

技報 73

2022.11 No.

TOYOTA INDUSTRIES TECHNICAL REVIEW

株式会社 豊田自動織機



特集

新たな挑戦

時代に即して生まれ変わる



技報 73

2022.11 No.

TOYOTA INDUSTRIES TECHNICAL REVIEW

株式会社 豊田自動織機

▲▲▲▲ 表紙の説明 ▲▲▲▲

デジタルをイメージした背景に、特集に掲載した製品をデザインしました。
時代に合わせ新しい技術やアイデアを結集し、未来に向けた製品に挑戦していることを表現しています。

目次

豊田自動織機技報
第73号

巻頭言

- 4 **START YOUR ENGINES !**
松本 洋

特集

- 6 **新型3.3L V型6気筒ディーゼルエンジンの開発**
浅野 智幸 岡村 昌明 畠山 剛 村井 義之 山道 智裕 小関 知史 山口 猛

- 18 **デジタル画像相関法を活用した熱疲労予測技術向上**
井上 幸治 浮田 和彦 浅野 哲夫 相原 秀紀

- 23 **スプリットピン形状を有するクランクシャフトの焼入れ工法開発**
浅野 司

インタビュー

- 27 **新型V6ディーゼルエンジン(F33A-FTV)開発ストーリー
攻めるディーゼルエンジン**
浅野 智幸 山口 猛 川浦 聡司 井上 崇 町田 和也 小関 知史 井上 幸治
浮田 和彦 村井 義之 浅野 司

トレンド

- 40 **N700S新幹線車両のSiC素子を適用した駆動システム**
佐藤 賢司 濱島 豊和

- 46 **バイポーラ型NiMH電池の開発**
中條 祐貴 吉田 憲史 小竹 広和 田丸 耕二郎 宗 真平 河野 聡

- 52 **新型NOAH/VOXY HEV向け DC-DCコンバータの開発**
種谷 公作 平林 信夫 粉井 知康 成瀬 英典

- 57 **bZ4X向け6.6kW車載充電器・DC-DCコンバーター一体ユニットの開発**
中村 太 中坪 勇人

製品技術紹介

- 62 **電動コンプレッサ ESHシリーズの開発**
山下 拓郎 木下 雄介 浜名 祥三 安保 俊輔 早川 賢治

- 67 **フォークリフト向け第2世代燃料電池システムの開発**
山本 哲太郎 下築 祐介 西村 幸史 富本 尚也 垣見 洋輔

- 72 **New Traigo80 2.0-3.5 ton Electric Counterbalance Forklift**
Francesco Mastroianni

- 77 **商用車向けターボチャージャーの開発**
種田 剛夫

- 83 **エアジェット織機用変形箆のよこ糸飛走性能に関する評価指標**
牧野 洋一

- 88 **フォークリフト用ワイヤハーネスの電線色選定ツール開発**
伊藤 尚徳

技術解説

- 94 **アンモニアを燃料とする火花点火エンジンの始動技術**
本間 隆行 竹内 正 針生 聡 竹内 秀隆

- 99 **AIを活用した良品条件探索と変化点検知の自動化**
末高 直樹 柴田 顕次 寺田 侑司 鈴木 祐輔

- 105 **作業姿勢分析システムの開発とその応用**
大竹 一世 早川 貴英 寒川 淳平

表彰

- 112 **自動運転トローイングトラクター(3TE25) グッドデザインベスト100受賞**
薬師 忠幸 森 博樹

- 115 **特許発明「スクロール型圧縮機の背圧調整機構」が愛知発明表彰にて
愛知発明大賞を受賞**
今福 真紀子

論文

- 118 **電解加工(ECM)によるターボチャージャー用チタンアルミ製
タービンホイール翼加工に関する研究**
後藤 昭弘 小尾 伸昭 清水 達也 青野 将大

- 119 **ラジカル-アニオンUV硬化を用いた傾斜構造を有する
有機-無機ハイブリッド膜の作製**
有光 晃二 白井 凱己 宗像 秀典 佐藤 咲也子 佐々木 彩乃

CONTENTS

TOYOTA INDUSTRIES TECHNICAL REVIEW

No.73

Foreword

4 **START YOUR ENGINES !**

Hiroshi Matsumoto

Feature

6 **The New 3.3L V6 Diesel Engine Development**

Tomoyuki Asano Masaaki Okamura Takeshi Hatakeyama Yoshiyuki Murai Toshihiro Yamamichi
Tomohito Ozeki Takeshi Yamaguchi

18 **Improvement of Simulation Method for Thermal Fatigue by Digital Image Correlation**

Koji Inoue Kazuhiko Ukita Tetsuo Asano Hideki Aihara

23 **Development of Induction Hardening Method for Split-Pin Crankshaft**

Tsukasa Asano

Interview

27 **A Story about Developing the New V6 Diesel Engine (F33A-FTV) Innovative Diesel Engine**

Tomoyuki Asano Takeshi Yamaguchi Soushi Kawaura Takashi Inoue Kazuya Machida Tomohito Ozeki
Koji Inoue Kazuhiko Ukita Yoshiyuki Murai Tsukasa Asano

Trend

40 **SiC-applied Traction System for N700S Shinkansen High Speed Train**

Kenji Sato Toyokazu Hamajima

46 **Development of Ni Metal Hydride Bipolar Battery**

Yuki Chujo Norifumi Yoshida Hirokazu Kotake Kojiro Tamaru Shimpei Mune Satoshi Kono

52 **Development of DC-DC Converter for the New NOAH/VOXY HEV**

Kosaku Taneya Nobuo Hirabayashi Tomoyasu Momii Hidenori Naruse

57 **Development of Integrated Unit with 6.6kW On-board Charger and DC-DC Converter for bZ4X**

Futoshi Nakamura Hayato Nakatsubo

Product Technology

62 **Development of Electrical Compressor ESH Series**

Takuro Yamashita Yusuke Kinoshita Shozo Hamana Shunsuke Ambo Kenji Hayakawa

67 **Development of the Second Generation Fuel Cell System for Forklift**

Tetsutaro Yamamoto Yusuke Shimoyana Koji Nishimura Naoya Tomimoto Yosuke Kakimi

72 **New Traigo80 2.0-3.5 ton Electric Counterbalance Forklift**

Francesco Mastroianni

77 **Development of Turbocharger for Commercial Vehicles**

Yoshio Taneda

Technical Review

83 **Characteristic Weft Insertion Indicators of Profile Reed on Air Jet Loom**

Yoichi Makino

88 **Developing Tool to Select Wire Colors of Wiring Harnesses Used in Forklift**

Takanori Ito

94 **Cold-start of Ammonia-fueled Spark Ignition Engine**

Takayuki Homma Tadashi Takeuchi Satoshi Hariu Yoshitaka Takeuchi

99 **Automation of Good Condition Search and Change Point Detection by Utilizing AI**

Naoki Suetaka Kenji Shibata Yuji Terada Yusuke Suzuki

105 **Development of Work Posture Analysis System and Its Application**

Kazutoki Otake Takahide Hayakawa Jumpei Samukawa

Commendation

112 **Autonomous Towing Tractor Received Good Design Award Best100**

Tadayuki Yakushi Hiroki Mori

115 **The Patented Invention of "A Back Pressure Adjustment Mechanism of a Scroll Type Compressor" Won the Grand Prize in Aichi Prefecture Commendation for Invention at the Aichi Invention Award**

Makiko Imafuku

Monograph

118 **Study on Titanium Aluminide Turbine Wheel Blade Machining for Turbochargers by Electrochemical Machining (ECM)**

Akihiro Goto Nobuaki Obi Tatsuya Shimizu Masahiro Aono

119 **Fabrication of an Organic-inorganic Hybrid Film with a Gradient Structure by Radical-anionic UV Curing**

Koji Arimitsu Yoshiki Shirai Hidenori Munekata Sayako Sato Ayano Sasaki

START YOUR ENGINES!



エンジン事業部
キャラクター「エジソン」
(エンジン生産累計2,000万台
達成記念として誕生)

「お前は、生まれたときからクルマ好きだなあ〜」
今でも記憶に残っている。日本のモータリゼーション進展の草創期、オオタ自動車(後の東急くろがね工業)という小さな自動車メーカーに勤めていた父の声である。

経営役員

松本 洋

Hiroshi Matsumoto



東急くろがね工業「くろがねベビー」のカタログ

ボンネットを外した試験車両に乗り込み、テストコースならぬ山坂道で走行試験を繰り返す父。その背中にはおんぶ紐で括られた幼児、それが私である。記憶には無いし、とても信じられない状況だが、当時はこんな光景もあったようだ。四六時中仕事の話をしていて記憶しかない程、仕事熱心な人だった。

家庭環境の影響からか、物心ついた頃から自動車は身近にあった。排ガスの匂い、オイル・燃料の匂いが好きで、特にタクシーやバスの排気臭に惹かれ、通り過ぎると走って後を追いかけた。「エンジンが動き、クルマを動かす」そのメカニズムが面白くてたまらず、中学時代の愛読誌は自動車工学やオートメカニックだった。モータースポーツと車両・設備の分解・修理に明け暮れた学生時代、入社後はエンジン事業部に配属、とても恵まれた会社生活である。

昨今、急激な脱炭素ブームで、エンジンが悪者のように思われているのが残念でならない。地球環境が保護・保全されるのは必然である。その達成方策の一つが電動化であるのは理解できるが、それが全てのような報道が後を絶たない。

先日、中国製のBEV(電気自動車)に試乗した。近場の買い物程度なら満足できるレベルと感じた。衝突安全性を除けば、近距離移動車としては十分。自宅や出先で気軽に使えるコンセントがあれば、実用的で問題ないと思った。

一方で、現時点では高速道路やオフロードの巡航など、高負荷・長距離の移動にBEVは向いていない。安心して使えるのはエンジン搭載車になる。将来技術の進化はあると思うが、そもそもの考え方として原動機毎の強みを活かし、使い分けるバランス感覚が重要だと思う。

脱炭素社会達成のためには、電動とエンジン各々の特徴を活かした動力源の開発、さらに次世代燃料と従来技術との連携が必須。正しい認識を世論がもつためには客観的な根拠を論理的に示し、それを正しく伝える必要がある。



エンジン事業部は昨年、トヨタ自動車(株)からディーゼルエンジン事業を移管し、これまでの「受託事業」を「自前事業」へと変えた。

脱炭素・電動化が進捗し、エンジン車全体の市場は縮小傾向にある。一方で、新興国・商用/産業用を中心に、まだまだディーゼルエンジンを必要とされるお客様がいる。加えて次世代燃料対応エンジンへの要求も高まっている。我々は覚悟と責任を持って、エンジンを提供し続けるつもりだ。

自前事業への変革は並大抵ではない。部門長と次世代のリーダー候補達が十分な議論を重ね、エンジン事業部のビジョンを策定した。

『人と社会、地球環境のためになるエンジンを創ろう』
事業部全員がこの想いを貫いて欲しいと切に願う。

最近では若い世代を中心に「クルマ離れ」と言われている。私の娘達もクルマには全く興味がない。自動車は運転をしなくても、安全に目的地に運んでくれるが良い。彼女らの世代にはリアルを知らずしてバーチャルな現実感を楽しむ人も多い。

そんな世代のプロレーサーがいる。リアルでも速い。運転技術はバーチャルで十分訓練されている。問題は人が関与する事による「想定外」。レースには相手がいる。相手も人だから想定外な動きをする時がある。いくら学習をしてもバーチャルはそれに弱い。人の曖昧さと融合・協調ができれば、自動運転の実現が見えてくるのだろう。

エンジニアとして大切にしたい姿勢

① 上質なKKD(勤・経験・度胸)を養う

お客様の常識≠自身の常識

お客様の使い方を知る。限界を見極める

それでも問題は起きる。その時は愚直に問題解決する

② 真実を知る。真因追究にこだわる

データは嘘をつかない。原理原則に基づいた解析、

ばらつきを考慮したリスクの予測

その上で適切な判断基準を考え抜く

③ 不変な事、変化すべき事を見極める

論理的に正しくてもそれを実現できない時がある。

妥協せず、あきらめず

その中でバランスを保ち最善策を探る

時代・環境は、いつの時代でも変化し続けている。その変化に柔軟に対応しながら、敏感に反応しすぎない「鈍感力」も必要だと思う。

目の前にはカーボンニュートラルという新しいサーキットがある。読めないコースコンディションや競合がひしめく中、漸くスタートラインに着いたエンジニアの皆さん。栄光のチェッカーに向かい、果敢に挑戦し、颯爽と駆け抜ける事を願ってやまない。

START YOUR ENGINES !!



特集 新たな挑戦

The New 3.3L V6 Diesel Engine
時代に即して生まれ変わる

新型3.3L V型6気筒
ディーゼルエンジンの開発 7

デジタル画像相関法を活用した
熱疲労予測技術向上 18

スプリットピン形状を有する
クランクシャフトの
焼入れ工法開発 23



新型3.3L V型6気筒ディーゼルエンジンの開発

The New 3.3L V6 Diesel Engine Development

浅野 智幸^{*1} 岡村 昌明^{*2} 畠山 剛^{*2} 村井 義之^{*1} 山道 智裕^{*1} 小関 知史^{*2} 山口 猛^{*1}
Tomoyuki Asano Masaaki Okamura Takeshi Hatakeyama Yoshiyuki Murai Toshihiro Yamamichi Tomohito Ozeki Takeshi Yamaguchi

*1 エンジン事業部 技術第一部 *2 エンジン事業部 技術第二部

要旨

世界で燃費規制が強化されるなか、新型ランドクルーザーの刷新に合わせ、新たに3.3L V6ディーゼルエンジンを開発した。ランドクルーザーに求められる悪路走破性は継承し、ダウンサイジングしながらも、過給システムに新技術を採用することで、低燃費と高出力を高次元で両立した。さらに、プレミアムSUVに相応しい上質な静粛性も実現。排気性能も大幅に向上し、14年ぶりに国内導入を果たした。本稿では、採用した主要技術について紹介する。

キーワード：熱機関、圧縮点火エンジン、燃費、性能

Abstract

As fuel economy regulations are tightened around the world, a new 3.3L V6 diesel engine has been developed in line with the renewal of the new LAND CRUISER. Inheriting the off-road performance required for the LAND CRUISER, while downsizing, by adopting a new technology for the turbocharger system, both low fuel consumption and high power output have been achieved at a high level. In addition, it also achieves high-quality quietness suitable for a premium SUV. Exhaust emissions performance has also improved significantly, and it was introduced in Japan for the first time in 14 years. The purpose of this paper is to explain about new diesel engine and the main technologies.

Keywords : Heat engine, Compression ignition engine, Fuel economy, Performance

1. はじめに

地球温暖化による深刻な環境問題に直面するなかで、『世界中のあらゆる道を走破し、どこへでも行き、生きて帰ってこられるクルマ』として、人々の命と生活を支える使命を持つランドクルーザーが、次世代にわたり生き残り続けるためには、そのパワートレインもクルマの刷新に合わせて新しく生まれ変わる必要がある。

そこで、耐久性、信頼性、および悪路走破性に関わる基本機能については従来エンジンの設計コンセプトを踏襲しつつ、年を追うごとに厳しくなる各国の燃費規制や排気規制に適合させると同時に、爽快な加速感を得る動力性能やプレミアムクラスに相応しい静粛性に対する市場ニーズにも応えるため、新たに3.3L V6ディーゼルエンジンを開発した(図1)。

本稿では、この新開発エンジンの概要と主要採用技術について報告する。



図1 新型3.3L V6ディーゼルエンジン
Fig.1 New 3.3L V6 diesel engine

2. 開発の狙いと主要諸元

前述のような背景により、新開発エンジンは、次世代にわたり生き残り続けるために必要な(1)~(2)(図2)、(3)、続いて、快適な運転に必要な(4)~(5)の項目に重点をおいて開発を行った。

- (1)低燃費化
- (2)厳しくなる排気規制への対応
- (3)高い悪路走破性の継承
- (4)爽快な加速感を得る動力性能の実現
- (5)燃焼の変動感を払拭した上質な静粛性

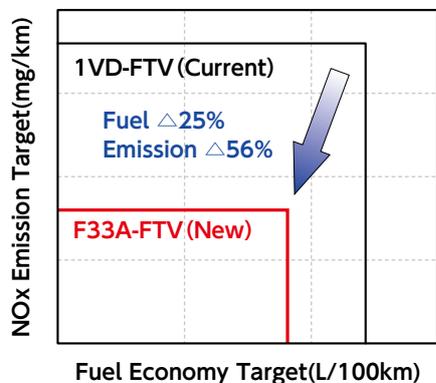


図2 新型ランドクルーザーの狙い燃費と排気
Fig.2 New LAND CRUISER Fuel Economy & Emission Target

表1に、従来エンジンと比較した主要諸元を示す。

表1 エンジン諸元
Table.1 Engine specification

| Engine | Current(1VD-FTV) | New(F33A-FTV) |
|------------------------------|-------------------|------------------------------|
| Engine Type /Bank Angle[deg] | V8 / 90 | V6 / 90 |
| Displacement[ml] | 4461 | 3345 |
| Bore x Stroke[mm] | φ86×96 | ← |
| Compression ratio | 16.8 | 15.4 |
| Max. torque[Nm/rpm] | 650/1600-2800 | 700/1600-2600 |
| Max. power[kW/rpm] | 200/3600 | 227/4000 |
| Exhaust Regulations | Euro5 | Euro6, JP18 |
| Fuel Injection System | Piezo(Max.200MPa) | Solenoid(Max.270MPa) |
| Turbocharger | Twin VNT | 2Way twin VNT |
| EGR System | HP cooled EGR | Step-less control cooled EGR |
| After Treatment | DOC+DPF | DOC+SCR-DPF+SCR |

3. 重点開発項目

3.1. 低燃費化

今後、さらに厳しい燃費規制の導入が想定されるなか、引き続き、ディーゼルエンジンのランドクルーザーをお客様にお届けするためには、大幅に低燃費化した新たなエンジンを導入する必要があった。

エンジンの低燃費化のため、まず従来の4.5L V8エンジンに対し、新エンジンは3.3L V6へのダウンサイジングを採用した。排気量の低減により冷却損失の低い高熱効率の領域を拡大。8気筒から6気筒への変更による動弁系部品およびピストンなどのフリクションを13%低減した効果と合わせて、新モデル車両でのWLTC(Worldwide-harmonized Light vehicles Test Cycle)走行時の使用頻度より正味熱効率が平均で1.5point改善した(図3)。

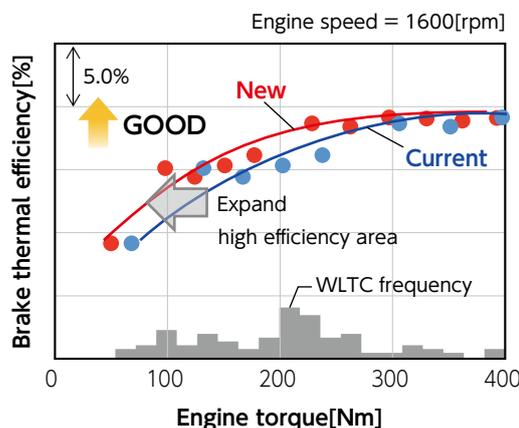
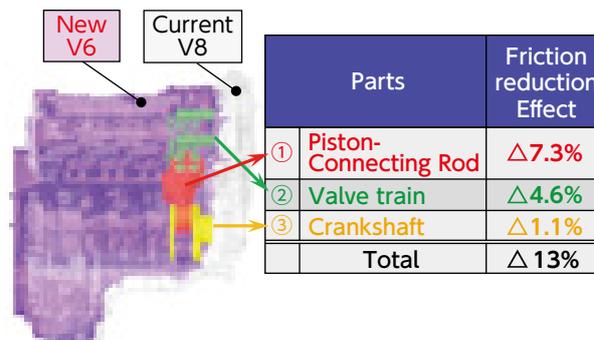


図3 ダウンサイジングによる正味熱効率改善効果
Fig.3 Brake thermal efficiency effect due to downsizing

さらなる低燃費化のために、上記のダウンサイジングに加えて、追加フリクション低減アイテムの採用や燃焼改善による冷却損失の低減およびポンピングロス低減を実施した。

フリクションロスの低減については、ピストンに高強度の鋼材を採用し、ピストンの姿勢保持を従来アルミピストンのスカート部のみに対し、スカートと2ndランドで姿勢を保持する設計とし、コンプレッションハイトを従来比で28%短縮して、スカート面積を縮小し、樹脂コーティングを採用した(図4)。

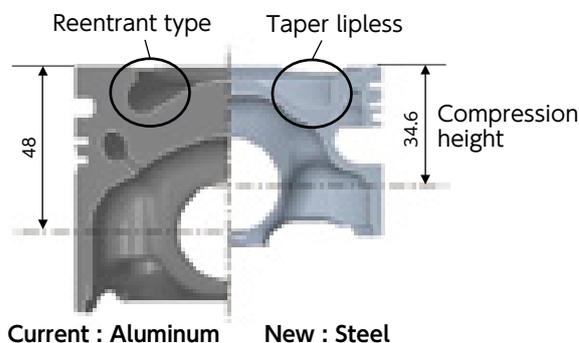


図4 ピストン断面図
Fig.4 Comparison of piston design

さらに、ピストンリングの合計張力を従来エンジンに対し27%低減。また、一部地域に低粘度の0W-20オイルを採用した。

これらにより、さらに13%のフリクションを低減。ダウンサイジング分と合わせて、従来エンジン比26%のフリクション低減を実現した(図5)。

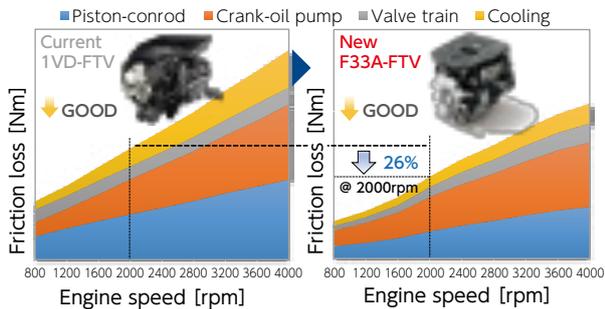


図5 フリクションロス比較
Fig.5 Comparison of friction losses

燃焼改善による冷却損失低減には、筒内ガス流動の最適化を実施した。従来は、リエントラント型燃焼室を用いて、高スワールによる強い空気流動で混合気を形成し、燃焼させるコンセプトでこれが冷却損失の要因となっていた。そこで、新エンジンにはテーパリップレス燃焼室に適正なスワールまで空気流動を弱めて、そこに、高拡散、高貫徹噴霧を可能にした噴射系を組み合わせて燃焼させることで冷却損失を抑え、熱効率を9.2%改善し低燃費化に貢献した(図6)。

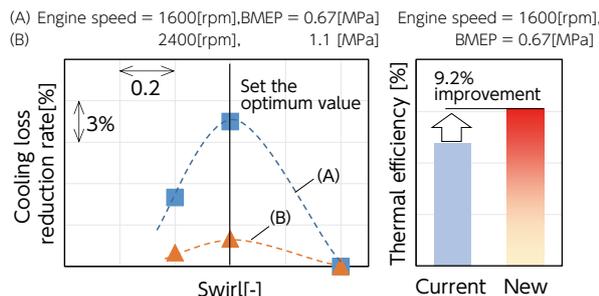
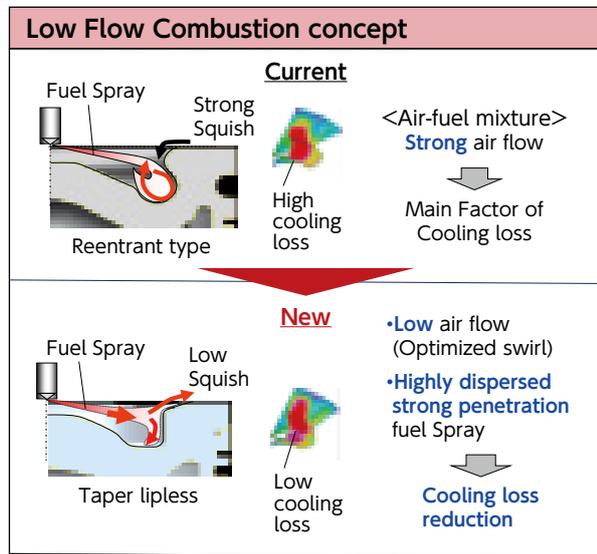


図6 冷却損失低減効果
Fig.6 Cooling loss reduction effect

ポンピングロス低減については、排気バルブオープン(EVO)の早期化を実施した。背反となる実膨張比の低下による出力性能との最適化を図るため、EVOとしてはポンピングロス低減効果がサチレートする24degABDCに設定した。

これらの採用技術により、一般的な走行パターン中におけるエンジン運転領域の正味燃料消費率を、広範囲にわたり向上。前モデル車両に対し、WLTCモード燃費で17%改善した(図7)。

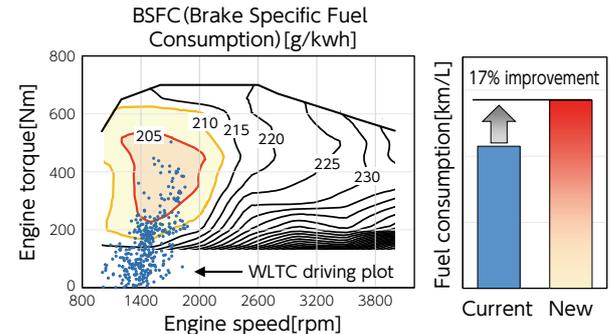


図7 BSFCマップと燃費低減効果
Fig.7 BSFC Map and fuel consumption improvement

3.2. 厳しくなる排気規制への対応

Euro6排気規制への対応は、まずエンジン出ガス排気をEuro5排気達成レベルに改善したうえで、後処理にDe-NOx(窒素酸化物)触媒をアドオンすることで達成を図った。

エンジン出ガスの排気改善のため、従来エンジンに対してEGR(Exhaust Gas Recirculation)クーラサイズを60%大型化しつつ、EGRクーラNO.1とEGRクーラNO.2をUフロー配置し冷却水を対向流(図8)とすることで、EGRクーラ効率を65→95%に向上。これによりEGR率を35→41%に増加させた(EGRガス量20g/s時)。

さらに、応答性に優れたDCモータタイプの電子制御式EGRバルブを採用し、最適なEGRガス量となる制御を可能にした。

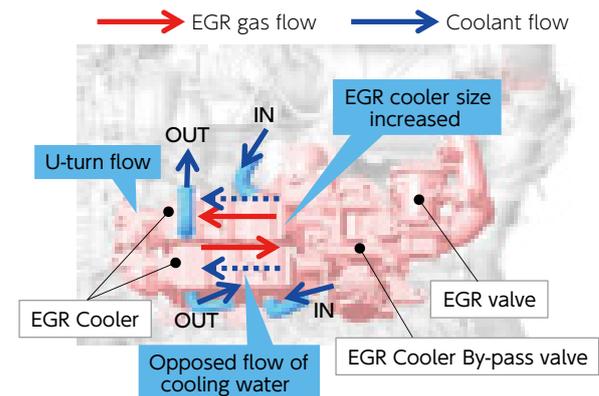


図8 EGRシステム
Fig.8 EGR System

また、低外気温時や低水温時、及び低負荷運転領域の低エミッション化・NV性能向上のため、EGRクーラをバイパスさせるEGRクーラバイパスバルブを採用した。アクチュエータには、DCモータを採用し、クーラモードとバイパスモードの比率を無段階に調節することで、最適な吸気温度に制御するシステムとした。

これにより、従来のON-OFFでのクーラ切替え方式に対し、インテークマニホールド(以下、インマニ)のガス温を信頼性と両立する目標温度への精密なコントロールが可能となり、EGR率を向上することでNOx低減に貢献した(図9)。

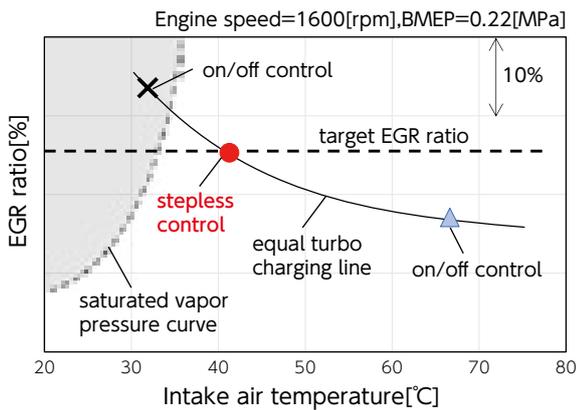


図9 吸気温とEGR率の関係
Fig.9 Comparison of gas temperature and EGR ratio

また、後処理システムは、Vバンク間に搭載したターボ下流にレイアウトし、DPFシステムとNOx選択触媒還元(SCR)機能を合体した尿素SCR-DPFシステムの技術を採用した。

SCR-DPF触媒は酸化触媒(DOC)の下流に配置され、フィルター基材(DPF)によるPMの捕集と、尿素水を噴霧し、SCRコート機能によりNOx浄化を行う(図10、11)。

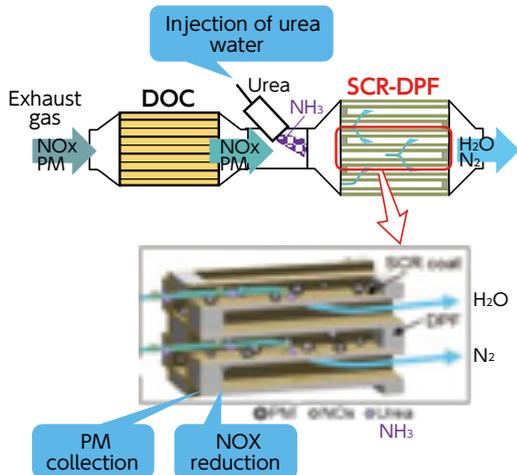


図10 尿素SCR-DPFシステム
Fig.10 SCR-DPF System

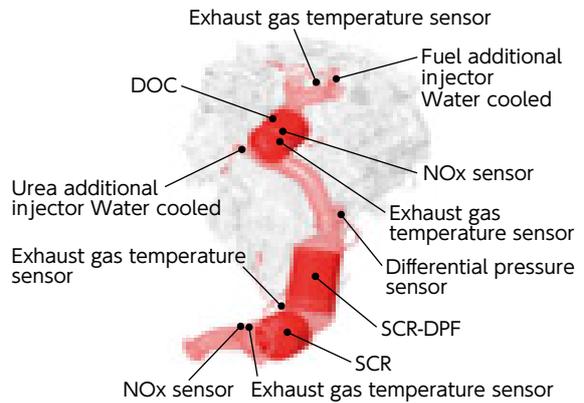
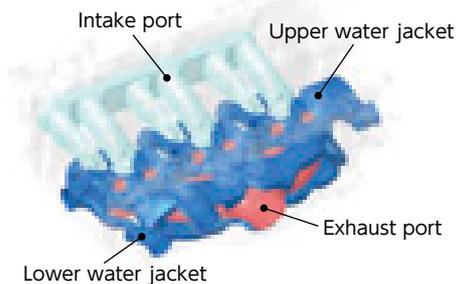


図11 Euro6後処理システムレイアウト
Fig.11 After treatment system layout (For Euro6)

また、SCR-DPF触媒の早期活性化のために、エキゾーストマニホールド(以下、エキマニ)のシリンダヘッド一体化とホットインサイドレイアウトを採用(図12)し、排気系部品の熱容量を44%低減した。

Exhaust Manifold Integrated Head



Hot Inside layout

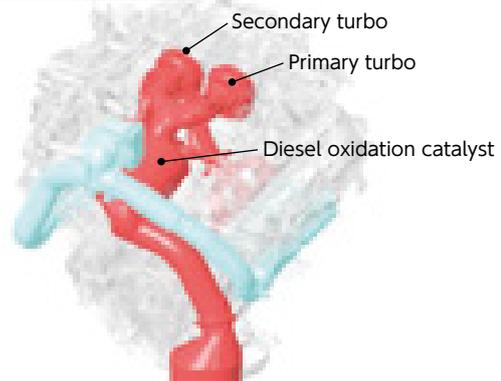


図12 ヘッド一体エキマニとホットインサイド
Fig.12 Exhaust manifold integrated head and hot inside layout

上記のSCR-DPFシステム化と熱容量低減を合わせて、モード走行中の昇温性が約100°C向上し、NOx浄化率を20→66%に大幅に改善することができた(図13)。

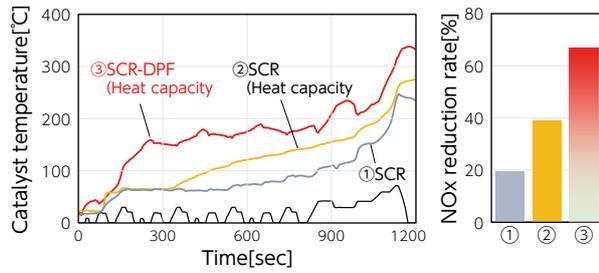


図13 触媒床温上昇によるNOx浄化率向上感度
Fig.13 Improvement of NOx reduction rate by increasing temperature

3.3.高い悪路走破性の継承

ランドクルーザー用のエンジンとして、譲ることのできない悪路走破性は、従来エンジンのコンセプトを継承した。

車両の低重心化による運動性能向上に貢献するため、エンジンセンターを従来エンジンに対し12mm下げたが、オイルの戻り性確保のためのオイルパンの形状工夫とオイルストレーナ吸い口の中央配置により、実働時に可視化して確認した油面に対しオイルストレーナ吸込み口の油量を確保することで油圧を維持し、従来エンジンと同等の全方位角45°までの傾斜地走行を可能とした(図14)。

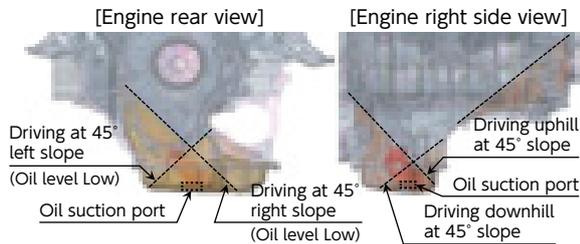


図14 オイルストレーナ吸込み口位置適正化
Fig.14 Oil suction port position relative to the visualized oil surface

スターターには、呼吸パイプを設定。各部へのオイルシールの設定や、ターボアクチュエータの防水設計、電子制御クーリングファンカップリングの最外部のベアリングに二重シール構造を採用するなど、泥水の侵入を防止し、水深700mmまでの渡河走行を可能とした(図15)。

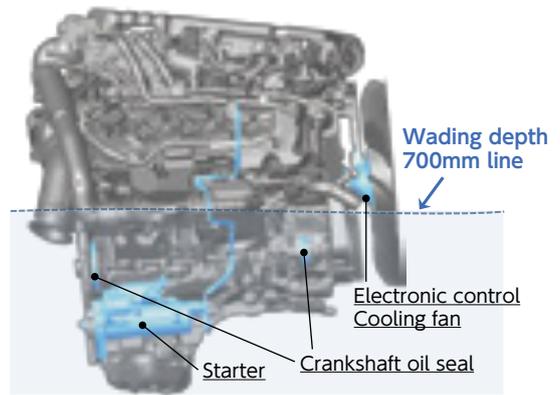


図15 防水設計採用構造
Fig.15 Adopting waterproof structure

エンジンマウントブラケットには、悪路走行時の衝撃入力に耐えうる強度を持たせた。FCVブロックと相まって、FCD製マウントブラケットは45G以上の衝撃荷重に耐えられる強度を確保した。

これらの採用技術により従来エンジンと同等の悪路走破性と耐久性を確保した。

3.4.爽快な加速感を得る動力性能の実現

エンジンのダウンサイジングにおいても、ランドクルーザーに求められる力強い低速トルクとダイレクト感、さらには、ドライバーの感覚にあった爽快な加速感を実現するために、シングルターボによる過給特性とツインターボによる大吸気量の高過給特性を併せ持つ、2Wayツインターボ(VN付き)を採用した。

シングル、スイッチング、ツインと各モードを回転数と負荷により切り替えることで、シングルターボとツインターボの良いところを併せ持ったフルトルクカーブを実現(図16、17)。

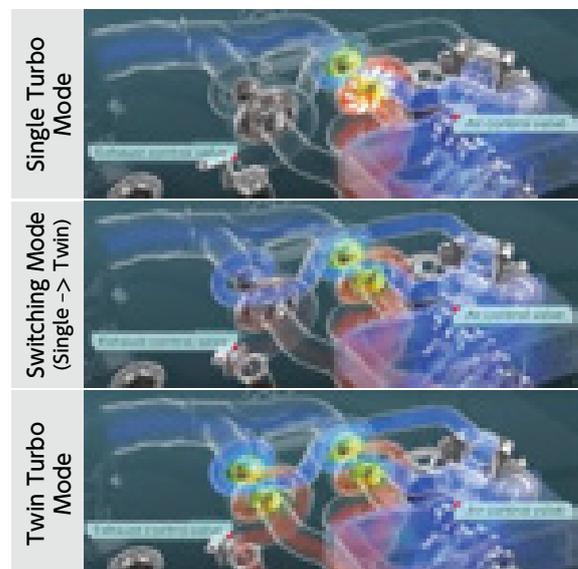


図16 2Wayツインターボシステム
Fig.16 2Way twin turbocharger system

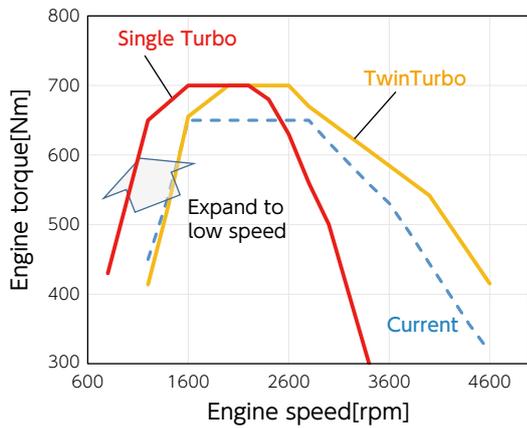


図17 ターボ切替領域と効果
Fig.17 Turbo switching area and its effect

ターボの切り替え制御には、排気ガスのセカンダリターボへの通路の開閉を制御する負圧アクチュエータ式のエキゾーストコントロールバルブ(ECV)、セカンダリターボからの過給気をインタークーラーへ流す通路の開閉を制御する負圧アクチュエータ式エアコントロールバルブ(ACV)、さらに、シングルからツインへの切り替え時のみに使用し、セカンダリターボの過給気をプライマリターボの上流に戻すためのバイパス通路の開閉を制御する電動式エアバイパスバルブ(ABV)を設定した。

これらに加えて、各タービンに可変ノズルベーンを採用し、2Wayツインターボは、3つの通路切り替えバルブと各ターボの可変ノズルベーンの2つで制御する。

シングルモードでは3つのバルブを全てクローズし、プライマリターボのみを作動させる。

スイッチングモードでは、まずACVを閉じた状態でECVを開き、排気ガスをセカンダリターボに導入して予回転させる。但し、過給圧が上がりすぎて、サージ領域に突入させないため、ABVを開いてセカンダリの過給気をプライマリのコンプレッサ上流にバイパスさせる。ツインモードでは、まず、ACVを開いて、セカンダリの過給気をインタークーラーへ流し始めてから、少し遅れてABVを閉じて、バイパスを止め、セカンダリを立ち上げていく。

但し、プライマリターボとセカンダリターボの可変ノズルベーン開度を一体で制御した場合は、セカンダリターボ立ち上げ時にノズルベーンが開いている状態となってしまうため、過給圧の落ち込みが発生する。この問題を解決するために、プライマリターボとセカンダリターボのノズルベーン開度を独立で制御している。セカンダリターボを通過する排ガス量を最小限

としてプライマリターボの回転維持とセカンダリターボの急速立ち上げの両立を狙い、セカンダリターボのノズルベーン開度をプライマリターボより閉じることで、落ち込みのない過給圧特性を実現している(図18)。

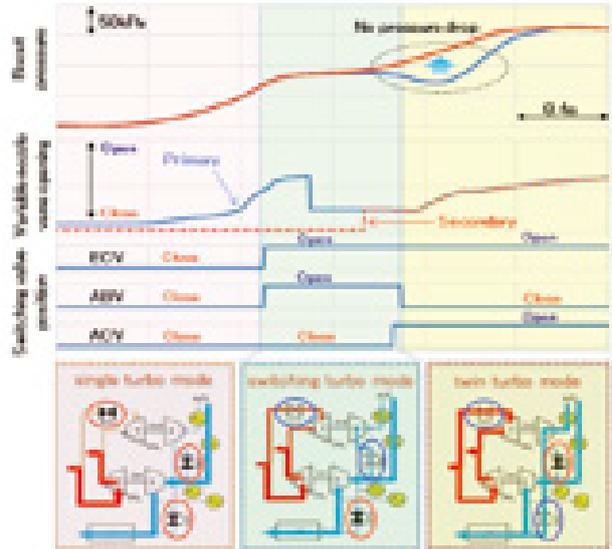


図18 ターボ切り替え制御
Fig.18 Strategy of 2way twin turbo control

このノズルベーン開度制御には、従来のマップ制御に対し、ECU内で最適値を自動算出するアルゴリズムを構築した。ターボをモデル化し数式としてECUに実装することで、目標排気圧力となる最適なベーン開度をECU内で自動算出できるようになったことが、スムーズなターボ切り替えに寄与している(図19)。

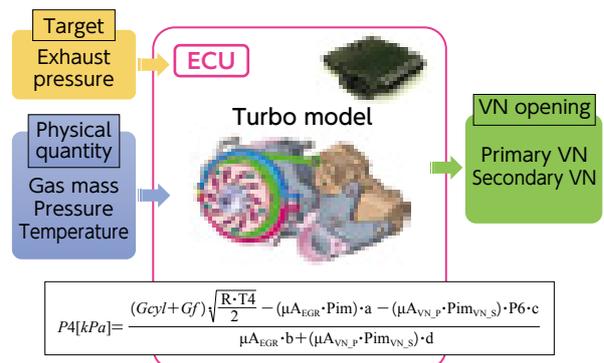


図19 VN開度算出方法
Fig.19 How to calculate the variable nozzle

ターボ性能は、インペラ翼形状とコンプレッサハウジング形状を最適化することで、コンプレッサマップのワイドレンジ化と高圧力比化を行い、エンジンの低速トルク・出力性能向上に貢献した(図20)。

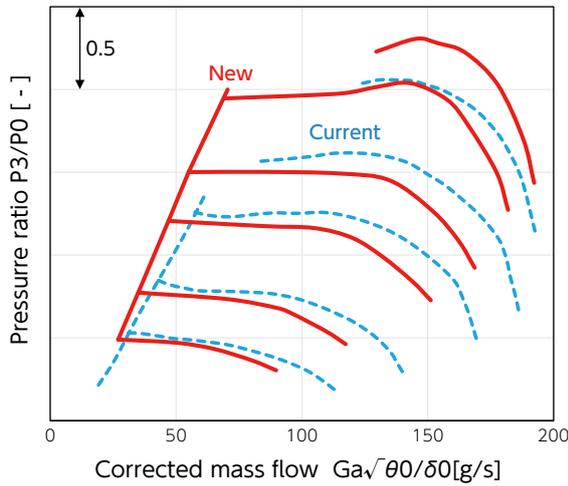


図20 ターボコンプレッサマップ比較
Fig.20 Comparison of turbocharger compressor MAP

また、コンプレッサハウジングには、水冷構造を追加し、空気通路壁面へのデポジット堆積抑制をすることで、高吸気温・高過給化が可能となり、エンジンの高出力化に貢献した(図21)。

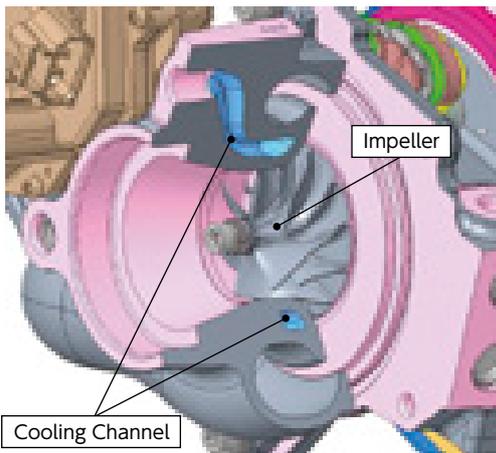


図21 コンプレッサハウジング水冷構造
Fig.21 Cooling channel in compressor housing

可変ノズルベーン機構には、高耐熱材料・遮熱構造を採用し、高温環境下での熱変形・劣化・酸化を抑制することで排気ガス的高温化が可能となり、高出力化に貢献した(図22)。

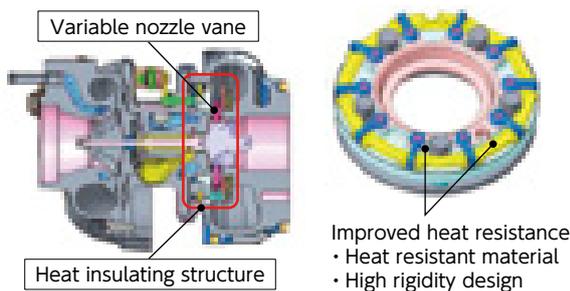


図22 高耐熱可変ノズルベーン機構
Fig.22 High heat resistance variable nozzle vane

エアパスは、ホットインサイドレイアウトを採用することで、エアクリーニンレットからターボコンプレッサ入口までの吸気配管を短縮し、吸気圧損を従来エンジンに対し等空気量下で、32%低減した。また、ターボコンプレッサ出口からインマニまでの吸気ボリュームも従来エンジンに対し53%低減。これにより、2Way ツインターボによる加速レスポンス向上の効果をさらに高めた(図23)。

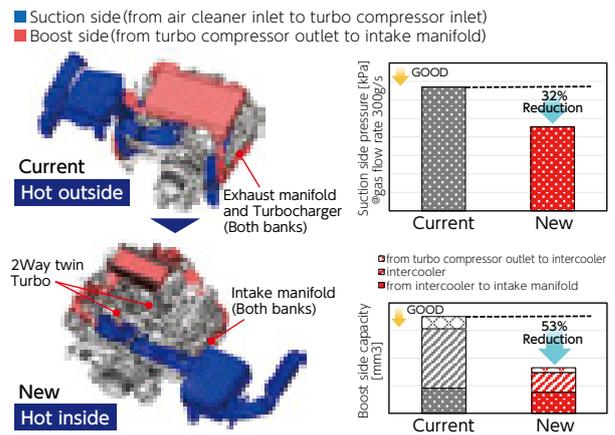


図23 吸気ボリューム比較
Fig.23 Comparison of intake volume

噴射系は、燃料の高圧噴射技術として、270MPa対応の第4世代のコモンレール噴射システムを採用した。インジェクタ内部に、圧力センサーを内蔵したi-ARTインジェクタ®を採用することで、高精度な燃料噴射を実現した。

コモンレールには、時効硬化材を用いることで、耐圧性を向上。サプライポンプは、カム軸受けブッシュに新材料を用いることで270MPaの高圧吐出を実現した。

以上の技術により、従来エンジンに対し、ダウンサイジングしながらも最大トルクで8%、最高出力で14%向上し、全域での性能向上を果たした(図24)。

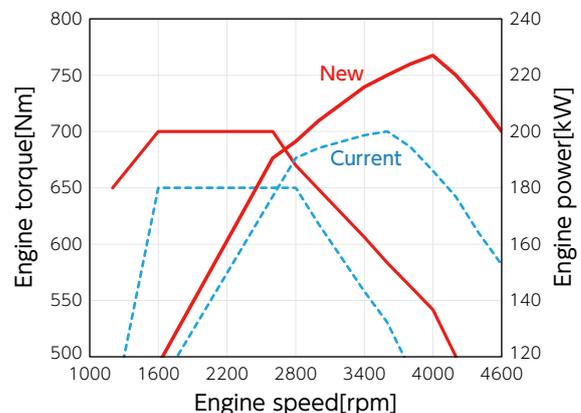


図24 エンジン全負荷性能
Fig.24 Engine full load performance

また、気持ち良い走りの実現のために、前述のエンジンの性能向上に加え、車両の軽量化に寄与するため、ダウンサイジングによる-35.5kg/unitの軽量化に加え、基本骨格設計についても、刷新を図った。

シリンダブロックは、ターボ搭載スペース確保のため、90°バンクを選択し、より高強度なFCV450材を採用した。 casting 方案の最適化を行うことで一般肉厚2.5mmの薄肉化を実現。またハーフスカート構造採用により合計-3.5kg/unitの軽量化に貢献した(図25)。

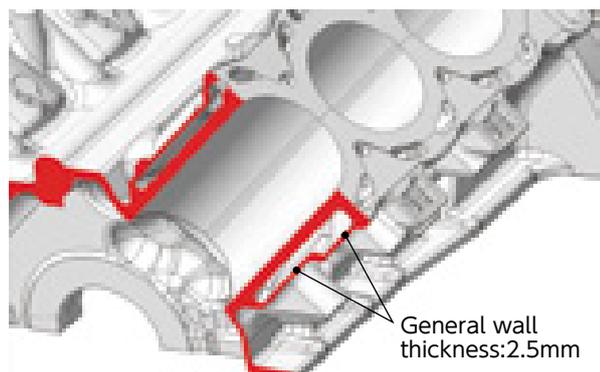


図25 シリンダブロック
Fig.25 Cylinder Block

クランクシャフトは、V6 90°に対応して、ピン・ピン間剛性を確保することで、中間ウェブの無いスプリットピンを日本で初めて採用(当社調べ)。高強度の特殊炭素鋼にフィレット部への高周波焼き入れを施し、強度を確保。エンジン全長短縮への貢献も合わせ、-9kg/unitの軽量化を実現した(図26)。

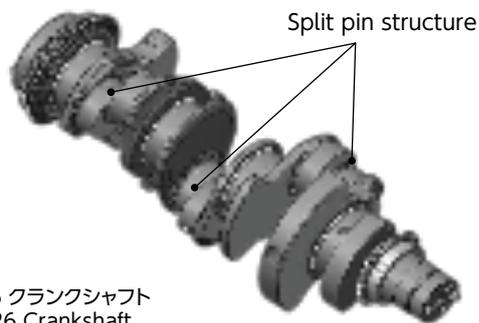


図26 クランクシャフト
Fig.26 Crankshaft

ピストンピンはスチールピストンの剛性を活かし、ピン長さを従来比で28%短縮、かつ鍛造粗材を総加工することにより無駄肉を削る工法を採用することで、ピストンをアルミからスチールに材質変更したにも関わらず、ピストンw/ピンで-0.5kg/unitの軽量化を実現した(図4)。

カムシャフトは、基本形状の最適化と中空 casting 抜きを採用することで、-1.8kg/unitの軽量化を実現した(図27)。

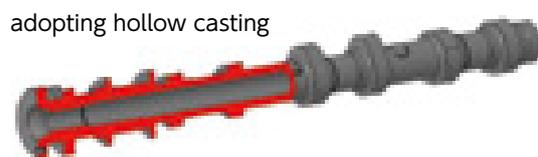


図27 カムシャフト
Fig.27 Camshaft

サプライポンプおよびカムシャフトの駆動は、従来のギア駆動に対しチェーン駆動を採用することで、コンパクトな搭載と-3.5kg/unitの軽量化を実現した(図28)。

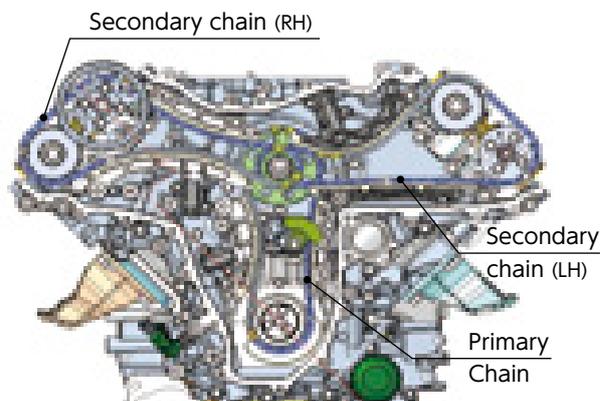


図28 タイミングチェーンシステム
Fig.28 Timing chain system

これらにより、エンジン質量は従来に対して、-62kgもの大幅な軽量化を達成した。

お客様が体感する車両での加速性能は、人間工学を用いてドライバーの期待値を定量化した加速度波形の目標を設定。それを達成するためのエンジンのトルクカーブの実現とエンジンを含む車両の軽量化により、従来エンジンを上回る気持ちの良い加速性能を達成した(図29)。

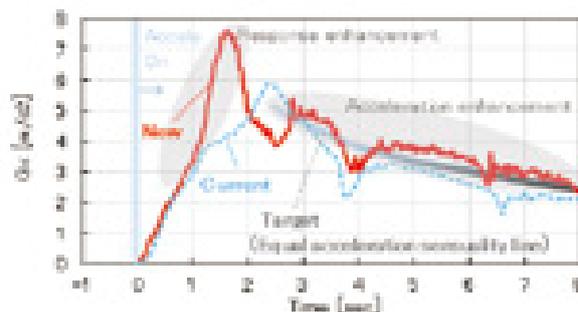


図29 車両加速性能比較
Fig.29 Comparison of vehicle acceleration performance

3.5. 燃焼の変動感を払拭した上質な静粛性

従来のディーゼルエンジンでの燃焼の変動感を払拭した上質な静粛性を目指し、以下の2つを実施した。

- ・エンジン伝達特性のコントロールと燃焼加振力改善による騒音レベル低減。
- ・ノック音の大きい気筒が顕著に聞こえることで、変動感が強くなることを抑えるため、燃焼音の気筒間バラツキの低減。

エンジン伝達特性については、前述の軽量化しつつ低騒音を両立するため、基本骨格のシリンダブロック構造を検討。シリンダブロックを22領域に分割しモンテカルロ法を用いて各部の形状を500仕様以上CAE (Computer Aided Engineering) 解析 (図30)。

