

ISSN 0916-7501
CODEN : TTEREB

TOYOTA Technical Review

[トヨタ・テクニカル・レビュー]

2016/ 4 232

特集

プリウス



VOL.62

【表紙のデザイン】

「TNGA のさきがけ」として五感で感じるクルマに生まれ変わったプリウス。ワクドキの情熱の赤を基調に構成し、“破”は常識を打ち破り、不可能を可能にしながら開発したプリウスのクルマづくりを表現しています。

TOYOTA Technical Review

232

Vol. 62 Apr. 2016

目次

巻頭言

・挑戦こそプリウスのDNA.....	専務役員 吉田 守孝.....	4
--------------------	-----------------	---

▷特集「プリウス」

基調論文：プリウスが変わった！トヨタが変わった！.....	豊島 浩二／菅野 伸介.....	6
・アイコンニック・ヒューマンテック.....	児玉 修作／高橋 俊弥／武政 憲明／岡本 桃子.....	12
・TNGAによるもっといいクルマづくり.....	神谷 元雄／七里 文子／安部 朋彦.....	23
・「運転して楽しい」を実現した新型プリウスのボデー構造.....	西野 章／岡本 亨／和田 敏尚／近藤 圭一.....	27
・期待を超える感動の走り ～新型プリウスのシャシー開発	浅井 徹／鷲谷 雄介／鈴木 啓之／井辻 隆志／福本 康孝.....	34
・安心で経済的な止まる技術 ～ AHB-R 回生協調ブレーキシステムの開発	鈴木 雅邦／阪本 健二／水谷 恭司／金盛 且洋.....	42
・終わりなき挑戦 ～新型プリウスの燃費開発	岡部 啓一／中島 勇波／福村 光正／間嶋 宏／村田 登志朗／青山 晃久／西馬 和也.....	48
・ESTEC 2ZR-FXE エンジンの燃費向上技術..	太田 行紀／伊藤 良秋／川村 明裕／西浦 博之／松尾 真二.....	55
・新型プリウスのハイブリッド技術	伏木 俊介／谷口 真／滝澤 敬次／菊地 隆二／原 浩二／熊谷 尚憲／牟田 浩一郎.....	61
・風と友だちになる ～新型プリウスの空力性能開発	北沢 祐介／寺門 晋／市川 創／前田 和宏／日野 雄太／田中 一伸.....	71
・小型 E-Four システムの開発.....	伏木 俊介／道下 雅也／豊田 浩也／宇木 慎一郎／清水 聡之.....	78
・走りを創る ～新型プリウスの走りの性能開発.....	松本 聖司.....	83
・走りを極める ～新型プリウスの車両運動性能開発.....	大庭 恵太／佐藤 博文／高山 敏明／牟田 浩一郎.....	87
・音を奏でる ～新型プリウスの振動騒音性能開発	福永 恒太郎／鈴木 恭信／今泉 親等／若原 正明／山下 和孝／宮崎 大三／牟田 浩一郎.....	95
・GOA の進化 ～新型プリウスの衝突安全性能...小杉 育朗／工藤 俊哉／酒井 省吾／平岡 学／近藤 仁.....	101	
・Toyota Safety Sense P の開発.....	池 涉／渡辺 篤／豊福 邦彦／相澤 一郎／棚瀬 将康.....	105

▷論文／解説

・新型 1.2L 直列 4 気筒 ESTEC D-4T エンジン	原田 慎治／品川 知広／近藤 哲生／十河 教介／工藤 雅仁／松原 渉.....	110
・新型 1.4L 直列 4 気筒 ESTEC ディーゼルエンジンの開発	阪本 秀男／笈川 直彦／池田 栄次／小林 正明／パケ ティボ／ゴージェエ レジス.....	117
・新型 2.8L 直列 4 気筒 ESTEC ディーゼルエンジンの開発	岸本 岳／笈川 直彦／濱村 芳彦／川口 暁生／金子 広孝／真鍋 啓輔／小郷 知由.....	123
・壁温スイング遮熱法 TSWIN によるエンジン熱損失低減	川口 暁生／立野 学／西川 直樹／山下 親典／脇坂 佳史／堀江 俊男.....	128
・アクティブ制御を用いたエンジンサウンドのデザイン.....	林 毅.....	136
・普及型複合予防安全システム「Toyota Safety Sense C」の開発	坂口 敦俊／安達 隆宏／千田 和身／上地 正昭／山田 幸則.....	142
・トータル接近感指標の構築とドライバ減速タイミングの予測への応用	グエンヴァン クイフン／岸 浩司／菊池 弘一／岡村 宏樹／吉澤 真太郎／伊藤 祥司.....	149
・ロードサインアシストの開発.....	川崎 智哉／クリストフ ジレ／トム ライケン／藤巻 裕介.....	156
・アイドリングストップ車用走行環境適応型バッテリーマネージメントシステム	栃木 康平／宮下 亨裕／前田 智治.....	161
・楽しみながら運転がうまくなるスマホアプリの開発.....	柏井 忠大／松村 健／岡田 広毅.....	166
・豊田市低炭素社会システム実証実験における地域エネルギーマネジメントシステム EDMS の開発	是石 純／川本 雅之／森井 達弥／平田 哲也／伊藤 晃史／藤井 大悟.....	171
・MIRAI を支える高機能 FC スタックケースの開発.....	一ノ瀬 浩／森元 一／猿橋 謙.....	176
・簡単教示でレイアウト変更に対応する部品搬送ロボット	敷下 英典／小田島 正／森 健光／藤井 亮暢／田中 稔.....	181

▷受賞技術概要.....	186
--------------	-----

▷優秀特許.....	190
------------	-----

Contents

Preface

- The Prius DNA: Overcoming Impossible Challenges
Moritaka Yoshida, Senior Managing Officer 4

▷ Special Feature: The Prius

- Introduction: Brand New Prius, Brand New Toyota
Koji Toyoshima/Shinsuke Sugano..... 6
- ICONIC Human-tech
Shunsaku Kodama/Toshiya Takahashi/Noriaki Takemasa/Momoko Okamoto 12
- Making Ever-Better Cars through the TNGA
Motoo Kamiya/Nobuko Shichiri/Tomohiko Abe 23
- Innovative and Fun-to-Drive Body Structure of the New Prius
Akira Nishino/Toru Okamoto/Toshinao Wada/Keiichi Kondo 27
- Impressive Vehicle Dynamics that Exceed Expectations: Chassis Development for the New Prius
Toru Asai/Yusuke Washitani/Hiroyuki Suzuki/Takashi Itsuji/Yasutaka Fukumoto 34
- Reliable and Economical Vehicle Brake Technology: Development of AHB-R Cooperative Brake System
Masakuni Suzuki/Kenji Sakamoto/Yasuji Mizutani/Katsuhiko Kanamori 42
- Constant Challenge: Development of Fuel Efficient Technologies for the New Prius
Keiichi Okabe/Yuha Nakajima/Mitsumasa Fukumura/Hiroshi Majima/Toshio Murata/Akihisa Aoyama/Kazuya Nishiuma..... 48
- Fuel Economy Improvement Technologies of the ESTEC 2ZR-FXE Engine
Yukinori Ota/Yoshiaki Ito/Akihiro Kawamura/Hiroyuki Nishiura/Shinji Matsuo 55
- Hybrid Technologies for the New Prius
Shunsuke Fushiki/Makoto Taniguchi/Keiji Takizawa/Takaji Kikuchi/Koji Hara/Takanori Kumagai/Koichiro Muta...61
- Impressive Coefficient of Drag: Development of Aerodynamic Performance for the New Prius
Yusuke Kitazawa/Susumu Terakado/Hajime Ichikawa/Kazuhiro Maeda/Yuta Hino/Kazunobu Tanaka 71
- Development of Compact E-Four System
Shunsuke Fushiki/Masaya Michishita/Hironari Toyoda/Shinichiro Uki/Satoshi Shimizu 78
- Fun-to-Drive: Development of Dynamic Performance for the New Prius
Seiji Matsumoto..... 83
- Optimized Handling: Development of Vehicle Dynamics Performance for the New Prius
Keita Oba/Hirofumi Sato/Toshiaki Takayama/Koichiro Muta 87
- The Sound of Silence: Development of Noise and Vibration Performance for the New Prius
Kotaro Fukunaga/Yasunobu Suzuki/Chikara Imaizumi/Masaaki Wakahara/Kazutaka Yamashita/Daizo Miyazaki/Koichiro Muta 95
- Evolution of GOA: Development of Passive Safety Performance for the New Prius
Yasuaki Kosugi/Toshiya Kudo/Shogo Sakai/Manabu Hiraoka/Hitoshi Kondo..... 101
- Development of Toyota Safety Sense P
Wataru Ike/Atsushi Watanabe/Kunihiko Toyofuku/Ichiro Aizawa/Masayasu Tanase..... 105

▷ Technical Papers/Technical Articles

- The New Toyota 1.2-Liter Inline 4-Cylinder ESTEC D-4T Engine
Shinji Harada/Tomohiro Shinagawa/Tetsuo Kondo/Kyosuke Togawa/Masahito Kudo/Wataru Matsubara..... 110
- The New Toyota 1.4-Liter Inline 4-Cylinder ESTEC 1ND-TV Diesel Engine
Hideo Sakamoto/Naohiko Oikawa/Eiji Ikeda/Masaaki Kobayashi/Thiebault Paquet/Regis Gauthier 117
- The New Toyota 2.8-Liter Inline 4-Cylinder ESTEC 1GD-FTV Diesel Engine
Gaku Kishimoto/Naohiko Oikawa/Yoshihiko Hamamura/Akio Kawaguchi/Hirotsuka Kaneko/Keisuke Manabe/Tomoyuki Kogo.... 123
- Engine Heat Loss Reduction by Thermo Swing Wall Insulation Technology (TSWIN)
Akio Kawaguchi/Manabu Tateno/Naoki Nishikawa/Chikanori Yamashita/Yoshifumi Wakisaka/Toshio Horie 128
- Engine Sound Design Applying Active Sound Control
Takeshi Hayashi 136
- Development of Toyota Safety Sense C
Atsutoshi Sakaguchi/Takahiro Adachi/Kazumi Chida/Masaaki Uechi/Yukinori Yamada 142
- Study of Driver Total Perceived Risk Estimate and Application to Driver Braking Timing Modeling
Quy Hung Nguyen Van/Hiroshi Kishi/Hirokazu Kikuchi/Hiroki Okamura/Shintaro Yoshizawa/Shoji Ito 149
- Development of Road Sign Assist System
Tomoya Kawasaki/Christophe Gillet/Tom Rycken/Yusuke Fujimaki 156
- Driving Environment-Adaptive Battery Management System for Vehicles Installed with Idling Stop System
Kohei Tochigi/Michihiro Miyashita/Tomoharu Maeda 161
- Development of Smart Phone Application to Enhance Driving Technique and Enjoyment
Tadahiro Kashiwai/Takeshi Matsumura/Hiroki Okada..... 166
- Development of Community Energy Data Management System (EDMS) in the Toyota City Low-Carbon Society Verification Project
Jun Koreishi/Masayuki Kawamoto/Tatsuya Morii/Tetsuya Hirata/Koshi Ito/Daigo Fujii..... 171
- Development of High-Performance Fuel Cell Stack Case for the Mirai Fuel Cell Vehicle
Hiroshi Ichinose/Hajime Morimoto/Ken Saruhashi 176
- Parts Delivery Robot with Instant Learning Technology Capable of Responding to Layout Changes
Hidenori Yabushita/Tadashi Odashima/Takemitsu Mori/Akinobu Fujii/Minoru Tanaka..... 181

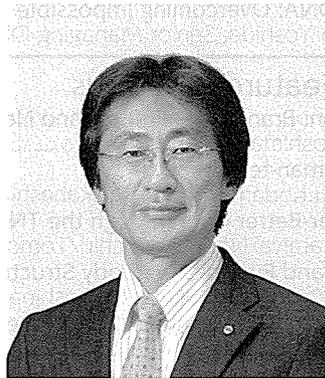
▷ Technical Award News..... 186

▷ Award-Winning Patents..... 190

挑戦こそ プリウスの DNA

専務役員

吉田 守 孝



プリウスの心臓であるHVシステムの要素技術の開発は1990年に始まりました。開発そのものは苦難の連続であり、「先々行車が完成してから49日間ぴくりとも動かなかった」というのは有名な話ですが、今なら再発防止資料を何枚も書かされそうです。このように、初代プリウスは失敗を恐れず、全社を挙げて挑戦した開発でした。そして、多くのエンジニアの襷が繋がって、初代プリウスは1997年に「21世紀に間に合いました」というキャッチフレーズで誕生しました。

あれから18年、2代目、3代目を通じてプリウスとハイブリッドシステムは共に進化し続けました。「プリウスと言えばHV」、「HVと言えばプリウス」と言われるほどになり、トヨタの環境と先進イメージを大きく引き上げてきました。こうして、プリウスの販売台数は累計340万台を超え、エポックメイキングなプリウスがトヨタを代表する量販車に成長したのです。

現在の地球を見渡すと、温室効果ガスによる異常気象、都市部の大気汚染、エネルギー問題等、地球環境は改善するどころか悪化傾向にあります。今後、新興国の経済発展や人口増加により一層深刻化することが予想され、自動車業界としても今まで以上に環境技術開発に取り組まなければなりません。昨年11月に「トヨタ環境チャレンジ2050」として6つのチャレンジを掲げ、公表しました。その中の1つが「新車CO₂ゼロチャレンジ」であり、もし実現すれば2050年には新車の全てがHV、PHV、FCV、

EV等の環境車ということになります。社外の人からしばしば「50年にそんな時代がくるのか?」と聞かれます。「よくわからない」というのが本音ですが、重要なことは、将来を見渡して「新車CO₂ゼロ」の技術開発にチャレンジすることなのです。従来の概念を一変させる様な新技術開発は難易度が高く、実現には時間がかかります。マーケットニーズが出てからでは遅く、よりよいクルマ社会の実現を目指して、信念を持って挑戦し続けなければなりません。もちろん、挑戦すべきテーマは環境だけではなく、自動運転や人工知能など数多くあります。

4代目の新型プリウスが立ち上がりました。プリウスですからダントツの燃費でなければ、お客様に納得していただけません。また、ハイブリッドが当たり前になった今、ダントツの燃費だけではお客様に満足していただけないでしょう。ダントツの燃費や新たなプリウスの魅力を実現する為に、TNGA頭だしとして多くの新技術を織込みました。では、新型プリウスはどんな仕上がりになったのでしょうか?

福山雅治さん風に言えば

「ま、Technical Reviewを読んで、乗ってみなきゃわからないけどね。」読んで気に入った方、乗ってみて良さを体感した上で購入を検討して下さい。私は自信を持ってお勧めします。



49日間ぴくりとも動かなかった
初代プリウス先々行車



歴代プリウス

プリウスが変わった！トヨタが変わった！

Brand New Prius, Brand New Toyota

豊島 浩二*
Koji Toyoshima

菅野 伸介*
Shinsuke Sugano

1 はじめに

1997年初代プリウスの発売後17年間にグローバルで約350万台を販売した。この間、2代目、3代目を含めトヨタのハイブリッド技術を牽引しながらハイブリッド車の普及に大きく貢献してきた。

プリウスのDNAである圧倒的な環境性能を継承しながら「もっといいクルマ」とする為にTNGA(トヨタニューグローバルアーキテクチャ)というクルマ開発の構造改革によりプラットフォームやハイブリッドシステム等、すべてを「ALL NEW PRIUS」として開発を進めた。

新型プリウスは「新たなHV(ハイブリッド車)の先進イメージ」と「トヨタのクルマが変わった」という「新たなさきがけ」の存在として生まれかわる。

2 プリウスというクルマ

プリウスはラテン語で「さきがけ」、1997年に21世紀にさきがけ初代プリウスはまさに「HVのさきがけ」、世界初の量産ハイブリッドカーとして誕生した。2代目は「燃費のいいクルマのスタイルのさきがけ」として、トライアングルシルエットを採用し、その後の環境車のシルエットに大きな影響を与えた。

3代目は環境車は量産してこそ社会貢献できる。「HVの普及・社会環境へのさきがけ」としてHV普及に大きく貢献し、今では日本の保有の10台に1台はプリウスという程プリウスが環境車の普及に大きく貢献してきた(図1)。

一方で次世代環境車の柱であるPHV(プラグインハイブリッド車)誕生も4代目には新たな「さきがけ」を担う必要があった。

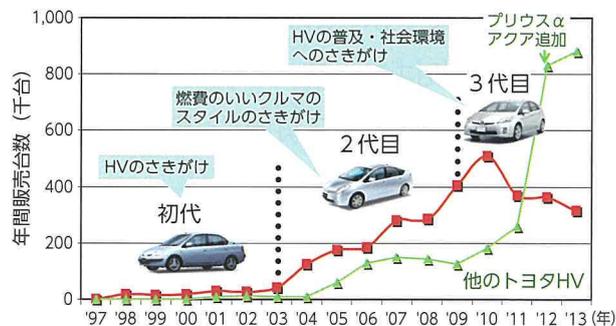


図1 トヨタ HV 全世界販売台数

3 新型プリウスの開発

3.1 新型プリウスの変化と役割

プリウスのDNAである圧倒的な環境性能は継承しつつ「もっといいクルマづくり」の構造改革TNGAとの融合により低フードでカッコいいデザイン、低重心・新サスペンション・高剛性ボデーによる走りの楽しさ、静粛な空間、先進の安心・安全装備の採用等によりハイブリッドカーの常識を打ち破る存在として変化し、新型プリウスをスタートに「プリウスが変わった！トヨタが変わった！」を世界に発信してゆく役割をも担っている。

3.2 開発コンセプト

開発コンセプトはBeautiful HV(美しい地球・美しいクルマ)とした。圧倒的な燃費環境性能「燃費がいい(Fun)」を土台に「カッコいい(Fun)」, ワクワドキドキの「走りがいい(Fun)」, 「社会にいい(Fun)」の4つのFunで「美しいクルマが美しく走りそれが美しい地球を創りあげる」をコンセプトとした(図2)。

* 製品企画本部

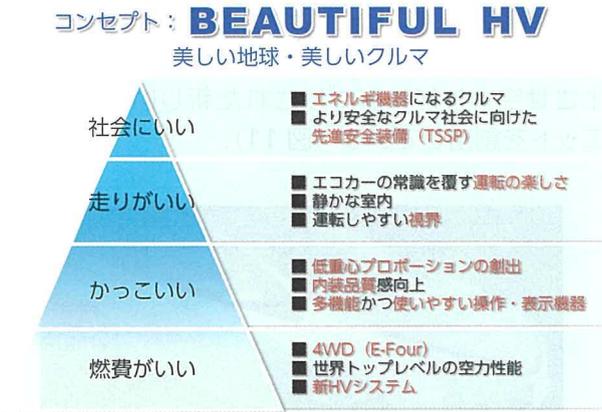


図2 車両コンセプト

3.3 車両パッケージ

車両パッケージで重点としたのは空力性能と低重心化である(図3)。ルーフピークの前出し(170mm)と車高を下げることで空気抵抗係数(C_D)と前影投影面積(A)を低減したフォルムとした。HVバッテリーをリヤシート下に配置することで荷室容量が拡大(+56L)し、低重心化と共に両立させた。また疲れにくい最適なドライビングポジションの為、ヒップポイントは下げながらも従来型以上の視界とするなど革新のパッケージを実現した。

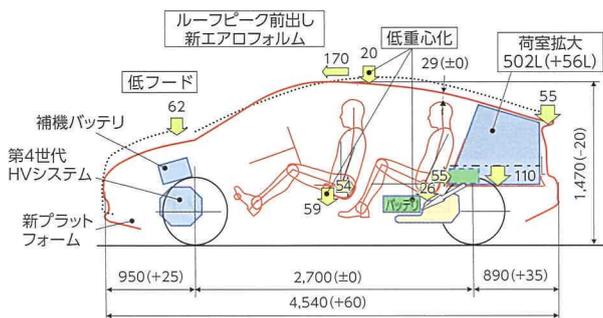


図3 車両パッケージ

3.4 燃費がいい (Fun)

2代目、3代目共、先代からの燃費向上率が約10%であったのに対して新型ではJC08モードで32.4km/Lから40.8km/L(Lグレード⇒Eグレード)とクラスを超えた圧倒的な低燃費を実現した。その他グレードでも30.4km/Lから37.2km/Lとなり何れも従来型から20%以上の突き抜けた燃費性能向上を実現した(図4)。

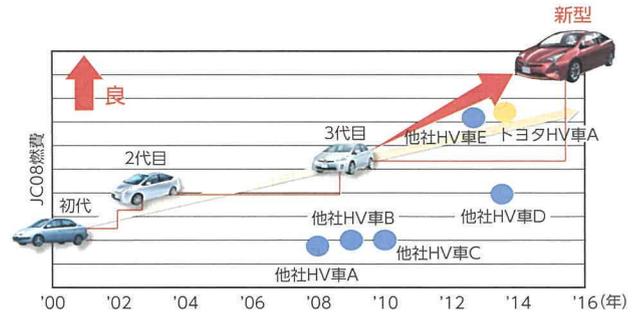


図4 年代別燃費推移

3.4.1 圧倒的なハイブリッド性能

新型プリウスではハイブリッドシステムを一新し(図5)、エンジンの熱効率向上、パワーコントロールユニット、トランスアクスル、電池の徹底した小型軽量化、低損失化を行い圧倒的な低燃費を実現した。電池の小型化は12Vバッテリーのエンジンルーム搭載と合わせてラゲッジ容量の拡大に貢献した。又、走りもアクセル特性の最適化によりスムーズと滑らかに走る気持ちいい加速感を実現した。



図5 新ハイブリッドシステム

3.4.2 空力性能

突き抜けた燃費性能達成の為、空力性能も世界トップレベルのC_D値0.24を実現した。空力性能に裏打ちされたシルエットとすると共に新型プリウスの開発に合わせ移動地面とタイヤ回転装置を備えた新風洞設備を導入し、タイヤ廻りや床下の更なる空力改善を行った。マフラーの配置や形状まで拘り床下全体をフラットにし空力向上に努めた(図6)。

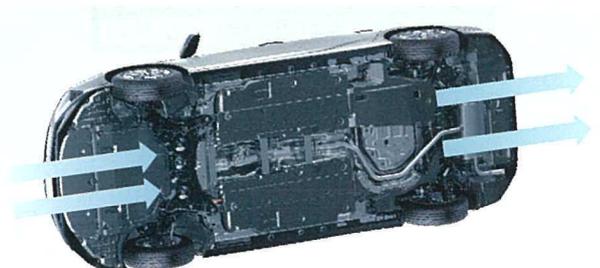


図6 床下レイアウト

3.4.3 コンパクト E-FOUR

雪寒地のお客様から長年要望のあったHV-4WDを新設定した。電気モーター式4WDシステムとし車両リヤ廻りに空冷インバータ、リヤモーター、トランスアクスルを新設(図7)、モーターの低損失化により燃費は34km/Lと従来型(FF)よりも低燃費を実現した。またFFパッケージをベースにリヤ廻りにコンパクトに配置することで荷室容量や足元スペース共に、FF同等レベルを実現した。

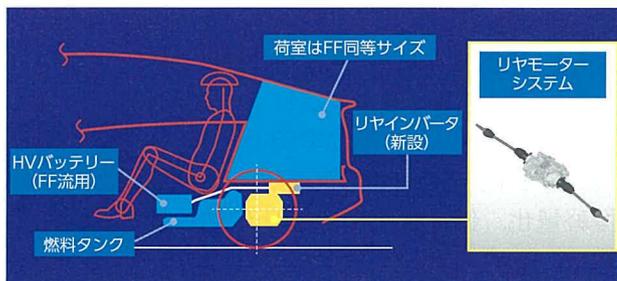


図7 E-FOUR 構成図

また燃費がいい(Fun)を実現する為、メーターにはエコウォレット(図8)、エコダイアリー(図9)、エコジャッジ等、毎日のエコドライブが楽しくなる装備を追加した。



図8 エコウォレット

日付	距離 km	平均燃費 km/L
12/15	32.2	26.5
12/14	13.5	29.2
12/13	29.8	22.3
12/12	13.5	19.8

図9 エコダイアリー

3.5 カッコいい

デザインコンセプトは「アイコンニックヒューマンテック」とし、美しいエモーションのあるユニークな記号性を持つデザインを目指した。新しいプラットフォームを活かし、走りの良さの象徴である低重

心を強調する「エモーショナルな造形」を実現した(図10)。またトライアングルシルエットを更に進化させ空力性能に裏づけされた新しいサイドシルエットを創出している(図11)。



図10 低重心を強調する造形



図11 サイドシルエット

インテリアは無駄を削ぎ落とした開放的で快適な空間を創出、低く構えたインパネ基本面をドアトリムまでシームレスに繋げ、乗員を優しく包み込む造形とすることで一体感のある空間を演出した(図12)。



図12 インテリアデザイン

3.6 走りがいい (Fun)

走りがいい (Fun) を実現する為に拘ったのは「人の意図に素直に答えてくれる」と「上質感」である。新型プリウスではお客様が遭遇されるシーンを想定してそれぞれのシーンで下記4点に拘って開発した(図13)。

- ①車両の低重心化 (クルマの素性を良くする)
- ②最適なドライビングポジション
- ③気持ち良いハンドリング, 質感高い乗り心地
- ④静かな室内

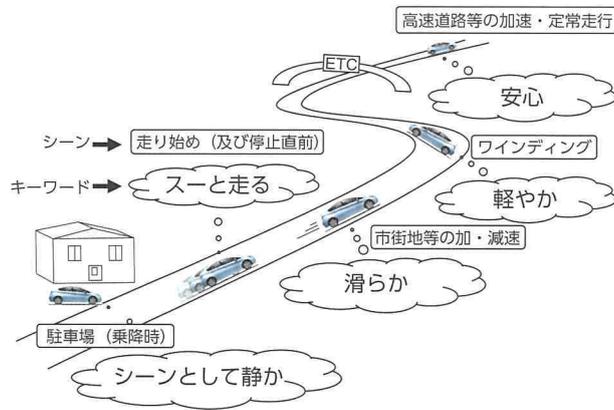


図13 シーン&キーワード性能

3.6.1 車両の低重心化

乗員, 電池配置, サスペンション, シート等大物部品の配置だけでなく全ての部品の低配置に拘り従来型から約20mmの重心高ダウンを実現した。

3.6.2 最適なドライビングポジション

フロアからヒップポイントまでの高さを首, 肩, 腰, それぞれの筋負担の少なくなる (疲れにくい) 高さとし, ステアリングの角度や位置も最適化しながら長距離走行でも疲れにくいポジションとした。

3.6.3 気持ち良いハンドリング, 質感高い乗り心地

(1) 強固なボデー骨格

キャビン環状骨格(図14)やリヤボデー環状骨格(図15)によりボデーねじり剛性を60%向上させた(図16)。またトヨタ独自の溶接技術LSW(レーザースクリューウェルディング)を積極的に採用し打点を約30%増し, 鉄板同士の接合剛性を高め, 優れた操縦安定性としなやかな乗り心地を実現した。

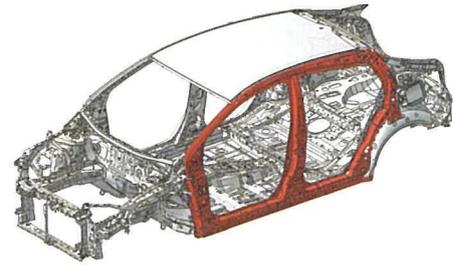


図14 キャビン環状骨格

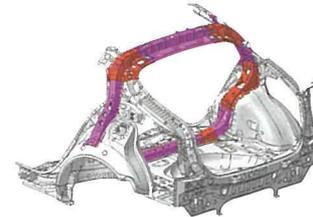


図15 リヤボデー環状骨格

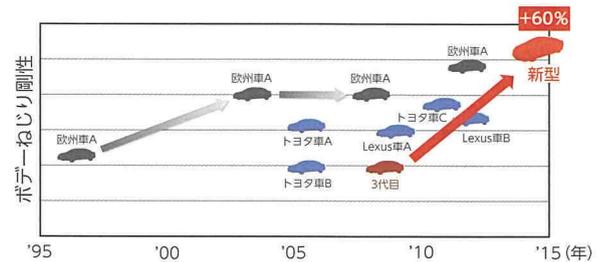


図16 ボデーねじり剛性

(2) しなやかに動くサスペンション

フロントリヤ共にサスペンションを新開発した(図17)。

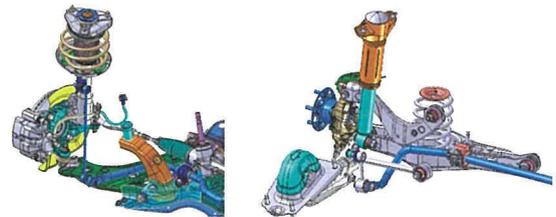


図17 フロント・リヤサスペンション

特にリヤサスペンションはダブルウィッシュボーン式を採用し(従来はトーションビーム式)前後方向のショックを吸収しやすくする為, トレーリングアームブッシュサイズアップやジオメトリの最適化によりショックの少ない優れた乗り心地と安定感のある操縦安定性を高次元で両立させた。段差乗り越え時のショックは現行型の1/3となり高級輸入車をも凌駕する性能を実現した(図18)。

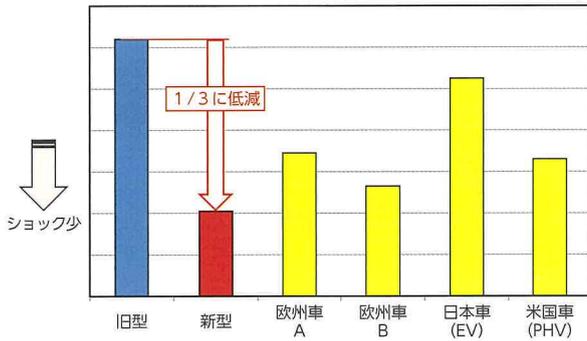


図 18 段差乗り越え時のショック (リヤ)

3.6.4 静かな室内

上質感やダイレクト感を感じるのは触覚や視覚だけでなく、クルマに乗り込んでドアを閉めた時の静かさ(隔壁感)や閉まり音はクルマに乗り込んだ時に質感を感じるポイントである。新型ではドアを閉めた時の静かさを高級輸入車にも勝る静粛性とした(図 19)。

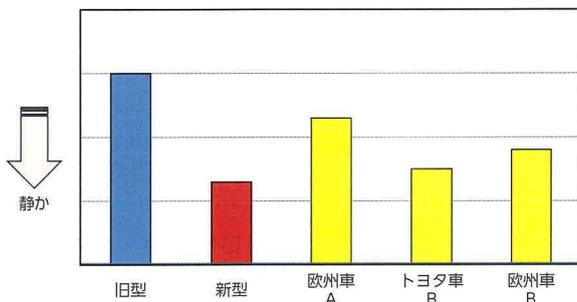


図 19 ドアを閉めた時の静粛性

効率的に静粛性を向上させる為、遮音対策に拘り徹底的に室内に音が入ってくる穴を埋めた。走り出してから静粛性にも拘り EV 走行からのエンジン始動時のスムーズさや定常走行でのエンジン音はセリングポイントとして隔壁感同様に拘った。高級輸入車にも勝るエンジン音でシームレスな加速と協調した上質な加速感を実現した(図 20)。

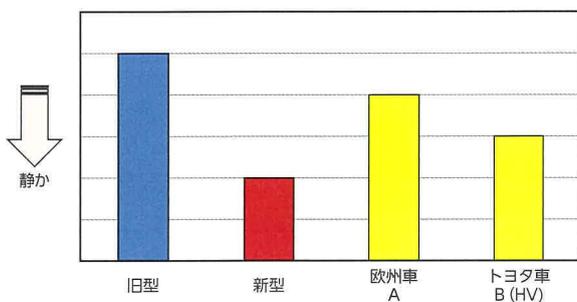


図 20 エンジン音の静粛性

3.7 社会にいい

3.7.1 予防安全性能 (トヨタセーフティセンス P)

ミリ波レーダーと単眼カメラによる高性能なプリクラッシュセーフティシステムに加え自動ブレーキ制御機能のあるレーダークルーズコントロール、ステアリング制御機能のあるレーンディパーチャーアラート、オートマチックハイビーム、歩行者検知などのトヨタセーフティセンス P (図 21) に加え、BSM (ブラインドスポットモニタ)、クリソナ IPA (インテリジェントパーキングアシスト) 等、全方位での車両監視で予防安全性能をアシストした。



図 21 トヨタセーフティセンス P

3.7.2 衝突安全性能

新型プリウスでは「環境性能」「安全性能」を高い次元で達成する為、世界トップレベルの衝突安全基準 GOA を進化させ適用した。進化した基準では将来の規制となるオブリーク前面衝突も取り込み開発を行った(図 22)。またハイブリッド車の高電圧システム保護の為、衝突時に損傷の少ない位置に高電圧発生部品を配置させる等の十分な配慮を行った。

	微小ラップ前突 (Narrow Object)	オブリーク前突 (Car To Car)
衝突速度 (kph)	64	90
形態概要	40mph (64kph) 剛壁 25% H-III (AM50)	56mph (90kph) 35% 15° THOR (AM50) 2,486kg
被突物	IIHS SOLバリア	NHTSA-RMDB
位置・ラップ量 (%)	25	35
セット角度 (°)	0	15

図 22 前面衝突試験形態の例

3.7.3 外部給電

外部給電も新型プリウスの重要な機能である。東日本大震災や各地の災害による停電・ライフラインの途絶を経験し、ライフラインが停止した際の備蓄として「食糧」だけでなく「エネルギー」の備蓄も注目されつつある。災害時に地域社会の為にクルマから家やインフラに電源供給できる外部給電への関心が非常に高まっている。2013年には停電信号機への電力を供給する実証実験を実施しその有効性を確認した(図23)。新型プリウスでは非常時給電モードを設定し給電モード中はDレンジに入らない様にして使用性を高めた。



図23 信号機にパトカー (PHV) 給電

4.2 リサイクル

初代プリウス発売以来、トヨタは独自のHVバッテリー回収ネットワークを構築し使用済バッテリーのリサイクルに取り組んでいる。2012年からはHVモーター磁石(レアアース)を循環させるリサイクルシステムをスタートさせた。

リビルト/リユースの一例として廃車から回収し検査したニッケル水素バッテリーを定置式蓄電池として再利用、太陽光パネルやカーポートBEMS (Building Energy Management System) と組み合わせることで省エネ/創エネ/蓄エネに取り組んでいる。

5 おわりに

「もっといいクルマづくり」に向けプラットフォームやHVシステムを始めとする、ほぼ全ての部品を0から作りなおして新型プリウスを作り上げた。乗って頂ければ、「これがあのプリウスなのか?！」と驚いて頂けるものと確信している。一人でも多くの方々に、一日でも早くこの新型プリウスを体験して頂きたい。

最後にこの開発に携わられ、不可能を可能に変えながらもっといいクルマ、新型プリウスを作り上げた全ての皆さんに感謝の意をこの場を借りてお伝えする。

■著者



豊島 浩二



菅野 伸介

4 環境性能, リサイクル

4.1 LCA (ライフサイクルアセスメント)

プリウスは素材製造, 車両製造, 走行, メンテナンス, 廃棄, リサイクルの各段階を含む全ライフサイクルで排出するCO₂を大幅に低減し, 当社2.0Lガソリン車に比べてハイブリッド効果で約-45%低減している(図24)。

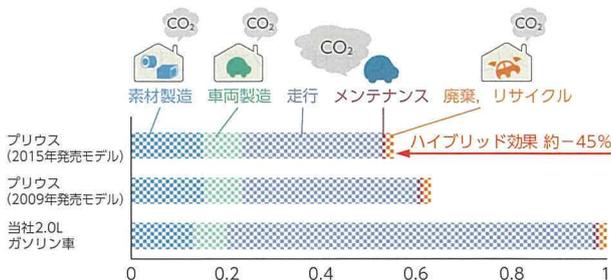


図24 プリウスのLCA効果

アイコニック・ヒューマンテック

ICONIC Human-tech

児玉 修作* 高橋 俊弥*
Shunsaku Kodama Toshiya Takahashi
武政 憲明* 岡本 桃子**
Noriaki Takemasa Momoko Okamoto

要旨

プリウス歴代モデルの貢献を経て、ハイブリッド車が普及・一般化し当たり前となった現在、プリウスのキャラクターは相対的に希薄化している。ひしめくハイブリッド車の中で再びエコアイコンとして存在意義を獲得するには、環境に先進的な価値観を持つお客様（環境先進層）の心に強く訴えることが不可欠である。ここでは「環境を大切にすることで社会に貢献したい」というエシカルなおお客様の価値観をクルマに乗るだけで自己表現でき、かつそうしたお客様の知的で洗練されたファッショナブルなライフスタイルに相応しい強い存在感を持つことが期待された新型プリウスのデザインについて紹介する。

Abstract

Thanks to the succeeding generations of the Prius, hybrid vehicles (HVs) have entered the mainstream and become an everyday presence on roads around the world. As a result, the impact of the Prius itself has relatively faded. Therefore, to reinforce the identity of the Prius as an eco-icon in the fierce HV market, it is necessary to make a strong appeal to environmentally and technologically conscious customers. These customers see vehicles as the self-expression of an ethical desire to contribute to society through environmental friendliness, while also expecting the Prius to make a strong impression that reflects an intelligent, sophisticated, and fashionable lifestyle. This article describes the design of the Prius from these varied standpoints.

キーワード エコアイコン, 環境先進層, エシカル

1 コンセプト

1.1 デザインミッション

我々は、純粋にエシカルな価値観のお客様が多くいる一方で、同時に潜在的自己主張への欲望の両方を持ち合わせ葛藤するお客様もいると仮定し、そこまで踏み込み応えられる強い魅力を与えることが必要であり、その自己主張への欲求を敢えて「エコ」ならぬ「エゴ」と呼び、達成すべきタスクとした。

環境に先進的な価値観を持つお客様（以下、環境先進層）の心に響くデザインを目指し、「エシカル」な技術進化の可視化の上に「エゴ」を満足させる最先端のエモーションを、新型プリウスで具現化しなければならないと考えた（図1）。

1.2 トヨタデザインフィロソフィー

トヨタブランドの車両は「Vibrant Clarity（バイブラント・クラリティ）」というデザインフィ



図1 「Ethical」と「Ego」

ロソフィに基づいてデザインされている。これは Vibrant エモーションと Clarity 合理性の二律双生による「心と知にひびくデザイン」を意味している。心とは、わくわくドキドキ、エモーションなど感覚的な価値であり、知とは、知性、合理性など論理的な価値である。この二つの価値を融合し、心と知にひびく価値を生み出すのを目的としている。そして、Vibrant Clarity をもう少し具体的な要素に落とし込んだのが3つの構成要素「彩：さい」「潔：けつ」「強：ごう」である（図2）。

* トヨタデザイン部

** デザイン開発部

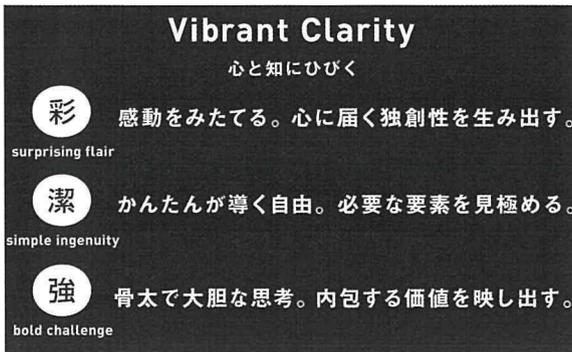


図2 トヨタデザインフィロソフィー

1.3 イメージユーザーと期待される先進性

前述したように新型プリウスで仮定したイメージユーザーは「エシカル」を知的でセンス良くアピールしたい「エゴ心」を持つ「環境先進層」の方達である。表向きとしては衣食住のバランスに優れた知的な好奇心が強い層だが、本音である『いつもお洒落に見られたい！・知的／博識と思われたい！・先進アイテムはすぐに欲しい！』という「エゴ心」を持つと考える。その方達がプロダクトに期待する先進性は次世代を感じる機能美である。多機能／高機能を心地よく直感的に楽しみ、ユーザーに寄り添う見た目にも楽しくわかりやすいモノである。

1.4 デザインコンセプト「ICONIC Human-tech」
“アイコンニック ヒューマンテック”

我々は、自然の摂理に通じ人の記憶／直感／心に響く機能と遊び心が融合した機能美を、「遊美心（ゆうびしん）」と名付け、美しいエモーションのあるユニークな記号性を持つデザインを目指した（図3）。



図3 デザインコンセプト

2 外形デザイン

2.1 外形デザインの狙い

新たなプラットフォーム※をベースに、空力／燃費に寄与する最新技術を、遊び心と融合する新たなアプローチ「遊美心」により心に響く美しいエモ-

ーションとユニークな記号性を持つ意匠へと飛躍的に進化させ、ハイブリッドトップランナーに相応しい先進スタイルを目指す。

（※ エンジン搭載位置や燃費，乗員，荷室等，）
（車両の骨格を左右するベースとなるもの。）
具体的には、下記（1）～（3）である。

- (1) 走りの良さを象徴する低重心プロポーションの創出
新しいプラットフォームを活かし走りの良さの象徴である、低重心を強調するエモーショナルな造形を実現している（図4）。

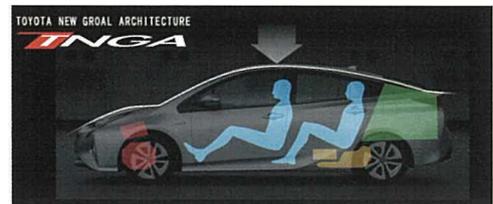


図4 低重心プロポーション

- (2) ユニークかつ特徴的なシルエット
2代目、3代目と続いた「トライアングルシルエット」をさらに進化させ、空力性能に裏づけられた新しいシルエットを創出している（図5）。
- (3) 「遊美心」のある知的な Prius-ness の表現
必要な機能部品をミニマムサイズで表現してきた歴代のDNAを受け継ぎ新型では更に機能と遊び心が融合したエモーショナルな機能美を、アイコンニックかつシンプルに表現している（図5）。

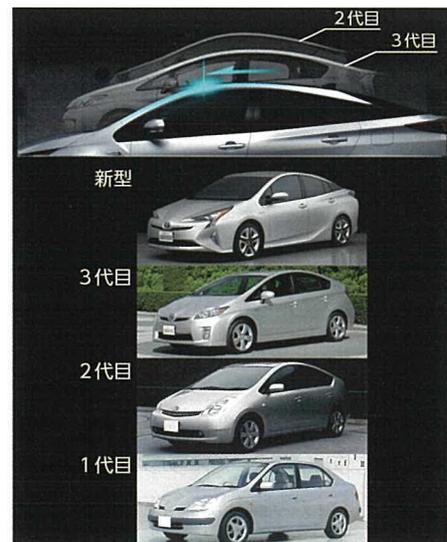


図5 歴代シルエットと Prius-ness を表現したフロントマスク

2.2 外形デザインの方向性

エコカーのトレンドを大きく見ると歴代モデルが築いたトライアングルシルエットのバリエーション群と、従来のクルマらしい様式美に環境ユニットを搭載した群の2極化が見られる。プリウスではエコカーのシンボルとしての強い存在感の復権を狙い従来の「様式重視」や「理屈重視」の表現とは異なる、抜きん出た新しい価値観の表現として「機能と遊び心の融合」と「心に響くエモーション」を併せ持った強い記号性 ICONIC Human-tech を目指している (図6)。

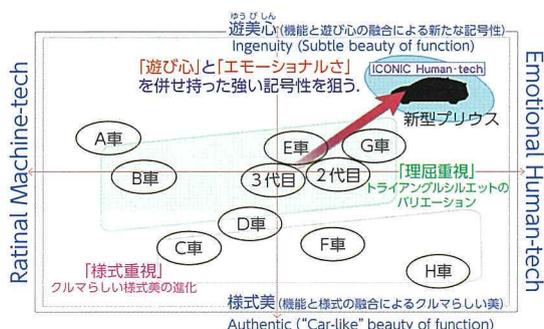


図6 外形デザインの方向性

2.3 パッケージ

エンジン/モーター及び乗員レイアウトを下げることによって、前後のヘッドクリアランスを増やしながらか空力に有利な低い構えのサイドシルエットを実現している。高さを抑えたカウル位置は、前方視界の向上に寄与し、バッテリー/燃料タンクの床下配置により荷室も拡大した (パンク修理剤装備の場合: LOW デッキ仕様で15L 拡大) (図7)。

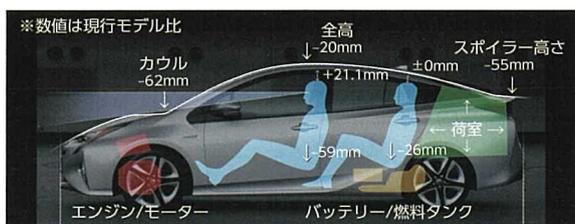


図7 低重心シルエット

2.4 全体造形の狙い

走りの良さを訴求する低重心パッケージを活かし、低い位置にあるフロントシンボルマークからサイド→リヤへと抜ける低い軸①を通し、低重心を強調している。更にベルトラインを前傾させ、キャビンがボディに食い込むような構成②で一体化し前進感を表現すると共に、フードからキャビンへと連続

するトライアングルシルエット③によって、この車独自のエモーショナルな造形を表現している (図8)。

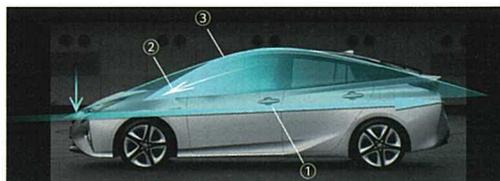


図8 走りの良さを訴求する低重心を活かしたエモーショナルな造形

また、ロッカー部の光りを受ける上向き面の造形をできるだけ地面に近づけ、安定した低い構えを強調した (図9)。

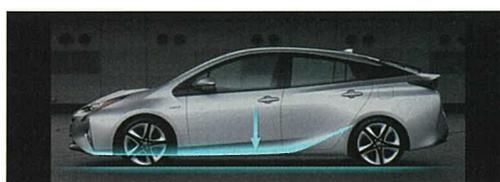


図9 安定した低い構えを強調

2.5 特徴的なルーフシルエットを持つサイド

3代目モデルに対し側面視でのルーフピークを約170ミリ前出しし、更なる空気抵抗の軽減と前席のゆとりある頭上空間を確保しながら、次世代環境車に相応しい空力最適フォルムを実現させている (図10)。

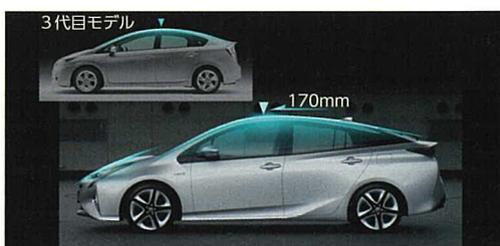


図10 ルーフシルエット

ルーフサイド後端にはサイドウィンドウがリヤへと吹き抜ける“風の流れ”をイメージした特徴的な造形処理を採用している (図11)。

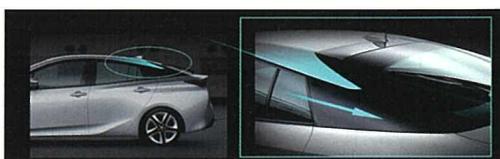


図11 風の流れをイメージした特徴的な造形

2.6 知的な Prius-ness を表現するフロント

キーンルック^{※1}の考え方に基づきながら、歴代モデルが培ってきた“マークを強調する造形”を低く構える新プラットフォームを使い先進的なHV（ハイブリッド車）の表情として進化させている。フロントの低重心な構えと低いカウルがもたらす下方視界の良さを実現し「優美心」のある知的なPrius-nessを表現した（図12）。

※1 キーンルック

知的で明晰な印象を与えるトヨタ独自のフロントの表情を、トヨタマークの立体的な強調とダイナミックなアンダープライオリティ^{※2}との組み合わせで表現している。

※2 アンダープライオリティ

空力性能・冷却・歩行者保護向上を配慮したアンダーグリルの主張度合いを高めたフロントデザインである。



図12 遊美心のある知的な Prius-ness を表現

ランプ類エアインテークなどの必要な機能部品を、ミニマムサイズで最適な位置に配置しながら滑らかに変化するフロントの立体にシャープに融合させ、先進かつエモーショナルな造形を表現している（図13）。



図13 ミニマムサイズの機能部品配置

2.7 鋭くアイコンニックなヘッドランプ

ロービーム/ハイビーム機能を持たせた一眼プロジェクターヘッドランプは特徴的な三角形状とし立体と機能性が融合した機能美をアイコンニックに表現し、三角形状の輪郭を生かしたクリアランスランプも今までに無いシャープな印象の光り方を演出している（図14、15）。



図14 鋭くアイコンニックな“目”



図15 ヘッドランプ機能配置

2.8 空力性能をよりエモーショナルに表現したリヤ

空力を向上させるリヤスポイラー^①及びバンパーサイドのコーナーエッジ^②をユニークな線使いで繋げたリヤエンドと、その動きに合わせた立体的な縦長リヤコンビランプも大きな特徴としフロントと同様に「遊美心」を表現している（図16）。



図16 空力性能をよりエモーショナルに

後方へ向け絞りを強めたキャビンに対し、アンダーボディはワイド方向に広がりを持たせたアッパー部形状と台形形状のバックドア造形で、タイヤを意識したスタンスの良い構えとしている（図17）。



図17 安定感のあるスタンスの良い構え

2.9 シルエットを表現するリヤコンビランプ

リヤスポイラーからリヤバンパーサイド下端へ流れる動きを、リヤコンビ内のテールランプが明快に表現しながら、その流れに沿うように、他のランプ機能を効率よく配置している（図 18、19）。

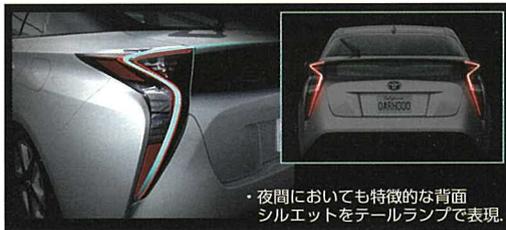


図 18 シルエットを表現する“光の帯”

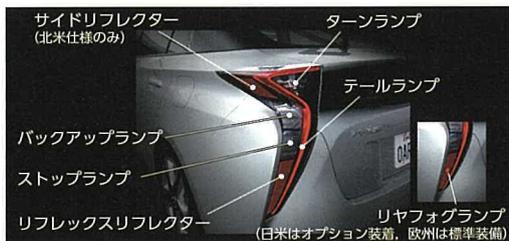


図 19 リヤコンビ機能配置

2.10 各部位の空力への取り組み

全高を低く抑えることで全面投影面積を減少①、かつ、ルーフピーク (a) と、スポイラー高さ (b) の位置関係を最適化したキャビンシルエットにより、空力性能を向上させた（図 20）。

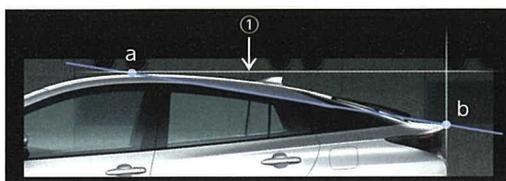


図 20 空力性能向上を図ったルーフシルエット

サイドウィンドウ前端部とリヤコンビランプ側面に配置したエアロスタビライジングフィンで、操安性向上に寄与している（図 21）。

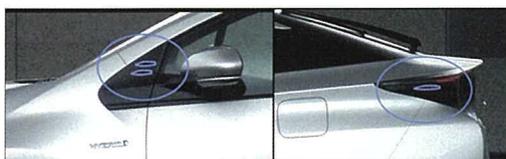


図 21 操安性を向上させる
エアロスタビライジングフィン

ピラー周りはガラスとの段差を減少させた造形とし、整流ガーニッシュを内側に配置した（図 22）。



図 22 空力性能向上を図ったAピラー造形

フロントタイヤ前を整流する最適な角度で造形したバンパーコーナーとしている。後方への流れを整流するリヤバンパーコーナー造形と、側面 (c) 及び下面 (d) の気流も最適化を図ったリヤ周りの造形である（図 23）。



図 23 空力性能向上を図ったバンパーコーナー

2.11 「遊美心」の表現：

なめらかな面質に機能性がシャープに融合

豊かな曲面を持たせた艶やかなテイストの面と、硬質な張りを感じさせる緊張感あるテイストの面を対比させダイナミックに変化する面造形を追求した。その造形変化を際立てる滑らかでシャープな線使いにより前後ランプ類の機能部品やキャビン全体フォルムに融合させ、機能性とエモーショナル性が一体となったモダンな「遊美心」を表現している（図 24）。



図 24 「遊美心」の表現

2.12 スポーツグレード

スポーツグレードでは専用ホイール、専用リヤバンパーを装備し、よりスポーティーさを強調する設定とした（図 25）。



図 25 “スポーツグレード” 専用装備

2.13 車名マーク

機能として存在するブリッジを意匠に取り込み、一体感ある先進性と親しみやすく読みやすい書体を表現している (図 26)。



図 26 ブリッジも意匠としたロゴマーク

2.14 ホイール

軽量化と空力の相反する性能を両立させるために、15 インチアルミホイールは軽量骨格アルミに空力カバーを被せ、17 インチアルミホイールは軽量意匠アルミに樹脂加飾パーツを組み込む各構成を採用した。両方とも空力効果を狙った「くさび形」形状により、ひと目で分かるアイコンニックさを追求している (図 27)。



図 27 機能的でアイコンニックなホイール意匠

2.15 外形標準部品&エンジンカバー

アウトサイドミラーは、バイザー/ステーを2段構成とし、シャープな横基調のイメージを付与しな

がら、細型ターンランプとクローム加飾のコンビネーションにより上質感を演出している (図 28)。

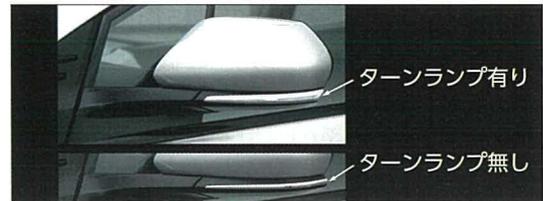


図 28 アウトサイドドアミラー

新意匠のアウトサイドドアハンドルは見切りレス構造の採用で意匠のシンプル化と風切り音低減を実現しながら、ハンドル中央にエッジを通した①断面形状でシャープさを強調している (図 29)。

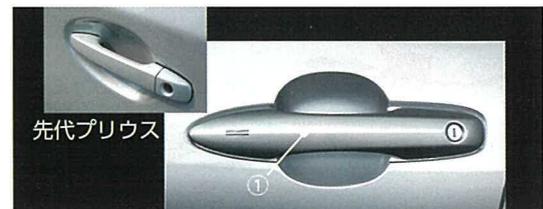


図 29 アウトサイドドアハンドル

ルーフアンテナは機能別に2種類用意し、水平断面の翼断面化で、気流の流れの向上に寄与する形状としている (図 30)。

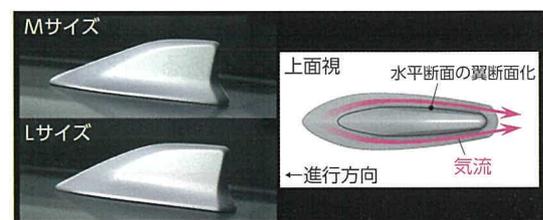


図 30 ルーフアンテナ

エンジンカバーは精緻感ある造形と、左右のヒートシンク表現により先進的なHVイメージを訴求している (図 31)。



図 31 エンジンカバー

3 外形カラー

3.1 外形カラーの狙い

エクステリアカラーでは先進技術による高意匠カラーを投入し、鮮やかな発色と機能性を兼ね備えた、新しいアイコンカラーを創出している。従来のブルー～ラベンダー系の環境をイメージさせる色はハイブリッド車共通の定番イメージとして定着している。新型プリウスのハイブリッドカラーの考え方として、時代の最先端を行く「先進性」をアピールする為、新技術採用による機能性を付与しながら、より個性とエモーショナル性を高めた鮮やかなカラーを実現した（図 32）。

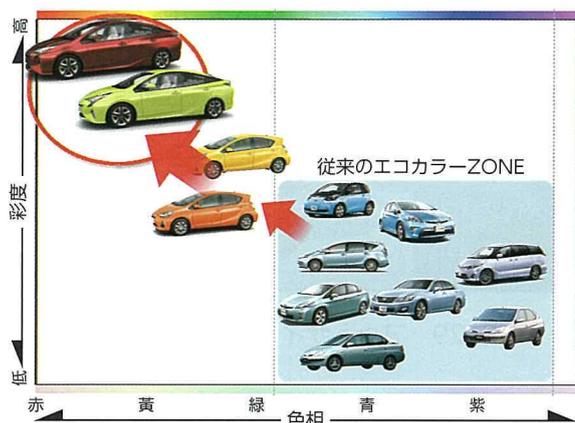


図 32 プリウスハイブリッドカラーの考え方

3.2 エモーショナルレッド（新規開発色）

濁りのない色鮮やかさとスポーティーな表現を目指し高彩度でありながら透明感ある、存在感の強いカラーを開発している（図 33）。



図 33 エモーショナルレッド

3.3 エモーショナルレッドの特徴

着色層の中に、アルミを使用した「反射層」と、高彩度赤顔料を使用した「透過層」を重ねることで、強い反射と赤の深みを兼ね備えた新しい色を実現させた（図 34）。

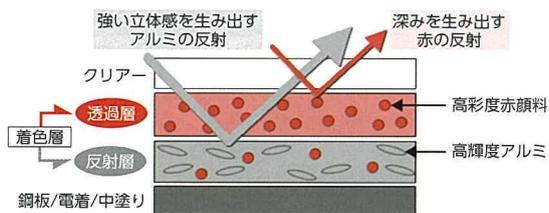


図 34 エモーショナルレッドの塗装工程

3.4 サーモテクトライムグリーン（新規開発色）

緑の新芽のようにフレッシュさと活力を表現したライムグリーンは、遮熱機能を付与することで先進性を表現している（図 35）。



図 35 サーモテクトライムグリーン

3.5 遮熱技術の特徴

赤外線吸収率が高いカーボンブラック粒子のかわりに赤外線反射率の高い「大粒径酸化チタン」を採用し、熱を反射させることで、太陽光下での車体表面温度を下げる技術を実現させた（図 36）。

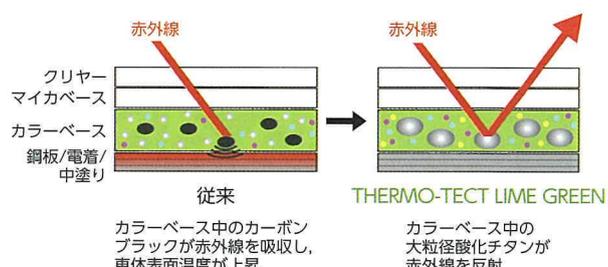


図 36 遮熱技術の特徴

4 室内デザイン

4.1 室内デザインの狙い

室内デザインの開発では外形デザインと同様に先進性のシンボルとして強い存在感を追求し、機能と遊び心を美しくまとめ上げた遊美心によるエモーショナルな表現でインパクトあるアイコンック

ヒューマンテックインテリアを実現している。それには三つの構成要素がある (図 37)。



図 37 室内デザインテーマ

4.2 室内デザインの方向性

エコカー市場での各車室内デザインの方向性は、左上 2 代目プリウスの「機能をシンプルに統合」、右上の「オーガニックな優しさ」下段の「メカメカしさの誇張」や「セダンの様式」など様々ありプリウスは先進性のシンボルとしての新しい存在感が必要であると考え (図 38)。新型は先進技術と遊び心を美しくまとめ上げ、心に響くヒューマンスティックな造形を狙いとしている。

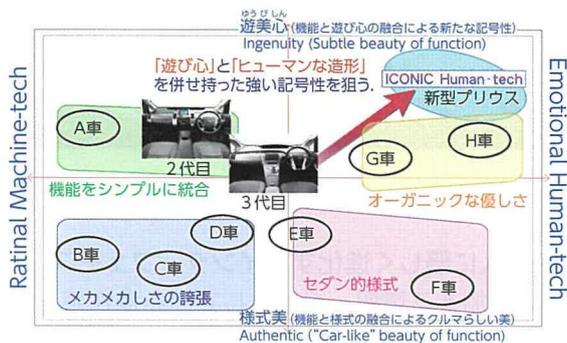


図 38 室内デザインの方向性

4.3 情報デバイスの明快な構成とシンボル化

人の感覚を起点とした歴代モデルの考えに基づき、メーターパネルは遠方に、操作系パネル (オーディオ / ヒーターコントロールパネル) は手元配置とし、情報の整理 / 集約を図った造形としている (図 39)。メーターパネルとセンター操作系パネルはインパネ (インストルメントパネル) に巻きついたレイヤー構成とし、機能がシンボル化された強い存在感を演出している (図 40)。



図 39 インパネ全体



図 40 パネルをシンボリックに表現

4.4 開放的で一体感あるインパネ

インパネ / ドアトリム / ピラー等は無駄をそぎ落とした断面とし、身体の動きを阻害しない開放的で快適な空間を創出している。低く薄く構えたインパネ基本面をドアトリムまでシームレスに繋げた乗員を優しく包み込む造形とすることで一体感ある空間を演出した (図 41)。また「温かみ / しっとり感」ある滑らかな面質とし、先進的な中にも温かみのある「ヒューマンテック」な世界観を表現している。



図 41 開放的でシームレスな造形テーマ

4.5 機能美と広がりある空間表現

天井はそぎ落とす造形テーマで先代より頭上空間を確保しつつ凹面の美しさで機能美を表現し、センターピラーとリヤクォーターピラーはブラックアウトすることで前後の広がりを感じる室内空間を創出している (図 42)。

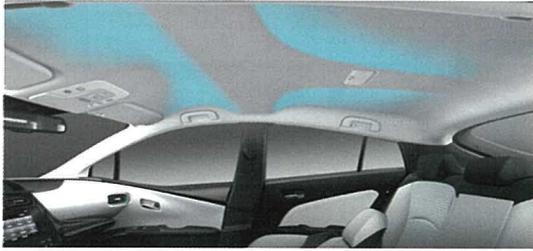


図 42 室内全体



図 45 機能美と温かみあるプロダクト表現

4.6 足元、視界確保の快適空間

インパネはステアリング角度を最適化させ足元スペースを広く確保している (図 43)。バックドアは窓枠を出来るだけ細くすることで後方視界を極力確保している (図 44)。

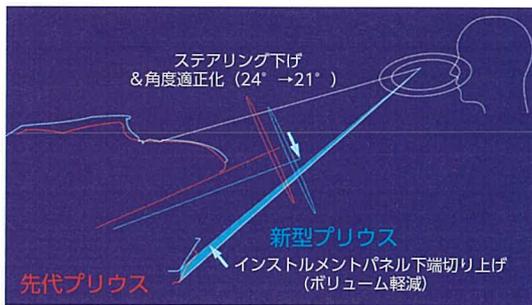


図 43 低く薄いインパネ断面



図 44 後方視界改善

4.7 「遊美心」ある質感表現

機能部品の造形は、機能を特徴的に表現しながらシンプルに美しくまとめてアイコンニックに昇華した。インパネトリム同様『温かみしっとり感のある』面質に加え、ホワイト加飾で表現することで親和性のある『ICONIC Human-tech』を表現している (図 45)。

4.8 優しさと機能美を追求したシート

フロントシートは、ゆったりと広がりを持たせたクッションに対して、シートバックは優しく包み込む肩のホールド部をグラフィックで際立たせ、シート全体で「遊美心」を表現している。リヤシートは、トリムに溶け込む意匠・配色とし、インテリアとしての一体感と室内空間の広がりを図っている (図 46)。



図 46 シート

4.9 人に優しく進化するインターフェース

年々増加する情報、複雑化している操作系に対し運転しながらでも「直感で操作出来る、安全快適なHMI※」の実現が必須である。初代より常にトヨタのHMIの革新を示し続けて来たプリウスに於いては更なる安全、快適なインターフェースが求められている。新型プリウスはメーターパネル内に4.2インチフルカラーTFTを2画面配置し、サブ画面に様々な車両情報を表示する (図 47)。これにより複数の情報をシンプルな操作で視ることが可能である。

※HMI = ヒューマンマシンインターフェース

Human Machine Interface

人間と機械が情報をやり取りするための手段や、そのための装置やソフトウェアなどの総称。



図 47 メーター

4.10 ステアリングホイール

操作性と握り心地にこだわったグリップ断面を採用した。水平スポーク部にはアイコンニックな十字キーを含むスイッチを設定し、手で様々な操作が出来る。手探りで操作しやすい形状と見た目によりやすい色分けで、安全で優しいHMIを実現した。またホワイト加飾でコーディネートし、コンソール/シフトレバーと同様、温かみある表現をしている(図48)。



図 48 機能的でアイコンニックなステアリングホイール

5 室内カラー

5.1 室内カラーの狙い

アイコンニックな印象をコントラストの強い配色によって表現している。さらにシート表皮への先進機能付与や緻密で上質な作りこみ、アクセントカラーのステッチを施すことで、「ヒューマンテック」な世界観を演出している。

5.2 室内カラー：

3つのカラーバリエーション展開

「クールグレイ」：ブラックに爽やかなグレイを効かせたコントラストの強いカラーリング、新型プリウスのDNAを最も感じられる、アイコンニックな室内空間である(図49)。



図 49 クールグレイ

「ニュートラルベージュ」：次世代ラグジュアリーを表現したブラウンとベージュをコーディネーションさせた、モダンさと上質感を合わせ持った室内空間である(図50)。



図 50 ニュートラルベージュ

「ブラック」：定番として人気のあるブラックの室内にポイントでアクセントカラーのホワイトを効かせた、シンプルかつアイコンニックな室内空間である(図51)。



図 51 ブラック

5.3 アイコンニックなアクセントカラー

サイドレジスターやシートステッチにカラーアクセントを施し、モダンなインテリアをさらにエモーショナルに表現している(図52)。



図 52 アクセントカラーを施した配色

5.4 シートマテリアル

より新型プリウスの先進性を表現するため、機能性と質感を併せ持ったファブリックを新規開発し、本革・合成皮革を含む全4種類のラインナップである(図53)。

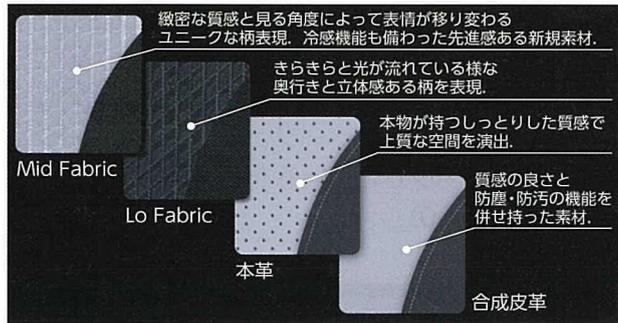


図 53 シートマテリアル

6 おわりに

以上、4代目となる新型プリウスのデザインについて紹介した。現在、電気自動車や水素燃料電池車がエコカーとして肩を並べる時代に突入している。プリウスの存在意義は、その中でもお客様へのニーズや期待を裏切らない新しい商品価値を生み出すことと考える。新型プリウスが世界中のお客様にエコアイコンの象徴として、心に残る強い記号性を持ったデザインで笑顔を作ることが出来れば幸いである。

■著者



児玉 修作



高橋 俊弥



武政 憲明



岡本 桃子

TNGA によるもっといいクルマづくり

Making Ever-Better Cars through the TNGA

神谷 元雄*
Motoo Kamiya

七里 文子*
Nobuko Shichiri

安部 朋彦*
Tomohiko Abe

要旨

Toyota New Global Architecture 略して TNGA による『トヨタのもっといいクルマづくり』について説明します。『もっといいクルマをつくろう』—トヨタが一貫して抱いてきた強い想いを基に、TNGA は生まれました。クルマの基本性能や商品力を飛躍的に向上させること、そしてその先に、「お客様の笑顔」を見ること、それがこの取組みの大きな目標です。

Abstract

This article describes Toyota's vision of making ever-better cars through the Toyota New Global Architecture (TNGA). The TNGA was created through a strong desire across the whole of Toyota to enhance the vehicle making process by achieving dramatic improvements in basic performance and product appeal. The ultimate aim of the TNGA is to bring a smile to the faces of customers by exceeding expectations.

キーワード TNGA, もっといいクルマづくり, 基本性能・商品力向上

1 はじめに

これまでのクルマづくりは、初代クラウン以来「CE (チーフエンジニア) 制度」を基に、個々の車をより良くする為に皆が力を合わせ「いいクルマづくり」を進めて来た。

しかし近年では、世界各国の多様なニーズに対応すべく車種数が増え、プラットフォームも小分類では約 100 種類まで増大、また、エンジン種類数もプラットフォームや駆動方式の違い、各国の排気規制対応などにより約 800 種類にまで増大し、その結果、量の拡大と共に個別車種毎にいいクルマづくりを続けることが困難になってきた。そこで、今後も更に持続的成長を続け「もっといいクルマづくり」を継続していく為、従来の個別最適な仕事のやり方を見直し、全社をあげて構造改革に取り組んでいる。それが「TNGA (Toyota New Global Architecture)」である。

2 TNGA による基本性能・商品力の向上

TNGA の一番の狙いは、魅力あるクルマ、カッコいいクルマをつくる為に、クルマの基本性能・商

品力を大幅に向上させることである。お客様が一目見て、「このクルマが欲しい」と思って頂けるデザインや、一度乗ったら「ずっと乗っていたい」と思って頂ける走りなど、これまで以上に磨きをかけていく。その為、TNGA では、クルマの心臓部であるプラットフォームとパワートレインユニットを新たに開発、刷新し、それぞれの機能・性能を徹底的に高めると共に、クルマ全体で最適を図った開発を進めている。

2.1 新しいクルマづくりの考え方

2.1.1 車両の低重心化へのこだわり

TNGA では、お客様の感性に訴える商品力向上の為、車両の低重心化にこだわっている。図 1 にコンパクトクラスの重心高比較を示す。

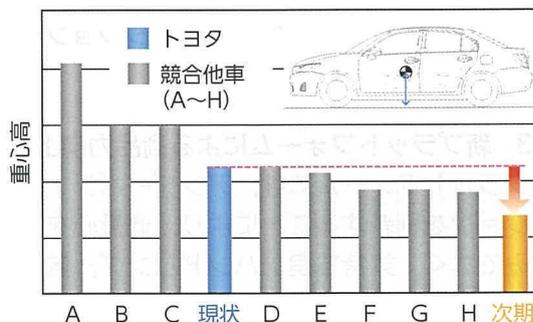


図 1 コンパクトクラスの重心高比較

* TNGA企画部

重心高を低くすると、クルマの左右ロールが減り、より安定した気持ち良い走りを実現出来る (図 2)。

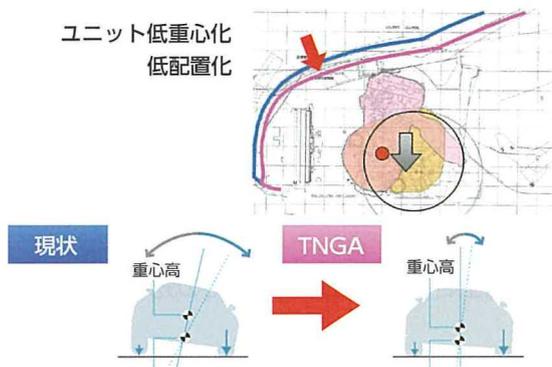


図 2 低重心による安定した走り

現状は残念ながら、競合トップレベルではないが、プリウスを始めとした次期型モデルでは、クラストップの低重心を実現させ、操縦性能で競合トップレベルを目指している。これを実現する為、新パワーtrainユニットを新プラットフォームと組み合わせ、従来よりも低い位置へ搭載した。

2.1.2 最適なドライビング・ポジション

TNGA では、運転し易く、長距離でも疲れのないドライバーにとって最適なドライビング・ポジションとは何か？を徹底的に追及し、図 3 に示す 6 つの観点で、最適なドライビング・ポジションを定義し直し、アーキテクチャーとして策定した。

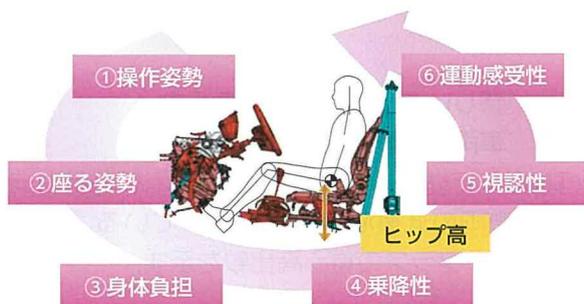


図 3 最適なドライビング・ポジション

2.1.3 新プラットフォームによる商品力向上

新プラットフォームでは、アンダーボディやサスペンションを刷新することにより、低重心を実現するのみでなく、気持ち良いハンドリング、質感高い乗心地、安全・安心を届ける衝突安全性能など、商品力が飛躍的に向上する。次期 FF 系及び FR 系の新プラットフォームでは、原理原則に基づいた重量

配分、部品配置、力の取り方や骨格構造などの考え方を改めて見直し、開発を進めている。新骨格ボディの剛性は、セグメントによって異なるが、従来比約 30%から 65%向上する見込みである (新型プリウスは約 60%向上) (図 4)。

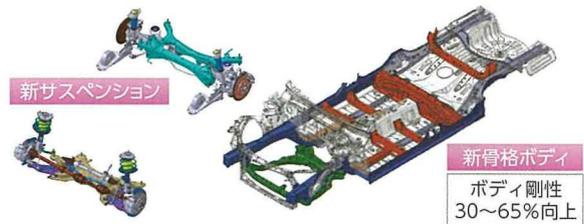


図 4 新プラットフォーム

2.1.4 TNGA で変わる前方視認性

車両の低重心化で得られる効果は、クルマの走りだけではない。クルマを基本骨格から見直し、ユニットを低く配置した結果、エンジンフードを低く構えることが可能となり、より見やすく、運転しやすい前方視認性が確保出来る (図 5)。

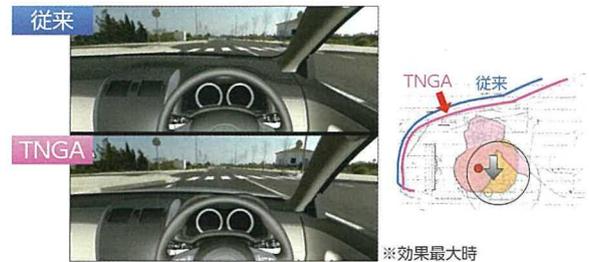


図 5 より見やすく、運転しやすい前方視認性

こうしたクルマの基本骨格から見直した TNGA の取組みにより、お客様が一目見て「このクルマが欲しい」と思って頂けるプリウスのような流麗なデザイン、クールでカッコいいクルマも実現できる。

2.1.5 TNGA で変わる予防安全

TNGA では新たな予防安全システム「トヨタセーフティセンス」を開発した。グローバルに予防安全技術の普及を図る、トヨタの新しい予防安全パッケージである (図 6)。最大の特徴は、2 種類の異なるセンサーを組合せ、衝突回避の為に認識性能の向上と信頼性確保の両立を図ったことである。プリクラッシュセーフティに加え、レーンディパーチャーアラートやオートマチックハイビームなどの衝突回避をサポートする機能をワンパッケージにしたトヨタセーフティセンスをほぼ全ての車種、グレードへ設定する。



図6 トヨタセーフティセンス



図8 TNGA 部品

2.1.6 更なる「安全・安心」の為に衝突安全

トヨタの衝突安全性評価「GOA (Global Outstanding Assessment)」では、時代や技術の進化と共に、評価条件の見直しや評価方法を追加するなど、常により高いレベルへ進化させている。従来の前面、側面、後面の衝突評価に加え、TNGAでは従来にない斜め衝突評価に対しても取組み、安全性能を進化させている。

2.2 新パワートレインシステム

新パワートレインシステムは、エンジン・トランスミッション・ハイブリッドシステムを組合せたシステム全体で、燃費・動力性能を大幅に向上させる。従来と比較すると、コンベンショナルエンジンシステムでは、燃費約25%、動力性能約15%以上、また、HVシステムでも燃費約15%以上（新型プリウスは約20%）向上すると見込んでいる（図7）。

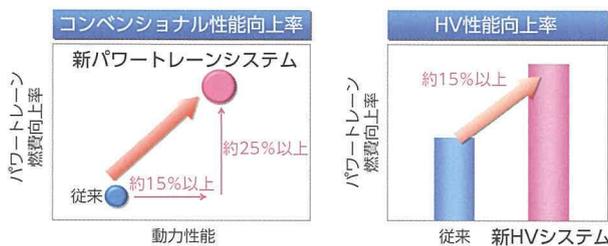


図7 燃費・動力性能の大幅向上

3 TNGA による全体最適なクルマづくり

図8で示す部品は、クルマの基本性能を決める機能部品で、TNGA 部品と呼んでいる。基本性能を向上させるいいモノを造り、全体最適を考え、賢く共用化を図り、クルマを賢くつくる・・・それがTNGA の取組みである。

4 CE 制度によるこだわりのクルマづくり

TNGA 部品が増えて、個性的なもっといいクルマができるのか？と思われるかもしれないが、お客様が見て、触れる所は、今まで通り殆どの部品については、車種毎にデザインする。図9では、黄色の部分を示す。

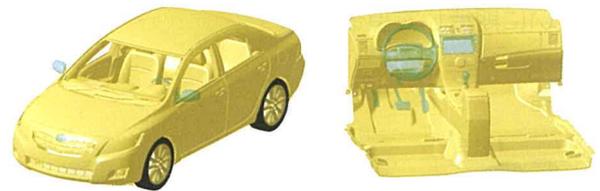


図9 車種毎のこだわり部品

また、走りの味も、基本性能のいいTNGA 部品をベースに車種毎に、効率的にチューニングする。CE 制度によるこだわりのクルマづくりで、魅力あふれるもっといいクルマに仕上げる。

5 CE 制度とTNGA の融合

これからは、車種毎にこだわるCE 制度によるクルマづくりと、TNGA による基本性能・商品力向上&賢いクルマづくりとの融合が、トヨタの新しい「もっといいクルマづくり」となる。この新しい「もっといいクルマづくり」のもと、トヨタの持続的成長に向けたコア技術開発を通して、「考える力」を結集することで、次世代を担う人材育成につながると考えている（図10）。

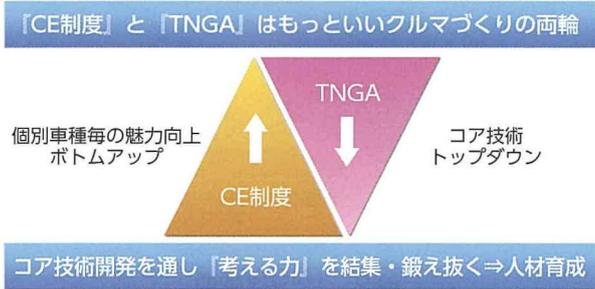


図 10 CE 制度と TNGA の融合

6 おわりに

トヨタ自動車は、全社をあげて取り組んでいるこの TNGA をプリウスより導入を開始し、FF 系コンパクト車・ラージ車や、FR 系の車種も含め、2020 年頃までに約半数の販売車へ順次展開していく予定である。お客様にきっと満足頂ける「もっといいクルマ」が続々と登場するので、今後のトヨタに大いに期待して頂きたい。

■ 著者



神谷 元雄



七里 文子



安部 朋彦

「運転して楽しい」を実現した新型プリウスのボデー構造

Innovative and Fun-to-Drive Body Structure of the New Prius

西野 章*	岡本 亨**
Akira Nishino	Toru Okamoto
和田 敏尚***	近藤 圭一***
Toshinao Wada	Keiichi Kondo

要旨

「もっといいクルマをつくろうよ」- TNGA のさきがけとなる新型プリウスを「運転して楽しいクルマ」にするために、改めて骨格構造を見直し、基本性能や商品力の向上に取り組んだ。ここでは新型プリウスに採用した新プラットフォーム (P/F) や新アッパーボデーの開発の狙いとボデー構造について紹介する。

Abstract

The new Prius is the first model to be based on the Toyota New Global Architecture (TNGA) and its vision to make ever-better cars. An innovative and fun-to-drive body structure was developed to achieve dramatic improvements in basic performance and product appeal. This article describes the objectives of the platform and upper body development of the new Prius, as well as the body structure adopted to achieve those objectives.

