

## 特集：DXでめざすKOBELCOらしさ

ページ

- 1 (巻頭言) 「DXでめざすKOBELCOらしさ」特集の発刊にあたって 宮岡伸司
- 3 (解説) KOBELCOが考えるDX 難波信充
- 6 (解説) 産業DXの動向と神戸製鋼所への期待 鷺尾 隆
- 9 (技術資料) 業務効率化に寄与するデジタルツールを用いたEUCの推進 大山隆弘
- 13 (解説) 全社データ分析基盤DataLab<sup>®</sup>の構築と活用 南 和男・藤平雅信・逢坂武次
- 17 (技術資料) 加古川製鉄所第2分塊工場における設備状態監視・異常予兆検知システムの構築  
萩原 尚・井上佳賢・森居数広・宇野久史・安東 努
- 22 (解説) IoTプラットフォームを用いた機械加工工場の統合管理 浅井新輔・北 一貴・池田英生
- 28 (論文) 熱画像解析による連続測温法を適用した高炉溶銑温度予測技術の開発  
加茂和史・森居数広・桑名孝汰・植崎博司・笠井昭人・原 大悟
- 33 (解説) 鋼板製造工場の冷却工程への深層ニューラルネットワークを用いた巻取温度制御技術の適用  
佃 岳洋・原田 駿・樋口真之・長谷川裕之・逢坂武次・森居数広
- 37 (技術資料) 熱間鍛造品の形状計測技術による作業安全性・効率の改善  
岡本 陽・滝下峰史・佐藤明宏・池上智紀・緒方啓丞
- 42 (解説) 廃棄物処理プラント向けクレーン自動運転技術 森田 啓・清水克哉・尾崎圭太・福川宙季
- 46 (技術資料) アジャイルの原則を適用した生産管理の業務変革 福田啓一・井本孝亮
- 51 (論文) 神戸発電所における燃料需給計画シミュレータの開発  
梅田豊裕・藤井優貴・瀧澤勇介・瀧 秀行・濱野貴央・平出洋太郎
- 57 (解説) 材料開発および利用におけるMI技術 和田 堯・井元雅弘・中山啓太・倉 千晴・小林拓史
- 63 (論文) アルミ押出型材断面設計へのベイズ最適化の適用と有効性検証 伊原涼平・鎮西将太・山川大貴
- 68 (解説) プロセスシミュレータによる設計および開発プロセス変革への取り組み  
四木悠貴・植田 達・森田 啓
- 72 (技術資料) デジタルツインを用いたDX化による建機開発プロセス改善  
山手真治・平賀智徳
- 77 (技術資料) ロボット溶接のさらなる自動化に貢献するDX技術  
木村雄士・日高一輝・東良敬矢・澤川史明・新井敦士・小向航平
- 82 (解説) バーチャルトレーニングシステムによる溶接の技能伝承 青山雄一郎
- 86 (解説) サービス業務DXによる「持続可能なKOBELCOらしいアフターサービス体制」の実現  
宗 陽一郎
- 90 (技術資料) 利用者の声をもとに開発 クレーン施工計画支援ソフトウェアK-D2PLANNER<sup>®</sup>  
岡本真典・岡田 哲・高松伸広・多々川都央
- 96 (技術資料) マテリアルDXに向けたマテリアルズ・インフォマティクスの紹介  
古賀健治・狩野恒一・大政和之・加々尾慎哉
- 102 (論文) 触媒粒子形状を考慮した固定層触媒反応器のモデリング  
高岸洋一・松岡寛和・馬場亮平・山下岳史
- 107 (解説) お客様情報共有基盤の構築と今後の情報活用の展望 菅野翔太・佐藤拓也・加藤 拓
- 114 (解説) KOBELCO未来協働研究所が目指すもの 友近信行
- 119 DXでめざすKOBELCOらしさ関連文献一覧表 (Vol.63, No.1～Vol.72, No.2)

《FEATURE》 Digital Transformation to Embody KOBELCO's Unique Value

- 1 On the Publication of This Special Feature "Digital Transformation to Embody KOBELCO's Unique Value"  
Shinji MIYAOKA
- 3 KOBELCO's Perspective on Digital Transformation (DX)  
Nobumitsu NAMBA
- 6 Trends in Industrial Digital Transformation (DX) and Expectations for Kobe Steel, Ltd.  
Dr. Takashi WASHIO
- 9 Promoting EUC Using Digital Tools to Contribute to Operational Efficiency  
Takahiro OYAMA
- 13 Building and Utilizing Company-wide Data Analytics Platform, DataLab®  
Kazuo MINAMI · Masanobu FUJIHIRA · Taketsugu OSAKA
- 17 Establishment of Condition Monitoring and Predictive Anomaly Detection System in No. 2 Bloom Mill at Kakogawa Works  
Takashi HAGIWARA · Yoshitaka INOUE · Kazuhiro MORII · Hisafumi UNO · Tsutomu ANDO
- 22 Integrated Management of Machining Factory Using IoT Platform  
Shinsuke ASAI · Kazuki KITA · Hideo IKEDA
- 28 Prediction Technology for Blast Furnace Hot Metal Temperature, Adopting Continuous Measurement and Analysis of Thermal Image at Tap Hole  
Kazufumi KAMO · Kazuhiro MORII · Kota KUWANA · Dr. Hiroshi NARAZAKI · Dr. Akito KASAI · Daigo HARA
- 33 Application of Coiling Temperature Control Technology Using Deep Neural Network to Cooling Process in Steel-plate Manufacturing Plant  
Takehiro TSUKUDA · Shun HARADA · Masayuki HIGUCHI · Hiroyuki HASEGAWA · Taketsugu OSAKA · Kazuhiro MORII
- 37 Improvement of Work Safety and Efficiency through Shape Measuring Technology for Hot-forged Products  
Akira OKAMOTO · Takashi TAKISHITA · Akihiro SATO · Tomonori IKEGAMI · Keisuke OGATA
- 42 Automatic Crane Operation for Waste Treatment Plants  
Kei MORITA · Katsuya SHIMIZU · Dr. Keita OZAKI · Hiroki FUKUKAWA
- 46 Business Process Re-engineering of Production Management Applying Agile Principles  
Keiichi FUKUDA · Takaaki IMOTO
- 51 Development of Fuel Supply and Demand Planning Simulator at Kobe Power Plant  
Dr. Toyohiro UMEDA · Yuki FUJII · Yusuke TAKIZAWA · Hideyuki TAKI · Takahisa HAMANO · Yotaro HIRAIDE
- 57 MI Technology in Developing and Utilizing Materials  
Takashi WADA · Masahiro INOMOTO · Keita NAKAYAMA · Dr. Chiharu KURA · Takufumi KOBAYASHI
- 63 Application of Bayesian Optimization to Cross-sectional Design of Aluminum Extrusion and Validation of Its Effectiveness  
Dr. Ryohei IHARA · Shota CHINZEI · Taiki YAMAKAWA
- 68 Transformation of Design and Development Processes with Dynamic Process Simulator  
Yuki SHIGI · Tatsuki UEDA · Kei MORITA
- 72 Improvement of Construction Machinery Development Process by Digital Transformation Using Digital Twin  
Shinji YAMATE · Tomonori HIRAGA
- 77 Digital Transformation (DX) Technology Contributing to Further Automation of Robotic Welding  
Yuji KIMURA · Kazuki HIDAKA · Takaya HIGASHIRA · Fumiaki SAWAKAWA · Atsushi ARAI · Kohei KOMUKAI
- 82 Transferring Welding Skills through Virtual Training System  
Yuichiro AOYAMA
- 86 Realizing "Sustainable KOBELCO-like After-sales Service System" through Service Process Digital Transformation (DX)  
Youichirou SOU
- 90 User-Centered Design of K-D2PLANNER® Crane Construction Planning Support Software  
Masanori OKAMOTO · Satoshi OKADA · Nobuhiro TAKAMATSU · Hiroo TATAKAWA
- 96 Introduction to Materials Informatics for Material DX  
Dr. Kenji KOGA · Koichi KANO · Kazuyuki OMASA · Shinya KAGAO
- 102 Modeling of Fixed-bed Catalytic Reactor Considering Pellet Particle Geometry  
Dr. Yoichi TAKAGISHI · Hirokazu MATSUOKA · Ryohei BABA · Takeshi YAMASHITA
- 107 Building Customers' Information Sharing System and Future Prospects for Information Utilization  
Shota KANNO · Takuya SATO · Taku KATO
- 114 Aim of KOBELCO Future Pioneering Co-Creation Research Center  
Dr. Nobuyuki TOMOCHIKA
- 119 Papers on Advanced Technologies for Digital Transformation to Embody KOBELCO's Unique Value in R&D Kobe Steel Engineering Reports (Vol.63, No. 1 ~Vol.72, No. 2)

(巻頭言)

# 「DXでめざすKOBELCOらしさ」特集の発刊にあたって

宮岡伸司

取締役執行役員

## On the Publication of This Special Feature “Digital Transformation to Embody KOBELCO's Unique Value”

Shinji MIYAOKA



### 1. これまでの当社グループのDXへの取り組み

当社グループは前中期経営計画が始まった2021年度に、経営審議会の補佐機関であるIT戦略委員会をDX戦略委員会へ改編し、従来から取り組んできた経営基盤領域の4テーマ（既存システム再構築、人材育成、インフラ・セキュリティ、ITアーキテクチャ）を継続するとともに、新たに「ものづくりDX」、「お客様対応DX」、「働き方DX」の三つを価値創造領域におけるDX推進の重点3テーマとして定め、全社横断でDXを推進してきた（図1）。



図1 前中期経営計画におけるDX戦略推進体制

Fig. 1 DX strategy promotion structure in the previous mid-term management plan

また、DX戦略の取り組み方針において、STEP1～3に分類し、「STEP1：積極的かつ勇猛果敢な“デジタル化”」としては、DX人材（ITエバンジェリスト、データサイエンティスト）育成やスタッフ業務効率化のためのデジタルツール導入の環境整備など、「STEP2：“デジタル化”を基軸にしたKOBELCOの変革」としては、データ蓄積・分析基盤であるDataLab®（データ分析基盤）の構築やMI（マテリアルズ・インフォマティクス）による新材料開発など、「STEP3：DXによる“KOBELCOらしさ”の追求」としては、AIを活用した高炉操業支援や建設機械遠隔操作技術のコトビジネスへの展開など、各ステップにおいて当社のDXは確実に進捗してきている。

### 2. 事業環境の変化 ～VUCAの時代～

しかしながら、当社グループを取り巻く事業環境はこの3年間で大きく変化した。カーボンニュートラル移行の必要性の高まり、地政学リスクなどを背景とした原材料調達コスト高騰や地産地消へ向かうサプライチェーンの

再構築、国内人口減少にともなう国内需要減や働き手不足の顕在化、生成AIに代表されるデジタル技術の急激な進歩など、不確実で大きな変化をともなうVUCA<sup>注1)</sup>の時代を迎えている。

2030年、2050年へ向けた中長期のメガトレンドが影響を及ぼす事業環境の大きな変化へ対応していくためには、今までのDXという言葉や枠組みにとらわれることなく、将来の社会課題へのソリューションとなり得る技術・製品・サービスをお客様へ提供できる事業構造への「変革」や、外部環境変化に柔軟に対応できるような人材・組織・制度などの「変革」に取り組んでいく必要がある。

### 3. 新中期経営計画における「魅力ある企業への変革」

このような変化が大きく不確実で曖昧な事業環境下においても、当社グループが将来にわたって「お客様や社会にとってかけがえのない存在」であり続けるためには、2030年度には「未来に挑戦できる事業体」になっている必要があると考え、そこからバックキャストする形で、今年度より始まる2024～2026年度の新中期経営計画を策定した。

新中期経営計画では、「稼ぐ力の強化」と「成長の追求」、「カーボンニュートラルへの挑戦」の二つを最重要課題として取り組む。また、これらの確実な実行を支えるために、人的資本の有効活用や財務体質などのさらなる基盤強化、当社が有する資本のかけ合わせにより「魅力ある企業への変革」を進めていく。

この「魅力ある企業への変革」においても、「KOBELCOらしさ」が重要となる。多様な事業領域において、社会やお客様の困りごとへ対するソリューションを提供してきた中で培ってきた製品・技術・サービス、お客様や市場・社会とのつながり、そして多様な人材など、当社が有する様々な資本のかけ合わせによるKOBELCOらしい総合力を発揮した変革でなくてはならない。

### 4. KOBELCOらしい変革 ～KOBELCO-X～

新中期経営計画では、従前のDX起点の考え方ではなく、「変革」＝「X」を「未来へ挑戦できる事業体」の確立に必要な「手段・ドライバ」と位置づけ、AX～GX

脚注1) Volatility (変動性), Uncertainty (不確実性), Complexity (複雑性), Ambiguity (曖昧性) の頭文字をとった言葉。目まぐるしく変転する予測困難な状況を意味する。

表1 KOBELCO-X  
Table 1 KOBELCO-X

KOBELCO-X		「X」により目指したい姿
AX	Ambidexterity 両利きの経営	▶「既存事業の深化」と「新たな事業機会探索」のかけ算
BX	Business Transformation 業務変革	▶「業務プロセス変革」×「行動変容」によるあらゆる業務の変革
CX <sup>2</sup>	Customer Experience Transformation お客様対応変革	▶「KOBELCOのお客様」への「技術×技術」、「市場×技術」等のかけ算で新たな価値提供
DX	Digital Transformation デジタル・トランスフォーメーション	▶「DX推進力」の強化による「xD」（デジタルとデータ）を活用した「変革」の実現・加速・高度化
EX	Employee Experience 人材戦略・従業員体験向上	▶優れた人材の確保と育成を通じた当社グループの成長と競争力強化
FX	Factory Transformation ものづくり変革・工場変革	▶圧倒的な生産性向上などをはじめとしたものづくりの変革、ものづくり強化策の実行
GX	Green Transformation グリーン・トランスフォーメーション	▶当社グループのカーボンニュートラル実現とグリーン社会への貢献

の七つの「X」を設定して「魅力ある企業への変革」を推進していく。さらに「X」には、「変革」、「体験」だけでなく、「技術×技術」、「市場×技術」といったKOBELCOの総合力を発揮するための「かけ算」、各変革の「交点」の意味も込めて、「KOBELCO-X」（コベルコ・エックス）と総称する（表1）。

このうち、AXとGXは事業戦略の両輪と位置づけている。AXは「既存事業の深化」×「新たな事業機会の探索」という「両利きの経営」を意味し、新中期経営計画で掲げる「稼ぐ力の強化」×「成長の追求」と同意である。とくに今後の当社グループの持続的成長には、外部環境変化を背景とした新たな需要の捕捉やコト売り・ソリューションビジネスなどによる事業領域拡大といった「新たな事業領域の拡充」がより一層重要となってくる。GXは「当社グループのカーボンニュートラルの実現」×「グリーン社会への貢献」であり、まさに「カーボンニュートラルへの挑戦」そのものである。

このAXとGXを実現するための変革がBX, CX<sup>2</sup>, EX, FXの四つのXである。中でも「KOBELCOらしさ」を実現していくうえで重要な「X」となるCX<sup>2</sup>について少し触れておきたい。「CX<sup>2</sup>:お客様対応変革」(Customer experience transformation)は、各製品や各事業のお客様として考えるのではなく、「KOBELCOのお客様」と考え、全社共通のデジタルツールとしてSFA（セールス・フォース・オートメーション）を導入することでお客様や社会の困りごとを共有し、複数の事業をまたいだ「市場×技術」、「技術×技術」で化学反応を起こして、お客様へ新たな価値を提供していく取り組みである。SFA導入・データ利活用などの仕組みづくりは全社横断の「お客様対応変革プロジェクト」にて取り組んでいく。

## 5. これからのDX ～KOBELCO-Xの中でのDX～

CX<sup>2</sup>でSFAの全社導入について触れたように、これらの「X」を推進していくには、これからは「D」＝「デジタル技術」×「データ」抜きで考えることはできない。デジタル技術とデータの利活用によって、「KOBELCO-X」

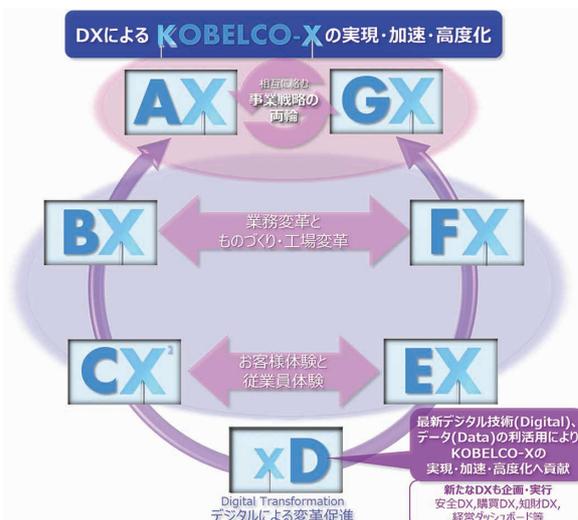


図2 KOBELCO-XにおけるDX  
Fig. 2 Digital transformation (DX) at KOBELCO-X

を実現・加速・高度化する。それが当社グループにとっての新たなDXの位置づけ・役割である（図2）。

## 6. 本特集の意義・期待

本特集では、当社グループのこれからの変革となり、「KOBELCO-X」の実現・加速・高度化に寄与するDXの技術や取り組みの一部について紹介する。

なお、おのおのの技術は、AX～GXのどれか一つのXのみに貢献するというものではない。例えば、工場での異常予兆検知技術・自動化技術の高度化などは、当然「FX:当社のものでづくり変革・工場変革」に寄与するが、当社ものづくり現場の従業員にとっては「EX:働き方変革」でもあり、あわせて業務プロセスの見直しを合わせることによって「BX:業務変革」にも通じる。また、これらを当社内業務の改善や高度化という考えに留めず、「CX<sup>2</sup>」の取り組みによって得られる「KOBELCOのお客様」の困りごとを解決できるソリューションになるのであれば、新製品・サービスとして提供することで「AX:新たな事業機会の探索」の新事業としてコト売り・ソリューションビジネスにもなり得るとともに、そのお客様で解決される困りごとがCO<sub>2</sub>削減であれば「GX」にも通じる。このことから「KOBELCO-X」の「X」には、「変革」だけでなく「交点」の意味も込めた。

また、もっとも重要なことは、これらの当社の技術や取り組みを当社自身の変革や事業成長のためだけではなく、「お客様や社会の変革」のために役立たせていくことである。そして、それは当社の技術のみ、当社個社の取り組みのみでは、決して成し遂げられない。「市場×技術」で考えるためには、お客様との対話が必須であり、また「技術×技術」を考えるうえでも、当社グループ内の技術同士のかけ算だけでなく、ときには外部の技術とのかけ算も必要である。そのためにも本特集が、お客様をはじめとした様々なステークホルダの皆様と、VUCAの時代の大きな社会課題の解決へ向けた対話を始めるきっかけになることを願う。

(解説)

# KOBELCOが考えるDX

難波信充\*<sup>1</sup>

## KOBELCO's Perspective on Digital Transformation (DX)

Nobumitsu NAMBA

### 要旨

KOBELCOグループの特長・強みは、多様な事業を営むことで蓄積してきた多種多様な特長ある技術資産やビジネス資産を保有していること、また多様な需要分野におけるお客様との関わりや接点を有するとともに各業界の動向やお客様ニーズを把握していることである。KOBELCOが考えるDX(デジタルトランスフォーメーション)は、この特長のある資産にデジタル技術やデータを掛け合わせて、社会課題の解決や新たな価値を創造することであり、この考え方と取組方針について紹介する。

### Abstract

The distinctive strengths of the KOBELCO Group lie in its diverse technological and business assets accumulated through engaging in various businesses. Additionally, the group possesses interactions and touchpoints with customers in diverse fields of demand, enabling the group to understand industry trends and customer needs. KOBELCO's concept of digital transformation (DX) involves combining digital technology and data with these unique assets to solve societal challenges and create new value. This article introduces the concept of and approach taken by KOBELCO's DX.

### 検索用キーワード

DX, デジタルトランスフォーメーション, KOBELCOらしさ, 業務効率化, 業務プロセス変革, データ活用, DX人材育成

ま え が き = 経済産業省から2018年に発行された「DXレポート」<sup>1)</sup>を機に、日本国内ではDX(デジタルトランスフォーメーション)への関心が高まり、当社グループでは「KOBELCOグループ中期経営計画(2021~2023年度)」において、当社グループの経営戦略の一つとしてDXに取り組むことを公表した<sup>2)</sup>。

経済産業省によるDXの定義は、「データとデジタル技術を活用して、ビジネス環境の変化に対応し、お客様や社会のニーズに応える製品やサービス、ビジネスモデルの変革と、業務や組織、プロセス、企業文化・風土の変革を行い、競争力を高めること」であるが、各企業においては自社の経営戦略に合わせて目的やスコープを設定して、それぞれ特長のあるDXの取り組みが行われている。

本稿では、KOBELCOが考えるDXとその取組方針について述べる。

## 1. KOBELCOらしいDX

当社グループは、グループ企業理念に基づくサステナビリティ経営により、企業価値の向上に取り組んでいる。当社グループのDXとは、この経営方針に沿った経営戦略であり、グループ企業理念で「KOBELCOが実現したい未来」として掲げている「安全・安心で豊かな

暮らしの中で、今と未来の人々が夢や希望を叶えられる世界」を、デジタル技術やデータを駆使して実現していくことである。

また、KOBELCOらしいDXとは、グループ企業理念で「KOBELCOの使命・存在意義」として掲げている「個性と技術を活かし合い、社会課題の解決に挑み続ける」ことを、デジタル技術やデータを駆使して実現していくことである。ここでいう「個性と技術」には、鉄鋼アルミ、素形材、溶接からなる素材系事業、機械、エンジニアリング、建設機械からなる機械系事業、そして電力事業という多様な事業を営むことで蓄積してきた多種多様な特長ある資産(技術資産・ビジネス資産)がある。さらには、多様な分野において社会やお客様との関わりや接点を有するとともに、各業界の動向やお客様ニーズなどの情報に対してのアンテナを有している。この特長ある資産と社会やお客様のニーズをデジタルデータ化することによりグループ横断で活用できるようにする、そのビッグデータをAIなどを用いて分析することで単一事業では発見し得なかったインサイト(洞察)を得る、そのインサイトから導き出された新たな価値を当社の特長ある技術と掛け合わせ、デジタル技術の適用によるソリューションで実現し、カーボンニュートラルや労働人口不足などのお客様や社会の課題を解決することが、当社

\*<sup>1</sup> IT企画部

グループの目指すKOBELCOらしいDXである。

## 2. DXの取組方針

KOBELCOらしいDXの実現のため、中長期的なロードマップの元、図1に示すSTEP 1～3の三つの取り組みに分類して推進することをDXの取組方針としている。

### 2.1 STEP1「積極的かつ勇猛果敢な“デジタル化”」

STEP1は、一般的には“デジタイゼーション”と言われる領域で、従業員全員が取り組めるように「積極的かつ勇猛果敢な“デジタル化”」と言い換えて推進している。これまで紙で蓄積されていたデータをデジタル化して活用できるようにする、あるいはこれまで人手で行ってきた作業をデジタルツールを用いて自動化・効率化する取り組みである。

具体的には、従業員一人ひとりが自ら、RPA (Robotic Process Automation, 反復処理の自動化) やノーコード・ローコード開発ツール (プログラミング言語を用いないシステム開発), BIツール (Business Intelligence Tool, データの可視化), 電子契約ツールなどのデジタルツールを使い、業務効率化を実現することである。

STEP1の取り組みは業務効率化に直結するものであり、STEP2でデータ活用や変革を行うベースになるものである。

### 2.2 STEP2「“デジタル化”を基軸としたKOBELCOの変革」

STEP2は、一般的には“デジタイゼーション”と言われる領域で、「“デジタル化”を基軸としたKOBELCOの変革」と言い換えて推進している。業務をデジタル化 (システム化) して、業務プロセスの上流から下流までデータでつなぐことで業務効率化を図るとともに、データ活用を前提とする最適な業務処理手順を構築して、さらには処理や判断の自動化を図ることで大幅な業務効率化と働き方の進化を実現する業務プロセス変革を行う取り組みである。

また、デジタル化したデータを統合管理して可視化・分析することで、迅速な意思決定ができる、さらには人間の能力では発見しえない新たなインサイトにより高度な意思決定ができるようにする取り組みでもある。

データの可視化・分析の具体例としては、材料開発に

おいて保有する材料に関するビッグデータと機械学習を用いることで、材料開発の効率を高めたり、従来知見・経験値だけでは発想が困難な材料配合を発見したりするマテリアルズ・インフォマティクス (MI) があげられる<sup>3)</sup>。

また、生産現場では、プロセスや設備の状況をIoT (Internet of Things, モノのインターネット) 技術でデジタル化して集約し、これまでの操業ノウハウの強みにビッグデータ解析の判断を組み合わせるデータ駆動型のものづくりへと変革を進めている (本号「全社データ分析基盤DataLab<sup>®</sup>の構築と活用」p.15～16参照)。

### 2.3 STEP3「DXによる“KOBELCOらしさ”の追求」

STEP3は1章で述べたKOBELCOらしいDXを実現することであり、STEP1, 2の推進によって生み出したリソース (時間) や統合管理された資産 (データ) を活かして、「DXによる“KOBELCOらしさ”の追求」を行うことで、社会課題の解決、新たな価値創造につなげる取り組みである。

具体例としては、建設業界の人手不足という社会課題に対して、建設機械の遠隔操作システムと稼働データを用いた建設現場の効率化とオペレータの働き方変革を実現し、人手不足や安全性向上などをはじめとした建設現場の課題を解決する「K-DIVE<sup>®</sup> (コベルコ建機株の商標)」サービスがあげられる<sup>4)</sup>。

また高炉におけるHBI (Hot Briquette Iron) 多量挿入によるCO<sub>2</sub>削減を実現する、AIによる自動高炉制御システム「AI操炉<sup>®</sup>」など、ものづくりの分野でもカーボンニュートラル社会の実現に積極的に貢献している<sup>5)</sup>。

## 3. DXを支える基盤整備

STEP1～3の取り組みを加速させるためには、従業員一人ひとりがデジタル技術やデータを駆使して変革に取り組んでいく必要があり、その変革を実現・加速・高度化するための力 (以下、DXの推進力) を会社全体で獲得していかなければならない。

DXの推進力は、「デジタル技術やデータの活用および変革を推進する人材」, 「従業員の武器となるデジタルツールやデータが利用しやすい環境」, 「従業員のマインドセットと組織や周囲が支援・賞賛する風土」の三つの要素に分解でき、これら全てが向上することで、DXの



図1 DX戦略の取組方針  
Fig.1 Promotion policy for Digital Transformation

推進力が強化されたことになると考える。

この三つの要素をそれぞれ「DX人材育成」「データ活用環境の整備」「DXに取り組む風土の醸成」として取り組んでいる。

### 3.1 DX人材育成

各部門でデジタルを活用した業務改善と変革をリードする「ITエバンジェリスト」の育成と、デジタル化によって蓄積されたデータを統計学的手法や分析技術を用いて課題解決や新たな知見の創出を行う“データサイエンティスト”の育成に取り組んでいる。

育成した人材が自らの業務の中で継続的にDXに取り組んでいくことが重要であり、デジタルツールの教育やコミュニティ活動の活性化など、研修受講後の支援も行っている。

### 3.2 データ活用環境の整備

社内外の変化に対して業務プロセスが迅速かつ柔軟に対応できるように、また業務プロセスで発生するデータを蓄積して有効に活用できるように、老朽化したシステムの再構築に取り組んでいる。

さらに、自社工場内の生産設備やお客様に納入した機械製品の稼働データを収集するためにIoT技術を導入し、収集したデータをクラウドで蓄積し、先進的なデータ分析ツールで分析するといった、新しいテクノロジーを用いたデータ利活用の環境整備を推進している（本号「**「**全社データ分析基盤DataLab<sup>®</sup>**」**の構築と活用」p.13～15参照）。

### 3.3 DXに取り組む風土の醸成

従業員一人ひとりがデジタル技術やデータの活用を自分ごととして捉えて、自ら能動的に変革に向けて行動し、新しいことにチャレンジしていく風土を醸成していく必要があり、従業員一人ひとりの行動の積み重ねにより実現していくものである。

これまでの、イントラネットや社内イベントを通じた好事例の共有を中心に風土の醸成に取り組んできたが、まだ十分とは言えない。

今後は、DXに関するリテラシの向上やマインドセットの獲得などの教育と支援、成果を誉める・称えるといった褒章制度の構築などに取り組んでいく計画である。

**むすび**=本稿では、KOBELCOが考えるDXとその取組方針について述べた。STEP1はDX推進の前提として必要であり、STEP2のKOBELCOの変革を通じてSTEP3を実現することが目指す姿である。

この取り組みは、今後、巻頭言で紹介されている新中期経営計画で示している「KOBELCOらしい変革～KOBELCO-X～」によって加速させていくこととしており、「KOBELCO-X」とKOBELCOが考えるDXとの関係について整理しておく。

「KOBELCO-X」の中の「BX：業務変革」「CX<sup>2</sup>：お客様対応変革」「EX：人材戦略・従業員体験向上」「FX：ものづくり変革・工場変革」の各変革を、デジタル技術とデータの利活用によって実現・加速・高度化することが、「STEP2：“デジタル化”を基軸としたKOBELCOの変革」である。

また、事業戦略の両輪である「AX：両利きの経営」「GX：グリーントランスフォーメーション」を、デジタル技術とデータの利活用によって実現することが、「STEP3：DXによる“KOBELCOらしさ”の追求」である。

これらの取り組みを強固に推進することで、「KOBELCOが実現したい未来」を見据え、「KOBELCOの使命・存在意義」を果たすという企業理念の具現化に貢献していく。

#### 参考文献

- 1) 経済産業省. DXレポート～ITシステム「2025年の崖」克服とDXの本格的な展開～. [https://www.meti.go.jp/shingikai/mono\\_info\\_service/digital\\_transformation/20180907\\_report.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/digital_transformation/20180907_report.html). (参照 2024-3-15)
- 2) 神戸製鋼所. KOBELCOグループ中期経営計画(2021～2023年度). [https://www.kobelco.co.jp/releases/1209072\\_15541.html](https://www.kobelco.co.jp/releases/1209072_15541.html). (参照 2024-3-15)
- 3) 谷口元一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2023, Vol.72, No.1, p.91-96.
- 4) コベルコ建機. K-DIVE<sup>®</sup>. <https://www.kobelco-kenki.co.jp/dx/kdive.html?221205>. (参照 2024-3-15)
- 5) 神戸製鋼所. プレスリリース. 2020年9月. [https://www.kobelco.co.jp/releases/1205231\\_15541.html](https://www.kobelco.co.jp/releases/1205231_15541.html). (参照 2024-3-15)

(解説)

# 産業DXの動向と神戸製鋼所への期待

鷲尾 隆\*<sup>1</sup> (工学博士)

## Trends in Industrial Digital Transformation (DX) and Expectations for Kobe Steel, Ltd.

Dr. Takashi WASHIO

### 要旨

産業・行政・社会のデジタル化 (DX) が加速しており、(株)神戸製鋼所においても「KOBELCO DX戦略」の策定を踏まえてDX技術の利用が活発化している。本稿では、最初にDXを巡る神戸製鋼所の状況やスタンスを確認し、つぎに地球環境問題や先進国製造業の状況から、神戸製鋼所が経済社会システムに自らを組み込んで発展していくために主力事業をビジネスソリューション提供に転化していく必要があることを指摘する。さらに、急激な発展を遂げつつあるDX技術の動向を俯瞰 (ふかん) し、とくにビジネスソリューションにおける従来型AIや生成AIを含むDX技術利用の重要性を述べる。最後に、神戸製鋼所発展の礎となるDX技術を生かしたビジネスソリューションの構築可能性や課題、期待について述べる。

### Abstract

Amid the acceleration of industrial, governmental, and societal digital transformation (DX), Kobe Steel is activating the use of DX technologies on the basis of its “KOBELCO DX Strategy” formulation. This paper first confirms Kobe Steel's situation and stance regarding DX. Then it points out the need for Kobe Steel to convert its main business to providing business solutions to incorporate itself into the economic and social system and develop further, considering global environmental issues and the situation of the manufacturing industry in advanced countries. Also provided is an overview of the rapidly evolving trends in DX technology, particularly emphasizing the importance of utilizing conventional AI and generative AI in business solutions. Finally, the paper discusses the possibilities, challenges, and expectations regarding the construction of business solutions utilizing DX technologies, which will serve as the foundation for Kobe Steel's development.

### 検索用キーワード

デジタル化, DX, ICT, AI, ビジネスソリューション, 地球環境問題, 先進国製造業

まえがき = 近年のICT, AIをはじめとするデジタル技術の革新と、地球環境問題の切迫やコロナ禍を通じた社会の急激な変化があいまって、産業・行政・社会のデジタル化 (DX) に向けた動きが加速している。(株)神戸製鋼所においても2023年5月の「KOBELCO DX戦略」の策定を通じて、三つのSTEPで「DXによる“KOBELCOらしさ”の追求」に取り組むことが確認され、今後の既存事業展開や新規事業開発においてDX技術利用の動きが活発化しつつある。

本稿では、はじめにDXを巡る神戸製鋼所の状況やスタンスを確認する。つぎに地球環境問題への対応や先進国の置かれた立場などの観点から、製造業として日本を代表する大手企業である神戸製鋼所の今後の課題について論考する。さらに、AIをはじめとして現在急激に発展を遂げつつあるDX技術の動向を俯瞰し、それらの製造業に対するインパクトについて論考を重ねる。最後にこれらを受けて、神戸製鋼所のDX展開の可能性や課題、期待について述べたい。

なお本稿は、半ば第三者的立場である大阪大学に所属する筆者の論考から成っており、その中には神戸製鋼所の社内や現場の状況に関する理解不足や誤解が含まれるかも知れないことをあらかじめご容赦願いたい。

## 1. 神戸製鋼所の状況とDX

「KOBELCO DX戦略」では、KOBELCOグループが保有する多種多様な特徴ある技術資産やビジネス資産を生かしたDX戦略の推進に向けて、スタッフ業務の効率化や人材育成などを通じて取り組みの基盤を作るSTEP1、蓄積したデータの活用によって開発・製造プロセスの変革を図るSTEP2、それらを生かして社会課題の解決や新たな価値創造を図るSTEP3、の三つのSTEPを通じて「DXによる“KOBELCOらしさ”の追求」に取り組むことが確認されている。<sup>1)</sup>

とかく上滑りで絵にかいた餅になりがちな既存大企業のDX戦略に比し、現状を踏まえて地に足をつけ着実にDXを目指すスタンスであり、今後の実質的成果を期待したい。

いっぽうで神戸製鋼所の主力事業の一つである鉄鋼業は、最もドラスティックに地球温暖化などの環境問題への対応が求められている産業である。ご存じのように、日本のCO<sub>2</sub>総排出量の中で製造業の排出量が35%を占め、その中で鉄鋼業の排出量は約4割である。すなわち、我が国のCO<sub>2</sub>総排出量の実に15%を鉄鋼業が占めている。<sup>2)</sup> 先進国の製造業として、鉄鋼業に大幅な排出量削

\*1 大阪大学KOBELCO未来協働研究所

減が課されるのは避け難い。そのいっぽうで、高炉で鉄を製造するには、鉱石中の酸化鉄を還元するプロセスを避けることはできない。この両立は非常な困難を伴い、日本の製造業の中でも存亡の際に立たされているといってもいい。この問題は、神戸製鋼所のもう一つの主力事業である火力発電についても然りである。すなわち、従来ビジネスの単純な延長では神戸製鋼所が今後永きにわたって存続することは困難であり、今後10年程度のタイムスパンで経営や技術の飛躍的革新が求められている。

この革新には水素やアンモニアを利用した製鉄や発電などの新技術の開発とその産業実装が必要とされるが、単に技術だけの問題に留まらない。輸入、再生可能エネルギー、原子力など様々な水素やアンモニアの調達手段の可能性やそれらの経済性、生産される鋼材や電力の内容や品質、コスト、それらの社会需要創出も含めて、新しいビジネスモデルをどう設計するかという経営上の課題が含まれる。あるいは神戸製鋼所の業態転換までを含めた経営課題が含まれると言っている。神戸製鋼所のビジネスを経済社会システムの中にどう位置付けて設計して社会に組み込むかという、経営上の最も難しい課題に取り組んでいかねばならない。

また、中国やインドをはじめとする中進国、途上国の産業キャッチアップの中で、先進国の製造業は単に製品を作って売るといふビジネスでは生産性を上げられないと言われて久しい。それにもかかわらず、日本の多くの製造業がなかなかそのビジネス形態から抜け出せないできた。それが失われた30年という日本の経済停滞の主要な原因の一つである。最近の円安効果や経済のデカップリングによって、日本の製造業は息を吹き返しているように見えるが、このままでは上位先進国の経済水準から引き離されていくのは避けられない。上位に返り咲き、少子高齢化社会の諸問題を軽減していくには、この問題の克服が必須である。

神戸製鋼所は、その草創期から鉄鋼のみならず社会の発展に欠かせない様々な製品を製造し、社会に供給する事業を興してきた。しかも売りっぱなしではなく、顧客の生産設備の保守・メンテナンス、製品開発に役立つサービスの開発、提供に力を入れてきた。現在においても自社製品の提供と並行して、顧客の製造製品の軽量化や電動化などに役立つ設計、生産、保守の技術ソリューションの開発と提供に力を入れている。この点で神戸製鋼所は、草創期から現在まで先進的な取り組みを続けて来た企業である。<sup>3)</sup>

しかしながら、どのような計算評価を行うかにもよるが、ソリューション提供が神戸製鋼所の売り上げや収益上の主力事業となるには至っていないと思われる。これに対して、現在の先進国において市場が大きく伸び収益性も高いのは、ソリューション提供ビジネスである。すなわち、神戸製鋼所が上述した諸課題を乗り越えて、そのビジネスを経済社会システムにしっかりと組み込んで成長していくには、その優れた製品群を基盤にしたソリューション提供を主力事業とする業態に転換することが

求められていると言える。

以上のような新しいビジネスモデルの開発とそれに向けた業態転換は、技術の問題に留まらず本質的には経営の問題である。しかしながらいっぽうで、社会経済システムの中にビジネスを組み込む上で、DX技術が強力かつ必須な手段であることは明らかである。経済社会全体でDXが進む中では、それを踏まえたビジネスモデルの設計と実装が不可欠である。神戸製鋼所にとって、DXやそれらを推進するSEやICT、AI、シミュレーションなどの技術は、従来ビジネス業務の高度化や改善のための手段という考えに留まらず、社の生き残りをかけて新しい主力とするソリューションビジネスを実現する手段であると捉えるべきであろう。

## 2. DXの技術動向

DXは上述のように種々のデジタル技術を駆使して、業務や製造の生産性を向上させることと理解されることが多い。しかし、業務や製造のプロセスを明確に細かなタスクに分解し、おのおののタスク要件を明確に定義しないと、DX技術の本格的導入は一般に困難である。このため、DXは業務や製造プロセスの見直しを含むリエンジニアリングを必要とする。

とくに実世界の業務や製造プロセスの各タスク遂行に並行して、サイバー世界で各タスクをモデル化して計算処理を行い、実世界に対する様々な支援を行う概念がデジタルツインである。現在ではDX技術の進化によって、原料調達・保管や生産加工・出荷、物流、営業・マーケティング、総務、労務など、上流から下流までほとんどあらゆる業務へのデジタルツインを含むDX技術の導入が可能になっている。

業務や製造プロセスのDXに必要とされる技術の特徴は、サイバー世界に閉じるものではなく、必然的に実世界に関する何らかのモデルやインターフェイス、同期処理を含むことである。その点で、実世界で収集されるデータから実世界のモデルを構築して利用する深層学習・機械学習を含むAIと、我々の実世界に関する知見を計算可能な形に集約するシミュレーションは、DXを推進する上で中核的技術である。

とくに従来のAIは、複雑なデータから重要情報・知識を見つける探索や、データを関連性・類似性を持つものに仕分けるクラスタリング、その反対に外れた事例を見つける異常検知、データ中の各事例について分類や評価を行う分類・回帰など、所与のデータや情報の認識を自動化する機能を中心に研究開発が進められてきた。そして、過去十数年にわたって様々な業務や生産のプロセスへ従来型AIの導入が試みられ、実際に使われるようになっていく。神戸製鋼所においても、これまで研究開発部門を中心に様々な従来型AI技術の開発が進められ、事業部門や本社部門のDXに導入されてきた。今後は、より業務の根幹にかかわる部分はもちろんのこと、上述した主力事業となるべきソリューション提供ビジネスへの導入が期待される。

この二、三年で注目を浴びている生成AI技術は、既

存のデータから新しい事例を生成するという新たな機能を提供する。これは各事例に関して分類・回帰を行う上述の学習モデルを、事例からそれに関連ないし類似する事例を出力するように拡張したモデルを用いる。機能面では全く新しく見えるが、技術的にはこれまで数十年にわたって重ねられてきた研究開発の延長線上にある。

生成AIは大規模なデータを学習することで人間同様の常識や柔軟な思考を身に着けつつあり、その延長には汎用人工知能（AGI）の実現も期待される状況になっている。今後は従来型AIと生成AIが同時並行ないしは統合される形で、様々な業務や製造プロセスのDXに導入されていくと考えられる。

また、従来型AI、生成AIを問わずAIは、自然言語で書かれた文書や画像、音声、動画、センサ信号など、従来のデータベースには収まらない非定型情報の処理を得意とする。さらにたとえば、文書の内容を表す図を描いたり、写真を説明する文書を生成したりと、異なる形式（モード）の情報を統合処理する能力を獲得しつつある。今後の業務や製造プロセスのDXにおいては、このようにマルチモーダルで非定型な情報の蓄積や利用が容易になると見込まれる。逆に言えば、このような情報の蓄積とそのAIを通じた利用が、今後の企業や社会の競争力を大きく左右すると予想される。

### 3. DXを巡る神戸製鋼所の可能性と課題

以上の神戸製鋼所の現状とDXの技術動向を踏まえると、「KOBELCO DX戦略」における三つのSTEPでのDXの推進は、業務や製造プロセスの高度化や改善に留まらず、プロセスの大幅なりエンジニアリング、さらにはビジネスモデル変革の手段として位置づけられるものである。上述のように、先進国の鉄鋼業が置かれた立場は多くの困難を抱えており、逆に言えばこのピンチは神戸製鋼所にとって大きな飛躍のチャンスでもある。DX技術の活用は、その飛躍の可能性を拡大する有力な手段であると考えられる。

経済社会システムに自らをうまく組み込んで発展を維持していくために、ソリューションビジネスを主力の生業とすることは、おそらく創業期を除けば神戸製鋼所にとっても経験が少ない経営展開であろう。とくにDXソリューションビジネスでは、社内外の業務や製造プロセス、顧客の具体的なニーズが不明確であり、あるいは現場や顧客が知らないニーズを新しく創造していかねばならない。いっぽうで、DXソリューションを開発実装するコストは、製鉄所のような巨大な設備、装置を実装していくコストに比べるとずっと少なく済むことが多い。したがって、ソリューションビジネスでは、暫定的な仮

説の下で現場や顧客にソリューションの $\alpha$ 版、 $\beta$ 版を提供し、反応を見ながら臨機応変（アジャイル）にソリューションを転換、改善して開発することが常套（じょうとう）手段である。当初の想定とは全く異なる姿になることもしばしばである。このようなやり方のビジネス導入は、重厚長大型の社内文化を持つ企業においては大きなカルチャーショックや様々な軋轢（あつれき）を生みやすい。しかしながら先にも述べたように、このような変革は今後の神戸製鋼所にとって必須であり、社内においてこれらのショックや軋轢を乗り越えていくための良い意味での様々な化学反応が起きることを期待したい。

また、このようなビジネス開発、転換は、研究開発部門に留まらず、事業部門や本社部門、そして経営全体を巻き込むことになるため、社内各部門や複数部門間の連携による展開が必要であり、それを支える新しい人材育成や既存社員のリカレント研修が重要となる。ICT技術の利用やビジネス転換に留まらず、人材育成を含めて大きな視野での経営展開を期待したい。

**むすび** = 本稿では、地球環境問題への対応や先進国製造業の置かれた立場などの観点から、神戸製鋼所が中長期中で直面する経営上の諸課題について論じた。そして、昨年策定された「KOBELCO DX戦略」は適切な方向を目指すものであることを確認した上で、神戸製鋼所がこれら諸課題を乗り越えて、そのビジネスを経済社会システムにしっかりと組み込んで成長していくには、この戦略を一層推し進めつつ、優れた製品群を基盤にしたソリューション提供を主力事業とする業態に転換することが求められることを述べた。

また、経済社会全体でDXが進む中では、DX技術を核とするソリューションビジネスが不可欠であり、AIを中心としたDX技術の動向やその特性を俯瞰した上で、アジャイルにソリューションを開発することの重要性を述べた。

このような業態転換やそのための開発体制の変革には様々な軋轢が予想されるが、それらを包み込んで人材養成や体制整備の壁を乗り越え、神戸製鋼所が21世紀中葉に向けて大きく羽ばたくことを期待してやまない。

#### 参考文献

- 1) 株式会社神戸製鋼所. KOBELCO Digital Transformation (DX) 戦略. 2023. [https://www.kobelco.co.jp/about\\_kobelco/outline/dx/index.html](https://www.kobelco.co.jp/about_kobelco/outline/dx/index.html). (参照2024-03-01).
- 2) 資源エネルギー庁. 鉄鋼業の脱炭素化に向けた世界の取り組み (前編). 2023. [https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/green\\_steel\\_01.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/green_steel_01.html). (参照2024-03-01).
- 3) 株式会社神戸製鋼所. R&D神戸製鋼技報. 2024, Vol.72, No.2.

