

ISSN 0916-7501
CODEN : TTEREB

TOYOTA Technical Review

[トヨタ・テクニカル・レビュー]

2014/ 3 230

特集

パワートレーン

Vol.60

【表紙のデザイン】

ユニットセンター設立に伴い、パワートレーンユニット開発の研究・開発と生産技術の両機能を、トヨタ創業の「原点」でもある本社工場敷地内に集約。世界一の競争力を持つパワートレーンユニットの開発と迅速な製品化で、「もっといいクルマづくり」を加速させるという思いを、『挑』の字で表現しています。

TOYOTA Technical Review

230

Vol. 60 Mar. 2014

目次

巻頭言

・ユニットセンターに対する思い.....	取締役副社長（ユニットセンター長） 須藤 誠一.....	4
----------------------	------------------------------	---

▷特集「パワートレーン」

基調論文：低燃費化に貢献するパワートレーン	嵯峨 宏英.....	6
・ガソリンエンジンの低燃費化技術	中田 浩一.....	15
・新型HV 小型車用エンジンの開発	芝 利光／莊司 純平／井藤 裕二／山田 哲／安藤 大吾.....	22
・コンパクトカー向けハイブリッドトランスアクスルの開発 上野 裕／岩田 茂嗣／平井 悠／松本 隆志／松本 雅志／黒野 洋輔／藁科 泰輔.....		27
・コンパクトカー向けハイブリッドシステムの開発.....	田下 広和／上原 隆史.....	32
・新 1.8L バルブマチック付ガソリンエンジンの開発.....	太田 行紀／吉永 潔／李 先基／谷 昌章.....	38
・新型北米カローラ用 CVT の開発 外山 真悟／新居 大介／服部 邦雄／高原 秀明／大石 俊弥／井上 孝志.....		44
・パワートレーン共同開発棟の紹介 坂巻 薫／城田 幸司／小林 武史／日下部 卓也／芦田 敏／柳 功／河合 長／矢矧 雅彦.....		50
・車両レス・エンジンレスでHV ユニートを適合・評価可能なバーチャル&リアルシミュレータ（VRS）の開発 水野 光／直野 隆哉／及部 七郎斎／花田 秀人／城田 幸司.....		57

▷論文／解説

・新型 Lexus LS の空力開発	西浦 正昭／市川 創／安岡 志朗.....	62
・少気筒ハイブリッド車の起動時振動改良技術開発.....	城 佳久／石崎 啓祐／松島 将人.....	67
・事故場面再現に基づく対横断歩行者システムの効果試算手法の開発 モラレス寺岡 エドガル芳男／田中 信.....		72
・保磁力機構解明による重希土類フリー磁石の可能性検討（1）－放射光X線顕微鏡による磁化反転挙動解析－ 矢野 正雄／小野 寛太／荒木 暢／真鍋 明／庄司 哲也／加藤 晃.....		77
・保磁力機構解明による重希土類フリー磁石の可能性検討（2）－局所磁化反転挙動および界面構造解析－ 長島 真也／真鍋 明／宮本 典孝／庄司 哲也.....		81
・アーク溶接の熱ひずみシミュレーション技術の開発.....	和田 季也／井寺 基弘／桑原 仁志.....	86
・認知症介護に向けた対話制御・対話知識獲得技術の開発	渡部 生聖／中野 雄介.....	91

▷受賞技術概要.....	96
--------------	----

▷優秀特許.....	102
------------	-----

Contents

Preface

- My Vision for the Unit Center
Seiichi Sudo, Center President of the Unit Center, Executive Vice President, and Member of the Board 4

▷ Special Feature: Powertrain

- Introduction: Development of Powertrain Technology for Even Better Fuel Efficiency
Koei Saga 6
- Engine Technology for Improving Fuel Economy
Koichi Nakata 15
- Development of Engine for New Compact Hybrid Vehicle
Toshimitsu Shiba/Junpei Shoji/Yuji Ito/Tetsu Yamada/Daigo Ando 22
- Development of New Hybrid Transaxle for Compact Vehicles
Yutaka Ueno/Shigetsugu Iwata/Yu Hirai/Takashi Matsumoto/Masashi Matsumoto/Yosuke Kurono/Taisuke Warashina 27
- Development of Hybrid System for Compact Vehicles
Hirokazu Tashita/Takashi Uehara 32
- Development of 1.8-Liter Gasoline Engine with Valvematic System for New Corolla in North America
Yukinori Ota/Kiyoshi Yoshinaga/Sunkee Lee/Masaaki Tani 38
- Development of Continuously Variable Transmission (CVT) for New Corolla in North America
Shingo Toyama/Daisuke Niii/Kunio Hattori/Hideaki Takahara/Toshiya Oishi/Takashi Inoue 44
- Outline of the New Powertrain Development and Production Engineering Building
Kaoru Sakamaki/Koji Shiota/Takeshi Kobayashi/Takuya Kusakabe/Satoshi Ashida/
Isao Yanagi/Nagashi Kawai/Masahiko Yahagi 50
- Development of Virtual and Real Simulator (VRS) to Calibrate and Evaluate Hybrid Vehicle
Components without Real Car or Engine
Hikaru Mizuno/Takaya Naono/Hichirosai Oyobe/Hideto Hanada/Koji Shiota 57

▷ Technical Papers/Technical Articles

- Aerodynamic Development of the New Lexus IS
Masaaki Nishiura/Hajime Ichikawa/Shiro Yasuoka 62
- Development to Improve Engine Starting Vibration in Hybrid Vehicle with Low Number of Cylinders
Yoshihisa Jo/Keisuke Ishizaki/Masahito Matsushima 67
- Development of Benefit Estimation Method for Active Safety Systems for Crossing Pedestrians
Based on Accident Scenario Simulation
Edgar Yoshio Morales Teraoka/Shin Tanaka 72
- Feasibility Study of Heavy Rare-Earth-Free Permanent Magnets by Coercivity Mechanism Clarification (1)
– Magnetic Reversal Analysis Using Synchrotron X-Ray Microscope –
Masao Yano/Kanta Ono/Tohru Araki/Akira Manabe/Tetsuya Shoji/Akira Kato 77
- Feasibility Study of Heavy Rare-Earth-Free Permanent Magnets by Coercivity Mechanism Clarification (2)
– Analysis of Local Magnetic Reversal Behavior and Interfacial Structure –
Shinya Nagashima/Akira Manabe/Noritaka Miyamoto/Tetsuya Shoji 81
- Development of FEM Simulation for Arc Welding Distortion
Toshiya Wada/Motohiro Idera/Hitoshi Kuwabara 86
- Development of Dialogue Algorithms and Dialogue Learning Techniques for Nursing Robot
Narimasa Watanabe/Yusuke Nakano 91

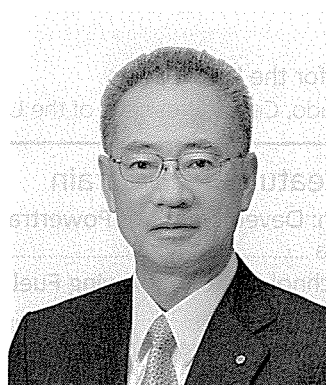
▷ Technical Award News 96

▷ Award-Winning Patents 102

ユニットセンターに 対する思い

取締役副社長（ユニットセンター長）

須藤 誠一



ユニットセンターが設立されて今年の4月で1年が経ちます。

各国のエネルギー政策の絡みやお客様の燃費志向の高まりと共に、ユニットの競争力や多様性がクルマの商品力の鍵を握ることが多くなります。今後技術に根差した経営の主体的役割を果たすため、製品開発・生産技術開発・製造の各機能がスルーで集まってモノづくりに集中し、従来にないスピードで次世代ユニットを開発できる体制にしたのがユニットセンターです。

燃費規制は先進国と同様に中国／インドでも年率4%での強化が想定されると共に、最近では産油国のサウジアラビアなど相当数に上る新興国で規制法規を導入する動きがあり、今後は先進国向けに開発した最新の高性能／低燃費ユニットを世界同時展開する必要性が出て来ています。また環境戦略においてトヨタは経営資源の大半をHV戦略に割いてきました。おかげさまでHVは順調に販売台数を伸ばし、累計販売台数は600万台を超えました。しかし、商品の多様性という点では他社に遅れを取っていることも否めません。欧州では過給エンジンが主力になりつつあり、コンパクトには1L以下のディーゼルの商品化も進んでいます。振り返ってみるとHV以外のユニットでは必ずしも我々に優位性があるわけでない一方、それらの商品を求めているお客様が多くおられることも認識する必要があります。

一方社内の開発現場は規制に絡む開発難易度や、車種ラインナップの多さ故の種類対応に忙殺され、真の競争力向上には充分に手が回っていない現状がありました。

世界各地域のお客様にお答えする『もっといいクルマづくり』を進めていくには、世界一の競争力と魅力あるユニットを幅広く、タイムリーに提供していくことが必要です。そのために仕事の仕方を変える！ユニットセンターの設立の狙いはここにありました。

ユニットセンターでは大きくは次の3つの構造改革を進めています。

- (1) 市場・競合の分析の強化です。真摯に市場調査を通じて自らの身の丈を知った上で、世界で長期に渡り戦える性能目標、コスト目標、技術戦略、供給戦略を策定します。
- (2) 従来の組織の壁を完全撤廃し、意思決定を圧倒的に迅速化します。
- (3) 仕事の進め方の改革です。製品開発～生産技術一体開発により画期的に開発のスピードアップを図ります。

また、ユニットセンターの設立と時を同じくパワートレイン開発棟を開設しました。このビルが建った場所は創業者の豊田喜一郎が日本に自動車産業を興そうという志のもと、『トヨタ AA 型乗用車』の生産を始めた、まさに『トヨタの原点』となる創業の地であります。ここでは材料／工法開発からユニット評価／車両評価に至る一連のプロセス完結が可能で、まさに思いついたアイデアのポンチ絵が一日で試作品になり次の日には評価結果が出るといったやり方を目指し、いろいろな形のトライを進めています。既にシリンダヘッドの従来比 1/10 の短期間試作や、CVT ベルト挙動、AT クラッチ作動、燃焼の可視化技術など今までにない新たな手法の開発が進んでおり、早く適用した製品が出てこないか楽しみです。

またここはトヨタグループ全体の総合力を結集するための協業スペースも用意しており、すでに 16 プロジェクトで各地域事業体メンバーやグループ各社、サプライヤー殿に集まってもらって大部屋活動が進んでいます。

これらの活動を通じて製品開発～生産技術開発～製造をスルーで見ることが出来る人材がどんどん育つと共に、『もっといいクルマづくり』に貢献できる魅力あるユニットを次々と生み出していけるユニットプロ集団をつくるのが私の思いです。

低燃費化に貢献するパワートレイン

Development of Powertrain Technology for Even Better Fuel Efficiency

嵯峨 宏英 *

Koei Saga

1 パワートレイン開発を取り巻く環境

石油の需要は今後も増加を続けると見られている(図1)。主因は、急速にモータリゼーション化が進む途上国の発展である。しかし、エネルギー危機と大気汚染は、世界の成長に伴う深刻な問題になっている。そして、徐々に拡大する需要と供給の乖離は、各国のエネルギー保障政策に影響して、代替燃料の普及を加速させている。

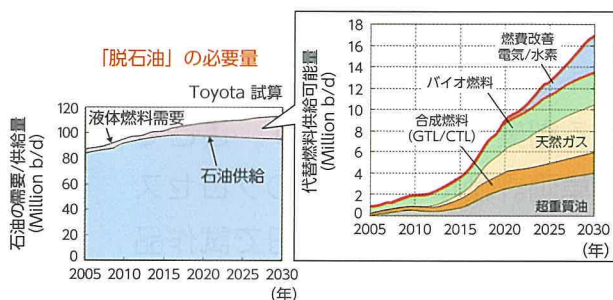


図1 石油需要・供給量

地球温暖化対策と、エネルギー供給対策の双方のニーズから、今後は、先進国だけでなく、途上国を含む全世界で燃費規制が急速に進行する(図2)。同時に、時間差で排気規制も進行するため、世界の市場は、燃料の多様性と燃費・排気規制の地域毎の

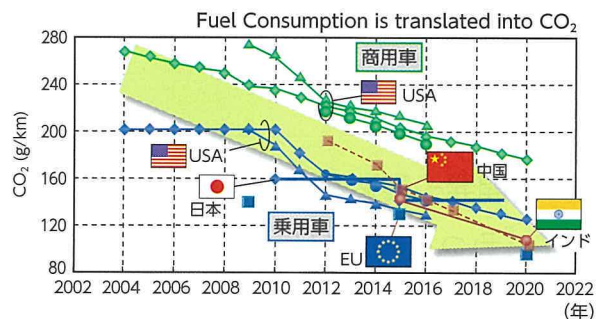


図2 燃費規制動向

対応が必要となる。このような激動の時代を迎え、パワートレインの進化はますます重要な役割を担うことになる。本稿では、トヨタのこれまでのパワートレイン開発の歩みを振り返り、今後の開発の方向性を紹介する。

2 トヨタのパワートレイン開発の歩み

2.1 エンジン

2.1.1 エンジンシリーズ

トヨタのエンジンシリーズの大きな流れとしては、① LASRE エンジン (1981 ~ /S, G 型等)、② Z シリーズ (1997 ~ /NZ, MZ 等)、③ R シリーズ (2006 ~ /ZR, GR) と続いている(図3)。

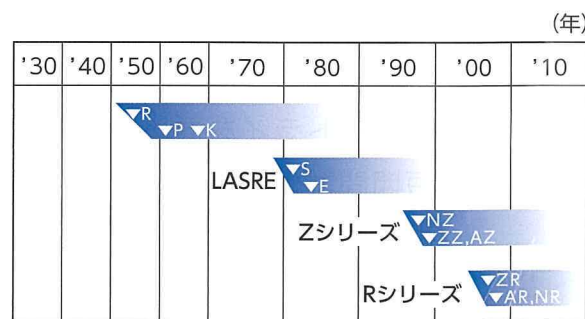


図3 エンジンシリーズの変遷
(ガソリン4気筒乗用車系)

2.1.2 LASRE エンジン (1981 ~ /S, G 型等)

1970 年代に自動車業界にとって非常に大きな技術的試練であった排気規制(米国のマスキー法、日本の S.50 ~ 53 年規制)が実施された。この規制に対して、自動車業界は「三元触媒+ストイキ・フィードバック制御」という技術的なブレークスルーで乗り切ることができた。

その後、排気規制対応で悪化した性能を回復させることを狙って LASRE (Light-weight Advanced Super Response Engine) エンジンが開発された。

* ユニットセンター 副センター長

軽量・ハイレスポンスを狙った中空クランクシャフトや組み立てカムシャフトなどの軽量運動部品や、ローラーロッカー採用等による低フリクション化が徹底して行われた。当時は、吹き上がりの良さと低燃費で好評を博した。

さらに、1986年から従来はスポーツエンジンにしか採用されていなかった4バルブDOHC技術を一般エンジンにまで採用し、ハイメカツインカムエンジンとして量産化した(図4)。4弁エンジンの吸排気効率の素性の良さと、バルブ挟角を立てて燃焼室をコンパクトにすることで燃費と性能の両立を果たした(図5)。

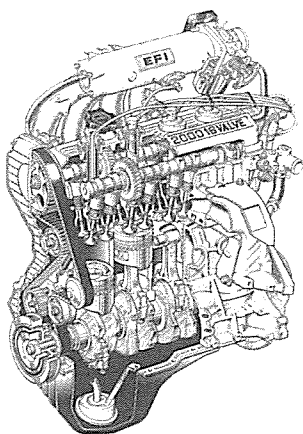


図4 3S-FE

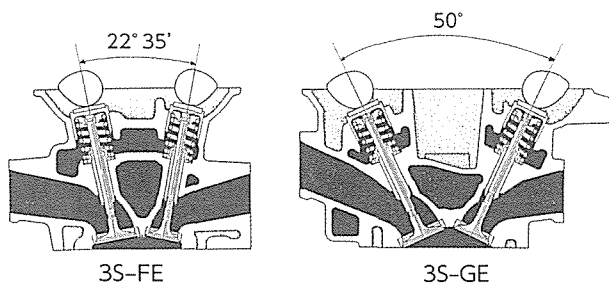


図5 バルブ挟角の比較

シリーズの末期では、D-4(筒内直接燃料噴射)成層リーンバーンやDual-VVT-i(バルブ位相可変機構)など次世代に繋がる技術アイテムを採用したモデルも開発・量産化された。

2.1.3 Zエンジンシリーズ(1997～/NZ, MZ等)

排気規制強化や燃費向上要求からLASREエンジンの更新が計画されZシリーズが開発された。基本構造としては、素性の良い4弁DOHCコンセプトは継承しつつ、斜めスキッシュ採用による燃焼改

善、シリンダブロックのアルミ化による大幅軽量化、カムシャフト駆動のチェーン化による全長短縮等を実現した。さらに、吸気VVT-iやD-4はこのシリーズでは計画段階から採用が検討され量産化に至った。

HV用エンジンもこのシリーズから開発され、熱効率向上を狙ったアトキンソン・サイクルやオフセットクランクなどの新技術が採用された(図6)。

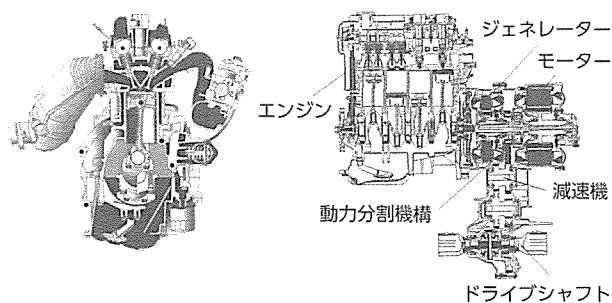


図6 1NZ-FXE, THS 断面図

2.1.4 Rエンジンシリーズ(2006～/ZR, GR等)

2000年代に入ると新興国の経済発展に伴い車の需要が急増した。トヨタの世界販売台数も1,000万台に近づき、エンジン種類の削減とグローバル生産対応が急務となった。

これに対応すべく開発されたのがRシリーズで、ボアモジュールコンセプト採用によりガソリンエンジン種類を13から6種類へ半減させた。

ボアモジュールとはエンジン排気量のバリエーションを揃える際に、エンジンのボア径は変えずに、ストロークを変えて対応しようという設計思想である。シリンダヘッド、シリンダブロック、動弁系部品などは排気量が変わっても共通使用が可能となる。

技術的な特徴としては、吸・排気動弁系ともVVT-iが標準となり、以下の技術が進化を遂げた。可変動弁系は電動VVT-iや連続バルブリフト可変機構(VALVEMATIC:図7)が量産化され、燃料系ではD-4がD-4Sへと発展しARエンジンより大排気量のエンジンに採用が広がった(図8)。HV用エンジンもCooled EGR(Exhaust Gas Recirculation)や電動ウォーターポンプなどの採用により大幅に熱効率が向上した。

さらに、代替燃料(エタノールやCNG)対応エンジンや過給ダウンサイジングエンジンも開発している。

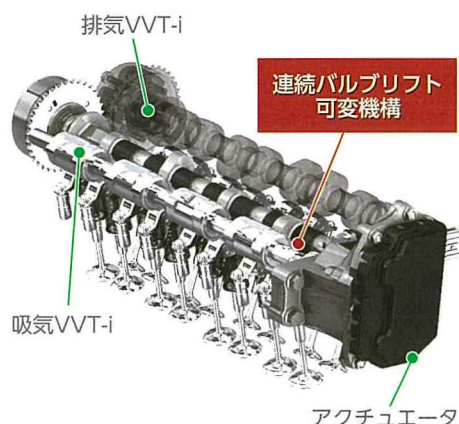


図7 連続バルブリフト可変機構

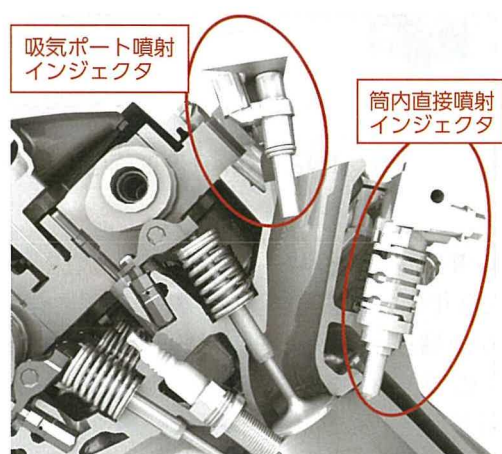


図8 デュアルインJECTIONシステム (D-4S)

2.2 トランスミッション

2.2.1 トランスミッションタイプ

はじめに、トヨタを代表するトランスミッションとして、ダイレクト感があり操作を楽しめるマニュアルトランスミッション（以下MT）、イーゼードライブのニーズに応えるために生まれたオートマチックトランスミッション（以下AT）、エンジン使用領域を最適化し燃費を追求した金属ベルト式無段変速機（以下CVT）の3タイプがある（図9）。

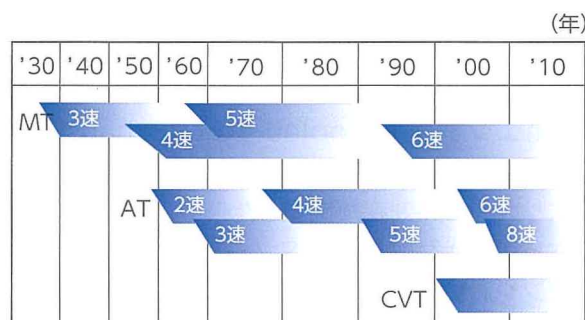


図9 トランスミッションの変遷

いずれのタイプも、動力性能、燃費と静粛性の両立から、多段・無段化かつワイドギヤレンジとなり、エンジン使用領域の適正化を図ってきた。また、動力伝達効率100%を目指して、様々な損失低減技術を導入し、効率向上に取り組んできた。これらの技術はHV用トランスミッションにも導入されている。ここではAT、CVTについて、その歩みを紹介する。

2.2.2 AT

AT開発の歴史は、多段化開発の歴史といっても過言ではない（図10）。1959年2速ATのトヨグライドに始まり、世界初となる4速ATを1977年に製品化した。エンジン使用領域を適正化するため、変速点を電子制御化した『ECT』や高品質な変速を実現するエンジンとの統合制御が導入されている。そして2006年、再び世界初となる8速ATを量産化した。

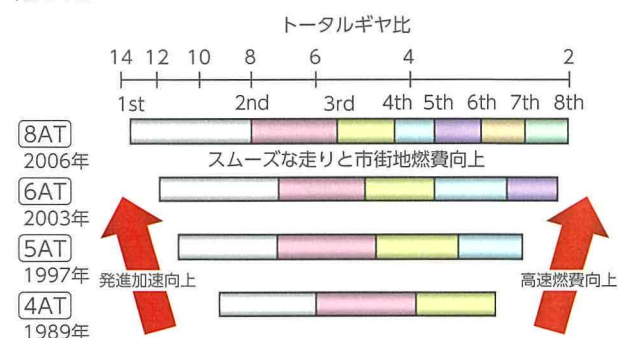


図10 LEXUS LSにおけるAT多段化の推移

そして、一般的には多段化によって変速段を構成するプラネタリギヤセット数と湿式摩擦材のクラッチやブレーキ等の係合要素数が増加傾向にあるが、高度な電子制御技術によって、その最小化を実現している（図11）。

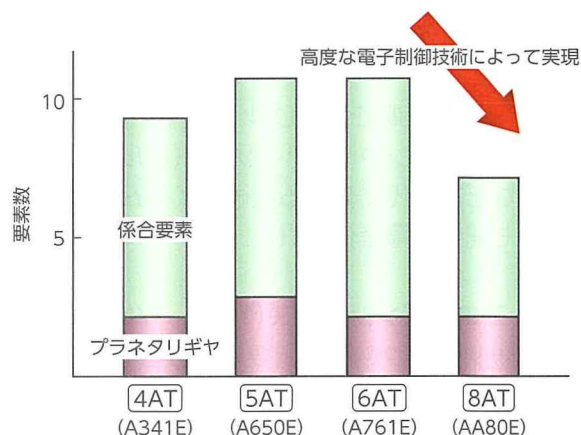


図11 AT構成要素数の推移

また、トルクコンバータ（以下、TC）では、ロックアップクラッチによる直結化や、当時世界一の伝達効率を実現したスーパーフロー TC も製品化した。そして、低車速域から直結に近い伝達効率を実現する H ∞ 制御理論を導入したフレックスロックアップや、発進車速域からのフレックススタートを開発している。

他にも損失低減技術として、非係合状態の係合要素等の引き摺り損失を低減するために、低温粘度が従来の半分以下の最も低粘度な ATF（Automatic Transmission Fluid）を導入した（図 12）。

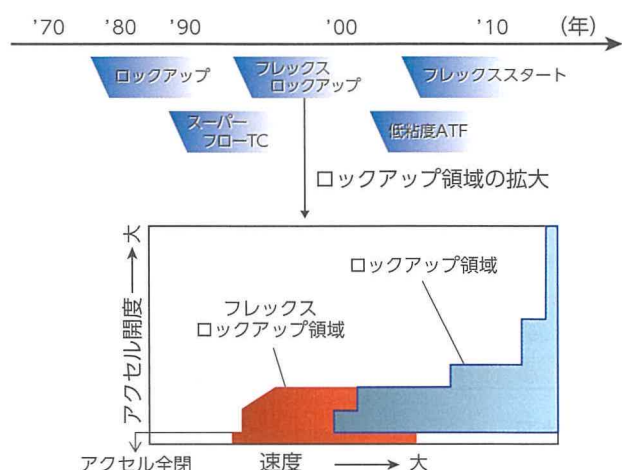


図 12 主な AT 伝達効率向上技術

2.2.3 CVT

2000 年、無段変速機能を最大限生かすため、エンジン使用領域を常に燃費最適となるようエンジンと CVT の協調制御を採用し、大幅に燃費性能を向上させ量産化した。発進装置には TC を用い、発進加速性能と登坂性能を確保し、AT と同様な発進フィーリングを実現するとともに、ダンパーはねじれ角を大きくとったロングトラベルタイプを採用し、低車速・エンジン低回転でのロックアップを可能とし、伝達効率向上に貢献している（図 13）。

製品化当時は、BOSCH 製の金属ベルトを採用していたが、2003 年より CVTEC 製に切り替え、ベルト自身の伝達効率向上を図っている。

更には、エンジンアイドル時の燃料消費を低減させるために、Dレンジ停車中に前進クラッチを開

放させる『ニュートラル制御』や、自動変速機用アイドルストップ機構を採用し、ともに燃費性能向上に大きく貢献した。

他の損失低減技術として、2012 年、世界初の同軸 2 ポートオイルポンプシステムを採用した。吐出ポートを高圧と低圧の 2 系統備え、吐出圧を可変に切り替えてポンプ駆動トルクを低減させた（図 14）。

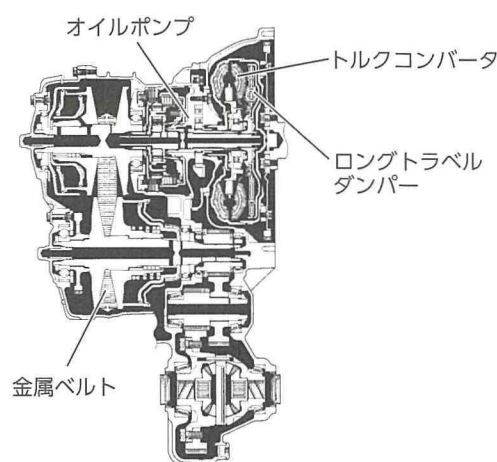


図 13 CVT (K110) の断面図

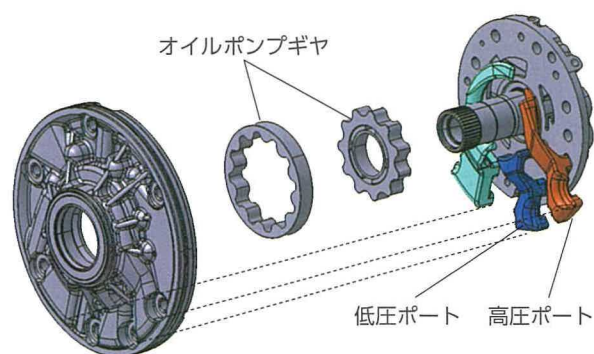


図 14 オイルポンプの駆動トルク低減技術

2.3 ハイブリッドシステム

2.3.1 ハイブリッド車（HV）の開発と展開

エネルギー、環境問題への対応の一つの解として開発してきた HV の展開状況を（図 15）に示す。

その中でも 1997 年に発売した初代プリウスに搭載したトヨタ・ハイブリッド・システム（THS）をすべてのカテゴリーに展開し、グローバルの累計販売台数は 2013 年 3 月に 500 万台に達した。

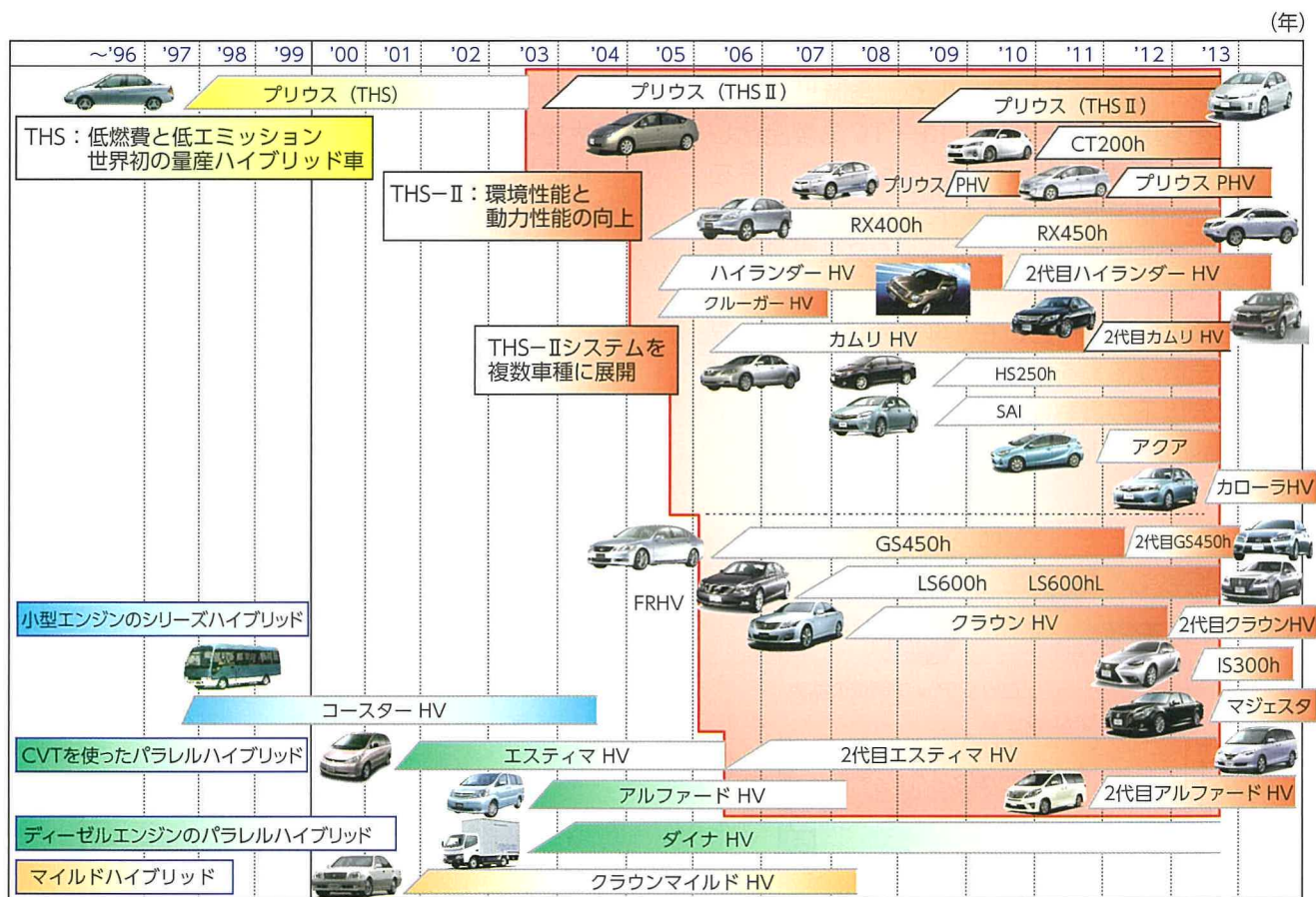


図 15 HV 開発と展開状況

2.3.2 プリウスのハイブリッドシステムの進化

ここでは、THS の構成・特徴と 2 度のモデルチェンジを行ったプリウスの各世代での技術進化について説明する。

THS は、モータ、発電機、およびエンジンが接続される動力分割機構（プラネタリギヤ）、直流／交流の電力変換を行う PCU（パワー・コントロール・

ユニット）と電池から成るシリーズパラレルハイブリッドシステムである（図 16）。

このシステムは、高効率なアトキンソン・サイクルエンジンを搭載、エンジン運転時は熱効率の高い動作点で動かし、熱効率が低い領域ではエンジンを停止してモータのみで走行、減速時には運動エネルギーをモータで電気に変換して電池に回生し、燃費を向上させている（図 17）。

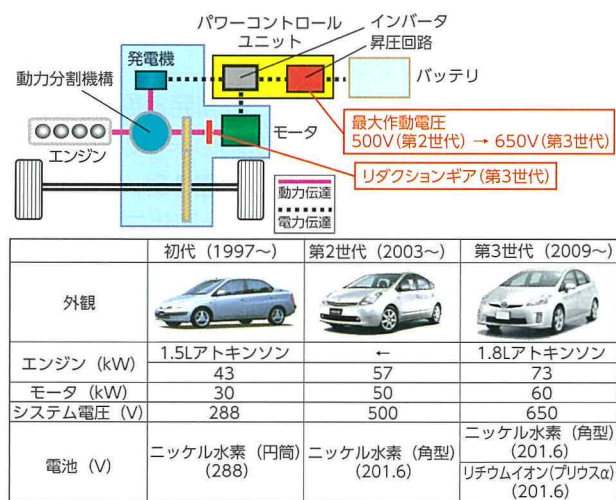


図 16 プリウスの各世代比較

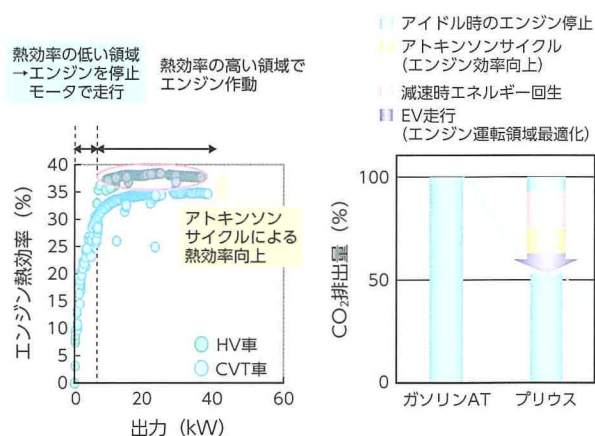


図 17 THS の燃費向上

第2世代では、高電圧化する昇圧回路をPCUの中に組み込み、電池電圧を500Vに昇圧してモータ・インバータを大出力化し、ユニットの小型・軽量化、損失低減を行った。

また、ニッケル水素電池セルを円筒型から直方型に変更し、角型のモジュールを構成して性能向上とパックの小型・軽量化を図った。

第3世代では、PCUのパワー半導体 (IGBT) を放熱グリス無しで冷却する直接冷却構造を開発して性能向上し、インテリジェント・パワーモジュール (IPM) の小型化を実現 (図 18)。また電池電圧を650Vまで昇圧し、さらにモータのリダクション機構を組み込んで高回転化し、更なる小型・低損失化を行った (図 19)。

PCU の出力密度は初代の2倍になり、モータの体格は初代の1/2になった。

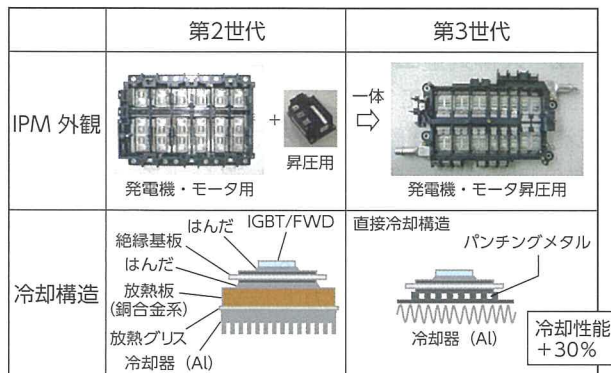


図 18 IPM の進化

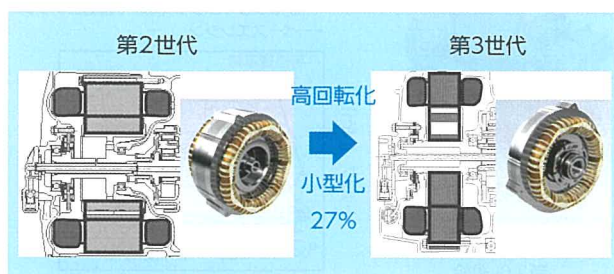


図 19 モータの進化

電池については、内部抵抗を低減するなどの改良を行い、初代の240セルから第3世代では168セルまで減らし、電池パックを大幅に小型化した。

システム出力については、初代から第3世代で約1.6倍の100kWまで引き上げ、燃費の向上だけでなく加速性能との両立も行った。

また派生車のプリウスαでは、ニッケル水素電池の約3倍の平均電圧を持ち、出力密度・エネルギー

密度が優れるリチウムイオン電池を新たに開発して搭載し、性能を向上しながらセル数を減らしてユーティリティスペースを確保した。

ここまでの電池セルの進化を示す (図 20)。

車両	初代 プリウス	第2世代 プリウス	第3世代 プリウス	プリウスα
電池形状	円筒 (金属電槽)	角型 (樹脂電槽)	角型 (樹脂電槽)	角型 (金属電槽)
電圧 (V)	7.2 (6セル直列)	7.2 (6セル直列)	7.2 (6セル直列)	3.6 (単セル)
容量 (Ah)	6.5	6.5	6.5	5.0
出力密度 (W/kg)	800	1,000	1,300	2,950
エネルギー密度 (Wh/kg)	43	46	46	73
質量 (g)	1,090	1,050	1,040	245
外観				

図 20 電池の進化

プリウスは、さらなる低燃費・低排出ガスを実現するために、外部充電によって電気で走行できる距離を延ばし、またゼロエミッションであるEVの長所と航続距離を確保できるHVの長所を併せ持つプラグイン・ハイブリッド車 (PHV) へと進化した (図 21)。

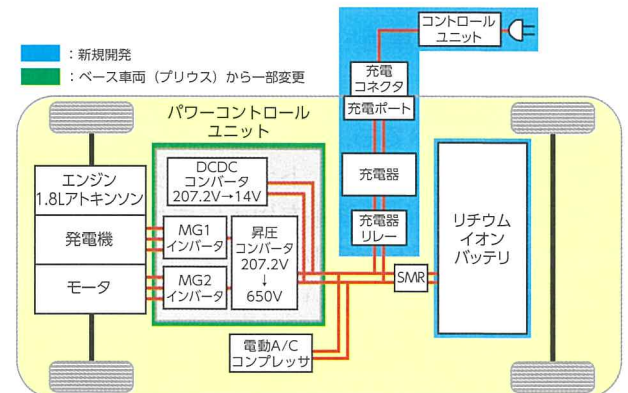


図 21 PHV システム構成

国内の一般のお客様の走行距離の調査では、過半数が日当たり20km以下の走行であり、それを考慮して高エネルギー型のリチウムイオン電池を搭載。従来車からHVにすることで約50%のガソリン消費が削減できるが、PHV化することで20kmのEV走行が加わり、さらに24%（合計74%）を削減した。

3 次世代パワートレーンの今後の取組み

将来の自動車は、世界市場の多様性に対応しながら、燃費向上を達成していくことが至上命題となる。そのためにパワートレーンが車両としてのシステム効率を最大にすることが重要である。

従来車では、①エンジン熱効率向上と高熱効率領域の拡大、②トランスミッション伝達効率の向上、③車両の動作域分布をエンジンの効率の高いところへ持っていくことが、システム効率向上の基本となる。

ハイブリッド車では、上記のエンジン熱効率向上、伝達効率向上に加えて、①モータのみの走行域の拡大、②回生領域の拡大、③エンジン運転時の動作点最適化、④電池への充放電を利用した動作点制御によりシステム効率を引き上げていく（図 22）。

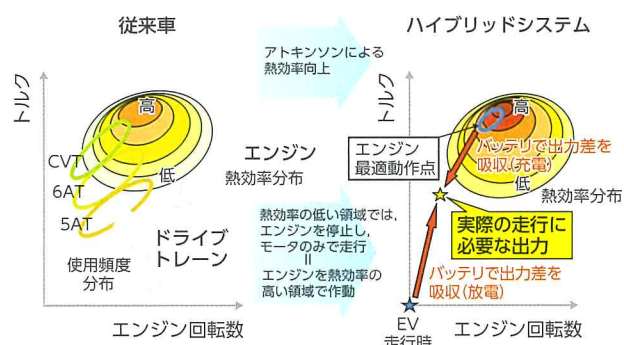


図 22 車両・システム燃費改善

後の開発においても、これら基本は変わらない。次世代で目指すエンジン、トランスミッション、ハイブリッドシステムの詳細を以下に述べるが、これらが連携し、車両トータルでのパワートレーンシステム効率の向上を図っていく（図 23）。

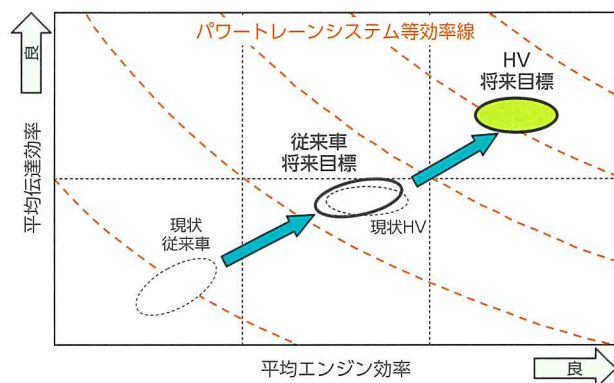


図 23 将来パワートレーンシステム効率目標

3.1 次世代エンジン

3.1.1 次世代エンジンの取り組むべき課題

次世代エンジンの主な課題としては、

- ①燃費向上（CO₂削減、石油消費低減）
- ②排気規制強化対応（北米のLEVⅢ等）
- ③代替燃料対応（アルコール、CNG、H₂等）
- ④性能向上（Fun to Drive）
- ⑤電動車両対応（HV/PHV/EV）

と非常に多岐にわたる。EVやFCといった次世代車両の技術レベル向上や社会インフラが整備されるまでは、内燃機関を主軸とする全方位的な技術開発が必要と考えられる。

以下に、一番重要な『燃費向上』について記述する。欧州を中心にHV車も含めて過給ダウンサイジングを全面展開していくOEMもあるが、前述の通り車両と駆動を含めたシステム全体で考えた最適なエンジン技術を選択・開発することが重要である。

3.1.2 大排気量エンジン搭載車両

この場合は、エンジンの熱効率が良い領域とエンジン使用領域が離れているために熱効率の良い領域を使用領域である低負荷側に移動することが重要である。過給ダウンサイジング（図 24）や可変気筒といった技術が有効となる。ただし、過給エンジンではノッキングの悪化から圧縮比を下げる必要があり最大熱効率は低下し高負荷域では燃費が悪化する。そこで、さらなる燃費向上には次の項で示すようなアイテムで熱効率自体の向上が必要となる。

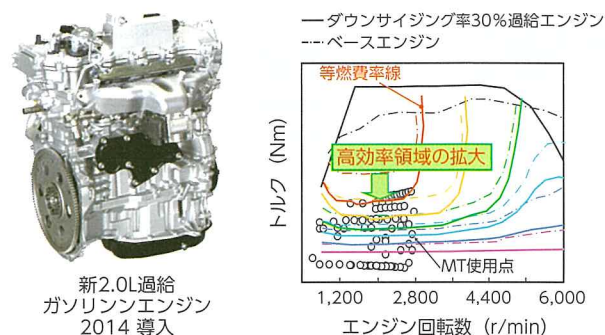


図 24 新 2.0L 過給ガソリンエンジン

3.1.3 小中排気量エンジン搭載車両

この場合はエンジンの熱効率の良い領域と使用領域が近いので、エンジンの最大熱効率自体を向上することが車両燃費改善に重要となる。最大熱効率を向上させるには、まずはエンジン本体の効率を向上させ、それでも捨てられてしまう排気熱は廃熱回収していくというのが大きい方針となる（図 25）。

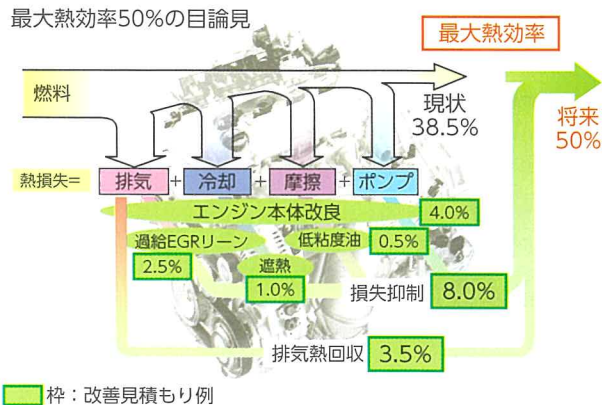


図 25 最大熱効率向上シナリオ

本体の熱効率向上には圧縮比アップの効果が大きい。ただし、ノッキングの発生を防止するため燃焼室壁温や吸入空気冷却や、乱れ強化による急速燃焼などの技術開発が必要となる。HV用エンジンで採用しているアトキンソン・サイクルもノッキング回避に有効だが性能が低下してしまう。そこで、将来的には可変圧縮比機構の開発も必要と考える。

また、燃焼温度低下による冷却損失低減をねらった Cooled-EGR や比熱比を向上させるエアリーンバーンも次世代エンジンのキー技術として開発を進めている。また、ひとつひとつの効果は小さいが、クランクシャフトの細径化などの低フリクション技術も重要となる（詳細は次論文“ガソリンエンジンの低燃費化技術”を参照）。

さらに廃熱回収技術として、熱電素子やランキンエンジンといったものも研究中である。

現在トヨタのエンジンの最高熱効率は約 40% を実現しているが、上記のような技術開発シナリオで将来的には 50% 達成を目標に開発を推進している（図 26）。



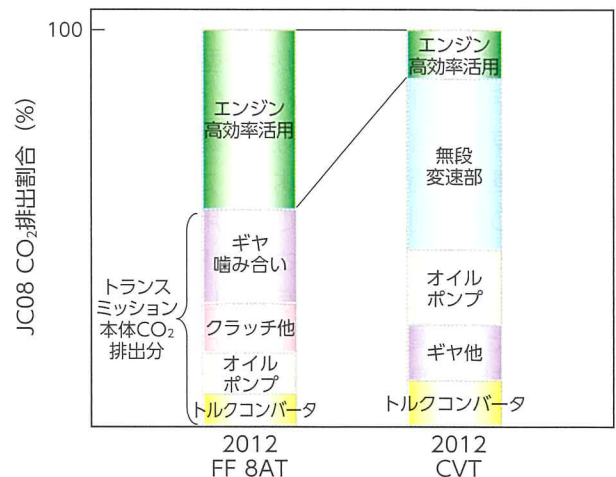
図 26 最大熱効率 50% に向けて

3.2 次世代トランスミッション

次世代トランスミッションにおいても、エンジンのパワーを余すことなく使いきる役割に変わりはなく、具体的に取り組むべき課題は、次のとおりと考えられる。

- ①伝達効率向上
 - ②エンジン熱効率の良い領域と使用領域が近づくようワイドギヤレンジ化
 - ③エンジン低回転化と少気筒化に対応する振動抑制技術
 - ④スムーズでダイレクトな走りを実現するギヤステップ、低慣性化
- など多岐にわたる。

JC08 モード走行時のトランスミッション系の CO₂ 排出割合を示す（図 27）。

図 27 AT・CVTのCO₂排出割合

CVTは既にエンジン高効率領域をほぼ活用しており、今後は無段変速部やオイルポンプなどの損失低減が重要である。CVTベルトの高効率化、作動油圧の低圧化や必要流量の低減などが求められる。ATは大排気量車を中心に、更なるワイドギヤレンジによるエンジン使用領域の改善や構成要素数増加の最小化、高効率歯車や係合要素の低フリクション化などが求められる。このような技術を、よりコンパクトに実現できるトランスミッションタイプが今後も競争力を保つことができると考える。

また、エンジンの低回転化や少気筒化も進むと思われる、その振動抑制を低慣性で実現させる技術開発も重要なポイントである。

現在トヨタのトランスミッションは伝達効率向上技術により CO₂ 排出量半減を目指し、HV システム同等のシステム効率を目標に開発を推進している。

3.3 次世代ハイブリッドシステム

先に述べた次世代エンジンの熱効率、トランスミッションの伝達効率向上は、将来のハイブリッドシステムのシステム効率向上にそのまま寄与するが、他のハイブリッドユニットについても進化が必要である。取り組むべき課題は、小型・軽量化、低損失化、そしてシステム効率最大化である。

モータは高回転化による小型化を進めながら、電磁鋼板の鉄損やコイル線で発生する銅損の低減、サージ耐圧向上、レアアースの削減などを進める。

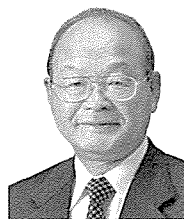
PCU は、パワー半導体の進化 (Si, SiC 素子など) に合わせて制御の高周波化による損失低減と部品の小型化を進める。衝突時の課題も踏まえ PCU 全体の小型化と出力密度向上による熱課題を解決する冷却技術の向上も不可欠となる。

電池については、車両の使用環境や特性に合わせて、ニッケル水素電池とリチウムイオン電池を使い分け、さらに出力型・エネルギー型電池の基本特性 (密度) を引き上げることが、HV のみならず PHV や他電動車両も含めた性能向上の鍵となる。

これら基盤技術の革新により、さらなる CO₂ 低減、石油の使用削減に向けて、実用的な EV での走行距離とコストがバランスされた PHV の普及が進むと思われる。また災害時等に際して、外部への給電も含めた充放電装置、利便性を考えた非接触充電・給電装置の開発も重要である。

以上、述べてきた次世代のハイブリッド関連のコア技術は、電気自動車や燃料電池車へと展開が進む。

■著者



嵯峨 宏英

4 まとめ

環境問題とエネルギー問題が、法規制や商品性の波となって、地球全体の全ての地域で進行している。その結果、自動車を取り巻く環境は日々、複雑さを増していると言っても過言ではない。自動車は、過去もそうであったように、これらの波を乗り越えて行くはずであり、トヨタはその先頭に立って、地球社会全体に貢献して行く所存である。

ガソリンエンジンの低燃費化技術

Engine Technology for Improving Fuel Economy

中田 浩一*

Koichi Nakata

特
集

要旨

自動車の低燃費化には、動力源であるエンジンの熱効率向上が大きく貢献する。トヨタでは初代のプリウス用のエンジンから熱効率を高めることに重点を置いた開発を行い、現在では、アトキンソンサイクル、Cooled EGR (Exhaust Gas Recirculation)、電動ウォーターポンプ、低フリクション技術などを採用することで、最高熱効率を 38.5% にまで高めてきた。将来的にもエンジンの熱効率を高めることの重要性はますます高まり熱効率 50% の技術開発を目指しつつ、短期的には、ハイブリッド車用エンジンは言うに及ばず、従来車用エンジンの熱効率も 40% 以上にまで高めていくことになるであろう。そのためには、燃焼技術をはじめとして低フリクション化や動弁系技術の改良などがますます重要となる。本報では、燃焼技術の改良が熱効率向上に寄与することを中心に、将来の開発の方向性を論じる。また、トヨタは今後これらの低燃費化技術を有するエンジンを ESTEC (Economy with Superior Thermal Efficient Combustion) エンジンと称し、市場に導入していくことでサステナブル・モビリティの実現に貢献していく。

Abstract

Enhancing engine thermal efficiency is an important means of improving vehicle fuel economy. Over the course of engine development for the Prius, Toyota Motor Corporation has raised engine thermal efficiency to 38.5% by adopting the Atkinson cycle, cooled EGR, an electrical water pump, and low friction technology. Engines with higher thermal efficiency will become even more important in the future and technological development is under way with the ultimate aim of achieving an efficiency of 50%. In the shorter term, however, these existing efficiency improvement measures will be generally adopted in conventional as well as hybrid vehicles to help boost the thermal efficiency of all gasoline engines to more than 40%. To accomplish this goal, combustion, low-friction, and valve train technologies will play an increasingly important role. This article describes the future direction of gasoline engine development, focusing on the effects of faster combustion on thermal efficiency. Toyota applies the description "economy with superior thermal efficient combustion" (ESTEC) to engines that incorporate these technologies and is continuing to make every effort toward achieving sustainable mobility by installing these engines in mass-production vehicles for the market.