キーワード 高剛性, 低重心, 走りの質感

1 はじめに

新型プリウスを「運転して楽しいクルマ」にするため、下記3点の運動性能の素性を良くする基本諸元を最高レベルで実現することを開発のテーマとした。

- (1) 高剛性ボデーの実現
- (2) 車両の低重心化
- (3) 走りの質感向上

徹底的にボデーを鍛え上げ、先代の「燃費は良い」から新型プリウスは「燃費も操縦安定性も乗心地も良い」と評されるクルマにすることを目指した。

2 高剛性ボデーの実現

運動性能の基本諸元であるボデーねじり剛性は3代目プリウス比+60%を実現、操縦安定性能を大幅に向上させた(図1)。以下に各部位の開発の狙いや構造について述べる。

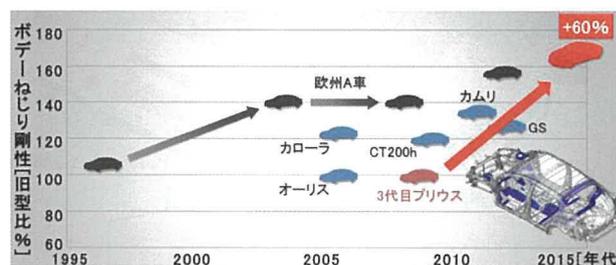


図1 ボデー剛性値推移

2.1 新プラットフォームのボデー構造

新型プリウスに採用した新プラットフォーム (P/F) には今後のコンパクトクラスに展開されるP/Fとして、操縦安定性・乗心地といった基本性能を向上させるボデー構造を織込んだ。以下に採用技術について述べる。

2.1.1 リヤアングボデー骨格結合部

リヤサスペンション取付部の着力点剛性と骨格の結合剛性向上を目的に、サイドメンバとクロスメンバの結合部を三又部材で結合した(図2)。

* 第1ボデー設計部 ** 第2ボデー設計部
*** 内装設計部

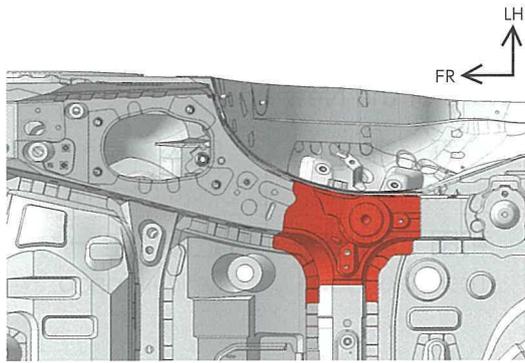


図2 リヤメンバとクロス結合部

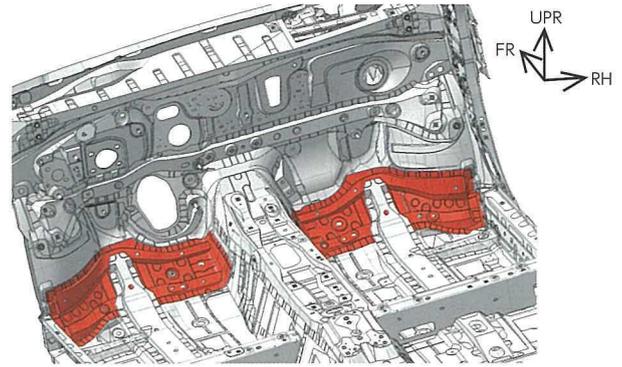


図4 フロントフロア前端部

2.1.2 フロアとロッカー結合

旋回時の左右ロッカーの前後方向ズレを、フロアがせん断で受けるよう、フロアをロッカーの下面でつなぐ構造を採用し、キャビンのねじり剛性を向上させた (図3)。

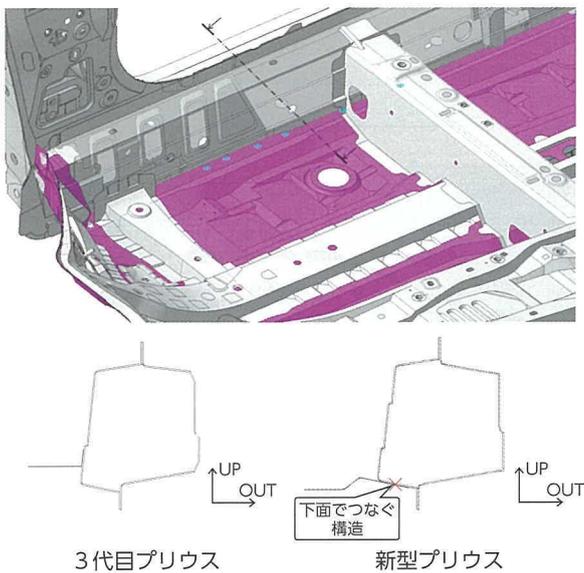


図3 ロッカーとフロア結合構造

2.1.3 フロントフロア前端部

ダッシュパネル後端とフロントフロア前端の繋ぎ部にクロス部材を配置し、トンネルとロッカーインナを結合することでキャビンねじり剛性を向上させた (図4)。

2.1.4 フロントエンド構造

エプロンアップパーメンバ先端からフロントサイドメンバ先端を繋ぐ骨格部材を追加し、フロントサスタワーの剛性を向上させた (図5)。

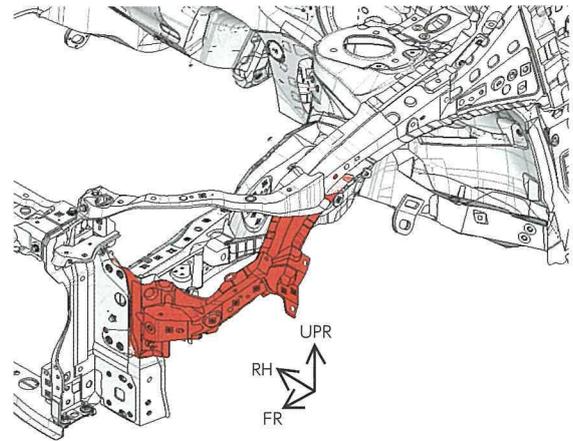


図5 フロントエンド構造

2.2 新アップパーボデー構造

新P/Fとの一体感を高め、操縦安定性・乗心地、商品力、お客様の嗜好に合った、車両の実現に向けて開発した新型プリウスのアップパーボデーの採用技術について以下に述べる。

2.2.1 Laser Screw Welding

Laser Screw Welding (LSW) は従来のスポット溶接や、線レーザー溶接に代わるトヨタ独自の溶接技術である (図6)。

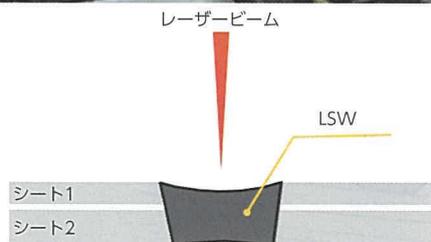


図6 LSW工程と溶接断面概要

LSWは既存車種において、ドアオープニング増打による操縦安定性確保の手段として採用例はあるが、新型プリウスではオープニング増打(図8)に加え、骨格の結合手段として採用(図9, 13)(世界初)、後述する①狭所多打点(図7)と②片側溶接(図9)の特徴を最大限に活かし、高剛性・高強度と軽量化を実現した。

①狭所多打点

従来のスポット溶接は溶接ピッチが狭い場合電流が分流し品質確保が困難である。LSWは狭所の多打点化が容易に行える。

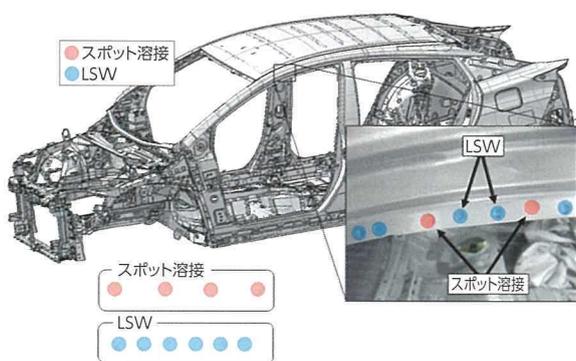


図7 狭所多打点の例

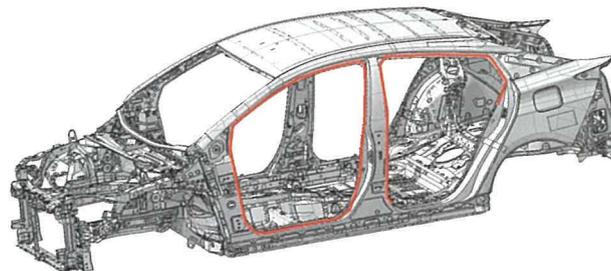


図8 LSW増打採用部位

②片側溶接

スポット溶接は、溶接ガンアクセス用の溶接作業穴や、前工程で溶接後、本工程にセットするなど複雑な工程が必要とされる。LSWでは効率的に閉断面部への片側溶接が可能となる。図9にフロントピラーインナーの片側溶接の例を示す。

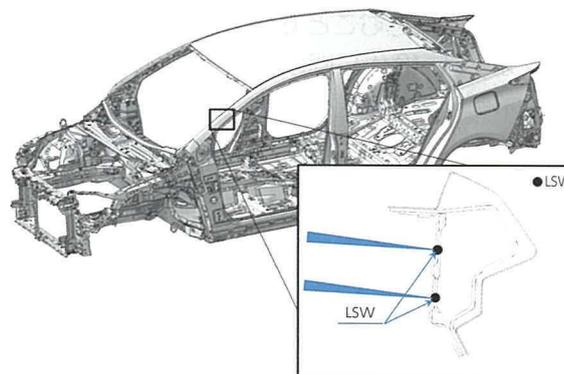


図9 片側溶接採用例

2.2.2 環状骨格ボデー

以下に環状骨格ボデー採用構造①②について述べる。

①リヤボデー環状骨格

ボデーのねじり剛性とリヤサスタワー着点剛性の向上を目的にリヤボデー環状骨格構造を採用した(図10)。左右のリヤサスタワー間にクロスメンバを配置、ルーフサイド～リヤヘッダーで環状骨格を形成し、ボデーねじり剛性と(+60%)、サスタワー着点剛性を(+50%)向上させた。

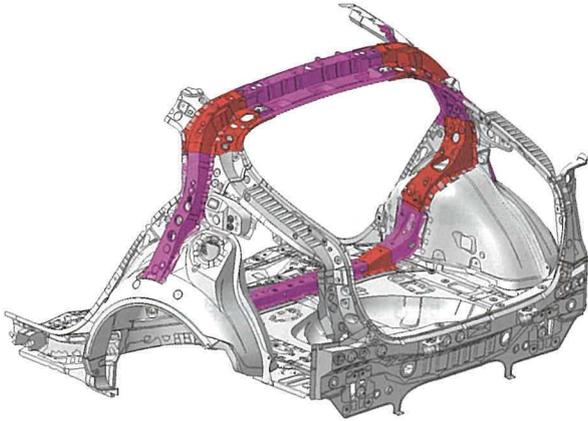


図 10 リヤボデー環状骨格

②キャビン環状骨格

ボデー剛性とキャビン強度の向上を目的にキャビン環状骨格構造を採用した(図 11)。下記 (i) ~ (iv) に示す構造を織込むことで、センターピラーアウトリンフォース (R/F) 間の結合を強固にし、連続性のあるボデー骨格を実現した。

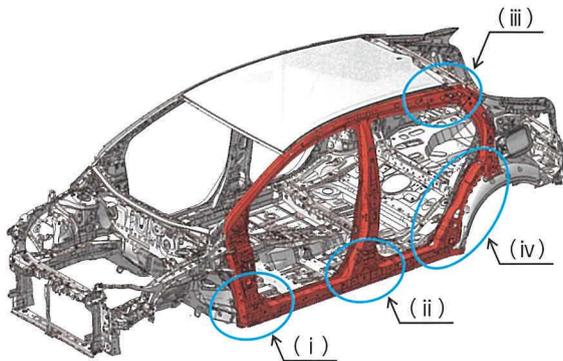


図 11 キャビン環状骨格

(i) フロントピラー下部のロッカーとの結合部(図 12)において、スポット溶接多打点化を採用した(曲げ剛性向上+ 6%)。

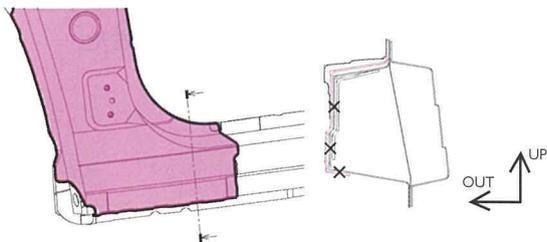


図 12 フロントピラーとロッカー結合部

(ii) センターピラー下部(図 13)において、センターピラーインナローアを追加した。また、R/Fとロッカーアウト R/F を LSW 多打点で結合した(曲げ剛性向上+ 21%)。

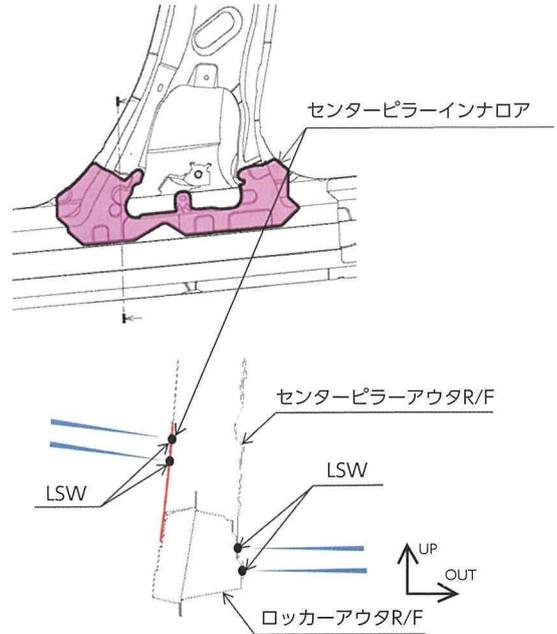


図 13 センターピラーとロッカー結合部

(iii) ルーフサイドレール後端にルーフサイドアウトエクステンション(図 14)を追加し、リヤボデーとの結合を強固にした。

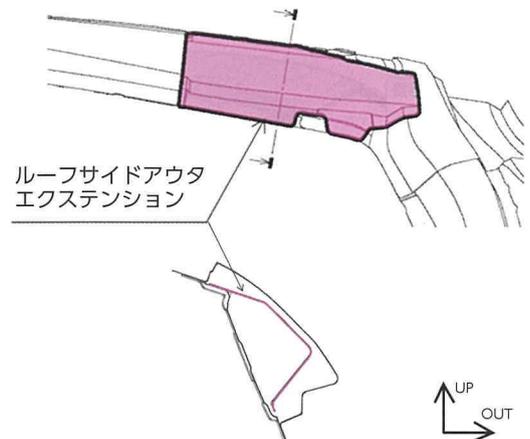


図 14 ルーフサイドアウトエクステンション

(iv) リヤホイールハウス前部にクォータアウト R/F(図 15)を追加し、リヤボデーとの結合を強固にした。

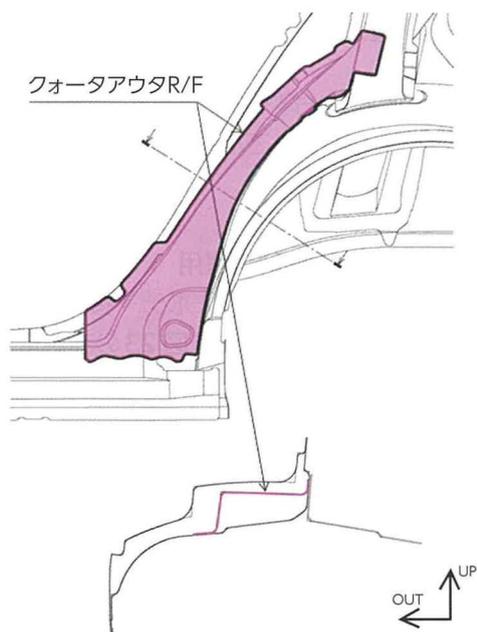


図15 フォータアウト R/F

2.2.3 カウル構造

操縦安定性や操舵感確保を目的に、フロントサスペンション取付部の剛性向上を図った。左右のサスタワーをカウル閉断面で結合し（図16）、サスタワー上下剛性と（+20%）、左右剛性を（+50%）向上させた。

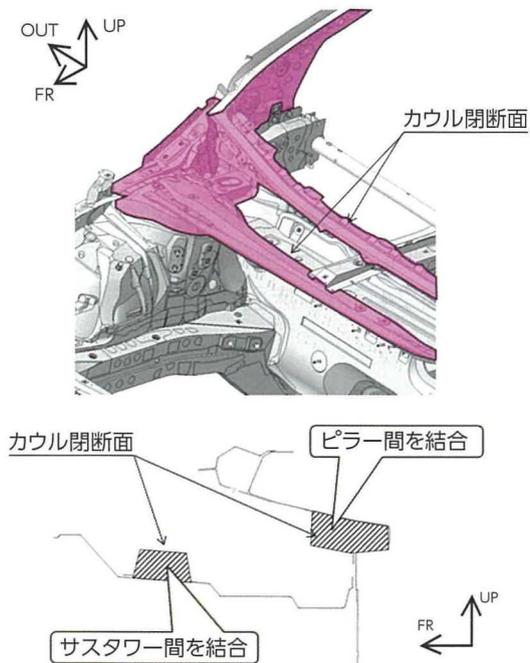


図16 カウル構造

2.3 インパネ R/F

インパネ R/F ステアリング支持部の左右剛性向上による操縦安定性の確保を目的に、インパネ R/F（図17）とフロントピラーの締結部を閉断面化、カウルサイドブレースを設定し、高剛性トラス構造（図18）を形成した（左右剛性+85%）。

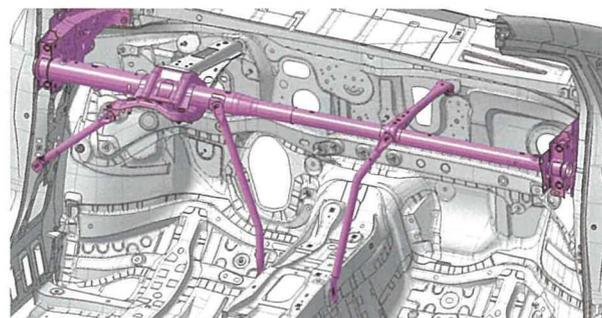


図17 インパネ R/F

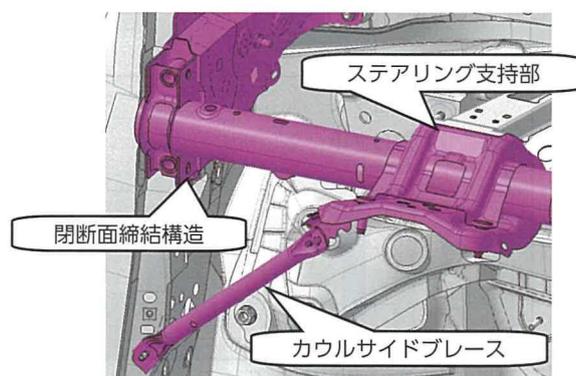


図18 トラス構造部拡大

ステアリング支持部とダッシュを結ぶダッシュトウブレース（図19）を閉断面化し、ステアリング剛性を向上させた。また、上面のスリット形状を最適化し、衝突時のエネルギー吸収にも配慮した。

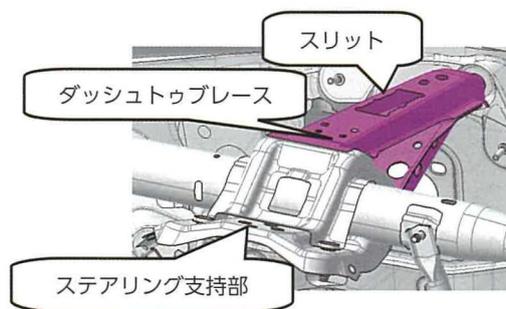


図19 ダッシュトウブレース

3 車両の低重心化

車両の重心高を低くすることは、操縦安定性を向上させる重要な要素である。図 20 に新型プリウスの車両パッケージを示す。

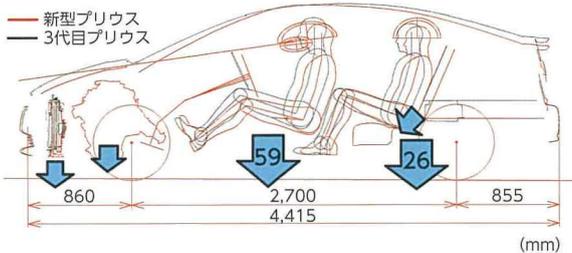


図 20 車両パッケージ図

パワートレインや乗員の低配置化によりクラストップの低重心を実現した(図 21)。また前後重量配分も見直した。

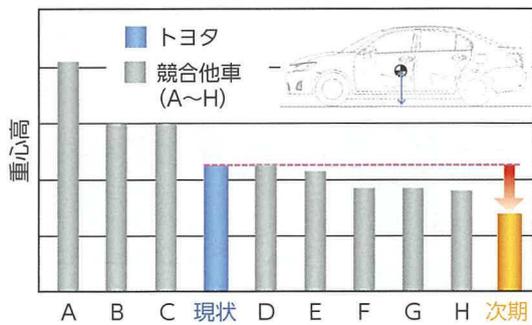


図 21 コンパクトクラスの重心高比較

エンジンルーム内の部品配置の見直しやエアコンユニットの小型化を実施し、乗員の低配置化をしつつ前方視認性を確保した(図 22)。

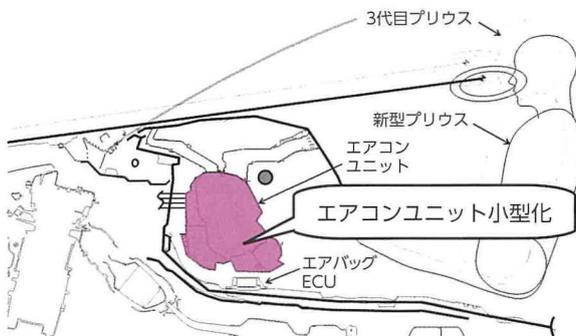


図 22 フロントウィンド下端車両センター断面

4 走りの質感向上

2章で示したボデー剛性確保の他にも運転者に対しての安心感や快適性にこだわった開発を行い、走りの質感を向上させた。

4.1 構造用ボデー接着剤の採用

振動伝達感度の低減を目的にボデー接着剤を採用した。ボデー接着剤の適用部位を図 23 の赤色に示す。

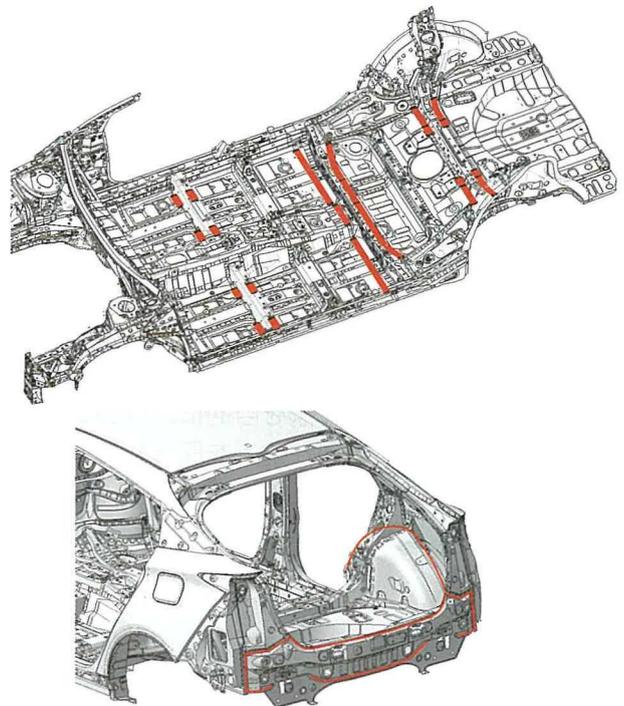


図 23 ボデー構造用接着剤塗布位置

4.2 キャビンへの差厚結合パネル採用

フロアパネルは差厚結合により運転者足元部位を厚板化し(図 24 赤)、床面から伝わる不快な振動の抑制を図った。

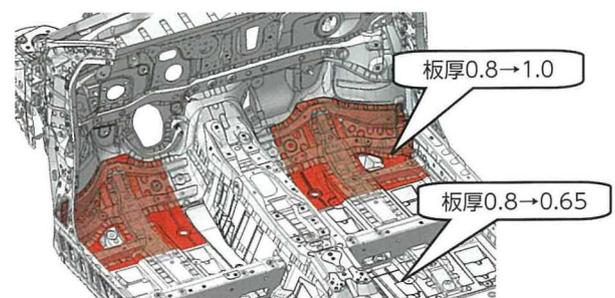


図 24 フロア差厚結合採用部位

4.3 フロントシート取付部

車両と乗員の一体感向上を目的に、フロントシート（図 25）の締結剛性向上を図った。ブラケットAを介して締結していた構造を廃止し、シートレールをボデーに直接締結する構造（図 26）とした（左右剛性+42%）。

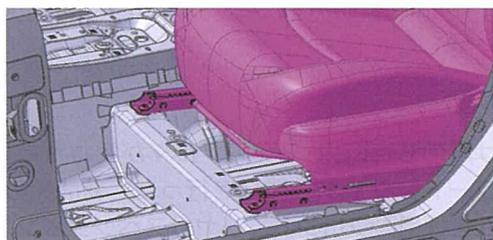


図 25 フロントシート取付部

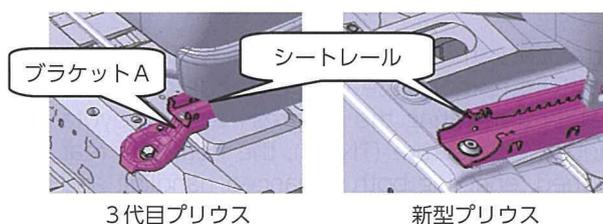


図 26 フロントシート取付部拡大

5 最後に

「運転して楽しいクルマ」を目指し、開発した新型プリウス、ここに紹介した新構造・新アイテムやパッケージングによりお乗り頂くお客様に「笑顔」になって頂けると確信している。

■著者



西野 章



岡本 亨



和田 敏尚



近藤 圭一

期待を超える感動の走り ～新型プリウスのシャシー開発

Impressive Vehicle Dynamics that Exceed Expectations: Chassis Development for the New Prius

浅井 徹*
Toru Asai

鷺谷 雄介*
Yusuke Washitani

鈴木 啓之*
Hiroyuki Suzuki

井辻 隆志*
Takashi Itsuji

福本 康孝**
Yasutaka Fukumoto

要旨

新型プリウスでは「もっといいクルマをつくろうよ」の掛け声のもと、「トヨタのクルマが変わった」と印象づける「エコカーの常識を覆す運転の楽しさ」をキーワードにシャシー開発を行った。新開発のTNGA (Toyota New Global Architecture) プラットフォームを採用、フロント、リヤサスペンション、ステアリングシステムを刷新、操縦安定性と質感のある乗心地を高次元で両立した。本稿ではそのシャシー開発の概要について紹介する。

Abstract

Following the guiding principle of creating ever-better cars, the chassis of the new Prius was developed with the aims of achieving an enjoyable driving experience that exceeds customer expectations of environmentally friendly vehicles while demonstrating the progress of the Toyota group. Using a platform based on the Toyota New Global Architecture (TNGA), the front and rear suspensions and steering system were completely refreshed, enabling both enhanced handling and refined ride comfort. This article outlines the details of this chassis development.

キーワード V字開発プロセス, TNGA 新プラットフォーム, 操縦安定性, 乗心地

1 はじめに

新型プリウスでは「もっといいクルマをつくろうよ」の掛け声のもと、「走りの良さ」にとことんこだわり、「トヨタのクルマが変わった」と言っていただけのようなシャシー性能の実現を目指した。TNGA (Toyota New Global Architecture) 新プラットフォームとして取組んだ「重心高低減」, 「ボデー剛性の確保」といった車両基盤技術を基に、操縦安定性と乗心地を高い次元で両立させ、旧型比較で大幅な性能向上を実現することを目指し、サスペンション、ステアリングの刷新を行った。本稿では新型プリウスで狙いの目標性能をどのように具現化したか、その開発概要について紹介する。

2 開発概要

2.1 開発のプロセス

TNGA 開発のトップバッターである新型プリウスの開発にあたっては、トヨタが車両運動性能開発において取り組んでいる「V字開発プロセス」を愚直に実践した。

「V字開発プロセス」とは、図1に示す様に、開発車両の性能イメージを車両定量目標に落とし込み、その性能を実現するシステム、部品特性を決定、図面化を行い、部品、システム、車両での目標達成を確認し、各々にて未達の場合はその小サイクルを繰り返すプロセスを言う。設計にあたっては、シミュレーション技術、サスペンション特性計測装置等の充実した性能開発環境を活用し、目標達成に向け背反する性能の両立度向上検討を行う。また設計者は設計検討を行うだけでなく、実車評価適合においてテストドライバーの意見を聞き、設計者自らもよくクルマで走り込みを行い、指摘現象を理解することで更なる性能向上を目指し、このV字開発をやりきることに取組んだ。第3章では具体的な性能設計事例を紹介する。

* 第2シャシー設計部

** シャシー開発部

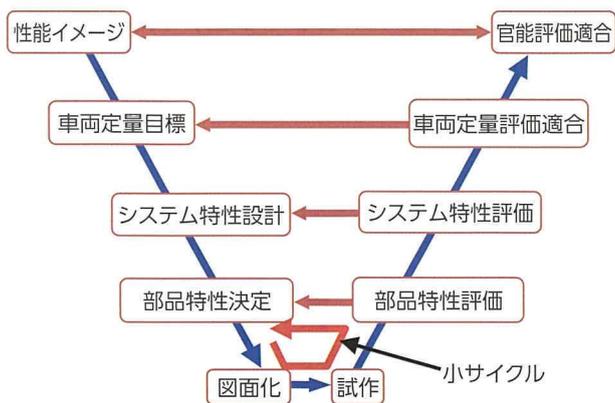


図1 V字開発プロセス

2.2 開発の狙い

新型プリウスでは「エコカーの常識を覆す運転の楽しさ」をキーワードに、またドライバーにとって「安心で安全、自然なフィール」になるようシャシー開発に取り組んだ。その目標実現のため、下記2点にとことんこだわり、車両定量目標を見出した。

- (1) 操縦安定性：操作に対して自然で繋がりの良い車両挙動
- (2) 乗心地：外乱に対して穏やかで収まりの良い車両挙動

その目標から落とし込んだサスペンション特性を達成するよう、サスペンションの配置、構成部品を新規設計した。

2.3 織込み内容

2.3.1 サスペンション

新型プリウスでは、フロントにマクファーソンストラット式サスペンション（図2）を、リヤはトレーリングアーム式ダブルウィッシュボーンサスペンション（図3）を採用、いずれも TNGA 新プラッ

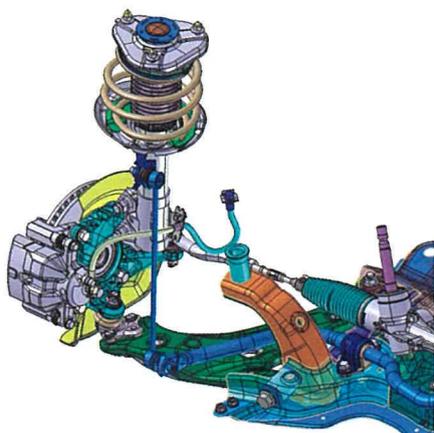


図2 フロントサスペンション

トフォーム用に新開発したものである。特にリヤサスペンションは、目標性能達成のため3代目のトーションビーム式から形式を変更した。いずれもサスペンションジオメトリと構成部品特性の見直しにより、開発の狙いとした車両挙動を実現すると共に、車両取り回し性の向上、効率の良い室内パッケージを実現した。

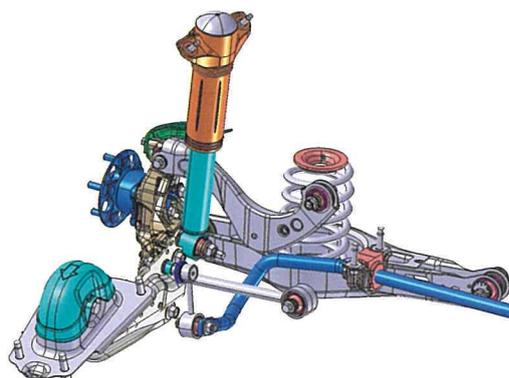


図3 リヤサスペンション

2.3.2 ステアリングシステム

ステアリングシステムは TNGA として新開発したコラムアシスト式 EPS を採用した（図4）。

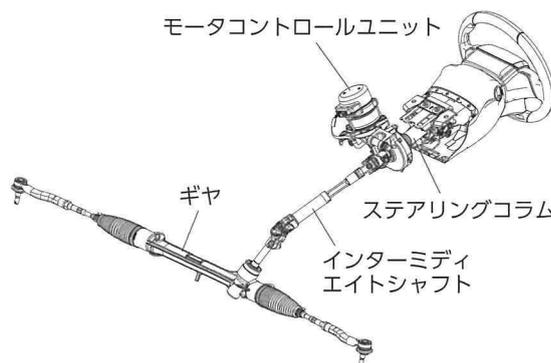


図4 ステアリングシステム

モータコントロールユニット（MCU）は、モータと ECU を一体化した高出力ブラシレタイプを採用した。ロック・ツウ・ロック回転数を縮小して、車両の取り回し性を向上させた（表1）。

表1 オーバーオールギヤ比

	3代目プリウス	新型プリウス
オーバーオールギヤ比	17.6	13.4
ロック・ツウ・ロック回転数	3.7	2.8

注) 15インチタイヤ仕様比較

2.3.3 タイヤ

新型プリウスには表2に示す2つのタイヤサイズを設定した。低燃費実現のため、タイヤころがり抵抗の大幅な低減を実現しながら、ハンドリング、乗心地、制動性能、振動騒音特性を高次元でバランスした。一例として、燃費と制動性能の両立度を示す(図5)。

表2 タイヤサイズ

グレード	タイヤサイズ
全グレード	195/65R15
ツーリングセレクションパッケージ	215/45R17

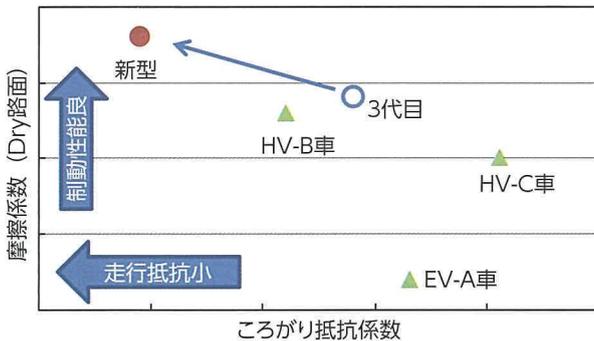


図5 ころがり抵抗係数-摩擦係数 (Dry 路面)

3. 運動性能の狙いと達成手段

3.1 操縦安定性

新型プリウスでは、ドライバーの意図した操作(操舵、制動)に対して、高速旋回時には安定感があり、低~中速旋回時には車両が意のままにตอบสนองするリニアで軽快感のある応答特性や、コーナー進入時の制動~操舵といった一連の操作の中で、繋がりの良い車両姿勢変化の実現を目指した。

これらを実現するため、車両パッケージング・軽量化による重心高・ヨー・ロール慣性モーメントの低減といった車両基本諸元の改善と、サスペンションシステム特性の最適化を行った。

3.1.1 軽快感と安定感の両立

軽快感と安定感の両立のためには、リヤのコーナリングパワーを増加し車両安定性を高め、フロントのコーナリングパワーを調整し、狙いのスタビリティファクタを確保する必要がある。この狙いを達成するため、フロントのキャストトレールを

15% 増加、リヤサスペンションロア No.1 アーム、ロア No.2 アームの取付けスパンを適正化し、横力コンプライアンスステアを増加した(図6, 7)。

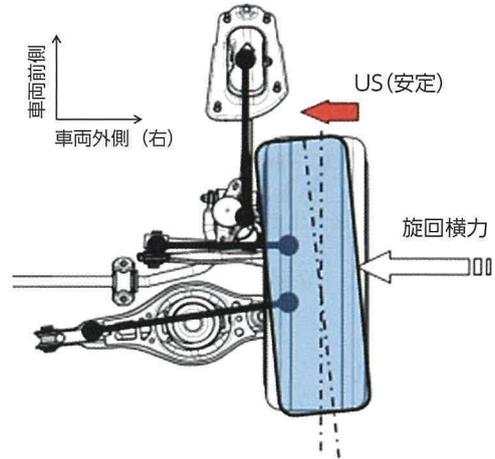


図6 リヤサスペンション配置 (横力)

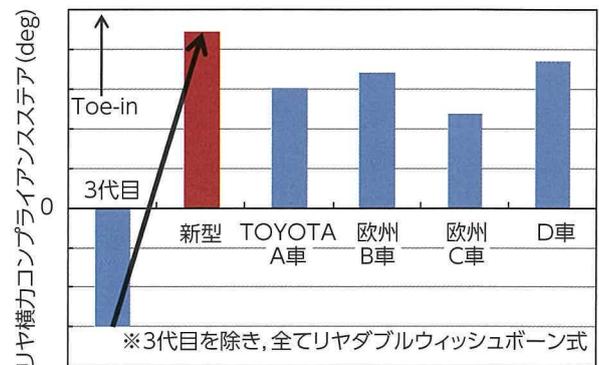


図7 横力コンプライアンスステア

これらにより、適正なコーナリングパワーを確保、前述のオーバーオールギヤ比の低減と合わせ、低~中速域の軽快感を向上しながら、高速域の安定感を確保した(図8, 9)。

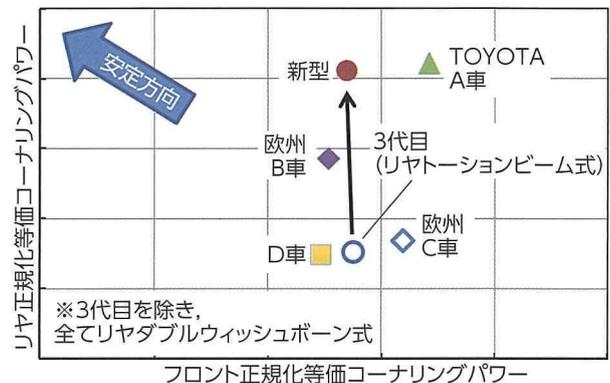


図8 コーナリングパワー比較

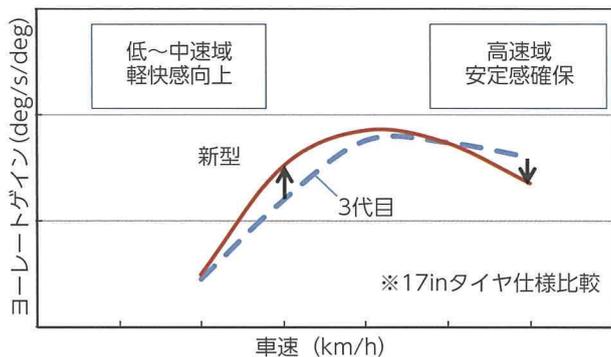


図9 車速-ヨーレートゲイン特性

更に、制動時の車両安定性確保を狙い、フロント、リヤサスペンションのアーム配置を適正化し(図10, 11)、前後力コンプライアンスステア特性のUS化を実現した(図12)。

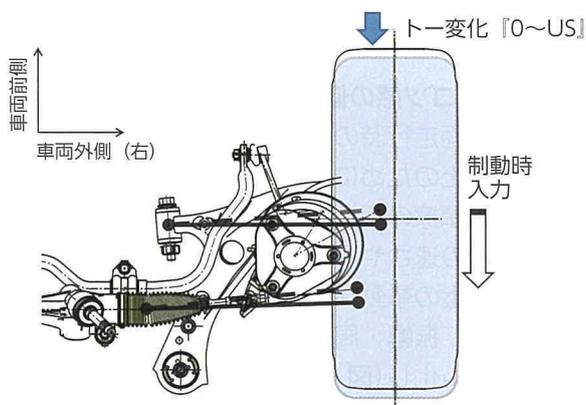


図10 フロントサスペンション配置

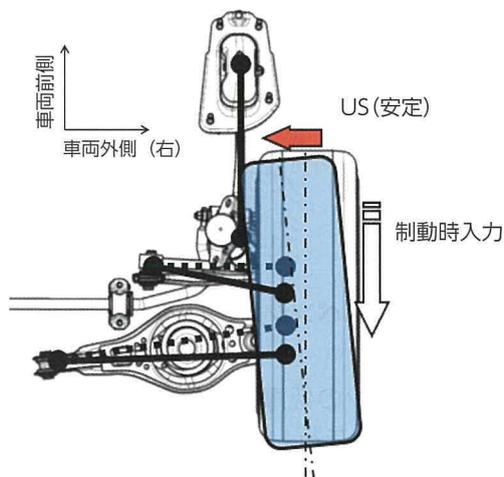


図11 リヤサスペンション配置(前後力)

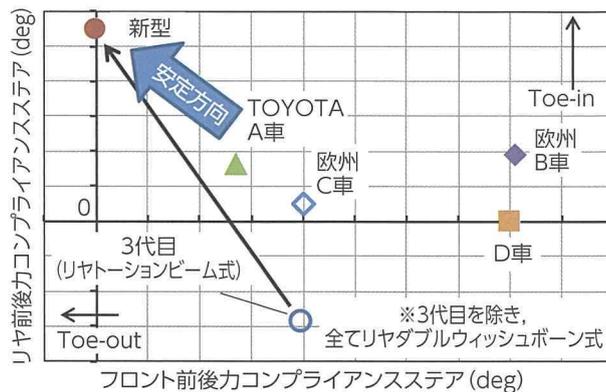


図12 前後力コンプライアンスステア

3.1.2 繋がりの良い車両姿勢変化

車両姿勢については、アンチダイブ・リフト特性、バウンドストップクリアランス、ショックアブソーバ減衰力、サスペンション取付け部を含む各部位の剛性の適正化を実施した。旋回加速度に対するピッチ角変化等、スムーズで繋がりの良い車両姿勢変化の作りこみを行った(図13)。

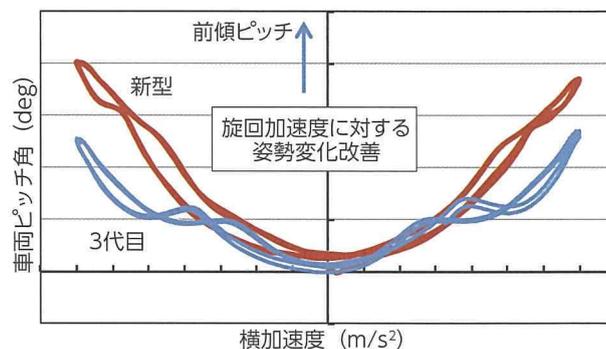


図13 旋回加速度に対するピッチ角変化

3.1.3 操舵フィーリング

旋回時の操舵初期～保舵～戻しの一連の走行シーンで安心感のある自然な操舵フィーリングの実現を目指した(図14)。

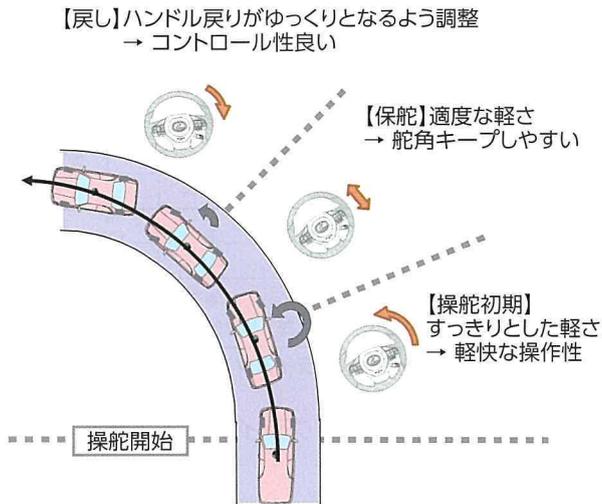


図 14 操舵フィーリングイメージ

フロントストラットベアリング (図 15, 16) は、旧型ではアブソーバ軸に一致させていたベアリング回転軸を、キングピン軸と同軸に配置した。転舵時のベアリングこじり解消による操舵感の向上、キングピン軸まわりのモーメントキャンセルによる操舵力の左右差低減を実現した。

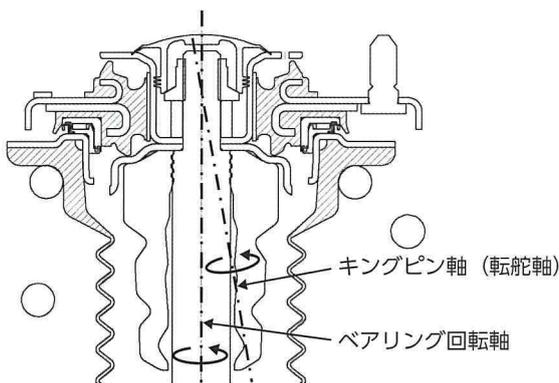


図 15 ストラットベアリング (旧型)

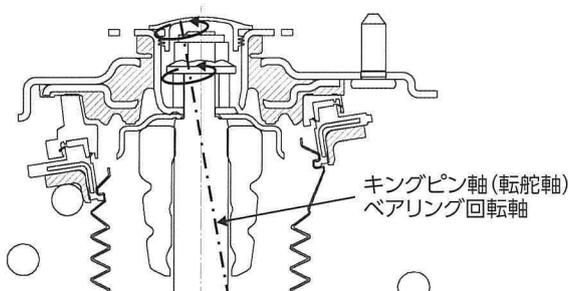


図 16 傾斜軸ストラットベアリング (新型)

ステアリングシステムは、より緻密なアシスト制御を織込み、安心感のある自然な操舵フィーリングとなるよう設計した。また、高い剛性感を感じるステアリングを実現するため、ステアリングコラムの剛性を新旧比で 30% アップした。ステアリングコラムだけではなく、インターミディエイトシャフトのジョイントクリアランス縮小やギヤのラック&ピニオン噛み合い部の支持剛性も高めており、これらも剛性感の向上に寄与している。

3.2 乗心地

新型プリウスでは、路面外乱や操作 (操舵, 制動) に対してピッチ・ロール・バウンス挙動が穏やかで、収まりが良い車両挙動にこだわった。しかし、荒れた路面走行時のゴツゴツ感や段差走行時のインパクトショックが背反する。これらを高次元でバランスさせ、旧型に対し大幅に質感の高い乗心地性能の実現を目指した。

3.2.1 ゴツゴツ感の低減

荒れた路面走行時のゴツゴツ感の低減及び、乗心地の質感向上のためには、サスペンションストロークに対する摩擦の低減が必要である。一方、背反としてロールの速さや収まり等、路面外乱や操舵入力によるばね上の挙動が悪化する。この背反性能を両立するため、振幅・周波数依存性を再現可能な力学特性をモデル化し (図 17)、各要素特性を導出した。

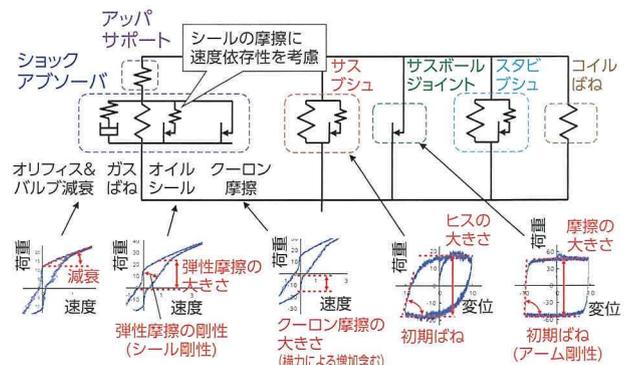


図 17 サスペンション力学特性モデル

サスペンションの低摩擦化、小入力時のばね定数低減 (図 18) を行い乗心地の質感を向上し、新開発ショックアブソーバによる微低速減衰確保 (図 19) により穏やかなばね上挙動を目指した。

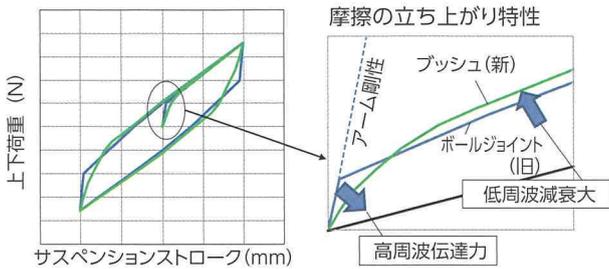


図 18 小入力時ばね定数低減狙い

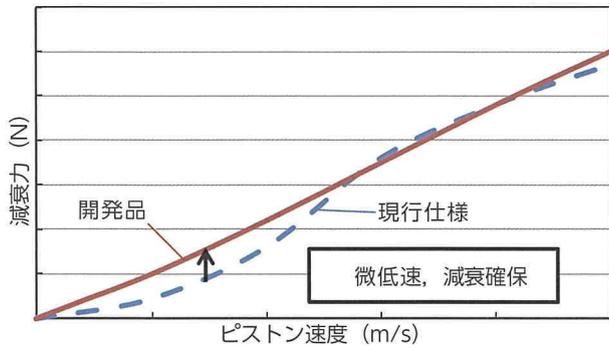


図 19 アブソーバ減衰力特性比較

フロントサスペンションはストラット配置やコイルスプリング荷重軸の適正化によるショックアブソーバへの横力低減及び、スタビライザ摺動部へフッ素コーティング採用により、摩擦を低減した(図 20)。

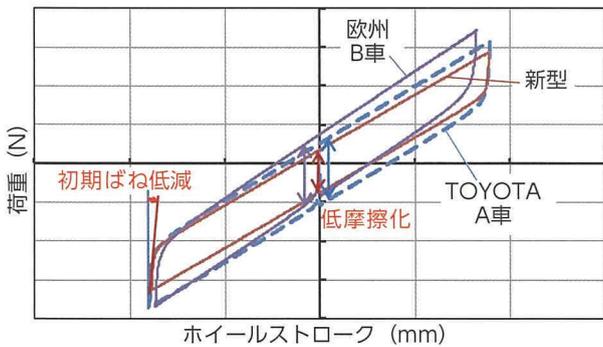


図 20 フロントサスペンション摩擦

リヤは、サスペンションジョイント部のボールジョイントを廃止し、新規開発の低ねじり/こじりばね特性のブッシュを採用した。現行ダブルウィッシュボーンに対して、小入力時のばね定数の低減や大幅な低摩擦化を実現した(図 21)。

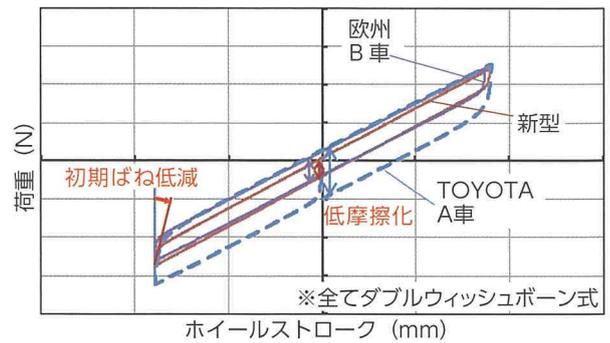


図 21 リヤサスペンション摩擦

これらの織込み技術により、前・後輪入力に対し、低周波・高周波領域共に大幅な乗心地改善を実現した(図 22, 23)。

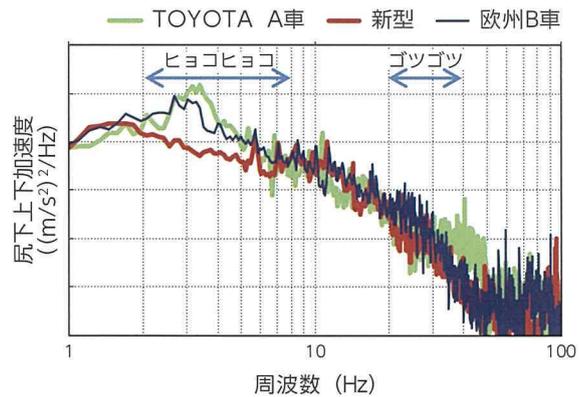


図 22 前輪入力尻下上下振動

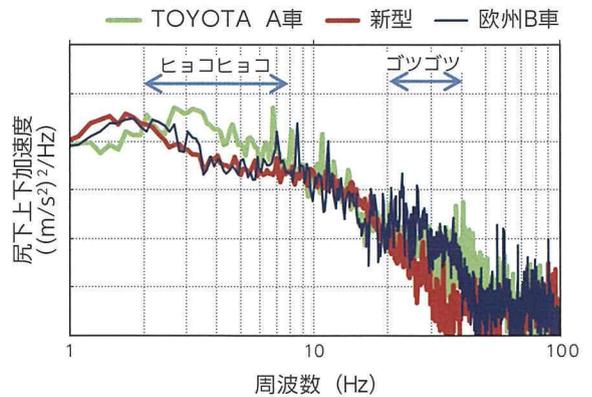


図 23 後輪入力尻下上下振動

3.2.2 インパクトショックの低減

段差走行時のインパクトショックを低減するためには、前後力コンプライアンス拡大が必要だが、ブルブルした床下前後振動の悪化が背反となる。

タイヤ動荷重半径変動により発生する前後力を相殺可能なトレーリングアーム配置及びアブソーバ傾角を算出(図24)し⁽¹⁾、上記背反を両立可能なリヤサスペンション配置を決定した(図25)。

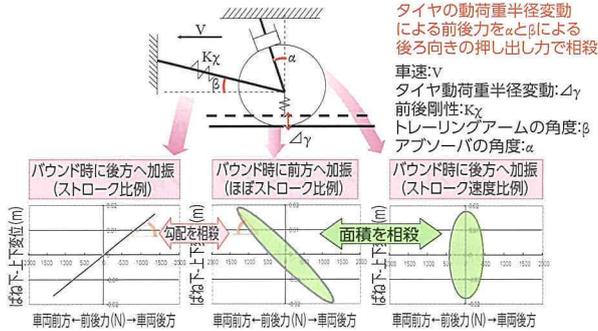


図24 インパクトショック、ブルブル両立技術

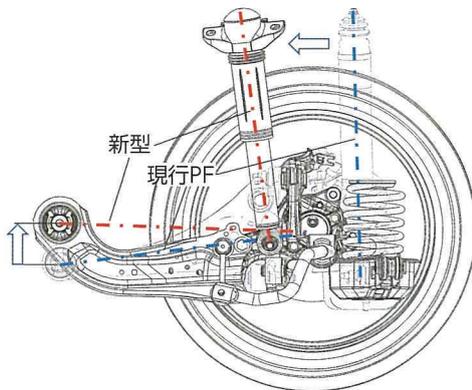


図25 リヤサスペンション配置(側面視)

トレーリングアームブッシュボリュームを現行比40%増加し、すぐりクリアランスを拡大した。荷重-たわみ特性の線形域を拡大することにより、前後力コンプライアンスを現行比大幅拡大した(図26)。

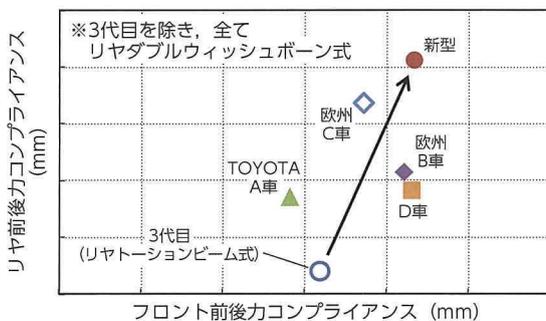


図26 前後力コンプライアンス

前述のサスペンション配置を採用することにより、背反関係にあるインパクトショックの低減(図27)と、平坦路走行時のブルブルした前後振動の低減(図28)を高次元で両立した。

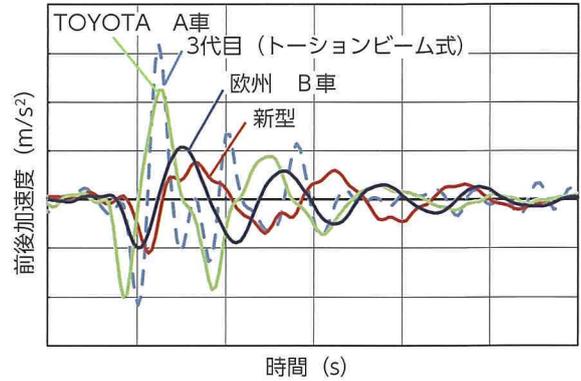


図27 後輸入力インパクトショック

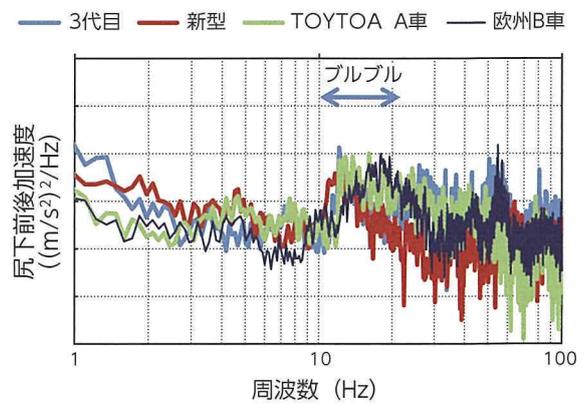


図28 後輸入力尻下前後振動

4 パッケージへの対応

HV(ハイブリッド車)の荷室空間の高効率化のため、デッキボード下に配置をしていた電池をリヤシート下に格納した。この配置はトーションビーム式サスペンションを採用した3代目では燃料タンク容量との両立が困難であったが、リヤサスペンション配置を最適化することで実現、荷室空間の大幅な拡大を実現した(図29)。

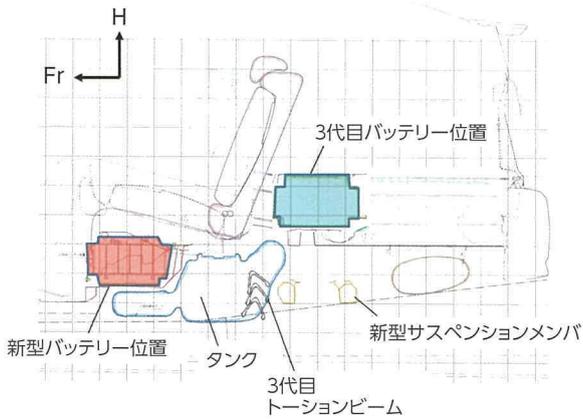


図 29 荷室周辺パッケージ (側面視)

さらにショックアブソーバをアクスルキャリア前方側に配置することで荷室空間の幅を拡大し、後部座席の位置まで、荷室を効率的に活用できるレイアウトを採用した (図 30)。

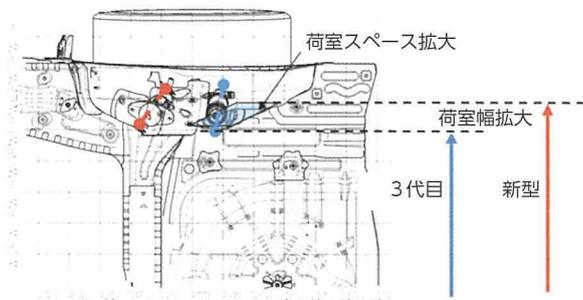


図 30 荷室周辺パッケージ (平面視)

■参考文献

- (1) 神戸弘樹, 香村 : 側面視サスペンション配置による前後振動低減. 自動車技術会学術講演会前刷集, No.105 - 07, P.1 ~ 6 (2007)

■著者



浅井 徹



鷺谷 雄介



鈴木 啓之



井辻 隆志



福本 康孝

5 おわりに

新型プリウスは TNGA 新プラットフォームの頭出し車両として、「もっといいクルマづくり」実現のため、シャシー性能にもとことんこだわったサスペンション、ステアリングシステム開発を行い「エコカーの常識を覆す運転の楽しさ」を実現することができたと自負している。

最後に、一緒になって開発にあたっていただいた社外サプライヤーの皆様に対して深く感謝の意を表し、本稿を終わる。

安心で経済的な止まる技術 ～ AHB-R 回生協調ブレーキシステムの開発

Reliable and Economical Vehicle Brake Technology:
Development of AHB-R Cooperative Brake System

鈴木 雅邦 *

Masakuni Suzuki

阪本 健二 **

Kenji Sakamoto

水谷 恭司 *

Yasuji Mizutani

金盛 且洋 *

Katsuhiko Kanamori

要旨

プリウスに搭載した電子制御回生協調ブレーキシステム AHB-R (Active Hydraulic Booster Regenerative) について紹介する。AHB-R は歴代のプリウスに合わせて開発してきた ECB システムの第 4 世代目に当たる製品で、制御ブレーキシステムとしての機能に加えてハイブリッドシステムとの協調制御を通じてブレーキ操作時にエネルギー回収を行い、燃費向上に貢献するシステムである。AHB-R では新規に回生協調マスターシリンダを開発し、従来システムに対してパイロット圧によるレギュレータ油圧サーボ機構を採用することで優れたブレーキフィーリングと静粛性を達成している。本稿では AHB-R のシステム構成とシステム動作、制御モード・機能などについて紹介し、実際のブレーキ油圧制御について説明する。

Abstract

This article describes the electronically controlled brake (ECB) system installed in the new Prius called the active hydraulic booster regenerative (AHB-R) cooperative brake system. AHB-R is the fourth generation ECB system, which has been re-developed for each succeeding generation of the Prius. In addition to functioning as an ECB system, the AHB-R system also recovers energy when the brakes are operated through cooperative control with the hybrid vehicle (HV) system, thereby contributing to higher fuel efficiency. A new regenerative cooperative master cylinder was developed for the AHB-R system, which achieves superior braking feel and lower noise than the previous system through a regulator hydraulic servo mechanism that uses pilot pressure. This article details the configuration and action of the AHB-R system, its brake control modes and functions, and describes the hydraulic brake control performed in actual driving.

キーワード AHB-R, 回生協調, 制御ブレーキ, リニア電磁弁, マスターシリンダ, レギュレータ

1 はじめに

車両の燃費向上は CO₂ 排出量軽減に貢献するだけでなく、車両の商品性向上の観点からも、広く望まれている技術である。一般に、燃費向上のためには車両減速時に車両の運動エネルギーを摩擦エネルギーではなく電気エネルギーに可能な限り変換して再利用することが良いが、これには、電気ブレーキと摩擦ブレーキとの配分を常に適切にコントロールする精緻なシステムが必要になる。AHB-R (Active Hydraulic Booster Regenerative) システムは

ハイブリッドシステムの発電モータによる回生ブレーキを最大限に利用してエネルギー回収を行なうと共に、回生ブレーキと油圧ブレーキを最適配分させるシステムである。また、ABS (Antilock Brake System), ブレーキアシスト, TRC (Traction Control), VSC (Vehicle Stability Control) などのブレーキシステムと統合的に制御を行ない、優れた車両安定性と操縦性を確保している。以降に AHB-R システムの動作モードや機能について説明する。

* シャシー開発部

** 性能実験部

2 回生協調ブレーキの変遷と AHB-R

2.1 回生協調ブレーキとは

回生ブレーキは、車両の持つ運動エネルギーを減速時に電気エネルギーとして回収する装置である。

図1に示すように回生ブレーキはハイブリッドモータによる発電により発生するため、その量はモータ回転数、車速、蓄電量に依存して変動する。弊社ではドライバー要求による全制動力を油圧制動力と回生制動力に配分し、回生制動力の変化に応じて油圧ブレーキを協調制御している。

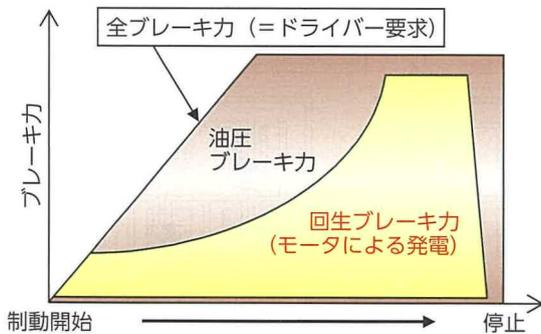


図1 回生協調時のブレーキ配分

2.2 回生協調ブレーキの変遷

弊社では初代プリウスから新型プリウスまでそれぞれの世代に合わせて世界に先駆けた回生協調ブレーキシステムを開発・搭載してきた(図2)。弊社初の回生協調システムとなる回生協調ブレーキを第1世代として、コンパクトで高機能化を図った第2世代のECB2システム⁽¹⁾(Electronically Controlled Brake system 2th)、普及タイプとなる第3世代のECB-R⁽²⁾(Electronically Controlled Brake system - Regenerative)をそれぞれ製品化してきた。これらのシステムは、減速時のブレーキ力を摩擦ブレーキから電気ブレーキに最大限変換をすることを使命としており、システムの黎明期から普及期に至るまで過去20年余りに渡り一貫した設計思想のもと開発されてきた。AHB-Rシステムはその4世代目に当たる製品となる。

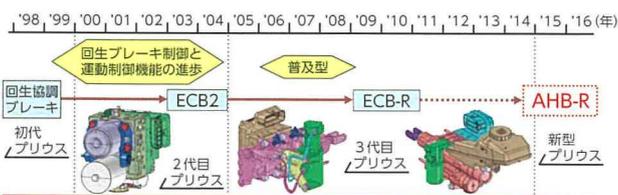


図2 回生協調システムの変遷

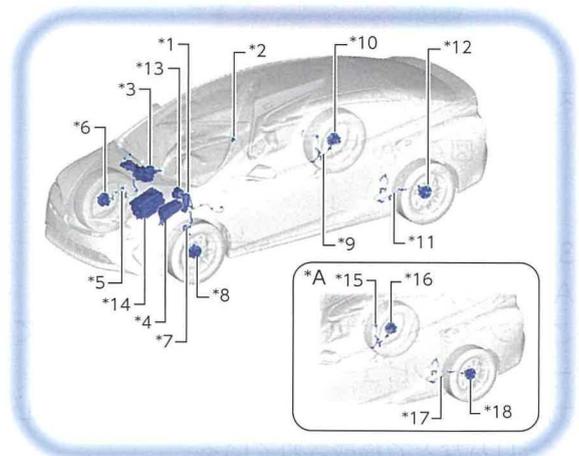
2.3 AHB-R システムの狙い

AHB-R システムでは新たに回生協調マスターシリンダを開発し、従来システムに対してパイロット圧によるレギュレータ油圧サーボ機構を採用することで優れたブレーキフィーリングと静粛性を狙いとして開発した。

3 AHB-R システムの構成

3.1 AHB-R システムのレイアウト

プリウスに搭載された AHB-R システムの主要部品のレイアウトを図3に示す。システム構成部品は、マスターシリンダとポンプ、ABS アクチュエータ、キャリパ、スピードセンサなどで構成されており、図のように配置されている。



- *1 ブレーキブースタポンプアッセンブリ
- *2 フロントドアカーテシランプスイッチアッセンブリ
- *3 スキッドコントロールコンピュータ&ブレーキブースター
ブレーキアクチュエーター
ブレーキマスターシリンダリザーバアッセンブリ
- *4 エンジンルームリレーブロック
ABS MTR ヒューズ
ABS-MAIN ヒューズ
- *5 スピードセンサFR RH
- *6 フロントアクスルハブ RH
センサーロータFR RH
- *7 スピードセンサFR LH
- *8 フロントアクスルハブ LH
- *9 スキッドコントロールセンサワイヤRH
- *10 リヤアクスルハブ&ベアリング
スピードセンサRR RH
センサーロータRR RH
- *11 スキッドコントロールセンサワイヤLH
- *12 リヤアクスルハブ&ベアリング
スピードセンサRR LH
センサーロータRR LH
- *13 ブレーキアクチュエーターアッセンブリ
- *14 インバータアッセンブリ
- *A 駆動方式4WD/FF
- *15 スピードセンサRR RH
- *16 リヤアクスルハブ&ベアリングアッセンブリ RH
センサーロータRR RH
- *17 スピードセンサRR LH
- *18 リヤアクスルハブ&ベアリングアッセンブリ LH
センサーロータRR LH

図3 AHB-R システムのレイアウト

3.2 AHB-R マスターシリンダ

図4にAHB-Rシステム用に開発されたマスターシリンダを示す。このマスターシリンダには通常のマスターシリンダの他、レギュレータ、リニア電磁弁、ブレーキアクチュエータコンピュータ (ECU)、油圧センサ、ストロークシミュレータが組み込まれており、ドライバーのブレーキ操作に応じて、リニア電磁弁を操作して、目標油圧に調圧する機能の他、故障時にドライバー踏力で直接マスターシリンダを操作できる機能も備えている。

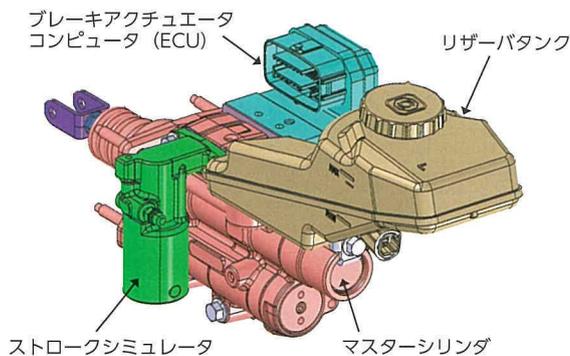


図4 AHB-R マスターシリンダ

3.3 AHB-R システムの油圧回路

AHB-R システムの油圧回路図を図5に示す。

このシステムの油圧回路は主要部品としてブレーキ制御コンピュータ内蔵マスターシリンダ、高出力パワーサプライ、軽量 ABS ユニット、ブレーキキャリパなどで構成されている。

このシステムではブレーキペダル踏込操作時、ブレーキペダルストロークセンサと油圧センサの信号からアクムレータに蓄圧された高油圧をリニア電磁弁 (SLA・SLR) を操作してレギュレータに導く。レギュレータはこの圧力を受けてアクムレータ圧をスプール弁を通じてマスターシリンダ内に送り込み、マスターシリンダ油圧が発生する。マスターシリンダ圧力は、ABS アクチュエータを経由して4輪のキャリパを作動させて制動力が発生する。図5に増圧時の油圧の流れを合わせて記載した。図中、2つの切替ソレノイドバルブ (SSA, SGH) は車両電源のONに連動して常に作動しており、ブレーキ操作時の反力を創出するストロークシミュレータを作動させる。

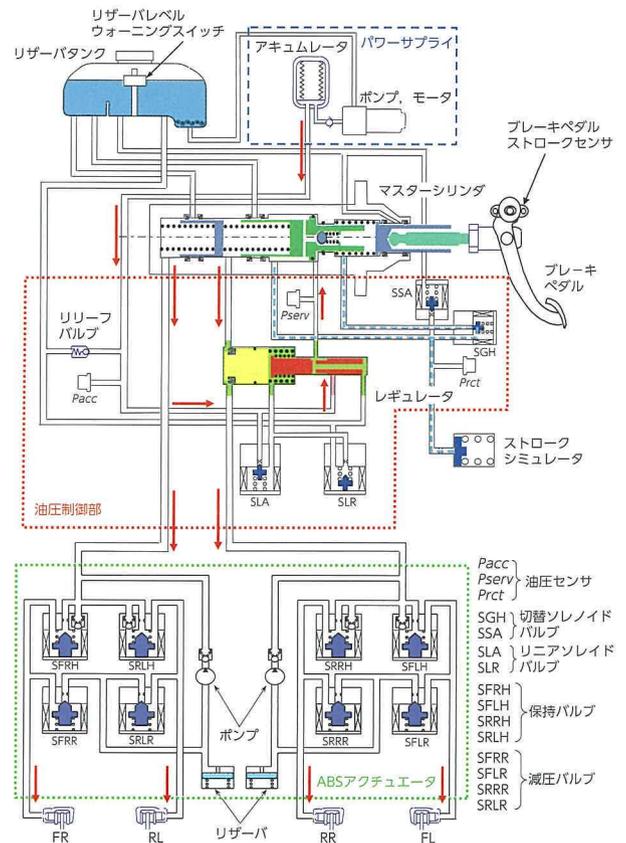


図5 AHB-R システム回路図 (増圧時のフルードの流れ)

3.4 AHB-R システムの特徴

AHB-R システムで開発したレギュレータでは油量剛性を高く設定した。このためリニア電磁弁は小流量でレギュレータを制御でき、その結果、弁のオリフィスを通る際に発生する流動音が相対的に小さくなっている。また、従来製品と比較してマスターシリンダ圧力を切り替える電磁弁を持たないため、ブレーキ操作毎の電磁弁打音も発生せず、システム作動時の静粛化を達成している。更にマスターシリンダ入力部のシール部品数を従来比で半数以下にすることで摺動抵抗を低減しており、軽踏力での自然なブレーキフィーリングを可能にしてブレーキフィーリングを向上させている。

3.5 ブレーキフィーリング向上

AHB-R システムでは一般的なバキュームタイプのブレーキシステムの特徴を参考とすることでより自然なブレーキフィーリングを実現した。図6にブレーキペダル上の踏力とストロークの関係を示す。

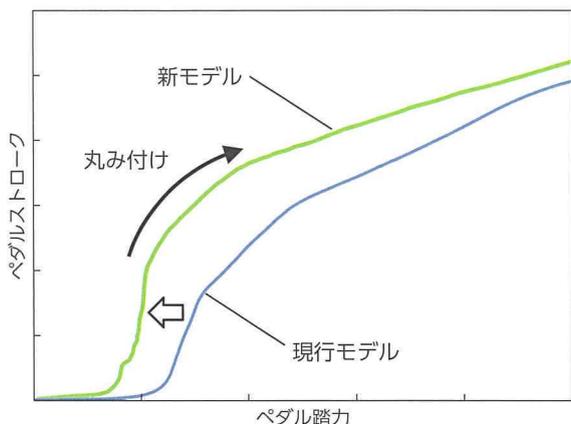


図6 ブレーキペダル踏力・ストローク特性

前述の軽踏力化に加え、踏力に対するストローク特性に非線形特性を採用した。これによってスムーズに踏力・ストロークの関係が変化する違和感の少ない、すなわち自然なフィーリングとすることに成功している。また、各部の剛性やストローク量の最適化を行い、後述のブレーキ制御や油圧制御を組み合わせることで、より自然でコントロールがしやすく、踏み応えがある安心感の高いブレーキフィーリングを実現させている。

4 ブレーキ制御モード

AHB-R システムはリニアモード、レギュレータモード、マニュアルモードの3つの主要なブレーキモードを持つ (図7)。リニアモードは最も使用される正常時のモードでレギュレータをコントロールしてマスターシリンダ油圧を発生させる役割を持つ。

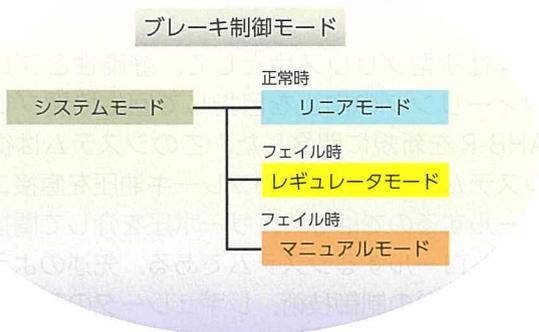


図7 AHB-R システムのブレーキモード

レギュレータモードとマニュアルモードは共にフェイル時のブレーキモードである。レギュレータモードでは、ドライバー踏力によりレギュレータス

プール弁を直接開弁し、ブレーキコンピュータを介さずにアクкумуляタ圧を利用してサーボ室圧力 (図8) の調圧をすることができる。マニュアルモードは、アクкумуляタ圧を発生できないときのフェイルモードであり、同じくコンピュータを介さずドライバー踏力により直接マスターシリンダ圧力をコントロールできる。このように万一故障が生じた後であっても十分な制動力を発生できるシステムとしている。

5 システム制御

5.1 油圧回路の動作

図8にAHB-Rシステムの模式図を示す。ドライバーがブレーキペダルを操作するとAHB-Rシステムは増圧用と減圧用の2つのリニア電磁弁を用いて、高压に蓄圧された油圧源からレギュレータパイロット室に圧力を導き、サーボ圧を制御する。この圧力によりマスターシリンダピストンを移動させ、マスターシリンダ圧力を出力する。この時、ブレーキペダルのストロークと反力はペダル入力部で作られ、サーボ室とは電磁弁で油圧的に切り離されているため、回生協調ブレーキ中でも、ブレーキフィーリングを確保しつつ、サーボ油圧を独立に制御することができる。

また、フェイル時にはペダル入力部から直接サーボ室の圧力を上昇させることができレギュレータモードを可能にしている。

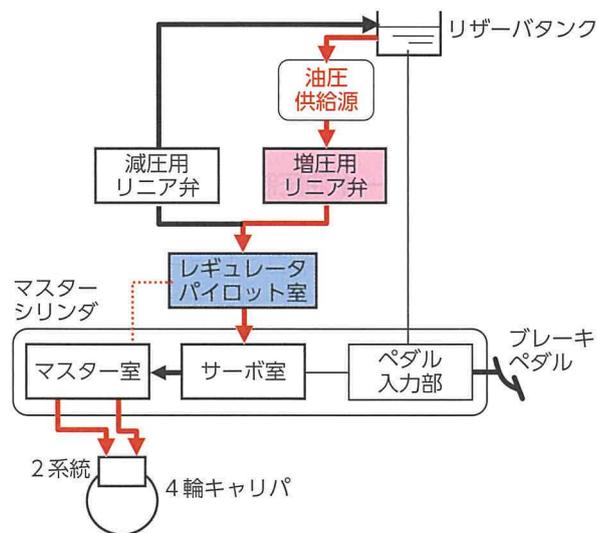


図8 AHB-R システム模式図

5.2 ブレーキ制御の流れ

図9にマスターシリンダ油圧が上昇するまでのブレーキ制御の流れを示す。AHB-Rシステムはドライバーのブレーキ操作に伴い、ストロークセンサ、油圧センサ信号をもとに目標制動力を計算する。これを電気ブレーキと摩擦ブレーキに配分した後、油圧サーボモデルに基づいて、目標油圧と実油圧の偏差を小さくするように、増圧・減圧リニア電磁弁を用いてブレーキ油圧制御を行い、必要な減速度が得られるようにマスターシリンダ油圧を調圧する。同時に、ストロークシミュレータで決まるペダル踏力とストローク、目標制動力で決まる減速度の関係を適切に与えることでブレーキフィーリングを作り出している。

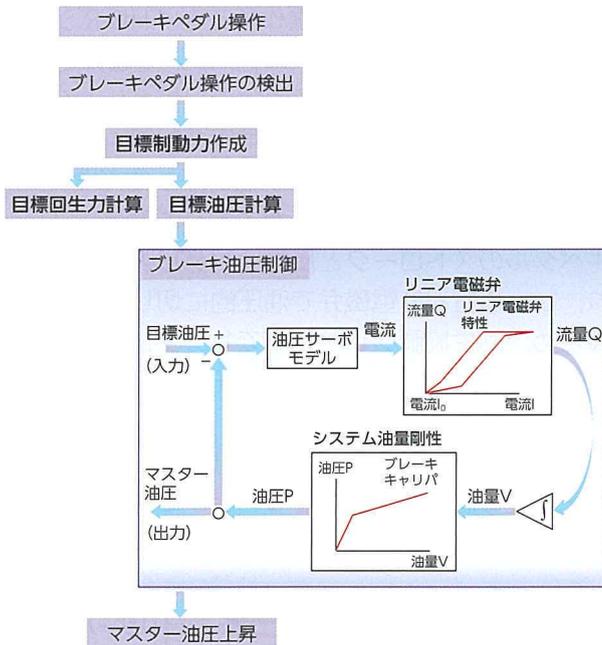


図9 ブレーキ制御の流れ

5.3 実際のブレーキ油圧制御

AHB-Rシステムの油圧制御波形の例を図10に示す。図10は、ブレーキコンピュータに台形波の目標サーボ油圧を指示して、サーボ油圧を制御させたものである。このように目標サーボ油圧が指示されると実際のサーボ圧との偏差をフィードバックして、アクチュエータ圧 (ACC 圧) に合わせて増圧・減圧のリニア電磁弁電流値を短いサイクルで自動的に調節しながら目標サーボ油圧に追従する制御を行っている。

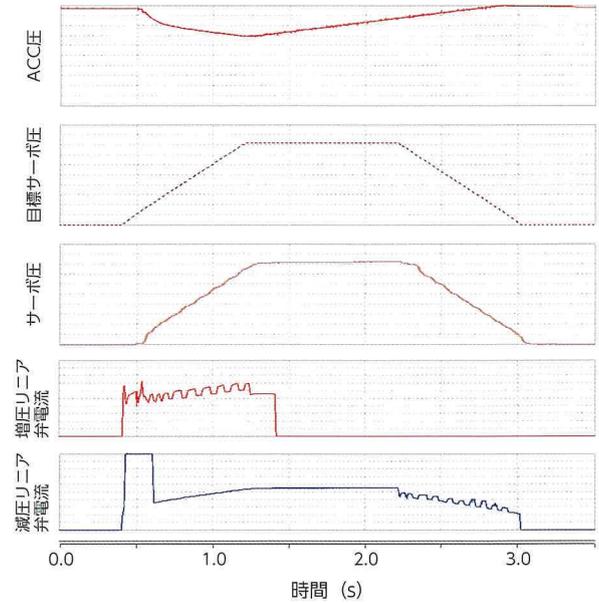


図10 AHB-R 油圧制御波形

6 システムの機能

AHB-Rシステムは、コンピュータ制御により、回生協調ブレーキ、アンチロックブレーキシステム (ABS)、ブレーキアシスト、トラクションコントロール (TRC)、車両安定性制御 (VSC)、などのブレーキ制御機能にも対応して、統合的に制御を行ない、優れた車両安定性と操作性を確保している。特に、レギュレータ昇圧が従来のシステムより速く、高いブレーキ油圧制御が必要な時の高昇圧時に優れた性能を発揮する。

7 まとめ

弊社新型プリウス用として、静粛性とブレーキフィーリングの向上を目指して回生協調ブレーキ AHB-R を新規に開発した。このシステムは従来のシステムのように4輪のブレーキ油圧を直接コントロールするのではなく、サーボ圧を介して間接的にコントロールするシステムである。先述のようにリニア電磁弁の制御技術、レギュレータの高精度駆動技術と生産技術、車両運動制御技術など、ハード・ソフト・システム技術を高度に融合したシステムとして完成させることができた。

8 おわりに

このシステムを完成させるに当たり、ご協力頂いた関係者の方々に深く感謝するとともに、製品化に携わった一技術者として本稿を寄稿させて頂きました。本製品の開発を通じて、タイトルにありますように『安心で経済的な止まる技術』を実現できたと考えている。

■参考文献

- (1) M. Suzuki, T. Ishida, S. Kono : VIBRATION REDUCTION APPLYING SKEW PHENOMENA OF NEEDLE ROLLER BEARINGS IN BRAKE ACTUATORS. SAE Technical Paper No.2006-01-0881 (2006)
- (2) 中岡宏司, 深沢, 田中, 福田 : 新電子制御ブレーキ用油圧サーボ制御技術の開発. Toyota Technical Review. Vol.57, No.1, p.78 - 82 (2010)

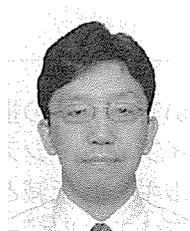
■著者



鈴木 雅邦



阪本 健二



水谷 恭司



金盛 且洋

終わりになき挑戦 ～新型プリウスの燃費開発

Constant Challenge: Development of Fuel Efficient Technologies for the New Prius

岡部 啓一* 中島 勇波* 福村 光正** 間嶋 宏***
 Keiichi Okabe Yuha Nakajima Mitsumasa Fukumura Hiroshi Majima
 村田 登志朗**** 青山 晃久***** 西馬 和也*****
 Toshio Murata Akihisa Aoyama Kazuya Nishiuma

要旨

プリウスは初代より先進的な低燃費技術を用い、モデルチェンジごとにダントツの低燃費性能を送り届けてきた。新型プリウスの燃費開発ではHVシステムの更なる高効率化や、空力性能の大幅な向上、各部品・各種制御の徹底的な損失低減など、最新の低燃費技術を採用した。ここでは新型プリウスの燃費性能とそれを実現するために開発した新技術を紹介する。

Abstract

The Prius has adopted advanced fuel efficient technologies since the first generation and each succeeding model change has delivered unsurpassed fuel economy. The new Prius features a range of the latest fuel efficient technologies, including a more efficient hybrid system, substantially improved aerodynamics, as well as parts and controls that incorporate intensive loss reduction measures. This article describes the fuel efficiency of the new Prius and the technologies that were newly developed to achieve this performance.

キーワード ハイブリッド, プリウス, 燃費, 環境

1 はじめに

1997年初代プリウスはToyota Hybrid System (THS) を搭載し世界初の量産型ハイブリッド車 (HV) として市場に導入された。今や累計 361 万台を販売するに至り、そのCO₂低減効果は 3,800 万tにも及んでいる（'15年12月時点）。

その一方、新興国をはじめとした車両台数の増加や、環境意識の高まりにより更なる低燃費化が求められるされており、新型プリウスでは更に突き抜けた燃費性能を実現する開発に挑戦した。

2 低燃費の実現に向けて

初代から3代目プリウスまで常に先進的な低燃費技術を開発・導入してきたが、新型の開発にお

いても各部の損失低減・走行抵抗の低減に加えハイブリッドシステムの更なる進化により消費エネルギーの低減とエネルギー回収を進め、車両全体でのエネルギーマネジメントを行った。その結果、表1に示すように旧型から大幅な燃費性能の向上を実現した。

表1 各国での燃費性能

仕向け	モード	新型 ^注	旧型
国内	JC08 (km/L)	40.8	32.4
米国	Combラベル (mpg)	56	50
欧州	EC (CO ₂ g/km)	70	89
	EC (L/100km)	3.0	3.9

※一部グレード

この燃費性能達成のため、走行状態毎に各部品の損失を徹底的に洗い出し損失低減・効率向上を図った。

図1にHVの燃料消費エネルギーの内訳を示す。

* 性能実験部

** HVシステム開発統括部

*** 制御システム開発部

**** 第1ボデー設計部

***** 内装設計部

***** (株)デンソー

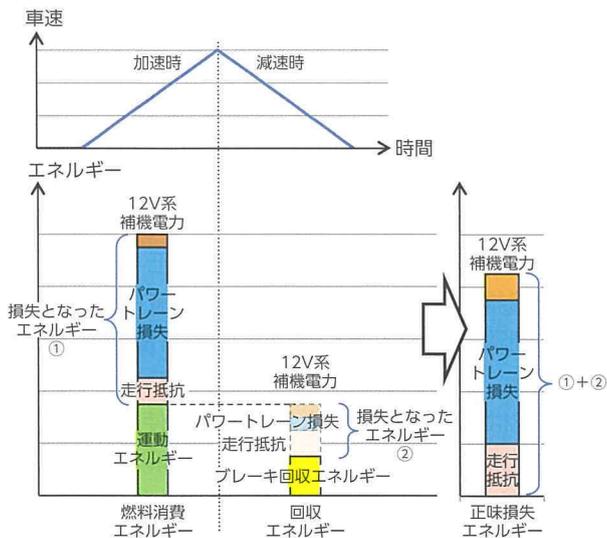


図1 燃料消費エネルギーの内訳

HVは加速時に燃料を消費し運動エネルギーを得る。減速時は運動エネルギーを電気に変換し、バッテリーへ充電することで従来車ではブレーキで熱として捨てていたエネルギーを回収し正味損失エネルギーを低減、つまり燃費を向上させている。

加速時、減速時共にパワートレイン損失や走行抵抗による損失が発生するが、損失が減ると燃料消費エネルギーが減るだけでなく減速時の回収エネルギーが大きな効果をもたらすことがわかる。

さらに図2に示すような部品軸にブレークダウンし改善を進めた。

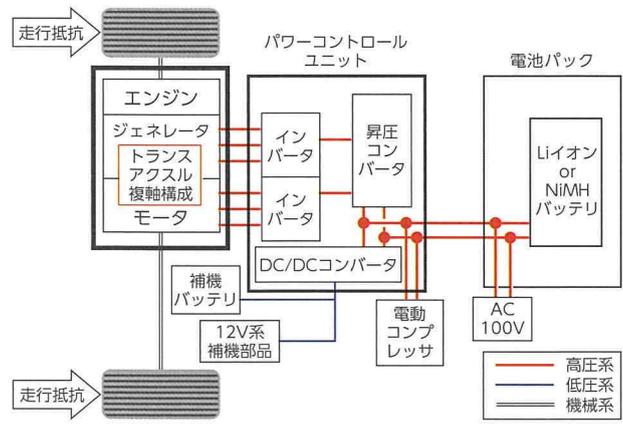


図2 新型プリウスのシステム構成部品

HVのパワートレインにおいては、機械損失の低減に加え電気損失の低減も重要となるため、エンジン、モータ、インバータ、バッテリーなどシステムの全ての構成部品において高効率化を図った。

走行抵抗も空気抵抗の低減、タイヤやベアリングの転がり抵抗低減、ブレーキの引きずり低減などの

損失低減を実施した。空気抵抗低減の詳細については他稿を参照されたい。

12V系部品（補機）の消費電力についても ECU・メータ・ランプなどの部品ひとつひとつの省電力化を行い、低燃費性能に貢献した。図3に燃費向上の各項目の内訳を示す。

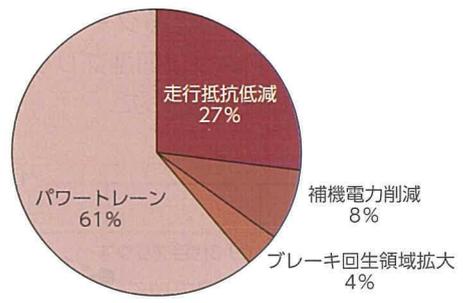


図3 JC08モード燃費向上内訳

このように、車両全体で燃費向上に努めたことにより燃費性能の大幅な向上を実現した。

また、実使用環境下での燃費の向上のために空調システムの高効率化を行った。走行エネルギーの低減と同様に各部品の損失を洗い出し、エアコン動力の更なる低減や排熱エネルギーの回収量増加を実施した。さらに低燃費運転支援を目的としてメータ内に表示しているエコジャッジに空調スコアを新しく導入した。次節では代表例として冬季と夏季における燃費性能を紹介する。

2.1 冬季燃費

冬季の燃費を向上させるために、「新型排気熱再循環システム（EHRシステム）」によるエンジン排熱エネルギーの回収量アップや、「内外気2層エアコンユニット（HVAC）」を採用することで車室内空気を有効に使い、換気損失の低減に取り組んだ⁽³⁾。

その結果ヒータ性能を両立させながら、図4に示すように旧型プリウス比約20%向上の冬季燃費性能を実現した。

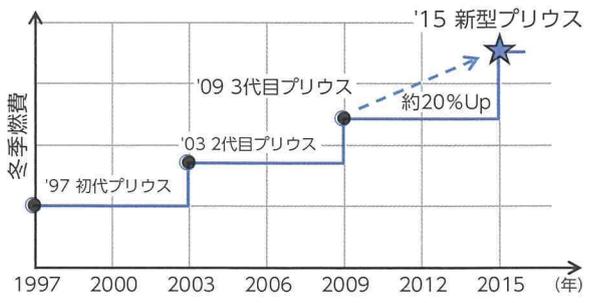


図4 冬季燃費の変遷（社内評価条件）

2.2 夏季燃費

夏季の燃費を向上させるために、高効率な「新型電動コンプレッサ」の開発や、コンプレッサ動作点の最適化制御によるエアサイクル効率向上を図った。また乗員を検知してそこに集中して送風する「S-Flow システム (Save energy + Airflow control)」により使用エネルギーの低減を図った。

その結果、乗員に与えるクーラ性能を両立させながら、図5に示すように旧型プリウス比約20%向上の夏季燃費性能を実現した。

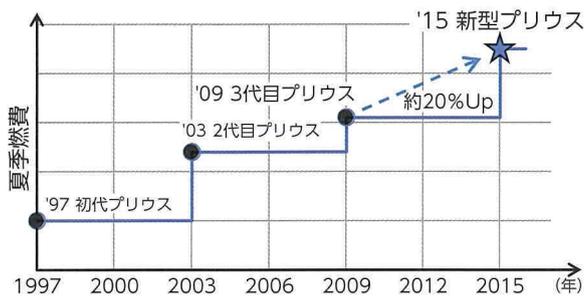


図5 夏季燃費の変遷 (社内評価条件)

3 パワートレーンの燃費向上技術

3.1 パワートレーンによる燃費向上

図3に示したように国内JC08モードの燃費向上内訳においてパワートレーンは約6割を占める。

パワートレーンでは、エンジン、トランスアクスル、モータ、インバータのハードを改良すると共に最大限活かす制御を開発することで燃費向上を図った(図6)。

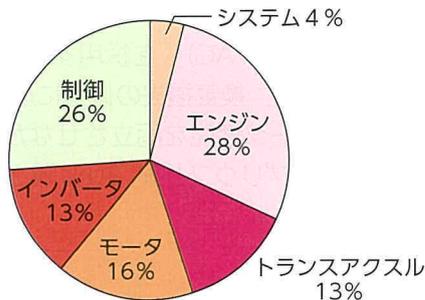


図6 パワートレーン燃費向上内訳 (JC08モード)

3.2 エンジン

タングル比向上やEGR (Exhaust Gas Recirculation) 率拡大による燃焼改善、ノッキング低減技術、暖機性能を向上させる2系統冷却システムや発泡ゴム付ウォータージャケットスペーサによるヒートマネジメント技術、クランクベアリング

や動弁系のフリクション低減技術、排気対応や故障検出の制御改良技術等、数多くの燃費向上技術を採用し、量産ガソリンエンジンとして世界初となる最大熱効率40%を達成した。

3.3 トランスアクスル&モータ

トランスアクスルについては、モータリダクション機構に平行ギヤ式を採用し機械損失を低減、オイル潤滑機構の改良や複軸化による攪拌損失低減等により、約20%の損失低減を実現した。

モータは新構造採用によるコイル線使用量の低減、高調波対応のコア設計、電磁鋼板の新開発等により、旧型に対し約20%の損失低減を実現した(図7)。

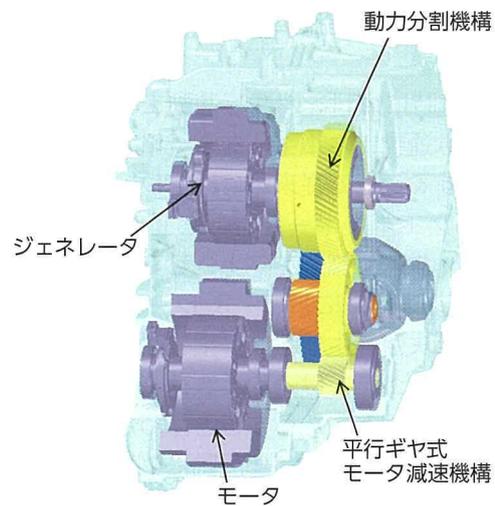


図7 トランスアクスル構造

3.4 インバータ&DC/DCコンバータ&ウォーターポンプ

インバータでは、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 素子とダイオード素子の低損失化、両素子をモールドパッケージしたパワーカード構造(2in1化)、およびパワースタック冷却構造改良等により、旧型比約20%の損失低減を実現した。

DC/DCコンバータにおいても材質、形状の見直し、および交流部の制御最適化により、旧型と比較し約8%の低損失化を実現した。

また、新開発の電動ウォーターポンプを含めた冷却システムの効率化により、常用域での冷却水流量を低減し、ポンプ消費電力を低減した。

3.5 ハイブリッド制御

3.5.1 エンジン間欠停止車速アップ

エンジンを間欠停止する最高車速をエンジン始動時制御の改良や、モータによるエンジン回転数制御

等の最適化を行うことで旧型から 40km/h 以上引き上げた。これにより高速走行時 (115km/h) でもエンジンを停止して EV 状態で走行することを可能とした。

3.5.2 昇圧制御の最適化

2代目プリウスで採用したハイブリッドシステムから、電池電圧を昇圧してモータおよびジェネレータを駆動するシステム構成としている。性能要求を満たしつつ、モータ、ジェネレータ、昇圧コンバータの総損失を最小にする昇圧制御の最適化技術を進化させた。旧型では昇圧電圧域を限定して最適化を実施したが、新型では、高速高応答化した制御構成を利用して昇圧停止状態も含めたほぼ全電圧域の最適化を実現した。

3.6 システム&電池

電池性能については、NiMH 電池、Li イオン電池いずれも旧型に対し充放電性能を拡大することで、燃費性能の向上に貢献した。

3.7 システムの小型軽量化

新型では各ユニットの軽量化についても徹底した開発を進め、NiMH 電池仕様で 5.7%、Li イオン電池仕様の場合 16.4%の軽量化を実現し燃費向上に寄与した。

4 その他の燃費向上技術

4.1 回生ブレーキ領域の拡大

HV の燃費向上手法として回生ブレーキ領域の拡大が挙げられるが、新型プリウスの開発では ECB (Electronically Controlled Brake) の改良に合わせて油圧ブレーキと回生ブレーキの協調制御を見直すことで図 8 に示すように回生ブレーキ領域の拡大を実施した。

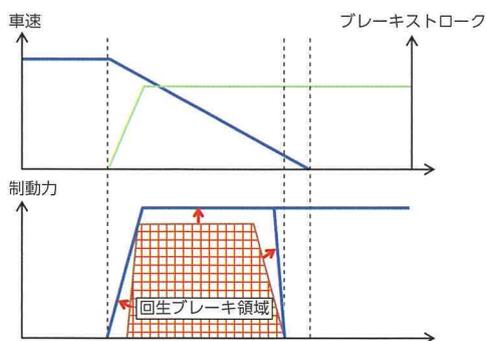


図 8 制動力と回生領域の区分

4.2 補機電力削減制御

JC08 モード走行では DC/DC コンバータや補機バッテリーからの電力供給によって作動している補機部品の消費電力が車両全体の損失のうち約 4% を占める。新型プリウスでは DC/DC コンバータの出力電圧をコントロールする「補機電力削減制御」を採用し、燃費向上に貢献した。

図 9 にシステム構成を示す。補機電力削減制御では、補機部品の作動状態と補機バッテリーの状態に基づいて、車両に適切な補機電圧を算出し、DC/DC コンバータの電圧を制御している。なお、補機バッテリー状態 (容量、温度等) を精度よく検出するため、マイナス端子には図 10 に示すバッテリーセンサを搭載した。

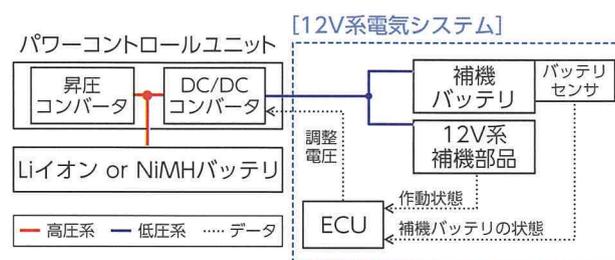


図 9 HV 補機電力削減制御 システム構成図



図 10 バッテリーセンサ (補機バッテリー用)

補機電力削減制御の採用により、燃費向上に加えて、補機バッテリーの過充電を抑制し、劣化を抑える効果も得られる。

4.3 排気熱再循環システム (EHR システム)

排気熱再循環システム (Exhaust Heat recirculation system : EHR システム) とは排気ガスで熱を冷却水に回収し再循環させるシステムである (1) (2)。

図 11 に新型プリウスの EHR システムと排気熱回収器の構造を示す。回収/非回収切替バルブは冷却水温または切替バルブ前後の差圧に応じて開閉制御される。熱交換器はフィンチューブ構造 (図 12)

とし、熱交換効率を高めるとともに、従来の積層型構造と比較して熱容量も低減することができた。

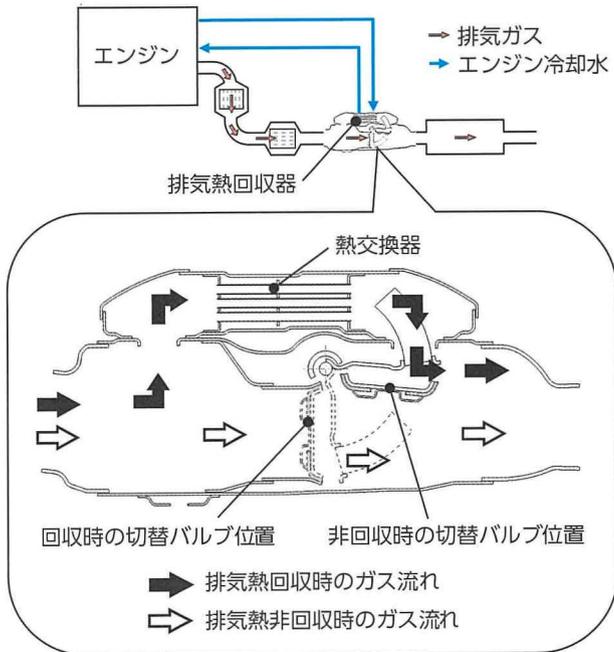


図 11 EHR システムと排気熱回収器

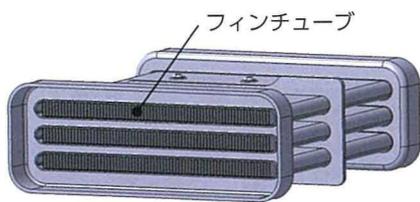


図 12 熱交換器

図 13 に外気温 5℃，コールドスタート，ヒータ ON 時のエンジン冷却水温推移を旧型と新型を比較して示す。

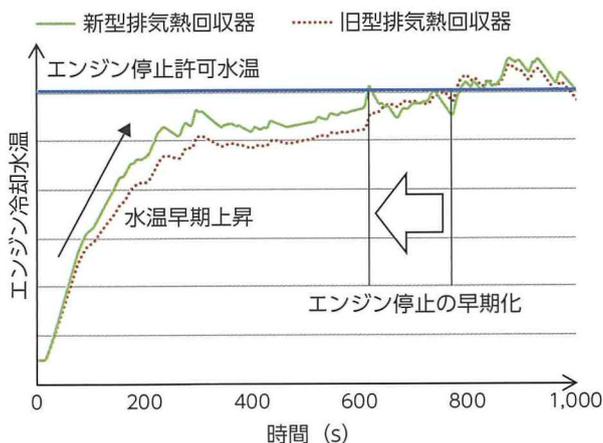


図 13 新型排気熱回収器効果 (外気温 5℃)

旧型と比較しエンジン冷却水温が早く上昇し、エンジン停止が早期化されることでエンジン停止の頻度が増加した。その結果、冬季の燃費性能を約 4% 向上させた。

4.4 空調の低エネルギー化

4.4.1 新型電動コンプレッサ

電動コンプレッサの効率向上のために、旋回スクロールの背圧構造の改良を実施した。旧型の電動コンプレッサでは、旋回スクロールの背圧(押付け力)を定圧調整弁で負荷によらず一定に保っていたが、新型で採用したスラストバルブ機構により図 14 に示すように必要な背圧だけかけることで過剰な背圧(機械損失)を低減することで効率向上を図り、夏季コンプレッサ動力を約 5% 低減した。

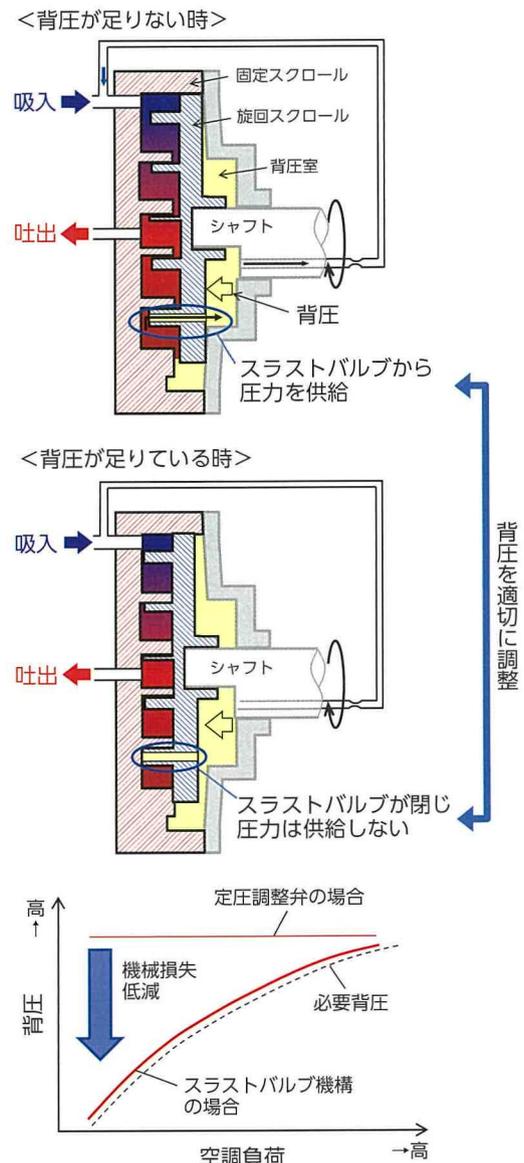


図 14 背圧調整機構の改良と効果

4.4.2 S-FLOW システム (Save energy + Airflow control)

乗員を検知してそこに集中して効率的に送風する S-FLOW システム (図 15) によりコンプレッサ電力とブロワ電力を合わせて約 20%低減した。また、従来は乗員がスイッチを押した場合にのみ作動していたが、乗員を検知することで自動化し作動頻度向上を図った。

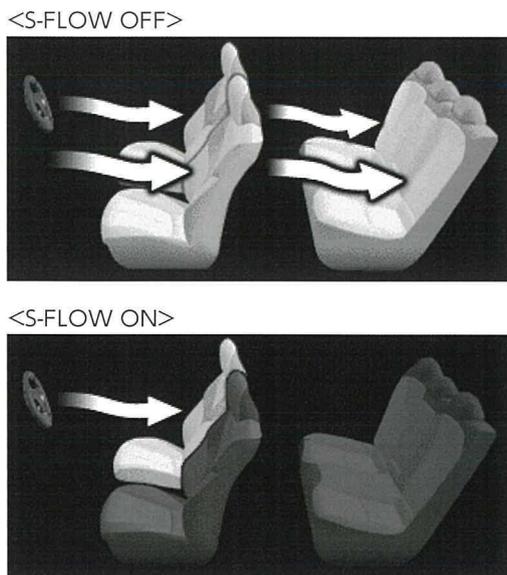


図 15 S-FLOW による風量制御

4.4.3 内外気 2層 HVAC

従来、暖房時は窓曇り防止のために外気を導入する必要があり、暖かい室内空気が換気損失として奪われていた。新型プリウスでは内外気 2層化することで、図 16 に示すようにデフロスタ側には外気を用いて防曇性能を確保し、足元側は暖かい内気を用いることで外気の導入量を必要最小限とした。その結果、暖房性能の向上と燃費の両立を実現した。

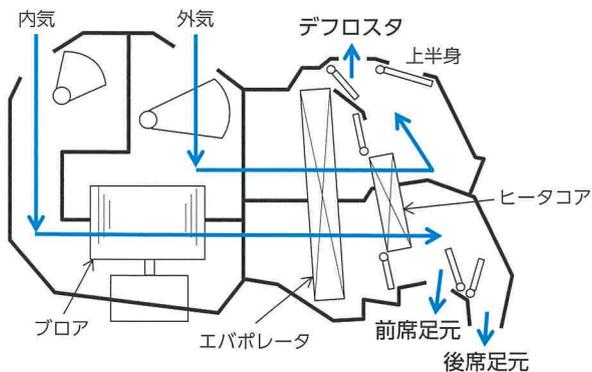


図 16 内外気 2層 HVAC

4.4.4 エコジャッジ (空調スコア)

図 17 に示すように、より低エネルギーな空調設定をユーザーに促すためにエコジャッジに空調スコアを追加した。空調スコアは夏季の内・外気の使用状況や S-FLOW の使用有無、空調エコモードの使用状況から、算出している。



図 17 空調スコア画面例

また、IG-OFF 時に図 18 のようにエアコンの使用に関するアドバイスが表示されることでユーザーにフィードバックする機能を追加した。



図 18 アドバイス例

5 終わりに

1997 年に世界初の量産型ハイブリット車として導入以来、今回で 4 代目へのモデルチェンジとなる新型プリウスは車両全体で消費エネルギー低減に取り組み、ダントツの低燃費を実現した。

今後も更に低燃費技術を改良していくと共に市場の声をフィードバックして、魅力あるハイブリットを提供していきたい。

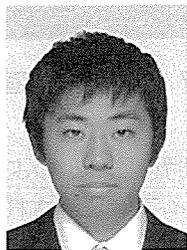
■参考文献

- (1) 中川正, 坪内, 鈴木 : 排気熱再循環システムによる冬季実用燃費向上. 自動車技術会誌 Vol.61, No.7, P.49 - 54 (2007)
- (2) 山田逸作, 時枝, 陣野, 武知, 坪内, 石畑 : 3代目プリウスの燃費開発. TOYOTA Technical Review. Vol.57, No.1, P.27 - 32 (2010)
- (3) 藤原健一, カーエアコン研究会 : カーエアコン. 東京電機大学出版局, 2009, p.166 - 169, p.212 - 215

■著者



岡部 啓一



中島 勇波



福村 光正



間嶋 宏



村田 登志朗



青山 晃久



西馬 和也

ESTEC 2ZR-FXE エンジンの燃費向上技術

Fuel Economy Improvement Technologies of the ESTEC 2ZR-FXE Engine

太田 行紀*
Yukinori Ota

伊藤 良秋**
Yoshiaki Ito

川村 明裕***
Akihiro Kawamura

西浦 博之***
Hiroyuki Nishiura

松尾 真二*
Shinji Matsuo

要旨

新型プリウスに搭載されるエンジンは、3代目プリウスに搭載されている2ZR-FXEをベースに基本骨格を変更することなく改良を加え、ESTEC 2ZR-FXEとして燃費向上の開発を行った。このエンジンは、燃焼改善、ノッキング改善、ヒートマネージメント、フリクション低減の技術を数多く採用し、細部まで燃費技術を追求することにより、量産ガソリンエンジンとしては世界で初めてとなる最大熱効率40%を達成した。本稿ではこれらの燃費向上技術について紹介する。

Abstract

The engine in the new fourth generation Prius carries over the same basic structure as the 2ZR-FXE used in the third generation and incorporates various refinements to enhance fuel economy. Called the ESTEC 2ZR-FXE, the new engine incorporates various fuel efficient technologies to improve combustion characteristics, knocking, and heat management, while also reducing friction. As a result of this meticulous approach to enhancing fuel economy, the ESTEC 2ZR-FXE is the first gasoline engine in the world to achieve a maximum thermal efficiency of 40%. This paper describes the technologies incorporated into this engine to improve fuel economy.

