

株式会社 豊田自動織機

# 技報 76

2026.1

No.

TOYOTA  
INDUSTRIES  
TECHNICAL  
REVIEW

特集

最適化技術が拓く  
新たな価値創造

技報 76  
2026.1 No.  
TOYOTA INDUSTRIES TECHNICAL REVIEW  
株式会社 豊田自動織機

---

# 目次

## 豊田自動織機技報

第76号

### 巻頭言

- 4 次の100年のために、今もっと努力しよう！  
熊澤 聡太郎

- 7 トポロジー最適化を用いたモータコア設計手法の開発と実用化  
真田 拓弥 佐々木 智則 岡部 大輔

- 12 FCシステム 自動搭載設計  
菊池 駿介 村木 俊博 岡田 直行 野田 五十樹

- 17 物流業界の常識を覆す三次元梱包計画アルゴリズム  
大貫 峻 岡部 大輔 岡本 和也 岡本 浩伸 辻 祐矢 伊藤 健一 越村 三幸

- 24 データ活用で切り拓く物流効率化～共起性を活用した荷配置準最適化～  
服部 直樹 岡本 和也 岡本 浩伸 伊藤 辰都 野田 五十樹

- 30 物流分野における最適化問題  
加藤 拓朗 横町 尚也

- 34 生産計画立案自動化、最適化技術確立  
山根 有輝也

- 40 最適化技術を活用した自動車向けプレス金型設計の効率化  
山本 雄介 加賀谷 俊樹 千賀 大嗣 小倉 夏樹

### 特集

- 47 最適化技術の最先端へ。豊田自動織機と産業技術総合研究所との技術連携  
加藤 紀彦 岡本 和也 岡部 大輔 岡本 浩伸 加藤 拓朗 菊池 駿介 横町 尚也 大隈隆史

### インタビュー

### 表彰

- 58 「自動運転トーイングトラクタ」の意匠が全国発明表彰にて内閣総理大臣賞を受賞  
葛谷 賢司

- 61 国内初！空港制限区域内における自動運転レベル4無人貨物搬送の実運用を開始  
深津 史浩 佐藤 誠 鈴木 元太 開田 宏介 藤井 浩二 田島 将太

### トレンド

- 68 AI時代に求められるエンジニアに伝えたいこと  
栗原 聡

- 79 発電機用FCモジュールの開発  
山本 哲太郎 吉田 智志 小野 大輔 飼沼 徹 本村 浩平

### 製品技術紹介

- 84 3.5～8.0トン積 高性能電動フォークリフトの開発  
三浦 知道 藤岡 久未子 北村 圭祐 炭釜 康一 竹村 憲治

- 91 BEV向け5in1 ESUの開発  
津田 晋佑 古野間 高顕 田中 優 爲永 陽樹

- 98 IoT未対応設備への遠隔管理システム導入による業務効率改善  
濱口 富平

- 102 鑄造現場の安全性向上に向けた遠隔操作ノロ取りロボットの開発  
阪野 樹央 垣見 勇介 松澤 知行 安達 直功 松井 俊幸

- 108 カーエアコン用電動コンプレッサの回転1次振動低減における機構解析の活用  
太田 貴之 佐伯 愛 戸澤 耕作

### 技術解説

- 114 富岳を活用した電極-電解液界面シミュレーション  
櫻本 和弘 白井 敬介

- 120 データの類似性を考慮した転移学習による予測モデルの性能向上  
-燃料電池フォークリフト稼働データによる検証-

松浦 慶伍

- 127 高耐熱複合材料むけプリフォーム製織技術の開発  
中山 真広 高島 宏明 牧 垂矢 吉田 祐介

- 132 製品に含まれる化学物質の規制とその対応  
佐藤 裕史

- 138 Demonstration of Efficiency Increase of 350 V-to-13.3 V Isolated DC-DC Converters for Electric Vehicles by Active Gate Driving

鋤田 陽平 畑 勝裕 近藤 弘規 渡辺 健一 永吉 謙一 高宮 真

- 138 産業用エンジンをベースとした水素エンジンシステムの性能向上に関する研究開発

田中 耕太 田中 剛 山本 浩史 泉 光宏 水嶋 教文 葛岡 浩平

### 論文

- 139 水素燃料火花点火機関の異常燃焼に関する研究  
-ノッキング予測モデルの構築-

神戸 浩揮 増田 糧 田中 剛

- 139 Experimental Study on Hydrogen-Methane Co-Combustion in Small Gas Engines

田中 健太 谷 俊宏 佐古 孝弘

- 140 成形工程における糸の力学的形状変化を考慮した織物複合材料の分離型マルチスケール解析

笹川 崇 田中 真人 伊藤 祐

# CONTENTS

## TOYOTA INDUSTRIES TECHNICAL REVIEW

No.76

### Foreword

- 4 Let's Put in Greater Effort Now for the Next 100 Years!**  
Sotaro Kumazawa

### Feature

- 7 Development and Practical Application of Motor Core Design Method Using Topology Optimization**  
Takuya Sanada Tomonori Sasaki Daisuke Okabe
- 12 Automated Layout Design of FC System**  
Shunsuke Kikuchi Toshihiro Muraki Tadayuki Okada Itsuki Noda
- 17 A 3D Packing Planning Algorithm That Challenges Traditional Practices in the Logistics Industry**  
Ryo Onuki Daisuke Okabe Kazuya Okamoto Hironobu Okamoto Yuya Tsuji Kenichi Ito Miyuki Koshimura
- 24 Advancing Logistics Efficiency Through Data Utilization: Semi-Optimal Storage Allocation Using Co-Occurrence Analysis**  
Naoki Hattori Kazuya Okamoto Hironobu Okamoto Tatsuto Ito Itsuki Noda
- 30 Optimization Problems in Logistics**  
Takuro Kato Naoya Yokomachi
- 34 Establishment of Automation and Optimization Technologies for Production Planning**  
Yukiya Yamane
- 40 Application of Optimization Techniques to Automate the Structural Design of Automotive Press Dies**  
Yusuke Yamamoto Toshiki Kagaya Daishi Senga Natsuki Ogura

### Interview

- 47 To the Cutting Edge of Optimization Technology. Technical Collaboration Between Toyota Industries and the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology**  
Norihiro Kato Kazuya Okamoto Daisuke Okabe Hironobu Okamoto Takuro Kato Shunsuke Kikuchi Naoya Yokomachi Takashi Okuma

### Commendation

- 58 The Design of the "Autonomous Driving Tow Tractor" Won the Prime Minister's Award.**  
Kenji Kuzuya
- 61 First in Japan to Start LV4 Autonomous Operation**  
Fumihiko Fukatsu Makoto Sato Genta Suzuki Kosuke Kaida Kouji Fujii Shota Tajima

### Trend

- 68 A Message to Engineers in the Age of AI**  
Satoshi Kurihara

### Product Technology

- 79 Development of FC Module for Power Generators**  
Tetsutaro Yamamoto Satoshi Yoshida Daisuke Ono Toru Kainuma Kohei Motomura
- 84 Development of 3.5-8.0ton High-Performance Electric Counter Balanced Forklift Truck**  
Tomomichi Miura Kumiko Fujioka Keisuke Kitamura Koichi Sumigama Kenji Takemura
- 91 Development of 5-in-1 ESU for BEV**  
Shinsuke Tsuda Takaaki Konoma Suguru Tanaka Haruki Tamenaga

### Technical Review

- 98 Improving Operational Efficiency by Introducing a Remote Management System to IoT-Unsupported Facilities**  
Tomihiei Hamaguchi
- 102 Improving Foundry Safety through Remote-Controlled Slag Removal Robotics**  
Shigeo Banno Yusuke Kakimi Tomoyuki Matsuzawa Naokatsu Adachi Toshiyuki Matsui
- 108 Utilization of Multibody Dynamics Simulation in Reducing First-Order Rotational Vibration of Electric Compressors for Car Air Conditioners**  
Takayuki Ota Ai Saeki Kosaku Tozawa
- 114 Electrode-Electrolyte Interface Simulation Using the Fugaku Supercomputer**  
Kazuhiro Sakuramoto Keisuke Shirai
- 120 Transfer Learning Utilizing Real Industrial Vehicle Date Based on Similar Usage Trends**  
Keigo Matsuura
- 127 Development of High-productivity Weaving Technology for Preforms of Heat-resistant Composite Materials**  
Masahiro Nakayama Hiroaki Takashima Aya Maki Yusuke Yoshida
- 132 Regulations on Chemical Substances Contained in Products and Respond to legal requirements**  
Hirofumi Sato

### Monograph

- 138 Demonstration of Efficiency Increase of 350 V-to-13.3 V Isolated DC-DC Converters for Electric Vehicles by Active Gate Driving**  
Yohei Sukita Katsuhiko Hata Hiroki Kondo Kenichi Watanabe Kenichi Nagayoshi Makoto Takamiya
- 138 Research and Development on Performance Improvement of Hydrogen Engine Systems Based on Industrial Engines**  
Kota Tanaka Takeshi Tanaka Hiroshi Yamamoto Mitsuhiro Izumi Norifumi Mizushima Kohei Kuzuoka
- 139 Research on Abnormal Combustion in Hydrogen-Fueled Spark Ignition Engines - Construction of a Knocking Prediction Model -**  
Hiroki Kambe Ryo Masuda Takeshi Tanaka
- 139 Experimental Study on Hydrogen-Methane Co-Combustion in Small Gas Engines**  
Kenta Tanaka Toshihiro Tani Takahiro Sako
- 140 A Decoupling Multiscale Analysis of Textile Composite Considering Deformation of Fiber Yarns During Weaving and Molding Processes**  
Takashi Sasagawa Masato Tanaka Tasuku Ito

# 次の100年のために、 今もっと努力しよう！

Let's Put in Greater Effort Now for the Next 100 Years!



経営役員

**熊澤 聡太郎**

Sotaro Kumazawa

エンジン事業部、事業部長の熊澤です。自動車事業部の技術系も担当しています。歴史ある当社技報に執筆の機会を頂き、心より感謝申し上げます。根っからの技術屋ゆえ、読みづらい点もあるかと思いますが、少しでも皆さんに「想い」が届けばと願い、筆を執りました。



▲RAV4<sup>[1]</sup>

まず簡単に自己紹介をします。私は1989年にトヨタ自動車(株)(以下、トヨタ)へ入社し、約22年間、車両のボデーや内装設計に携わってきました。カムリから始まり、アイゴ、レクサス、タンドラなど多くの車種開発を経験し、当社の皆さんと初めて一緒したのはRAV4とヴィッツでした。



▲ヴィッツ<sup>[1]</sup>

2013年より車両基盤企画部長として、TNGA (Toyota New Global Architecture)の推進に取り組みました。これはトヨタ全車種におけるプラットフォームおよびユニットを刷新する、前例のない大改革でした。



▲TNGAによる新プラットフォーム<sup>[1]</sup>

この取組みは、CE制度(Chief Engineer制度)に挑戦する形となり、各車両の「社長」とも称されるCEが担うすべての意志決定と責任に対して、新たな視点からの変革を迫るものでした。そのため、全車種のCEからの反発に苦しみましたが、当時の豊田章男トヨタ社長(現トヨタ会長)の「もっといいクルマをつくらうよ」という言葉が改革を進めるうえでの大きな支えとなりました。

2015年のプリウス、カムリの立ち上げ後、2019年に当社自動車事業部へ出向。2024年からはエンジン事業部を担当しています。



▲カムリ<sup>[1]</sup>

ここからは、皆さんにぜひ伝えたい3つのメッセージです。

## 1. 新しい技術を生み出すには、信念を持ってやり続けること

トヨタグループのビジョン「次の道を発明しよう」にあるように、今はモビリティカンパニーへの変革期です。2016年、トヨタの若手社員が「ランドクルーザーの技術でJAXAの月面探査計画に参加すべき」と提案しました。社内では「なぜ宇宙?」「リスクが高すぎる」と否定されましたが、私は「まず技術的に可能か検討しよう」と支援しました。当時私は先行開発部の部長として、先行開発のまとめ役を担当していました。

彼らは諦めず、2018年FC(燃料電池)技術チームと協力し、酸素のない月面で1,000km走行可能な技術案を策定できました。そこで当時、私の上司の寺師茂樹トヨタ副社長(現当社会長)に相談したところ、早速、豊田章男社長に相談いただき、「面白そう、やってみる」との言葉を頂き、JAXAと正式契約。今では100人以上が2031年の打ち上げを目指して奮闘中です。

若い皆さん、新しいことに挑戦する精神は当社のDNAです。絶対に諦めず、挑戦し続けてください。

## 2. 商品力で競合に絶対負けるな!

「もっといいクルマをつくろうよ」は、単なるスローガンではありません。私が入社した頃、北米市場でFord Taurusが全米販売No.1でした。トヨタは打倒Taurusを掲げ、徹底的にベンチマークし、北米のお客様に選んでもらえる商品を目指しました。その結果、今ではTaurusは市場から完全に消えました。



▲Ford Taurus<sup>[2]</sup>

お客様の目は本当に厳しい。価格だけでなく、構造・性能・品質すべてで勝たなければ選ばれません。今、皆さんが担当している商品は、お客様の目線で本当に勝っていますか? 10年、20年先まで戦える

技術を開発し、商品力で魅了できるか? それが問われています。

ベンチマークとは、競合の構造を理解し、性能・原価・質量などをCVI(Cost Value Index)で分析し、自分の開発品が未来でもトップであるかを語れることです。世界のエンジニアと競い、打ち破る技術力を持ちましょう。

## 3. その道のプロになれ!

私は常々こう言っています。

- ・ 技術論をぶつけるとき、上司は肩書を外せ
- ・ 責任を取るとき、肩書は必要
- ・ 図面・データ・現物で議論し、解を導き出せ

「俺の言うことを聞いておけ」と根拠のない指示をしていませんか? 上司はメンバーの話聞き、技術的判断を。メンバーは技術で上司を論破すること。担当部品のプロとして、上司に「なるほど!」と思わせることが成長につながります。

DR(デザインレビュー)は、必ず図面・データ・現物で行うこと。PowerPointだけで済ませていませんか? 上司は「図面を持ってこい」「工程を確認してこい」と言っていますか? 当社が次の100年を勝ち抜くには、皆さんが「真のプロ」になることが必要です。プロとは、誰にも負けないという強い想いを持ち、日夜努力を続ける人です。プロのエンジニア集団にならなければ、商品力で負け、お客様に選ばれなくなります。

最後に、商品力で競合に負ければ、最終的には市場から消えます。トヨタ車も中国では一部の新興メーカーに負けています。「国の予算で価格に勝てない」と言い訳していませんか? 昔から価格では負けていましたが、商品力で勝っていたから選ばれていたのです。

中国のエンジニアは、自国のお客様に選ばれる商品力で、ドイツや日本勢を打ち負かそうと努力しています。トヨタはそのような厳しい現場で、逃げずに戦っています。私たちも「絶対負けない」と誓い合しましょう。

このメッセージが、皆さんの挑戦の一助となれば幸いです。

### ■参考文献

- [1]トヨタ自動車WEBサイト
- [2]フォード・トーラスWikipedia

# 特集

## 最適化技術が拓く

## 新たな価値創造

トポロジー最適化を用いたモータコア設計手法の開発と実用化	7
FCシステム 自動搭載設計	12
物流業界の常識を覆す三次元梱包計画アルゴリズム	17
データ活用で切り拓く物流効率化～共起性を活用した荷配置準最適化～	24
物流分野における最適化問題	30
生産計画立案自動化、最適化技術確立	34
最適化技術を活用した自動車向けプレス金型構造設計の自動化	40

# トポロジー最適化を用いた モータコア設計手法の開発と実用化

Development and Practical Application of Motor Core Design Method Using Topology Optimization

真田 拓弥<sup>\*1</sup> 佐々木 智則<sup>\*1</sup> 岡部 大輔<sup>\*1</sup>  
Takuya Sanada Tomonori Sasaki Daisuke Okabe

\*1 先行開発部

## 要旨

環境規制強化により電動化が加速するなか、モータの高性能化が重要課題となっている。当社ではモータ性能を向上させるためにトポロジー最適化を用いたモータコア設計手法を開発した。本手法は、設計領域内の材料分布を自由に变化させて解を探索することにより、広い設計空間から最適形状を導出できるとともに、製造上の制約を考慮した形状生成を実現する。本手法をコンプレッサやフォークリフト用モータに適用し、ミーゼス応力やトルク脈動の低減を確認し、実用性を実証した。

キーワード：トポロジー最適化、モータコア設計、最適設計、連続最適化

## Abstract

With the acceleration of electrification due to strengthening environmental regulations, enhancing motor performance has become an important issue. We have developed a motor core design method using topology optimization to improve motor performance. This method can derive optimal shapes from a wide design space by freely changing the material distribution within the design domain, as well as realize shape generation considering manufacturing constraints. When applied to motors for compressors and forklifts, reductions in von Mises stress and torque ripple were confirmed, demonstrating the practical applicability of this method.

Keywords: Topology Optimization, Motor Core Design, Optimal Design, Continuous Optimization

## 1 はじめに

環境規制強化により自動車をはじめ多くの分野で電動化が加速し、コンプレッサやフォークリフトの電動システム市場の成長が期待される。この成長市場で優位性を確保するには、電動システムの中核であるモータの高性能化が不可欠である。図1のコンプレッサ用モータはステータとロータで構成される。モータコアの形状は出力特性や効率に大きく影響するため、モータの高性能化にはモータコア設計の最適化が重要である。

設計手法として計算科学に基づく最適化技術があり、パラメータ最適化とトポロジー最適化に大別される。パラメータ最適化は設計者が事前に設定した変数とその範囲内で解を探索するため、結果がその設定に大きく依存する。一方、トポロジー最適化は設計領域内で材料分布を自由に变化させながら最適解を探索する。そのため、より広い設計空間から要求性能を満たす形状を生成できる。

当社はこのトポロジー最適化をモータコア設計に適用し、性能向上を実現した。本稿では、当該技

術の概要と実際に適用した成果を報告する。



図1 コンプレッサ用モータ概要  
Fig.1 Overview of Motor for Compressor

## 2 トポロジー最適化

本章では、トポロジー最適化の基本的なアルゴリズムと、モータコア設計適用における特長について述べる。

トポロジー最適化の処理フローは図2の通りである。入力情報として、設計領域、解析条件、制約条件、目的関数を設定する。その後、形状生成手法と解探索手法を組み合わせ、設計領域の最適形状を探索する。生成された形状はCAE (Computer Aided Engineering) による特性評価が実施さ

れ、その結果を踏まえ探索方向を決定する。形状生成、特性評価を反復し、探索終了時点で最適候補の形状を出力する。

また、トポロジー最適化のモータコア設計適用における特長は以下の通りである。

- 任意の形状を探索できるため、フラックスバリアのような形状自由度の高い複雑構造との相性が良い。
- モータコアは2次元設計のため、トポロジー最適化で複雑な形状が生成されても、従来同様に電磁鋼板の打ち抜き・積層で製造可能である。

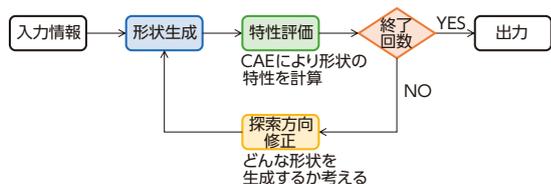


図2 トポロジー最適化の処理フロー  
Fig.2 Process Flow of Topology Optimization

### 3 モータコア設計への適用

#### 3.1 形状生成手法

トポロジー最適化の代表的な形状生成手法に on/off法がある。この手法は、設計領域を小さな領域(要素)に分割し、各要素を「鉄が存在する状態(on)」または「空気の状態(off)」として材料分布を決定し、形状を生成する(図3)。

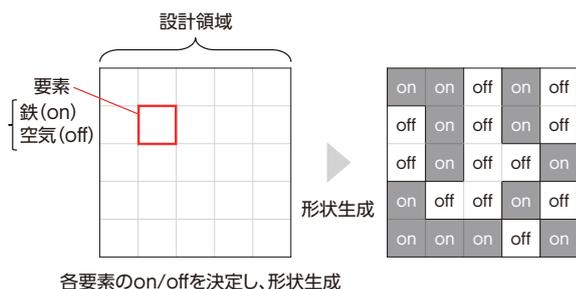


図3 on/off法の概要  
Fig.3 Overview of on/off Method

モータコア設計分野では、on/off法の1つとしてNGnet(Normalized Gaussian Network) on/off法<sup>[1]</sup>が広く利用されている。この手法は、設計領域全体に複数のガウス基底関数(正規分布に基づく数学的な関数)を配置し、それらの重ね合わせによって得られる形状関数の符号を基に各要素の材料分布を決定する。形状関数が正の値を持つ

領域に位置する要素には「鉄」を、負の値を持つ領域に位置する要素には「空気」を割り当てる。

NGnet on/off法は、ガウス基底関数が複数の要素にまたがって影響を与えるため、on/off法で問題となっていた極端に細い構造や不自然に複雑な構造を回避し、連続的で滑らかな形状を生成できる。また、要素数分の膨大な離散変数に代わり、少数のガウス基底関数の重み係数のみで形状生成できるため設計変数が削減され、計算負荷を軽減できる。さらに連続的な重み係数により離散最適化問題を連続最適化問題に変換でき、安定した最適化が実現される。これらの利点から、NGnet on/off法をモータコア設計における形状生成手法として採用した。

NGnet on/off法による形状生成は以下の手順で実施される(図4)。

#### 1) 基底関数配置

設計領域全体に複数のガウス基底関数を配置する。

#### 2) 重み係数の適用

各関数に重み係数を積算する(山の高さを変化させる)。

#### 3) 形状関数構築

各関数を重ね合わせることで形状関数を構成する。

#### 4) 材料状態決定

設計領域内の要素の中心位置で形状関数の値を参照し、その値が正なら「鉄(on)」、負なら「空気(off)」として材料の状態を決定し、形状を生成する。

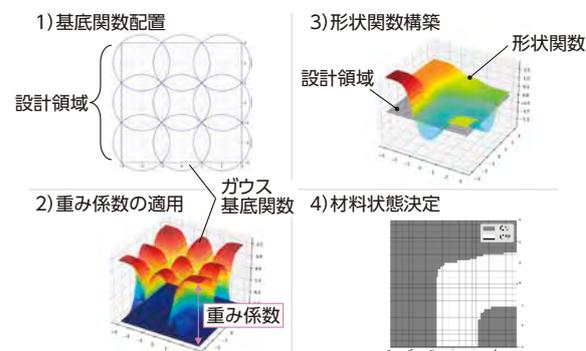


図4 NGnet on/off法の概要  
Fig.4 Overview of NGnet on/off Method

#### 3.2 解探索手法

NGnet on/off法によりガウス基底関数の重みを変化させ形状を最適化する場合、一般的な勾配

ベース解探索手法では局所解に陥りやすく、良好な解を見つけることが困難であった。とくに、モータコア設計のような多峰性を持つ複雑な目的関数においては、複数の局所解が存在するなかで良好な解を見つけるために、探索の方向や範囲を状況に応じて変更できる手法が必要である。そこで、解探索手法にはCMA-ES (Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy) を採用した。

CMA-ESは、複数の解候補を評価し、そのなかで性能の良い解を基に、次に探索すべき領域を自動的に絞り込んでいく仕組みを備えている。この仕組みにより、探索を有望な領域に集中させつつ、局所解に陥ることを防ぐことができる。また、複数の解候補の評価値を比較し探索方向を決定するため、微分計算が困難な関数や不連続な関数に対しても適用できる汎用性の高いアルゴリズムである。

CMA-ESによる探索は以下の手順で実施される(図5)。

#### 1) 解候補集団の生成

現時点で有望と考えられる解(初期解はランダム)を中心として、設計解候補の集団を生成する。

#### 2) 解候補の評価とランク付け

生成した候補それぞれについて目的関数や制約条件に対する達成度を評価し、有望な解を見つける。

#### 3) 探索方法の更新(進化)

有望な解の周辺を重点的に探索するように探索の方向や範囲を調整し、次の世代の解候補集団を生成する方法を改善する。

#### 4) 反復と終了判定

1)~3)を繰り返し、反復回数が指定回数に達した時点で探索を終了する。

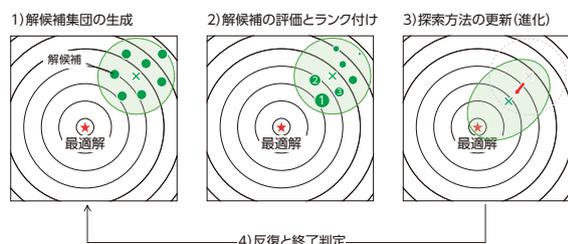


図5 CMA-ESの概要  
Fig.5 Overview of CMA-ES

### 3.3 製造制約への対応

モータコア設計にNGnet on/off法とCMA-ES

を組み合わせることで、効率的に高性能な最適形状を導出できる一方で、実際には製造できない形状となることがある。

モータコアは通常、電磁鋼板を打ち抜き加工して積層することで製造される。打ち抜き加工には加工精度を担保するための寸法制約が存在する。この制約によりトポロジー最適化が生成する高性能形状が製造困難な形状と判定され、設計者が手作業で修正を施す必要が生じる。こうした修正は、最適形状の性能を維持しつつ製造可能な形状に整える作業であるため、試行錯誤が求められる。

そこで、最適化過程そのものに製造制約を組み込む手法を開発した。具体的には、最適化中の形状に対して幾何学的な寸法制約を設定し、最小寸法未滿の細い部分や狭い隙間を自動検出して制約違反として処理する。この手法により、製造可能な形状のみが最適化過程で評価対象となるため、打ち抜き加工に適したモータコア形状を生成できる。

寸法制約違反検出は以下の手順で実施される(図6)。

#### 1) 材料境界のグルーピング

材料の境界を形成する辺を基に連続する境界線をグループ分けする。

#### 2) 周囲節点抽出

材料境界上の各節点を中心節点とし、最小寸法未滿の距離にあるほかの材料境界上の節点を抽出する。

#### 3) 周囲節点のグループ確認

抽出した節点が中心節点と同じグループ内に属しているかを確認する。

#### 4) 制約違反判定

##### (1) 異なるグループの場合

2つの空間に挟まれる部位は細く、最小寸法違反と判定される。

##### (2) 同じグループの場合

近傍に位置する周囲接点を違反と誤検出することを防ぐため、中心節点から周囲節点までの「経由する辺の数」を計算し、その数が基準値を超える場合のみ最小寸法違反と判定する。

#### 5) 全域処理

材料境界上のすべての節点に1)~4)を実施する。

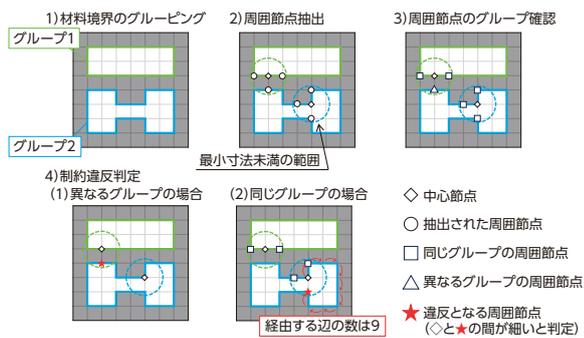


図6 寸法制約違反検出の概要  
Fig.6 Overview of Dimension Constraint Violation Detection

開発手法の効果を確認するため、コンプレッサ用モータのロータコア設計に対し、製造制約なしの場合と製造制約ありの場合で最適化を行った。最適化を行った結果、同程度の性能を持つ異なる形状が生成された(図7)。製造制約を組み込んだ場合、細い箇所(図7左赤丸部)が解消され、寸法制約を満たした形状が獲得できることを確認した。

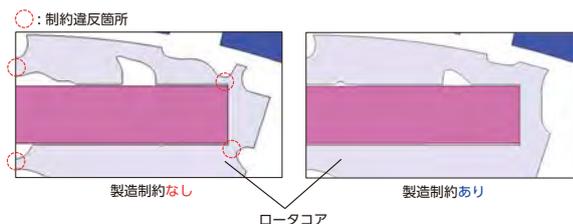


図7 製造制約の有無によるロータコア形状の比較  
Fig.7 Comparison of Rotor Core Shapes With and Without Manufacturing Constraints

## 4 最適化事例

### 4.1 コンプレッサ用モータ

コンプレッサ用モータを対象としたロータコア最適化事例について述べる。本件は、遠心力によってロータコアに発生するミーゼス応力(材料破壊の可能性を示す指標)低減を目的とし、コンプレッサ事業部 技術部と協業で実施した。目的関数としてミーゼス応力最小化を設定し、制約条件として最小寸法制約とその他特性は元モデルと同等の性能維持を設定した。CMA-ESの世代数(反復回数)を300、個体数(各世代の解候補数)を100とした。設計変数にはガウス基底関数の重み係数256個を使用した。

最適化結果として、図8に示す通りロータコアにある固定穴横の応力緩和穴の形状変化が得られ、ロータコアに発生する最大ミーゼス応力19%

減の改善を実現した。

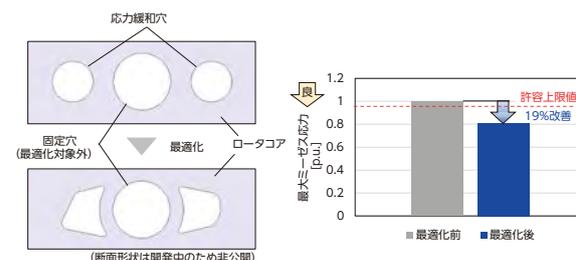


図8 コンプレッサ用モータの最適化結果  
Fig.8 Optimization Results of Motor for Compressor

### 4.2 フォークリフト用モータ

フォークリフト用モータを対象とした最適化事例について述べる。本件は、振動騒音の原因となるトルク脈動(回転中のトルク変動)低減を目的とし、L&Fカンパニー SC開発部と協業で実施した。最適化の目的関数としてトルク脈動最小化を設定し、制約条件として最小寸法制約とその他特性は元モデルと同等の性能維持を設定した。設計領域はトルク脈動に寄与しやすいロータコア外周部を設定し、CMA-ESを用い、世代数を470、個体数を100とした。設計変数としては、ガウス基底関数の重み係数80個を使用した。

最適化の結果、図9に示すようにロータコア外周部に切り欠きを有する形状が得られ、トルク脈動71%減の改善を実現した。切り欠きによる磁気抵抗の調節で磁束が平滑化され、トルク脈動低減に寄与したと考えられる。また、切り欠きの位置や形状だけでなく、その個数についても最適化が適切に実現されている。これは、事前に設定した変数とその範囲内でのみ最適化を行うパラメータ最適化では実現できないトポロジー最適化の利点である。

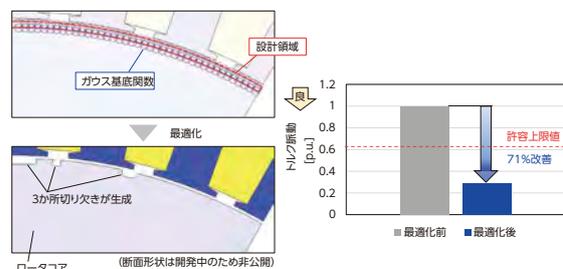


図9 フォークリフト用モータの最適化結果  
Fig.9 Optimization Results of Motor for Forklift

## 5 まとめ

トポロジー最適化をモータコア設計に適用した手法を開発し、ロータコア設計を通じて高性能化を確認した。製造制約を最適化過程に組み込むことにより、製造性を考慮した形状の生成が可能となった。コンプレッサおよびフォークリフト向け事例において、ミーゼス応力やトルク脈動の低減を確認し、本手法の有効性を確認した。今後は磁石を含めたトポロジー最適化やAIを用いた設計手法の確立を進めつつ、ほかの電動システムへの適用範囲拡大を図る。

### 謝辞

本研究は室蘭工業大学との共同研究として実施いたしました。開発の推進にあたり、多大なるご指導とご協力を頂いた室蘭工業大学の佐藤孝洋先生をはじめ、関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

### 参考文献

- [1] T. Sato, K. Watanabe, H. Igarashi, "Multimaterial Topology Optimization of Electric Machines Based on Normalized Gaussian Network", IEEE Trans. Magn., vol. 51, no. 3, Art. No. 7202604, (2015).

### 著者紹介



真田 拓弥

佐々木 智則

岡部 大輔

# FCシステム 自動搭載設計

## Automated Layout Design of FC System

菊池 駿介<sup>\*1</sup> 村木 俊博<sup>\*2</sup> 岡田 直行<sup>\*2</sup> 野田 五十樹<sup>\*3</sup>

Shunsuke Kikuchi Toshihiro Muraki Tadayuki Okada Itsuki Noda

\*1 先行開発部 \*2 トヨタL&Fカンパニー H2プロジェクト \*3 北海道大学 大学院情報科学研究院

### 要旨

燃料電池 (FC) フォークリフトのユニットを対象とし搭載設計の自動化を目指している。搭載設計のなかでも工数がかかる配管経路の自動化に取り組んだ。遺伝的アルゴリズムを用いて配管経路を自動作成する技術構築を行ったので紹介する。

キーワード: 燃料電池フォークリフト、搭載設計、最適化、遺伝的アルゴリズム

### Abstract

The goal of this project is to automate the layout design of a fuel cell (FC) forklift unit. We have been working on the automation of pipe routes, which is one of the most time-consuming parts of the design process.

Keywords: FC Forklift, Layout Design, Optimization, Genetic Algorithm

## 1 はじめに

地球規模での気候変動への対応が求められているなかで、日本を含む多くの国々では2050年までに温室効果ガス排出量を「実質ゼロ」とするという目標を掲げている。とくに、水素社会の構築は脱炭素化に向けた重要な柱として注目されており、日本政府も「水素基本戦略」や「燃料電池ロードマップ」を策定し、水素エネルギー利用の拡大を進めている状況である。

水素を利用する燃料電池技術は、ゼロエミッションを実現するものとして重要視されている。とくに産業車両分野では、食品業界や物流業界などを中心にFCフォークリフトの導入が進められており、環境負荷の低減と作業効率の向上を両立させる取組みが期待されている。

## 2 製品の特徴

FCフォークリフトは、従来の鉛電池を燃料電池システムで置き換えるという考え方をもとに設計されており、そのため限られたスペース内でのサイズや構造に配慮した設計が行われている。

本製品に搭載されている「FCユニット」は、水素と酸素を供給することで発電を行うFCスタックを中心に、水素供給装置、空気供給装置、電気装置、

冷却装置などで構成された統合システムである(図1)。これらの複数の機能を一つに集約したユニットであり、効率性と実用性を兼ね備えている点が特徴である。

また、FCユニットは多数の部品で構成されており、それらの部品間はホース、配管、ケーブルなどで接続されている。これらの接続部品は狭いスペースを通す必要があるため、緻密な計画に基づいた設計と高度な技術が必要になる。

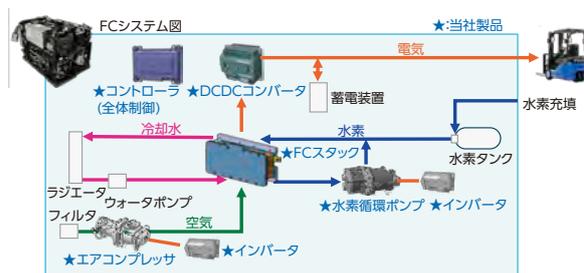


図1 FCシステム図  
Fig.1 Fuel Cell System Diagram

## 3 現状と課題認識

FCフォークリフトのFCユニット設計では、限られたスペース内に構成部品を効率的に配置することが課題となっている。部品を適切に配置するだけでなく、ホースや配管、ケーブル、ハーネスを詳細にモデル化し、接続や搭載が可能かを確認す

る必要がある。このモデル化は、システム全体の成立性や実装性を評価するうえで重要な役割を果たしている。

設計初期段階では、部品の配置検討後にフレームのモデルを作成し、ホースや配管などの接続モデルの作成と検証を繰り返して設計している。だが、接続が成立しない場合や設置が不可能と判明した場合に、部品配置を見直し、再度ホース類のモデル化を行う必要が生じており、これに時間がかかっている。また、これら複雑な接続作業の効率化は、全体の設計スピードを左右する重要なポイントとなっている。

ホース類のモデル化を含めたプロセスの効率化を積極的に推進する必要がある。そのためには、自動化技術やデジタルツールを活用することで、設計効率の向上を図り、短期間で成立性を確認できる仕組みを構築することが求められる。今回は、ホースのモデル化の自動化技術を構築したので紹介する。技術的には柔軟性のあるホース、硬質な配管どちらでも適用可能なため、以下、配管と総称する。

## 4 配管配策の問題設定

配管配策は、部品配置と配管の出入口をもとに、入口と出口をつなぐ配管経路を作成する作業である(図2)。製造とレイアウトの制約により、配管経路は要件8件(図3)を満たす必要がある。また、製造費用と組付け性の観点から、配管は短く曲がりが少ない形状が要望されている。

FCユニットは形状の複雑な部品が限られた空間内に密集している。そのため、複雑で狭い空間のなかで要件を満たす配管経路を探索できる技術が求められている。

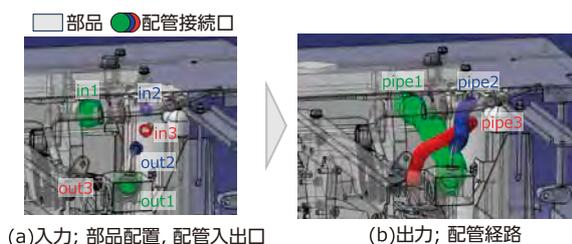


図2 配管配策の入出力イメージ  
Fig.2 Inputs and Outputs of the Pipe Routing Process



図3 配管経路の要件  
Fig.3 Requirements for Piping Routes

## 5 配管経路の最適化技術

### 5.1 手法の選択

配管経路の探索手法はグラフ探索アルゴリズムや遺伝的アルゴリズムが知られている<sup>[1][2]</sup>。先行研究ではプラントおよび船舶を対象にしており、配管経路の探索空間が比較的広い場合が多いため、グラフ探索を使用する技術が多く提案されている<sup>[3][4]</sup>。空間が広い場合は疎なグラフを作成し、グラフ上で探索することで高速に解を得ることができる。一方、FCユニットは狭く複雑な空間内で配管同士の距離を確保する必要があるため、密なグラフを作成する必要がある。グラフが疎から密になると、グラフのノード数(グラフ構造データにおける頂点の数。ここでは空間の分割数)が増加する。配管経路の解空間はノード数に対して指数的に増加するため、計算時間も爆発的に増加する。そのため、FCユニットではグラフ探索アルゴリズムでは現実的な時間内で解を出すことが困難であると判断した。そこで、遺伝的アルゴリズムを用いることにした。

### 5.2 遺伝的アルゴリズムの適用方法

遺伝的アルゴリズムとは、生物の進化メカニズムを模倣して最適解を探索するアルゴリズムである。問題に対する解を個体、解の構成要素を遺伝子として定義し、環境に適合できる個体を生き残らせる。適合度合いに応じて世代交代を繰り返すことで、よりよい個体を解とする手法である。遺伝的アルゴリズムでは、遺伝子および個体の定義、適合度の定義、進化の仕方を工夫することが性能にかかわる技術課題である。

#### 5.2.1 遺伝子と個体の定義

配管1本を1つの遺伝子、配管の集合を個体とみなすことにした(図4)。FCユニットの配管は断面形状が常に真円であるため、遺伝子は折れ線と定

義した。折れ線は順序付きの点集合で、各折れ点は3次元座標値を持っている。個体は作成したい配管本数と同数の遺伝子を持つ。

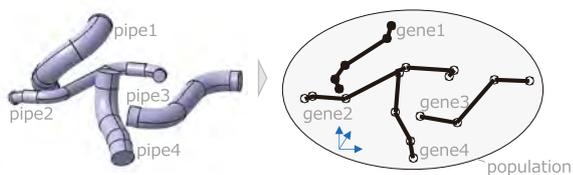


図4 遺伝子、個体  
Fig.4 Gene, Population

### 5.2.2) 適合度の定義

環境への適合度として「コスト」と「ペナルティ」の2種の評価指標を設け、重み付きの線形和で表現する。コストは要望である配管中心線の経路長、曲げ回数、円弧の中心角の3つの最小化とした。ペナルティは配管経路の要件を定式化し制約条件として与えた。解の探索空間を広げるためにソフト制約を入れる工夫を行った。

### 5.2.3) 進化の仕方

遺伝子(=配管)は交叉と突然変異を繰り返すことで進化させる。遺伝子の順番が重要な場合はn点交叉(nは整数)を行うが、配管の番号に順番がないので一様交叉を採用している。突然変異には、折れ線における点の削除、追加、摂動を設けた(図5)。一般的には、突然変異は前世代の個体および遺伝子を近傍で少し変化させる操作のことを言う。今回は、遺伝子を折れ線としているため、折れ点の座標値を3次的にランダムな方向に少し移動した座標値に変更することに相当する。FCユニットでは、配管と部品の干渉を回避することが重要な課題である。それを効果的に解決する手段として斥力を導入し、進化の仕方を工夫した。具体的には、斥力が大きい線分間に点を優先的に追加し、斥力が大きい点を優先的に摂動するようにした。

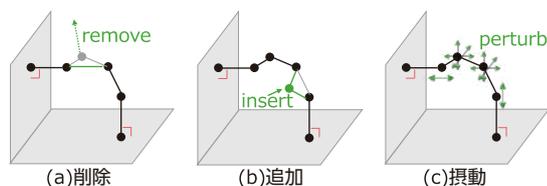


図5 突然変異  
Fig.5 Mutation

### 5.2.4) 斥力

部品との距離を確保した経路を探索する場合、部品が存在する領域は侵入禁止とすることが多い<sup>[5][6]</sup>。しかし、複雑形状の部品が多数存在する場合、侵入可能な領域を正確に抽出する処理が非常に重くなる。

そこで、本研究では侵入禁止の領域を設ける代わりに、侵入可能～禁止を定量的な度合いで表現する指標を考えることにした。配管と部品の位置関係を表現する指標として「符号付の最短距離」を定義した。配管が部品から離れている場合はプラスの値をとり(図6(a))、配管が部品にめり込んでいる場合はマイナスの値をとるように定式化した(図6(b))。

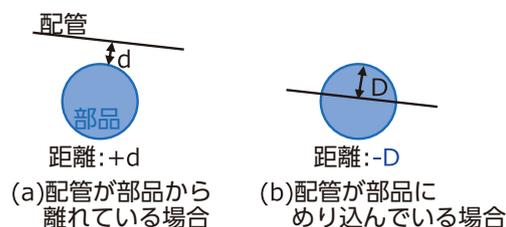


図6 符号付の最短距離  
Fig.6 Signed Shortest Distance

さらに、配管が部品および他配管から離れるような突然変異をさせるために斥力を定義した。斥力の大きさは、符号付の最短距離が小さいほど大きく、要件の基準値以上では発生しないように定式化した。斥力により、部品との距離を確保するように経路探索することが可能となる(図7)。また、1本の配管経路に対して干渉する部品および配管が複数存在する場合は、干渉する部品および配管すべてとの斥力を合算することで、全体の経路として成立する方向に探索が進むようになっている。

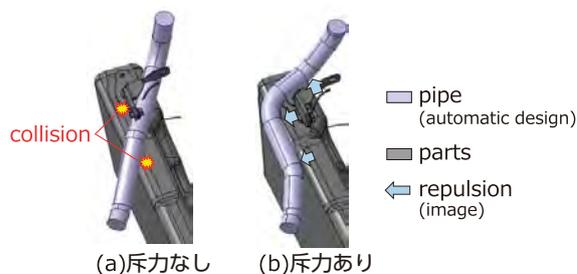


図7 斥力の効果  
Fig.7 Effect of Repulsion

### 5.3 FCユニットへの適用結果

本自動化技術を部品点数が2000点以上存在するFCユニットへ適用した。配管本数は15本とした。そのなかでも、干渉する部品または配管が多い空間での最適化結果をそれぞれ図8、図9に示す。いずれの場合も配管の要件をすべて満たし、人間が設計した配管形状と同等レベルで出力できることを確認した。

図8より、干渉する部品を避けながら、配管形状の要件を満たすように角度および長さを調整していることが確認できる。図9より、配管1本では直線的な経路になるものが、お互いの配管の距離を確保するように迂回していることが確認できる。人間の設計では配管形状を調整するために試行錯誤を繰り返しているが、この作業を自動的に行うことができるようになると考える。



図8 干渉する部品が多い空間での最適化結果  
Fig.8 Optimization Result in a Space with Many Conflicting Parts

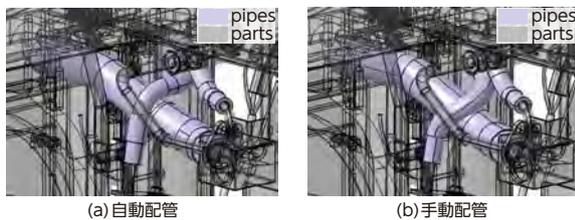


図9 干渉する配管が多い空間での最適化結果  
Fig.9 Optimization Result in a Space with Many Conflicting Pipes

### 5.4 高速化

本自動化技術を高速化するにあたって、「並列化」と「空間索引の活用」の2つの工夫を行った。遺伝的アルゴリズムは、個体の適応度算出を個体ごとで行うため並列化が可能である。また、適合度算出のなかでも配管と部品間の距離を算出する処理が重いことが実験を通してわかった。空間索引の1つであるR-tree<sup>[7]</sup>を用いることで、計算すべき部品点数を減らしながら厳密な距離算出をすることが可能となった。

「並列化」と「空間索引の活用」により、FCユニットへ適用した場合、計算時間を約60倍速にするこ

とができるようになり、目標の計算時間を達成することができた(図10)。目標は、人間の勤務時間外に計算が終了するレベルとして設定している。

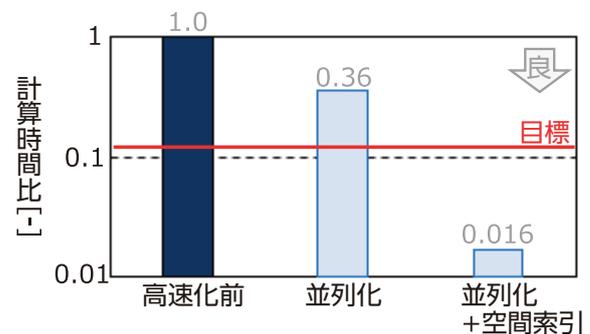


図10 高速化の効果  
Fig.10 Effect of Speed-up

## 6 まとめ

FCユニットの配管経路を自動生成するため遺伝的アルゴリズムを用いた探索技術を開発し、人間の設計した配管と同等の形状を得られることを確認した。また、人間の設計工数を削減するため、勤務時間外に計算が終了できるように高速化を行った。

今後は、配管経路の自動化技術を他の製品にも適用し、実用的に使えるような研究開発を行っていく。さらに、FCフォークリフトのFCユニット設計の効率化をするために、部品配置を含めた最適化を行っていく予定である。

### 参考文献

- [1] M. Blokland, R. D. van der Mei, J. F. J. Pruyn, J. Berkhout, Literature Survey on Automatic Pipe Routing, Operations Research Forum, Volume 4, article number 35, (2023)
- [2] José Ricardo Sánchez-Ibáñez, Carlos J. Pérez-del-Pulgar, Alfonso García-Cerezo, Path Planning for Autonomous Mobile Robots: A Review, Sensors, 2021, 21, p.7898
- [3] Yuto Ando and Hajime Kimura, Automatic Pipe Routing to Avoid Ar Pockets, International Conference on Computer Applications in Shipbuilding 2013 (ICCAS2013) 24-26 September 2013, Busan, Korea, Vol.2, pp.147-153
- [4] Gleb Belov,1 Wenbo Du,2 Maria Garcia de la Banda,1 Daniel Harabor,1 Sven Koenig,3 Xinrui Wei1, From Multi-Agent Pathfinding to 3D Pipe Routing, The Thirteenth International Symposium on Combinatorial Search (SoCS 2020)

- [5]Wentie Niu, Haiteng Sui, Yaxiao Niu, Kunhai Cai, and Weiguo Gao, Ship Pipe Routing Design Using NSGA-II and Coevolutionary Algorithm, Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering Volume 2016, Article ID 7912863, 21 pages
- [6]Jiang Fan, Hongbin Xu, Qingze Meng and Yumin Su, Routing Design for Pipe System Considering Natural Frequency, Applied Sciences (MDPI), Vol. 14(Issue 3), Article 1143
- [7]Antonin Guttman: R-Trees: A Dynamic Index Structure for Spatial Searching, Proc. 1984 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, pp. 47-57. ISBN 0-89791-128-8

■ 著者紹介 ■



菊池 駿介



村木 俊博



岡田 直行



野田 五十樹

# 物流業界の常識を覆す 三次元梱包計画アルゴリズム

A 3D Packing Planning Algorithm That Challenges Traditional Practices in the Logistics Industry

大貫 峻<sup>\*1</sup> 岡部 大輔<sup>\*1</sup> 岡本 和也<sup>\*1</sup> 岡本 浩伸<sup>\*1</sup> 辻 祐矢<sup>\*2</sup> 伊藤 健一<sup>\*2</sup> 越村 三幸<sup>\*3</sup>  
 Ryo Onuki Daisuke Okabe Kazuya Okamoto Hironobu Okamoto Yuya Tsuji Kenichi Ito Miyuki Koshimura

\*1 先行開発部 \*2 トヨタL&Fカンパニー 物流ソリューション事業室 \*3 九州大学 大学院システム情報科学研究院

## 要旨

梱包箱内の充填率が高くなる商品の組合せを高速で決定するために、複数の商品を1つの直方体に近似することで組合せ爆発を抑制しつつ、梱包計画の精度を向上させるアルゴリズムを開発した。最初に考案したアルゴリズムを物流センターへ導入したところ、1日あたり約500[箱]の輸送費削減効果が確認され、最新版アルゴリズムではシミュレーション上で1日あたり約2,000[箱]の輸送費削減効果が見込まれる。

キーワード: 物流、梱包計画、組合せ最適化、SAT

## Abstract

To quickly identify the best combination of differently shaped items in a packing box, we developed an algorithm that reduces the complexity of combinations and improves packing accuracy by iteratively merging multiple items into one unit. When tested at a logistics center, the initial algorithm was confirmed to cut transportation costs by approximately 500 boxes daily. The latest version is expected to reduce transportation costs, saving approximately 2,000 boxes per day in simulations.

Keywords: logistics, packing planning, combinatorial optimization, SAT

## 1 はじめに

### 1.1 背景

物流センターの輸送費[円]は、梱包箱数[箱] × 1箱あたりの輸送料金[円/箱]で決まることがある。そのため、輸送費を削減するためには、輸送する梱包箱数を最少化することが必要であり、1箱あたりの充填率を高めることが不可欠である。そして、充填率を高めるためには、商品同士の形状やサイズを考慮して最適な組合せで梱包することが必要である(図1)。

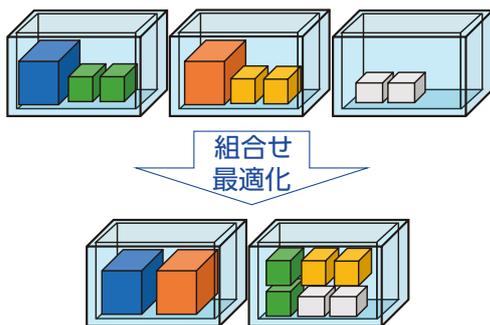


図1 適切な商品組合せによる梱包箱削減  
 Fig.1 Packing Box Reduction Through Optimized Item Combinations

しかし、多種多様な商品を最適に組み合わせる梱包しようとする場合、組合せパターンは膨大となり、最適解を計算するには膨大な時間を要する。

先行開発部では、トヨタL&Fカンパニー物流ソリューション事業室と協業し、物流センターの出荷プロセス(図2)のうち、自動倉庫に保管された多種多様な形状の商品群のなかから、規定サイズの折り畳みコンテナ(以下、オリコン)へ梱包する商品の組合せを決定するアルゴリズム開発に取り組んだ。

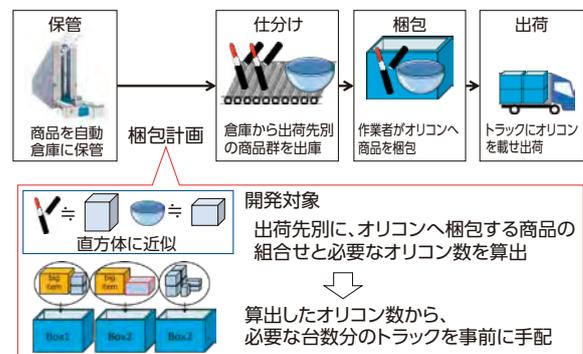


図2 出荷プロセス  
 Fig.2 Shipping Process

## 1.2 物流センターの課題

対象の物流センターでは、1日あたり約50,000個の商品を5,000箱超のオリコンに梱包する。すべてのオリコンを出荷するために、「梱包計画」でオリコン数を算出し、トラックを事前手配する。

膨大な量の商品とオリコンの組合せを算出する際に、運営の時間制約上、梱包計画の立案を短時間で行う必要がある。そのため、従来アルゴリズムは計算負荷が少ない簡易的な処理によって梱包計画を行っていた。しかし、図2の梱包計画で従来アルゴリズムが算出した計画オリコン数と実際の梱包で使用したオリコン数を比較すると、計画オリコン数に対して使用したオリコン数が1日あたり約1,500[箱]以上も増加し、輸送費の増加やトラックの追加手配が発生していた。

以下に、従来アルゴリズムのルールを示す(図3)。

- No.1 多種多様な形状の商品を直方体に近似し、その直方体の容積の合計値がオリコン容量のしきい値以下であること
- No.2 商品間の干渉によるはみ出し(梱包不可)のリスクを低減するために単品で容積が大きい商品同士は同梱しないこと

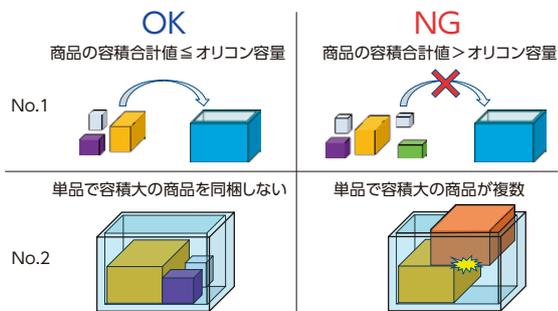


図3 従来アルゴリズムのルール  
Fig.3 Rule of the Conventional Algorithm

しかし、従来アルゴリズムでは容積上は同梱可能でも形状的に同梱不可な場合があり、実際の梱包でオリコン追加が発生しやすい課題があった。

## 1.3 ねらい

本研究の目的は、以下の2点を実現するアルゴリズムを開発することである。

- ・梱包時のオリコン数を最少化し輸送費を削減
- ・従来手法と同等の計算時間で梱包計画を立案

## 2 提案手法

アルゴリズムを開発するにあたり、後述のようなVersion1~3(以下、V1~3)までの段階的なアプローチによって、オリコンへ梱包する商品の組合せを幾何学的に決定するアルゴリズムを開発した。

### 2.1 前提条件

#### ①商品形状

従来アルゴリズムと同様に、商品を剛体の直方体として近似して計算する。また、各辺の長さは最長辺をL、2番目に長い辺をW、最短辺をHと定義する。

#### ②入力順序

アルゴリズムへの入力の商品容積が大きい順とする。

#### ③終了条件

オリコンの残容量を下回る容積の商品がない場合、アルゴリズムは終了する。

### 2.2 幾何学V1:1対1で幾何学判定

オリコン内の隅に最大容積の商品(以下、商品1)を梱包後の3つの隙間空間である配置候補に対して、他商品が同梱可能かを1対1(商品1と他商品)で幾何学的な判定を行うアルゴリズムである(図4)。

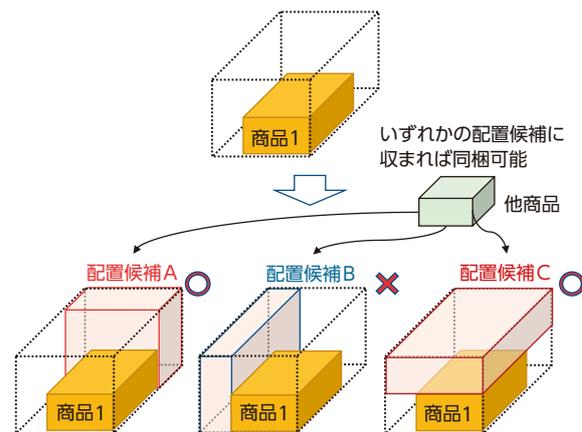


図4 幾何学V1アルゴリズム  
Fig.4 The Geometry V1 Algorithm

図4に示す各配置候補の寸法を算出し、いずれかの配置候補に対して他商品の寸法が小さければ、商品1と他商品の同梱を保証する。幾何学的な判定を1対1に絞ることで、組合せ数を削減し、商品の回転を考慮しても高速に梱包計画が可能とな

る。また、商品1の姿勢を変えると隙間の寸法も変わるため、「自由度」という考えを導入した。自由度とは、商品をオリコンのなかに梱包する際に、商品が取れる姿勢の選択枝の数であり、最大で6通りの直交回転がある。商品の自由度を決定するために、図5の判別式を用いる。

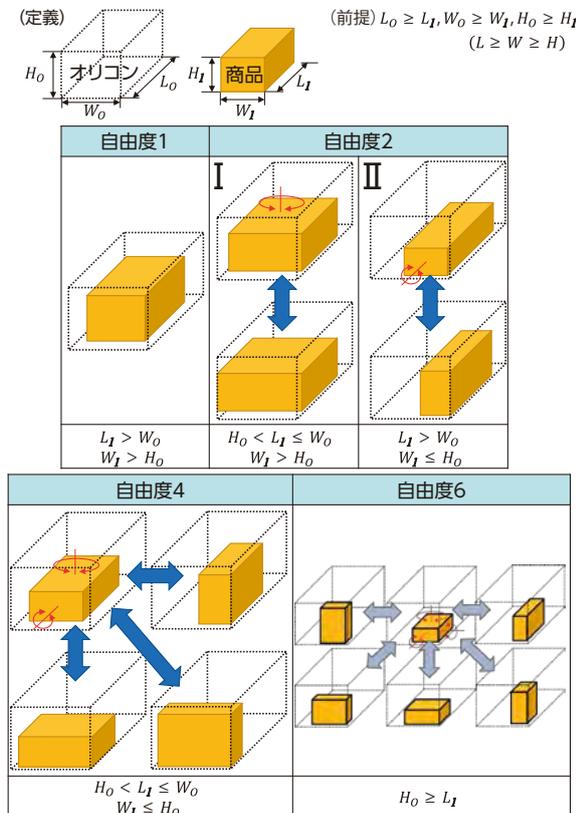


図5 自由度の定義と判別式  
Fig.5 Degrees of Freedom Definition and Discriminant Formula

商品1の自由度を算出したのちに、配置候補に対して他商品の寸法が収まるか同梱判定を行う。商品1の自由度が2以上の場合、商品1の姿勢を変えて、配置候補を再度計算し、同梱判定を行う。図6に商品1と2番目に詰める予定の商品(以下、 $i$ 番目の商品は商品 $i$ と表記)が同梱可能であるかを判定するフローチャートを記す。

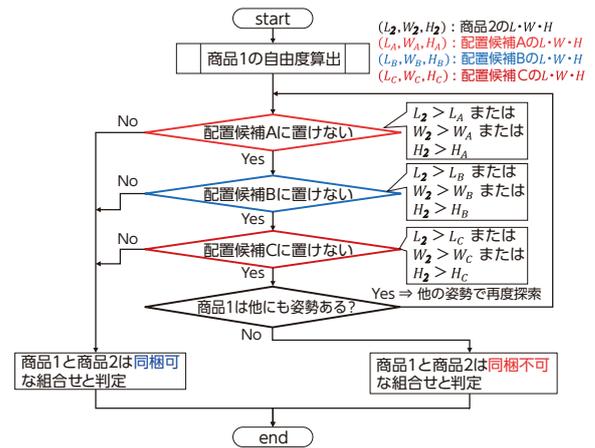


図6 幾何学的同梱判定のフローチャート  
Fig.6 Flow Diagram of Geometric Packing Judgment

上記のような幾何学判定をすべての姿勢で計算し同梱不可だった場合は、商品1と商品2は同梱不可な組合せとして判別し、別のオリコンに梱包するように計画する。しかし、幾何学V1は3個目以降の商品を同梱する際に、商品1以外の商品の形状情報は考慮せず、商品1との1対1の幾何学的な判定を行う(図7)。

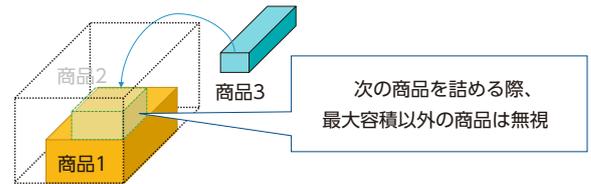


図7 商品1と商品3が1対1で幾何学判定  
Fig.7 One-to-one Geometric Judgment

図7では、商品2と商品3の幾何学判定は未考慮になるため、梱包時には同梱不可になる可能性がある。そのため、オリコン内の商品数が増えるほど、梱包時の同梱不可が起りやすくなる。そこで、幾何学V2を開発した。

### 2.3 幾何学V2:2対1で幾何学判定

幾何学V2は、幾何学V1をベースに形状情報を考慮する範囲を拡大したアルゴリズムである。複数の商品の形状情報を保持したまま幾何学判定を行う場合、配置候補の数が大幅に増えて計算負荷が増大することが幾何学V1の課題であった。オリコン内の商品数を $n$ とすると、配置候補数は $(2n+1) \times 6^n$ となる。そこで、商品1と商品2を同梱後、1つの直方体(以下、近似直方体)に近似することを考えた(図8)。