キーワード 燃焼, 低燃費, 熱効率, アトキンソンサイクル, EGR

1 はじめに

近年、エネルギーセキュリティや気候変動の問題から、各国の燃費規制が厳しくなるなど自動車の燃費低減が強く求められている。自動車の燃費低減には、動力源として機能するエンジンの熱効率向上は大きく貢献する。トヨタはこれまでに、ハイブリッド車用のエンジン開発としてエンジンの熱効率向上に焦点をおき、エンジン開発を推進してきた。また、将来的には理論熱効率を目指す技術開発を推進する中で、得られた技術をハイブリッド車用エンジンに加えて従来車エンジンにも展開することで、自動車の低燃費化に大きく貢献していけると考える。

自動車としては、低燃費化の要求に応えるのと同時に、性能向上も図り、“Fun To Drive” も高次元に両立させていくことも求められる。これらを実現していくには、フリクション低減や動弁系改良などのエンジンの基盤技術に加えて、燃焼技術を進化させていくことが求められる。そこで、本稿では将来の熱効率向上の方向性を論じるとともに、燃焼を促進することによる EGR 限界の拡大効果やノック改善効果も紹介する。また、これらの技術は、最高熱効率を高めるだけでなく、自然吸気ガソリンエンジンの弱点である部分負荷の燃費も大きく改善することから、現在、普及が進んでいる過給ダウンサイズエンジンに対しても燃費面で優れると考えられるので、その可能性を論じる。

* エンジン先行統括室

2 熱効率の歴史と将来の方向

図1にガソリンエンジンの熱効率の歴史と将来の方向性を示す。ハイブリッド車用エンジン開発において、前述したように、最高熱効率を38.5%にまで高めている⁽¹⁾。そして、将来的には、エンジンの理論熱効率に限りなく近づけることが求められるために、熱効率50%を目標として開発を進めている。

短期的には、ハイブリッド車用エンジンの熱効率向上技術を従来車にまで拡大して低燃費化に貢献していくことは言うまでもないが、更に、燃焼技術をはじめとして低フリクション化や動弁系技術の改良を進めて、ハイブリッド車用エンジンに加えて、従来車用エンジンでも最高熱効率を40%以上に高めていくことが必要となる。これらの技術は最高熱効率を高めるだけでなく部分負荷の効率向上も可能であり、自然吸気ガソリンエンジンの弱点も克服していくことになる。

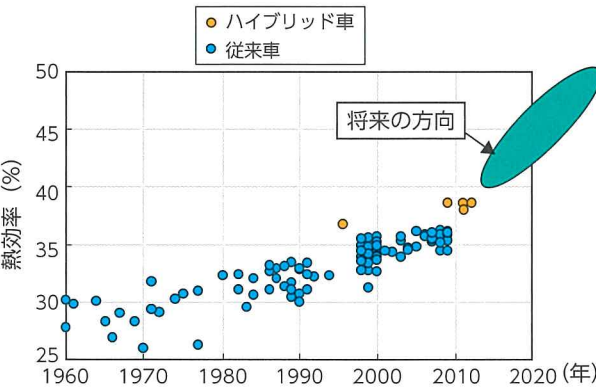


図1 熱効率の歴史と将来の方向

3 熱効率の向上手法と将来の取り組みの方向

この章では、ガソリンエンジンの効率向上手法を記した後で、ハイブリッドエンジンを事例にして今後の方向性を論じる。

ガソリンエンジンの熱効率は、理論的には次に示すオットーサイクルの式を用いて表現される。この式(1)より、熱効率を高めるためには膨張比を高めることが判る。エンジンにおいての具体的な取り組みとしては、前者は機械圧縮比を高くすることや、排気バルブを開くタイミングを遅らせることになる。この手法については、ハイブリッド車用エンジンを始めとして採用が拡大しつつある。後者について

は、リーンバーン⁽²⁾が有効であるが、現時点ではNOxの課題があることから、普及は限定的になっている。

$$\eta_{th} = 1 - \varepsilon^{\kappa-1} \quad \dots\dots\dots (1)$$

η_{th} : 理論熱効率 ε : 膨張比(圧縮比)

κ : 比熱比

次に、実際のエンジンで発生する各種損失を示す。実際のエンジンでは図2に示すように摩擦損失、ポンプ損失、冷却損失、排気損失、未燃損失がある。また、エンジンの負荷が高くなると、ノックが発生することから点火時期を遅らせることになり排気損失の増大につながる。熱効率向上のためには、これらの損失を低減していくことが重要となる。

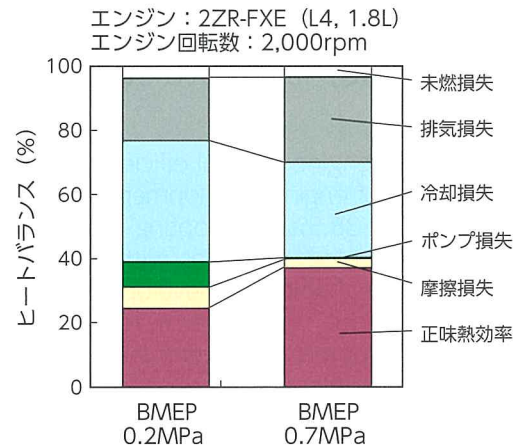


図2 ヒートバランス

ここでは、各種損失を低減するための代表的な取り組みを記す。

摩擦損失の低減はエンジンの熱効率向上を支える基盤技術の一つであり、ボアの変形抑制や表面処理技術の改良、オイルポンプの改良などの技術開発が行われてきた。図3にはフリクションの推移と代表的な取り組み例を示す⁽³⁾⁽⁴⁾。

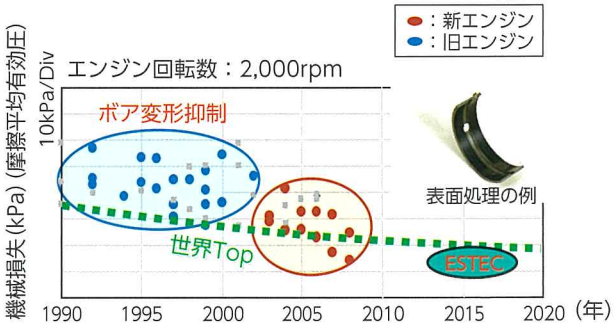


図3 フリクションの推移

ポンプ損失を低減する方法としては、動弁系を活用する手法や燃焼面からの取り組みがある。動弁系としては、これまでに広く普及してきた位相を可変にする手法や、バルブのリフト量を可変にする手法⁽⁵⁾がある。また、燃焼面ではEGRの活用やリーンバーンなどがある。EGR活用やリーンバーンは燃焼温度が低下することから、冷却損失も低減する効果があり、これらの燃焼限界を拡大することで燃費低減の可能性が大きく高まる。

冷却損失の低減には、上記のように燃焼温度を下げることに加えて、エンジンのボア、ストロークの見直しを図ることで、ロングストロークに設定し、燃焼室の容積に対する表面積の割合を小さくすることや、燃焼室の設計を見直し、燃焼室面積を小さくしていくことも有効である。

排気損失を低減する手法としては、前述のように膨張比を高めることが有効である。しかし、膨張比を高めるために圧縮比を高める手法を用いると、ノック対策が併せて重要となる。

ノック対策としては、直噴の活用⁽⁶⁾や冷却系の改良による各部の冷却強化が効果的である。直噴は、筒内の冷却効果が大きいことからノック改善だけではなく、吸入空気量が増すことから性能向上にも繋がるために採用が拡大している。一方で、後者の手法においては、冷却損失の増大にもつながることから、ノック対策と冷却損失低減の両立を図る取り組みが必要になる⁽⁷⁾。図4では、上記で紹介した動弁系と直噴の採用経緯を示す。

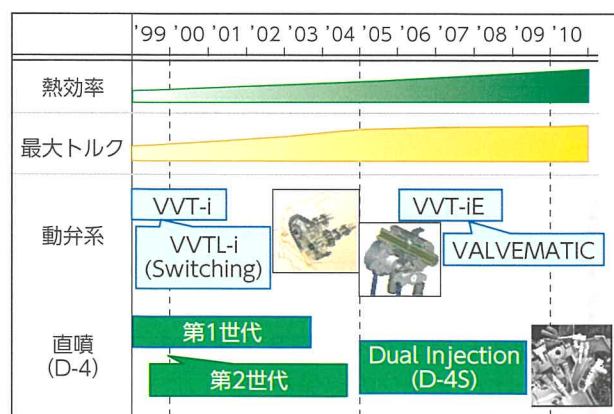


図4 要素技術の採用例

実際のエンジン開発において熱効率を高めるために取り組んできた技術と熱効率向上のために将来的に取り組むべき技術の方向を、ハイブリッド車用エンジンを例に図5で紹介する。初代のエンジンにお

いて熱効率向上のために大きく貢献したのは、高膨張比化とノック対策を両立させるために採用したアトキンソンサイクルと低フリクション化であり、最高熱効率37%を実現した。そして、この技術を核として、Cooled EGRや電動ウォーターポンプを採用することでノック改善や冷却損失低減、フリクション低減が実現したことから、現在のエンジンでは最高熱効率を38.5%にまで高めることが出来た。この開発の中で、EGR技術が、従来のように部分負荷でポンプ損失低減に使えるだけでなく、高負荷域ではEGRを冷却することでノック改善に活用できることが判るなど大きな進化を図ることができた。

将来的には熱効率50%を目指していくが、短期的にも、熱効率向上を追及することの重要性は高まっていることから、ハイブリッド車用エンジンに加えて従来車用エンジンの熱効率も40%以上にまで高めていくことがエンジン開発の方向となるであろう。

この要求に応えるためには、これまでに論じたように、ポンプ損失、冷却損失、ノック改善などに大きく寄与する燃焼改善が大きな意義をもつと考えられる。次章では、将来的に燃費改善や性能向上に寄与すると考えられる燃焼促進効果についてEGRの事例を用いながら紹介する。

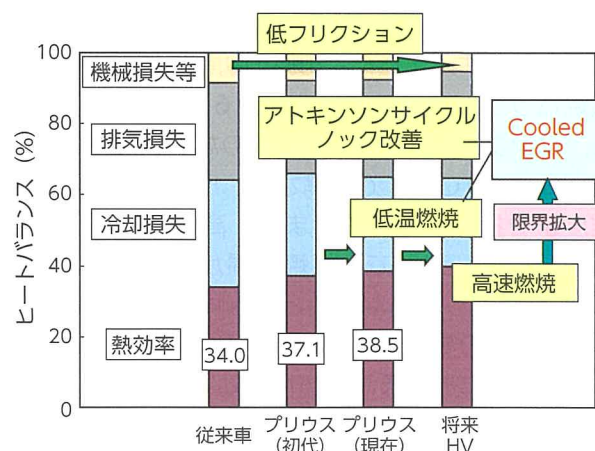


図5 技術の方向性

4 燃焼促進の手法

EGR活用やリーンバーン技術において、その効果を最大限活用するためには、速い燃焼を実現することが最も効果的である。燃焼を促進する方法としては、筒内での強い乱れ生成を狙いスワール、

スキッシュ、タンブルの検討がなされてきた。以下に、これらの特徴を示した上で、将来の主流となる技術の検討例を紹介する。

スワールを生成するには、吸気系にSCV (Swirl Control Valve) のような追加アイテムが必要となるが、回転数が高くなるとポンプ損失を伴うことから、エンジンの高性能化には適していない。また、スキッシュはピストンが上死点近傍にある時に、ヘッドとピストンの間で強い気流を生成することから、ボア近傍でのノック抑制には効果が見られるが、EGR 限界の拡大やリーンバーンの希薄燃焼の限界の拡大には大きな効果を期待出来ない。他方で、タンブルはポート形状の工夫によって、筒内での乱れ促進と空気の流量確保が最も両立させやすいために、次世代の主力技術になると考えられる。

本稿では、タンブル活用における燃焼限界の拡大事例やノック改善の検討例とともに、熱効率向上効果を記す。

4.1 高速燃焼による EGR 限界拡大

タンブルの効果を確認するために、量産エンジンのポートに小変更を行うことで、燃焼促進の効果を確認した。なお、本稿では、燃焼促進については高速燃焼と記すこととする。

表 1 にエンジン諸元を示す。図 6 に部分負荷において高速燃焼による EGR 限界の拡大効果と燃費の改善率を示す。また、この時の初期燃焼と主燃焼の燃焼バラツキを図 7 に示す。図 6、7 から判るように、タンブルを高めると EGR のない状態での主燃焼期間は 20℃A まで短縮され、EGR 限界が 30% 程度まで拡大していく。また、高タンブルにした時の EGR 率 20% での燃焼期間が、低タンブルで EGR を導入していない時とほぼ同程度であり、高タンブルでの高速燃焼の効果が確認できる。

燃費改善における高速燃焼の効果としては、同じ EGR 率でも燃費が改善されることに加えて、EGR 限界が拡大することが大きく寄与していることが判る。

表 1 エンジン諸元

エンジン	2ZR-FXE
気筒数	4
ボア×ストローク	80.5mm×88.2mm
排気量	1,796cc
圧縮比	13
燃料供給	PFI

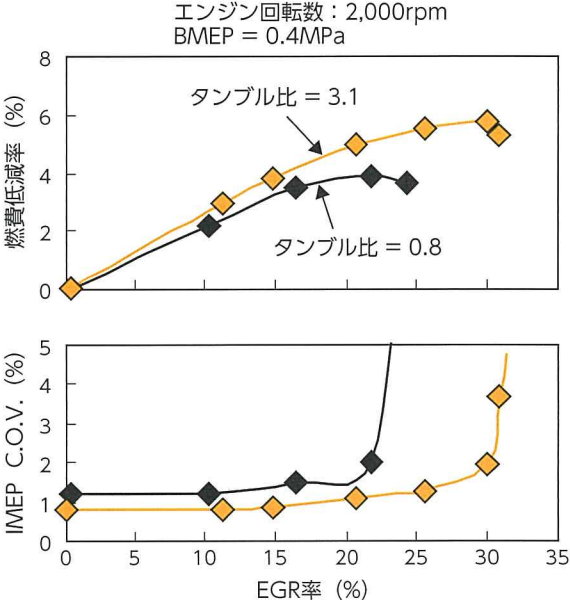


図 6 高タンブルの効果

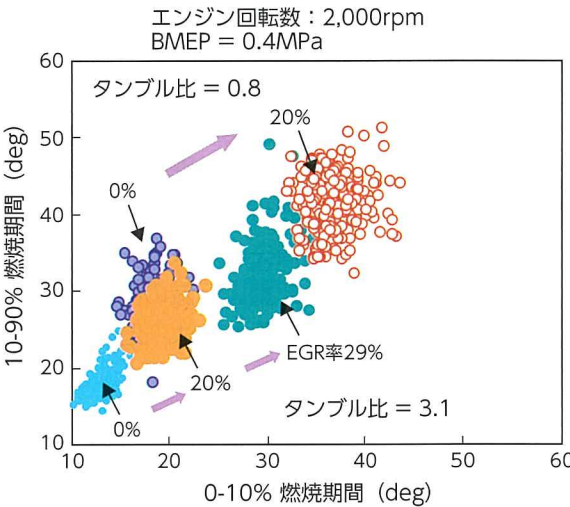


図 7 EGR 率と燃焼期間

4.2 高速燃焼によるノック改善効果

燃焼を促進し高速燃焼を実現すると、燃焼限界を拡大することで燃費が改善する効果に加えて、ノック改善効果も見られる。図 8 に種々のエンジンでタンブル比とノックの関係を検討した結果を示す。なお、エンジン間でのノックの比較をするのは容易ではないので、図 8 は 1 つの指標として表記してある。図 8 より、タンブル比を高めて高速燃焼を実現することで、ノック改善効果が大きくなることが判る。これは、燃焼を速くすることで、未燃部でのノックに繋がる化学反応時間を短くすることが可能となるためである。

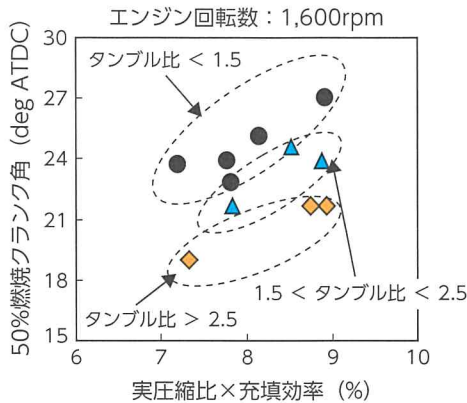


図8 タンブル比とノックの関係

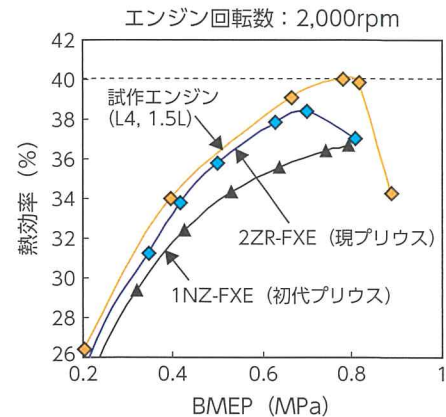


図10 熱効率検討結果

4.3 高速燃焼と最高熱効率

高速燃焼を行うことで EGR 限界が拡大する効果とノック改善効果があることが判った。高負荷域において Cooled EGR の活用を想定すると、これらの相乗効果が期待出来ることから、1.5L エンジンを試作して高速燃焼が最高熱効率に与える影響を検討した。エンジンの諸元を表2に示す。

表2 エンジン諸元

エンジン	試作
気筒数	4
ボア×ストローク	72.5mm×90.6mm
排気量	1,496cc
圧縮比	13
燃料供給	PFI

図9にこのエンジンの EGR 特性を示す。このエンジンでもタンブルを高めることで EGR 限界が30%程度にまで拡大出来ていることが判る。また、このエンジンを用いてのエンジン負荷と熱効率の関係を図10に示す。ここでは、初代プリウス用エンジン、現行プリウス用エンジンのデータも参考に載せてある。高速燃焼を行い Cooled EGR の効果を高めることで、ガソリンエンジンにおいても $\lambda = 1$ 運転で最高熱効率を40%以上に高めることが可能であることが判る。

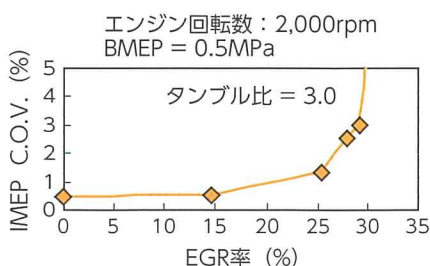


図9 高タンブルの効果

4.4 自然吸気ガソリンエンジンの可能性

自然吸気ガソリンエンジンを部分負荷で運転すると図5に示すようにフリクション損失、ポンプ損失、冷却損失があることから、高負荷運転に比べて熱効率は低くなる。部分負荷で運転された場合の燃費の改善手段として、欧州を中心に過給ダウンサイズエンジンが普及している。

排気量を小さくした場合の効果を示すための例として、自然吸気の2Lエンジンと2Lエンジンを相対的に1.6Lにした時の熱効率マップを図11に示す。排気量を小さくした時には低トルク域で熱効率が高くなることから、部分負荷を用いるような車両では排気量を下げると燃費が良くなるのが判る。一方で、実際の過給エンジンはノックが厳しくなることから圧縮比を下げたり、筒内の燃焼圧力が高くなることからフリクションが高くなったりしており図11に示すような効果を全て得ることは難しいのが実情である。

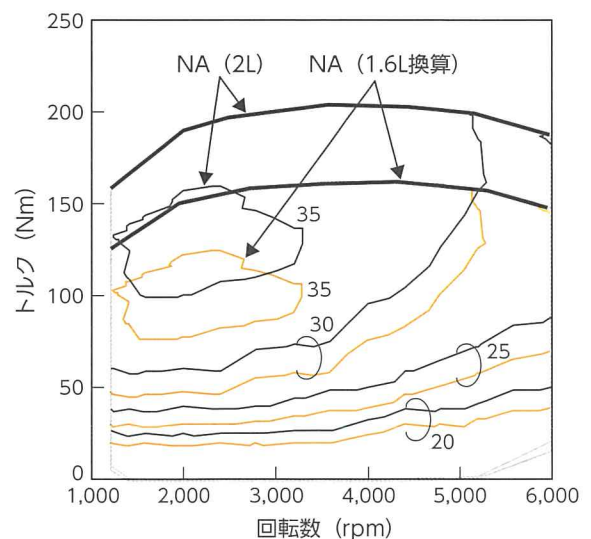


図11 排気量の影響

この章では、高速燃焼で EGR 限界が拡大し、部分負荷の燃費が改善することやノックが改善することを述べてきた。また、高速燃焼を行うことで最高熱効率が 40%以上にまで高められることを述べた。この燃焼技術に、低フリクション化や動弁系改良を組み合わせると、部分負荷において大きな燃費改善を図ることが可能となる。また、吸入空気量を高めることにより性能向上も同時に行うことで、走りと燃費を高次元に両立することが可能となる。

ここで、現在の自然吸気ガソリンエンジン、技術開発を進めて熱効率 40%を想定した時の自然吸気ガソリンエンジン、現在の過給エンジンの熱効率の比較の一例を図 12 に示す。現時点での自然吸気ガソリンエンジンと過給ダウンサイズエンジンの効率を比較すると、軽負荷では過給ダウンサイズエンジンの方が優れている領域も見られるが、自然吸気ガソリンエンジンの改良を行っていくと燃費の面でも自然吸気ガソリンエンジンの方が優れる領域が大きく拡大する。燃費に関しては、車両とエンジン排気量の関係で使用域が変わることや、過給エンジンの技術開発も進むことから結論付けることは難しいが、ハイブリッド車用エンジン技術を核にして自然吸気ガソリンエンジンの技術開発を追及していくと、中型車両までは、自然吸気ガソリンエンジンの方が優位になる可能性が大きいと考えられる。走りに関しては、過給エンジンの定常状態でのトルクは高いが過給機の応答遅れがあることから、自然吸気ガソリンエンジンの低中速トルクを高めていくことで遜色のない車両に仕上がっていくと考えている。

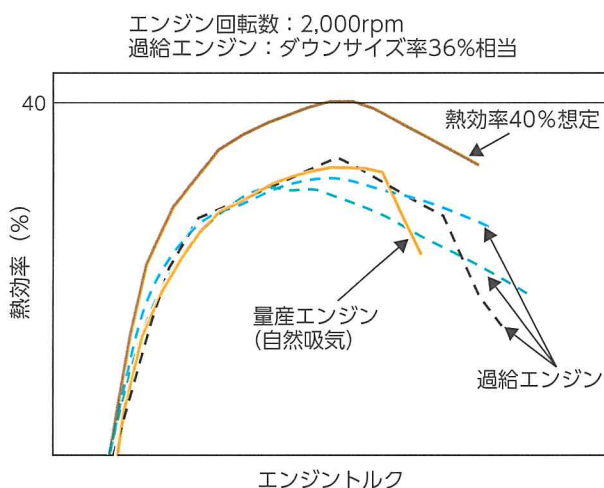


図 12 自然吸気ガソリンエンジンと過給ダウンサイズエンジンの比較

5 おわりに

本稿では熱効率の経緯と将来の展望を中心に述べてきた。本稿のまとめを、下記に記す。

- (1) 将来の燃費低減には、燃焼改善を中心に、低フリクション技術や動弁系技術の進歩が重要となる。燃焼技術を中心に、これら低燃費に繋がる技術を有するエンジンを ESTEC (Economy with Superior Thermal Efficient Combustion) エンジンと称して市場に導入していく。
- (2) 燃焼技術の方向としては、タンブルを活用した高速燃焼がある。高速燃焼を行うことで EGR 率の限界が拡大し、ガソリンエンジンにおいても $\lambda 1$ 運転で、最高熱効率 40%を実現することが可能となる。これらの技術に、低フリクション化や動弁系の改良を組み合わせることで、部分負荷の熱効率も改善が進む。性能向上も平行して行うことで、過給ダウンサイズエンジンに対しても優れるエンジンが開発できると考えている。

本稿では低燃費技術を中心に論じてきたが、これらの技術を開発していくことで自然吸気ガソリンエンジンにおいて、低燃費化と“Fun To Drive”の両立が可能となる。今後は、先進諸国のみならず新興国のお客様にも、低燃費であり、かつ自動車の有する楽しさを体感して頂けるようにしていきたい。

参考文献

- (1) Shouji Adachi et al. : The renewed 4-Cylinder Engine Series for Toyota Hybrid System. Vienna Motor Symposium (2012)
- (2) Koichi Nakata et al. : The Impact of RON on SI Engine Thermal Efficiency. SAE Technical Paper 2007-01-2007
- (3) 神谷周ほか : 固体潤滑オーバーレイの摩擦低減効果. 内燃機関シンポジウム. 2012 年
- (4) 森中翔一郎 : 電子可変吐出圧オイルポンプシステムの開発. 自動車技術会学術講演会前刷集. No.30-11, P.1 - P.4 (2011)
- (5) Koichi Shimizu et al. : The New Toyota Variable Timing and Lift System. Aachen Colloquium. No.2, P.979 - P.994 (2007)

- (6) Takuya Ikoma et al. : Development of V-6 3.5-liter Engine Adopting New Direct Injection System. SAE Technical Paper 2006-01-1259
- (7) Daishi Takahashi et al. : Engine Thermal Control for Improving the Engine Thermal Efficiency and Anti-Knocking Quality. SAE Technical Paper 2011-01-0377

■著者



中田 浩一

新型 HV 小型車用エンジンの開発

Development of Engine for New Compact Hybrid Vehicle

芝 利光*
Toshimitsu Shiba

莊司 純平*
Junpei Shoji

井藤 裕二*
Yuji Ito

山田 哲*
Tetsu Yamada

安藤 大吾**
Daigo Ando

要旨

熱効率の向上と B セグメント車搭載のために 1NZ-FXE エンジン进行改良した。新型エンジンには主な技術アイテムとして、クールド EGR、電動ウォーターポンプ、高耐熱コンパクトマニバータを採用。さらに、フリクションの低減により熱効率 38.5%を達成した。また、電動ウォーターポンプの配置とマウントブラケットの形状を変更することでコンパクトにした。

Abstract

Toyota Motor Corporation has refined the 1NZ-FXE engine to increase thermal efficiency and for installation in B-segment vehicles. The key technological items adopted in the new engine are a cooled exhaust gas recirculation (EGR) system, electric water pump, and a compact exhaust manifold with high heat durability. Engine friction was also significantly reduced, improving thermal efficiency to 38%. In addition, the length of the engine was reduced by optimizing the electric water pump and the engine mount bracket layout.

キーワード クールド EGR、電動ウォーターポンプ、低フリクション、高耐熱コンパクトマニバータ

1 はじめに

近年の地球温暖化、石油価格の高騰などの観点から、自動車の CO₂ 削減は自動車メーカーの責務である。こうした社会的要請に応えるために、トヨタでは 1997 年に世界で初めて量産ハイブリッド車を導入し、改良を重ねることで、お客様の支持を得て図 1⁽¹⁾ に示したように年間販売台数 500 万台まで普及させている。その中で広く市場へ浸透させるために、最新燃費技術を織り込み、かつ、B セグメント車に搭載可能な、低燃費でコンパクトなハイブリッド用エンジンの開発を紹介する。

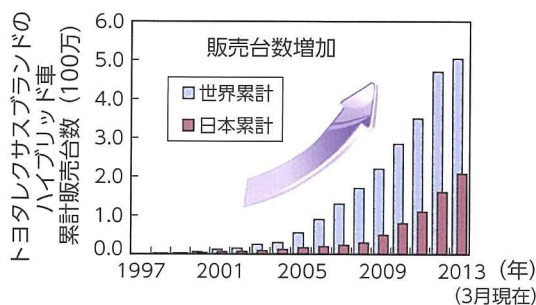


図 1 トヨタ・ハイブリッド車の展開

* エンジン設計部

** HV システム制御開発部

2 エンジンの燃費向上技術

2.1 概要

図 2 に今回採用した 1NZ-FXE エンジンの外観を示す。旧型 1NZ-FXE からの主な変更点は、クールド EGR (Exhaust Gas Recirculation)、高効率 EGR クーラ、電動ウォーターポンプ、高耐熱コンパクトマニバータの採用、低フリクション化、バルブタイミングの最適化、触媒暖機制御の改良、圧縮比の変更 (13.0 から 13.4) である。これらの燃費向上技術により、図 3 に示すとおり、燃料消費率 230g/kWh 以下の領域を旧 1NZ-FXE⁽²⁾ に比べ大幅に拡大することができ、最小燃料消費率 221g/kWh を達成することができた。

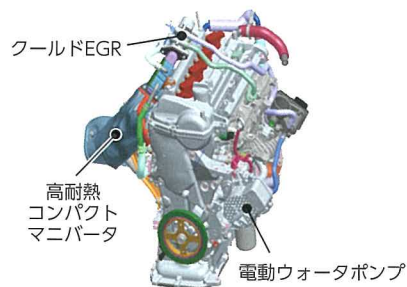


図 2 エンジン外観

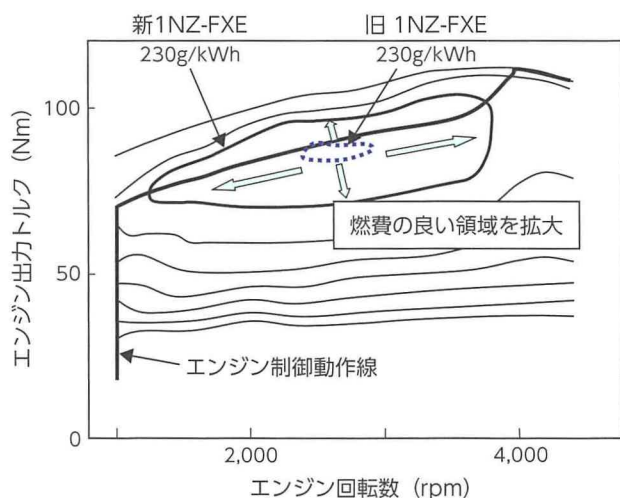


図3 燃料消費率マップ

2.2 クールドEGRおよびバルブタイミング最適化

クールド EGR 採用により EGR ガス温度を低減し、点火時期の進角が可能となり、燃料消費率が改善する。図4はクールド EGR の採用に合わせてバルブタイミングを最適化することで燃料消費率の低減を行ったものである。吸気カム作用角を狭くし、オーバーラップ量を抑制することで、内部 EGR 率の増加を抑えて外部 EGR 率を上げることができた。その結果、耐ノック性能が向上し、MBT (Minimum Advance for Best Torque) 点火時期に設定できる領域が拡大、燃料消費率を低減した。

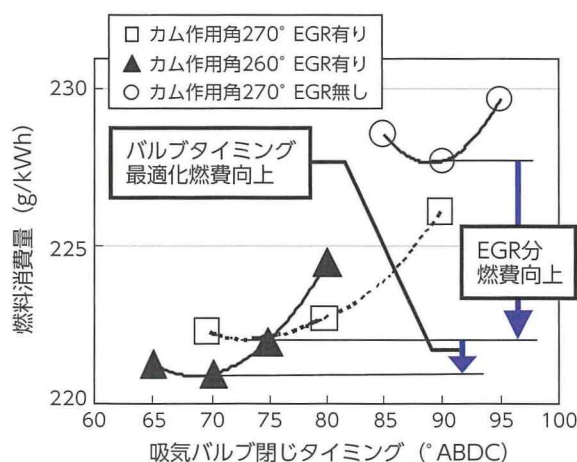


図4 吸気バルブタイミングと燃料消費率

2.3 高効率 EGR クーラ

EGR ガス温度を低減するため、オフセットフィン構造の高効率水冷クーラを新たに採用した (図5)。従来フィンに比べオフセットフィンを採用することで、単位容積当りの放熱率を向上し、クーラ体格の小型化により車両搭載性を向上した (表1)。

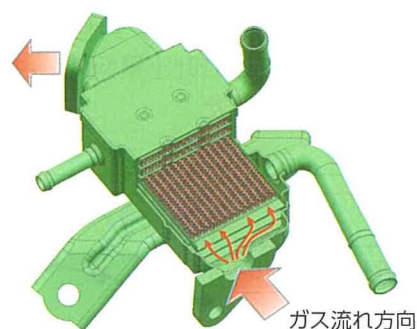
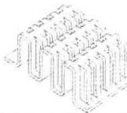


図5 高効率 EGR クーラ

表1 EGR クーラのフィン形状比較

	オフセット	ウェーブ
フィンタイプ		
放熱率	313	100 (基準)
体格 V/Q	▲40%	基準

* Q ; 放熱量, V ; コア容積

2.4 電動ウォーターポンプ

ウォーターポンプに要求される流量性能を図6に示す。従来のベルト駆動のウォーターポンプは、最も厳しい低速登板でウォーターポンプのサイズが決まり、流量がエンジン回転数に依存するため、高回転域 (図6中a) では無駄に仕事をしていた。電動ウォーターポンプの採用により、エンジンの使用状況に応じて冷却水流量を制御することが可能となり、フリクション低減と暖機性の改善、A/C (Air Conditioner) 暖房性能向上を図ることができた。

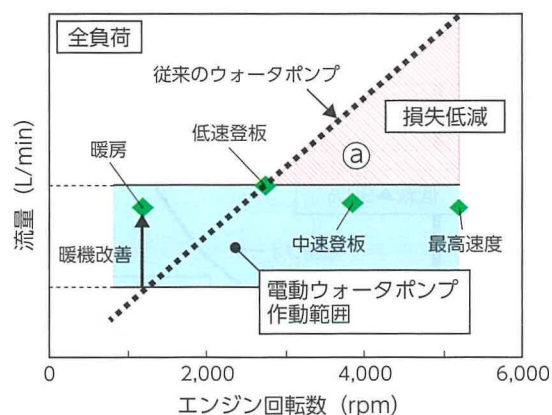


図6 電動ウォーターポンプ流量性能

また、図7、8に示すエンジン負荷に応じた冷却水量の最適化を図ることで吐出量低減によるウォーターポンプの省動力化をした。

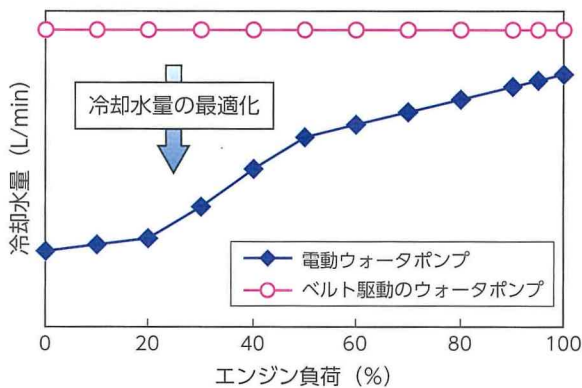


図7 エンジン負荷と冷却水量
(エンジン回転数 1,600rpm)

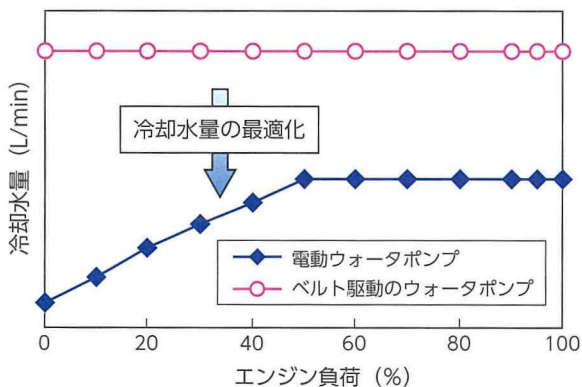


図8 エンジン負荷と冷却水量
(エンジン回転数 4,800rpm)

これらの流量最適化により、ベルト駆動ポンプに比べて最大流量を50%低減した。これは、モータサイズで90%の低減に相当し、コンパクト化と軽量化に貢献した(図9)。

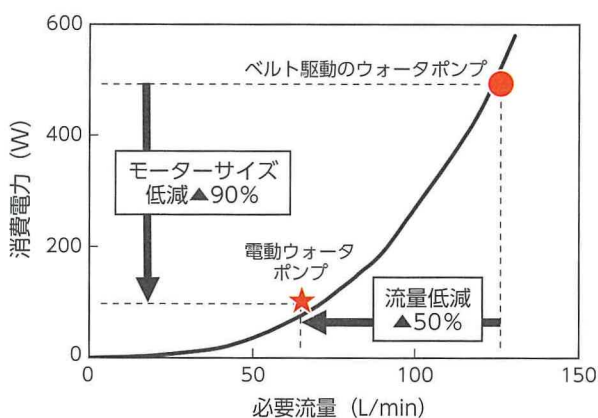


図9 ウォータポンプ必要流量

2.5 低フリクション

下記(1)～(6)のフリクション低減アイテムを採用し旧1NZ-FXEより約30%の低減⁽³⁾を達成した(図10)。

- (1) 電動ウォーターポンプ
⇒補機ベルト&メカニカルシール廃止
- (2) 低フリクションチェーン
- (3) オイルシールのテフロンコート追加
- (4) オイルポンプ容量低減
- (5) 低摩擦エンジンオイル (OW-16)
- (6) バルブリフターにDLCコート追加

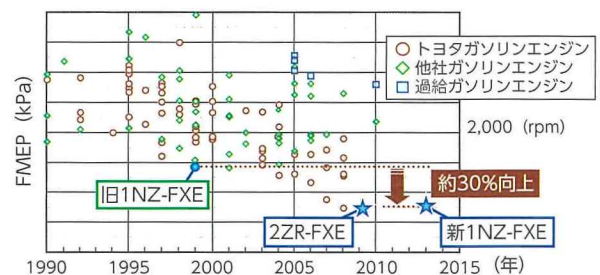


図10 メカニカルフリクション

タイミングチェーンに採用した低フリクションチェーンの形状を図11に示す。チェーンの内側リンクプレートを突形状にし、チェーンガイドとの接触面積を低減することでフリクションを0.6kPa低減した。

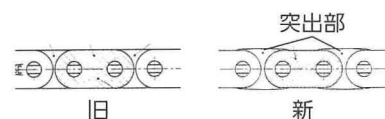


図11 低フリクションチェーン

2.6 高耐熱コンパクトマニバータ

エキゾーストマニホルドをパイプからシェルマニバータタイプ(図12)に変更し、小型化することでシリンダヘッドから触媒までの排気管表面積をプリウス(2ZR-FXE)の840cm²から488cm²に42%低減することで触媒暖機性能を向上させた。更に、触媒暖機制御を改良することにより冷間始動時の触媒暖機時間を67%短縮した(図13)。

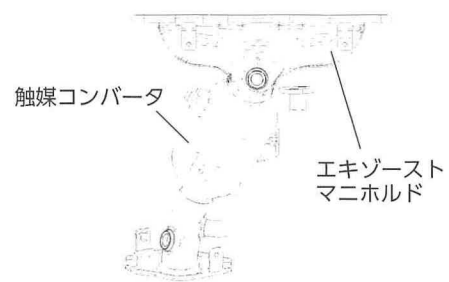


図12 高耐熱コンパクトマニバータ

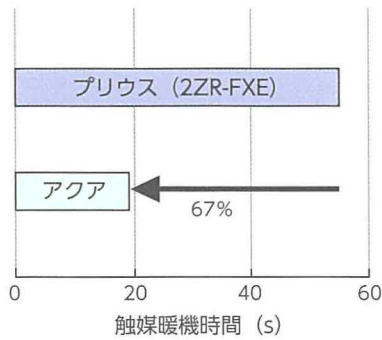


図 13 触媒暖機時間短縮

3 B セグメント車搭載のための小型化

エンジン全長を 20mm 短縮し、B セグメント車への搭載を可能にした。ウォーターポンプの電動化によりベルトレイアウトの制約を受けずにポンプの搭載位置を決定することが可能になった。これにより、ウォーターポンプをエンジン後方に移動し、マウントブラケットの締結点もエンジン後方に移動することで全長を短縮した（図 14）。

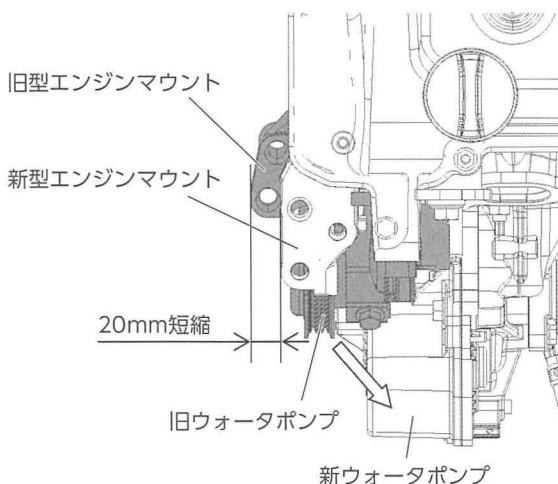


図 14 エンジン全長短縮

4 まとめ

- (1) 最新燃費向上技術（図 15）の採用により、旧 1NZ-FXE より 4.9%向上し、最新のトヨタ HV 用 L4 エンジンシリーズと同様にトップレベルの最大熱効率 38.5%を達成した⁽³⁾（図 16）。
- (2) エンジン全長を 20mm 短縮することで B セグメント車への搭載を可能にし、アクアのみならず、カローラにも搭載することができた。

- (3) このエンジンを搭載した新型アクアは、JC08 モードで 37.0km/L 世界トップの燃費を達成すると同時に、動力性能も B セグメント車トップレベルも達成した。

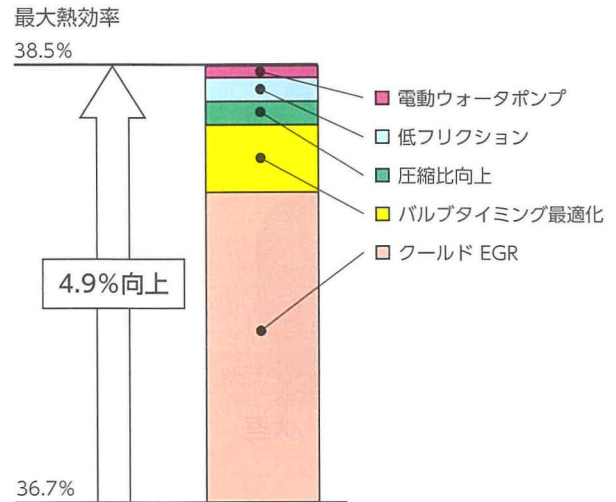


図 15 熱効率向上割合率

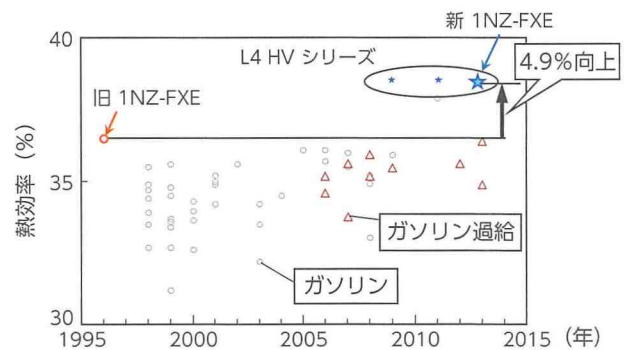
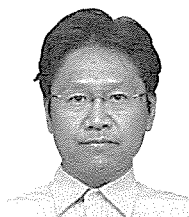


図 16 エンジン最大熱効率

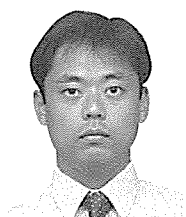
参考文献

- (1) Adachi, S et al. : The Renewed 4-Cylinder Engine Series for Toyota Hybrid System. 2012 International Vienna Motor Symposium
- (2) Uehara, T et al. : Development of the New THS-II Powertrain for Compact Vehicles. SAE Technical Paper 2012-01-1017, 2012
- (3) 萩原彦昌ほか：ハイブリッドシステム用新型 4 気筒エンジンシリーズ. TOYOTA Technical Review, Vol.59, P104 - P108 (2013)

■著者



芝 利光



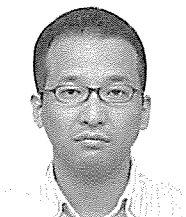
莊司 純平



井藤 裕二



山田 哲



安藤 大吾

コンパクトカー向け ハイブリッドトランスアクスルの開発

Development of New Hybrid Transaxle for Compact Vehicles

上野 裕 *
Yutaka Ueno

岩田 茂嗣 *
Shigetsugu Iwata

平井 悠 **
Yu Hirai

松本 隆志 **
Takashi Matsumoto

松本 雅志 **
Masashi Matsumoto

黒野 洋輔 **
Yosuke Kurono

藁科 泰輔 **
Taisuke Warashina

特
集

要旨

コンパクトカーに搭載可能な新型ハイブリッドトランスアクスル（以下 HV T/A）を開発した。この HV T/A は現行の 3 代目プリウスに搭載されている HV T/A と同一構造とし、「小型化・質量低減」「モータ冷却性能向上」「機械損失低減」を開発の狙いとした。これらを達成するため、ステータ、新歯型オイルポンプ、歯車列などを新規に開発し、コンパクトカーの商品魅力向上に貢献している。本稿では HV T/A の変遷とシリーズ構成、新型 HV T/A 構造、新規開発した新ステータ構造と新歯型オイルポンプについて紹介する。

Abstract

Toyota Motor Corporation has developed a new transaxle for compact hybrid vehicles. Based on the transaxle of the third generation Prius, the objectives of this development were to reduce size and weight, improve motor cooling performance, and lower mechanical losses. These objectives were achieved by adopting a newly designed stator and gear train, as well as an oil pump with a new tooth profile. As a result, this new hybrid transaxle helps to enhance the product appeal of compact vehicles. This article describes the trends of hybrid transaxle development, an outline of the hybrid transaxle series, the structural characteristics of the newly developed transaxle and stator, as well as the details of the oil pump with the new tooth profile.