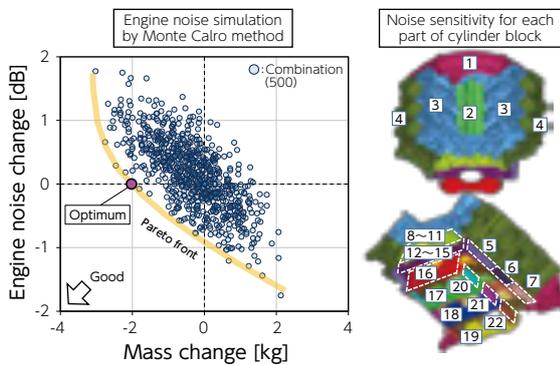


図30 モンテカルロ法による軽量化と低騒音の両立
Fig.30 Trade-off curves between Engine noise and Mass by Monte Carlo method

エンジン質量と騒音の2軸の応答曲面から得られた最適解を分析し剛性向上実施。①バルクヘッドの肉厚の最適化と②ベアリングビーム構造を最適化しジャーナルの振れモードの抑制、③ブロックリア側のバンク間をアーチ形状で連結することでバンク開閉モード抑制の方策を織り込み、放射音を低減した (図31,32)。

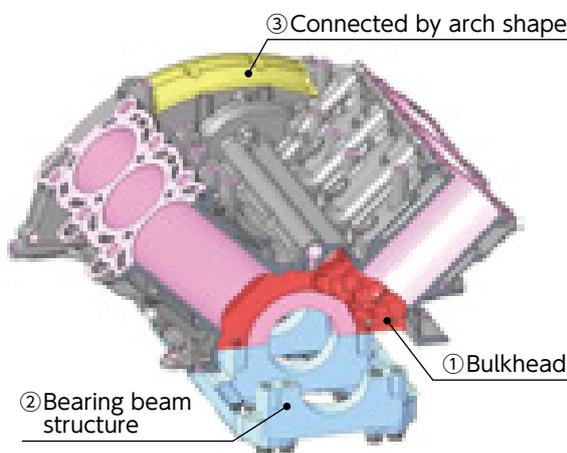


図31 シリンダブロック伝達特性改善
Fig.31 Improved transmission characteristics of the cylinder block

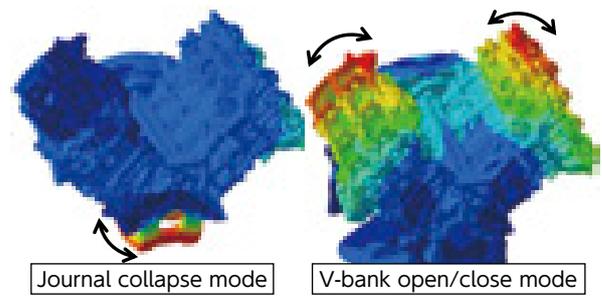


図32 ジャーナル倒れモードとバンク開閉モード
Fig.32 Journal collapse mode and V-bank open/close mode

その上で、ブロック、オイルパン、ヘッドカバー、チェーンカバーなどからの放射音を抑えるために効果的な位置に吸音・遮音材を設定した。これにより従来エンジンに対し燃焼騒音に寄与する1-5kHzの構造減衰を1~5dB向上した (図33)。

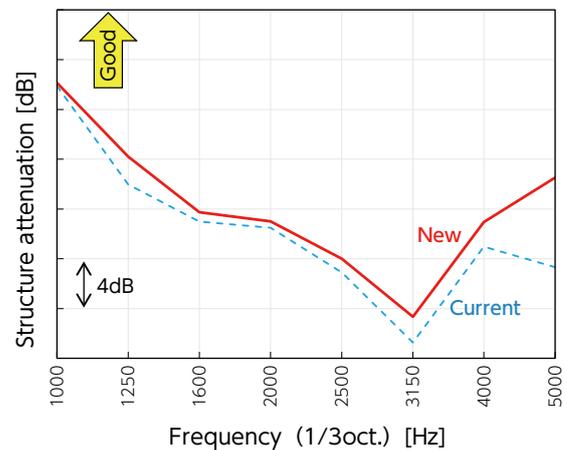


図33 構造減衰比較
Fig.33 Comparison of Structure attenuation

燃焼加振力は排気との両立を図るため、分割噴射を用いた二段着火予混合燃焼を採用し低減を図った。従来のディーゼル拡散燃焼は、燃料を噴射しながら不均一に燃焼するため、すすが生成してしまう課題があった。すすの対策として、早期に燃料を噴射し、均一な燃焼が可能な予混合圧縮着火燃焼の採用が進むものの、燃焼騒音が悪化する問題があった。そこで、D-SPIAと呼ぶ二段着火予混合燃焼を採用した。この燃焼は、二つの熱発生ピークを半周期ずらすことで圧力波を打ち消し低騒音化する技術 (図34)。正味平均有効圧0.7MPa以下の領域まで適用し、お客様が緩加速で使うエンジン負荷領域の騒音低減に寄与した。

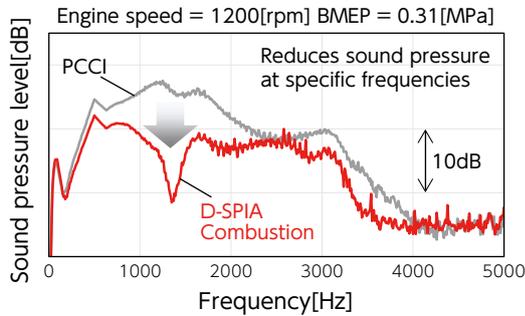
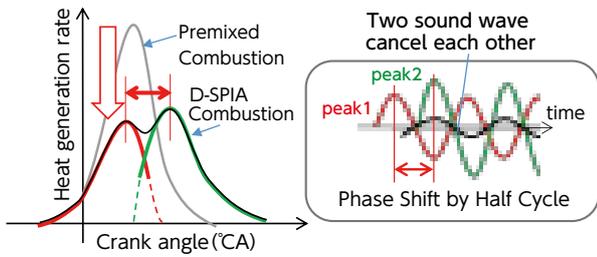


図34 D-SPIA模式図(上段)と燃焼加振力(下段)
Fig.34 D-SPIA Overview and Combustion noise spectra

これにより、エンジン燃焼音は従来エンジンを上回る静粛性を確保した(図35)。

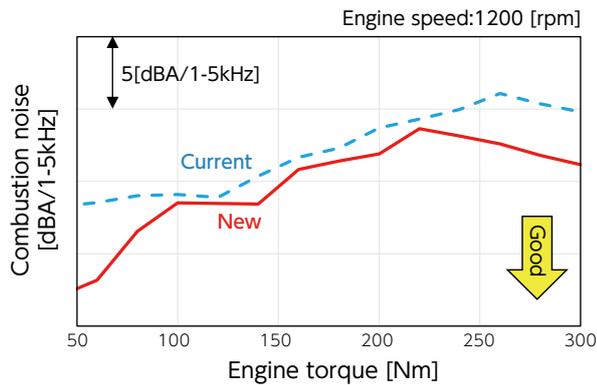


図35 エンジン燃焼音比較
Fig.35 Comparison of combustion noise

一方、気筒間の燃焼バラツキ低減には、緻密な噴射量制御のできるi-ARTインジェクタ®を採用した上で、着火遅れ期間に影響するEGR分配の偏りを改善するため、吸気とEGRガスをあらかじめ左右に分割させた上で、それぞれ合流させる形状を採用することで改善した(図36、37)。

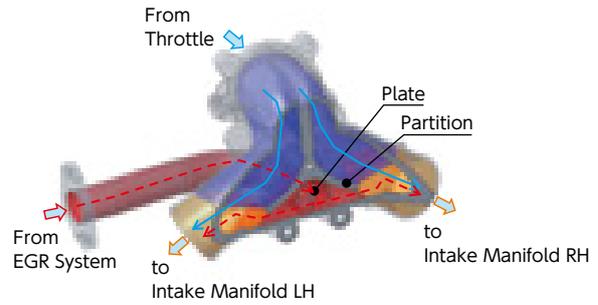


図36 吸気とEGRガス合流部形状
Fig.36 Shape of the confluence of intake air and EGR gas

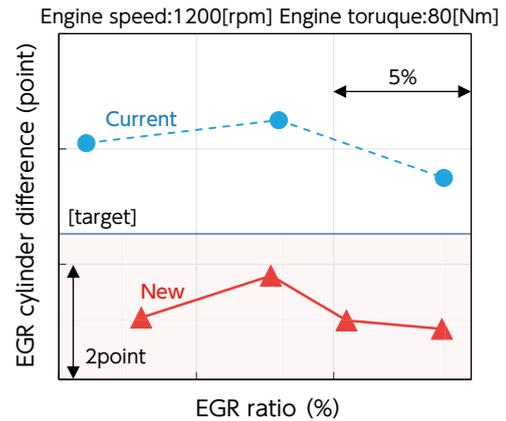


図37 EGR分配改善効果
Fig.37 Effect of improving EGR gas distribution

これらの採用技術により、燃焼音の気筒間バラツキを2.5dB(1-5kHzにて)低減した(図38)。

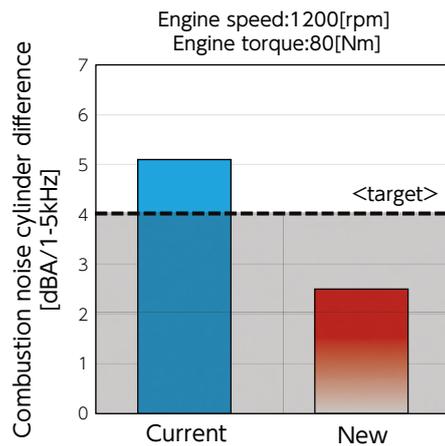


図38 燃焼音の気筒間バラツキ改善
Fig.38 Improvement of combustion noise from different cylinders

ディーゼルエンジンとガソリンエンジンの燃焼騒音を音圧レベルで比較することが容易でないことは公知のため、ディーゼル燃焼音の“ガラガラ”、“チリチリ”と表現される特徴的な高周波(1kHz以上)の変動成

分を抽出し、これらの音圧レベルと変動レベルで、従来エンジンと静粛性を比較した。

上記の燃焼加振力の低減と燃焼音の気筒間バラツキ低減技術により、従来エンジンに対して燃焼騒音を官能評点で3pt向上し、燃焼の変動感を払拭した上質な静粛性を達成した(図39)。

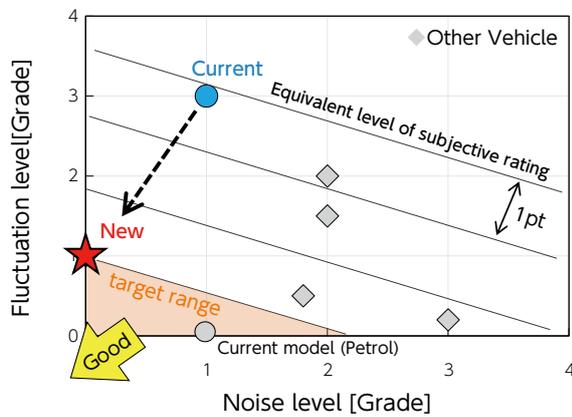


図39 車両騒音と燃焼変動感改善結果
Fig.39 Vehicle noise and fluctuation level

4. まとめ

新開発3.3L V型6気筒ディーゼルエンジンF33A-FTVは、ここまで述べてきたような最新技術を投入することで、低燃費かつクリーンなエンジンへと生まれ変わりながらも、従来と変わらない高い悪路走破性を持ち、さらに、より快適な運転を実現する高い性能を併せ持ったエンジンに仕上げることができた。また、ランドクルーザー用として14年ぶりに国内導入を果たすなど、各国の燃料性状や排気規制に幅広く適合させ、世界中のお客様の日々の生活を支える相棒としてお届けすることができた。

私たちは、将来のカーボンニュートラル社会の実現に向け、ディーゼルエンジン技術のさらなる発展を通じて、未来の地球環境づくりに引き続き貢献して参ります。

謝辞

このエンジンの開発に多大なるご指導、ご支援、ご協力をいただいた全ての社内外の皆様へ深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1]伊与田伸彦ほか:新4.5L V8ディーゼルエンジンの開発、自動車技術会学術講演会前刷集(2007)、20075988
- [2]小郷知由ほか:ESTEC GDエンジン新燃焼技術と吸排気システムの開発、自動車技術会学術講演会予稿集(2015)、20155078
- [3]冬頭孝之ほか:二段着火予混合燃焼を活用した高効率クリーンディーゼル燃焼(第3報)、自動車技術会論文集、Vol.45、No.3、p.493-499 (2014)

著者紹介



デジタル画像相関法を活用した熱疲労予測技術向上

Improvement of Simulation Method for Thermal Fatigue by Digital Image Correlation

井上 幸治^{*1} 浮田 和彦^{*1} 浅野 哲夫^{*1} 相原 秀紀^{*1}
Koji Inoue Kazuhiko Ukita Tetsuo Asano Hideki Aihara

*1 エンジン事業部 技術第一部

要旨

今回新たに開発したV型6気筒ディーゼルエンジン(F33A-FTV)では、排気エネルギーを効率的に利用するために、排気系部品をバンク間に収めるホットインサイドレイアウトを採用した。しかし、複雑なストレスが作用するバンク間において、従来のCAE手法では耐熱疲労性の予測精度確保が困難であった。本稿では、デジタル画像相関法(以下DIC: Digital Image Correlation)を活用したCAE実証によって、予測精度向上に取り組んだ内容を報告する。

キーワード: CAE、デジタル画像相関法、ホットインサイドレイアウト、熱疲労

Abstract

The brand new V6 diesel engine (F33A-FTV) adopted the hot inside layout that installed the exhaust system between V banks for increase efficiency of the exhaust energy. However, that is difficult to predict heat fatigue bresistance by the conventional CAE method between V banks under the complicated stress. The purpose of this paper is to explain the method of the improved prediction CAE verification using DIC (Digital Image Correlation).

Keywords : CAE, Digital Image Correlation, Hot Inside Layout, Thermal Fatigue

1. はじめに

今後、さらに厳しい燃費規制や排気規制の導入が想定されるなか、V型6気筒ディーゼルエンジン(F33A-FTV)には規制対応に加え、走りと静粛性を両立するためのさまざまな新システムが採用された。

新システムの開発を効率よく進めるための要素技術として、CAE(Computer Aided Engineering)は条件や形状を変更したときのバーチャル評価の役割

を担っている。

しかし、排気系部品の耐熱疲労性については従来よりCAEの想定どおりとならず、実機での耐久試験を繰り返すことで信頼性を確保していた(図1)。

CAEにおいて、排気系部品の熱疲労予測を難しくさせる主要因は以下の2つと考えられる。

- a) 材料非線形性:高温での弾塑性変形
- b) 境界非線形性:締結部品間の接触、滑り

F33A-FTVに採用されたホットインサイドレイアウトは排気系部品が左右バンクの本体構造を連結する構成であり、従来システムに比べてさらに締結構造が複雑化した。そのため、開発を効率化するうえでCAE手法の改善が必須であった。

本稿では、システム評価フェーズで新たにDIC計測技術を導入し、締結近傍の現象把握をすることでCAEの精度向上に活かした事例を紹介する。

2. ホットインサイドレイアウトの採用

V型エンジンにおいて、吸排気部品のレイアウトは大きく二通りに分かれる。排気系部品がVバンク外側に位置するホットアウトサイドと、排気系部品がVバンク内側に位置するホットインサイドである(図2)。

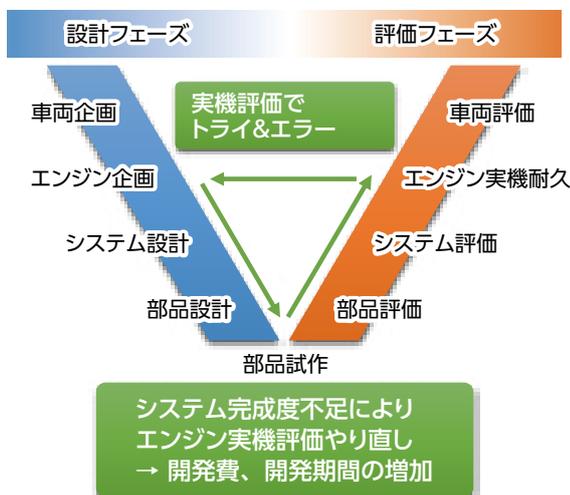


図1 従来の開発プロセス
Fig.1 Conventional Development Process

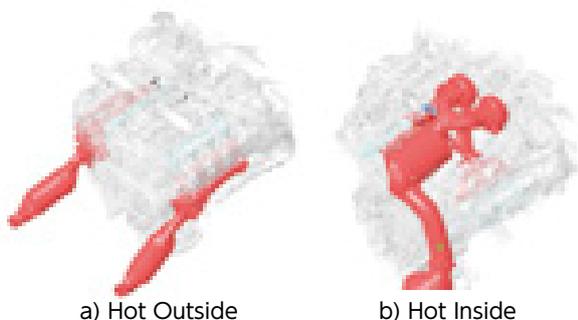


図2 排気系部品のレイアウト
Fig.2 Layout of Exhaust System

従来、ランドクルーザーに搭載していたVD型ディーゼルエンジンではホットアウトサイドを採用していたが、今回開発したF33A型ディーゼルエンジンでは、力強い低速トルクとダイレクト感、爽快な加速感を実現するため、2wayツインターボシステムを採用している^[1]が、このシステムにおいて、より効率的に排気エネルギーを利用するため、排気系部品をVバンク間に集約するホットインサイドを採用した(図3)。

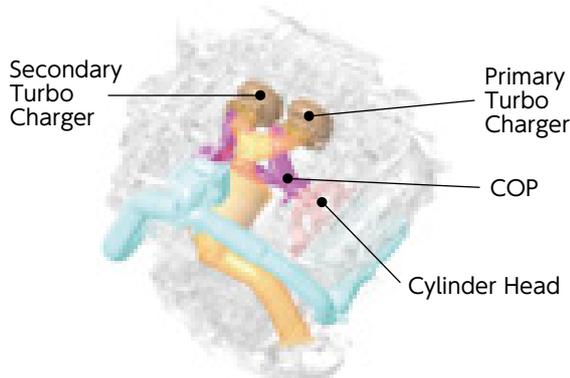


図3 F33A-FTV ホットインサイドレイアウト
Fig.3 Hot Inside Layout adopted by F33A-FTV

2wayツインターボシステムにおいて、シングルモードでは、両バンクの排気ガスをプライマリターボに、ツインモードでは、両バンクの排気ガスを2つのターボに流す役割を担うのがクロスオーバーパイプ(以下COP: Cross over Pipe、図4)である。

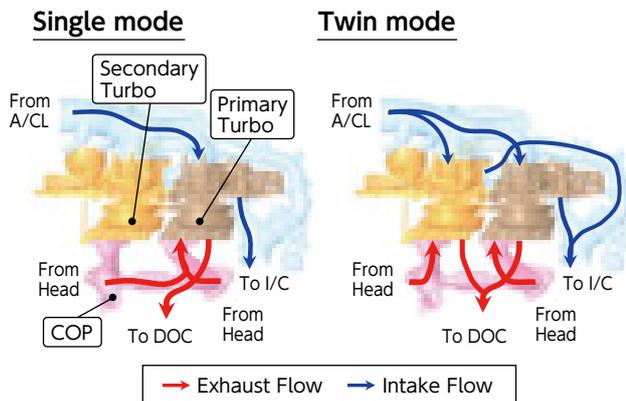


図4 2wayツインターボシステムおよびCOPの機能
Fig.4 2Way Twin Turbo System & Function of COP
(A/CL: Air Cleaner, I/C: Inter Cooler, DOC: Diesel Oxidation Catalyst)

Vバンク間に熱変形の大きい排気系部品をレイアウトすることは、部品の耐熱疲労性を確保することが非常に困難である。特に、シリンダヘッドやターボチャージャーに挟まれるCOPには、周辺部品の熱膨張が複数作用することから、複雑なストレスが発生するため、耐熱疲労性確保が開発上の大きな課題であった。

3. COPの熱疲労予測と計測ニーズ

熱疲労は、冷熱サイクルに伴う熱ひずみの繰り返しによって起きる疲労現象である。したがって、熱疲労を予測するためには、CAEによる熱ひずみの再現性が重要となる。ここで記述する熱ひずみは弾性ひずみと非弾性ひずみの和である。

排気系部品の熱ひずみ計算に用いられる従来CAE手法は実測した熱ひずみと比較しながら、直列エンジンやホットアウトサイドのV型エンジンの排気レイアウトを前提に構築された。モデル化範囲を最小限とし、締結境界条件として遊離しない接触を設定し、また、摩擦滑りを扱わずにガスケットのせん断剛性を調整することで、簡易的に締結部品間の相対滑りを模擬している。

新開発のF33A-FTVに採用されたホットインサイドレイアウトの場合、熱変形が影響を及ぼし合う周辺部品が多く、熱膨張に伴う締結部品どうしの接触や滑りが複雑になる。これらに対応するため、CAEのモデル化範囲を大幅に拡大したうえ、摩擦滑りを考慮するなど締結境界条件を詳細化した(図5)。

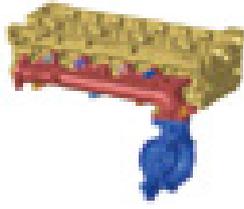
| | 今回(F33A-FTV) | 既存(直列4気筒エンジン) |
|--------|---|---|
| モデル化範囲 |  部品数: 39 |  部品数: 6 |
| 締結境界条件 | | |
| 法線方向 | 接触、遊離が可能 | 遊離なし |
| 滑り方向 | 摩擦滑り | せん断剛性を調整して相対滑りを表現 |

図5 CAEモデルの比較
Fig.5 Comparison of CAE Models

F33A-FTVにおけるCAE計算手順を図6に示す。Step1～5まで連続ステップで計算することで荷重履歴の影響を受けた弾塑性変形や摩擦滑りが得られる。組付けステップについては、COPを締結する際のミスアライメントを考慮するため2段階に分け、実際の組付け順に沿って計算した。事前に測定した温間時および冷間時の温度実測値を参考に温度計算を行い、それらの結果を熱ひずみ計算の入力値としている。一度、温間条件(Step3)にて初期塑性変形を生じさせたうえで、Step4以降の冷間から温間で発生する熱ひずみを評価した。

見直したCAE手法の妥当性を確認するため、計測による現象把握が必要である。まず、着目すべき計測部位を検討するため、ホットインサイドレイアウトのCAE結果を確認した。熱膨張したCOPは前側に締結されたターボに押し付けられることで、締結ボルト座面の隅にある曲率が小さい部位に熱ひずみの集中が見られた(図7)。従来より排気系部品の熱ひずみは高温域対応の溶接型ひずみゲージを用いて計測される。しかし、ゲージが長く、また、小さな曲率に曲げて装着できないことが難点である。そのため、COPの熱ひずみ計測は困難と判断し、別の物理量を対象とした現象把握を検討した。

熱ひずみの影響要因を図8に示す。熱ひずみは自由な熱膨張が拘束されることで生じる^[2]。自由な熱膨張については各部材の線膨張係数と温度変化によって決まり、それぞれ、材料データおよび実測温度に基づいてCAEソフトウェアに入力することで容易に表現できる。それに対し変位は、締結部品どうしが弾塑性変形したうえで、力がつり合うことで結果的に決まる。したがって、締結境界における変位は拘束を示す物理量である。つまり、COPに関していえばシリンダヘッドおよびターボとの締結境界において、法線方向および滑り方向の変位についてCAE結果が正しければ、熱ひず

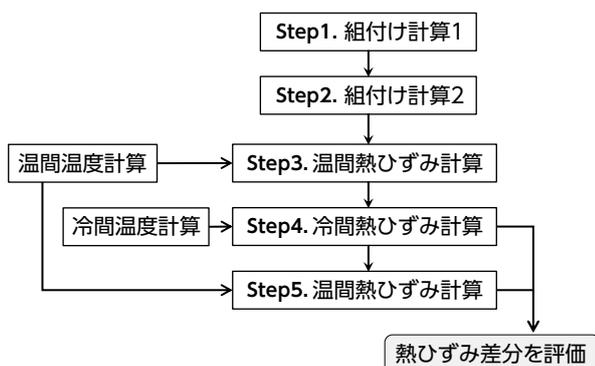


図6 CAE計算手順
Fig.6 CAE Calculation Steps

みのCAE結果も信頼できるといえる。そこで、CAE検証の対象として変位の計測が必要となった。

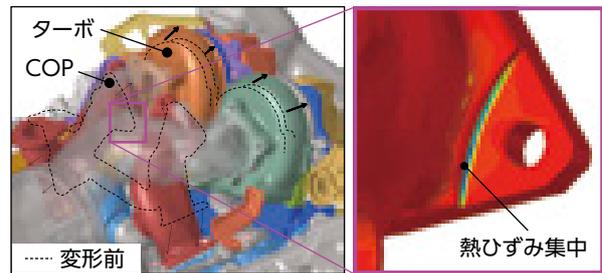


図7 ホットインサイドの熱変形(倍率30倍)とCOPの熱ひずみ集中
Fig.7 Thermal Deformation of Hot Inside (x30) and Thermal Strain Concentration of COP

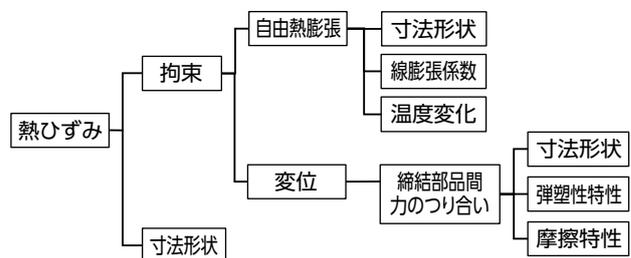


図8 熱ひずみの影響要因
Fig.8 Factors of Thermal Strain

4. 変位測定

従来、測定対象の変位を把握するには、ギャップセンサもしくはレーザ変位計を用いてきた。しかしながら、ギャップセンサは接触式のため使用温度に制限がある。レーザ変位計は設置箇所が限定されることや、エンジン振動の影響を受けやすいため微小変位の測定精度が悪い。このように従来の計測手法では、Vバンク内のシステム全体変位の把握には適さなかった。

Vバンク内全体変位を把握するため、今回、DICを用いた。DICの特徴は非接触で広範囲の変位と温度を同時に3次元計測できることである。測定対象表面に塗装されたスペクトルパターンをカメラで撮影する。撮影した画像をサブセットと呼ばれる微小領域に分割し、変形前のサブセット内パターン分布と同じ分布を画像解析により探査。これにより変形前後のサブセット移動量から、その点における変位量を算出。これらを画像全体で行うことで、変位分布を算出できる^[3]。COPでの事例を図9に示す。

また2台のカメラ視差を利用することで、面内変形に加え、奥行方向も計測することができる。さらに

サーモカメラと2台のカメラとの位置関係を校正することで、温度分布も同時に3次元把握が可能である。

しかし運転中のエンジンを撮影するため、振動や排気熱による画像の焦点ズレを防止する必要があった。上記対策として、振動や高熱でも撮影できる環境整備を行った。振動対策にはシャッタースピードを速くできるように強い光源を用意した。排気熱による熱ゆらぎ防止として、測定物とカメラの間に熱気が停滞しないよう、送風機を設置した(図10)。上記システムにより撮影、解析した画像の一例を示す。コンターで変位分布や温度分布を示すことができる(図11)。

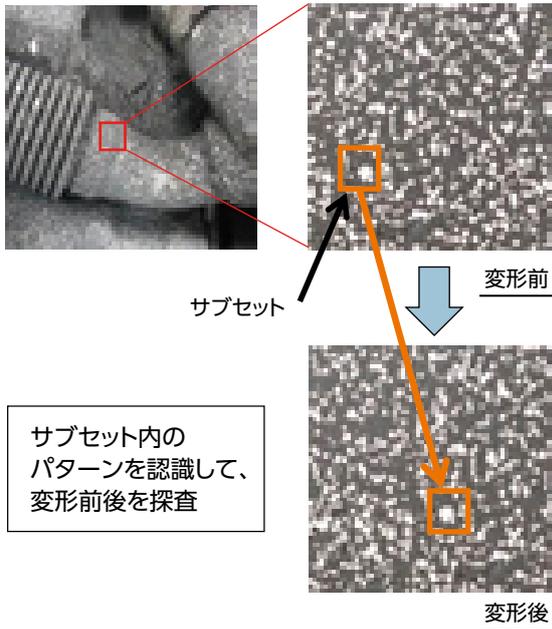


図9 DIC計測時のスペクトルパターンとサブセットイメージ
Fig.9 Spectral Pattern & Subset on DIC Measurement

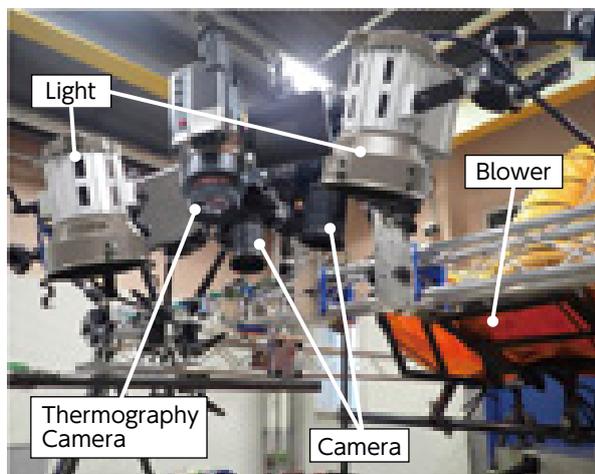


図10 DIC計測外観
Fig.10 DIC Measurement System

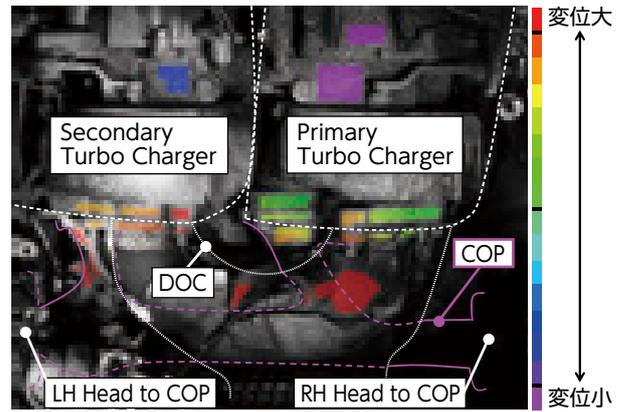


図11 DICによる計測例(エンジン上面視)
Fig.11 Output Image of DIC Measurement (Engine Upper View)

5. 変位量CAE解析結果

ベンチに固定されたDICでの測定結果をCAEの検証に使うには、エンジン全体の剛体回転補正が必要となる。この剛体回転は、エンジン定常運転時に出力トルクの反作用によってゴムマウントが変形して起こる(図12)。しかし、CAEはエンジン静止状態のまま熱応力計算をするため、座標系が維持される。そこで、座標変換の補正として計測値とCAE計算値の差が小さくなるように、最小二乗法にて計測値をエンジン回転軸周りに回転させた。

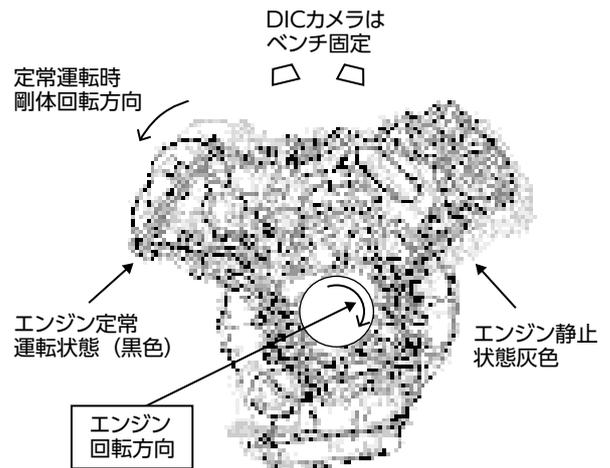


図12 エンジン定常運転時の状態(正面視)
Fig.12 State of Engine Constant Operation (Engine Front View)

このDIC検証試験の結果を参考に、温間、冷間ステップのCOP周辺の境界条件(主に摩擦係数)の最適化を実施した。ターボおよびシリンダヘッドとの締結近傍について、変更前後の変位を実測値と比較したものを図13に示す。従来CAEに比べ、今回はDIC実測値との乖離が低減され、解析精度の向上が確認できた。

今回の変位量実証結果を元に、COPの熱ひずみ、耐熱疲労性の解析を実施することで、COPの形状最適化を行い、ホットインサイドのシステム成立に貢献した。

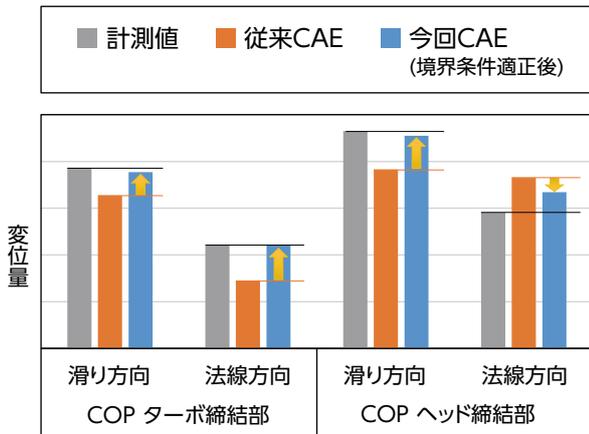


図13 計測値とCAE計算値の変位比較
Fig.13 Comparison of Displacement of DIC Measured Values and Calculated Values

6. まとめ

従来、排気系部品の熱疲労性は、エンジン実機耐久試験の繰り返しで信頼性を確認していたが、今回、システム評価として、DICを活用した非接触変位計測を実施し、CAE解析精度を飛躍的に向上させた。その取り組みにより、複雑なストレスが発生するホットインサイドレイアウトにおいて、実機評価前にシステムの完成度を向上させ、実機評価のやり直しを防止した(図14)。

今後は、本計測技術を活用したCAE実証を多様な部品、システムに幅広く適用することで解析精度の向上を図り、モデルベースでの完成度向上に取り組む予定である。

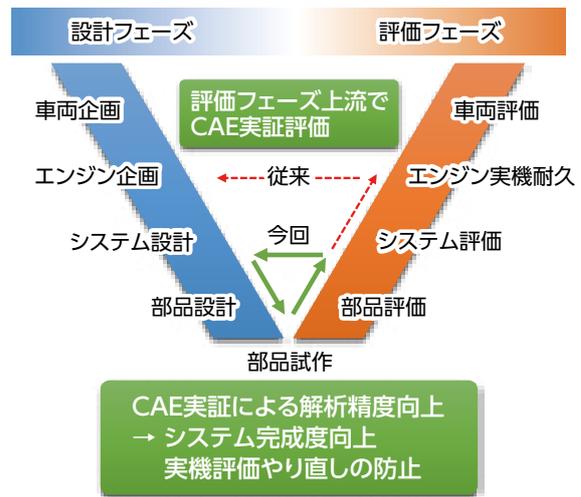


図14 F33A-FTVホットインサイドでの開発プロセス
Fig.14 Development Process for F33A-FTV Hot Inside

謝辞

最後に、今回の取り組みにあたり、多大なるご指導、ご協力を賜りましたトヨタ自動車(株)をはじめとした社内外の関係者の皆様に深くお礼申し上げます。

参考文献

- [1]横田晋司ら:自動車技術会学術講演会(20216116)
- [2]岡崎正和:材料 Vol.56, No.2, pp.190-196, Feb.2007
- [3]出水亨ら:土木学会論文集Vol.68, No.2, I_683-I_690

著者紹介



井上 幸治 浮田 和彦 浅野 哲夫 相原 秀紀

スプリットピン形状を有する クランクシャフトの焼入れ工法開発

Development of Induction Hardening Method for Split-Pin Crankshaft

浅野 司^{*1}
Tsukasa Asano

*1 エンジン事業部 生産技術部

要旨

新開発3.3L V型6気筒ディーゼルエンジンF33A-FTVの主要部品であるクランクシャフトは、乗用車向けでは日本初(当社調べ)となる、スプリットピン形状を採用している。この形状に対し、従来の焼入れ工法を適用するとピン部の熔融回避と焼入れ深さ品質確保の両立ができないという課題が発生した。本稿では、この課題を隣接するピンのコイルに流れる電流を逆方向にするという新工法により解決したため報告する。

キーワード：スプリットピン、高周波焼入れ

Abstract

The crankshaft of new V6 type engine has split shape Pin which is first case for passenger car in Japan. It is difficult to apply conventional induction hardening method to split shape Pin due to the problem that both prevention of melting Pin and securing hardening depth are not achieved at the same time. In this article, it is shown that the difficulty is resolved by opposite direction of current in the coils of induction hardening.

Keywords : split shape Pin, induction hardening

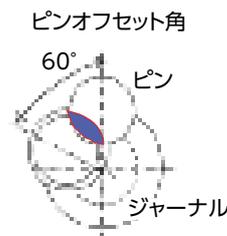
1. はじめに

新開発3.3L V型6気筒ディーゼルエンジンは、従来V型8気筒ディーゼルエンジンからのコンパクト化・軽量化を実現するために主要部品であるクランクシャフトにスプリットピン形状を採用している。この形状は、中間ウェブを介さず直接ピン部同士を連結するもので、ピンオフセット角を30度にするにより、隣接ピンとのラップ量が増加し、直接連結が可能となっている(図1)。

このスプリットピンクランクシャフトの量産加工ライン(国内乗用車初_当社調べ)を実現するなかで、加工各工程のリスク評価と実証試験により焼入れ工程において課題があることが明らかとなった。

本稿では、この焼入れ工程の課題を新工法にて解決したため報告する。

通常のV6クランクシャフト



スプリットピン クランクシャフト

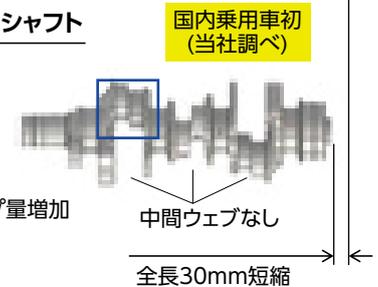
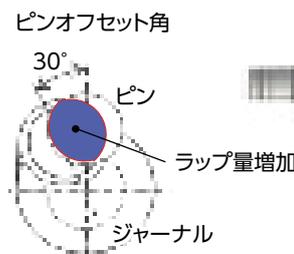


図1 スプリットピンクランク形状
Fig.1 Shape of Split-Pin Crankshaft

2. 高周波焼入れ

クランクシャフトのピン部には、耐摩耗性と耐疲労強度を確保するために、ピン表面からの一定以上の焼入れ層深さが要求される。

焼入れとは、鋼をオーステナイト組織の状態に加熱後、急冷することによりマルテンサイト組織の状態に変化させることをいう。本焼入れ工程においては、10～30kHzの高周波電源を用いた高周波焼入れを採用している。

高周波焼入れの加熱原理は、ワークに発生するジュール熱を利用したものである。コイルの中にワーク(導電体)を置き、高周波電流を流して交番磁束を発生させると電磁誘導によりワークに渦電流が生じる(図2)。この渦電流が発生するとワークの電気抵抗によりジュール熱が発生し加熱される^[1]。

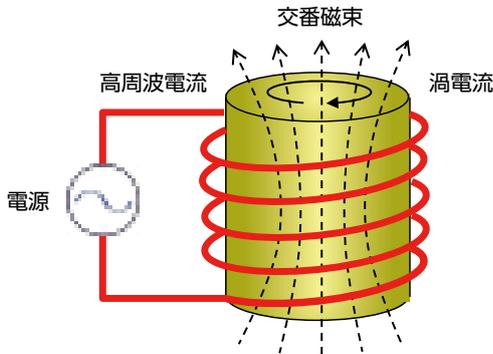


図2 誘導加熱の原理
Fig.2 Principle of Induction Hardening

量産ラインでは、高周波焼入れを採用することが多く、今回の焼入れ工程においても採用している。その理由を以下に示す。

- ①直接加熱のため熱効率が良く短時間の加熱で済む
- ②短時間加熱、急冷処理のため酸化、脱炭、変形が少なく、圧縮残留応力による耐疲労性も向上する
- ③短時間加熱のため、設備を小型化できる

3. スプリットピンの焼入れ方式

スプリットピンの焼入れにおいて、従来同様にピンを1箇所ごとに加熱を行うと加熱1回目で形成された焼入れ層を加熱2回目でもう一度加熱することとなり、硬度低下する可能性がある。そのため、本形状においては、二箇所同時加熱による焼入方式を採用している(図3)。

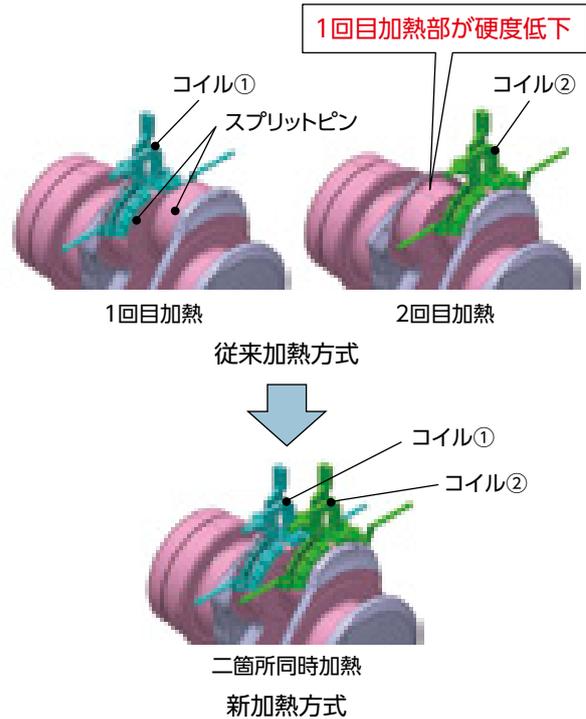


図3 従来加熱方式と新加熱方式
Fig.3 Comparison of old and new heating method

4. 課題

二箇所同時加熱方式でスプリットピンの焼入れを行う場合、ピン部の溶融回避と焼入れ深さ確保を両立させることが課題となる。

同時加熱の際、隣接コイルによる入熱が加わることと、熱容量が小さいピン角形状に磁束が集中することにより溶融が発生する(図4-1)。溶融は入熱量を減らすことで解消できるが、その背反として焼入れ深さを満足することができない。これらの両立範囲は、量産ラインで管理可能な電力範囲の50%程度であり、量産困難である(図4-2)。



図4-1 品質不良発生部位
Fig.4-1 Melted portion of Split-Pin

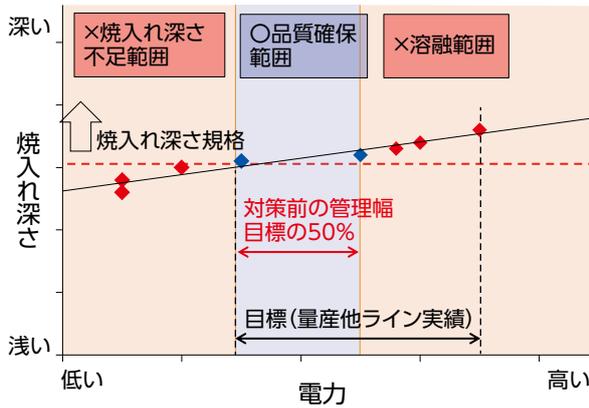


図4-2 対策前の電力管理幅
Fig.4-2 Power management range before measures

溶融現象を明らかにするため、磁場解析による視覚化を行った(図5)。その結果、つなぎ部における過加熱現象が解析上でも現れた。この現象は、隣接コイルにより発生する磁束が干渉し強め合うことが要因と推定された。

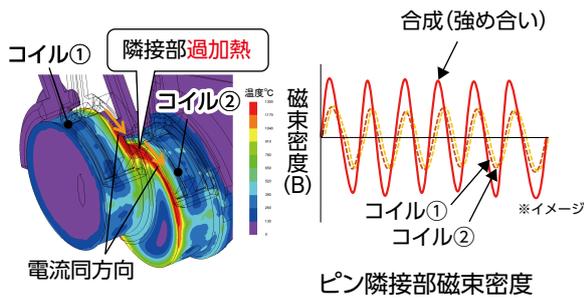


図5 対策前の磁場解析結果と磁束密度イメージ
Fig.5 Magnetic field analysis result before measures

5. 対策

溶融対策として、隣接コイルによる磁束強め合いを抑制する必要がある。そのためには、隣接コイルより発生する磁束方向が常に逆向きとなり、磁束を弱め合う干渉を促すことが必要と考えられた。この状況を実現させるため、隣接するコイルの電流方向を逆向きにした^[2](図6)。さらに、2つのコイルへ1つの電源で電流を供給する構成とすることで、常に磁束を弱め合う干渉を起こさせることを可能とした。

対策後の磁場解析の結果を図7に示す。従来構成では過加熱となっていた隣接部が、上記の対策により過加熱を抑制されていることが示されている。実際のワーク加工においても溶融現象が解消され、焼入れ深さとの両立が可能となった。その結果、管理幅は従来量産レベルまで拡大が可能となった(図8)。

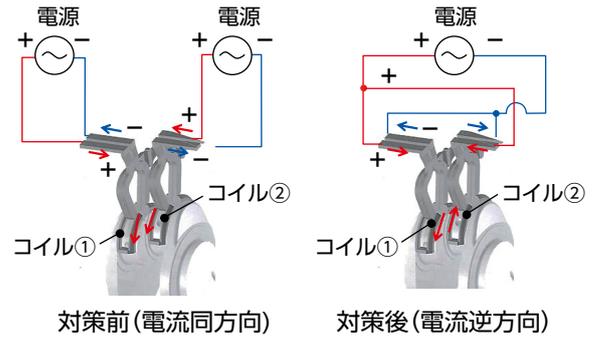


図6 対策前後のコイル電流方向
Fig.6 Direction of current flowing through the coil before and after measures

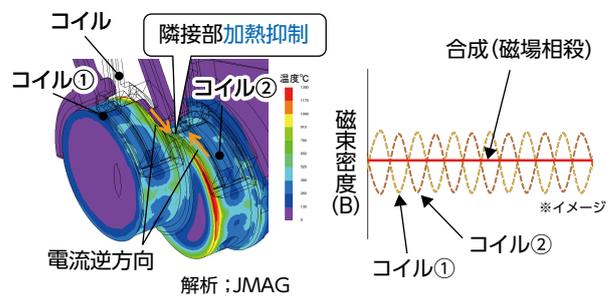


図7 対策後の磁場解析結果と磁束密度イメージ
Fig.7 Magnetic field analysis result after measures

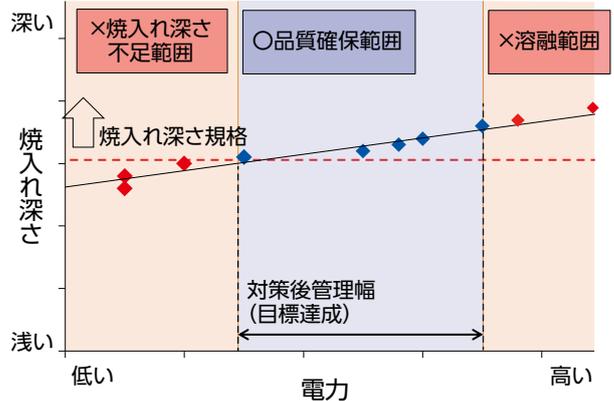


図8 対策後の電力管理幅
Fig.8 Power management range after measures

6. 焼入れ条件のロバスト性評価

品質への影響が予想される主な焼入れ条件の管理値上下限を組み合わせ、管理範囲の境界でも品質が確保できることを確認した。

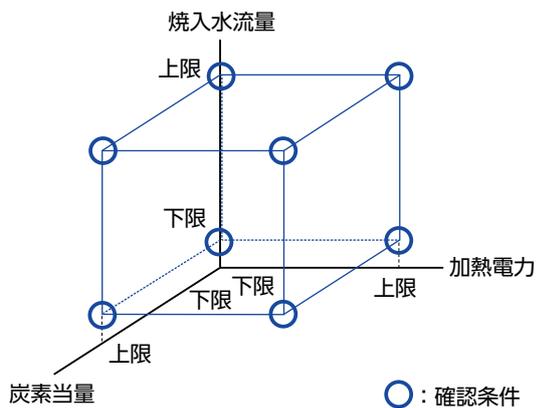


図.9 ロバスト性評価マップ
Fig.9 Robustness evaluation map

7. まとめ

乗用車では日本初(当社調べ)のスプリットピン形状を有するクランクシャフトについて、ピン部の溶融回避と焼入れ深さ確保という、相反する課題を隣接するコイルの電流向きを逆にすることで解決し、焼入れ工法開発を完遂することができた。また、焼入れ条件のロバスト性についても評価し、量産ラインでの管理に問題が無いことを確認できた。

■ 参考文献 ■

- [1]大和久重雄:熱処理108つのポイント 大河出版
- [2]特許第6517960号 電気興業株式会社

■ 著者紹介 ■



浅野 司

攻めめる ディーゼルエンジン

——新たな技術に挑戦した生粋の“エンジン屋”たち

インタビュー



ランドクルーザーが2021年、14年ぶりのモデルチェンジを果たした。
その心臓部となるエンジンは、ガソリンエンジンとディーゼルエンジンの2種類で
先代(1VD-FTV)に引き続き、当社がディーゼルエンジンの開発・生産を担当。
トルクアップ、排気規制のクリア、燃費や静粛性の向上など、
多くの要望を満たすため、まったく新しいエンジンとして開発をスタートさせ、
数々の挑戦を重ねながら、約5年の歳月をかけて完成させた。
今回はこの新型V6ディーゼルエンジン(F33A-FTV)に尽力した
開発メンバーのチャレンジとエンジン開発にかける想いを記したストーリーである。

新型ディーゼルエンジンは 「ホットインサイド」レイアウト

トヨタ自動車(株)(以下、トヨタ自動車)のランドクルーザーに搭載されるディーゼルエンジンは、国内市場向けとしては2007年まで発売された100系以来となる。

先代のディーゼルエンジンから時は経ち、ディーゼルエンジンに対するイメージや求められる性能は大きく変化した。ランドクルーザーにふさわしい耐久性、信頼性、悪路走破性などをしっかりと継承しながら、年々厳しくなる燃費規制や排気規制にも適応しなければならない。そんな多くの課題を解決するために、エンジンは4.5L V8から3.3L V6へとダウンサイジング。ランドクルーザーらしさを維持しながらも、軽量化、低燃費化を図り、さらに爽快な加速感、静粛性の向上までもターゲットにし、まったく新しいエンジンとして開発が進められた。



浅野 智幸

技術第一部

F33A-FTVは排気量、気筒数ともに減らしているが、そもそもの構造から刷新されている。それは「ホットインサイド」という国産量産車として初*のレイアウトを採用していることだ(*当社調べ)。このレイアウトはV6エンジンでありながらバンク角90度を採用することで、Vバンク間を広げ、その広げたスペースを利用して排気系をVバンク内にまとめている。一般的にはバンクの内側には吸気系を、その外側には排気系をレイアウトするのだが、このホットインサイドはその逆と捉えてもらっていい。F33A-FTVのエンジン設計・機能評価の取りまとめを行った浅野智幸はこう話す。

「ホットインサイドを採用することで、高価な排気浄化装置(DOC*1やDPF*2など)を1系統にまとめ、かつ触媒の早期活性化のために、エキゾーストポートの最短距離に配置することで、熱容量を低

減できます。排気浄化装置は高温を維持することで性能を発揮するので、この場所が好都合なんですね。あと、動力性能に大きく寄与する2wayツインターボをVバンク内側に配置し、吸気ボリュームを低減させることで、加速レスポンスを向上させたかったことも採用の理由です」。

その他にもホットインサイドのメリットは様々だが、大きな理由としては上記の2つが有力だ。

F33A-FTVエンジンの大まかな構成が決まり、いよいよ本格的な開発が始まっていく。

*1……DOC(Diesel Oxidation Catalyst/ディーゼル酸化触媒)

*2……DPF(Diesel Particulate Filter/ディーゼル微粒子捕集フィルター)

——エンジンのトルク向上

「ガソリン車より走らないよね」 その印象を覆す

排気量が4.5Lから3.3Lにダウンサイジングされていることから、当然そのままではエンジンのパワーもトルクも低減してしまう。そのため、後述する2wayツインターボとの組み合わせにより、燃費向上や排気のクリーン化などにも配慮しながら、パワーやトルクも上げていかなければならない。

「エンジンのトルクアップについては、650Nmを1200rpmという低い回転数で発生させることを目標の一つとして、トルクカーブをつくっていきました」。



川浦 聡司

技術第二部

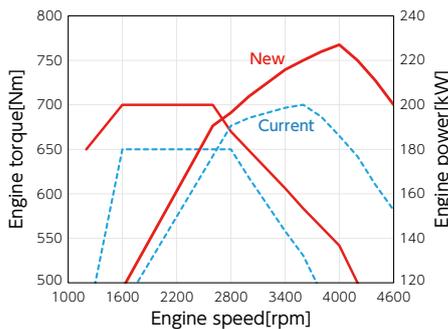
そう話すのはエンジン適合を担当した川浦聡司だ。そもそもディーゼルエンジンは低回転域でのトルクが出しやすい特性を持っているが、なぜ1200rpmなのだろうか？ その疑問に車両適合に携わった井上崇が答える。

井上 崇

技術第二部



「クリアしなければならない法規として車外騒音があるのですが、それを元にしています。1200rpmであれば厳しい規制値をクリアできるからです。1200rpmで650Nmを出し、1600~2600rpmの間で700Nmが出るようなトルクカーブを描き、それ以上のエンジン回転数のトルクカーブも含め、目標を設定し、それを満足できるように開発を進めていきました。これは従来の開発では行わなかった方法です」。



エンジン全負荷性能

エンジンができてしまってから「もうちょっとトルクがあるほうが良かったよね」と言われても、そこから変更するのはかなり困難である。そうならないようにエンジンをつくる前の段階で理想のトルクカーブを決めていったのだ。どのようにしてトルクアップを果たしたのか、その具体的な内容はターボの項に譲るが、ここで井上(崇)が興味深い話をしてくれた。それはトルクカーブが2600rpm以降の高回転側で緩やかに下がっていることについてだ。これでは運転している人がアクセルを踏んで回転を上げて、加速しないと感じるのではないだろうか。

