

ISSN 0916-7501
CODEN : TTEREB

TOYOTA Technical Review

【トヨタ・テクニカル・レビュー】

2018/5 234

特集

TNGAパワートレーン

VOL.64

【表紙のデザイン】

異業種がクルマを開発する時代の中で、これまで積み上げてきた知識を、ディープラーニングのような新しい手法で新たにシステム化すれば、新しい気づきもあり、新しいことに挑戦できる、という思いを「知」の字で表現しています。

TOYOTA Technical Review

234

Vol. 64 May 2018

目次

巻頭言

- ・よりよいモビリティ社会を目指して.....元専務役員 水島 寿之.....4

▷特集「TNGA パワートレーン」

- 基調論文：TNGA パワートレーン.....岸 宏尚.....6
- ・トヨタ新型直列 4 気筒 2.5L ガソリンエンジン
坂田 邦彦／戸田 忠司／坂井 光人／秤谷 雅史／加藤 寿一.....12
- ・新型直列 4 気筒 2.5L ガソリンエンジンのシリンダシステム開発
平沼 亨／山下 親典／寺田 竜啓／中田 和哉／中村 光宏／倉内 孝.....20
- ・新 V 型 6 気筒 3.5L 過給ガソリンエンジン湯浅 貴夫／山崎 大地／森 章夫／能川 真一郎.....26
- ・新型 V6 気筒 3.5L 過給ガソリンエンジン冷却システム開発
森下 大作／河本 直也／丹羽 雄祐／久湊 直人／山口 満／安藤 宏和.....33
- ・内接ギア式可変油圧オイルポンプを用いた潤滑システムの開発
細木 貴之／山本 道隆／渡邊 哲治／西田 裕基.....40
- ・レーザクラッドバルブシート開発
青山 宏典／宮良 直之／杉山 夏樹／谷中 耕平／安藤 公彦／大島 正.....47
- ・新 FF ダイレクトシフト 8 速自動変速機の開発
今西 亮平／草本 大輔／東井 浩臣／池 宣和／安田 崇／伊藤 正泰.....54
- ・FR 乗用車用 10 速自動変速機の開発
山田 和彦／宮崎 光史／長谷川 善雄／近藤 貴裕／増永 聖二／北折 一郎／竹市 章.....61
- ・FR 乗用車 高効率・低 NVH ドライブライン.....今井 信治／高松 晋也／木天 孝／溝口 典弘.....68
- ・マルチステージハイブリッドトランスミッションの開発
椎葉 一之／大室 圭佑／玉地 俊明／安藤 郁男／加藤 春哉／熊田 拓郎.....73
- ・実市場ビッグデータを活用した PHV の充電行動分析
橋元 慶太／小澤 環／田多 由佳／大橋 喜芳／嶋田 新也.....80
- ・エンジン性能とアルミ鋳物を変える革新生産技術 CS コアプロセスの紹介
渡邊 浩庸／泉 尚吾／岡田 真幸.....87

▷論文／解説

- ・市場走行データを活用した設計手法.....小池 伸.....95
- ・機械学習を用いた傾聴対話ロボット向け応答種類推定技術の研究.....堀 達朗／渡部 生聖.....103
- ・硫化物固体電解質の粒子構造解析.....塩谷 真也／山村 英行.....108

▷受賞技術概要.....114

▷優秀特許.....125

Contents

Preface

- To Achieve an Ever-Better Mobile Society
Toshiyuki Mizushima, former Senior Managing Officer..... 4

▷ Special Feature: TNGA Powertrains

- Introduction: TNGA Powertrains
Hirohisa Kishi..... 6
- The New Toyota Inline 4-Cylinder 2.5-Liter Gasoline Engine
Kunihiko Sakata/Tadashi Toda/Mitsuto Sakai/Masashi Hakariya/Toshikazu Kato..... 12
- Development of Cylinder System for the New Toyota Inline 4-Cylinder 2.5-Liter Gasoline Engine
Toru Hiranuma/Chikanori Yamashita/Tatsuhiko Terada/Kazuya Nakata/
Mitsuhiro Nakamura/Takashi Kurauchi..... 20
- The New Toyota V6 3.5-Liter Turbocharged Gasoline Engine
Takao Yuasa/Daichi Yamazaki/Akio Mori/Shinichiro Nogawa..... 26
- Development of Cooling System for the New Toyota 3.5-Liter V6 Turbocharged Gasoline Engine
Daisaku Morishita/Naoya Kawamoto/Yusuke Niwa /Naoto Hisaminato/
Mitsuru Yamaguchi/Hirokazu Ando 33
- Development of Engine Lubrication System with New Internal Gear Fully Variable Discharge Oil Pump
Takayuki Hosogi/Michitaka Yamamoto/Tetsuji Watanabe/Yuki Nishida..... 40
- Development of Laser-Clad Valve Seats
Hironori Aoyama/Naoyuki Miyara/Natsuki Sugiyama/Kohei Yanaka/
Kimihiko Ando/Tadashi Oshima..... 47
- Development of New Front-Wheel Drive Direct-Shift 8-Speed Automatic Transaxle
Ryohei Imanishi/Daisuke Kusamoto/Hiroomi Toi/Nobukazu Ike/Takashi Yasuda/Masahiro Ito 54
- Development of New 10-Speed Automatic Transmission for Rear-Wheel Drive Passenger Vehicles
Kazuhiko Yamada/Terufumi Miyazaki/Yoshio Hasegawa/Takahiro Kondo/
Seiji Masunaga/Ichiro Kitaori/Akira Takeichi..... 61
- Design of Highly Efficient Driveline with Low Noise, Vibration, and Harshness for
Rear-Wheel Drive Passenger Vehicles
Nobuharu Imai/Shinya Takamatsu/Takashi Kiten/Norihiro Mizoguchi 68
- Development of Multi Stage Hybrid Transmission
Kazuyuki Shiiba/Keisuke Omuro/Toshiaki Tamachi/Ikuo Ando/Shunya Kato/Takuro Kumada 73
- Analysis of PHV Charging Behavior Based on Real-World Big Data
Keita Hashimoto/Tamaki Ozawa/Yuka Tada/Haruyoshi Ohashi/Shinya Shimada..... 80
- Introduction of Innovative CS Core Process Production Technology Affecting Engine Performance and
the Aluminum Casting Process
Hirotsune Watanabe/Shogo Izumi/Masaki Okada 87

▷ Technical Papers/Technical Articles

- Design Method Using Real-World Vehicle Data
Shin Koike 95
- Research into Response Type Detection Technology for Active Listening Robot Using Machine Learning
Tatsuro Hori/Narimasa Watanabe 103
- Particle Structural Analysis of Sulfide Solid Electrolyte
Shinya Shiotani/Hideyuki Yamamura 108

▷ Technical Award News..... 114

▷ Award-Winning Patents..... 125

よりよい モビリティ社会 を目指して

元専務役員

水島 寿之



2017年を振り返ると、さまざまな国や地域が将来に向けた電動車へのシフトを表明し、足元では高度運転支援が急速に普及し始めるなど、自動車産業の構造に大きな変化をもたらされた年となりました。

実際に、これまでは異業種に括られてきた企業を始め、さまざまな会社や組織が、電動車や自動運転車の開発に対して従来とは異なる視点でアプローチしており、それらがますます存在感を示しつつあります。

我々は、「彼を知り 己を知れば 百戦殆うからず」と孫子の兵法にありますように、まず競争相手を知り、自分たちの立ち位置を知った上で戦略を立てなければならず、そのためには曇りなき眼で事実を見定めていかなければなりません。

さらに、この大転換期を変革への絶好の機会と捉え、例えば、これまで先人達から脈々と伝承され積み上げてきた知識や技術を、ディープラーニング（深層学習）を活用してシステム化（組み合わせ）するなど、新たな価値を生み出していく必要があると考えています。

一方で、「地球環境に貢献し、人を幸せにしたい」との我々の思いは、これからも変わりません。

1997年に、電動車の先駆けとなったハイブリッド車「プリウス」を発表して以来、2017年でちょうど20年が経ちました。その間、多くの車種に電動化技術を搭載して、CO₂削減や排出ガスのクリーン化に取り組んでまいりました。

しかし、これからも持続的に地球環境や人に対して貢献していくためには、クルマの性能を向上させるだけでなく、クルマやその技術を広く普及させていくことが大切だと考えています。しかもそれは、各地域が自分たちの力でつくったと思えるクルマや技術でなければならないとの思いもあります。

そのためにはまず、各地域に根差した企画と開発が必要です。それぞれの地域事情や技術水準などを踏まえた企画を立て、その地域で開発することによってクルマを普及させることができ、それが地域の技術力向上へつながっていくと考えています。

それに加えて、各地域のエネルギー政策や交通環境などと連携した施策も必要です。エネルギーの生産からタイヤに伝えるまで、いわゆる Well to Wheel 全体の中で、利用する人が不自由なく充電や充填ができる Well to Tank の環境整備や、電池等のリサイクルシステムの整備などと連携しながら、Tank to Wheel でのクルマの性能向上と普及を図っていきたいと考えています。

これからも、もっといいクルマづくりとよりよいモビリティ社会を実現させることにより、地球環境に貢献し、人を幸せにすることを目指したいと思います。

TNGA パワートレーン

TNGA Powertrains

岸 宏尚*1
Hirohisa Kishi

1 はじめに

20世紀以降、自動車が急激に発展・普及してきている一方で、自然環境破壊や資源枯渇、地球温暖化などの問題が顕在化しつつあり、CO₂削減や大気環境の改善のため、使用するエネルギーや動力源を変えていかなければならず、自動車業界としても対策が急務な状況である。

この状況の中、各国や各社が様々な形での電動化へのシフトを表明し、自動運転を商品力の柱として訴求する動きが加速している。また、所有から利用（リース／シェアリング）への変化もさらに進むと予測されており、我々自動車メーカーは、まさに100年に一度の生き残りをかけた競争に直面している。

従来、トヨタは「省エネルギー」「燃料多様化への対応」「エコカーは普及してこそ環境への貢献」を3つの柱とするパワートレーン開発を目指してきた。

図1は、2015年に発表した、トヨタの2050年に向けたパワートレーンミックスの推移に関するビジョンである。

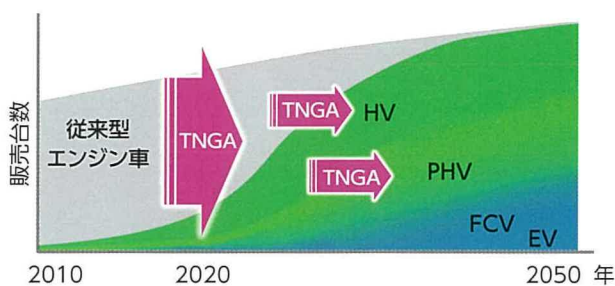


図1 パワートレーンミックスビジョン

現在の市場の主流は、ガソリンやディーゼルエンジンのみを動力源とする従来型エンジン車だが、ハイブリッド車（HV）／プラグインハイブリッド車（PHV）／電気自動車（EV）／燃料電池車（FCV）などの電動車が大多数を占める時代が目前に迫っている。我々はこのパワートレーンの大転換期を確実に乗り切るため、従来型のパワートレーンに磨きを

かけると同時に、それらが将来、ハイブリッドシステムやプラグインハイブリッドシステムに連続性を持つユニットであることを念頭に置いて開発することが求められている。

2 パワートレーンによる TNGA への貢献

「Toyota New Global Architecture (TNGA)」とは、「もっといいクルマ」の実現を目指すトヨタの新しいクルマづくりの考え方であり、クルマを骨格から変えて基本性能と商品力を大幅に向上させる取り組みである。

今回、プラットフォームの新設と展開に合わせて、パワートレーンでは、エンジン／トランスミッション／ハイブリッドシステムといったユニットを全面的に刷新した。低フード化、低重心化を実現し、運動性能の向上とともに環境性能のさらなる向上を図ることで、「もっといいクルマ」づくりに貢献した。

また、ユーザーに、より早く商品を届けるには、開発効率向上や生産効率向上を進める必要があるため、開発だけでなく、生産技術や工場の革新、働き方の変革も同時に実施した。

3 TNGA パワートレーン

従来、エンジンやトランスミッションなど個々のユニットの効率を向上し、それらを組み合わせで最適化を図ることにより、パワートレーンとしての効率を最大化してきた。

今回の TNGA では、クルマの大きさや使われ方を考慮して、それぞれの車両に理想的なパワートレーンシステムを設計し、システムとして効率最大化を目指すことで、燃費と走り向上させた。

図2に TNGA パワートレーンの基本的な開発思想を示す。この思想では、変えない基本骨格の部分（ピラミッド1階）と進化させる部分（ピラミッド2階、3階）に分けた。

*1 パワートレーンカンパニー President

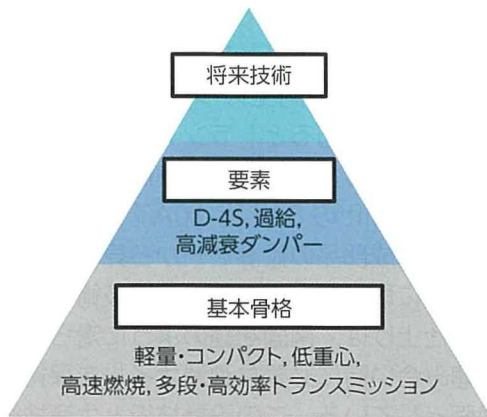


図2 TNGA パワートレインの開発思想

具体的には、基本骨格を徹底的に磨いて素の性能や品質の向上を図る。その基本骨格の土台の上に要素技術を追加して、環境変化・商品ニーズ・地域ニーズに適應させる。さらにその上に、将来に向けた技術革新を積み上げる。

以下に、TNGA パワートレインシステムを構成する個々のユニットについて、役割や目標、その達成手段を説明する。

3.1 新型エンジン

まず、エンジン開発の考え方を説明する。

エンジン開発は、排気量や気筒数によらず進化させる共通の基盤技術と、排気量や形状の影響を大きく受ける燃焼や吸・排気系に分けられる。

熱効率向上のための損失低減は、従来トヨタが培ってきた経験をもとに基盤技術を地道に進化させた。一方、燃焼の質や吸入効率の向上は、エンジン種類をまたぐと共通化することが難しかったが、TNGA ではこれを両立させ、エンジンの基本設計のコモンアーキテクチャーとして全エンジン機種へ展開することを目標に開発した (図3)。

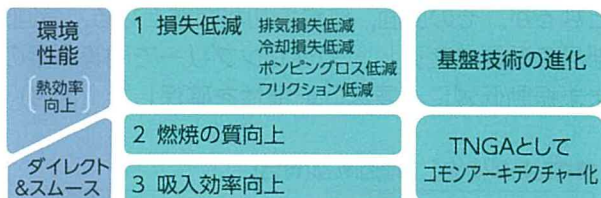


図3 エンジン開発の考え方

そのコモンアーキテクチャーについて説明する。図4はTNGAエンジンで目指す目標の物理量を示している。走りと燃費を向上させるためには、吸入

効率と筒内空気の乱れを同時に向上させる必要がある。それらをTNGAエンジンで目指すべき物理量と定義し、そのトレードオフラインを突き抜けた位置に目標を置いた。

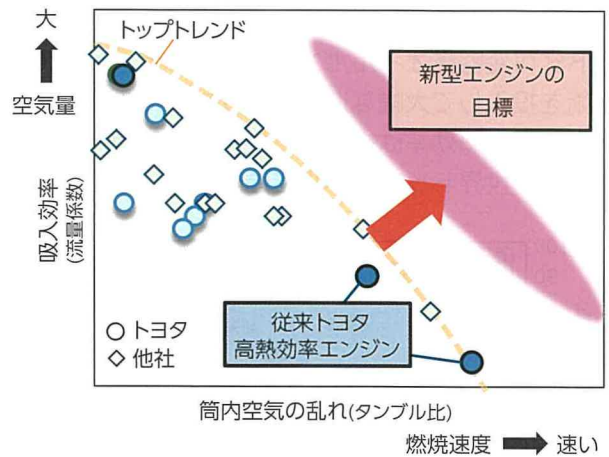


図4 TNGAエンジンで目指す物理量

そのときの燃焼状態を我々が目指す最適な燃焼と定義し、最適な燃焼状態をシリンダー筒内圧で示される燃焼波形としてコモンアーキテクチャー化した(図5)。

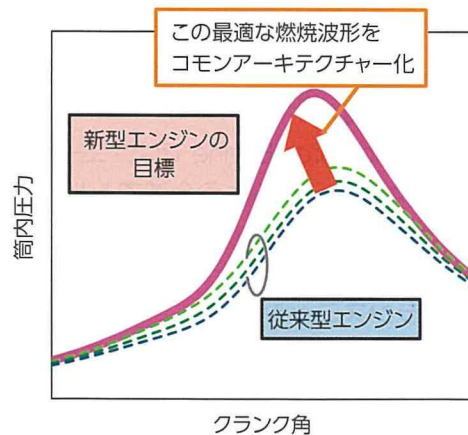


図5 TNGAにおける最適な燃焼波形

その燃焼波形を実現する理想のポート及び燃焼室構造を、タンブル比/ポート形状/バルブはさみ角/ストローク・ボア比などの設計諸元に落としこむ。そして、その諸元をモジュールとして、排気量の異なるエンジンに展開する。

また、TNGAでは直線的なポート形状を実現するため、レーザークラッドの新工法開発に取り組んできた。レーザークラッドバルブシートとは、バルブが閉じたときに、シリンダーヘッドと接触するシート部分に特殊な合金を溶射させる技術である。合金

材料の開発から高速でレーザー溶射する新工法まで、すべてをゼロから開発した。この新技術は、今後すべての新型エンジンに展開する。

その他にも従来型のトヨタ高熱効率エンジンと比較して、TNGA では全機種に、新開発のマルチホール型ノズルを備えた直噴システムや世界初のトロコイド式可変容量オイルポンプの採用など、多くの新技術を投入して大幅な進化を遂げた。その結果、比出力と最大熱効率は従来のトレードオフラインを突き抜け、世界トップレベルを達成した（図6）。

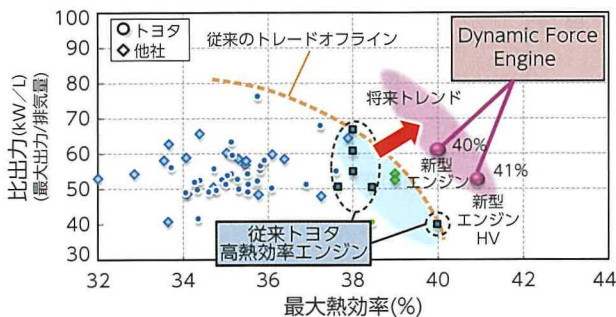


図6 比出力と最大熱効率

この考え方に基づき、新たに2.5L直列4気筒エンジンと3.5L V型6気筒エンジンを開発した。そして、これら新型エンジンシリーズを『Dynamic Force Engine』と命名し、今後展開する新型エンジンシリーズすべてにおいて、環境性能と出力性能を大幅に向上していく。

また、Dynamic Force Engineでは、ユーザーが走りの魅力を日々感じられるよう全域でトルクアップを実現すると同時に、排気も大幅にクリーン化した。

3.2 新型トランスミッション

次に、新型トランスミッションについて説明する。

トランスミッション開発では、環境性能とダイレクト&スムーズの両立に向けて、基本性能である伝達効率の向上とエンジン高効率領域の活用、リズムカルな高応答変速をテーマに開発した（図7）。

そして、これらを実現するため、機械損失低減やさらなるロックアップ領域拡大、多段化に取り組んだ。

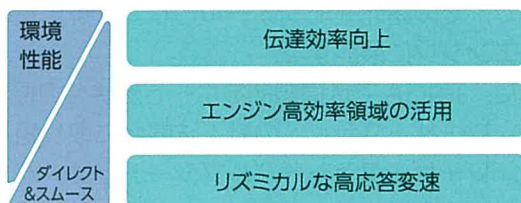


図7 トランスミッション開発の考え方

この考え方に基づき、新たにFF用のDirect Shift-8ATとFR用のDirect Shift-10ATを開発した。

まず、伝達効率の向上について説明する。一般的には、多段化を図るとトランスミッションの構成部品数が増加するため、伝達効率は悪化する。そこで、Direct Shiftの8ATと10ATでは、ギヤやクラッチなど構成部品の設計を一から見直し、徹底した損失低減に取り組んだ。特に採用技術の一つである歯面超仕上げは、歯面を鏡のように滑らかにしながら、噛み合い時に必要な潤滑オイルを保持する特殊な歯面としている。この設計技術と生産技術の融合によって実現した技術で、ギヤが噛み合う時のエネルギー伝達ロスさらに低減した。

これらの技術を用いて、ワイドなギヤ比幅と世界トップレベルの伝達効率を実現した（図8）。

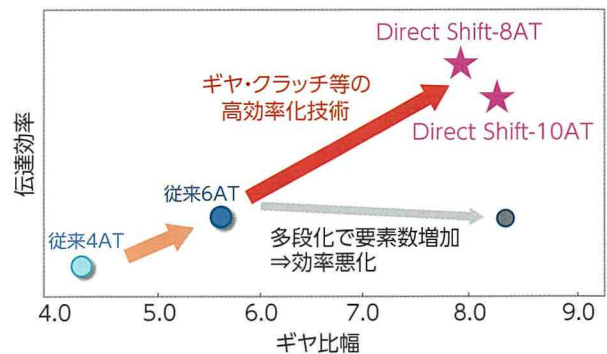


図8 伝達効率とギヤ比幅

次に、ロックアップ領域拡大に対しては、低回転域でのこもり音や振動の低減が課題となる。そこで、パワートレインと車体をモデル化し、こもり音や振動の要因とその低減に効果的な設計諸元を車両全体で解析することで、ロックアップ領域の拡大を図った。以下に、ロックアップ領域の拡大を可能にしたトランスミッションの要素技術を2つ紹介する。

一つ目は、AT内部の部品の慣性配置最適化である。振動を低減するためにはATの回転慣性の増加が必要となるが、その反面、質量増加が問題となる。今回、部品の配置を変更し、アセンブリーで同等質量のまま振動低減に必要な回転慣性を確保した（図9）。

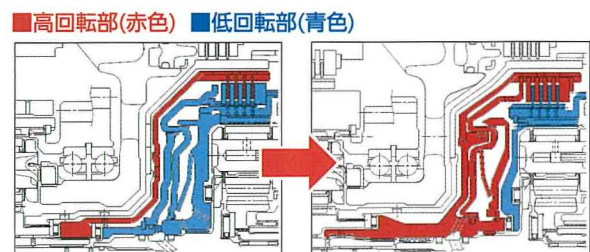


図9 AT内部慣性配置の最適化

二つ目は、新開発のトルクコンバータである。部品レベルでの緻密な構造解析から高減衰ダンパを設計し、多板式ロックアップクラッチと小型超扁平トーラスを組み合わせることで、新トルクコンバータを開発した (図 10)。

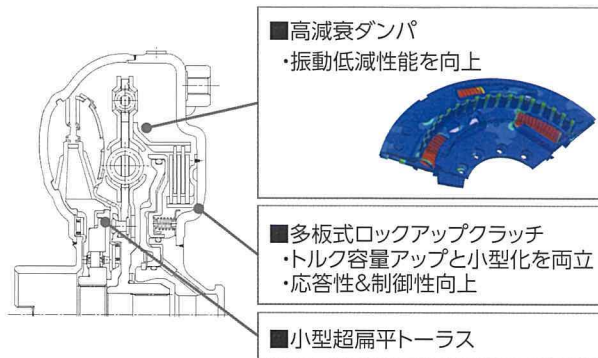


図 10 新開発トルクコンバータ

これらにより、Direct Shift-8AT では全変速段で、より低い車速からロックアップ状態での走行が可能になり、加減速走行時のエンジン回転数の吹け上がりやふらつきが低減し、よりダイレクト感のある走りを実現した。

次に、多段化によるリズムカルで心地よい加速について説明する。心地よい加速のためには、一定のリズムで変速する等間隔変速が必要となる。Direct Shift-10AT では、クロスギヤステップのギヤトレインを開発することで、リズムカルで心地よい加速を実現した (図 11)。

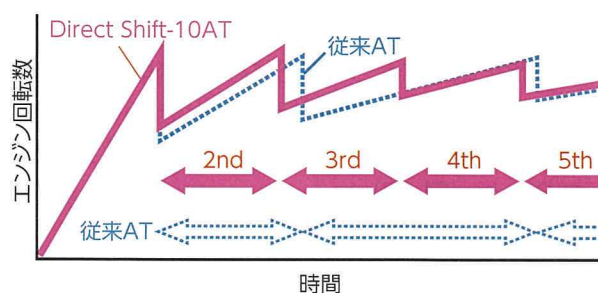


図 11 リズムカルな変速

また、変速時間の短縮にも取り組んだ。変速時間短縮は、ショックとの両立が課題となる。Direct Shift-10AT では、ハードの高応答化を図るとともに、新開発のパワートレインモデルベース統合制御と組み合わせることで、世界最速かつスムーズでキレの良い変速を実現することができた。

また、新プラットフォームのFR 乗用車向け高トルクエンジン及び多段トランスミッションと同時

に、プロペラシャフトやディファレンシャルなどのドライブラインも新たに開発した。

ドライブラインの損失要因は、負荷損失/摩擦損失/攪拌損失に分けられる。今回、それぞれを改善することで、燃費向上と高効率化を実現した。

また、従来、高周波ノイズの遮断のために採用されているゴムカップリングについて、今回新たに、径方向と軸方向、それぞれの強制力の寄与度を明確にして低減に取り組み、静粛性を大幅に向上させた。

3.3 新型ハイブリッドシステム

次に、新型ハイブリッドシステムについて説明する。ハイブリッドシステムは、環境性能とダイレクト&スムーズの両立に向けて、プリウスにて開発したハイブリッドシステムの機種展開として、2.5L ダイナミックフォースエンジンを組み合わせた2.5L用のTHS IIや、さらなる価値創造を狙ったマルチステージハイブリッドトランスミッション、プラグインハイブリッドシステムを開発した (図 12)。

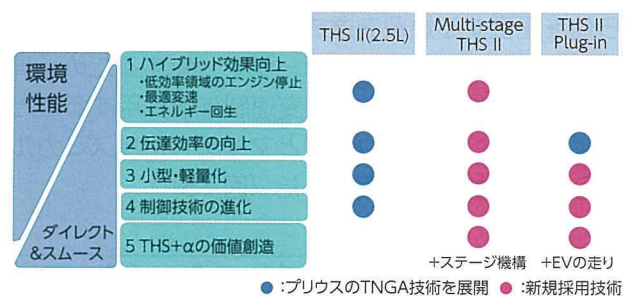


図 12 ハイブリッドシステム開発の考え方

まず、2.5L用の新THS IIについて説明する。2014年に発表したプリウス用THS IIをベースに、トランスアクスル/モーター/パワーコントロールユニット/電池の全ユニットを開発した (図 13)。

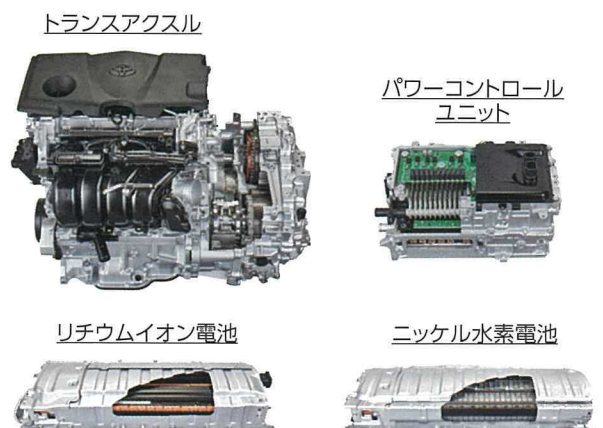


図 13 新型THS II(2.5L)システム

これらと2.5Lダイナミックフォースエンジンとを組み合わせ、燃費向上と走りの両立を達成し、従来モデルに対して、パワートレーンで燃費を20%、中間加速性能を10%向上させた(図14)。

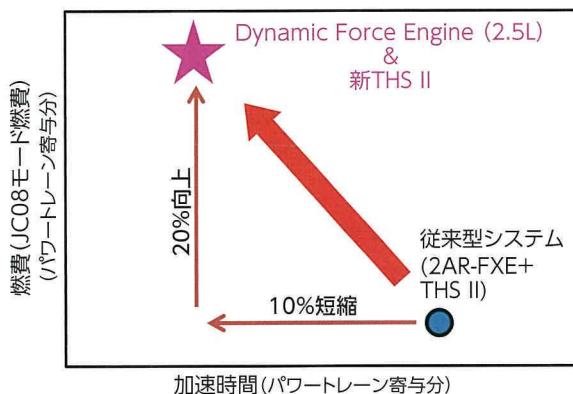


図14 燃費と走りの両立

次に、新開発マルチステージハイブリッドトランスミッションでは、競合のプレミアムスポーツ車両をターゲットに開発し、高い動力性能を実現しながら他を圧倒する燃費を達成した。さらに、従来型ハイブリッド車の走りのイメージを一新するため、高い加速性能に加えて10速変速制御を採用することにより、エンジンサウンドとマッチしたリズムカルで心地よい加速感を実現した(図15)。

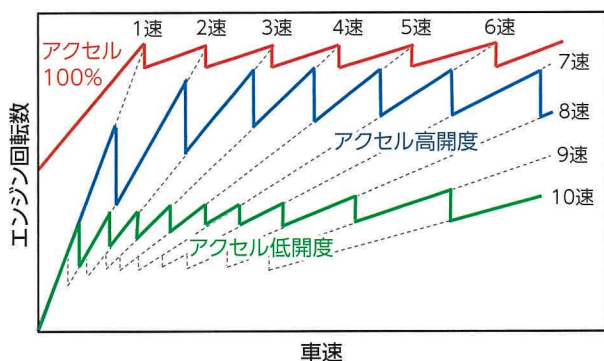


図15 10段変速エンジン動作点

その実現のため、動力分割機構部に、全体を変速する変速機構を追加したマルチステージハイブリッドトランスミッションを新開発した。この機構により、低車速域時からエンジンの最大出力を引出すことが可能になり、システム出力が大幅に向上した。

また、燃費性能においても変速機構は大きな役割を果たしており、ハイエフィシエンシーポイントを4点に増加することで、低速だけでなく、高速においても伝達効率を大幅に改善させ、燃費を向上した。

そして、新型プリウスのプラグインハイブリッドシステムでは、プリウス用ハイブリッドシステムにワンウェイクラッチを加えたデュアルモータードライブシステムの採用により、ジェネレーターをモーターとして利用し、力強いEV走行を実現した。

この結果、初代プリウスPHVに比べ、EV走行出力が1.8倍となり、さらに最大車速や駆動力も向上し、高速走行を含むほとんどのシチュエーションをEV走行で走り切ることができる(図16)。

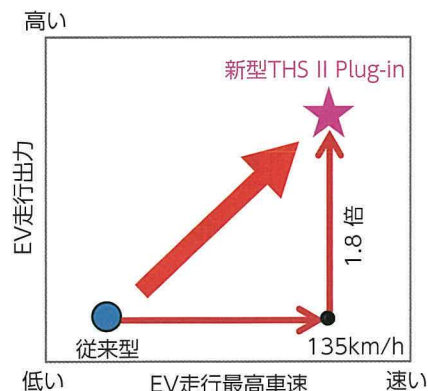


図16 EV走行領域の拡大

4 生産性と開発の効率化

4.1 生産効率向上

製品革新と連動したTNGAの生産効率向上、いわゆる「モノづくりの革新」について説明する。

ユーザーのニーズや環境変化によるパワートレーンの変化に対して、フレキシブルに素早く対応するため、加工基準や組み付け基準などを統一し、異なる機種を高速でフレキシブルに生産できるラインを新開発した(図17)。

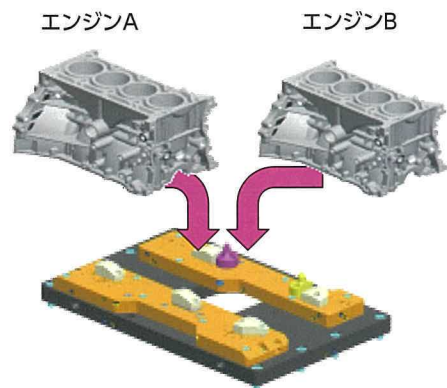


図17 加工治具共通化の例

さらに、生産工程や設備仕様の統一などにより、全世界に散らばる生産ラインを年間 100 万台のスピードで切り替え、一気に全世界展開を進めていく。

また、環境性能と鑄造品質を向上させる革新生産技術「CS コアプロセス」や、モノづくりの革新の一環として、生産設備のコンパクト化・スペースの縮小・エネルギー使用量の削減に同時に取り組むことで、従来より少ない投資でラインを完成させることが可能になるとともに、工場 CO₂ 排出量を削減し、パワートレーンを生み出す現場から環境にやさしく対応できるように取り組んでいる。

4.2 開発効率向上

次に、開発効率の向上について説明する。

従来、例えばエンジンでは、様々なデバイスや構造をそれぞれのクルマのニーズや特性に合わせて選択していた。

今回、クルマのプラットフォームの刷新とすべてのパワートレーンの刷新を同期させることにより、重心を低くし、かつ最適な搭載方法に構造を統一することが可能になった（図 18）。

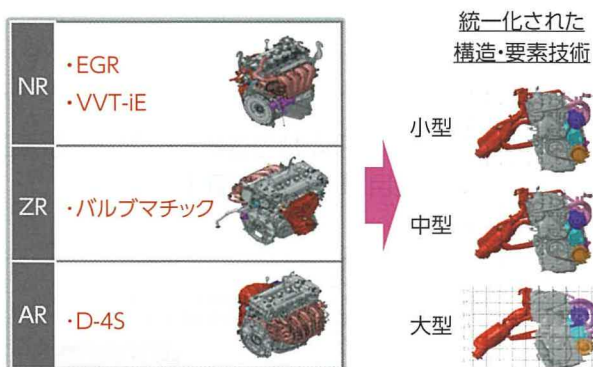


図 18 構造・要素技術統一化

合わせて、エンジンの燃焼室やシリンダー設計を統一し、気筒容積と気筒数の組み合わせでエンジンバリエーションを構成することも実施した。それにより、従来発生していた「同一排気量別型式」といった重複を無くし、整理統合を進めることで、エンジンの開発種類数を約 40%削減した（図 19）。

エンジンのモジュール化

気筒容積	気筒数
a	4
b	6
c	...
...	...

エンジン種類を整理統合

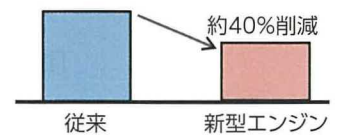


図 19 エンジン開発種類数削減

トランスミッションやHVシステムとの組み合わせでも効率化を達成しており、開発の効率化を実現するとともに、生産性向上も達成させることが可能になった。

5 まとめ

トヨタは、TNGA に基づくモジュール開発によって、全 19 機種 37 バリエーションを 2021 年までの 5 年間で一気に導入し、一新した TNGA パワートレーンを続々とマーケットに投入していく計画である。

このような展開により、2021 年には、パワートレーンで 2015 年比年間約 15%以上の CO₂ の削減を見込んでいる。

我々は、中短期的には、世界の燃料事情やインフラ整備状況に合わせて、最適な時期に、最適な地域に、最適なパワートレーンを提供・普及させることが、エネルギー消費低減と環境負荷低減への貢献と考える。長期的には、将来の電気エネルギー利用の拡大に対し、車だけでなく社会全体でサステナブルなモビリティ社会を目指し、その実現に向けた活動を、企業や行政、ステークホルダーとともに主導的に進めていく。

■ 著者



岸 宏尚

トヨタ新型直列 4 気筒 2.5L ガソリンエンジン

The New Toyota Inline 4-Cylinder 2.5-Liter Gasoline Engine

坂田 邦彦 *1 Kunihiko Sakata	戸田 忠司 *2 Tadashi Toda	坂井 光人 *3 Mitsuto Sakai
秤谷 雅史 *4 Masashi Hakariya	加藤 寿一 *5 Toshikazu Kato	

要旨

新型直列 4 気筒 2.5L ガソリンエンジンの技術的な最大の特徴は、ロングストローク化・バルブ挟角の拡大・レーザークラッドバルブシートを用いた高効率吸気ポートによって実現される高速燃焼であり、この高速燃焼モジュールは骨格構造を統一した TNGA (Toyota New Global Architecture) エンジンシリーズへ展開される。更に新技術として、マルチホール直噴システムや新型電動 VVT (可変バルブタイミング)、可変容量オイルポンプ、可変冷却システムを採用し、比出力と熱効率の大幅向上を実現した。

Abstract

The main distinguishing technological characteristic of the new inline 4-cylinder 2.5-liter gasoline engine developed by Toyota Motor Corporation is high-speed combustion, which was achieved by adopting a long stroke design, an expanded valve included angle, and highly efficient intake ports using laser-clad valve seats. This high-speed combustion package was then incorporated into the Toyota New Global Architecture (TNGA) engine series that shares a uniform basic structure. Additional new technologies adopted in this engine include multi-hole direct injection, a redesigned variable valve timing (VVT) system, a variable capacity oil pump, and a variable cooling system.

キーワード ガソリンエンジン, 高出力, 高熱効率

1 まえがき

トヨタは、TNGA (Toyota New Global Architecture) 新型直列 4 気筒 2.5L ガソリンエンジンを開発した。本エンジンは、将来のエネルギー・環境問題を解決するサステナブル社会の実現に向け、大幅な燃費向上と年々厳しさを増す排気ガス規制に適用させた。また一方で、ユーザーの期待を超える「fun-to-drive」を実現するために、高い出力性能も兼ね備えた。本稿では、この新型ガソリンエンジンの概要と主要技術について紹介する。

率 40%と TOP クラスの動力性能 60kW/L を両立させることを開発目標とした (図 1)。

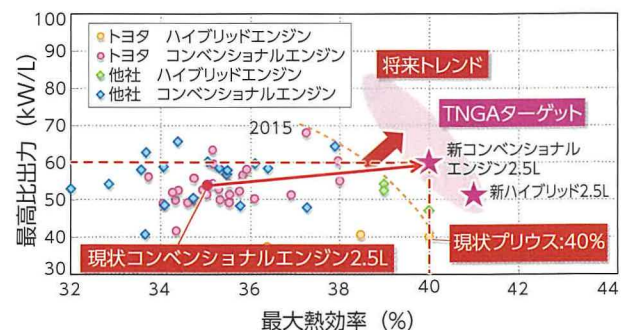


図 1 比出力と熱効率トレンドと目標

2 開発の狙い

本エンジンはコンベンショナルエンジンとして、従来から提唱している高速燃焼技術を更に進化させ、最新 HV (ハイブリッド車) と同等の最大熱効

この目標を達成し、且つ将来への発展性・生産性も考慮したうえで、下記の基本骨格を見直し、エンジン素性をより一層向上させた。

- ・ロングストローク化
- ・高圧縮比化
- ・吸排気方向変更
- ・バルブ挟角拡大

更に、下記技術を採用した。

- ・レーザークラッドバルブシート

*1 CV Company CVZ

*2 TNGA 推進部

*3 パワートレーンカンパニー 第 3 電動パワートレシステム開発部

*4 パワートレーンカンパニー エンジン設計部

*5 パワートレーンカンパニー 第 2 電動パワートレシステム開発部

- ・多孔噴霧直噴インジェクターを採用した新 D-4S システム
- ・高エネルギー点火コイル
- ・電動可変容量オイルポンプ
- ・クールド EGR (排気再循環) システム
- ・電動 VVT (VVT-iE = Variable Valve timing -Intelligent by Electric motor)

図 2 にエンジン断面図、表 1 に主要諸元を示す。

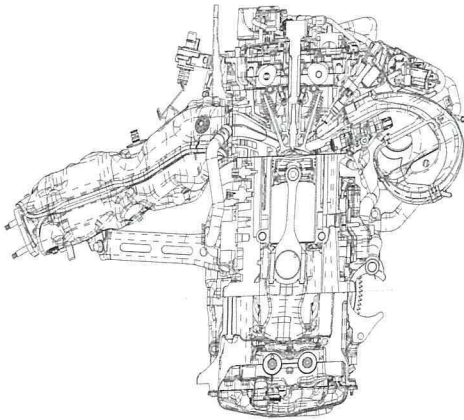


図 2 エンジン縦断面

表 1 新 2.5L エンジン諸元表

エンジン	コンベンショナルエンジン	
	新エンジン	2AR-FE
エンジン形式	直列4気筒	←
排気量(cc)	2,487	2,494
ボア×ストローク(mm)	φ87.5×103.4	φ90.0×98.0
圧縮比	13.0	10.4
最高出力(kW/rpm)	151/6,600	134/6,000
最大トルク(Nm/rpm)	250/5,000	231/4,100
動弁系システム	DOHC4バルブ/ 気筒HLA+ローラーロッカー	←
	Dual VVT-iE (Motor-driven@インテーク側)	Dual VVT
潤滑システム	可変容量	コンベンショナル
冷却システム	電動ウォーターポンプ	ベルト駆動ウォーターポンプ
吸気システム	無し	可変吸気
EGRシステム	クールドEGR	無し
燃料システム	D-4S (多孔DI+PFI)	PFI
後処理	2A/F×2CAT	A/F+O ₂ ×2CAT

3 燃焼技術

一般的にトレードオフの関係にある熱効率と出力性能を、高い次元で両立させるために、最適な圧縮比とストローク / ボア比を選択した。加えて、従来の高速燃焼技術を進化させるために、筒内の乱れ強

度を向上させるブレークスルー技術を開発した。

高タンブル、高流量インテークポートの実現のため、IN-EX バルブ挟角を拡大し HLA 配置をバルブ軸中心に対して内側配置に変更した (図 3)。更に、レーザクラッドバルブシートを採用により直線的なポート形状とし、高い気流流速を維持して燃焼室に導入、且つポート下面スロート部で気流を剥離させ逆タンブルを抑制した効果により、従来のトレードオフラインから大きく改善するタンブル比 2.9, 流量係数 0.49 を達成した (図 4)。

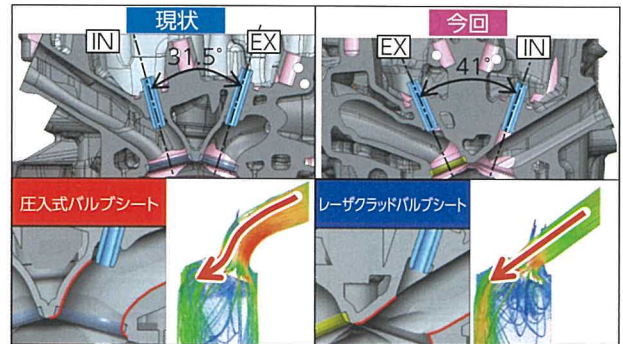


図 3 シリンダヘッド燃焼室断面

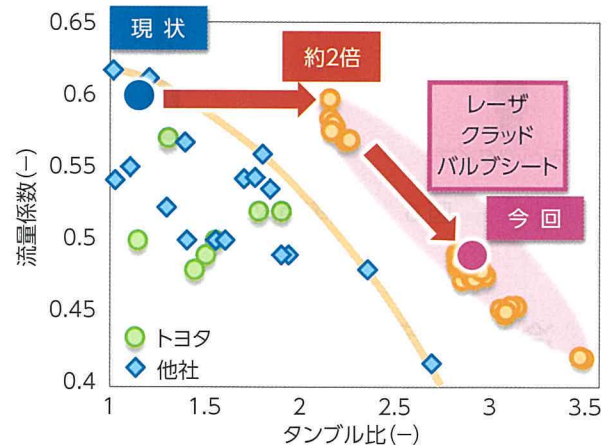


図 4 インテークポートの目標性能

将来の PN 規制も考慮した新 D-4S システムを開発した。多孔噴霧の直噴インジェクターの採用によりペネトレーションを縮小し、ピストン及びボア壁への燃料付着量を低減した。また、ピストン頂面形状については、図 5 に示すように成層キャビティを廃止することで、圧縮工程における筒内の乱れ強度も向上させた⁽¹⁾。

動弁系については、リフト量と作用角を拡大した。IN 側への電動 VVT の採用により、全条件下で瞬時に最適なバルブタイミングを実現させ、ポンピングロス低減と出力向上を両立した。

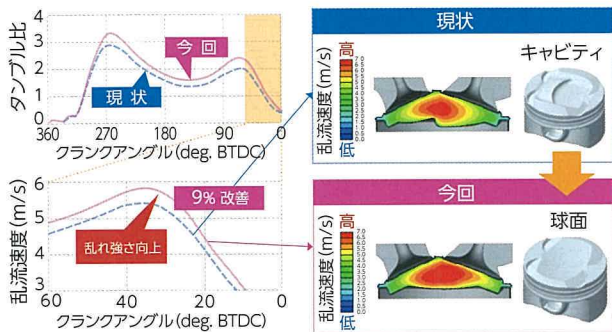


図5 タンブル比とピストン形状比較

更に、大量 EGR 導入時の燃焼安定化のため、高エネルギー点火コイルを採用し、コア内を通過する磁気回路ギャップを低減、磁気効率を向上させた (図 6)。

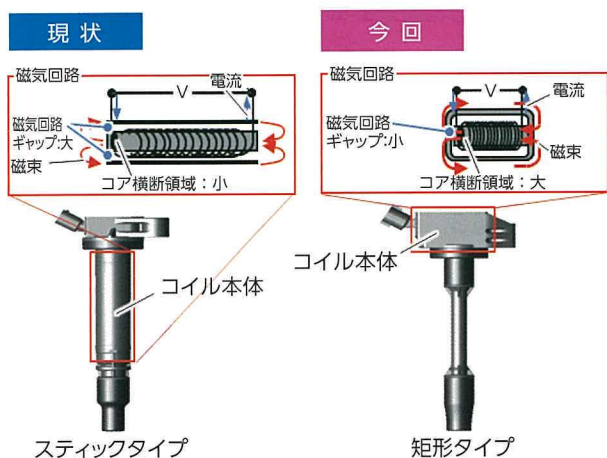


図6 高効率点火コイル

4 冷却システム

4.1 耐ノッキング性向上

高圧縮比化によるノッキング性の悪化を抑制するため、クランク回転数に依存せず流量制御できる電動ウォーターポンプをコンベンショナルエンジンにも採用した。搭載可能なポンプ体格に低減するために、圧力損失低減と冷却性の向上を図った。まず、シリンダヘッドに2段ウォータージャケットを採用し (図 7)、シリンダヘッド内の冷却水を縦流しから横流しに変更することで、圧力損失を従来比 35% 低減した。また、冷却水を EX-EX 弁間に集中的に流し、且つウォータージャケット中子の材質を変更、中子断面積を従来比 20% 低減させることで、従来の約 1/2 の流量で熱伝達係数を従来比 20% 向上させた (図 8)。

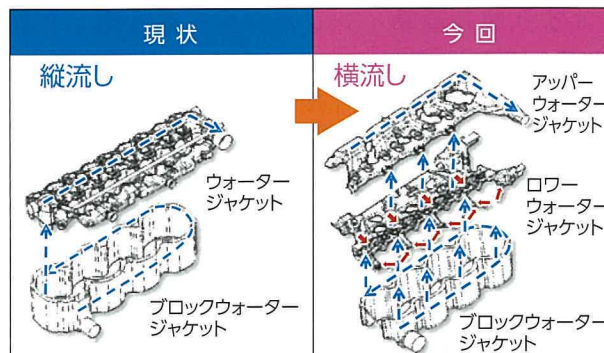


図7 ウォータージャケットの構造比較

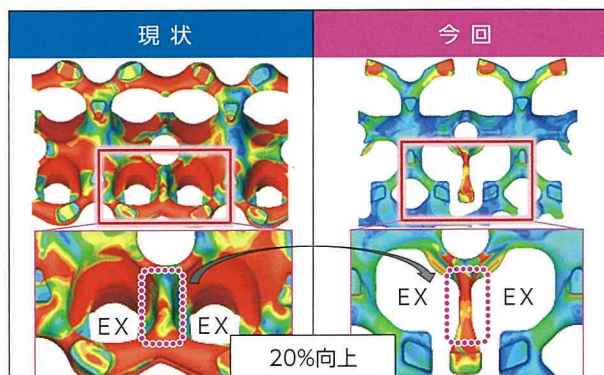


図8 熱伝達係数比較

ウォータージャケットスペーサは、シリンダブロックのウォータージャケット内の EX 側のみに配置した (図 9)。これにより、集中的に EX 側の流速を向上させることで、高タンブルによる混合気温度の上昇を抑制するとともに、IN-EX のボア壁温差を均一化させた。

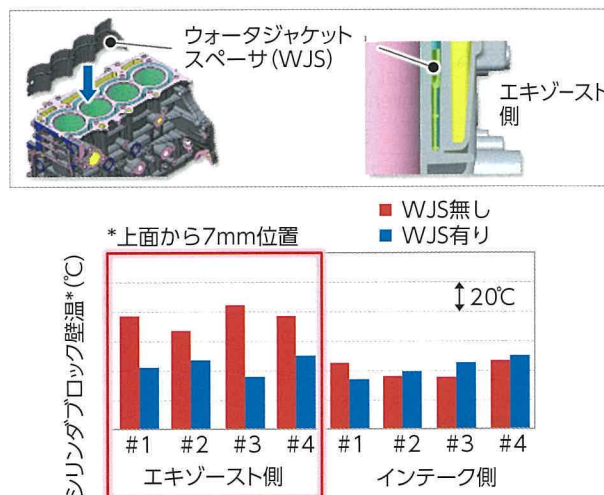


図9 ウォータージャケットスペーサとブロック壁温

冷却制御については、電動ウォーターポンプの採用により、必要なときに必要な分だけ流す制御が可能になった。これにより MBT (Minimum advance for Best Torque) 領域での運転時には、流量を低減させることで冷却損失とフリクションを低減し、ノック制限領域については流量を増加させることで壁温を低減し、従来よりもエンジントルクを向上させることができた (図 10)。

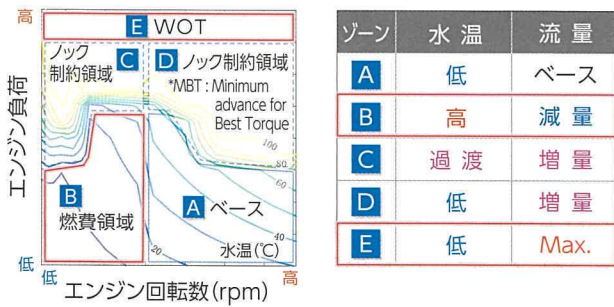


図 10 流量と冷却水温度コントロール

4.2 暖機性能

冷間時により早く水温を上昇させるため、電動 W/P による流量制御に加えて、冷却回路の切り替えバルブ (FSV : Flow Shut Valve) を採用した。図 11 に示すように、コンベンショナルエンジンの冷却回路は 2 つの FSV を採用した。これにより、各部品温度の適正化による燃費と冷暖房性能の向上を両立させた。

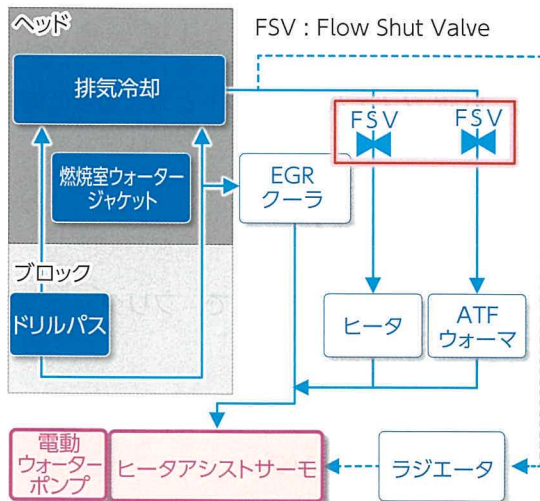


図 11 冷却回路

5 往復回転系

熱効率向上のためロングストローク化し、出力性能向上のために、最高回転数を 6,600rpm に拡大した。これによりピストン最高速度は 22.8m/s に到達するため、往復慣性質量を大幅に低減した。

ピストンは、型設計の変更によるピストンリング溝裏の肉盗み拡大と、スカート及び頂面の薄肉化により、従来ピストン比 7% 軽量化し、世界トップレベルの質量を達成した (図 12)。

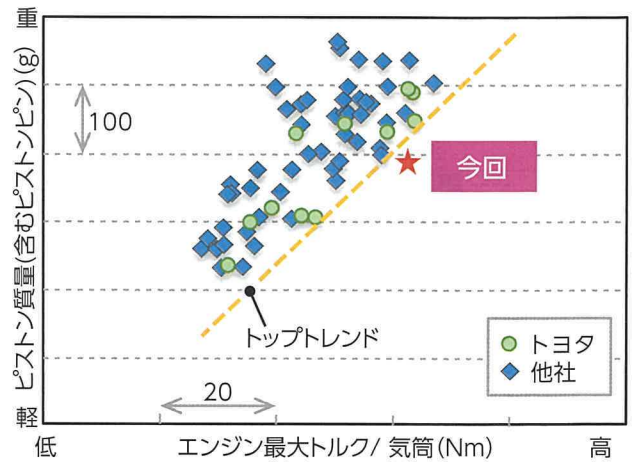


図 12 ピストン質量と 1 気筒当たりのトルク関係図

コンロッドは小端部をバイパー形状とし、また、高強度鋼の採用により、コラム部の断面積を縮小することで、軽量化とピストン剛性向上を実現した。クランクシャフトは、軽量化とクランク打音を両立させるため、慣性力の影響が大きい部位は質量低減を優先し、NV (騒音・振動) への寄与が大きい部位は剛性向上を優先させることで、ジャーナル毎に最適化した。

高回転化に伴うフリクションとオイル消費の増加については、2ND リング外周の当たり幅縮小、オイルリング外周への DLC (ダイヤモンドライクカーボン) 被膜、オイルリングのサイドレール先端位置の変更により増加を抑制した。

6 潤滑システム

電動可変容量オイルポンプを採用し、内接ギヤ式ロータと、電子オイルコントロールバルブによる油圧制御により、フリクションロスを低減した (図 13)。これにより、本システムは、メインギャラの油圧に応じて、必要な場所に必要な量の油を供給す

特集

ることが可能となった。

油路の構成としては、メインギャラとオイルジェット通路を分離することで、容易にオイルジェットを停止することが可能となり、ピストンの早期暖機によるフリクションロス低減、及びPN低減を実現した。

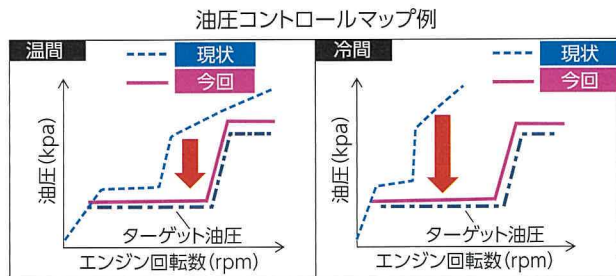
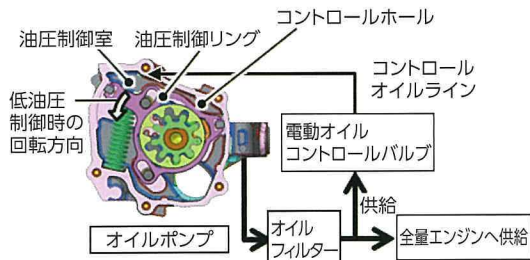


図 13 電動式可変オイルポンプ

7 排気システム

SULE30・Euro6 対応のため、触媒暖機性に有利な後方排気を選択した。また、2本のA/Fセンサで制御することで、触媒サイズと貴金属使用量を低減させた。シリンダヘッドの排気ポートは、出力性能の向上と触媒信頼性の観点から排気冷却(図14)を採用し、排気ガス温度を低減、スロイキ運転領域を大幅に拡大させた(図15)。

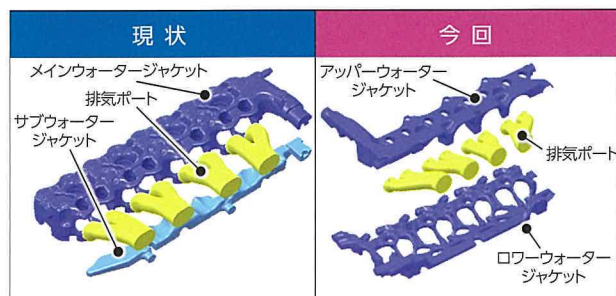


図 14 シリンダヘッド内の排気ポートとウォータージャケット構造

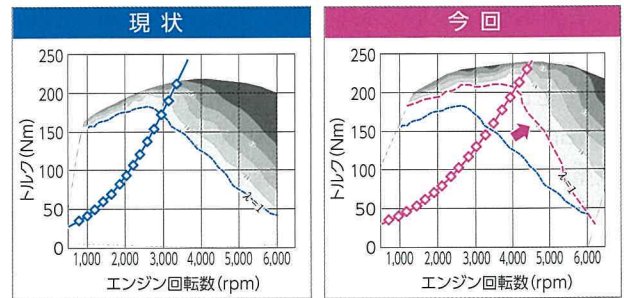


図 15 スロイキ運転領域比較

8 EGR システム

高速燃焼システムにより、EGR 率を最高 25%まで向上させた。また、燃焼変動抑制のため、インテークマニホールドの形状を最適化し、EGR ガス量の気筒間差を抑制した。EGR ガスは、最初にシリンダヘッド内のウォータージャケットに囲まれたフィン形状の通路を通し、その後 EGR クーラを通すことで、低コストでガス温度を低減した(図16)。

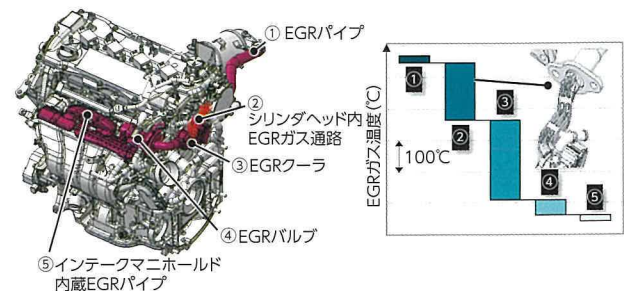


図 16 EGR システムレイアウトとガス温度低減効果

9 フリクション

下記の技術を採用することで、フリクションを従来比 20%低減した(図17)。

- ・樹脂コートピストン
- ・DLC コートピストンリング (トップ&オイル)
- ・樹脂コートベアリング
- ・樹脂チェーンガイド
- ・ビーハイブバルブスプリング
- ・低粘度エンジンオイル (SAE 0W-16)
- ・ウォーターポンププーリー廃止 (電動ポンプ)
- ・高効率バキュームポンプ

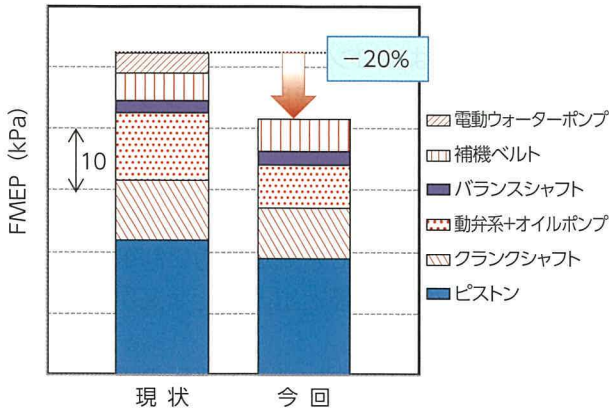


図 17 FMEP 比較 (2,000rpm モーダリング時)

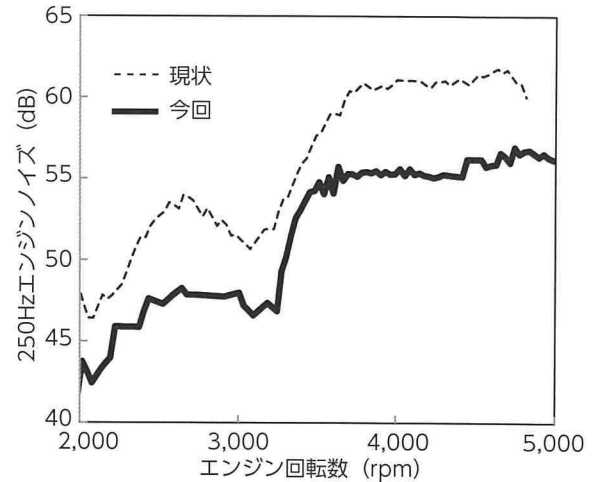


図 19 エンジンノイズ比較

10 NV

静粛性については、エンジン剛性向上はもちろんのこと、新トランスミッション、新プラットフォームも含めて向上させた。

低周波領域は、トルクロール軸上にマウントを配置し、アイドル運転時の低振動化を実現した。また、弾性主軸上にパワープラント重心を配置し、エンジン起動時の低振動化を実現した。

中・高周波領域は、シリンダブロックとトランスミッションの締結位置を最適化することで、パワープラント剛性を向上させ (図 18)、マウント振動を約 4dB 低減した (図 19)。

また、高速燃焼による高周波ノイズについては、ポリウレタン製のインシュレータを最適配置することで低減させた (図 20)。

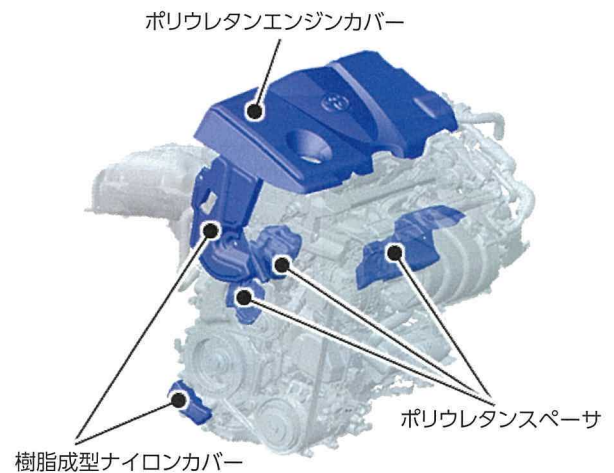


図 20 NV インシュレータ

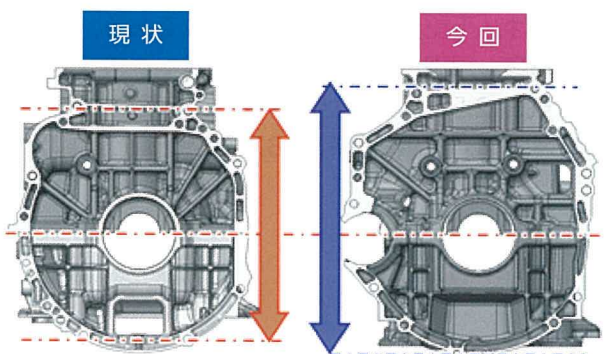


図 18 トランスミッション締結位置比較

11 エンジンパフォーマンス

これまで述べてきた高速燃焼技術や新技術アイテムの採用により、従来エンジンと比較して、低回転から高回転まで全域にわたって大幅に性能を向上させ、最高出力 151kW (比出力 60kW/L) を達成した (図 21)。

燃費についても、最大熱効率 40% を達成するとともに、熱効率 35% の領域を大幅に拡大した (図 22)。また、新 8 速オートマチックトランスミッションとの組み合わせで、パワートレーンとして 16% 燃費向上させた。

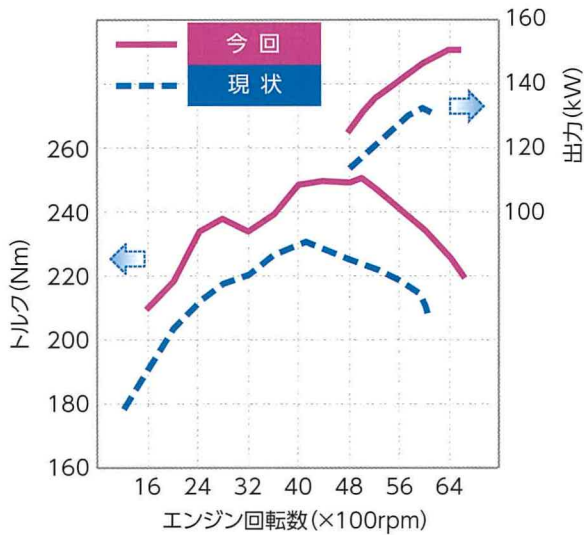


図 21 エンジン出力とトルクカーブ

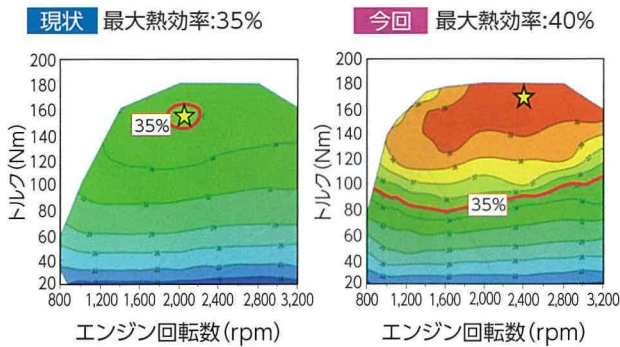


図 22 熱効率マップ比較

12 まとめ

トヨタ新型直列4気筒2.5Lガソリンエンジンは、これまで述べてきた最新技術を惜しみなく投入することで世界トップレベルの最大熱効率と出力性能を達成し、トヨタの次世代ガソリンエンジンにふさわしい仕上がりを実現した。

排気エミッションについても、各国の排気規制に対応し、今後複数の車種に搭載して全世界のユーザーに提供していく予定である。

- ①ロングストローク化，高速燃焼パッケージにより，高タンプル・高流量を高次元で両立し，最大熱効率40%，最高比出力60kW/Lを達成した。
- ②高速燃焼パッケージは，レーザクラッドバルブシート，高タンプル高流量インテークポート，高タンプル維持のための球状頂面ピストン，多孔噴霧直噴インジェクタ採用による新D-4Sシステ

ム，及び各部品の最適設計により実現した。

- ③冷却システムは，コンベンショナルエンジンに電動ウォーターポンプを採用，シリンダヘッドは，2段ウォータージャケットと冷却水のEX-EX弁間集中横流しを採用した。また，ヒートマネジメントアイテムとしてFSVを採用し，電動ウォーターポンプと合わせて水温を最適に制御することで，エンジン燃費性能と出力性能を高次元で両立させた。
- ④電動可変容量オイルポンプと各部品の最適設計により，フリクションを従来比20%低減させた。
- ⑤排気冷却システム，クールドEGRにより，ストイキ運転領域を拡大させた。
- ⑥NVについては，エンジンだけでなく，新トランスミッション，新プラットフォーム開発と合わせて最適設計を実現し，静粛性を向上させた。

本エンジンを頭出しとして，高速燃焼技術に代表されるTNGAコンセプトを採用したエンジンシリーズを順次展開する予定である。

最後に，本エンジン開発に多大なるご指導，ご支援，ご協力頂いた全ての関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

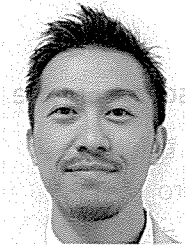
参考文献

- (1) E. Murase, Shimizu : Innovative Gasoline Combustion Concepts for Toyota New Global Architecture. 25th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology (2016)

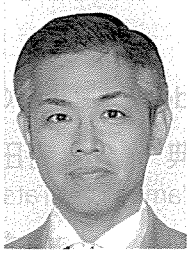
本論文は，下記発表済み論文の転載である。

坂田邦彦，戸田，坂井，秤谷，加藤：トヨタ新型直列4気筒2.5Lガソリンエンジン. 自動車技術会学術講演会講演予稿集. P.1887-1892 (2017)

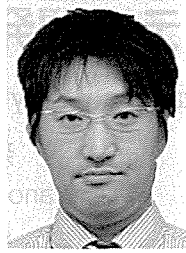
■ 著者



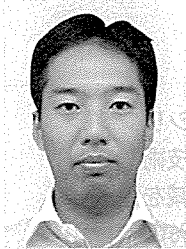
坂田 邦彦



戸田 忠司



坂井 光人



秤谷 雅史



加藤 寿一

新型直列4気筒 2.5L ガソリンエンジンの シリンダシステム開発

Development of Cylinder System for the New Toyota Inline 4-Cylinder 2.5-Liter Gasoline Engine

平沼 亨 ^{*1} Toru Hiranuma	山下 親典 ^{*1} Chikanori Yamashita	寺田 竜啓 ^{*1} Tatsuhiro Terada
中田 和哉 ^{*1} Kazuya Nakata	中村 光宏 ^{*1} Mitsuhiro Nakamura	倉内 孝 ^{*1} Takashi Kurauchi

要旨

新型直列4気筒 2.5L ガソリンエンジンは熱効率率 40%と性能 60kW/L を目標に開発した。シリンダシステム（ピストン、コンロッド、クランク、ブロック、軸受）は軽量化、低フリクション化の技術を織り込み、ピストン、コンロッドは合わせて 13%の軽量化、フリクションはシステムで 15%の低減を達成した。ピストンは薄肉化と、コンロッドのバイパー形状によるピンボス間の短縮により従来比 7%の軽量化を達成した。スカート部の表面処理を変更することでフリクションを低減した。クランク、ブロックは形状の作りこみに実稼働解析（3D-CAE）を活用し、剛性必要部位を見極めながら設計した。質量増加を抑え込み、従来エンジンと同等の体格で性能目標を達成した。

Abstract

Toyota Motor Corporation has developed a new inline 4-cylinder 2.5-liter gasoline engine with the aim of achieving a thermal efficiency of 40% and a power performance of 60 kW/L. Weight and friction reduction technologies were incorporated into the cylinder system (i.e., the pistons, connecting rods, crankshaft, cylinder block, and bearings), which reduced the weight of the pistons and connecting rods by 13%, and the overall friction of the system by 15%. A 7% reduction in weight compared to the previous engine was achieved by adopting thinner piston walls and by shortening the distance between the pin bosses using viper head-shaped connecting rods. Friction was reduced by changing the surface treatment of the skirts. Operation under actual conditions was analyzed using three-dimensional computer aided engineering (3D CAE) to finalize the shape of the crankshaft and cylinder block, which were designed with careful attention to the portions requiring optimum stiffness. Measures were adopted to suppress increases in weight, and the power performance target was achieved without enlarging the size of the engine compared to the previous generation.