キーワード ハイブリッド車, トランスアクスル, モータ, ギヤトレイン

1 はじめに

近年、環境や省エネに関心が高まる中、自動車からの CO₂ 排出低減と燃費向上がますます重要になっており、ハイブリッド車など低排出ガス・低燃費車の普及・拡大が期待されている。

今回、より多くのお客様にハイブリッド車を選んでいただくためにコンパクトカーに搭載可能な HV T/A (P510) を開発した。この HV T/A は現行の 3 代目プリウスに搭載されている HV T/A (P410) と同一構造とし、「小型化・質量低減」「モータ冷却性能向上」「機械損失低減」を開発の狙いとしたことを本誌 Vol.58 ⁽¹⁾ で紹介した。本稿では HV T/A の変遷とシリーズ構成を紹介した後、新型 HV T/A 構造と新規開発した新ステータ構造、新歯型オイルポンプについて紹介する。

* HV ドライブトレイン開発部

** HV ユニット開発部

2 ハイブリッドトランスアクスルの 変遷とシリーズ構成

図 1 にシリーズパラレルハイブリッドシステム用 FF (Front Engine Front Wheel Drive) 系 HV T/A の変遷とシリーズ構成を示す。1997 年に世界初の量産ハイブリッドシステム (Toyota Hybrid System: THS) を開発し、モータ・ジェネレータ、動力分割機構および減速機で構成される HV T/A (P110) を初代プリウスに搭載した。2003 年には、電源電圧の昇圧を行い、モータを高出力化することで低燃費と走行性能向上を両立した第 2 世代ハイブリッドシステム (Toyota Hybrid System II : THS II) を開発し、高出力モータに対応した HV T/A (P112) を 2 代目プリウスに搭載した。

ハイブリッドシステム	エンジン排気量	'95	'00	'05	'10
THS	1.5L				
THS II	1.5L				
モータリダクション機構付 THS II	1.5L				
	1.8L				
	2.4L 2.5L				
	3.3L 3.5L				

図1 シリーズパラレルハイブリッドシステム用FF系HV T/Aの変遷とシリーズ構成

2005年にはTHS IIにモータリダクション機構を追加することでモータの高回転・小型化を実現。これによりコンパクトな構造とした3.3Lエンジン用のHV T/A (P310)を開発、LEXUS RX (旧ハリアー)に搭載した。

その後、モータリダクション機構付THS IIのHV T/Aシリーズ展開を進め、2006年に2.4Lエンジン用のHV T/A (P311)を開発しカムリに搭載した。2009年には1.8Lエンジン用のHV T/A (P410)を開発し3代目プリウスに搭載した。

これまではプリウスより大きな車種を中心にモータリダクション機構付THS IIのHV T/Aシリーズ展開を進めてきたが、今回1.5Lエンジン用のHV T/A (P510)を開発したことで、アクアクラスのコンパクトカーにHV T/Aを搭載することが可能となった。これにより同一構造のモータリダクション機構付THS IIのHV T/Aをコンパクトカーから大型車まで搭載できるようになり、ハイブリッド車の普及・拡大に貢献している。

3 ハイブリッドトランスアクスル構造と主要諸元

P510とP410の主要諸元を表1に、主断面図および体格比較を図2に示す。P410にも用いられている2つのプラネタリリングギヤとカウンタドライブギヤ、パーキングギヤの4つのギヤを一体化した複合ギヤを構造上最適な形状に変更し、モータリダ

クション機構と動力分割機構の外側に配置した。

さらに次章で紹介する新ステータ構造によってモータ・ジェネレータが小型化されて、カウンタギヤ対とファイナルギヤ対の体格・軸間距離の縮小が可能となった。図2および表1に示すようにP410に対し質量で8kg、全長で21mm、軸間距離で12mm低減し、コンパクトカーに搭載されているAT・CVTと同等の体格とした。

これらにより、エンジンルームの搭載スペースが小さいコンパクトカーへのHV T/A搭載が可能となった。

表1 主要諸元

		P510	P410
エンジン	排気量 (L)	1.5	1.8
	最高出力 (kW)	54	73
	最大トルク (Nm)	111	142
モータ	形式	交流同期モータ	
	最高出力 (kW)	45	60
	最大トルク (Nm)	169	207
	最高回転数 (rpm)	13,000	13,500
モータ減速比		2.636	
最終減速比		3.190	3.267
軸数		3	
質量 (含 ATF) (kg)		▲8	—
全長 (mm)		▲21	—
(入出力軸) 軸間距離 (mm)		▲12	—

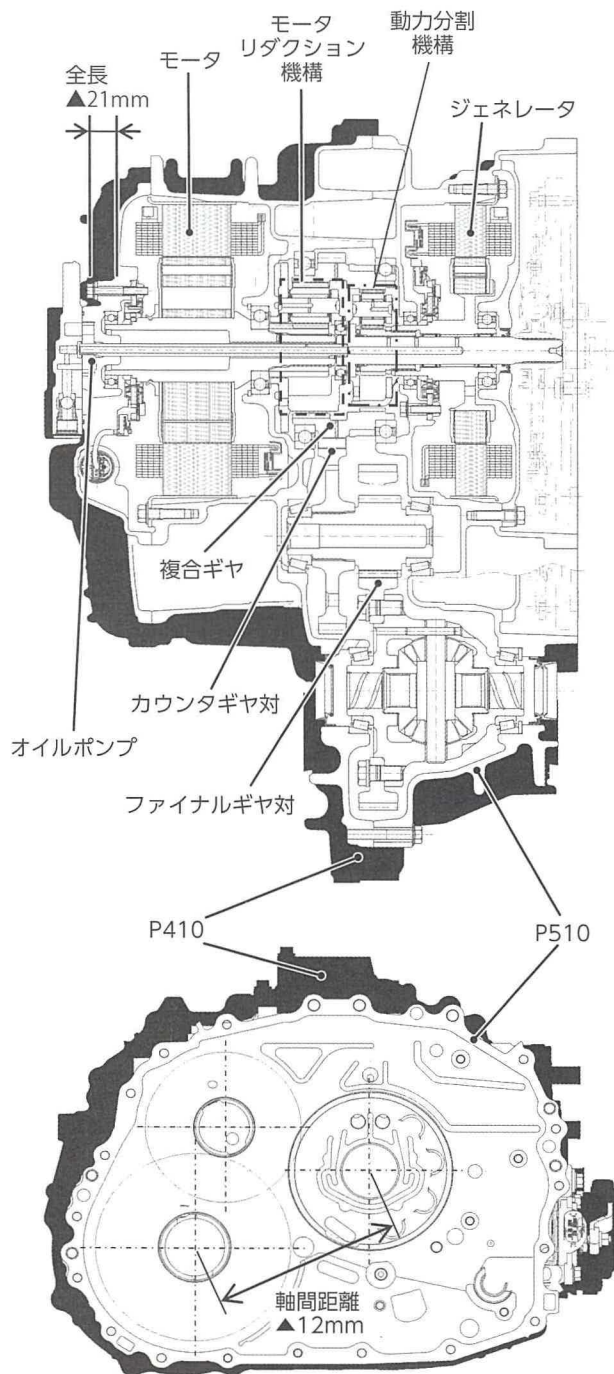


図2 主断面図および体格比較

4 新ステータ構造

新開発のステータには小型化を目的として、従来の丸線コイルに置き換えて平角線コイルを採用した⁽²⁾。図3にステータコアのスロット断面形状を示す。コイルの平角線化により、丸線間に存在する空間および絶縁層を導体で占め、スロット当りの導体占積率が10%向上し、ステータコアの体格低減に貢献した。

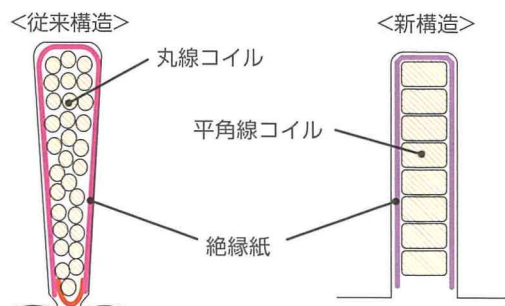


図3 ステータコアのスロット断面

また、従来の丸線コイルではコイル素線の形状・配置ばらつきにより隙間が生じるのに対し、平角線コイルでは規則正しい形状に成形できる。階段上に成形された平角線コイルを整理して組み付けることで、図4に示すように従来ステータに対しコイルエンド体格を低減することができた。

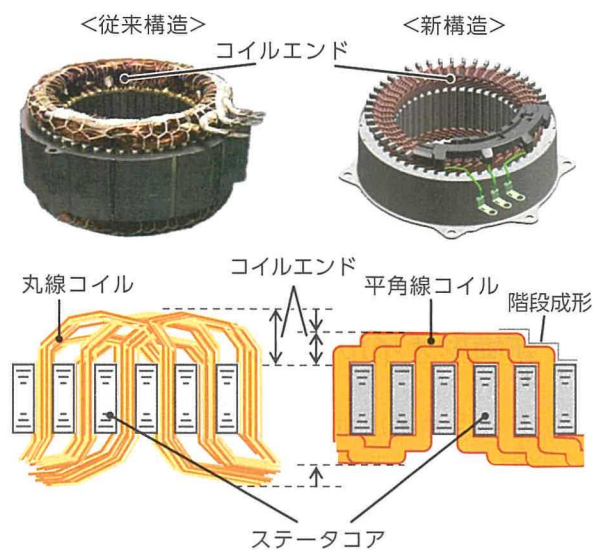


図4 コイルエンド構造

さらにコイルには、新規に厚皮膜コイルを採用した。コイルの皮膜は図5に示すように2層構造とし、内層のエナメル皮膜に加え、導体間の絶縁距離を確保するために外層に樹脂皮膜を被覆した。コイル皮膜の厚皮膜・2層構造化により、コイル皮膜の絶縁性能を向上させて相内および相間コイルの絶縁を行った。これにより、これまで使用していた相間絶縁紙やウェッジ紙を廃止することが可能となり、コイルエンドの体格低減に貢献した。

これらによって図6に示すようにモータステータでは従来構造に比べて軸長を15%、径を10%縮小することが可能となり、HV T/Aの小型化・質量低減を実現した。

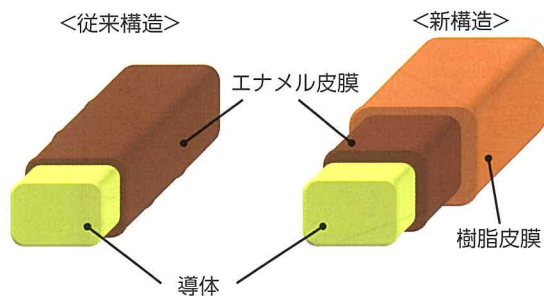


図5 ステータコイル構造

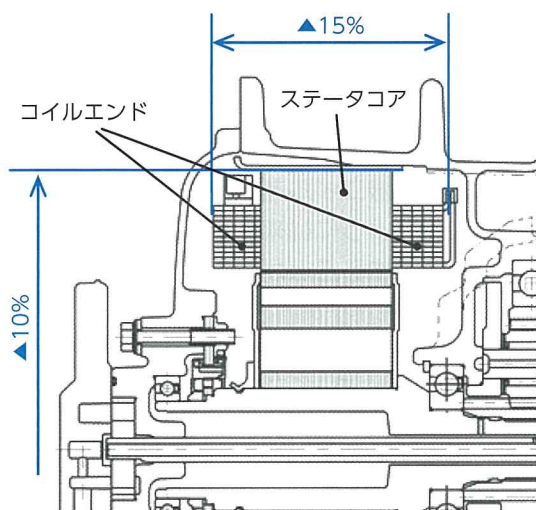


図6 モータステータの小型化

5 新歯形オイルポンプ

P510ではオイルポンプから吐出されるオイルを、ギヤ・軸受けの潤滑だけでなく、モータに供給することでモータ冷却性能を向上させている⁽¹⁾。このため、オイル吐出量を増加させる必要があったが、オイルポンプの小型化・損失低減との両立のために、新歯型オイルポンプを採用した⁽³⁾。新歯型オイルポンプは、オイルポンプの歯の高さが基礎円径と歯数によって決まるトロコイド曲線を用いた歯形とは異なり、曲線創成パラメータにより自由に歯の高さを変えることができる。図7にトロコイド歯形に対して歯の高さを増やし吐出量を増加させた新歯形のポンプ形状を示す。

図8に同一吐出量を確保した場合のオイルポンプロータ厚みと損失トルクの関係を示す。オイルポンプはHV T/Aの入力軸上に配置されており、エンジンルームへのHV T/A搭載上の制約からオイルポンプロータ厚みの上限が決まる。オイル吐出量を確保するためにはオイルポンプロータを大径化する必要があるが、オイルポンプロータの径は損失に対

する寄与が厚みに比べて大きい。そのため、P510では搭載制約を満足する厚みに抑えながら、新歯形を採用することでオイルポンプロータの大径化を抑制した。

これによりトロコイド歯形を採用した場合に対してオイルポンプの損失トルクを17%低減しながら、吐出量増加と小型化の両立を達成。HV T/Aの機械損失を低減し、車両の低燃費に貢献した。

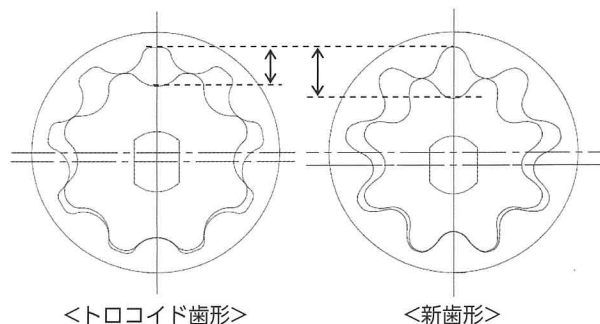


図7 オイルポンプ歯形形状

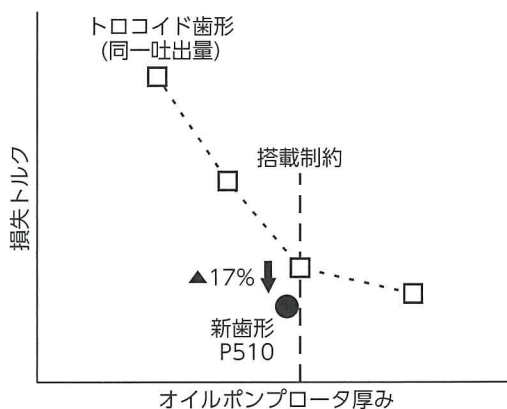


図8 オイルポンプロータ厚みと損失トルクの関係

6 まとめ

コンパクトカーに搭載可能な1.5Lエンジン用の新型HV T/A（P510）を開発した。開発の狙いである「小型化・質量低減」「モータ冷却性能向上」「機械損失低減」のため新ステータ構造、新歯形オイルポンプを新規に開発・採用した。

P510を搭載したコンパクトカーのアクアは、同一排気量エンジンの2代目プリウスと比べて、JC08モード燃費で19%の燃費向上が達成され、コンパクトカーの商品魅力向上に貢献している。

■参考文献

- (1) 岩田茂嗣, 高木, 伊良波, 林, 冨田ほか : サブコンパクト車用新型ハイブリッドトランスアクスルの開発, TOYOTA Technical Review, Vol.58, No.1, P.55 - 58 (2012)
- (2) 高崎哲, 神谷, 水谷, 金岩, 加藤ほか : 小型ハイブリッド車のモータステータの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.58-12, P.5 - 8 (2012)
- (3) 吉田健太郎, 魚住, 島田, 小菅 : 高効率オイルポンプロータ (ジオクロイドTMロータ) の開発, SEI テクニカルレビュー, No.180 (2012)
- (4) 岩田茂嗣, 茨木, 木村, 近藤, 渡辺ほか : サブコンパクト車用新型ハイブリッドトランスアクスルの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.58-12, P.9 - 12 (2012)

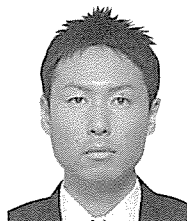
■著者



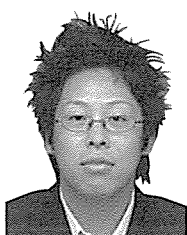
上野 裕



岩田 茂嗣



平井 悠



松本 隆志



松本 雅志



黒野 洋輔



藁科 泰輔

コンパクトカー向けハイブリッドシステムの開発

Development of Hybrid System for Compact Vehicles

田下 広和 *
Hirokazu Tashita

上原 隆史 *
Takashi Uehara

要旨

トヨタを代表する車種であるカローラに、いよいよハイブリッドが追加された。ハイブリッドパワートレーンはアクア用に開発したものを適用した。アクアでの開発内容を含め、Bセグメント用のハイブリッドシステムに求められる性能要件、目指す姿について述べる。

Abstract

Toyota Motor Corporation has incorporated a hybrid system into the latest generation of the Corolla, one of its most important and representative vehicles. The Corolla hybrid uses the powertrain developed for the Aqua (the Prius c in North America). This article describes the performance requirements and development targets of this hybrid system for B segment compact vehicles, including some of the details of the Aqua hybrid system development.

キーワード コンパクトカー、ハイブリッドシステム、燃費、小型化、最適化

1 はじめに

新型カローラに搭載したハイブリッドシステムは、アクアの発売に合わせて開発したものである。アクア開発時、コンパクトな5ナンバーサイズで、ハイブリッドを特段意識する事なく乗って頂ける車にする事を前提に、ハイブリッドシステムを小型・高効率化した。結果として、アクアはプリウスよりもお求め易い販売価格で、クラス世界トップの燃費性能を実現した。

- I. 圧倒的な燃費
- II. 使いやすさの追求
- III. 手の届く価格

この3つを満足させるために、ハイブリッドシステムと各コンポーネントとに、プリウス用と比較して様々な進化・改良を加えた。

本稿では、アクアでの開発内容を含め、Bセグメント用のハイブリッドシステムに求められる性能要件、目指す姿について述べる。

2 ハイブリッドシステムの概要

ハイブリッド車専用 1.5L アトキンソンサイクルエンジンを採用し、低燃費とハイパワーを両立させ

た(図1)。

トランスアクスルは新構造のモータを採用し、モータ減速機構と複合ギヤを最適設計、小型軽量化を実現した。

パワーコントロールユニットでは、内蔵するDCDCコンバータ、IGBT冷却器、モータECUなどの新規開発、その他周辺部品の、出力に応じた小型化・最適化などを行った。

また、駆動用電池を12V補機バッテリーとともにリアシート下に搭載する事で、ガソリン車と同等の荷室空間の確保に寄与した。



図1 カローラに搭載されるハイブリッド車用ユニット・搭載位置

表1に、現行プリウスと比較した本ハイブリッドシステムの主要諸元を示す。

* HV システム開発統括部

システム出力はプリウス用の 100kW から 73kW に抑えているが、最大空車重量が 1,430kg から 1,165kg に低減されたなどの車両諸元を考慮に入れ、必要な燃費、動力性能を満足できる数値として定めた。

表1 ハイブリッドシステム主要諸元

車名		プリウス	アクア	カローラ
エンジン	タイプ	1.8L アトキンソンサイクル 水冷直列4気筒DOHC	1.5L アトキンソンサイクル 水冷直列4気筒DOHC	←
	最高出力 (kW／rpm)	73／5,200	54/4,800	←
	最大トルク (Nm／rpm)	142／4,000	111/3,600～4,400	←
	圧縮比	13.0	13.4	←
	動弁機構	ローラーロッカー式	直打式	←
	EGR	クールドEGR	クールドEGR	←
	使用燃料	無鉛レギュラーガソリン	無鉛レギュラーガソリン	←
変速機	種類	電気式無段変速機	電気式無段変速機	←
ジェネレータ	種類	交流同期電動機	交流同期電動機	←
駆動用モータ	種類	交流同期電動機	交流同期電動機	←
駆動用電池		201.6V ニッケル水素	144V ニッケル水素	←
システム最高出力 (kW)		100	73	←

3 各コンポーネントの改良

3.1 エンジン

エンジンの排気量は、燃費、動力性能の観点から 1.2L ~ 1.5L の範囲内で検討した。

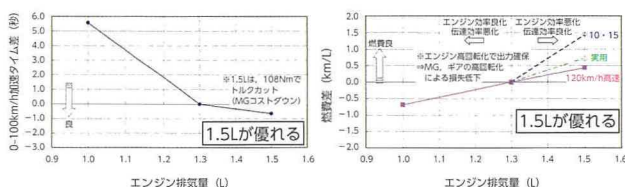


図2 加速性能比較

図3 燃費比較

我々の検討諸元においては、動力性能は排気量が大きいくほど有利となった(図2)が、燃費においても、大排気量側でモード、実用燃費とも良好な結果となった(図3)。これは、等出力条件下で相対的にエンジン回転数を低く抑える事が出来るため、モータやトランスアクスルの回転数を低く保つ事が可能となり、伝達損失が減少したためと考えられる。以上より、エンジン排気量を 1.5L とした。

エンジン型式は、2代目プリウスと同じく“1NZ-FXE”であるが、クールド EGR、電動ウォー

ターポンプ、小型エキゾーストマニホールドなど、燃費改善およびコンパクト化のための様々な改良を施し、70%の部品を新設した(図4)。また、燃焼室も見直し、圧縮比を 13.0 ⇒ 13.4 とした。

アトキンソンサイクル

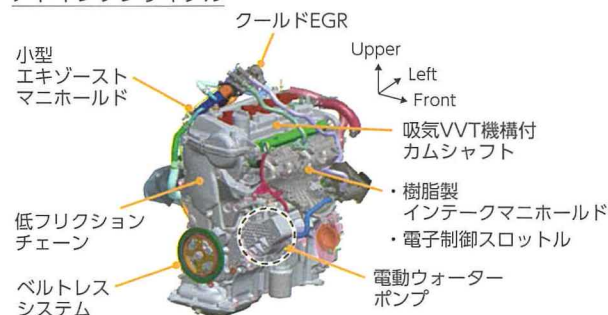


図4 エンジン低燃費アイテム

エンジンのフリクションを、2,000rpmのFMEPで2代目プリウス用、現行プリウス用と比較した結果を図5に示す。1NZ エンジンには直打ヘッドを採用しているにもかかわらず、チェーンを含めそれ以外の様々なフリクション低減技術を投入した結果、ローラーロッカーヘッドを採用する現行プリウス並の低いフリクションを実現できた。

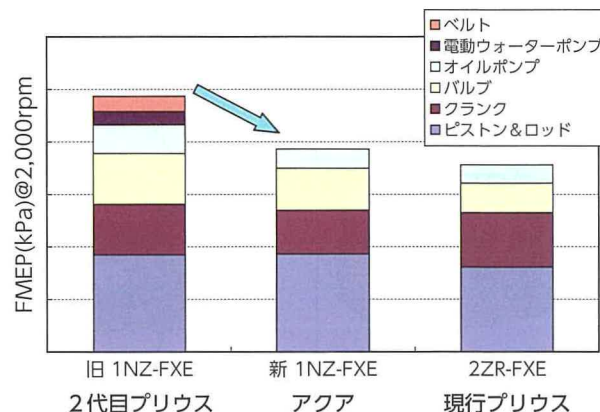


図5 エンジンフリクション比較

3.2 トランスアクスルウィズモータ

アクアのフロント・サイドメンバー幅はプリウスの 907mm に対し 858mm と狭く、エンジンおよびトランスアクスルを搭載するために工夫を要した。例えば、エンジンとトランスアクスルの合わせ面は、総長さ(車幅方向)を短縮するために双方より何度も設計検討を行った(図6)。

プリウス同様、本システムもモータ減速機構と複合ギヤを採用する。ディファレンシャルギヤ比は、アクア、カローラの車両重量燃費とドライバビ

リティを両立させる最適値とした。トランスアクスル全体で、プリウスに比べ全長で 21mm、重量で 8kg の小型軽量化を達成した。

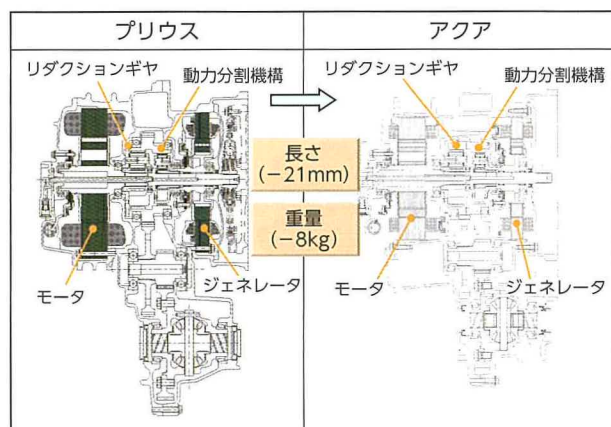


図6 トランスアクスルウィズモータ

また、損失低減と冷却性能向上のため、モータ冷却方法を変更した。

プリウスで採用した、パワーコントロールユニット冷却水を共用する、ウォータージャケットによる水冷構造を廃止、低損失オイルポンプを新規開発して直接モータへオイルを供給する構造とした（図7）。

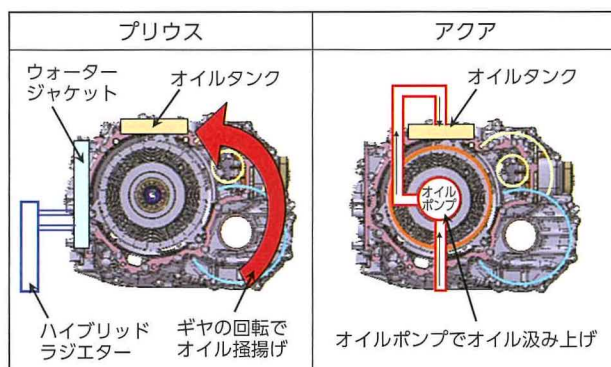


図7 モータ冷却方法

適正なオイルレベルを確保した上で攪拌抵抗を最小化するため、トランスアクスル内のオイル流れを全面的に見直し、各部の潤滑バランスを最適化した。

3.3 ジェネレータとモータ

ジェネレータとモータは、巻線を平角線コイルに変更し、新構造分布巻を採用する事で出力密度を向上させ、トータル重量で 10% の軽量化を達成した（図8）。



図8 ジェネレータ及びモータ比較

3.4 パワーコントロールユニット

パワーコントロールユニットは、プリウス用をベースとしているが、平滑コンデンサ容量、走行素子の厚さ、IPM 基盤枚数を低減させ、さらに、スナバコンデンサの廃止、冷却構造見直し等の小型、軽量化により重量で 8%、体積で 12% 低減した（図9）。

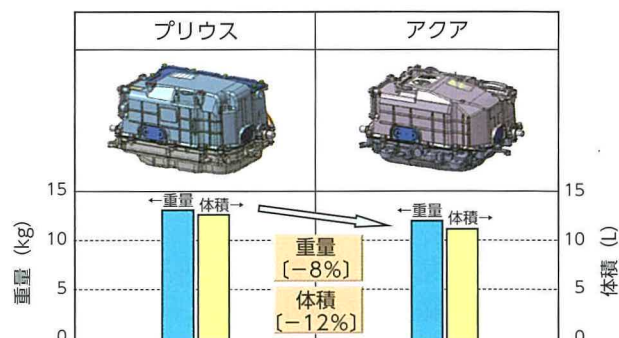


図9 パワーコントロールユニット比較

これにより、十分な歩行者保護性能の確保とともに、エンジンコンパートメント内に収める事を可能とした。

また、DCDC コンバータの定格容量についても、車両の消費電力に応じて見直しを実施し、燃費改善に貢献している。

3.5 駆動用電池

プリウスと同じくニッケル水素電池を採用し、電池セル数をプリウスの 168 セルから 120 セルへ減らした事で、重量で 11kg、体積で 20% 低減し、リアシート下への搭載を可能にした。その結果、リア席ニースペース 640mm などガソリン車と同一の居住性と荷室スペースを確保する事が可能となった（図10）。

(カローラアクシオ 461L, カローラフィールダー 407L [5名乗車時]・872L [2名乗車時])

また、冷却風、導入口をリアシートのアンダーカバー部に設置する事で、冷却風量の確保と冷却風温度の低減を実現している。冷却風は、電池セル間を下から上に流れ、リアシート横から荷室横に排出させる事で、リアシートへの熱の影響も極力抑えている。

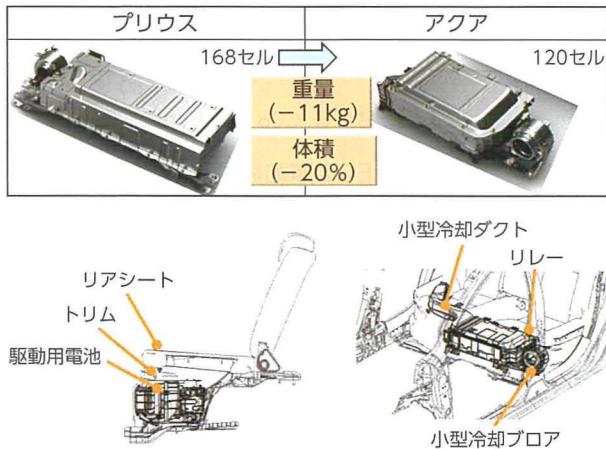


図10 駆動用電池比較及び搭載位置

4 燃費改善

4.1 課題

燃費に関しては、2つの大きな課題があった。

1つ目は、プリウスに比べ電池セル数を大幅に減らしたため、印加電流が増して電気損失が増加した事である。

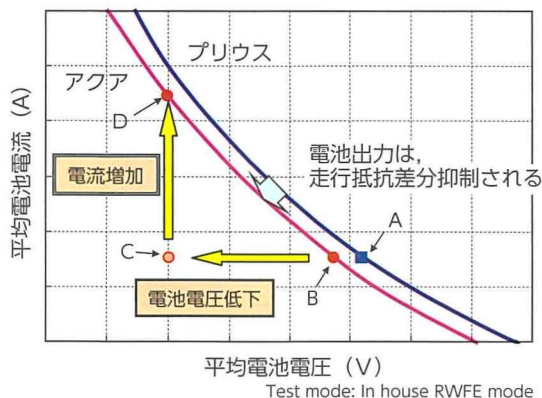


図11 平均電池電圧と平均電池電流の関係

図11に、ある走行モード中の平均電池電圧と平均電流の関係をプリウスとアクアの例で示す。

プリウスで、ある一定の走行をしたときの必要パワーがこのライン上の点Aにあるとした場合、同じ電流値でアクアの必要電圧は点Bとなる。電池のセル数をこの低下分だけ減らしていれば問題ないのだが、搭載制約によりそれ以上に減らす必要があったため、点Cまで電圧が下がってしまい、点Dまで電流を増加させる必要が生じ、電気損失が増大する。

2つ目は、昇圧頻度増加による電気損失の増加である。昇圧コンバータによって、駆動用電池電圧は、プリウスで最大650V、アクアでは520Vまで高めている。図12は、ある走行モード中に昇圧している頻度を比較したものである。プロットはモータの動作点を表し、青いプロットのラインより上側が、昇圧を必要とする範囲となる。

プリウスでは、走行時間の25%しか昇圧していないのに対し、アクアでは駆動用電池電圧が低いため、62%も昇圧している事が判る。

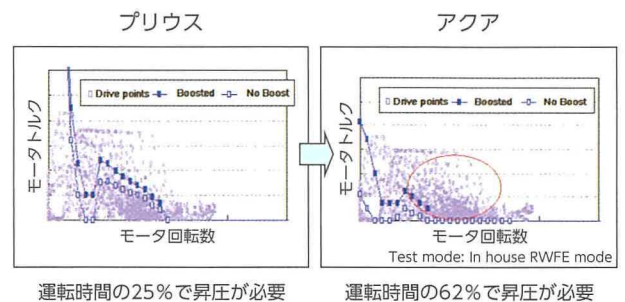


図12 走行モード中の昇圧頻度比較

4.2 改善策

これらの課題を克服するため、さまざまな燃費向上策を織り込んだ。先に述べた、エンジン単体のフリクション低減もその1つだが、さらに5つほど紹介する。

一般に、エンジンの燃料消費率は、出力が上がるにつれ徐々に最も低い、すなわち最も効率の良い領域に近づいていき、動作点が更に高出力側に移動するとそのピークを外れる。アクア・カローラハイブリッド用のエンジンは、プリウス用に比べその最適ゾーンがより高いパワー域に存在する（図13上段）。

そこで、アクア・カローラハイブリッドの適合においては、運転中に極力出力が高く熱効率のよい領域を使用するよう変更を行った（図13下段）。

また、先に述べたように、エンジン本体のフリクション低減と綿密な制御により、2代目プリウス用エンジンよりも、最低燃料消費率で運転できる領域を広げる事ができた（図14）。

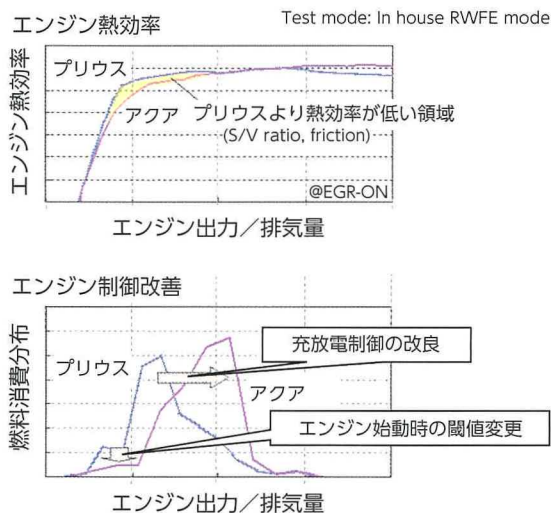


図 13 走行モード中のエンジン熱効率及び燃料消費分布

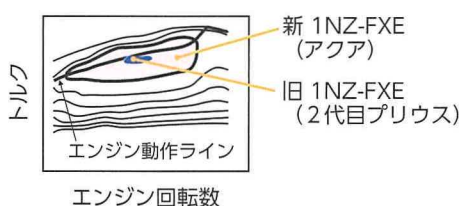


図 14 燃料消費率マップ

2つ目は、触媒の暖機性向上のため、エキゾーストマニホールドを含め熱容量を可能な限り低減した。プリウスに比べ、触媒を排気ポートにより近い場所に配置し、シリンダヘッドから触媒上面までの排気パイプ表面積をプリウスの 840 平方センチメートルから 488 平方センチメートルと、約半分程度まで低減できた効果と、冷間時の点火時期の最適化により、JC08 モードでは、触媒暖機時間を 67%短縮する事ができた。

冷間始動後の燃費は、プリウスより 14.5%向上しており、暖気後の 7.9%に比べて、改善率が大きくなっている (図 15)。

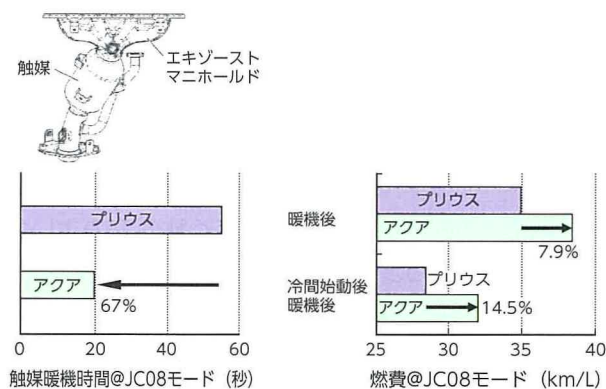


図 15 触媒暖機時間及び燃費比較

フールド EGR の作動領域もできる限り拡大し、JC08 モードでのフールド EGR 運転領域は、プリウスに比べ 17.5%拡大した (図 16)。

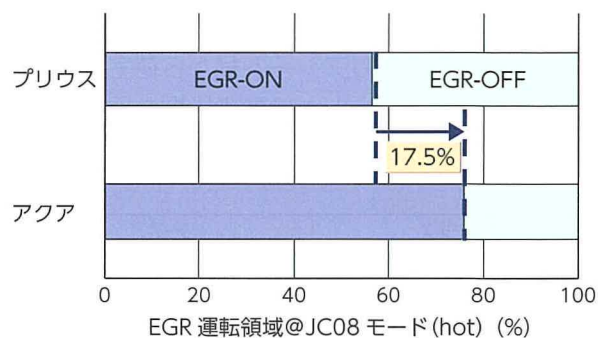


図 16 EGR 運転領域比較

フールド EGR 運転領域拡大は混合気温度の低下に寄与し、アンチノック性能が向上し、MBT の取れる範囲が広がる。但し、内部 EGR 率はそれに依りて下げなければならず、これはポンピングロスの増加に繋がる。そこで、作用角およびバルブタイミングを最適化し、実使用における燃費率を総合的に向上させた。

トランスアックスルのオイル攪拌損失も低減した。オイルタンクを上面に配置し、ギヤによって掻き揚げられるオイルと、オイルポンプが汲み上げるオイルを集める事でギヤ室内のオイル面高さを下げる事ができた。また、オイルポンプの採用により、掻き揚げ量が少ない低速域でもモータの熱をオイルに伝達する事ができるため、早くオイル温度が上昇してオイルの粘度が低下する。これにより、図 17 に示すように、各車速域で損失を低減できた。

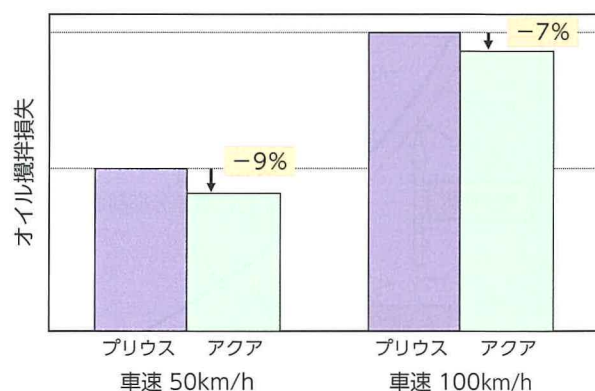


図 17 オイル攪拌損失比較

5つ目は、実用燃費の向上策を示す。

渋滞走行時などで、駆動用電池充電量が低下したとき、充電量回復のためにエンジンで発電するが、

そのレートの見直しにより充電時間の短縮、つまり、エンジン作動時間の短縮を図った。

渋滞走行を模擬したある条件下で、プリウスに比べ、67%エンジン作動時間を短縮し、燃料消費量を低減した（図18）。

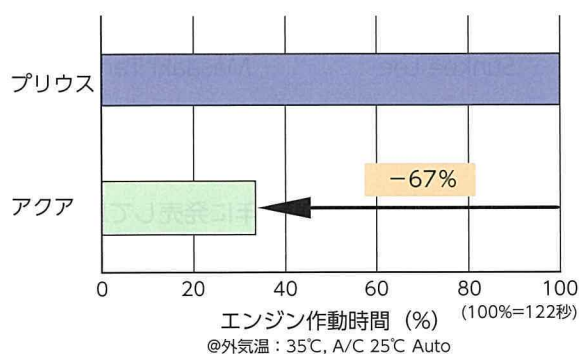


図18 駆動用電池充電時のエンジン作動時間@渋滞走行

4.3 燃費

以上のようなさまざまな取り組みにより、アクア、カロラの燃費は、図19の様に改善する事ができた。

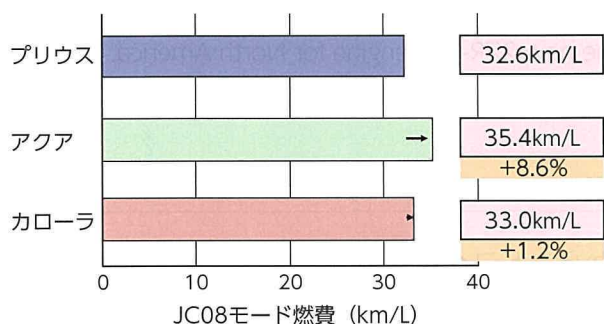


図19 JC08 モード燃費比較

なお、ここには示していないが、社内の実用燃費モード比較でも、約5%の燃費改善が確認できている。

5 加速性能

図20は、アクアの加速性能について示す。

0-100km/hの発進加速性能と40-70km/hの中間加速性能ともコンパクトクラストップレベルであり、十分な動力性能を実現する事ができている。

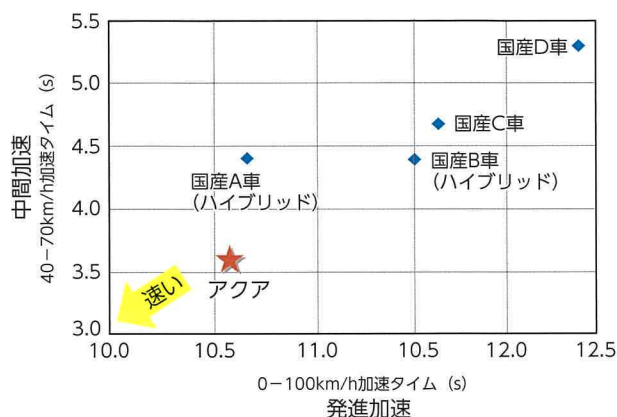


図20 加速性能

6 あとがき

アクア（国内）・プリウスc（北米）開発時、世界中のより多くのお客様にお求めやすい価格でハイブリッド車を楽しんで頂ける様に、細部にわたるまでこだわり抜いて、車両性能を最大限引き出せる、コンパクト車用ハイブリッドシステムを開発した。ヤリス（欧州）、今回のカロラ（国内）へと、展開車種を広げつつある。

- (1) 全てのコンポーネントを小型軽量化し、エンジンコンパートメント内に収め、電池はリアシート下に配置する事で、十分な荷室容量を確保できるようにした。
- (2) 駆動用電池セル数削減による電流増加損失と、昇圧損失を補う以上の燃費性能向上を、エンジンを含めた各コンポーネントの損失低減と、制御改良で行った。

今後も、環境性能に優れ、運転して楽しいハイブリッドシステム開発に邁進していきたいと思う。

■著者



田下 広和



上原 隆史

新 1.8L バルブマチック付ガソリンエンジンの開発

Development of 1.8-Liter Gasoline Engine with Valvematic System for New Corolla in North America

太田 行紀 *

Yukinori Ota

吉永 潔 **

Kiyoshi Yoshinaga

李 先基 ***

Sunkee Lee

谷 昌章 *

Masaaki Tani

要旨

連続リフト可変動弁機構 (VALVEMATIC) を用いた ZR シリーズエンジンは、2007 年に発売して以来、高い評価をいただいている。今回、新型北米カローラに搭載するために、VALVEMATIC 技術を進化させ、新型 1.8L エンジン (2ZR-FAE) を開発した。北米に VALVEMATIC 付エンジンを本格導入するにあたり、VALVEMATIC 技術を最大限活用するため、細部にわたって設計と制御を見直し、潜在的な燃費・出力性能・排気エミッションのポテンシャルを大幅に引出すことに成功した。本稿では、この北米向け新型 2ZR-FAE の新技術を紹介する。

Abstract

The ZR series engine combined with the Valvematic variable valve timing and lift system has been well-received by customers since its release in 2007. A further advanced version of the Valvematic system has now been developed and integrated with the new 1.8-liter 2ZR-FAE engine installed in the latest generation of the Corolla in North America. This development marks the full-scale adoption of the Valvematic system in engines in North America, and each aspect of the design and control of the system was thoroughly revised to take full advantage of the Valvematic technology. As a result, it was possible to maximize the fuel efficiency, dynamic performance, and emissions potential of the engine. This article introduces the new technology adopted in the new 2ZR-FAE engine for North America.

キーワード ガソリン内燃機関、可変動弁機構、低燃費、出力性能、排気エミッション

1 はじめに

近年、地球温暖化が叫ばれる中、我々自動車メーカーの使命は、自動車の持つ負の側面をゼロに近づけながら、お客様に走る喜びを提供することである。

自動車用ガソリン内燃機関は、部分負荷域を多用することから、スロットル絞りによるポンピングロスに伴ない効率を悪化させる課題があり、様々な取組みがなされてきた。例えば成層燃焼やアトキンソンサイクル等が挙げられるが、各々、排気エミッション対策の困難さや出力の低下といった課題が生じる。こうした中、連続リフト可変動弁技術は、燃費改善のみならず、出力、排気エミッションの向上効果が大きく有効な技術である。2007 年

から、トヨタ自動車も、シンプルでコンパクト、かつ汎用性の高い連続リフト可変動弁機構である VALVEMATIC 付エンジンを日本や欧州向けに展開してきた。

今回、北米カローラにこの VALVEMATIC 付エンジンを搭載するにあたり、すでに高い評価を得ている ZR シリーズ VALVEMATIC 付エンジンを進化させ、潜在的な燃費・出力性能・排気エミッションのポテンシャルを大幅に引出すことに成功した。本稿では、この北米向け 1.8L 新型 2ZR-FAE の新技術を紹介する。

2 エンジン概要と基本諸元

ZR シリーズは同一ボア径で 3 種類の排気量バリエーションを持たせ、まず 2006 年に 1.6L と 1.8L が 1ZR-FE、2ZR-FE として発売された⁽¹⁾。これらには Dual VVT-i 等の燃費低減技術を採用

* エンジン設計部

** トヨタテクニカルディベロップメント (株)

*** エンジン制御システム開発部

し、2007年に追加された2.0Lの3ZR-FEも含め素性を向上させた。そして2007年、燃費向上と出力向上との相反する市場ニーズに応えるべくVALVEMATICを採用した2ZR-FAE、3ZR-FAEを日本や欧州で発売し、平成22年度燃費基準+20%、平成17年排出ガス基準75%低減とクラストップレベルの車両動力性能を達成した⁽²⁾。

そして今回、高い燃費性能と厳しいエミッション特性が求められる北米市場に対して、この2ZR-FAEを改良して提供することで、同クラスでトップの燃費42MPG（ハイウェイ（HWY）燃費）を達成しつつ、厳しいLEVⅢ規制を満足した。

表1に主要諸元、図1にエンジン性能、図2に主な採用技術を示す。

表1 エンジン主要諸元

エンジン種類	2ZR-FAE (改良後)	2ZR-FE (前モデル)	2ZR-FAE (改良前)
総排気量 (L)	1,798	←	←
気筒配列	L4	←	←
内径×行程 (mm)	φ80.5×88.3	←	←
動弁系機構	DOHC, 4バルブ (ローラーロッカーアーム)	←	←
可変動弁機構	VALVEMATIC (作用角280°CA)	Dual VVT-i (吸気+排気)	VALVEMATIC (作用角260°CA)
燃料噴射機構	ポート噴射	←	←
圧縮比	10.6 : 1	10.0 : 1	10.0 : 1
最高出力 (hp/rpm)	140/6,100	132/6,000	142/6,400
最大トルク (lb·ft/rpm)	126/4,000	128/4,400	130/4,400
燃費 (MPG) (CITY/HWY/COMB)	30/42/35 <CVT>	27/35/30 <4AT>	— (同一条件なし)

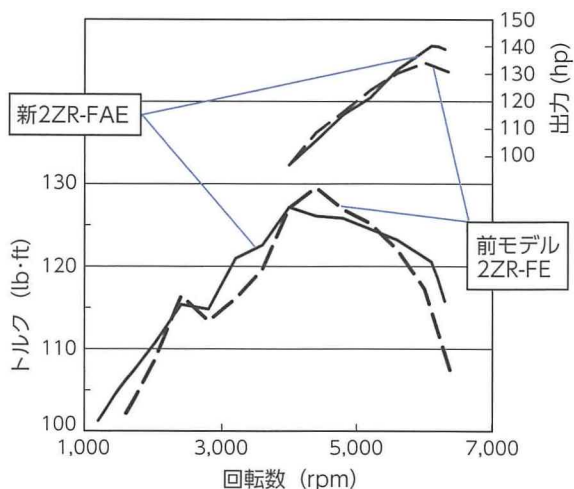


図1 エンジン性能

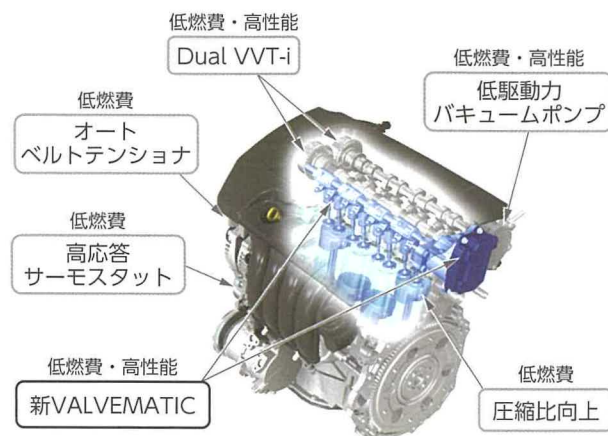


図2 主な採用技術

改良前 2ZR-FAE⁽³⁾ に対して、吸気バルブの作用角を 260°CA から 280°CA に拡大し、最大リフト量を 11mm から 11.5mm まで拡大。圧縮比は 10.6 まで高めた。また、バルブタイミングの作動領域を拡大し、VALVEMATIC および VVT の作動量に応じてスロットル開度を制御する協調制御により、燃費とドライバビリティを大幅に向上した。

新 2ZR-FAE では、VALVEMATIC 改良だけでなく、エンジン本体のメカフリクション低減のためにエンジン各部の見直しを行なった。例えば、バキュームポンプの駆動力を約 50% 低減し、加えて、オートベルトテンショナを開発し、ベルト張力を低減することなどをおり込んだ（図2）。

また、冷却システムの改良も行なった。サーモスタット構造を見直すことで感温性を改善し、水温ばらつきを低減し、応答性を高めることで、エンジン内冷却水の低水温化を行なった。この高い応答性をもつサーモスタットの採用により、CVT 特有の高負荷運転域においてノック発生を抑制し、点火時期を適正化することができ、モード燃費を大きく向上させた。

以上の改良を行なった結果、図3に示すように、北米カローラとしての車両燃費は前モデルより 16～20% の向上と、クラストップレベルの動力性能の達成を両立した。

また同時に、排ガス規制については、LEVⅢ (ULEV70) を達成。北米法規 On-Board Diagnostics (以下、OBD) にも対応した。

図 8 に連続リフト可変機構部の関係図を、図 9 に動作を示す。アクチュエータ内にてモータの回転運動を直線運動に変換し、連結されたコントロールシャフトを軸方向に駆動する。スライダはコントロールシャフトと軸方向に連動し、ロッカーシャフト上をスライドする。スライダとセンターアーム及び揺動アームはヘリカルスプラインで勘合しており、そのヘリカル作用によりセンターアームの径方向の回転動作に変換される。揺動アームにはローラーロッカーアームのローラ面に接触するカム面にプロファイルが形成されており、スライダを介し揺動カムとローラーアームとの相対位相を連続的に変化させ、バルブリフト量を連続的に制御する。

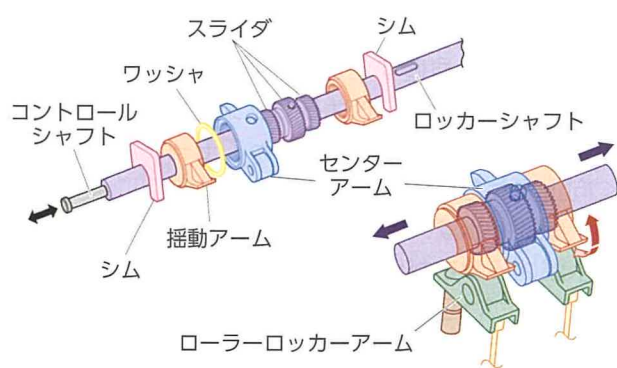


図 8 リフト可変動弁機構部構成

	スライダ位置	揺動カム位相角度
バルブリフト量 小		
バルブリフト量 大		

図 9 バルブリフト量可変メカニズム

3.3 バルブリフトとタイミング

3.2 項で示したハードウェアにより吸気側のバルブリフト量を 1.0mm～11.5mm、開閉期間を示す作用角で 106°CA～280°CAまで変化させ、バルブタイミングを制御する VVT-i と組み合わせるこ

とで、図 10 に示す吸気バルブの開弁範囲及び吸排気のオーバーラップを連続的にコントロールする。

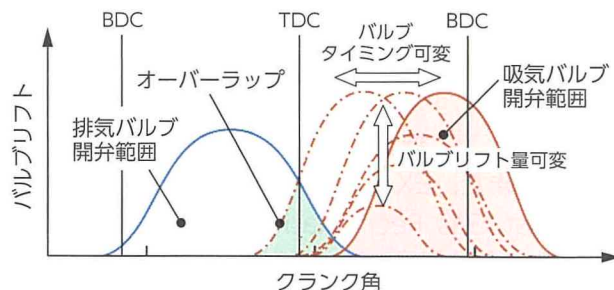


図 10 バルブリフトカーブ

4 燃費メリットの確保

今回、VALVEMATIC 改良として、連続リフト可変動弁技術を用いたエンジンの燃費効果の取りきりを目指し、細部にわたって設計と制御を見直すことで進化させた。以下、これらについて詳述する。

4.1 吸気バルブ最適化によるポンピングロス低減

VALVEMATIC 機構では、軽負荷域～中負荷領域において、リフト量で空気量を制御することによりスロットルバルブにおけるポンピングロスを低減するが、吸気バルブのリフトカーブ特性により吸気バルブにおけるポンピングロスが増減する。