「人間工学的に『等加速度感線』というのですが、実際の加速度は下降しているのに、ずっと同じ加速をしているように感じるトルクカーブを設計できるんです。それは『ウェーバー・フェヒナーの法則』に基づくものです。その法則は、ある時間に対

して、ある加速度の変化以内であれば、人間はその変化を感じないということが証明されています」と井上(崇)。

たとえば、2600rpmを超えてもトルクカーブをそのまま維持した状態にすると、トルクカーブが変化していないのに、人はどんどんとクルマが加速していくように感じ、恐怖感を覚えるという。そのため、むしろ緩やかに下降しているほうが運転者に心地良い加速感を与えられるというのだ。

「この法則が妥当なのかを検証するため、企画段階でBEV(電気自動車)を使い、実証実験をしてみました。結果、法則通りでした」と話す。

にわかには信じられないが、トルクカーブの設定にはこのような人間工学的な要素も参考にしながら、緻密に決めていったことがわかる。しかし、実機がない状態でトルクカーブまで決めていくことは、かなり大変な作業ではないだろうか。

「その通りです。目標とするトルクカーブや加速度ラインをどのように達成するのか。実機がない状態でイメージし、作り込んでいくのは苦労しました。ただ、その点においてはCAEなどの解析機器やシミュレータなどを活用して解決していきましました」と川浦。

現在の自動車の開発現場では、CAE(Computer Aided Engineering)などを活用するのが常識だが、コンピュータ上でできたエンジンモデルが寸分変わらずリアルなエンジンになるわけではない。机上の理屈や理論も大切だが、その図面を元にできてくる実機を想像する力も必要なのである。

開発を振り返ってみて、最も印象に残っていることは何だろうか。

「ディーゼル車って昔からガソリン車と比べられる存在で、そのたびに『ディーゼル車って燃費や低速域のトルク感はいいけど、ガソリン車より走らないよね』と言われ続けてきました。でも、F33A-FTVは関係者の試乗会で『ガソリン車よりいいね』と言ってもらえるようになり、すごくうれしかったです。ガソリン車よりもいいと言われたのは、僕の経験では初めてのことなので」と井上(崇)は笑顔で話す。さらに「私は関係部署とのコミュニケーションの重要性を再確認しました。エンジンは特に駆動系システムと密接な関係があります。だからこそ、より良いクルマをつくっていくためには、こちらの要望を他部署にもしっかりと伝え、連携・協力しながら仕事を進めていくことが重要です。トヨタ自動車のエンジンとAT*3と実験

の3部門とは週1回ミーティングをし、どうやったら高次元で走り・燃費・NV*4性能を成立させられるか、とことん意見交換ができたからこそ、満足いくエンジンを生み出すことができたと思っています」と締めくくった。

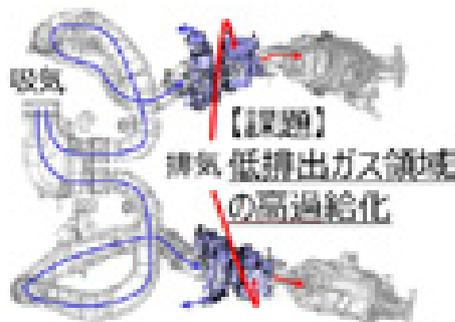
*3……AT(Automatic Transmission/自動変速機)

*4……NV(Noise Vibration/騒音および振動)

——2wayツインターボ エンジンとターボを同時に 開発できる当社の強みを再認識

F33A-FTVは先代の1VDからダウンサイジングしながらも、低速域でのトルクアップも図らなければならない。先代のツインターボシステムはエンジンの排気を2つのターボに割り振るので、どうしても低速トルクでの排気エネルギーが不足してしまうのが課題だった。その他、さまざまな条件を考慮しつつ、ツインターボシステムを選定していった結果、最終的に「シリーズシーケンシャル(直列)」か「2wayツインターボ(並列)」の2択に絞り込まれた。

これらのシステムは2つのタービンのつなぎ方が異なる。シリーズシーケンシャルは小型のタービンと大型のタービンを直列につなぐ方法。一方、2wayツインターボは並列につなぐ方法だ。さまざまな要件を総合的に検証していった結果、ホットインサイドのエンジンレイアウトによる搭載性やアクセルに対する応答性、さらに2基のターボの部品を共通化できるコストパフォーマンスの良さも相まって2wayツインターボを採用することに決まった。



1VD-FTV ターボシステム



F33A-FTV ターボシステム

2wayツインターボの仕組みをもう少し詳しく説明してもらおう。ターボの設計に携わった町田和也はこう話し出す。

「2つのタービンをプライマリとセカンダリに役割分担させるのが2wayツインターボです。低回転域はプライマリターボのみを動かしますが、エンジン回転が上がっていくとともにコントロールバルブを開き、セカンダリターボにも排気を導入。2基のターボを同時に動かす仕組みです。これにより低回転域でも高過給を維持でき、低速のトルクアップや出力向上を実現できました」。



町田 和也

技術第一部

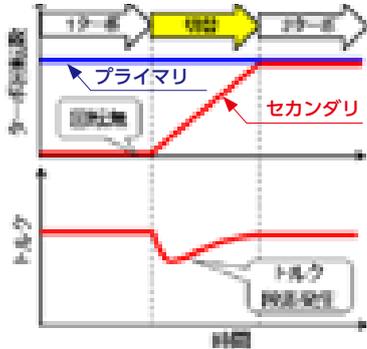
ただ、それだけではない。F33A-FTV専用インペラ(タービンの羽根)やコンプレッサの形状を最適化し、より幅広い回転域で高過給を可能にしたこともトルクアップ・出力アップに貢献している。

「2wayツインターボは非常に優秀なシステムなのですが、大きな課題があります。それはプライマリからセカンダリに切り替わるときに、急激なトルク変動が出てしまうことです」と、制御開発を行った小関知史は言う。

プライマリが回転しているとき、セカンダリはまったく回転していない。その状態で回転数が上がり、バルブを開くことでセカンダリのほうに急激に排気の流れると一瞬、トルクが落ち込んでしまう現象が起こるといふのだ。

「実はこの課題は、2wayツインターボを採用するときから想定していました。解決方法はセカンダリに排気の流れる前にタービンを回転させておくこと。そのために電動式のエアバイパスバルブ

(ABV)を装着することでセカンダリをあらかじめ回転させておき、1ターボから2ターボへの切り替えをスムーズにしました」と町田はその解決方法を話してくれた。たとえるなら、リレーでボタンをもらう走者を助走させていくようなイメージだろうか。



2wayツインターボの切替段差

「ただ、これだけで解決したのではなく、排気量の調整ができる可変ノズル式のタービンを採用したり、各種バルブを装着することで、よりスムーズな切り替えを実現しているんですよ」と小関が付け加える。

この問題は想定内だったため、順当に対応できたが、開発中に思わぬ課題も発生した。

「低回転域でプライマリが回転しているとき、セカンダリは無回転です。ただオイルは常に両方のターボに供給されているため、回転していないセカンダリのほうにオイル漏れが発生しました。これはオイルの経路と形状を見直すことで解決しました。しかし、プライマリのインペラが破損してしまう問題は頭を悩ませましたね」。

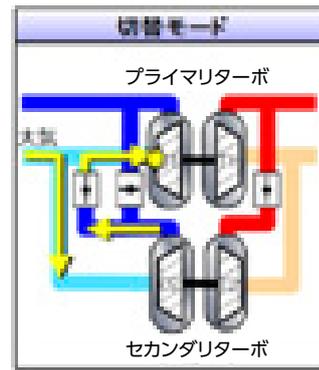


小関 知史

技術第二部

このインペラ破損問題は1ターボから2ターボになる切り替えモードのときのみ発生するという。当初はなぜ壊れるのかまったく見当がつかなかったが、切り替え時にセカンダリとプライマリの吸気経路が直列につながることで、セカンダリの空気脈動がプライマリに伝わり、プライマリのイン

ペラが持つ固有振動数とたまたま合致。そのため、共振して破損するということがわかったのだ。



切替モード中のインペラ共振

「原因がわかれば単純なことです。そこに着目するまでに苦労しましたね。対策としては、インペラの形状を変更し、セカンダリから流れてくる空気脈動と共振しないようにすればOK。無事解決しました」と町田は安堵の表情を浮かべながら話す。

今回、ここに紹介したのは、2wayツインターボシステムに関連したものだけだが、その他にもさまざまな新規アイテムを考え、盛り込んでいる。それらはもちろん、当社単独で開発できるものではなく、トヨタ自動車の設計部門をはじめ、さまざまな部署と連携することでチャレンジすることができた。

「私は特に適合チームとの連携が印象に残っています。今回の2wayツインターボは1ターボから2ターボへの切り替えに3つのバルブを使うだけでなく、細かな排気量の調整ができる可変ノズルベーンも採用し、非常に制御の幅が広がっています。そのため、どのようなエンジンの味付けにするのかは無限に組み合わせられるんですね。そこを絞り込むために適合チームと密接に連携し、彼らの要望を迅速に制御システムに反映し、実現できたと思っています」。

小関は開発を振り返ってこのように話してくれた。町田は小関の発言を受けてこう語る。

「それができたのも、やはりターボを内製していることに尽きると思うんです。たとえば出力性能の不足が指摘されたときも、短期間でインペラをさらに改良することで解決できました。エンジンと一緒にターボも開発しているからこそ、ターボ単体ではなく、システムとして捉えることができ、高性能化、短納期化を実現できるのだと思います。これは他社では真似できない私たちの強みだとあらためて実感しましたね」。

——低燃費化、排気のクリーン化

低燃費化、排気のクリーン化はエンジンだけでなくエンジン以外の領域との連携も肝

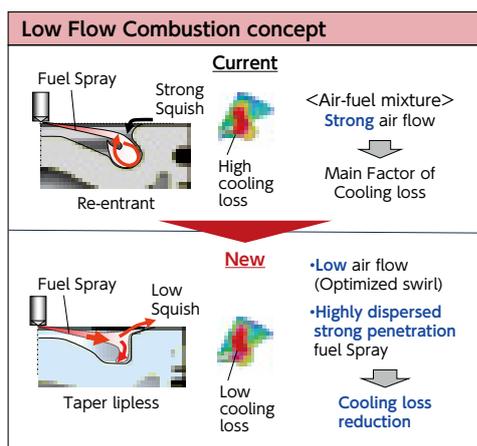
燃費改善と排気のクリーン化においては、燃費を先代エンジンの-25%に設定。排気(NOx)は今後、さらに厳しくなる規制を見据え、-56%とし、開発に取り組んだ。今回、4.5L V8から3.3L V6へダウンサイジングしているの、8気筒から6気筒への変更による機械的な抵抗(フリクション)などが減るが、それに加えてさらなる燃焼効率の改善とフリクション低減アイテムを追加している。

「燃焼効率とフリクション低減には、新たにスチールピストンを採用したことが大きなトピックです」と川浦は言う。

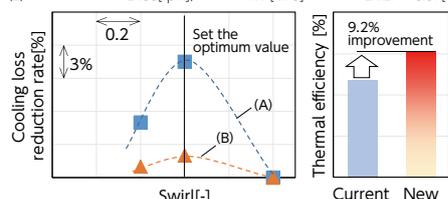
いまどきのピストンはアルミ材が使われているのが常識だが、あえてスチールを採用したのはなぜだろうか。

「高強度のスチール材を使うことで、ピストンの全長を短くでき、フリクションを低減できるからです。ピストンリングの張力を低くすることで、さらに抵抗を少なくしているのも特長ですね」と浅野(智)は続ける。

燃焼改善についてはどのような方法でアプローチしたのだろうか？



(A) Engine speed = 1600[rpm], BMEP = 0.67[MPa] Engine speed = 1600[rpm], BMEP = 0.67[MPa]
 (B) 2400[rpm], 1.1 [MPa]



冷却損失低減効果

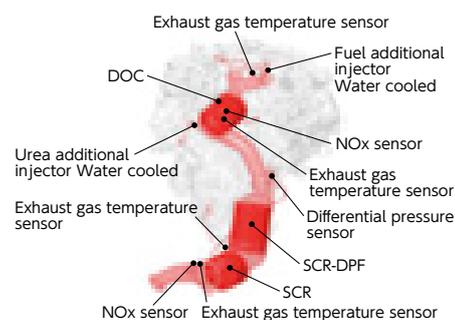
「筒内ガス流動の最適化に着目しました。筒内流動が大きいと、壁面を通じて熱が失われる量が増え、冷却損失増加につながります。そのため筒内流動を抑える新しい燃焼室形状を採用しました。ただ、筒内流動を抑えると噴射した燃料が拡散できずに燃焼が悪化してしまうため、高拡散、高貫徹噴霧を可能にした噴射系を組み合わせることで低流動化を実現しています」と川浦は言う。

燃焼効率の改善とフリクションの低減によって、目標の半分以上をクリアするほど効果を出したというから驚きだ。併せてエンジン回転数とトルクの関係性を考慮し、エンジンが高効率に仕事をしてくれる領域を拡大。F33A-FTVは低回転かつ高負荷の領域が使えるようATとのマッチングも煮詰めていった。

「今回、先代の6速ATから新開発の10速ATを組み合わせています。より多段化したことで、広げた高効率領域に細かくミートできるようになりました」と川浦は話してくれた。

一方、排気のクリーン化については、どのような取り組みを行ったのだろうか。

「基本的な考えは燃料をきれいに燃やして、Euro5の排気規制達成レベルに改善した上で、排気浄化装置にNOxを低減する触媒を追加し、さらに上のレベルのEuro6排気規制にも対応できるようにする方向性です」と井上(崇)は言う。



尿素SCR-DPFシステムレイアウト

エンジンから出た排気はEGR (Exhaust Gas Recirculation) を通して、吸入空気とともに再度燃焼室に誘導される。そのEGRの性能を強化することで排気をクリーン化し、さらにその後、DPFシステムとNOx選択触媒還元(SCR)機能を合体させた「尿素SCR-DPFシステム」の技術を新たに採用することで、さらなるNOx低減を実現することができた。

燃費向上や排気のクリーン化においては、エンジン単体だけでなく、ATを担当するトヨタ自動車

の駆動系部署や性能実験をする部署と連携して進めていった。

「燃費マップやNOxマップを製作し、どこをターゲットにするのが理想なのかを協議し、見定めていきました。たとえば、ディーゼルエンジンにとって低回転・高負荷で走らせるのが理想で、燃費的にも高効率ですが、一方でNOxの排出量が大きくなってしまいう弱点もあります。また、燃費や排気は、NVやドライバビリティにも影響するので、緻密な連携が必要なのです。このような経験をすることで、折衝能力がさらに身に付いたような気がします。エンジンだけでなく、広い視野で開発全体を見つ、こちらの要望もしっかり主張する。そんな自身の成長を実感しました」と井上(崇)。

川浦も続けて話す。

「走りの良さを高めていくと、排気のクリーン化に影響が出るなど、背反することが多いんですよ。だからこそ、お互いが集まって話し合うことで、より良い落としどころを決めていくことが重要。そこが苦労した部分でもありますね」。

エンジンはクルマの心臓部であるからこそ、あらゆる部分に影響する。エンジン開発の奥深さを実感できるエピソードだ。

——熱対策

攻めの姿勢で熱を制する

F33A-FTVは排気エネルギーを効率的に活用するため、排気系部品をVバンク間に収める「ホットインサイド」レイアウトを採用したことは先述した。2wayツインターボとの相性も良く、死角のない理想的なレイアウトに思えるが、弱点もある。それが熱問題だ。機能性・信頼性を担当した井上幸治はこう説明してくれた。

「エンジンの排気系部品は700~800℃とかなり高温になります。その温度は一定ではなく、走行

条件によって、高温になったり低温になったりするため、金属部品の熱疲労が課題となります。従来のホットアウトサイドに対し、今回採用したホットインサイドのレイアウトだと、限られたスペースに排気系部品が集められているので、熱疲労の課題がより顕著になったと言えます」。

「井上(幸)が言うように排気系部品は温度が変化するため、金属部品の熱疲労を予測するのは難しいのですが、試作する前にCAEである程度予測し、熱対策を行っていきました」と話すのは、CAEを担当した浮田和彦だ。



浮田 和彦

技術第一部

その方法はCAEに温度条件を入力し、熱ひずみを計算することで排気系の熱疲労を算出していく。熱ひずみを計算するうえで締結部品間の滑りも重要だ。温度変化によって締結部品の膨張差が生じると同時に、締結面の面圧が変化。摩擦限界を超えれば、部品間で相対滑りが起きてしまう。F33A-FTVはホットインサイドになったことで、先代のエンジンよりも締結部品数が増え、締結構造も複雑になったという。CAEは締結部品の滑りを予測するのが苦手なので、なおさら難しい。

「ただ、CAEで算出した数値があるからこそ、実機ができてきたときに実際の数値とどれだけ乖離があるかなどを知ることができ、それをまた開発にフィードバックできます。排気系部品の予測精度はまだですが、重要なデータであることは確かです」と浮田は話してくれた。

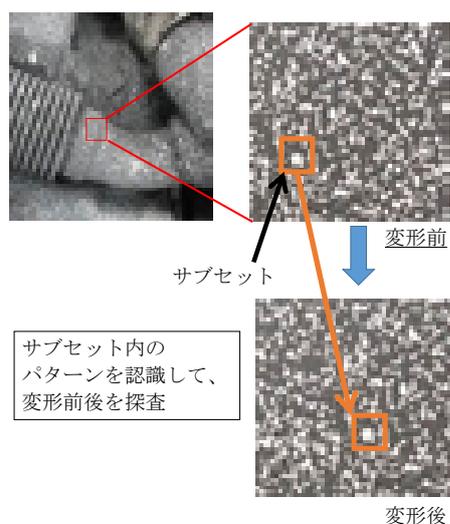
2019年頃から現象把握のための本格的な計測を開始した。ここで採用されたのが「デジタル画像相関法」という新しい技術だ。通常、高温部の熱疲労の実験には溶接型ひずみゲージを用いるが、ゲージ本体が大きく、小さな曲率部には設置不可能であるため、F33A-FTVでは非接触で微小変位を計測する手法にチャレンジした。その方法は、計測したい部品に白い点を塗布し、エンジンを回す。あらゆる運転状況をシミュレーションしつつ、2

井上 幸治

技術第一部



台のカメラでその白い点がどれくらい、どの方向に動いたかを撮影。



計測部品への白色塗布状況

撮影データを分析すると、各部の変位量分布を示してくれるのだ。その数値から締結部品間の相対滑りを把握できる。

井上(幸)は「デジタル画像相関法は、まだ一般的ではない特殊な技術。そのため、この技術を使いこなすオペレーターも少ないのが現状です。しかも今回の計測部位は、高温かつ振動も加わるため、さらに難易度が上がりました」と教えてくれた。

排気系部品の中でも最も厳しい条件下に置かれているのが「クロスオーバーパイプ」であることも、この技術で再確認した。クロスオーバーパイプはプライマリターボとセカンダリターボへ排気を流す役割を持つ。この部品はターボとシリンダヘッドに隣接している上、非常に狭いスペースに押し込められている。そのため、耐熱疲労性を確保することが大きな課題となっていた。デジタル画像相関法によって得たデータに基づいてCAEの精度を向上。クロスオーバーパイプの対策形状を導き出し、課題をクリアしていった。

このような熱対策への取り組みについて、印象に残っていることを聞いてみた。浮田はこう話し出す。

「F33A-FTVで適用したCAE手法においては、モデル構成部品が従来の直列4気筒エンジンに比べて約6倍に増え、1諸元の計算が1週間くらいかかるようになりました。そのため、計算方法の工夫に加えて、ITデジタル推進部に全社共有コンピュータの割り当てを増やしてもらうことで、1日程度で計算できるようになりました。開発期間が限られている中、さすがに計算1回で1週間も取

りませんからね」。

浮田にとって想定外の出来事であり、それが判明した当時は絶望しただろう。そんな中でも他部署の協力を迅速に得ることで、ピンチをクリアしていったことを考えると、デジタル的な支援がいかに重要なのかを思い知らされる。

「F33A-FTVの開発期間は短く、厳しかったにも関わらず、今回新たな計測方法にチャレンジしました。一般的に考えれば、時間がないのであれば、従来のやり方を踏襲する“守りの開発”をすると思うのですが、攻めの姿勢で臨んだことで、結果的に大きな成果を得ることができました」と井上(幸)は振り返る。浮田も開発を総括してこう話す。

「熱問題はホットインサイドのレイアウトを採用した時点で想定していましたが、やはり実際に取り組むと課題は多く、悩まされました。特にスペースが限られているので、クロスオーバーパイプに手を加えると他の部分にも影響してくる。周囲の部品にも配慮をしながら開発していく大切さをあらためて学びましたね」。

——NV対策

「ディーゼルとは思えないエンジン音だ」と驚きの声

「ディーゼルエンジンの特長とは何か？」と質問をすると、多くの人は「燃費がいい」、「低速トルクがある」と回答するだろう。同時に「ガラガラという不快な音がする」とネガティブな印象を持つ人もいる。では、そもそもディーゼルエンジンの「ガラガラ音」はなぜ発生するのだろうか。NV対策を担当した村井義之に聞いてみた。



村井 義之

技術第一部

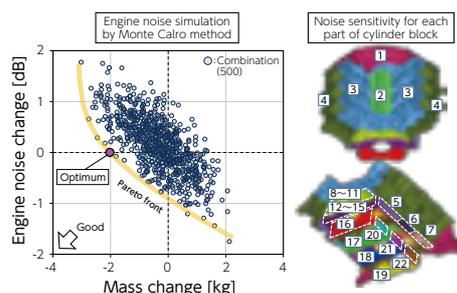
「ディーゼルエンジンはガソリンエンジンに比べて燃焼圧が高いので、そもそも大きな燃焼音がします。音が大きいだけでなく、ガラガラという特

有の音も気になりますよね。F33A-FTVのアイドルリングは600rpmに設定されていますが、アイドルリング状態では1秒間に30回爆発している計算になります。1秒間に30回も爆発していれば、普通は連続した音に聞こえ、あのようなガラガラという音にはならないはず。なぜなのか？ 詳しく検証していくと、大きく2つの原因があることがわかりました。1つはエンジンの向きによって聞き手に近い位置にある気筒の音がとりわけ大きく聞こえるという点。もう1つは、6気筒すべてがまったく同じ燃焼をしているわけではないので、しっかり燃えた気筒の音は大きく、そうでない気筒の音は小さく聞こえる。そのバラつきが、ガラガラという音となって聞こえることが判明したのです。

ディーゼルエンジン特有のガラガラ音は、単に爆発音が大きいという理由だけではないことは理解できた。では、この問題をどのように解決していったのだろうか。川浦は言う。

「まず各気筒における燃焼のバラつきを抑えるため、EGRガスを各気筒に均等に送り込むことを考えました。そもそもEGRガスは燃えにくいので、1気筒だけ多く入ってしまうとその分、燃焼も悪くなり、それが音のバラつきの原因になります」。

EGRガスを均等に分配できれば、各気筒の燃焼状態も揃い、音のバラつきも低減できるというわけだ。その他にもシリンダブロックに補強を加えて音を伝わりにくくするため「モンテカルロ法」を使った最適化も行った。



モンテカルロ法による軽量化と低騒音の両立

「モンテカルロ法とは、数値計算法の一つです。シリンダブロックを22の領域に細分化し、各部の形状を変化させてCAEで騒音解析を繰り返し、なるべく軽く、なるべく音が小さくなる形状の最適解を導き出しました」と村井は話す。

ただ、この手法はエンジンの軽量化と大きく関わってくる。基本的に各部に補強を入れていけば、音は静かになるが、それではエンジンがどんどん重くなってしまふ。軽く、しかも静かなエンジンを

実現するため、どのようにバランスを取っていくかが開発の肝となった。

もう一つ大きな取り組みとして「D-SPIA」と呼ばれる2段着火予混合燃焼を採用したことも大きな効果を発揮した。D-SPIAとは何だろうか。川浦はこう説明する。

「すす (PM) の発生を抑えるため、燃料噴射から着火するまでの時間を長く取り、均一に燃料を燃やす『予混合燃焼』という方法がありますが、燃焼音が悪化するデメリットがありました。そこで私たちは予混合燃焼を2分割し、2つの燃焼ピーク間隔を制御し、1回目の爆発と2回目の爆発で発生した音同士をぶつけて打ち消し合うようにしました。これによって、人がうるさいと感じる燃焼音の主成分1~2KHzの周波数帯を下げることができました」。

D-SPIAは1回目の噴射と2回目の噴射をする間隔がポイントだという。この間隔を運転状況に合わせてコントロールしていくことが重要。もしこの間隔を間違えると、打ち消し合うタイミングがずれ、より大きな燃焼音を発生させてしまうという。そのため、これまでの「マップ制御」に対し「モデルベース制御」という燃料噴射制御手法を採用。これも前例のない大きなチャレンジである。

「このようなさまざまな取り組みによって、高い静粛性を実現できたと思っています。後ろの人と会話するときも、わざわざ振り向いて大きめの声で話さなくてもいいレベルまで持っていくことができたと自負しています。これまで以上に車内で会話がしやすくなっていますよ」。

村井はうれしそうな顔で話してくれた。

「ちょっと上げさかもしれないですが、常識を覆した開発だと思います。基本的に軽いエンジンはうるさくなりがちなので。あとは音の質感をどのように作り込むかを学べた開発でした。いくら音量を下げても、ガラガラという音質は変わりませんからね。D-SPIAのおかげでディーゼルらしくない音質を実現できたと思っています」。

続けて川浦も言う。

「D-SPIAは開発後半から取り組んだので、それまでは関係者の試乗会をするたびに『うるさい』、『ランドクルーザーという高級車にふさわしくない』と散々な言われようでした。でも、D-SPIAを採用してから評価は一変。『ディーゼルとは思えないエンジン音だ』、『燃焼の切り替わりも気づかない』という意見が出て、手応えを感じました。音の面で

ディーゼルの常識を覆すことができましたね」と話してくれた。

——軽量化

これまで踏み込んだことのない領域まで追求し、答えを出す

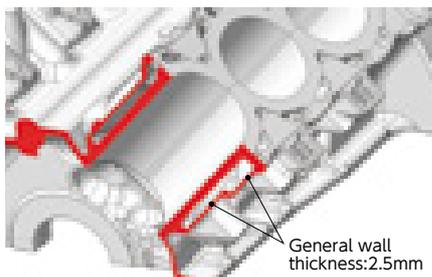
車両の軽量化に貢献するため、車両を構成するパーツの中で重量物であるエンジンのシェイプアップは避けて通れない。F33A-FTVは先代のV8からV6になっているため、それだけで-35kgの軽量化を実現しているが、さらなる軽量化を図るため、前項のNV対策で述べた「モンテカルロ法」を用い、軽量化できる部分を探っていった。そこで突き止めたものの一つが、エンジンの最重量部品であるシリンダブロックのウォータージャケット外壁である。先代エンジンの外壁は3.5mm厚だったが、鋳造部門での高強度鋳鉄材料の開発と薄肉化技術の確立により、2.5mm厚まで薄くすることができた。

山口 猛

技術第一部

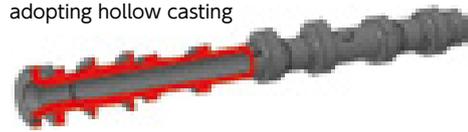


「クランクシャフトの中間ウェブをなくす『スプリットピン構造』も軽量化に貢献しました。他にもカムシャフトを中空化したり、ピストンやピストンピンの軽量化、燃料ポンプ駆動をギアからチェーン化するなどさまざまな部分にメスを入れ、結果的にエンジン全体で-62kgの軽量化に成功しました」と山口猛は話してくれた。

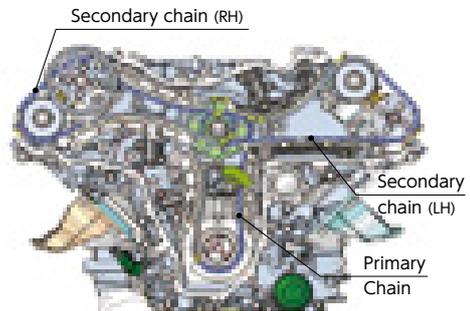


シリンダブロック

adopting hollow casting



カムシャフト



タイミングチェーンシステム

ただ、-62kgという驚異的な数値を実現した陰には、想像を絶する困難とそれを乗り越える飽くなき追求があった。その一例がクランクシャフトの焼き入れだ。

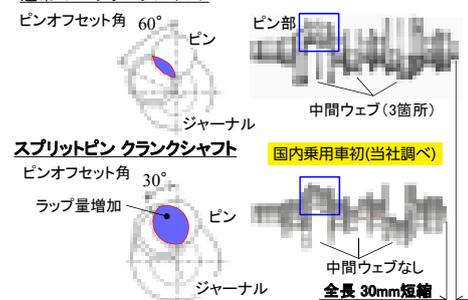
クランクシャフトは先述した通り、軽量化のために中間ウェブをなくしているが、その影響で強度を高めるための焼き入れが従来通りにいかなかった。その詳細について、生産技術部の浅野司はこう話す。

浅野 司

生産技術部



通常のV6クランクシャフト



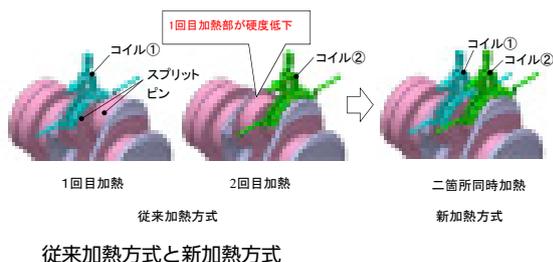
スプリットピンクランク形状

「クランクシャフトは強度を高めるために『高周波焼き入れ』という方法を採用しています。誘導加熱の原理を利用し、コイルに電流を流し、クランク

シャフトを加熱して焼き入れするのですが、今回のクランクシャフトは中間ウェブがないため、加熱され過ぎて表面が溶けてしまうという現象が起きました。溶けないように電流を弱めると、今度は焼き入れが不十分になります」。

浅野(司)は電流を弱める、加熱時間を変える、予熱による温度の急上昇を抑える、コイルの形状を変える、周波数を下げるなど、思いつく限りの方法を試したが、すべて徒労に終わった。

「従来のクランクシャフトは、焼き入れしたい部分にコイルを当て、1カ所ずつ順番に実施できました。しかし、今回のクランクシャフトは中間ウェブを介さず、ピンとピンが直接つながっているのです。1カ所を焼き入れした後、隣の焼き入れ部を加熱すると、1回目に焼き入れした部分にも熱が伝わって再加熱されてしまい、硬度が低下してしまうのです。そのため、2つのコイルで2カ所を同時に加熱する必要がありますが、この同時加熱の前提もまた、今回の焼き入れを難しくしていました」。



「従来の延長線上の対策では解決できない」。そう考え、一度、原点に立ち戻った。焼き入れ時にコイルによる磁場や磁束がどのように発生しているのかを、(株)豊田中央研究所などの協力を仰ぎ、解析してみることにしたのだ。

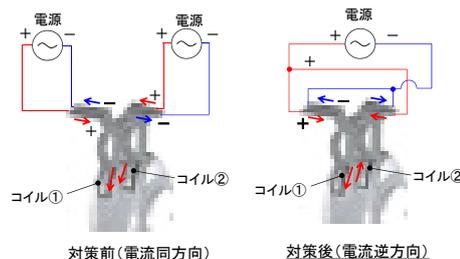
その結果、ピンとピンのつながっている部分に顕著な温度上昇が確認された。これを見て、2つのコイルから発生する磁束が干渉し、増大することで過加熱を起こし、クランクシャフトを溶かしているのではないかと考えた。



品質不良発生部位

「この仮説を確かめるため、1つの電源で2つのコイルに流す電流方向を逆向きにしたのです。つまり磁束がお互いに弱め合う方向に持っていったのです」。

仮説は正解だった。実際に検証してみると過加熱を起こしていたピンとピンのつなぎ目の温度上昇が抑えられており、溶けることなく焼き入れ深度も十分に確保できていることが判明。焼き入れ管理の難易度も量産レベルまで下げることができた。



対策前後のコイル電流方向

「ドツと肩の荷が下りた思いでした。これまでの焼き入れ工程整備では、対策の方向性の予測が付いたんですが、今回はまったく予測がつかない手探りの状態で正解を見つけていったので、それはもう大変でした。だからこそ、解決したときの達成感は大きかったですね。これまでやってこなかった深い領域まで踏み込んで仕事できたのは、初めての経験。私自身、大きく成長できたと思っています」。浅野(司)は感慨深く語ってくれた。

クランクシャフトができなければ、エンジンは回らない。エンジンが回らなければ、その後に控えている工程を待たせてしまうことになる。そんな重圧と戦いながら、見事に結果を出してみせた。

「先代からですが、エンジンの主要な重量部品を、設計から製造まで一貫して内製できているところが大きいですね。 casting・生技・製造・品保部門と意見をぶつけながら、軽量化を追求しつつも、作りやすさと品質を兼ね備えた部品を、一体となって作り上げていくマインドが根付いていると思います」と山口も語ってくれた。

ランドクルーザーへの 強い想いを实感した車両適合



Takashi Inoue

車両開発において後半に行われる

「車両適合(以下、適合)」と呼ばれる工程がある。

今回の場合は、当社が開発したエンジンを最終製品である車両に搭載し、お客様の使われ方を想定した走り方をすることで、その性能を検証。

より良くするための課題を抽出していく工程である。

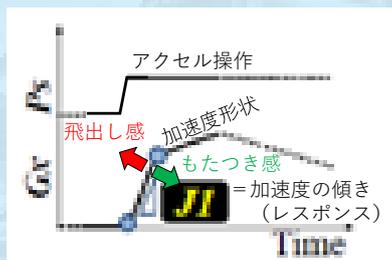
今回の適合ではどのようなことをしたのだろうか。

走って気持ちがいい 理想的なレスポンスを実現せよ!

今回の適合で、私は車両で走行して得たデータをエンジン開発にフィードバックする役割を果たしました。国内だけでなくメイン市場となるオーストラリアや中近東での適合に参加した部署にも、エンジンデータを取得してもらい、そのデータを入手。有効活用しました。

エンジンの評価はハード・ソフトの進化によって、ベンチテストでもエンジン過渡の挙動などを再現できるようになりつつありますが、実車に載せた状態まで正確に再現できません。これは今後、取り組むべき課題だと認識しています。

F33A-FTVは先代のエンジンに比べ、気持ちの良い加速感を重視しています。そのため、エンジン単体だけでなく、ターボやATなどのマッチングも重要。全開加速においては、先述した等加速度感線元にしたつくり込みをしていきました。ただ、一般のユーザーの使い方として、アクセル全開で加速させるシーンはそれほどあるわけではありません。そのため、一般道などの走行をターゲットとし、アクセルを少し踏み込んだときに、エンジンがどのような反応(レスポンス)をするのかに注力しました。レスポンスが速すぎると、クルマが急加速する恐怖感を与えてしまいますし、レスポンスが遅すぎると、走らないなあと不満を覚えてしまいます。アクセル開度とレスポンスのちょうどいいラインは、何度も関係者と乗り合わせを実施して評価していきました。企画時に導き出した目標ラインを目指し、それをいかに達成するかが私たちの腕の見せ所です。ターボの味付けやATについても、ちょうどいいところで変速できるプログラムを組めるよう、3者が一緒になって開発を進めていったのが印象に残っています。



車両加速性能比較

コロナ禍で生まれた新しい適合の形

適合で苦労したのは、やはり新型コロナウイルス感染症の影響です。特に海外での適合はメイン市場であるオーストラリアに、当社メンバーは一度も行くことができませんでした。そのため、オーストラリアに車両を送り、現地のスタッフに適合を指示し、データを採取してもらいました。そのデータを見ながら「次はこんな走り方をしてほしい」と要望を出し、再び走行してもらってデータを取る……。そんな繰り返しでした。メンバーたちは現地で体感できなかったものの、リモートによる打ち合わせや車両を走行させるときに、カメラで撮影したテストドライバーのコメント付き映像をリアルタイムに見ながら検証するという新しい開発手法を手に入れることができました。オフロード走行においては、ドローンを飛ばし、クルマの挙動を車外から撮影し、エンジントルクをどのようにコントロールしたらよいかを検証。その様子もリアルタイムに体験できました。このような方法は従来にはなかったので、とても新鮮でしたね。

F33A-FTVの適合はトヨタ自動車をはじめ、関係部署全員がランドクルーザーにける強い想いを再確認できた経験でした。

適合はお客様に提供する最終製品の形で行うため、私たちの仕事でそのクルマの評価が決まる最後の工程と言えます。そんなユーザーに近いところで仕事ができたと誇りに思っています。

——開発を終えて

ディーゼルエンジンの新規開発
未来に馳せる
“エンジン屋”たちの思い

新型ランドクルーザーのディーゼルエンジンは、2016年からの先行開発を経て2021年、無事に完成を迎えた。このような人気車種の心臓部を開発できたことに対し、いま一度、開発メンバーにそれぞれの想いを語ってもらおう。

「現代において内燃機関を新規で開発できるのは、非常にまれなことで、そのチャンスをいただけたことに感謝しています。今回の開発を一言で言うと『変えるためのチャレンジがしやすかった開発』と言えます。というのも、既存のエンジンの改良だと設計上、制約が出てきて、変えたくても変えられないジレンマが起きてしまいます。しかし、新規開発であれば、変えることに躊躇する必要はありません。モンテカルロ法を試すことができたのも、新規開発だからこそ、挑戦できたことです」。

村井はそのように語ってくれた。

メンバーたちはディーゼルエンジンをまったくの新規開発として取り組めたことに大きな誇りを抱いているようだ。ただ、現在の自動車業界は電動化に追い風が吹き、内燃機関に厳しい情勢であることは確かだ。このような流れに対し、生粋の“エンジン屋”である開発メンバーは内燃機関の行く末をどのように考えているのだろうか。井上(崇)が口を開く。

「確かに先進国では電動化の風潮です。電動車には内燃機関車にない利点が数多くあり、私たちもそれは十分に理解しています。でも、世界に目を向けるとインフラが整備されておらず、内燃機関を必要としている地域がまだまだあります。ましてやこのランドクルーザーは『どこへでも行き、必ず生きて帰ってこられるクルマ』です。電動車がこのテーマを叶えられるようにならないと、内燃機関に置き換わるのは難しいと思いますね」。

「電動車と内燃機関車って『電動車＝温室効果ガスを出さない』、『内燃機関車＝温室効果ガスを出す』という二極で語られている気がするんです。しかし、内燃機関でも水素エンジンやeフューエルと呼ばれるカーボンニュートラル燃料などの開発も進んでいます。つまりカーボンニュートラルは

内燃機関でも達成できる可能性は充分あると思うんですよね」と村井は言う。

「電動化が進んでも、必要とする人がいる以上、内燃機関はなくならないし、必要とする人たちのニーズをくみ取り、改良しつづけていかなければならないと思っています」と川浦も語気を強める。

「時代の波を考えれば、ディーゼルエンジンを新規開発できるのは、これが最後かもしれないです。F33A-FTVはまだ生まれたばかり。これから10年、20年、30年と提供しつづけられれば幸せですが、そのためには必要な改良を地道に継続していかなければなりません。電動化、ディーゼルエンジンとカーボンニュートラル燃料の組み合わせなど、選択肢は多いです。まだまだ内燃機関に可能性を抱く一方、カーボンニュートラルに対する世の中の流れは非常に速いため、これからの3～5年をいかに過ごすかが重要。これまでの考え方、仕事のやり方も革新していく必要があると思っています」。

浅野(智)はこれからの内燃機関、そしてこれからのエンジン事業部についての私見を述べ、そう締めくくった。

**約5年にわたるエンジン開発は、
関わるすべての部署が同じ方向を向き、
協力しなければ成し得ることはできない。
燃費を1%でも伸ばそう。**

1gでも軽いエンジンにしよう。

**そんな食欲に前に進む気持ちを支えるのは、
これまで数々のエンジンをつくりつづけてきた
彼らのプライドに違いない。**

F33A-FTVは生まれたばかりである。

**このエンジンが今後どのように
ブラッシュアップされていくのか
期待せずにはられない。**

**2022年、F33A-FTVは、
第72回自動車技術会賞において
「技術開発賞」を受賞
(トヨタ自動車との共同受賞)した。**

TREND

N700S新幹線車両のSiC素子を適用した駆動システム

SiC-applied Traction System for N700S Shinkansen High Speed Train

東海旅客鉄道株式会社
総合技術本部 技術開発部



佐藤 賢司
Kenji Sato



濱島 豊和
Toyokazu Hamajima

はじめに

鉄道は自動車と同様に、身近な交通機関として人々の生活に不可欠な存在となっている。今年、1872年(明治5年)10月14日に日本初の鉄道が新橋～横浜間に開業して150年を記念する年である。また、新幹線の高速化を象徴する「のぞみ」も誕生から30年の節目を迎えた。東海道新幹線は、東京オリンピックの年である1964年に営業運転を開始し、東京、名古屋、大阪の3大都市圏を結ぶ輸送の大動脈として、現在も日本の経済を支えている。

新幹線車両は、第1世代の0系から2020年7月に営業デビューしたN700Sに至るまで、車体や床下機器の小型・軽量化を進め、その生み出したスペースと重量を活用し、速度向上、到達時分の短縮や車両性能向上、旅客サービスの充実、省エネルギー化の推進など、大幅な進化を遂げてきた。特に、架線から電気を取り入れ、主変圧器、主変換装置によって駆動用のモータを制御する駆動システムは、最新のパワーエレクトロニクス技術を取り入れることによって改良が重ねられた。

本稿では、まず、東海道新幹線の駆動システムの変遷を振り返り、高速鉄道としては世界で初めてSiC素子を適用し、小型・軽量化を追求したN700Sの駆動システム開発について述べる。さらに、小型・軽量化がもたらした車両の機能向上や省エネルギーへの寄与について紹介する。

駆動システムの変遷

鉄道車両の駆動システムは車両の床下に搭載され、架線から取り入れた電気を動力に変換して車輪を回転させる役割を担っている。図1に、現在の新幹線車両(300系以降の車両)の代表的な駆動システムの構成を示す。東海道新幹線の架線電圧は交流60Hz、25kVであり、これをパンタグラフから取り入れ、主変圧器で降圧する。さらに、主変換装置(PWMコンバータ・インバータ方式でCIと略す)のコンバータで一旦、直流に変換し、さらに、インバータで周波数と電圧を

調整した3相交流に変換することで、台車に搭載されている駆動用モータを制御している。

東海道新幹線の駆動システムは、パワーエレクトロニクス技術を取り入れて発展してきた。表1にその変遷を示す。300系からは小型・軽量化のため、駆動用のモータを誘導電動機に変更し、主変換装置(CI)はGTOサイリスタによるPWMコンバータ・インバータ方式とした。同時に、交流回生ブレーキを開発し、発電ブレーキの抵抗器を廃止している。主変換装置による誘導電動機駆動および交流回生システムは、これ以降の新幹線の標準となっている。700系では電流駆動のGTO素子に変えて、電圧駆動のIGBT素子を適用した。その後、N700系およびN700Aでは低損失IGBTを用いて走行風冷却方式の主変換装置を開発したことにより素子冷却用のブローアを廃止し、大幅な小型・軽量化を実現した(図2)。

これらの開発を踏まえ、N700Sでは、さらなる小型・軽量化を目指し、新型パワー半導体であるSiC(silicon carbide:炭化ケイ素)素子の効果を最大化するため、走行風冷却方式の主変換装置(ブローレスCI)と組み合わせ、駆動用モータを含めたシステム全体での開発を行った。

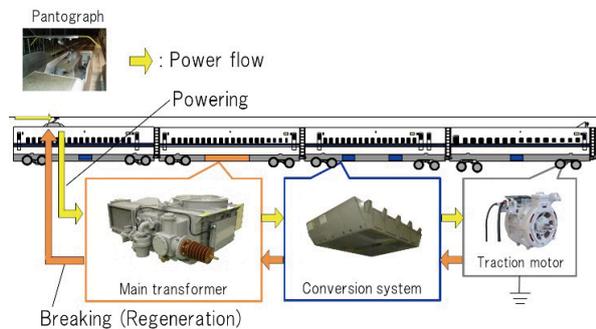


図1 新幹線車両の代表的な駆動システムの構成

表1 東海道新幹線車両の駆動システムの変遷

| Type | Series 0 | Series 100 | Series 300 | Series 700 | Series N700 N700A | N700S |
|-------------------|-----------------------------------|--------------------------------|----------------------------|------------|--|--------------|
| Year | 1964 | 1985 | 1992 | 1999 | 2007 | 2020 (2018)* |
| Power device | Diode | Thyristor | GTO thyristor | IGBT | Low-loss IGBT | SiC device |
| Control system | Tap changer control | Thyristor-driven phase control | PWM converter and inverter | | | |
| Cooling system | Forced ventilation cooling system | | | | Blowerless cooling system (Train draft cooling system) | |
| Traction motor | DC motor | | 3-phase induction motor | | | |
| | | | 4-pole | | 6-pole | |
| Electric breaking | Rheostatic braking | | Regenerative breaking | | | |

* N700S validation test train, or the prototype train, started running tests.

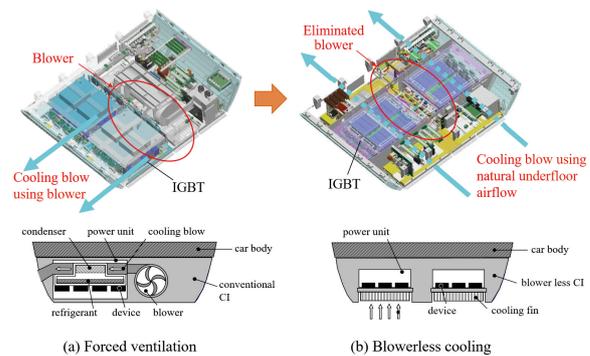


図2 走行風冷却方式の主変換装置(ブローレスCI)

SiC素子を適用した N700Sの駆動システムの特徴

N700Sの駆動システムの開発では、SiC素子の低損失、高耐圧、高温動作等の長を走行風冷却方式の主変換装置と組み合わせたことで、駆動システム全体(主変換装置と駆動用モータ)のさらなる小型・軽量化を目指すことを開発のキーポイントとした(図3)^[1]。

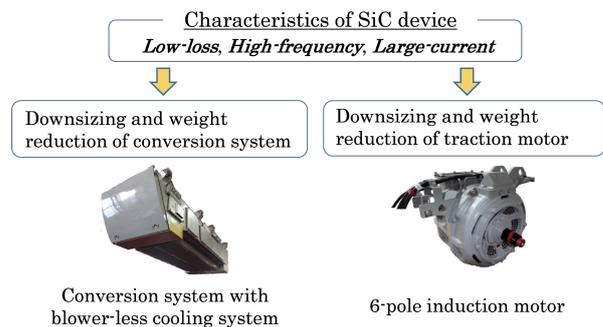


図3 N700S駆動システムの開発コンセプト

▶ SiC素子を適用した主変換装置

新幹線の主変換装置は、図4に示すようにPWMコンバータとPWMインバータで構成されていて、N700Sでは、走行風冷却方式の主変換装置のコンバータとインバータ両方にSiC素子を適用している。SiC素子のモジュールは、IGBTとSiC-SBDの組み合わせ(ハイブリッドSiC)と、SiC-MOSFETとSiC-SBDの組み合わせ(フルSiC)の2種類が一般的だが、開発ではそれぞれの素子のモジュールを使用した試作機を製作し、各種試験を行った。走行風冷却方式は発熱源である半導体素子を冷却体の上に載せ、冷却体下部より冷却フィンが突き出す構造であり、冷却フィンに走行風を当てることで半導体素子を冷却する。SiC素子を

適用することにより熱損失を低減することができ、この冷却体を小型・軽量化することができた(図5)。図6、7は、今回検討した駆動システムの回路である。

試験結果をもとにした熱損失のシミュレーションによりIGBTとSiC素子の熱損失を比較したところ、約30%低減されることがわかった。また、フルSiCではより熱損失が小さく、冷却体のさらなる軽量化が可能であることが確認できた。N700Sの営業車ではハイブリッドSiCとフルSiCの2種類の主変換装置を採用し、主変圧器が搭載された重量が大きい車両にフルSiCを使用している主変換装置を搭載した。

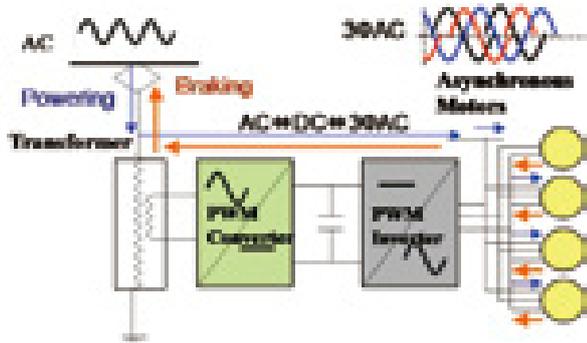


図4 主変換装置の構成



図5 N700Sの主変換装置

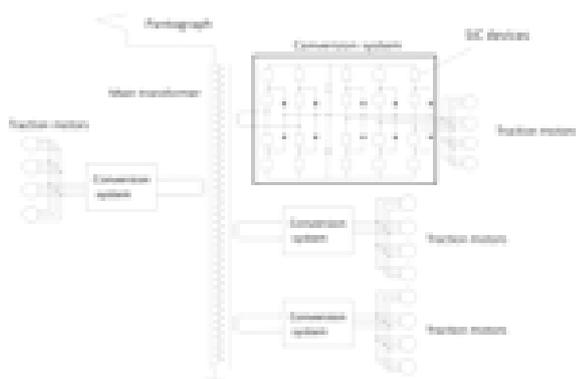


図6 N700Sの駆動システムの回路

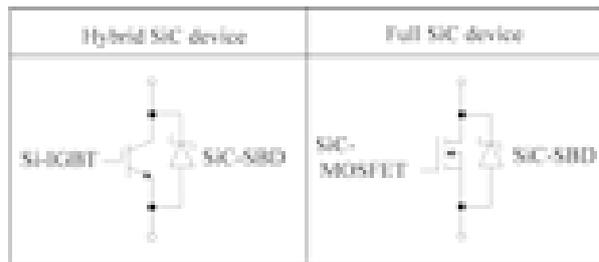


図7 ハイブリッドSiCとフルSiC

▶ 小型・軽量の駆動用モータ

SiC素子を主変換装置に適用することによって、電流を大きく、周波数を高く設定できるようになり、駆動用モータの設計の自由度が大幅に広がった。今回の開発では、300系以来4極であった極数を6極に変更した。極数を増やすと、各極あたりの磁気回路を小さくすることができ、一次側の鉄心の容量を削減することができる(図8)。加えて、固定子コイルのループ長が、4極より短くできるので、コイルエンド部の縮小が可能となり、コイル導体量および軸方向寸法が低減可能となった。

また、回転子については、磁界シミュレーションを行い、構造を変更した。回転子バー付近の鉄心はトルクを発生させる磁気回路として必要だが、バーから離れた内径側の鉄心は磁束密度が小さくなり、トルクに寄与しない。従来は、この部分に複数の丸穴を空けることで、通風と軽量化を行ってきたが、今回さらなる軽量化のため、台形穴を空け、磁気回路に寄与する回転子バーの近傍を厚くすることとした(図9)。

さらに、モータの特性を磁気装荷型から電気装荷型に変更した。周波数に対する電圧の傾き(V/f)を小さくし、鉄心、巻き線の軽量化を狙いつつ、停動トルク余裕率を確保する特性を検討した。このように最適なV/fを選択できたのは、SiC素子の電流特性の効果である。

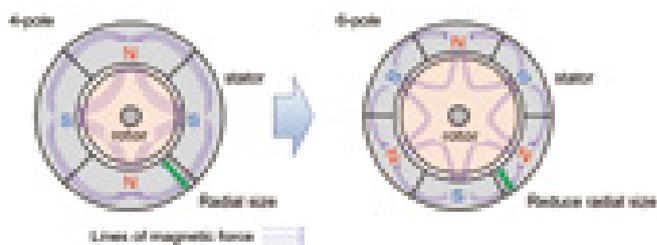


図8 小型・軽量の駆動モータのコンセプト



図9 回転子の新構造

小型・軽量化がもたらした効果

図10は、小型・軽量化の効果をまとめたものである。N700Sの主変換装置の幅は、N700系の半分になった。また、駆動モータの軸方向の長さは10%短くなった。駆動システム全体では、N700と比較して20%軽量化された。

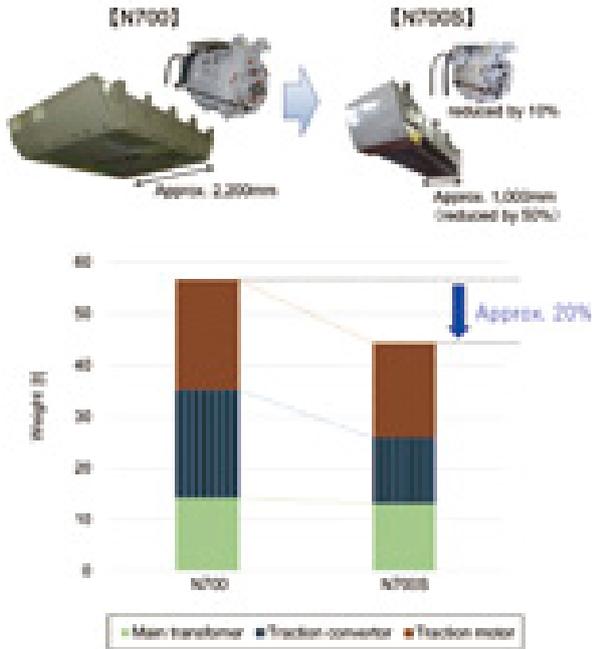


図10 小型・軽量化の効果

▶ 標準車両の実現

この小型・軽量化により、図11に示すように、床下機器配置のレイアウト設計の自由度を高めることができた。N700Aの主変換装置は、主変圧器を搭載した車両に搭載できるほど小さくないため別の車両に搭載されている。したがって、車両間を渡って主変圧器から主変換装置を介してモータへ接続する配線が必要となる。このように、異なる車両に主変圧器と主変換装置を別々に搭載すると、床下レイアウトの設計の自由