キーワード ガソリンエンジン, ロングストローク, 高回転, 軽量化

1 まえがき

トヨタは新型直列4気筒 2.5L ガソリンエンジン (A25A) を開発した。このエンジンは熱効率率 40%と性能 60kW/L を達成するために、燃焼から見直し、様々な新技術を採用するとともに、エンジンの基本骨格についても新たに設計・開発をした。本稿では主にシリンダシステムの開発について紹介する。

2 シリンダシステム開発のコンセプト

高い熱効率と性能を達成するために、システム諸元は圧縮比 13, ストローク・ボア比 1.2, 最高出

力回転数 6,600rpm, エンジンオイルは 0W-16 を採用した。表 1 にエンジン諸元を示す。これらの諸元において、ロングストローク化によりピストン速度は 22.8m/s に達し、コンロッドも質量が増加、エンジン体格の大型化、NV（騒音・振動）の悪化が考えられる。シリンダシステム（ピストン、コンロッド、クランク、ブロック、軸受）はこれらの高いシステム要求を達成するために、ピストン、コンロッドの回転運動部品は高回転化による慣性荷重増加を低減しなければならず、従来よりも質量を 10%以上軽量化にする必要があり、システム全体でも軽量化を徹底的に実施した。さらに従来エンジンより低フリクション化を目標に設計、開発した。

^{*1} パワートレーンカンパニー エンジン設計部

表1 エンジン諸元

	新型	従来
気筒数	直列4気筒	←
排気量 (cc)	2,487	2,494
ボア × ストローク (mm)	φ87.5 × 103.4	φ90 × 98
圧縮比	13	10.4
燃料噴射方式	D-4S	PFI
その他デバイス	吸気：VVT-iE 排気：VVT-i クールド EGR 電動ウォーターポンプ 連続可変容量 オイルポンプ	Dual VVT-i ACIS
最高出力 (kW/rpm)	151/6,600	132.7/6,000
最高トルク (Nm/rpm)	250/5,000	230.5/4,100

部品の開発にあたり実稼働解析 (3D-CAE) を活用、エンジン、トランスミッションを含んだパワートレーン全体の動的な変形を考慮した解析を用い、クランク、ブロック、コンロッド、軸受の強度信頼性、振動騒音等の検討、および開発の効率化、軽量化を実現した (図1)。

結果、ピストン、コンロッドは従来比 17%の質量低減を実現、フリクションは従来比 15%低減を達成した。以降の章ではこれらの目標を達成する手法について記載する。

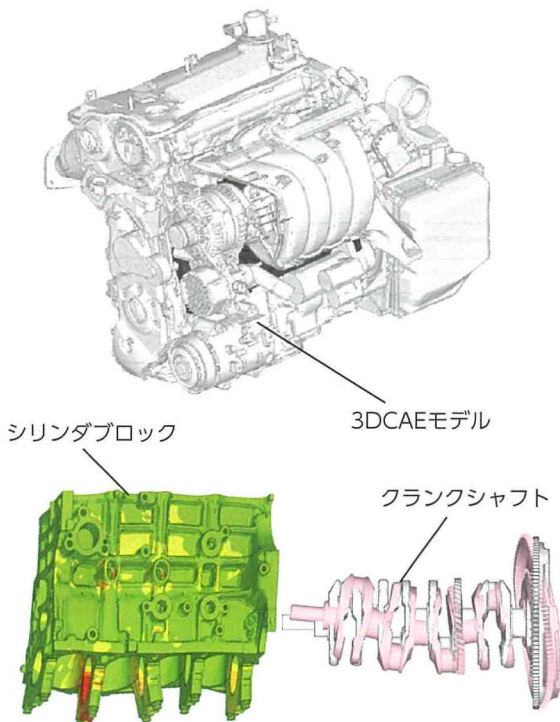


図1 3D-CAE モデル

3 ピストン

ピストンはピストンリング溝裏の肉盗みや、スカート、頂面の薄肉化により、軽量化を実現した。背反となる剛性低下についてはサイドウォールを傾斜形状にすることで、頂面の剛性を向上させピストンの変形を抑えた。また、オイルジェットは従来よりも 0.4mm 細径とし、流速を上げることで高ピストン速度においても冷却が可能となるようにした (図2)。

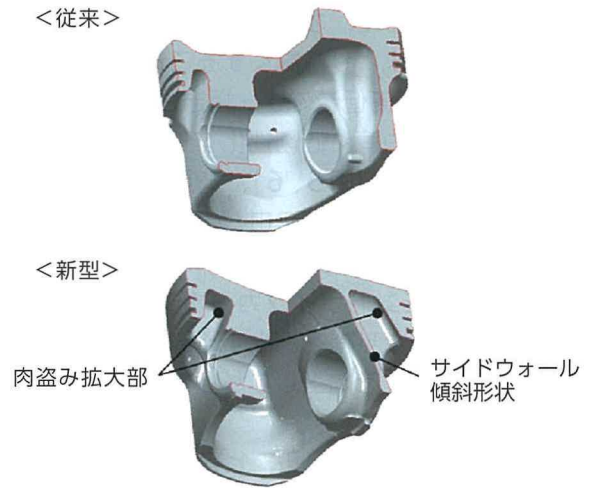


図2 ピストン形状比較

ピストンスカートは従来、表面粗さが大きく、フリクションが大きいことが課題であった。そこで、表面をマイクロディンプル化し、保油性を確保しつつ表面を平滑化することで、耐焼き付き性を確保すると同時に低フリクション化を実現した (図3)。

ピストンピンは、従来より径を 1mm、長さを 7mm 縮小した。コンロッドのピストンピンボスの側面を先端に至るにつれて偏位するバイパー形状とすることで、ピストンとピストンピンの接触面積を確保しつつピンボス間距離を縮小し、剛性を確保しつつ軽量化を実現した (図4)。

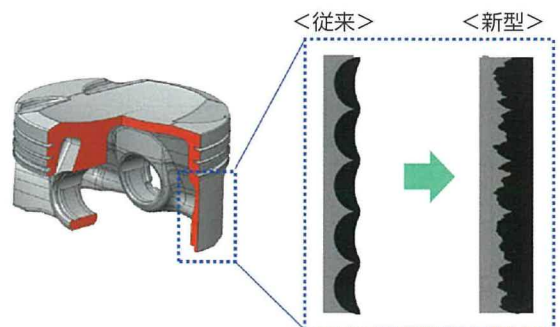


図3 ピストンスカート形状

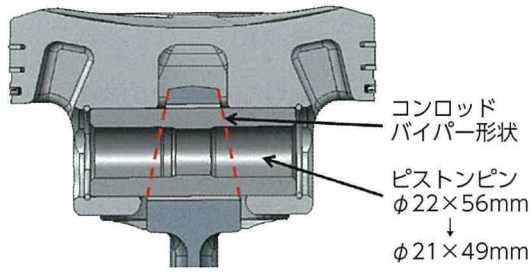


図4 ピストンピン形状

高回転による主な課題である、高ピストン速度下でのオイル消費性については、オイルリングを改良することで対応した。オイルリングはサイドレールの先端形状を従来よりも高くすることで、油膜の厚さを従来比で30%低減でき、掻き残る油量を低減、さらに従来よりも薄く低剛性化することで、ボアへの追従性を上げた(図5, 6)。背反となる摩耗に対しては、耐摩耗性の高いクロムナイトライドコートを採用することで対応した。また、リング外周にDLC(ダイヤモンドライクカーボン)被膜, 2NDリング外周の当たり幅を縮小する改良を加えることで、オイル消費性を向上しながらもフリクションを低減させた。

これらの技術を織り込み、ピストンは単品で従来比約7%質量低減を達成した(図6)。

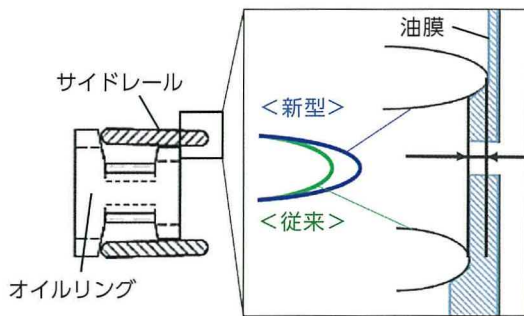


図5 サイドレール先端形状

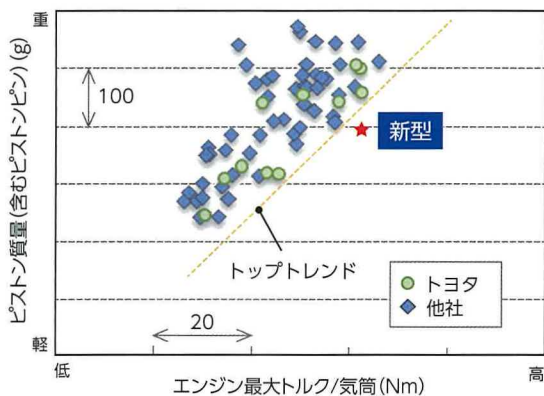


図6 ピストン質量比較

4 コンロッド

前述にあるように、小端部はバイパー形状にすることで、ピストンの剛性確保とコンロッドの軽量化を実現した。

鍛造素材には引張強度を従来材に対して30%強度を向上させた高強度鋼を採用した⁽¹⁾。従来品に比べ、コラム部を細くすることができ、コラム断面積を約25%減少させた(図7)。

大端部はピン径を従来比3.5mm減のφ48mmに縮小、さらに大端部周りの形状は、入力される爆発、慣性荷重に対し、大端中心の角度毎の各断面の入力モーメントを算出し、必要十分な断面2次モーメントの分布になる断面形状とすることで、軽量化を図った。図8に大端中心からの角度毎の断面2次モーメントを示す。40~60度の断面2次モーメントを従来形状より低減させ、軽量化を実現した。

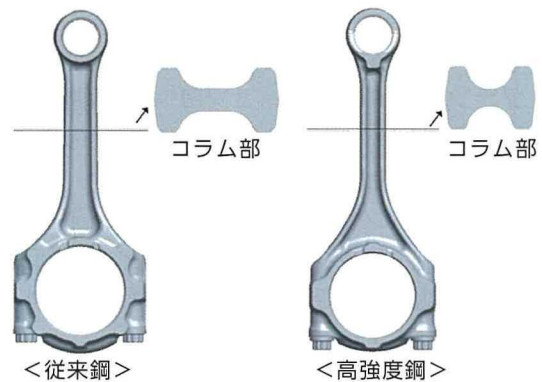


図7 コンロッド形状比較

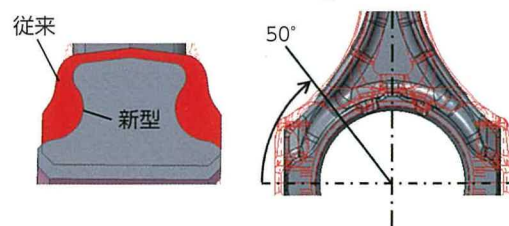
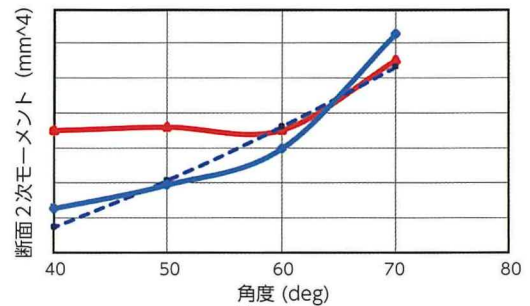


図8 コンロッド大端部断面2次モーメント分布

爆発荷重により、コンロッド軸受が高面圧に曝されるが、コンロッド大端上部の肉厚を低減することで軸受にかかる圧力を分散させ、軸受の耐焼き付き性を向上させた（図9）。

これらの変更により、コンロッドは従来比約17%の質量低減を実現した。また、ピストン、コンロッド合わせて10%の軽量化目標に対して13%低減した。

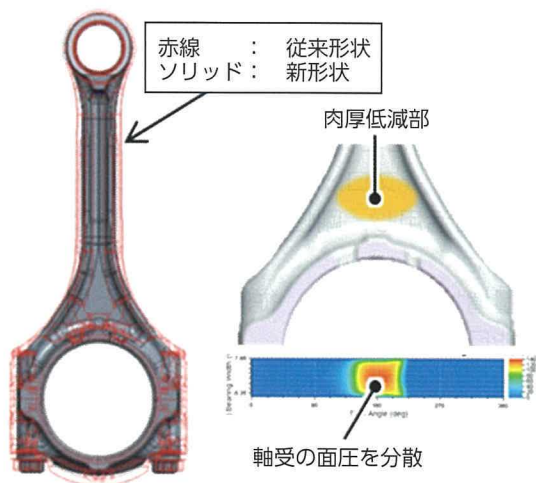


図9 コンロッド軸受の面圧

5 クランクシャフト・シリンダブロック

高回転、高筒内圧、ロングストロークに伴う背反として、慣性荷重の増加、クランクシャフト（以下クランク）の剛性低下によるシリンダブロック（以下ブロック）への入力負荷の増加、さらにはNV、特にクランク打音の悪化が考えられる。これらの課題に対し、ブロック、クランクで寸法のバランスを取りながらシステム諸元を満足すること且つ、車両への搭載性を確保するために、体格を大きくさせないことを目標に開発した。

まずNVの対応でクランクの剛性を向上するため、従来エンジンよりジャーナル部の幅を1mm短縮し、クランクのショルダー部の幅を拡大した。ショルダー部の剛性を向上するのみでは、質量増加、慣性荷重の悪化を招いてしまい、さらにその対策にブロックの剛性向上が必要となる、といった悪循環になってしまう。そのため、ブロック強度、NV、軸受強度、これら全てを成立させる、剛性と質量を両立するバランスの良いショルダーにする必要があった。

ショルダーの作りこみには3D-CAEを活用し、シリンダシステム全体の動的な解析を実施することで、ブロックの強度信頼性、NV、軸受の耐焼き付き性を確認しつつ、ショルダーの部位毎の形状を作りこんでいった。結果、剛性は部位毎に異なり、質量バランスも異なるものとなった（図10）。図11に各気筒の剛性比を示す。3番ジャーナル周辺は回転運動による慣性力の影響が高いため、質量低減によるブロックへの入力荷重低減を優先した。逆に1番、4番ピン周辺はNVへの寄与が高いため、剛性の確保を優先した形状とした。

ブロックは、ジャーナル部肉厚を1mm削減する一方、ボトムレールとつなぎ部を広げることで応力を低減した（図12）。また、ウォータージャケット底部は、組付け応力が高いヘッドボルト側を楕円Rに変更することで、応力を約25%緩和する形状とした（図13）。

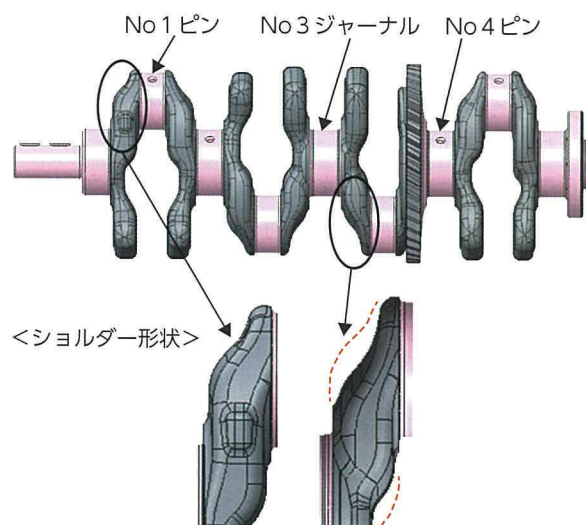


図10 クランクシャフトのショルダー形状

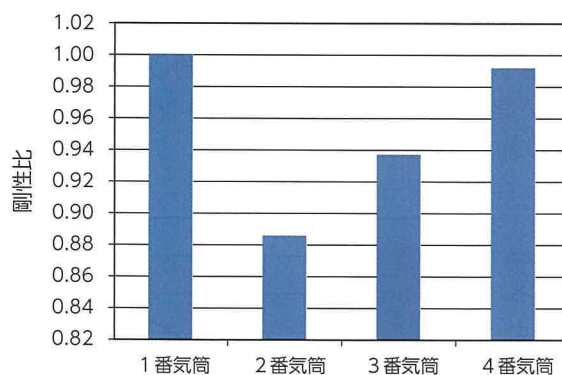


図11 気筒別クランクシャフト剛性

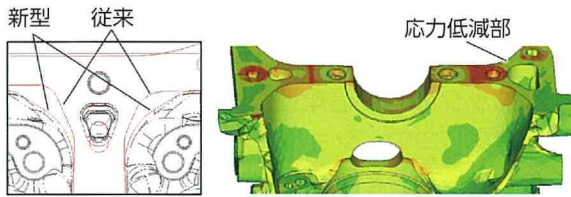


図 12 シリンダブロック応力解析

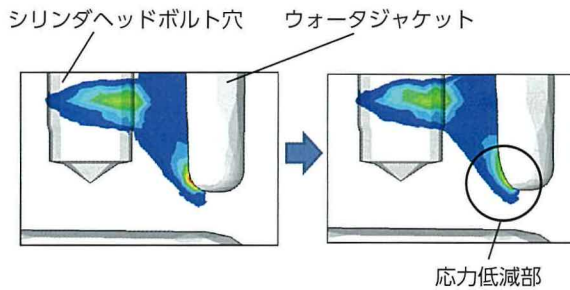


図 13 ウォータージャケット底部発生応力

同様に他の応力集中部に対しても、応力低減する形状の作りこみを実施し、必要部位のみ剛性を上げてブロックの形状を決定し、エンジン体格を大きくさせないようにした。

低フリクション化にはコンロッド軸受、主軸受摺動面に樹脂コート処理を採用し、荷重を受けた際のフリクション低減を図った。さらに潤滑システムには、連続可変容量オイルポンプと低粘度エンジンオイル SAE 0W-16 を採用している。低粘度オイルを用いつつオイルポンプ吐出量を可変制御することで、必要なオイルを最適に供給することが可能となり、軸受摺動抵抗の低減を実現した。背反として軸受部の発熱、入力荷重が大きくなるため、軸受のライニング材の強度アップと低 Sn 化による微細組織化で耐疲労性を向上したものに変更した⁽²⁾。

シリンダシステムはクランク、ブロックの形状作りこみ及び、前述のピストン、コンロッドの質量低減を織り込むことにより、従来と同じ体格で、強度と NV を両立、さらにフリクションは従来エンジンより約 15% 低減した (図 14)。

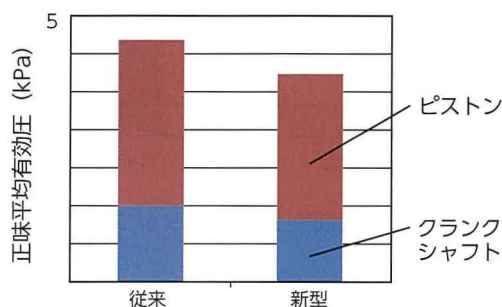


図 14 フリクション比較

6 むすび

シリンダシステム (ピストン、コンロッド、クランク、ブロック、軸受) は軽量化、低フリクション化の技術を織り込み、ピストン、コンロッドは合わせて 13% の軽量化、フリクションはシステムで 15% の低減を達成した。

- ・ピストンは薄肉化と、コンロッドのバイパー形状によるピンボス間の短縮により従来比 7% の軽量化を達成し、また、スカート部の表面処理を変更することでフリクションを低減した。
- ・コンロッドは高強度鋼を採用し、大端部の形状を工夫することで従来比 17% の軽量化を実現した。
- ・クランク、ブロックは形状の作りこみに 3D-CAE を活用し、剛性必要部位を見極めながら設計した。

質量増加を抑え込み、従来エンジンと同等の体格で性能目標を達成した。

参考文献

- (1) 篠原伸幸, 棚橋, 北野, 深沢, 今川ほか : 被削性に優れる高強度コネクティングロッド用鋼. 自動車技術会論文集. Vol.46, No.4, P.825 - 829 (2015)
- (2) 出崎亨, 神谷 : 小型ディーゼルエンジン用高性能アルミ合金軸受の開発. 自動車技術会学術講演会講演予稿集 (1998)

本論文は、下記発表済み論文の転載である。

平沼亨, 山下, 寺田, 中田, 中村ほか : 新型直列 4 気筒 2.5L ガソリンエンジンのシリンダシステム開発. 自動車技術会学術講演会講演予稿集. P.1841 - 1845 (2017)

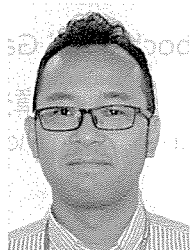
■著者



平沼 亨



山下 親典



寺田 竜啓



中田 和哉



中村 光宏



倉内 孝

新 V 型 6 気筒 3.5L 過給ガソリンエンジン

The New Toyota V6 3.5-Liter Turbocharged Gasoline Engine

湯浅 貴夫 *1
Takao Yuasa

山崎 大地 *1
Daichi Yamazaki

森 章夫 *1
Akio Mori

能川 真一郎 *2
Shinichiro Nogawa

要旨

レクサス LS の刷新に伴い、低重心・低フードをデザインコンセプトとする車両に搭載可能、かつ将来規制・環境動向に対応できるエンジンとして、V 型 6 気筒 3.5L 過給エンジンを新たに開発した。一方で、競合 V8 過給エンジン並の出力性能 310kW（比出力 90kW/L）、600Nm（1,600～4,800rpm）を目標に掲げ、新たに高効率ターボ、高速燃焼の過給エンジンへの適用と、吸気ポートへのレーザクラッドバルブシート等の技術を投入することで、これを達成した。このエンジンと Direct-shift 10 速自動変速機を搭載したプロトタイプ車両にて、競合 V8 過給エンジン搭載車両並の 0-60mph 加速タイム 4.6 秒および燃費 23mpg を達成した。

Abstract

In association with the completely redesigned Lexus LS, Toyota Motor Corporation has developed a new V6 3.5-liter turbocharged engine. This engine can be installed in vehicles designed based on a low-center-of-gravity, low-hood concept, and is also compatible with future regulations and environmental requirements. The development of this turbocharged engine targeted a power performance of 310 kW (specific power: 90 kW/L) and 600 Nm (between 1,600 and 4,800 rpm), which is equivalent to V8 turbocharged engines in competing vehicles. This target was accomplished by adopting a new highly efficient turbocharger and high-speed combustion, and by incorporating technologies such as laser-clad valve seats in the intake ports. A prototype vehicle installed with this engine and the direct-shift 10-speed automatic transaxle achieved a 0-to-60 mph acceleration time of 4.6 seconds, which is in the same class as competing vehicles installed with V8 turbocharged engines, as well as fuel efficiency of 23 mpg.

キーワード 内燃機関, 火花点火機関, 高速燃焼, ターボチャージャー, 性能 / 燃費 / 効率, タンブル流

1 はじめに

レクサスのフラッグシップモデルである LS の刷新に伴い、新 V 型 6 気筒 (V6) 3.5L 過給ガソリンエンジンを開発した。開発にあたり、フラッグシップに相応しい以下 3 つの性能目標を掲げた。

- (1) 動力性能とドライバビリティ：競合 V8 過給並の車両加速タイムおよび加速フィーリング、どこからでも加速できる、四角くフラットなトルク特性とトルクレスポンス
- (2) 環境性能：競合を凌駕する燃費と 2023 年以降の米国の排気規制に対応できる排気性能の実現
- (3) NV（騒音・振動）・静粛性：歴代 LS の上品さとスムーズさの正常進化

本稿では、この新型ガソリンエンジンの概要と主要技術について述べる。

2 開発目標値の設定

新型 LS で開発目標とする動力性能と燃費の関係を図 1 に示す。競合車である V8 過給エンジン + 8/9 速自動変速機 (8/9AT) も凌駕する 0-60mph 加速タイムと燃費を目標とした。エンジンは、現行搭載の V8 4.6L 自然吸気 (NA) から大幅に向上した、最高出力 310kW、最大トルク 600Nm (1,600～4,800rpm)、最大熱効率 37% を開発目標に設定した。目指す比出力および燃費の競合性を図 2 に示す。

さらに、過給エンジンならではのドライバビリティの良さを実現するために、低回転かつ高トルクの領域を積極的に運転して、10AT のリズムカルな変速を活用し、優雅で伸びのある加速を実現させることを目指した。また、図 3 にエンジン単体のトルク勾配トレンドを示す。車両 G シミュレーションに基づき、エンジン単体のトルク勾配目標値を競合トップライン付近に設定して開発を進めた。

*1 パワートレーンカンパニー エンジン設計部

*2 パワートレーンカンパニー 第 3 電動パワートレシステム開発部

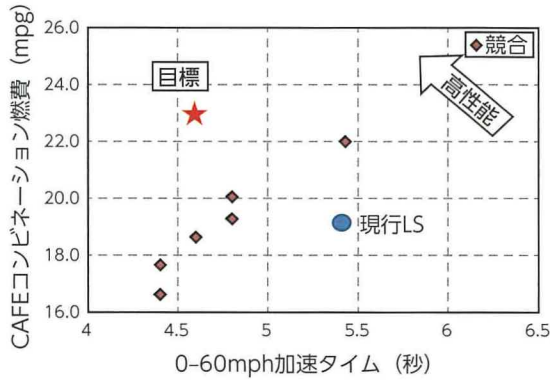


図1 新型 LS の出力性能および燃費目標

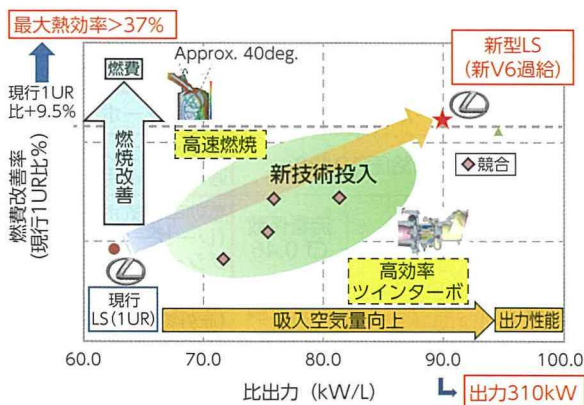


図2 新エンジンの比出力と燃費の競合性

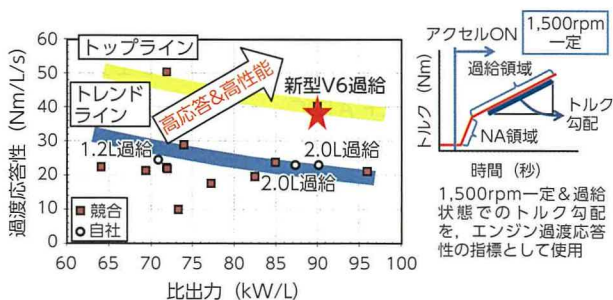


図3 エンジンのトルク勾配トレンド

前述の高い目標に加えて、さらに新型 LS のデザインコンセプトである低重心・低フード車両 (写真1) に搭載可能で、燃費、排気の将来規制・環境動向に柔軟に対応できるエンジンとして、現行よりスマートサイジングした排気量 3.5L の V6 エンジンを選択した。一方で、V6 化による振動増加に対しては ANC (Active Noise Cancel), ESE (Engine Sound Enhancement) を採用することで、歴代 LS にて好評の静粛性および上品さ、スムーズさを継承、進化することができた。また、スマートサイジング化しながら競合 V8 並の出力性能を達成するために、高効率ツインターボの開発

と共に、Toyota New Global Architecture (TNGA) エンジンの高速燃焼コンセプトを過給へ適用することによる、燃焼改善や出力向上を行った。以下に性能目標達成のための織入技術の詳細について述べる。



写真1 新型 LS のデザイン

3 全負荷性能向上に対する開発技術

3.1 目標の性能&トルク曲線と達成方策

図4に、新型 V6 過給エンジンの目標とする台上出力性能トルクカーブを示す。現行 1UR-FSE の V8 4.6L NA エンジンに対して、低回転、高回転ともに大幅な性能向上を目標とした。

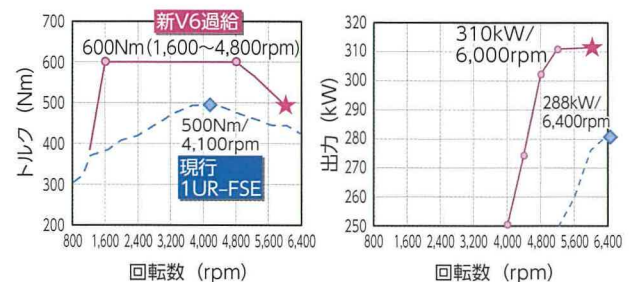


図4 現行とのエンジントルク&出力比較

レクサスのフラッグシップとして、低速からスムーズかつ気持ちよく立ち上がる加速感を重視して、1,600rpm で最大トルク 600Nm を実現するターボチャージャーの仕様を検討した。図5に検討したターボのコンプレッサマップを示す。2014年に2.0L 過給エンジン (8AR-FTS) で搭載したターボをベースとした場合、600Nm を発生する回転数は 1,850rpm になる。このため、サージの発生を回避して目標の 1,600rpm を実現するにはターボの小型化が必要であるが、6,000rpm で最大出力 310kW の目標出力を成立するにはチョーク限界に対しコンプレッサの空気流量が不足する。必要な空気流量を導入するために、吸気システムの

効率化、ターボの効率向上、燃焼促進による過給圧増加、ノッキング改善を実施して、低回転から高回転までワイドレンジな過給特性を得ることとした。

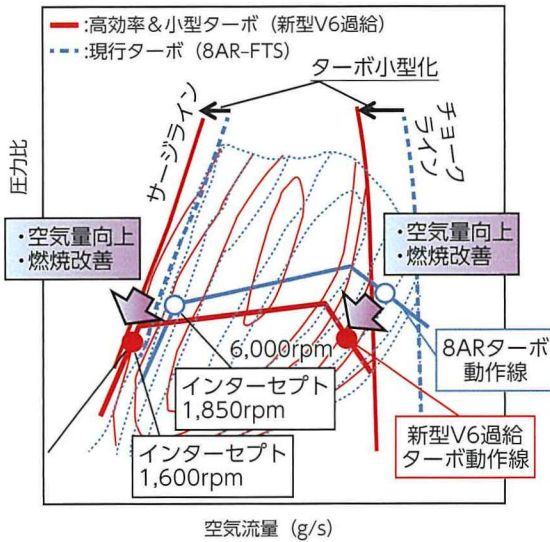


図5 タービンコンプレッサ動作点

図6に、6,000rpmの出力と、1,600rpmのトルクにおける、向上技術の効果積み上げを示す。現行8AR-FTSのターボから小型化したターボの状態をベースに、不足するトルクを空気量の向上と燃焼改善に目標を割り付けて、達成を目指した。

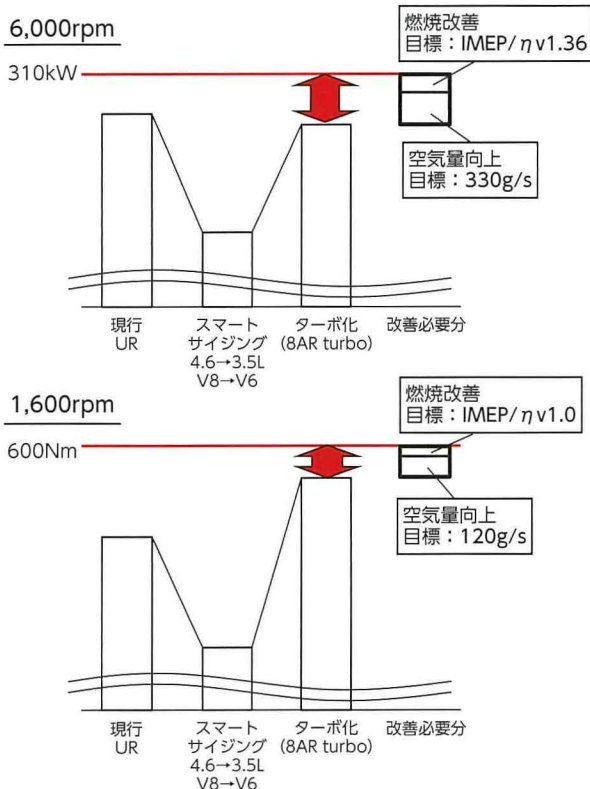


図6 性能目標達成のための割り付け

設定した空気量向上および燃焼改善目標を達成するために投入した技術を、表1に示す。目標値をさらに詳細な物理量に落とし込み、それらを達成するために必要な技術を積み上げ、開発した。その中で、今回新たに開発した技術として、高効率タービン翼形状によるターボ効率向上、高速燃焼コンセプトの過給への適用による過給圧向上、高効率吸気ポート（レーザークラッドバルブシート）採用による流量係数と高速燃焼の両立、高速燃焼およびピストン排気側冷却を狙った多点オイルジェットによる点火進角等について、詳細を述べる。

表1 性能目標達成のための投入技術

6,000rpm

目標	詳細な目標値	達成のための投入技術	
空気量向上 330g/s	ターボ効率 η_{tot} A%	高効率ターボ	
	過給圧 194kPa	高速燃焼コンセプトの過給への適用	
	充填効率向上 η_{vb} B%	流量係数 Cf 0.46	高効率吸気ポート (レーザークラッドバルブシート)
		吸気圧損 C kPa	新工法サージタンク (赤外線加熱後溶着による溶着リブ高さ低減)
		吸気温 D°C	・高効率インタークーラ ・インテークマニホールド直上搭載インタークーラ
排気圧損 E kPa	排気管クラムシェル		
燃焼改善 IMEP/ η_v 1.36	点火時期 θ_{Pmax} F ATDC	高速燃焼コンセプトの過給への適用 直噴インジェクタ流量 UP 多点オイルジェットによるピストン排気側冷却 シリンダボア間冷却強化	

1,600rpm

目標	詳細な目標値	達成のための投入技術	
空気量向上 120g/s	ターボ効率 η_{tot} A%	高効率ターボ	
	過給圧向上 194kPa	高速燃焼コンセプトの過給への適用	
	充填効率 η_{vb} G%	流量係数向上 Cf 0.46	高効率吸気ポート (レーザークラッドバルブシート)
		吸気温 D°C	・高効率インタークーラ ・インテークマニホールド直上搭載インタークーラ
燃焼改善 IMEP/ η_v 1.03	点火時期 θ_{Pmax} H ATDC	高速燃焼コンセプトの過給への適用 直噴インジェクタ流量 UP スカベンジ回避	

3.2 空気量向上のための投入技術

3.2.1 高効率ターボ

目標ターボ効率達成のために、内製の小型高効率ターボを新たに開発した。8ARのターボで既に採用済の、鍛造材総切削工法による高効率曲面コンプレッサ翼形状は踏襲した上で、今回新たにタービン翼の高効率化設計を行った。従来は低慣性モーメントを重視し、翼長および湾曲量を短くすることで小型化を狙った設計としていたが、今回新たに湾翼長および湾曲量増加により排気エネルギー吸収効率化を狙った(図7)。

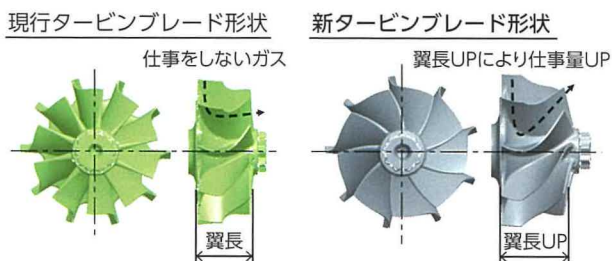


図7 タービンブレード形状の新設計

また、電動ウエストゲートバルブ(WG)採用(図8)による全閉時締切力向上、入口翼高さの数値流体力学解析(CFD)最適化による翼仕事量増加、薄翼共振回避形状採用による慣性モーメント低減、コンプレッサハウジングのダイカスト化による空力特性向上も行い、さらに機械効率を向上させた。結果、世界トップレベルのタービン機械効率を実現し(図9)、目標のターボ効率 $\eta_{tot}=42\%$ を達成した。

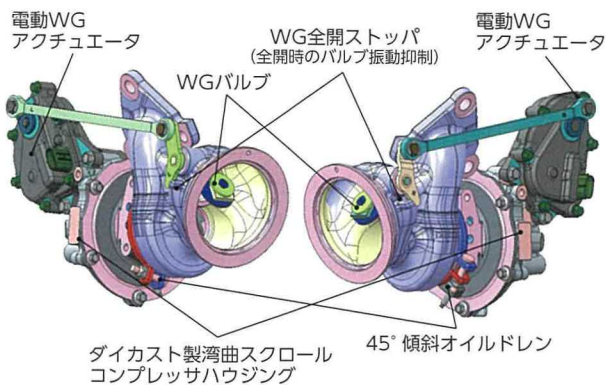


図8 電動ウエストゲートアクチュエータ

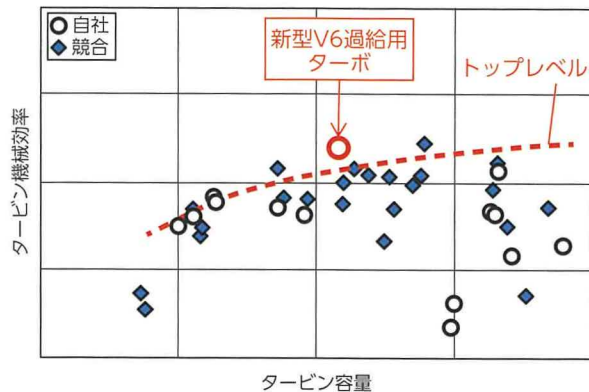


図9 タービン機械効率トレンド

3.2.2 高速燃焼の過給エンジンへの適用

比出力と高い熱効率を実現するために、高速燃焼を燃焼コンセプトの基軸としたパワートレートをTNGAシリーズとして新開発し、2017年に新型シリーズ第1弾として2.5L NAのコンベンショナルエンジンとハイブリッド(HV)車用エンジンを市場に導入した(1)。図10に示すように、高速燃焼によって、①燃焼変動を抑制して排気再循環(EGR)限界を拡大することで、ポンプ損失と冷損の低減が可能になる。更に②ノッキング抑制効果により圧縮比を上げることが可能になる(2)。本開発では、この高速燃焼を過給エンジンに適用することで、③過給圧を向上して更なる比出力向上と高い熱効率の両立を行った。

図11に示すように、燃焼促進によって排気ガス温度が低下するため、過給圧を増加することができる。しかしながら、乱れ強度を大きく増加すると、吸気の流量係数低下やエンジン最大燃焼圧力の制約によって出力はサチュレートする。今回、新エンジンで目標とする最高出力310kWを実現するための乱れ強度の目標値を4.8m/sとした。



図10 過給エンジンへの高速燃焼コンセプトの適用

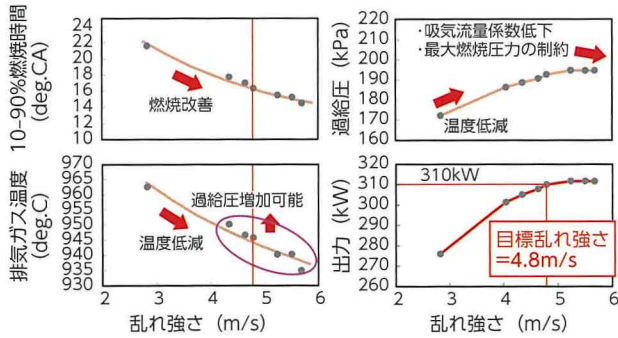


図 11 過給エンジンにおける燃焼速度と排気ガス温度の乱れ強さに対する関係

次に、筒内の乱れ強度を決定する因子を検討して、要求乱れ強度を達成する諸元を決定した。図 12 に筒内の非定常タンブル比と乱れ強度の時間履歴およびその特徴を決める燃焼諸元を示す。非定常タンブルは吸気流入によるピーク A と、その後のタンブル流形成により圧縮行程中にピーク B に達し、上死点 (TDC) に向かうに従い減衰する。一方、乱れ強度は非定常タンブルのピーク B の後で、タンブル流がピストン上昇に伴い圧縮されることで乱れに変換されてピーク C を持ち、その後 TDC に向かい減衰して燃焼前の乱れ強度 D となる。これまでの実験および 1D/3D シミュレーション結果より、D の目標値を達成する諸元は、図 11 に示す 4 つのエンジン基本諸元により決定されることが分かっている。この前提を考慮した上で、3.5L V6 過給エンジンの要求乱れ強度 4.8m/s を達成するための燃焼に関わる基本諸元を決めた。

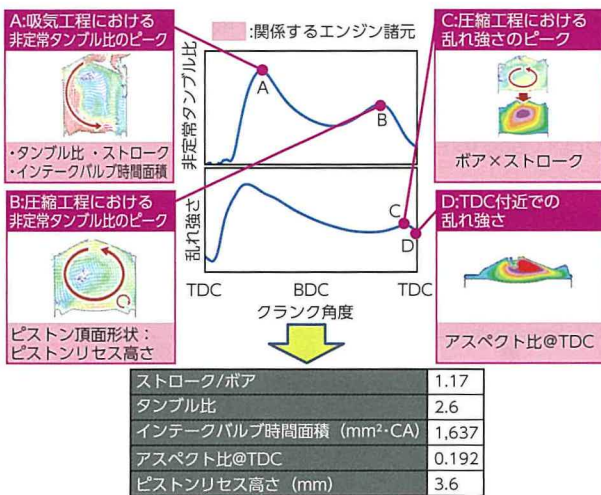


図 12 新エンジンの燃焼に関わる基本諸元狙い値

次に、ピストン頂面形状について述べる。図 12 中の B, D の乱れ強さを高める (乱れの減衰を抑制

する) ために、乱れの流路を妨げず、かつスムーズに点火プラグ周辺に導くピストン頂面形状とアスペクト比が重要となる。図 13 に直列 4 気筒 (L4) 2.5L で採用したピストン形状と、今回の V6 過給エンジンで新採用したピストン形状の比較、および両者での乱れ強さの比較結果を示す。高圧縮比の NA の場合と、それと比較して低圧縮比の過給の場合で、取り得るリセス深さの差異があるため、乱れ強さを最も向上できるピストン頂面形状が異なることを見出して、過給の圧縮比に最適な B の形状を採用した。

A) 直列4気筒2.5Lの形状

B) 新型V6過給の形状

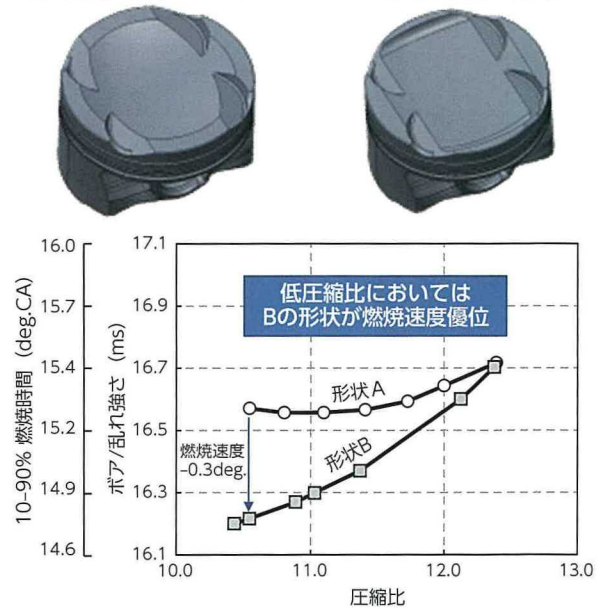


図 13 ピストン頂面形状による乱れ強さの比較

3.2.3 高効率ヘッド吸気ポート

目標空気量達成のために、流量係数 0.46 の確保が必要であるが、一方で、3.2.2 で述べたタンブル比 2.6 の達成も必要となる。それらを主に左右するのはヘッドの吸気ポート形状であるが、一般的に両者は相反する関係にあるため、両立させるための技術フィードバックが必要である。そこで、シリンダヘッドの吸気ポートのバルブ挟み角とスロート高さを見直した。筒内へ流入する流れがより直線的になる様に改良し、このスロート高さを実現するためにレーザクラッドバルブシートを採用した。図 14 はタンブル比と流量係数の関係を現号 1UR エンジンと比較したもので、新型エンジンのタンブル比×流量係数は、目標値を両立した上で、さらにトレンドトップクラスとなっていることが分かる。

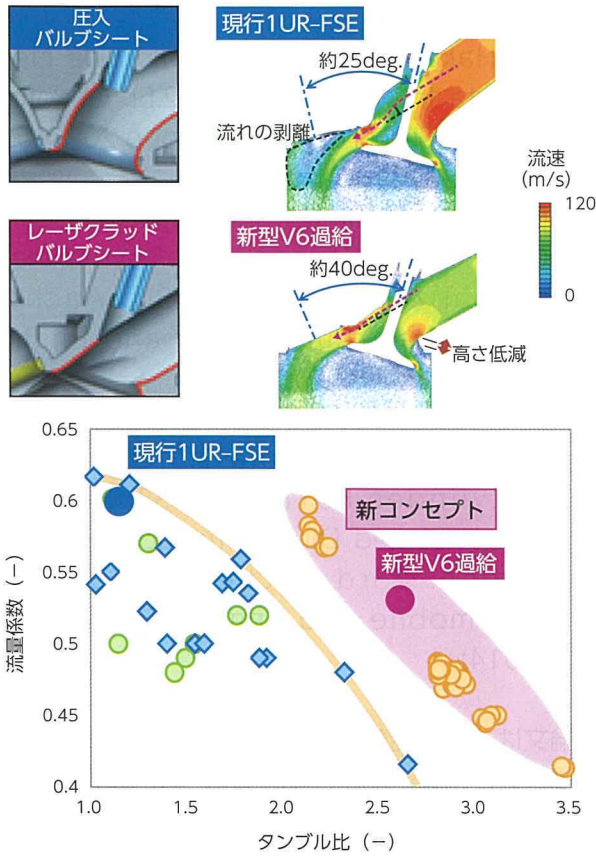


図 14 吸気ポート形状比較およびタンブル比と流量係数の関係

3.3 燃焼改善 (高速燃焼によるノッキング改善)

3.2.2 で述べた高速燃焼コンセプトを織り込んだ V6 過給プロトタイプエンジンの実機評価結果を示す。図 15 は、10-90% 燃焼速度と 50% 熱発生率タイミング (CA50) の 200 サイクルの分布を示している。従来コンセプトの 8AR-FTS に対して、新エンジンでは燃焼を促進することで CA50 が進角しており、図 16 にあるように圧縮比を従来の 10 から 10.5 に向上しながらも、ノッキングが向上していることを示している⁽³⁾。

その結果、出力性能目標を達成するとともに、最大熱効率 37% も達成した。新開発の冷却水制御弁採用によるヒートマネージメント技術の織り込み等も含めて、燃費目標達成も実現した。

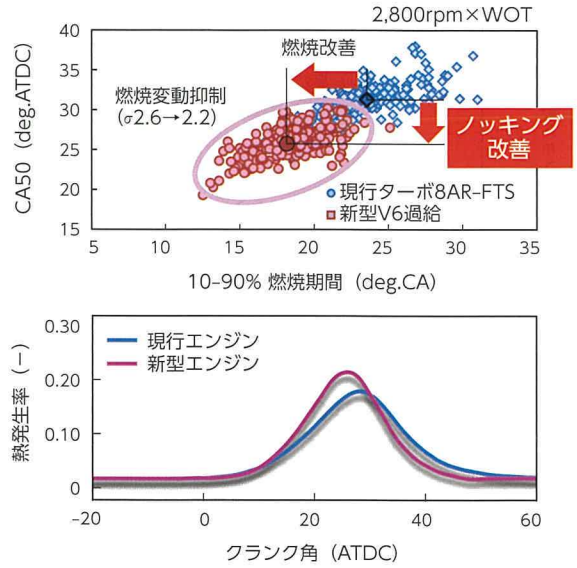


図 15 燃焼速度確認結果

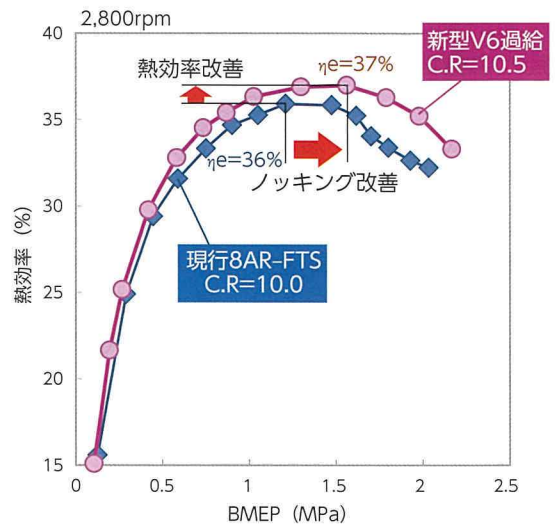


図 16 熱効率確認結果

4 車両性能まとめ

これまで述べた V6 ターボプロトタイプエンジンを搭載した新型 LS の車両動力性能・燃費結果についてまとめる。

図 17 に、LS 車両加速タイムと燃費結果を示す。低速トルクである V6 ターボエンジンとワイドギアレシオの Direct-shift 10AT を組合せる事により、FR 車にて 0-60mph 加速タイム 4.6 秒、北米 Comb. 燃費 23mpg を達成、動力性能は競合 V8 ターボ車両と肩を並べた上で、燃費はダントツとなるレベルを実現した。

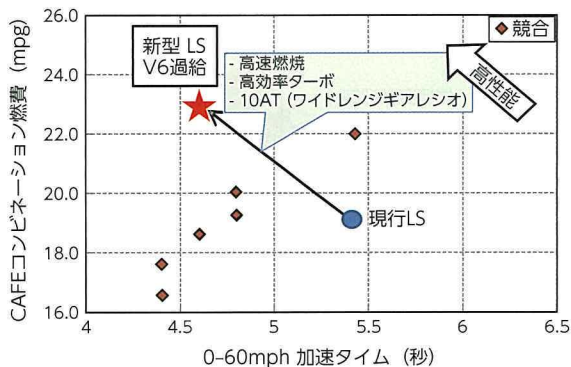


図 17 新型 LS の 0-60mph 加速タイムと CAFE コンビネーション燃費確認結果

5 まとめ

新型 V6 3.5L 過給エンジンは、これまで述べてきた新技術の導入により、競合トップレベルの出力性能と燃費性能を達成し、レクサスのフラッグシップモデルである LS にふさわしい完成度を実現した。

- (1) 競合 V8 過給を凌駕する出力性能を目標に、高効率ターボおよび TNGA 高速燃焼の過給エンジンへの適用等の空気量向上アイテム、および TNGA 高速燃焼等の燃焼改善アイテムの織り込みにより、最大トルク 600Nm (1,600 ~ 4,800rpm)、出力 310kW (比出力 90kW/L) の目標を達成した。さらに、最大熱効率は 37% を達成し、燃費目標も両立させた。
- (2) 3.5L V6 ターボエンジンと Direct-shift 10AT を搭載したレクサス LS プロトタイプ車両にて、0-60mph 加速タイム 4.6 秒、Comb. 燃費 23mpg を達成、動力性能は競合 V8 ターボ車両と肩を並べた上で、燃費はダントツとなるレベルを実現した。

参考文献

- (1) M. Hakariya, Toda, Sakai: The New Toyota Inline 4-Cylinder 2.5L Gasoline Engine. SAE Technical Paper 2017-01-1021 (2017)
- (2) E. Murase, Shimizu: Innovative Gasoline Combustion Concepts for Toyota New Global Architecture. 25th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology (2016)
- (3) I. Watanabe, Kawai, Yonezawa, et al.: The New Toyota 2.0-Liter Inline 4-Cylinder ESTEC D-4ST Engine-Turbocharged Direct Injection Gasoline Engine. 23rd Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology (2014)

本論文は、下記発表済み論文の転載である。

湯浅貴夫, 山崎, 能川, 森: 新型 V6 3.5L 過給ガソリンエンジン. 自動車技術会学術講演会講演予稿集. P.800 - 805 (2017)

著者



湯浅 貴夫



山崎 大地



森 章夫



能川 真一郎

新型 V6 気筒 3.5L 過給ガソリンエンジン冷却システム開発

Development of Cooling System for the New Toyota 3.5-Liter V6 Turbocharged Gasoline Engine

森下 大作 ^{*1} Daisaku Morishita	河本 直也 ^{*2} Naoya Kawamoto	丹羽 雄祐 ^{*1} Yusuke Niwa
久湊 直人 ^{*3} Naoto Hisaminato	山口 満 ^{*4} Mitsuru Yamaguchi	安藤 宏和 ^{*3} Hirokazu Ando

要旨

新型 V 型 6 気筒 3.5L 過給ガソリンエンジンの冷却システムについて述べる。本エンジンは、高出力と良好な燃費・空調性能を高次元で実現するために、冷却システムを大幅に改良した。エンジン内部の冷却水通水抵抗の徹底的な削減と、ウォーターコントロールバルブ (WCV) によるサーマルマネジメント (熱管理) を採用した。WCV を使うことで、エンジンの冷却水を車両デバイスのどこにどれだけ流すかを制御することができ、冷却水を必要とするデバイスに優先的に流すことが可能となった。これにより、冷却水流量ゼロによるエンジン早期暖機 (燃費改善)、ヒーターコア優先通水による暖房性能向上等を実現した。

Abstract

This article describes the cooling system of the new 3.5-liter V6 turbocharged gasoline engine developed by Toyota Motor Corporation. The cooling system of this engine was substantially redesigned to help achieve high power, while ensuring superlative fuel efficiency with excellent air-conditioning performance. Refinements included greatly reducing the flow resistance of the coolant in the engine, and the adoption of thermal management using a water control valve (WCV). The WCV is capable of controlling how much coolant flows to which engine device, and can prioritize flow to devices requiring coolant. Accordingly, this cooling system supports rapid engine warm-up by reducing coolant flow to zero (thereby helping to improve fuel efficiency), while also enhancing heater performance by prioritizing coolant flow to the heater core.