(技術資料)

# 業務効率化に寄与するデジタルツールを用いたEUCの推進

大山隆弘\*<sup>1</sup>

## Promoting EUC Using Digital Tools to Contribute to Operational Efficiency

Takahiro OYAMA

### 要旨

長期的な労働者人口減少などに伴う業務効率化の要請に対し、当社では「働き方DX」の一環として、ユーザである全社員がデジタルツールを使いこなしてみずから業務変革を進めるEUC（End User Computing）の推進を試みた。本稿では、当社取り組みにおけるEUCの対象業務、取り組み方針やKPIを示すとともに、取り組みにおいて直面した課題やそれに対する対策、効果の測定方法と対策の結果を説明し、また、EUCの推進が業務効率化だけではなく自律的な変革風土へのきっかけとなりうる可能性を示す。

### Abstract

The long-term decline in the workforce has caused further demand for increased operational efficiency. In response, Kobe Steel is implementing end-user computing (EUC), in which all employees, who are end users, can master digital tools as part of "work style DX." The aim is to use the initiative of individuals to promote business transformation. This paper presents the work covered by EUC in Kobe Steel's initiatives, the initiative policy, as well as the KPI, and explains the challenges faced in the initiative, countermeasures, methods for measuring effectiveness, and the results of the countermeasures, as well as how to promote EUC. It is shown that the promotion of EUC not only improves work efficiency, but also has the potential to trigger a culture of autonomous change.

### 検索用キーワード

デジタルトランスフォーメーション, DX, 働き方改革, 業務効率化, デジタルツール, EUC

ま え が き = 長期的な労働者人口減少に伴い、国内企業にとっては、操業現場や事務系スタッフにかかわらず、業務効率化による労働生産性向上が喫緊の課題となっている。また、コロナ禍におけるリモートワークの拡大は少なからず労働の価値観にも影響を与え、人材確保においても「自由で効率的な働き方」が重要になりつつある。

近年、DXによる業務変革やビジネス改革の推進が企業の競争力に直結するとの認識が広がってきた<sup>1)</sup>。当社においても2021年より大規模なDX戦略の実行に着手し、「働き方DX」分科会にてITツールの有効活用による働きやすい環境の整備や業務効率化による生産性向上を目指した活動を開始した<sup>2), 3)</sup>。従来、業務効率化と言えばシステム開発による業務のIT化であったが、IT開発人材の不足が深刻となる中、当社では、ユーザである全従業員がデジタルツールを使いこなして自ら業務変革を進める「EUC (End User Computing)」を取り組みの一つの柱として進めることとした。

2010年代に「ローコード開発」という言葉をフォレスト・リサーチ社が使い始めて以降、ユーザ自身が簡易に業務アプリケーションを開発できる開発環境が多く登場し始め、近年は、GUI (Graphical User Interface) で入力画面をデザインするだけでデータベースや出力帳票を開発できる「ノーコード開発」も普及するようにな

った<sup>4)</sup>。また、ユーザの画面操作を自動化できるRPA (Robotics Process Automation) や、データの集計や解析を簡単に実現するBI (Business Intelligence) など、自動化や可視化を支援するツールなども多く販売されるようになってきた。

当社のDX戦略では、ERP (Enterprise Resource Planning) などシステム基盤の整備、ITエバンジェリストやデータサイエンティストなどDX人材の育成に加え、上記のようなITツール活用を促進することにより、生産性の革新的な向上による高付加価値業務へのシフトと人材のスキルアップ、場所に縛られず時間を有効活用できる自由度の高い働き方を実現することを方針とした。本稿では、この方針に従って進めている「業務効率化と働き方変革をユーザみずから実現するEUC」の取り組みについて紹介する。

### 1. 取り組みの Scope

当社では、「働き方DX」の柱としてEUCを推進することとしたが、すべての業務をEUCの対象とすることは適切ではない。取り組みの対象とした業務領域の考え方を図1に示す。

右上に位置する、「大きな投資額により大きな効果」を求める領域は、ERPやPLM (Product Lifecycle

\*<sup>1</sup> IT企画部 (現 鉄鋼アルミ事業部門 システム技術部)

Management) など多くの部署や部門にまたがる大規模なシステム開発を行う領域であり、パッケージソフトウェアやそれに規定される標準的なデータ構造を適用することが、部署間にまたがる業務の標準化やデータ活用、効率的な製品開発において有効である。また、左下に位置する「小さな投資額で小さな効果」を求める領域は、Web会議や電子契約ツール、翻訳ツールなど、基本的な作業を標準ツールの組み合わせによって素早く効率化を図る「Quick Win」をを求める領域と言える。

EUCの対象とするのはその中間領域であり、限定的な組織内での業務判断や複数人による業務情報の受け渡しなど、組織内における固有の業務群である。これらの業務群は、パッケージソフトウェアなどで標準化するには固有の条件が多く、「Quick Win」を適用するには複雑で、これまでは、独自のExcelフォームと手作業の組み合わせで処理するなど、しばしば属人的な暗黙知の温床となっていた。これらの領域は従来の取り組みではカバーできておらず、広く業務改善を進めることで大きな余力を創出することが可能と考えられた。

EUCに用いるデジタルツールとしては、

- ・「ノーコード・ローコード」によりファイルやデータ帳票を処理するデータベースツール
- ・「RPA」によりデータの受け渡しや転記作業などを行う自動化ツール
- ・「BI」によりデータのドリルダウンや分析を行うダッシュボード（可視化ツール）

などそれぞれのカテゴリについて、社内の利用実績や学習コストなどを踏まえて推奨ツールを選定し、サーバ区画の設定や利用者向けマニュアルの整備を行った。ただし、EUC経験の広がりを重視し、類似の他ツールの利用も禁止しなかった。

また、取り組みのKPI（Key Performance Indicator）として、業務削減時間の全社合計の目標を2023年度に12万5千時間、2024年度以降に25万時間/年と定めた。

## 2. 推進していく上での障壁と対策

活動当初、これらのデジタルツールの活用を全社員に周知しても、数箇月間なかなか利用が進まず、業務改善事例が創出できない状況が続いた。この期間は、活用の事例自体が少なく、また、活用試行が開始されたとして

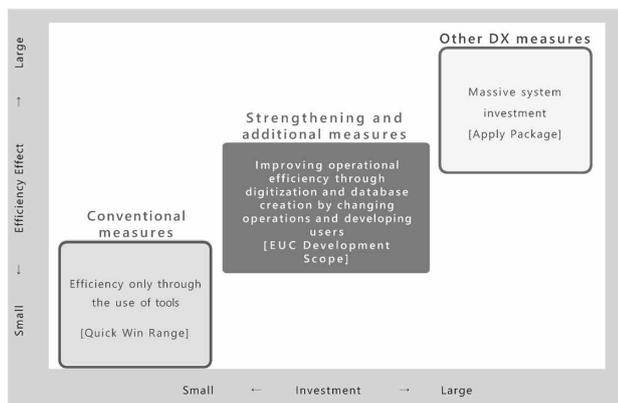


図1 取り組みの対象とした業務領域  
Fig.1 Intended scope of EUC development

も、すぐに挫折してテーマとして途絶えてしまう例が散見された。

一般に、ユーザがデジタルツールを使って自身や部署の業務を改善するまでの道のりを想定するとつぎのようなプロセスをたどると考えられる。

- 1) 使いそうなツールを知る
- 2) 試用用のライセンスを取得し、ツールを用いた業務アプリの試作を行う
- 3) 周囲の関係者にも使ってもらい、改善点を抽出する
- 4) 改善点について改修して再度試行する
- 5) 利用者の人数に応じてライセンスを購入し、実務での利用を開始する

このプロセスにおいて、当社の状況を踏まえた課題として下記の3点を抽出し、それぞれ対策を検討した。

- ① ツールを知る機会が充実していない
- ② ライセンス取得などツールの利用を開始するまでの手続きが煩わしい
- ③ アプリの試作・改修におけるサポートが充実していない

ツール活用の道のりと対応すべき課題を図2にまとめる。

上記の課題に対し、それぞれ対応策を「ツール紹介サイトのリニューアル」「ライセンス試用制度」「なんでも相談窓口の開設」として設定し、取り組みを行った。詳細を以下に紹介する。

### 2.1 ツール紹介サイトのリニューアル

「① ツールを知る機会が充実していない」という課題に対する対応策として、ツール紹介サイトのリニューアルを実施した。従来も社内ポータルサイトにてツールとその活用事例の紹介を行ってきたが、現場のニーズに十分応えられていなかった。

今回、改めて操業現場など様々なスタッフから活用課題をヒアリングした結果、従来のツール名を入り口としたサイト構成では「業務課題を出発点として解決策を探す」ユーザの行動に適合していないことが分かった。そこで、「システム開発（データベース化）」「データ可視化」「業務自動化」など、「業務課題」を入り口としてガイダンス資料を準備するとともに、社内事例やライセンスの概要など情報を集約して提示できるようポータルサイトをリニューアルした。また、業務課題ごとに有効なツールを整理した「ツールマップ」を作成し、全体感を理解できるようにした。リニューアルしたポータルサイトの画面とツールマップを図3、図4に示す。

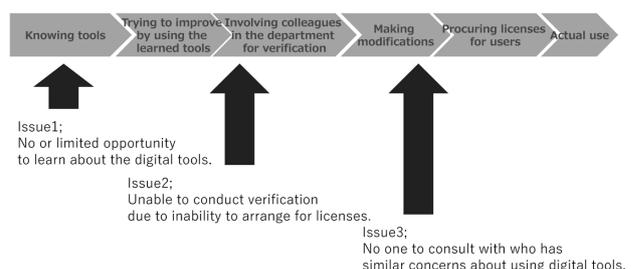


図2 ツール活用までの道のりと課題  
Fig.2 The journey to tool utilization and issues to challenge



図3 ツール紹介サイトのイメージ  
Fig.3 Website for introducing digital tools

業務要件	詳細	kintone	Power Apps	Quick View Quick Screen	Power BI	Power Automate	UPPath StudioX	COIQA Translator
可視化	可視化画面構築			○	○			
自動化	定型作業の自動化					○	○	
データ集計	ファイル結合 ファイル更新	○	○					
データ 収集・管理	ファイル結合 データ結合監視	○	○					
業務データの データベース化	業務の形式知化	○	○					
翻訳	文章＆書類翻訳							○

図4 デジタルツールマップ  
Fig.4 Digital tool map

## 2.2 ライセンス試用制度

「②ライセンス取得などツールの利用を開始するまでの手続きが煩わしい」に対しては、ライセンス試供制度を開設した。これは本社IT部門が各ツールの一定数のライセンスを常時保持しておき、ユーザ部門の現場の試用ニーズに応じて貸し出す制度である。

ヒアリングの結果、各現場の業務課題に対してデジタルツールを試してみたいとなった場合でも、そのツールを使った業務変革に効果があるのかどうか検証が持てない段階でライセンスを購入することのハードルが高い場合が多くあることが分かった。各ツールのサプライヤなどが試用ライセンスを提供している場合もあるが、提供される機能の制約や試用期間の短さから十分な評価ができない場合や、試用ライセンスで構築した環境がその後の実ライセンスに引き継がれない場合がある、などの問題があった。

当社のライセンス試用制度では、ユーザはWebフォームで申請するだけで、本社IT部門が保有するライセンスをおおむね3箇月程度の試用期間の間、自由に使うことができ、実運用に移る際も、試用に用いたライセンスを「実運用」ライセンスとして管理区分を変更するだけでそのまま運用できるよう設計した。ライセンス試用制度を用いると本社IT部門の管理下で試用を開始する

ため、ライセンス管理や、クラウド利用にかかわる社内規定への適合確認など、通常ソフトウェアツールの導入で必要となる社内手続きが省略できることもユーザから見た利点となる。

また、Webフォームには、ツールの使用目的や対応したい課題を記述する欄を設けており、運営側としては、ユーザの課題や活用方法を把握するための手段としても活用している。

## 2.3 なんでも相談窓口の開設

「③アプリの試作・改修におけるサポートが充実していない」に対しては、なんでも相談窓口によって対応した。具体的には、「問合せWebフォーム」を開設するとともに専用のヘルプデスクを開設した。ヘルプデスクの体制としては、デジタルツール整備の企画全体にかかわるスタッフを配置し、同じ業務課題に対応する複数のツールや関連する業務にかかわるツールの相談にもワンストップで対応できるようにし、単なるツール利用のヘルプにとどまらず業務変革の支援を統合的に行えるようにした。また、これらの支援を通じて各ツールの活用の傾向や課題を把握し、ハンズオンセミナーなどの企画・開催を通じて効率的な支援につなげた。

## 3. 効果の測定

取り組み効果のKPIとして業務削減時間を測定するにあたり、本来は改善された業務の一つひとつを精査して積算していくべきであるが、すべての改善を網羅的に確認することは現実的に不可能である。そこで、一定の仮定を置き、システムログのデータから推定することにした。

例えばデータベースツールの場合、代表的なユースケースの調査をしたところ、年間70時間の業務効率化に対し、データベースへの月平均アクセス回数が100回程度であったため、アクセス1回あたり3分程度の効率化とみなして試算を行うこととした。可視化ツールや自動化ツールにおいても同様に単位利用ログ当たりの効率化時間を代表的なユースケースより設定し、業務削減時間を推定した。その結果得られた削減効果の累積値を表1に示す。

課題への対策を開始した2022年度より業務削減時間が加速度的に増加していることが分かる。2023年度には約25万9千時間と2025年度目標の25万時間を大幅に前倒して達成した。また、アンケート調査では、「一つの課題に対して普段の業務チームをまたいだ複数人でアプリケーション開発を行った結果、チームをまたいだ一体感の醸成や、自身の貢献の実感が得られた」とのコメントもあり、EUCを通じた自律的な変革への参画によるエンゲージメント向上も期待できると認識した。

いっぽう、現状、EUCを活用しているのはまだ特定の従業員のみであり、「全従業員がみずから業務変革を進める」というコンセプトには届いていないとも認識している。今後はEUCを活用している従業員の分布もKPIに加え、ロジャースの普及理論でいう、普及が加速する「クリティカル・マス」である16%の先進的従業員、あ

表1 デジタルツールによる業務効率化効果の累積値

Table 1 Cumulative values of business efficiency improvement effect due to digital tools

	(Hours)		
	End of FY2021	End of FY2022	End of FY2023
Database creation and workflow digitalization of business data	6,426	93,972	135,938
Improvement of transcription efficiency (ex:RPA)	40,300	40,600	45,991
Visualization through dashboards(ex:BI tool)	0	0	13,904
Other digital tool (Communication tool, translation tool)	30,000	52,442	63,964
Sum	76,726	187,014	259,797

るいは、パレートの法則でいう、組織全体の80%の成果を生み出す20%の中心的従業員への普及をつぎの目標と定め、新たな対策を検討していきたい<sup>5)</sup>。

むすび=当社では、「働き方DX」としてデジタルツールを用いたEUCの活用を一つの柱として、取り組みを進めてきた。EUCの活用カテゴリごとに推奨ツールを定め、KPIをモニタリングしながら、活用プロセスにおける課題に対し、支援の仕組みを構築した。

これまでの活動の結果、EUCの活用定着に向けての「最初のハードル」は越えつつあるとの認識ではあるが、「自由で効率的な働き方」の実現まではまだ途上である。これらEUCの取り組みに、ITエバンジェリストなどDX人材教育やコミュニティ活動を通じた変革の風土醸成の活動を有機的に機能させ、実現を加速していきたい。

DXによる従業員体験の変革に向け、引き続き、取り組みを続けていく所存である。

#### 参考文献

- 1) 独立行政法人情報処理推進機構. DX白書2023. 2023. <https://www.ipa.go.jp/publish/wp-dx/gmcbt8000000botk-att/000108041.pdf>, (参照2024-01-30)
- 2) 株式会社神戸製鋼所. DX戦略説明会. 2022. [https://www.kobelco.co.jp/ir/library/investor\\_meeting/2021/2202211700\\_dx.pdf](https://www.kobelco.co.jp/ir/library/investor_meeting/2021/2202211700_dx.pdf), (参照2024-01-30)
- 3) 株式会社神戸製鋼所. KOBELCO DX戦略. 2023. [https://www.kobelco.co.jp/notices/files/20230522\\_dx.pdf](https://www.kobelco.co.jp/notices/files/20230522_dx.pdf), (参照2024-01-30)
- 4) Luo, Yajing, et al. "Characteristics and challenges of low-code development: the practitioners' perspective". Proceedings of the 15th ACM/IEEE international symposium on empirical software engineering and measurement (ESEM), 2021.
- 5) エベレット・ロジャーズ. イノベーションの普及. 翔泳社, 2016.

(解説)

# 全社データ分析基盤 DataLab<sup>®</sup> の構築と活用

南 和男\*<sup>1</sup>・藤平雅信\*<sup>2</sup>・逢坂武次\*<sup>2</sup>

## Building and Utilizing Company-wide Data Analytics Platform, DataLab<sup>®</sup>

Kazuo MINAMI・Masanobu FUJIHIRA・Taketsugu OSAKA

### 要旨

ものづくりにおけるデータ活用はますます重要性を増している。当社では、IoTやビッグデータの利用を早期に開始し、製品開発、サービス向上に貢献してきたが、データの全社的活用を効率的に進める統一プラットフォームが不足していた。本課題に対応するため、データ分析基盤DataLab<sup>®</sup>を構築した。この基盤は、大量データの効率的な収集・分析を可能にし、先進的分析ツールを活用して新しい洞察を提供する。DataLab<sup>®</sup>の目的は、データの一元管理、柔軟なインフラストラクチャ、高度な分析能力、厳格なセキュリティ、ユーザーフレンドリーな操作性を実現、提供することである。本稿では、材料開発と設備診断の事例を通じて、DataLab<sup>®</sup>の取り組みを紹介する。

### Abstract

The utilization of data is becoming increasingly important in the art of manufacturing. Kobe Steel is an early adopter of IoT and big data, which has contributed to product development and service improvement, but lacked a unified platform for efficiently utilizing data across the company. To meet this challenge, a data analysis platform, DataLab<sup>®</sup>, has been established. This platform enables efficient collection and analysis of large amounts of data and leverages advanced analytical tools to provide new insights. The purpose of DataLab<sup>®</sup> is to provide centralized data management, flexible infrastructure, advanced analytical capabilities, strict security, and user-friendly operability. This paper introduces the DataLab<sup>®</sup> initiative through material development and equipment diagnosis examples.

### 検索用キーワード

データ収集, IoT, MI, マテリアル・インフォマティクス, データ分析, 異常予兆, 状態監視

ま え が き = 情報通信技術やAI技術などのテクノロジーの進歩は、現代のビジネス環境における競争力を高めるうえで不可欠な要素である。とくに操業データや製品データの活用は、新たな製品開発や製品の改善、市場戦略の立案、顧客体験の向上での多岐にわたる分野で、企業の成長に不可欠な役割を果たしている<sup>1), 2)</sup>。

当社においても2014年頃からIoTやビッグデータの重要性を認識し、それぞれの事業部門で製品開発や製造現場の改善、お客様サービスの向上などへの活用を開始した。しかし、当時はデータの蓄積や分析を全社で活用できるプラットフォームがなかったため、これらの活動をそれぞれ独立して行い、個別にデータやノウハウが蓄積された分析システムを開発していた。

その後、2016年から始まった当社の中期計画では、IT企画部と技術開発本部が共同で、操業データや製品データの分析支援や、データサイエンティストの育成を開始した。また、デジタル技術の進化により、コンピュータやネットワークの処理能力が大幅に向上し、クラウドサービスが発展したことによって、以前は困難だった大量データの収集、伝送、処理が格段に容易になった。

このような背景を踏まえ、当社はデータとノウハウを統合的に管理し、全社規模での組織的なデータ活用を促進するための基盤として、データ蓄積から前処理、分析

までの機能を提供するデータ分析基盤 (DataLab<sup>®</sup><sup>注1)</sup>) の構築に着手した。

DataLab<sup>®</sup>は、従来活用が難しかった、研究開発データや操業設備の時系列データなど、あまり構造化されていない大量のデータを扱える環境を全社に提供することを目指した。そのため、膨大なデータを迅速に収集・蓄積し、必要に応じて柔軟にリソースを追加したり、容易にアクセスしたりできる環境を準備した。また、先進のデータ分析ツールやAIアルゴリズムを組み込み、データから効率的に洞察を抽出して、新たな価値創出を加速することを目指した。

本稿では、1章でDataLab<sup>®</sup>の概要、2章で最初にテーマとして取り組んだ材料開発と設備診断の事例の概要について述べ、DataLab<sup>®</sup>の取り組みを紹介する。

## 1. DataLab<sup>®</sup>の概要

データ分析基盤の構築をするうえで重要なことは、データの統合と管理、柔軟に計算資源を変更できるインフラストラクチャ、高度な分析ツールや技術、データのセキュリティ保護、操作の容易性である。

とくにデータの統合と管理は、データの正確性、完全

脚注1) DataLab<sup>®</sup>は当社の商標である。

\*<sup>1</sup> IT企画部 \*<sup>2</sup> 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター

性、信頼性を確保し、分析のための有効な情報とするために不可欠である。業務システムや設備など様々なデータソースから収集したデータは形式の不一致や不完全なデータが存在するため、データクレンジング（形式や不完全データの修正）、データ変換（データを共通のフォーマットや標準形式に変換）、データ保存（データを後続のビジネスロジックや分析モデルに適合させて保存）を通してデータの質を高める。

つぎに、柔軟な拡張性をもったインフラストラクチャを確立することで、データ量の増加や計算処理量の増加に柔軟に対応できるようになる。クラウドサービスの活用は、このような拡張性を実現するうえで非常に効果的である。

さらに、高度な分析ツールと技術を導入することで、統計分析、機械学習、ディープラーニングなど、目的に応じた分析手法を適用し、データからの洞察を効率的に抽出できるようになる。また、データのセキュリティ保護は、データアクセスの厳格な制御や暗号化技術の導入で対処している。

最後に、より多くの人が容易に分析を行えるよう、汎用的なデータ可視化ツールを組み込むことで、意思決定者も情報の結果を迅速かつ直感的に理解し、行動を起こせるようになる。

DataLab<sup>®</sup>は、データ分析に必要な機能を具備した基盤であり、大きくはデータを蓄積するデータベース層と、データ分析やソリューション開発を行うソリューション層に分かれている（図1）。以降はそれぞれの層について概要を述べる。

### 1.1 データベース層

データ管理における主要な課題として、元データが個人端末や設備内部のコンピュータ、共有ファイルサーバなど様々な場所に分散して保存されている点がある。これに加え、データ間の関連付けルールが不在であったため、分析に適した形式へのデータ変換や、同じテーマで別の人が作成したデータの関連付け作業に大きな労力が必要であった。また、設備内部の制御用コンピュータに

保存されたデータは、そのコンピュータのデータ容量の制限があり、数箇月で消失することもあることから、必要なデータが存在しない、利用できないとの問題も生じている。

効率的な分析を行うためには、収集した生データを分析テーマに合わせて適切な形式に変換し、目的に応じたデータベースに保存することも必要である。

これらの課題に対応するため、DataLab<sup>®</sup>のデータベース層では、ExcelやCSVの構造化データ、XMLのような半構造化データ、画像や音声ファイルなどの非構造化データを含む、様々な形式の生データを同一のデータ集約領域に一元的に保存、管理できるようにした。

また、データ収集からデータベース層への保存までのプロセスを標準化することでデータ収集・保存を容易にするとともに、データ関連付け機能を具備させるなど、データ分析のための前処理工程の手間を大幅に削減できるようにした。その際、未加工の状態生データを保管し、将来的な分析ニーズの追加にも対応できるようにしている。これらのデータはクラウド上に保存されるため、無制限にデータを保存し続けることが可能になる。

以上の処理を経て、データベース層に整形・蓄積されたデータは、つぎのソリューション層で作成するモデルやツールから参照して利用される。

### 1.2 ソリューション層

ソリューション層の目的は、蓄積されたデータを基に、具体的なビジネスソリューションを開発することである。ソリューション層では当社が独自に開発した分析ツールの利用や市販の分析ソフトウェア、BI（Business Intelligence）ツールなどの可視化ツールを利用して、アプリケーションの開発や分析を行う。

作成された独自開発分析ツールには、当社のデータサイエンティストがそれぞれの分析テーマに合わせて機械学習・チューニングしたモデルを組み込んでおり、データベースに蓄積されたデータを高度に分析することが可能になる。

また、可視化ツールは、前述のデータベースにアクセ

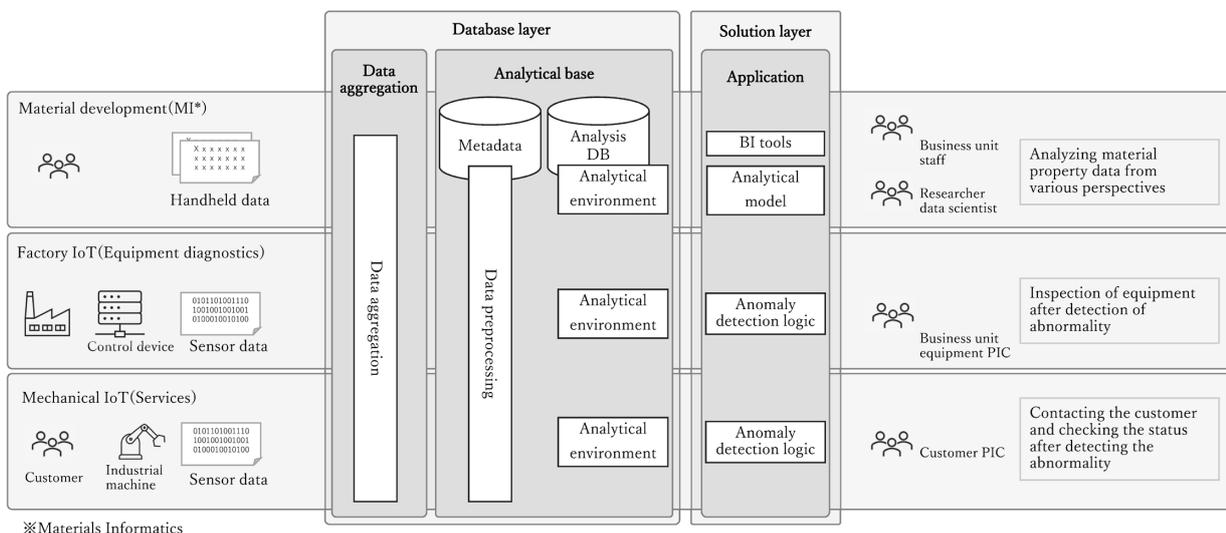


図1 DataLab<sup>®</sup>の概要図  
Fig.1 Concept of DataLab<sup>®</sup>

スして必要なデータを取得し、可視化することでユーザーの意思決定を補助する役割を担う。

さらに、外部のデータ分析サービスとセキュリティを確保した状態でデータ連携が可能であるため、他社が準備したデータ分析モデルを容易に利用できる。そのため、開発のマンパワーや、AIに関する専門的な知識がなくても簡単にデータ分析や予測が可能となる。

## 2. 活用事例

データ分析では、一つのシステムで全ての分析ニーズに対応することは難しいため、材料開発や設備診断などの大きなテーマごとに最適な構成を設計し実装することが必要になる。例えば、材料開発で扱うデータは非定型かつ少量データであるいっぽう、設備診断では定型的で大量のデータを扱うため、データの整理の手順や最適なデータ構造も異なる。

今回、当社で幅広く活用が見込める材料開発と設備診断をユースケースとして設定し、DataLab<sup>®</sup>の構築に取り組んだ。本章では、材料開発と設備診断の事例（本号「材料開発および利用におけるMI技術」p.57、本号「加古川製鉄所第2分塊工場における設備状態監視・異常予兆検知システムの構築」p.17、参照）に基づき、データ分析基盤としての概要を説明する。

### 2.1 材料開発

材料開発では、一般的に、新しい材料の開発や既存材料の改良に関連する多様な実験データが生成される。これには、物理的特性、化学的反応、耐久性試験などのデータが含まれ、それぞれが異なる形式で記録される。また、担当者ごとにデータを管理していることが多く、整理の仕方も担当者、実験時期、内容によって統一されていないことが多い。そのため同じ項目名称でも担当者によってその項目にひもづくデータが異なることや、逆に同じ意味のデータであっても項目名称も異なることが多く、データ分析可能な形式への整理負荷が大きかった。

この整理を簡単にできるように、収集したデータを自動的に分析し関連データを分類したうえで、解析用デー

タベースに体系化して保管する仕組みを組み込んだ。

材料開発では、特定のルールに従って記述されたcsvファイルなどの実験データをデータ集約領域に保存する。そのデータを分類分けし、新たにテーブルを作成するとともに、キー項目をもとにテーブル間の関連を抽出し、逆スタースキーマとして構成する。そして、リレーショナルデータベースにデータを保管し、必要なデータテーブルを自由に組み合わせることで分析データを取得できるようにした（図2）。

データ分析時は、使用したいデータを目的別にテーブル形式でまとめ、市販の表計算ソフトウェアやBIツールなどの可視化ツール、当社のデータサイエンティストが機械学習・チューニングすることにより作成した様々なモデルを組み込んだ独自開発ツールで分析する。本ツールは、分析者が目的に応じたモデルを選択し、変数や条件を入力して計算を実行することで、材料特性の予測や目的材料の設計探索を行うことができる。また、高度な計算をクラウド上で実行することができるため、ローカル端末のスペックにも依存しない高速な計算が可能となる（図3）。

### 2.2 設備診断

設備診断の分野では、工場の設備稼働率の向上や操業の安全性を確保するために、様々なセンサからのデータがリアルタイムで収集される。これらのデータには、設備の動作状態、温度、圧力、振動レベルなどの情報が含まれ、設備の健全性や性能のモニタリングに利用されるとともに、予防保全や障害予測にも役立てることができる。

そのセンサー数は非常に多く、取得周期も極めて短いため、非常に大量のデータを扱う必要がある。いっぽう、取得するデータは定型化されたデータであるため、データ収集の仕組みを構築すれば他設備へも容易に展開することができる。また、設備診断については、多くの開発ツールが市販されており、市販ツールと独自開発ソフトウェアを組み合わせることで、効率的に分析システムを開発できる。

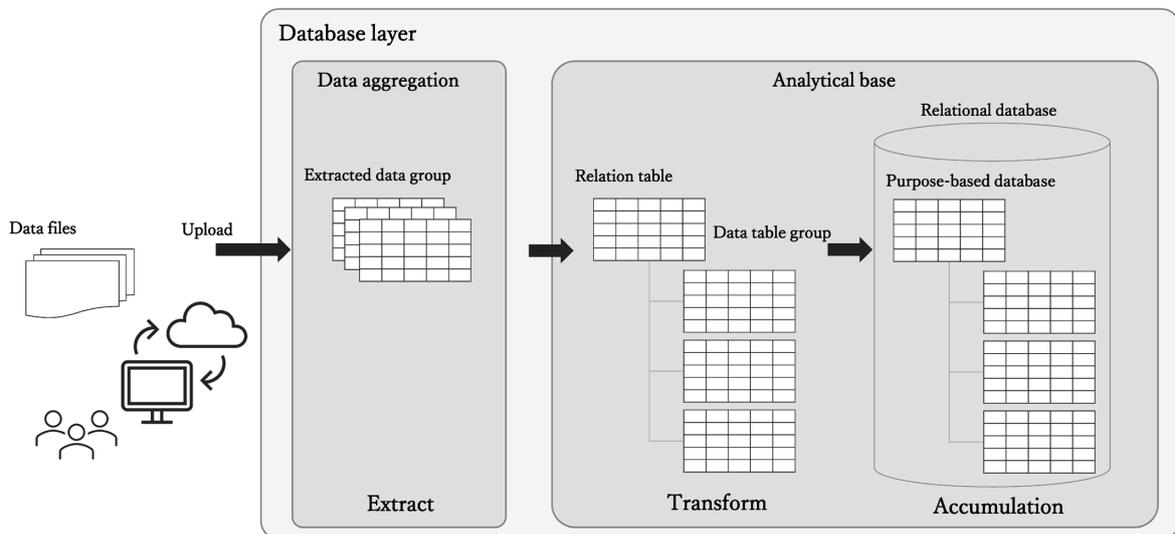


図2 データベース層におけるデータ処理概略図  
Fig.2 Data processing image on the database

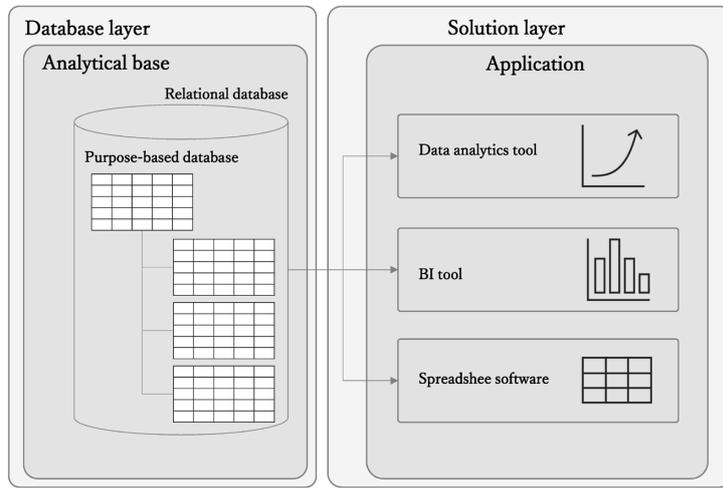


図3 材料開発 DataLab<sup>®</sup>の構成図  
Fig.3 System architecture of DataLab<sup>®</sup>

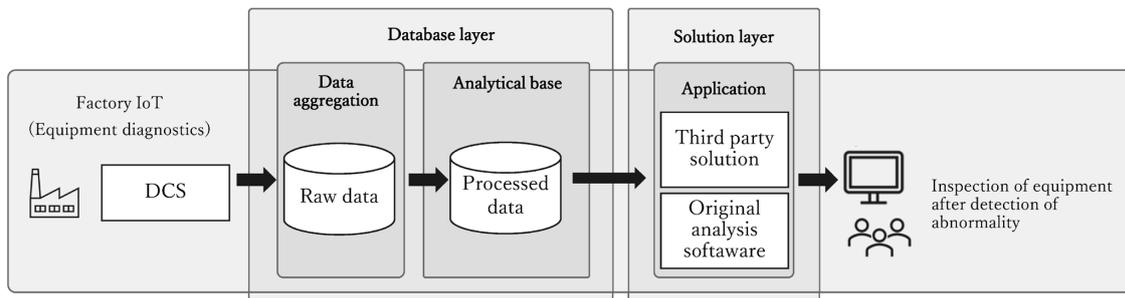


図4 設備診断におけるデータ処理概略図  
Fig.4 Data processing image for Equipment Diagnosis

設備のデータ収集から分析まで構築した構成例を図4に記す。

データの収集には、DataLab<sup>®</sup>へのデータ伝送ソフトウェアを搭載したゲートウェイ装置を用いる。本装置はDataLab<sup>®</sup>への伝送と保存先があらかじめ組み込まれており、データ発生元の制御装置（DCSやPLC）と接続すればDataLab<sup>®</sup>へデータ伝送できる。伝送されたデータは所定の形式でデータ集約領域に生データとして保存される。そのデータは後続の分析モデルや分析ソリューションで分析しやすいように処理され整形データとして保存される。

設備診断の場合、各設備に接続された様々なセンサなどから多様なデータが収集されるため、データ構造としては膨大なデータ種類（列項目）が生成されるが、いっぽう、実際の異常検知モデルで有効なデータは検知したい異常ごとに限定されたものとなる。今回、設備診断のための解析用データベースとしては、時系列データを所定時間ごとに分割したうえで列指向データベースを構築して格納し、分析しやすさとパフォーマンスの両立を図った。

分析ソリューションとしては、市販ツールを活用し、あらかじめ用意されたアルゴリズムを活用した異常検知モデルや、正常時の運転データをもとにした異常予兆の検知機能を実装したが、社内のデータサイエンティストがPythonなどの統計解析向けプログラムを駆使して独自分析ソフトウェアを構築し実装してもよい。また、データの可視化ツールも具備しており、それを用いた設備

監視も可能である。

### 3. 今後の展望

材料開発と設備診断に適した環境を整備したが、まだ一部の事業部門で利用を開始したばかりである。今後は他事業部門へ展開していくとともに、検査や材料開発で要望の多い画像データへの対応など新たな機能を追加していく。

また、現場の装置や個人のパソコンなど、将来価値を生み出す可能性のあるデータが様々な場所に多く存在するが、データ集約により事業部門間でのデータ連携につながる可能性もあるため、データ集約を進めていく。

さらに、手元にデータはたまっており、簡易にデータ分析をしたいというニーズも存在するため、多くの人がデータ分析を簡単にできるように、DataLab<sup>®</sup>を用いたデータ可視化支援やノウハウの蓄積・共有も推進していきたい。

むすび=本稿では、組織的データ活用を促進するためのDataLab<sup>®</sup>のコンセプトを活用事例も交えて紹介した。ものづくり力の向上にデータ活用は必要不可欠だと考えている。そのため、DataLab<sup>®</sup>を用いて様々な工場や設備のデータ、実験のデータの蓄積と分析を推進していくことで、当社のものでづくり力の向上に貢献していく。

#### 参考文献

- 1) 森田 登氏ほか. 三菱電機技報. 2022, Vol.96, No.5, p.40-43.
- 2) 田谷文彦ほか. JFE技報. 2022, No.50, p.44-49.

(技術資料)

# 加古川製鉄所第2分塊工場における設備状態監視・異常予兆検知システムの構築

萩原 尚<sup>\*1</sup>・井上佳賢<sup>\*1</sup>・森居数広<sup>\*2</sup>・宇野久史<sup>\*3</sup>・安東 努<sup>\*4</sup>

## Establishment of Condition Monitoring and Predictive Anomaly Detection System in No.2 Bloom Mill at Kakogawa Works

Takashi HAGIWARA・Yoshitaka INOUE・Kazuhiro MORII・Hisafumi UNO・Tutomu ANDO

### 要旨

加古川製鉄所第2分塊工場の安定稼働を目的として、データ収集装置を導入し、設備異常の予兆を検知するシステムを開発した。多様な操業条件およびパターンが存在する第2分塊工場において、異常の予兆を精度よく捉えるために、評価に適した区間のデータを抽出して学習、解析することでモデルの汎用性を高める手法を採用し、プログラミング不要でデータ事前処理からモデル製作まで行えるシステム（Mode Oriented Novel Anomaly Detector (MONAD)）を開発した。モデル製作からMONADを活用した保全業務に至るまでのフローを標準化することで、機械学習の専門知識のない操業や保全の技術者、作業員でも運用可能な体制を整え、製造現場での運用を行いながらモデルの精度向上に取り組んでいる。

### Abstract

To ensure the stable operation of the No.2 Bloom Mill at the Kakogawa Works, a data acquisition apparatus has been introduced to develop a system for detecting signs of equipment abnormalities. To accurately capture the signs of abnormalities in the No.2 Bloom Mill, where diverse operating conditions and patterns exist, a method has been adopted that enhances the versatility of models by extracting, learning, and analyzing data at suitable intervals for evaluation. This has led to the development of a system, Mode Oriented Novel Anomaly Detector (MONAD), which enables the steps from data preprocessing to model creation without the need for programming. Standardization of the flow from the model creation to maintenance work using MONAD has enabled the set-up of a system that can be operated by technicians and operators without expertise in machine learning. Efforts to improve the accuracy of the model are being made through its operation at the manufacturing sites.