キーワード 燃焼改善, ノッキング改善, ヒートマネージメント, フリクション低減, 最大熱効率

1 はじめに

既に3代目プリウスに搭載されている2ZR-FXEは、従来に於いても最大熱効率38.5%のガソリンエンジントップクラスの低燃費エンジンであるが、新型プリウス用にESTEC (Economy with Superior Thermal Efficient Combustion) 2ZR-FXEとして更なる燃費向上の改良を行った。本稿ではESTEC 2ZR-FXEに採用した燃費向上技術について紹介する。

2 改良のコンセプト

図1にハイブリッド(以下HVと略)用エンジンと通常エンジンの走行時に使用する領域を示す。通常エンジンが熱効率が低い低出力の領域を使用して走行するのに対して、HV用エンジンはモーターによる(EV)走行をすることにより熱効率が高い領域を使用して走行するため、最大熱効率の向上が車両

燃費の向上につながる。ESTEC 2ZR-FXEでは燃焼改善、ノッキング改善、ヒートマネージメント、フリクション低減技術を数多く採用し、基本骨格を変更することなく、細部まで燃費技術を追求することにより、最大熱効率をガソリンエンジンとしては世界で初めてとなる40%まで向上させ、車両燃費を向上させた(図2)。図3にエンジン断面図、表1にエンジン諸元を示す。

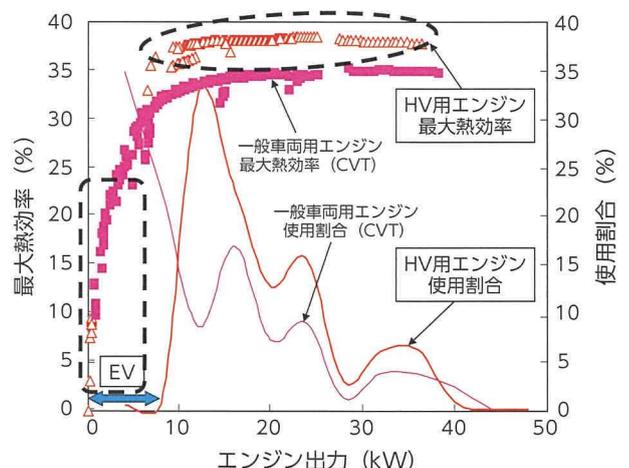


図1 ガソリンエンジン熱効率と使用割合

* エンジン開発推進部
** HVシステム制御開発部
*** エンジン設計部

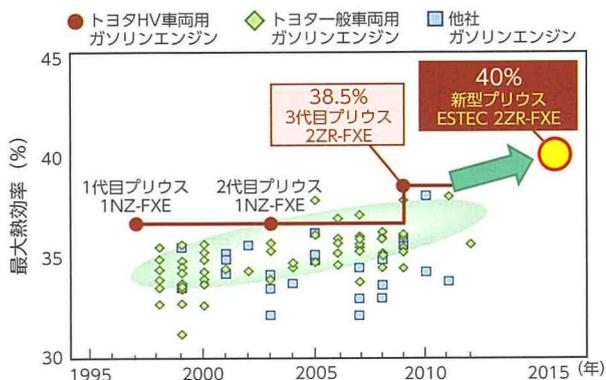


図2 ガソリンエンジン最大熱効率の変遷

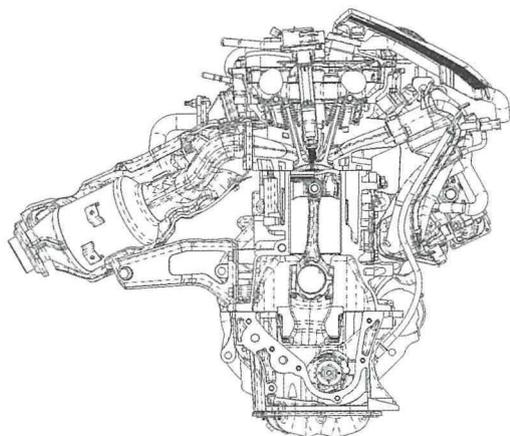


図3 エンジン断面図

表1 エンジン諸元

	ESTEC 2ZR-FXE	従来 2ZR-FXE
気筒配列	直列4気筒	←
排気量 (cc)	1,797	←
ボア×ストローク (mm)	φ80.5×88.3	←
圧縮比	13:1	←
最高出力 (kW/rpm)	72/5,200	73/5,200
最大トルク (Nm/rpm)	142/3,600	142/4,000
最大熱効率 (%)	40	38.5

3 燃費向上技術

3.1 燃焼改善, ノッキング改善

熱効率を向上させる技術として一般的にクールド EGR (Exhaust Gas Recirculation) 技術が用いられる。図4に示す様にエンジン高負荷域はノッキングにより熱効率が悪化するが、この技術によりノッキングが改善され ESTEC 2ZR-FXE では最大熱効率を 40% まで向上させた (図5)。

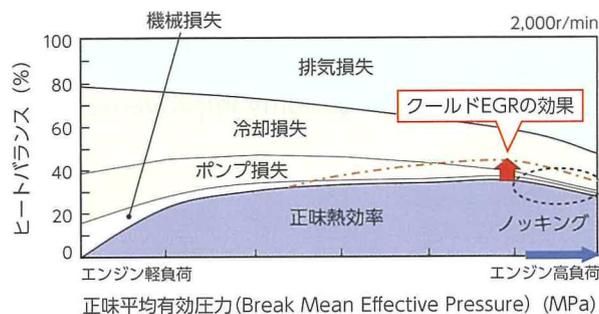


図4 エンジン負荷とヒートバランス

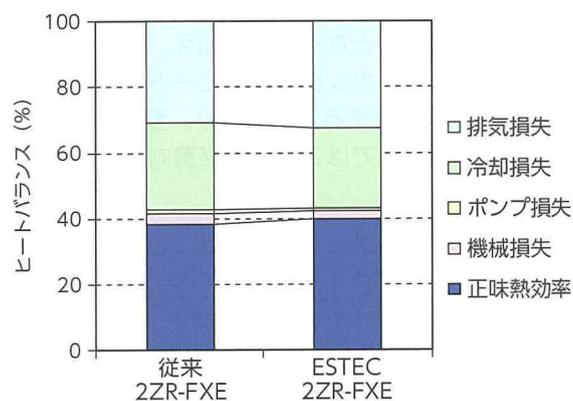


図5 ヒートバランス比較

EGR 限界の拡大には高速燃焼が有効であり、燃焼速度を向上するためには筒内の乱れ促進効果の大きいタンブル流れ強化が有効である。本エンジンでは吸気ポート等の形状変更によるタンブル流れ強化とその流れを阻害しないピストン冠面形状の最適化 (図6) で、タンブル流れ強さの指標を表すティップルマンタンブルレシオ (以下 TTR と略) を 0.8 から 2.8 に向上させ (図7) 燃焼速度を 10-90% の燃焼期間^{*}において、35%短縮した。更に、以下に紹介する技術を合わせることにより EGR 率を従来の 15% に対して 25% まで拡大させた。

^{*}燃焼による全発熱量のうち、10% から 90% が燃焼するのに必要なクランクアングル、2,000r/min, 0.4MPa で比較

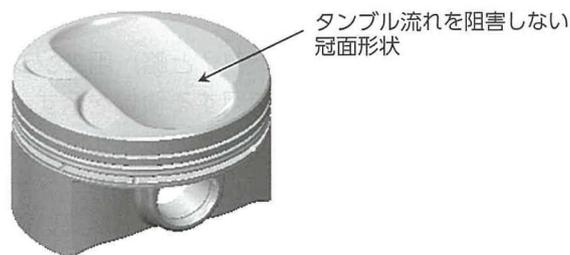


図6 ピストン冠面形状

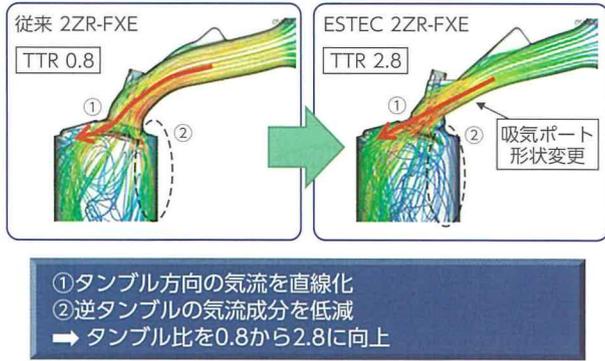


図7 タンブル流れの比較

3.1.1 バルブタイミング

吸気バルブタイミングは従来同様閉じる時期を遅らせるアトキンソンサイクルを採用しながら、吸気バルブが開く時期を遅くすることで作用角を小さくし、吸気VVTの作動角最適化と併せて大量クールドEGR効果を最大限に引き出した。また排気バルブタイミングは従来よりも開閉タイミングを拡大し、排気押し出し損失低減、掃気効果向上によるノッキング低減を図った(図8)。

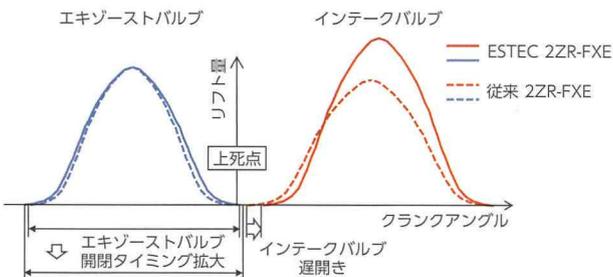


図8 バルブタイミング

3.1.2 エキゾーストマニホルド

排気管長を最適化することにより掃気性能を改善し、残留ガスを低減させてノック改善を行った。また、触媒位置をエンジンに近づけることにより始動時の触媒暖機性を向上させた(図9)。

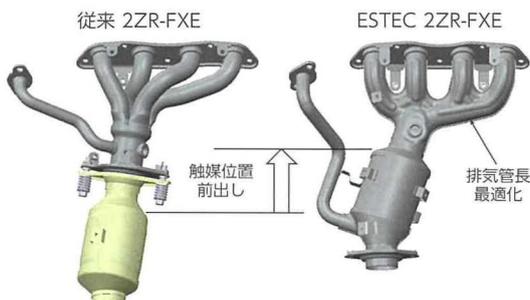


図9 エキゾーストマニホルドの形状

3.1.3 インテークマニホルド

EGRガスは1番～4番気筒の各インテークポートにそれぞれ独立して導入させた。EGRガス量の気筒間バラツキで特定気筒のノッキング制約を受けない様に気筒間のEGR率バラツキを1%以下に抑えた。この低減はインテークマニホルドに内蔵されたEGR通路をトーナメント式に分岐させ、各気筒へのEGR分配穴径を最適化して実現させた(図10)。またEGR分配同様に各インテークポートの吸入空気量バラツキも低減させ、ノッキング耐性を強化した。

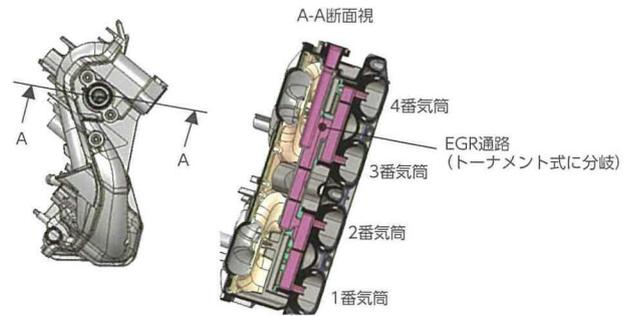


図10 EGR分配通路形状

3.1.4 点火コイル, 点火プラグ

EGR率拡大化の背反となる燃焼変動に対して燃焼を安定させるために、着火を強化するための点化コイルの高エネルギー化と、点火プラグの接地電極の位置合わせを行った(図11)。

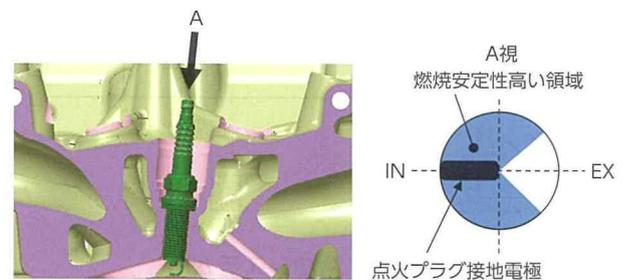


図11 点化プラグ接地電極の向き

接地電極位置合わせは点火プラグの雄ねじとシリンダヘッドの雌ねじのねじのきり始め位置を規定することで実現させた。

3.2 ヒートマネージメント

暖機促進によるフリクション低減と燃焼室周りの冷却性向上によるノッキング改善を行うために以下に示すヒートマネージメント技術を採用した。

3.2.1 2系統冷却システム

冷却回路をエンジン本体と排気熱回収器・ヒーターの2系統にすることで、排気熱回収器とヒーターの機能を確保しながらエンジン本体を循環させる冷却水の低流量化を実現し、暖機促進による燃費向上を図った。冷却回路にフローシャットングバルブ（以下FSVと略）を追加して2系統の冷却回路を構成し（図12、13）冷間時はFSVを閉じてエンジン本体を流れる冷却水を絞って暖機性を向上させ、暖機後はFSVを開いてエンジン本体を流れる冷却水を増やして冷却性能を確保した。

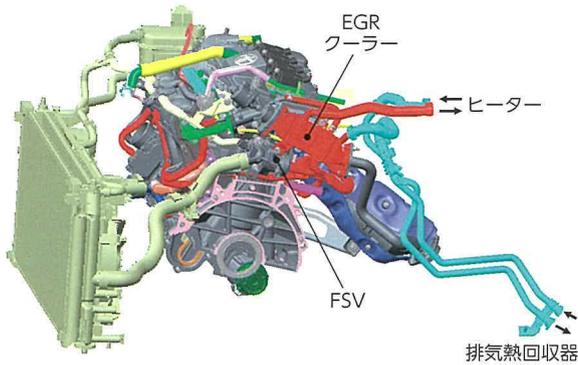


図12 FSV 取付位置

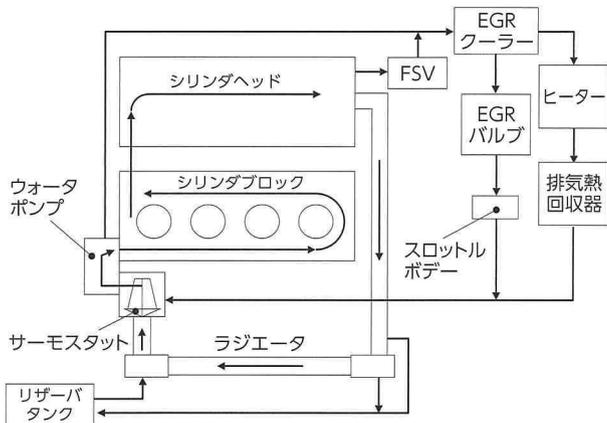


図13 冷却システム

3.2.2 EXPAD 付ウォータージャケットスペーサ

シリンダブロックのウォータージャケット内にEXPAD付ウォータージャケットスペーサ（以下WJSと略）を設定し、シリンダボア冷却の最適化を行った。WJSは、図14に示す様に冷却水の流れを制御するプレートとそこに貼られたEXPADと呼ばれる発砲ゴムで構成され、タンブル流れの冷却に最も有効な排気側ボア上部冷却によるノッキング改善とEXPADでのボア中下部保温によるフリクション低減を併せて実現させた（図15）。

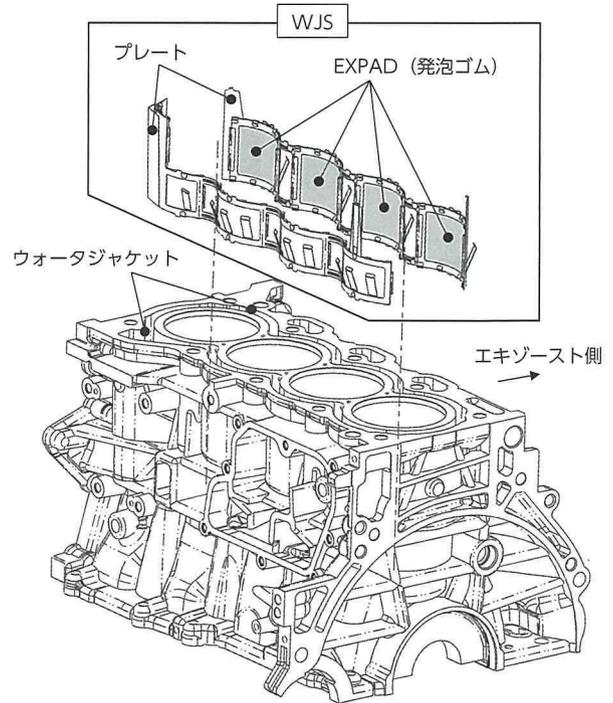


図14 WJS

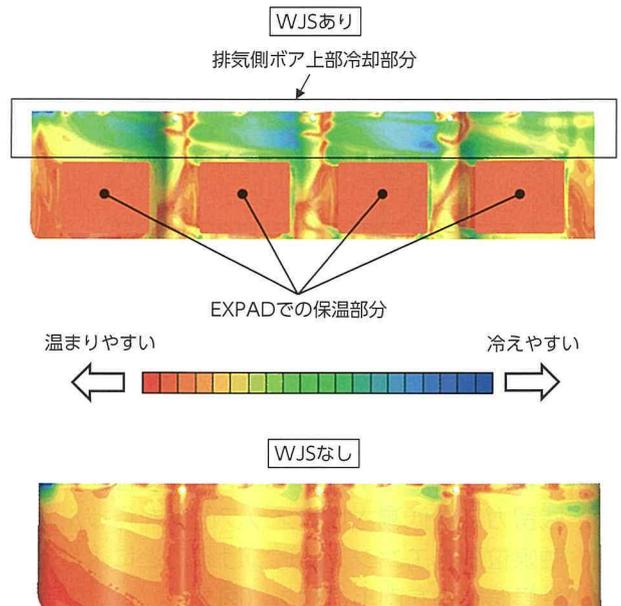


図15 ウォータージャケット温度分布比較

3.2.3 シリンダヘッド、シリンダブロック

シリンダヘッドのエキゾーストポート下側のウォータージャケット通路をシリンダヘッド下面まで貫通させ（図16）、冷却強化によるノッキング改善と冷却水圧損低減を行った。また、シリンダブロックのボア間にV字状のドリルパスを設け（図17）、冷却を促進させてノッキング改善を図った。

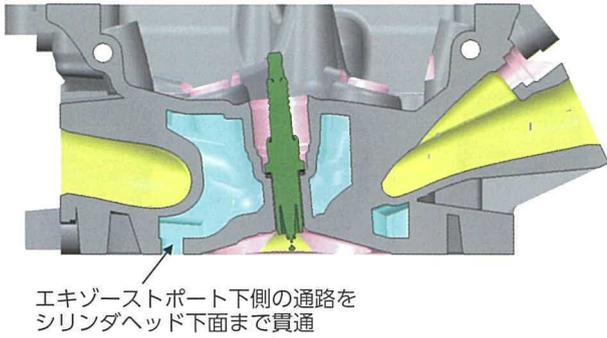


図 16 シリンダヘッドウォータジャケット



図 19 オイルポンプ新歯形形状

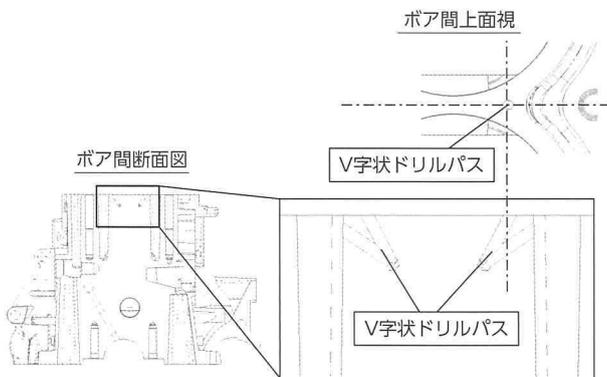


図 17 シリンダブロックのV字状ドリルパス形状

3.3 フリクション低減

各部摺動抵抗の低減と軽量化による摩擦損失低減については数多くの改善を実施した。細溝付クランクベアリング (図 18)、オイルポンプ新歯形形状 (図 19)、0W-16 低粘度エンジンオイルを採用し、潤滑油供給量を最適化した。オイルポンプに関しては低粘度エンジンオイルに対応するために吐出量を 20% 向上させながら、機械損失は従来品並に抑えた。

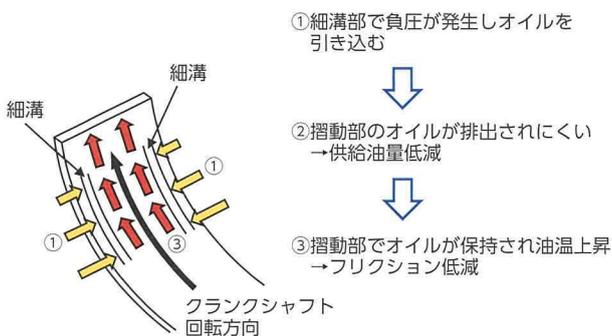


図 18 細溝付クランクベアリング形状と作用

動弁系は薄幅ローラアーム、小型バルブスプリングリテーナ、ビーハイブ形状バルブスプリング (図 20) を採用し慣性質量低減による荷重低減を行った。

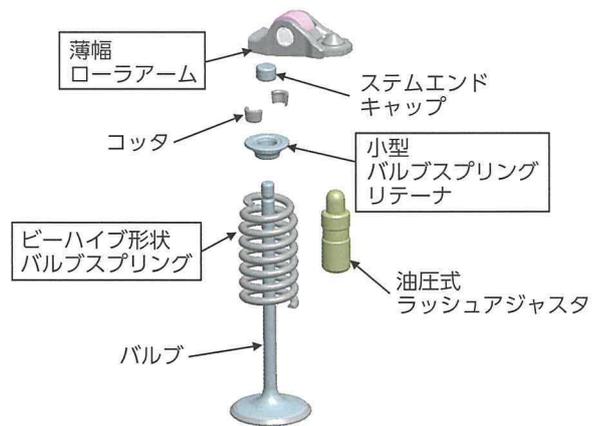


図 20 バルブスプリングと動弁系部品

コンロッドベアリング幅縮小、ピストンスカート部への表面平滑化処理追加、低フリクション樹脂コート (図 21)、低フリクションチェーン採用、チェーン摺動材の低摩擦化 (図 22) で摺動抵抗を低減した。これらの技術の採用で従来エンジンに対して 13.8% の大幅なフリクション低減を実現した (図 23)。

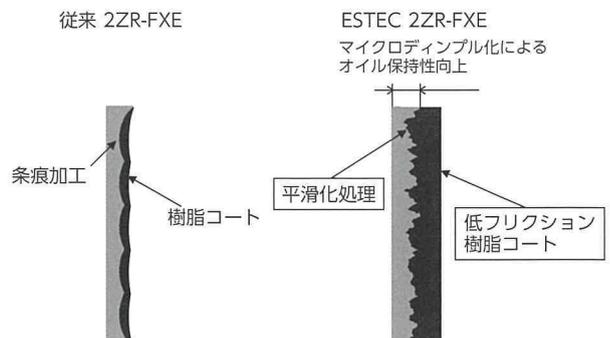


図 21 ピストンスカートの表面平滑化処理

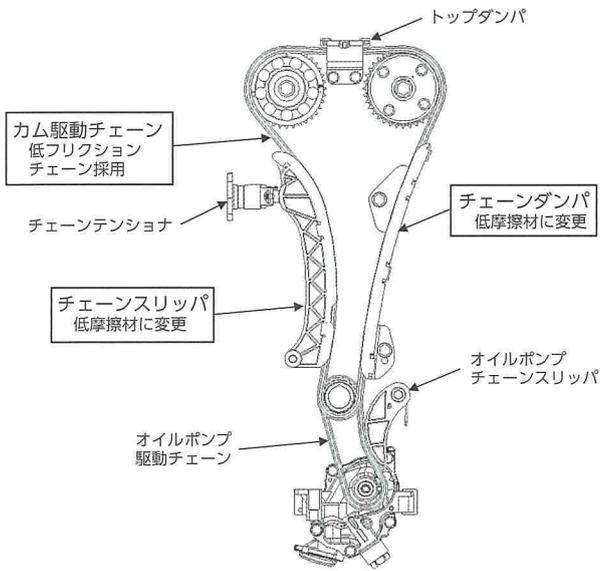


図 22 チェーン系のフリクション低減

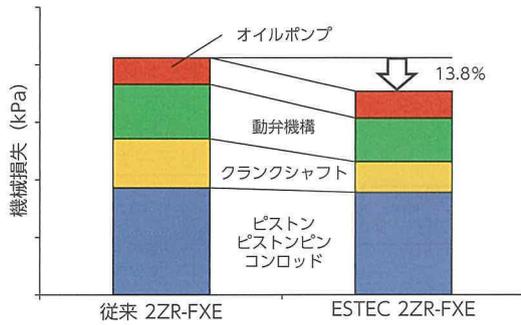


図 23 フリクション低減の内訳

■ 著者



太田 行紀



伊藤 良秋



川村 明裕



西浦 博之



松尾 真二

4 おわりに

ESTEC 2ZR-FXE はここまで紹介してきたような技術に加え、紙面上紹介できなかった技術を合わせて 50 アイテム以上の燃費向上技術を投入し、それらの効果を積み上げることで量産のガソリンエンジンとしては世界で初めて最大熱効率 40% を達成した。最後に本エンジンの開発にご協力頂いた関係会社の皆様に深謝の意を表する。

新型プリウスのハイブリッド技術

Hybrid Technologies for the New Prius

伏木 俊介*
Shunsuke Fushiki

谷口 真**
Makoto Taniguchi

滝澤 敬次***
Keiji Takizawa

菊地 隆二***
Takaji Kikuchi

原 浩二***
Koji Hara

熊谷 尚憲****
Takanori Kumagai

牟田 浩一郎*****
Koichiro Muta

要旨

新型プリウスに搭載した新世代ハイブリッドシステムについて紹介する。システムについてはトヨタ・ハイブリッド・システム (THS-II) の可能性を最大限に高めるべく、すべてのユニットを新規開発した。高効率・低損失化を推進すると共に、旧世代から更なる小型・軽量化を図った。

ここではハイブリッドシステムの性能と、各ユニットの新規技術について紹介する。

Abstract

This article describes the latest generation hybrid system installed in the new Prius, its performance, and the new technologies adopted for each system component. Every component was newly developed to maximize the potential of the Toyota Hybrid System II (THS II), resulting in higher efficiency and lower friction, as well as a smaller and lighter system than the previous generation.

キーワード ハイブリッドシステム, モータ, トランスアクスル, PCU, バッテリ

1 はじめに

3代目プリウスの登場によって、特に国内市場ではハイブリッド車両がポピュラーな存在となり、CO₂ 排出低減にも大きく寄与した。しかし今後日米欧はもとより、BRICS や中東含め、世界的に環境規制が厳格化されることから、今まで以上に環境性能にフォーカスをおいた車両を開発し普及させる必要がある。また一方で、環境性能だけでなく、快適性や走りの楽しさも盛り込んだ車両を開発することも、ハイブリッド車をこれまで以上に普及させる上では不可欠な要素である。本稿では、徹底した高効率化、小型軽量化、また走って楽しい、新世代ハイブリッドシステムを紹介する。

2 開発の狙い

2.1 低燃費

3代目プリウスのハイブリッドシステムでは、ハイブリッドの強みである市街地燃費性能に加えて、冬季および高速走行時の燃費性能向上を実現したが、本世代については、トヨタ・ハイブリッド・システム (THS-II) の可能性を最大限に高めるべく、基本構造から見直すことで、走行全域の更なる燃費向上を狙った。具体的にはトランスアクスル、モータ、パワーコントロールユニット (PCU) それぞれの損失低減を推進すると共に、システムの能力を最大限に発揮する制御開発を進めた。

バッテリーはリチウムイオンバッテリーとニッケル水素バッテリー双方を採用した。リチウムイオンバッテリーはプリウス α で採用したセルから入出力密度を大幅に向上、またニッケル水素バッテリーについても充電性能を大幅に向上させた。

2.2 システムの小型化と共通化

新型プリウスに搭載する本ハイブリッドシステムは、今後順次登場するハイブリッドシステムの基本となる構造を確立させるため、トランスアクスル、

* HV システム開発統括部

** HV ドライブトレイン開発部

*** HV ユニット開発部

**** HV 電池ユニット開発部

***** HV システム制御開発部

モータ、PCU、バッテリーすべて新設計とした。また同クラス他車両に対するシステム展開性を確保するため、小型軽量化についても必須テーマとして開発を進めた。これにより、プリウスについては、補機バッテリーのエンジンルーム内搭載、また駆動用バッテリーのリアシート下搭載を可能とした。

2.3 E-Four システムの新規設定

新型プリウスから、国内向けとして小型電気式4WD (E-Four) システムを新たに設定した。

このE-Fourシステムは、バッテリーから専用のPCUを介してリアモータを制御するシステムを採用した。またトヨタ初となる誘導モータ採用により、システムの低フリクション化を図った。詳細については別項を参照されたい。

3 ハイブリッドシステム

図1にシステム構成を示す。

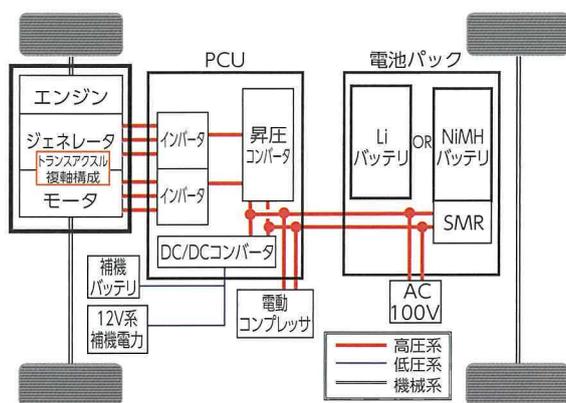


図1 システム構成

エンジンは3代目プリウス搭載の2ZR-FXEエンジンを基本に燃費性能をさらに向上し、熱効率は40%を達成した。

ハイブリッドシステムの基本構成は旧世代と同一だが、トランスアクスルの複軸化、モータとジェネレータの小型化と高回転化、PCU構造変更により更なる小型化と高効率化を図った。

バッテリーは、リチウムイオンバッテリーパック、ニッケル水素バッテリーパック共に、新開発セルの採用と内部機器レイアウトの最適化により、小型、軽量、かつ高性能なバッテリーパックを実現した。

4 ハイブリッドトランスアクスル

4.1 トランスアクスルの構造

コンパクトクラス車両用に開発した新型トランスアクスルには、新しいギヤトレーン構造を採用した。特徴は、以下の4点である。

- ①平行ギヤ式モータリダクション機構
- ②モータ複軸配置構造
- ③カウンタドリブンギヤの2歯同時噛み合い構造
- ④小型化モータ

これらにより、トランスアクスルの全長を短縮し、軽量化と機械損失低減を達成した。図2にトランスアクスル断面図を示す。

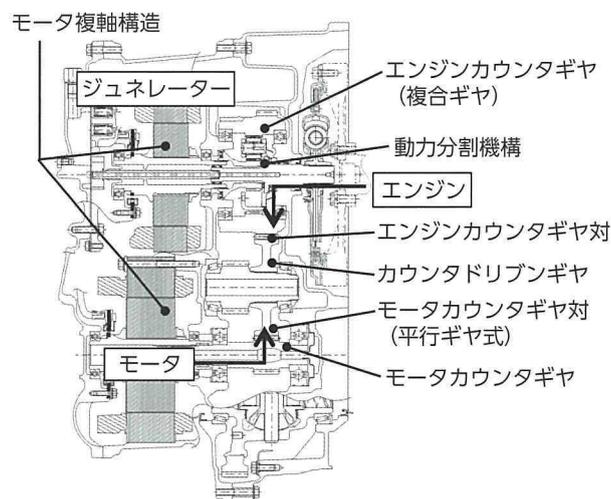


図2 トランスアクスル断面図

4.1.1 平行ギヤ式モータリダクション機構とモータ複軸配置構造

これまではトランスアクスルのモータリダクション機構がプラネタリ式であったのに対し、新開発のトランスアクスルは平行ギヤ式を採用した。

モータリダクション機構の各歯数は、ドライブギヤが17枚、ドリブンギヤが53枚で、減速比は3.118に設定している。

この構造を採用したことにより、低損失性能を損なうことなく、より大きな減速比の確保が可能となった。減速比を大きくしたことで、図3のようにモータの高回転・低トルク仕様ででき、モータの小型化に貢献した。また、プラネタリ式ではジェネレータとモータは同軸に配置していたが、平行ギヤ式ではモータ複軸配置構造が可能となり、トランスアクスル全長を47mm短縮することができた。

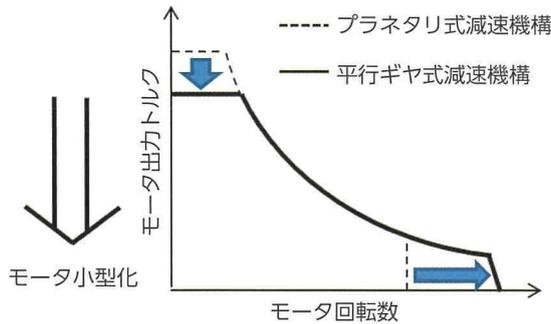


図3 平行ギヤ式減速機構によるモータ小型化

4.1.2 カウンタドリブン2歯同時噛み合いギヤ

図4のようにカウンタドリブンギヤは、モータカウンタギヤとエンジンカウンタギヤとの2歯同時噛み合い構造を採用することで、トランスアクスルの全長短縮が図られている。

一方、本構造は同じギヤに2ヶ所からの噛み合いによる振動が同時に入力する構造のため、ギヤノイズが悪化し静粛性向上が必要となった。そこで、CAE解析により各ギヤ対の噛み合いによる振動位相が相殺される位置に噛み合い点を設定してある。また、カウンタドリブンギヤにレーザー加工による剛性チューニング、CAE解析による各部品の共振分散設計、全ての減速ギヤに歯面研削を採用することで旧型以上の静粛性を実現している。

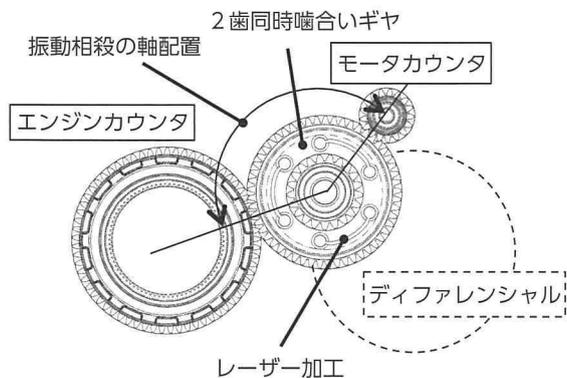


図4 2歯同時噛み合いギヤ

4.2 新型モータ

今回新型プリウス用として、低損失、小型軽量、低コストを狙いとした新型モータを開発した。新型モータと3代目プリウス用モータ(P410)との比較を表1にまとめる。駆動用モータのステータはセグメントコイル式分布巻線、ロータは高速回転対応ロータを開発した。またP410(旧型)と比較

して、トランスアクスルの複軸構造を採用するために、小径長軸モータとした。

モータ銅損低減として新構造に伴うコイル線使用量、鉄損や高調波損失を低減するコア設計、さらに新規開発電磁鋼板の開発を織り込んだ。その結果、P410との比較で20%以上の損失低減を実現した。

またモータの小型化によりP410比較で重量も21%以上低減した。

表1 新型モータ(駆動用)の諸元

	新型モータ	P410
最高出力(kW)	53	60
最大トルク(Nm)	163	207
最高回転数(rpm)	17,000	13,500
重量比(%)	▲21.2	-

駆動モータ用のステータとして、セグメントコイル分布巻を開発した(図5)。主な特徴は以下の3点である。

- ①高占積率化や損失低減を狙いとした新規分布巻を開発した。占積率は丸線から平角線に変更し、15%以上向上された。またセグメント巻線化により、コイル線使用量を低減することで、銅損低減、軽量化にも貢献した。
- ②セグメント巻線対応コイル線を新規に開発した。占積率向上のために薄膜高電圧対応、さらに溶接性、加工性などを向上させた皮膜材を開発した。
- ③セグメントコイル分布巻は多数のセグメントコイルを溶接で接続する構造で、革新生産技術(峡ギャップ多点溶接、高速コイル成形技術など)により、量産性を確保し、低コスト化も達成した。

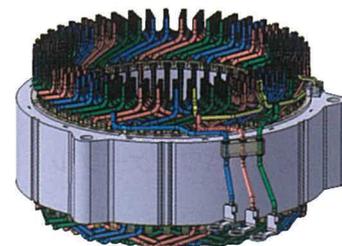


図5 駆動用モータ

またジェネレータ用モータのステータも新規開発した。

新型ロータ(図6)は高回転化対応としてコア固定をロックナット方式を採用した。さらに低コスト化のために、磁石使用量を低減する設計とした。P410よりリラクタンストルクを活用する磁気設計を織り込んだ。また磁石温度を大幅低減するモータ

冷却技術を開発し、レアアース使用量の大幅低減を実現した。P410 との比較で磁石量を 15% 以上、レアアース使用量は 85% 以上低減した。

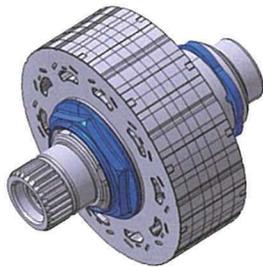


図 6 駆動用ロータ

モータ冷却は ATF によるモータ冷却を採用した。今回はトランスアクスルに搭載されているメカオイルポンプを用いて、積極的に ATF による油冷構造とした。またトランスアクスルにオイルクーラーを搭載し、ATF 温度も下げ、モータ冷却性能を大幅に向上させた。

その他にモータと PCU をつなぐパワーケーブル (図 7) も搭載要件で新構造を開発した。複軸レイアウトを活かし、モータ用、ジェネレータ用のそれぞれのケーブルを短縮・一体化し、60% 以上の軽量化と低コスト化に貢献した。

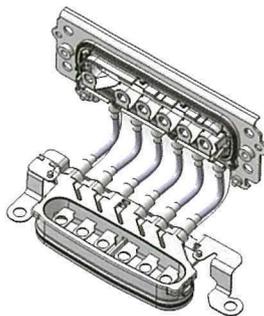


図 7 パワーケーブル

4.3 軽量化

4.3.1 ディファレンシャルケースとリングギヤの新締結構造

先述の新型トランスアクスルの特徴 4 点に加え、ディファレンシャルケースとリングギヤの締結には、図 8 に示す「圧入+かしめ」による新締結手法を開発した。旧型のボルトによる締結に比べ、部品点数の削減やトルクの伝達経路にない駄肉の削減により、軽量化を実現している。

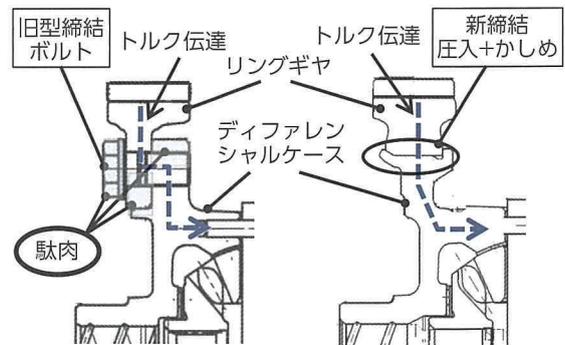


図 8 ディファレンシャル×リングギヤ 新締結

4.3.2 PCU 直上搭載

ハイブリッドシステム全体としての軽量化を図るため、トランスアクスルの直上に PCU を搭載することで、パワーケーブルの短縮により軽量化を実現した。一方、ギヤノイズを悪化させないよう、PCU とブラケットの間にゴムブッシュを設け、ブラケット形状を CAE 解析より最適な剛性となるよう設計している。

4.4 機械損失の低減

4.4.1 噛合い損失低減

モータリダクション機構をプラネタリ式から平行ギヤ式に変更したことにより、ギヤ対の噛合い損失を低減することができた。

4.4.2 攪拌損失の低減

ギヤの回転による潤滑油の流れを図 9 に示す。オイルキャッチタンクをケース上部に配置し、ギヤによって掻き揚げられた潤滑油が集められる構造とした。これにより、各軸への潤滑油および冷却油を分配するとともに、走行中のオイルレベルを下げることで攪拌損失を低減することができた。この

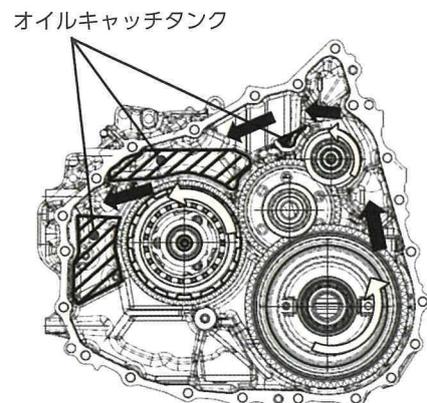


図 9 オイル流れ模式図

キャッチタンクには油路が形成されており、ベアリングやモータへの潤滑油を供給する機能と、潤滑油の一定量を蓄える機能が備わっており、ギヤが回転することによりオイルレベルを下げるができる。

また、図 10 のようにエンジンカウンタギヤの内側にベアリングを配置することで、ベアリングを小径化し、潤滑油の攪拌損失を低減している。

エンジンで駆動しているオイルポンプからの潤滑油を、モータ冷却と回転部品潤滑の最適分配により、オイルポンプ駆動のエネルギー消費を最小化している。これらの低損失化技術により、機械損失を 20%削減し、車両の低燃費に貢献している。

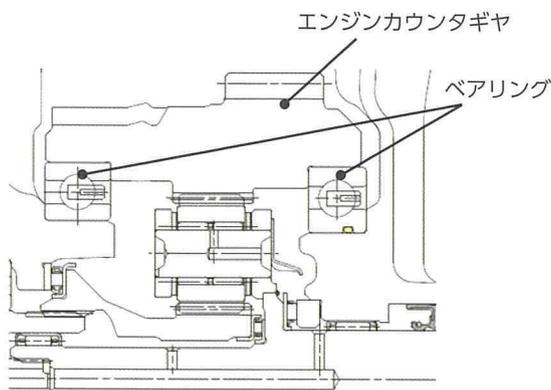


図 10 エンジンカウンタギヤ部

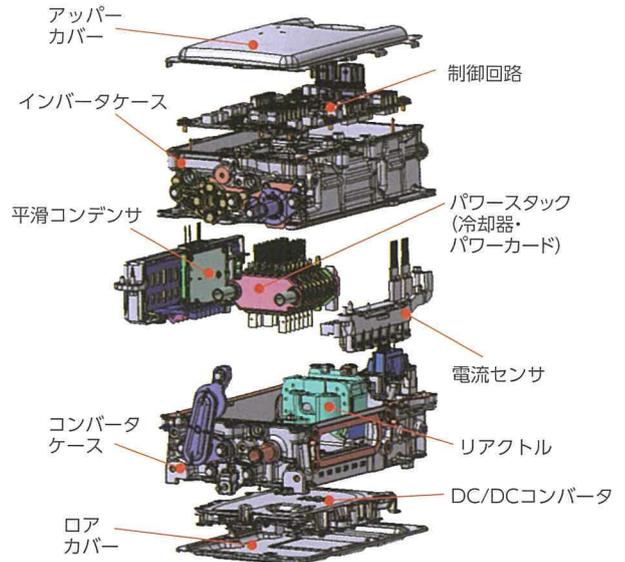


図 11 新世代 PCU 内部構造図

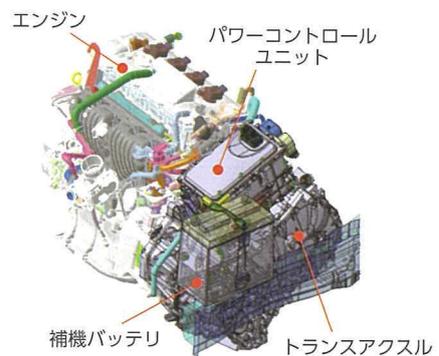


図 12 新世代 PCU 搭載レイアウト

5 パワーコントロールユニット

5.1 開発の狙い

図 11 に新世代 PCU の構成を示す。ハイブリッド車向け PCU にはラゲージスペースの確保、ユーティリティ確保の観点から、更なる小型化が求められると同時に燃費向上のためには低損失化が求められている。今回、パワー半導体素子の冷却に新開発の両面冷却構造を採用、また、高圧系・低圧系配線接続構造を見直し、旧世代比 33%の小型化を実現した。その結果、トランスアクスル直上搭載が可能となり(図 12)、コンベンショナルなガソリンエンジン車同様に補機バッテリーのエンジンルーム搭載が可能となった。また、パワー半導体素子を新開発しユニット全体の損失を旧世代比 20%低減した。

5.2 ユニット小型化技術

5.2.1 新両面冷却構造の採用

旧世代 PCU では、パワー半導体素子を実装した絶縁基板が冷却器に直接ロウ付けされ平面上に配置した「直接冷却構造」を採用している。図 13 に「直接冷却構造」を示す。

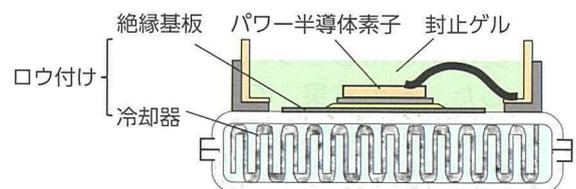


図 13 旧世代 PCU 直接冷却構造

今回、パワー半導体素子の小型化、スペース効率を向上するためにパワーカードと称するIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 素子とダイオード素子のペアをモールドパッケージしたカードの両面に配した積層冷却器を介して両面から冷却する「両面冷却構造」を採用した (図 14)。

新世代 PCU では、更なる小型化を目指し、上下アームを一体モールドパッケージした 2in1 パワーカード構成とし、同時に積層冷却器の小型化を実現した。これにより、1in1 構造の技術で同等の出力性能を実現した場合と比較し、パワースタック部の体格を 22% 小型化した。

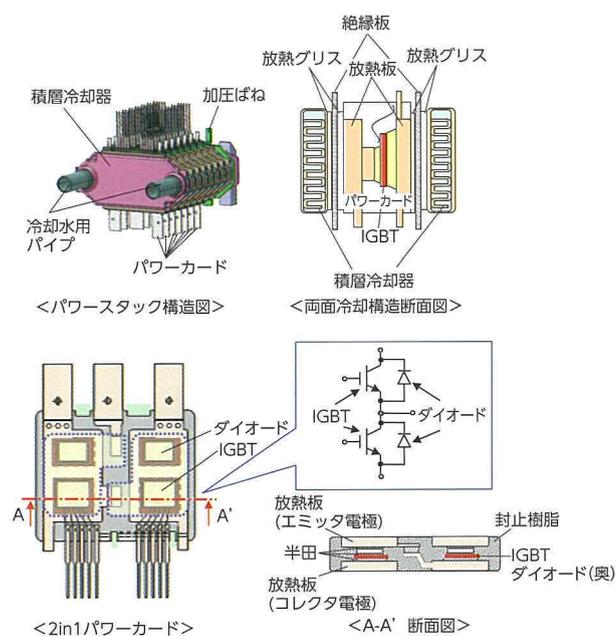


図 14 両面冷却構造説明図

5.2.2 制御回路の小型化

新世代 PCU では、IGBT 素子を駆動する高圧部電源の構成変更による高低圧分離箇所の削減と部品の小型化により IGBT 制御部の面積を縮小した。また、モータ・ジェネレータを制御する ECU (MG-ECU) 内に配置しているモータ回転数をデジタル変換する R/D コンバータをマイコン内に集積化した。その結果、IGBT 素子の駆動回路、MG-ECU の構成を旧型の 2 ボード構成から 1 ボードへ一体化し面積比で 31% の小型化を実現した。

5.2.3 パワー半導体素子の低損失化

旧世代で採用したモータ、ジェネレータ用 IGBT のトレンチ型ゲートと薄板化技術を更に進化させた低損失構造 (SBL 構造 : Super Body Layer) を採

用した (図 15)。損失を低減するためにバリア層で正電荷を抜けにくくし、表面側に蓄積し通電抵抗の低減を可能とした。一般的に素子のスイッチング損失と定常損失はトレードオフの関係にあるが、SBL 構造採用により、定常損失-スイッチング損失トレードオフを 16% 改善した (図 16)。

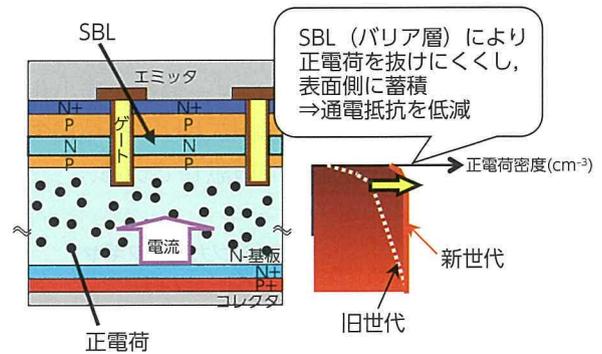


図 15 IGBT 素子 SBL 構造

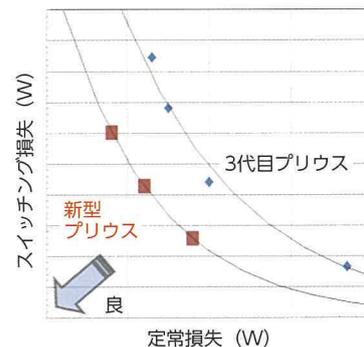


図 16 IGBT 素子の定常損失-スイッチング損失比較

5.3 DC/DC コンバータ

ハイブリッド車はコンベンショナルな車と異なり、エンジン停止モードが存在するため、オルタネータに代わる部品が必要不可欠である。今回ハイブリッド車に設定されている 12V 系 DC/DC コンバータを以下の通り機能向上させ新規開発した (図 17)。

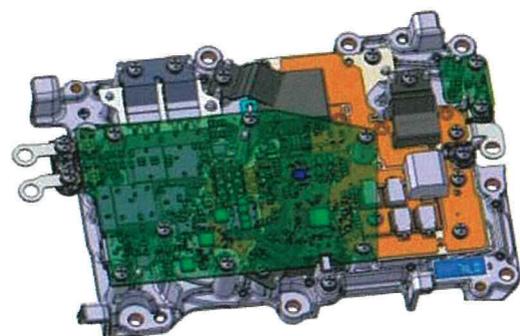


図 17 新世代 DC/DC コンバータ

5.3.1 高放熱厚銅基板による小型化

トランスアクスル直上の PCU 内部に搭載するため、パワー回路部の小型・軽量化、低重心化が求められる。

旧型のトランス、キャパシタ、ダイオード等とのバスバー接続では部品点数が増え、特に低重心化が困難であったが、高放熱厚銅基板の開発によりバスバー接続を廃止し、高放熱厚銅基板に直接部品を実装・組み付けすることで小型・軽量化、低重心化し、さらに締結等の部品点数削減と低コスト化を実現した。

また、高放熱厚銅基板には大電流が流れるため銅箔を厚くする必要があり、旧型のエッチング工法ではエッチングダレにより正確なパターン形成が困難であった。今回、金型プレス工法によりパターン形成精度を向上し、基板配線間距離縮小による小型化を実現させ、大電流通電とダイレクト高放熱を両立した高放熱厚銅基板を開発した（旧世代比：体積 46% 減、質量 58% 減）（図 18）。

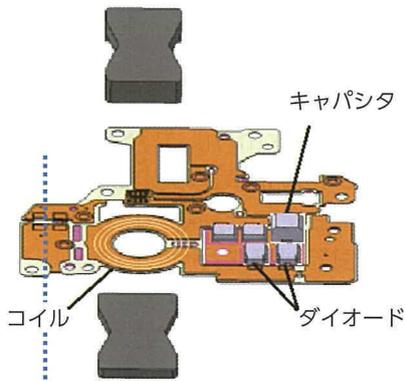


図 18 高放熱厚銅基板

5.3.2 低損失化

トランス材質、形状の見直しおよび交流部の最適制御（出力電流値によりデッドタイムを変更）により更なる低損失化を実現した。

また、定常時の出力電圧範囲を旧型の 13.5 ~ 15.0V から 11.0 ~ 15.0V に拡大し、低負荷時の出力電圧低減を可能とした（旧世代比：損失 8% 減）。

5.3.3 低ノイズ化

最適なノイズフィルタ構成による、低ノイズ化を実現した。磁界解析を用いたノイズシミュレーションの精度向上により、旧世代に対し 20dB 伝導ノイズレベルを向上した。

6 駆動用バッテリー

駆動用バッテリーパックをリアシート下に搭載することで、ラゲージ容量拡大を実現した。現行に比べ、デッキ高さを 110mm 低減することで +56L のラゲージ容量を確保し（図 19）、ゴルフバック 4 個搭載を可能とした。また、バッテリーをリアシート下に搭載することで低重心化による優れた操縦安定性にも貢献している。

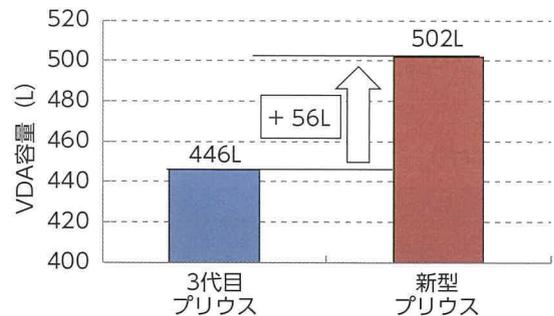


図 19 ラゲージ容量比較

バッテリー冷却は、冷却風導入口をリアシートのアンダーカバーに設置することで冷却風量確保と冷却風温度低減を実現し、バッテリー冷却性能を向上させた。冷却風は、バッテリーセル間を下から上に流れセルを冷却し、リアシート下空間とラゲージに拡散排気し、冷却風による熱影響を抑制している（図 20）。

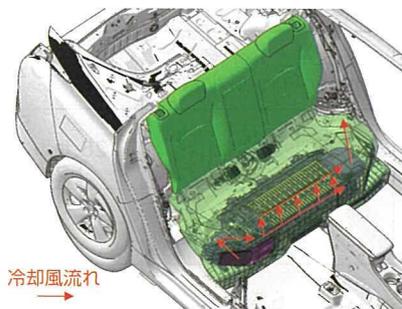
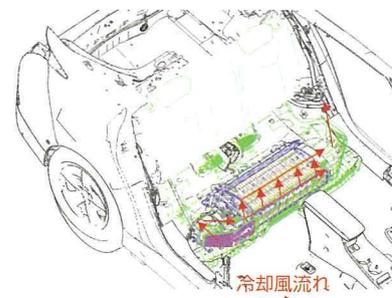


図 20 車両搭載状態と冷却構造

駆動用バッテリーは、新開発のニッケル水素バッテリーモジュール『Hyper-Prime Nickel*』および新開発のリチウムイオンバッテリーセルを採用した。ニッケル水素バッテリーについては、電極材料およびバッテリーケース構造の新規開発により充電性能が大幅に向上、またLiバッテリーについても、プリウスαで採用したセルから、電極材料の新規開発やセル抵抗低減などにより、出力性能を大きく向上させた。

ニッケル水素バッテリーパックは、28モジュールを積層し、168セルを搭載した(図21)。リチウムイオンバッテリーパックは、セルを28セル積層したスタックを2個、56セルを搭載した(図22)。

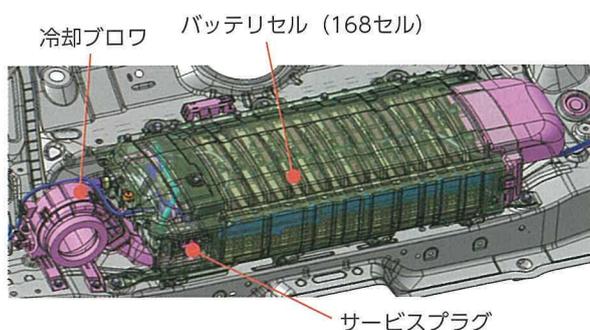


図 21 ニッケル水素バッテリーパック

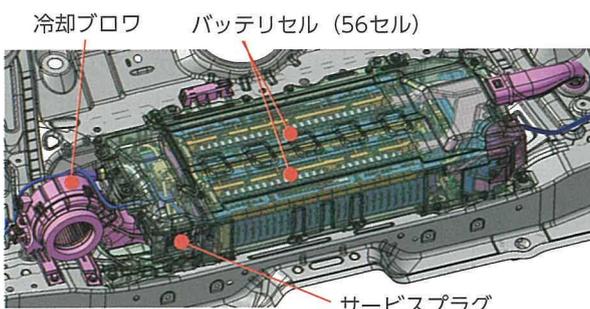


図 22 リチウムイオンバッテリーパック

表 2 バッテリー構成

バッテリー	ニッケル水素 『Hyper-Prime Nicke*』	リチウムイオン
セル数 (cell)	168 (28モジュール)	56 (28セル/スタック) 2スタック構成
定格電圧 (V)	201.6	207.2
バッテリー 容量 (Ah)	6.5	3.6
パック 重量 (kg)	39	24

* プライムアース EV エナジー (株) 登録商標

リチウムイオンバッテリーパック、ニッケル水素バッテリーパック共に新規開発セルの採用と内部機器レイアウトの最適化による小型、軽量、かつ高性能なバッテリーパックを実現した(表2)。

7 制御

7.1 制御開発の狙い

新型プリウスでは、燃費はもちろんのこと、多様な車両性能を制御技術で向上させることを目指した。また、同時に高度化する制御要求に的確に対応できる制御構造、開発環境の改善を目指した。

その幾つかの制御改良技術を紹介していく。

7.2 損失低減制御

プリウスにはダントツの燃費となる使命が常に課せられる。徹底的な損失低減が必要なため、損失解析を行い、損失発生要因の排除を実施した。制御での損失低減の大きな着眼点は、エンジン動作点改善と電気損失低減になる。

エンジン動作点改善として、エンジン停止車速引き上げ(72 → 115km/h)や充放電制御最適化を行った。エンジン停止車速の引き上げを実施すると再加速時の加速もたつきが課題になるが、エンジン始動制御の改良で対策を行っている。

電気損失低減として、HVシステム動作点からジェネレータ、モータ、昇圧コンバータの総損失を最小となるように最適システム電圧を決定する手法構築、また、定常走行などでバッテリーからの電力授受を要しない場合に昇圧コンバータのスイッチングを停止するなど、昇圧制御の最適化を実施した。

制御での損失低減効果は、JC08燃費向上のうち、2割強を占めている。

7.3 高応答化制御

システムを小型軽量化するにあたり、モータでは多極化や高回転化、PCUではコンデンサなどの構成部品小型化、駆動用バッテリーではリチウムイオンバッテリーを採用している。これらの実現には、より高応答で正確な制御性能が必要となる。

ハイブリッドシステム全体の制御性能を高応答化するために制御機能の再配置を実施した。旧型まではパワーマネージメントコントロールコンピュータ(HV-ECU)に様々なセンサやコンピュータからの信号を集約し、エンジン、ジェネレータおよびモータの出力要求値を決定し、MG-ECUなどのアクチュ

エータコントロールコンピュータへ出力要求を送信していた。ハイブリッドシステム制御とアクチュエータ制御がECU毎に分かれておりECU責務としては明確であるが、情報伝達遅れによる制御誤差が発生する。新型プリウスではこの制御誤差を改善するために、高応答が要求される機能をHV-ECUからMG-ECUへ機能移植をする制御機能再配置を実施した(図23)。これにより、モータ回転数認識遅れ、トルク指令遅れなどの情報伝達遅れが改善され、車輪スリップ時などの電力や回転数の超過量が大幅に改善された。

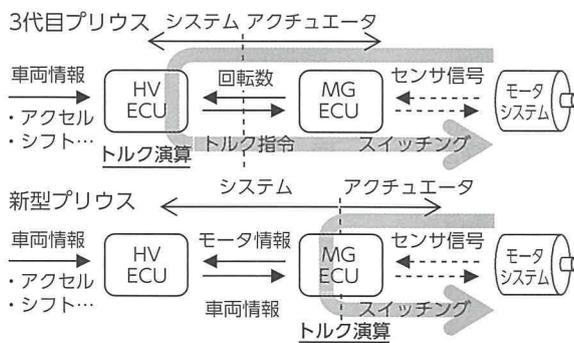


図23 制御機能再配置によるトルク演算フロー

また、モータ・昇圧システムの制御性能を高応答化するためにモータ・昇圧制御系の改善を実施した。モータ制御では定型化できる入出力処理をハード処理とし、また、必要となる電圧指令値を予測処理することで5倍以上の高応答化を実現した。昇圧制御では制御周期の高速化と電力移動を電流から予測することで応答性の大きな向上を実現した。

7.4 ドライバビリティ

新型プリウスでは、エコカーであるが故の割り切りをせずリアサスペンション形式としてダブルウィッシュボーンを採用するなど、操安性能や乗り心地を大きく改善している。ハイブリッド制御としても、その車両側改善に合わせるべく、大きく制御改善を行った。

駆動力特性は、伸び感のある気持ちの良い加速感を創出するためにアクセル操作と加速度応答の関係を定式化した(図24)。また、車体バネ上の過度なピッチを抑制するために、駆動トルクを入力とする車両モデルにより予めピッチ挙動を推定し余分な

ピッチ挙動を抑制するように駆動トルクを補正するアクセルピッチ制振制御を適用した。更に、パワーモードではワインディングなどを軽やかに走行できるように、車両前後左右加速度からシーン推定を行い減速度やアクセルレスポンスを自動可変とする制御を適用した。

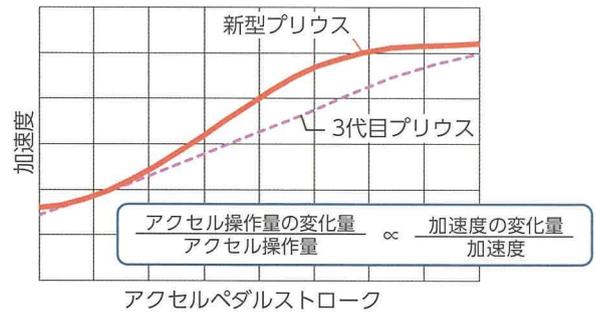


図24 発進駆動力特性

エンジンサウンドは、電気式CVTであるが故に、3代目プリウスでは効率重視の動作をさせた場合に車両加速とエンジン回転数上昇が一致しないラバーバンドフィーリングが指摘されていた。この課題を解決するために、新型プリウスでは理想のエンジン回転数挙動とした際の駆動出力に対するエンジン出力の過不足をもう一つのパワー源であるバッテリーを積極活用することで解消した(図25)。

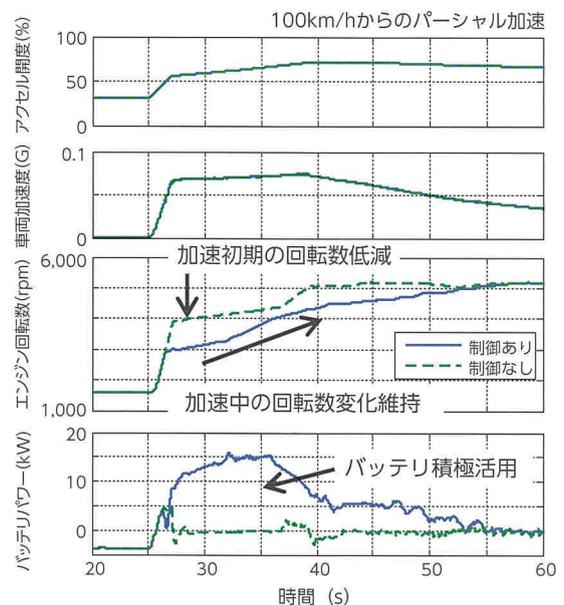


図25 ラバーバンドフィーリング改善

7.5 制御開発環境

車両性能向上のための制御要求は急速に増加してきている。新型プリウスでは、車両性能を向上させる高度な制御要求に加え、駆動用バッテリーの2類別化、4WD設定など、複数のバリエーションに対応するニーズも存在した。より高度で多様な制御要求に、迅速に、正確に対応できるべく開発環境の再構築を行った。

設計要件、機能責務を明確にした上で機能毎の塊を作り、構造設計思想に則り制御設計を行う制御再構築を実施した。これらを行うことで、制御の見通しが良くなり設計や検査が容易になることが期待できる。また、同時にMBDを導入したことにより、今後の制御開発がより早く可能となることが期待できる。

これらの取り組みは試行錯誤の面はあるが、今後も制御開発容易化に向けて、継続改良を行っていく。

7.6 制御開発纏め

制御技術により、多様な車両性能向上に貢献でき、また、今後の制御開発における新たな仕組み作りを遂行できた。

8. 車両性能

表3に新型プリウスの各国モード燃費性能を示す。国内、欧州、米国でそれぞれ、26%、20%、14%の燃費向上を達成した。

表3 各国の燃費性能

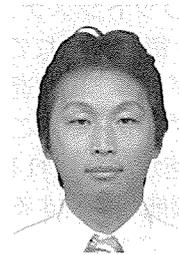
仕向け	モード	新型	3代目
国内	JC08 (km/L)	40.8	32.4
欧州	EC (g/km)	70	89
米国	Comb ラベル (mpg)	56	50

また排出ガス性能についても、国内 J-SULEV、欧州 EURO6、米国 LEV3 SULEV30 に対応した。

■著者



伏木 俊介



谷口 真



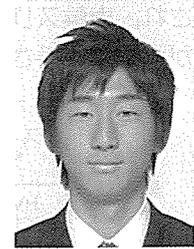
滝澤 敬次



菊地 隆二



原 浩二



熊谷 尚憲



牟田 浩一郎

風と友だちになる ～新型プリウスの空力性能開発

Impressive Coefficient of Drag: Development of Aerodynamic Performance for the New Prius

北沢 祐介 *	寺門 晋 *	市川 創 *
Yusuke Kitazawa	Susumu Terakado	Hajime Ichikawa
前田 和宏 *	日野 雄太 **	田中 一伸 ***
Kazuhiro Maeda	Yuta Hino	Kazunobu Tanaka

特集

要旨

Toyota New Global Architecture (TNGA) を取り入れたプラットフォーム (P/F) の頭出し車両となる新型プリウスの空力性能開発にあたり、「もっといいクルマづくり」をさらに積極的に進めるため、実走行に近い空気の流れを精度高く再現できる最新の風洞・計測設備を導入し、先代からさらなる空力性能の進化を実現した。その結果、 C_D (空気抵抗係数) =0.24 (トヨタ風洞値) となる世界トップレベルの性能を実現し、今後のトヨタ車をリードする圧倒的な燃費性能、40.8km/L (JC08 モード) に貢献した。本稿では、新型プリウスの空力性能の進化について報告する。

Abstract

As the first model created using a platform based on the Toyota New Global Architecture (TNGA), the aerodynamic performance of the new Prius was developed with the aim of actively advancing Toyota's vision of making ever-better cars. Substantial progress in aerodynamic performance was achieved compared to the previous model through repeated and extremely realistic air flow simulations using state-of-the-art wind tunnel and instrumentation facilities. As a result, a world-class coefficient of drag (C_D) of 0.24 (in-house measurement) was accomplished, helping the new Prius to achieve fuel efficiency of 40.8 km/L in the JC08 test cycle, a value that will keep the Prius at the forefront of Toyota's vehicles into the future. This article describes the aerodynamic performance development of the new Prius.

キーワード 空力, 環境, 燃費, 風洞, パッケージ

1 はじめに

環境車リーダーとして世界中のお客様に認知されているプリウスの新型車の開発において、燃費性能の一層の向上に重要である空力性能をさらに進化させた。今回、この開発にあたり、トヨタ自動車としては40年ぶりに空力風洞設備を更新し、より実走行に近い環境を精度高く再現、詳細な車体周りの風流れ解析を実施することを可能にした。それにより、Toyota New Global Architecture (TNGA) 新プラットフォーム (P/F) の頭出しの車両として、トヨタ歴代の量産車の中で最小となる世界トップレベルの $C_D=0.24$ の空気抵抗係数を実現し、今後のトヨタ車をリードする圧倒的な燃費性能 40.8km/L (JC08 モード) に貢献した。

本稿では、その新型プリウスに実現した新たな空力性能の進化、およびその開発技術について報告する。

2 トヨタの低 C_D 開発の歴史

トヨタの空力開発の歴史を振り返ると、1980年代から2000年までは年々 C_D 値を低減できてきたが、2000年以降は2002年にセルシオ (LS) で $C_D=0.25$ を達成して以来、 C_D 値としては頭打ちであった (図1)。プリウスの C_D 値としては、初代は $C_D=0.30$ 、プリウスの特徴となった「トライアングルシルエット」を採用した2代目は $C_D=0.26$ と大幅に空気抵抗を低減したが、3代目となる先代モデルはトヨタ歴代 TOP と同等の $C_D=0.25$ に留まっていた。4代目となる新型の開発では、この頭打ちを打破すべく、新たな技術の開発に取り組んだ。

* 性能実験部
 ** 車両 CAE 部
 *** 計測技術部

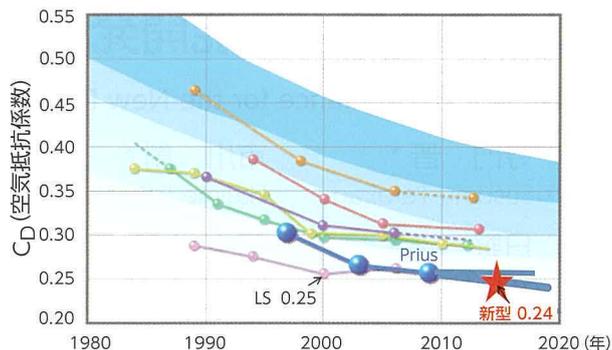


図1 トヨタのC_D開発の歴史

3 新風洞設備の導入

今回の新型プリウスの開発では、新たな技術開発のため2013年3月に導入した世界トップクラスの性能を誇る大型風洞設備(図2)を、開発初期より活用して行った。この風洞の特徴は、移動地面とタイヤ回転装置を備えることで、実路走行により近い風流れを再現、走行時の現象を詳細に解析可能となり、大幅な空力性能の向上につながった(図3)。



図2 新風洞実験棟外観

風洞形式：回流式低騒音実車風洞
 最高風速：250km/h
 送風機：ファン直径9.0m，出力8,000kW
 吹出口寸法：幅7.0m×高さ4.5m
 風洞全体寸法：全長110m，全幅52m，全高27m
 主要装備：5ベルト式ムービングベルト
 音響解析システム
 大領域3次元流れ解析システム



図3 新風洞の概要

3.1 移動地面装置の効果

実路の走行では空気中を車両が動くため、地面近傍に空気の境界層はないのに対し、従来の風洞設備では車両が止まっている状態で送風するため、地面近傍に空気の境界層が発達する。このため、実路走行での床下流れを再現しきれていなかった。そこで、新風洞では移動地面装置を導入することにより、地面近傍の空気の境界層の発達を防ぎ、より実路走行に近い床下流れを再現できるようになった。図4は、移動地面装置有無の車両後方の流速分布を示しているが、移動地面装置により床下流速が速くなっており、地面近傍の空気の境界層の発達を防いでいることがわかる。これまではその地面近傍の境界層により車両後方の流れが再現できず、効果が十分に確認できていなかった床下下部の整流効果が、この装置により精度高く捉えることが可能となり、大幅な空力性能の向上を実現することができた。

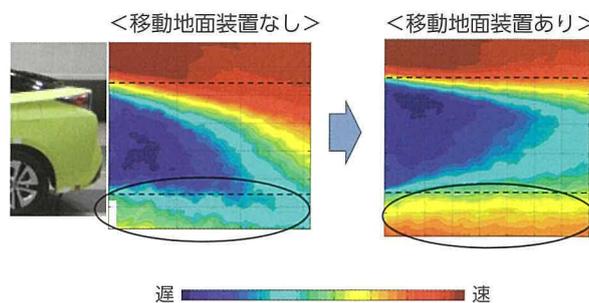


図4 移動地面装置有無の車両後方流れ

3.2 タイヤ回転装置の効果

従来風洞ではタイヤを固定した状態で空力評価を行っていたが、新風洞ではタイヤ回転装置により、実路の走行と同様にタイヤ回転を再現した。それによりタイヤ周辺の流れを、実路走行に近い状態で評価が可能となった(図5)。これまで実路走行で検討、確認していた部分を、風洞試験にて風流れの解析を行いながら詳細な検討することが可能となり、それにより新たな知見が見いだされ、新たな性能向上策を実現することができた。

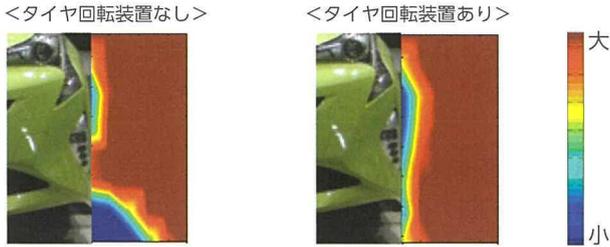


図5 タイヤ回転有無の車両側面全圧分布

4 新型プリウスの空力性能開発コンセプト

新型プリウスの空力性能開発において、コンセプトを以下のように設定し、開発を進めた(図6)。

- (1) 車両後方流れの収束性のさらなる改善
- (2) タイヤ周辺流れのさらなる改善
- (3) 外形発聲音低減による静粛性向上

この3つの観点を重点とした開発により、低 C_D 、風切音低減、運動性能向上を共に実現させた。

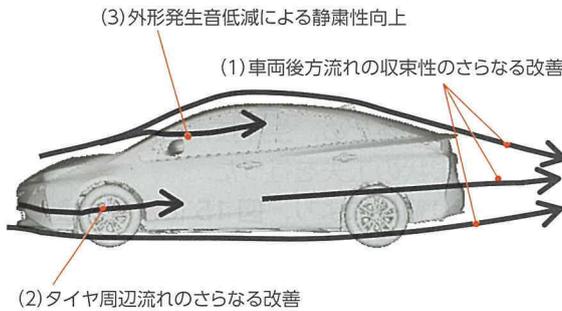


図6 空力性能開発コンセプト

5 車両後方流れの収束性のさらなる改善

5.1 低 C_D 化の流れコンセプト

空気抵抗は大きく分けて圧力抵抗と摩擦抵抗に分類でき、自動車の場合は圧力抵抗が90%以上を占める。その圧力抵抗の中でも車両背面の圧力抵抗をいかに減らす(車両背面の圧力回復を大きくする)かが空気抵抗を低減するポイントである。プリウスの特徴的なトライアングルシルエットは車両上面からの圧力回復を狙ったものであるが、今回はさらなる圧力回復のため、アッパ上面の絞り込み(ルーフ後方を下げる)を最大限にできるように車両パッケージに踏み込んだ検討を重ね、絞り込み拡大を両立さ

せた。このとき、上面の流れを絞りすぎると後流の上面流れが落ち込み背面の C_D が増加する可能性があることに注意が必要で、その最適化を精度高に行うため、流れの運動量を考えた後流の最適化手法を活用し、定量的な検討を行った⁽¹⁾。

車両後方には死水域が発生し、その死水域と主流の間に流れのせん断層が発生する。せん断層は上下に発生するが、その上下のせん断層が合流するまでに失う運動量(Δ microdrag と定義)が背面圧力と相関があり、空気抵抗の大きさを表す指標となる。この Δ microdrag の上下の和が最小となることが最適な流れと考えられ、上下の流れがぶつかる合流点の高さが重要と着目した。また、その高さは上下せん断層の運動量の差で決まっているため、上下の Δ microdrag の差と和を見ながら最適な高さを調整した。具体的な手法としては、下記(1)、(2)を実施した。

- (1) 上面流れ：ルーフ後方の地上高を下げる
- (2) 床下流れ：床下のフラット化と切上げ、グリルシャッターの設定

旧型と新型についての後流を示したのが図7、 Δ microdrag を示したのが図8である。車両上面の流れの Δ microdrag は増加したが、車両下面の Δ microdrag を大幅に低下し、結果の和として低下している。この手法により、後流を確実に最適化することができ、図9のように車両背面の圧力を平均9%増加することができた。

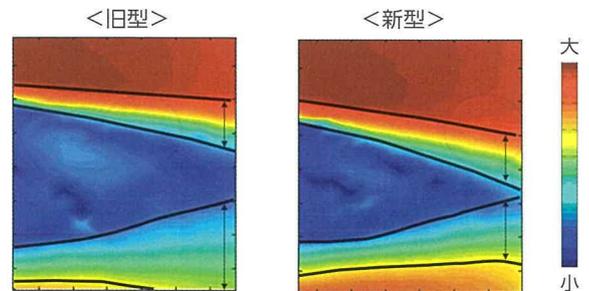


図7 新旧の車両後方の流速分布

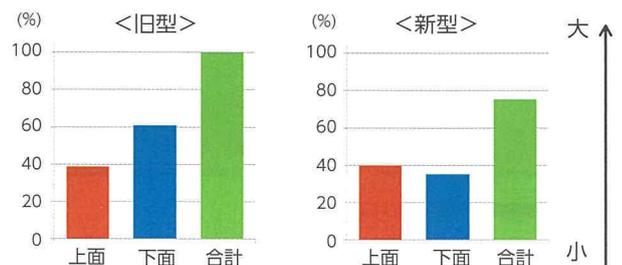


図8 新旧の Δ microdrag の比較

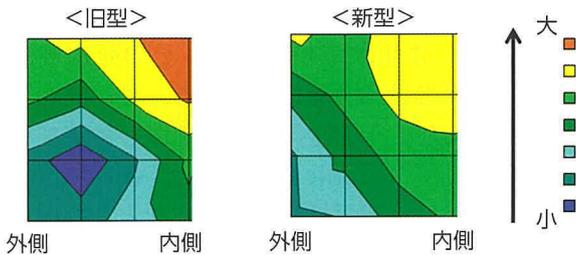


図9 新旧の車両背面の圧力分布

5.2 上面流れの最適化

新型プリウスではアッパの絞りを最大限にするために、デザイナーとともに、一からシルエットを見直した。検討を重ねた結果、図10のように新型ではルーフの頂点を旧型より約170mm前に出し、ルーフ後端は約55mm下げることができた。それにより、ルーフからバックウィンドウにかけて緩やかな切り下げの形状が実現し、新型では旧型に比べ車両後方の圧力が高くなり、狙いの流れを実現できた(図11)。また、このシルエットを採用した場合、

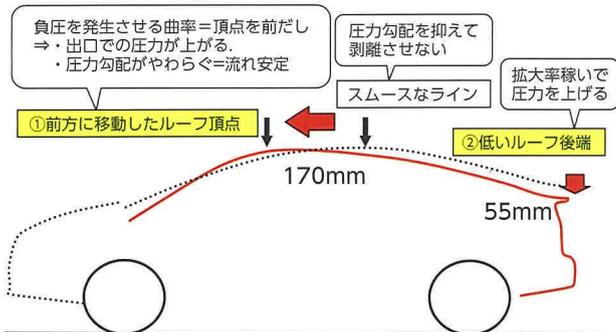


図10 新旧のパッケージ比較

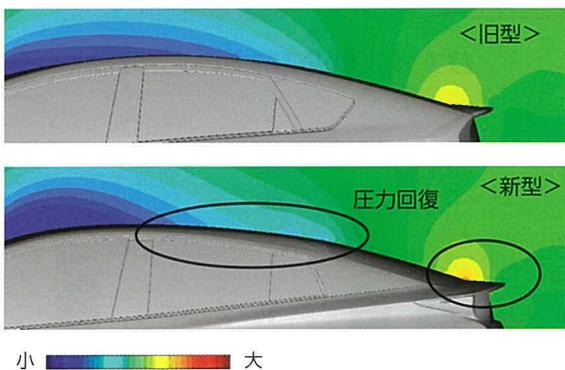


図11 新旧のルーフ周辺の圧力分布

後席の室内空間が狭くなる可能性があったが、後席位置を工夫することにより、空力性能と室内空間の両立を図った。

5.3 床下流れの最適化

5.3.1 床下レイアウト

図12に示すTNGA P/Fでは、優れた整流効果を確認することはもちろんのこと、世界中の工場でも製造することを可能とする床下レイアウトの実現を目指した。

P/F開発では、床下の整流効果を最大限に引き出すために、理想の床下ラインを設定し、各部品1mm単位の高さにこだわり、形状と配置を工夫した。しかしながら、運動性能向上のためにビームサスからダブルウィッシュボーンに変更したリアサスペンションが、理想の床下ラインより下に位置しており、そのままではロアアームに流れが衝突し整流効果が低減してしまう。そこで、フューエルタンクサイドアンダーカバーの工夫により、ロアアームへの流れの衝突を抑制した(図13)。またメインメンバーも断面が1mmでも薄く、かつ周辺の床下カバーを少しでも拡大できるように配置を検討し(図14)、床下整流効果の向上に貢献させた。各床下カバーについては、少しでも覆う面積を大きく、またカバー穴を低減するため、生産技術と両立させる検討を実施し、形状の工夫を行った。

これらの取り組みにより、図15に示すように新型プリウスでは車両中央の流速が大きくなっており、平均流速を旧型比で20%向上し、優れた整流効果を実現した。

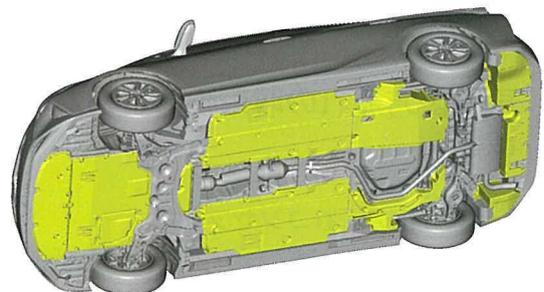


図12 床下レイアウト

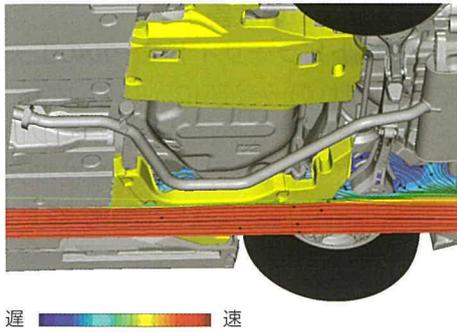


図 13 フューエルタンクサイドアンダーカバー流速分布

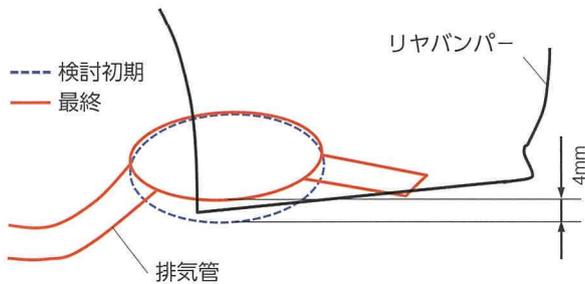


図 14 メインマフラー断面図

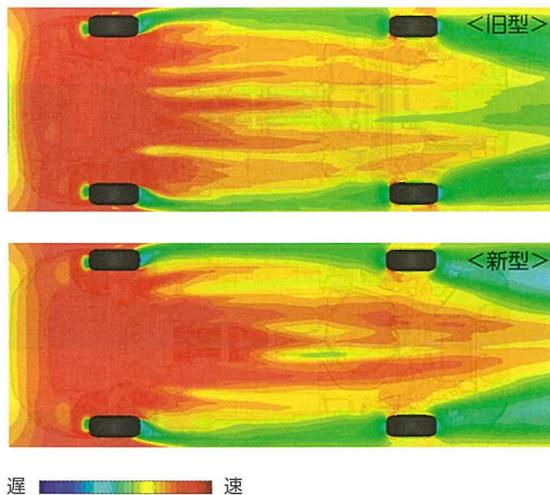


図 15 新旧の床下流速分布

5.3.2 エンジンルームの流れ

フロントバンパー開口からエンジンルームに入った流れは、床下及びホイールハウスへ抜けていき、車両全体流れに影響を及ぼす。新型プリウスでは床下の流速を大きくするために、フロントバンパーから入っていく流れを塞ぎ止めてその流れを積極的に床下に導くことと、エンジンルームから床下に抜けていく流れを抑制することを狙い、グリルシャッターを設定し、床下流れの整流に大きく貢献した (図 16)。

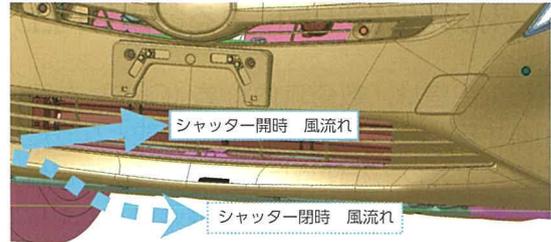


図 16 グリルシャッター周辺構造

6 タイヤ周辺流れのさらなる改善

車両後方の流れの収束性を向上させるためには側面の流れの整流も重要である。側面の流れを乱す大きな要因としてホイールハウスから吹き出す流れがあり、このタイヤ周辺の吹き出す流れを低減することが空気抵抗の低減につながる。このホイールハウスからの吹き出す流れはタイヤ回転の影響が大きく、今回新風洞にてタイヤが回転している状態で最適化を実施することで、図 17 に示すフェンダーライナー、エプロンシール、フロントスパッツの効果を増大させた。図 18 は車両側面の全圧分布を示しているが、側面流れの乱れが小さくなったことで、全圧損失 (流れエネルギー損失) が小さくなっており、新型では旧型に対し損失が5%低減できた。

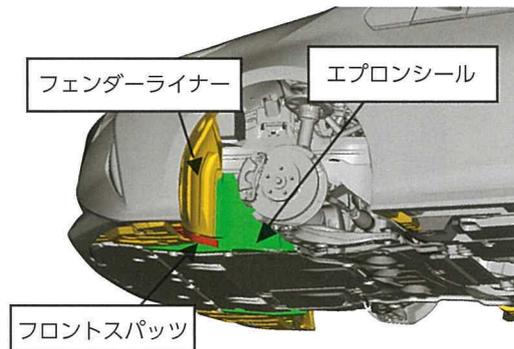


図 17 フロントタイヤ周辺部品

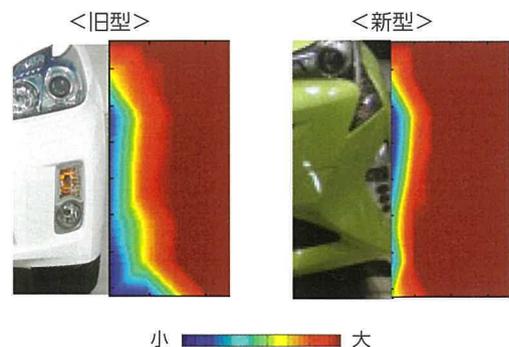


図 18 新旧の車両側面全圧分布

7 外形発生音低減による静粛性向上

外形発生音は、数値流体力学（CFD）を用いた予測をするとともに、新風洞にて可能となったマイクロフォンアレーを使った試験での音の可視化を活用し、発生源での低減を形状の最適化で実施した。

7.1 外形発生音の低減による室内風切音低減

音の可視化を活用することで、発生源を特定し、その要因となる風の流れを車両形状（フロントピラー、ミラー形状）によりコントロールすることで、外形発生音を旧型より大幅に低減することができた（図 19）。

その結果として、旧型に対して高速走行時の車内騒音を大幅に低減し（図 20）、高速走行時におけるワンクラス上の静けさを実現することができた。

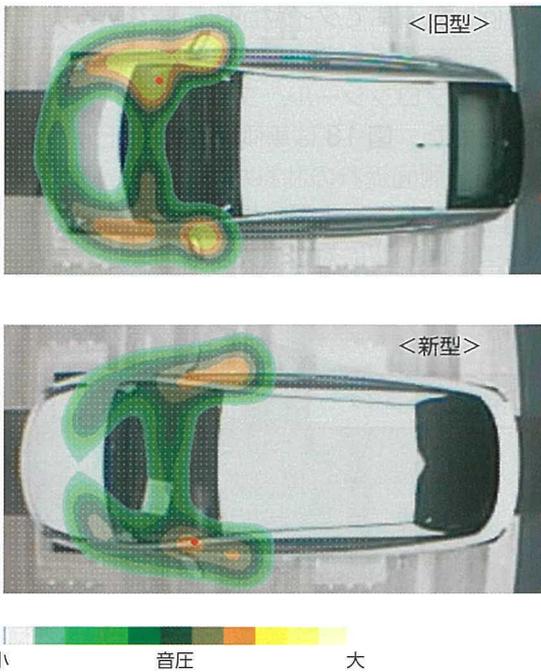


図 19 新旧 外形発生音分布

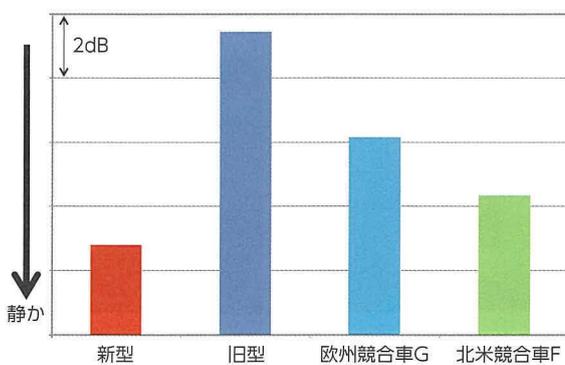


図 20 風洞車内音レベル比較 (120km/h)

7.2 外形の風流れの改善 (フロントピラーサイドモールの工夫)

外形での風流れの改善部位として、特にフロントピラー付近での剥離流れに着目した。フロントピラー先端形状の工夫により、風の剥離を抑え、外形発生音・空気抵抗を共に低減した（図 21）。

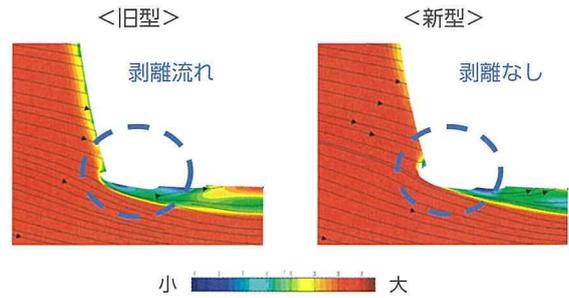


図 21 フロントピラー周り外形発生音 CFD 検討結果

7.3 変動する風に対するロバスト性

新型プリウスは定常時の風切音だけでなく、走行中の自然風の変動により発生する「バサバサ」という音の変動に対しても、注力して開発を実施した。図 22 に自然風変動成分レベルマップを示す。

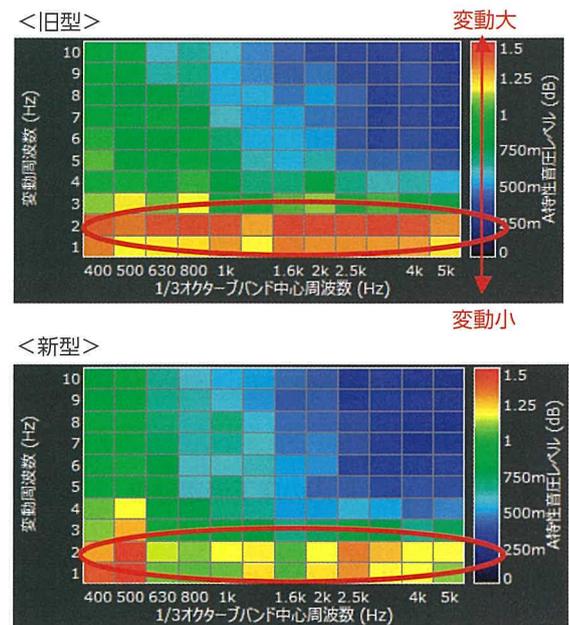


図 22 新旧型 自然風変動成分レベルマップ

この計測システムは、横軸が音の周波数、縦軸が変動周波数、変動レベルをコンター（色）で、車室内の音を評価できる。このシステムを活用し、自然風中を走行する車両の変動音の低減を実施し、キャビン周りの段差や風の流れを最適化することによ

り、新型では、自然風の変動によって発生する音を2 Hz 付近を中心に大幅に低減できた。

8 まとめ

以下に示す、新しい設備を活用した評価方法の確立とそれを用いた開発により、新型プリウスにおいて $C_D=0.24$ を実現し、燃費 40.8km/L に貢献、「もっといいクルマづくり」を推進することができた。

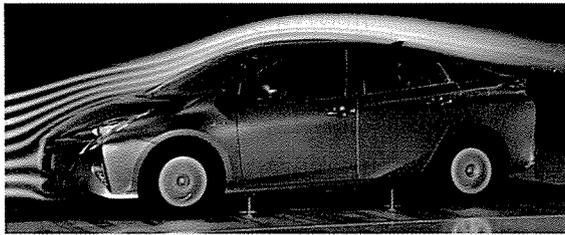


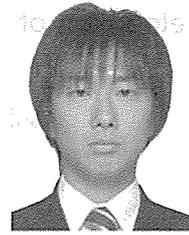
図 23 車両全体流線

- (1) 移動地面装置とタイヤ回転装置を備えた新風洞を活用した開発を実施し、新たな流れの知見を見出し、それに基づいた新たな性能向上を実現した。
- (2) 実路流れを再現した検討を実施することで、精度の高い新たな流れ評価方法を確立し、車両後方流れの収束性およびタイヤ周辺流れを、定量的に改善することが可能となった。
- (3) 外形発生音の可視化、自然風変動による音の変動の評価法を確立し、外形発生音および自然風による変動を大幅に低減した。またあらゆる走行環境での風切音を低減し、車内の静粛性向上に貢献した。

参考文献

- (1) 寺門晋, 榎原, 前田: 空気抵抗低減に向けた車両後流構造に関する一考察. 自動車技術会学術講演会講演予稿集, No.78-15, p.1860 - 1865 (2015)

著者



北沢 祐介



寺門 晋



市川 創



前田 和宏



日野 雄太



田中 一伸

小型 E-Four システムの開発

Development of Compact E-Four System

伏木 俊介*	道下 雅也**	豊田 浩也***
Shunsuke Fushiki	Masaya Michishita	Hironari Toyoda
	宇木 慎一郎***	清水 聡之**
	Shinichiro Uki	Satoshi Shimizu

要旨

新型プリウスに搭載する小型ハイブリッド車用の E-Four（電気式 4 輪駆動方式）システムを紹介する。システムについてはエスティマ等に搭載済みの E-Four システムを基本に、小型ハイブリッド車に搭載可能な、コンパクトかつ市場ニーズに対応する 4WD 性能を確保すべく開発を行った。ここでは E-Four システムの性能と、各コンポーネントの新規技術について紹介する。

Abstract

This article describes the E-Four electronic four-wheel drive system that was developed for compact hybrid vehicles (HVs) and installed in the new Prius. Based on the existing E-Four system installed on vehicles such as the Estima Hybrid (Japanese market only), the development aimed to reduce the size of the system to enable adoption in small hybrid vehicles and to meet the need for four-wheel drive (4WD) performance mainly in the Japanese market. This article focuses on the performance of the E-Four system and the new technology adopted for each component.