図 11 に示すように、等時間面積（等空気量）で考えた場合、バルブ作用角はより小さく、リフト量はより大きくすることにより、低負荷～中負荷までの吸気バルブポンピングロスを低減することができる⁽⁷⁾。今回、吸気側 VVT（以下、IN-VVT）の作動領域を最適にすることでピストンへのバルブスタンプに配慮し、最大リフト量を 11mm から 11.5mm に増やした。これにより、従来の VALVEMATIC に対して更なるポンピングロス低減を図ることが可能になった。

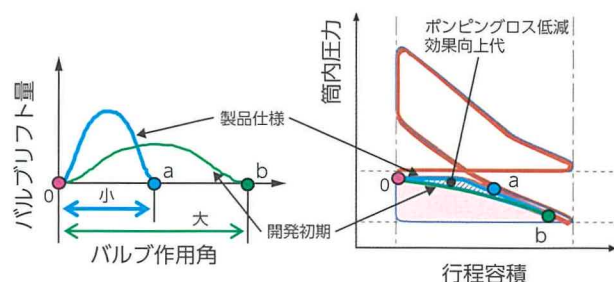


図 11 ポンピングロス低減効果向上

4.2 低負荷領域の燃費向上

図 12 に、低負荷領域における燃費向上の概要を示す。IN-VVT、および排気側 VVT（以下、EX-VVT）双方の作動領域を従来に比べて広げ、VALVEMATIC 協調制御を改良し、オーバーラップ領域を拡大することによりポンピングロス低減を図ることで、低負荷～中高負荷までの燃費を向上した。また、EX-VVT 作動拡大による内部 EGR（Exhaust Gas Recirculation）導入強化によってポンピングロスを低減し、低負荷領域における燃費向上を図った。

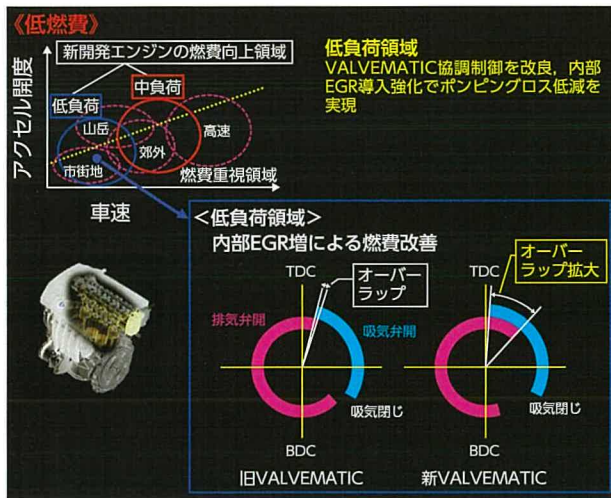


図 12 低負荷領域の燃費向上概要

4.3 中負荷領域の燃費向上

図 13 に、中負荷領域における燃費向上の概要を示す。内部 EGR 導入強化に加え、圧縮比を 10.0 から 10.6 へ高めることとアトキンソンサイクル強化とを組み合わせることで、中負荷領域のポンピング



図 13 中負荷領域の燃費向上概要

グロスを低減でき、低燃費を実現した。そのために、今回、ZR シリーズに対してピストンを専用設計とした。図 13 に示すように、バルブの閉じ時期を大きく遅らせるとともに、バルブ開き時期を早めたアトキンソンサイクルの採用により、中負荷領域におけるポンピングロス改善を行なった。

5 ヒートマネージメントの改良

燃費向上に対してノック改善、冷却システムの改良は非常に重要で、特に高負荷運転を多用する CVT との組合せでは、その効果は MT よりも大きくなる。

今回、冷却システムの改良として、サーモスタット構造を見直すことで応答性を高め、CVT 特有の高負荷運転域におけるノック発生を抑制し、点火時期を適正化することによってモード燃費を大きく向上させた。図 14 に水温制御性向上による燃費向上概要を示す。感温性を高めることで、実走行中の水温ばらつきが低減し、制御水温は暖房要求最低温度に近づけられる。これにより、実走行中のノック発生による点火時期遅角量を抑えられ、燃費向上した。

図 15 にサーモスタット構造を示す。従来のボトムバイパスバルブを廃止し、常時ボトムバイパス感温タイプの高応答仕様のサーモスタットに変更した。これによって、ヘッド出口水温に対する応答性が向上し、制御水温のばらつきを抑えることが可能になる。

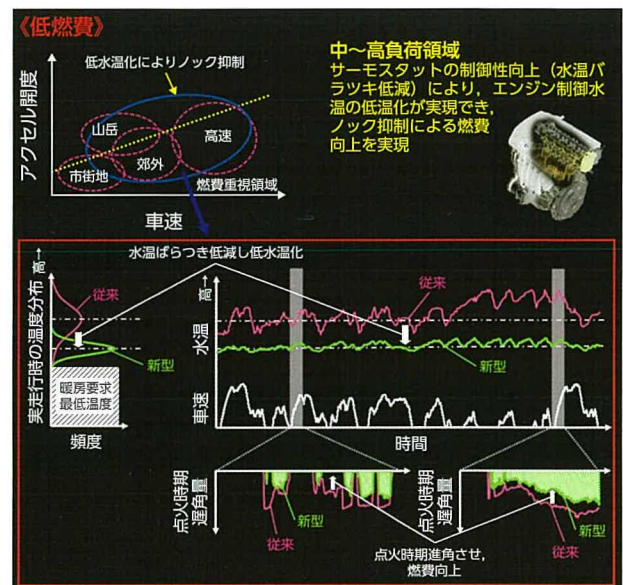


図 14 水温制御性向上概要

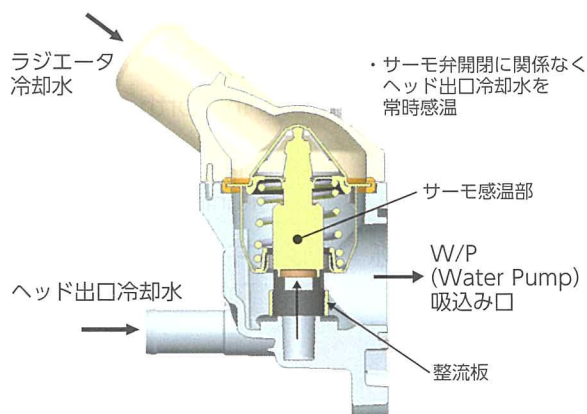


図 15 高応答サーモスタット概略

6 排気性能

始動後のバルブタイミングと燃料噴射時期を最適に制御させることで、点火時期の大幅遅角に対する燃焼安定化を実現し、エンジン出ガス低減と後燃え促進による触媒の早期活性化を図った。さらに、インジェクターの噴霧角の変更も加え、エンジンからの出ガスを大幅低減した。その結果、LEVⅢ規制をクリアすることができた。

7 ドライバビリティーの改良

新型 CVT との協調制御として、発進時に CVT トルクコンバーターの速度比に応じたスロットル開度制御を導入することで、ドライバビリティーも大幅に向上した。

8 おわりに

2007 年当時、国内メーカーとして初めて実用化した連続リフト可変動弁機構“VALVEMATIC”を採用した 3ZR-FAE は、クラストップレベルの低燃費と動力性能を実現した。そして今回、その VALVEMATIC 技術を進化させることで更なる燃費向上に成功しつつ、LEVⅢ (SULEV70) を達成することで、北米に初めて本格導入することに成功した。今後の地球環境改善に大きく寄与することが期待できる。

最後に、本エンジンの開発および製品化にあたり、多大なご尽力を頂いた関係会社の皆様に深謝の意を表する。

参考文献

- (1) 加納 知 広, 遠 藤 : ZR エンジン の 開 発. TOYOTA Technical Review. Vol.55, No.1, P.90 - P.93 (2006)
- (2) 高橋政克, 加納, 山田, 上浦, 河崎, 細田 : 新 2.0L バルブマチック付ガソリンエンジンの開発. TOYOTA Technical Review. Vol.56, No.1, P.12 - P.19 (2008)
- (3) R. Fierl et al. : Der neue BMW Vierzylinder Ottomotor- mit VALVETRONIC, MTZ Motortechnische Zeitschrift. Vol.62, No.6, P.458 - P.463 (2001)
- (4) 浅田俊昭, 川竹, 猪原, 安藤 : 動弁系による燃費低減技術の研究. 自動車技術会学術講演会前刷集. No.78-01, P.1 - P.4 (2001)
- (5) 濱村芳彦, 岩橋, 平工, 堀 : 新 2.0L 連続リフト可変動弁機構付ガソリンエンジンの開発. 自動車技術会学術講演会前刷集. No.131-07, P.17 - P.22 (2007)
- (6) 山田 哲, 原田, 渡 辺, 加 納 : 新 開 発 Valvematic 付 3ZR-FAE エンジン. ENGINE TECHNOLOGY. Vol.09, No.06 Dec., P.58 - P.63 (2007)
- (7) K. Shimizu et al. : Die neue Toyota Ventilsteuerung für variable Steuerzeiten und Hub. 16 Aachener Kolloquium. Fahrzeug- und Motorentechnik. Vol.2 P.979 - P.994 (2007)

著者



太田 行紀



吉永 潔



李 先基



谷 昌章

新型北米カローラ用 CVT の開発

Development of Continuously Variable Transmission (CVT) for New Corolla in North America

外山 真悟 *
Shingo Toyama

新居 大介 **
Daisuke Nii

服部 邦雄 **
Kunio Hattori

高原 秀明 *
Hideaki Takahara

大石 俊弥 **
Toshiya Oishi

井上 孝志 **
Takashi Inoue

要旨

新型北米カローラ用に、新世代の金属ベルト式無段変速機（CVT）を開発した⁽¹⁾。北米に CVT を本格導入するにあたり、燃費性能向上と北米のお客様にマッチしたドライバビリティを高次元で両立させた。世界初の同軸 2 ポートオイルポンプシステム等の燃費向上技術を採用し、伝達効率を極め、北米競合クラストップの燃費性能に貢献した。また、変速制御システムを一新し、CVT モデルベース制御を採用することで、変速応答性を向上させた。走りの魅力向上のため、駆動力特性最適化と北米専用の有段変速制御により、優れたドライバビリティを実現した。本稿では、新型 CVT を支える新技術を紹介する。

Abstract

Toyota Motor Corporation has developed a new continuously variable transmission (CVT) for the latest generation of the Corolla in North America⁽¹⁾. To facilitate the full-scale adoption of CVTs in North America, the development focused on improving both fuel economy and driveability to make the operation of the CVT more appealing to North American drivers. This CVT features various technologies to improve fuel economy, such as the world's first coaxial 2-discharge port oil pump system. These technologies have enhanced the transmission efficiency of the CVT, enabling class-leading fuel economy in North America. In addition, shift response was improved by the adoption of an innovative model-based shift control system. More appealing dynamic performance was achieved by optimizing driving force characteristics and adopting a step shift control specifically for North America. These measures achieved excellent driveability. This article describes the new technologies incorporated into this CVT.

キーワード 新型北米カローラ、金属ベルト式無段変速機（CVT）、燃費性能向上、ドライバビリティ、変速制御システム

1 はじめに

トヨタ自動車は、北米市場に新型カローラを開発し、2013 年より発売した（写真 1）。競合クラストップの燃費性能に貢献しつつ、北米のお客様にもマッチする高いドライバビリティを実現した金属ベ



写真 1 新型北米カローラ

ルト式 CVT を開発した。本稿では、その新型 CVT を支える新技術を紹介する。

2 開発のねらい

新型北米カローラは、競合クラストップの燃費性能、高品質、若者にも受け入れられる高い操作性やスポーティさをコンセプトとして開発された。新型 CVT の開発にあたって、以下 3 項目をねらいとした。

- (1) 伝達効率を極めることによる車両の燃費性能向上への貢献
- (2) ベルトノイズ低減による静粛性の向上
- (3) 変速制御システムの一新、駆動力特性最適化、有段変速制御による、優れたドライバビリティの実現

新型北米カローラのコンセプトに適合し、北米のお客様に受け入れられる CVT 開発を目指した。

* ドライブトレインユニット設計部

** ドライブトレインシステム統括部

3 構造と主要諸元

新型 CVT の主要諸元を表 1 に、断面図を図 1 に示す。新型 CVT は、ベースユニットとなる従来 CVT から全長、軸配置、軸間距離を変更せず、部品モジュール単位で新開発することで、大幅に性能を向上させた。

主な新開発部品は、図 1 に記載あるとおり、トルクコンバータ (以下 T/C)、オイルポンプ、プーリ、バルブボディ等である。

表 1 主要諸元

	従来CVT	新型CVT
トルク容量 (Nm)	184	←
全長 (mm)	360	←
質量 (Wet) (kg)	73.5	73.8
変速比幅	5.8	6.3
変速比	2.386~0.411	2.480~0.396
ファイナルギヤ比	5.698, 5.356	4.761
プーリ軸間距離 (mm)	156	←
1-4軸間距離 (mm)	185	←
使用オイル	TOYOTA 純正CVTフルード (TC)	新開発 低粘度CVTフルード (FE)

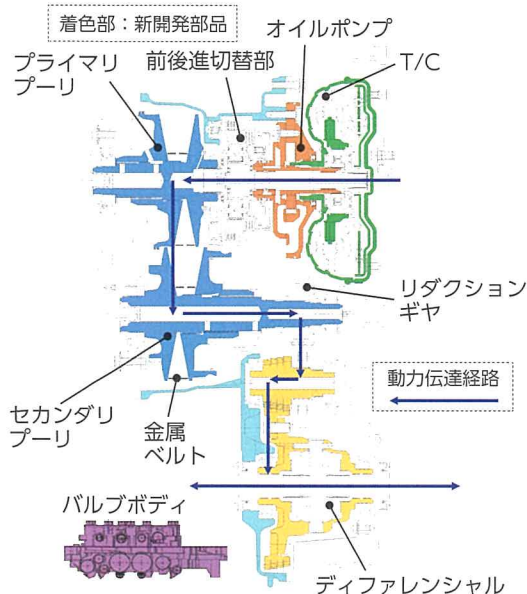


図 1 新型 CVT 断面図

4 燃費向上への取り組み

新型 CVT を搭載する北米カローラは、競合クラストップの北米認証モード Highway 42mpg を達成した。

新型 CVT で採用した低燃費技術の概要を下記に述べる。

4.1 世界初 同軸 2 ポートオイルポンプシステム

CVT のエネルギー損失のうち、オイルポンプが占める割合は大きい。そこで、2 ポートオイルポンプシステムを採用し、吐出圧を可変に切り替え制御する (図 2) ことで、オイルポンプの駆動トルクを約 30% 低減した (図 3)。

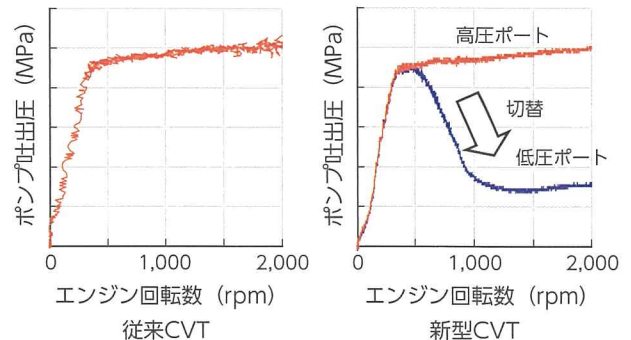


図 2 オイルポンプ油圧

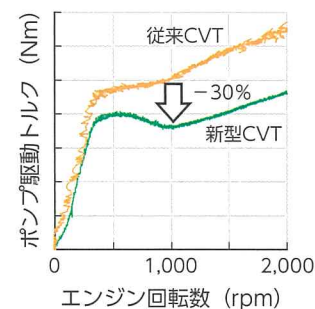


図 3 オイルポンプ駆動トルク

オイルポンプの定格容量は、プーリに短時間でオイルを供給しなければならない変速時や回転数が低いアイドル状態で所望の吐出圧を出力できるように決定される。

図 4 にオイルポンプの仕事 (油圧×流量) の内訳を示す。

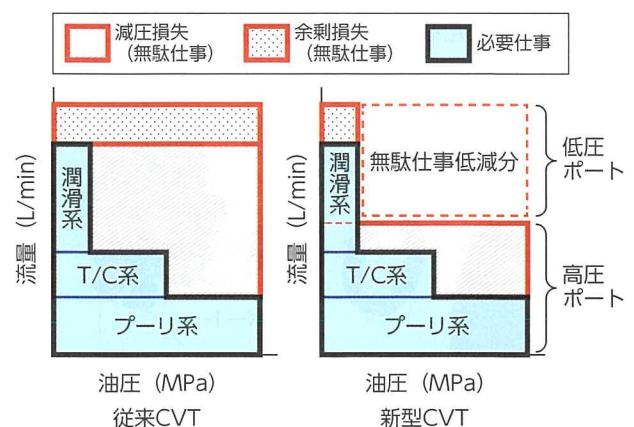


図 4 オイルポンプ仕事の比較

プーリ系は T/C 系や潤滑系よりも高い油圧を必要とする。これは、ベルトがトルクを伝達する際、金属間摩擦伝達をしているためである。

従来 CVT では、プーリ系で決定されるオイルポンプの吐出圧を減圧して T/C 系や潤滑系に圧送する際に、多くの減圧損失が発生していた。そこで新型 CVT では、従来 1 つであったオイルポンプの吐出ポートを高圧ポートと低圧ポートの 2 つに分割し、高圧ポートは主にプーリ系にオイルを圧送し、低圧ポートは主に潤滑系にオイルを圧送することで、オイルポンプの無駄仕事を大幅に低減した。

低圧ポートの切り替え方式については、図 5 に示すとおり、従来のレギュレータバルブに切り替え用のポートを追加し、切り替え機能を持たせた。この利点は、流量収支（オイルポンプ吐出量と下流の消費流量のバランス）に応じて機械的に制御できることにより、低回転時から切り替えが可能になることである。

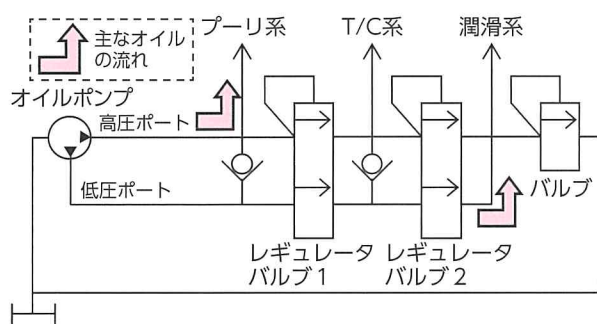


図 5 油圧回路システム

オイルポンプは、従来 CVT と同様に入力軸と同軸上に配置し、吐出ポートを増やしながらも従来 CVT と同等の体格とした。図 6 にオイルポンプの構造を示す。オイルポンプ内部における高圧ポートから低圧ポートへのリークを減らすため、オイルポンプギヤの諸元を見直した新歯型を採用した。

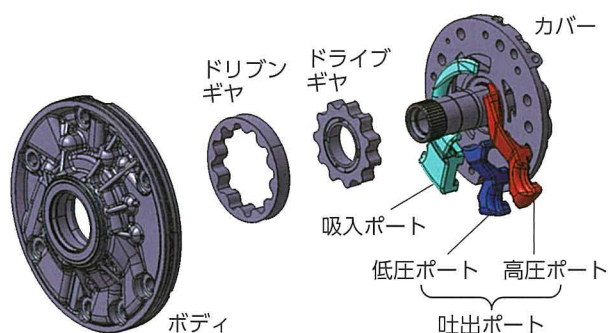


図 6 同軸 2 ポートオイルポンプ構造

また、リニアソレノイドの消費流量低減などにより、バルブボディからのリーク量を低減することで、オイルポンプの定格容量を約 10% 低減した。オイルポンプギヤの摺動抵抗は、ギヤ径に対する感度が高いため、ドリブンギヤの外径を約 3mm 小さくすることで、摺動損失を低減した。

4.2 変速比幅の拡大

金属ベルトの軌道やプーリの弾性変形・強度について解析を実施し、プーリ軸径・外径の最適化を行った。その結果、従来 CVT の軸配置・軸間距離を大きく変えることなく変速比幅を 6.3 に拡大し、低燃費化に貢献した（図 7）。

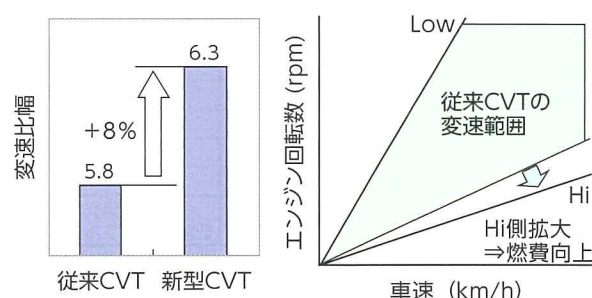


図 7 変速比幅比較

これら以外にも、低粘度 CVT フルード、ブレーキ用摩擦材の改良、ベアリングの改良といったフリクション低減技術を採用し、従来 CVT よりもロストルクを約 15% 低減した。

また、バルブボディの変更によって従来 CVT よりもライン圧の最低圧を低減した。

また、T/C やバルブボディを変更し、発進時フレックスロックアップ制御を採用することで、発進時の燃費を向上させた。

5 静粛性向上への取り組み

新型 CVT では、金属ベルトのプーリへの噛み込み振動を起振力とするベルトノイズに対し、起振力とケースの振動伝達感度の低減に取り組んだ。

起振力は金属ベルトのエレメント配列見直しにより低減した。従来の配列構造は、エレメントの板厚 2 水準（1.4mm、1.5mm）の配合比率が異なる 2 分割構造からなり、放射音の音圧振幅がベルト回転周期で変動する振幅変調となることで、「ヒュルヒュル」という変動感を伴う音が発生していた。新型 CVT では、配列構造を多分割化することで変動感

を低減し音質を改善した。また各配列構造を3種の並び①1.4mmを連続、②2水準交互、③1.5mmを連続の組み合わせで構成することで、起振力のスペクトルをさらに分散し、音圧レベルの低減も同時に達成した(図8)。

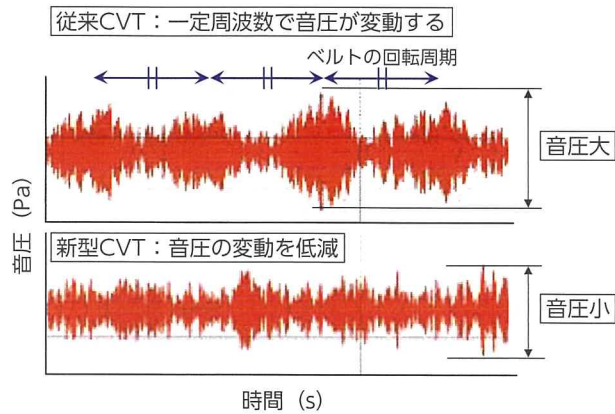


図8 ベルトノイズ波形

ケースの振動伝達感度は、ノイズの放射部位に対しリブやマスの最適配置により低減した。放射部位は、レーザドップラ振動計にて実稼動時の振動部位を把握し(図9)、その部位を遮音して放射音への寄与度調査を行うことで効率的に特定した。

これらの取り組みにより、車内音で官能1ランク分以上に相当する改善効果が得られた。

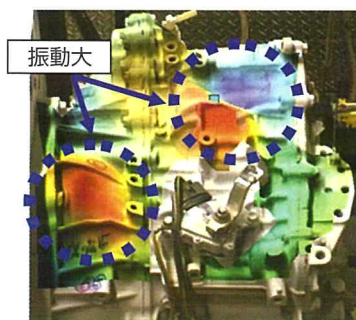


図9 レーザドップラ測定結果

6 ドライブビリティ向上への取り組み

6.1 変速制御システム

6.1.1 制御システム構成

従来 CVT はデューティソレノイドによりプライマリプリーへの供給・排出流量を制御して変速していた。しかし、流量を制御する際のばらつき因子が多いことにより、効果的なフィードフォワード制御の設計が難しく、フィードバック制御主体の変速制

御であった。今回、従来よりも高い変速応答性を実現するために、2つの大きな変更を実施した。1つ目はプライマリプリー内の油圧をリニアソレノイドにより直接制御して変速する方式に変更し、ばらつき因子を低減させた。2つ目は CVT の各プリー推力バランスと変速比の間にある変速特性をモデル化し、それに基づいてフィードフォワード制御を新設計した。この変更により、フィードフォワード制御を主体とし、フィードバック制御を補助的に使うモデルベース変速制御⁽²⁾を構築することができ、変速比の制御性能を向上させることができた。図10にその制御システム構成を示す。

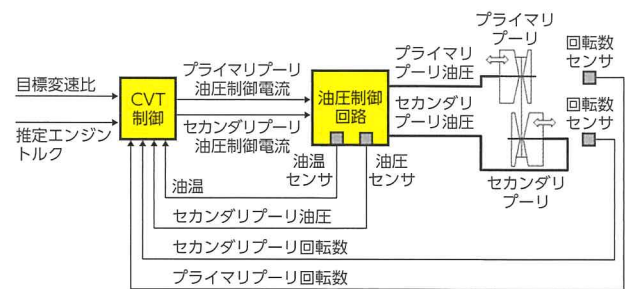


図10 制御システムの構成

6.1.2 モデルベース変速制御

図11に CVT の変速特性モデルを用いて開発したモデルベース変速制御の構成を示す。図中のハッチングブロックにモデルを適用している。特に、変速過渡を制御するための変速必要推力演算部にて、実際に出力可能なプリー推力限界の情報をモデルに付加した(図12)。また、制御ゲイン K はリアルタイムにモデルの非線形性 m を線形化するように設定することで、変速必要推力の応答性を安定化した。これにより、フィードフォワード制御の精度を向上させることができた。

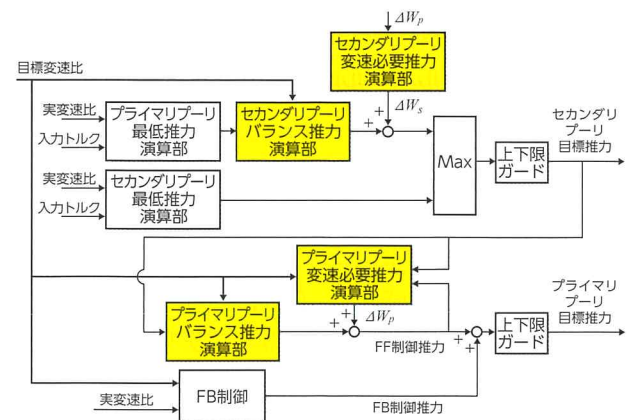


図11 モデルベース変速制御の構成

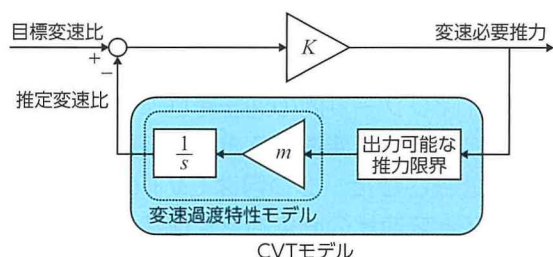


図 12 変速必要推力演算部の簡略図

このモデルベース変速制御を採用することにより、変速応答無駄時間（図 13）を従来比約 30 ～ 70% 低減させることができた（図 14）。フィードフォワード制御を主体とした制御系により、特に目標変速比と実変速比の偏差が小さい低開度の変速に関して、変速応答性を大きく向上させることができた。これにより、アクセル操作に対しても遅れの少ない変速が可能となり、よりドライバー意図にあった加速フィーリングを実現することができた。

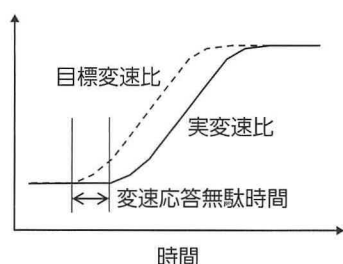


図 13 変速応答無駄時間

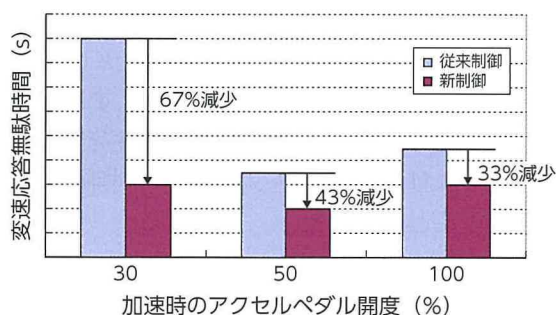


図 14 アクセルペダル開度毎の変速応答無駄時間

6.2 走りの魅力向上のための変速制御

6.2.1 駆動力設計手法に基づいた変速

アクセル開度一定時にドライバーが同じ加速度と感じる、等加速感特性（図 15 左）、アクセルペダル操作と車両加速度の関係がリニアに感じる特性をもとに（図 15 右）、実パワートレーンの実現制約を踏まえて駆動力を設計した。スロットル開度と変速比の協調制御により、発進時のアクセルコント

ロール性を向上させ、伸びのある加速フィーリング、アクセルペダル操作に対するリニアな加速度応答を実現した（図 16）。

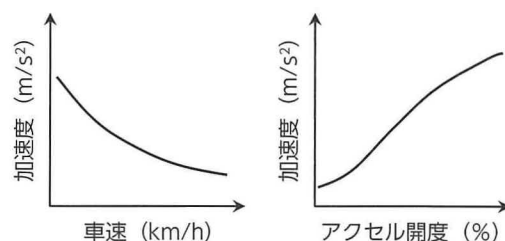


図 15 等加速感特性およびアクセルペダル操作と車両加速度のリニアリティ特性

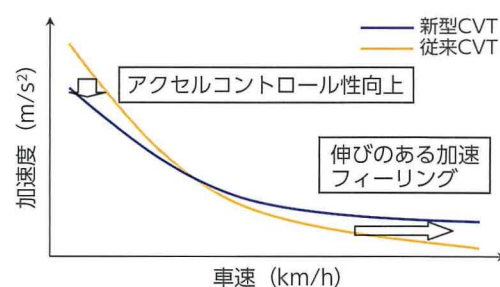


図 16 従来 CVT と新型 CVT の発進時加速度

6.2.2 北米専用の有段変速スポーツモード

北米のお客様にご満足いただけるドライバビリティを目指し、さらに走りを重視した北米専用の有段変速スポーツモードを開発した。エンジン回転数をノーマルモードよりも少し高めに設定し、ロー側の変速比を使用することで、アクセル踏み込みに対するレスポンスを向上させた（図 17）。そして、アクセルペダル操作に対して、変速比を維持する領域

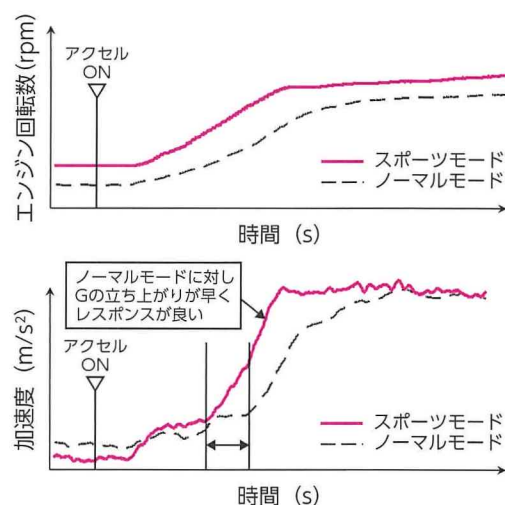


図 17 車速一定からキックダウンしたときのノーマルモードとスポーツモードの比較

を設け、エンジントルクにより駆動力をコントロールすることで、ダイレクト感を向上させた。さらに駆動力が必要な場合には、ステップ状にダウンシフトすることで駆動力を確保するようにした (図 18)。

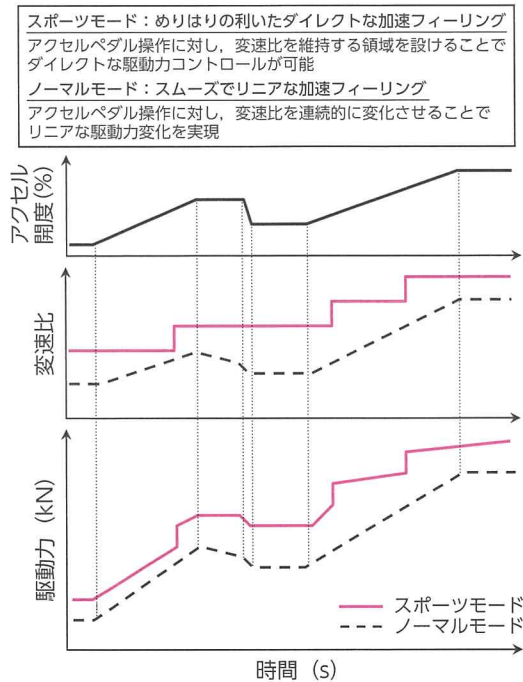


図 18 加速操作時の変速比と駆動力

■著者



外山 真悟



新居 大介



服部 邦雄



高原 秀明



大石 俊弥



井上 孝志

7 おわりに

これまでに述べた新技術により、北米のお客様にご満足いただける CVT を開発することができた。この新型 CVT は、グローバルに通用するものと考えている。

最後に、新型 CVT の開発ならびに製品化に多大なご協力をいただいた関係会社の方々に謹んで感謝する。

■参考文献

- (1) 大形勇介他：1.5L クラス FF 車用 CVT の開発，自動車技術会学術講演会前刷集，No.146-12，P.1 - P.4 (2012)
- (2) K. Hattori et al. : Development of Ratio Control System for Toyota's New Continuously Variable Transmission. SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems. Vol.6, No.1, P.144 - P.151 (2013)

パワートレイン共同開発棟の紹介

Outline of the New Powertrain Development and Production Engineering Building

坂巻 薫*
Kaoru Sakamaki

城田 幸司**
Koji Shirota

小林 武史**
Takeshi Kobayashi

日下部 卓也***
Takuya Kusakabe

芦田 敏****
Satoshi Ashida

柳 功*****
Isao Yanagi

河合 長*****
Nagashi Kawai

矢矧 雅彦*****
Masahiko Yahagi

要旨

2013年4月1日よりユニットセンター設置に対応し、本社工場内のトヨタ創業の原点でもある場所に、研究・開発、生産技術の両機能を集約したパワートレイン共同開発棟を建設した。パワートレインシステムの益々の複雑化、高度化が予想される“研究・開発”と“生産技術”の両機能に対し、更なる効率化・スピード感を加えていくため、開発業務プロセス改善にも取り組み、実験設備へも織り込んだ。本稿ではその取り組みや導入実験設備について解説する。

Abstract

On April 1, 2013, Toyota Motor Corporation established the Unit Center as a new organization to develop globally competitive powertrain components such as engines and transmissions. The Unit Center is based in the Powertrain Development and Production Engineering Building located inside the Honsha Plant, the roots of Toyota's global operations. This new facility consolidates both the R&D and production engineering (PE) functions of the powertrain field in a single location. As powertrain systems are likely to become even more complex and sophisticated in the future, there is a pressing need to enhance the efficiency and response of powertrain R&D and PE. Therefore, Toyota has taken the opportunity to introduce innovative development processes and to provide testing equipment in the new building for this purpose. This article provides an outline of these processes and testing equipment.

キーワード パワートレイン、研究・開発、生産技術、一体化、連携強化

1 はじめに

世界一の競争力を持つユニットの開発と、迅速な製品化の実現のための新組織「ユニットセンター」が2013年4月1日に設置されるのに対応し、パワートレインユニットの開発についても、ロケーションが点在していた研究・開発と生産技術の両機能を、トヨタ創業の『原点』である本社工場敷地内に集約。「もっといいクルマづくり」を加速するために、クルマの中核となる次世代パワートレインユニットの開発拠点として同年2月から運用を開始した。

本稿では、新パワートレイン共同開発棟の狙い・取り組み事例や、導入設備の一部を紹介する。

2 パワートレイン共同開発棟概要

この開発拠点では、研究・開発と生産技術の両機能が一体となって、新技術や新工法を開発するための、開発業務プロセスを変革することにより、卓越したパワートレインユニットの開発と、迅速な製品化の実現を目指す。オフィス内には、両機能の開発者が図面や部品・車両を一緒に見ながら議論できる場を多く配置し、そのためのスペースを十分確保するために、個人の席をなくして執務エリアを自由に使用できるオフィスのフリーアドレス化や、書類の電子化によるペーパーレス化などを新たに導入する。

パワートレイン共同開発棟は、研究・開発と生産技術両機能の一体開発オフィスを中心に、上層部に試作・工法開発・部品などの機能評価エリア、下層部にユニット・車両評価を中心とした評価・適合エリアで構成され、一連の業務を建屋内完結で行うことができる（図1）。

* ユニット統括部

** 計測技術部

*** エンジン統括部

**** ドライブトレイン実験部

***** HV システム開発統括部

***** プラント・エンジニアリング部

***** 技術管理部

なお、通常稼動時には約 2,800 人の従業員が勤務する予定。

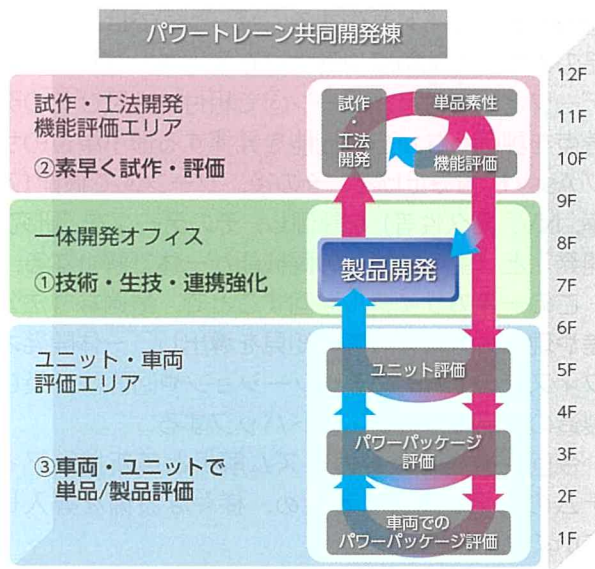


図1 各エリア概要

2.1 外観・用途

図2に建物外観を示す。

鉄骨造12階建、延床面積10,997m²、高さ58.27m
主な外部仕上げ

外壁：フッ素ガルバリウム鋼板

屋根：アスファルト外断熱防水工法



図2 パワートレーン共同開発棟全景

従来のパワートレーン系実験棟はSRC造（鉄骨鉄筋コンクリート造）としていたが、下層階（1～5F）に重量大&振動大の車両実験室・エンジン実験室・モータ実験室を配置しCFT柱（鋼管コンクリート柱）を採用した鉄骨造とすることで、オフィスの居住性を確保しながら構造コストで約10%の低減を実現できた。

2.2 大空間レイアウト（図3）

南北に階段、エレベーター、トイレ等のコアゾーンを配置することで中央に大空間（東西105m×南北70m）の作業室・実験室ゾーンを確保。床耐荷重2t/m²とすることで大半の実験設備等を設置することができ、更に将来の変更にもフレキシブルに対応が可能となっている。

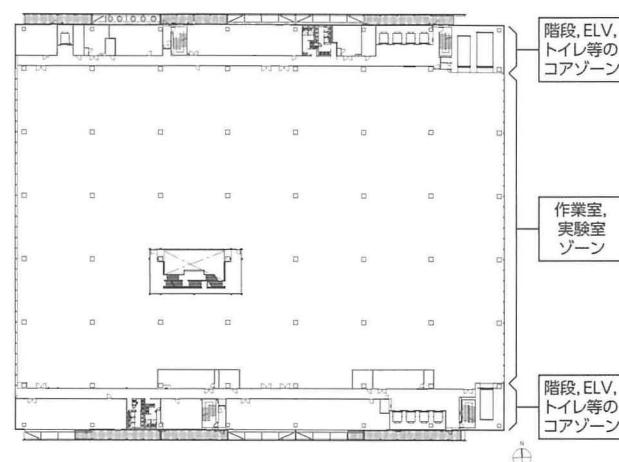


図3 大空間レイアウト

2.3 建屋省エネ、防災等

2.3.1 省エネ・CO₂低減の取り組み

Low-e（低放射）ガラス窓、庇、局所排気等による負荷の抑制、太陽光発電、外気冷房等の自然エネルギー利用、エンジン試験の排熱利用、高効率照明、人感センサー制御等のエネルギー資源の有効利用、実験設備非稼動時の建屋設備連動停止制御、実験用冷却水の流量制御等の実験設備との連動制御を行うことで、従来に比べ53%のCO₂削減となる見込み。

この取り組みの中でも特にエンジン排気ガスのカスケード利用は、排ガス投入ボイラ、熱交換器を用いて排熱利用を行う（図4）。

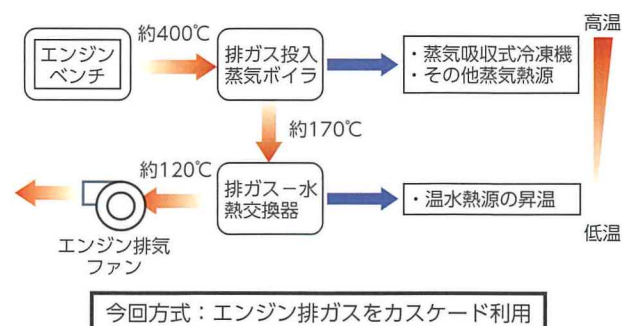


図4 エンジン排気ガスのカスケード利用

また昨今の電力不足への対応として、熱源設備では吸収式冷凍機とターボ冷凍機の組み合わせにより電力デマンド抑制に寄与している。更にはオフィス空調として EHP（電気式ヒートポンプ）+ GHP（ガス式）のベストミックス空調を採用している。

2.3.2 防災の取組み

災害時には非常用発電機によりスプリンクラー、非常用エレベーター等の防災設備の機能を維持するとともに、感震器、燃料漏液センサーを設け、燃料設備及び実験ガスなどを緊急遮断する。

3 “研究・開発”と“生産技術”の一体化

これまで、自動車の機能・システムの複雑・高度化に伴い、“研究・開発”と“生産技術”の分業・肥大化が進んできたが、その弊害として、互いの要件の共有不足による、開発の質・効率・スピード感低下が課題になってきている。

今後も競合に勝ち続けていくためには、「もっといいクルマづくり」をリードする圧倒的競争力を持つ次世代パワートレーンユニットの迅速な製品化が必須である。

そこで、“研究・開発”と“生産技術”の両機能が一体で開発を実践・加速する場を 10F 及び 12F を中心に構築した。

図 5 で、10F を例に、そのコンセプトを示す。ここでは、部品～サブ Assy で、機能要件とモノづくり要件を定量紐付けし、徹底したメカニズム解析と革新技術アイテムの効果実証を狙い、①試作・工法開発、②単品素性計測、③組付け評価、④サブ Assy 機能評価の 4 つのゾーンで構成している。

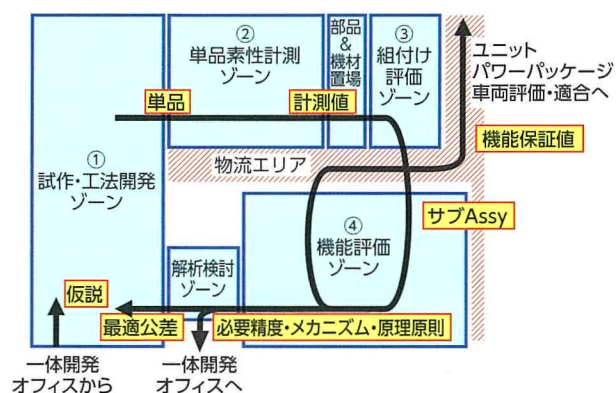


図5 一体開発ゾーンコンセプト

8F 及び 9F の一体開発オフィスから上がってきた「仮説や技術課題」を受け、ゾーン①で、次世代の試作技術や新工法の開発・実証をしながら部品を超短期でスピード試作する。ゾーン②では、その部品の素性（寸法精度や剛性分布等）を計測し、定量データとして付与、ゾーン③で組付け性及びその改善点を評価しながら、機能を発揮する最小単位のサブ Assy に組み上げる。その後、ゾーン④で機能（効率、NV、耐久性等）を評価し、そのデータを“研究・開発”と“生産技術”の両機能が一体で解析する。

この一連のサイクルを回すことで、最適な寸法公差や現象メカニズム等の知見を導出し、一体開発オフィスでの CAE シミュレーションや図面設計及び製造の良品条件にフィードバックする。

今回、徹底したメカニズム解析と革新技術アイテムの効果を実証するため、様々な設備を導入していく。

主な設備としては、パワーソースであるエンジンの熱効率を究極まで向上させること、及び肝となる状態量を指標としたやり直しの無い燃焼開発プロセス実現を狙い、吸気～燃料噴霧・混合～圧縮～点火・着火～火炎伝播～排気の燃焼の各工程におけるメカニズムを徹底的かつスピーディに計測・評価・解析する燃焼解析装置があげられる（図 6）。

吸気流量やタングルの測定装置をはじめ、気流を可視化する LDV（レーザドップラー流速測定）や PIV（粒子画像流速測定）、火炎伝播の速度や偏り、筒内の燃焼圧や温度・残留ガス、外部 EGR 率等々を測定する装置を導入する。

あわせて、可視化エンジンベンチ、可変動弁系サブ Assy を評価するベンチ等も計画している。

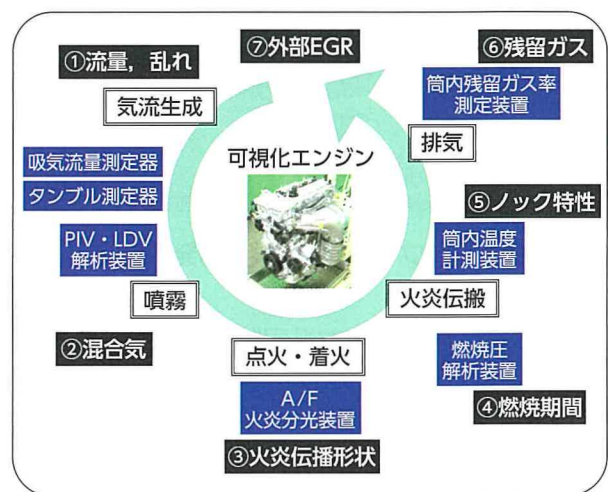


図6 燃焼解析プロセス

また、駆動系としては、核となる構成要素である歯車（ヘリカル、ハイポイド）及びCVTベルトの「ゼロ損失とNV・耐久性の両立」を狙い、歯面の精度やベルト構成部品であるエレメント・リング・シーブの形状精度を計測する装置、ギヤ対やプラネタリギヤサブ Assy、ベルトサブ Assy、ユニット Assy 状態で効率・NV・耐久性を評価するベンチ等の導入も計画している（図7）。

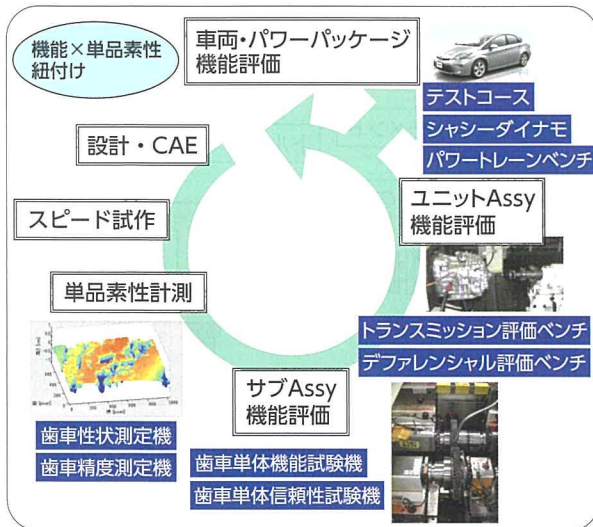


図7 一気通貫・高速開発（歯車開発の例）

これらを活用した、機能×単品素性紐付けとメカニズム解析による、CAE/モデルベースの机上設計力向上、モノづくり要件の定量化により、「もっといいクルマづくり」に貢献していく。

4 パワートレーン研究開発の連携強化

高い品質と開発工程短縮を両立するためには、部品、ユニット、システム、車両の性能・機能进行评估していくプロセスにおいて、モデルを組み込んだ実験環境を通じてフロントローディングを図っていくことが重要となってくる（図8）。

パワートレーン共同開発棟では、エンジン／駆動系／ハイブリッド（以下、HV）各ユニットのモデルの精度を高めるため、パワートレーン（動力源＋駆動系）または車両状態で動的運転が可能なパワートレーンベンチ（図9）および後述するHVシステム効率ベンチを導入する。ここでは、パワートレーンベンチで同定した駆動系モデル、エンジンベンチで同定したエンジンモデルを相互に活用する事例を紹介する。

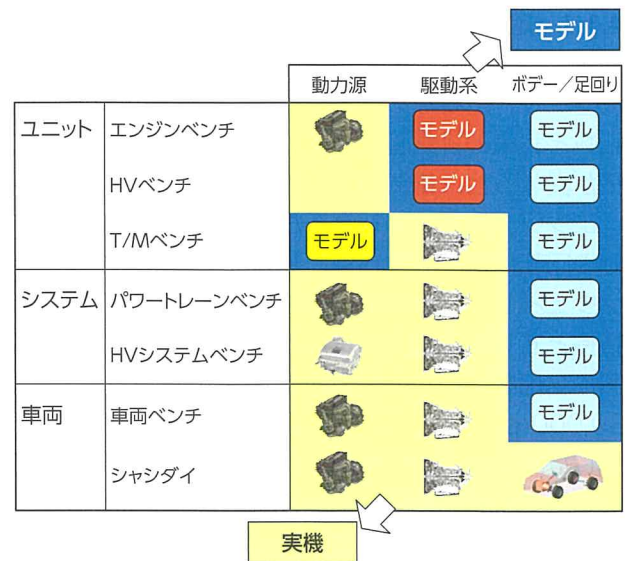


図8 各設備の実機とモデル区分け

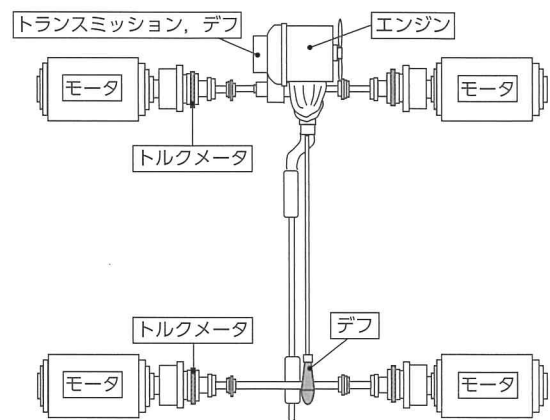


図9 パワートレーンベンチ

4.1 モデルの共通化とエンジン開発への活用

エンジンの開発においては、このパワートレーンベンチで同定された駆動系モデルを活用し、実車シミュレーションベンチ（以下、過渡ベンチ）（図10）にて開発のフロントローディングを行っていく。しかし、過渡ベンチは実車エンジン搭載角を再現できない、高回転まで回せないなどの弱点があり、定常ベンチ（図11）と過渡ベンチ間の乗せ替えが不可欠であったため、定常・過渡兼用できる新たなベンチの開発に取り組んだ。