キーワード エンジン冷却システム, サーマルマネジメント, ウォーターコントロールバルブ, 早期暖機

1 はじめに

TNGA (Toyota New Global Architecture) シリーズの、新型 V 型 6 気筒 (V6) 3.5L 過給エンジンを開発した。本エンジンは、現在の V8 エンジン (V8 4.6L-NA) (NA : 自然吸気) 以上の出力性能と、競合車に負けない加速性能・燃費・環境性能を実現するために、エンジンを構造から刷新した。過給システムの追加、高出力を支える本体構造はもちろんのこと、エンジン燃焼室の冷却能力を向上させるために、冷却システムをサーマルマネジメント (熱エネルギーの最適化) などで大きく改良し、エンジンの暖機速度向上、空調の冷暖房性能向上、軽負荷時のフリクション低減、高負荷時の耐ノック性向上を実現した。本稿ではその内容について述べる。

2 開発の狙い

2.1 エンジン出力向上対応

エンジンの出力向上に対応するために、燃焼室周りの冷却能力を向上させる必要がある。冷却水の熱伝達係数 (流速) を上げる手法としてはウォーターポンプの揚程を上げる手法が簡易だが、ウォーターポンプを大きくしすぎると、キャビテーション (吸込み負圧による冷却水の飽和蒸気圧超えの現象) を招くため、ウォーターポンプの揚程拡大と合わせて、冷却経路の徹底した通水抵抗の低減を実施する。

2.2 燃費・空調性能の両立対応

エンジンの熱効率 (燃費) 向上により、暖機の遅れ (アイドル時エンジン停止制御の許可水温到達遅れや、暖機後制御への切り替え遅れなどの燃費効果減) と、冷却水を熱源とする車室の暖房性能の低

*1 パワートレーンカンパニー エンジン設計部
 *2 パワートレーンカンパニー EHV 電池設計部
 *3 パワートレーンカンパニー 第2電動パワートレシステム開発部
 *4 パワートレーンカンパニー 第3電動パワートレシステム開発部

下を招いている。これは、冷却水の流量制御と接続する車両のデバイス（ラジエータ、ヒーターコア、ATF/W：オートマチック トランスミッション フルード ウォーマー）を適切に切り替えることで不足する熱量を補う。

暖機遅れに対しては、車両のデバイスの冷却水流量を全てゼロにする冷却水の水止めにより、エンジン燃焼室周りに熱マスを限定し、早期暖機を実施する。暖房性能の低下に対しては、ヒーターコアのみにエンジンの冷却水を通水し、エンジンの熱を全て暖房にまわすことで改善する。その他にも、冷房（空調）性能必要時は、ヒーター通水をカットし、ヒーターコア放熱の影響を排除して、冷房効率を高める。また、エンジン性能必要時はラジエータ通水量を増やし、かつエンジン水温と燃焼室壁温を下げることによってノック限界を増やし、点火時期を進角させて、性能向上を実施する。更に、軽負荷時はラジエータ通水量を減らし、エンジン水温と燃焼室壁温を上げ、エンジンフリクションを低減（水温増による油温増効果も有り）し、燃費を向上させる。

このように、エンジンと車両のデバイスの接続を切り替え、冷却水流量をコントロールする冷却制御弁（WCV：Water Control Valve）を使って冷却回路のサーマルマネジメントを実施する。

WCVがサーモスタット（エンジン水温を制御する部品）の機能を包括するため、サーモスタット廃止により、ラジエータ通水経路のサーモスタット圧力損失を排除することができ、キャビテーション限界の向上と、ラジエータ放熱能力の向上につながる。

以上のように、冷却システムの改良により、エンジン出力性能・燃費・空調性能を高次元で実現させる。

本システムを採用する開発エンジン（図1）と、V8 4.6L-NA との諸元比較を表1に記載する。

表1 エンジン主要諸元の比較

エンジン		開発エンジン	現在エンジン
エンジンタイプ		V6 気筒	V8 気筒
排気量 (cc)		3,445	4,608
ボア径 × ストローク長さ (mm)		φ85.5×100	φ94×83
圧縮比		10.5	11.8
最高出力 (kW/rpm)		310/6,000	288/6,400
最大トルク (Nm/rpm)		600/1,600-4,800	500/4,100
冷却システム	ターボチャージャー	ターボ 2 個 (右バンク / 左バンク)	無し
	インタークーラー	水冷式	無し
	ウォーターポンプ	ベルト駆動式	ベルト駆動式
	冷却水量可変アイテム	ウォーターコントロールバルブ	無し
	冷却水温度調整アイテム	ウォーターコントロールバルブ	サーモスタット (82℃開弁)
	低水温冷却水回路	ターボ、インタークーラー用に有り	無し
	外部 EGR システム	無し	無し

3 冷却システムの採用技術

3.1 冷却回路の通水抵抗低減

エンジンからラジエータへの冷却水回路（図2）の通水抵抗について調べると、エンジン通水抵抗が全体の約 60%を占め、ラジエータ通水抵抗が約 25%、残りの 15%をその他の冷却配管が占めている。ラジエータと冷却配管はそのサイズによって通水抵抗が支配されるが、エンジン本体はウォータージャケット形状とサーモスタット圧力損失が支配的となる。サーモスタットは WCV 採用によって廃止できているため、エンジン本体のウォータージャケット形状の変更に取り組んだ。

通水抵抗を低減するには、冷却水を流す距離を短くし、冷却水を流す経路を多くとると良いことが分かっている。エンジンのシリンダーヘッドは直方体形状となっており、従来のエンジン（V6 3.5L-NA）は、エンジンの後方から前方へ長手方向に通水していた。これを、エンジンの吸気側から排気側へ短手方向に通水（図3）させることで、通水距離を短くし、かつ通水経路を増やして、通水抵抗の低減につなげた。

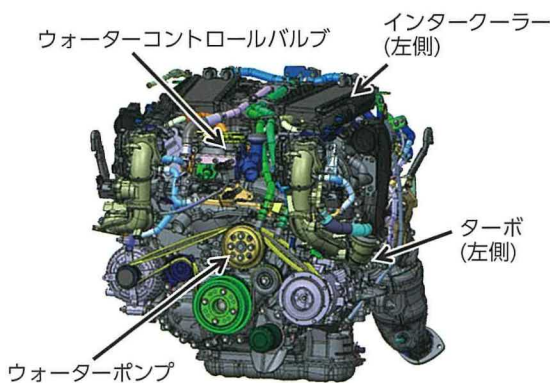


図1 開発エンジンの外観図

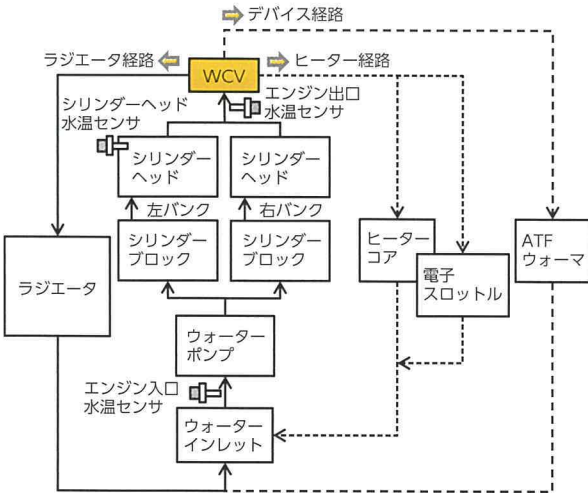


図2 開発エンジンの冷却水回路図

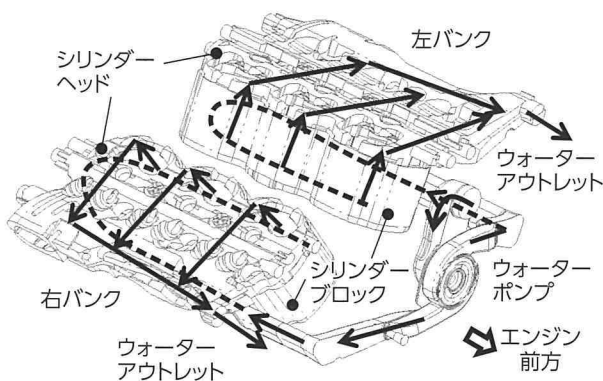


図3 エンジンウォータージャケットの冷却水流路

また、ウォーターポンプ通過後のシリンダーブロックへの流入経路を見直した。V6 3.5L-NAでは、2段曲げ形状（図4）になっていたが、通水抵抗を下げるために、緩やかな曲げ（図5）に改良した。

結果として、V8 4.6L-NAから30%の通水抵抗低減を可能とした（図6）。

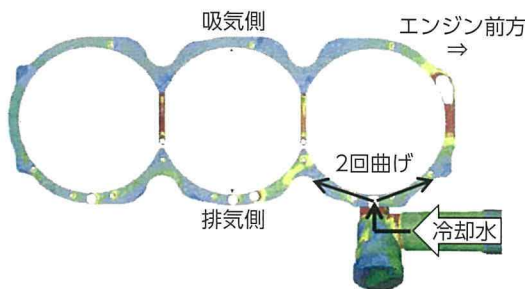


図4 現在エンジンのシリンダーブロックウォータージャケット上面視

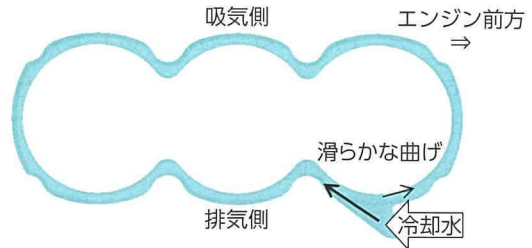


図5 開発エンジンのシリンダーブロックウォータージャケット上面視

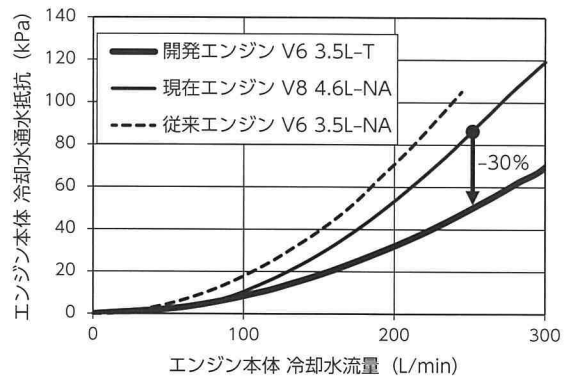


図6 エンジン本体冷却水通水抵抗比較

3.2 コンパクト、低冷却水容量の設計

燃費とエンジン出力性能を両立させるために、熱マスとしての冷却水容量を少なくし、かつ冷却性能（冷却水流量、熱流束）を耐ノック性向上のために底上げする必要がある。開発目標を、V8 4.6L-NA以上の冷却性能と、V6 3.5L-NA並みの冷却水容量の両立とし、その手段として、以下の2つを織込んだ。

1つ目は、ウォーターポンプの揚程能力向上による冷却水流量アップである。ウォーターポンプは、キャビテーションの観点で揚程を上げられなかったが、前述の通水抵抗低減により可能となった。通水抵抗を低減した分だけウォーターポンプの吸込み負圧の軽減に繋がり、吸込み負圧に生じた余裕分をウォーターポンプの揚程能力に置き換えた。結果として、V8 4.6L-NA以上の冷却水流量を確保し、高出力化に対する冷却性能（冷却水流量増によるラジエータ放熱量）を確保した。

2つ目はウォータージャケットに、ウォータージャケットスペーサー（WJS）を挿入することである。燃焼室の排気（EX: Exhaust）側上部の熱流束を高めることで、冷却水容積を増やすことなく、耐ノック性を向上する狙いである。シリンダーブ

ロックのウォータージャケット下部にWJS（図7）を入れることで、ウォータージャケットEX側上部の熱流束向上（図8, 9）を確認した。結果として燃焼室のボア間壁温を低減（図10）させることに成功し、耐ノック性を向上した。

また、冷却水容量を低減するために、構造のシンプル化を実施した。WCV採用による、エンジンの冷却水出口の一元化と、エンジン前面に冷却水部品を纏めて配置したことである。

以上の対応により、本開発エンジンは冷却水容量をV6 3.5L-NA 相当に抑えたまま、V8 4.6L-NA 以上の最高出力を実現した（図11）。

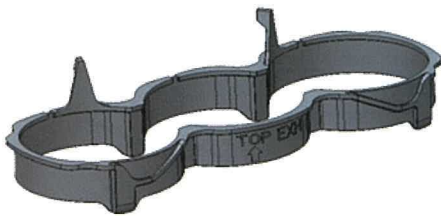


図7 ウォータージャケットスペーサー外観図

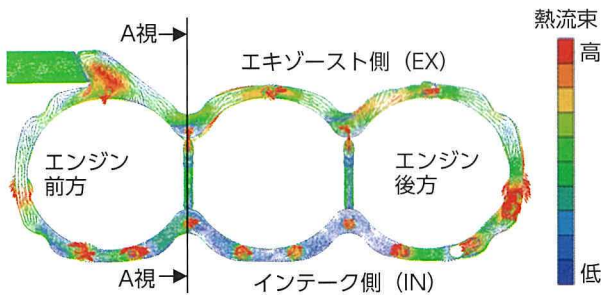


図8 冷却水熱流束 シリンダーブロックウォータージャケット 上面視

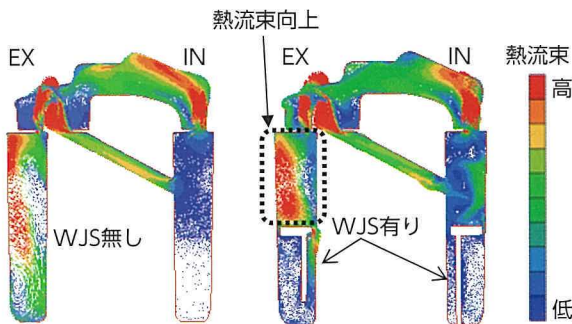


図9 冷却水熱流束比較 WJS 有無（図8 A視）

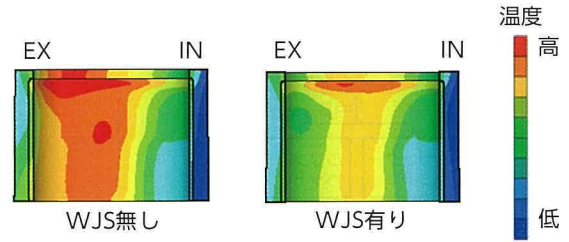


図10 シリンダーブロックボア壁温比較（図8 A視）

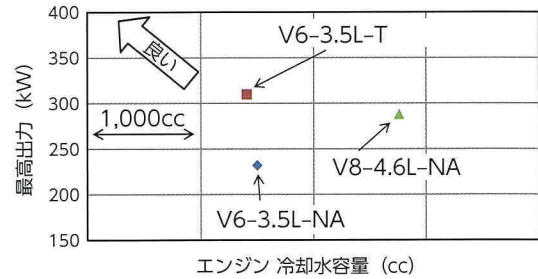


図11 冷却水容量 × 最高出力比較

3.3 ターボとインタークーラーに水冷式を採用

本エンジンは過給エンジンのため、ターボとインタークーラーの冷却が必要である。ターボは新開発の小型高効率ターボを採用し、タービン効率は、従来製品比で+5%となり、世界トップレベルとなった。

インタークーラーは、吸気温度低減（耐ノック性）と加速のレスポンス性を重視し、冷却後の吸気通路表面積（エンジンルームからの受熱減）と吸入空気の圧力損失を最小にするために、エンジン前方配置ではなく、エンジン直上配置とした。また、耐ノック性を確保するために高いインタークーラー効率が求められており、エンジン直上搭載でも十分な熱交換量を確保するために、空冷式ではなく水冷式を採用した。

エンジンの冷却水は水温が高いため、インタークーラーの冷却効率を十分に確保できないと判断し、エンジン冷却水とは別の冷却水回路（図12）を採用した。この冷却水回路の冷却水温度を低く保つために、インタークーラーとターボの冷却水回路のラジエータはエンジン冷却水のラジエータ前配置とし、更にサブラジエータを右タイヤ前に配置した。外気温相当の空気をたくさん当て、放熱能力を確保する狙いである。

以上により、最高出力点のインタークーラー冷却効率を90%以上にすることができ、過給域の耐ノック性を向上、出力向上（図13）を実現した。

インタークーラーに並列してターボにも冷却水を通水しているが、これは高過給圧によるターボ本体の物温上昇を避けるためである。ターボのベアリングハウジングに冷却水を通水し、コンプレッサハウジング及び、ベアリングハウジングの物温を下げて、オイルのコーキングを抑制した。

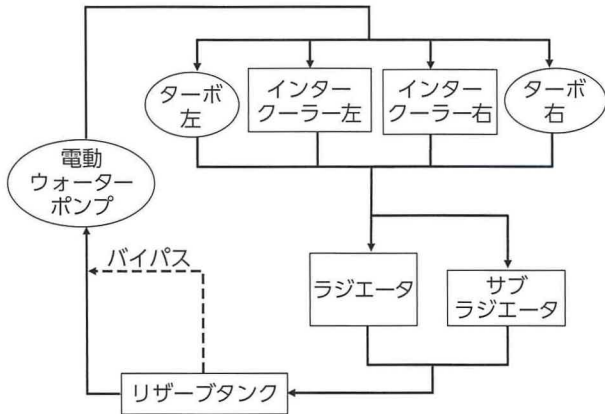


図 12 ターボとインタークーラーの冷却水回路図

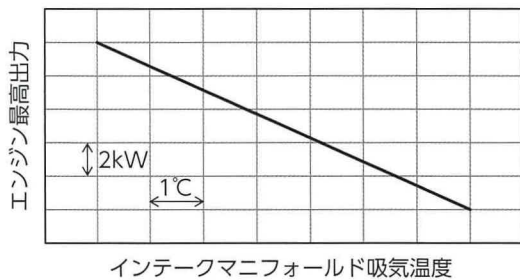


図 13 エンジン吸気温度と最高出力の関係

3.4 排気ガス冷却を採用

V6 3.5L-NA では排気ガス温度を下げる（部品保護目的）ため、燃料噴射による気化熱を利用していった。これは、燃料消費（燃費）とエミッションの悪化を招くため、できれば避けたい。本エンジンでは、シリンダーヘッドのウォータージャケットで排気ポート（図 14）を挟む構造（図 15, 16）を採用し、燃料増量をしない領域を拡大した。また、シリンダーヘッドのウォータージャケット形状は排気ポートを挟むため、上下 2 段に分割した。1 段目（下側）のウォータージャケットで燃焼室近傍と排気ポート下側を冷却し、2 段目（上側）のウォータージャケットで排気ポート上側を冷却する。

排気ポート部のウォータージャケットで、排気ガスから熱を貰うため、エンジン冷却水の暖機速度と、冬場の暖房性能が向上した。

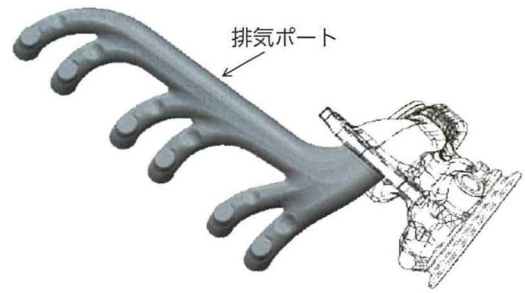


図 14 シリンダーヘッド内部の排気ポート形状

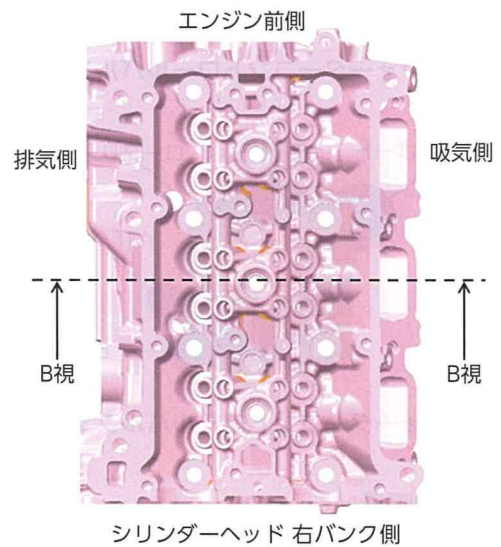


図 15 シリンダーヘッド右バンク側上面視

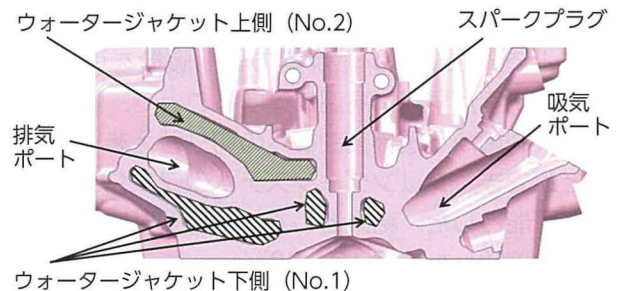


図 16 シリンダーヘッド右バンク側 (図 15 B 視)

3.5 WCV によるサーマルマネジメントの採用

本節ではサーマルマネジメントの詳細内容を述べる。

WCV (図 17) の内部構造を図 18 に記載する。WCV は車両のデバイス (ヒーターコア、ラジエータ、ATF/W) と接続するために、3つの出口 (ポート) を有している。冷却水を必要とするデバイスの通路のみを開口し、冷却水量をエンジンの運転状態や外気温、空調設定に応じてバルブでコントロールする。運転手のアクセル操作や、細かな水温変動

にも追従させる必要があるため、応答性の良いDCモーターを採用した。バルブは球面ロータリーバルブを使用し、DCモーターで回転させる構造とした。

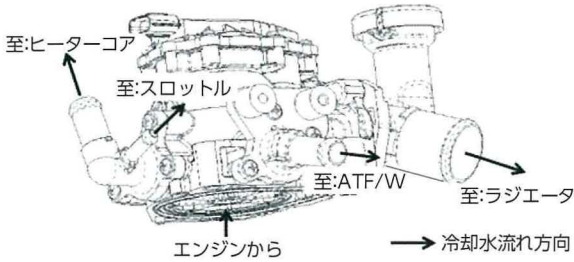


図 17 ウォーターコントロールバルブ 外観図

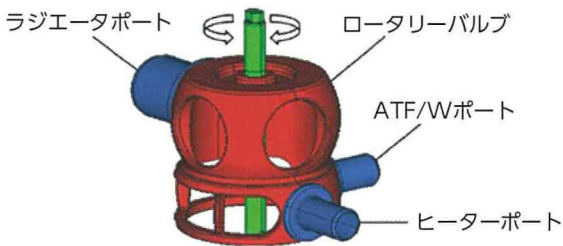


図 18 ウォーターコントロールバルブ 内部構造物

3.5.1 早期暖機

暖機初期は冷却水流路を全て遮断し、水流れを無くすことで、熱マスを低減する。シリンダーヘッド、シリンダーブロック周りに熱を集中させ、更にウォータージャケット壁面近傍の熱流束を低下させることで、エンジン燃焼室の早期暖機を可能とした。燃焼室が早期に高温に達することで、燃料噴射と点火制御から暖機後制御への切り替えを早くすることができ、シリンダーシステムのフリクション低減を可能とした。結果として、早期暖機による燃費向上を確認した (図 19, 20)。

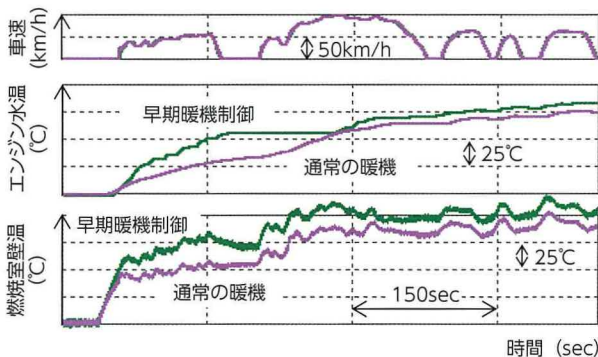


図 19 エンジンの早期暖機効果

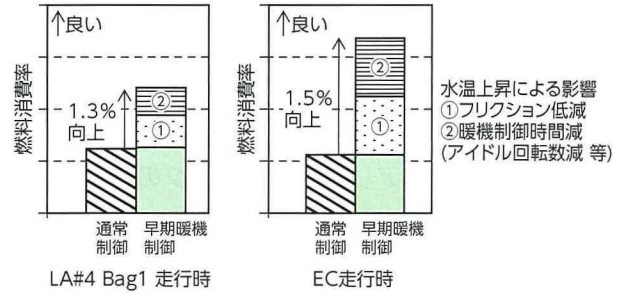


図 20 早期暖機制御による燃料消費率向上

また、水止め時は従来の出口水温センサ位置では感温できないため、シリンダーヘッド部に水温センサを追加 (位置は図 2 に記載) することで、燃焼室壁温に応じたエンジン制御を実現した。

3.5.2 高水温化

暖機後の軽・中負荷域は、ラジエータ冷却水流量を絞り、ラジエータ放熱量を抑える制御を採用した。水温・燃焼室壁温を高温化することで、フリクションを低減し、燃費が向上した。

3.5.3 低水温化

暖機後の高負荷域は、ラジエータ冷却水流量を増やし、ラジエータ放熱量を増やす制御を採用した。水温・燃焼室壁温を低温化することで、ノッキングを抑制し、点火時期を進角 (1.1CA/水温 15°C) した。結果として、動力性能と熱効率を向上した。

3.5.4 空調性能

エンジンの熱効率向上に伴い、軽負荷域の冷却損失が減り、ヒーターに与える熱量も減る。暖機初期の暖房要求時は、ヒーターコア経路のみを通水し、エンジンの熱をヒーターに集中することで、暖房性能の向上 (1.5°C) を実現した。

また、冷房最大要求時は、ヒーターコアへの通水を止めることで、エアコンの吹出し温を下げ、冷房性能の向上 (1.5°C) を実現した。

4 おわりに

新型 V6 3.5L 過給エンジンは、通水抵抗の低減による徹底した冷却性能の向上と、WCV を使ったサーマルマネジメント採用により、エンジン出力性能・燃費・空調性能を高次元で実現した。

4.1 エンジン出力性能向上対応

エンジン性能向上に対応させるため、ウォータージャケット形状変更⁽¹⁾を含む冷却水経路の改良を実施した。結果として、V8 4.6L-NA 比較で約 30%の通水抵抗低減を達成し、高出力化に耐える冷却性能を確保した。

4.2 燃費・空調性能の両立について

燃費とエンジン出力性能を両立するために、冷却経路のコンパクト化（冷却水容量の低減）と、冷却性能の高効率化（熱流束の向上）を行なった。WCV を使った冷却部品の一元配置と、WJS による排気側上部への熱流束向上により、V6 3.5L-NA 相当の冷却水容量で、V8 4.6L-NA 以上の出力性能を実現した。

また、車両の要求（暖房優先、冷房優先、燃費優先、出力優先）に応じたサーマルマネジメントを、WCV を使って実現した。水停止による暖機速度向上（燃費向上 1.5% (EC)）、ヒーターコア通水優先による暖房性能向上（1.5℃）、ヒーターコア通水停止による冷房性能向上（1.5℃）、ラジエータ通水量増によるノック緩和（エンジン出力向上）、ラジエータ通水量減によるフリクション低減（燃費向上）を実施し、性能・燃費・空調性能を高次元で実現した。

4.3 まとめ

本冷却システムを搭載したエンジンは、エンジン出力（310kW、エンジン回転数 6,000rpm）・燃費（V8 4.6L-NA 比 +9.5%）・空調性能（V8 4.6L-NA 同等以上）ともに開発目標をクリア⁽²⁾し、新型 V6 3.5L-T エンジンとして相応しい仕上がりに至った。

最後に、本冷却システムの開発にご支援、ご協力いただいた関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

■参考文献

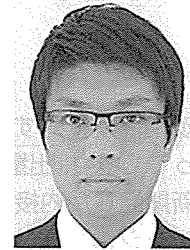
- (1) K. Sakata, Toda, Sakai, et al.: The New Toyota Inline 4 Cylinder 2.5L Gasoline Engine. JSAE Annual Congress Spring (2017)
- (2) A. Mori, Yamazaki, Nomura, et al.: The New Toyota V6 3.5L Turbocharged Gasoline Engine. 26th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology (2017)

本論文は、下記発表済み論文の転載である。
森下大作，河本，丹羽，久湊，山口ほか：新型 V6 気筒 3.5L 過給ガソリンエンジン 冷却システム開発. 自動車技術会学術講演会講演予稿集. P.240 - 245 (2017)

■著者



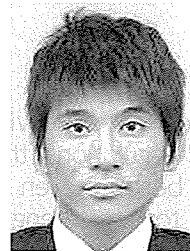
森下 大作



河本 直也



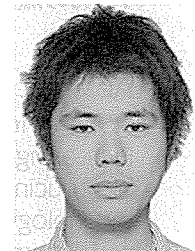
丹羽 雄祐



久湊 直人



山口 満



安藤 宏和

内接ギア式可変油圧オイルポンプを用いた 潤滑システムの開発

Development of Engine Lubrication System with New Internal
Gear Fully Variable Discharge Oil Pump

細木 貴之 *1
Takayuki Hosogi

山本 道隆 *2
Michitaka Yamamoto

渡邊 哲治 *3
Tetsuji Watanabe

西田 裕基 *4
Yuki Nishida

要旨

近年，地球環境問題に対する世界的な関心の高まりを背景に，法規制が強化されてきており，自動車メーカーにとって CO₂ 排出量を抑える低燃費技術の重要性は，これまで以上に増している。

本稿では，新開発した内接ギア式の電子制御式可変油圧オイルポンプ（F-VDOP）を用いた冷間時および暖機時のエンジンフリクションの低減技術について述べる。油圧フィードバック制御と組み合わせ、エンジン各部で要求される油圧を高応答で実現すると共にフリクション低減に成功し，LA#4 モードにて 1.2%の燃費向上を確認した。

Abstract

Over the past decades, faced with growing awareness of global environmental issues and increasingly stringent rules and regulations, the development of fuel efficient technologies capable of reducing CO₂ emissions has become even more important to automakers. This article describes technology that was developed to reduce engine friction under both cold and hot conditions using a new internal gear fully variable discharge oil pump (F-VDOP). In combination with hydraulic pressure feedback control, this newly developed oil pump reduces friction and achieves highly responsive oil pressure supply to each engine part, helping to improve fuel efficiency by 1.2% under the Los Angeles Driving Cycle #4 (LA#4).

キーワード 潤滑システム，燃費向上，油圧応答性，油圧フィードバック制御，元圧比

1 はじめに

近年，自動車メーカーにとって燃費向上は最重要課題の一つであり，特にパワートレーン分野ではハイブリッド車（HV）やプラグインハイブリッド車（PHV）といった電動化に向けた動きが加速し，主流となりつつある。しかし，HV や PHV では，従来のエンジンに比べて冷間始動から暖機されるまでの時間が長くなり，平均の油温が低下するため，エンジンオイル粘度に起因するエンジンフリクションが増加する。そのため，冷間時のエンジンフリクション低減の方策として，エンジン各部品へ供給する油圧を必要最低限にすることが重要である⁽¹⁾⁽²⁾。

競合他社ではベーン式の電子制御式可変油圧オイルポンプを採用している⁽³⁾。一方，これまでトヨタは内接ギア式の 2 段階可変油圧オイルポンプしか採

用しておらず，冷間時のエンジンフリクション低減が不十分であった⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

そこで今回，内接ギア式の電子制御式可変油圧オイルポンプ（F-VDOP）を新規に開発した。従来，内接ギア式は全効率に劣ると判断されてきたが⁽⁶⁾⁽⁷⁾，新開発の歯型ロータの採用により，容積効率と機械効率を共に改良することができ，ベーン式を上回る全効率を確認できた⁽⁸⁾。

本稿では，新開発の歯型ロータを用いた内接ギア式の F-VDOP を TNGA (Toyota New Global Architecture) エンジン (2.5L) に搭載し，燃費効果の検証を実施した。冷間時から低油圧状態に制御し，かつ油圧制御によるオイルジェットの ON/OFF の切換え制御を同時に組み合わせることによって，LA#4 モードにて 1.2%の燃費向上を得た。

*1 パワートレーンカンパニー 第 2 電動パワートレシステム開発部

*2 ユニット部品調達部

*3 パワートレーンカンパニー エンジン設計部

*4 アイシン精機 (株)

2 新開発可変油圧システムの狙い

これまで可変油圧システムには、メカ式可変油圧オイルポンプ (M-VDOP) および、電子制御式2段切換えオイルポンプ (S-VDOP) を採用してきたが、両オイルポンプ共に下記二点の問題点を有している。一点目は、油圧フィードバック制御ではないため、予め潤滑系部品の公差を考慮し、エンジン各部の必要最低限の油圧よりもやや高めに制御油圧を決定しなければならない点である (図1)。

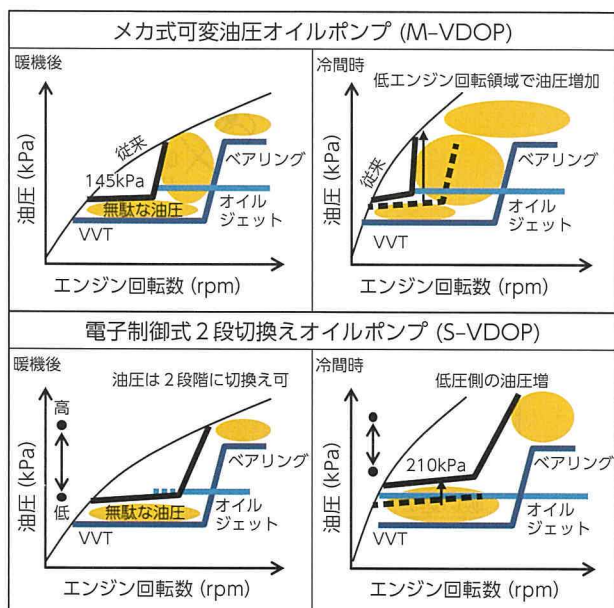


図1 M-VDOP および S-VDOP の油圧制御範囲

二点目は、リリーフバルブの ON/OFF 切換えにより油圧を制御するため、油圧が高い冷間時では十分に油圧を低下させられない点である。そのため、冷間時のエンジンの暖機性向上を狙いとしたオイルジェットを停止させるためには、別途スイッチ弁を設けるか、オイルジェットの開弁圧を高く設定する必要がある。開弁圧を上げると、高油温かつ低エンジン回転数の条件でオイルジェットを噴射できなくなり、耐ノック性が損なわれるため、HV や PHV で主流の高圧縮比エンジンに対応した潤滑システムとは言えない。

上記に対し、今回開発した F-VDOP および潤滑システムでは、油圧フィードバック制御を用いて部品公差の影響を最小限に抑えた。同時に目標油圧に追従させる制御が可能のため、必要最低限レベルの油圧で制御し、エンジンフリクション低減を図った (図2)。

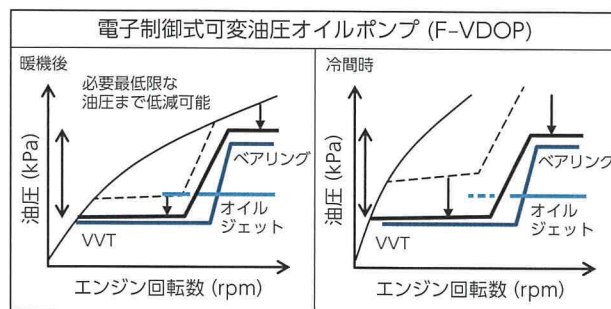


図2 F-VDOP の油圧制御範囲

油圧フィードバック制御を開始する油温は、低油圧下での軸受の信頼性を考慮し、 -10°C を目標に置いた。目標メインギャラリ油圧は、主に VVT (可変バルブタイミング)、軸受の信頼性を考慮し、 100kPa とした。なお、F-VDOP 単体の目標油圧は、オイルフィルタ圧損分を考慮し、 125kPa 以下とした。また、油圧制御の応答性は、マニュアルトランスミッションのシフトチェンジなどによるエンジン回転数の急低下時でも即時に必要な油圧を確保できるように、 0.4sec 以下を目指した (表1)。オイルジェット開弁圧は 170kPa と設定し、オイルジェットを噴射可能な最低エンジン回転数は $1,400\text{rpm}$ (油温 90°C) とした。

表1 F-VDOP の開発目標値

オイル: 0W-16 エンジン回転数: 1,600rpm			F-VDOP (新)	S-VDOP
目標油圧 (メインギャラリ)	(kPa)	油温 ($^{\circ}\text{C}$)	100	-
		-10		210
		20		145
目標油圧 (ポンプ吐出口)	(kPa)	油温 ($^{\circ}\text{C}$)	125	-
		-10		-
		20		-
油圧応答時定数	(sec)	油温 ($^{\circ}\text{C}$)	0.4	-
		-10		0.6
		20		0.2
オイルジェット開弁圧 (kPa)			170	200
オイルジェット開始 エンジン回転数	(rpm)	油温 ($^{\circ}\text{C}$)	90	1,400
				2,200

3 可変油圧システムの開発

3.1 油圧制御システムの概要

油圧の制御手法は、油圧センサ、エンジンコントロールユニット (ECU) およびオイルコントロールバルブ (OCV) を用いた油圧フィードバック方

式を採用した。油圧は油圧センサ出力値と目標油圧の差分に応じて、OCV 指示電流を変化させて制御する。

OCV 指示電流が 0.1A の時は OCV は閉じており、オイルポンプ吐出圧は最大となる。OCV 指示電流の増加に伴い OCV 開度は大きくなり、油圧は徐々に低下する (図 3)。

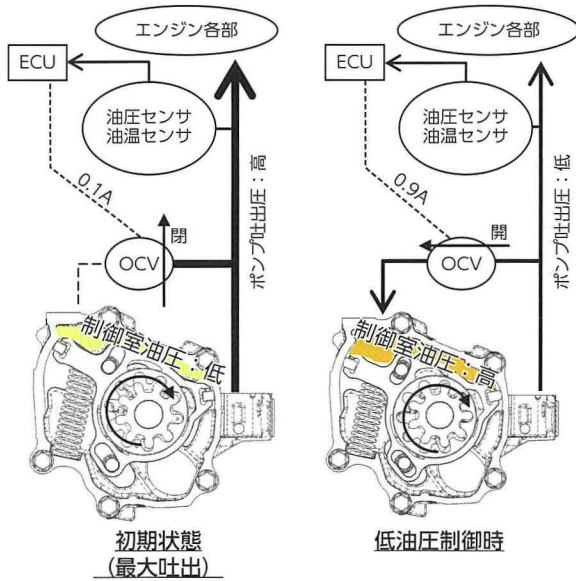


図 3 油圧制御システムの全体図

3.2 F-VDOP の内部構造

構成部品は、従来の内接ギア式容量固定式オイルポンプに対し 7 要素 (図 4 下線部) を追加している。

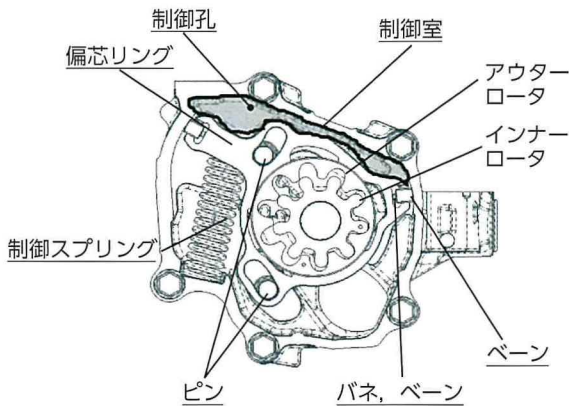


図 4 F-VDOP の構成部品

初期状態 (最大吐出時) では、吸い込み部で歯間にオイルを充填し、締め切り部を通過させた後、吐出ポートに吐出する (図 5)。

油圧の変化は、ハウジングの締め切り部を通過する時のインナーロータとアウターロータにより形成される容積を変化させて実現する (図 6)。インナーロータに対し、アウターロータの偏芯角度をずらして最大容積部を回転させ、締め切り部を通過する容積を変化させる。

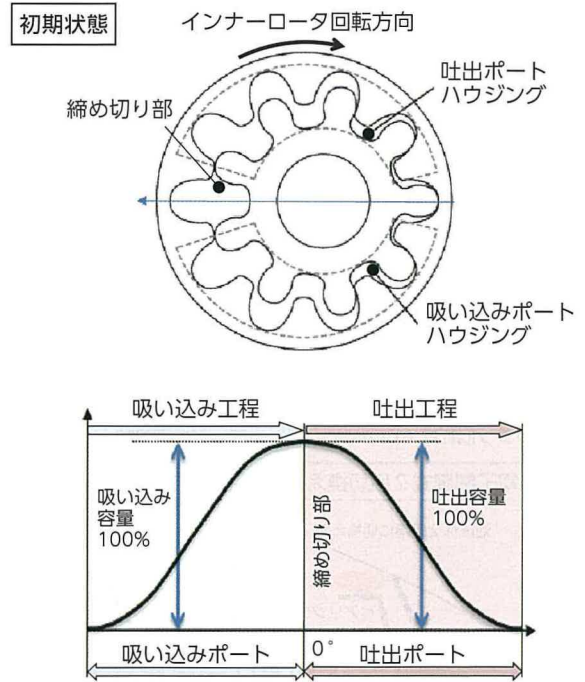


図 5 初期状態のポンピング工程

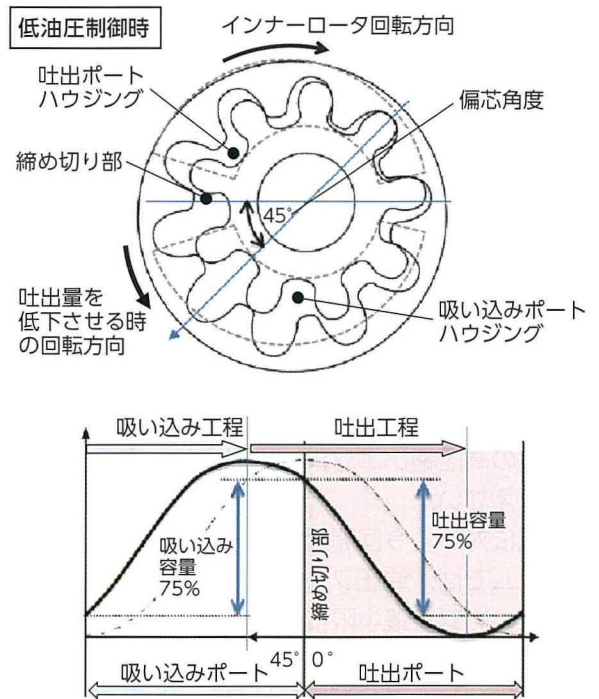


図 6 低油圧制御時のポンピング工程

アウターロータの偏芯角度の動きは、アウターロータの外周でロータを保持している偏芯リングにて行う(図7)。偏芯リングは2ヶ所の規制ピンにより軌跡を規定されており、初期状態では制御スプリングによってポンプ上方に固定されている。偏芯リング上方の制御室にオイルが充填されると、制御室内の油圧が上昇し、制御スプリングから受ける反力(Fspr)および歯間内圧(Frot)に対して、制御室からの受圧力(Fcon)が勝ると偏芯リングが動き始め、吐出圧が低下する。

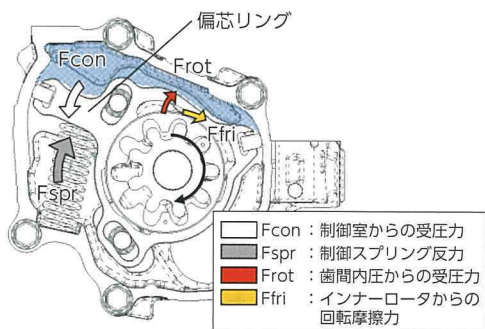


図7 ポンプ内の各部に働く力

オイルポンプ吐出圧を上昇させる際は、制御室内に設けた制御孔から制御室内のオイルを抜いて、制御室内の圧力を低下させ、制御スプリングの力でアウターロータの偏芯角度を戻す。制御室内の油圧を抜く手法は、OCVのドレインポートを用いる方法も検討したが、制御室からOCV間の油路圧損の影響によって制御室の油圧低下速度が遅くなり、メインギャラリ油圧の上昇遅れに繋がることを懸念し、採用を見送った。

3.3 油圧特性の設計指標

オイルポンプ吐出圧と制御室圧の比率を元圧比とおき、油圧特性の設計指標として用いた。

$$\text{元圧比 (\%)} = \frac{\text{制御室圧 (kPa)}}{\text{オイルポンプ吐出圧 (kPa)}}$$

図8に元圧比に対するオイルポンプ吐出圧の特性を示す。ポンプ単体の目標吐出圧125kPaを達成するには、70%以上の元圧比が必要であることが分かる。すなわち、オイルポンプ吐出口から制御室間(OCV含む)の圧力損失が30%以上の場合は、メインギャラリ油圧を100kPa以下に低下させることはできない。そのため、オイルポンプ吐出口から制御室間の回路設計は、30%以下の圧損を目標値とした。F-VDOP単体の目標吐出圧125kPaを更に下げることが可能だが、制御スプリング力や制

御孔径を縮小する必要があるため、昇圧時の応答性が損なわれる背反がある。そのため、油圧応答性と油圧低減代のバランスを鑑みて諸元を選定した。

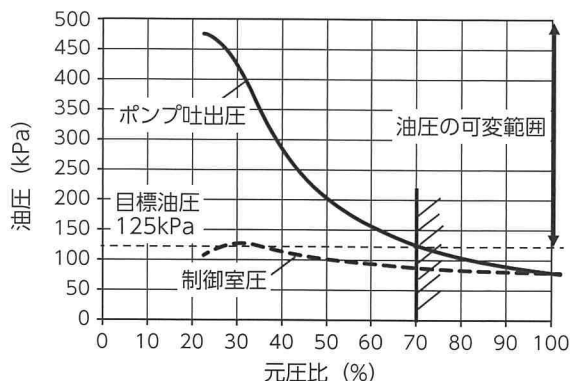


図8 元圧比とポンプ吐出圧の特性 (1,600rpm, 油温 20℃)

3.4 F-VDOP 単体の油圧応答性

制御スプリング力、制御孔径、偏芯リング形状を最適化し、油圧応答性の達成を目指した。油圧応答性は、油圧フィードバック制御を用いる本システムにとって、エンジン回転数低下時の急激な油圧低下を回避し、エンジンを保護するために重要な要素の一つである。

図9に応答時定数の結果を示す。油圧を120kPaから200kPaまで上昇させた時の応答時定数は0.17secとなり、目標の0.4secを満足することを確認できた。

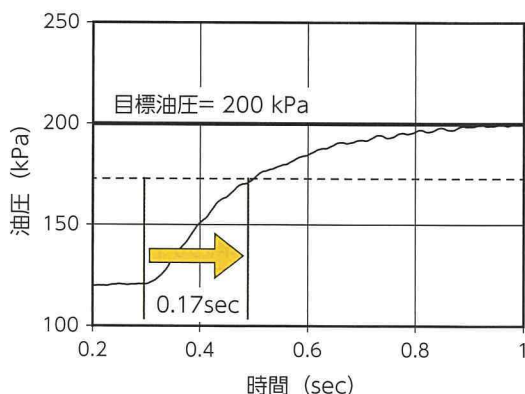


図9 油圧応答時定数の確認結果 (1,600rpm, 油温 20℃)

3.5 搭載レイアウト

F-VDOPの搭載位置はエンジン下部に配置し、チェーン駆動とした。間欠運転を多用するHVも見据えて常時油没させており、間欠始動後の油圧上昇速度を早めている(図10)。

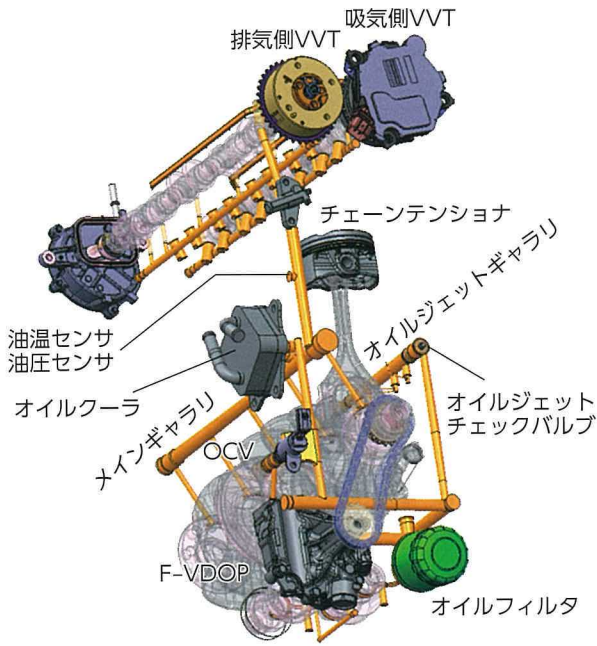


図 10 搭載レイアウト

油圧センサは、油圧応答性が必要とされるデバイスの近傍に搭載するレイアウト思想に基づいてVVT近傍に搭載した。また、軸受やチェーンテンショナなどのように、油圧の要求が高い部品は圧損の低い回路内に集約した(図 11)。

F-VDOP から OCV 間および、OCV から制御室間にはデバイスを設置せず、圧損を下げるよう配慮した。特にオイルクーラなど、圧損が大きく、車両の仕向けにより搭載有無が異なる部品を上記の回路内に搭載した場合、最低油圧が上がることに加え、制御特性を見直す必要が生じるため、回路外に搭載した。

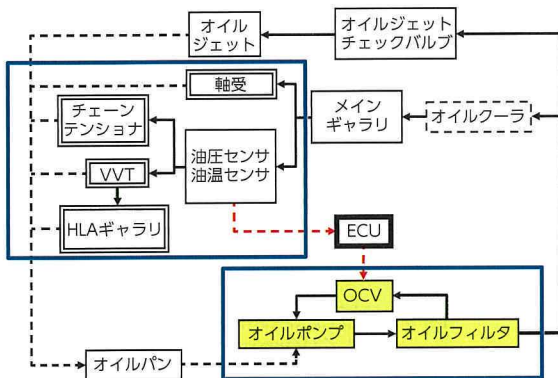


図 11 油路全体図

3.6 F-VDOP 単体特性まとめ

F-VDOP 単体の開発結果を表 2 に示す。油温 -10°C では、目標油圧を満足できなかったが、影響が限定的であり、かつ冷間から暖機後の全体的な油圧応答性を考慮して仕様を決定した。

表 2 F-VDOP 単体の開発結果

オイル：0W-16 エンジン回転数：1,600rpm			目標値	結果	
油圧 (ポンプ吐出口)	(kPa)	油温 ($^{\circ}\text{C}$)	125	-10	177
		20		111	
		80		80	
油圧応答時定数	(sec)	油温 ($^{\circ}\text{C}$)	0.4	-10	0.3
		20		0.17	
		80		0.24	
オイルジェット開弁圧 (kPa)			170	170	

4 エンジンを用いた評価結果

4.1 エンジン各部の油圧確認

表 3 に示した TNGA エンジンで実機評価を行った。SAE 0W-16 の低粘度エンジンオイルを使用し、エンジン回転数 2,000rpm、油温 20°C の条件でメインギヤラリ油圧および、油路各部の圧損が狙い通り実現できているか検証試験を実施した。結果を図 12 に示す。オイルフィルタの圧損は 29%に抑えられ、元圧比は 71%確保できており、開発目標を満足することができた。メインギヤラリ油圧は 100kPa を下回り、オイルジェット停止も確認できた。

表 3 TNGA エンジン諸元

	TNGA2.5 (F-VDOP)	2AR-FE (M-VDOP)
排気量 (cc)	2,487	2,494
気筒配列	L4	L4
ボア径 × ストローク (mm)	$\phi 87.5 \times 103.4$	$\phi 90 \times 98$
圧縮比	13	10.4
最高出力 (kW)	151/6,600	132.7/6,000
最大トルク (Nm)	250/5,000	230.5/4,100
潤滑油	0W-16	0W-20
オイルポンプ 諸元	容量 (cc/rev)	18
	駆動方式	チェーン駆動
オイルジェット開弁圧 (kPa)	170	180

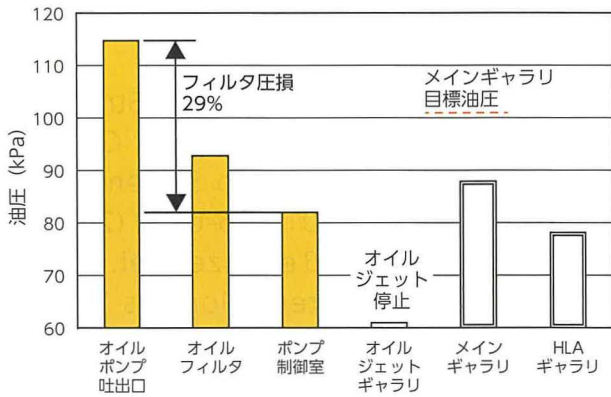


図 12 エンジン各部の油圧確認結果 (2,000rpm, 油温 20°C)

4.2 油圧制御性の確認

エンジン実機の油圧応答性の評価は、マニュアルトランスミッションでのシフトチェンジによるエンジン回転数の急激な低下を想定し、エンジン回転数を 2,000rpm から 1,400rpm まで 0.3 秒間で低下させた条件で実施した。計算上はエンジン回転数の低下に伴い、油圧は約 30% 低下するが、油圧フィードバック制御の最適化によって油圧低下は 12% に抑えることができた (図 13)。

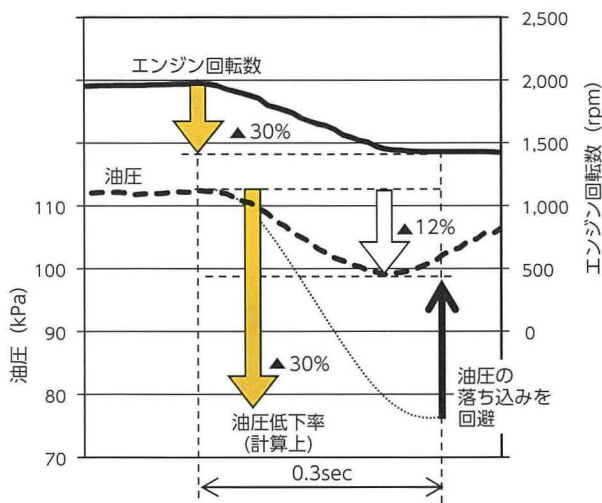


図 13 油圧制御性の確認結果

4.3 エンジンフリクションの計測結果

図 14 は、エンジン回転数 2,000rpm、油温 80°C の条件で計測した、メインギャラリー油圧に対するエンジンフリクションの低減効果である。メインギャラリー油圧を約 350kPa から 100kPa まで低

下させた場合、エンジンフリクションが 1.4Nm 低減することを確認した。低減効果は飽和することなく、メインギャラリー油圧に対して、ほぼ一次比例の効果があることが分かった。

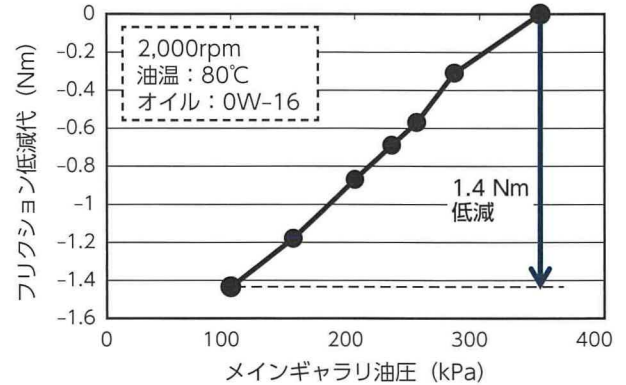


図 14 エンジンフリクションの低減効果

4.4 実車における燃費効果

LA#4 モード (COLD 試験) を走行時の油温 40°C および、80°C の領域における油圧低下代の結果を図 15、16 に示す。図内のハッチング部は、従来のオイルポンプに対する油圧低下代である。実車においても各 부품の要求油圧を満足する油圧制御ができており、本システムにて 1.2% の燃費向上を確認できた。

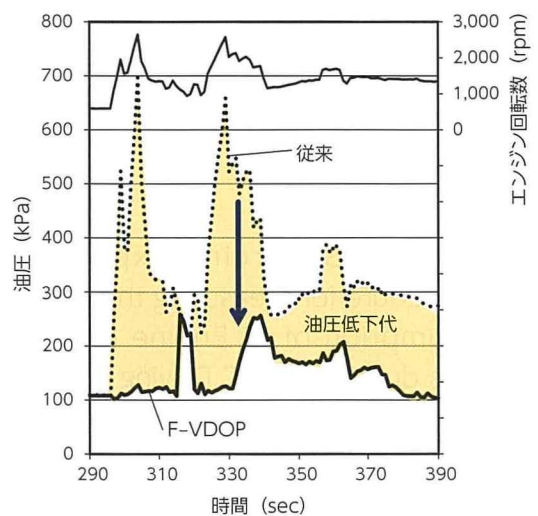


図 15 F-VDOP の油圧低下代 (油温 40°C)

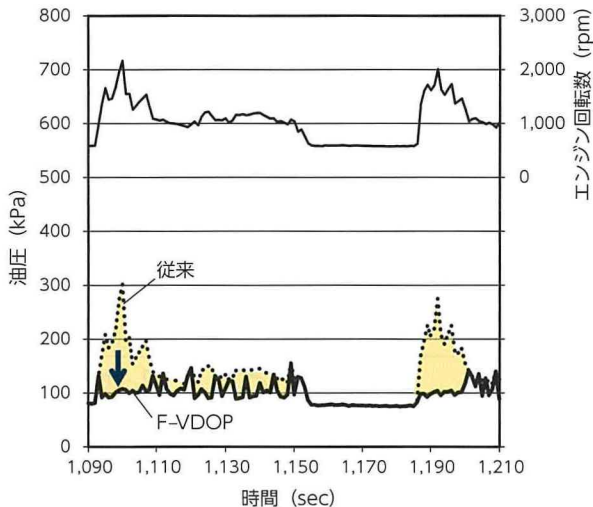


図 16 F-VDOP の油圧低下代 (油温 80℃)

5 おわりに

新開発の F-VDOP と油圧制御によって、エンジンの燃費改善と信頼性確保の両立を実現できた。

- (1) 油温 -10°C から油圧の制御が可能となり、暖機後のみならず、冷間時のエンジンフリクションを低減できた。
- (2) TNGA エンジン (2.5L) にて、LA#4 モード走行時の燃費を 1.2% 向上できた。

最後に、本システムの開発と製品化にあたり、多大なご尽力を頂いた関係各社の皆様に深く感謝の意を表す。

■参考文献

- (1) M. Rundo, Squarcini: Experimental Procedure for Measuring the Energy Consumption of IC Engine Lubricating Pumps during a NEDC Driving Cycle. SAE Technical Paper 2009-01-1919 (2009)
- (2) P. J. Shayler, Cheng, Li, et al.: A Modified Oil Lubrication System with Flow Control to Reduce Crankshaft Bearing Friction in a Litre 4 Cylinder Diesel Engine. SAE Technical paper 2016-01-1045 (2016)
- (3) F. Toyoda, Kobayashi, Miura, et al.: Development of Variable Discharge Oil pump. SAE Technical paper 2008-01-0087 (2008)
- (4) T. Arata, Novi, Ariga, et al.: Development of a Two-Stage Variable Displacement

Vane Oil Pump. SAE Technical Paper 2012-01-0408 (2012)

- (5) J. Meira, Filho, Melo, et al.: Strategies for Energy Savings with Use of Constant and Variable Oil Pump Systems. SAE Technical Paper 2011-36-0150 (2011)
- (6) J. Hadler, Neußer, Szengel, et al.: The new TSI. Internationales Wiener Motorensymposium (2012)
- (7) N. Ardey, Wichtl, Steinmayr, et al.: The New BMW 3-cylinder and 4-cylinder diesel engines with TwinPower Turbo technology. Internationales Wiener Motorensymposium (2014)
- (8) 西田裕基, 小野, 寺島, 豊田, 沼波: 連続可変容量オイルポンプの開発. 自動車技術会学術講演会予稿集. P.1942 - 1945 (2017)
- (9) A. De Vizio, Senatore, Buono, et al.: A Simulated Analysis of the Lubrication Circuit of an In-Line Twin Automotive Engine. SAE 2014 World Congress and Exhibition (2014)

本論文は、下記発行済み論文の転載である。

山本道隆, 細木, 渡邊, 西田: 内接ギア式可変油圧オイルポンプを用いた潤滑システムの開発. 自動車技術会学術講演会講演予稿集. P.1769 - 1774 (2017)

■著者



細木 貴之



山本 道隆



渡邊 哲治



西田 裕基

レーザクラッドバルブシート開発

Development of Laser-Clad Valve Seats

青山 宏典 ^{*1} Hironori Aoyama	宮良 直之 ^{*1} Naoyuki Miyara	杉山 夏樹 ^{*2} Natsuki Sugiyama
谷中 耕平 ^{*3} Kohei Yanaka	安藤 公彦 ^{*4} Kimihiro Ando	大島 正 ^{*5} Tadashi Oshima

要旨

レーザクラッドバルブシートは、シリンダヘッド上にバルブシートを直接肉盛り成型するトヨタ独自の技術である。直接溶着することで、一般的な焼結圧入シートと比べて、熱伝導性の向上による耐ノック性改善や、ポート周辺的设计自由度の向上により燃焼効率を改善できる。TNGA (Toyota New Global Architecture) エンジン群では、本技術の採用により強いタンブル流形成と相反する吸気抵抗低減を両立した革新的なヘッド設計を可能にした。その結果、世界最速燃焼を実現し、エンジンの熱効率と比出力を大幅に向上させた。本技術を世界標準採用するために、各国で普及が進む代替燃料に対応する耐摩耗性を有した新材料を開発した。併せて、省電力かつ設備信頼性の高い新工法を開発し、海外での生産を可能にした。

Abstract

Laser-clad valve seats are a unique technology developed by Toyota Motor Corporation in which wear-resistant alloy is directly deposited onto cylinder head valve seats. Compared with conventional press-fit sintered valve seats, this direct deposition process enhances knocking resistance by raising thermal conductivity, and improves combustion efficiency by increasing design flexibility around the ports. This technology has been adopted in the Toyota New Global Architecture (TNGA) engine series and enables an innovative cylinder head design that helps to improve the trade-off relationship between tumble flow and intake resistance by simultaneously generating intense tumble while reducing resistance. As a result, these laser-clad valve seats help to achieve the world's fastest combustion and greatly increase engine thermal efficiency and specific power. To enable the application of this technology as a global standard in Toyota's engine lineup, a new wear-resistant material was designed for use with alternative fuels, which are becoming more common around the world. In addition, a new energy-saving manufacturing process featuring highly reliable equipment was developed to facilitate deployment of this technology to production plants outside Japan.