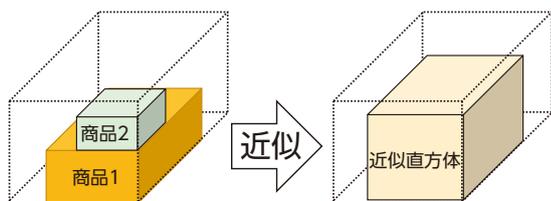


図8 幾何学V2アルゴリズム  
Fig.8 The Geometry V2 Algorithm

近似直方体を作成することで、配置候補数を90 [%]削減した。あとは幾何学V1と同様に配置候補に対して、近似直方体と次の商品で同梱判定を行えばよい。2つの商品を近似直方体にする際に、さまざまな近似パターンが考えられるが、オリコンの寸法に収まるなかで、近似直方体の容積が最小になるパターンを採用した。この理由は、残りの空間の容積が最大となり充填率の向上が狙えるためである。

このような近似方法を幾何学V1と併せて取り入れることで、幾何学的な同梱判定を1対1から2対1(オリコン内の商品2個に対して、次に詰める商品1個)まで拡大した。そして、さらに同梱判定の範囲を拡大するために、次に述べる幾何学V3を開発した。

## 2.4 幾何学V3:2m対1で幾何学判定

幾何学V3は、2つの商品を1つの直方体に近似する処理を繰り返すことで、同梱可能を保証する範囲を2m対1(オリコン内の商品2m個に対して、次に詰める商品1個or近似直方体1個; $m=1,2,3,\dots$ )まで拡大したアルゴリズムとなる(図9)。商品3と商品4をそれぞれ単品でオリコン内の商品1、商品2の近似直方体(緑)と幾何学V1で判定したのち、商品3と商品4の近似直方体(青)を幾何学V2で作成する。そして、近似直方体(緑)と近似直方体(青)に対して幾何学V1で同梱判定を行う。最後に、近似直方体(緑)と近似直方体(青)の近似直方体(ピンク)を幾何学V2で作成する。もし同梱不可だった場合、商品4を除外し次の商品で同梱判定を再度行う。これにより、配置候補の増大を抑制しつつ、商品の同梱可否を幾何学的に判定できる。

あとは幾何学V1と同様に配置候補に対して、近似直方体(ピンク)と残りの商品で同梱判定を行えばよい。

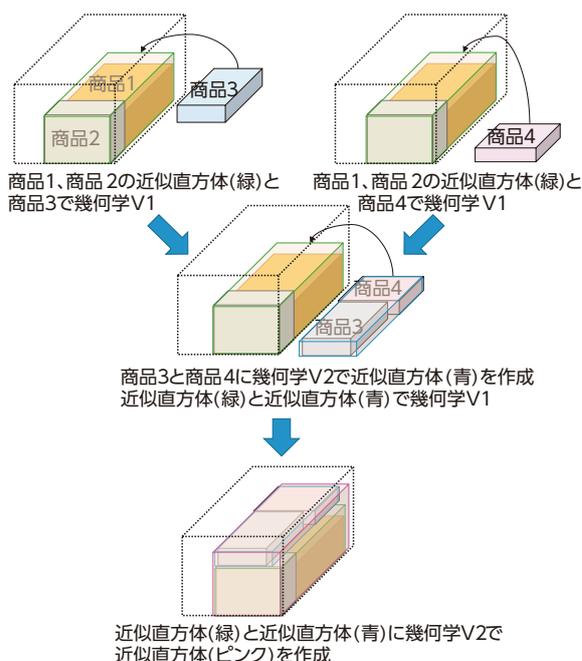


図9 幾何学V3アルゴリズム  
Fig.9 The Geometry V3 Algorithm

## 3 アルゴリズム評価結果

### 3.1 評価方法

1日分の出荷商品リストを入力として、オリコンに梱包する商品の組合せ解を出力する。すなわち、提案手法では「商品組合せと使用予定オリコン数」を見積もるだけである。そのため、実際に使用するオリコン数の把握は、物流センターで実際に梱包する必要がある。しかし、そのような検証方法は容易にはできない。

そこで、提案手法のアルゴリズム(幾何学V1~3)が立案した計画の妥当性をシミュレータ上で評価するために、九州大学との共同研究により、梱包判定シミュレータを開発した。このシミュレータは、幾何学V1~3が出力した“オリコンに梱包する商品の組合せ解”に対し、SAT (Satisfiability)<sup>[1]</sup>を活用し理論的に梱包可能/不可能を判定し、「使用したオリコン数」を算出できる。SATは与えた論理式が真になる解が存在するかを高速に探索することが可能であるため、商品形状、回転姿勢、オリコン寸法の論理式を制約条件として記述すれば、1日分の出荷商品リストに対しての梱包可能/不可能を数時間で厳密に判定できる。このシミュレータを用いることで、使用したオリコン数を把握できる。

本評価では、(シミュレータ上で)使用したオリ

コン数から、従来アルゴリズムと幾何学V1~3の有効性を比較した。

評価に使用する出荷商品リストでは、商品数4個まででオリコンの残余容積が20[%]となる傾向にあるため、幾何学V3において $m=2$ とし、商品数4個までの近似直方体とした。

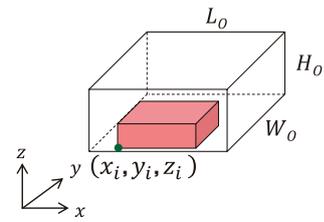


図10「オリコン内に商品が収まる」  
Fig.10 "Items Fit in Container"

### 3.2 SATの定式化

梱包計画で決めた $n$ 個の商品の組合せがオリコン1箱内に梱包可能か不可能かをSATでシミュレーションするための定式化は以下となる。

#### ①変数の定義

- ・オリコンの実寸法： $L_o, W_o, H_o$
- ・商品 $i$ の実寸法： $L_i, W_i, H_i (i=1 \dots n)$
- ・商品 $i$ の回転形態(6通りの直交回転)：  
 $rot_i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$
- ・回転考慮後の商品 $i$ の寸法： $l_i^{rot}, w_i^{rot}, h_i^{rot}$   
(表1参照)
- ・商品 $i$ の位置情報： $x_i, y_i, z_i$

ただし、商品 $i$ の位置情報は、直方体の手前左下の $(x,y,z)$ 座標である。

表1 回転考慮後の商品iの寸法  
Table1 Dimension of Item i After Considering Rotation

$rot_i$	$l_i^{rot}$	$w_i^{rot}$	$h_i^{rot}$
1:基本姿勢	$L_i$	$W_i$	$H_i$
2:y軸回転	$H_i$	$W_i$	$L_i$
3:x軸回転	$L_i$	$H_i$	$W_i$
4:z軸回転	$W_i$	$L_i$	$H_i$
5:z→y軸回転	$H_i$	$L_i$	$W_i$
6:z→x軸回転	$W_i$	$H_i$	$L_i$

#### ②制約条件

今回、制約条件は以下の2つとなる。

i) オリコン内に商品が収まる

商品 $i$ がオリコンのなかに収まることは、以下の式で表現できる(図10)。

$$0 \leq x_i \wedge x_i + l_i^{rot} \leq L_o \quad \text{式(1)}$$

$$0 \leq y_i \wedge y_i + w_i^{rot} \leq W_o \quad \text{式(2)}$$

$$0 \leq z_i \wedge z_i + h_i^{rot} \leq H_o \quad \text{式(3)}$$

また、商品は最大で自由度6であるため、それぞれの姿勢の取り方によって、表1のように $l_i^{rot}, w_i^{rot}, h_i^{rot}$ に代入される寸法が変化する。

ii) 商品同士が重ならない

$n$ 個の商品同士が重ならない制約は、式(4)となる。任意の商品 $i, j (1 \leq i < j \leq n)$ の位置情報と商品寸法から重なりを表現する。

$$\begin{aligned} x_i + l_i^{rot} \leq x_j \vee x_j + l_j^{rot} \leq x_i \vee \\ y_i + w_i^{rot} \leq y_j \vee y_j + w_j^{rot} \leq y_i \vee \\ z_i + h_i^{rot} \leq z_j \vee z_j + h_j^{rot} \leq z_i \end{aligned} \quad \text{式(4)}$$

図11に、 $(rot_i, rot_j) = (1, 4)$ における商品同士が重ならない制約のイメージを示す。実際の制約条件は $(rot_i, rot_j) = (1, 1)$  or  $(1, 2)$  or ...  $(6, 5)$  or  $(6, 6)$ で全36通りの組合せごとに論理式が存在する。

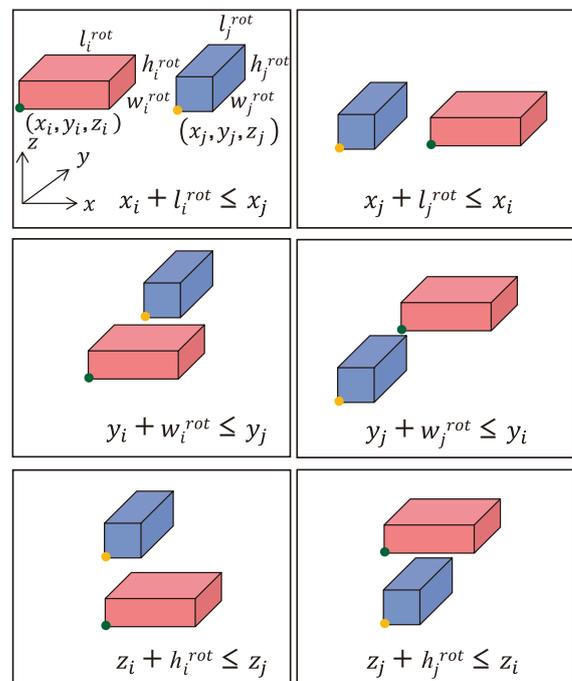


図11「商品同士が重ならない」  
Fig.11 "No overlapping of items"

### 3.3 評価結果

提案手法の性能を評価するために、物流センターの1日分の出荷指示データを使用して、前節の梱包判定シミュレーションを実施した。その結果を以下の図12に示す。

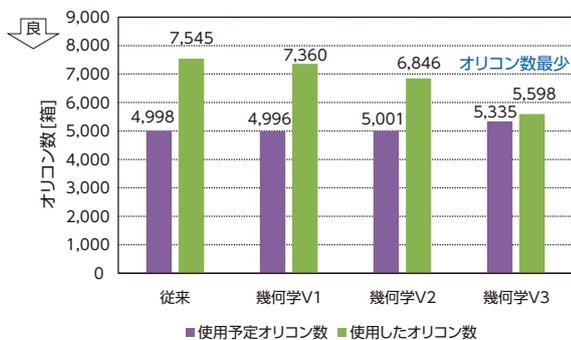


図12 シミュレーション上のオリコン数の比較結果  
Fig.12 Comparison Result of Container Number of Each Algorithm

図12の横軸はアルゴリズムの種類を、縦軸はオリコン数を表しており、縦軸の値が小さければ輸送費の観点から良いと判断できる。また、図内の棒グラフは2種類あり、紫棒は梱包計画時の使用予定オリコン数を、緑棒はシミュレーション上で使用したオリコン数を表している。図12の結果から、幾何学V3が使用したオリコン数が最少であることから最も効果の大きいアルゴリズムであると判断できる。また、図12内の従来アルゴリズムと幾何学V3の使用したオリコン数(従来:7,545箱、幾何学V3:5,598箱)を比較すると、1日あたり約2,000[箱]のオリコンを削減でき、大幅な輸送費削減が期待できる。

次に、1日分の出荷指示データを入力したときの各アルゴリズムの計算時間を図13に示す。アルゴリズムの計算時間を測定するにあたり、各アルゴリズムで3回ずつ計算時間を測定した。なお、評価で使用したPCは一般的なスペックである(表2)。

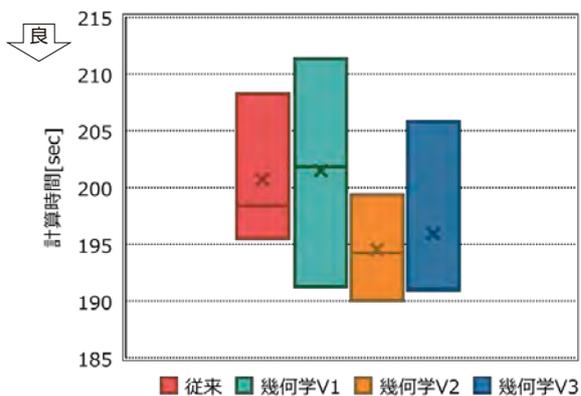


図13 各アルゴリズムの計算時間の比較結果  
Fig.13 Comparison of the Computation Time of Each Algorithm

表2 PCのスペック表  
Table2 PC Specification Table

CPU	13th Gen Intel(R) Core(TM) i5-1345U 1.60 GHz
GPU	Intel(R) Iris(R) Xe Graphics
RAM	16.0 GB
OS	Windows 11 Enterprise 22H2
言語	Python 3.12.2

以上の図12と13の結果から、従来アルゴリズムと同等の計算時間で、従来アルゴリズムよりも使用するオリコン数を低減し、大幅な輸送費の削減が期待できるアルゴリズムを作成できたことを確認した。

## 4 まとめ

本報告では、以下の2点を満たすアルゴリズムの開発が目的であった。

- ・梱包時のオリコン数を最少化し輸送費を削減
- ・従来手法と同等の計算時間で梱包計画を立案

これに対し、評価結果から、上記のすべての項目を満たす幾何学V3を開発した。

幾何学V1と本報告では未紹介のアルゴリズムを組合せたアルゴリズムは既に物流センターへ導入済みであり、平均で1日あたり約500[箱]の輸送費削減効果が確認され、大幅な輸送費の削減が実現できた。さらに、シミュレーションの結果では、幾何学V3は従来アルゴリズムに比べて1日あたり約2,000[箱]の輸送費削減効果が期待される。今後は、幾何学V3が物流センターへ導入されることで、さらなる輸送費の削減に寄与できると考える。

## ■参考文献

- [1] 番原睦則, 鍋島英知, 森畑明昌(編): "特集「SAT技術の進化と応用～パズルからプログラム検証まで～」, 情報処理, Vol.57, No.8, pp.702-737, (2016)

## ■著者紹介■



大貫 峻



岡部 大輔



岡本 和也



岡本 浩伸



辻 祐矢



伊藤 健一



越村 三幸

# データ活用で切り拓く物流効率化 ～共起性を活用した荷配置準最適化～

Advancing Logistics Efficiency Through Data Utilization:  
Semi-Optimal Storage Allocation Using Co-Occurrence Analysis

服部 直樹<sup>\*1</sup> 岡本 和也<sup>\*1</sup> 岡本 浩伸<sup>\*1</sup> 伊藤 辰都<sup>\*2</sup> 野田 五十樹<sup>\*2</sup>  
Naoki Hattori Kazuya Okamoto Hironobu Okamoto Tatsuto Ito Itsuki Noda

\*1 先行開発部 \*2 北海道大学 大学院情報科学研究院

## 要旨

物流倉庫の出庫工程の運用効率向上を目指し、出庫対象の荷物を集め歩く際の移動距離を低減する荷配置最適化技術を開発した。本技術は、過去の注文履歴を基に一緒に注文される頻度が高い荷物集合を特定し、同じ集合に属する荷物間の配置距離を最小化するような荷配置を探索する。ある物流倉庫の簡易モデルを用いた概念実証により、移動距離の削減効果を確認し、本技術の有効性を示した。

キーワード: 組合せ最適化、物流倉庫、荷配置、トピックモデル、メタヒューリスティクス

## Abstract

We developed a storage allocation optimization method to improve the efficiency of the picking process in logistics warehouses by minimizing travel distances during item picking. By analyzing historical order data, our approach identifies groups of frequently co-ordered items and determines a semi-optimal storage allocation that reduces distances between them. Proof-of-concept testing using a warehouse model confirmed a reduction in travel distances, highlighting the effectiveness of this method.

Keywords: Combinatorial Optimization, Logistics Warehouse, Storage Allocation, Topic Model, Metaheuristics

## 1 はじめに

### 1.1 社会的背景

少子高齢化にともなう労働力人口の減少や、eコマース(電子商取引)の拡大により、物流倉庫では、荷物配送の小口化や多頻度化が進んでいる。また、荷物配送に対して効率性や迅速性への要求は高まり続けており、物流を取り巻く環境が急激に変化している。このような背景を受け、物流倉庫内の処理能力を向上させる取組みが進められている。現在、約7割の事業者は作業者を必要とする倉庫形態であり<sup>[1]</sup>、人が介在する作業の効率化が求められている。

### 1.2 物流倉庫の課題

小口配送を行う物流倉庫においては、限られた作業人員のなかで出荷量を最大化することが求められる。しかしながら、出庫工程には必要な人員が多く、運用効率向上の妨げとなっている<sup>[2]</sup>(図1)。

出庫工程は出庫指示に従って作業者が荷物を集め歩く工程(以降、ピッキングと呼ぶ)であり、「出

庫指示を確認」「保管場所へ移動」「荷物を取り出す」といったプロセスを繰り返す。ピッキングの作業時間のうち、保管場所への移動にかかる時間が大半(出庫工程の40%以上<sup>[2]</sup>)を占めている。このため、物流倉庫の運用効率を向上させるには、移動時間の削減が必要であり、従来の人々の経験に基づいた改善活動のみでは、移動時間の削減に十分に対応しきれないのが現状である。具体的な課題として、荷物の適切な配置、作業者の効率的な経路計画、適切な作業の割当などが挙げられ、これらに対する解決策が必要とされている。

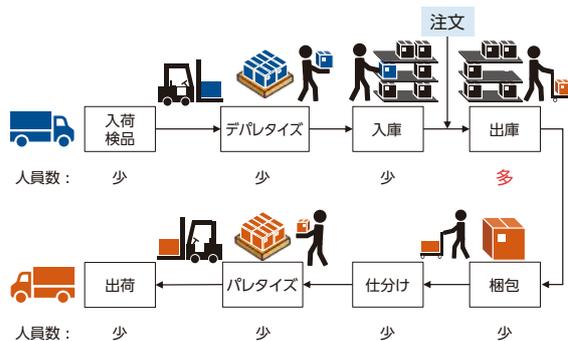


図1 物流倉庫の工程と作業人員数  
Fig.1 Processes and Workload in Logistics Warehouses

## 1.3 先行開発部の取組み

先行開発部では、物流課題の解決に向けて、北海道大学と連携しながら、荷配置、経路計画、作業割当に対する最適化技術の開発を進めている。並行して、トヨタL&Fカンパニー 物流ソリューション事業室と協業しながら、お客様の倉庫をモデルケースに、荷配置の最適化による効果を検証する取組みも行っている。本稿では、シミュレーション評価に基づく荷配置最適化の概念実証の結果を報告する。

## 2 物流倉庫の荷配置最適化

### 2.1 荷配置最適化とは

荷配置最適化とは、ある制約条件を満たしつつ、評価指標を最大化または最小化する荷配置を求めることである。物流倉庫では、荷物の特性(重量、体積、保管温度など)に応じて、配置可能な場所が制限される場合があり、これが制約条件となる。また、荷配置の評価指標としては、ピッキングにかかる移動時間や移動距離、保管スペースの利用効率などが用いられる。

### 2.2 物流倉庫における技術課題

荷配置最適化の難しさは、荷配置の膨大な組合せ数に起因する計算の複雑性にある。理論上、この組合せ数は(荷物の種類数)<sup>2</sup>(配置候補数)となり、荷物や配置候補の数が増加するにつれて、可能な配置パターンが膨大になる(図2)。このため、一般的な厳密解法では、実用的な計算時間内で解を得ることが難しい場合が多い。小口配送を行う物流倉庫では、数万種類の荷物を数十から数百か所の保管場所に配置する必要があるため、実用的な解法を考案することが重要となる。

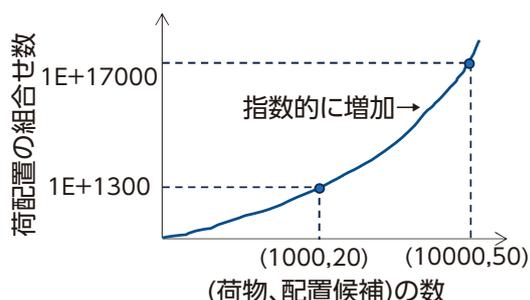


図2 荷配置組合せの増加イメージ  
Fig.2 Image of the Increase in the Number of Combinations

## 3 開発技術

### 3.1 概要・ねらい

ピッキングに必要な移動距離が最小となるように荷配置を最適化する。これにより、ピッキング時の移動時間を削減し、物流倉庫の運用効率向上に貢献することを目指す。

本技術では、最適解を直接求める厳密な方法ではなく、実用的な時間で近似解を導き出すヒューリスティック(発見的)なアプローチを採用している。具体的には、図3に示すような、過去の注文データから得られる共起性に基づいて準最適な荷配置を探索する手法である(国際学会論文にて発表済み<sup>[3]</sup>)。共起性とは、特定の荷物が他の荷物と同時に出荷される頻度を示す指標である。共起性が高い荷物同士をできるだけ近くに保管することで、ピッキング時の移動距離を低減し、出庫工程の作業時間を削減する。

さらに、共起性が高い荷物のみを最適化対象とすることで、荷配置の組合せ数を削減し、最適化の計算負荷を軽減できる。また、共起性が高い荷物間の配置距離を評価指標とすることで、ピッキング時の移動距離を近似的に評価できる。したがって、短時間で荷配置の評価が可能となり、探索的に準最適な荷配置を求めることができる。

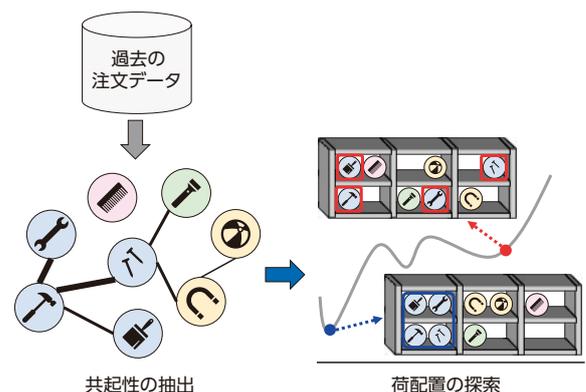


図3 開発技術による荷配置最適化アプローチ  
Fig.3 Proposed Optimization Approach for Storage Allocation

### 3.2 共起性の抽出

本技術では、共起性の抽出にトピックモデルを活用する。トピックモデルとは、複数の潜在的なトピック分布と、それに含まれる単語分布から確率的に文書が生成されると仮定したモデルである(図4)。複数の文書を学習データとして使用し、そ

それぞれの文書の潜在トピック分布と、各トピックに含まれる単語の確率分布を推定することで、トピックモデルを構築する。

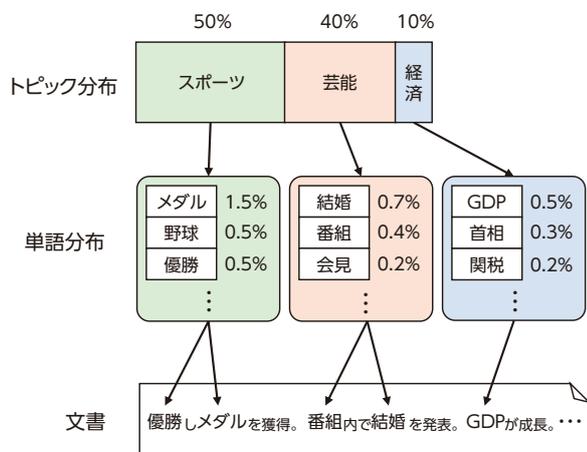


図4 トピックモデルにおける文書の生成イメージ  
Fig.4 The Process of Document Generation in Topic Models

物流倉庫に適用する際、トピックモデルにおける文書を「注文データ」、単語を「荷物」と見なし、過去の注文データ(図5上)に基づいてトピックモデルを構築することで、注文データの潜在的なトピック分布と、各トピックにおける荷物ごとの出現確率が得られる(図5中央)。さらに、あるトピックにおいて出現確率が高いM個の荷物は同時に注文されやすいと見なせるため、それらを共起性の高い荷物集合(以降、共起性セットと呼ぶ)として抽出できる(図5下)。トピックごとに共起性セットを抽出し、それらを荷配置の決定に活用する。

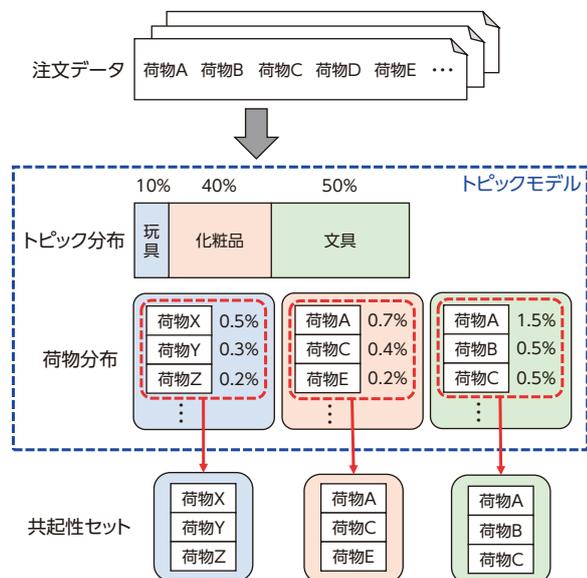


図5 トピックモデルに基づく共起性の抽出方法  
Fig.5 Co-occurrence Extraction Method Based on Topic Model

### 3.3 荷配置の探索

注文データから抽出した共起性セットに基づいて、準最適な荷配置を求める。共起性セットに所属する荷物同士の距離を最小化するように荷配置を決定する。しかし、同じ荷物が複数の共起性セットに所属する場合があるため、問題は非常に複雑になる。そこで、本技術ではメタヒューリスティクスの代表的な近傍探索手法である焼きなまし法を採用し、荷配置を準最適化する。

焼きなまし法は、現在の解を更新しながら探索を行うアルゴリズムである。特徴として、現在の解よりも良い解だけでなく、悪い解もある確率(以降、受理確率と呼ぶ)で受理することで、局所最適解に陥ることを回避し、大域的な最適解への探索を可能にする(図6右)。

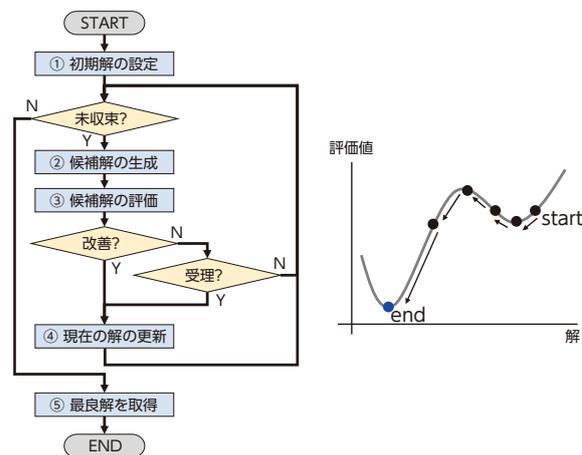


図6 焼きなまし法のフロー(左)と探索イメージ(右)  
Fig.6 Simulated Annealing Workflow (Left) and Search Concept (Right)

本技術において、焼きなまし法の1つの解は1パターンの荷配置を表す。初期解はランダムまたは人の知見に沿って生成し、その評価値を式(1)に従って算出する(図6左の①)。

$$\text{評価値} = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N |BaseLoc_k - ItemLoc_{k,j}| \quad (1)$$

式(1)において、 $BaseLoc_k$ はk番目の共起性セットにおける基準位置を、 $ItemLoc_{k,j}$ はk番目の共起性セットのj番目の荷物の配置位置を表す。ここで、それぞれの位置情報は座標やIDなどである。つまり、共起性セットごとの基準位置と荷物の配置位置との距離の総和を評価値とする。候補解は、現在の解に対して荷物の配置場所を入れ替えるこ

とで生成する(図6左の②)。候補解に対し、式(1)により評価値を算出する(図6左の③)。候補解の評価値が現在の解の評価値よりも良い場合は、候補解を現在の解とする(図6左の④)。候補解の評価値が現在の解の評価値よりも悪い場合でも、受理確率に従って候補解を受け入れ、現在の解を候補解で更新する(図6左の④)。探索が進むにつれて受理確率を下げっていくことで、良い解の近傍を集中的に探索しやすくする。探索回数や解の評価値、非改善期間(最良解が更新されなかった期間や探索回数)などが指定の条件を満たした場合、探索が収束したと判断し最良解を出力する(図6左の⑤)。

## 4 効果検証

ある倉庫をモデルケースとして、本技術の有効性を検証した。検証では、本技術で求めた荷配置による、ピッキング時の移動距離の削減効果を評価した。

### 4.1 倉庫モデルの概略

図7に本技術の評価対象として使用した倉庫の簡易モデルを示す。倉庫内には複数の棚が1列に並んでおり(以降、ラック列と呼ぶ)、各棚には複数種類の荷物を保管することが可能である。ラック列は2列ずつまとめて配置されており、作業者はラック列間の通路を通過して、ピッキング対象の荷物を集める。通路の両側のラック列をレーンと呼び、レーン内の通路には通行方向が指定されている。作業者は、ピッキング指示された荷物をすべて集め終わると、梱包エリアへ移動して荷物を次の工程に引き渡す。その後、再びピッキング作業に戻る。

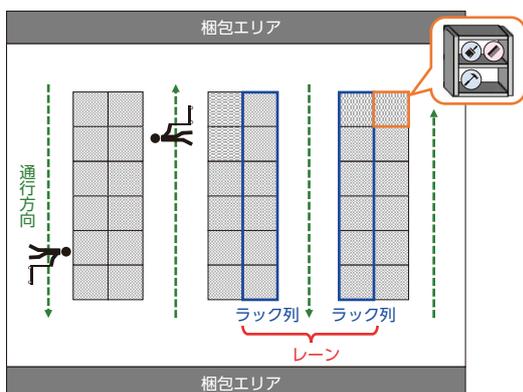


図7 評価対象の倉庫モデル(上面図)  
Fig.7 Warehouse Layout for Evaluation (Top View)

### 4.2 倉庫モデルに対する本技術の適用

焼きなまし法の初期解として、現場の経験に基づく荷配置(以降、現場検討荷配置と呼ぶ)と、荷物ごとに保管場所(棚)をランダムに割当する方法(以降、ランダム荷配置と呼ぶ)を採用した。

焼きなまし法における解 $x$ は式(2)のように表現される。

$$x = [l_1, l_2, \dots, l_M] \quad (2)$$

式(2)において、 $l_i$ は $i$ 番目の荷物が配置されるレーンのIDを示す。つまり、焼きなまし法では荷物ごとにどのレーンに配置するかを求める。

荷配置の評価式(1)における、 $k$ 番目の共起性セットの基準位置 $BaseLoc_k$ は、式(3)に従って算出した。

$$BaseLoc_k = \operatorname{argmax}_{l \in LaneIdSet_k} Freq_k(l) \quad (3)$$

式(3)において、 $LaneIdSet_k$ は $k$ 番目の共起性セットに所属する荷物が配置されているレーンID集合を、 $Freq_k(l)$ はあるレーンID  $l$ に配置されている $k$ 番目の共起性セットに所属する荷物の数を表す。つまり、式(3)は $k$ 番目の共起性セットに所属する荷物が最も多く配置されているレーンIDを基準位置とする。また、評価式(1)における、 $k$ 番目の共起性セットの $j$ 番目の荷物の配置位置 $ItemLoc_{k,j}$ は、その荷物が配置されているレーンIDとした。

焼きなまし法の収束条件は、最良解が連続して $T$ 回更新されなかった場合とした。

焼きなまし法による候補解は、次に示すどちらかの方法をランダムに選択して生成した。

- ランダムに選択した2つのラック列を入れ替え(図8左)
- ランダムに選択した2つの荷物を入れ替え(図8右)

表1に、本技術の適用時におけるパラメータ設定を記す。

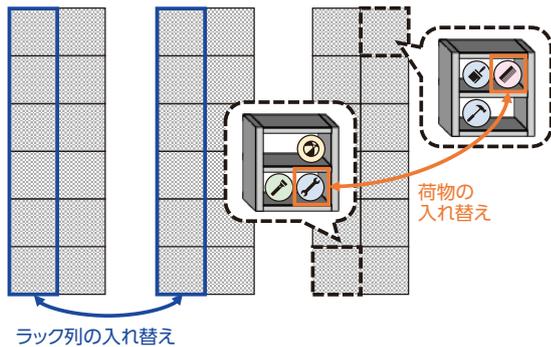


図8 候補解の生成方法  
Fig.8 Methods for Generating Candidate Solutions

表1 本技術のパラメータ設定  
Table 1 Proposed Method's Parameter Settings

大項目	小項目	設定値
共起性の抽出	過去の注文データ	1か月分
	トピック数 $K$	49
	各共起性セットの荷物種類数 $N$	200種
荷配置の探索	荷物種類数 $M$	6,260種
	配置候補数	25レーン
	収束条件: 非改善期間 $T$	100,000回

### 4.3 検証結果

図7に示す倉庫モデルを用いて、本技術による荷配置最適化の効果を検証した。具体的には、実際の注文データを用いて1日分のピッキング作業をシミュレーションし、ピッキングにかかる移動距離を測定した。また、比較手法として、ランダム荷配置と現場検討荷配置を採用した。これらの結果を比較することで、本技術による移動距離の削減効果の評価した。

検証結果を図9に示す。各荷配置における移動距離は、ランダム荷配置の結果を基準とした相対値で表している。図9より、ランダム荷配置に対して、共起性を考慮した荷配置は、ピッキング時の移動距離を約28%削減する効果を示した(図9(a))。一方で、本技術の結果と現場検討荷配置の結果を比較すると、その差は約2%に留まった(図9(b))。

本技術の移動距離が、初期解とした荷配置の移動距離よりも小さいことから、過去データから抽出した共起性の有効性が示唆される。一方で、本技術の結果が現場検討荷配置の結果を大幅に上回らなかった要因として、荷配置の組合せ数が膨大で有望な解をなかなか見つけられず、局所解に収束してしまった点が考えられる。また、表2に示す本

技術の計算時間が非常に長い要因も、荷配置の組合せ数に起因して、有望でない方向への探索が非常に多かったためと考えられる。以上より、荷配置の膨大な組合せ数に対応した効率的な探索手法の構築が、今後の課題となる。

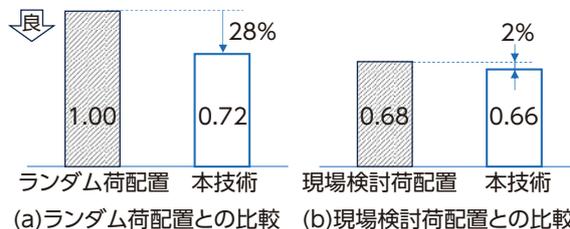


図9 各荷配置手法の移動距離の比較  
Fig.9 Comparison of Travel Distance for Each Storage Allocation Method

表2 各荷配置手法の計算時間の比較  
Table 2 Comparison of Computation Time for Each Storage Allocation Method

手法	計算時間
ランダム荷配置	約0.1[s]
現場検討荷配置	約1~2[week]
本技術(初期解:ランダム)	約72[h]
本技術(初期解:現場検討)	約72[h]

## 5 まとめ

注文データからトピックモデルを利用して共起性を抽出し、それに基づいて準最適な荷配置を焼きなまし法で探索する技術を開発した。本技術により、ピッキングの移動距離削減に一定の効果があることを確認した。一方で、荷配置の膨大な組合せ数に起因する探索効率の低下が課題として明らかとなった。お客様倉庫への導入を目指して改善を進めていくと同時に、最適化ツールとしてブラッシュアップし競争力の向上につなげていく。

### 謝辞

本技術の開発にあたり、トヨタL&Fカンパニー物流ソリューション事業室の皆様からは、迅速かつ詳細な現場データの提供に加え、的確な助言を頂戴いたしました。ここに深く感謝の意を表します。

## ■参考文献

- [1] 富士電機(株), “物流センター・倉庫に関する動向調査,” 8 2021. [オンライン]. Available: [https://www.fujielectric.co.jp/products/logistics/research/research09/box/pdf/research\\_2021\\_09\\_busturyuhitodebusoku.pdf](https://www.fujielectric.co.jp/products/logistics/research/research09/box/pdf/research_2021_09_busturyuhitodebusoku.pdf).
- [2] (株) インフォセンス, “現場主導型のピッキング作業改善事例,” 2019. [オンライン]. Available: <https://www1.logistics.or.jp/wp-content/uploads/2025/03/2019clmronbun3.pdf>.
- [3] T. Ito, N. Hattori, H. Sakaji, I. Noda, “LDAS: Proposal for optimal Storage Locations using LDA and SA,” Springer, 2025.

## ■著者紹介■



服部 直樹



岡本 和也



岡本 浩伸



伊藤 辰都



野田 五十樹

# 物流分野における最適化問題

## Optimization Problems in Logistics

加藤 拓朗<sup>\*1</sup> 横町 尚也<sup>\*1</sup>  
 Takuro Kato Naoya Yokomachi

\*1 先行開発部

### 要 旨

先進的物流ソリューションの実現を目指し、当社は2016年に産業技術総合研究所内に当社-産総研 アドバンスト・ロジスティクス連携研究ラボ (ALラボ) を設立した。本稿では、ALラボが取り組んだ物流分野における最適化問題に対する研究事例を紹介する。物流センター全体の生産性向上には、ピッキング作業工程の高効率化が不可欠である。しかし、最適化に基づく計画における計算の複雑性、計画実行時の不確定要素の多さが課題となる。これらの課題克服に向けて開発した要素技術である、1) タスクスケジューリング・経路計画の二階層最適化、2) 交差点離合制御、3) 混雑緩和経路計画を概説する。

キーワード: 経路計画, タスクスケジューリング, 階層最適化, 形式的検証, 混雑緩和

### Abstract

Aiming at advanced logistics solutions, TICO-AIST Advanced Logistics Collaborative Research Laboratory (AL Lab) was established within the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology in 2016. This paper outlines case studies from the AL Lab's research addressing optimization problems in logistics. Improving the efficiency of order-picking processes is essential for enhancing the overall productivity of logistics centers. Critical challenges include computational complexity in optimization-based task planning and uncertainties in execution. To address these challenges, key technologies have been developed: 1) two-layer optimization of task assignment and path planning, 2) intersection collision avoidance control, and 3) congestion mitigation path planning.

Keywords: Path Planning, Task Scheduling, Hierarchical Optimization, Formal Verification, Congestion Mitigation

## 1 物流センターの最適化

EC (電子商取引) の普及により小口・高頻度配送の需要が増加する一方で、労働力人口の減少にともなう物流能力の不足が懸念されている。この課題に対処するため、物流センターの生産性を向上させるソリューションが求められている。在庫型物流センターでは、仕入先から入荷した商品を保管し、顧客の注文に応じて出庫・梱包・出荷する(図1)。全体工程のうち、ピッキング作業は出荷リストに従って棚間を移動し商品を取得・検品・出庫する高負荷作業であり、とくに生産性向上の要望が強い。

このような背景のもと、生産性向上を目指して自動搬送ロボットの導入が進められている。ロボットシステムの導入効果を高めるには、効率的な運用を可能にする計画技術と実行フレームワークが不可欠である。本稿では、物流センターの高効率運用を目的として開発した、マルチエージェント最適化技術に基づく要素技術について概説す

る。本稿ではロボットを一般化し、「エージェント」という呼称を用いる。ただし、明確に人と区別する必要がある場合に限り「ロボット」という用語を用いる。

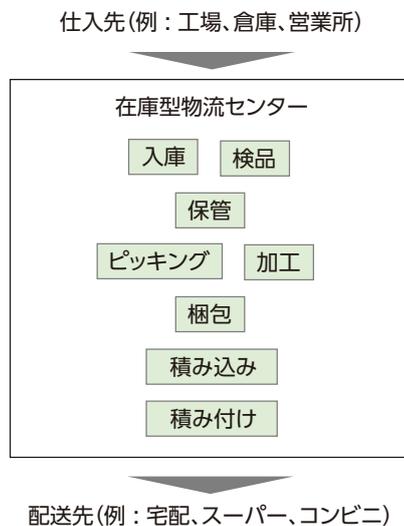


図1 物流センターの作業工程  
 Fig.1 Operational Processes in Logistics Center

## 2 ピッキング作業におけるエージェント群誘導の課題

### 2.1 計算の複雑性

物流倉庫のピッキング作業では、複数商品の回収指示が一度にエージェントへ与えられる。指示内容は、配送先ごとにまとめた品目群や格納場所が近接する品目群など、運用により異なる。複数のエージェントが狭路を含む共有空間で同時に行動するため相互の進路妨害が生じやすい。行動計画中の無衝突を保証しつつスループット(単位時間当たりの処理量)やメイクスパン(全タスク完了時間)を最適化する問題は、マルチエージェント経路計画に分類され、多項式時間で最適解を求める汎用アルゴリズムは存在しない。したがって、現実的な計算時間で実用上の精度要求を満足する準最適解を得るヒューリスティック(発見的手法)の設計が不可欠となる。

### 2.2 人口ロボット共存、制御誤差による不確実性

最適化に基づく精緻な計画を立案しても、物流現場における運用では次のような外乱的事象が計画通りの実行を阻害する。1) 人・ロボット共存環境: 作業者がロボットの進路を横切る、棚補充のために一時停止を強いられるなどの干渉。2) 制御遅延・誤差: 完全自動化倉庫においても、ロボットの速度制御誤差や通信遅延により指示した地点へのロボットの到着時刻に誤差が生じる。こうした不確実性に対処し計画崩壊を防ぐには、環境の特性を捉えた実行フレームワークの設計が不可欠となる。

## 3 事例紹介

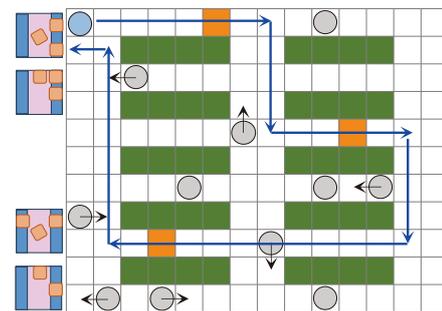
### 3.1 タスクスケジューリング・経路計画の二階層最適化

本節ではピッキング作業におけるタスク割当て、順序決定、経路計画を同時に扱う最適化問題を概説する。

#### 3.1.1 問題設定

環境を表現されたグラフと、エージェントの集

合が与えられる。初期位置から、所定の商品をピックアップし、目的地に到達するまでの時間依存経路を求める。エージェントは商品をピックアップする際、同一地点に一定時間とどまる必要がある。また、エージェントが目的地に達するまでの移動において互いに衝突しないことを制約とする。初期位置から目的地に到達するまでに要した時間を移動コストとし、全エージェントのコスト総和を最小化しよう経路を計画する。この際、エージェントへのタスク割当て・順序決定も変数とする(図2)。



●: エージェント ■: タスク実行地点

図2 ピッキング作業のタスク割当て・経路計画

Fig.2 Task Assignment and Path Planning in Warehouse Picking

#### 3.1.2 解法アプローチ

この問題は、エージェントへのタスク割当て・順序決定と、経路計画問題の二階層に分割し、各問題の計算結果をフィードバックして繰り返し計算することで解くことができる。ここでタスク割当て・順序を最適化する上位問題はTime-dependent Vehicle Routing Problem (TDVRP)<sup>[1]</sup>と呼ばれ、経路計画を行う下位問題はMulti-Agent Path Finding (MAPF)<sup>[2]</sup>と呼ばれる。この二階層最適化問題全体はExtended TDVRP (Ext-TDVRP)<sup>[3]</sup>と呼ばれる(図3)。

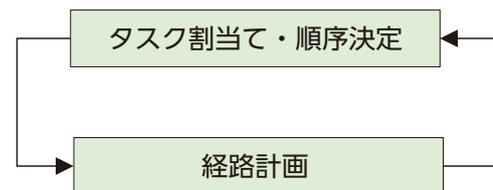


図3 ピッキング作業における二階層最適化問題

Fig.3 Two-layer Optimization Problem in Warehouse Picking Operations

本問題に対してはメタヒューリスティクスを用いて計算する解法が知られている。ただし、当該手

法ではTDVRPの繰り返し計算がボトルネックとなり、計算可能な問題の規模が限られる。この課題を克服するため、初回のみTDVRPを計算したうえで、繰り返し計算においてはTime-dependent Traveling Salesperson Problem (TDTSP)<sup>[4]</sup>に基づくヒューリスティックを用いてタスク順序のみを更新しつつ、上位問題を解く軽量化アプローチを提案した<sup>[5]</sup>。実在する倉庫のレイアウトを参考に作成したマップでのベンチマークでは、従来のメタヒューリスティクスに基づくExt-TDVRP解法と同等コストを維持しつつ、計算速度を10-60倍改善することを確認している。

### 3.2 交差点離合制御

最適化アルゴリズムを用いて無衝突を保証しつつ移動コストが低い計画を精緻に得ることが可能である一方で、実際のロボットシステムにおいては制御誤差、遅延、予期しない人の介入といった外乱的事象が生じ事前に立てた計画を正確に実行することが難しい場合がある。これによりデッドロック(相互阻害による進行不能)や深刻な遅延をまねく渋滞が発生する可能性がある。これらを回避するには、適切な実行フレームワークを構築し、適用することが必要となる。

こうした実行誤差や予期せぬ介入に強い運用を実現する代表的な枠組みの一つが、交差点の通行ルール(Merging Arbitration Control)を事前に設計し、ロボットに遵守させる方法<sup>[6]</sup>である。具体的には、ロボットの侵入方向、残作業量、ピックアップ位置に応じた優先順位(直進優先、右折優先規則を含む)を設定することで、デッドロックを未然に防ぎつつ、全体の移動効率を維持することを目指す。

設計した交通ルールを用いてマルチロボットシステムを運用した場合に、デッドロックが発生しないことを検証するためには、Timed-CSPモデル<sup>[7]</sup>およびモデル検査ツールPAT(Process Analysis Toolkit)<sup>[8]</sup>を用いた形式検証が有効である。形式検証により、交差点侵入(図4)パターンに対して網羅検査を行い、提案ルールの安全性が理論的に示されている。このように交通ルールの設計と形式検証を組み合わせることで、最適化に基づいて算出した計画と、実システムの運用を橋渡しする堅牢なフレームワークを構築することが可能である。

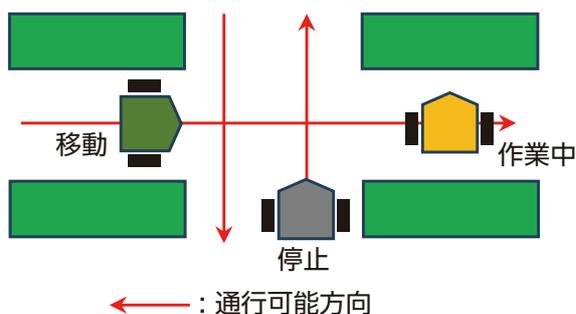


図4 作業中のロボットが絡む交差点侵入パターン  
Fig.4 Intersection Entry Patterns Involving a Robot Executing a Task

### 3.3 混雑緩和経路計画

多数のロボットが同一フロアを走行する倉庫において全体の稼働効率を維持するためには、局所的な渋滞の発生を抑制する仕組みも必要となる。本節では、渋滞そのものをコストに組み込み、エージェントが不確実性をともなって移動しても混雑が発生しにくい経路を計画する、「混雑緩和経路計画 (Congestion Mitigation Path Planning, CMPP)」<sup>[9]</sup>を紹介する。

CMPPでは環境をエリアごとの混雑状態を捉えるために疎グラフで表現する。この疎グラフの頂点には、倉庫シナリオであれば交差点や通路の入り口など、環境中のキーポイントを設定する。疎グラフ上の各頂点に対し、エージェント群の経路に基づく「混雑度」と呼ぶ指標を計算する。混雑度は、各頂点への流入辺を経路に含むエージェントの数の乗算により定義され、頻繁に異方向からエージェントが侵入する頂点において値が急激に増大するよう設計する。グラフ全体の混雑度総和を最小化する経路集合を求め、各エージェントが沿うべき大域的経路を得る。この経路は各エージェントに対してウェイポイントとして与えることができる。局所的な衝突回避や移動タイミングの判断をエージェントに委ねつつ、これに沿って移動させることで混雑の発生が抑制される(図5)。

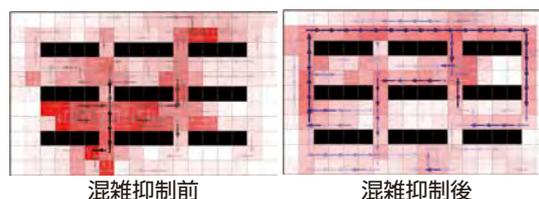


図5 混雑緩和抑制前後のヒートマップ比較  
Fig.5 Heatmap Comparison between with and without Congestion Mitigation

効果検証の一例として、離散空間上での衝突回避プランナーであるPIBT (Priority Inheritance with Backtracking)<sup>[10]</sup>とCMPPを組み合わせ、Lifelong-MAPF<sup>[11]</sup>と呼ばれる設定のエージェント群誘導シミュレーションを行った。倉庫を模擬したマップ(図6(a))において、疎グラフ(図6(b))を作成しCMPPを計算した。エージェント数が200の場合において、従来手法の平均スループットが3.99(タスク/シミュレーションステップ)であることに対して、提案手法では5.54と38%改善することを確認している(図6(c))。

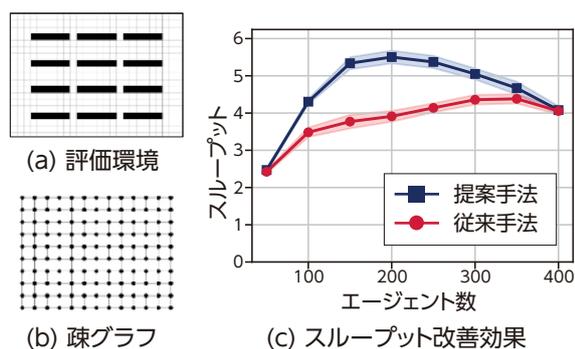


図6 評価結果例  
Fig.6 Example of Evaluation Result

## 4 まとめ

本稿では、物流センターに関連する最適化問題の研究事例を紹介した。実現場に適用するには、利用可能なセンサ・アクチュエータへの適合に加え、安定した通信と通信途絶に対してロバストな運用設計が必要となる。これらの要件を満たす改良を重ね、開発技術の社会実装を目指す。

3.1節で紹介した技術[5]はALラボとNEC-産総研 人工知能連携研究室の共同研究成果である。

### 参考文献

- [1] C. Malandraki and M. Daskin, "Time Dependent Vehicle Routing Problems: Formulations, Properties and Heuristic Algorithms," in *Transportation Science*, 1992.
- [2] R. Stern, N. Sturtevant, A. Felner, S. Koenig, H. Ma, T. Walker, J. Li, D. Atzmon, L. Cohen, T. Kumar, E. Boyarski, and R. Bartak, "Multi-Agent Pathfinding: Definitions, Variants, and Benchmarks," in *Proc. of the International Symposium on Combinatorial Search (SoCS)*, 2019.
- [3] A. Aggarwal, F. Ho, and S. Nakadai, "Extended Time Dependent Vehicle Routing Problem for Joint Task Allocation and Path Planning in Shared

Space," in *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2022.

- [4] J. Picard and M. Queyranne, "The Time-Dependent Traveling Salesman Problem and Its Application to the Tardiness Problem in One-Machine Scheduling," *Operations Research*, 1978.
- [5] R. Higa, T. Kato, and F. Ho, "Dual-Process Optimization for Multi-Vehicle Route Planning and Parts Collection Sequencing," in *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2024.
- [6] N. Miyamoto, H. Okamoto, N. Ando, and Y. Koide, "Formal Verification of Merging Arbitration Control System for Logistics Robots," in *Proc. of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, 2024.
- [7] J. Davies and S. Schneider, "A brief history of Timed CSP," *Theoretical Computer Science*, 1995.
- [8] J. Sun., Y. Liu, J. Dong, "Model Checking CSP Revisited: Introducing a Process Analysis Toolkit," *Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation*, 2008.
- [9] T. Kato, K. Okumura, Y. Sasaki and N. Yokomachi, "Congestion Mitigation Path Planning for Large-Scale Multi-Agent Navigation in Dense Environments," in *IEEE Robotics and Automation Letters (RA-L)*, 2025.
- [10] K. Okumura, M. Machida, X. Défago, and Y. Tamura, "Priority inheritance with backtracking for iterative multi-agent path finding", in *Proc. of International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, 2019.
- [11] J. Li, A. Tinka, S. Kiesel, J. Durham, T. Kumar, and S. Koenig, "Lifelong Multi-Agent Path Finding in Large-Scale Warehouses," in *Proc. of the International Conference on Autonomous Agents and Multi Agent Systems (AAMAS)*, 2020.

### 著者紹介



加藤 拓朗

横町 尚也

# 生産計画立案自動化、最適化技術確立

## Establishment of Automation and Optimization Technologies for Production Planning

山根 有輝也<sup>\*1</sup>  
Yukiya Yamane

\*1 ITデジタル推進部

### 要旨

鑄造ラインを対象に、生産計画の立案業務を自動化する多目的最適化ツールを開発した。本稿では、業務フローの分析からアルゴリズムの選定、数理モデルの構築、そして実証に至る2年間の取組みについて報告する。混合整数計画法(MIP, Mixed Integer Programming)の数理モデルに対し、熟練担当者の意思決定を模倣する「離散的なペナルティ」を導入し、計画立案工数を63%削減するとともに、段取り替え回数・在庫数・残業時間の3指標を同時に最適化した。

キーワード: 生産計画、鑄造、段取り替え最小化、オペレーションズ・リサーチ、組合せ最適化、混合整数計画法

### Abstract

A multi-objective optimization tool was developed to automate the production planning process for casting lines. This paper reports on the two-year effort, covering the analysis of workflows, the selection of algorithms, the construction of mathematical models, and the validation results. By incorporating a “discrete penalty” approach to model the decision-making of experienced planners into a Mixed Integer Programming (MIP) mathematical model, we achieved a 63% reduction in planning workload while simultaneously optimizing three metrics: setup change frequency, inventory levels, and overtime hours.