図10 過渡ベンチ

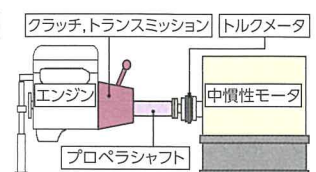


図11 定常ベンチ

4.1.1 定常・過渡両立ベンチの開発

エンジンベンチにて実車をシミュレーションするに当たり、重要なのはエンジン始動時のエンジン回転数と実車の排気管レイアウトの再現である。これらが異なると、排気ガスの再現は望めない。

エンジン始動時の初爆後から回転ピークに至るまでの回転加速度は大きく、動力計に要求されるトルクウェイトレシオも最大となる。そこで、低慣性を特長とする永久磁石式PMダイナモ（図12）の高トルク化を行い、従来の低慣性動力計の回転加速度30,000rpm/sを大きく上回る50,000rpm/sを達成した。また、小型なため、最小限の排気管の加工にて、ダイナモ架台に干渉しない実車排気管レイアウトが可能となった（図13）。



図12 PMダイナモ外観

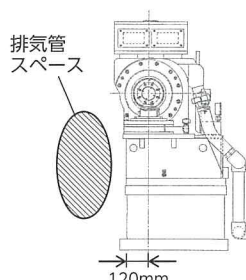


図13 ダイナモ架台

動的運転の再現のためには、トルクウェイトレシオだけでなく、トルク制御応答性が求められる。よって、過渡ベンチには、高剛性シャフトが不可欠であるが、搭載時のセンター合わせに時間を要する、実車のエンジン搭載角を再現できないという弱点がある。そこで、高いねじり剛性と曲げ方向のフレキシブルさを併せ持つ等速ジョイント（CVJ）シャフト（図14）を採用し、両立を実現。合せて、エンジンとのアタッチメントの軽量化、短縮化により曲げ共振を回避し、従来の過渡ベンチでは限界とされていた4,000rpmの壁を打ち破り、7,000rpmまで試験を可能とした（図15）。

エンジンと軸トルクメータ間の剛性を高めることにより、爆発変動をダイレクトに計測できるため、エンジンモデルの同定精度が向上できる。その反面、エンジンのトルクピーク値が2倍近くなり、定格の大きな軸トルク計の選択を余儀なくされるため、平均トルクの計測精度が悪化する。そこで、これまでの単一方向のモーメントのみ計測するトルク計より、xyz方向の力とモーメントを計測してラジアル力やスラスト力の干渉補正が可能な6分力計タイプを採用するとともに、伝達速度の速いアナログ値で

制御し、精度の高いデジタル値で計測することにより、要求精度を確保した。

このような二律背反の困難を克服し、定常・過渡両立ベンチの開発を行い、パワートレーン共同開発棟への設備設置に至った。



図14 CVJシャフト

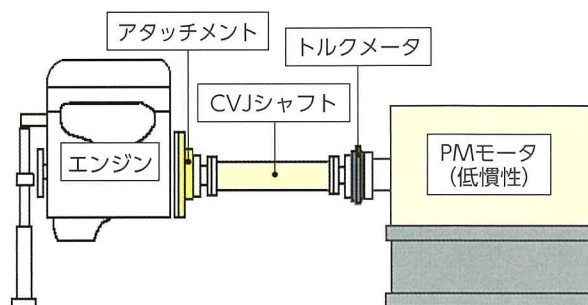


図15 定常・過渡両立ベンチ

4.1.2 実車シミュレーションの実証試験

エンジン始動時の実車再現性を検証した。従来のベンチと比較して、エンジン回転数の実車再現性が大幅に向上し、実車との排気ガス濃度の差も±5%以下を確認した（図16）。

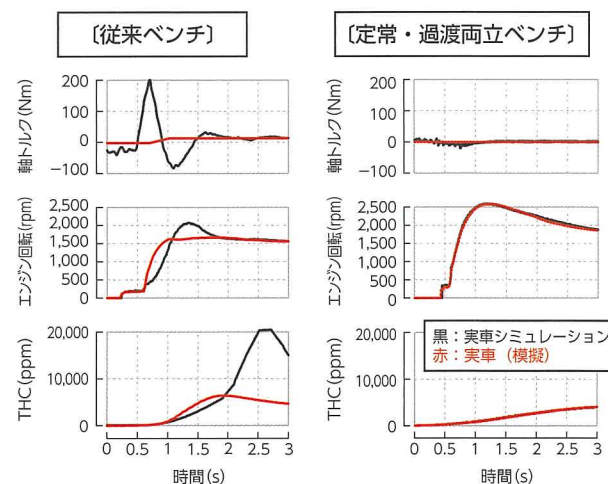


図16 実車シミュレーション実証試験結果

4.2 HV 新多機能ベンチ

HVシステムを早期に迅速に評価するため、今回最新のシミュレーション技術導入により、評価ベンチにてエンジン挙動のモデル化を実現した。本評価

ベンチはベンチにて車両挙動の模擬、およびそれらの自動計測化を可能にし、種々のHVシステムをエンジンレスで電気部品のみで評価開発できる環境を構築した。これによりエンジン実機の試作品の完成を待つことなく、エンジン開発と並行してモータの評価が行えることで大幅な評価のフロントローディングと期間短縮化が可能となり、スピーディなHV車両開発に大きく貢献する。

なお、本機の詳細は後述の論文「車両レス・エンジンレスでHVユニットを適合・評価可能なバーチャル&リアルシミュレータ（VRS）の開発」で詳細に解説するため、ここでは省略する。

4.3 HVシステム効率ベンチ

ハイブリッド車の更なる燃費向上に向けて、HVパワートレインにおいてはHVシステム全体の効率向上も不可欠である。そのためには、各要素の損失を究極まで低減することが必要である。損失解析手法として、モデルベースを活用し、HVシステム全体で評価することで、性能向上と開発効率化の両立を実現させる。

4.3.1 HVパワートレインの損失低減

HVパワートレインシステムは主にエンジン、モータ、インバータ、電池、トランスミッションを含めたドライブトレイン全体と、それらを統合制御する制御装置で構成される。

各構成要素の損失は、大きく“機械損失”と“電気損失”に分類される。

従来の開発においては、個々の損失を単独で測定し、車両の走行状態に当てはめてシステム全体の損失解析をしていたが、車両の走行状態は環境条件に応じて様々に変化するため、実際の走行状態を正確に把握することが困難であった。

4.3.2 HVシステム効率ベンチの開発

HVパワートレインの損失解析試験装置として、従来の課題を解決すべく、さまざまな条件下での車両（HVシステム）の走行状態を正確に再現させ、高精度で損失解析できるHVシステム効率ベンチを開発した。試験設備の概要を、図17、18に示す。

本設備の機械構成は、エンジントルク特性を模擬する駆動用低慣性モータ（M1）、タイヤ特性を模擬する吸収用低慣性モータ（M2、M3）、HVバッテリーを模擬したバッテリーシミュレータで構成される。

設備は、制御部のモデルで指令値を作り高速運転制御し、計測部で高速データ計測を実行する。

損失計測は、電気損失は高精度の電力計、機械損失は高精度のトルク計を用い、システム全体を同期計測することで、各走行状態の各瞬間の損失が測定・解析できるシステムとしている。走行環境の設定は、バッテリーの充電状態や各種温度等の条件をモデル上で演算し、様々な実走行条件を模擬することが可能となる。走行パターンは、定常走行はじめ各種モード走行や、実走行データをもとに運転再現させることができ、実走行状態を正確に再現し損失解析が可能となる。

これにより、走行状態に応じた各要素の損失を正確に掴むことで、機械損失と電気損失が切り分けられ、的確な効率向上を実現できるようになる。

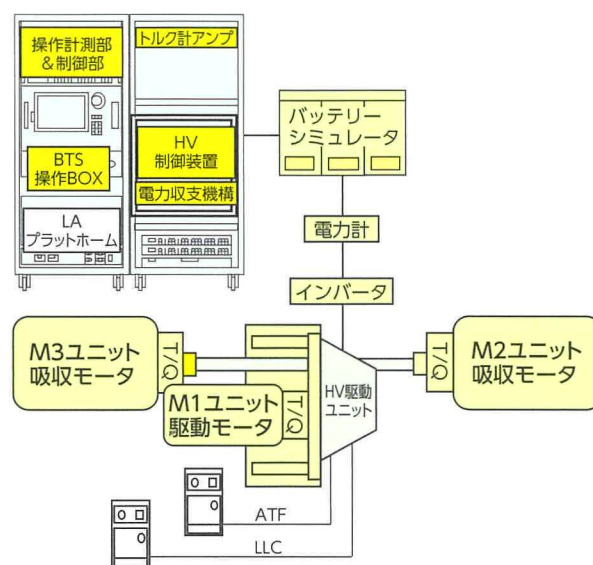


図17 HVシステム効率ベンチの構成



図18 HVシステム効率ベンチの外観

5 まとめ

本パワートレイン共同開発棟は、研究・開発と生産技術の両機能を単に集約しただけでなく、本稿にて一部紹介させて頂いた通り、開発業務プロセスを変革する様々な仕組みも取り入れている。

「もっといいクルマづくり」に向けますます重要な役割を担っているパワートレーンユニット開発において、パワートレーン共同開発棟が「もっといいユニットづくり」の象徴となるべく、研究・開発、生産技術一体となり、世界一競争力のあるユニットの開発と速やかな製品化を実現させる。

■著者



坂巻 薫



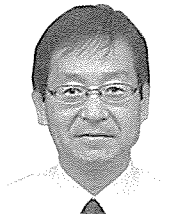
城田 幸司



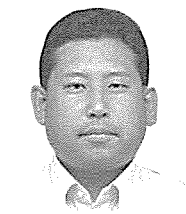
小林 武史



日下部 卓也



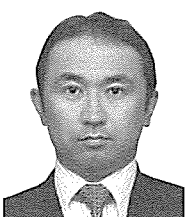
芦田 敏



柳 功



河合 長



矢矧 雅彦

車両レス・エンジンレスでHVユニットを適合・評価可能な バーチャル&リアルシミュレータ (VRS) の開発

Development of Virtual and Real Simulator (VRS) to Calibrate and Evaluate Hybrid Vehicle Components without Real Car or Engine

水野 光*
Hikaru Mizuno

直野 隆哉*
Takaya Naono

及部 七郎斎**
Hichirosai Oyobe

花田 秀人**
Hideto Hanada

城田 幸司*
Koji Shiota

特
集

要旨

従来、HVの評価・適合は、エンジンを含めた完成車両にて、実施していた。今回、エンジン・車両レスで、電気部品（モータ、インバータ）の評価・適合を実現する“HV-VRS”を開発した。これは、エンジン/バッテリー/車両特性と2モータ機械分配式HV制御をシミュレーション技術を駆使することで組み合わせ、最新の高応答ダイナモやバッテリーシミュレータをリアルタイムに動作させることで実現した。結果、HV特有の過渡状態の評価・適合が、ユニット開発の先行段階より可能となり、様々なHVシステム開発のスピードアップに大きく貢献した。

Abstract

Conventionally, evaluation and calibration procedures for hybrid vehicle (HV) components have been performed using completed vehicles installed with a real engine. Consequently, Toyota Motor Corporation has developed a virtual and real simulator for hybrid vehicle components (HV-VRS) that enables the evaluation and calibration of electronic parts such as the motor and inverter without requiring the use of a real car or engine. HV-VRS uses simulation technology to integrate engine, battery, and vehicle characteristics with the controls used by a 2-motor mechanical power split type HV. This allows the latest high-response dynamometer and battery simulators to be operated in real-time. As a result, evaluation and compliance procedures for the special transient operation states of HVs can be carried out at earlier stages of hybrid system component development, thereby helping to speed up various aspects of HV system development.

キーワード HV, 適合, ベンチ, VRS, 過渡評価/適合, エンジンレス

1 はじめに

現在のトヨタのHV (Hybrid Vehicle) 車両開発は、まず車両の試作と並行してエンジン、トランスミッション、モータ、インバータ、バッテリー等の各ユニットの設計～試作～評価を実施する。その後、開発後期に各ユニットを試作車に組み込み、車両としての性能評価・確認を擦り合わせていく開発プロセスとなっている。この車両評価における擦り合わせの過程で各ユニットの問題が見つかった場合、ユニット再設計～試作～評価～車両評価のやりなおしが発生する。これにより非常に大きな期間・工数・

コストが発生し、最悪の場合車両生産日程へ影響が出ることも考えられる。

この問題を回避する為には、各ユニットの目標性能割付～要件定義～設計～試作～評価サイクルを早期に完結させ、またユニット単体での車両状態の評価を可能にし、開発後期の車両評価フェーズでのやりなおしを低減していくことが急務である。

これを実現する手段として、開発早期に使用するCAEモデルや制御シミュレータ等のシミュレーション技術を、開発中期～後期であるユニット単体評価～パワーパッケージ評価フェーズでのテストベンチによる性能確認・評価にうまく組み合わせることを考える。これによりユニット単体評価フェーズから車両としての過渡的な走行模擬を実現させ、ユニット早期完成度向上及び開発後期でのユニット設

* 計測技術部

** HVシステム制御開発部

当社では上記の実現を目指し、エンジン単体のテストベンチ⁽¹⁾、エンジン+トランスミッションのパワートレーンテストベンチ⁽²⁾の形態での実車走行模擬が可能なVRSベンチ（VRS：Virtual & Real Simulator）を開発してきた。今回HVユニット（モータ、インバータ、昇圧コンバータ）のみで車両走行状態の再現可能にし、制御適合を早期に実現可能なテストベンチが完成したので報告する。

実走行状態を車両レス・エンジンレスで模擬するテストベンチ“HV-VRS”を開発した(図1)。これは実車部品であるHVユニットとトランスアクスルに、シミュレーション技術であるエンジン/バッテリー/車両動特性モデルとHV走行制御シミュレータを、リアルタイムに高応答アクチュエータで負荷することで、実走行状態の模擬を実現している。



3 開発目標

- (1) エンジンのトルク・回転変動を模擬
- (2) 車両（路面）のトルク・回転変動を模擬
- (3) バッテリの電流・電圧変動を模擬
- (4) エンジン・モータ協調制御の模擬

のみとし、モデルを構成するエンジン / バッテリ / 車両等のプラントモデルや HV 走行制御シミュレータは全て MATLAB/Simulink 上に構築した。これはエンジン / バッテリ / 車両 / HV 走行制御の特性を自在に可変化することを狙いとしている。そして上記モデルは DSP (デジタルシグナルプロセッサ) 上に全て実装し、 $\mu s \sim ms$ オーダでリアルタイムに演算・入出力可能とした。これによりアクチュエータとモデルは相互に DSP を介して結合され、最終には供試体を含んだテストベンチ全体としてリアルタイムな制御・評価を可能とした。



開発したエンジンレス HV-VRS ベンチの構成図（図 3）を下記に示す。



エンジン模擬ダイナモ (図3の M1 ダイナモ) は、トヨタのHV 用エンジンの最高回転数 / 最大トルクをカバーできるよう、最高回転数 7,000rpm 以

上、最大トルク 520Nm 以上、回転慣性モーメント $0.01\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 以下を開発目標とした。

アクチュエータである高応答・低慣性 M1 ダイナモの駆動/吸収トルクは、最高回転数 8,000rpm、最大トルク 525Nm、回転慣性モーメントは $0.103\text{kg}\cdot\text{m}^2$ まで極小化し、更に慣性補正制御により、実エンジン以下の0慣性モーメント相当まで可能にした。またこれを駆動するエンジンモデル(図4)により、実エンジン同等のトルク立上り/立下り特性を模擬した。図5にプリウスでの車両とベンチのアクセル ON-OFF 走行時のエンジントルク及び回転の比較結果を示す。トルクの立上り/立下り及びエンジン回転は実車同等に模擬できていることがわかる。

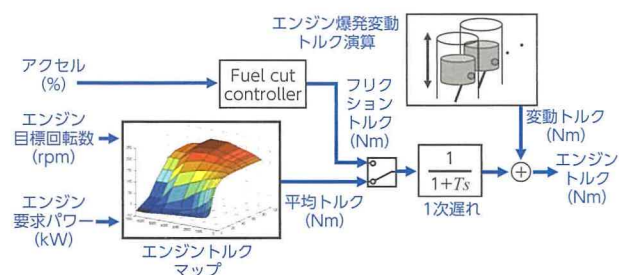


図4 エンジンモデル

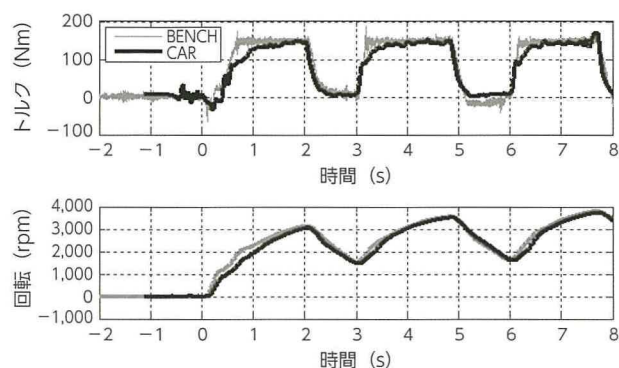


図5 プリウス アクセル ON/OFF パターン

4.3 車両(路面)模擬ダイナモ

動力吸収 M2, M3 ダイナモに関しては、HV 電気システムの評価上重要な MG2 (モータジェネレータ 2) 回転加速度 $15,000\text{rpm/s}$ 以上を開発目標とした。

低 μ 路飛び込みなどの車両側トルク変動は、車両の荷重変動やタイヤのスリップ特性を織り込んだ車両モデル(図6)と低 μ 路等の路面負荷モデルを組合せ模擬した。図7にプリウスのベンチと実車での低 μ 路スリップ走行結果を示す。図より MG2 回転加速度は実車同等の $15,000\text{rpm/s}$ で模擬できていることがわかる。

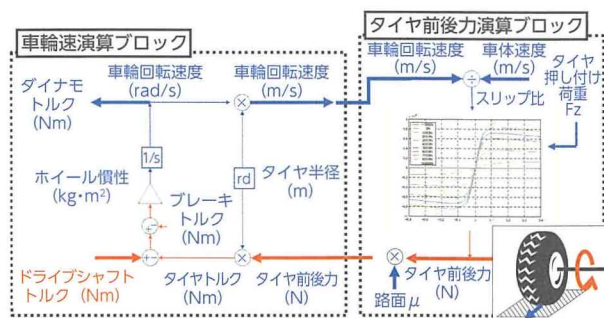


図6 タイヤスリップモデル

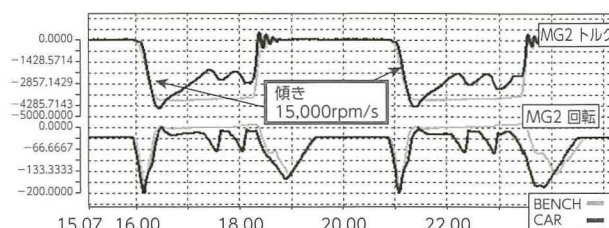


図7 プリウス 低 μ 路スリップ走行パターン

4.4 HV バッテリー模擬装置

PHV や EV などの大規模なバッテリーを積むシステムでは、今までバッテリーのパックが完成するまでシステムの評価が着手できなかった。そこで高速応答可能な直流電源と内部抵抗器により、負荷急変時の電流変化や内部抵抗による電圧降下を模擬する。

装置仕様は、従来のHVから将来のEVまでを見据えた 160kW の電源容量を選定し、最大電圧 600V、最大電流 400A が出力可能とした。また電圧応答性能は 50ms とし、バッテリーモデル(図8)

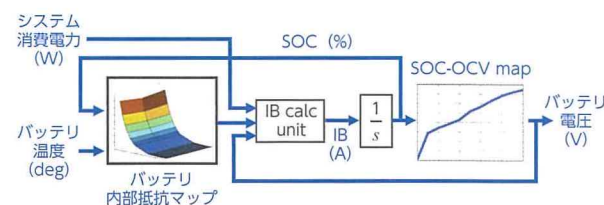


図8 バッテリーモデル

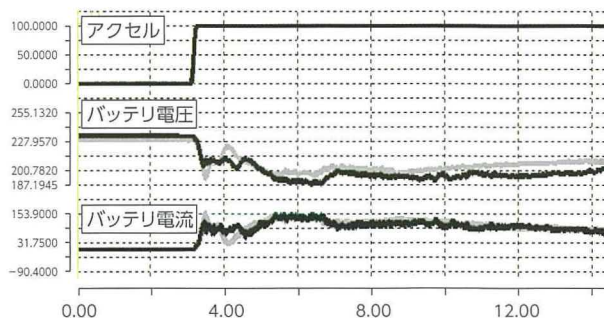


図9 プリウス 全開加速パターン

で計算する電圧値をリアルタイムに指令可能とした。図9にプリウスのフル加速時のバッテリー電流 (IB), バッテリー電圧 (VL) を示す。

図9より、バッテリーの電流・電圧変化を模擬できていることがわかる。

4.5 ECU 模擬装置

車両ではアクセル開度が一定でも ECU によってエンジン、モータの指令値は時々刻々と変化する。このアクセル指令からエンジンパワー、MG1、MG2 (モータジェネレータ 1, モータジェネレータ 2) のトルク指令値を生成する走行制御を模擬できないと、先述の実走行状態を正確に模擬できない。

そこで机上検討用の走行制御シミュレータをベンチ上でリアルタイムに運転できる開発に取り組んだ (図10)。今回その走行制御を車両と同周期で演算する為、ms オーダで計算可能なプロセッサ演算能力、開発環境である MATLAB/Simulink と C 言語との親和性から DSP の演算能力を選定した。また、並行してベンチの I/O との整合性を取るインタフェース開発も実施した。図11にプリウスでのフル加速走行結果を示す。

エンジン、MG1、MG2 のトルク指令値が一致することがわかる。一部 MG1 トルクに差異があるが、評価上はアクセル ON 直後のトルクの立上りが重要である為、問題はない。これより、実車同等の走行制御をベンチ上で模擬することができた。

以上の主要な構成要素技術により、ベンチ上で実車評価を置き換え可能になった。

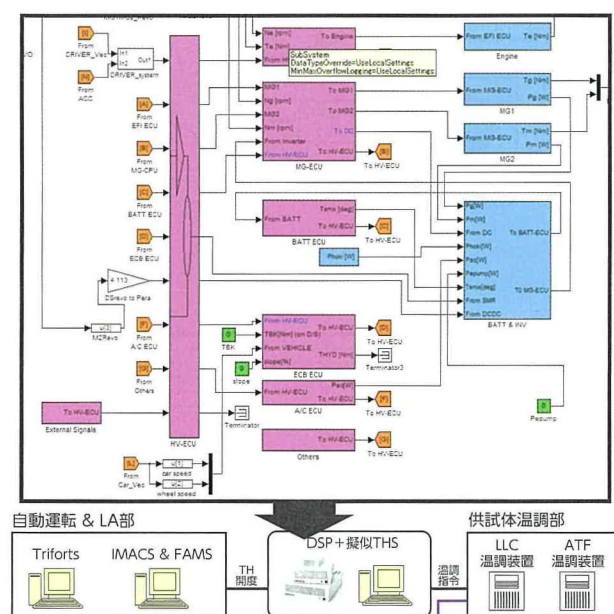


図10 シミュレータのリアルタイム化及び実装

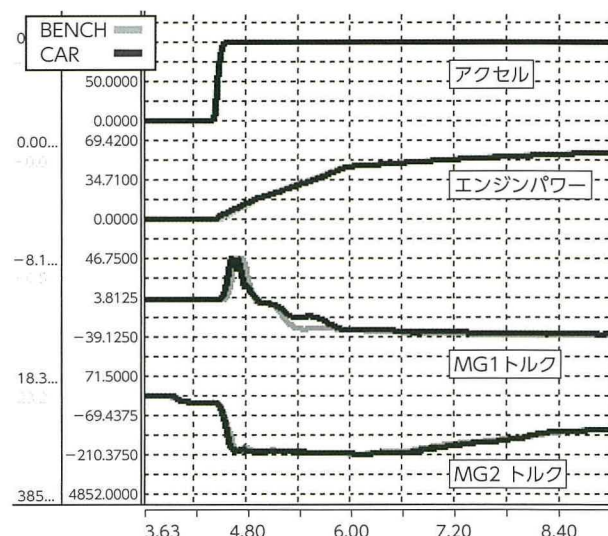


図11 プリウス 全開加速パターン

5 車両開発への適用

HV の電気部品は、世代交代に合わせコスト、体格、重量の低減を強力に推進している。その中で電気部品の一例であるコンデンサ (図12) の容量決めは重要な課題である。

従来、コンデンサの容量決めは、車両で HV 電気システム全体の成立性評価が必要であり、コンデンサ試作～車両評価まで、長い評価期間が必要だった。

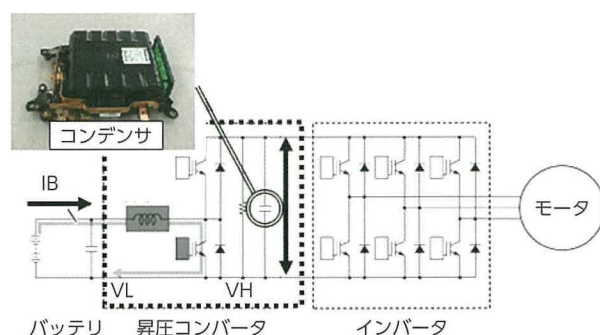


図12 昇圧コンバータ用コンデンサ

今回、開発ベンチを活用し、車両完成前にシステムに必要なコンデンサ容量の検討にトライした。具体的には、容量違いのコンデンサを準備し、ベンチ上での車両で実施している全試験パターンを走行し、それぞれのコンデンサ容量の違いによる影響を確認した。

今回そのパターンの代表例として、フル加速走行時バッテリー電流 (IB)・昇圧コンバータ電圧 (VL)・インバータ入力電圧 (VH) を図13に示す。黒線がコンデンサ容量大、灰線が容量小の波形である。

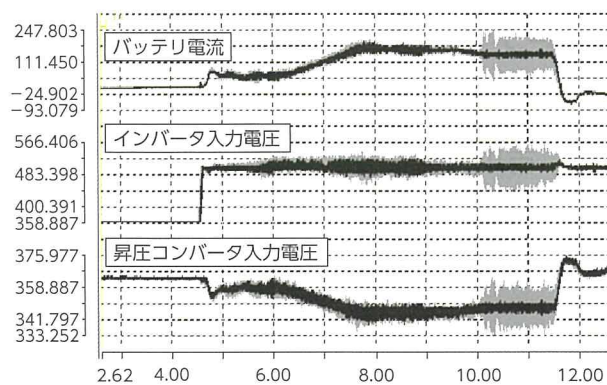


図 13 コンデンサ容量違い

図 13 のように、コンデンサ容量違いにおける昇圧コンバータ電圧の安定度の違いがわかる。このように車両完成前からコンデンサなどの電気部品のスペック決めが可能となった。

今回評価がベンチ上で可能となったことから、従来必要な車両準備工数やテストコース上での評価工数を画期的に低減することができた。図 14 に車両とベンチでの必要工数を示す。

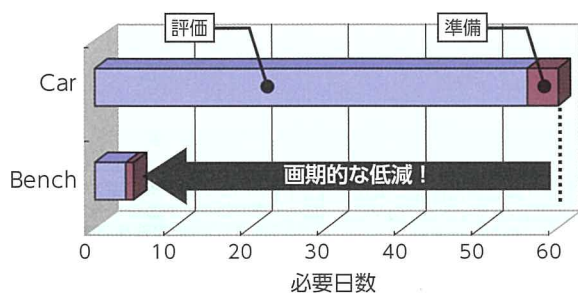


図 14 ベンチ利用時の工数低減効果

図 14 に示すように、従来 1 ヶ月必要であった評価期間をベンチではわずか 5 日で実施することができた。

今回開発したベンチを用いることで、試作車両ができる前から検討が可能になり、HV ユニットの早期完成度向上や評価期間短縮への貢献が可能となり、開発を大きく推進できる。今後もこの開発ベンチを活用し、HV 電気部品の早期スペック決めや制御の早期評価実現に貢献していく。

6 まとめと今後の方針

エンジン、車両、バッテリー、HV-ECU を模擬し、エンジンレス HV-VRS ベンチを実用化した。その結果、以下のことが可能になった。

- (1) アクセル急変時のエンジン・MG1・MG2 回転変動の再現
 - (2) スリップ&グリップ走行時のエンジン・MG1・MG2 回転変動の再現
 - (3) 車両完成からの HV ユニット過渡評価・適合
- これにより HV 電気システム評価の大部分をベンチ上で実施可能になった。

今後は、本ベンチ技術の応用としてインバータ評価や次世代 HV・EV システムの開発、ドライブトレイン評価への展開と並行し、エンジン、トランスミッションベンチにおいても本ベンチと同様にシミュレーションと実ユニットを融合させることにより、過渡的かつ実車両相当の挙動の評価を可能にし、ユニット早期完成度向上及び評価やり直し撲滅を目指していく。更にベンチでの計測データと CAE シミュレーション等での計算データとの比較によるシステム同定、現象の物理モデル化による CAE・シミュレーション精度向上に貢献していく予定である。

参考文献

- (1) 城田幸司, 馬場文彦, 堀越正史: 車両レス・エンジン仮想評価シミュレータ, 自動車技術会学術講演会前刷集, Vol.66, p.1 - 4 (2000)
- (2) 小島靖, 城田幸司, 堺昭治: ハイブリッド車の開発支援設備としての VRS, Toyota Technical Review, Vol.54 No.1, p.76 - 81 (2005)

著者



水野 光



直野 隆哉



及部 七郎齋



花田 秀人



城田 幸司

新型 Lexus IS の空力開発

Aerodynamic Development of the New Lexus IS

西浦 正昭*

Masaaki Nishiura

市川 創*

Hajime Ichikawa

安岡 志朗**

Shiro Yasuoka

要旨

新型 Lexus IS の開発では、歴代の IS で培われてきたスポーティセダンとしての魅力的なスタイルと良好な運動性能をさらに向上させることに加え、近年の環境問題に対応した燃費性能を両立させていくことが求められている。これらの要求を満足するため、空力性能の面からもその両立に取り組んだ。その結果、スタイルと運動性能を向上させつつ空気抵抗係数 C_D は 0.25 を達成し、D セグメントの 4 ドアセダンとしてトップレベルの値を得ることができた。本稿ではそれを達成させた新型 Lexus IS に採用した空力技術について報告する。

Abstract

In the Lexus IS, Toyota Motor Corporation has developed a stylish sporty sedan with top-class dynamic performance. The development of the latest Lexus IS aimed to further enhance these characteristics while achieving the high fuel economy performance also required by modern environmentally conscious customers. Aerodynamic performance plays a critical role in helping to satisfy both of these requirements. The aerodynamic development of the Lexus IS successfully enhanced the style and dynamic performance of the vehicle while achieving a drag coefficient (C_D) of 0.25, one of the lowest values for a four-door D-segment sedan. This article describes the aerodynamic technology adopted on the Lexus IS to achieve these aims.

キーワード 空力, 空気抵抗係数 (C_D), 運動性能

1 まえがき

新型 IS の空力性能開発において、車両コンセプトに合わせ、スタイルとの両立、運動性能の向上、低 C_D 化を共に両立させる開発を行った。そのために、車両の基本となるパッケージの検討からスタイルを決定する過程において、継続的に CFD (数値流体解析) や風洞試験を繰り返し、さらには運動性能向上のための走行試験も並行して実施することで、空力性能を向上させた。本稿は其中で開発した新たな空力技術について報告する。

2 空力性能開発のコンセプトと取組み手段

本開発車両においては、スポーティなスタイルと 4 ドアセダンとしてのパッケージ、運動性能を高次元で両立することを目指し、下記項目に着目し開発を実施した (図 1)。



図 1 空力開発コンセプト

これらを実現させるためには、開発初期段階から車両の基本パッケージや初期デザインへ空力要件を織り込むことが重要である。そのため、初期段階では CFD を活用し複数の車両形状案を検証し、スタイルやパッケージ、造形の塊の方向性を決定した。スタイルの方向性が決まってきた段階では、1/1 モデルを用いた風洞試験、さらに試作車による走行試験を繰り返し、細部の形状について開発を重ねた (図 2)。

* 性能実験部

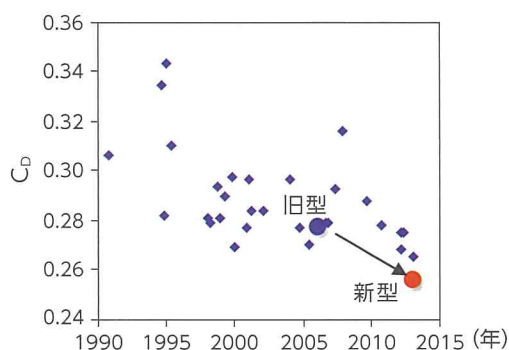
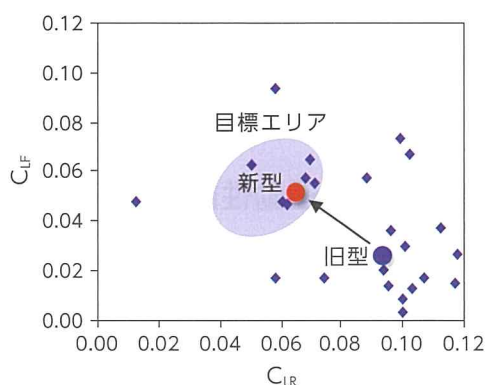
** 車両 CAE 部



図2 評価車両

3 空力特性（空気抵抗，揚力）の進化

近年の燃費性能向上の必要性より、スポーティセダンであっても他のセダン型乗用車と同様に低 C_D 化が必要である（図3）。また、スポーティセダンに求められる運動性能向上のためには、空気揚力係数 C_L の低減と前後バランスの最適化が必要である。新型車両では、旧型車両に対して C_D を約8%低減、リア空気揚力係数 C_{LR} を約30%低減し良好な C_L の前後バランスを実現している（図4）。


 図3 セダン車の C_D トレンド

 図4 セダン車の C_L 前後バランス

4 車両パッケージでの空力性能改善

車両の空力性能向上のためには、車両各部位の流れが相互に影響することを考慮し、車両全体の形状

を最適化することが必要である。そのためには、車両パッケージを空力性能に配慮したものにすることが重要である。

旧型車両に対して新型車両では4ドアセダンとしての快適性を向上させるため、後席居住性の向上、トランク容量の拡大を狙い、ホイールベースを+70mm延長させた。その延長分の内、50mm分を後席位置の後退に使用し、20mm分を後席乗員の頭上空間の確保とルーフ後端の高さの低減に利用した（図5）。このパッケージ設定によりルーフ頂点からトランク間の曲率を拡大することが可能となり、ルーフ後方の流れの剥離を縮小し（図6）、圧力を回復させている（図7）。

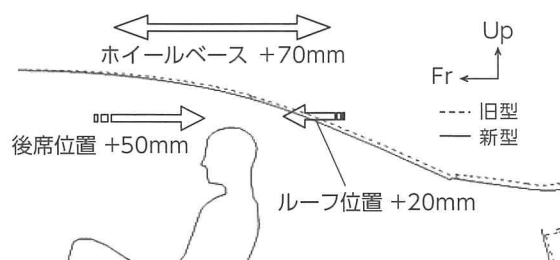


図5 リアキャビン，ルーフのパッケージ変化

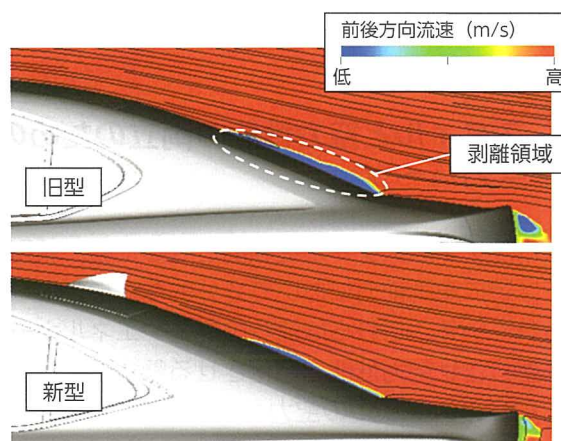


図6 ルーフ後方流速比較結果（CFD）

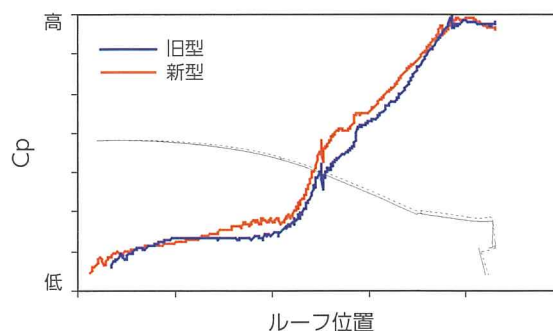


図7 ルーフ後方静圧比較結果（CFD）

このルーフ後方の剥離縮小，圧力回復により，トランク後方の流れが安定し，車両後流の収束性向上にも貢献している．同様に圧力回復を促進させる改善をボデー側面や床下についても実施しており，4方各面の風流れバランスを整えることで，車両背面の圧力を効率的に回復させ（図8）， C_D を低減させている．

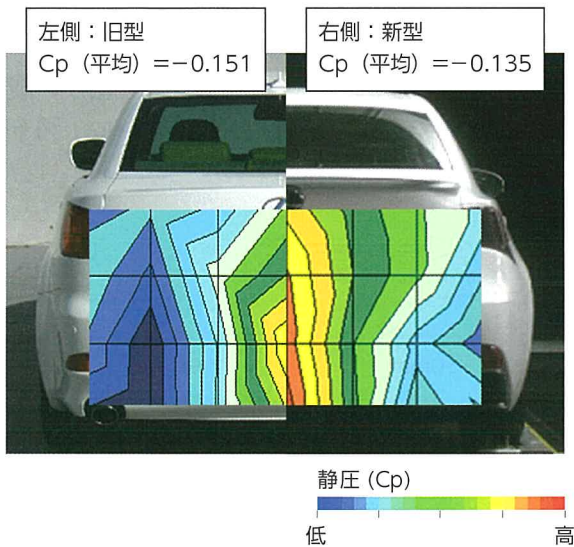


図8 車両背面静圧比較結果（実車）

5 スタイルと空力性能の両立のための空力パーツ

スポーティなスタイルを強調させるため，新型車両では特に車両前方において立体的な造形が取り入れられている．これらは流れの剥離やエネルギー損失を生じさせ空力性能を悪化させる懸念がある．この前周りのスタイルの空力への影響を最小限にし， C_D 低減効果が得られる空力パーツを導入した．

5.1 フロントバンパサイドエアロダクト

立体的な造形となっているフロントバンパコーナー部では，流れの剥離やホイールアーチから流れの噴出しが増加する傾向であり，車両側面の流れを乱してしまう．この問題を解決するためにエアロダクトを設定した（図9）．バンパコーナー部より流れを取り込み，バンパ側面流れの剥離を低減する効果と，ダクトで取り込んだ流れをホイールアーチ内からタイヤ側面へ沿うように後方へ排出し，ホイールアーチから噴出す流れを抑制する効果により，車両側面を整流している（図10）．

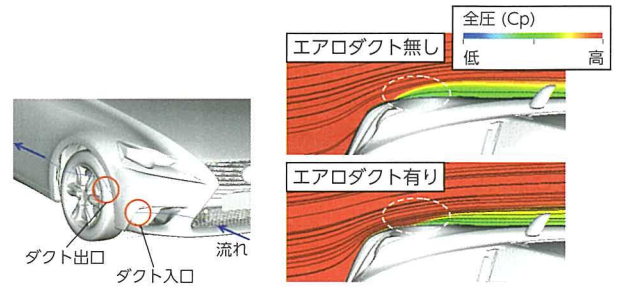


図9 エアロダクト構造 図10 全圧比較結果（CFD）

5.2 グリルシャッター

フロントグリルより流入するラジエータ冷却風は，ラジエータとエンジンルームを通過し床下やホイールハウスへ噴出するため，空気抵抗を発生させる．この抵抗を低減するために，フロントグリル直後に冷却風を遮断する開閉機構を備えたグリルシャッターを導入した（図11）．これにより，前周りのスタイルを生かしつつ流れの噴出しを減らし， C_D を低減している．グリルシャッターは空力改善効果のみならず，エンジン水温が低い時にエンジンルーム内への冷たい外気の流入を遮断することで，エンジンの暖機時間を短くし，燃費の向上にも貢献している．

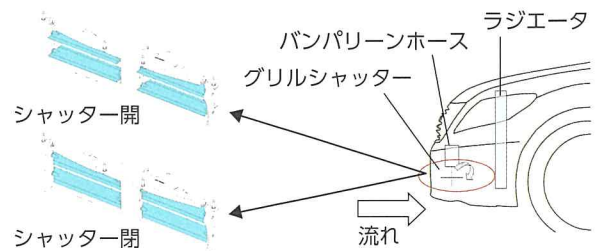


図11 グリルシャッター構造

6 空力による運動性能向上のための空力パーツ

空気力によって運動性能を向上させるため，風洞での定常状態の検討だけでなく，走行試験を実施し過渡状態の空気力変化にも着目して開発を行った．

6.1 リア周り整流パーツ

新型車両では，空気揚力の前後バランスを最適化するため C_{LR} を旧型に対して約30%低減した．主な手段としてはリアアングスポイラとリアタイヤ前スパッツを用いた（図12）．リアアングスポイラは後方へ切り上げた傾斜面とし，床下の流れをス

ムーズに車両後方へ排出することで床下の流速を増速させ、揚力を低減している。リアタイヤ前に設定しているスパッツは、一般的な板型のものより車両外方向へ拡大させた大型の形状を採用した。これによりリアタイヤ前方に衝突する流れとホイールハウス内へ侵入する流れを低減させることで、ホイールハウスの圧力上昇を抑制し揚力を低減している。リアアンダスポイラの切り上げ傾斜面を無くし、リアスパッツを一般的な板型にした場合と比較した結果、 C_{LR} を 27% 低減できている (図 13)。

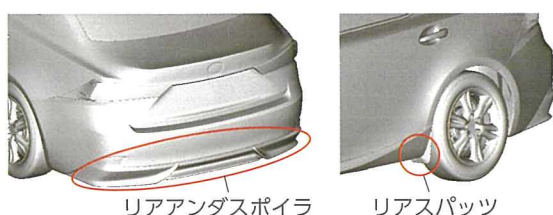


図 12 リア周り整流パーツ

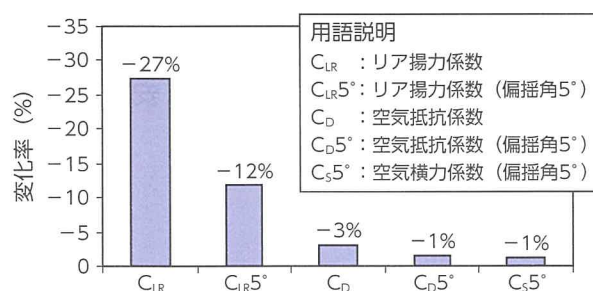


図 13 リア周り整流パーツ効果

さらに、形状の決定については、過渡状態の空力変化も考えて開発した。その効果検証のため、レーンチェンジによる走行試験を実施した (図 14)。

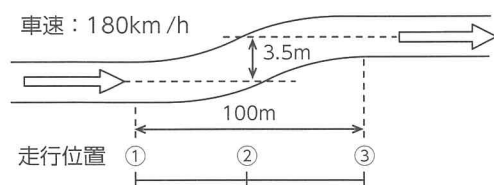


図 14 レーンチェンジ試験概要

リアタイヤ周り、リアフロア後方の流れが整流されることにより、レーンチェンジ時においてもボデー表面の流れ変化が抑えられ、ボデー表面の圧力変動が低減している (図 15)。これにより、レーンチェンジ区間①から③においてロール姿勢の変化が低減しており、レーンチェンジ区間③以降でもロール姿勢の収まりが良くなっている (図 16)。

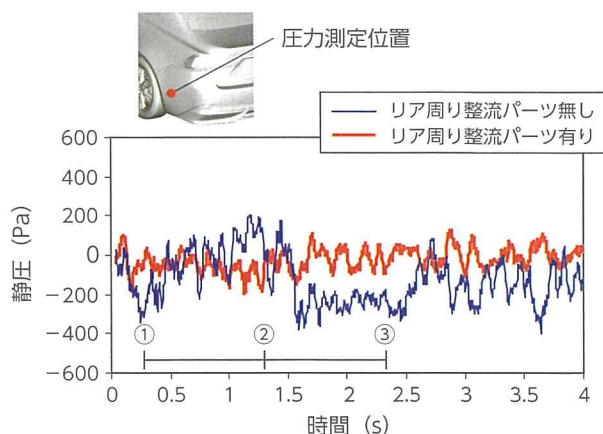


図 15 静圧比較結果 (レーンチェンジ時)

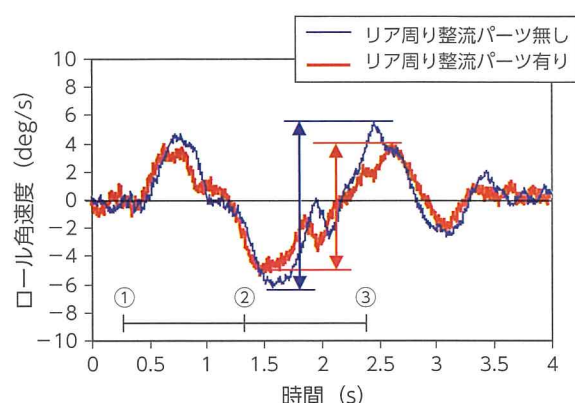


図 16 ロール角速度比較結果 (レーンチェンジ時)

6.2 フロントタイヤ周りの縦渦発生パーツ

流れが乱れやすいフロントタイヤ周りの流れを安定化させることで、運動性能を向上できると考えた。フロントタイヤ前スポイラとフロントバンパ側面部から車両前後軸方向の縦渦を発生させ、床下と側面の流れを強制的に車両後方へ誘導し、流れを安定化させる技術を導入した (図 17)。

縦渦は、進行方向に対して傾斜したタイヤスポイラの内側とバンパステップの下端において、前後の圧力差により流れが回り込む現象を利用し発生させている (図 18)。

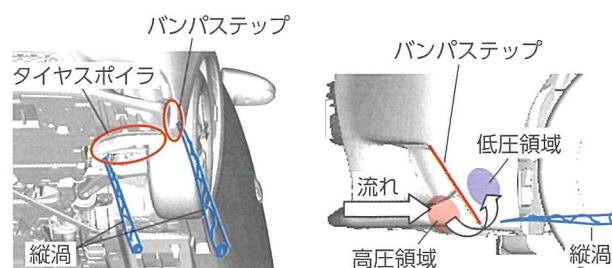


図 17 縦渦発生パーツ 図 18 縦渦発生メカニズム

効果検証のため、縦渦が発生しない状態との比較を示す。車両床下、側方の流れを確認した結果、縦渦の効果によりタイヤ後方の全圧が増加しており、タイヤ周囲の整流効果が確認できる（図 19）。また運動性能としては、縦渦の効果により直進走行時のロール姿勢の変動が低減しており、高度な直進安定性を確保している（図 20）。

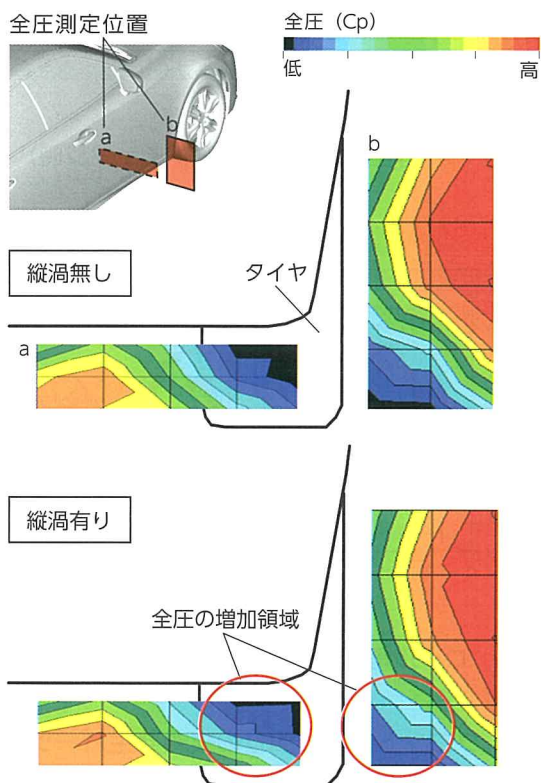


図 19 タイヤ後方全圧比較結果

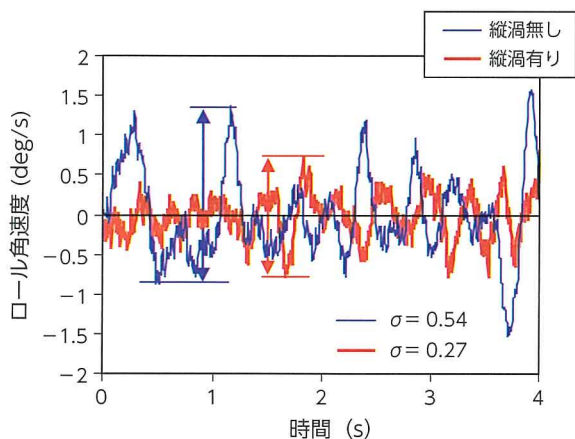


図 20 ロール角速度比較結果（直進時）

7 まとめ

スポーティセダンに求められるスタイルと車両パッケージを守りつつ、空力性能、運動性能を向上させる下記の空力技術を開発できた。

- (1) フロントバンパサイドエアロダクト，グリルシャッターによる，スタイルとの両立技術
- (2) リアアングダスポイラ，リアタイヤ前大型スパッツによるリアリフト低減と，フロントタイヤ前スポイラ，バンパ側面部からの縦渦の発生による，フロントタイヤ周りの流れ安定化による運動性能向上技術

■著者



西浦 正昭



市川 創



安岡 志朗

少気筒ハイブリッド車の起動時振動改良技術開発

Development to Improve Engine Starting Vibration in Hybrid Vehicle
with Low Number of Cylinders

城 佳久 *
Yoshihisa Jo

石崎 啓祐 *
Keisuke Ishizaki

松島 将人 *
Masahito Matsushima

要旨

近年の環境問題やCO₂削減の観点からハイブリッド車（以下HV）への期待は高まり、世界中の様々な地域で普及しつつある。HVの更なる燃費向上が求められており、達成手段としてエンジンの少気筒化が必要である。しかし少気筒HVにすると、従来技術では目標の起動時振動レベルまで低減しない。そこで本稿では過渡応答の理論解析により少気筒HVの起動時振動の発生メカニズムを明確にした。更にMG1モータトルク（以下MG1トルク）制御により起動時振動が低減でき、エンジン始動性が確保できるMG1トルク形状を考案し、実車にてその有用性を確認したので報告する。

Abstract

Hybrid vehicles (HVs) are becoming increasingly popular around the world as a potential means of helping to resolve environmental issues and reducing CO₂ emissions. It is important to further improve HV fuel efficiency, and reducing the number of cylinders in the engine is one means of accomplishing this goal. However, it has not been possible to reduce engine starting vibration to the required level in a low-cylinder HV using conventional technology. Consequently, this article describes a theoretical examination of the engine starting vibration mechanism in a low-cylinder HV using transient response analysis. It also describes the reduction of engine starting vibration by controlling the torque of motor-generator 1 (MG1) in the hybrid system. Finally, this article outlines the MG1 torque waveform that was devised to ensure engine startability and the verification of this waveform in an actual vehicle.