キーワード レーザクラッド, バルブシート, 耐摩耗性, タンブル, 流量係数

1 はじめに

近年、地球環境保護の観点から、自動車の燃費向上に対する要求が一層高まっている。エンジンに関しては、熱効率の更なる向上に向けた取り組みが進められており、トヨタでは、ガソリン燃料種用高効率エンジン群 ESTEC (Economy with Superior Thermal Efficient Combustion) において、最高熱効率 38% を達成している。併せて、“走る楽しさ” を追求した高い動力性能も追及している。

このような背景の中、今後のトヨタの主力エンジンとなる TNGA (Toyota New Global

Architecture) 用エンジンは、世界最高水準の熱効率と比出力の両立を目標に開発された⁽¹⁾⁽²⁾(図 1)。性能実現には、強いタンブル流の形成と相反する吸気抵抗低減の両立による高速燃焼が必要となる。また、世界戦略エンジンとして、多様な燃料種や排気量に対しても共通設計で対応可能とするため、使用する部品には良好な生産性と様々な燃料種に対応可能な耐久性が求められる。これらの要求に応えるべく、レースエンジンで培ったレーザクラッドバルブシートを採用したポート設計技術を量産車へ展開し、世界最高水準のタンブル比 2.9、流量係数 0.49 の両立による高速燃焼を実現したことで、目標とする熱効率 40% 超と比出力 60kW/L を達成した。

本報では、高速燃焼実現のキー技術であるレーザクラッドバルブシートの TNGA 用エンジンへの

^{*1} パワートレーンカンパニー エンジン設計部

^{*2} パワートレーンカンパニー 生技開発部

^{*3} パワートレーンカンパニー 鍛圧・表改生技部

^{*4} 先進技術開発カンパニー 無機材料技術部

^{*5} (株) 豊田中央研究所

採用に向け、専用開発した高効率な新クラッド工法と、世界戦略エンジンとして対応可能な新材料の開発について報告する。

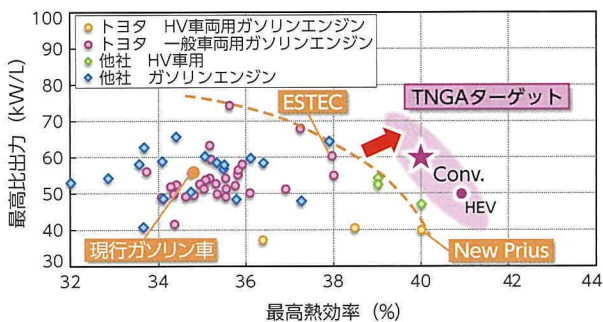


図1 最高熱効率と比出力の関係および開発目標

2 レーザクラッドバルブシートとは

高い耐摩耗性や耐熱性が求められるバルブシートには、鉄系焼結バルブシートを圧入する方法が広く普及している。トヨタでは、レーザクラッド法を用いてアルミ合金上に耐摩耗性を有する合金を直接肉盛する技術を開発し、1997年にZZ系エンジンへ採用した。本技術を用いることで、①バルブシートの小型化が可能となり、ポート口周辺の設計自由度の向上、②熱伝達の増加により、バルブ冷却能の向上が可能となる(図2)。

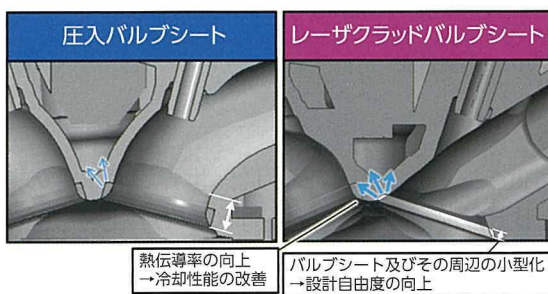


図2 バルブシートおよびポート形状の比較

一般的に、高速燃焼に必要なタンブルと、比出力向上に必要な流量係数は相反関係にある(図3)。そのため、高いタンブルと流量係数を両立するためには、吸気ポートの設計を一新する必要があった。図4に圧入バルブシートとレーザクラッドバルブシートを用いた時のポート形状と吸気流線を比較して示す。焼結バルブシートを圧入する従来方式では、シート保持に必要な肉厚を確保する必要があるので、ポート形状に制約があり、圧損が生じていた。レーザクラッドバルブシートの採用に

より吸気ポート形状を直線化することで、高い気流速度を維持したまま燃焼室に吸気を導入することが可能となった。また、ポート下面のスロート部で気流を剥離させ、逆タンブルを抑制することにより、同タンブル比に対する流量係数を20%以上向上させることが可能となった。

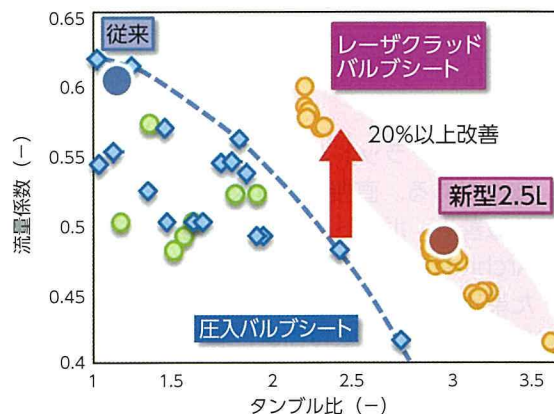


図3 タンブル比と流量係数の関係とレーザクラッドの採用による効果

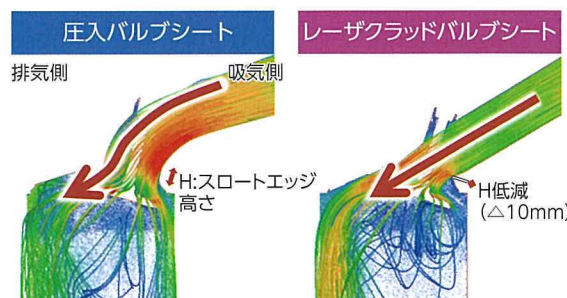


図4 バルブシートの違いによるポート形状および吸気流線の比較

3 グローバル展開に向けての課題

3.1 生産プロセス

レーザクラッドバルブシートの生産ラインは、1997年に下山工場に導入された⁽³⁾。ここでのプロセスには、CO₂レーザを使用したシリンダヘッド回転方式を採用していた。グローバル展開するためには、消費エネルギーの低減や設置スペースの削減という課題があった。そのため、このプロセスを一新した高効率なクラッド工法の開発が必要となった。

3.2 グローバル燃料対応

これまでのレーザクラッドバルブシートの量産実績は、国内モデルのみである。そのため、対象とする燃料種は、ガソリンのみであった。TNGA用エンジンへのレーザクラッドバルブシート採用課題

の1つとして、エタノール混合燃料への適応がある。環境保全の高まりにより各国でエタノールの混合が奨励されており、南米を中心に一般ガソリンに25%まで混合されている。そのため30%エタノール混合燃料（E30燃料）への適応を目標とした。

図5(A)に、ZZ系エンジンの市場想定パターン耐久試験における、燃料種の違いによる吸気バルブシートおよびバルブの摩耗量を比較して示す。E30燃料ではガソリンに比べてシート摩耗量が増加した。また図5(B)からわかるように、TNGAエンジンの高速燃焼では、摩耗環境はさらに厳しくなる。そのため、バルブシートにはこの使用環境に耐えうる耐摩耗性が必要となる。

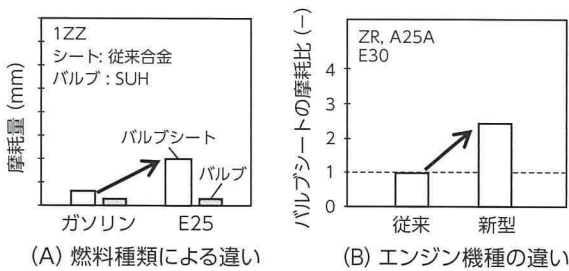


図5 市場模擬パターンにおけるエンジン耐久試験後のバルブシートとバルブの摩耗量

4 新クラッド工法の開発

消費エネルギーの低減と設置スペースの削減のため、熱源に、高効率かつ光学系の小型化が可能な半導体レーザと成形ビームを採用した。レーザ光・粉末・シールドガスを一体で供給可能な、同軸ノズルによる斜方向成形技術を開発し、シリンダヘッドに対してレーザ側を回転して肉盛りすることを可能にした。これにより消費エネルギー 1/5 以下、設置スペース 1/3 以下を実現した (図6, 表1)。

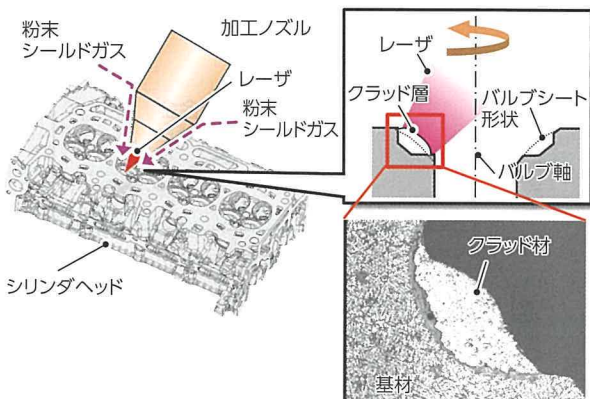


図6 レーザ回転型により高効率なバルブシート成形を実現した新クラッド工法

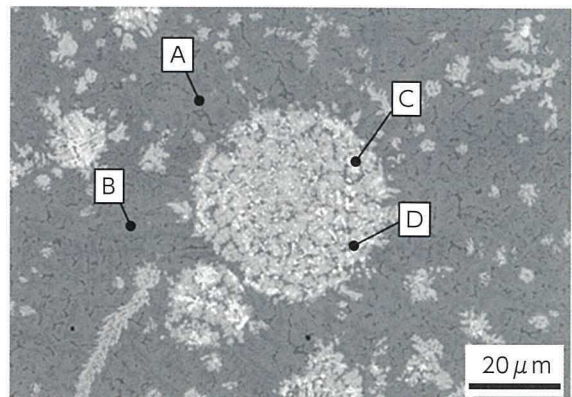
表1 新旧クラッド工法の比較

	従来	本技術
レーザ	CO ₂ +オンレーションビーム	LD +成型ビーム
プロセス	ワーク回転	ツール回転
電力消費量	1	0.17
設置スペース	1	0.3

5 新材料の開発

5.1 バルブシートに必要な金属組織

はじめに、ZZ系エンジンに採用していたレーザクラッドバルブシート用材料 (Cu-Ni-Co-Mo-Fe-Si-Cr 合金)⁽⁴⁾⁽⁵⁾ について説明する。この材料はCu-Co系をベースとした銅系合金である。アルミ合金への肉盛り性と耐熱性、機械的強度を有する銅系マトリクス中に、耐摩耗性を有する比較的粗大な球状硬質粒子 (Co-Mo-Si系 Laves 相) を分散させた複合組織を有する (図7)。



	マトリクス	硬質粒子
構成相	A [Cu-Ni-Co-Fe<S.S.> Co-Ni-Fe-Si<S.S.> B (Ni, Co, Fe) ₅ Si ₂	C (Co, Ni, Fe) ₃ Mo ₂ Si D Co-Ni-Fe-Si<S.S.>
機能	肉盛り性 強度 耐熱性	耐摩耗性

<S.S.>=Solid solution (固溶体)

図7 従来合金の微視組織

さらなる耐摩耗性向上のためには、

- ①硬質粒子体積率の増加
- ②硬質粒子の硬さの増大

が考えられる。高温すべり摩耗試験の結果、①②いづれにおいても耐摩耗性が向上したものの、肉盛り時に硬質粒子を起点とするビード割れ (ワレ) が発生した。そのため、従来合金では、これ以上の耐摩耗性向上と肉盛り性を両立することが困難であることがわかった。そこで、新合金の開発では、ベースとなる合金系を一新することにした。

5.2 二液相分離型基本成分の選定

新合金の開発にあたり、従来合金で得た耐摩耗性の向上指針のもと、耐ワレ性を改善するためには硬質粒子の改良が必要と考えた。また従来課題でもあった被削性についても再検討を行うこととした。

従来合金の複合組織は、水中の油滴のように2つの液相に分離する特殊な冶金現象によって形成されている(図8)。これは、レーザクラッド法の攪拌・急冷凝固(10³ K/sec)を活かした手法であり、新合金の開発もこの組織形成機構を踏襲した。

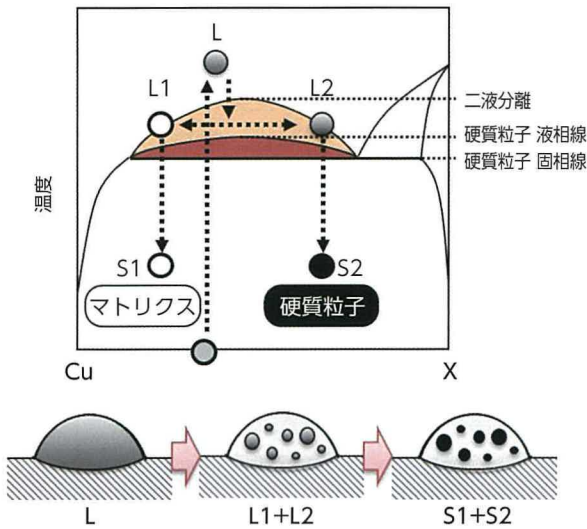


図8 偏晶反応系における二液相分離の模式図

銅系合金において二液相分離を起こす合金元素としてはPb, Tlなどの偏晶系が知られているが、これらは毒性・蒸気圧が高いなど粉末製造性あるいはレーザクラッド処理上好ましくないため除外した。

Cu-Co系, Cu-Fe系の状態図は類似した包晶系であるが、広い組成範囲に渡って液相線が水平に近い特徴を有し(図9)、熔融状態から急冷すると二液相分離を起こすとされている(5)。

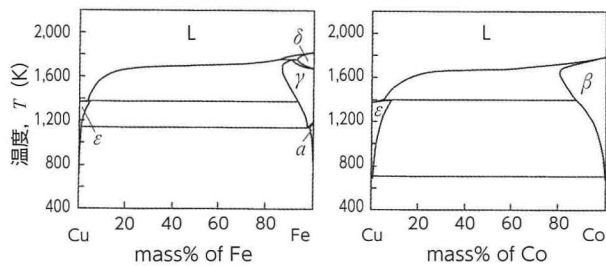


図9 Cu-Fe および Cu-Co の2元系状態図(6)

またCu-Fe系はCr, V, Siを加えたそれぞれの3元系において偏晶系に変化し、およそ1,500K~2,000Kの間で二液相分離を起こすとされている(7)(8)。そこで新合金の開発では、耐ワレ性と耐摩耗性の向上を目指し、Cu-Fe系をベースとして検討を進めた。

耐摩耗性向上に有効な硬質粒子には、耐熱鋼を強化する金属間化合物であるLaves相が有効と考え、Fe-Mo-Siから成るLaves相生成の可能性を3元系状態図(9)より確認し、Cu-Ni-Fe-Mo-Siを新合金の基本成分とし開発した。

その結果、新合金系においても、従来合金と同様、銅系マトリクス中に、より粗大な球状硬質粒子が分散した組織形成を実現した(写真1)。

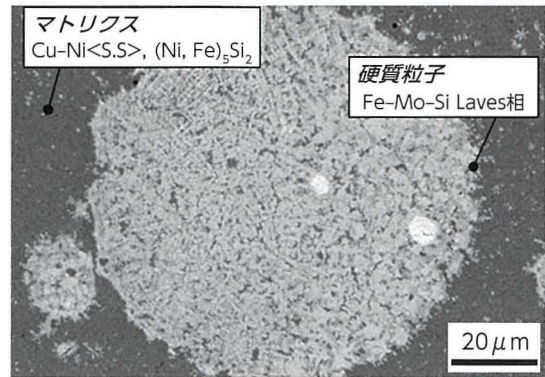


写真1 新合金(Cu-Ni-Fe-Mo-Si)の微視組織

図10に、硬質粒子体積率と弁座摩耗試験結果および肉盛り時のワレ発生との関係を示す。新合金系では高い硬質粒子体積率でもワレが生じず、従来合金に比べて耐摩耗性の向上が可能となった。一方で、硬質粒子が粗大なため、被削性の悪化が懸念された。

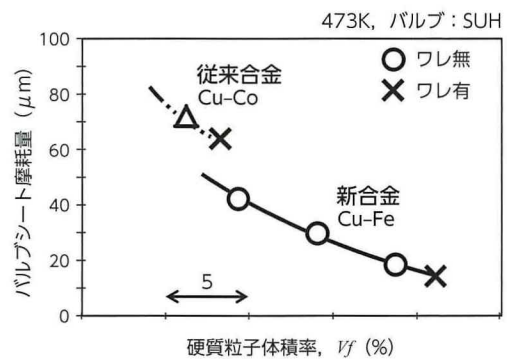


図10 従来合金および新合金の耐摩耗性と耐ワレ性の関係

5.3 硬質粒子微細化手法

被削性向上を目的に、以下の二つの手法で硬質粒子の微細化を検討した。

手法1：基本成分量の最適化

硬質粒子の量、分散度合い（粒子径）は二液相分離により生じる硬質相となる液相の分離化傾向（図8のL2）に相関があると考えられる。そこで二液相分離を促進するMo、Feと、それを抑制するNi、Siの添加量による制御を試みた。図11は、二液相分離を抑制するNi、Siを試行的に変量させた場合の最大硬質粒子径の関係を示している。Ni、Si量を増加させることにより、最大硬質粒径を小さくできる。最大硬質粒径を小さくしても耐摩耗性への影響が大きい硬質粒子の体積率は同程度であることを確認している。

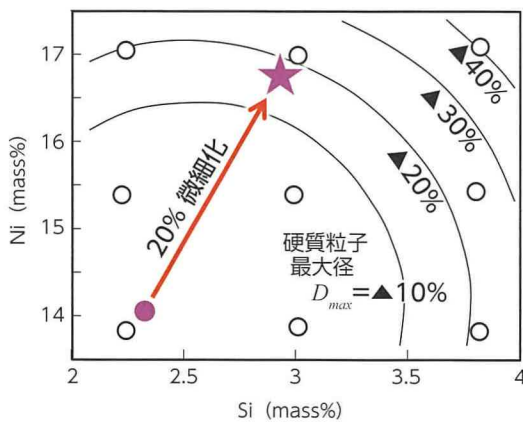


図11 硬質粒子最大径に及ぼすNiとSi添加の影響

手法2：微量元素の添加

先の二液相分離の抑制だけでは、成分上下限において硬質粒子最大径のバラつきが大きいことがわかった（図12）。そこで硬質粒子の微細均一化を目的に、合金元素の微量添加を検討した。添加元素には、レーザクラッド時の溶融温度が高いこと、粉末製造性（酸化・蒸気圧・揮発性）等から炭化物を検討し、生成傾向・比重・硬さなどから、NbCを選定した。

図12に、NbCの微量添加有無による硬質粒子径の比較を示す。NbCの微量添加により、硬質粒子径は微細化し、バラつきも低減した。

上記検討から、Cu-Ni-Fe-Mo-Si-Nb-Cを新合金の最終成分とすることで、硬質粒子サイズを制御した組織形成を図った（写真2）。

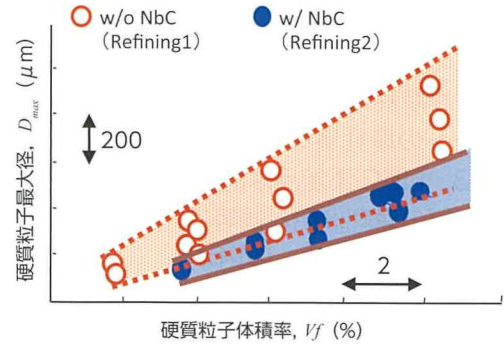


図12 新合金へのNbC添加有無による硬質粒子最大径と体積率の関係

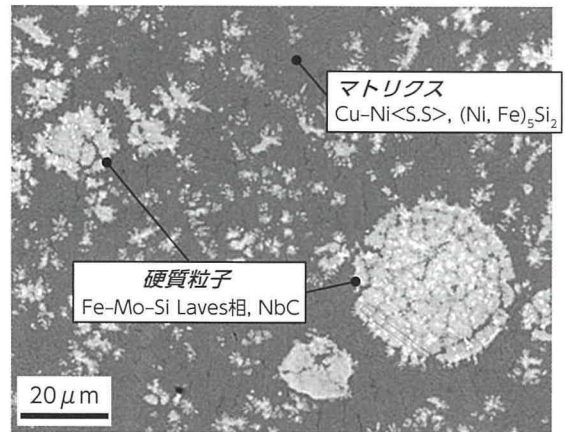


写真2 新合金の微視組織 (Cu-Ni-Fe-Mo-Si-Nb-C)

6 各特性評価

6.1 耐食性

エタノール燃料や低品位燃料の使用を想定し、凝縮水腐食について検討を行った。図13は新合金と従来合金および鉄系焼結材の凝縮水に対する耐食性を示している。銅系合金である新合金および従来合金は、鉄系合金である焼結材に比べ、高い耐食性を有することを確認した。

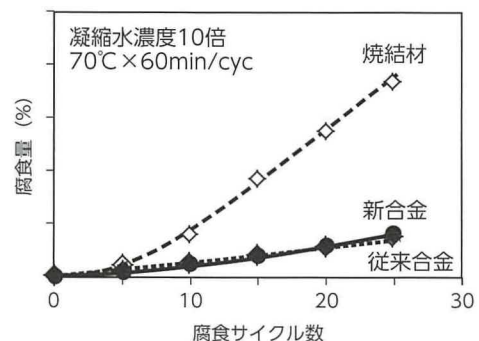


図13 凝縮水腐食に対する耐食性試験結果

6.2 耐摩耗試性

新合金のNbC添加有無，従来合金の計3種について，弁座摩耗特性評価を実施した．その結果，バルブシートの摩耗量は，NbC添加無品で従来合金の約2/3，NbC添加品は約1/2まで減少した．また，バルブの摩耗は殆ど同等で，相手攻撃性に問題が無いことも確認した（図14）．

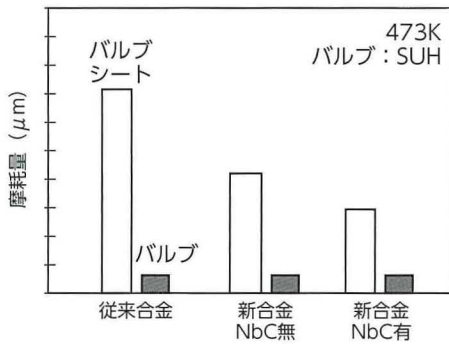


図14 弁座摩耗試験における耐摩耗性試験結果

6.3 被削性

耐摩耗性と被削性は相反関係にある．そこで，硬質粒子径が被削性に与える影響について検討した．

図15に，切削抵抗に及ぼす硬質粒子径の影響を示す．マトリクスの切削抵抗はほぼ一定であるのに対し，硬質粒子径が大きくなるとともに切削抵抗は増加する．また写真3に示すように切削後の刃具にチッピングを生じていることから，大きな硬質粒子を切削する時の切削抵抗の増大が，刃具摩耗の増加に影響していると考えられる．そこで先に述べた微細化手法を用いて，硬質粒子のサイズを制御することで，CuLS50と同等の被削性を得た（図16）．

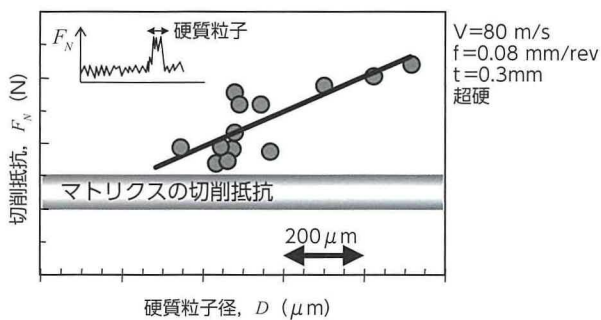


図15 単体被削性試験における硬質粒子径と切削抵抗の関係

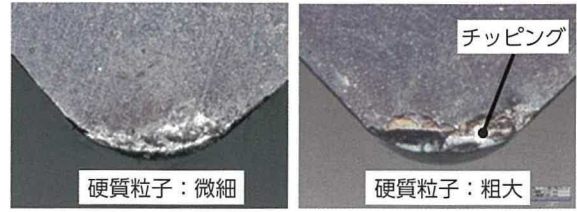


写真3 単体被削性試験後の刃具の様子

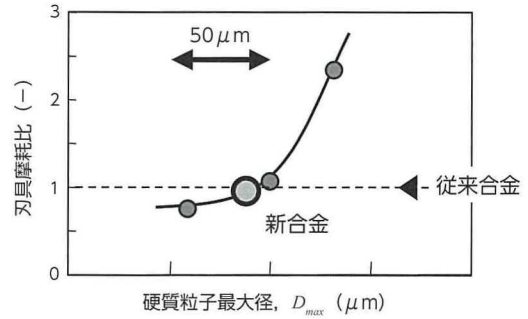


図16 実機被削性試験における硬質粒子最大径と刃具摩耗量の関係

7 エンジン実機耐久試験評価

最終組成にて，新型エンジンにおける市場想定パターン耐久試験を実施した．図17に各燃料におけるシートおよびバルブ摩耗量を示す．いずれの燃料に対しても摩耗量は少なく，試験後のバルブシートとバルブの表面のダメージが無いことを確認した（写真4）．

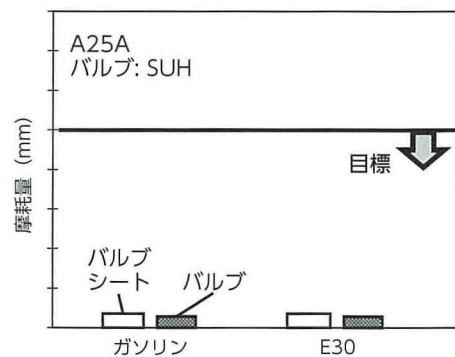
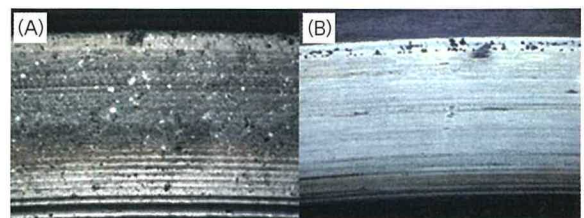


図17 新型エンジンのエンジン耐久試験結果



加工による線条痕が残るほど摩耗は少ない

写真4 E30燃料でのエンジン耐久試験後の (A)バルブシートおよび (B)バルブの様子

8 おわりに

高効率な新クラッド工法と、グローバル燃料種環境下での性能を有する新合金 Cu-Ni-Fe-Mo-Si-Nb-C の開発により TNGA 用エンジンへの採用課題をクリアした。

- ・半導体レーザーの採用およびレーザー光・粉末・シールドガスを一体で供給可能な同軸ノズルによる斜方向成形技術を開発し、小型かつエネルギー効率に優れたレーザー回転型クラッドシステムを確立した。
- ・Cu-Fe 系を基本合金とした合金設計と、硬質粒子の分散を制御することによって肉盛り時の耐ワレ性を改善した。
- ・グローバル燃料に対応可能な耐摩耗性と良好な被削性を実現した。
- ・合金成分の最適化により、硬質粒子の微細分散を可能とし、良好な被削性を確保した。
- ・レーザークラッドバルブシートを採用した理想的な吸気ポート形状の設計により、世界最高水準のタンブル比 2.9、流量係数 0.49 を実現し、目標とする熱効率 40% 超と比出力 60kW/L を達成した。

レーザークラッドバルブシートおよび CuLS11 と命名した新クラッド用材料は、高速燃焼実現の基盤技術として TNGA エンジン群に広く採用を予定している。

最後に、レーザークラッドバルブシート材料設計・評価にご協力いただいた豊田中央研究所の皆様へ深謝の意を表す。

■参考文献

- (1) E. Murase, Shimizu: Innovative Gasoline Combustion Concepts for Toyota New Global Architecture. 25th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology (2016)
- (2) M. Hakariya, Toda, Sakai: The New Toyota Inline 4-Cylinder 2.5L Gasoline Engine. SAE Technical Paper 2017-01-1021 (2017)
- (3) A. Sato: Development of Mass Production Technology for Laser-Clad Valve Seat, GPC (2000). Vol.16, pp. 92 - 101
- (4) M. Kawasaki, Takase, Kato, et al.: Development of Engine Valve Seats Directly Deposited onto Aluminum

Cylinder Head by Laser Cladding Process. SAE Technical Paper 920571 (1992)

- (5) J. He, Zhao, Wang, et al.: Microstructure development in finely atomized droplets of copper-iron alloys. Metallurgical and Materials Transactions A, Vol.36, (2005) pp. 2449 - 2454
- (6) 田中浩司, 斎藤, 志村, 森, 河崎ほか: アルミ合金にレーザー肉盛り可能なバルブシート用銅基複合材料の開発. 日本金属学会誌, 第 57 巻, 第 10 号, P.1114 - 1122 (1993)
- (7) C. P. Wang, Liu, Ohnuma, et al.: Phase Equilibria in Fe-Cu-X (X: Co, Cr, Si, V) Ternary Systems. Journal of Phase Equilibria, Vol.23, No. 3 (2002) pp. 236 - 245
- (8) C. P. Wang, Liu, Ohnuma, et al.: Formation of Immiscible Alloy Powders with Egg-Type Microstructure. Science, Vol. 297, Issue 5583 (2002) pp. 990 - 993
- (9) Handbook of Ternary Alloy Phase Diagrams. ASM International (1995) pp. 10487

本論文は、下記発表済み論文の転載である。

青山宏典, 河崎, 宮良, 杉山, 安藤ほか: レーザクラッドバルブシート開発. 自動車技術会学術講演会講演予稿集. P.1854 - 1859 (2017)

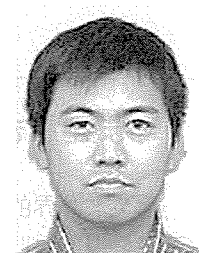
■著者



青山 宏典



宮良 直之



杉山 夏樹



谷中 耕平



安藤 公彦



大島 正

新 FF ダイレクトシフト 8 速自動変速機の開発

Development of New Front-Wheel Drive Direct-Shift 8-Speed Automatic Transaxle

今西 亮平 *1 Ryohei Imanishi	草本 大輔 *2 Daisuke Kusamoto	東井 浩臣 *2 Hiroomi Toi
池 宣和 *3 Nobukazu Ike	安田 崇 *3 Takashi Yasuda	伊藤 正泰 *3 Masahiro Ito

要旨

3.5L および 2.5L クラスの FF 車向けに、新ダイレクトシフト 8 速自動変速機（新 8AT）を開発した。新 8AT は、従来の 6AT と同等の搭載性を保ち、運動性能向上と燃費向上を達成するため、ギヤトレーンを新設計し、先進技術を織り込んだ。

本稿は以下の 3 つの重点項目について述べる。

1) 高効率・低燃費 2) ダイレクトかつ滑らかな変速性能 3) 軽量・コンパクト

特に 1, 2 に大きく寄与するロックアップ領域の拡大の背反として、高ギヤ段でのこもり音が課題となった。その解決手段として、C1 ドラムと Rr サンギヤ間にトレランスリングを設定し、C1 クラッチをイナーシャとして有効活用して、こもり音を改善した。3 は、部品の一体化・材料置換により、軽量化・全長短縮を実現した。

Abstract

A new direct-shift 8-speed automatic transaxle has been developed for 3.5-liter and 2.5-liter class front-wheel drive (FWD) vehicles. To maintain the excellent mountability of the previous 6-speed transaxle while enhancing both vehicle dynamics and fuel efficiency, the new transaxle features a completely redesigned gear train as well as various advanced technologies. This article focuses on the following three key development targets: 1) enhancing efficiency and fuel efficiency, 2) achieving direct and smooth shifting performance, and 3) reducing weight and size. One of the main issues was booming noise in high gear stages, which has a trade-off relationship with the enlarged lock-up area adopted to help achieve targets 1) and 2). Booming noise was reduced by setting a tolerance ring between the C1 drum and the rear sun gear to utilize the C1 clutch effectively as inertia. Target 3) was achieved by integrating parts and adopting different materials to reduce the weight and shorten the overall length of the transaxle.

キーワード TNGA, 自動変速機, 燃費向上, 変速性能, ロックアップ, こもり音, 軽量化

1 まえがき

近年、世界的な環境問題への意識の高まりから、CO₂ 排出量削減のため、自動車の燃費向上への要求は高まっている。日欧米を代表する先進国では、ハイブリッド車の普及、さらにゼロエミッション車である電気自動車の開発が活発に進められている。

一方、グローバルな視点では、内燃機関車が大半を占める状況は当面変わらないと予測され、従来型パワートレーンに対する技術開発は、その普及力の高さから CO₂ 削減効果が期待される。今回、幅広いトルク帯をカバーした新ダイレクトシフト 8 速自

動変速機（新 8AT）である、3.5L 向け UA80 ⁽¹⁾ 及び 2.5L 向け UB80 を開発し、燃費向上による CO₂ 排出量削減への貢献を目指す。本稿では、新 8AT の概要と採用技術を紹介する。

2 開発の方針

トヨタは競争力強化のため、商品力の飛躍的向上と原価低減、生産性向上を両立する新しいクルマづくりの方針「Toyota New Global Architecture (TNGA)」に取り組んでいる。TNGA は、クルマの骨格とともにパワートレーンを刷新し、低フー

*1 パワートレーンカンパニー 製造エンジニアリング部

*2 パワートレーンカンパニー 第 2 駆動・EHV 設計部

*3 アイシン・エイ・ダブリュ株式会社

ド・低重心化によるデザインおよび運動性能向上を目指している。生産分野では、加工治具の共通化による各工場の工程・設備の仕様を統一し、市場要望に柔軟に対応、迅速な商品提供を目指している。トヨタ初の TNGA コンセプトユニットである新 8AT では、エンジン特性・必要動力性能に基づき、トランスミッションのトルクコンバータ、ギヤトレン、バルブボデー、オイルポンプに対し、共通化・シリーズ化を使い分けて開発した。

3 開発の狙い

多段化による燃費向上を目指し、制御性、搭載性、ユニット効率の観点から、図 1 の断面図で示す、8 速ギヤトレンを選定し、以下の 3 点を重点項目として開発を行った。

- (1) ギヤスプレッドの拡大・ユニット損失低減・ロックアップ領域拡大による高効率・低燃費設計
- (2) 新制御手法及び、ロックアップ領域の拡大による、ダイレクト・高応答な駆動力設計
- (3) 軽量・コンパクト
部品点数低減・材料置換による、ユニット質量低減、幅広い車種への搭載を可能にしたコンパクト設計

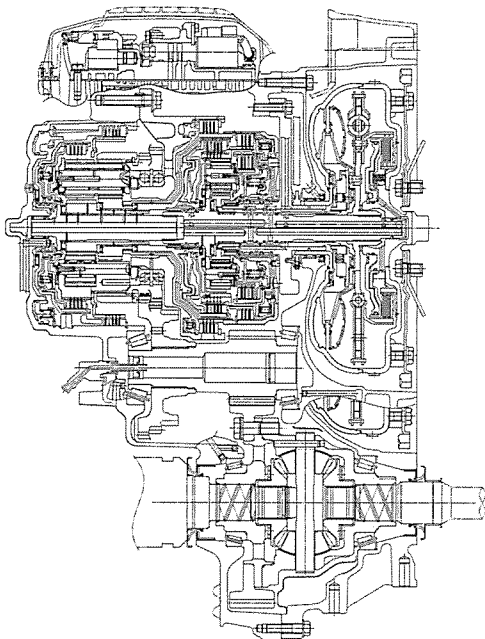


図 1 新 8AT 断面図

4 主要諸元と基本構造

新 8AT は、1 軸にトルクコンバータおよびギヤトレン、2 軸にカウンタギヤ、3 軸にディファレンシャルギヤをもち、リダクションギヤのバリエーションは、カウンタギヤ比で設定している (表 1)。

オイルポンプはチェーン駆動による別軸構造となっており、効率向上および全長短縮に貢献した。バルブボデーは、従来の 6AT (2) の下面配置から前面配置に変更し、車両の低重心化に貢献している。

ギヤスプレッドを拡大することで、発進性・燃費を向上させた。また、クロスギヤステップとし、特に 4 速から 8 速にかけては等間隔のギヤステップとすることで、リズムカルな変速を実現した。

表 1 新 8AT 主要諸元

ユニット	従来 6AT (V6)	新 8AT		
		UA80 (V6)	UB80 (L4)	
トルクコンバーター	φ260 ロックアップクラッチ	φ230 with ロックアップクラッチ		
変速要素	2 クラッチ 3 ブレーキ 1 ワンウェイクラッチ	4 クラッチ 2 ブレーキ		
制御方法	電子 - 油圧	電子 - 油圧		
ギヤ比	1st	3.300 >(1.83)	5.519 >(1.73)	5.250 >1.73
	2nd	1.900 >(1.34)	3.184 >(1.55)	3.029 >1.55
	3rd	1.420 >(1.42)	2.050 >(1.37)	1.950 >1.34
	4th	1.000 >(1.40)	1.491 >(1.21)	1.457 >1.19
	5th	0.703 >(1.17)	1.234 >(1.23)	1.221 >1.22
	6th	0.609	1.000 >(1.25)	1.000 >1.24
	7th	-	0.800 >(1.18)	0.809 >1.20
	8th	-	0.673	0.673
	Rev	4.148	4.220	4.015
カウンタギヤ比	1.068	0.803	0.846	
ファイナルギヤ比	3.238	3.187	3.312	
最大トルク (Nm)	350	380	280	
重量 (kg)	94.5	94.3	88.0	
全長 (mm)	384	379	374	

ギヤトレンは、フロントプラネタリ、ラビニョプラネタリと 4 つのクラッチ (C1, C2, C3, C4)、2 つのブレーキ (B1, B2) で構成されている (図 2)。

新制御技術の織込みと、ワンウェイクラッチの廃止で、従来の 6AT と同数の構成要素数に抑え、全長短縮、質量低減に貢献した。

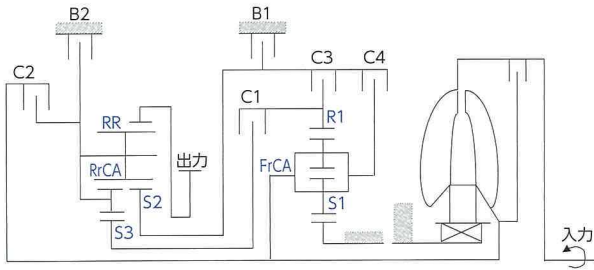


図2 ギヤトレーン スケルトン図

本ギヤトレーンでは、ギヤ段を構成する1要素の切り替えのみで、隣接する変速段への切り替えが可能な構造を採用し、変速制御を簡略化した(表2)。

表2 新8AT 変速チャート

	クラッチ				ブレーキ	
	C-1	C-2	C-3	C-4	B-1	B-2
1st	●					●
2nd	●				●	
3rd	●		●			
4th	●			●		
5th	●	●				
6th		●		●		
7th		●	●			
8th		●			●	
Rev			●			●

トルク帯毎の自動変速機のラインナップを図3に示す。従来の3種でカバーしていたトルク帯を、UA80 および UB80 の2種でカバーすることで、ユニット種類を削減し、車両の要求性能に広く対応した。

エンジントルク (Nm)	200	250	300	350	400	6AT 8AT
現状	U760		U660		U880	
開発	UB80		UA80			

図3 オートマチックトランスミッション種類 (FFAT)

5 TNGA 方針に基づいた開発

幅広いトルクレンジに対応するため、3.5L 向け UA80 及び、2.5L 向け UB80 を開発し、部品の共通化、トルクによって部品の差別化を図るシリーズ化を実施した(図4)。

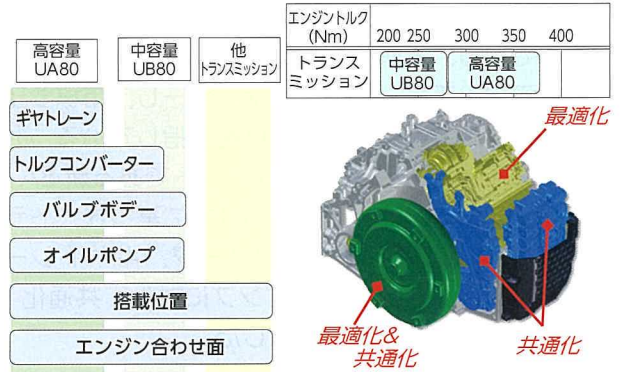


図4 最適化および共通化例

5.1 他トランスミッションとの共通化

図5に、新2.5Lエンジン用UB80及び、HVトランスアクスルのエンジン締結部を示す。今回の開発では、異なるユニットを跨いで締結ボルト位置、組付用ノックピン位置を共通化することで、ユニット毎に変更していたエンジン合わせ面を統一し、製造工程への投資を最小限に抑えた。

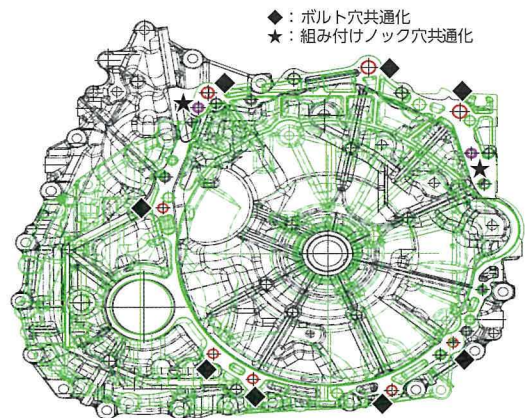


図5 UB80-HV トランスアクスルエンジン 合わせ面比較

5.2 UA80・UB80 シリーズ内での共通化

トルク値に依存しない油圧関係部品のバルブボデー、オイルポンプは、高容量・中容量で共通化した。

5.3 UA80・UB80 間でのシリーズ化

トルクコンバーター、ギヤトレーン、トランスミッションケースは、各基準位置を共通化し、トルク値に依存する形状で仕様を分け最適設計とした(図6)。

各基準位置を共通化することにより、混流可能な汎用ライン設計を可能とした。

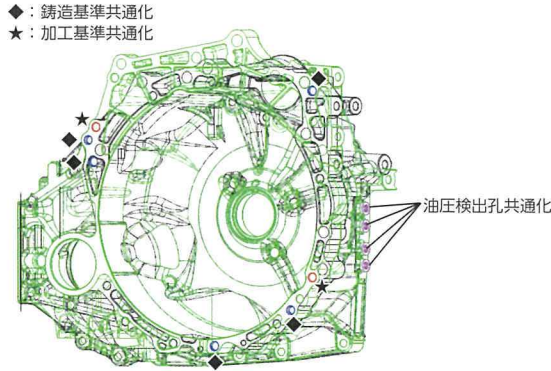


図6 UB80-UA80ハウジング比較

が5.4 → 7.8と、それぞれ搭載車両のエンジン特性に合わせ拡大した。

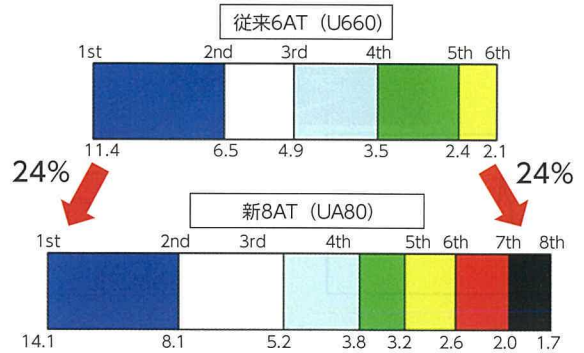


図8 ギヤスプレッド比較

6 燃費性能

新8ATは、効率向上のため、①ギヤトレーンのワイドスプレッド化、②ユニット損失低減、③ロックアップ領域の拡大の3つの観点に損失分解し、それぞれに対し、新たに開発した技術を織込むことで、従来の6ATに比べ、高い燃費性能を達成した(図7)。

本項では、燃費向上のために採用した、代表的な新技術の説明を実施する。

■トランスミッション損失分解

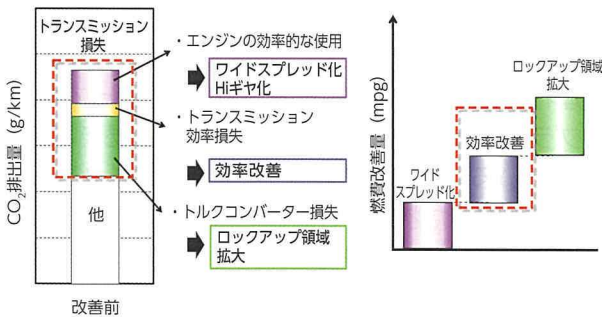


図7 トランスミッション損失分析

6.1 ワイドスプレッド化

新8ATでは、従来の6ATに対し、1stギヤ比を24%ローギヤ化、トップギヤ比を24%ハイギヤ化しており、発進および低速域からの加速性能の向上と、巡航燃費および静粛性の両立を実現した(図8)。

1stギヤ比のローギヤ化は、低速域へのロックアップ領域拡大に貢献し、ダイレクト感溢れる走りとも燃費向上にも貢献している。ギヤスプレッドは、従来の6ATに対し、UA80が5.4 → 8.2、UB80

6.2 ユニット損失低減

新8ATは、同トルク帯のFF-ATにおいて、世界トップレベルの伝達効率を実現し、車両燃費に大きく貢献している(図9)。以下に伝達効率向上のために採用した主要アイテムを紹介する。

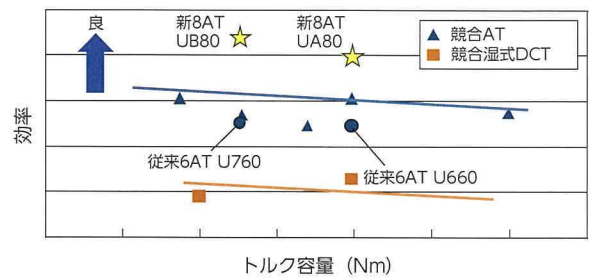


図9 ユニット効率比較

トランスミッションの伝達効率の大きな影響因子のひとつとして、ギヤのかみ合い損失がある。

かみ合い損失は図10に示されるように摩擦係数、荷重分布、滑り速度に依存する。

$$\left[\text{かみ合い損失} \right] = \int \left[\text{かみ合い進行長} \int \left[\text{同時接触長} \left[\text{摩擦係数} \right] \times \left[\text{分布荷重} \right] \times \left[\text{滑り速度} \right] \right] dl dt$$

↑ 超仕上げ歯面 ↓ 歯型最適化

図10 ギヤ効率計算式

新8ATではカウンタギヤ・ファイナルギヤの歯面超仕上げにより、ギヤ歯面の微小な凸形状を平滑にし、噛み合い時に必要な潤滑オイルを保持するための凹形状は残すことでかみ合い損失を低減した(図11)。

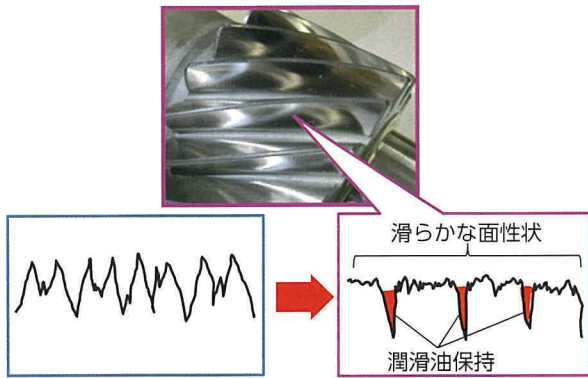


図 11 ギヤ歯面性状

6.3 ロックアップ領域の拡大

トランスミッション構成部品のトルクコンバータについては、ロックアップクラッチを多板化するとともに、イナーシャの最適化によってロックアップ領域を拡大し、燃費向上と、ダイレクトな変速応答性向上を図った。図 12 に従来の 6AT と、新 8AT との比較を示す。

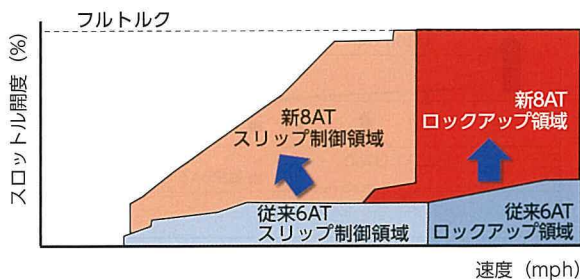


図 12 ロックアップ領域比較

こもり音の伝達経路は、エンジンマウント、排気系ハンガーブッシュ、サスペンションマウントがある。低回転域でロックアップを実施すると、ドライブシャフトの変動トルク (D/S 変動トルク) が悪化し、サスペンションマウントからのこもり音伝達の原因となる。新 8AT では、C1 部のクラッチの構成部品を、高速で回転する C1 ドラム部品と一体化することで、ユニットの質量を増加させることなく慣性を増加させ、高ギヤ段でのこもり音を改善させた (図 13)。

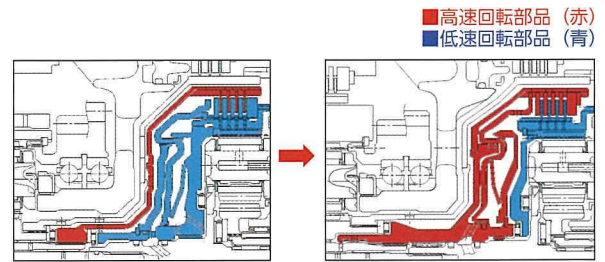


図 13 C1 クラッチ構造変更

4気筒エンジン用のUB80では、拡大したロックアップ領域において、ある回転数を超えると追加したC1慣性が機能せず、D/S変動トルクが回転数に応じて減少しない領域があることが分かった (図 14)。

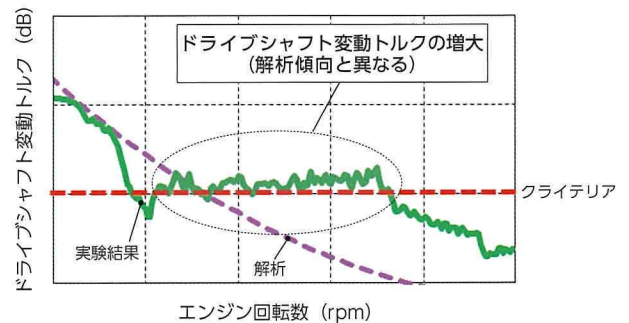


図 14 シミュレーション・実験結果比較

8th を例に挙げると、C1 クラッチは、他回転体に連れ回されている「無負荷部慣性」となっており、スプライン嵌合部のがただけ自由度がある状態となっている。図 15 に C1 クラッチ部をユニットから取り除いた状態での実機評価結果を示す。課題領域では、追加した慣性が作用しておらず、慣性要素としては非常に不安定な挙動を示している。

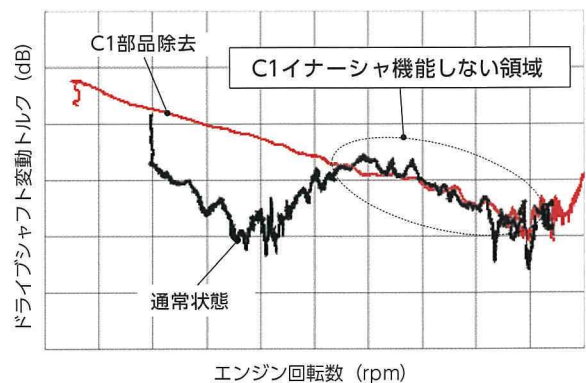


図 15 C1 部_イナーシャ影響確認結果

無負荷部慣性の原因であるスプライン嵌合部のがたに着目して解析すると、実機と同様の傾向を示し、また、がた量を減少させることでこもり音を低減できることがわかった (図 16)。

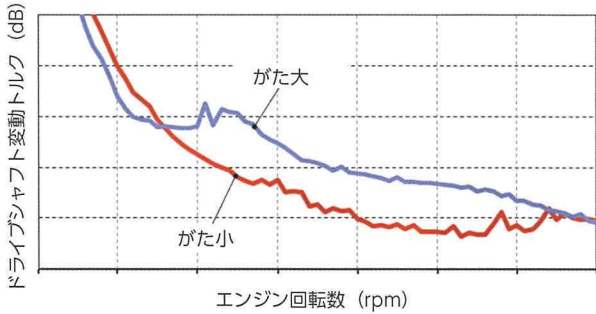


図 16 スプラインがた量によるドライブシャフト変動トルク比較

対策として、スプライン部を圧入し、がたを無くす方法も考えられるが、高い圧入荷重が必要となり生産上の課題が大きい。スプライン構造のがた量をつめる方法もあるが、寸法精度の限界もあり、十分な効果が得られない。

今回 UB80 では、回転方向のがたを吸収する部品 (トランスリング) を新たに開発し、トルク変動の低減を図った (図 17)。材質、クリアランスを最適設計することで、圧入荷重を低く抑え、生産上の課題も解決した (図 18)。

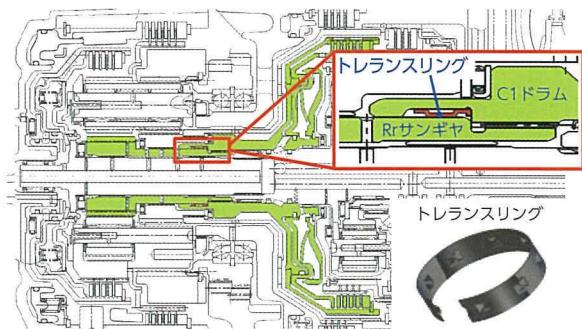


図 17 トランスリング構造

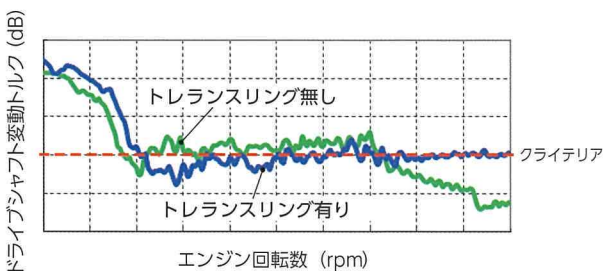


図 18 トランスリング効果確認結果

7 軽量化

新 8AT では、多段化しながらも従来の 6AT 同等の質量を維持するために、アルミや樹脂への材料置換、部品の統廃合などにより軽量化を図った (図 19)。

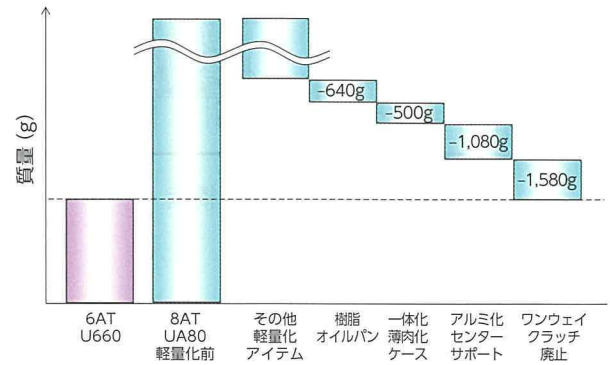


図 19 質量低減アイテム

7.1 センターサポート

従来センターサポートの材料には、カウンタギヤの反力に耐える強度確保のため、鋳鉄を用いていた。新 8AT では、伸び向上および引張強度のばらつきを抑えたアルミ材を新たに開発し、隣接するドラムと一体化することで、1 kg 以上軽量化した (図 20)。新開発のアルミニウムは、鉄、マグネシウム、ケイ素等の成分量の最適化により、従来比 4 倍以上の伸び性能を有している。また、ブレーキ構造を一体化させることで、剛性向上、部品点数削減、組付け性向上にも貢献した。

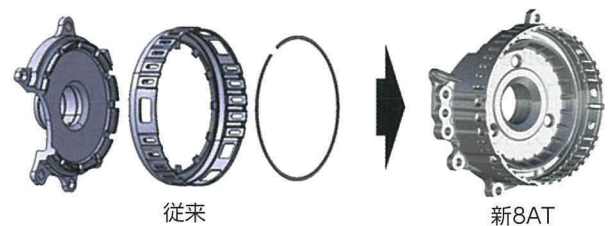


図 20 センターサポート構造

7.2 C3 ドラム

従来 8AT⁽³⁾ では、C3・C4 クラッチ構造の複雑な形状を成立させるため、鋼板のプレス部品を組み合わせていた。UB80 では、アルミ製の 2 部品を溶接することで質量低減を図った (図 21)。本部品において課題となる、溶接熱によるクラックに対しては新開発の材料特性で、内蔵するクラッチピストンのゴムシール部の熱変形に対しては溶接条件

を最適化することで課題を解決し、約 1.2kg 質量を低減した。

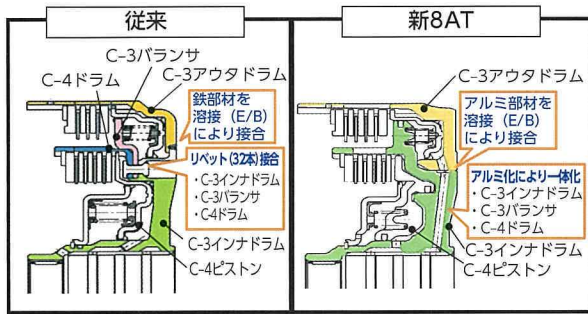


図 21 C3 クラッチ構造

8 まとめ

- 1) 部品共通化・シリーズ化を使い分け，開発を効率化，生産性を向上させ，幅広い車種に素早く展開することにも貢献した。
- 2) 従来の 6AT に比べ，ユニット伝達効率が 8% 向上し，ロックアップ領域拡大と合わせ，車両燃費の改善に貢献した。
- 3) 従来の 6AT に比べ，ロックアップ領域が 10% 拡大し，変速時のダイレクト感が向上した。
- 4) 多段化しつつ，6 kg 以上の軽量化，全長を 5 mm 短縮し，従来の 6AT 同等のユニット質量を達成，同等の搭載性を維持した。

参考文献

- (1) Y. Michikoshi, Kusamoto, Ota, et al.: Toyota New TNGA High-Efficiency Eight-Speed Automatic Transmission Direct Shift-8AT for FWD Vehicles. SAE Technical Paper 2017-01-1093 (2017)
- (2) D. Kusamoto, Yasuda, Watanabe, et al.: Toyota's New Six-Speed Automatic Transmission U660E for FWD Vehicles. SAE Technical Paper 2006-01-0847 (2006)
- (3) T. Aoki, Kato, Kato, et al.: The World's First Transverse 8-Speed Automatic Transmission. SAE Technical Paper 2013-01-1274 (2013)

本論文は，下記発表済み論文の転載である。
 今西亮平，草本，藤田，東井，竹林ほか：新 FF ダイレクトシフト 8 速自動変速機の開発. 自動車技術会学術講演会講演予稿集. P.1436 - 1441 (2017)

著者



今西 亮平



草本 大輔



東井 浩臣



池 宣和



安田 崇



伊藤 正泰

FR 乗用車用 10 速自動変速機の開発

Development of New 10-Speed Automatic Transmission for Rear-Wheel Drive Passenger Vehicles

山田 和彦 *1 Kazuhiko Yamada	宮崎 光史 *2 Terufumi Miyazaki	長谷川 善雄 *3 Yoshio Hasegawa	近藤 貴裕 *3 Takahiro Kondo
	増永 聖二 *3 Seiji Masunaga	北折 一郎 *3 Ichiro Kitaori	竹市 章 *2 Akira Takeichi

要旨

新世代のFRラグジュアリークーペ用に開発したFR乗用車用10速オートマチックトランスミッション(AT)について紹介する。このATは、車両の走りのコンセプトとして掲げた「より鋭く」「より優雅に」を実現するため、最適なギヤ比設定や新たな制御を採用し、燃費・動力性能だけでなく、走りの魅力向上に大きく貢献している。

本稿では、この新FR乗用車用10速AT(モデル型式:AGA0)の開発コンセプトについて触れ、走りの魅力に貢献する変速比設計手法、ハード改良内容、新たに採用した新しい変速制御技術について紹介する。

Abstract

A new 10-speed automatic transmission has been developed for next-generation rear-wheel drive (RWD) luxury coupes. In accordance with the dynamic performance concept of these vehicles ("sharper and more refined driving"), this automatic transmission was developed with an optimum gear ratio and new shift control technology. These features help to enhance both fuel efficiency and driving performance, while also ensuring an exciting and greatly improved driving experience. This article describes the development concept of the new 10-speed automatic transmission for RWD passenger vehicles (model code: AGA0), the gear ratio design method that was adopted to achieve the targeted driving performance, the details of hardware refinements, and the newly adopted shift control technology.