### 検索用キーワード

状態監視, データ収集, 異常予兆, モード, MONAD, 2分塊

まえがき = 加古川製鉄所第2分塊工場（以下、第2分塊工場という）は1970年に稼働開始し、条鋼製品の圧延工場に供する鋼片を製造している。2017年には上工程集約に伴う大幅な増強工事<sup>1)</sup>が行われ、その生産能力は分塊工場単体としては世界に類を見ない月間30万トンとなった。当社条鋼製品に使用されるほぼすべての鋼片は第2分塊工場を経て供給されるため、第2分塊工場の安定稼働体制の確立は条鋼製品全体の安定供給にとっての重要課題となっている。

従来の設備保全は、日常点検にて設備の状態を把握し、過去の経験に基づいて保全基準を定めるTBM（Time-Based Maintenance、時間基準保全）やCBM（Condition-Based Maintenance、状態基準保全）が主流であった。しかしながら、2017年の増強工事導入された設備については、TBMやCBMの暫定的な保全基準を定めて運用せざるを得ないところがあり、より確実に設備の突発故障を抑止できる手法の導入が求められていた。このような背景から、当社では2018年より第2分塊工場の多種多様な設備を対象として、常時状態監視および異常予兆検知が可能な情報インフラ整備とシステム

開発を進めてきており、本稿ではその内容について述べる。

## 1. 異常予兆検知システム開発方針

### 1.1 本システムのコンセプト

機械学習による異常予兆検知では、データに定常的な規則性があることを前提にして、それを学習し、規則性から外れた「いつもと違う」状態を異常予兆として検知する手法が一般的である<sup>2), 3)</sup>。とくに、常時稼働のプラントなどでは、プラント単位の多変量データを一括で解析し、「いつもと違う」挙動を見つける異常予兆検知の事例が多く報告されており、人がデータを見ていても気づかない、データ間の意外な関係性に基づく異常の兆候を発見できることから注目を集めている<sup>4)</sup>。

しかし、第2分塊工場では鋼種や寸法などの製造条件に応じ、各設備の運転方法や設備の駆動モータにかかる負荷が変動するほか、状況によっては現場作業員が手動で操作を行う場合もあり、操業条件や操業パターンは多岐にわたる。このため、常時稼働のプラントのような操業データ全体にわたる定常的な規則性は期待できず、機

\*1 鉄鋼アルミ事業部門 加古川製鉄所 線材部 \*2 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター \*3 鉄鋼アルミ事業部門 加古川製鉄所 制御部  
\*4 鉄鋼アルミ事業部門 加古川製鉄所 設備部

機械学習の結果捉えられた「いつもと違う」状態が、必ずしも本当に捉えたい異常予兆ではなく誤検知となることがある。

この対応として、おのおのの操業条件、操業パターンに応じたモデルを製作し、学習させることも考えられるが、必要なモデル数が膨大となるため現実的ではない。また、新たな操業条件、操業パターンに適用する際の障壁にもなる。そこで、本活動では操業条件、操業パターンによらず、評価に適した動きをする区間（例えば、負荷が一定となる区間）のデータを抽出して学習対象とすることで、モデルの汎用性を高める手法を採用することとした。データ抽出条件の決定には操業条件や操業パターンに加えて、設備構造や自動制御条件などを考慮する必要があり、操業および保全技術者の知識が不可欠となる。また、上述のようなデータ抽出を行ったとしても、誤検知が生じる例外的な状況も存在するため、異常発報時に人を介さず即座に設備を止めるなどの画一的な処置を行うことは難しく、取るべきアクションは最終的に人が判断しなければならない。

以上を踏まえ、機械学習の専門知識のない操業および保全技術者ならびに作業員主導でモデル製作および運用を行えるよう、以下の方針でシステム開発を進めることとした。

- ・工場全体の多変量データを一括解析するのではなく、設備単位で最適化したモデルを製作すること。
- ・プログラミング不要でデータの前処理やモデル製作を行えるツールを備えること。
- ・モデルの挙動やデータと実現象との対応が視覚的に理解できるよう、使用する特徴量は最大2変数までに限定すること。

## 1.2 監視対象設備の決定

第2分塊工場の全設備数は数千点におよび、これら全てに対して異常予兆検知のモデル製作をすることは現実的ではない。そのため、本プロジェクトの目的である第2分塊工場の安定稼働の観点より、トラブルにより24時間以上の突発ライン停止が予想される設備に絞り込み、常時状態監視のためのデータ収集と異常予兆検知のためのモデル製作を行うことにした。

設備の常時状態監視のためのデータとしては、従来の制御ネットワークにて収集されているモータの回転数や電流値、制御信号などのデータがあり、これらデータを活用して、異常予兆検知のためのモデルを製作する。

## 2. データ収集装置の導入

### 2.1 データ収集装置の要件

第2分塊工場は、工場の増強や繰り返し行われた制御システムの部分更新によって多種多様なメーカーの装置が混在しており、制御システムが複雑になっている。そのため、データ収集装置もメーカーごとに異なっていたり、そもそもデータ収集できていない信号もあり、全データを同期して一元的に収集することができていなかった。しかし、異常予兆検知では様々なデータの相関関係を監視して、「いつもと違う」ことを判断するため、データ

の同期化・一元収集は必須である。

これらを踏まえ、異常予兆検知システムを開発・構築するために、データ収集装置には以下の五つの要件を設定した。

- ① 当社他工場へ水平展開しやすいように国内主要PLC (Programmable Logic Controller, 制御装置) メーカーの制御ネットワークに接続できること。
- ② ①において、データの同期化、一元収集ができること。
- ③ 汎用的なデータ出力ができるようにテキストファイルでの受け渡しができること。
- ④ 社内ネットワークを経由し、どの端末からでも収集したデータが閲覧でき、活用がしやすいこと。
- ⑤ 将来性および拡張性を考慮して、規模拡大や機能追加がしやすいこと。

これらの要件を満たすため、iba AG(以下、iba社という)のデータ収集装置(ibaPDA)を採用した。

### 2.2 iba社データ収集装置の特徴

iba社のデータ収集装置は、多数のPLCメーカーのネットワークに接続ができ(要件①)、データの同期化・一元収集が可能である(要件②)。また、上位システムとのデータ連携方法も多彩で、パッケージ化されており、テキストファイルでの受け渡しも可能である(要件③)。さらに、分析ソフトウェア(以下、分析ソフトという)をインストールすれば、社内ネットワークを経由し、どの端末からでも収集したデータの閲覧・活用が可能である(要件④)。振動解析や画像処理などの機能付与も簡単にできて拡張性が高い(要件⑤)。本プロジェクトでは、種々の信号をこの分析ソフト上で処理し、相関関係を可視化する(図1)ことでモデル化の事前検討が容易になる点が非常に優れていた。

### 2.3 iba社データ収集装置導入時の工夫

システム導入時には、国内メーカーのネットワークとの接続が保証されていなかったため、小規模実証試験を実施し、安定してデータの一元収集ができていることを確認した。

また、収集したデータを当社他システムとも簡単に連

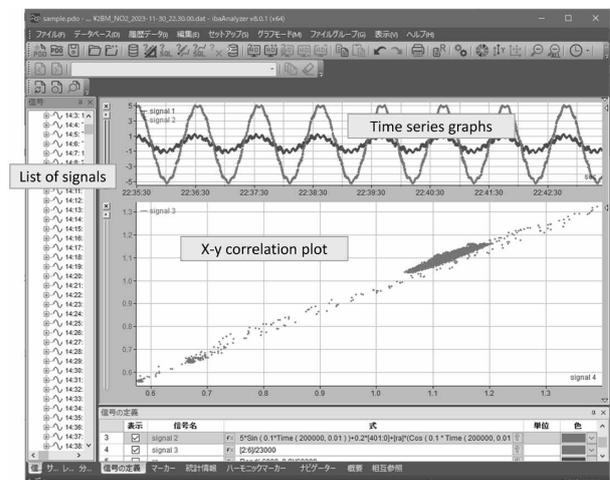


図1 分析ソフト画面例

Fig.1 Sample screen image of analysis software

携し活用しやすいように、設備装置ごとに統一したIDを共通キーとして使用し、タグ付けをした。重要なデータについては、変数名や工学単位を追加しデータ活用をしやすいようにした。

さらに、今後他工場へ展開する際に同等の設計品質を維持できるよう、第2分塊工場での導入例をもとに設計仕様の標準化を実施した。

### 3. モデル製作手法の確立

#### 3.1 異常予兆検知モデル製作フロー

本活動では、1.1節で述べたコンセプトにしたがって操業および保全技術者が主導して設備単位で最適化したモデルを製作していくため、モデルごとに品質や開発効率のばらつきが生じないように標準となる作業フローを定めることとした。

設備の異常予兆検知は機械学習の教師データとなる異常時のデータが少ない、あるいは全く存在しないことが多いため、ある程度の誤検知を許容したモデルを製作し、実装後に誤検知の発生率が許容できるレベルになるまで試行錯誤で改良を加えていくことになる。そこで、「混合型規格学習ライフサイクルプロセスの概念図」<sup>5)</sup>を参考に、図2に示すような作業フローを作成した。本フローでは、モデル製作工程を事前処理フェーズと実装フェーズに分割し、それぞれのフェーズの中でデータチェックサイクルを回すアジャイル開発（開発途中での変更や追加をあらかじめ想定した開発手法）の思想を取り入れている。とくに特徴量の選定とデータ抽出を行う事前処理フェーズは、モデルの精度を高めるために重要なプロセスであり、次節にて例を用いて詳細に説明する。

#### 3.2 実例を用いたモデル製作手順の解説

図3に示す搬送設備を実例にモデル製作の手順を解説する。この設備は偏心輪に連結された移動フレームが、鋼片をリフトアップして前方に進める構造である。この設備で想定される故障の一つである偏心輪の回転不良を事例にモデル製作を行う。

##### i) 検知対象の特性調査

最初のプロセスとして、「回転不良」を検知するための特徴量を、開発コンセプトに沿って最大二つまで選択

する。偏心輪での回転不良はモータ出力トルクの増大につながるため、一つめの特徴量はモータ電流値に設定できる。また、この設備は駆動と停止を繰り返しており、動作中の加減速に伴い常に電流値が変化していることから、モータ回転速度を二つめの特徴量に設定する。搬送設備が無負荷であれば、これらは一定の関係を保つことが想定されるが、鋼片をリフトアップしている間は、鋼片の総重量などによりモータ電流値が変動するため、二つの特徴量の関係性にも変化が生じる。鋼片総重量という操業条件によって生じる変化は誤検知の要因となり得るため、あらかじめ設備図面や制御方案などを調査したうえで、無負荷状態のデータ区間のみを抽出するための条件を検討しておく。図3より、本設備の場合は「偏心輪角度が0°から90°の間、もしくは270°から360°の間の区間」が無負荷となっていると想定できる。

##### ii) 分析ソフトでの特性調査

続いてのプロセスは、i)で調査した内容を元に、分析ソフトを使って実際のデータ分布を確認し、二つの特徴量の相関性の有無を確認する。選定した二つの特徴量およびデータ抽出条件として用いる偏心輪角度の時系列データを表示させ、データの特徴を掴む(図4(a))。この事例では、想定していた「負荷あり」の区間以外に、駆動開始直後や停止直前に再現性の低いスパイクが生じているため、「負荷あり」の角度条件に加えて、これらのスパイクが生じる角度範囲もデータ抽出範囲から除外する。分析ソフト上の機能を活用し、偏心輪角度の条件で抽出した二つの特徴量の散布図を表示させる(図4(b))。ここで、データが密集していれば再現性の高いデータ抽出ができていたためにモデル製作可能、ばらつきが大きければ再現性が低いためにモデル製作不可と判断し、後者の場合はデータ抽出区間を見直す。この一連の工程は、モデル製作上最も重要な工程であり、ここでの考え方や試行結果を体系的に残していくことが重要である。

##### iii) モデル設計書作成

データ検証が完了した時点、これまで検討した内容をモデル設計書として記録する。これにより、モデル製作者以外でも当該モデルの設計思想や妥当性を検証するこ

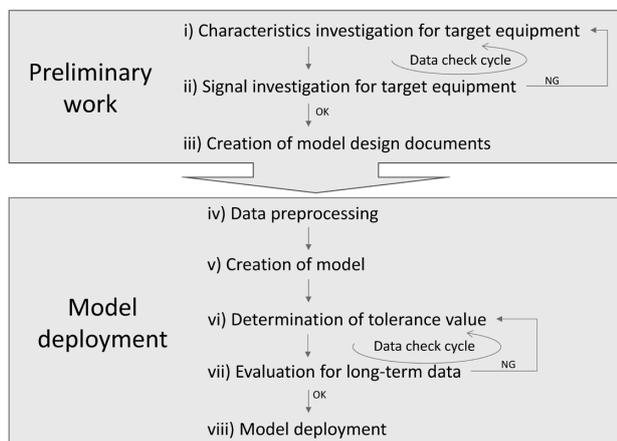


図2 モデル製作のためのワークフロー  
Fig.2 Workflow for model creation

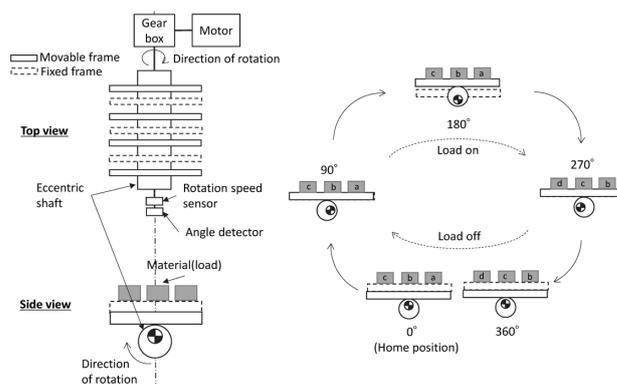


図3 設備概略図  
Fig.3 Schematic diagram of equipment

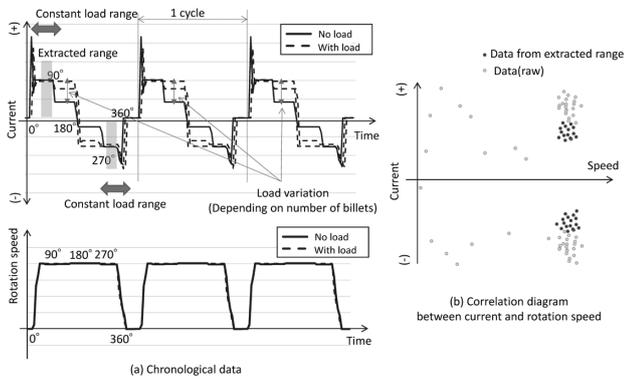


図4 設備から得られたデータ例  
Fig.4 Example of summary data

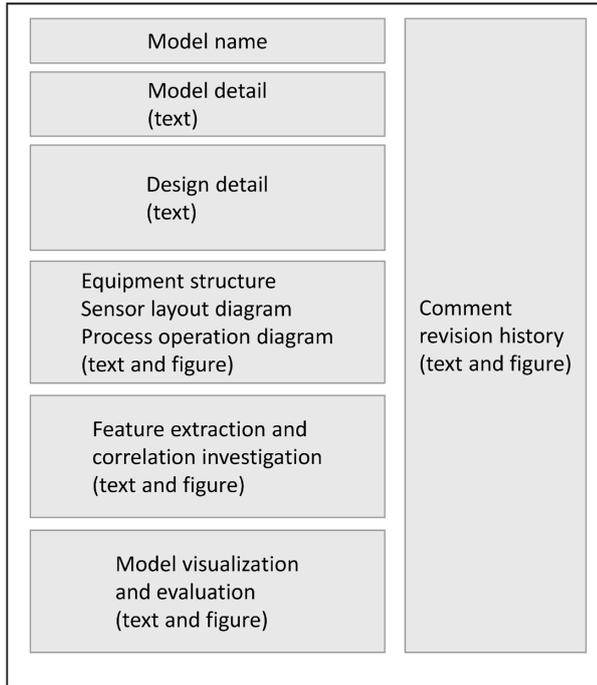


図5 Airtable概略図  
Fig.5 Schematic image of Airtable

とが可能となり、長期的なモデル管理や保全活動への応用に役立つ。

モデル設計書には Airtable (Formagrid Inc.の商標) というウェブサービスを活用した (図5)。これは、モデルに関する情報 (設計情報, 設備構成, 運転方案, 信号情報, 相関調査結果やモデル評価結果など) をテキストと画像で保存することが可能で、コメントや改訂履歴も保存できるため、モデルの製作過程や改造履歴を簡単に残すことができる。

#### 4. 異常予兆検知システム開発

「3.モデル製作手法の確立」で標準化した設計手順を元に、図2の Model deploymentで実際のモデル製作と実装を、プログラミング不要で簡単に実施できるシステム「MONAD (Mode Oriented Novel Anomaly Detector)」を開発した (図6)。

MONADの特長としては、①異常予兆検知に必要な特徴量を最大2変数までに絞り込むことで、機械学習の

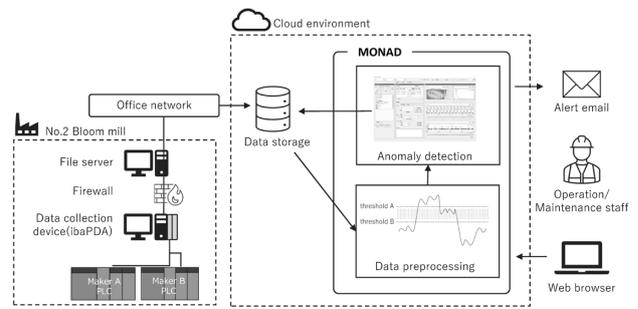


図6 MONADシステム  
Fig.6 MONAD system

知識を持たない操業および保全技術者でも、散布図やトレンドグラフを見ながらモデルの挙動を理解し、設備知見を活かした実用的な異常予兆検知ロジック設計が行える点と、②豊富な前処理メニューを備えており、選定した2変数に対して、ユーザが意図するようなデータ加工を簡易に行える点が挙げられる。以降でMONADのモード抽出および異常予兆検知ロジック構築機能を紹介する。

##### 4.1 モード抽出機能

MONADでは、操業条件や操業パターンに応じて変化するデータの規則性のことを、「モード」と呼んでいる。データから所望のモードを抽出するために、まず、異常検知対象のデータ項目 (最大2変数) と、モード抽出に用いるON/OFF信号や指令値などの補助信号を選択する。モード抽出方法としては、補助信号の値の範囲を指定して抽出する方法のほかに、時系列データの変化パターンを元にセグメンテーションを行う方法や、散布図上で直接抽出範囲を指定する方法も機能として備えている。これらの機能を組み合わせることで、ユーザが設備知見に基づき、一定負荷運転時など、評価したいデータを抽出することができる (図7)。

##### 4.2 異常予兆検知ロジック構築機能

MONADでは、モード抽出後のデータに対してLOF (Local Outlier Factor)<sup>6)</sup>をはじめとする異常予兆検知モデルの訓練を行い、訓練済みモデルを用いた評価期間に対する異常度スコア計算およびグラフ化を行える。異常度スコアの等高線図を散布図上に描画することで、ユーザが意図した通りのモデルになっているかを確認できる (図8)。

実際の異常判定は、デプロイ (開発したソフトウェアやアプリケーションを実際に運用環境に導入すること) 後にバッチ処理 (あらかじめ決められた一定量のデータをまとめて処理する方法) で行われ、異常度スコアの閾値越え頻度が許容頻度を上回った場合に異常発報が行われる。

また、LOF以外の異常予兆検知ロジックとしては、時系列トレンドの単調増減傾向や、データの分布や波形の変化を評価することで異常を検知する機能を備えている。これらの異常予兆検知ロジックは、ユーザが選択可能であり、ユーザの要望や、新たな異常事例の分析を元に、適宜拡充する予定である。

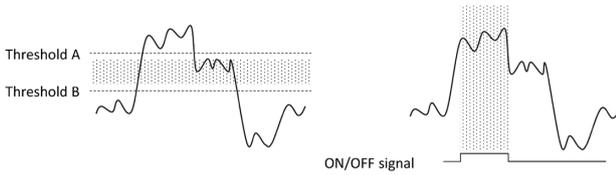


図7 モード抽出例  
Fig.7 Examples of mode extraction

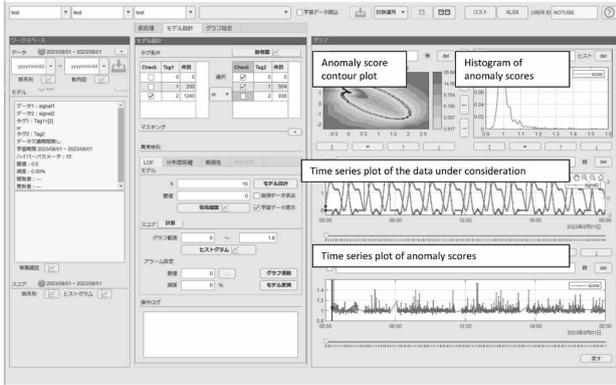


図8 モデル設計画面例  
Fig.8 Example of model design screen

## 5. 保全活動への応用

MONADに実装した各設備のモデルを使用し、異常予兆検知（予知保全）のツールとして保全活動へ応用するためには、製造現場での運用へ展開し、モデル精度の向上に取り組む必要がある。

製造現場での運用を進めるにあたり、まずは異常予兆情報が発報された後に、どのようなワークフローでデータ確認・現物確認を行うのが最適かを検討した（図9）。そして、ステップごとに必要な情報を保全作業員に提供するため、MONADを活用するための必要なシステムの画面設計を行った。

MONADにて異常状態と判定された設備は、保全作業員に自動的にメールで通知される。保全作業員は異常度スコアのトレンドや異常時の状態をデータで確認したうえで、当該設備の外観点検（異常振動や異音の確認含む）を実施する。外観検査で異常が疑われる場合には、設備を停止して詳細調査を行う判断をする。また、点検の結果や処置内容などの情報を保全作業員が監視画面上に入力することで、モデル設計者を含めた関係者と情報が共有できるようにした。

上述のような運用の仕組みを整えたうえで、2023年10月より製造現場での運用を開始した。図8のフローに沿

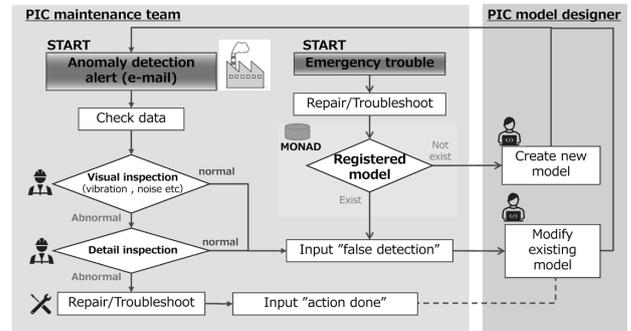


図9 MONADを活用した保全フロー  
Fig.9 Workflow of daily maintenance using MONAD

って運用を行いながら、各モデルの精度検証および向上に取り組んでいるところであるが、これまでに銅片搬送設備の軸受潤滑不良の初期症状を検知できた事例もあり、今後の効果が期待できる。いっぽう、減速機など多数の駆動部品から構成される装置については、モデルの精度検証を継続しながらそれぞれの機器特性に応じた合理的な状態監視の手法を探っていく必要がある。

むすび＝第2分塊工場における設備データ収集およびデータを活用した異常予兆検知システム導入の取り組みについて述べた。本稿で紹介したMONADの開発コンセプトやモデル製作手順は、機械学習の専門知識のない操業・保全技術者でも設備単位でアジャイルにモデルの製作が行えるところに特徴があり、多様な操業条件や操業パターンが存在する工場での異常予兆検知手法に新たなアプローチを提供した。また、MONAD自体は設備を監視するデータを適切に選定することができれば、他工場にも容易に展開が可能な汎用性を有したシステムとなっており、第2分塊工場での有効性検証とあわせて、社内の他の工場への展開を図っていく。

## 参考文献

- 1) 多比良知秀ほか. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.2, p.37-41.
- 2) 井手 剛. 入門 機械学習による異常検知-Rによる実践ガイド. コロナ社, 2015.
- 3) 山西健司. データマイニングによる異常検知. 共立出版, 2009.
- 4) 相馬知也. 安全工学. 2018, Vol.57, No.2, p.107-113.
- 5) 産業技術総合研究所. 機械学習品質マネジメントガイドライン第4版. 2023-12-12. <https://www.digiarc.aist.go.jp/publication/aigm/AIQuality-requirements-rev4.1.0.0112-signed.pdf>. (参照2023-12-13).
- 6) Breunig, et al. Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD international conference on Management of data. 2000, p.93-104.

(解説)

# IoTプラットフォームを用いた機械加工工場の統合管理

浅井新輔\*<sup>1</sup>・北 一貴\*<sup>2</sup>・池田英生\*<sup>3</sup>

## Integrated Management of Machining Factory Using IoT Platform

Shinsuke ASAI・Kazuki KITA・Hideo IKEDA

### 要旨

多品種混流生産の加工工場において、一人の作業者が複数の工作機械を掛け持ちする体制を整えてきたが、従来の人に依存した管理方法では工場全体を効率よく稼働させることが困難な状況にある。このような課題に対してIoT技術を活用して、工作機械の状態を把握するIoTプラットフォームを構築し、工作機械から得られるプロセスデータを用いて、課題解決を試みた。解決事例として、工作機械から得られるプロセスデータをリアルタイムで分析し、異常を検知して機械停止指令まで自動化したシステム構築と工作機械への実装、作業者位置情報と機械稼働情報を組み合わせた分析と活用事例について詳細に紹介する。

### Abstract

In a processing plant with a multiple-variety mixed-flow production system, a single worker handles multiple machine tools. The traditional human-dependent management method, however, is facing difficulty in efficiently operating the entire factory. As an attempt to solve such issues using process data obtained from machine tools, an IoT platform has been constructed to monitor the status of the machine tools by utilizing IoT technology. This paper details the construction of a system that analyzes process data from machine tools in real-time and detects abnormalities for automation, including the machine-stop command. It also discusses the implementation of this system on machine tools and provides examples of analysis and utilization by combining worker position information with machine operation information.

### 検索用キーワード

工作機械, IoT, 多品種混流, 可視化, プロセスデータ, 異常検知, 作業者位置情報

まえがき = 日本では、ものづくりが高度化するいっぽう、人材不足が顕著で大きな課題となっている。21世紀に入り、AI、IoT、ロボティクスなどのデジタル技術が実用化する中、様々な分野で自動化、効率化が進んでいる。その反面、熟練技能や人手に頼ったものづくりも多く残っており、これらの課題を解決する技術の実現が望まれている。

当社の高砂機械加工工場では、多品種混流生産を行っており、一つの部品を完成させるための工程数も多く、1工程あたりの所要時間が数時間～数百時間と非常に幅がある。加えて、客先ごとに異なる詳細仕様に応えるべく、類似形状の部品は多いが全く同じ部品は少ない特徴があり、操業は複雑である。これまで生産性向上のため、機械の自動化を進め、1人の作業者が複数の工作機械を掛け持ちする体制（以下、多台持ちという）を整えてきた。しかし、繰り返し品ではないこと、および形状、被削材質、要求精度の面でも高い加工技術が要求されることから監視作業も多く、機械稼働状況と作業者の状況の組み合わせが複雑になるにつれて、監督者による操業状況の全体把握が困難となり、現場での生産性向上に対する障害要因となっている。

昨今、IoTの進化とともに工作機械の様々な情報がリアルタイムで取得可能な通信機能が搭載されているた

め、工作機械全体（または群）の状態を把握するIoTプラットフォーム（以下、PFという）を構築し、工作機械から取得された操業データを活用することにより、上記課題の克服が試みられている。

製造現場における付加価値の定量化と改善効果の測定は、IE手法により、主に人作業の付加価値生産性の分析として多くの試みがなされており<sup>1)</sup>、近年は様々なセンサ技術の発展により、作業者の位置情報や画像情報から直接作業分析を行おうという試みもなされている<sup>2)</sup>。また、工作機械のIoT化も進展が著しく、NC制御やPLCの情報から詳細な稼働状況が取得できるようになってきており、とくに切削加工分野は稼働情報取得のための標準プロトコルMTConnectなどもあり、様々な事例が報告されている<sup>3)</sup>。

そのような中、作業者の位置情報と設備の稼働情報を組み合わせ、人と設備を組み合わせ付加価値の可視化を行おうという試みもみられている<sup>4)</sup>。

本稿で紹介するPFは、このような取り組みを組み合わせ、切削加工工場の生産状況を作業者や設備を含め統合的に管理しようという試みである。

以下、1章では取り組みの中心的役割を果たす工作機械IoTプラットフォームについて解説し、続く2章でPFを用いて工作機械から取得したプロセスデータの活

\*<sup>1</sup> 機械事業部門 生産本部 機械工場 \*<sup>2</sup> 技術開発本部 材料研究所 (現 技術開発本部 企画管理部) \*<sup>3</sup> 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター

用事例を紹介する。最後にPFで取得した機械稼働情報に作業者の位置情報を組み合わせ、人と機械を統合して生産性を評価した結果を報告する。

## 1. 工作機械IoTプラットフォーム

当工場では、様々なメーカーの工作機械を保有しており、多様な工作機械と連携できる汎用性の高いデータ収集システムが必要となる。当工場で保有している工作機械の多くがファナック(株)の制御盤を使用していること、および他メーカーの制御盤やロボットとの通信も可能なことから、MT-LINK i (ファナック(株)製の工場稼働管理ソフトウェア)を採用した。可視化ツールは、自由度が高くカスタマイズが継続的に行えることから、MotionBoard Cloud (ウイングアーク1st(株)製のBIダッシュボード)を使用し、コベルコシステム(株)と連携してPFを構築した。本PFにより、データ収集→可視化→分析→最適化のサイクルを回すことが可能となる。

### 1.1 システム構成

図1にシステム構成を示す。MT-LINK iは、ファナック(株)製のCNCを搭載した工作機械だけでなく、ファナック(株)製のロボットコントローラ、OPC UA通信対応のPLCやMTConnect通信対応の工作機械などの機器情報を収集することが可能で、他メーカーの工作機械(当工場ではヤマザキマザック(株)、オークマ(株)で実績あり)は、MTConnectを介してMT-LINK iに接続されている。このシステム構成では、ファナック(株)製の制御盤を使用している機械は0.5秒ごと、MTConnectを介した場合は、2.0秒ごとにデータ取得が可能となる。

### 1.2 取得可能な情報と可視化画面

工作機械から取得可能なデータの一例を表1に示す。機械稼働状況、プログラム情報、回転数・送りの指令値と実測値、主軸負荷、各軸サーボ負荷および位置偏差といった多くの情報を得ることができる。

工作機械から得られる情報を活用しやすくする目的で、可視化画面を構築し、試験的に運用開始したので、可視化画面とその活用方法について紹介する。

図2に稼働状況可視化画面を示す。この画面は、作

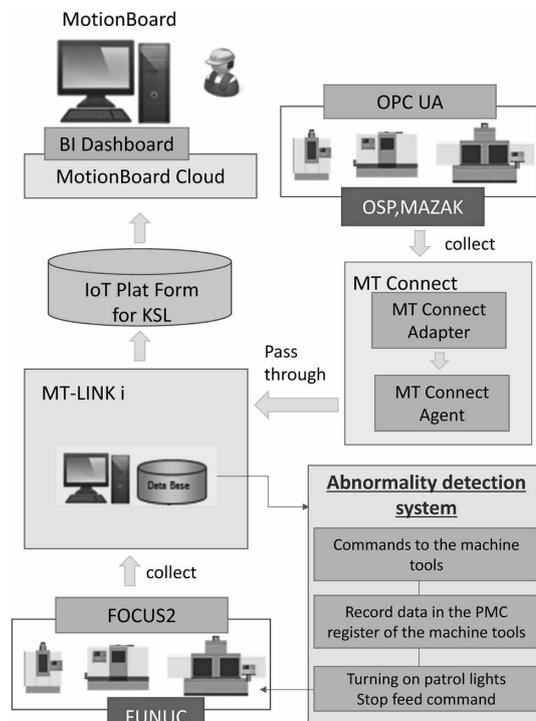


図1 システム構成  
Fig.1 System Configuration



図2 稼働状況可視化画面  
Fig.2 Operation status visualization screen

表1 工作機械から取得可能なデータ  
Table 1 Signal data from machine

No	Signal data	Description	No	Signal data	Description
1	SigOP	Automatic operation signal	31	Override	Override of federate
2	SigSTL	Automatic operation starting signal	32	SigNP	Inposition signal
3	SigSPL	Automatic operation stop signal	33	AbsPos	Absolute position
4	SigAL	Alarm signal	34	RelPos	Relative position
5	EMG	Emergency stop signal	35	McnPos	Machine position
6	Mode	Mode	36	SpindleLoad	Spindle load
7	MainProgram	Main program	37	SigENB	Operating spindle load signal
8	ActProgram	Running program	38	SpindleSpeed	Spindle speed
9	Sequence	Sequence no	39	SpindleTemp	Spindle motor temperature
10	MainComment	Main program comment	40	ServoSpeed	Servo speed
11	ActComment	Running program comment	41	ServoTemp	Servo temperature
12	ActS	Actual revolutions	42	ServoError	Servo position deviation amount
13	ActF	Actual feed rate	43	ServoLoad	Servo load
14	ActFdec	Measured feed rate	44	ServoCurrent	Servo current
15	ModalS	Command value of revolutions	45	ServoCurrentPer	Servo current rate
16	ModalF	Command feed rate	46	PulseCodeTemp	Servo pulse code temperature
...	...	...	...	...	...

業者がスマートフォンなどのMobile端末で自分が担当する機械の稼働状況をリアルタイムに確認するための画面であり、作業中の機械操作完了後に、つぎにどの機械に行くべきかをこの画面を見て判断することにより、機械停止時間の短縮を図るものである。緑の機械は自動運転中であるので、フォローは必要ないが、黄色の機械はプログラム運転がSTOPしていることを示しており、人介入が必要な状態である。赤色の機械はアラームSTOPの状態であり、即座に機械状況の確認が必要である。

図3に自動計測結果可視化画面を示す。運用は、量産品加工時と限定的になるが、加工後に機上でタッチセンサを用いて被加工物の寸法を自動計測した結果を時系列でみることができる。縦軸が自動寸法計測の結果であり、公差の上限および下限をあらかじめセットしておけば、測定値が公差範囲内にあるかが一目で分かる。トレーサビリティ強化や寸法安定性の傾向管理に活用できると考えている。

図4にプログラム運転状況可視化画面を示す。当工場では、以前から自動運転、停止、アラームの3パターンのみを稼働状況表示灯から情報収集するシステムがあったが、本画面では稼働状況だけでなく、運転モードごとの時間割合が分かる。EDITはプログラム編集作業中、HANDLE、JOG、MDIは操作内容は異なるもののいずれも作業者介入での運転、MEMORYが自動運転となる。この運転モード割合をNCプログラムごとに分析し、自動運転以外のモードの中身を精査し削減することにより、自動運転比率を高めることが可能となる。加えて、類似部品のNCプログラムを比較することで、NCプログラマごとの自動運転比率の差異も確認でき、自動運転がしやすいプログラムとなっているか比較検討が可能となる。

## 2. プロセスデータを活用した工具異常の予知・検知

部品Aの加工では、深いポケットをエンドミル工具にて削り出す必要がある。この加工では工具直径に対し、突き出しが長い工具を使用するため、加工振動や工具のたわみなどにより工具欠損が発生しやすく、生産量増大や無人化/省人化の阻害要因となっている。そこで当社では、機械加工のIoT化技術を活用して工具異常の予知・検知技術および適応制御システムを開発、実ラインへ適用することにより、工具異常の発生を未然に防止することを試みた。

### 2.1 対象ワークおよび加工工程

本加工において、図5に示すような工具の大きな損傷が生じることがあり、場合により、加工部品が廃棄となることがある。そこで完全に工具が折損する前段階、つまりチップの欠損や溶着を工作機械から収集できるプロセスデータの変化から検知して装置を停止すること

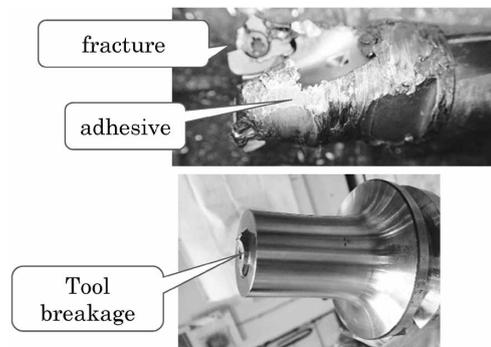


図5 破損工具写真  
Fig.5 Pictures of damaged tools

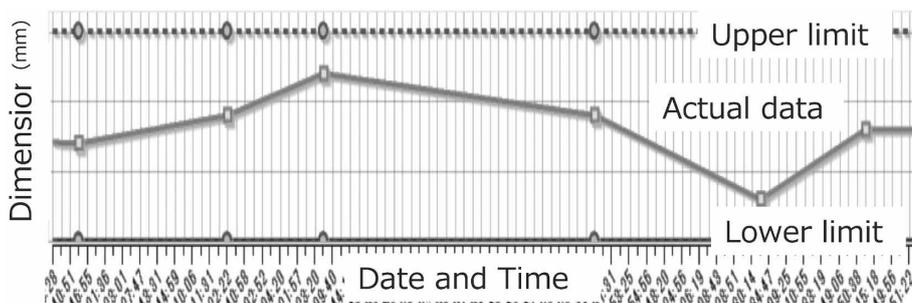


図3 自動計測結果可視化画面  
Fig.3 Automatic measurement result visualization screen

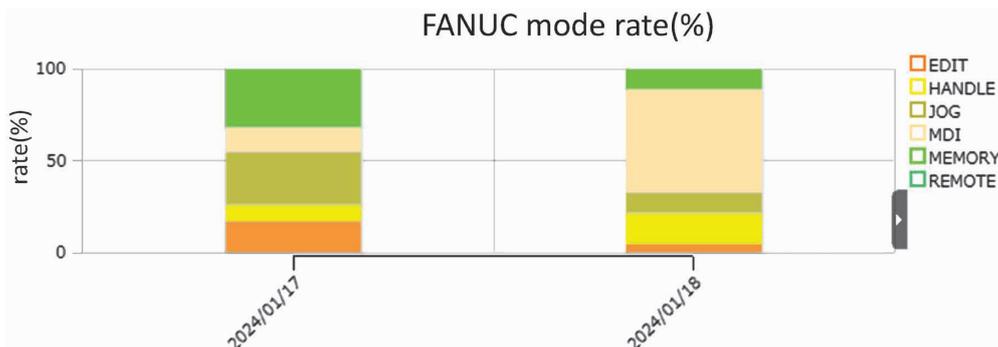


図4 プログラム運転状況画面  
Fig.4 Program operation status screen

で、工具の折損を防止するシステムの開発を試みた。工具異常の検知に関しては、シミュレーションとの比較による異常検知技術<sup>5)</sup>や、加工音、アコースティックエミッション、主軸電流などの正常時のデータのみを学習して異常を判別する手法<sup>6), 7)</sup>などが検討されているが、これらはあらかじめシミュレーションデータや類似加工条件における正常データが必要になることが実用化の課題となっていた。そこで、本取り組みでは、事前の学習データを必要とせずに、加工機から得られる負荷データのみを使用する手法を検討した。具体的には、過去に工具異常が発生した工程においては、**図6**に示すように、異常発生前に主軸負荷（主軸モータの負荷）の急増もしくは主軸およびZ軸サーボモータの負荷振動量（負荷の振れ幅：一つ前のデータとの差の絶対値）の増加が発生していることに着目し、負荷および負荷の変動を加工異常の予兆として検知する異常検知アルゴリズムを開発した。なお、主軸負荷や各負荷変動量は、それぞれの軸の駆動モータの定格出力に対する割合（%）で示している。

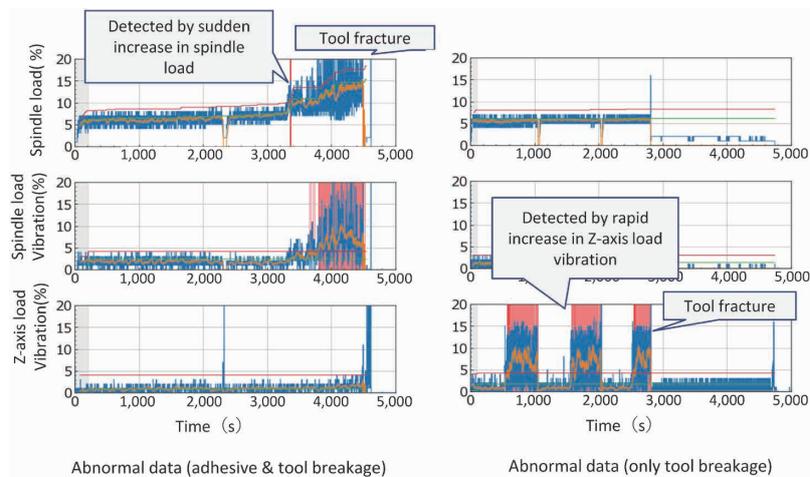
## 2.2 異常検知アルゴリズム

**図7**に示す主軸負荷データを用いた検知アルゴリズムを説明する。まず、工具回転開始前後や加工開始前後で大きな負荷変化が生じやすいプログラム開始40秒間の加工を検知対象から除外するとともに、さらに、異常判定の直近20秒間の平均値（以下、平滑化値という）

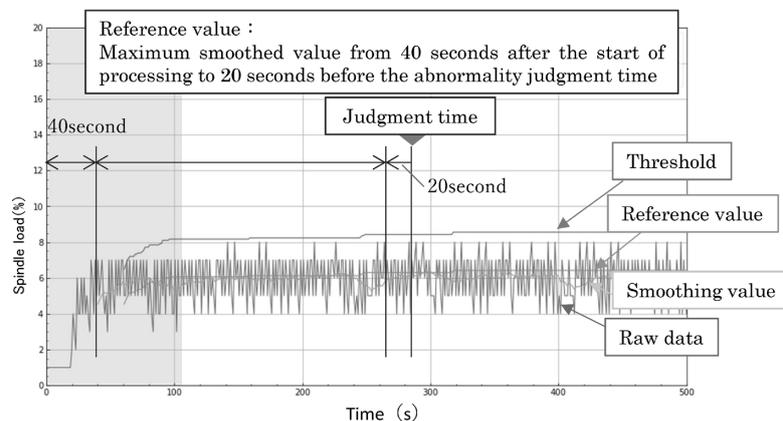
を用いることにより、意図した工具異常以外の突発的な加工負荷の変動による誤検知の発生を抑制できるようにした。具体的には式（1）に示すように、各対象工程の加工開始40秒後から異常判定時刻の20秒前までの各区間における平滑化負荷の最大値を基準値として、過去の実績から導出した係数をかけた値にオフセットを加えた閾値を平滑化値が超えた場合に、異常が発生する予兆と判定する。

$$\text{平滑化値} > \text{閾値} = \text{係数} \times \text{基準値} + \text{オフセット} \dots (1)$$

これらの異常検出手段の妥当性を評価するため、過去の対象工程2年分のデータを用いて、異常検知システムの検出性能を検証した結果を**図8**に示す。**図8**中の各プロットは、過去に加工した全加工オーダーにおいて逐次算出される平滑化値と基準値の比（平滑化値/基準値）が最大となるタイミングの基準値と平滑化値（当該加工オーダーの中で最も異常リスクが高いデータ）を示している。また、各グラフ中の閾値となる紫線よりも上では、システムが“異常”と判定したことを意味している。左のグラフは主軸負荷による判別結果を示しており、異常があった加工のうち、ここで検知された点はオレンジ色の星としている。中央のグラフはZ軸負荷振動による判別結果を示しており、異常があった加工のうち、ここで検知された点は赤い星としている。右に示すグラフは主



**図6** 異常発生時のプロセスデータ  
**Fig.6** Process data when an abnormality occurs



**図7** 主軸負荷に関する異常検知用の特徴量  
**Fig.7** Features for abnormality detection related to spindle load

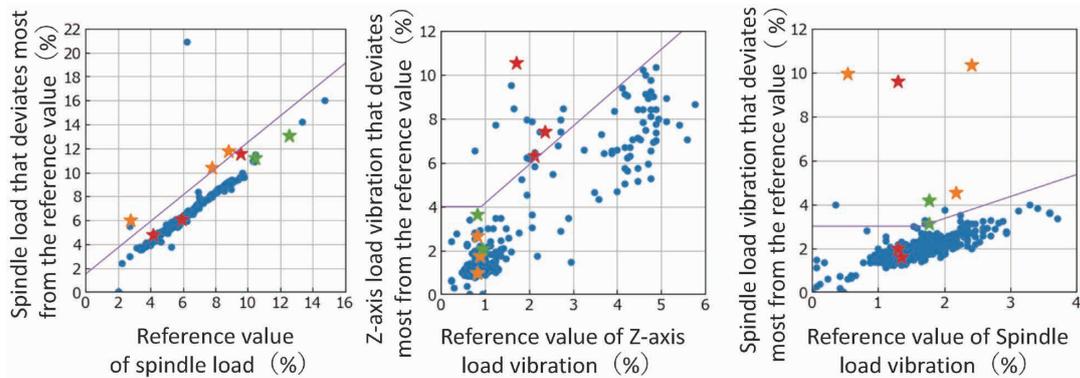


図8 過去の異常状態に対する検知シミュレーション結果  
Fig.8 Detection simulation results for past abnormal conditions

軸負荷振動量による判別結果を示しており、前述の二つの基準で検出されなかったプロットのうち、ここで検出されたものを緑の星としている。三つの判定基準のいずれかに該当したときに異常と判定することで、過去に生じた加工異常は見落とし無しで、すべて検出できていることが分かる。いっぽう、異常が無かった加工も検出している点が複数あるが、これらは問題なく加工できている反面、もう少しで異常となった点も少なからず含まれていると考えており、工具折損による部品の廃却を確実に回避するという点ではこの検出方法で問題ないと考えている。

本システムを実加工プロセスに実装する際には、工具が折損し膨大な損害が生じることを防止することが必要となる。本取り組みでは、異常の予兆が検知されると、自動的に工作機械が安全に停止するシステムを構築し、実装したところ、作業者を加工機の傍に常駐させることなく、工具の異常監視を継続して実施することができている。

### 3. 機械稼働情報と作業員位置情報の組み合わせによる生産性分析

加工機の自動化が進むにつれ、一人の作業員が複数の加工機を担当して操業する「多台持ち」が増えてきた。当社のような多品種混流生産では、加工前後の段取り作業や新規加工品や難加工品の加工中の確認作業などが不定期に発生し、これら担当する複数の加工機の「人介入作業」と加工機の操業とをどのように組み合わせるかが生産性を左右する要因となるが、従来網羅的、継続的に分析する仕組みがなかった。

そこで、加工機の稼働データ、作業員位置データを組み合わせ、生産性（無駄時間）を可視化するシステムを開発した。

#### 3.1 システム概要

本システムでは、加工機の稼働状況と作業員位置で加工機の状態の可視化を試みた。加工機の稼働データはMT-LINK iや稼働状況可視化システムなどで取得し、作業員位置情報は、加工機の操作盤や段取り場に設置したBLEビーコンの信号を作業員が携帯するスマートフォンで受信し、受信できたBLEビーコンの信号強度より作業員位置を推定する方式とした。

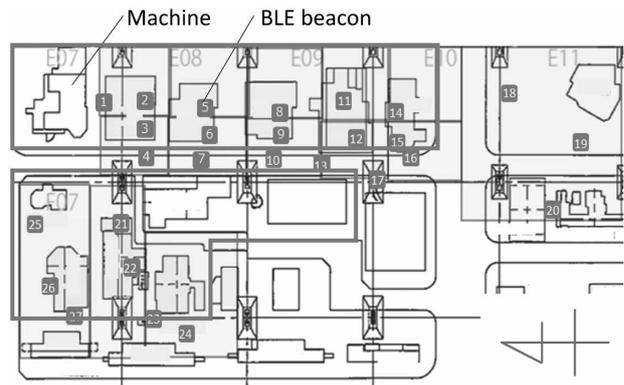


図9 実験対象現場  
Fig.9 Experimental site



Machine operation status	Worker position status	Situation status
Stop	Absence	00_Waiting for worker
Operation	Absence	01_Automatic Operating
Operation	Control panel	02_Operating while Control
Operation	Setup location	03_Operating while Setup
Stop	Control panel	04_Waiting for control
Stop	Setup location	05_Waiting for setup

図10 状況可視化の例  
Fig.10 Example of visualizing operational status

実験対象の現場を図9に示す。約1,800 m<sup>2</sup>（東西32 m × 南北56 m）のエリアに設置された12台の加工機周辺に27個のビーコンを設置し、昼夜勤あわせて9名の作業員にスマートフォンを携帯させ、データを収集した。

#### 3.2 分析手法と実験結果

状況可視化の例を図10に示す。加工機の稼働状態としては「加工・停止・異常」の3種類とし、作業員の位置情報も各加工機に対して「不在」「操作盤側」「段取り場側」の3種類にラベリングして、それらの組み合わせに対して状況を整理した。例えば、作業員が不在で加工機が停止している場合は「人待ち」で、作業員が来れば加工できる可能性があり、改善可能性のある状態、作業員

Machine	Operating rate	(Automatic op. rate)	Worker waiting rate	Other (setup, etc.)
A	76%	(100%)	21%	3%
B	59%	(100%)	41%	0%
C	28%	(66%)	48%	24%
D	72%	(21%)	7%	21%

図11 稼働実績データの例  
Fig.11 Example of operational performance data

が不在で加工機が稼働している場合は「自動稼働中」で最も生産性の高い状態、などと定義し、可視化を行った。可視化の実験結果を図11に示す。自動稼働率が高い加工機A, Bは、自動加工しているか人待ちをしているかであり、いかに切れ目なく稼働させるかが改善ポイントであることが推定されるのに対し、稼働や段取りなどで多くの人手を割いている機械C, Dについては、人作業の生産性向上が課題であることが分かる。

**むすび** = 当社の多品種混流生産であるが故の多台持ちが難しいという課題を紹介し、その課題に対してIoT技術を活用し工作機械から得られるプロセスデータを用いて、異常を検知して自動的に工作機械を停止する適応制

御システムを構築し、実装した成功例を示した。多台持ちの生産性分析では、機械稼働情報に作業員位置情報を組み合わせることにより、より詳細に分析可能なことを示せたものの、作業員へのタイムリーな情報提供までは至っていない。今後も多品種少量混流生産は続くだけでなく、労働力の確保も年々難しくなっていることから、いかに少ない人数で多くの機械を安定的に稼働させるかという課題はますます重要になってくることが予想される。このため、本PFの活用幅を広げ、作業員へタイムリーに最適な動きを指示できるような人・機械の生産ラインをトータルにとらえた統合システムを実現し、ものづくり現場を変えていくDX（システム化 = D、業務フロー変革 = X）を目指していきたい。

#### 参考文献

- 1) 終 紫乃ほか. 原価計算研究. 2017, Vol.41, No.1, p.76.
- 2) 石田明久ほか. 情報処理学会論文誌コンシューマ・デバイス&システム. 2019, Vol.9, No.3, p.10-19.
- 3) 榎本俊一. 商学論纂(中央大学). 2018, Vol.60, No.3-4, p.391-474.
- 4) 妻鳥陽子ほか. 日本機械学会生産システム部門講演会講演論文集. 2019, p.611.
- 5) 西田 勇ほか. 日本機械学会論文集. 2018, Vol.84, No.857, p.17.
- 6) 村越智弘ほか. 2022年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集. p.408.
- 7) 西川顕二ほか. 2021年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集. p.235.