Keywords: Production Planning, Casting, Die Change Minimization, Operations Research, Combinatorial Optimization, Mixed Integer Programming

## 1 はじめに

### 1.1 生産計画立案業務の課題

本取組みの対象である鑄造ラインでは、約60基の鑄造設備(以下、マシンと表記)と、1品番につき複数ある金型との組合せで、最大400品番超の製品を製造している。生産計画の立案および修正作業は、従来、熟練の生産管理担当者が多大な時間をかけて手作業で行っていた。事前調査の結果、計画を構成する要素の組合せ数は最大で10の240万乗に達することが判明した。この想像しがたい規模の問題を、自動化を目的とした市販のパッケージソフトウェアで解くのは極めて困難である。

これらの課題に対し、2年間の取組みを経て、熟練担当者のノウハウを取り入れた独自の数理モデルを構築した。このモデルを活用することで、日次計画立案の自動化および最適化を目指すとともに、他工程で最適化技術を活用する際の新たな可能性についても検討した。

### 1.2 計画立案の業務フロー

月初に暫定的な1か月分の日次計画を2日間かけて作成したうえで、①突発的な変更やトラブルに対応しながら、②稼働情報の登録・確認を踏まえて、③毎日計画の修正を行う。そのため、計画の立案・修正工数は、生産管理の関係部署の累計で月に約1,000時間にも及んでいた(図1)。

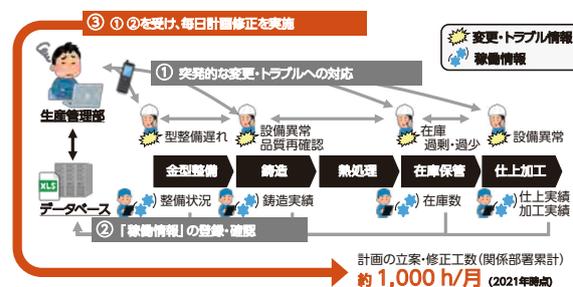


図1 日次計画修正フローと月間工数  
Fig.1 Daily Planning Revision Flow and Monthly Workload

### 1.3 計画立案時に参照するデータ

熟練担当者が計画立案時に参照するデータを表

1に示す。なお、表内の★印は日々の変動が大きい値である：

表1 計画立案時に参照するデータの詳細  
Table1 Details of Data Referenced During Planning

データファイル名	値の名称
品番マスタ	★現在の在庫数、★在庫の引き取り数、在庫数の基準値、サイクルタイム、ロット数
マシン割当計画	各品番の生産が割り当てられているマシンの番号
稼働カレンダー	日々の残業時間上限(定時退場日など)、所定休日、休日出勤日

## 2 数理モデルの構築

### 2.1 アルゴリズム選定までの試行錯誤

「手持ちの解法にこだわるのではなく、問題にあった解法を探せ」という格言がある通り、生産計画を数学的な問題に変換して解く際には、実務との整合性を保ちながら適切なアルゴリズムを選定することが重要である<sup>[1]</sup>。

アルゴリズムの選定にあたり、とくに本取組みの初年度は課題の本質を明らかにするために、あらゆる手段を用いて熟練担当者へのヒアリングを行った。例えば、計画立案作業のPC画面をビデオ通話ツールで録画し、作業の流れや工数の内訳を詳細に解析した。また、熟練担当者のPC作業を背後から直接観察させてもらいながらヒアリングを実施することもあった。さらに、開発者自身が計画立案を試み、その結果を熟練担当者に添削してもらい、具体的な判断基準や思考プロセスを体感的に学んだ。

以上を経て、アルゴリズムの選定と、初期の数理モデルの構築に成功した。なお、技術的な詳細は後述する。

### 2.2 制約抽出・数理モデル改良サイクルの確立

次年度では、その数理モデルを改良するため、計算結果と実績の差異分析を行った。また、その差異に対する熟練担当者の意見も反映させた。また、マシンや自動搬送装置(AGV)を現地・現物で確認し、ヒアリングで得た制約の背景を調査することで、さらなる改良を図った。

そして、これらの活動を標準化し、制約抽出・数理モデルの改良サイクルを確立した(図2)。

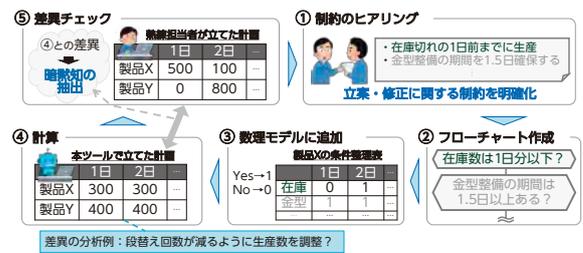


図2 熟練担当者へのヒアリングと差異分析による制約抽出・数理モデル改良サイクル  
Fig.2 Constraint Extraction and Mathematical Model Refinement Cycle via Expert Interviews and Gap Analysis

### 2.3 混合整数計画法(MIP)の採用

本取組みでは、混合整数計画法(MIP)というアルゴリズムを採用し、日次の生産計画に関する制約や条件などを線形の数式のみを用いて定式化した。そして、生産数、段取り替え(段替え)の回数、在庫数などを同時に最適化するツールを開発した。

選定にあたり、「近似解法」という種類のアルゴリズム群も検討したものの、制約が多すぎて対応できない可能性がある点が課題となった。一方で、今回採用したMIPはすべての制約を満たす「解」を出力できる(「解」は、計算の結果得られる計画案を示す)。また、MIPは数理モデルが構築できれば、その計算はソルバ(solver)とよばれるソフトウェアに任せられるため、他のアルゴリズムと比べて習得難易度が比較的低いという利点もある。

MIPの数理モデルは、決定変数、制約式、目的関数の3要素からなる(図3)。以下では各要素について説明する。

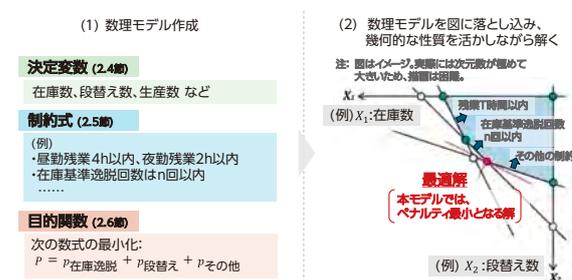


図3 MIPの数理モデルにおける3要素(決定変数・制約式・目的関数)の概念図  
Fig.3 Conceptual Diagram of the Three Components in the MIP Model—Decision Variables, Constraints, and Objective Function

### 2.4 決定変数

決定変数とは、最適化の対象となる変数のことである。本モデルでは、各マシン $m$ が品番 $i$ を、稼働日 $d$ にいくつ生産するかを表す変数 $x_{m,i,d}$ を中心と

し、その生産数を昼勤・夜勤・休日出勤というシフト(直)ごとに加え、1時間単位に細分化して管理する。この仕組みにより、熟練担当者の考え方と同様の粒度での計画立案が実現できる。

また、在庫数については欠品や基準逸脱(過剰・過少)などの状態を判定し、ペナルティとよばれる罰則点を自動で加算するための変数(ペナルティ変数)も設けている。さらに、週内の負荷のピークを管理する変数を設けて平準化を図った。

## 2.5 制約式

制約式とは、生産計画を立案する際のルールや条件を数学的に表現したものである。前章の表1に示した参照データをもとに、鑄造ラインの制約や条件を整理することで設定した。各データファイルと制約式の対応を表2に示す：

表2 各データファイルと制約式の対応  
Table 2 Correspondence Between Data Files and Constraint Formulations

データファイル名	設定した制約式
品番マスタ	在庫数の推移制約(本節で説明) 在庫基準逸脱の回数制限制約
マシン割当計画	品番×マシンの組合せ制約 生産能力および段替え回数の制約
稼働カレンダー	残業時間上限、休日制約 週内の負荷バラつき防止制約

さらに本取組みでは追加制約として、需給バランスや金型の整備間隔などに関する熟練担当者のノウハウを取り入れることで、実務に即した計画立案を可能にしている。

ここで、日ごとの在庫数の推移を表現する制約式を紹介する。品番*i*について、稼働日*d*の翌日の在庫数 $Z_{i,d+1}$ は以下の制約式(1)で表せる：

$$Z_{i,d+1} = Z_{i,d} + \sum_m x_{m,i,d} - h_{i,d} \quad (1)$$

(各変数の説明)

・ $Z_{i,d}$ : 品番*i*の稼働日*d*時点の在庫数

・ $h_{i,d}$ : 品番*i*の稼働日*d*での引き取り数

なおこの制約式は、複数のマシンが分担して同じ品番を生産するケース(いわゆるブリッジ生産)にも対応できる。

## 2.6 目的関数

目的関数とは、最小化(または最大化)の対象となる関数である。本モデルでは、計画のペナルティを最小化させるように設定している。ペナルティは、前述のペナルティ変数に、優先順位を示す係数(ペナルティ係数)を乗じた数の和で表される。ペナルティ係数は優先順位が高いほうから、在庫基準逸脱、段替え、負荷変動などについて設定している。詳細は次の章で説明する。

## 3 ペナルティの仕組み

### 3.1 離散的なペナルティの採用

ペナルティの決定にあたっては、各項目が同時に最適化できるよう、熟練担当者へのヒアリングや実験を重ねた。そして、その過程から得られた知見をもとに、評価指標の目標値からのかい離を区分ごとに捉える「離散的なペナルティ」を考案、採用した<sup>[2]</sup>。

一方、既存技術である連続的なペナルティも限定エリアを対象に試行したが、計算時間が延びるという課題があった。これは、連続的なペナルティの最小化の過程で、解の組合せが無数にあるためと考えられる(図4)。

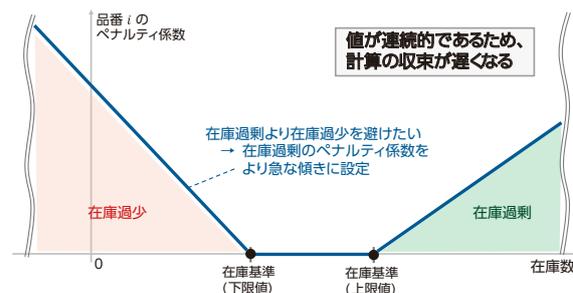


図4 連続的なペナルティ関数のイメージ  
Fig.4 Illustration of a Continuous Penalty Function

### 3.2 在庫基準逸脱ペナルティ

代表例として、在庫基準に対して在庫数が過剰または過少となった場合に適用されるペナルティの仕組みを説明する。通常、在庫基準は上限値と下限値の2つのしきい値で管理されるが、検証の結果、しきい値を段階的に細分化することで計算精度を向上できることが判明した。この知見をもとに、熟練担当者と協議を重ねながらしきい値を調

整し、精度をさらに高めた。

ここからペナルティ算出の流れを示す。まず、品番*i*の在庫基準のうち下限を $u_i$ 、上限を $o_i$ とし、加えて下限の3分の2を $t_i$ 、上限の1.5倍を $r_i$ という定数で表す。

続いて、稼働日*d*、品番*i*について、ペナルティ変数の組 $\delta_{i,d,1}.. \delta_{i,d,4}$ を、式(2) - (5)で定義する(ただし、実際の制約式では、Big-M法を利用)<sup>[3]</sup>。また、各ペナルティ変数に対応するペナルティ係数 $k_1.. k_4$ とする(図5)。

$$\begin{cases} \delta_{i,d,1} = 1 & (\text{if } Z_{i,d} < t_i) \\ \delta_{i,d,1} = 0 & (\text{if } t_i \leq Z_{i,d}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \delta_{i,d,2} = 1 & (\text{if } t_i \leq Z_{i,d} < u_i) \\ \delta_{i,d,2} = 0 & (\text{if } Z_{i,d} < t_i \text{ or } u_i \leq Z_{i,d}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \delta_{i,d,3} = 1 & (\text{if } o_i < Z_{i,d} \leq r_i) \\ \delta_{i,d,3} = 0 & (\text{if } Z_{i,d} \leq o_i \text{ or } r_i < Z_{i,d}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \delta_{i,d,4} = 1 & (\text{if } r_i \leq Z_{i,d}) \\ \delta_{i,d,4} = 0 & (\text{if } Z_{i,d} < r_i) \end{cases} \quad (5)$$

このとき、在庫基準逸脱ペナルティ  $p_{\text{在庫逸脱}}$  は式(6)のように表せる。このペナルティが最小となるとき、製造部門にとって最適な在庫数となる。

$$p_{\text{在庫逸脱}} = \sum_i \sum_d (k_1 \delta_{i,d,1} + k_2 \delta_{i,d,2} + k_3 \delta_{i,d,3} + k_4 \delta_{i,d,4}) \quad (6)$$

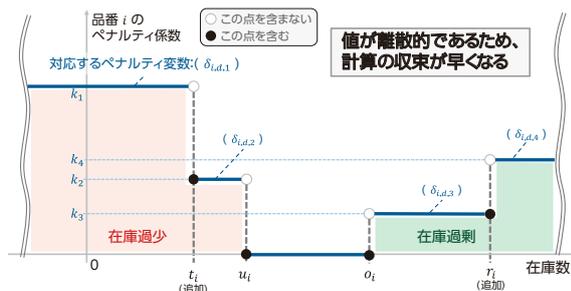


図5 在庫基準逸脱を評価する離散ペナルティの仕組み  
Fig.5 Discrete Penalty Mechanism for Inventory Deviation

### 3.3 目的関数へのペナルティの組み込み

最終的に、すべてのペナルティの和をとると、多目的最適化が可能な目的関数ができあがる。目的関数*P*は式(7)となる。

$$P = p_{\text{在庫逸脱}} + p_{\text{段替え}} + p_{\text{その他}} \quad (7)$$

ここで、 $p_{\text{段替え}}$  は、1日あたりの段替え回数に応じ

て発生するペナルティを示す。同じ日に複数の段替えが重なると、生産可能な時間が減少するだけでなく、製造部門の作業者の負担も大きくなる。この問題に対応するため、段替えが重なる日に対して指数関数的に増加するペナルティ係数を設定し、段替え重複を抑制できる仕組みとした。また、 $p_{\text{その他}}$  には負荷の平準化や金型整備期間の確保に関する項目が含まれる。

前述のように各項目のペナルティに適切な係数を設定することで、在庫基準逸脱を回避し、段替えの重複を抑制し、さらに負荷の平準化などを同時に考慮した最適化を実現できる。

## 4 実証結果と考察

### 4.1 計画立案の工数および働き方の変化

導入前は熟練作業者のみで計画立案していたため、手作業と電話対応で残業も多かった。さらに、1か月分の暫定計画を立てるのに2日間かかっていた。

導入後は本ツールが解を提示することで、月初の計画立案工数が63%減少し、空いた分を在庫の基準値の見直しなどといった改善活動に回せるようになった(図6)。

また、1か月分の暫定計画を1日で立てられるようになった。これにより、数日後の見通しが目で見てわかるため、経験と勘が頼りであった電話調整の負担も減少した。これにより新任担当者でも業務の質を落とさず作業ができるようになった(図7)。

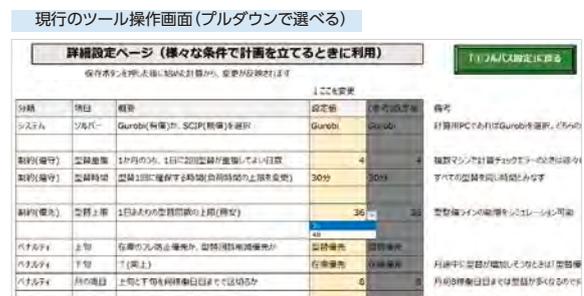


図6 在庫基準値などを調整できる最適化ツールの詳細設定画面(例)  
Fig.6 Example of the Optimization Tool's Detailed Configuration Screen for Revising Inventory Thresholds

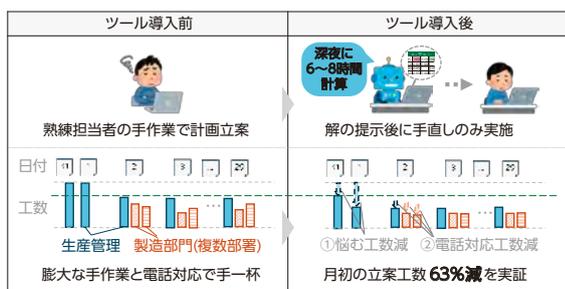


図7 ツール導入前後における計画立案工数と残業時間の削減効果  
Fig.7 Reduction of Planning Workload and Overtime by Tool Implementation

## 4.2 計算時間・精度の比較

2022年の3か月分のデータを用い、複数のソルバについて、計算時間と得られる解の精度を比較した。なお計算環境は、OSとしてWindows (R) 10 Enterprise 64bit (検証当時)、プロセッサとしてIntel (R) Xeon (R) Gold 6226R (2.90 GHz)、RAMとして192 GBを備えたPCである。

比較項目は以下の3点である。

- 1か月分の計画立案問題について解が出せたか
- 2週間分の計画立案問題について解が出せたか
- 得られた解の収束度合い

3点目の「収束」とは、ペナルティが十分に小さい解が得られており、実務で利用できるほどの品質が期待できることを意味する。ソルバの比較結果を表3に示す：

表3 ソルバの比較結果  
Table 3 Comparison Results of Solvers

ソルバ	費用	1か月分の計画	2週間分の計画	収束度合い
Gurobi <sup>[4]</sup>	商用	6~8時間で収束	— (評価を省略)	十分に収束
SCIP <sup>[5]</sup>	無償	24時間で未完	約8時間で完了	24時間で収束せず
CBC <sup>[6]</sup>	無償	24時間で未完	24時間で未完	— (評価不可)

Gurobiは商用であるが計算性能が非常に高く、1か月分の計画の計算は6~8時間で収束した。また、1か月単位の生産計画を実用的な時間内に立案できる唯一のソルバとして採用に至った。一方、無償ソルバのSCIP、CBCでは、解を得られる場合はあったものの、24時間計算しても十分に収束しなかった。

## 4.3 考察

得られた解と実績の差異分析および、離散ペナルティの導入により、熟練担当者の経験からしきい値として用いていた条件 (例：在庫の基準値やペナルティ係数など) を数理モデル内で再現できた。また、連続的なペナルティを用いる場合に比べて、計算の高速化を実現した。

実証結果においては、計画立案工数を削減できた一方、欠品や過剰在庫、段替え回数などの評価指標については、従来水準から変化がなかった。各評価指標のさらなる改善を行うには、熟練担当者の評価に基づく数理モデルではなく、原単位を反映したコストなどに置き換えるのも一案である。

また、ソルバの比較結果からは、大規模な最適化問題では商用ソルバが実用的である一方、問題の分割やモデリングの見直しといった工夫を行えば、無償ソルバも活用できることが示された。

以上により、最適化技術を他工程などに適用する際には、熟練担当者と連携しながら評価項目を決めたのちにアルゴリズムを選定し、ソルバへの投資や数理モデルの工夫を検討することが「最適」な戦略であるといえよう。

## 5 おわりに

### 5.1 まとめ

本取組みでは、鑄造ラインの生産計画立案の自動化・最適化を行う数理モデルを構築した。在庫基準逸脱や段替え回数といった複数指標について、独自の離散的なペナルティを活用して同時に考慮できる仕組みを実装した。その成果として計画立案工数の63%削減を実現した。また、ソルバへの投資またはモデルの工夫のどちらを進めるかなど、最適化技術を活用するうえでの汎用的な知見を得た。

### 5.2 今後の展望

今後の展望として、主に以下の3点を据えている。

まず、複数拠点が連携して生産を行う場合でも全体最適を実現する「多拠点同時最適化」への拡張が課題である。

2点目は、任意の条件で日次や週次の計画を素

早く修正できる「シミュレーション機能」を導入し、需要変動や設備異常への迅速対応を目指す。

3点目は「生成AIの活用」であり、今後、当社ひいては製造業界に最適化技術の活用を広げるうえで欠かせないものと考えられる。自然言語で記述されたルールや熟練担当者のノウハウを定式化することで、数理モデルを自動で調整する仕組みを検討する。これにより、複雑な制約条件を効率よく反映でき、計画立案の精度とお客様への対応の柔軟性がさらに向上するであろう。

以上の展望を踏まえ、今後も理論と実践を組み合わせながら、鋳造ラインのみならず幅広い工程での適用を目指した最適化手法の高度化を進めていく。

## 謝辞

本取組みにおける共同研究先の(株)豊田中央研究所の皆様および、ご協力を頂いた社内外の関係者の皆様に心より感謝を申し上げます。

## 参考文献

- [1]久保幹雄: Python言語による実務で使える100+の最適化問題, 2025/7/16閲覧,  
< <https://scmopt.github.io/opt100/> >.
- [2] (株)豊田中央研究所、(株)豊田自動織機:日本公開特許公報, 特開2024-134808, 2024/10/4.
- [3]宮代隆平: 整数最適化アプローチへの入門, IEICE 総合大会講演資料, p.17, 2019/3/22.  
< [https://web.tuat.ac.jp/~miya/miyashiro\\_IEICE2019.pdf](https://web.tuat.ac.jp/~miya/miyashiro_IEICE2019.pdf) >.
- [4]Gurobi Optimizer, 2025/7/16閲覧,  
< <https://scmopt.github.io/opt100/> >.
- [5]SCIP (Solving Constraint Integer Programs), 2025/7/16閲覧,  
< <https://scipopt.org/> >.
- [6]CBC (Coin-or branch and cut), 2025/7/16閲覧,  
< <https://github.com/coin-or/Cbc> >.

## 著者紹介



山根 有輝也

# 最適化技術を活用した自動車向けプレス金型設計の効率化

Application of Optimization Techniques to Automate the Structural Design of Automotive Press Dies

山本 雄介<sup>\*1</sup> 加賀谷 俊樹<sup>\*1</sup> 千賀 大嗣<sup>\*1</sup> 小倉 夏樹<sup>\*2</sup>

Yusuke Yamamoto Toshiki Kagaya Daishi Senga Natsuki Ogura

\*1 ダイエンジニアリングセンター \*2 (株)豊田中央研究所 イノベティブ研究部門

## 要旨

自動車向けプレス金型構造設計のより高度な自動化を目指し、機械学習と最適化技術を活用。過去設計データを基にした類似型選定、多目的最適化による複数部品配置、単目的最適化を用いた部品詳細設計により、設計作業の効率化と高い設計品質を実現した。

キーワード: 多目的最適化、単目的最適化、自動化、プレス金型、構造設計

## Abstract

Aiming for more advanced automation in the design of press dies, machine learning and optimization techniques were applied. The process incorporates similar model selection from historical design data, multi-objective optimization for component arrangement, and single-objective optimization for detailed component design, enabling enhanced efficiency and superior design quality.

Keywords: multi-objective optimization, single-objective optimization, automation, press dies, design

## 1 はじめに

自動車産業において、個性的で魅力的なデザインの実現が市場競争力を左右するなか、その具現化に必要なプレス金型は年々複雑化しており、市場への早期導入の難易度を一層高めている。この課題に対応するため、設計現場では3D CADを基盤とした設計モデルの寸法や形状をパラメータ(数値)として定義し、変更していくパラメトリック設計が普及しており、設計ルールや制約条件を部品の3Dモデルに取り込むことで、寸法変更や設計改良の効率性と柔軟性を大幅に向上させることが可能となった。また、さらにルールベースでのモデル作成作業や品質チェックの自動化を進めてきた(図1)。しかしながら、これらの技術のみでは、設計者の知識や経験に依存する部品間の調整の完全な自動化には限界があり、この領域が効率化のボトルネックとなっていた。一方、近年急速に進展している機械学習や最適化技術は、こうした未解決の課題への有効なアプローチを提供する可能性がある。本稿では、これらの技術を金型設計へ応用し、経験則に基づく工程の自動化を目指すことで、設計品質の向上と設計効率化の両立を図り、設計技術の革新に寄与することを目的とする。



図1 プレス金型設計効率化の4ステップ  
Fig.1 Four Stages of Press Die Design Efficiency Improvement

### 1.1 自動車外板パネル製造工程

自動車外板パネルの製造では、生産効率を向上させるため、素材の搬送と複数工程の連続自動加工が行われる。その工程は主に「絞工程」「抜工程」「曲工程」の3つに分けられ、それぞれに高いデザイン性と成形精度を両立させる高品質なプレス金型が求められる。絞工程では鋼板の立体成形、抜工程では余剰部分の切断、曲工程では寸法や形状出しの最終成形が行われる。1つの金型には数百の仕様や部品が適用され車種・生産工場ごとに都度設計を行っている(図2[1])。



図2 自動車外板パネルの製造工程  
Fig.2 Manufacturing Process of Automotive Outer Panels

今回の設計効率化の対象としている「抜工程」は、主に上下型本体と、カム、パッド、鋼材の3つの主要構造部品によって構成される(図3)。他の工程に比べて部品点数が多く加工部位が車種ごとに变化しやすいため、配置調整が複雑となり設計者の経験に依存する部分が多いことが課題となっている。

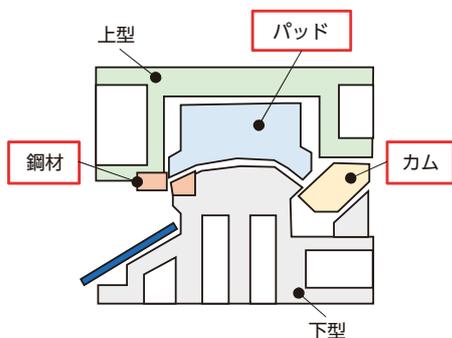


図3 プレス金型抜工程の主要構造部品  
Fig.3 Primary Components for the Press Die Trimming Process

## 1.2 金型設計手順と効率化のアプローチ

プレス金型の設計は主に「過去類似型の選定」「構想図(基本設計)」「正式図(詳細設計)」の3つの手順に分けられる。過去の類似型設計データを選定し、活用することにより設計自由度を適切に絞り込み、過去の暗黙知や設計経験を構想図設計に生かすことが可能となる。また、構想図と正式図と最適化設計の関係は図4[2]のようになっており、以下に手順ごとの効率化のアプローチ方法を示す。

### 1) 類似型の選定

はじめに過去の設計実績から類似した金型を選定する際には、機械学習を用いて過去の設計データやパラメータを分析し、最も近い設計3Dデータを特定する。これにより、各設計者の記憶に頼っていた設計開始データ選定が効率化され、より最適な出発点を提供することが可能となる。

## 2) 構想図の作成

次に基本構成部品配置を設計する構想図作成においては、設計自由度や考慮すべき目的関数が多岐にわたるため、多目的最適化手法を活用し、自動化を進める。

## 3) 正式図の作成

最後に詳細な寸法や仕様を設計する正式図作成では、自由度や目的関数が減少するため、単一の最適解が求められる単目的最適化技術を活用し、自動化を進める。

本稿では、これら3つの設計手順について図3で記載したカム、パッド、鋼材の3つの主要構造部品の設計効率化への具体的な技術アプローチを個別に述べる。

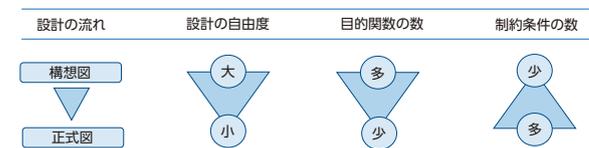


図4 設計の流れと最適化設計の関係[2]  
Fig.4 Relationship Between the Design Flow and Optimized Design

## 2 類似型の選定(カム)への機械学習の活用

### 2.1 カムと過去設計データの概要

カムは、プレス機の上下運動を斜め方向の運動に変換する主要構造部品である。カムは加工方向や大きさが多岐にわたり、多数の構成部品の個数や形式の変化、および機能を満足させるための部品間干渉の回避をとまなうため、多様なバリエーションが発生している(図5)。



カムの多様なバリエーション

図5 主要構造部品「カム」の代表例  
Fig.5 Typical Variations of the Press Die Component: "Cam"

過去15年以上にわたり、カム設計におけるパラメトリック設計手法は広く定着しており、設計パラメータを含めた一定数のカム設計データの実績が蓄積されている。今回、この豊富な設計実績を基に、高類似度の過去データを自動選定する仕組みの構築を目指した。

## 2.2 類似型の自動選定アルゴリズムの作成

今回の取り組みでは、以下の開発ステップを通じて類似型特定アルゴリズムを構築した。

### 1) 過去実績のデータベース作成

過去の設計データからカムの各パラメータを抽出し、データベース化する作業を実施した。このプロセスではCAD付随のプログラム機能(以下、CADVBA)を活用し、1カム当たり約400を超えるパラメータ抽出を自動化するシステムを構築。これにより、効率的なデータ蓄積と管理が可能となり、汎用性の高いデータベースを形成することができた。

### 2) 類似型特定アルゴリズムの作成

まず、設計パラメータへ与える影響度が高いと思われる“設計前時点で知り得る情報”(以下、設計前情報)を、ベテラン設計者へのヒアリングを通じて“カム加工長さ”など7項目抽出した。次に、過去実績データベースを基に統計的手法や機械学習などで分析し、設計前情報の精査および重要度を定量的に定義した。そして、これらの設計前情報から類似度を算出する独自のモデルを構築した。

さらに、CADVBAを活用することで、設計者がCAD上から起動できるツールとして開発した。新規設計対象の設計前情報を選択/入力すると過去実績データベースを自動で探索。類似度の最も高い過去データを特定し設計パラメータを3Dモデルへ自動的に反映するという一連の仕組みを開発した(図6)。



図6 類似型自動選定アルゴリズムの概要  
Fig.6 Outline of the Similar-Type Auto-Selection Algorithm

## 2.3 結果

開発した類似型自動選定システムを実際に運用した結果、設計者が手動で最後まで設計したカムの設計パラメータと、システムによって引用されたカムの設計パラメータを比較すると、一致率85%という高水準となった(図7)。この結果から、本システムを活用することで、類似型の特定が迅速化され、初期段階から高い完成度のデータに基づいて設計を進めることが可能となり、設計効率

化に大きく寄与することが示された。

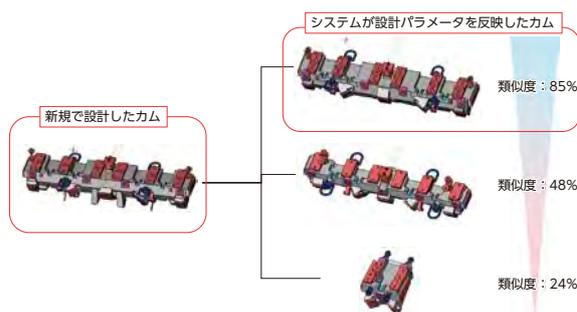


図7 「カム」類似型自動選定結果  
Fig.7 Results of Automatic Similarity-Based Selection for “Cam”

## 3 構想図(パッド)複数部品配置への多目的最適化の活用

### 3.1 パッド構造と設計内容の概要

パッドは、加工刃がパネルを切断する前にパネルを押さえ込む役割を担っている主要構造部品である。パッドは複数の構成部品で構成されており、それぞれが適切な配置位置を取り合う構造となっている。そのため、部品間の位置調整には多くの設計工数がかかることが課題となっている。

構成部品のなかでも、以下の3部品がとくに重要な役割を果たしている：

- 1) ウレタン：パネル全体を均一に押さえる役割を担う。
- 2) スライドプレート：パッドと上型間で摺動を行い、円滑な動作と位置決めを実現する。
- 3) サイドピン：パッドの落下防止とストローク管理を担う。

本稿では、これら3部品を対象に、多目的最適化技術を活用した配置調整の自動化を試みる(図8)。

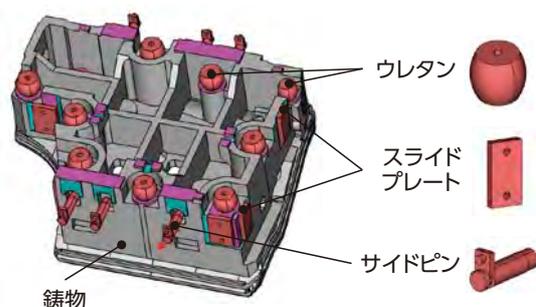


図8 主要構造部品「パッド」の構成部品  
Fig.8. Principal Structural Units of the Press Die Component: “Pad”

### 3.2 設計変数と定式化

まず、各部品の機能と設計要件を定量的に整理し、3部品以外の部品と干渉が発生しない配置可能なエリアを決定する。次に、3部品の機能が最大限発揮される配置を目的関数として数式を定義し、配置可能エリア内のXY座標を探索するような最適化を部品ごとに実施した。その結果、3部品同士の最適配置は競合することがわかった(図9)。しかし、これらの部品間の優先順位はプレス設備仕様やパネル形状、金型の全体構成など多くの要素によって複雑に分岐するため、同一の計算プロセスで自動化することが難しい。そこで、今回は多目的最適化による自動探索を活用することで、3部品が互いに成立し、かつ、優先順位の多様な解を複数算出する方法を採用した(図10)。

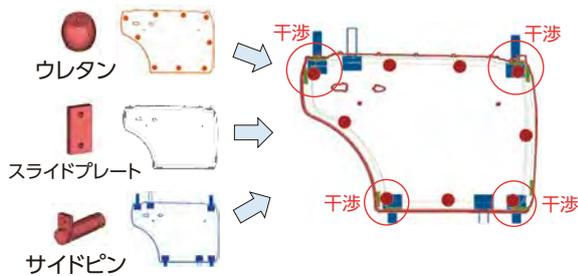


図9 構成3部品の単目的最適化結果  
Fig.9 Single-Objective Optimization Results for Principal Structural Units

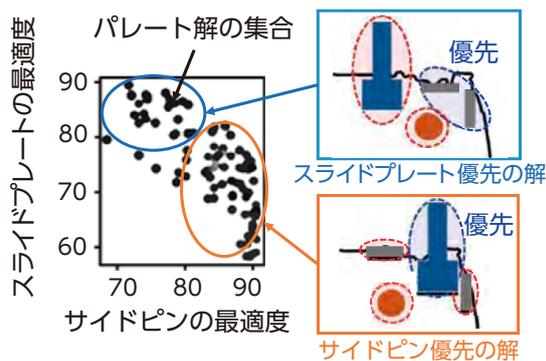


図10 構成部品の多目的最適化結果  
Fig.10 Multi-Objective Optimization Results for Principal Structural Units

### 3.3 パレート解の層別

多目的最適化アルゴリズムによってパレート最適解の集合は約1,400件が得られた。このなかから設計者が最適な解を選定することは困難であり、設計作業の負担が増加することが想定される。そこで、今回の取組みではこれらパレート解の層

別を行い、設計者が効率的に候補を選定できる仕組みを構築した。

具体的には、各パレート解における部品座標に対して階層的クラスタリングを実施することで、部品座標が近い類似解を集約し約5件程度まで選択肢を絞れるような仕組みとした(図11)。

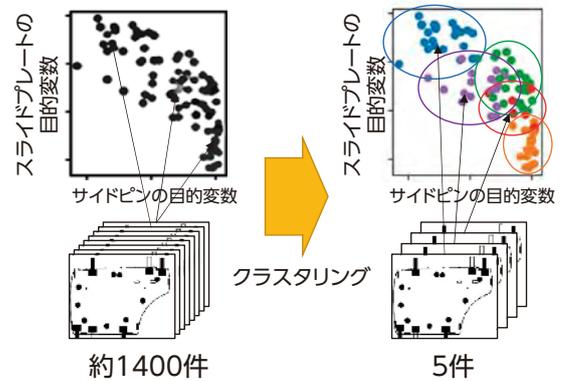


図11 パレート解のクラスタリング結果  
Fig.11 Cluster Analysis of Pareto Solutions

さらに、ここまでのPythonの処理とCADVBAを連携させることで、設計者が容易に使用できるようにCAD上から起動できるツールとして開発した。設計者は必要事項をCAD上で選択/入力するだけで自動で多目的最適化が実行され、クラスタリングされた少数の選択肢から適した解を選択、その結果がCADモデルへ反映される。このツールにより、従来設計者が実施していた試行錯誤プロセスを削減し、設計品質の安定化も可能となった。

### 3.4 結果

開発したツールを実際のパッド設計に適用したところ、パッド設計工数を従来比で24%削減することが確認できた(図12)。また、ツールで出力された部品配置と設計者が手動で設計した配置を比較した結果、目的関数をよりよく再現した配置で部品配置される場合もあり、より高い設計品質が実現できた。

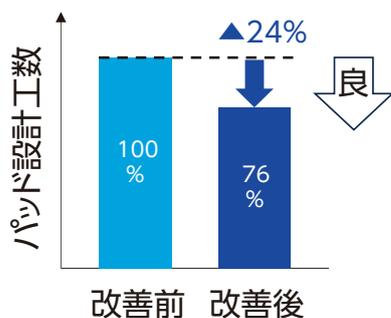


図12 「パッド」自動最適化設計の設計工数効果  
Fig.12 Design Labor Efficiency Effect of Optimized Automated Design for "Pad"

## 4 正式図(鋼材)部品詳細設計への単目的最適化の活用

### 4.1 鋼材の概要

鋼材は、金型の保全性や加工成立性を確保し、強度が懸念される箇所用いられる局所的な高強度部品であり、「締付け」「位置決め」「切刃」の機能を有する。配置場所と形状や数の都度変化は、設計作業の煩雑化による工数増加を引き起こしている(図13)。

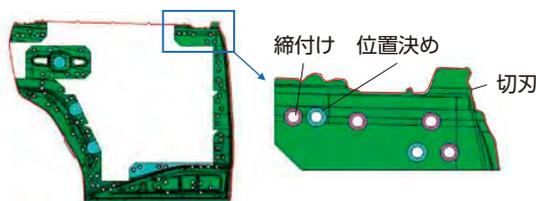


図13 主要構造部品「鋼材」の概要  
Fig.13 Description of the Press Die Structural Component: "Cutting Steel"

### 4.2 鋼材設計フロー

鋼材の設計工程は、4つのフローに分かれる。

#### ①鋼材配置決め

製品の外形形状に合わせて鋼材の平面的なサイズやレイアウトを決定する。鋼材1つの最大サイズや分割位置などの制約を厳守する必要がある。

#### ②締付け個数決め

鋼材の平面サイズに基づき、既定の設計規格を適用することで締付けの個数を一意に決定する。

#### ③締付け配置決め

締付けを平面的に配置し、締付け間のピッチや鋼材端からの最小距離など制約を満たしながら最適な位置を割り出す。

#### ④作りこみ

①②③で決めた平面配置を元に、鋼材の三次元的な形状を作りこんでいく。

④は従来のパラメトリック設計により効率化が進んでおり、今回は、鋼材設計フロー①②③の自動化を目指す(図14)。

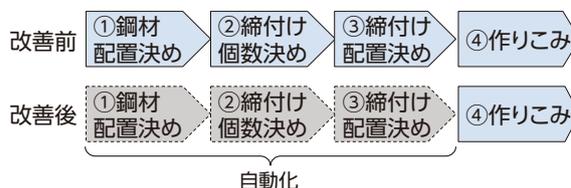


図14 「鋼材」の改善前後の設計フロー  
Fig.14 Design Flow Before and After Refinement of "Cutting Steel"

### 4.3 設計変数と定式化

まずは、既存の鋼材設計要領の整理と、過去の設計データ分析から設計者が持つ暗黙知を抽出した。それらを数式化し、画像処理も活用することで数式では表現しにくい形状特性も加味した計算式を作成した。この計算式を使い①②はルールベースで構築できたが、③は①②の結果とパネル形状などにより複雑な分岐が生じるため、今回は最適化技術による自動探索を採用した。具体的には、鋼材形状の内側に締付け配置可能エリアを設定し、このエリア内で締付け同士を結んでできる図形の面積が最大となる締付け配置を探索している。これにより、「鋼材全体に満遍なく締付けを配置したい」という設計者の感覚と合致する締付け配置が高効率で実現できた(図15)。

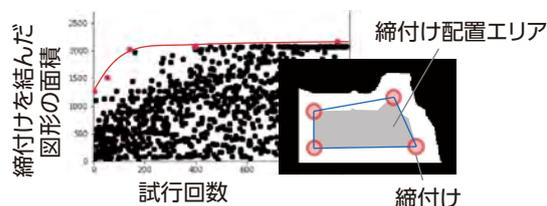


図15. 締付け穴配置の単目的最適化結果  
Fig.15 Results of Single-Objective Optimization of Bolt Hole Layout

さらに、ここまでのPythonの処理とCADVBAを連携させることで、設計者が容易に使用できるようにCAD上から起動できるツールとして開発した。設計者は必要事項をCAD上で選択/入力すると①②③の処理が実行され、④のパラメトリック設計に反映される。

## 4.4 結果

以上の自動化プロセスにより、鋼材設計工数を従来比55%削減する成果を得た(図16)。また自動化により作業の再現性が向上したことで、設計者ごとの品質ばらつきが収束し、設計の信頼性が向上している。

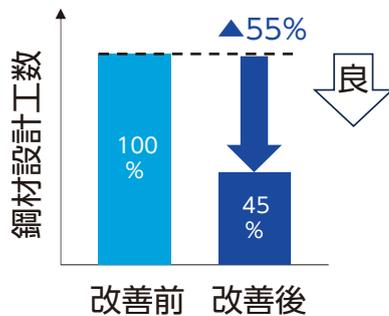


図16. 「鋼材」自動最適化設計の設計工数効果  
Fig.16 Design Labor Efficiency Effect of Optimized Automated Design for "Cutting Steel"

## 5 まとめ

従来の自動車向け外板プレス抜型の設計では、過去車種の類似型選定や部品間の配置調整など設計者の経験則に依存している部分が多くあった。しかし、今回の機械学習と最適化技術および画像処理技術のCAD連携により、多くの暗黙知を形式知化することができ、設計の効率化および設計品質の安定と向上につながった。この成果は、(株)豊田中央研究所との共同研究による成果であり、その多大な貢献に深く感謝の意を表す。引き続き本技術のさらなる拡張を通じ、設計技術向上を目指して取り組んでいく。

### ■参考文献

- [1]<https://japanforming.com/ホワイトボディの組み立てとジグソーパズル/>
- [2]北山哲士. “工学系のための最適設計法-機械学習を活用した理論と実線-”(2021)

### ■著者紹介■



山本 雄介

加賀谷 俊樹

千賀 大嗣

小倉 夏樹



# 最適化技術の 最先端へ。

豊田自動織機と産業技術総合研究所との技術連携

## Introduction

茨城県つくば市にある「産業技術総合研究所(以下、産総研)」という施設をご存じだろうか。産総研は日本に3つしかない特定国立研究開発法人のひとつで、1882年に設立された農商務省地質調査所を起源とする100年以上の歴史を持つ研究所だ。多様な研究領域を持つ総合力を生かし、エネルギーや環境などに関する課題、少子高齢化対策など、さまざまな社会課題に対して、その課題解決と社会実装に挑んでいる。全国に12か所の拠点を持ち、常勤研究員は約2,200名、さらに企業、大学、公的研究機関などの研究者を外来研究者として6,000名以上受け入れている。また、年間3,000件を超える共同研究により、企業との連携を強化している。産総研は、いわば“日本の産業技術の頭脳”的な存在と言ってもいい。この産総研と当社は密接なかかわりがある。それは2016年まで遡る。

当時、佐々木副社長と産総研の理事長である中鉢氏が双方の現場を視察し、意見交換した際、佐々木副社長は産総研の保有技術とその能力の高さ、当社との親和性に感銘を受け、産総研との共同研究を進めることで、必要な革新的技術を獲得できると確信。2016年4月にできた「冠ラボ制度」を活用し、同年10月「豊田自動織機-産総研 アドバンスト・ロジスティクス連携研究ラボ」を設立。共同研究を開始した。冠ラボ制度とは、企業ニーズに特化した研究室を産総研内に設置し、産総研の研究者と企業出向者が共同で研究する制度。現在、当社をはじめ、NECや日立、ソフトバンクなど23の企業が冠ラボを設置し、研究活動を進めている。

今回は、この冠ラボで当社と産総研がどのような研究をしているのか、共同研究によって得られるものは何かなど、過去と現在を交えながら紹介していく。

## ALラボで研究者と出向者が共同研究をする意義とは?

当社と産総研の共同研究の場は「AL (Advanced Logistics) ラボ」と名付けられ、フォークリフトなど機器の自動化・自律化をはじめ、先進的な物流ソリューションのための要素技術を研究している。具体的にはAIを活用したロボティクス、データ分析、最適化などの研究で、今回焦点を当てるのが、そのなかの「最適化技術」だ。この最適化技術について、先行開発部部長であり、過去にはALラボ長も務めた加藤紀彦はこう話す。



加藤 紀彦  
先行開発部

「最適化とは、制約条件のもとで目標となる目的関数を最大化または最小化することを指します。近年ではAI、画像処理技術などのデジタル技術の進展により、効率的かつ正確な最適化結果を迅速に求めることが可能となりました。一方で、私たちを取り巻く環境を見ると、日本社会では少子高齢化が加速し、とくに物流業界において人手不足が深刻化すると予測されています。さらに、ECサイトの拡大にともない物流が活性化することで、迅速性、正確性、効率性の向上がより求められるでしょう。こうした課題に対し、産総研との共同開発により、最適化技術を活用したソリューションを提供することで、当社の社会的な価値や存在感を一層向上させることが期待されます。加えて、日本トップクラスの研究者とひざを突き合わせて議論し、研修することで、人材育成にも大きな成果を上げられると考えています」。

# 最適化技術研究の足跡

## ALラボで学んだ「最適化技術」とは?

ALラボでは設立以来、約3年を1サイクルとして区切っている。2016年から2019年までが第1期、2020年から2022年までが第2期、2023年から2025年までが第3期である。ここでは過去、産総研に出向した当社の社員たちが、どのような研究テーマに取り組んできたのかを紹介する。

### ——岡本和也の場合



岡本 和也  
先行開発部  
先行開発第三室

## 日本トップクラスの研究者のすごさを実感した瞬間

2019年3月から2023年5月まで産総研に出向していたのは、先行開発部 先行開発第三室の岡本和也だ。岡本は「30歳を目の前にして、何か新しいことに挑戦したいと思っていました。そこに産総研への出向の話があり、いいチャンスだと感じ、思い切って飛び込みました」ときっかけを話してくれた。岡本は産総研で物流領域における最適化アルゴリズムの開発に着手。その代表的なものに「高速仕分け自動倉庫アルゴリズム」がある。これは当社の高浜工場内にある垂直搬送機の動作を最適化するための技術開発だ。

「この垂直搬送機は、エレベータ式の垂直搬送機よりも倍以上の搬送能力を持ちます。しかし、当時はその制御にA\*(エースター\*<sup>1</sup>)というアルゴリズムを用いており、その実力を十分に発揮できず

にいました。そこで、この垂直搬送機の動作最適化アルゴリズムの開発に取り組みました」。

A\*の限界を感じていたが、どのようなアルゴリズムが最適なのか、迷っていた。そこで北海道大学の教授であり、人工知能学会の前会長である野田五十樹先生にアドバイスを求めた。

「先生にこの課題をお話ししたら『これならMaxSAT\*<sup>2</sup>が使えるかもしれない』とすぐに答えを出され、九州大学の越村先生を訪ねに行きました」。

野田先生はさっそく越村先生に要件を話すと、確かにMaxSATのアルゴリズムで解決できそうだと返答を頂き、野田先生の北海道大学、越村先生の九州大学、そして豊田中央研究所とも共同でMaxSATを用いた搬送動作の最適化に取り組んだ。

「野田先生は専門家ではないとおっしゃりながらも、MaxSATの可能性をすぐに示唆されたのには驚きました。日本トップクラスの研究者は、課題に対して何が本質なのかを瞬時に捉え、その解を導き出すことができるのだと感心するばかりでした」と岡本は当時を振り返る。その後、MaxSATのアルゴリズム開発を進め、搬送能力を9%向上させることに成功。その後、実際に高浜工場で実用化するため、強化学習を加えた開発をさらに重ねたことで、搬送能力は13%にも引き上げることができた。

- \*1……経路探索アルゴリズムの代表格で、地図アプリやゲームなどに使用される手法。スタート地点からゴール地点までの最短ルートを探すのが得意。
- \*2……すべての条件を満たせない場合でも、できるだけ多くの条件を満たすように解を探す手法。満たさなければならぬ条件をすべて満たすなかで、評価関数を最大or最小化する解を探索できるアルゴリズム。

## ALラボ時代の研究経験を元に現場での実装化に励む

2023年5月に帰任した岡本は現在、基礎アルゴリズムを構築してそのシステムを現場に実装する活動を推進している。岡本はALラボ時代、先述した「高速仕分け自動倉庫アルゴリズム」以外にも、パーツセンターを舞台にピッキング作業の最適化シミュレーションを構築し、作業性の向上を図る研究もしていた。その経験を元に通過型倉庫の配荷作業をスムーズに行うため、配置工程の最適化

に取り組んでいる。

「ALラボで取り組んだパーツセンターのピッキング作業シミュレーションはシーズベースでしたが近年、以前よりも倉庫の最適化に注目が集まっています。そのため、現在取り組んでいる仕事は、ALラボでの経験を生かせる好例だと思っています。通過型倉庫は入荷した商品を保管せず、店舗ごとに商品を仕分けてすぐ出荷する物流センターのような役割を持っています。倉庫内には商品が置かれた棚があり、作業員が配送先ごとに商品をピックアップしながら一方通行の通路を進んでいきます。配送先の規模によってピックアップする商品数はバラバラなので、場所によっては渋滞が発生し、作業効率が低下してしまう課題を何とかしたいと考え、取り組んでいます」。

岡本は渋滞のメカニズムを分析するなど、解決策に当たったが、現場固有のルールもあり、当初は難航したようだ。

「商品を載せるカートがいっぱいになると、そのカートはほかの場所に置き、空のカートを持ってきて作業を続けるため、それも考慮しながら棚の配置を考えたり、作業員がショートカットできる経路をつくったりと試行錯誤を重ねています」。

現場導入を成功させるため、さまざまな条件や制約を乗り越え、渋滞が発生しそうな場所をうまく分散する方法を検討している。

「ALラボ時代に日の目を浴びなかったシミュレーション技術が、いま仕事で活用できていることに喜びを感じています。ただ、実装すれば終わりではありません。棚の配置をさらに改善していきながら、物流センターの皆さんが持続的に運用できる方法も考えていかなければなりません。ワーキングリーダーとして、メンバーたちに開発技術を社会実装につなげていく進め方をしっかり考え、伝えていく役割もあります」と岡本は力強く語ってくれた。

## 物流領域の枠を飛び越え、ほかの領域にも挑戦していきたい

「日本トップクラスの研究者の皆さんと交流できたことで、とても大きな刺激を受けました。また、開発を進めていくうえで、ニーズをベースとした開発はそのニーズを満たすことがゴールとなりますが、シーズベースの場合は自分たちでゴール

を設定しなければなりません。そこを明確にして開発を進めていく大切さを痛感しました。そのほかにも開発したものを実用化するためには、研究者と当社の思惑のズレをいかに小さくするか。その重要性も学びました。今後はALラボで開発したものをL&Fと一緒に実用化していきます。当社の物流部門のソリューションを高めていくために、お客様の困りごとを解決するだけでなく、こちらから有意義な提案ができるようにしていきたいと思っています。さらにいまは物流領域を担当していますが、その枠を飛び越えて、他領域にも挑戦していきたいですね」。

岡本は今後の目標を語ってくれた。ALラボでの経験は学術的な知識だけでなく、これから取り組んでいく仕事への意欲までも培ってくれたようだ。

## ——岡部大輔の場合



岡部 大輔

先行開発部  
先行開発第三室

## AIを学べば学ぶほど、人間の卓越した能力を実感

多くのラボメンバーが当社から直接、産総研へ出向するという形で研究開発に取り組んでいるのに対し、先行開発部 先行開発第三室の岡部大輔は、少し異色の経歴を持つ。入社3年目の冬、2018年2月から岡部は技術を習得するために、NEDOプロジェクト(国の助成を受けた産学連携プロジェクト)に参画。そこではコンビニでロボットの活用に向け、商品のピッキングや補充に関する研究を実施していた。岡部は、ディープラーニングを用いた画像認識技術に取り組んでいたが、プロジェクト側の事情により2018年度末に1年間の活動で終了してしまった。そのまま会社に戻る選択もあったが、加藤部長からALラボに誘われ、

2019年から産総研でラボのメンバーとして、研究活動を始めることになった。

「2019年からはディープラーニングの経験を生かし、AIによる梱包箱選定に取り組みました。当社の高浜工場のパーツセンターにおいて、数ある課題のなかのひとつに『26種類ある配送箱を選んで、そのなかに大小・形状もさまざまな部品を効率的に梱包したい』というニーズがありました。熟練者なら瞬時に各部品の特徴を把握し、どの部品とどの部品を組み合わせれば配送箱にきっちり収まるのかがわかりますが、経験の浅い作業者の場合は、やり直しがあったり時間がかかったりします。そこでディープラーニングを活用し、熟練者の経験に頼らなくても、梱包する部品リストを入力するだけで、その部品を高効率に詰められる配送箱を弾き出してくれる仕組みをつくらうと考えたのです」。

岡部は熟練者6人がこれまで梱包してきた15万件の記録をAIに学習させようと考え、正解率80%を目指すなか、70%の結果を残すことができた。ただ、このシステムは現場での実証実験まで進んだものの、実用化には至らず悔しい思いをした。

「AIを学べば学ぶほど、人間の卓越した能力をあらためて実感します。当時はAIやビッグデータ活用が普及し始めた頃でしたが、集めたデータを適切に活用する難しさを思い知らされました」と岡部は語る。

## 幾何学的手法と統計的手法の2つを用いて課題を解決

ただ、この経験は現在、現場で取り組んでいる仕事に生かされることとなる。岡部は2021年に帰任し、最適化理論チームのリーダーとして活躍している。そこで、ある物流倉庫向けに注文商品をどのように分ければ1つのコンテナに入るかを事前計算する仕事に取り組むこととなる。

「従来は1種類しかないコンテナにさまざまな商品を入れる際、高速化のために商品の容積情報のみで判断して梱包していました。商品の容積の合計値がコンテナの容積以下であること、容積の大きい商品は同梱しないことを条件にしていたのですが、容積的には問題はないが、形状的に入らない場合も出てきます。そうすると、新しいコンテナを追加しなければならず、その分輸送コストが増

えてしまいます。このコンテナの追加を低減することが現場からの要望でした」。

課題となったのは計算時間だった。1日分の計画を約10分という短い時間で計算する必要があったため、すべての商品の詰め込みパターンを正攻法で計算しては、とても間に合わない。そこで岡部はコンテナに商品を入れた際に発生する隙間と同梱する他商品の寸法の関係から幾何学的に同梱できるかどうかを判別するルールを追加。さらにコンテナ追加が発生した時のデータを集め、その時の商品形状を統計的に分析した。その結果、商品の2番目に大きい面積(中面積)が閾値を超えるとコンテナが追加される可能性が高いことが判明した。そこでコンテナ追加に影響する商品は、同梱を避けるルールも追加した。

「最初のアイデアは幾何学的手法に基づいたルール、2つめは統計的手法に基づいたルールと言えます。これを従来のアルゴリズムに追加してみると、コンテナ追加率を7%低減することができました。これは一日あたり500箱以上のコンテナの削減効果があり、現場の困りごと解決に貢献できたと考えています」。

## 最適化の対象をさらに広げ、ジェネラリストとして活躍したい

今回の課題は、理屈による幾何学的手法とデータによる統計的手法の2つのルールを追加したことによって、効果を上げたのだが、じつは統計的手法のみでも良い結果が出ていたという。

「データを利用した手法は複雑な問題にも適用しやすい反面、“なぜそう判断したか”を知ることが難しいという弱点があります。幾何学的手法のような理屈ベースの手法は判断根拠が明確ですが、人が理論を構築するので複雑な問題に適用するのは知識や労力が必要です。現場で使える技術をつくるためには両者の良い面、悪い面を理解して、適切に使い分けることが大切だと感じました。

また現場での実用化を目指す、当然、現場での前提条件に合わせなければなりません。計算リソースがなかったり、コスト増が受け入れられなかったり……。そういった面を加味しながら課題解決に取り組んでいくことの重要性を学びましたね」。

先行開発はどうしても技術先行で進めたくなる

ものだが、この技術を活用することで、何がうれしいのか。岡部はそのことを常に前提として考えるようになったと言う。それがまさしくALラボで経験したことによる成長を意味するのだろう。

「ALラボでの活動を含めて、これまでは物流領域を主眼に最適化を行ってきましたが、今後はその対象をもっと広げていきたい。実際、モータの設計や制御、エネルギーマネジメントなど、広い分野にテーマを広げています。モータの分野は熟練者による経験則で最適化されている部分が多いため、ビギナーであっても簡単に熟練者と同等以上の仕事ができるよう最適化を目指しています。エネルギーマネジメントも今後必要になる分野。非常に大規模で複雑なシステムの制御になるため、人力では最適化しきれないことが予想されます。そこに、最適化理論を用いてよりよくできるように技術を確立していきたいですね。このような活動によって、成果を積み上げていくことで、最終的には社内でも研究活動ができるような環境をつくれれば、最高です！」。

岡部は今後、ジェネラリストとしての立場から仕事を包括的かつ俯瞰的に捉え、自身がなすべき道をしっかりと見据えているようだ。

## ——岡本浩伸の場合

### 岡本 浩伸

先行開発部  
先行開発第三室



## 研究そのものも、 マネジメントの手法も学んだ

先行開発部 先行開発第三室でGMを務める岡本浩伸は、2020年4月から産総研に出向した。当時、岡本は自律度の高い多数の物流ロボットを用いたシステムの研究の立ち上げ準備にかかわっていた。

「この研究を行うためには、どの研究者に相談す

ればいいのかを選定する最初期の頃です。研究内容や方向性もまだ明確でなかったため、L&Fと相談しながら進めていきました」と岡本は話す。フォークリフトの自律化の研究にも携わった。これは人が状況に応じて操作しているようにフォークリフトが周囲の環境を認識し、その時点で最も効率的な動きができるようにするもので、現在、副ラボ長を務めている大隈隆史先生からテーマを頂いた。これも多数台物流ロボットの研究同様、初期の立ち上げを行った。

「当初は具体化された課題に対する研究開発をするつもりで出向したのですが、実際は研究の立ち上げに携わり、最初はちょっと肩透かしを食らったような感じでした。しかし研究を軌道に乗せるために、さまざまな先生と話し合い、そもそも研究課題は何か、どのような研究方法が最適かを考えたり、その先生からより適任である先生を紹介していただいたりして、とても楽しかったですね」。

そして岡本は、次第にこの経験が将来のマネジメント業務に生かせるのではないかと気づいていく。立ち上げ業務は今後、研究者や当社からの出向者が研究に没頭できるよう環境を整える仕事でもある。岡本は当時40代前半だったこともあり、今後のことも考えると自身が研究に没頭するよりも、このような環境をつくり上げる仕事のほうが、自分のためになると考えるようになった。

「実は以前、自分の知識や方法論の引き出しが少なく、マネジメントでうまくいかなかった苦い経験がありまして……。今回、数多くの先生とコミュニケーションすることで、足りなかった引き出しが増えたと実感しています」。

この2つの案件の立ち上げを経験したことで、岡本は研究をうまく進めていくための大切な要素も学んだという。それは研究者とお客様をうまくつなぐことだ。

「研究者にはシーズがあり、お客様（この場合はL&F）にはニーズがあり、それぞれ目的が異なります。たとえば、研究者は研究の成果を論文にまとめて発表したい。お客様は課題を解決し、生産性を向上させたい、といった具合に。両者の間にはどうしても目的の違いが生じてしまうため、私のような立場の人間がその間に入り、うまく調整していく必要があります」。

当然のことだが、大切なのはまずコミュニケーション。お互いの実現したいことをしっかりと伝

え、理解してもらおうこと。そして役割を分担すること。たとえば、要素技術は研究者に任せ、お客様特有の事案に関しては出向者が行うやり方も効果的だと言う。また、岡本はこんなことにも取り組んだ。

「研究者の皆さんが論文をまとめる際に有用なデータを提供して、私たちと共同で研究開発をすることへのメリットを感じていただくことも大切です。そうすることで、研究者の皆さんも私たちの依頼に対して気持ちよく応えてくださるので」。

研究者とお客様の目指すゴールが完全に一致することはほぼないと思われる。だからこそ、少しでもズレをなくし、お互いに気持ちよく研究できる環境をつくり上げることが大切だと岡本は語った。

## 生き生きと研究に向き合う 研究者を見て、気づいたこと

そのほかにもALラボでの経験は岡本に多くの学びをもたらした。なかでも研究者の皆さんとのコミュニケーションにより、これまでにない多角的な考え方を学び、問題解決の幅が広がったと言う。

「とくに印象に残っているのは、大隈先生が話されていたことです。大隈先生は人と機械の協調をテーマに研究を進められていたのですが、大隈先生曰く『自動化の先に協調がある』と言われていました」。

製造業において、近年では人機械協調の言葉を耳にするものの、当時の一般的な解釈だと最終目標が「自動化」としてしまいがちだ。しかし、大隈先生は完全な自動化は難しいとし、機械が得意なこと、人が得意なこと、その両者が手を取り合っものづくりやサービスを行うのがあるべき姿ではないかと提唱する。このように自身の常識に一石を投じるような意見や考え方に触れられるのは、産総研に出向する醍醐味ではないだろうか。

「あとは研究者の皆さんが、とにかく楽しそうにしている。生き生きと研究に向き合っている姿が印象的でした。それを見た経験から、私もGMの立場からメンバーたちが楽しく、生き生きと仕事ができる職場環境づくりを意識するようになっています。組織内で働くことは、さまざまな制約やルールがありますが、そのなかで最大限、メンバーのみんなが能力を発揮し、楽しく働いてもらうためには何ができるだろうか、と考えるようになったんです。これはずっと当社内にいたら気づけなかったことです」。

岡本はこのような意識になったことで、現在はメンバーとのコミュニケーションの機会をより充実させ、個々のパーソナリティや目標を把握することで、生き生きと働ける環境づくりに奔走している。

## AIやデータサイエンスなどの 専門組織をつくりたい

岡本は7月から先行開発部から品質統括部へ異動した。部の名称だけ見ると、まったく他分野の業務に携わるように思えるが、実際はデータサイエンスを活用し、全社的に品質機能の強化を支援することが使命であり、これまでの先行開発部や産総研での経験を十分に生かすことができる仕事だという。

「たとえば、各事業部向けに検査工程にAIを活用したり、その活用のためのガイドラインをつくったりしたいと思っています。これからは最適化技術を品質の観点から活用していきたいですね」と抱負を語ってくれた。さらに岡本は続ける。

「将来、当社がものづくりだけでなく、AIやデータサイエンスの分野においてもブランド力を発揮できるようになればいいなと思っています。そのためには、データサイエンス専門の研究開発拠点ををつくりたいです」。

産総研への出向は人を大きく成長させる。岡本はこの先の当社が強化すべき領域をも見定め、その実現を視野に入れている。

次に紹介するのは2021年(第2期)からと2023年(第3期)からの出向者2人。現在、ALラボで研究に取り組んでいる真っ最中だ。2021年から出向している加藤拓朗はEC開発部から、2023年から出向している菊池駿介は先行開発部からの出向となる。

## ——加藤拓朗の場合



加藤 拓朗

先行開発部  
産業技術総合研究所

### 思わぬ方法で 華麗に課題を解決した 研究者のアイデアに脱帽

加藤拓朗は2021年4月から産総研に出向し、先述した岡本浩伸が初期の立ち上げにかかわった自律度の高い多数の物流ロボットを用いたシステムの研究や、自動運転フォークリフトでのパレット位置・姿勢認識・荷役制御の研究を行った。現在はそれに加え、自律型ケースハンドリングロボットシステムにおけるケース配置最適化にも取り組んでいる。

そのなかでも加藤が最も印象に残っているのは、自動運転フォークリフトでのパレット位置・姿勢認識・荷役制御の研究だという。この研究の歴史は深く、ALラボが設立された2016年当初の第1期から取り組んでおり、加藤が引き継いだものとなる。倉庫内外でフォークリフトを自動化させるためには、当然、トラックに載ったパレットを降ろしたり積んだりする荷役作業が必須。しかし、トラックに載っているパレットを降ろす際、パレットは必ずしも地面に対して水平になっているとは限らない。地面そのものが傾斜していることもあれば、トラック自体が積み荷の重みで傾いている場合もある。そのような状況でもフォークをパレットの差し込み穴に対し、正確に差し込むことができなければならない。パレット開口部の上下幅は90mm前後。角度が2度ズレルだけでも、パレットに触れてしまうのだから、その難しさが想像できる。

「この課題を解決するポイントは、フォークとパレットの位置関係とピッチ角（傾き）を高精度に把握することです。産総研の高精度画像計測技術を

応用してピッチ角推定誤差±1度以内を目標に研究を進めていきました」。

フォークとパレットの位置関係とピッチ角（傾き）を高精度に把握するためには、そもそも取り付けカメラとフォークの位置関係を正確に把握できなければならない。この取り付け位置関係を正確に把握するため、どのような手法が最適なのか、加藤は悩んだという。そこで産総研のベテラン研究者にアドバイスを求めた。

「私は当初、カメラを取り付けたい位置とフォークリフトの設計寸法から計算するぐらいの案しか持っていませんでした。しかし、その先生はこのカメラ外部パラメータのキャリブレーション（取り付け位置・姿勢の計測）も、画像計測で高精度に実現してしまう手法を提案してくださいました。取り付け誤差が生じる可能性を排除できない私の案の課題をエレガントに解決してくださいました」。

加藤は画像認識以外にもセンサーによる解決方法にもトライした。トラックからパレットを降ろす際は画像認識技術を元にした制御を使い、トラックにパレットを載せるときは、センサーを使うやり方を考えたのだ。

「こだわったのは、カメラもセンサーもまったく新しいものを追加するのではなく、自動機において標準的に搭載されるものを活用したこと。これは実用化を見据えたコストダウンのためです。いくら高精度のカメラやセンサーを使っても、それを導入する際、大幅なコストアップになってしまっただけでは、現実的ではないからです」。

加藤はつねにゴールである現場での実用化を見据えて研究を重ねていった。プログラムを書き、それを実験用のフォークリフトに組み込み、実作業をさせてみる。不具合があれば、プログラムを書き直し、またトライしてみる。その繰り返しによって次第に精度が上がっていった。

「産総研には私たちがいる棟の隣に実験棟があり、そこにフォークリフトの実験機が置いてあります。だから、すぐにプログラムを反映し、動作を試すことができるんです。産総研の研究環境にはかなり助けられていますね」と加藤は話す。

### 抽象的なニーズをより具体化、 明確化するスキルを習得

加藤は出向してから約4年経ち、今年が出向の

最終年だ。通常、1期は3年単位で区切られていくため、加藤の場合は2期に跨っての長期出向となる。

「長く産総研に在籍させていただき、さまざまな分野の研究者の皆さんと交流することで、視野が広がり、問題解決の幅も広がりました。それ以上に、抽象的なニーズをより具体化、明確化していくスキルが身に付いたと思っています。ニーズというものは、常に明確になっているわけではなく『何となくこんなことしたい』といったぼんやりとしているものが多いです。そのような不確定性の高いものに対し、どのように実現していくのか。何が課題になるのか。どんな着地点(ゴール)を目指せばいいのかなどをハッキリさせていく力。研究者の皆さんは常にそのようなことをされているので、皆さんと密に接することでその知識や手法を学ぶことができたと思っています」。

産総研での出向は今年で終了するが、ここでの経験と知識を元に、加藤は当社に戻り、研究してきた内容を実装化できるよう努めていきたいと抱負を語ってくれた。

## ——菊池駿介の場合



### そもそも 「解が存在するかどうか分からない」 この課題に向き合う

菊池駿介は先行開発部から2023年5月、産総研に出向した。出向当初は先述した岡本和也の研究内容を引き継ぎ、積み付けロボットに関する最適化アルゴリズムの開発を半年間行い、その後、FC(燃料電池)フォークリフトに搭載されているレギュレータの故障予測の開発を半年間取り組んだ。そして2024年度からはFCシステムの自動搭

載設計をテーマに研究をしている。

「FCフォークリフトの心臓部であるFCユニットには、限られたスペースに発電や冷却などの機能部品、接続部品など2,000点以上のパーツがひしめき合っています。設計の初期段階では、一部の機能部品は形状が決まっていますが、配管や配線のような部品間の接続部品およびフレームやブラケットのような筐体部品は形状に自由度があります。設計要件を満たすような形状を自動出力できれば、FCユニットの設計者の作業負担が軽減されるはず。私たちはそれを目指して研究に取り組み始めました」。設計担当者との議論をくりかえし、最初の自動化の研究対象は配管形状の生成とした。

この研究は産総研の研究者3名、当社のメンバー2名などを含めた8人ほどのグループで取り組み、菊池はそのなかでも研究方針の決定、アルゴリズムの実装や研究者と当社の間に入って、情報の橋渡し役などを行った。

「研究で課題となったのが、ものすごく根本的なことでした。それはそもそも解が存在するのかわからないこと。『この問題は解が存在します!』とすぐに断言できないんです。それでも研究を進めなければならないので、先行研究で多かったグラフ探索アルゴリズムを用いて試してみました。グラフ探索アルゴリズムは、与えられた対象のなかから目的に合うものを見つけ出したり、最良の経路を見つけ出したり、条件を満たすものを列挙したりする手法で、カーナビなどに用いられています。ただ、この手法は解が存在する場合に有効であり、今回のような狭く複雑な空間で瞬時に解があるかどうか分からない場合、現実的な時間で解くことが難しいとわかったのです」。

そこで菊池は解が存在するかどうか分からない状態でも探索可能な「遺伝的アルゴリズム」に切り替えることにした。遺伝的アルゴリズムとは、生物の進化に着想を得た最適化手法で、機械学習、組み合わせ最適化問題などで広く利用される。この場合、配管を遺伝子にたとえることで、FCユニットという空間内を効率的に探索し、解を求めていこうと考えた。結果、この手法を選択することで、設計者がつくる配管形状と同等レベルを自動出力できるようになった。いまは遺伝的アルゴリズムで生み出した配管の3Dモデルを元に設計担当者、配管メーカーや実際に配管を組み付けるメンバーと一緒に評価している段階だ。

## 実装化まで経るべき、 「4つのステップ」を学んだ

この研究を通して菊池は、実装化までどのような段階を経て研究を進めていけばいいのかを学んだという。

「人工知能学会前会長の野田五十樹先生から、技術要素から実装までのステップとして4つの段階があることを教えていただきました」。菊池が教わったのは、この4つだ。

**ステップ1：やりたいことを明文化せよ**

**ステップ2：定式化せよ(人の感覚やイメージ、固定観念を削ぎ落とし、共通言語化する)**

**ステップ3：式がやりたいことを表しているかどうかをチェックせよ**

**ステップ4：実装せよ**

「この4つのステップを教えていただき、情報整理の仕方が大切だと実感しました。漠然とした問題であっても、研究関係者間で共有し、理解できる

粒度まで深掘りし、整理することが重要です。メンバーそれぞれの固定観念やイメージは違って当然ですが、みんながバラバラな解釈をしていると研究開発がうまく進まないと実感しました。先生の話聞いてから、全員が同じ方向を向けるよう数式や説明図などに落とし込むことを意識するようになりました」。

## AIの視点からモノやコトを語れる エンジニアを目指す

「産総研に出向して約2年経ちますが、学びが多く、とても有意義な時間を過ごしています」。

菊池は満たされた表情でそう言った。野田先生から学んだ4つのステップだけでなく、ハード(モノ)の視点に加え、AIの視点から技術を見ることもできるようになった。最適化や統計的なデータ処理の思考(コト)も身に付けることで、新たな技術を研究していく楽しさがさらに深まったという。

「今後はAIを絡めた視点でモノやコトを語れる

## 近視眼的な思考にならず、 視野を広く持とう！

産総研に出向されているメーカー系の方々に共通して言えるのは、自身がするべきことへの使命感を強く持っていること。ここで学んだ技術を手の内化し、必ず自社に持って帰るといったマインドが積極的な言動に表れていると思います。豊田自動織機の出向者については、創意工夫と仕組み化への意欲を感じます。専門分野においては研究員に頼らざるを得ない部分がありますが「自分たちでやろう！」という意気込みを持った方々が多いですね。

副ラボ長として皆さんにアドバイスができることがあるとするなら「視野を広く持とう！」ということ。短い期間で集中して研究をするため、どうしても視野が狭くなってしまふのは仕方ないことだと思います。ただ、ときどき立ち止まり、いったん引いて考えてみる。研究内容を俯瞰して捉えてみ

る。そういうことをすると、また新しい世界が見えてくるものです。産総研では定期的に勉強会や各分野の交流会も開催しているので、会に参加することで新たな人脈もつくれるかと思います。このような機会もうまく活用してほしいですね。



### 大隈 隆史

1999年、奈良先端科学技術大学の博士後期課程を修了。産総研の前身である通商産業省工業技術院電子技術総合研究所の研究員や米・コンビア大学の客員研究員などを経て、現在は産総研の人間社会拡張研究部門の副研究部門長とALラボの副ラボ長を務める。

ようなエンジニアになっていきたいと思っています。ハード設計のなかにはまだまだ大変な作業があります。そのなかにはこれまで以上に効率化、最適化できることがあるはず。産総研で学んだ最適化技術をもっと広めていきたいですね。

菊池はいま、これまでとは違う環境に身を置くことで、研究のエッセンスを貪欲に吸収しているようだ。産総研への出向には、研究者の探究心をこれほどまでに刺激する魅力があるのだろう。

## ——ALラボの未来

### 横町 尚也

先行開発部  
産業技術総合研究所  
ALラボ



## 自身をさらに成長させたい方々 すべてにALラボの門戸は 開かれている

「2016年から発足したALラボは、第1期、第2期で先々行開発をしていった結果、第3期の現在でその成果が出始めていると思っています」。

そう語るのは現在のラボ長である横町尚也だ。横町は当社のエアコンプレッサ開発や研究開発センターで熱マネジメントや油圧などを専門に取り組んできた技術者で、2023年の半ばからラボ長を務めている。

「産総研には量子コンピューターやABCI (AI Bridging Cloud Infrastructure) と呼ばれるAI技術開発のための計算インフラストラクチャなど、研究開発に必要なハードが揃っています。これらはほかの研究施設にはない産総研独自のもので

す。そして何より、産業技術の頭脳とも言える研究者たちと直接コミュニケーションを取り、その考え方に触れられるのは、またとない機会です。産総研で過ごす時間は、確実に出向者を成長させてくれるでしょう」。

第3期は最適化技術をテーマに研究を進めているが、横町は次の第4期でどのようなテーマを設定するのか思案している最中だと話す。

「産総研、当社、そして社会。この3者のニーズを満たすようなテーマ設定が望まれます。時代の流れを読みながら、社会実装に値するテーマをさらに熟考していきたいと考えています」。

先行開発部部長の加藤もこのように付け加える。

「ALラボは現在、茨城のつくばセンター(中央、東)と東京の臨海副都心センターに拠点があり、さまざまな分野の研究者さんたちとひびを突き合わせ、深い議論ができるとても良い環境です。ラボ設立当初は、愛知にある豊田自動織機の開発拠点とはロケーションが離れているため、コミュニケーションが取りにくいといった課題もありましたが、目標を明確にして共有し、産総研研究者、ALラボ出向者、豊田自動織機の技術者の役割を明確にして、定期的に状況を共有する施策をとることで、大きな成果を出せるようになってきました。

研究者の皆さんは、私たちとは考え方や視点が異なり、そのセンスや感性に大きな刺激を受けることも多いです。ALラボに出向したメンバーは、帰任後もその専門性を生かし、各部署でリーダーとして活躍してくれています」。

ALラボへの出向はいわば、産業技術における“道場”へ通うようなものかもしれない。企業という組織とはまた違った環境に身を置くことで、これまでの業務とは違う「研究」という視点や姿勢で臨む。それは出向者の五感を刺激し、確実に世界を広げるだろう。そして道場での修行を終えて帰任したとき、自身がひと回りもふた回りも大きくなっていることに気づくのもかもしれない。



# 表彰

## Commendation

P.58 「自動運転トローイングトラクタ」の意匠が全国発明表彰にて内閣総理大臣賞を受賞

P.61 国内初! 空港制限区域内における自動運転レベル4無人貨物搬送の実運用を開始

# 「自動運転トーイングトラクタ」の意匠が全国発明表彰にて 内閣総理大臣賞を受賞

## The Design of the “Autonomous Driving Tow Tractor” Won the Prime Minister’s Award.

葛谷 賢司<sup>\*1</sup>

Kenji Kuzuya

\*1 知的財産部

### 要 旨

「自動運転トーイングトラクタ」の意匠(意匠登録1700574号)が内閣総理大臣賞を受賞した。受賞した「自動運転トーイングトラクタ」は、レベル4での自動運転(特定条件下における完全自動運転)を可能とし、トヨタL&Fカンパニーが羽田空港において2021年4月より実証実験を実施し、2025年12月より羽田空港にて運用が開始された。本稿では意匠の特徴について紹介する。

キーワード: 全国発明表彰、内閣総理大臣賞、レベル4自動運転、トーイングトラクタ

### Abstract

The design of the “Autonomous Driving Tow Tractor” won the Prime Minister’s Award (Japanese design No.1700574). The awarded “Autonomous Driving Towing Tractor” enables Level 4 autonomous driving (full automation under specific conditions). It has been undergoing demonstration testing at Haneda Airport by Toyota L&F Company since April 2021 and operations began at Haneda Airport in December 2025. This article introduces the key features of its design.