キーワード 小型 E-Four, 4WD, モータ, トランスアクスル, インバータ

1 はじめに

3 代目プリウスの登場によって、特に国内市場ではハイブリッド車両がポピュラーな存在となり、CO₂削減にも大きく寄与しているが、寒冷地においても燃費の良い小型ハイブリッド車 +4WD システムのニーズが高まっている。そこで、主に国内市場で実用的な性能を有する電気式 4WD システムを、新型プリウスから搭載すべく開発を推進した。

2 開発の狙い

2.1 システムの小型化

プリウス等の小型ハイブリッド車に搭載する上で、システムの小型化は必須条件である。このため、モータ、およびトランスアクスルの小型化を進めた。

また、従来はフロントに搭載するインバータにて前後モータを制御するが、小型化およびシステムの展開性を確保するため、インバータを別体化、かつトランク下のスペースに収容できるようサイズを小型化した。

2.2 4WD 性能

国内市場において必要な 4WD 性能を調査するため、主に北海道にて本システムを搭載した車両による長期走行評価を実施し、季節変動を含めた環境変化に対し、顧客のニーズを満たす 4WD 性能を決定した。

2.3 低燃費

4WD システムを搭載しても、燃費に代表する環境性能を確保することは必須項目である。本システムはトヨタとして初の誘導モータを採用し、システムの低フリクション化を実現した。

* HV システム開発統括部

** ドライブトレインシステム統括部

*** HV ユニット開発部

3 小型 E-Four システム

図 1 にシステム構成を示す。

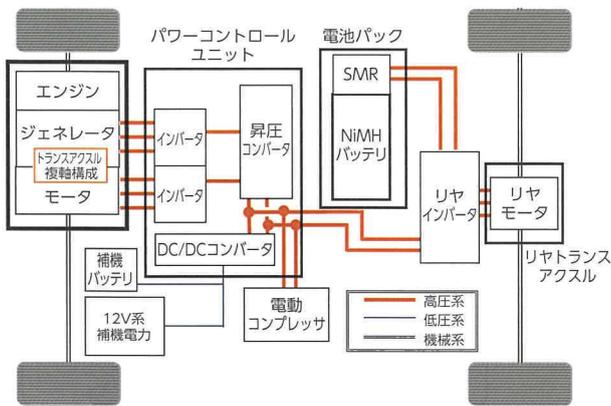


図 1 システム構成

小型 E-Four（電気式 4 輪駆動方式）システムは上図の通り、バッテリーからリヤインバータを介して、リヤモータを駆動する。エスティマ等に搭載する大型 E-Four と異なり、インバータはリヤモータ用に個別化することで、他車両への展開性を確保した。

4 リヤトランスアクスル

小型ハイブリッド車用 E-Four 用にリヤトランスアクスルを新たに開発した。

開発されたリヤトランスアクスルは軽量化・引き摺り損失低減による燃費への貢献・コンパクト車両の限られたスペースにも搭載可能となるコンパクト体格を実現している。

4.1 モータリダクション構造

低回転域で大トルクを確保すべくリダクションは 2 組のギヤ対で構成されている。カウンタギヤ対の減速比が 2.294、ファイナルギヤ対の減速比が 4.571 でモータトルクは後輪軸上にて 10.487 倍に増幅される。高減速比のリダクション機構を採用することによりモータを高回転・低トルク仕様にする事ができ、モータの小型化を実現した。

2 組のギヤを配置した場合通常は、インプット軸、カウンタ軸、アウトプット軸の 3 軸構成となるが、2 組のギヤの 2 軸間距離を 80mm に統一し、

インプット軸とアウトプット軸を同軸に配置し、2 軸構成を取ることにより、車両前後方向を大幅に小型化することに成功している。図 2 にリヤトランスアクスルの断面図を示す。

これにより、コンパクトクラスの車両に搭載可能な体格を実現している。合わせて、小型化により大幅な質量低減にもつながっている。

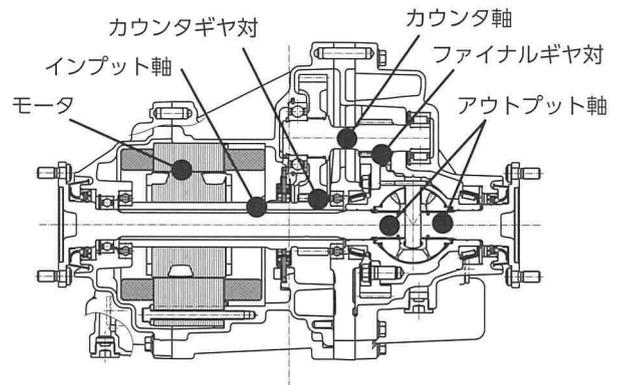


図 2 リヤトランスアクスル断面図

4.2 潤滑構造

引き摺り損失低減とモータ油冷の両立のため、ユニット後方にオイルキャッチタンクを設定した。

車速にあわせ、オイルをオイルキャッチタンクに溜めることにより油面高さを下げ、回転物によるオイルの攪拌損失を低減している。オイルキャッチタンクへのオイル流入は、ギヤのオイル攪拌による跳ね上げにより行われ、オイルポンプ等の機能部品廃止に成功している。これによりコスト低減とオイルポンプによる損失低減を可能にしている。

オイルキャッチタンクへのオイル流入はカウンタドリブンギヤとリングギヤで行っており、車速 10km/h 程度から高回転で回るカウンタドリブンギヤでオイル流入を開始し、動的に油面を下げる。これによりユニット内で最も高回転で回るモータロータに接触するオイルを減らし抵抗を低減する。

中高速域ではリングギヤの攪拌で流入させ、カウンタドリブンでのかき揚げを終了させ攪拌抵抗をさらに抑える（図 3）。

オイルキャッチタンクへのオイル流入は、モータを積極的に駆動させる車速 10km/h 以下では抑制することで、低速域でのモータ油冷を可能にしている。

特集

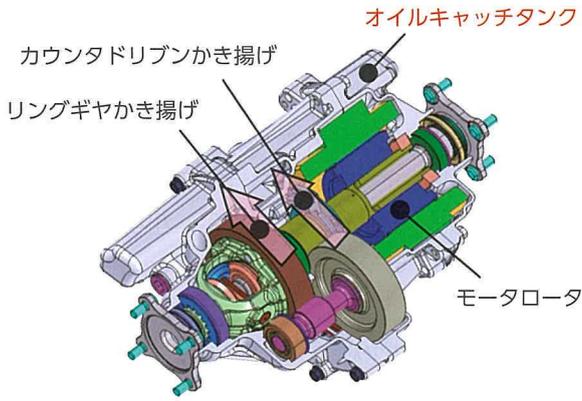


図3 オイルの流れ

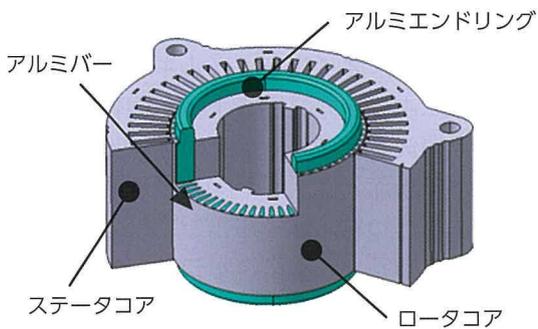
4.3 誘導モータ

コンパクト車両向け E-Four 用に小型・低コストモータを開発した。

コンパクト車両に必要・最適なモータ仕様を考慮し、磁石を使わない誘導モータを採用した。

図4に誘導モータの構造を示す。

リヤモータは引き摺り状態での運転頻度が高く、誘導モータを採用することで非駆動の時の無負荷引き摺り損失低減を実現し、車両の低燃費化にもつながっている。



※ステータは磁石モータと同構造
 ※ロータはアルミダイカストで製造

図4 誘導モータの構造

5 リヤインバータ

5.1 車両搭載

図5にリヤインバータの車両搭載図を示す。今回開発したリヤインバータは、従来のLexus RX450h、ハリアーハイブリッドで採用されているフロントインバーター体型とは異なり、リヤインバータを別体化し車室内のスペアタイヤスペースに搭載している。これにより、エンジンルームの狭いコンパクトカーでの E-Four システムを実現した。

また、車室内搭載になることで、従来水冷方式で

あった冷却方式の空冷方式への変更、荷室空間確保のためのスペアタイヤスペース内に収まる小型化設計、および、従来以上の高周波音対策の必要性が求められた。

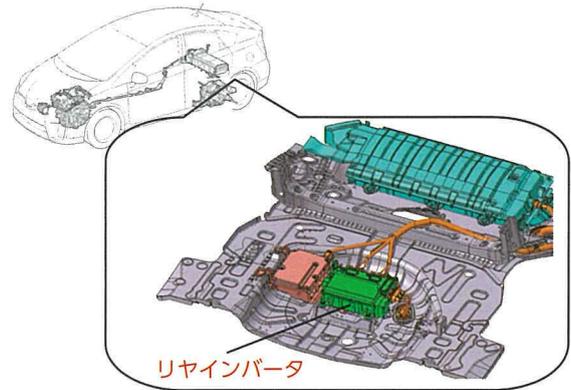


図5 リヤインバータ車両搭載図

5.2 リヤインバータの構成

図6にリヤインバータの構成を示す。

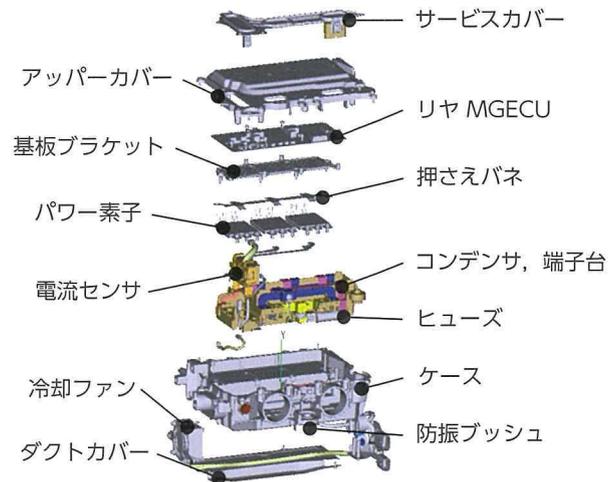


図6 リヤインバータ構成

空冷化への取り組みとして、冷却設計の最適化、小型化への取り組みとして、コンデンサの薄膜化、端子台機能の統合、高周波音対策への取り組みとして、コンデンサ、ケースの振動伝搬対策を行った。以下でその詳細について述べる。

5.3 冷却設計の最適化

冷却設計の最適化として、車両での使われ方を解析し、冷却器のベースプレート厚み、冷却フィン長さの最適化を行った。まず、車両の使われ方解析については、全国の4WD向けのモデルコー

スから走行条件が厳しいコースを選定し、走行時の車両動作データを収集し分析した。図7に一例を示す。

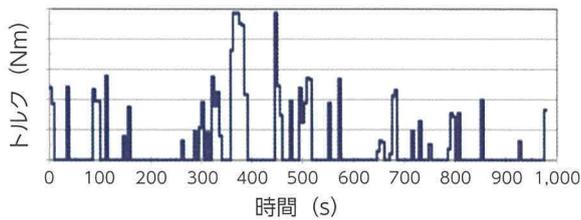


図7 モデルコース走行時のリヤトルク

今回の開発車両はパートタイム4WDのため、走行条件が厳しいコースを走行しても、図7に示す通り連続してリヤトルクを出し続けることはない。このインバータが動作する時間、停止する時間を分析し、ベースプレートでの熱吸収と冷却フィンでの放熱のバランスが取れるように、ベースプレート厚みと放熱フィン長さを最適化することで、冷却器のサイズを連続通電設計比で約1/3に低減できた(図8)。

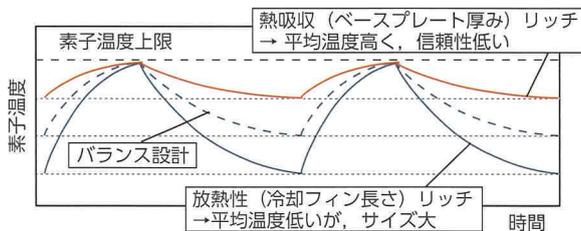


図8 ベースプレート、冷却フィンの最適化事例

5.4 小型化設計

図9にコンデンサの外観を示す。今回開発したコンデンサは、3代目プリウスに使用している薄膜フィルムをさらに薄膜化することで、容量比で8%の小型化を実現した。また、端子台は、コンデンサとの一体化により、3代目プリウス比で20%の小型化を実現した。

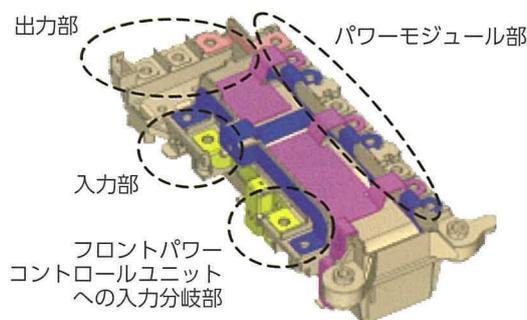


図9 コンデンサ外観

5.5 高周波音対策

車室内にリヤインバータを搭載するにあたり、コンデンサを音源とする高周波音への対策が重要となる。コンデンサの高周波音は、スイッチング時にコンデンサのフィルムが振動し、その振動がコンデンサケース→インバータケース→ボデーと伝搬していくことで発音するため、伝搬経路で減衰させることが有効である。

まずコンデンサケースからインバータケースへの振動伝搬に対しては、コンデンサのインバータとの締結部のカラーにマスを追加し、締結部の剛性を高めることで抑制した。図10に示す通り、締結カラーへのマス追加により、8dBの振動低減効果を得られた。

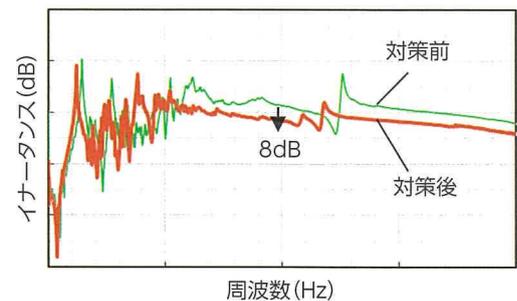


図10 締結部カラーマス効果

またインバータケースからボデーへの振動伝搬に対しては、インバータケースとボデーとの締結部に防振ブッシュ(図11)を採用することで抑制した。図12に示す通り、防振ブッシュの採用により、20dBの振動低減効果を得られた。



図11 防振ブッシュ外観

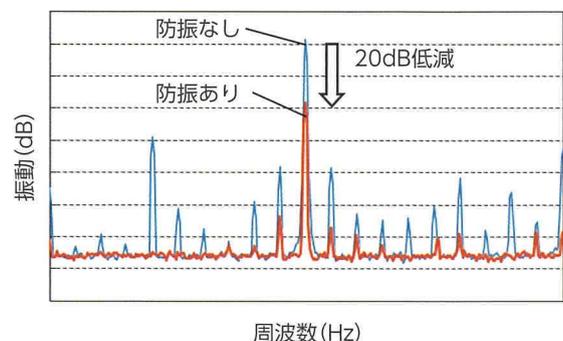


図12 防振ブッシュによる振動低減効果

インバータケースの振動伝搬に対しては、ケースのイナータンス解析を行うことで、必要部位にリブを最適配置することで、振動対策と軽量化を両立させた。

6 4WD 制御

様々な走行条件下における 4WD 性能の最適化を図り、燃費性能だけでなく良好な発進性能と走行性能実現に寄与する小型乗用車専用 4WD 制御を開発した。

車輪速センサ、加速度センサ、ヨーレートセンサ、舵角センサなどの様々なセンサ情報を用いて、走行状態に合わせて前後トルク配分を 100 : 0 ~ 40 : 60 の範囲で緻密に制御する。

また、マルチインフォメーションディスプレイにて 4WD システム作動による前後トルク配分量を表示する。滑り易い路面であっても状況に応じた 4WD システムの作動状態を把握できることで、4WD にて走行している安心感向上に寄与する。

ドライバーのステアリングスイッチ操作により 4WD 作動状態表示のページを選択することで前後トルク配分量の表示を行う。

図 13 に 4WD 作動状態表示画面を示す。各輪に掛かるトルクが大きい場合には表示セグメント数が増加し、小さい場合には減少する。

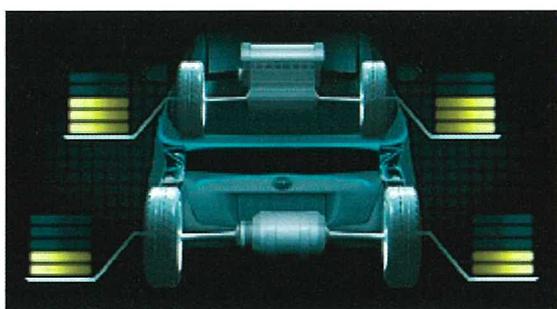


図 13 前後輪トルク配分量表示

7 4WD 性能

小型乗用車専用の 4WD システムとするため、従来 E-Four システム、ガソリン 4WD システムに比べ、4WD の作動領域と出力量を制限した。タイヤスリップの無い状態では、効率の良いフロントモータを極力活用し、低燃費に貢献した。

7.1. 発進性能

4WD 性能が求められる低 μ 路面での登坂発進性能は、図 14 の通り従来 E-Four システムと同等の性能を有するが、機構が異なるため後輪トルクは従来 E-Four システムに比べ小さく、車速により減少する。

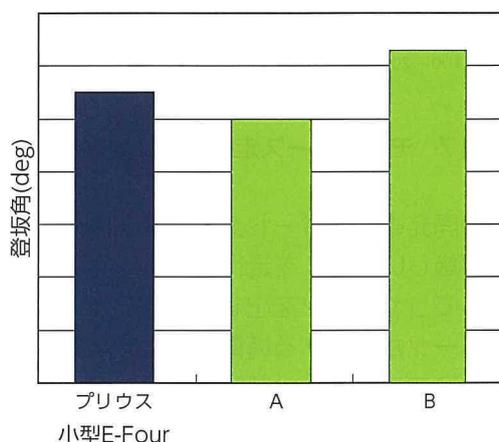


図 14 低 μ 路面での登坂発進性能

7.2. 燃費性能

本システムは昇圧機能や回生機能を持たないが、低フリクション化により、4WD 車としてはトップとなる、JC08 燃費；34km/L を達成した。

■著者



走りを作る ～新型プリウスの走りの性能開発

Fun-to-Drive: Development of Dynamic Performance for the New Prius

松本 聖司*

Seiji Matsumoto

要旨

新型プリウスは、お客様にお届けしたい4つのFunとして、「燃費がいい」「かっこいい」「走りがいい」「社会にいい」をかかげて開発した。

本稿では、その中の1つである「走りがいい」について、TNGA (Toyota New Global Architecture) の走りの考え方、それをベースにお客様が実際に遭遇されるシーンを想定して設定した走りのキーワード、お客様へ提供したい価値、その実現手段などについて解説する。

Abstract

The new Prius was developed with four distinguishing characteristics: (1) impressive fuel efficiency, (2) eye-catching design, (3) fun-to-drive dynamic performance, and (4) social responsibility. This article describes the development of the fun-to-drive dynamic performance of the new Prius through the Toyota New Global Architecture (TNGA), the dynamic performance keywords that were set assuming actual driving scenarios based on the TNGA, the value that this performance provides to the customer, and the means adopted to achieve this performance.

キーワード プリウス, TNGA, 走りの性能, Fun to Drive, 上質感, シーン別評価

1 はじめに

昨今の環境、エネルギー問題への関心の高まりに伴い、様々な付加価値を有するエコカーが普及しつつある。そのような中で新型プリウスの開発においては、世界トップの燃費性能に加え、走りの性能においても新開発のプラットフォームをベースとし、開発手法の変革も加えながらトップ性能を狙った。

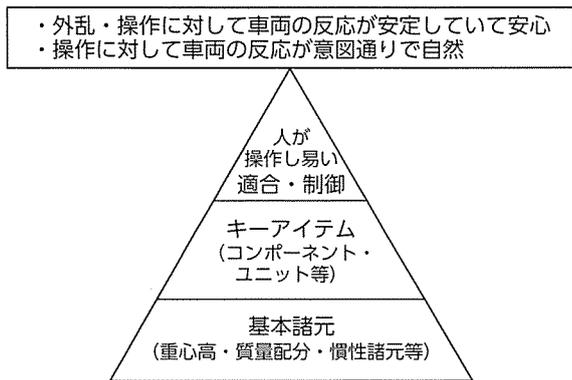


図1 走りのアーキテクチャー概念

2 TNGA (Toyota New Global Architecture) の走りの基本的な考え方

トヨタでは走りの性能に関する概念として、「外乱・操作に対して車両の反応が安定していて安心」、「操作に対して車両の反応が意図通りで自然」をかかげ、その実現のために図1に示すような分類でそれぞれの特性最適化を最大限に行っている。

そこでは「人を中心に考える」をその考え方の骨格に置いており、上述の2つの概念に基づいて開発したクルマの目指すところを「人の意図に素直に反応するクルマ」、「上質感を感じられるクルマ」とする。

「人の意図に素直に反応するクルマ」とは図2に示すように、人の意図的な操作に対して素直な挙動を示し、視界の変化や発生加速度、音や振動として適切なフィードバックを返してくれるクルマのことである。また「上質感を感じられるクルマ」とは、クルマに乗り込み、ドアを閉め、エンジンをスタートさせ、発進、加速、定常走行、減速、停止に至る各シーンにおける「音・振動」に関して、お客様にとって不快に感じられる「雑味」を最小限としたものである。

新型プリウスではこれらの考え方を基本に、走りの性能の開発に取り組んだ。

* 商品実験部

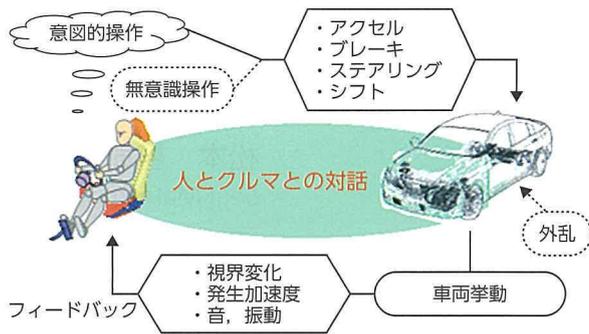


図2 人の意図に素直に応えてくれるクルマ

3 新型プリウスの Fun to Drive

新型プリウスは、前述したようにお客様に提供したいFunのひとつに「走りがいい」をにかけており、その基本は「人の意図に素直に応えてくれる」と「上質感」である。

その基本の上に新型プリウスでは、お客様が遭遇される代表的なシーンを想定して、それぞれのシーンでキーワードを設定して走りの性能を開発した。概略を図3に示す。

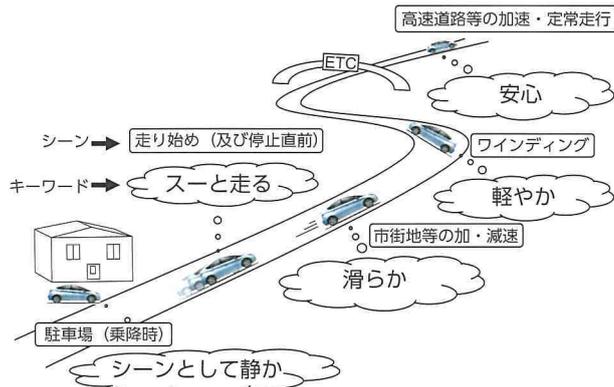


図3 シーンとキーワード

従来の開発が操安性、乗心地、振動、騒音などの単機能にて性能目標を設定し、その目標を達成することに注力する進め方であったのに対し、新型プリウスではそれらに加えて図3に示すようなシーン別評価を行い、実際のシーンにおいてお客様にどのような価値を提供したいかを描いた。

そして新型プリウスでは、単機能ごとにトップ性能を狙うのではなく、シーンごとのトータル性能でトップを狙った。例えば短距離も長距離もこなせる10種競技での優勝を狙うということであり、シーンごとのお客様への提供価値に拘り抜き、性能

をブラッシュアップしていくことでキング・オブ・アスリートを目指した。

以下に各シーンについて詳細に述べる。

3.1 駐車場での上り下り時

キーワードは「シーンとして静か」とした。

お客様に提供する価値は、上質なドア閉まり音、ドアを閉めたときの静粛性、座り心地の良いシートなど「クルマに乗り込んだ際の静粛性と上質感」である。

ドア閉まり音については、音色向上のために制振材の設定やドア剛性向上、シール材の最適化を実施し、上質な音を演出した。

またドアを閉めたときの静粛性を確保するために、まず隔壁感という車室内の静粛性に対応が取れる新しい評価指標を作った上で、遮音性能、吸音性能を面的に向上させ、ラグジュアリーセグメントに匹敵する静粛性を達成した(図4)。

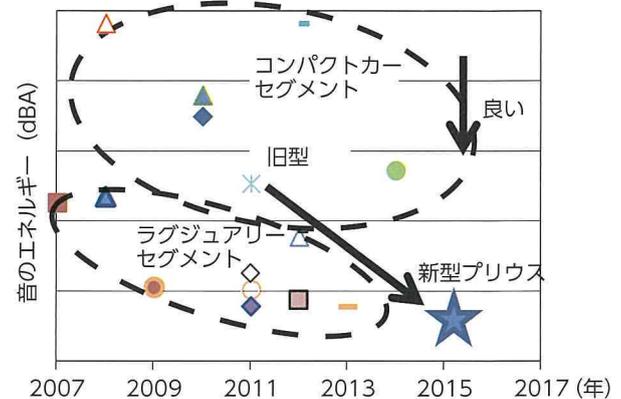


図4 圧倒的な隔壁感

シートの座り心地については、尻周りの圧力分布の適正化により包まれ感の向上を図った(図5)。

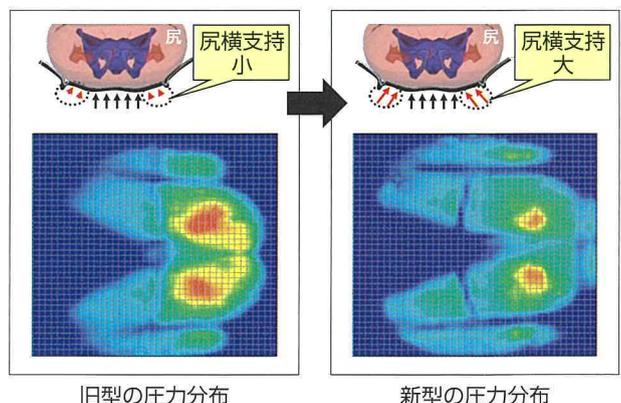


図5 尻の包まれ感の向上

これらにより、ドアを開けて乗り込み、着座してドアを閉めるまでの一連の動きの中で、トップレベルの上質感を実現することができた。

3.2 走り始めおよび停止直前

キーワードは「スーと走る」とした。

お客様に提供する価値は、上質な乗心地、エンジン始動時の静粛性、リニアかつ小さいモーターの音など「走り出しや停止前のスムーズさ」である。

乗心地については、例えばステアリングやシートの支持剛性を高めることにより不快な振動を低減し、質感の向上を図った(図6)。

エンジン始動時の振動については、エンジンマウント配置を適正化し、パワープラント重心の慣性主軸と弾性主軸とのずれを短縮して改善した。

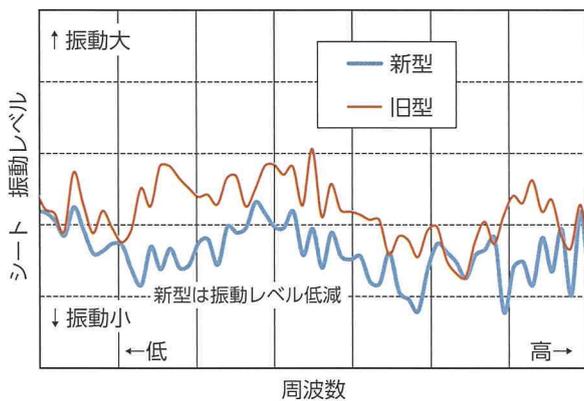


図6 前席シート振動感の改善

また走り出しのモーター音は、防音材の適正配置等により騒音レベルの低下を図った。

3.3 市街地等の加減速

キーワードは「滑らか」とした。

お客様に提供する価値は、EV(電気自動車)・HV(ハイブリッド車)でのアクセルコントロール性および加速感、減速にマッチした回生音、上質な乗心地など「街乗りでの上質で滑らかな走り」である。

アクセルコントロール性と加速感については、まず駆動力特性の適正化により、アクセル操作に対してドライバーが期待するリニアで伸び感のある応答性を実現した(図7)。

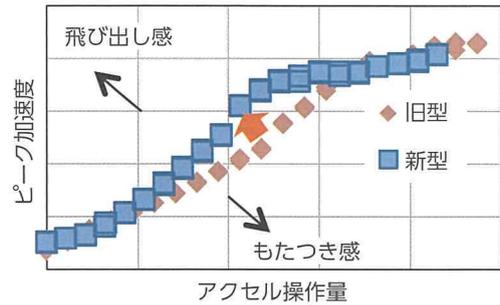


図7 気持ち良い加速感

次にドライバーのアクセル操作に対し、加速度とエンジン音がリニアに対応した自然な加速感となるよう、車速変化とエンジン回転数変化の一体化を図った(図8)。

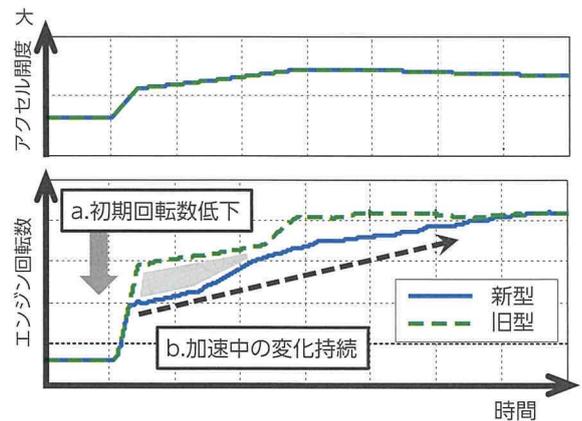


図8 加速度とエンジン音のリニアな対応

3.4 ワインディング

キーワードは「軽やか」とした。

お客様に提供する価値は、ブレーキ・ステアリング・アクセルの3操作系と調和した車両挙動、それに加えた加速サウンドとの調和、加速のリニア感など「安定した自然な走り」である。

その実現に向けては、特にボデー剛性特性の改善に注力した。ねじり剛性の旧型比67%向上、LSW(Laser Screw Welding)による溶接打点のピッチ縮小・増し打ち(図9)、構造用接着剤の採用(図9)によるボデー各部の結合部剛性向上、カウル閉じ断面化によるサスタワー間環状骨格化(図10)等により画期的に改善した。

— 構造用接着剤塗布範囲
— LSWによる溶接打点ピッチ縮小・増し打ち範囲

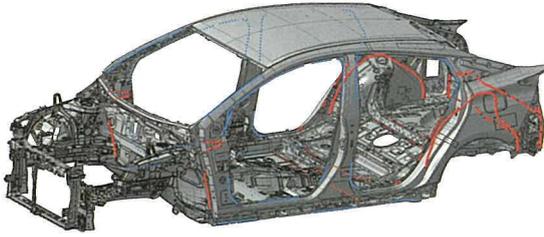


図9 ボデー結合部剛性向上部位

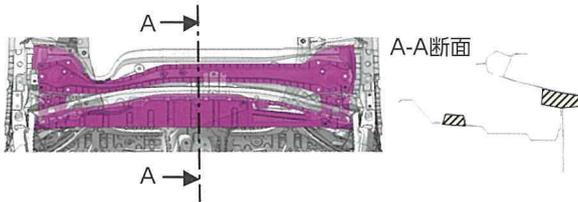


図10 フロントサスタワー廻り環状骨格

3.5 高速道路等の加速・定常走行

キーワードは「安心」とした。

お客様に提供する価値は、少ない姿勢変化、ばね上のどっしり感、疲れず安心感のあるアクセル、小さい風切音・ロードノイズ、加速のリニア感などによる「安心感のある高速走行」である。

特に注力したのは、世界トップレベルの空力性能開発と併行して、外形発生音の低減(図11)と車両側の遮音性能の向上(図12)により風切音を低減するとともに、アップボデー適正形状による剥離流れの抑制と床下フラット化(図13)による整流等で高速走行時の安定性を向上させたことである。

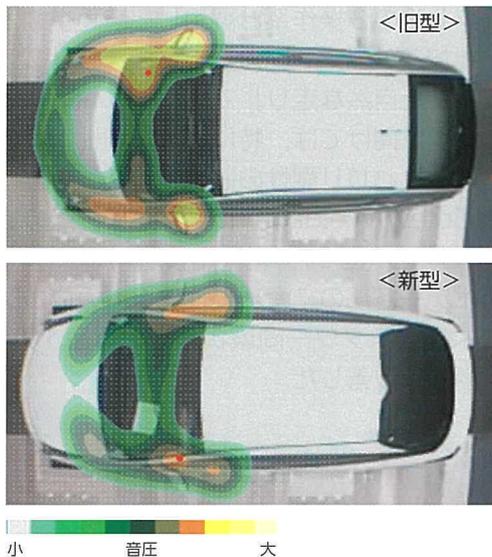


図11 外形発生音分布

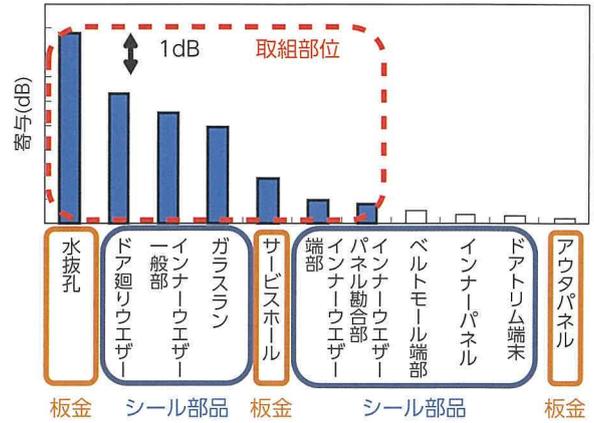


図12 ドア遮音性能向上部位

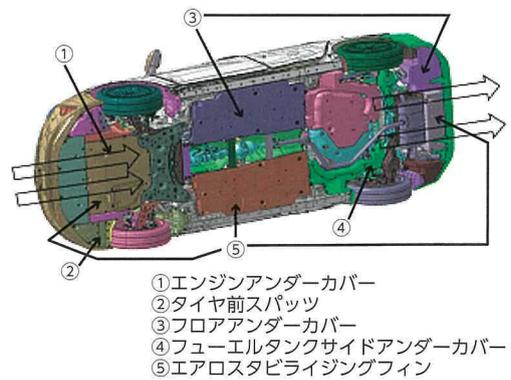


図13 床下空力パーツ

4 おわりに

新型プリウスの走りの性能は、新しいプラットフォーム、TNGAというクルマづくりの構造改革の「さきがけ」として、新しいプリウスらしさを創造すべく開発に取り組んだ。

そのために、走りに対する共通概念を設定し、評価方法や評価指標も見直しながら、開発メンバーが総力をあげて作り上げたものであり、生まれ変わったトヨタの走り、「ずっと運転していたいクルマ」をご体感頂けるものと思う。

■ 著者



松本 聖司

走りを極める ～新型プリウスの車両運動性能開発

Optimized Handling: Development of Vehicle Dynamics Performance for the New Prius

大庭 恵太* 佐藤 博文*
Keita Oba Hirofumi Sato

高山 敏明* 牟田 浩一郎**
Toshiaki Takayama Koichiro Muta

要旨

新型プリウスの車両運動性能開発について紹介する。本モデルは新プラットフォームを採用した。TNGA (Toyota New Global Architecture) に基づき、基本性能向上を目的とし、シャシーやボデー、パワートレインなど多くの構成部品変更を行った。走りのアーキテクチャーに基づき、運動性能向上の観点から、基本諸元である重心高低減や質量配分の適正化、高性能シャシー、軽量高剛性ボデーや新世代ハイブリッドシステムの採用など様々な改良を行った。ドライバにとって扱いやすく、安心で自然なドライビルの演出を重点的に取り組んだ。

Abstract

This article describes the vehicle dynamics development of the new Prius. Built on a new platform based on the Toyota New Global Architecture (TNGA), the chassis, body, and powertrain of the new Prius all feature a large number of parts that were redesigned to enhance basic dynamic performance. This development adopted the approach of enhancing dynamic performance through the basic vehicle architecture. Various improvements were incorporated into the basic specifications, including a lower center of gravity, optimized weight distribution, a high-performance chassis, a lightweight and highly rigid body frame, and a next-generation hybrid system. The development focused on achieving an easy-to-drive, stable, and natural driving feeling.

キーワード 操縦安定性, 乗心地, ハイブリッド

1 はじめに

昨今の市場はHV（ハイブリッド車）などの環境車両が増えつつあるが、同時に運転の楽しさや快適性が求められている。新型では、走行性能や快適性を大幅に向上させ、お客様に十分満足いただけるクルマ作りに取り組んだ。本稿では操縦安定性、乗心地とドライバビリティの狙いや達成手段、達成性能について報告する。

2 開発の狙いとコンセプト

新型の開発キーワードとして、エコカーの常識を覆す運転の楽しさを掲げ、操縦安定性、乗心地とドライバビリティについて旧型比較で大幅な性能向上を行った。

ドライバにとって“安心で自然なフィール”になるように、慣性諸元の最適化（パッケージングや質量配置変更）、多くのシステム・コンポーネント特性の最適化を実施した。

図1に性能開発イメージを示す。旧型比較で、運動性能や快適性能など全般に向上した。

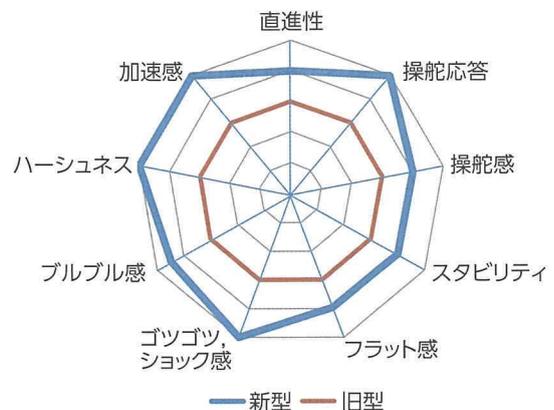


図1 性能開発イメージ

* 性能実験部

** HV システム制御開発部

3 達成手段

3.1 走りのアーキテクチャー

性能フィロソフィーを実現するために必要な要件として、重心高や質量配分などの基本諸元、コンポーネントやユニットなどのキーアイテム、人が操作し易い適合・制御に分類し（図2）、それぞれの特性最適化を最大限に行った。



図2 走りのアーキテクチャー概念

基本諸元については、運動性能の素性を良くするため、重心高低減や前後質量配分の適正化、左右輪重差の低減を行った。重心高低減策として、パワートレーンユニットやバッテリー配置及び乗員配置の見直しを行い、トータルで約20mmの低減が可能となった（図3）。

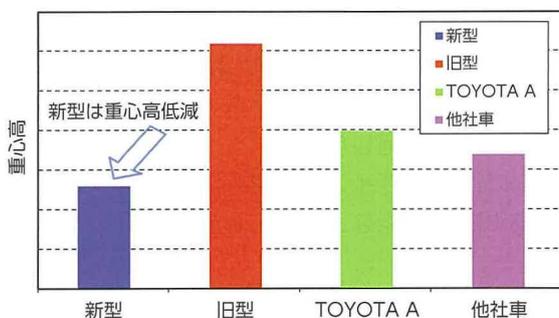


図3 重心高比較

キーアイテムとしては、ボデー特性やシャシー特性、ステアリング特性や駆動系特性など細部に至る部分まで安心感や質感向上にこだわった。

また、人にとって運転しやすく、長距離でも疲れない、最適なドライビングポジションを実現するため、ヒップポイントやシートバック角度の適正化を実施し、それに合わせてステアリング配置や傾斜角を決めた。

制御系特性について、ステアリングやアクセル及びブレーキなど人が操作し易いように、市場での使われ方を十分考慮しながら適合（設計）を行った。

3.2 シャシー

フロントサスペンションはマクファーソンストラット式を採用した（図4）。キャスト角増加や横力ステア増加による安定性向上、前後力コンプライアンス増加、ストラットの摩擦低減やブッシュ摺動部のフッ素コーティング追加による乗心地向上を行った。

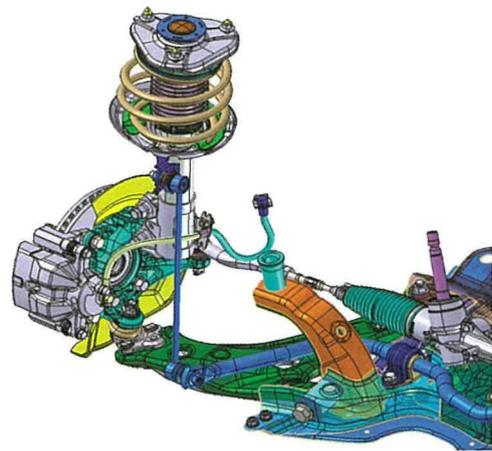


図4 フロントサスペンション

リヤサスペンションはトレーリングアーム式ダブルウィッシュボーンを採用した（図5）。トレーリングブッシュボリュームアップや取付け点上方配置化によるタイヤ軌跡の最適化、前後力コンプライアンス増加による乗心地向上、横力ステア増加による安定性向上を図った。旧型のトーションビーム式に比べ、操縦安定性と乗心地性能を高次元で両立させることが出来た。

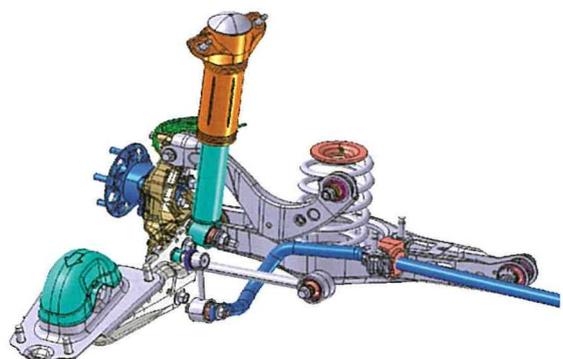


図5 リヤサスペンション

3.3 ボデー

ボデー構造については、プラットフォームを一新することで、サスペンション取付け部剛性やボデーねじり剛性など大幅に向上した。

剛性向上のための主要変更部位としては、カウル閉じ断面化によるサスタワー廻り環状骨格 (図 6)、リヤピラー環状骨格 (図 7)、バックドア開口部コーナー形状の最適化 (図 8) が挙げられる。

図 6 に示すように、フロントサスタワー部の剛性増加により、操舵応答性や操舵感が向上した。

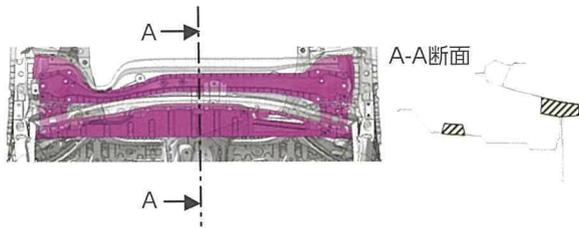


図 6 フロントサスタワー廻り環状骨格

図 7 に示すように、リヤピラー環状骨格によりボデーねじり剛性が増加し、振動伝達感が低減した。

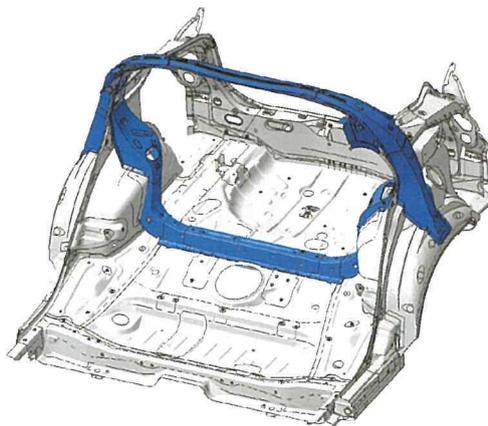


図 7 リヤピラー環状骨格

図 8 に示すように、バックドア開口部の形状を最適化することで、結合剛性を向上した。このように各部の部品形状を適正にすることで、軽量かつ高剛性ボデー構造を実現した。

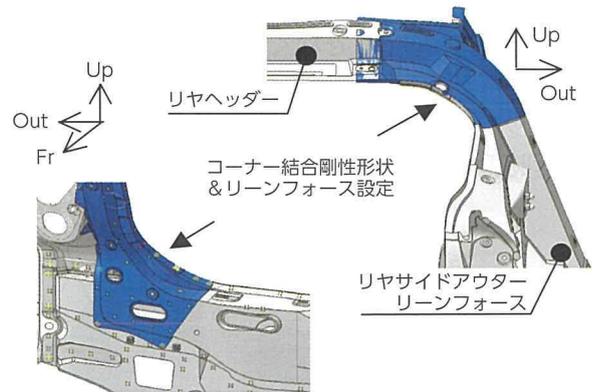


図 8 バックドア開口部 コーナー形状

ボデーねじり剛性は、旧型比で 67% 向上した (図 9)。

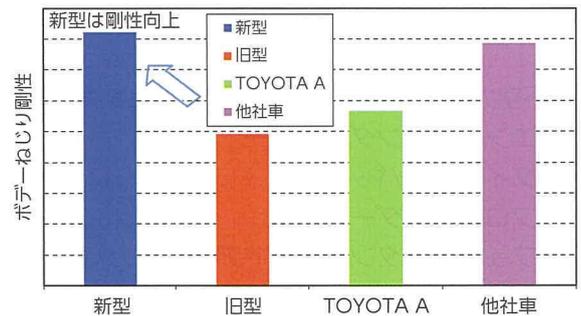


図 9 ボデーねじり剛性 比較

更にボデー各部の結合剛性を向上させるため、溶接打点増し打ち、LSW (Laser Screw Welding) や構造用接着剤を採用した (図 10)。これらの変更により、操舵応答性や乗心地の質感が向上した。またインパネリールンフォースやステアリングコラム取付け剛性も向上させることで、操舵感向上やステアリング振動低減を行った。

- 構造用接着剤塗布範囲
- LSWによる溶接打点ピッチ縮小・増し打ち範囲

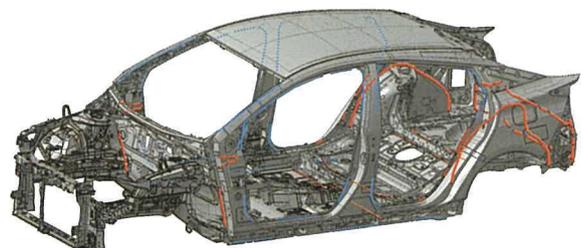


図 10 ボデー結合剛性強化部位

3.4 空力性能

空気抵抗低減だけでなく運動性能向上のため、アップーボデー適正形状による剥離流れの抑制、床下フラット化による整流向上（図 11）により、高速走行時の安定性が向上した。

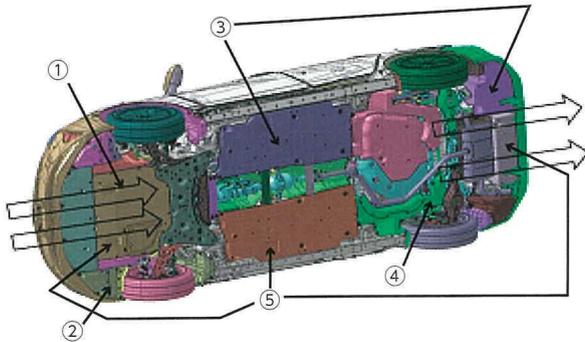


図 11 床下空力パーツ

床下空力パーツは①～④の形状最適化を実施した。

- ① エンジンアンダーカバー
- ② タイヤ前スパッツ
- ③ フロアアンダーカバー
- ④ フューエルタンクサイドアンダーカバー
- ⑤ エアロスタビライジングフィン

更に各パーツに⑤のアイテムを追加することで整流効果を高めた。

4. 達成性能

4.1 操縦安定性

新型は重心高低減、スタビライザー効率配置やマウントブッシュ、ブラケット形状の最適化により軽量で高いロール剛性を確保し、車体ロール角を低減した。

また、旋回姿勢向上を狙い、前後サスペンションジオメトリー、バウンドストッパー特性やクリアランスの適正化を実施し、またロール角変化に対するピッチ角変化の連続性を確保し、よりドライバの感性に合ったロールとピッチフィールを実現した（図 12）。

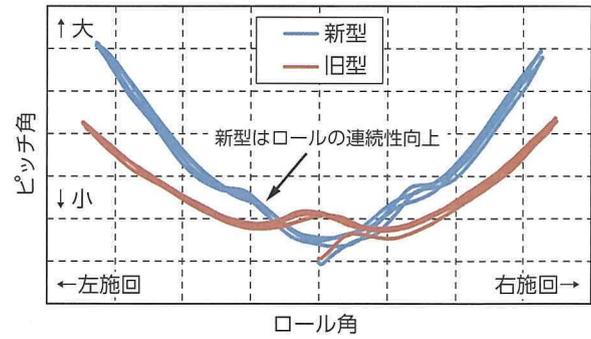


図 12 ロールとピッチ姿勢比較

制動時姿勢の向上を狙い、前後サスペンションジオメトリーを最適化し、制動力発生に対して重心高を下げることで、車両姿勢を安定化した（図 13）。

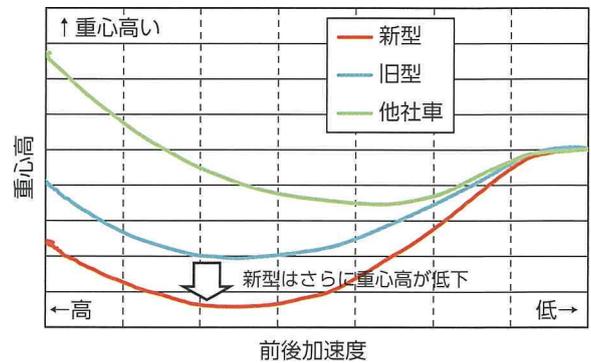


図 13 制動時重心位置変化

また軽快感向上のため、ステアリングのギャビをクイック化し、ヨーゲインを増加させると共に手数を減らしてステアリングの操作性も向上した（図 14）。

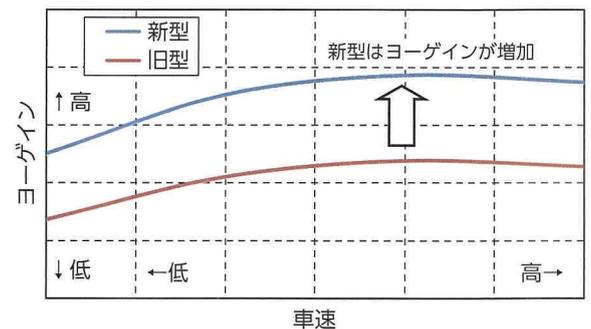


図 14 車速とヨーゲイン比較

操舵感向上のため、EPS 制御の改良を行い、車両応答に対する操舵力特性の適正化、操舵速度に対する操舵力のロバスト性を向上させた。

さらにステアリングコラム剛性やインパネリーノフォース剛性を向上することで、操舵時の車両応答向上、路面インフォメーション向上と共に、不快な振動も低減し、安心感と運転する楽しさのあるステアリングフィールを実現した。

4.2 乗心地

乗心地質感の大幅向上を狙い、ボデーねじり剛性などの骨格系剛性や LSW 及び構造接着剤による結合剛性向上による振動伝達感度を低減した。リヤサスペンションをトーションビーム式からトレーリングアーム式ダブルウィッシュボーンへ変更し、アブゾバ前傾化、揺動時摩擦力の低減、さらに前後コンプライアンス増加やトレーリングブッシュ上方配置化によりタイヤ軌跡を最適化することで、路面入力を低減した。これらの組み合わせにより、シートから乗員に伝わる不快な振動やハーシュネスショックを低減した (図 15, 16)

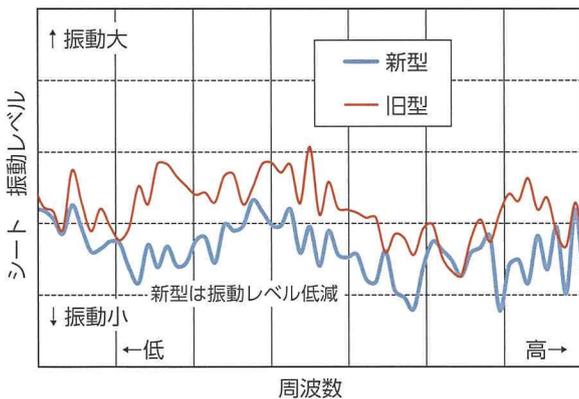


図 15 前席シート振動比較

図 16 は、目地突起後輪入力時の前席フロア前後加速度を示す。新型は旧型比較で 57% 低減した。

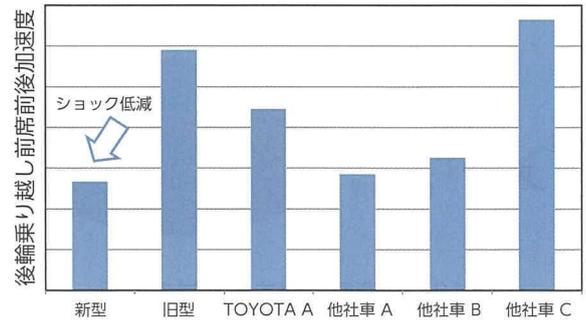


図 16 ハーシュネスショック比較

5. 加速感を設計する

5.1 考え方

図 17 に示すように、快適で、心地よい走りを実現する為には、ドライバの操作に対し、意図したとおり車両が応答し、余分な動きをせず、いつでも安全に車両を操ることが重要である。従って、ドライバが直接、触れている操作系や車両の応答がドライバの感覚に合った情報としてフィードバックされる必要がある。

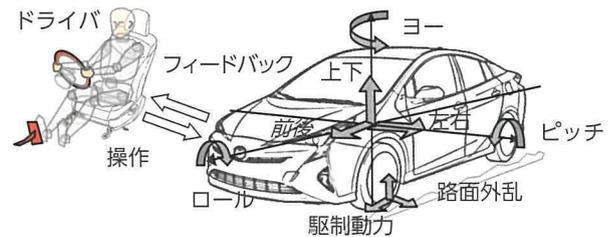


図 17 快適で心地よい走り

加減速時には、ドライバのアクセル操作に対し、応答遅れなく、滑らかに車両が加減速できることが期待される。ドライバは操作系としてペダル操作時の反力を触覚情報として感じ、車両応答としては、加速度などの体性感覚情報以外にも、エンジン音などの聴覚情報、車速や姿勢変化などの視覚情報を取得し、総合的に、加速感の良し悪しを判断している (図 18)。新型では、心地よい加速感を実現するため、加速度と合わせて、エンジン回転数変化及び車両のピッチ挙動を考慮した新たな加速感設計技術を織込んだ。

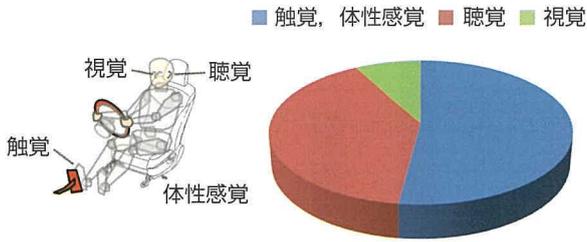


図 18 加速感に対する感覚の内訳

5.2 加速度（体性感覚）の設計

アクセル操作に対して、ドライバが期待する加速度を設計し、それを実現する駆動力を実現系（パワートレーン制御）に要求する駆動力設計モデルを構築した（図 19）。これはFCV“MIRAI”にも適用した技術であり、加速度に対する人間の知覚特性調査結果を基に定式化したモデルにより、ドライバが期待する加速度が設計できる。

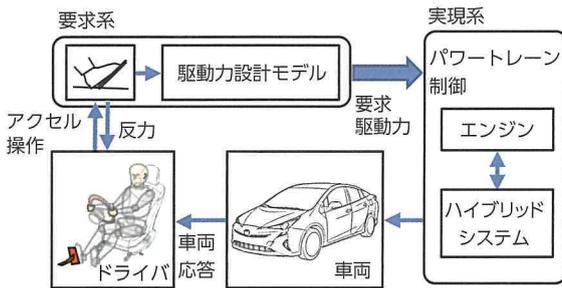


図 19 駆動力設計モデルの位置づけ

図 20 にアクセル操作量①に対する加速度応答を示す。ピーク加速度④及びそれ以降の応答⑤を定常特性、ピーク加速度④までの応答②、③を過渡特性と定義した。

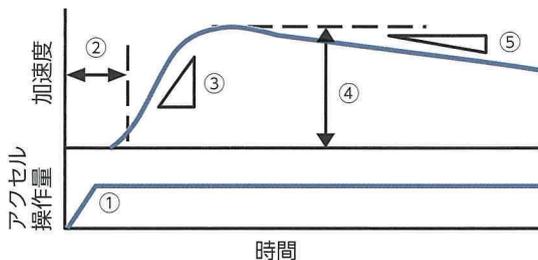


図 20 加速度応答（定常、過渡特性）

5.2.1 定常特性

リニア感向上のために、アクセル操作量に対するピーク加速度の大きさを、また、伸び感向上のために、車速増加に対する加速度の変化をそれぞれ定式化し、アクセル操作量と車速からドライバが期待する加速度を設計した（図 21）。

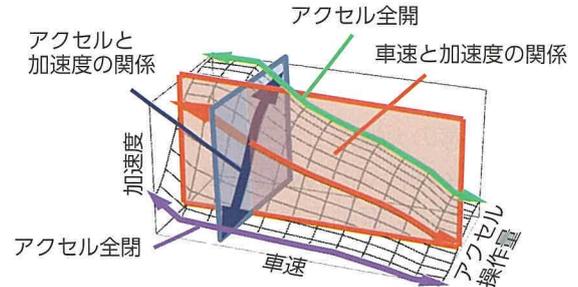


図 21 加速度の設計（定常特性）

5.2.2 過渡特性

ピーク加速度までの過渡特性としては、リニア感や応答性向上のために、ドライバが期待する遅れ時間②およびジャーク③を定式化し、車速とピーク加速度からそれぞれ設計した。

5.2.3 実際の加速度

発進加速時のアクセル操作量とピーク加速度の関係を図 22 に示す。新型は、ドライバの感覚としてよりリニアな特性を実現した。

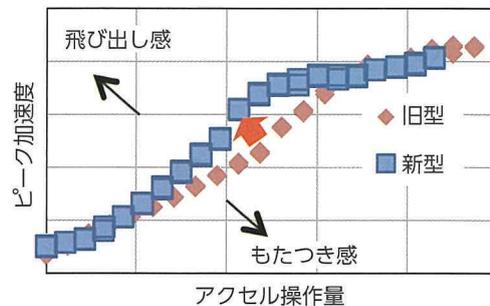


図 22 アクセル操作量とピーク加速度の関係

同一アクセル操作量で、発進加速した時の加速度応答を図 23 に示す。新型は、定常、過渡特性において、ドライバが期待する特性を実現し、リニア感、伸び感を向上した。

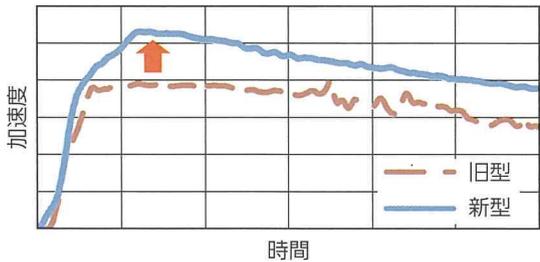


図 23 発進加速時の加速度応答

5.3 パワーモード時の加速度

パワーモードを選択すると、より少ないアクセル操作で、加速することができ、軽快な走りを実現している (図 24)。

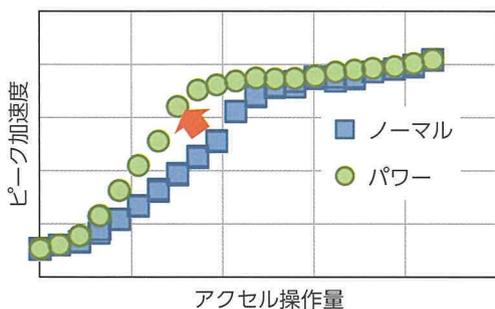


図 24 パワーモードの加速度特性

さらに、走行シーンに応じて、アクセル踏込時の加速度応答性及びアクセル全閉時の減速度を可変とする制御の新たな導入により、ワインディングなどで、よりスポーティな走りができる。図 25、26 に新制御の効果を示す。

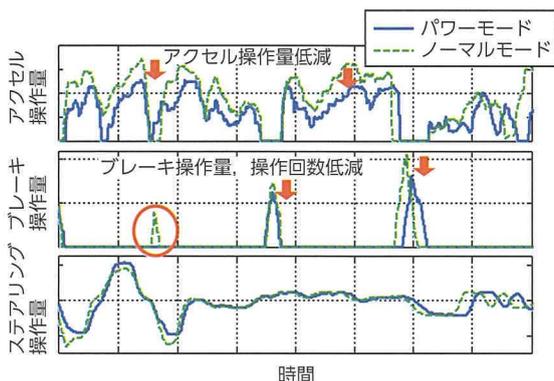


図 25 ドライバ操作 (パワーモードとノーマルモードの比較)

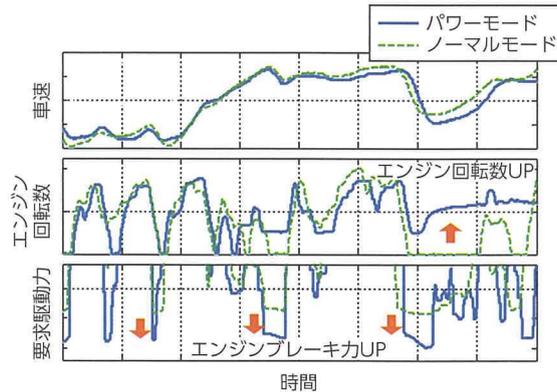


図 26 要求駆動力と車両応答 (パワーモードとノーマルモードの比較)

5.4 エンジン回転数 (聴覚) の設計

ドライバーの期待と異なるエンジン回転数変化であるラバーバンドフィールを改善するため、図 27 に示すように電池出力を活用することで、エンジン回転数の上昇を抑え、車速に対するリニアな特性を実現し、アクセル操作に対するスムーズな加速度と両立した。

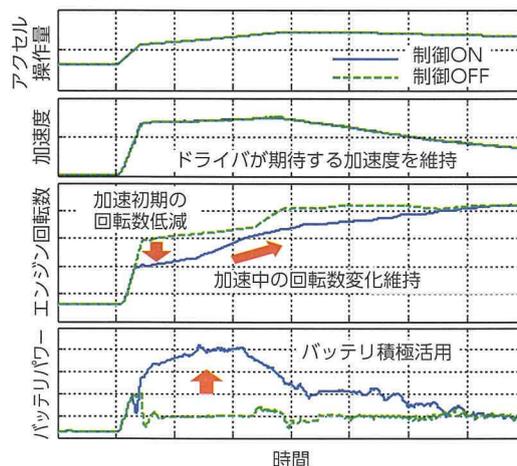


図 27 エンジン回転数制御の効果 (車速 100km/h からの加速)

5.5 車両姿勢 (視覚) の設計

既にHVに採用している路面外乱により発生するピッチ挙動を駆動力で低減するばね上制振制御に加え、新型では、図 28 に示すように、アクセル操作時に発生する余分なピッチ挙動を低減する新たな制御を織込んだ。

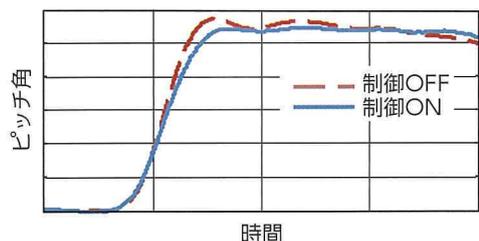


図 28 加速時のピッチ挙動変化

6 おわりに

新型は新プラットフォーム、新HVシステムの頭出しモデルとして、車両企画の初期段階からいいクルマづくりに向けて基本諸元の最適化やドライバーの知覚特性等を徹底的にこだわり、高性能シャシーや軽量高剛性ボデーの効果を含めて、運転しやすく、快適で質感の高いクルマをつくることが出来た。

今後も市場のフィードバックをもとにプリウスの高性能化を徹底的に追求して行きたい。

■著者



大庭 恵太



佐藤 博文



高山 敏明



牟田 浩一郎

音を奏でる ～新型プリウスの振動騒音性能開発

The Sound of Silence: Development of Noise and Vibration Performance for the New Prius

福永 恒太郎*	鈴木 恭信*	今泉 親等*	若原 正明*
Kotaro Fukunaga	Yasunobu Suzuki	Chikara Imaizumi	Masaaki Wakahara
	山下 和孝*	宮崎 大三*	牟田 浩一郎**
	Kazutaka Yamashita	Daizo Miyazaki	Koichiro Muta

要旨

新型プリウスの振動騒音 (NV : Noise and Vibration) 性能開発について紹介する。ハイブリッド車 (HV) において静粛性は、お客様が期待される性能の一つである。本稿では、お客様が使用されるシーンにて実現したい価値に基づく目標設定を始め、具体的性能開発としてボデー遮音性能を大きく向上させることにより実現した隔壁感、HV の優位性であるエンジン・モーター制御を活用した気持ちの良い加速感、HV 特有コンポーネントによる電磁気騒音低減、新ドア構造採用による高速定常走行騒音の改善事例について紹介する。

Abstract

This article describes the development of noise and vibration (NV) performance for the new Prius. Quiet performance is one of the key expectations of customers for hybrid vehicles (HVs). First, NV target values were established in accordance with the usage scenarios of the vehicle. Specific measures were then adopted to greatly improve body transmission loss, isolating the users from NV. One of the merits of an HV is the excellent acceleration feeling using a combination of engine and motor control. This article also describes how the development reduced electric and magnetic noise from components particular to HVs, and the improvement of constant high speed noise performance through the adoption of a new door structure.