(論文)

# 熱画像解析による連続測温法を適用した高炉溶銑温度予測技術の開発

加茂和史\*<sup>1</sup>・森居数広\*<sup>1</sup>・桑名孝汰\*<sup>1</sup>・檜崎博司\*<sup>1</sup> (工学博士)・笠井昭人\*<sup>2</sup> (工学博士)・原 大悟\*<sup>3</sup>

## Prediction Technology for Blast Furnace Hot Metal Temperature, Adopting Continuous Measurement and Analysis of Thermal Image at Tap Hole

Kazufumi KAMO・Kazuhiro MORII・Kota KUWANA・Dr. Hiroshi NARAZAKI・Dr. Akito KASAI・Daigo HARA

### 要旨

高炉操業においては、目標温度範囲の溶銑（ようせん）を計画どおりに安定生産することが常に求められている。近年の主流である大型高炉では、炉の熱容量増大によって溶銑温度変化の時定数も大きくなる。炉熱の変化を見誤り熱調整アクションが遅延すれば重篤な炉況不調を招くこともあり、操炉には適切なタイミングで適正なアクションを行う高度な判断能力が要求される。

当社では、究極の安定操業（冷え込み・吹き抜けゼロ）実現を目的に、炉況（炉熱と炉内通気性）を予測し制御するAI操炉<sup>®</sup>を開発中である。その基盤技術が溶銑温度の予測技術である。本稿では、従前の間欠的な熱電対、および熱画像解析により連続測温する新計測端の両結果を効果的に適用することで、溶銑温度予測の高精度化を達成した内容を報告する。

### Abstract

A blast furnace must steadily produce hot metal in a target temperature range as planned. In recent mainstream large blast furnaces, the time constant for the temperature change of hot metal also increases with the increase in the furnace's heat capacity. Inaccurate estimation of the changes of temperature in furnace and delays in heat regulation action can lead to seriously poor furnace conditions. Therefore, furnace operation requires a high level of judgment ability to take the appropriate actions at the right time. Kobe Steel is currently developing AI SOURO to predict and control furnace conditions (temperature and gas permeability in furnace) to achieve ultimately stable operation (without tapping trouble or channeling.) The fundamental technology for this is one for predicting hot metal temperature.

This paper reports on achieving high accuracy in hot metal temperature prediction by effectively applying the results of both conventional intermittent thermocouple measurements and continuous temperature measurements using new measuring equipment based on thermal image analysis.

### 検索用キーワード

製鉄、製銑、高炉、炉熱予測、放射測温、熱画像解析、プロセス制御、AI操炉<sup>®</sup>

まえがき＝高炉は鉄鉱石とコークスを炉頂から交互に層状に装入し、炉下部の羽口から熱風と微粉炭を吹き込んで鉄鉱石を還元・溶解することで溶銑を製造する、固気向流移動層型の巨大な反応容器である。高炉の安定操業においては、炉況（溶銑温度に代表される炉熱、および炉内を上昇する還元ガスの通気性）の変動を適正範囲に制御することが肝要であるが、炉況制御の重要な役割を担っているのが“操炉”と呼ばれる操業者である。操炉は膨大な計測データに基づいて炉況の変化を予測し、例えば、溶銑温度については管理値範囲内に収まるよう送風温度や送風湿度を調整するなどの熱調整アクションを実行する。反応器として極めて大型化した近代の高炉では、炉の熱容量も増大し、熱調整アクションや炉内反応が溶銑温度の変化として顕在化するまでの時定数も大きくなる。炉熱の変化を見誤り、熱調整アクションが遅延・不足した場合、管理値外への溶銑温度低下やさらに重篤な炉況不調を招く場合もある。そのため、操炉には

高度で正確な判断が要求される。とくに近年、コスト低減やCO<sub>2</sub>削減などの環境要因から低コークス比・低還元材比操業が望まれており、炉況の悪化を招き易い高難度な操業条件のもと適切な操業判断の重要性はより一層高まっている。

このような背景のもと、高炉の安定操業やコークス比低減に寄与すべく、当社では数学モデル・新規計測端・AI技術を融合し、炉況を予測し制御する“AI操炉<sup>®</sup>”の開発に取り組んでいる<sup>1)</sup>。その基盤となる技術として、溶銑温度の予測技術を開発した。本稿では、以前より溶銑温度を間欠的に測定していた熱電対と新規開発した連続的に測温可能な計測端を組み合わせることで、溶銑温度予測の高精度化を達成した内容を報告する。

### 1. 従来の溶銑温度予測技術

溶銑温度の予測には現在の炉熱を正確に把握する必要

\*<sup>1</sup> 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター \*<sup>2</sup> 鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター 製鉄開発部 \*<sup>3</sup> 鉄鋼アルミ事業部門 加古川製鉄所 製鉄部

があるが、高炉内部は高温・高圧条件下にあり、炉内を直接計測することは難しい。そのため、計測可能箇所である炉壁や炉頂部などに圧力計や温度計など多数の計測端を設置し、操炉はこれら計測端情報を元に現在の炉況を想定し、数時間先の炉況変化を予測して熱調整アクションを実施している。炉況不調の兆しを見逃し、アクションタイミングやアクション内容を誤判断すると、冷え込み（炉内鉄凝固）による長期の生産停止という最悪の事態を招く場合もある。

このような背景のもと、計測端情報を元にデータ解析技術や数学モデルを活用して溶銑温度を予測・制御するという取り組みが古くから行われてきた。例えば、松田ら<sup>2)</sup>は操業ノウハウをルールベースに組み込んだエキスパートシステム的アプローチにより操炉に近いレベルでの操業判断が可能となると報告している。しかし、高炉固有の特性にシステムを合わせ込んだり、諸元変更や原料性状変化に応じてルールベースの内容を継続的に見直ししたりすることが運用上困難といった課題があった。

近年は、計算機の性能向上や計算手法の進展を背景に、モデルの合わせ込みを自動化ないし効率化することが可能となり、鉄鋼各社においても操業環境の変化に追従可能な適応的な予測や制御の検討など、溶銑温度予測技術の高度化に向けた取り組みが活発化している。例えば、橋本ら<sup>3)</sup>は高炉の非定常二次元モデルを元に、誤差を熱物質収支から考察してパラメータ調整にて補う方法を提案している。また、夏井ら<sup>4)</sup>は2変数を制御するPID制御やセンサ情報を追加することでモデル予測制御の高精度化につなげた事例を報告している。

## 2. 新計測端とAIを融合した溶銑温度予測技術の開発

### 2.1 溶銑温度予測技術の概要

今回開発した溶銑温度予測技術のコンセプトを、以下の①～③に示す。

- ①データから溶銑温度予測モデルを直接構築するデータ駆動型アプローチも考えられたが、操炉の考え方に沿ったわかりやすさと温度変化原因の説明性を重視し、熱収支に基づく物理モデル的アプローチを採用した。
- ②熱収支に関わる炉内影響因子の変化は時間遅れなどの動特性をともなって溶銑温度に影響をおよぼすため、その関係を過渡応答モデルで表現した。操業実績データを用いて過渡応答モデルのパラメータをAIで逐次オンライン学習することで、諸元変更や炉況変化に追従した予測精度の維持を可能とした<sup>5)</sup>。
- ③従来、溶銑温度は浸漬型熱電対を用いて間欠的に測定していたため、予測直前の溶銑温度情報が数十分欠損する時間帯が存在した。過渡応答モデルの学習において過去の溶銑温度はAI予測の教師データであるため、溶銑温度情報の欠損は予測精度の低下につながる。そこで、出銑画像（熱画像）を数秒間隔で撮像し、その輝度情報を短周期で溶銑温度へ換算する技術（連続的な放射测温システム）を開発し<sup>6)</sup>、溶銑温度情報欠損にともなう問題点を解決した。

各開発内容について、以下で詳細説明する。

### 2.2 熱収支モデル

熱原単位変化に着目した熱収支モデルを溶銑温度予測技術のベースとした。熱原単位変化量として、熱調整アクションに起因するもの $\Delta Q_1$ [J]と、炉内反応と炉体への抜熱に起因するもの $\Delta Q_2$ [J]を定義した。

$\Delta Q_1$ と $\Delta Q_2$ の合計を $\Delta Q$ [J]とする（式（1））と、溶銑温度の変化量 $\Delta HMT$ [K] (Hot Metal Temperature) は式（2）で求めることができる。

$$\Delta Q = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta HMT = \frac{\Delta Q}{W_{HM} \cdot C_p} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $W_{HM}$ [kg]：炉内残銑量、 $C_p$ [J/(kg・K)]：溶銑の比熱

### 2.3 溶銑温度予測モデルの学習

溶銑温度を求める際の逐次オンライン学習法について、その考え方を説明する。

上記の熱原単位変化量は、時間遅れなど動特性をもって溶銑温度変化に影響をおよぼす。各熱原単位変化量の溶銑温度への影響度合いは定性的・経験的には知られているものの、現在の炉況に合わせて溶銑温度を精度良く予測するには、とくに直近の過去データに合わせた過渡応答モデルのパラメータ逐次最適化が重要となる。そこで過渡応答曲線を図1に示すシグモイド関数で表現し、下記三つのパラメータ $\theta$ [-] ( $\theta_1$ ：影響係数、 $\theta_2$ ：遅れ時間、 $\theta_3$ ：過渡時間)を定義し、逐次最適化した。

今回は、過去1日強の実績データを用いて、10分間隔で学習し、将来5時間の溶銑温度を予測した。操炉が日常的に実施する送風温度変更や送風湿度変更などの熱調整アクションが溶銑温度変化に反映されるまでには2～3時間を要するが、これら至近での熱調整アクション影響を含め5時間先の溶銑温度予測があれば、操炉判断を十分に支援可能であると考えた。

図2を用いて、溶銑温度の予測スキームを説明する。各時刻での熱原単位変化量 $\Delta Q_1$ と $\Delta Q_2$ は、おのおのがシ

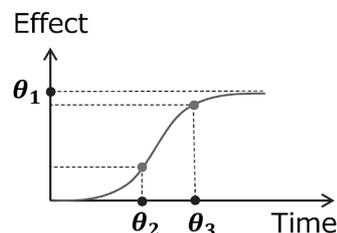


図1 過渡応答モデルにおけるパラメータ  $\theta$   
Fig.1 Parameter  $\theta$  of transient response model

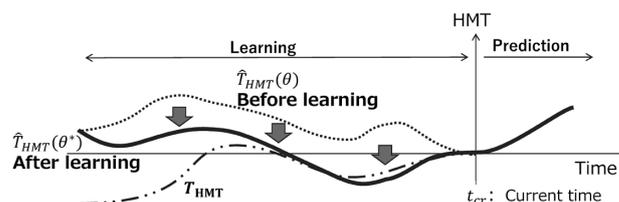


図2  $t_{cr}$ における溶銑温度の予測スキーム  
Fig.2 HMT prediction scheme at  $t_{cr}$

グモイド状の過渡応答モデルの入力値として溶銑温度変化 $\Delta HMT$ に反映される。熱原単位変化量の影響分を、過去 $\tau$ 時間分の学習期間および将来5時間にわたって合計することで、時間軸に沿った $\Delta HMT$ が計算できる。これに予測時刻 $t_{cr}$ での溶銑温度を加味することで、学習および予測期間の推定溶銑温度 $\hat{T}_{HMT}(\theta)$ が算出される。なお、 $\hat{T}_{HMT}(\theta)$ は、各熱影響因子の過渡応答モデルのパラメータ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ )に依存する。そこで、過去 $\tau$ 時間分の推定溶銑温度 $\hat{T}_{HMT}(\theta)$ と実績溶銑温度 $T_{HMT}$ について式(3)の計算値が最小になるようにパラメータ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ )を逐次更新する。

$$\int_{t_{cr-\tau}}^{t_{cr}} w(t) (T_{HMT} - \hat{T}_{HMT}(\theta))^2 dt \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $t_{cr}$ は予測時刻、 $T_{HMT}$ は実績溶銑温度である。 $w(t)$ は誤差重みで、直近の一致精度を重視するという考え方にもとづき、過去に遡って値を小さくしている。そして、式(3)が最小となる時のパラメータ $\theta^*$ を用いて計算された5時間先までの溶銑温度 $\hat{T}_{HMT}(\theta^*)$ を予測結果とする。

パラメータ更新のための学習期間は、学習に十分なデータを得るという観点とともに、オンラインでの計算時間を考慮して決定した。いっぽうで、その期間内で操業データの変化が小さい場合、学習期間の特定データに過剰適合し、適正なパラメータが学習できない事例が散見された。そこで、①評価関数に従来値からの変化幅の制約項を追加する、②各パラメータ値の範囲にあらかじめ制約条件を設ける、などの解析上の工夫を実施した。

## 2.4 出銑画像を用いた溶銑温度の連続的放射測温システム

本研究における溶銑温度の予測精度向上のポイントは、熱画像解析による放射測温技術によって従来の熱電対測温の欠損期間、とくに直近の予測時点に至るまでの溶銑温度の値を補完し、欠損なく溶銑温度の値を考慮できるようにした点にある。熱電対による測温は出銑孔から一定距離離れた場所で行われるため、溶銑が出銑孔から計測点まで移動する間に温度低下するが、とくに出銑初期は溶銑が流れる樋(とい)が冷えていることもあり、溶銑温度が低めに計測されやすく、焔熱を正確には反映していないこともありうる。いっぽう、放射測温では出銑直後に(樋を流れる前に)測温するため、計測点までの温度低下影響を受け難い利点も有している。

今回開発した放射測温方法の概要を図3に、放射測温を用いた溶銑温度の計算フローを図4に示す。①高炉出銑孔から数m/sで吐出される溶銑・溶さいの混相噴流(以降、出銑さい流)を高速カメラ(図3(a))で撮像する。②撮影された画像において、出銑さい流が明瞭な所定サイズの領域を解析対象として抽出(図3(b))する。出銑さい流の熱画像は高温溶融状態にある溶銑と溶さいの放射率の差により、溶銑は暗く、溶さいは明るいマール模様を呈する。③対象領域内の輝度分布を求め(図5)、最も暗く映る箇所が最も確からしく溶銑の輝度を示すものと仮定し、最小輝度を抽出する。この輝度値から式(4)に示す放射測温の原理を用いて溶銑温度 $T_{HMT}$ を算出する。

$$T_{HMT} = a \left( \frac{C_2}{\lambda \ln(c/V)} - 273.15 \right) + b \dots\dots\dots (4)$$

ここに

$\lambda$  : 観測波長 [m]

$V$  : 観測画像輝度 [-]

$C$  : 第一放射定数に基づく係数 (=  $5.0 \times 10^7$ ) [-]

$C_2$  : 第二放射定数 (=0.014) [K·m]

$a, b$  : 温度換算係数 [-]

本技術を実機適用した場合、レンズの汚れやカメラ向きの変化などによって温度換算係数 $a, b$ を変更する必要がある。④そこで、間欠的な熱電対温度測定時点において、過去一定点数の熱電対温度を用いて、熱電対温度と放射測温値の誤差が小さくなるよう温度換算係数をオンラインで逐次較正する。なお、次の熱電対温度が計測されるまではこの時点で較正した温度換算係数を用いる(④')。⑤それらの温度換算係数を用いて、逐次温度を算出する。

実際の測定場所は実機の出銑孔近くであり、溶銑などの高温溶融物からの輻射(ふくしゃ)熱や飛散物・粉じんなどが存在し、過酷な環境下にある。汎用的なカメラを設置した場合には輻射熱を受けてカメラ本体の温度上昇による故障や、粉じんなどがレンズに付着する光学障害によって、数日程度で出銑画像が取得できなくなる場合もある。本研究では、独自のカメラ冷却機能や飛散

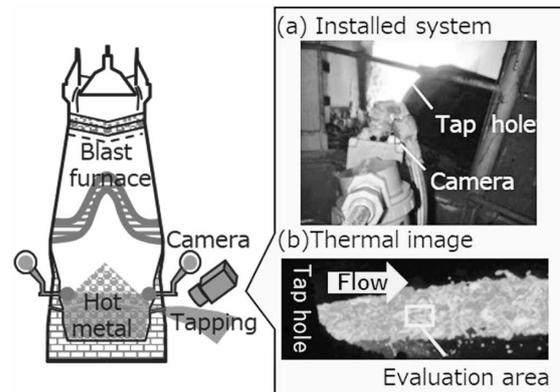


図3 出銑熱画像を用いた放射測温方法の概要  
Fig.3 Outline of radiation measurement of HMT using thermal image at tap hole

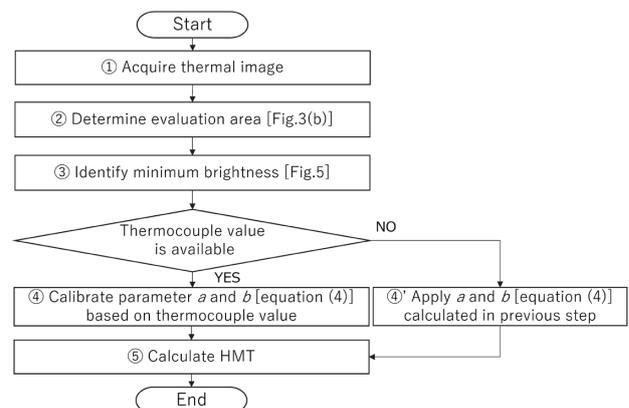


図4 放射測温を用いた溶銑温度の計算フロー  
Fig.4 Flowchart of calculating HMT with radiation measurement

物・粉じんを吹き飛ばすエアパージ機能など機構上の工夫により、半年以上メンテナンスフリーで良好な熱画像を取得可能な安定測温を実現した。

また、計測上の代表的な外乱としては熱画像への煙の映り込みがある。煙が発生すると輝度が低く計測されるため、測温誤差が生じる。そこで、煙発生時には溶銑部輝度の時間変動が大きくなる現象を利用し、煙の有無を常時判定して煙画像を除去するなどの信号処理上の工夫によっても測定の安定性を担保している。

図6に放射測温結果の一例を示す。放射測温と熱電対測温との温度差の標準偏差は10℃以下で良い一致を示しており、また熱電対が測温できていない時間帯も連続的に測温できている。

## 2.5 溶銑温度予測における放射測温システムの活用

放射測温システムの活用方法に関して、図7を用いて説明する。放射測温値  $T_{Rad}$  が必要とされるのは、熱電対による溶銑温度情報が欠損する  $t_{last}$  (熱電対の最終計測時刻) から  $t_{cr}$  (予測時刻) までの時間帯である。そこで、直近の熱電対計測時点以降の欠損期間  $[t_{last}, t_{cr}]$  を放射測温値で補完するスキームを構築した。この欠損期間において、放射測温値  $T_{Rad}$  を取得できたか否かに応じて二つの方法(方法1, 方法2)を使い分けて予測を行った。

放射測温値が取得できた場合(方法1, 図7(a))は、最終の熱電対測温結果  $T_{Thr}(t_{last})$  に対して放射測温値  $T_{Rad}$  の変化と同等の変化が生じると仮定し、現時点  $t_{cr}$  までの溶銑温度を推算した。このようにして現時点までの学習期間  $[t_{cr}-\tau, t_{cr}]$  の溶銑温度情報を得たうえでパラメータ学習を行った。

画像計測上の問題により放射測温値が取得できなかった場合(方法2, 図7(b))は、欠損期間の溶銑温度を下記I~IVの手順で推定し、パラメータ学習を行った。そのスキームを図8に示す。

I. 期間  $[t_{cr}-\tau, t_{last}]$  における熱電対測温結果を入手す

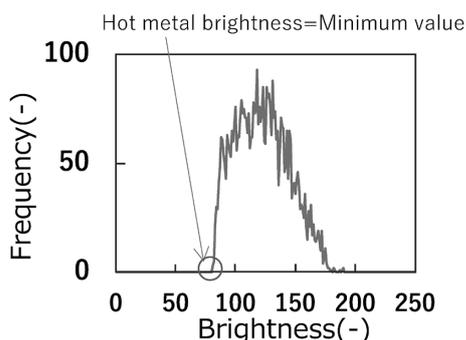


図5 溶銑代表輝度の決定方法  
Fig.5 How to determine hot metal brightness

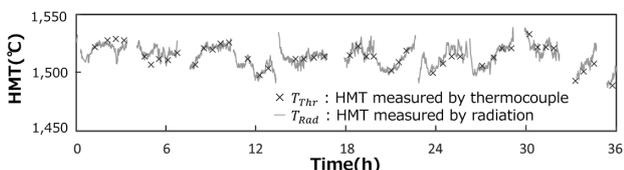


図6 溶銑温度計測値の比較  
Fig.6 Comparison of hot metal temperatures

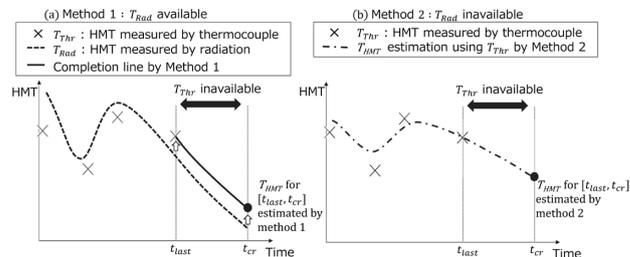


図7 方法1と方法2による  $[t_{last}, t_{cr}]$  での  $T_{HMT}$  の推定  
Fig.7 Method 1 and 2 estimation of  $T_{HMT}$  for  $[t_{last}, t_{cr}]$

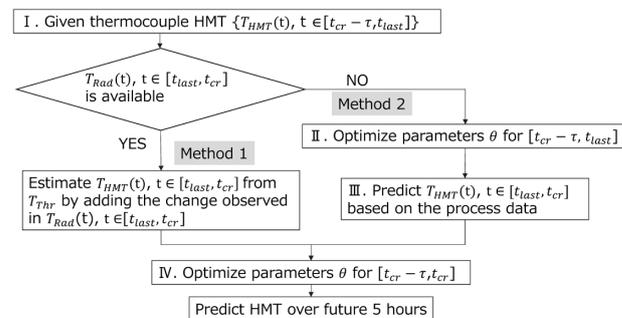


図8 溶銑温度予測スキーム  
Fig.8 HMT prediction scheme

る。

- II. 上記温度を元に最適化計算を行い、過渡応答モデルのパラメータ  $\theta$  を最適化する。
- III. 熱電対の欠損期間  $[t_{last}, t_{cr}]$  では、IIで求めたパラメータ  $\theta$  による過渡応答モデルとその間の熱原単位変化量を用いて溶銑温度を推定する。
- IV. IIIにより全学習期間  $[t_{cr}-\tau, t_{cr}]$  に必要な溶銑温度を求めたうえで、改めて過渡応答モデルの学習を行い、将来5時間先の溶銑温度を予測する。

## 3. 実機適用結果

方法2で5時間先の溶銑温度を予測した結果を図9に示す。①予測時刻  $t_{cr}$  で、モデルは将来5時間にかけて溶銑温度HMTの管理下限以下への低下を予測している。②操炉が同タイミング以降で複数回の送風温度BT (Blast Temperature) の上昇アクションを実施することで、③溶銑温度の実測値は管理範囲内に維持することができた。

次に、熱電対の欠損期間  $[t_{last}, t_{cr}]$  が約5時間と長い事例で、2種類の予測結果を比較して図10に示す。欠損期間における方法2での溶銑温度変化を見ると、 $t_{last}$ 直前でのBT上昇アクションを反映して溶銑温度が上昇した後に、他の炉内影響因子  $\Delta Q_2$  の影響で温度低下している。方法1の放射測温した溶銑温度も、上昇後に低下する同様の傾向を示しているが、予測時刻  $t_{cr}$  では方法1の方が方法2よりも低い温度となっている。①その結果、5時間先の溶銑温度予測は、方法1の方が管理範囲から大きく乖離(かいり)した低い値を示している。②予測タイミングの後に操炉が溶銑温度を上昇させる送風温度BT上昇アクションを複数回取ったため、③実際の溶銑温度は管理範囲内に回復した。②の大幅なアクション実績と

③の炉熱変化の結果から、溶銑温度は予測タイミング時点で比較的大きな低下傾向にあったことが分かる。より低い温度予測をし得た放射测温値による補完方法（方法1）がより安全側での予測ができたと言えるが、これは新規開発した放射测温計により熱電対温度欠損期間での大きな温度低下を検知できた成果である。いっぽう、方法2による溶銑温度予測についても操炉に対して適正アクションを促すことを図9で確認できており、放射测温値が適用できない場合は方法1の有効なバックアップスキームとなりうる。

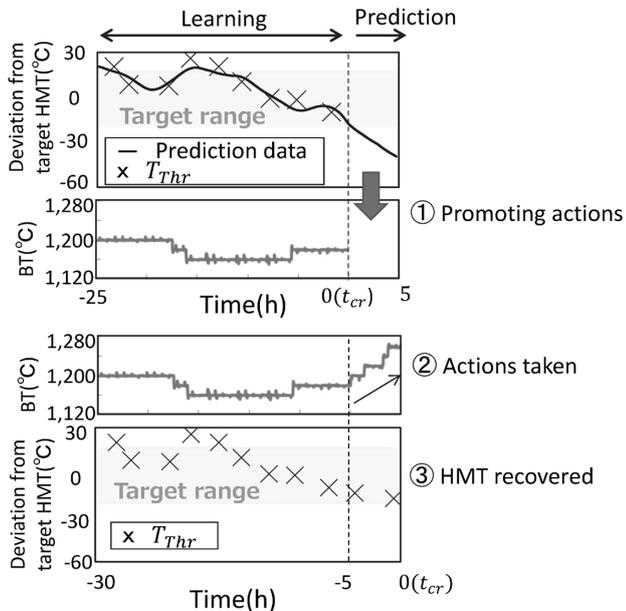


図9 方法2による予測と操業結果

Fig.9 HMT prediction by Method 2 and operational results

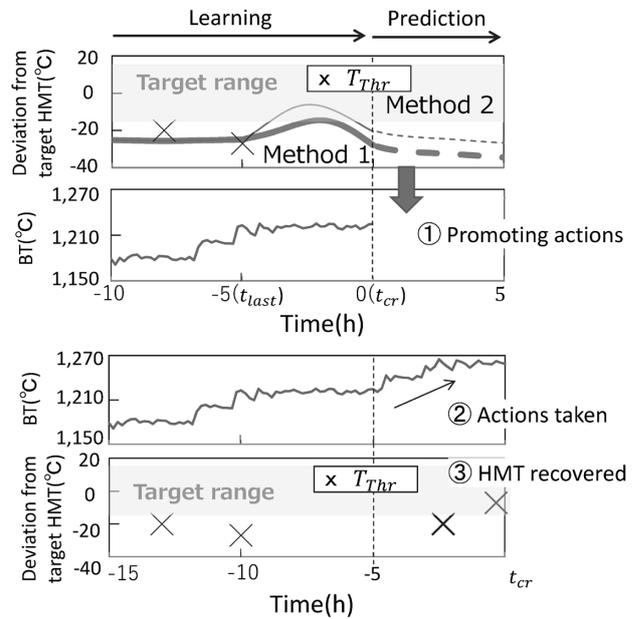


図10 方法1と方法2の予測比較と操業結果

Fig.10 Comparison of Method 1&2 predictions and operational results

むすび = 本稿では溶銑温度予測技術の開発について報告した。熱収支を考慮した過渡応答モデルのパラメータをAIによって逐次最適化し、さらに入力情報として熱電対温度と放射测温値を適切に組み合わせることで高精度な溶銑温度予測が可能となった。今後は、本予測技術を応用した制御技術を開発し、さらに通気性を含めた炉況制御を行うAI操炉<sup>®</sup>の実現を目指す。

#### 参考文献

- 1) 神戸製鋼所, 「AIによる高炉の炉熱予測システム」の運用開始及び「AI操炉<sup>®</sup>」構想について. [https://www.kobelco.co.jp/releases/1205231\\_15541.html](https://www.kobelco.co.jp/releases/1205231_15541.html), (参照2023-12-13).
- 2) 松田浩一ほか, システム制御情報学会論文誌(ファジィ推論を用いた大規模分布系変動予測とその高炉炉熱予測制御への応用), 1991, Vol.4, No.2, p.86-94.
- 3) 橋本佳也ほか, 日本鉄鋼協会第178回秋季講演大会概要, Vol.32, 2019-9-11/13, 日本鉄鋼協会, 2019, p.608.
- 4) 夏井琢哉ほか, 日本鉄鋼協会第186回秋季講演大会概要, Vol.36, 2023-9-20/22, 日本鉄鋼協会, 2023, p.444.
- 5) 加茂和史ほか, 日本鉄鋼協会第180回秋季講演大会概要, Vol.33, 2020-9-16/18, 日本鉄鋼協会, 2020, p.90.
- 6) 迫田尚和ほか, R&D神戸製鋼技報, 2023, Vol.72, No.2, p.48-52.

(解説)

# 鋼板製造工場の冷却工程への深層ニューラルネットワークを用いた巻取温度制御技術の適用

佃 岳洋\*<sup>1</sup>・原田 駿\*<sup>1</sup>・樋口真之\*<sup>2</sup>・長谷川裕之\*<sup>2</sup>・逢坂武次\*<sup>3</sup>・森居数広\*<sup>3</sup>

## Application of Coiling Temperature Control Technology Using Deep Neural Network to Cooling Process in Steel-plate Manufacturing Plant

Takehiro TSUKUDA・Shun HARADA・Masayuki HIGUCHI・Hiroyuki HASEGAWA・Taketsugu OSAKA・Kazuhiro MORII

### 要旨

熱間圧延の冷却工程における巻取温度は鋼板の機械的特性を決定する重要な要素であるため、非常に高い制御精度が要求されている。これを実現するためには、鋼板に注水する冷却水量を決定するための鋼板の温度予測モデルを高精度化することが不可欠であり、今回、AI手法の一つである深層ニューラルネットワークを用いた温度予測モデルを開発・導入した。その結果、ハイテン系の鋼板を中心に巻取温度の制御精度が大幅に向上した。さらには、操業部門において新しい予測モデルの効率的かつ柔軟な運用が定着化しており、スタッフや製造現場のオペレータの業務において大きな変革が起きている。

### Abstract

In the cooling process of a hot strip mill, the coiling temperature is a crucial factor that determines the mechanical properties of steel plates and therefore requires extremely high control accuracy. To achieve this, it is essential to improve the accuracy of the temperature prediction model for the steel plates, which determines the amount of cooling water to be injected. In this study, a temperature prediction model using a deep neural network, one of the AI methods, has been developed and introduced. As a result, the control accuracy of the coiling temperature, especially for high-tensile steel plates, has significantly improved. Furthermore, in the operational department, an efficient and flexible operation of the new prediction model has been established, leading to significant changes in the tasks of staff and operators at manufacturing sites.

### 検索用キーワード

熱間圧延, 巻取温度, CT, AI, 深層ニューラルネットワーク, 技術継承

まえがき = 熱間圧延の冷却工程は当社ビジネスの主力の一つである薄板製品<sup>1), 2)</sup>の品質・機械的特性に多大な影響をおよぼす。中でも、巻取機前の巻取温度 (Coiling Temperature; CT) は、最も重要な要素であり、高精度に制御することが強く求められている。CTを制御するために、冷却工程専用のプロセスコンピューター (以下プロコンと呼ぶ) において、鋼板の温度予測モデルに基づき、冷却設備から鋼板に注水する冷却水量を決定している。しかし従来、鋼板温度の高精度な予測、かつその維持が難しく、CTの制御精度低下が問題となっていた。そこで今回、この課題を解決するために、深層ニューラルネットワーク<sup>3)</sup>を用いた温度予測モデルを開発・導入した。

本稿では、深層ニューラルネットワークを用いた巻取温度制御開発の経緯・概要や運用方法、さらには開発・導入による操業部門での業務の変革について述べる。

## 1. 深層ニューラルネットワークを用いた巻取温度制御開発の経緯

### 1.1 巻取温度制御の概要

熱間圧延工程での仕上圧延機と巻取機の間にある冷却

設備の概要を図1に示す。本冷却設備では、鋼板の上下から注水する複数の冷却ヘッダーが設けられており、各ヘッダーには開閉の動作を行うシリンダーバルブが取り付けられている。プロコンは、仕上圧延機出側での鋼板温度や板厚、搬送時間の情報を用いて仕上圧延機出側から巻取機間での鋼板の温度降下量 (以下: 温度降下量) を予測する機能を有している。この温度降下量の予測値を基に鋼板全長にわたって目標CTと一致するように開閉するバルブ本数および位置 (以下: 開閉バルブパターン) を周期的に繰り返し計算している。

### 1.2 従来制御の問題点

従来制御では、温度降下量の予測に、鋼板の熱伝導方程式に基づく物理モデルを用いていた<sup>4)</sup>。しかしながら、繰り返し計算の時間制約の観点から、差分法を用いて熱伝導方程式を厳密に計算することができず、その計算結果を基にした近似モデルを用いていた。近似モデルでは、鋼板の板厚方向の復熱現象を表現しきれないなどの問題があり、精度向上を図るには限界があった。また、従来の熱伝導方程式に基づくモデルでは、精度維持のためのパラメータ調整だけでなく、予測モデル構造の改良を必要とする場合もあった。さらには、本改良を行う

\*<sup>1</sup> 鉄鋼アルミ事業部門加古川製鉄所薄板部 \*<sup>2</sup> 鉄鋼アルミ事業部門加古川製鉄所プラントシステム部 \*<sup>3</sup> 技術開発本部デジタルイノベーション技術センター

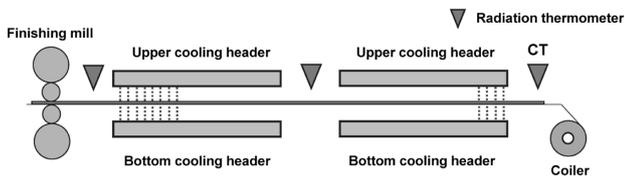


図1 冷却設備の概要  
Fig.1 Overview of cooling equipment

には専門的な知識や技術を要するため、対応不十分により、CTの制御精度確保が困難な製品もあった。この問題に対応するため、製造現場のオペレータは、特定の製品に対し、プロコンで計算され開閉バルブ本数への増減方法を記した作業指示書をもとに作業を行っていた。それでもなお、異なる作業指示書の製品が連続圧延される場合、オペレータによる増減対応が間に合わない、作業指示書がない一般の製品に対してバルブの増減を戻し忘れるなどといった事例も発生し、オペレータの作業負荷が高くなっていた。さらに、予測モデルのパラメータ調整が、スタッフの属人的なノウハウに依存しており、新商品の高強度ハイテン材や冷却条件変更時など従来とは異なる条件で通板する場合、柔軟かつ迅速な対応が困難であった。

### 1.3 巻取温度制御におけるAI手法適用によるメリット

上記で述べた問題を解決するためには、以下三つのメリットから温度降下量予測にAI手法の一つである深層ニューラルネットワークを適用することが有効であると考えた<sup>5)</sup>。

- (1) シンプルなネットワーク構造で単純な計算処理を行うため、差分法より計算負荷が小さく、繰り返し計算の時間制約を受けない。
- (2) 入力されたデータに対し、正しい出力結果を得るようにネットワーク内の重みなどのパラメータを適正化する。(以下、学習という。) そのため、物理現象が非常に複雑である鋼板先端・後端などの非定常部に対し、定式化する必要がなく、適正化したパラメータを用いたネットワークによって予測を行うため、精度良く予測することができる。
- (3) モデルの調整において、調整パラメータを内包した物理モデルとは異なり、重みなどのパラメータを変更するだけで予測できるため、メンテナンス性が良い。

いっぽう、デメリットとしては、予測モデルがブラックボックスであるため、温度予測の挙動が分かりづらいことが挙げられるが、シミュレーションによる評価環境を構築することで克服できると考えた。

これらのメリット・デメリットを踏まえて、深層ニューラルネットワークを活用した温度予測モデルを開発することとした。

## 2. 深層ニューラルネットワークを用いた巻取温度制御の概要および運用方法

### 2.1 深層ニューラルネットワークを用いた温度予測モデルの概要

今回開発した深層ニューラルネットワークのモデル構造を図2に示す。板厚や製品の成分濃度などの材料要

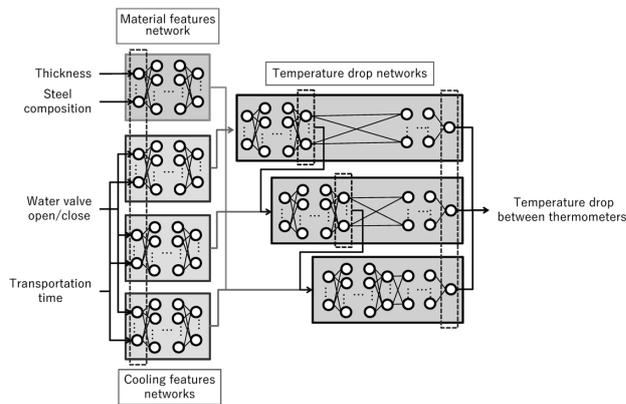


図2 深層ニューラルネットワークの構造  
Fig.2 Deep neural network architecture

表1 モデルの分割条件  
Table 1 Conditions of dividing models

Model No	Coiling temperature (°C)	Thickness of steel sheets (mm)	Concentration of steel components (%)
1	$X_1 \sim X_2$	$Y_1 \sim Y_2$	$Z_1 \sim Z_2$
2	$X_3 \sim X_4$	$Y_3 \sim Y_4$	$Z_3 \sim Z_4$
...	...	...	...
N	$X_i \sim X_j$	$Y_i \sim Y_j$	$Z_i \sim Z_j$

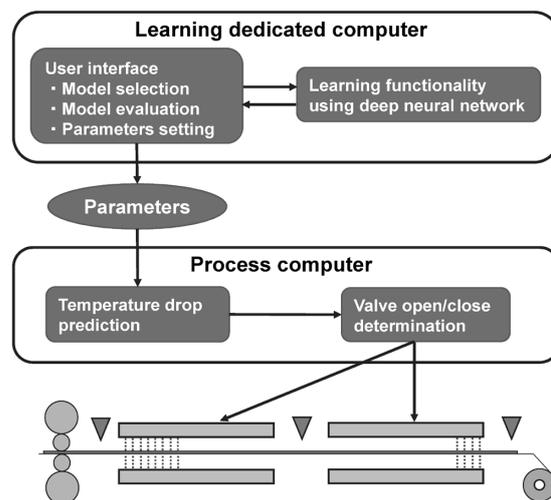


図3 機能構成の概要  
Fig.3 Overview of functional configuration

因と、開閉バルブパターンや搬送時間などの作業要因を入力値として、温度降下量を予測している<sup>6)</sup>。

また、表1に示すように、CTや板厚、および炭素やシリコンなどの製品の成分濃度に対して、範囲を与える形式でモデルを分割し、それぞれモデルNo.で管理している。本方式を採用することで、CTや板厚、成分濃度を広範囲に網羅したモデルと特定の範囲に絞り込んだ詳細なモデルを混在させることが可能となる。これにより、モデルの汎用性確保と精度向上を図っている。

### 2.2 新制御の機能構成の概要

図3に示すのは、今回開発した新制御の機能構成の概要であり、プロコンとそれに付帯するモデル学習計算機で構成されている。プロコンでは、深層ニューラルネットワークモデルを用いた温度降下量の予測を行い、開閉バルブパターンを決定している。いっぽう、モデル学習計算機は深層ニューラルネットワークモデルを学習す

る専用計算機であり、スタッフが計算機を操作し、学習を実行する。本計算機はAIに関する知識やプログラミング技術を有していなくても学習を実施できるユーザインタフェースを備えており、スタッフは任意のタイミングでニューラルネットワークの学習を実行し、適正化したパラメータをプロコンに転送して登録することができる。

### 2.3 新制御への切替方針

従来制御での過去実績データを用いて、全モデルNo.のパラメータを決定した。そして、従来制御と比較して開閉バルブパターンがおおむね同じで、かつ制御精度が悪かった部分が改善方向に変化することを確認し、2021年9月に新制御方式に切り替えた。

従来制御ではモデルの分割数が非常に多く、まれにしか通板されない製品は制御精度が悪くなる傾向にあった。これを改善するため、可能な限りCTや板厚などの条件を広範囲にカバーするモデルを作成することを基本方針とした。ただし、この方針の場合、汎用性は高いが制御精度は劣る傾向にあるため、より高い制御精度が要求されているハイテン系鋼種に対しては、個別にモデルを作成することにした。

### 2.4 新制御におけるモデル調整方法

操業部門では、今回開発したモデル構造や機能構成の特性を考慮して、下記に示す手順をもとに調整を行っており、全ての製品に対し、対応できている。

#### Step 1：[調整対象モデルの選択]

最初に調整を実施する対象のモデルNo.を選択する。選択方法として、主に以下の三つのCaseがある。

#### Case 1：[条件を変更せず、既存モデルNo.を選択]

既に条件の範囲を絞りこんでおり、かつ、データ数が豊富にあるモデルNo.に対しては、範囲を変更せず対応する。

#### Case 2：[条件を変更し、既存モデルNo.を選択]

条件の範囲が広く、モデル精度が確保できない場合やCTなどが変更となった既存モデルNo.に対しては、範囲を変更して対応する。

#### Case 3：[新しいモデルNo.を作成]

過去に数本程度しか生産されることがない試作材や生産本数が非常に少ない量産製品の場合、既存のモデルNo.が存在しない場合が多い。この場合、CTなどの各条件の範囲を規定して、新規にモデルNo.を作成する。

#### Step 2：[学習に使用するデータの選定]

Step 1で選択したモデルNo.に対し、CTや成分濃度などの条件に合致する指定した期間内の全データを抽出する。つぎに、抽出したデータの中から、条件範囲内で極力バリエーションに富むよう自動でデータを選定する。

#### Step 3：[学習したモデルの評価]

Step 2で選定したデータを用いて学習を実行し、モ

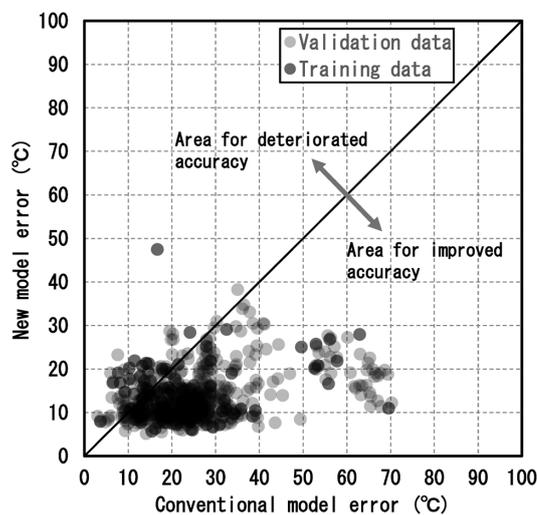


図4 モデル評価画面例

Fig.4 Example screen for Model evaluation

デルのパラメータを決定する。つぎに、自動選定により学習に使用したデータも含め、対象モデルNo.の全データに対し、パラメータを用いて鋼板全長のCT予測計算を行い、下記二つの誤差を計算する。

- a 適正化したパラメータによるCT予測値と実績値の誤差
- b プロコン実装中のパラメータによるCT予測値と実績値の誤差

aとbの誤差の評価を図4に示す画面で実施する。誤差が小さくなっていなければ、Step 1あるいはStep 2に戻って調整を行い、再度Step 3を実施する。誤差が小さくなるまで、Step 1～Step 3の作業を繰り返す。

#### Step 4：[新パラメータのプロコンへの登録]

Step 3で決定した新パラメータをモデル学習計算機からプロコンに転送し、新パラメータの登録を行う。これにより、プロコンでは新パラメータを用いて温度降下量を予測する。

## 3. AI手法導入による操業に与えた効果

操業部門では、CTの制御精度改善は尽きることのない命題である。そのような状況の中、今回開発・導入したAI手法により、操業部門にて業務内容を中心に以下の変革が進んだ。

- (1) スピーディーなモデル調整作業
  - (2) オペレータによるバルブ開閉負荷の大幅軽減
  - (3) モデル調整作業の属人性排除と円滑な技術継承
- 以下におおのの詳細について記す。

### 3.1 スピーディーなモデル調整作業の実現

スタッフがAI手法の専門知識や技術を有していなくても、つぎに示すように、スピーディーにモデル調整作業を実施できるようになった。表2に示すのは、CTの制御精度を改善する必要があると判断してから、モデル調整が完了するまでの作業時間を従来制御と比較したものである。今回、操業実績データを確認するためのユーザインタフェースを整備したことにより、実態調査の時間を大幅に削減できた。さらに、モデル調整において、

最低限の実績データを確認して、深層ニューラルネットワークモデルを学習するだけとなり、1日未満で全ての作業を完了している。また、図4に示すように、調整によるモデル誤差の改善状況も可視化しており、調整したモデルの評価やプロコンへの登録の判断を迅速に行うことができています。

### 3.2 オペレータによるバルブ開閉負荷の大幅軽減

前節で記したように、CTの制御精度が悪化した場合に都度、モデル調整作業を適正かつスピーディーに実施して制御精度を改善している。それにより、特定の製品に対するバルブ本数への増減方法を記した作業指示書を全て撤廃することができており、オペレータの作業負荷が大幅に軽減した。また、作業ミスなどのリスクも大幅に減少した。

### 3.3 モデル調整作業の属人性排除と技術継承の実現

従来制御で実施していた予測モデルの改良作業や属人的ノウハウとなっていたパラメータ調整作業が無くなり、深層ニューラルネットワークモデルの学習によってモデルの調整を行うようになった。それにより、モデル調整作業において、経験や勘から脱却することができ、従来制御と比較して、属人性を大幅に排除することができた。また、スタッフ間の技術継承も円滑かつ確実に行うことができるようになったことで、スタッフがモデル調整作業を行う持続的体制を構築できた。

表2 モデル調整期間の比較  
Table 2 Comparison of model adjustment periods

Working item	Expected number of working days [day(s)]	
	Conventional method	New method
Actual condition survey	2	0.1
Model tuning	1	0.6
Model evaluation	-	0.1
Parameter implementation to process computer	0.1	0.1
Total number of days	3.1	0.9

## 4. AI手法導入による製品品質に与えた効果

今回開発・導入した技術により、定常状態である鋼板中間部のみならず、従来制御では精度低下が多発していた鋼板先端・後端部、とくに目標温度を定常部と変更した場合でも、CTを高精度に制御することができるようになった。それにより、当社の代表的な熱延ハイテン材と冷延ハイテン材において、CT公差外れによる廃却量が従来制御と比較して、それぞれ21%、71%削減し、歩留まりが向上した。

**むすび**=ここでは鋼板製造工程における巻取温度制御の温度予測モデルに深層ニューラルネットワークを実機適用した経緯や運用方法、および生み出すことができた操業部門の業務の変革について述べた。

近年、当社では熱間圧延工程全体の多種多様なデータを収集するインフラを再構築し、従来よりも格段に大量のデータを活用できる環境が整った。今後、その環境を利用することで加熱炉や圧延設備などの熱間圧延工程内の他工程に対しても、本稿のAI手法の技術を横展開し、さらなる品質の安定化や製造現場のオペレータの作業負荷の軽減などを実現していく。

### 参考文献

- 1) 池田宗朗ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.8-11.
- 2) 村田忠夫ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.17-20.
- 3) 岡谷貴之. 深層学習 改訂第2版. 講談社. 2022.
- 4) 佃 岳洋ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.2, p.75-79.
- 5) 前田知幸ほか. R&D神戸製鋼技報. 2024, Vol.72, No.2, p.79-83.
- 6) 逢坂武次. 材料とプロセス. 35 (2022) 2, 387.