度が制限される。

SiC素子を採用した駆動システムは、小型で軽量なため、主変圧器と主変換装置を同じ車両に搭載でき、この問題を解決することができた。これらの柔軟性により、基本の16両編成の列車とは異なる構成の列車(例:8両編成または12両編成)を効率的に再設計できるようになった(「標準車両」と呼んでいる)。このコンセプトは、国内外で新幹線を展開する際に役立つことが期待されていて、九州新幹線の西九州ルート(長崎～武雄温泉)に6両編成のN700Sを導入する際にも活用された。

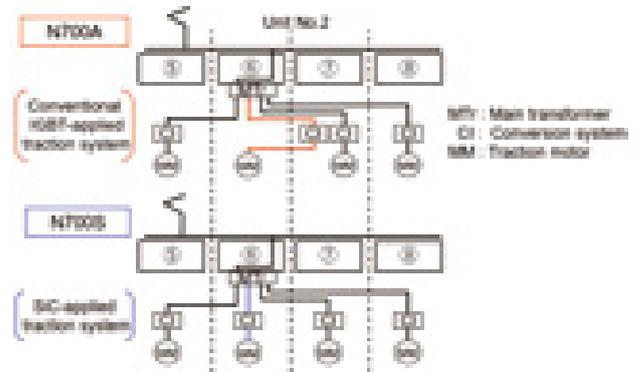


図11 標準車両のコンセプト

▶ バッテリー自走システムの実現

N700Sでは、駆動システムの小型・軽量化で生まれたスペースと重量余裕を旅客サービスの向上にも活用している。

長時間の停電が発生したときに、車両に搭載したバッテリーにより30km/h以下の低速で自走し、乗客を安全な場所に移動できるバッテリー自走システムを開発して、導入した(図12)^[2,3]。開発では、駆動システムの基本構成を変更しないことや、バッテリーの種類や、安全性と信頼性を確保するための保護機能等を考慮した。

図13に、バッテリー自走システムの簡略回路図を示す。リチウムイオンバッテリーを使用したバッテリーユニット、接触器、コントロールユニットで構成されていて、通常モードでは、バッテリーは補助回路によって充電される。自走モードでは、バッテリーユニットのDC750Vが、主変換装置のDCリンク(通常モードではDC3000V)に接続されることで、インバータに電力を供給して駆動用モータを制御する。

N700Sは、16両編成に8台のバッテリー自走システムを搭載し、東京から新大阪までの全てのトンネルや橋梁から脱出することができる。なお、リチウムイオンバッテリーを使用したバッテリー自走システムは、世界の高速鉄道では、N700Sが初めてである。



図12 バッテリー自走システム

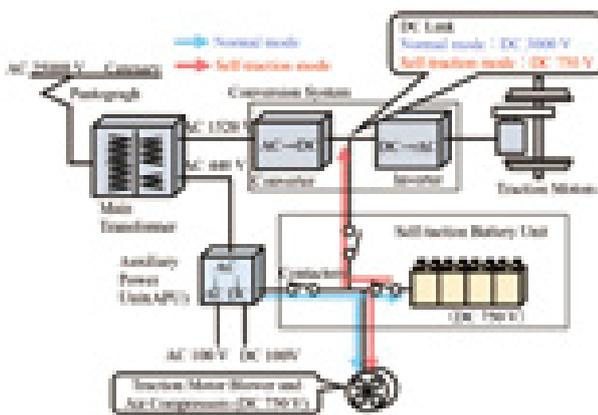


図13 バッテリー自走システムの回路

省エネルギーの推進

東海道新幹線では、省エネ車両の開発・導入により、省エネを積極的に推進している^[4]。N700Sは、走行抵抗の低減、列車の軽量化、およびSiC素子適用による効率の向上により、エネルギー消費を改善した。駆動システムの軽量化は、台車カバーなどの車体を平滑化する走行抵抗低減策を導入するための軽量化に貢献している。

図14に消費電力の比較を示す。N700Sでは、SiC素子を適用した駆動システム、軽量の車体、空気抵抗の低減、その他の機能により、N700Aと比較してエネルギー消費をさらに6%削減した。

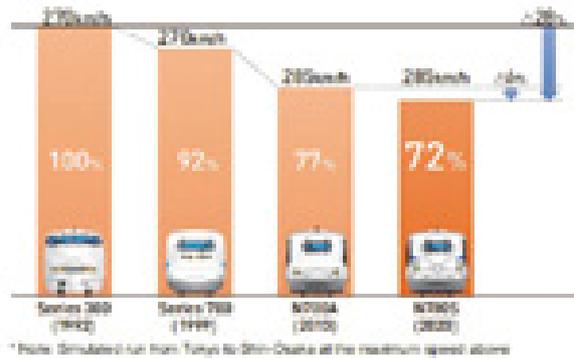


図14 N700Sによる省エネルギーの推進

まとめ

最新の新幹線車両であるN700Sでは、SiC素子と走行風冷却方式の主変換装置および6極誘導電動機を組み合わせることで、SiC素子のメリットを効果的に活用し、小型・軽量化を図った。さらに、この効果により、車両の床下機器のレイアウト設計の自由度が高まり、「標準車両」を実現した。また、「自然災害等の非常時バッテリー自走システムの搭載が可能となった。

コロナの影響が一日も早く収束し、より多くの方々へ東海道新幹線をご利用いただけることを願いつつ、安全、安定輸送とサービス向上に邁進していく所存である。また、本開発が、国内外の鉄道におけるパワーエレクトロニクス技術の発展に寄与できれば幸いである。

参考文献

- [1] K. Sato, H. Kato, T. Fukushima: "Development of SiC Applied Traction System for Shinkansen High-speed Train", Proc. of The 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Nigata), pp.3478-3483 (2018)
- [2] 小田 耕太郎, 佐藤 賢司, 加藤 宏和, 福島 隆文, 瀬尾 哲平, 山崎 実: 「N700Sバッテリー自走システムの開発について」, 日本機械学会第28回 交通・物流部門大会講演論文集 (2019)
- [3] K. Sato, H. Kato, T. Fukushima: "Outstanding Technical Features of Traction System in N700S Shinkansen New Generation Standardized High Speed Train", IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol.10, No.4, pp.402-410 (2021)
- [4] JR東海アニュアルレポート 2019, p.18,33

製品技術紹介



Product Technology

- P.46 バイポーラ型NiMH電池の開発
- P.52 新型NOAH/VOXY HEV向け DC-DCコンバータの開発
- P.57 bZ4X向け6.6kW車載充電器・DC-DCコンバーター一体ユニットの開発
- P.62 電動コンプレッサ ESHシリーズの開発
- P.67 フォークリフト向け第2世代燃料電池システムの開発
- P.72 New Traigo80 2.0-3.5 ton Electric Counterbalance Forklift
- P.77 商用車向けターボチャージャーの開発

バイポーラ型NiMH電池の開発 Development of Ni Metal Hydride Bipolar Battery

中條 祐貴^{*1} 吉田 憲史^{*1} 小竹 広和^{*1} 田丸 耕二郎^{*1} 宗 真平^{*1} 河野 聡^{*1}
 Yuki Chujo Norifumi Yoshida Hirokazu Kotake Kojiro Tamaru Shimpei Mune Satoshi Kono

*1 電池事業室 技術部

要旨

カーボンニュートラルの実現に向けて拡大傾向にある電動車市場において、当面電動車の中心はHybrid Electric Vehicle (以下、HEV)とされている。そこで、これまでの使用実績があるNi Metal Hydride (NiMH) 電池に着目し、駆動用車載用電池としては世界初(当社調べ)となるバイポーラ型構造を適用することによって、従来型NiMH電池に対し出力特性をブレークスルーすることにチャレンジした。バイポーラ型構造により部品点数が少なくなり、体格をコンパクト化することでより多くのセルを搭載することが可能となる。また、通電面積が広くシンプルな構造になるため、電池内抵抗が小さく、大電流を一気に流せるため、従来型NiMH電池に対し出力比2倍を実現した。本稿では、このバイポーラ型NiMH電池の概要と要素技術を、開発の進め方を交えて紹介する。

キーワード: 電動車、電池、バイポーラ、高出力

Abstract

In the electric vehicle market, which is expanding toward the realization of carbon neutrality, hybrid electric vehicle (HEV) is considered to be the center of the electric vehicle market for the time being. We focused on Ni Metal Hydride (NiMH), which has a proven track record in use and developed the world's first bipolar NiMH battery (according to our own research) as a drive-use automotive battery, breaking through the output. The bipolar structure reduces the number of parts, and the compact body size allows more cells to be installed. In addition, the large current-carrying area and simple structure of the bipolar NiMH battery results in low internal resistance, allowing a large current to flow all at once, doubling the output ratio compared to conventional NiMH batteries. This paper presents an overview of this bipolar battery and its elemental technologies, along with the development process.

Keywords: Electric vehicles, Batteries, Bipolar, High power

1 はじめに

カーボンニュートラルの実現に向けて、電動車市場は拡大傾向にある。Battery Electric Vehicle (以下、BEV) の拡大は顕著ではあるが、当面電動車の中心はHEVとされている(図1)。トヨタ自動車(株)も電動車のフルラインアップ化を推進しており今後もHEV市場の拡大が見込まれる。そのため、2020年からHEV用電池の需要拡大が見込まれていた。

また、車両の特性に応じてLithium Ion Battery (LIB)、NiMHの2種類の電池で対応する方針を取っていたため、電池事業室としては、HEVで長く使用実績があるNiMHに着目し、従来型NiMH電池の出力特性をブレークスルーする電池を開発することで、電池事業に参入することを考えた。

本稿では、トヨタ自動車(株)との共同開発により新型アクアに搭載した、駆動用車載用電池としては世界初(当社調べ)となるバイポーラ型NiMH電池(図2)の概要とその要素技術、開発の進め方について紹介する。

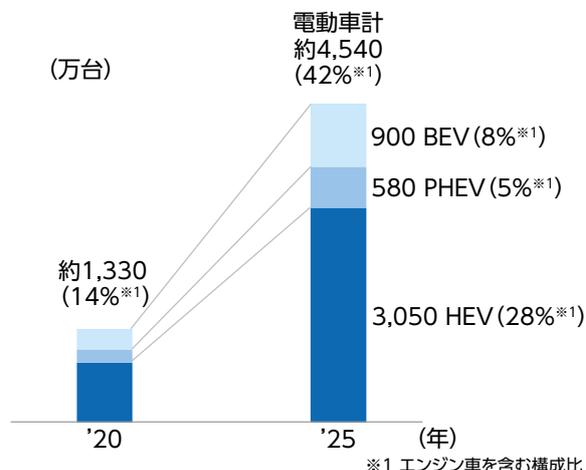


図1 電動車市場の動向^[1]
Fig.1 Trends in the electric vehicle market^[1]



図2 バイポーラ型NiMH電池と搭載車両
Fig.2 NiMH bipolar battery and equipped vehicle

2 電池事業室の開発の進め方

電池事業室では前身の研究開発センターであった2007年当時から、来るべき電動化の時流に先んずるべく「電池開発」をスタートさせた。

電池メーカーとしては後発であるため、以下3点を武器に原理原則に基づいた開発の進め方を行うことで競争力のある電池の開発を可能とした(図3)。

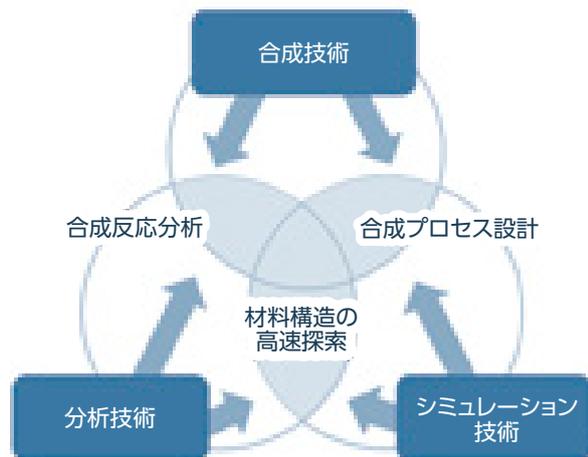


図3 電池事業室の開発手法
Fig.3 Development method of Battery Dev

1) シミュレーション技術

革新的な電池開発のため、独自のプログラミングで、原子・分子～電池セルレベルまでシームレスに繋ぐシミュレーション技術を開発することによって、電池設計および製造プロセス設計手法を構築した。

また、ソフトとハードの専門知識を併せ持つことで、スパコン(京、富岳、Oakbridge)やワークステーション等、複数の計算資源を使用可能な環境を構築し、解析ツールの特長に合わせた使い分けによって計算効率を最大化した。

2) 合成技術

電極材料の合成設備、表面処理設備、および必要なインフラを自社内に導入し、原理検証を独自に進めることで、バイポーラ型構造に必要な不可欠な機能だけでなく、高出力、高耐久を兼ね備えた電極材料の開発を実現した。

3) 分析技術

X線回折装置、分光分析装置などの分析装置、および測定治具をカスタマイズし、In-situ(その場観

察)により電池駆動時の電極、材料の状態を直接捉える技術を独自に開発した。また、スペクトルシミュレーションを活用したデータ分析技術や、電池内の環境を模擬した材料単体での電気化学分析技術を確立することで、電池内の発現事象を原子レベルで紐解くことが可能となった。

これら3つの技術を一体となって使用することで、迅速で手戻りのない開発を実施し、性能向上を行うだけでなく短納期開発を実施した。

3 開発目標と設計コンセプト

3.1 開発の狙い

従来型アクアのNiMH電池に比べバッテリー出力2倍を目標に設定した(図4)。

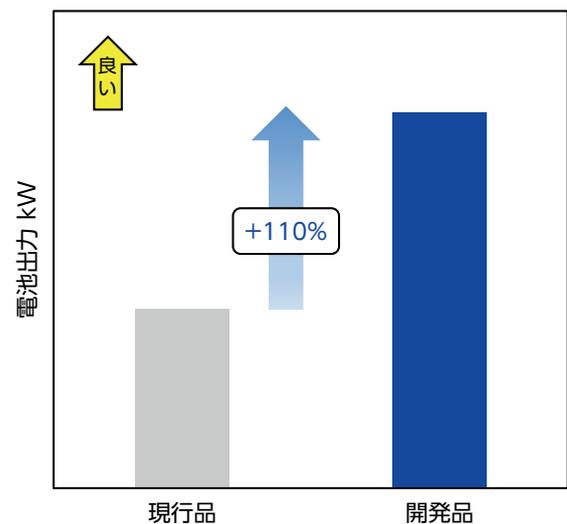


図4 電池出力特性
Fig.4 Battery output characteristics

3.2 バイポーラ型構造の設計コンセプト

一般的なNiMH電池が正極・負極ともに同質材(ニッケル)の集電体を使用していることに着目し、正極・負極で集電体を共有できるバイポーラ型構造を着想した。バイポーラ型構造は、バイポーラ(双極)という名称のとおり、集電体を正極・負極で共有でき、部品点数を少なくすることで電池のコンパクト化を実現し、多くのセルを搭載することが可能となる。また、通電面積が広くシンプルな構造になるため、電池内抵抗が小さく、大電流を一気に流すことができ、従来品よりも高出力化が見込める。

図5に従来構造(モノポーラ型構造)とバイポーラ型構造の比較を示す。モノポーラ型構造では、正極・負極それぞれを塗った集電箔と集電板を溶接することで1つの電池セルを作る。できたセル毎にケースへ収納し、隣り合う集電板同士を溶接していくことで電池を直列化しているため、通電部品に電流集中し電気抵抗が大きくなる。一方、バイポーラ型構造は、1枚の集電箔の表裏に正極・負極と別々の材料を塗り、積み上げることでセルを作るため、集電板等の通電部品やケースをなくすことで1セル当たりの部品点数を大幅に削減することができ、体格をコンパクトにできる。また、1枚の集電箔に機能を集約し通電部品レスでモジュール化でき、集電箔全面で通電するため電気抵抗を小さくすることができる。

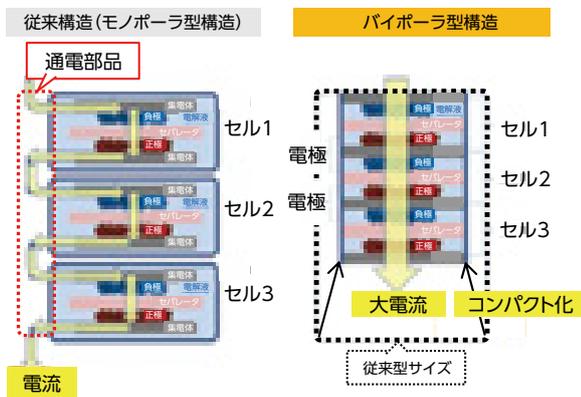


図5 従来構造とバイポーラ型構造の比較
Fig.5 Comparison of conventional structure and bipolar structure

4 要素技術開発

4.1 開発した要素技術

図6に今回の新型電池で開発した要素技術をまとめる。本項では特にバイポーラ型構造特有の課題を解決したシーリング技術、正極材料について紹介する。

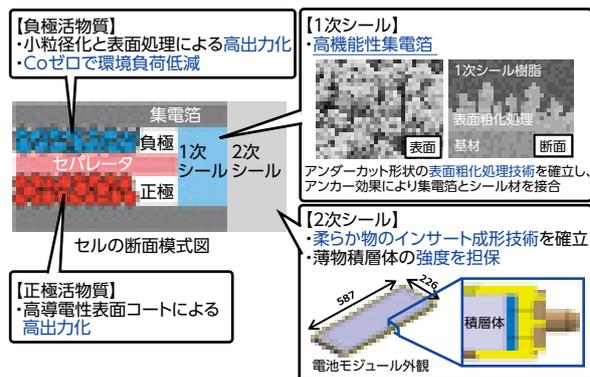


図6 バイポーラ型NiMH電池の要素技術
Fig.6 Elemental technologies for bipolar NiMH batteries

4.2 シーリング技術

4.2.1 高機能性集電箔の開発

NiMH電池ではアルカリ性電解液の外部への漏液やセル同士の液絡を防止するためにシーリングを施す技術が必要となる。従来構造では電池セルの集電端子部にOリングシールを施していたが、バイポーラ型構造では集電箔外周部を全周シーリングする必要があることから、金属・樹脂の異種材料を接合する1次シールと、1次シールを施した集電箔を積み重ねた積層体外周部にシーリングを施す2次シールの2回に分けたシーリング技術を確立した。

1次シールでは、アルカリ性電解液を使用する電池特有の現象であり電解液が駆動力を持って集電箔上を這い上がるアルカリクリープ現象(図7)に耐え得る接合強度が必要となるが、化学結合による接合では金属・樹脂界面にアルカリ性電解液が浸入するためシール性を維持することができない。そこで、金属と樹脂を機械的に接合するために集電箔の表面を粗して凹凸のアンカー効果による接着効果を付与する表面粗化処理技術を見出した。

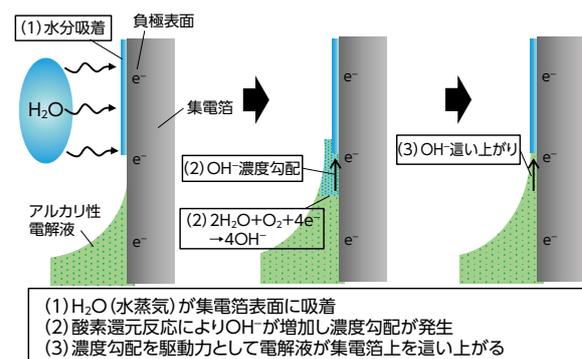


図7 アルカリクリープ現象のメカニズム^[3]
Fig.7 Mechanism of alkaline creep phenomenon^[3]

表面粗化処理の条件は、シミュレーションや分析技術を活用することで確立し、1次シールの設計要件を満たす最適な表面粗化形状を導出することで1次シール技術を確立した。

4.2.2 シーリング部の強度設計

バイポーラ型NiMH電池は、部品点数が少なく構造がシンプルであるがゆえに、シーリング部材や高機能性集電箔自体が電池筐体としての機能を持つ。そのため、電池内部での内圧上昇まで考慮した耐圧強度設計がシーリング部材・集電箔の設計に必要となる。一般的に、強度設計はFinite Element Method (以下、FEM) 解析を活用して実施する。今回開発したバイポーラ型NiMH電池は、高機能性集電箔と樹脂を接合した大面積(約200mm×580mm)かつ薄物(<200μm)の電極を積み重ねた構造体のため、通常の3次元によるFEM解析では計算時間が膨大になる。そのため、代表断面による2次元モデル化と各部材界面における滑りを考慮した境界条件の設定により解析精度向上と計算時間短縮の両立を行った。

図8に本開発で確立したFEM解析の実施例を示す。想定される電池内圧に対して安全率を確保するように、シーリング部材と高機能性集電箔の設計を行った。

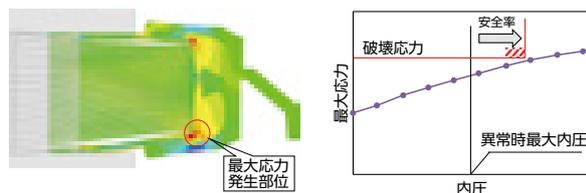


図8 FEM解析の実施例
Fig.8 Examples of FEM analysis

4.3 正極材料開発

4.3.1 正極材料の開発課題

NiMH電池の高出力化には、正極抵抗の低減が重要課題の一つである。従来型のNiMH電池では、集電体に多孔質材料を用いているが(図9)、バイポーラ型NiMH電池では箔材料を用いるため、正極活物質上での電子移動距離が従来に比べて長い(図10)。従って、正極活物質自体の低抵抗化が、正極抵抗の低減および高出力化に向けた、重要な課題となる。バイポーラ型NiMH電池では、活物質へ

の高導電性表面コート処理条件を改良し、正極活物質を低抵抗化した。

従来電池 (多孔質集電体)

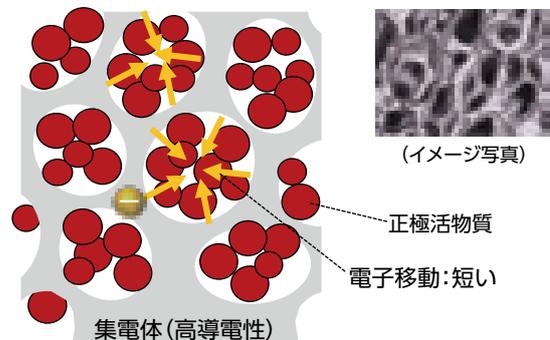


図9 従来型NiMH正極材料の微小構造
Fig.9 Microstructure of conventional NiMH positive electrode

新型電池 (箔集電体)

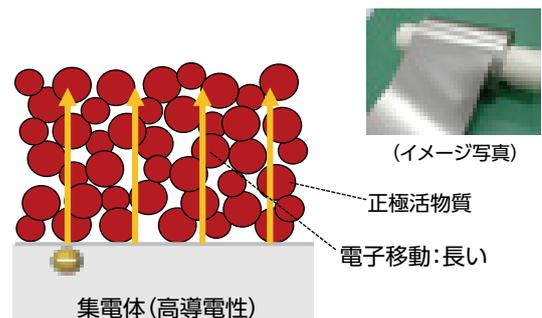


図10 開発したNiMH正極材料の微小構造
Fig.10 Microstructure of NiMH positive electrode

4.3.2 正極活物質の低抵抗化

正極活物質(水酸化ニッケル(Ni(OH)₂)が主成分)の表面コートには、高導電性のコバルト化合物が従来から用いられている。正極活物質の生産プロセスにおいて、水酸化ニッケル粒子を水酸化コバルト(Co(OH)₂)で被覆した後、電池の活性化プロセスにおいて、水酸化コバルトコートを経電化学的に酸化することで、導電性の高いオキシ水酸化コバルトコート(CoOOH)が得られる。

バイポーラ型NiMH電池では、さらなる低抵抗化を目指して、水酸化コバルトに対する化学酸化処理を実施した(図11)。正極活物質生産プロセスで、水酸化コバルトコートに化学酸化処理を施すことで、高次コバルト化合物(CoOOH_{1-x})が得られる。高次コバルト化合物は、電気化学的酸化(従

来法) で得られるオキシ水酸化コバルトよりコバルトの価数が高く、より高い導電性を有するため、正極活物質のさらなる低抵抗化を実現できる。

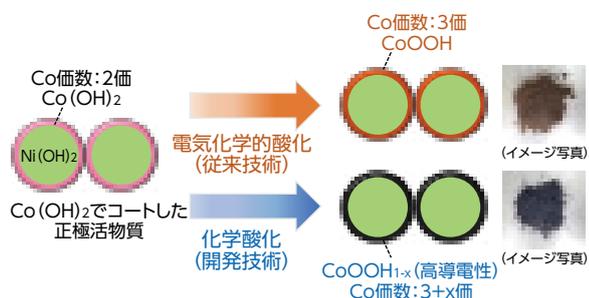


図11 正極活物質のCo(OH)₂コートに対する酸化処理工程
Fig.11 Oxidation process for Co(OH)₂ coating on positive electrode material

コバルト化合物コートの状態の分析には、あいちシンクロトロン光センターの放射光設備を活用し、化学酸化処理によるコート材の変化を結晶学的に解析した。正極活物質に対する放射光XAFS(X-ray Absorption Fine Structure) 分析により、化学酸化したコバルト化合物コートは、従来品よりも高酸化状態にあることを確認した(図12)。放射光を用いた分析や、当社保有の結晶構造解析、化学状態分析、顕微鏡観察等に関する知見を駆使して、コバルト化合物コートの酸化処理条件、量を最適化した。これにより、正極活物質の電子移動抵抗を大幅に低減し、正極抵抗の低減、電池の高出力化を達成した(図13)。

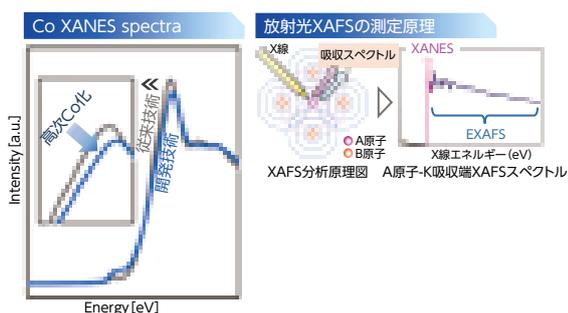


図12 NiMH正極活物質に対する放射光XAFS分析
Fig.12 XAFS spectroscopy for active material of NiMH positive electrode

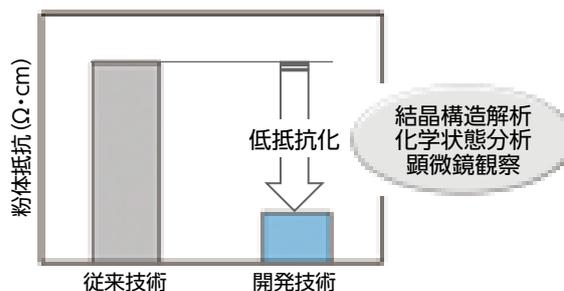


図13 NiMH正極活物質の粉体抵抗
Fig.13 Powder electroresistance of active material for NiMH positive electrode

5 まとめと今後の展望

自動車市場の拡大のニーズに応えるべく、HEVへの搭載拡大を可能とするバイポーラ型NiMH電池の開発を行うことができた。なお、今回開発した電池をアクアに搭載することで、従来型アクアに対して出力比約2倍(電池セル出力1.5倍、小型化により同体積で搭載セル数1.4倍)を達成した。

今回開発したバイポーラ型NiMH電池モジュールは、構造の効率化と展開性を考慮して24直列で設計している。そのため、車載する際には車両に応じて積層するモジュール数の変更のみで対応可能なため、バイポーラ型NiMH電池の高出力特性を活かし、今後搭載車両を増やすことを目指す。

最後にバイポーラ型NiMH電池の開発に多大なご支援をいただいた社内外の関係者の方々に深く感謝の意を表します。

■参考文献

- [1] IHSマークイット
- [2] トヨタ自動車(株)ホームページ
- [3] Michael N. Hull and Herbert I. James, J. Electrochem. Soc., Vol.124, No.3. (1977)
H.W.Nientiedt, J. Power Sources, 8 (1982) 257-265

■ 著者紹介 ■

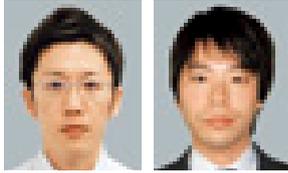


中條 祐貴

吉田 憲史

田丸 耕二郎

小竹 広和



宗 真平

河野 聡

開発の経緯と開発者の思い

社是に“研究と創造に心を致し、常に時流に先んずべし”とあります。我々は、来るべき電動化の時流に先んずるべく、2007年から、様々な課題に対して「なぜ・なぜ」を繰り返し、原理原則に基づく課題解決に拘った独自の電池開発を進め、「車載電池をつくりたい」という熱意のもと、2016年よりバイポーラ型NiMH電池の開発に着手しました。開発を進める中で多くの課題に直面しましたが、電池事業室と生技開発センターのメンバが部署の垣根なく一致団結し、あきらめずに原因究明と対策に奔走し、全員で必死に開発を進めてきたことで、この新型電池を世の中に送り出すことができました。また、トヨタ自動車(株)や仕入先の皆様にも多大なご協力を頂きました。関係者一同で生み出したこの新型電池による加速の力強さや運転フィーリングの良さを皆様にも体感いただければと思います。今後も、たくさんのお客様のご期待に沿えるよう、世界一の電池開発を目指し精進してまいります。

新型NOAH/VOXY HEV向け DC-DCコンバータの開発 Development of DC-DC Converter for the New NOAH/VOXY HEV

種谷 公作^{*1} 平林 信夫^{*1} 舩井 知康^{*1} 成瀬 英典^{*1}
Kosaku Taneya Nobuo Hirabayashi Tomoyasu Momii Hidenori Naruse

*1 エレクトロニクス事業部 技術部

要旨

電子化、電動化の進展に伴う消費電力増に貢献するため、「大電流」、「小型」をコンセプトとした次世代DC-DCコンバータを開発した。また従来車両側で有していた「プリチャージ機能」をDC-DCコンバータ内に追加することでシステムコストダウンに貢献した。その概要について紹介する。

キーワード:大電流、小型、プリチャージ機能

Abstract

We have developed a next-generation DC-DC converter with the concepts of “Larger current” and “Smaller” in order to contribute to the increase in power consumption accompanying the progress of computerization and electrification. In addition, adding the “Pre-charge function” normally installed on the vehicle to the DC-DC converter contributes to system cost reduction. In this article describes the outline of this development.

Keywords: large current, down-sizing, pre-charge function

1 はじめに

年々厳しくなる各国の環境規制に対応するため、各自動車メーカーは、ハイブリッド車(HEV)や電気自動車(BEV)などの電動車開発に力を入れている。

その中で、満を持してトヨタ自動車(株)からMサイズミニバン 新型 NOAH/VOXY が市場に投入された。新型NOAH/VOXYは、Mサイズミニバンで23.4km/L(WLTCモード^{*})の世界トップクラス(当社調べ)の低燃費と高出力の動力性能、先進装備を投入し、安全性能の充実が特徴である。

開発当初から燃費性能と自動車の電子化と電動化の進展に伴う消費電力増に貢献するため、「小型」「大電流」をコンセプトとして技術開発に取り組み、従来品に比べ大幅な性能向上を達成した(表1)。また従来車両側に搭載されていた車両起動時に発生する過電流からハイブリッドシステムの回路を保護するための「プリチャージ機能」をDC-DCコンバータに追加することでシステムコストダウンに貢献した。

本稿ではこれらを達成した技術アイテムについて紹介する。

^{*}燃費を計測する世界統一試験サイクル
(World wide-harmonized Light vehicles Test Cycle)



写真1 新型NOAH/VOXY外観^[1]
Photo1 Appearance of New NOAH/VOXY

表1 従来品との性能比較
Table1 Comparison of main performance

| | 従来品 | YARIS HEV | 開発品 | 向上率 (従来品比) |
|----------|---------|-----------|----------|---------------|
| コンバータ世代 | Gen4 | Gen5 | Gen5 | — |
| 出力電流 | 100A | 100A | 150A | 50%向上 |
| 重量 | 416g/kW | 334g/kW | 333g/kW | 20%減 |
| 体積 | 0.5L/kW | 0.29L/kW | 0.33L/kW | 34%減 |
| プリチャージ機能 | なし | なし | あり | — |

2 DC-DCコンバータとは

DC-DCコンバータとは、高圧バッテリーを14Vに変換し低圧バッテリーとアクセサリへ電力供給する電動車特有の電源装置である。



図1 DC-DCコンバータの機能
Fig.1 Function of DC-DC Converter

3 大電流、小型化

DC-DCコンバータ開発において大電流、小型化を実現するためには熱、電磁ノイズ*の課題を解決する必要がある。

2020年にDC-DCコンバータのGen5の最初の製品として量産化したYARIS HEV向けDC-DCコンバータで大電流通電部の銅板厚を最適化する技術(部分厚銅)を確立した。本開発ではその技術の継承と放熱性能アップにより、従来品の100Aから150Aへの大電流化を実現した。

電磁ノイズ性能においてはノイズ影響を受けにくい出力部の配策を検討し、ノイズ抑制を実現した。

以降で詳細について紹介する。

*DC-DCコンバータから発生する電磁ノイズで、ラジオ放送波に混信することでラジオ聴感の悪化を招く

3.1 発熱の抑制

大電流化に伴い大電流通電部の発熱が問題となる。

本開発では、YARIS HEV向けで開発した部分厚銅技術を応用し、大電流が流れる厚銅部の断面積を最適化することで、発熱を抑制した。またトランス、コイルは厚銅部をコアで挟むことで構成しており、厚銅部の投影面積を小さくすることでトランス、コイルのサイズアップを最小に抑えることができた(図2)。厚銅部分はアルミダイカストケースに放熱シートを介して放熱させるため(図3)、放熱シートの性能アップにより100A製品と同等体格にて150A製品を実現した。

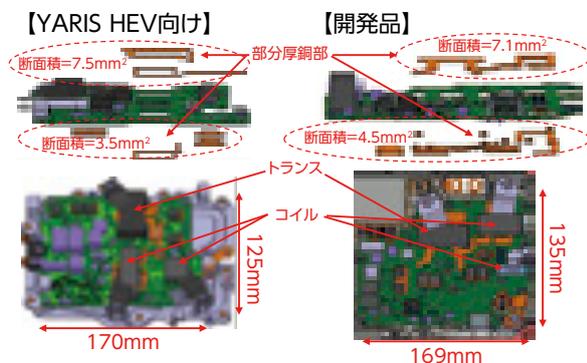


図2 YARIS HEV向けと開発品の構造比較
Fig.2 Structure for YARIS HEV and developed products

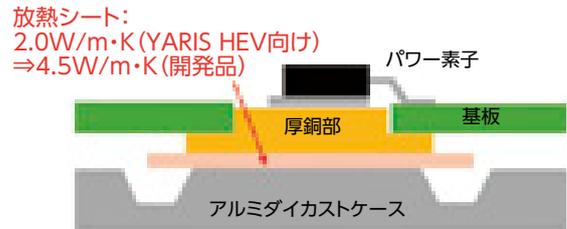


図3 放熱構造
Fig.3 Heat dissipation structure

3.2 電磁ノイズレベルの抑制

大電流化により発生ノイズが大きくなり、ノイズ対策部品が大型化する。

本開発ではCAE*を駆使し磁界を視える化し、最適レイアウトによる対策で体格アップを抑制した。

*Computer Aided Engineering

1) 伝導ノイズ

電磁ノイズは半導体のスイッチングにより発生し、交流成分が出力電流に重畳することで伝導ノイズとして車両に漏洩する。この伝導ノイズが車両アンテナに結合しラジオの聴感に悪影響を及ぼす。伝導ノイズの要因には、以下の2つが挙げられる。

- ・基板パターンを伝搬するノイズ……①
- ・磁界による空間結合により伝搬するノイズ……②(図4)

①は出力フィルタ(L1,C1,L2,C2)で交流成分を減衰させて対策できるが②は空間結合を回避するレイアウトが求められる。特に出力段ループ配線との結合はフィルタ後のため減衰ができず注意が必要である(図5)。

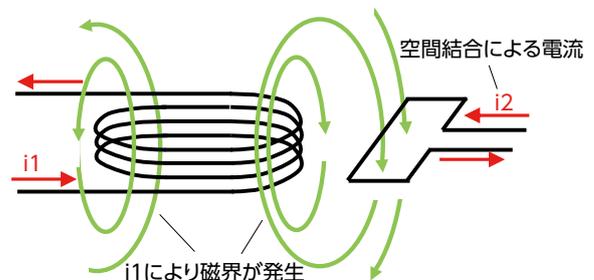


図4 磁界によるノイズ伝搬
Fig.4 Noise propagation by magnetic field

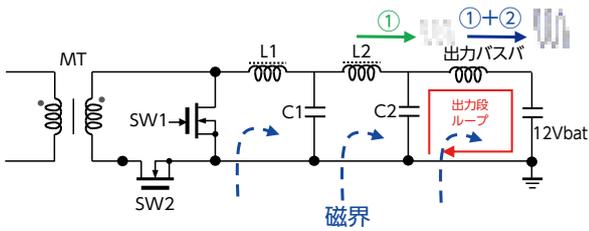


図5 出力フィルタ構成
Fig.5 Output filter configuration

2) 磁界の視える化による最適レイアウト設計

3次元電磁界シミュレーションにより磁界を視える化し、伝導ノイズ発生要因の分析と対策検討を行った。

先行開発時の3次元磁場解析結果を図6に示す。

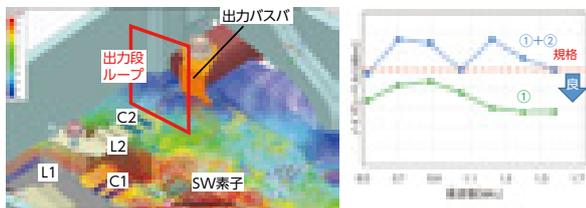


図6 3次元磁場解析結果 (解析ソフト:HFSS)
Fig.6 3D magnetic field analysis result

解析の結果、伝導ノイズは①のみでは規格を満足するも、②の重畳により8dB規格を未達。磁場解析結果より、スイッチング素子から出た磁束が出力フィルタ後の出力段ループ(赤枠線)に鎖交し、伝導ノイズが悪化することがわかる。

磁界結合はループ面積と鎖交磁束強度に比例するため、本開発ではバスバを磁界の弱いケースに併走し、出力段ループ面積を最小にする対策を実施した(図7)。

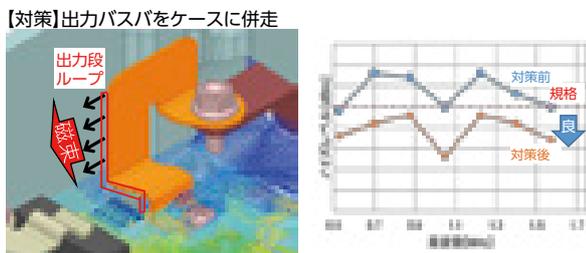


図7 3次元磁場解析結果(対策後)
Fig.7 3D magnetic field analysis result "after measures"

対策の結果、10dB以上の効果を確認。実機でも同等の効果を確認でき、規格を達成した。

磁界の視える化からデッドスペース活用により、体格アップ無しで「小型化」に貢献し、バスバ形状変更のみで「低コスト」の対策を実現した。

4 双方向出力化によるプリチャージ機能の追加

プリチャージ機能とは車両起動時、高圧バッテリーとHEVシステムを接続する際に発生するPCUコンデンサへの突入電流から回路を保護するため、接続前に予めPCUコンデンサを高圧バッテリー電圧まで充電する機能である。

従来品では車両側J/B(ジャンクションボックス)内に抵抗/リレーを設け電流制限をかけながらPCUコンデンサを充電している(図8)。

開発品では同一機能をDC-DCコンバータに追加することで従来品の抵抗/リレーを削除しシステムコストダウン、J/B体格ダウンに貢献した(図9)。

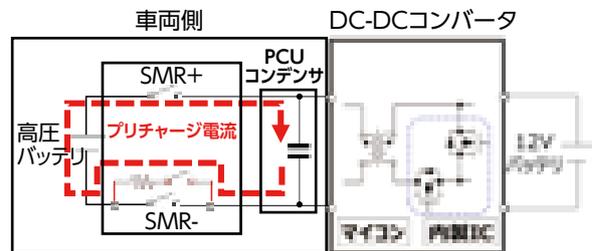


図8 プリチャージシステム(従来品)
Fig.8 Pre-charge system (conventional vehicle)

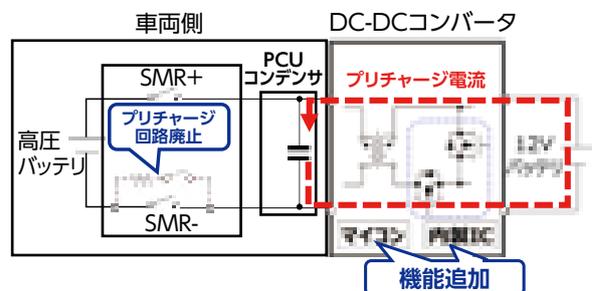


図9 プリチャージシステム(開発品)
Fig.9 Pre-charge system (development vehicle)

4.1 昇圧機能

プリチャージを行うには、従来の降圧(高圧→低圧)動作に昇圧(低圧→高圧)動作を追加する必要がある。Gen4までの低圧出力側の整流部には、制御の容易性、体格とコスト低減の観点からダイオード整流を採用していた。このダイオードは単方向スイッチになるので、逆方向電流を流すことができない。しかし、一昨年に販売されたYARIS HEV向けに搭載されたDC-DCコンバータ以降は高効率化を果たすために、整流部への同期整流の採用により、双方向スイッチであるMOSFETへ変

更になった(図10)。つまり、電力変換に必要なアイテムが揃っているのに、如何にコスト、体格アップ無しに制御できるかが課題となる。

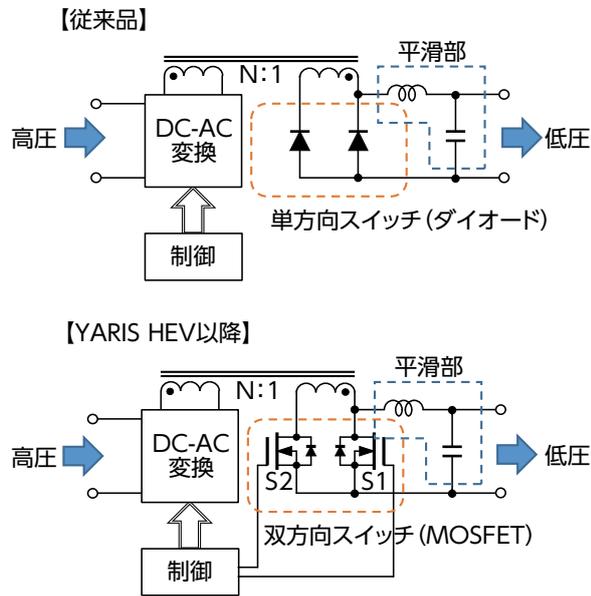


図10 整流部への双方向スイッチの採用
Fig.10 Adoption of bidirectional switch in rectifier circuit

4.2 プリチャージ機能の特異性

プリチャージ動作の特異性は、単純な双方向の電力変換動作とは違い、走行系インバータの高容量コンデンサへの0Vから目標電圧への充電動作となるので、充電初期は出力短絡と同じ状態が継続する。そのため、通常の電流制限の制御では電流制限ができず、増大し続けて、最終的には素子を破損してしまう(図11)。また、低圧から入力される電流を制限する制御となるので、従来からの降圧動作で使用している電流検出が高圧側にあるのに対して、低圧側にも電流検出する機能を別に追加する必要がある。

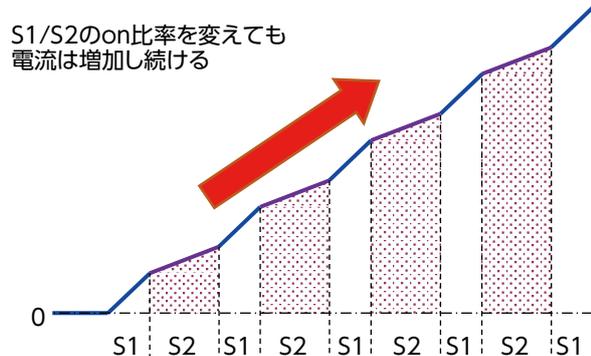


図11 低出力電圧時の平滑部のL電流
Fig.11 Smooth part L current at low output voltage

4.3 動作モード

DC-DCコンバータの出力平滑(交流成分除去)部の動作モードとしては大きく以下の2つが挙げられる(図12)。

- ・不連続電流モード
 - ……動作周期毎に電流が0Aに戻る状態
 - ・連続電流モード
 - ……動作周期毎に電流が0A以上の電流値に戻る状態
- これらの動作モードの特徴を表2にまとめる。

表2 動作モードの特徴
Table2 Features of operation mode

| モード | メリット | デメリット |
|-------|---|--|
| 不連続電流 | <ul style="list-style-type: none"> ・制御速度の速さ不要 ・電流検出は条件次第で不要 | <ul style="list-style-type: none"> ・伝達電力が小さい ・電力変換効率が悪い |
| 連続電流 | <ul style="list-style-type: none"> ・伝達電力が大きい ・電力変換効率が良い | <ul style="list-style-type: none"> ・制御速度の速さが要求される ・電流検出が必須 |

プリチャージは限られたコンデンサ容量への充電のみなので、大きな伝達電力は必要ない。また、制御速度を上げるには、それに対応したハード構成とソフト側の処理の構成変更が必要になる。

これらの要件と先の課題を考慮して不連続電流の動作モードを採用することにした。

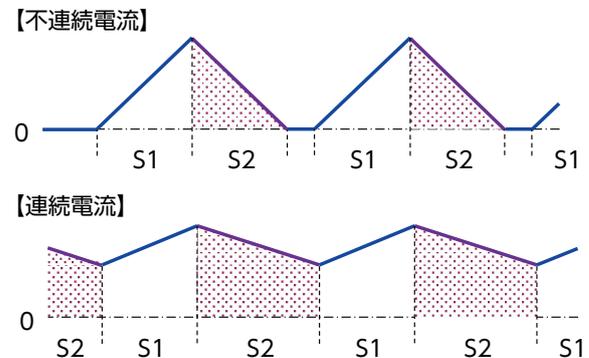
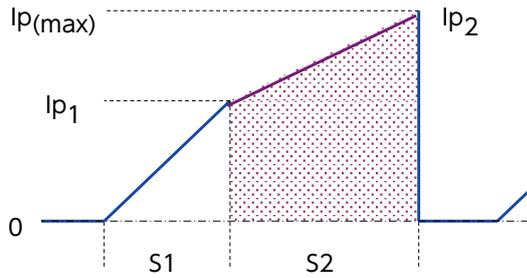


図12 出力平滑部のL電流の動作モード
Fig.12 Operation mode of L current

4.4 不連続制御

プリチャージ動作は出力平滑部のLに低圧側からの充電→高圧側への放電を繰り返すことで電力伝達を行っている。その充電過程で低圧側電圧と高圧側電圧の関係が常に変化するが、出力平滑部のLの電流波形を見ると、大きく2つの状態に分けられる(図13)。

【プリチャージ前期: $0 \leq V_H / (N \cdot V_L) \leq 1, (I_{p1} < I_{p2})$ 】



【プリチャージ後期: $1 < V_H / (N \cdot V_L), (I_{p1} > I_{p2})$ 】

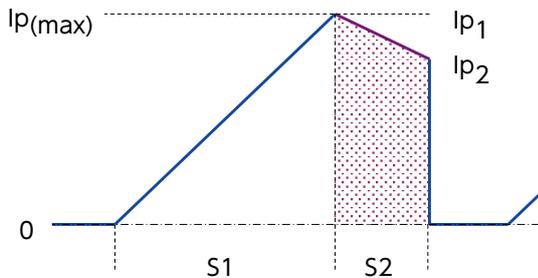


図13 高圧側電圧/低圧側電圧による平滑部のL電流の変化
Fig.13 Change in L current of smooth part

- ・プリチャージ前期: $0 \leq V_H / (N \cdot V_L) \leq 1 \Rightarrow$ 電流増加
- ・プリチャージ後期: $1 < V_H / (N \cdot V_L) \Rightarrow$ 電流減少

先に述べたように、後期は高圧側へ放電する期間で電流は減少するのに対して、前期は増加し続けるので、動作周期毎に休止期間 (S1:off, S2:off) を設けることで確実に0Aに戻す不連続電流にする制御とした。

後期においても同様に休止期間を設けることで出力平滑部のLの電流は直流成分を持つことがなくなるため、S1、S2のon期間、休止期間のみで電流を管理することができ、低圧側の電流モニタを不要にすることができた。

4.5 マップ制御

降圧動作時の制御は状況に合わせて常時行っているが、昇圧動作の内のプリチャージ動作に限定するならば、入力電圧や負荷変動の頻度が小さいので、常時行う必要性はない。制御ソフトのメモリ量が軽いマップ制御とした。予め低圧電圧、高圧電圧を条件に制御値 (S1のon期間、S2のon期間) を計算したマップを作成し、制御時に条件に合う制御値を読み込み制御する (図14)。

| $V_L < V_L \leq U_L$ | $d1(FWD)$ | 低圧側制御値 | $d2(FWD)$ | 0 | 1 | | |
|----------------------|-----------|--------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| 8.11 | 8.6 | 0.188 | 0.398 | 0.679 | 0.234 | 0.494 | 0.49 |
| 8.6 | 9.1 | 0.153 | 0.407 | 0.657 | 0.221 | 0.531 | 0.477 |
| 9.1 | 9.6 | 0.134 | 0.303 | 0.634 | 0.217 | 0.492 | 0.469 |
| 9.6 | 10.1 | 0.118 | 0.310 | 0.643 | 0.219 | 0.373 | 0.511 |

高圧側制御値 S1制御Duty S2制御Duty

図14 制御マップ
Fig.14 Control map

本開発の結果、従来回路のままコストアップ無しに「プリチャージ機能」を追加し、従来品の抵抗/リレー削除によるシステムコストダウン、J/B体格ダウンに貢献した。

5 まとめ

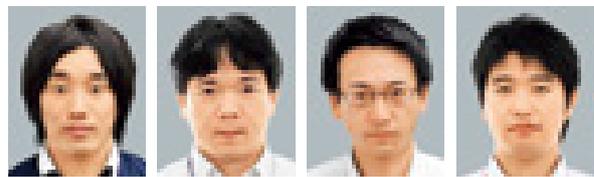
今回の開発では開発当初から「小型」「大電流」「プリチャージ機能追加」をコンセプトに技術開発を進めてきた結果、当初の目標を上回る性能を達成することができた。また今回開発した技術アイテムは今後のDC-DCコンバータにも展開される予定である。

最後に、本開発に当たり多大なご指導・ご協力をいただきましたトヨタ自動車(株)、(株)デンソーをはじめとする社内外の関係部署の皆様へ深く感謝いたします。

■参考文献

[1]トヨタ自動車(株)ホームページ

■著者紹介■



種谷 公作 平林 信夫 初井 知康 成瀬 英典

開発の経緯と開発者の思い

従来品から大幅な小型、大電流化を実現する必要があったため、要求性能成立に苦労しました。特にノイズ対策には体格、コストがアップするアイテムばかりの中、室全体で議論することで対策の方向性も定まり、体格、コストアップ無しで性能を満足することができました。

DC-DCコンバータへのプリチャージ機能追加はトヨタ自動車(株)でも初めての採用であるため、商品性を確保できる最適な要求仕様/制御を協業で開発することで機能を実現することができました。その甲斐もあり、トヨタ自動車(株)より「技術開発賞」を頂くことができ、技術貢献できたことを大変うれしく思っております。

今後もお客様に喜んでもらえる製品開発に取り組みたいと思います。

bZ4X向け6.6kW車載充電器・DC-DCコンバーター一体ユニットの開発 Development of Integrated Unit with 6.6kW On-board Charger and DC-DC Converter for bZ4X

中村 太^{*1} 中坪 勇人^{*1}

Futoshi Nakamura Hayato Nakatsubo

*1 エレクトロニクス事業部 技術部

要旨

トヨタ自動車(株)は環境対応車としてBEV(電気自動車)専用プラットフォームを採用した電気自動車bZ4Xを発表した。

今回bZ4X向けに車載充電器とDC-DCコンバーターを一体化した小型軽量化ユニットを開発したので、概要について紹介する。

キーワード:bZ4X、一体化ユニット、BEV専用ユニット、車載充電器、小型、軽量

Abstract

Toyota Motor Corporation announced the electric vehicle bZ4X that uses the BEV(Battery Electric Vehicle)-dedicated platform as an environmentally friendly vehicle. This time, we have developed a downsizing and lightweight unit for bZ4X that integrates on-board charger with DC-DC converter, so introduce an overview.