キーワード 自動変速機, 10速, ギヤステップ, ギヤスプレッド, 変速制御, ドライバ志向, 走行シーン

1 はじめに

近年、グローバルでの環境規制が急速に進んでいることから、トランスミッションにおいても「優れた走行性能と低燃費の両立」が求められており、エンジンパワーの伝達効率向上に重点を置いた多段化(無段化)・直結化が進められてきた。加えてFRプレミアム車のカテゴリーでは、更なる商品力として、ドライバーの感性に訴えかける“気持ち良い走り”を実現することも求められている。

今回、新世代のFRラグジュアリークーペを開発するにあたり、新たにFR乗用車用10速自動変速機(AT)(モデル型式:AGA0)を開発した。このATの開発では、燃費・動力性能の向上だけでなく、走りの魅力向上を目的とし、車両の走りのコンセプトとして掲げた「より鋭く」「より優雅に」を具現化

することを追求した。

本稿では、AGA0の開発コンセプトについて触れ、走りの魅力に貢献する変速比設計手法とハード改良内容、新たに採用した新しい変速制御技術について紹介する。

2 開発の狙い

AGA0の開発コンセプトは以下の通りである。

①リズムカルで切れ味の良い変速

各変速の変速比を最適化することで、車両加速中のエンジン回転数が同一回転帯域でテンポよく変化するパワーオンアップシフトを実現した。さらに、変速時間(ATの入力軸回転数が変速前後の同期回転数を遷移する時間)を短縮することで、切れ味の良い変速を演出した。

*1 パワートレーンカンパニー 第2駆動・EHV設計部

*2 パワートレーンカンパニー パワートレーン先行設計部

*3 パワートレーンカンパニー 第4電動パワートレシステム開発部

②発進加速性能と高速巡航時の高い静粛性

Loギヤ化により発進加速性能を向上しつつ、高速巡航時には低いエンジン回転数での走行を可能にする、ワイドなギヤスプレッドを実現した。

③ドライバの志向・意図に合致した走り

アクセル操作やブレーキ操作、車両速度や車両加速度に基づいて、ドライバの加速意図を推定し、ドライバに最適な変速段を選択する変速制御を採用した。

④アクセル操作に対してダイレクトに応答する走り

多板ロックアップクラッチ、新ダイナミックロックアップダンパを採用した新開発のトルクコンバータにより、従来ATよりも大幅にロックアップ領域を拡大した。

⑤優れた省燃費性能

軽量なギヤトレーンに加え、新トルクコンバータによるロックアップ領域拡大や低フリクション摩擦材などの技術を織り込むことで、車両燃費性能を大きく向上した。また、アイドリングストップの適用も可能な仕様とし、エンジン復帰時にA/T作動に必要な油圧供給デバイスとして、アクムレータを搭載できる構造とした。

3 最適ギヤ比の設計

開発コンセプトである「リズムカルで切れ味のよい変速」と「発進加速性能と高速巡航時の高い静粛性」の両立を実現するため、AGA0に採用した変速比設計プロセスの内、ギヤステップとギヤスプレッドの設計手法について述べる。

3.1 ギヤステップ設計手法

車両加速中のエンジン回転数が同一回転帯域でリズムカルに変化する変速を実現する。

はじめに、実現したい車両の目標加速度を設計する。一定開度のアクセル操作で加速走行した場合、ドライバが同一の加速感を感じ続けることのできる加速度を目標加速度として設計する。人間の官能特性を表現する手法として、人間への刺激量と知覚の関係性を実験的に導出したWeber-Fechnerの法則が広く知られている。これは、人間の知覚変化量 ΔE が刺激量 R のWeber比 $(\Delta R/R)$ に比例するという法則で下式のように表せる。ここで、 k は比例定数である。

$$\Delta E = k \Delta R/R \quad \dots\dots\dots (1)$$

この法則を用い、知覚変化量をドライバの体感上の加速度 $\Delta V'$ 、刺激量を車両加速度 G 、比例定数 k とすると下式のように表せる。

$$\Delta V' = k \Delta G/G \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、ドライバの体感上の加速度 $\Delta V'$ が一定となる比例定数 k を実験的に求め、目標加速度を設計した。設計した車両の目標加速度を図1に示す。等加速感を実現する車両加速度は、車両加速度が大きいときに車両加速度の変化率が大きくなる傾向がある。

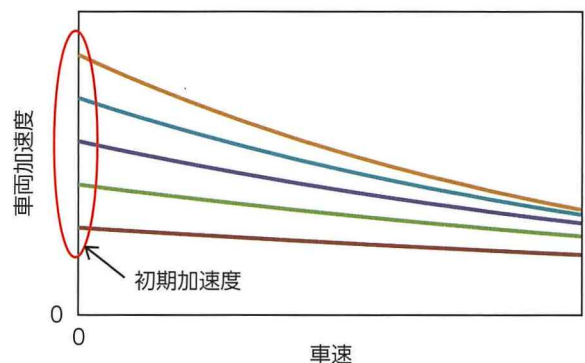


図1 等加速感を実現する目標加速度

次に、車両加速中のアップシフト開始間隔の目標時間を設計する。従来のATでは、良好な駆動力特性を維持するために、アップシフト開始間隔がアップシフトを重ねるにつれて伸びる傾向があった。

AGA0では、良好な駆動力特性はエンジン制御と変速比で実現することとし、リズムカルな変速を実現するため、車両加速中のアップシフト開始間隔に目標時間を設定した。ここで、発進加速時におけるAT入力軸回転数の挙動を、従来8AT（モデル型式：AA80）と比較したイメージを図2に示す。

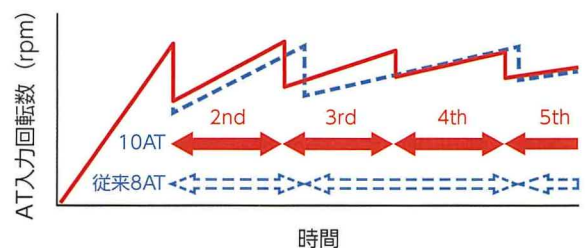


図2 発進加速時のAT入力軸回転数挙動の比較

以上より、目標加速度を実現しつつ、目標とするアップシフト開始間隔で、同一回転帯域での回転変化が生じるよう、各変速段間のギヤステップを設計した。ここで、設計した変速比とアップシフトタイミングを採用したときの発進加速時の AT 入力軸回転数挙動を図 3 に示す。AT 入力軸回転数が、ある回転数帯域内で回転変化し、アップシフトできていることがわかる。

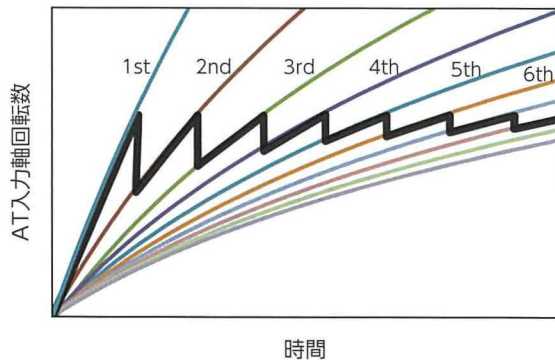


図 3 発進加速時の AT 入力軸回転数挙動

3.2 ギヤスプレッド設計手法

本節では Lo ギヤ側と Hi ギヤ側の変速比に対する設計手法について述べる。

AGA0 では、1 速を発進専用変速段と位置付け、常用する 2 速から最高速変速段の変速比を重要視して設定した。ロックアップ領域の大幅な拡大に伴い、トルクコンバータのトルク増幅機能に頼らずに、加速に十分な駆動力を確保できるよう 2 速変速比を設定した。この 2 速変速比を基準に、前節で設計したギヤステップを適用して、低速側変速段の変速比を決定した。

一方、最高速側変速段の変速比は、燃費性能および高速巡行時の静粛性に加えて、巡行時の余裕駆動力を考慮して設定した。エンジン効率、エンジントルク特性、NV（騒音・振動）性能に基づいて、高速巡行時の最適な目標エンジン回転数を明確化し、最適な変速比を設定した。

以上より、各変速段における変速比設計手法のまとめを図 4 に示す。最低速側変速比は AA80 に対して、Lo ギヤ化が必要となり、最高速側変速比は Hi ギヤ化が必要となる。

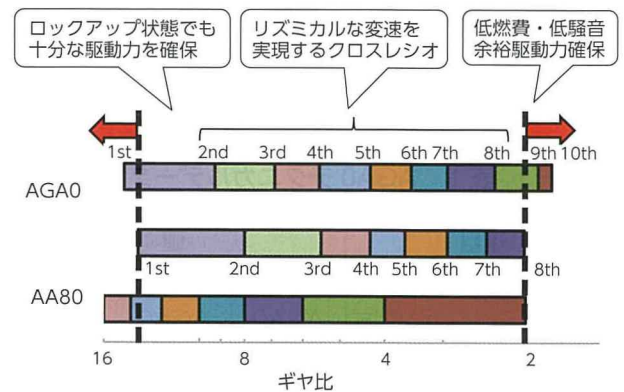


図 4 変速比と変速比設計手法

4 トランスミッションのシステム構成

前節で設計したギヤステップとギヤスプレッドを両立する AT を設計した。AA80 に対して、車両加速中のアップシフト開始間隔を短縮するために各変速段の変速比を近づけるクロスギヤ化を行い、変速段を 1 段追加することとなった。また、高速巡航時の静粛性と良好な燃費性能のためにも高速側にさらに 1 段追加が必要となり、10 速 AT を構築することとなった。本節では AGA0 のシステム構成について述べる。ここで、AGA0 の外観を図 5 に示す。

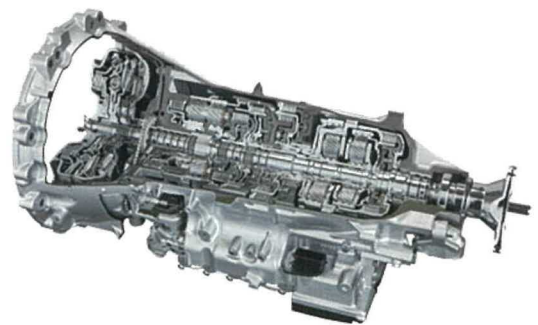


図 5 AGA0 外観

4.1 構造と主要諸元

AGA0 は新設計した 4 つのプラネタリギヤと AA80 と同数の摩擦要素数で構成され、前進 10 速の狙いの変速比を実現した。さらに、同一部位を内径側と外径側からそれぞれ別の摩擦要素で係合する 2 段構造やアルミ部材の採用等により、世界トップレベルの質量を達成した。また、軸長及び径サイズ（胴回り）も AA80 と同等とすることにより、良好な車両搭載性を確保した。ここで、AGA0 のテク

ニカルデータを表1、摩擦要素の係合表と各変速段での変速比を表2、ギヤトレーンのスケルトン図を図6に示す。

表1 AGA0 テクニカルデータ

項目	値		
搭載エンジン	2UR-FSE	V35AFTS	8GR-FKS
トランスミッション型式	AGA0	AGA0	AGA0
駆動方式	RWD	RWD/AWD	RWD
トルクコンバータ形式	3-element, 1-stage, 2-phase (with lock-up mechanism)		
トランスミッション形式	Electronically controlled planetary gears		
オイル名称	Genuine Toyota World Standard (WS)		
オイル容量 (L)	8.8		

表2 AGA0 シフトパターン

	C1	C2	C3	C4	B1	B2	ギヤ比	ステップ	
Rev		○	○			○	5.169	▲	
1st	○	○				○	4.923		
2nd	○				○	○	3.153		1.56
3rd		○			○	○	2.349		1.34
4th				○	○	○	1.879		1.25
5th		○		○	○		1.462		1.29
6th	○			○	○		1.193		1.23
7th	○		○	○			1.000		1.19
8th			○	○	○		0.792		1.26
9th	○		○		○		0.640		1.24
10th		○	○		○		0.598	1.07	

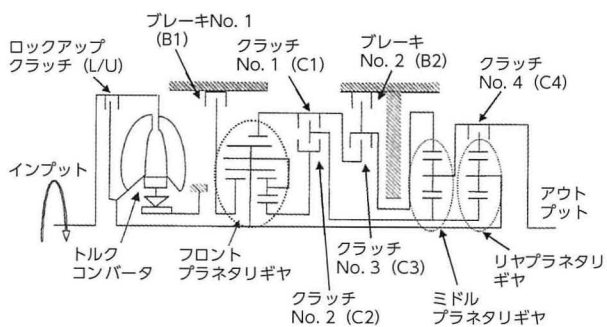


図6 AGA0 ギヤトレーンスケルトン図

4.2 新開発トルクコンバータ

AGA0は、油圧応答性の良い多板ロックアップクラッチと、低車速からのロックアップを可能とする新ダイナミックロックアップダンパを採用した

新開発のトルクコンバータにより、AA80に対し、大幅にロックアップ作動領域を拡大した。AA80とのロックアップ作動領域の比較を図7に示す。より低車速、よりアクセル高開度までロックアップ制御を行うことで、ほぼ全域にわたって、アクセル操作に対してダイレクトに応答するマニュアルトランスミッションやデュアルクラッチトランスミッションのような走りを実現した。また、ロックアップ作動領域拡大により、走行中のトランスミッション伝達効率も向上し、車両燃費性能に大きく貢献した。

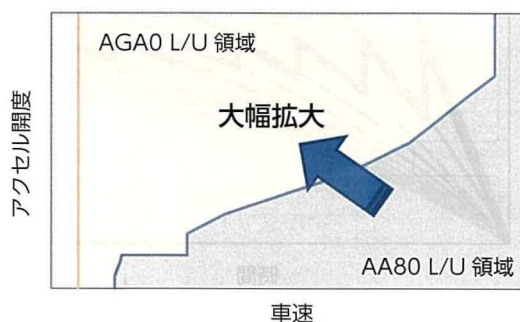


図7 ロックアップ作動領域比較 (AGA0 vs AA80)

さらに、トルクコンバータのトールス部は、AA80に対し、流路外形の小径化 ($\phi 272 \rightarrow \phi 260$)、および扁平化 (約13%) を行いつつも高容量化を実現し、軽量化と搭載性に貢献した。エンジン仕様違いに対してはステータとダンパのみの変更で対応できる仕様とし部品共通化を図った。ここで、トルクコンバータ外観のAA80との比較を図8に示す。

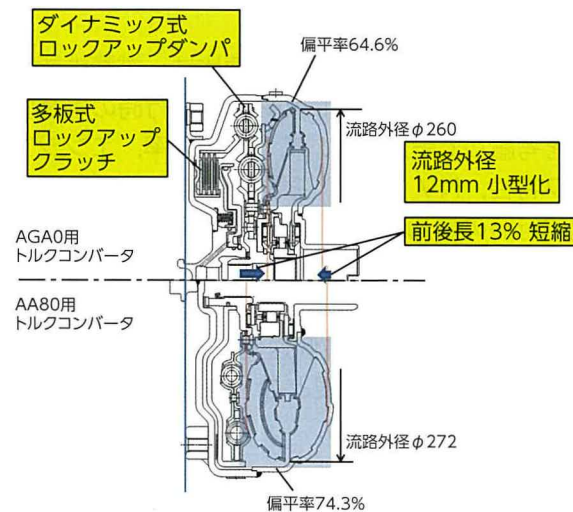


図8 トルクコンバータ比較 (AGA0 vs AA80)

4.3 高応答, コンパクトバルブボデー

高応答な変速に貢献するため, リニアソレノイドによる油圧応答性を AA80 比で 10% 向上, リニアソレノイド及びバルブの最適配置により油路長さを低減し, 管路抵抗を AA80 比で 67% 低減させた⁽¹⁾.

4.4 高応答クラッチ

変速応答性を向上する取り組みとして, クラッチチャンバ容積を低減させ, 油圧応答性の向上を図った. AA80 比, 最大 34.2% の容積低減を行った⁽¹⁾.

5 制御技術

本章では, AGA0 の開発コンセプトである「リズムカルで切れ味の良い変速」「ドライバ意図に合致した走り」「アクセル操作に対してダイレクトにตอบสนองする走り」を実現するために採用した, 新規制御技術について述べる.

5.1 ドライバ志向・走行シーン適応制御

従来 AT では, 車速とドライバのアクセル開度をパラメータとするシフトパターンと, 道路勾配情報に基づいて, 変速段を決定している. そのため, ドライバ志向 (燃費重視の走り, きびきびとした走りなど) や道路環境 (高速道路, ワインディング路など) に適応した変速段を設定することが困難な場合があった. 例えば, ワインディング路のコーナー脱出時に大きな駆動力を用いて再加速したい場合 (このようなドライバ志向をきびきびとした走りと定義する) に, ダウンシフトが作動 (以下, 追いダウンシフト) し, ドライバが要求する駆動力に対する応答性が低下することがあった.

AGA0 では, ドライバ志向がきびきびとした走りの場合にのみ, ワインディング路のコーナー脱出時の追いダウンシフトを解消し, コーナー脱出前に予めダウンシフトを実施できるドライバ志向・走行シーン適応制御を新たに開発する. ここで, 狙いとするドライバ志向・走行シーン適応制御の実施有無の違いにより選択される変速段の比較イメージを図 9 に示す.

はじめに, ドライバ志向・走行シーン適応制御を実施すべきシチュエーションを判断するために, ドライバ志向と走行シーンの判定方法を検討した. 燃費重視の走行中や通常走行中にダウンシフトを作動させてしまうと, エンジン回転数が増加し, 燃費効

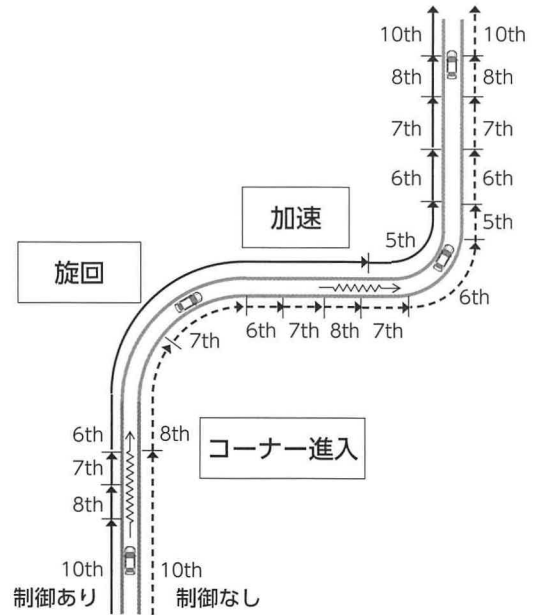


図9 ドライバ志向・走行シーン適応制御の実施有無による変速段比較 (ドライバ志向: きびきびとした走り)

率が低下してしまう. このため, ドライバ志向と走行シーンの判定は重要な機能となる.

様々な走行シーンとドライバ志向の組み合わせで実車走行試験を実施した結果, ドライバ志向と車両加速の相関性が強いことがわかった. また, 走行シーンの違いを判別するためのワインディング路走行時の特徴として, 車両に横方向の加速度が大きくなることわかった. これらに着目し, 車両走行データを車両前後加速度と横方向加速度とに基づいて整理した結果を図 10 に示す. 車両前後加速度と横方向加速度を用いることで, きびきびとした走り, かつワインディング路での走行データを分類することができた. これにより, 高速道路や市街地路走行時の実燃費に影響を与えず, 限定した領域で制御を実施することができた.

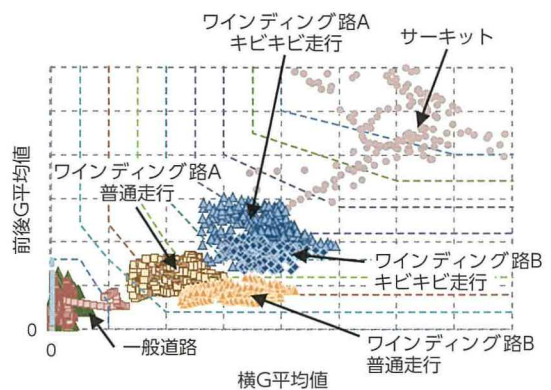


図10 ドライバ志向判定結果

次に、ワインディング路のコーナー脱出時の追いダウンシフトを回避するために、コーナー進入時や走行中に、どの変速段を形成しておくべきかを判定する方法を検討した。

コーナー脱出時にドライバーが要求する変速段は、ドライバーの要求駆動力に基づいて決定される。よって、コーナー脱出時にドライバーが要求する駆動力を予測する手法が必要となる。そこで、コーナー脱出時の要求駆動力に関係する因子と、コーナー進入中や走行中の因子（一例を表3に示す）で相関性の強い因子の組み合わせを車両走行実験に基づいて導出した。結果、再加速開始時の車速とコーナー脱出時の最大対地加速度に強い相関があることがわかった。さらに、ドライバー志向を変えた走行データにおいても同様の傾向があることがわかった。この相関図を図11に示す。以上より、コーナー進入時や走行中の車速情報からコーナー脱出時のドライバーの要求駆動力を予測することができる。

表3 因子一覧（コーナー走行中 / 脱出時）

		走行シーン	
		コーナー走行中	コーナー脱出時
因子（一例）	減速度		アクセル開度
	ブレーキマスダシリンダ圧		最大前後G
	ブレーキング開始時車速 Va		最大対地加速度
	コーナー進入時車速		目標駆動力
	旋回中車速 Vb		実駆動力
	加速開始時車速 Vc		エンジン回転数
	車速差 (Va vs Vb)		変速段
	車速差 (Va vs Vc)		加速開始～終了時の車速差

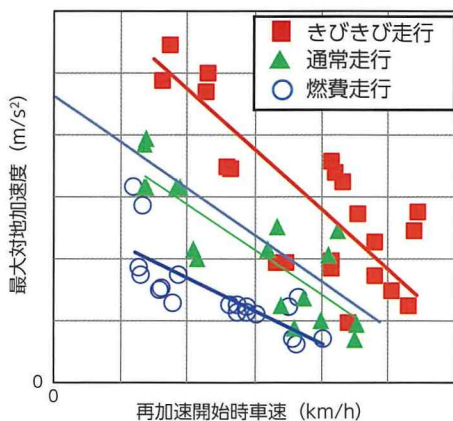


図11 再加速開始時車速と最大対地加速度

さらに、図12に示すように、エンジンの出力可能なトルク特性を併用することで、要求駆動力を実現できる変速段を導出することができる。なお、ダウンシフトの際は、コーナー進入時や走行中に必要以上に減速度が発生してしまうことを抑制するため、要求駆動力を実現できる最も高速側の変速段を選択することとした。以上により、ドライバーに最適な変速段をコーナー脱出前に予め設定することができる。

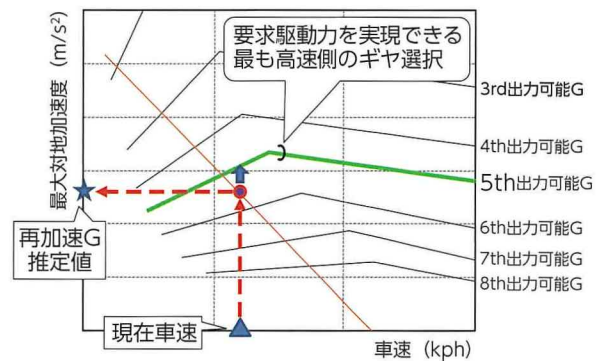


図12 目標変速段の決定方法

最後に、実車でのワインディング路走行時におけるドライバー志向・走行シーン適応制御の実施有り、実施無しで選択される変速段と車両加速性能との比較検証結果を図13に示す。ドライバー志向・走行シーン適応制御を実施すると、ドライバーがキビキビとした走行をしている場合、制御実施無しの場合と比較して、低速側の変速段が選択され、追いダウンシフトが解消されていることがわかる。また、ドライバーが志向を切替え、穏やかな走行となった場合、走行時間が経過するにつれて、制御実施無しの場合と同様に燃費重視の高速側の変速段を選択することがわかる。

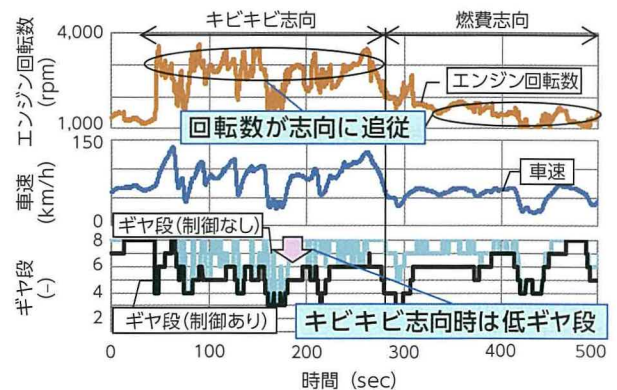


図13 実車検証結果

6 まとめ

FR 乗用車用 10 速 AT を開発した。開発コンセプトである走りの魅力を向上するために、AT ギヤトレーンの変速比設計と変速制御系設計について研究した。まず、リズムカルで切れ味の良い変速と、発進加速性能と高速巡航時の高い静粛性の両立を目的として、ギヤステップとギヤスプレッドの設計手法を提案した。また、ドライバ意図に合致した走りの実現を目的として、ドライバ志向・走行シーン適応制御を提案し、実車評価にてドライバ志向を推定し最適な変速段を設定できることを実証した。

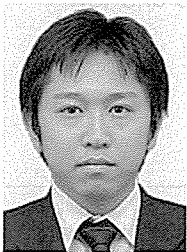
■参考文献

- (1) 濱野真, 杉浦, 新実, 鈴木, 前塚ほか: 新 FR10 速オートマチックトランスミッションの開発. 自動車技術会学術講演会講演予稿集. P.227 - 232 (2017)

本論文は、下記発表済み論文の転載である。

山田和彦, 宮崎, 長谷川, 近藤, 増永ほか: FR 乗用車用 10 速自動変速機の開発. 自動車技術会学術講演会講演予稿集. P.1442 - 1447 (2017)

■著者



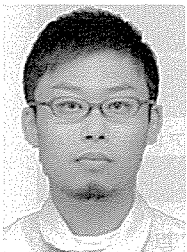
山田 和彦



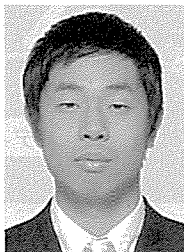
宮崎 光史



長谷川 善雄



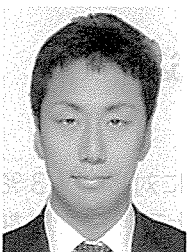
近藤 貴裕



増永 聖二



北折 一郎



竹市 章

FR 乗用車 高効率・低 NVH ドライブライン

Design of Highly Efficient Driveline with Low Noise, Vibration, and Harshness for Rear-Wheel Drive Passenger Vehicles

今井 信治 *1
Nobuharu Imai

高松 晋也 *2
Shinya Takamatsu

木天 孝 *3
Takashi Kiten

溝口 典弘 *4
Norihiro Mizoguchi

要旨

新型 LC500h/LC500 に搭載した、新開発ドライブラインについて紹介する。

このドライブラインは、レクサスのフラッグシップに相応しい動力性能と静粛性、環境性能を高次元で両立すべく、新たに開発した。ここでは、新ドライブラインの高効率化技術、NVH（騒音・振動・ハーシュネス）性能向上技術について紹介する。

高効率化技術として、ディファレンシャルのハイポイドギヤ諸元、ベアリング、潤滑構造の最適化を行った。従来比 +11% のリングギヤサイズにも関わらず、+0.5%（EC モード）の燃費向上、高効率化を実現した。NVH 性能向上技術として、プロペラシャフトの軸方向強制力の影響を明確にし、ダブルオフセットジョイント及び低剛性ゴムカップリングを採用することにより、こもり音を大幅に低減した。

Abstract

Toyota Motor Corporation has developed a new driveline for the Lexus LC500h and LC500 with the objective of achieving the low levels of noise and excellent driving and environmental performance suitable for flagship Lexus models. This article focuses on the technologies adopted to increase the efficiency of the new drivetrain, and the technologies adopted to reduce noise, vibration, and harshness (NVH). High efficiency was achieved by optimizing the differential hypoid gear specifications, bearings, and lubrication structure. Despite increasing the ring gear size by 11% compared to the conventional driveline, fuel efficiency was improved by 0.5% in the European test cycle. NVH performance was improved by greatly reducing booming noise. This was achieved by identifying the effects of propeller shaft axial direction excitation force, and adopting double offset joints and low-stiffness rubber couplings.

キーワード ドライブライン、ディファレンシャル、プロペラシャフト

1 はじめに

レクサスの LC, LS は高い動力性能や環境性能、NVH（騒音・振動・ハーシュネス）性能が要求されており、新ドライブラインはこれらが高い次元で両立させる必要があった。魅力ある FR 乗用車を目指し、マルチステージハイブリッドや新 10 速自動変速機を採用した。その動力を余すこと無くダイレクトにタイヤに伝えつつ、新たな高効率化、高静粛性化技術を織り込んだドライブラインを開発した（図 1）。

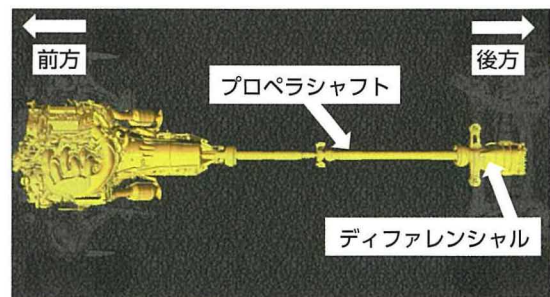


図 1 ドライブライン概要

2 新ドライブラインの織り込み技術

2.1 ドライブライン高効率化

ドライブライン損失は、車両燃費に対し 2～3% の寄与があり、燃費向上を考える上で無視できない

*1 先進技術開発カンパニー 東京技術部

*2 Toyota Motor Europe

*3 パワートレインカンパニー 駆動・HV 生技部

*4 先進技術開発カンパニー 先進技術統括部

い。損失要因は、負荷損失、摩擦損失、攪拌損失に分けられる。今回ディファレンシャル（図2）のハイポイドギヤ諸元、ドライブピニオンベアリング、封入油量を最適化することにより、従来比+11%のリングギヤサイズにも関わらず、+0.5%（ECモード）の燃費向上、高効率化を実現した。

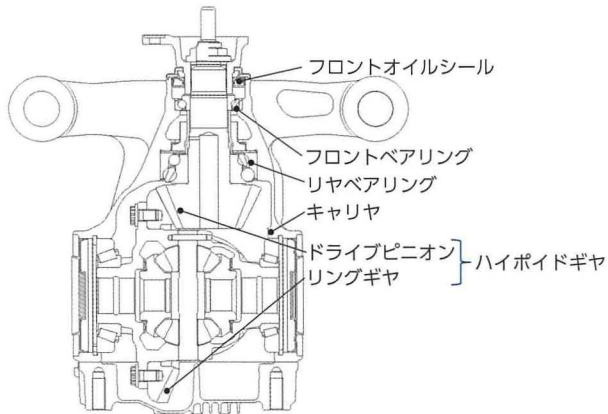


図2 新ディファレンシャル概要

2.1.1 負荷損失低減技術

負荷損失は、主にディファレンシャルのハイポイドギヤによって生じる⁽¹⁾。従来のハイポイドギヤは、上下オフセットとねじれ角（図3）を大きく設定することにより、ギヤ強度とNVH性能を確保しているが、噛み合い歯面で発生する滑りによる噛み合い損失が大きい。

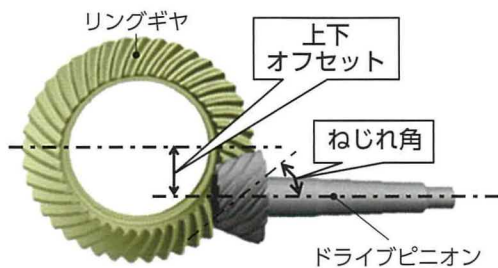


図3 ハイポイドギヤのオフセットとねじれ角

今回、パラメータスタディを行い、燃費と強度を両立させるハイポイドギヤ諸元を採用した。図4に、上下オフセットに対する燃費向上率とハイポイドギヤ強度の関係を示す。低オフセットほど燃費は向上するが、一方で、ドライブピニオンの強度は低下するため、歯厚調整を行い、強度目標を達成する最適なオフセットを選択した。また、低ねじれ角を採用することにより、噛み合い損失を低減すると共に、ドライブピニオンベアリングの小型化を実現し

た。図5に、ねじれ角に対する燃費向上率と有効噛み合い率の関係を示す。低ねじれ角化により、燃費向上が図れるものの、有効噛み合い率が低下しNVHが悪化するため、歯面形状の高精度化を実施し、NVH目標を満足する最適なねじれ角を選択した。

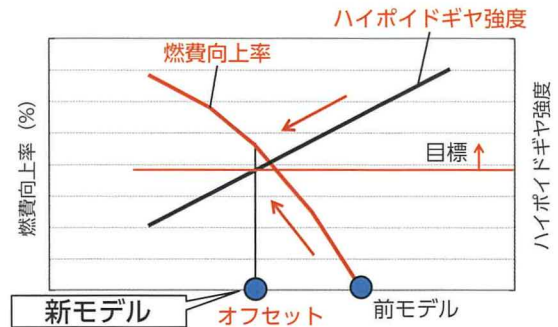


図4 オフセットと燃費向上率

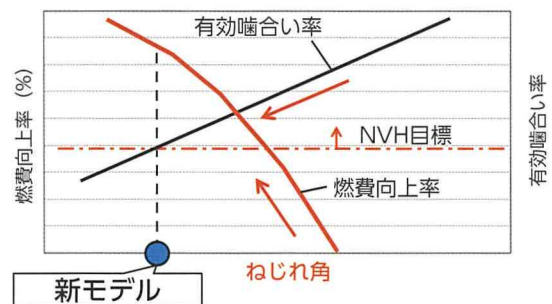


図5 ねじれ角と燃費向上率

2.1.2 摩擦損失低減技術

摩擦損失は、主にドライブピニオンを支持しているベアリングによって生じる。従来は、テーパベアリングからボールベアリングへ変更（図6）すると損失は低減するが（図7）、一方で、ベアリング寿命とハイポイドギヤの支持剛性は下がる。目標を達成するためにはベアリングサイズを大型化する必要があり、採用できなかった。今回、目標となる寿命と剛性を達成する設計を行い、ボールベアリングを採用した。



図6 ベアリング変更概要

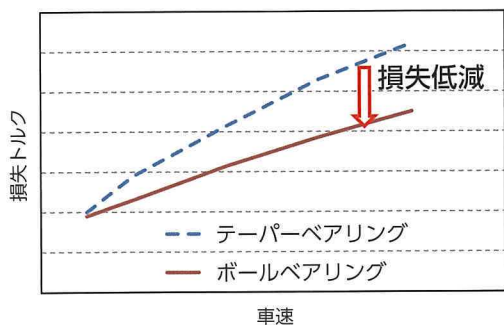


図7 損失トルク比較

ボールベアリングの寿命については、キャリアの潤滑構造を最適化し寿命を確保した。ディファレンシャルの潤滑構造は、リングギヤにて掻き上げられたオイルをベアリング部に供給している。テーパベアリング用の前モデル潤滑構造では、耐焼き付き性向上のためにフロントベアリング部にオイルを潤滑に供給しており、潤滑解析にて十分なオイルが供給されていることを確認した(図8)。この潤滑構造にボールベアリングを適用すると、異物油中寿命はテーパベアリングに比べ大幅に低下する(図9)。

前モデル

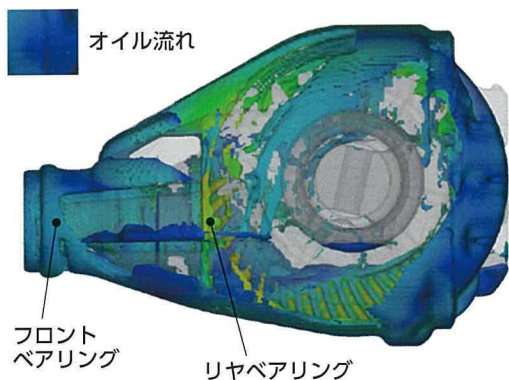


図8 前モデルでの潤滑構造と解析結果

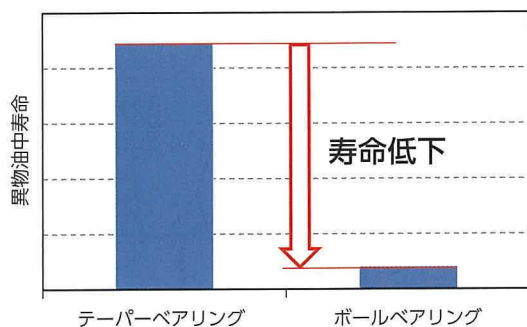


図9 ベアリング寿命比較

今回は、潤滑構造を見直し、リングギヤから掻き上げられる主流をベアリング部に極力供給せず、フ

ロントオイルシール部に必要なオイルのみ供給する潤滑構造とすることにより、リングギヤから掻き上げられた油がベアリング部へ供給される量を、車速に大きく依存せず安定的に低減した。従来構造に比べ、ベアリング部への油量が低減されていることが分かる(図10)。

新モデル

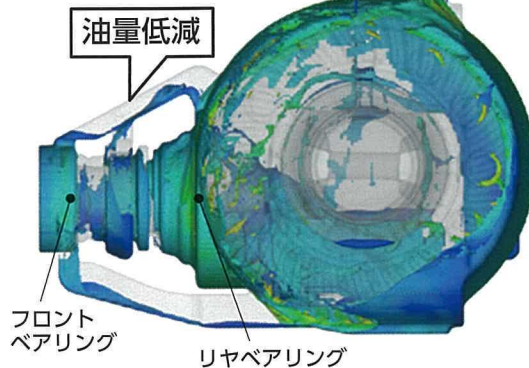


図10 新モデルでの潤滑構造と解析結果

また、図11は、実験にて確認した車速と油面高さを示している。前モデルキャリア構造では、車速に応じ油面高さが増加するが、新モデルキャリア構造では、車速の変化に対し油面高さが低い状態で安定していることを検証した。上記より、目標のベアリング寿命を達成した(図12)。

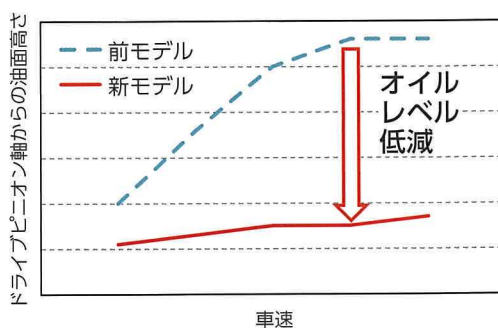


図11 オイルレベル測定結果

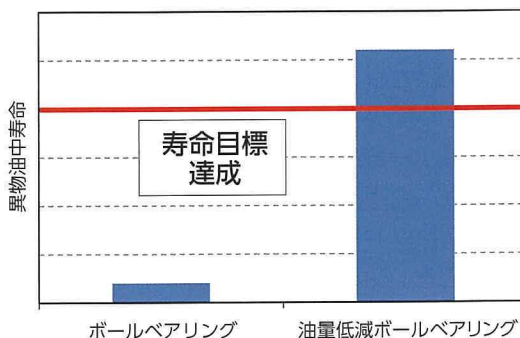


図12 油量低減時のボールベアリング寿命

支持剛性については、キャリアを含むディファレンシャルアッセンブリーとして支持剛性を確保した。トルク負荷時の各部変位による歯当たり移動量を、従来品同等以下となるようキャリア形状の最適化を行った（図 13）。キャリアの形状最適化は、軽量化にも貢献している。部位毎に必要な肉厚を明確化することにより、トルク負荷時に高応力部位とならない部位の肉厚低減を行った。薄肉化の課題であった製造時の肉厚バラツキに対して型精度向上を行い、湯回りに対しては、湯道の拡大等、鋳造方案を最適化した。

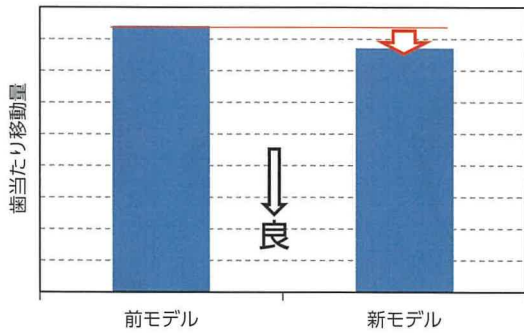


図 13 歯当たり移動量比較

2.1.3 攪拌損失低減技術

攪拌損失は、主にリングギヤの回転に伴う油の攪拌によって生じる。ディファレンシャル内に封入する油量を低減することにより、リングギヤ等の油浴レベルを下げ、攪拌損失を低減した。

2.2 ドライブライン低 NVH 化技術

FR 乗用車には、高周波ノイズの遮断のためにゴムカップリング（図 14）が採用されているが、それらの車両において定常走行時のこもり音が課題の一つであった。こもり音レベルは、プロペラシャフトの強制力とマウント系の車両感度により決定される。

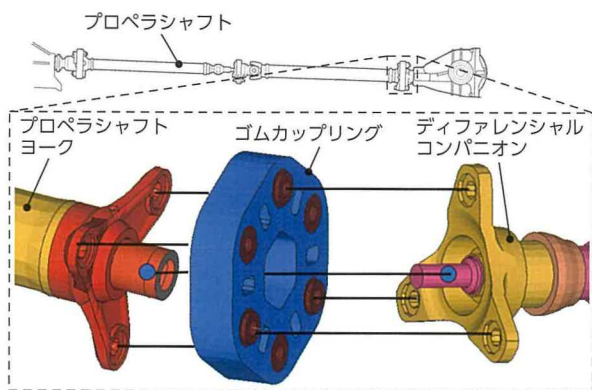


図 14 ゴムカップリング概要

従来、強制力はプロペラシャフトアンバランスに起因する径方向強制力のみと考えられていたが、同一アンバランスのプロペラシャフトにおいて異なるこもり音レベルが測定された（図 15）。

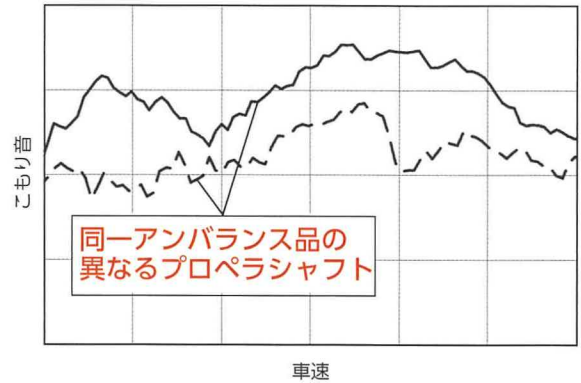


図 15 同一アンバランス品のこもり音測定結果

今回、要因解析を行い、径方向強制力に加え、軸方向強制力もこもり音へ影響を与えていることが分かった。軸方向強制力のモデル化及びスライド抵抗と軸方向強制力の計算、強制力ベンチでの検証（図 16）、CAE での解析を実施した。

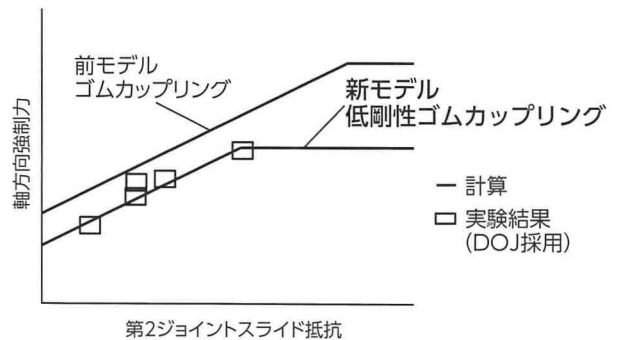


図 16 スライド抵抗と軸方向強制力

CAE の結果から、プロペラシャフトとディファレンシャルヨークの芯ズレがある場合、張力 A, B, C に差が発生し、軸方向強制力の合計が 0 とならないことが分かった（図 17, 18）。

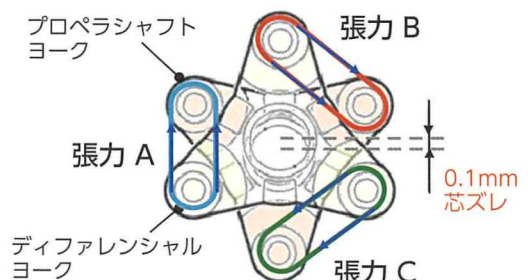


図 17 芯ズレ時の張力差概要

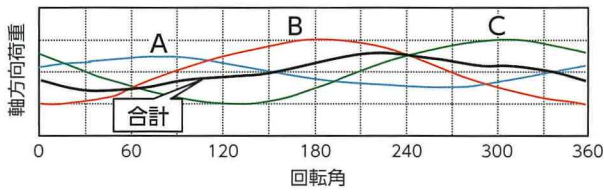


図 18 芯ズレ時の軸方向荷重

また、こもり音に対する径方向強制力と軸方向強制力の寄与度の明確化を行い⁽²⁾、軸方向強制力の低減目標値を決定した。軸方向強制力低減のために、第2ジョイントにダブルオフセットジョイント(DOJ)を採用し、ゴムカップリングの剛性低減を実施した(図19)。以上により、こもり音のレベルを大幅に向上させることを可能にした(図20)。

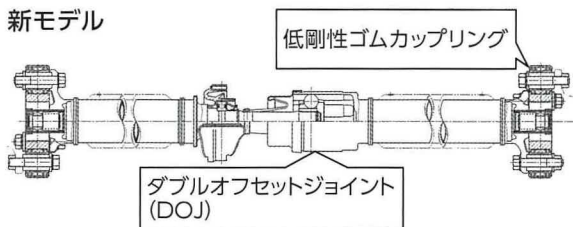


図 19 新プロペラシャフト概要

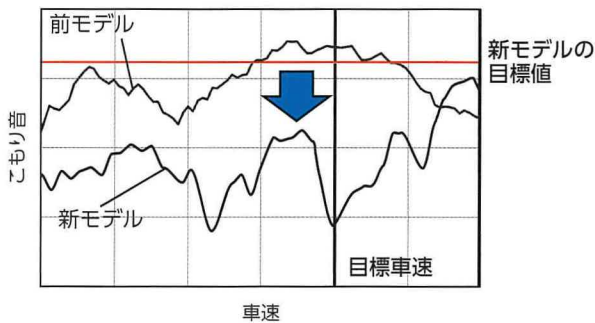


図 20 こもり音低減効果

3 おわりに

本稿で紹介したドライブラインの新技术により、従来に比べ+0.5% (ECモード)の燃費向上と、こもり音の大幅な低減に貢献した。

今回の開発にあたり、関係会社の方々に謹んで感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 斎木康平, 渡辺, 白木ほか: 自動車用ハイポイドギヤの効率化. 自動車技術会論文集, Vol. 44, No.1, P.63 - 68 (2013)
- (2) David A.B., Colin H.H.: Engineering Noise Control. Spon Press, pp. 47

本論文は、下記発表済み論文の転載である。

今井信治, 高松, 木天, 溝口: FR 乗用車高効率・低 NVH ドライブライン. 自動車技術会学術講演会講演予稿集. P.233 - 236 (2017)

著者



今井 信治



高松 晋也



木天 孝



溝口 典弘

マルチステージハイブリッドトランスミッションの開発

Development of Multi Stage Hybrid Transmission

椎葉 一之 ^{*1} Kazuyuki Shiiba	大室 圭佑 ^{*2} Keisuke Omuro	玉地 俊明 ^{*2} Toshiaki Tamachi
安藤 郁男 ^{*3} Ikuo Ando	加藤 春哉 ^{*4} Shunya Kato	熊田 拓郎 ^{*5} Takuro Kumada

要旨

新型 LC500h に搭載された新開発マルチステージハイブリッドトランスミッションについて紹介する。本トランスミッションはトヨタ・ハイブリッド・システム (THS II) の性能を飛躍的に高め、走りと環境性能を高次元で両立すべく新規開発したトランスミッションである。THS II に 4 速変速機構を直列に配置することにより、エンジン出力の活用範囲を大きく広げ、発進時から大きな駆動力を得ることを実現した。それにより、走りの魅力が大幅に向上し、また、システム効率の高い領域を使用できる頻度が向上し、高い燃費性能も合わせて実現した。

ここでは、マルチステージハイブリッドシステムの性能と、それを実現するためのトランスミッションハードと制御について紹介する。

Abstract

The innovative Multi Stage Hybrid Transmission was developed for the new Lexus LC500h. This transmission was developed with the objective of substantially enhancing the performance of the Toyota Hybrid System (THS II) by achieving high levels of both driving and environmental performance. This system consists of a shift device installed in series with the THS II, which greatly expands the operating range of engine power and provides powerful driving force from a standing start. This configuration combines enhanced and exciting dynamic performance with excellent fuel efficiency by increasing the usage frequency of the most efficient system regions. This article describes the performance of the Multi Stage Hybrid System, as well as the transmission hardware and controls that were developed to achieve this performance.

キーワード マルチステージハイブリッドシステム, トランスミッション, モータ

1 はじめに

乗用車向けに適用したレクサスハイブリッドドライブを開発し、2006 年に GS450h、2007 年に LS600h に搭載した⁽¹⁾⁽²⁾。レクサスハイブリッドドライブの燃費性能は競合車両を凌駕し、動力性能はユーザーから高く評価された。それ以来、多くの改良が加えられ、CO₂ 排出削減に大きく貢献している。

昨今、環境意識の高まりやガソリン価格の先行きが不透明なことから、いわゆるエコカーへの要望が益々高まっている。

今後、多くの国と地域で環境規制が厳格化される。このため、今まで以上に高い環境性能を備えた車両を開発し、普及させる必要がある。自動車業界ではより積極的にエコカーの開発に取組み、様々なシステムが市販化され、競争は激化している。

高い動力性能が要求されるラグジュアリーカー市場にもハイブリッド化の流れが加速しており、更なる燃費性能及び動力性能向上が必要となっている。そこで今回、ラグジュアリーカー市場において、燃費性能と動力性能を高い次元で実現できるマルチステージハイブリッドトランスミッション (L310) を開発した。

^{*1} パワートレーンカンパニー 第1 駆動・EHV 設計部
^{*2} パワートレーンカンパニー 第2 駆動・EHV 設計部
^{*3} パワートレーンカンパニー パワートレーン製品企画部
^{*4} パワートレーンカンパニー 第1 電動パワートレシステム開発部
^{*5} アイシン・エイ・ダブルユ (株)

2 開発の狙い

今回開発した L310 の狙いは以下の通りである。

① 燃費性能向上

高速走行時の燃費性能を大幅に向上させることを開発の主要な目的とした。具体的には、トランスミッションの増速域に高効率なハイエフィシエンシーポイントを追加した。これは動力分割機構と、直列に配置した変速機構の 4 速段のギヤ比を適切な値とすることで実現した。

② 動力性能向上

同一排気量の車両の中でトップクラスの動力性能を達成することを開発の目的とした。具体的には動力分割機構と直列に配置した変速機構の 1 速のギヤ比を最適な値とし、エンジントルク及びモータトルクを増幅することで実現した。

③ 静粛性向上

高い燃費性能及び動力性能を併せ持ちながらもトップクラスの静粛性を持つ、従来ハイブリッドトランスミッション (L110) 同等以上の NV (騒音・振動) 性能を確保することを開発の目的とした。具体的には、モータ接続構造の改良、トレランスリングの採用、プラネタリリングギヤ別体構造等の採用により実現した。今回、トレランスリングについて紹介する。

④ 変速性能向上

応答性と上質な変速フィーリングをトップレベルで両立させることを開発の目的とした。具体的には、エンジン、発電機、モータ、変速機構などからなる多自由度の系を、モデルベース変速制御により精密にコントロールすることで実現した。

⑤ ドライバビリティ向上

従来、レクサスハイブリッドドライブの走りは滑らかであることが重視されてきた。エンジンサウンドにおいては静粛性を重視し、可能な限り低い回転数を維持するように制御を実施してきた。故に加速しようとしてアクセルを踏むと、必要な出力を得るためにエンジン回転数を上昇させる必要があり、ラバーバンドフィールと呼ばれる加速フィールとエンジンの動きが運転者の感覚に合わない面があった。そこで今回は、ラバーバンドフィールの改善を目的とした。ワイドレンジ化されたハイブリッドシステムを活用した 10 段変速制御を採用することで、車速に対してエンジン回転がリニアに上昇するようになり、ダイレクト感溢れる走りを実現した。

3 マルチステージハイブリッドトランスミッション

3.1 構造と基本諸元

図 1 に今回開発した L310 の主断面、図 2 に概略図を示す。L310 はモータ、発電機、動力分割機構、動力分割機構とモータの出力回転を変速させる 4 段の変速機構、変速機構の係合要素を制御する油圧制御機構、油圧を発生させるメカオイルポンプ及び電動オイルポンプで構成され、動力分割機構と変速機構をエンジンクランク軸と同一軸上に配置する構造を採用した⁽³⁾。表 1 に係合表、表 2 に主要諸元を示す。

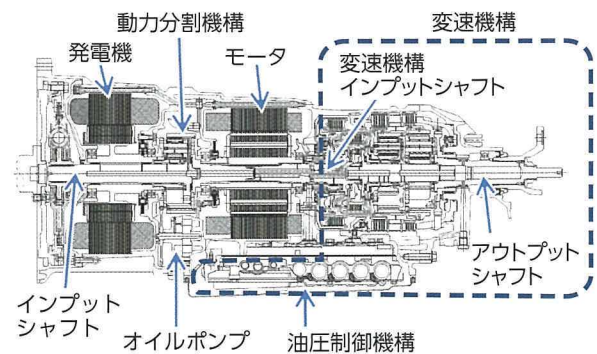


図 1 主断面 (L310)

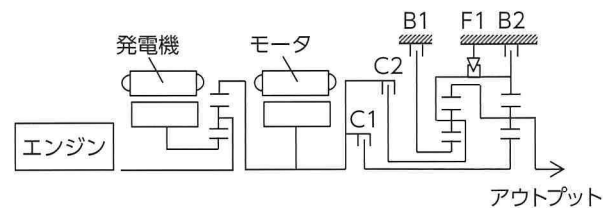


図 2 L310 のスケルトン

表 1 係合表

		係合状態				
		C1	C2	B1	B2	(F1)
D	R	○			○	
	1st	○			○	○
	2nd	○		○		
	3rd	○	○			
	4th		○	○		

表2 主要諸元

トランスミッション	L310 (新)	L110 (従来)
2段モータ変速機構ギヤ比	-	1.9 3.9
変速機構ギヤ比	3.538	-
	1.87	
	1.88	
	1.000	
	0.650	

3.2 燃費性能向上

L110ではモータ出力回転のみを2段変速させているのに対し、L310では動力分割機構の出力軸に変速機構を配置することで、動力分割機構とモータの出力回転を4段変速させている。

図3に理論伝達効率とギヤ比の関係を示す。モータと発電機間で電気パワーを授受する際、機械と電気パワー間の変換が行われることで損失が発生する。この変換損失を考慮した伝達効率を理論伝達効率とする。よって、発電機の回転が0rpmの場合、電気バスパワーが0kWになり、この状態をハイエフィシエンシーポイントと呼ぶ。

L110では1つの効率曲線を持つのに対し、L310では複数の効率曲線を持つことで、全体的に伝達効率が向上し燃費性能が改善する。

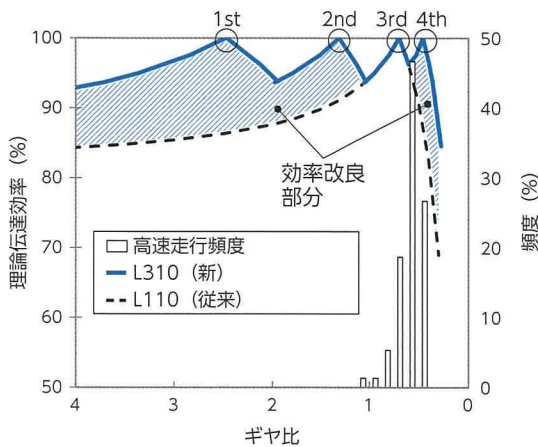


図3 理論伝達効率の改良

図3で示すように、3rdギヤ(≒L110)にて高速定常走行を実施すると動力分割機構が增速状態となり、発電機が負回転することで電気バスパワーが増加し、伝達効率が低下する(図4-A)。これに対し、変速機構の最高速段をオーバードライブに設定することで、動力分割機構が過剰な增速状態になること抑制し、伝達効率を向上できる(図4-B)。

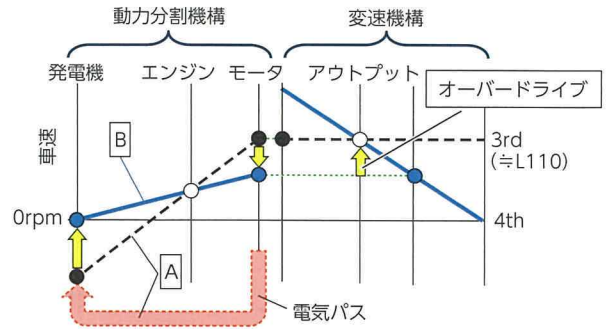


図4 高速走行時の共線図

3.3 動力性能向上

図5に示すように、L110では発進加速時は動力分割機構が減速状態となり、発電機の回転数が高回転になる。そのため、発電機の最高回転数を変えずに動力目標性能を達成するエンジン回転数を使用できるようにするために、最低速段はアンダードライブが要求される。

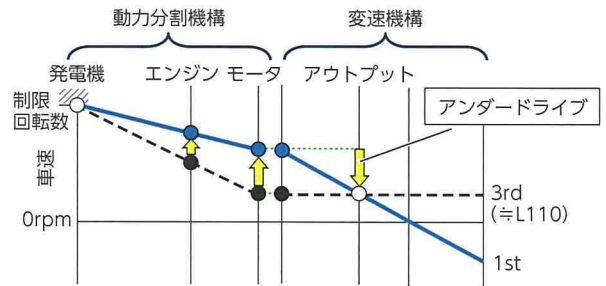


図5 加速時の共線図

今回、L310が搭載される車両クラスでの目標加速性能を満足させるため、変速機構の1速ギヤ比を3.538とした。これにより、図6に示すように駆動力がL110に対し約50%向上した⁽³⁾。

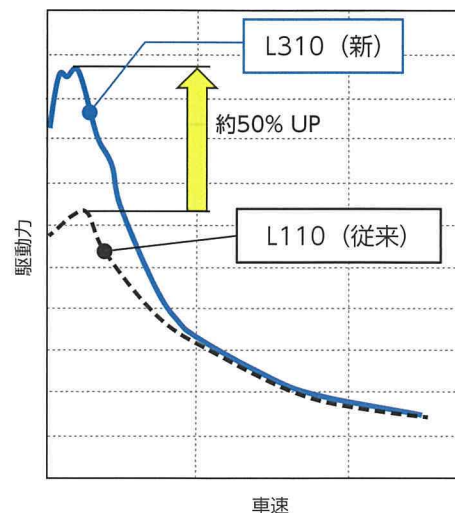


図6 駆動力比較

3.4 静粛性確保

変速機構入力トルクが0Nm時には、モータと変速機構の接続部でトルク抜けが発生する場合がある。それにより、エンジン、モータそれぞれが起振となり、変速機構入力トルクが0Nm時には、モータと変速機構の接続部が歯打ち音発生部位となる可能性がある。

そこで、図7に示すように、モータと変速機構入力シャフトの接続部にトレランスリングを配置した。通常走行時のトルク伝達は隣接のスプラインで行うが、トレランスリングが分担する微小トルク領域のトルク伝達はトレランスリングにて行う。これにより、変速機構入力トルクが0Nm付近では、スプラインでのトルク伝達は行われなため、当該部位での歯打ち音の抑制が可能となった。

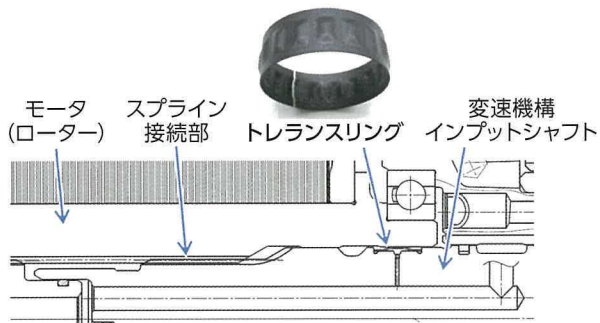


図7 トランスリングの採用

図8に示すように、トレランスリングを採用することで歯打ち音の暗騒音からの突出音圧レベルを56%低減でき、NV性能向上に貢献した⁽⁴⁾。

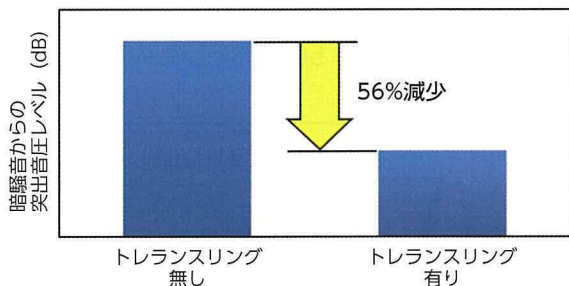


図8 トランスリングによる歯打ち音低減効果

4 変速制御設計

4.1 モデルベース変速制御

図9に変速機構のアップシフト（1速から2速）中の共線図を示す。この時、動力分割機構に連結されたエンジンと発電機、モータそれぞれの回転数と、変速機構、発電機とモータに電力を供給するバッテリーの電力を同時に制御する必要がある。

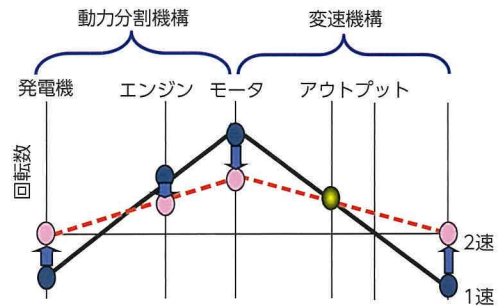


図9 1→2速アップ変速時共線図

この様な多自由度のシステムを制御するために、モデルベースによる変速制御を開発した。この制御の主な設計コンセプトは以下の通りである。

1. 運動方程式からエンジンと変速機伝達トルクを推定すること
2. 運動方程式とパワーバランス式、境界条件から、各回転要素の回転数目標値を算出し、それを実現するように発電機とモータのトルクを制御すること
3. モデルベース変速制御と既存の自動変速機の技術を合わせることで、係合要素への入力トルクとエンジンパワーとトルクを制御すること

図10にモデルベース変速制御を含んだ変速制御の構成を示す。係合要素を制御する油圧は、トランスミッションフルードの温度、変速機構への入力トルク、各構成要素の回転数、バッテリーの状態などに合わせて設定される。

発電機とモータのトルクは、運動方程式やパワーバランス式、バッテリー最大電力、モータ最大トルクなどの境界条件から成るモデルと、変速性能を確保するように調整された目標変速軌道によって制御される。ここで、目標変速軌道は変速中のモータとエンジンの回転数によって調整される。また、上記境界条件が、各要素の制限状態で変化する場合にも変速性能を確保できるように、制限状態に応じてエンジンパワーやトルク、油圧設定も補正制御される⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

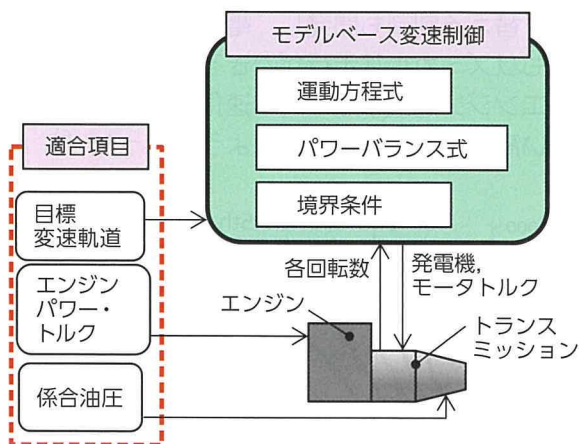


図 10 変速制御構成

運動方程式、パワーバランス式、境界条件は以下となる。

運動方程式：

$$\dot{\omega}_e = k_{eg}T_g + k_{em}T_m + k_{ee}T_e + k_{ec}T_c \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\dot{\omega}_m = k_{mg}T_g + k_{mm}T_m + k_{me}T_e + k_{mc}T_c \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$T_o = k_{og}T_g + k_{om}T_m + k_{oe}T_e + k_{oc}T_c \quad \dots\dots\dots (3)$$

パワーバランス式：

$$T_e\omega_e + P_b = T_c\omega_m + F_1(\omega_e, \omega_m)\dot{\omega}_e + F_2(\omega_e, \omega_m)\dot{\omega}_m \quad \dots\dots\dots (4)$$

境界条件：

$$W_{in} \leq P_b \leq W_{out} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$T_{gMIN} \leq T_g \leq T_{gMAX} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$T_{mMIN} \leq T_m \leq T_{mMAX} \quad \dots\dots\dots (7)$$

定義：

- T_o ：アウトプットトルク
- T_g ：発電機トルク
- T_m, ω_m ：モータトルク，回転数
- T_e, ω_e ：エンジントルク，回転数
- T_c ：変速機伝達トルク
- k_{**} ：係数（回転イナーシャ，動力分割機構ギヤ比）

- F_* ：関数（エンジン回転数，モータ回転数）
- P_b ：バッテリー電力
- W_{in} ：バッテリー入力最大値
- W_{out} ：バッテリー出力最大値
- T_{gMIN} ：発電機トルク最小値
- T_{gMAX} ：発電機トルク最大値
- T_{mMIN} ：モータトルク最小値
- T_{mMAX} ：モータトルク最大値
- $\dot{\omega}_e$ ：エンジン回転角加速度
- $\dot{\omega}_m$ ：MG2 回転加速度

4.2 変速性能

図 11 に、LC500h (L310) のアクセル全開での1速から2速へのパワーオンアップシフトの時系列波形を示す。シフトの変更から油圧制御が開始され、変速機構のインプット回転数が1速同期回転数から離れたタイミングで、エンジントルク制御とモデルベース変速制御が開始される。モデルベース変速制御で発電機とモータのトルクを協調して制御することで、短時間での変速を可能とした。

図 12 に LS460 (8AT：8速自動変速機) 及び競合スポーツクーペ車両とのパワーオンアップシフト（1速から2速）の変速指標（変速時の車両前後加速度より変速特性を指標化したもの）の比較を示す。L310は、正確かつ迅速な変速制御によって、応答性と変速品質を競合トップレベルで両立した⁽⁵⁾。

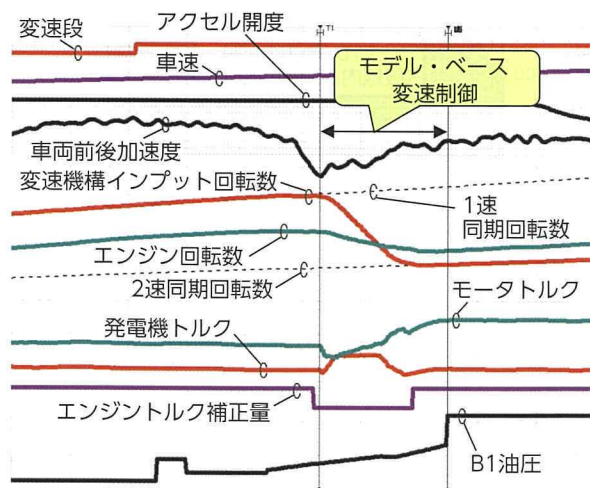


図 11 1→2速パワーオンアップシフト特性 (LC500h (L310) 全開加速 エンジン運転中)

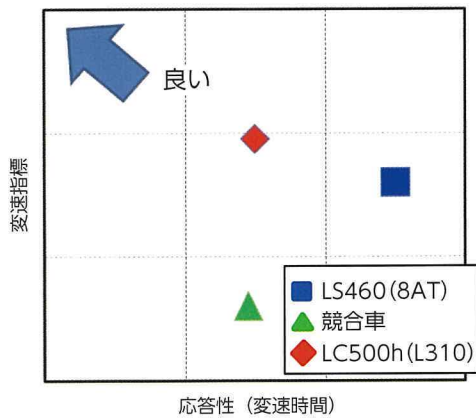


図 12 1→2速 パワーオンアップシフト指標 (全開加速 エンジン運転中)

5 ドライバビリティ向上の仕組み

図 13 には、L110 と L310 の車速に対するエンジン回転数の動作可能域を示す。変速機構をLoギヤに設定し、その減速効果を利用することで、低車速からでもエンジンを最高回転数で運転でき、エンジンから最大パワーを得ることができるようになった。

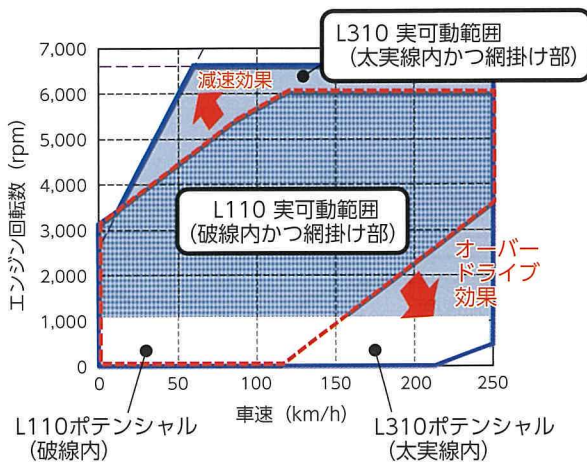


図 13 エンジン動作範囲の拡大

減速効果とオーバードライブ効果によって拡大したL310のエンジン回転数の動作可能域(図13)を利用して、車両加速時のエンジン回転数遷移の改善と、エンジン間欠車速の高車速化を実現できた。車両加速時のエンジン回転数遷移の改善では、最Lo比4.7からクロスレシオに10本の車速上昇に連動するエンジン回転数を設計できるようになった(図14)。更に、ドライバーの要求と車両の加減速、車両の運転状況に応じて、これらのエンジン回転数

を切り替える制御も開発し、電気式無段変速機においてもリズムカルな走行ができるようになった。また、エンジン間欠車速の高車速化では、より静粛性の高い高速巡航を実現できるようになった⁽⁶⁾。

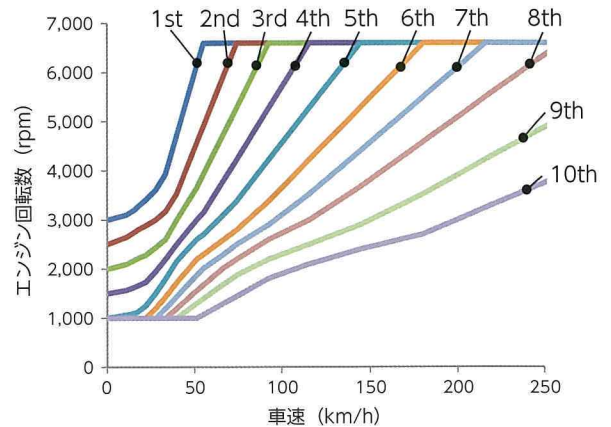


図 14 加速時のエンジン回転数軌跡

6 おわりに

新たに開発したマルチステージハイブリッドトランスミッションについて紹介した。動力分割機構の出力軸に変速機構を最適化して配置することで、燃費性能と動力性能の向上を実現させることができた。

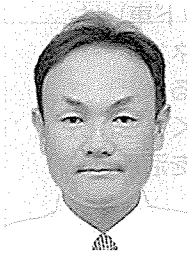
これにより、世界中のユーザーにこれまでにない感動と笑顔をもたらすことができたと確信している。

参考文献

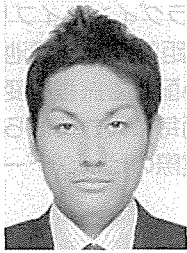
- (1) K. Kamichi, Okasaka, Tomatsuri, et al.: Hybrid System Development for a High-Performance Rear Drive Vehicle. SAE Technical Paper 2006-01-1338 (2006)
- (2) M. Adachi, Endo, Mikami, et al.: Development of a New Hybrid Transmission for RWD Car. SAE Technical Paper 2006-01-1339 (2006)
- (3) K. Okuda, Yasuda, Adachi, et al.: Development of Multi Stage Hybrid Transmission. SAE Technical Paper 2017-01-1156 (2017)
- (4) H. Tateno, Yasuda, Adachi, et al.: Rattling Noise Reduction Technology for Multi Stage Hybrid Transmission. SAE Technical Paper 2017-01-1157 (2017)

- (5) K. Kumazaki, Matsubara, Kobayashi, et al.:
Development of Shift Control System for
Multi Stage Hybrid Transmission. SAE
Technical Paper 2017-01-1150 (2017)
- (6) S. Kato, Ando, Ohshima, et al.:
Development of Multi Stage Hybrid
System for New Lexus Coupe. SAE
Technical Paper 2017-01-1173 (2017)

■ 著者



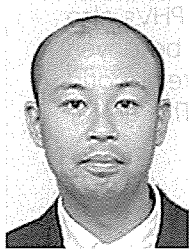
椎葉 一之



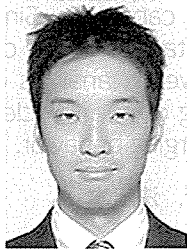
大室 圭佑



玉地 俊明



安藤 郁男



加藤 春哉



熊田 拓郎

実市場ビッグデータを活用した PHV の充電行動分析

Analysis of PHV Charging Behavior Based on Real-World Big Data

橋元 慶太 *1
Keita Hashimoto

小澤 環 *1
Tamaki Ozawa

田多 由佳 *2
Yuka Tada

大橋 喜芳 *3
Haruyoshi Ohashi

嶋田 新也 *4
Shinya Shimada

要旨

HV（ハイブリッド車）の電池容量を増やし外部充電可能とした PHV（プラグインハイブリッド車）は、HV に比べより高い環境性能を実現できる。PHV のメリットの一つは、長距離走行で電池エネルギーが枯渇してもガソリンを使用して走行できるため、行動を制限（次の充電を心配して旅程を変えるなど）されにくいことである。実市場での走行データの分析の結果、充電行動が車両毎に大きくばらつくことが分かった。充電行動はどのような条件によって変わってくるのかについて、実際のビッグデータを活用して解析した。

Abstract

Plug-in hybrid vehicles (PHVs) have even higher environmental performance than conventional hybrid vehicles (HVs) due to their higher battery capacity and external charging capability. Since PHVs also run on gasoline when the battery capacity is depleted over longer distances, PHVs can be driven more freely without anxiety about the next charging opportunity. However, analysis of real-world driving data has identified wide variations in charging behavior depending on the vehicle. This article describes how big data was used to analyze the conditions that affect charging behavior.