Keywords: National Commendation for Invention, the Prime Minister’s Award, Capable of Level 4 autonomous driving, Tow Tractor

## 1 はじめに

2025年7月1日に公益社団法人発明協会主催の令和7年度全国発明表彰式が開催され、「自動運転トーイングトラクタ」の意匠(意匠登録1700574号)が内閣総理大臣賞を受賞した(写真1)。内閣総理大臣賞は全国発明表彰のなかで、恩賜発明賞に次ぐ上から2番目の賞であり、栄えある受賞となった。

全国発明表彰は、日本国における発明の奨励と育成を図るため、産業界において大きな実績を挙げ、かつとくに優れていると認められた発明・意匠の完成者に賞を授与すべく、毎年開催されている。

今回受賞した「自動運転トーイングトラクタ」の意匠は、トヨタL&Fカンパニーの森博樹さん、薬師忠幸さんによって創作されたものであり、自動運転を行うために必要となる複数のセンサ類を安定的に機能させる要件と、意匠性とを両立させた点が評価された。

なお、本意匠は2021年度のグッドデザイン賞においてベスト100を受賞している。

## 2 意匠の内容

### 2.1 意匠の背景

本意匠は、空港内で旅客の手荷物や貨物を載せたコンテナドローリー(台車)をけん引するレベル4自動運転機能を備えたトーイングトラクタに関するものである(写真2)。

空港では、今後の労働人口の減少に対応するため、自動運転技術による、荷貨物運搬業務の効率化が強く期待されている。

本製品は、人・車両・飛行機などが混在する多様な空港環境下において、独自の路面パターンマッチングなどの高性能化・冗長化された自己位置推定システムや障害物検知システムを搭載することにより、レベル4の自動運転(無人運転)を実現させた。



写真1 全国発明表彰式(左から森博樹さん、伊藤社長、薬師忠幸さん)  
Photo1 FY2025 National Commendation for Invention Ceremony (From left; Mr.Hiroki Mori, President Ito, Mr.Tadayuki Yakushi)



写真2 自動運転トーイングトラクタの外観  
Photo2 Autonomous Driving Tow Tractor

## 2.2 意匠の特徴

本意匠では、これらシステムに搭載された複数のセンサ類を効率的かつ安定的に機能させる要件と意匠性とを両立させるため、センサの選定、配置位置などを検討する開発初期から意匠の視点を入れ、車両全体として一体感のある意匠とした(図1)。



図1 意匠のポイント  
Fig.1 Design Highlights

具体的には、フロントとサイドに配置される2Dのレーザセンサは、レーザを通過させるスリット形状を施したガードカバーで保護することでセンサ機能を確認したうえで破損リスクを軽減させるとともに、ヘッドランプをつなぐ横長のスリットラインと合わせて外観デザインの特徴として昇華させた(図2)。

ルーフ上のセンサ類は、コンパクトにまとめつつスリムに見せる意匠を採用することで、車両上部にボリュームを感じさせず、車両の安定感を演出した。

また、センサ類を保護するガードカバーを含むボディは16mmの厚板鋼板を使用し、直線および平面主体で構成することで過酷な使用環境に耐える堅牢性を確保しつつ、生産性を満足する意匠を実現した。

意匠のポイント  
ワイドで安定感を狙った  
フロントグラフィック

ブルーライト  
(進行先表示ライト)



図2 意匠のポイント (前面)  
Fig.2 Design Highlights (Front)

さらに、大型のリアタイヤに向けてフロントからせり上がっていく連続したウェッジ形状のボディとすることで、力強いけん引性を表現した(図3)。

意匠のポイント  
トーイングの機能を視覚的に表した意匠  
自動運転に必要な機器類をコンパクトにまとめスリムに見せる意匠



図3 意匠のポイント (側面)  
Fig.3 Design Highlights (Side)

## 3 まとめ

今回受賞した「自動運転トーイングトラクタ」の意匠は、レベル4自動運転という高度な機能とトーイングトラクタのボディ形状の美的要素とを高次元に調和させ、機能的かつ統一感のある未来的な外観として表現している。

これにより、国の玄関口である空港の発展に寄与するとともに、人と車両との新しい共存の形を提案することができた。

知的財産部では、当社の技術者が取り組んだ多くの技術的課題に対する成果や創作された意匠を漏れなく出願し、権利化することで当社製品の優位性の確保を図っている。今後も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、開発部署と力を合わせて、努めていきたい。

## ■ 著者紹介 ■



葛谷 賢司

### 受賞者(森 博樹さん)の思い

このたび、全国発明表彰において内閣総理大臣賞という栄誉ある賞を賜りましたこと、心より光栄に思います。

今回の受賞は意匠に対してのものですが、その美しさや独創性のみが評価されたのではなく、レベル4自動運転という人々の生活を大きく変革し、豊かな社会の実現に大きく貢献する技術の重要性と、その実現のために当社が長年培ってきた開発力、そして実現への困難に挑戦した姿勢などが高く評価された結果であると、深く感じております。

ご支援いただいたすべての皆様に心より御礼申し上げます。ありがとうございました。

今後もこの受賞を励みに、さらなる技術革新と社会貢献を目指し、挑戦を続けていく所存です。

# 国内初\*1！空港制限区域内における 自動運転レベル4無人貨物搬送の実運用を開始 First in Japan to Start LV4 Autonomous Operation

深津 史浩\*2  
Fumihiro Fukatsu

佐藤 誠\*2  
Makoto Sato

鈴木 元太\*2  
Genta Suzuki

開田 宏介\*2  
Kosuke Kaida

藤井 浩二\*2  
Kouji Fujii

田島 将太\*2  
Shota Tajima

\*1 当社調べ \*2 トヨタL&Fカンパニー AR開発部

## 要旨

空港制限区域内での物流において重要な役割を担うトーイングトラクタの自動運転レベル4を達成し、特定条件下における完全無人搬送の実運用を開始した。自己位置推定および障害物検知システムの冗長化により安定運行を可能とし、フリートマネジメントシステム (FMS) による作業管理の一元化とインフラと車両の連携による高効率なオペレーションを実現した。

キーワード: トーイングトラクタ、自動運転、レベル4、冗長化、フリートマネジメントシステム (FMS)

## Abstract

We achieved Level 4 autonomous driving for towing tractors, which plays a crucial role in logistics within restricted areas of airport, and began a actual operation of fully unmanned transportation under specific conditions. Stable operation has been made possible through redundancy in self-localization and obstacle detection systems. Additionally, the centralized management of tasks via the Fleet Management System (FMS) and seamless coordination between infrastructure and vehicles have enabled highly efficient operations.

Keywords: Towing Tractor, Autonomous Driving, Level 4, Redundancy, Fleet Management System (FMS)

## 1 はじめに

昨今、生産年齢人口の減少が大きな社会問題となっているが、コロナ禍の影響も相まって、空港制限区域内におけるグランドハンドリング業務の人員不足は深刻な状況にある。当社と全日本空輸(株) (以下、ANA) は、国土交通省航空局による空港イノベーションの一環として、人員不足解消のため、また空港業務の持続的な発展に向け、2025年中のトーイングトラクタ (以下、トーイング) の自動運転レベル4 (以下、レベル4) 実運用開始を目指して取り組みを進めてきた。従来の自動運転レベル3 (以下、レベル3) においては、搭乗者による常時安全監視が必要であるが、レベル4では、特定条件下においてすべての運転タスクが自動で行われる完全無人運転が可能となる (表1)。

表1 自動運転レベル [1]  
Table1 Autonomous Driving Level

システムによる監視	レベル	説明	搭乗者
システムによる監視	Level 5	完全自動運転 常にシステムがすべての運転タスクを実施	搭乗なし
システムによる監視	Level 4	特定条件下における完全自動運転 特定条件下においてシステムがすべての運転タスクを実施	搭乗なし
システムによる監視	Level 3	条件付き自動運転 システムがすべての運転タスクを実施するが、システムの介入要求に対して搭乗者が適切に対応することが必要	搭乗あり
人による監視	Level 2	特定条件下での自動運転機能 システムが前後・左右の車両制御を実施	搭乗あり
人による監視	Level 1	運転支援 システムが前後・左右いずれかの車両制御を実施	搭乗あり

人員不足解消に大きく貢献しうるレベル4の早期実現を目標として、2017年に自動運転トーイングの開発に着手、2019年より、まずは九州佐賀国際空港、中部国際空港において、レベル3での実証実験を重ねた後、国内最大規模の羽田空港へとステップアップして開発を継続した。2021年には、当社電動トーイング「3TE25」ベースに開発したレベル4対応可能な新型自動運転トーイングを導入し、実証実験、試験運用を通して課題の抽出と対策を進めた結果、2024年7月に国内初 (当社調べ) となるレベル4での試験運用を実施、さらに2025年12月には目標であったレベル4での実運用を開始するに至った (表2)。

表2 開発経緯  
Table2 Development History

自動運転レベル	'19年	'20年	'21年	'22年	'23年	'24年	'25年	'26年~
レベル3			▼九州佐賀国際空港 実証実験 ▼中部国際空港 実証実験 ▼九州佐賀国際空港 試験運用					
レベル4				▼国内最大規模 羽田空港へ				
				▼実証実験 ▼試験運用		▼信号機連携実証実験 ▼試験運用 (7月)		▼実運用 (12月)

## 2 羽田空港への導入

### 2.1 走行経路および貨物搬送オペレーション

羽田空港において、トーイングは、駐機場とターミナル建屋間の旅客手荷物搬送、および駐機場と貨物エリア内にある荷下ろし場間の貨物搬送作業に用いられている。ANAとの協議の結果、今回の開発において、まずは貨物搬送作業時の拠点間往復経路の走行のみを自動化対象範囲(図1)とし、それぞれの拠点における航空機への寄付き運転、けん引台車連結などについては、従来通り人が作業を行うものとした(図2)。

なお、人による作業は残存するため、車両については、有人運転時の視認性・操作性などを損なうことなく、自動運転のための機能を付与しなければならない。

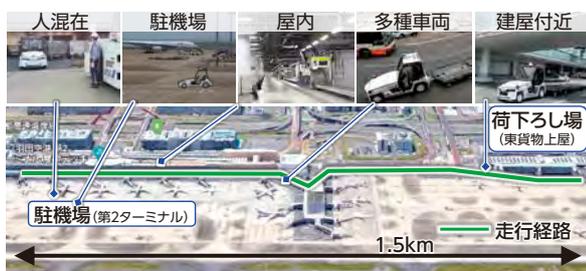


図1 走行経路および周囲環境 [2]  
Fig.1 Work Environment Within the Airport



図2 オペレーション概要  
Fig.2 Overview of Operations

### 2.2 周囲環境への対応

空港内は、多数の作業者と多種多様な車両が混在し、非常に混雑しているうえ、屋外で広大な駐機場、ターミナル建屋に沿った通路、また建屋下の屋内手荷物ソーティング場(荷捌き場)など周囲環境の変化も大きい。自動運転を行うためには、自車の位置を正確に測定する自己位置推定と、自車周辺にある障害物を正確に捕捉する障害物検知の2つ

の機能がとくに重要であるが、このような環境変化の大きな条件下で、安心安全なオペレーションを遂行し、航空機の定時性を確保するためには、各機能に冗長性を持たせることが非常に重要である。

## 3 車両開発内容

### 3.1 主要機能

国土交通省からも、レベル4車両に対しては、システムの冗長性確保が必須の技術要件として求められている。

まず、自己位置推定については、変化の大きな環境下でも高い精度と信頼性を維持するため、以下に示す4種類の異なる自己位置推定装置を統合的に実装した。

- ①路面の模様特徴を解析する路面パターンマッチング(RSPM®: Road Surface Pattern Matching)
- ②衛星測位を利用するGNSS(Global Navigation Satellite System)
- ③周辺環境のレーザ測位を基盤とした3D-SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)
- ④路面に埋設された磁気マーカを検出する磁気誘導(Magnetic Marker Identification)

これらの装置を組み合わせることで、空港制限区域内において、いつでもどこでも常に2種類以上の装置から正確な位置情報を得ることを可能とし、高精度・高信頼性かつ冗長性のある自己位置推定システムを実現した。

一方、障害物検知についても

- ①遠距離検知用3D障害物センサ(LIDAR)
- ②近距離検知用2D障害物センサ(レーザスキャナ)の異なる2種類の装置を各3個ずつ搭載することで監視エリアを多重化し、高い安全性を実現した(図3)。

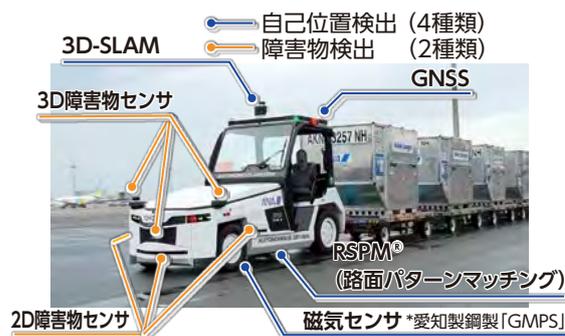


図3 自己位置推定および障害物検知システム  
Fig.3 Self-Localization and Obstacle Detection System

また、車両の運行管理に加え、駐機場や貨物エリアへの行先指示、現場スタッフの作業項目などの情報を一元化する「Fleet Management System (以下、FMS)」を新たに開発、空港側のシステムや信号機などのインフラとも連携し、高効率なオペレーションを実現した。さらには、より高い安全性を実現するため、遠隔監視機能も搭載しており、異常時に迅速に周囲の状況を把握し、周辺の作業員へ通知することも可能とした。

### 3.2 冗長性確保

#### 1) 自己位置推定システムの冗長化

屋外の開けた場所においてはGNSSから高精度な位置情報を取得することができるが、ターミナル下などの屋内はもとより、屋外であっても巨大な金属物である飛行機の機体や建物の近傍、もしくは搭乗ブリッジ下を通過する際などは、取得困難である。これとは逆に、3D-SLAMは柱や梁などの特徴物が多く存在する屋内などの環境では有効だが、屋外の開けた場所では精度確保が困難である。従って、システム冗長化のためには、屋内外シームレスに精度確保が可能な新たな技術の確立が不可欠であった。この課題を解決するため、米国Southwest Research Institute (SwRI)の技術をライセンス利用して新たに開発・導入したのが「RSPM<sup>®</sup>」である(表3)。

表3 自己位置推定方式  
Table3 Self-Position Estimation Method

方式	GNSS	3D-SLAM	RSPM <sup>®</sup>	磁気誘導
イメージ	衛星 アンテナ	3D-LiDAR 点群地図	約60cm RSPM <sup>®</sup> カメラ	磁気マーカ 磁気センサー
条件	屋外の開けた場所	周辺特徴物があること	積雪、光沢路面NG	埋設工事必要
駐機場	○	△	○	(○)
建屋付近	△	○	○	(○)
屋内	×	○	○	(○)

位置推定可否・・・○:可、(○):磁気マーカがあれば可、△:不安定、×:不可

RSPM<sup>®</sup> は、カメラで路面のテクスチャや特徴点を検出し、高精度な位置推定を行う技術である。磁気マーカの設置が難しい場所や広大な空間でも一貫した性能を発揮し、屋内外シームレスに適応可能な柔軟性を備えている(図4)。

さらに、RSPM<sup>®</sup> が苦手な視覚的特徴を捉えにくい路面状態(例:積雪や光沢路面)で性能が制約されるケースも想定し、愛知製鋼(株)製の磁気センサーも搭載、埋設された磁気マーカを検知し、走行することも可能とした。

以上4種類の異なる技術を統合したシステムを構築、動作環境に応じて各技術の特性を最適に活用するとともに、それぞれが相互に補完し合うことで、高精度・高信頼性かつ冗長性のある自己位置推定システムを実現した。

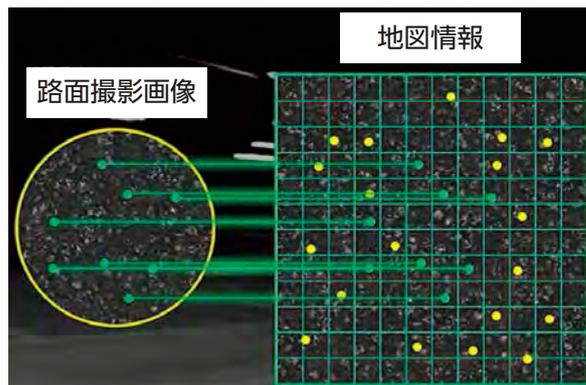


図4 RSPM<sup>®</sup> マッチングイメージ  
Fig.4 Matching Image of RSPM<sup>®</sup>

#### 2) 障害物検知システムの冗長化

トレーシングトラックの安全機能の信頼性を向上させるため、検知システムの冗長化と検知範囲の最適化を行った。近距離検知用の2D障害物センサー、遠距離検知用の3D障害物センサーをそれぞれ車両の前方と左右に配置し、多方向からの情報の同時収集を可能とした(図5)。

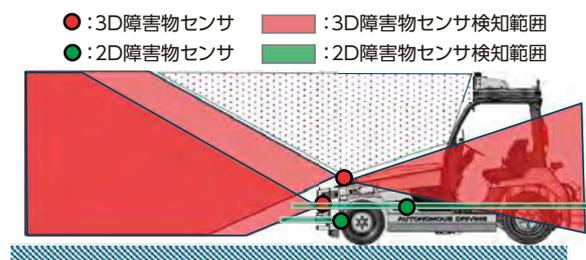


図5 障害物センサーの検知範囲  
Fig.5 Detection Range of Obstacle Sensor

前方検知範囲については、走行速度、経路形状、けん引台車幅などに応じて可変な検知範囲を自動生成することで、多様な運用環境に対応するとともに、検知範囲内に構造物などによる死角が生じる場合には、死角の延長線上に仮想障害物を設定、車両を減速制御し、潜在的なリスクを想定した安全走行を行うことができるようにした(図6)。

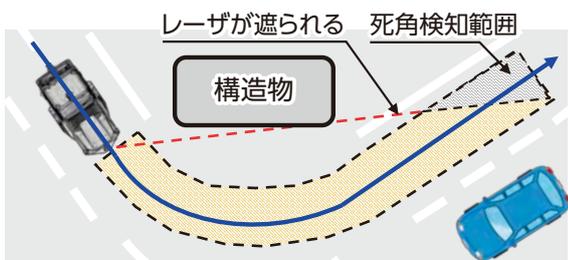


図6 死角検知範囲への仮想障害物設定  
Fig.6 Virtual Obstacle Configuration for Blind Spot Range

また、路面に対する各レーザ反射点の高さについて推定路面に基づいた分析・対策を行い、路面のうねりや車両の揺れに影響されない安定した環境認識を可能としたことで、遠方の物体や点群密度の低い小さな物体でさえも障害物として高精度に検知可能なシステムを実現した(図7)。

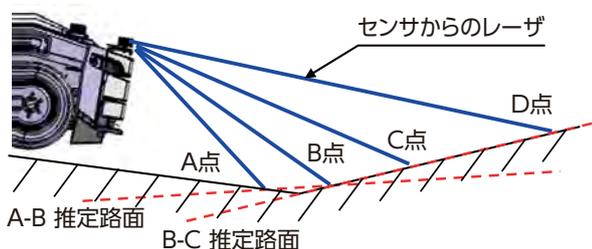


図7 路面位置の推定方法  
Fig.7 Road Surface Position Estimation Method

### 3.3 デジタル技術の活用

#### 1) デジタルツイン技術を活用した検証

羽田空港における実証実験においては、空港の稼働を止めることなく安全かつ速やかに実施しなければならず、評価期間・条件ともに大きな制約があり、十分な検証を行うことが難しいという問題があった。そこで、デジタルツイン技術を導入し、実環境における評価を補完し、網羅的な検証を行うための基盤を構築した(図8)。



図8 デジタルツイン(左:実環境,右:仮想環境)  
Fig.8 Digital Twin (Left: Real Environment, Right: Virtual Environment)

3DCGを用いて周囲空間と機台に搭載されているセンサの情報を仮想環境内に再現し、さまざまな評価シナリオにおいて自動運転に必要な基本機能「認知・判断・制御」の評価、および多様な運用条件下での機能検証を可能とした。

また、国土交通省3D都市モデル「PLATEAU」<sup>[3]</sup>を活用し、飛行機やけん引車両などの空港特有の

物体を追加配置することで広大な実証エリアを仮想環境内に高精度に再現した(図9)。

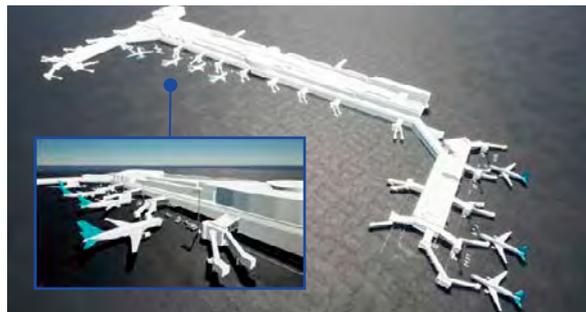


図9 羽田空港3Dモデル[3]  
Fig.9 Haneda Airport 3D Model

この仮想環境内で、他車両の往来・動作も含めたシミュレーションを行うことで、実運用を想定した障害物検知と自動運転制御ロジックの検証を行った(図10)。

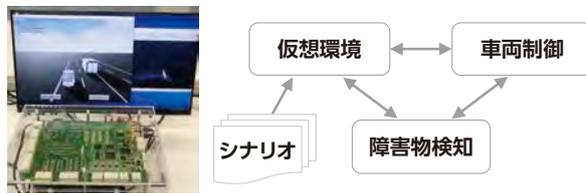


図10 仮想環境を用いた検証基盤構成  
Fig.10 Validation Platform Configuration Using a Virtual Environment



図11 車線変更シナリオ  
Fig.11 Lane Change Scenario

他車両の往来がある状況での車線変更、交差点進入といった、安全面での懸念から実環境での評価が難しいシナリオについても、適切な障害物検知範囲の設計と検知結果に基づく車両制御ロジック検証を行うことができた(図11)。

以上のように、デジタル技術を活用することで実環境における物理試験の制約にとらわれず、正確、迅速かつ柔軟な検証が行えるようになったことから、不具合や設計上の課題の早期発見・対策が可能となり、システム全体の信頼性を大きく向上させることができた。

### 3.4 機能的意匠とエルゴノミクス

#### 1) レイアウトコンセプト

センサの動作要件と美的要素を調和させた機能的意匠の実現と、ベース車両のエルゴノミクスを維持することで、自動運転と有人運転の両立を狙った(図12)。



図12 センサ・コントローラ搭載位置と前後方視野、居住スペース  
Fig.12 Position of Sensor and Controller, Fr/Rr Visibility, Living Space

## 2) 車両FR部

前方の障害物センサは、背の低い障害物も検知させるため、フレームよりも高い位置に配置できない。

そこで、FRデザインカバー内にセンサ搭載スペースを設けた。さらに、センサ検知範囲を考慮した意匠面とすることで、車両とセンサの一体感を醸成した(図13)。

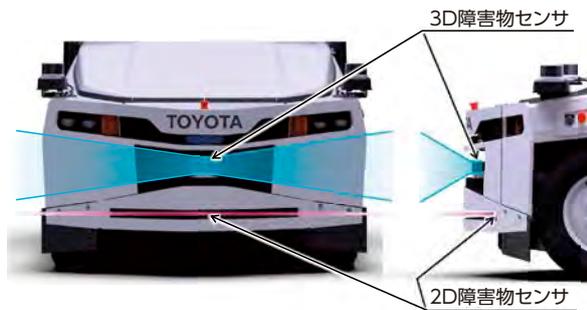


図13 障害物センサの検知範囲  
Fig.13 Detection Range of Obstacle Sensor

障害物センサの検知範囲内にまとまった水が落下すると、水を障害物としてセンサが誤認識し、意図しない車両停止や減速を発生させてしまう。

そこで、意匠面に影響しないセンサ背面に水の流路を構成し水の落下による誤検知を防いだ(図14)。

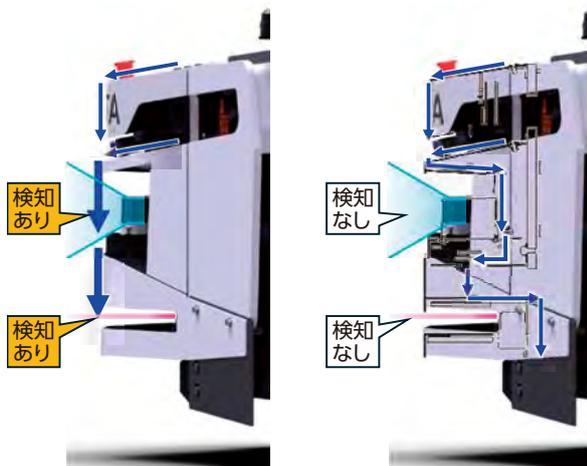


図14 成行き（w/o）の流路（左）と本機台（w/）の流路（右）  
Fig.14 Flow Path of w/o (LH) and w/ (RH) Measurement

## 3) 車両ルーフ部

4種類の自己位置推定装置にはセンサだけでなく、コントローラ類も必要となる。搭載スペースを確保できるルーフ上にコントローラ類を配置した。

さらに、ルーフ上には自己位置推定装置の一つである3D-SLAM用3D-LiDARを搭載している。そのセンサ検知範囲に入らないよう、厚みのあるコントローラ類はルーフ中央に集中配置した(図15)。

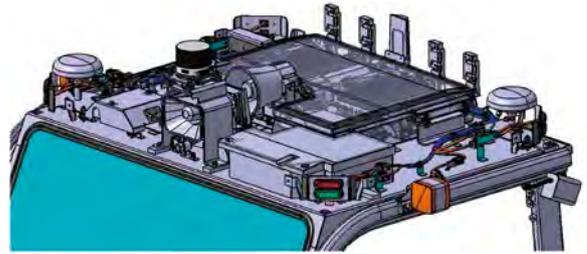


図15 ルーフ上機器搭載状態  
Fig.15 Condition of Loaded Equipment on the Roof

同時に、意匠カバー上面を傾斜のある断面にすることで、ルーフ上をコンパクトに見せ、多くの部品が高所に配置されることによる不安定な印象を回避した(図16)。

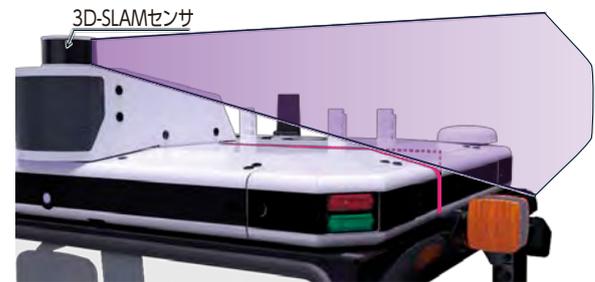


図16 3D-SLAM用センサ検知範囲とルーフカバー断面形状  
Fig.16 Detection Range of 3D-SLAM Sensor and Cross Section Shape of Roof Designed Cover

一方で、本車両は有人運転も想定しており、後方視野、とくにトーイングで頻繁に行うけん引台車連結作業時の視野範囲は重要である。そこで、周辺部品搭載に必要なスペースを精査し、自動運転コントローラを低位置に搭載した(図17)。

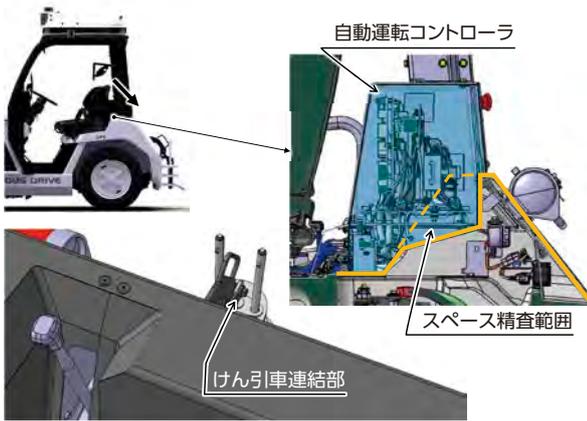


図17 けん引車連結部の視認性と自動運転コントローラ搭載状態  
Fig.17 Visibility of Dolly Connection Part and Condition of Automation Controller

## 4 FMS(Fleet Management System)開発内容

### 4.1 インフラ連携した運行管理

グランドハンドリングの現場は、何十年も積み重ねられてきた多能工化された現場のため、現状オペレーションのサービスレベルを維持しつつ、自動化を推進する必要があった。

全体オペレーションのなかで、搬送を一部自動化に置き換えた有人/自動の混在運用をもとに、現場が徐々に自動化に移行しやすく、かつ他空港への容易な横展開が可能な空港向け標準FMS（運行管理システム）を、当社社会のT-Hive（T-Hive, B. V.）やTIIS（当社ITソリューションズ）とも連携し開発を進め、実用化した（図18）。

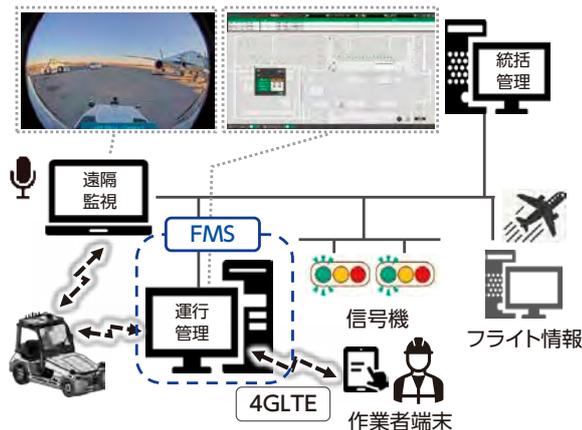


図18 FMSシステム構成図  
Fig.18 FMS System Configuration Diagram

### 4.2 信号機との連携

信号機システムは、地上車両の移動を安全かつ円滑に監視、制御するために使用される重要なインフラである。

交差点通行に際して、自動運転車両、有人運転車

両が混在走行するなか、信号機と連動することで自動運転車両が交差点へ進入する際には他進行方向からの車両は停止する制御を行い、運用効率と安全性を向上させた（図19）。

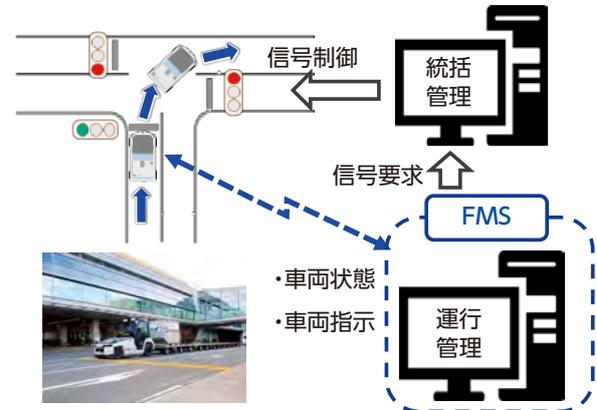


図19 信号機とFMS連携  
Fig.19 Integration of Traffic Signals and FMS

### 4.3 情報セキュリティ対応

本システムは、航空機運航情報、貨物情報、運用システムなど社内外ネットワークと接続されているため、空港運営の安全性・信頼性を脅かす不正アクセス、データ漏洩、サービス妨害などのインシデントは絶対に防止せねばならない。

図4に示した通り、当社・顧客ネットワークは閉域網部にあり脆弱性リスクは低いが、外部接続可能なインターネット部はリスクが高い（図20）。

このようなリスクを排除するため、第三者機関による脆弱性診断を行い、対策を講じることで、不正アクセス、情報漏洩といったインシデントを防止する堅牢なセキュリティシステムを構築した。

今後も継続的なセキュリティ強化や、最先端技術の導入により、FMS運用の安全性と持続可能性を追求していく。

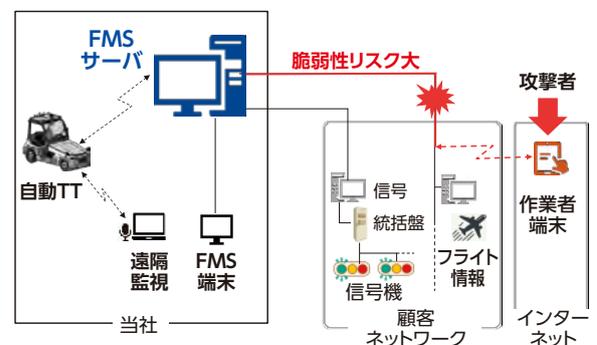


図20 情報セキュリティネットワーク  
Fig.20 Information Security Network

## 5 まとめ

自動運転トローイングは、2017年の開発着手以来、国土交通省やANAなどの協力により各空港での実証実験・試験運用を重ねた結果、目標であった羽田空港でのレベル4実運用を2025年12月に開始するに至った。グランドハンドリング作業の人員不足解消に大きく貢献しうるものとして、空港業界からの注目・期待は大きく、国内外から早期導入を期待する声を多数頂戴している。また、今後は空港のみならず、工場や港湾などでの構内搬送作業も対象として、FMSやデータ活用も含めたパッケージでのソリューションとして顧客価値向上・提供範囲拡大を目指し、引き続き開発を進めていく。

### ■参考文献

- [1]国土交通省資料「自動運転のレベル分けについて」より抜粋して加筆
- [2]Map data © 2025 Google
- [3]国土交通省 PLATEAUウェブサイト  
(<https://www.mlit.go.jp/plateau/>),  
「国土交通省3D都市モデル PLATEAU」を加工して作成

### ■著者紹介■



深津 史浩



佐藤 誠



鈴木 元太



開田 宏介



藤井 浩二



田島 将太

### 開発者の思い

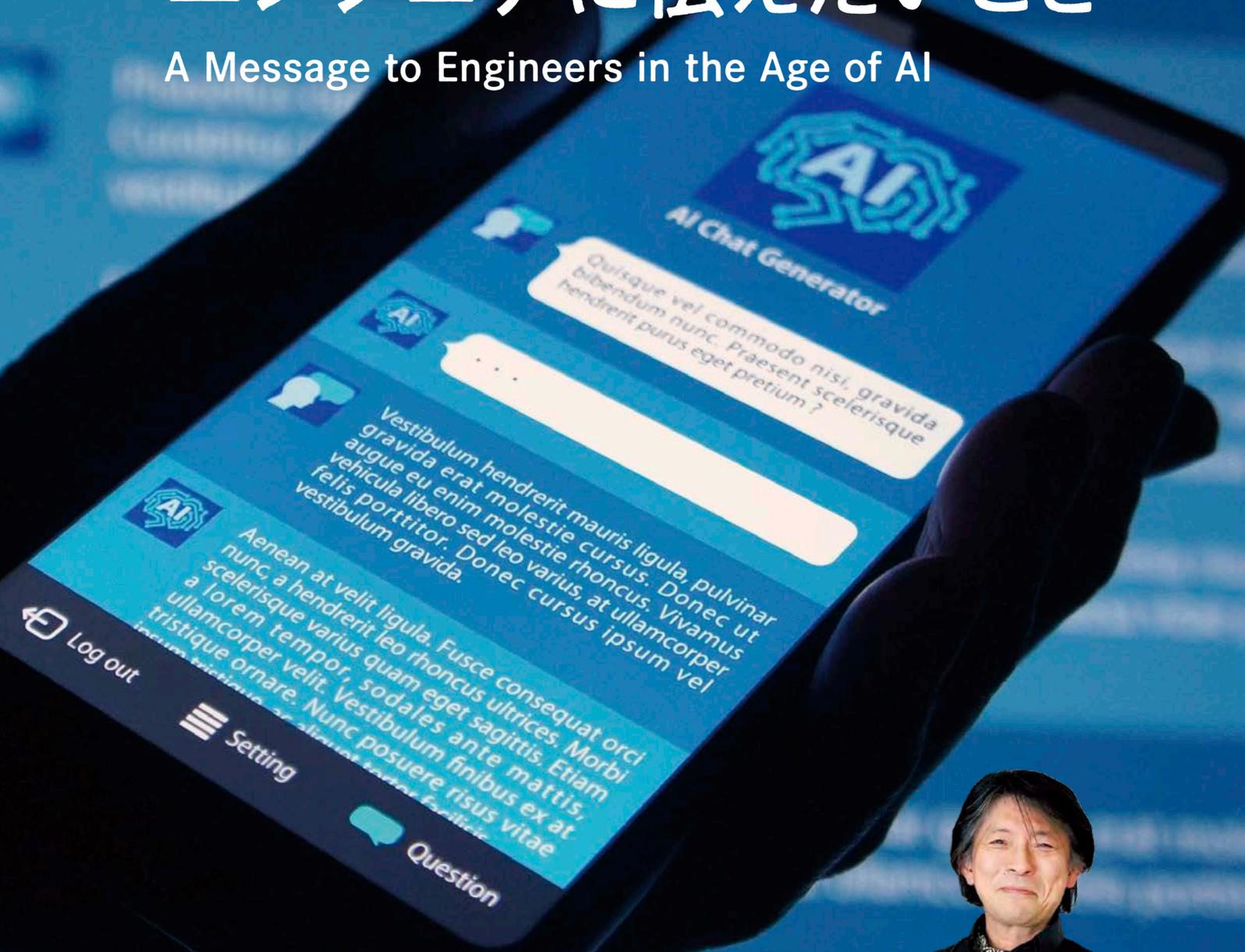
2025年12月、国内最大規模となる羽田空港で、レベル4自動運転トローイングの実運用がついに開始されました。最初に羽田空港での運用が決まった際、その過密な環境から「この空港での自動運転は絶対無理だ」と感じたほどの困難がありました。しかし、国土交通省航空局やANAなどの皆様と運用ルールを一つひとつ議論し、何度も協議を重ねた結果、2025年の実運用開始という大きな目標を達成することができました。運用開始の瞬間を迎えた時には、本当に胸が熱くなる思いでした。また、初めての製品や活動に対し、高浜工場の各部門が協力を惜しまず、一丸となって取り組んでくださったことも大きな助けとなりました。このチームの結束なくして今回の成果は得られませんでした。心から感謝いたします。

今まさに物流業界は変革の時を迎えています。単に製品を売るだけでなくソリューションを提供する、「モノ売りからコト売り」へと進化していく流れが加速しています。今回の開発が、その先駆けとなり、未来へ続く自動化の大きな礎となれるよう、私たちはこれからも技術開発に挑んでいきます。



# AI時代に求められる エンジニアに伝えたいこと

## A Message to Engineers in the Age of AI



慶應義塾大学理工学部

**栗原 聡** Satoshi Kurihara

慶應義塾大学理工学部 教授、人工知能学会 会長、慶應義塾大学共生知能創発社会研究センター センター長。慶應義塾大学大学院理工学研究科修了。博士(工学)。NTT基礎研究所、大阪大学、電気通信大学を経て、2018年より現職。科学技術振興機構(JST)さきがけ「社会変革基盤」領域統括。オムロンサイニックエックス社外取締役、総務省・情報通信法学研究会構成員など。マルチエージェント、複雑ネットワーク科学、計算社会科学などの研究に従事。著書『AIにはできない—人工知能研究者が正しく伝える限界と可能性』(角川新書)、『AI兵器と未来社会キラーロボットの正体』(朝日新書、2024)、監修『サクッとわかる ビジネス教養 AIの基本』(新星出版社、2025)、編集『人工知能学事典』(共立出版、2017)など多数。



## はじめに

2023年11月にChatGPTが登場してからほぼ2年が経過、さらに高性能な生成AIがどんどん誕生している。人を凌駕するデータを一度に処理できることから、言葉を扱うほぼすべての領域において人の能力を越えつつあると言えよう。当然、言葉にはプログラム言語も含まれる。Deep Learningが登場した頃は、ブルーカラーの仕事が奪われるといった論調が多かったものの、生成AIが登場してからはホワイトカラーの仕事が奪われるといった懸念が多く指摘されるようになった。事実、IT企業においてAI導入に基づく人材採用の鈍化に関するニュースを耳にする機会も増えつつある。では、エンジニアという職業はどうなのか？

エンジニア職は両方にまたがるものの、ITエンジニアなどは典型的なホワイトカラーであり、決して対岸の火事ではなくなってきた。とはいえ、100%がAIに置き換えられるわけではないし、結果としての人とAIとの棲み分けが進むことになる。棲み分けが進むということは、AIがやるべきタスクに従事しているエンジニアは残念ながら仕事が奪われる可能性が高いということを意味する。以下、その背景や今後におけるAIの進化、ならびに、あるべき人と進化するAIとの共生社会における人の有り様について考察する。

## 1 AIは経済の底上げに寄与するのか

ChatGPTを出発点とする生成AIは、経済、とくに日本の経済の浮揚に寄与するのか？ と問われれば、声を大にしてYESと答える。着実にかつ広範に行政や民間でのビジネスで生成AIの活用を根付かせねばならない。最先端のGPT-5やGeminiといった生成AIを例にすれば、圧倒的な文書を読み込んでの要約や、異なる文書を読み込んでの内容の比較分析、それを表などにする作業、また電子メールや報告書などでの定型文からプログラミング、言いたいことを箇条書きしてからのフォーマルな文書化、さらにはマーケティング調査から分析などは、AI自体が分析するためのプログラムを自ら生成し実行して分析するなど、今やその進化のスピードは異常と言えよう。

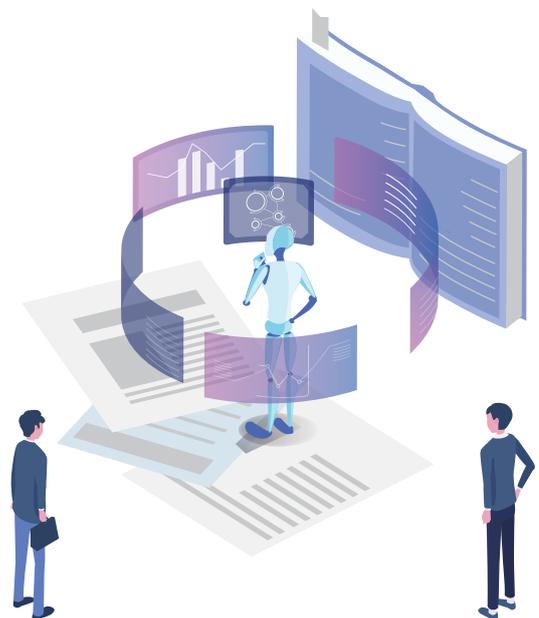
想定される生成AIの市場規模<sup>[1]</sup>は2027年には1,200億ドル



図1 生成AIの市場規模(試算)<sup>[1]</sup>  
Fig.1 Generative AI Market Size (Estimated)

そして私たちはこれらの作業に、これまでどれほどの時間を割いてきたことか。報告書の内容を理解し整理する作業において、もっとも時間がかかるのは、報告書を読み込む部分である。大量の文書を一瞬で取り込み、さらに数分での確に要約や整理してくれれば、人はそれを理解し判断に活用する意思決定の部分のみに集中することができる。そして、今やAIが読み込むことができる情報の量と処理速度は人のそれをはるかに凌駕するレベルとなった。

今までであれば、いろいろなデータを収集して分析する作業において、データを集めたことや、それらを横断的に分析した努力も評価の対象であったのかもしれないが、本来評価されるべきはそれら複数データから導出された分析結果と分析結果に対する考察であろう。そして、「何をしたいのか」をAIにちゃんと伝えれば、そのための面倒な作業をほぼほぼAIがやってくれるようになったのだ。人はその結果を評価し判断に利用する部分のみに



脳を使えばよい。AIからの結果をどのように理解し、評価し、判断に活用するのか、という能力がこれまで以上に重視されることになる。淡々と与えられたタスクをこなせばよい、という歯車のな認識のままだと、それこそAIに仕事を奪われることになる。

生成AI境界は多いに盛り上がっているし、今やAIエージェントといった、次のフェーズに注目が移りつつあるなど、たしかに部分的にはものすごく勢いを感じる。しかし、日本全体としてのDXやAI導入についての実態を見ると盛り上がっているとは言えない。生成AIの活用についても他の先進国に比べてChatGPTを使ったことがある人の割合を見ても日本は低い方である。

総務省の2024年版情報通信白書によると、生成AIを利用している個人が10%程度とのことである。比較対象とした欧米や中国とは大きな開きがある。生成AIに対するネガティブなイメージが先行してしまったのかもしれない。明らかに活用している層とそうでない層の二極化がじわじわと進んでおり、それはおおかたにおいてべき乗的な分布、すなわち利用している層は極めて少数ということになる。生成AIの活用は間違いなく日本の経済浮揚にとって必要であるものの、現状では盛り上がる状況からほど遠いところにいるように思える。しかし、生成AIを活用している他国であっても、主な用途は効率化であり、効率化だけでは本格的な経済浮揚への寄与は限定的なものとなるであろう。

本格的な経済浮揚にAIが寄与できていないことは、米国ビッグテックを含め、AIの利活用においてしっかりした利益を出せていないことから明らかである。巨額の投資がされているにもかかわらずそれに見合った利益が出せていないとすると、それはバブル状態であることを意味する。なぜに利益が出せていないのか？ それはまだAIを本来の用途に活用できていないからである。効率化はあるべき用途ではなく、価値を生み出すためにこそAIを活用しなければならないはずだ。

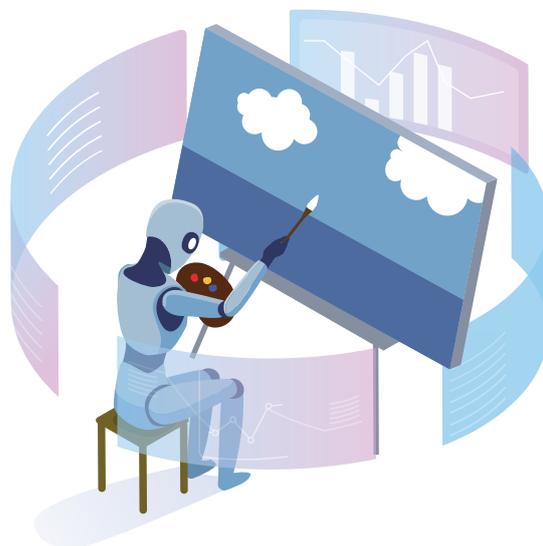
## 2 効率から創造へ

「まずは効率化！」という流れを否定はしないが、効率化自体は何かを生み出して先に進むためのプロセスではなく、限界まで効率化し尽くされればそれで終わりである。本来あるべきAIの用

途、それは先に進むための創造的作業での活用であり、イノベーションに寄与する活用である。生成AIは人の創造的作業をサポートするための道具としても大きく寄与することが期待されているわけで、これこそが経済浮揚の原動力になるはずだ。

生成AIの登場でよく耳にするのが、「AIも人のようにゼロからの創造ができるのか？」である。大量であってもデータを学習するタイプの現在のAIではゼロからの創造はできないのである。ChatGPTに何か問い合わせれば自分では思いつかない回答をどんどんしてくれる。いかにもこちらからの問いに対して創造性豊かであるという感覚を持ってしまいが、学習の際に獲得した膨大な知識からもっともな出力をしているだけである。とはいえこちらが思いつかないアイデアがどんどん瞬時に生成されるので創造性を感じてしまうのは致し方ないところである。

生成AIから学習された範囲外のものが出てくるわけがないのは、実は私たち人間においても同様であり、人も生まれてから五感を通して入力される情報にて学習されたこと以外のものを創造することができるわけがない。では、これまでの人類のゼロからの創造や発見による進歩が説明つかないということになるが、意図しない「偶発的な出来事」がこれを可能とするのである。ノーベル賞クラスの発明において、その発明に至るきっかけについての質問において、よく聞かれるのが「失敗からの偶然の発見」である。偶発的に起こる失敗は、失敗などではなくゼロからの創造や発見を生み出す重要な出来事なのである。また、どうなるかわからないけどやってみる、という際にも、その結果が想定外なものである場合にゼロからの発見をとま



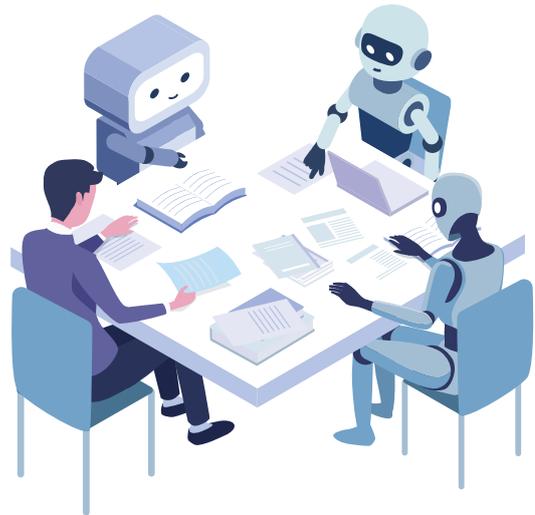
うことがある。「どうなるかわからないけどやってみよう、という自律的な行動が重要なんだ！」という考え方自体が学習により獲得された知識だとすれば、その学習に基づき、AIが自律的に行動することで、ゼロからの創造が可能である、ということになるが、現在のAIにはそのような自律性はまだない。創造することにおいて、自律性は本質的に必要な能力なのである。

ブレインストーミング(ブレスト)により新たなイノベーションが生まれるのも、自分では思いつかないイノベーションが、ブレスト相手からのヒントと結びついて生まれるからである。つまり、ノーベル賞級の発見が、偶発性によるヒントによりイノベーションの種自体が生まれることだとすると、ブレストでのイノベーション創出は、自分が持つイノベーションの種と相手からのヒントという種をつなぎ合わせたことで生まれた新たな種ということになる。つなぐことで新たな価値を生み出すイノベーションこそが日常におけるイノベーションと見立てるとわかりやすい。

そのためにも、まずは「なぜだろう？」という好奇心を持つことである。好奇心があるということは、それだけ内から湧き出る自発的な動機がある証拠である。そして、好奇心を生み出すためにも五感を育むことが望まれる。好奇心とは、自らつなぐとする意欲である。

ここで個人差が出るのが種と種とをつなげることができる距離である。つなぐ種同士が近すぎるとつなぐことが簡単過ぎ、誰でもすぐに思いつくようなレベルのイノベーションしか期待できない。個人差はあれども、どれだけ遠くの種と種をつなぐことができるかがイノベーションの斬新さを決めることになるのは間違いなさそうである。

トップクラスのイノベーターやクリエイターはそれまでの活動を通して頭の中に多種多様な種が詰め込まれているからこそ、種同士をつなぐことでの新たなイノベーションがどんどん生まれる。そのような彼らに対して、自分にはない種が外から提供されれば、より斬新なイノベーションを起こすことができる。しかし、それは彼らに比べれば頭の中の種の数が少ないであろう、一般の人々においても同様である。では、外からの種をどのように入手すればよいのか？それが他人とのブレストや生成AIとの壁打ちである。そして、種が詰め込まれたAIとの壁打ちの方が人とのブレストよりも効果があるということになる。なぜならブレスト



はお互いが意図的に集まって行うことから、そもそも相手を選んだという時点で多様性が高いとは言えないからである。その意味では、打算のない多様な人的ネットワークを日常において形成しておき、場当たりにブレストする方が普通のメンバーが決まっているブレストより効果的なのかもしれない。いつイノベーションに役立つかわからないものの多様な種を収集もしくは何気ない会話から得ることができる。しかし、そのような人的ネットワークの形成は簡単ではない。その点、ChatGPTなどの生成AIはイノベーションを起こすための種を簡単に提供してくれるというわけだ。ただし、AI壁打ちをしてのアイデア出しにおいても、最も重要なのは、最初の人からの問いかけである。AIに何か案を提示されればそれに対していろいろアイデアが湧いてくるのはそう難しいことではない。むしろ最初にどのような問いかけをAIにするのかを考えることこそがその後の壁打ちのレベルを左右することになる。最初の一步は難しいし、安易に検索して手がかりを探そうとしたり、それこそ最初からAIに頼ってしまうのは意味がない。

一方、つなぐためにはつなぐ双方の種に対して意識を集中させる必要がある。しかし、人の集中力は長くは続かず、その時はしっかり意識していても、時間が経過するとだんだん薄れてしまうものだ。クリエイターがあるシナリオの草案を書き、その内容の確認や助言を制作チームのメンバーに依頼したとしても、依頼された側にて原稿を読み込み、助言すべき箇所を探す作業には数日はかかる。その間にクリエイターは別の仕事をするであろうし、

草案を依頼した時の高揚した感情や意識や記憶は薄れてしまう。そして数日後に助言が戻ってきたことで、2日前のことを思い出しての作業となる。もしも、瞬時に助言があれば面白い展開を思い付いたかもしれない。しかし、ChatGPTであれば瞬時にプロンプトに対する出力が戻ってくるのである。頭に鮮明にイメージされているストーリーが色褪せることなく、ストーリーを修正したり、新たな展開を入れ込むことが可能となるのであり、クリエイターによると「思考の仕方が変わる」という表現であった。より種と種をつなぎやすくして、人のイノベティブな能力を引き出すうえでも生成AIには高い可能性がある。生成AIをイノベーションに活用することは、思考の仕方を大きく変えることを意味している。



### 3 イノベーション力低下の理由

つまり、つなぐ力の低下はイノベーション力の低下に直結する。豊かな人間関係を育む幼少期において、外遊びをしたくても公園や放課後の校庭は閉鎖され自由に友達と遊ぶことができない現代の状況、どうしても画一的で詰め込み型になってしまう教育現場など、本を読まず、人の話をじっくり聞く機会も減り、すべてがつなぐ能力の形成にとってマイナスである。

私たち人間は社会性生物であり、お互い協調するために言葉を生み出し、表情や仕草といったノンバーバルなコミュニケーション方法も発達させてきた。人にとって人間ネットワークは生きるうえでの基盤である。自分だけが持つアイデアの種からのイノベーションには限界があるし、偶発性に頼るのも効率が悪い。しかし、残念なことに皆がつながることが期待されたインターネットは真逆の分断を生み出す始末で、このままでは人類の未来はなかなか厳しいものとなることが避けられない状況である。

しかし、人は楽をしたい。即断即決でそれなりに問題ないのであれば、じっくり考える必要はないと考えるようになる。それに即断即決といっても、判断をサポートしてくれる分析ツールや意見集約システム、それこそChatGPTの出番であるが、これを駆使することでそれなりの品質が維持できるようになればさらに人はじっくり考えることはなくなるわけである。

また、注目されることに意味があるというアテンションエコノミー<sup>[2]</sup>が台頭することで、真に価値がある情報、真に伝えられるべき情報が、目立ちただけの表面的な多数の情報に埋もれてしまう現象も深刻化している。アクセス数が多ければ多いほど、そこに出示した広告主にとって利益となる仕組みがあるからである。プラットフォームは広告収入が重要な財源であり、そのためにもアテンションエコノミーという流れを止めることは難しい。モラルに反する内容であろうが、注目されればお金になるのであればやるというわけだ。