キーワード 少気筒HV、起動時振動、エンジン始動性、MG1トルク制御

1 はじめに

近年の地球温暖化や大気汚染等の環境問題を背景に1997年にHVが量産されて以来、CO₂排出削減の有効手段としてHVへの期待は高まり、自動車各社から発表されている。更なる燃費向上のためにHVにもダウンサイジングが求められており、HVのエンジンの少気筒化が必要である。

HVのエンジンはMG1トルクにより始動させる。エンジン起動時振動はこのMG1トルクとシリンダ内の空気の圧縮反力が強制力となり振動が発生する。従来は始動してから目標のエンジン回転数に達するまで、駆動系の1次共振を早く通過させるため、MG1トルクを急峻に立ち上げる形状としてきた。しかし少気筒にすると従来技術では目標の起動時振動レベルまで低減できない。

本稿では少気筒HVの起動時振動発生メカニズムを明確にした。更にMG1トルク制御により起動

時振動が低減でき、エンジン始動性が確保できるMG1トルク形状を提案し、実車にてその有用性を確認したので報告する。

2 少気筒HVの概要と課題

図1にHVユニットの概要を示す。エンジン始動時にはMG1により起動トルクが発生、エンジンが回転するとシリンダ内の空気の圧縮反力が生じるが、それに打ち勝ってエンジン回転数を上昇させる。その後規定のエンジン回転数になると点火する。図2に少気筒HVの起動時のフロア振動の時間軸波形を示す。従来は共振域での振動の増幅を抑えるために、MG1トルクを急峻に立ち上げ、共振を早く通過させてきた。しかし従来技術では少気筒HVの振動が目標まで低減しない（図2、AとB）。そこでMG1トルクと圧縮反力がAとBの振動の強制力となると仮説を立て検証した。

* 車両技術開発部

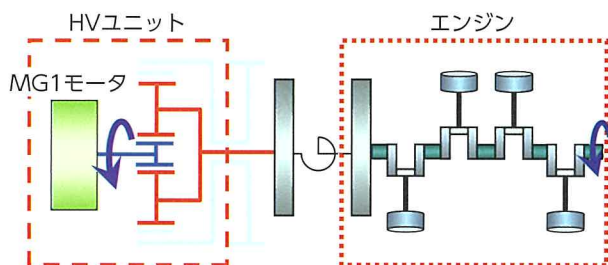


図1 HVユニットの概要

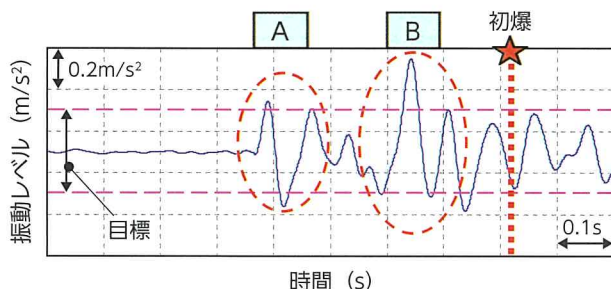


図2 起動時のフロア振動

3 MG1 トルクによる振動の発生メカニズムと振動低減検討

3.1 過渡応答解析モデル

MG1 トルクを強制力とした時のエンジン振動を検討する。理論計算のために MG1 トルクの模式化が必要である。実測した MG1 トルク波形から式 (1) の様に二次関数で模式化した。図 3 に模式化した MG1 トルクを示す。

$$T_{mg1(t)} = \begin{cases} \frac{a}{t_1^2} t^2 & (0 < t < t_1) \\ a & (t > t_1) \end{cases} \quad \text{..... (1)}$$

ここで、 $T_{mg1(t)}$ を MG1 トルク、 a を MG1 の最大トルク、 t_1 を最大トルクまでの立ち上げ時間、 t を任意の時刻とする。

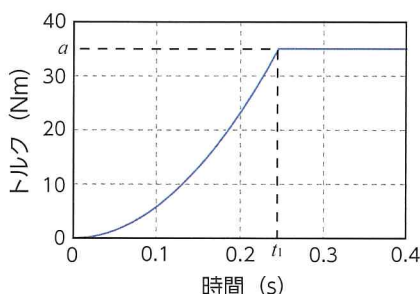


図3 MG1 トルク形状

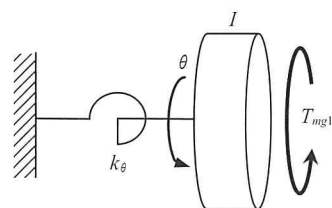


図4 理論モデル

図 4 に示すエンジンロール 1 自由度モデルに模式化した MG1 トルクを入力し、過渡応答解析を実施する。

この系の運動方程式は以下となる。

$$I\ddot{\theta}_{(t)} + k_{\theta}\theta_{(t)} = T_{mg1(t)} \quad \text{..... (2)}$$

初期条件を $\theta_{(0)} = 0$ 、 $\dot{\theta}_{(0)} = 0$ とした時、1 自由度系のインパルス応答は以下となる。

$$\theta_{(t)} = \frac{1}{I\omega_n} \sin\omega_n t \quad \text{..... (3)}$$

したがって式 (1) を入力とした時の振動応答は以下となる。

$$\ddot{\theta}_{(t)} = -\frac{2a}{I\omega_n^2 t_1^2} \beta \sin(\omega_n t + \alpha) \quad \text{..... (4)}$$

ここで I をエンジンロール軸周りのイナーシャ、 k_{θ} をエンジンマウント等価ばね定数、 $\theta_{(t)}$ をエンジンロール角変位、 ω_n をエンジンの固有振動数とする。 α 、 β は以下である。

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{1 - \cos\omega_n t_1 - t_1 \omega_n \sin\omega_n t_1}{-\sin\omega_n t_1 + t_1 \omega_n \cos\omega_n t_1} \right] \quad \text{..... (5)}$$

$$\beta = \sqrt{2 + t_1^2 \omega_n^2 - 2 \cos\omega_n t_1 - 2 t_1 \omega_n \sin\omega_n t_1} \quad \text{..... (6)}$$

この起動時のフロア振動はエンジンロール振動の寄与が大きく、エンジンロール振動を下げることでフロア振動の低減が可能である。

エンジンロール振動の計算値と実験値の比較を図 5 に示す。周期、レベルが概ね一致し、モデルの妥当性が検証できた。

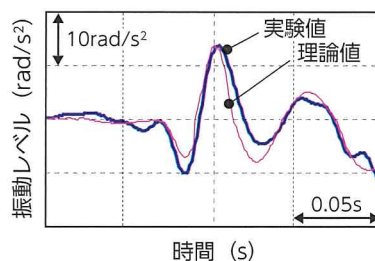


図5 実験値と理論値のロール振動の比較

3.2 振動低減方法の検討

式 (4) よりロール振動の最大値は以下となる。

$$|\ddot{\theta}_{(t)}| = \left| \frac{2a}{I\omega_n^2 t_1^2} \beta \right| \quad \dots\dots\dots (7)$$

式 (7) を用いて立ち上げ時間 t_1 を変更した時のロール振動の最大値を従来 HV と少気筒 HV について図 6 に示す。少気筒 HV は振動の最大値が増加する。これは少気筒 HV ではエンジンロール軸周りのイナーシャが小さくなるからである。立ち上げ時間を長くすると右肩下がり振動が低減する。現状のトルク形状で少気筒 HV の振動を目標まで低減するには立ち上げ時間 t_1 を延長することが必要である。しかし、立ち上げ時間を延長するとエンジンの始動時間が長くなる背反が生ずる。その他の設計パラメータについても振動低減の検討をしたが搭載スペースや質量の面で実現が困難であった。

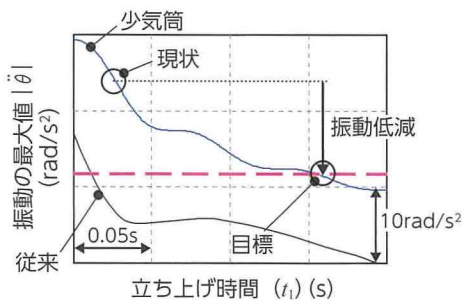


図 6 立ち上げ時間の影響

そこで現状のトルク形状を変更することで始動性と両立する振動低減方法を検討する。

振動低減指針のイメージ図を図 7 に示す。過渡的入力に対して、振動系の角速度、角加速度がともに 0 となる時点で一定外力とすることにより、それ以降の振動は発生しないと考えられる。

一定外力となる時刻 t_2 における振動を 0 にする

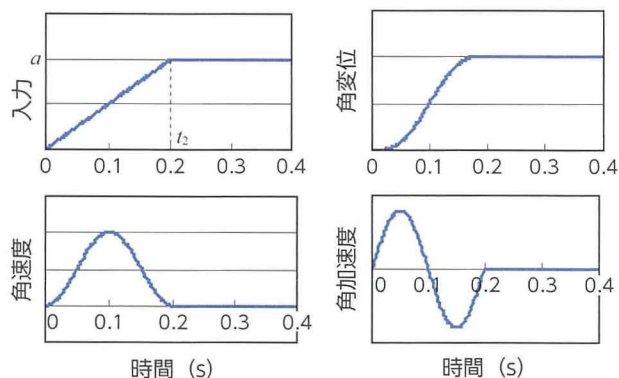


図 7 振動低減指針

必要条件是時刻 $t_2/2$ において目標トルク $a/2$ を満たし、かつその点を中心に点対称な立ち上げ形状にすることである。

MG1 トルク制御の実現性を考慮しバーサイン、サイクロイドを検討する。バーサインを式 (8) にサイクロイドを式 (9) に示す⁽¹⁾。振動が 0 となる立ち上げ時間をそれぞれ式 (10), (11) に示す。

$$T''_{\text{mg1}(t)} = \begin{cases} \frac{a}{2} \left\{ 1 - \cos \left[\frac{\pi t}{t_2} \right] \right\} & (0 < t < t_2) \\ a & (t > t_2) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$T'''_{\text{mg1}(t)} = \begin{cases} \frac{a}{2\pi} \left\{ \frac{2\pi t}{t_2} - \sin \left[\frac{2\pi t}{t_2} \right] \right\} & (0 < t < t_2) \\ a & (t > t_2) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$t_2'' = \left(\frac{3 + 2n}{2} \right) \frac{2\pi}{\omega_n} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$t_2''' = (2 + n) \frac{2\pi}{\omega_n} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで n は非負の整数である。

次に始動性について検討する。図 8 に MG1 トルクの現状とバーサインを示す。始動性を同等にするためにはトルク総和が同等になる必要がある。そのためには図 8 に示す増加する角力積（トルクの時間積）である図中の面積 S_1 と減少する角力積である面積 S_2 が等しくなるような立ち上げ時間 t_2 とする必要がある。結果として、始動性が同等以上となる条件は以下の時である。

$$t_2 \leq \frac{4}{3} t_1 \quad \dots\dots\dots (12)$$

サイクロイドの場合でも同様の結果であった。

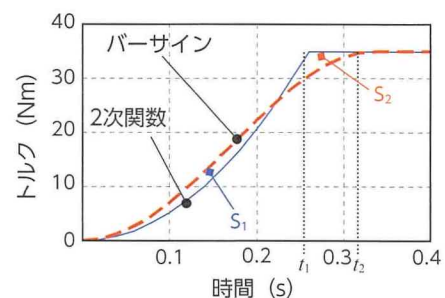


図 8 MG1 トルク形状と角力積

式 (8), 式 (9) の形状を入力とした時のロール振動の最大値を図 9 に示す。バーサイン、サイクロイド共に始動性が同等以上となる時間内に振動が 0 となる立ち上げ時間が存在する。現状の立ち上げ時間 t_1 から $\frac{4}{3} t_1$ の間に 0 となる立ち上げ時間が存在するサイクロイドを選択する。この形状により始動性は同等以上になり振動が低減できると考えられる。

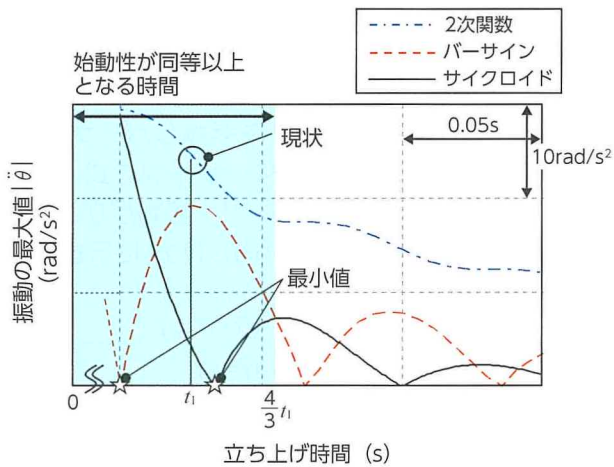


図9 トルク形状変更時の効果

4 圧縮反力による振動の発生メカニズムと振動低減検討

4.1 発生メカニズムと振動低減指針

図10にMG1と圧縮反力によるトルクの合力を示す。振動は図に示す領域で発生することから、Bの振動の強制力はこの2回のトルク変動であると考えられる。

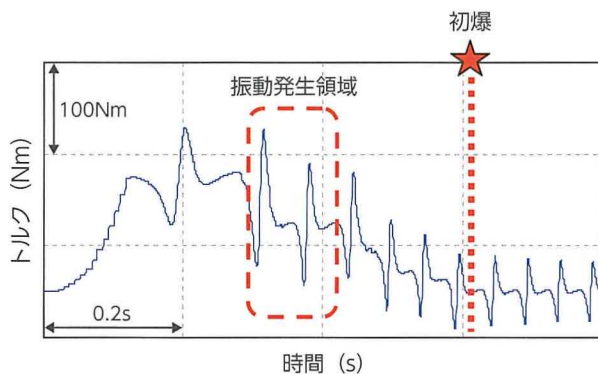


図10 MG1と圧縮反力によるトルク

現状の強制力と振動応答のイメージ図を図11(a)に示す。1つ目の入力の実線で2つ目が破線であり、それぞれの入力により固有周期で振動する。現状では固有周期 T_n が加振周期 ΔT と一致し、振動レベルが大きくなっていると考えられる。

低減指針のイメージ図を図11(b)に示す。低減指針としては、加振周期を長くすることで、1つ目と2つ目の振動応答をキャンセルさせレベルを低減する。圧縮反力による振動は加振周期を長くすることで低減可能であると考えられる。

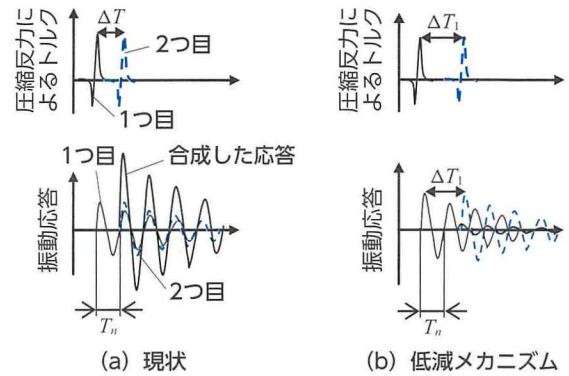


図11 振動低減の原理

4.2 始動性を考慮した振動対策

加振周期を長くすることをMG1で実施することを考える。図12に現状のMG1トルクの時間軸波形を示す。現状のトルク形状はトルクが立ち上がり、最大トルクになった後、2段階でトルクを下げている。図に示した領域で振動が発生するため、その時間より前に角力積を小さくすることが必要である。最大トルクからトルクが下がる時間 t_3 を早くすることで角力積を小さくする。図13にMG1トルクを下げる時間の制約と始動性を同等とするためのMG1トルク形状を示す。下げる時間 t_3 の制約はAの振動低減に必要なトルクを形成する時間 t_2 までである。また始動性が同等以上となる様に減少した角力積 S_3 と同一になる角力積 S_4 を増加する。

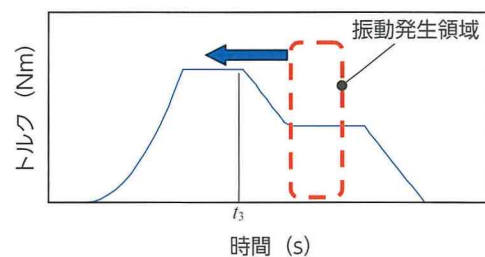


図12 現状のMG1トルク形状

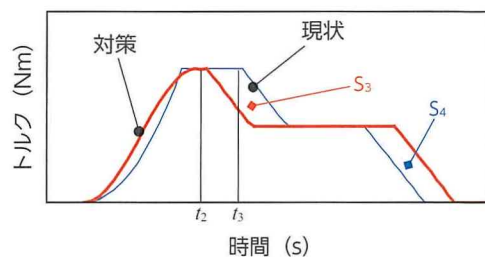


図13 始動性と振動低減の両立

トルクを下げる時間を変更 ($t_3 \rightarrow t_2$) することで角力積が小さくなり、図14に示す様にエンジン回

転数が低下し、加振周期が長くなる ($\Delta T_3 \rightarrow \Delta T_2$)。図 15 に加振周期を変更した時のロール振動の最大値を示す。空気の圧縮膨張による筒内圧を求め、それをクランク軸周りのトルクに変換し、図 14 に示すエンジンロール 1 自由度のモデルに与えてロール振動を算出した⁽²⁾。周期を長くすることで振動が低減できることがわかる。

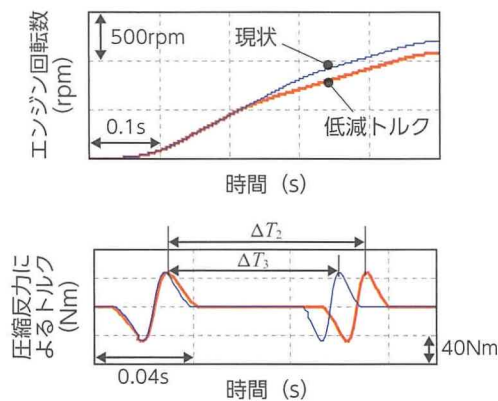


図 14 トルク変化による効果

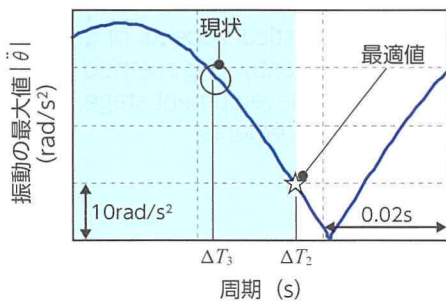


図 15 シミュレーションによる効果予測

5 実車への適用

理論での予測結果を踏まえて実車での MG1 トルクの制御マップを変更した。図 16 に現状と変更後の MG1 トルク形状を示す。

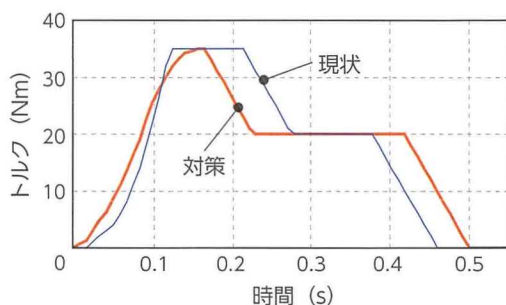


図 16 対策後の MG1 トルク形状

MG1 トルク形状を変更した時のフロア振動とエンジン回転数を図 17 に示す。対策により A の振動は 1/10、B は 1/3 に低減することができた。また、アイドル回転数までに達成する時間は同等であり、エンジンの始動時間も同等となることが確認できる。本技術は他の HV ユニットにも適用可能であると考えられる。

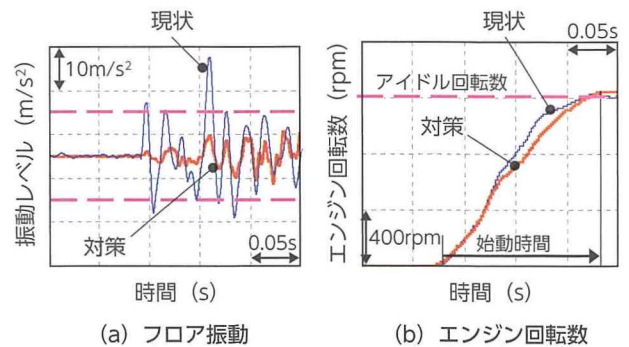


図 17 適用結果

6 まとめ

- (1) HV の場合、MG1 トルク及び圧縮反力によるトルク変動の 2 種類の強制力で起動時振動が発生することがわかった。
- (2) MG1 トルクによる振動は MG1 トルクの立ち上げ形状をサイクロイド形状にすることで低減できる。
- (3) 圧縮反力による振動は加振周期を長くすることで低減できる。
- (4) 始動性が同等でかつ振動を低減できる MG1 トルク形状を提案し、実車でその効果を確認した。

参考文献

- (1) 振動工学ハンドブック編集委員会：振動工学ハンドブック。養賢堂、1985、p.305 - p.339
- (2) 栗野誠一：内燃機関工学、山海堂、1984

著者



城 佳久

石崎 啓祐

松島 将人

事故場面再現に基づく対横断歩行者システムの効果試算手法の開発

Development of Benefit Estimation Method for Active Safety Systems for Crossing Pedestrians
Based on Accident Scenario Simulation

モラレス寺岡 エドガル芳男*
Edgar Yoshio Morales Teraoka

田中 信*
Shin Tanaka

要旨

横断歩行者に対する予防安全システムの事故低減効果試算手法を確立した。まず、実際の事故データやDS・実車試験結果から横断歩行者事故場面を模擬し、システム搭載時の状況との差分から、事故低減効果を定量的に試算する。検証として、模擬した事故場面と実事故を比較し、衝突速度や死傷者数等の統計的な事故特性も表現できていることを確認した。本手法は、システム開発段階でも事故低減効果を試算でき、システム仕様検討や要求仕様の設定に貢献する。

Abstract

Toyota Motor Corporation has developed a method to estimate the potential benefit of active safety systems designed to help avoid accidents with pedestrians crossing a road. First, this development simulated crossing pedestrian accident scenarios from actual accident data as well as the results of driving simulator (DS) and actual vehicle tests. The potential benefit of an active safety system can be estimated quantitatively based on the difference in results with and without the system installed on the vehicle. The effect is then verified by comparing the simulated accident scenarios with actual accidents. It was confirmed that this method is capable of expressing statistical aspects of accidents, such as impact speed and the number of fatalities and injuries. Consequently, this method enables the potential benefit of an active safety system to be estimated at an early development stage, thereby facilitating studies of system specifications and the definition of system requirements.

キーワード 予防安全, 歩行者, 効果試算, 効果評価, システム

1 背景

2013年の警察庁交通局の統計によると、2012年日本での1年間の交通事故死亡者数は4,411人となり、減少傾向にある。しかし、これを状態別に見ると歩行者との事故は2008年以降からは横ばいが続いており、状態別死者で最も高い割合を占めている。これらの歩行者に対する事故の対策として、歩行者をいち早く検知し、衝突の可能性が高いときには警報、さらに衝突が避けられないと判断された場合に車両を減速させることで、歩行者への被害軽減もしくは衝突回避等の支援をするシステムの研究・開発が始まっている。

しかし、このような予防安全システムの開発は始まったばかりで、実際の事故低減効果もまだ明確にされていない。また、効果試算の研究も十分になされているとは言い難い。その理由は、事故低減効果

がドライバの警報に対する応答行動や、歩行者の出現を発見するタイミングに大きく影響されるためである。

そこで本研究では、事故統計分析およびフィールド調査の結果をベースに対歩行者予防安全システムの効果試算手法を開発したので報告する。

2 実験装置および方法

予防安全システムの事故低減効果は、「システムがない場合」の事故状況（事故件数・死傷者数など）と「システムがある場合」の事故状況の差分で定義する。システムの定量的な事故低減効果を試算するために、実事故データを用いて、歩行者横断場面を模擬し、さらに、車両にシステムを搭載した場合の状況を模擬する。これらの差分を予防安全システムの事故低減効果と定義とする（図1）。

交通環境・事故場面の模擬には予防安全シミュ

* 制御システム先行開発部

レーション“AS-STREET (Advanced Safety System & Traffic REaltime Estimation Tool)”を用いた⁽¹⁾。AS-STREETはマルチエージェント型のドライバモデルを持ち、各ドライバは周辺環境の状況を知覚・認識して、自律的に運転行動を判断する(図2)。

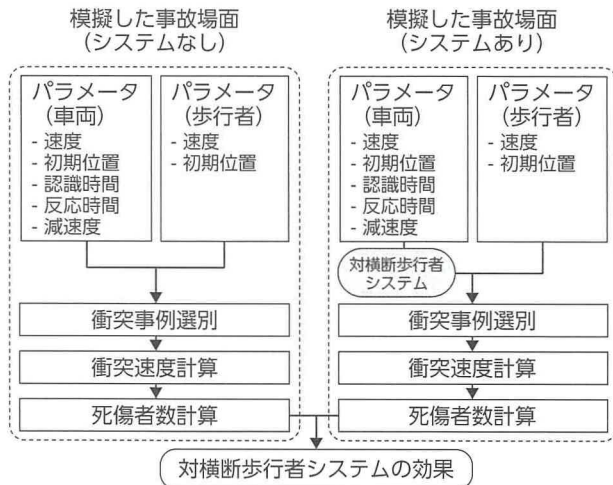


図1 事故場面模擬による予防安全システムの定量的評価の手法

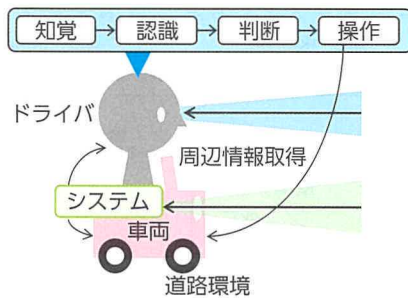


図2 AS-STREETの概要

3 事故分析

歩行者事故の低減効果試算するために、対象となるシーンを事故分析を基に選定した。歩行者が関与した死亡事故の行動別割合を図3⁽²⁾に示す。車両

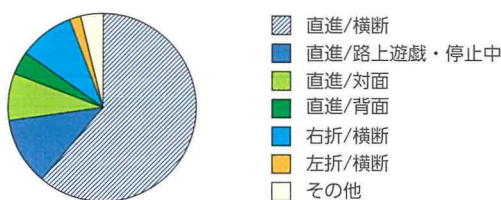


図3 死亡事故の衝突直前時、車両・歩行者状態

直進中かつ歩行者横断中の事故が約6割を占めており、最も多い。したがって、まず車両直進－歩行者横断の事故場面の模擬を試みた。

4 横断歩行者事故場面の特性

歩行者横断時の事故状況を模擬するためには、車両と歩行者の行動分析データが必要である。そこで、図4のような場面を想定して、それぞれに関する特性データを実事故データや交通調査、ドライビング・シミュレータ(DS)試験から計測・モデル化した。

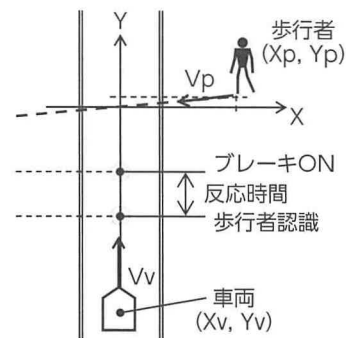


図4 事故再現に使われた横断歩行者場面

4.1 歩行者の歩行速度と横断角

歩行者の歩行速度と横断角は実路での交通調査の結果を用いる。ビデオによる定点観測映像から、歩行者の移動経路を抽出して、歩行速度と横断角の分布を作成した(図5)。

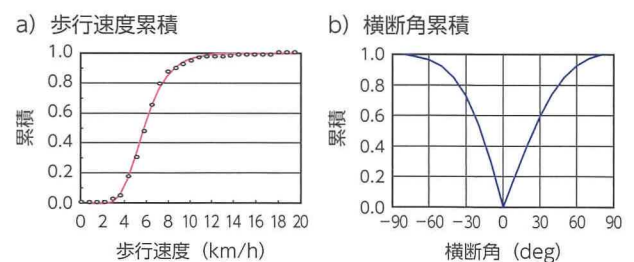


図5 定点観測の結果：a) 歩行速度、b) 横断角

4.2 歩行者出現と歩行者認知のタイミング

歩行者が出現したタイミングは、ドライブレコーダのデータから歩行者の出現した瞬間における相対位置関係（進行方向距離、横方向距離）から分布を作成(図6)。また、ドライバーが歩行者を認知したタイミングは同じくドライブレコーダから、ドライバーがブレーキを踏んだ瞬間の相対位置関係から分析を行った。

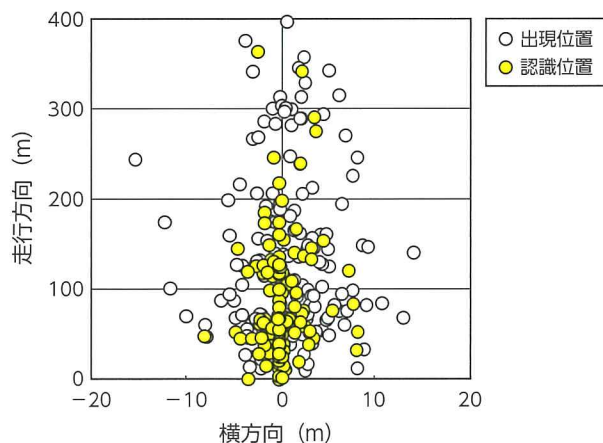


図6 歩行者出現と認識位置

4.3 車両の走行速度

車両の走行速度は、実事故データの該当するマクロデータから分布を作成。ドライバの歩行者に対する減速行動モデルは、マイクロデータ・ドライブレコーダ・実車・DS試験の結果を用いて、TTC (Time To Collision) に対する減速度で分布を作成した (図7)。

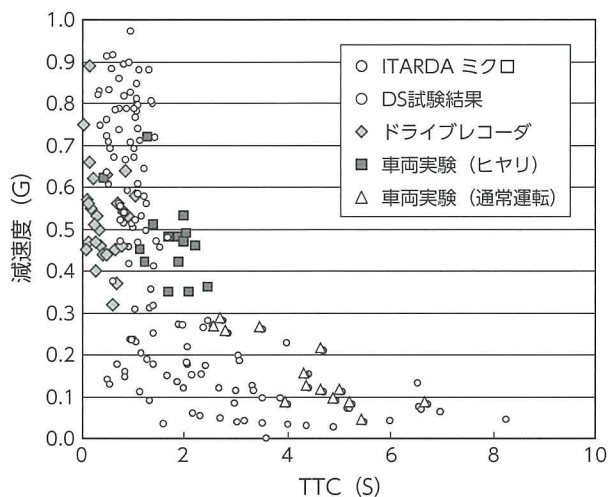


図7 最大減速度と歩行者認識タイミング

5 事故場面の模擬

以上の歩行者と車両の特性データを図4の場面に設定することで交通場面を表現する。このとき、歩行者と車両の設定次第で交差時の通過タイミングが重なったケースが事故となる。実データの分布に従って様々な特性・タイミングの歩行者と車両を走行させたときに、事故に至ったケースを抽出することで、事故低減効果の母集団 (システムがない場合の事故状況) とした。

5.1 死傷者数の試算

これまでの事故場面模擬によって、システム搭載による衝突回避率や衝突時の速度低減量を定量的に試算することができるようになった。そこで、ここからは発生した事故でどのくらいの受傷リスクとなるのかを換算する。

マクロデータから衝突時の速度と受傷のリスクの関係は図8ようになる。速度が高くなるほど、重傷、死亡のリスクが高くなることを示している。また、ドライバは受傷しにくく、歩行者は受傷しやすいため、これらは分けて分析した。また、歩行者の年齢層によって、受傷のしやすさが異なるため、「12歳以下のグループ」と「65歳以上のグループ」と「その他」の3つに分けて試算を行っている。歩行者の年齢が高くなるほど、死傷のリスクが高くなる傾向を示している。

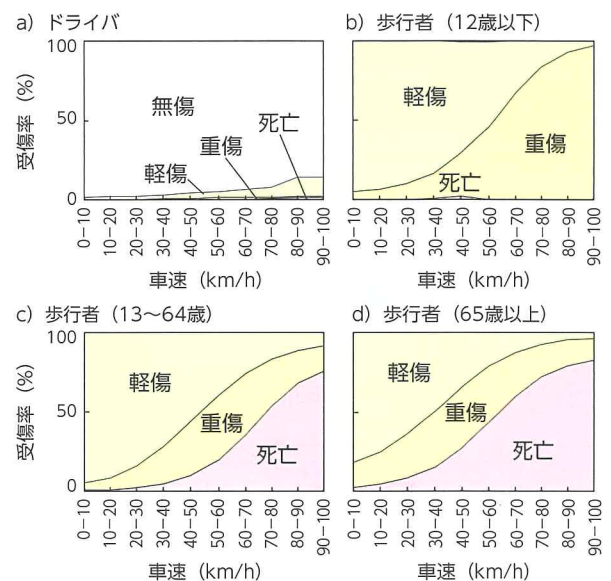


図8 事故当事者の受傷リスク速度依存性

5.2 再現性の確認

模擬した横断歩行者事故と実際の事故の死傷者数の比較を表1に表す。死亡・重傷・軽傷・無傷の割合は、実事故と同様の傾向を示した。また、模擬した事故場面の速度分布やドライバ年齢分布なども実

表1 実事故と模擬した事故の比較

	日本統計データ (%)	模擬した事故 (%)
死亡	2.4	3.2
重傷	9.0	8.8
軽傷	39.3	39.4
無傷	49.3	48.6
合計	100.0	100.0

際の事故と同様の傾向を示したことから、対象とする横断歩行者事故場면을模擬できていることを確認した。

6 システム効果評価

システムの効果試算は、システム有無での状況の差分で試算する。そこで、模擬した事故場面の車両に予防安全システムを搭載することで、システム作動時の状況模擬を行う。

今回は、効果試算手法の妥当性を確認するために、シンプルなサンプルシステムを想定した場合の事故低減効果試算を行った。想定したシステムは、接近する歩行者を検知して、警報を鳴らすことで、ドライバにブレーキを促す機能を有する。ドライバが歩行者を認知するタイミングよりも、警報のタイミングが早い場合は、ドライバのブレーキタイミングを早くすることができ、歩行者との衝突までの速度低減、もしくは交差タイミングがずれることで衝突回避に寄与する。図9にシステム有無での状況模擬の一例を示す。システム無しの場合は、衝突の0.6秒前（ $TTC = 0.6s$ 、衝突余裕時間[s]）で歩行者を認知したが、ブレーキを踏むまでの反応時間に1.1秒かかり、衝突までに回避行動を行えずに事故に至ったケースである。これにシステムを搭載すると、 $TTC = 2.0s$ で警報が鳴り、1.1秒の反応時間後に操舵回避、続いて減速回避行動を行えたことで、事故を回避できている。

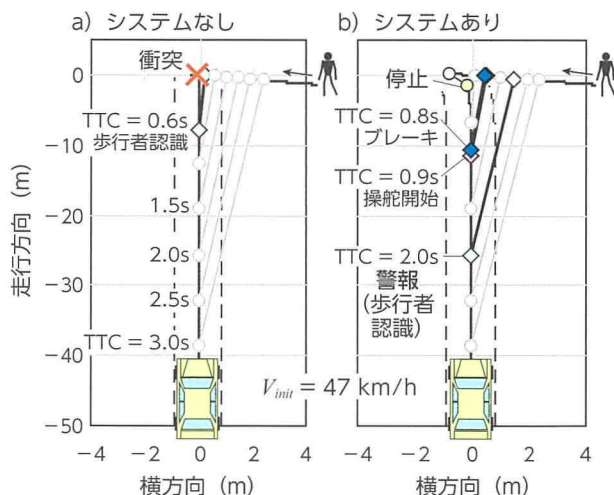


図9 システム有無での状況模擬一例

このような事故場面模擬に基づくシステムの効果試算を抽出した全ての事故場面で行った。図10の

バブルチャートは、事故件数を車両速度と歩行者認知時TTCを軸として、システム有無（警報タイミング $TTC = 2.0s$ ）で比較している。警報が鳴る2.0秒よりも遅いタイミングで歩行者を認知したケースの事故を低減できていることが分かる。また、低速の方が減速効果を期待できる為、回避した事故件数の割合が大きくなっている。

また、図11は歩行者認知タイミング別の死傷者数割合（システムなし死傷者数を100%）である。歩行者認知タイミングが遅い事故ほど、システムによりドライバの回避行動が支援され、死傷者数が低減されていることを定量的に確認することができる。

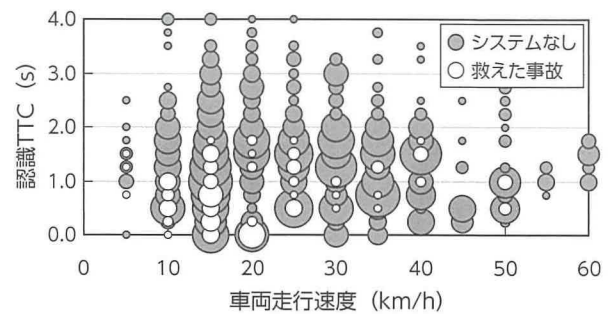


図10 システムなし事故とシステムで救えた事故

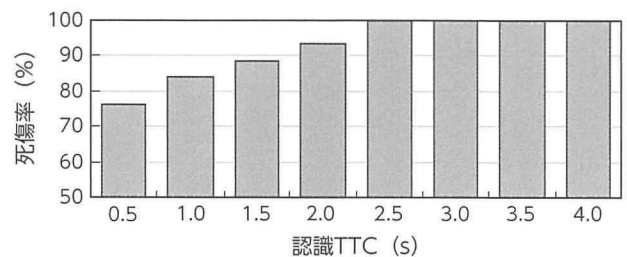


図11 認知タイミング別のシステムありとシステムなし時の死傷者数の比率

7 まとめ

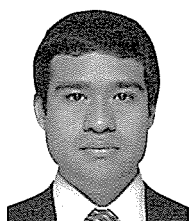
対横断歩行者予防安全システムの事故低減効果を、実データに基づく場面模擬によって定量的に試算する手法を確立した。事故場面の模擬には実際の事故データ、DSや実車試験結果を用いて、模擬した場面も実際の事故状況と比較をすることで、再現性の確認も行った。また、サンプルシステムでシステム搭載時の状況模擬も行えることを確認した。車両に搭載するシステムの仕様を変えることで、システム開発段階においても、そのシステムが市場の事故をどのくらい低減できるのかを定量的に試算することができ、システム仕様の検討に貢献する。また、

事故低減目標に対するセンサや検出性能の要求性能を検証することで、今後の予防安全システムの開発に貢献していく。

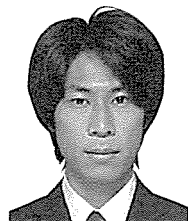
■参考文献

- (1) S. Tanaka, M. Aga, T. Mochida, et al.: Benefit Estimation of a Pre-Crash Safety System for Rear-End Collisions by ASSTREET. Fast-Zero 2011, Tokyo, Japan, 2011.
- (2) Institute of Traffic Accident Research and Data Analysis: Annual Traffic Accident Report 2011, 2011.

■著者



モラレス寺岡 エドガル芳男



田中 信

保磁力機構解明による重希土類フリー磁石の可能性検討(1) －放射光X線顕微鏡による磁化反転挙動解析－

Feasibility Study of Heavy Rare-Earth-Free Permanent Magnets by Coercivity Mechanism Clarification (1)
－ Magnetic Reversal Analysis Using Synchrotron X-Ray Microscope －

矢野 正雄 *
Masao Yano

小野 寛太 **
Kanta Ono

荒木 暢 ***
Tohru Araki

真鍋 明 ****
Akira Manabe

庄司 哲也 ****
Tetsuya Shoji

加藤 晃 *
Akira Kato

要旨

HV モータ用 Nd-Fe-B 永久磁石は高保磁力（高耐熱）化のため、重希土類元素 Dy が用いられている。Dy は資源リスクと磁石の磁化低下という欠点があり、Dy フリー化技術の構築が求められている。私たちは、約 30nm の空間分解能で磁区の磁場応答とそれに対応する組織との関連付けを可能とする放射光 X 線顕微鏡観察手法を確立した。この手法を用い、(1) 結晶粒の微細化により磁区が外部磁場に対し安定になること、(2) 結晶粒間の磁気分断により反転磁区の連結を抑制することが、保磁力向上と対応していることを明らかにした。

Abstract

The heavy rare-earth element dysprosium (Dy) is used to enhance the coercivity (i.e., the heat resistance) of Nd-Fe-B permanent magnets used in hybrid vehicle (HV) motors. However, since Dy is a scarce resource and has the effect of reducing magnetization, it is important to develop Dy-free technologies. To help obtain higher coercivity, a magnetic reversal analysis technique using a synchrotron X-ray microscope has been developed that enables the visualization of magnetic domains related to the microstructure. Using this analysis technique, it was found that high coercivity can be achieved by (1) stabilizing the magnetic domains against demagnetizing fields by reducing grain size, and (2) suppressing the collective behavior of reversed magnetic domains by magnetical isolation between grains.

キーワード 永久磁石、保磁力、磁区、走査型透過 X 線顕微鏡、組織制御

1 まえがき

HV/EV の基幹部品であるモータに使用されるネオジム磁石 (Nd-Fe-B 磁石) は、耐熱性 (保磁力) 確保のために重希土類元素ディスプロシウム Dy (以下、Dy) が必須である。しかし、Nd-Fe-B 磁石に Dy を添加すると磁力が低下するという問題だけではなく、Dy は中国に偏在しており埋蔵量が少ないため資源リスクが高いという問題がある。そこで、私たちは Dy フリー Nd-Fe-B 磁石実現をめざし、耐熱性を決めている保磁力機構解明の研究を行っている。

磁石は小さな磁区の集合体であり、磁力 (磁化) が最大の場合は図 1 中 (A) のように、磁石中の全ての磁区が同じ向きである。この磁石に減磁場 (磁石の磁化と逆方向の磁場) を与えると、図 1 中 (B) のように磁石内部の一部の磁区が反転することで、磁力がその分減少する。さらに大きな減磁場を与えると、図 1 中 (C) のように反転部分の体積が 50% となり、磁石の磁力は相殺されてゼロとなる。このときに与えた減磁場の大きさが保磁力と定義される。

このように、磁石の保磁力は磁区の磁場による変化に対応しているため、高保磁力化に必要な組織要件を導出するためには、磁区の磁場による変化領域にどのような組織的特徴があるかを明らかにすることが重要である。

* 先端材料技術部

** 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構

*** (株) 豊田中央研究所 (現 Diamond Light Source)

**** 材料技術開発部

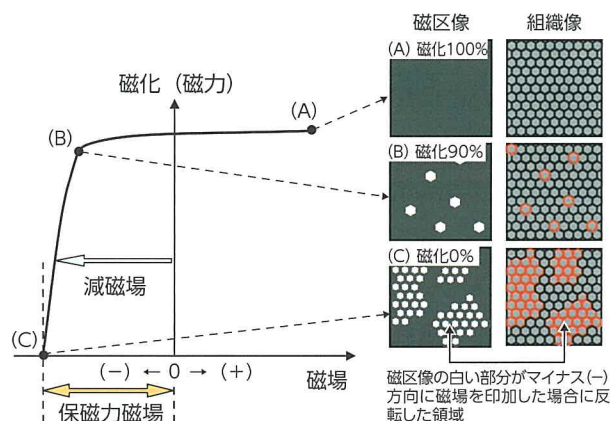


図1 磁化の磁場依存性(左図)と対応する磁区(右図)

Nd-Fe-B 磁石は $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 磁石相（主相）の結晶粒とそれを取り囲む Nd 比率の高い粒界相の二相からなる。主相の結晶粒径と保磁力の関係は、図2中の破線のようになることが経験的に知られており⁽¹⁾、結晶粒の微細化が Dy を用いずに保磁力を向上させられる方策と考えられる。しかし、微細化を狙った液体急冷法＋熱間強加工（図2●）で作製した磁石の保磁力は粒径減少から期待される保磁力を大きく下回っている。微結晶化による高保磁力化を実現するためには、磁区と組織の対応付けを行い、保磁力が低い原因を明らかにすることが必要である。

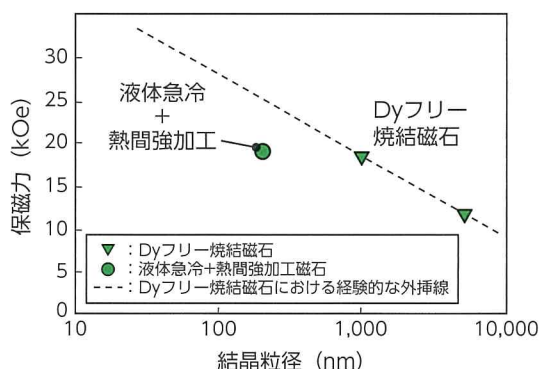


図2 保磁力と結晶粒径の関係

2 実験装置および方法

Nd-Fe-B 磁石は主相結晶の c 軸方向のみ磁石になりやすい性質（一軸異方性）があるため、減磁場による反転磁区の伝播挙動は、結晶の c 軸に平行方向と垂直方向で異なることが知られている⁽²⁾。このような性質の磁性体の磁区観察を行う場合、c 軸と平行方向の磁区観察はローレンツ顕微鏡、c 軸方向と垂直方向は X 線顕微鏡が適しており、磁石内

部における磁区構造の総合的な理解のためには両者からの結果を組み合わせるとより有益な議論が可能となる。本報では、c 軸方向と垂直方向の磁区観察を、走査型透過 X 線顕微鏡（STXM: Scanning Transmission X-ray Microscope: 図3）⁽³⁾⁽⁴⁾ を用いて行った。この手法では、試料に含まれる元素固有の X 線吸収エネルギーに調整した放射光 X 線を入射すると、その元素が存在している場所で X 線の吸収が起こるため元素の存在位置を知ることができる。さらに、入射光として円偏光 X 線を用いた場合、円偏光の向きと磁性元素の磁気モーメントの向きが平行と反平行の場合で X 線の吸収量に差が出ることが知られており、これを利用することで、磁気モーメントの向きが同じ領域（＝磁区）の空間分布を知ることが可能である。また、STXM 用に加工した試料は透過電子顕微鏡（TEM: Transmission Electron Microscope）での観察が可能のため、同一の試料について TEM で結晶構造などの組織を観察し、STXM で試料の磁区構造、化学状態分布を観察することで、組織構造と磁区構造変化の相関を高分解能で調べられるという大きな特長がある。

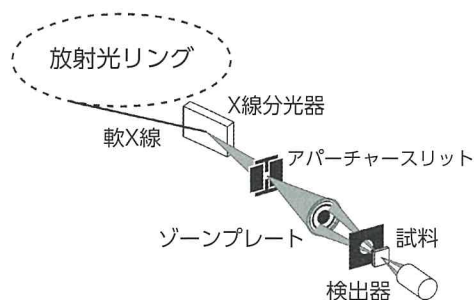
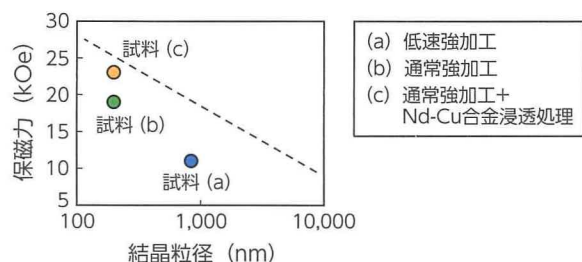


図3 STXM 測定装置の配置図

STXM による磁区観察は放射光施設スライスラインソース（SLS）の PolLux ビームラインにて行った。今回、高精度に加工したゾーンプレートという X 線集光光学素子を用いて X 線を試料上の 30nm 程度の微小スポットへ集光し、試料のスキャンを行い、透過した X 線の強度を測定することによって、約 30nm の高い空間分解能での磁区観察を実現した。また、試料への磁場印加機構を作製したことで、磁性材料の磁化反転挙動の観察が可能となった。

この STXM を用いて結晶粒径の違いによる反転挙動の違いを明らかにするため、液体急冷粉の強加工歪速度を変えることにより、結晶粒径を約 900nm とした試料 (a)、結晶粒径を約 200 nm とした試料 (b) を作製した（図4（上））。



	磁区構造 (STXM)		組織構造 (TEM)	組織構造 模式図
試料 (c) 粒径~200nm + 浸透処理	着磁状態	減磁状態		粒界相
試料 (b) 粒径~200nm				
試料 (a) 粒径~900nm				

図4 (上) 作製試料の保磁力の粒径依存性
(下) STXMにより観察した磁化反転挙動, TEMにより観察した組織構造と組織構造の模式図

磁区観察のための試料薄片化には収束イオンビーム (FIB: Focused Ion Beam) を使用し, c 軸と垂直方向を観察面とした厚さ約 100nm へと試料を加工した。加工後, c 軸方向に +10T の磁場を印加することで着磁を行い, 無磁場中で着磁状態の磁区観察を行った。その後, 試料を STXM 装置から取り出し, c 軸方向に -1T の減磁場を印加することで減磁を行い, 再び無磁場中で減磁状態の磁区観察を行った。