キーワード プラグインハイブリッド、ビッグデータ、充電頻度、充電行動分析、決定木

1 はじめに

トヨタは、新車 CO₂ ゼロチャレンジとして、2050 年までに 2010 年比 90%低減に挑戦することを宣言した。走行時の排出 CO₂ 削減にはパワートレーンの電動化が必須であり、中でも PHV（プラグインハイブリッド車）は従来車の利便性を損なわないという面から、車両の電動化対応の柱と位置付けられている（図 1）。

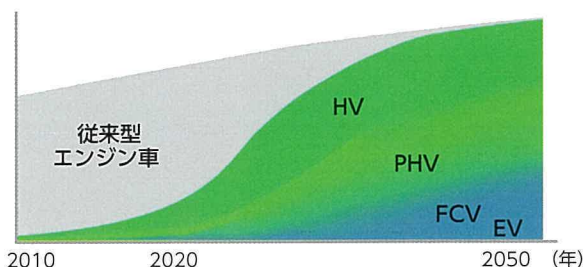


図 1 2050 年に向けたパワートレーン予測

2 PHV 開発の経緯

トヨタは世界に先駆けて量産 HV（ハイブリッド車）であるプリウスを開発し、これをベースに、外部充電を可能にした PHV を開発、大規模実証試験を経て、2012 年には量販 PHV を市場導入した。

PHV の狙いは、頻度の高い近距離走行では EV（電気自動車）、長距離走行では燃費の良い HV として走行することで、ユーザ利便性を損なわずに高い環境性能を実現することである（図 2）。

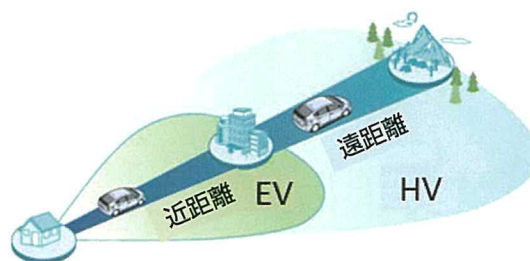


図 2 PHV の走行モード

*1 パワートレーンカンパニー パワートレーン製品企画部

*2 先進技術開発カンパニー 技術管理部

*3 (株) ダッド

*4 (株) トヨタコミュニケーションシステム

2007 年の PHV の少量導入に次ぎ、2009 年には全世界での大規模実証試験を行った(図3)。中でも、一都市における最大規模の実証を行ったフランス東部のストラスブール市での試験結果(写真1)からは、車両の行動範囲等において従来車と同等の利便性を確保できていることが確認できた⁽¹⁾(図4)。

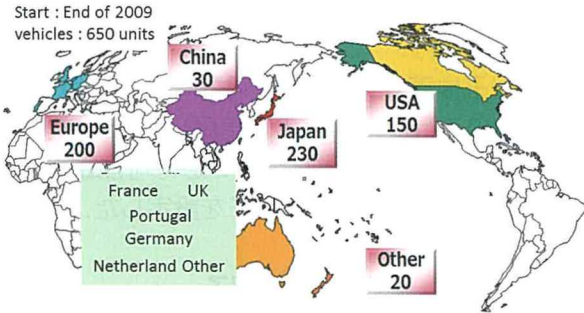


図3 2009年大規模実証試験での導入先と台数



写真1 2009年ストラスブール市(仏)の実証試験



図4 ストラスブール実証での車両走行軌跡

この結果を受け、2012年にはEV距離26.4km(JC08)の量産型PHVを発売し、その2017年モデルでは、電池技術の進化に伴いEV距離を68.2km(JC08)に拡大させた(図5)。

2009年モデル 2012年モデル 2017年モデル

	2009年モデル	2012年モデル	2017年モデル
電池容量 (kWh)	5.2	4.4	8.8
EV走行距離 @JC08 (km)	23.4	26.4	68.2

図5 PHV 開発の歴史

3 量産型 PHV の市場データ

2012年にトヨタ初の量産型PHVとして発売したプリウスPHVの一部の車両から、車載通信機を通じて車両走行データ(ビッグデータ)を入手した(表1)。

表1 取得データ項目例(日本)

車両数(台)	5,388
データ取得期間	2012年2月7日~ 2017年3月31日
総走行距離(km)	116,521,676
総充電回数(回)	2,701,738

3.1 充電行動分析の対象車両

今回、日本の車両の中で、充電行動が比較的パターン化されていると考えられる平日前日の夜間駐車時に、少なくとも週に平均1回以上充電をしている1,871台を対象に、充電行動の解析を行った。ここでの夜間駐車とは、午前0時から6時を含む駐車のことである。夜間に駐車した時に充電をする割合(夜間駐車時の充電頻度)は図6のようになり、車両毎に大きなばらつきがあることが分かった。

これを受けて、車両毎の充電行動がどのような因子に依存するのかを分析した。

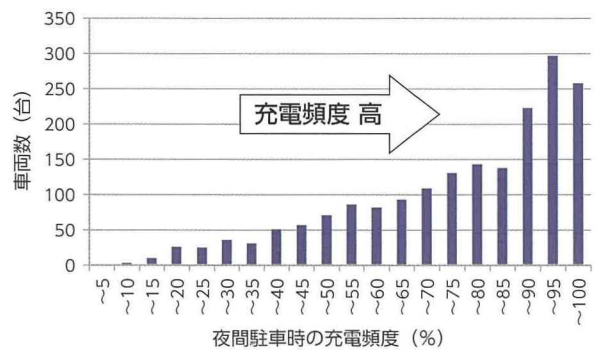


図6 夜間駐車時の充電頻度

4 充電行動の分析

4.1 分析手法

今回の分析では、統計的な分析手法の一つである決定木分析を用いることで、人の主観や先入観によらない普遍的な分析を実施した。決定木とは、木構造のモデルを扱い、アルゴリズムに基づいて、多数の因子の中から目標行動を左右する影響因子とそのしきい値を抽出し、それぞれの因子の相対的な重要度を判定する手法である。例えば、表2のように「外出をする」という目標行動に対し、各因子を設定し、その寄与度を分析すると、図7に示される「決定木」と、表3に示される「影響因子と重要度」が得られる。この例によれば、「外出をする」という目標行動は、天気、気温といった因子に大きく影響を受けるが、湿度にはあまり影響を受けないことが分かる。

表2 因子の例 (目標行動=「外出する」の場合)

No.	目標行動 外出したか	因子					
		天気	気温 (°C)	風速 (m/s)	湿度 (%)	日照 時間 (h)	降水量 (mm)
1	した	晴れ	25	4	45	8	0
2	しなかった	晴れ	23	7	50	7	0
3	しなかった	雨	34	13	69	1	17
4	した	雨	33	2	64	2	8
13	しなかった	晴れ	36	8	46	9	0
14	した	曇り	29	3	46	3	0
15	した	晴れ	32	3	46	7	0

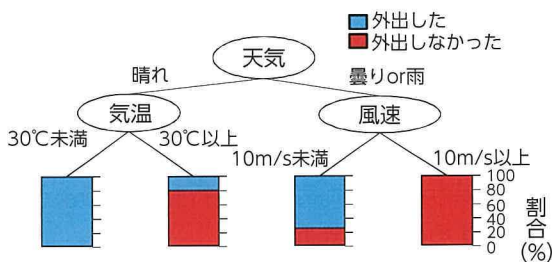


図7 決定木の例 (目標行動=「外出する」の場合)

表3 抽出された影響因子と重要度

順位	因子	重要度
1	天気	50
2	気温	25
3	風の強さ	20
4	湿度	5

4.2 充電行動における目標行動と因子

今回は、目標行動を「夜間駐車時における充電の実施」と設定した。影響因子は、走行や駐車などの「行動因子」と、天気や外気温、ガソリン価格などの「環境因子」に分類した。

総計 178 万回に及び、車両の夜間駐車に対する充電実施の有無を決定木分析にて解析した。

4.2.1 行動因子

行動因子は表4のような、駐車をした曜日や時間、直前の走行距離などの「車両の使われ方」や、SOC (電池容量) や残りのEV 走行可能距離などの「車両情報」にかかわる因子を設定した。

表4 行動因子

駐車をした曜日	直前の走行の走行時間
駐車をした時刻	直前の走行の走行距離
駐車時間	次の駐車時の駐車時間
駐車時のSOC	次の駐車時が夜間駐車
その日最後の夜間駐車	次の走行の走行時間
残EV 走行可能距離	次の走行の走行距離
一つ前の駐車時の駐車時間	一つ前の駐車時に充電したかどうか
一つ前の駐車時が夜間駐車	初回データ取得からの経過日数

4.2.2 環境因子

環境因子は、ガソリン価格や天候、気温など、車両の行動に直接影響を与えない外的な因子を設定した (表5)。

表5 環境因子 (主に外的要因)

ガソリン価格	風速
ガソリン価格変動	現地気圧
気温	海面気圧
降水量	湿度
降雪量	露点温度
積雪量	天気
日照時間	視程
風向	

4.3 充電行動のグルーピング

決定木分析を行った結果、「夜間駐車時の充電頻度」を表す図6は、異なる影響因子、重要度、決定木をもつ3つのグループに分けられることが分かった (図8, 9)。各グループを①~③とし、以降、この3つのグループについて説明する。

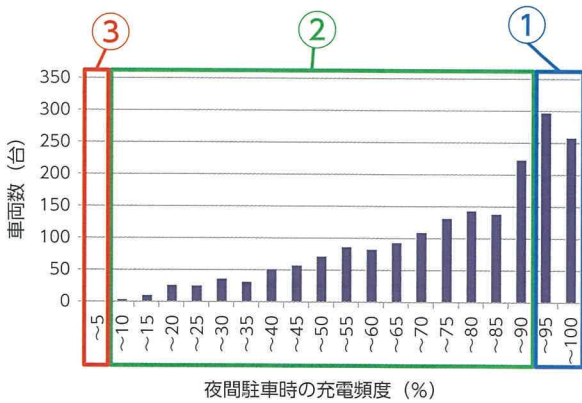


図8 夜間駐車時の充電頻度

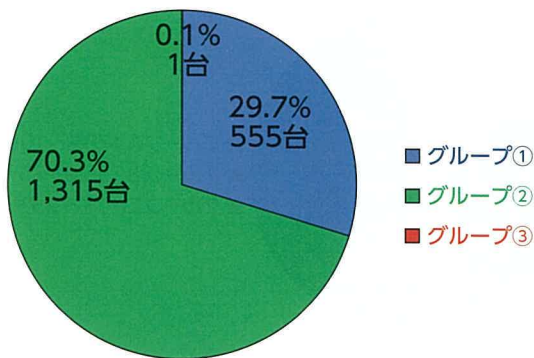


図9 グループ毎の車両台数割合

グループ①の決定木解析の結果は図10、表6となり、充電に影響を与える影響因子として「その日最後の夜間駐車」「駐車時間」「駐車をした時刻」が得られた。その日最後の夜間駐車であり、ある程度の駐車時間があれば充電をすることから、夜間駐車時の充電率が高くなっていることが分かる。

このグループの車両では、他の行動因子 (SOC など) や環境因子の影響は少ない。

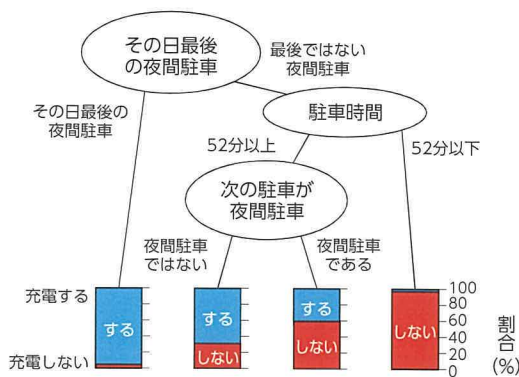


図10 グループ①の決定木

表6 グループ①の影響因子と重要度

順位	因子	重要度
1	その日最後の夜間駐車	39
2	駐車時間	31
3	駐車をした時刻	23
4	次の駐車が夜間駐車	2
5	一つ前の駐車が夜間駐車	1

重要度リストの順位3に「駐車をした時刻」がある。駐車時刻が夕刻に集中しているが、この因子は決定木には出現しない (図10、11)。夕刻に駐車をした場合、その駐車はその日最後の駐車であり長時間駐車になる可能性が高いため、「駐車をした時刻」は「その日最後の夜間駐車」と「駐車時間」の2つの因子に含まれると考えられる。



図11 グループ①の駐車をした時刻のデータ数

グループ②の解析結果は図12、表7となり、充電に影響を与える影響因子として「駐車時SOC」「その日最後の夜間駐車」「駐車をした時刻」「駐車時間」が得られた。

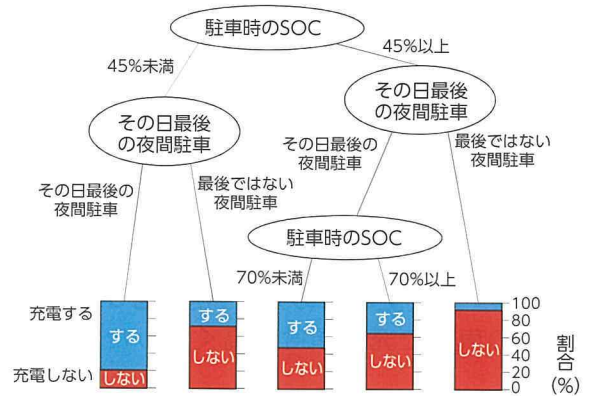


図12 グループ②の決定木

表7 グループ②の因子と重要度

順位	因子	重要度
1	駐車時のSOC	45
2	その日最後の夜間駐車	22
3	駐車をした時刻	13
4	駐車時間	11
5	一つ前の駐車で充電したかどうか	6
6	一つ前の駐車時の駐車時間	1

このグループの充電行動は駐車時SOCや駐車時のタイミング等によって決定されており、効果的に充電ができる時に充電をする、「充電の最適化」を図っていると考えられる。つまり、「1. 駐車時のSOCが高く」「2. その日最後の夜間駐車ではなく」「3. 駐車時間が短い」時は充電しても効果が少ない場合が多いと判断できるため、このような条件に合致する駐車時に充電をしないことは充電最適化の範囲内であると考えられる。

重要度リストの順位3の「駐車をした時刻」は、グループ①と同様に「その日最後の夜間駐車」と「駐車時間」に含まれるため、除外できる。

グループ③では、一定の影響因子が現れず、決定木解析を行うことができなかった。充電行動が特定の走行条件や環境条件に影響を受けていないため影響因子が特定できなかったと考えられる。

4.4 充電を期待する条件下での再グルーピング

グループ①、②の分析結果より、夜間駐車時の充電を期待する条件として以下を考慮すべきであることが分かった。

<充電を期待する条件>

1. 駐車時SOCが10%以下
2. その日最後の夜間駐車である
3. 駐車時間が長い(30分以上)

これらの条件に合致した駐車における充電頻度を分析すると、充電率75%以上の車両数が全車両の80%以上を占めることが確認できた(図13, 14)。夜間駐車時の充電頻度(図8)に対し、大多数の車両で充電頻度が高くなったことが分かる。

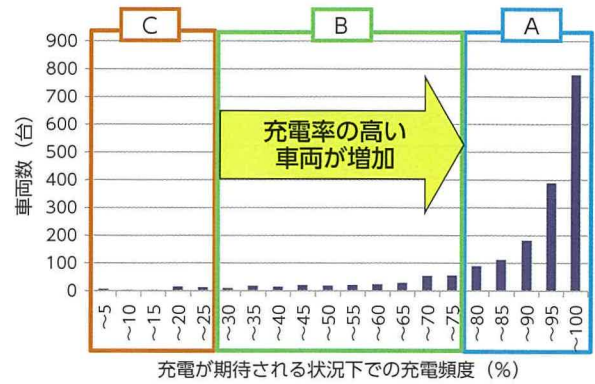


図13 充電を期待する条件下での充電頻度と対応する車両台数

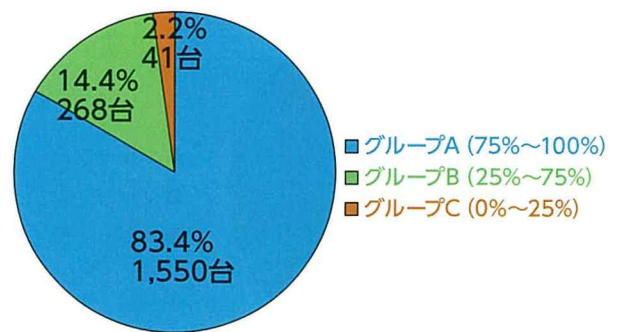


図14 グループA, B, Cの車両台数割合

充電を期待する条件下での充電頻度において、75%以上をグループA、75~25%をグループB、25%以下をグループCと分類する。グループAでは充電を期待する条件下において80%以上の確率で充電されていることが分かった。一方、グループBの車両は充電頻度が25~75%と大きくばらついている。そこで、グループBの充電行動がどのような因子に影響されるか更に決定木を用い分析した。

4.5 グループBの充電行動分析

前回と同様の因子を使い、グループBの充電行動を決定木で分析した結果、図15と表8となり、環境因子である「ガソリン価格」と、行動因子である「経過日数」が重要度の高い影響因子として得られた。

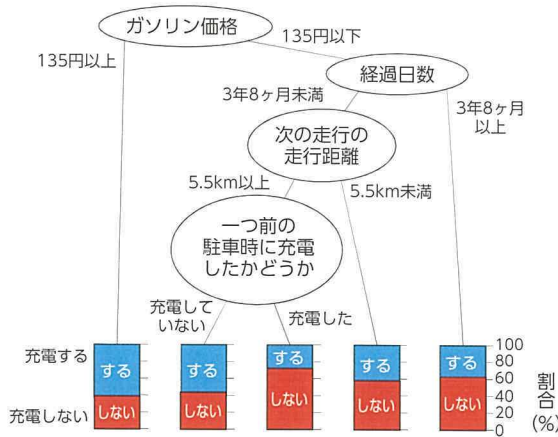


図 15 グループ B の決定木

表 8 グループ B の因子と重要度

順位	因子	重要度
1	ガソリン価格	51
2	初回データ取得からの経過日数	29
3	次の走行の走行距離	6
4	次の走行の走行時間	4
5	一つ前の駐車で充電したかどうか	4
6	直前の走行の走行距離	1
7	直前の走行の走行時間	1

グループ C はどんな環境下においても充電率が低く重要度の高い影響因子が出現しないことから、グループ A、B のガソリン価格と経過日数に対する充電頻度の影響を確認した。

ガソリン価格に対する充電頻度では、グループ A がほとんど影響を受けないのに対し、グループ B はガソリン価格が高くなると充電率が上がる傾向が確認できる (図 16)。ガソリン価格が高くなるほどガソリン走行に対する電気走行の経済メリットが増えることから、グループ B では、経済性を考慮して充電行動が変化している可能性がある。

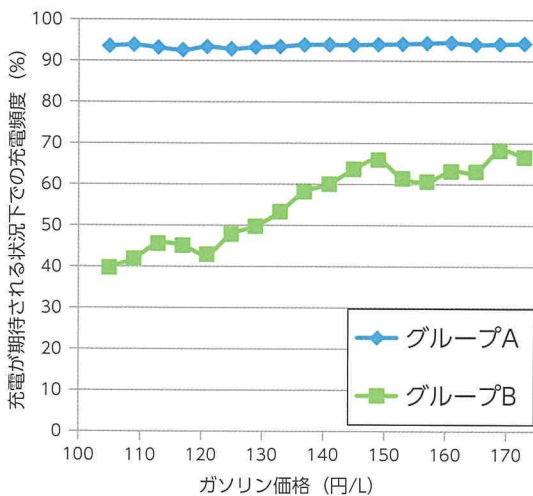


図 16 ガソリン価格の影響 (グループ A, B)

経過日数に対する充電頻度では、グループ A は経過日数によらず高い頻度を維持しているが、グループ B では経過日数とともに頻度が低下していることが確認できる (図 17)。グループ B では、充電のモチベーションが経過日数とともに低下し、充電頻度が減少している可能性がある。しかし、経過日数に対する充電頻度の低下に関しては、充電の利便性を向上することで改善できる可能性がある。

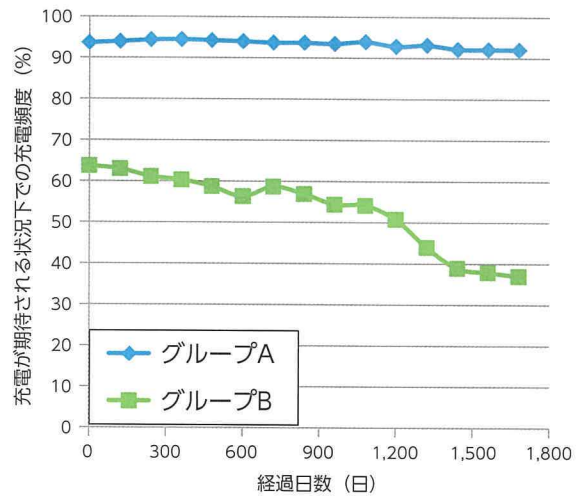


図 17 経過日数の影響 (グループ A, B)

5 まとめ

車両の夜間駐車時の充電行動は駐車時の SOC や駐車時間、その日最後の夜間駐車であるかどうかの影響を受けることが分かった。上記条件がそろわない場合は充電しても効果が少ないと考えられることから、このような条件に合致しない駐車時は充電をしなくても、充電最適化の範囲内であると考えられる。

上記条件に合致する場合のプリウス PHV の充電行動を分析した結果、80%を超える大多数の車両が夜間に駐車したときに充電を実施していることが分かった。

また、14%程度の車両で、夜間駐車時の充電頻度に大きなばらつきがあることも分かった。これらの車両では、その時点のガソリン価格や車両の経過日数により、充電頻度が低下する現象が確認できた。しかし、経過日数に対する充電頻度の低下に関しては、充電の利便性を向上することで改善できる可能性があるため、今後の開発が必要である。

■参考文献

- (1) 橋元慶太, 武内, 板垣: 実証実験データを基にしたプラグインハイブリッド車の環境性能の分析. 自動車技術会論文集. Vol.46, No.6, P.1079 - 1085 (2015)

■著者



橋元 慶太



小澤 環



田多 由佳



大橋 喜芳



嶋田 新也

エンジン性能とアルミ鋳物を変える革新生産技術 CS コアプロセスの紹介

Introduction of Innovative CS Core Process Production Technology Affecting Engine Performance and the Aluminum Casting Process

渡邊 浩庸^{*1}

泉 尚吾^{*1}

岡田 真幸^{*1}

Hirotsune Watanabe Shogo Izumi

Masaki Okada

特集

要旨

TNGA (Toyota New Global Architecture) パワートレーンでシリンダーヘッドのアルミ鋳造工程に採用された、革新生産技術「CS コアプロセス」について紹介する。オリジナル技術として開発されたCS コアプロセスは、高い熱効率と高出力を両立するダイナミックフォースエンジンに貢献するため、シリンダーヘッドの形状自由度を飛躍的に向上させた。また、環境性能と鋳造品質に優れ、古い鋳物世界を刷新する50年ぶりの新技術として新規ラインに採用し、グローバル展開中である。本論文では、高熱効率エンジンのヒートマネージメントに必要な不可欠であったCS コアプロセスの特性を、「いいクルマ」と「いい工場」づくりの視点から紹介する。

Abstract

This article describes the clean and smooth/circulation sand (CS) core process, an innovative production technology adopted in the aluminum cylinder head casting process of powertrains developed following the Toyota New Global Architecture (TNGA) design philosophy. Developed as an original technology by Toyota Motor Corporation, the CS core process drastically improves the flexibility of cylinder head design to help realize Toyota's Dynamic Force engine series, which balances high thermal efficiency with high power. The CS core process also enables superior environmental performance and casting quality. It was adopted on the new TNGA production lines as the first new casting technology in fifty years, and is currently being introduced on a global basis. This article details the characteristics of the CS core process as an indispensable part of heat management in engines with high thermal efficiency from the standpoints of developing ever-better cars and ever-better plants.

キーワード シリンダーヘッド, 中子, アルミ鋳物, 無機中子, CS コア, 鋳造

1 はじめに

1.1 もっといいクルマづくりと良い工場づくり

近年の劇的な気候変動など、地球温暖化によるとされる環境変化への対応として、自動車業界では燃費向上などのCO₂排出抑制は一刻の猶予も許されない状況である。また同時に、製造工場消費されるエネルギーや、工場からの排出物質による地球環境への負荷を低減することも求められている。

1.2 生産技術開発の背景

アルミ鋳物産業では高熱を扱うために、工場からのCO₂排出量は自動車工場全体の中でも多くの割合を占め、省エネルギー化への取り組みは急務で

ある。さらに、工場からの排出物質への環境規制は年々厳しくなり、世界的な傾向として、鋳造施設から排出される臭気ガスゼロを目指す技術開発競争が始まり、製造工程に反映され始めている。しかしながら、市販技術では臭気ガスを大幅に低減できる反面、製品形状の設計自由度の低下や、製造でのリサイクル技術が未確立などの課題が残されており、「もっといいクルマづくり」「もっといい工場づくり」に貢献するための生産技術として満足できるレベルとは言えないのが現状である。

そこで、エンジンとアルミ鋳物工場の環境性能向上の両立ができれば、今後のアルミ鋳物のものづくりを支える生産技術のカギになると考え、オリジナル技術の開発に取り組んだ。

*1 パワートレーンカンパニー 鋳造生技部

2 アルミ鋳物の解説とエンジン開発の背景

2.1 シリンダーヘッドの構造

TNGA (Toyota New Global Architecture) パワートレーンとダイナミックフォースエンジンを写真1に示す。また、ダイナミックフォースエンジンの断面と、そのシリンダーヘッドの断面構成図を図1に示す。シリンダーヘッドはエンジン燃焼室の上部を構成し、動弁機構、吸排気機構、油路、冷却水路などの機能を有する重要な部品である。

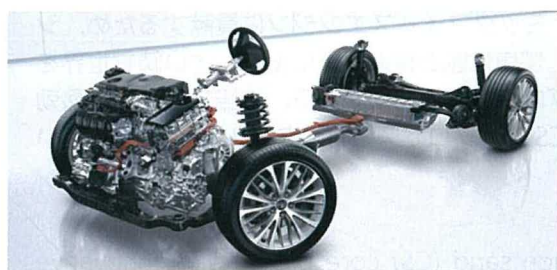


写真1 TNGAパワートレーン

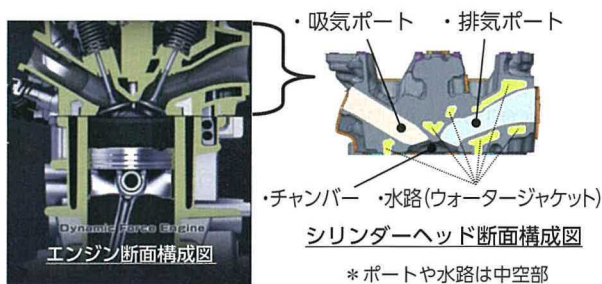


図1 エンジン断面とシリンダーヘッドの構成

シリンダーヘッドの素材はアルミ鋳物工場で鋳造され、機械工場で機械加工されたあとエンジンに組付けられるが、ここではアルミ鋳物としてのシリンダーヘッド(図2)について解説をする。

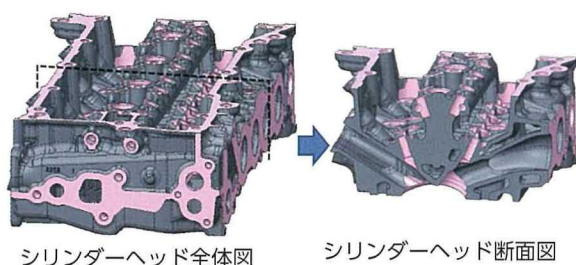


図2 シリンダーヘッドの全体図と断面図

一般的には燃焼室の形状や強度が注目されるが、シリンダーヘッド内部は多くの中空部から構成されている(図1, 2)。これら中空部は、吸排気ポート、油路、水路であり、中空部間の壁厚、形状、精度、強度、シール性などが相互に作用して、エンジンの性能や信頼性を左右する重要な機能を担う。

近年は、エンジンの熱効率を高めるためのヒートマネージメント強化から、燃焼室や排気ポート等を冷却する為の水路(以降はウォータージャケット=WJと記す)は急激に複雑化している。

2.2 アルミ鋳造シリンダーヘッドの作り方

シリンダーヘッドのアルミ鋳造工程を解説する。シリンダーヘッドは外型にアルミの溶湯を充填し、凝固させて造る。吸排気ポートやWJなどの中空部は、中子(なかご)によって形成される。図3にシリンダーヘッド・外型・中子の断面位置の関係図を示す。

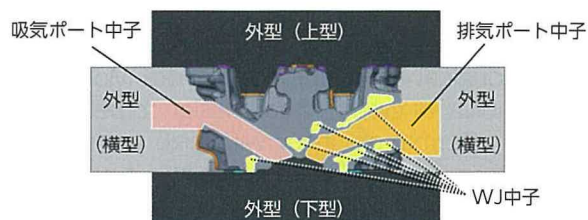


図3 外型と中子の組付け説明図

製品で中空部となる形に造型された耐火物の固まりが中子で、あらかじめ外型の内に組み合わせ設置する。中子は、アルミ溶湯に鋳込まれても焼失や変形をしない耐火性の材料(砂)で造られている。鋳造工程を図4に示す。鋳造工程では、中子を外型に組付け、外型を閉じ、外型内にアルミ溶湯を充填して冷却凝固させる。凝固したら外型からシリンダーヘッド素材を取り出して、仕上げ工程に送る。仕上げ工程では、シリンダーヘッド素材にパイプレーターなどで衝撃を加え、中子のみを崩壊させて砂粒状にし、排砂穴から取り出し除去する。中子のあった中空形状が吸排気ポートやWJとなる(図1, 2)。

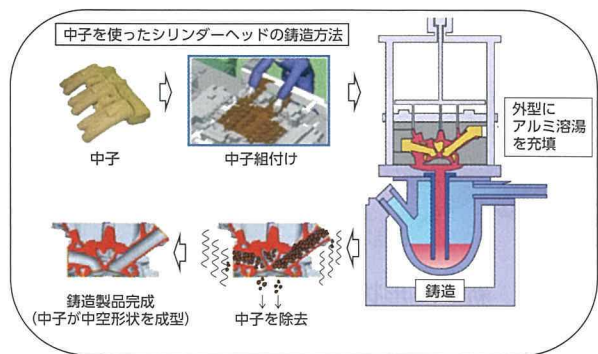


図4 アルミ鋳造工程とシリンダーヘッドの造り方

2.3 中子の作り方

トヨタでは、中子を造型するのにシェルモールド法を用いてきた。図5に中子の造り方を示す。

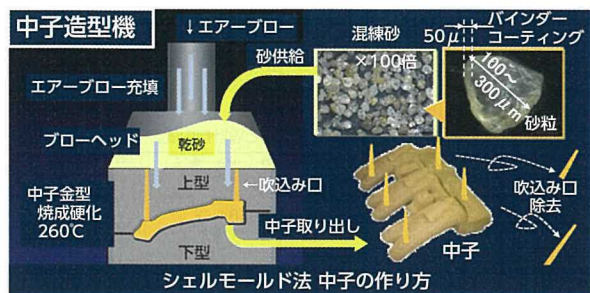


図5 中子の造り方 (シェルモールド法)

中子とは、製品で中空部になる形に造型された耐火物の固まりで、耐火物とは直径が0.1～0.3mm程度の天然珪砂である。砂には砂粒同士を固めるための粘着剤として、フェノール系樹脂がコーティングされている。砂は中子造型機のブローヘッドから吹込み口を通り、中子型のキャビティにエアブローによって充填される。充填された砂は約260℃の中子型で加熱硬化される。中子は吹込み口と一体になって型から取り出され、吹込み口が除去されることで中子が完成する。

2.4 エンジン開発の背景と形状の進化

今回開発されたダイナミックフォースエンジンは、最大熱効率と比出力で従来のトレードオフラインを突き抜けている。最大熱効率はガソリン車で40%、ハイブリッド車で41%に達し、世界トップレベルのエンジン性能となっている(図6)。

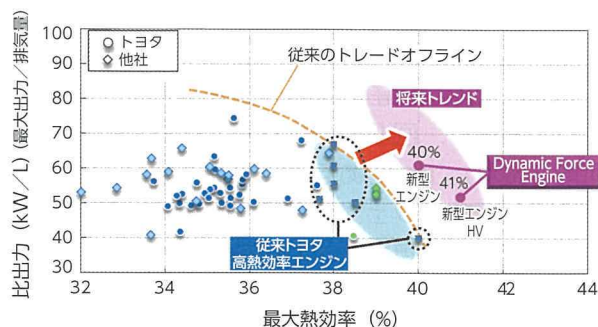


図6 新エンジンの熱効率と出力の位置付け

具体的には、ノック限界を拡大するため、ヒートマネジメントシステムとして電動ウォーターポンプと電子制御サーモスタットを採用している。この冷却制御の変更に伴い、燃焼室周りのWJ形状に大幅な形状見直しが求められた。特に細径化されたEX-EX弁間WJを図7に示す。

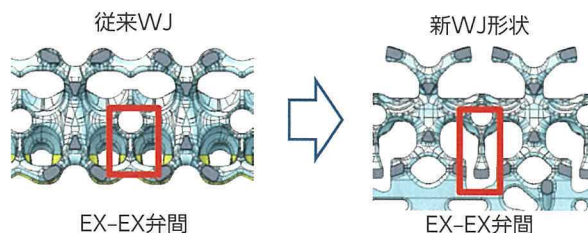


図7 EX-EX弁間WJの新旧比較

この細径化により、流量は従来比1/2にしながらチャンバー壁温度を10℃低減させることが可能となる。このような設計変更により、新形状WJでは分割化、網目構造化が促進された(図8)。



図8 新旧WJ形状の変化

上記WJの網目構造化により、中子造型工程、アルミ鋳造工程及び仕上げ工程のそれぞれで課題が発生し、生産技術としての革新的なレベルアップが求められた。

2.5 生産技術開発の背景と課題

これまでトヨタで採用してきたシェルモールド法は、製品の形状自由度が比較的高く、製造時の取り扱い性も良く、回収砂をリサイクル使用することが可能な優れた工法である。しかし、砂にコーティングする粘着剤のフェノール系樹脂が、中子成型工程や鑄造工程で燃焼され、ガスを発生させる。このガスの臭いや煙、汚れこそが、鑄物工場「臭い汚い危険」の根源なのである。

臭気ガスゼロを達成する一つの方法として、粘着剤を水ガラスに置きかえる、熱硬化無機中子工法の特殊粘結剤が市販されている。図9に水ガラスの熱硬化反応式を示す。熱硬化する過程で水蒸気しか排出しないため、環境性能と鑄造品質に優れている反面、水ガラスの物性に起因した多くの課題を解決する必要がある。

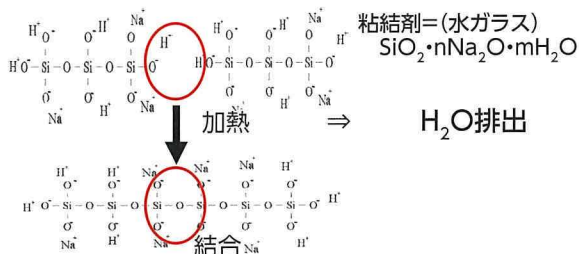


図9 熱硬化無機中子の硬化反応

3 いいクルマ、いい工場づくりにおける課題

3.1 WJの網目構造化による課題(いいクルマ)

もっといいクルマづくりに向けて網目構造WJを採用するにあたり、中子成型の観点から3つの課題を説明する。

3.1.1 充填性の悪化

1つ目は、中子の充填性である。中子断面積が小さい網目構造WJでは、エアブロー充填に必要な面積分の吹込み口を設置できる箇所が足りずに、充填性を確保できない。従来工法での成型試験で発生した充填不良を図10、11に示す。吹込み口面積を拡大するための形状変更は設計自由度を低下させてしまう。

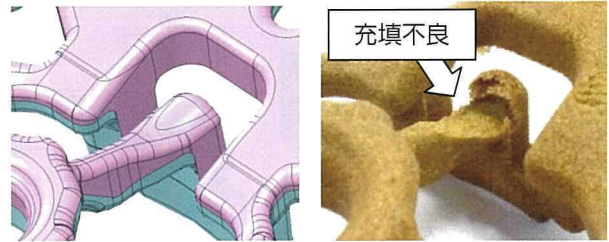


図10 新WJ形状

図11 従来工法試験

3.1.2 排砂性の悪化

2つ目は、シリンダーヘッドからの排砂性(砂抜き)である。網目構造WJになることで中子断面積が縮小し、シリンダーヘッドから砂を除去する際の経路が大幅に制約され、排砂性が悪化する。

図12にWJ形状と排砂性の関係を示す。TNGAシリンダーヘッドでは、従来のシェルモールド法の排砂限界を大幅に超える排砂能力が必要となり、生産技術面でブレイクスルーが必要不可欠である。

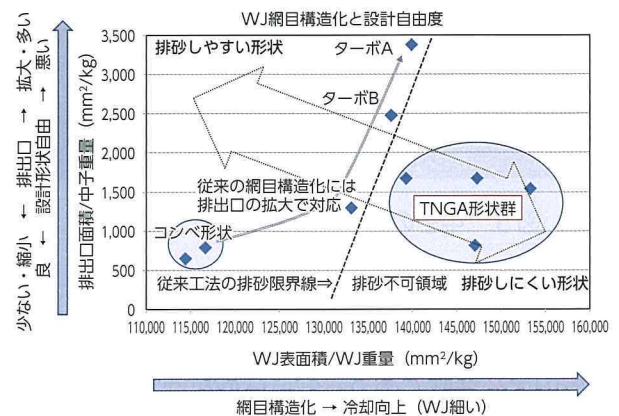


図12 WJの網目構造化と排砂性の関係

3.1.3 WJ折れ(ベーニング)の増加

3つ目は、鑄造時の熱負荷によるWJ折れ(ベーニング)である。ベーニングとは、鑄造時のアルミニウム溶湯からの熱により、中子に使用している砂が熱膨張することで中子が折れる現象である。主として細かいWJにて問題となるため、今回の網目構造WJにおいては中子断面積の縮小に伴いベーニングが顕在化する(図13)。

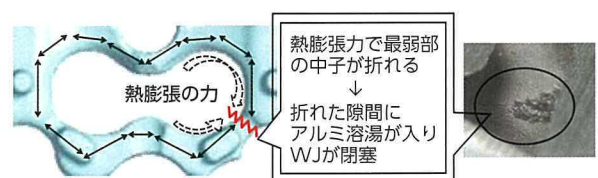


図13 ベーニングのメカニズム

3.2 熱硬化無機中子開発の課題 (いい工場)

3.2.1 設備の大型化と砂の物流負担

シェルモールド法の混練砂は乾態砂で、エアブロー充填時の流動性が比較的良好で、現場でも管理保管が容易であった。フェノール樹脂は焙焼で焼失するのでリサイクルも可能であった。ただし、1台の集中式混練装置で混練砂を作り、工場内に数十台ある中子造型装置まで、1トン単位の砂缶をフォークリフト等で運搬する物流が必要であった。

一方、熱硬化無機中子は水溶性の水ガラスのため、混練砂は湿態砂になる。写真2に乾態砂と湿態砂を示す。

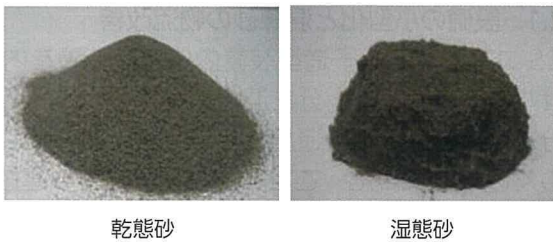


写真2 乾態砂と湿態砂

湿態砂は、エアブロー充填時の流動性に劣り、キャビティへの充填性が難しいので、製品の形状自由度が低く、含有水分量によって流動性や中子の強度が変動してしまい、乾燥しすぎると硬化しない。このため中子造型装置は高圧力・大流量エアブローで大型化が必須となる。混練砂はシェルモールド法と同様に集中式混練装置で作るが、湿態砂は重く、水分管理が厳格で現場の負担となる。また、大量保管はできず、使用可能時間は数時間以内とされ、超過すれば廃却することになる。

3.2.2 回収砂リサイクルの開発課題

シェルモールド法の砂再生は焙焼方式で熱効率重視のため、混練砂と同様に、1台の集中式再生装置で焙焼処理を行う。工場内に数十台ある砂落とし装置などから、1トン単位の排砂缶をフォークリフト等で回収運搬する物流を実施している。

熱硬化無機中子の水ガラスは、無機物質なので焙焼しても焼失せず、リサイクルが難しい。約600℃で砂粒同士が焼着し、砂が塊化して焙焼炉内で流動性が悪くなり、約700℃以上でガラス化すると、砂から剥離する工程では歩留まりが悪化する。

これらの理由で、回収砂のリサイクル処理は確立されておらず、様々な方法が研究されてきたが、工業的な成功例の報告は無かった。

市販されている水ガラス系特殊粘結剤には、流動性、排砂性などの弱点を補う効果を狙って特殊な添加材が配合され、リサイクル性を難しくしていると推測される。グローバル展開を考えると、規格品をベースにした汎用的で安価な粘結剤の開発も平行で実施することが求められた。

熱硬化無機中子の開発課題を明確に示すため、シェルモールド法との比較表を表1に示す。

表1 無機中子とシェルモールド法の比較表

工法比較	排出ガス	鑄造品質	形状自由度	製造取扱い性	回収砂リサイクル	粘結剤
シェルモールド法	X	○	○	○	○	市販品
熱硬化無機中子法	○	◎	X	X	X	特殊品

4 課題解決とブレイクスルーポイント

4.1 網目構造 WJ へのブレイクスルー (いいクルマ)

網目構造 WJ を採用するために、中子造型技術のブレイクスルーが必要であり、今回、発泡砂による流動性改善、中空化による排砂性改善及び熱膨張低減によるベーニング改善を実施した。

4.1.1 WJ の充填性向上

CS コア技術においては、従来の熱硬化無機中子とは大きく異なり、湿態砂に界面活性剤を添加し発泡させることで、砂と砂の摩擦抵抗低減による圧倒的な充填性の改善を実施しているのが特徴となる。

図14に、従来工法とCSコアの吹込み口面積の比較を示す。CSコア技術では、良好な充填性を利用してWJ網目構造を実現させただけでなく、製品形状には不要な吹込み口面積を減らし、設計自由度をさらに向上させた。

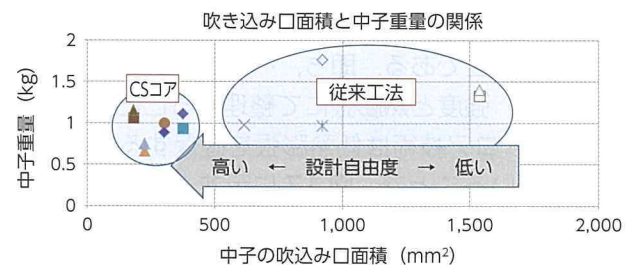


図14 吹込み口面積と中子重量による工法の比較

4.1.2 排砂性の向上

排砂性の改善として、図15の模式図で示すように、CSコア技術では中子内部の中空化及び中子の最外殻のみを硬化させることで、中子形状を確保しながら排砂性を向上させることを特徴とする。

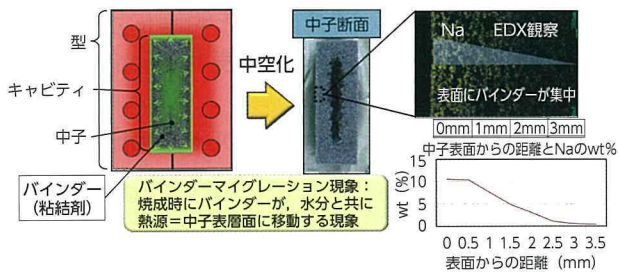


図15 中子の最外殻の硬化メカニズム

結果として、図16に示すように、従来技術では到底なしえなかった排砂能力を確保した状態で、ダイナミックフォースエンジンのキー技術である網目構造WJの成立を可能としている。

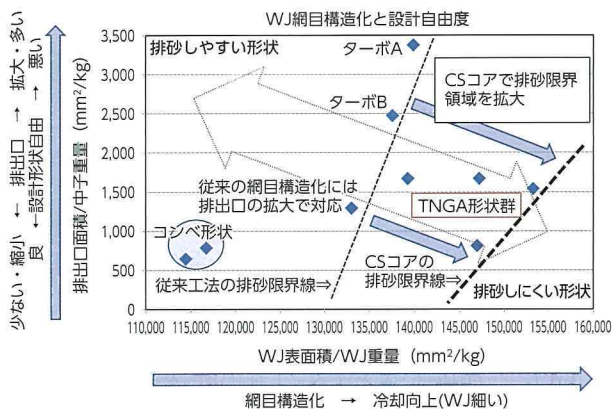


図16 CSコア技術の排砂性

4.1.3 ベーニング対策

前項で述べたように、ベーニングとは、中子の強度が casting 時の熱膨張に耐えることができずにWJが折れることである。即ち、ベーニングの発生のしやすさは、強度と熱膨張にて整理することが可能である。CSコア技術は低熱膨張を確保するために人工砂を用いることで、図17に示すように、従来工法に対してベーニング耐性を向上させることが可能となった。今回、EX-EX 弁間 WJ 中子の最小断面積は、従来の限界以下に縮小しても熱膨張によるベーニングの発生はない。

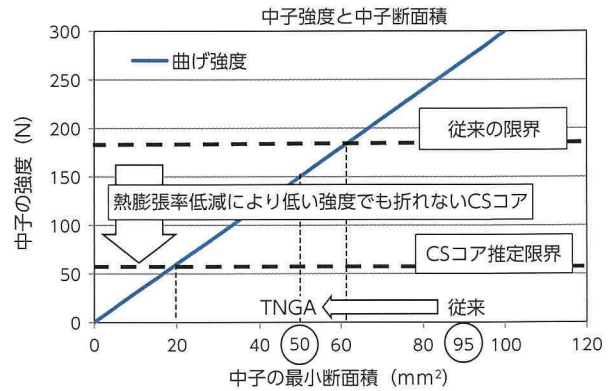


図17 中子強度とWJ中子の断面積の関係

4.2 いい工場へのブレークスルーポイント

4.2.1 設備の小型化と混練砂の物流改善

CSコアでは、中子造型装置内に混練装置を内蔵させた。ワンショット分を混練、射出成型し、減った分だけ砂と添加剤を追加して、混練するムダのないしくみを実現した。これにより、混練砂の運搬・保管作業は不要となった。

シェルモールド法の中子造型機では、煙や臭気を捕集するダクト・フードなどの構造物が設備上部にあったが、CSコアでは無煙・無臭の特性を生かし、さらに金型と充填装置の位置関係を根底から見直すことで、設備構造を刷新し基本骨格の高さ1.5mを実現した。図18に、シェルモールド用設備とCSコア設備の外観を示す。これにより、ライン内の見通しが飛躍的に良好になった。

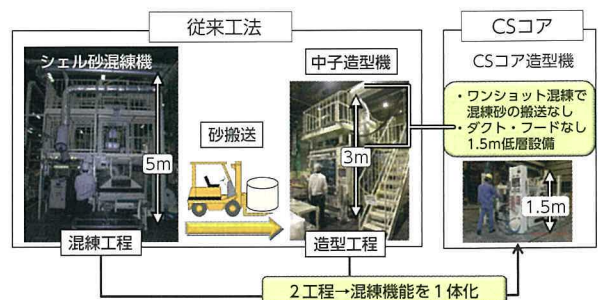


図18 従来工法とCSコア造型機

4.2.2 回収砂のリサイクル技術確立

リサイクル技術が確立できたのは、大きな発想の転換が始まりだった。一般的には、回収砂に残った水ガラスを無効化するために強力に研磨して取り除く方法か、700℃以上の高温で焙焼して水ガラスをガラス化したあとに研磨して取り除く方法か、その2つを組み合わせた方法が考えられていた。それ

らは前項で述べた理由で成立しなかったが、評価試験の中で、ガラス化する前の 400℃前後の低温焙焼でも水ガラスに化学的変化があることに注目し、ガラス化させない不活性化処理と、不活性分のみ剥離させる弱い研磨を組み合わせた「低温加熱と弱研磨」工法がブレークスルーとなって、回収砂のリサイクル処理が可能になった。

加熱工程では約 400℃の低温度で砂表面の水ガラスを不活性化、剥離工程では機械式研磨で不活性化させた水ガラスを剥離処理、分離工程では水ガラスのダスト分と砂を分離して再利用が可能になる。

再生処理での残留バインダー指数は、**図 19** の上グラフのように減少する。残留バインダー指数がゼロにはならないが、残留活性分は次の造型時に粘結剤として機能する。**図 19** の下グラフで示すように、50 回以上のリサイクル実証においてバインダー残留指数の規格値以下を証明した。

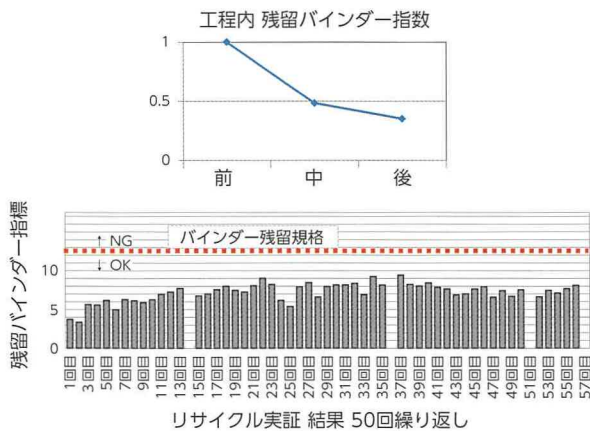


図 19 砂リサイクルのバインダー残留指数

「低温加熱と弱研磨」工法により、熱源はすべて電気ヒーター化し、設備の小型化と CO₂ 排出量の低減にも効果があり、**図 20** に示すように CO₂ 排出量は従来の 2 分の 1 以下となり、大型設備に比べ、投資、処理能力、専有面積を 10 分の 1 程度に小規模化することができた。**図 21** に、従来の大型砂リサイクルシステムと CS コアの小規模リサイクルシステムの外観図を示す。

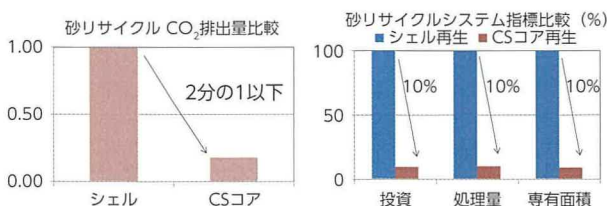


図 20 CO₂ 排出量とその他指標の比較

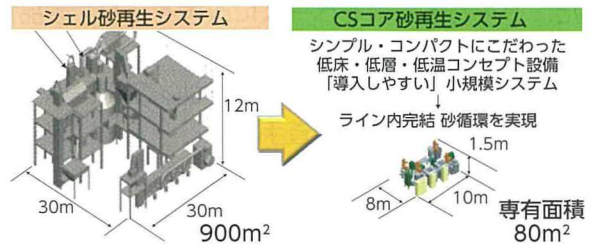


図 21 回収砂リサイクルシステムの外観図

この小規模リサイクルシステムと、ワンショット混練機能付きの中子造型機の組み合わせにより、砂のリサイクル循環は、9,000 (台/月) 規模のラインで自己完結することができるようになった。**図 22** に砂物流のイメージ図を示す。

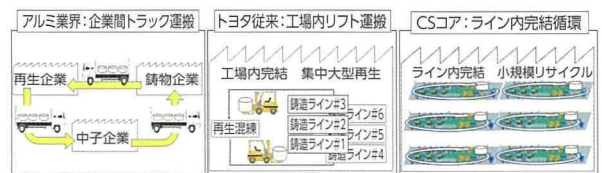


図 22 砂物流イメージ図

アルミ鋳物産業では、砂の物流は、砂再生リサイクル企業から中子造型企業、アルミ鋳物企業を経て、砂再生リサイクル企業へと戻る循環物流が一般的だが、CS コアが実現したのは砂のライン内完結循環である。

5 CS コアまとめ

CS コアプロセスの評価結果を**表 2** に示す。この評価指標が全てを表すわけではないが、グローバル展開を見据えた工法としての完成度を高めることができたと考える。

表 2 CS コアプロセスの評価表

工法	排出ガス	鋳造品質	形状自由度	製造取扱い性	回収砂リサイクル	粘結剤
CS コア	○	◎	◎	○	○	規格品

工法開発にあたり、単なる環境対策やコスト低減技術で満足することなく、次世代のクルマづくりに貢献できる夢の工法・工場を具体的にイメージし、それを目指した。また同時に、エンジン性能向上に寄与できるシリンダーヘッド設計の形状自由度についても、大きくポテンシャルを伸ばすことがで

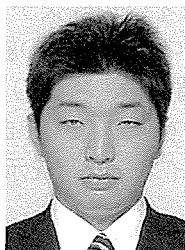
きた。今後も本技術をベースに改善を重ね、製品性能・工場環境の革新を進めていく。

最後に、造型設備や金型、砂リサイクル設備、粘結剤や砂等の副資材、検査手法など、工法開発の範囲は多岐にわたり、多くの仕入先、関係者からのアドバイスやご協力の基で本工法を世に送り出したことに、心より感謝する。

■著者



渡邊 浩庸



泉 尚吾



岡田 真幸

市場走行データを活用した設計手法

Design Method Using Real-World Vehicle Data

小池 伸^{*1}

Shin Koike

要旨

本稿では、市場走行データを活用することで、人や環境の違いによって発生するバラツキの大きいデータを確率分布として扱い、複数の異なるパラメータの確率分布を使ってモデルを構築し、目標となる設計パラメータの確率分布を求めて最適設計を行う方法を、様々な製品化設計にて応用した例に基づいて紹介する。

Abstract

This article describes an optimum design method through an explanation of various applications of the method to product design. Using real-world vehicle data, this method handles data with large variance caused by differences in vehicle users and usage environments as probability distributions, constructs a model using the probability distributions of multiple different parameters, and then calculates a probability distribution for the target design parameter.