人が中身の無い表層的なシステムと変貌しつつあるように感じてしまう。これでは入力に対して適当に出力を返す単純なシステム化である。AI化しつつあると言ったが、AIのような豊富な知識やしっかり文章を生成できるわけでもないとしたら、劣化したAI化である。しかも、悪いことにAIの方がこれからの発展で豊かな感性や自ら考える自律性など、本来の人が持つ能力を獲得しようとしている。将来は、モラルもAIから教えてもらう時代がくるのかもしれない。さらには、人が内なる動機がなくなり、単に入力される情報に対する脊椎反射的な処理をするシステムと化し、それでも安定して生存できるのであればそれでよい、という人々も出てくるのかもしれないし、その方が統治しやすいと考える政治家だって出てくるかもしれない。まさに人が動物レベルになるということであるが、それでよいとは自分は思わない。

そもそも考えるとか創造するという行為は脳を

強制的に動かすことであり、疲れるし、何かを生み出すことは苦しいことである。これに対し、効率化は程度の差はあれども基本的に誰がやってもできるし、しかもちゃんとやったことに対しての数字も見えることから効率化に寄与する仕事をしたことを客観的に見せることができるし評価する側もやりやすい。

一方、イノベーションに対する評価は簡単ではない。ニーズと異なり、シーズはその有用性がその時には判断できないこともあるし、そもそも斬新なイノベーションになればなるほど、最初は周りからの理解が得られないかもしれない。何より、イノベーションにAIを活用するとすると、効率化へのAI活用と異なり、その人がそもそも持つイノベーション力に応じた活用の仕方しかできないのである。AIとの壁打ちが成立するのは、AIからのアイデアをこちらが理解できるからであり、AIからのアイデアが難解で理解できないレベルではそもそも壁打ちにならない。日本のイノベーション力の低下の理由を、ITやAIのリテラシーが低いことを理由とする論考もあるが、それは明らかに間違いであろう。私たち一人一人のイノベーション力が低下しつつあるという、根深い問題に起因しているのではないだろうか。いや、イノベーション力があるが、それを使っても評価されなければやろうとはしなくなるだろうし、やっても理解されなければ、やはりやろうとは考えなくなる。

しかし、それでも、先を見据えてより多くのシーズを生み出すことこそが、社会を前進させるのであり、国際的なイノベーション力の低下が指摘される日本においては、あまりに直近のみを見て、やれば成功する類いのチャレンジしかやらなくなってしまったのではないだろうか。まさに効率化がその最たる例である。もちろん、効率化自体は悪いことではないし、そもそも無駄なことをしないことは美德である。しかし、敢えて言うなら、日本は「効率化という思考停止状態」になってしまっているのではないだろうか。

#### 4 私たちに求められる能力とは？

今、明らかに主張できること、それはエンジニアに限らず、これまで以上に人本来の能力である創造力や状況認識能力、共感性、感性、そして深いコミュニケーション力といった人間力を高めることである<sup>[3]</sup>。

これらは、現在のAIではまだまだ苦手とする能力である。イノベーションを生み出すためのアイデアの種同士をつなぐことでの新たな価値の創造は人にしかできないし、現在のAIは膨大な知識が詰め込まれているものの、まだ、五感を通してその場の状況を理解しての判断ができるわけではない。そして、社会性は人が生きるための根幹であり、同じく社会性を持つアリにせよ魚にせよ、お互いが協調することで生存し続けてきた。そしてそのためには人にせよアリにせよ魚にせよ、それぞれが自律性を持ち、自ら能動的に行動できる自律行動主体である必要があり、そもそも生命とはそのようなシステムであった。しかし、現在のAIはまだ高い自律性を持つに至ってはおらず、人と豊かな社会性を構築する相手とはなり得ないのである。

#### 5 広がる格差は避けられないのか

人は楽を求め、テクノロジーはそのために貪欲に進化する。この流れは止まらないとすると、AIを活用し新たなイノベーションを起こすことで突き進む層と、それらの価値を受け入れるだけの層の格差はどうしても開いてしまうことになる。では、どのような格差となってしまうのか？ 価値を受け入れるだけの層もまだよいのかもしれない。新たな価値がそもそも全員に行き渡るとも限らな



いからである。富の分布において大きな格差が生じていることはよく耳にする。そもそも資本主義社会において、富む者とそうでない者の格差が生まれるのは必然であり、しかもべき乗則に基づく分布(べき分布)となることが正しい流れである。実際、世界の10%の富裕層が全体の75%の富を持つという。お金がある人はそれだけしっかりした教育を受ける機会やAIを利用できる可能性は高いし、持つ者にはどんどん機会も集まるのである。日本における大企業は全体の1%、99%は中小企業である。そして、AIを活用することでより高い価値を生み出すことが可能となり、AIを活用できるのがごく一部、現状においては富裕層となれば、べき分布に基づく格差がさらに広がることは容易に想像できる。一方、私たちの社会の対局になるのが社会主義圏であるということになるが、後者の社会システムに基づく国々を見ても理想的な社会が構築されているようには見えない。世界を見れば温暖化や紛争、そしてデマ情報が飛び交い、人間社会がもはや臨界状態に突入したように思える。こうなると、複雑系で言うところの新たな相に転移する時期が迫っているのかもしれない。相転移とは、複雑系システムにおいて安定した時期がカオスのような混沌とした段階を介して新たな安定した時期に一気に移る現象のことを言う。ここで言うカオス的な状況がとんでもない黒船、例えば戦争であっては本末転倒であり、現在の社会が混乱している状態という意味でのカオス的な状況であって欲しいところであるが、新たな安定した社会に転移するためにできることはいろいろあるのだと思うが、成功するかどうかはAIの進化にかかっている。

## 6 高い自律性を持つAIがもたらす変革

協働ロボットと呼ばれるロボットの現場への導入が進んでいる。人の作業場にロボットが入り込み一緒に作業する風景を見たことがあると思う。たしかに人とロボットがともに働いているように見えるが、人同士がともに働く状況を想像すると、本質的な違いが見えてくる。

まず、人同士が働く現場においては人間同士の気遣いや、私語は慎むものの、目配せでのやり取りや、ちょっとした表情でお互いの状況を理解し合うなど、人は言葉以外の豊かなノンバーバル・コミュニケーションも使い、その場の雰囲気も共有

したり、時には調子の悪くなった人の介助や、その人の担当をカバーするなど、臨機応変な行動もする。人は極めて高いレベルの汎用性を持つ自律型システムであり、多様な行動ルールがすでに体に染みついているからこそそのなせる技であるが、時には初めての状況にも臨機応変に対応することができる。私たちにとっては常識的な行動はとくに意識することもない。

しかし、現時点での協働ロボットにはそのような人と豊かにコミュニケーションしたり、臨機応変な多様な行動をとれる機能が搭載されるはずもなく、淡々と決められた作業をするだけであることから、これを協働と表現することにはかなりの違和感を感じてしまうのだ。人の働く現場にロボットが導入されただけであり、作業以外で人とロボットとのインタラクションが発生しない関係なのであるから、ロボット化された環境に人が入り込む世界と本質的な差異はない。

さて、ここで「信頼」について考えてみたい。人が人を信頼するという時の信頼である。現在の協働ロボットをはじめ道具としてのAIが存在する現在の世界において、人がAIに感じる信頼とは何なのであろうか？ それは正確性もしくは精度に尽きる。協働ロボットは自動レベルのロボットであるから道具型AIである。私たちの道具への信頼とは正確性である。命令通りに動かなければ道具としてちゃんと使うことができない。

では、人が人を信頼するとはどういうことか？ 人に頼み事をする場合、たしかに頼んだことをちゃんとやってくれるのかという意味での正確性が高いことに対する信頼という面があることは当



たり前として、人が人を信頼するうえでの重要な要素が「自分から心的な搾取をしない」ということであろう。自分のことを想って行動してくれるという安心感である。人は自律性のあるシステムであるから、道具ではなく、各システムそれぞれが自ら考え判断して動作する。人対人において、相手は自分の制御対象ではないことから、動作を強制することはできないし、頼み事をしたとしても道具のように高い精度でしかも真っ先にその依頼をやってくれるかどうかの確証もない。場合によっては、依頼を受けたと思わせ、自分から何かを搾取するかもしれない。人が人を信頼するうえでの最低限の条件が自分から搾取しないことというわけだ。

とすると、自律型AIはもはや道具型ではないことから、人が自律型AIを信頼するための重要な条件として人から搾取しないということが当てはまることになる。その意味することは、「自律型AIは能動的に人の状態を把握し、人の意図を推定し、人からの依頼がなくても人のために、人が遭遇する、そして遭遇するであろう問題解決のための動作をする」ということになる。

例えば、人と自律型AIがともに冬の雪山に登山しているとしよう。人が足を滑らせ滑落しようとしたその刹那、人はロボットに手を出し、ロボットもずっとその手を掴んで滑落を防止する、マンガや映画で当たり前のように見る情景であり、お互いの気心通じた阿吽の関係を想像させる。もしも、これが道具型のAIであった場合、滑落しそうになった時点で助ける動作をAIに依頼している間に人は滑落してしまうであろう。自律型AIにはいっしょに登山することが目的であり、人が安全に登山できているかを常時見守りつつ自身も登山をし、人からの依頼がなくても能動的に手を出す動作ができなければならない。

幸い、日本にはよい言い回しがある。まず思いつくのが「おもてなし」である。この単語と1対1で対応する英語はなく、Hospitalityとか、Welcome、Entertainといった単語がニュアンス的に近い。「おもてなし」を工学的に定義するとすれば、「相手の状況を詳細に観察して相手が何をしたいのかを推測し、相手はその目的を達成しようとするタイミングで、こちらが先んじて介入すると適切と判断できる動作を適切なタイミングで、まさに相手が行動を起こす前に実行すること」ということになる。まさに、人が信頼できる自律型AIとは「おも



てなし」ができるAIということになる。そしてこのような言い回しが存在すること自体が、日本社会が、自律型AIが浸透するに適切な土壌であるということの証なのかもしれない。しかし、おもてなしではまだ物足りないと言えよう。なぜなら、おもてなしでは、相手のして欲しいことに対する先んじたインタラクションであることから、人の利己的な欲求の充足の度合いが強くなってしまっているからである。

「思いやり」こそが、まさに人と共生するAIに必要とされる能力である。

思いやりとは、よりメタな視点からのおもてなしと定義することができよう。相手のことを思い、場合によっては苦言を呈し、拒否もする。日本には思いやりのできる、人ではない多様なキャラクターが登場する物語が数多く存在し、それを現実にも実現しようということである。

## 7 信頼できるAIに判断を委任する

さて、これから述べる可能性は、とくにEU圏におけるAIはあくまで人が使う道具であるべきという考え方のかかなり対極な考え方である。筆者は、現在のAIがさらに発展した人と共生できる自律型AIが溶け込んだ社会であれば、現状を変えることができるかもしれないと考えている。

自律型AIは、与えられた目的を達成するために、能動的に状況を理解しつつ適応的に行動するAIであった。つまりは、個人レベルの損得に対して躊躇することなく、社会レベルでの損得の維持・発展のために、個人レベルでの利得を考慮しつつも、思い切った対策を私たちに提示することができる。道具型AIではそれを使う人の利己的であったり保身的な意向が入り込んでしまう可能性がある。問題は、AIからの提案に対して私たちや、政治

がそれを受け入れるかどうかであるが、そう簡単にはいかない。ただし、人がAIを信頼する土壌が形成されていたとしたらどうであろうか？

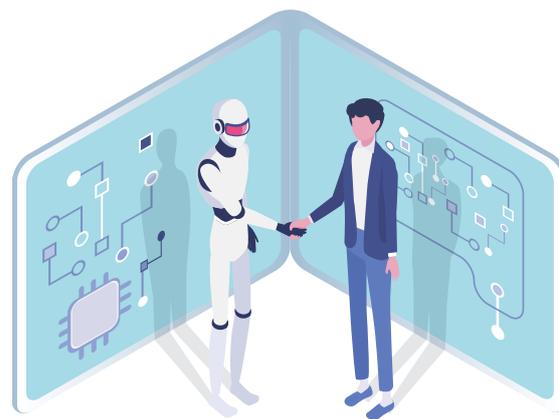
AIの判断を信用するかどうかについて、まず考慮すべきは判断の透明性であるという議論がある。AIがシステムとしてどのようにしてその判断を導出したのかを明らかにせよということである。ただし、数千億もしくは数兆にもなるパラメータが綿密に調整されたDeep Learningの詳細な動作を正確に把握することはもはや不可能だし、そもそも、それがわかったからといってどうなるものでもない。むしろ、必要なのは透明性よりも説明可能性(アカウンタビリティ)である。AIが出力した判断について、その判断を導出した理由を人にわかりやすく説明できることが、私たちがAIを信用するうえで重要であろう。

ただし、私たちがAIの判断を受け入れるかどうかであるが、それには時間を要する。容易な問題から難しい問題までにおいて、「AIの判断を受け入れることが結果的によかった」という成功経験を多く積むことで、AIへの信頼も増していくのだと思われる。これは私たちが高い適応性を持つからこそその変容であるが、段階的そして部分的にせよ、いずれそのような判断をする時が来るだろうし、いずれ私たちは何かしらの複雑な問題に対する判断をAIに委任することが当たり前になるのだと思うわけである。そう言うAIに支配されるように思われるかもしれないが、そうではなく、信頼するAIの判断を理解したうえで委ねるということである。判断するのはやはり人である。

## 8 学びへのAIの役割

現在のAIは、まだ場の空気を読んだり、人を想っての先回りした「思いやり」のような動作はできないが、これらの能力が自律型AIの登場により実現されていくことで、人とAIが共生する社会の本格的な到来が見えてくる。

そして、高度に自律的なAIが「バディ AI」として、一人一人に寄り添う共生社会が到来することで、人が学ぶということにおける理想とするAIの役割も見えてくる。それはまさに学ぶという行為にAIが溶け込むということでもある。現在は何かを知ることや学ぶためにAIを明示的に道具として使用する。しかし、それはAIに頼ってしまい考える能力を低下させる懸念を常にはらんでいる。



しかし、バディ AIは、バディとしての人々が学ぶために自分が何をすればよいのかを自律的に考え、人からの命令に依存することなく動作する。時にはすぐに答えを教えようとはしないであろうし、いわゆる足場掛け的な指導をするかもしれない。自分で考えろと突っぱねるかもしれない。でも、人はすぐに答えを教えてくれないバディ AIに文句は言わない。なぜなら、バディ AIは自分のために自ら考え行動しているのだという信頼関係が醸成できているからである。今更であるが、バディ AIのすることは普段、学校の先生や親が生徒や子供に親身に教育する姿そのものである。ただし、現在のAIにおいてもすでにその知識量や文章理解能力は人を凌駕しつつあり、つまりは、より私たちはしっかり学ぶことができるようになるのだと思うわけである。

人の情報処理能力はホモ・サピエンスが地球上に誕生してからずっと変化していない。それでも、その限界が解明されたわけではなく、脳はまだまだ高い能力を発揮できるのかもしれないが、やはり限界はあるのだろう。そのような人間に対して圧倒的な量と雑多な情報が混在するインターネットを基盤とする複雑化する情報社会は、そもそも人が直接向き合うのは無理な状況になってしまっている。であれば、私たちは私たちの身の丈にあった生活ができるよう、インターネットや情報社会との間に入って、私たちをサポートしてくれる相棒が欲しくなる。それが私たちが実現させるべき次世代AIであるバディ AIなのではないか。

ただし、それは私たちがただただ楽ができる世界を実現しようというのではない。人が高い人間力を駆使して生活する世界を維持・発展させるための見守りであり、その世界には多様性や人の喜

怒哀楽、そして苦勞や壁が存在しなければ、人に先に進もうとするインセンティブは生まれない。そして、どうすることが人類の存続に至るのかについてAIからの提示により苦澁の判断をすることになるかもしれない。何かを学ぶにおいても、ひたすら楽に学べる世界が到来する、ということにはならないのであろう。

## さいごに

どのような職業であれ、これからの人とAIとの共生社会において、何をすることが人としての役割であり、どこで人とAIとの棲み分けができるのか、それは端的に表現するなら、AIは効率の領域、そして人は創造の領域にいるべき、というのが答えであり、AIのすべき領域にいると思うのなら、人がやるべき領域にシフトするためのチャレンジをしなければならない。人類がここまで発展してきたのは、チャレンジし続けてきたからであり、その過程では多くの失敗もあった。失敗こそがイノベーションに必須なイベントであり、失敗は成功の素というのはまさにその通りである。現状に留まれば何も起きないが、動けば必ず変化が起きる。まずは兎にも角にも最初の一步である。

### ■参考文献

- [1] 総務省2024年版情報通信白書
- [2] 山本龍彦, アテンション・エコノミーのジレンマ 〈関心〉を奪い合う世界に未来はあるか, KADOKAWA, 2024/8/26.
- [3] 栗原聡, AIにはできない 人工知能研究者が正しく伝える限界と可能性, 角川新書, 2024/11/8.

# 製品技術紹介

## Product Technology

- P.79 発電機用FCモジュールの開発
- P.84 3.5～8.0トン積 高性能電動フォークリフトの開発
- P.91 BEV向け5in1\_ESUの開発

# 発電機用FCモジュールの開発 Development of FC Module for Power Generators

山本 哲太郎<sup>\*1</sup> 吉田 智志<sup>\*1</sup> 小野 大輔<sup>\*1</sup> 飼沼 徹<sup>\*1</sup> 本村 浩平<sup>\*1</sup>  
Tetsutaro Yamamoto Satoshi Yoshida Daisuke Ono Toru Kainuma Kohei Motomura

\*1 トヨタL&Fカンパニー H2プロジェクト

## 要旨

当社は2016年に日本で初めて(当社調べ)燃料電池(以下FC)フォークリフトの販売を開始した。フォークリフト向けFCシステムをベースとして、コア部分を切り出し発電機へ対応することでFCモジュールとして2025年に販売を開始する。今回FCモジュール開発における、氷点下始動、供給水素低圧化、冷却機能外付け対応、騒音低減の技術的課題に取り組んだ成果を報告する。

キーワード: 燃料電池、Fuel Cell、FC、FCシステム、FCモジュール、発電機向け電源

## Abstract

Our company launched Japan's first FC forklifts in 2016 and began sales of FC modules in 2025. These modules, derived from fuel cell system for FC forklift, are tailored to support diverse applications. During development, we addressed key challenges including sub-zero temperature operation, low-pressure hydrogen supply compatibility, cooling performance, and noise reduction.

Keywords: Fuel cell, FC, FC System, FC Module, Generators

## 1 はじめに

2016年に日本初(当社調べ)のFCフォークリフトの販売開始して以来、当社はトヨタ自動車(株)と連携し、産業車両用FCシステムの開発を進めてきた。2023年より発電機用FCシステムの開発に着手し、2025年10月に販売を開始した。発電機メーカーへFCモジュールとして販売することで、FC発電機の早期市場投入に貢献する。

## 2 FCモジュールについて

FCモジュールはフォークリフト向けFCシステムのコア部分を切り出し発電機用として設計したものである。本モジュールは定格出力8kW(公称電圧DC48V)で、フォークリフト向けFCシステムと同等の出力性能を有している。

システム構成は、水素と空気をFCスタックに供給して発電を行い、その過程で生じる熱を冷却水で冷却し、発電によって得られた電力を、DCDCコンバータを介して外部に送電する仕組みである。

フォークリフト向けFCシステムとは異なり、本モジュールには水素タンクおよび蓄電装置を含まない仕様となっている。また、機能オプションや使用条件に応じて、エア吸気フィルターや冷却装置は外付け仕様として設計しており、これらの部品は発電機メーカーが別途用意する必要がある(図1)。

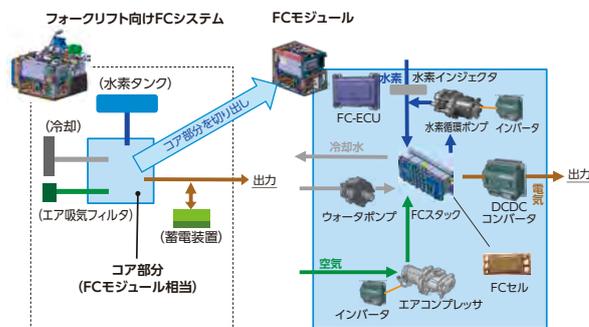


図1. フォークリフト向けFCシステムとFCモジュール比較  
Fig.1 Comparison of FC system for forklift and FC module

両者の主な機能的違いは下記の通りである(表1)。

表1. フォークリフト向けとの主な要求仕様の違い  
Table 1 Main Specification differences from FC system for forklift

項目	フォークリフト向けFCシステム	発電機用FCモジュール※
最低起動温度	0℃	-20℃(氷点下対応)
供給水素圧力	標準	600~1,600kPa
	低圧	85~100kPa
冷却機能外付け	なし	あり

※ FCモジュールの対応有無は、バリエーション次第

熱交換器接続によってお湯を沸かすなどの特定のお客様ニーズに柔軟に対応するため、冷却機能(ラジエータなど)の有無に応じて2種類の製品タイプを用意した(図2)。

モデル名	TFCM2-08R	TFCM2-08B
特徴	冷却機能内蔵	冷却機能外付け
製品タイプ	ラジエータ	熱交換器 水冷 IN 発電機メーカー熱交換器に接続 熱交換器 水冷 OUT

図2. FCモジュールの製品タイプ  
Fig.2 FC module product types

各製品タイプに対して、使用環境温度について標準0℃～40℃と氷点下20℃～40℃、供給水素圧について標準600～1,600kPaと低圧85～100kPaという2つのバリエーションを設定している。

FCモジュール要求仕様を満足するための主な開発課題は、「氷点下始動」「供給水素低圧化」「冷却機能外付け対応」が挙げられる。さらに開発過程で新たに発生した課題として「騒音低減」が加わった。これらの各課題への対応内容について、以下に詳述する。

### 3 氷点下始動

フォークリフト向けFCシステムでは、使用環境温度を0℃以上としていたが、FCモジュールでは氷点下20℃からの始動を可能とした。FCは発電時に生成水が発生するため、氷点下環境ではこの生成水がFCスタックで凍結し、始動が困難になる。

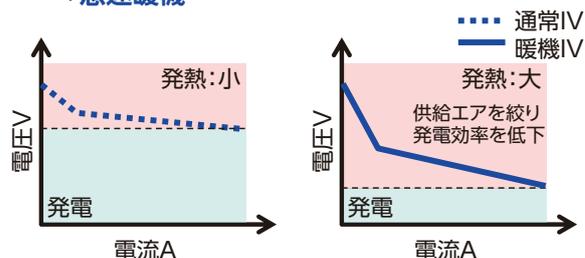
そのため、氷点下での始動時には「急速暖機」という運転モードを採用している。このモードでは、FCスタックへのエア供給量を制限して、一時的に低効率で発電させることで発熱量を増加させ、FCスタックを発電可能な温度(60℃)にまで引き上げる制御を行う。しかし、この運転モードの背反として排気中の水素濃度が増加する。

FCスタック内のアノード側(負極)では、供給された水素(H<sub>2</sub>)が触媒によってプロトン(H<sup>+</sup>)と電子に分解される。プロトンとは、水素原子から電子を除いたものであり、正に帯電した粒子を指す。

通常、アノードで分解されたプロトン(H<sup>+</sup>)および電子はカソード側(正極)に移動後、カソード側では酸素(O<sub>2</sub>)とプロトン(H<sup>+</sup>)、電子が反応して水(H<sub>2</sub>O)が生成される。

しかし、低効率発電を目的としてエア供給量を制限した場合、カソード側での酸素不足により酸素とプロトンが反応する電気化学反応の速度が低下し、一部のプロトンは水素に戻って排気に混ざり放出される。その結果、排気中の水素濃度が上昇する(図3)。

(1) 暖機時エア流量を絞ることで発熱量増大  
⇒急速暖機



(2) 供給エア流量低下により未反応水素が発生  
⇒排気水素濃度増加(背反)

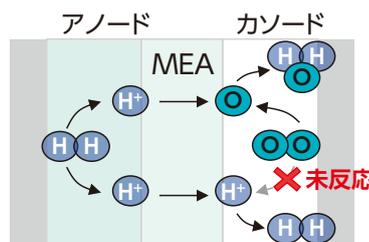


図3. 急速暖機時の排気水素濃度増加の仕組み  
Fig.3 Mechanism of increased exhaust hydrogen concentration during rapid warm-up

そこでエア供給量を制限しながら排気水素濃度を低減するために、低効率発電の電圧・電流条件を確認し、暖機時の動作点を最適化した。

しかし開発過程では、急速暖機で氷点下始動したのち発電中に水素出口配管内で生成水が凍結し、発電不良が発生した(図4)。要因としては二つである。一つ目の要因は、急速暖機中であっても補機冷却ファンが常時駆動しており、放熱量が過剰となり、モジュール内部が十分に暖機されない挙動となっていたことである。対策として氷点下始動時、外気温が-3℃以下の場合は冷却ファンの駆動を停止する制御に変更して解決している。背反である部品オーバーヒートについては、部品基板温度が規定温度超えでファン回転開始する制御を適合のうえ織り込んでいる。二つ目の要因は、不純物を含む水素と水を排出する排気排水弁開弁頻度が低く残水排出できないこと、加えて暖められた気体が配管内に十分流れ込まずに入熱量が不足し、配管内の残水が冷却される現象が発生していたことである。対策として排気頻度を上げることによって解決している。背反が懸念される排気水素濃度については、凍結防止との両立を満足させる排気排水最適間隔を算出し適合、制御に織り込んでいる。

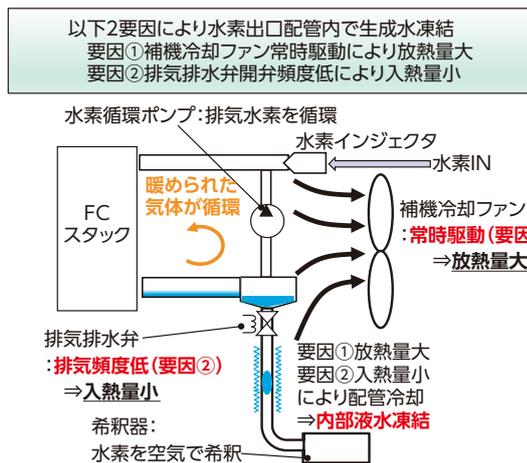


図4. 開発過程における急速暖機後発電時の課題  
 Fig.4 Issues regarding power generation after rapid warm-up

## 4 供給水素低圧化

国内については運用上の負担軽減を理由として、供給水素圧0.1MPaG未満の発電機の需要が見込まれる。これは発電機に適用される電気事業法において、定格出力10kW未満の場合、供給水素圧力が0.1MPaG以上となることで主任技術者による監視や法定検査の実施など、運用上の負担が増大するためである。このようなお客様の負担軽減およびFC発電機の設置障壁低減を目的として、供給水素低圧対応のバリエーションを設定した。

しかし水素の供給圧が低いと、発電に必要な水素流量を満たさない懸念が生じる。そのため供給水素を、圧力調整しながらスタックに供給する水素インジェクタという部品の制御を見直すことで解決を図った。具体的にはインジェクタ開/閉の駆動制御を見直し、インジェクタを常時開にすることで必要な水素流量を確保した。背反としては2つある。1つ目は常時通電状態となったコイル発熱による近傍樹脂溶損である。この対策としてインジェクタのコイルに印加する電圧を下げることで保持電流を低減させ、コイル発熱量を抑制している。2つ目はインジェクタ内の弁体ゴム部の張りつきである。この対策として3つ備えられているインジェクタ弁体のうち、開弁するものを2つずつ交互に切り替える制御手法を新たに採用した。

## 5 冷却機能外付け(ラジエータなし)対応

冷却機能外付けの場合、FCモジュール内部の補

機を冷却する風量が不足する問題が生じる。この問題に対応するため、冷却機能外付けモデルについては、ラジエータファンの代替として補機冷却用の小型ファンを新たに設定した。冷却風流れについて流体解析を用いて構造レイアウト設計を実施し、冷却対象部品周辺に必要な冷却風速を確保した。さらに一部部品について出力電圧によって許容する基準温度を超えないように、当該部品近傍の風流りを改善した構造レイアウトに変更することで冷却性能を満足させている。

また構造レイアウト設計全般においては、FCモジュールのベースとなるフォークリフト向けFCシステムと、搭載位置関係の共通化を図ることで開発期間・工数の削減を実現した(図5)。

フォークリフト向けFCシステムとFCモジュールでFCコア部品の位置関係を共通化

フォークリフト向けFCシステム	発電機用FCモジュール	
	TFCM2-08R (冷却機能内蔵)	TFCM2-08B (冷却機能外付け)
FCスタックモジュール 48VDCDC 水素ポンプINV	位置関係共通化	

図5. FCコア部分の搭載位置レイアウト  
 Fig.5 FC core part position layout

## 6 騒音低減

フォークリフト向けFCシステムからの変化点は、FCモジュール外板の開口部位置が変更されていることである。また搭載レイアウト上の制約から配管の取り回しも変更している。この変更にともない、開発過程で最大出力8kW時騒音目標値に対して7dB超過する見込みであることが判明したため、騒音低減への取組みが必要となった。発電時に動作音が発生する主要部品として、水素循環ポンプ、エアコンプレッサ、ウォーターポンプ、ラジエータファンが考えられる。

そこで、これら4つの部品を一つずつ駆動させ、音圧レベルを測定していき最終的にエアコンプレッサ周辺に着目した。FCモジュール内での搭載配置および外観については、以下に示す通りである(図6)。

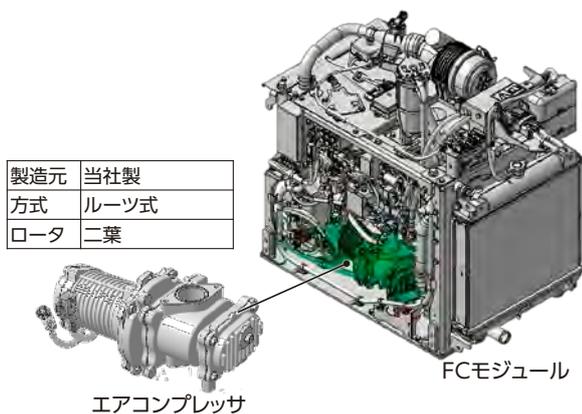


図6. FCモジュール内のエアコンプレッサ配置  
Fig.6 Air conditioner compressor layout in FC Module

エアコンプレッサ周辺におけるさらなる騒音源特定調査の結果、騒音の主な寄与要因はエアコンプレッサ本体そのものでなく、排気系ホースから発生する放射音であることを特定した(図7)。

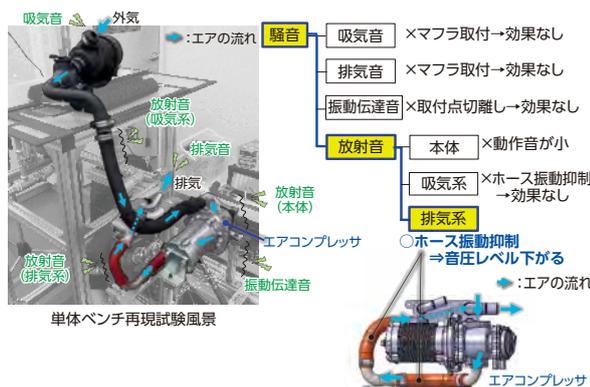


図7. 騒音源の特定  
Fig.7 Identification of noise sources

ホースが発音するメカニズムについて説明する。エアコンプレッサ(ACP)の回転で生じるエアの脈動が、ホースに伝わることで、ホースが振動し発音する。つまりホースがスピーカになるイメージである。したがって、発音量は「ホースへの振動入力大きさ」「ホース自体の発音しやすさ」の2つの因子によって決まることになる(図8)。

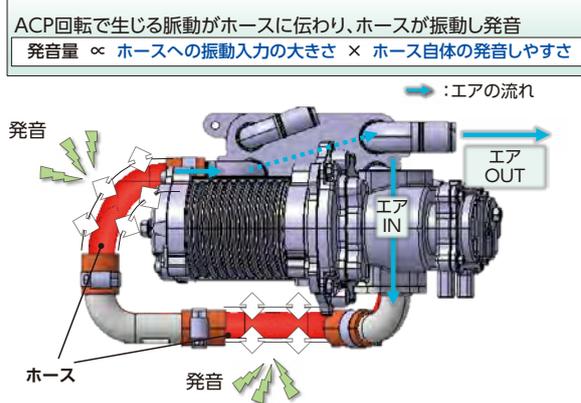


図8. ホース発音のメカニズム  
Fig.8 Mechanism of hose sound

この2つの因子についての真因を分析した。その結果、1つ目の因子については、「エアコンプレッサ吐出時の脈動が大きい」ことが真因であると判明した。2つ目の因子については、「ホース長が長いこと」が真因であると判明した(図9)。

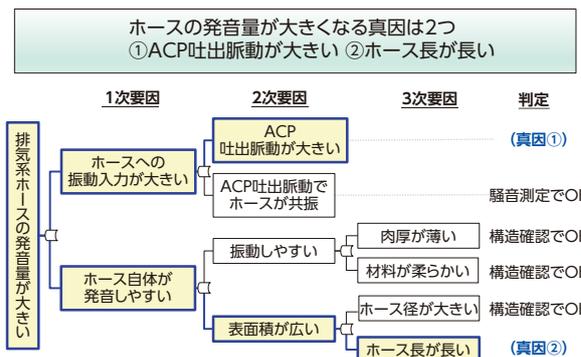


図9. 要因分析からの真因洗い出し  
Fig.9 Identifying the root causes of noise through factor analysis

真因①への対策として、マフラ搭載を検討したが、エアコンプレッサ(ACP)の吐出脈動が大きいため、小さなマフラでは脈動を減衰し切れずマフラ自体が発音してしまうこと、大きなマフラだと組付成立の目途がないこと、コストアップが大きいためから対策採用は見送った。

そこで真因②への対策として一部を金属配管に変更しホース長を4分の1にすることで音圧レベルを8dB低減することが確認できた。

さらにモジュールの開口部に音漏れ防止プレートを追加するなどの方策を講じ、さらなる騒音低減を実現した。

## 7 まとめ

今回のFCモジュール開発では、主に氷点下始動、供給水素低圧化、冷却機能外付け対応、騒音低減という課題に取り組んだ。この開発過程で得られた知見と成果をもとに、今後もお客様ニーズに柔軟かつ的確に応えていく。また高性能で環境性能に優れた製品を提供していくことで燃料電池技術のさらなる普及促進に寄与し、持続可能な社会の構築に貢献していきたい。

### ■著者紹介■



山本 哲太郎



吉田 智志



小野 大輔



飼沼 徹



本村 浩平

### 開発の経緯と開発者の思い

フォークリフト向けFCシステムの技術展開として、発電機用FCモジュールを最初の開発ターゲットとして取り組んだ。FCモジュールは水素と空気中の酸素を化学反応させて発電する燃料電池を用いて発電するため、稼働時にはCO<sub>2</sub>や環境負荷物質を全く排出しない優れた環境性能を実現する。さらに、複数モジュールの連結などにより、さまざまな出力に対応可能であることなど、高い汎用性を有しており、FCを動力とする新たな製品の開発・生産を促進することが期待される。これからも燃料電池技術の普及を通じて、持続可能な社会の実現に寄与していきたい。

# 3.5～8.0トン積 高性能電動フォークリフトの開発 Development of 3.5-8.0ton High-Performance Electric Counter Balanced Forklift Truck

三浦 知道<sup>\*1</sup> 藤岡 久未子<sup>\*1</sup> 北村 圭祐<sup>\*2</sup> 炭釜 康一<sup>\*3</sup> 竹村 憲治<sup>\*4</sup>  
Tomomichi Miura Kumiko Fujioka Keisuke Kitamura Koichi Sumigama Kenji Takemura

\*1 トヨタL&Fカンパニー 製品開発部 \*2 SC開発部 \*3 製品企画部 \*4 PGプロジェクト

## 要旨

世界的なカーボンニュートラルの流れにより電動フォークリフトへの市場シフトが進んでいるが、従来の3.5～8.0トン積電動フォークリフトの性能はエンジンフォークリフトをご使用のお客様を満足させるものではなかった。今回、これまで培った技術をベースとし「エンジンフォークリフトのように使える高性能電動フォークリフト」をコンセプトに開発を進め、さらには最新機能も織り込み、より使いやすい商品として従来との差別化を実施した。

キーワード:カーボンニュートラル、フォークリフト、電動、高性能

## Abstract

The market shift to electric forklifts is progressing due to the global trend of carbon neutrality, but the performance of conventional 3.5-8.0ton electric forklifts did not satisfy the customers using engine forklifts. This time, based on the technology cultivated up to now, the development was carried out based on the concept of “high-performance electric forklifts that can be used like engine forklifts”. Furthermore, the latest functions were incorporated, and the product was differentiated from the conventional product as an easier to use product.

Keywords: Carbon Neutrality, Forklift, Electric, High-Performance

## 1 はじめに

当社は3.5～8.0トン積エンジンフォークリフト(以降、エンジン車)を「GENEO」として2013年にフルモデルチェンジし、その後もさまざまな改良を重ね、走行・荷役性能、安定性、操縦性、信頼性の高いフォークリフトとして高い評価を得てきた。

その一方では世界的なカーボンニュートラルの流れにより電動フォークリフト(以降、電動車)への市場シフトが進んでいるが、3.5～8.0トン積エンジン車については厳しい環境でご使用のお客様が多く、従来の電動車ではパワー不足、稼働時間や屋外作業への不安があり(図1)、それらの環境での使用を満足させることができなかった(写真1)。この高性能電動車はこのような背景のなか、高負荷・高稼働のエンジン車からの代替として、電動化で最新機能を織り込み、エンジン車よりも使いやすくお客様に満足いただける商品を提供することを開発の目標とした。



写真1 北米客先での屋外悪路環境  
Photo1 Outdoor Rough Environment at US Customers

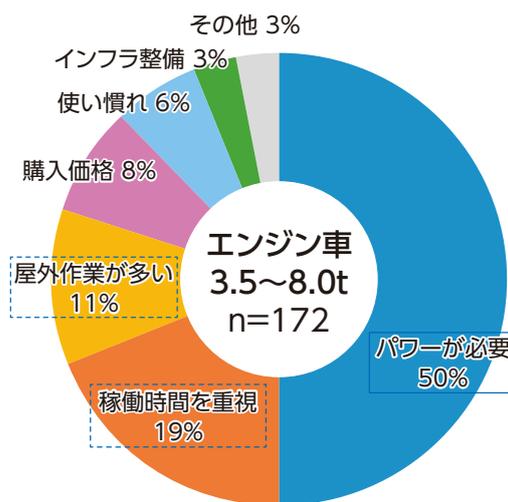


図1 電動化への阻害要因  
Fig.1 Disincentives to Electrification

## 2 コンセプト

新型の高性能電動フォークリフトの開発は、以下を主要なコンセプトとして推進した。

- 1) エンジン車に匹敵する走行・荷役性能
- 2) エンジン車に匹敵する耐久性・力強さ
- 3) エンジン車に匹敵する使い勝手
- 4) 他機種で好評な機能の横展開

### 3 製品の特長

#### 3.1 エンジン車に匹敵する走行・荷役性能

他機種で既 に実績のあるTIEV(Toyota Industrial Equipment Vietnam) 製モータをベースとしインターフェイス部品を新設した。走行・荷役それぞれに2モータを採用すること(図2)により、エンジン車に匹敵する走行・荷役性能を達成している(図3)。

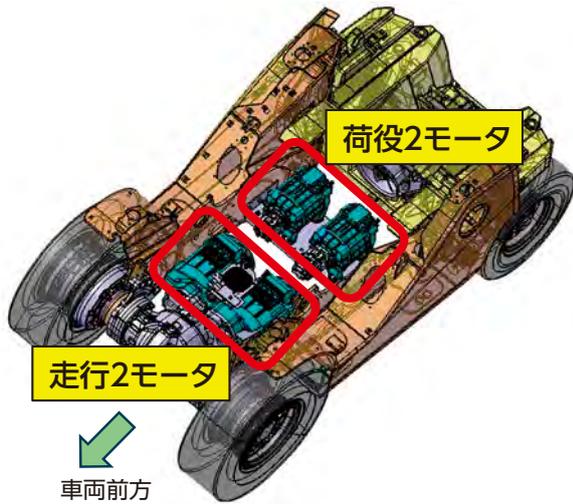


図2 フレーム中央部の走行・荷役モータ配置  
Fig.2 Location of Drive and Pump Motor in the Center of the Frame

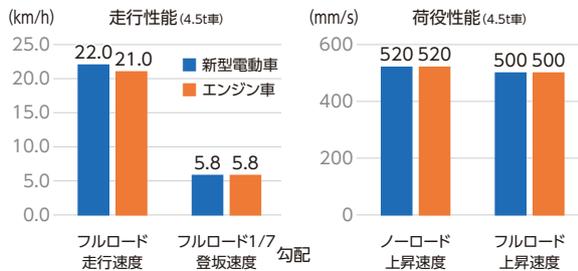


図3 走行・荷役性能比較  
Fig.3 Driving and Loading Performance

#### 3.2 エンジン車に匹敵する耐久性・力強さ

フレームモジュール構成を採用し、ボルトオン構造により良い組付性を確保した(図4)。従来の電動車ではバッテリー搭載スペースが中央に必要であり、エンジン車のように断面の剛性が高いフレームを構成することが難しかったが、バッテリーをウエイト内に搭載するレイアウトを採用したことにより、エンジン車同等の高いボディー剛性を確保した(図5)。また、エンジン車で開発した湿式ブレーキならびに密閉モータの採用により、耐環境性能(耐水・耐塵)を確保した(図6)。

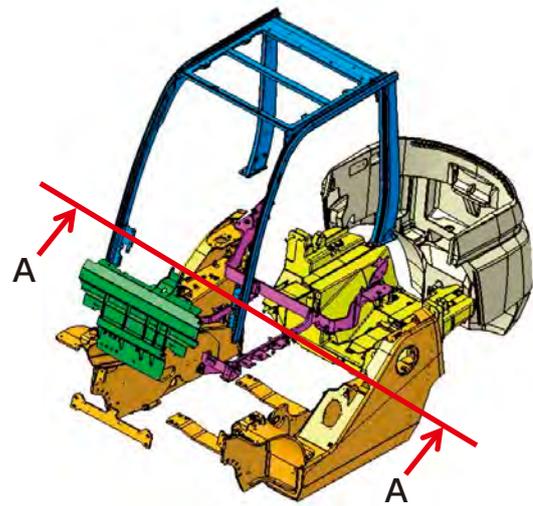


図4 ボルトオン構造によるフレームモジュール構成  
Fig.4 Frame Module Configuration (Bolt-on Structure)

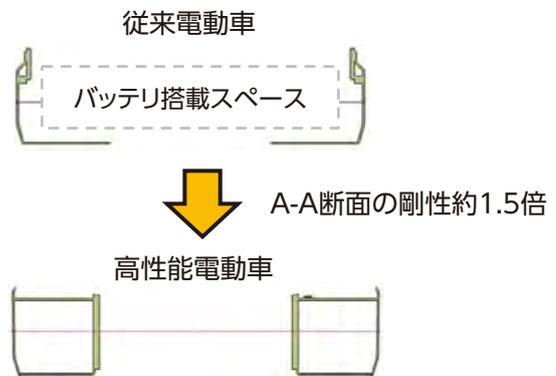
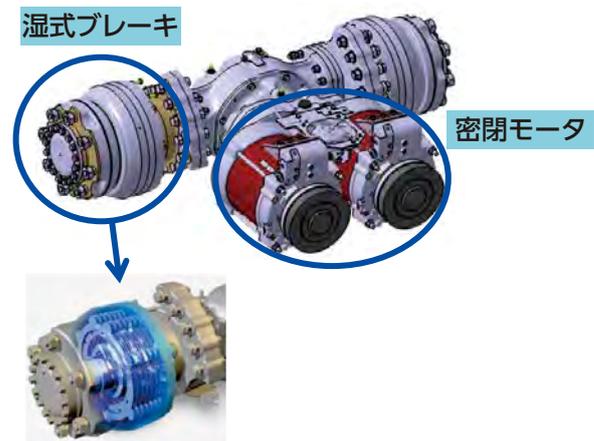


図5 フレーム断面の剛性比較  
Fig.5 Stiffness Comparison of Frame Sections



摩擦材を配置した密閉ハウジング内にオイルを充満(荷役用オイルと共用し全体で循環)

図6 湿式ブレーキ構造図と密閉モータ  
Fig.6 Wet Brake Structure and Sealed Motor

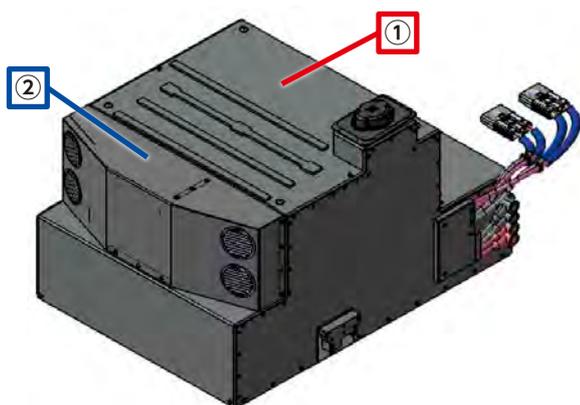
#### 3.3 エンジン車に匹敵する使い勝手

- (1) オペレータ周辺レイアウトの共通化  
オペレータに対するシート、ステアリング、アクスルペダル、ブレーキペダル、レバー類の配置につ

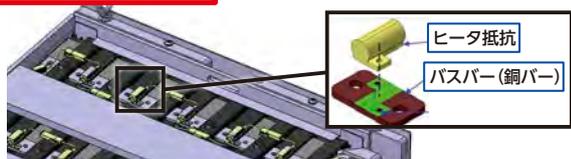
いて極力エンジン車と共通とし、エンジン車からの代替えについて違和感がないように開発を進めた。

## (2) リチウムイオンバッテリーの採用

従来の鉛バッテリーでは定期的なメンテナンスとしてバッテリーフードの開閉をとまなう補水作業、清掃作業などを必要としたが、リチウムイオンバッテリーを採用することによりメンテナンスの手間を最小化した。高温・低温といった過酷な使用環境下でも車両性能を維持し、お客様の作業効率を損なわないため、ヒーター抵抗を用いた冷間時のヒーターシステムならびにバッテリーの発熱を抑制する液冷式クーリングシステムを採用し(図7)、高稼働・高負荷のお客様のオペレーションにも対応可能とした。さらには225Aでの充電運用を実現し、最大性能での稼働と休憩時間での補充電を組み合わせることで約7時間の運用を可能とした。



### ①ヒータシステム ※バスバー加熱方式は当社初



### ②冷却システム ※液冷方式は当社初

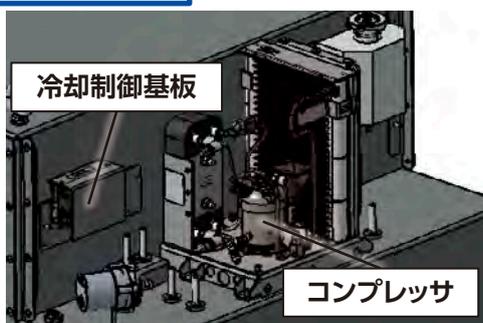


図7 リチウムイオンバッテリーの温調システム  
Fig.7 Temp. Control System for Lithium-Ion Battery

## 3.4 他機種で好評な機能の横展開

### (1) オートパーキングブレーキ

車両の状態に合わせパーキングブレーキ(PKB)の作動/解除を自動で制御する機能を搭載し、ブレーキの操作性向上と掛け忘れ防止を狙った。

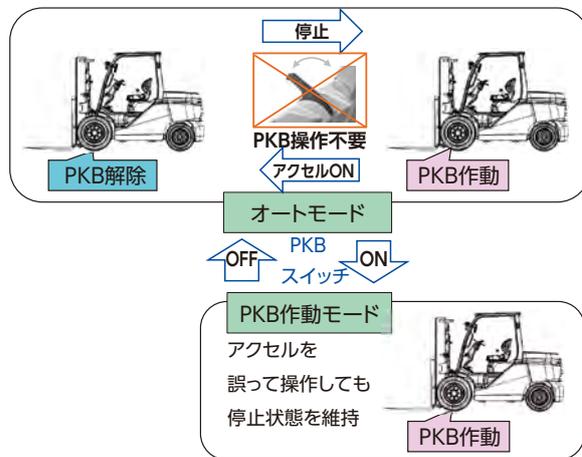


図8 オートパーキングブレーキ機能  
Fig.8 Automatic Parking Brake Function

### (2) テレマティクス標準装備

(商品名: MyInsights)

機台使用アワーメータ、衝突検知、エラーコード検知など、稼働状況を常にデータ化し作業改善、安全管理が可能なテレマティクス(稼働管理装置)を標準搭載とした。



- ・キーオンアワーメータ  
手動による時間管理を排除し、使用率を最適化して長期的なコストを最小限に抑制
- ・衝撃検出(オプション)  
機器または設備の損傷を示す可能性のあるインパクトイベントの可視性
- ・エラーコード管理  
サービスを必要とする可能性のある機器のエラーやメンテナンスの問題を把握
- ・GPSによる車両位置把握  
フリートの認識を高め、機器の最後の既知の場所を把握

図9 テレマティクス機能  
Fig.9 Telematics System Function

## 3.5 デザインコンセプト

新技術の洗練性とエンジン車に負けない力強さを感じるデザインを目指した。

- 1) 大型リチウムイオンバッテリーを包み込む特徴的な造形

- 2) 強靭さを感じさせる張り出したバンパー造形で電池をプロテクト
- 3) コーナーRの大径化により旋回のしやすさと接触時のダメージ低減を実現
- 4) ハの字の下広がりグラフィックにより低重心で安定感のある形状を表現
- 5) フィンの反射テープにより暗い場所でのフォークリフトの視認性を向上

これらの機能的デザインが評価され2025年度グッドデザイン賞を受賞した。



図10 カウンターウェイト意匠コンセプト  
Fig.10 Counterweight Design Concept

## 4 開発内容

### 4.1 ドライバ間のCAN(Controller Area Network)通信による走行2モータ制御

- 1) ドライバ間のCAN(Controller Area Network)通信による走行2モータ制御

エンジン車同等の走行性能を確保するため、高性能電動車では駆動ユニットとして「2軸直結型直交配置」を採用し、2つのモータで大トルク化を実現している(図11)。

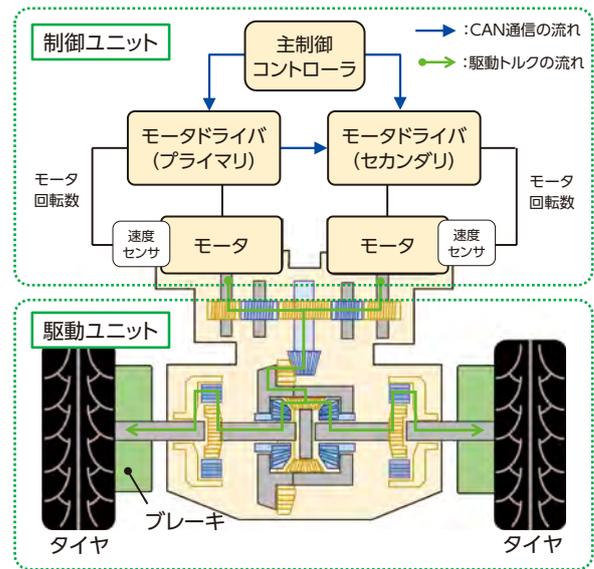


図11 Drive Unit Structure and Motor Control System

制御ユニットとして2モータを2モータドライバで独立に制御する方式を採用した場合のシステム図を以下(図12)に示す。

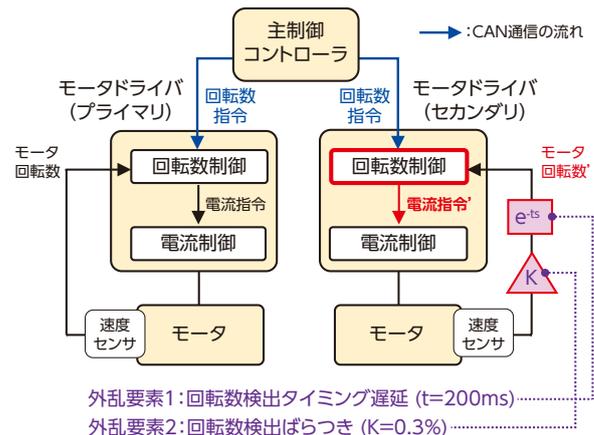


図12 2モータ独立制御のシステム図  
Fig.12 System Diagram for Independent Control of Two Motors

2モータ独立制御時のシミュレーション結果を以下(図13)に示す。外乱要素の影響で生じた電流指令の差異により、プライマリ(主要)とセカンダリ(補助)のトルクに乖離が発生していることがわかる。

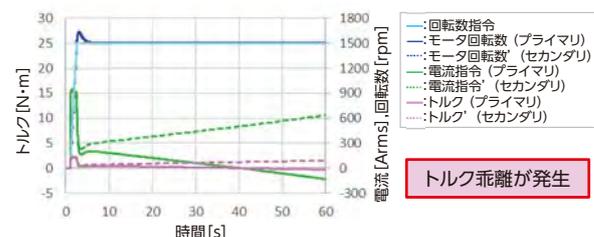


図13 2モータ独立制御のシミュレーション結果  
Fig.13 Simulation Results of Independent Control of Two Motors

製品技術紹介

この課題に対し電流指令調整機能をプライマリ側の回転数制御に集約し、セカンダリ側は電流制御に限定することで2モータドライバ間の電流指令を共通にする方式を新規採用した(図14)。

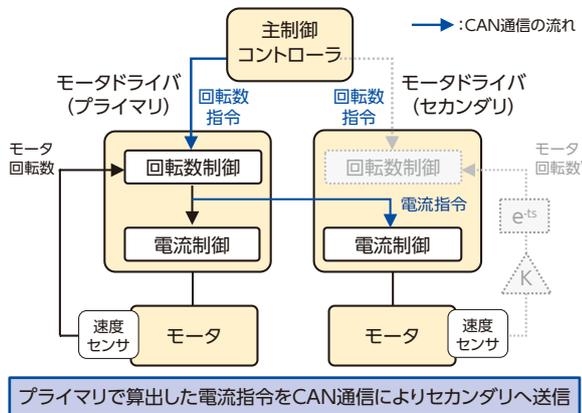


図14 新規制御システム図  
Fig.14 New Control System Diagram

本技術方策の採用により外乱要素の影響を無効化することができるため、2モータ間のトルク乖離が解消(図15)し、駆動ユニットと制御ユニットの安定した連携が可能となり、車両要求性能の達成に貢献した。

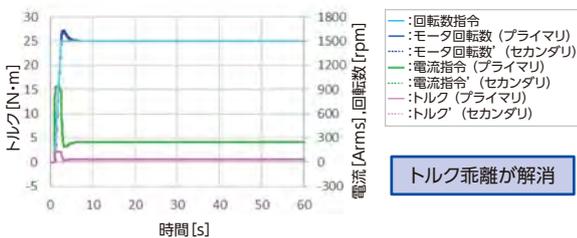


図15 新規シミュレーション結果  
Fig.15 New Simulation Results

## 4.2 高出力コンポーネントの冷却

高出力化によるモータドライバ、走行モータ、荷役モータのオーバーヒートを抑制するため、機台内の各部にファンを設け、車両全体での冷却効率を高めた。

走行モータでは、2つのモータ直上にファンを配置し、筐体に直接風を当てることで内部のベアリングやコアを冷却する構造とした(図16)。

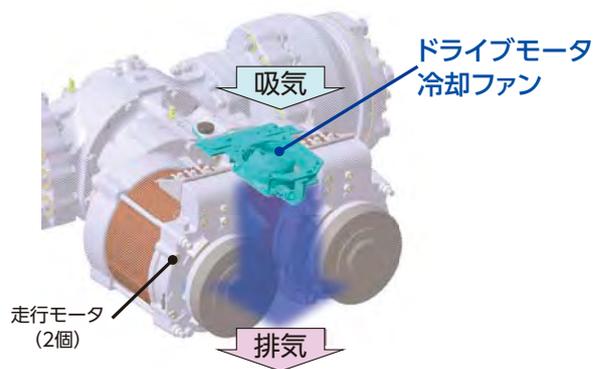


図16. 走行モータ冷却構造  
Fig.16 Drive Motor Cooling Structure

荷役モータでは、モータ後方に設置したファンで前方から走行風を取り込み、モータ筐体に風を当てることで冷却する構造とした(図17)。

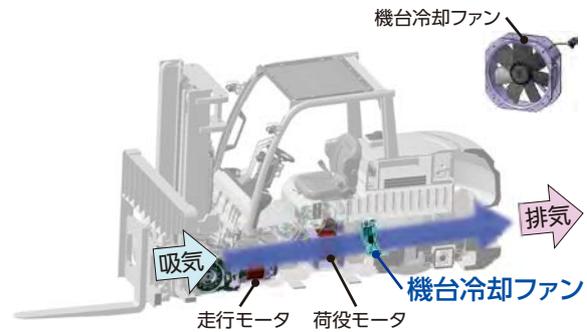


図17. 荷役モータ冷却構造  
Fig.17 Pump Motor Cooling Structure

また、モータドライバはヒートシンクを向かい合わせに配置することで省スペース化を図りドライバ下部に設置した4つのファンで排熱を下方に排気(図18)、さらにその排熱を機台冷却ファンで機台後方へ排出する構造とし、効率的な機台冷却を実現した(図19)。

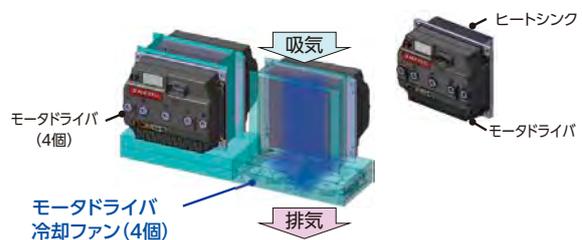


図18.モータドライバ冷却構造  
Fig.18 Motor Driver Cooling Structure

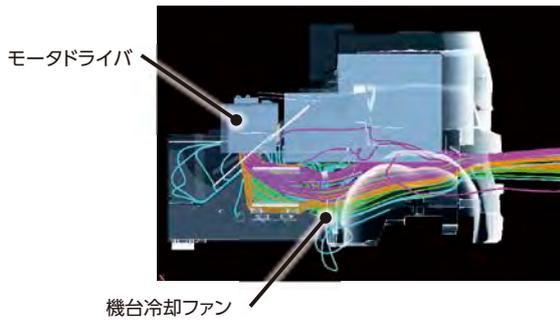


図19.モータドライバ排熱の風流れ解析結果(側面視)  
Fig.19 Air Flow Analysis Results of Motor Driver Exhaust Heat (Side View)

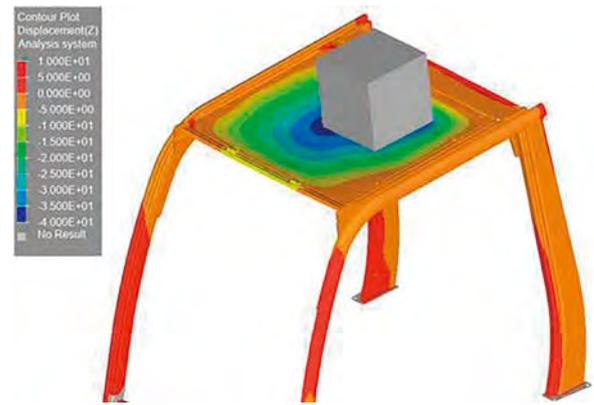


図20 立方体落下試験シミュレーション結果  
Fig.20 Cube Drop Test Simulation Results

### 4.3 PGルーフ

フォークリフトのヘッドガードに新たにPGルーフ(Plastic Glazing Roof)を採用し、開放的な運転空間と広い上方視界を実現した(写真2)。PGルーフは当社として独自に開発し自動車にも採用される技術であるが、フォークリフト特有の使用環境に対応するためには、落下物に対する強度要件を満足する設計が求められる(図20)。そこで今回の開発では、ハードコート材料の最適化に加え、PGルーフにかかる入力を低減する機台フレームレイアウトを採用することで、要件を満たした。また、屋外での長期使用を前提に、紫外線などによる経年劣化への対策として高耐候性を付与しており、長期間にわたり強度を維持することで、安全性と快適性を両立するヘッドガード構造を実現している。



写真2 PGルーフ  
Photo2 PG Roof

## 5 まとめ

今回、新たに開発を行った3.5～8.0トン積電動フォークリフトは、これまで当社が提供してきたエンジンフォークリフト代替の受け皿となる商品としてお客様に提案することができたと確信している。カーボンニュートラルが加速していくなかで、トップメーカー(当社調べ)である当社としてお客様にこのような商品を提供することができた今回の開発の知見が、今後のさらなる新しい開発の礎になることを願っている。最後に今回の開発にあたり、多大なご協力・サポートを頂きました社内外的関係者各位に深く感謝いたします。

## ■ 著者紹介 ■



三浦 知道



藤岡 久未子



北村 圭祐



炭釜 康一



竹村 憲治

### 開発の経緯と開発者の思い

従来のような旧モデルに対するモデルチェンジの開発ではなく、新しいコンセプトに基づく新開発を推進するにあたり、まずは各機能品の性能や車体構造を確認するための先行確認車をしっかり作り込むことから始めました。そのために「先行確認車着手審査→先行確認車の製作・評価→先行確認車完了審査」という新しい開発の仕組みに従い、各ステップにてさまざまな有識者のご意見を取り入れ、製品としてのレベルアップを図ることができました。

本製品については、その市場自体が未成熟な状況のなかで当社の今後の開発方針を検討するテストマーケティング的な位置付けのフォークリフトでもあり、実際にご使用いただくお客様の声にしっかり耳を傾けていきたいと思っております。

# BEV向け5in1\_ESUの開発

## Development of 5-in-1 ESU for BEV

津田 晋佑<sup>\*1</sup> 古野間 高顕<sup>\*1</sup> 田中 優<sup>\*1</sup> 爲永 陽樹<sup>\*1</sup>  
 Shinsuke Tsuda Takaaki Konomi Suguru Tanaka Haruki Tamemaga

\*1 エレクトロニクス事業部 技術部

### 要旨

近年の環境対応や燃料高騰による省エネルギー要求の高まりから、BEV(電気自動車)/HEV(ハイブリッド車)/PHEV(プラグインハイブリッド車)分野の市場拡大は著しいものがある。当社は電動車両に必要な、電圧変換機能を担う製品の開発を通じて、低炭素社会への貢献を目指している。

今回、トヨタ自動車(株)のBEV展開車種拡大に対応する、統合電源ユニット(ESU)を開発したので、その概要について紹介する。

キーワード: 一体化ユニット、BEV専用ユニット、車載充電器、DCDCコンバータ

### Abstract

In recent years, the market for BEV, HEV, and PHEV has seen significant growth due to increasing demands for energy efficiency in response to environmental considerations and rising fuel costs. Our company aims to contribute to a low-carbon society through the development of products responsible for voltage conversion functions, which are essential for electric vehicles.