3 結果と考察

3.1 結晶粒径依存性

図4 (下) に結晶粒径の異なる試料 (a), (b) について磁区と組織の観察結果を示す。左側の磁区像は着磁状態 (図1 (A) に対応), 右側の磁区像は減磁状態 (図1 (C) に対応) である。黒いコントラストの部分は着磁 (+) 磁場と同じ向きの磁気モーメント, 白いコントラストはそれと逆向きの磁気モーメントが存在していることを示す。試料 (a) について TEM から得られた結晶粒輪郭の一部を磁区像上に示した。粒径が比較的大きい試料 (a) は, 900nm 程度の結晶粒で構成され, これと同一視野の磁区像を見比べると, 図4中試料 (a) の (A) 粒

に示す中央右側に結晶粒に対応した黒い磁区像が見られる。減磁状態ではこの磁区は白と黒に分かれ, ひとつの結晶粒の中に複数の磁区が存在した「多磁区」状態に変化したことがわかる。一方, 他の結晶粒 (例えば試料 (a) の (B) 粒) では着磁状態でも多磁区状態を示し, 磁区は複数の結晶粒をまたいでつながっている。(B) 粒は結晶粒内において着磁状態と減磁状態で磁区模様に変化しており, 試料 (a) のような多磁区構造は, 外部磁場に対して変化しやすく, 減磁しやすいことを示している。

この多磁区構造に対して, 試料 (b) では結晶粒径とほぼ同じ大きさで磁化反転が生じる「単磁区」状態となっていることが確かめられた。これより, 試料 (a) では多磁区構造のため 11kOe であった保磁力が, 試料 (b) では結晶粒の微細化により 19kOe に増加したことは, 単磁区化することで磁区の外部磁場に対する安定性が増加したことによるものと考えられる。

3.2 Nd-Cu 合金の浸透処理

主相の結晶粒が微細な試料 (b) の反転磁区が単磁区であることがわかったが, 図4の試料 (b) の減磁状態にある円を取り囲んだ部分のように, 広範囲で反転している部分が見られる。この部分は複数の反転磁区同士が磁氣的に結合しているために反転領域が大きい。これは, 微細結晶粒であるにも関わらず結晶粒同士が磁氣的に結合し, あたかも大きな結晶粒径となったかのように, 外部磁場に対して影響を受けやすい状態となっているものと考えられる。外部磁場に対して安定な磁区構造とするためには, 減磁場による反転単位を小さくすることが有効で, 試料 (b) で見られていたような反転磁区同士の連結を切ることが必要と考えられる。そこで, 反転磁区同士を分断するために結晶粒間に非磁性の粒界相を増やすことを狙い, 試料 (b) に Nd-Cu 合金を接触させた状態で熱処理⁽⁵⁾⁽⁶⁾を行った。この手法では低融点の Nd-Cu 合金を融解させることで, 粒界相への Nd-Cu 合金の浸透が可能であり, 主相の結晶粒径を変えずに結晶粒間の分断性のみを担保することが可能である⁽²⁾。その結果, 保磁力は 19kOe から 23kOe に増加した (図4上)。

3.3 結晶粒間分断の影響

Nd-Cu 合金の浸透処理を行った試料 (c) は図4の組織像からわかるように, 結晶粒間の粒界相量が増加し, 結晶粒同士が Nd-Cu 合金により分断されたことが確かめられた。これにより図4の試料 (c)

のような磁区が見られ、試料(b)で見られたような反転磁区同士の結合は少なく、減磁状態でも磁区同士の連結はほとんど見られなかった。このように、粒界相量を増やすことによって減磁場を受けたときの磁区同士の連結が抑制され、これが23kOeという高保磁力の理由であると考えられる。

以上のように、保磁力向上のためには結晶粒の微細化のみではなく、結晶粒間の磁気分断性が必要という、材料開発に極めて有用な組織要件を明らかにすることができた。今後更なる高保磁力化につながる知見を得るためには、磁区と組織の原子分解能観察を行うことで、磁区反転の起点となる結晶粒の組織的な特徴を明らかにすることが必要と考えられる。(第2報に続く)

4 むすび

本研究によって、世界初となるNd-Fe-B磁石内部の磁区構造観察手法を確立した。これにより磁区の磁場変化と組織の対応付けが可能となった。

Dyフリー磁石の高保磁力化のためには、結晶粒の微細化が有効で、微細化により外部磁場に対して安定な単磁区状態になったことを確かめた。しかしながら結晶粒の微細化のみでは予想保磁力を下回っており、磁区観察からその原因は反転磁区の連結にあることを示した。これより、結晶粒間の分断を行うことが磁区の集団反転抑制に有効であると予想し、粒界相量を増やすNd-Cu合金の浸透処理を行った。この浸透処理により減磁状態における反転磁区同士の連結が抑制されたことが確かめられた。本研究より、高保磁力化のために必要な材料開発の設計指針として結晶粒の微細化と結晶粒間の磁気分断が必要であることが示された。

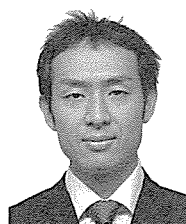
本研究の磁区観察実験では、株式会社 豊田中央研究所の野崎洋氏、Paul Scherrer Institut SLSのJörg Raabe 博士から多大な協力をいただいた。ここに深謝の意を表する。

■参考文献

(1) R. Ramesh, G. Thomas, B. M. Ma : Magnetization reversal in nucleation controlled magnets. II. Effect of grain size and size distribution on intrinsic coercivity of Fe - Nd - B magnets. Journal of Applied Physics. Vol.64 No.11, p.6416 - p.6423 (1988)

- (2) H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, S. Nagashima, M. Yano, T. Shoji, et al. : High-coercivity ultrafine-grained anisotropic Nd-Fe-B magnets processed by hot deformation and the Nd-Cu grain boundary diffusion process. Acta Materialia. Vol.61, p.6622 (2013)
- (3) K. Ono, T. Araki, M. Yano, N. Miyamoto, T. Shoji, et al. : Element-Specific Magnetic Domain Imaging of (Nd, Dy)-Fe-B Sintered Magnets Using Scanning Transmission X-Ray Microscopy. IEEE Transactions on Magnetics. Vol.47, No.10, p.2672 - p.2675 (2011)
- (4) 小野寛太, 荒木, 矢野, 宮本 : 走査型透過X線顕微鏡による(Nd, Dy)-Fe-B焼結磁石の元素識別磁区観察. Vol.50, No.9, p.379 - p.382 (2011)
- (5) T. Sato, N. Oka, T. Ohsuna, Y. Kaneko, S. Suzuki, et al. : Enhancement of coercivity for Nd-Fe-B thin films by the infiltration of Nd-Cu alloy cap layer. Journal of Applied Physics. Vol.110, 023903 (2011)
- (6) H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, T. Nishiuchi, S. Hirose, K. Hono : Coercivity enhancement of hydrogenation-disproportionation-desorption-recombination processed Nd-Fe-B powders by the diffusion of Nd-Cu eutectic alloys. Scripta Materialia. Vol.63, No.11, p.1124 - p.1127 (2010)

■著者



矢野 正雄



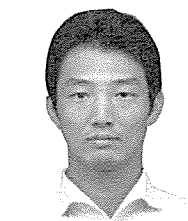
小野 寛太



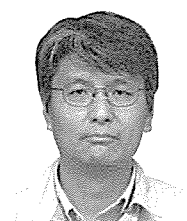
荒木 暢



真鍋 明



庄司 哲也



加藤 晃

保磁力機構解明による重希土類フリー磁石の可能性検討(2) — 局所磁化反転挙動および界面構造解析 —

Feasibility Study of Heavy Rare-Earth-Free Permanent Magnets by Coercivity Mechanism Clarification (2)
- Analysis of Local Magnetic Reversal Behavior and Interfacial Structure -

長島 真也* 真鍋 明*
Shinya Nagashima Akira Manabe
宮本 典孝* 庄司 哲也*
Noritaka Miyamoto Tetsuya Shoji

要旨

HV モータに用いられる Nd-Fe-B 磁石の耐熱性の指標となる保磁力は、希土類元素 Dy の添加により確保されている。しかし、Dy はレアアースであること、Dy の添加に伴い残留磁化が低下するという課題がある。Nd-Fe-B 磁石の Dy によらない高保磁力化には、結晶粒の微細化および結晶粒界の磁気分断性の向上が必要である。そこで、200nm 程度に結晶粒径を調整した Nd-Fe-B 磁石について、磁気分断性を決める界面構造を明らかにするため、独自改造したローレンツ顕微鏡法と最新の収差補正透過型電子顕微鏡法、三次元アトムプローブを併用し解析を行った。解析の結果、結晶粒間の粒界相、結晶粒子端部のファセット、粒界相の Fe 濃度が磁気分断性を向上させる組織要件であることを明らかにした。

Abstract

Coercivity, which serves as an index for the heat resistance of Nd-Fe-B permanent magnets used in hybrid vehicle (HV) motors, is enhanced by adding the heavy rare-earth element dysprosium (Dy). However, Dy is a scarce resource and has the effect of reducing residual magnetization in accordance with the amount of addition. To help obtain higher coercivity without depending on Dy, it is necessary to reduce grain size and improve the magnetical isolation between grains. Consequently, a refined Nd-Fe-B permanent magnet with a grain size of approximately 200 nm was analyzed to clarify the interfacial structure that determines magnetical isolation. The analysis was performed using a combination of Toyota's own improved Lorentz microscopy technique, and the latest spherical aberration-corrected scanning transmission electron microscopy and three-dimensional atom probe techniques. The analysis results found that the microstructural requirements for improving magnetical isolation included the phase of the grain boundary, grain end facets, and the grain boundary iron (Fe) density.

キーワード 永久磁石, Nd-Fe-B, 粒界, 透過型電子顕微鏡, ローレンツ顕微鏡法, 三次元アトムプローブ

1 はじめに

ハイブリッド車、電気自動車の駆動用モータに使用される磁石は、150℃を超える動作環境においても高い残留磁化および保磁力を必要とする。現在、Nd-Fe-B 焼結磁石に Dy (ディスポロシウム) を含有させることにより、保磁力を向上させた磁石をモータに使用している。しかし、Dy はレアアースであること、Dy の添加に伴い残留磁化が低下するという課題がある。私たちはこれまでの検討により、Dy を用いずに磁石の保磁力を向上させるには、結晶粒サイズの微細化および結晶粒界の磁気分

断性の向上が必要であることを放射光 X 線顕微鏡による磁化反転挙動解析から明らかにした。Dy フリー磁石の保磁力向上の開発指針を得るためには、さらに、粒界の磁気分断性を決定する組織要件を明らかにすることが必要である。これまで、磁気分断性の指標となる磁化反転挙動について理解されているのは、結晶粒サイズに相当する 100nm のオーダーの情報であった。これに対し、粒界構造は nm オーダーの局所情報である。そこで、本研究では透過型電子顕微鏡 (TEM: Transmission Electron Microscope) を用いて磁化反転の先端箇所と粒界構造の直接観察を行い、磁気分断性と粒界構造を対応付けることを目的とした。

* 材料技術開発部

2 実験装置および方法

本研究では、結晶粒サイズを変化させず粒界の磁気分断性のみを変化させた磁石試料として、200nm 程度に結晶粒径を調整した Nd-Fe-B 磁石と、同じ磁石に Nd-Cu 合金を結晶粒界に浸透させた磁石を用いた⁽¹⁾。Nd-Cu 浸透処理により、磁石の保磁力は、浸透処理前の Hc: 19kOe から、浸透処理後は Hc: 23kOe に向上した。これらの浸透処理前後の磁石について磁化反転挙動と粒界構造の比較を行った。

まず、TEM 観察用薄膜を集束イオンビーム (FIB: Focused Ion Beam) 装置を用いて作製した。次に、汎用 TEM を用いてローレンツ顕微鏡法による磁気観察を行った。ローレンツ顕微鏡法には 2 種類の観察手法として、磁壁観察のフレネル法と、磁区観察のフーコー法がある。フレネル法は観察時にフォーカスをずらすことにより磁壁のコントラストが得られ、明瞭な磁壁像を取得できる。しかし、フレネル法では結晶粒界に非磁性の粒界相が存在した場合において、磁壁のコントラストが得られないという問題がある。一方、フーコー法は、電子線が対物レンズ後焦点面において試料の磁化方向に対応した 1 点のスポットに収束することを利用しており、対物絞りによって結像するスポットを選択することで磁区のコントラストが得られる。本研究では、一般的なフレネル法に加え、多結晶試料では結像条件の設定が困難とされているフーコー法についても検討を行った。本研究で用いた汎用 TEM は、試料の着磁を回避するために、磁気観察時に対物レンズを結像に用いることができない。このため、通常のフーコー法は成立しない。ここで、試料の下段に位置する制限視野絞りを用いて、試料の磁化によって偏向された電子線を選択的にカットし、さらに下段に位置する中間レンズにより結像するという工夫を行うことで、磁区像の取得を可能とした。磁気観察時には、TEM 装置内にて対物レンズ磁場を試料の磁化容易方向に印加することにより、磁壁の移動をその場観察した。この際、粒界の磁気分断性を反映する現象として、磁壁が粒界で止まる現象 (ピンング) の有無を確認した。

次に、磁壁のピンングが生じた粒界、生じなかった粒界についてその構造を明らかにするために、原子レベルの観察を可能とする収差補正走査型透過電子顕微鏡法 (Cs-STEM: Cs-corrected Scanning Transmission Electron Microscopy) を用いて、磁気観察部位と同一部位の構造解析を

行った。また、三次元アトムプローブ (3DAP: Three Dimensional Atom Probe) により、粒界相の組成分析を行った。

3 結果と考察

3.1 浸透処理前の試料の磁気観察結果

図 1、図 2 に TEM ローレンツ顕微鏡法による浸透処理前の試料の磁気観察結果を示す。磁区像ではコントラストの明暗が互いに反平行な磁化を有する領域、つまり磁区に対応する。磁壁像ではコントラストの明暗を有する線が互いに反平行な磁化を有する磁区の境界、つまり磁壁に対応する。本実験では、印加磁場を 0T (熱消磁状態) から +0.08T, -0.08T, +0.08T と変化させながら観察を行ったところ、結晶粒界において磁壁のピンング挙動の有無が確認された。

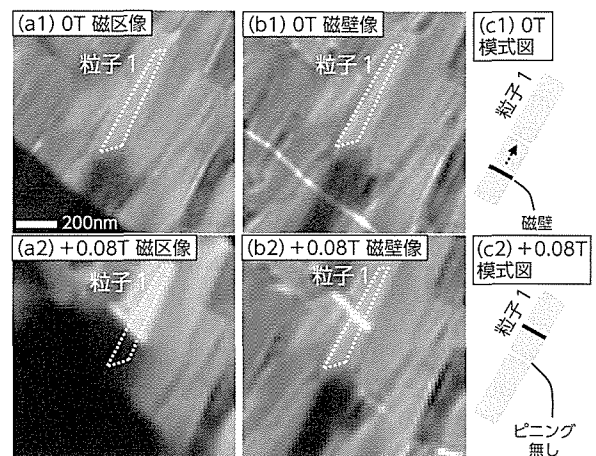


図 1 浸透処理前の試料において多磁区挙動を示した粒子

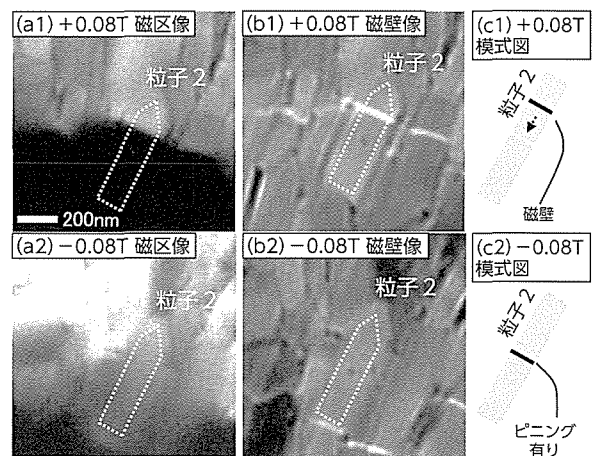


図 2 浸透処理前の試料において着磁後に単磁区挙動を示した粒子

まず、図1中の粒子1と示した結晶粒子では、印加磁場を0Tの熱消磁状態から+0.08Tまで増大した際に、粒子1に隣接した粒子の内部に存在していた磁壁が結晶粒界を超えて粒子1の内部に侵入した。粒子1は単磁区粒子から多磁区粒子に変化したことになり、磁壁がピンングされなかった結晶粒界は磁気分断性が低いと考えることができる。

一方、図2中に粒子2と示した結晶粒子は、熱消磁状態から結晶粒内に磁壁が存在していた。印加磁場を+0.08Tから-0.08Tまで変化すると、粒子2内部に存在していた磁壁は粒内を移動し、結晶粒界でピンングされた。次に、再び印加磁場を+0.08Tに変化させても磁壁は粒子2内部に侵入することなく、粒界でピンングされたままであった。粒子2は多磁区粒子から着磁後に単磁区粒子に変化したことになり、磁壁がピンングされた結晶粒界は磁気分断性が高いと考えることができる。

浸透処理前の試料では図1中の粒子1のように磁壁が結晶粒内に侵入する、多磁区挙動を示す粒子が支配的であった。一部では図2中の粒子2のように結晶粒子内部の磁壁が除去された後は再び結晶粒内に磁壁が進入しない粒子、つまり着磁後に単磁区挙動を示す粒子が確認された。

3.2 浸透処理前の試料の粒界構造

3.1の磁気観察により粒界での磁壁のピンングの有無を特定した結晶粒界について、TEM、Cs-STEMを用いて構造観察を行った。多磁区挙動を示した粒子（磁壁のピンングが生じなかった粒子、図1中の粒子1）の結晶粒界の観察結果を図3に示す。(a)は低倍TEM像、(b)は(a)中の点線枠部分（磁壁のピンングが生じなかった結晶粒界）の収差補正STEM像を示す。粒子1のC軸方向（Nd₂Fe₁₄B結晶の磁化容易軸方向）はC軸配向方向である熱間強加工時の加工方向とほぼ一致していた（図3(a)）。磁壁のピンングが生じなかった結晶粒界は湾曲した形状であり、粒界相は確認されなかった（図3(b)）。よってこの界面では結晶粒子同士が直接接していると考えられる。

次に、単磁区挙動を示した粒子（磁壁のピンングが生じた粒子、図2中の粒子2）の結晶粒界の観察結果を図4に示す。図4(a)より、粒子2のC軸方向は熱間強加工方向とほぼ一致しており、多磁区化した粒子である図1中の粒子1と同様であった。磁壁のピンングされた結晶粒界には厚さ1nm程度のアモルファスの粒界相が形成しており、結晶粒端部の外形はNd₂Fe₁₄B結晶の(110)からなる

ファセット（平らな面）が形成していた（図4(b)）。以上より、結晶粒子短辺において粒界相およびファセットの形成した部位が磁壁のピンングサイトとして機能することが明らかになった。粒界相の形成により、直接接していた結晶粒子の磁氣的結合（交換結合）が切れ、磁気分断性が向上したと考えられる。

浸透処理前の試料においては、図4(b)のように結晶粒短辺に粒界相およびファセットが形成した粒界の存在率は非常に限られており、大半は図3(b)のように結晶粒短辺において結晶粒同士が接している粒界であった。

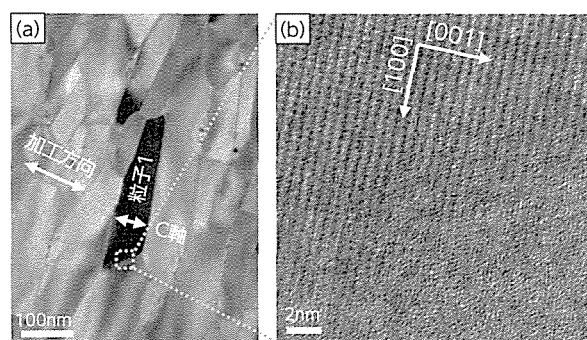


図3 浸透処理前の試料において多磁区挙動を示した粒子の界面構造

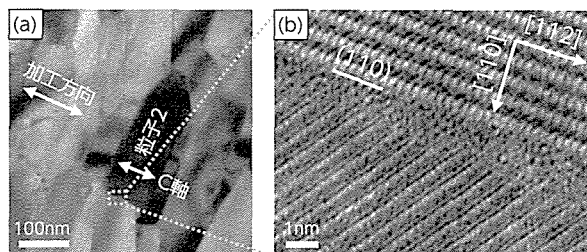


図4 浸透処理後の試料において単磁区挙動を示した粒子の界面構造

3.3 浸透処理後の試料の磁気観察結果

図5に浸透処理後の試料の磁気観察結果を示す。図5中に粒子3と示した結晶粒子は、印加磁場0Tの熱消磁状態では結晶粒子の内部に磁壁が存在していた。印加磁場を+0.07Tに増大すると、粒子3内部の磁壁は結晶粒界まで移動し、磁壁のピンングが生じた。浸透処理後の試料においてはほぼ全ての結晶粒界で磁壁のピンングが生じており、着磁後に単磁区挙動を示す粒子が支配的であった。よって浸透処理後の試料の結晶粒界は磁気分断性が高いと考えることができる。

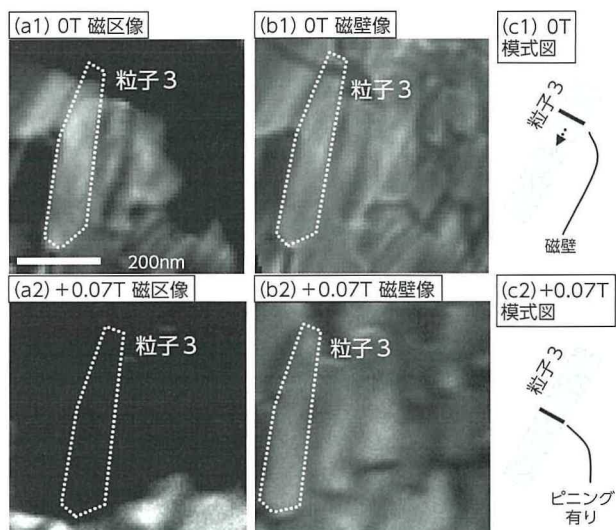


図5 浸透処理後の試料のローレンツ顕微鏡像

3.4 浸透処理後の試料の粒界構造

図6に浸透処理後の試料の組織観察結果を示す。図6(a)の低倍TEM像より、Nd-Cu合金が粒界に浸透することにより粒界相が増加していることが確認された。図6(b)のピンギの生じた結晶粒短辺のTEM像より、結晶粒子の短辺にはファセット(110), (111)が形成していた。図6(c)の粒界相の収差補正STEM観察結果より、浸透処理により粒界相の厚さは10nm程度に増加しており、結晶質であった。

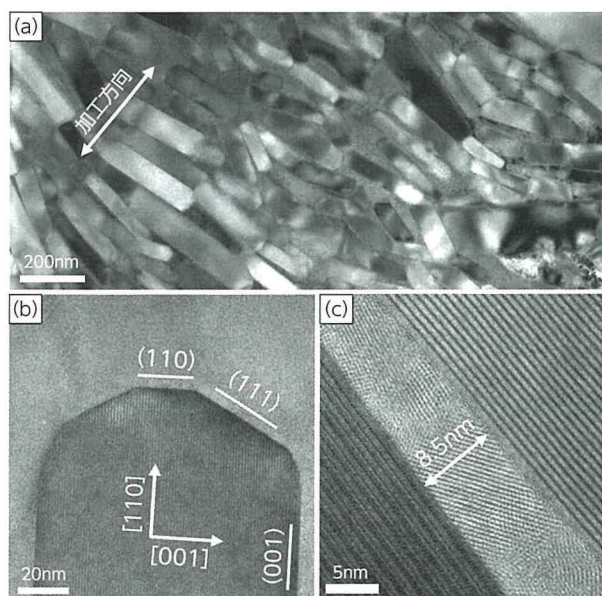


図6 浸透処理後の試料の粒形状および界面構造

Nd-Cu 浸透処理により、結晶粒子の磁化反転挙動が多磁区反転から単磁区反転に変化し、粒界相の

形成、粒界相厚さの増加、結晶粒短辺のファセット形成部位の増加が確認された。粒界相厚さの増加は、結晶粒同士の静磁相互作用を減少し、保磁力向上に寄与したと考えられる。また、Nd-Cu 浸透処理による結晶粒短辺でのファセット形成部位の増加は、Nd-Cu 合金が粒界に浸透した際に結晶粒端部の溶融、再結晶化が促進され、結晶回復が生じたことによると考えられる。この結晶回復に伴い、結晶粒端部に存在していた歪み領域が除去された可能性がある。ここで、結晶粒端部に歪み領域が存在すると磁化反転の核となり、保磁力が低下することが理論計算により報告されている⁽²⁾。本研究においても浸透処理により歪みが除去され、磁化反転核の形成が抑制されたことが推定される。

次に、3DAPによりNd-Cu 浸透処理前後の粒界相の組成分析を行ったところ、結晶粒短辺側ではFe濃度が80at%から75at%に低下し(図7(a1, b1))、結晶粒長辺側ではFe濃度が80at%から20at%に低下していた(図7(a2, b2))。磁性元素であるFeが粒界相に存在すると、粒界相が磁性を持ち、結晶粒子間を磁氣的に結合すると考えられる。よって、Nd-Cu 浸透処理による粒界相のFe濃度の低下は、結晶粒短辺側の粒界相のFe濃度は浸透処理後も依然として高く、このFe濃度を下げるによりさらなる保磁力向上の余地があると考えられる。

以上より、粒界相の形成およびFe濃度の低下、結晶粒端部のファセットの形成が磁壁のピンギサイトとして機能することが明らかになった(図8)。

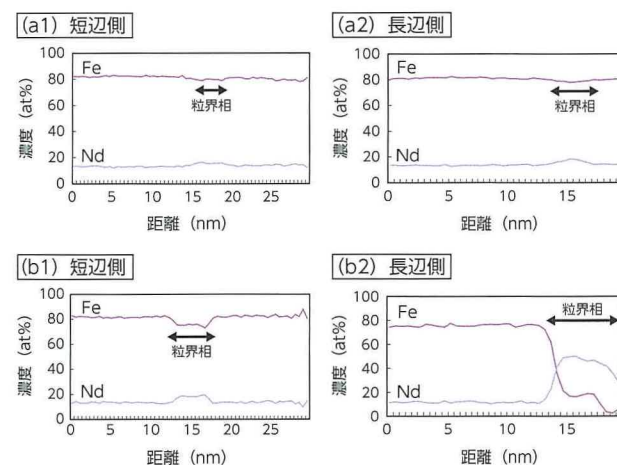


図7 3DAPによる粒界の組成分析結果
(a) 浸透処理前, (b) 浸透処理後

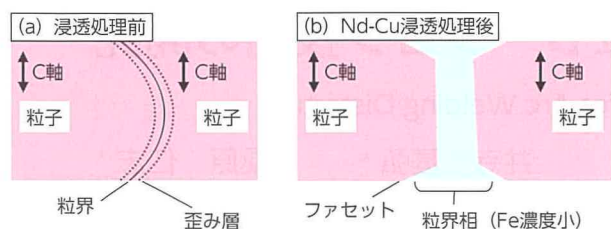


図8 粒界構造の模式図

4 おわりに

Nd-Fe-B 磁石の保磁力機構について、結晶粒単位の磁化反転挙動解析から結晶粒の微細化および結晶粒間の磁気分断が必要であることが示されたのに対し、本研究では磁化反転の先端箇所について独自改造を行ったローレンツ顕微鏡法や最新の分析技術を駆使して局所的な磁区および組織の解析を行った。その結果、磁気分断性向上に必要な組織要件として、粒界相の形成およびFe濃度の低下、結晶粒子端部のファセットの形成が必要であることが明らかになり、材料開発において重要な指針が得られた。また、浸透処理による保磁力の向上は、必然的に磁性相率の低下、すなわち磁化減少を伴う。この背反克服を次の大きな研究課題と考えている。

本研究にあたり、磁区観察および組織観察についてご協力いただきました福永啓一博士（一般財団法人ファインセラミックスセンター ナノ構造研究所）、ローレンツ像の解釈に関し議論いただいた Hossein Sepehri Amin 博士、大久保忠勝博士、宝野和博フェロー（独立行政法人物質・材料研究機構 磁性材料ユニット）に感謝します。

参考文献

- (1) H.Sepehri-Amin, T.Ohkubo, S.Nagashima, M.Yano, T.Shoji et al.: High-coercivity ultrafine-grained anisotropic Nd-Fe-B magnets processed by hot deformation and the Nd-Cu grain boundary diffusion process. Acta Materialia. Vol.61, P.6622 - P.6634 (2013)
- (2) G.Hrkac, TG. Woodcock, C. Freeman, A. Goncharov, J.Dean et al. The role of local anisotropy profiles at grain boundaries on the coercivity of Nd₂Fe₁₄B magnets. Appl. Phys. Lett. Vol.97, 232511 (2010)

著者



長島 真也



真鍋 明



宮本 典孝



庄司 哲也

アーク溶接の熱ひずみシミュレーション技術の開発

Development of FEM Simulation for Arc Welding Distortion

和田 季也*
Toshiya Wada

井寺 基弘*
Motohiro Idera

桑原 仁志*
Hitoshi Kuwabara

要旨

自動車の足回り部品に多用されているアーク溶接は、溶接時の熱ひずみが大きく、試作を繰り返して製品精度を造り込んでいるのが現状である。シミュレーションによる熱ひずみ予測は長年の課題であったが、急激な温度変化と変形を伴うアーク溶接に対しては、従来のソフトでは精度と計算時間に問題があった。そこで、複雑な現象を極力忠実にモデル化するとともに、反復サブストラクチャ法を用いた溶接ソフトをベースに計算の高速化を図ることで高精度と時間短縮を実現し、実務で使える予測技術確立した。

Abstract

Arc welding is frequently adopted for automotive chassis parts. However, this method generates large amounts of welding distortion and repeated prototyping is required to ensure product accuracy. Although simulation technology to predict arc welding distortion has been under development for a long period of time, issues of conventional software include prediction accuracy and the time required for computation due to the severe temperature changes and deformation generated by the arc welding procedure. Consequently, Toyota Motor Corporation has developed a practical arc welding prediction technology that is both highly accurate and relatively fast. This was accomplished by creating extremely faithful models of complex phenomena and by incorporating welding software that uses the iterative substructure method to speed up the computation time.

キーワード 有限要素法, 3次元解析, 溶接ひずみ, 計算時間, 計算精度

1 前書き

アーク溶接は安価に強度を得ることのできる接合方法として、自動車の特に足回り部品に多く用いられている。一方、アーク溶接は高温溶接のため、溶融範囲が大きく、母材がひずみやすいという欠点をもつ。このため、実際に溶接して得られた変形結果を元にして治具やパネル形状の調整を繰り返すことで、製品精度を造り込んでいる。これが試作におけるコスト増と共に、生産準備のリードタイム増大の原因となっている。これを解決すべく熱ひずみシミュレーションによるひずみ予測が長年取り組まれてきたが、計算精度と計算時間に課題があったため、自動車部品への応用はなかなか進まなかった。その理由として、アーク溶接による熱ひずみ現象が、複雑かつ非線形な現象であることが挙げられる。母材は熱が進行しながら溶融し、その後、接合部及び接合部近傍が逐次冷却され凝固する過程で発生する応力によってひずみが発生する。ひずみを精

度良く予測するためには、この物理現象を厳密にモデル化して解く必要があるが、背反として計算負荷が非常に高くなってしまふ。汎用のソフトでは、それほど厳密なモデルでなくとも自動車の足回り部品1つを計算するだけで、数ヶ月の膨大な計算時間がかかる。

そこで近年、計算時間を短縮する手法として、大阪大学接合科学研究所が開発した反復サブストラクチャ法（以下ISM）を適用して、精度と時間において実務に使える熱ひずみシミュレーション技術を開発したので報告する。

2 現状把握、目標

リアサスペンションメンバアッセンブリ（以下リアサスメン、図1）は、足回り部品の中でも溶接量が多く熱ひずみの影響を受け易いにもかかわらず、要求される製品精度は高い。現状の業務プロセスでは、試作によって熱ひずみ量を測定し、その結果をもとにパネル及び治具へ見込みを入れることで対応

* ボデー生技部

しており、1ヶ月以上の期間を費やしている。今回、このプロセスを実際に物を作らずにシミュレーションで実施することで、試作にかかる工数の削減を目指した。

開発するシミュレーションの目標であるが、リアサスメンなどの対象物に対し、溶接順序などを変更した計算を数回実施することを念頭におき、1回の計算時間を15日以内とすることを目標とした。一方、計算精度については、実部品の熱ひずみ量のばらつきが±0.3mm程度であることから、シミュレーションと実部品との精度差を、90%以上の範囲において±0.3mm以内に入れることを目標とした。



図1 リアサスペンションメンバと溶接長

3 一般的な溶接ひずみ解析の手法

溶接による熱ひずみを有限要素法により予測する手法は、熱弾塑性法と固有ひずみ法に大きく分けられる。前者は、熱伝導解析と応力解析を連成させて解く手法で、高い計算精度が期待できる反面、計算時間が長い。一方後者は、簡易形状での実験から得られた固有ひずみの値をもとに対象形状のひずみ量を求める手法で、高精度は期待できないが、計算時間は短い。まずは精度面の優位性から熱弾塑性法をベースに開発を進めていくこととした。

熱弾塑性法による熱ひずみ解析は伝熱解析と応力解析の2段階で求められる。それぞれの解析においては、溶接時間全体を細かいピッチで分割して計算を行う。伝熱解析において、ある時点でのある部位の温度変化 ΔT ($=\partial T/\partial t$) は、式(1)の非定常熱伝導方程式から求められる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 λ : 熱伝導率、 c : 比熱、 ρ : 密度、 T : 温度、 t : 時間、 x : 位置 を表す。

次に、応力解析において、簡単のため1次元の弾性問題で考えると、荷重増分 ΔF は式(2)から求められる。

$$\Delta F = \alpha \Delta T A E + \Delta F' \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 α : 熱膨張係数、 A : 断面積、 E : ヤング率を表す。すなわち、 ΔF は式(1)の温度増分 ΔT をもとに求まる熱荷重増分 $\alpha \Delta T A E$ とクランプによる外部荷重増分 $\Delta F'$ との和として求められる。

そして、ある時点でのある部位の変位量 Δu は、式(2)で得られた荷重増分 ΔF と対象の構造物の形状と材種などにより決まる剛性 K から式(3)より求められる。

$$\Delta u = \frac{\Delta F}{K} \quad \dots\dots\dots (3)$$

第1ステップとして一連の溶接における伝熱解析を行い、次に第2ステップとして第1ステップで求めた時系列の温度分布を用いて応力解析を行う。以上の手順により熱ひずみ量を算出する。

4 アーク溶接現象のモデル化

一般的な熱ひずみ解析手法の概要は前述の通りであるが、非定常な温度分布と接合現象をとまなうアーク溶接現象には更なる工夫が必要である。そこでアーク溶接の特徴から、その中でシミュレーションに最も影響を与えと考えられる因子を考察し、下記の3つの現象をできるだけ現実に近い形でモデル化することに取り組んだ。

- ①溶接ビードが逐次形成されていく
- ②溶接による応力で板隙が発生する
- ③アーク熱の入熱状態

4.1 溶接ビードを逐次形成させる手法

溶接ビードは逐次形成されていくため、その剛性や形状は、溶接トーチが通過してから冷え固まるまで変化する。一方、シミュレーションでは、計算を開始する前に入力条件としてビード形状や剛性特性を事前にモデル化しておく必要がある。そこでビードを硬度の変わるゴムと見なし、溶接前は柔らかくして母材の変形を妨げない状態を表現し、溶接後には順次固くし、本来のビードの状態を表現することを考えた。具体的な方策として、ゴムの固さを、ビードのヤング率の大小で表すこととした。図2のように溶接前のビード部は初期のヤング率を非常に小さくし、変形に対する寄与を限りなくゼロにしておくことで、未だ接合されていない状態を表現する。その後溶接が進行し、溶接後の冷却過程で温度

履歴に合わせてビード部のヤング率を通常の値に戻し、接合された状態を表現する。このような工夫により、溶接ビードが逐次形成される接合現象の詳細なモデリング手法を確立した。

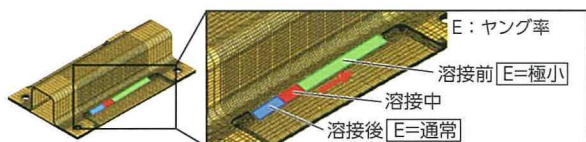


図2 溶接ビードの逐次形成モデル

4.2 板隙の表現方法

実溶接を詳細に観察すると、溶接の進行に伴って接合部が熱により膨張し、未溶接部のパネル間に隙や面内方向のズレが生じることが確認された。この隙やズレを表現した場合としない場合とでは母材の変形は変わってくる。そこで計算モデルでは前述したビードモデルを用い、図3のように溶接前から入熱、凝固するまではビード要素がパネルの動きに応じて伸びることができるようにした。また溶接後の凝固タイミングでは、その時の板隙やズレを保持したままビード部のヤング率を通常の値に戻すように工夫することで、パネル間の隙やズレの発生を再現した。

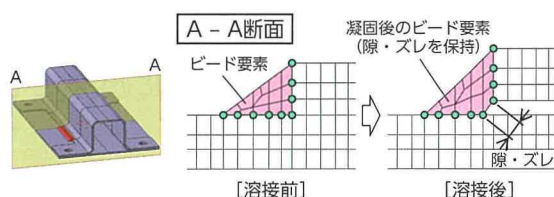


図3 パネル間の隙・ズレのモデル

4.3 入熱状態のモデル化

正確な入熱範囲を決定するために、伝熱解析から求めた溶接部の断面方向の温度分布と、実部品の断面内の溶融範囲とを比較し、検討を行った。その結果、実際の溶接で溶け込みの発生した部位と同じ範囲に熱を与えることが適正であることが確認できた。そこで、実部品の溶接部の断面カットによる断面情報から、溶け込み領域と面積を測定し、継手形状毎に適正な入熱モデルを作成した(図4)。

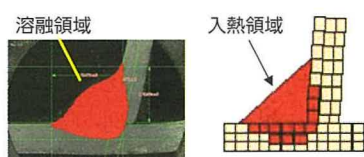


図4 入熱状態のモデル

5 計算時間短縮への取組み

次にもうひとつの課題である計算時間の短縮について、計算精度を維持しながら達成するために、以下の2つの対策に取り組んだ。

- ①変形に応じた計算手法の使い分け (ISM の適用)
- ②計算ピッチの最適化

5.1 変化量に応じた計算手法の使い分け

従来の熱弾塑性法による非線形シミュレーションでは、3章の式(3)に示す構造物の形状、材種、温度、材料の弾塑性状態に依存して変化する剛性 K を逐次求めて方程式を解く必要があるが、一般にこの計算に最も時間を要する。図5(a)に示すように、 K の算出と方程式の求解を数百～数千回繰り返していた。この計算時間は、メッシュサイズを固定した場合、対象の体積の約2乗に比例するため、計算対象が大きくなるほど膨大な計算時間がかかってしまう。一方 ISM による計算手法は、形状や材料特性が強い非線形性を示す部位は温度変化の著しい入熱部近傍に限定されるという溶接現象の特徴に着眼することで、計算の短時間化を実現している。具体的には、図6に示す温度変化や応力変化の小さい、すなわち非線形性が弱い領域 (A 領域) と、変化の大きい、すなわち非線形性が強い領域 (B 領域) に計算領域を分割し、B 領域でのみ強非線形性問題を解くことで計算量を縮小し高速化を図っている⁽¹⁾。図5(b)に示すように、A 領域においては温度や

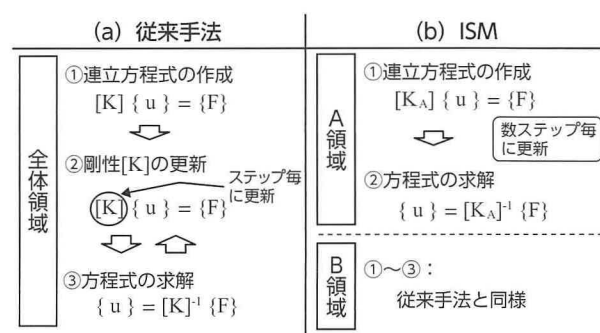


図5 応力解析手法

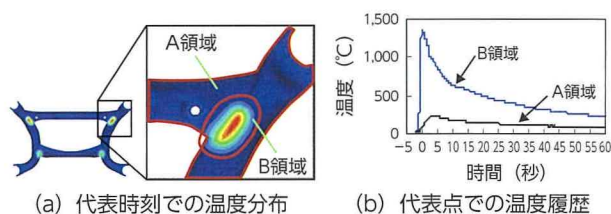


図6 ISM における A 領域と B 領域

応力の変化が小さいため、A 領域の剛性 K_A は逐次更新せず計算を行い、一方 B 領域では急激な温度変化と大きな塑性変形が発生するため剛性 K_B を逐次更新して計算を行う。そして両領域の境界における変位の連続性と力の釣り合いが満足するよう反復計算を行う。B 領域は入熱部近傍の狭い範囲に限定できるため計算量は小さくなり、従来の非線形解析手法に比べ計算時間を大幅に短縮できる。

ISM を適用するには、この B 領域の決定が重要となる。B 領域を狭く設定すると、計算時間は短縮する反面、計算精度は低下してしまうため、計算時間と精度を両立する最適な範囲を定義する必要がある。B 領域は、温度変化の大きい、すなわちしきい値 T_B (°C) 以上に温度が上昇した部位で定義するのが妥当である。そこで、図 7 に示すフロントクロスメンバを用い、実溶接中の温度分布推移の測定結果をもとに T_B 値を数水準変化させ、計算時間と精度の関係を評価した。その結果、計算精度の低下が少なく、最も計算時間が短くなる T_B 値を最適条件として決定した。



図 7 フロントクロスメンバ

5.2 計算ピッチの最適化

ISM は有効な高速化手法であるが、溶接長が長くなるに伴って、計算時間が比例して増えることは避けられない。そこで、更なる高速化の手法を考案した。3 章で述べたように、シミュレーションでは伝熱解析で時刻毎の温度分布を求め、その温度分布を元に応力解析でひずみ分布と応力分布を求める(図 8 (a))。当初は、伝熱解析において細かい時間ピッチ Δt で増分させながら温度分布の履歴を計算した後、応力解析でも同様の時間ピッチ Δt でひずみ分布を計算していた(図 8 (b))。この時間ピッチが細かいほど計算精度は高くなるが計算時間は長くなる。アーク溶接による温度変化は急峻なため、伝熱解析の時間ピッチは、材料の熱的特性とメッシュサイズから決まる上限値以下にする必要がある⁽²⁾。一方で、鋼材の場合、温度が約 750°C 以上では降伏応力はほぼゼロとなり⁽²⁾、力学的にはほぼ同一の挙動を示すことから、温度の急激な変化に比べ、応力の変化は緩やかであると考えられる。そこで、応力解析の時間ピッチのみを大きくして計算回数を少なくし、時間短縮を図ることを考えた。

最適な応力解析の時間ピッチを求めるため計算ピッチを変えたトライを行った。図 8 (b) のトライ 1 ~ 3 に示すように、伝熱解析の時間ピッチ Δt に対して応力解析の時間ピッチを 3, 5, 7 倍にし、図 7 のクロスメンバを対象に行ったトライ結果を図 9 に示す。計算ピッチの拡大に伴い計算時間が減少し(図 9 (a))、逆に計算精度は計算ピッチの拡大に伴い悪化することがわかった(図 9 (b))。しかし精度の悪化レベルは目標精度 ($\pm 0.3\text{mm}$) に比べて小さいため、目標精度の 1/10 以下である 0.03mm 以下となる計算ピッチ ($5\Delta t$) を選択することとした。

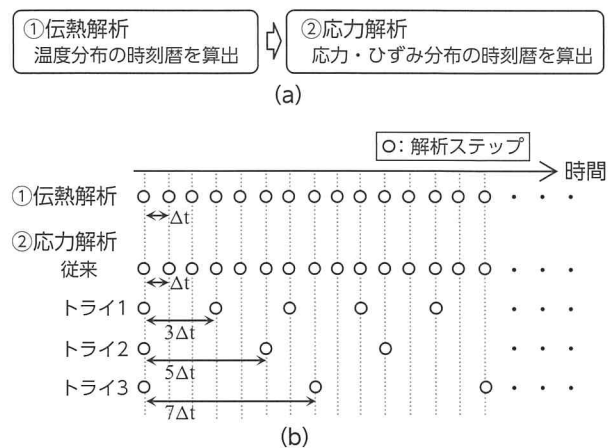


図 8 伝熱解析と応力解析の手順

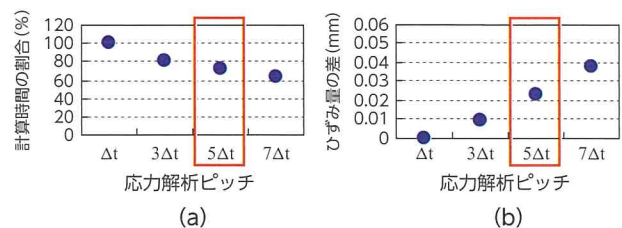


図 9 応力解析頻度の精度と時間への影響

6 計算精度と計算時間のまとめ

上述の手法を活用したシミュレーションによる予測値と実部品の熱ひずみ量との整合性検証および計算時間短縮効果の検証を行った結果を表 1 に示す。リアサスメンを構成する 3 部品 (①, ②, ③) とそれらを組合せたリアサスメン (④) の合計 4 部品の溶接工程において、それぞれを溶接する前後でのひずみ量とその際にかかった計算時間を評価した。計算精度については、いずれも一致率 90% 以上が得られ、目標を達成した。ここでの一致率とは、比較

計測ポイント全数に対する実測との差が± 0.3mm 以内のポイント数の割合である。一方、計算時間については、評価工程の中で最も大規模で、溶接長が長く計算時間のかかるリアサスメン工程において、従来手法では 110 日（推定）かかるものが、開発手法では 10.6 日と大幅短縮により目標 15 日を達成できた。

表 1 実部品での計算精度と計算時間

	①サイド レール	②フロント クロス	③リア クロス	④リア サスメン
工程				
溶接長 (mm)	348	1,178	1,035	1,475
節点数	178,471	293,829	284,812	627,195
一致率 (%)	100	97	91	97
計算時間 (日)	3.1	3.1	3.6	10.6

■著者



和田 季也



井寺 基弘



桑原 仁志

7 結び

溶接現象をできるだけ現実に近い形で再現するとともに、計算時間短縮の取組みを行うことで、実用レベルの計算精度と計算時間を両立する熱ひずみシミュレーション技術を確立した。この技術を生産準備業務プロセスに適用し、試作工数削減を実証中である。更なる展開として、生産能力増強の計画段階で工程数増加に伴う溶接順序の変更検討にも活用している。また、溶接ひずみが最小になる最適溶接順序の提案も行っている。今後は、熱ひずみレス構造の提案による製品精度の向上や設備費低減に向けた取組みを行い、更なる良品廉価なクルマづくりに貢献していく。

最後に、本開発にあたりご協力頂いた(株)先端力学シミュレーション研究所および大阪大学接合科学研究所 村川英一教授に深謝の意を表する。

■参考文献

- (1) 西川弘泰，芹澤，村川：大規模溶接シミュレーションの実機適用．溶接学会論文集．第 24 巻，第 2 号，P.168 - P.173（2006）
- (2) 上田幸雄，村川，麻：技術者のための「溶接変形と残留応力」攻略マニュアル．産報出版，2007，P.52 - P.64

認知症介護に向けた対話制御・対話知識獲得技術の開発

Development of Dialogue Algorithms and Dialogue Learning Techniques for Nursing Robot

渡部 生聖* 中野 雄介*

Narimasa Watanabe Yusuke Nakano

要旨

認知症患者のためのカウンセリング対話ロボットの実現を目指し、これまでに「傾聴対話」と呼ばれるオウム返しや共感応答が可能な対話システムを構築した。本稿では、表層的な応答である傾聴対話に加えて、深層的な理解を伴う応答となる話題深堀機能として、(1)類似文章をWEB上から検索するアルゴリズム、(2)重要語の知識DB、(3)類似語の知識DBをそれぞれ実装した。従来よりも的確な応答が可能となり、対話による認知症患者のストレス低減効果を確認した。

Abstract

With the aim of developing a nursing robot capable of engaging in dialogue with patients suffering from dementia, a dialogue system has been developed that is capable of parroting and making empathetic responses. This capability is conventionally referred to as active listening. In addition to active listening, which involves responses on a surface level, this article describes the application of the following functions to research topics of conversation that require understanding on a deeper level: 1) an algorithm that searches for similar sentences on the internet, 2) a knowledge database of essential words, and 3) a knowledge database of related words. These functions allow a nursing robot to provide more precise responses, and it was confirmed that dialogue incorporating these functions reduced the stress levels of patients suffering from dementia.