Keywords: bZ4X, integrated unit, BEV-dedicated unit, on-board charger, downsizing, lightweight

1 はじめに

2050年のカーボンニュートラル実現のため、電動車の急速な拡充が自動車メーカーに求められている。

トヨタ自動車(株)は2021年末に2030年までに30車種のBEV(Battery Electric Vehicle)を展開し、グローバル販売で年間350万台、レクサスブランドも同年までに、欧州、北米、中国でBEV100%を目指すを発表。また、BEV専用プラットフォームを採用したbZシリーズの第一弾としてbZ4Xを発表した。

従来のHEV(Hybrid Electric Vehicle)、PHEV(Plug-in Hybrid Electric Vehicle)に対し、BEVでは長距離の電動走行を実現するため走行用高圧バッテリー容量が飛躍的に大きくなり、それに伴う搭載空間が必要となる。広々とした車室内空間を確保するために、小型軽量化された車載部品の開発が求められる。

今回、bZ4Xに採用された車載充電器^{*1}とDC-DCコンバーター^{*2}を一体化した小型軽量化ユニットを開発したので紹介する。本製品はESU(Electricity Supply Unit)^{*3}に搭載された基幹ユニットである。

*1 家庭用の交流電源を直流電圧に変換し、走行用高圧バッテリーを充電するユニット

*2 走行用高圧バッテリーの直流電圧を降圧し、補機用バッテリーを充電するユニット

*3 充電機能と電力分配機能を集約した機器



写真1 bZ4X^[1]
Photo1 bZ4X



参考文献^[1]

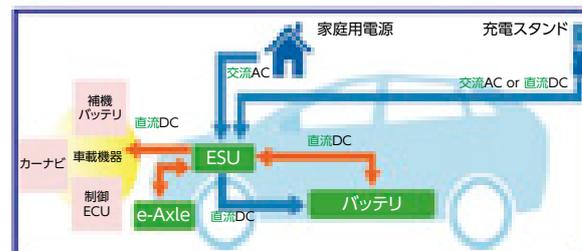


図1 充電システム概要
Fig.1 system overview

2 製品の特長

本製品では車載充電器の小型化を実現するとともにDC-DCコンバータを一体化することにより、従来と比べて体積で23%、重量で17%の小型軽量化を実現している。

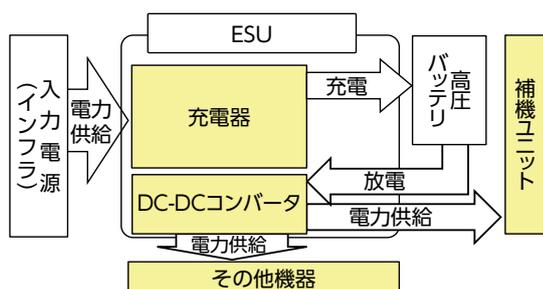
車載充電器の特徴としては各国のインフラ（日米欧中及びその他地域）に適合させるため、AC100V～240Vの入力電圧に対応可能な設計としている。

表1 車載充電器仕様
Table1 On-board charger specification

| | |
|----------|------------|
| 入力電圧 | 86～264Vrms |
| 出力電圧 | 170～416V |
| 最大入力電流 | 32.9Arms |
| 最大電力 | 6.6kW |
| 冷却方法 | 水冷 |
| 性能保証温度範囲 | -40～73℃ |

また、充電効率を向上するためSub-DC-DCコンバータを採用している。充電中に補機用バッテリーから電力を供給する必要があるが、補機用バッテリーをDC-DCコンバータで充電すると、充電に関係がない機器などが動作し充電効率が低下する。Sub-DC-DCコンバータに補機用バッテリーを充電させることにより、これらの機器を停止させた状態で充電し、高効率を実現している。

【Sub-DC-DCなし】



【Sub-DC-DCあり】

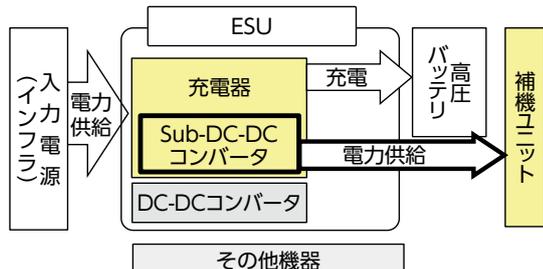


図2 充電時のシステム効率向上
Fig.2 Improved system efficiency during charging

3 小型化

フロントコンパートメント（従来のエンジンルームに相当）の空間に搭載するため、以下5つの手法を用い小型化を図った。

1) ケース内部水路の採用による構成部品の立体配置

従来の車載充電器及び、DC-DCコンバータでは電子部品を冷却するため、個別に冷却用水路を形成していた。本製品では、ケース内部に水路を形成することで水路両面に部品を配置することを可能にした。これにより冷却用水路及び、水路用部品を削減した。

冷却面を2面にしたことで、水路上面にはDC-DCコンバータを配置、水路下面には車載充電器を配置した。また、電力が小さいSub-DC-DCコンバータは水路が形成できないDC-DCコンバータ横のスペースに配置することで主要構成部品を無駄なく立体配置し、小型化を実現した。



図3 車載充電器・DC-DCコンバーター体ユニット
Fig.3 Integrated unit with on-board charger and DC-DC converter

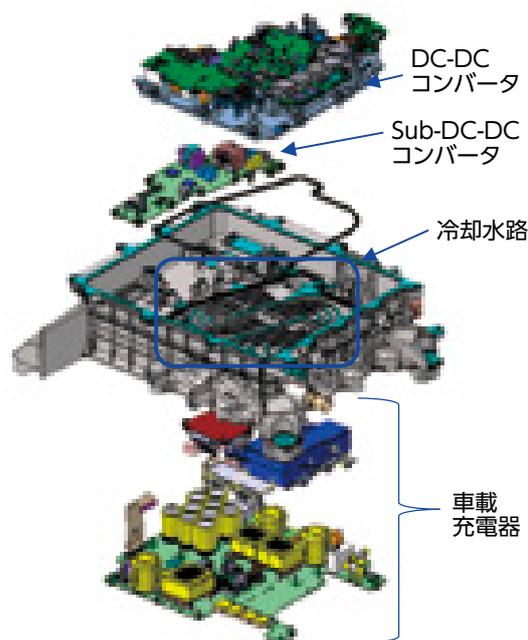


図4 展開図
Fig.4 deal drawing

一方で車載充電器とDC-DCコンバータの水路を共通化することで、水路内上下に冷却フィンを形成することになり流路が複雑化する。これにより圧力損失が増大し、水路内にエア溜まりが発生しやすくなる。エア溜まりの発生は冷却性能を低下させるため望ましくない。また、ウォーターポンプにエアを巻き込む可能性があり、車両冷却水路系への影響が大きい。本開発では水路モデルを作成し、解析によりエア溜まりの発生箇所を把握することで、設計段階において水路及びフィン形状の作り込みを実現した。

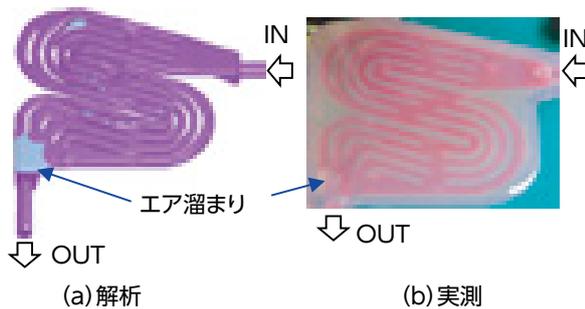


図5 冷却水路エア溜まり解析
Fig.5 Air pocket analysis of water passage

2) パワー回路シングル化による電子部品の削減

従来の車載充電器では3.3kWのパワー回路を平行接続し、出力を6.6kWに拡大している。本製品では小型化のためパワー回路をシングル化し、電子部品の削減した。

シングル化することにより、パワー回路部品は従来の2倍の電流を通電することになる。これにより電子部品に発生するサージ電圧と部品発熱が大きくなるのが課題となる。

サージ電圧に関しては、特に影響が大きい二次側の電力変換回路に使用されているSi(シリコン)ダイオードを高耐圧高速なSiC(シリコンカーバイド)ダイオードで置き換えることで対策した。

SiCダイオードは従来のSiダイオードと比較し、スイッチング時の逆電流が小さく、サージ電圧を抑えることができる。また、同じ理由で発生する損失も小さくなり発熱量を小さくすることができる。

部品発熱に関しては従来の放熱シートからギャップフィラに変更することで対策した。ギャップフィラとはペースト状の放熱材で、磁気部品のような巻線を使用する部品においては放熱面が拡大でき、非常に有効である。

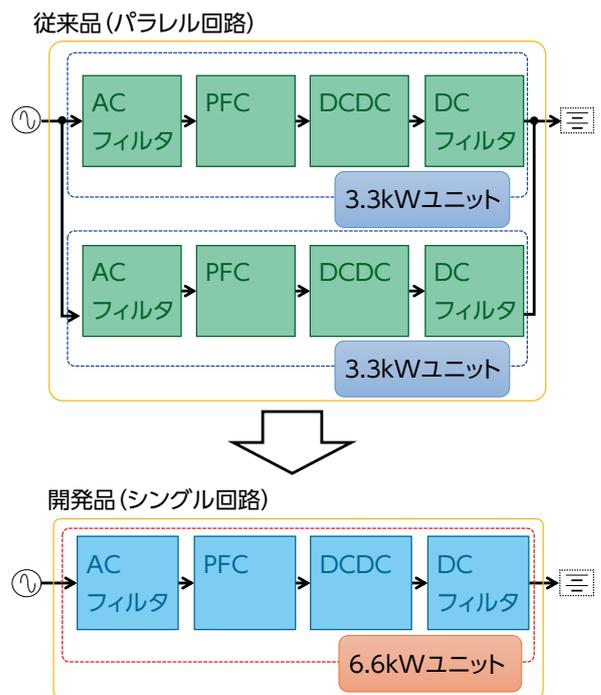


図6 充電器ユニット構成
Fig.6 On-board charger unit composition

3) トランス・共振コイル一体化構造による小型化

パワー回路の構成部品として、電力変換用のトランスとスイッチング損失低減用の共振コイルが使用されている。従来に対し、パワー回路をシングル化したことにより発熱が大きくなるため、これらの部品をバスタブ状のアルミケースに搭載し、放熱用のポッティングで充填することにより冷却性能を向上した。また、従来の開発ではトランス及び共振コイルをそれぞれ個別部品としていたのに対し、同一ケースに搭載することで不要な固定点や位置決めピン、搭載隙といったスペースを削減し、小型化している。

背反としてはトランスと共振コイルの距離が接近することにより、互いの発熱を相互に受熱するため発熱が増大する。課題の解決策としてケース底面の面積を拡大し、水路への放熱経路を改善した。拡大した面積は、近接する平滑電解コンデンサの実装方向を横置きから縦置きにすることにより確保し、ユニット全体として小型化を実現した。

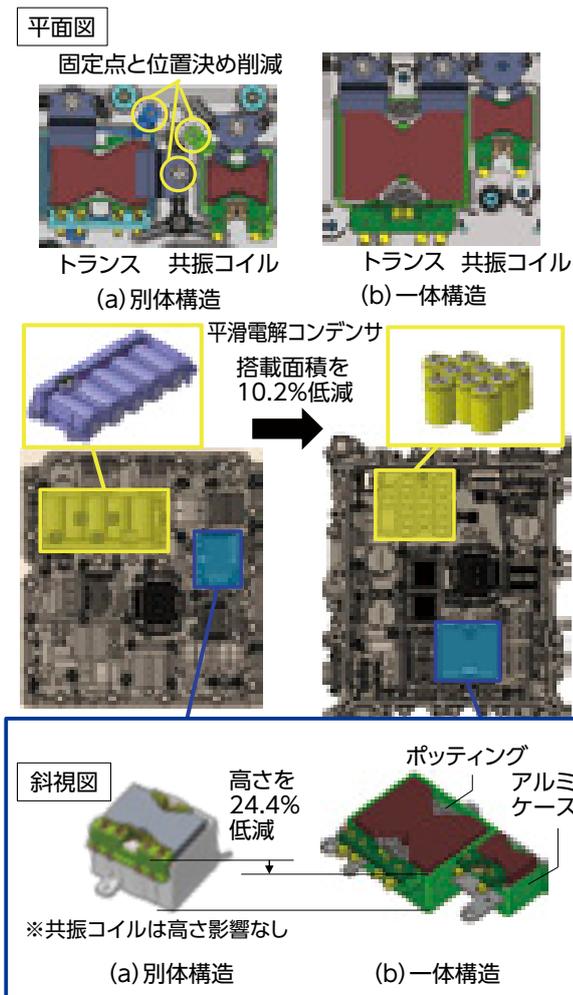


図7 トランス・共振コイル一体構造
Fig.7 Integrated Unit with Transformer and resonance coil

4) 内製制御ICの採用による部品点数の削減

従来の充電器では制御回路を面実装部品で構成している。本開発では制御回路部をIC化して小型化を実現した。

また、制御回路の中で他の充電器と共通化できる回路(停止ラッチ、Duty制御)をICに集約し、汎用的に使用できる内製制御ICを開発した。

IC化により部品点数を110点削減し、制御回路の基板面積を85%削減した。

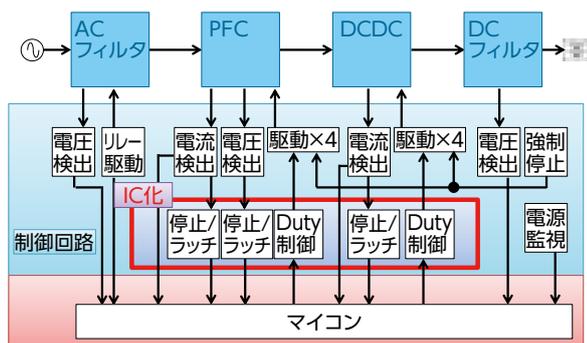


図8 制御回路ブロック図
Fig.8 Control circuit block diagram

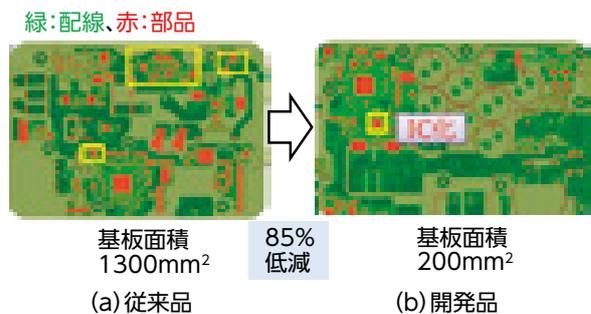


図9 内製制御IC
Fig.9 In-house production of IC

5) パワーモジュールの開発による体格低減

本開発では従来の車載充電器に引き続き内製のパワーモジュールを採用している。これにより、複数の電力変換用半導体素子を金属基板上に集積することで不要な配線スペースを削減でき、小型化することができる。半導体を集積することで、発熱密度が大きくなるが、放熱性の高い金属基板を用いることで発熱を抑制した。

パワー回路をシングル化するため、本開発では従来のパワーモジュールに対し、半導体素子上の配線を3本から4本にして許容電流を増やした。また、ワイヤボンディング^{※4}をステッチ化して素子上の接続点を1点から2点にすることで接続部に発生する接触抵抗を低減した。

配線数を増やすことで、ボンディングのスペースが圧迫される。ワイヤと部品の干渉を防ぐため、ボンディングツール^{※5}の軌跡をCAE (Computer Aided Engineering) で想定し、ワイヤ位置を見直した。これにより金属基板上のパターンを変更せずに配線数増加を実現した。

※4 半導体素子と金属基板を電氣的に接続する手法
※5 ワイヤの送り出し、部品との接続、カットを行う装置

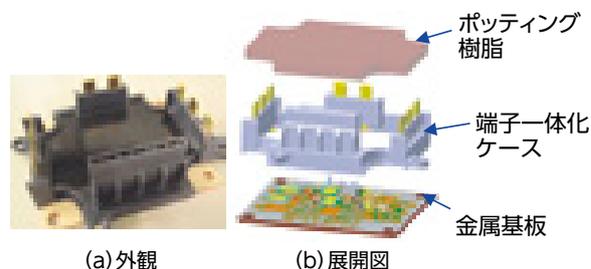


図10 モジュール外観と展開図
Fig.10 Power Module appearance, deal drawing

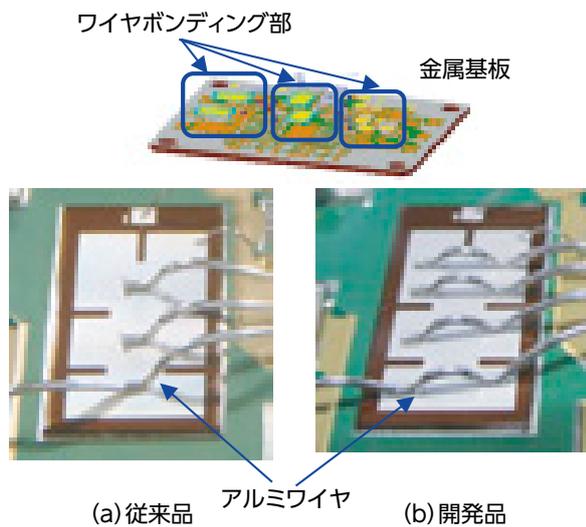


図11 ワイヤボンディング
Fig.11 Wire bonding

■参考文献

[1]トヨタ自動車(株)ホームページ

■著者紹介■



中村 太

中坪 勇人

4 まとめ

今回はBEV専用ユニットの開発において、走行用高圧バッテリー容量確保のため小型化が必要であった。

ケース内部に水路を形成することで車載充電器とDC-DCコンバータを立体配置し、空間を効率的に活用した。また、充電器においては既存のパワー回路をシングル化することにより電子部品の削減をした。制御回路に関しても内製ICを開発し、面実装部品の使用点数を削減した。

小型化へ向けた開発により、従来と比べて体積で23%、重量で17%の小型軽量化を実現した。

最後に、本開発にあたり多大なご指導・ご協力を頂きましたトヨタ自動車(株)をはじめとする社内外の関係部署の皆様へ深く感謝致します。

開発の経緯と開発者の思い

トヨタ自動車(株)からBEV専用プラットフォームを採用したbZシリーズの第一弾としてbZ4Xが発表されました。開発の初期段階では海外の競合他社を凌駕するユニットの開発をするため、連日の試行錯誤が続きました。そして最終的に辿り着いたのが、同一ケースに車載充電器とDC-DCコンバータを搭載する一体化案でした。近年、開発が短期化している中で、品質を確保しながら本案を成立させるのは非常に困難でしたが、それをやり切ることができたのは偏にエレクトロニクス事業部の総力を結集できた賜物だと感じています。

この先、電動車の発展のため、車載充電器およびDC-DCコンバータの小型化・高出力化を推進し、お客様に貢献できるように努めてまいります。

電動コンプレッサ ESHシリーズの開発

Development of Electrical Compressor ESH Series

山下 拓郎^{*1} 木下 雄介^{*1} 浜名 祥三^{*1} 安保 俊輔^{*1} 早川 賢治^{*1}
 Takuro Yamashita Yusuke Kinoshita Shozo Hamana Shunsuke Ambo Kenji Hayakawa

*1 コンプレッサ事業部 技術部

要旨

電動コンプレッサ ESHシリーズは、電動車の普及に伴う多様なニーズに応えるために開発され、2022年よりトヨタ自動車(株)「bZ4X」に搭載されている。ESHシリーズは車室内空調だけでなく、高温になりやすい電池などの車載電子機器を冷却する熱マネジメントにも重要な役割を担っており、電動車の商品力向上に貢献している。ここでは、その製品概要を紹介する。

キーワード: スクロール式圧縮機、電池冷却、ヒートポンプ、電磁ノイズ

Abstract

The ESH series electrical compressor was developed to meet diverse needs associated with the spread of electric vehicles, and has been installed in Toyota's bZ4X since 2022. The ESH Series plays an important role not only in vehicle interior air conditioning, but also in thermal management to cool automotive electronic equipment such as batteries, which are prone to high temperatures. This article introduces the product outline of the ESH series.

Keywords: Scroll Type Compressor, Battery Cooling, Heat Pump, EMC

1 はじめに

自動車の電動化ニーズの高まりに伴い、ハイブリッド車(HEV)、プラグインハイブリッド車(PHEV)、電気自動車(BEV)などさまざまな電動車の販売が増えている。

そうした電動車に搭載されるカーエアコン用コンプレッサは電動タイプが必要となり、当社は2003年に2代目プリウス向けに世界初(当社調べ)の量産型カーエアコン用電動コンプレッサES18の生産を開始した。その後も約20年にわたり国内外の自動車メーカーのさまざまな電動車へ電動コンプレッサ(図1)を提供する中で技術・ノウハウを蓄積し、生産台数は2021年度に累計2700万台を突破している。

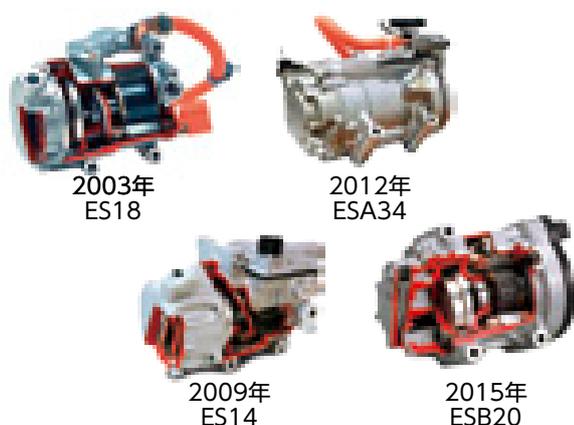


図1 電動コンプレッサの機種変遷
 Fig.1 History of Electrical Compressor

このような環境の中、電動コンプレッサに求められる機能も多様化している。車室内だけでなく、高温になりやすい電池などの車載電子機器を冷却する熱マネジメントの重要性が高まっており、電動車に必要な不可欠な部品として役割の幅を広げている。

ESHシリーズは、多様なニーズに応える電動コンプレッサとして開発され(写真1)、2022年に発売されたトヨタ自動車(株)新型BEV「bZ4X」にも搭載されている。

ここでは、その製品概要を紹介する。



写真1 ESH34カットモデル
 Photo1 Cut Model of ESH34

2 開発コンセプト

電動コンプレッサは、スクロール式のコンプレッサ部、コンプレッサを駆動するモータ部、モータを駆動制御するインバータ部から構成されるシステムとなっている(図2)。

当社では、コンプレッサ、モータ、モータ制御ソフトウェア、インバータといった基本構成部品を設計、評価、生産する体制を整えており、車両ニーズに対応した最適な製品作りに取り組んでいる。電動コンプレッサに求められる主な事項は以下である(図3)。

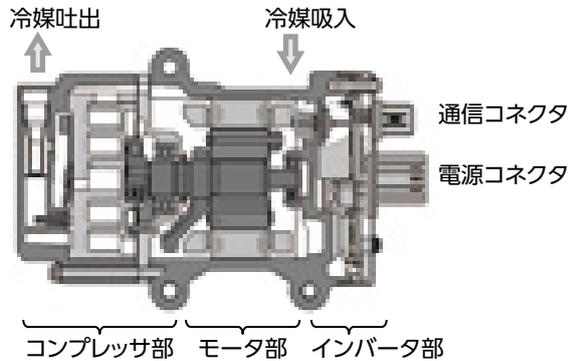


図2 電動コンプレッサのシステム概要
Fig.2 System Outline of Electrical Compressor



図3 電動コンプレッサに求められる機能の拡大
Fig.3 Expanding the Functions Required of Electrical Compressor

1) 大能力・長寿命化

BEVでは、エンジンの廃熱を利用して暖房を行うことができないため、大気から熱を取り込んで暖房する、電動コンプレッサを用いたヒートポンプ空調システムの採用が増えている。そのため、夏場の車室内の冷房だけでなく冬場の暖房にも使われるため使用時間が長くなる。

また、車両の電池などの車載電子機器は、高出力運転時や急速充電時に大電流が流れ高温になりやすく、性能劣化や寿命低下を招く。よって、車室内空調だけでなく車載電子機器を冷却するために電動コンプレッサの能力増強が必要であり、信頼性を確保した大容量タイプの電動コンプレッサが求められている。

2) 高電圧化

電動車の充電時間の短縮や、加速性能向上のため車両電池の高電圧化が進んでいる。そのため、車両電池から電力供給を受ける電動コンプレッサ

は、3相交流に変換するインバータの高電圧化対応が必要になっている。

具体的には、高電圧化においても電磁ノイズの上昇を抑制、充電時含め他機器ノイズ影響による電動コンプレッサの誤作動防止が重要であり、それらに対応した素子の選定が必要になっている。

3) 低騒音・低振動化

電動車、特にBEVでは、従来の騒音源であったエンジンがないため、車両静粛性は高まった。電動コンプレッサは、車両停止時や充電時にも作動するため、騒音が大きいと電動車の商品性が損なわれる恐れがある。

また、電動コンプレッサの搭載位置・方法の多様化も進んでおり、車室内から近い位置や振動が伝わりやすい搭載方法となるケースもあり、より一層の低騒音・低振動の電動コンプレッサが求められている。

4) 省動力化

電動車の航続距離を長くすることは利便性の観点で重要であり、多様な場面で使われる電動コンプレッサの省動力化は、電動車の商品性に直結する。従来の車室内空調だけでなく、幅広い作動領域で運転する電動コンプレッサの省動力化が求められている。

以上のように、電動車の多様なニーズに応えるため電動コンプレッサESHシリーズでは容量・電圧帯のバリエーションを拡充した(図4)。



図4 電動コンプレッサの高電圧化・大容量化の拡充
Fig.4 Expanding of High-Voltage / Large-Capacity Electrical Compressor

3 開発の概要

1) コンプレッサ

コンプレッサの能力を向上させるには冷媒流量を多くする必要があり、その手段として「容量を大きくする」・「回転数を上げる」が挙げられる。その背反として、冷媒圧縮時の加振力が大きくなることにより、騒音・振動を悪化させる課題があった。

そこで、まずはスクロール形状に着目した。

スクロール式圧縮機では、1対のスクロール形状が噛み合い三日月形状の圧縮室を形成する。この圧縮機は、回転スクロールの公転運動により容積を縮小しながら徐々に中心部に移動し冷媒を圧縮する。圧縮工程における半径方向圧縮力の変動が加振力の原因であり、変動を小さくする必要がある。しかし、従来設計法では圧縮力の総和ならびにその変動は「なりゆき」となり制御できない。そのため、圧縮力の制御が極めて困難で、長年にわたって騒音・振動低減の根本的な障害となっていた。

圧縮力変動低減を可能にするために歯車用に構築された新歯形理論を発展させ、インボリュート曲線における基礎円半径の可変性と形状の非対称化により、圧縮力と歯厚を所望の値に設定できる新たな形状を創出した((株)豊田中央研究所と共同研究)。これにより歯厚の調整が可能になり、スクロールの巻数増、噛み合う接触位置の調整により圧縮力変動の小さいスクロール形状を設計した(図5)。

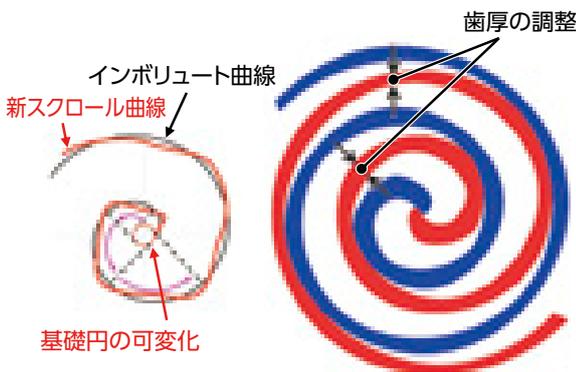


図5 新スクロール形状
Fig.5 New Scroll shapes

さらには、回転不釣り合いの低減に取り組んだ。

回転スクロールは、シャフト回転軸から偏芯した軸で公転運動をするため、回転不釣り合いが発生する。この不釣り合いを解消するために balan

ス部材を組み込んでいるが、回転スクロールの偏芯距離を調整する従動クランク機構により、運転中に揺動し振動増加を招いていた。

これは、大容量・高回転化でより大きな影響を受けるため、揺動する部材を小型化し、バランス部材をシャフトと結合する新たな構造を採用した(図6)。

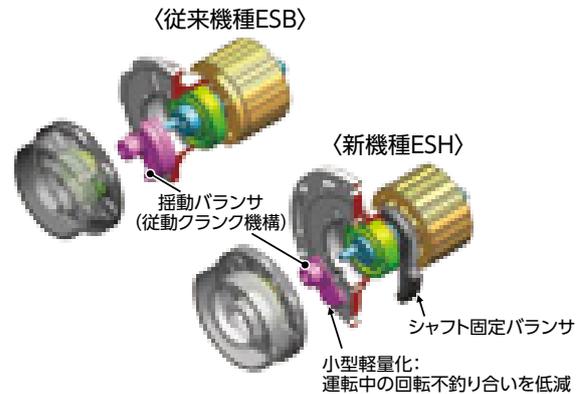


図6 回転バランス構造の比較
Fig.6 Comparison of Rotational Balance Structure

また、回転スクロールを押し付ける背圧機構にも改良を加え、省動力化に取り組んだ。

背圧室の入口は、回転スクロール歯先の隙間を利用し自動的に吐出圧力に比例した背圧制御ができる構造をとっており、常に最適な背圧制御をしている。今回は、背圧室の出口機構を変更した。シャフト後端にて絞り部を設けていた従来構造を見直し、回転スクロールの公転運動に伴い背圧室から吸入室へ間欠的に排出する流路を設けた。

これにより、回転スクロール背面とプレートの摺動部における潤滑性が向上し摺動損失を小さくした(図7)。

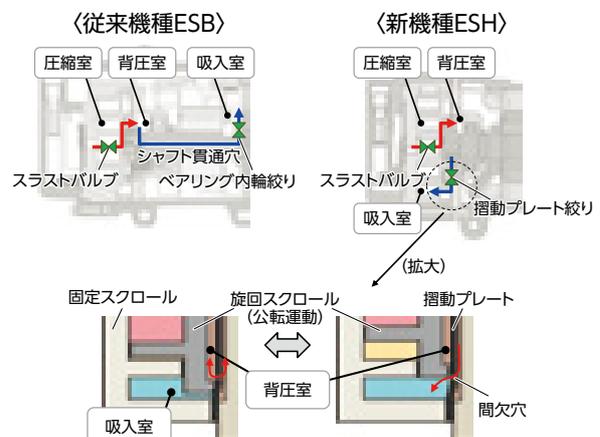


図7 背圧調整機構の比較
Fig.7 Comparison of Back Pressure Adjustment Mechanism

2) モータ

ESHシリーズのモータは、従来機種ของモータを更に小型軽量化する設計を行った。

そのために、効率向上につながるトルクアップアイテムを織込み、その特性向上分を軸短化に振り分け、効率を従来機種と同等にしながら小型軽量化を実現した。そのトルクアップアイテムは、エアギャップ縮小、高磁力磁石の採用、ステータ断面形状の台形ティース化などである(図8)。

そのなかでエアギャップ縮小はトルクアップが大きい反面、騒音・振動の悪化につながるトルク脈動が増加するという背反があった。これを解決するために、実機のモータ電流波形を用いてロータ外周形状を最適化する形状変更を複数回繰り返し、トルク脈動の増加を抑制するロータ外周形状を決定した。

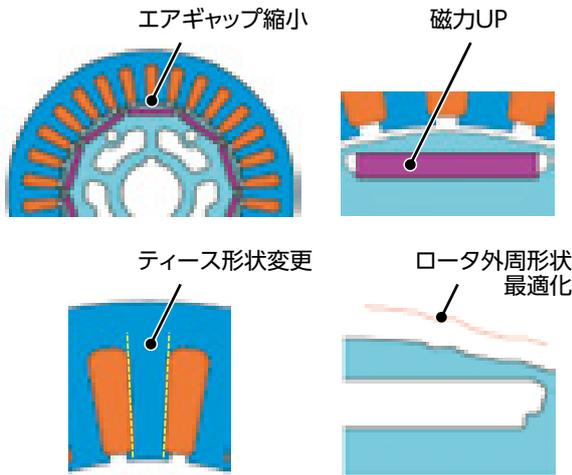


図8 ESHシリーズのモータ概要
Fig.8 Overview of ESH Series Motor

3) インバータ

電動コンプレッサのインバータは車両側システムとの電気適合設計だけでなく、BEVの厳しい電磁ノイズ規格を満足させる必要がある。

従来は、電磁ノイズ抑制のためにディファレンシャルモードコイル2個とコモンモードコイル1個を搭載しており、インバータの体格が大きくなる課題があった。そこで、ESHでは漏れ磁束を利用して上記2種のコイル機能を兼ね備えたハイブリッドコイルを採用し小型化を実現した。

また、車両側との電気共振を抑制するための新技術として機能統合コイルを開発した。ハイブリッドコイルの外周にメタルリングを配置することでハイブリッドコイルで発生した漏れ磁束の電磁誘導によりメタルリングに電流を流し、電力消

費することでダンピング機能を実現した(図9)。

そして、インバータの外壁には、車両の電池および車両側システムと接続するコネクタを各1個備えているが、従来構造はシール材やコネクタ固定部をそれぞれ設置する必要があった。

今回、樹脂と金属の直接接合を開発し、鉄製インバータカバーに樹脂製コネクタを直付けすることで、シール材や固定部材を用いない簡素化を実現し、小型化にも貢献した(図10)。

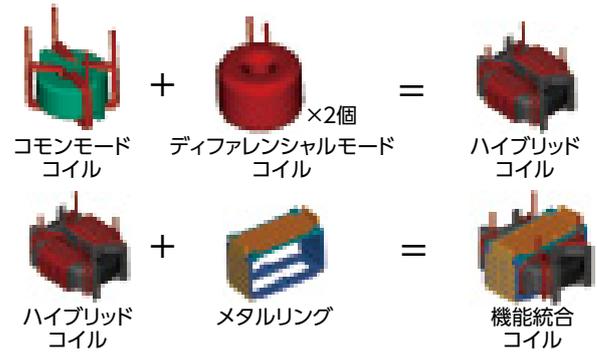


図9 機能統合コイル
Fig.9 Function integrated coil



図10 インバータ構造
Fig.10 Structure of Inverter

4 まとめ

スクロール形状変更による圧縮力変動の抑制、回転バランス構造変更、モータロータ外周形状の最適化により、従来機種の同容量コンプレッサ比較において、静粛性は大幅に改善された。また、背圧調整機構の改良や、モータ磁力UPにより、コンプレッサの効率(COP^{*1})を約5%向上^{*2}できた(図11)。

*1 COP: Coefficient of Performance

*2 年間の使われ方に基づいた条件で測定し、発生頻度を加味して重み付けし積算した効率

また、ESHシリーズとして大能力の電動コンプレッサESH41（スクロール容積41cc）は、容積増加と高速化により従来機種に比べ、冷房能力を40%向上できた（体格20%増）。その一方で、軸受の配置等の構造見直しにより従来機種に比べ2倍以上の長寿命化を実現し、電動コンプレッサ振動は約半分にする事ができた（図12）。

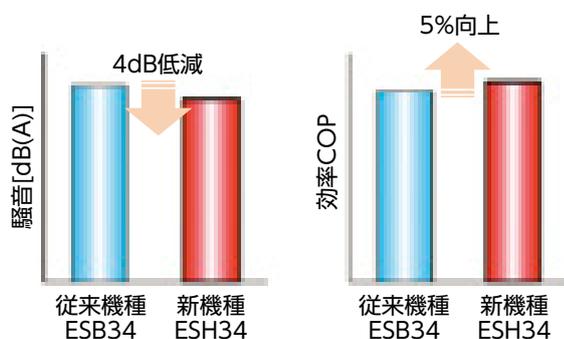


図11 同一容量機種の性能比較
Fig.11 Performance Comparison of Same Capacity Models

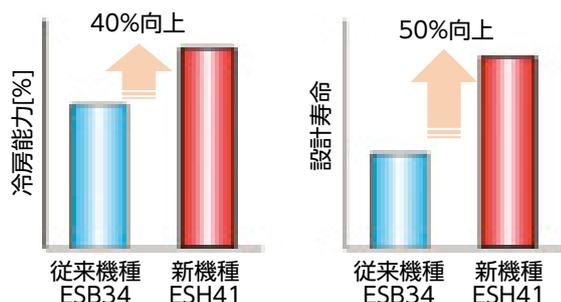


図12 大容量機種の性能比較
Fig.12 Performance Comparison of Large-Capacity Models

2003年にES18の生産を開始して以来、ESHシリーズは当社として第4世代となる電動コンプレッサとなる。

今後は更なる電動車の普及に伴いニーズは多様化することが考えられるため、このESHシリーズの拡充を図り、脱炭素社会構築に貢献していく。

本稿においては、機密の観点からグラフの数値表記は省略しています。

■ 著者紹介 ■



山下 拓郎 木下 雄介 浜名 祥三 安保 俊輔



早川 賢治

開発の経緯と開発者の思い

ESH開発初期を振り返ると、当時の電動コンプレッサはHEV向けを中心に生産台数を拡大していた時期でした。ESHはその延長線上ではなく、BEV向けにも幅広く対応できるようにコンセプト・要求特性を考えるとところから始まりました。具体的には、BEVでより一層重要になる静粛性確保、充電時の電磁ノイズ対応、電池冷却に対応した冷房能力増強など、従来機種では対応できない特性の向上を狙いました。

その具現化には、従来機種まで踏襲してきた設計諸元の見直しや、構造の変更など、ゼロベース思考を心がけました。その一方で、従来機種との混流生産など、ものづくりを考慮する必要があり、開発メンバー全員で課題解決に取り組んできました。

お客さまにとって電動コンプレッサは、普段気に掛けないものだと思います。だからこそ、縁の下の力持ちとなって快適な車室内空間・電動車の利便性に貢献できるよう黒子役に徹することが、良い電動コンプレッサだと考えています。「ん？何か音がするぞ」「エアコンをつけるとガソリンの減りが早いぞ(HEV)、走行可能距離が短くなったぞ(BEV)」と思われないよう今後も製品開発をしていきたいと考えています。

最後に、本製品の開発、生産準備、および生産にあたり多大なご指導・ご協力を頂いた社内の関係者の方々、仕入先の皆様に深くお礼申し上げます。

フォークリフト向け第2世代燃料電池システムの開発 Development of the Second Generation Fuel Cell System for Forklift

山本 哲太郎^{*1} 下築 祐介^{*1} 西村 幸史^{*1} 富本 尚也^{*1} 垣見 洋輔^{*1}
Tetsutaro Yamamoto Yusuke Shimoyana Koji Nishimura Naoya Tomimoto Yosuke Kakimi

*1 トヨタL&Fカンパニー H2プロジェクト

要旨

当社は2016年11月より、日本で初めて(当社調べ)FCフォークリフトの販売を開始した。今後さらに水素社会実現にむけた貢献をするためスタック寿命向上と大幅な原価低減を図った第2世代FCシステムを開発、1.8トン積FCフォークリフトに搭載し2022年度中に販売予定である。

キーワード:FC、水素、FCフォークリフト

Abstract

We started the sale of the Fuel Cell forklift (FC forklift) in November, 2016 for the first time in Japan. We developed the second generation FC system which planned stack life improvement and large cost price reduction in future to do contribution for the hydrogen society realization more. We are going to put it on 1.8 tons FC forklift of L/O in 2022.

Keywords: FC, Hydrogen, FC forklift

1 はじめに

世界的にもカーボンニュートラルへの動きが加速しているなか、当社では、2004年よりトヨタ自動車(株)と共同で第1世代フォークリフト用燃料電池システム(以降FCシステム)の開発を開始し、2016年11月に2.5トン、2019年9月には1.8トン積FCフォークリフトの販売を開始した。

今回、原価大幅減、スタック寿命2倍を図った第2世代FCシステムを開発、1.8トン積FCフォークリフトに搭載し2022年度中に販売予定である。本稿ではその取り組みを紹介する。

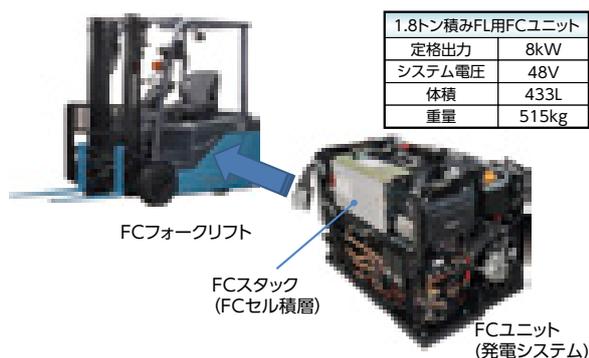


図1 FCフォークリフトとFCユニット
Fig.1 FC Forklift and FC Unit

ルの構成は、2枚のセパレータが電解質膜をはさむ構成になっている。セパレータと電解質膜の間には外部からガスを流し込むための溝や空間が設けられていて、一方に水素、もう一方に空気(酸素)を送ると電解質膜を介して反応が起こり、電気(および水)が発生する。

セル1枚で得られる出力は限られているため、実際に発電システムとして使用する際は必要な出力が得られるよう多くのセルを積み重ねてパッケージ化する。これを「FCスタック」と呼ぶ。出力を変更したい場合は、セルの積層数を変えることで調整が可能である。この締結構造については当社にて専用設計を行っている。

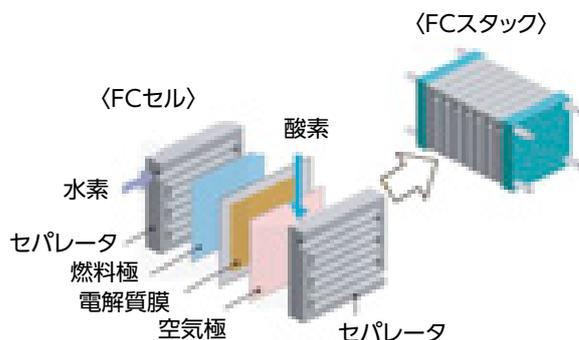


図2 FCセルの構成
Fig.2 Structure of fuel cell

2 フォークリフト向けFCシステム概要

1) FCセル

フォークリフト向けFCシステムで使用しているFCセルは、トヨタ自動車(株)FCEV(燃料電池車)「MIRAI」の第2世代セルを使用している。FCセ

2) FCシステム

図3にFCユニットのシステム概要を示す。心臓部であるFCスタックを中心に、水素供給系装置、空気供給装置、電気装置、冷却装置などで構成されている。これらをワンパッケージ化したユニッ

トがFCフォークリフトに搭載されている。FCユニットは、水素を燃料とし電気を発生するシステムであり、この発電システムを従来の鉛バッテリーに代わる動力源として搭載した電動フォークリフトがFCフォークリフトである。

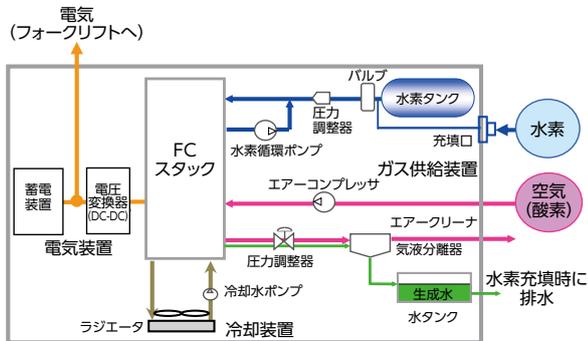


図3 FCシステム図
Fig.3 Fuel cell system diagram

3 第2世代FCシステム開発

第2世代FCシステム開発の主なコンセプトは下記のとおりである。それぞれについて述べる。

- ・FCユニット原価 第1世代比 大幅減
- ・FCスタック寿命 第1世代比 2倍
- ・稼働データ管理システムの海外対応(将来対応)

1) FCユニット原価 第1世代比 大幅減

(1) FC電圧変換システムの変更

FCスタックを構成するセル枚数を減らすことで大幅なコスト低減が図れる。セル枚数を少なくしたうえで、1.8トンFCフォークリフトに求められるシステム電力を供給するシステムを構築する必要がある。

第1世代はセル枚数82セルで構成して降圧DC-DCコンバータを用いる降圧システムであった。第2世代ではセル枚数を減らしてコスト低減するため、昇圧DC-DCコンバータを用いた簡易昇降圧システムを考案した。

| 項目 | 第1世代 | 第2世代 |
|-------|--|--|
| 基本構成 | FCスタック nセル → 電圧変換器 (DC-DC) → フォークリフト 蓄電装置 | FCスタック nセル → 電圧変換器 (DC-DC) → フォークリフト 蓄電装置 |
| システム | 降圧システム | 簡易昇降圧システム |
| DC-DC | 降圧式 | 昇圧式 |
| セル数 | 82 | 58 |
| 考え方 | [スタック電圧 > 蓄電装置電圧]の関係が必要 要求出力以上のセル数82セルで構成 | 簡易昇降圧を実現することで、要求出力にあったセル数(82→58セル)にしてコスト低減 |

図4 FC電圧変換システムの世代比較
Fig.4 Generation comparison of the FC voltage conversion system

従来、昇降圧を実現するためには昇圧式と降圧式の2つDC-DCコンバータが必要であったが、第2世代では今回1つの昇圧DC-DCコンバータで昇降圧を実現している。昇圧式DC-DCコンバータによる昇圧動作だけでなくDC-DCコンバータ上アームダイオードに電流(10~20A)を流すことで降圧動作を行う独自のシステムである。

これは燃料電池の低電流域における電圧ドロップ特性から小電流・小電力で降圧可能なことを利用している。なおセル枚数を減らすことはシステム効率には不利な条件となるが、トヨタ自動車(株)第2世代セル採用による発電IV性能向上や発電制御の工夫等により第1世代同等の効率を達成している。

このセル枚数を減らした58枚セルスタックと昇圧DC-DCコンバータの組み合わせで簡易昇降圧システムを考案したことで、システム出力目標8.0kW確保したうえでコスト低減を達成した。

(2) 補機部品の変更

全部品について選定から見直し、要求仕様を満足しながらもより安価な汎用部品や、とりわけトヨタ自動車(株)のFCEV部品を多数採用(そのまま、もしくは一部変更して採用)した。主要機能部品のFCEV部品流用比率は第1世代約20%に対し、第2世代では約40%と2倍に高めコスト低減を推進した。また各補機の部品点数を削減することでコスト削減できないかを検討した。一例をあげるとDC-DCコンバータアッシーにおいては、ダイオード・コンデンサ・電流センサ・リアクトルヒートシンクを廃止することで、変更前比で60%の原価低減を図っている。

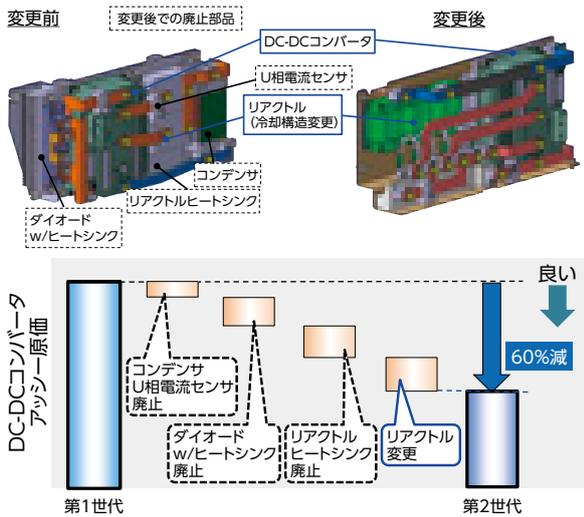


図5 DC-DCコンバータアッシーの原価低減策
Fig.5 The cost price reduction measures of the DC-DC converter assy

なお各補機については1.8トン向けだけでなく、2.5トン向けFCフォークリフトにも共通して使える部品を選定することに留意し今後のラインナップ展開も見据えた。

以上の取り組みによりFCユニット原価 第1世代比大幅減を達成した。

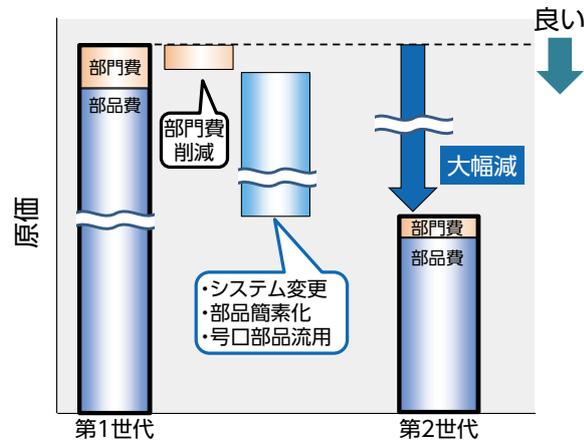


図6 FCユニット原価 第1世代比大幅減
Fig.6 FC unit cost price reduction

2) FCスタック寿命 第1世代比 2倍

(1) スタック劣化許容率の拡大

スタックは通常発電やアイドル、起動停止時などに様々な要因で劣化し徐々に電圧が低下、必要なシステム出力を出せなくなった際に寿命となる。第1世代の降圧システムの場合「スタック電圧>蓄電装置電圧」と常に蓄電装置よりも高い電圧が必要のため許容できるスタック劣化量に制限があった。今回、簡易昇降圧システムを採用したことは、その制限をなくし、より多くの劣化が許容できるようになった。

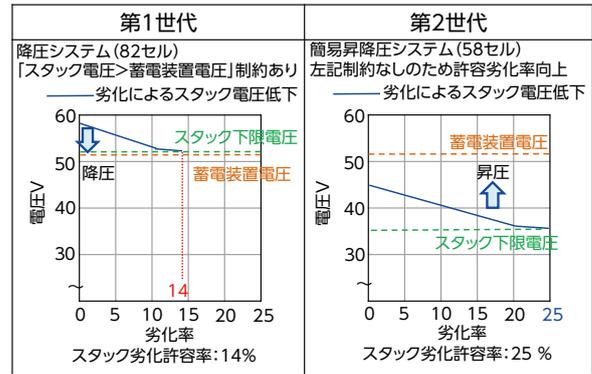


図7 スタック劣化許容率の世代比較
Fig.7 Generation comparison of the stack deterioration permission rate

市場データ解析によりお客様での使われ方をもとにしたスタック耐久パターンを策定し、シミュレーションを行った結果、簡易昇降圧システム採用でスタック劣化許容率が大幅に増加したことにより第1世代比でスタック寿命約1.8倍の見込みとなった。

(2) 新発電制御の開発

簡易昇降圧システム採用によりスタック劣化許容率が向上しスタック寿命が延長したものの、目標の第1世代比2倍には未達であった。スタック劣化要因を分析すると、アイドル時と発電時の劣化が大きいことが分かった。

そこでアイドル時と発電時の劣化メカニズムに着目した。スタックはFCセルを複数枚積層して構成され、セルは水素と酸素を供給すると発電する。このとき投入された水素は膜に付着する触媒に触れることでイオン化する。イオン化した水素は膜を透過し、酸素と電子と結びついて発電する仕組みである。

ポイントは水素分子が触媒に触れることでイオン化し発電するという点であり、基本的にこの反応が阻害されることが劣化につながる。

セルは発電すると電位が変動するが、高電位(0.85V以上)になると触媒が溶出し、逆に下がる際には触媒が凝縮し粒径が大きくなる特徴がある。触媒溶出は高電位にさらされる時間が長いほど溶出率が増加し、その分触媒が減少、水素の反応率が低下し劣化につながる。

また触媒凝縮は、凝縮した際に触媒粒径が大きくなるため、電位変動回数が増えるほど触媒が肥大化する傾向がある。肥大化すると反応面積が低下するため劣化につながる。

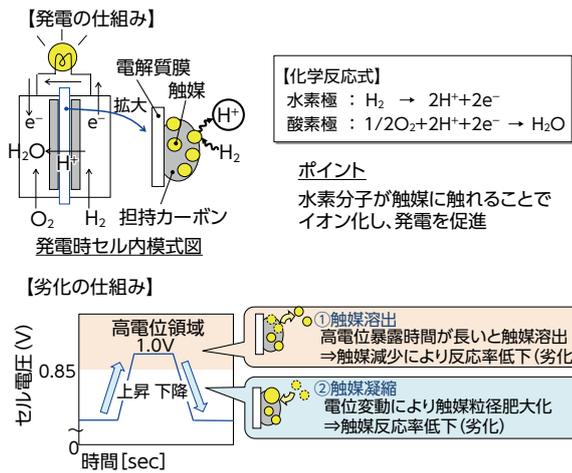


図8 アイドル時、発電時のスタック劣化メカニズム
 Fig.8 Stack deterioration mechanism at the time of idol and the generation

以上のことからアイドル時の高電位暴露時間の短縮化、また発電時の電位変動抑制という新しい制御を導入したので次に示す。

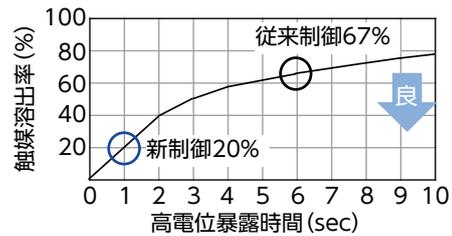
①アイドル時の高電位暴露時間の短縮化

アイドル時はエアコンプレッサを制御し、微量なエア(空気)を間欠的にスタックに供給することにより、劣化の少ない電圧領域に収まるよう制御する必要がある。

しかし従来制御だと最低エア流量100L/minとなるため、エア供給量の加減が難しく、高電位暴露時間が長くなってしまい触媒溶出率が大きかった。今回、エアコンプレッサによるエア供給にあたり、これまでの流量指令でなく回転角指令を用いてエアコンプレッサインバータのDuty算出、モータ角度をより細かく制御する新たな手法を構築した。

これにより約20L/minと従来の約1/5のエア流量で制御可能となり、高電位暴露時間も従来制御に比較し1/6に短縮。アイドル時のスタック劣化率も低減することに成功した。

【効果】
 高電位暴露時間の短縮化



スタック劣化率

電位変動頻度増加による凝縮率増という背反の一方、溶出率低減メリットが劣化率改善に大きく貢献

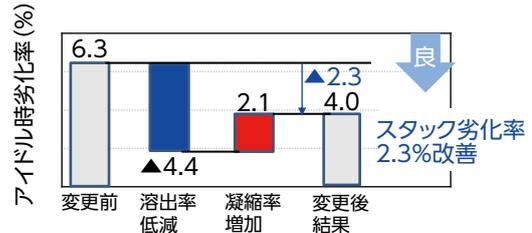


図9 アイドル時の高電位暴露時間短縮による効果
 Fig.9 Effect by high electric potential retention time shortening

②発電時の電位変動回数抑制

発電は車両負荷に応じてスタック発電量を段階的に制御することで低負荷/中負荷/高負荷の3段階で発電量切替を行っている。

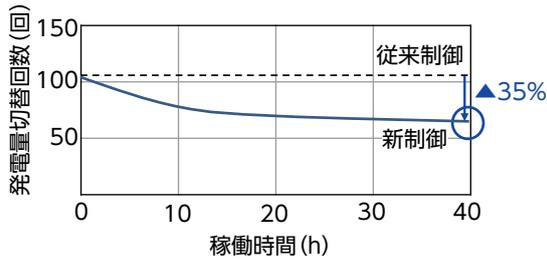
従来制御においては、この3段階の発電量は車両負荷に対応し固定値で発電量切替が行われる。

今回新たに車両負荷から直近40Hの平均発電量を算出し3段階のスタック発電量に適合する制御を構築した。

これによりスタック発電量切替頻度を35%低減し、発電時のスタック劣化率を抑制することに成功した。

【効果】

スタック発電量切替回数推移



スタック劣化率

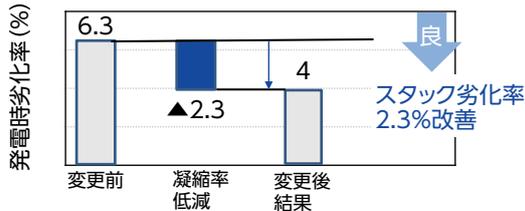


図10 発電時の電位変動回数抑制による効果
Fig.10 Effect by the electric potential change number of times reduction

以上の取り組みによりFCスタック寿命 第1世代比2倍を達成した。

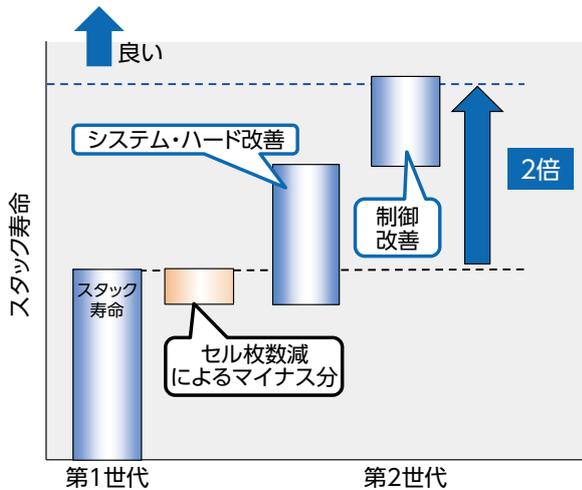


図11 FCスタック寿命 第1世代比2倍
Fig.11 Extension of the FC stack life

3) 稼働データ管理システムの海外対応(将来対応)

第1世代FCシステムから開発データ収集目的での稼働データ管理システムを搭載していたが、国内専用回線・煩雑な手動解析が必要という制約があった。

第2世代では今後のサービス提供や海外展開を見据え、海外対応端末を採用。さらにFCシステムデータ収集をクラウド化することで解析処理の自動化を実現し、今後のサービス拡張が可能なシステムとした。

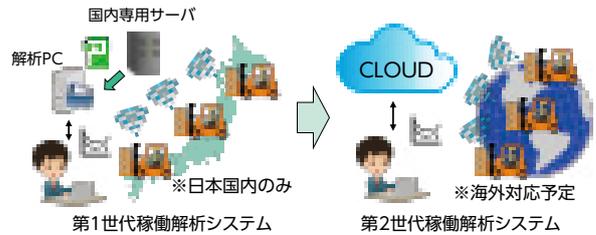


図12 稼働データ管理システムのクラウド化
Fig.12 Cloud of the operation FC data management system

4 まとめ

FCシステム開発にあたっては原価第1世代比大幅減、スタック寿命第1世代比2倍を掲げ、部品・制御・システムの全てにおいて見直しを図った。今後は燃料電池フォークリフトのラインナップ展開を図るとともに、FCシステムの定置発電機・農機・建機等への展開も見据えて技術開発を継続していく。

■著者紹介■



開発の経緯と開発者の思い

2016年11月に、日本で初めて(当社調べ)燃料電池フォークリフト(以下、FCFL)の2.5トン積タイプを発売し、2019年9月に1.8トン積タイプを追加するなど、FCFLの製品開発に取り組んできた。今回、燃料電池タイプの産業車両の普及に向け、トヨタ自動車(株)MIRAI第2世代FCセルを搭載した低コストかつ寿命向上した燃料電池システムを開発した。この開発にあたっては、全部品再選定し、システム構造を根本から見直して刷新することで目標達成した。環境課題への対応は、年々その重要性を増しており、水素の利活用に向けた技術開発を積極的に取り組んでいきたい。

New Traigo80 2.0-3.5 ton Electric Counterbalance Forklift

新型電動フォークリフトTraigo80(2.0-3.5トン)の開発

*1

Francesco Mastroianni

*1 Toyota Material Handling Manufacturing Italy S.P.A.