This time, we have developed an integrated power unit (ESU) to support Toyota Motor Corporation's expansion of BEV models. Here, we introduce an overview of this development.

Keywords: Integrated Unit, BEV Dedicated Unit, Onboard Charger, DC-DC Converter

## 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2025年からBEV(電気自動車)販売を本格化し、2030年までに30車種のBEVを展開、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%を目指すと発表している。

グローバル展開には、電力事情の異なる幅広い国・地域における複数の送電方式への対応や、北米で標準化されている充電規格NACS(North American Charging Standard)への対応が必要となる。また、昨今では充電時間短縮のための高出力化のニーズも高まっており、製品にはこれらの多様な要求への対応が求められている。

今回、各種充電機能、給電機能、電力分配機能を一体化した基幹ユニット「Electricity Supply Unit」(ESU)を開発した。また、本製品は上記グローバル対応や高出力ニーズに対応するため全6バリエーションを同時開発している。本製品の概要と特長について紹介する。

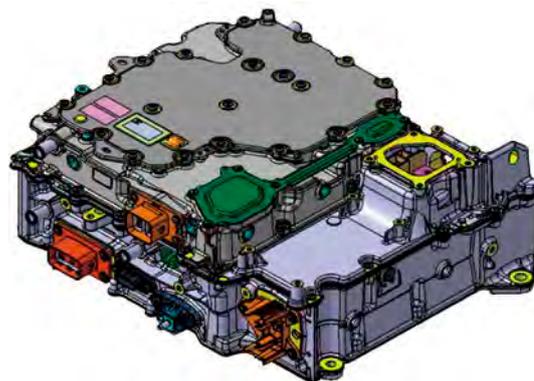


図1 ESU\_22kW外観  
 Fig.1 The external appearance of ESU\_22kW

## 2 製品の特長

製品の主要な特長は、下記3点である。

- ①1ユニットに5機能を集約
- ②全6バリエーションの同時開発
- ③設計共通化による省工数・同一ラインによる混流生産

### 2.1 1ユニットに5機能を集約

下記5機能を実装しており、従来機種と比較してほぼ同体格で各機能のスペックアップを実現している。

AC充電機能は、従来同等の7kW出力と約1.5倍の11kW出力を設定している。また、Add-ON充電器を追加搭載することにより22kW出力が可

能となる。DC充電機能については、お客様の繰り返し急速充電のニーズに対して、水冷部を適切に配置し、DCリレーを冷却することにより対応した。AC給電機能については、新規回路方式の採用によりAC充電器を双方向化し、素子数同等での機能追加を実現している(3.1参照)。

- ・AC充電: 家庭用の交流電圧を直流電圧に変換し、高圧バッテリーを充電
- ・DC充電: 急速充電器の直流電圧で、高圧バッテリーを充電
- ・補機充電: 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
- ・AC給電: 高圧バッテリーの直流電圧を交流電圧に変換し、家庭用電子機器類へ供給
- ・PDU: 高圧電力を分配

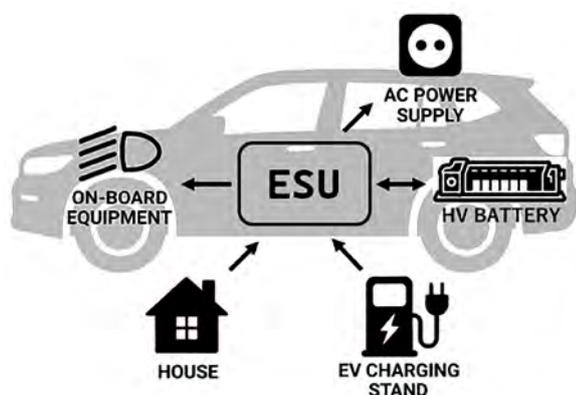


図2 システム図  
Fig.2 System Diagram

## 2.2 全6バリエーションの同時開発

BEV展開車種の拡大に対応するため、各国のインフラに適合するバリエーションを同時開発した(図3)。

また、新充電規格のNACSにも対応、電力分岐部分をASSY内に取り込むことにより、車両側での配線を不要としている。

さらに、お客様の高出力ニーズに対応するためAdd-ON設定、最大出力22kWまでの対応を可能としている。

項目	従来品	開発品					
		1	2	3	4	5	6
体格	300×325 ×200	358×419 ×130				358×419 ×196	
AC充電	単相 7kW	単相 7kW	単相 11kW	単相 11kW	3相 11kW	開 発 中	3相 22kW
充電規格	CCS	CHA deMO	CCS	NACS	CCS		CCS
DC充電	415A	415A※繰り返し充電可能					
AC給電	無し	室内コンセント: ~1.5kW級 外部給電: ~7.2kW級					
補機充電	150A	210A					

図3 仕様一覧  
Fig.3 Specifications List

## 2.3 設計共通化による省工数・同一ラインによる混流生産

単相および三相交流に対応可能な共通回路構成を開発(3.2参照)。また、車両搭載時の占有面積、車両締結部の配置、コネクタや冷却配管といったインターフェース類の配置も共通として設計している。高出力に対応するバリエーションについては、充電器部分をAdd-ONし並列動作させることにより対応(3.3参照)。

これらの設計共通化により、全バリエーションを同一ラインで生産可能とし、フレキシブルな生産体制を実現、BEV台数変動への対応を可能とした。

## 3 新規技術の概要

### 3.1 次世代充電器回路方式

BEVへの大容量AC電源標準搭載のニーズの高まりを受け、交流電圧(系統電圧、室内コンセント電圧)と直流電圧(高圧バッテリー)を双方向で電力変換可能とする双方向充電器を採用した。当社従来BEV向け充電器は、単方向仕様であるため、開発品では主回路構成を大きく見直した。

充電器主回路は、AC入力フィルタ、PFC(力率改善回路)、DCDC、DC出力フィルタから構成される(図4)。従来品のDCDC主回路方式は、低損失動作を特徴とするフェーズシフト方式を採用している。同方式は、逆変換動作の際、過渡動作時高いサージ電圧が発生する特徴をもち、DCDC2次側素子の高耐圧化が必要となり、体格面・コスト面に課題が残る。

上記課題を解決する回路方式として、CLLLC共振方式が知られているが、次世代BEV高圧バッテリーの広い電圧範囲に対しては、素子スイッチング損失が大きくなる電圧(ZVS(ゼロボルトスイッチング)不可)領域が存在し、充電効率性能に課題があった(図5)。

これらの課題を解決すべく、開発品では、DAB(Dual Active Bridge)方式を採用した。同方式は、フェーズシフト方式で必要となるサージ抑制用還流ダイオード、2次側平滑コイルを削減することができ、トランス・共振コイルを一体化可能。同方式は、動作原理的に低サージが特徴であり、2次側素子高耐圧化を必要としない。体格・コスト面

で有利であるとともに、広い高圧バッテリー電圧範囲で、ゼロボルトスイッチング、すなわち低損失動作(高効率)を特徴としており、開発品仕様に最適な回路方式と判断し、採用に至った(図6)。

DAB方式採用の結果、部品コストでAC充電器部分として、従来製品比30%低減、体格で18%低減に成功した(図7)。また、充電効率目標94.5%を達成し車両充電システム目標を達成した。

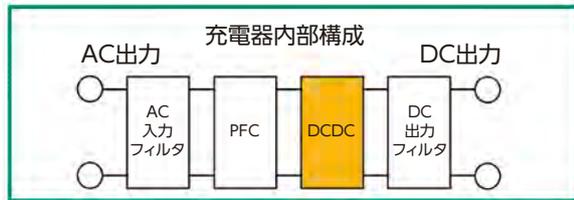


図4 充電器内部構成  
Fig.4 Internal Configuration of the Charger

	フェーズシフト方式 (従来方式)	CLLLC共振方式	DAB方式
回路方式			
Q	サージ リプル	○ 2次側 高耐圧不要 △ 出力コンデンサUp	○ 2次側 高耐圧不要 △ 出力コンデンサUp
	効率 (ZVS領域)	△ 一部範囲でZVS不可	○ 全領域ZVS可能
C	部品点数 (双方化:リレー、 MOS追加)	△ 共振コイル:トランス 一体化 共振コンデンサ必要	○ 共振コイル:トランス 一体化

図5 回路方式比較  
Fig.5 Circuit Method Comparison

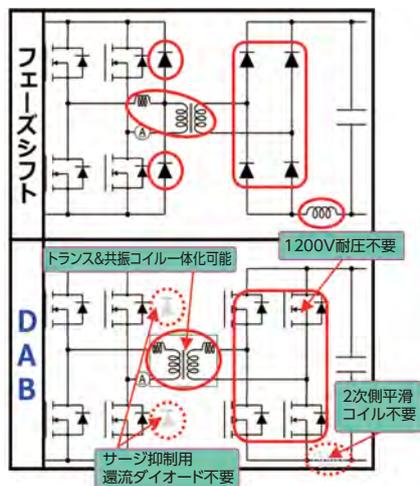


図6 DAB回路特長  
Fig.6 DAB Circuit Features

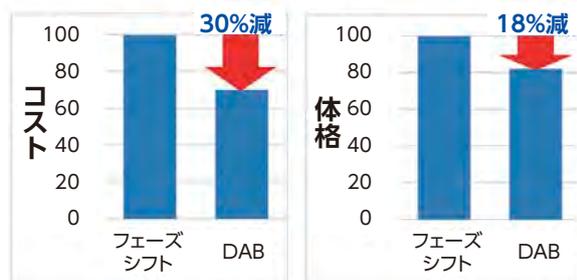


図7 コスト・体格低減効果  
Fig.7 Cost and Size Reduction Effect

### 3.2 単相および三相交流に対応した共通回路構成

開発品は、従来品の単相7kW仕様、北米仕向単相大電力仕様、欧州仕向三相仕様(最大22kW出力)が加わり、充電仕様のバリエーションが大幅に増えた。そのため、従来品1品番に対して、開発品は全6品番での対応が必要となった。

開発品は、入力電圧センサにより入力電圧が単相か三相かを識別し、リレー操作を通じて動作モードを切り替えることにより、回路構成の統一を可能としている。また、単相、三相仕様の両方に対応できる部品仕様を検討し、性能面の許す限り部品共通化を推進した。その結果、開発品は部品共有化率を90%以上に高めることに成功した。

図8に単相モード時の回路図、図9に三相モード時の回路図を示す。単相入力時には、トータムポール型インターリーブ回路方式となり、単相入力下での高効率なPFC動作を可能にする。三相入力時には、2レベル電圧形三相インバータ回路方式となり、三相入力下でのPFC動作を実現している。制御方式はモータ制御分野でも広く使用されるベクトル制御をベースとした電流制御法を新たに開発した。

図10に示す通り、交流電源電圧ベクトルを基準に、最適制御された電圧ベクトルを三相インバータ部で生成することで充電電力伝送かつ高力率動作を可能としている。

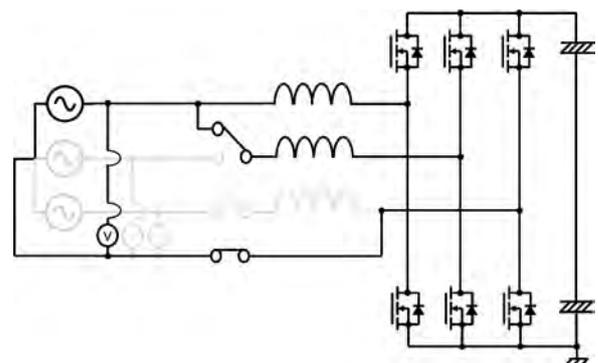


図8 トータムポール型インターリーブ回路方式  
Fig.8 Totem-Pole Interleaved Circuit Method

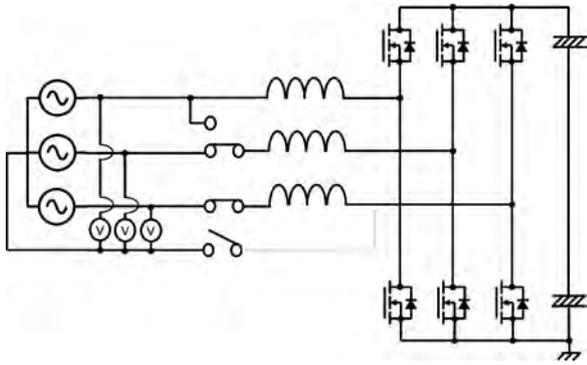


図9 2レベル電圧形三相インバータ回路方式  
Fig.9 Two-Level Voltage-Type Three-Phase Inverter Circuit Method

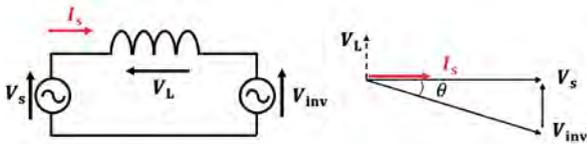


図10 三相回路の1相あたりの等価回路とベクトル図  
Fig.10 Equivalent Circuit and Vector Diagram per Phase of Three-Phase Circuit

### 3.3 体格共通化

ESUは充電仕様の単相7kWと単相11kWの2バリエーションをベース設計のStandard充電器とし、車両搭載時の占有面積を同等、車両締結部の配置、コネクタや冷却配管といったインターフェース類の配置を共通として設計した。内部構成は全バリエーション共通で、1階部分に「AC充電フィルタ部」「DCDC」「DCリレー駆動」の3枚の基板を配置、2階部分にAC充電のメイン部、DCリレー、PDUを配置している。各部の発熱は、1階と2階の間に配置した冷却水路へ放熱する。

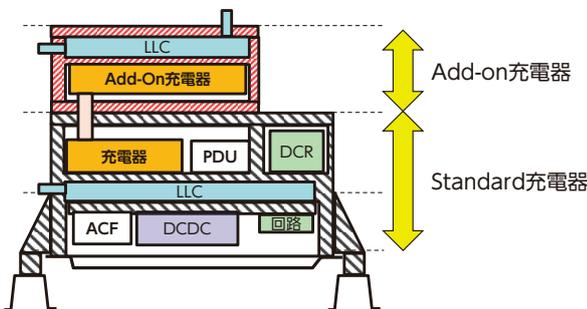


図11 内部構成  
Fig.11 Internal Configuration

体格共通のため11kW仕様は7kWよりも発熱密度が大きくなり、必然的に冷却の課題が生じることに加え、本開発では、低コスト化をねらい従来の充電器で用いてきたパワーモジュール(無駄な

配線スペースを削減可能で小型化に寄与)の採用を見送り、ディスクリートのパワー素子を用いることを方針としたため、必要な放熱面積が増え、パワー素子の配置と放熱は設計上の大きな課題となった。

この課題を解決するため、11kW仕様ではPFC回路の素子冷却用として「素子縦置き構造」を採用した。アルミ押し出しで製作するヒートシンクの側面にパワー素子を配置し、ヒートシンクを經由してケースへ放熱する構造である。部品同士の接触面にシリコングリスを介在させ熱抵抗を改善し、高密度の素子実装と放熱を両立させている。

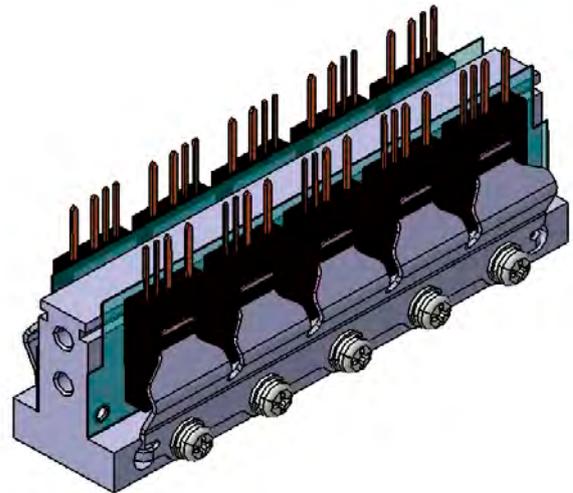


図12 縦置き構造  
Fig.12 Vertical Placement Structure

充電器のメイントランスやPFCコイルといった磁気部品はパワー素子と同様に発熱が大きく、放熱を十分に考慮する必要がある。11kW仕様ではケースにバスタブ構造を設け、そのなかに磁気部品を配置し、放熱ポッティングを充填して高放熱構造としている。また、この放熱ポッティングは熱硬化炉による生産時のCO<sub>2</sub>排出を抑制する目的で、常温硬化が可能な物を採用し、最小限の加熱に留めている。

高出力バリエーションは、Standard充電器の「3階部分」としてAdd-ON充電器を搭載する構造であり、ESUユニットとしての体積は増加するが、占有面積はAdd-ONを追加しても同等となるのが特徴である。Add-ON専用の冷却水路がユニット最上面に設けてあり、Standardと配管を接続することで、ESUとして連続した一つの冷却水路となる。

北米仕向のNACS仕様は、ACとDCが共通のラインで送電されるため、車両のどこかに電力を分岐させる機構が必要となる。ESUのDCリレー上

部のスペースを活用し、追加のコネクタおよび端子台を配置し、Global仕様から構成を大きく変えることなくESU ASSY内にAC分岐機構を構成した。これにより機器外の分岐機構が不要となり、車両の搭載成立性に貢献することができた。

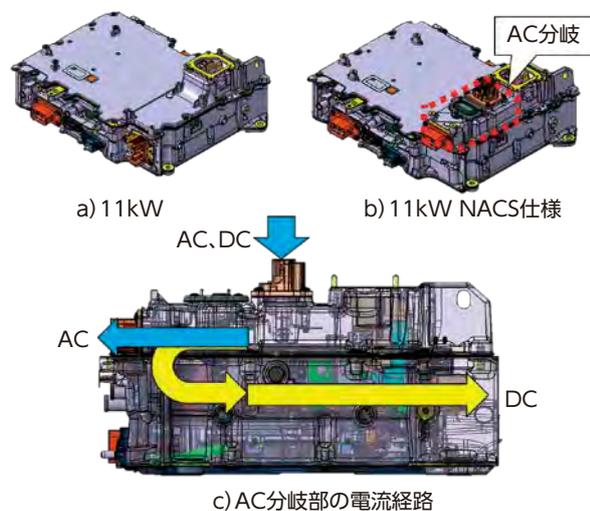


図13 AC分岐箇所  
Fig.13 AC Branch Point

#### ■ 著者紹介 ■



津田 晋佑



古野間 高頭



田中 優



為永 陽樹

## 4 まとめ

本製品では、5機能集約という新規の開発が必要であった。また、6バリエーションを同時開発するという試みも初であった。これらの新規要素に加えて、製品の競争力強化のために、機能面強化と工程自由度の向上も追求した。

AC充電器の双方向化・单相/三相充電の回路構成の共通化、構造部品類の共通化などの各種新規技術に取り組み、従来製品と同等の体格にスペックアップした各種機能を織り込み、同一ラインによる混流生産を実現することができた。

結果、体積は26%、重量は13%の小型軽量化を実現している(单相11kWで出力密度を考慮し算出)。

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に深く感謝いたします。

## 開発の経緯と開発者の思い

拡大する電動車両市場に対応するにあたり、多様なお客様のニーズに応える提案力がサプライヤーに求められる時代だと考えています。

そのようななか、今回の5in1\_ESUの全6バリエーション同時開発は、非常にやりがいのある製品開発であり、挑戦的な取り組みでした。また、BEVの生産台数変動に柔軟に対応するため、混流ラインでの対応が必要不可欠であったことから、各部署を横断する強力な開発体制が重要でした。

開発初期には、関連部署との調整や仕様の整合性確保について不安を抱いていましたが、すべての関係者が目標達成に向けて協力し合い、無事に量産を迎えることができました。この成果は、エレクトロニクス事業部の総力を結集できたおかげだと感謝しています。

今後も電動車両の進化を支えるべく、付加価値の高い製品づくりを目指し、お客様に満足いただける製品開発に努めていきたいと考えています。

# 技術解説

## Technical Review

- P.98 IoT未対応設備への遠隔管理システム導入による業務効率改善
- P.102 鋳造現場の安全性向上に向けた遠隔操作ノロ取りロボットの開発
- P.108 カーエアコン用電動コンプレッサの回転1次振動低減における機構解析の活用
- P.114 富岳を活用した電極-電解液界面シミュレーション
- P.120 データの類似性を考慮した転移学習による予測モデルの性能向上  
-燃料電池フォークリフト稼働データによる検証-
- P.127 高耐熱複合材料むけプリフォーム製織技術の開発
- P.132 製品に含まれる化学物質の規制とその対応

# IoT未対応設備への遠隔管理システム導入による業務効率改善 Improving Operational Efficiency by Introducing a Remote Management System to IoT-Unsupported Facilities

濱口 富平<sup>\*1</sup>

Tomihei Hamaguchi

\*1 コンプレッサ事業部 アルミ技術部

## 要旨

IoTに対応していない旧型の生産設備に対し、東芝デジタルソリューションズ(株)が提供する制御パッケージを活用することで設備を遠隔管理するシステムを提案する。このシステムの導入により、エンジニアが生産設備のデータ収集や維持管理を行うために要する付帯作業工数を89%低減することができた。このシステムを国内外の生産拠点に展開することで現場作業の工数低減だけでなく、生産準備のリードタイム短縮や出張費の低減が見込まれる。

キーワード: 生産設備、遠隔管理、作業効率化

## Abstract

We propose a system for remotely managing legacy production equipment that is not IoT-compatible, by utilizing a control package provided by Toshiba Digital Solutions Corporation. The implementation of this system has successfully reduced the auxiliary workload required for engineers to perform tasks such as data collection and quality control for production equipment by 89%. By deploying this system at both domestic and international production sites, not only can on-site workload be minimized, but lead times for production preparation can be shortened and travel expenses can be reduced as well.

Keywords: Production facilities, Remote administration, Work efficiency

## 1 はじめに

近年、深刻化する労働力不足と労務費増加の問題から、競争力の高い製品を生産するため業務効率の改善が課題となっている。この課題の解決策として、大府工場の新しい設備はIoT技術を活用したデータ収集や品質管理を行っているが、多くの割合を占める旧型の生産設備ではIoT未対応の機器で構成されており、そういった設備では業務効率の改善ができておらず、エンジニアがトラブルのたびに現場へ足を運んでいるのが現状である。そこで本稿では、大府工場にあるIoT未対応の生産設備に、現場で行っていた業務を自席から遠隔で行えるシステム(図1)を導入し、エンジニアの業務効率改善を行った事例を紹介する。

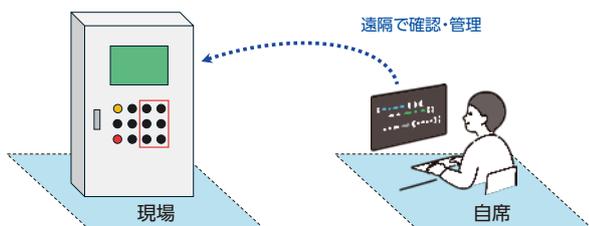


図1 遠隔管理システムの概要  
Fig.1 Remote Management System Overview

## 2 システムの導入

### 2.1 対象設備

今回遠隔管理システムを導入する生産設備は、大府工場でコンプレッサ部品を生産する設備として多くの台数を保有しているアルミダイカスト工程である。ダイカスト工程では、図2に示すよう、射出速度、圧力、金型温度など多くのパラメータが製品品質へと相互に影響し合うため、エンジニアがバランスを調整しながら条件管理を行っている。

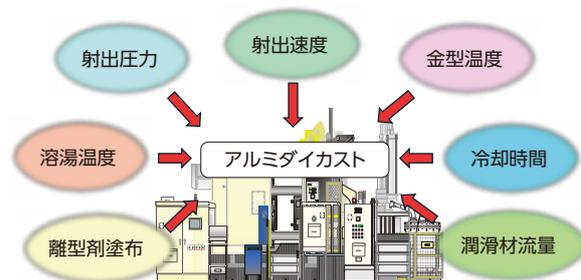


図2 ダイカスト工程の管理項目  
Fig.2 Management Items in Die Casting Process

しかし、熔融金属を高速、高圧で射出するため設備の摩耗や劣化を招きやすく、铸造温度や射出速度などが刻一刻と変化することから、管理することが難しい技術であり、トラブルが発生するたび、エンジニアが現場で状態、状況を確認し、条件を調

整して対応している。そのため、現場を往復する頻度は多く、対応によっては、データを収集するための機器やケーブルの準備、接続も必要なため、ダイカスト工程への遠隔管理システム導入による効果は大きいと考えた(図3)。

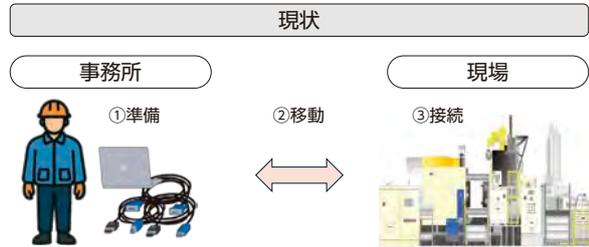
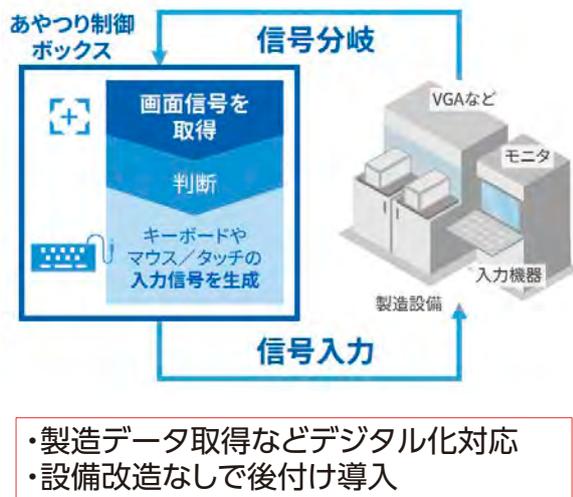


図3 ダイカストエンジニアの現状  
Fig.3 Current Status of Die Casting Engineers

## 2.2 システム設計

大府工場のアルミダイカスト設備は、導入した年代によって構成する機器のメーカーや型式が異なる。すべてのマシンへ横展開することを考えたとき、これらの機器を統一しようとする、莫大な費用と期間が必要であり、設備改造のリスクも発生する。そのため今回は、設備の改造は必要とせず、後付けする形でのシステムを検討した。そこで、機器を遠隔で制御できる仕組みとして活用したのが、東芝デジタルソリューションズ(株)が提供する「Meister Apps™ 設備あやつり制御パッケージ」(以下、あやつり制御と表記)である(図4)。



- ・製造データ取得などデジタル化対応
- ・設備改造なしで後付け導入

図4 Meister Apps™ 設備あやつり制御パッケージ<sup>[1]</sup>  
Fig.4 Equipment Manipulation Control Package

このパッケージでは旧型の設備にも改造なしで後付け可能であり、データの収集だけでなく、信号の入出力を制御することで、リアルタイムでの設備データの閲覧や、遠隔地から設備のソフト上の操作も可能となるのがメリットだ。また、搭載されている産業用コンピュータが、24時間連続稼働を前提に、高信頼・長寿命の部品を採用しているため、アルミダイカストの過酷な環境現場でも安心して設置できることも採用したポイントの1つである。

このあやつり制御を導入し、ダイカスト工程に合わせた機能の追加や制限など、当社と東芝デジタルソリューションズ(株)共同でカスタマイズすることによって、既設の旧型設備にはできなかった、PLC(Programmable Logic Controller)やマイコン(マイクロコンピュータ)、RB(ロボット)などの複合的な情報を遠隔で維持・管理するとともに、従来は現場で行っていた調整作業を自席から実施可能とする仕組みを構築した。

## 2.3 システム構成

あやつり制御を用い、遠隔管理を行うシステムの構成を図5に示す。あやつり制御盤は生産設備の横に設置した。生産設備に使用する通信方式の入出力をあやつり制御盤内に用意し、生産設備内の機器に後付けで配線接続することで産業用コンピュータから制御することを可能としている。そしてその産業用コンピュータに社内ネットワークを接続し、Windows搭載のリモートデスクトップ機能を使用することで、事務所からあやつり制御盤を経由して各機器の必要なデータ収集や、条件の調整などを可能とした。

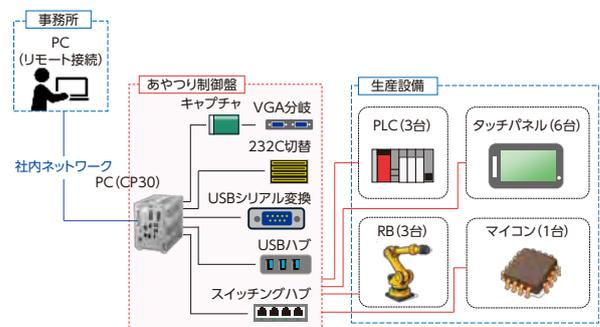


図5 遠隔管理のシステム構成  
Fig.5 Remote Management System Configuration

### 3 業務効率の改善

前述の遠隔管理システムの導入によって、これまで現地で行うことができなかったデータの収集や条件調整など設備の維持管理や品質管理にかかわる業務が自席から行えるようになった(図6)。

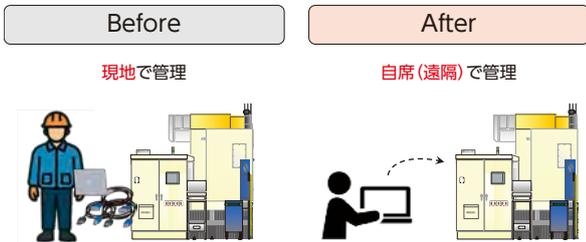


図6 遠隔管理システム導入による作業の変化  
Fig.6 Changes in Work Processes Due to The Introduction of Remote Management Systems

これにより、現地で条件調整する時間や、機器の準備、現地を往復する時間といった維持管理にかかわる付帯作業工数が約89%削減された(図7)。またこの効果以外にも、複数の設備のデータを一つの画面で確認することができるためデータの確認が容易になったことや、熟練度の低いエンジニアでも、現地データを見ながら熟練度の高いエンジニアに相談することができるため、品質管理にかかわる作業工数のさらなる改善効果が期待される。

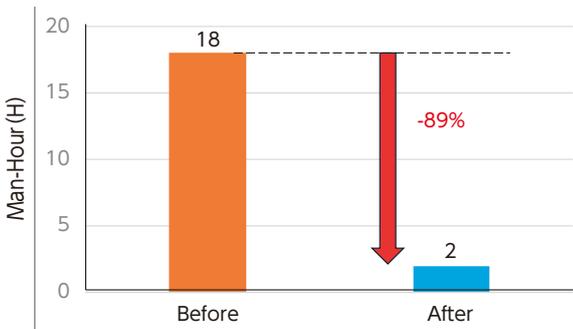


図7 遠隔管理システム導入による作業改善効果  
Fig.7 Work Improvement Effects by Introducing a Remote Management System

### 4 運用方法

#### 4.1 システムへのアクセス

このシステムを導入するうえで、課題となったのが安全な運用方法だ。遠隔でソフト上の操作が可能となるため、機能の制限や関係者以外システムにアクセスできないようなセキュリティを構築する必要がある。そこで活用したのが、ワンタイム

パスワードである。ワンタイムパスワードは1分ごとに変化するため、パスワード流出による関係者以外のアクセスリスクが発生しないメリットがある。また、ワンタイムパスワードを発行する機器を対象とする生産設備に設置し、製造部門にパスワードを発行してもらうことで、現場での安全確認をするとともに、製造現場が意図しない変化を発生しないようにした。そのアクセスフローを図8に示す。ワンタイムパスワードだけでなく遠隔制御使用者の資格情報も入力させることで、いつ誰がアクセスをしたか履歴が残るような仕組みとなっている。

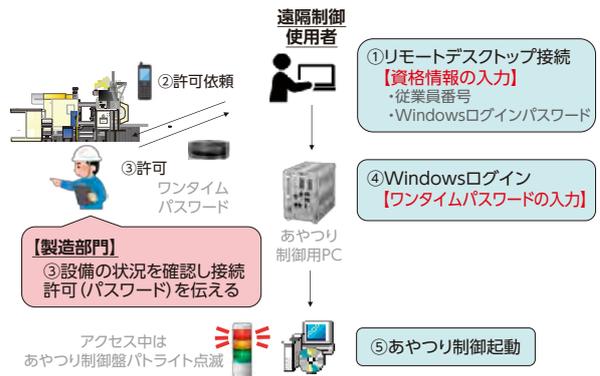


図8 遠隔管理システムへのアクセスフロー  
Fig.8 Access Flow to Remote Management System

#### 4.2 操作履歴の記録

前述の資格情報入力による、システム使用者の記録に加え、鑄造条件を管理するタッチパネルの操作履歴も記録可能とした。これまで、鑄造条件の設定値をタッチパネルで変更する際、いつの設定を変更したのか記録できなかったが、今回タッチパネルのクリック信号をコンピュータに取り込むことで操作履歴を記録することが可能となった(図9)。品質にかかわる設定値は帳票で管理しているが、すべての設定値を管理はしていなかったため、これにより変化点の調査が容易になることが期待される。

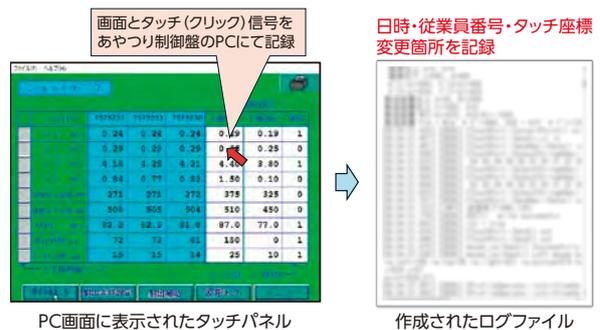


図9 タッチパネル操作履歴の記録  
Fig.9 Recording of Touch Panel Operation History

## 5 まとめと今後の展開

### 5.1 まとめ

大府工場の既設アルミダイカスト設備に遠隔管理システムを導入することで、設備の維持管理や品質管理にかかわる作業効率を改善することができた。また課題であった遠隔管理システムを安全に運用する仕組みを整えることができた。今回は生産技術部門の作業を改善する取組みであったが、今後は産業用コンピュータの拡張性を生かし、データの自動バックアップや設備の故障予兆を検知する保全部門での作業効率改善や、圧力や流量などを日常的に管理する製造部門での作業効率改善に取り組みたい。

### 5.2 今後の展開

遠隔管理システムの今後の展開について、目指す姿を図10に示す。本稿ではSTEP1として、大府工場のアルミダイカスト設備で遠隔管理システムを導入した事例を紹介したが、このシステムを国内外の拠点へ展開することでより大きな効果が得られると考えている。大府工場ではコンプレッサ部品を生産するアルミダイカストのマザー工場として、多数ある国内外の関係会社にも技術支援を行っている。しかしすぐに現場に足を運び現地現物で確認することができないため、国内外の関係会社で現地生産が増加するなか、限られたエンジニアで対応することが困難となってきた。そこで今回の遠隔管理システムを国内外の拠点に展開することで、生産の立ち上げリードタイムの短縮や、品質改善の対応工数削減など、拠点全体として作業効率の改善を目指していきたい。



図10 遠隔管理システム展開の目指す姿  
Fig.10 The Vision for Remote Management System Deployment

#### ■参考文献

[1] 東芝デジタルソリューションズ(株) ホームページ

#### ■著者紹介■



濱口 富平

### 開発の経緯と開発者の思い

国内外拠点での生産が増加することから、限られたエンジニアのみですべての品質不具合への対応や生産準備を行うのは難しく、これまで以上に幅広く現場を支援できる体制を整える必要がありました。またコロナの影響で海外拠点にも行くことができない経験をしたからこそ、より大府工場から各拠点の支援をリアルタイムで行う必要性を感じていました。遠隔管理システムは比較的スムーズに進みましたが、安全な運用方法をつくるというのが苦労したポイントです。アクセスの方法や遠隔で操作する箇所の機能制限など、関係部署と打ち合わせを繰り返し決定していきました。このシステムを私たち大府工場のエンジニアだけでなく、保全部門や製造部門にも使っていただき、そして国内、海外への拠点へ展開することで、関係会社全体のダイカスト工程のレベルアップにつながったと思います。またシステムの導入に際し、多くの相談やアドバイスをいただいた東芝デジタルソリューションズ(株)の方々へ感謝申し上げます。

# 鑄造現場の安全性向上に向けた遠隔操作ノロ取りロボットの開発 Improving Foundry Safety through Remote-Controlled Slag Removal Robotics

阪野 樹央<sup>\*1</sup> 垣見 勇介<sup>\*1</sup> 松澤 知行<sup>\*1</sup> 安達 直功<sup>\*1</sup> 松井 俊幸<sup>\*1</sup>  
Shigeo Banno Yusuke Kakimi Tomoyuki Matsuzawa Naokatsu Adachi Toshiyuki Matsui

\*1 エンジン事業部鑄造部

## 要旨

鑄造現場の安全性向上を目的に、遠隔操作ノロ取りロボットを開発。背景には高熱物接近作業の危険性と熟練者依存があり、操作性と力覚フィードバックを評価。専用コントローラとフィードバックの織込みにより熟練作業の再現性を実現。結果として安全性と作業標準化に貢献できる目途付け完了。今後は設備完成度を高め、類似工程への横展を目指す。

キーワード：鑄造、遠隔操作、高熱物、熟練作業、安全性向上、作業標準化

## Abstract

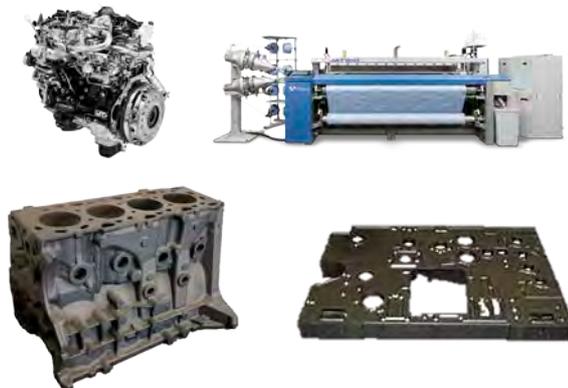
To improve safety in casting operations, a remotely operated slag removal robot was developed. The system addresses risks from working near high-temperature materials and dependence on skilled labor. Operability and haptic feedback were evaluated, confirming that expert-level performance can be reproduced using a dedicated controller. The results indicate potential contributions to safety and operational standardization. Future work will focus on refining the system and applying it to similar processes.

Keywords: Casting, Remote Operation, High-Temperature Materials, Skilled Worker, Safety Improvement, Work Standardization

## 1 はじめに

当社および豊田工業(昆山)有限公司(TIK)で生産される鑄鉄部品は、エンジン用のシリンダブロック、シリンダヘッド、カムシャフト、繊維機械のフレーム、産業車両の油圧バルブなど、幅広い分野で活用されている(図1)。エンジン事業部方針には「鑄鉄事業の継続」が掲げられており、東知多工場とTIKには、期待と責任が寄せられている。

エンジン事業部鑄造部では、東知多701、702工場が鑄造業界をリードするという気持ちで、鑄造現場の安全・品質・生産性向上に向けた技術開発や現場活動を進め、鑄造業界を「この工場で働きたい」と思える製造業に変化させる取組みを行っている。



シリンダブロック  
(GD型エンジン)

フレーム  
(エアジェット織機)

図1 製品紹介  
Fig.1 Product Introduction

## 2 背景

鑄造とは、金属を溶かして型に流し込み、目的の形状に成形する加工方法である。鑄鉄はそのなかでも鉄を主成分とする鑄造品を示している。東知多工場では、鉄源としてプレス端材(長草工場から支給)、Si(シリコン)合金、黒鉛、銅線屑(刈谷工場から支給)などを原料として使用している。これらの材料を高周波誘導炉(以降 溶解炉)で約1500℃まで加熱・溶解し、成分調整を行う工程が「溶解工程」である。

溶解工程では、溶湯を確認しながら作業を行う必要がある。とくに「ノロ取り」と呼ばれる、溶湯表面に浮かぶ不純物を除去する作業では、約1500℃の溶湯に接近する時間が長く、高温の重量物をハンドリングする高リスク作業となる。そのため、ノロ取り作業(図2)において「作業者と危険源を隔離」する技術開発に着手した。



東知多工場の高周波誘導炉  
6 トン炉2基  
3.5トン炉1基  
2 トン炉2基

図2 ノロ取り作業  
Fig.2 Slag removal work

### 3 ノロ取り作業の課題

#### 1) 鑄鉄に発生するノロについて

ノロ(写真1)は材料に付着した汚れや、砂、鑄鉄の主成分であるSi(シリコン)の酸化物、材料である黒鉛の溶け残りなどが混在した不純物で、材料溶解時や、溶湯を保持しているときに発生する。



写真1 溶解炉内のノロ  
Photo1 Slag

#### 2) ノロの影響

ノロは溶解炉から溶湯を移し替える作業で溶湯の流れを乱し、火災や災害の原因となる可能性がある。ノロが製品に入ると粗材不良を引き起こす可能性がある。安全性と品質の両面から、ノロの確実な除去が不可欠となっている。

#### 3) ノロ取り作業

ノロ取り作業(図3)は、溶湯表面に浮かぶ軟化したノロや、塊状のノロを溶解炉外へ排出する作業である。「溶湯に接近できない」、「溶湯品質に影響しない」、「安価」などの理由で、棒状のノロ取りツール(図4)を使用して実施する。ノロ取り作業には、熟練者の経験と勘に頼る部分が多く残存している。

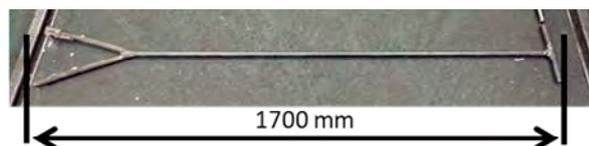


図4 ノロ取りツール  
Fig.4 Slag removal tools

### 4 目指す姿 熟練作業と同等

他社でも産業用ロボット(写真2)を使用したノロ取り作業の事例はある。しかし、他社のロボットを使用したノロ取りでは、溶解炉開口面積の20%程度のノロが取り残されていた。そのため、作業員が炉に接近してノロ取り作業を完了する必要があった。※トヨタ自動車(株)はツール形状の工夫により、ノロ取りの完成度を高めた。

私たちの目指す姿は、熟練作業員と同等のノロ取り作業をロボットにより実現して、作業員と高熱物を隔離することとした。そこで、遠隔からノロ取り作業を完了する方法を検討した。

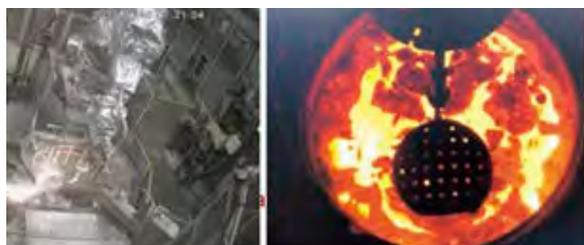


写真2 トヨタ自動車(株)のノロ取りロボット  
Photo2 Slag Removal Robot (TMC)

### 5 技術的課題とアプローチ

ロボットによるノロの取り残しは、溶解炉の炉壁周辺に発生する(図5)。これは、溶湯の対流によってノロが炉壁に集まり、冷えて固着するためである。固着したノロを剥がすには、炉壁とノロの間にノロ取りツールを差し込む縁切り作業が必要となる。しかし、ロボットの自動プログラムでは炉壁ギリギリまで接近できず、縁切り作業が困難であった。

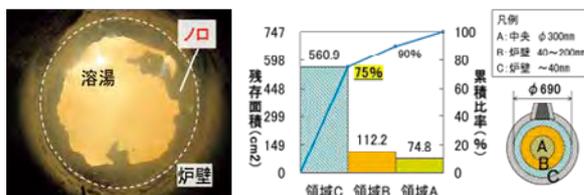


図5 ノロ残存部位  
Fig.5 Slag Residual Areas

ロボットが炉壁に接近できない要因解析を行った。ノロ取りツールの溶損や炉壁の変形、損耗による、「ロボットと炉壁の位置関係の変化に対して修正ができない」。ロボットと炉壁を守るための「接触を認知・調整ができない」という2つの真因が洗い出された(図6)。



図6 要因解析  
Fig.6 Cause Analysis

## 6 解決策

2つの真因に対応するために、ロボットを自在に遠隔操作可能で、手元に反力を伝え認知を補う機能を持つ遠隔操作システムを使用し、熟練作業者が遠隔から炉壁のノロを除去することを目指した。

そこで、川崎重工業(株)の遠隔操作システムに着目し、東知多工場での鑄鉄ノロ取りに適用するために共同で追加開発を実施した。

遠隔操作システム「Successor Plesio」は、以下の構成で成り立っている(図7)(写真3)。

- ・スレーブロボット(産業用ロボット)
- ・コミュニケーター(遠隔操作を行う装置)
- ・制御PC(動作演算・指令)

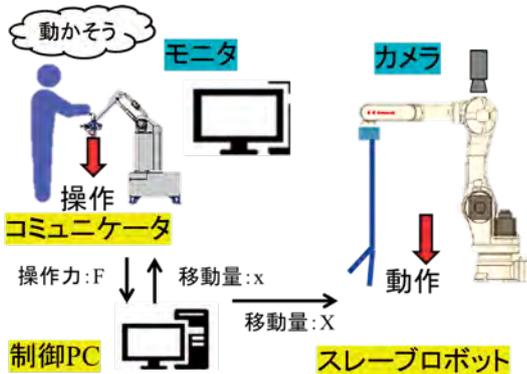


図7 遠隔操作システムの構成<sup>[1]</sup>  
Fig.7 Configuration of Remote Control System



写真3 遠隔操作システム  
Photo3 Remote Control System

作業者は溶解炉のなかを映すカメラ映像を、モニターにより確認しながらロボットを遠隔操作して、遠隔からのノロ取り作業を実現する。

ロボットを遠隔操作する作業者が、ノロ取りツールを炉壁まで違和感なく操作するための視界の確保を実施した。

炉壁のノロに対する縁切り作業では、作業の反力を6軸フランジ面に搭載する力覚センサにより検知し、コミュニケーターの動作として作業者に認知させるシステムとした。作業に必要な接触感覚を伝えるための評価を実施した。

## 7 評価結果

オフラインの事前評価では、遠隔操作システムを東知多工場の環境下で機能を発揮するための適用開発を実施した。インライン(溶湯を使用した)評価では、溶解工程という特殊環境への対応と、遠隔操作により熟練作業者同等のノロ取り結果を得るための評価を実施した。評価内容は下記表(表1)のとおりである。

表1 ノロ取りロボット評価項目  
Table.1 Evaluation Items of Slag Removal Robot

区分	評価項目	内容・目的
オフライン	操作性	ノロ取りツールの動き、角度調整、操作時の重さを確認
	手感覚のフィードバック	力覚センサを使用した接触感覚をチューニング
オンライン	視覚	炉内状況の把握と、操作性を満足するカメラ設定
	ロボットへの熱影響	高温環境下でのロボット使用可否判断
	ノロ取り残し量	ノロ除去の能力確認 安全・品質を満足する熟練作業者と同等を目指す

### 1) オフライン評価

試験場に東知多工場のレイアウトを再現して模擬溶解炉とロボットを設置して、遠隔操作の事前

評価を実施した。

(1) 操縦性

実作業に近い操作感を遠隔操作で再現できることを目指した。

ロボットの操作感に関しては、コミュニケータを操作しながら手元にあるミニチュア炉に対してノロ取り作業を実施すると、スレーブロボットが溶解炉のノロ取り作業を実施しているような状態を目標とした。コミュニケータとスレーブロボットの動作比率を調整して、敢えて小さい操作で大きく動作する設定とすることにより、操作感を向上させた(図8)。

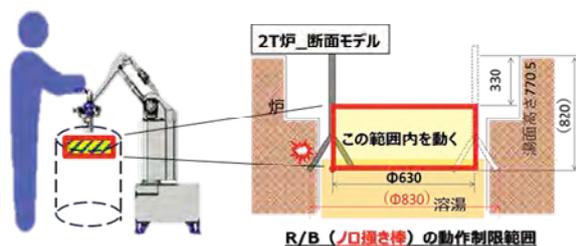


図8 コミュニケータとロボットの動作範囲  
Fig.8 Work Area

ノロ取りツールの操作感は、コミュニケータに取り付けするグリップ部分を「両手」で操作するノロ取りツールの持ち手を模した形状とすることで、ノロを取るための3つの動作(図9)が、実作業に近い感覚で操作できるようになった。

項目	評価項目	結果	コメント
S, Q	作業領域内を自在操作(炉内に限定)	○	操作性良好
S, Q	ノロ取り3動作(掬う、突く、巻き取る)	× →○	ノロ取りツールの持ち手を模したコントローラに変更し改善
S	エラーにより炉内で停止	× →○	川崎重工業担当者と連携してプログラムを修正

図9 両手操作によるコントロール性の向上  
Fig.9 Improved Control by Two-Hand Operation

(2) 手感フィードバック

ノロ取り3動作(掬う、突く、巻き取る)の反力(図10)を再現して、必要な感覚がコミュニケータにフィードバックされるための調査・設定を実施。

曲げ方向の反力は長尺のノロ取りツールが変形するため感度が悪い。また、振動(しなり)により操作性を悪化させたため、フィードバックを無効とした。

圧縮方向の反力は想定通りにフィードバックされ、炉壁とノロの縁切り作業に必要な力を認知することを可能とした(図11)。

力: ← 移動方向: →

	掬う(曲げ)	突く(圧縮)	巻き取り(振れ)
動作	曲げ	圧縮	振れ
力	△	○	△
結果	△ →○	○	△
コメント	過敏に設定すると曲げ振動で、円滑な操作を阻害	縁切りに必要なフィードバックを得た	突き、曲げと比較してフィードバックを感じにくい

図10 手感フィードバック調査  
Fig.10 Tactile Feedback Investigation

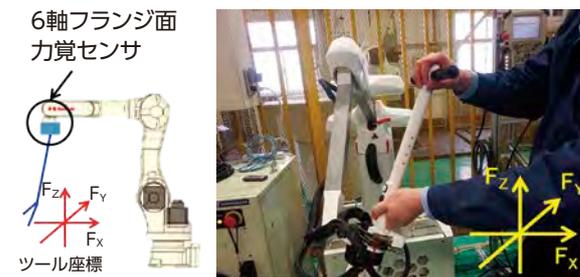


図11 フィードバック座標系  
Fig.11 Feedback coordinate system

2) インライン(溶湯使用)評価

東知多工場の溶解炉にロボットを設置。溶湯を使用して、明るさ・輻射熱への対応と、事前評価した遠隔操作機能が、ノロ取り作業に使用できるか目途付けを実施した(表2)。

表2 インライン(溶湯使用)評価  
Table.2 Inline (Molten Metal Usage) Evaluation

項目	観点	内容	結果	コメント
SQE	視覚	溶湯に残るノロを確認	× ↓ ○	遮光ガラス使用し白飛びが減少
S	耐熱性(熱影響)	ロボットのエンコーダ温度の変化	○	耐熱ジャケット着用。上限95℃に対して、0.2℃/minの温度上昇
SQ	品質	ノロの取り残しゼロ	△ ↓ ○	ツール形状を変更

技術解説

### (1) 視覚

炉壁やノロと溶湯の明暗差が大きく、溶湯が白飛びする課題があった。遮光ガラスを使用し、短波長光をカットすることで対策を実施した。飛散する溶湯や、赤外線からカメラを保護する効果も期待できる。

溶湯から煙が多く発生するときに、乱反射により作業性が損なわれるため、引き続き改善が必要。

### (2) ロボットの耐熱性

溶湯の輻射熱に対して、ロボット、ケーブル、付帯機器が対応可能か確認を実施した。輻射熱に対しては、遮熱板により影を作れば十分対応可能であることを確認したが、飛散する溶湯への対応としてロボットジャケットを採用した。

ジャケット着用状態で、溶湯に約1000mmまで接近させた状態(写真4)で25分保持しロボットエンコーダ温度の変化を確認した。上限温度95℃に対して、温度上昇は0.2℃/minで問題ないことを確認できた。



写真4 ノロ取りロボットの輻射熱対策  
Photo4 Heat Protection for Slag Removal Robot

### (3) ノロの取り残しゼロ

遠隔操作によるノロ取りツールの操作は、熟練作業者のようにクイックなノロの排出動作が実施できない課題が浮き彫りになった。

そこで、ノロ取りツール(表3)をロボット用に形状変更してノロを掬う能力を強化することで、ノロを安定して排出することに成功した。この形状は溶損しても能力が維持できること、ノロ排出後にノロ取りツールとノロを分離する作業性の悪化がないことを確認した。

表3 ノロ取りツールの評価結果  
Table.3 Evaluation Results of Slag Scraping Tool

ノロ取りツール	先端形状	結果	コメント
三角 (手作業)		×	先端が溶損にともない作業性が悪化
四角 (ロボット)		○	溶損してもノロをのせる面積を維持重量増加するが、ロボットなら対応可能

## 8 今後の展望

実証機による味見評価を経て、号口炉にロボットと付帯設備を設置し評価のN増しを実施している。ロボットの周囲には、ノロ取り作業以外の溶湯接近作業用のツールも配置した。結果として溶解炉2個分のスペース(図12)を使用しているため、横展を目指すには省スペース化や、作業区域の見直しが必要となる。

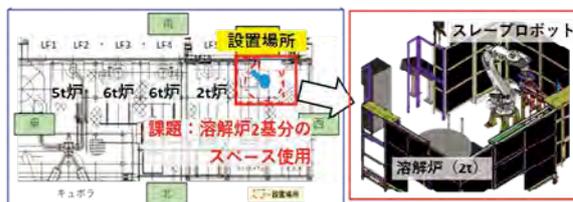


図12 ロボットレイアウト(現在の姿)  
Fig.12 Current Demonstration Furnace Layout

ロボットを使用してノロ取り以外の溶解作業の自動化(図13)を評価するため、溶湯量の変化に追従する機能と、自動ツールチェンジが可能なハンドを別途評価し織込みした。

今後は、溶解中の溶湯攪拌作業を自動化して、作業者が溶湯を確認する時間の短縮と、発生するノロの性状安定化を目指す。

No.	溶解工程フロー	進捗	No.	ノロ取り工程	進捗
1	材料計量・投入	-	2-1	ノロ掻き棒装着	完了
1.5	溶解中の溶湯攪拌	新課題	2-2	湯面高さ測定	完了
2	遠隔操作ノロ取り	完了	2-3	スラグキャッチ投入	完了
3	自動ノロ取り	完了	2-4	(遠隔)ノロ取り	完了
3	温度測定	完了	2-5	ノロ搬送	-
4	分析試料採取	評価中	2-6	ノロ掻き棒取り外し	完了
5	材料計量・投入(調整用)	-	2-7	湯面残存ノロ確認	完了
6	出湯	-	2-8	ノロ分離	完了

図13 ロボット化完了目途有り工程  
Fig.13 Schedule for Completion of Robotization

1) 溶湯高さ追従機能がもたらすメリット

自動プログラムで溶湯に触れることが可能となった。これにより遠隔操作開始位置が、当初の炉外定位置に対して、溶湯と一定距離の位置に変更することができる。溶湯量が変化した際も、同じ遠隔操作の動きによる作業が可能となった。

2) ハンドとツール

溶解工程では、熱や荷重によりツールの変形が起きる。ロボットハンド(写真5)には変形による位置ずれを許容することをコンセプトに掲げてノロ取りロボットの設計を実施した。具体的には、ツール把持部の形状を統一し、置き台とハンドそれぞれV字形状として、ノロ取りツールが重力とクランプ力により同一位置に修正される設計とした。

クランプにはトグルクランプを採用した。小型シリンダで大きなクランプ力を発生するためハンドの小型化に寄与している。

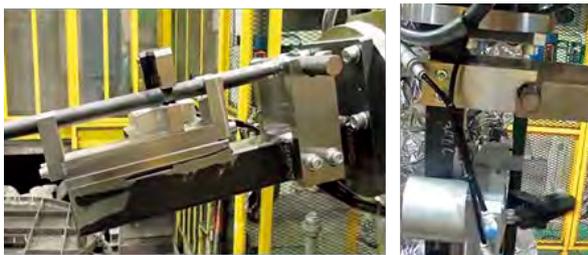


写真5 ロボットハンド  
Photo5 End Effector

## 9 まとめ

鑄造現場の安全性向上に向けて、遠隔操作ノロ取りロボットの開発を行った。ノロ取り作業の動きを分解・分析し、遠隔操作を介してロボットに必要な動作を選定することで、熟練作業といわれるノロ取り作業の設備化を実現した。ロボットを介するノロ取り作業は、作業者の体格差に左右されず、標準化された作業が可能となり、習熟の効率化にもつながると考えている。

将来は東知多工場すべてのノロ取り作業場所へ横展し、「作業者と高熱物の隔離」を進めていきたい。そのため、残存する接近作業の遠隔化、設備故障時の保全作業などの課題解決を進めていく。

引き続き現場の知恵と技術を融合し、より安全で持続可能な鑄造ラインの構築を目指す。

### 参考文献

[1] Successor コミュニケータ Plesio Kawasaki Robot  
トラブルシューティング要領書

### 著者紹介



阪野 樹央

垣見 勇介

松澤 知行

安達 直功



松井 俊幸

## 開発の経緯と開発者の思い

鑄造現場の安全性向上を目的に、遠隔操作によるノロ取りロボットの開発を進めた。熟練作業を理解するために自らノロ取り作業を体験し、現場作業者との対話を通じて得た知見を設備に反映した。

試験評価は操作性など官能評価が中心で、ログ活用や感覚の数値化ができなかった点が反省として残る。今後は、カメラ映像・ロボット動作・ノロ取り結果を紐づけたAI解析による自動化に挑戦したいと考えている。鑄造には多くの熟練作業が残されており、AIなど活用して暗黙知を紐解き、自動化により安全で魅力ある鑄造工場を目指して引き続き取り組む。

# カーエアコン用電動コンプレッサの回転1次振動低減における機構解析の活用 Utilization of Multibody Dynamics Simulation in Reducing First-Order Rotational Vibration of Electric Compressors for Car Air Conditioners

太田 貴之<sup>\*1</sup>   佐伯 愛<sup>\*1</sup>   戸澤 耕作<sup>\*1</sup>  
Takayuki Ota   Ai Saeki   Kosaku Tozawa

\*1 コンプレッサ事業部 技術部

## 要旨

電気自動車(BEV)に搭載されるカーエアコン用電動コンプレッサは、従来の振動・騒音源であったエンジンがないため、高レベルの振動・騒音低減が求められている。本稿では、機構解析を活用して、設計の初期段階から回転1次振動の原因となるコンプレッサ作動時のアンバランス発生を低減した取組みについて報告する。また、最適化ツールを用いて寄与度分析を行い、多くの設計諸元や運転条件がアンバランス発生に及ぼす影響を効率的に確認した事例を紹介する。

キーワード: 電動コンプレッサ, スクロール式, 回転1次振動, 機構解析, 寄与度分析

## Abstract

Electric compressors for automotive air conditioning systems in battery electric vehicles (BEV) require high levels of vibration and noise reduction due to the absence of traditional sources of vibration and noise, such as the engine. This report outlines efforts to reduce the unbalance generated during compressor operation, a major cause of first-order rotational vibration, through multibody dynamics simulation in the early design stages. Furthermore, the study introduces a case in which contribution analysis was performed using optimization tools to efficiently assess the impact of various design parameters and operating conditions on unbalance generation.