キーワード プリウス, 振動, 騒音, 隔壁感, 加速感, 軽量化, 高速定常走行騒音, 風切音

1 はじめに

昨今のエネルギー・環境問題に対し自動車業界では、燃料電池車を始めとして電気自動車、ハイブリッド車 (HV) などのいわゆるエコカー開発に取り組んでいる。特に HV は競合他社を含め積極的に開発が行われ、お客様の選択肢は近年増加傾向である。ただ HV というだけではお客様へ訴求価値としては小さくなっているのが現実である。

本稿では、お客様が使用されるシーンを具体的に想定し訴求したい価値に基づく目標設定を始め、具体的性能開発としてボデー遮音性能を大きく向上させることにより実現した隔壁感、HV の優位性であるエンジン・モーター制御を活用した気持ちの良い加速感、HV 特有コンポーネントによる電磁気騒音低減、新ドア構造採用による高速定常走行騒音改善事例について紹介する。

2 新型プリウス 振動騒音性能開発の狙い

従来の性能開発は、振動騒音 (NV : Noise and Vibration) 性能、操縦安定性、乗り心地、ドライバビリティ等各分野でベンチマークや時代トレンドを基にした、競合性のある開発目標を設定し開発してきた。新型プリウスにおいては、従来手法による競合性ある確実な基本性能開発に加え、お客様の使用されるシーンを具体的に想定し必要な要件を企画する手法に取り組んだ。

本稿では、このシーンに基づく NV 性能開発として、シーンとして静か、滑らか、安心の 3 シーンを取り上げ、具体的に紹介する。

* 性能実験部

** HV システム制御開発部

3 隔壁感開発（シーンとして静か）

お客様がクルマのドアを開け、車内へ乗り込み、ドアを閉めた瞬間に感じる“シーンとして静か”な価値。この価値を具現化するために、ベンチマークを通じ、技術指標を検討した。

一般的外界の騒音を模擬するために、残響室にて一定音圧とし、車内音を計測した。複数人の官能評価と定量値の対応を取ると、オーバーオール音圧レベルよりある特定周波数の音のエネルギーの方が官能との対応が取れることが分かり、車両発表年と音圧レベルで整理した（図1）。

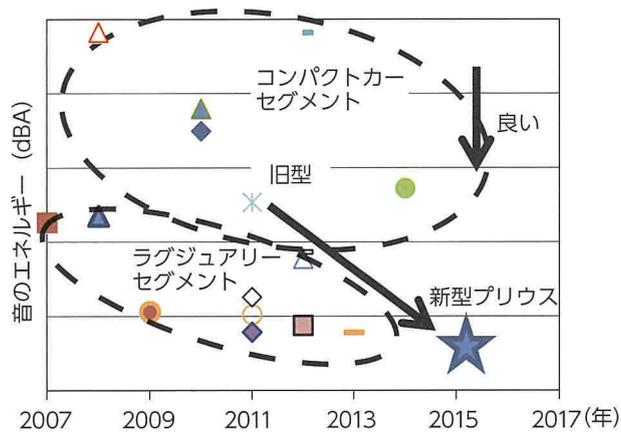


図1 隔壁感のベンチマーク結果と目標設定

お客様に価値を体感して頂くために、目標はラグジュアリーセグメントに匹敵するよう設定した。この隔壁感を実現するために対策織り込みによる質量増加が必要となるが、エコカーであるプリウスにとって軽量化は必須である。軽量で高い隔壁感を実現するために、車内に音を入れない遮音に拘り、室内吸音部品を最適化する手法で改善検討を実施した。

新型プリウスは新開発プラットフォームとなりダッシュインナーサイレンサ、フロアサイレンサ等の部品を含め新設した。ダッシュサイレンサは部品性能を最大限引き出すため、サイレンサの車両板金に対するサイレンサの設定率（以下：サイレンサカバー率）、板厚の確保、貫通部の遮音性能を確保することで高い透過損失、吸音率を確保した（図2）。

旧型のフロアカーペットは表皮とサイレンサが一体に対し、新型プリウスでは、表皮とサイレンサを別体とすることで、フロアパネルへのサイレンサカバー率を向上した。平均板厚も向上させサイレンサの遮音、吸音性能を最大化させることができた（図3）。

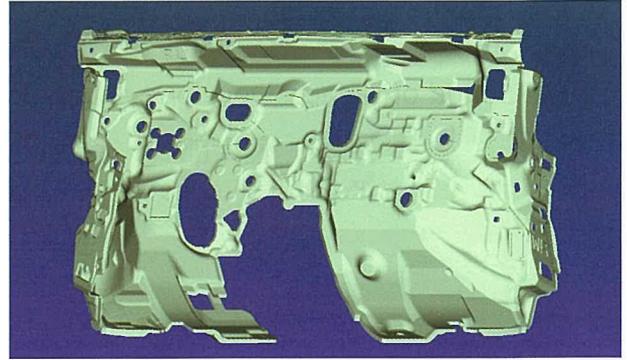


図2 新開発のダッシュインナーサイレンサ

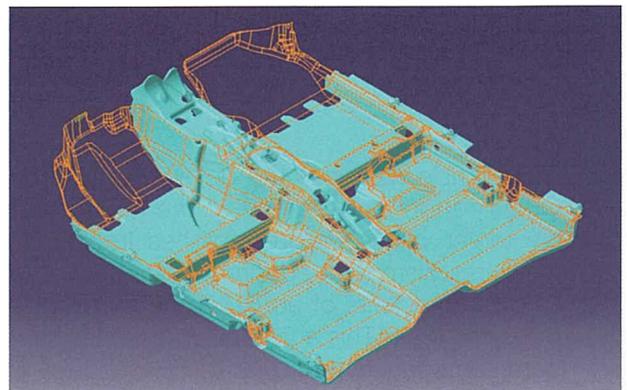


図3 新開発のフロアサイレンサ

加えてボデーシェル自体の遮音対策として、板金隙に設定するボデーシーラも旧型比で+20%延長した（図4）。ボデーの穴部処理も丁寧に進め、技術と生産が一体となりボデーの透過損失向上を積み重ねることで、軽量で高い遮音性を確保することができ高い隔壁感を実現できた。

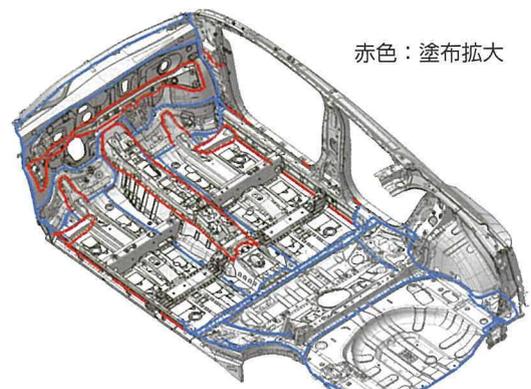


図4 ボデーシーラの設定部位と追加部位

4 気持ちの良い加速感（滑らか）

ドライバーのアクセル操作に対し加速度とエンジン音がリアに対応した自然な加速感を実現するために以下の改善検討を実施した。

- ・車速変化とエンジン回転数変化の一体感
- ・エンジン音の低減
- ・電磁系騒音の低減

4.1 車速変化とエンジン回転数変化の一体感

THS（トヨタ・ハイブリッド・システム）は動力分割機構と発電機のMG1（モータジェネレータ1）を用いることで走行条件に応じて無段階にエンジン回転数を最適制御できる電気式CVT機構である（図5）。

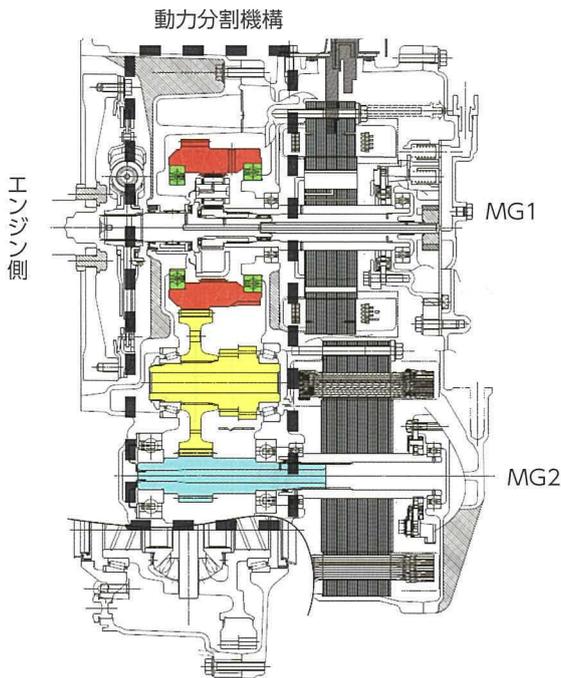


図5 トランスアクスル断面図

従来はドライバーのアクセル操作と車速から決まる要求出力に対しエンジン効率が最良になるエンジン回転数で運転していた。そのため旧型ではドライバーのアクセル踏みこみ量が大きくなると大きなエンジン回転数変化をし、車速変化に対してエンジン回転数変化が一致しないことによる違和感を感じる時があった。特に旧型ではハイウェイでの合流や追い越し加速でエンジン回転数が急増し、その後変化が無いことによる違和感があった。新型では気持ちの良い加速感を目指してドライバーのアクセル操作に対し車速変化とエンジン回転数変化の一体感を実現

するため、電池を積極的に活用する制御を追加しエンジン動作の見直しを実施した。

その結果、下記（a）、（b）を適用することで、気持ちの良い加速感が実現できた（図6）。

- （a）加速初期のエンジン回転数低下
- （b）加速中のエンジン回転数変化持続

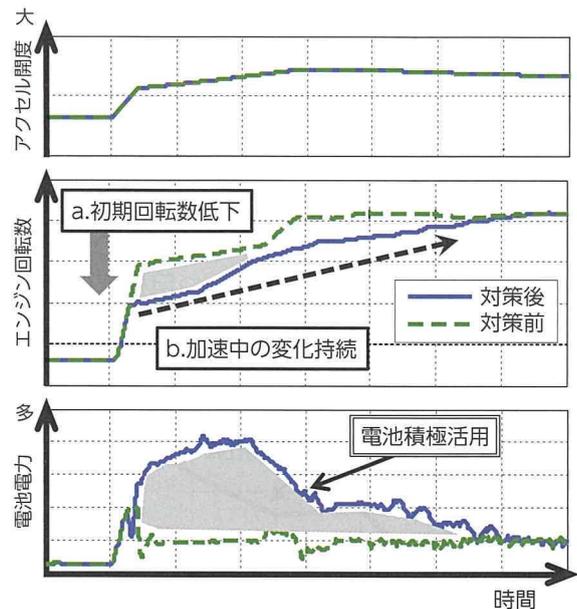


図6 電池積極活用によるイメージ

4.2 エンジン音の低減

エンジン回転数は上記技術で改善したが、加速時のエンジン音が“滑らか”と感じるには音圧レベルが高いという課題があった。加速時エンジン音の主成分を確認すると250Hz帯、315Hz帯であることが分かり、この周波数帯に着目し“滑らか”が官能で分かる低減目標を設定した。

エンジン音の寄与解析結果より、ダッシュパネル付近の発音寄与が高いことが分かり、ダッシュインナサイレンサ改善を検討した。従来技術ではサイレンサの中間層に遮音層（例：塩ビシート）を追加等の手段が例として挙がるが、エコカーであるプリウスにとって軽量化との両立は必須である。今回、改善する周波数を絞り込み、遮音層追加比で軽量化となるダッシュインナーを検討した。ダッシュサイレンサ表層で着目する周波数にて意図的に逆位相の振動を発生させ、音をキャンセルさせることを狙い検討した。手段として、中間層へ穴あき遮音層を設定することにより、遮音層有無のエリアを作ることによって実現した（図7）。

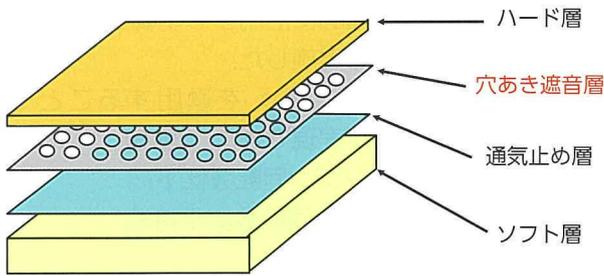


図7 新開発ダッシュインナー構成図

ダッシュインナーのソフト層をバネと見立てると、遮音層部と遮音層無部で共振周波数が変化することを確認でき、穴径を適合することで低減できる周波数をコントロールし、狙いの周波数の音圧を遮音層追加比で約20%軽量化しつつ目標達成することができた(図8)。

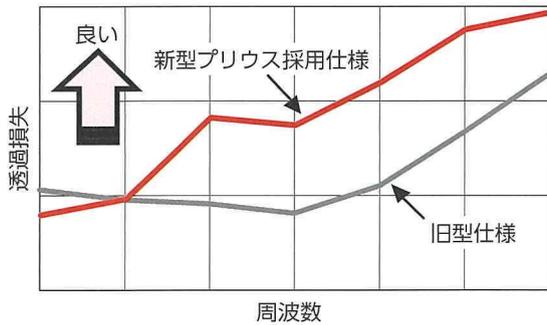


図8 新開発ダッシュインナーの透過損失

4.3 電磁系騒音の低減

滑らかさを実現するためには、HV特有コンポーネントの電磁系騒音の低減も必須となる。THSでは電池電圧からシステム電圧変換のための昇圧コンバータ、電池の直流からモータ作動の交流変換のためのインバータをパワーコントロールユニット(PCU)に内蔵している。これらが作動するときに実施するスイッチングに伴い高い周波数の電磁系騒音がPCUより発生し振動や放射音が車体に伝わり車内音となる。高い周波数の音は不快に感じる人が多いことから車内音低減のためにPCU配置の大幅な見直しをした。

旧型ではPCUがボデーに直接搭載されているため振動伝達による車内音低減のため車両に多くの対策が必要であった。新型ではPCUをトランスアクスル上に直接搭載しトランスアクスルのマダンパー効果とエンジンマウントの防振効果により、振動伝達寄与による車内音を大幅に低減することができた(図9)。

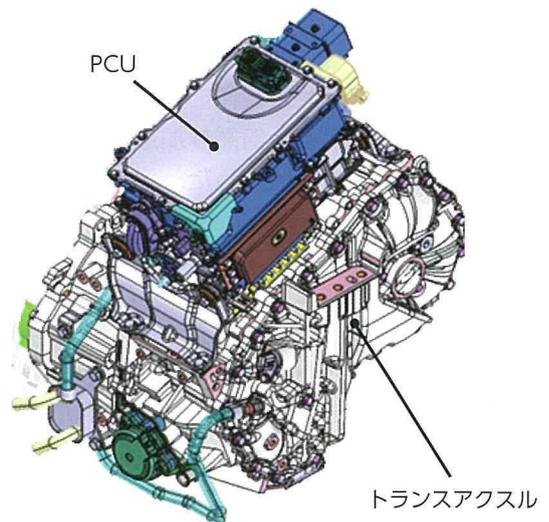


図9 PCUとトランスアクスル

また、強制力低減と聴感特性を利用するためランダムPWM(Pulse Width Modulation)制御を採用した。制御周波数を分散させることで特定周波数成分を出さないようにして強制力を低減する制御方法である。周波数をランダムに変化させることで人には雑音に近い聞こえ方をするため認識しにくいという効果も狙い開発を行った(図10)。

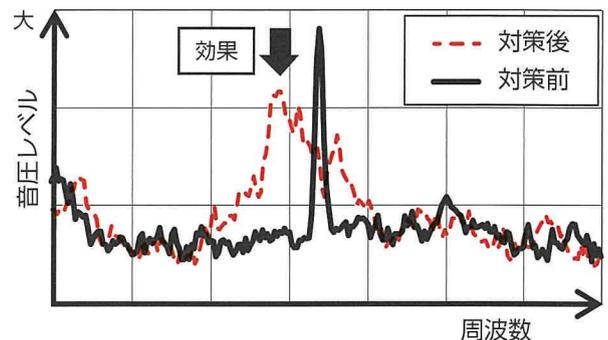


図10 ランダムPWM制御の効果

5 高速定常走行騒音(安心)

高速定常走行時に車室内に透過してくる音は、風切音、タイヤ音、エンジン音である。その透過音において最も寄与が大きい音は風切音であり、車室内静粛性を向上するには風切音低減が必要である。

風切音は高速定常走行時に車両外部で発生した気流騒音(外形発生音)がウインドシールドガラス、Aピラー、ルーフ、ドアなどの部位から車室内に透過した音であり、その大きさは外形発生音と車両各部位の遮音性能により決まる(図11)。

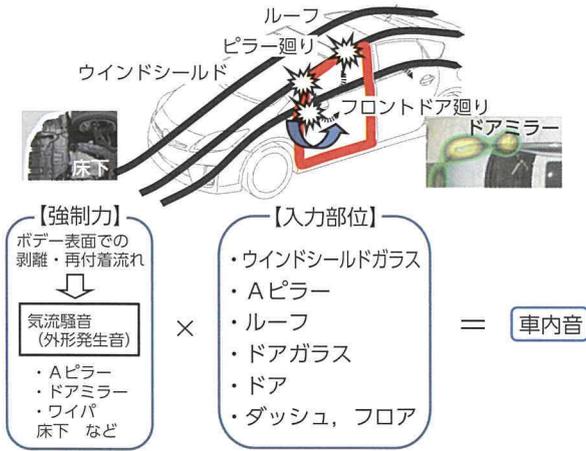


図 11 風切音発生メカニズム

つまり、風切音を低減するには、外形発生音を小さくするか車両側の遮音性能を向上させれば良い。そこで、遮音性能を向上するための構造、諸元検討に取り組むため、車内音に対する入力部位毎の寄与解析を旧型を使い低騒音風洞で行った。

解析の結果、図 12 に示す様に最も寄与が大きい部位はドアガラスを含めたドア全体であり、ウエザーストリップなども含めた遮音性能向上が必要であることが判った。この結果はテストコース走行時の官能評価結果とも一致している。

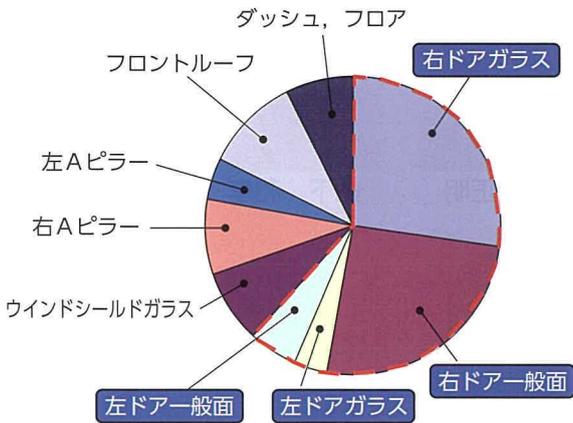


図 12 風切音の発生部位寄与

次に現状のドア遮音性能の立ち位置を明確にするため、旧型のドアと競合車ドアの透過損失を測定・比較した。旧型のドア透過損失は競合車に対して大幅に劣っており、競合車を凌駕できる高速定常走行音を実現するには世界トップのドア透過損失目標の設定と目標を達成できる構造の開発が必要であると考えた。目標を達成するには透過損失が低い部位、つまり音の透過量が多い部位の遮音性能向上が必要である。そこで、旧型ドアを使い部位毎の透過寄与

調査を実施した。その結果、寄与が高い部位はドア下端水抜孔、ウエザーストリップ、インナーウエザーストリップ、ガラスラン、ドアサービスホールなどであることが判った (図 13)。

得られた結果に基づき、先述の部位に対する遮音性能向上構造の開発を設計と連携して実施した。その結果、新型プリウスのドア透過損失は目標を達成することができた。

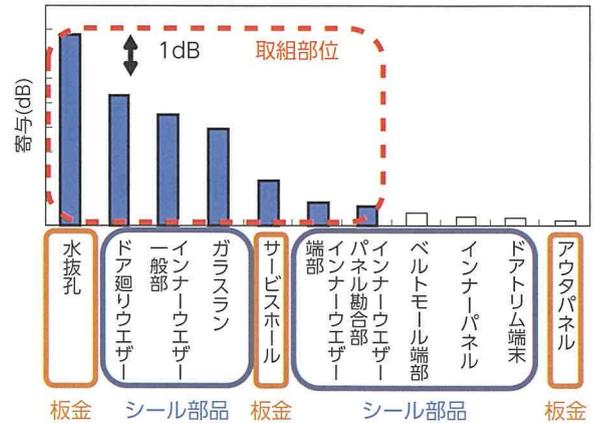


図 13 寄与調査結果と取組部位

更に、部品形状、組付けバラツキなどにより存在する隙が経路となり、車室内外の圧力差によって発生する空気の吸出し音（リーク音）対策も大変重要である。しかし、従来の対策方法は、スポンジ等の後付けシール部材による隙埋めであり、シール部材の貼付位置バラツキ等による量産車のリーク音を完全に対策することは困難であった。そこで、先述のバラツキを吸収できかつ、確実に隙をカバーできる部品の検討が必要であると考え、設計、工場サイドとの連携による新規部品開発を実施した。その結果、組付け工程での作業性とシール性能を両立できる形状追従性が良い (ex. エラストマ材) 型成形部品を具現化し設定した (図 14)。

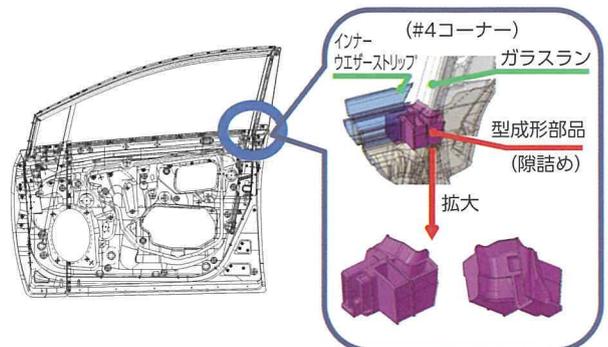


図 14 型成形部品の例

これまでに述べたような徹底したドア各部位毎の性能構造開発により、クラスを超えた高速定常走行車内音の実現をすることができた (図 15)。

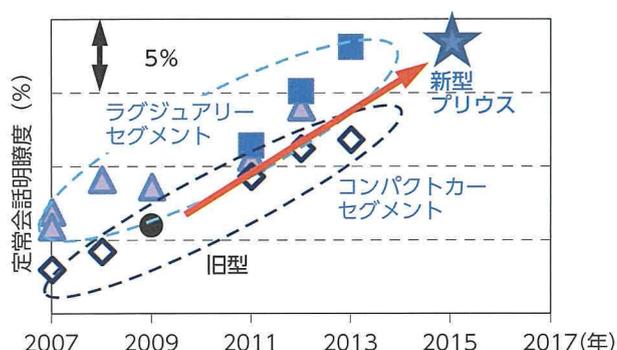


図 15 高速定常走行車内音比較

6 おわりに

新型プリウスの NV 性能開発について、訴求価値に基づく目標設定から改善事例として隔壁感、リニアな加速感、高速定常走行騒音を紹介した。隔壁感は、ボデー遮音性能を改善することでラグジュアリークラスに匹敵する“乗ってすぐに分かる”価値を実現し、気持ちの良い加速感は、加速度とエンジン回転数上昇を抑え、エンジン音を低減することによりリニアで上質な加速感を実現した。高速定常走行騒音は、風切音に着目し改善を行い、寄与の高いドア部を徹底した遮音、構造の工夫によりラグジュアリークラスに勝る透過損失を軽量で実現することができた。

今回で 4 代目となるプリウス開発は、NV 機能総力で新構造、新制御にチャレンジし新型プリウスにふさわしい NV 性能が実現できた。読者の皆様も一度乗り込み／運転して頂き、開発で目指した価値を共感して頂ければ、開発陣にとってこの上ない喜びである。

■参考文献

- (1) Taschuk, E., Kavarana, F., DeYoung, J.: Acceleration Noise Metric for Vehicles with CVT Transmission. SAE Technical Paper 2011-01-015
- (2) 炭谷圭二, 篠原: 自動車周りの空力騒音に関する研究. 自動車技術会論文集. Vol.27, No.1, pp.98 - 103 (1996)
- (3) Cordioli, J., Stumpf, C., Calcada, M., Rocha, T. et al.: Prediction of Sound Transmission through Door Seals Using the Hybrid FE-SEA Method. SAE Technical Paper 2010-36-0531

■著者



福永 恒太郎



鈴木 恭信



今泉 親等



若原 正明



山下 和孝



宮崎 大三



牟田 浩一郎

GOA の進化 ～新型プリウスの衝突安全性能

Evolution of GOA: Development of Passive Safety Performance for the New Prius

小杉 育朗*
Yasuaki Kosugi

工藤 俊哉*
Toshiya Kudo

酒井 省吾*
Shogo Sakai

平岡 学**
Manabu Hiraoka

近藤 仁***
Hitoshi Kondo

要旨

世界保健機構 (WHO) によると、2010 年は全世界で約 124 万人が交通事故で死亡し、2020 年には 190 万人に増加すると予測されている。ここでは、万一、交通事故が発生した場合の新型プリウスの衝突安全性能について紹介する。TNGA (Toyota New Global Architecture) 思想にて開発した新プラットフォームを用い、トヨタの掲げる世界トップクラスの衝突安全目標 GOA (Global Outstanding Assessment) を進化させ適用し、マルチロードパスの考え方に基づく衝撃吸収フロントボデー構造と高強度キャビン、及び乗員を適切に保護する拘束装置を採用することによって高いレベルの衝突安全性能を確保した。

Abstract

According to the World Health Organization (WHO), traffic accidents resulted in approximately 1.24 million fatalities around the world in 2010, a figure that is predicted to increase to 1.90 million in 2020. This article describes the development of the passive safety performance of the new Prius to help protect occupants in the event of a collision. The new Prius uses a platform based on the Toyota New Global Architecture (TNGA), which satisfies the world's top-level safety performance goals defined by Toyota's Global Outstanding Assessment (GOA). Through this approach, a high level of passive performance was achieved by adopting an energy-absorbing front body structure with multiple load paths, a high-strength cabin, and various occupant restraint systems.

キーワード 交通事故, 衝突安全, 衝撃吸収, 乗員保護

1 はじめに

世界保健機構 (WHO) の GLOBAL STATUS REPORT ON ROAD SAFETY 2013 によると、2010 年は全世界で約 124 万人が交通事故で死亡し、2020 年には 190 万人に増加すると予測されている⁽¹⁾。交通事故は、ある日突然に人の命を奪うことが起こりうる。万一の事故の際に必要なのが衝突安全性能であり、新型プリウスは、「環境性能」と「衝突安全性能」を高次元で両立するべく開発された。

トヨタの掲げるクラス世界トップレベルの衝突安全目標 GOA (Global Outstanding Assessment) を進化させ適用した。先進的衝突安全ボデーと SRS エアバッグを含む乗員保護装置を採用し、更に衝突時の電気安全性能についても十分な配慮をしつつ開発した。

2 衝突安全性能

2.1 新プラットフォームの衝突安全性能

TNGA (Toyota New Global Architecture) の考え方に基づき新プラットフォームを開発した。その際、改めて市場の交通事故実態を調査し (図 1)、GOA 目標を進化させ適用した。

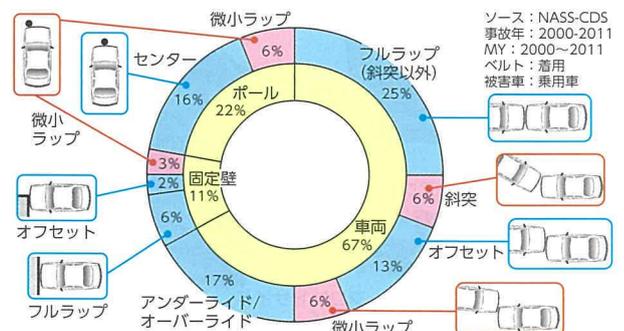


図 1 市場事故調査結果…前面衝突事故形態

* 性能実験部

** トヨタ紡織 (株)

*** 製品企画本部

従来より進化させた点を中心に記述する。

前面衝突では、ラップ率の少ないオフセット衝突形態や斜め方向衝突として、米国の微小ラップ前突や将来の規制であるオブリーク前突を取り入れた(図2)。

	微小ラップ前突 (Narrow Object)	オブリーク前突 (Car To Car)
衝突速度 (kph)	64	90
形態概要	40mph (64kph) 剛壁 25% H-III (AM50)	56mph (90kph) 35% 15° THOR (AM50) 2,486kg
被突物	IIHS SOLバリア	NHTSA-RMDB
位置・ラップ量 (%)	25	35
セット角度 (°)	0	15

図2 前面衝突試験形態の例

側面衝突では、対SUV衝突の速度アップを取り込んだ開発を行った。

後面衝突では、後席乗員客室空間目標を強化させた開発を行った。

また、魅力的な意匠への自由度と歩行者保護性能の両立を図るため、徹底的にエンジンルーム内部品の低配置を実施した。

2.2 前面衝突性能

新型プリウスでは、フロントサイドメンバー、第2メンバー、アウトリガー構造を採用し、荷重分散の考え方を進化させたボデー構造とした。また、前方からの入力荷重は、高張力鋼板の採用により強度を向上させた客室構造部材(ロッカー、Aピラー、ダッシュロアクロスメンバー、トンネル、アンダグリンフォースメント等)に効率的に分散させることにより、客室侵入量を抑制した(図3)。

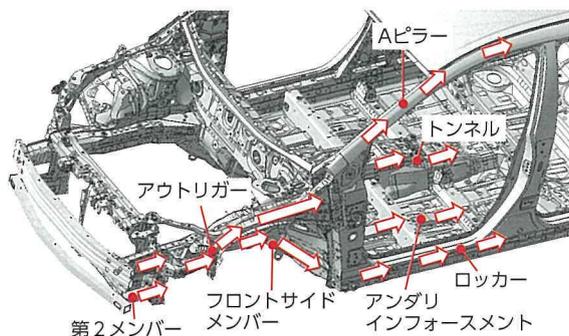


図3 前面衝突時の荷重分散

前面衝突時の乗員保護装置として、運転席、助手席SRSエアバッグ、プリテンショナー&フォースリミッター付シートベルトを採用し、衝撃吸収式ステアリングコラムとともに乗員への頭部、胸部への衝撃を緩和している(図4)。



図4 運転席、助手席SRSエアバッグ

また、前面衝突時にもSRSカーテンシールドエアバッグを展開させ、インテリアからの頭部保護について配慮した。

乗員足元のフロア面に衝撃吸収材を配置し、衝突時の足元への衝撃を緩和するとともに、フットブレーキ、パーキングブレーキのペダル後退防止機構を設定し脚部傷害の緩和に寄与している。

2.3 側面衝突性能

新型プリウスでは側面衝突性能を高めるとともに軽量化にも取り組んだ。

側面衝突時の入力荷重を主にBピラーとドアビームで受け止め、クロスメンバーやロッカー等に効率的に荷重を分散させる構造によって客室変形を抑制した(図5)。軽量化のためにホットスタンプ材をBピラー、ロッカー、クロスメンバーに採用した。また、Bピラー、ロッカーにはLSW(レーザースクリュー溶接)とスポット溶接を併用し、より小さな溶接ピッチを実現し溶接部への入力を分散した。

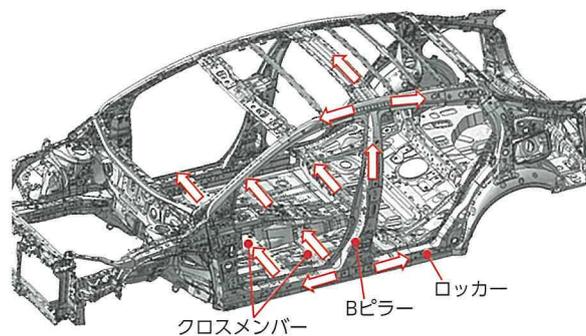


図5 側面衝突時の荷重分散

側面衝突時の乗員保護装置として、SRS サイドエアバッグ、頭部保護のためのSRS カーテンシールドエアバッグを採用し、ドア内の衝撃吸収パッドと合わせて乗員への衝撃を緩和している（図6）。

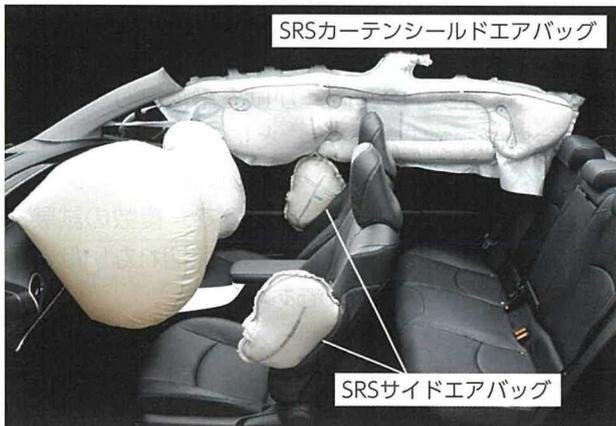


図6 SRS サイドエアバッグ
SRS カーテンシールドエアバッグ

SRS サイドエアバッグ及びカーテンシールドエアバッグのセンシングには、フロントドア内の圧力変化を検知するシステムを採用し、より広範囲なエアバッグの作動判別を可能とした（図7）。

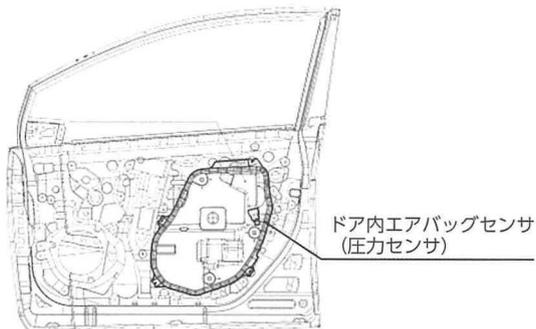


図7 ドア内圧力検知センサ

2.4 後面衝突性能

リヤサイドメンバーの耐力設定を適正化し、後面衝突時の後席乗員の客室空間確保と燃料装置及び高電圧装置の損傷抑止に役立たせている。

前席シート骨格は新規開発し、各部剛性を向上させた。アッパーパネル構造によるヘッドレスト支持部、サイドフレームの剛性を向上させ、後面衝突時の乗員の頸部への衝撃を緩和している。また、シートのボデーへの取付構造は足ブラケットを介さないシートレール直締め構造とすることにより、取付剛性を向上させ、頸部への衝撃緩和に貢献している（図8）。

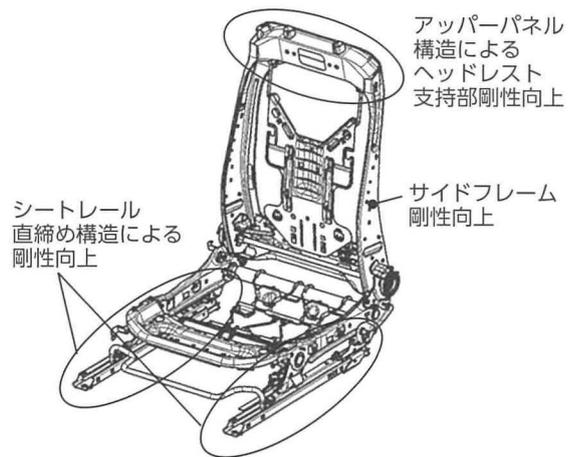


図8 前席シート骨格

2.5 歩行者保護性能

エンジンルーム内部品やラジエターの低配置化を行い、より多くのクラッシュストロークを確保した。かつ歩行者衝突部の構造を最適化させることにより、より速度の高い頭部の衝突や大腿部への衝突、人体忠実度を向上させた脚部フレックスインパクトにも対応した。

2.6 転覆時の客室保持性能

転覆事故時の客室空間の確保についても配慮した。ルーフの強度を確保するためAピラー及びBピラー等のボデー各部材の耐力配分と配置を最適化し、高レベルの転覆時の客室保持性能を達成している（図9）。また、頭部衝撃吸収構造の内装材と合わせて頭部傷害の緩和に配慮している。



図9 ルーフ強度試験

2.7 全方位コンパティビリティ

重量・車高の異なる車両の衝突時に双方の安全性を確保するコンパティビリティ（両立性）の概念は新型プリウスにも受け継がれている。2tクラスの乗用車や車高の高いSUVとの前面、側面、後面か

らのカーツーカー衝突試験を実施し、客室空間やダミーの傷害値において独自の厳しい目標を設置しクリアしている（図 10, 11）。

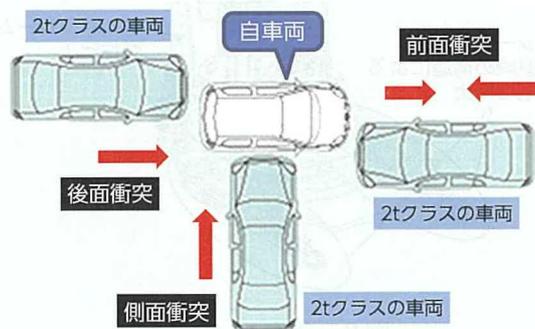


図 10 全方位コンパティビリティ



図 11 2tクラスの車両との前面衝突試験

2.8 衝突時の高電圧保護性能

ハイブリッド車であるプリウスの、衝突時における高電圧システムの保護は、従来の燃料装置の保護と並び重要な課題である。

歴代プリウスにおいて、市場での衝突事故における感電等の事例は報告されていないが、新型プリウスでも充分な配慮をした。

高電圧部品は（高電圧バッテリー、ケーブル等）衝突時に損傷の少ない位置に配置される。

万一の衝突時には、エアバッグの作動信号によってバッテリーパック側にある自動遮断装置（SMR）を作動、電子式コンバーターへの高電圧を遮断する。

更に事故の際には、乗員及び救護員が直接高電圧部品に触れることが無いように配慮されている。

3 おわりに

新プラットフォーム開発と新型プリウスの開発において実施した衝突試験を数えてみたところ、お

よそ 400 回であった。やり直しは皆無では無いものの、プラットフォーム開発ではプリウスのみではなく今後の対象プロジェクトまで包含し、多岐に渡る衝突形態をカバーした結果である。なお、衝突試験は高価な試作車を一瞬のうちに破壊する試験であり、失敗は許されない。入念な準備と確認を繰り返し、1 試験あたり 2 週間をかけて実施する。単純計算では述べ 15 年の時間をかけて新型プリウスの衝突安全性能が確立されたことになる（コンポーネントレベルの試験を含めるとさらに・・・）。実際は 15 年もかけることはできないので、複数の試験を同時進行で進めてゆく。これは数え切れないほどの多くの人々の努力の成果である。

今、新型プリウスを『もっと良いクルマ』にすることができ、我々、衝突安全性能に携わる者の願いである「交通事故死傷者ゼロ」に近づけたのではないかと思います。開発を進めていく中で、巨大な壁と感じられる困難も多々あったが、関係者の協力のもと、乗り越えることができた。「交通事故死傷者ゼロ」に更に近づくために、これからも『もっと安全なクルマ』を開発していきたい。

参考文献

- (1) WORLD HEALTH ORGANIZATION
Department of Violence and Injury
Prevention and Disability (VIP) : GLOBAL
STATUS REPORT ON ROAD SAFETY 2013
SUPPORTING A DECADE OF ACTION

著者



Toyota Safety Sense P の開発

Development of Toyota Safety Sense P

池 渉*
Wataru Ike

渡辺 篤*
Atsushi Watanabe

豊福 邦彦*
Kunihiko Toyofuku

相澤 一郎*
Ichiro Aizawa

棚瀬 将康*
Masayasu Tanase

要旨

事故解析に基づき、発生割合の高い事故形態に対応する安全システムをパッケージ化した Toyota Safety Sense P を開発した。単眼カメラとミリ波レーダーを組み合わせたセンサー構成とすることで高い認識性能と信頼性を両立し、単眼カメラの広角化、ミリ波レーダーのエンブレム一体構造化、および歩行者の動きを考慮した衝突判断アルゴリズムにより、横断歩行者にも対応したプリクラッシュセーフティシステムを開発した。世界各地の市場走行データで適合を行い、世界の予防安全アセスメントに対応した高い安全性能を実現した。

Abstract

Toyota Safety Sense P, one of Toyota Motor Corporation's two new active safety packages, was developed based on real-world accident analysis to help reduce frequently occurring types of accidents. In addition to achieving both high detection performance and reliability through a sensor configuration that combines a monocular camera and millimeter wave radar, Toyota Safety Sense P also includes a Pre-Collision System capable of detecting pedestrians crossing the road in front of the vehicle. This was accomplished by widening the field of view of the monocular camera, incorporating the millimeter wave radar into the emblem on the front grille, and developing a collision judgment algorithm that factors in pedestrian movements. The algorithm was calibrated based on real-world driving data from regions around the world, resulting in a system with high safety performance that is compatible with global active safety assessments.

キーワード 予防安全, プリクラッシュセーフティ, ミリ波レーダー, 単眼カメラ

1 はじめに

日本における交通死亡事故の主な類型は、歩行者事故、走路逸脱事故であり、この2つで約7割を占めている（図1）。追突事故は死亡事故に占める割合で見ると5%にとどまるも、交通事故全体に占める割合は約4割と最も多く、これら3つの事故形態に対策を打つことが安全に大きく寄与すると考えられる。

また歩行者死亡事故に着目すると、夜間および横断中がそれぞれ約7割を占めており（図2, 3）、歩行者死亡事故の低減にはこれらのシーンに対応することが重要である。

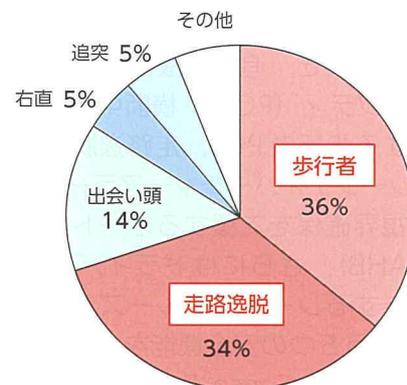


図1 日本の交通死亡事故類型 (1)

* 制御システム開発部

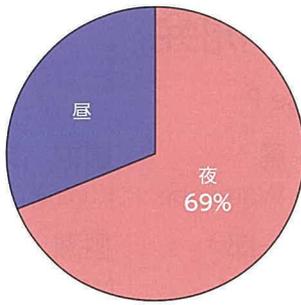


図2 歩行者死亡事故の昼夜割合 (2)

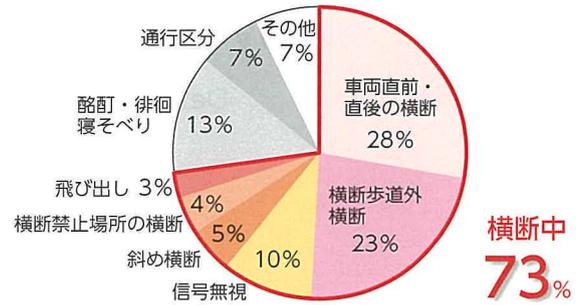
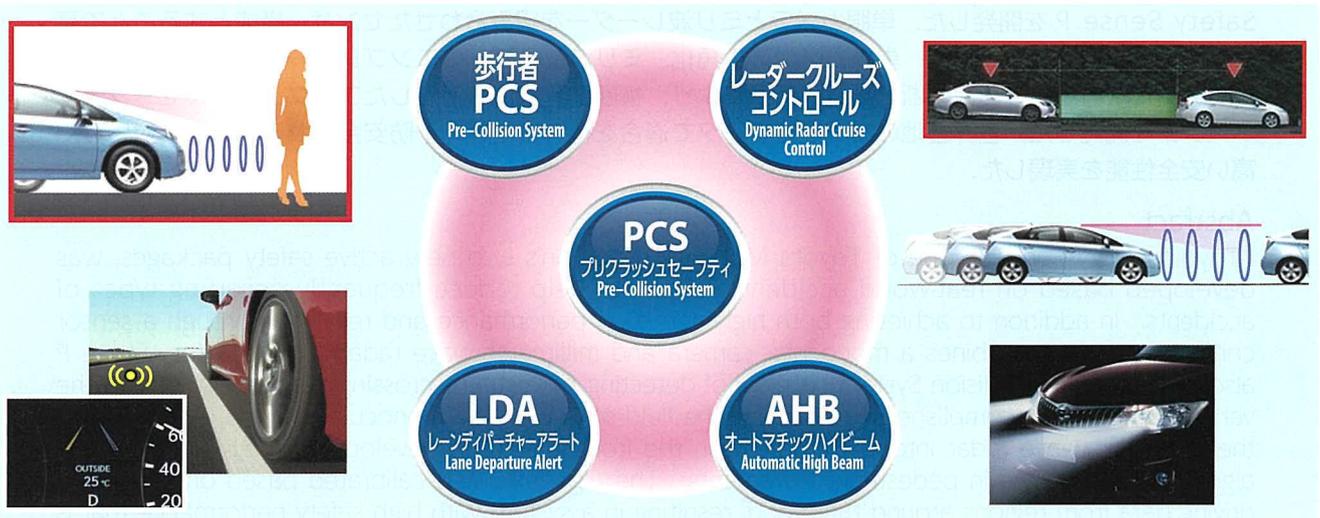


図3 歩行者死亡事故の行動別割合 (3)



2 開発の狙い

事故解析に基づき、追突事故に対応するプリクラッシュセーフティ (PCS)、横断中を含む歩行者事故に対応する歩行者 PCS、走路逸脱事故の予防に貢献するレーンディパーチャーアラート (LDA)、夜間の前方視界確保を支援するオートマチックハイビーム (AHB)、さらにはドライバーの運転負担低減に寄与するレーダークルーズコントロール (DRCC) という5つの安全機能を1つのパッケージ「Toyota Safety Sense P (TSS P)」として開発した (図4)。

これまでは各機能を個別のオプション装備として展開してきたが、TSS P では5つの機能をセットで装備する安全パッケージとすることで、安全機能を広範に普及させていくことを狙いとす。

3 TSS P センサー構成

安全システムにおいては事故の危険を検知する技術が非常に重要である。自車前方の車両や歩行者と衝突するかどうかを判断するためには、衝突対象の形状と距離を正確に把握する必要がある。人間の眼であれば即座に形状と距離を把握することが可能だが、既存のセンサーではそれぞれ一長一短があり、例えばカメラは形状認識は得意だが距離認識はやや不得手である。

TSS P を開発するにあたり、形状と距離をより正確に認識し、より信頼性を上げるため2つのセンサーを組み合わせることを選択した。具体的には、図5に示す通り単眼カメラとミリ波レーダーを使った構成としている。

単眼カメラは視野角が広く、横断歩行者を早期に検出することに寄与する。一方、ミリ波レーダーはより遠くから車両や歩行者を検出することが可能である。

これら2つのセンサーをフュージョンすることで、それぞれの長所を生かし、認識性能を相乗的に高めている (図6)。



図5 TSS Pのセンサー構成

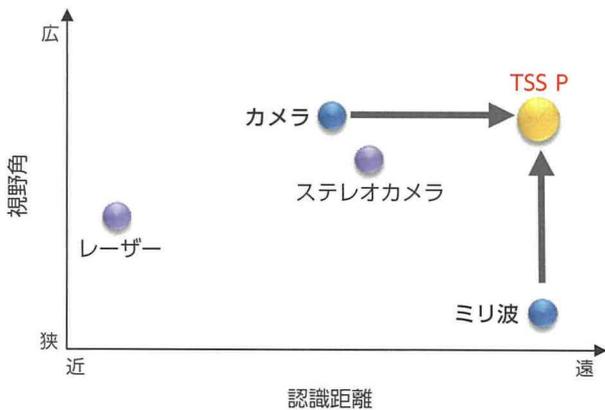


図6 フュージョン技術の効果イメージ

3.1 ミリ波レーダー

TSS Pでは横断歩行者の検出を実現するため、ミリ波レーダーの検出角度および受信感度を見直した。従来の搭載構造のままレーダーの照射範囲を広角化しようとする、搭載位置をフロントグリル外側にする必要があり、衝突時の歩行者への傷害が課題となる。衝突安全と検出範囲の広角化を両立するため、レーダーとエンブレムを一体化構造に変更した (図7)。エンブレムから透過する電波の範囲を広げることで、子供の飛出しにも対応可能な広い検出角度を実現した (図8)。

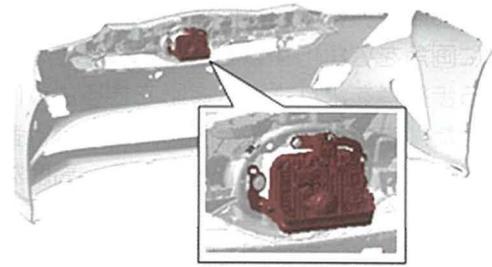


図7 ミリ波レーダー取り付け構造

また、人間の場合は車両に比べてミリ波レーダーの反射波が微弱である傾向がある。人間の微弱な反射波を捉えるために、対象物判断アルゴリズムの受信閾値を歩行者の反射レベルに応じて調整することで、横断歩行者の検出を実現した。

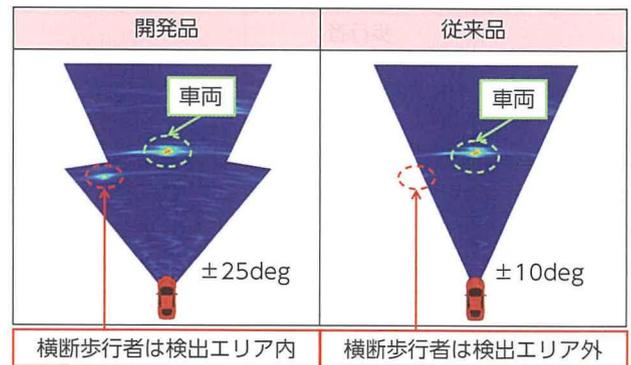


図8 レーダーの受信電力と検出角度

3.2 単眼カメラ

歩行者を検出するために、従来 LDA と AHB で用いていた単眼カメラに対して、搭載構造とスペックを見直した。

搭載構造は、左右どちらからの横断歩行者にも十分な検出性能が得られるよう、車両中央にカメラを配置できる搭載に変更した。室内ミラーの取り付け部の前方にカメラを配置し、ミラーの取り付け部を含めた一体カバー構造とすることで、乗員の視界確保と両立するとともに、幅広い車種に採用可能な構造を実現した (図9)。

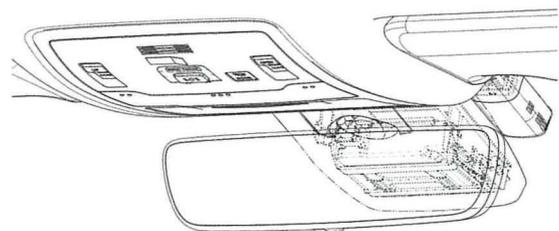


図9 単眼カメラ搭載状態

カメラ部はレーダー同様に横断歩行者を検出できるように画角を広角化するとともに、複雑な形状をしている歩行者をより詳細に撮影できるように高解像化させた。また取り込んだ画像内から歩行者と歩行者以外をより正確に識別できるように、高度な認識アルゴリズムを取り入れた。この処理を高速に演算できる画像認識 IC を採用し、制御 IC との 2 構成として処理能力を向上させた (表 1)。

表 1 単眼カメラスペック

	TSS P単眼カメラ	従来単眼カメラ
水平画角(deg)	約57	約49
画素数(pixel)	約123万	約36万
処理IC	SH4A(ルネサス) Visconti2(東芝)	SH4A(ルネサス)
認識対象	歩行者 車両 白線 ライト(ヘッドランプ等)	白線 ライト(ヘッドランプ等)

4 歩行者 PCS 衝突判断アルゴリズム

従来の PCS⁽⁴⁾ では、自車進行方向の自車幅の延長線上に存在する車両を対象に衝突可能性を判断する。ところが、歩行者の場合は歩道からの飛び出し等、走行車線の外から急に自車進路上に出てくる可能性があるため、TSS P で歩行者 PCS を開発するにあたり衝突予測の判断方法を変更した。歩行者 PCS の衝突判断アルゴリズムの概要は以下 (1) ~ (3) の通りである。

(1) 衝突対象の識別

単眼カメラの画像から、パターンマッチングにより衝突対象が歩行者であることを識別する (図 10)。

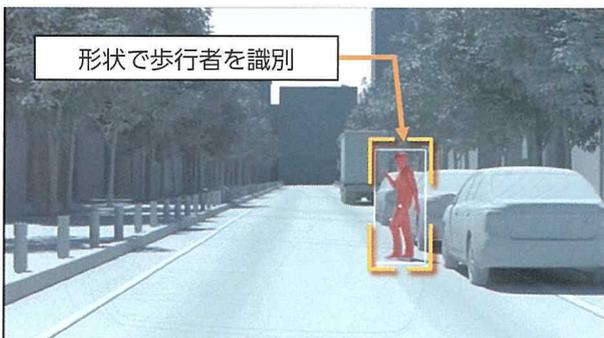


図 10 横断歩行者の検出

(2) センサーフュージョン処理

単眼カメラで認識した歩行者情報と、ミリ波レーダーで認識した歩行者情報を照合し、それぞれの検出結果が一定距離範囲内で重なっている場合 (図 11) にペアリングして同一の歩行者情報として衝突判断に使用する。

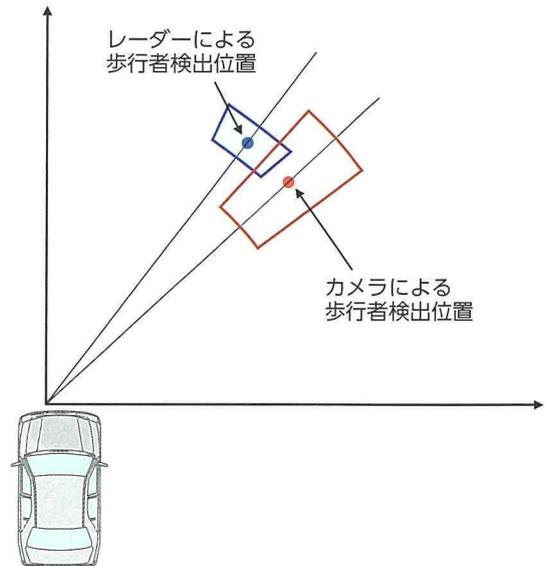


図 11 センサーフュージョン概要

(3) 自車と歩行者の動き推定に基づく衝突判断

単眼カメラとミリ波レーダの認識情報から、歩行者の横方向の移動速度を算出するとともに、操舵角センサー等の車載センサー情報から自車の推定走行軌跡を算出する。歩行者が自車進路上に侵入してくる可能性が高い場合に衝突判断エリアを拡大することで横断歩行者にも対応した衝突判断を実現した (図 12)。

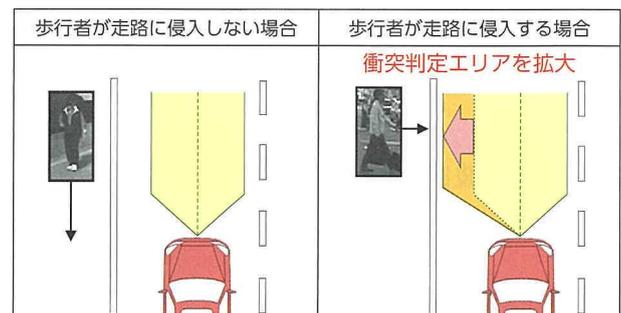


図 12 歩行者の動きを考慮した衝突判断

世界中を 70 台以上の評価車両で、約 1 年間に渡って走行して集めたデータによって本アルゴリズムを適合し、世界の予防安全アセスメントにも対応した高水準な安全性能を実現した。

5 おわりに

発生割合の高い事故形態に対応した安全機能をパッケージ化し、2つのセンサーの組み合わせで高い信頼性を実現した。また死亡事故の中で最も割合が高い歩行者事故に対応するため、センサーおよび衝突判断アルゴリズムを変更することで歩行者PCSを実現した。

TSS Pは新型プリウスをはじめとした2015年の新型車から順次搭載され、2017年までに日本、北米、欧州のほぼ全ての乗用車への設定を予定している。

最後に、TSS Pの開発にあたり多大なご協力を頂いた株式会社デンソー様、株式会社アドヴィックス様に深謝の意を表す。

■参考文献

- (1) 警察庁 交通事故統計 2013年
- (2) 警察庁 2009年中交通事故の特徴及び道路交通法違反取り締まり状況について
- (3) ITARDA infomation No.94
- (4) Setsuo Tokoro, et al. : Pre-Crash Sensor for Pre-Crash Safety. The 18th ESV Conference. Paper No.545 (2003)

■著者



池 渉



渡辺 篤



豊福 邦彦



相澤 一郎



棚瀬 将康

新型 1.2L 直列 4 気筒 ESTEC D-4T エンジン

The New Toyota 1.2-Liter Inline 4-Cylinder ESTEC D-4T Engine

原田 慎治* 品川 知広** 近藤 哲生***
Shinji Harada Tomohiro Shinagawa Tetsuo Kondo
十河 教介* 工藤 雅仁* 松原 渉****
Kiyosuke Togawa Masahito Kudo Wataru Matsubara

要旨

新型 1.2L 直列 4 気筒 ESTEC D-4T 過給ダウンサイズエンジン (8NR-FTS) を開発した。エキゾーストマニフォールド一体シリンダヘッド，中間止め機構付センタースプール方式 VVT (VVT-iW) 活用によるアトキンソンサイクル，高速燃焼など低燃費技術を基本コンセプトとしつつ，直噴インジェクタのみとした D-4 システム (D-4T) を採用，シングルエントリーターボチャージャーと組み合わせ，VVT との協調制御で低回転域からの高トルクを実現した。トランスミッションは 6MT もしくは CVT と組み合わせ，特に CVT では回転数制御によりターボラグをなくし，“Fun to drive” と良好な燃費を両立させた。

Abstract

A new 1.2-liter inline 4-cylinder downsized turbocharged direct injection (DI) gasoline engine using D-4T fuel injection technology has been developed following the ESTEC (Economy with Superior Thermal Efficient Combustion) development concept. Called the 8NR-FTS, this engine incorporates various fuel efficient technologies, such as a cylinder head with an integrated exhaust manifold, the Atkinson cycle using a center-spooled variable valve timing with mid-position lock system (VVT-iW), and high-speed combustion. The D-4T fuel injection technology is a special version of the D-4 system for turbocharged engines and carries out only direct in-cylinder injection. In combination with a single-scroll turbocharger, high torque is achieved from low engine speeds by cooperative control with the VVT system. The engine can be mated with either a 6-speed manual transmission (6MT) or continuously variable transmission (CVT). Especially with the CVT, turbocharger lag duration is reduced by shifting control, achieving both fun-to-drive dynamic performance and excellent fuel economy.

キーワード 内燃機関，火花点火機関，ターボチャージャー，高速燃焼，アトキンソンサイクル，タンブル流

1 はじめに

2.0L (8AR-FTS)⁽¹⁾⁽²⁾ に続き，直列 4 気筒 1.2L 過給直噴エンジン (8NR-FTS) を開発した。このエンジンは従来の 1.6 ～ 1.8L NA エンジンの一部置き換えとして，2015 年 4 月に日本，5 月に欧州市場へ投入された。

本エンジンは，長年ハイブリッド用エンジンにおいて培った高熱効率化技術を，コンベンショナルなエンジンにも適用するため，高速燃焼，燃焼室内掃気，燃焼室温度コントロールといった技術を磨き上げ，ポンプ損失，排気損失，冷却損失，摩擦損失を全方位で更に低減させた高熱効率・低燃費エンジン

群 (ESTEC ; Economy with Superior Thermal Efficient Combustion) のひとつである。

本エンジンと 8AR-FTS の主な違いを表 1 に示す。ターボチャージャーはシングルエントリーを採用，トヨタとしては 12 年ぶりのポート噴射を持たない新型直噴エンジンとなる。トランスミッションは 6MT または CVT と組み合わせている。

表 1 8NR-FTS と 8AR-FTS の比較

	8NR-FTS	8AR-FTS
排気量 (cc)	1,196	1,998
燃料噴射方式	D-4T	D-4ST
過給器	シングル エントリー	ツイン エントリー
トランスミッション	6MT CVT	6AT

* エンジン設計部

** 先行プロジェクト推進室

*** エンジン制御システム開発部

**** ユニット統括部

2 エンジン仕様と燃焼コンセプト

エンジン基本諸元を表 2 に示す。ESTEC エンジンシリーズでは、高速燃焼の実現のため高い吸気流動、筒内乱れを求めている。本エンジンはトヨタの直噴エンジンでは最小の排気量でボア径が小さい。そのため、直噴噴霧がボアに直撃する前に空気と混合できるよう、通常よりさらに強い空気流動が必要となる。本エンジンでは、吸気ポート形状の自由度追求と、搭載性などの観点から、直噴 (D-4) を選択し、これにより吸気流を強化したポート形状の最適化を行った (図 1)。さらに、ピストン形状を浅皿キャビティ形状から新型湾曲ドッグディッシュ形状に変更した (図 2)。これにより、触媒暖機過程での点火遅角燃焼に対応しつつ、タンブル流の減衰を抑え、圧縮行程後期の筒内乱れを増加させた (図 3) (3)。



図 2 ピストン頂面形状

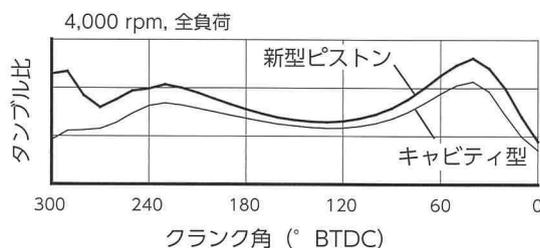


表 2 エンジン基本諸元

排気量 (cc)	1,196
ボア × ストローク (mm)	φ71.5 × 74.5
圧縮比	10.0
燃料噴射方式	D-4T
燃料噴霧形状	ファンスプレー
動弁系	16バルブ DOHC, VVT-iW (吸気), VVT-i (排気)
インタークーラー	水冷式
最高出力 (kW/rpm)	85/5,200-5,600
最大トルク (Nm/rpm)	185/1,500-4,000
燃料 (オクタン価)	95RON 以上
排気規制対応	Euro6, 新長期規制基準 75%低減

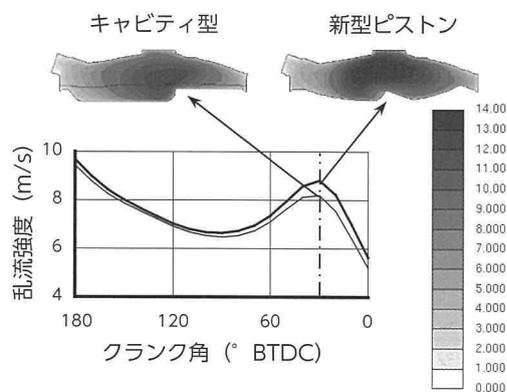


図 3 筒内タンブル比と乱流強度

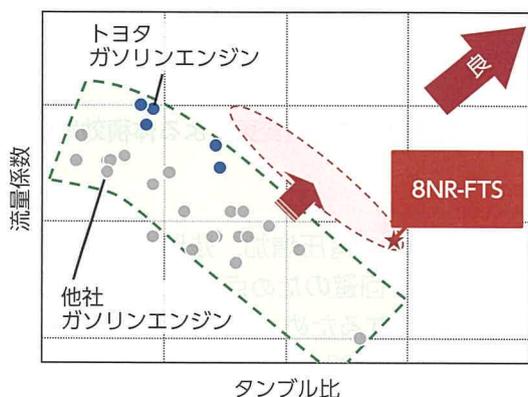


図 1 ポート性能 (タンブル比 × 流量係数)

燃料の噴霧形状は従来のトヨタ直噴エンジン同様にファンスプレー形状を選択したが、従来型に対しスリット孔厚さを薄く、液膜厚さを薄くすることで空気とのせん断力を増加させ、微粒化を促進して噴霧長を従来比 23% 減少させた (図 4)。あわせて、吸気バルブへの燃料付着を低減させるため、バルブ挟角、噴射角を最適化するとともに、マルチ噴射 (後述) で 1 噴射における噴霧長をさらに短縮し、混合改善と燃料のボア付着低減を実現した (図 5)。さらに、PCV 系のオイルセパレート機能の向上により、吸気系へのオイル持ち去りを徹底的に低減し、吸気デポジット量も低減した。

圧縮比は 10.0、燃料は 95RON 以上対応、欧州 Euro6、および新長期規制基準 75%低減に対応している。

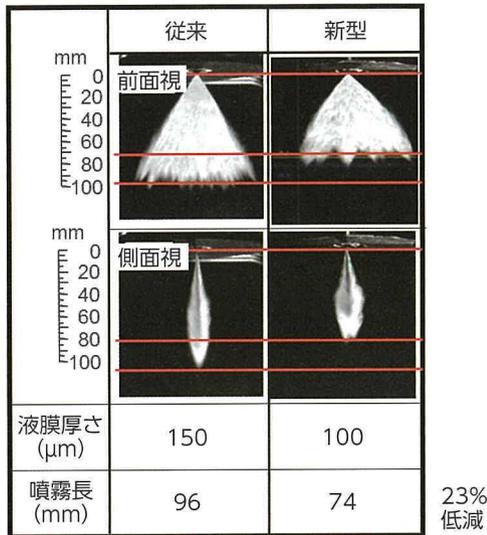


図4 ファンスプレー形状

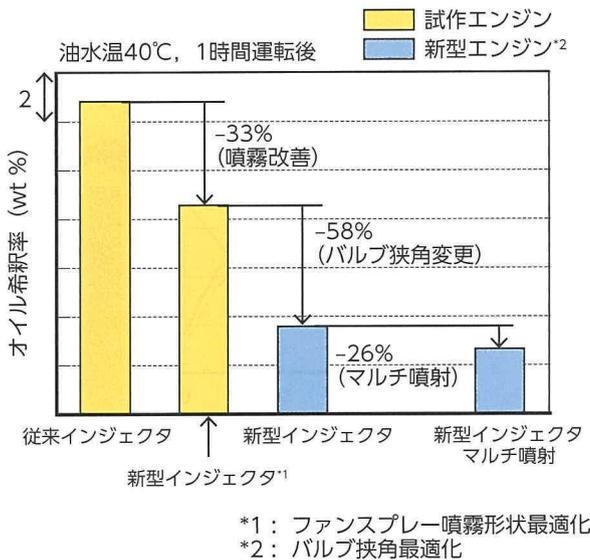


図5 オイル希釈率

3 排気系

エキゾーストマニフォールドをシリンダヘッドに内蔵することにより、排気流線を滑らかに繋ぎ、断面積変化の最適化と排気表面積の低減を行うとともに、エンジン全体のコンパクト化にも貢献した。また、ターボをシリンダヘッド下方に配置し、かつ触媒をターボ下流直下に配置することにより、触媒までの距離を短縮して触媒の暖機性向上を図った。

タービン側は極低速トルク（ローエンドトルク）と過渡応答性能を成立させるため、高効率・ワイドレンジ化した低慣性のシングルエントリーターボを採用した。また、アクティブウェイストゲートシス

テムの採用により、ウェイストゲートバルブの開度を任意に制御可能とした。エンジン始動時には、ウェイストゲートバルブを開くことで、触媒に高温の排気ガスを供給し、暖機時間の短縮を図った。また、軽負荷領域においても、ウェイストゲートバルブを開き、排気圧損の低減によるポンプ損失低減と、燃焼改善（残留ガス減）による燃費向上を図った。

4 全負荷性能

本エンジンは搭載性や生産性などの観点からシングルエントリーターボを採用した。排気カムの作用角を小さくすることで、オーバーラップ期間と脈動波のタイミングをずらし、排気干渉の影響を最小化して（図6）、エンジン低回転時の吸入空気量を増加させ（図7）、低速トルクの向上を図った。

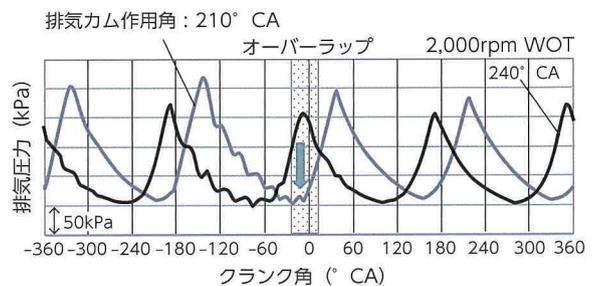


図6 排気カム小作用角化による排気干渉低減

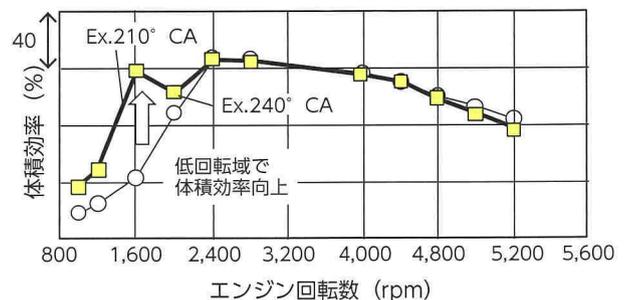


図7 排気カム作用角変更による体積効率向上

一方高速側は、背圧増加、残留ガス増加に起因するノッキング回避のため点火時期を遅角すると、排気温度が上昇するため、タービン入りガス温度抑制のための燃料冷却が必要となる。本エンジンでは、エキゾーストマニフォールド一体型シリンダヘッド（図8）による排気冷却を行い、背圧と残留ガスを低減、ストイキ（ $\lambda=1$ ）領域を拡大した。

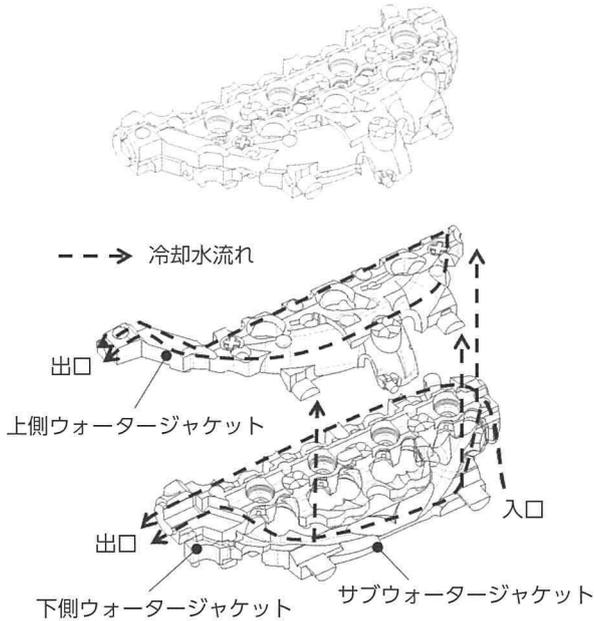


図 8 シリンダヘッドウォータージャケット構造

エキゾーストマニフォールド一体シリンダヘッドは、各ポートでの冷え代を均一化する形状として、ブローダウンの影響を排除し、排気ポート集合部を集中的に冷却することにより、排気冷却の効率向上を図った。また、排気ポートの独立部を長くすることにより、ターボチャージャーの効率を最大限活用できるようにした。また、排気温度が比較的低いときは、タービン性能を確保するため、冷え代を抑え、排気温度が上昇する高負荷時に、最適に冷却できる設計とした。

これらの結果、全負荷性能として 1,500rpm から 4,000rpm までの広い範囲で最大トルク 185Nm を実現し、最高出力は 85kW を達成した (図 9)。

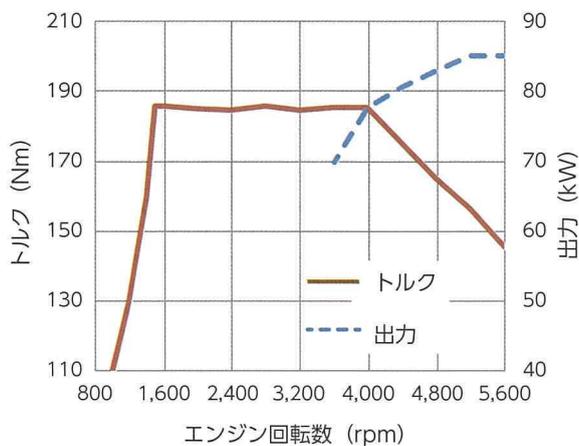


図 9 全負荷性能

5 燃費

ポンプ損失低減のため、中間止め機構付センタースプール方式 VVT (VVT-iW)⁽⁴⁾ 活用によりアトキンソンサイクルを実現、軽負荷域での燃費改善を行った (図 10)。ただし、吸気バルブタイミングだけの位相変化では負のオーバーラップ期間ができるため、ポンプ損失を低減できない。しかも、排気作用角を縮小しているため、排気バルブタイミングを遅角しオーバーラップを大きくすると、排気の開きタイミングが下死点より遅くなり、ポンプ損失が悪化する。

また、中負荷域では過給すればするほど背圧が増加し、ポンプ損失が増加する。そのため、この領域では過給しないこと、つまり NA エンジンとしての空気量を確保することが必要である。このため、吸気バルブタイミングを、下死点付近で閉じるように設定した。

1,300rpm 0.4MPa 吸気バルブ閉：97° ABDC (固定)

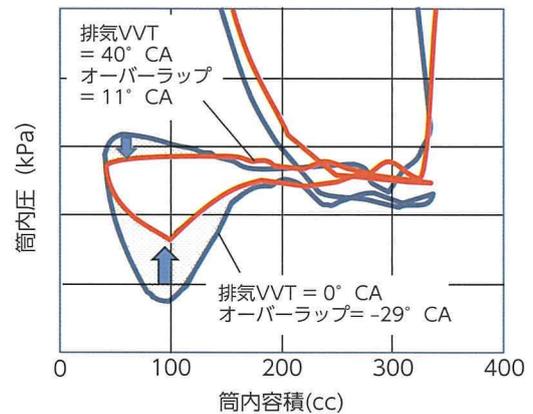


図 10 VVT によるポンプ損失低減

上記 2 点、および全負荷性能とのつながりを考慮し、本エンジンでは図 11 のようにアトキンソンサイクルを極軽負荷に限定し、負荷増加に対して吸気バルブタイミングを遅閉じから早閉じに早めに変化させ、全領域で燃費をバランスよく向上させた。

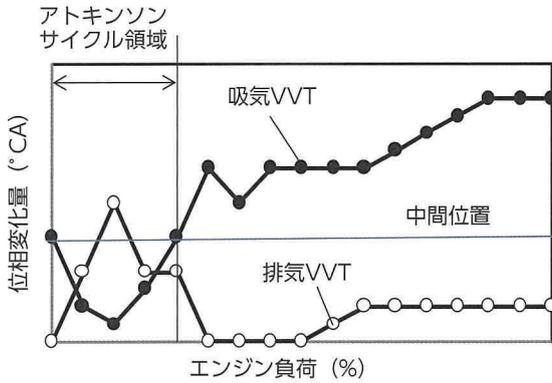


図 11 VVT 位相設定

燃焼面では、マルチ噴射を活用し、負荷領域ごとに1サイクル中の噴射回数と噴射タイミングを最適化した。図 12 に、各運転領域における、噴射回数と噴射タイミングを示す。軽負荷域ではアトキンソンサイクルでの圧縮端温度低下による燃焼悪化を防ぎ、高負荷域では燃焼速度の向上を狙い、圧縮行程での噴射を設定し、点火プラグ周辺に弱成層混合気を形成した。中負荷域では吸気流速が減衰する下死点付近で燃料を噴射し、筒内乱れを増加させ燃焼速度を向上させた。この噴射タイミングを温間と冷間で変更し、冷間では弱成層領域を多くし、燃焼を向上させた。

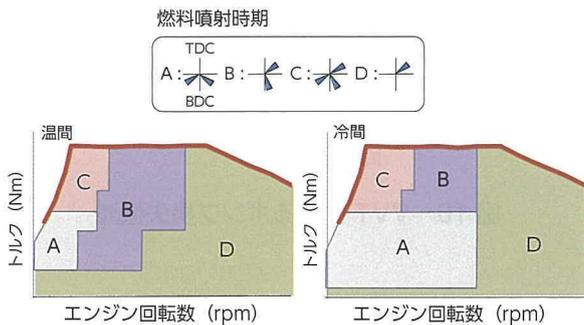


図 12 噴射条件設定 (温間・冷間)

図 13 は全域の正味燃料消費率と λ (空気過剰率) 分布を示す。最小燃料消費率は 236g/kWh (正味熱効率 36.2%) である。ストイキ ($\lambda=1$) 領域はシリンダヘッドでの排気冷却効果もあり、最高车速の 97% までカバー、ほぼ全域でのストイキ燃焼を実現した。

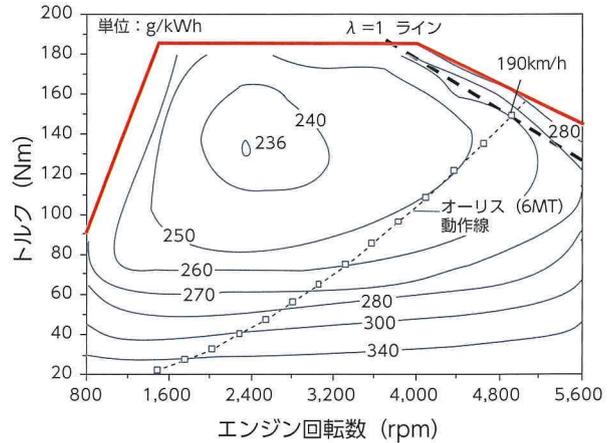


図 13 正味燃料消費率

6 ヒートマネジメント

暖機過程での燃費向上のため、エンジン、CVT ウォーマー、車室内ヒーターの冷却水量を最適化した。暖機過程では、エンジンとヒーターに重点的に通水し、車室内の快適性と、エンジンの摩擦損失低減による燃費向上の両立を図った (図 14)。

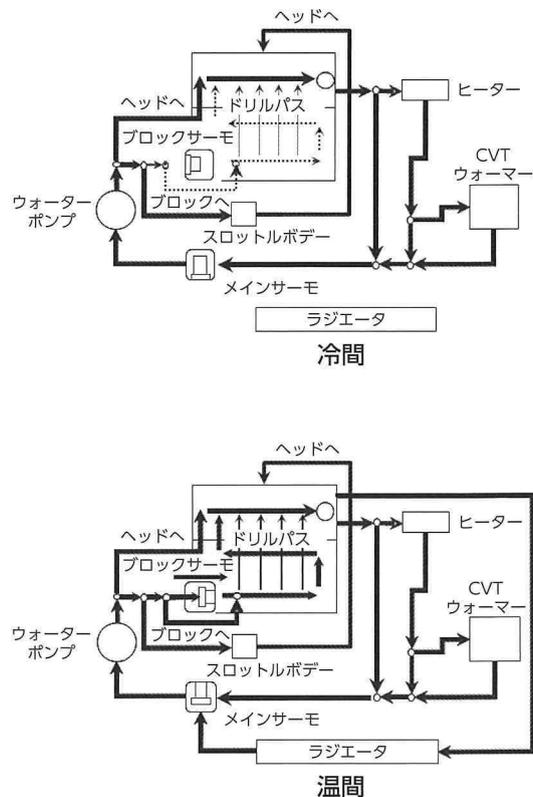


図 14 冷却回路

また、シリンダブロック内で、オイル落とし通路と、ウォータージャケットとを近接させ（図 15）、オイルと冷却水の熱交換ができる構造とし、暖機過程中は、冷却水からオイルへ熱移動させることにより、各摺動部の温度上昇を促進した。一方で、高温、高負荷時は、オイルの熱が冷却水に移動し、いわゆるオイルクーラーの作用をすることにより、オイルクーラーレスの構造とし、最高出力点において、8℃以上の油温低減を実現した。

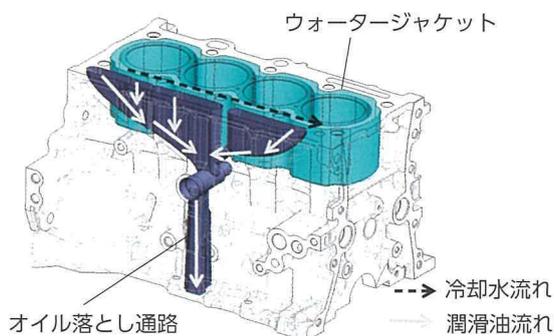


図 15 シリンダブロックの熱交換促進構造

他にも、冷間時にシリンダブロックへの冷却水流量を抑制し保温するシリンダブロック暖機促進システム、ピストンへの冷却用オイル供給を運転状況によって停止し、ピストンおよびピストンリングの過度な冷却を抑制することでボアとの摺動抵抗とPN（PN：Particle Number）を減少させるピストンオイルジェット制御システムを採用している。このシステムは、シリンダブロック内に、高圧油路（オイルギャラリ）を 2 本並列に内蔵する構造で、メインギャラリからクランクジャーナルへ常時給油する一方で、サブギャラリからピストンジェットへの給油を停止できるようにした。またエキゾーストマニフールド一体型シリンダヘッドで排熱を回収し、水温上昇を早めシリンダボア等の暖機を促進することで燃費向上に貢献している。

7 車両動力性能

7.1 低速レスポンス

実車での動力性能向上には、エンジン単体での全負荷性能だけでなく、ターボラグの短縮が必須となる。吸気系全体を図 16 に示す。本エンジンでは過渡レスポンスを追求するため、吸気系の容積を可能な限り小さくするとともに、インタークーラーを含

めた吸気圧損を低減した。サージタンク容積はトヨタでは最小の排気量当たり 1.1L に設定した。

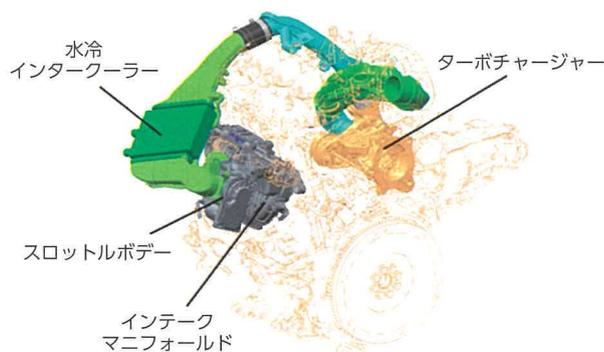


図 16 吸気システム

インタークーラーはターボ下流の吸気系容積を最小化するため、水冷式を採用した。インタークーラーの冷却には、エンジン冷却系と独立した電動ウォーターポンプを備えた低水温冷却回路を採用し、エンジンの運転状況に応じて最適な冷却効果が得られるように流量を調整している。

また、ターボのウェイストゲートバルブ駆動源として、無段階で制御可能な負圧式アクチュエーターを採用し、ウェイストゲートバルブが即座に作動ができるよう負圧タンクを設定し、断続的な作動要求への応答を可能としている。さらに、吸気温を低下させるため、吸気経路には、多くの樹脂部品を採用している。エンジン制御面では、バルブオーバーラップを一時的に大きくし、過給圧が背圧を上回ることによって、タービンへの流入ガス量を増加させ過給圧を確保するスカベンジング制御を採用し、ターボラグ短縮を図っている。

低速トルクの向上により、低回転時の発生熱量が増加するため、低速側での冷却を強化した。特に、低水温時、シリンダブロック暖機促進システムにより冷却水流量を低減している最中に高負荷となった場合、各部の沸騰や、エンジン水温の上昇を招きやすい。そのため、ウォーターポンプ吐出量を増加するとともに、エンジン内部では、高温となるエキゾーストマニフールド部への流量配分を最適化した。

7.2 過給エンジンと CVT との統合制御

本エンジンの特徴として、CVT との協調制御が挙げられる。過給エンジンに合わせ、CVT の変速制御の最適化をしている。エンジン回転の増加を抑制する変速制御により、変速ロスを最小限に抑え、加速度のつながりをリアにし、いわゆる「ラバー

バンド感」を排除している。

DCTとCVTの発進加速時の車両前後加速度波形の比較を図17に示す。ただし、DCTはトータルギア比が10%ローギアード(ショート)である。DCTのクラッチ係合による発進遅れに対し、CVTではトルクコンバーターのトルク増幅機能により初期の発進性に優れる。また、中間域の加速度の大きさは、トルクコンバーター損失により若干DCTに対し劣るが、トルク増幅機能によりトータルギア比で劣るDCTと同等のピーク加速度が実現できた。

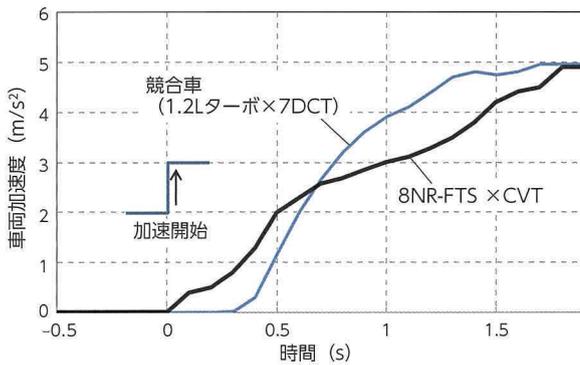


図17 CVTとDCTの加速性能比較

8 まとめ

新型1.2L直列4気筒ESTEC D-4Tエンジン8NR-FTSの特徴について、以下にまとめる。

- ・徹底した吸気流動、筒内乱れの強化、および燃料マルチ噴射により、高速燃焼を実現した。
- ・高速燃焼と損失低減により、最小燃費率236g/kWh(正味熱効率36.2%)を達成した。
- ・シングルエンターターボと排気カム小作用角、スカベンジング制御の活用で1,500rpmから最大トルク185Nmを実現した。
- ・CVTの変速制御と組み合わせ、Fun to driveな走りと低燃費を両立した。

参考文献

- (1) Izumi Watanabe, T. Kawai, K. Yonezawa, T. Ogawa : The New Toyota 2.0-Liter Inline 4-Cylinder ESTEC D-4ST Engine -Turbocharged Direct Injection Gasoline Engine-. 23rd Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology. Aachen 2014.
- (2) 鈴木智章, 渡邊, 川合, 米澤 : 新型2.0L直列4気筒ガソリン直噴過給ダウンサイズエンジン. 自動車技術会学術講演会前刷集, No.94-14, p.1 - 4 (2014)
- (3) S. Mitani, S. Hashimoto, H. Nomura, R. Shimizu, et al. : New Combustion Concept for Turbocharged Gasoline Direct-Injection Engines. SAE Technical Paper 2014-01-1210 (2014)
- (4) 遠藤慶, 横山, 藤村, 竹中 : ESTEC新可変動弁系(VVT-iW)の開発. 自動車技術会学術講演会前刷集. No.137-14, p.23 - 26 (2014)

著者



原田 慎治



品川 知広



近藤 哲生



十河 教介



工藤 雅仁



松原 渉

新型 1.4L 直列 4 気筒 ESTEC ディーゼルエンジンの開発

The New Toyota 1.4-Liter Inline 4-Cylinder ESTEC 1ND-TV Diesel Engine

阪本 秀男 *

Hideo Sakamoto

笈川 直彦 *

Naohiko Oikawa

池田 栄次 **

Eiji Ikeda

小林 正明 ***

Masaaki Kobayashi

パケ ティボ ****

Thiebault Paquet

ゴージェエ レジス ****

Regis Gauthier

要旨

トヨタ自動車は、欧州市場のニーズに応えるべく、新型 1.4L 直列 4 気筒 ESTEC D-4D ディーゼルエンジン (1ND-TV) を開発した。新型エンジンでは、小型高効率ターボチャージャーをはじめ、小スペースへの搭載を可能としたタンデム配置の NSR (吸蔵還元型 NOx 触媒) システム、低冷損燃焼を実現するテーパ付リップレス燃焼室、低フリクション技術など、最新技術を惜しみなく投入することで、“Fun to Drive” と低燃費、低エミッションを高次元で両立させた。本稿ではこの 1ND-TV (ESTEC) エンジンの技術について紹介する。

Abstract

Toyota Motor Corporation has developed a new 1.4-liter inline 4-cylinder diesel engine called the 1ND-TV to meet European legislative and market requirements. Based on the ESTEC (Economy with Superior Thermal Efficient Combustion) development concept, the 1ND-TV engine features a small high-efficiency turbocharger and a tandem layout NOx storage and reduction catalyst system that can be installed in small spaces. A tapered lipless combustion chamber reduces combustion cooling loss and various low friction technologies were adopted to help reduce CO₂ emissions. The result is a fuel efficient engine with fun-to-drive dynamic performance and low emissions. This article describes the technologies adopted on the ESTEC 1ND-TV engine.

キーワード 低燃費、低エミッション、Fun to Drive、低冷損燃焼、吸蔵還元型 NOx 触媒、リッチ燃焼

1 まえがき

地球温暖化対策として CO₂ 削減の必要性が増大する中、欧州の乗用車市場では、高い熱効率を有するディーゼルエンジンが低燃費と高性能を両立する動力源として人気が高い。

トヨタ自動車 (以下、トヨタ) は市場のニーズに応えるため、2000 年に 1.4L の乗用車用小型ディーゼルを B セグメントの YARIS に搭載して欧州に導入し、その後、C セグメントのカローラ、オーリスなど搭載車種の拡大をはかってきた⁽¹⁾。

本稿では、走り、燃費、低エミッションをより高いレベルで両立した新開発 ESTEC (Economy with Superior Thermal Efficient Combustion) 1.4L 直列 4 気筒ディーゼルエンジン 1ND-TV エンジンについて紹介する。

2 新開発エンジンの概要と諸元

今回開発したエンジンを図 1, 2 に、主要諸元を表 1 に示す。排気量 1,364cc の直列 4 気筒エンジンで、噴射系は最高レール圧 180MPa のコモンレールシステムとソレノイドインジェクタを採用した。また、燃焼時の冷損を大幅に低減するためテーパ付リップレス燃焼室を採用した。排気浄化システムとしては NSR (吸蔵還元型 NOx 触媒) システムを採用しユーロ 6 規制に対応している。1 気筒当たり 2 弁のバルブ数、可変ノズルターボチャージャーやバイパス経路切替式の高効率 EGR (Exhaust Gas Recirculation) クーラーはユーロ 5b 規制対応の従来エンジンのシステムを流用している。

* エンジン制御システム開発部

** エンジン設計部

*** エンジン統括部

**** TOYOTA MOTOR EUROPE NV/SA

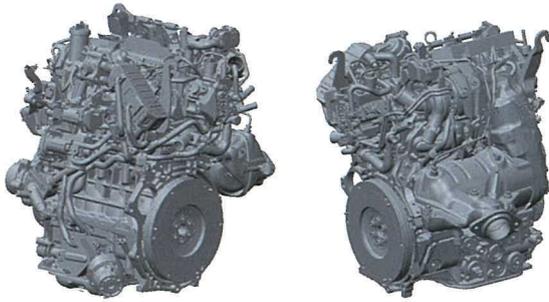


図1 1ND-TV(ESTEC) エンジン外観

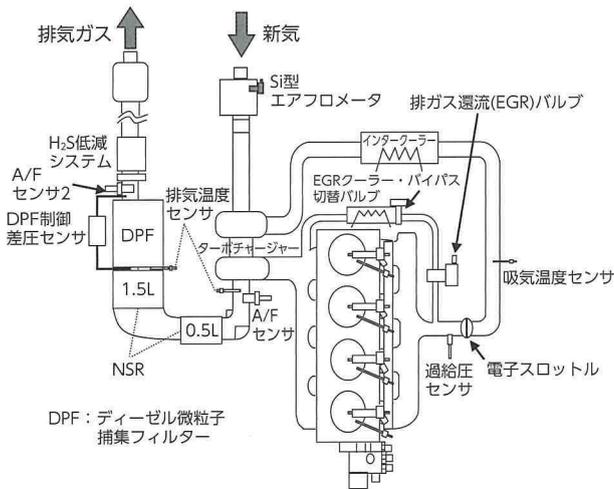


図2 エンジンシステム図

表1 エンジン主要諸元

エンジン形式	直列4気筒
排気量 (cc)	1,364
ボア × ストローク (mm × mm)	φ73.0 × 81.5
圧縮比	16.5 : 1
最高出力 (kW/rpm)	66/3,800
最大トルク (Nm/rpm)	205/1,400-2,800
燃料噴射システム	コモンレール (180MPa) ソレノイドインジェクタ
バルブ機構	SOHC, 2 valve
過給システム	可変ノズルターボ
EGR システム	バイパス付きクールド EGR
燃焼室形状	テーパ付リップレス
後処理	NSR + DPF

3 新開発エンジンの採用技術

3.1 動力性能の改善

近年、低燃費要求の高まりから車両のハイギア比化が進んでいる。本エンジンでは、ハイギア化の影響で使用頻度が増加する低回転域の加速性能を改善することで、低燃費と動力性能の両立を実現した。低回転域での加速性能を向上するには、低速トルクの向上と目標過給圧への追従性改善が必要であり、ターボチャージャーの性能が重要となる。本エンジンで採用したターボチャージャー諸元を表2に示す。

表2 ターボチャージャー諸元

		新型ターボ	従来ターボ
コンプレッサ	内径 (mm)	27.8	29.0
	外径 (mm)	41	41
	トリム	46	50
	翼枚数	8	5+5
タービン	内径 (mm)	35.5	35.5
	外径 (mm)	29.3	30.1
	トリム	68	72
	翼枚数	11	9

翼枚数および翼形状を見直し、総合効率を改善しながらタービン、コンプレッサトリムを小さくした。その結果、高回転側の性能を犠牲にすることなく、2,000rpm以下のトルク向上を実現した(図3)。また、目標過給圧への追従性を改善するため、軸受けの構造変更、シャフトの小径化を行い、ターボチャージャーの低フリクション化を実現した。本エンジンにおける3速30km/hから60km/hに到達するまでの加速度推移を図4に示す。従来エンジンと比較し、リニアな加速度の立ち上がりを実現するとともに、目標車速へ到達する時間を20%短縮した。

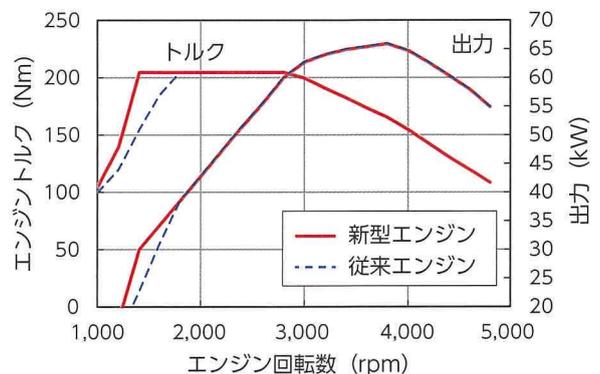


図3 全負荷性能曲線

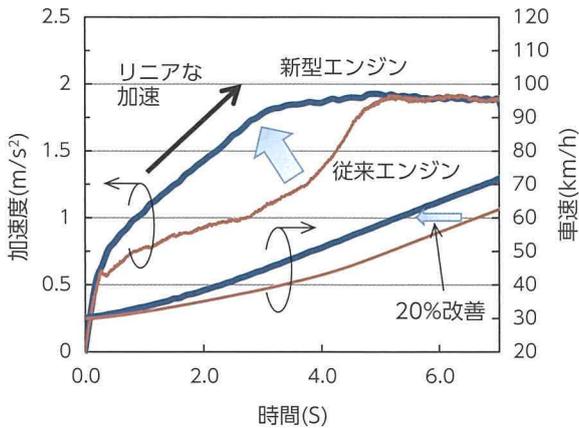


図 4 車両加速性能 (3 速 30km/h-60km/h)

3.2 燃費改善技術

本エンジンでは、トップレベルの燃費性能を実現するため、冷却損失低減、フリクション低減、ポンプ損失低減の3つの観点から熱効率向上に取り組んだ。

ボア径の小さいディーゼルエンジンはシリンダ容積に対する表面積の比が大きいことや燃焼領域が壁面近傍となるため、図 5 に示すような冷却損失の占める割合が高い傾向にある。冷却損失を低減するため、本エンジンでは燃焼時の冷却損失を大幅に低減する低冷損燃焼⁽²⁾を採用した。

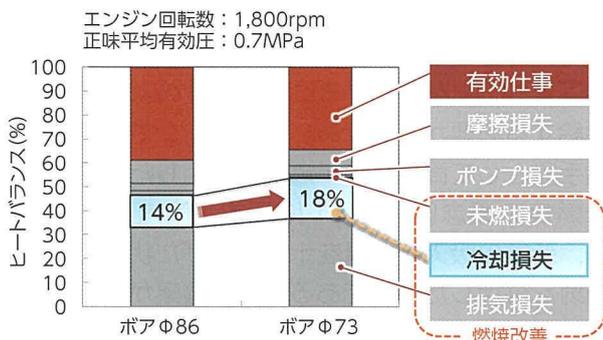


図 5 ボア径違いによるヒートバランス比較

低冷損燃焼とは、空気流動による冷却損失を低減することを狙いとした燃焼コンセプトである。スワールやスキッシュ流を抑制するとともに、高温の燃焼ガスを壁面から遠ざけることで壁面との温度勾配を低減し燃費を改善する。一般にスワールやスキッシュ流を低減するとスモークが悪化するが、本エンジンでは、テーパ付リップレス燃焼室を採用することで低冷損とスモーク抑制の両立を実現している。図 6 に燃焼室形状を示す。スモークの悪化は

燃焼室内に混合気が停滞し、過濃な雰囲気下で燃焼することに起因して生じる。テーパ付リップレス燃焼室では燃焼初期より、テーパに沿って混合気がスキッシュエリアに拡散するため、スワールやスキッシュ流に頼ることなく、空気利用率を向上し得る。図 7 に低冷損燃焼コンセプトにおける混合気拡散効果を可視化した結果を示す。従来の燃焼室と比較し、輝炎が燃焼室全体に拡散しており、空気利用率が向上していることがわかる。本エンジンでは低温燃焼の採用により等 NOx、等スモークの条件下で約 2.5%の燃費向上効果を得た。

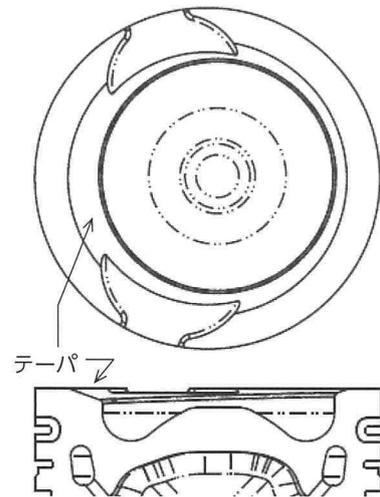


図 6 テーパ付リップレス燃焼室

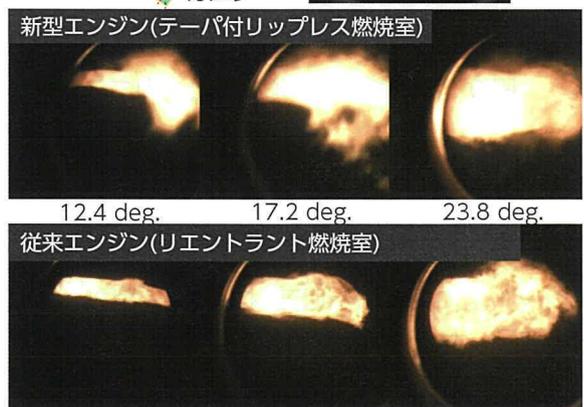
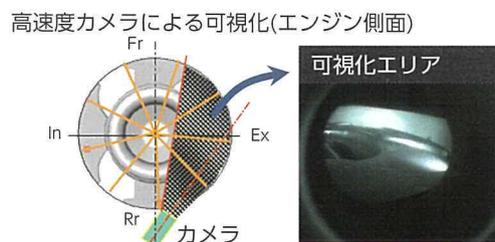


図 7 低冷損燃焼可視化結果 (2,000rpm/1.4MPa)

合わせて本エンジンでは、バキュームポンプ改良によるフリクション低減、カムプロフィール見直しによるポンプ損失低減を同時に実施した。この結果ユーロ6規制に適合しながらエンジン単体で4%の燃費改善を実現した(図8)。

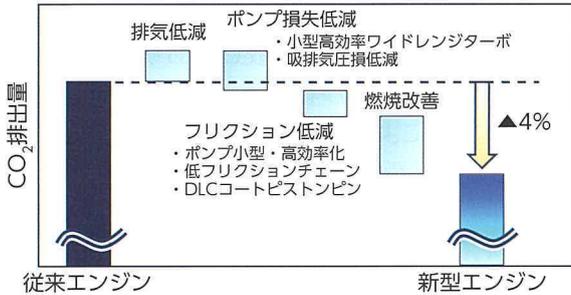


図8 燃費低減効果

3.3 エミッション低減技術

小型ディーゼル乗用車の排気浄化システムには低排気温条件下での浄化性能、小スペースへの搭載性が求められる。本エンジンでは安価で搭載性に優れる、NSRを採用し、ユーロ6規制へ対応した。NSR触媒の浄化原理を図9に示す。NSRは一定量NOxを吸蔵すると浄化率が低下するため、定期的に還元剤を供給し、吸蔵したNOxを還元する必要がある。本項では低温でのNOx吸蔵性能を改善する触媒システム、および筒内リッチ燃焼を用いたNOx還元技術について説明する。

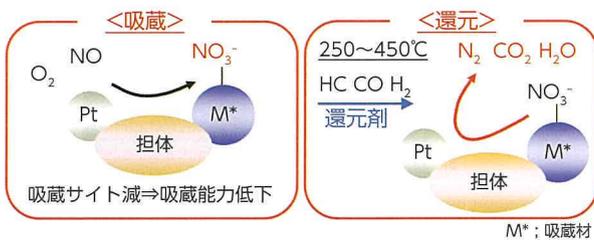


図9 NSR触媒のNOx浄化メカニズム

3.3.1 NSR触媒のタンデム化

吸蔵時は、排気中に含まれるNOを酸化し、触媒コート上に担持した吸蔵材(M)に硝酸塩として吸蔵する。低排気温条件下で冷間から高いNOx浄化率を得るには、触媒活性温度到達までの時間を短縮する必要があり、触媒の熱容量低減が重要である。一方、触媒を低容量化するとNOx吸蔵可能量が不足し、頻繁な還元が必要となるため燃費が悪化する。

本エンジンでは、必要容量の確保と触媒の早期活性を両立するため図10に示すようにNSR触媒のタンデム搭載を行った。大小2つのNSR触媒をタンデムに配置することで、冷間時には小容量近接配置のNSR1の温度が素早く上昇しNOxを吸蔵する。触媒活性後はNSR2の吸蔵性能によりシステムとしての要求吸蔵量を確保することができる。本エンジンではNSRのタンデム化より、吸蔵容量の確保と早期活性化の両立を実現している。

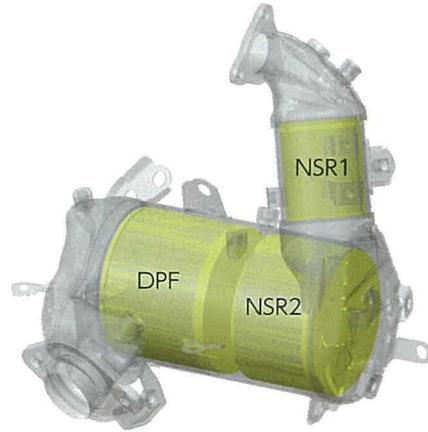


図10 タンデムNSRシステム

3.3.2 筒内リッチ燃焼

前述の通り吸蔵還元型NOx触媒は、吸蔵したNOxを定期的に還元する必要がある。低排気温条件下でNOxを還元するには反応性のよい還元剤を供給する必要があるため、本エンジンでは還元剤供給手段として筒内リッチ燃焼を採用した。筒内リッチ燃焼の概念図を図11に示す。筒内リッチ燃焼は、新気の吸入空気量を十分に下げた状態でポスト噴射を併用した燃焼である。共存酸素が少なく、還元性に優れるCOを供給できるため、低排気温条件下でもNOxを還元できる(図12)。

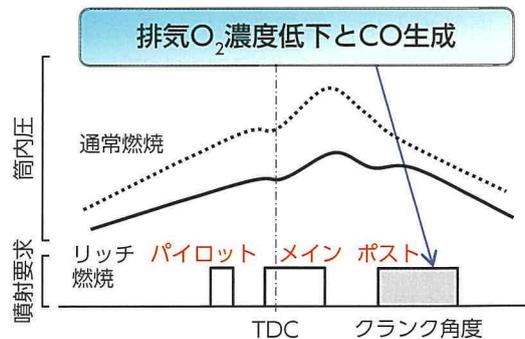


図11 筒内リッチ燃焼コンセプト

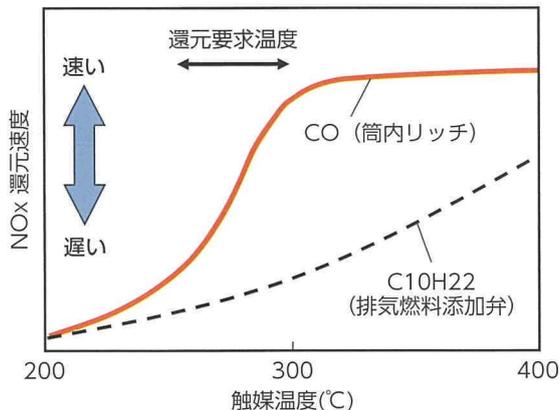


図 12 還元剤違いによる NOx 還元速度

筒内リッチ燃焼で課題となるのは、吸気絞りによって圧縮端温度が低下し着火性が悪化すること、および低 O₂ 濃度での燃焼によるスモークの増加である (図 13)。これらの課題に対して、本エンジンでは EGR 制御により対処した。着火性が問題となりやすい軽負荷域では、EGR の導入により、吸入ガス温度とインテークマニホールド圧力を上昇させ、着火に必要な圧縮端温度を確保した。一方、高回転高負荷域でのスモーク増加に対しては、燃焼温度の低下を狙って EGR を導入した⁽³⁾。スモークとポスト噴射時の燃焼温度の関係を図 14 に、EGR 導入による筒内温度の変化を図 15 に示す。リッチ燃焼中の筒内温度コントロールにより、NOx 還元、脱硫制御に必要なリッチ燃焼運転領域を確保した。

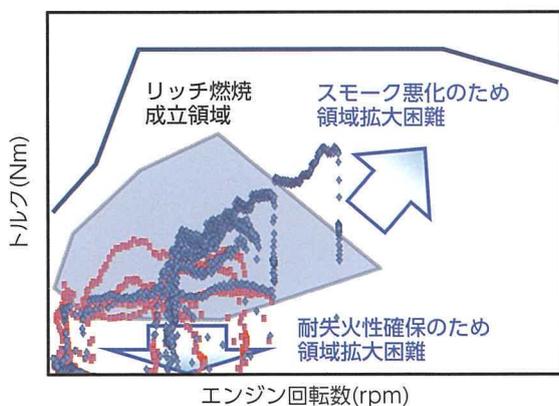


図 13 リッチ燃焼可能領域

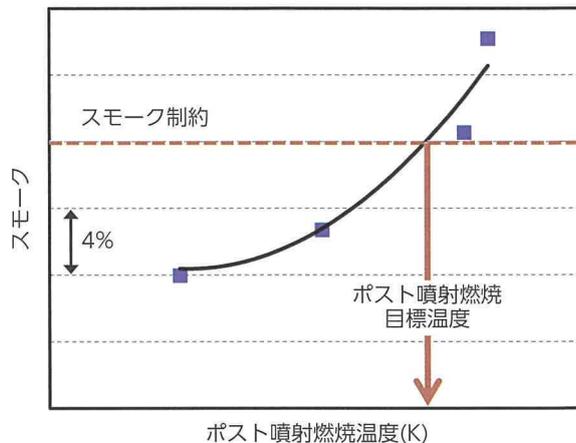


図 14 燃焼温度とスモーク排出の関係

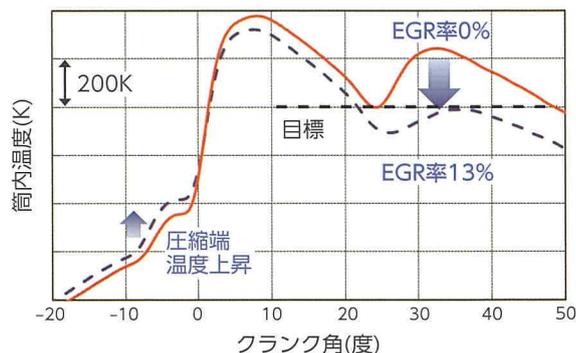


図 15 EGR 導入による筒内温度変化

4 まとめ

新型 1.4L 直列 4 気筒 ESTEC D-4D ディーゼルエンジン (1ND-TV) は、新コンセプトの低冷損燃焼の採用、フリクション低減、ポンピングロス低減により 4% の燃費向上を果たし、“Fun to Drive” と環境性能を高次元で両立するトヨタの次世代エンジンに相応しい仕上がりにすることができた。また、排気浄化システムとして、高 NOx 浄化率の NSR システムを開発し、ユーロ 6 規制に対応した。

今後、WLTP (Worldwide Harmonized Light Duty Test Procedure) や RDE (Real Driving Emission) 規制の導入、CO₂ 規制への対応など、ますますディーゼルエンジンへの期待が高まる。お客様の期待を超えるクリーンディーゼル車を開発し続けるため、今後もより一層の努力と挑戦を続ける。

最後に、本エンジンの開発に多大なるご指導、ご支援、ご協力いただいた社内外のすべての関係者の皆様に深く感謝の意を表す。

■参考文献

- (1) 小林正明, 天野, 山口, 竹田 : 1.4L 小型直噴ディーゼルエンジンの開発. 2012 自動車技術会シンポジウム 新開発エンジン. No.10-12, p.31 - 35 (2013)
- (2) 西田健太郎, 小川, 橋詰, 石山, 長谷川 : 小ポアディーゼル燃焼コンセプト. 自動車技術会秋季学術講演会前刷集. No.130-14, p.19 - 23 (2014)
- (3) K. Akihama, Y. Takatori, K. Inagaki, S. Sasaki, et al. : Mechanism of the Smokeless Rich Diesel Combustion by Reducing Temperature. SAE Technical Paper, 2001-01-0655 (2001)
- (4) 片山真伸, 小林, 池田, 野崎, 吉田, 筧川 : EU6 向け小型直噴ディーゼルエンジンの開発. 2015 自動車技術会シンポジウム 新開発エンジン. No.15-14, p.70 - 74 (2015)

■著者



阪本 秀男



筧川 直彦



池田 栄次



小林 正明



パケ ティボ



ゴーティエ レジス

新型 2.8L 直列 4 気筒 ESTEC ディーゼルエンジンの開発

The New Toyota 2.8-Liter Inline 4-Cylinder ESTEC 1GD-FTV Diesel Engine

岸本 岳*
Gaku Kishimoto

笈川 直彦*
Naohiko Oikawa

濱村 芳彦**
Yoshihiko Hamamura

川口 暁生***
Akio Kawaguchi

金子 広孝*
Hiroataka Kaneko

真鍋 啓輔****
Keisuke Manabe

小郷 知由*****
Tomoyuki Kogo

要旨

ディーゼルエンジンは新興国や商用用途で経済性や商用車ならではの走り、即ち燃費と低速トルクから市場の支持を得ている。より一層の市場ニーズと排気規制強化に応えるため、新型 4 気筒ディーゼルエンジンを開発した。本エンジンは従来の KD 型エンジンの単なる改良ではなく、基本骨格から見直しあらゆる損失に対して全方位で低減させた高熱効率低燃費エンジン群 ESTEC (Economy with Superior Thermal Efficient Combustion) の一つである。トヨタ自動車初の尿素 SCR (Selective Catalytic Reduction) システムを採用してユーロ 6 規制並びに国内ポスト新長期乗用車規制に対応した。

Abstract

Diesel engines are particularly popular in emerging markets and for commercial vehicle applications due to the excellent economic (fuel efficient) and low-end torque dynamic performance of these engines. Toyota Motor Corporation has developed a new 4-cylinder diesel engine under its ESTEC (Economy with Superior Thermal Efficient Combustion) development concept to comply with increasingly stringent emissions regulations and respond to the expectations of customers. Rather than simply refining the previous 1KD-FTV engine, the basic specifications of the 1GD-FTV were substantially modified to comprehensively reduce loss, increase thermal efficiency, and lower fuel consumption. This new engine also incorporates Toyota's first ever urea selective catalytic reduction (SCR) system, and meets both Euro 6 and Japan's post-new long-term emissions regulations for passenger vehicles.