(技術資料)

## 熱間鍛造品の形状計測技術による作業安全性・効率の改善

岡本 陽\*<sup>1</sup>・滝下峰史\*<sup>1</sup>・佐藤明宏\*<sup>2</sup>・池上智紀\*<sup>2</sup>・緒方啓丞\*<sup>3</sup>

### Improvement of Work Safety and Efficiency through Shape Measuring Technology for Hot-forged Products

Akira OKAMOTO・Takashi TAKISHITA・Akihiro SATO・Tomonori IKEGAMI・Keisuke OGATA

#### 要旨

当社鍛圧工場で生産される大型鍛造品（船舶用クランク軸や推進軸などの丸棒素材，プラスチック射出成型用金型などの矩形（くけい）品など）は，自由鍛造プレスにより所定の形状に鍛造される。鍛造工程における熱間鍛造品の寸法確認は，作業者が熱間物に近づきパス測定により行われるが，酷暑作業であることに加え重篤な火傷のリスクがあり，また，立入許容限界内で行う『特別管理作業』の一つである。そこで，パス測定頻度の高い丸棒の直径，矩形品の高さ，段付き丸棒の軸長さについて，画像処理により非接触で高精度に測定できる計測装置を開発し，実用化した。これにより熱間物に近づく作業が大幅に低減し，作業者の安全確保につながり，業務プロセス改善（測定作業の技能レス化）にも役立った。

#### Abstract

The large, forged products produced at Kobe Steel's forging foundry, such as round bar materials for marine crankshafts and propulsion shafts, as well as rectangular products for dies for plastic injection molding, are forged into their predetermined shapes using a free forging press. In the forging process, the dimensions of hot-forged products are checked by workers using calipers. This task is performed close to the hot products, in an extremely hot environment and with the additional risk of severe burns. It is considered one of the "special management operations" conducted within permissible entry limits, hence the development and putting into practical use of a measuring device that utilizes image processing for non-contact and accurate measurement of the diameters of round bars, the heights of rectangular products, and the axial lengths of stepped round bars, which require frequent caliper measurements. As a result, the need for workers to approach hot products has been significantly reduced, leading to enhanced safety for the workers and contributing to the improvement of business processes by eliminating dependence on the worker's skills in measurement tasks.

#### 検索用キーワード

熱間鍛造品，形状計測，画像処理

ま え が き = 当社鍛圧工場では，船舶あるいは陸上発電用エンジンクランク軸用の丸棒素材，そのクランク軸と連動する連接棒，船舶動力用の推進軸や中間軸，プラスチック射出成型用金型（矩形品）などの大型鍛造品を2,000～13,000トンプレスにより，所定の形状に鍛造している。鍛造作業は，加熱炉により高温（約1,200℃）に加熱された鋼塊をマニプレータで把持し回転させながら，自由鍛造プレスにて所定の寸法や形状に造り込んでいくものである。鍛造作業における寸法確認方法として従来は，プレス作業を一時停止した後，作業者がプレス直下の熱間鍛造品（500～900℃程度）に近づき，パスや寸法棒を熱間鍛造品に直接接触させて行ってきた。しかし，この作業は，

- ・ 酷暑環境で行われるため，作業負荷が非常に高い
- ・ 火傷のリスクがある
- ・ 一時停止中のプレスに近づき立入許容限界内で行う『特別管理作業』の一つであり，重篤な災害を引き起こすリスクをはらんでいる
- ・ 技能や感覚に頼る部分があり，作業や使用するパスの状態による計測ばらつきが大きい

などの問題がある。そこで，これら課題を克服するため，鍛造中の熱間鍛造品の寸法を非接触で迅速かつ高精度に測定する計測装置を開発し，実用化することで，熱間鍛造中の寸法測定作業の作業安全性向上・効率化に貢献したのでその概要を紹介する。

#### 1. 丸棒形状計測

従来，クランク軸や推進軸などの丸棒素材は，プレス作業途中もしくは作業終了時に，所定の寸法に成形されているかを確認するために，作業者が熱間鍛造中の丸棒に近づき，丸棒直径のパス測定や金尺による直径の測定を行っていた（図1）。とくに丸棒のパス測定は頻度の高い作業であるため，過去にも参考文献1）に示す計測手法で丸棒直径を計測する装置を開発したが，カメラを移動させるため計測に時間がかかることが課題であり，より早く，安定して直径を計測できる別の手法が求められていた。

##### 1.1 丸棒直径計測装置の概要

開発した計測装置仕様を表1に示す。本計測装置の計測ヘッドは，近赤外波長領域に感度が高い高解像度モ

\*<sup>1</sup> 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター \*<sup>2</sup> 素形材事業部門 鋳鍛鋼ユニット鋳鍛鋼工場製造部 \*<sup>3</sup> 素形材事業部門 鋳鍛鋼ユニット鋳鍛鋼工場技術部

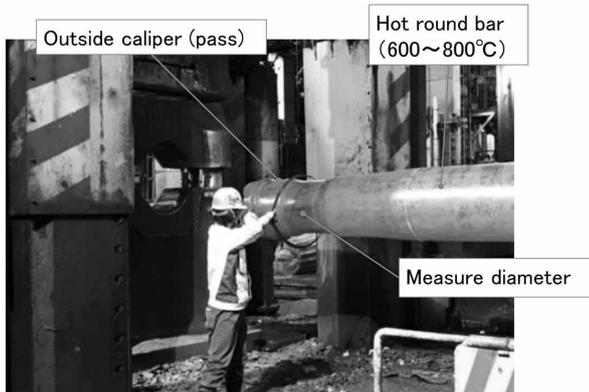


図1 丸棒のパス測定

Fig.1 Round bar diameter measurement by using outside caliper (pass)

ノクロカメラと、丸棒までの距離を測定するレーザ距離計と、カメラとレーザ距離計を搭載している台を上下に傾けて熱間丸棒を測定視野内に移動させる自動ゴニオステージで構成される (図2 (a))。計測ヘッドの設置場所は、プレスから5~10 m程度離れているが、高温、粉じん環境であるため、計測ヘッドをケーシング内に格納し、さらにケーシング内をエアパージし正圧にすることで計測ヘッドを輻射 (ふくしゃ) 熱および粉じんから保護している。計測ヘッドの外観の2例を図2 (b) に示す。

次に直径計測原理について説明する。まず、撮影した画像例を図3に示す。図3に示す直径測定ラインの輝度プロファイルにおいて、明るさが急変する箇所を画像処理で、丸棒の上下端点位置として検出する。

丸棒の上下端点位置は図4に示すように撮像面上のaa, bbとして検出される。丸棒が真円であると仮定すれば、レーザ距離計からの距離値dを使うと幾何学的な関係から、丸棒直径 (=半径r × 2) が計算できる。

また、操作インターフェースを図5に示す。画面右上に常にリアルタイムで直径の概略値が表示されている。そして本測定するときには作業者が左上ボタンを押すと、本装置は、

ステップ1: 測定誤差の少ない画像中央付近に丸棒が映るように、自動ゴニオステージが自動で動く。

ステップ2: 丸棒を画像撮像して、画像解析する。

の2ステップで直径が計算され、画面右下に直径の詳細値が表示される。本画面はタッチパネル操作であるため操作性も良い。

### 1.2 丸棒直径計測装置の現場適用

丸棒直径のパス測定の実施頻度が最も高い4,000トンプレスにてバララン (作業によるパス測定と直径計測装置の併用) を実施した。パス測定と計測装置の計測値の比較結果を図6に示す。Φ275~750 mmの丸棒直径を40回測定し、パス測定と直径計測装置での計測値の差のばらつきは±2.3 mmであった。鍛造品に求められる寸法精度やパス測定自体の測定者によるばらつきを考慮したうえで問題なしと判断し、パス測定を廃止し、計測装置の値を正として実運用を開始した。現在は、他の3プレスにも横展開し、鍛圧工場の主要4プレスで常時

表1 熱間丸棒直径計測装置の仕様

Table 1 Specifications of hot round bar diameter measuring device

Item	Specification
Measurement time	1 second or less
Difference with pass measurement	±3mm or less at temperature 600~800°C
Dustproof/Heat resistant	Air purge flows through the measurement head to achieve dustproof and heat resistant.
Operability	User-friendly interface
Saving measurement results	A function that automatically saves measurement results for confirmation in the event of quality abnormality/equipment abnormality.

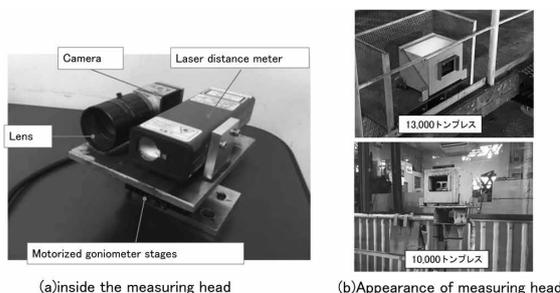


図2 計測ヘッドの外観

Fig.2 Appearance of measuring head

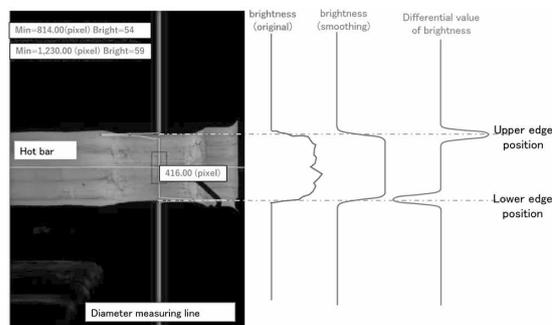


図3 平滑化した輝度プロファイルの微分値からのエッジ検出

Fig.3 Edge detection from the differential value of brightness profile after smoothing processing

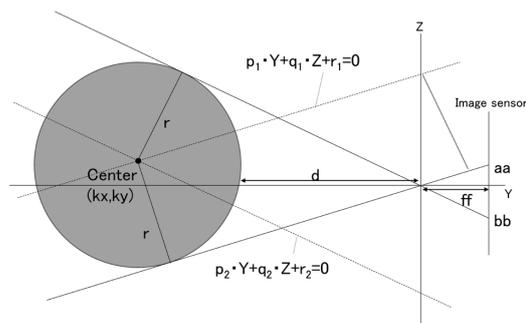
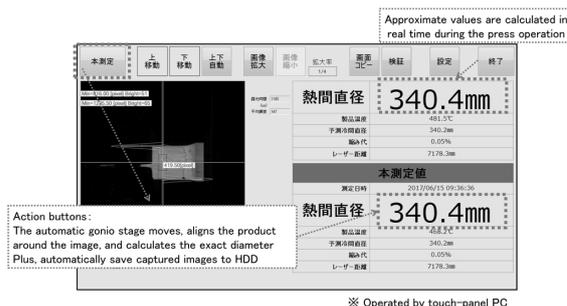


図4 丸棒直径の計測原理

Fig.4 Measuring principle of round bar diameter



※ Operated by touch-panel PC

図5 丸棒直径計測の操作インターフェース

Fig.5 Operation interface for round bar diameter measurement

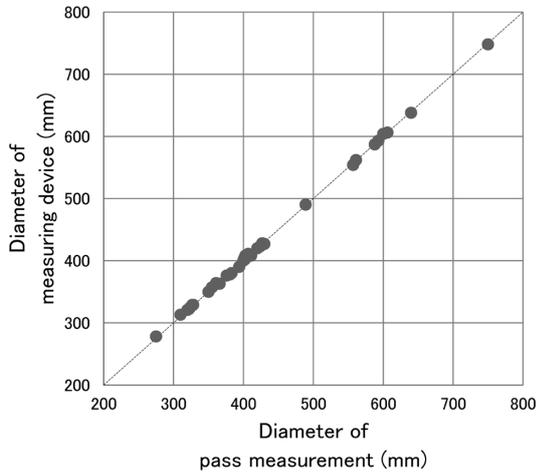


図6 パス測定と計測装置の直径値の比較

Fig.6 Comparison of diameter values between "outside caliper (pass) measurement" and "measuring device"

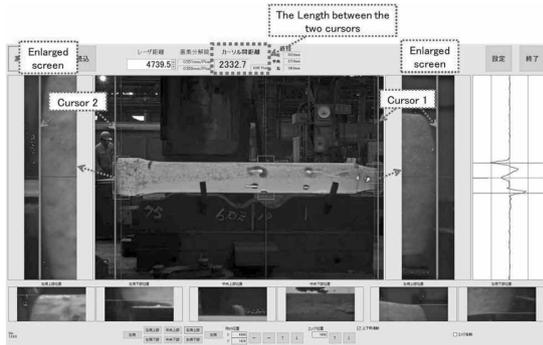


図7 段付き丸棒長さ計測の操作インターフェース

Fig.7 Operation interface for stepped round bar length measurement

活用している。丸棒の直径計測は、4プレス合計で1日あたり10回以上は行われる作業だったが、これをなくすことができている。

### 1.3 段付き丸棒の長さ計測装置の概要

次に、1.1節の丸棒直径計測装置を応用し、段付き丸棒の長さ計測装置を開発した<sup>2)</sup>。装置構成は、図2の丸棒直径計測装置と基本的には同様であるが、カメラのみRGBカメラに変更した。図7に段付き丸棒長さ計測の操作インターフェースを示す。計測画面上にて、2本のカーソル位置を指定することで、指定したカーソル間の丸棒長さを計測することが出来る。図8を用いて計測原理を説明すると、カーソル指定部の丸棒長さW (mm) は以下の計算式 (1) で算出される。

$$W = \Delta W_1 + \Delta W_2 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

$$\Delta W_1 = \frac{L_1 \cdot k \cdot \Delta x_1}{f}, \quad \Delta W_2 = \frac{L_2 \cdot k \cdot \Delta x_2}{f},$$

$$L_1 = L_0 + R_0 - R_1, \quad L_2 = L_0 + R_0 - R_2$$

$L_0$  (mm) : レーザ変位計を用いて計測したレンズ主点から丸棒までの距離,  $\Delta x_1, \Delta x_2$  (pixel) : 画像上のセンターラインからのカーソル指定位置,  $f$  (mm) : レンズの焦点距離,  $k$  (mm/pixel) : 受光素子のサイズである。また,  $R_0, R_1, R_2$  (mm) は丸棒の半径であるが、1.1節で説明した直径計測と同様の計測原理を用いることで、画像上のサイズ  $\Delta y_0, \Delta y_1, \Delta y_2$  (pixel) から幾何学計算により算出

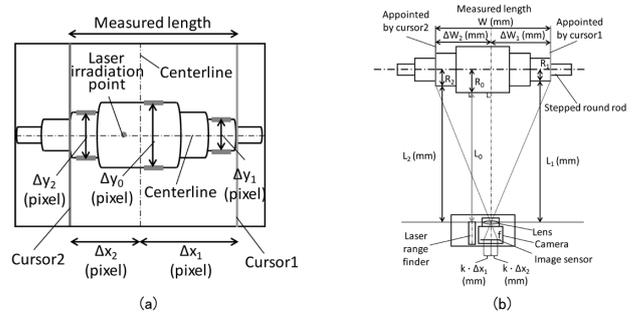


図8 段付き丸棒の長さ計測原理

(a) インターフェースおよび (b) 装置構成の模式図

Fig.8 Principle of measuring the length of stepped round bar. Schematic diagrams of (a) the operation interface and (b) the equipment configuration

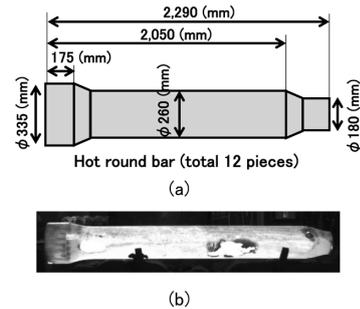


図9 (a) 測定した段付き丸棒の概寸および (b) 写真  
Fig.9 (a) Approximate dimensions and (b) photograph of the measured stepped round bar

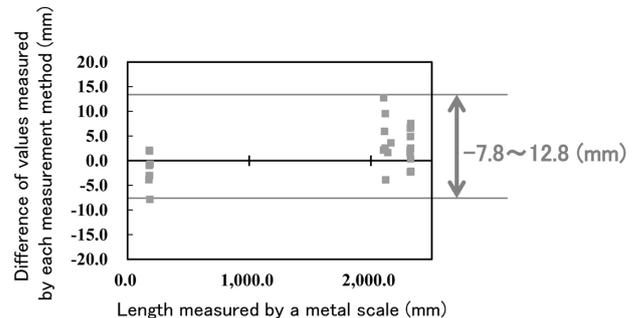


図10 金尺による長さ計測値と計測装置による長さ計測値の差異  
Fig.10 Difference of values measured by a metal scale and the developed equipment

できる。

実機検証として、図9に示す段付き丸棒12本に対して、金尺での計測と本計測装置の比較を行った。結果として、図10に示すように計測値との差異は-7.8~12.8 mmとなった。中間工程の鍛造品(荒地)に求められる長さ寸法精度、手計測自体の誤差を考慮したうえで問題無いと判断し、2,000トンプレスにて実運用を開始した。

## 2. 矩形品の寸法計測

プラスチック射出成型用金型のような矩形品においても、鍛造途中あるいは鍛造終了時に、図11に示すように熱間矩形品の幅や厚みが所定の寸法に成形されているかを現場作業員が熱間物に近づいてパス測定している。高さが1 mを超える大きな矩形品になると輻射熱が非常に大きく、丸棒よりもパス測定の作業負荷が高い。パス測定頻度は丸棒と比べ低いものの、数回/週程度発生

している。そこで、作業の本質安全化をさらに進めるべく、矩形品の寸法測定装置も開発した。

## 2.1 矩形品の寸法（幅、厚み）計測

計測ヘッド設置場所のスペース制約や保守メンテナンスの簡易化のため、1章で紹介した丸棒直径計測装置のハードウェアを共用し、鍛造品種別に応じて丸棒直径計測用と矩形品寸法計測用ソフトウェアを切り換えるコンセプトとした。

矩形品のプレス作業は、マニプレータで矩形品の端部を把持して、矩形品を回転させながら、矩形品の幅と厚みを所定の寸法に鍛造していく。矩形品の高さを計測する原理を図12に示す。画像計測の観点から見ると、矩形品の幅も厚みも同じように観測されるので、計測対象である「幅」あるいは「厚み」を図12では「高さH」として記述している。

ここで、レーザー距離計出力値L (mm)、下エッジの撮

像上の位置a (mm)、上エッジの撮像上の位置b (mm)、カメラ光軸の仰角 $\theta$  (rad)、レンズ焦点距離f (mm)としたとき、

- 1) 矩形品のカメラ側の面は、地面から垂直であること。
- 2) レーザ距離計出力値の0点がレンズ中心であること。
- 3) レーザ距離計の測定方向とカメラ光軸が一致していること。

以上の仮定を置けば、矩形品の高さHは、幾何学的な関係から計算できる。

また、矩形品高さ計測の操作インターフェース画面を図13に示す。図5と同様、タッチパネル仕様となっている。

## 2.2 矩形品寸法計測装置の現場適用

矩形品についても、13,000トンプレスで、パス測定と計測装置の比較を行った。厚みの測定結果を図14 (a)に示し、幅の測定結果を図14 (b)に示す。図14 (b)に



図11 矩形品のパス測定  
Fig.11 Outside caliper (pass) measurement of rectangular product

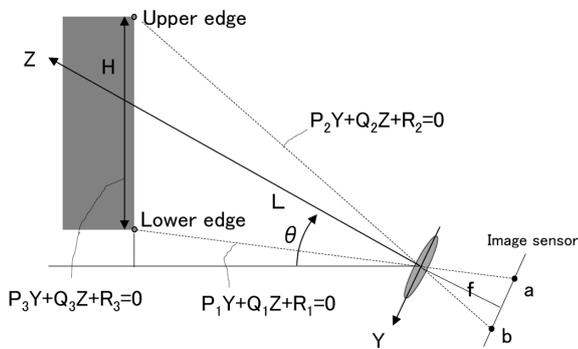


図12 矩形品高さの計測原理

Fig.12 Principle of measuring the height of rectangular products

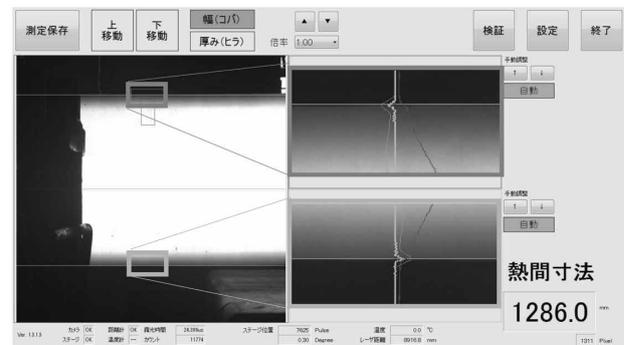
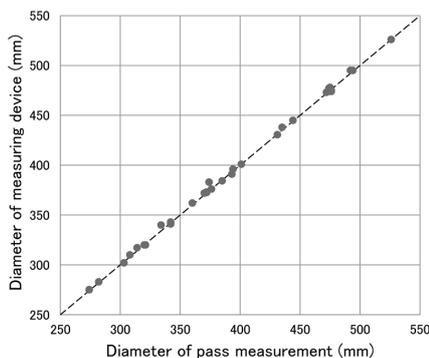
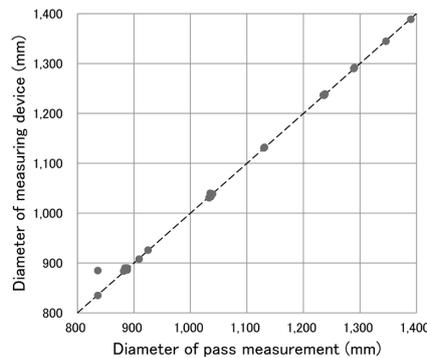


図13 矩形品高さ計測の操作インターフェース

Fig.13 Operation interface for rectangular product height measurement



(a)thickness



(b)width

図14 パス測定と計測装置の比較

Fig.14 Comparison of diameter values between "outside caliper (pass) measurement" and "measuring device"

において、エッジ検出がずれて、大きめに計測されているケースがあったが、製品が地面に対して傾いていたことに起因する測定誤差であった。これを除けばパス測定との差異は±3mm以内であり、丸棒と同程度の精度を有することが確認できた。上記の測定誤差を防止するため、製品が傾いている場合は操作画面上にアラートを表示する機能を追加した上で13,000トンプレスでの実機適用を開始しており、約3回/週のパス測定作業を削減できている。今後、他プレスへ水平展開していく。

**むすび** = 熱間鍛造工程における丸棒の直径、段付き丸棒の長さ、矩形品の厚みと幅を測定する計測装置を開発し、本技術適用により、特別管理作業の頻度が低減でき、遠隔で安全かつ技能レスの寸法測定が可能となった。本作業以外にも、段付き丸棒の偏心ずれ量や丸棒曲がり量など熱間鍛造品の形状を、作業者が目視判断している作業も残っている。引き続き、自動計測の適用範囲を広げる開発を行い、実適用するなど鍛造作業の業務改善に努めていく。

#### 参 考 文 献

- 1) 岡本 陽ほか. R&D神戸製鋼技報. 2007, Vol.57, No.3, p.29-33.
- 2) 滝下峰史ほか. 段付き丸棒の長さ計測装置の開発. 材料とプロセス. 第181回春季講演大会. 日本鉄鋼協会. 2021, Vol.34, No.1, p.137.

(解説)

# 廃棄物処理プラント向けクレーン自動運転技術

森田 啓<sup>\*1</sup>・清水克哉<sup>\*1</sup>・尾崎圭太<sup>\*1</sup>(博士(理学))・福川宙季<sup>\*2</sup>

## Automatic Crane Operation for Waste Treatment Plants

Kei MORITA・Katsuya SHIMIZU・Dr. Keita OZAKI・Hiroki FUKUKAWA

### 要旨

廃棄物処理プラントでは焼却炉の安定操業のため、ごみクレーンを用いて搬入ごみの運搬攪拌(かくはん)作業を行っている。今回、ピット内にたまったごみの高さを計測する距離センサとごみ面の画像を取得するためのカメラの情報を基にごみピット内の状況を認識する技術(①ごみ高さ計測技術、②ごみ攪拌状態認識技術)、クレーンの動作を決定する技術(③運転員操作を再現するクレーン動作計画技術)、および決定された動作に従いクレーンを制御する制御技術(④3D計測情報と動作計画に基づいたクレーン制御技術)の四つの要素技術を開発した。これにより運転員の高度な認知・判断・操作スキルを代替する自動運転技術を開発したのでシステムの全体概要について紹介する。

### Abstract

In waste treatment plants, cranes are used to transport and mix the waste to ensure the stable operation of incinerators. Four key technologies have been developed for measuring the height of waste accumulated in the waste pit and acquiring images of the waste surface: i.e. i) technology to recognize the situation inside the waste pit on the basis of distance sensors (waste height measuring technology), ii) technology to recognize the stirring state of the waste on the basis of camera information, iii) technology to reproduce the operator's actions in planning crane movement, and iv) crane control technology based on 3D measurement information and the movement planning. This paper introduces an overview of a developed system that utilizes the technologies mentioned above to automate the operation, aiming at substituting the high-level cognitive, judgmental, and operational skills of the operators.

### 検索用キーワード

自動運転, ごみクレーン, ごみ焼却炉, 画像処理, 3D計測, 機械学習, クレーン制御, 経路生成

まえがき=当社グループである(株)神鋼環境ソリューションでは、廃棄物処理メニューとして回転ストロカ式ごみ焼却炉、流動床式ごみ焼却炉(ガス化溶融、ガス化燃焼)など豊富なコア技術を保有しており、処理対象物および地域のニーズにあわせた処理技術の提案をしてきた。近年、日本国内において労働人口の減少、熟練技術者不足が問題となっており、廃棄物処理分野においても同様の問題を抱えている。また、日本国内の廃棄物処理プラントでは、建設と運転保守の包括受注方式(Design Build and Operate (DBO)方式)が主流になっている。当社および(株)神鋼環境ソリューションでは、これら潮流に対応する製品開発やソリューションの提案として廃棄物処理プラントの運転保守コスト削減に向けたごみクレーン自動化技術の開発に取り組んできた。

本稿では、従来熟練運転者の認知・判断・操作スキルによって行われていたクレーン運転を代替するクレーン自動運転技術について紹介する。

## 1. 自動運転システムの概要

廃棄物処理プラントでは、ごみ質のばらつきが焼却炉の燃焼状態に直結する。そこで、安定した燃焼状態を実現するため袋ごみや汚泥などの様々なごみを焼却炉に投

入する前段階に、ごみ質が均一になるようクレーンを用いて攪拌(かくはん)作業を行っている。クレーン作業としてはこのほかに、焼却炉ホッパへの投入作業、翌日のごみ受入対応のための積替作業など複雑な作業が多岐にわたる。しかもこれらは画一的な作業ではなく、時々刻々と変化のごみピット内の貯留状況に応じて運転員が作業内容を判断しなければならず、状況に応じて適切かつ複雑な作業を迅速に実行できる高い運転スキルが求められる。

図1にこれらの運転スキルを代替する自動化技術として開発したクレーン自動運転システムの概略図を示す。この図ではダブルピット形式(受入ピット/貯留ピット)の廃棄物処理プラントを例として示している。ピット内にたまったごみの高さを計測する距離センサとごみ面の画像を取得するためのカメラの情報を基にごみピット内の状況を認識する技術(①ごみ高さ計測技術、②ごみ攪拌状態認識技術)、クレーンの動作を決定する技術(③運転員操作を再現するクレーン動作計画技術)、および決定された動作に従いクレーンを制御する制御技術(④3D計測情報と動作計画に基づいたクレーン制御技術)の四つの要素技術により構成される。これら要素技術の組み合わせにより、従来クレーン運転員が行ってきた認知・判断・操作スキルを代替する。

<sup>\*1</sup> 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター <sup>\*2</sup> (株)神鋼環境ソリューション 技術開発センター技術開発部

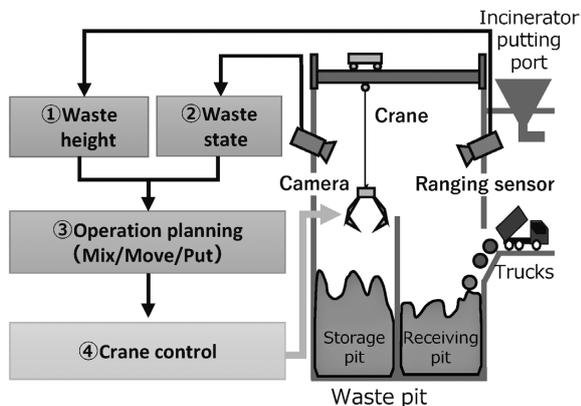


図1 クレーン自動運転システム概略図  
Fig.1 Schematic of crane autonomous operation system

## 2. 自動運転システムの概要

本章では、前章にて述べた四つの要素技術の内容について紹介する。

### 2.1 ごみ高さ計測技術<sup>1)</sup>

従来、クレーンコントローラにて保有する高さ情報は、ピット内を粗い番地に分割し、バケットがピット内のごみ山に着床した箇所に該当する番地の高さ情報を更新する。この方式では粗い分割による情報の分解能や情報更新のリアルタイム性（つかみ動作を行った時点でのみ更新）の点で信頼性に欠ける問題があった。今回、ごみピット全面の高さをリアルタイムに測定するため、距離センサ2台構成を採用している。各センサで取得した3D点群データに対してごみピット座標系に合わせた回転・平行移動処理を施し合成する。いっぽう、実運用に際して、クレーンや落下ごみが映り込むことで不要なデータが混在したり、ごみの堆積状態によって計測データが欠損したりすることで、得られた測定データが実際のごみ高さとは異なる場合がある。そこでデータ補正技術として、ノイズ除去処理と欠損部の補間処理技術を新たに開発した。図2に今回開発したデータ処理技術を適用した結果を示す。左図は計測時にクレーンが映り込み、距離センサの死角部分でデータが欠損している例である。本技術を適用することでクレーン映り込みを除去するとともに欠損箇所を補間し本来のごみ面形状に近い状態で計測できることを確認した。

### 2.2 ごみ攪拌状態認識技術<sup>2)</sup>

廃棄物処理プラントでは、袋ごみや汚泥など、様々なごみを受け入れている。受け入れたごみは焼却されるまでごみピット内に一時的に貯留される。ごみピット内では、焼却炉で安定した燃焼ができるように、ごみの均一化を目的とした攪拌操作が行われるが、運転員は全てのごみ種類を目視にて確認し、ごみ種類に応じた適切なクレーン操作により攪拌作業を行っている。

そこで、まずピット内カメラ撮影画像から搬入されたごみ種類を区別する技術を開発した。本技術で、ごみピットを撮像した画像からごみの種類と位置を認識する手法として、学習コストと精度の観点から物体検出法の一つであるSSD (Single Shot MultiBox Detector)<sup>3)</sup>を採

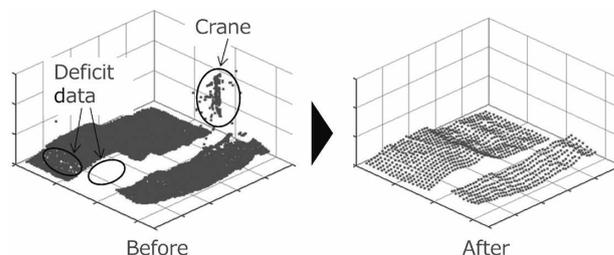


図2 3D計測データ補正処理結果例  
Fig.2 Example of schematic of 3D data correction

用した。本手法では、入力画像に対して画像特徴量を抽出する畳み込みニューラルネットワークによって、様々なスケールの物体の種類と位置を同時に学習する。今回、事前の現場調査や運転員ヒアリングを行い、燃焼状態に影響をおよぼすごみ種として袋ごみや汚泥など6種類に大別できることが分かった。そこで、これら6種類を学習させることで搬入されたごみの種類を判別した結果を図3に示す。ここでは代表的なごみ種である袋ごみ、汚泥、草を検出できていることが分かる。

いっぽう、安定した燃焼状態の実現には、ごみ種の判別だけでなく、それらが十分に攪拌されていることが重要である。現状、運転員は過去の経験に基づき、ピット内を目視にて確認しごみの攪拌状態を感覚的に認識している。運転員の判断を再現するためにはごみの攪拌状態を定量的に把握する必要がある。しかしながら、攪拌されたごみは複数のごみが混ざった状態であるため、外見は千種万様である。そのため良く混ざった状態を直接画像から認識することは困難であった。そこで「攪拌ごみは特定のごみ種に分類できないもの」、すなわちごみ種を判別できなかった領域を攪拌された領域として定義することで、攪拌状態を定量的に評価する方法を考案した。図4に攪拌された領域と未攪拌の領域の検出結果の例を示す。図4の矩形（くけい）で囲った部分がSSD法により判別した領域であり、それ以外が攪拌された領域としてみなすことができる。この考えから、任意の対象範囲（図4のwidth×height）における攪拌状態を定量的に示す攪拌度Vとして定義した（式（1））。

$$V = 1 - \frac{S_{all}}{width \times height} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $S_{all} = \sum_{i=1}^n S_i^{bbox}$  : 総検出面積（n個の矩形面積）

$S_i^{bbox}$  : おのおのごみの検出領域（矩形面積）

算出される攪拌度は0から1の範囲の値を取り、攪拌度が0に近づくほど攪拌が不十分であり、攪拌度が1に近づくほど攪拌が進展していることを表す。

図5に攪拌度の時間推移とそのときの判別結果を示す。開始時点では攪拌度は0.5程度となっており十分攪拌ができていない値である。その時のピット内画像を見ると袋ごみなど矩形で囲われた箇所が大部分を占めており攪拌ができていないことが確認できる。その後、時間の経過とともに攪拌度が0.8程度まで上昇し、同時に矩形領域が減少して攪拌領域が増加していることが確認できる。今回、攪拌完了の目安としては攪拌度0.8程度を設定しており、目標の攪拌度まで攪拌していることがわ

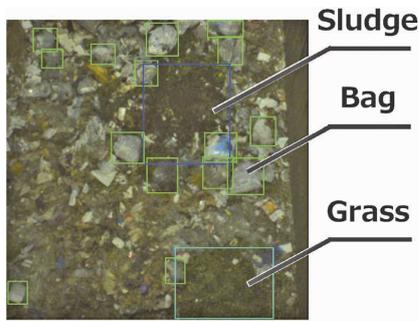


図3 ごみ種別結果例  
Fig.3 Example of determining the type of waste

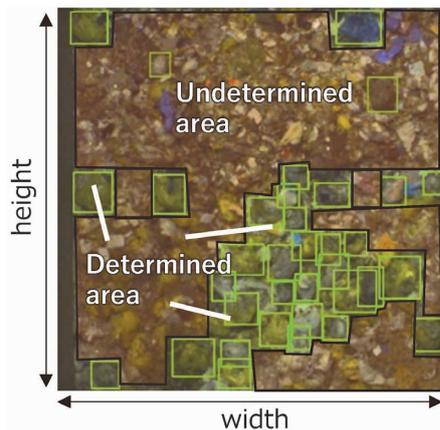


図4 未攪拌領域の検出方法  
Fig.4 Detection method of unmixing area

かる。攪拌完了後は順次積替え作業を行い攪拌度が横ばいで推移している。ここで運転員の攪拌完了の判断を再現できる値として、運転員による手動操作時の攪拌度と同程度の値を目安値として設定した。このように本技術を適用することで、これまでは運転員が目視にて感覚的に判断していた攪拌状態を定量的に評価することが可能となる。

### 2.3 運転員操作を再現するクレーン動作計画技術<sup>4)</sup>

従来技術では事前に設定した動作を繰り返すのみしかできず、不必要な操作（過攪拌など）の発生や、新規ごみ搬入などの変化が生じた際には攪拌不十分となる可能性があるため、夜間などの閑散時間の短時間だけなど限定的な運用に留まり、大半は人による操作介入が必要となっていた。そこで長時間の自動運転を実現するため、運転員の操作ノウハウや操作履歴データを基にしたクレーン操作判断ロジックを構築した。構築した操作判断ロジックのフローチャートを図6に示す。2.1節のごみ高さ計測技術、および2.2節のごみ攪拌状態認識技術により認識するごみの種類・攪拌状態・高さに加えて、クレーン位置やプラント運転情報をインプット情報として、次に取るべきクレーンの操作内容を判断し、クレーンの目標位置など操作内容を算出する。これにより、従来、熟練運転員が行っていた各種判断を再現でき、ピット状況に応じて様々な制約条件にあわせた最適な動作（積替／攪拌／投入）の計画を自動的に策定することができ、長時間の自動運転が可能となる。

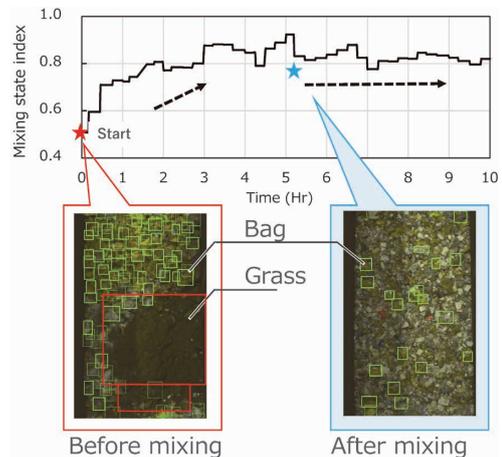


図5 攪拌状態認識結果  
Fig.5 Result of distinction of mixing state

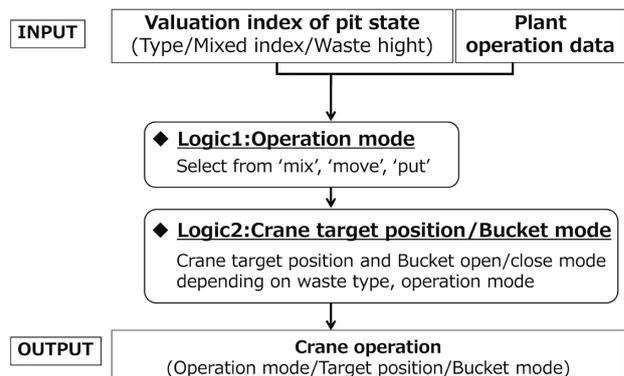


図6 動作計画決定フローチャート  
Fig.6 Flow diagram of operation planning

### 2.4 3D計測情報と動作計画に基づいたクレーン制御技術<sup>5)</sup>

2.1節にて記載のとおり、従来のバケット着床箇所の高さを測定する方式では、測定の分解能やリアルタイム性の点で信頼性に欠けるためクレーンは過度な回避経路を取らざるを得ず、タクトタイム悪化の要因となっていた。そこで、2.1節のごみ高さ計測技術により高い信頼性のごみ高さ情報を取得できるようになることで、過度な回避経路を考慮する必要がなく、目的地まで適切な経路で移動するクレーン制御を開発した。図7に今回開発した経路生成技術の概略図を示す。ごみ高さ情報に関しては、2.1節のごみ高さ計測技術にて紹介したとおり、距離センサ2台によりピット壁死角を補完することで、ピット全面の高さを高精度かつ同時に測定ができる。このごみ高さ情報と動作計画にて指定された位置情報に基づき、クレーンの各軸移動速度を考慮した障害物回避経路を演算する。さらに、本技術では各軸の速度を減速させることなく曲がれるようにするため、スムージング機能を搭載することで、コーナー部で滑らかな経路を生成できる。これにより障害物を回避するための無駄な経路をたどることなく指定された目的地に到達することができる。その結果、経路によって短縮効果は異なるが、代表的な動作の一つであるピット間をまたぐ積替動作では約3割のタクトタイム改善を確認しており、全体動作に関しても作業性向上が期待できる。

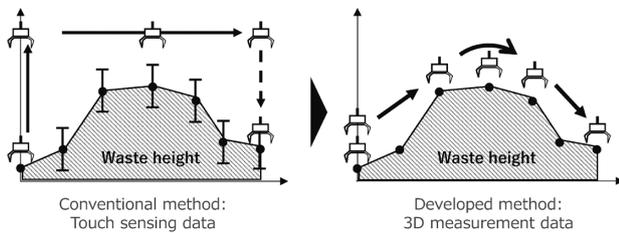


図7 ごみ高さ情報に基づいたクレーン経路生成  
Fig.7 Crane pass planning based on waste height data

### 3. 実プラントでの自動運転評価

開発した四つの要素技術を組み合わせたクレーン自動運転技術を開発することで、運転員の判断を再現するとともに手動操作と同様の複合軸操作が可能となる。本技術の成立性を検証するため、これら技術を搭載した自動運転システムによる実機プラントで連続運転を行った。攪拌完了を示す攪拌度の目安は運転員による手動操作時と同程度として運転を実施した。

いっぽう、連続運転中に攪拌不十分のごみを誤って焼却炉内へ投入した場合、炉内燃焼状態が不安定となることが考えられる。そこで試験期間中の「NO<sub>x</sub>量」の平均値、「蒸気流量」、「砂層温度」の標準偏差の相対値を表1に示す。ここでは、通常の手動操作による操業が行われている期間の各指標を1とした相対値として算出し、燃焼の安定性を評価した。表1に示すとおり、自動運転中の三つの評価指標は運転員による操作時と同等レベルとなっており、安定した燃焼状態を実現できることを確認している。

以上から、開発した四つの要素技術から構成するクレーン自動運転システムにて、従来熟練運転者の高度な運転スキルによって行われてきたクレーン運転を代替する

表1 手動操作に対する自動運転時の燃焼安定性評価 (手動操作時=1)

Table 1 Evaluation of combustion stability during automatic operation compared to manual operation. (manual operation = 1)

NO <sub>x</sub> (Avg. )	1.00
Steam flow rate (SD)	1.03
Sand temperature (SD)	0.65

クレーン自動運転技術として有効であることを確認した。

むすび=今回、廃棄物処理プラントにおいて、ごみクレーン運転員の高度な認知・判断・操作スキルを代替するクレーン自動運転技術を開発した。今後も、ごみ焼却施設における自動運転の高度化を進めるとともに、今後の操業技術者不足への対応に留まらず、持続的社会的な実現に貢献していく所存である。

#### 参考文献

- 1) 上村祥平ほか. ごみピット3D計測技術の開発. 第31回廃棄物資源循環学会研究発表会講演原稿. 2020, p.253-254.
- 2) 尾崎圭太ほか. 画像AI技術を用いたごみ種センシング機能の開発. 第31回廃棄物資源循環学会研究発表会 講演原稿. 2020, p.247-248.
- 3) Wei Liu et al. SSD: Single Shot Multibox Detector, ECCV 2016, p.21-37.
- 4) 福川宙季ほか. ごみクレーン動作計画自動化技術の開発. 第44回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集. 2023, p.227-229.
- 5) 清水克哉ほか. クレーン自動制御システムの開発—ごみピット情報に基づいたクレーン経路生成機能に関して—. 第44回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集. 2023, p.218-220.

(技術資料)

# アジャイルの原則を適用した生産管理の業務変革

福田啓一\*<sup>1</sup>・井本考亮\*<sup>1</sup>

## Business Process Re-engineering of Production Management Applying Agile Principles

Keiichi FUKUDA・Takaaki IMOTO

### 要旨

事業環境が変化する中、デジタル技術を活用したDXの推進が必要とされており、また、不確実性の高いDXの業務変革では、アジャイルの原則を適用することが望ましいと提言されている。そこで、この提言を踏まえ、当社でもチタン工場の生産管理業務を対象に、簡易な業務支援ツール群の適用と改善試行のPDCAサイクルによる業務変革を実施した。その結果、アジャイルの原則が、ノウハウや制約が数多く残るレガシーな生産管理の業務変革に有効であることを確認した。

### Abstract

In a changing business environment, it is necessary to promote Digital Transformation (DX) by utilizing digital technology. Additionally, for DX business transformations, which are highly uncertain, it is recommended to apply agile principles. On the basis of this recommendation, Kobe Steel has implemented a business transformation in the production management operations of its titanium plant. This has been achieved through the application of simple business support tools and the Plan-Do-Check-Act (PDCA) cycle for continuous improvement. As a result, it has been confirmed that agile principles are valid for the business transformation of legacy production management operations, which still have numerous constraints and accumulated know-how.