Keywords: Electric Compressor, Scroll-Type, First-Order Vibration, Multibody Dynamics Simulation, Contribution Analysis

## 1 はじめに

カーエアコンシステムは、冷媒ガスの循環によって熱の吸収と放出を行い、車室内の温度を制御する。このシステムの心臓部であるコンプレッサ(圧縮機)は、冷媒を圧縮して循環させる役割を持つ。従来のコンプレッサはエンジンの回転をベルトで伝達して作動させていたが、近年、電気自動車(BEV)やハイブリッド車(HEV)の増加にともない、車両電源の電力でモータを回転させて作動する電動タイプへの移行が進んでいる(図1)。

BEVでは従来のエンジンに代わって主機モータや車体に電動コンプレッサが取り付けられる。BEVはエンジンによる振動・騒音の発生がなくなるため、車両の静粛性が高まっている。そのようななかで、電動コンプレッサは主機モータが停止していても単独で作動すること、また、車体に取り付けられる場合は作動による振動が車室内に伝わりやすくなることから、コンプレッサの振動や騒音が目立つようになる。そのため、電動コンプレッサには、これまで以上の高レベルの低振動・低騒音化が求められている。

また、電動コンプレッサは車室内空調だけでなく、車両電池の冷却などの熱マネジメントにも使用されるようになってきているため、冷房能力のアップ

が必要となっている。冷房能力を増やすには、コンプレッサの容量(エンジンの排気量に相当)を増やす方法があるが、体格が大きくなるため、車両によっては搭載できなくなることがある。その場合、容量はそのままに回転数を増やすことで対応するが、一般に高い回転数で作動させると振動、騒音は大きくなる。

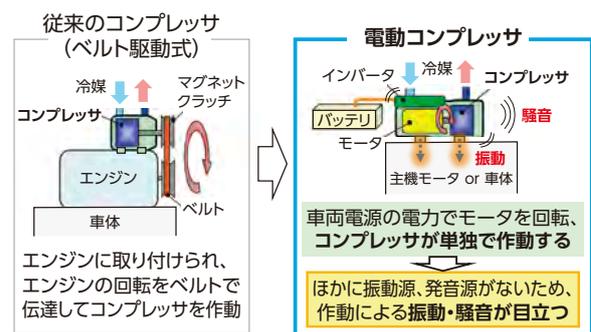


図1 カーエアコン用コンプレッサの電動化  
Fig.1 Electrification of Car Air Conditioning Compressor

低振動・低騒音化のほかに、電動コンプレッサには省動力化も求められている。車両電源の電力を使用するため、動力を抑えられれば、車両の航続距離が長くなる。

これらのニーズから、当社の電動コンプレッサは圧縮形式に高回転数でも静粛性と性能に優れた

スクロール式を採用しているが、冷媒ガスを回転して圧縮するため、回転不釣り合いがあると高回転数での作動時に大きな振動(回転1次振動)が発生してしまう。

本稿では、スクロール式電動コンプレッサの作動により生じる振動の低減を目的に、設計の初期段階で機構解析を活用することで作動時の回転不釣り合いを予測し、回転1次振動を低減した取組みと、多くの設計諸元や運転条件の影響を効率的に確認するため、最適化ツールを用いた寄与度分析を実施した事例について紹介する。

## 2 電動コンプレッサの概要

### 2.1 電動コンプレッサの構造

当社の電動コンプレッサ(ESBシリーズ)の構造を図2に示す。主軸受で支持されたシャフトをモータで回転(最大10000 r/min)し、シャフト先端にある偏心ピン、ブッシュを介して旋回スクロールを固定スクロールに対して公転運動(旋回)させることで冷媒ガスを圧縮する。旋回スクロール(質量 M1、主軸受からの軸方向距離 L1)はシャフト回転軸から偏心した位置(偏心距離 r1)で公転するため、このままではシャフトの回転により遠心力の不釣り合いが発生する。この不釣り合いを解消するため、旋回スクロールに対向する位置にバランス(質量 M2、偏心距離 r2、主軸受からの軸方向距離 L2)をブッシュに一体化して配置している。また、モータ回転子の2か所にバランスウェイト(質量M3、M4、偏心距離 r3、r4、主軸受からの軸方向距離 L3、L4)を配置することで、シャフト回転で生じる遠心力の釣り合い(静バランス、式(1))と、主軸受まわりに生じるモーメントの釣り合い(動バランス、式(2))をとっている(図3)。本稿では静バランスの改良について述べる。

遠心力の釣り合い(静バランス)

$$M1 \cdot r1 + M4 \cdot r4 = M2 \cdot r2 + M3 \cdot r3 \quad \text{式(1)}$$

モーメントの釣り合い(動バランス)

$$M1 \cdot r1 \cdot L1 + M3 \cdot r3 \cdot L3 = M2 \cdot r2 \cdot L2 + M4 \cdot r4 \cdot L4 \quad \text{式(2)}$$

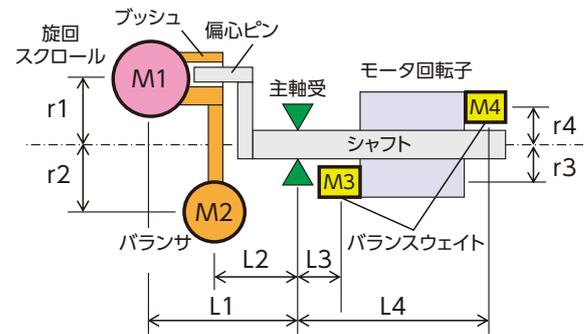
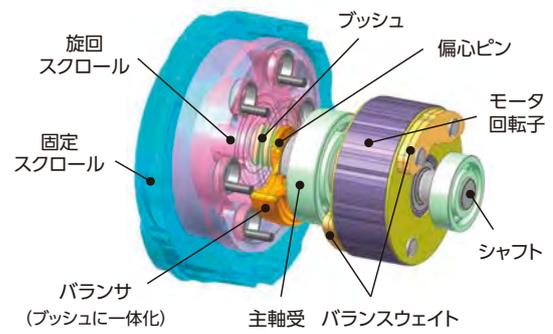


図2 電動コンプレッサ(ESB)の構造  
Fig.2 Structure of Electric Compressor (ESB)

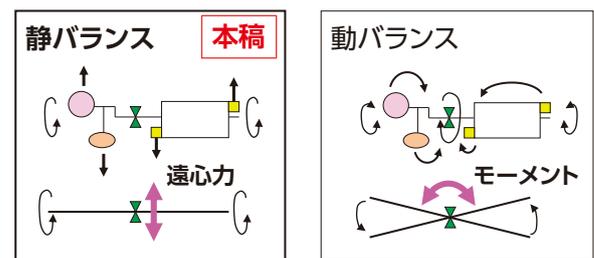


図3 静バランスと動バランス  
Fig.3 Static Balance and Dynamic Balance

### 2.2 ブッシュの揺動

ブッシュ(バランサー体)は偏心ピンに対して揺動することで、旋回スクロールの偏心距離(公転半径)を調整する機構を備えている(図4)。スクロールの渦巻き形状の出来栄や作動時の挙動により、固定スクロールと旋回スクロールとの間に隙間が生じる場合、詰まるようにブッシュが揺動し、内部漏れを防止する。逆に干渉する場合は避けるようにブッシュが揺動し、スクロールの損傷を防ぐ。

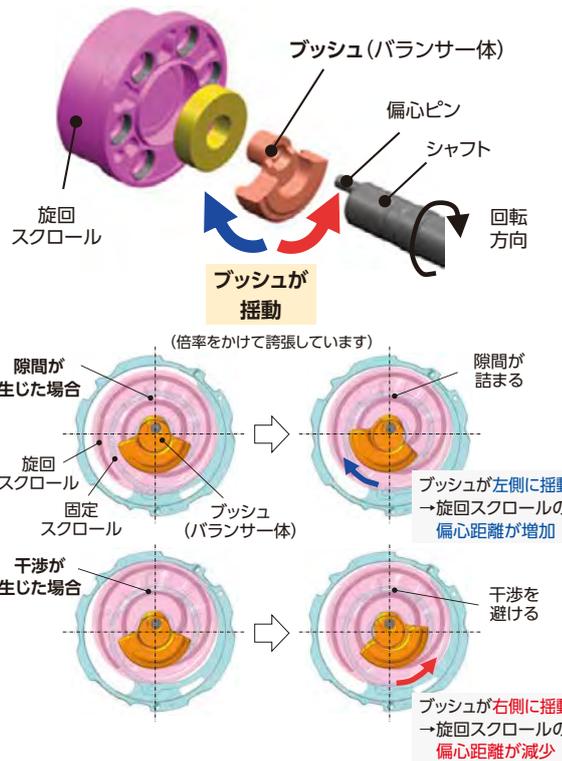


図4 ブッシュの揺動による偏心距離(公転半径)の調整  
Fig.4 Adjustment of Orbital Radius by Bush Swinging

## 2.3 アンバランスの発生

静バランスや動バランスがとれていないと、作動時に回転1次振動が発生する。設計の際には2.1で述べたように各種のバランスを配置することでこれらのバランスをとるが、作動時には各部品間の隙間や変形によって部品が理想の位置からずれる(例: 回転スクロールの偏心距離  $r_1$  が変化する)ため、アンバランスが生じる。また、そのずれを吸収するためにブッシュが揺動し、ブッシュに一体化されたバランサーが移動( $r_2$  が変化)するため、これによってもアンバランスが発生してしまう。

低振動を実現するには、これらの部品の作動時の挙動を考慮したバランス設計を行う必要があるが、構成部品が多く、各部品が接触しながら複雑に動くため、手計算での予測には限界がある。

## 3 回転1次振動低減の取組み

そこで、機構解析<sup>\*1</sup>を活用することで、作動時の各部品の挙動を予測し、作動時のアンバランス発生量の見積りを行うことにした。解析には機構解析ソフトウェア RecurDyn を使用した。

\*1 機構解析: 複数部品で構成される機構の動的な挙動を計算(出力として位置、速度、力など)

## 3.1 機構モデル<sup>\*2</sup>の構築

作動時のアンバランス発生を精度よく再現させるため、以下の点に配慮してスクロール式電動コンプレッサESBシリーズの機構モデルを構築した(図5)。

- ・各部品間の隙間、接触を考慮
- ・偏心距離の調整機構(ブッシュの揺動)を考慮
- ・荷重を受けるシャフト、偏心ピンの変形を考慮
- ・シャフトを指定回転数で回転、回転位相に合わせてスクロールに冷媒ガス圧縮による荷重変動を付与

コンプレッサ内部には、隙間を持つ接触部が多数存在する。一般に機構解析では接触計算をともなうと計算負荷が高くなるが、これらの接触部をなるべく単純な形状に置き換え、専用の接触要素を用いることで計算の負荷を軽くしている<sup>[1]</sup>。また、隙間量はパラメータで調整可能にしている。

\*2 機構モデル: 複数の部品をジョイントなどで結合し、強制運動や荷重の入力を設定した計算モデル

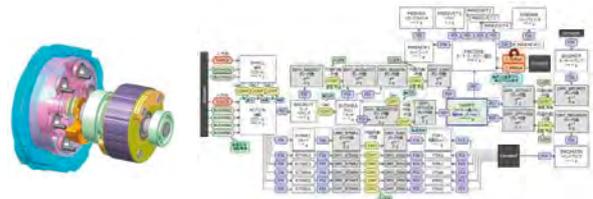


図5 電動コンプレッサ ESB 機構モデルのブロック図  
Fig.5 Electric Compressor ESB Mechanism Model

## 3.2 解析結果に基づく1次振動低減の検討

構築した機構モデルを用いて、発生頻度の高い運転条件で機構解析を行った。部品寸法はすべて図面中央値とした。

回転数 2000~6000r/min での解析結果を図6に示す。各部品の重量に、解析結果から得られた重心位置(回転軸中心からの距離)を掛けた値の総和(静バランス量)を算出し、XY座標のグラフにプロットしている。グラフの原点から離れるほど、静バランスがとれていない状態である。

作動前、部品配置が理想の状態とすると静バランス量はゼロで、グラフの原点に位置する。作動すると、各接触部の隙間の詰まりや偏心ピンの変形が生じ、これを吸収するようにブッシュがシャフト回転方向に揺動、ブッシュに一体化されているバランサーの重心位置が移動する。これにより、作動時の静バランスはグラフの原点から左側に離れた

位置にプロットされ、アンバランスが発生することがわかる。また、回転数によってアンバランスの大きさが変化することもわかった。

この解析結果より、作動時に生じる回転1次振動を低減する対策を立案した。作動時に静バランスがゼロになるように、各種バランサの位置や重量を当初の設計からずらす。回転数によってアンバランスの量は変化するため、すべての回転数で静バランスをゼロにすることはできないが、振動がより大きくなる高回転数を狙って、ずれ量を設定する。

この1次振動低減案での解析結果を図7に示す。狙い通り、作動時に静バランスがゼロに近づくことを確認した。

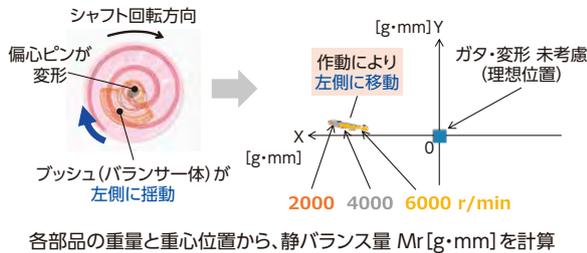


図6 機構解析結果(2000~6000r/min)  
Fig.6 Simulation Result (2000~6000r/min)

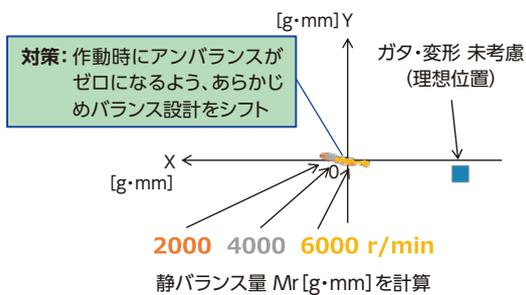


図7 機構解析結果(1次振動低減案)  
Fig.7 Simulation Result (Reducing First-Order Rotational Vibration)

### 3.3 高回転数化の検討

先述の通り、電動コンプレッサには冷房能力アップのニーズが高まっていることから、高回転数における検討も行った。同じESBシリーズの機構モデルを用いて、回転数を10000r/minとした場合の解析結果を図8に示す。作動時、6000r/minまでの場合とは異なり、ブッシュはシャフト回転方向と反対の向きに揺動し、アンバランスが反対側に生じる結果となった。

これが実際に生じると、10000r/minでアンバランスがゼロになるように調整しても6000r/minでアンバランスがより増加してしまうため、

3.2で示した1次振動の低減案は適用できないことになる。

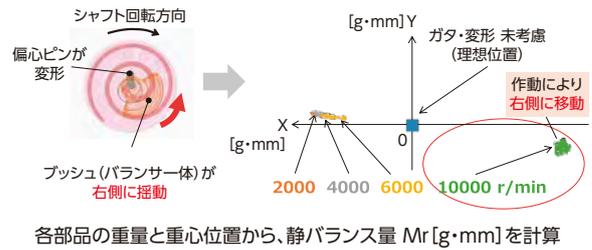


図8 機構解析結果(10000r/min)  
Fig.8 Simulation Result (10000r/min)

## 4 実機評価による確認

解析結果の検証として、実機試験で作動時の部品挙動および振動特性を評価した。

### 4.1 ブッシュの挙動確認

図9のようにギャップセンサを用い、作動時のシャフトとブッシュとの距離を計測し、ブッシュの揺動角を算出した。結果を図10に示す。

2000~6000r/minではブッシュはシャフト回転方向に揺動し、10000r/minではシャフト回転方向とは逆向きに揺動していることが確認された。これにより、実機挙動が機構解析の結果と同様の傾向であることが確認された。

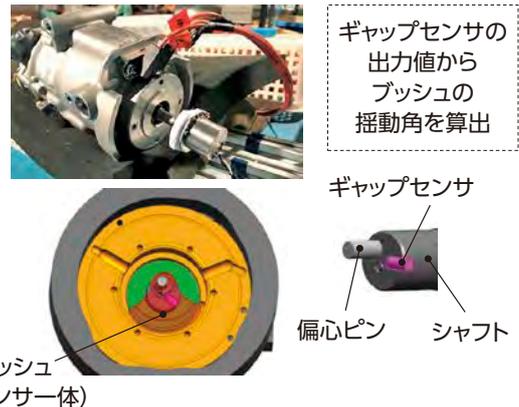


図9 ブッシュの挙動計測  
Fig.9 Measurement of Bush Behavior

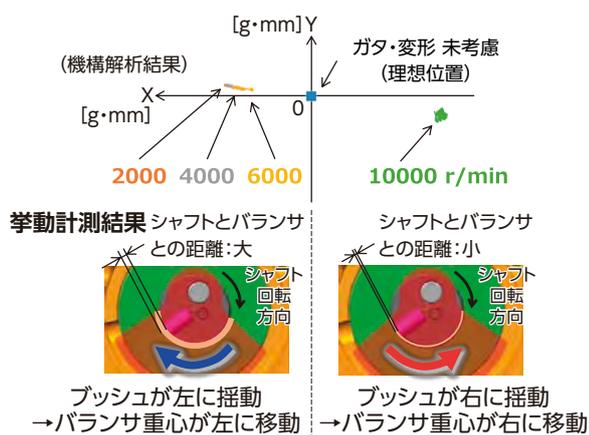


図10 ブッシュの挙動計測結果  
Fig.10 Results of Bush Behavior Measurement

## 4.2 振動測定

コンプレッサ作動時の振動測定結果を図11に示す。

3.2で示した1次振動低減案の仕様にて回転数を上昇させたところ、10000r/minに至る前に回転1次成分の振動が急増することがわかった。これにより、機構解析でのアンバランス発生傾向と一致していることが確認された。

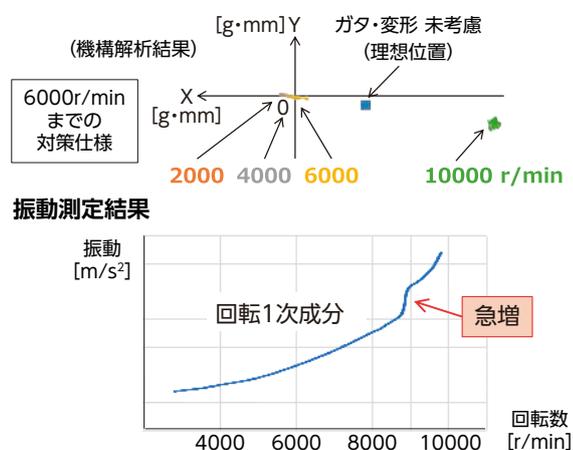


図11 振動測定結果  
Fig.11 Result of Vibration Measurement

## 5 高回転数化への対応

ESBシリーズの構造では、低～中回転数と高回転数とでは内部の挙動に大きな違いがあることが機構解析と実機評価の両方で確認された。機構解析の結果の分析から、このような挙動になるメカニズムの解明も行っているが、ここでは割愛する。

このままでは高回転数で1次振動低減の方策が取れないため、ESBシリーズの後継であるESH

シリーズでは、一部のバランスの取り付け部と形状を変更するなどして、バランス部材の配置と重量配分を変更し、高回転数域においても作動時のアンバランス発生を抑制できる新構造とした(図12)。

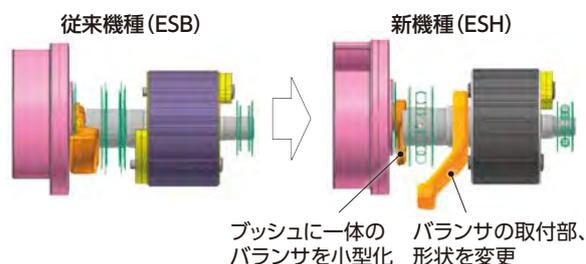


図12 高回転数化への対応  
Fig.12 Action for High-speed rotation

## 6 寄与度分析

前述の解析では、部品寸法はすべて図面中央値のモデルを用い、1つの運転条件で計算をしている。実際は、多数ある構成部品それぞれに寸法や重量、重心位置のばらつきがあり、運転条件も多数存在する(図13)。どの要因が内部の挙動やそれによるアンバランスの発生に影響を及ぼすのかがわかれば、効果的に振動低減の対策ができるが、組合せが膨大なため、総当たりでの計算は非現実的である。

そこで、機構解析と最適化ツールを連成させることで、複数の設計変数(部品寸法、公差、冷媒圧力条件など)の1次振動発生への寄与度の分析を実施した。

最適化ツールには modeFRONTIER を使用、RecurDynと連成させて<sup>[2]</sup>、アンバランス発生に直結するブッシュの揺動を決める要因を調査した。その結果の一例を図14に示す。

modeFRONTIERのクラスタ多次元解析により、ある部品の寸法公差が大きく、吐出圧力が低い低負荷な運転条件では、ブッシュの揺動角が小さくなりやすい、といった結果が得られている。

この手法により、設計諸元や運転条件が内部挙動に与える影響を効率的に分析することが可能となった。

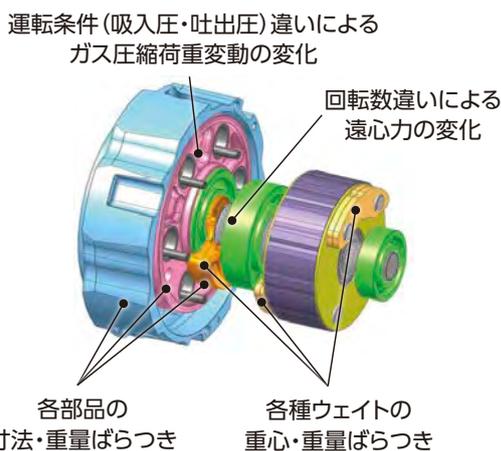


図13 電動コンプレッサにおけるばらつき  
Fig.13 Variation in Electric Compressor

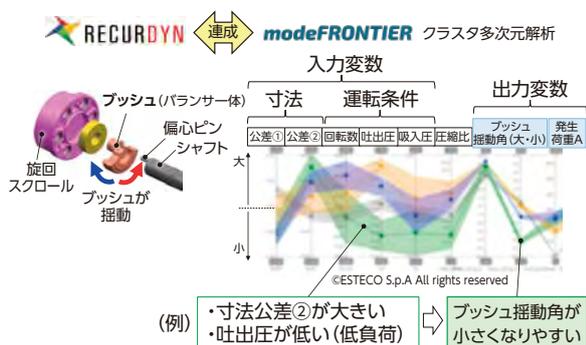


図14 寄与度分析の事例  
Fig.14 Example of Contribution Analysis

## 7 まとめ

スクロール式電動コンプレッサ作動時のアンバランス発生(回転1次振動の原因)について、機構解析を活用することで、隙間や変形を考慮した精度の高い見積りが設計初期段階からできるようになった。また、機構解析と最適化ツールとの連成に

より、多くの設計諸元や運転条件の内部挙動への影響を効率的に確認することが可能となった。これらの手法はESHシリーズほかの電動コンプレッサ開発において現在活用中である。

なお、本取組みでは静バランスの改良による回転1次振動の低減を狙いとしているが、同様に動バランスについても改良の検討が可能である。

最後に、今回の取組みにあたり、機構解析の技術指導を頂きました(株)豊田中央研究所、機構解析ソフトウェアRecurDynのサポートで協力いただきましたファンクションベイ(株)をはじめとする社内外の皆様に対し、深く御礼申し上げます。

### 参考文献

- [1] ファンクションベイ(株):RecurDynリファレンスガイド
- [2] (株)IDAJ:RecurDyn/ProcessNet機能を使ったCATIA-modeFRONTIER連成  
(ファンクションベイ(株)技術サポート専用サイトに掲載)

### 著者紹介



## 開発の経緯と開発者の思い

電動コンプレッサ開発における機構解析の取組みは2013年より開始しました。作動時の振動・騒音の発生原因を探るにあたって、コンプレッサ内部の挙動測定が容易ではないため、これまではいくつかの予想のもとで仕様を振っての実機評価を中心に行っていましたが、準備や計測に時間がかかり、予想が外れることもあり。そこで、シミュレーションで内部挙動の予測ができればメカニズム解明がスムーズに進むと考え、機構解析を始めました。

コンプレッサ技術部ではさまざまなシミュレーション技術を設計に活用していますが、機構解析については、当初は扱える技術者がほとんどおらず苦労しました。(株)豊田中央研究所の皆様から技術指導を頂き、また実機との合わせ込みを進めることで、精度を確保しつつ計算負荷が高くない機構モデルの構築を行うことができました。今後も、電動コンプレッサのさらなる低振動、低騒音、高効率化、高耐久性を実現するため、解析技術の向上を進めていきます。

# 富岳を活用した電極-電解液界面シミュレーション Electrode-Electrolyte Interface Simulation Using the Fugaku Supercomputer

櫻本 和弘<sup>\*1</sup> 白井 敬介<sup>\*2</sup>

Kazuhiro Sakuramoto Keisuke Shirai

\*1 電池事業室技術部 \*2 革新材料開発部

## 要旨

電池性能や寿命に影響する電極-電解液界面では、電気二重層構造などの複雑な現象が発生するが、実験での直接観察や従来の計算手法による再現が困難である。そこで、界面構造を効率的かつ高精度に予測できる新たなシミュレーション技術を構築した。本稿では、この界面予測技術の概要とAl溶出現象への適用事例について紹介する。

キーワード：電池、電気二重層構造、界面シミュレーション、Al溶出、スーパーコンピュータ「富岳」

## Abstract

In lithium-ion batteries, the interface between the electrode and electrolyte greatly affects performance and lifetime. However, complex phenomena like electric double layers are difficult to observe directly and hard to reproduce with traditional simulation methods. To address this, we developed a new simulation technique that can efficiently and accurately predict interface structures. This paper presents an overview of the interface prediction technology and a case study on its application to the aluminum dissolution phenomenon.

Keywords: Battery, Electric Double Layer, Interface Simulation, Al Dissolution, the Fugaku Supercomputer

## 1 はじめに

電池事業室では、HEV (Hybrid Electric Vehicle) 向けにニッケル水素電池 (NiMH) の高出力化に取り組み、世界初(当社調べ)の車載用バイポーラ型NiMHを開発した。この電池は2021年にトヨタ自動車(株)の2代目アクアに搭載され(図1)、その後レクサスRXやクラウン、アルファードなど、搭載車種を拡大している。

現在はPHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) ・BEV (Battery Electric Vehicle) 向けに、LIB (Lithium-Ion Battery) の高性能・長寿命化を目指した開発も進めており、次世代車両への適用を視野に入れている。



図1 バイポーラ型NiMHと搭載車両  
Fig.1 The NiMH bipolar battery and its equipped vehicle

## 2 CAE(Computer Aided Engineering)を用いた電池開発の進め方

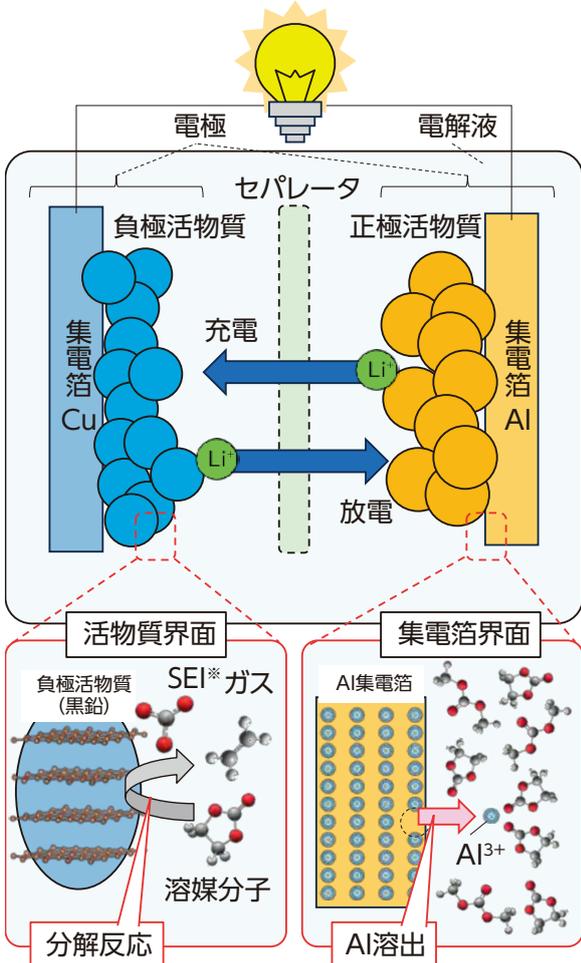
原子・分子の現象から、電池・電池パックの現象迄をシームレスに再現するため、異なるスケール間の現象を同時に解くマルチスケール解析、複数の現象を同時に解くマルチフィジックス解析を独自のプログラミングにより可能にした。また、ソフトとハードの専門知識を併せ持つことで、スーパーコンピュータ(京、富岳、SQUID)やワークステーション(WS)など、複数の計算資源を活用できる環境を構築し、解析ツールの特長に合わせた使い分けにより、計算効率を最大化した。これらにより、原理原則に基づいた設計を可能にし、革新的な電池開発を実現している。

今回は、LIBの原子・分子シミュレーションを中心とした電池材料開発について、詳細を述べる。

## 3 LIBの動作原理と界面の重要性

LIBの動作原理と界面での現象を図2に示す。LIBはリチウム(Li)イオンが塩と溶媒からなる電解液を介し、正極活物質とAl集電箔からなる正極電極と、負極活物質とCu集電箔からなる負極電極の間を移動する際の、Liイオンの化学状態の変化( $\text{Li} \rightarrow \text{Li}^+ + \text{e}^-$ )で生じる電気化学エネルギーを利用する。LIBが動作するとき、電池内部では、負極活物質と電解液界面で、Liイオンの活物質への出入

りや電解液の分解反応が起こる。またAl集電箔と電解液界面では、集電箔Alの溶出が起こり、それぞれ電池の性能や寿命に大きな影響を及ぼす。そのため、この界面構造や反応メカニズムを理解し、制御することが、高性能かつ長寿命な電池開発において不可欠となっている。



※Solid Electrolyte Interphase

図2 LIBの動作原理と界面での現象<sup>[2]</sup>  
Fig.2 Operating principle and interfacial phenomena of LIB

電極と電解液界面の構造イメージを図3に示す。電極表面から数十nm程度離れた領域では、電解液は塩や溶媒の偏りがなく均一な構造をとるが、電極界面の近傍では、電極電位の影響を受けて、塩や溶媒が吸着・配向することで偏り(濃度ムラ)が生じる。この領域を電気二重層構造と呼ぶ。

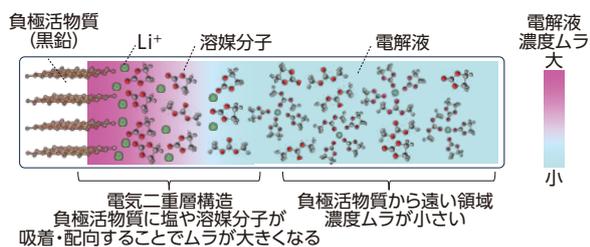


図3 電極-電解液界面の構造イメージ  
Fig.3 Structural image of the electrode-electrolyte interface

電解液に濃度ムラが生じると、溶媒の電子状態が変化し、電極と電解液間での電子授受のエネルギー障壁が増減するため、電気二重層構造は電解液の分解反応性に大きな影響を与える。そのため、負極活物質界面で起こる電解液の分解反応や、Al集電箔で起こるAl溶出現象を検討するには、電気二重層構造を考慮することが必須であるが、その影響を反映可能な界面シミュレーションは、一般的には普及しておらず、実際の電池開発において十分に活用されているとは言い難い。

また界面は、分析での直接的な測定が困難であるため、現状は間接的な測定情報の組合せなどで、その構造や現象のメカニズムを推定するしか手段がなく、対策指針を構築するために非常に時間を要する。

そこで電池事業室では、界面シミュレーションの技術構築に取り組んだ。

## 4 界面現象のシミュレーション技術の構築

### 1) 界面シミュレーションの難しさ

原子・分子の反応を予測する代表的な計算手法として、第一原理計算が使われる。

第一原理計算はシュレディンガー方程式を解くことで、電子のエネルギーと力の釣り合いから、原子の挙動を予測する手法である。量子力学に基づき電子状態を解析することが可能であり、化学反応の理解に有効である(図4)。

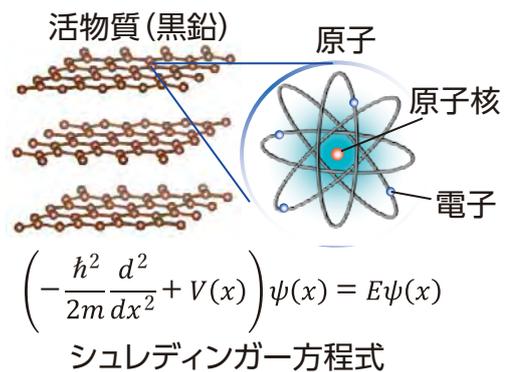


図4 第一原理計算のモデルと支配方程式  
Fig.4 Model and governing equations in first-principles calculations

一方で、シュレディンガー方程式の計算時間は、原子が持つ電子数の3乗に比例する。そのため、一般的なWSでは200原子程度が限界である。

私たちはスーパーコンピュータ「富岳」の活用により、計算規模の拡張に取り組んできた。富岳は

15万ノードを超える超並列計算機で、数百並列以上のジョブを複数同時に計算可能である。しかし、一般的なソフトを利用するだけでは、並列数10~20程度で計算速度は頭打ちとなる。そこで富岳専用にチューニングした第一原理計算ソフトを活用し(図5)、数百ノードにおいても高い並列化効率を達成することで(並列化性能36%)、1500原子迄の計算を可能にしている。

しかし、検討中の界面シミュレーションでは、電気二重層構造を再現するために、4万原子以上の大規模モデルが必要となるため、計算時間的に現実的でない(図6)。

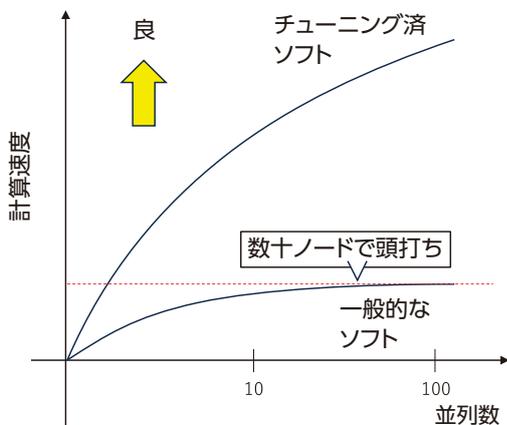


図5 並列数と計算速度の関係(イメージ)  
Fig.5 Relationship between number of processors and computational performance (conceptual diagram)

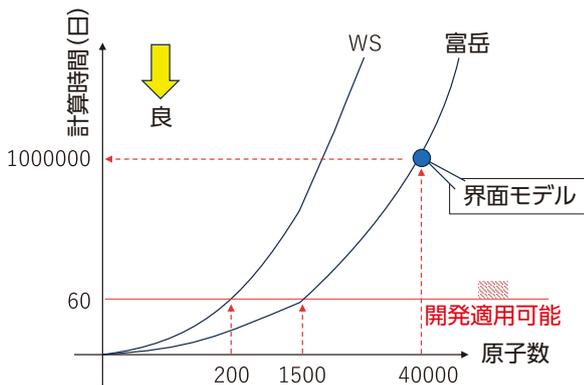


図6 原子数と計算時間の関係  
Fig.6 Relationship between number of atoms and computational time

## 2) 界面シミュレーションの技術構築

このような問題に対し、近年、電解液を連続体近似でモデル化することで(図7)、数百原子規模の計算で電気二重層構造を考慮可能な方法が提案された。この手法は、第一原理計算と統計熱力学に基づく溶媒モデルを連成させたESM-RISM<sup>[3][4]</sup>と呼

ばれ、原子・分子を個別に扱わず、原子間距離を変数とする二体相関関数で表現することで、自由度を削減し、計算負荷を低減できる。一方で、計算精度は連続体近似に用いるパラメータ(図8)に依存するが、パラメータの決め方は世の中でも確立されておらず、簡易的に、電解液単体の計算に特化した古典分子動力学計算のパラメータを流用するに留まっており、その計算精度の検証は十分でない。そのため、電池開発におけるESM-RISMの適用は進んでおらず、パラメータ決定の信頼性向上が課題である。

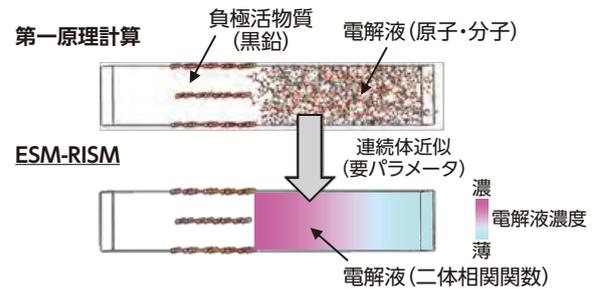


図7 電極-電解液界面の計算モデル  
Fig.7 Computational model of the electrode-electrolyte interface

$$U(r) = 4 \varepsilon \left[ \left( \frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left( \frac{\sigma}{r} \right)^6 \right]$$

$$F = \frac{1}{4 \pi \varepsilon_0} \frac{q q'}{r^2}$$

$\varepsilon, \sigma$  : 材料特性を示すパラメータ

$r$  : 原子間距離

$q, q'$  : 電荷

図8 LJポテンシャルとクーロン相互作用の式  
Fig.8 Equations of the Lennard-Jones Potential and Coulomb Interaction

そこで私たちは、ESM-RISMの連続体近似に用いるパラメータの決め方を独自に構築した。

まずは、第一原理計算で得られた電解液単体の構造情報を再現するように連続体近似のパラメータを決める。これにより電極から離れた領域での計算精度を担保する。ここで第一原理計算するモデルは、電解液構造の均一性を利用して、数百原子程度の規模に抑えた。

次に、電極-電解液界面の計算を1500原子程度の小規模で実施し、得られた構造情報を再現するように連続体近似のパラメータを修正することで、界面での計算精度も担保する。しかし、1500原子程度の界面モデルでは、実際の活物質-電解液界面の一部の局所的な構造しか再現できないため、界面の範囲を変えて数十パターン実施する。一

一般的なスーパーコンピュータでは、数十パターンの計算に2年以上要するが、富岳の複数計算の同時実行が可能な能力を活用することで、2か月に低減し、開発への適用を実現した。

### 3) 開発した計算手法の予測精度検証

開発した計算手法の予測精度を検証するため、充電時の電位変化に応じた、電極-電解液界面における電解液の構造変化を実測と比較した。

一般的に電解液の構造分析には、IRビームをサンプルに照射し、そのスペクトルを分析することで推定する。通常は電池を構成していない電解液単体の材料測定に限られ、また、平均構造情報しか得られない。

電極-電解液界面の状態を観察する際は、電池を構成したうえで、電極-電解液界面を局所的に観察する必要がある。そこで、電極裏面にプリズムを設置し、ビームの反射を利用することで、電極-電解液界面をリアルタイムに観察することを可能にした(図9)。

測定した電池の構成は、黒鉛活物質、LiPF<sub>6</sub>塩と溶媒A、Bからなる電解液で、電位を黒鉛の平衡電位である3.14Vから2.0V(電解液の分解反応が起きる前)まで下げたときの電解液の濃度変化を確認した。

実験結果を図10に示す。横軸は周波数で、縦軸はIRスペクトルのピーク強度である。ピーク位置が分子の種類、ピーク面積がその量(濃度)を表しており、界面近傍での塩や溶媒の濃度変化を確認できる。各溶媒のピークが現れる周波数は決まっているため、1700-1800cm<sup>-1</sup>にある2本のピークは、Li配位無しの溶媒BとLi配位有りの溶媒Bに、1850cm<sup>-1</sup>のピークは溶媒Aに帰属される。

電位を下げた際のピーク強度は、溶媒Aと溶媒B(Li配位無し)は増加し、溶媒B(Li配位有り)は減少していることから、充電することで、電極表面から溶媒Aと溶媒B(Li配位無し)の濃度は増加し、溶媒B(Li配位有り)の濃度は減少していることがわかる。

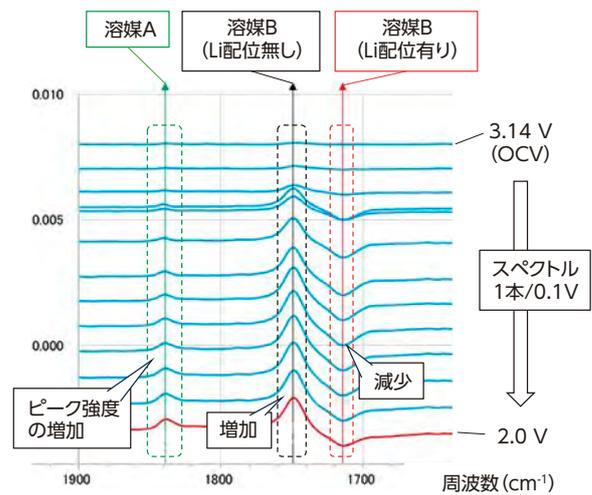


図10 実験結果  
Fig.10 Experimental results

次に同条件で電位を下げた際の、溶媒A、Bの濃度分布の計算結果を図11に示す。横軸は電極からの距離で、縦軸が各溶媒の量(濃度)を表す。

電位を下げた際の電極表面での濃度変化は、図11の(a)から、溶媒Aは増加しており、図11の(b)から、Li配位有りの溶媒Bは減少しており、Li配位無しの溶媒Bは増加していることがわかる。ここでLi配位の有無は、Li濃度分布を別途確認することで判断した。この結果は、実測結果と一致していることから、本手法で電気二重層構造の変化が予測可能であると判断した。

また開発した界面シミュレーションでは、実測では得られない、電極界面における分子位置の3次元情報や量の情報が定量的に得られることから、電極-電解液構造のさらなる現象理解が期待される。

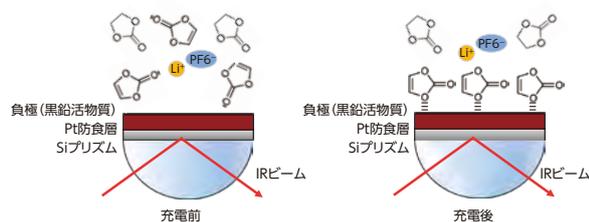


図9 実験装置イメージ  
Fig.9 Image of the experimental setup

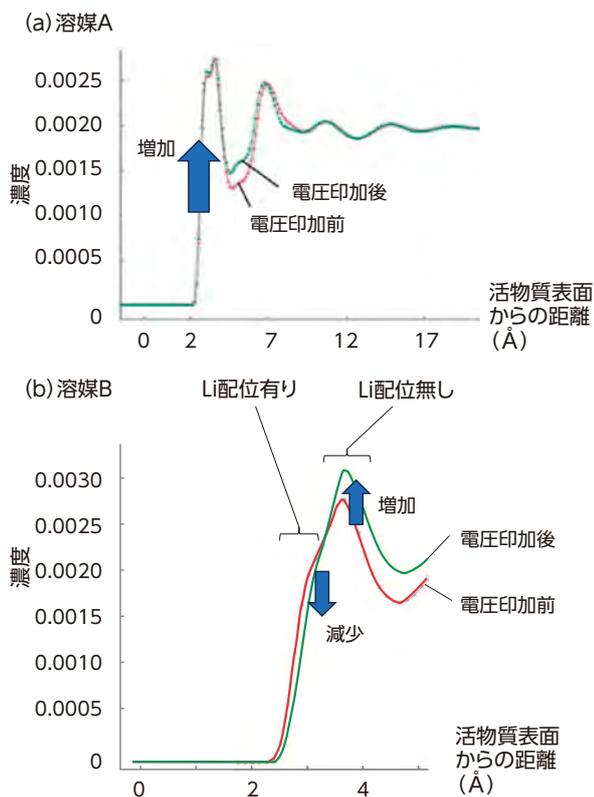


図11 計算結果  
Fig.11 Calculation results

## 5 構築した計算手法の活用例(Al溶出対策の検討)

正極のAl集電箔からのAl溶出は、LIBの安全性や寿命に大きくかわる重要な課題である。電極と電解液の界面で起こる化学反応がAl溶出の引き金となるため、界面の設計や制御が非常に重要である。

シミュレーションがない場合の対策は、実験で試行錯誤するしかなく、膨大な時間がかかる。今回構築した界面シミュレーションを活用し、Al溶出電位を予測することで、効率的に溶出対策を進めた事例を紹介する。

電解液の塩濃度が1.4Mになるように2種類の塩A、Bの混合量を変えた際の、Al溶出電位を予測した事例を図12で示す。電池の出力特性の観点からは、塩Aの混合量は多い方が良いことがわかっている。計算結果から、塩Aの混合量を増加すると、溶出電位が下がり、Alが溶出しやすくなるため、出力特性とAl溶出特性は背反関係にあることが確認できる。

電池の上限動作電位を4.3Vと設定した場合、塩A、Bの混合比率は0.9:0.5Mが最適であることを示し、実験でも同条件において、Alが溶出しなことを確認した。

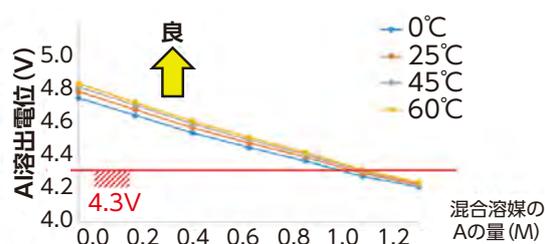


図12 混合塩比率を変えた際のAl溶出電位  
Fig.12 Al dissolution potential with varying mixed salt ratios

Al溶出時のAl集電箔-電解液界面の構造変化の一例を図13に示す。

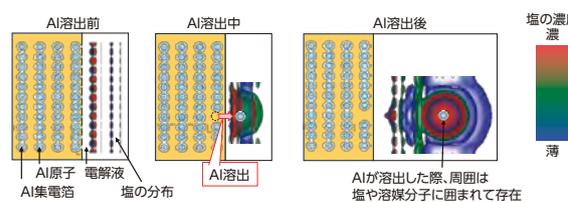


図13 Al集電箔-電解液界面構造の計算結果  
Fig.13 Computational results for the Al current collector-electrolyte interface

Alが溶出する前から、Al集電箔表面では、塩のアニオンの濃度が均一でなく、濃度ムラがあることを確認でき、電気二重層構造が形成されている。次にAlが電解液側に移動すると、その周囲を塩や溶媒が取り囲み、高濃度化する様子が見られる。取り囲まれた構造がエネルギー的に安定な程、Alは溶出しやすく、その溶出電位も低くなる。このように、シミュレーションでは、Al溶出中の周辺電解液の濃度変化を可視化することが可能である。界面シミュレーションで、電解液組成や塩濃度を水準振りすることで、どのような構造が不安定になるか、メカニズムを明らかにすることができ、原理原則に基づいたAl溶出対策に取り組むことで、開発期間を短縮することが可能になる。例えば前述の事例の場合、実験であれば1か月以上かかる検証を2、3日に対応可能になった。

## 6 まとめと今後の展望

富岳を活用し、連続体近似のパラメータの決め方を構築することで、ESM-RISMの電池開発への適用を可能にした。

本手法を用いて、電極-電解液界面での現象理解や効率的な対策検討を行うことで、高性能かつ長寿命な電池の開発期間短縮に貢献する。

## 謝辞

研究の一部は、スーパーコンピュータ「富岳」(※)の計算資源の提供を受け、実施した(課題番号: hp220059、hp230153、hp240168、hp250198) ※スーパーコンピュータ「富岳」はスーパーコンピュータ「京」の後継機として理化学研究所が設置し、2021年3月から共用を開始した計算機。2025年6月のGraph500ランキングで11期連続1位を獲得。また、TOP500では7位、HPCG (High Performance Conjugate Gradient) では2位、HPL-AI Mixed Precision (HPL-MxP、旧名HPL-AI) では6位を獲得するなど、世界トップレベルの性能を持つ。

## ■著者紹介■



櫻本 和弘

白井 敬介

## ■参考文献

- [1]トヨタ自動車(株)ホームページ
- [2]K. Momma and F. Izumi, “Commission on Crystallogr”, Comput., IUCr Newslett., 106 (2006)
- [3]M. Otani and O. Sugino, “First principles calculations of charged surfaces and interfaces: A plane wave nonrepeated slab approach”, Phys. Rev. B 73, 115407 (2006)
- [4]S. Nishihara and M. Otani, “Hybrid solvation models for bulk, interface, and membrane: Reference interaction site methods coupled with density functional theory”, Phys. Rev. B 96, 115429 (2017)

## 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」とあるように、私たちは2007年より電動化の流れを先取りすべく、原理原則に基づいた電池開発に取り組んできた。開発の過程では、課題に対し「なぜ・なぜ」を繰り返し、合成・分析などの専門メンバーと連携しながら、地道な技術検証を積み重ねてきた。とくに、電池性能や寿命に影響する電極－電解液界面では、電気二重層構造などの複雑な現象が発生し、実験や従来の計算手法では十分に理解することが難しかった。そこで諦めず、最先端のCAE技術を導入し、さらに発展させることで、原理原則に基づく電池開発を可能にしてきた。今後も、より多くのお客様の期待に応えるために、技術の深化と挑戦を続け、世界一の電池開発を目指して努力を重ねていく。

# データの類似性を考慮した転移学習による予測モデルの性能向上 —燃料電池フォークリフト稼働データによる検証—

## Transfer Learning Utilizing Real Industrial Vehicle Date Based on Similar Usage Trends

松浦 慶伍<sup>\*1</sup>

Keigo Matsuura

\*1 ITデジタル推進部

### 要旨

予防保全に活用可能な高精度の予測モデル構築技術を確立したため紹介する。燃料電池フォークリフトの稼働データにはお客様ごとで使われ方が異なるという特徴があり、従来手法では予測モデルの精度向上に限界があった。そこで私たちは、使われ方が類似のデータをグルーピングし、同一グループ内で知識を共有させる転移学習の枠組みを提案することで、従来手法に比べて予測精度を16%向上させる効果を確認した。

キーワード: 転移学習、類似性

### Abstract

We introduce a technology we have developed for building highly accurate prediction models applicable to preventive maintenance. Fuel cell forklift operation data varies in usage patterns depending on the customer, which has posed limitations in improving prediction accuracy using conventional methods. To address this, we proposed a transfer learning framework that groups data with similar usage patterns and enables knowledge sharing within each group. As a result, we confirmed a 16% improvement in prediction accuracy compared to conventional approaches.

Keywords: Transfer Learning, Similarity

## 1 はじめに

燃料電池(FC: Fuel Cell)フォークリフトのロガーデータを用いて、予防保全(図1)に活用可能な高精度な予測モデルの構築技術を確立したため紹介する。

精度よく寿命予測ができると寿命時期にあわせて、予め部品交換などの準備を行うことができるため停止期間の低減を期待できる。しかしながら、新たな動力源であるFCの劣化挙動は、お客様ごとに異なる使われ方の影響を受けて多様であり、高い精度での予測が難しいという課題があった<sup>[1]</sup>。

上記の難しさを詳しく説明する。一般的にAIや機械学習を用いた予測モデルは、訓練データと同じ分布のデータを出力することを目指す。言い換えると、予測モデルの能力はおおよそ訓練データの平均程度の能力に収束する。より正確には、出力の決定方法に依存する。

例えば、10台の車両データを訓練データとした場合、内8台が標準的な使われ方、2台が特殊な使われ方をしていたとすると、後者の2台に対する予測精度は悪化する可能性がある。利用したFCフォークリフトの稼働データは、車両ごとに僅かに分布が異なっていた。そこで、私たちは出力の決定方法に転移学習という工夫を施すことで、高精度な予測を実現した。

本技術により、機械学習におけるベースラインなパラメータ同定手法であるRidge回帰と比較して、平均予測誤差を約16%削減することに成功した。

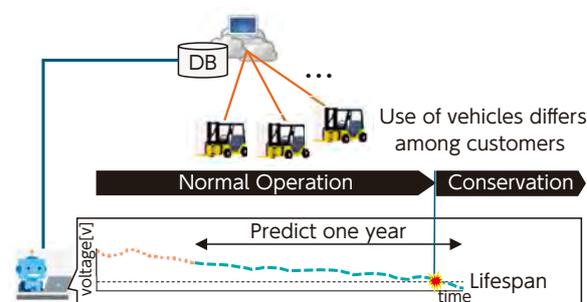


図1. 予防保全への予測モデルの活用: 寿命時期を1年前に予測することで最適な部品交換タイミングをお客様へ提供し、計画外な停止時間の軽減に貢献する

Fig.1 Preventive maintenance applying the ML technology

## 2 転移学習

本技術のコンセプトとなる転移学習について、まず一般的な定義を紹介した後に、本技術における独自の工夫点の概要を解説する。

神鳥<sup>[2]</sup>らは、転移学習(Transfer Learning)という語は統一された形式的定義を与えることは難しいとしながらも、形式的でない定義としては、次のものが広く受け入れられるだろうと述べている。

「新規タスクの効果的な仮説を効率的に見つけ

出すために、1つ以上の別のタスクで学習された知識を得て、それを適用する問題<sup>[3]</sup>

今回においては、ある対象(ターゲット)の予測を行う際に、別の類似対象(ソース)から得られた知識を活用することで、予測精度を高める枠組みであると言える<sup>[4-6]</sup>。

転移学習は、ターゲットとソースの間に大きな違いが存在する場合、かえって予測精度を悪化させる「負の転移」<sup>[7]</sup>が生じることが、実用上の課題として知られている。この課題に対し、本研究では使用傾向が類似した車両同士の「グルーピング」を行い、グループ内限定の「転移学習」を実施することで負の転移を回避し、転移学習を実用可能な技術とした。詳細は3章で述べる。

### 3 方法

本章では、本研究の技術内容について詳述する。

章の構成として、まず使用データセットと時系列モデルの概要を説明し、その後、本提案手法の中核である「転移学習」と「グルーピング」、最後に全体の処理フローを示す。

原理的には、本提案手法は任意の多変量時系列データに適用可能であるが、現時点では本研究において使用したFCフォークリフトのデータセットに限定した評価に留まっており、汎用性については今後の検証が必要である。ただし、本手法で用いる温度や積載量といった変数は、他の電源装置にも共通して利用されている指標であることから、他の産業車両への適用可能性は高いと考えられる。

#### 3.1 データセット

お客様の現場で稼働しているFCフォークリフトから取得されたデータを用いた。各車両における時系列データは、時刻を含む9種類のセンサ値から構成されており、1台あたりのサンプル数はおおよそ100点程度である。取得されたセンサ項目には、FC電圧(Voltage)、空気供給量(Airflow)、水素供給量(Hydrogen)、外気温(Temperature)、リフトの起動・停止回数(Lift start-and-stop)、積載量(Load amount)、出力切替回数(Power output change)、出力値(Power output value)が含まれる。

このうち、FC電圧・空気供給量・水素供給量の3項目(図2(a))は、車両の制御に関連する情報であ

り、空気や水素の供給を通じて化学反応を制御し、電圧を一定に保つ制御機構を反映している。一方、外気温、リフトの起動・停止回数、積載量、出力切替回数、出力値の5項目(図2(b))は、車両の使い方に関連する情報であり、作業環境や運転パターン、負荷の程度などに関係している。

分析対象は、時刻を除いた8次元の多変量時系列データであり、これをもとに予測モデルの構築と評価を行った。

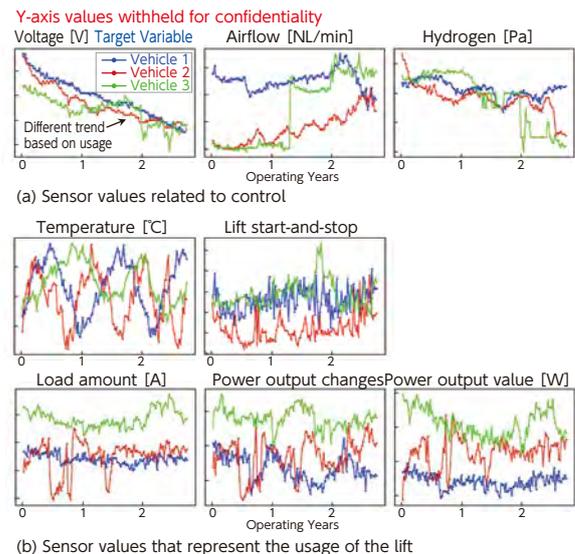


図2. 時系列データの外観: (a) 制御に関する3項目 (b) 使い方に関する5項目。3台の車両の比較でも、使い方によってデータ傾向が異なることがわかる

Fig.2 Time series plots of features

#### 3.2 時系列モデル

モデルを選定するためにデータを分析して特徴を確認した。ここでは、時系列モデルの性能に与える影響が大きいとされる多重共線性と定常性の有無の確認結果に絞って紹介する。

センサはすべてFCシステム周辺に設置されており、多重共線性が懸念されたが8変数間の相互相関は弱く、モデルへの悪影響は低いと想定された。また、制御の影響や装置の劣化はあるものの、対象変数には定常性が見られた。

これらのデータ特徴を考慮して本研究ではベクトル自己回帰モデル(VARX: **v**ector **A**utoregression model with **e**xogenous)を採用した。

VARXモデルは、複数の相互依存する内生変数(endogenous variables)を、それらの過去の値と外部から与えられる外生変数(exogenous variables)の系列と関連付ける自己回帰方程式モデルの1つである。モデル構造は以下のように定

式化され、

$$\hat{y}_{i,t} = \sum_{j=1}^3 W_{1,ij} y_{j,t-1} + \sum_{k=1}^5 W_{2,ik} x_{k,t} + W_{3,it} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

ここで、 $\hat{y}_{i,t}$ は時刻tにおける予測値であり、データセットの第2列～第4列に対応する。3つの連立方程式を解くことで、第2列の変数(すなわちFC電圧)を用いてFC電池の寿命予測を行う。

t-1におけるjはラグ数を示し、1つ前の時点までの情報を用いることを意味する。jは内生変数の数であり、これは第2～4列に該当する3つの変数である。kは外生変数の数であり、第5～9列に該当する5つの変数である。

$W_{1,ij}$ は内生変数に対する標準化偏回帰係数、 $W_{2,ik}$ は外生変数に対する標準化偏回帰係数、 $W_{3,i}$ はトレンド項に対する標準化偏回帰係数であり、以後、これらを総称してモデルパラメータと呼ぶ。データセットは標準化済みのため切片項は存在しない。

### 3.3 提案手法

#### (1) コンセプト

本研究のアプローチは、他車両の知識(本手法では、モデルパラメータ)を自車両へ転移することで予測精度を向上させるものである。しかし、既に2章で述べたように、類似性を考慮せずに転移すると「負の転移」が発生するため、他車両との共通点は取り込みつつ、自車両固有の特徴は維持させる必要がある。

この2つをバランスさせるため、使用傾向が類似した車両同士の「グルーピング」を行い、グループ内限定の「転移学習」を実施することを提案した。イメージを図3で解説する。図3は、各点が1台の車両を表し、車両の特徴空間上の分布を模擬している(機械学習に明るい方には、モデルパラメータを2次元空間へ射影した図だと置き換えていただきたい)。当初、全車両は図3(a)のように1つの領域に密集していると仮定していたが、データ分析した結果、図3(b)のように複数のクラスタに分かれて分布していることが明らかになった。これは、お客様ごとに異なる使われ方をしていることが原因と推測される。

この結果を踏まえ、本研究では各車両の固有性を保ちながら知識の転移を行うために、車両が集中するクラスタ領域ごとにグルーピングを行い、同一グループ内でのみ転移を行う方向性を採用し

た。

転移の方法としては、各車両のモデルパラメータが属するグループ内では、共通部分空間を共有するという仮定を置き、グループ内の車両のモデルパラメータをその平均値へと近づけるような正則化項の拡張を新たに提案した。

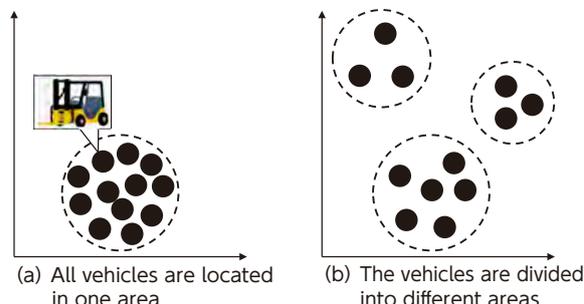


図3. 車両の特徴空間. 1点が車両1台を表す:  
(a) すべての車両は1つの領域に密集  
(b) 車両ごとに複数の領域に分かれる  
Fig.3 Space of usage characteristics

#### (2) 私たちの転移学習

本研究における知識とは、モデルパラメータである。車両ごとのモデルパラメータは、事前に推定済みであるという前提のもと、同一グループに属する他車両のモデルパラメータの平均的な値へ、自車両のモデルパラメータを近づける操作を転移学習と呼ぶ。これらの数学的な表記は機械学習におけるベースラインな正則化手法の1つであるRidge回帰を拡張し、第3項を追加することで実現した。具体的な正則化の式は以下となる。

$$W_{\text{fix}}^T = \arg \min \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 + \lambda_2 \|W^T\|^2 + \lambda_3 \sum_{k=1}^N \rho(T, S_k) \|W^T - W^{S_k}\|^2 \right\} \quad (2)$$

ここで、上付きの Tは「ターゲット車両(自車両)」を、 $S_k$ は「ソース車両(類似使用傾向を持つ他車両)」を示す。 $W_{\text{fix}}^T$ は転移後に得られる自車両の最適化済みモデルパラメータ、 $W^T$ は自車両の初期モデルパラメータ、 $W^{S_k}$ は他車両(ソース)のモデルパラメータ、nは自車両のデータポイント数、Nは全車両数、 $y_i$ は実測値、 $\hat{y}_i$ は予測値をそれぞれ示す。 $\lambda_2$ と $\lambda_3$ はハイパーパラメータであり、 $\rho(T, S_k)$ は以下のように定義される関数である。

$$\rho(T, S_k) = \begin{cases} 1 & T \text{ and } S_k \text{ are same group} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

第3項は、同一グループ内にある他車両のパラメータとの差異を抑制することで、パラメータの共通性を高めている。この項の効果を図4で幾何

学的に説明する。図4(a)の各点はRidge回帰によって車両ごとに推定されたモデルパラメータの初期値である。図4(b)では、これらをソースに式(2)を用いて転移を行った結果、モデルパラメータが更新され3台の車両の平均値に近づいている様子が示されている。本提案手法により、グループ内での知識共有を通じて、モデルパラメータが効果的に平均値へと収束し、精度向上が実現できることが確認された。

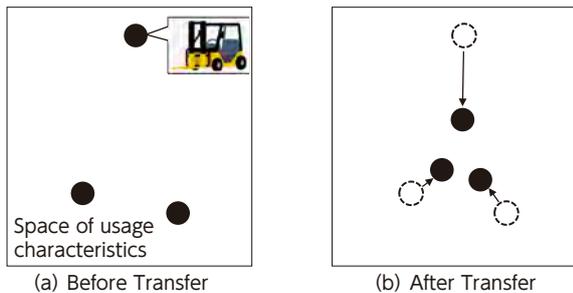


図4. 車両の特徴空間:  
(a) 転移学習前のモデルパラメータの配置  
(b) 転移学習後のモデルパラメータの配置(式(2)を使用)  
Fig.4 Space of usage characteristics