キーワード GD, 最大熱効率 44%, TSWIN, 低速トルク, モジュラーデザイン, 燃焼設計, 尿素 SCR システム

1 はじめに

トヨタは新興国や商用車のディーゼル市場にピックアップトラックやミニバンおよび SUV で構成される IMV (Innovative International Multi-purpose Vehicle) を 2002 年以降導入し、各国で好評を博している (図 1)。

商品力向上と排気規制強化に応えるため、ESTEC (Economy with Superior Thermal Efficient Combustion) と呼ばれる新型 GD エンジンを開発した。



図 1 新型 IMV (タイ)

* エンジン制御システム開発部

** エンジン開発推進部

*** エンジン先行設計部

**** エンジン設計部

***** 先行プロジェクト推進室

2 開発のねらい

基本骨格から見直して素を良くすることと、各仕向けや各車両への展開性と将来への連続性を考慮し、信頼性・耐久性を確保しながら次のような狙いを掲げ、開発を行った。

- (1) 従来比 15%以上の燃費改善
- (2) 力強い走りを実現する低速トルク向上
- (3) プラットフォームに依存しない商品展開性
- (4) 圧倒的に静かなディーゼル燃焼音
- (5) 欧州および国内乗用車規制対応

3 エンジン本体

IMV に搭載されている 1KD-FTV と新開発の 1GD-FTV (ESTEC) のエンジン外観を図 2 に、主要諸元を表 1 に示す。

3.1 燃費改善技術

低流動低冷損燃焼の採用および冷却損失、排気損失、摩擦損失の低減とともに、吸排気ポート形状およびピストン燃焼室形状の最適化、ピストン頂面の遮熱被膜の採用などで最大熱効率 44%を達成した。

ピストン燃焼室形状は世界の市場環境の燃料を考慮し、圧縮比を従来より高め、広口浅皿化とともにリップ部にテーパ面を持たせることでスキッシュエリアの新気を効率良く活用できる新形状を採用した(図 3)。



図 2 エンジン外観

表 1 主要諸元

エンジン	1GD-FTV (ESTEC)	1KD-FTV (2014)
種類	直列 4 気筒	←
排気量 (cc)	2,755	2,982
内径 × 行程 (mm)	φ92×103.6	φ96×103
圧縮比	15.6	15
使用燃料	軽油	←
最大トルク (Nm/rpm)	450/1,600-2,400	360/1,400-3,200
最高出力 (kW/rpm)	130/3,400	126/3,600
ヘッド/ブロック	Al/FC	←
バルブシステム	DOHC4 バルブ HLA+ローラーロッカー	DOHC4 バルブ 直打
燃料噴射系 (bar)	ソレノイド (2,200)	ピエゾ (2,000)
過給	VN ターボ D シリーズ	VN ターボ C シリーズ
EGR システム	高圧 + クールド EGR	←
後処理	DOC+DPF (エンジン横) + SCR (床下)	DOC + DPF (床下)
対応排ガス規制	ユーロ 6, ポスト新長期	ユーロ 5



図 3 燃焼室形状

ピストン頂面には、世界初のシリカ強化多孔質陽極酸化膜 (SiRPA:Silica Reinforced Porous Anodized Aluminum) と呼ぶ遮熱被膜を適用し、燃焼～膨張行程時は燃焼室ガス温に応じて高温化、排気～吸気行程ではピストンからの放熱を抑えて低温化する温度スイング技術 (TSWIN: Thermo Swing Wall Insulation Technology) により、冷却損失を大幅に低減させた (図 4)。



図 4 ピストン頂面遮熱被膜 (TSWIN)

3.2 低速トルク向上

摩擦損失の低減、吸排気ポート形状性能向上、燃焼室形状最適化、新型ターボおよび新型コモンレール噴射システムの採用により、低速トルク 11%、最大トルク 25%、最高出力 3% 向上を達成した (図 5)。

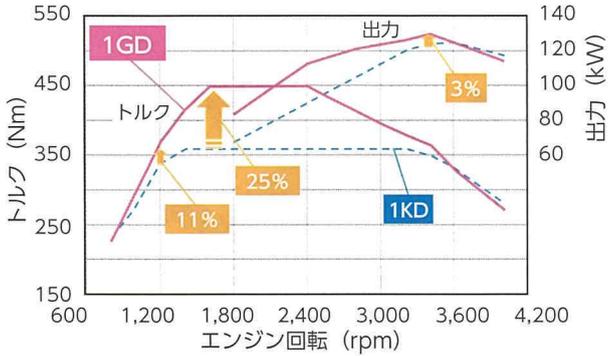


図 5 エンジン性能曲線

従来の KD 型エンジンは強いスワールによる拡散燃焼促進のためにダブルヘリカルポートを採用したが、本エンジンではポート流量係数向上を狙い、タンジェント+ヘリカル型へ変更した (図 6)。このポート実現のために、1 気筒あたりのシリンダヘッドボルト数を削減することにし、シール性・耐久性を確保するため、シリンダヘッドおよびシリンダブロックの骨格構造を見直した。

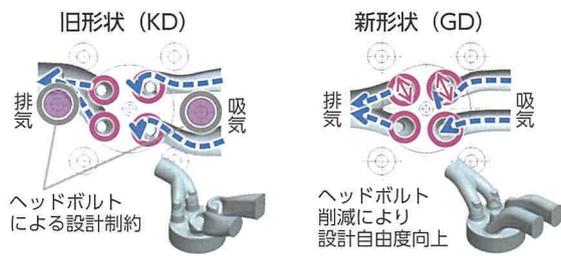


図 6 ポート形状比較

吸入効率向上の結果として、従来型エンジン比で排気量を小さくしたにも関わらず、多くの空気を取り込むことができ、無過給トルクも大幅に向上した (図 7, 8)。

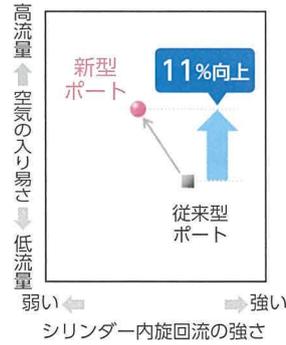


図 7 吸入空気量比較

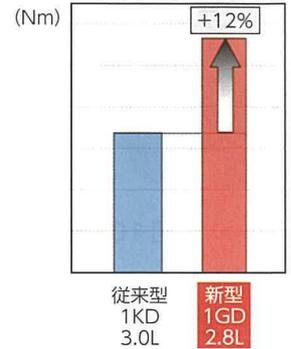


図 8 無過給トルク比較

3.3 商品展開性

触媒改良による触媒サイズの小型化やレイアウトのコンパクト化を行い、触媒をエンジン側面に配置した。排気規制強化に応じて触媒追加や入れ替えをすることで、全ての車種と各仕向けの排気規制対応を 3 種類の排気システムに共通化した。車両プラットフォームによらず同一のレイアウトとし、開発の効率化とコスト削減を実現し商品展開性を高めた。ユーロ 4 排気規制対応では DOC (Diesel Oxidation Catalyst) をエンジン側面に搭載し、ユーロ 5 排気規制対応ではその位置に DOC/DPF (Diesel Particulate Filter) を搭載する (図 9)。

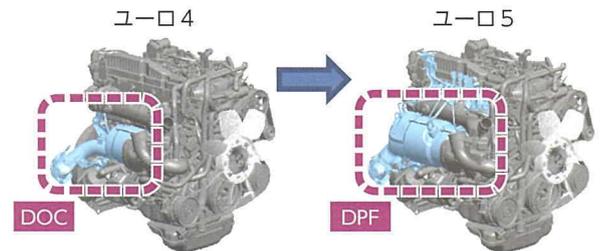


図 9 排気システムモジュラーデザインコンセプト

触媒のエンジン側面配置で床下の触媒搭載性を向上させたため、ユーロ 6 排気規制および国内ポスト新長期乗用車規制対応のための尿素 SCR (Selective Catalytic Reduction) システムはベースとなるユーロ 5 エンジンの変更なしで床下に追加とした。さらに床下搭載も DPF 後端から SCR 触媒までの設計を 1 種類に統一することで、開発効率化を達成し、商品展開性を向上させた (図 10)。



図 10 尿素 SCR システム搭載

3.4 静粛性

ブロック壁面やチェーンカバー表面の剛性向上などの燃焼音（燃焼時振動）の伝達経路に存在する共振周波数と、周辺部品の表面の固有振動数を分散させるといった一般的な構造減衰の改善とともに、主燃焼の開始時期と熱発生を一定に制御する燃焼設計（図 11）により、燃焼音を従来モデルから 2～5dB 低減、また回転数や負荷の変化に対する燃焼音変化を大きく低減させた（図 12）。

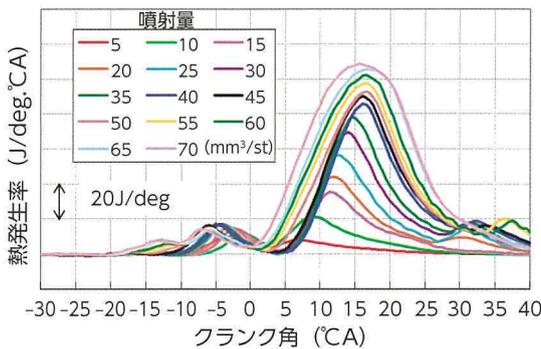


図 11 熱発生率

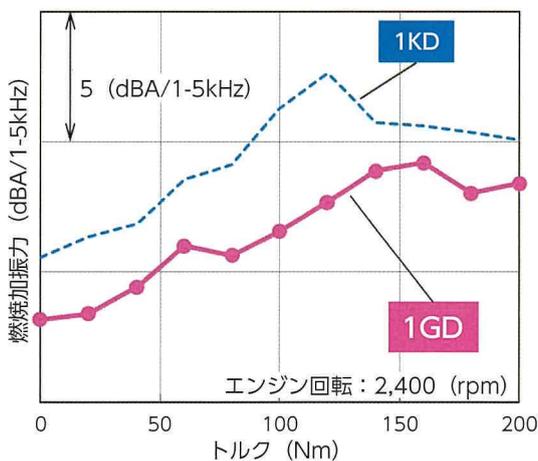


図 12 燃焼加振力比較

3.5 排気規制対応

各国排気規制および将来規制動向を考慮して、排気システムとしてトヨタ初の尿素 SCR システムを開発し、欧州ユーロ 6 規制および国内ポスト新長期乗用車規制に対応した（図 13）。

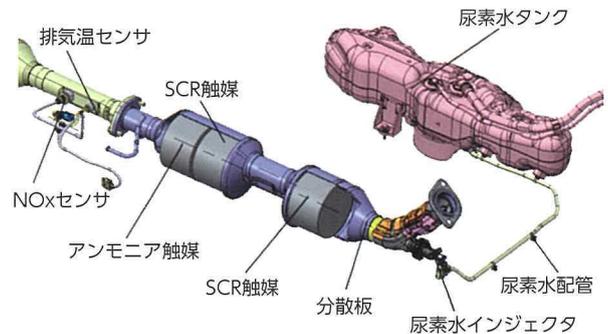


図 13 尿素 SCR システム

NOx 浄化性能向上のためには SCR 触媒の暖機性が重要であり、排気管形状と尿素水インジェクタ、分散板形状の最適化を行い、尿素水を短距離で均一に分散させ、SCR 触媒のエンジン近接搭載を実現し触媒暖機性を向上させた（図 14）。

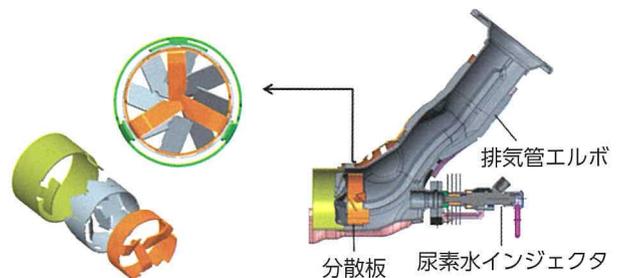


図 14 尿素水インジェクタと分散板

SCR 触媒の早期暖機により、触媒暖機のための燃費を悪化させず排気規制を達成しただけでなく、尿素 SCR システムの高い NOx 浄化率を活用し、ユーロ 5 規制対応エンジン比 3% の燃費向上を達成した。NOx 低減を EGR (Exhaust Gas Recirculation) で行うユーロ 5 システムではタービン背圧を維持して必要な EGR 率を確保する必要があるが、NOx 低減を尿素 SCR システムに頼れるユーロ 6 システムでは背圧上昇を抑えることができるため、燃費と排気の両立を実現できた。

尿素 SCR システムでは、各種モデル制御を採用し、適合効率化と精度向上、コスト低減を行った。エンジン排出 NOx は直接センサで計測せずにエンジン運転条件に相関の高い吸気 O₂ 濃度をもとに

NOx を推定し尿素水添加量を決定する。本制御採用により SCR 触媒前の NOx センサを廃止、システムの簡素化と制御精度向上に貢献した。同様に SCR 入口温度センサも廃止するため、DPF 出口温を元に排気ガス量と放熱量をもとに SCR 入口温を推定、尿素水添加量の補正を行う制御を採用した。

さらに、お客様の利便性を考慮して、尿素水噴射量制御の最適化を行ない、尿素水の補給というお客様のご負担を車両メンテナンスピッチ内は尿素水無補給となるようにした。

以上の通り、ユーロ 5 システムに対して尿素 SCR システムの追加と、わずかな適合修正のみでユーロ 6 および国内ポスト新長期乗用車規制に対応し、同時に燃費向上も実現した。

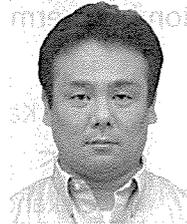
4 おわりに

商用車用エンジンに重要な低速トルクと燃費の大幅向上を実現し、熱効率の世界トップレベルの 44% を達成した。また圧倒的に静かなディーゼル燃焼を実現した。

排気は欧州ユーロ 4 からユーロ 6 および国内規制に対応し、今後複数の車種に展開してグローバル市場のお客様へお届けしていく予定である。

最後に、本エンジン開発に多大なるご協力をいただいた (株) 豊田自動織機、(株) デンソーはじめ社内外の全ての関係者の皆様に、紙面を借りて感謝の意を表します。

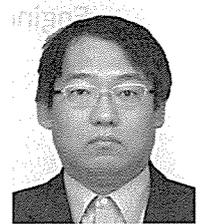
■ 著者



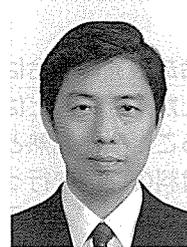
岸本 岳



笈川 直彦



濱村 芳彦



川口 暁生



金子 広孝



真鍋 啓輔



小郷 知由

壁温スイング遮熱法 TSWIN によるエンジン熱損失低減

Engine Heat Loss Reduction by Thermo Swing Wall Insulation Technology (TSWIN)

川口 暁生* 立野 学* 西川 直樹**
Akio Kawaguchi Manabu Tateno Naoki Nishikawa
山下 親典*** 脇坂 佳史**** 堀江 俊男****
Chikanori Yamashita Yoshifumi Wakisaka Toshio Horie

要旨

内燃機関の各種損失の中でも冷却損失の割合は大きく、燃焼室を断熱することによりこれを低減する試みは従来から数多くなされてきたが、ほとんどは背反を克服できず実用化に至っていない。本研究では燃焼室の壁温をガス温に追従させることで、遮熱と性能への背反防止を両立する「壁温スイング」による遮熱手法と、これに対応する遮熱材料の開発を行った。遮熱材への要求特性である、低熱伝導率・低体積比熱の薄い膜を燃焼室壁面上に形成しエンジン評価を行った結果、冷却損失の低減と正味仕事・排気損失の増加が確認された。燃費改善・熱マネジメントアイテムとして、世界で初めて実用化した本技術について解説する。

Abstract

Cooling loss accounts for a large proportion of the losses in an internal combustion engine. Although many studies to reduce cooling loss by insulating the combustion chamber walls have been carried out in the past, most failed to resolve the drawbacks of this approach and were not successful. This article describes a new concept called Thermo Swing Wall Insulation Technology (TSWIN), which helps to prevent the adverse effects of insulation on performance by quickly changing the temperature of the combustion chamber walls in accordance with the transient in-cylinder gas temperature. It also details the development of an insulating material with low thermal conductivity and low heat capacity to realize the proposed concept. The results of engine tests after applying a thin coating of the developed material onto the combustion chamber walls confirmed that this technology reduced cooling loss while increasing brake work and exhaust loss. TSWIN is the world's first mass-production example of this type of heat management technology to improve fuel efficiency.

キーワード エンジン, 燃焼室, 冷却損失, 熱損失, 燃費改善, 遮熱, 断熱, スイング

1 はじめに

燃料電池車の市販開始に代表されるように、自動車の多様な動力源開発の進展は目覚ましい。しかし依然として先進国・大都市以外、世界の大多数の自動車が必要とする人々にとって、燃料の調達や取扱いが容易な内燃機関は生活に欠くことのできない存在であり、モビリティ普及拡大とともにその効率向上への要求は、今後ますます高まると予想される。

図1はエンジンで燃料が発生する熱エネルギーの行き先を示した、熱バランスグラフの一例である。

図からわかるように全体の約6割が損失として失われ、このうち排気損失は後処理触媒の暖気や、将来的には排熱回収による有効活用の可能性もあるが、冷却損失は車室暖房の他には有効な用途がなく、エンジンでの低減が望まれている。

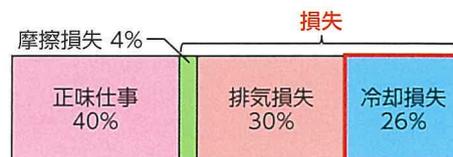


図1 エンジン熱バランスの例

* エンジン先行設計部
** 材料技術開発部
*** エンジン設計部
**** (株) 豊田中央研究所

ディーゼルエンジンにおいては、1980年頃から燃焼室壁面を遮熱化する多くの研究が行われた。これらの遮熱手法は、燃焼室壁面そのものを、熱伝導

率が低く耐熱性も兼ね備えたセラミックスなどで構成し、燃焼室から冷却水への熱損失を低減するというものであった⁽¹⁾⁽²⁾。これにより得られたエネルギーをピストン仕事に利用し、また増加した排気エネルギーをターボチャージャにより回収して熱効率の向上を図っている。しかし一方で、燃焼室壁が常時高温となることにより吸気を加熱し、吸入効率の悪化、すす・NOx 排出量の増加を招いてしまうこと、また遮熱壁の信頼性低下などの欠点が報告されている。また上記遮熱手法をガソリンエンジンに適用すると、吸気効率の悪化のみならずノッキングの悪化を招くことが懸念される。

これらの欠点を克服するため、筆者らは吸気行程での燃焼室壁温を上げない遮熱手法を提案し、実現を目指してきた。基本とする考え方は、ガス温度に応じて壁表面温度を変化させることで、吸気・圧縮行程では壁温の上昇を抑制して吸気加熱を防止し、膨張・排気行程ではガスと壁面との温度差を減少させ、吸気加熱防止と熱損失低減を実現するというものである⁽³⁾⁻⁽⁶⁾。本稿では、上記遮熱手法のコンセプト検討・材料開発・エンジンへの適用を報告する。

2 壁温スイング遮熱コンセプト

2.1 コンセプト

一般的に、エンジン筒内における燃焼ガスから燃焼室壁面への熱損失は式(1)で記述される。

$$Q' = h_g \times (T_{\text{gas}} - T_{\text{wall}}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 Q' : 単位面積当たりの熱損失
 h_g : 熱伝達係数
 T_{gas} : ガス温度
 T_{wall} : 燃焼室壁温度
 である。

本壁温スイング遮熱法は、サイクル中に燃焼室壁温度がガス温度の変化に追従するように上昇・降下させることによって、ガスと燃焼室壁の温度差を小さくすることを狙った熱損失低減手法である。本遮熱法のコンセプトを材料の熱物性(図2)、壁温度の時間履歴の模式図(図3)と関連付けて説明する。

アルミニウム合金や鋼などの金属(図2△▲)は熱伝導率、体積比熱が大きいため、圧縮・膨張行程中で壁表面温度がほとんど変化しない(図3: 金属壁)。従って、上死点付近で燃焼によってガス温度

が上昇するとガスと壁面との間に大きな温度差が発生し、燃焼室壁面への熱損失の要因となる。一方、燃焼室壁面にジルコニアなどのセラミックス(図2□■)の断熱層を数mm形成する1980年代の遮熱法では、壁面への熱流束は減少するが、定期的に壁面温度が上昇し(図3: 従来遮熱壁)吸気加熱を引き起こす。これに対し壁温スイング遮熱法では、熱伝導率と体積比熱がセラミックスより低い材料を燃焼室壁面に形成し、その表面温度は燃焼行程で急速に上昇し、排気行程で急速に低下する(図3: スイング遮熱壁)ことにより、吸気加熱を起すことなく熱損失を低減することを狙っている。尚、この表面温度の最大値と最小値の差をスイング幅と呼ぶ。

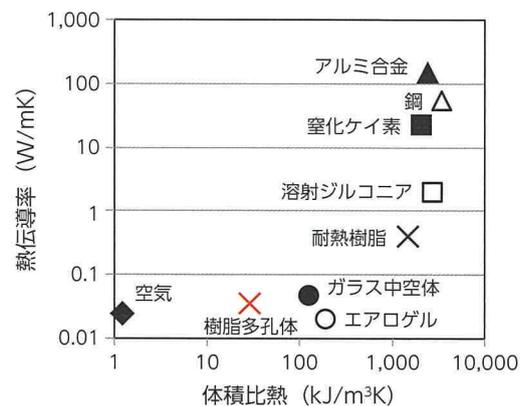


図2 各種材料の熱物性

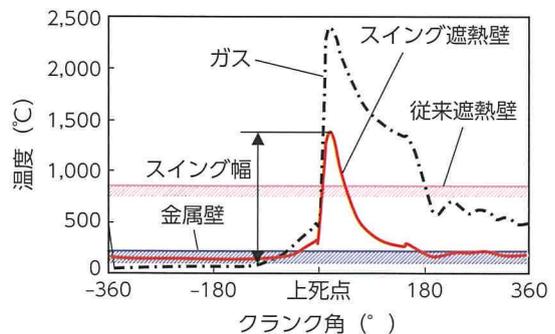


図3 ガス温度および燃焼室壁温度履歴

2.2 熱効率改善効果の予測

エンジン筒内の燃焼サイクル計算を用いて、遮熱膜の有無による熱効率の違いを比較した。遮熱膜を形成した場合の1サイクル中の壁温変化は、燃焼室壁への熱の流入を模擬した1次元計算で算出した値をサイクル計算の境界条件として与えた。計算に用いたエンジン諸元・運転条件を表1に、遮熱膜の熱物性を表2に示す。

表1 サイクル計算に用いたエンジン諸元

エンジン形式	過給ディーゼルエンジン
ボア×ストローク (mm)	86×96
圧縮比	13.8
機関回転数 (rpm)	2,100
燃料噴射量 (mm ³ /st)	60

表2 計算に用いた遮熱膜熱物性

	物性1	物性2
熱伝導率 (W/mK)	0.3	0.1
体積比熱 (kJ/m ³ K)	800	100

図4は、横軸に遮熱膜の膜厚さを記し、縦軸は上段から、サイクル中の最大壁温度変化（以降、スイング幅）、熱損失低減率、熱効率向上率を示している。膜厚に着目すると、およそ100 μ mの膜厚の時に熱効率改善率がピーク値をとることが分かる。膜厚が100 μ mを超えると膜自身が持つ熱容量により排気行程中に壁温度が下がりきらず、壁温度が上昇して吸気加熱を引き起こし、ポンプ損を増加させるためである。次に、熱物性の違いを比較すると、熱伝導率・体積比熱がともに小さい物性2の方が、スイング幅が大きいため熱損失の低減率も高く、高い熱効率向上率を得られることが分かる。

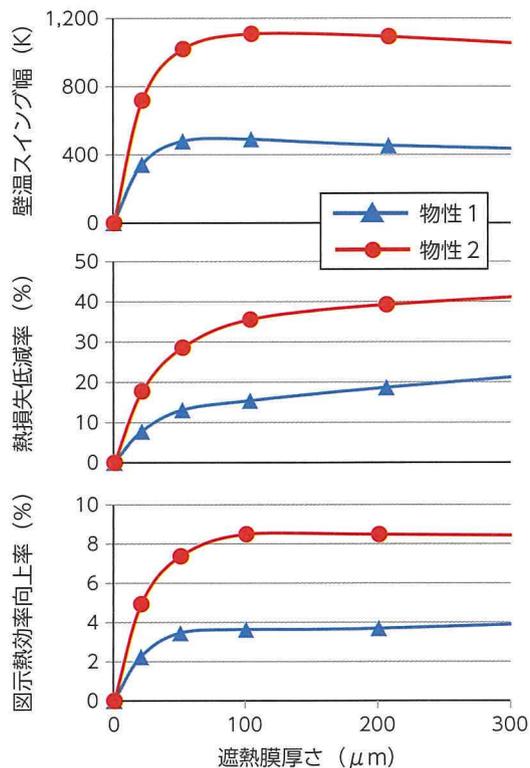


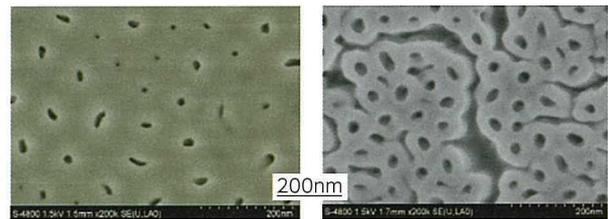
図4 遮熱効果の予測（サイクル計算）

3 遮熱材料の開発

3.1 遮熱材料の選定

壁温スイング遮熱法を実現するには、体積比熱と、熱伝導率がともに小さい特性を持った材質の膜を燃焼室壁面へ形成する必要がある。この特性を達成するための膜材料として、外部から遮断された空隙を含む、多孔質セラミックに着目した。その中からピストン材としても広く使われている、アルミニウムから成長する陽極酸化皮膜を選択した。陽極酸化皮膜は電解液中のアルミニウムを陽極にし、通電することでアルミニウムを酸化させ、柱状のアルミナをアルミニウム表面に成膜するものである。

ピストンへの陽極酸化皮膜の適用事例としては、耐摩耗性向上を目的としてリング溝に成膜する膜厚約10 μ mの硬質な陽極酸化皮膜（以降、硬質陽極酸化皮膜）が良く知られているが、今回スイング遮熱膜材質として成膜したのは膜厚約70 μ mの多孔質陽極酸化皮膜である。図5にSEM画像での微細構造を示す。



(a) 硬質陽極酸化皮膜 (b) 多孔質陽極酸化皮膜

図5 陽極酸化皮膜の微細構造比較

硬質陽極酸化皮膜（図5-(a)）と比べ、多孔質陽極酸化皮膜（図5-(b)）は、成膜中に発生する直径数10nmの微細孔（以降ナノポア）の孔が大きく、かつセル間が拡大している。

図6にピストン用の鋳造アルミニウム合金（アルミニウム-12%シリコン（Si）系合金）に約70 μ m成膜した陽極酸化皮膜の断面組織を示す。このスケールで見えている陽極酸化皮膜の空隙は、アルミニウム合金中晶出物の直上に生成される直径約10 μ mの孔（以降マイクロポア）であり、多孔質陽極酸化皮膜の空隙はこれら2種のスケールの違うものからなる。

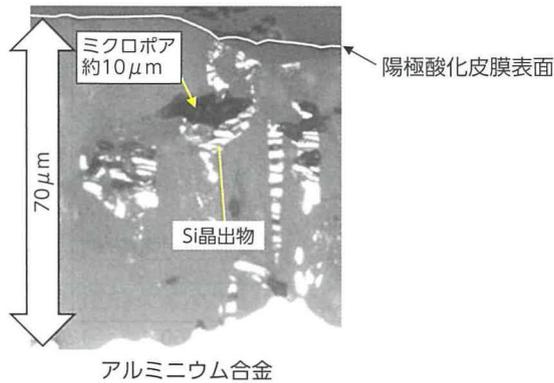


図6 陽極酸化皮膜の断面組織

3.2 膜強度の向上

多孔質陽極酸化皮膜をピストン頂面に約 70 μm 成膜し、エンジン試験を実施した結果、図7に示すようにアルミニウム合金との界面ではなく皮膜の内部で破壊した。このことから皮膜自体の強度向上が必要であると推測される。そこで皮膜自体の強度指標として皮膜断面の硬度をマイクロビッカースにて計測した結果、硬質陽極酸化皮膜に比べ、多孔質陽極酸化皮膜の硬度は 1/4 に低下していることが判明した。これは図5で示したように、硬質陽極酸化皮膜(a)と比べ、多孔質陽極酸化皮膜(b)はナノポアとセル間が拡大しているためと考えられる。

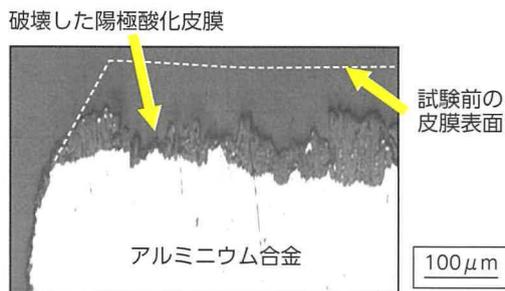


図7 エンジン試験後の断面組織

そこで拡大したナノポアを補強し、皮膜自身の強度を確保することを目的として、保護膜材をナノポアに充填することとした。保護膜材は、エンジン運転中の熱により劣化せず、強度を有するという観点からシリカを選定した。シリカをナノポア内に充填させるため、流動性を持ったパーヒドロポリシラザンを陽極酸化皮膜に塗布し、ナノポア内充填後シリカへ熱転化させた。図8に保護膜塗布後のナノポアとセル間を Scanning transmission electron microscopy (STEM) で面分析した結果を示す。画像からはナノポアとセル間に、シリカを構成する Si が存在しており、シリカが充填されていること

が確認できた。この保護膜充填後の硬度を確認したところ、硬質陽極酸化皮膜と同等の硬度となっており、多孔質陽極酸化皮膜の強度向上が達成された。一方、マイクロポアには図9に示すように Si の検出が見られず空隙が保持されていることを確認した。この構造により外気と遮断された閉空孔を形成し、断熱性が確保された。

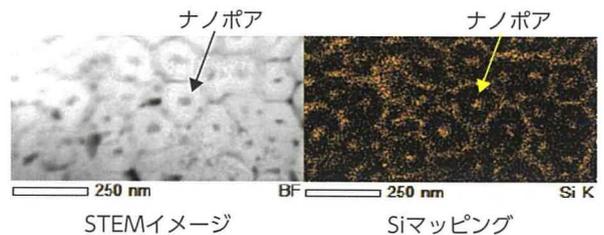


図8 シリカ充填後のナノポア内 Si 分布 (TEM マップ)

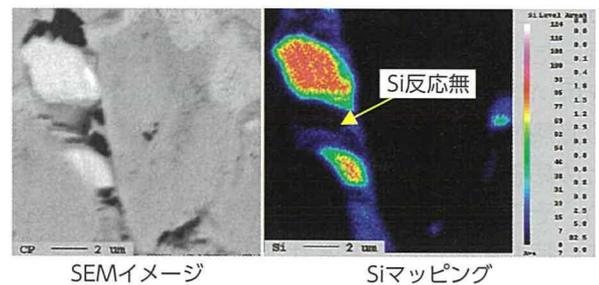


図9 シリカ充填後のマイクロポア内 Si 分布 (FE-SEM マップ)

今回開発した遮熱膜をシリカ強化多孔質陽極酸化皮膜 (Silica Reinforced Porous Anodized Aluminum)、以降略称で SiRPA と呼ぶ。図10はその構造の模式図を、図11は熱物性を示す。アルミニウムに比べ熱伝導率は 1/100 以下、体積比熱は 1/2 以下と良好な熱物性値となっている。

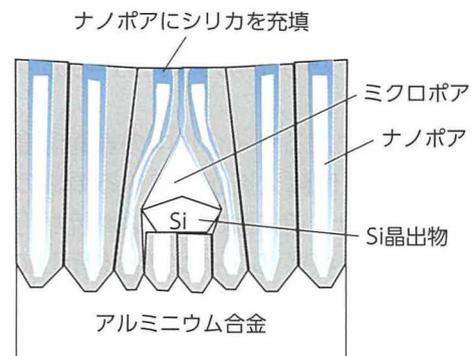


図10 SiRPA 皮膜構造の模式図

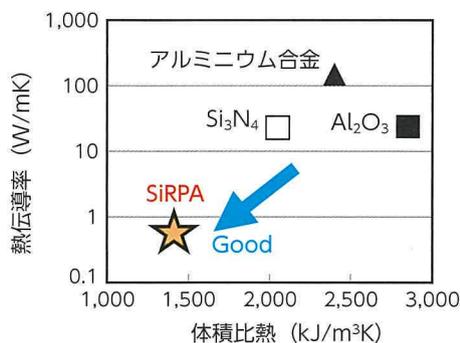


図 11 SiRPA の熱物性

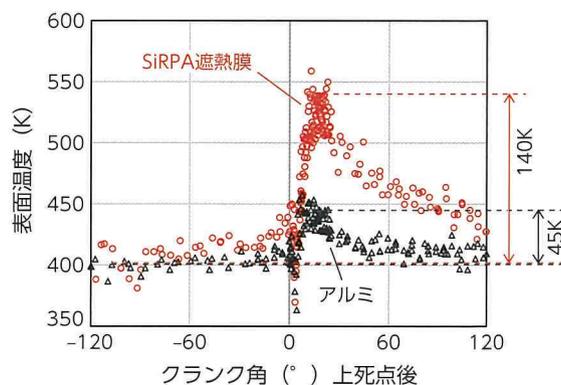


図 12 遮熱膜有無での燃焼室壁表面温度計測結果

4 エンジンへの適用

4.1 壁温スイング現象の検証

開発した遮熱膜が狙い通り温度スイング現象を実現することを検証するため、実際に燃焼運転を行うエンジン燃焼室内にて、遮熱膜の表面温度計測を行った。従来、筒内の表面温度計測には薄膜熱電対を用いた手法がとられることが多いが、本遮熱法での遮熱膜材質に対し熱電対の材料は熱容量が大きいため応答が遅れ、正確なスイング幅を計測できない。そこで本研究では、燐光寿命が温度依存性を有する特性を利用した温度計測手法、レーザー誘起燐光法 (Laser-Induced Phosphorescence) を適用した。光学アクセスが可能な単気筒エンジンのピストン頂面に SiRPA 皮膜を形成し、その上に燐光体を塗布して温度測定を行った。実験条件を表 3 に示す。なお、この手法による温度計測は参考文献⁽⁷⁾に詳述されている。

表 3 温度計測時実験条件

エンジン回転数 (rpm)	1,200
燃料	DGM*
コモンレール圧 (MPa)	80
燃料噴射量 (mm ³ /st)	37.5

*ジエチレングリコールジメチルエーテル

遮熱膜の有無によるサイクル中の表面温度の履歴を図 12 に示す。噴霧火炎が衝突する領域の表面温度を計測しており、遮熱膜ありでは燃焼が行われる上死点近傍で約 140K のスイング幅を示している。

本計測結果は熱物性から推定されるスイング幅に概ね一致しており、運転中のエンジン燃焼室壁上でコンセプト通りの温度スイング現象が実現できていることが確認できた。

4.2 実エンジンへの適用方法検討

実エンジンでの燃費と冷損低減効果を検証するため、4気筒ターボディーゼル機関にて運転評価を行った。エンジン諸元および評価条件を表 4 に示す。遮熱膜の加工範囲はピストン燃焼室面全面を対象にしたものと、ピストン上面中央の凹部 (以降キャビティー) は機械加工の金属表面のまま残してそれ以外の部分に膜加工したものとの 2 諸元とし、評価・比較した。それぞれの皮膜加工範囲を図 13 に示す。

表 4 エンジン諸元および評価条件

ボア×ストローク (mm)	φ92 × 103.6
排気量 (cm ³)	2,755
圧縮比	15.6
スワール比	2.2
燃料噴射装置	コモンレール, G4S
エンジン回転数 (rpm)	1,400
EGR率 (%)	40
燃料噴射量 (mm ³ /st)	10

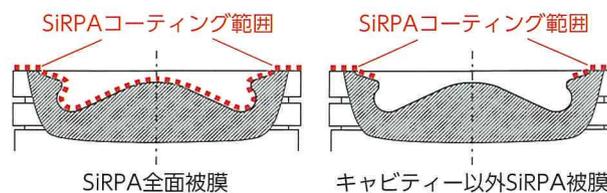


図 13 遮熱皮膜加工範囲

図 14 はこれら 2 諸元の遮熱ピストン適用時における、ベースに対する燃費改善率を示す。燃焼室面

全面に遮熱膜を加工したものに對し、キャビティー以外に被膜したものは大幅に燃費効果が大きくなっている。また、この時の排気温のベースに対する上昇幅はいずれも約 2℃ でほぼ同等となり、単純な遮熱面積の比率では説明できないことがわかった。

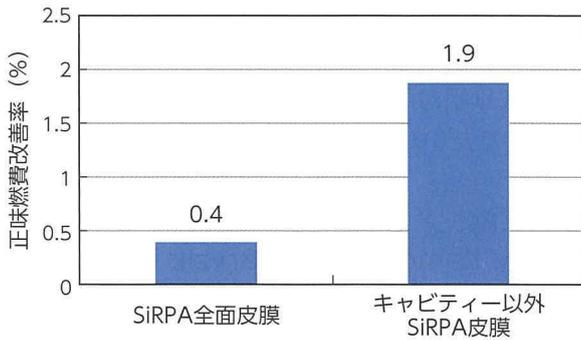


図 14 キャビティー部皮膜加工有無での燃費効果

4.3 燃費差が生ずる要因解析

遮熱部の範囲によって効果が変わる要因として、遮熱膜加工有無での表面粗さの変化に着目した。遮熱膜を加工しない金属機械加工面の粗さは Ra1 μm 以下だが、SiRPA 皮膜を加工すると Ra3 ~ 5 μm 程度にまで増大する。これは 3.1 項の図 6 で見られるように、ミクロポア形成過程において陽極酸化皮膜の生成高さが不均一になることに起因している。

ピストンキャビティー部は、燃料噴霧を高速で壁面に衝突させ、その運動量により混合気を壁面沿いにガイドして移動・拡散させる機能を持っている。この現象を部分的に取り出して再現し観察するために、急速圧縮装置 (Rapid Compression Machine, 以降 RCM) にて可視化を行った。その装置の構成を図 15 に、諸元と運転条件を表 5 に示す。表面粗さの水準は Ra1.4 と Ra6 μm とした。

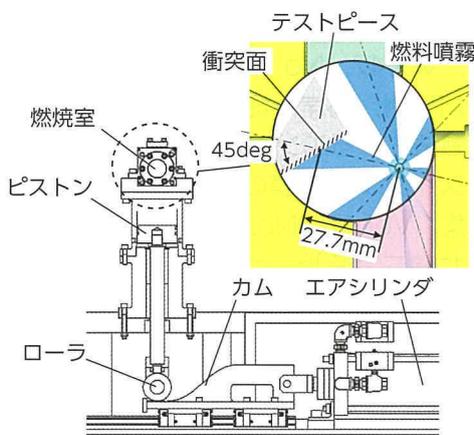
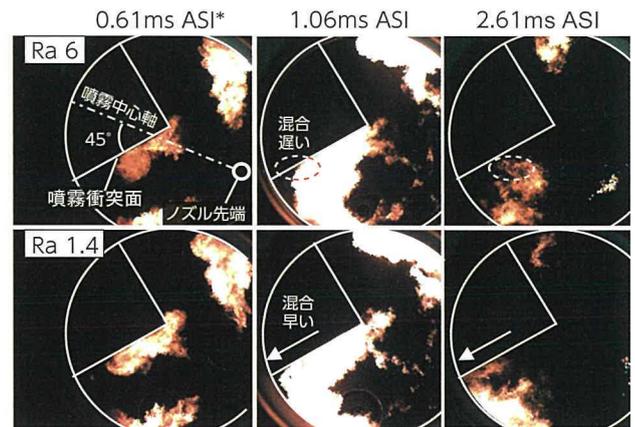


図 15 RCM 装置構成

表 5 RCM 装置諸元と運転条件

燃料噴射圧力 (MPa)	80
燃料噴射量 (mm ³ /st)	12
ノズル噴孔径 (mm)	0.12
圧縮時雰囲気圧力 (MPa)	4
圧縮時雰囲気温度 (K)	600

直接観察画像を図 16 に示す。Ra1.4 μm では噴霧衝突後、壁面沿いに火炎が高速で移動・拡散する様子が見られる。一方で、Ra6 μm では上記に比較して壁面上とその近傍で火炎の伸展が遅くなっていることが観察される。さらに燃料噴射後 2.61ms の画像において、Ra6 μm では噴霧衝突面近傍に依然として輝炎が滞留していることが観察できる。



*ASI (After start of injection) : 噴射開始後

図 16 RCM 直接可視化画像

これを燃焼室内に当てはめ、推定現象を模式的に表したのが図 17 である。表面粗さが大きい場合は壁面上の噴霧・混合気の移動速度が低下し、拡散が遅くなる。高 EGR (Exhaust Gas Recirculation) 率では酸素濃度が低いため、燃料蒸気が適正に燃焼可能な空燃比となるには、EGR 無しの時よりも広い空間に拡散する必要がある。このため、表面粗さ増大による壁面流速の低下で拡散が遅れる影響が、より顕著になったと考えられる。

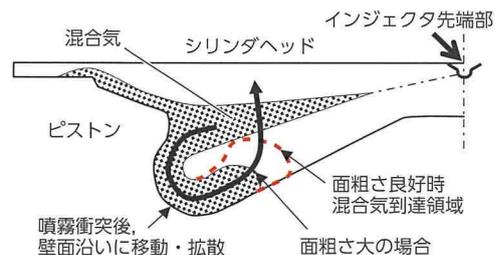


図 17 燃焼室内現象推定図

尚、上記の混合気拡散の影響は燃焼室内の CFD (シミュレーション) でも傾向が確認され、その結果高温の燃焼ガスがキャビティー壁面近傍に長く滞留することが示された。これが冷損低減効果を妨げる要因の一つとなったと考えられる。

このキャビティー以外 SiRPA 皮膜加工ピストンのカットモデルを図 18 に、表 4 の評価条件でのエンジン熱バランスのベースとの比較を図 19 に示す。ベースよりも冷却損失が低減し、正味仕事と排気損失が増加していることが確認でき、コンセプト通りの熱流れ改善で燃費効果が得られていることが示された。



図 18 SiRPA 皮膜適用ピストンカットモデル

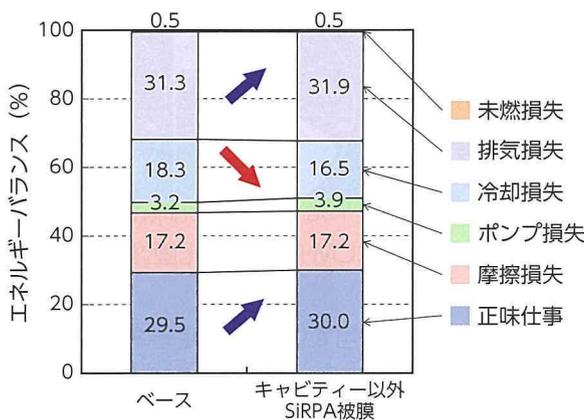


図 19 ベースと遮熱でのエンジン熱バランス比較

5 まとめ

ガス温度に追従して表面温度を変化させ、冷損低減と吸気加熱防止を両立する壁温スイング遮熱コンセプトを検討した。遮熱膜の開発・エンジン評価・現象解析を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 壁温スイング遮熱膜材質としてシリカ強化多孔質陽極酸化皮膜 (SiRPA) を開発し、4 気筒直噴ディーゼル機関に適用した結果、冷損の低減と正味仕事・排気損の増加が確認され、燃費が改善した。
- (2) エンジン運転時の膜表面温度の推移をレーザー

誘起燐光法により計測、予測計算とほぼ一致することから狙いのスイング遮熱現象が実現していることが確認された。

本技術は Thermo Swing Wall Insulation Technology, 略称 TSWIN と名付けられ、新開発 2.8L ESTEC 1GD ターボディーゼルエンジンの一部仕様にて世界で初めて実用化された。今後も遮熱膜熱物性の改良や遮熱部位の拡張により、燃費効果の拡大に取り組む所存である。この研究開発の過程でご協力いただいた関係各位に深く感謝の意を表す。

■参考文献

- (1) Roy Kamo, Walter Bryzik : Adiabatic Turbocompound Engine Performance Prediction. SAE Technical Paper 780068 (1978)
- (2) Hideo Kawamura and Mitsuru Akama : Development of an Adiabatic Engine Installed Energy Recover Turbines and Converters of CNG Fuel. SAE Technical Paper 2003-01-2265 (2003)
- (3) 小坂英雅, 脇坂, 野村, 堀田, 小池, 中北ほか : 壁温スイング遮熱法によるエンジンの熱損失低減 (第 1 報) —数値計算による適切な遮熱膜特性の検討—. 自動車技術会論文集, Vol.44, No.1, p.39 - 44 (2013)
- (4) 脇坂佳史, 稲吉, 福井, 小坂, 堀田, 川口 : 壁温度スイング遮熱法によるエンジンの熱損失低減 (第 2 報) —単筒エンジンによる遮熱効果の先行検討—. 自動車技術会論文集, Vol.47, No.1, p.39 - 45 (2016)
- (5) 川口暁生, 立野, 山下, 猪熊, 小山石, 山下ほか : 壁温スイング遮熱法によるエンジンの熱損失低減 (第 3 報) —列型過給直噴ディーゼルエンジンへの適用—. 自動車技術会論文集, Vol.47, No.1, p.47 - 53 (2016)
- (6) 西川直樹, 高岸, 堀江, 清水 : 壁温スイング遮熱法によるエンジンの熱損失低減 (第 4 報) —スイング遮熱膜の材料—. 自動車技術会論文集, Vol.47, No.1, p.55 - 60 (2016)
- (7) 福井健二, 脇坂, 西川, 服部, 小坂, 川口 : レーザー誘起燐光法を用いた高応答温度計測技術—温度スイング遮熱膜への応用—. 自動車技術会論文集, Vol.47, No.1, p.61 - 66 (2016)

■ 著者



川口 暁生



立野 学



西川 直樹



山下 親典



脇坂 佳史



堀江 俊男

アクティブ制御を用いたエンジンサウンドのデザイン

Engine Sound Design Applying Active Sound Control

林 毅*

Takeshi Hayashi

要旨

車両の統合運動知覚（加速感など）やエンジン音の音源知覚（吸排気音など）の観点から、エンジン音の機能を考え、運転者への情報性を強調する音響をDSP（Digital Signal Processor）ソフトウェアを用いてデザインした。本技術は、主に正弦波重畳法による合成波形や周波数フィルターパラメータの時間制御に基づく音響を原音と融合するように車室内に発音させるものである。エンジン音の種類により、車室内において適切な音像定位が得られるように電気音響変換器を設置した。エンジン音の種類は、回転数域に対応するため、回転数変化による音色とピッチ変化がデザイン音で強調され、さらに、定位置移動により、空間的エンジンサウンドを実現した。本システムは、V8ガソリンエンジン搭載のスポーツセダンに搭載された。

Abstract

In this development, the functions of engine noise were considered from the standpoints of the perception of overall vehicle dynamic performance (such as acceleration feeling) and the perception of the engine sound sources (such as intake and exhaust sounds). As a result, an engine sound was designed using a digital signal processor (DSP) and software to create acoustics that emphasize the provision of information to the driver. The developed technology generates interior sounds that combine original sounds with acoustics, mainly based on synthetic waveforms created using the sine wave composition method and time control of frequency filter parameters. Electro-acoustic transducers were placed in the vehicle to perform appropriate acoustic image localization in the interior in accordance with the engine sound type. Since the type of engine sound varies in accordance with the engine speed range, the designed sound emphasized the changes in timbre and pitch that occur at different engine speeds. The design also accomplished a spatial engine sound by shifting the acoustic localization. This system is installed in a sporty sedan with a V8 gasoline engine.

キーワード エンジンサウンド、サウンドデザイン、アクティブ制御、ASC、波形合成、DSP、音響心理

1 はじめに

エンジン音の機能は、車両の加速や減速といった運動を認知させる全体的で統合的な知覚⁽¹⁾⁽²⁾に寄与する面と、アクセルやシフト操作によるエンジンや駆動系の状態と応答を知覚させる面がある。前者を統合運動知覚、後者を音源知覚として考える⁽³⁾⁽⁴⁾。前者は、比較的長い時間間隔で視覚、触覚、体性感覚等による知覚と統合され、音響的には、構成スペクトラによる聴感上の音程感と連続性が重要な要素と考える。後者の発生源とその状態は、音源固有の音色で、スペクトラ構造による⁽⁵⁾⁽⁶⁾。過渡的な時間区間での気流や特異な燃焼など、非定常な音源媒質の振動状態が、操作応答として知覚され、音響的には、広帯域スペクトラや線スペクトラも混在する（なお、変速操作では、ピッチの過渡的变化も駆動力伝達状態知覚の一要素であるが、本稿では取り扱

わない）。本稿は、統合運動知覚に寄与するピッチと、音源知覚に寄与する音色を両立するスペクトラ構造を主に踏査し、アクティブ制御により、音像定位と共にエンジン音の情報性の構築を目的とする。

2 音響デザイン

2.1 音像と定位

車室空間における音像と定位は、音響をデザインする前提として、排気音や吸気音そしてエンジン機関音といった音源位置の生態学的妥当性にも関わる基本的な要素である。車室内で、低次エンジン爆発次数による排気音は、車両の後方に定位し、局所的な音像ではなく、車両の幅及び高さ方向に立体的な広がりを持っている。これは、車室の前後1次共鳴が支配的な周波数域のためでもある。一方、高回転域での高次次数成分の吸気音やエンジン機関音は、前

* 性能実験部

方や上方に定位し、音像は中央付近にあることが多い。これは、フロントウインドシールドガラスとカウルの構造的な遮音特性とエンジンの搭載位置による。これらに基づき、合成波形音源を出力する電気音響変換器（以下、スピーカ）の車両搭載位置を図1及び図2に示す。



図1 リヤスピーカ

図1のリヤスピーカをリヤシートバック後方のアッパバックパネル上面に設置、パッケージトレイ間の副音場によるビルドアップ効果と車室前後1次共鳴の相乗により、局所感の無い後方定位を得た。



図2 フロントスピーカ

図2のフロントスピーカをインストルメントパネル内の中央上部、オーディオ用センタスピーカ下部に設置、フロント及びサイドガラスでの反射により、前方上方と側方定位の音像を得た。遮音壁のダッシュパネルにより、通常は平面的な音像が、音源を増やすことで奥行きを得た。これらのスピーカ配置とエンジン回転数に応じた出力制御により、車室内での前後方向の定位置移動を加減速と対応させ、空間的な音像デザインを実現した。

2.2 線スペクトラ構造

統合運動知覚からは、エンジン回転数上昇をより強調するため、非線形なピッチ上昇を生じる基音変化、また、音源知覚からは、回転数域に対応した音源特徴、これらを両立する線スペクトラの展開構造を検討した。DSP (Digital Signal Processor) ソフトウェアによる正弦波重畳法での合成波形の聴感評価に基づいた。図3は、加速時の高スロットル開度に対応するデザイン音のスペクトログラムである。

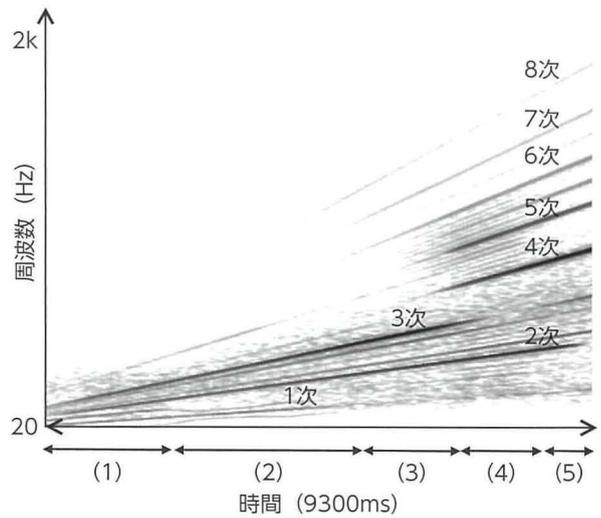


図3 デザイン音のスペクトログラム (加速)

図3の代表的な区間(1)から(5)の各スペクトラ構成、ピッチと音色及び音源対応について、以下に述べる。

(1)は、ピッチ低下と排気音源強調のため、1, 1.5, 2, 3次倍音を主成分に構成、1と1.5次及び1.5と2次による0.5次相当のmissing fundamental⁽⁷⁾⁽⁸⁾で低ピッチ化、低回転での排気音の変動感も得た。ここで補足として、例えば、100, 150, 200Hzの3つの純音からなる複合音の場合、ピッチとして50Hzを感じ、これが基音として知覚されることから、missing fundamentalと呼ばれる。図4にこの3つの純音の複合音から、150及び200Hzを減衰させていったスペクトログラムとPraatによるピッチ判定変化(青線)、図5にこの時の時間波形変化を示す。図5では、周期が20msの50Hzに相当する顕著な振幅ピークが観察され、この刺激が知覚されているものと考えられる。一方、図6に図3(1)区間で1次が80Hz、1.5次が120Hz近傍の時間波形を示す。40Hz, 20Hz近傍周期の振幅ピークが存在し、低い音色と変動感に影響していると考えられる。

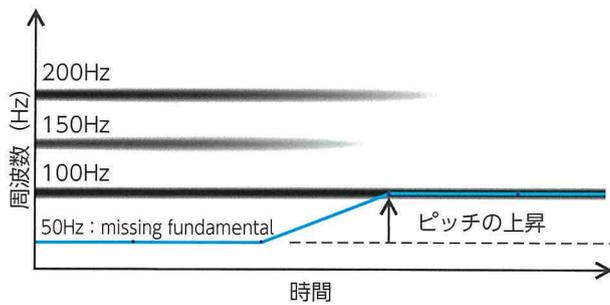


図4 複合音から純音でのピッチ感変化

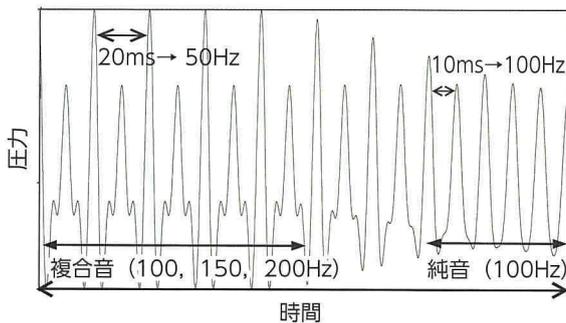


図5 複合音から純音での波形変化

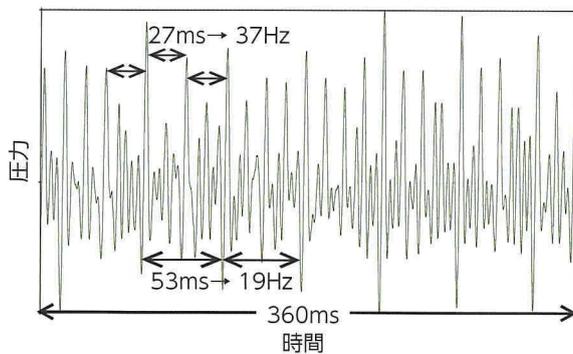


図6 図3 (1) 区間の波形

また、各成分の周波数比は、完全5度、完全4度、完全8度で協和、調性感が無く、変動感と合わせて、低回転のやや不安定さから重厚感となる排気音に対応した音色である。

(2) は、回転上昇の強調のため、(1) から1.5次を減衰、missing fundamentalを無くし、基音を1次とすることで、ピッチを上げ、変動感も低減させた。安定した燃焼に対応する音色とするため、1, 2, 3次を主とし、完全8度の上に完全5度の配置で、広がりのある開離和声を構成した。

(3) は、さらに回転上昇の強調のため、(2) から1次を減衰、基音を2次に上げ、ピッチを上げた。また、2.25次と2.75次を強調することで干

渉による変動感を加え、トルクピーク付近の主音源である吸気の脈動に対応する音色を構成した。さらに、6, 7, 8次を主とする高次倍音も動弁系等の機関音の寄与の上がる次の(4)への音色の連続性のために付加した。

(4) は、主音源の機関音への移行と高回転を認知させる高ピッチの音色のため、(3)から3次を減衰させ、2, 4, 5次を基本成分として、(3)から連続する6, 7, 8次の高次倍音で構成した。高次側を強調するため、低次側は主に2, 4次と線スペクトラを疎にした。動弁系による粗造性と鈍い金属音の音色のため、次項2.3のトーンクラスタも加算した。

(5) は、最高回転の認知のため、動弁系の音源状態の粗造性を減少させ、吸気音としては、変動感を減少させ、明瞭な高ピッチの音色を強調した。(4)のトーンクラスタを減衰させ、3, 4, 5次の基本成分に6, 7, 8次の高次倍音の音量を漸次的に上げ、周波数が高いため、比較的疎なスペクトラ分布で明瞭な高ピッチを実現した。

また、図7は、減速時の低スロットル開度に対応する線スペクトラ構成で、高スロットル開度に対し、高次の6, 7, 8次成分やトーンクラスタ等を加算せず、1.5, 2, 3次を主成分に構成し、低スロットル開度の低負荷状態の音色を強調した。1.5次は、低回転低開度での燃焼圧低下に合わせ、音色も重くならないように音圧を減衰、下限回転に向けて2, 3次に収束させ、アクセルを閉じた操作応答を顕著な音色差で情報化した。

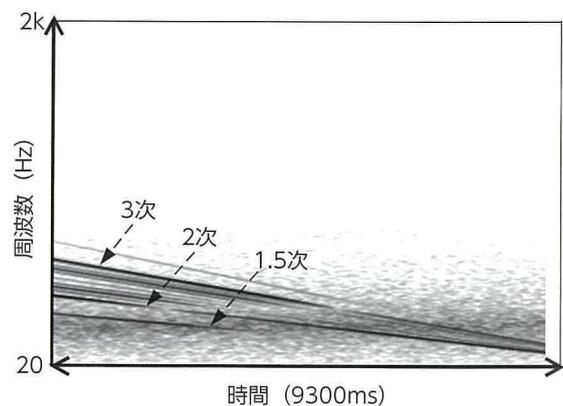


図7 デザイン音のスペクトログラム (減速)

2.3 トーンクラスタ

本音響は、動弁系の打音音源を表現する6次までの高密度に分布させた線スペクトル群であり、協和的な響きはない。一般的に増1度、2度音程等で

構成する和声をトーンクラスタと呼び、音色の類似性から同様に呼ぶことにする。図8, 9に図3(4)区間でトーンクラスタ有無の時間波形を示す。有りは、無しに比べ、振幅が複雑であり、変動の非周期性と粗さがある。目的である動弁系打音の持つ粗造性と鈍い金属音的な音色を実現した。

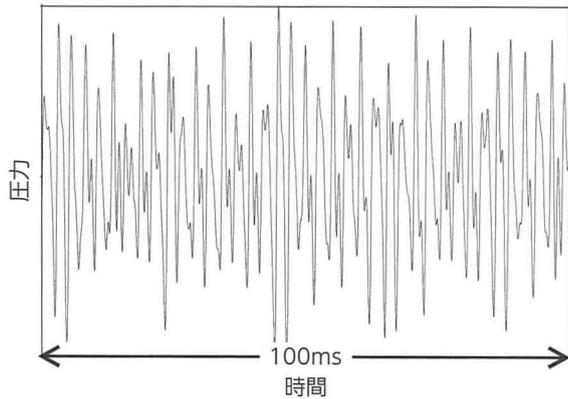


図8 トーンクラスタを含む波形

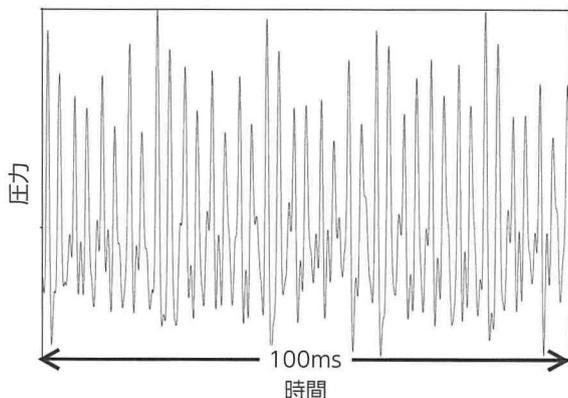


図9 トーンクラスタを含まない波形

2.4 グラウンドスペクトラ

図3のスペクトログラムで線スペクトラ以外の広帯域音(影の部分)は、複数のランダムノイズに回転数にも同期したフィルタ処理を行った合成音源で構成されている。これをグラウンドスペクトラと呼ぶことにする(以下、GS)。本音響は、離散的に構成される線スペクトル個々の純音的な聴感(視覚的なコントラストの高さに類比)の低減と時間的な振幅均一性を側帯波を伴わずに自然な変動とするために加算した。

図10に一定エンジン回転数相当で、GS有無のスペクトログラムを示す。線スペクトルの特に高次成分は、音圧レベルがGSと相対的に近いため、振幅変動が顕著で(色が濃い程、振幅が大きい)、

聴感でも複雑な変動は明確である。

ここで、音脈分凝の観点から、線スペクトル複合音とGSの知覚的な融合について考察しておく。図3の各線スペクトルは、協和的な結合及び時間的同期性により、1つの音源を形成して知覚されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。また、GSの周波数特性は、図3の各線スペクトル成分を含み、かつ、同様に回転数と同期させた成分を含むため、両者は、融合した1つの音源として知覚される。さらに、両音響は、継時的ではなく、同時に呈示される点も重要である。例えば、複数の純音を同時に聞けば、1つの音源(音色)として知覚されるが、継時的に聞けば、3つの音源(音脈)が知覚される経験からも明らかである。音響デザインにおいて、複数音源の呈示順序も配慮を要する点である。

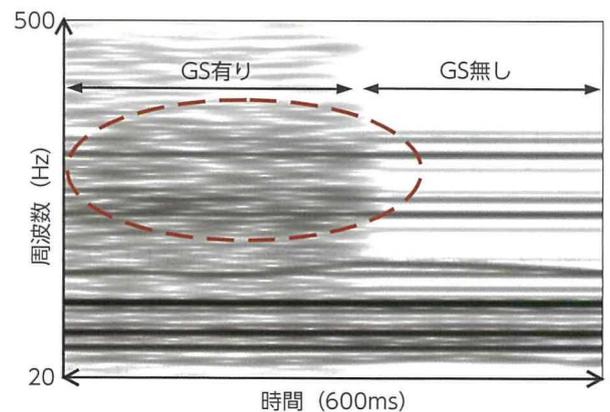


図10 グラウンドスペクトラによる振幅変調効果

2.5 運転操作への応答

アクセルやシフト操作への応答をデザインすることは、運転者の自我と車両を系として結び付け、統合運動知覚と音源知覚と共に知覚、環境、行動が連動するシステム性、すなわち、アフォーダンスを考慮することである⁽³⁾⁽⁴⁾。操作開始から、定常安定状態になる以前の過渡状態を操作応答として、音源媒質の振動状態(非周期振動)を音響にデザインすることを考えた。本稿では、排気脈動音のデザインを一例に述べる。

排気脈動音とは、アクセルペダル操作により、スロットルバルブが、全開から急閉された時、排出された未燃焼ガスが、排気管内で再燃焼する小規模な爆発音である。通常は、エンジンの適合により、発生することは極めて少ない。そこで、俊敏なアクセル操作に対するスロットル応答を知覚させるため、排気脈動音を付加し、強調するために音響合成を行った。図11, 12にその時間波形とスペクトログラムを示す。

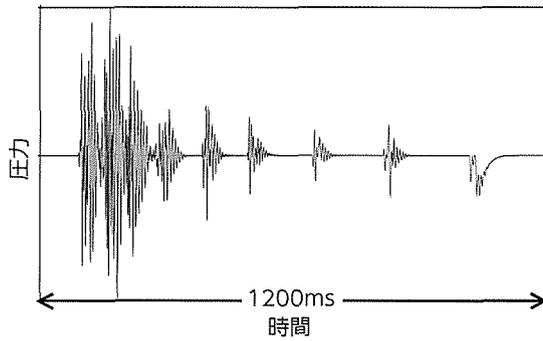


図 11 合成した排気脈動音の波形

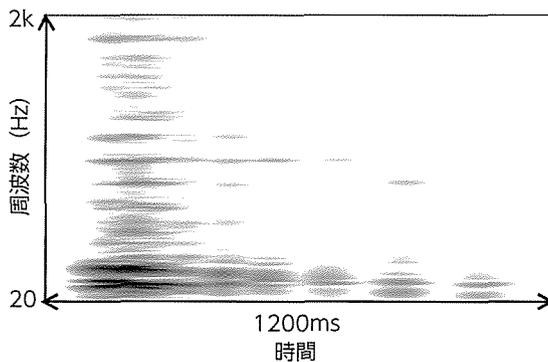


図 12 合成した排気脈動音のスペクトログラム

本音響は、正弦波と時間制御フィルタ処理の複数ランダムノイズを音源とし、管共鳴感を出すための遅延とフィードバック処理、発生タイミングも含めた音量の時間エンベロープ処理を行った。操作条件により、車室後方のスピーカで発生させる。

3 開発車両への適用

3.1 適用の考え方

本稿でデザインした音響のアクティブ制御をV型8気筒ガソリンエンジン搭載車両に適用し、製品化を図った。開発においては、実エンジンからの爆発次数成分と制御次数成分の選択整合、干渉回避及び電気信号特性の車室空間周波数特性補正等を行い、開発重点である音源に対応した音色で、かつ加速感を高めるピッチの跳躍、そして、音源位置に対応した車両前後方向の音像定位置移動を実現するサウンドデザインを行った。実エンジン音と融合する自然で動的なサウンドが狙いである。

3.2 実走行でのエンジンサウンド

図 13 に車室後方、図 14 に車室前方での収録音のスペクトログラムを示す。車両は、加速状態であ

る。車両後方には、排気音として、回転3, 4, 6次を主成分とする制御音を音圧が回転数に対して連続的になるように付加した。中回転数域で音圧は最大とし、音像の後方定位から前方定位への移動のため、最高回転数に向け、漸次的に減衰させた。

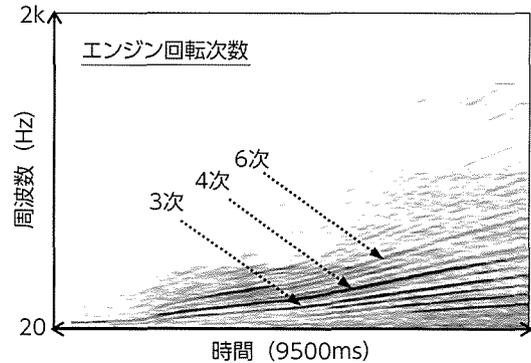


図 13 車室後方音のスペクトログラム

車両前方には、吸気音として、制御音を中回転数域から付加した。回転3, 4, 6次を主成分に、4, 6次の音圧を高回転数に向けて、ピッチ強調のために上げた。回転4.5, 5, 5.5次も付加、トルクバンドでの変動感を強調し、シフトタイミング情報とした。高回転数域では、粗造性と鈍い金属音感のある機関音として、トーンクラスタを付加した。最高回転数近傍では、回転8, 10, 12, 14, 16次の音圧を立ち上げ増加させ、トーンクラスタの音圧は減少させることで明瞭な高ピッチの音色を実現した。全体的には、高回転数に向かって漸次的に音量を上げ、音像定位の車両前方移動を強調した。

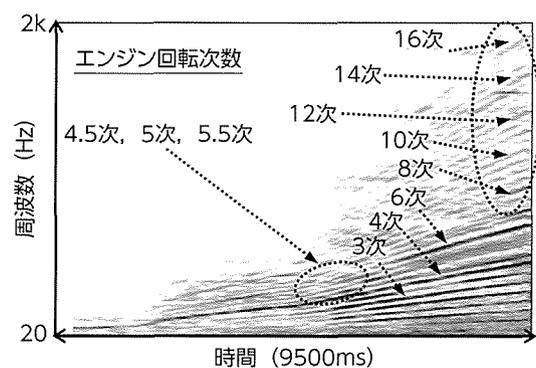


図 14 車室前方音のスペクトログラム

4 まとめ

統合運動知覚及び音源知覚に基づいたエンジン音の情報性の構築を目的としたデザインとして、以下を示した。

- (1) 加速感の強調として、特定の単一スペクトルの連続性によるピッチ上昇に対し、複合音のスペクトラ構造を展開させて、基音や音色を変化させることで、よりピッチ上昇を高め、加速感を高めることができる。
- (2) 上記 (1) のピッチ変化と吸排気音や機関音といった音源の振動様相に対応する音色変化の両立は可能である。
- (3) (2) の音色の微細構造として、粗造性と鈍い金属音感を得るためにトーンクラスタを、自然な振幅変動と純音的聴感低減のためにグラウンドスペクトラを提案した。
- (4) 運転操作への応答としての音源情報を強調するため、過渡的な音源媒質の非定常な振動状態 (非周期振動) に着目し、一例として、排気脈動音の合成による手法を開発した。
- (5) 車室内の前方及び後方のスピーカ配置とエンジン回転数域に応じた出力制御により、音源に応じたエンジン音の前後方向の音像定位が強調される。これにより、回転上昇 (下降) に伴って、車室空間で前後方向に明確な定位移動のある空間音響を実現した。
- (6) 以上のデザインに基づくアクティブ制御を開発車両に適用し、実エンジン音との融合を図り、車両運動や音源状態の認知情報としてデザインされたエンジン音を構築した。

5 おわりに

本稿は、車両運動という全体性の中で、エンジン音を統合運動知覚と音源知覚から位置付け、音響的な倍音構造のデザイン手法を示した。アクティブ制御による積極的音響デザインを前提にピッチと音色をエンジン回転数域と音源に対応させ、両者の両立を図るデザインであり、従来技術に対して、ピッチ上昇と音源対応が高まるように倍音構造を積極的に展開させる手法である。また、非定常な振幅変動 (自然な揺らぎ)、純音的聴感の低減、操作応答としての非周期振動 (排気脈動音) の合成は、従来の正弦波だけでなく、広帯域ノイズのフィルタリング制御も応用した。そして、音源位置対応や音像の広がり感を高めるため、車室前方及び後方の専用スピーカの出力を独立制御とした点も新しい試みである。本取り組みにより、エンジン音が自身を越えて、車両全体の中で意味を獲得することを望む⁽¹¹⁾。最後に象徴とした音響を参考文献に記す⁽¹²⁾。末尾なが

ら、本稿のデザインを実装する車両搭載電子システムの設計に関わられた方々と企画面で支援頂いた方々に改めて、深く感謝の意を表す。

■参考文献

- (1) クルト コフカ (鈴木正彌監訳): ゲシュタルト心理学の原理. 福村出版, 1999, p.849
- (2) Ariel Bleicher: Edges of Perception. 日経サイエンス. 9月号, p.36 - 43 (2013)
- (3) 林毅: 製品音の快音技術. 第6章 第5節 スポーツカーの統合運動知覚と動的音響. S&T 出版, 2012, p.300 - 304
- (4) 林毅: 自動車の運動知覚と車内音デザイン. 騒音制御. Vol.37, No.5, p.259 - 263 (2013)
- (5) William W. Gaver: What in the World Do We Hear? An Ecological Approach to Auditory Event Perception. Ecological Psychology. Vol.5, No.1, p.1 - 29 (1993)
- (6) 川上央: フランス国立音楽音響研究所 (IRCAM) における音のデザイン活動の紹介. 日本音響学会誌. Vol.68, No.1, p.43 - 48 (2012)
- (7) 力丸裕: 音楽知覚の聴覚神経生理学的アプローチ. 音声言語医学. Vol.37, No.4, p.455 - 461 (1996)
- (8) 力丸裕: 音響・聴覚系の生理学. 岩波講座 認知科学3 視覚と聴覚. 岩波書店, 1994, p.149 - 153
- (9) Albert S. Bregman, Steven Pinker: Auditory Streaming and the Building of Timbre. Canada. J. Psychol. Vol.32, No.1, p.19 - 31 (1978)
- (10) R. Plomp: The Ear as a Frequency Analyzer. J. Acoust. Soc. Am.. Vol.36, No.9, p.1628 - 1636 (1964)
- (11) Morris R. Cohen: A Preface to Logic, Meaning and Implication. The Nature of Meaning. p.47 (1944)
- (12) Klaus Schulze: 7. Moogie Baby Goes Solo, Are You Sequenced? SPV GmbH, 2006, SPV 304982 DCD

■著者



林 毅

普及型複合予防安全システム 「Toyota Safety Sense C」の開発

Development of Toyota Safety Sense C

坂口 敦俊*

Atsutoshi Sakaguchi

安達 隆宏*

Takahiro Adachi

千田 和身*

Kazumi Chida

上地 正昭*

Masaaki Uechi

山田 幸則*

Yukinori Yamada

要旨

赤外線レーザと単眼カメラの複合センサによる普及型複合予防安全システム (Toyota Safety Sense C) を提案する。本システムは、速度低減量 30km/h のプリクラッシュブレーキを有するプリクラッシュセーフティシステムを含む、5つの安全機能から構成される。複合センサによる信頼性の高い認識性能に加え、ECU(Electronic Control Unit) を含めた一体型センサとすることで、スペースが限られた小型車においても高い搭載性を実現している。本稿では、従来、複数のセンサと ECU で構成されていた機能を、センサ・ECU 一体型のユニットで実現したハードウェア技術、および速度低減量 30km/h を実現するためのシステム制御技術について述べる。

Abstract

Toyota Safety Sense C is a multi-aspect active safety system for compact vehicles with a sensor configuration that combines an infrared laser and monocular camera. This system consists of five functions to help enhance safety, including a pre-collision braking system capable of reducing the speed of the vehicle by 30 km/h. In addition to achieving both high detection performance and reliability, the combined sensor also features a built-in electronic control unit (ECU) that allows the system to be adopted in the limited installation space of compact vehicles. This article describes the hardware technology that integrates the functions that were previously configured over multiple sensors and ECUs into a single component, and the system control technology capable of decelerating the vehicle by 30 km/h.