キーワード 対話, 傾聴, ロボット, 認知症介護, 類似文章検索, WEB

1 背景

少子高齢化が進む中、介護施設では介護士不足が深刻化し社会問題にもなっている。介護・医療機関への訪問調査を実施し、医師や介護士へのヒアリングを行ったところ、介護士の仕事は下記の3つに大きく分類されることが分かった。

- (A) 困りごとの解決（入浴介助、排泄介助など）
- (B) リハビリ（特に認知症患者の場合に認知機能回復をめざしたトレーニング）
- (C) カウンセリング（自信や自立心を起こさせたり、リラックスできるように安心を与えたりするコミュニケーション）

トヨタパートナーロボットでは、これらを補助できるロボット開発を目指しており、本稿では特に、(C) カウンセリングについて着目した。

カウンセリングは、忙しい介護現場において十分に行われない場合が多い。「5分でも話を聴いてあげられるといいんだけど（忙しいから出来ない）」

という意見も得られた。このような背景から、カウンセリングを代行する対話ロボットを開発し、介護士の負担軽減の一助となることを目指している。

2 開発の狙い

先述したカウンセリング対話を模擬した対話システム（以後傾聴対話システム⁽¹⁾と呼ぶ）を構築し、トヨタ記念病院などで実証実験を実施した。傾聴対話システムとは、話し手の話をじっくりと聴く、あるいはより多くのことを話せるように働きかけながら行う対話システムである。その際、対話システムは次のような応答をする。

- (ア) 語られたことを繰り返す（繰り返し）
- (イ) もっと語るように問い返す（問い返し）
- (ウ) 話し手に共感し、気持ちを言葉にする（共感）
- (エ) 相槌などにより聴いている事を示す（相槌）
- (オ) 語られた内容を要約する

事前に構文知識や感情生起知識を学習し、それらの知識と照合しながら、先述した応答生成を行う。傾聴対話システムの処理概要を図1に、対話例を図2

* パートナーロボット部

に示す。実証実験では「もっと話題を掘り下げて欲しい」という意見があり、データ分析からも「対話満足度の高さ」が「話題の深さ」に強く影響する結果となった。これは、傾聴対話システムが言語的に表層的な応答しかできない事に起因しており、図3の例に示すように、相手の話に沿いつつも他の補足情報が付加される「話題深堀」が期待されていると分かった。この対話例を実現するにあたり、ユーザ発話の深層的な文意を理解して、深い知識源であるWEBから関連情報を抽出することが必要となる。

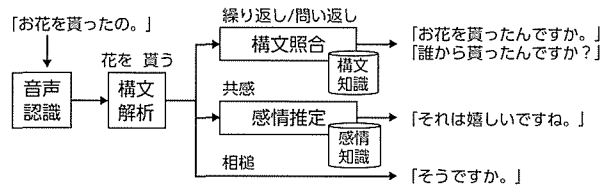


図1 傾聴対話システムの処理概要

ユーザ	北海道に行きました。
システム	北海道に行ったんですか。そこで何をしましたか。
ユーザ	旭山動物園に行きました。
システム	そうですか。
ユーザ	雨が降ってきて寒かったです。
システム	それは大変でしたね。

図2 傾聴対話システムの対話例

ユーザ	ニュースを教えて。
システム	昨日は中日が負けてしまいました。
ユーザ	中日が負けちゃったんだね。
システム	中日は広島にいいところなく敗れ、オープン戦6度目の完封負けです。
ユーザ	監督は怒っていたんじゃない?
システム	高木監督が今年初めて、怒りをあらわにしていたよ。

図3 話題深堀ができる対話例

今回、述語項構造パターンを利用してユーザ発話に類似するWEB情報を検索する方法⁽²⁾を用いた対話技術を開発した。述語項構造とは、「中日が負ける」のような「格要素 格助詞 述語」の文章構造である。ユーザ発話と構造の近い文を含む文章自体が、話題深堀した対話応答になると想定している。この対話アルゴリズムの概要を図4に示す。ユーザの質問発話から述語項構造パターンを抽出し、重要語DBと類似語DBを照合しながら類似した述語項構造パターンを作成し、WEB上のニュース記事とパターンマッチングすることで類似文章検索を

行う。類似文章が見つからない場合には、後述する典型的な従来手法であるBag-Of-Words（以後BOWと呼ぶ）モデルによる文章検索を行う。重要語、類似語DBを予め話題領域ごとに作成することで、類似性の推定精度が高くなり、話題を発散させない点が特徴である。

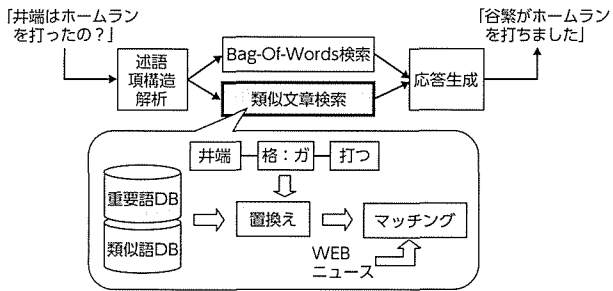


図4 深堀情報検索対話システムの処理概要

3 深堀情報検索対話の実装技術

3.1 重要語DBの作成手法

ここでは、重要語DBの作成方法について記載する。ある単語 w が特定の話題領域 t で出現しやすい場合、 w は t において重要な役割を持っていると考えられる。よって、重要度スコア $P(t | w)$ の計算式は次のように定義している。

$$P(t | w_i) = \frac{C(w_i, t) + D_t \gamma}{C(w_i) + \gamma} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$D_t = \frac{\sum_j C(w_j, t)}{\sum_k C(w_k)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $C(w_i, t)$ は話題領域 t における単語 w_i の出現頻度を、 γ はスムージング係数を表す。つまり、ある単語の特定話題領域での出現頻度と、全話題領域での出現頻度の比である。このように求めた単語と重要度スコアの組み合わせが重要語DBである。

3.2 類似語DBの作成手法

ここでは、類似語DBの作成方法について記載する。これまでも類義用言の自動獲得を行う手法が研究されており、本稿ではこれを応用した分布類似度⁽³⁾を用いる。具体的には、文章中で同時に出現しやすい格要素は類似した意味を持ち、類似した文脈に出現しやすい述語は類似した意味を持つ、という考え方である。まず、格要素の類似度スコア sim_{arg} の計算式を次のように定義している。

$$sim_{arg} = (w_1, w_2) = \frac{C(w_1, w_2, t)}{C(w_1, t) \times C(w_2, t)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

つまり、2つの格要素同士が一つの文章に同時に出現しやすい場合を似ている格要素としている。また、述語の類似度スコア sim_{pre} の計算式は次のように定義している。

$$sim_{pre}(w_1, w_2) = \cos(\vec{w_1}, \vec{w_2}) = \frac{\vec{w_1} \cdot \vec{w_2}}{|\vec{w_1}| |\vec{w_2}|} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式(4)において、 $\cdot$ は内積を表す。つまり、2つの述語に対する「格要素」のそれぞれの出現頻度をベクトル化して、そのコサイン距離に基づいて類似性を定義している。このようにして求めた2つの単語とその間の類似度スコアの組み合わせが類似語DBである。

3.3 類似文章検索のアルゴリズム

詳細な類似文章検索のアルゴリズムを図5に示す。処理の手順は以下となる。

- 手順①：ユーザ発話の述語項構造を抽出する。
 手順②：WEB上のニュースなどの文章群を獲得し、それぞれの述語項構造を抽出する。
 手順③：①と②のマッチングをとり、一致する文章があれば終了し、なければ手順④に進む。
 手順④：予め作成された重要語DBを検索し、①の述語項構造に含まれる単語を重要度スコアの順に並べ替える。
 手順⑤：予め作成された類似語DBを検索し、重要度の一番低い他の単語を類似語と置き換えた述語項構造を作成する。
 手順⑥：②と⑤のマッチングをとり、一致する文章があれば終了し、なければ重要度スコアの一番低い単語を取り除き、手順⑤から繰り返す。以上で述べたアルゴリズムで、応答文章を生成する。

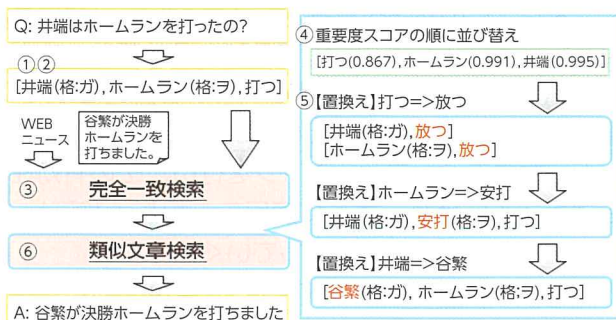


図5 類似文章検索の詳細アルゴリズム

例えば、ユーザが「井端はホームランを打った?」と質問すると、「井端 が ホームラン を 打つ」という述語項構造が得られる。同様に、WEB上の野球ニュース記事に「谷繁が決勝ホームランを打ちました」があるとすると、「谷繁 が ホームラン を 打つ」という述語項構造が抽出される。この場合、ユーザ発話とニュース記事の述語項構造が一致しないので、次に示すような類似文章検索処理を行う。「井端」「ホームラン」「打つ」のそれぞれの単語を重要度スコアの低い順に並べかえ、「打つ, ホームラン, 井端」を得る。重要度スコアの一番低い「打つ」を類似語である「放つ」に置き換え、「井端 が ホームラン を 放つ」という述語項構造を作成する。この場合、一致する文章でないため、次に重要度が低い「ホームラン」を類似語「安打」に置き換えて、「井端 が 安打 を 打つ」という述語項構造を作成する。この場合も一致する文章でないため、次に重要度が低い「井端」を類似語「谷繁」に置き換え、「谷繁 が ホームラン を 打つ」という述語項構造を作成する。ここで述語項構造が初めて一致するため、この文章を利用して「谷繁が決勝ホームランを打ちました」と応答する。なお、文章の述語項構造解析のために juman/knp⁽⁴⁾ という日本語形態素解析 / 係り受け解析ツールを利用している。

3.4 BOW モデルによる文章検索アルゴリズム

従来例となる BOW モデルによる文章検索について説明する。この処理の手順は以下となる。

- 手順①：ユーザ発話の単語頻度ベクトルを抽出する。
 手順②：WEB上のニュースなどの文章群を獲得し、それぞれの単語頻度ベクトルを抽出する。
 手順③：①と②の類似度が最も高い文章のペアを決定する。

文章 s_i に出現する単語の頻度ベクトル $\vec{v_i} = \{C(w_{i1}), \dots, C(w_{im})\}$ のコサイン距離を用いて s_i と s_j の類似度 sim_{BOW} を次のように定義する。

$$sim_{BOW} = (s_i, s_j) = \cos(\vec{v_i}, \vec{v_j}) = \frac{\vec{v_i} \cdot \vec{v_j}}{|\vec{v_i}| |\vec{v_j}|} \quad \dots\dots\dots (5)$$

4 評価試験

4.1 応答生成手法の評価

重要語と類似語を新聞記事データベース 10 年分から学習し、システム評価のためにユーザ質問文を

73問用意した。質問文は3話者によって読み上げ、その音声認識結果を用いている。WEBニュース中に回答となりえる述語項構造が存在する29質問について、応答的確率の結果を図6にまとめた。

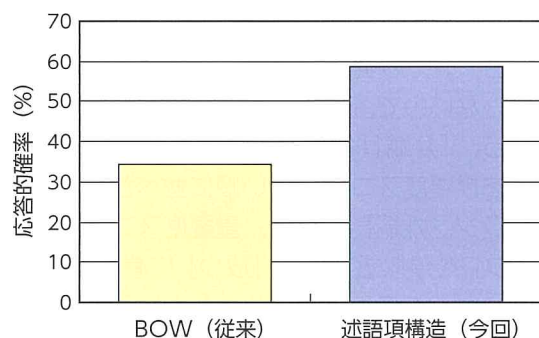


図6 対話システムの応答精度の評価結果

主観的に正しいと判断された応答文を提示できた場合を「的確」とした。比較手法としてBOWモデルのみを用いた場合を行った。開発手法では、BOWモデルと比較して、回答を的確に提示できている割合が24.1%と大幅に増加しており、ユーザーの問いかけに関係の深い適切な応答が可能となっている事が分かる。

4.2 対話システムの実証実験

図7の対話システムを構築し、介護施設職員19名と、認知症患者11名に協力いただき対話実証実験を行った⁽⁵⁾。本実験では、対話システムのストレス低減効果を評価した。評価指標として、被験者の行動を制約しないこと（無拘束性）、被験者に苦痛を与えないこと（非侵襲性）を選定基準として、心拍数、血圧、唾液アミラーゼを用いた。ストレスが軽減されることで心拍数、血圧、唾液アミラーゼが低下するとされている。心電計（心拍数）は実験開始とともに計測を開始し、対話終了後5分程度まで継続して計測を行った。唾液アミラーゼと血圧については、実験開始後安静状態にて測定し、数分程度の対話システム使用後に改めて安静状態にて測定した。これらの生理指標の計測タイミングを図8に、各種指標の測定値とpaired-t検定の結果（ $p<0.01$ ：**, $p<0.05$ ：*）を図9に示す。

血圧、心拍数、唾液アミラーゼについて、対話前後の値に統計的有意な差が見られた。特に、認知症患者においては唾液アミラーゼの低下が顕著であり、対話を行うことによりストレスが低減し、落ち着いた効果が得られると考えられる。

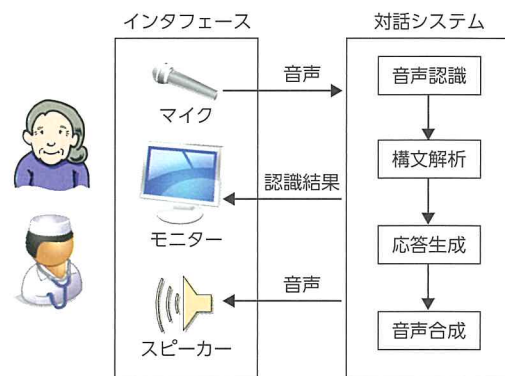


図7 対話システムの構成

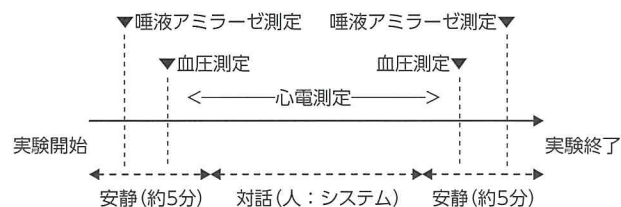


図8 生理指標の計測タイミング

	健常被験者 (n=19)			認知症患者 (n=11)		
	対話前	対話後	P値	対話前	対話後	P値
収縮期血圧 (mmHg)	138.0 ±16.5	129.1 ±14.8	0.00 **	139.36 ±17.4	134.50 ±19.2	0.15
心拍数 (回/分)	73.9 ±11.0	69.7 ±10.4	0.00 **	72.4 ±12.1	70.1 ±13.4	0.02 *
唾液アミラーゼ (kU/L)	74.6 ±48.6	74.4 ±60.1	0.99	219.5 ±141.3	130.4 ±122.8	0.00 **

図9 生理指標の計測値、検定の結果

5 まとめ

述語項構造に着目した情報抽出によって、WEB上のニュース記事から応答生成可能な対話システムを構築した。対話システムにより、認知症患者のストレス低減効果の可能性が見られ、病院でのカウンセリング対話への適用を目指し精度向上を図っていく。また、この対話技術はKIBO ROBOTプロジェクトにも提供された。このプロジェクトでは、極限の孤独状態となる宇宙空間での癒しを目的として、国際宇宙ステーションにて小型ロボットが宇宙飛行士と日本語コミュニケーションを行い、その有効性を評価する。今後、さらに適用先を幅広く検証し、ロボットの社会貢献に寄与していく。

最後に、本開発にあたって京都大学様、徳島大学様、豊田中央研究所様の多大なるご協力を頂きました。ここに深くお礼申し上げます。

■参考文献

- (1) 下岡和也ほか：音声対話ロボットのための傾聴システムの開発. 人工知能学会, SIG-SLUD 58, pp.61 - 66 (2010)
- (2) Yoshino, K. et al. : Spoken Dialogue System based on Information Extraction using Similarity of Predicate Argument Structures, Proc. SIG-DIAL, pp.59 - 66 (2011)
- (3) Dekang, L. et al. : Automatic retrieval and clustering of similar words, Proc. ACL and COLING, pp.768 - 774 (1998)
- (4) KNP, <http://nlp.ist.i.kyoto-u.ac.jp/index.php?KNP>, 京都大学 黒橋・河原研究室
- (5) Chiba, S. et al. : The attentive-listening based dialogue system for supporting communication and its influence on demented patients, Proc. IJAI, pp120 - 126 (2010)

■著者



渡部 生聖



中野 雄介

自動車技術会 技術開発賞 ドライバ快適性と車両安定性を両立した 前後輪操舵システムの開発

Development of Four-Wheel Steering System with Enhanced Driver Comfort and Vehicle Stability

藤田 好隆 *

Yoshitaka Fujita

土屋 義明 **

Yoshiaki Tsuchiya

廣瀬 太郎 *

Taro Hirose

宮崎 英敏 ***

Hidetoshi Miyazaki

1 背景

自動車の安全性への要求は年々高まっており、運動性能向上のための技術開発が日々進められている。本開発では、運動性能の向上を目的として再び前後輪操舵システム（4WS）に着目し、ドライバに違和感を与えることなく安心感の高い車両応答を実現する前後輪操舵システムを開発すると共に、他システムとの協調による車両限界領域での運動性能向上手法について検討した。

2 開発技術の概要

一般的な車両の線形2輪モデルで表される運動方程式を元に、ヨー運動と横運動を独立にコントロールする前後輪操舵手法を設計した。図1に概要を示す。各車速に対して車体スリップ角、ヨーレートの目標特性を独立に与えることで、前後輪の定常項、過渡項のゲインが算出され、ドライバのステアリング角度 δ_{MA} に対する前後輪の目標舵角が演算される構成とした。

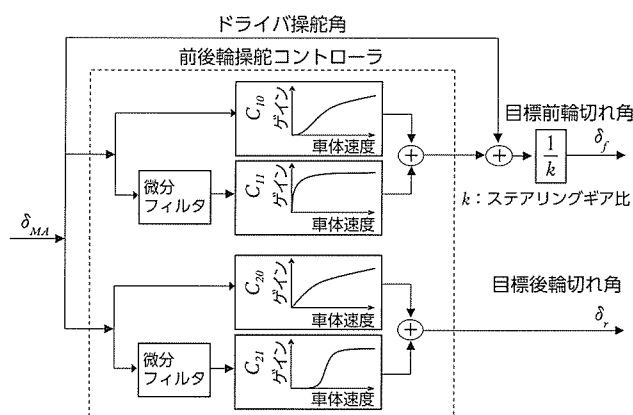


図1 前後輪操舵コントローラ概要

3 車両運動制御性能向上に向けた検討

前後輪操舵システムとPCS（Pre-Collision Safety）システムと協調し、回避操作における車両運動性能向上を検討した。図2に緊急回避性能の評価指標の一つであるドイツエルク試験のコースとその試験結果を示す。PCSシステムからの信号に基づいて車両の目標特性を切り替え、ヨーレートの応答性より横加速度の応答性の方が高くなるように設定することで通過可能最大速度が約10%向上し、回避性能を向上させることが可能となった。

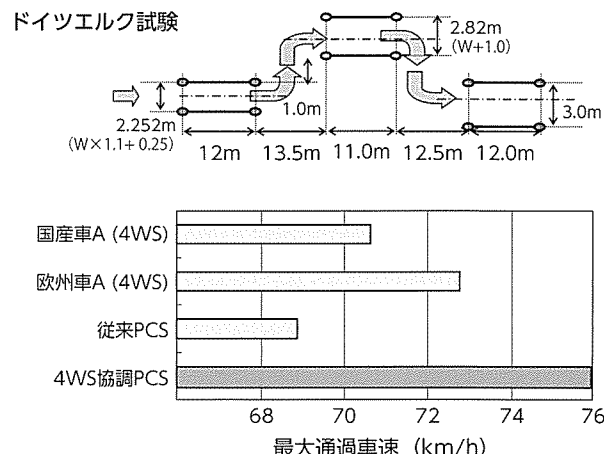


図2 緊急回避操作における前後輪操舵の効果

4 まとめ

全車速域で快適かつ安心で違和感の無い目標車両特性を実現するアクティブ前後輪操舵システムを開発し、緊急回避性能においても操舵による回避性能を向上させることが可能であることを示した。本技術は今後の運動性能向上に大きく寄与でき、更なる安全な自動車社会の実現に貢献できると考える。

* 車両運動制御設計部

** アイシン精機（株）

*** 第4電子開発部

インホイールモータによる非連成 3D モーメント制御の開発

Development of Decoupled 3D Moment Control by In-Wheel Motors

勝山 悦生*

Etsuo Katsuyama

1 はじめに

電気自動車は動力源であるモータの分散配置が容易である。モータをホイールの内側に搭載したインホイールモータ車は、各輪の駆動力を独立に制御できるため、車両運動の制御も可能である。左右輪への駆動配分によるヨー運動制御は広く知られているが、本研究ではヨー運動だけでなくロールやピッチのばね上運動も同時にかつ独立に制御する駆動力配分法を考案した。

2 技術概要

2.1 3D モーメント制御法

モータの駆動に伴って働くサスペンション反力により、ボディに上下方向の力が生じる（図1）。各輪接地点で働くその力を積極的に利用することで、駆動力配分によるヨー、ロール、ピッチの3D モーメントと前後力の、計4自由度の力を自在に制御することが可能となる。

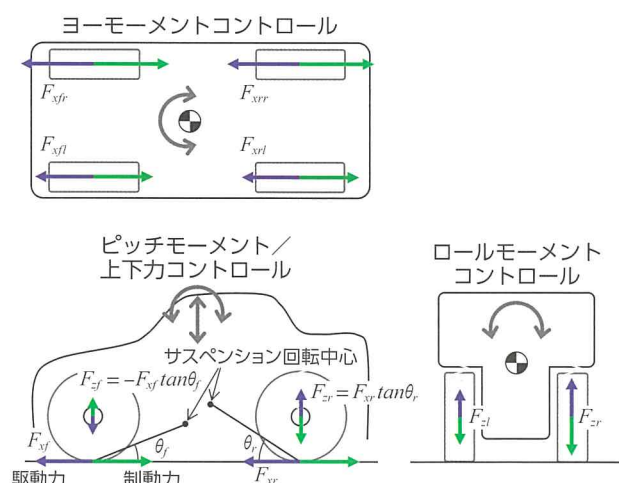


図1 3D モーメント制御のメカニズム

2.2 動的運動の非連成化

しかしヨー、ロール、ピッチ運動は互いに動的に連成するため、制御も互いに影響し合う。そこで車両モデルからその連成運動成分を導出し、その影響を相殺する非連成制御法を開発した。一例として、ヨー運動のみ制御を行った時のロール運動への影響が、本手法により相殺できることが確認できた（図2）。これにより、ヨー、ロール、ピッチの各運動制御を独立に設計することが可能となる。

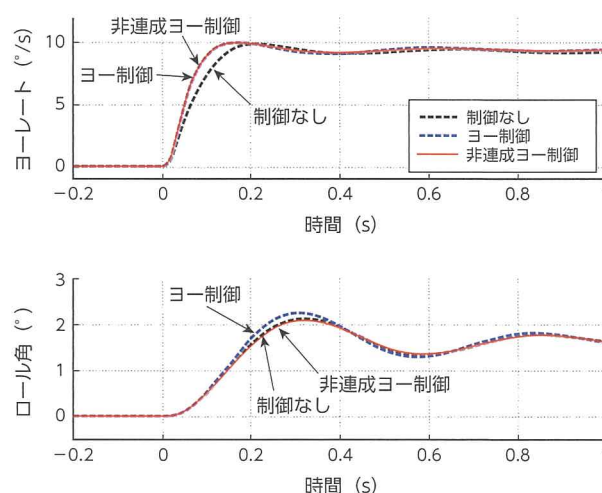


図2 非連成化のシミュレーション検証

3 おわりに

自動車の電動化に伴い、今後、各輪独立駆動車の普及が予想される。本研究では、そのアクチュエータの自由度を有効利用した、駆動力配分によるばね上運動制御という新たな技術領域を開拓した。

* 車両運動制御設計部

自動車技術会 論文賞 新 NOx 浄化技術 DiAir の開発

Development of DiAir
- A New Diesel deNOx System by Adsorbed Intermediate Reductants -

美才治 悠樹 *
Yuki Bisaiji

吉田 耕平 *
Kohei Yoshida

井上 三樹男 **
Mikio Inoue

梅本 寿丈 *
Kazuhiro Umemoto

福岡 隆雄 *
Takao Fukuma

1 まえがき

欧州中心に議論されている、EURO6 以降の新しい排気ガス規制では、より幅広い運転領域を使用する認証走行モードが制定されようとしており、あらゆる運転領域で NOx を浄化できる後処理システムの開発が急務である。

2 開発技術の概要

2.1 DiAir システム構成と性能

代表的な NOx 浄化システムの 1 つである吸蔵還元型触媒 (NSR) は、高負荷運転領域 (高ガス流量 / 高温条件) での浄化性能が課題である。本研究では、排気管に設置した燃料添加弁から NSR に対し、少量の炭化水素 (HC) を間欠的に供給することにより、従来課題であった高負荷領域で大幅に NOx 浄化性能が向上することを見出した (図 1, 2)。

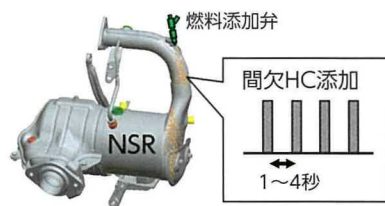


図1 検討システム (DiAir) の構成

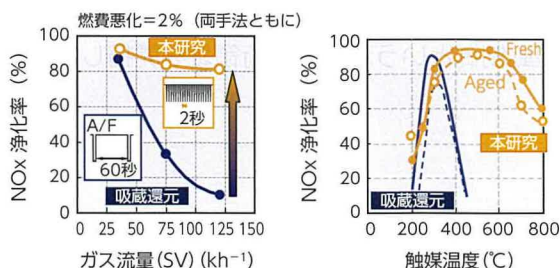


図2 高ガス流量・高温条件での性能比較

2.2 浄化メカニズム解析

本現象の浄化メカニズムを解析したところ、浄化に寄与していると示唆される多数の還元性中間体が検出された (図 3)。この結果から、本 NOx 浄化システムを DiAir (Diesel NOx aftertreatment by Adsorbed Intermediate Reductants) と名づけた。

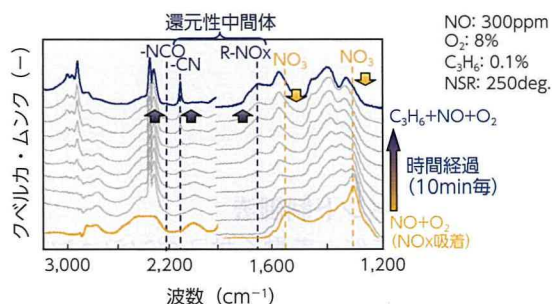


図3 浄化中の触媒吸着物質解析

2.3 高負荷運転モードへの適応

DiAir システムを高負荷運転モードへ適応することで、従来 NSR システムに比べ大幅に NOx 浄化率を向上しうることを示した。

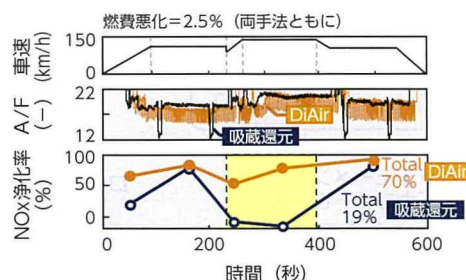


図4 高負荷運転モードでの浄化率比較

3 むすび

NSR の課題である高負荷領域で、高 NOx 浄化を示す DiAir システムを開発し、浄化メカニズムを明らかにした。また、高負荷モードへ本システムを適応し、将来排気規制へのポテンシャルを実証した。

* エンジン先行制御システム開発部

** TNGA 企画部

自動車技術会 2012 年春季大会学術講演会 優秀講演発表賞 小型ハイブリッド車のモータステータの開発

Development of Motor Stator for Small Hybrid Vehicle

高崎 哲 *

Akira Takasaki

金岩 浩志 ***

Hiroshi Kaneiwa

神谷 宗宏 **

Munehiro Kamiya

加藤 充 ***

Mitsuru Kato

水谷 竜彦 *

Tatsuhiko Mizutani

梅田 敦司 ***

Atsushi Umeda

1 まえがき

HV の更なる低燃費化、低コスト化および高い動力性能の要求から、駆動用モータには体格・重量低減と共に、要求出力を有する高い出力密度が要求されている。本技術開発ではスモール HV の限られたスペースに搭載するため、モータ出力および絶縁性能を確保しつつ、モータ体格の低減を達成した。

2 開発技術の概要

2.1 コアの体格低減

同一出力のモータではスロット内占積率の向上に伴いコアの体格を低減できる。今回コイル線を丸線から平角線に変更することで、スロット内占積率は 10% 向上しコアの体格を低減した (図 1)。

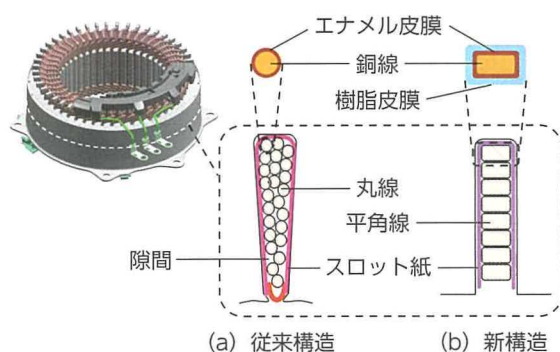


図 1 占積率

2.2 コイルエンドの体格低減

平角線化による線間隙の低減と、樹脂皮膜追加に伴う相間絶縁紙廃止によりコイルエンド体格を低減した。また、コイルエンドは従来は丸線を束ねて成形していたが、今回は階段状に成形することで更に体格低減に貢献した (図 2)。

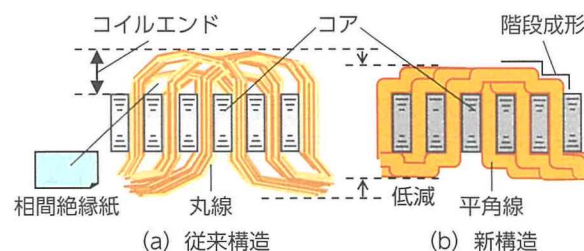


図 2 コイルエンド体格

2.3 分割コアの採用

コイルエンド体格低減とコアの組付け性を考慮し分割コアと外筒を採用した (図 3)。分割状のコアシートを積層してコアブロックを形成し、コイルに挿入した後、コアブロック外周を外筒にて固定した。

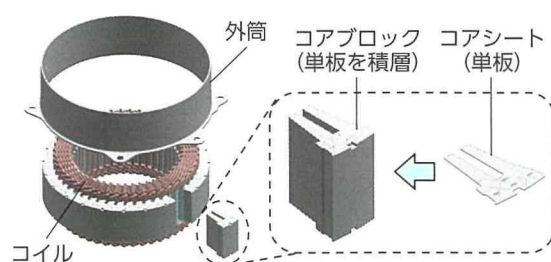


図 3 分割コア

3 むすび

小型ハイブリッド車に搭載可能なモータステータの開発を行った。従来構造に比べ軸長 15%、径 10% 縮小、重量は 15% 低減し燃費向上に貢献した (図 4)。

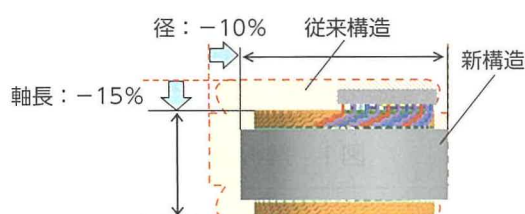


図 4 ステータ体格

* HV ユニット開発部

** BR-EV・充電システム開発室

*** (株) デンソー

自動車技術会 2012 年秋季大会学術講演会 優秀講演発表賞 キーオフ時のエンジンルーム内部部品温度予測技術の開発

Development of Thermal Soak Analysis on Under Hood Heat Damage after Engine Shut Off

田中 義輝 *

Yoshiteru Tanaka

安木 剛 *

Tsuyoshi Yasuki

田中 博 *

Hiroshi Tanaka

高光 二郎 *

Jiro Takamitsu

野村 篤志 **

Atsushi Nomura

加藤 英俊 ***

Hidetoshi Kato

1 前書き

エンジンルーム内の部品温度低減に向けて、数値流体力学 (CFD) が活用されている。従来技術では登坂走行時の部品温度を予測してきた。しかし、排気系上部に配置された部品は登坂走行後のキーオフ時に温度上昇するものが多く、その予測技術の開発が必要である。

そこで本研究では、キーオフ時におけるエンジンルーム内の部品温度を予測する技術を開発した。

2 部品温度予測手法

登坂走行とその後のキーオフに相当する状態を模擬している当社熱風洞での部品温度評価試験に対して、熱流体解析を行った。

登坂走行時は、車両周りの流体解析だけではなく、エンジン等の冷却水流れやエアコンの冷媒流れ、エキゾーストマニフォールド内部の排気ガス流れ解析を結び付け、熱の三形態 (熱伝導・熱伝達・熱輻射) を考慮し、エンジンルーム内の部品温度を予測した。その後、キーオフ時は熱源からの熱気上昇 (浮力) を模擬するため、空気を圧縮性流体として解析を行い、部品温度を予測した。

解析モデルは、エンジンルーム内のほぼすべての部品を配置した (図 1)。また、それらの部品の内部構造は熱伝導による熱移動量を計算するため、ソリッド要素でモデル化された。

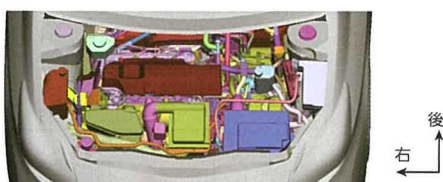


図 1 解析モデル

* 車両 CAE 部

** エンジン設計部

*** トヨタテクニカルディベロップメント (株)

3 部品温度予測結果

エンジンルーム内の部品に対し、登坂走行時からキーオフ時にかけての部品最高温度の予測値は、実験値に対し $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 以内であり、製品開発適用に十分な精度を有していた (図 2)。また、熱源からの熱気上昇を精度良く予測し、熱気による部品温度の上昇も再現することができた (図 3, 4)。

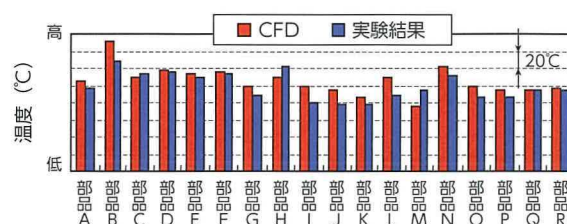


図 2 部品温度予測結果

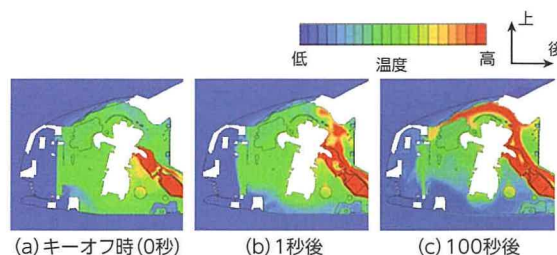


図 3 キーオフ後の熱源からの熱気の様子 (車両中央断面)

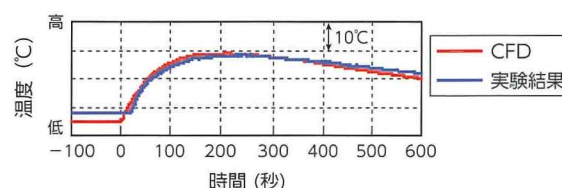


図 4 部品 D の温度の時間履歴

4 むすび

本研究により、走行時からキーオフ時にかけてのエンジンルーム内の部品温度予測が可能となった。今後、他走行形態への適用や製品開発への適用が期待される。

Development of Diesel Engine Using New Fuel Injection System
- Direct Monitoring of Fuel Injection Pressure Using Injector with Built-In Sensor and its Application -

伊藤 嘉康^{*}
Yoshiyasu Ito

立木 豊盛 **
Toyomori Tsuiki

図1 i-ART インジェクタとシステム概要

** (株) デンソー



2012 年度優秀特許 めっき鋼板のプレス成形性評価法

特許番号 4341735 号

Method for Evaluating Press Moldability of Plated Steel Sheet

伊原 智章 *

Tomoaki Ihara

佐藤 章仁 **

Akihito Sato

山岸 康一郎 **

Koichiro Yamagishi

塩川 正隆 **

Masataka Shiokawa

1 特許の背景

自動車部品のプレス成形（絞り成形）の際には、素材の周辺を適切に押さえた状態でなければ、しわや割れが発生してしまう。このような状態下で、特にプレス割れを防止するためには、鋼板表面の潤滑性を的確に把握することが重要である。そのため鋼板試験片を押さえ付けて特定速度で引き抜く際の押さえ圧と引き抜き力とから摩擦係数を求める平板摺動試験により、鋼板の潤滑性及びプレス成形性を評価するなど様々な試験方法が提案されている。

しかしながら、これまでの鋼板の試験方法は、その評価方法が複雑であるため、評価結果に鋼板の表面以外の因子が複雑に影響するため正確な評価を十分に行うことができなかった。本稿では、この点を改良した特許に関して説明する。

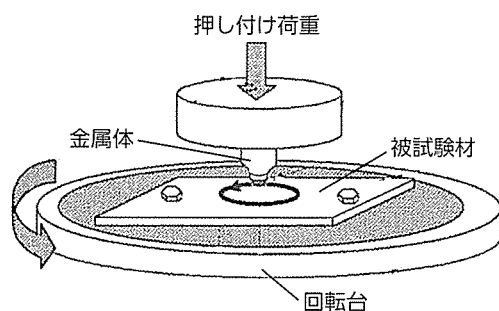


図1 鋼板表面の試験方法

2 特許の概要

本特許のめっき鋼板のプレス成形性評価法（図1）は、めっき鋼板からなる被試験材に金属体を点状の接触面をもって所定条件で接触摺動させ、摺動長内において測定される摺動抵抗の変動から「摺動抵抗／押し付け荷重」の値（以下、摩擦係数と呼ぶ）の変化を求め、更にこの摩擦係数の変化から摩

擦係数平均値 μ_{ave} と摩擦係数標準偏差値 $\mu\sigma$ とを求め、その値によって被試験材のプレス成形性を評価する。なお所定条件とは金属体の押し付け荷重を2～300N、摺動速度を1～1,000mm/min、総摺動長を5～20,000mmとすることが好適である。

ここで摩擦係数平均値 μ_{ave} は金型への材料流入のしやすさを表すと共に、めっき鋼板の焼付きやすさを示し、摩擦係数標準偏差値 $\mu\sigma$ は金型に焼きついた金属粉の剥離のしやすさを示している。この両方を見ることでプレス割れを予測することが可能となる。

摩擦係数平均値 μ_{ave} と、摩擦係数標準偏差値 $\mu\sigma$ と実プレスの結果（●：好適、○：合格、×：不合格）との関係を図2に示すが、本発明の範囲であれば満足する実プレス結果が得られることがわかる。

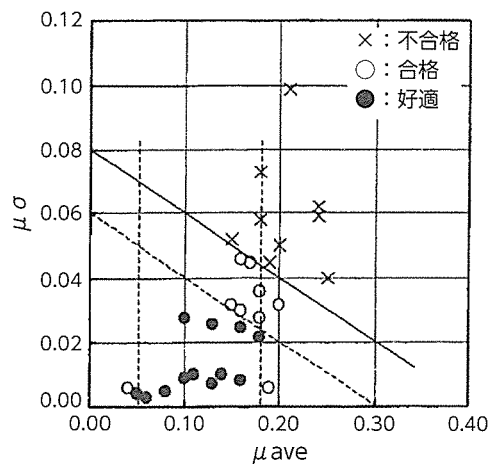


図2 鋼板表面の試験結果

3 特許の効果

本特許を採用しためっき鋼板のプレス成形性評価法により、摩擦係数平均値 μ_{ave} と摩擦係数標準偏差値 $\mu\sigma$ の相関関係から、実プレスを行う前に短時間、低コストで、正確かつ安定的にプレス成形性を評価することができる。

* TOYOTA MOTOR MANUFACTURING INDONESIA

** 品質保証部

2012 年度優秀特許 車両の組立ライン

特許番号 4752929 号

Vehicle Assembly Line

遠山 伸治 *
Shinji Toyama

富田 幸治 *
Koji Tomida

1 特許の背景

従来の車両の組立ラインは、車体の前後方向が組立ラインの搬送方向と同じ方向（縦置き）になるように複数の車体がフロアフリクション式の車体用台車に支持され、組立ラインに沿って搬送される。車体に対して足回り部品を組み付ける作業工程では、作業者が工具を使用して車体の下方から足回り部品を取り付ける。このとき車体の下方で、工具を載せた工具用台車と足回り部品を載せた部品用台車を車体用台車の移動に同期して搬送方向に移動させることで効率的に組み付け作業ができる。

しかしながら、車体を縦置きにした組立ラインの場合、車体の下方空間に制約があるため工具用台車と部品用台車を最適に配置することに改善の余地があった。本稿では、この点を改良した特許に関して説明する。

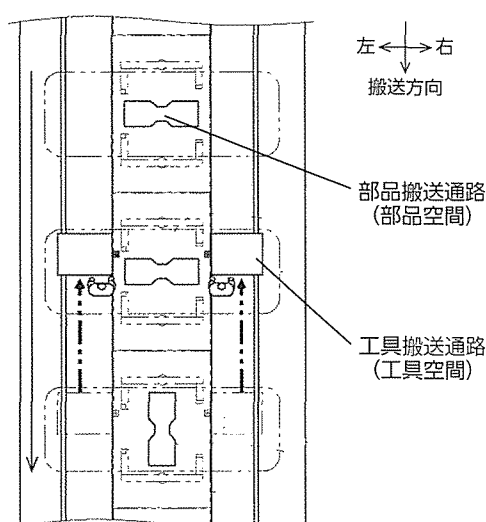


図1 足回り部品の組立ラインの平面図

2 特許の概要

本特許の足回り部品を組み付ける車両の組立ライン（図1）は、車体の前後方向がラインの搬送方向に対して直行する方向（横置き）に支持されるように車体が組立ラインに沿って搬送される。このとき車体下方の空間を搬送方向に沿って連通するように足回り部品を搬送する通路（部品空間）と工具を搬送する通路（工具空間）が設けられ、両通路が車体下方において互いに独立して配置される。具体的には横置きされた車体の下方において、搬送方向と直行する方向に両通路が並列配置される。このように両通路が並列配置された状況下で、作業者は工具空間を移動する工具用台車から工具を手に取り、工具を使って部品空間を移動する足回り部品を車体に組み付ける（図2）。

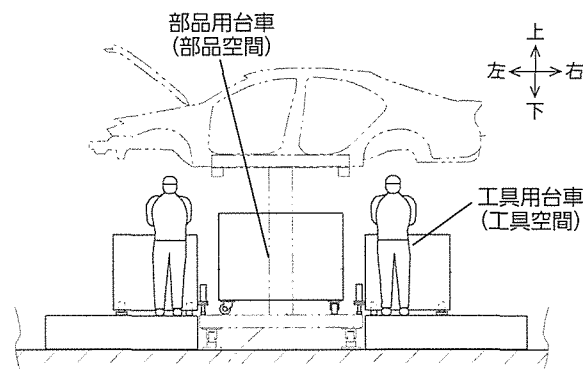


図2 足回り部品の組立ラインの側面図

3 特許の効果

本特許を採用した足回り部品を組み付ける組立ラインは、車体が横置きに支持された車体の下方空間において、足回り部品の空間と工具の空間を互いに独立して配置するので、組立ライン全体のスペース効率を向上させることができる。また作業者の組み付け作業の効率を向上させることができる。

* 組立生技部

2012 年度優秀特許

液圧ブレーキ装置

特許番号 4760246 号

Hydraulic Brake Device

大朋 昭裕 *

Akihiro Otomo

1 特許の背景

従来の車両に適用された液圧ブレーキ装置は、ポンプまたは液圧ブースタで発生した液圧をリニア開閉弁の開閉制御によりブレーキ要求量に対応するように調圧する調圧制御装置と、調圧された液圧を供給することによりブレーキ力を発生するブレーキシリンダを備える。なお、リニア開閉弁は4つの車輪（ブレーキシリンダ）に対応するようにそれぞれ配置されている。また、ポンプ等の異常時にはブレーキ操作に対応してマスターシリンダからブレーキシリンダに液圧が供給できるように構成されている。

しかしながら、複数の液圧源（ポンプ、液圧ブースタ、マスターシリンダ）とブレーキシリンダを接続する液圧通路の構成に改善の余地があった。本稿では、この点を改良した特許に関して説明する。

2 特許の概要

本特許の液圧ブレーキ装置（図1）は、マスターシリンダと、操作力を倍力させた液圧を発生させる液圧ブースタと、モータ駆動により高圧の液圧を発生させるポンプとからなる液圧源と、液圧源から液圧を供給されるブレーキシリンダを備える。またブレーキシリンダが接続されると共に、複数の液圧源が互いに並列に接続されるメイン通路と、複数の液圧源のうち一つ以上をメイン通路に選択的に連通させる連通制御装置（開閉弁及び制御コンピュータ）を備える。連通制御装置はポンプとメイン通路を接続する液圧通路に設けたリニア開閉弁を含む。また液圧ブースタまたはマスターシリンダとメイン通路の間の液圧通路に開閉弁を備える。

この構成によりブレーキ操作時、ブレーキ操作に対応してポンプで発生した高い液圧をリニア開閉弁で調圧し、ブレーキシリンダに供給する。また、所定条件下では、ブレーキ操作に対応して液圧ブースタやマスターシリンダからの液圧を選択的に供給することもできる。

3 特許の効果

本特許を採用した液圧ブレーキ装置は、メイン通路に複数の液圧源がそれぞれ互いに並列に接続されているため、液圧通路の構成を簡単な構造にすることができる。また、ブレーキシリンダに対して複数の液圧源のうち一つ以上をメイン通路を介して選択的に連通させることができるので、液圧の制御性を向上させることができる。

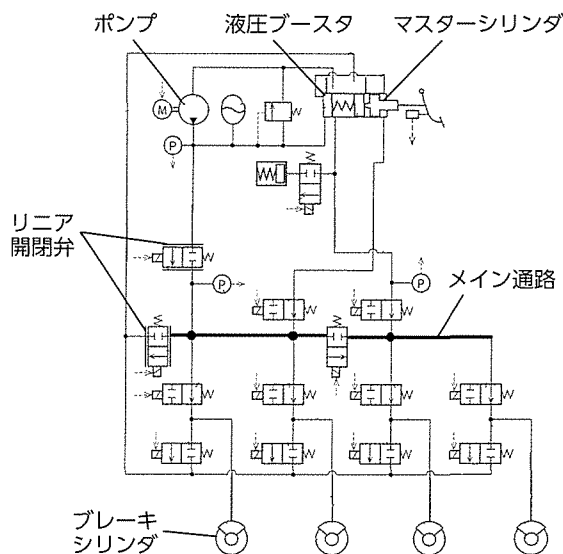


図1 ブレーキシステムの全体

* 設計品質改善部

Back Number Index



Vol.50 No.1
特集：環境先進技術車



Vol.52 No.2
特集：独創



Vol.54 No.2
特集：快適な車内空間



Vol.55 No.1
特集：感性に合う快適な走り



Vol.55 No.2
特集：レクサスの品質



Vol.56 No.1
特集：環境・エネルギー



Vol.56 No.2
特集：安全・ITS



Vol.57 No.1
特集：プリウス



Vol.57 No.2
特集：次世代電池とその活用



Vol.58 No.1
特集：日本独創



Vol.59
特集：生産技術

定価：1,890円（本体：1,800円）

※ Vol.48 No.1「リサイクル」、Vol.48 No.2「生産技術」、Vol.49 No.1「デザイン」、
Vol.49 No.2「エレクトロニクス」、Vol.50 No.2「エンジン」、Vol.51 No.1「安全」、Vol.51 No.2「ITS」、
Vol.52 No.1「軽量化」、Vol.53「材料」、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：2,940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>



toyota Technical Review Vol. 60

© 2014 TOYOTA MOTOR CORPORATION, Printed in Japan
(禁無断転載)

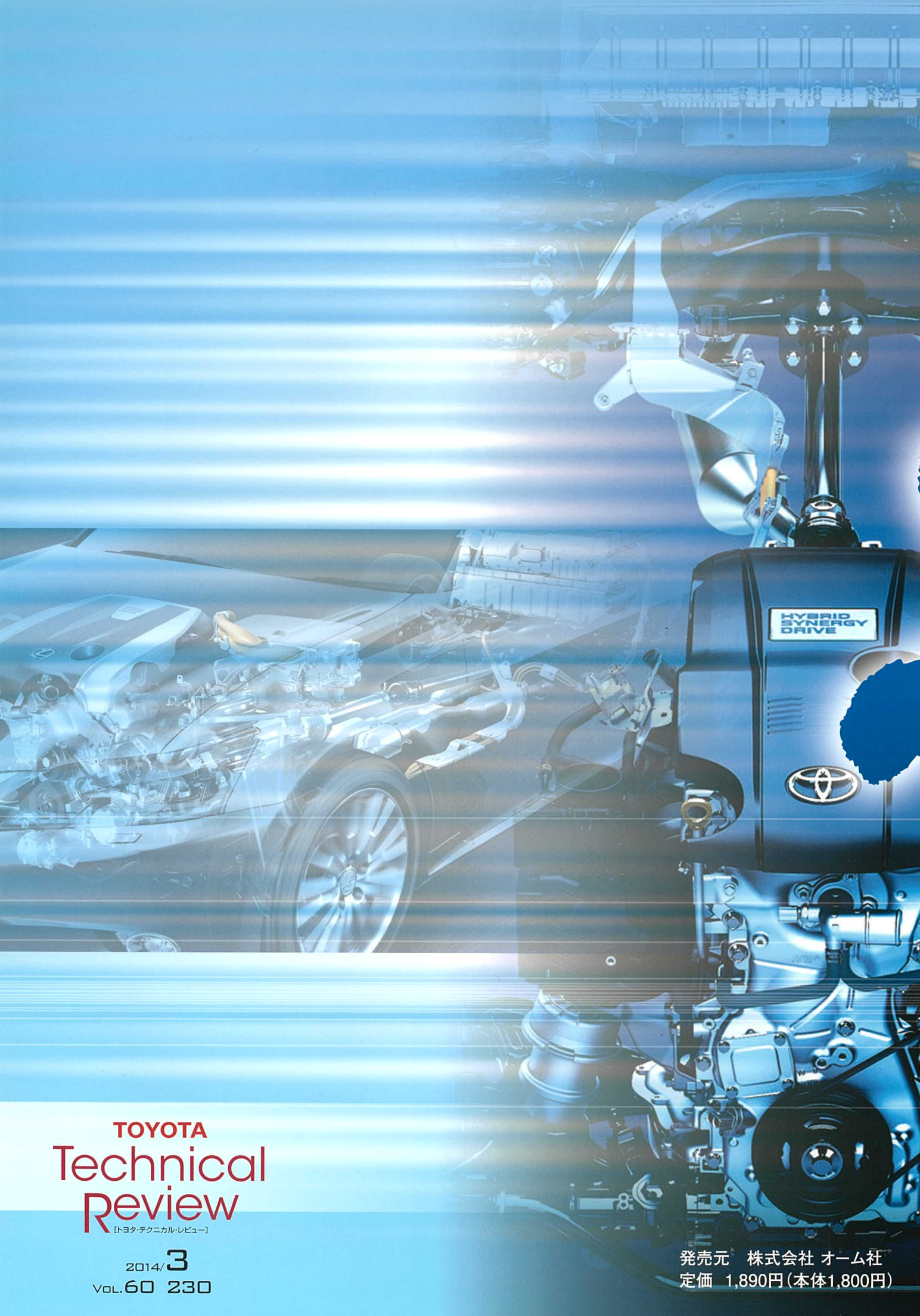
発行所 トヨタ自動車株式会社
技術管理部
〒471-8572 愛知県豊田市トヨタ町1
(0565) 28-2121 (代表)

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事業統括部 技術資料室 荒島 笑子/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 2014年3月24日



TOYOTA
Technical
Review

[トヨタ・テクニカルレビュー]

2014/ **3**
VOL.60 230

発売元 株式会社 オーム社
定価 1,890円(本体1,800円)