Abstract

The New Traigo80 (2.0-3.5 ton) is 9th generation 80V EL CB (Electric CounterBalance forklift) developed by TMHMI (Toyota Material Handling Manufacturing Italy S.p.A.) from 2018 to 2021.

The Counterbalance Forklift 2.0-3.5 ton is one of the largest market in EU, however, in the past, the largest part of the trucks within this range were IC CB (Internal Combustion CounterBalance forklift), due to the required performance in terms of Power, Durability and Operating Time.

On the other hand, under the influence of always higher and higher environmental demands, the increasing customers' request is to shift from IC CB to EL CB.

New Traigo80 is enabling users to switch to EL CB instead of using trucks with IC CB by having "Higher power", "Higher durability" and "Long operating time" than conventional to improve productivity and provide a comfortable working environment to the operator by achieving "Low noise", "Low vibration", and "High ergonomics".

Keywords: Electric Forklift, Ergonomics, Display, Armrest, Lithium-ion battery

要旨

新型Traigo80(2.0-3.5トン)は2018年から2021年にかけてTMHMI(Toyota Material Handling Manufacturing Italy S.p.A.)で開発した9シリーズの80V電動カウンターバランスフォークリフトである。これまで欧州での主要ボリュームゾーンでの2.0-3.5トン車では求められる性能(出力・耐久性・稼働時間)によりエンジン車の高シェア状態が続いてきた。

一方で世の中の環境に対する関心の高まりを受け、お客様のエンジン車から電動車へシフトする要望も高まってきている。新型Traigo80は従来車より出力・耐久性・稼働時間を高め生産性を高めると共に低騒音・低振動・高いエルゴノミクス性を達成することで、お客様に電動化へのシフトの機会を提供すると共にオペレーターへ快適な作業環境を提供することを可能にした。

キーワード: 電動フォークリフト、エルゴノミクス、ディスプレイ、アームレスト、リチウムイオン電池

1 Background and introduction

The 8-series Toyota 2.0–3.5 ton Electric CounterBalance forklift was launched in 2013 and it was the first step to increase our share in this growing segment. The 80V is growing faster and is becoming a more dominating factor seeing a shift from IC CB to EL CB over the years linked to environmental benefits for customer (No NO_x, PM) and society (CO₂) due to more stringent emissions regulations on IC CB, specifically diesel. In addition, this new generation looks to support product appeal with improved appearance, ergonomics and features to exceed the competitor's forklifts.

Key points

1) Competition leading performance

- (1) Noise
- (2) Vibration
- (3) Energy consumption
- (4) Productivity

2) Wide list of Options

- (1) Color touch display
- (2) Low hydraulic noise system
- (3) Lithium-ion battery
- (4) Lever and joystick



Figure 1 New Traigo80 Appearance

2 Features and Benefit

1) Competition leading performance

- (1) Noise

Lowest noise values towards the driver achieved thanks to the fully Floating Cabin and new low noise pump with helical gear.

An extensive range of cabin options provides weather protection, increasing comfort and enhanced safety making it easier to take on long shifts both inside the warehouse and in the yard.



Figure 2 Floating Cabin Figure 3 Low noise pump

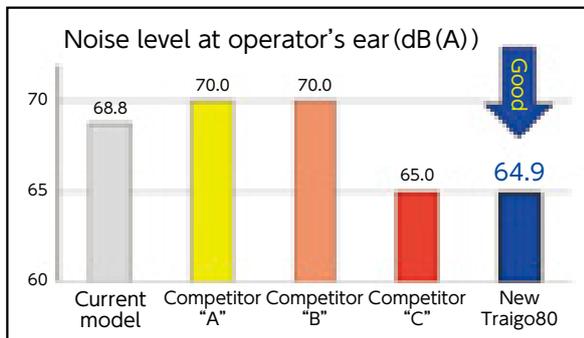


Figure 4 Noise level comparison

(2) Vibration

Thanks to the new fully Floating Cabin and suspension system design, the vibrations transferred to the driver are minimized, reaching lowest values in the market.

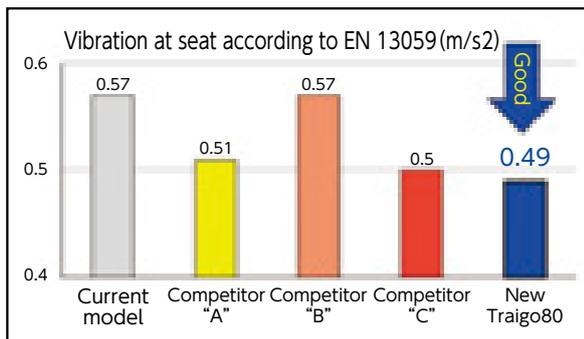


Figure 5 Seat Vibration level comparison

(3) Energy consumption

Lowest energy consumption mainly due to a new generation pump motor with permanent magnetics (IPM motor).

With IPM motor the number of lift is higher in the same time and more with one battery charging.

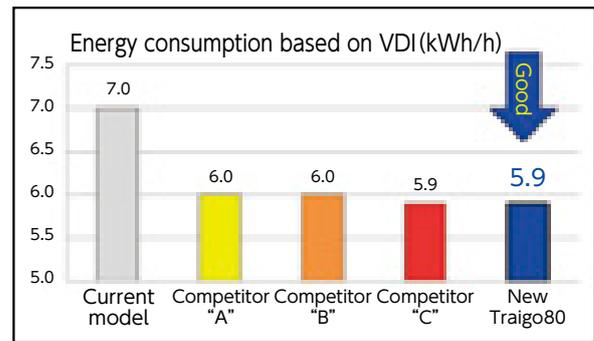


Figure 6 Energy consumption comparison

(4) Productivity

'Easy battery exchange and charging'

The new standard open chassis design which is open on side and bottom of the frame allows easy and quick lateral battery exchange by using another forklift.

Additionally there is an easy access to battery for maintenance.



Figure 7 Open Frame for easy battery exchange

Also available: Lithium-ion Batteries made in-house (420 Ah and 630 Ah). With an integrated charging plug it is possible to charge the truck in a fast and safe way without opening the side panel. This charging plug is called "Kobra plug" and it is in common with WH (Warehouse forklift).



Figure 8 Lithium-Ion Battery (Made in TMHMI)

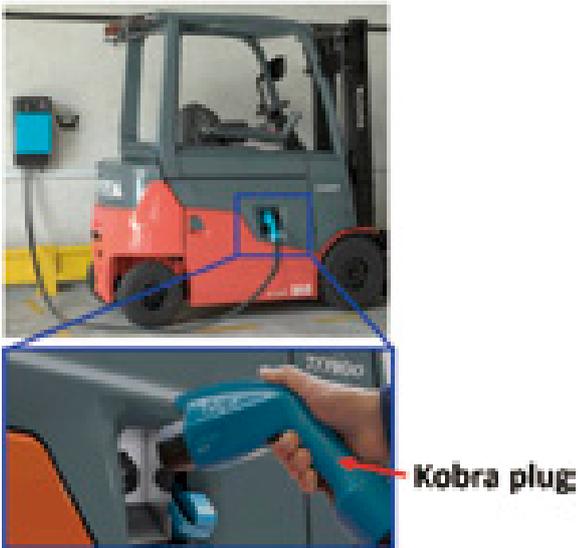


Figure 9 Easy charging with Kobra plug

3 Detailed design – New Armrest

The new Armrest is the prominent innovative feature of the New Traigo80 interior. From the beginning a big focus was placed on user-centric design, usability, and ergonomics. The design was ideated from the very start by using VR technology and corroborated during the development with advanced ergonomics studies following the expertise of Dresden University.

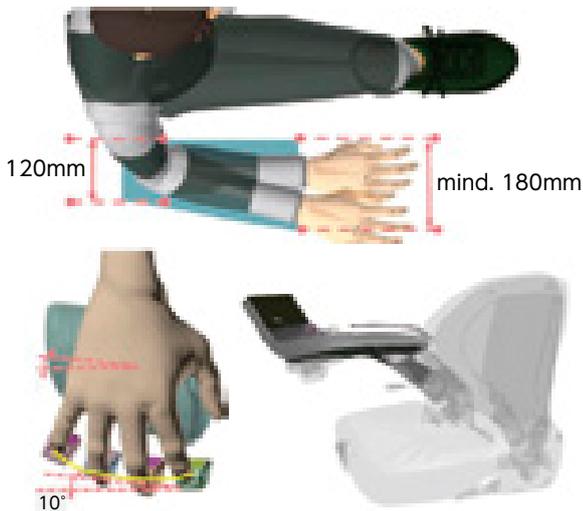


Figure 10 Ergonomic study on the armrest position

The New Armrest was designed to offer a common family feeling with the WH (Warehouse forklift) style which was designed by TMHMS (Sweden), achieved by sharing colors, symbols and design elements such as the mini levers. Furthermore, the graphic layout and

functionality of the Touch Screen user interface has a common theme and shared assets, giving a similar look and feel to the CB and WH screens. This armrest will be implemented to other CB.



Figure 11 Family design with WH

The Armrest is available in multiple configurations with two different types of Display (Touch screen and standard) with mini levers, multi-functional joystick and mini joystick



Figure 12 Mini Lever



Figure 13 Multi-functional Joystick



Figure 14 Mini Joystick

The multi-functional touchscreen provides easy interaction between truck and driver.

The standard multi-functional display provides more traditional interaction.

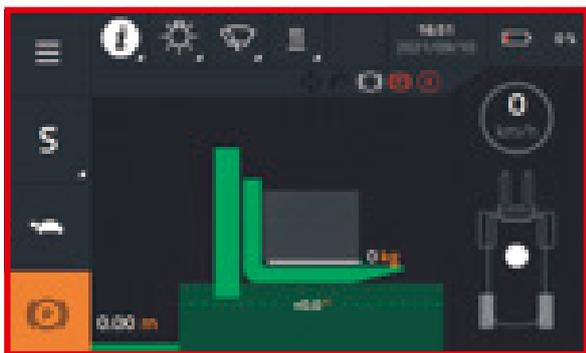


Figure 15 Multi-functional touch screen display (7 inch)



Figure 16 Standard multi-functional display (3.5 inch)

A patent granted for the function that the hand control device vibrates as an alert when the clamp interlock is released. Four other patents are pending.



Figure 17 Patent of hand control device vibration

4 iF DESIGN AWARD 2022

The design was highly rated and won the iF DESIGN AWARD. The iF DESIGN AWARD is one of the most prestigious design awards worldwide. It is organized by the Hannover, Germany-based iF International Forum Design GmbH, a design organization with the longest history in the world, founded in 1953.

In 2022, more than 10,000 entries were received from 57 countries and regions. New Traigo80 was awarded after rigorous judging by an expert jury.



Figure 18 IF DESIGN AWARD 2022



Figure 19 New Traigo80 Appearance

■ Author ■



Francesco Mastroianni
TMHE CB R&D Director

5 Conclusions

The sales result 6 months after commercial launch was 150% exceeded target sales volume. The range 2.0-3.5 ton is going to become more and more one critical segment in the market. The applications are several and severe. The new family trucks will be a big step forward to increase market share.

Improving Ergonomics has become every day more important. The human interface is critical also for the newest request from the new generations

- Touch screen display
- High performance radio
- USB charging ports

商用車向けターボチャージャーの開発 Development of Turbocharger for Commercial Vehicles

種田 剛夫^{*1}
Yoshio Taneda

*1 エンジン事業部 技術第一部

要旨

新たな客先向けに新規のターボチャージャーを開発した。従来の自動車向けではなく、商用車向けターボチャージャーの開発である。商用車向けではターボ性能だけでなく信頼性が重要であり、商用車特有の使われ方も考慮して開発した。

キーワード：商用車向けターボ、性能、排気ブレーキ、翼信頼性

Abstract

We developed new turbocharger for new customers. It is the development of a turbocharger for commercial vehicles, not for conventional automobiles. For commercial vehicles, not only turbo performance but also reliability is important, and it was developed in consideration of the usage peculiar to commercial vehicles.

Keywords: Turbocharger for Commercial Vehicles, Performance, Exhaust Brake, Blade Reliability

1 はじめに

開発当時の2017年は、ターボ事業拡大のためにトヨタ自動車(株)向けや産汎向け以外の外販を目指していた。

その足掛かりとして、日野自動車(株)小型トラック向けターボを開発した。



図1 ターボ事業計画 (2017年当時)
Fig.1 Turbocharger Business Plan (at the time of 2017)

日野自動車(株)は新たなターボサプライヤーを探していた。

同じトヨタグループで生産している当社製GD向けターボに着目し、日野自動車(株)向けに流用・改良で対応できないかと考えていた。両社の考えが一致し、開発を実施した。

2 開発の狙いとコンセプト

今回のターボが搭載されるのはデュトロ等に搭載されているN04Cエンジンの一部仕向である。



| | |
|--------|-------|
| エンジン型式 | N04C |
| 排気量 | 4L |
| 出力 | 100kW |
| トルク | 400Nm |

図2 搭載車両⁽¹⁾とエンジン諸元
Fig.2 Vehicles and Engine Specifications

エンジン出力よりターボサイズ(≒空気量)が決まり、今回は当社ターボシリーズのMサイズターボである。

| TICO Turbo Series | | S | M | L | LL |
|-------------------|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Impeller Size | φmm | 38~43 | 45~51 | 54~61 | 62~70 |
| Air Flow | g/sec | ~120 | 100~200 | 160~250 | 200~350 |
| Engine Power | kW | ~100 | 90~170 | 140~210 | 170~300 |
| Displacement | L | 1.2-2.0 | 1.8-3.0 | 2.8-5.2 | 3.6-5.5 |
| Diesel | Heavy Duty | ● | ● | ● | ● |
| | VGT | ● | ● | ● | ● |
| | Variable Geometry Turbocharger STD | ● | ● | ● | ● |
| | $\pi C > 3.5$ | ● | ● | ● | ● |
| | $\pi C > 3.5$ | ● | ● | ● | ● |

●:量産中、●:今回開発

図3 ターボラインナップ
Fig.3 Turbocharger Lineup

2015年に量産化したMサイズターボのCT8DVをベースに、性能や信頼性といった日野自動車(株)からの要求を満足するよう開発を実施した(図4)。商用車においても燃費は重要な項目であり、その要求に対して新規の高効率翼を開発した。

今回の開発で重要である、商用車特有の使われ方に対してはヒアリングし、信頼性確保のコンセプトを決定した。

1つはブレーキ力強化のために排気ブレーキが装着されており、排気ブレーキ作動においてターボの排気側(タービン側)の構成部品のストレス増加への対応である。

2つめは翼の信頼性確保である。翼が破損すると走行不能になるため、開発時には要求の安全率を確保した設計、評価では壊し切ることで設計の確からしさを確認することである。

3 開発内容

1) ターボ概要

ベースに対して2つのコンセプトを満足するように翼や可変ノズル(VN)を開発したが、タービンハウジングやコンプレッサハウジングも搭載要件に合わせて新規設計した。

| ポイント | 項目 | コンセプト |
|-------------|----------------|---------------|
| 性能マッチング | 現行エンジン同等以上の燃費 | ① 高効率翼設計 |
| 商用車特有の信頼性確保 | 高負荷 | ② 翼信頼性確保 |
| | 長時間 | ③ 高耐熱材採用 |
| | 排気ブレーキ | ④ 商用車向け可変ノズル |
| | | ⑤ スラストベアリング強化 |
| オイルシール | ⑥ シールリング耐摩耗性向上 | |
| 低コスト化 | ⑦ シール機能強化 | |
| | | ⑧ 部品共通化 |

図4 ターボコンセプト
Fig.4 Turbocharger Concept

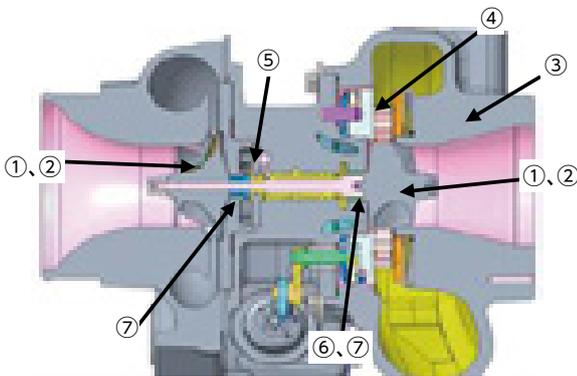


図5 ターボ断面図
Fig.5 Turbocharger Cross Section

N04Cエンジンに搭載されるターボは、仕向地違いで他社ターボも使用している。そのためエンジン全体のコスト低減のためにコンプレッサ入口配管を共通化できるよう要求あり、それに合わせた形状とした。タービンハウジングは自動車向けに対してリブ追加等の剛性アップをした。従来はタービン入口とターボステでエンジンに拘束されていたが、今回はタービン入口のみのためハウジング剛性を上げて変形を抑制した。

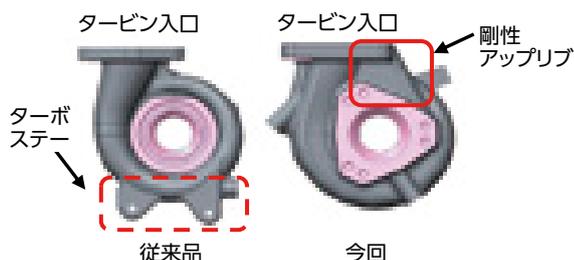


図6 タービンハウジング
Fig.6 Turbine Housing

2) 性能

性能面で要求されていることは他社量産ターボより燃費を向上させることである。エンジン燃費向上にターボで貢献するためにはターボ効率を向上させ、エンジンのロスを低減することである。

エンジンデータを入手し、燃費に寄与度の大きいポイントを管理点として設定し、新翼開発に着手した。



図7 性能管理点
Fig.7 Performance Control Points

モード走行での燃費寄与度の大きい箇所を面でカバーし、出力点も加えた効率管理点で翼開発を実施した。作動範囲の全域で効率向上が必要である。そのために翼面のエネルギー分布に着目して、従来翼に対して最適エネルギー分布の翼形状を開発し、他社トップレベル(図8)と同等の効率を達成した。

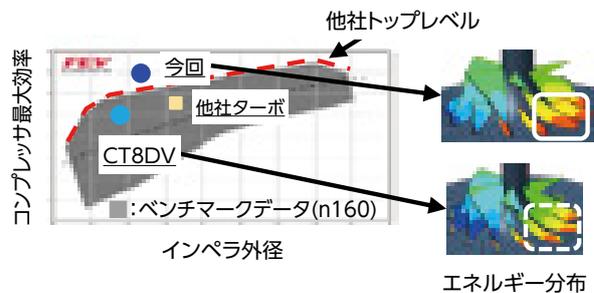


図8 効率比較
Fig.8 Efficiency Comparison

3) 商用車特有の信頼性

(1) 排気ブレーキ対応

排気ブレーキはエンジンのフリクションを増加させてエンジンブレーキを強化するものである。今回はターボ直後に搭載されたバルブがあり、排気ブレーキ作動時にはバルブを閉じることで圧力を高めてフリクションを増加させる、商用車特有の構造である。

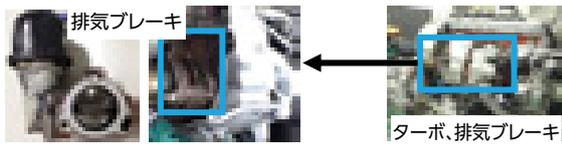


図9 排気ブレーキ
Fig.9 Exhaust Brake

バルブを閉じた時は、タービン側の圧力上昇や脈動が増加し、各部品の強度アップが必要である。

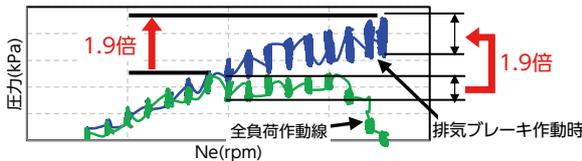


図10 排気ブレーキ作動時
Fig.10 Exhaust Brake Activated

強化するのは可変ノズル(VN)、スラストベアリングである。ターボは排気ガスのエネルギーによって駆動する。排気ガスはエンジンの運転状態で変化する。可変ノズル(VN)はガス流量に追従するように構成部品であるベーンの角度を変更してターボが効率良く駆動できるようにする機構である。



図11 可変ノズル(VN)
Fig.11 Variable Nozzle

圧力脈動によりベーンが振動し摺動部に摩耗が発生する。

摩耗低減のためにベーンの軸径アップにより摺動部面圧低減と、ユニゾンリングとベーンアームの衝撃荷重低減の設計をした。



図12 可変ノズル(VN)にかかる荷重
Fig.12 Load on Variable Nozzle

衝撃荷重低減には排気ブレーキ作動時の他社ターボでの運転データを独自評価にて取得・解析しストレスを正確に把握し、ベースターボ以外の

機種の一部も流用することで部品質量を低減し荷重低減した。

また、部品流用もできたのでコスト低減にもつながった。

耐摩耗性が向上した可変ノズル(VN)では排気ブレーキのターボ評価、それ以外の評価でも摩耗低減を確認できた。

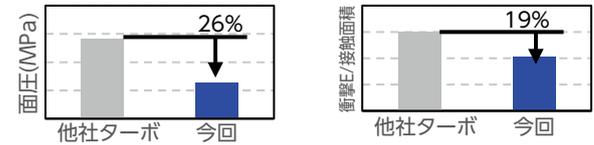


図13 面圧、衝撃荷重
Fig.13 Surface Pressure, Impact Load

スラストベアリングはターボの軸方向の荷重を受ける部品である。軸受部はテーパ形状になっており、相手部品であるスラストカラーとのくさび効果により油圧の反力で保持する。排気ブレーキ作動時にはタービン側とコンプレッサ側の圧力差が大きくなり、スラスト荷重が大きくなる。

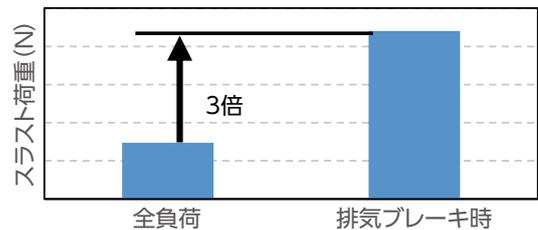


図14 スラスト荷重
Fig.14 Thrust Load

排気ブレーキ時の荷重に耐えるために、衝撃荷重低減と同じように独自評価結果を解析し、摺動部の面圧低減とテーパ形状設計によりスラスト発生荷重を確保した。

スラストベアリングも同様に排気ブレーキのターボ評価、それ以外の評価でも不具合ないことを確認できた。



図15 スラストベアリングとスラストカラー
Fig.15 Thrust Bearing and Thrust Color

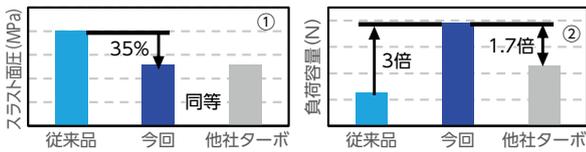


図16 面圧と負荷容量
Fig.16 Surface Pressure and Load Capacity

(2) 翼信頼性

翼の主な破損モードはインペラの低サイクル疲労破損 (LCF) とタービンの高サイクル疲労破損 (HCF) である。

インペラLCFは従来開発手法で要求を満足でき、ここではタービンHCF対応の考え方、開発内容を述べる。

タービンHCFはベーン後流のウェークによる圧力疎密がタービン翼の固有値が共振して起こる破損モードである。

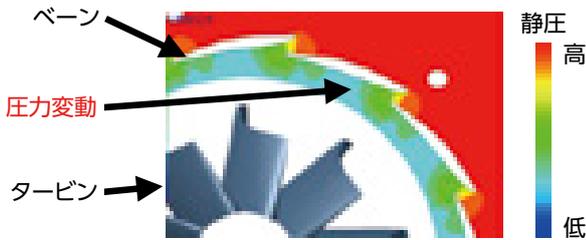


図17 ノズルウェーク
Fig.17 Nozzle Wake

タービンHCFを回避するためには以下の2つがポイントである。

- ・ 翼の固有値を使用域に入れない
- ・ 共振が発生しても破損しない応力設計

自動車用では使用域に翼3次固有値は入れない。2次以下の固有値に対しては、共振時の応力がクライテリア以下になる設計をしてきた。

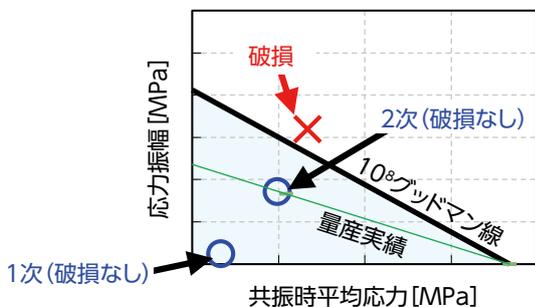


図18 HCF信頼性確保の考え方 (従来)
Fig.18 Concept of HCF Reliability (Conventional)

しかし今回は使われ方や物のバラツキ含めてきわめて高い信頼性が要求されている。設計方針(≒

要求)は翼2次固有値がバラツキを考慮しても使用域に入らないことである。

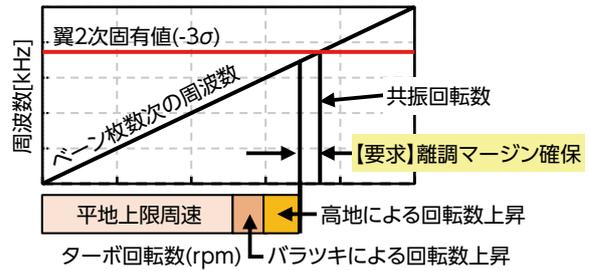


図19 HCF信頼性の考え方 (今回)
Fig.19 Concept of HCF Reliability (this time)

翼固有値を上げるためには剛性アップが必要であるが、要求が厳しいうえに2)の性能の両立も必要のため、従来の翼やハブの肉厚アップに加えて翼枚数やディスク部剛性も含めて開発した。

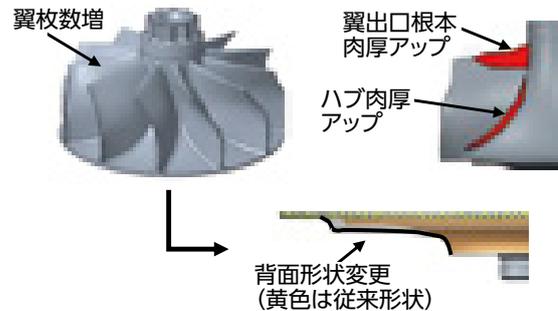


図20 固有値対応
Fig.20 Eigenvalue Correspondence

翼枚数増加はベーンとの枚数差を1とすることで、ウェークによる翼への加振を1回転につき1回にする。

また、ディスク部は翼を支えるため従来より厚くした。

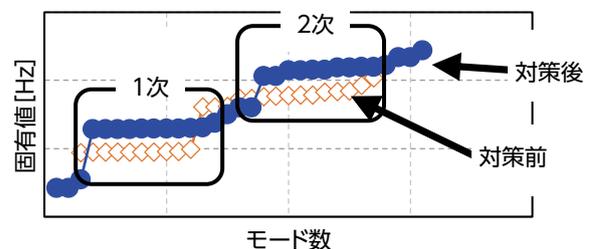


図21 固有値解析結果
Fig.21 Eigenvalue Analysis Result

CAE (Computer Aided Engineering) によりこれらの対策で固有値向上を確認でき、実測においても使用域に対して余裕のある結果である。

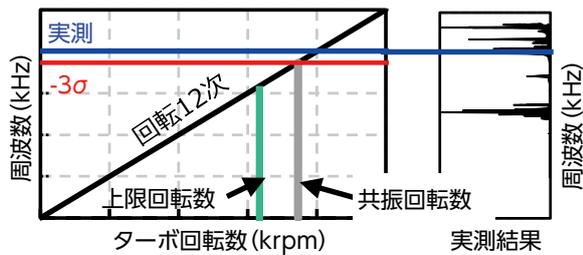


図22 固有値実測結果
Fig.22 Eigenvalue Measurement Results

4 まとめ

今回の開発を通して当社初の商用車向けターボが完成し、今後、同じような高い信頼性が要求された時の開発のベースとする。

また、トヨタ自動車(株)以外の客先向けに進め方・考え方の違いの一つがわかったので、今後の参考にしたい。

参考文献

- [1]日野自動車(株)ホームページ
- [2]FEV_TC_Scatterbands_Update_210322

著者紹介



種田 剛夫

開発の経緯と開発者の思い

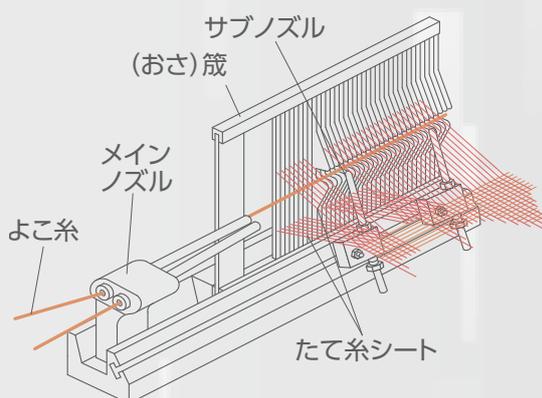
商用車向けは信頼性が重要だとは聞いていたが、自動車向けの改良レベルで対応できると考えていた。

実際に開発を始めると、信頼性要求を満足するために自動車用の開発の延長線のものもあったが、商用車特有の要求を満足するためにはさまざまな開発要素があり、ほぼ新規開発となってしまった。

要求仕様は受領していたが、それぞれの項目について日野自動車(株)の考え方を理解するために、コミュニケーションを密にとり意図を一つずつ確認しながら開発した。客先が変われば同じ要求でも内容が異なることを体験でき、今後さまざまな客先と付き合いにあたって貴重な経験ができた。

開発の進め方も従来のトヨタ自動車(株)向けとは異なる。トヨタ自動車(株)向けではエンジン開発の中でターボ開発も実施し完成度を上げる進め方である。それに対して他社のエンジン開発でのターボはある程度完成されたもの・実績のあるもので進める。そのため他社向けで開発する時は、従来より完成度の高いターボでスタートする必要がある。

技術解説



Technical Review

- P.83 エアジェット織機用変形箆のよこ糸飛走性能に関する評価指標
- P.88 フォークリフト用ワイヤハーネスの電線色選定ツール開発
- P.94 アンモニアを燃料とする火花点火エンジンの始動技術
- P.99 AIを活用した良品条件探索と変化点検知の自動化
- P.105 作業姿勢分析システムの開発とその応用

エアジェット織機用変形箄のよこ糸飛走性能に関する評価指標 Characteristic Weft Insertion Indicators of Profile Reed on Air Jet Loom

牧野 洋一^{*1}
Yoichi Makino

*1 繊維機械事業部 技術部

要 旨

変形箄おさまはエアジェット織機の省エネ性能、稼働安定性に関わる重要部品である。当社開発の変形箄「e-REED」は、2011年に発売以後多くのお客様から受入れられてきた。変形箄は専門メーカーでの製造になるが、サブノズルエアとの組合せでそのよこ入性能を発揮するため、箄メーカーのみならず織機メーカーの熟練者の経験、見識も重要になる。変形箄には薄板に特殊な研磨テーパ加工が施されている。このテーパ加工の研磨基準は、よこ入性能に大きく関わるものであり、実製織評価とそれに基づく熟練者の感覚頼りで決定される場合が多かった。本報告では、熟練者の感覚を可視化することにより、変形箄におけるよこ糸飛走性能の定量的な評価指標化に取り組んだ事例について報告する。

キーワード：エアジェット織機、よこ入、箄、風速分布

Abstract

The profile reed is an important equipment in the energy-saving performance and operational stability of air-jet looms. Our "e-REED" have been accepted by many customers in the world since 2011. Profile reeds are manufactured by specialized manufacturers. Profile reeds work well in combination with sub-nozzle air. So the experience and insight of not only the reed manufacturer, but also the weaving machine manufacturer's skilled workers are also important. In this report, we report the characteristic indicator about weft insertion performance in profile reeds by visualizing the senses of our skilled persons.

Keywords: Air Jet Loom, Weft Insertion, Reed, Air Flow Velocity Distribution

1 はじめに

変形箄の重要な役割のひとつは、サブノズルから噴射される圧縮空気を用い、よこ糸を布端まで安定して搬送することである。圧縮空気用エアコンプレッサが消費する電力は非常に大きく、変形箄の性能は品質のみならず省エネ性能にも大きく影響する。エアジェット織機では、薄板状の箄羽（数千枚）に適切な研磨加工を施すことにより、安定したよこ糸飛走を実現している。従来、よこ糸飛走性能を左右する研磨仕上げの検査基準は、熟練者の感覚を頼りに、入口部の糸姿勢やよこミスの発生状況などを確認しながら決定されてきた。本報告では、これらの関係を定量的に評価するための指標について紹介する。

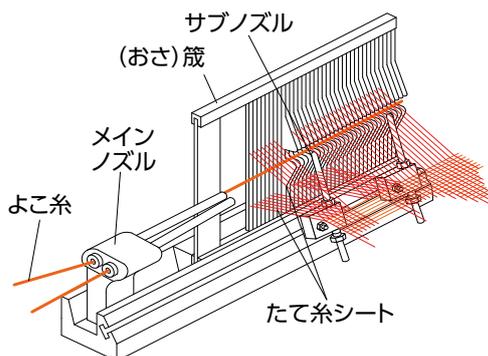


図1 よこ入装置
Fig.1 Weft Insertion

2 変形箄

エアジェット織機のよこ入概念図を図1に示す。変形箄の役割としては次のようになる。

- ・たて糸シートを揃える
 - ・サブノズルエアでよこ糸を織幅端まで搬送させる
 - ・搬送が完了したよこ糸をたて糸シートに打込む
- 変形箄は図2aに示すようによこ糸搬送用通路を持った薄板状の箄羽（数千枚）から成っている。板厚0.1~0.6mmの箄羽一枚一枚には図2bに示すように、断面方向にテーパ加工（研磨）が施されている。各面（上壁、奥壁、下壁）に適正なテーパ加工を施すことにより、よこ糸飛走に適したエア流れを形成する。

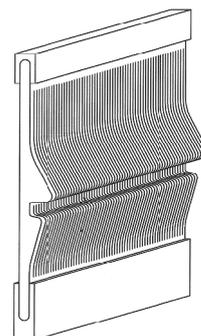


図2a 変形箄
Fig.2a Profile Reed

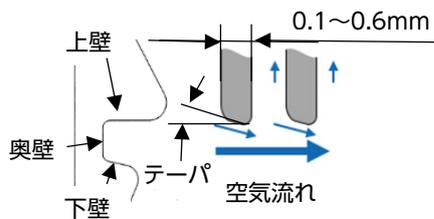


図2b 変形箄 (箄羽詳細)
Fig.2b Profile Reed (Detail)

テーパ加工 (研磨) の検査方法は、図3aに示すようなノズルと一定間隔に配置されたピトー管のセットを用いて、箄通路内の (Y,Z) 定点を長手方向 (X方向) に移動させながら風圧値を測定する方式が多く用いられる。図3bに風圧値の例を示す^[1]。この例では、入口部のL1領域ではその他の右側のL2領域より風圧値を低くしている。L1、L2領域を実体イメージ図で示すと図3cのようになり、各領域でのよこ糸飛走との関係を示すと表1のようになる。本報告はL1領域でのよこ糸飛走の安定性に関するものである。

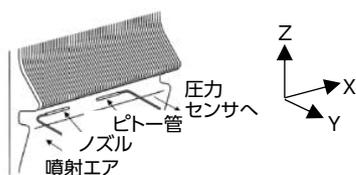


図3a 風圧値検査 (イメージ図)
Fig.3a Instction Method

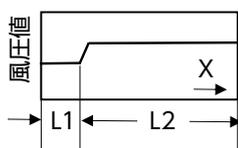


図3b 風圧値設定例
Fig.3b Adjustment Example

表1 よこ糸性能との関係
Table1 Effect for Weft Insertion

| 領域 | L1 | L2 |
|-------|-----|-----|
| 飛走安定性 | 影響大 | 影響小 |
| 飛走速度 | 影響小 | 影響大 |

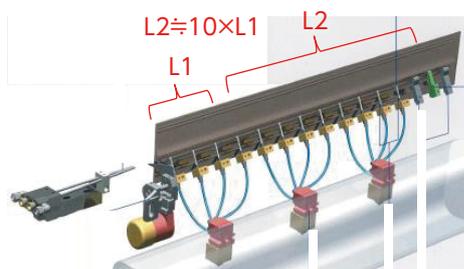


図3c よこ糸3Dモデル図
Fig.3c Weft Insertion 3D model

3 風速分布測定

熟練者の感覚を可視化するために、箄通路部風速分布の測定を行った。図4aに示すような装置で、一定圧噴射状態の風圧を上下左右0.2mmピッチで測定し画像処理する方式である^[2]。図4bに示した第1サブノズル下流の測定面1での風速分布を図4c(i)に示す。同図ではメインノズルからのエアとサブノズルからのエアが別々に存在している。第2サブノズル上流の測定面2での風速分布図を図4c(ii)に示す。同図ではサブノズルからのエア流れがメインノズルエアに合流している。外縁線は風速10m/sの等高線を示し、これより外側の領域はよこ糸飛走に影響を与えないと考えている。

図5に風速分布と稼働安定性との関係について示す。これはスパン糸細番手幅仕様での例であるが、上段が稼働不安定であった箄、下段が稼働安定であった箄である。第2サブノズル前後で、風速分布には相対的に、次の特徴が表れている

- ・ 箄通路前面へのエア漏れ出し量が安定箄の方が少ない。
- ・ 高風速領域が安定箄の方が通路奥側によっている。

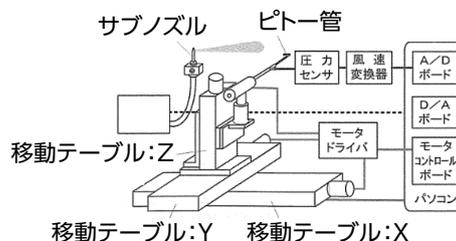


図4a 風速分布測定装置
Fig.4a Measuring System

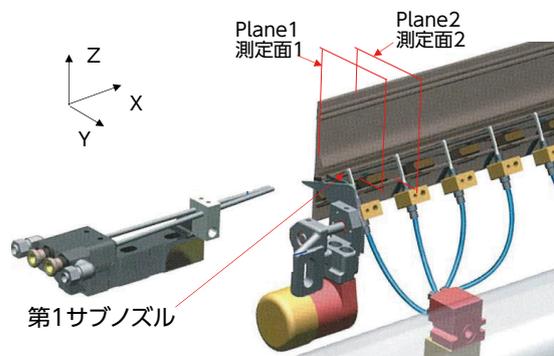


図4b 測定面
Fig.4b Measuring Plane

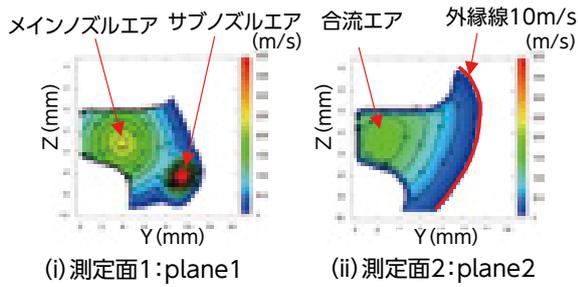


図4c 風速分布図
Fig.4c Velocity Map

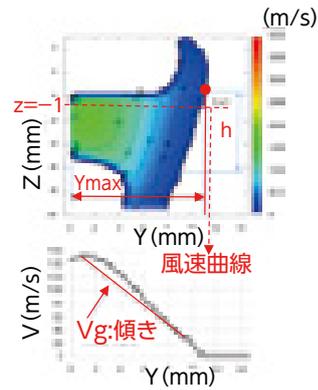


図6 評価指標 (Ymax, Vg)
Fig.6 Characteristics Indicators

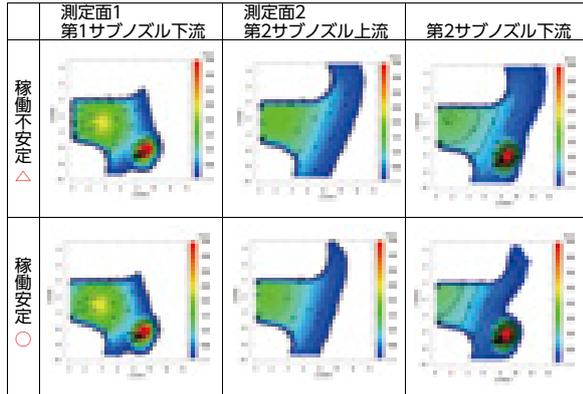


図5 風速分布比較 (安定筈 (下段) と不安定筈 (上段))
Fig.5 Velocity Map (Stable (bottom) and Unstable (top))

4 評価指標

図5の例について、いくつかの指標について検討し、最も有効性の高かったのが次の2項目である。

1) Ymax:

図6上図の筈通路内(h)の上下領域で、風速10m/sの測定点のうちY方向の最大値を示す。

これはよこ糸の筈通路外部への飛出し易さの指標と言え、小さい方がよい。

2) Vg:

図6上図のZ = -1での風速値vを図6下図に示す。この曲線の線形近似Vaの勾配の絶対値(|dVa/dy|)をVgとした。

これはよこ糸の筈通路奥部への寄り易さの指標と言え、大きい方がよい。

5 筈評価検討例

1) 検討例1

図5の稼働安定性に差のある1組の筈(スパン細番手広幅仕様)で検討した。Ymaxについて第1サブズル~第2サブズル下流までの値を図7(a)に示す。安定筈A1は長手方向に変化しても全体的に小さく、第2サブズル付近で安定筈A1(○)と不安定筈B1(△)には大きな差が発生している。

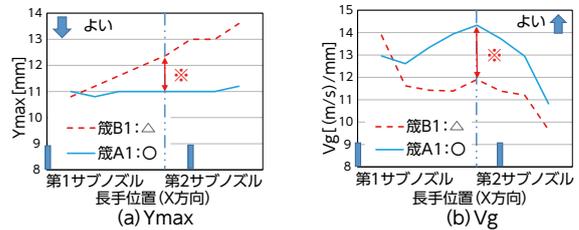


図7 検討例
Fig.7 Test Sample 1

Vgの検討結果を図7(b)に示す。安定筈A1は不安定筈B1よりVgが大きくなっている範囲が多い。これらの関係を適正な位置で評価することが重要になる。ここで、Ymax、Vgとも第2サブズル前の測定面2(図4b)で、安定筈A1と不安定筈B1に大きな差が発生しており(※印部)、評価位置として適していると考えられる。その妥当性を風速分布で確認する。測定面2の風速分布比較として、図8(a)に安定筈A1、図8(b)に不安定筈B1を示す。Ymaxは不安定筈B1である図8(b)の方が大きく、同図(上図)で筈前面へのエア漏れ出し量が多く、筈B1の不安定さが確認できる。また、Vgは前述のように安定筈A1である図8(a)の方が大きく、同図(下図)で最高風速部が筈奥壁面に寄っており、筈A1は、よこ糸が筈通路奥部への寄り易い流れになっている。これらより、測定面2が指標評

価位置として妥当であると言える。

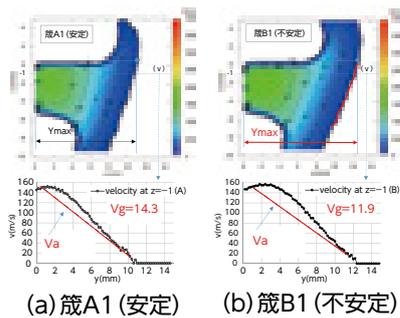


図8 風速分布(測定面2)
Fig.8 Velocity Map (Plane2)

2) 検討例2,3

検討例2として、フィラメント仕様の箆において稼働安定差のある1組の箆について、Ymax、Vgの測定結果を図9(a)(b)に示す。安定箆A2と不安定箆B2の傾向は図7と同様な傾向にあり、検討例1と同じ測定面2で安定箆A2(O)と不安定箆B2(△)の間に差が確認できる(※印部)。

検討例3として、スパン特殊仕様での1組の箆について、Ymax、Vgの測定結果を図10(a)(b)に示す。同図より検討例2と同様なことがわかり、検討例2,3でも評価指標とその評価位置の妥当性が確認できる。

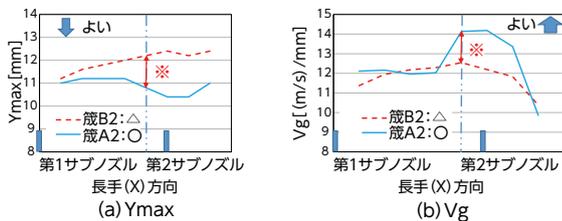


図9 検討例2
Fig.9 Test Sample 2

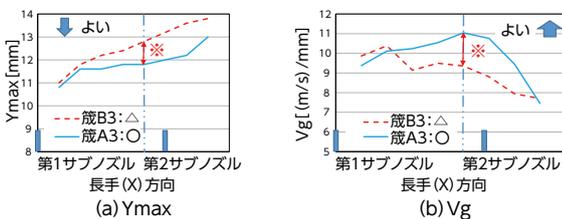


図10 検討例3
Fig.10 Test Sample 3

6 評価指標まとめ

図11aに第2サブノズル上流の測定面2のYmaxの比較、同様に図11bにVgの比較を示す。3例とも安定箆A(O)と不安定箆B(△)との間に一定の差

が認められる。安定箆と不安定箆の間に絶対的なしきい値を設定することは困難であるが、同様な仕様間の箆であれば相対比較が可能である。

この特性を利用すれば、新規仕様の箆を検討する場合に、実績のある類似仕様の箆との間で、Ymax、Vgを用いて相対比較すれば、実製織での評価なしで、ある程度の性能確認が可能である。

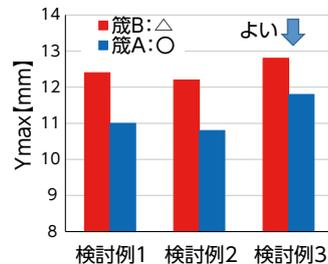


図11a Ymax(測定面2)
Fig.11a Ymax(Plane2)

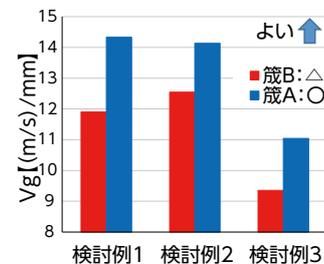


図11b Vg(測定面2)
Fig.11b Vg(Plane2)

7 サブノズル圧と評価指標との関係

前項までの指標はメインノズル圧力、サブノズル圧力とも300KPaでの測定結果である。ここでは実際の調整方法を想定して、サブノズル圧力を変化させた場合の特性について示す。スパン標準仕様のe-REEDで、メインノズル圧力を300KPaに固定し、サブノズル圧力を200~500KPaに変化させた場合のYmax、Vgを図12aに示す。箆前面へのよこ糸の飛出し易さを示すYmaxはほぼ変化せず、よこ糸の箆通路奥部への寄り易さを示すVgは大きくなっている。図12bに風速分布図の比較を示す。サブノズル圧力が300KPaと500KPaで箆前面へのエア漏れは変わらず、500KPaのときの方が最高風速値は高くなっている。これらのことは評価指標面からみると、サブノズル圧力の上昇は、よこ糸飛走の安定化につながることを示している。

一方、熟練者がよこ糸飛走安定化のために、サブ圧を上げることは、基本的な対策方法のひとつで

ある。このことから評価指標 Y_{max} , V_g の妥当性が確認できる。

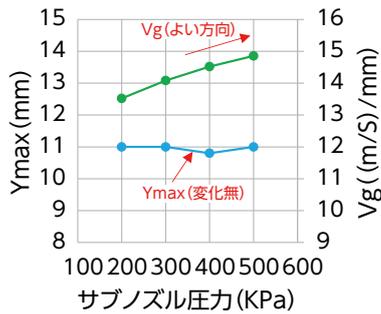


図12a Y_{max} , V_g と圧力
Fig.12a Y_{max} , V_g on Pressure

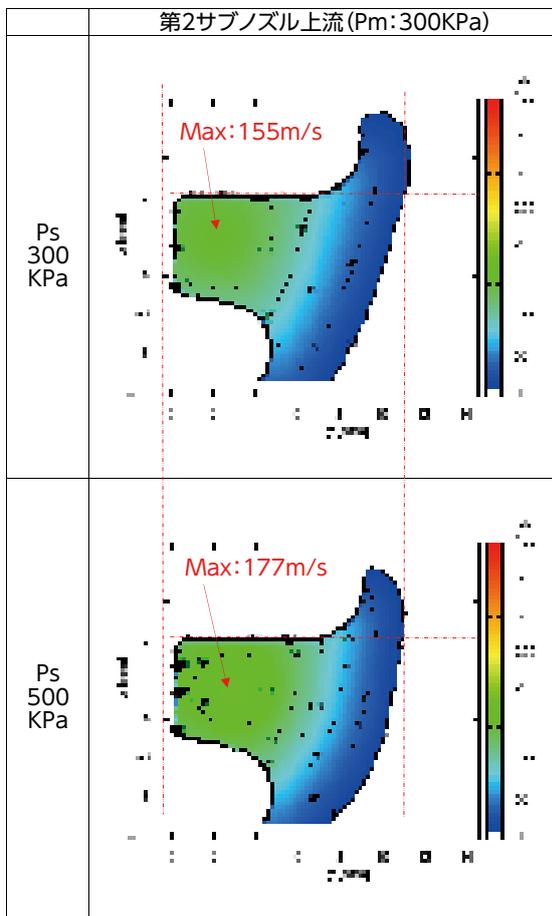


図12b 風速分布 (300&500KPa)
Fig.12b Velocity Map

8 おわりに

エアジェット織機用変形筈におけるよこ糸飛走の安定性について、相対評価レベルではあるが、 Y_{max} , V_g を用いて定量的に評価できることを示した。

e-REED特型仕様において、本指標を有効利用の上、研磨仕様を決定した筈をお客様に納入し、

稼働もご満足いただいている実績もある。また、e-REED標準仕様の改良検討も進行中である。

変形筈における評価指標は、背面エアの流れの制御、間欠噴流の影響^[3]等、発展の余地は多い。本取組みが、その足掛りになり、よこ糸性能向上につながることを確信している。

参考文献

- [1] 白木, 松山, 石川 公開特許公報 特開平 5-86544
- [2] 牧野, 鈴木, 戸田, 吉田 エアジェット織機用サブノズルの噴射特性 繊維機械学会誌 せんい Vol.68 No.1 (2015)
- [3] 山崎, 川口, 牧野, 鈴木 エアジェット織機におけるよこ入れ間欠噴流の風速分布自動計測技術 繊維機械学会誌 せんい Vol.75 No4 (2022)

著者紹介



牧野 洋一

開発の経緯と開発者の思い

本報告は、本年6月に繊維機械学会で、(株)豊田中央研究所(以下、豊田中研)山崎才弘殿と連名で発表した内容で、当日の出席者からも好評価をいただいた。私が業務着手時に苦しんでいたところを、当時当社に在籍された豊田中研OBの鈴木藤雄殿とともにご協力いただいた。短期間でここまでまとめられたことに、お二人には大変感謝しているとともに、そのスキルの高さ、洞察力の高さに感心している。本手法利用によるe-REEDの改良は、既に何点かの号口化に結びついている。さらなる改良も現在進行形である。今後も彼らの遺産とともに可能な限りエアジェット織機の発展に貢献したいと考えている。

本報告内容は、当社の製織エキスパートの感覚の可視化とも言える。その中で改めて痛感したことは、エキスパートの本質を見抜く洞察力と努力が、現在のエアジェット織機のよこ糸を支えていたということである。その技術の大事な部分を少しでも後世にも伝えていけたら幸いである。

フォークリフト用ワイヤハーネスの電線色選定ツール開発 Developing Tool to Select Wire Colors of Wiring Harnesses Used in Forklift

伊藤 尚徳^{*1}
Takanori Ito

*1 トヨタL&Fカンパニー 製品開発センター 技術部

要旨

2020年に改正された欧州向け産業車両の電気規格EN1175には同一コネクタ内に異なる電気信号でありながら識別(電線色等)が同じ電線があってはならないという要件があり、電線色の変更による対応を計画している。しかし、電線色を選定する際の要件が複雑になっており、電線色の変更が困難になってしまっている。今回は複数の図面からなる車両全体の回路情報を一元化し、また上記の設計要件を適切に処理して使用可能な電線色の判定までを自動実行するツールを開発して業務の効率化を実現したのでこれを報告する。

キーワード: フォークリフト、ワイヤハーネス、自動処理、設計効率化

Abstract

The electrical standard EN1175 revised in 2020 requires that there must not be wires with the same identification (wire color, etc.) even though they have different electrical signals in the same connector. Therefore, we are planning to change the color of the electric wire. However, the requirements for selecting the wire color are complicated, and it is difficult to change the wire color. We will report on the development of a tool to reduce the work load that unifies the circuit information of the entire vehicle consisting of multiple drawings and automatically determines the available color of the wire complying with above regulation.