キーワード ブレーキ制御、ブレーキアクチュエータ、ACC、自動運転、運転支援、確率分布、信頼性、Perl, Python, MATLAB

1 はじめに

近年、車は誰でも簡単に運転できて安全な道具として進歩している。自動運転を部分的に実現した技術や衝突防止などの制御が一般的になりつつあり、そのための開発で多くの走行データや制御データが蓄積され、正しく制御されるための改善がなされている。本編では、開発で蓄積された走行データから、どのように情報を抽出して処理をすれば設計に生かすことができるかを提案する。

人や環境の違いによって発生するバラツキの大きいデータを精度良く扱うことは、製品の信頼性と性能を高いレベルで両立させるために必要である。ところが、必要とされる性能や信頼性を測るパラメータは、走行データから抽出した情報から直接求めることはできない場合が多い。部品やシステムをモデル化することで予測することはできるが、満足できるレベルで大きなバラツキを精度よく考慮できるモデルは無いと考える。例えば、寸法のバラツキが正規分布である複数の寸法を合計した場合の分布は、 σ が二乗和平方根になると言われているが、一般のバラツキは偏りがある上に、モデル化するためには、寸法以外の異なるパラメータを和以外の商や積

を使った演算で合成することも必要である。

次章より、走行データから抽出したバラツキ情報を様々なパラメータの確率分布として扱い、それらのパラメータを四則演算することで、目標となる設計パラメータの確率分布を求めて最適設計を行う方法を、様々な製品化設計にて応用した例に基づいて紹介する。

2 ブレーキアクチュエータ作動耐久条件

確率分布によって設計を行うきっかけとなった、ブレーキアクチュエータの作動耐久条件について述べる。ブレーキ制御が製品化されはじめた時期、トヨタ製ABS（アンチロックブレーキシステム）、TRC（トラクションコントロール）用ブレーキアクチュエータの作動耐久条件は、他社の条件と比較して必要以上に厳しいと言われており、適正化することが求められていた。そこで、耐久条件を決めるために、まずアクチュエータの作動頻度を調査した。様々な条件で社外走行を繰返し、測定したデータから作動頻度に関する情報を抽出して、それに市場走行する車がどんな割合でどんな道路や条件で走

*1 先進技術開発カンパニー 第1 先進安全開発部

行するかといった統計データを加えることで、人や環境によって作動頻度がどのようにばらつくかという確率分布を作成した。作動頻度の確率分布とは、1km 走行するにあたりアクチュエータが平均的に何回作動するかを求め、市場での環境バラツキによって、その回数がどのくらいばらついて、それぞれの回数がどのくらいの確率で発生するかを分布としてグラフ化したものである。図 1 に、作動頻度の実測データからヒストグラムを作成し、そこからカーネル分布を使って確率分布を作成した例を示す。カーネル分布とは、ヒストグラムのそれぞれの頻度値を小さな正規分布として加重平均して置換え、全てを合成して確率分布を作成したものである。このグラフは当時のデータではなく、別のシステムの作動頻度から求めたもので、実際の ABS, TRC とは異なり、市場環境にあわせて補正をすることも行っていない。

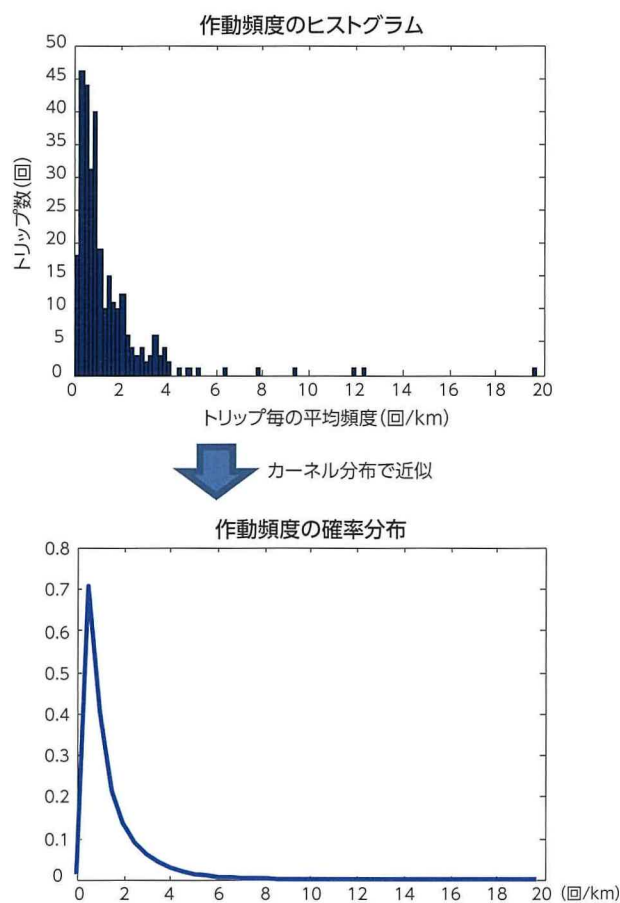


図 1 作動頻度の確率分布 (分布 b)

作動頻度 (回 /km) の確率分布に、保証する距離 (km) をかければ、車両生涯で保証する回数の確率分布が求まる。ところが、市場走行する車両が生涯走行する距離は、保証する回数よりも長い場合

もあれば短い場合もある。そこで、車両生涯で走行する距離の確率分布データと、先ほどの作動頻度の確率分布データから、車両生涯のアクチュエータの作動回数確率分布を求めることができれば、製品が故障する作動回数の確率分布 (ワイブル分布) を一意に定めることができ、実際の市場における使われ方に即した耐久条件を求めることができると考えた。車両生涯に受ける作動回数の確率分布とワイブル分布を同じグラフに表示して故障率を求める方法は、ストレス・ストレングスモデルと呼ばれている。

図 2 の走行距離分布は最近のデータから推定したものであるが、この走行距離分布と、先の作動頻度分布から、生涯作動回数分布を求める方法を説明する。

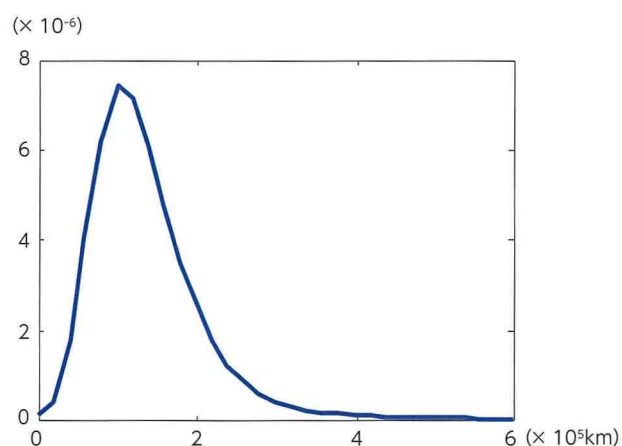


図 2 車両生涯の走行距離分布 (分布 a)

図 2 の車両生涯走行距離の確率分布 a (横軸は km) と、図 1 のアクチュエータ作動頻度の確率分布 b (横軸は回 /km) から、横軸がそれぞれの積である確率分布を求めれば、アクチュエータの車両生涯の作動回数 (横軸は回数) の確率分布 c が求まると考えた。

確率分布 c 上のある作動回数が発生する確率は、a, b それぞれの発生確率が独立である場合、その作動回数が発生する全ての組合せの確率の合計である。分布 a 上のある距離と、分布 b 上のある作動頻度の積が、分布 c 上のある作動回数と一致する全ての距離と作動頻度の組合せについて、それぞれの距離が発生する確率と作動頻度が発生する確率の積を合計したものが、作動回数の確率になる。具体的には、それぞれの分布を微小幅の短冊で分割し、その短冊の幅が全領域を網羅するように拘束して、a と b の組合せの短冊それぞれの面積の積を全領域で合計する。式化の考え方は以下の通りである。

- (1) 分布 c の横軸のある点 x_c での確率は、分布 a と b それぞれの横軸の点 x_a と x_b の積が x_c になる 2 点の組合せが発生する確率、その全ての組合せについて合計したものになる。
- (2) 分布 c の横軸を微小幅 dx_c で分割し、同じく分布 a を微小幅 dx_a で、分布 b を微小幅 dx_b で分割する。その際、それぞれの微小幅の関係は x_c , x_a , x_b の関係と同様で、 $(x_c+dx_c) = (x_a+dx_a)(x_b+dx_b)$ となる。その場合、少なくともひとつの分布の微小幅は可変となる。
- (3) 分布 c の x_c での確率を $h(x_c)$ 、同じく分布 a は $f(x_a)$ 、分布 b は $g(x_b)$ とする。 dx_b が可変幅とすると、それぞれの x_c で、以下の式の x_a を dx_a 毎に最小値から最大値まで代入して合計したものが c の確率分布になる (図 3 参照)。

$$\begin{cases} h(x_c) = [\sum\{f(x_a) \cdot dx_a \cdot g(x_b) \cdot dx_b\}] / dx_c \\ dx_b = (x_c + dx_c) / (x_a + dx_a) - x_b \\ x_b = x_c / x_a \end{cases}$$

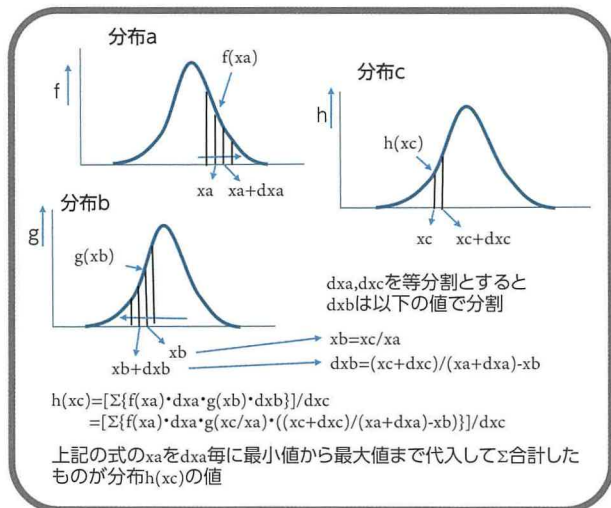


図 3 分布 a と b の積の分布 c の求め方

以上を数値計算することによって、アクチュエータの作動頻度の確率分布と、車両生涯での走行距離確率分布から、車両生涯でのアクチュエータ作動回数確率分布 (分布 c) を求めることができる (図 4)。

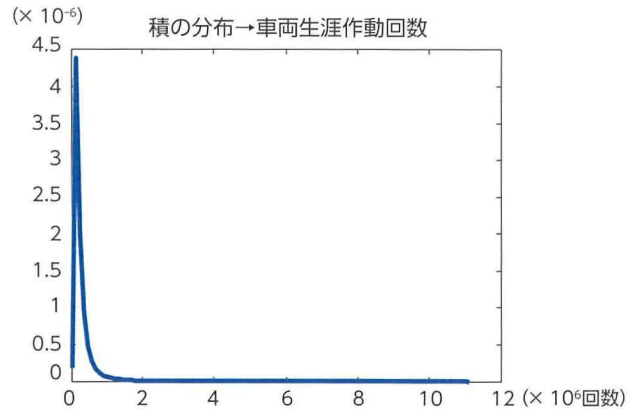


図 4 車両生涯のアクチュエータ作動回数 (分布 c)

この確率分布を①とし、アクチュエータの故障パターン m 値をもつワイブル分布の累積値②を同じ作動回数のグラフに記述して、両者の値の積の分布③を求めると、その面積が故障率となる。故障率が所定値になるようにストレス-ストレングスモデルを作成したものが図 5 である。故障率を求める分布を可視的に表示するための対数表示を図 6 に示す。例えば、このワイブル分布の 80% タイルの作動回数が S 回だとすると、 S 回の作動耐久試験を N 個のサンプルで行って故障が無ければ、 $(1-0.8)^N$ のリスクでワイブル分布が保証できている。この場合、リスクが数%以下で保証できる作動回数とサンプル数であれば十分であると考えられる。

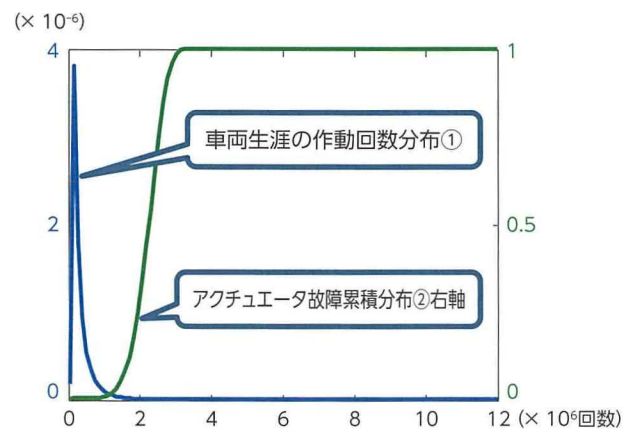


図 5 ストレス-ストレングスモデル

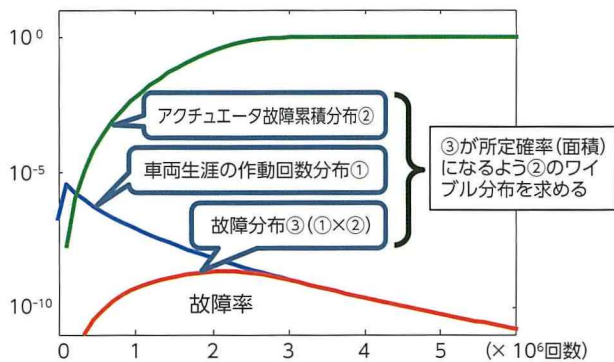


図6 ストレス-ストレングスモデルの対数表示

以上のように、パラメータの異なる複数の確率分布から、それぞれのパラメータの積となる確率分布を求めたが、前述の x_c , x_a , x_b の関係と可変分割のやり方を和や商にすることで、同様に和や商の分布を求めることもできる。

これらの手法を使って、当時から様々なアクチュエータや制御システムの設計を行うことにより、競合他社と比較して十分な信頼性と性能の差別化ができた。

3 ACC 制御トリガーのパラメータ設計

最近の設計例として、ACC（レーダークルーズ）の制御トリガー設計として検討しているものを紹介する。ACCは近年、トヨタセーフティセンスの1つの機能として普及が進んでいるシステムで、ドライバーが車速を設定すると、先行車との車間距離をレーダーで測定しながら車速を制御する運転支援システムである。この運転支援システムは、市場で改善の必要がありそうなデータで特徴があるものを記録して、製品の改善につなげるデータ記録機能がついている。ACCは走行中に長く制御されていることもあり、改善の必要がありそうな特徴のあるデータを全て記録しようとする、改善の必要がない正常データと区別が付きにくく、不必要に記録されてしまうデータが多いために、ディーラで必要なデータを抽出する前にメモリーが上書きされてしまう可能性がある。従って、記録をとるトリガーをどのように設計するかは、記録頻度とデータの抽出タイミングのバランスを考慮して決める必要がある。このように、記録されるトリガー頻度や、ACCの使われ方にバラツキが大きいいため、前述の確率分布を

使った設計を行った。

トリガー設計は次の(1)～(6)のフローで実施した。

- (1) 記録したいケースが確実に抽出できて、作動頻度を抑えたトリガーから多少頻度の高いトリガーまで、作動要件の候補を多数作成する。
- (2) 様々な環境で測定した社外走行データを使って、それらのトリガーがトリップあたり平均何km毎に作動しているかという作動頻度(km/回)のヒストグラムを作成し(図7)、カーネル分布によって確率分布を作成した(図8)。この社外走行データの処理方法については次の章で述べる。
- (3) 市場走行している車両について、日当たり走行距離の確率分布(km/日)データを集計する(図9)。その日当たり走行距離の逆数の確率分布と、(2)で作成した作動頻度の確率分布の積の分布を作成すると、(km/回)/(km/日)=(日/回)となり、1回トリガーが作動するのに必要な日数の確率分布を求めることができる(図10)。
- (4) メモリーが上書きされるまでに確保されているメモリーのケース数をNとすると、(3)で作成した確率分布と、それと同じ確率分布の和の分布を作成して、それをN-1回繰返す。1回トリガーが作動する日数のN倍の分布を作成すると、N回トリガーが作動してN個のメモリーが上書きされるまでの日数の確率分布(日)を求めることができる(図11)。
- (5) ユーザーが事象を体験してからディーラに持込むまでの日数(市場情報の発生日からディーラ受付日までの日数)の頻度分布とその確率分布を求める(図12)。
- (6) (4)で求めた確率分布からその累積分布を求め、(5)で求めた確率分布の累積分布を同じグラフ上に記述すると、在庫日数に対する上書き日数の余裕が視覚化される(図13)。メモリー上書きの累積Bと、ディーラに持込まれるまでの在庫日数の確率Aを同じグラフ上に記述すると、ある日数でのAはその日数で持込まれる確率、Bはその時上書きされている確率で、両者の積A×Bがその日数で持込まれて上書きされている確率となり、その分布の面積がメモリー上書きされる全体の確率となる(図14)。図15はその対数表示である。

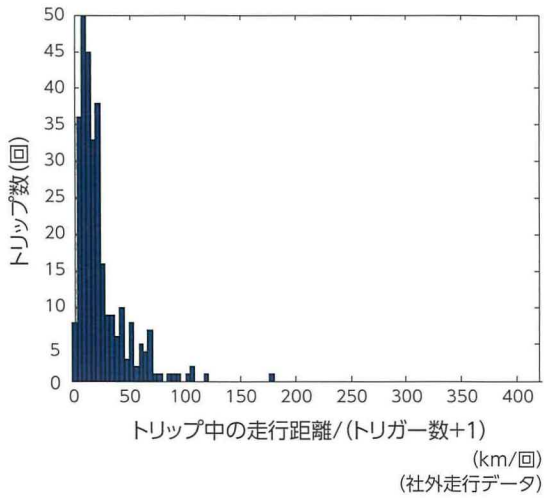


図7 トリガー作動頻度ヒストグラム

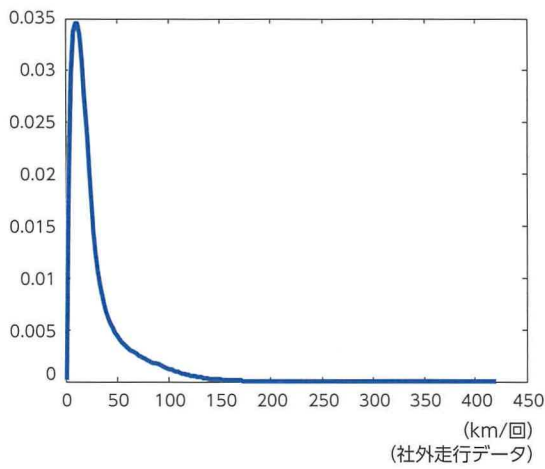


図8 トリガー作動の確率分布

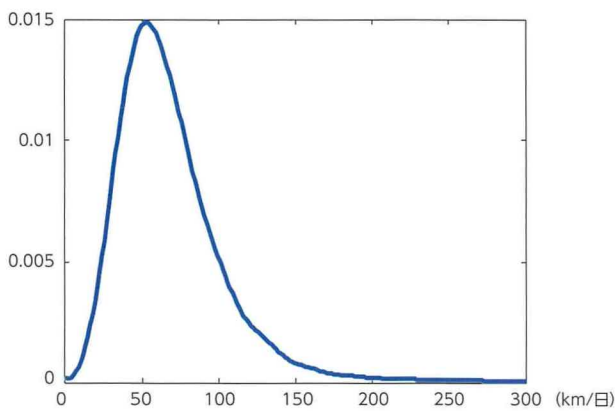


図9 日当たり走行距離の確率分布

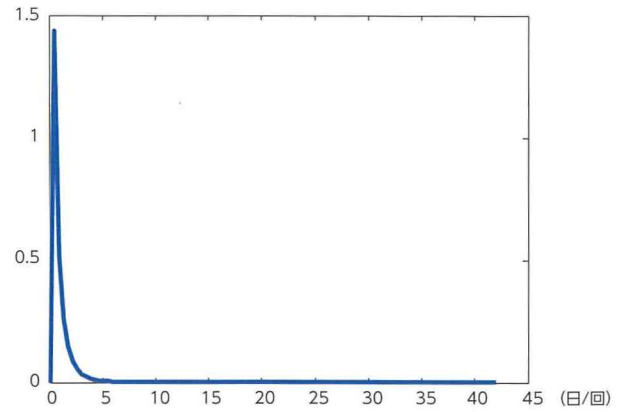


図10 トリガー1回作動する日数の確率分布

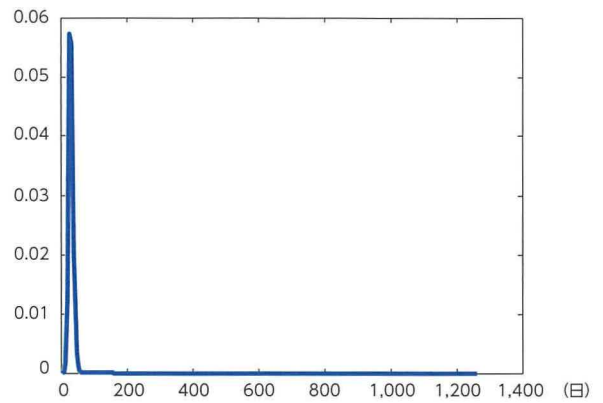


図11 N個のメモリー上書き日数の確率分布

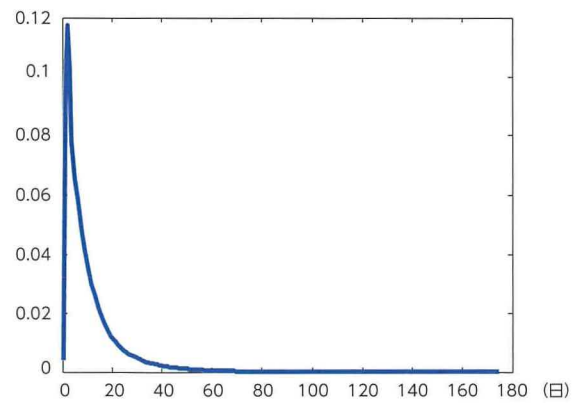


図12 入庫までの日数の確率分布

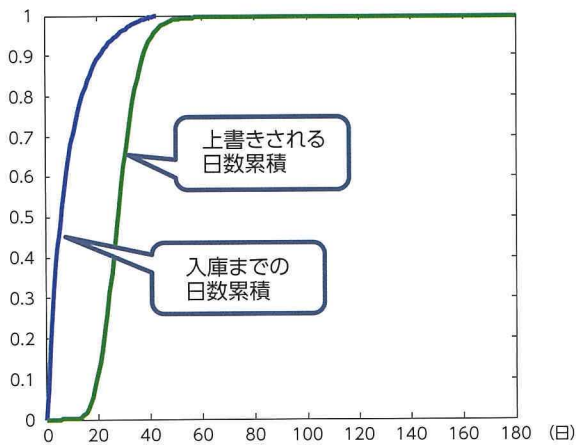


図 13 在庫日数と上書き日数の関係

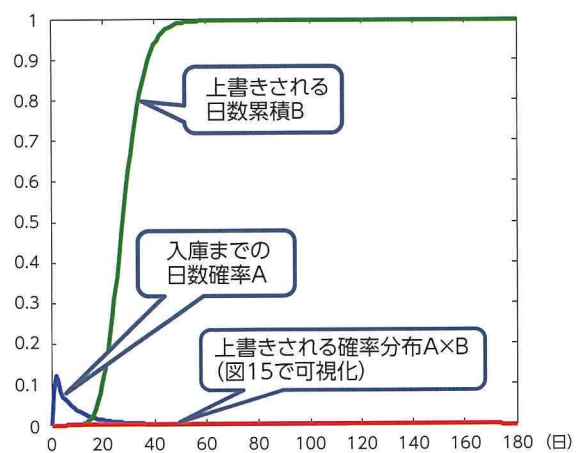


図 14 上書きされる確率分布

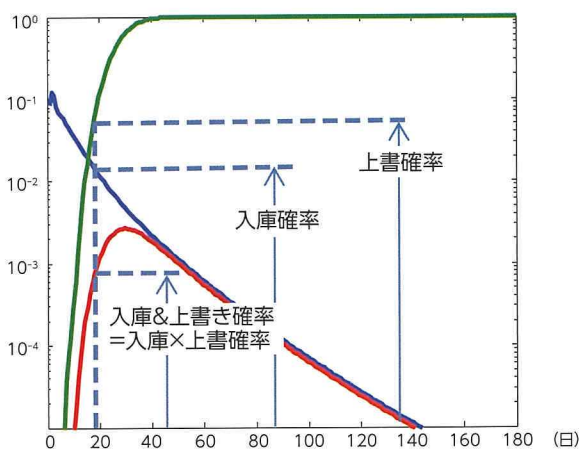


図 15 上書きされる確率分布の対数表示

以上のように、ディーラ在庫後にメモリーが上書きされている確率が分かると、その値を目標としてトリガー要件やメモリー数を設計することが可能になる。ここで示した例では、在庫後に上書きされる確率を 10%以下としているが、10 日間程度で在庫された場合はほぼ 99%以上が上書きされておらず、必要十分な余裕が確保できていることが分かる。目的とするパラメータの分布を作成することで、数字だけでは分からない上書き状況を可視化できる。

今回はトリガー作動頻度、走行距離、在庫日数の 3つのバラツキを確率分布として利用したが、確率分布の演算を行わず、例えば同じ条件で 3つそれぞれの確率分布の 90～80%タイルの値を使って必要なメモリー数を演算すると、先ほどの N の 5～18 倍のメモリー領域が必要な計算になる。これは大幅な過剰品質で、性能を競うシステムで実施した場合は大幅な性能妥協になる。作動頻度の 90%タイルを X_{90} km/回、80%タイルを X_{80} km/回として (図 16)、日当たり走行距離の 90%タイルを Y_{90} km/回、80%タイルを Y_{80} km/回として (図 17)、在庫日数の 90%タイルを Z_{90} km/回、80%タイルを Z_{80} km/回として (図 18)、それぞれの値から必要メモリー数を計算した例を図 19 に示す。

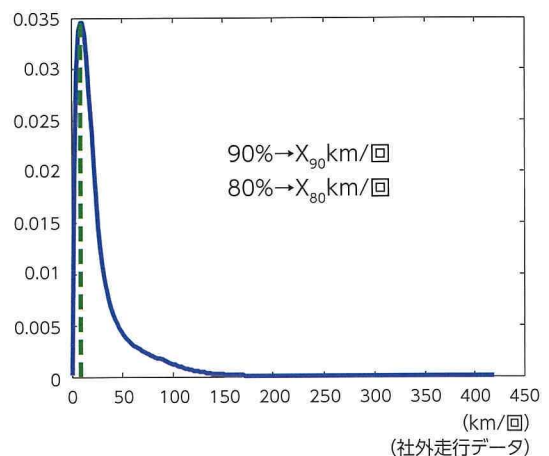


図 16 トリガー作動頻度の 90%タイル, 80%タイル

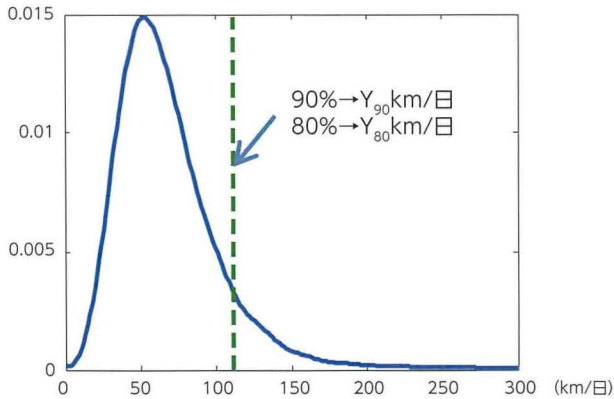


図 17 日当たり走行距離 90%タイル, 80%タイル

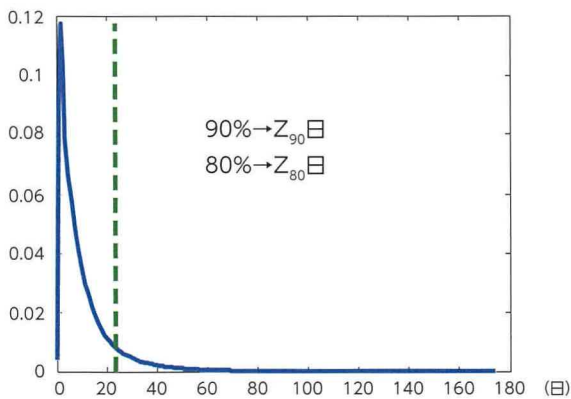


図 18 在庫日数の 90%タイル, 80%タイル

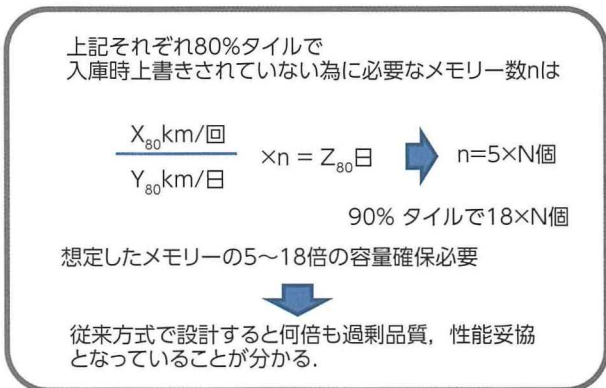


図 19 必要メモリー数を従来方式で計算

前述のように、走行データから様々なバラツキの確率分布を抽出し、それらの確率分布を合成したモデルを作成して目標とするパラメータの確率分布を求めることで、品質と性能の的確なバランスをもって設計することができる。今回の例では、確率分布の積、商、和を行っており四則演算が可能であるため、従来数値演算によって作成していたモデルは全て確率分布に置換えてモデル化することができる。図 20 に今回説明した演算の概要を示す。

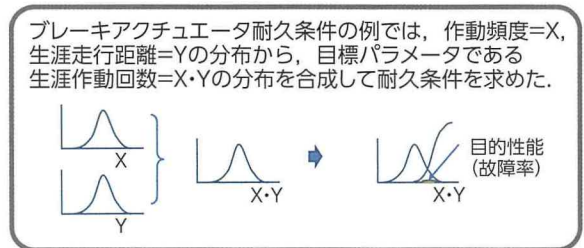
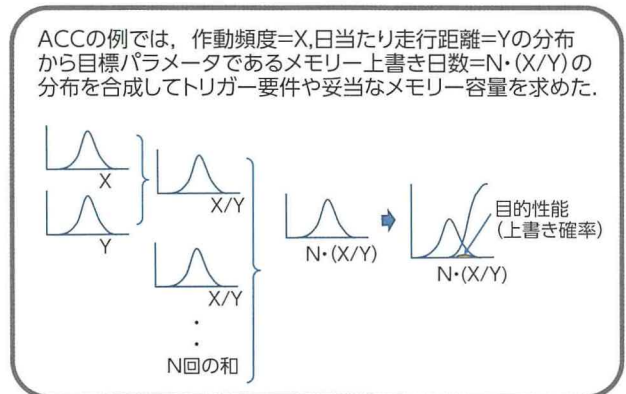


図 20 確率分布の四則演算例

4 計測データからの情報抽出

前章では確率分布からモデルを作成して最適設計を行う方法を示したが、ここでは、社外走行やシステム評価において、どのようにデータを抽出・処理することで設計に活用できるかについて述べる。

近年、運転支援等の開発に利用できる社外走行データは様々な形で収集されるようになった。これらのデータにはシステム制御データの他に、車両状態量やレーダー認識データ、前方画像などのデータが含まれている。それらはサプライヤや記録された時の目的に応じて様々な計測器が使われているが、どの計測器も csv 形式で扱うことができる。csv 形式である程度リッチな情報を残しておけば、様々な目的に役立てて再利用性が高い。例えば、ABS、TRC用ブレーキアクチュエータ耐久条件検討で測定したデータは、他の異なるブレーキアクチュエータやブレーキ制御システムでも使えたため、不要作動などの信頼性評価においても追加の社外走行が必要なかった。

これらのデータは、AWK、Perl、Pythonといったスクリプト処理言語を使って処理する。このスクリプト処理言語が、正規表現と呼ばれている強力な検索機能や様々なライブラリーを利用して、膨大な csv データから必要な情報を短時間で横断的に抽出してくれる。それでもテラバイトデータの処理には

何日もかかってしまうため、最初は必要なデータだけを必要な形で中間データに描き出しておく。一旦中間データにすれば MATLAB など扱う形式にして、処理、やり直し、といったことを短時間で繰り返すことができる (図 21)。

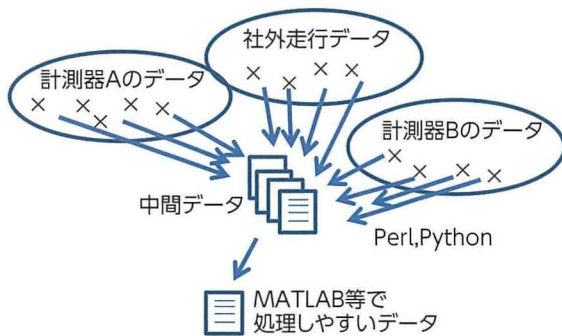


図 21 データの処理フロー

処理の流れとして、スクリプト言語で以下の (1) (2) を行い、(3) (4) は MATLAB を使って処理を行った。

- (1) 計測器毎に異なる csv 形式のデータフォーマットを共通のデータラベルや単位に読み替え、それに対応するデータに対して様々なトリガーを使って検索を行い、そのタイミングのデータを様々な形で中間ファイルに記述する。
- (2) 頻度分布を作成する場合は、全ての中間ファイルに書き込まれたトリップ毎の平均距離間隔を読み込み、MATLAB で読み込みやすいように、まとめてリストにしたファイルを作成する。頻度分布以外に制御パラメータや様々な状態量のバラツキから制御で使う設定値やデータ容量等を検討する場合は、トリガー作動時の制御データから MATLAB で処理するファイルを作成する。
- (3) MATLAB でそのファイルを読み込み、ヒストグラムを作成し、そこからカーネル分布を作成する。分布は全ての点列として扱われ、必要に応じて補間を行い、精度を確保する必要がある。
- (4) 走行データから作成した確率分布以外に、日当たり走行距離や車両生涯の走行距離といった統計データを MATLAB に取り込み、2～3章で説明した分布計算を行った (図 22)。

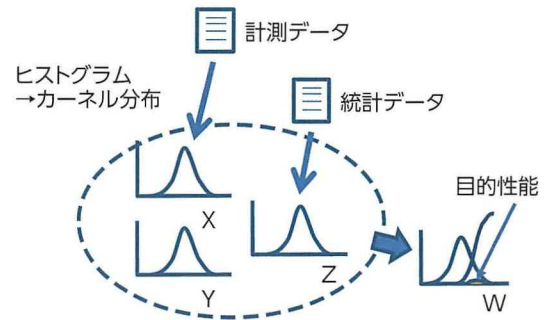


図 22 確率分布の作り方

5 おわりに

2～3章では頻度分布を確率分布として扱い、複数の確率分布に対して四則演算を行うことでモデル化し、目的とするパラメータの確率分布を合成できることを述べた。また、4章では様々な計測器で収集した大規模データを集約して、頻度分布を作成するフローの概要を述べた。これらの手法を使うことで、バラツキの大きい複雑なシステムを精度良く設計することが可能になり、効率よく信頼性と性能を確保できる。また、大規模データから様々な設計データや隠れた事象を抽出することもできる。

概要の説明しかできていないが、このようなニーズやシーズがあることを多くの方々を知っていただき、様々な分野で活用・進化させていただけたらと思う。

■著者



小池 伸

機械学習を用いた傾聴対話ロボット向け 応答種類推定技術の研究

Research into Response Type Detection Technology for Active Listening
Robot Using Machine Learning

堀 達朗 *1
Tatsuro Hori

渡部 生聖 *1
Narimasa Watanabe

要旨

本研究では、認知症の発症予防や進行防止を目的とした雑談対話ロボットにおける、適切なタイミングで適切に発話種類を切り替える技術について取り組んでいる。従来技術では、ユーザとロボットの発話が交互に続く一問一答型の対話であった。本研究では、ロボットの応答種類（沈黙／うなずき／応答）を、ユーザの声を特徴とした機械学習のランダムフォレストにより推定することで、応答タイミングを適切に制御する方法を確立し、一方のみが発話を続けることも可能な状態を実現した。ランダムフォレストは、複数の決定木により集団学習することで、高い識別性能が得られる。その結果、定量指標により、従来よりもリズム感のある対話が可能となることを確認した。

Abstract

This research is developing technology that switches the type of response made by active listening robots designed to help prevent or arrest the progress of senile dementia at an optimum timing. Conventional technologies permit users and robots to converse in an alternate question and answer format. In contrast, this research established a control method that allows the robot to make responses at appropriate timings by detecting the type of required response (silence, nodding, or an actual response) using randomized decision forests in machine learning characterized by the user's voice. Randomized decision forests are capable of achieving high identification performance through group learning using multiple decision trees. Quantitative indices were used to confirm that this method enables more rhythmical dialogues than conventional technology.

キーワード 対話ロボット, 発話衝突, 対話権推定, 機械学習, ランダムフォレスト

1 はじめに

日本の少子高齢化問題は深刻で、65歳以上の高齢者人口は、2035年には33.4%を超え、認知症有病率はその25%に上ると推計されている⁽¹⁾。認知症高齢者の周辺症状として、「妄想・幻覚」「暴力などの興奮行動」などがあり、これらの症状が介護者の負担感に大きな影響を与えている⁽²⁾。医療法人社団三船病院などの介護・医療機関へ訪問調査を実施し、医師や介護士へヒアリングを行ったところ、認知症介護の仕事には対話が必要とされていることが分かった。ロボットが認知症高齢者の話し相手になるためには、Apple社のSiriのようなタスク志向の対話ではなく、ユーザに安心や愛着を感じてもらおうための雑談志向の対話が必要である。

トヨタでは、これまでに「ユーザの話を受容的

に傾聴する対話システム」⁽³⁾や「WEBニュース探索により話を掘り下げる雑談対話システム」⁽⁴⁾、「ユーザの話題に合わせた応答を検索する雑談対話システム」⁽⁵⁾を開発してきた。そして2016年4月より、これらの対話技術を集約した対話ロボット「Pocobee (ポコビィ)」(写真1)の開発を進めている。



写真1 Pocobee (ポコビィ)

*1 未来創生センター Z-フロンティア部

2 対話ロボット「Pocobee」の概要

対話ロボット Pocobee は、言葉や表情を認識し、目と体を動かしながら利用者と対話することができ、日常的な雑談相手として利用することで、認知症の発症予防や進行防止、並びに認知症介護の負担軽減に寄与することを狙いとしている。昔の写真を眺めながら回想を促す対話（回想法）をベースとし、「話す／聴く／応える／問う」をタイミング良く切り替えながら会話の内容を読み取り、ユーザの感情状態を分析しながら対話をするのが主な機能である。

回想法においては、ユーザに積極的な対話を促すことが求められる。そのためには、ユーザ発話とロボット応答の間が空くこと（以下、長い沈黙）、ロボット応答がユーザ発話を不要に遮ること（以下、発話衝突）が課題となっており、これらを解決する必要がある。そのため、適切なタイミングで適切に発話種類を切り替える技術（以下、対話権推定）の開発を行った。3章では対話権推定技術の詳細について、4章ではその評価実験について説明する。

3 対話権推定技術

対話権推定の処理フローを図1に示す。対話権推定は3つのモジュール（ユーザ発話特徴抽出、タイミング検出、発話種類推定）で構成される。長い沈黙の原因となる計算処理負荷を低減するため、発話特徴量やタイミング検出の手法を工夫しており、それぞれ3.1節、3.2節で説明する。また、発話衝突の影響を軽減するため、発話種類を適切に判別する手法を3.3節で説明する。

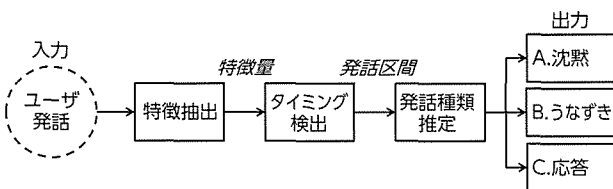


図1 対話権推定の処理フロー

3.1 ユーザ発話特徴抽出

ユーザ発話特徴抽出は、ユーザ発話の句末や区間全体のピッチ、ボリューム、発話長など、計算負荷が小さい特徴量をリアルタイムで抽出する。例えば、声が小さくなったり高くなったりする場合に

ユーザ発話が終わりやすい、といった特徴を捉えることができる。また、発話の句末の特徴量を用いることで、語尾の一次変化（上昇調：楽しみだ「よ」など）や二次変化（上昇下降調：今週末「はね」など）を捉えることもできる（図2）。Siriに代表される対話型アプリケーションでは、音声認識結果のような言語特徴を用いているため、音韻特徴のみを用いている本稿の手法と比較し、遅延が大きくなりやすい（Siri：約2sec、本稿の手法：約0.8sec）。本稿の手法によって、遅延時間、つまり、長い沈黙を低減することができるようになる。

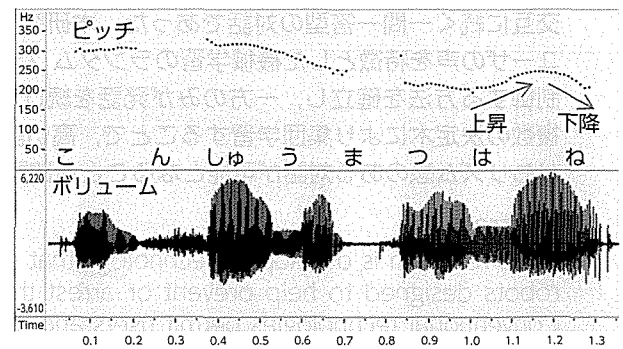


図2 ピッチ、ボリュームの波形

3.2 タイミング検出

応答に適するタイミングとしては、一般的に、相手の発話が小休止するタイミングでうなずきを挟むことが多い。表1（右）のような対話では、意味のまとまりごとに発話が小休止し、そのタイミングでうなずきを挟むことにより自然な対話が実現されている。このようなケースを想定し、ユーザ発話の切れ目を応答タイミングとして検出する。具体的には、図3にあるように、ボリューム閾値を下回った点から一定区間Tにおいて、再びボリューム閾値を超え、かつゼロ線を交差する回数がN以下となった点を応答タイミングとして検出する。

表1 発話種類選択

ユーザ	ロボット	応答種類	ユーザ	ロボット	応答種類
今朝やったんだけど			今朝やったんだけど		
	それはいいね	C. 応答		うん	B. うなずき
もう乾いたか			もう乾いたか		
		A. 沈黙		うん	B. うなずき
確認してよかったかな			確認してよかったかな		
	うん	B. うなずき		それはいいね	C. 応答

ランダム発話種類選択

適切な発話種類選択

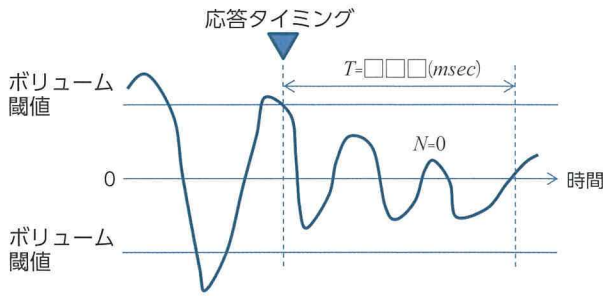


図3 応答タイミング

3.3 発話種類推定

発話種類推定は、3.1節で抽出した特徴量を入力して、適切な発話種類を推定する⁽⁶⁾。発話種類をランダム選択すると、表1(左)のように、ユーザが話している途中で応答し、発話衝突が発生しやすい。適切な推定により、表1(右)のように聞き役では聞き続け、話し役では話し続けることができ、自然な対話を実現できる。

Raveeshらの研究⁽⁷⁾(以下、先行研究)では、発話種類を沈黙・応答の二種類とし、その判別に分類器のサポートベクターマシン(SVM)を用いている。本研究との違いは、発話種類数と分類器の手法である。

本研究では、3.2節で示したように、うなずきを挟むことで自然な対話を実現することを目的としている。よって、発話種類を沈黙・うなずき・応答の三種類とした。

分類器の手法は、より高精度な判別を目的として検討を行った。分類器の手法は三つに大別できる。特徴量のある程度定めた上で用いる「決定木(ルール)」「機械学習」、膨大なデータをもとに特徴量抽出と判別器をまとめて学習する「深層学習」である。本研究の特徴量には、抜きんでて寄与率の高いものが存在せず、「決定木」を設定することは困難である。また、対話権推定にある程度チューニングされており、膨大な学習データを必要としない。対話データも入手困難なものであり、膨大な学習データを必要とする「深層学習」は不向きである。よって、今回は「機械学習」が適切であると考えられる。発話種類推定のための学習データ作成と分類器の詳細について、それぞれ3.3.1項、3.3.2項で説明する。

3.3.1 学習データ作成

本研究では、ロボットの裏でオペレータのボタン操作によってロボットの発話種類を決定する、

Wizard-of-Oz(WoZ)対話でデータ収集を行った。これにより、対話データに理想的なタイミングで理想的な発話種類の教師ラベルを半自動的に付与することが可能となり、分類器の構築が容易にできるようになる。

ただし、WoZ対話であっても応答誤りが存在する。そのため、一部の教師ラベル(全データの5%程度)は事後的に手動で修正を行っているが、全て手動で教師ラベル付与を行う場合と比べて、学習データ作成にかかる工数はかなり低減され、5人の被験者×3分(計15分)の対話データに教師ラベルを付与する工数は、150分から30分に低減された。

3.3.2 発話種類判別モデルの手法比較

3.3.1節で作成したデータを用いて、分類器を作成する。分類器の候補として、ロジスティック回帰、SVM、ランダムフォレストを用いる。また、訓練データの教師ラベル比率(36%沈黙、48%うなずき、16%応答)でのランダム選択をベース手法とし、先行研究のベース手法であるSVMと併せて比較する。

各候補の比較評価を10-fold cross validationで行った結果を図4に示す。ランダムフォレストを用いた場合の精度が最も高く、それ以降は、SVM、ロジスティック回帰、ベース手法の順である。特にランダムフォレストは、ベース手法と比較して三種類判別の精度が27%向上しており、先行研究で二種類判別の精度向上が15%であったことを考慮すると、大きく向上しているといえる。ランダムフォレストは図5に示すように、複数の決定木により集団学習することで高い識別性能が得られる機械学習の手法で、少量の学習データでも過学習が起きづらいという特徴があり、入手が困難な対話音声データでの有用性も高い。

もう1つの要件として、ユーザタイプ別の適応性がある。例として、語尾を上げるタイプと上げないタイプでは声の高さの上げ方が変わるため、境界面が細かく異なる学習モデルとなる。SVMとランダムフォレストの決定境界面の比較を図6に示す。ランダムフォレストの方が細かい境界面で分類することができ、適している。

以上、「精度」と「ユーザタイプ別の適応性」の両面から、ランダムフォレストを用いた発話種類判別モデルを提案手法とする。

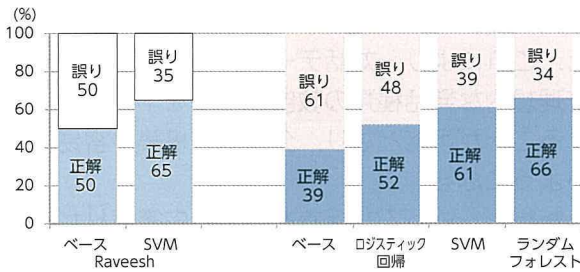


図4 様々な発話種類判別モデルの判別精度比較

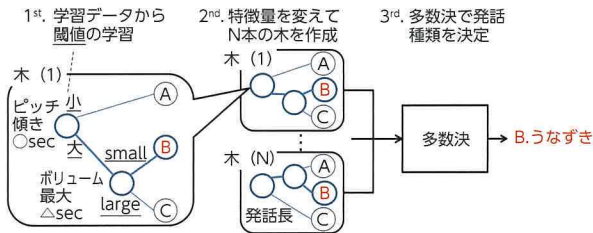


図5 ランダムフォレストの学習と判別フロー

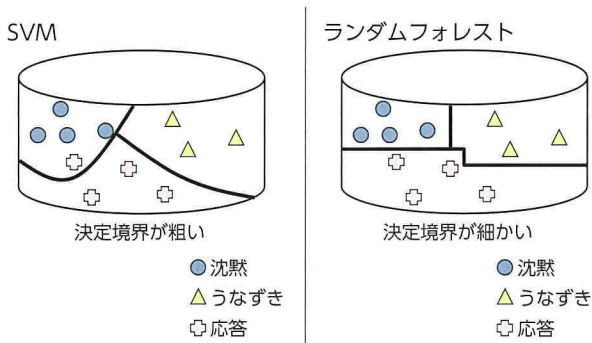


図6 決定境界面の比較

4 検証実験

この章では、検証実験について説明する。4.1節では評価データの収録方法について、4.2節では定量評価について、4.3節では定性評価について説明する。

4.1 評価データの収録

15人のユーザに二種類の対話システム（ベース手法、提案手法）と対話してもらった。8名はベース手法、提案手法の順に、7名は提案手法、ベース手法の順に対話を行い、順序による影響を除くように実験を行った。一対話の時間は約4分（計120分）である。

4.2 定量評価

発話衝突 n (回/分) を式 (1)、ユーザ発話割合 p_u (%) を式 (2) のように求める。

$$n = c / (t_u + t_r) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$p_u = 100 * t_u / (t_u + t_r) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 c (回) は累計衝突回数、 t_u (分) はユーザの累計発話時間、 t_r (分) はロボットの累計発話時間である。

15人のユーザについて、平均発話衝突回数と平均ユーザ発話割合を図7に示す。ベース手法と比較して、提案手法は発話衝突回数が減少しており（片側t検定で $p=0.049$, 5%有意*）、ユーザの発話割合が増加している（片側t検定で $p=0.045$, 5%有意*）。つまり、ユーザはシステムと対話する際の発話衝突回数が低減されたことで、対話への違和感も低減され、積極的に話し続けやすくなったと考えられる。

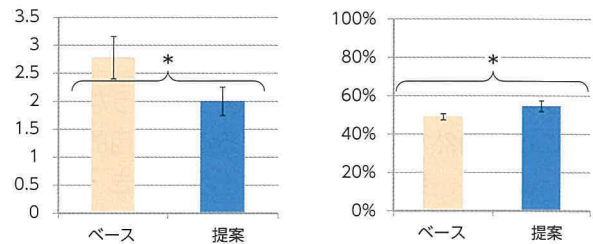


図7 発話衝突回数と発話割合

4.3 定性評価

各対話システムでの実験終了後に、SD法を用いた主観評価を行った。評価項目は、(a) ロボットの発話タイミングは良かったか、(b) ロボットは良い聞き役であったかである。結果を図8に示す。(a) (b) それぞれのスコアについて、ウィルコクソンの符号順位検定を行った。その結果、(a) については、提案手法の平均スコアは高いが、統計的な差があるとは言えなかった。(b) については、提案手法のスコアが1%有意で高いことが分かった。つまり、ロボットの発話タイミングの良さは体感的にはっきりと感じられないものの、提案手法の方が聞き役として好印象になったと考えられる。

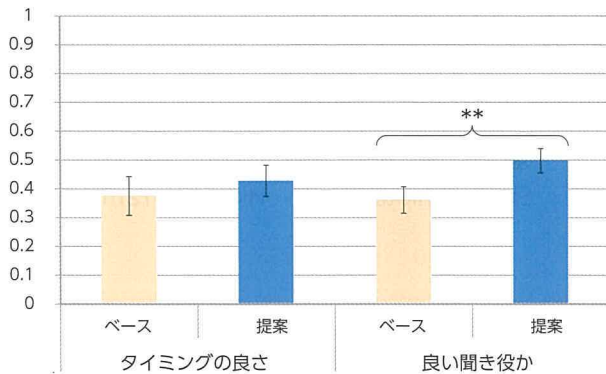


図8 SD法を用いたロボットに対する主観評価結果
 (「0:悪」から「1:良」にスケール)

5 まとめと今後の展開

本研究では、認知症患者に積極的な対話を促す対話ロボットを目的として、ユーザ発話特徴からロボットの応答タイミング・種類(沈黙・うなずき・応答)を推定する対話権推定技術を開発した。処理負荷の低い音韻特徴を用いたこと、判別モデルにランダムフォレストを用いたことで、入手困難な対話音声データでも精度、使いやすさに配慮した構成にすることができた。さらに、Wizard-of-Oz(WoZ)形式で学習データを作成することで、半自動的に教師ラベル付与が可能となり、分類器の構築を容易にした。評価実験の結果、提案手法はベース手法と比較して、発話衝突を低減させ、ユーザの発話割合を増加させることを確認した。また、先行研究と比較しても判別精度が良く、提案手法の有効性を示すことができた。

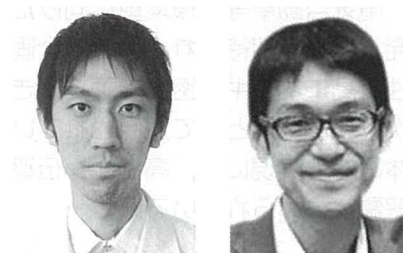
今後、本研究を実証現場に適用予定であり、認知症患者の対話データを用いて発話種類判別モデルを再構築し、実証実験を行う予定である。

本研究は、スウェーデン王立工科大学のJoakim Gustafson教授、Gabriel Skantze准教授、Martin Johansson殿に多大なご協力を頂いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 内閣府 平成 28 年度版高齢社会白書
http://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2016/zenbun/28pdf_index.html
- (2) 認知症の人の介護に対する効果的な支援の実施に関する調査研究事業
https://www.nri.com/~media/PDF/jp/opinion/r_report/syakaifukushi/201503_report.pdf
- (3) 下岡和也, 徳久, 吉村, 星野, 渡部 : 音声対話ロボットのための傾聴システムの開発. Journal of natural language processing. Vol.24, No.1, P.3 - 47 (2017)
- (4) 渡部生聖, 中野 : 認知症介護に向けた対話制御・対話知識獲得技術の開発. TOYOTA Technical Review. Vol.60, P.91 - 95(2014)
- (5) 高谷智哉, 山田 : ニューラルネットワークを用いた機械学習による対話ロボット向け話題推定技術の研究. TOYOTA Technical Review. Vol.63, P.67 - 72 (2017)
- (6) M. Johansson, Hori, Skantze, et al.: Making Turn-taking Decisions for an Active Listening Robot for Memory Training. International Conference on Social Robotics (2016)
- (7) R. Meena, Skantze, Gustafson: A Data-driven Model for Timing Feedback in a Map Task Dialogue System. Proceedings of the SIGDIAL 2013 Conference. pp. 375 - 383 (2013)

著者



堀 達朗

渡部 生聖

硫化物固体電解質の粒子構造解析

Particle Structural Analysis of Sulfide Solid Electrolyte

塩谷 真也*¹
Shinya Shiotani山村 英行*¹
Hideyuki Yamamura

要旨

環境車の普及に向けて、次世代蓄電池の実用化が求められている。全固体電池は、高安全性と高エネルギー密度を両立できる可能性があり、次世代蓄電池として注目されている。高性能な全固体電池の実現には高イオン伝導率を有する固体電解質が求められている。全固体電池用の硫化物固体電解質の性能を最大化するには、粒子内部の構造と特性との相関を解明し、粒子構造を制御する必要がある。しかしながら、硫化物固体電解質は結晶／ガラスが混在した複雑な状態と想定され、さらに化学的に不安定であることから、粒子の構造解析手法は未確立であった。本研究では、TEM（透過型電子顕微鏡）を用いた暗視野法により、硫化物固体電解質の構造を定量的に解析することに成功した。

Abstract

The practical adoption of next-generation batteries will play an important role in the further popularization of environmentally friendly vehicles. One promising example is all-solid-state batteries, which have the potential to achieve both excellent safety performance and high energy density. Solid electrolytes with high ionic conductivity are necessary to realize high-performance all-solid-state batteries. To maximize the performance of sulfide-based solid electrolytes for all-solid-state batteries, the correlation between the internal structure and characteristics of particles must be identified to enable particle structural control. However, it has not been possible to establish an analysis method for the particle structures of sulfide-based solid electrolytes due to chemical instability and the assumption that these structures consist of a complex blend of crystals and glass. This research succeeded in quantitatively analyzing the structure of sulfide-based solid electrolytes through dark-field transmission electron microscopy (TEM).

キーワード 全固体電池, 硫化物固体電解質, 伝導機構, 結晶化挙動, 透過型電子顕微鏡

1 はじめに

1.1 背景

近年、環境問題の観点からハイブリッド、プラグインハイブリッド、電気自動車等の環境車に向けた高性能蓄電池の開発・普及が期待されている。全固体電池は、高安全性と高エネルギー密度を両立できる可能性があり、次世代蓄電池として注目されている。高性能な全固体電池の実現には、高イオン伝導率を有する固体電解質が求められている。

1.2 固体電解質の現状と課題

これまで、 $\text{Li}_2\text{S}-\text{P}_2\text{S}_5$ ⁽¹⁾ や $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ (以下、LGPS)⁽²⁾ 等の高イオン伝導率を示す硫化物固体電解質が発見されてきた。これらは、メカニカルミリング法で作製したガラス状態の前駆体から、熱処理

で結晶相を析出させることで得られるが、これまでイオン伝導率と結晶構造の相関が議論されてきた。

一方、イオン伝導率は熱処理条件によっても変化する。例として、図1にLGPSと $75\text{Li}_2\text{S}-25\text{P}_2\text{S}_5$ (以下、 Li_3PS_4) の熱処理条件とイオン伝導率の相関を示す。LGPSのイオン伝導率は処理温度に対して急激に上昇するのに対し、 Li_3PS_4 は上昇した後に低下する。これは、イオン伝導率が結晶構造のみに支配されるのではなく、粒子内の結晶化度や結晶子サイズ、結晶とガラスの分布等の、結晶構造以外の影響を受けることを示唆している。このことから、粒子内の構造制御によるイオン伝導率の向上が期待でき、その設計指針の獲得には、粒子状態と特性との相関解明が必要である。これまで硫化物固体電解質を解析する手法として、XRD、ラマン分光法等が検討されてきたが、これらの手法は平均的な情報しか得られず、さらに分布の評価は不可能であることから、粒子解析には適していない。そこで、透過

*¹ 先進技術開発カンパニー 電池材料技術・研究部

型電子顕微鏡（以下、TEM）を用いた直接観察が有効であると期待されるが、硫化物固体電解質は電子線に対して弱く、粒子構造を解析する手法の確立には至っていない。

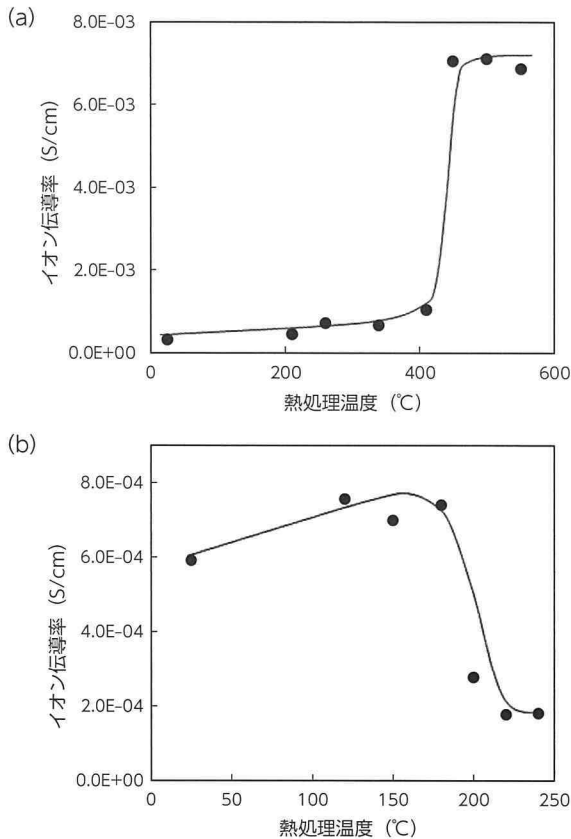


図1 熱処理条件とイオン伝導率の相関
(a) LGPS, (b) Li₃PS₄

そこで本研究では、TEMを用いて硫化物固体電解質の粒子状態（結晶／ガラスの分布、結晶化度）を評価できる手法を開発する。そして図1に示す挙動の解析に適用することで、LGPS および Li₃PS₄ の構造変化とイオン伝導率の相関を解明し、イオン伝導率向上に向けた粒子構造の制御指針の獲得を狙った。

2 構造解析手法の考案

TEMを用いた観察手法には、主に電子線回折、高分解能像、ナノビーム電子線回折、明視野／暗視野法が存在する。この中で、高分解能像およびナノビーム電子線回折は高倍率での像取得や収束した電子線を用いることから、電子線による試料へのダメージが回避できないため、硫化物固体電解質の観察には適さないと考えた。そこで、低倍率で像の取

得ができ、さらに結晶成分のみを選択的に抽出できる暗視野法に着目した。図2に暗視野法による観察の概略図を示す。この手法は、試料を透過する際に回折された電子線で像を結像させる。具体的には、対物絞りを上面から見た図2 (b) において、特定の回折スポット、すなわち結晶情報を選択して像を結像する。この場合、回折条件を満たす領域のみが明るく見える像が得られるため、実像から明るい領域を結晶、暗い領域をガラスと判断できる。

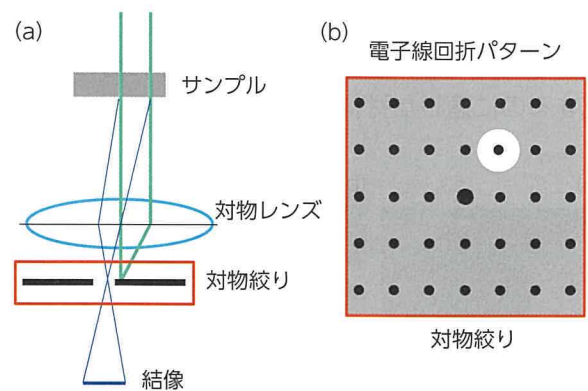


図2 暗視野法による観察の概略図
(a) 暗視野法による観察の光学系、
(b) 対物絞りの上面図

この手法を硫化物固体電解質に適用するため、新たな解析手法を考案した（図3）。図3 (a) で示すように、異なるスポットを選択した複数の像を取得し、図3 (b) で示すようにそれらを重ね合わせる。この手法により、多くの結晶情報を反映した像が得られ、粒子内の結晶／ガラスの分布を可視化できると考えた。

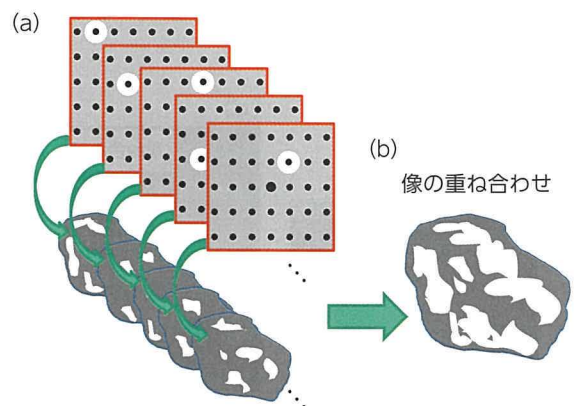


図3 考案した解析手法の概略図
(a) 複数のスポットから像取得、
(b) 取得した像の重ね合わせ

3 結果と考察

3.1 構造解析手法の有効性実証

TEM を用いた観察手法の検討には FE (Field-Emission) タイプの TEM システム JEM-2100F を用いた。手法検討には、モデル材料として 240°C で焼成した Li_3PS_4 を用いた。

明視野像および像中に示した各領域から得られた電子線回折パターンを、**図 4** に示す。**図 4** (b) に示す電子線回折パターンはハローとスポットからなり、観察領域は結晶とガラスの混在状態であることがわかった。これにより結晶/ガラスの分布を可視化するのに適した材料であると言える。

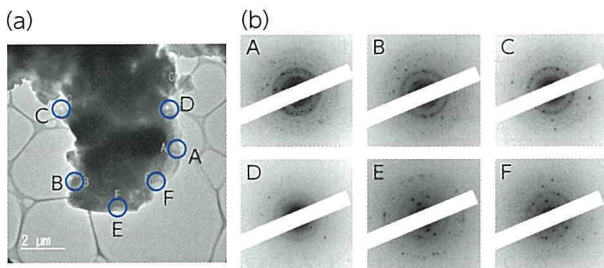


図 4 硫化物固体電解質の TEM 観察結果
(a) 明視野像, (b) 電子線回折パターン

考案した**図 3**の暗視野法を適用して解析を進めた。**図 5** (a), (b) に示すように、電子線回折において複数のスポットを選択し、暗視野像を取得して、それらの像を重ね合わせることで、**図 5** (c) に示すような粒子内に結晶領域のコントラストを強調したマッピング像を得ることができた。この像の明るい領域を結晶、暗い領域をガラスと判断することができるため、考案した手法が結晶/ガラス分布

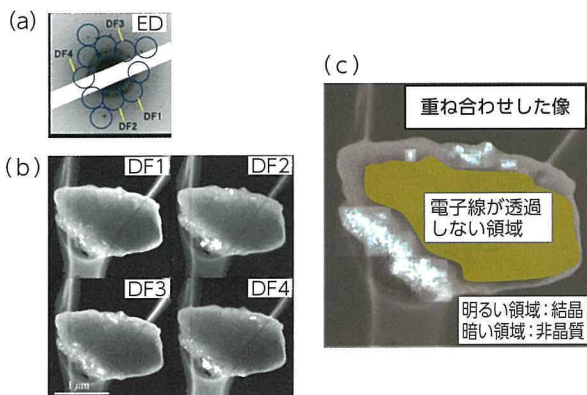


図 5 考案した手法の適用結果
(a) 電子線回折パターンと選択したスポット,
(b) 各スポットから得られた暗視野像,
(c) 暗視野像の重ね合わせ

の可視化に有効であることを実証した。さらに明るい領域は約 50 ~ 100 nm の塊として存在する。ここからは結晶子サイズと判断することができ、結晶子サイズの評価も可能であることを実証できた。

さらに得られたマッピング像を用いて、画像解析による結晶化度の定量化を検討した。明るいピクセルを結晶、それ以外のピクセルをガラスと判断できるため、結晶化度 χ_c は下記の式 (1) で表現することができる。

$$\chi_c = \frac{N_{pb}}{N_{pt}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 N_{pb} = 明るいピクセル数, N_{pt} = 全ピクセル数を表す。

この手法を**図 6**の像に適用し、結晶化度の定量化を試みた。ただし、ハッチング部分は電子線が透過しない試料厚みのため、それ以外の領域①~④で検討した。結果を**図 6**中の表に示す。これにより、結晶化度は約 60%と算出され、任意の領域の定量化が可能であることを実証できた。

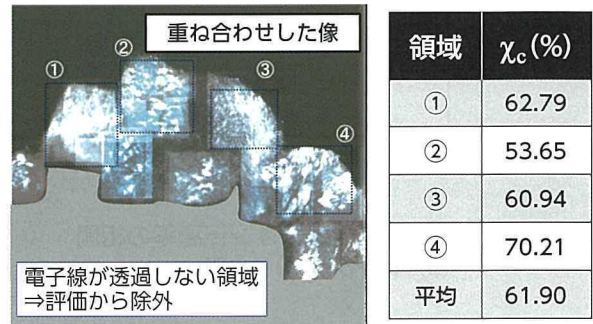


図 6 マッピング像からの結晶化度の定量化

3.2 結晶化挙動の解明

確立した解析手法を、LGPS および Li_3PS_4 の熱処理時における構造変化の解析に適用した。まずは LGPS の解析結果について、焼成温度による電子線回折パターンの変化を**図 7**に示す。左上の温度は焼成温度を表す。これにより、全焼成温度の試料からスポットが観察され、結晶を含む状態であることがわかった。さらに 410°C 付近からスポットの変化を観測した (**図 7**中に白丸点線で表示)。これは結晶構造の変化を示している。この温度域で LGPS への相転移が起きると過去に報告されているため⁽³⁾、本研究で観測された現象も LGPS 相への相転移によるものと結論付けた。

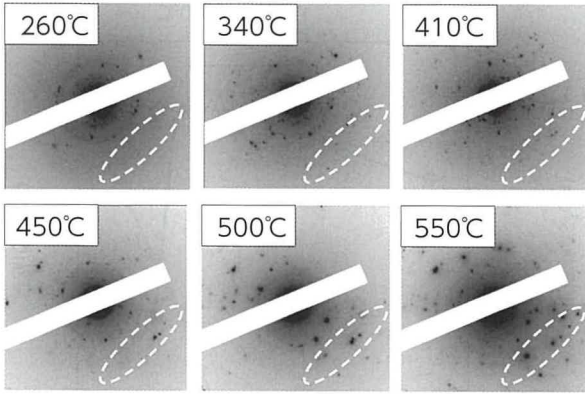


図7 熱処理によるLGPSの電子線回折パターンの変化

結晶化挙動を評価するために、暗視野像による観察を行った。図8に焼成温度による暗視野像の変化を示す。これにより、温度上昇に伴う結晶領域の増加が観測された。一方で、結晶子サイズを見積もると、相転移まで(410°C以下)は約30 nmであり、相転移後(410°C付近)に約100 nmに成長するが、焼成温度をそれ以上に上昇させても結晶子サイズは変化しないということが明らかになった。つまり、LGPSの結晶成長のメカニズムは、結晶子サイズの増加ではなく、結晶子数の増加が支配的であると考えられる。