### 検索用キーワード

DX, 業務変革, アジャイル, 生産管理, PDCA サイクル

まえがき=デジタル技術の急速な発展、パンデミックやSDGsなどの外部環境の変化の激しさ、企業活動のグローバル化などが加速している。こうした要因を背景に、企業競争力の維持・拡大にはデジタル技術を活用した事業変革、すなわちデジタルトランスフォーメーション(以下、DXという)の推進が必要とされ、業界によらず多くの企業が取り組みを開始している。しかしながら、一般社団法人日本能率協会の2022年度の調査では、「すでに取り組みを始めている」企業が55.9%と前年から増加しているにもかかわらず、「大いに成果が出ている」「成果が出ている」企業は合わせて16.9%にとどまり、成果を実感している企業は多くはないことが分かる<sup>1)</sup>。DX推進の課題については、DX推進人材の不足、DXに対する経営戦略の不足について、具体的な事業への展開の困難が挙げられており、DXを推進する方法論が大きな課題の一つとなっている。

DXの推進については、DX白書2023など多くの文献で「アジャイルの原則」<sup>2)</sup>に従ったプロセスの必要性が提言されている<sup>3)</sup>。DXによる事業変革では、多くの場合、最終的なあるべき姿の不確実性が高く、技術の適用可能性も分からない状況下において推進することが求められるため、事前に立てた綿密な計画をそのまま実行するのではなく、仮説をもとに活動を始め、状況に応じて

柔軟に対応していくことが必要となる。システム開発においても、従来のウォーターフォール型開発のみではなく、アジャイル型開発の活用を考えなければならない。

本稿では、当社素材系事業の生産管理業務変革プロジェクトにおいて、業務変革とそれを支えるシステム開発にアジャイルの原則を適用して実行した事例を紹介する。1章では生産管理業務変革におけるアジャイルの原則を適用するための基本方針を述べ、2章で具体的な実施事例を報告する。

## 1. アジャイルによる生産管理業務変革のアプローチ

### 1.1 当社における生産管理業務の課題

当社の素材系事業では、お客様からの要望に柔軟に対応、多様で高品質な製品を提供してきた。競合他社に比べ規模において劣後する事業が多い中、生産管理面では、協力会社を含む生産リソースをうまく組み合わせ、限られた設備群で多様な製品を効率的に生産するノウハウを蓄積してきており、これが当社の強みの一つとなっていると考えられる。

しかしながら、近年お客様からは、製品品質の向上、納期対応の強化、サプライチェーン全体での安定供給などの要望に加え、低CO<sub>2</sub>操業といった新たな軸での価値創造も求められており、生産管理に代表される工場のも

\*1 技術開発本部デジタルイノベーション技術センター

のづくりの難易度は日々上がっている。また、とりわけ大規模な設備投資や生産規模の拡大など前提となる事業環境が変化する場合には、これまで培ってきた生産管理のノウハウを生かしつつ、業務プロセスの再構築も合わせて必要となり、これらの課題に遅滞なく対応するためにはデジタルデータを用いた生産管理業務の変革、すなわち生産管理のDXが必要である。

## 1.2 業務変革におけるアジャイルの活用

アジャイル型開発は、大きなゴールをチームで共有しつつ、開発の単位プロセスを設定し、小さな開発サイクルを短時間に繰り返す手法である<sup>4)</sup>。従来のウォーターフォール型開発では、プロジェクト全体を要件定義、仕様設計、実装などのフェーズに分け、フェーズごとに基準を設けて段階的にプロジェクトを進めるが、アジャイル型開発では数週間から2~3箇月の期間を定め、その期間内で要件定義など開発する機能の選定から実装、テストまでを繰り返し、一連のPDCAサイクルの繰り返りでシステムを構築していく。

この考え方をもとに、生産管理の業務変革を進める場合の業務構築手順を図1に示す。

- (1) 新生産管理業務の基本方針の作成
  - ビジネスモデルに対する生産管理業務の目標・基本方針の定義
  - 業務フロー案の作成
- (2) 新生産管理業務の業務フローの構築
  - アジャイルの原則に則った業務フローの構築と支援ツールの開発
    - (2-1) 業務手順の作成
      - 業務手順の作成とシステム化する作業領域の特定
    - (2-2) 業務支援ツールの開発
      - システム化する作業領域における業務支援ツールの開発と改善
    - (2-3) 業務試行
      - 業務フローに従って、業務支援ツールを用いた業務試行
    - (2-4) 課題抽出・業務見直し
      - 課題抽出・業務フロー／業務手順修正・業務支援ツールの改善計画立案

上記の(1)で、まず基本方針や業務全体の業務フロー案を作成する。その後(2)では、具体的な業務手順を作成し、負荷が高く中核となる業務を特定してシステ

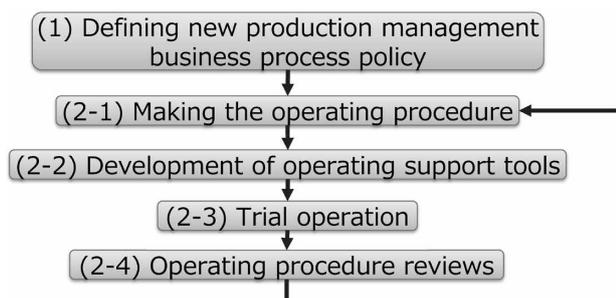


図1 新生産管理業務の構築手順

Fig.1 Construction process of new production management

ム化を図り、業務試行を行って、課題抽出・改善計画を立案するサイクルを繰り返す。このように進めることで、早期に新業務を開始し、生産管理担当者の理解・習熟を図りながら、業務やツールの課題を短期で抽出し、段階的に全体の業務変革を実行することができる。

## 2. チタン工場における生産管理の業務変革

### 2.1 チタン工場における生産管理業務の概要

当社は、チタンの溶解から最終製品まで手がける国内唯一の一貫メーカである。当社高砂製作所のチタン工場では、国内外の航空機機体メーカ、エンジンメーカのお客様に対し、純チタンからチタン合金に至る様々な材料で、鍛造品やリング圧延品などの様々な形状の製品を製造し、納入している。

チタン製品の製造は、原料から製品に仕上げるまでの様々な製造工程をあらかじめ定めた工程設計に従って行う。具体的には、原料であるスポンジチタンから鑄塊(インゴット)を製造し、鍛造工程を経て製品の素材の元となるピレット形状に加工した後、リング圧延/鍛造や熱処理、機械加工などを行って製品に仕上げていく<sup>5)</sup>。

このような製造工程に対し、当社では製品アイテムごとに専用ラインを持つのではなく、共通の設備群をロット単位で混流生産することによって、多様な製品の効率的な生産を実現している。そのため、生産管理部門では、お客様の製造計画に合わせ、各製造工程や協力会社の製造負荷を考慮しつつ生産計画を立案し、進捗実績を管理しながら、状況に応じて計画を修正するなど、多くの関係部署と情報連携しながら生産を管理するノウハウを積み重ねてきた。

しかしながら、新型コロナウイルス後の航空機などの需要回復により、今後予測される大幅な供給増に対応した継続的な事業拡大を想定すると、従来の比較的小規模な生産を柔軟に行うことを旨とする生産から、一定規模の量産を効率的かつ安定的に行うことに重点を置いた生産へと生産管理業務を変革することが必要となり、2021年よりデータに基づく業務変革の取り組みを開始した。

### 2.2 生産管理業務変革に向けての方針

一般的に混流生産工程で生産量を増加させる場合、業務負荷の増加に加え、工程間のバッファとなる中間製品在庫の増加やそれに伴う製造リードタイムの長期化が発生するが、チタン工場でもその兆候が発生していた。

そこで、新生産管理業務を設定するにあたり、まず、実現すべき業務の指針を以下のように定めた。

- 営業から生産管理、製造部門まで、生産管理に関係する業務間/部署間の情報連携
- 工程ごとの製造負荷/製造能力管理の精度向上
- ボトルネック工程の最大稼働実現とボトルネック工程に連動した生産計画立案

また、上記の業務指針に基づく業務フローとデータモデルを設計するとともに、大日程計画、中日程計画、中間製品在庫管理の大きく三つの領域について業務方針を設定した。その業務フローとデータモデルの概要図を図2に示す。

[大日程計画]

- ・営業部門が予算策定用として作成した販売計画に基づき、長期の製造負荷や製造能力の管理に必要な工程すべてを一元化して算出できるようにする。また、製造部門に対し、物量変動が発生する時期が可視化できるように、工程別／製品アイテム別／月別に管理メッシュを適宜細分化し、製造負荷を提示する。これにより、製造能力オーバーによる製造リードタイムの長期化や必要以上の中間製品在庫の積み上がりの発生を防ぐ。

[中日程計画]

- ・営業部門が作成した受注・引合実績などの販売明細情報に基づき、必要ときに必要なものだけを製造する受注生産の考え方で生産計画を立案する。これにより、必要以上の中間製品在庫の発生を防ぐ。
- ・日程計画を立案する際、制約条件のTOC理論 (Theory of Constraints)<sup>6)</sup>に基づき、まずボトルネック工程の製造能力を最大限発揮する日程計画を立案し、その後、ボトルネック工程を起点に、前後の製造工程の日程計画を立案する。これにより、ボトルネック工程での製造能力オーバーによる製造リードタイムの長期化や必要以上の中間製品在庫の積み上がりの発生を防ぐ。
- ・全体の工程進捗を管理するうえで、必要な工程すべての日程計画を立案する。とくに、製造負荷の大小を問わず、重要な工程を担当する製造部門に対し、定期的に製造負荷を提示する。さらに、製造負荷の変動が可視化できるように管理帳票や提示資料を刷新し、どの

時期にどの程度の製造能力が必要か把握できるようにする。これにより、製造能力オーバーによる製造リードタイムの長期化や必要以上の中間製品在庫の積み上がりの発生を防ぐ。

[中間在庫管理]

- ・工場の製造能力や製造条件を営業部門にも共有し、引合検討時には最小ロット数を満足しているかチェックして、中間製品在庫が発生しない数量に見直し可能かを確認する業務フローとする。また中間製品が最小になるように中間製品を優先的に受注・引合に引き当てて使用することを生産管理方針として明確化する。これにより、必要以上の中間製品在庫の発生を防ぐ。

さらに、上記指針に基づき、具体的な業務プロセスの設計を行った。ここでは中日程計画の業務プロセスを、**図3**を用いて説明する。

- ①販売明細情報に基づき製造量を算出する。つぎに、余材情報を基に中間製品を引き当て、新規の製造に必要な製品アイテムごとの数量を算出し、その受注・引合のお客様納期を確認する。これにより、必要最低限の製造となるようにし、さらなる中間製品在庫を発生させないようにする。
- ②製品アイテムごとに設定されているボトルネック工程の日程計画を立案する。まず、お客様納期とボトルネック工程の間の標準製造リードタイムを基に、ボトルネック工程の標準工程納期を算出する。つぎに、その標準工程納期、および製造部門から提供された製造能力の情報を基に、負荷平準化した計画を立案する。こ

## Business process of new production management

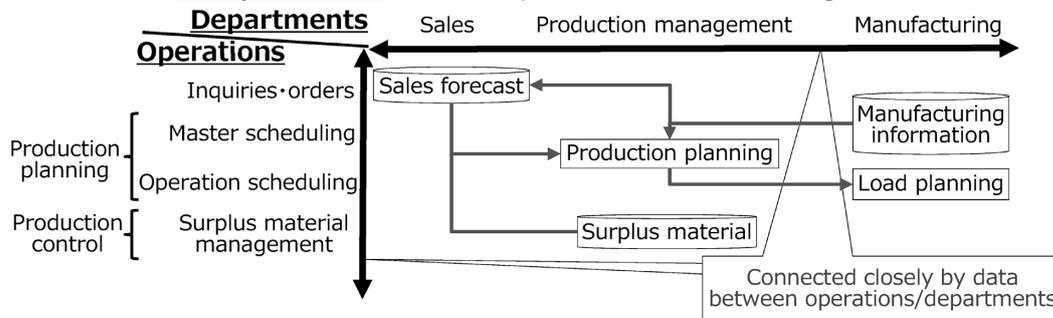


図2 生産管理業務フローのあるべき姿  
Fig.2 To-be production management business process

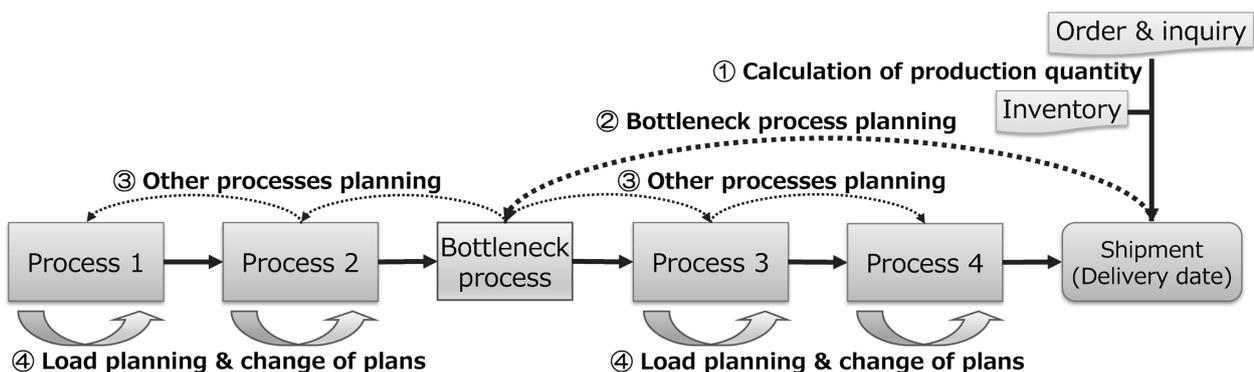


図3 中日程計画業務の流れ  
Fig.3 Operation flow of to-be operation scheduling process

れにより、ボトルネック工程での製造着手待ちによるリードタイムの長期化を発生させないようにする。

- ③ボトルネック工程の日程計画を基に、前後の製造工程の製造量、および標準工程納期を算出する。その際、前後工程の標準工程納期は、ボトルネック工程の標準工程納期より、各工程間の標準製造リードタイムを用いて、それぞれバックワード／フォワード展開して算出する。これにより、ボトルネック工程を基とした、前後の製造工程の負荷平準化が図られる。
- ④製造部門と定例の工程会議を行い、各工程の日程計画、およびその計画より算出した製造負荷を連携させる。もし、ある工程で製造負荷が製造能力を超えている場合は、負荷平準化または能力向上策の検討を図る。これにより、必要な製造能力が確保でき、全工程での製造着手待ちの発生に伴う製造リードタイムの長期化を回避する。

### 2.3 アジャイルによる新業務の運用と改善

前節で示した新業務プロセスをすべて人手でこなすことは不可能であるが、いっぽう、すべてを一つの管理システムとして設計開発すると、完成までに多くの時間を要するうえに、各製造現場に内在する様々な要件に適合しないリスクが高くなる。

今回の取り組みでは、これら業務の中でも負荷が高い中核業務を選定し、アジャイルによる簡易な業務支援ツールを開発・提供して業務運用を行いながら新業務プロセスの定着と改善を図っていくこととした。

具体的には、②ボトルネック工程の日程計画立案、③ボトルネック工程計画を基にした各工程の工程納期算出とそれに基づく進捗管理、④工程ごとの製造負荷・能力管理を対象として支援ツールを開発した。また、販売明細情報に基づく出荷計画や中間製品在庫、各工程の製造実績など生産管理に必要なデータを整理したうえで、ツールで算出した工程の製造負荷や計画情報などを含めて

工場内で共有して運用することとした。

各ツールはおおむね2～3箇月程度の期間でプロジェクトメンバーによる内作で開発し、業務適用後は運用を通じて生産管理担当者から課題を抽出して、1箇月に一度のタイミングで改善版をリリースするPDCAサイクルを回した。

ここでは②ボトルネック工程計画立案の例として、リング圧延工程の中日程計画立案業務の新業務適用と改善の流れを説明する。

リング圧延工程では、当社が受注するリング品アイテムのほとんどを混流生産により製造している。いっぽう、生産性向上のためには同一製品を連続して圧延するロット生産を行う必要がある。

この工程の生産計画を立案するにあたり、中長期では数千～一万点程度の膨大なデータを取り扱うことになるが、これらすべてを人手作業で行うことは非現実的である。そのため、営業部門からの販売明細情報の連携タイミングに合わせ、支援ツールを用いて毎月自動立案することとした。ツールの基本要件は以下のとおりである。

- i 販売明細情報や中間製品引き当ての情報を基に、製造に必要な各品種の数量を算出し、その受注・引合のお客様納期を確認する。
- ii リング圧延工程の標準工程納期を、お客様納期からリング圧延工程の標準製造リードタイムを差し引いて算出する。
- iii 標準工程納期を製造の優先順とし、それに従い受注・引合を並べる。そして、生産性を重視して決定した標準ロットサイズに基づき、受注・引合を組み合わせることでロットを編成し、ロットの製造順を決定する。
- iv 製造部門より連携された製造能力（単位製造時間）の情報を基に各ロットの製造日時を算出する。

表1は中日程計画を自動立案した一例である。複数

表1 中日程計画立案結果（一例）  
Table 1 An example result of operation scheduling planning

Order				Bottleneck process					
No	Types	Delivery date	Qty	①Standard delivery date on the process	②Start date	End date	Margin (①-②)	Lot ID	Tact time
1	A	2023/08/31	7	2023/07/12	2023/07/10	2023/07/19	2	L1	57
2	A	2023/09/14	2	2023/07/26			16		
3	A	2023/09/30	3	2023/08/11			32		
4	B	2023/09/06	5	2023/07/18	2023/07/19	2023/07/24	-1	L2	37
5	B	2023/09/14	5	2023/07/26			7		
6	B	2023/09/21	5	2023/08/02			14		
7	B	2023/09/28	5	2023/08/09			21		
8	B	2023/09/30	5	2023/08/11			23		
9	B	2023/10/07	5	2023/08/18			30		
10	B	2023/10/14	2	2023/08/25			37		
11	C	2023/09/12	4	2023/07/24	2023/07/24	2023/07/24	0	L3	5
12	D	2023/09/15	5	2023/07/27	2023/07/24	2023/07/25	3	L4	5
13	E	2023/09/20	10	2023/08/01	2023/07/25	2023/08/02	7	L5	47
14	E	2023/12/20	10	2023/10/31			98		
15	E	2024/02/20	5	2024/01/01			160		
3	A	2023/09/30	12	2023/08/11	2023/08/02	2023/08/11	9	L6	57
10	B	2023/10/14	3	2023/08/25	2023/08/11	2023/09/17	14	L7	37
17	B	2023/11/14	10	2023/09/25			45		
18	B	2023/11/21	9	2023/10/02			52		

の受注・引合をロットに編成し、各ロットに対して製造日と標準工程納期を表示することで製造日の余裕日数を表示している。生産管理担当者はこの余裕日数を基に納期遅れリスクを確認し、必要に応じて

－後工程で巻き返しを図る計画を立案する

－設備稼働時間の延長（残業対応）

などの手段を取ることで納期遅れリスクを低減させる。

本ツールは、初期バージョンを短時間で設計開発し、業務適用を開始した。その後、図1（2-1）から（2-4）の改善サイクルを回すことで業務とツールを一体で改善を図った。運用期間においては、累計約25の課題が抽出されたが、優先度をつけて改善計画を立て、毎月の計画立案タイミングに合わせて新バージョンをリリースし、併せて業務の改善を図った。

このような取り組みにより、当初の目的であったボトルネック工程を最大稼働させる生産計画を毎月短時間で立案できるようになったほか、改善サイクルのコミュニケーションを通じ、現場からの自主的な改善提案など現場の改善活動の活性化にもつながった。

今回の取り組みにおいて、通常数年はかかるところを、構想3箇月、各ツールの開発3箇月、アジャイルによる6箇月の改善期間の計1年間となり、短期間に生産管理業務全体の変革を行うことができた。また、今回の取り組みの結果、主力製品であるリング圧延品の製造リードタイムが2/3に減少し、棚卸資産が半減した。さらに、倉庫保管料や製造遅延減少による突発輸送費も減少するなど、具体的な経済効果にもつながり、想定以上の効果を上げられた。

**むすび**=本稿では、DX推進におけるアジャイルの原則の有用性について述べたうえで、アジャイルによる生産管理業務変革アプローチについて解説し、当社チタン工場における取り組み事例を通じて、具体的な導入プロセスとその効果について述べた。

これらの取り組みを通じ、アジャイルの原則に基づくアプローチは、とくに暗黙知的なノウハウや制約が数多く残るレガシーな生産現場の変革には有効であることが確認できたと考えられる。

生産管理は、お客様と「ものづくり」をつなぎ、「もの」の価値をお客様に届ける業務である。今回の取り組みを起点に、お客様によりよい「価値」を確実に届けられるよう、DXの取り組みを進めていきたい。

#### 参 考 文 献

- 1) 一般社団法人日本能率協会. 日本企業の経営課題2022. [https://www.jma.or.jp/img/pdf-report/keieikadai\\_2022\\_report.pdf](https://www.jma.or.jp/img/pdf-report/keieikadai_2022_report.pdf), (参照2022-12-12).
- 2) Kent Beck et al. アジャイルソフトウェア開発宣言. <https://agilemanifesto.org/iso/ja/manifesto.html>, (参照2020-06-10).
- 3) 独立行政法人情報処理推進機構. DX白書2023 エグゼクティブサマリー. 第1版, p.5-14.
- 4) 佐藤達夫. DX推進における異分野連携とアジャイルに対応したプログラムマネジメントフレームワークの提案, Journal of International Association of P2M. 2022, Vol.17, No.1, p.171-189.
- 5) 鈴木敏之ほか. チタンのおはなし改訂版, 日本規格協会, 2003, p.51-61.
- 6) Goldratt, Eliyahu M. Theory of constraints, North River Press, 1990.

(論文)

# 神戸発電所における燃料需給計画シミュレータの開発

梅田豊裕\*<sup>1</sup>(博士(工学))・藤井優貴\*<sup>2</sup>・瀧澤勇介\*<sup>2</sup>・瀧 秀行\*<sup>2</sup>・濱野貴央\*<sup>2</sup>・平出洋太郎\*<sup>3</sup>

## Development of Fuel Supply and Demand Planning Simulator at Kobe Power Plant

Dr. Toyohiro UMEDA・Yuki FUJII・Yusuke TAKIZAWA・Hideyuki TAKI・Takahisa HAMANO・Yotaro HIRAIDE

### 要旨

火力発電用燃料の荷揚げからボイラまでの物流計画を対象に、物流モデルと人間判断を双方向で利用して動作する新コンセプトのシミュレーションシステムを実用化した。本システムは配船、サイロ在庫、発電量、燃料成分、プロセスデータなど多様な実績・計画情報をもとに、船からサイロへの貯蔵、サイロからボイラへの搬送、およびサイロ間での循環の物流を時系列で計算するシミュレータをコアとし、シミュレーション中の物流切り替えに人の判断を反映できる機能を持つ。また、実行後に任意の時刻に遡り、切り替えの判断を変更または追加して再シミュレーションできる。これらにより、データとモデルに基づく標準条件での物流計画をベースとしながら、モデル化困難なイレギュラーな操業をシームレスに織り込むことを可能とした。

### Abstract

This study focuses on the logistics planning of fuel for thermal-power generation from its unloading to being supplied for boilers. A new concept simulation system has been developed and implemented, which utilizes both logistics models and human judgment bidirectionally. This system utilizes diverse historical and planned information such as ship allocation, silo inventory, power generation, fuel composition, and process data. Its core is a simulator that calculates the logistics of storage from ships to silos, transportation from silos to boilers, and circulation among silos in a time series manner. Additionally, this system can incorporate human judgment in switching logistics during simulation. Furthermore, it is possible to backtrack to any chosen point in time after execution and modify or add judgments for switching, enabling re-simulation. These capabilities allow for the seamless incorporation of irregular operations that are difficult to model, while basing logistics planning on standard conditions derived from data and models.

### 検索用キーワード

シミュレーション, 計画, スケジュール, 発電, 石炭, 物流, 在庫, 需給, 滞船

まえがき = 1995年の電気事業法改正を受け、当社では既存インフラや製鉄事業での自家発電ノウハウなどを最大限に活用した新規事業として、石炭火力発電所を建設し70万kW×2基(1, 2号機)体制で、1号機は2002年4月、2号機は2004年4月より電力供給事業を開始した。さらに、2017年の神戸製鉄所の上工程休止に伴い、高炉跡地に発電規模65万kW×2基(3, 4号機)の発電所を建設し、3号機は2022年2月、4号機は2023年2月よりそれぞれ営業運転を開始した。3, 4号機建設前の投資判断の段階では、3, 4号機の稼働により、発電用燃料である石炭の入荷量が2倍近くになるため、製鉄所を中心とする物流能力検証の知見を活かし<sup>1)</sup>、発電所の石炭物流専用に設計したシミュレータ<sup>2)</sup>を構築して石炭輸送用の船舶の構成や貯炭用サイロの増設数の検討を実施した。いっぽう、業務面においては、積み地からの輸送や発電所内でのバス～サイロ～ボイラ間の石炭需給物流が複雑化することから、従来の熟練者に依存した人手作業による需給計画業務を継続することは困難と予想された。そこで、これまでに社内の製造拠点において生産計画の立案や製造方針の決定などの計画系業務にシ

ミュレータを活用<sup>3), 4)</sup>した経験をもとに、3, 4号機建設前の投資判断に用いたシミュレータをベースに、発電所内の直近数日から数箇月先までの石炭需給計画の支援システムを新たに構築した。本システムは3, 4号機稼働後の物量増加や、より複雑化する石炭物流に対応できる需給計画業務の実現を目指すもので、その計算結果は非定常操業を含む現実の操業指示に直接利用される。そのため、シミュレータのロジカルな計算精度だけでなく、人間独自の判断とのシームレスな連携方法とその効率化をとくに技術課題として着目した。本稿ではこれら課題に対して開発したシミュレーションシステムの構成および特徴について述べる。

## 1. 対象プロセスと業務の概要

### 1.1 発電所の石炭物流

図1に神戸発電所の物流の概要を示す。発電燃料である石炭は豪州やインドネシアなど海外から数万トンクラスの船舶で輸送され、発電所の専用岸壁からアンローダで荷揚げされ約3万トンの容量を持つ15基のサイロに貯炭される。入荷する石炭には産地により種々の銘柄

\*<sup>1</sup> 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター \*<sup>2</sup> 電力事業部門 神戸発電所第一発電部 \*<sup>3</sup> 電力事業部門 技術部

があり組成が異なるため、入荷するロットごとに貯炭サイロが割り当てられる。発電機に直結する蒸気タービンは4基あり、それぞれに蒸気を供給するボイラが設置される。貯炭された石炭はスクリーンとクラッシャで粒状を整えた上でこれら4基のボイラ前のバンカに受け入れられたのち、ボイラに供給される。また、アンローダ以降の搬送は全てコンベアで行われ、環境対策としてアンローダ、コンベアのいずれも密閉式となっている。

以上が基本的流れであるが、発電用燃料としての石炭の物流上の特徴を以下に示す。

- (1) ボイラでの燃焼性や燃焼後のばい煙抑制、副産物である灰や石こうの品質確保（セメント原料などに再利用するため）など、各種制約条件を満足するため、組成の異なる複数の銘柄を混合して燃焼させることが通常行われる。これを「混炭」と呼び、銘柄の組み合わせや操業状況により比率を変える。
- (2) 貯炭中の石炭の一部は空気に触れることで活性化し発熱する特徴がある。貯炭期間が長期化すると最悪発火する恐れもあるため、サイロ内のガス濃度、貯炭温度、貯炭期間により石炭を別の空サイロに移動させる操作を行う。これを「リサイクル」と呼び、銘柄により発熱特性が異なる。また、リサイクル中はコンベアを利用するため、通常の送炭との物流干渉が生じる。
- (3) 上記のように長期間の貯炭は防災上好ましくないことに加え、都市型発電所で敷地の制約もあるため、貯炭能力を十分に大きく取ることが難しい。そのため、荷揚げに必要な空きサイロが無い状況も起きやすく、その場合は石炭輸送船の待ち（滞船）が発生する。

## 1.2 需給計画業務

発電所での石炭需給計画は、前節で説明した荷揚げ～貯炭～ボイラまでの石炭の移動経路と流量を決める業務であるが、移動経路には自由度があり、サイロ在庫や石炭輸送船の状況に応じて適切な経路を選択する必要がある。いっぽう、流量は移動経路終端のボイラでの石炭消費量および経路上の設備やコンベアの能力などから従属的に決まる。そのため、石炭需給計画のポイントは石炭の移動経路を時間軸上で設定することであり、物流の切り替え方とそのタイミングを決定する業務であるとも言える。ここで物流の切り替えは下記の3種類である。

- ①荷揚げ：石炭輸送船の航海情報、アンローダやコンベアの保全計画をもとに荷揚げを開始する時期、荷揚げ先のサイロを決める。
- ②混炭：ボイラごとの発電計画をもとに、供給する銘柄（1～3種類）とサイロ、銘柄ごとの使用比率（混炭比）を決める。通常はサイロが空になった時点で混炭を切り替える。
- ③リサイクル：貯炭日数、貯炭温度、サイロの空き状況予測をもとに、送炭の開始時期、送炭元の貯炭中サイロ、送炭先の空きサイロを決める。また、サイロの補修がある場合はその前に石炭を別のサイロに移動させるが、これもリサイクルと同様に扱う。

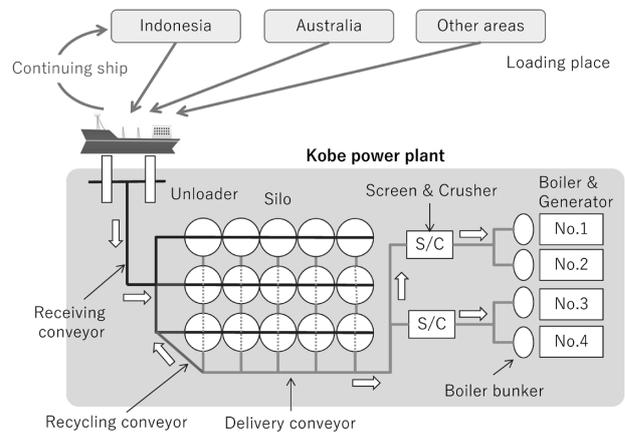


図1 神戸発電所の物流概念図  
Fig.1 Outline of Kobe power plant logistics

現実の石炭物流のコントロールにおいては、これらの物流切り替えを決定する上で考慮する条件は多岐に渡り、以下のような難しさがある。

- 1) リサイクルはサイロの受入側と払出側両方のコンベアを使用するため、荷揚げやボイラ送炭との物流干渉を考慮する必要がある。例えば、防災上リサイクルを優先することにより、荷揚げの延期や中断、あるいはボイラ送炭の経路に制約が発生する可能性がある。
- 2) 石炭物流の切り替え方は自由度が大きく、切り替えの影響は時間的空間的に伝播（でんば）するため、切り替え時にその影響を正確に予測することが非常に難しい。つまり、試行錯誤的に物流計画を立案することが必要な構造となっている。
- 3) 石炭輸送船の到着時期、貯炭温度、設備のトラブルなど計画する上での不確実要素が存在するため、需給計画は最新の情報をもとに日々修正する必要があるが、2)に示した物流伝播により前日の計画を一部修正するに留まらず全体を見直す必要がある。
- 4) 標準的な物流の切り替えルールや制約は存在するが、状況により標準的な切り替えルールに沿わないイレギュラーな操業も行われる。例えば、新規銘柄の試験的操業ではサイロが空になる前に混炭を何度も切り替える場合がある。また、特定の炭種を優先して使用する必要が生じた場合は、先に到着した石炭輸送船を待たせて後に到着する石炭輸送船から先に荷揚げする場合がある。

これらのうち、1)～3)は標準的な条件の範囲での物流コントロール（定常操業）であり、事前に設定したパラメータ、ルール、ロジックに基づくシミュレーションモデルの適用が有効であると考えられる。いっぽう、4)は標準範囲外の物流コントロール（非定常操業）であり、論理的なモデル化は困難である。そのため、人の判断を積極的に活用することが有効な部分と考えられる。これら定常操業と非定常操業は時間的につながり互いに影響し合うため、シミュレーションモデルと人の判断を双方向に連動させることが需給計画をシステム化する上での課題となる。

## 2. 石炭物流シミュレーションモデル

### 2.1 構成要素

今回構築した需給計画用シミュレーションシステムの構成を図2に示す。本システムはシミュレータに実績、計画、制約パラメータなど種々のデータを連携させることで、発電所内の石炭の動きを状況や前提が異なる条件下で計算することができる。以下に構成要素の概要を示す。

#### ○物流要素モデル (Logistics elements model) :

物流のベースとなる設備や施設に対応し、バッファ、機械、搬送の3種類の要素から構成される。バッファは容量、機械と搬送は単位時間当たりの処理重量を能力として持ち、搬送にはバッファまたは機械を端点とする経路が設定される。

#### ○実績情報 (Actual data) :

計画は実績と接続するため、サイロ在庫や配船の実績を入力する。また、混炭計算に利用する石炭ロットごとの成分検査情報、リサイクル時期の決定に利用する貯炭温度やガスクロデータも実績として取得する。

#### ○事前計画情報 (Preliminary planning data) :

需給計画の前提となる事前に作成された計画として、配船、発電量、設備保守などの情報を入力する。

#### ○マスタ (Masters) :

物流要素の能力、銘柄の組み合わせと混炭比、銘柄ごとの最大貯炭日数などの標準的な制約条件のパラメータを設定する。

#### ○シミュレーションエンジン (Simulation engine) :

本シミュレータは一定時間間隔で物流状態の変化を計算する動作方式である。そのため、時刻を更新するごとに物流の切り替えが必要かどうかを判断する部分、およびその間の物量の変化を計算する部分から構成される。さらに、物流切り替えはユーザインタフェースを介して人の判断を反映できる。

#### ○シミュレーションログ (Simulation log) :

シミュレーション過程の情報として、物流の切り替

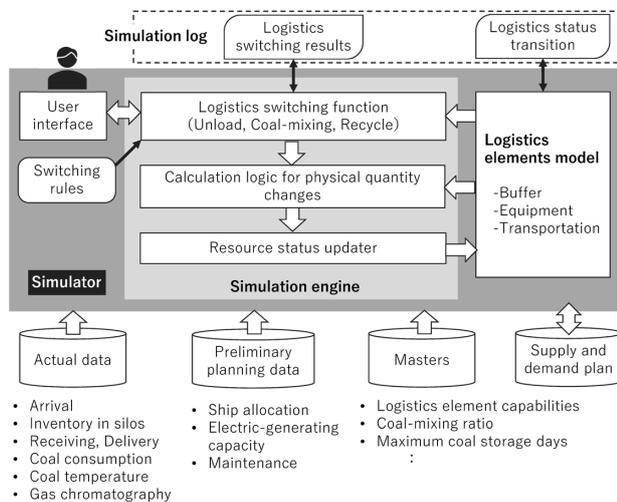


図2 システム構成  
Fig.2 System configuration

えの結果と各物流要素の状態の時間推移を保存する。前者は切り替えのタイミングで後者は一定時間ごとに出力する。これらは後述する本システムの特徴である後戻り再実行時に利用される。

### 2.2 シミュレータの動作

本節では図3に示すシミュレータ本体の動作フローをもとに、シミュレータの動作上の特徴を説明する。

- 時刻を更新しながら動作するため一定時間間隔 ( $\Delta T$ : 可変) で時刻を更新し、その間の物量変化を計算することで、離散的に物量状態を更新する。 $\Delta T$  は小さく設定するほど時間軸上の変化を詳細に計算できるが、計算時間が長くなるため、予備実験により1時間に設定した。
- 物流の切り替え判断を各時刻で行い、その結果に応じて物量変化を計算する。物流の切り替え判断はシミュレータの持つ標準ルールに基づくモードとユーザの判断を反映できるモードの2種類がある。なお、ユーザ判断の反映方法は次章で説明する。
- 翌日にシミュレーションする場合や、次章で紹介する後戻り再実行時にユーザ判断の結果を再利用できるように、各時刻において前回の物流切り替え判断を検索し実行可能であれば採用する。

### 2.3 精度検証

本シミュレータはシミュレーション過程でユーザの判断を反映できる点が特徴ではあるが、需給計画業務に適用するには、前提として標準的なシミュレーションロジックにより現実的な物流を精度よく再現できることが求められる。そこで、過去の物流実績とシミュレータによる物流計算の比較をおこなった。ここで、シミュレータに設定した条件は以下の通りである。

- 配船情報: 石炭輸送船の積載銘柄, 重量, 港への到着時刻

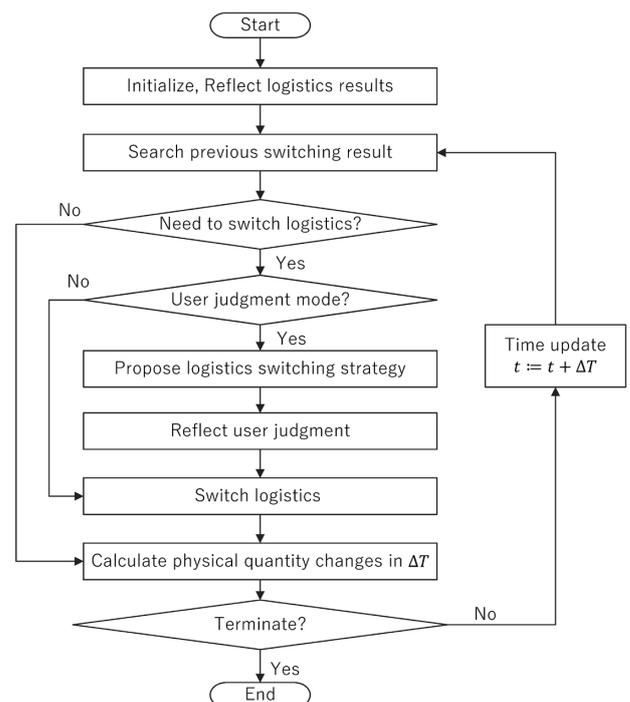


図3 シミュレーションの流れ  
Fig.3 Simulation flow

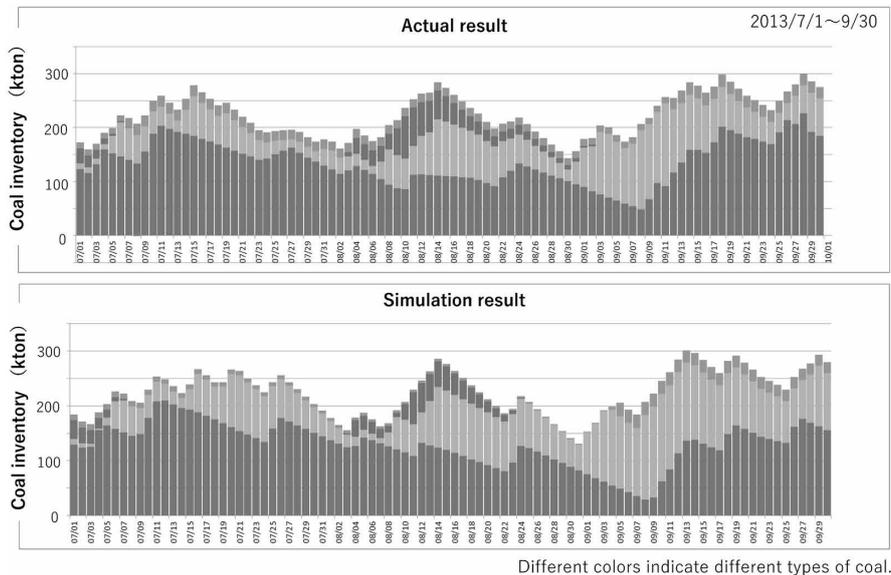


図4 シミュレーション結果と実績との比較 (石炭在庫量の推移)  
 Fig.4 Comparison between simulation results and actual results(changes in coal inventory)

- 在庫情報：各サイロの初日での銘柄と在庫量
  - 石炭需要：日ごとの各ボイラでの石炭消費量
  - 貯炭日数：各サイロ在庫の初日時点での貯炭日数
- また、混炭やりサイクルのルールについては、操業上の標準的な条件を設定した。

上記設定のもとで、3箇月間のシミュレーションを実行した結果と実績との比較例として、サイロ在庫全体の推移を図4に示す。図4は銘柄を特性により4種類の炭種に分類した時の在庫の構成である。物流の切り替えはシミュレータ独自に決定しているが、在庫構成の時間的な変化が実績を良く再現していることが分かる。なお、1箇月目あたりで在庫の総量に差が見られるが、これはアンローダのトラブルが発生したためである。

その他、リサイクルした石炭量、平均の滞船時間についても実績と比較し数%の差であることが確認できたため、本シミュレータを需給計画作成のベースとして利用することとした。

### 3. 人の判断との連携

#### 3.1 対話形式による実行モード

上述のように、本シミュレーションシステムはユーザーによる物流切り替えの判断をシミュレーション過程で反映できる点が特徴である。そのため、標準ルールに基づくシミュレータの判断を人の判断に変更する、新たな判断を追加する、あるいは、判断のタイミングを変更することが可能な実行モードを備えている。以下にその特徴を示す。

- シミュレータが物流切り替え必要と判断した時点でいったん停止し判断結果を提示する。ユーザーはその内容を確認し変更することができる。例えば、混炭に使用するサイロや混炭比、リサイクルや荷揚げ先のサイロを変更する。
- シミュレータの提示した物流切り替えのタイミングをユーザーが延期することができる。例えば、石炭輸送船の荷揚げ順を入れ替えるための荷揚げの延期

や、払出中のサイロではリサイクルの延期も可能である。

- 次節の後戻り再実行機能と組み合わせることで、一度シミュレーションを実行した後に、新たな物流切り替えを実行期間内の任意の時刻に設定できる。例えば、サイロが空になる前に混炭を切り替える、早めにリサイクルを開始するなど標準ルールでは物流切り替えが発生しないタイミングでの切り替え設定が可能となる。

物流切り替えの判断結果は全て判断ログとして時刻や内容が保存され、次回実行時に読み込んで再利用できる。これにより、ユーザーが同じ設定を繰り返し入力する必要がなくなる。さらに、前回の入力を変更して異なる物流切り替えを設定することもできる。図5に時間をおいて再度シミュレーションするケースを例に、前回の物流切り替え判断結果を利用するイメージを示す。ここでは、1回目のシミュレーションを4/1の0時から開始し、①から⑤の5回の物流切り替えを行っている。このうち、②、③、および⑤の3回がユーザー判断による切り替えである。また、5回の物流切り替え判断結果はその

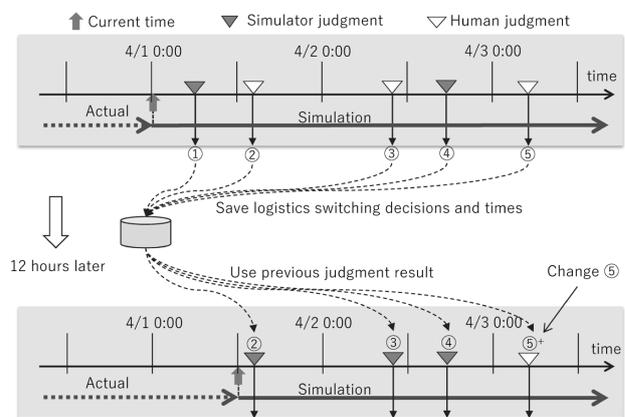


図5 前回の物流判断結果を利用したシミュレーション  
 Fig.5 Simulation using results of previous logistics switching decision

時刻とともにログとして保存される。次に12時間後の4/1 12:00に再度シミュレーションを開始する際、保存されたログのうち開始時刻以降の②から⑤の物流切り替え判断を読み込むことで前回のユーザ判断結果が反映される。この例では、⑤の物流切り替えを前回判断結果から修正することで、4/3以降の物流計画が修正される。

### 3.2 後戻り再実行機能

需給計画の作成においては、シミュレーション実行と修正（物流切り替えの変更）を何度か繰り返しながら、より望ましい計画に仕上げて行くことになる。このプロセスにおいては前節でも述べたように任意の時刻にシミュレーション状態を戻した上で、物流切り替え判断を追加・変更できる必要がある。ここで、任意時刻に戻す方法としては、物流を逆向きに再生して所定時刻で停止する方法<sup>5)</sup>と各時刻での物流状態、すなわちサイロやバンクの在庫、石炭の向け先、延期中の判断などを保存しておき所定時刻の物流状態にシミュレータ内を置き換える方法が考えられる。前者は逆向き再生に順方向シミュレーションと同じだけ時間が必要となる点で、後者は時間刻みの数（需給計画の場合数千〜数万）だけ状態を保存する必要がある点でいずれも現実的では無い。

そこで、本システムでは、物流状態の保存は日単位のような粗いメッシュで行い、保存時刻から後戻り先の所定時刻までは事前シミュレーション（Pre-simulation）を行うことで、任意の時刻まで短時間で戻れる機能を新規に開発した。図6に後戻り先時刻への復帰を実現する方法の例を示す。この例では2日ごとに物流状態を保存しており、戻り先である4/6 15:00の直近保存時刻である4/5 0:00の物流状態にリセットした後、39時間の事前シミュレーションを実行している。この間4/5 12:00には前回実行時の物流切り替え判断を読み込むことで、ユーザ判断があった場合でも正確に物流状態を再現できる。

所定時刻に戻った時点でシミュレータは一時停止し、新たな物流切り替え判断を設定する、あるいは前回の判断を変更することで、何度でも途中から異なる条件でのシミュレーションが可能となる。

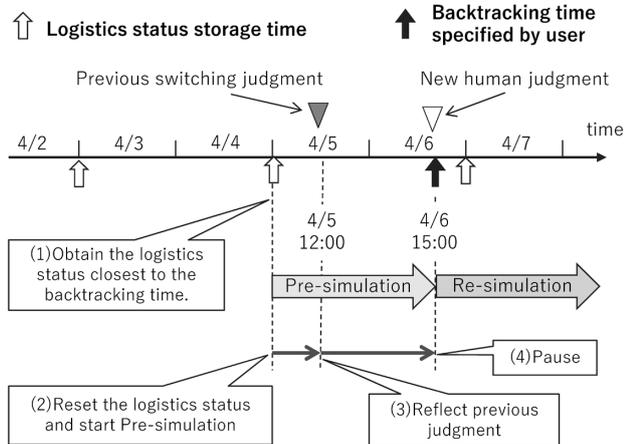


図6 後戻り先時刻への復帰と物流状態の再現  
Fig.6 Return to backtracking time and reproduction of logistics status