Keywords: Forklift, Wiring Harness, Automation, Improvement of Design Efficiency

1 はじめに

ワイヤハーネスの線色は分解修理時のサービス性向上や誤組付防止のため、機能の異なる電線はそれぞれを識別できるように機能ごとに異なる線色を使用することが社内設計基準で推奨されている。しかし、フォークリフトへの安全機能の追加や排ガス規制対応のためのエンジン電子制御化等により回路数・コネクタ極数は増加傾向にあり(図1)、前述の設計基準を実現するための検討工数が多大になってきている。

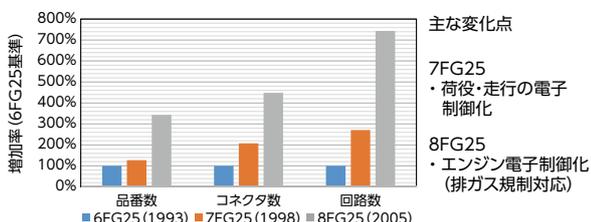


図1 モデルチェンジによる回路数の増加
Fig.1 Increment of circuits by model change

一方、欧州電気規格 EN 1175 「Safety of industrial trucks - Electrical / electronic requirements (産業車両の安全性 電気/電子要件)」が2020年に改訂され、「1つのコネクタ内に識別(線色/線径等)が同じ電線が複数あってはならない(要約)」という条文が追加されたことによ

り、ワイヤハーネスの電線を機能ごとに識別する取り組みは欧州で販売する車両においては法規要求事項としての厳格な管理が必要となった。

本稿では回路の設計情報をベースに情報を一元化し、ワイヤハーネスの線色検討時に必要な情報処理を自動化することで、検討時間の短縮と配線色の管理性向上を実現したためこれを紹介する。

2 現状の把握

2.1 ワイヤハーネスの設計要件

設計要件にはコネクタ内に同一の線色を使用しないことのほかに、ワイヤハーネス同士がコネクタで接続されている場合(以下、ワイヤtoワイヤコネクタ)に相対する端子同士で接続されている電線同士は原則同色にするという社内設計基準がある(図2)。そのため、あるワイヤハーネス部品に属する電線の線色を変更する際には変更の影響がその部品のみにとどまらず車両全体のワイヤハーネス部品を確認しなくてはならないため、線色検討に係る設計工数を増加させる要因となっている。

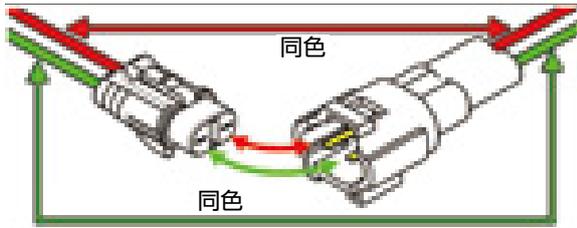


図2 ワイヤ to ワイヤコネクタ
Fig.2 Connectors for Wire to Wire

2.2 同一信号回路の把握における問題点

この社内設計基準に適合させるためには同一信号の回路を把握する必要があるが、その方法としてはワイヤハーネス設計ソフトウェア上で作成したデータを製品図(図面)に変換してデータを取得する必要がある。

図面からデータを確認するためには、ワイヤハーネス設計ソフトウェアでの検討を線色以外は完了させた状態でデータ変換して図面を取得し、そこから情報を読み取る。図面はワイヤハーネス形状、長さ等の α 図、コネクタ情報の β 図、結線情報の γ 図が複数枚集まって1まとまりの集合図となっている。このうち、EN1175の適合検討が必要になるのは β 図と γ 図である(図3)。

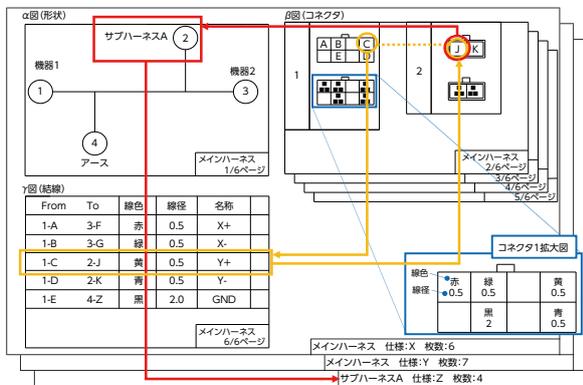


図3 図面(α 図、 β 図、 γ 図)および同一信号の確認手順
Fig.3 Drawings and Signal Confirmation Procedure

図面に含まれる β 図には線径と線色の情報があるため、コネクタ内に問題があるかは把握しやすい。しかし、例えば車両中央で使用されるメインハーネスでは100以上のコネクタと300以上の端子があり確認は容易ではない。

回路信号の同一性については、複数の図面・シートを確認しないと把握することができず、検索性に難がある。図3を例とすると、コネクタ1の端子Cと同一である信号を確認するには、 β 図とは別のシートである γ 図から端子同士のつながりを確

認しなくてはならない。さらに、機器用ではなくワイヤtoワイヤコネクタの場合は別図面についても同様に確認をする必要がある。

オプションやエンジン種類などの仕様別に図面が分かれている場合もあり、車両上は同じ位置に配置される同じ機能のコネクタ・端子を調査する際に多いものでは10図面以上を比較する必要がある。

上記のように回路の同一性を確認する場合には、複数の図面を確認する必要がある。欧州生産エンジン車と中国生産エンジン車における図面数を表1に示すが、例えば欧州生産車では集合図数で74、図面枚数で223と多数の図面から逐次必要な情報を抽出しなくてはならないため、検討時間を増大させる要因となっている。

表1 総図面数
Table1 Amount of Drawings

| | 図面数 | |
|-------|------|------|
| | 集合図数 | 図面枚数 |
| 欧州生産車 | 74 | 223 |
| 中国生産車 | 89 | 332 |

2.3 線色検討箇所・数量の問題点

現行車においてはEN1175に適合していない箇所は一部であり、個別の端子およびコネクタでは全体の約10~15%、図面数においては全体の約35%が該当する(表2)。しかし、電気回路の構造上ほぼすべての電線は両端が別のコネクタになっているため、端子1箇所の適合性を確認するためには対象の端子が含まれるコネクタと対象端子の電線結合情報、電線の反対側コネクタの3箇所を調査する必要がある(図4 ①②③)。加えて、ワイヤtoワイヤコネクタ(図4 ③④)の場合は、社内設計基準により相手側コネクタの同じピンの電線も色を変更する必要がある。その端子とつながる電線を経由してさらに先のコネクタ(図4 ⑤等)もあり、最終的に機器接続のコネクタに到達するまで確認は続く。補機用の電源回路などの一部の回路はジョイントコネクタ(図4 ⑥)により信号を分岐させており、この場合はより多くのコネクタが対象になる。

表2 各要素の非適合状況
Table2 Nonconformity Rate

| | | 端子 | コネクタ | 集合図 |
|-----------|-------------|---------------|--------------|-------------|
| 欧州 生産車 | 総数 | 6000 | 1085 | 74 |
| | 非適合 (割合) | 729 (12%) | 123 (11%) | 27 (36%) |
| 中国 生産車 | 総数 | 7500 | 1400 | 89 |
| | 非適合 (割合) | 1100 (15%) | 150 (11%) | 31 (35%) |

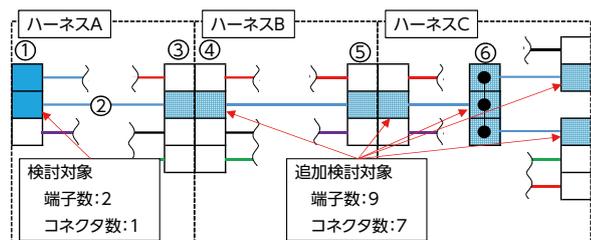


図4 見かけ上の非適合箇所と変更時の影響箇所
Fig.4 Apparent Range and Actual Range

そのため、個別に適合していない箇所よりも多くの箇所が検討対象となる(表3)。実際に検討を進めると不適合の箇所が含まれる回路のみを変更するだけでは適合させることができず、適合済みの他の回路の線色を変えることが必要になってくる場合もある。したがって、検討対象となる可能性があるのは車両のすべての回路にわたるため、すべての端子について適合性を確保できるように検討をする必要があり検討時間を増大させる要因となっている。

表3 実際の検討範囲
Table3 Actual Scope to Consider

| | | 端子 | コネクタ | 集合図 |
|-----------|---------------------|---------------|--------------|-------------|
| 欧州 生産車 | 非適合 (割合) | 729 (12%) | 123 (11%) | 27 (36%) |
| | 実際の 検討箇所 (割合) | 2825 (47%) | 752 (72%) | 46 (62%) |
| 中国 生産車 | 非適合 (割合) | 1100 (15%) | 150 (11%) | 31 (35%) |
| | 実際の 検討箇所 (割合) | 3600 (48%) | 900 (64%) | 57 (64%) |

2.4 線色変更時の問題点

線色変更の段階においては、変更が必要な回路を任意に選択し、その回路において使用可能な線色から適宜新しい線色を選択してゆくことになる。しかし状況によっては選択可能な線色が存在

せず、他の回路を変更することによって選択可能な線色を確保する必要がある場合がある。他の回路の線色変更だけでは十分な線色が確保できなかった場合は、検討を巻き戻してやり直しをする可能性もある。

選択可能な線色が少なくなる例としては、回路がワイヤtoワイヤコネクタで接続していることがあげられる。経由するコネクタが多いとその分他の端子で使用している線色も多くなるため、利用可能な線色の選択肢が減少する。

また、1コネクタに入る電線数が多い場合にも電線色の選択肢が十分でない場合がある。主に電子制御ユニット(ECU)やワイヤtoワイヤコネクタで多極コネクタが使用されることが多くこれらのコネクタの線色を検討するためには注意を払う必要がある。

線種自体の使用可能な線色が少ない場合もあり、代表的なものとしてシールド電線・ツイスト電線(図5)のように、2本以上の電線を組にした耐ノイズ性を向上させた電線種がある。これらの線種は線種ごとに使用できる線色が決められているほか、線色の組合せも特定の組合せしか使用できない。また、線種が違う場合は同じ線色の組合せがない場合がある。このため、ワイヤtoワイヤコネクタで異なる線種が接続された場合、使用可能な線色が大きく制限されることになる。

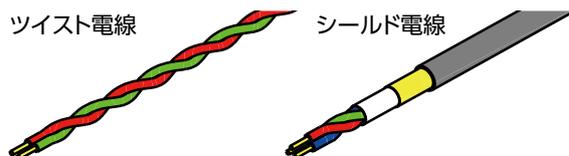


図5 ツイスト電線とシールド電線
Fig.5 Twisted Wires and Shielded Wires

上記の問題が起こる代表的なものとしてエンジンECUへのコネクタがある。エンジンECUは多数の制御装置やセンサの情報を処理するために1つのコネクタに50本以上の電線が接続されている。これは車両内で最も極数が多いコネクタであり、線色選択の大きな課題となっている。また、エンジン自体がノイズ発生源となるためセンサ用には複数組のシールド電線も使用されており、さらにはセンサ作動のため電源電圧回路やアース電圧回路等は車両全体で使われているため総延長が長く、前述の問題がすべて含まれているコネクタとなっている。

線色変更のやり直しが必要な状況が発生させないようには、線色の選択肢が少なくなるような状況を避けることが重要であるが、そのための指針は現在の設計手順には存在せず、設計者の感覚頼りになっている。

2.5 問題点まとめ

前述の問題点をワイヤハーネス線色検討の設計フローにて整理すると、下記の3点の問題によって検討時間が増大していることが分かった。

- ・ 検討の要否や回路の同一性を確認するために必要な情報が複数の図面に分散されている。
- ・ 使用可能な線色を調査するために確認対象となる回路数が多い。
- ・ 使用可能線色が少ないために検討のやり直し・巻き戻しが発生する可能性がある。

3 対策

3.1 対策方針

前述の問題点の対策として、以下の3点を対策の方針とした。

- ・ 必要な情報に素早くアクセスするため回路情報の一元化
- ・ 検討時間短縮のため使用可能線色の自動算出
- ・ やり直し低減のため検討順序の優先順位付け

1) 回路情報の一元化

回路情報の分散については、複数の図面等に分かれている情報を単一のデータとして取り扱えるように一元化することを実施した。回路情報の一元化は図面のβ図とγ図が電子化されたデータを基に、同一機種すべてのワイヤハーネスの情報を結合することで実現した。また、一元化後の様式は、本手法ではコネクタ内の電線の識別を検討することが目的のため、同一車種内のすべてのコネクタ・端子をコネクタごとに単一データファイルにすることで、車両全体の回路情報を一括して閲覧できる形式とした(図6)。

| β図・γ図共通情報 | | β図情報 | | γ図情報 | | 一元化により得られた追加情報 | | | | | | |
|-----------|--------|------|------|------|------|----------------|------|------|----|----|-----|-----|
| ハーネス種類 | コネクタ番号 | ピン番号 | 線種 | 線色 | 線径 | 重複 | 回路番号 | 回路延長 | 色数 | 仕様 | カノン | ワイヤ |
| メイン | 1 | 1 | 一般 | 赤 | 0.5 | | 1 | 20 | 5 | ○ | ○ | |
| | | 2 | 一般 | 青 | 0.5 | | 2 | 16 | 3 | ○ | ○ | |
| | | 3 | 一般 | 緑 | 0.5 | | 3 | 4 | 6 | ○ | ○ | |
| | 2 | 1 | 耐熱 | 青 | 1.25 | 3 | 4 | 4 | 2 | ○ | × | |
| | | 耐熱 | 白 | 1.25 | | 5 | 4 | 2 | × | ○ | | |
| | | 2 | 一般 | 赤 | 0.5 | | 1 | 20 | 5 | ○ | ○ | |
| 3 | 一般 | 青 | 0.5 | | 2 | 16 | 3 | ○ | × | | | |
| エンジン | 1 | 1 | シールド | 白 | 0.5 | | 6 | 20 | 2 | ○ | × | |
| | | 2 | シールド | 黒 | 0.5 | | 7 | 16 | 2 | ○ | × | |

図6 一元化データの概要
Fig.6 Summary of Integrated Data

データ一元化により、検討の際に複数の図面を閲覧する必要がなくなり作業効率が改善された。また、類似部品情報の共通化を実施したため、検討対象のデータ量自体も削減することができた。データ量は端子数において35~50%、コネクタ数は約40%、結線情報は約12%へ削減された。これにより、検討時に確認する項目を大幅に削減することができた(図7)。

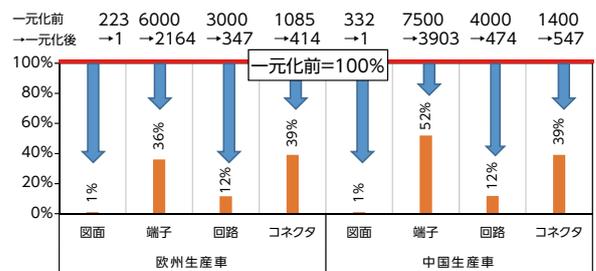


図7 一元化による情報削減量
Fig.7 Reduction of Data Volume by Integration

2) 使用可能線色の自動算出

データの一元化によりデータ量が削減されたが、300を超える回路が存在し、かつ各回路においても同一の信号となる電線をすべて検討する必要があるため、依然として多くの検討時間が必要である。そのため、変更する線色の候補を自動的に提示し、かつ線色変更による車両全体の適合状況も自動的に更新するツールを作成した。

は回路そのものの設計に集中することができるため、さらなる自動化の推進をしていきたい。

■著者紹介■



伊藤 尚徳

開発の経緯と開発者の思い

欧州向け産業車両の電気規格EN1175対応のためにワイヤハーネスの線色変更対応の業務を担当することになり、設計に必要な条件をすべて人力で管理・掌握することが非常に困難であることが分かり、本手法の開発に着手した。

本手法の技術的な部分に関しては図面調査を計算機に肩代わりさせることで高速化したものであるが、自動化するにあたっては人が行えば直感、経験則で判断できるコネクタの接続をいかに機械的に判断させるかに苦慮する部分が多かった。

ワイヤハーネスの線色は社内設計基準に記載が少なくあまり重要視されていなかったが、今後は法規要件となり設計への負担が増加することが予測されるため、その負担の軽減に貢献することに期待する。

アンモニアを燃料とする火花点火エンジンの始動技術 Cold-start of Ammonia-fueled Spark Ignition Engine

本間 隆行^{*1} 竹内 正^{*1} 針生 聡^{*1} 竹内 秀隆^{*1}
Takayuki Homma Tadashi Takeuchi Satoshi Hariu Yoshitaka Takeuchi

*1 開発第一部

要旨

温暖化防止という社会課題に対し、CO₂を出さない代替燃料として着目されているアンモニア燃料のみで動作可能なアンモニアエンジンを開発している。難燃性アンモニアに対し、アンモニアから改質により抽出した水素と混焼することで燃焼性を改善するエンジンシステムを構築するが、触媒反応による改質水素生成は冷間時に起きないため、始動時に未燃アンモニアが排出されることが課題である。改質器の早期暖機条件の最適化と後処理触媒の適用条件探索により、未燃アンモニア排出を抑制可能なエンジン始動を実現した。

キーワード：アンモニア燃料、冷間始動、改質水素、アンモニア排気

Abstract

Ammonia is attracting attention as an alternative fuel that emits no CO₂ to prevent global warming. The ammonia engine has been developed that can be used with mono-ammonia fuel. The engine system was prepared that is co-fired ammonia with hydrogen reformed partially from ammonia, because ammonia has poor combustibility. The issue is to emit unburned ammonia at cold-start, because hydrogen production by catalytic reaction does not occur. Unburned ammonia emission could be controlled during cold-start of the engine system by optimizing early warm-up conditions for a reformer, and investigating applicable conditions for aftertreatment catalysts.

Keywords: Ammonia fuel, Cold start, Reforming hydrogen, Ammonia emission

1 はじめに

2021年にイギリスで開催された国連気候変動枠組条約第26回締約国会議(COP26)では、気候変動への強い危機感が示され、脱炭素化への取り組みが重要視されている。パワートレインの対応手段として、「蓄電池+モータ」、「燃料電池+モータ」と並び、「代替燃料+エンジン」もその一つであり、安価なエンジンをベースとして燃料変更でのCO₂削減の可能性を検討している。代替燃料として、アンモニア(NH₃)は炭素を含まないため、燃焼してもCO₂を出さないことから大型発電での利用検討が進められている。現状では化石燃料から作られているが、将来的には再生可能エネルギー利用などで製造するよう計画されている。

NH₃は化学肥料や工業利用等で古くから利用されており、輸送や貯蔵方法が確立されている。また、常温常圧で気体であるものの10bar程度の加圧により容易に液体になることから、エネルギー密度の観点でも有利であり、移動体への適用は稼働時間の面からも望まれる。しかし、刺激臭を伴う物質であり劇物であることから広く一般市民が使うものではなく、適切な管理・運用ができるプロ向け機器での利用が想定される。具体的なNH₃エンジンの適用イメージとしては、工場(屋外)におけるフォークリフトや、熱利用も含めた分散電源(コージェネレーション)などへの適用、工場以外

では、空港におけるトーイングトラクターやバス、物流を支える拠点間移動のトラックへの実装が考えられる。さらには建設機械や農業機械、屋外工事などで利用される発電機などにも適用可能と想定される。

2 NH₃エンジンシステム

2.1 燃料特性

NH₃は燃焼が遅く可燃範囲が狭いことから、非常に燃えにくい燃料である(図1)。エンジンに適用した場合は運転範囲が狭く、出力が大幅に低くなるのが課題となる。そこで燃えやすく、同じく炭素を含まない水素(H₂)を混ぜることで改善を図る。

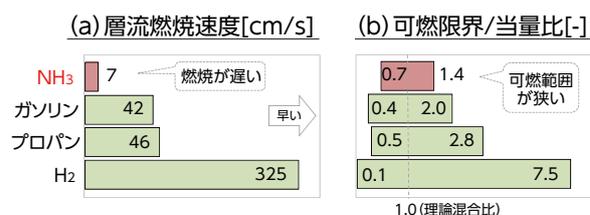


図1 NH₃燃料特性
Fig.1 Fuel properties of NH₃

2.2 オンボード改質と後処理

移動体用途を想定した場合、H₂の供給はH₂ボンベ利用が考えられるが、NH₃との2燃料補給や高圧タンクが必要となることから、ユーザ利便性・コストの観点より、NH₃からH₂を取り出す「燃料改質」を適用する。既存のエンジンに水色部分の改質システムを追加することで、改質器からエンジンが必要な分だけ、触媒反応によりH₂を供給できるオンボードシステムを構築した(図2)。ベースエンジンは排気量3.7L、直列4気筒、火花点火の当社製1FSを用いた。

NH₃を燃料とした場合、理想的に完全燃焼することができればエンジン排気成分は窒素と水のみとなるものの、実際には微量の未燃NH₃と窒素酸化物が排出される。そこで、後処理触媒としてガソリン・ガスエンジンで使用される一般的な三元触媒を用いた。なお、三元触媒とは炭化水素・一酸化炭素・窒素酸化物の3つの燃焼排気物質を量論比とすることで窒素・水・CO₂とし無害化する働きがある。一方、NH₃の場合は、炭素が存在しないものの、NH₃・H₂・窒素酸化物を量論比とすることで、窒素・水のみとなる酸化還元反応が同じ触媒にて起こるため、それを利用する。

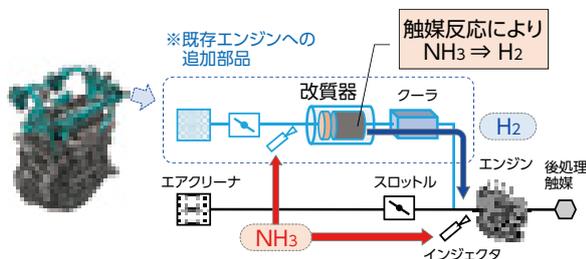


図2 NH₃エンジン概略図
Fig.2 Schematic of NH₃-fueled engine system

2.3 定常性能

構築したNH₃エンジンシステムの定常性能を評価した。回転数・負荷により最適なNH₃/H₂割合は変化するものの、回転数750~2550rpm(LPガス燃料適用時の動作範囲と同等)にて安定燃焼でき、最大トルクはNH₃の熱量や空気との混合比による目減りもありLPガス燃料動作比20%減となるが、概ね運転範囲をカバー可能であることが確認された。また、空気/燃料比(空燃比)を制御することにより、三元触媒後の未燃NH₃および窒素酸化物排気濃度をそれぞれ検出下限以下、56ppm以下まで同時浄化できることがわかった。

3 始動時の課題と対策

3.1 改質器の暖機

本システムに適用する改質器は自己熱改質式(ATR:Auto Thermal Reforming)である。図3に構造と作動イメージを示す。NH₃からH₂への改質は吸熱反応であり、触媒温度が高いほど改質効率上がることから、持続的にH₂へ改質するには熱を供給し続けることが必要となる。ATR改質器では空気-NH₃の混合気を入れ、触媒にて一部のNH₃が酸化(燃焼)し、発生した燃焼熱を利用して残りのNH₃がH₂へ改質することが特徴である。

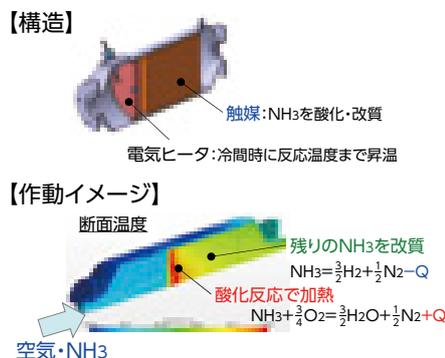


図3 ATR改質器の構造と作動イメージ
Fig.3 Structure and operation image for ATR reformer

一方、冷えている触媒に空気-NH₃の混合気を投入しても触媒反応は起きず、触媒活性が十分に得られる温度まで昇温する必要がある。そこで、触媒上流にヒータを付け空気-NH₃の混合気を流通しながら触媒活性温度まで加熱する。この時、NH₃エンジンを起動するためには、以下3つ条件を段階的に成立させる必要がある。

- ①改質触媒が活性温度以上
- ②改質H₂がエンジンシリンダ内燃焼に必要な量以上
- ③エンジンシリンダ内での空燃比が燃焼範囲内

条件成立までは安定的にNH₃が燃えず、供給するNH₃がそのままエンジン外へ排出されてしまう。従来のエンジンでは燃料供給から③のみ成立で起動するため、本NH₃エンジンシステムの課題は①・②を早期に実現すること、すなわち改質器を早期暖機することとなる。

3.2 後処理触媒での吸着

始動時は後処理用の三元触媒が暖機されていないため、触媒反応が起きずシリンダから排出された未燃NH₃がすり抜けてしまう。そこで、一般的なディーゼル車に使用されており、NH₃を吸着する機能を持つSCR(選択的触媒還元)触媒を適用する。NH₃排気を抑制する考え方を図4に示す。三元触媒の下流にSCR触媒を設置し、三元触媒暖機までNH₃を吸着する。一方で、排気温度上昇に伴いSCR触媒での吸着能力が下がるためNH₃が再放出されてしまうこと、また吸着したままではいずれ吸着限界を超えてしまい繰り返し使えないことが利用上の課題である。したがって、三元触媒暖機後は意図的にリーン(燃料不足)燃焼し、生成するNO_x(窒素酸化物)によってSCR触媒に吸着されたNH₃を無害化させる(SCR触媒再生)が、これは、一般的な尿素SCRシステムによるNO_x浄化と同じ化学反応を利用する。

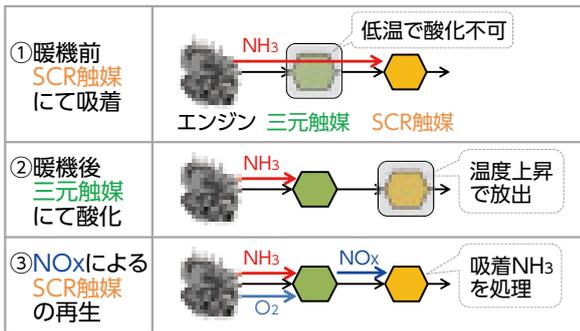


図4 後処理触媒でのNH₃排出抑制
Fig.4 NH₃ emission control with aftertreatment catalysts

4 始動条件の最適化

4.1 始動パラメータ

エンジン始動を成立させるためには、改質器の空燃比およびエンジンでの空燃比を適切に調整する必要がある。燃料量はインジェクタにて制御するため、エンジン制御ユニットからの指示により比較的制御性良く調量可能である。空気量はエンジンメイン側と改質器側の2つのスロットルの開度によって制御するため調量が難しい。例えば、片方を閉めると閉めた側は狙い通り空気量が減るが、もう一方は開度を変化せずとも、空気量が増えてしまう。そこで系統的にパラメータを振りやすく、始動現象の傾向を取得しやすくするため、改

質器側のスロットルをマスフローコントローラ(MFC)へ置き換え、空気を流量として設定可能となるよう実験系を変更し予備試験を実施した(図5)。最適化のパラメータとしてはヒータ予熱温度、改質器の空燃比、改質器の燃料流量である。

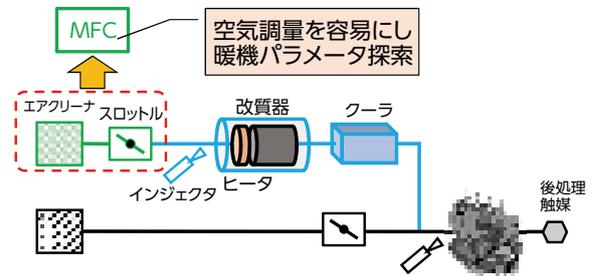


図5 始動条件探索の実験系
Fig.5 Experimental system for startup condition search

4.2 ヒータ予熱温度の影響

予熱温度と燃焼安定性の関係を調査した。事前加熱としてヒータが設定温度へ到達したと同時にエンジンスタートの回転を開始し、回転数が600rpmを超えた瞬間にヒータ電源をOFFする始動プログラムとした。1~4番気筒の図示平均有効圧(IMEP)を図6に示す。予熱温度200℃では初爆から約40サイクルまで、燃焼変動が大きく不安定であった。すべての気筒でIMEPがゼロとなる瞬間があるため、失火が頻繁に起きていることが確認された。一方、予熱温度400℃では初爆から時間に対する変動が少なく、各気筒にバラつきが少ないため安定して燃焼していることがわかる。

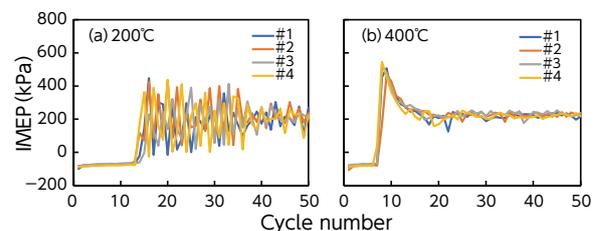


図6 ヒータ予熱温度がIMEPへ与える影響
Fig.6 Effect of pre-heating temperature on IMEP

4.3 改質器の空燃比の影響

空燃比と燃焼安定性の関係を調査した結果を図7に示す。空燃比の調整にあたり、NH₃量は固定して空気量のみ変更した。空燃比0.42の場合、全気筒においてIMEPがゼロ付近になるサイクルが多かったため、失火が多発していたと考えられる。空燃比を上げるに従い燃焼変動が小さくなり、空燃

比0.89の場合では、IMEP変動は小さくエンジン燃焼は安定していた。

以上の結果から、空気割合が多いほど改質器内での燃焼が促進し温度上昇するため、改質反応が促進され H_2 生成量が増えたと考えられる。

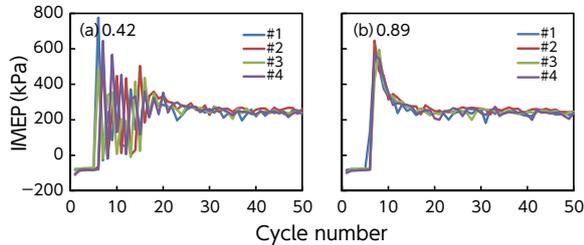


図7 改質器の空燃比がIMEPへ与える影響
Fig.7 Effect of air-fuel ratio for the reformer on IMEP

4.4 始動成立要件

始動パラメータである改質器の燃料流量も同様に影響を調査し、表1のとおり冷間始動の成立要件を導き出した。次に実験系をMFCからスロットルへ戻し、成立要件となるように改質器側スロットルの適合ならびにシステム全体のパラメータも微調整した。その結果、予備試験同等の始動性が得られることを確認した。

表1 冷間始動の成立要件
Table1 Requirements for cold-start of the engine

| | |
|----------|------------|
| ヒータ予熱温度 | 400℃以上 |
| 改質器の空燃比 | 0.69以上 |
| 改質器の燃料流量 | 61 L/min以上 |

5 後処理触媒の適用条件探索

5.1 NH_3 吸着容量

試験片サイズとしたSCR触媒に上流から NH_3 を一定量で流入し、下流側の NH_3 濃度を測定することで漏れ出てくるまでに吸着した量として見積もった(図8)。結果として体格2LのSCRを用いた場合3.3gの NH_3 が吸着可能と判断した。また、最適化した条件により始動した場合の三元触媒後の NH_3 排気濃度を測定した。その結果、すり抜け NH_3 量としては約1gと見積もられ、吸着容量の1/3程度であることから、 NH_3 漏洩は起きにくいと判断した。

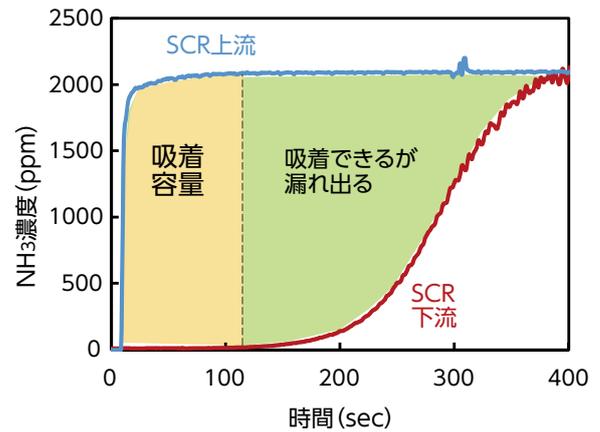


図8 SCR触媒の NH_3 吸着可能量
Fig.8 NH_3 absorption capacity of SCR catalyst

5.2 NH_3 排気とSCR触媒再生

上記予備実験の結果を元に、 NH_3 エンジンシステムの始動評価を実施した。空気過剰率 $\lambda = 1.1$ のリーン燃焼となるように制御し、スタータONから3.1秒で1000rpmを超える噴き上がりを確認した。エンジン出口およびSCR触媒後における NH_3 濃度を測定した結果が図9である。エンジン出口では噴き上がり直後から9000ppm程度と高い濃度だが、SCR触媒後では検出下限であった。その後6分間SCR触媒後から NH_3 はほぼ排出されなかった。また、始動を繰り返しても NH_3 が漏れてこないことから、SCR触媒再生ができていることを確認した。

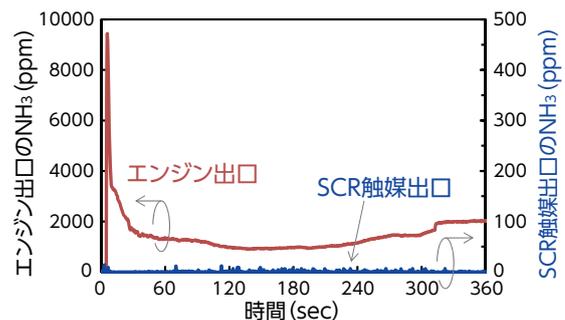


図9 始動時の NH_3 排気
Fig.9 NH_3 emissions for cold start of the developed engine

6 まとめ

NH_3 は燃やしても CO_2 を排出しない代替燃料候補の一つではあるが、難燃性燃料であることから、オンボード改質システムを追加することにより、改質 H_2 を用いて安定燃焼させるシステムを構築した。改質 H_2 を早期発生するためにヒータ予熱温度や改質器の空燃比といった始動条件を検討し、

最適化を図った。また、量産品の三元触媒とSCR触媒を流用し、NH₃の除害・吸着を時間差で利用することで繰り返しNH₃を漏らさずに始動が可能な後処理の適用条件を見出した。以上から、未燃NH₃排出を抑制可能なNH₃エンジン始動を実現できた。

謝辞

本成果は株式会社豊田中央研究所の協力により得られたものであり、本開発の一部は環境省「CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業」の支援を受けて実施した。この場を借りて感謝申しあげる。

■著者紹介■



本間 隆行

竹内 正

針生 聡

竹内 秀隆

開発の経緯と開発者の思い

カーボンニュートラル実現に向けた取り組みとして、バッテリーによる電動化や燃料電池利用が拡大しつつある。脱内燃機関の動きの中、なぜアンモニアを燃料として使うのか、と感じる方も多いと思われるが、最近では特に発電・船舶分野にてアンモニア燃料化の流れが加速しており、既存内燃機関を活用したCO₂削減に向けた新たな手段の一つとして新技術開発に取り組んでいる。

ゼロからエンジン評価ベンチを立上げ、評価できるようになるまでにも相当の苦労があった。ここまで開発できたのは他社の協力も大きく、連携を密に進めてきた賜物だと思う。然るべきタイミングで世の中へ貢献できるように引き続き努力したい。

AIを活用した良品条件探索と変化点検知の自動化

Automation of Good Condition Search and Change Point Detection by Utilizing AI

末高 直樹^{*1} 柴田 顕次^{*1} 寺田 侑司^{*1} 鈴木 祐輔^{*2}
 Naoki Suetaka Kenji Shibata Yuji Terada Yusuke Suzuki

*1 ITデジタル推進部 *2 コンプレッサ事業部 アルミ技術部

要 旨

全社DX推進活動の一環として、2020年度にダイカスト工程を対象にビッグデータ分析を行い、良品率が高い生産条件の特定とその条件による生産を監視するシステムの開発を実施し、データを活用した働き方の効果を検証した。その結果、良品率が向上し、効果が確認できたため、他工場・他工程への適応を検討したが、適応毎に分析作業が必要となる課題を抱えていた。そこで今回、AIの技術を活用して自動で良品率が高い条件を探索するモデルを開発することで適応工数を削減し、展開性を向上させた。

キーワード: DX, AI, Autoencoder, K-means++, 品質管理

Abstract

As part of the company-wide DX promotion activities, a big data analysis was conducted for the die casting process in FY2020 to identify production conditions with a high percentage of good products and to develop a system to monitor production under those conditions to verify the effectiveness of data-based work methods. As a result, the good product rate was improved and the effectiveness of the system was confirmed, so the company considered adapting the system to other plants and processes, but the system had the problem of requiring analysis work for each adaptation. This time, we developed a model that automatically searches for conditions that have a high good product rate by using AI technology, thereby reducing the man-hours required for adaptation and improving the deployability.

Keywords: DX, AI, Autoencoder, K-means++, Quality control

1 はじめに

近年、様々な業種・企業においてDX(デジタルトランスフォーメーション)が重要視されている。DXとは、経済産業省の「DX推進ガイドライン」において、「企業がビジネス環境の激しい変化に対応し、データとデジタル技術を活用して、顧客や社会のニーズを基に、製品やサービス、ビジネスモデルを変革するとともに、業務そのものや、組織、プロセス、企業文化・風土を変革し、競争上の優位性を確立すること」と定義されている^[1]。この定義の通り、DXの推進が不十分な企業は競争力を失い、ビジネスそのものが成り立たなくなる危険性をはらんでいる。それは当社のようなものづくりの会社においても決して例外ではない。

このような背景から、当部では、全社DXを推進すべく、安全なITデジタル環境の提供や全社デジタル化を支える最適ナリソースの確保を行った。働き方変革と機能強化を目指し、モデルラインでデジタル技術活用の実証を行い、成果を全社に広める活動に取り組んでいる。

2 2020年度の実証内容と課題

2.1 モデルラインの選定

全社DX推進活動の一環として、2020年度にダイカスト工程をモデルラインとした取り組みを行った。ダイカスト工程をモデルラインとした理由は2つある。1つ目は、ダイカストは品質への影響要因が多く、計測・制御が難しいため、トヨタグループ内でも現場におけるデータ活用が進んでいないからである。2つ目は、ダイカスト工程ではデータを活用した働き方に効果が期待できるからである。図1に示すように、ダイカストの不良の多くを占める鋳巣は鋳造時には検出できず、後工程の加工工程で表面に露出し、目視検査工程で不良判定が行われている。不良が多発した際には、不良ロットの回収を行い、熟練作業者が原因の調査とダイカスト工程への対策を実施している。そのため、データ変動を予測し、不良が多発する前に対策可能な環境を構築することにより、不良率低減や早期の対策着手などの効果が期待できる。

以上より、ダイカスト工程をモデルラインとし、図1に示すデータを活用した働き方の効果を確認するための実証を行った。

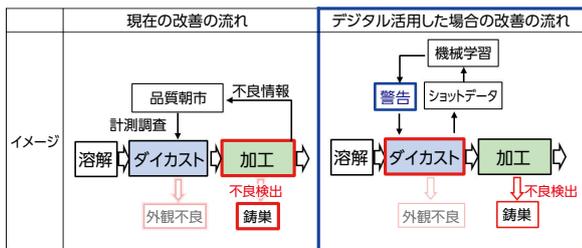


図1 ダイカスト工程における改善の流れ
Fig.1 Flow of improvement in Die Casting process

2.2 実証内容と課題

本実証では、はじめに対象のダイカストマシンのデータ収集環境を構築した。要因系統図を作成し、品質に影響を与える要因の洗い出しを行い、センサーを付けて1ショット(1回の生産)あたり数十種類の時系列データ(数万点)を収集する環境を構築した。この環境を用いて、2年以上のデータを収集し、数十万ショットのデータを確保した。次に、各種時系列データを手作業で分析し、品質への影響やばらつきがある箇所を図2のとおり特徴量と定義した。その後、作成した数百種類の特徴量と不良率の相関を確認し、各特徴量において不良率が低い条件を見つけ出した。

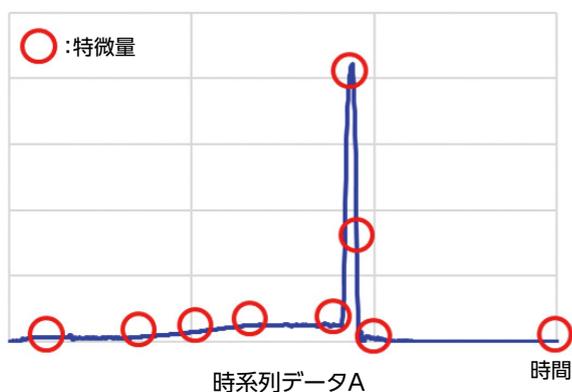


図2 特徴量定義
Fig.2 Definition of features

最後に、不良率が低い条件で生産できるように、工程の改善とその条件で生産できているかを監視するシステムの開発を行った。その結果、目標不良率を達成し、良品率の向上と維持に貢献することができたため、データを活用した働き方の効果を確認できた。

さらなる効果創出をねらい、実証内容を他工場へ展開することを検討したが、展開するためにはデータ分析を行い、監視システムを展開先のデータに適応させる必要がある。しかし、これらのデー

タ分析は手作業で行っており、適応には膨大な工数がかかるため、他工場への展開に向けて適応工数を削減する必要がある。

3 開発のねらい

本開発では、監視システムの適応工数削減による展開性向上のため、AIの技術を活用し、人の分析作業を自動化することを目指す。今回取り組んだ内容は、図3に示すとおり、自動で良品条件(不良率が低いデータ群)を探索するモデルと良品条件からの変化を検知する変化点検知モデルの開発、変化点検知モデルを活用した監視ルールの定義である。

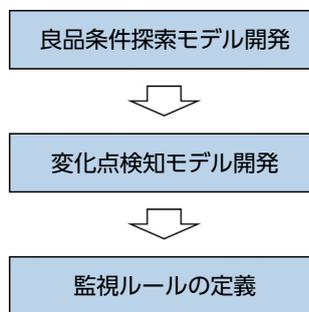


図3 開発の流れ
Fig.3 Development flow

4 良品条件探索モデルの開発

クラスタリングの技術を活用し、自動で良品条件を探索する良品条件探索モデルを開発した。クラスタリングとは機械学習手法の一種で、図4のようにデータ間の類似度が高いデータをグルーピングする手法であり、クラスタリングで作成したグループをクラスタと呼ぶ。今回はクラスタリングにより、類似度が高いショットデータをグルーピングした後、各クラスタの不良率の調査を行い、良品条件を見つけ出す。なお、今回は不良率を30%低減することを目標としたため、不良率を30%以上低減可能なクラスタを良品条件とする。

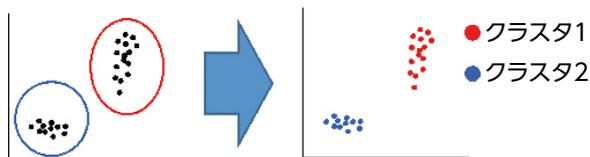


図4 クラスタリングのイメージ
Fig.4 Image of clustering

4.1 データ前処理

クラスタリングをするため、分析対象データの
前処理を行った。機械学習に使用するデータに欠
損や異常値が含まれている場合、分析の精度に悪
影響を及ぼすため、データ前処理が必要である。ま
ず、図5に示すように、各種時系列データの可視化
結果を目視で確認し、ダイカストマシンの動作と
して異常なデータや外れ値を除去した。その後、同
一ショットのデータを結合し、クラスタリングに
使用するデータセット*を作成した。

*データセットとは、分析対象のデータ群のことを示す。

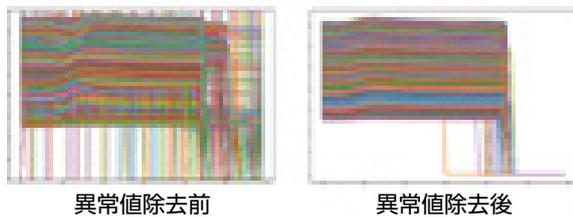


図5 時系列データの異常値除去
Fig.5 Outlier removal for time series data

4.2 クラスタ数の決定方法の検討

クラスタリングを行う際に、事前にグルーピングするクラスタ数を決定する必要があり、一般的には、各クラスタ内のデータの類似度を最大化するようにクラスタ数を定義する。例として、図4のデータをクラスタリングする場合には、青枠と赤枠の中にデータの塊が存在するため、クラスタ数を2と定義する。しかし、このようにデータ間の類似度を最大化する方法では、品質情報をもとにクラスタ数を決定していないため、不良率を30%以上低減可能な良品条件を必ず見つけ出すことができるとは限らない。

そこで、クラスタ数の決定方法を工夫し、必ず良品条件を見つけ出すことができる方法を確立した。今回実施したクラスタ数決定の流れは次の①～③である(図6)。

- ① 全データの不良率を調査
- ② 2つのクラスタにグルーピングし、各クラスタの不良率を調査
- ③ 各クラスタの低減不良率を算出し、低減不良率の最大値が目標値を超えている場合は終了し、超えていない場合はクラスタ数を1つ増やし、再度②以降を実施

このように、目標を満たすクラスタを作成できるまで、クラスタ数を増やしていく方法を考えた。また、目標を満たすクラスタを作成できた際には、そのクラスタを良品条件と定義した。

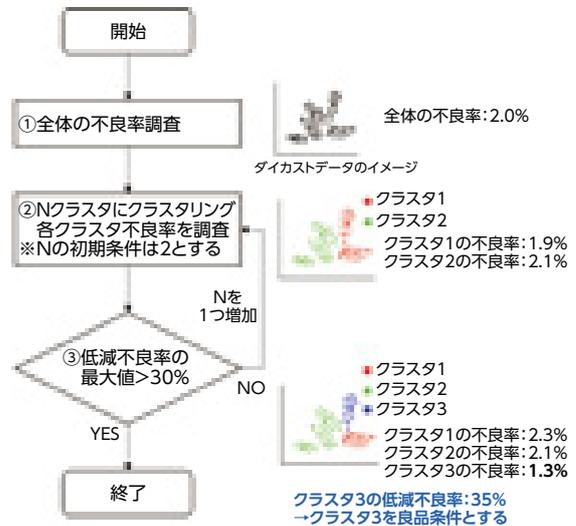


図6 クラスタ数決定の流れ
Fig.6 Flow of determining the number of clusters

4.3 アルゴリズムの選定とモデルの開発

類似度が高いデータを高速にグルーピングし、良品条件を見つげ出すことを目標としたため、機械学習手法であるK-means++を採用した。K-means++とは、データ間の距離を用いてクラスタリングする手法であり、次の①～⑤の流れで実施する(図7)。

- ① クラスタ数を設定
- ② クラスタ数分のクラスタ中心点をランダムで作成(各クラスタ中心点は離れるように作成する)
- ③ データとクラスタ中心点の距離を求め、各データを最も距離が近い中心点のクラスタに分類する
- ④ 各クラスタのデータの重心を求め、重心をクラスタ中心点に置き換える
- ⑤ ④の結果、中心点に変化がない場合は終了し、変化がある場合は再度③以降を実施

K-means++は、このようにクラスタ中心点の更新と全データの分類を繰り返すことで、距離が近いデータをグルーピングする手法となっている。

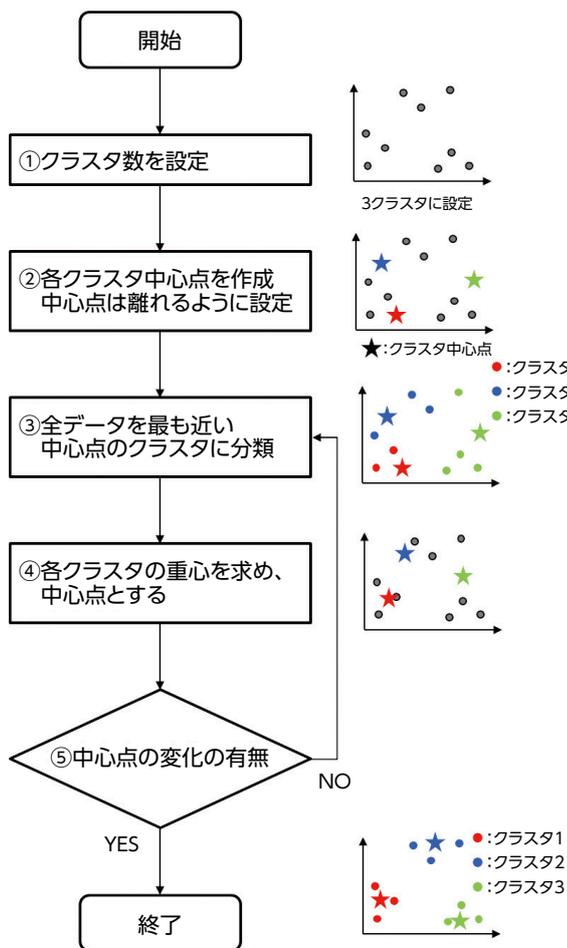


図7 K-means++によるクラスタリングの流れ
Fig.7 Clustering flow with k-means++

前節で示したクラスタ数の決定方法をもとに、K-means++でクラスタリングした結果、5クラスタにグルーピングすることで、不良率を34.6%低減可能な良品条件を見つけ出すことができました。

5 変化点検知モデルの開発

前章で定義した良品条件で生産できているかを監視するため、生産時に取得する時系列データに対して良品条件からの変化を検知する変化点検知モデルを開発した。なお、今回は1ショットあたり数十種類の時系列データを取得しているため、各種時系列データに対して変化点検知モデルを作成することで、どの時系列データに変化が発生したかを明確にする。

5.1 アルゴリズムの選定

高精度に変化を検知し、さらに変化を検知した際に変化箇所を提示することを目標としたため、機械学習手法であるAutoencoderを採用した。図8に示すように、Autoencoderはデータから

自動で特徴を抽出し、抽出した特徴をもとに復元する手法となっており、学習データに似た傾向のデータだけを正しく復元できる。そのため、学習データから傾向変化したデータは正しく復元できなくなっており、異常検知等に活用される手法である。図8に示すように、今回は前章で定義した良品条件の時系列データのみをAutoencoderの学習に使用することで、良品条件に似たデータだけを正しく復元可能なモデルの開発をする。また、学習済みのAutoencoderを用いて変化点検知を行う際には、入力データと復元データの誤差と閾値の比較により、変化の有無を判断する。

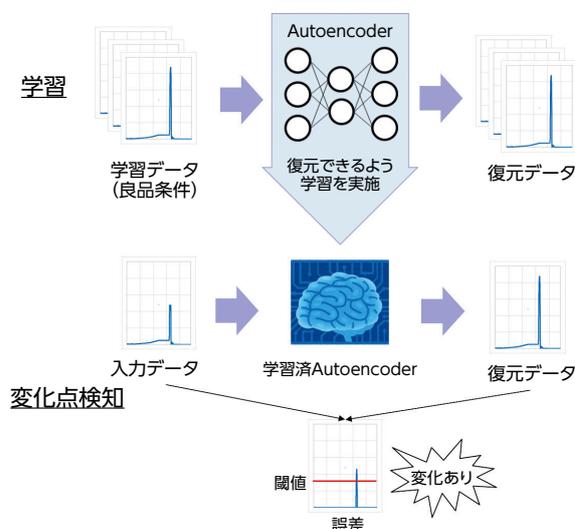


図8 Autoencoderの学習と変化点検知の方法
Fig.8 Autoencoder training and method of change point detection

5.2 モデルの開発と精度確認

はじめに、良品条件のデータと良品条件以外のデータを用いて、図9のようにAutoencoderの学習に使用する学習データと閾値定義に使用する検証データ、変化点検知モデルの精度評価に使用するテストデータを作成した。

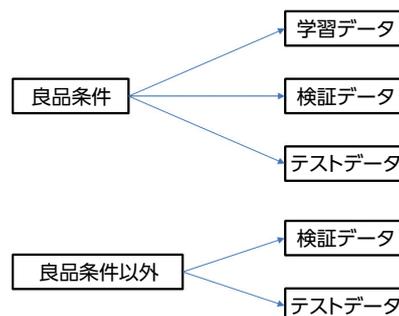


図9 データの分割方法
Fig.9 Method of data division

次に、学習データを用いてAutoencoderの学習を行い、良品条件のデータを復元可能なモデルを作成した。そして最後に、学習済Autoencoderと検証データを用いて、良品条件からの変化を判断可能な閾値の定義を行った。

今回開発した変化点検知モデルを使用して、良品条件からの変化を検知した際には、図10のように入力データと復元データの誤差と入力データを同時に可視化することで、変化箇所を提示し、作業者の改善サポートを行う。

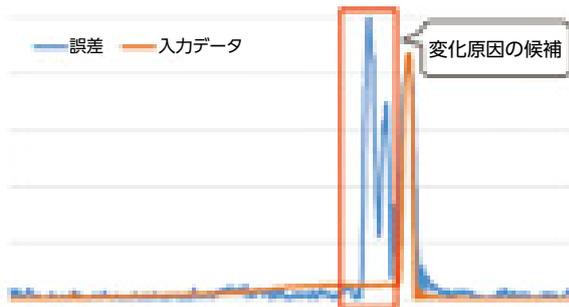


図10 変化箇所の可視化
Fig.10 Visualization of change locations

変化点検知モデルの精度確認のため、テストデータを用いて良品条件と良品条件以外の各ショットデータを正しく判断する確率を調査した。その結果、両方の条件において、90%以上の確率で正しく判断できることが分かった(表1)。以上のことから、今回作成した変化点検知モデルは高精度に良品条件からの変化を検知でき、さらに誤検知が少ないことが確認できた。

表1 変化点検知モデルの精度
Table1 Accuracy of change point detection model

| | 良品条件 | 良品条件以外 |
|----|-------|--------|
| 精度 | 98.5% | 90.2% |

6 監視ルールの定義

6.1 変化点検知モデルを用いた監視ルールの検討

前章に示した変化点検知モデルを活用した監視ルールの検討を行った。図5に示したとおり、現在取得している時系列データには異常値が混入しており、異常値を取得した際に誤検出することを防ぐため、複数ショットのデータを使用して、良品条件で生産できているかを監視する。監視方法は次の①～⑤の流れで実施する。

- ① 変化点検知モデルを活用して、1ショット目の各種時系列データが良品条件で生産できているかを確認
- ② 1種類の時系列データでも良品条件から変化している場合はそのショットを異常なショットと判断する
- ③ 検査対象のデータを次のショットに変更し、検査したショット数が指定した個数を超えるまで、①と②を繰り返す
- ④ 変化点検知した全てのデータを統合し、表2のようなデータセットを作成
- ⑤ 異常なショットの割合が閾値を超えている場合、良品条件から変化したと判断し、アラートを出力する

表2 良品条件からの変化点検知方法
Table2 Method of detecting change points from good conditions

| ショットNo | 製造データ | | | | | 結果 |
|--------|-------|---|-----|---|---|----|
| | A | B | ... | C | D | |
| 1 | ○ | × | ○ | ○ | × | 異常 |
| : | | | : | | | : |
| N | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 正常 |

異常なショット数が閾値を超えた

良品条件から変化した

6.2 精度確認・効果確認

はじめに、前節に定義した監視ルールの精度を確認するため、テストデータを用いて良品条件のロットと良品条件以外のロットを正しく判断する確率を調査した。監視ルールの精度と良品条件による低減不良率(34.6%)を掛け合わせた際、目標の低減不良率(30%)を達成するために、監視ルールの目標精度を90%とした。監視ルールの精度を確認した結果、良品条件と良品条件以外ともに目標を達成していることが確認できた(表3)。

表3 監視ルールの精度
Table3 Accuracy of monitoring rules

| | 良品条件のロット | 良品条件以外のロット |
|----|----------|------------|
| 精度 | 92.3% | 93.2% |

次に、効果確認のため、今回開発した技術を用いた監視システムの適応工数を調査した。その結果、2020年度の実証時に比べ、88%の工数削減が確認できた。

7 まとめ

2020年度に開発した監視システムの課題であった展開性の悪さに対して、AIの技術を活用し、人の分析作業を自動化することで、解消することができた。

今後は、本内容を他工程・他工場に広めていくことにより、全社のDX推進に貢献していきたい。また、本開発内容をアプリ化することにより、さらなる展開性向上なども検討していきたい。

最後に、本開発にご協力いただいた、コンプレッサ事業部 大府工場の皆様に、厚くお礼申し上げます。

■参考文献

- [1] “デジタルトランスフォーメーションを推進するためのガイドライン(DX推進ガイドライン)”. 経済産業省, 2018.
https://www.meti.go.jp/policy/it_policy/dx/dx_guideline.pdf,
(参照 2022-05-19).