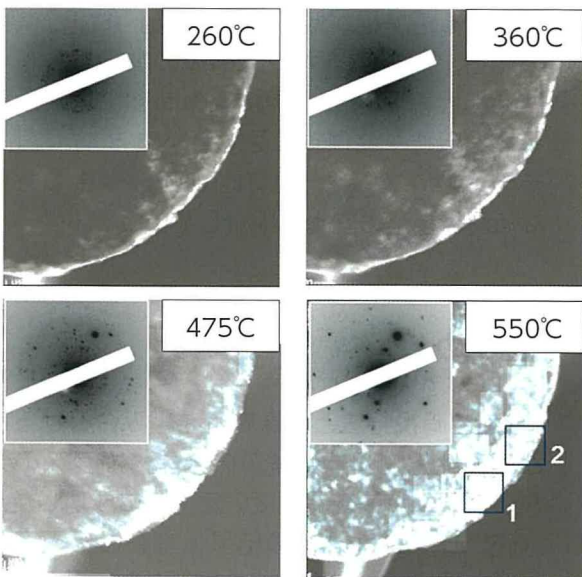


図8 LGPSの熱処理による暗視野像の変化

結晶化度とイオン伝導率の相関を明らかにするため、各焼成温度の結晶化度を算出した。図9に、結晶化度とイオン伝導率に対する温度との相関を示す。

す。400°C付近からの、イオン伝導率の急激な増加と結晶化度の増加の傾向が一致した。すなわち、析出する結晶相が高イオン伝導相であり、LGPSにおける高イオン伝導率の発現は結晶相の生成・成長に起因することが明らかとなった。

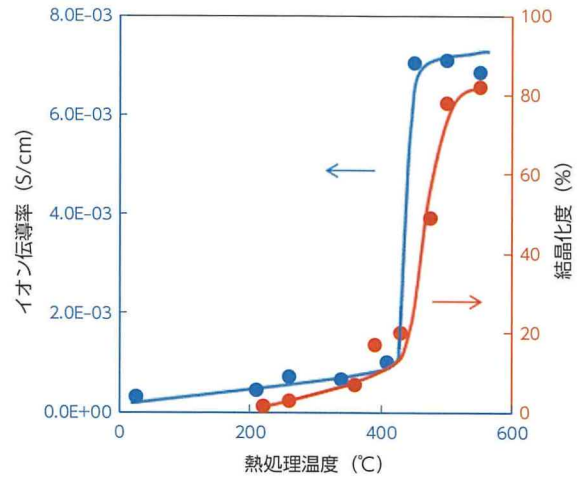


図9 LGPSのイオン伝導率と結晶化度の相関

次に、 Li_3PS_4 の解析結果について、焼成温度による電子線回折パターンの変化を図10に示す。180°Cからスポットが観察され、結晶化が生じていることが確認された。

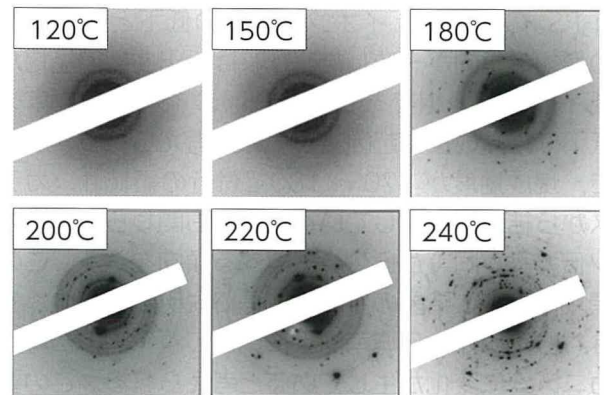


図10 熱処理による Li_3PS_4 の電子線回折パターンの変化

LGPSの解析と同様に結晶化挙動を評価するため、暗視野像による観察を行った。図11に焼成温度による暗視野像の変化を示す。図10の電子線回折でも確認されたように、暗視野像において180°Cでわずかな結晶生成を確認でき、またそれ以上の焼成温度では結晶領域の増加が観測された。

結晶子サイズを見積もると、焼成温度によらず約 30 ~ 50 nm であることもわかった。これにより、 Li_3PS_4 の結晶成長のメカニズムも、結晶子サイズの増加ではなく、結晶子数の増加が支配的であることがわかった。

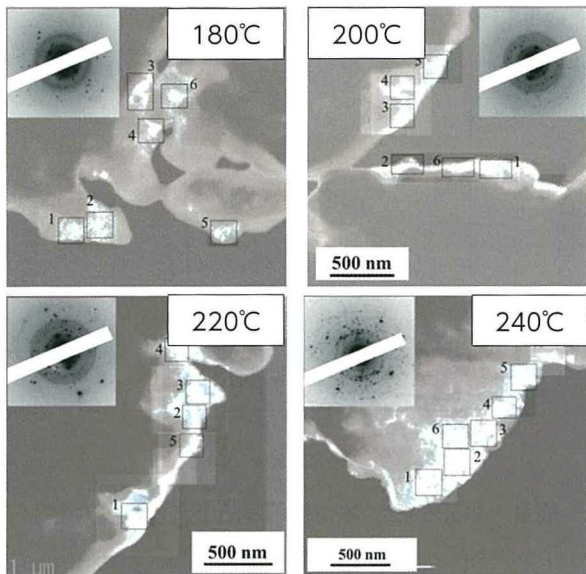


図 11 Li_3PS_4 の熱処理による暗視野像の変化

さらに LGPS の解析と同様に結晶化度を算出し、イオン伝導率との相関を算出した。図 12 に、焼成温度と結晶化度及びイオン伝導率との相関を示す。 Li_3PS_4 の場合は、イオン伝導率の低下と結晶化度の増加の傾向が一致した。これは析出する結晶相が低イオン伝導相であり、 Li_3PS_4 のイオン伝導率の低下は結晶成長に起因するものと考えられる。一方で、焼成温度が 120 ~ 180°C 付近の領域は、ガラスから結晶が生成していく状態にも関わらず、イオン伝導率が同等から少し上昇する傾向を示す。この領域は単純に結晶の生成・成長で説明できない。すなわち、イオン伝導率向上に繋がる粒子内の伝導メカニズムに変化が生じていると考えられる。この要因として以下の 2 つを推察しているが、本研究だけでは明らかにできていない。

- i) 加熱によって粒子内に残存するガラス構造が変化し、伝導率向上に寄与
- ii) 微小な結晶子と、ガラス界面に高イオン伝導率を有する第三相が形成され、伝導率向上に寄与

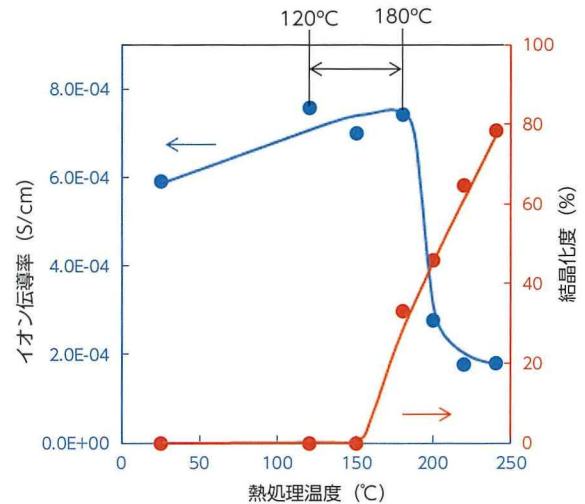


図 12 Li_3PS_4 のイオン伝導率と結晶化度の相関

今回、硫化物固体電解質の粒子構造を可視化及び定量的に評価する解析技術を世界で初めて開発し、LGPS および Li_3PS_4 の結晶化挙動とイオン伝導率の変化の相関を解明した。これらの結果から、硫化物固体電解質のイオン伝導率を向上させるための 2 つの指針が得られた。

- (1) 析出結晶相が高イオン伝導相である場合 (LGPS 等)、粒子の結晶化度を向上させる、すなわち単結晶に近い状態に近づけることが有効である。
- (2) 析出する結晶相が低イオン伝導相 (Li_3PS_4 等) の場合、残存するガラス構造の制御、もしくは結晶とガラスの混相状態の制御により、高イオン伝導が発現する可能性がある。ただし、そのメカニズムは未解明であり、今後のさらなる解析技術の向上に期待したい。

4 まとめ

- i) TEM の暗視野法と画像解析を組み合わせることで、硫化物固体電解質の結晶/ガラスの分布の可視化及び結晶化度の定量化に成功した。
- ii) LGPS および Li_3PS_4 の結晶化挙動と伝導率の相関を評価し、以下 3 点を解明した。
 - ・ LGPS, Li_3PS_4 とともに結晶成長のメカニズムは同一であり、結晶子数の増加が支配的である。

- ・ LGPS は結晶化度の上昇に伴い伝導率が上昇する。
- ・ Li_3PS_4 は結晶化度の上昇に伴い伝導率が低下するが、結晶化度の急激な増加前に伝導率が上昇する。

これにより、イオン伝導率向上に向けた以下の指針を得た。

- (1) 粒子内の結晶化度の制御
- (2) ガラス構造、もしくはガラス・結晶の混相状態の制御

今後、本研究で開発した硫化物固体電解質の内部状態の観測技術は、イオン伝導率の向上だけでなく、これまで未解明だった固体電解質の劣化機構の解析に適用でき、全固体電池の開発推進に大きく貢献することが期待される。

最後に、本研究の成果は大阪府立大学（森教授、塚崎様）との連携によって得られたものであり、関係者の皆様に心より御礼申し上げます。

■参考文献

- (1) A. Hayashi et al.: Preparation of $\text{Li}_2\text{S}-\text{P}_2\text{S}_5$ Amorphous Solid Electrolytes by Mechanical Milling. J. Am. Ceram. Soc. Vol. 84, Issue 2, pp. 477 - 479 (2001)
- (2) N. Kamaya et al.: A lithium superionic conductor. Nature Materials 10, pp. 682 - 686 (2011)
- (3) S. Hori et al.: Phase Diagram of the $\text{Li}_4\text{GeS}_4-\text{Li}_3\text{PS}_4$ Quasi-Binary System Containing the Superionic Conductor $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$. J. Am. Ceram. Soc. Vol. 98, pp. 3352 - 3360 (2015)

■著者



塩谷 真也



山村 英行

新技術開発財団 第49回 市村産業賞 貢献賞 エンジン燃焼室壁温スイング遮熱技術 (TSWIN) の開発

Research and Development of Thermo-Swing Wall Insulation Technology (TSWIN)
for Engine Heat Loss Reduction

川口 暁生*1 西川 直樹*2 脇坂 佳史*3
Akio Kawaguchi Naoki Nishikawa Yoshifumi Wakisaka

1 はじめに

地球温暖化防止のため、内燃機関の熱効率向上が渴望されている。図1は燃料の全発熱量の行き先を示したヒートバランスの一例であるが、燃焼室から壁面を通して熱が逃げる冷却損失は大きな割合を占めている。その低減のため、1980年頃から燃焼室をセラミックスで断熱する研究が数多く行われたが、壁温度が常に高い(図2：従来遮熱)ことにより吸入空気を加熱し、性能低下や排気ガスの悪化などの背反が大きいため、実用化には至っていない。これらの欠点を克服するため全く新しいコンセプト、「壁温スイング遮熱」を提案し、開発に取り組んだ。

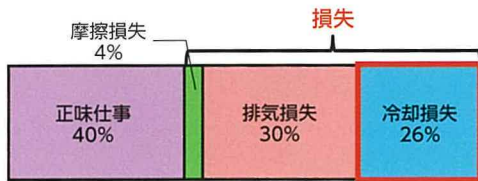


図1 エンジンヒートバランスの例

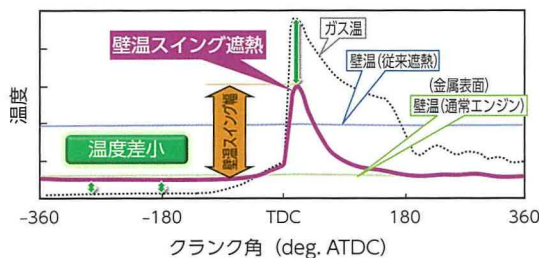


図2 壁温スイング遮熱コンセプト

2 壁温スイング遮熱コンセプト

壁温スイング遮熱法は、サイクル中の燃焼室壁面温度(以降 壁温)が、ガス温度(以降 ガス温)の変化に追従するように上昇・降下すること(壁温スイング)によってガス温と燃焼室壁温の差を小さくし、燃焼行程での冷却損失低減と、吸気行程における壁からの吸気加熱防止の両立を狙って

いる(図2：壁温スイング遮熱)。これを壁温スイング遮熱技術(TSWIN: Thermo-Swing Wall Insulation Technology)と呼ぶ。

3 材料開発

燃焼室壁面に形成される遮熱膜は、筒内ガス温への追従性と断熱性実現のため、低熱伝導率・低体積比熱の熱物性、すなわち多量の空隙と、適切な膜厚が求められる。その材料としてアルミニウム合金の陽極酸化皮膜に着目し、合金中の晶出物による空隙も利用して従来の皮膜より膜内部の空隙量を増やし、熱物性を向上させた。さらに、エンジン運転中の高いストレスに対する補強として、膜にシリカを充填し、「シリカ強化多孔質陽極酸化皮膜(Silica Reinforced Porous Anodized aluminum: 略称 SiRPA)」として新たに開発した(図3、4)。

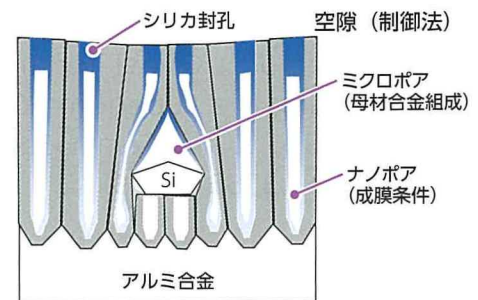


図3 シリカ強化多孔質陽極酸化皮膜



図4 SiRPAの熱物性

*1 パワートレーンカンパニー パワートレーン先行機能開発部
*2 先進技術開発カンパニー 無機材料技術部
*3 (株) 豊田中央研究所

4 ディーゼルエンジンへの適用

開発した SiRPA をディーゼルエンジンのピストン表面に形成し、表面温度の計測と性能評価を行った。表面温度の計測には非接触・高応答で温度測定が可能なレーザ誘起燐光法を、可視化単筒エンジンに適用して実施した。SiRPA の表面温度は、狙い通り燃焼時のみ最大約 140K 上昇し、吸気行程では低下することが確認できた (図 5)。

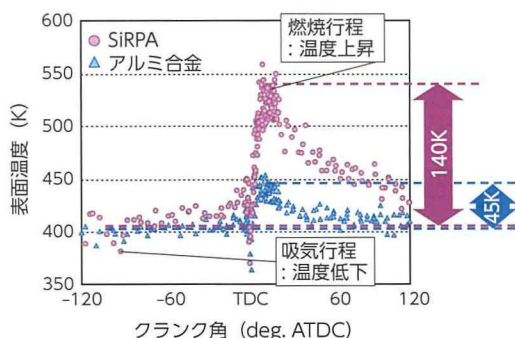


図 5 SiRPA 有無での表面温度計測結果

実エンジン評価では、SiRPA を形成したピストンは通常のアルミピストンと比べて冷却損失が低下し、正味仕事と排気損失が増加している (図 6)。これらの結果より、エンジン運転状態において壁温スイング遮熱コンセプトが実現され、それにより熱効率が向上していることが確認できた。また排気エミッションは、壁温スイング遮熱有無にかかわらず、同一のエンジン適合にて目標の排出レベルをクリアできることを確認した。

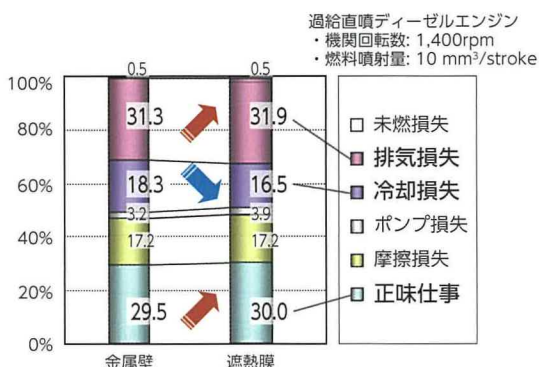


図 6 SiRPA 有無でのエネルギーバランス

5 おわりに

本技術は、ランドクルーザープラドに搭載される、新開発 2.8L ターボディーゼルエンジンにて世界で初めて実用化された (写真 1: 本技術適用ピストン)。



写真 1 SiRPA 適用ピストンカットモデル

ここに至るまでの過程で貴重な助言とご協力を頂いた多くの関係者の皆様に深く感謝の意を表す。今後は他機種への展開を進めるとともに、膜の遮熱特性を向上・遮熱膜の形成範囲を拡大し、さらなる熱効率の向上を追及する所存である。

市村産業賞以外の受賞名、タイトル、受賞者は下記のとおりである。

- ◆ R&D Magazine R&D 100 Awards
 “Toyota Land Cruiser Prado”
 川口暁生, 西川直樹, 山下親典, 脇坂佳史
- ◆ 日本機械学会賞 (技術)
 「エンジン熱効率向上のための新規冷却損失低減技術の開発」
 川口暁生, 西川直樹, 山下親典, 脇坂佳史, 清水富美男
- ◆ 自動車技術会賞 技術開発賞
 「燃焼室壁温スイング遮熱によるエンジン冷却損失低減技術の開発」
 川口暁生, 西川直樹, 山下親典, 脇坂佳史, 清水富美男
- ◆ 自動車技術会賞 論文賞
 「壁温スイング遮熱法によるエンジンの熱損失低減 (第 2 報~第 4 報)」
 脇坂佳史, 堀江俊男, 川口暁生, 西川直樹, 山下親典

第 67 回自動車技術会賞 技術開発賞

世界トップクラスの低燃費を実現した HV 用リチウムイオン電池の開発

Development of Lithium Ion Batteries for Hybrid Vehicle with World-Leading Fuel Efficiency

佐藤 広一 *1
Kouichi Sato

永井 裕喜 *2
Hiroki Nagai

秋田 宏之 *1
Hiroyuki Akita

高橋 泰博 *2
Yasuhiro Takahashi

棚橋 隆幸 *3
Takayuki Tanahashi

1 まえがき

低燃費化に向けた燃費改善技術が多様化する中、HV (Hybrid Vehicle) 開発には高い期待が高まっている。低燃費化や商品性向上を狙い、車載用として、従来のリチウムイオン電池 (LIB) に対し、電池パックの小型軽量化が可能となる高出力化技術開発に着手した。高出力化技術としては、LIB の抵抗低減を狙い、特に抵抗の支配要因となる正極において、開発コンセプトの見直しを行った。

2 技術内容

正極の開発技術として、新たに正極活物質を中空粒子化した。これにより活物質粒子当りの抵抗を低減し、単位電極面積当たりの出力性能を大幅に向上させた。図 1 に正極活物質の中空粒子化による高出力化技術のコンセプトを示す。正極活物質は、一次粒子が凝集した二次粒子で構成されている。この二次粒子内部が中空になるように一次粒子を凝集させる。一次粒子が凝集する際に二次粒子内部への貫通孔を形成させると、電解液が二次粒子内部 (中空部) に浸透できる。その結果、電解液と接触する活物質表面積が増大し、内部抵抗が低減し、高い出力を実現できる。上記コンセプトに基づき、正極活物質の前駆体合成からのプロセス開発を行い、正極活物質の中空粒子化を行った。図 2 に、従来の正極活物質を用いた第 1 世代 LIB と、開発した中空粒子化した正極活物質を用いた第 2 世代 LIB の出力特性を示す。また、表 1 に開発電池の緒元を示す。開発した正極活物質を用いた第 2 世代 LIB は、単位電極面積当たりの出力特性が 40% 向上した。出力特性を向上させた結果、第 2 世代 LIB は第 1 世代 LIB に比べ約 20% の小型化・軽量化を実現した。

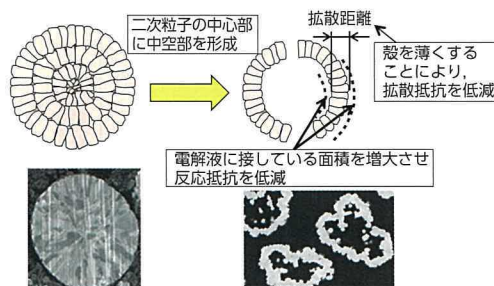


図 1 第 2 世代 LIB 用正極活物質の中空粒子化による出力向上の開発コンセプト

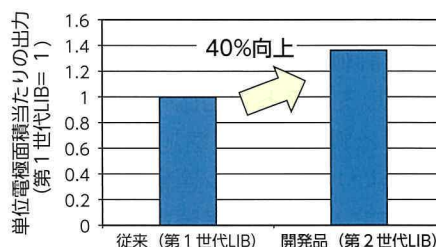

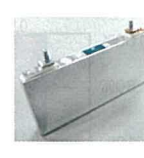


図 2 第 1 世代 LIB と第 2 世代 LIB の単位電極面積当たりの出力特性比較

表 1 開発電池 (第 2 世代 LIB) の緒元

	従来 (第 1 世代 LIB)	開発品 (第 2 世代 LIB)
		
電圧 (V)	3.6	3.7
容量 (Ah)	5.0	3.6
出力 (W/kg)	2,950	3,920
重量 (g)	245	204
寸法 (mm)	111(W)×14.1(T)×91.8(h)	137(W)×13.3(T)×63.3(h)

3 むすび

HV 用 LIB の高出力化技術として、中空粒子化した正極活物質を開発した。この技術により、出力特性を向上させ、電池の小型軽量化が可能となり、HV の燃費性能、商品性の向上を実現した。

*1 先進技術開発カンパニー 電池材料技術・研究部

*2 パワートレーンカンパニー EHV 電池設計部

*3 パワートレーンカンパニー 電池・FC 生技部

第 67 回自動車技術会賞 技術開発賞

熱可塑性 CFRP スタンパブル材料及び その適用部品燃料電池スタックフレームの開発

Development of Stampable Thermoplastic Carbon Fiber Reinforced Plastic
and its Application to Stack Frame

林 浩一郎 *1
Koichiro Hayashi

池田 光希 *2
Koki Ikeda

外園 清志 *3
Kiyoshi Hokazono

片平 奈津彦 *4
Natsuhiko Katahira

1 背景・目的

世界的な CO₂ 排出規制への対応等のため、自動車の軽量化の重要度が増す中、鉄やアルミ等と比べて比強度・比剛性が高い炭素繊維複合強化樹脂 (CFRP) が注目されている。従来、自動車部品用 CFRP は、熱硬化性エポキシ樹脂が多く、生産性向上が求められていた。本開発では、スタンピング成形可能な熱可塑性 CFRP を開発し、燃料電池車用燃料電池スタックフレーム (写真 1) に適用することを目的とした。

2 材料開発

材料は、形状付与しやすい高流動性を得るため、連続でない繊維を樹脂にランダム分散させた構成 (写真 2) で、繊維の束を適正にほぐした炭素繊維マットを開発した。部品要求からくる強度と流動性を共に満足するよう繊維体積含有率を 30% に決定、繊維長を最適化した。樹脂マトリックスにはポリアミド 610 を採用し、高温吸水時の強度低下を抑制した。



写真 1 部品外観

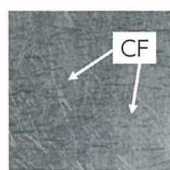


写真 2 材料外観

3 部品設計

燃料電池の保持、外力 (路面干渉・衝突等) に対する燃料電池の保護、車体剛性の確保等の部品機能を満足させつつ、CFRP の破断ひずみが約 2% と小

さいことや鉄部品のガルバニック腐食等を考慮した結果、図 1 に示すように三層の CFRP をダンボールの様に接着、鉄製フレームでその CFRP パネルを囲み、燃料電池ユニット・車体との締結点を全て鉄部材で構成する構造とした。

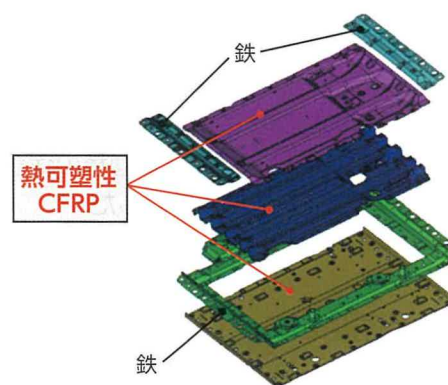


図 1 燃料電池スタックフレームの構成

4 生産技術開発

成形方法は、材料強度と量産性、具体的には炭素繊維長と熱プレス時間 (金型占有時間) のバランスを考慮し、シート状材料を予備加熱した後にプレス成形する工法を選択した。試作過程で発生した反りやボイド等を解決し、製品化した。

5 まとめ

今後の適用拡大が期待できる熱可塑性 CFRP スタンパブル材料を開発した。種々の課題を解決し、世界で初めて自動車部品に適用、燃料電池スタックフレームの性能目標を満足できた。熱可塑性 CFRP を使用することで、鉄製のみの部品に対し、15 部品削減、約 11kg の軽量化に成功した。

*1 先進技術開発カンパニー 有機材料技術部

*2 先進技術開発カンパニー ボデー先行開発部

*3 CV Company CV ボデー設計部

*4 先進技術開発カンパニー 先行生産技術部

第 67 回自動車技術会賞 論文賞

統計的手法を用いたリモートレーザ溶接の インライン品質保証技術の開発

In-line Quality Monitoring System Using Multiple Regression Equation in Remote Laser Welding

中島 佐知子*¹ 落合 大*² 福西 篤志*¹
Sachiko Nakajima Masaru Ochiai Atsushi Fukunishi

1 まえがき

環境への取り組みにハイブリッド車の需要は年々上昇しており、その基幹部品のインバータは、バッテリーの直流を交流に変換する機能を持ち、半導体を実装した放熱モジュールで構成される。そのモジュール端子と外部バスバーの溶接には高速溶接が可能なりモートレーザ溶接を採用している。この溶接部は、大電流の経路を確保するため一定値以上の溶接面積が必要であり、この溶接面積の保証方法として溶接中のプロセス波形に着目した。

2 レーザ溶接モニタリングの開発

溶接には、波長 1,070nm のパルスレーザを用いている。このとき発生する溶接光はプラズマ化した波長 600 ~ 800nm の光であり、光センサ回路を用いて取得する。このプラズマ光は溶接品質が正常であれば強く、電圧値も大きく変化する。このプラズマ光波形から重回帰分析を利用して溶接面積を推定することで溶接品質を良否判定するアルゴリズムを策定する。

まず溶接への影響因子を設備・部品・人の観点から洗い出し、各々の因子を振って溶接面積とプラズマ光波形を 1 対 1 で紐づける。次に図 1 より波形を溶接プロセスの原理に沿って特徴点を設定し、取得した波形を全て数値化する。

次にこの特徴点を説明変数とし、実測した溶接面積を目的変数に重回帰分析を行う。ここで重回帰式

の感度を悪化させるデータを各々調査し、例えば波形挙動の歪みが大きい金属蒸気のヒュームは面積判定から除外し、特徴点に判定窓を設ける。また、異常燃焼であるスパッタ影響のある特徴点は説明変数から除外する。その結果、図 2 よりプラズマ光を重回帰式で定量化した溶接面積の予測値と実測値に、重相関係数 0.89 と高い相関を得ることができた。

最後に、良否の判定精度を検証するため、良品と溶接面積が規格以下のテストピースを製作した。なお良否判定値は、重回帰式から導出される信頼区間の溶接面積規格の上限値で設定する。その結果、良品、及び、溶接面積が規格以下の不良テストピース、共に良否を正しく判定できていることを確認できた。

このモニタリングシステムを設備に組み込み運用する。プラズマ光波形は、レーザの照射信号をトリガにして取得し、溶接面積の算出と同時に良否判定を実行する。今後は、このようなプロセスモニタリング技術を他の加工点にも応用していく。

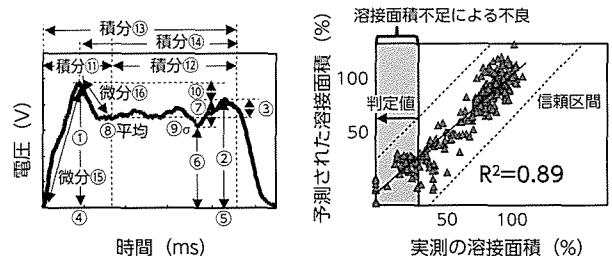


図 1 プラズマ光と特徴点

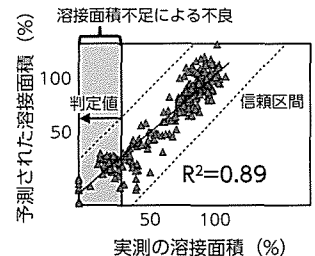


図 2 重回帰分析結果

*1 パワートレーンカンパニー エレクトロニクス生技部
*2 先進技術開発カンパニー 電子プラットフォーム開発部

第 67 回自動車技術会賞 論文賞

装飾クロムめっき腐食に及ぼす融雪剤と土壌成分の影響解析

Analysis of Influence of Snow Melting Agents and Soil Components on Corrosion of Decorative Chrome Plating

梶山 優子 *1
Yuko Kajiyama森 元秀 *2
Motohide Mori中村 昌博 *1
Masahiro Nakamura杉本 剛 *3
Tsuayoshi Sugimoto

1 はじめに

自動車の外装部品には、金属感を与える目的で樹脂に銅-ニッケル-クロムめっきを施している。自動車市場のグローバルな拡大に伴い、ロシアで自動車の使用が増加する中で、ロシア市場のみで表層のクロムが溶解する特異的な腐食が認められている。しかし、ロシア同様に厳しい腐食環境では発生せず、ロシアでのみ特異的に発生している原因が不明であった。本研究では土壌成分に着目し、ロシア土壌に含有するフルボ酸が原因で特異的な腐食を引起こしたことを解明した。

2 本文

2.1 ロシアのクロムめっき腐食の特異性解明

2.1.1 クロムめっき腐食機構と課題

通常のめっき腐食は表層のクロムではなく下層のニッケルが先に犠牲腐食する。しかし、ロシアで発生する腐食はクロム層が最初に腐食しており、ロシアでのみ発生する原因が不明であった。

2.1.2 ロシアの特異性調査

土壌成分に着目し、ロシア土壌は有機質土壌地帯、高イオン交換性土壌地帯、強酸性土壌地帯という、腐食に影響を及ぼす3種類の土壌全てに該当した。あらゆる成分を分析し各種酸を調査した結果、特に金属との相互作用を有する腐食有機酸のフルボ酸に着目した。

2.2 腐食メカニズム推定

2.2.1 フルボ酸による不動態皮膜の変化

クロムとニッケルめっきを用いロシア土壌のフルボ酸濃度である 11mass% を、融雪剤成分である飽和塩化カルシウム溶液に添加した場合と添加しない場合で電位測定を実施した。クロムはフルボ酸と錯体を形成し、クロム表面に吸着した錯体がクロムの不動態皮膜を消失させていると推定する (図 1)。

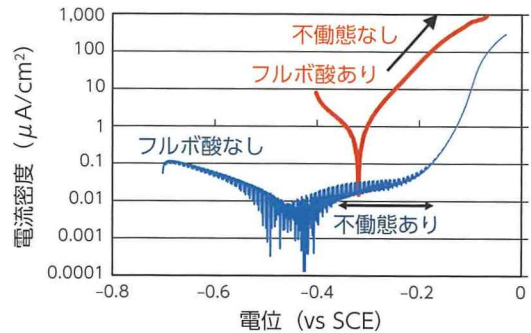


図 1 クロムめっきの分極曲線

2.2.2 フルボ酸によるニッケル犠牲腐食効果消失

飽和塩化カルシウム溶液にフルボ酸濃度を 20mass% まで添加し、濃度変化をさせてクロムとニッケルの自然電位変化の測定を実施した。フルボ酸濃度が 10mass% 以上で、クロムとニッケルの電位差が無くなることを確認した (図 2)。

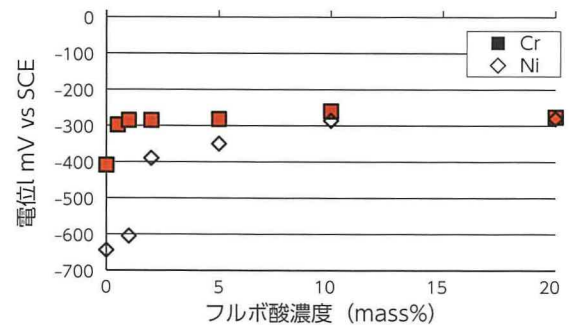


図 2 フルボ酸濃度による Cr/Ni 電位変化

上記 2 つの理由より、フルボ酸がロシアで発生する特異的な腐食の要因になっていると推定できる。

3 おわりに

ロシアにて確認されている装飾クロムめっきの腐食に関し、ロシアでのみ特異的に発生している理由を明確にした。地質学や土壌学等、腐食以外の他分野の調査をすることで、土壌中のフルボ酸が融雪剤成分と相互作用し腐食を発生させるメカニズムも明らかにした。

*1 先進技術開発カンパニー 有機材料技術部

*2 先進技術開発カンパニー 無機材料技術部

*3 先進技術開発カンパニー 基盤材料技術部

自動車技術会 2016年春季大会学術講演会 優秀講演発表賞 新型FCV用高耐久性燃料電池スタックの開発

Development of Highly Durable Fuel Cell Stack for New FCVs

則本 理人 *1
Michito Norimoto

窪 英樹 *1
Hideki Kubo

水野 誠司 *1
Seiji Mizuno

1 はじめに

トヨタの新型量産FCV（燃料電池自動車）では、FCシステムの簡素化によるコンパクト化や低コスト化の観点から、(1) 加湿器を廃止した世界初の加湿レスシステムで発電可能なFCスタックを開発し、(2) 電極触媒のPt（白金）量を1/3に削減、セパレータ表面処理のAu（金）めっき廃止により貴金属使用量を大幅に低減したスタックの開発にチャレンジした。

世界トップレベルの出力密度3.1kW/Lを実現し、セダンタイプのシート下への搭載を可能にした（図1）。本稿では主に、(1) 加湿レス運転、(2) Pt使用量削減とFCスタックの耐久性両立、出力低下抑制に関する対応について述べる。

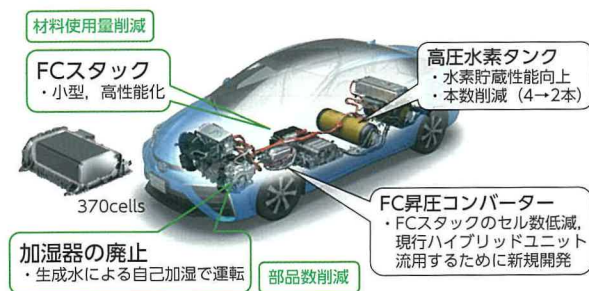


図1 新型FCVシステム

2 加湿レス発電における出力低下抑制

加湿レスにおける課題は、発電時に生成するOHラジカルがセル内で濃縮し、電極中のスルホン酸が脱離、発電性能が低下することである。対応として、(1) 電解質膜の薄膜化、(2) 水素循環量の増加、(3) 水素と空気の流れる方向を対向させて（対向流）、加湿器等の外部加湿によらず、自己加湿機能の強化により、乾燥傾向が強いエア入口部分のラジカル濃縮を低減した。対策前後の発電、抵抗分布を示す（図2）。

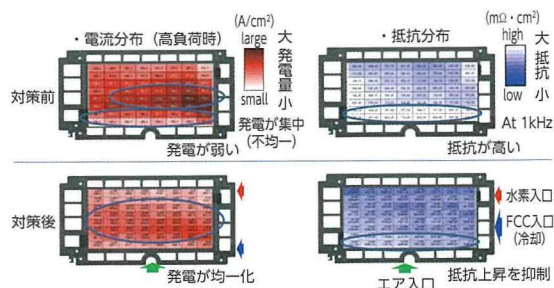


図2 発電耐久後のセル電流分布、及び抵抗分布

3 Pt使用量削減における出力低下抑制

FCシステムの起動/停止、運転中の電位変動/高電位においてPt粒の溶出、粗大化に伴い触媒活性の低下、酸素拡散抵抗の増加により出力低下に至る。使い方によるが、出力低下量の7割程度を占め、劣化の主因と考えられる。

触媒目付量を下げると発電耐久中の酸素拡散抵抗増加が大きくなるため、出力低下がより大きくなる。触媒担持カーボンの中実化により、発電への寄与が大きいカーボン表層近くにPt触媒を担持することで（図3）、Pt量を1/3に削減しつつ同程度の出力低下に抑制可能とした。

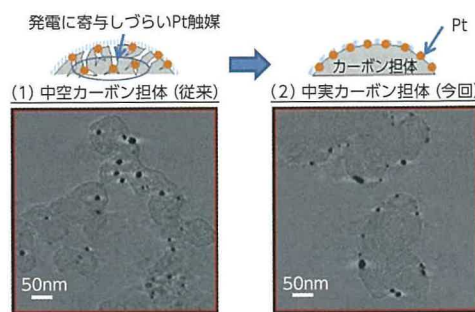


図3 電極の触媒担持状態

4 終わりに

上記に示すスタックの対応、及び運転中の上限電圧を下げ、高電位を回避した運転方法の採用により、システム台上の耐久試験において出力低下量を従来モデルと比べ1/3に低減し、量産化に対応可能な耐久性を確保した。

*1 パワートレーンカンパニー FC技術・開発部

自動車技術会 2016 年秋季大会学術講演会 優秀講演発表賞 側面衝突時の効果的なライドダウン活用手法の検討

Study of Enhancing the Ride Down Effect in Side Impacts

国定 正人*¹ 名倉 博幸*² 深渡瀬 修*³
Masato Kunisada Hiroyuki Nagura Osamu Fukawatase
長谷川 俊*⁴ 近藤 仁*¹
Takashi Hasegawa Hitoshi Kondo

1 まえがき

衝突時のエネルギー吸収スペースの少ない側面衝突では、前面衝突のように乗員の慣性エネルギーを車両に代替吸収させるライドダウン効果と呼ばれる傷害低減技術がこれまで使えなかったが、高強度ボデーとセンシング早期化により活用できつつある。そこで普及が進むプリクラッシュセンサを側面衝突に活用した場合のライドダウン効果および、市場事故の被害低減効果について試算を行った。

2 技術の内容

2.1 側面衝突へのプリクラッシュセンサの活用

側面衝突でライドダウン効果を高め傷害を低減するには、衝突前から持続的、かつ矩形的に乗員を拘束することが有効である。そこでプリクラッシュ信号で作動する装置も含めた複数の乗員拘束装置からなるシステムを考案した(図1)。

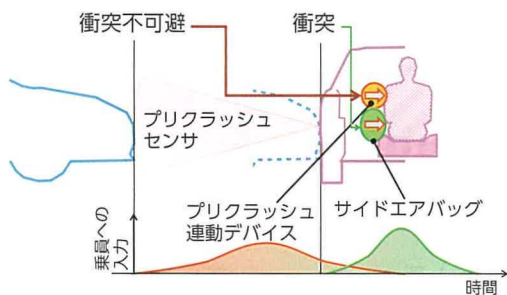


図1 プリクラッシュ連動による側面衝突

2.2 ライドダウン効果

衝突前から衝突直後まで連続的に作動するプリクラッシュ連動デバイスおよび、衝突で作動するサイドエアバッグを組み合わせた乗員拘束を模擬したバネマスモデル計算によると、これまでと比べて乗員

の外力は17%低減し、ライドダウン効果は32%であった(図2)。また、衝突速度を20%増加させてもこれまでと同等の保護性能が得られる結果であった。

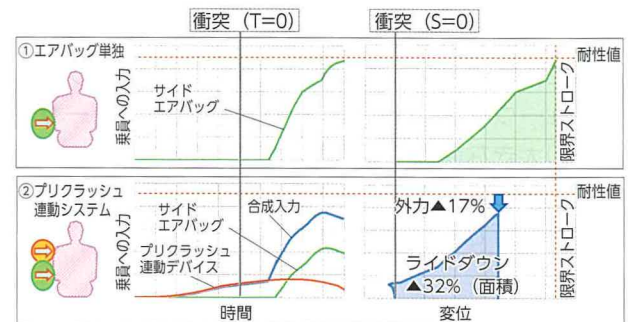


図2 プリクラッシュセンサを活用した波形効果

3 被害低減効果の見積もり

側面衝突の事故データから、ロジスティック回帰解析による確率曲線を用いて重傷・死亡者数を試算すると、エアバッグ単独を1としたとき、プリクラッシュ連動システムでは最大で0.7であった。つまり側面衝突の重傷・死亡事故を最大で30%程度低減できる可能性があることがわかった(図3)。

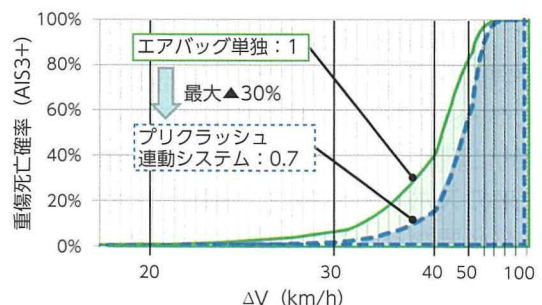


図3 被害低減効果の見積もり

4 むすび

プリクラッシュセンサを活用すれば側面衝突の被害低減をさらに進められることがわかった。自動運転に必要な側方レーダーの装備拡大を見据え、今後の実用化・普及の一助となることを期待する。

*1 先進技術開発カンパニー 車両技術開発部
*2 MS Company MS 車両性能開発部
*3 先進技術開発カンパニー ボデー先行開発部
*4 先進技術開発カンパニー 先進安全性能開発部

2016 年度日本機械学会賞（技術） レーザー円形走査溶接法「LSW」を用いた車体骨格開発

Vehicle Frame Development Using Laser Screw Welding with Circular Scanning Method

是石 智正*¹ 牧野 潤一郎*² 小倉 修平*²
Norimasa Koreishi Junichiro Makino Shuhei Ogura
熊谷 孝士*³ 鄭 銘晃*³
Koushi Kumagai Minghuang Cheng

1 はじめに

車両性能の基盤を成している車体骨格の接合は、スポット溶接がその大部分を占めるが、分流により接合点数には限界があり十分に骨格部材の強度・剛性を引き出すことが困難である。そこで、スポット溶接に代わる溶接技術として開発をしたレーザースクリューウェルディング（以下、LSW）は、レーザー溶接の大きな課題であった板隙裕度を克服し、生産性を向上させつつ接合点数及び適用範囲を拡大できる接合技術である。

スポット溶接と比較して高速であるため、スポット溶接を LSW に代替させることで溶接工程を約 40% 短縮することが可能となる（図 3）。

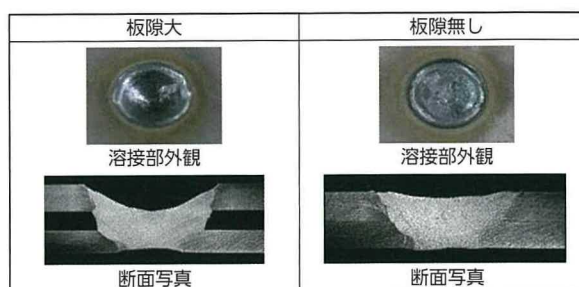


図 1 板隙変化による溶接品質比較

2 技術の概要

2.1 レーザー溶接工法の開発

LSW は、円形にレーザーを走査し、溶接条件の工夫によって溶融した鉄をうまく攪拌することで亜鉛の金属蒸気を逃がしながら溶接を行い、板隙の有無に関わらず安定した溶接品質が得られる（図 1）。これにより車体骨格に広く適用でき、従来のレーザー溶接と比較して主体的に車両性能へ寄与することができる。

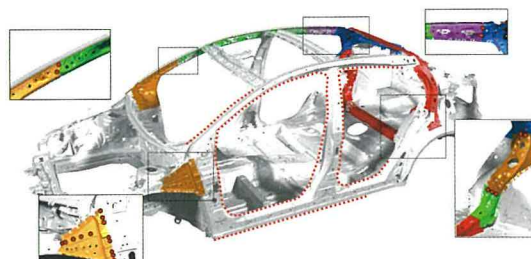


図 2 LSW 採用部位の例

2.2 LSW を活用した車体骨格の開発

2.2.1 車体骨格構造の刷新

衝突時の車体への負荷が高い部位に対して、従来のスポット溶接では実現できない短ピッチで LSW を集中的に配置することで、衝突性能に効果があった。

従来のスポット溶接は、溶接部を溶接ガンで挟み込む必要があったため接合できない場合があったが、LSW では図 2 に示すような閉じ断面骨格へ LSW を配置することで生産性を損なうことなく連続な骨格構造を実現した。

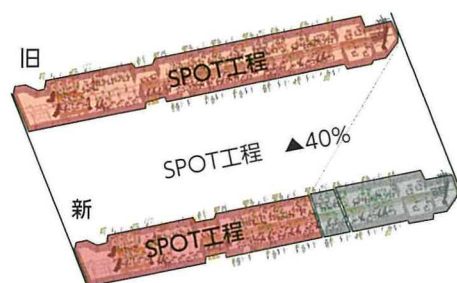


図 3 新旧 溶接工程の比較

2.2.2 高速での接合による溶接工程の刷新

LSW の溶接時間は 1 打点当り 0.3 秒～0.8 秒と

3 おわりに

LSW は、従来のレーザー溶接を量産化する上で課題となる板隙裕度を解決する世界初の溶接技術であり、生産性と性能を両立させることができる。今後も、適用車種の拡大と、さらなる車両性能向上を積極的に推進していく計画である。

*1 先進技術開発カンパニー ボデー先行開発部

*2 MS Company MS ボデー生技部

*3 先進技術開発カンパニー 車両 CAE 部

2016年度日本機械学会賞（論文） 歯面の摩擦力を考慮した動力伝達用歯車のマイクロピッチング 発生機構の検証

Verification of Micro Pitting Formation Mechanism Considering Frictional Force at Gear Tooth Mesh Surface of Power Transmission Gears

安江 悠好*¹
Yuko Yasue

弘嶋 誠司*²
Seiji Hiroshima

林田 泰*²
Yasushi Hayashida

松本 将*³
Susumu Matsumoto

1 緒言

1.1 マイクロピッチング設計の課題

自動車用トランスミッションには軽量化と伝達効率向上が求められている。しかし、軽量化のために歯車を小型化すると歯面の接触圧力が高くなり、潤滑油の攪拌損失低減のために潤滑油の粘度を下げると油膜の厚さが小さくなるため、潤滑状態が過酷になる。このような条件ではマイクロピッチングの発生が懸念される。マイクロピッチングは歯車の歯面にくもりとして確認される微小クラックの集まりであるが、摩耗を伴うため歯車ノイズが悪化する恐れがある。

マイクロピッチングの設計には、歯面の潤滑状態やフラッシュ温度など様々なパラメータが提案されている。しかし、これらは物理的根拠が不明であったり、歯車緒元毎に限界値の確認が必要であったりして、実際の設計に用いるには問題がある。

1.2 マイクロピッチング設計課題解決方針

マイクロピッチングが生じた歯面には強いしゅう動痕や微小クラックが観察され、これらの現象は接触面の摩擦力に起因すると考えられることから、マイクロピッチングの直接的な発生要因としては歯面に生じる摩擦力を取るべきではないかと考えた。そこで、この考え方が正しいかを確認するために、実験的にマイクロピッチングを発生させ、その分布を歯面に発生する理論摩擦力の分布と比較した。

2 マイクロピッチング発生メカニズムの検証

2.1 試験方法および歯面摩擦力の計算

供試品の歯車には2種類の歯車を5対ずつ準備

し、マイクロピッチングを発生させた。

歯面の摩擦力は、久保・梅沢の方法で荷重分布を計算、摩擦係数は松本式で算出した値を用いた。

2.2 マイクロピッチングと摩擦力分布の比較

図1は、歯面に発生したマイクロピッチングの写真と、摩擦力分布計算の結果を比較した例である。

写真に橙色の線で示したマイクロピッチング発生範囲と、摩擦力計算結果に黒い線で示した摩擦力範囲が一致し、摩擦力の高い部分にマイクロピッチングが発生することが確認できた。また、他の歯車もマイクロピッチング発生範囲の最低摩擦力がほぼ同じであることが確認され、マイクロピッチングの発生する摩擦力値の存在が確認できた。

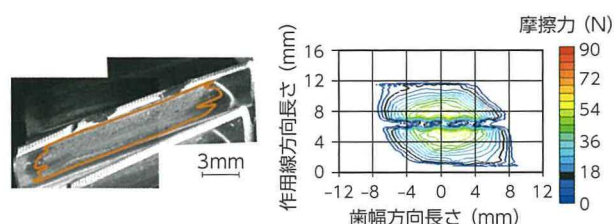


図1 マイクロピッチングの発生した歯面と摩擦力計算結果

3 結言

実験検証結果から、摩擦力の高い範囲にマイクロピッチングが発生するという考えの裏付けが取れ、その限界値となる摩擦力も確認できた。この結果は歯面に発生する摩擦力をマイクロピッチング設計に用いることに物理的矛盾がなく、今後の設計手法に活用できることを示すものである。

*1 パワートレーンカンパニー 第2 駆動・EHV 設計部

*2 パワートレーンカンパニー 第3 駆動・EHV 設計部

*3 早稲田大学

省エネルギーセンター 平成 28 年度省エネ大賞 経済産業大臣賞 新型プリウスのハイブリッド技術

Hybrid Technologies for the New Prius

福村 光正 *1 Mitsumasa Fukumura
伏木 俊介 *1 Shunsuke Fushiki
土田 充孝 *1 Michitaka Tsuchida
滝澤 敬次 *2 Keiji Takizawa
菊地 隆二 *3 Takaji Kikuchi
熊谷 尚憲 *4 Takanori Kumagai
牟田 浩一郎 *5 Koichiro Muta

1 まえがき

環境車、ハイブリッド車の代名詞とも言えるプリウスには、高い先進性とダントツの低燃費性能が求められ、ハイブリッド技術はその中核を担う。

4 代目プリウス向けに開発し、小型・軽量・高効率を実現した新世代ハイブリッドシステム（図 1）の技術について、構成部品毎に紹介する。

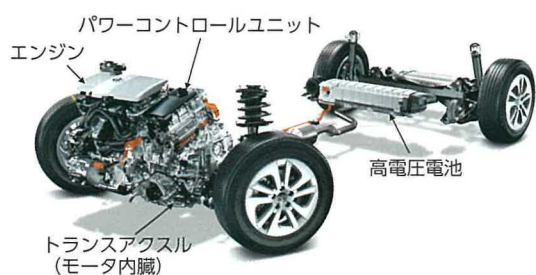


図 1 新型プリウスのハイブリッドシステム

2 ハイブリッド技術の内容

【エンジン】吸気ポート形状変更や排気ガス循環率向上による燃焼改善、各部フリクション低減アイテムの採用等で、最大熱効率 40% を実現した。

【トランスアクスル】モータとジェネレータを複軸配置にし、モータ減速機構に平行軸ギアを選択したことで、ユニット全長を 47mm 短縮、機械損失を約 20% 低減した。

【モータ】ステータにセグメントコイル分布巻構造を採用し、コイル線を最適化したことで、銅損を低減した。また、鉄損や高調波損失を低減する電磁鋼板やコア構造を開発したことで、損失と質量をそれぞれ 20% 以上低減した。

【パワーコントロールユニット】パワー半導体素子を新開発し、冷却構造や高電圧系配線構造も最適化したことで、損失を約 20%、容積を約 33% 低減した。

【高電圧電池】電極材料やケース構造の改良で充放電性能を拡大したことで、10% の小型化を実現した。

【電気式 4WD システム】誘導モータを採用し、4WD 特有の引き摺り損失を大幅に低減したことで、低燃費な 4WD システムを実現した。

【制御システム】各ユニットの能力を最大限に引き出すため、エンジン停止可能車速域の拡大や昇圧制御の最適化等の改良を実施した。車両燃費向上分の 4 分の 1 はこれら制御改良により実現した。

3 あとがき

小型・軽量・高効率化を進めたことで、JC08 モード燃費 40.8km/L に代表する高い環境性能を達成した（図 2）。



図 2 歴代プリウスの燃費向上変遷

さらに、低燃費な電気式 4WD システムの実現により、環境車の市場拡大に貢献した。

*1 パワートレーンカンパニー パワートレーン製品企画部
*2 パワートレーンカンパニー 第 1 駆動・EHV 設計部
*3 パワートレーンカンパニー EHV 電力変換ユニット設計部
*4 トヨタ自動車研究開発センター（中国）有限公司
*5 パワートレーンカンパニー 第 1 電動パワートレシステム開発部

2016 年度優秀特許 側突用エアバッグ装置を備えたシート構造

特許番号 3345279 号

Seat Structure Having a Side Impact Air Bag Apparatus

加藤 久明 *1
Hisaaki Kato

大野 光由 *2
Mitsuyoshi Ohno

1 発明の背景

従来から、側面衝突（以下、単に「側突」と略す）時における乗員保護性能を向上させるべく、種々の対策が講じられている。

その対策の1つとして、車両のフロントシートの側部に側突用のエアバッグ装置を内蔵させることを推進することが考えられる。しかしながら、この場合、シートバックの表皮にニット等の比較的伸び易い材料を使用した際に、バッグの展開初期において表皮がシート幅方向外側へ大きく伸びることにより、本来破断されるべき縫製糸による縫製部が破断し難くなり、エアバッグ袋体の展開速度が遅くなったり、バッグの展開形状が安定しなくなることが考えられる。

を介して縫製部に集中する。従って、図2に二点鎖線で示される如く、縫製部が瞬時に破壊され、エアバッグ袋体が迅速に展開される。

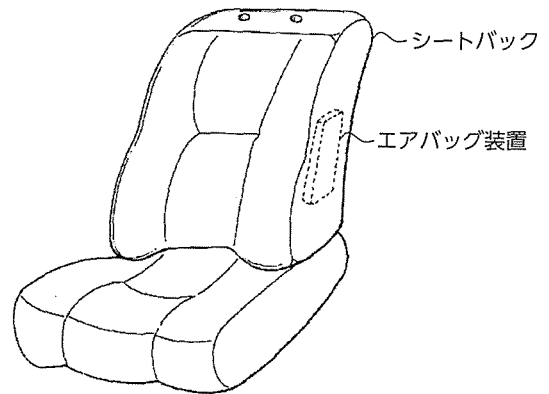


図1 シート構造

2 発明の概要

図1は、本発明における側突用エアバッグ装置を備えたシート構造を示す斜視図である。

図2は、本発明におけるシート構造のサイド部を示す水平断面図であり、シートバックサイド表皮の前方側の端末とフロントサイド表皮の外側の端末との縫製部は、エアバッグケースのリッドの前側近傍に位置しており、エアバッグ袋体が展開する場合に、リッドにより破壊されるようになっている。

そして、シートバックサイド表皮の内側には、伸び難い布として綿布が配設されている。この綿布の前方側の端末は縫製部に縫製され、後方側の端末はシート側の固定部材に係止されている。

側突時にエアバッグ装置のインフレーターが作動すると、インフレーターから噴出されるガスによって、エアバッグ袋体が膨張してエアバッグケースのリッドを図2の矢印A方向へ押し広げようとする。この際、エアバッグ袋体の膨張による、エアバッグケースのリッドを押し広げようとする応力が、綿布

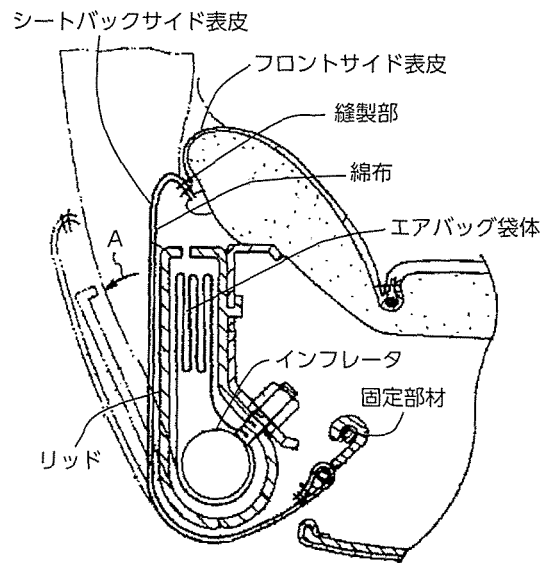


図2 サイド部の水平断面図

3 発明の効果

側突用エアバッグ袋体を迅速且つスムーズに展開させることができる。

*1 先進技術開発カンパニー 車両技術開発部
*2 先進技術開発カンパニー ボデー先行開発部

2016 年度優秀特許 マスタシリンダ装置およびそれを用いた 液圧ブレーキシステム

特許番号 5626414 号

Master Cylinder Device and Hydraulic Brake System Using the Same

磯野 宏^{*1}
Hiroshi Isono

1 発明の背景

従来から、車輪のブレーキ装置に作動液を加圧して供給するためのマスタシリンダ装置の中には、図1に示すように、高圧源からの作動液が導入される入力室の圧力によって前進して作動液を加圧する受圧ピストンと、その受圧ピストンの後方に開口する有底穴に嵌め込まれ、ブレーキ操作によって前進する入力ピストンとを有するものがある。この従来の装置では、有底穴の底面と入力ピストンの前端面との間にピストン間室が形成され、それらのピストンは互いに独立して移動することが可能となっている。しかしながら、高圧の作動液によって受圧ピストンが移動する際、それらのピストンのあるシールの摩擦力によって、入力ピストンを移動させる力が作用してしまい、ブレーキ操作における操作感が悪化する。

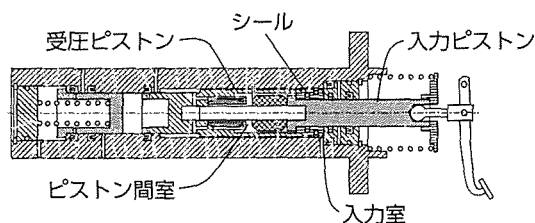


図1 従来のマスタシリンダ装置

れることで、受圧ピストンの本体部の前方に、ブレーキ装置に供給される作動液の加圧室が、本体部の後端と区画部との間に、高圧源からの作動液が導入される入力室が、本体部の周囲に、鏝を挟んでその入力室と対向する対向室が、それぞれ形成されている。

本発明のマスタシリンダ装置では、入力ピストンがハウジングとシール嵌合されることで、入力ピストンと受圧ピストンとがシール嵌合されることなく、入力ピストンと受圧ピストンとの間に、それらのピストンとが向かい合うピストン間室が形成されている。

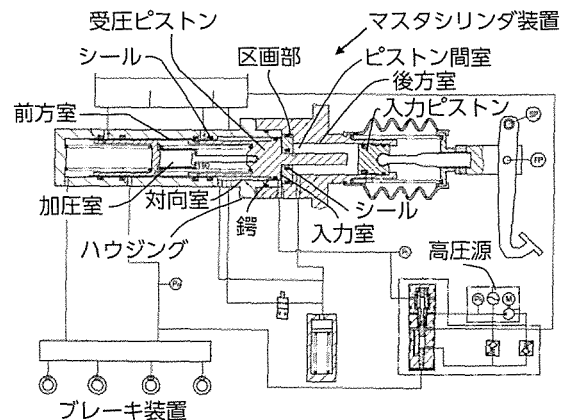


図2 液圧ブレーキシステム

2 発明の概要

図2に、本発明におけるマスタシリンダ装置を含む液圧ブレーキシステムを示す。

マスタシリンダ装置のハウジングは内部を前方室と後方室に区画するとともに、自身を貫通する開口が形成された区画部を有する。受圧ピストンは後端に鏝が形成されており、本体部が鏝とその前方の部分とにおいてハウジングとシール嵌合され、かつ、受圧ピストンがハウジングの区画部とシール嵌合さ

3 発明の効果

本発明のマスタシリンダ装置は、入力ピストンが受圧ピストンにシール嵌合されていない。そのため、入力室の作動液によって受圧ピストンが移動した場合でも、シールの摩擦力に起因する力が入力ピストンに作用することはない。したがって、受圧ピストンの移動に引き摺られて入力ピストンあるいはブレーキペダルが移動することがないため、ブレーキ操作における操作感が優れている。

*1 先進技術開発カンパニー 先行開発推進部

Back Number Index



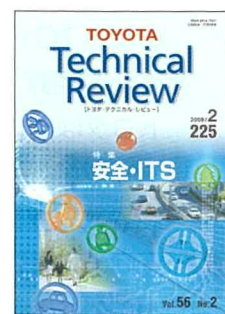
Vol.55 No.1 (2006年)
特集:感性に合う快適な走り



Vol.55 No.2 (2007年)
特集:レクサスの品質



Vol.56 No.1 (2008年)
特集:環境・エネルギー



Vol.56 No.2 (2009年)
特集:安全・ITS



Vol.57 No.1 (2010年)
特集:プリウス



Vol.57 No.2 (2011年)
特集:次世代電池とその活用



Vol.58 No.1 (2012年)
特集:日本独創



Vol.59 (2013年)
特集:生産技術



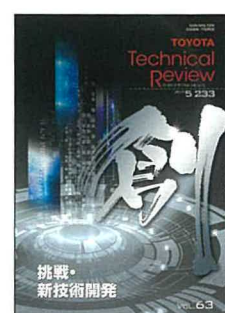
Vol.60 (2014年)
特集:パワートレイン



Vol.61 (2015年)
特集:MIRAI
第2特集:ITS・高度運転支援



Vol.62 (2016年)
特集:プリウス



Vol.63 (2017年)
特集:挑戦・新技術開発

定価:1,944円 (本体:1,800円)

※ Vol.54 No.2「快適な車内空間」は販売終了となっております。

※ 英文版も販売しております。定価:3,024円 (本体:2,800円)

発売元:(株) オーム社 Tel:(03) 3233-0641

https://www.ohmsha.co.jp/magazine/partners_magazine.htm

いつも TOYOTA Technical Review をご愛読いただき、誠にありがとうございます。TTR 第 64 巻 通算 234 号をお届けします。

トヨタは、「もっといいクルマづくり」と「人材育成」の一層の促進のため、常に『もっといいやり方がある』を念頭に、2013 年に「ビジネスユニット制」を導入、2016 年にはカンパニーを設置し、従来の「機能」軸から「製品」軸で仕事を進める開発体制へと大きく舵を切りました。

今回の特集では、いち早く開発体制を見直したパワートレーンカンパニーより生み出された、「TNGA パワートレーン」の技術を紹介しています。技術と生産が互いに深く連携しながら開発されていることを文面から感じとっていただければ幸いです。

今号の発行に際し、執筆者の方々に多大なご協力をいただき、厚くお礼申し上げます。

さて、去年はトヨタグループの創始者・豊田佐吉の生誕 150 年という節目の年でした。改めて足跡を調べてみると、「発明によって世の中に尽くす」ことを決意した佐吉は、「製品は徹底的に営業的試験を行い、十分に評価を行った後でなければ世の中に出してはいけない」という信念を貫き通し、30 数年掛けて、当時世界一の性能を誇ったといわれる無停止杼換式豊田自動織機（G 型自動織機）を完成させました。

私も佐吉の精神を引き継ぐ者の一人として、新技術を紹介することで、世の中の研究開発の活性化に繋がられるよう努めなければと改めて思っていますので、今後ともご愛読いただきますようお願い申し上げます。

(発行人：松本)

TOYOTA Technical Review Vol. 64

© 2018 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 松本 保志
編集 株式会社トヨタエンタプライズ
トヨタ事業所 技術業務室 小坂 拓

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)
<https://www.ohmsha.co.jp>

発行 2018年5月16日



しらびそ高原に昇る夏の大三角と天の川

TOYOTA
Technical
Review
〔トヨタ・テクニカルレビュー〕

2018/5
VOL.64 234

発売元 株式会社 オーム社
定価 1,944円(本体1,800円)