キーワード 予防安全, プリクラッシュ, Toyota Safety Sense, 運転支援, 自動ブレーキ, 衝突回避

1 はじめに

自動車をより安全なものとする技術開発は自動車会社の使命であり、交通事故死傷者ゼロという究極の願いに向けてあらゆる方面から研究開発に取り組んでいる。トヨタ自動車は実際の事故に学び、常に改善を続けていくという「実安全の追求」を基本的な考え方とし、様々な安全システムを独立で考えるのではなく、連携を図り安全性を高めていくという「統合安全コンセプト⁽¹⁾」を掲げ、安全な車両開発・技術開発を行っている。その中のプリクラッシュセーフティ (PCS) システムは、衝突を未然に回避、あるいは衝突被害を軽減するシステムとして、2003年2月に世界で初めて製品化されて以来、

歩行者検知、出会い頭事故への対応と進化を遂げてきた⁽²⁾⁽³⁾。

一方、市場でもこれまで高級車を中心に展開されてきたミリ波レーダ方式やステレオカメラ方式のシステムだけでなく、赤外線レーザや単眼カメラセンサを利用したシステムが、小型車を中心に展開され、予防安全システムの普及を加速させている。

本稿では、小型車層をターゲットにした新たな普及型複合予防安全システムについて述べる。赤外線レーザと単眼カメラの複合センサを装備し、運転はあくまでも人が主体という考え方のもとで、ドライバーへ衝突の危険を通知し、回避操作を支援する警報やブレーキアシストに加えて、速度低減量 30km/h のプリクラッシュブレーキも有する PCS システムをはじめ、車線逸脱警報、オートマチックハイビーム、標識認識 (欧州のみ)、先行車発進告知の計 5

* 制御システム開発部

つの安全機能を備えたシステムを提案する。

本システムは、複合センサによる信頼性の高い認識性能に加え、ECU (Electronic Control Unit) を含めた一体型センサとすることで、スペースが限られた小型車においても高い搭載性を実現している。まず本システムが有する5つの機能とその実安全効果について述べ、次に従来、複数のセンサとECUで構成された機能をセンサ・ECU一体型のユニットで実現したハードウェア技術、および速度低減量30km/hを実現するためのシステム制御技術について述べる。

なお、本システムは「Toyota Safety Sense C」として2015年3月発売のカローラから順次導入されている。

2 システム概要

2.1 システムの狙い

日本国内の交通事故調査結果によると、交通事故のうち、事故形態別で最も多いのは「追突事故」である⁽⁴⁾。さらに、これらの追突事故の自車速度分布を見てみると、図1に示すように、追突事故の9割以上が自車速度80km/h以下の状況にて発生していることがわかる⁽⁵⁾。

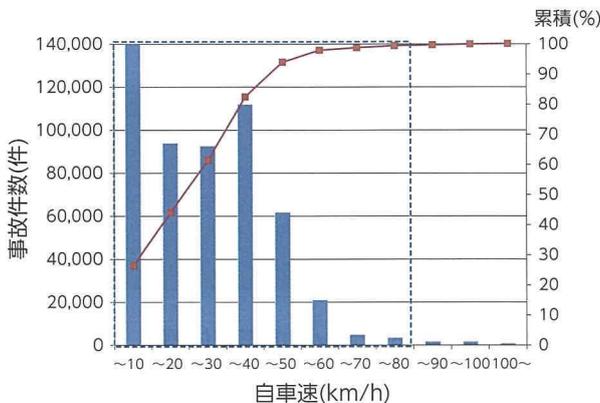


図1 平成23年度国内事故件数と自車速の関係

また、これらの追突事故における先行車との相対速度の分布を見てみると、図2に示すように追突事故の6割以上が相対速度30km/h以下、8割以上が相対速度40km/h以下の状況で発生していることがわかる⁽⁵⁾。

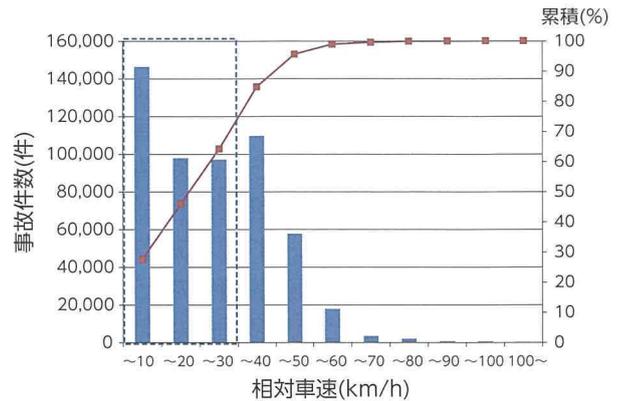


図2 平成23年度国内事故件数と相対速度の関係

一方、交通事故件数を昼夜別に見ると、図3の左図に示すように、夜間の占める割合は交通事故全体の約4分の1であるのに対し、死亡事故では図3の右図に示す通り夜間が全体の約半数を占めている。夜間の死亡事故率は1.25%で、昼間の0.47%に対して約2.7倍と高くなっていることがわかる⁽⁴⁾。

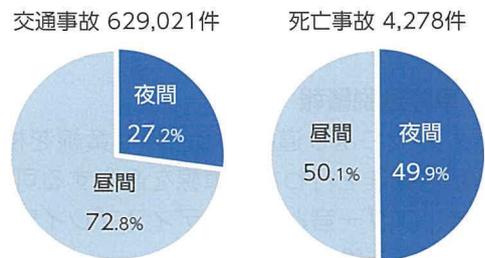


図3 昼夜別交通事故(左)・死亡事故(右)比率

また一方で、国内の死亡事故率(=死亡事故件数÷交通事故件数×100)を事故形態別に見ると、図4に示すように「路外逸脱」が最も多いことがわかる⁽⁴⁾。

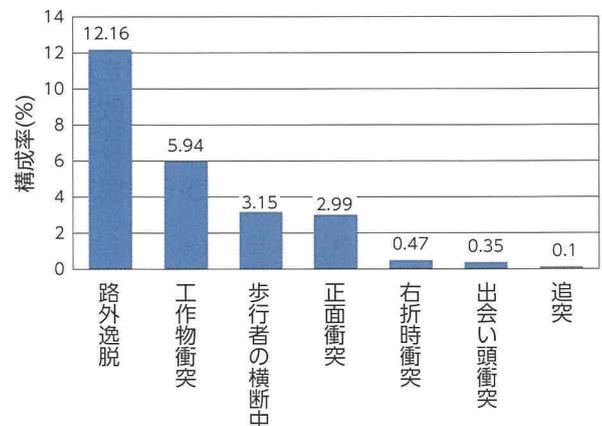


図4 事故類型別死亡事故率

これらの事故統計の解析結果を踏まえ、本システムでは、現在 30km/h 以下が主流の小型車向け PCS システムの作動車速域を自車速度 80km/h の領域まで拡大し、自動ブレーキによる車速低減量を 30km/h 以上確保することで、追突事故の低減に寄与する。また、死亡事故の発生割合が高い夜間や路外逸脱などの事故形態にそれぞれ対応するオートマチックハイビームや車線逸脱警報などの複数の機能を同時に実現することで、多面的な安全運転支援を可能にし、交通事故の低減に役立つと考える。

2.2 複合機能の概要

2.2.1 PCS システム

赤外線レーザーと単眼カメラを用いて先行車を検知し、衝突の危険があるとき、ブザー音とメータディスプレイ表示でドライバーに対して「(i) 警報」する。警報に反応したドライバーがブレーキを踏んだ際には減速を助勢する「(ii) ブレーキアシスト」が作動する。更に衝突の可能性が極めて高い場合には、「(iii) プリクラッシュブレーキ（自動ブレーキ）」による減速制御が作動する。

2.2.2 車線逸脱警報

単眼カメラにより道路上の白線や黄線を検出し、方向指示器操作を行わずに車線を逸脱する可能性があるとき、ブザー音とメータディスプレイ表示でドライバーに注意を喚起する。

2.2.3 オートマチックハイビーム

単眼カメラにより先行車や対向車のライトを認識し、自車のハイビームとロービームを自動で切り替える。遠くまで照らせるハイビームでの走行頻度を高めることで、夜間歩行者などの早期発見を支援する。

2.2.4 標識認識

単眼カメラにより速度標識や追い越し禁止などの道路標識を認識し、ドライバーに通知すべき情報を選択し、メータディスプレイに表示する。欧州などにおいて制限車速が頻繁に切り替わり、ドライバーが見落とした場合など、意図せず規制から逸脱する状況の回避を支援する。

2.2.5 先行車発進告知機能

自車が停車している状況において、赤外線レーザーを用いて同じく停止している先行車を検知し、先行車が発進しても自車が発進しなかった場合にブザー音とメータディスプレイ表示でドライバーに通知し、

自車が交通流の妨げとなる状況の回避を支援する。

2.3 センサの小型化

本システムを幅広い車両に展開し、市場への拡大を加速させるためには、ハードウェアの小型化と信頼度の高いセンシング性能の両立が必要である。

2012 年発売の LEXUS LS に搭載した衝突回避支援型 PCS システムでは (i) ステレオカメラ、(ii) ミリ波レーダ、(iii) ECU の 3 つの部品を必要としていたのに対し、本システムでは赤外線レーザー、単眼カメラおよび ECU を全て一体化し、大幅な小型化（図 5）と軽量化（266g）を実現している。これらにより搭載スペースが限られた小型車のインナーミラー裏（図 6）への搭載を可能とした。

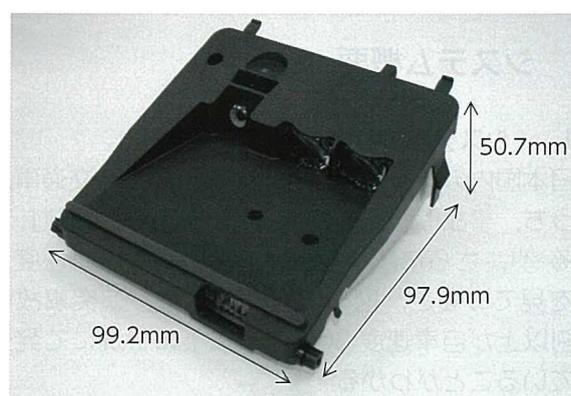


図 5 センサの外観



図 6 センサの搭載位置

2.4 システム構成

本システムのシステム構成を図 7 に示す。

本システムは、赤外線レーザーと単眼カメラにて車両前方の先行車、白線、ライト、標識などの (a) 周辺環境情報と、車速やヨーレートなどの (b) 車両状態情報、ドライバーのアクセルやステアリングの操作量などの (c) ドライバ情報の 3 つの情報を入力値として各機能の制御を行う。例えば、PCS システムの場合は、入力情報に基づき、先行車との衝突可能性を判定し、メータ ECU によるディスプレイ表示とブザーによる (i) 警報と、ブレーキ ECU による (ii)

ブレーキアシスト, (iii) プリクラッシュブレーキを行う。パワートレイン ECU はプリクラッシュブレーキ支援の際に駆動力を抑制する制御を行う。

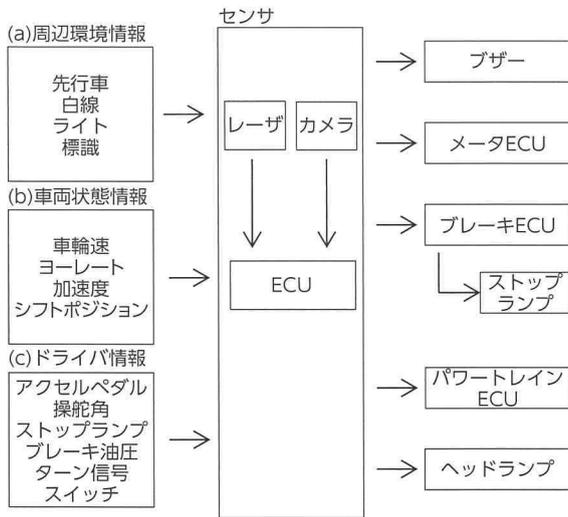


図7 システム構成 (カローラの例)

3 PCS システムの減速度制御

本章より、本システムの核となる安全機能である PCS システムについて述べる。PCS システムは、自車前方の先行車を検知し、自車と先行車の位置、速度、予測進路などから衝突可能性のレベルを事前に判定し、それに応じて各衝突回避支援機能を制御させる。各衝突回避支援機能の作動シーケンスを図8に示す。衝突の可能性があると判断されたときに、ブザーとメータ表示により衝突の危険をドライバーに通知し、ブレーキ操作やハンドル操作による回避操作を促す。さらに衝突の可能性が高まった場合、プリクラッシュブレーキアシストによりブレーキペダル踏力に応じブレーキ助勢制御を行うことで、ドライバーの回避操作を支援する。衝突が避けられないと判断した場合は、ドライバーのブレーキ操作有無に関わらずプリクラッシュブレーキを介入作動させて衝突回避を支援する。

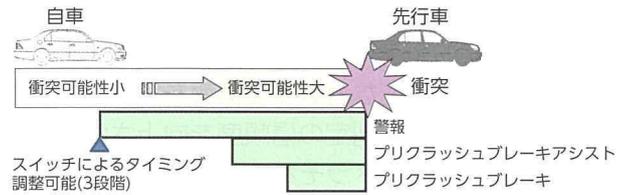


図8 衝突回避支援機能の作動シーケンス

プリクラッシュブレーキにおいて、相対速度 30km/h までの衝突回避性能の確保と、従来 30km/h 以下が主流であった作動車速域を自車速度 80km/h まで拡大するための、主要な開発項目は下記 2 項目である。

- ・ 衝突判定の早期化のためのセンサ認識性能の向上
 - ・ 後続車の後突を回避するための制動制御の追加
- 次章以降でそれぞれ詳細に説明する。

4 衝突判定の早期化

作動車速域および車速低減量拡大のためには、より早いタイミングで衝突可能性を判定し、プリクラッシュブレーキを作動させる必要がある。本システムでは、従来の赤外線レーザーを利用した衝突判定アルゴリズムに加えて、単眼カメラによる車両形状認識を組み合わせることで衝突判定の信頼性を向上し、プリクラッシュブレーキ作動タイミングの早期化を実現した。

4.1 赤外線レーザーを使用した衝突判定

従来の赤外線レーザーを利用した衝突判定アルゴリズムでは障害物の形状や高さを認識していないため、図9に示すように路上障害物や上方構造物への不要作動を避けるには、車間距離約 6m 未満のタイミングでプリクラッシュブレーキを作動させる必要があった。このタイミングでの作動では車速低減量が 20km/h 程度であった。

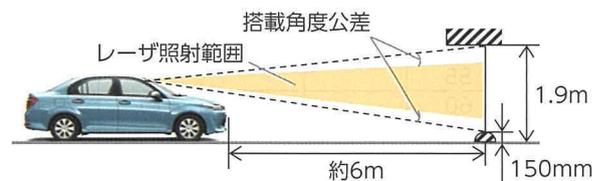


図9 従来のブレーキ作動タイミングの制約条件

4.2 単眼カメラの認識情報を利用した衝突判定

より遠方の先行車を衝突対象として認識するため、形状認識が可能なカメラの情報を組み合わせて利用することで衝突判定の信頼度を向上させた。赤外線レーザと単眼カメラそれぞれで検出した距離や相対速度などの差が閾値以下の場合に、レーザとカメラの情報をフュージョンして利用することで、レーザのみでは認識できない対象物の形状情報もレーザ情報に合わせて利用可能となった。これにより、検知対象をカメラで車両形状を認識できたものに限定することで、6mより遠方に存在する先行車を衝突対象として認識し、プリクラッシュブレーキの作動タイミングを早期化した。さらに、距離および速度推定には測距精度が高いレーザの情報を主として利用することで、安定した作動を実現した。

表1にJNCAP（(独)自動車事故対策機構）が公表しているプリクラッシュブレーキの衝突回避性能の評価結果を示す。他社の多くが小型車で提供しているレーザ単独システムが25km/hの相対速度でしか衝突回避を達成できていないのに対し、本システムではレーザと単眼カメラを用いた高い認識性能により、倍の50km/hまで衝突回避を実現できることがJNCAPの評価結果でも示されている。

表1 衝突回避性能のJNCAP 受験結果

○は衝突回避できた試験項目

JNCAP試験シナリオ	種別	自車速 (km/h)	(他社)レーザ単独システム		本システム	
			AEB試験	FCW試験	AEB試験	FCW試験
CCRs (対静止車両)		10	○	○	○	○
		15	○	○	○	○
		20	○	○	○	○
		25	○	○	○	○
		30			○	○
		35			○	○
		40			○	○
		45			○	○
		50			○	○
		55				○
CCRm (対先行車 20km/h)		35			○	○
		40			○	○
		45			○	○
		50			○	○
		55			○	○
	60			○	○	

5 後続車の後突回避のための制動制御

プリクラッシュブレーキの作動車速域を80km/hまで拡大したことに伴い、システム作動時に後続車が存在している場合には、その車速が従来よりも高い状態になっている可能性も必然的に高くなる。そのため、本システムでは後続車からの後突を回避するための3つの制御を実装している。

5.1 プリクラッシュブレーキ前のストップランプ点灯制御

ドライバのシステムへの依存・過信を防止するため、および早いタイミングからのプリクラッシュブレーキによる運転への介入を極力回避するために、本システムでの制動制御の減速度・ジャークはドライバによる通常ブレーキ操作よりも十分大きな値に設定している。一方で、自車の後続車が存在した場合には、そのドライバへの前方注意の負荷が相対的には高くなる。そこで本システムでは、プリクラッシュブレーキ制御の直前に 0.7m/s^2 程度のわずかな減速度を発生させることで、自車のストップランプを点灯させ、プリクラッシュブレーキに対する後続車ドライバのブレーキ反応時間確保を支援する。

本制御の効果を検証するために、表2の条件でトヨタドライビングシミュレータ⁽⁶⁾を用い、一般ドライバによるモニタ評価試験を実施した。先行車が急減速を開始してから、後続車がブレーキ操作をするまでの時間を計測した。試験の反復による反応時間の短縮がないように被試験者1名につき1回の計測とし、被試験者の性別・年代が各条件で均等になるようにした。急減速前のストップランプ点灯制御有無による後続車の反応時間を図10に示す。急減速の0.3～0.5秒前にストップランプ点灯制御を実施することで、後続車ドライバのブレーキ反応時間が短縮されていることがわかる。また、ストップランプ事前点灯時間の増加に対し、反応時間の平均値は収束する傾向であることが図10から分かる。

表2 モニタ評価試験条件

項目	内容
先行車、後続車の車速 (km/h)	100
車間時間 (s)	0.7
道路形状	直線
先行車の減速度 (G)	1.0
先行車の減速度勾配 (G/s)	2.0
被験者 (名)	85

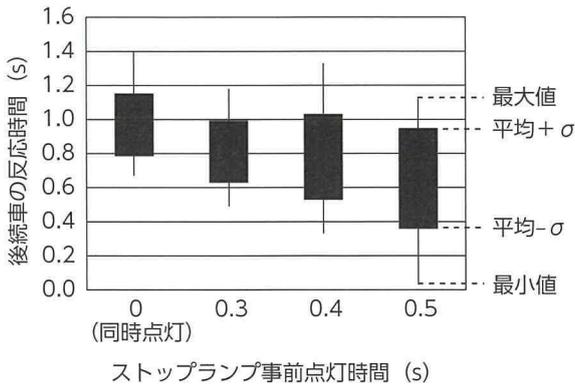


図 10 ストップランプ事前点灯時の後続車の反応時間

5.2 減速度フィードバックによる停止距離制御

プリクラッシュブレーキ作動時の後突の可能性をより低減するためには、後続車の制動距離をできるだけ確保できるように、自車が回避対象の障害物に可能な限り近い状態で自車を停止させることも有効である。しかし、実環境ではブレーキパッド状態、車両重量や路面 μ など多くの要因により実際に発生する減速度が変動する。そこで、さまざまな状況においても安定して障害物直前で停止するために、新たに減速度フィードバック制御アルゴリズムを導入した。図 11 にブロック線図を示す。

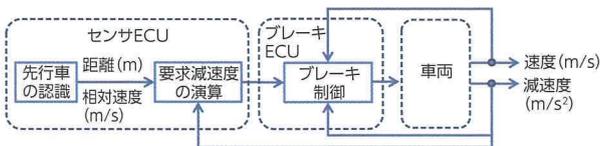


図 11 減速度フィードバック制御のブロック線図

まず、センサ内の要求減速度演算モジュールでセンサから検出した距離や相対速度に、実際に発生している減速度をフィードバックし、回避に必要な減速度を求め、要求減速度としてブレーキ ECU に送信する。次に、ブレーキ ECU 内の減速度フィードバック演算モジュールにて実際に車両で発生している減速度をフィードバックし、要求減速度を補正することで、ブレーキの効きバラツキの影響を抑制する。これにより、ブレーキの効きバラツキに対して、ロバスト性の高い停止距離制御を実現した。本制御アルゴリズムを用いた場合と用いなかった場合の停止距離の実測データを比較した結果を図 12 に示す。残距離は予防安全アセスメント JNCAP で規定される試験条件において、相対速度 40km/h 時のプリクラッシュブレーキによる衝突回避後のター

ゲットとの距離を計測した。本制御がなければ 2.7 m 前後の残距離で衝突回避を終えているのに対し、本制御を加えたことにより 0.7 m 前後まで引きつけ、後続車からの後突リスクを軽減したブレーキ制御が実現されていることが分かる。

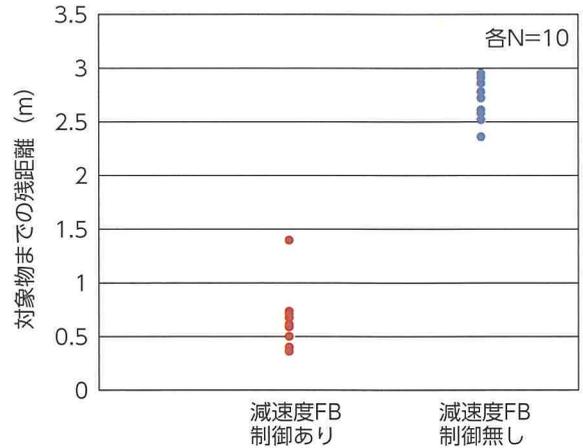


図 12 衝突回避時の対象物までの残距離

5.3 ドライバオーバーライドによるキャンセル

本システムではプリクラッシュブレーキ制御中にアクセル、ステアリングなどの操作量が閾値以上あった場合には、ドライバがプリクラッシュブレーキを意図していないと判断し、プリクラッシュブレーキ制御をキャンセルする機能を実装した。これにより例えば、ドライバが自車の前突の可能性よりも後続車からの後突の可能性が高いと判断した場面においては、本機能によりプリクラッシュブレーキ制御をキャンセルする選択をドライバが行うことが可能となる。

以上のように、センサの認識性能を高めたことによる衝突判断の精度向上だけでなく、後突を考慮した 3 つの機能もセットで装備することにより、より高い車速域で高相対速度域まで衝突回避なプリクラッシュブレーキを作動させることを可能とした。

6 おわりに

交通事故死傷者ゼロという究極の願いに向けて、センサ ECU の小型化およびセンサ認識性能と制御ロジックの改善により速度低減量 30km/h のプリクラッシュブレーキも有する PCS システムを装備した普及型の予防安全システムを開発した。更に車線逸脱警報、オートマチックハイビームなどのシス

テムも同一のセンサ ECU で実現することで、追突事故だけでなく車線逸脱、夜間事故といった多様な事故形態に対し支援することが可能な複合支援型のシステムを実現した。

なお、2015年3月に本システムを搭載したカローラにて予防安全性能アセスメント JNCAP を受験した結果、最高評価である先進安全車プラス (ASV+) を満点の 40.0 点で獲得した。

今後は、PCS システムの衝突回避性能のレベルアップ、センサ検知対象物の拡大に加え、更なる複合機能の追加による支援対象の事故形態の拡大などに向けて技術開発を推進し、より安全・安心な車社会の実現に貢献していきたい。

■参考文献

- (1) 葛巻清吾, 松尾 : トヨタの安全への取り組み. TOYOTA Technical Review. Vol.56, No.2, p.6 - 11 (2009)
- (2) J. Tsuchida, S. Tokoro, H. Fujinami, M. Usami : The advanced sensor fusion algorithm for Pre-Crash Safety system. SAE Technical Paper 2007-01-0402 (2007)
- (3) T. Kawasaki, J. Tsunekawa, T. Harada, K. Suzuki : DEVELOPMENT OF FRONT-SIDE PRE-CRASH SAFETY SYSTEM FOR INTERSECTION COLLISIONS. ITS World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services. (2009)
- (4) 警察庁交通局 : 平成 25 年中の交通事故の発生状況 (2014)
- (5) Institute for Traffic Accident Research and Data Analysis : 交通統計 平成 23 年度版 (2011)
- (6) Adachi T. et al. : MOTION CUEING ALGORITHM FOR PREVENTION OF SIMULATOR SICKNESS CAUSED BY UNNECESSARY VESTIBULOCULAR REFLEX. FISITA Paper. No. F2014-AHF-003 (2014)

■著者



坂口 敦俊



安達 隆宏



千田 和身



上地 正昭



山田 幸則

トータル接近感指標の構築と ドライバ減速タイミングの予測への応用

Study of Driver Total Perceived Risk Estimate and Application to Driver Braking Timing Modeling

グエンヴァン クイフン* 岸 浩司** 菊池 弘一***
 Quy Hung Nguyen Van Hiroshi Kishi Hirokazu Kikuchi
 岡村 宏樹*** 吉澤 真太郎*** 伊藤 祥司*
 Hiroki Okamura Shintaro Yoshizawa Shoji Ito

要旨

対横断歩行者の接近事故場面において、衝突危険に陥る前に、ドライバに煩わしくないタイミングで危険を気付かせる支援技術開発のために、対横断歩行者の接近感指標を開発した。自車の進行（前後）方向の接近感と、横断歩行者の横方向接近感から、トータルの接近感を構成される仮説を立て、トータル接近感指標（T_PRE）を定式化した。9人のドライバによる実車実験で、ドライバ毎の平常時のブレーキタイミングが予測可能であることを検証した。これに基づき、個人毎の煩わしくないタイミングで支援することを可能にする基盤技術の目処付けができた。

Abstract

Toyota Motor Corporation is developing driving support technology to notify drivers at an early timing when a collision risk with a pedestrian crossing a road occurs. As part of these efforts, a perceived risk estimation method for crossing pedestrians was developed. Two hypotheses were formed to describe the mechanism of the driver's risk perception based on (1) longitudinal risk perceived from the approach of the subject vehicle toward the crossing pedestrian and (2) lateral risk perceived from the approach of the crossing pedestrian toward the subject vehicle. The total perceived risk estimate index (T_PRE) was then formulated based on these hypotheses. The T_PRE index was evaluated by analyzing braking data from actual vehicle tests involving 9 drivers. These results confirmed that the T_PRE index is capable of modeling the usual and delayed braking timings of individual drivers in normal driving conditions. These findings should enable the personal adaptation of system support, thereby notifying individual drivers of a collision risk at an early timing without causing annoyance.

キーワード 予防安全、運転支援、ドライバ運転行動、減速タイミング、横断歩行者、リスク感覚、ドライバ運転モデル

1 前書き

事故統計では、日本における交通事故の死亡率は「対歩行者事故」の割合が高い⁽¹⁾。さらにその分類の約7割は歩行者が横断中の事故である⁽²⁾。

事故低減を目指すためには、歩行者との衝突リスク（危険）が高まった際の回避制御支援（システム介入）と合わせて、歩行者との衝突リスクの少ない、早いタイミングからドライバに危険を気付かせて、ドライバのペダル操作（アクセル オフ：A-off、ブレーキ オン：B-on）を促すことにより、衝突リスクの高い状態に近づかないようにする運転支援が有効であると考えられる。

しかし、歩行者接近場面のような衝突リスクがまだ顕在でない段階（衝突までの時間-TTC（Time to Collision）が『大』側）では、その危険に対する感じ方（リスク感覚）の個人差が大きく、支援の受容性（煩わしさ）が課題となる（図1）。

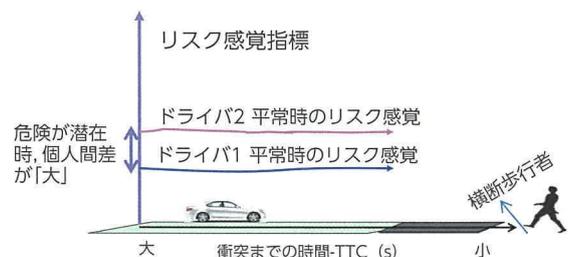


図1 早いタイミングの支援における受容性（煩わしさ）の課題

* 制御システム先行開発部

** 車両技術開発部

*** FP部

この課題を解決するために、個人のリスク感覚を考慮し、支援タイミング等を個人適合することが有効な手段だと考えられる。ドライバ毎の走行データから、平常時の操作タイミングを学習し、その平常時のタイミングからドライバの操作が遅れた場合に、操作を促す報知等の支援を行うことは有効であると考えられる。そのため、平常時の運転における操作タイミングを捉えることが重要である。

本研究では、衝突リスクがまだ顕在でない段階（衝突までの時間 -TTC > 4s）で、横断歩行者が発見可能な場面における減速（B-on）タイミングを検討対象とした。ドライバ（9人）の一般道運転データから、個人毎の対横断歩行者の減速タイミングは、自車進行（前後）方向に対する既存のリスク指標（TTC, PRE⁽³⁾⁽⁴⁾）単独では説明できない複雑な特性（バラツキ）を保有していることが確認できた。そこで、自車の進行方向の接近感（前後方向接近感）に加え、横断歩行者の動きの横方向接近感から、対横断歩行者とのトータル接近感が構成される仮説を立てた。この仮説に基づき、人間の刺激感覚規則（ウェーバーの法則）により、トータル接近感指標（T_PRE）を定式化し、T_PREの一定値でドライバ毎のブレーキタイミングを捉えることが可能であることを検証した。また、T_PREの値で表現したペダル操作のタイミングを「個人の構え度モデル」とし（図2）、B-on前に、ドライバ毎の「平常時の減速タイミング」・「平常時から遅れた減速タイミング」の判断（予測）技術を開発した。

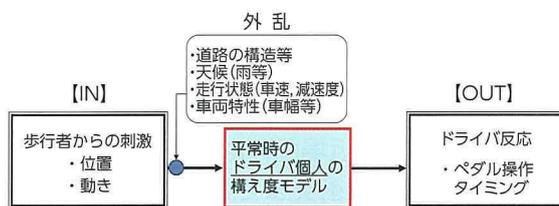


図2 構え度モデルの構成

2 本研究の検討プロセス

本研究の検討プロセスは以下の通りとした。

- ①一般道走行での減速行動データの収集
一般道（自車速 30～60km/h）にて、データロガーを搭載した試験車を用いて、対横断歩行者接近時のデータを計測した。
- ②減速行動データの分類
衝突リスクがまだ顕在でない段階（衝突までの時間 -TTC > 4s）で横断歩行者が発見可能な一般

道走行データにおいて、対横断歩行者のB-on後の車両挙動データにより、評価する指標（ τ ）を導入し、「平常時の減速タイミング」シーン・「平常時から遅れた減速タイミング」シーンの客観的な分類を行った。

- ③平常時の減速行動における「個人の構え度モデル」の構築
対横断歩行者のリスク感覚の仕組みの仮説を立て、T_PREを定式化した。②に分類した「平常時の減速タイミング」シーンのB-on前のデータにより、T_PREの妥当性を検証し、T_PREを用いた平常時の減速時の「個人の構え度モデル」を構築した。
- ④構え度モデルの予測性能の検証
構築した構え度モデルを用いて、②で分類した「平常時の減速タイミング」シーンと「平常時から遅れた減速タイミング」シーンの予測性能を検証した。

3 一般道走行データの収集

本報告は、衝突リスクがまだ顕在でない段階（衝突までの時間 -TTC > 4s）で、横断歩行者が発見可能なシーンに対する減速タイミングを検証対象とする（図3）。

歩行者と遭遇する頻度が高い一般道路において、運転スキル（社内運転資格）、及び運転経験（運転年数、年間運転距離）が異なる社内ドライバ（9人）の平常時の運転データを収集した。一般道走行の延べ200時間の中から、約6時間の有効な対象シーンを抽出できた。

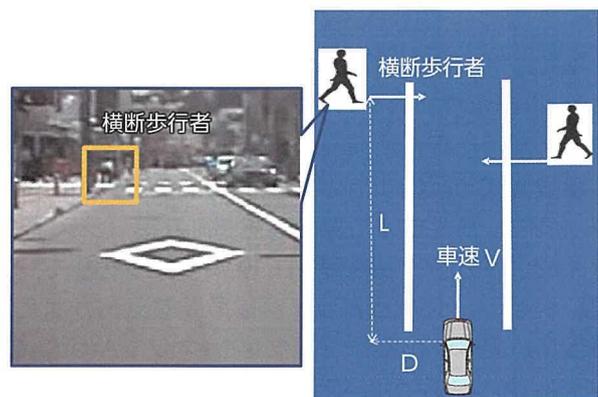


図3 ターゲット（ブレーキ）シーン

4 車両挙動の指標による減速シーンの分類

平常時の減速行動での「個人の構え度モデル」を構築するために、収集した一般道走行データから、 $7s > TTC > 4s$ で横断歩行者が発見可能なシーンに対して、ドライバ毎の「平常時の減速タイミング」シーンと「平常でない時の減速タイミング」シーンの分類が必要である。また、「平常でない時の減速タイミング」シーンの中で、よりリスクが高いシーンとして、「平常時から遅れた減速タイミング」シーンに着目した。

ドライブレコーダーの技術では、運転中の急減速シーンを検出するために、車両減速度の異常値がトリガー値としてよく採用されている。しかし、対象とする平常時の運転の場面は、急減速の場面と異なり、多少減速操作が遅れても、修正に時間的な余裕があるため、必ずしも減速度の異常値が出るとは限らない。

本研究では、ブレーキ操作後の車両挙動の計測データを観察し、車両のジャークと減速度との間に、比例関係があることを見出した（図4）。

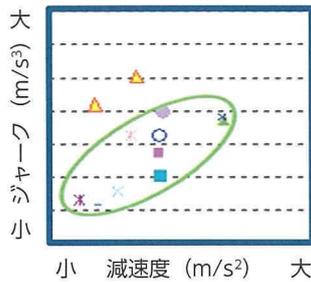


図4 車両のジャークと減速度
(一人ドライバのB-on後の車両挙動)

そこで、ペダル操作による車両挙動を評価する指標 (τ , 式(1)) を導入し、シーンの客観的な分類方法を構築した。

①車両挙動によるブレーキ操作の評価指標 τ

ブレーキ操作の後に、車両運動特徴量のジャークと減速度の比率 (τ) を指標とする。

$$\tau = \max \left[\frac{\text{ジャーク } [J(t)(m/s^3)]}{\text{減速度 } [G(t)(m/s^2)]} \right] \dots\dots\dots (1)$$

平常時からブレーキタイミングが遅れると、ドライバが所望の減速度を得るために、操作がスムーズでなくなり、B-on後の車両の運動が乱れる。その結果、ジャークJが「大」となり、 τ が大きくなる。従って、減速操作タイミングが遅れるほど、 τ が大きくなると考えられる。

②評価指標 τ によるシーンの分類方法の構築

実際の走行データを解析した結果、図5に示したように、 τ の平均値 $\pm (1\sigma)$ のバラツキ範囲のシーンを「平常時のB-onタイミング」と、 τ の平均値から $+ (1\sigma)$ のバラツキ範囲を超えたシーンを「平常時から遅れたB-onタイミング」シーンと分離することができた。

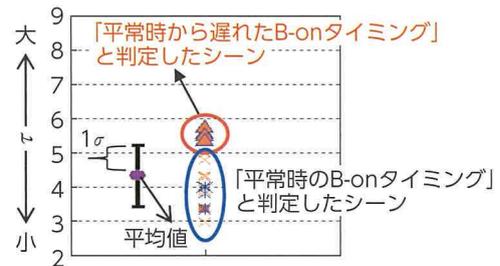


図5 τ 指標値によるドライバ毎のシーンの分類
(一人ドライバのデータ)

5 平常時の減速行動における「個人構え度モデル」の構築

5.1 横方向接近の影響によるブレーキタイミングのバラツキに関する仮説とその検証

平常時から減速操作タイミングが遅れるシーンをドライバのブレーキペダル操作前に予測するためには、 $TTC > 4s$ の段階で、ドライバ毎の平常時のブレーキペダル操作タイミングを小さいバラツキの幅（一定の値）で表現できるリスク感覚指標が必要である。

まず、前後方向接近感指標 (PRE)⁽³⁾ 単独で、リスク感覚を表現できるかどうかを確認するために、前方距離感覚や自車減速感覚を用いたPREを対横断歩行者接近の場面に適用し、対歩行者の前後方向接近感 (longitudinal PRE) を定式化した（図6, 式2）。

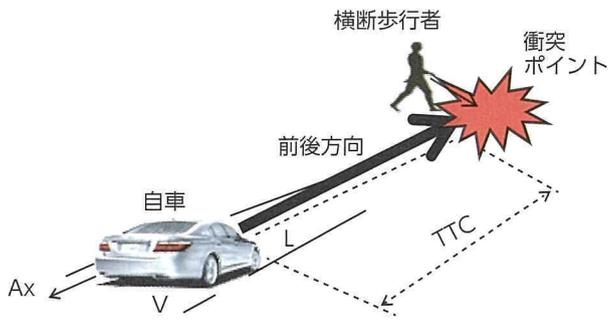


図6 longitudinal PRE の定義

$$longitudinal\ PRE = \left[\frac{V + \beta A_x}{L^n} \right] \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 V : 自車速度 (m/s),
 A_x : 自車減速度 (m/s^2),
 L : 前後距離 (m),
 β : 減速感覚定数 (s)
 n : 知覚的な距離誤差補正定数 を表す.

縦軸に longitudinal PRE, 横軸に TTC をとって, 4章で分類した一人のドライバの平常時の B-on タイミングを図7に示す. 図7より, 平常時の B-on タイミングの TTC が約 7s ~ 4s の広幅で変動し, longitudinal PRE 単独では, この変動 (バラツキ) が大きく, 有効なリスク感覚指標とはいえないことが確認できた. この結果から, ドライバの平常時の B-on タイミングは, 前後方向の刺激だけではなく, 横方向からの刺激の影響も受けると考えられる. そこで, 以下の仮説1を立て, 横方向からの刺激量による影響の検討を行った.

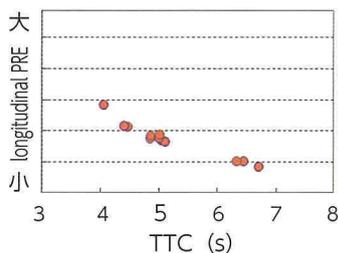


図7 longitudinal PRE による平常時の B-on タイミングの表現

【仮説1】

対横断歩行者と接近時の T_PRE として, 以下の要因①②が影響する (図8)

①【前後方向】 自車の進行方向における接近感覚 (longitudinal PRE, 式(2))

②【横方向】 横断歩行者の移動方向における接近感覚 (lateral PRE, 式(3))

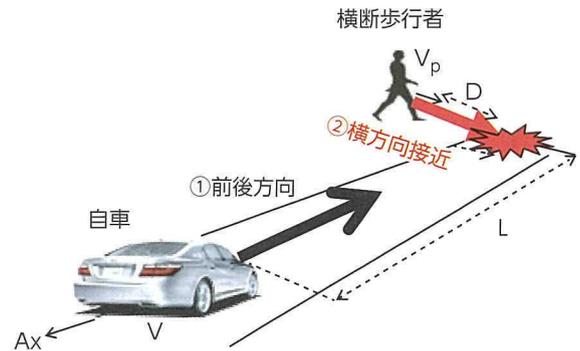


図8 T_PRE の定義

【仮説1の検証】

横方向接近感指標 (lateral PRE) を以下で定義する.

$$lateral\ PRE = \frac{V_p}{D^m} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 V_p : ドライバが知覚した歩行者の移動速度 (m/s),
 D : 横距離 (m),
 m : 知覚的な距離誤差補正定数 を表す.

横方向接近感を人間の刺激感覚の規則 (ウェーバーの法則) に従って, 構成した. 即ち, lateral PRE (式(3)) の分母が刺激量 (ドライバが知覚した横方向距離), 分子が刺激変化量 (ドライバが知覚した歩行者の移動速度) であり, その相対的關係でドライバが歩行者の動きを感じることを考えた.

4章で分類した「平常時の B-on タイミング」シーンのデータから, 縦軸に longitudinal PRE, 横軸に lateral PRE をとって, B-on のタイミングを図9に示した. その結果, lateral PRE の値が【小】【大】によって, longitudinal PRE で示した B-on タイミングが2層に分布していることが, 9人のドライバ全員で確認され, 仮説1が成り立つことが示された.

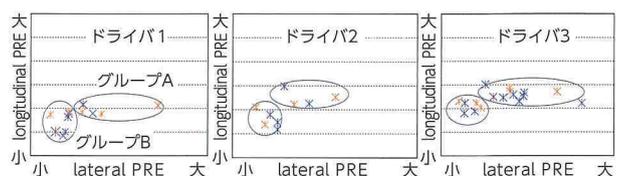


図9 ドライバ毎の平常時の B-on タイミングの分布 (3人ドライバの例)

5.2 T_{PRE} の構築と検証

ドライバが、平常時の運転状態において、ドライバ固有のT_{PRE}（許容なリスク感度）を有して、リスク感度がある一定のレベルに到達したときに、ブレーキ（反応）すると考えられる。

しかし、図9に示した結果のように、B-on タイミングが2層に分かれているという複雑な特性となっている。本研究では、B-on タイミングをリスク感度の一定値で示すためには、lateral PRE の値の【大】【小】に着目し、この複雑な特性をドライバのリスクの感度として、以下の図10のように、整理した。

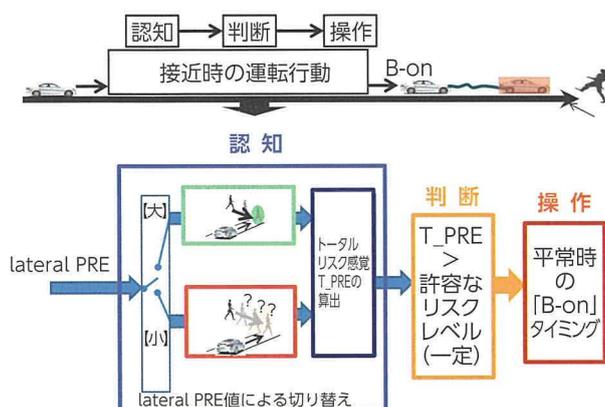


図10 T_{PRE} による平常時の B-on タイミング 特性の整理

- ① lateral PRE が【大】の場合（図9，グループA），対横断歩行者との仮想的な衝突ポイントが明確となるため，ドライバが，これ以上に近づいていかないように，前後方向の接近感覚のみに基づいた減速操作を行ったと考えられる。
- ② lateral PRE が【小】の場合（図9，グループB），対横断歩行者との仮想的な衝突ポイントが明確でなく，横方向からのリスクを構える必要があるため，ドライバが前後方向の情報だけでなく，横方向の情報も用いて，減速操作を行ったと考えられる。

そこで，以下の仮説2を立て，T_{PRE} を構築した。

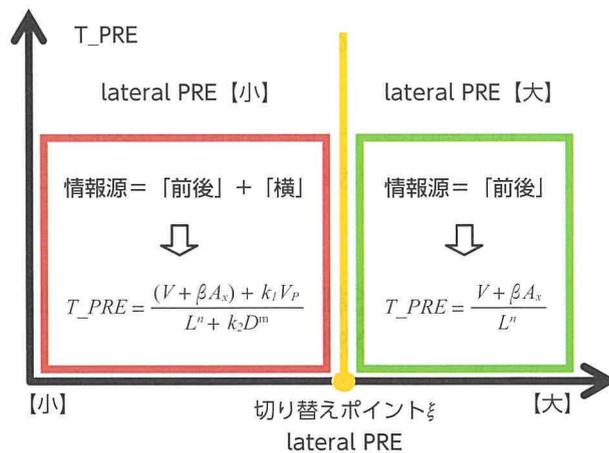
【仮説2】

ドライバは，lateral PRE の値（【小】・【大】）を情報源とし，リスク感度の見積もり方法を切り替えることで，T_{PRE} を一定値として算出し，T_{PRE} が一定値に到達した時にブレーキを開始する。

【仮説2の検証】

仮説2を検証するために，T_{PRE} の数学モデルを構築した。刺激に対する人間感覚の規則（ウエー

バーの法則）に基づき，分母を刺激量（ドライバが知覚した総合距離），分子を刺激量の変化（ドライバが知覚した総合速度）とし，歩行者接近時のT_{PRE} を式(4)のように定式化した。



$$T_{PRE} = \frac{(V + \beta A_x) + k_1 \frac{d}{dt} f(D)}{L^n + k_2 f(D)} \quad \dots\dots (4)$$

$$f(D) = \left[1 + \text{sgn} \left[\xi - \frac{V_P}{D^m} \right] \right] \frac{D^m}{2} \quad \dots\dots (5)$$

ここで， $\frac{V_P}{D^m} < \xi$ （横方向接近【小】）： $f(D) = D^m$ ，
 $\frac{V_P}{D^m} > \xi$ （横方向接近【大】）： $f(D) = 0$ ，

ξ ：予測式の切替ポイント（平常データから二値判別された値），

k_1, k_2 ：横方向接近感の重み（平常時のT_{PRE} 範囲が最小になるよう最適化された定数）

を表す。

4章に分類した「平常時の減速タイミング」シーンのブレーキタイミングをT_{PRE} 値で表現した。パラメータは，晴天かつ自転車走行速度V=30～50km/hの領域で，9人のドライバに共通なパラメータ値（n=m=1, β=1.5, k₁=3, k₂=1）を用いた。また，ξは，ドライバ毎の全体データのバラツキが少なくなるように，ドライバ毎に最適化した。その結果，9人のドライバ全員で，平常時のB-on タイミングをT_{PRE} で示し，2層に分布していたタイミングがほぼ一定となることが確認され，仮説2が成り立つことが示された（図11）。

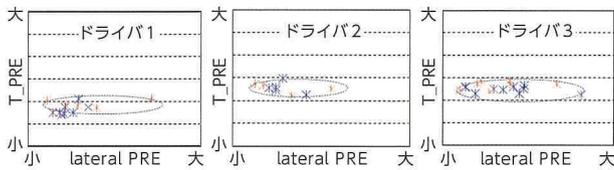


図 11 T_PRE 値による平常時の B-on タイミング (3人ドライバの例)

更に、個人間の違いが主に予測式の切替ポイント ξ と「T_PRE」値で表現できることも示された。

6 T_PRE による構え度モデルの予測的な判断性能の検証

T_PRE の一定値で、ドライバ毎の平常時のブレーキタイミングが示せた構え度モデルから、これより大きいブレーキタイミングの T_PRE 値で、「平常時から遅れるブレーキタイミング」シーンの予測が可能と考えられる。

そこで、4章の手順で、ブレーキ後の車両挙動評価指標 τ により、「平常時の B-on タイミング」シーンと「平常時から遅れた B-on タイミング」シーンを分類した (図 12)。その後、それぞれの T_PRE 値がどの程度離れているかを検証した。ドライバ別に、B-on 時の T-Pre 値を示し、T_PRE 値で「平常時の B-on タイミング」シーンの操作範囲と「平常時から遅れた B-on タイミング」シーンの操作範囲が 2σ 以上、分離できること、ドライバ9人全員で同様な結果が確認できた (図 13)。

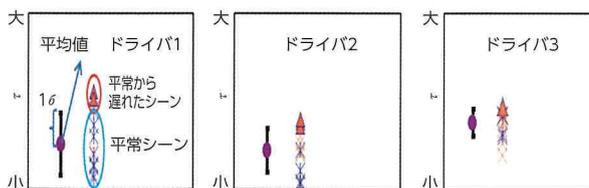


図 12 τ 指標値(4章)による「平常時の B-on タイミング」シーンと「平常時から遅れた B-on タイミング」シーンの分類 (3人ドライバの例)

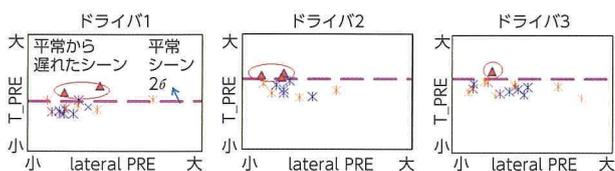


図 13 T_PRE 値による「平常時の B-on タイミング」シーンと「平常時から遅れた B-on タイミング」シーンの分離 (3人ドライバの例)

7 T_PRE とその応用

7.1 煩わしくない早出し報知の支援

TTC = 約 7s ~ 4s の間に、ドライバの減速操作 A-off, B-on の有無を検出しながら、①, ②のような T_PRE 値のモニタリングにより、平常時から遅れる減速タイミングを予測し、煩わしくないブレーキ操作を促す報知等の支援を可能にする。

① T_PRE の閾値による支援

T_PRE 値がある閾値より「大」になった場合、「平常時から遅れた B-on タイミング」と判断し、支援を開始する。

② T_PRE の変化量による支援

T_PRE の変化量がある値より大きくなった場合、「平常時から遅れた B-on タイミング」と判断し、支援を開始する。

7.2 個人の運転特性変化に適応した支援

τ , ξ , longitudinal PRE 等の接近感覚の特徴量と、ドライバ毎の平常時の運転特性との紐付けで、そのドライバの運転傾向 (運転タイプ) を把握できる。例えば、平常時の運転時に、longitudinal PRE 値が ξ より高いドライバが、「前後方向の接近にリスク感受性が高い」というタイプであり、横方向からの微妙な接近に対して不注意の傾向があると考えられる。逆に、 ξ が longitudinal PRE 値より高いドライバが、「横方向の接近にリスク感受性が高い」というタイプであり、横方向の接近に対して、敏感的に反応する傾向があると考えられる。このように、上記の接近感覚の特徴量で、ドライバの運転特性がモニタリングでき、そのドライバの運転経験年数、及び走行環境等に伴って変化する運転特性に適応した運転支援の提供を可能にする。

8 結論

本研究は、TTC > 4s で横断歩行者が発見可能な場面において、横断歩行者の移動量に着目した「トータル接近感指標 T_PRE」(図 8, 10, 式(4)) × 「ペダル操作 (B-on) タイミング」を用いて、ドライバ毎の平常な接近時の構え度モデルが構築できた。これにより、ドライバ毎の「平常時の減速タイミング」シーン・「平常時から遅れる減速タイミング」シーンが予測可能であることを検証できた。

これに基づき、TTC が 4s 以前の衝突リスクがまだ顕在でなく、個人間差が大きい段階における煩わ

しくない支援タイミングを、個人適合により、可能にする基盤技術の目処付けができた。また、 τ , ξ , T_PRE 等を用いて、ドライバの運転特性変化に適応した支援の可能性についても考察した。

今後の課題として、対横断歩行者以外の要因（道路の構造等、天候等）による操作タイミングのバラツキの影響を確認し、必要な場合に、環境認識技術× T_PRE の係数適合による補正を検証する。

■参考文献

- (1) 公益財団法人 交通事故総合分析センター：歩行者死亡事故は自動車直進中に多く発生。イタルダ・インフォメーション No.94, 2012
- (2) 公益財団法人 交通事故総合分析センター：自動車と歩行者の事故。イタルダ・インフォメーション No.83, 2010
- (3) 青木宏文, 安田, 福井：前後方向の接近感に関する研究－接近感指標 PRE の開発－。自動車技術会論文集 Vol.42, No.2, p.619 - 623 (2011)
- (4) Nguyen Van Q.H., H. Aoki, Y. Inuzuka: A Study on Relation Between Steering Timing and Braking Timing Based on Longitudinal Collision Risk Perception. 18th World Congress on Intelligent Transport Systems Proceedings (2011)

■著者



グエンヴァンクワン



岸 浩司



菊池 弘一



岡村 宏樹



吉澤 真太郎



伊藤 祥司

ロードサインアシストの開発

Development of Road Sign Assist System

川崎 智哉 *	クリストフ ジレ **
Tomoya Kawasaki	Christophe Gillet
トム ライケン **	藤巻 裕介 ***
Tom Rycken	Yusuke Fujimaki

要旨

ヨーロッパでは制限速度が頻繁に変わることや、速度規制が異なる国々へ国境を越えて走行することが頻繁にあるため、ドライバーは走行している道路の制限速度に常に注意を払う必要がある。このような運転環境を踏まえ、道路に設置されている制限速度などの標識をフロントカメラで認識し、メーターディスプレイに表示することでドライバーへの情報提供を行う運転支援システム「ロードサインアシスト」を開発した。本システムは、制限速度のみならず追越し禁止標識にも対応し、ドライバーが標識を見落とすなどして意図せず規制から逸脱した場合に表示もしくは音による警告を行い、安全な運転に寄与する。

Abstract

In Europe, speed limits change frequently and drivers often cross national borders into areas with different speed restrictions. For these reasons, drivers have to pay close attention at all times to the posted speed limits. In response, Toyota has developed Road Sign Assist, a driving support system that uses the front camera to recognize speed limits and other road signs, and then provides this information to the driver via a display in the instrument cluster. In addition to speed limit notification, this system also encourages safe driving by displaying no-overtaking signs and alerting the driver through a display or sound if the driver unintentionally disregards the restrictions posted on the detected signs.

キーワード 道路標識, 制限速度, フロントカメラ, スピードアシスタンス

1 はじめに

近年、先進運転支援システム (Advanced Driver Assistance Systems : ADAS と略す) の開発・普及が世界的に急速に進んでいる。この背景として、各地域で自動車アセスメント (New Car Assessment Program : NCAP と略す) に従来の衝突安全性能に加えて予防安全性能が多く取り入れられ始めたことが挙げられる。予防安全では、レーダーやカメラなどの車載センサーを用いて自車両の周囲を監視し、安全な運転に必要な情報を提供する。また、事故が起こりそうな状況において、ドライバーへの警報から事故回避操作支援、更には衝突被害を軽減するための自動ブレーキまで作動させるプリクラッシュセーフティ (Pre-Collision System : PCS と略す) が実用化されている⁽¹⁾。

トヨタ自動車は、統合安全コンセプト⁽²⁾に基づき、予防安全から衝突安全までの領域で、相互に連携した安全システムにより最適な支援を実現すべく開発を進めている。

交通事故低減のための一つの重要な要素は、制限速度の遵守である。速度超過は、運転における認知・判断・操作の遅れやミスを招きかねないためである。そこで、既に LDA (Lane Departure Alert)⁽³⁾ や AHB (Automatic High Beam) に用いられている ADAS フロントカメラを活用して制限速度などの道路標識を認識し、メーターディスプレイを介してドライバーへの情報提供を行う運転支援システム「ロードサインアシスト」(Road Sign Assist : RSA と略す) をヨーロッパ市場向けに新規に開発した。本稿では、RSA の構成と機能について解説する。なお、本システムはトヨタセーフティセンスの一機能として 2015 年 6 月に欧州向 Avensis, Auris に搭載されて製品化されている。

* 制御システム先行開発部

** TOYOTA MOTOR EUROPE NV/SA

*** 制御システム開発部

2 システム概要

2.1 開発の狙い

ヨーロッパでは、一本の同じ道路を走行していても制限速度が頻繁に変わる。速度規制が異なる国々へ国境を越えて走行することも頻繁にある（図1）。

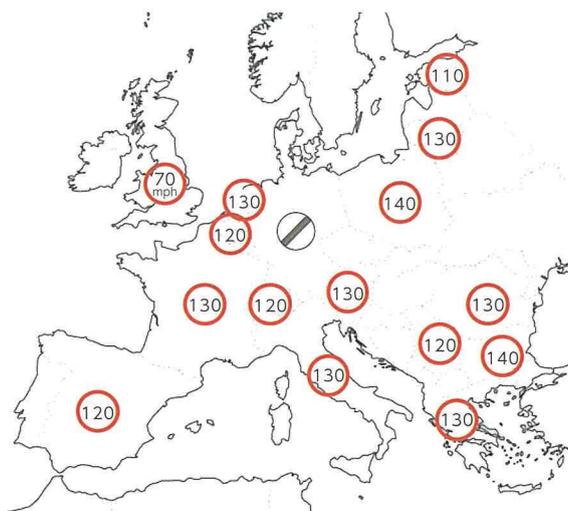


図1 国毎の最高速度の違い

このような状況下でスピードカメラによる速度超過取り締まりが厳しく行われていることもあり、ドライバーは走行している道路の制限速度に常に注意を払う必要がある。制限速度遵守のため、可変スピードリミッター（Adjustable Speed Limiter：ASLと略す）が大衆車まで広く普及していて、Euro NCAP Speed Assistanceの性能要件に採用されていることはヨーロッパの一つの特徴と言える。しかしながら、道路標識を見落とすなどによって意図せず規制から逸脱してしまうことはときに起こり得る。これを防ぐため、ナビゲーションの一機能として、電子地図情報の中にある制限速度をナビゲーション画面に表示する機能がある。しかし、電子地図上の制限速度情報には以下の観点で課題がある。

- ①電光標識など制限速度が時間などで変わり得る道路では情報が無い。
- ②道路工事などで一時的に制限速度が変わる場合には間違った情報になる。
- ③制限速度以外の道路標識情報はナビゲーションには無い。

RSAにより、走行している道路に実際に設置されている標識を認識することができ、上記課題を補完することができる。

2.2 システム構成と機能概要

図2にRSAシステム構成、図3にカメラ機能ブロック図を示す。標識の認識に用いるカメラは他のADASとハードウェアが共通であり、ここに専用のソフトウェアを組み込むことでRSA機能を実現している。図4にRSA機能を組み込んだカメラの一例を示す。カメラで標識を認識した後、ドライバーに知らせるべき情報を選択してメーターディスプレイに表示する（図5）。更に、カメラでは車速などの車両信号を用いて自車両がメーターに表示中の規制から逸脱していないかどうかを監視し、逸脱したと判定された場合には表示や音でドライバーに警告する。

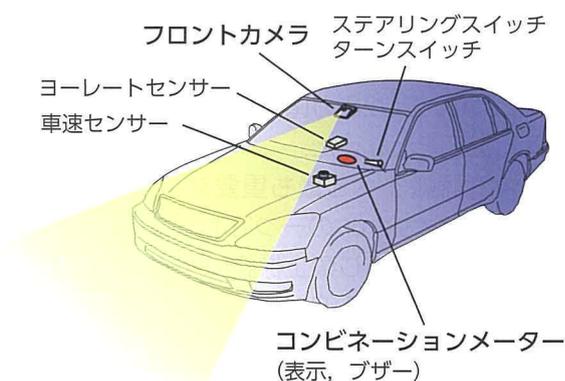


図2 RSAシステム構成

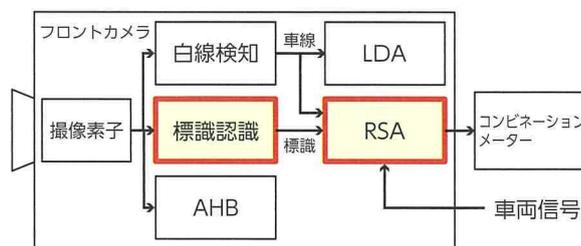


図3 カメラ機能ブロック図



図4 RSA機能付きカメラの一例



図5 RSA 表示画面の例

2.3 認識する標識

ヨーロッパの多くの国では、道路標識及び信号に関する条約（ウィーン，1968）に基づいた標識が採用されている。そのため、道路標識はほぼ標準化されており、今回のRSAもそれを前提としている。これにより、EU28カ国のほぼ全域とその周辺国への導入が可能となった。

RSAで認識すべき最も重要な主標識は禁止標識（Prohibitory sign）の一つである最高速度制限標識である。更に、同じ禁止標識の中で規制逸脱の影響が大きいと思われる追越し禁止標識も認識できるようにした。また、補助標識についても一部ではあるが識別している。表1は主な対象標識一覧である。

表1 RSAの主な対象標識一覧

標識種類		例
主標識	最高速度制限	
	速度制限地帯	
	追越し禁止	
	全制限解除	
補助標識		400m

3 標識認識・表示制御

3.1 標識認識

カメラの撮像素子から出力された画像信号から標識を抽出するアルゴリズムの概要を述べる。まず、生画像からエッジ検出を行った後、特徴抽出演算により円形状を抜き出す。これをカメラ内の認識辞書と比較して標識としての確からしさを識別し、その種類を特定する（図6）。



図6 標識認識結果の一例
(Continental AG 提供)

3.2 表示制御

認識された標識は、次にそれが自車両に適用されるものか否かの判定をする必要がある。これは、例えば本線を走行している際に側道やランプウェイ向けの標識を表示すると、ドライバーにとって誤った情報となるからである。RSAでは、複数の条件式によりこれに対処している。一つには、本線に比べて側道の制限速度が低いことを考慮して、両者の速度差が大きい場合には低い側の表示を一時見合わせたり、ランプウェイにのみ適用されることを示す矢印の補助標識と一緒に認識された場合はランプウェイに進入したと判定されるまで表示を待つなどの処理がある（図7）。

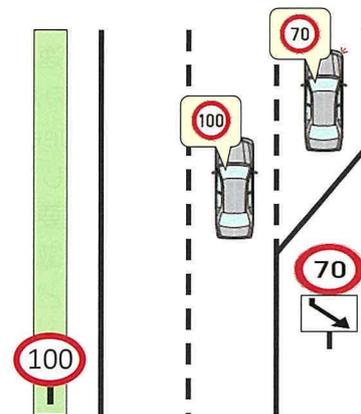


図7 ランプウェイの対策

認識・表示された標識が未だに有効かどうかの判定も必要である。例えば、通常の制限速度標識は交差点で右左折した後は無効となる。そこで、各種車両信号を用いて右左折判定を行い、成立後に標識表示を消去するようにした。但し、例外として速度制限地帯の場合にはその標識が持つ意味を考慮して右左折では消去せず、それが終わったことが判定できたときのみ消去するようにしている（図8）。

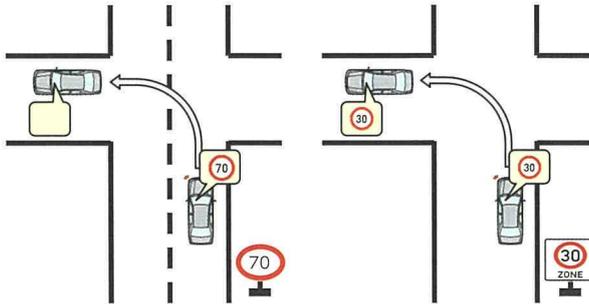


図8 右左折判定による標識消去

制限速度情報は、理想的にはその規制が適用される限り常時表示されるべきである。しかし、カメラでいかなる標識も抜け漏れ・誤りなく認識できることはなく、次の正しい標識が認識されるまで誤った標識が表示し続けてしまうことが起こり得る。これを防ぐためには、認識された標識はできるだけ早く消した方がよい。この相反する要求のバランスを取るため、標識の設置間隔距離を主要国 11 カ国、約 12,000km に渡り調査した。図9はその結果である。長くとも 3km 以内に次の標識が出現する割合が 8 割を超えることが分かる。これを元に、表示継続距離の適合を行った。

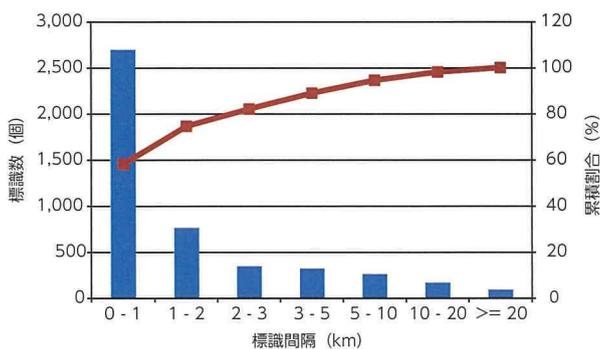


図9 標識の設置間隔調査結果

表示すべき標識が確定した後、それらはメーターディスプレイに送られてドライバーに伝達される。メーターには 2 種類の表示画面を用意した。1 つは ADAS タブと呼ぶ RSA や PCS/LDA の専用画面であり、ここには複数の標識を表示することができる。もう一つは汎用表示画面であり、燃費表示やマルチメディア表示時にも標準制限速度標識を表示することができる (図 10)。



図10 ADAS タブと汎用表示画面例

4 性能基準

ヨーロッパの標識がウィーン標識条約に準拠しているとはいえ、細かく見れば国毎にデザインは異なる。また、標識が設置されている環境は道路種別によって異なり、カメラは日射や天候などの外乱による影響が避けられない。これらを考慮した上で安定した性能を確保するため、認識性能開発は次のような考えで行った。

- ① 適合性確認は国毎に行う
- ② 4 つの環境条件 (A: 晴れ・昼, B: 晴れ・夜, C: 雨・昼, D: 雨・夜) で著しい性能差が無いこと
- ③ 3 つの道路種別 (a: 高速道, b: 郊外路, c: 市街地) で著しい性能差が無いこと

最終的に、ヨーロッパ 37 カ国、約 70,000km に渡って約 80,000 個の標識データを取得し、適合を行った。

5 HILS による効率的な評価法

標識表示制御の評価を効率良く行うため、専用の HILS (Hardware-In-the-Loop Simulator) を開発した (図 11)。標識表示制御の確認を実車による公道走行で行うことは、標識の遭遇頻度を考えると非現実的である。テストコースなどに所望の標識を設置すれば効率化が図れるが、日射や天候などの環境要因で認識性能が低下した場合には安定した評価ができない。そこで、屋内の安定した光環境下で

論文解説

HILS を構築し、実際の標識の代わりに PC 画面上に記録された実カメラ動画やアニメーション画像を流すことにより、10 倍以上の効率化を達成することができた。



図 11 RSA HILS

6 将来の発展

今回の RSA はドライバーへの情報提供を目的としたが、RSA で認識した制限速度情報は ASL や ACC (Adaptive Cruise Control) への入力として用いることもできる。つまり、従来ドライバーが道路標識を見て手で設定速度を変更していたところを、RSA の情報を使って自動で変更するのである。これにより、RSA で認識した制限速度をより有効に実際の運転に適用することができる。

7 おわりに

カメラによる画像認識技術は飛躍的な進化を続けており、走路認識、歩行者認識などに加えて RSA の標識認識も将来の自動運転には欠かせない技術の一つと考えられる。今後、認識する標識の種類を増やしていき、安全な運転を支援する範囲を広げていきたい。また、今回はヨーロッパ向けの製品化であったが、他の地域への導入も順次進めていきたい。

最後に、この RSA 開発にあたっては A.D.C. Automotive Distance Control Systems GmbH, Continental AG の多大なご協力を頂きました。ここに謹んで御礼申し上げます。

■参考文献

- (1) 川崎智哉, 藤田, 山田 : プリクラッシュセーフティー自律統合安全技術ー. TOYOTA Technical Review. Vol.56, No.2, p.51 - 57 (2009)
- (2) 見市善紀, 中川 : 安全・運転支援技術開発の取り組み. 自動車技術. Vol.68, No.12, p.19 - 24 (2014)
- (3) M. Nishida, S. Kawakami, A. Watanabe : Development of Lane Recognition Algorithm for Steering Assistance System. SAE Technical Paper 2005-01-1606 (2005)

■著者



川崎 智哉



クリストフ ジレ



トム ライケン



藤巻 裕介

アイドリングストップ車用走行環境適応型 バッテリーマネージメントシステム

Driving Environment-Adaptive Battery Management System for Vehicles Installed with
Idling Stop System

栃木 康平*
Kohei Tochigi

宮下 亨裕**
Michihiro Miyashita

前田 智治**
Tomoharu Maeda

要旨

ハイブリッド車以外の燃費向上技術として、普及拡大しているシステムに充電制御とアイドリングストップがある。鉛バッテリーを用いた充電制御はSOC（バッテリー充電状態）を低く制御すれば回生電氣量が増加するため、燃費効果が上がる。一方、アイドリングストップはSOCを高く制御すれば作動禁止を回避できるため、燃費効果が上がる。このように両システムによる鉛バッテリーへの要求は相反するため、両システムを両立できない場合が生じる。そこで、走行環境に応じて適切にSOCを管理することで両システムを両立させる手法を開発し、燃費効果を向上させた。

Abstract

Idling stop and charging control systems are entering widespread use as technologies to help improve fuel efficiency in vehicles installed with conventional powertrains. In vehicles installed with a lead-acid battery, a charging control system can improve fuel efficiency by controlling the battery state of charge (SOC) at a low level, thereby increasing the amount of electricity regeneration. In contrast, an idling stop system can improve fuel efficiency by controlling the battery SOC at a high level to maximize the duration of system operation. Since these systems have opposing requirements for lead-acid batteries, it is difficult to apply the functions of both systems at the same time. Therefore, a method to help improve fuel efficiency was developed that allows the application of both systems by managing the SOC to an appropriate level depending on the driving environment.

キーワード アイドリングストップ, 充電制御, 鉛バッテリー, SOC, 走行環境

1 はじめに

1.1 背景と目的

地球温暖化の抑制や燃費規制の強化に対し、ハイブリッド車以外の燃費向上技術として普及が拡大しているシステムにIS（Idling Stop：アイドリングストップ）と充電制御がある。

燃料消費を削減するために、ISは停車中や停車直前の減速中からエンジンを停止する。充電制御は走行中にオルタネータの発電を停止する。システム作動中は、オルタネータの発電が停止するためバッテリーから車両補機へ電力を供給する必要があり、バッテリーのSOC（State of Charge：バッテリー充電状態）が低下する。しかし、バッテリーの寿命を確保するためSOC下限値には制限があり、利用できるSOCは限られている。このため、両システムに

よってSOCが低下しすぎるとエンジンのアイドリングやオルタネータの発電を停止できず意図した燃費効果が得られないという課題が生じる。

SOCの低下による燃費効果の減少を抑制するには以下2つの方法がある。

①燃料を消費せずにSOCを高めるために、減速時の回生電氣量を増加させる

②使用可能な限られたSOCを効率的に利用する

回生電氣量によって車両補機の消費電力を賄うことができれば、両システムの燃費効果を最大化できる。このため近年、回生電氣量の増加を目的として、電気二重層キャパシタ⁽¹⁾やリチウムイオン電池⁽²⁾を搭載するシステムが商品化されている。しかし搭載性やコストの課題に加え、車両補機は増加傾向にあり、回生電氣量だけで実用まで含めた補機電力を賄うことは困難である。

そこで本研究は限られたSOCを効率的に利用する制御を開発し、両システムによって得られる燃費効果を向上させることを目的とした。

* 制御システム先行開発部

** エンジン制御システム開発部

1.2 燃費向上への背景

充電制御はオルタネータの発電を停止することで燃費効果を得ているが、ISと比較した場合、オルタネータに加えエンジンを停止できるISの方が燃料消費の削減効果大きい。しかし、充電制御により走行中にSOCが低下しすぎるとSOC許容下限値の制約から停車時にISが作動しない、またはIS中にエンジンの再始動が必要となる(図1)。

一方、燃費効果の大きさからISの禁止を防ぐために走行中にSOCを高める方法が考えられる。しかし、この場合にIS機会が少ないと、燃料を消費して不要にバッテリーを充電したこととなる(図2)。

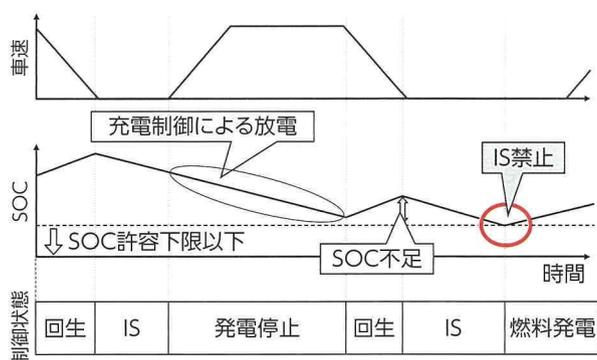


図1 SOC低下によるISの作動禁止

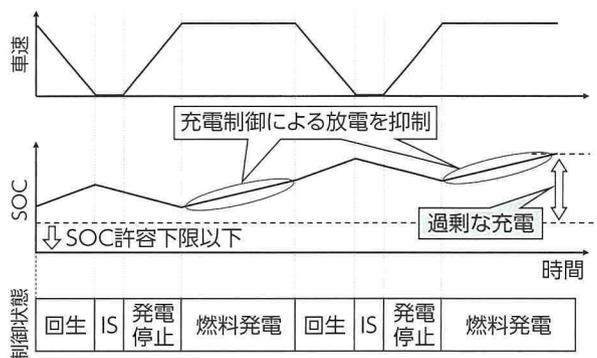


図2 充電制御の抑制による過剰な充電

また鉛バッテリーは高SOCで充電受入性が悪化するため、回生電気量の増加を併行して行うには低SOCで利用することが必要である。しかし低SOCでは、SOC許容下限値までの放電可能な量が減少する。これによりIS禁止が頻発すると回生電気量増加の効果よりも却って燃費効果は低下する。

以上の様に、回生量増加のために鉛バッテリーを低SOCで利用したい充電制御と作動禁止回避のためSOC許容下限値から余裕を持ちたいISとでは、SOC制御への要求が相反する。

2 研究手法

限られたSOCを効率的に利用し燃費効果を向上させるために以下2つを必要要件とした。

- ① SOC低下によるIS作動禁止を回避すること
 - ② 回生電気量の増加、過剰な充電抑制のため、①を満たす範囲の中で極力低SOCを利用すること
- 2つの要件を満たすためにISの禁止を推定し、それに基づきSOCを制御することで燃費効果が向上すると仮説を立てた。

2.1 IS禁止の推定

IS禁止を推定するために、実走行データからISが禁止される状況を解析した。評価条件を表1、結果を図3に示す。

表1 評価条件

評価時期	2010/10
車両重量	1,000kg
エンジン	1.3L (L4 NA)
トランスミッション	CVT
評価コース	豊田 ~ 名古屋

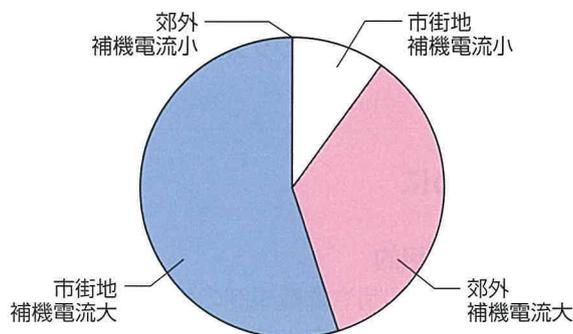


図3 SOC低下によるIS禁止発生シーンの割合

SOC低下によるIS禁止は市街地や補機電流が大きい場合に多く生じている。補機電流が大きいとIS中の放電量が大きくなり、SOC許容下限値に達する時間が短い。市街地では信号等による停車機会が多く、ISによる放電頻度が多い。これらが合わさると放電に対して充電が間に合わず、SOC許容下限値を下回り易くなることからIS禁止が増加する。以上より、ISの禁止は補機電流とIS時間の積から推定できると考えた。ただし、IS時間が長い場合でも充電時間が長ければSOCは回復できる。このためIS機会として、過去所定時間に占める停車時間から停車時間率を算出した。

IS 禁止の発生頻度にはバッテリーの充電受入性も大きく関わる。充電受入性は SOC と密接な関係にあるため、停車時間率から定まる充電・放電の時間比率と補機電流をパラメータに、充放電収支が成立するバランス SOC と SOC 許容下限値の関係を調査した。バランス SOC が SOC 許容下限値よりも低い場合は、現在の充放電を続けると SOC が許容下限値まで低下するため、IS が禁止される可能性が高い、上回れば禁止される可能性は低いと推定できると考えられる。IS 禁止の可能性は補機電流と停車時間率に対し、図 4 の関係となる。

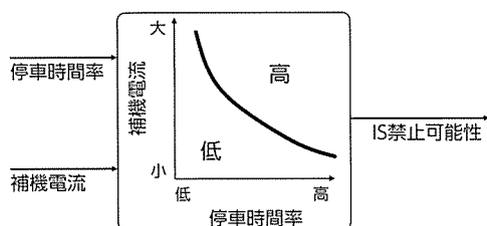


図 4 IS 禁止可能性の推定

2.2 IS 禁止可能性に基づく SOC 制御

SOC 制御は、IS 禁止可能性に基づき、充電制御による走行中の目標 SOC とオルタネータの発電頻度を変える事によって行う (表 2)。IS 禁止の可能性が高いと推定される場合は、目標 SOC を上げオルタネータの発電頻度を増加させる。一方、IS 禁止の可能性が低いと推定される場合は、目標 SOC を下げオルタネータの発電頻度を低下させる。SOC 制御の動作例を図 5 に示す。

表 2 目標 SOC と発電頻度

IS 禁止可能性		低	高
目標 SOC		低	高
発電頻度	SOC ≥ 目標 SOC	減速	減速
	SOC < 目標 SOC	減速 定常 アイドル	減速 定常 アイドル 加速

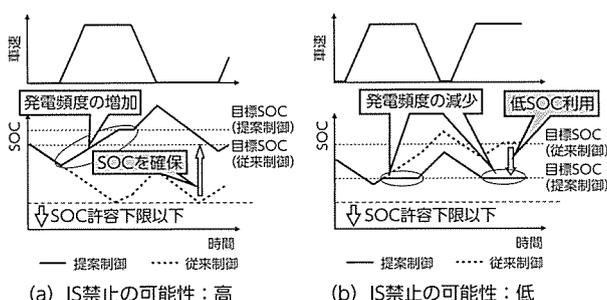


図 5 SOC 制御

3 評価方法と条件

車両、電源系、各制御をモデル化したシミュレータ (図 6) を用いて評価した。車両モデルは燃料消費量を算出する。電源系モデルは電圧、電流、エンジンへの負荷トルクを算出する。制御系モデルは車速と SOC に応じて IS と充電制御を制御する。

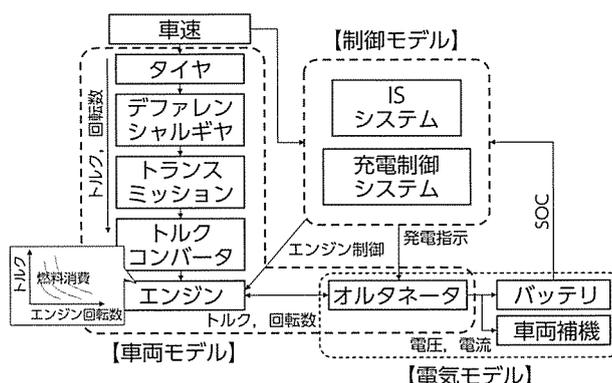


図 6 シミュレーション構成図

燃費効果は走行パターンと補機電流を条件として評価した (表 3)。走行パターンは停車時間率が異なる郊外、市街地、渋滞の 3 つに分類した。補機電流は車両補機の作動が少ない春 / 秋と多い夏 / 冬を想定した 2 つに分類した。また、国内認証パターンである JC08 (補機電流は小) も併せて評価した。

表 3 評価条件

車両重量	1,740kg
エンジン	2.0L (L4 Turbo)
トランスミッション	6AT
評価コース (停車時間率)	郊外: 六甲 (12.9%) 市街地: 東京 (32.6%) 渋滞: 名古屋 (49.3%) JC08 (29.6%)
補機電流	20A (春 / 秋) 45A (夏 / 冬)

4 評価結果

従来制御に対して走行環境適応型 SOC 制御の燃費効果を図 7 に示す。全条件で燃費は向上しており、平均で約 1.6% の効果が得られた。走行環境によって効果の大きさは異なり、市街地または渋滞で補機電流が大きい場合は平均約 5.2%、それ以外の場合は平均約 0.2% の向上効果が得られた。

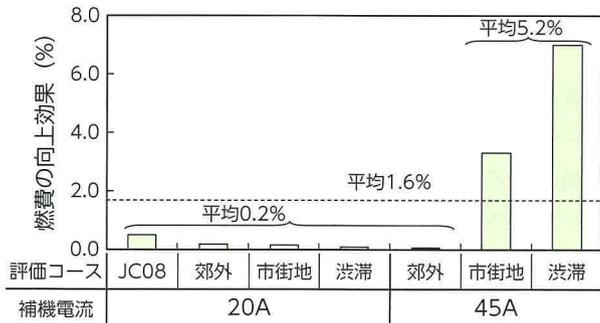


図7 燃費の向上効果

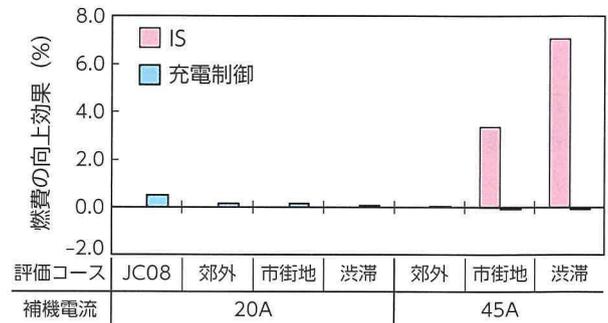


図10 燃費効果の内訳

走行環境による燃費効果について、IS 禁止の割合と回生電気量から述べる。

大きな燃費効果が得られた市街地または渋滞で補機電流が大きい場合は、従来制御で発生した IS 禁止を低減し、1%以下まで抑制できた (図8)。

燃費効果が小さい上記以外の走行環境の場合では回生電気量の割合が増加しており、最大約30%向上した (図9)。一方、IS 禁止を低減できた条件では回生電気量は約5%低下 (図9) しているが、IS 禁止低減の効果は回生電気量の低下による影響より大きく、トータルの燃費効果は向上した (図10)。



図8 IS 禁止割合の比較

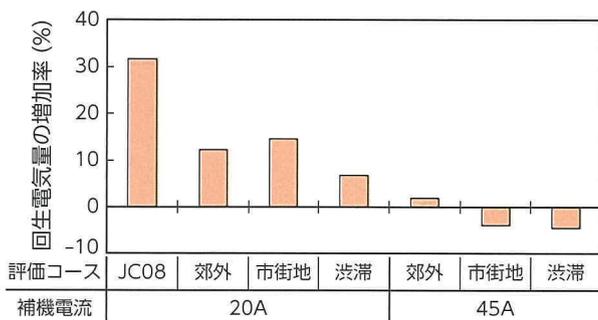


図9 回生電気量の比較

IS 禁止の低減と回生電気量の増加について、SOC の推移から以下に述べる。

IS 禁止の低減については渋滞で補機電流が大きい場合の結果を図11に示す。従来制御では充電制御によって走行中にも SOC が低下している。このため、SOC 許容下限値付近を推移することで IS 禁止が発生しやすくなっている。これに対し、走行環境適応型 SOC 制御では IS 禁止の可能性が高いと推定しており、走行中に充電を行うことで停車中の SOC を確保し、IS 禁止を回避できた。

回生電気量の増加については JC08 かつ補機電流が小さい場合の結果を図12に示す。IS 禁止は従来制御でも差はない。しかし、今後の IS 禁止が不明なため、目標 SOC を高く維持しており、結果的に過剰な SOC を推移している。これに対し、走行環境適応型 SOC 制御では IS 禁止の可能性を低いと推定しており、低 SOC で制御することで回生電気量が増加できた。

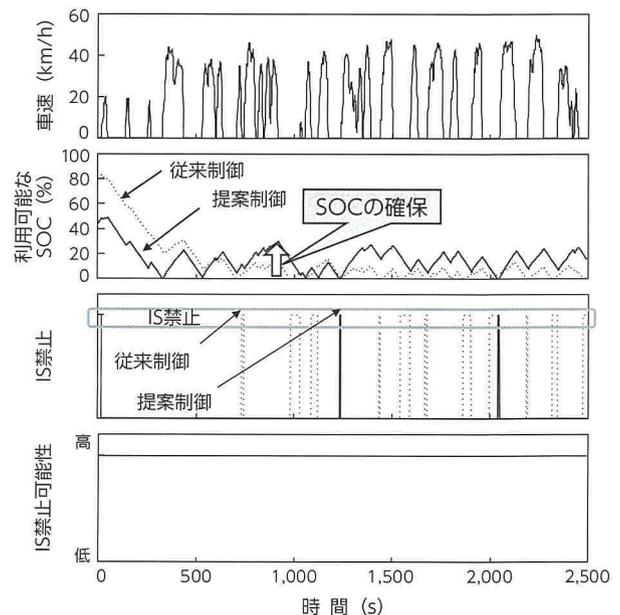


図11 SOC 推移の比較 (渋滞, 45A)

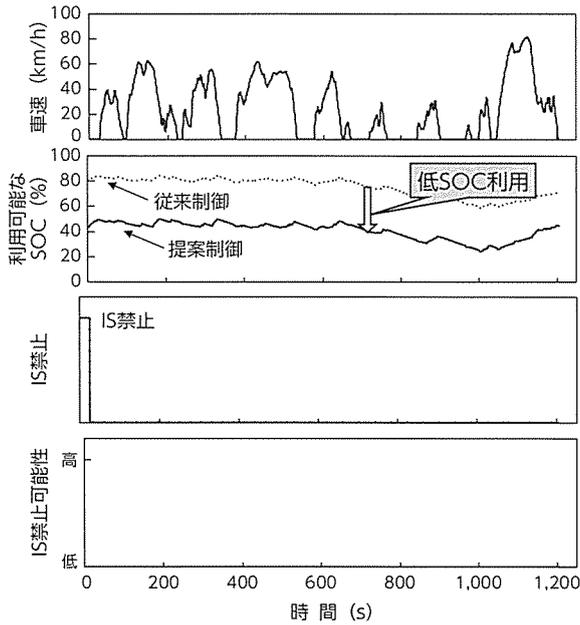


図 12 SOC 推移の比較 (JC08, 20A)

以上より、市街地または渋滞で補機電流が大きい場合は充電制御を抑制し、IS 禁止を低減させることで燃費効果が向上した。上記以外の走行環境の場合は、低 SOC で制御することで回生電気量の増加によって燃費効果が向上した。このことから、走行環境適応型 SOC 制御によって IS と充電制御の相反する SOC 制御への要求を両立できたことで燃費効果が向上したと考えられる。

5 おわりに

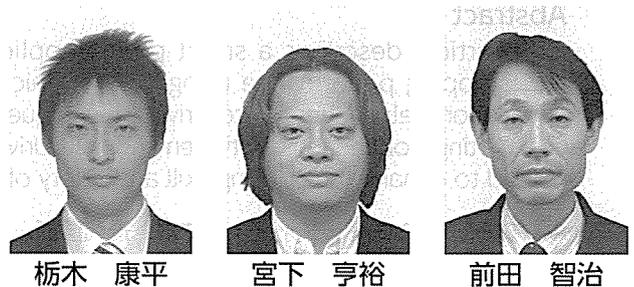
IS と充電制御の相反する SOC 制御に対する要求に対し、走行環境に基づき SOC を制御する手法を開発し、シミュレーションから以下を確認した。

- ・推定した IS 禁止の可能性に基づき、SOC を制御することで燃費効果が平均約 1.6% 向上
- ・市街地または渋滞で補機電流が大きい場合は、IS 禁止の低減によって平均約 5.2% 向上
- ・上記以外の走行環境の場合は、回生電気量の増加によって平均約 0.2% 向上

参考文献

- (1) 藤田弘輝, 高橋, 鈴木, 栃岡 : 減速エネルギー回生システム (i-ELOOP) 用キャパシタの開発. 自動車技術会学術講演会前刷集. No.14-13, p.9 - 12 (2013)
- (2) 淡川拓郁 : アイドリングストップ用減速エネルギー回生システム「エネチャージ」とリチウムイオン電池パックの開発. 自動車技術会学術講演会前刷集. No.14-13, p.13 - 16 (2013)

著者



栃木 康平

宮下 亨裕

前田 智治

楽しみながら運転がうまくなるスマホアプリの開発

Development of Smart Phone Application to Enhance Driving Technique and Enjoyment

柏井 忠大* 松村 健** 岡田 広毅*
Tadahiro Kashiwai Takeshi Matsumura Hiroki Okada

要旨

本論文では、車両情報をスマホで疑似的に生成してブレーキ操作と停止のスムーズさを診断するアプリを紹介する。これによりお客様には『ツナガルを活用して楽しみながら運転がうまくなる』というクルマ会社ならではの価値を提供する。実際に本アプリを使った結果、多くのドライバーの運転が改善され、安全にも寄与することをうかがわせる声も聞かれた。

Abstract

This article describes a smart phone application that gives feedback to drivers about braking and stopping performance using virtual vehicle information created within the smart phone. This application helps to enhance driving technique, while providing a more enjoyable driving experience by creating connections between multiple drivers. Evaluation results confirmed that the application helped to enhance the driving skill and safety of the drivers that used it.

キーワード スマートフォン, スマホ, 運転診断, 停止診断, ブレーキ, 間接型運転支援

1 はじめに

昨今、ドライバーの運転技量を診断する機能が様々なメーカーから提案されている。既存のエコ運転診断⁽¹⁾に加えて安全度を診断する機能や運転のスムーズさを診断する機能⁽²⁾が出始めたことに加え、スマートフォン（以下、スマホ）の普及により自動車会社以外からも多数の機能が提供されるようになってきた。このような取り組みは間接型運転支援システムに分類され、運転の技量向上、ひいては安全向上につながることを期待されている⁽³⁾⁽⁴⁾。

本論文ではそのような考えをさらに前進させた。すなわち、運転行動そのものを捉えて評価し、それを分かりやすく楽しくフィードバックすることで運転がうまくなり、さらにその結果を他人と競争することでその技量向上をより楽しみながら行える、という間接型運転支援システムを開発した。

運転行動を捉えるには車両のCAN情報を利用することが考えられるが、ここでは多くの人に使用してもらうため広く用いられているスマホにて実現した。具体的にはブレーキ操作と停止のスムーズさを診断・表示し、競争するアプリ“GoodStop”を開発した。

2 停止診断の概要と課題

本アプリはブレーキ操作と停止のスムーズさを診断する。その診断は次の5項目で行い、図1に表示例を示す。



図1 診断結果の表示例

- ①ブレーキ開始：ブレーキをふんわりと踏み始められたことを評価する
- ②最大G（減速度）：一定減速度がよく維持できたことを評価する
- ③車両姿勢：減速中の前後加速度の変動（ジャーク）の少なさを評価する
- ④ブレーキゆとり：追い込み型のブレーキ操作となっていないことを評価する
- ⑤ブレーキ抜き：停止時のショックの少なさを評価する

* 情報電子システム開発部

** 制御システム先行開発部

なおこれらの項目は停止に至るブレーキ操作に合わせて社内のテストドライバーとともに選定した。

次に、診断に必要な情報を考える。まず、診断に用いる主たる情報は車両前後方向の加速度である。これにはスマホ内蔵の加速度センサーを用いる。しかしながらスマホの置かれる向きは都度異なり、直接的には検出できない(課題1)。また、ブレーキが踏まれていることを知る必要がある。しかしスマホで直接的にブレーキ操作の有無は検出できない(課題2)。そして停止を知る必要がある。そのためには速度を知ればよく、多くのスマホにはGPSが内蔵されており、そこから速度はわかる。しかしGPSで測定した速度は遅延が大きく、またゼロにならない場合もある。つまり、GPSによる停止判断はできない(課題3)。次章ではこれらの課題について考える。

3 車両情報の生成

3.1 課題1：車両前後方向加速度情報の生成

スマホにはX,Y,Z方向3軸の加速度センサーがある。スマホの置かれる向きは都度変わることから、センサーの座標軸を一旦図2のように定めた上で、鉛直方向がZ軸、進行方向がX軸となるよう定めなおす。そのため、次の2段階の座標変換を行う。

- 座標変換1. 重力方向をZ軸とする座標変換
- 座標変換2. Z軸に垂直な平面上で停止直前の加速度方向をX軸とする座標変換

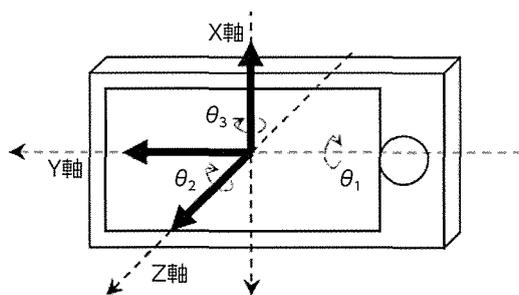


図2 スマホの加速度センサー軸

3.1.1 座標変換1

停止状態で観測される加速度は重力加速度である。図3(a)はある停止中の2秒間に観測されたスマホ座標軸での加速度である。この図からわかるように停止中の重力加速度は比較的安定した値として観測されている。原点からこの平均値に向かう軸が新たなZ軸となるように座標変換をする(図3(b))。

車両は重力と垂直な平面上を運動すると考える。実際には道路には勾配があるが、仮に勾配が10%あったとしてもそのことにより結果に与える影響は

$$\cos\left(\tan^{-1}\frac{1}{10}\right) = 0.9950 \quad \dots\dots\dots (1)$$

であるから、平面方向の加速度には約0.5%の誤差しか生じず、無視できると考えた。

図3(b)に対し車両が動いたときの加速度を加えたものを図3(c)に、そのXY平面への射影図を図4(a)に示す。図4(a)の動きが走行面上の動きである。

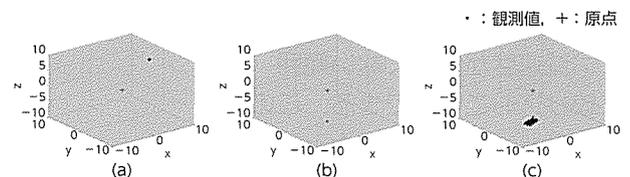


図3 重力方向をZ軸に座標変換
(a) 停止時の加速度
(b) (a)の方向が新たなZ軸となるように変換したもの
(c) 走行時の加速度

3.1.2 座標変換2

図4(a)から進行方向を見出すため、停止直前の情報を用いる。それは、停止直前は減速中であることから前後加速度の絶対値が大きく出る一方で、速度が遅いためカーブによる横加速度は比較的発生しにくい状況だからである。図4(b)は図4(a)に対して停止直前の値を白くしたものである。

この傾きを最小二乗法で求め、その方向が新たなX軸になるように座標軸を再定義する(図4(c))。このように変換したX値が前後方向の加速度である。

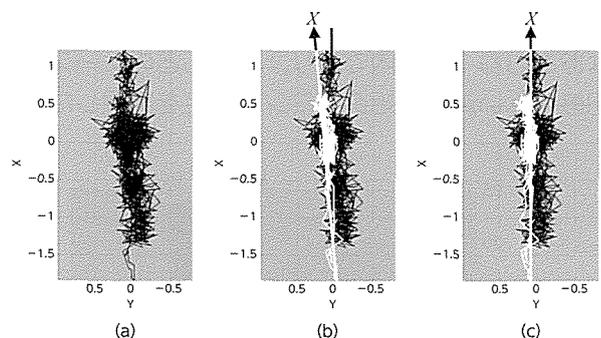


図4 進行方向をX軸にする座標変換
(a) 図3(c)のXY射影図
(b) 停止直前を白にしたもの
(c) (b)の白の方向が新たなX軸となるように変換したもの

3.2 課題2：ブレーキ操作情報の生成

前節で求めた加速度を用いてブレーキ開始点を推測する。ブレーキ操作時には加速度の変化率(ジャーク)が負の方向に大きく存在する。しかし逆は成り立たず、負に大きなジャークがあるからと言って必ずしもブレーキ操作が行われているわけではない。しかしブレーキ開始点は次の観点である程度絞り込むことが可能である。すなわち、**図5**に示す通りブレーキ開始点は、

- ①減速度が最大となる時刻よりも前かつ、そこから時間的にさかのぼり、加速度が正の極大となる時刻よりも後であること

に絞り込んだ上でブレーキ開始点では減速度はまだ大きくはなっていないので、

- ②減速度が大きくない範囲

に絞り込むことができる。この中で

- ③ジャークが負に最大となる点を

ブレーキ開始点とした。これは停止判定をした時点からある時間 T (s) までの範囲で検知する。この T は事前検討の結果から余裕をみて 20 秒とした。

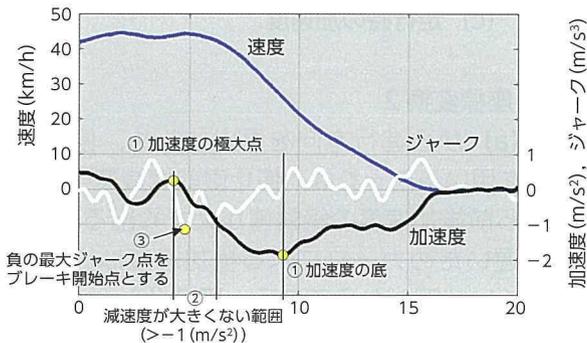


図5 ブレーキの操作開始点を推定する手順

このように判定したブレーキ開始点を CAN で取得したブレーキ開始点と比較し、その差を度数分布に表したものを**図6**に示す。図からわかるように差はおおむね 1 秒以内であり、ほとんどのケースで違和感のない減速開始タイミング判定を実現した。

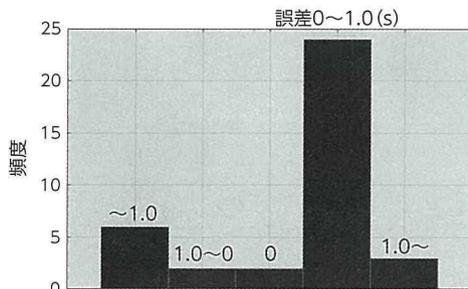


図6 ブレーキ操作開始点の推定誤差

3.3 課題3：停止判定と速度情報の生成

停止の判定には**第1章**で述べたように GPS で測定した速度は使用できない。ここではスマホの加速度センサーを用いた。一般に加速度では速度の変化量しかわからない。停止状態では加速度はゼロであるが、これは等速走行の場合も同様である。しかしここに大きな違いがあった。確かに大局的には両者の区別はつかないが、スマホの加速度センサー値を直接的に見れば**図7**のように違いは顕著に出る。すなわち、走行中では等速走行も含めてセンサー値の偏差が大きい。一方停止中ではそれが小さい。したがってこの偏差をみることで停止判定を行った。これによりほぼ確実に停止を判定することができる。

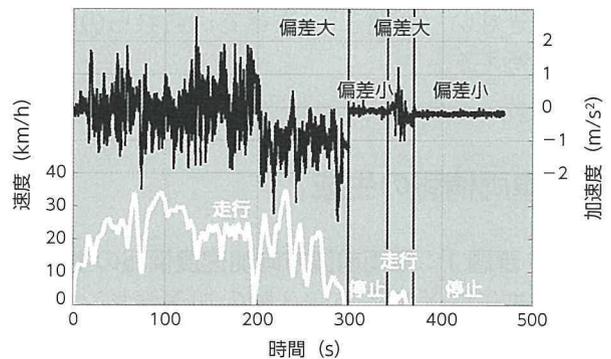


図7 車両が動いている状態と止まっている状態での加速度値の違い

停止が判定できれば加速度から走行速度は容易に計算ができる。**図8**にスマホの加速度センサーだけから算出した速度と CAN 情報から得た速度とを比較した。両者はよく一致している。

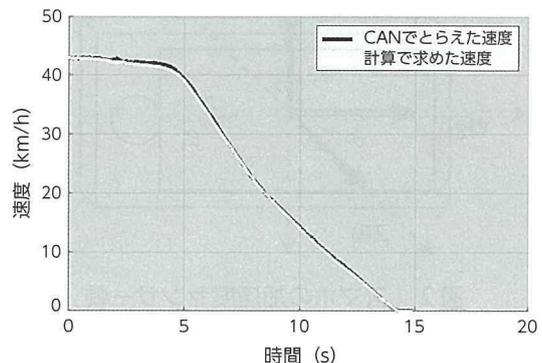


図8 計算した速度と CAN で取得した速度の比較

4 評価

4.1 診断項目の抽出と評価点の付与法

本検討における5項目の診断項目を抽出する例を図9に図解して示した。ここで、点数付与の考え方は、ブレーキを踏み始めてから停止するまでの減速度として台形を描く形を理想とし、それにどれだけ近いかで満点20点で点数付けを行った。

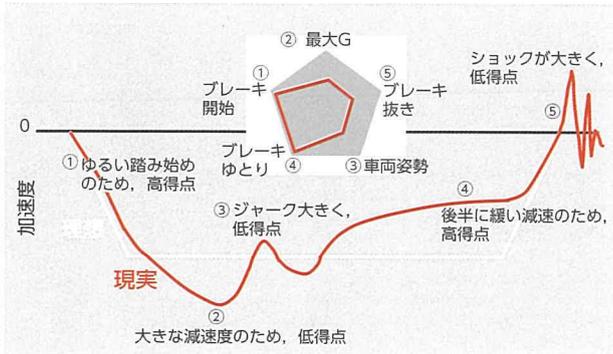


図9 各診断項目の結果例

4.2 運転技量の変化及び楽しさ評価

本アプリによる運転技量の変化及び楽しさを評価した。評価はアプリをリリースした約1年後に実施した。今回はユーザーの内、1,000回以上の長期使用61人を調査した。これは、全ユーザーを対象にした平均診断回数が日に13回であったことから、平均的には約3か月毎日使用したことに相当する。

全体の傾向をみるために61人のトータル点数の推移を図10に示す。但し、傾向が長期使用者に支配されないよう、61人の最小回数1,000回で打ち切っている。回帰直線の傾きが有意に正であることから、全体として上昇傾向であることが分かる。利用し始め(回帰直線の切片)と1,000回時の点数差は2.4点であった。この全体傾向が一部のヘビーユーザーのみに支配されているわけではないことを見るために、61名各々に対して回帰直線の傾きを評価した。その結果、傾きが正であるユーザーは44人、うち有意に正であるユーザーが33人と、全体の半数以上いた。このことより、図10の全体傾向が多くユーザーに当てはまる傾向であることが分かる。

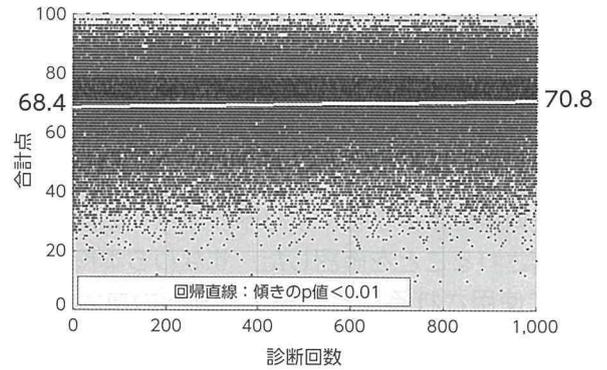


図10 合計点数の変化傾向

次に、診断項目毎の寄与の大きさを調べた。すなわち、診断項目毎に回帰直線を求めて1,000回当たりの上昇点数に換算した(図11)。その結果、車両姿勢において特に大きな点数の上昇が確認でき、ブレーキ開始やブレーキ抜きにもある程度の点数上昇が確認できる結果となった。

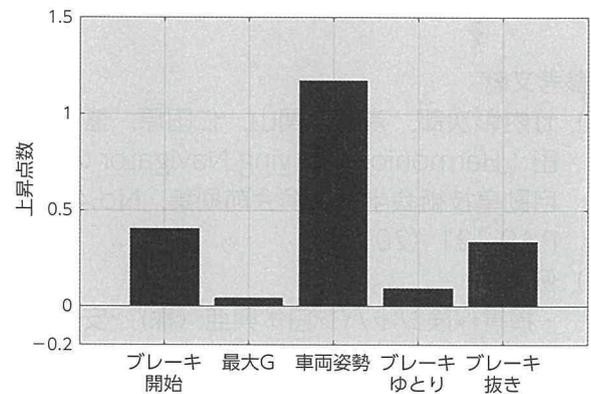


図11 1,000回診断当たりの上昇点数

最後にユーザーからの声の一部を示す。今回リリースしたアプリにはユーザーが意見を投稿できる仕組みを入れた。これは、我々の新価値創造の狙いがどの程度受け入れられているのか等を探るためである。その結果様々な意見が寄せられた。例えば、「止まるのが楽しい」との声も聞かれ、新価値創造の狙いは成功した。さらには、「丁寧なブレーキを心がけて運転できた」という声もあり、楽しみながら運転がうまくなるとともに安全運転に寄与することもうかがえる声であると考えられる。

5 まとめ

スマホのセンサから車両情報を疑似的に生成し、ブレーキ操作と停止のスムーズさを診断するアプリを開発し、リリースした。長期に利用しているユーザーを対象に本アプリによりドライバーの運転行動が改善されることを確認した。すなわち本機能が継続的に使用されることで停止行動への意識が改善し、安全運転にも寄与すると考えられる。

車の機能増加・改善による安全化が進む中においても運転の主体は人であり、人に働きかけることにより運転がうまくなる、安全になる、という取り組みは重要であると考えられる。また、このように運転の技量を上げることにより、運転は単なる移動手段というだけではなく、運転そのものを楽しんでいただける存在であってほしいと願い、今後もこのような機能を開発・実用化していきたいと考えている。

なお、このアプリ“GoodStop”は“停止の達人。”と名前を変え、T-Connectのアプリとして現在運用している⁽⁵⁾。是非試していただきたい。

■参考文献

- (1) 竹内彰次郎, 齊藤, 関山, 仁田原, 盛合, 山田 : Harmonious Driving Navigator の開発. 自動車技術会学術講演会前刷集. No.48-10, P.19 - 21 (2010)
- (2) 例えば
 - ・ 損害保険ジャパン日本興亜 (株) 安全運転サポートアプリ Safety Sight
http://www.sjnk.jp/app_pc/safetysight/
 - ・ 三井住友海上火災保険(株) スマ保『運転力』診断
<http://www.ms-ins.com/sumaho/untent.html>
- (3) 平岡敏洋 : 間接型運転支援システムが運転行動に与える影響に関する研究. 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2006 講演論文集. pp.241 - 246 (2006)
- (4) 平岡敏洋 : ドライバに安全運転を促す運転支援システム. 計測と制御. Vol.51, No.8, pp.742 - 747 (2012)
- (5) トヨタ自動車 (株) T-Connect
https://tconnect.jp/appcatalog/app/detail_10002.html

■著者



柏井 忠大



松村 健



岡田 広毅

豊田市低炭素社会システム実証実験における 地域エネルギーマネジメントシステム EDMS の開発

Development of Community Energy Data Management System (EDMS)
in the Toyota City Low-Carbon Society Verification Project

是石 純* 川本 雅之** 森井 達弥*
Jun Koreishi Masayuki Kawamoto Tatsuya Morii
平田 哲也* 伊藤 晃史*** 藤井 大悟****
Tetsuya Hirata Koshi Ito Daigo Fujii

要旨

2010年4月から2015年3月までの5年間、経済産業省が主導する次世代エネルギー・社会システム実証実験の下で、地方都市型の低炭素社会システムの構築を目指して、豊田市低炭素社会システム実証実験が行われた。本実証実験では、家庭内のエネルギー地産地消、低炭素交通システム、商業・公共施設のエネルギー利用最適化、地域全体のエネルギー利用の最適化等を目指してシステムの開発および実証を行なった。本稿では、生活者が自主的・継続的にエネルギーマネジメントに取り組む「需要側の視点」を重視した地域エネルギーマネジメントシステムの開発・実証を行なった成果について述べる。

Abstract

Over a five-year period from April 2010 to March 2015, the Toyota City Low-Carbon Society Verification Project was carried out under the auspices of the Next Generation Energy and Social System Demonstration Project led by the Japanese Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), with the aim of establishing low-carbon social systems in regional towns and cities. The Toyota City Low-Carbon Society Verification Project involved the development and testing of various systems to accomplish the following goals: local energy generation for local consumption by households, the establishment of low-carbon transportation systems, and the optimization of energy usage by companies, public facilities, and the region as a whole. This article describes the development and verification of a demand side-focused community energy management system, which enables users to manage energy usage in a proactive and sustainable manner.