### 3.3 実行例

現実を模擬したデータを用意し、シミュレータ上で上記の後戻り再実行機能を利用して再計画した際の需給計画画面例を図7および図8に示す。ここで、これらの画面例はサイロ（縦軸）ごとの日別の在庫量（横軸）を示しており、最上段の行は石炭輸送船の航海番号が荷揚げ開始日に設定されている。また、図の中のA~Lは石炭の銘柄を、その下の数値はサイロの在庫量 [kton] をそれぞれ示している。

図7は混炭設定のみ著者の判断で設定し、荷揚げとリサイクルはマスタに設定したルールに基づいてシミュレーションした日ごとの需給計画画面である。このシミュレーションでは、11/1 16:00にNo.2サイロの在庫が貯炭期限に達したために空き状態のNo.12サイロへのリサイクルを開始している。リサイクルの間11/2に石炭輸送船（★印）が到着したが、リサイクル優先と夜間入

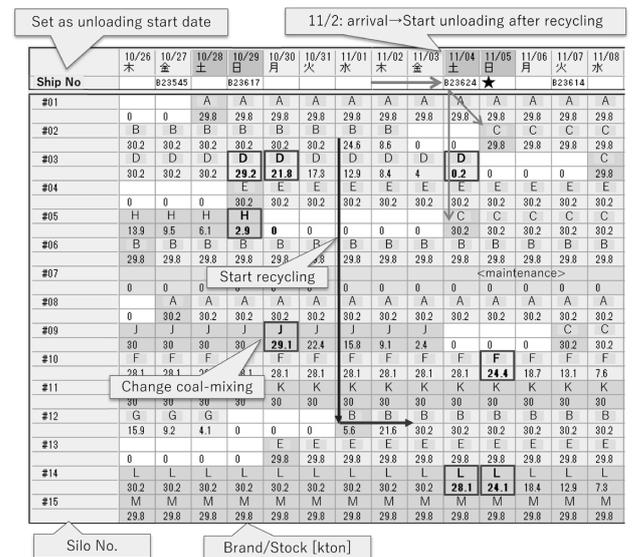


図7 需給計画画面の例（荷揚げとサイロ在庫計画）  
Fig.7 Example of supply and demand planning screen (unloading and silo inventory)

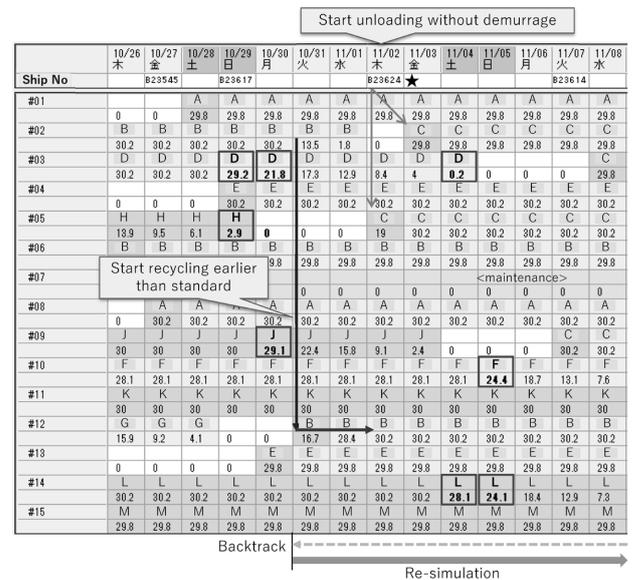


図8 後戻り再実行の例（リサイクル開始を40時間早めた場合）  
Fig.8 Backward re-simulation example (Case of starting recycling 40 hours earlier)

港不可の制約のためリサイクル終了後に入港できる11/4 8:00に荷揚げを開始している。

図8は再シミュレーション後の需給計画画面である。ここでは、リサイクルの開始を早めるため、10/31 0:00に後戻りしNo.2サイロのリサイクルを人が設定し、その後はシミュレータのみで実行している。その結果、11/2に到着した石炭輸送船(★印)は図7では発生していたリサイクル待ちによる滞船を発生させることなく11/2から荷揚げを開始できている。また、11/4と11/5の混炭切り替えは図7と図8で一致しており、前回の物流切り替え判断が再利用されていることも分かる。このように物流の切り替えタイミングを基準よりも早めるようなシミュレータ単独で実現するには難しい計画が、人の判断と後戻り再実行機能を利用することで実現することができる。

#### 4. 業務での活用

本シミュレーションシステムは発電所のプロセスデータや業務系の情報とリンクさせ、需給計画業務と並行した試行を通して機能面や操作性の改善を進めた結果、実操業に適用可能な計画を立案できることが確認できた。具体的な本システムの使い方を以下に示す。

- 配船がほぼ確定している直近約1箇月間は人の判断と連携させ、イレギュラーな操業を含めて精密に計画を作成する。その結果は石炭物流の操業指示に展開され、操業や石炭輸送船動静の変動を反映させるため日々計画を修正する。
- 1箇月目以降半年程度先までは、配船や計画修理の予定をもとにシミュレータの自動判断モードで計画を作成する。シミュレーション自体は直近の計画と接続しているため、直近計画の修正影響が反映される。その結果は配船(調達)の調整に活用する。
- 需給計画の結果得られるボイラごとの混炭計画をもとに燃焼後の灰や石こうの発生量を予測し、これらを再利用するための在庫管理や出荷計画に活用する。

今後、本システムを継続的に運用することで以下の効果が期待される。

- 当初の目的として、ボイラが2基から4基に増設されたことによる物量の増加と物流の複雑化に対応できる需給計画業務が可能となる。
- 計画に要する時間が短縮することで、混炭の組合せ、荷揚げやリサイクルのタイミングなどを変えた複数ケースの比較が可能となり、滞船の抑制と安定操業が可能となる。
- 配船を変更した場合のシミュレーションも可能であるため、発電所側で配船の調整案を作成した上で石炭調達部門に早期にリクエストすることができ、在

庫の安定化による操業リスクの低減が可能となる。

- これまで特定の担当者に埋もれていた種々の計画ノウハウが可視化・共有化されるため、需給計画業務を立案できる人材の拡張につながる。

**むすび** = 当社が保有するシミュレーション技術は、これまでに鉄鋼、非鉄など素材系を中心に多品種化が進展する種々の社内製造工程や物流プロセスへの適用を通して機能の強化・拡張とモデルの表現力向上を図って来た。これらの適用対象はオフライン、すなわち設備や物流要素の投資判断に資する能力検討や複数の製造パターンの比較検討といったリアルな現場とはいったん切れた形で動作させ、その結果はリアルな現場に直接反映されるものでは無かった。そのため、精度面での一定の粗さが許容される部分がある。いっぽう、本シミュレータはリアルな世界の操業現場と直接つながるオンライン系であり、現実の操業をそのまま再現できるレベルの精度が要求される点で明確な違いがある。ただし、現実の操業現場ではシミュレータでは認知できない情報に基づいたイレギュラーなオペレーションが常に行われる。そのため、データとロジックで駆動されるシミュレーション技術をベースに物流切り替えポイントでの人の判断を連携させる新たな駆動モデルに発展させることで、実操業につながられるレベルの精度を実現できた。

今後日々の業務で安定的に使い続けるためには、調達する石炭や操業方法の変化にマスタ設定を常時整合させる仕組みが必要である。これには、実績データとマスタ設定の不整合を検出しアラームを発信する方法が考えられる。また、操作性を高めるためのより使いやすいユーザインタフェースも課題となる。さらに、石炭物流全体を考えた場合には、発電所での需給計画と石炭調達部門での配船計画をシステム連携させ、積み地から発電ボイラまでの一貫需給計画の実現を目指したい。

なお、ユーザとの対話形式によるシミュレータの実行や後戻り再実行など本シミュレータに搭載した特徴的な技術は、発電所の物流に限らず生産工程や工場内外の搬送工程のシミュレーションにも広く適用可能であるため、今後グループ内の物流管理の課題に対して広く横展開してゆく所存である。

#### 参考文献

- 1) 岩谷敏治. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.68, No.2, p.29-35.
- 2) 神戸製鋼所. 梅田豊裕. 石炭物流状況管理装置及び方法. 特許第7011570号. 2022-1-18.
- 3) 松田浩一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2001, Vol.51, No.3, p.28-35.
- 4) 掘尾明久ほか. システム制御情報学会論文誌. 2018, Vol.31, No.10, p.347-355.
- 5) 日立製作所. 前田和彦ほか. シミュレーション方法. 特開平1-270164. 1989-10-27.

(解説)

# 材料開発および利用におけるMI技術

和田 堯\*1・井元雅弘\*2・中山啓太\*2・倉 千晴\*3(博士(工学))・小林拓史\*4

## MI Technology in Developing and Utilizing Materials

Takashi WADA・Masahiro INOMOTO・Keita NAKAYAMA・Dr.Chiharu KURA・Takufumi KOBAYASHI

### 要旨

効率的に新材料開発を進めていく手法としてMaterials Informatics/Materials Integration (MI) 技術が注目されている。当社が扱う幅広い金属材料の材料開発および利用技術の開発においてもAIやシミュレーションに代表されるMI技術の活用を進めている。その中で代表的な事例として、溶接材料と薄鋼板を対象に実験データを基にAIで材料特性を予測し、化学成分や熱処理条件を探索して目標特性を達成する材料を見出した事例や、MIを活用して少ない実施例で材料特許を取得した事例を解説する。また厚鋼板、銅合金を対象に原子レベル、材料組織・特性、部品への加工性を評価するシミュレーションを構築して机上で開発を行った事例も解説する。最後にMIを有効に広く活用していくための展望について述べる。

### Abstract

Materials Informatics/Materials Integration (MI) technology is gaining attention as a method to advance the development of new materials efficiently. Kobe Steel is actively utilizing MI technology, exemplified by AI and simulations, in developing and utilizing a wide range of metal materials and their associated technologies. This article explains some representative cases: one involves using AI to predict material properties based on experimental data for welding materials and thin steel sheets, enabling the discovery of materials that achieve target properties by exploring chemical composition and heat treatment conditions. The other case explains how MI was used to obtain a material patent with few embodiments. Also explained is a case where simulations were constructed to evaluate the atomic-level material structure, properties, and processability into parts for thick steel plates and copper alloys. This allowed the development to be conducted on the desk. Finally, this article discusses the outlook for broadly utilizing MI to its fullest potential.

### 検索用キーワード

MI, マテリアルズ・インフォマティクス, マテリアルズ・インテグレーション, 分子動力学法, 組織予測, 材質予測, FEM, AI, 機械学習

まえがき=カーボンニュートラルのように世の中を取り巻く環境が大きく変化する中で、材料や部品に求められる要求はますます多様化・複雑化・高度化して開発競争が激化している。いっぽうで、少子高齢化・人口減少に伴い開発人材の確保が難しくなることが予想される中、より効率的に新材料開発を進めていく必要がある。

従来の材料開発では実験・理論・研究者の経験と勘に依存した開発スタイルが主流であり、膨大な時間と労力が必要になることが多いが、近年、これを解決する新たな材料開発手法の一つとしてMaterials Informatics/Materials Integration (MI) が注目されている。MIは米国で2011年に始まったMaterials Genome Initiativeを筆頭に、日本でも2010年代半ばから機能材料を対象とした情報統合型物質・材料イニシアティブ (MI<sup>2</sup>I) や、構造材料を対象としたSIP-MI<sup>1), 2)</sup>などの国家プロジェクトで基礎研究が進められてきた。その後、素材メーカーでもMIを活用した材料開発を実施したり、ITベンダが色々な関連サービス提供を始めたりと産業応用が拡大している<sup>3)</sup>。当社でもDX戦略の一つとしてMIによる材料開発の変革を掲げて取組を進めている。

MIにはAI/機械学習に代表される情報科学を材料科学に応用していくMaterials Informaticsや、SIP-MIで提

唱されている実験、理論、計算/シミュレーションと情報科学を融合していくMaterials Integrationの考え方がある。代表的なMIによる材料開発の手法は、演繹(えんえき)的なアプローチとして実現象を捉えた物理モデルを構築してシミュレーションにより机上で開発を行う手法と、帰納的なアプローチとして実験やシミュレーションにより生み出されたデータをAIで分析して化学成分などの設計情報と材料特性との関係を見出していく手法がある。

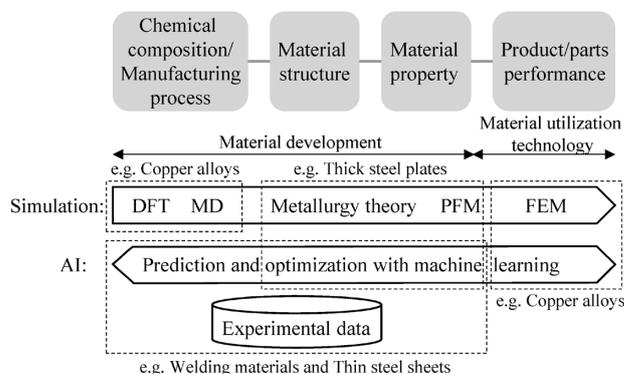


図1 材料開発から利用におけるMI技術活用  
Fig.1 Application of MI technology for material development and utilization

\*1 技術開発本部デジタルイノベーション技術センター \*2 技術開発本部材料研究所 \*3 技術開発本部応用物理研究所 \*4 技術開発本部ソリューション技術センター

シミュレーション技術には第一原理計算や分子動力学法による原子レベルのマイクロ計算、冶金理論やフェーズフィールド法による材料組織・特性のメゾスケールの計算、部品への加工性や強度特性を評価する有限要素法(FEM)のマクロ計算と、取り扱う現象のスケールに応じた技術がある。AI技術には設計情報から材料特性の予測モデル(順問題解析)を線形回帰、ガウス過程回帰、ニューラルネットワークなどの回帰手法によりデータから学習する技術や、所望の材料特性を実現する可能性の高い設計情報をベイズ最適化などの最適化技術で探索(逆問題解析)する技術がよく用いられる<sup>4), 5)</sup>。

当社では鉄鋼・アルミニウム合金・銅合金・溶接材料といった幅広い金属材料を対象に、化学成分・製造プロセス条件を見極めて所望の材料特性を実現する材料自体の開発と、材料から部品への加工や部品としての性能を担保する構造設計などの材料利用に関する開発を行っており、これら各種金属材料での材料開発および利用において適材適所でMI技術の活用(図1)を進めている。

本稿では、1章で溶接材料、2章で薄鋼板を対象に、実験データを基にAIで材料特性予測および化学成分や熱処理条件の探索を行った材料開発の事例を、3章で厚鋼板、4、5章で銅合金を対象に、ミクロおよびマクロの各スケールのシミュレーションを構築して一部AIを組み合わせた材料開発および利用の事例を解説する。

## 1. 溶接材料での実験データとAIを活用した材料開発

本章では溶接材料の一種であるアーク溶接用のフラックス入りワイヤを対象にAIで実験データから材料特性予測モデルを学習し、強度・じん性バランスに優れた材料の化学成分を探索した事例を紹介する。

今回開発したAIによる予測・探索技術の概略を図2に示す。従来の溶接材料開発は、①原材料配合、②複数原材料から構成される溶接材料の化学成分(溶材成分)、③溶接後の溶接金属の化学成分(溶金成分)、④溶接金属の機械的特性(溶金特性)の各関係性を考察しながら実施している。そこで、この溶接材料開発の特徴を考慮したMI技術として、①~④の各順逆方向の関係をつなぐAIの予測・探索技術を開発した<sup>6)</sup>。予測技術は①→②、②→③、③→④の各順方向の計算を行う予測モデルを構築し、①→④の全体の予測は各予測モデルを連結させることで実現した。また予測モデルを活用して④→③→②→①の逆方向の計算を行う探索技術も開発した。各予測・探索技術について詳しく説明する。

まず①原材料配合から②溶材成分の予測は線形式で表

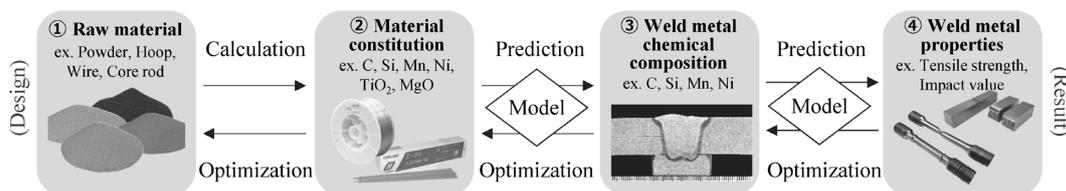


図2 溶接材料設計におけるMI活用コンセプト  
Fig.2 Concept of MI application for welding material designing

せる特徴を活かしてモデル化し、②溶材成分から①原材料配合の探索は線形モデルに効果的な凸最適化手法をベースにした手法を開発した。つぎに②溶材成分から③溶金成分、③溶金成分から④溶金特性の各予測モデルは複雑な溶接現象や材料組織形成に関わり明確な関係性を物理理論に従って構築することが現時点では難しいため、実験データから機械学習手法の一種であるガウス過程回帰により予測モデルを学習した。しかし、予測モデルの説明変数である溶材成分や溶金成分の種類は数十個と多く、限られた実験データに対して単純に機械学習手法を適用しただけでは良好な予測精度の実現が難しかった。そこで、予測精度を向上させる工夫として材料知見により成分の中から影響の小さいものは除外して説明変数の絞り込みを行ったり、溶金特性の一つであるじん性の予測では試験温度とぜい性破面率の材料学的な関係をモデルに取り込んだりして独自の予測モデルを開発した。さらに、④溶金特性から③溶金成分、②溶材成分の探索は予測モデルに用いたガウス過程回帰と相性の良いベイズ最適化を用いた。

今回、本技術を高強度鋼を用いた構造物向けのアーク溶接用フラックス入りワイヤに適用した。まず広範な強度クラスの数千点の実験データを収集し予測モデルを学習した。つぎに検証題材として設定した溶接金属の引張強さ(TS)  $\geq 830$  MPa、0℃じん性( $vE0^\circ C$ , 0℃のシャルピー吸収エネルギー)  $\geq 90$  Jを達成すると予測される原材料配合を探索し、実際にワイヤを試作して溶金特性を評価した。さらに、評価した結果を実験データに追加して同様の流れを数サイクル試行した。図3に人の知見に基づいて試作した従来結果(白印)と、MIに基づいて試作した結果(黒印)を示す。MIでは従来設計に対して大胆に複数の成分を変えた設計を提案しており、

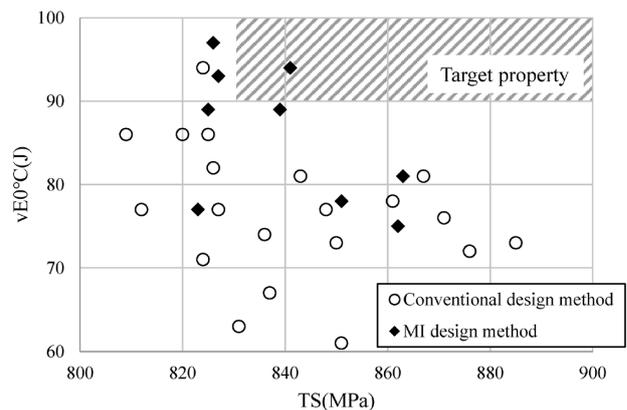


図3 従来設計手法とMI設計手法による材料特性の比較  
Fig.3 Comparison of material properties between conventional design method and MI design method

その中の一つの材料はTS,  $vE0^{\circ}C$ の特性バランスが最適化され目標特性を達成することができた。MIにより効率的に目標特性を達成する材料を見出したことに加え、従来の設計指針と異なる成分を活用するという新たな気付きも得られた。

## 2. 薄鋼板での実験データとAIを活用した材料開発

本章では、自動車用超ハイテンの材料開発を対象にこれまで当社に蓄積された実験データを用い、AIによる特性予測モデルを構築して候補材料の探索を行うことで目標特性を満足する材料を発見でき、さらには少ない実施例で特許取得まで至った事例を紹介する。

自動車用超ハイテンは衝突安全性向上の観点から引張強さ (TS)、成形性確保の観点から全伸び (EL) および穴広げ性 ( $\lambda$ ) といった、互いに背反する機械的特性の両立が求められる。また一般に添加成分を多くすれば機械的特性は向上する傾向にあるが、溶接性や製造性の観点から鋼材成分には上限がある。こうした制約範囲内で優れた機械的特性を実現する超ハイテンの材料開発は難易度が高く開発に要する実験コストは膨大である。そこで、MI技術を活用して少ない実験で所望の材料を探索することを試みた。

まず当社でこれまで蓄積されてきた超ハイテンの実験データ 369 点を用い、AIによる特性予測モデル構築を行った。説明変数には鋼材成分、熱処理条件に加えて「 $Ae_3$ 点と均熱温度 ( $T_1$ ) の差」や「 $Ms$ 点と冷却停止温度 ( $T_2$ ) の差」といったパラメータも併用した。これらのパラメータは材料組織の変化をより直接的に捉え、機械的特性の予測精度を向上することを狙って導入したものであ

り、 $Ae_3$ 点や $Ms$ 点は熱力学計算ソフト Thermo-Calc<sup>7)</sup>を用いて成分情報から算出可能である。目的変数はTS, EL,  $\lambda$ の3変数とし、予測手法にはガウス過程回帰を用いた。TS, ELの予測値と実験値の関係を図4に示す。TS, ELともに高精度に予測することができた。

つぎに構築した予測モデルとベイズ最適化を用い、検証題材として設定したC, Si, Mnの成分範囲内で目標特性：TS  $\geq 950$  MPa, EL  $\geq 22\%$ ,  $\lambda \geq 20\%$ を満足する材料の探索を実施した。ベイズ最適化により所望の特性を満たす確率が最も高いと予測される成分・熱処理条件を複数提案させ、実際に材料試作・特性評価を行った。1回目の探索では18材料を提示させ、2回目の探索では1回目の実験データを学習データに追加し、さらに2材料の探索を実施した。その結果、2回目の探索で目標特性を満足する材料を発見することができた。

さらに上記検討で発見した成分・熱処理条件について、AIによる特性予測モデルを用いて少ない実施例で特許取得することを試みた。具体的なロジックはつぎのとおりである。①まず大量の実験データを用いて成分・熱処理条件から特性を予測するAIモデルを構築したことを説明し、予測値と実験値の比較からこのモデルの予測値が信頼に値することを示す。②AIモデルにより請求項範囲の内・外の成分・熱処理条件で特性を予測したバーチャルデータを作成し、請求項範囲が妥当であることを説明する。③実際の実験データで実施例と比較例の2点を示す。表1に特許出願に用いた実験データとバーチャルデータを示す。ここで、バーチャルデータの特性欄の○は目標特性を満たすもの、×は満たさないものを示す。通常は請求項範囲を規定するためにそれぞれのパラ

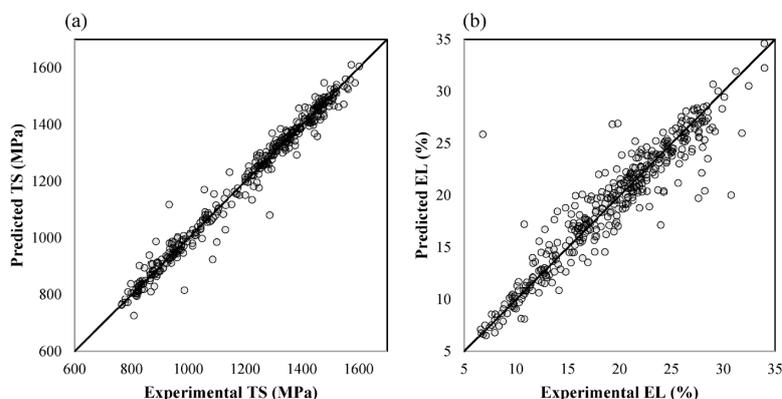


図4 各特性の予測値と実験値の関係 (a) 引張強さ, (b) 全伸び

Fig. 4 Relationship between predicted and experimental values of each property (a) tensile strength, (b) total elongation

表1 特許取得に用いた実験データとバーチャルデータ

Table 1 Experimental data and virtual data used for patent acquisition

Data No	Chemical compositions of materials								Annealing condition parameters					Mechanical properties				
	C	Si	Mn	Al	Ti	Ni	Mo	Cr	$T_1-Ae_3$	$T_{preAT}$	$Ms-T_2$	$T_{postAT}$	$t_{preAT}$	$t_{postAT}$	TS	EL	$\lambda$	
	(mass %)								(°C)					(s)			(MPa)	(%)
Experimental-Data 1	0.20	0.8	2.0	0.04	0.00	0.0	0.0	0.5	-9	500	180	400	10	300	983	24.2	39.0	
Experimental-Data 2	0.24	0.6	2.4	0.60	0.00	0.0	0.0	0.0	24	450	218	460	90	20	933	19.1	42.2	
Virtual-Data1	0.20	0.8	2.0	0.04	0.00	0.0	0.0	1.0	130	500	50	400	10	300	○	×	○	
Virtual-Data2	0.20	0.8	2.0	0.04	0.08	0.0	0.0	0.0	110	500	100	400	10	300	×	○	○	
Virtual-Data3	0.40	2.0	2.0	0.04	0.00	0.0	0.0	0.0	48	380	5	380	100	450	○	×	×	
Virtual-Data4	0.20	0.8	2.0	1.2	0.00	0.0	0.0	0.0	-12	450	200	400	23	300	×	○	○	
Virtual-Data5	0.20	0.8	2.0	0.04	0.00	0.5	0.0	0.0	130	450	100	400	5	300	×	×	○	
Virtual-Data6	0.20	0.8	2.0	0.04	0.00	0.0	0.2	0.0	110	500	50	400	5	300	×	×	○	

※○: achieve target property. ×: not achieve target property

メータを変化させた多数の実験データに基づく実施例を用意する必要があるが、今回は大部分をAIで予測したバーチャルデータで代用することで、実際の実験データはわずか2点だけの特許を構築することができた。本特許を出願し2022年10月に特許査定を取得、登録特許<sup>8)</sup>となった。

### 3. 厚鋼板での冶金および破壊力学モデルとAIを活用した材料開発

船舶、建築鉄骨などの大型構造物に用いられる厚鋼板は溶接により組み立てられる。鋼板の溶接熱影響部(Heat affected zone, HAZ)は一般に母材よりじん性が低下するため、HAZじん性の確保が構造物の安全性を確保する上で重要となる。実験的にHAZじん性に対する成分や溶接条件の影響を評価するには鋼板の溶製や圧延に加え、溶接施工または溶接時の熱履歴を模擬した熱処理が必要となり多くの試作コストを要する。そのため多数の実験データに基づくAIによる予測ではなく、物理モデルをベースにしたHAZじん性の予測と逆問題解析による厚鋼板HAZの鋼板成分設計に取り組んだ。本章ではその概要を紹介する。

逆問題解析を行うには成分と熱履歴からHAZじん性の予測を行う順方向の予測モデルが必要となる。順方向の予測には成分・熱履歴から相変態を計算し、その変態温度情報に基づき破壊の起点となる硬質第二相組織などの組織特徴量を計算するモデルと、最弱リンク説でぜい性破壊の発生を判定するモデルを連結させた<sup>9)</sup>。本モデルでは、化学成分の異なる低炭素厚鋼板に対して様々な冷却速度におけるHAZの相変態挙動を再現し、HAZのマイクロ組織の特徴量を用いた計算によってぜい性破壊が主となる温度域でのシャルピー吸収エネルギーの計算が可能である<sup>9)</sup>。また焼き入れ焼き戻しプロセスに対応した母材の強度とじん性予測もモデル化している<sup>2)</sup>。

いっぽう逆問題解析においては、最適化計算にかかる時間を低減するために、構築した順問題のモデルを用いてランダムな化学成分による1万回を超える順方向の計算を実行し、ニューラルネットワークによって近似関数を学習した。このAIモデルを用いて制約条件下で最適

化計算を実施することで、鋼材成分・溶接条件(1パス)の自動設計を行うことが可能となった。逆問題解析の検証題材として、980MPa級の強度を有し、母材およびHAZ部の低温じん性を両立する鋼板の成分とプロセス(溶接入熱)条件の設計を検討した。最適化時の制約条件として、母材強度および母材じん性の下限と合金コストや炭素当量の上限を規定し、4~8 kJ/mmの入熱範囲でHAZじん性を最大化する化学成分を探索した。逆問題解析で抽出した検証用の鋼板成分を表2に示す。表2の鋼板成分を狙い組成として鋼板を溶製し、圧延後に焼き入れ焼き戻しプロセスで母材鋼板を作製し、母材の引張試験とシャルピー衝撃試験を実施した。HAZじん性は再現HAZ熱サイクル材を用いて評価した。なお、じん性の評価指標はシャルピー吸収エネルギーが50 Jとなる遷移温度とした。表3に実験検証の結果と逆問題解析で求めた特性を示す<sup>2)</sup>。HAZじん性の予測値と実験値の差異がはかると比べ比較的大きいが、各特性を満足する実験検証結果が得られた。完全な試作レス化には至らないものの、材料設計指針を得るための手法として有効であると考えられる。これらのモデルの活用により、様々な仕様や制約条件に対応した鋼板開発の効率化への貢献が期待される。

### 4. 銅合金での分子動力学法を活用した材料開発

銅合金は優れた熱伝導性・導電性を示す材料として車載端子、電子機器、機械のケーブルなどの製品に利用されているが、製品の軽量化や小型化の要求に応えるべく、高強度・高導電率を有する銅合金の開発が進められている。銅合金の強度を向上させる方法の一つに固溶強化がある。固溶強化のメカニズムは諸説提唱されているが、仮説の一つとしてサイズ効果説<sup>10)</sup>がある。サイズ効果説は、単一元素の材料(溶媒側)に異なる元素(溶質側)が固溶することにより、溶質原子と溶媒原子の原子半径の違いから格子ひずみが生じ、溶質原子に転位が固着(ピンニング)して転位運動が抑制されることで強度が向上するという考えである。溶質/溶媒原子半径差が大きいほど固溶強化が大きくなる傾向は実験的には知られているが、サイズ効果説の原子レベルのメカニズムはよく分かっていない。そこで2元素銅合金を対象に、多数の原子の動的な解析が可能な分子動力学法<sup>11)</sup>(Molecular Dynamics, 以下MD法という)を用いて溶質原子に固着した転位が離脱する際に必要なデピンニング力を計算するシミュレーションモデルを作成した。さらに、デピンニング力に関連の深い因子を抽出し、簡易

表2 検証試験用の鋼板成分

Table 2 Chemical compositions of steel plate for verification test

(mass%)					
C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
0.06	0.4	1.6	2.0	1.0	0.5
Others Cu, Nb, V, Al					

表3 逆問題解析検証試験結果

Table 3 Inverse problem analysis verification test results

	Base material		HAZ
	Tensile strength (MPa)	50 J transition temperature (°C)	50 J transition temperature (°C)
Predicted value	1,090	-44	-91*
Experimental result	1,011	-45	-58~-70
Target property	> 980	< -40	< -50

\* Worst value in the heat input range for calculating HAZ toughness

にデピンニング力を計算する予測式も開発した。本章ではその事例<sup>12)</sup>を紹介する。

はじめに、MD法に用いるモデルとして溶媒原子にCu、溶質原子にNiあるいはMoを1原子、刃状転位を一つ導入した結晶構造を持つCu-NiおよびCu-Moのモデルを作成した。なお、銅のような面心立方格子(FCC)中の転位は二つの部分転位と積層欠陥に拡張することが知られており、この現象を再現できるようにした。つぎに、MD法にてモデルのすべり面方向に加える力を増加させることにより、部分転位が溶質原子から離脱するのに必要なデピンニング力を求めた。その結果、Cu-NiよりもCu-Moのモデルでは約10倍のデピンニング力が必要であることが分かった(図5)。原子サイズはMo>Ni~Cuであることから、溶質/溶媒原子半径差が大きいほど固溶強化が大きくなる傾向とも一致しており、デピンニング力の比較ができるようになった。

いっぽう、MD法で計算を行うためには各元素の原子間ポテンシャルが必要であり、その作成には膨大な計算コストを要するため色々な元素を固溶させたシミュレーションをすることが困難である。そこで、簡易的な予測式を構築することを検討した。MD法の結果を考察すると、溶質原子の周囲の体積ひずみの最大値と第一原理計算で求めた溶質/溶媒原子間のズレがデピンニング力に関係していることを見出した。そして、デピンニング力 $F_V$ を予測する式(1)を開発した。

$$F_V = \alpha |\Omega| G b^2 |\varepsilon_V^{\max}| \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $\alpha$ : フィットティングパラメーター、 $\Omega$ : 第一原理計算で求めた溶質/溶媒原子間のズレ、 $G$ : せん断剛性、 $b$ : バーガースベクトル、 $\varepsilon_V^{\max}$ : 最大体積ひずみである。これらパラメータは元素に応じて決まる値や簡易的なシミュレーションで求めることができる値である。この予測式を用いて種々の元素を固溶させたときのデピンニング力 $F_V$ を計算することで、固溶強化に対して効果の高い添加元素を机上計算でスクリーニングすることができる。これにより高強度銅合金の新たな設計指針が得られることが期待される。

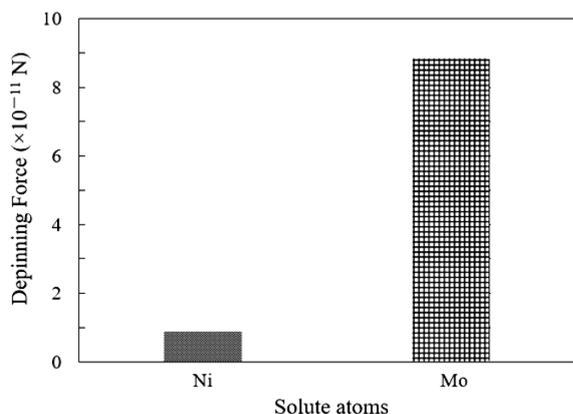


図5 溶質原子から部分転位が離脱する際に必要なデピンニング力  
Fig. 5 Depinning force required for partial dislocation to move away from solute atom

## 5. 銅合金での有限要素解析とAIを活用した材料利用技術の開発

本章では車載端子に用いられる銅合金板材の多工程曲げ加工プロセスに対して、有限要素法によるシミュレーションにAIを組み合わせて加工条件を最適化した事例<sup>13)</sup>を紹介する。

車載端子はピン状のオス端子と内部に板ばね機構を有するメス端子で構成されており、端子特性として重要な導電性は、オス端子をメス端子に挿入した際にメス端子内部の板ばねが変形することによって発生する反力(接圧)によって確保されている。近年、省スペース化の観点から車載端子の小型化が進められているが、接圧を従来同等に保つためには、端子小型化でメス端子内部の板ばねが短くなり、ばね定数が低下する分をばね部の変形量を増やして接圧を確保する必要がある。ただし、ばね部の変形量が増えて塑性変形してしまうと所望の接圧が得られなくなるため材料を高強度化して塑性変形を抑制する必要がある。しかしながら、高強度化により曲げ加工性が悪くなり、製造時に割れ・しわが発生しやすくなるという課題が生じる。曲げ加工性の改善方法として、曲げ加工条件を適切に設計することが挙げられるが、加工条件パラメータが多くあり実験により適切な加工条件を見出すのはコストがかかる。そこで、曲げ加工性をシミュレーションで評価する技術と最適化技術を組み合わせることで、効率的に最適な曲げ加工条件を探索する技術を開発した。

曲げ加工性を評価するシミュレーションとして図6に密着曲げを対象にしたFEモデルを示す。密着曲げは全4工程(1st~4th)で段階的に曲げていく工程であり、1st曲げ半径 $R_1$ 、1st曲げ角度 $\theta_1$ 、2nd曲げクリアランス $C$ 、2nd曲げ半径 $R_2$ 、2nd曲げパンチ半径 $R_p$ 、3rd曲げ角度 $\theta_3$ の計6個が主な加工条件パラメータである。曲げ加工性のシミュレーションでの評価には、過去知見から板表面の割れ・しわの度合いと曲げひずみに一定の相関があることが確認されているため、4th曲げ後の板表面に発生した最大曲げひずみ $\varepsilon_{\max}$ を用いた。有限要素解析には動的陽解法ソフトであるLS-DYNA<sup>14)</sup>を用いた。また加工条件パラメータの変更に伴いFEモデルを変更

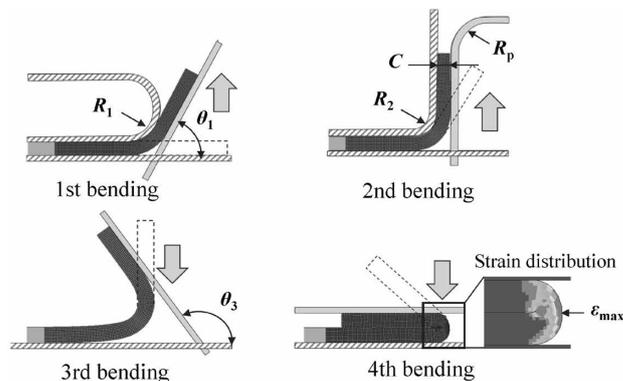


図6 密着曲げ評価のFEモデル  
Fig.6 FE model for contact bending evaluation

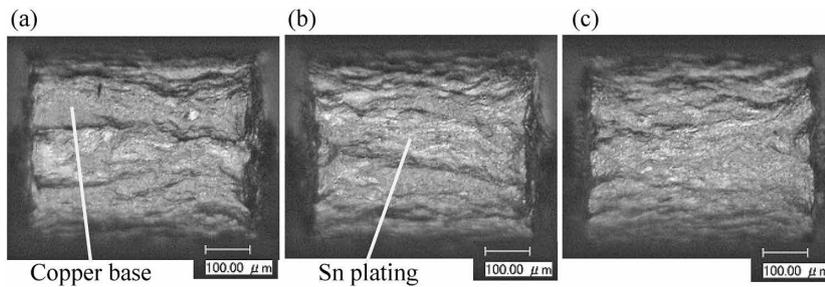


図7 各条件で実験した密着曲げ部の外観 (a) 従来条件, (b) 手動調整条件, (c) 最適化条件  
 Fig.7 Observation of contact bending outside surface experimented under each condition  
 (a) Conventional condition, (b) Manually adjusted condition, (c) Optimized condition

する必要があるためCADおよびメッシュ作成ソフトであるCATIA V5<sup>15)</sup>, HyperMesh<sup>16)</sup>も用いた。

本シミュレーションを用い、最適化技術により最大曲げひずみ $\epsilon_{max}$ が小さくなるような加工条件パラメータを探索した。シミュレーションの計算時間は1ケースあたり約30分と長いので、少ないシミュレーション実行回数で最適解が得られやすいバイズ最適化を用いた。全体の計算フローは、最初に実験計画法により選定した加工条件パラメータでシミュレーションを実行して初期データを取得した後に、バイズ最適化により加工条件パラメータを探索、FEモデルを変更してシミュレーションを実行する。新たに得られたデータを追加して同様の計算を繰り返しながら探索を行っていく。

本技術の有効性を検証するために (a) 従来条件, (b) 手動調整した条件, (c) 最適化条件の3種類の密着曲げ加工用の金型を製作して実験を行った。各条件での密着曲げ部の外観を図7に示す。今回の実験に用いた銅合金板にはSnめっきが施されており、従来条件や手動調整した条件では板表面のSnめっきが剥離し、銅素地が露出した幅が大きいものに対して、最適化条件では銅素地の露出が抑制されており良好な曲げ加工条件であることが確認できた。本技術を活用することで、特性の異なる銅合金板材に対して最適な曲げ加工条件を素早く提示できるようにすることが期待される。

**むすび** = 本稿では各種金属材料を対象にAIやシミュレーションに代表されるMI技術を活用した材料開発および利用の事例を解説した。MIを有効に活用していくためには、当社独自の実験や世の中の文献・特許などで公開されている幅広い実験データを蓄積していくこと、物理現象を各スケールで捉えた物理モデルを構築し実験では困難な様々な条件で机上のシミュレーションによりデータを生み出していくこと、そのようにして集められた人では処理しきれない大量の高次元な情報に対してAIを活用して新たな材料を探索していくことが大切であると考えられる。またMIを広く活用していくためには、実験データを蓄積するためのデータベースと、AIやシミュ

レーションの技術を材料開発者自身がプログラミングレスで使えるようなツールから構成されるプラットフォームが必要になると考え、クラウド上に「DataLab<sup>®</sup>」と呼ぶ基盤開発も行っている。DataLab<sup>®</sup>の詳細については、本号「**「全社データ分析基盤DataLab<sup>®</sup>」の構築と活用**」p.13~16をご参照いただきたい。DataLab<sup>®</sup>は溶接材料の開発現場での活用から進めており<sup>6)</sup>、今後さらに活用範囲を広げて、お客様の多様なニーズに素早く応えていける開発体制を構築していきたい。

なお本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「**統合型材料開発システムによるマテリアル革命**」(管理法人: JST)によって実施した成果である。

#### 参 考 文 献

- 1) 出村雅彦. 鉄と鋼. 2023, Vol.109, No.6, pp.490-500.
- 2) 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP) 統合型材料開発システムによるマテリアル革命 最終成果報告書. [https://www.jst.go.jp/sip/dl/p05/p05\\_results-report2023\\_1.pdf](https://www.jst.go.jp/sip/dl/p05/p05_results-report2023_1.pdf). (参照2023-12-15).
- 3) 三井住友銀行. 経済・業界動向に関するレポート. [https://www.smbc.co.jp/hojin/report/investigationlecture/resources/pdf/3\\_00\\_CRSDReport090.pdf](https://www.smbc.co.jp/hojin/report/investigationlecture/resources/pdf/3_00_CRSDReport090.pdf) (参照2023-12-15).
- 4) 日野英逸ほか. あたりあ. 2019, Vol.58, No.1, p.7-11.
- 5) 松井孝太ほか. あたりあ. 2019, Vol.58, No.1, p.12-16.
- 6) 谷口元一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2023, Vol.72, No.1, p.91-96.
- 7) Thermo-Calc Software AB. <https://thermocalc.com/>. (参照2024-1-29).
- 8) 株式会社神戸製鋼所. 中山啓太ほか. 高強度鋼板の製造方法. 特許第7146127号(P7146127). 2022.10.3.
- 9) 井元雅弘ほか. R&D神戸製鋼技報. 2021, Vol.71, No.1, p.31-36.
- 10) Z. Huda. Mechanical Behavior of Materials Fundamentals, Analysis, and Calculations, 1st ed. Springer, 2021, p.63-79.
- 11) 都築和馬ほか. 日本金属学会誌. 2002, Vol.66, No.7, p.728-734.
- 12) C. Kura et al. Mater. Today Commun. 2024, 38, 108242.
- 13) 小林拓史ほか. 第74回塑性加工連合講演会 講演論文集. 2023, p.303-304.
- 14) Ansys LS-DYNA. <https://www.ansys.com/ja-jp/products/structures/ansys-ls-dyna>. (参照2024-1-29).
- 15) DASSAULT SYSTEMES CATIA V5. <https://www.3ds.com/ja/products-services/catia/>. (参照2024-1-29).
- 16) Altair HyperMesh. <https://www.altairjp.co.jp/hypermesh/>. (参照2024-1-29).

(論文)

# アルミ押出型材断面設計へのベイズ最適化の適用と有効性 検証

伊原涼平\*<sup>1</sup> (博士(工学))・鎮西将太\*<sup>2</sup>・山川大貴\*<sup>3</sup>

## Application of Bayesian Optimization to Cross-sectional Design of Aluminum Extrusion and Validation of Its Effectiveness

Dr. Ryohei IHARA・Shota CHINZEI・Taiki YAMAKAWA

### 要旨

地球環境保護を背景にした車体軽量化に加え、衝突安全性能の両立が車体部品に求められている。その手段として、効率的な断面形状を設計可能なアルミ押出型材の適用は有効であるが、軽量化を目指す上では素材の性能を最大限活かす設計技術も求められ、その際には最適化技術が有用である。最適化では多くの繰返し評価が必要であることから、より効率的な手法が望ましい。本検討では、アルミ押出型材の断面設計を対象に、効率的な探索が可能であるベイズ最適化を適用し、その有効性を検証した。曲げ性能と軽量化を両立可能な多目的最適化問題として実施した結果、同等の断面設計レベルを確保しつつ、従来法比較で最適化実行回数を大幅に削減可能であることを示した。

### Abstract

Both weight reduction, driven by global environmental protection concerns, and collision safety performance are demanded in automotive body parts. As a means to achieve this, the application of aluminum extrusion, which allows for the designing of efficient cross-sectional shapes, is valid. Furthermore, designing technologies that maximize the material's performance is also required to achieve weight reduction, and in this regard, optimization technology is useful. The fact that optimization requires numerous repetitive evaluations increases the desire for more efficient methods. The present study focuses on the cross-sectional design of aluminum extrusion and applies Bayesian optimization, which enables efficient exploration, to verify its effectiveness. A multi-objective optimization has been conducted as a problem involving bending performance and weight reduction. The results have revealed the possibility of significantly reducing the number of optimization executions compared with the conventional methods, while maintaining an equivalent level of cross-sectional design.