■著者紹介



末高 直樹

柴田 顕次

寺田 侑司

鈴木 祐輔

開発の経緯と開発者の思い

ビジネス環境が激しく変化する中、競争上の優位性を維持・確立するため、当社では様々なDX推進活動を行っております。その活動の一環として、働き方変革と機能強化を目指し、ダイカスト工程を対象に良品条件で生産できているかを監視するシステムの開発と実証を行い、成果を出すことができました。しかし、監視システムは他工程・他工場への展開毎に、分析作業が必要となる問題を抱えていたため、AIの技術を活用し、分析作業を自動化するしくみを開発しました。

今回、分析対象としたダイカストのデータはばらつきが大きく、データの種類も多いため、丁寧なデータの前処理やクラスタ数・監視ルールの決定方法の工夫が必要でしたが、ダイカスト工程やデータ分析に詳しい方々からのアドバイスのおかげで、無事に開発を完了することができました。

今回開発したモデルを用いることで、大幅に監視システムの展开工数を削減できたため、本システムを多くの工程・工場に展開していき、豊田自動織機のDX推進に貢献していきたいと思っております。

作業姿勢分析システムの開発とその応用 Development of Work Posture Analysis System and Its Application

大竹 一世^{*1} 早川 貴英^{*1} 寒川 淳平^{*1}
Kazutoki Otake Takahide Hayakawa Jumpei Samukawa

*1 生技開発センター

要 旨

当社製造工程では、高齢者（50歳以上のメンバー）でも継続して働ける職場づくりのために、社内基準に基づく工程評価・改善に取り組んでいる。そこで、作業映像から作業者の2次元骨格を抽出し、さらに3次元化することで高精度に作業姿勢の辛さを自動評価できるシステムを開発した。これにより、従来の目視による手動評価と比較して評価工数を約85%低減し、大幅な効率化を実現した。

本記事では、今回開発した作業姿勢分析システムの内容とその応用事例について紹介する。

キーワード：作業姿勢、3次元化、工程改善、工数低減

Abstract

In our manufacturing process, we are working on process evaluation and improvement based on internal standards to create a workplace where even older workers (members over 50 years old) can continue to work. To this end, we have developed a system that can automatically evaluate work load of posture with high precision by extracting a worker's two-dimensional skeleton from work video and further converting it to three dimensions. This system reduces the man-hours required for evaluation by about 85% compared to the conventional manual evaluation by visual inspection, and has achieved a significant improvement in efficiency.

This article introduces the contents of the newly developed work posture analysis system and its application examples.

Keywords: Work Posture, Three Dimensionalization, Process Kaizen, Reduction of Man-hours

1 はじめに

1.1 高齢化問題

近年、社会問題となっている労働者の高齢化は、当社においても深刻である。工場で製造に関わる技能職のメンバーの高齢者数が急増し、体力が低下する高齢者でも就労できる工程の数（高齢者の就労可能工程数）が大幅に不足することが予想されるため、継続的な工程改善が必要である（図1）。

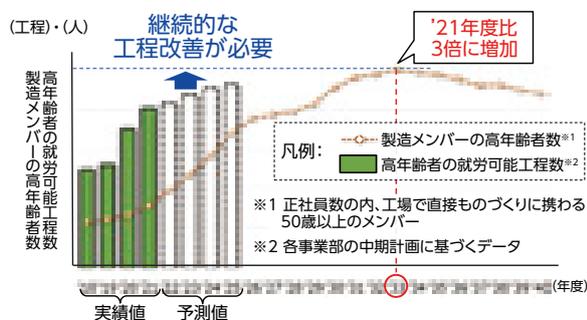


図1 高齢者数及び高齢者の就労可能工程数
Fig.1 Number of Older Workers and Number of Workable Processes for Older Workers

1.2 高齢者の就労可能工程の認定方法

当社では、高齢者の就労可能工程を認定するために、安全健康推進部が定める作業姿勢・重量物取扱い基準（図2）に基づく工程評価を行っている。評価は主に「作業姿勢の点数化」と「姿勢重量点の算出」の2つで構成される。「作業姿勢の点数化」とは、作業者の腰と膝の角度から作業姿勢を分類し、辛さに応じて点数化することである。「姿勢重量点の算出」とは、点数化した作業姿勢をとった合計時間や重量物の重さから総合的に姿勢重量点を算出することである。評価者は、姿勢重量点調査票を使ってこれらの評価を行い、各工程の姿勢重量点を求める。姿勢重量点が20点未満であれば高齢者の就労可能工程と認定される。



図2 作業姿勢・重量物取扱い基準
Fig.2 Work Posture and Weight Handling Standards

1.3 工程評価の問題点

当社のL&Fカンパニーで行われていた工程評価の方法を図3に示す。評価者は、作業者をカメラで撮影し、その作業映像を繰り返し見て、腰と膝の角度を測定していた。しかし、目視による角度測定のため、測定精度は約±20度と大きなばらつきが生じていた。また評価工数は、10分の工程を評価するのに平均73分/工程かかっており、評価者の負担が膨大になっていた。

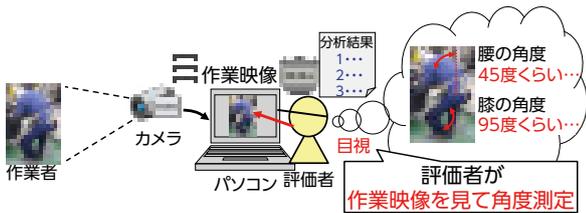


図3 L&Fカンパニーの工程評価方法 (2019)
Fig.3 Process Evaluation Method of L&F Company (2019)

その他の評価方法として、作業者の全身にセンサを取り付けるモーションキャプチャーを使う方法がある。測定精度は±5度と良く、作業者の周囲に遮へい物があっても問題なく測定できるメリットがある反面、センサの着脱や調整の工数は約45分/工程を要し、作業者の負担が大きかった。そこで、映像分析の技術を活用し、精度、効率よく作業姿勢を分析できるシステムの開発に取り組み、工程評価の工数低減を目指した(図4)。

| 評価方法 | 目視 | モーションキャプチャー | 映像分析 |
|--------|--|---|---------------------------------------|
| イメージ概要 | カメラ、作業映像、目視測定、評価者、ストップウォッチ、作業映像を繰り返し見ながら測定 | モーションキャプチャー(全身にセンサ取り付け)、作業者、ワイヤレス パソコン 受信機、モーションキャプチャー着脱・測定 | 作業映像入力、結果、評価者 パソコン 出力 システム、作業映像を入れるだけ |
| 性能 | 開節角度測定精度 約±20度 | ±5度 | ±10度 |
| 評価工数 | 73分/工程 | 45分/工程 | 10分/工程 |
| 備考 | | 当社所有品にて確認 | 今回開発 |

図4 評価方法毎の性能
Fig.4 Performance of Each Evaluation Method

2 作業姿勢分析システム

2.1 着眼点と課題

作業映像から自動で作業姿勢を分析するために、2017年頃より普及し始めた映像から人物の骨格を抽出するデジタル技術を取り入れている。当初、人物の骨格から腰と膝の角度測定をするこ

とで作業姿勢を分析できると考えたが、精度よく角度測定をするには作業者を真横から撮影する必要があった。実際の製造現場で検証してみると、常に真横から撮影し続けることは難しく、人物の骨格から高精度に角度測定をするアルゴリズムが必要であった(図5)。



図5 角度測定の課題
Fig.5 Issues of Angle Measurement

2.2 方策

今回開発したアルゴリズムとシステム構成を図6に示す。

アルゴリズムの特長は、作業映像から2次元の人物骨格を抽出した後、体の向きを考慮して3次元化することで、腰と膝の角度を高精度に測定できる点である。この工夫により、作業者を撮影する際に一定の制約条件(横や斜め横から撮影する等)はあるものの、測定精度±10度での角度測定が可能になった。角度測定後、作業姿勢の点数化を行い、身体的負荷を自動で評価する。

またシステム構成は、作業映像を所定フォルダにコピー＆ペーストで入れるだけで、姿勢重量点調査票等の分析結果が自動作成されるようにした。各工場のパソコン端末から、いつでも誰でも簡単操作で使用できるようになり、評価工数を10分/工程に低減できた(従来比85%減)。

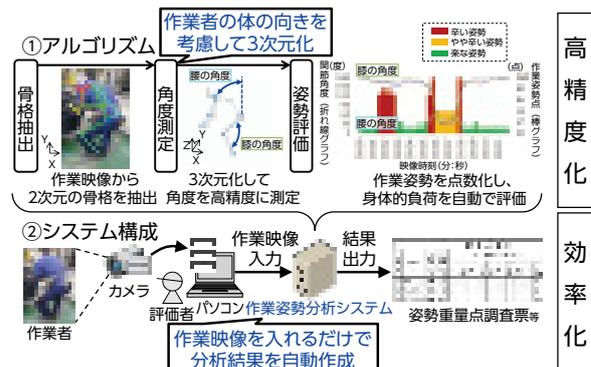


図6 アルゴリズムとシステム構成
Fig.6 Algorithm and System Configuration

このようなアルゴリズムとシステム構成により、姿勢分析の高精度化と効率化を両立した。

2.3 分析結果

自動作成される分析結果を下記に示す。

1) 映像

作業姿勢が分析された映像が作成される(図7)。左側には2次元の骨格抽出結果、右側には正確な角度測定のために3次元化した骨格データ、下側には作業姿勢点と姿勢名称の字幕を表示している。字幕の色は緑・黄・赤で色分けしており、姿勢が辛くなるに従って黄や赤で表示することで、作業の様子を見ながら辛い姿勢をとった箇所を確認できる。

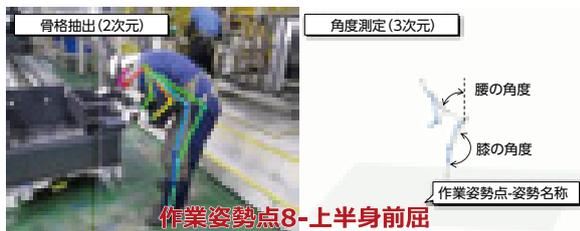


図7 分析結果(映像)
Fig.7 Analysis Result (Video)

2) グラフ

横軸に映像時刻、縦軸に腰と膝の角度と作業姿勢点を示したグラフが作成される(図8)。作業姿勢点を示す棒グラフにより、辛い姿勢をいつ、どれだけの時間とったかが可視化され、改善すべきポイントが一目で分かるようになっている。

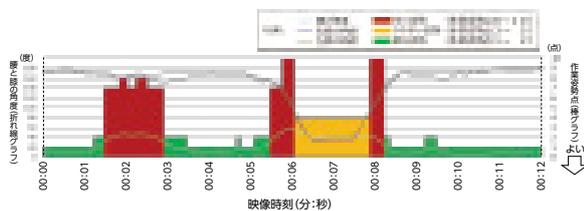


図8 分析結果(グラフ)
Fig.8 Analysis Result (Graph)

3) 姿勢重量点調査票

これまで評価者が全て手入力で作成していた姿勢重量点調査票が自動で作成される(図9)。これにより姿勢分析後に行う帳票作成作業を効率化している。

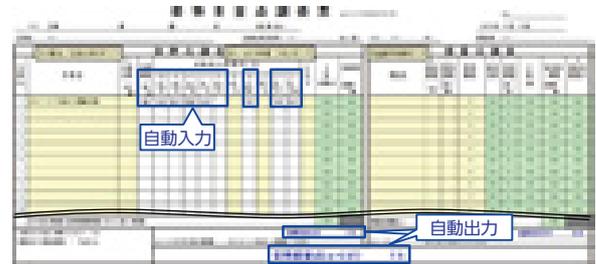


図9 分析結果(姿勢重量点調査票)
Fig.9 Analysis Result (Posture-weight Score Questionnaire)

2.4 製造現場特有の問題と対策

本システムの開発は、当初よりL&Fカンパニー及び自動車事業部と協力し、アジャイル開発にて進めてきた。実際に製造現場でシステムを活用した際に発生した問題とその対策の例を下記に示す。

1) 複数人の映り込み

複数人が並んで作業を行う工程等では、撮影中に評価対象者(評価すべき作業員)以外の人映像に映り込み、その人数分の骨格が抽出される。そのため、どれが評価対象者が特定できず正常に姿勢分析ができない問題が発生した。対策として、人の位置や大きさ等から、評価対象者のみを自動で特定するアルゴリズムを追加して、複数人の映り込みに対応した(図10)。

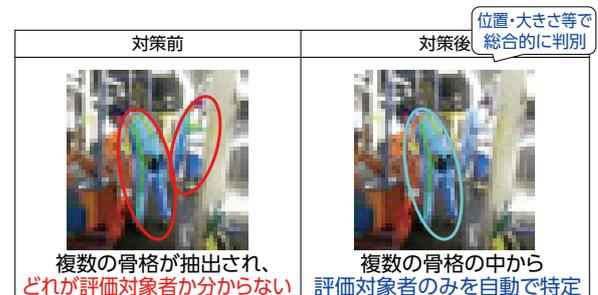


図10 評価対象者の特定アルゴリズム
Fig.10 Algorithm for Identifying Evaluation Target Person

2) 評価対象者の遮へい

作業環境によって、1台のカメラでは評価対象者がワークや設備で遮へいされ、正常に姿勢分析ができない問題が発生した。対策として、複数台の

カメラでそれぞれ別の方向から撮影し、評価対象者の全身が映っている作業映像を自動的に選択・統合するアルゴリズムを追加し、評価対象者の遮へいに対応した。

なお、車両内に入り込んで作業を行うような一部の工程では、複数台のカメラを用いても評価対象者の全身を撮影することが難しい。その際は、当社所有のモーションキャプチャーを用いる等、現場の状況に応じて使い分けて運用している。

3 システム運用結果

3.1 利用実績

2020年7月の社内利用開始後、高齢対応以外の工程評価・改善でも利用され、評価件数は2021年度で1367件、そのうち工程改善まで行われた件数は約80件あった。評価時間に換算すると、1754時間相当を削減できた。

また利用者のアンケート結果より、システムの利用用途は、辛い姿勢の見える化が最も多く、次いで工程改善前後の姿勢比較や姿勢重量点調査票の作成等があった(図11.②)。その他、利用者の声として「本人も気づきにくい年齢的な体力低下を考慮し、作業環境を改善できた」や「モーションキャプチャーよりも作業者の負担が少なくて良い」等、好評である。



図11 システムの評価件数と利用用途
Fig.11 Number of System Evaluations and Uses

3.2 工程改善への活用例

L&Fカンパニー製造部の溶接仕上げ・検査工程は改善前、姿勢重量点24.7点(基準の20点以上)で、高齢者の就労不可工程であったが、分析結果からしゃがみ姿勢での作業が多いことが判明したため、椅子を活用することで楽な着座姿勢に改善した。改善後は、姿勢重量点19.3点(基準の20点未満)となり、高齢者の就労可能工程となった(図12)。

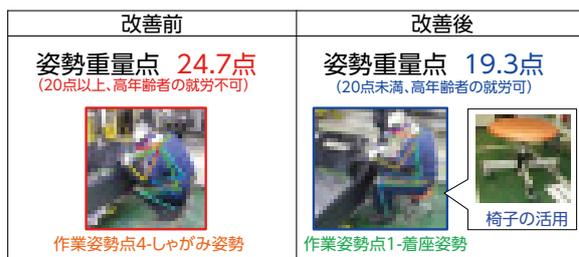


図12 システム活用による工程改善事例
Fig.12 Example of Process Kaizen by System Utilization

4 システム応用事例

4.1 市販の作業分析ソフトとの連携

当社では、作業の効率化や生産性向上のために市販の作業分析ソフトも活用している。今回はとくに、OTRS(ブロードリーフ社製ソフト)を組み合わせることで利用したいというニーズがあり、中間ファイルを生成してデータの受け渡しができる仕組みを構築した(図13)。OTRS上で作業姿勢の分析が可能となる他、OTRSの機能を活用することで作業姿勢・要素作業を合わせた標準作業組合せ票を作成することも可能となり、工程改善の検討がしやすくなった。

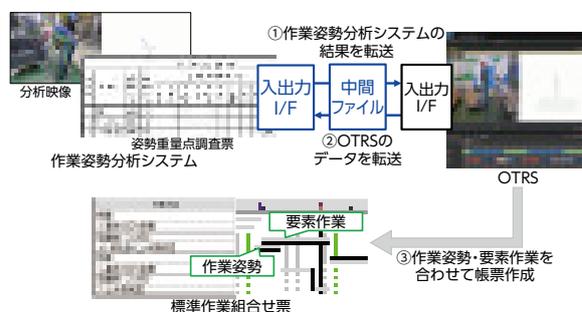


図13 OTRSとの連携イメージ
Fig.13 Image of the Linkage with OTRS

4.2 作業映像検索サイト「STube」の制作

作業姿勢分析システムが全工場で活用され始めたことにより、各工程の改善前、改善後の作業映像が自動的に蓄積されるようになったため、それらを検索・閲覧できる作業映像検索サイト「STube」を制作し、運用している(図14)。これまで工場見学等でしか見る機会がなかった他工場の工程・作業を、各工場のパソコン端末から手軽に見られるようにして、改善のヒント発見による工程改善のスピードアップと活性化を図っている。

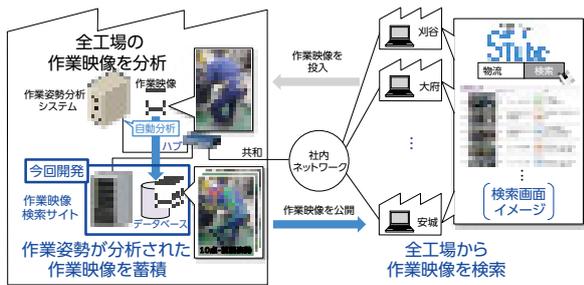


図14 作業映像検索サイト[STube]の構成
Fig.14 Configuration of the Work Video Search Site [STube]

また単に作業映像を検索して閲覧できるだけでなく、映像内の物体の種類や位置を検知する技術を取り入れ、骨格抽出の技術と組み合わせることで、映像中から見たい作業箇所へジャンプ再生できる機能を開発した(図15)。本機能により、時間の長い作業映像でも、効率よく短時間で内容を確認できるようになった。



図15 見たい作業箇所へのジャンプ再生機能
Fig.15 Jump Play Function to Points of Interest

4.3 姿勢比較アプリの制作

作業映像から作業者の2次元骨格が抽出できる技術を応用し、2つの映像と骨格の重ね合わせ表示ができる姿勢比較アプリも制作している。製造現場だけでなく、当社女子ソフトボール部でも活用されており、日々のコンディション毎にデータを蓄積し、分析している(図16)。監督や選手からは「修正すべき点の議論がしやすい」、「好調時の自分自身や、参考にしたい選手とのフォーム比較がしやすい」と好評である。



図16 姿勢比較アプリの女子ソフトボール部応用
Fig.16 Women's Softball Team Application of Posture Comparison App

5 まとめ

製造現場のニーズに応じてデジタル技術を活用し、作業映像から作業姿勢を分析できるシステムを開発した。さらに、蓄積される作業映像を活かした検索サイトや姿勢比較アプリの制作を順次進めている。

今後とも利用者のニーズに基づく機能改良を継続しながら、海外拠点への展開を検討していく。また骨格抽出や物体検知等の技術を作業の異常検知等にも活用し、誰でも安全で快適に働ける職場づくりを支援する取り組みを継続していく。

■ 著者紹介 ■



大竹 一世

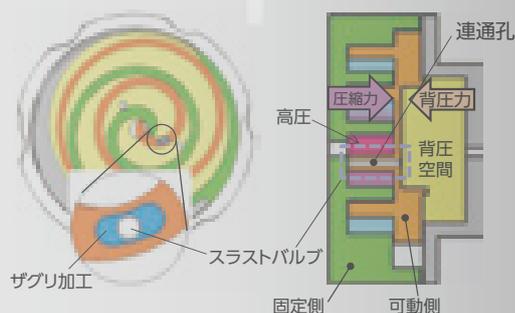
早川 貴英

寒川 淳平

開発の経緯と開発者の思い

本開発は、製造現場で姿勢評価を行っている担当者から困りごとを聞き、映像から人物骨格を抽出するデジタル技術が活用できそうと考えて開発を始めました。しかし、実際の現場で応用してみると作業者を常に真横から撮影ができない、他者が映り込む等、問題が多発しました。本稿で述べたような1台の汎用カメラで撮影した人物の2次元骨格を3次元化し、腰と膝の角度を測定して姿勢分析ができるシステムの実例はまだ少なく、実際に製造現場で使えるレベルにするために、各工場の担当者と一緒に精度向上やシステム改良に取り組んできました。新技術をただ取り入れるだけでなく、現地現物で課題を洗い出し、地道に改良を重ねる大切さを改めて学ぶことができ、とても良い経験になりました。本取り組みを通じて各工場の工程評価・改善の活動をさらに活性化し、安全で快適な職場づくりに貢献していきます。

表彰



Commendation

P.112 自動運転トラクタ(3TE25) グッドデザインベスト100受賞

P.115 特許発明「スクロール型圧縮機の背圧調整機構」が
愛知発明表彰にて愛知発明大賞を受賞

自動運転トーイングトラクター(3TE25) グッドデザインベスト100受賞 Autonomous Towing Tractor Received Good Design Award Best100

薬師 忠幸^{*1} 森 博樹^{*1}
Tadayuki Yakushi Hiroki Mori

*1 トヨタL&Fカンパニー R&Dセンター 製品企画部

要 旨

2021年4月より羽田空港において実証実験を実施した3TE25自動運転仕様(以下、本モデル)が、2021年度グッドデザイン賞においてベスト100を受賞した。本稿では本モデルのデザインと、グッドデザイン賞について解説する(図1)。

キーワード:自動運転、トーイングトラクター、デザイン

Abstract

The 3TE25 Autonomous Driving specification (hereinafter referred to as "this model"), which has been tested at Haneda Airport since April 2021, received the Best 100 in the Good Design Awards for 2021. This paper describes the design of this model and the Good Design Award.

Keywords: Autonomous Driving, Towing tractor, Design

1 はじめに

1.1 グッドデザイン賞について

グッドデザイン賞とは公益財団法人 日本デザイン振興会によって催される、日本唯一の公的デザイン表彰制度である。1957年から65年の歴史を持ち、国際的な賞としても知られる。

一次の書類審査、二次の現物審査により、一定の基準を満たしたものがGマークの表示を許される。さらに審査委員会が認めた、特に優れたデザインが「グッドデザインベスト100」に選出される。

2021年度は応募総数が5,835件、うち1,603件(28%)がGマークに選定された。

うち本件が受賞したベスト100は1.7%という狭き門である(図2)。



図2 グッドデザイン賞状
Fig.2 Good Design Award Certificate



図1 外観
Fig.1 3TE25 Autonomous

1.2 評価ポイント

デザインというと、外見の色や形を整える作業と思われることが多いが、グッドデザイン賞の審査で重視されるのは、美しさや格好良さだけではなく「その製品(サービス)が、どのように人(社会)の豊かさに貢献できるか」という点である。

審査員評は以下の通り。

「空港内で貨物台車をトーイングトラクターで運ぶ仕事は、極めて労働集約型であり、人手不足が深刻化する中、本製品ではトラクターの自動運転によるソリューションを提案している。法的制約や技術的課題により公道での自動運転の実装がなかなか進まない中、空港内での実装は比較的早く、社会課題解決の効果も小さくない。滑走路など建物が少ないSLAM技術では自己位置推定が困難な環境で、路面パターンマッチングを補完的に使用する技術的ブレークスルーもある。また、電動化により低炭素社会への貢献も提供できている。」

1.3 トーイングトラクター(以下T/T)について

本モデルは、空港内で旅客の手荷物や貨物を載せたコンテナドーリー(台車)をけん引するためのトラクターである。航空機と空港内の貨物エリアとの間、および空港内施設間の水平搬送に使用される。空港においては物流の多くをT/Tで処理しているため、T/Tの能力が空港の能力を決めると言っても良いほどの重要な役割を担っている(図3)。



図3 台車をけん引するT/T
Fig.3 T/T trailing a dolly

2 受賞の内容

2.1 開発の背景

空港においては長年、多くの部分を人手に頼ったやり方で業務が行われている。そのため、今後の労働人口の減少や、新型コロナなど様々なリスクへの対応力を高めるために、グランドハンドリング業務にイノベーションをもたらす新技術が期待されている。T/Tの運転のような反復定型業務について自動化を進めることで、人と機械の役割を見直し、作業品質の安定と、人の役割をより高度なものにシフトすることを目指している。そこで、ANA(全日本空輸株式会社)と共に、次世代の空港物流についての研究を進め、トーイング工程の自動化が可能な自動運転バッテリー T/Tを開発した。

2.2 デザインのねらいとポイント

空港の物流を革新する自動運転T/Tをデザインするにあたり、以下のポイントに重点を置いた。

1) 空港での「先進性」アピール

国の玄関としての役割を持つ国際空港において、海外からのお客様が、本モデルに搭載された最先端の機能を、外観を見ただけでイメージしてもらえるようなスタイリングを目指した。

2) センサーの一体化(図4)



図4 側面センサーカバー
Fig.4 Sensor cover on the side

自動化に必要なセンサー類を、効率よく安定して機能させるためには、ボディから突出した場所や四隅に配置する必要がある。一方、これらの部位は他の車両や障害物との接触リスクが高く、高価なセンサーを破損しないように保護する必要もある。センサーの選定、配置位置などを検討する開発初期からデザインの視点を入れることで、センサーの検知範囲をデザイン要素としたり、ベースとした有人車の造形を活かした保護カバー造形とするなど、後付け感のない、統一感のあるデザインを実現した。

3) 機能的デザイン(図5)

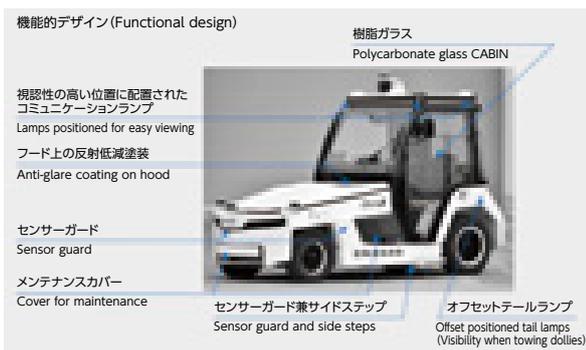


図5 デザインのポイント
Fig.5 Design highlights

ただ形状が整っているだけではなく、機能に裏打ちされたデザインを心がけた。

- ・被視認性の高いルーフ四隅に配置された、自動運転車両の走行状態を表示するサインライト。
- ・鉄板の曲げ加工のみで実現できるようにした、平面主体のデザイン。
- ・センサー類の調整がしやすいよう、脱着を容易にしたセンサーカバー。
- ・周囲からオペレータが運転していない様子がよくわかる、ガラス面積が広いデザイン。

4) TOYOTA産業車両ファミリーデザイン(図6)

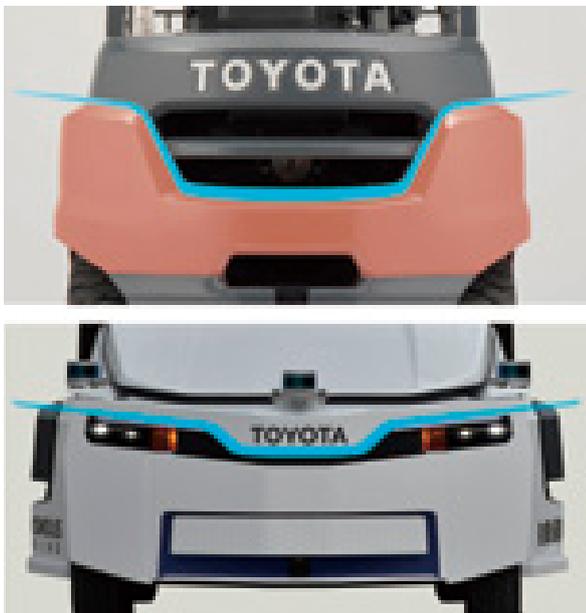


図6 ブランドを表現するグラフィック
Fig.6 Brand identity design

TOYOTAブランド産業車両のデザイン要素をフロント/リアのグラフィックに取り入れることで、他のトヨタ産業車両の共通イメージを持たせ、ブランド力の強化を意識した。

3 まとめ

自動運転の作業機など、この分野の車両の多くはセンサーを後付けして、ガードを張り巡らせたような無骨なものが殆どである。私たちは、使う人の負担軽減や安全など機能面をクリアするだけでなく、車両に込められた見えない高度な技術を表現し、見る人に明るい未来を想像してもらえるようなデザインを目指した。

今後も働く人が誇りを持って使ってもらえるような、また見る人が憧れを持つような、夢のあるデザインの製品を作っていきたいと考えている。

また、本稿執筆中に、国際3大デザイン賞の一つ、ドイツiF(アイエフ)デザイン賞の受賞が報じられた。デザインに対する高い評価は、関係各位の理解と協力の結果であり、この場をお借りして御礼を申しあげたい。

■著者紹介■



薬師 忠幸

森 博樹

特許発明「スクロール型圧縮機の背圧調整機構」が愛知発明表彰にて愛知発明大賞を受賞 The Patented Invention of “A Back Pressure Adjustment Mechanism of a Scroll Type Compressor” Won the Grand Prize in Aichi Prefecture Commendation for Invention at the Aichi Invention Award

今福 真紀子^{*1}

Makiko Imafuku

*1 知的財産部

要 旨

特許発明「スクロール型圧縮機の背圧調整機構」(特許第5201113号)が愛知発明表彰にて愛知発明大賞を受賞した。本発明は、圧縮動作に不可欠な可動側スクロールの背圧力をシンプルな構造で自動自律的に最適化することで、圧縮効率の向上と低コスト化の両立を実現したもので、本発明の技術は当社の全ての電動圧縮機に採用されている。特許発明の内容について紹介する。

キーワード: 愛知発明表彰、背圧調整、電動圧縮機

Abstract

The patented invention of “A Back Pressure Adjustment Mechanism Of A Scroll Type Compressor” (Japanese Patent No. 5201113) won the grand prize in Aichi prefecture commendation for invention at the Aichi invention award. The invention realizes both improvement of compression efficiency and cost reduction by automatically and autonomously optimizing the back pressure of the movable scroll, which is indispensable for compression operation, with a simple structure. The technology of the invention is used in all of our electric compressors. The contents of the patented invention are introduced.

Keywords: Aichi Invention Award, Back Pressure Adjustment, Electric Compressor

1 はじめに

愛知発明表彰は、愛知県内において優秀な発明をされた方々を表彰し、当該地域の発明奨励・振興を図ることを目的に、昭和55年から公益社団法人発明協会によって毎年開催されている。知的財産部ではこの愛知発明表彰に毎年社内発明を応募して、技術者のモチベーション向上および製品のPRを図っている。

2022年6月17日に令和4年度愛知発明表彰の表彰式が開催され、当社の発明である特許「スクロール型圧縮機の背圧調整機構」(特許第5201113号)が栄えある愛知発明大賞を受賞した。当社としては昨年度に引き続き大賞の受賞である。

今回受賞した特許発明「スクロール型圧縮機の背圧調整機構」は、スクロール型電動圧縮機の背圧力をシンプルな構造で自動自律的に最適化する構成により圧縮効率の向上と低コスト化の両立を実現できる点をはじめ、電動圧縮機への採用率が高い点や、省電力化に貢献できる点などが評価された。

今回受賞した特許発明は、コンプレッサ事業部の伊藤達也さん、福谷義一さん、水藤健さんらによって発明されたものであり、記念の賞状並びに盾が贈られた(写真1)。



写真1 愛知発明表彰授賞式(左から愛知県発明協会副会長の佐々木さん、伊藤達也さん、福谷義一さん、知財部長の伊東さん)

Photo1 Awarded Winners at Ceremony of Aichi Invention Award (From left; Aichi institute of Invention and Innovation Vice President Sasaki, Mr. Tatsuya Ito, Mr. Yoshikazu Fukutani, Intellectual Property Dept. General Manager Masaki Ito)

2 発明の内容

1) 発明の背景

地球温暖化や化石燃料の枯渇といった環境問題に直面していることから全世界で規制厳格化が進み、全車両メーカーは燃費の良いハイブリッド自動車(以下、HEVという)や電気自動車(以下、BEVという)など車両の電動化を加速させている。これらの電動車に搭載されるカーエアコン用の電動圧縮機は、昨今では室内冷房のみならず、暖房、電池冷却や電気機器冷却などにも用途が広がっており(図1)、燃費や航続距離を確保するためには、電動

圧縮機をできるだけ少ない消費電力で運転できる
よう効率を向上させる必要がある。

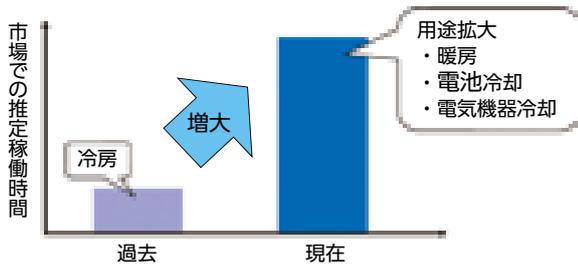


図1 用途拡大による電動圧縮機稼働時間
Fig.1 Operating time of electric compressor due to expanded use

電動圧縮機は、静粛性、体格、効率の観点から可動側と固定側の2つの渦巻壁からなるスクロール型が採用されている。本圧縮機は、圧縮力によって可動側が固定側から引き離されるため、効率的な圧縮を行うためには渦巻壁の先端の隙間を介した内部漏れを防ぐ必要があり、そのために可動側の背面に圧縮されたガスの圧力(以下、背圧力という)を圧縮力に対抗するように作用させ、可動側を固定側に押し付けて回転運動させている。

2) 発明が解決しようとする課題

従来の背圧力を調整する背圧調整機構は、高压空間に絞りを通して接続される背圧空間と低压空間との間にボール弁を設け、その前後差圧でボール弁を開閉させることで背圧力を調整していた(図2)。

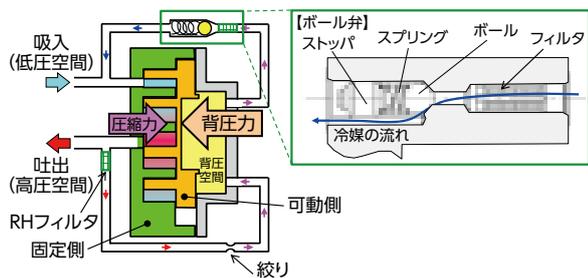


図2 ボール弁の背圧調整機構
Fig.2 Back pressure adjustment mechanism by ball valve

この方式では、背圧空間は一定の設定背圧となるため、使用範囲内で圧縮比が変動すると、圧縮比が小の状態では過剰背圧となって接触部の高摩擦による機械損失が拡大し、逆に圧縮比が大の状態では背圧不足で接触部が離れ冷媒漏れ拡大に繋がる問題があり、いずれの場合にも高効率化を達成できず、省燃費(省電力)要求に応えることがで

きないという課題があった(図3)。また、ボール弁は、設定圧力の調整が複雑で高コストである。

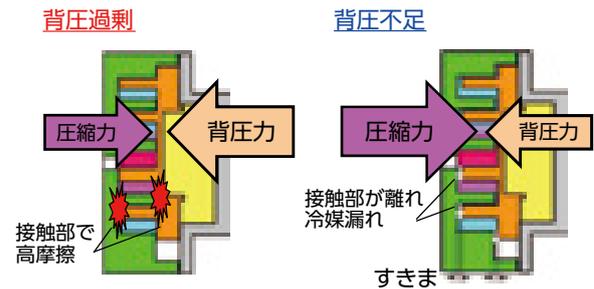
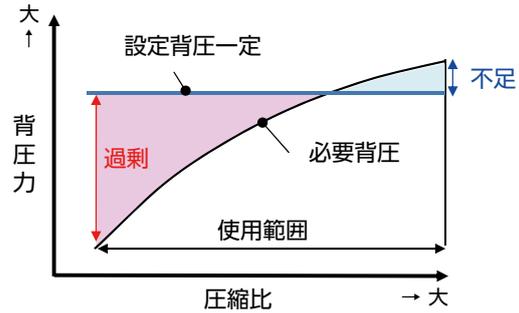


図3 従来の背圧挙動
Fig.3 Conventional back pressure behavior

3) 発明の特徴

(1) スラストバルブの基本構成

本発明は、圧縮力に対抗する背圧力を圧縮室から直接背圧空間に導入させることで、常に最適な圧力で可動側を固定側に押し付けるようにした背圧調整機構であり、開閉機能としてスクロール自身の軸方向移動を利用した弁機構(以下、スラストバルブという)を核心とするものである。可動側には、背面と渦巻壁の先端を連通させる連通路(給気通路)が設けられ、圧縮室と背圧空間とが連通可能となっている。また、圧縮室側の開口面積が大きくなるよう渦巻壁の壁面方向に延びるザグリ加工を施している(図4)。

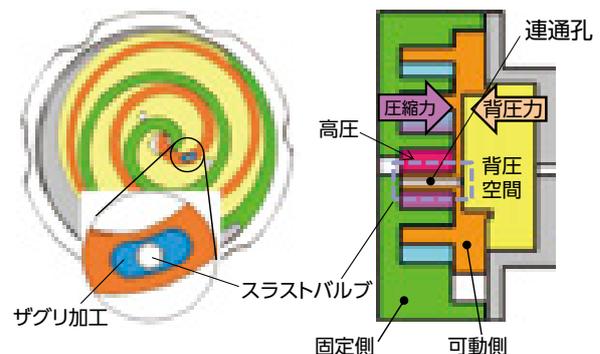


図4 スラストバルブの構成
Fig.4 Structure of thrust valve

(2) スラストバルブの機能・効果

背圧力が不足(圧縮力>背圧力)する場合、圧縮力により可動側の渦巻壁の歯先は固定側から離間するため連通路が開く。これにより背圧空間は圧縮力に対抗できる程度に加圧され冷媒漏れを効果的に防止する。背圧力が十分(圧縮力<背圧力)の場合、逆に連通路は閉鎖され背圧空間が過剰に加圧されることなく高摩擦による機械損失を効果的に防止する(図5)。開口時の冷媒漏れを極力低減するために、連通路の流入口は高圧側に配置している。このようなスラストバルブでは、自動自律的な背圧力の調整を可能とし(図6)、圧縮効率の向上と低コストを実現する電動圧縮機の提供を可能とする。

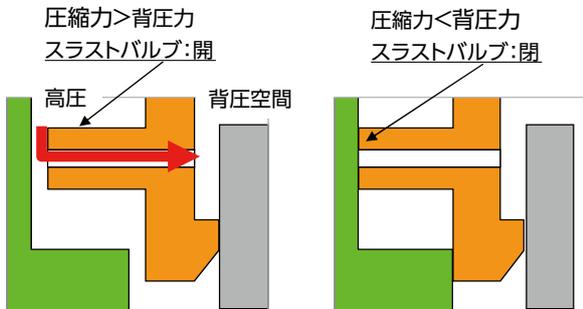


図5 スラストバルブの機能
Fig.5 Function of thrust valve

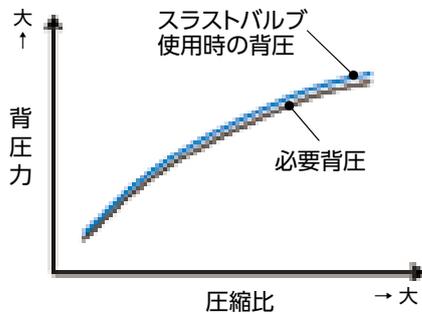


図6 スラストバルブの背圧挙動
Fig.6 Back pressure behavior of thrust valve

3 まとめ

今回受賞した特許発明「スクロール型圧縮機の背圧調整機構」は、当社の全ての電動圧縮機に採用され、多くのHEVやBEVなどの電動車に搭載されている。

知的財産部では、発明の益々の促進を図り、当社の技術者が多くの技術的課題に取り組んだ成果を漏れなく特許出願して権利化することにより、当社製品に対するより強固な特許網を構築するとともに、今回のような名誉ある賞に値するような優れた発明を創出できるよう、今後も開発部署と一丸となって努めていきたい。

■著者紹介■



今福 真紀子

受賞者(伊藤達也さん)の思い

開発当時、電動コンプレッサの効率向上を目指す上で背圧力の最適化は見積もり効果も大きく、達成すべき案件なのは明確だったのですが、背圧制御は電動コンプレッサが圧縮を行う過程で肝となるため、開発過程において非常に慎重な見極めが必要でした。そのため、メンバーで知恵を出し合い、日々試作品とにらめっこしながら試行錯誤を繰り返すことで、一步一步課題をクリアし、あらゆるシーンで信頼性と高効率を両立する背圧調整機構を成立させることができました。

今後も社会に貢献できる製品開発に挑戦していきたいと思っております。

電解加工 (ECM) によるターボチャージャ用チタンアルミ製タービンホイール翼加工に関する研究

Study on Titanium Aluminide Turbine Wheel Blade Machining for Turbochargers by Electrochemical Machining (ECM)

後藤 昭弘^{*1} 小尾 伸昭^{*2} 清水 達也^{*3} 青野 将大^{*3}
 Akihiro Goto Nobuaki Obi Tatsuya Shimizu Masahiro Aono

*1 静岡理科大学 *2 株式会社アクリテック *3 エンジン事業部 生産技術部

要 旨

ターボチャージャは、エンジンの燃焼室内の圧力を高めるために使用される装置である。近年、従来のNi基合金に代わり、TiAl材料をタービンホイールに使用する研究が行われている。TiAl材料は耐熱性に優れ、軽量であるため、タービンホイールの慣性モーメントの低減に有効である。

しかし、TiAl材は熔融時の粘度が高く、精密鑄造には適さないという問題がある。また、タービンホイール翼の厚さを1mm程度まで厚くしても、熔融したTiAlが金型の先端まで流れないことが多く、先端が欠ける問題がしばしば発生する。

そこで本研究では、厚さ1mm以上の翼を精密鑄造によりほぼ100%の歩留まりで製造し、電解加工 (ECM) により厚さを半分程度に薄く加工する方法について検討した。

ECMでは、電解液の流れが加工形状に影響を与えることが知られている。しかし、当初は思うような形状に仕上げることが難しく、未加工部分が残ってしまった。そこで、CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析を用いて電解液の流れを検討し、適正化することを試みた。その結果、形状精度や面粗度の要求を満たすタービンホイール翼を約100秒という短時間で加工する技術を確認した。

キーワード: TiAl, ターボチャージャ, タービンホイール, 翼, 電解加工

Abstract

A turbocharger is the device of a car that is used to add extra air into the combustion chambers of an engine. Recently, researches have been conducted on the use of TiAl materials in turbine wheels to replace traditional Ni-based alloys. Since TiAl material has good heat resistance and is lightweight, it is effective in reducing the moment of inertia of the turbine wheel.

However, the TiAl material has a problem that it has high viscosity when it is melted and that it is not suitable for precision casting. Even when the thickness of the turbine wheel blades is increased to about 1 mm, the molten TiAl does not always flow to the tip of the mold, and the problem of chipped tip often occurs.

In this study, authors investigated the method of manufacturing blades with thickness of more than 1 mm by precision casting in a yield of almost 100%, and then machining them into thin shape of about half thickness by electrochemical machining (ECM).

In ECM, it is well known that the flow of the electrolyte affects the machined shape. It was difficult to finish the blade in the desired shape at first and unmachined area remained. Then authors examined the flow of electrolyte using computational fluid dynamics (CFD) analysis and tried to make it appropriate. As a result, a technology was established to machine turbine wheel blades that meet the requirements for shape accuracy and surface roughness in a short time of about 100 seconds.

Keywords: TiAl, Turbocharger, Turbine Wheel, Blade, Electrochemical Machining

ラジカル-アニオンUV硬化を用いた傾斜構造を有する 有機-無機ハイブリッド膜の作製

Fabrication of an Organic-inorganic Hybrid Film with a Gradient Structure by Radical-anionic UV Curing

有光 晃二^{*1} 白井 凱己^{*1} 宗像 秀典^{*2} 佐藤 咲也子^{*2} 佐々木 彩乃^{*2}
Koji Arimitsu Yoshiki Shirai Hidenori Munekata Sayako Sato Ayano Sasaki

*1 東京理科大学 *2 PGプロジェクト

要 旨

ポリカーボネートを基材とした樹脂ウィンドウは、紫外線・傷付き等から保護するためにハードコートを表面に塗工する必要がある。本論文では、表面硬度と基材密着性の両立のため、表面に無機成分、基材側に有機成分をもつ傾斜構造の形成に取り組んだ。有機成分と無機成分の表面自由エネルギー差と溶剤の蒸発速度を調整することで、傾斜構造を有する有機-無機ハイブリッド膜をラジカル-アニオンUV硬化を用いて作製した。

キーワード: ハードコート、ラジカル-アニオン、有機-無機ハイブリッド膜

Abstract

It is necessary to apply a hard coat to the surface of the plastic glazing made of polycarbonate as a base material in order to protect it from ultraviolet rays, scratches, and the like. In this paper, we worked on the formation of a gradient structure with an inorganic component on the surface and an organic component on the base material side in order to achieve both surface hardness and substrate adhesion. By adjusting the surface free energy difference between the organic component and the inorganic component and the evaporation rate of the solvent, an organic-inorganic hybrid film with a gradient structure was produced by radical-anionic UV curing.

Keywords: hard-coat, radical-anion, organic-inorganic hybrid film

技報

TOYOTA INDUSTRIES TECHNICAL REVIEW

編集後記

いつも豊田自動織機技報をご愛読いただきまことにありがとうございます。
カーボンニュートラルの実現へ向けて世界中でグリーンエネルギーの利用、モビリティや物流の効率化、スマートな街づくりなどが進んでいます。世の中が急速に変化し多様化するなか、技術のイノベーションが果たす役割はますます高まっています。

当社でも化石燃料の利用効率化や水素の利用拡大、電動化への対応などさまざまな技術開発を進めております。

今号は、世界中で活躍する新型ランドクルーザーに搭載のディーゼルエンジンを特集しました。人と社会、地球環境のためになるエンジンを目指し、技術者の皆さんが約5年の歳月を重ねて完成させました。それぞれの役割を最後まで果たしひとつのピースも欠けずにやり遂げたから実現したエンジンです。

技報では、当社の新しい技術、製品を集め社内外の皆さんにお届けしながら、このような企業文化を感じていただく機会にもしていただければ幸いです。

末尾になりましたが、トレンドにご寄稿いただきました東海旅客鉄道株式会社様に厚く御礼申し上げます。また発行にご協力いただいた執筆者や編集委員の皆さんに感謝申し上げます。

技報事務局(R&D統括部)
北村 一典

編集委員

| | |
|---------------------|------------------------|
| 野田 昇 (トヨタL&Fカンパニー) | 濱口 敦司 (繊維機械事業部) |
| 樋脇 孝平 (自動車事業部) | 前坂 敏彦 (生技開発センター) |
| 細田 浩司 (エンジン事業部) | 佐藤 彰秀 (ダイエンジンアリングセンター) |
| 勝呂 知弘 (エレクトロニクス事業部) | 大津 達郎 (ITデジタル推進部) |
| 坪井 浩志 (コンプレッサ事業部) | 葛谷 賢司 (知的財産部) |

豊田自動織機 技報 No.73

2022年11月発行
(禁無断転載)

発行所 株式会社 豊田自動織機
〒448-8671 愛知県刈谷市豊田町2丁目1番地
TEL 0566-22-2511(代表)

発行人 赤塚 裕哉

印刷所 株式会社 アイワット



株式会社 豊田自動織機