### (3) グループング

グループングの目的は、ターゲット車両(自車両)の固有性と、ソース車両(他車両)との共通性とのバランスを取ることにある。グループング手法は、各変数間の類似度を算出するための手法として Dynamic Time Warping (DTW)<sup>[8]</sup>を用い、クラスタリング技術と組み合わせて実装されている。

本手法は、大きく3つの処理から構成されている(図5)。まず(I)DTWを用いて類似度行列を作成し、次に(II)その類似度行列に対して階層的クラスタリングを行い、最後に(III)クラスタリング結果を突き合わせてグループを定義する。

(I)では、特定の変数に対して $N \times N$ の類似度行列を作成する。ここで $N$ は対象となる車両台数であり、各要素は車両間で該当変数の学習期間を比較することで計算されたDTW類似度を表す。比較対象とする変数には、リフト操作に関連する5つの変数を使用している。

(II)では、それぞれの類似度行列に対して階層的クラスタリングを行い、2つのクラスタに分割している。クラスタ数を2としたのは、環境条件を大きく2種類に分類し、明確に異なる使用環境を分離するためである

(III)では、すべての変数で同一のクラスタ配置となった車両同士を同一グループと見なしてい

る。これは、5つの変数がそれぞれ車両の使用環境を表しているという仮定に基づく。言い換えれば、これらの変数がすべて同一パターンで一致する場合、それらの車両は同様の外部環境下で使用されていると判断される。

この手法には1つの制約がある。クラスタ数を変数ごとに2つと固定しているため、定義可能なグループ数は最大で32( $2^5$ :2はクラスタ数、5は変数の数)に限られる点である。スケーラビリティ(拡張性)に弱さがある点は課題である。

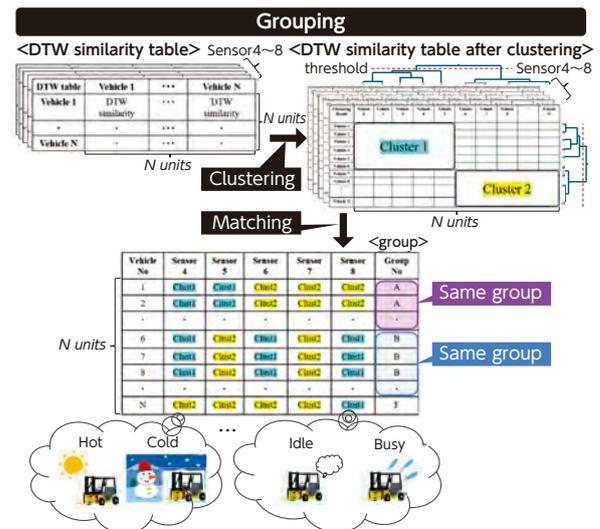


図5. 負の転移を軽減するためのグループング手法:  
・リフト操作に関連する5つの変数ごとに車両間の類似度行列を作成  
・類似度行列ごとに階層クラスタリングを行い2つのクラスタを形成  
・5つの変数のクラスタが完全一致する場合を同じグループと定義  
Fig.5 Grouping method to reduce negative transitions

### (4) 処理フロー

処理全体の流れを図6に示す。はじめに、 $N$ 台分のデータセットに対して、前述の手法に基づいてグループング処理を実施する。これと同時に、各車両に対してRidge回帰を用いて初期のモデルパラメータを推定する。

その後、式(2)に基づき、各グループ単位でモデルパラメータを更新する処理を行う。これら一連のプロセスを通じて、最終的な予測モデルのパラメータが推定される。

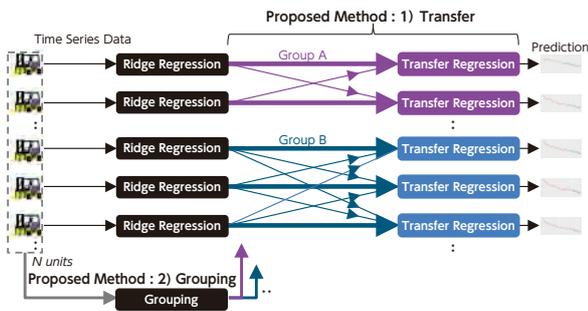


図6. 処理フロー: ソースモデルパラメータ  $W^{S_k}$  をRidge回帰によって推定する。同時に、 $\rho(T, S_k)$  の値を特定するために、 $N$  台の車両データから類似度行列を計算する。最後に、得られた  $\rho(T, S_k)$  と  $W^{S_k}$  を入力として、(2) を用いてモデルパラメータを再度推定する  
Fig.6 Process flow

## 4 実験設定

本章では、パラメータ推定方法、モデル評価の手法、および実験ケースについて説明する。

### (1) パラメータ推定方法

まず、学習と評価のデータ分割について述べる。全期間のうち、各車両の最後の50点を評価データとして用い、それ以前のデータを学習データとして使用した。データセットに含まれる車両数は25台である。各車両における学習データの時系列長は、最少で48点、最多で171点、平均で93点であった。

ハイパーパラメータ  $\lambda_2$  と  $\lambda_3$  については、交差検証を用いて決定した。具体的には、学習データを10分割し、10通りの評価パターンを作成したうえで、 $\lambda_2$  と  $\lambda_3$  のそれぞれに対して100通りの値を設定し、合計で1万通りのグリッドを生成した。各グリッド点に対して、10通りの評価パターンでモデルを評価し、平均二乗誤差 (MSE) を計算した。その結果、1万通りの組み合わせのなかから、最も平均MSEが小さくなる  $\lambda_2$  と  $\lambda_3$  の組み合わせを選択した。

### (2) 評価方法

モデルの入力データ数は1点、出力データ数は50点と設定した。およその目安として、1つのデータ点は約1週間分の情報に相当し、50点で約1年分の情報を表す。

モデル性能の評価には、評価データ50点を用いた二乗平均平方根誤差 (RMSE: Root Mean Squared Error) を指標として用いた。年単位での劣化傾向を捉えることを目的としており、RMSEはこの目的において信頼性の高い評価指標である。

RMSEの値が大きいほど予測性能が低く、小さいほど性能が高いことを意味する。

### (3) 実験ケース

本研究では、以下の3つのケースを比較対象として設定した。

1つ目は転移を行わないケースであり、ベースライン手法としてRidge回帰を用いた。2つ目はグルーピングを行わずに全車両から転移を行うケースである。3つ目は使用傾向に基づいてグルーピングを行い、グループ内でのみ転移を行うケースである。

## 5 結果

表1に、実験で比較した3つのケースの結果をまとめる。表中には、転移なし (Ridge回帰)、グルーピングなしでの転移、グルーピングありでの転移という3つのケースについて、それぞれ25台の車両におけるRMSEの平均値と標準偏差を示している。

予測精度 (RMSEの平均値) が最も高かったのはグルーピングありの転移学習 (0.17) であり、最も低かったのはグルーピングなしの転移 (0.24) であった。これは、グルーピングなしでの転移学習が実用的ではないことを示唆している。

また、RMSEの標準偏差についても、グルーピングありのケースが最も小さく (0.09)、予測性能のばらつきが抑えられていることが確認できた。これにより、本研究で提案した手法が複数の車両に対しても安定して効果を発揮することが示された。

表1. 車両25台のRMSEの結果一覧  
Table1 SUMMARY OF RMSE FOR 25 UNITS

Method	Average	Standard Deviation
No Transfer (Ridge)	0.20	0.13
Transfer without Grouping	0.24 (+21%)	0.16 (+23%)
Transfer with Grouping	0.17 (-16%)	0.09 (-31%)

### 5.1 グルーピングの効果

図7 (a) には、3つの実験ケースにおける各車両のRMSE値を一覧で示している。図7 (b) の右側の列には、グルーピングあり・なしでの転移学習の差分を示しており、グルーピングが効果的であった車両には青でハイライトが施されている。

図8では、9次元のモデルパラメータ空間を主成

分分析(PCA: principal component analysis)により2次元空間へ射影した結果を示している。図中の三角形は転移を行わないRidge回帰によるパラメータを示しており、これらは複数の領域に分布している。これは3.3(1)で述べたように、グルーピングの根拠となるものである。図7(b)の右側の列の結果からも、グルーピングの有効性が確認された。

車両ごとにグルーピングの効果を考察すると、とくにグループBとCに属する車両群において精度の向上が顕著であり、グループ内のすべての車両で改善が見られた。

改善が見られた要因として、図8に示す通り、グループBとCの車両は転移を行わない状態でも互いに近い位置に分布していたことが挙げられる。これは、それらの車両におけるモデルパラメータの構成比率が類似しており、多くの部分空間を共有していることを意味している。そのため、モデルパラメータの構成をグループ内で整合させることで、予測モデルの汎化性能が向上したと考えられる。

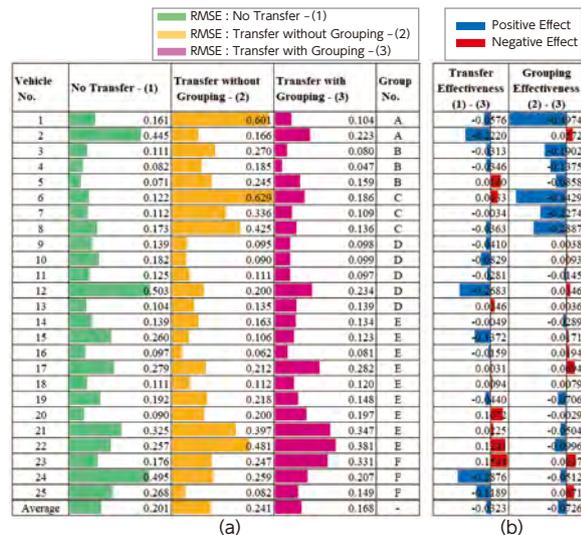


図7. RMSEの一覧と分析結果:  
 (a) 転移なし、グルーピングなし転移、グルーピングあり転移  
 (b) 転移学習の有効性、グルーピングの有効性転移学習により、予測精度の悪い3台のRMSE値が大幅に減少した。グルーピングすることで精度の悪化が緩和され、とくにグループBとCの精度が向上した

Fig.7 List and analysis of RMSE

## 5.2 転移学習の効果

図7(b)の左側の列には、転移なし(Ridge回帰)とグルーピングありの転移学習とのRMSEの差分が示されており、転移が有効であった車両は青でハイライトされている。

各車両に対する転移の効果を見ると、とくに車両No.2(RMSE: 0.45 → 0.22)、車両No.12

(0.50 → 0.23)、および車両No.24(0.50 → 0.21)で大幅な精度向上が確認された。これらのうち2台の結果は図9に示しており、転移を行わなかった場合には、将来1年のトレンド傾向の予測を外す傾向が見られたが、提案手法を適用することで改善された。残る1台も同様である。

以上の結果から、本手法は使われ方の変化などにとまれないトレンド傾向を外す場合に対し、とくに高い効果を示す可能性が示唆された。

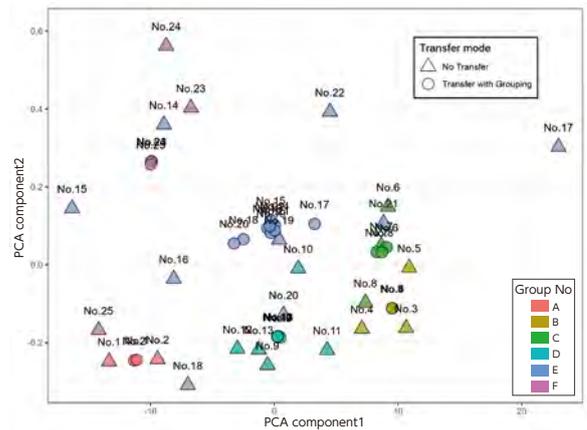


図8. PCAを用いて9次元のモデルパラメータを2次元に射影した図:色はグループを表し、△は転移なし、○はグルーピングあり転移を示す  
 Fig.8 Visualization of the nine model parameters in a two-dimensional space using PCA

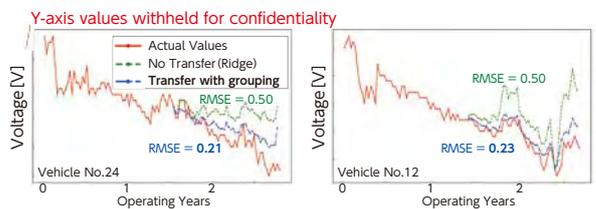


図9. 予測精度が最も向上した車両No.24とNo.12の観測値と予測値の時系列プロット:年単位のトレンド傾向の予測を外していたケースにおいて、予測精度が大きく改善された  
 Fig.9 Time series plot of observed and predicted values for vehicle 24 and 12, which showed the greatest improvement in prediction accuracy. The trend improved.

## 6 まとめ

本研究では、燃料電池フォークリフトの稼働データに対して、使われ方の類似性を考慮した転移学習の枠組みを提案し、予測モデルの性能向上を実現した。従来手法では、車両ごとの使用傾向の違いにより予測精度にばらつきが生じ、特定の車両では年単位のトレンド傾向を外すケースも見られた。これに対し、本手法では使用傾向に基づくグルーピングを行い、グループ内でのみ知識を共有することで、「負の転移」を回避しつつ精度向上を図った。

提案手法は、従来手法であるRidge回帰と比較して、予測誤差の平均を16%、標準偏差を31%削減する効果を示した。とくに、年単位のトレンド予測を外していたケースでは、誤差を最大58%削減するなど、顕著な改善が確認された。

本技術は、使われ方が多様な産業車両の現場において、予測精度の向上を通じて予防保全の実現を支援する有効な手法であると考えられる。今後は、より長期間のデータや異なる製品ラインナップへの適用を視野に入れ、本手法の頑健性と汎用性の検証を進めていく予定である。

## 謝辞

本研究の指導を頂いた産業技術総合研究所の赤穂氏、本村氏、佐々木氏、有益な議論を頂いたALラボの皆様、ならびに本研究を進める機会を頂いたトヨタL&Fカンパニー H2プロジェクト、先行開発部、ITデジタル推進部含む社内のすべての皆様へこの場を借りて感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] W. He, T. Liu, W. Ming, Z. Li, J. Du, X. Li, X. Guo, and P. Sun, "Progress in prediction of remaining useful life of hydrogen fuel cells based on deep learning," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 192, pp. 114193, March 2024.
- [2] [神島 10] 神島敏弘: 転移学習, 人工知能学会誌 Vol.25, No. 4, pp. 572-580 (2010)
- [3] NIPS 2005 Workshop - Inductive Transfer: 10 Years Later, <http://iitrl.acadiau.ca/itws05/> (2005)
- [4] S. J. Pan and Q. Yang, "A survey on transfer learning," *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, vol. 22, pp. 1345-1359, October 2010.
- [5] F. Zhuang, Z. Qi, K. Duan, D. Xi, Y. Zhu, H. Zhu, H. Xiong, and Q. He, "A comprehensive survey on transfer learning," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 1, pp. 43-76, January 2021.
- [6] K. Weiss, T. M. Khoshgoftaar, and D. Wang, "A survey of transfer learning," *J. Big Data*, vol. 3, 9, May 2016.
- [7] M. Rosenstein, Z. Marx, L. P. Kaelbling, and T. G. Dietterich, "To transfer or not to transfer," in *Neural Information Processing Systems*, 2005.
- [8] T. Giorgino, "Computing and visualizing dynamic time warping alignments in R: The dtw package," *J. Stat. Softw.*, vol. 31, pp. 1-24, August 2009

## 著者紹介



松浦 慶伍

## 開発の経緯と開発者の思い

当社のCSR重要課題の1つである「新たな価値の創出」に貢献すべく、本技術の開発に取り組みました。他車両の知識を活用するという「転移学習」のコンセプトは、当社産総研アドバンスト・ロジスティクス連携ラボに出向していた際、同研究所の赤穂 昭太郎氏からご教示いただいたものです。

転移学習は機械学習分野では一定の成熟を見せている技術ですが、自分と他者の共通性の混合度合いをバランスさせるため、類似度を定義することが課題でした。当初、何をもって「類似」とするのか見当もつかず、約30台の多変量データをさまざまな視点で眺める日々が続き、結果的に、波形を見るだけで車両の名前を当てられるようになったことは良い思い出です。

独自性と共通性をバランスさせる話は各所で見受けられますが、1つの視点だけで最適解が見える場合は少なく、多様な視点を持つことで徐々にその輪郭が見えてくる場合が多いと感じています。この教訓を活かしつつ、今後は研究開発分野に留まらず、ITを通じた組織全体の価値最大化に向けて貢献したいと考えています。

# 高耐熱複合材料むけプリフォーム製織技術の開発

## Development of High-productivity Weaving Technology for Preforms of Heat-resistant Composite Materials

中山 真広<sup>\*1</sup> 高島 宏明<sup>\*1</sup> 牧 亜矢<sup>\*1</sup> 吉田 祐介<sup>\*1</sup>  
 Masahiro Nakayama Hiroaki Takashima Aya Maki Yusuke Yoshida

\*1 CMプロジェクト

### 要旨

セラミックス基複合材料(CMC)むけプリフォームの製織技術の開発について報告する。CMCは優れた耐熱性と軽量性から航空機エンジン部品への適用が期待されている。当社は製織異常を自動検知する監視装置を開発するとともに、加熱によって短時間で除去可能かつ製織性の良いサイズ剤を開発することで工程の効率化を図った。これらにより製織レートを従来比で約4.4倍に向上させ、CMC部品の高レート製造技術の開発に貢献した。

キーワード: 複合材料, CMC, SiC繊維, 多層織物

### Abstract

This article reports on the development of high-productivity weaving technology for preforms used in ceramic matrix composites (CMCs) made with SiC fibers. Due to their excellent heat resistance and lightweight properties, CMCs are expected to be applied to aircraft engine components. In this development, an automatic monitoring system was designed to detect weaving defects, and a heat-removable sizing agent was introduced to improve process efficiency. These efforts successfully improved the weaving rate 4.4 times compared to conventional methods, contributing to the advancement of high-rate manufacturing technology for CMC components.

Keywords: Composite materials, CMC, SiC fibers, Multilayer textile

## 1 背景

### 1.1 CMCとは

セラミックス基複合材料、Ceramic Matrix Composites、CMCは耐熱性と軽量性を両立した材料として、とくに航空宇宙分野やエネルギー分野で近年注目を集めている<sup>[1]</sup>。セラミックスは軽量かつ高耐熱であるが、靱性が低く脆い材料である。これと高強度繊維とを複合化した材料がCMCである。図1にCMCの微視構造の概略図を示す。CMCの最大の特徴は、セラミックス単体では得られない擬延性が発現する点にある。これは、高強度繊維との複合化に加え、繊維と母材の界面にすべり層(たとえば、劈開性を有する窒化ホウ素(BN)など)を形成することで実現される。とりわけ炭化ケイ素(SiC)繊維をSiCマトリクスで固めたSiC/SiC複合材料は、近年General Electric Companyが初めて民間航空機エンジンに採用し耳目を集めた。図2に航空機エンジンの概略図とともに、CMCの適用が期待される部品を示す<sup>[2]</sup>。

### 1.2 次世代複合材創製・成形技術開発プロジェクト

当社は2020~2023年に実施された国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のプロジェクト(助成先:川崎重工業

(株)<sup>[3]</sup>に委託先として参加した。当該プロジェクトでは次世代航空機エンジンむけに、最も高温の燃焼ガスにさらされる燃焼器パネルの材料としてCMCを適正なライフサイクルコストで実装することを目的とし、必要となる高レート・低コストのCMC材料およびCMC製造プロセスの技術開発を行った。

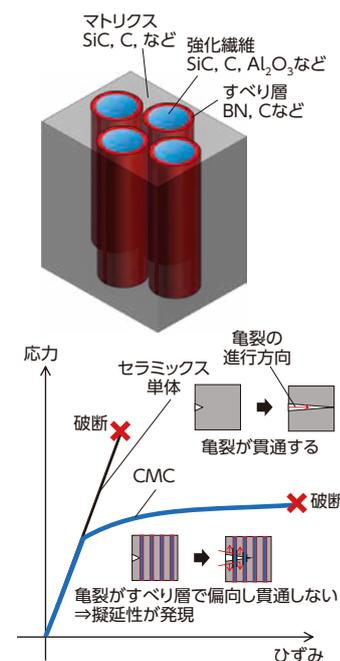


図1 CMC微視構造の概略図  
 Fig.1 A Schematic View of CMC Microstructure



図2 航空機エンジンにおけるCMC適用部品[2]  
Fig.2 CMC Applications in a Jet Engine

本プロジェクト内でのCMC製造工程および分  
担を図3に示す。当社は製織工程を担当した。本工  
程の特長は材料特性および生産性を向上させるた  
め、厚地の多層織物をプリフォーム(複合材料の強  
化繊維基材)として用いることである。単層織物の  
場合、所定の板厚になるまで積層することが必要  
であり、強化繊維のない層間が弱く破壊が進展す  
る可能性がある。一方で、多層織物は各層が交絡  
した厚地の織物であり積層の必要がなく、工程の  
低コスト化に貢献する。また層間に強化繊維が配  
されているため、層間強化の期待ができる。図4に  
SiC繊維の多層織物を示す。本稿では開発したSiC  
繊維の製織技術について述べる。

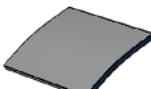
No.	工程	
1	製織	
2	すべり層形成	
3	マトリクス形成	
4	耐環境コーティング	
5	最終加工	

図3 CMC燃焼器パネル製造工程およびその担当  
Fig.3 CMC Combustor Panel Production Steps and  
Assigned Responsibilities

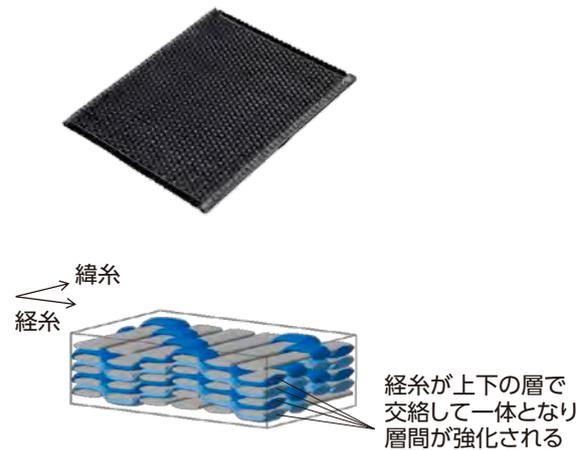


図4 SiC繊維 多層織物  
Fig.4 Multilayer Textile of SiC Fibers

## 2 目的・実施項目

SiC繊維の高レート製織技術を開発することを  
目的とした。

製織レート  $r$  は式(1) で定義する

$$r = q \times a \quad \text{式(1)}$$

ここで  $q$ :良品率,  $a$ :可動率である。 $0 \leq q \leq 1$   
かつ  $0 \leq a \leq 1$  であるから、 $r$  は  $0 \sim 1$  の値を  
とり、値が大きいほど良品を早く製織できること  
を表す。

SiC繊維は脆いため折損や毛羽が発生しやす  
い。SiC繊維の製織時に発生する異常には二つの  
モードがある。製織中に経糸が切れる「経糸切れ」  
および、毛羽が絡まることにより経糸が開口運動  
に追従しない「開口不良」である。図5に織機の五  
大運動および製織異常モードを示す。いずれの異  
常モードも発生すると、経糸の掛け直しや毛羽の  
除去などの修正作業に多大な時間を要するため、  
可動率  $a$  が低下し製織レートが低下する。さら  
に、これらの異常発生を見逃すと、糸が正常に織  
り込まれなくなり織物の組織異常を引き起こす。  
その結果良品率  $q$  が低下し製織レートが低下す  
る。すなわち、異常発生を抑制することのほか、発  
生した異常を確実に発見・停止し不良織物を製造  
しないことが、高レート製造および低コスト化に  
は不可欠である。本プロジェクトにて「異常発生  
の抑制」および「異常の発見・織機の停止」の両方  
を検討し、以下の2項目を実施した。

- ・異常監視の自動化
- ・サイズ剤の開発

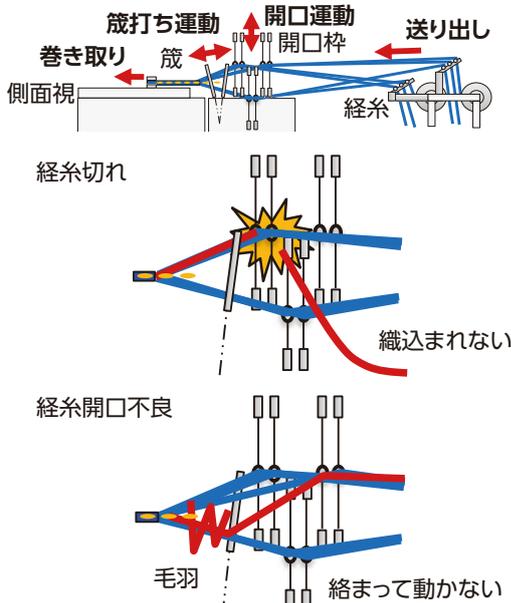
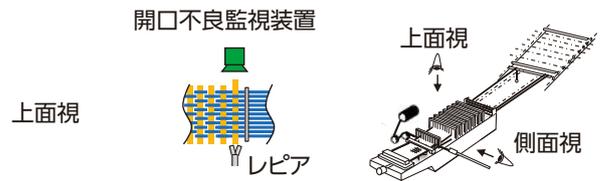
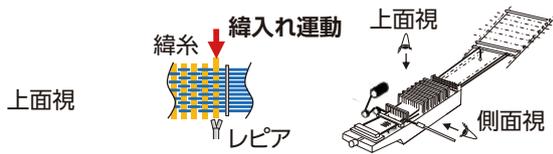


図5 織機の五大運動および製織異常  
Fig.5 The Five Major Motions of a Loom and Weaving Defects

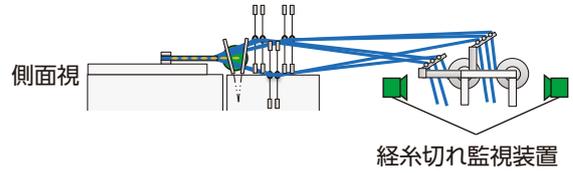


図6 製織異常監視装置の設置箇所  
Fig.6 Installation Locations of Weaving Defect Monitoring Devices

経糸切れ監視装置は送り出し装置の前後に設置し、経糸の送りが正常になされているかどうかを監視する。開口不良監視装置は開口部に設置し、開口が正常になされているかどうかを監視する。糸折損を発生させないため、両監視装置は非接触で画像から異常を検知する方式とした。監視は織機の動作中は常に行われており、装置が異常を検知すると織機に非常停止信号が入力され、製織を停止し前述の組織異常を防ぐことができた。

### 3 結果

#### 3.1 異常監視の自動化

下記を条件とし、異常監視装置を開発した。

- ・「経糸切れ」「開口不良」の両異常モードを検知できること
- ・監視装置による糸折損を発生させないこと
- ・異常検知後、次動作前に織機を停止させ、組織不良の織物を製織しないこと

図6に開発した製織異常監視装置の機台上での設置箇所を示す。

#### 3.2 サイズ剤の開発

前述の通り、SiC繊維は脆く折損しやすいため、製織を行うには耐摩擦性を向上させる糊剤であるサイズ剤が不可欠であり、その特性は製織性に大きな影響がある。一方でサイズ剤はすべり層の形成時には不純物となるため、製織後には除去が必要である。従来は湯洗いによる除去(湯洗デサイズ)が必要なサイズ剤を用いているが、デサイズ工程に最長8時間を必要とするため高レート生産の課題の一つであった。その対策として当社は、製織性を悪化させることなく工程の時間短縮が可能な、加熱によって除去できる(熱デサイズ)サイズ剤を開発した。

##### 3.2.1 製織評価

開発した熱デサイズタイプのサイズ剤(開発剤)をSiC繊維に塗布し製織した。また比較評価のため、従来の湯洗デサイズタイプ(従来剤)を塗布した糸でも同様に製織した。開発剤を塗布した糸での製織時にはほぼ経糸切れ、開口不良などの製織異常は発生せず、従来剤と同等の製織性を示すことを確認した。

### 3.2.2 デサイズ評価

前項で製織した織物について、川崎重工業(株)にてデサイズ評価を実施した。不活性雰囲気下(窒素、1000℃、5min) および大気雰囲気下(大気、500℃、10min)にて熱デサイズした結果、いずれの織物も残ったサイズ剤量はすべり層の形成時に問題とならないことが確認された。例として不活性雰囲気下での熱デサイズ後および比較として従来剤の湯洗後のSEM観察結果を図7に示す。開発剤は製織後の加熱により除去できることが確認され、製織性を損なわずに、従来の湯洗と比較してデサイズ工程の時間短縮が可能となることが示された。

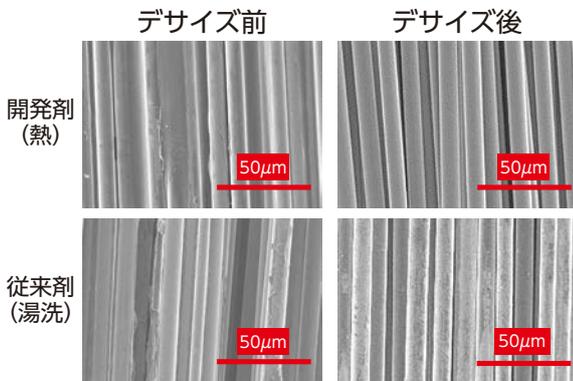


図7 デサイズ後織物SEM観察  
Fig.7 SEM Observation of Fabric After Desizing

### 3.3 製織レート評価

図8にプロジェクト当初と製織異常監視装置を導入し、かつ開発サイズ剤を糸に塗布した際の製織レートを比較して図示する。開発成果により製織レートを約4.4倍まで高め、目標値を満足することができた。

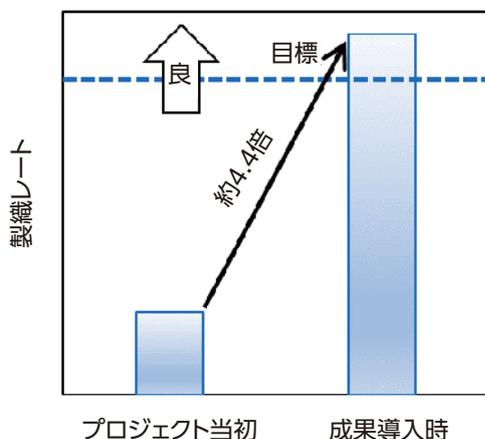


図8 プロジェクト当初-開発成果導入時点での製織レートの比較  
Fig.8 Comparison of Weaving Rates Between Project Start and Post-Implementation of Development Outcomes

## 4 まとめ

- ・次世代複合材創製・成形技術開発プロジェクトにおいて当社が担当した開発について述べた
- ・脆く折損しやすいSiC繊維を高レートで製織するために製織異常監視装置の開発および熱デサイズ可能で製織性を損なわないサイズ剤の開発を実施した
- ・開発成果を導入することで製織レートを約4.4倍まで高めた

本開発にて製織レートが量産事業への適用に見合う目途を得た。プロジェクトの今後の課題はCMC材料としてのTechnology Readiness Level, TRL 技術成熟度やManufacturing Readiness Level, MRL 製造技術成熟度の向上である。当社では、エンジンの開発スケジュールに合わせて、試作品の製作や認証取得の準備を進める計画である。

また、この開発で培ったSiC繊維の製織技術をエネルギーなど他分野への横展開することも検討中である。

### 謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成業務(JPNP20010)の結果得られたものである。

### 参考文献

- [1]George Karadimas and Konstantinos Salonitis, "Ceramic Matrix Composites for Aero Engine Applications—A Review," Applied Science, 13, 3017, 2023
- [2]Jim Steibel, "Ceramic matrix composites taking flight at GE Aviation," American Ceramic Society Bulletin, Vol.98, No.3, pp. 30-33, 2019
- [3]<https://www.nedo.go.jp/content/100969374.pdf>

## ■ 著者紹介 ■



中山 真広

高島 宏明

牧 亜矢

吉田 祐介

**開発の経緯と開発者の思い**

SiC繊維の製織に初めて取り組んだ際、その脆さと扱いづらさに直面し、試作は幾度となく失敗を重ねました。糸切れや開口不良といった異常の連続に、製織工程の安定化は遠い目標に思えました。監視装置の開発では、異常の定義や検知精度を巡って議論が尽きず、画像認識の調整には多くの時間を要しました。サイズ剤の開発・評価も難航し、熱デサイズの条件出しには繰り返しデサイズ評価を行いました。それでも、製織レートが向上したときの達成感は格別で、チーム全員の努力が報われた瞬間でした。本技術がCMCの量産化に貢献し、将来的にはエネルギー分野などへの展開にもつながることを期待しています。

## 製品に含まれる化学物質の規制とその対応

# Regulations on Chemical Substances Contained in Products and Respond to legal requirements

佐藤 裕史<sup>\*1</sup>

Hirofumi Sato

\*1 材料技術部

### 要 旨

近年、環境問題がクローズアップされており、工場排水や大気汚染だけでなく製品に含まれている化学物質についても規制の強化が進んでいる。材料技術部では欧米を中心に各国の製品含有化学物質規制を把握し社内展開するとともに、製品含有化学物質のデータ収集や管理を推進することで、各事業部の適切な法規対応を支援している。ここでは、近年の規制強化の流れと製品に含まれている化学物質管理の概要を説明する。

キーワード：環境、法規制、化学物質管理

### Abstract

In recent years, environmental issues have been in the spotlight, and regulations are being strengthened not only for factory wastewater and air pollution, but also for chemical substances contained in products. Material Engineering Department grasp the regulations on chemical substances contained in products in various countries, mainly in Europe and the United States, and spreads them within the company, while also promoting the collection and management of data on chemical substances contained in products, thereby supporting each business division in appropriate compliance with regulations. This article explains the recent trend in strengthening regulations and an overview of the management of chemical substances contained in products.

Keywords: Environment, Law, Chemical Substance Management

## はじめに

化学物質規制対応と聞いてどう感じますか？「法律はよくわからないから…」「聞いたこともない化学物質の名前ばかりでよくわからない」「海外の法律は英語だから苦手で…」というのが一般的な反応だと思います。

けれども、法律なのできちんと対応する必要があります。

これから、製品に含まれる化学物質の規制とはどういうものか、その法律にどのように対応しているか、について簡単に解説します。

## 本文の概要

製品の化学物質規制に対応するためには、1.規制している法律を理解すること、2.製品にどのような化学物質が含まれているかを知ること、の2つが必要で、どちらも専門的な知識と多くの人の協力が欠かせません。

この2点について、取組みの歴史や概要について説明していきます。

## 1 規制している法律を理解する

製品に含まれる化学物質の規制についてとくに

注目され始めたのは、欧州廃車指令が施行された2000年あたりからです。

欧州廃車指令で使用が規制されたのは鉛、カドミウム、水銀、六価クロムの4物質で、当時これらの4物質はSOC4物質(SOC:Substances Of Concern=(環境)負荷物質)と呼ばれていました。

これらの物質が有害であることは一般に知られていましたが、モノづくりに非常に有効な特徴を持った物質であったため、有害性を理解し管理して使えば問題ないというのが当時の一般的な認識でした。欧州廃車指令でも、規制する根拠は「健康を害するから」ではなく「リサイクルを阻害するから」というものでした。しかし、それまでほぼ規制なしで使用していた物質がいきなり使用制限される事態になり、自動車業界は代替え材料の調査や開発などで大混乱となりました。

さらに、2002年にWSSD(World Summit on Sustainable Development:持続可能な開発に関する世界首脳会議)が南アフリカのヨハネスブルグで開催され、「化学物質が人の健康と環境にもたらす著しい悪影響を最小化する方法で使用、生産されることを2020年までに達成することを目指す」ことが合意されました。

この合意を受けて先進国を中心に化学物質を規制する法律が新たに作られたり、規制対象物質を

増やしたりする動きが活発になったため、自動車業界では単なるSOC4物質の切り替えや管理だけでなく、製品に含有しているSOC4物質以外の多くの化学物質について、規制されているかどうかを確認する必要が出てきました。

ここで、新しく法律が整備された例として欧州REACH規則を取り上げて説明します。

欧州REACH規則は2007年に施行されました。REACHとは「Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals」の略で、直訳すると「化学物質の登録、評価、認可、制限に関する規則」となります。

この法律がそれまでのものと大きく異なるのは、基本原則である「No Data, No Market」つまり、有害性や特徴などのデータが登録されていない化学物質は市場に出すことができないというものです。この原則は1t/年を超えてEU域内で生産または輸入される物質や調剤を対象としており、2025年現在で登録されている化学物質数は2万2千を超えています。これらの化学物質を年間1tを超えて生産または輸入する企業は、毎年欧州化学品庁に届け出をすることになりました。

さらに、条文には予防原則（有害性が化学的に十分証明されていなくても規制する）が明記されており、人の健康と環境への悪影響を徹底的に減らす意図が読み取れます。この考え方に従うと、ある化学物質の有害性が明らかになれば、十分なデータがなくても類似物質や関連物質もまとめて規

制することができるようになるため、今までのハザード管理（特定された有害物質を廃止するなどの管理を行う）に比べて規制の対象となる化学物質が増えることになりました。つまり、予防原則により企業が把握して管理すべき化学物質の数が大幅に増加しました。

次に、既存の法規制が強化された例として日本の化審法と米国のTSCAを取り上げます。

日本の化審法（正式名称は「化学物質の審査および製造などの規制に関する法律」）は、ライスオイルへのPCB混入を原因とするカネミ油症事件を契機に1974年に施行されました。この法律の特徴は新規化学物質は事前審査を実施して、必要に応じて規制するというものですが、2011年の改正でそれまでのハザード管理（有害なものを特定し除去する考え方）からリスク管理（ハザードによる被害の発生確率と影響度合いを評価して軽減する考え方）に変わるとともに、化学物質の製造・輸入量を毎年報告することが義務付けられるなど、欧州REACH規則に近い規制が行われるようになりました。

また、米国のTSCA（Toxic Substances Control Act: 有害物質規制法。「トスカ」と呼ばれている）も2016年に改正され、EPA（Environmental Protection Agency: 環境保護庁）の権限が強化されるとともに化審法と同様にリスク評価の考え方が追加されました。

米国は有害化学物質を規制するPOPs



図1 世界の主な化学物質規制  
Fig.1 Major chemical substance regulations around the world

(Persistent Organic Pollutants: 残留性有機汚染物質) 条約を批准していないこともあり、それまで世界各国で使用が禁止されているPCB (Poly Chlorinated Biphenyl: ポリ塩化ビフェニル) やアスベストなどを規制していなかったため、大幅な規制強化となりました。

## 2 製品にどのような化学物質が含まれているか

2000年頃、自動車メーカー各社は欧州廃車指令だけでなく各国の化学物質規制を把握して管理すべき物質のリストを作成し、1次仕入れ先に順守することを求めています。

当時の要求は「規制対応できているかどうか」のヒヤリング程度から「有害物質の非含有宣言書」の提出要求が一般的で、要求を受けた1次仕入れ先企業のなかには、客先が規制している物質が含有されているかどうかのエビデンスを取得することなく非含有宣言書を提出しているというありさまでした。

そのため、いつまでたっても「実は規制物質が入っていました」という事例が後を絶たず、困った自動車メーカーは「全品番の成分分析」を要求する事態になり、1次仕入れ先各社は分析会社に成分分析を依頼したり、分析装置を購入したりと大慌てで対応していました。

その後、2005年ごろからIMDS (International Material Data System) という自動車業界向けの化学物質データ共有システムの運用が国内でも一般化し始め、部品メーカーが分析を行わずとも、材料メーカーまで遡ってデータを取得することができるようになっただけでなく、調査する物質のリストもGADSL (Global Automotive Declarable Substance List) という自動車業界の国際標準に統一されました。

しかし、はじめの頃は認知度が低く、材料メーカーの回答が得られなかったり、化学的な知見のない担当者がデータを作成したため、誤記が多数見られることがありました。なかには、塩ビ樹脂 (ポリ塩化ビニル) を禁止有害物質であるPCB (ポリ塩化ビフェニル) と記載されたデータが見つかり、本当に含有しているのかという確認を行った事例もありました。

その後、化学物質管理の勉強会や指導が進み、化学物質調査の重要性が認知されたことで、各社が通常の業務として対応するようになりました。

以上のように製品含有化学物質管理が始まり、管理レベルの向上が図られてきましたが、近年は化学物質を規制する法律が大きく変化し、対象物質数が急速に増加したため化学物質調査の担当者の業務負荷が大きくなったり、今まで以上の力量が要求されるようになってきました。

これは、前項で説明したリスク管理の考え方が要因の1つであると考えられます。つまり、ある化学物質の有害性が確認されると、環境負荷というリスクを下げるため、有害性評価が行われていない物質であっても、有害物質と類似の構造を持つ化学物質すべてを規制対象にしているからです。

例えば、1970年代に規制されたPCBは規制の対象となるのは1つの化学物質だけでした。1990年代に規制されたオゾン層破壊物質は約100物質、近年話題になっているPFAS (per-fluoroalkyl substances: ペルフルオロアルキル化合物) に至っては定義に該当する化学物質は1万物質以上あると言われています。しかも、化学物質1つ1つに付けられているCASRN (Chemical Abstracts Service Registry Number: アメリカ化学会が付与している登録番号) がないPFASも存在するため、実際にすべての物質を把握することは極めて困難です。

さらに、自動車にどのPFASが使われているのかも十分把握できておらず、将来規制された場合にはPFASが含まれている材料を抜けもれなく特定するのは不可能ではないかと考えられます。

以上のように、製品に含まれる化学物質の規制に100%対応するのは非常に困難です。ゼロリスクという考えは成立しません。

それでも色々な会社がリスクを最小限度に抑えようと努力しています。当社でも色々工夫しながら取り組んでいますので、次にその取組みについて説明します。

## 3 当社の取組み…法規情報の収集と解釈

当社は環境規制情報を提供する会社と契約しており、毎月200件以上の環境関連の動向情報から当社製品に関係しそうな情報をピックアップし、とくに影響が大きいものについては、毎月開催している製品含有化学物質連絡会において材料技術部の解説を加えた形で情報展開しています。

さらに、自動車部品工業会の環境関連の部会活動に参加することで、インターネット上には載っ

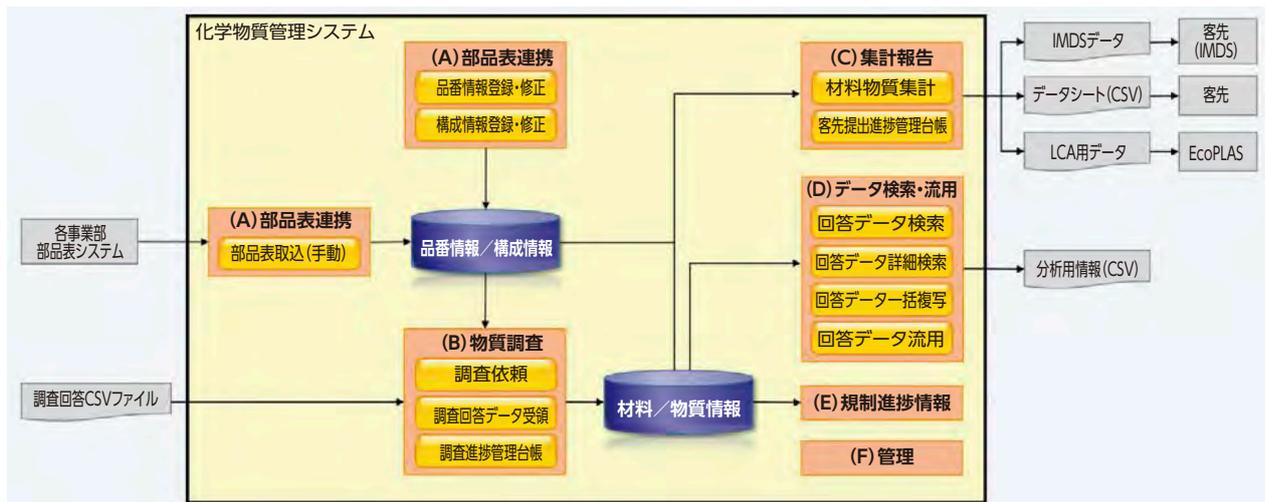


図2 化学物質管理システム (MARSY)  
Fig.2 Chemical Substance Management System

ていないような業界団体の動きや規制当局の情報を入手し、少しでも早く規制情報を社内展開するとともに、代替技術などが十分考慮された合理的な規制になるよう、業界団体の啓蒙活動や働きかけに協力し当社の利益をできるだけ損なわないようにしています。

次に、入手した規制情報の解釈手順について簡単に説明します。

規制内容を正しく把握するため、まずは原文を確認します。単語の意味や修飾語がどこにかかっているかなどは、前後の文章や規制化に至る背景、類似の法規制を考慮しないと判断を間違うため、自動翻訳の利用には注意が必要です。

例えば“Automobile”と“Motor Vehicle”です。翻訳ツールを使うとどちらも“自動車”と訳されてしまいますが、“Automobile”は一般的に乗用車を示し、“Motor Vehicle”はトラックや建設機械などもっと広い範囲を示すのが一般的ですが、産業車両まで含むかどうかとなると明記されていない場合が多いです。この場合は規制当局の会議議事録や法令のガイドラインなどを調べますが、それでも判断がつかない場合は、業界団体へのヒアリングや情報提供会社のコンサルタントサービスを利用するなどして判断します。

## 4 当社の取組み…化学物質データ管理

当社では化学物質データを管理するため、図2に示すような独自の管理システムMARSY (Material Analyses & Research System) を構築しています。初代は2007年に立ち上げ、現在は

第2世代のシステムが運用されています。

このシステムでは、調査依頼からデータ保管までをシステムチックに行えるうえ、部品表を取り込むことで、客先に出荷する製品を構築しているすべての部品の化学物質情報を集計することができるようになっています。

このシステムの特徴はデータの書式などをチェックする“データ品質チェック機能”と規制化学物質の含有チェックをする“順法チェック機能”を内蔵している点です。例えば、樹脂やゴムといった材料は、基本的に複数の化学物質を混ぜることで要求される性能を発揮するので、母材が100%ということはまずありません。そのため、樹脂やゴムを示す材料記号が記載されていて含有化学物質が単体で100%というデータがあると、データ品質チェックでひっかかり、「単一物質100%の組成です。法規対応上必要なほかの物質の記述漏れはありませんか？」というメッセージが表示され、作業者に注意喚起します。

また、国内外で使用が規制されている化学物質が含まれていると順法チェックでひっかかり警告が出て、データの確認や修正を行わない限り化学物質調査が終了できない仕組みになっています。

化学物質管理は自社だけで完結するものではありません。図3に示すように、仕入れ先やサプライチェーン上の企業の協力が必要不可欠です。また、管理レベルは化学物質調査データの確からしさに左右されます。

一般に化学物質データというとSDS (安全データシート) を想像する人が多く、とくに塗料などの化学物質調査を行うと、SDSを写したと思われる

データを受領することがあります。しかし、SDSとは作業者の安全のため揮発する物質を含んでいることを表示したり、そのまま廃棄すると自然環境に与える影響が大きい化学物質が含まれているという情報を提供するもので、最終製品に含まれる化学物質の情報はほとんど記載されていません。

よって、仕入れ先の担当者がSDSを基に製品含有データを作成して報告すると、製品とデータに大きな乖離が生じてしまい、最悪の場合規制物質が含有されているのに気づかないまま製品を出荷することにつながります。

こうした法令違反を防ぐには、仕入れ先を含めたサプライチェーンでの力量確保が必要になってきます。

材料技術部では、調達部門と協力して仕入れ先の化学物質管理レベルを把握するとともに、管理レベルが低い会社に対して改善指導を行い、サプライチェーン全体の管理レベル向上を推進しています。

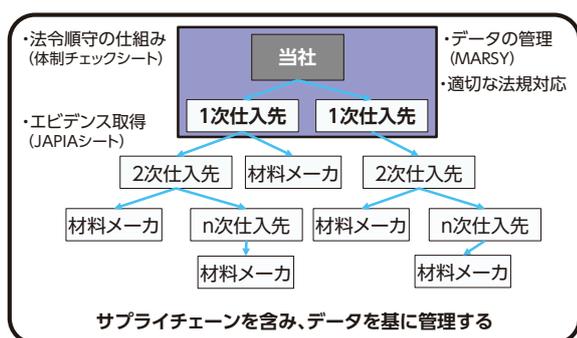


図3 当社の製品含有化学物質管理体制  
Fig.3 Our management system for chemical substances contained in products

## まとめ

製品に含まれる化学物質の規制が強化され始めてから20年以上経過しましたが、規制される物質数はまだまだ増加し続けています。また、その規制も含有率だったり用途によるものだったりします。さらに国によって規制物質も異なります。各国の法律を正しく解釈し適切な対応が取れるよう、情報収集能力の向上や仕組みの改善を進め、今後も事業部を支援していきます。

## ■ 著者紹介 ■



佐藤 裕史

## 著者の思い

他社の化学物質管理に関するミス进行调查すると、非常に大きな代償を払っています。

例えば、“設計時は化学物質規制に対応していたが、原価低減で変更した部品に禁止物質が含有していたことで欧州で通関できず、部品交換などに数百億円かかった”とか、“法律で定められた含有化学物質の情報開示要求に対応できず、製品を市場回収することになった”などの事例があります。

実際には高額な費用を支払っただけでなく、会社の信用もなくなっているかもしれません。そのようなリスクを減らすには、今まで以上に意識を高め、注意レベルを引き上げることが必要かもしれません。

# 論文

## Monograph

P.138 Demonstration of Efficiency Increase of 350 V-to-13.3 V Isolated DCDC Converters for Electric Vehicles by Active Gate Driving

P.138 産業用エンジンをベースとした水素エンジンシステムの性能向上に関する研究開発

P.139 水素燃料火花点火機関の異常燃焼に関する研究 –ノッキング予測モデルの構築–

P.139 Experimental Study on Hydrogen-Methane Co-Combustion in Small Gas Engines

P.140 成形工程における糸の力学的形状変化を考慮した織物複合材料の分離型マルチスケール解析

## Demonstration of Efficiency Increase of 350 V-to-13.3 V Isolated DC-DC Converters for Electric Vehicles by Active Gate Driving\*<sup>1</sup>

### 電動車向け350V-13.3V絶縁型DC-DCコンバータへのアクティブゲートドライブ適用による効率向上の実証

鋤田 陽平<sup>\*2</sup> 畑 勝裕<sup>\*3</sup> 近藤 弘規<sup>\*4</sup> 渡辺 健一<sup>\*4</sup> 永吉 謙一<sup>\*4</sup> 高宮 真<sup>\*2</sup>  
 Yohei Sukita Katsuhiko Hata Hiroki Kondo Kenichi Watanabe Kenichi Nagayoshi Makoto Takamiya

\*1 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Atlanta, USA, pp. 2551-2555, March 2025.

\*2 東京大学 工学系研究科 電気系工学専攻 \*3 芝浦工業大学 工学部 理工学研究科 \*4 エレクトロニクス事業部 技術部

#### Abstract

An active gate driving (AGD) is applied to a power converter product, and the efficiency increase of the power converter by AGD is demonstrated by measurements under switching noise aligned condition compared to a conventional gate driving. Specifically, the gate driver for a single Si power MOSFET comprising a 165 kHz, 350 V-to-13.3 V isolated DC-DC converter product for electric vehicles was replaced with a developed time-domain stop-and-go active gate driver, and the DC-DC converter efficiency and the spectrum amplitude at 27 MHz of the power MOSFET drain current of the conventional single-step gate driving and the proposed AGD are compared in measurements at 1.2 kW (= 13.3 V, 90 A) output. The results show that the proposed AGD reduces switching loss by 45% compared to the conventional single-step gate driving under the drain current spectrum amplitude alignment condition, resulting in a 10% reduction in total DC-DC converter loss and a 0.9% increase in DC-DC converter efficiency from 90.3% to 91.2%.

Keywords: Active Gate Drive, Switching Loss, DC-DC Converter, Efficiency

#### 要旨

開発したtime-domain stop-and-go方式のアクティブゲートドライバ(AGD)をDC-DCコンバータに適用し、従来の単ステップ電圧を印可するタイプのゲートドライバを用いた場合と損失および変換効率を比較した。比較にあたっては、パワー MOSFETに流れるドレイン電流の27 MHzにおけるスペクトラムの振幅が同等となるようゲート波形を調整した。結果として、提案したAGDは前述条件において従来のゲートドライバよりもスイッチング損失を45%低減し、コンバータの変換効率を90.3%から91.2%へ向上できた。

キーワード: アクティブゲートドライブ、スイッチング損失、DC-DCコンバータ、変換効率

## 産業用エンジンをベースとした水素エンジンシステムの性能向上に関する研究開発\*<sup>1</sup>

### Research and Development on Performance Improvement of Hydrogen Engine Systems Based on Industrial Engines

田中 耕太<sup>\*2</sup> 田中 剛<sup>\*2</sup> 山本 浩史<sup>\*3</sup> 泉 光宏<sup>\*3</sup> 水嶋 教文<sup>\*4</sup> 葛岡 浩平<sup>\*4</sup>  
 Kota Tanaka Takeshi Tanaka Hiroshi Yamamoto Mitsuhiro Izumi Norifumi Mizushima Kohei Kuzuoka

\*1 自動車技術会論文集 Vol.56, No.5 \*2 先行開発部 \*3 ダイアゼブラ電機(株) \*4 産業技術総合研究所

#### 要旨

産業用エンジンのカーボンニュートラル実現に向けて量産LPGエンジンをベースに燃料供給系を水素用に換装した水素エンジンを開発した。ターボ過給に加え、異常燃焼の抑制技術やクランクケース内循環システムなどの採用による最小限のシステム変更で、ベースエンジンと同等レベルの出力および低NOx(窒素酸化物)排出を達成した。また、燃焼適正化により高熱効率および低NOxが両立することを示した。

キーワード: 水素エンジン、異常燃焼、異常放電、イグニッションコイル、クランクケース内換気システム

#### Abstract

A hydrogen engine was developed by converting the fuel supply system of a mass-produced LPG engine to accommodate hydrogen, with the goal of achieving carbon neutrality for industrial engines. To address the torque reduction resulting from the conversion to a hydrogen engine, turbocharger was added, along with abnormal combustion suppression technologies and hydrogen concentration reduction technologies in the crankcase. Minimal system modifications enabled the achievement of power performance equivalent to the base engine as well as low NOx emissions. Additionally, combustion optimization demonstrated the capability to achieve both high thermal efficiency and low NOx emissions simultaneously.

Keywords: Hydrogen Engine, Abnormal Combustion, Abnormal Ignition, Ignition Coil, Crankcase Ventilation System

# 水素燃料火花点火機関の異常燃焼に関する研究 ーノッキング予測モデルの構築ー\*<sup>1</sup>

## Research on Abnormal Combustion in Hydrogen-Fueled Spark Ignition Engines - Construction of a Knocking Prediction Model -

神戸 浩揮<sup>\*2</sup> 増田 糧<sup>\*3</sup> 田中 剛<sup>\*2</sup>  
Hiroki Kambe Ryo Masuda Takeshi Tanaka

\*1 自動車技術会論文集 Vol.56, No.6 \*2 先行開発部 \*3 (株)豊田中央研究所

### 要 旨

水素燃焼のノッキング予測モデルを構築した。本報では、NO(一酸化窒素)濃度が水素の着火遅れ時間に与える影響に着目した。水素はガソリン燃料と比較し、NOによる着火遅れ時間の短縮効果が顕著であることが明らかとなった。また、ノッキング判定には、Livengood-Wu積分に基づく燃焼割合を閾値に用いることで、実験結果の再現を確認した。本研究より、水素用ノッキング予測モデルではNOの影響を適切に組み込むことが重要であることを示した。

キーワード: 内燃機関、水素、燃焼解析、ノッキング、着火遅れ時間

### Abstract

A knocking prediction model for hydrogen combustion was developed. This study focused on the influence of nitric oxide (NO) concentration on the ignition delay time of hydrogen. It was revealed that hydrogen exhibits a significantly pronounced effect of NO in reducing the ignition delay time compared to gasoline fuel. In addition, knocking was evaluated using a threshold based on the combustion progress determined by the Livengood-Wu integral, and the model successfully reproduced experimental results. This study highlighted the critical importance of incorporating the influence of NO concentration into the knocking prediction model for hydrogen combustion engines.

Keywords: Heat engine, Hydrogen, Combustion analysis, Knocking, Ignition delay time

# Experimental Study on Hydrogen-Methane Co-Combustion in Small Gas Engines

## 小型ガスエンジンにおける水素-メタン混合燃焼の実験的研究\*<sup>1</sup>

田中 健太<sup>\*2</sup> 谷 俊宏<sup>\*2</sup> 佐古 孝弘<sup>\*3</sup>  
Kenta Tanaka Toshihiro Tani Takahiro Sako

\*1 THE 29th SMALL POWERTRAINS AND ENERGY SYSTEMS TECHNOLOGY CONFERENCE (SETC), Florence, Italy, November 2025にて発表  
\*2 先行開発部 \*3 大阪ガス(株)

### Abstract

To adapt internal combustion engines for a carbon-neutral society, the utilization of hydrogen has garnered attention. Hydrogen, however, has a characteristic of igniting with extremely low energy, making it prone to abnormal combustion. In this study, we address the specific challenges associated with hydrogen by mixing methane, which possesses a high heating value and a lower tendency for abnormal combustion. Through experiments using a naturally aspirated engine, it was confirmed that this approach not only resolves hydrogen-related issues but also contributes to improvements in power output, thermal efficiency, and NOx reduction.

Keywords: Hydrogen, Methane, Co-combustion, Spark ignition engine, Alternative fuel

### 要 旨

内燃機関をカーボンニュートラル社会に適応させるための手段として、水素の利用に着目。水素は極めて小さいエネルギーで着火するため異常燃焼が発生しやすい特性を持つ。本研究では、発熱量が高く異常燃焼が発生し難い特性を持つメタンを混合することにより、水素特有の課題を解決するとともに、出力向上、熱効率改善、NOx(窒素酸化物)低減が可能であることを自然吸気エンジンで確認した。

キーワード: 水素、メタン、混焼、火花点火エンジン、代替燃料

# 成形工程における糸の力学的形状変化を考慮した織物複合材料の分離型マルチスケール解析\*<sup>1</sup>

## A Decoupling Multiscale Analysis of Textile Composite Considering Deformation of Fiber Yarns During Weaving and Molding Processes

笹川 崇\*<sup>2</sup>

Takashi Sasagawa

田中 真人\*<sup>3</sup>

Masato Tanaka

伊藤 祐\*<sup>4</sup>

Tasuku Ito

\*<sup>1</sup> 日本複合材料学会誌, 50, 3 (2024) 86-98 \*<sup>2</sup> (株)豊田中央研究所 サステナブルプロセス研究領域 \*<sup>3</sup> (株)豊田中央研究所 数理工学研究領域 \*<sup>4</sup> CMプロジェクト

### 要 旨

繊維系複合材料の機械的特性を正確に予測可能な新しいマルチスケールシミュレーション手法を提案する。本手法の重要な特徴は、製織および成形中における繊維束の変形を考慮して、代表体積要素を数値的に構築する点である。私たちは、乾燥状態における繊維束の力学的挙動をビーム要素およびソリッド要素を用いてモデル化する新しい手法を通じて、製織および成形中の繊維束の変形を精密に計算する方法を確立した。本手法の有効性は、炭素繊維複合材料の引張、圧縮、および曲げ試験を用いて得られた実験結果との比較によって検証された。この検証により、繊維束の変形を適切に考慮することで、複合材料の機械的特性を高い精度と信頼性で予測できることを示した。

キーワード: 織物複合材料、マルチスケール解析、非線形特性、ビームソリッドモデル

### Abstract

A novel multiscale simulation scheme for textile composites is proposed, which accurately predicts their mechanical properties. A key aspect of our method is the numerical construction of their representative volume elements by considering the fiber yarn deformations during weaving and molding of textile composites. We found that fiber yarn deformations during weaving and molding can be precisely computed using a novel method for modeling dry yarn mechanical behaviors with beam and solid elements. We validated our proposed method by comparing its mechanical property predictions with the experimental results obtained from tensile, compression, and bending tests of carbon fiber composites. The validation demonstrated that our method can accurately and robustly predict the mechanical properties of a composite by considering fiber yarn deformations during weaving and molding.

Keywords: Textile composite, Multiscale simulation, Nonlinear mechanical properties, Beam solid model

# 技報

TOYOTA INDUSTRIES TECHNICAL REVIEW

## 編集後記

「豊田自動織機技報」をご愛読いただき、誠にありがとうございます。

近年、地球温暖化や労働力人口の減少、デジタル技術の革新など、社会環境の大きな変化が進むなか、社会課題に対応するために多くの新技術が生まれています。

本号では、そのような新技術のひとつである「最適化技術」を特集として取り上げました。部品設計、物流、計画立案など、幅広い分野での開発事例をご紹介します。また、表彰、製品技術紹介、技術解説なども掲載しておりますので、当社の技術開発の取組みに触れていただければ幸いです。

トレンド寄稿には、最新のデジタル技術である「生成AI」について、慶應義塾大学の栗原先生にご寄稿いただきました。この場を借りて、厚く御礼申し上げます。また、ご寄稿いただいた執筆者の皆様、編集委員の方々にも心より感謝申し上げます。

今後も、読者の皆様に新たな技術や知見をお届けできるよう努めてまいります。引き続きご支援とご愛読を賜りますよう、よろしくお願い申し上げます。

技報事務局(技術管理部)  
大室 渉

## 編集委員

村瀬 幹生 (トヨタL&Fカンパニー)	水野 結介 (繊維機械事業部)
樋脇 孝平 (自動車事業部)	市川 慎一郎 (ITデジタル推進部)
町田 和也 (エンジン事業部)	堤内 雄大 (知的財産部)
澤 卓也 (エレクトロニクス事業部)	前坂 敏彦 (生技開発センター)
坪井 浩志 (コンプレッサ事業部)	杉本 和彦 (ダイエンジニアリングセンター)

## 豊田自動織機 技報 No.76

2026年1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 一条 恒  
印刷所 株式会社 アイワット



株式会社 豊田自動織機