キーワード 豊田市低炭素社会システム実証実験, 地域エネルギーマネジメントシステム

1 はじめに

2010年4月から2015年3月までの5年間、経済産業省が主導する次世代エネルギー・社会システム実証実験の下で、地方都市型の低炭素社会システムの構築を目指して、豊田市低炭素社会システム実証実験が行われた。豊田市低炭素社会システム実証実験は、図1に示すように、家庭内におけるエネルギーの地産地消、低炭素交通システム、商業・公共施設のエネルギー利用最適化、地域全体のエネルギー利用の最適化を目指すものである⁽¹⁾⁽²⁾。本稿では、地域全体のエネルギー利用の最適化を目指して、地域内で自然エネルギーを

相互融通し地産地消するシステム EDMS (Energy Data Management System) を開発した実証成果について述べる。



図1 豊田市低炭素社会システム実証実験の概要

* 技術統括部
** 国立大学法人 筑波大学
*** 情報電子システム開発部
**** e-TOYOTA 部

2 EDMS の狙いと機能概要

EDMS は家庭、商業施設、学校などの地域、交通を情報で結び、電力の需給バランスを調整することによってエネルギーの「地産地消」を目指すシステムである（図2）。EDMS では、低炭素効果・電力ピーク抑制効果の実現を目指しながら、同時に生活者が自ら進んで自主的・継続的にエネルギーマネジメントに取り組む「需要側の視点」を重視した地域エネルギーマネジメントシステムの構築を目指して開発を行なった。



図2 EDMS の概要

EDMS の機能の概要を以下に示す（図3）。まず天候や生活者の行動予測を基に、地域内の太陽光発電で発電する総電力（供給）と、地域内で消費される総電力（需要）を予測する。次に予測した電力需給のバランスに応じて、生活者の電力消費を抑制／促進するような情報を提示し生活者の行動誘発を促す。例えば地域内の総太陽光発電量が総消費電力量よりも少ない場合には電力消費を控えるような情報を提示する。その結果、地域内で太陽光発電電力の使用が促進され、逆に系統電力の使用が抑制されることで、地域全体の電力の低炭素化を実現する仕組みである。

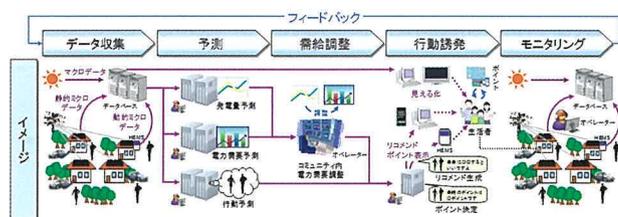


図3 EDMS の機能の全体像

なお実証に参加した各家庭（全67棟）には、太陽光パネルなどの創エネ機器、エネルギーのバッファとなる家庭用蓄電池やプラグインハイブリッド（PHV）、エコキュートなどの蓄エネ機器、それらを統合して制御するHEMS（Home Energy Management System）が設置されている（図4）。



図4 スマートハウスの構成

3 実証したサービス内容

EDMS では生活者に自主的・継続的にエネルギーマネジメントに取り組んでもらうために、低炭素化および電力ピーク抑制の観点から、家庭向け、PHV向けに多くのサービスを実証してきた。以下では、それらの中から代表的なサービス例を示す。

3.1 デマンドレスポンスポイント

3.1.1 サービス概要

デマンドレスポンスポイント（DRP）は、生活者にとって最も一般的なインセンティブになり得る電気料金を仮想的に変化させることで、生活者の自発的な行動変化を促すサービスである。DRPは、使用電力の炭素係数の値に基づき決定されるEDMS単価と、生活者が電力会社に支払う基準電力単価の差に、その時間帯に使用した系統電力量を乗じて算出される。それにより、低炭素な電力の時間帯に系統電力を使用すると、プラスポイントが付与され、電力消費を拡大する行動変化を促す。逆に高炭素な電力の時間帯に系統電力を使用するマイナスポイントが付与され、電力消費を抑制する行動変化を促す。

3.1.2 EDMS 単価の算出アルゴリズム

以下ではEDMS単価の算出アルゴリズムについて概説する。EDMS単価では3時間毎に料金単価の再計算が実施されるリアルタイムプライシング（RTP）を採用し、当該時刻より3時間先までの確定単価と3時間後～24時間後までの予定単価を生活者に提示する。RTPは系統電力の基準単価をベースに、地域内の全需要電力量に対する余剰PV（太陽光発電）発電量の割合や、系統電力の調達計画量に対する総予測量の差によって決定される（図5）。すなわち余剰PV発電量が多いときはRTP単価を

下げて生活者の電力消費増大を促し、逆に系統電力の総予測量が調達計画量を超えそうなときは RTP 単価を急激に高くすることで調達計画量を超えないように生活者の電力消費抑制を誘導する。

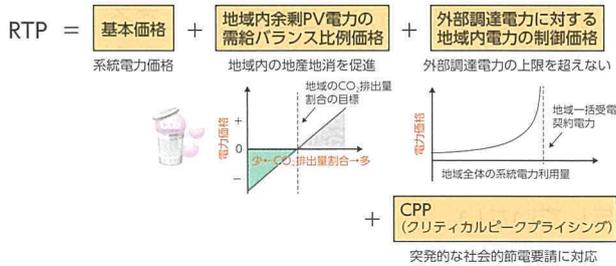


図5 RTPの算出ロジック概要

図6にRTP単価の実例を示す。晴天の日でPV発電量が余剰している日中はEDMS単価が基準単価(21円)よりも安く、逆に雨天の日でPV発電量が消費電力量よりも少ない時はEDMS単価が高くなっていることがわかる。また13時~16時までEDMS単価が基準単価の2倍以上になっている9月13日はクリティカルピークプライシング(CPP)の実証を行なった日である。

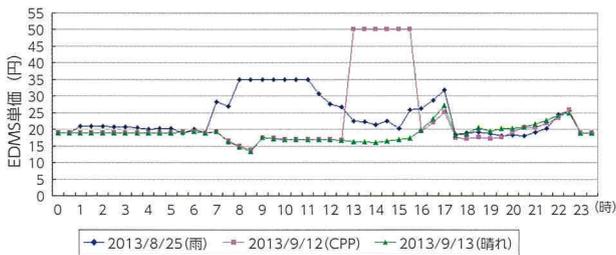


図6 RTPの実例

3.1.3 CO₂ 排出量削減効果

DRPなどによるCO₂排出量削減効果を以下に示す。図7は、世帯1日当たりのCO₂排出量をEDMS導入世帯の平均値、未導入世帯の平均値と比較したものである。2013年(2012年11月~2013年10月)の1年間でEDMS未導入世帯と比較して20.8%のCO₂排出量削減を達成できた。削減効果の内訳は消費電力削減(節電)効果が67.8%、地域融通効果が32.2%となっている。

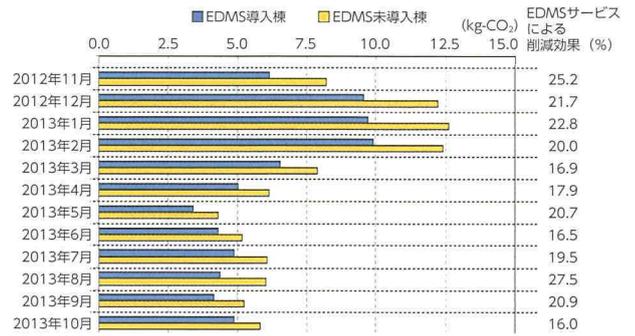


図7 CO₂ 排出量削減効果

3.2 目標チャレンジ

3.2.1 サービス概要

目標チャレンジは生活者自らに使用する系統電力消費の上限目標値を設定させることで、世帯の電力消費行動に対する意識を高め、世帯単位でのピーク電力抑制を行なうことを目的としたサービスである(図8)。目標達成状況を日々確認させることで継続的なサービス利用を促し、また様々な生活パターンの世帯で無理なく目標設定できるように複数の電力パターンや難易度を用意した(図9)。生活者は目標設定後に1か月間継続して目標値を超えなければ、目標達成と判定され、電力パターンや難易度に応じて設定されたインセンティブを得ることができる。



図8 目標チャレンジの表示画面

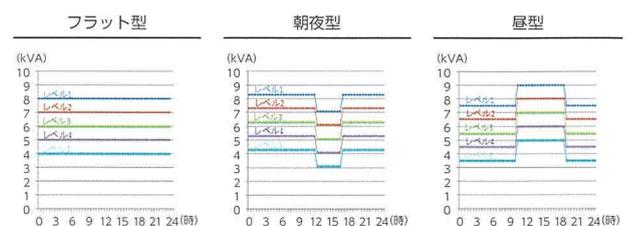


図9 電力パターンと難易度

3.2.2 ピーク電力削減効果

目標チャレンジによる系統電力のピーク電力削減効果を図10に示す。サービス提供後の月平均ピーク電力値を前年同月の平均ピーク電力値と比較した結果、サービス未提供世帯では3,800Wから4,112Wと312Wもピーク電力が増加したのに対し、サービス提供世帯では世帯平均で3,784Wから3,532Wと約252W（削減率6.7%）のピーク電力削減効果が得られた。

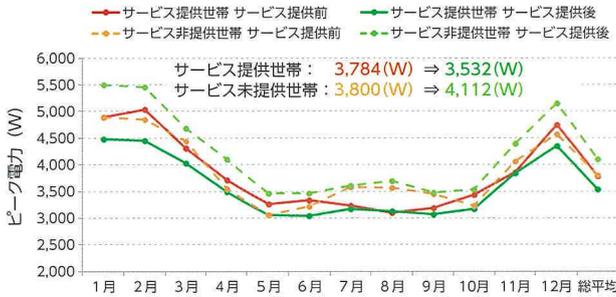


図10 ピーク電力削減効果

また目標チャレンジは非常に持続性の高いサービスであることが検証できた。図11は目標チャレンジの提供世帯数とサービスへの参加率の月次推移を示したものである。サービス開始時点での参加率は100%であり、2年間経過したサービス終了時点においても80%前後の非常に高い参加率を維持していることがわかった。この理由としては、生活者へのインタビュー結果等から、取るべき行動がわかりやすい点とインセンティブの効果等で日々の習慣として定着していったことが裏付けられた。

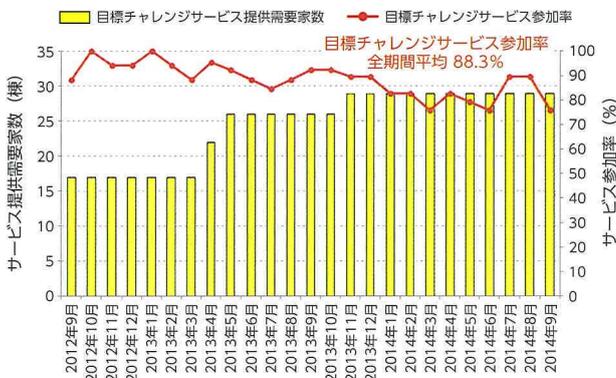


図11 サービス参加率

3.3 PHV 走行ランキング

3.3.1 サービス概要

自身のPHV走行状態を他の利用者と比較し、どのくらいのランキングかを参照できるサービスであ

る(図12)。「100円あたりの走行距離」等4つの指標をランキング化して表示する。「100円あたりの走行距離」は、電気とガソリン合わせて100円分走行した距離を求めランキングとして表示することで、電動走行比率を高め、更にEDMS単価の安い時間帯に充電を行なうことを目的とする。他の3つの指標(EV走行率、実複合燃費、電費)についても、電動走行比率を高め、燃費・電費の良い走行を行なうことで向上する指標である。

なお本サービスでは利用者にインセンティブを付与していない。



図12 PHV 走行ランキングサービスの表示画面

3.3.2 CO₂ 排出量削減効果

PHV 走行ランキング等のPHV向けサービスによるCO₂排出量削減効果を図13に示す。ランキングに関心の高いグループにおいては、主に充電頻度が向上することでサービス実施前に比べてCO₂排出量が5%削減できた。一方、ランキングに関心の低い下位グループではサービス実施前に比べてCO₂排出量が増大してしまうという結果が得られた。

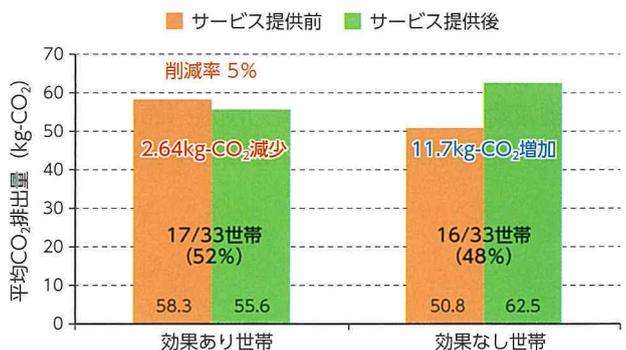


図13 PHVのCO₂ 排出量削減効果

また 100 円あたりの走行距離の指標で見た場合もサービス提供前と比較して、ランキング上位で 16.5% 向上、下位で 14.2% の低下となった (図 14)。これはランキングの順位がモチベーション変化を招いたためと推定される。サービス利用者へのアンケートからも、現状のランキングの指標では、1 日の走行距離によってほぼランキングの順位が決まってしまうため、下位グループはサービス開始 2 か月程度で急速に興味を失ってしまったという結果が得られた。

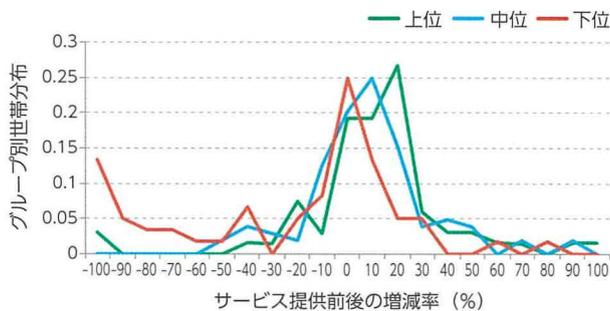


図 14 ランキンググループ別のサービス提供前後の増減率分布

4 終わりに

低炭素効果・電力ピーク抑制効果の実現を目指しながら、同時に生活者が自主的・継続的にエネルギーマネジメントに取り組む地域エネルギーマネジメントシステム EDMS の開発および実証を行なった。その結果、継続的に低炭素効果・電力ピーク抑制効果を期待できる幾つかのサービスを開発することができた。

今後は、開発・実証を通して得られた知見を活かして、PHV の利用者にとって有益なエネルギーマネジメントのサービスを開発すると共に、低炭素社会システムの実現に向けて貢献していきたい。

参考文献

- (1) 川本雅之, 岡島 : 次世代電池とその活用に向けた挑戦. TOYOTA Technical Review. Vol.57, No.2, p.6 - 9 (2011)
- (2) 古賀信彦, 松本 : 再生可能エネルギー電力とその利用. TOYOTA Technical Review. Vol.57, No.2, p.58 - 62 (2011)

著者



是石 純



川本 雅之



森井 達弥



平田 哲也



伊藤 晃史



藤井 大悟

MIRAI を支える高機能 FC スタックケースの開発

Development of High-Performance Fuel Cell Stack Case for the Mirai Fuel Cell Vehicle

一ノ瀬 浩*
Hiroshi Ichinose

森元 一*
Hajime Morimoto

猿橋 謙*
Ken Saruhashi

要旨

燃料電池自動車（FCV）を次世代の環境車として普及させていくためには、「エコカーでも魅力ある走りの実現」、「市販可能な価格に向けたコスト低減」が必要である。それを実現するために、「FC スタックのコンパクト化」および「部品点数の徹底的な削減」を追究した。本稿では、形状自由度の高いアルミダイカスト製の軽量・高強度・高精度な FC スタックケースを開発し、コンパクト化と低コスト化を実現した取組について紹介する。

Abstract

Two critical measures for widening the appeal of fuel cell vehicles (FCVs) as a next-generation environmentally friendly form of mobility are the achievement of enjoyable appealing dynamic performance that exceeds the expectations of the customer and the reduction of cost to a commercially viable level. Toyota Motor Corporation is aiming to realize these objectives by developing a more compact fuel cell (FC) stack and taking a thorough approach to reducing the number of parts in the FC system. This article describes the development of a lightweight, high-strength, and dimensionally accurate aluminum die-cast FC stack case with a high degree of design flexibility, and the measures that were adopted to reduce the size and cost of the case.

キーワード 燃料電池, スタックケース, アルミダイカスト, 高真空, ネットシェイプ

1 はじめに

1.1 アルミダイカスト化の必要性

2014年12月に市販化された燃料電池自動車「MIRAI」は究極のエコカーとして燃料電池自動車を普及させるため、「魅力ある走りを実現するための低重心化⇨重量物であるFCスタックの床下搭載」、「市販可能な価格に向けた徹底的なコスト低減」に取組んだ。

従来のFCスタックは図1に示すように積層した燃料電池セルを圧縮後に締結したものを鉄板プレス部品でカバーした構造で部品点数が多く、高コストな製品構造で市販価格には遠い状況であった。

また、ガソリン車同等の走行性能と利便性（水素充填時間と航続距離）を確保するには出力を上げる必要があるため、FCスタックケースも大型となりスペースに余裕があるSUV車のエンジンルームにしか搭載することができなかった。

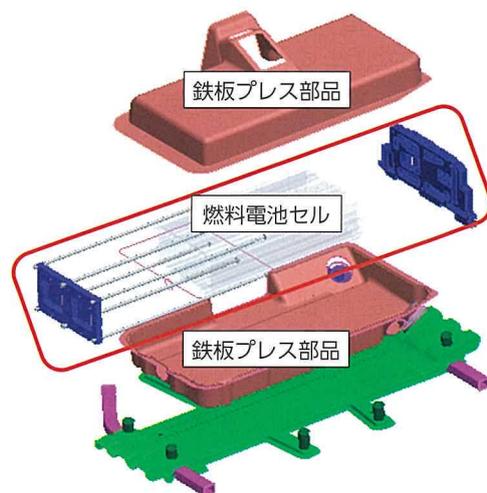


図1 従来のFCスタック構造

そこでMIRAIにおいては高い寸法精度で形状自由度が高く、複数部品の一体化に優れたアルミダイカスト製の軽量・高強度・高精度なFCスタックケースを開発し、部品点数を大幅に削減させ低コスト化の実現を目指した。

* 鋳造生技部

1.2 鋳造技術の変遷

地球環境保護の観点からCO₂排出量低減のため、車両軽量化、内燃機関の効率向上が進められているが当社としてはHV（ハイブリッド車）の拡大、PHV（プラグインハイブリッド車）の発売なども進めているなか、究極のエコカーである燃料電池自動車を2014年12月に市販化した。

上記のような軽量化ニーズに対応し、鋳造分野においてもアルミダイカスト部品の適用拡大がされてきた。

ダイカストとは溶けたアルミ（以下アルミ溶湯と呼ぶ）を高速・高圧で金型に充填し成形する工法のことによって生産性が高く、高精度な製品が製造できる反面、製品内部に空隙（以下鑄巣と呼ぶ）が発生する。

これまでは強度の必要なエンジン・ミッションケース類に採用されているが、近年さらに伸びを必要とし、鑄巣の厳格な管理を必要とするボデー・シャシー部品への採用も拡大してきている。当社としても2003年：クラウン、2006年：レクサスLSのフルモデルチェンジよりフロントサスペンションメンバーをアルミダイカスト化してきた。対応する工法についても通常ダイカスト法ではなく、品質が向上でき、薄肉大物部品にも対応できるトヨタオリジナルの高真空アルミダイカスト法を開発することにより伸びを満足し量産化した（図2）。

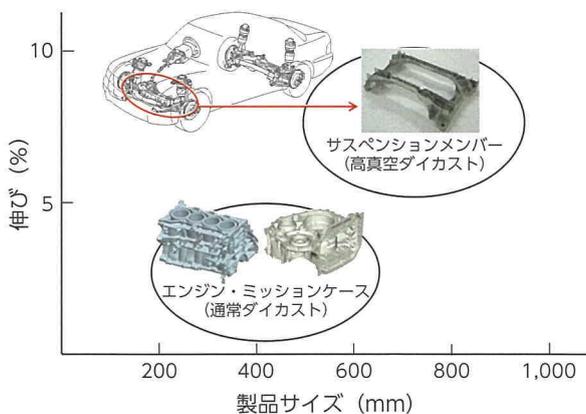


図2 鋳造技術と適用部品の変遷

本稿ではこれまでにない大物薄肉部品である燃料電池スタックケースをサスペンションメンバーを製造している高真空ダイカスト法をベースに新たな生産技術を追加して量産化した事例について紹介する。

2 要求される製品機能

MIRAIは「エコカーでも魅力ある走りの実現」をコンセプトとして開発されたため、図3のように重量物であるFCスタックを床下搭載とした。

また比較的スペースに余裕のあるSUV車ではなくセダンで成立させるため、車両全高・全幅方向の搭載スペースが厳しく、スタックには徹底的なコンパクト化が求められたが、FCシステムの簡素化・FCスタックケースを形状自由度の高いアルミダイカスト化することにより解決した。

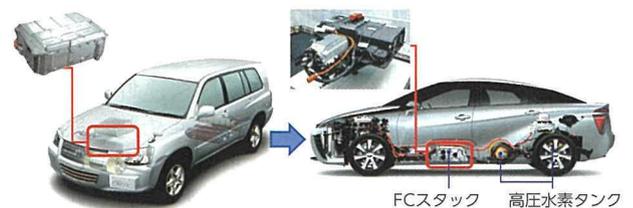


図3 FCスタック搭載位置の変化

一方、「世界初の燃料電池自動車市販化」という目標を達成するために、徹底的なコスト低減も同時に達成しなくてはならず、部品点数の徹底的な削減を進めた。そのためFCスタックケースも図4のように圧縮後に締結した燃料電池セルをカバーするだけの機能からFCスタックケースそのものに締結機能を持たせる構造に変更したため、強度部材としての機能を持つことになった。

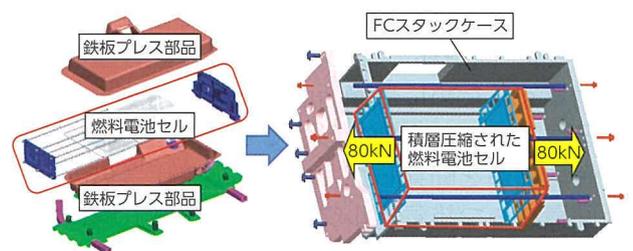


図4 FCスタックケースの機能変化

以上のような搭載位置および機能変化によりFCスタックケースには2つの製品機能が求められた。

1. セル圧縮荷重の反力に耐える高強度と路面干渉に耐える耐衝撃性
2. 浸水・冠水時での耐リーク性、シール性の確保
次章より、上記2つの製品機能を満足するための生産技術の取組みについて説明する。

3 強度を満足するための生産技術の取組み

3.1 強度低下の要因

FC スタックケースはトヨタ最大級の大型薄肉ダイカスト部品で難造部品であり、高強度・耐衝撃性も求められる部品である。

ブロックシリンダーやミッションケースを製造している通常ダイカスト法と材料（JIS：ADC12 相当）では強度と伸びを両立することができないため、サスペンションメンバーを製造している高真空ダイカスト法と新開発した高延性ダイカスト材料を採用し、新たな生産技術を付与することにより強度と伸びの両立を目指した。

また、工法・材料変更だけでなく、伸びや疲労強度の低下要因となる鑄巣の低減も進めた。鑄巣の主要因としては以下の4種類がある。

1. 金型内の空気を巻き込むことにより発生する鑄巣（巻き込みガス鑄巣）
2. 気化した離型剤を巻き込むことにより発生する鑄巣（離型剤ガス鑄巣）
3. アルミ溶湯内の水素ガスが真空により膨張する鑄巣（アルミ溶湯ガス鑄巣）
4. アルミ溶湯内に含まれる酸化物（アルミ酸化物）

3.2 強度低下要因ごとの対策と効果

3.2.1 巻き込みガス鑄巣

巻き込みガス鑄巣は高真空ダイカスト法の採用により金型内の空気を排出することで低減することができた。さらにスタックケースでは軽量と強度を両立するために最適断面形状を採用する必要性から従来にない方向の形状でも高真空を確保できる金型構造を開発した。さらに従来比3倍の排出断面積をもつ排気バルブを開発し、徹底的に金型内空気を排除することにより型内の空気抵抗を減らし、これまでにない大型薄肉部品の成形性も確保することができた。

3.2.2 離型剤ガス鑄巣

ダイカストにおいては金型に充填後凝固した素材をスムーズに取り出すために離型剤を塗布しているが、9割以上のダイカスト部品ではシリコン系水溶性離型剤や油性離型剤を使用している。これらの離型剤は型表面に付着した有機成分により良好な離型性能を確保できるが、アルミ溶湯により有機成分がガス化され製品内に取り込まれ鑄巣

の原因となっている。これに対しては、有機成分をまったく含まない無機系離型剤を開発、採用することにより対策した。

3.2.3 アルミ溶湯ガス鑄巣

アルミ溶湯は水素ガスを含有しているため、金型高真空下では水素ガスが膨張し鑄巣の原因となる。これに対しては、水素ガスを常時脱ガスする装置をアルミ溶湯を保持する設備（以下保持炉と呼ぶ）に組み込み、品質として問題のない水素ガス量を維持している。

3.2.4 アルミ酸化物

アルミ溶湯は酸化しやすいため、すぐにアルミ酸化物膜が作られ、溶湯内に含有され、製品内に取り込まれ強度低下の要因となる。これに対しては図5のように表面の酸化物を除去するワイパーを保持炉に設置し徹底的に除去した。



図5 表面酸化物を除去するワイパー

以上の対策により製品機能を満足するための強度を確保することができた。

4 シール性を満足する生産技術の取組み

4.1 取組の方向性

FC スタックの床下搭載により、大雨時の浸水環境や高圧洗浄によるFCスタックケース内部への水の侵入を防止する必要があるため、部品間にはガスケットを挟みシールする構造となっている。

当初このガスケットを組付ける溝を切削加工することにより寸法精度を満足する計画であったが肉厚

が薄く切削抵抗に対しての剛性が低いため加工速度を極端に遅くする必要があり、加工時間が長く高コストであった。また、切削加工により製品内部の鋸巣が製品表面に露出することによりシール性を阻害することも懸念された。

その課題を解決するため、図6に示すガスケット溝形状のネットシェイプ化（切削加工をせずに鋳造にて最終部品形状を作ること）にチャレンジした。これまでに実績のない大物薄肉部品でのネットシェイプ化のため製品変形の抑制が新たな課題となった。

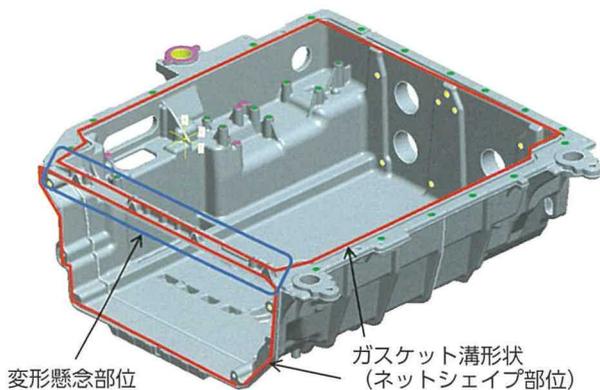


図6 ネットシェイプ部位

4.2 取組内容と効果

ネットシェイプ化は以下の3ステップで進めた。

- STEP1. 変形工程, 原因の解明
- STEP2. 素性をよくする
(変形しにくい製品形状)
- STEP3. 変形量を低減
(工程, 型, 条件の最適化)

4.2.1 変形工程, 原因の解明

各工程での変形要因を最新の計測機器を用いて計測した。変形は金型から素材を取り出した後の高温素材（約200℃）が常温まで水冷する工程で発生していることが明らかになった。

変形要因としては製品剛性不足による変形と、金型から取り出された素材温度のアンバランスによる収縮差による変形であることがわかった（図7）。

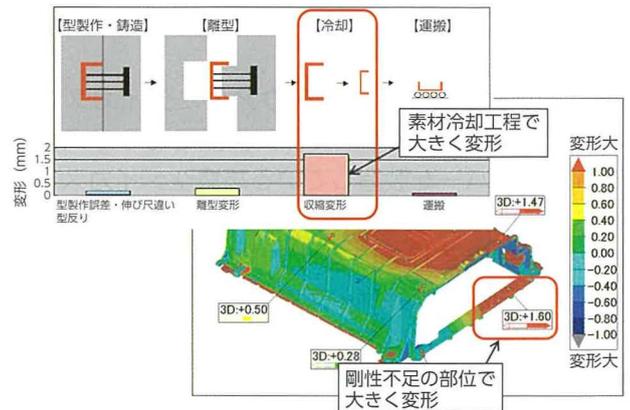


図7 変形工程と変形量

4.2.2 素性をよくする

変形工程と原因が特定できたため、製品形状への対策織込み（リブ追加による剛性アップと金型離型後の素材温度均一化をするため製品肉厚の均一肉厚化）を行った。しかし、車両搭載上の制約から対策を100%織込むことは困難であった。

4.2.3 変形量を低減

上記剛性アップだけでは必要な寸法公差を満足することができなかったため、収縮変形 CAE 解析を用いて金型冷却および鋳造条件の最適化を実施した。

素材冷却時の温度差を緩和するため素材冷却方法も急冷（水冷）から徐冷（空冷）に変更した。あわせて素材冷却前に高熱物である鋳造方案部を最初に除去し、方案収縮による素材変形も抑制した。

上記取り組みによりネットシェイプで必要公差を満足することができた。その結果、切削加工切粉量を75%削減し大幅にコスト低減することもできた（図8）。

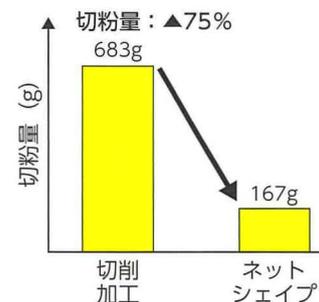


図8 切粉量削減の効果

5 まとめ

以上のように、トヨタ初のアルミダイカスト製FCスタックケースを重要保安部品であるサスペンションメンバーを製造している高真空ダイカスト法をベースとした工法にて量産化した。

また、鑄造工程での素材変形量の低減に取組み、これまでにない製品サイズでのガスケット溝形状のネットシェイプ化に成功し、大幅なコスト低減に貢献した。

6 おわりに

量産化に至るまで社内外の多くの方々にご多大なご協力をいただいた。関係各位に改めて感謝申し上げます。

今後も鑄造のメリットである形状および肉厚の自由度・部品一体化などを最大限に生かし、「鑄造からクルマを変える」という気概をもって、新たな領域へ挑戦し続けることにより、お客様に喜ばれる「もっといいクルマづくり」に取り組んでいきたい。

■著者



一ノ瀬 浩



森元 一



猿橋 謙

簡単教示でレイアウト変更に対応する部品搬送ロボット

Parts Delivery Robot with Instant Learning Technology Capable of Responding to Layout Changes

藪下 英典* 小田島 正** 森 健光*
 Hidenori Yabushita Tadashi Odashima Takemitsu Mori
 藤井 亮暢*** 田中 稔***
 Akinobu Fujii Minoru Tanaka

要旨

高齢者や身体の不自由な方の生活を支援する「生活支援ロボット」の開発に取り組んでいる。その開発成果である自律移動技術や画像認識技術を応用して、工場向けの部品搬送ロボットを開発した。本ロボットは周囲環境の地図および移動経路、搬送先の棚位置を記憶できるため、現場作業者がロボットを搬送先の棚まで移動させるだけで20分以内に簡単に教示を完了できる。本論文では特に、環境地図作成と移動経路記録を同時に行う簡単教示技術、他の移動物による環境変動に対してロバストな自己位置推定技術、部品を棚に投入するための高精度位置決め技術について解説する。

Abstract

Toyota Motor Corporation is developing robots capable of supporting aspects of peoples' life and work, with a particular focus on the elderly and physically disadvantaged. Two of the main results of these efforts have been autonomous mobility and image processing technologies. These technologies have now been applied to a parts delivery robot for plants. This robot memorizes a map of the surrounding environment, delivery routes, and the positions of shelves in delivery locations using instant learning technology that allows an operator to teach a new task to the robot within 20 minutes simply by moving the robot to the destination shelves. This article describes the instant learning technology that simultaneously performs map creation and route memorization, the robust localization technology capable of responding to changes caused by other mobile objects, and the highly accurate positioning technology that enables the robot to feed parts onto a shelf.

キーワード 教示, 搬送ロボット, 自律移動, 自己位置推定, マーカ位置認識

1 はじめに

少子高齢化社会を迎え、高齢者の自立生活を支援する生活支援ロボットへのニーズが高まっている。そのため、家庭内で人と共存し、日常生活の困りごとを解決する生活支援ロボット（Human Support Robot：HSR）の開発を進めている。生活空間は多様かつ複雑であり、期待される作業は多岐に渡るため、生活支援ロボットには高度な知能化技術が必要不可欠である。そこで、画像認識技術、自律移動技術、行動計画技術等の開発に取り組んできた。今回はこれらの要素技術を応用して、工場向けの部品搬送ロボットを開発した。

2 従来の部品搬送自動化の課題

部品搬送の自動化には、従来から無人搬送車（AGV）が広く利用されている（図1）。しかし、そのほとんどは磁気テープや磁気マーカなどの地面に設置した走行ガイドを追従するものである。そのため、走行経路を変更するたびに、走行ガイドを設置しなおすコストが発生する問題があった。

近年、走行ガイドを必要としないAGVが販売され始めている。例えば、屋内GPSを利用するものなどがあり、走行経路の変更コストを低減できる。しかし、変更作業には専門知識が必要であり、現場作業者が短時間かつ簡単に走行経路を変更することはできない。

* パートナーロボット部

** 組立生技部

*** (株)豊田中央研究所

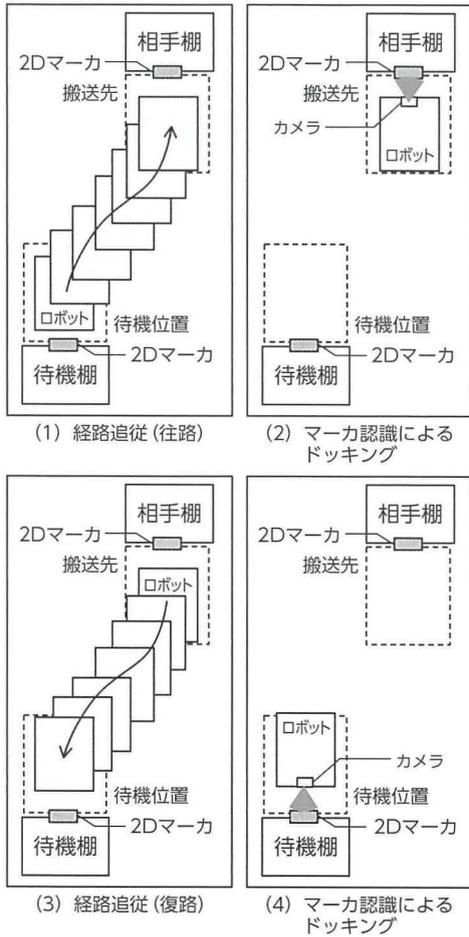


図4 移動とドッキング教示動作の再生

4.1 簡単教示技術

近年、移動ロボットの重要な研究テーマとして、環境の地図を生成しながら、同時にロボットの位置を推定する Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) に、多くの研究者が取り組んでいる⁽¹⁾。SLAMには、過去のセンサ計測値と制御入力から、その環境の地図とロボットの現在位置を同時に推定する難しさがある。

このSLAMを高速かつロバストに解くために、離散的な確率モデルであるパーティクルフィルタを利用した手法を開発してきた⁽²⁾。パーティクルフィルタはロボットの存在確率を候補点の集合として表現するもので、図5のようにロボットが存在する可能性が高い位置ほど高い密度で候補点が置かれる。センサ計測値と地図の一致度を照合することで、各候補点の確からしさを推定して、最も確からしい候補点を現在位置とする。この手法は、車輪スリップのような非線形ノイズを含めた確率モデルを表現できる特長を持つ。

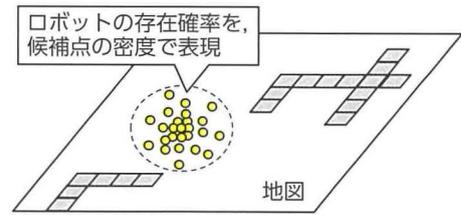


図5 パーティクルフィルタ

このSLAM技術に追加して、ロボットが一定距離移動する毎に、現在位置を移動経路点として逐次記録する経路記録機能を開発した。図6は、環境地図の生成と同時に移動経路の記録を行う「簡単教示」の様子を示す。地図中の薄い灰色は通路、濃い灰色は未観測領域(壁の向こう側など)、黒丸はロボットの推定位置、曲線はロボットの移動軌跡を平滑化した教示経路を示している。

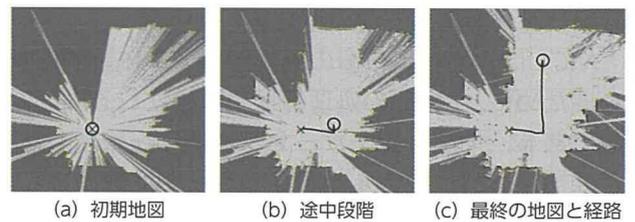


図6 地図生成と経路記録の同時実行

例えば、搬送先の棚の位置が変化した場合、図3に示すようにスタート位置から搬送先の棚の前までロボットを移動させ、搬送先の棚のマーカーをロボットのカメラで撮影するだけで、環境地図の生成、移動経路の教示、棚へのドッキングの教示が一度に実行できる。この教示作業に専門知識は必要なく、現場担当者が20分以内で完了できる。

4.2 ロバストな自己位置推定技術

教示作業を再生中のロボットの現在位置は、教示中と同様に、パーティクルフィルタを用いた統計的な位置推定手法である Monte Carlo Localization (MCL) を利用して推定する。ただし簡単教示とは違い、既にある地図に対して、ロボットの候補点毎にセンサ値と地図をマッチングし、各候補点の確からしさを統計的に推定する。

しかし、ロボットを導入した工場では、人が運転する電動牽引車や、床の仮置き箱などによって環境が変化し、教示時の環境地図と運用時のセンサ値が正しくマッチングできない状況がありえる(図7)。そのような状況では、現在位置を正しく推定することができず、作業を継続できない異常状態が発生する。



(a) 牽引車 (b) 床置き箱

図7 環境変化の例

そこで、MCLによる推定位置 \hat{x}_{MCL} について正常/異常を判定し、もし \hat{x}_{MCL} が異常である確率が高い場合は、相対的に信頼性の高いレーザーオドメトリ (Laser Scan Match : LSM) ⁽³⁾ による推定位置 \hat{x}_{LSM} へ切り替えて作業を継続する機能を開発した。なお、LSMはレーザーセンサ値の時間変化から、ロボットの移動量を推定する手法であるため、環境が変化しても位置推定が可能であるが、移動に伴って累積誤差が蓄積する欠点がある。

MCLによる推定位置の異常確率 p を統計的に求めるために、MCLの処理過程で算出される内部変数である、地図とレーザーセンサ値の一致度 w_{max} と候補点のバラつき σ_{x+y} の2つを説明変数として、 p を推定するロジスティック回帰分析を行った。なお、ロジスティック回帰分析は正規分布に従わない現象に対して有効である統計的な解析手法であり、 \hat{x}_{MCL} が異常か正常かという2択状態に対して、 p を算出する。

ロジスティック回帰分析への教師データを図8に示す。MCLによる推定位置 \hat{x}_{MCL} の算出過程で得られる候補点のバラつき σ_{x+y} を横軸、地図とレーザーセンサの一致度 w_{max} を縦軸にとり、MCLによる推定位置が異常である教師データと正常である教師データをプロットしている。ここで、推定位置の誤差が0.15m以上の条件を異常とした。図8の直線は回帰分析で得られた判定式であるロジット関数式(1)を示したものである。また、 p は式(2)で得られ、 p が大きいほどMCLが異常である確率が高いと判定される。 p が50%以上を異常、50%未満を正常と判定した結果と、真位置と推定位置から判定した正常/異常を比較した結果、判別率的中率は91.1%となり、MCLの正常/異常を高い確率で判別できることが分かった。

$$\text{logit} = -278w_{max} + 18.9\sigma_{x+y} - 0.664 \quad \dots\dots\dots (1)$$

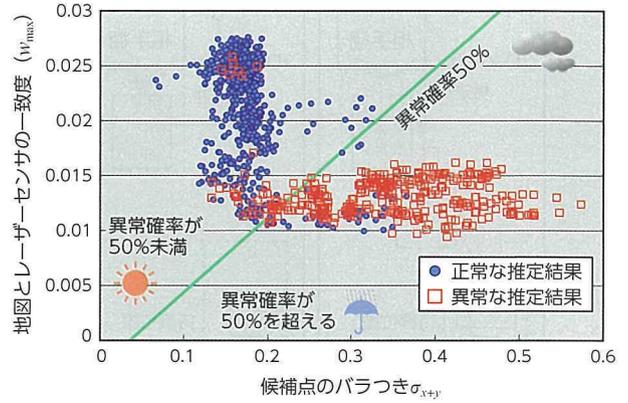


図8 推定誤差の正常/異常の判別

$$p = \frac{1}{1 + \exp^{-\text{logit}}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

p が高い場合は、MCLからLSMへ位置推定手法を連続的に切り替えて作業を継続するために、式(3)の重み係数 α に応じて、式(4)の重み付き平均によって推定位置を求める。例えば、 $p=10\%$ の場合は $\alpha=0.993$ となり、ほぼMCLで位置推定を行い、 $p=30\%$ の場合は $\alpha=0.007$ となり、ほぼLSMで位置推定を行う。なお、本ロボットでは式(3)の $a=50.0$, $b=0.2$ を採用した。

$$\alpha = \frac{1}{1 + \exp(a(p - b))} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{pmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha \hat{x}_{MCL} + (1 - \alpha) \hat{x}_{LSM} \\ \alpha \hat{y}_{MCL} + (1 - \alpha) \hat{y}_{LSM} \\ \tan^{-1} \left[\frac{\alpha \sin \hat{\theta}_{MCL} + (1 - \alpha) \sin \hat{\theta}_{LSM}}{\alpha \cos \hat{\theta}_{MCL} + (1 - \alpha) \cos \hat{\theta}_{LSM}} \right] \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (4)$$

本手法を適用した結果を図9に示す。縦軸は推定誤差 (m)、横軸は時刻 (s) を示す。大きな環境変化があった場合でも、本手法を適用後は推定誤差がほぼ0.15m以下になった。

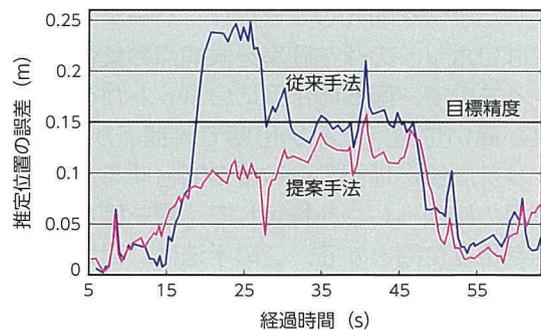


図9 自己位置推定の推定誤差

4.3 高精度位置決め技術

ロボットが教示経路に沿って棚の前まで移動した後、棚とドッキングすると、専用機構が働いて、排気管がロボットから相手の棚に流れ込む。この専用機構の動作に必要なドッキング精度は±8mmであるが、地図とセンサ値のマッチングによる推定位置には0.15mの推定誤差が発生し得るため精度不十分である。そこで、生活支援ロボットのために開発していた単眼カメラによる高精度マーカ位置認識をドッキング制御に応用した。

棚に2Dマーカを設置し(図10)、ドッキングする棚とロボットの相対位置を計測する。ここで2Dマーカの位置は環境に固定されているという前提をおき、その位置に時間フィルタを加えて計測時のバラつきを抑制した。認識した2Dマーカを元に、棚の前のロボットの停止位置まで直線経路を作り、経路追従制御で直線経路の停止位置までロボットが移動する。

その時のロボットと棚のドッキング精度は $\sigma=0.9\text{mm}$ (図11)であり、排気管の投入機構の動作に必要な±8mmに対して十分小さいことを確認した。

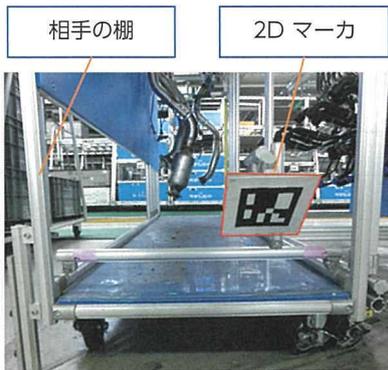


図10 棚の2D マーカ

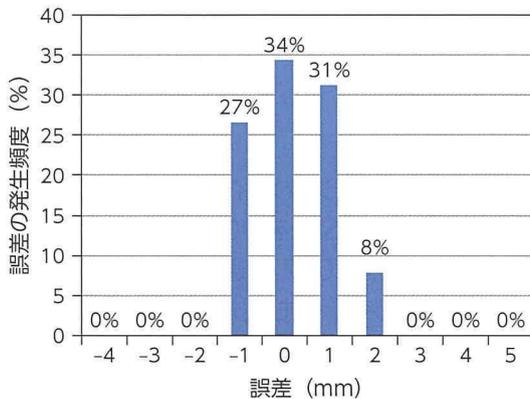


図11 ドッキング精度

5 おわりに

生活支援ロボットに向けて開発してきた知能化技術を応用し、部品搬送ロボットを開発した。現場担当者が20分以内に新しい作業をロボットに教示することができ、目標性能を達成できた。

今後は、本開発の成果である簡単教示技術、ロバストな自己位置推定技術、高精度な位置決め技術を生活支援ロボットに取り込み、実用化に向けた開発を加速させると共に、本ロボットの他工程への適用を検討していきたい。

参考文献

- (1) Sebastian Thrun, et al. : Robust monte carlo localization for mobile robots. Artificial Intelligence (2001)
- (2) G. Grisetti, et al. : Improving Grid-based SLAM with Rao-Blackwellized Particle Filters by Adaptive Proposals and Selective Resampling. ICRA (2005)
- (3) A. Censi : An ICP variant using a point-to-line metric. ICRA (2008)

著者



藪下 英典



小田島 正



森 健光



藤井 亮暢



田中 稔

自動車技術会 2014 年度技術開発賞

過給ガソリンエンジンでの異常燃焼抑制エンジン油の開発

Engine Oil Development for Preventing Abnormal Combustion in Turbocharged Gasoline Engine

藤本 公介*
Kosuke Fujimoto

山下 実**
Minoru Yamashita

平野 聡伺***
Satoshi Hirano

加藤 勝善***
Katsuyoshi Kato

渡邊 泉****
Izumi Watanabe

1 開発の狙い

過給ガソリンエンジンで低速トルクを高めると“低速プレイグニッション (Low-Speed Pre-Ignition, 以降 LSPI と称す)”と呼ばれる異常燃焼が発生する。頻発するとピストン系部品損傷の原因となる重要課題であり、エンジンオイルの自然着火が一因と考えられている。そこで、オイル組成の影響を定量化し、従来性能に加え新たに LSPI 抑制性能を付与した新オイルを開発した。

能を満足する配合を絞り込んだ (図 2 星印)。これにより、従来性能は維持しつつ、LSPI 頻度を 90% 以上低減することが可能となった (図 3)。

2 技術の内容

2.1 LSPI への影響因子

種々の検討の結果、オイルの酸化反応制御が自然着火・LSPI の抑制に重要であることを見出し、酸化に寄与する配合添加剤の LSPI 頻度への影響を定量化した (図 1)。中でも、Ca 量 (清浄剤) と P 量 (ジアルキルジチオリン酸亜鉛) の寄与度が高く、Ca は酸化反応を促進し、P は酸化過程で生成する過酸化物を分解・安定化するためと推察される。

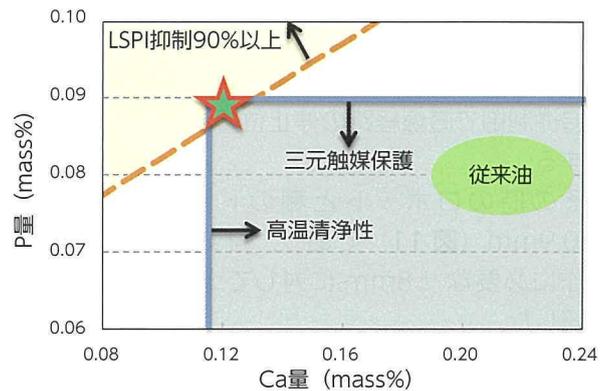


図 2 添加剤配合量の決定

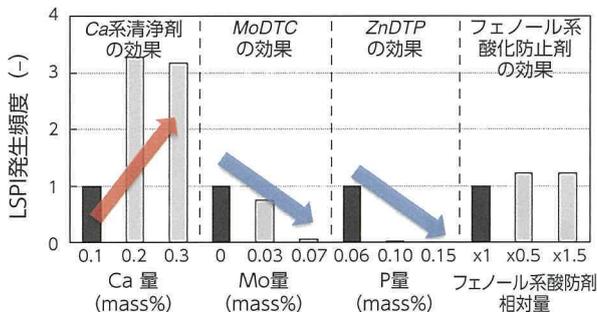


図 1 オイル配合添加剤の LSPI 頻度への影響

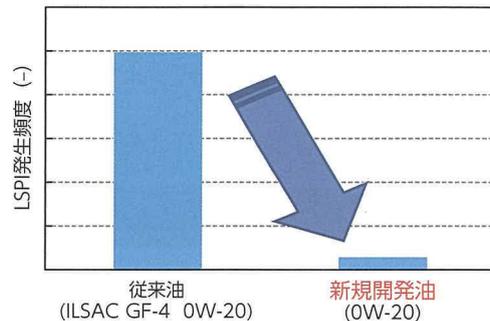


図 3 開発油の LSPI 抑制性能

2.2 組成設計と性能

LSPI 抑制には低 Ca 高 P 化が必要だが、三元触媒保護性や高温清浄性も確保する必要があり、3 性

3 むすび

LSPI に対するエンジンオイルの組成影響を世界で初めて定量化し、LSPI を 90% 以上抑制可能な新オイルを開発した。2017 年運用開始予定のオイル規格 (ILSAC GF-6) へも同性能が織込まれる等、市販オイルの性能向上や過給ダウンサイズエンジンの普及促進に貢献している点が評価され、2015 年 5 月に自動車技術会賞を受賞した。

* 材料技術開発部

** トヨタ自動車研究開発センター (中国) (有)

*** エンジン設計部

**** エンジン統括部

自動車技術会 2014年春季大会学術講演会 優秀講演発表賞 インフラ協調型 右折時衝突防止支援システムの効果評価

Effect Evaluation of Vehicle-Infrastructure Cooperative Right-Turn Collision Prevention System

中村 俊佑*

Shunsuke Nakamura

菅沼 英明*

Hideaki Suganuma

1 まえがき

交差点での右折事故を防止するため、路側センサ等のインフラから右折車のドライバーに対し、通信を用いて対向直進車の情報を提供する「右折時衝突防止支援システム」(図1)を開発した。システムの普及にあたっては、インフラ設置の投資に見合う事故削減効果が得られるかを定量的に評価することが重要であることから、システムの効果評価手法の検討と効果の試算を行った。



図1 システム概要

2 効果評価手法の検討

情報提供による運転支援システムの場合、支援

を受けたドライバーの行動変化をどのように事故削減効果と結びつけるかが課題であるが、右折においては、交差点の状況(対向右折車の有無、信号等)やドライバーの右折の仕方等が様々であるため、それらを網羅的に評価する手法が必要となる。そこで、バリエーションツリー分析を参考に、事故に至るシナリオやドライバーの支援活用方法等を整理することで、事故削減効果の算出モデル(図2)を作成した。このモデルは、支援のない状態・ある状態それぞれにおける(a)~(m)の件数を比較することによって、見通し有無や支援内容別の事故削減率を算出することが可能である。

3 効果の試算結果

公募した101名の参加者により実証実験を実施し、取得した右折時の映像データ約1万件をモデルに適用した。結果、事故削減効果は見通しの悪い状況で54%、見通しの良い状況で10%であった。

4 むすび

右折時衝突防止支援システムの事故削減効果の算出モデルを作成し、効果を試算した。本研究が、今後の実用化・普及の助けとなることを期待する。

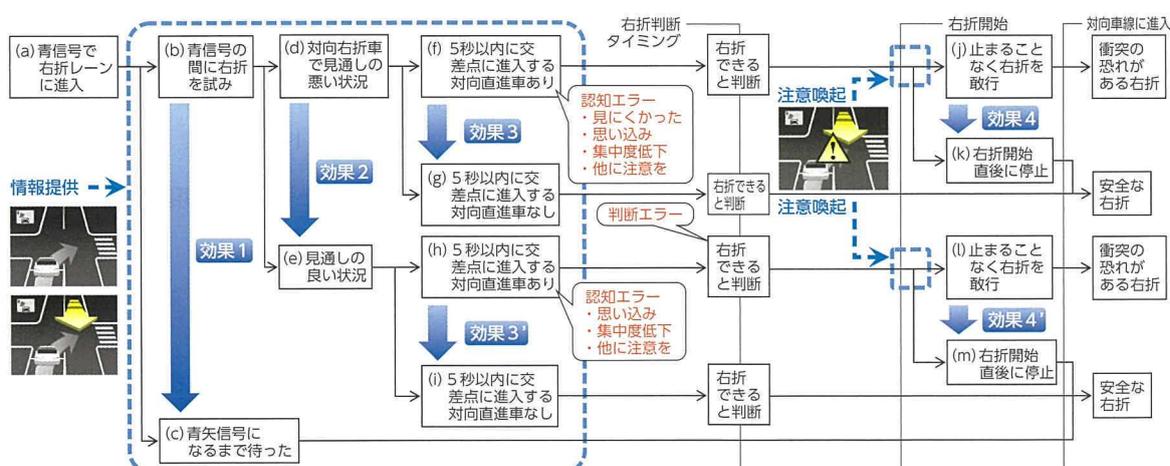


図2 事故削減効果の算出モデル

* ITS企画部

自動車技術会 2014 年秋季大会学術講演会 優秀講演発表賞 デポジットによる LSPI 発生メカニズムに関する研究

Study of LSPI Mechanism Caused by Deposits

岡田 吉弘* 宮下 茂樹** 矢口 寛**
Yoshihiro Okada Shigeki Miyashita Hiroshi Yaguchi
泉 桂広*** 青木 文明***
Yoshihiro Izumi Fumiaki Aoki

1 まえがき

燃費向上に有効なガソリン過給ダウンサイズエンジンでは、低回転高負荷域において前ぶれなく過早着火が発生することがあり、従来のプレイグと区別して低速プレイグ（以下 LSPI; Low-Speed Pre-ignition）等と呼ばれ、高トルク化の課題となっている。本研究ではその発生メカニズム解明および対策を目的とした。

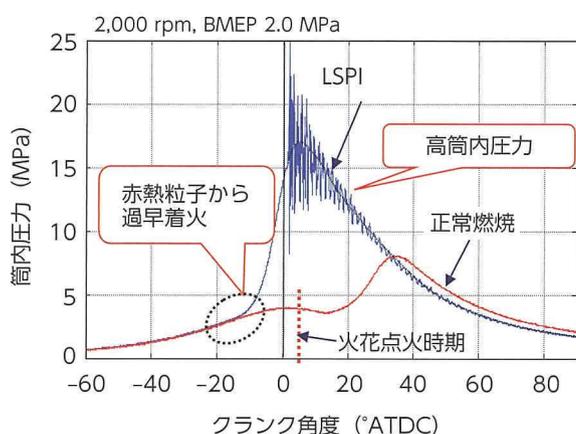


図1 LSPI 発生時の筒内圧力

2 研究の内容

LSPI はシリンダウェット（筒内噴射燃料のボア壁面付着）の多い条件で発生確率が高まるが、可視化の結果、そのような運転条件では約 10 秒程度の短時間にシリンダライナ上部（図 2 の部位 (a)）にデポジットが堆積した。そこから剥がれたデポジットの欠片が燃焼にさらされて赤熱化し、次の燃焼サイクルまで残留することで LSPI の着火源となる。

さらに、このような燃料とオイルの混合液体から生成されたデポジットは、オイル中の添加剤の影響

により発火温度が変化し、LSPI 発生頻度に影響を与えることがわかった（図 3）。

また、空燃比を濃くした際には残留ガス中の酸素濃度が減少することでデポジットが赤熱化する確率が低下する様子も確認された。

以上のようなメカニズムに基づき、シリンダウェットを低減する燃料噴霧および LSPI 発生時に直後の燃焼サイクルから一時的に空燃比を濃くする制御を開発し、LSPI の大幅な抑制に成功した。

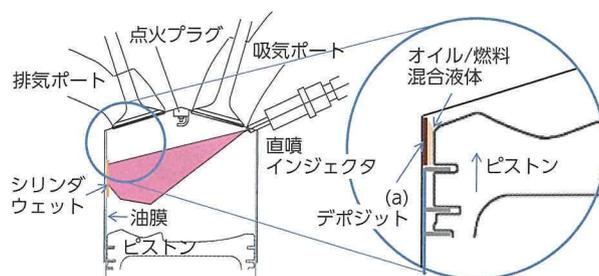


図2 シリンダウェットによるデポジット生成

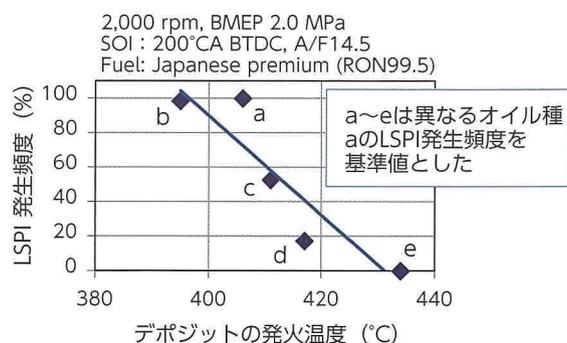


図3 デポジットの発火温度と LSPI 発生頻度

3 むすび

本研究によりデポジットによる LSPI の発生メカニズムはほぼ解明され、対策技術により過給ガソリンエンジンの高い信頼性を実現した。

* ユニット先行制御システム開発部

** エンジン先行設計部

*** (株) 日本自動車部品総合研究所

日本機械学会 2014年度 日本機械学会賞（技術） ハイポイドギヤのかみ合い率最適化設計手法

Design Method for Optimizing Contact Ratio of Hypoid Gears

柴田 好克*
Yoshikatsu Shibata

宮村 宏美*
Hiromi Miyamura

稲垣 瑞穂**
Mizuho Inagaki

青山 隆之**
Takayuki Aoyama

1 まえがき

本技術は、新歯形論による接触線の傾き角がギヤピッチ角と無関係に決定できることを利用し、従来の設計手法に対しギヤピッチ角を設計変数とすることで、かみ合い率をコントロールする手法である。これにより、設計可能領域が画期的に拡大し、歯車3大性能である振動・騒音、強度、効率を高いレベルで両立させることができる。

2 技術の内容

歯車諸元を決めるためには、未知数9個で2円錐の接触条件式7式を解く必要がある。従来手法では、歯すじの曲率をカットと一致させるという条件を与え、未知数を減らし解いていた。一方、新歯形論では平面接触領域を用いることで、未知数及び接触条件式を減らすことができた。この結果、ギヤピッチ角を設計変数とすることができ、歯車諸元設計において、積極的にかみ合い率をコントロールすることが可能となった。

図1に示すように、従来手法ではギヤピッチ角は一意に決まり、またかみ合い率も、加速側よりも減速側の方が大きくなり、バランスを変えることはできなかった。つまり、図1中の従来設計領域という軸上で、ねじれ角を変更し、かみ合い率を増減させるしか手段がなかった。従って、振動・騒音を向上させるかみ合い率を大きくするために、効率を悪化させるねじれ角増加という手段しかなく、振動・騒音と効率の両立が大変困難であった。一方、本手法ではギヤピッチ角を設計変数として扱えるため、図1の全域が設計領域となる。また、加減速のかみ合い率のバランスも変更できるため、図1中の●から★への変更や、ねじれ角を低減することで、一旦かみ合い率を△から◇へ減少させた後、ギヤピッチ角により☆へバランス変更し、目標かみ合い率を達成させることもできる。

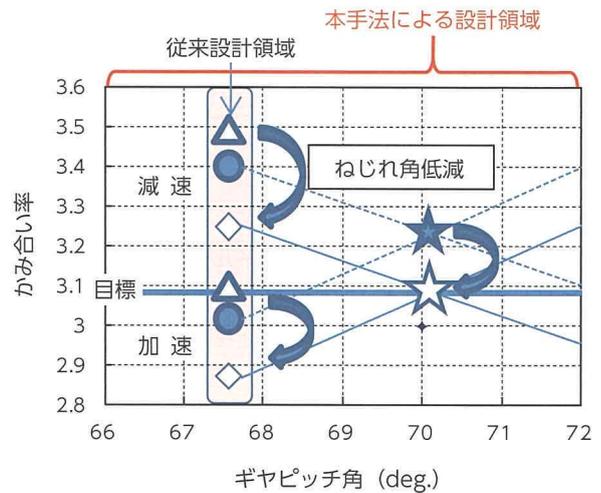


図1 ギヤピッチ角とかみ合い率の関係

本技術により、振動・騒音を満足しつつ、かみ合い損失を7%低減させることができた（図2）。

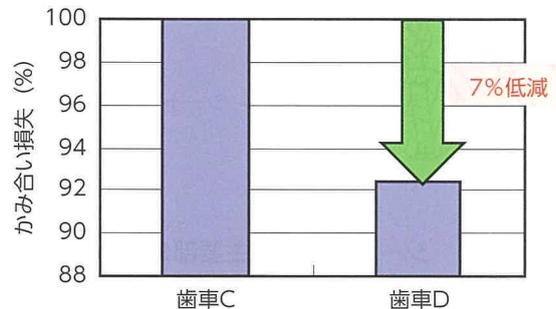


図2 事例 かみ合い損失低減結果

3 むすび

近年、静粛性を維持したままの燃費性能向上は必須である。そのため、従来両立が大変困難であった振動・騒音と効率を歯車の諸元のみで両立できる本手法は、大変有効であり画期的技術である。

2013年発表のLEXUS ISから本手法のハイポイドギヤを採用し、今後のTOYOTA、LEXUSの全乗用車系ハイポイドギヤに適用予定である。

* ドライブトレイン実験部 ** (株) 豊田中央研究所

2014 年度優秀特許 自動車用シートベルト装置

特許番号 2785665 号

Seat Belt Device for Automobile

安井 慎一*
Shinichi Yasui

杉浦 元信**
Motonobu Sugiura

磯村 誠*
Makoto Isomura

末沢 泰謙*
Yasunori Suezawa

1 発明の背景

自動車のセンターピラーに設けられた従来の自動車用シートベルト装置は、シートベルトを貫通させて滑り支持するアンカープレートと、アンカープレートをセンターピラーに固定するためのボルトと、センターピラーの補強パネルに溶接で固定されると共にボルトがねじ込まれるナットと、アンカープレートに取り付けてボルトを覆う樹脂製のキャップを含むシートベルトアンカーを備えた構成が知られている（図1）。

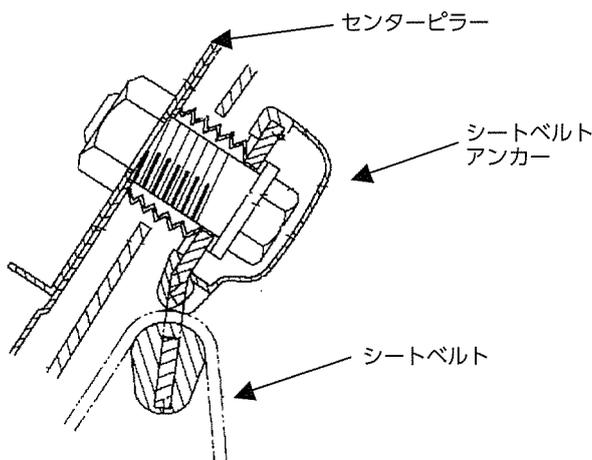


図1 シートベルトの主要部の断面図

しかしながら、センターピラーは車体に働く荷重に耐える強度を確保する必要から高剛性に形成され、センターピラーに設けられたシートベルトアンカーも大きな剛性を有する。そのため、通常の走行時に加わる荷重より大きな荷重、たとえば、側面衝突の際の衝撃荷重が車体に加わるとき、乗員の頭部がシートベルトアンカーに当たると頭部に大きな衝撃を及ぼす可能性がある。そのためシートベルトアンカーにおいて衝撃荷重を緩和するための様々な構造が提案されているが、その構造に改善の余地があった。本稿では、この点を改良した発明に関して説明する。

* 製品企画本部

** 性能実験部

2 発明の概要

本発明は、車両のセンターピラーに取り付けられたシートベルトを支持するアンカープレートと、アンカープレートをセンターピラーに固定するボルトと、ボルトの頭部を覆うキャップを含み、ボルト頭部の高さを低くすると共に、ボルト頭部とキャップとの間に車室内側から外側方向への変位を許容するようにキャップと一体に設けられたリブを備えることを特徴とする自動車用シートベルト装置を提供する（図2）。

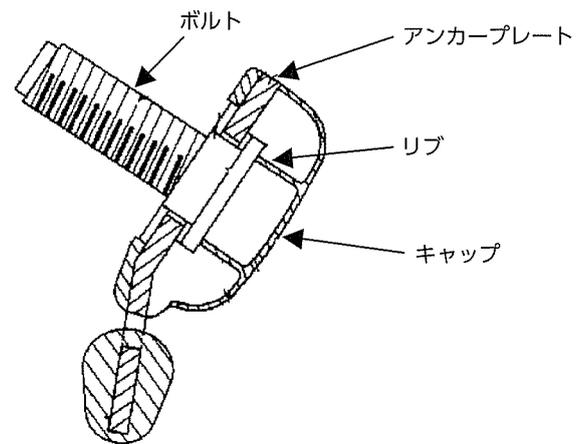


図2 アンカープレートの断面図

3 発明の効果

本発明を採用した自動車用シートベルト装置は、シートベルトアンカーの構成部品であるキャップへの乗員頭部等の衝突に際し、リブの座屈をもって車室外方向への変位を許容して衝撃エネルギーを吸収することができる。従って、シートベルトアンカーの構造を簡素にすることができる。

2014 年度優秀特許 エンジン自動停止始動装置

特許番号 3780753 号

Failsafe Device for Idling Stop Function

原 克哉*
Katsuya Hara

1 発明の背景

従来、燃費低減、排気エミッション低減のため、走行時に交差点等で自動車が停止した場合、エンジンを自動停止させるエンジン自動停止始動装置が知られている。エンジンを自動停止させる条件は、ブレーキペダルを踏み込んだときにブレーキスイッチが検出するブレーキ操作有無信号 ON の状態になること、エンジンを再始動させる条件は、ブレーキペダルの踏み込みを止めてブレーキ操作有無信号が OFF の状態になることである。

しかしながら、従来のエンジン自動停止始動装置では自動車の停止状態の検出をブレーキ操作有無信号だけに頼っているため、ブレーキスイッチに異常が生じた場合、ブレーキペダルを踏み込んでエンジン自動停止条件を満たしてもブレーキ操作有無信号が OFF の状態のままとなりエンジンが自動停止しないおそれがあり、この点で改善の余地があった。本稿では、この点を改良した発明に関して説明する。

2 発明の概要

本発明は、エンジン自動停止始動装置にブレーキスイッチによるブレーキ操作の有無を検知する手段と、さらにブレーキを踏み込んだ際のペダルストロークの変化を検知する手段と液圧式ブレーキのブレーキ装置内における圧力の変化を検知する手段とのうち少なくとも一方を組み合わせる。この組み合わせにより、ブレーキスイッチからの信号のみではなく、他のブレーキ操作の検知手段と合わせてブレーキ操作の有無を判定することができる（図1）。

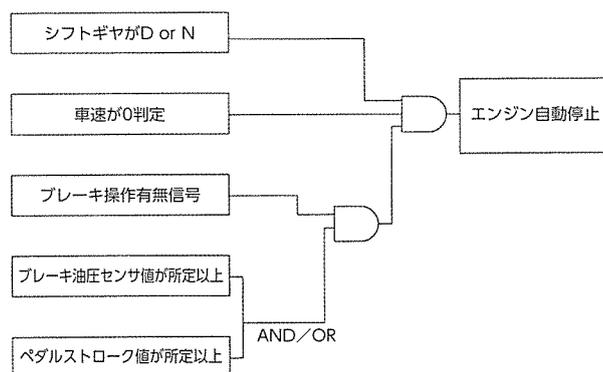


図1 エンジン自動停止始動装置のブロック図

3 発明の効果

ブレーキスイッチに異常が生じた場合でも、併設した検知手段によってブレーキ操作の有無を検出することができるので、エンジンの自動停止にともなう不都合を回避することができる。そのため、より正確にエンジンの自動停止始動を行うことができるので、燃費低減と排気エミッション低減を更に改善できる。

優秀特許

* シャシー企画統括室

2014 年度優秀特許 車両のエンジン再始動の制御装置

特許番号 3807145 号

Control Unit for Idling Stop Function

田端 淳*
Atsushi Tabata

1 発明の背景

従来、燃費低減、排気エミッション低減のため、走行時に交差点等で自動車停止した場合、エンジンを自動停止させるエンジン再始動装置が知られている。エンジンが自動停止すると、エンジンと連結されているオイルポンプも停止し、前進クラッチに供給されているオイルも油路から抜けてしまうので、前進クラッチのエンジンとの係合は解かれた状態となる。この場合、エンジン再始動と共に前進クラッチが速やかに係合されていないと、エンジンが吹き上がった状態で前進クラッチが係合することになり、係合ショックが発生する。そのためエンジン自動停止中でも前進クラッチの油路中のオイルが抜けないように保持し、前進クラッチを常時係合状態に維持する技術が提案されている。

しかしながら、前進クラッチを常時係合状態にすると、種々の構成部品から油圧が漏れ出るので実現は困難であり、またエンジン再始動時にスタータ系に大きな負担がかかるという点で改善の余地があった。本稿では、この点を改良した発明に関して説明する。

2 発明の概要

本発明のエンジン再始動装置は、前進クラッチと、前進クラッチに油圧を供給するオイルポンプとを結ぶ油路に、油圧を蓄圧可能なアキュムレータと切換弁を分岐・設置する。エンジン自動停止時には、オイルポンプも停止するため、油路の油圧は保持されず前進クラッチの係合は解かれるが、切換弁を閉じるのでアキュムレータには油圧が蓄圧される。エンジン再始動時には、オイルポンプが作動し油路に油圧が供給されるが、エンジンの再始動と共に切換弁を開くことによりアキュムレータに蓄えられた油圧が前進クラッチへの油路に供給される。そのため、

エンジン再始動時の油路への油圧の供給速度が速くなる (図 1)。

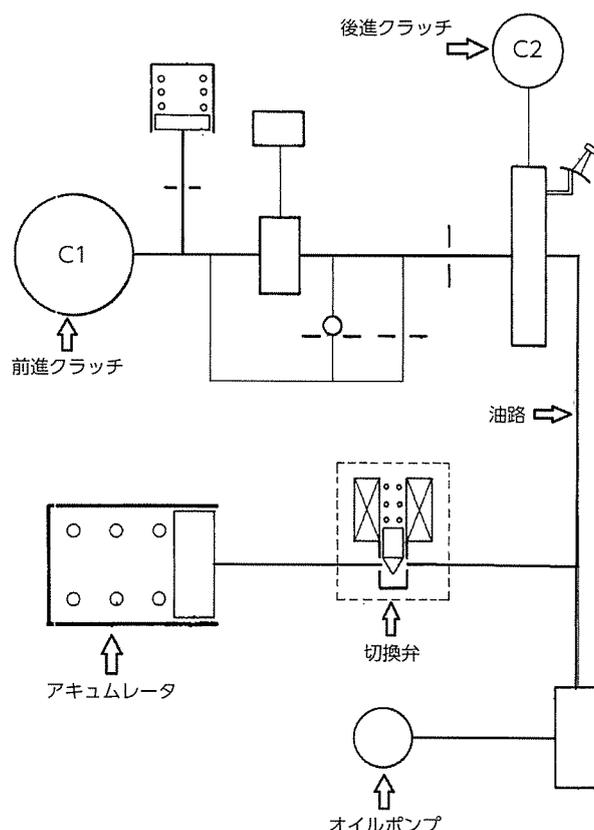


図1 エンジン再始動装置のシステム図

3 発明の効果

本発明では、エンジン再始動時に、オイルポンプの作動による前進クラッチへの油圧供給と共に、アキュムレータに蓄えられた油圧を前進クラッチに供給するので、油圧供給による前進クラッチの係合までの時間を大幅に短縮することができ、エンジンが吹き上がった状態での前進クラッチの係合による係合ショックを防止し、エンジン再始動時の応答性を改善できる。

* HV ドライブトレイン開発部

2014 年度優秀特許 ハイポイドギヤの設計方法

特許番号 5331872 号

Hypoid Gear Design Method

柴田 好克* 宮村 宏美*
Yoshikatsu Shibata Hiromi Miyamura

1 発明の背景

従来のハイポイドギヤの設計では、設計条件として、軸角、オフセット、歯数、リングギヤ半径を与えて得られる9個の変数をもつ7個の式を解くために、ピニオンのねじれ角と歯筋曲率半径の式を与えることにより、8元連立方程式を立て、解を求めている。また従来の歯車理論では、歯筋とは「歯面とピッチ面との交線」と定義されているが、全ての種類の歯車について共通のピッチ面の幾何学的定義が定まっていない。そのため円筒歯車からハイポイドギヤまでの共通の歯筋及び歯筋かみあい率の定義も定まっていない(図1)。

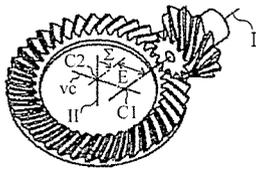


図1 ハイポイドギヤの全体図

このためピッチ円錐角 Γ_{gw} などの円錐諸元は、歯筋曲率半径に依存することになり、任意に円錐諸元を決定できないなど、設計の自由度を高めることが難しいため、従来の設計方法に改善の余地があった。本稿では、この点を改良した発明に関して説明する。

2 発明の概要

本発明は、下記(a)～(e)の工程を備えることを特徴とするハイポイドギヤの設計方法を提供する(図2, 3)。

- (a) ハイポイドギヤの軸角 Σ 、オフセット E 、ギヤ比 $i0$ に基づき、二つの歯車の相対角速度の軸である瞬間軸 S 、二つの歯車の回転軸に対する共通垂線 vc と瞬間軸 S の交点 Cs 、第2歯車の回転軸に対する瞬間軸 S の傾き角 Γ_s を算出し、諸元算出のための座標軸 $C1, C2, Cs$ を定める工程
- (b) 二つの歯車の諸元である基準円半径 $R1w, R2w$ のいずれか一方と、ねじれ角 ψ_{pw} 、

- ψ_{gw} のいずれか一方と、ピッチ円錐角 Γ_{pw} 、 Γ_{gw} のいずれか一方の3個の変数を選択する工程
- (c) 二つの歯車のそれぞれのピッチ円錐の共通接点である設計基準点 Pw と、前述の(b)工程で選択されなかった3個の変数とを、前述の(b)工程で選択された3個の変数に基づいて算出する工程
- (d) 第2歯車の駆動側歯面の接触法線 gwD と被駆動側歯面の接触法線 gwC を定める工程
- (e) 設計基準点 Pw と前述の(b)工程で選択された3個の変数と、接触法線 gwD 及び接触法線 gwC とに基づいてハイポイドギヤの諸元を算出する工程

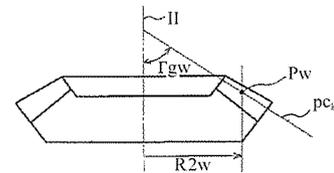


図2 ギヤの断面図

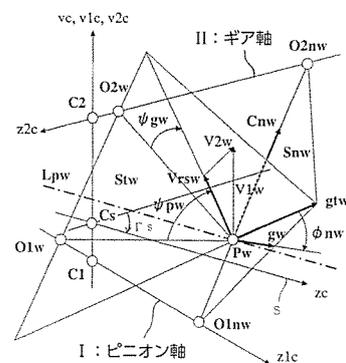


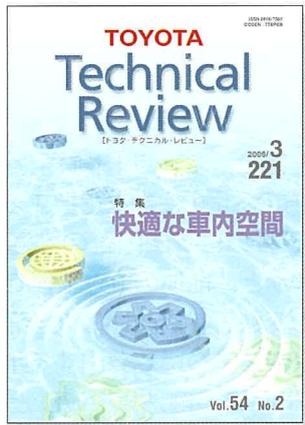
図3 ハイポイドギヤの基本座標系 $C1, C2, Cs$

3 発明の効果

本発明を採用したハイポイドギヤの設計方法は、一つの歯車のピッチ円錐角を瞬間軸の傾き角に等しくおき諸元計算を行うものである。ピッチ円錐角を瞬間軸の傾き角に等しくすると、駆動側歯面と被駆動側歯面のかみあい率がほぼ等しくなる。従って、簡易的に、即ちかみあい率を詳細に検討することなく、ピッチ円錐角を瞬間軸の傾き角とすることができるので、設計の自由度が改善できる。

* ドライブトレーン実験部

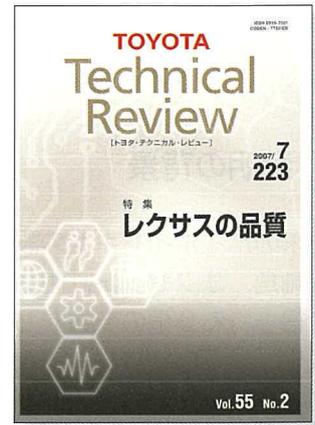
Back Number Index



Vol.54 No.2 (2006年)
特集：快適な車内空間



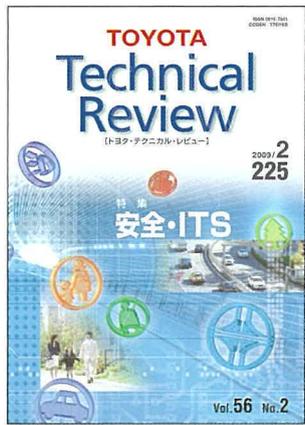
Vol.55 No.1 (2006年)
特集：感性に合う快適な走り



Vol.55 No.2 (2007年)
特集：レクサスの品質



Vol.56 No.1 (2008年)
特集：環境・エネルギー



Vol.56 No.2 (2009年)
特集：安全・ITS



Vol.57 No.1 (2010年)
特集：プリウス



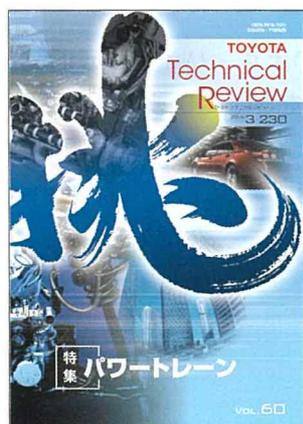
Vol.57 No.2 (2011年)
特集：次世代電池とその活用



Vol.58 No.1 (2012年)
特集：日本独創



Vol.59 (2013年)
特集：生産技術



Vol.60 (2014年)
特集：パワートレーン



Vol.61 (2015年)
特集：MIRAI
第2特集：ITS・高度運転支援

定価：1,944円 (本体：1,800円)

※ Vol.54 No.1 「ハイブリッド」は販売終了となっております。

※ 英文版も販売しております。定価：3,024円 (本体：2,800円)

発売元：(株) オーム社 Tel: (03) 3233-0641

<http://www.ohmsha.co.jp/information/st/magazine/index.htm>

いつも TOYOTA Technical Review をご愛読いただき、誠にありがとうございます。
TTR 第 62 巻 通算 232 号をお届けします。

今号の特集は、プリウスです。前号の MIRAI に引き続き、発表・発売前の猛烈に忙しい時期に執筆をお願いしました。ご協力いただいた豊島 CE はじめ開発エンジニアの方々に深く感謝いたします。

さて、いつものように TTR の記事をさかのぼって調べてみると、プリウスの記事は意外と少ないことに気がつきました。初代は 1997 年 208 号に、プリウスの名はなく、「トヨタハイブリッドシステムの開発」と題して登場。2000 年 213 号に初めてマイナーチェンジしたプリウスの記事が掲載されます。2 代目のころの 2005 年 220 号の特集「ハイブリッド」でも車両としてはハイパーハイブリッドを中心にアピールしています。プリウスとして特集を組んだのは先代プリウスの 2010 年 226 号が初めてのことでした。年に 1 回の発行タイミングにうまく合わないほど、プリウスがいかに一気に開発され、ハイブリッドシステムがいかに急速にすそ野を広げ普及していったのかがわかります。

TNGA の先駆けとしての使命を帯び、トヨタグループのエンジニアが渾身の力をこめて新型プリウスを開発しました。「もっといいクルマづくり」に賭けるエンジニアの燃える開発魂をそれぞれの記事から感じていただければ幸いです。

何台も乗り換えてきた私の愛車も今は自然にハイブリッド車となっています。ハイブリッド車に一度乗るともう元のクルマには戻れない、“BEAUTIFUL HV” の魅力を感じています。

(発行人：平野)

TOYOTA Technical Review Vol. 62

© 2016 TOYOTA MOTOR CORPORATION, Printed in Japan
(禁無断転載)

発行所 トヨタ自動車株式会社
技術管理部
〒471-8572 愛知県豊田市トヨタ町1
(0565) 28-2121 (代表)

発行人 平野 宗弘
編集 トヨタテクニカルディベロップメント株式会社
IP センター推進部 技術情報室 石原 広美

印刷所 笹徳印刷株式会社
〒470-1196 愛知県豊明市栄町大脇7番地

発売元 株式会社 オーム社
(03) 3233-0641 (代表)
<http://www.ohmsha.co.jp>

発行 2016年4月15日





TOYOTA
Technical
Review

[トヨタ・テクニカル・レビュー]

2016/4
Vol. 62 232

発売元 株式会社 オーム社
定価 1,944円(本体1,800円)