### 検索用キーワード

ベイズ最適化, 最適化解析, アルミ押出型材, CAE, 自動車, 軽量化

まえがき = 近年の地球環境保護を目的とした温室効果ガス排出規制に基づいて、自動車の燃費規制が年々厳しさを増しており、各国政府のCN (Carbon Neutral) 実現目標への言及にも関連して、自動車業界における環境対策への取組みは世界的な潮流となっている。CN化の有力な手段として、とくに欧米や中国を中心にBEV (Battery Electric Vehicle) 開発が急速に進められているが、BEVでは航続距離確保に必要なバッテリーが多量に搭載されることによる重量増が問題となる。そのため、車体軽量化ニーズはパワートレインの種類によらず変わらないとされている<sup>1)</sup>。軽量化に加え、年々高まる衝突安全性との両立も求められることから、材料を適材適所に配置するマルチマテリアル化が有効な手段として考えられ、当社においても様々な検討を行っている<sup>2), 3)</sup>。マルチマテリアル化の代表格はアルミニウム合金素材の採用であり、中でも押出型材は必要強度を得るために効率的な断面形状を比較的自由に設計できることから、バンパビームやドアビーム、サイドシル等の骨格部材にも適用が進んでいる<sup>4)</sup> だけでなく、側面衝突時の

電池保護を目的としたバッテリーフレームなどにも採用が進んでいる。

車体軽量化には材料配置だけでなく、材料の性能を最大限引き出すための設計技術も重要である。設計に寄与する技術として最適化技術が挙げられ、近年では車体骨格構造全体をトポロジー最適化により設計する取組みもなされている<sup>5)</sup>。一般に、構造設計に最適化技術を適用する際には、特定の性能を満たす大まかな構造を抽出するための概念設計、要求性能を満たしつつ抽出構造を具体化する詳細設計が段階的に用いられる。当社バンパビームを対象とした設計において概念設計に該当する部分は、過去設計や生産性、後加工性などの観点から代表断面<sup>4)</sup>を設定して効率化を図っている。いっぽうで、断面形状選定後における外寸形状や肉厚などを対象にした詳細設計では、要求性能を満たしつつ可能な限りの軽量化を求めてCAE (Computer Aided Engineering) による検討を行う。この段階においては最適化技術が有用であるが、非効率的な最適化手法では限られた時間の中で様々な要求や制約を満たしつつ軽量化構造を得ることは

\*1 技術開発本部 ソリューション技術センター (現 事業開発部) \*2 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター

\*3 素材事業部門 アルミ押出・サスペンションユニット アルミ押出・加工品工場

困難を極める。本検討では、効率的な設計技術の構築を目指し、その有力な手法として知られているベイズ最適化の有効性検証を目的に検討を行った結果を報告する。

## 1. ベイズ最適化手法とその適用対象

### 1.1 ベイズ最適化

ベイズ最適化<sup>6)</sup>は、逐次モデルベース最適化手法の一つであり、入出力間の未知の関係に対して試験やCAEなどで得られる観測データを基に統計モデルを構築し、予測の確からしさを考慮することで全体最適解を探索可能な手法である。この理由から効率的な最適化手法として知られており、本検討でもベイズ最適化を用いることとした。その探索効率に大きく影響する統計モデリングにはガウス過程 (Gaussian Process : GP, 以下GPという) 回帰<sup>7)</sup>を用いた。任意の $x$ に対し、以下の式(1)が成り立つ場合に $f(x)$ がGPに従うことを表す。

$$f(x) \sim GP(\mu(x), k(x, x')) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $\mu$  : 平均関数、 $k$  : カーネル関数である。カーネル関数は $x$ と $x'$ の類似度を表しており、探索を行ううえでの重要な因子である。本検討では、以下の式(2)で表されるMatérn関数<sup>8)</sup>を用いた。

$$k(x, x') = \frac{2^{1-\nu}}{\Gamma(\nu)} \left( \frac{\sqrt{2\nu} \|x - x'\|}{\theta} \right)^\nu \cdot K_\nu \left( \frac{\sqrt{2\nu} \|x - x'\|}{\theta} \right) \dots (2)$$

ここに、 $\Gamma$  : ガンマ関数、 $K_\nu$  : ベッセル関数、 $\theta, \nu$  : パラメータである。 $\nu$ はMatérn関数の滑らかさを表すパラメータであり $5/2$ とした。

ベイズ最適化において、次候補点は獲得関数に基づいて探索される。獲得関数には、GPから得られる予測平均と予測分散より算出される関数であり、後述のトレードオフ関係を有する多目的最適化問題を対象にしていることを考慮して、EHVI (Expected Hyper-volume Improvement)<sup>9)</sup>を用いた。

なお、ベイズ最適化では観測済みデータを基にした回帰モデル構築により次候補点探索を行うプロセスのため、その実行においては初期データが必要となる。この初期データにおける設計変数値の選定には、実験計画法の一つであり、探索空間を均一的にサンプリングすることで効率的な予測モデル構築が可能なラテン超方格法 (Latin Hypercube Sampling : LHS, 以下LHSという)<sup>10)</sup>を用いて最適化を実施した。

### 1.2 最適化問題設定

ベイズ最適化有効性の検証対象として、アルミ押出型材の曲げ性能評価を扱った。具体的には、押出型材の外形寸法ならびに断面肉厚を設計変数とし、曲げ強度最大化および質量最小化を目的とした多目的最適化問題としている。

#### 1.2.1 アルミ押出型材の三点曲げ解析

曲げ性能評価はFEM (Finite Element Method) により行っており、用いたFEモデルを図1に示す。バンパビームへの前突を模擬し、全長1,200 mmの日型断面を有する押出型材の三点曲げ解析としている。支点間距離

1,000 mmとしたR15の支持台を両端に配するとともに変位を完全固定し、R150とした圧子に36 km/hの強制速度を付与した。なお、これら治具は解析上剛体として扱っている。押出型材には表1に示す機械的特性<sup>3)</sup>を想定した材料特性を用いており、メッシュサイズ約5 mmのShell要素でモデル化して解析を行った。

#### 1.2.2 設計変数

押出型材の断面形状と設計変数の関係を図2に示す。5種の設計変数を用いており、各変数の設計範囲を表2に示す。図中の $h$ ならびに数値は断面外形寸法を表しており、外形を構成する部位の肉厚が変化した場合においてもこれらを満たすよう調整がなされ、押出型材の長手方向に一定断面となるモデルとした。

#### 1.2.3 目的関数

目的関数は、軽量かつ曲げ性能に優れた断面形状を得ることを目的に、曲げ性能最大化に加えて部材質量最小

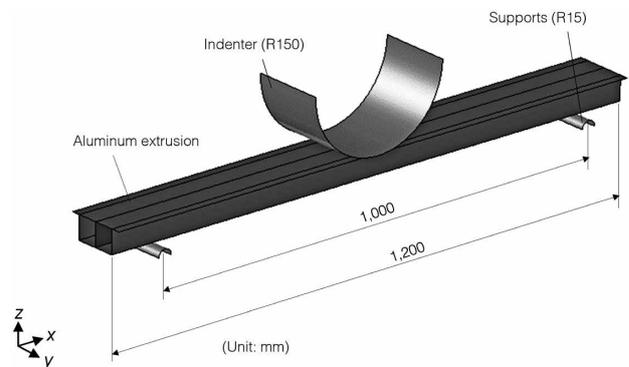


図1 三点曲げFEモデル  
Fig.1 FE model for three-points bending

表1 FEMで用いた材料の機械的特性  
Table 1 Mechanical properties used in FEM

Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.7
Young's modulus (GPa)	70
Poisson's ration (-)	0.33
Yield strength (MPa)	435
Tensile strength (MPa)	480

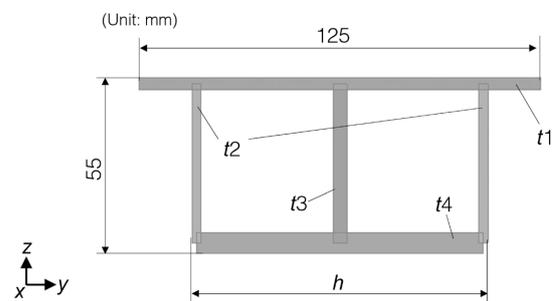


図2 押出型材断面形状と設計変数  
Fig.2 Cross section of extrusion and design variables

表2 最適化解析における設計変数とその範囲  
Table 2 Design variable ranges for optimization

	$h$ (mm)	$t1$ (mm)	$t2$ (mm)	$t3$ (mm)	$t4$ (mm)
Min.	80	2.0	2.0	2.0	2.0
Max.	120	7.0	5.0	5.0	7.0

化として設定しており、多目的最適化問題として扱った。曲げ性能を表す指標には以下の式 (3) で表される臨界曲げモーメント  $M_{cr}$  を用いた。

$$M_{cr} = F_{max} \cdot l / 4 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

$F_{max}$  : 三点曲げ時の最大荷重 (kN),

$l$  : 三点曲げ支点間距離 (m)

上記2種目的関数の探索範囲を表3に示す。本検討ではベイズ最適化の有効性検証を目的としていることから、 $M_{cr}$ や質量に対して特定の狙い性能を設けておらず、表2に示した設計変数範囲内で想定される全範囲を探索範囲に設定した。

### 1.3 最適化フロー

本検討における最適化フローを図3に示す。大きくLHSによる初期データ構築、最適化の2段階で構成されるフローとしている。初期データ構築は、LHSで抽出された設計変数に対応する目的関数を得るまでFEMを繰り返し行い、必要数取得完了後に最適化に移行する。最適化開始後は、現データからGPモデルの学習ならびに次候補点探索を行うとともにFEM実行で結果を得る。得られた結果は次ループにおいて学習データに組み込まれ、最適化終了条件を満たすまでこの操作を繰り返す。本検討において、LHSにより作成した初期データ数は15、終了判定は200回としたFEM実行回数を設定した。初期データ構築、最適化のいずれにおいてもCAD (Computer Aided Design) による形状修正、FEメッシュ

の生成、FEM実行、目的関数の算出を行っているが、全ての処理を自動化して実行可能なフローとして構築している。これら最適化解析には、CAD: CATIA V5 (ダッソー・システムズ社)、FEメッシュ生成: HyperMesh (アルテアエンジニアリング社)、FEM: LS-DYNA R9 (Ansys社) を用いた。

## 2. バンパビーム断面設計を対象とした多目的最適化結果

### 2.1 ベイズ最適化の有効性検証

ベイズ最適化の有効性は、最適化アルゴリズムにNSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithms-II)<sup>11)</sup>を用いて、同じ対象かつ同じ問題設定で得られた最適化結果<sup>3)</sup>と比較することで検証を実施した。NSGA-IIは遺伝的アルゴリズムの一種であり、種々の市販最適化ソフトウェアにも組み込まれている代表的な最適化手法である。ベイズ最適化により得られた結果を、NSGA-IIの結果と比較して図4に示す。なお、ベイズ最適化は初期データ含め215回、NSGA-IIは2066回の最適化を実施した結果であり、図中左上が軽量かつ曲げ性能に優れることを示している。図4より、 $M_{cr}$ と質量間にトレードオフ関係を有すること、最適解の集合を表すパレートフロントがベイズ最適化とNSGA-IIにおいてほぼ同等であることが確認できる。両者のパレート解を定量的に評価するため、図5に模式的に示す方法で算出され、獲得関数にも採用したHV (Hyper Volume) による比較を行った。なお、今回の問題設定では高い値

表3 最適化解析における目的関数の探索範囲  
Table 3 Search range for objective functions

	mass (kg)	$M_{cr}$ (kN · m)
Min.	2.0	6.0
Max.	8.0	25.0

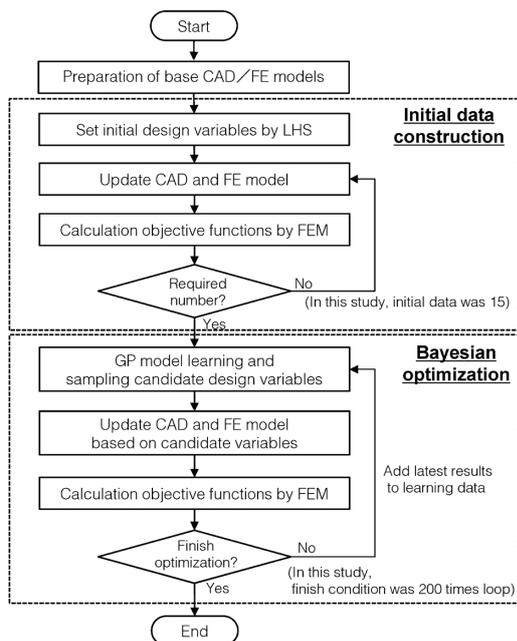


図3 最適化フロー  
Fig.3 Optimization flow

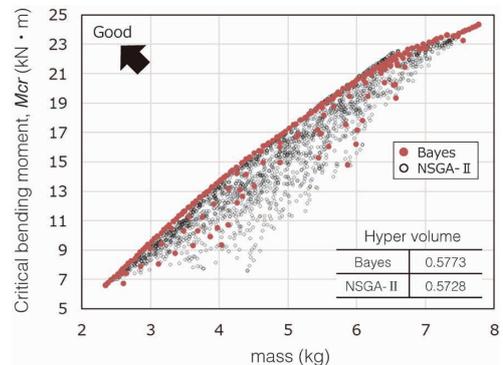


図4 ベイズとNSGA-IIにより得られた最適化結果の比較  
Fig.4 Comparison of optimized results obtained by Bayes and NSGA-II

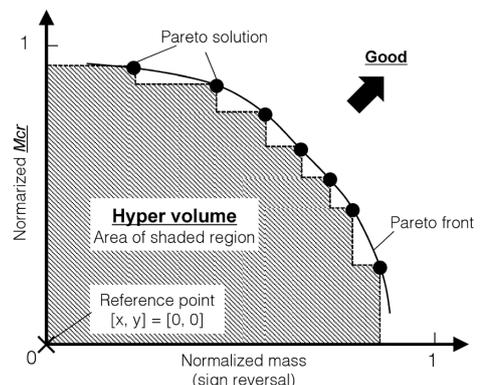


図5 ハイパーボリューム算出の模式図  
Fig.5 Schematic illustration of hyper volume calculation

ほどより最適化が進んでいることを示し、算出結果は図4中に併記している。その比較においてベイズ最適化の結果がより高い値を有していることから、ベイズ最適化により同等以上の軽量断面設計が得られること示している。より詳細な評価を目的に、最適化ループごとに算出したHVの推移を図6に示す。ベイズ最適化のHVは最適化の進行に伴って序盤から急上昇するとともに、118回目の最適化ループにてNSGA-II同等の値に達し、さらに上昇する結果となった。HVを基準にした場合、ベイズ最適化の適用により、必要な計算実行回数が約

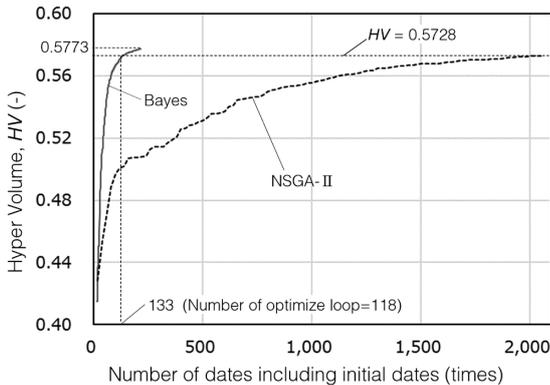


図6 ベイズとNSGA-IIにより得られたHV履歴の比較  
Fig.6 Comparison of HV histories obtained by Bayes and NSGA-II

1/15に削減され、効率が大幅に向上することが示された。

最適化の進展に伴うGPモデルの予測精度を評価した結果を図7に示す。予測精度評価は、5回ごとの最適化ループにおいて存在するデータをTraining:Test = 8:2とした5分割交差検証により行っており、それぞれの目的関数に対し算出した二乗平均平方根誤差 (Root Mean Squared Error: RMSE, 以下RMSEという) を精度指標として用いた。なお、RMSEは正規化した目的関数に対して算出した結果である。図7より、いずれもデータ数がおよそ100~150以降において鈍化するが、RMSE誤差は最適化の進展に伴って順調に低下することが確認できる。これは最適化に伴いGPモデルの学習が順調に進んでおり、その予測精度が向上していることを示している。

以上より、NSGA-IIに対するベイズ最適化の大幅な効率化は、GPモデルの予測精度向上に伴って効率的な探索がなされていることで達成されたと考えられることから、押出型材の断面設計に対してその有効性を確認した。

## 2.2 パレートフロント断面設計の分析

次に、得られた最適解としてどのような傾向があるかを評価すべく、変数間の相関関係を調査した。ベイズ最

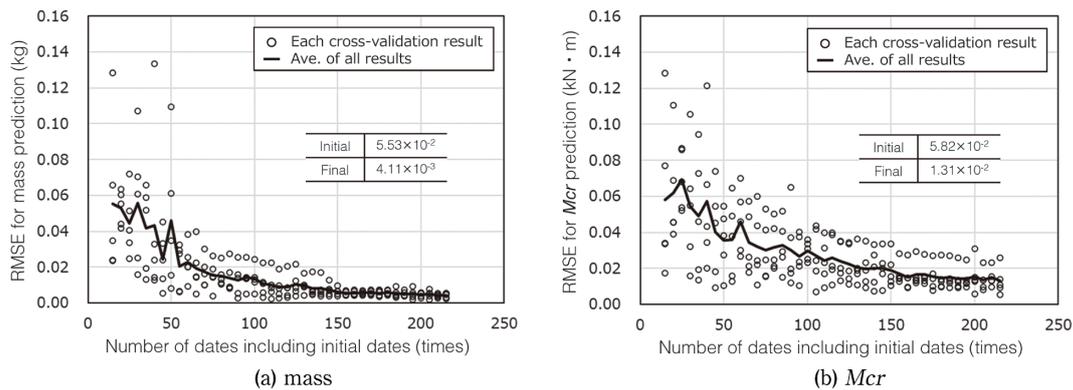


図7 GPモデルにおける予測精度の推移  
Fig.7 Prediction accuracy histories of GP model by 5-fold cross validation

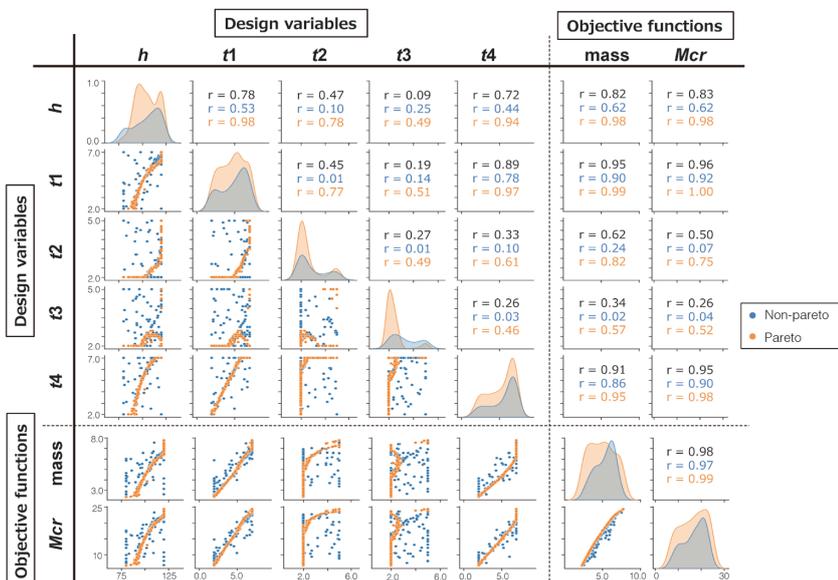


図8 ベイズ最適化結果における相関行列  
Fig.8 Correlation matrix for Bayesian optimization results

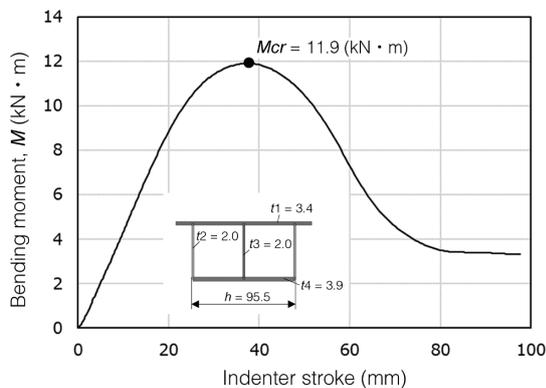


図9 三点曲げ解析により得られた曲げモーメント-ストローク関係  
Fig.9 Bending moment - stroke relationship obtained by three-point bending

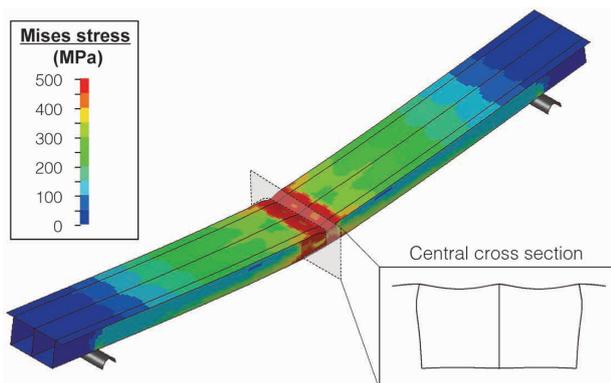


図10  $M_{cr}$ 直後における押出型材の変形挙動  
Fig.10 Deformation behavior of extrusion after  $M_{cr}$  in three-point bending

適化により得られた全結果を基に評価した結果を図8に示す。図中对角成分は各変数の確率密度分布を、対角右上は変数間の相関係数を、対角左下は変数間の散布図を示している。なお、結果はパレート解とその他で分類しており、相関係数の黒字は全結果を対象に算出した値である。図中最下行および最右列に示した $M_{cr}$ と各設計変数の関係に注目すると、 $h$ 、 $t_1$ 、 $t_4$ の3変数との相関が高く、パレート解に限定するとさらにその傾向は強まることが確認できる。いっぽう、 $t_2$ 、 $t_3$ は比較的相関が低く、散布図からも概ね $M_{cr} = 20 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 以下の領域において、設計変数の最小値2.0 mmを示している。

ここで、FEM結果の一例として、曲げモーメント-ストローク関係を図9に、 $M_{cr}$ 到達直後の押出型材変形状態を図10に示す。なお、この条件はパレート解に該当しており、設計変数および目的関数は表4に示すとおりである。図9より、ストローク38 mmにおいて曲げモーメントは $M_{cr}$ を示し、その後は減少する挙動となっている。図10に示した変形挙動から、 $t_1$ 部位の長手方向中央における座屈発生と、それを起点に断面崩壊する様子が確認でき、曲げモーメント低下は $t_1$ 部位の座屈起因によるものと考えられる。

表4 図9に示すFE結果の設計変数ならびに目的関数

Table 4 Design variables and objective function in FEM results as shown in Fig. 9

Design variables					Objective functions	
$h$ (mm)	$t_1$ (mm)	$t_2$ (mm)	$t_3$ (mm)	$t_4$ (mm)	mass (kg)	$M_{cr}$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )
95.5	3.4	2.0	2.0	3.9	3.56	11.9

以上より、最適化で得られたデータの分析結果として、各質量レベルにおいて $M_{cr}$ を最大化する設計は負荷方向に垂直な部位に座屈が生じる変形モードであり、軽量化の観点では、負荷方向に平行な部位は垂直部位より早期に座屈が生じない範囲で薄肉化を達成すれば良いといえる。なお、この考え方は従来からの設計指針に沿ったものであるが、このような分析は設計指針の適用範囲やより複雑挙動を有する問題における指針抽出などに活用可能と考えられる。

むすび=本検討では、車体部品軽量化に寄与する設計技術の向上を目的に、ベイズ最適化手法の有効性検証を行った。結果、同等性能を確保しつつ従来手法比較で15倍もの高効率化を達成可能であることを示した。なお、今回得た効果は問題設定に依存するため必ずしも同等効果が得られるものではないが、本稿で扱った問題設定以外にも適用を進めその有効性を確認している。また、最適化で得られる膨大なデータについては、近年注目を集めているサロゲートモデルとしての活用および設計業務のさらなる効率化が期待できることから、鋭意開発を進めている。

データを資産として捉え、積極的に活用することは、世の中動向が激しく変化し、種々社会問題が顕在化しつつある昨今において有力な武器になると考えられ、そのためには、データ蓄積段階からその貯め方も含めた戦略が重要であると考えられる。継続した技術開発に加えて、先々を想定したデータ構築ならびに活用により、お客様のみならず世の中の様々な要求に応じていきたい。

#### 参考文献

- 1) 坂上弘ほか. 自動車技術. 2016, Vol.70, No.8, p.42-44.
- 2) 内藤純也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.1, p.60-64.
- 3) 史棟勇ほか. 自動車技術会論文集. 2022, Vol.53, No.4, p.796-801.
- 4) 橋本成一. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.94-98.
- 5) 和田尚美ほか. マツダ技報. 2022, No.39, p.200-205.
- 6) 今村秀明ほか. ベイズ最適化 適応的実験計画の基礎と実践. 第1版, 近代科学社, 2023, p.305.
- 7) 持橋大地ほか. ガウス過程と機械学習. 第7版, 講談社, 2019, p.233.
- 8) M. G. Genton. Journal of Machine Learning Research. 2002, Vol.2, p.299-312.
- 9) S. Daulton et al. Proc. of NeurIPS 2020. 2020, Vol.39, No.443, p.21-26.
- 10) M. D. McKay et al. Technometrics. 1979, Vol.21, No.2, p.239-245.
- 11) K. Deb et al. IEEE Tran. on Evolutionary Computation. 2002, Vol.6, No.2, p.182-197.

(解説)

# プロセスシミュレータによる設計および開発プロセス変革への取り組み

四木悠貴\*1・植田 達\*1・森田 啓\*2

## Transformation of Design and Development Processes with Dynamic Process Simulator

Yuki SHIGI・Tatsuki UEDA・Kei MORITA

### 要旨

当社は、流体を扱う圧縮機のプロセス解析のためにシミュレータを開発した。シミュレータの適用により過渡状態における制御システムの応答を設計初期段階から検証することが可能となる。また、当社のシミュレータは実機の制御プログラムと接続するHILS (Hardware-in-the-Loop Simulation) 機能も有しており、機械に搭載される制御プログラムの妥当性も検証することが可能である。本稿では複雑な圧縮機プロセスの設計検証に適用できるシミュレーションツールの紹介、およびモデルベース開発を基にした開発工数短縮への展望を述べる。

### Abstract

Kobe Steel has developed a simulator to analyze the process of compressors that handle fluids. The simulator's application enables the verification of control-system responses in transient states from the initial design stage. Additionally, Kobe Steel's simulator is equipped with Hardware-in-the-Loop Simulation (HILS) functionality, allowing the validation of control programs before installation in the machine. This paper introduces a simulation tool that can be applied to the design verification of complex compressor processes. It also discusses the outlook for reducing development time using model-based development.

### 検索用キーワード

圧縮機, シミュレーション, モデルベース, スクリュー, レシプロ, ターボ, コンプレッサー, HILS

まえがき=圧縮機を含むプロセス系統には、時々刻々と変動する流体の圧力、温度および流量を制御するために調節弁や圧縮機の各形式特有の容量制御機器が搭載されている。これらの機器は圧縮機の保護および運転条件に応じたプロセスの状態を実現するために、DCS (Distributed Control System) やPLC (Programable Logic Controller) などのシステムによって制御されている。

CN (Carbon Neutral) 社会の到来に伴い、非汎用圧縮機分野でも水素やアンモニアといった非化石燃料を使ったガスタービンの燃料ガス供給用途やCCS (Carbon dioxide Capture and Storage) 用途などの需要が増加している。これらの新たな用途に対して、例えばガスタービンの燃料消費量が急変したときの流量制御や、高圧プロセスによる超臨界状態のCO<sub>2</sub>を物性の変化に応じて制御することが求められる。このような複雑なプロセスや新たな用途の制御設計において、プロセスが変動する過渡部に潜むリスクを網羅的に机上で抽出することが課題である。

当社は、設計段階から圧縮機プロセスのリスクを検証できる物性情報を含んだダイナミックシミュレーションツールを開発した。本稿ではその概要を紹介する。

## 1. 圧縮機プロセスシミュレーション技術

開発した圧縮機プロセスシミュレータの概要について紹介する。シミュレータの計算プラットフォームには汎用数値解析ソフトウェアであるMATLAB/Simulinkを使用した。ガスの物性計算には冷媒熱物性データベースを用いている。

### 1.1 シミュレーションモデル

当社にはスクリー式、ターボ式およびレシプロ式圧縮機の性能を模擬できるシミュレーションモデルがそろっている。図1に開発したシミュレータのモデル例を示

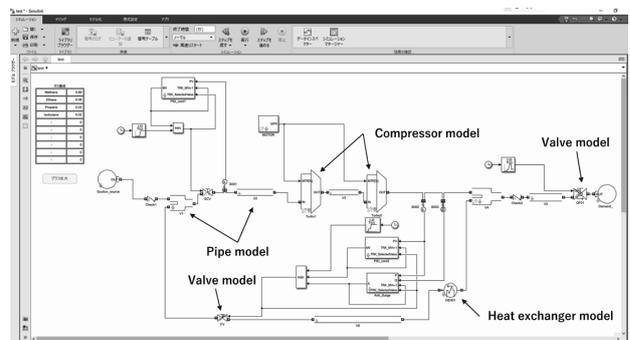


図1 圧縮機プロセスシミュレータモデル例  
Fig.1 Example of process simulator model for compressor

\*1 機械事業部門 技術本部 メカトロ技術部 \*2 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター

す。本シミュレータは圧縮機の諸元と特性式に基づいて圧縮機の圧縮過程と熱収支をモデル化し、配管、熱交換器、吐出圧力調整弁などを加えて圧縮機ユニット全体をモデル化することで、起動および停止動作や制御パラメータ変更時の過渡応答を再現できる。シミュレーションモデルは圧縮機、弁、配管、ガスクーラなどの機能ごとに分かれたモデルから構成され、時刻tにおけるプロセスの状態量（圧力、温度、流量）および制御信号を各モデル内で演算する。その結果を隣接するモデル間で双方向に受け渡し、時間刻みΔt後の時刻t+Δtにおける状態量を逐次計算する。時間積分法は、MATLAB/Simulinkの固定ステップソルバBogacki-Shampine<sup>1)</sup>を用いる。

(1) 圧縮機モデル

圧縮機本体モデル（スクリュ式、ターボ式、レシプロ式）の中で、代表例としてターボ式圧縮機モデルを紹介する。圧縮機モデルでは、理論計算とガス物性データベースを組み合わせて、吐出流量、吐出温度および動力を計算する。モデルには圧縮機入口および出口のプロセス状態量のほか、圧縮機回転数および吸込ガスを調節できるIGV（Inlet Guide Vane）開度指令値を変数として入力できる。当社の性能計算プログラムから作成した圧縮機特性テーブルと、圧縮機回転数、IGV角度およびヘッドから圧縮機の吐出流量を導出する。吐出温度は、下流側のモデルにて演算された圧力と、圧縮機出口のエンタルピーから冷媒熱物性データベースを用いて導出する。

一品一様に設計された圧縮機ごとに、前述した圧縮機特性テーブルの変更や理論式をベースに最適化された圧縮機モデルに変更することで様々な形式と仕様の圧縮機に対して高精度な演算を実現できる。

(2) 弁モデル

モデルは弁前後の圧力から弁を通過する流量を計算するモデルであり、弁前後圧力差に応じて式（1）あるいは（2）を用いて計算する<sup>2)</sup>。P<sub>in</sub>-P<sub>out</sub>≤0.5F<sub>L</sub><sup>2</sup>P<sub>in</sub>のとき、式（1）を使用し、それ以外のときに式（2）を用いて計算する。

$$Q = \lambda_1 C_v \sqrt{(P_{in} - P_{out})(P_{in} + P_{out})} \dots\dots\dots (1)$$

$$Q = \lambda_2 C_v P_{in} \dots\dots\dots (2)$$

- P<sub>in</sub> : 入口圧力
- P<sub>out</sub> : 出口圧力
- C<sub>v</sub> : 弁が有する固有の流量係数
- λ<sub>1</sub>, λ<sub>2</sub> : 弁開度、ガス密度、温度から決まる係数
- F<sub>L</sub> : 圧力回復係数

このほか、弁操作の応答特性として弁ストローク速度、無駄時間、動作遅れを模擬できるモデルとした。

(3) 配管モデル

配管モデルは任意のボリュームに対するガスの流入出による圧力および温度変化の計算を行う。各計算ステップにおける配管内の熱量変化量を積分計算することで配管内の温度を計算する。同様に、流量変化量を積分計算することで配管内部に存在するガス質量を演算し式（3）

から圧力を計算するモデルである。複数のポートを有する多ポート配管に対しても同様である。

$$P = \frac{MRT}{V} \dots\dots\dots (3)$$

- P : 配管内圧力
- M : ガス質量
- R : 気体定数
- T : 配管内温度
- V : 配管体積

(4) 熱交換器モデル

熱交換器モデルは異なる流体間で熱交換を行うモデルであり、熱伝達係数や伝熱面積などから導出される移動単位数（NTU（Number of Transfer Units））を用いて温度計算を行う。いっぽうで、ガスクーラのように冷却水など十分な冷却能力を持った冷媒を用いる場合、プロセスガスは冷媒によって指数関数的に冷却され、十分冷却が進むと冷媒温度に漸近するとみなすことができるため、式（4）により入口温度から出口温度を導出する。

$$T_{out} = e^{\gamma}(T_{in} - T_w) + T_w \dots\dots\dots (4)$$

- T<sub>out</sub> : ガスクーラ出口温度
- T<sub>in</sub> : ガスクーラ入口温度
- T<sub>w</sub> : 冷媒温度

ここでγはガスクーラの設計変数であるガスクーラ入口と出口の温度、冷媒温度、およびガス流量に関して設計値と計算値の比率に基づいて決定する係数である。

(5) その他のモデル

上記四つのモデルのほかに、PID制御モデル、逆止弁モデル、計器モデル（圧力計、温度計、流量計）を備えており、必要に応じて組み合わせることで目的のプロセスシミュレーションを実行することができる。

1.2 実機稼働データとの比較検証

シミュレーションモデルの妥当性を検証した事例の一つとして、ガスタービンへの燃料ガス供給用途で使用したターボ圧縮機ユニットの評価結果を紹介する。ユニットの構成を図2に示す。ユニットの構成は、2段ターボ圧縮機、圧縮機を可変速運転できるVFD（Variable Frequency Drive）、圧縮機吸込圧力を調節する吸込圧力調節弁、バイパスガス温度を冷却する熱交換器および吐出風量または吐出圧力を調節し、かつサージ防止を担うバイパス弁が搭載されている。

プロセスの初期値および、時間軸を実機に合わせ、実

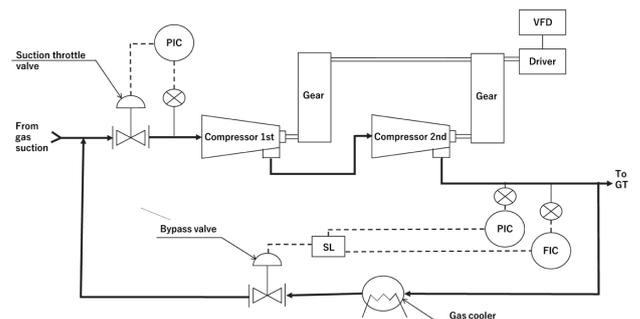


図2 ガスタービン用燃料ガス圧縮機系統図  
Fig.2 Process diagram for gas turbine fuel gas booster compressor

機とシミュレーション結果の比較を実施した。比較範囲は駆動機の起動から昇圧完了までを対象とした。比較対象を圧力（図3）、温度（図4）とし、結果を物理量ごとに示す。横軸は時間、縦軸は各物理量を正規化した値で表す。破線は実機データ、実線はシミュレータによる演算結果を示す。

実機データを基準とし、比較範囲内でのシミュレーション結果の平均誤差を過渡状態と昇圧完了後の定常状態に分けて表1に示す。

圧力は定常時で1%以下の範囲に収まっているが、過渡時では吸込圧で3.2%、吐出圧で1.3%と大きくなっている。これは調節弁のCV値や立上り、立下りに関する時定数の誤差によるものと思われる。指令値に対して、調節弁CV値や動作遅れに実機とシミュレーションで誤差があるため、調節弁を通過する流量にずれが生じ、圧力に影響をおよぼしていると考えられる。

温度は、定常時において誤差の増加が見られる。この誤差は、実機環境下で発生する周囲温度とプロセス流体の温度差による入熱および放熱のような外乱の影響によるものと考えられる。

1.2節では圧縮機プロセスシミュレータの性能について述べた。実機とシミュレーション結果の誤差は約3%となっており、実機をよく表現できている。また、プロセスの挙動や傾向といった過渡状態を良く再現できている。プロセス制御設計を検証できる性能を十分に有して

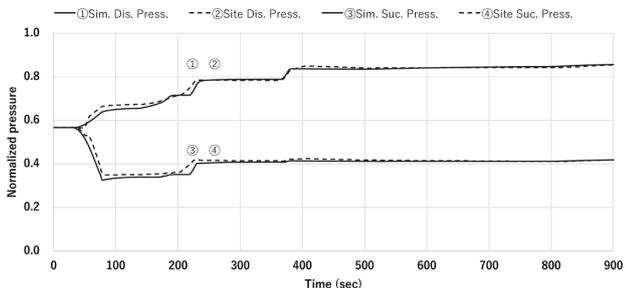


図3 吸込および吐出圧のシミュレーション結果と実機データの比較  
Fig.3 Comparison of simulation results for suction and discharge pressures with actual data

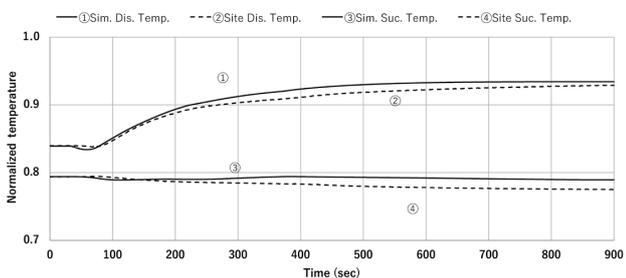


図4 吸込および吐出温度のシミュレーション結果と実機データの比較  
Fig.4 Comparison of simulation results for suction and discharge temperatures with actual data

表1 過渡状態および定常状態の平均誤差

Table 1 Average error of transient and steady part

	Suc. Press.	Dis. Press.	Suc. Temp.	Dis. Temp.
Transient part error (%)	3.2	1.3	0.7	0.8
Steady part error (%)	0.5	0.3	1.8	0.9

いることを確認した。

## 2. 圧縮機プロセス制御のHILS技術

制御システム開発の効率化とプラント立上げ時の失敗リスク低減において、HILS (Hardware In the Loop Simulation) 評価技術が有効な手段となる。HILSは、自動車分野ではエンジンや変速機、ECU (Electronic Control Unit) などの開発<sup>3)</sup>、鉄道分野では走行安定性の仮想試験<sup>4)</sup>などで活用されており、開発の大幅な効率化や性能・品質の向上に寄与している。そこで1章にて解説したシミュレータを実機の仮想モデルとして活用し、PLC制御装置と組み合わせて、圧縮機プロセス制御の妥当性や運転法案を試運転前に検証できるHILSシステムを構築した。図5に構成機器および各機器間での信号の流れを示す。本システムは、圧縮機プロセスシミュレータ、PLC、SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) から構成される。

まず、弁の開度指示値のような操作信号がPLCからシミュレータに送信され、操作信号に基づいてプロセスの状態量（圧力、温度、流量）をリアルタイムでシミュレータが導出する。同時にシミュレータで演算されたプロセス状態量がPCメモリを介してPLCに渡され、次の目標動作を決定する。

当社において、従来は図6に示すようにプロセスの変動に対するプログラムの応答を評価できるのは、実機の試運転時とならざるを得なかったが、HILS技術を活用することで、これまで机上のシステム検証では確認できなかった昇圧中や負荷変動時といった過渡状態でのプロセスの応答を事前に確認することができる。事前にプログラムや運転法案を最適化することによって、現地で

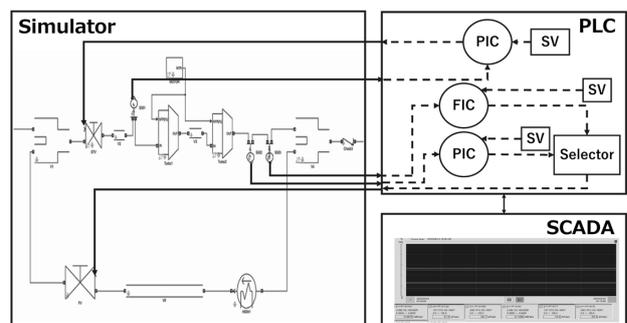


図5 HILSシステム構成図  
Fig.5 HILS system architecture

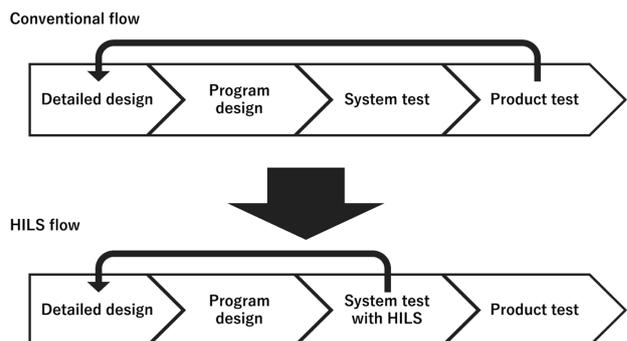


図6 プログラム設計フロー  
Fig.6 Program design flow

の調整や不具合を最小限に抑えることができ、試運転期間を短縮することができる。

### 3. 今後の展望

本稿で解説した技術を活用することにより設計の初期段階から実機を伴わないリスク検証を行うことが可能となる。設計の各段階においてシミュレータを適用することで設計効率の改善や高品質な機械を提供することを目指す。

具体的にはフィード段階における適切なユニットのサイジングや圧縮機制御方案の検証、設計段階では、HILS技術を用いた運転方案に応じたプロセスの検証や制御システムの妥当性検証、また現地試運転時に発生した不具合事象を再現し、迅速な原因究明と解決策の提示を実現できると考えている。

加えて、今回開発したシミュレータを活用することで、機械が故障した際の挙動を再現することができる。実機では様々な故障が発生する可能性があるが全ての故障モードに対して十分なデータを取得することはできない。そういったデータが不足する場合でもシミュレータで事前に予測し、それを基に実プロセスデータから早期に状態を予測する診断技術として展開することができる。実機に対してシミュレータをリアルタイムで並列に演算し比較することで、機械の故障や経年劣化による性能を予測する診断機能や運転状態に合わせた最適制御といったアフターサービスにも本技術の展開を検討している。

また、自動車分野を中心にシミュレーション技術を活用したモデルベース開発 (Model based development) という考え方が広まっている。モデルベース開発とは図7に示すように、コンピュータ上で機械をモデル化し、設計初期段階から机上でシミュレーションによる検証を行いながら開発を進めていく手法である。産業機械分野にこの開発プロセスは同様に当てはめることができ、本稿で解説したシミュレータを活用することができる。例えば、基本設計時は制御モデルも含んだシミュレータによる机上でのモデル検証 (MILS (Model In the Loop Simulation)) や実機製作前に制御プログラムと接続し制御システムの妥当性検証 (HILS) に活用できる。

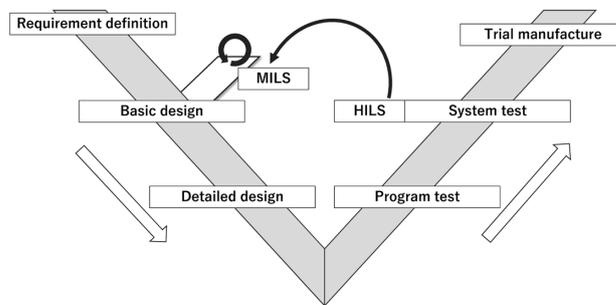


図7 モデルベース開発の流れ  
Fig.7 Model based development flow

むすび=今後、CN社会の到来によって、需要増が見込まれる水素、CCSのような、CN用途や多段圧縮機のような複雑かつ前例の無いプロセスに対して、高品質な性能を有する機械が求められる。機械の性能を正しく評価するために、前述したモデルベース開発の考え方を適用し、コストと時間を最小限に抑えつつ、高品質な機械を開発、検証できるツールは、顧客要求が大きく変化するCN社会の初期である今、必要不可欠であると考えている。当社としては本稿で述べた技術の発展に今後も注力し、環境変化に伴う新たな領域でのニーズに迅速に対応するため、今回開発したプロセス全体の動的シミュレーション技術をコア技術とした構造解析と流体解析の連成解析技術により、構造的な成立性を担保し、さらなる開発サイクルの短縮や安定稼働を実現する高品質な製品を開発する設計開発力の強化を見据えた開発を進めていく。

また、様々な事業を有する当社において圧縮機事業だけではなく他機種、他部門への技術の展開も検討し、さらなるモノづくり力の向上を目指していく。

#### 参考文献

- 1) P. BOGACKI, L.F. SHAMPINE. Appl. Math. Lett., 1989, Vol.2, No.4, pp.321-325.
- 2) 土屋喜一. 計測と制御. 1964, Vol.3, No.9, p.702-704.
- 3) 奥田尚住ほか. 計測と制御. 2010, Vol.49, No.4, p.250-254.
- 4) 山口輝也ほか. 日本機械学会論文集. 2013, Vol.79, No.806, p.3420-3431.

(技術資料)

# デジタルツインを用いたDX化による建機開発プロセス改善

山手真治\*1・平賀智徳\*2

## Improvement of Construction Machinery Development Process by Digital Transformation Using Digital Twin

Shinji YAMATE・Tomonori HIRAGA

### 要旨

デジタルツインソリューションを導入して生産準備業務の効率化を行った。組立検証では部品取り付け軌跡を再現する機能を活用して、ワークと搭載物の干渉を高精度に判別でき、試作機組立時の不具合による手戻りを防止できるようになった。設備適合性検証では、複雑な関節をもつナットランナーの挙動を簡単かつ正確に再現する機能により、可動域を考慮した締結部への到達性確認、アームやヘッドとワークの干渉判定などが可能となった。さらに、試作前の事前検証で使用した部品割付データを量産モデルへ流用することにより、設計段階から部品払出情報や作業指示書の作成に着手できるようになり、生産準備のコンカレント化と開発リードタイム短縮につなげることができた。

### Abstract

Production preparation work has been streamlined by a digital twin solution. Assembly verification now allows for highly accurate detection of interference between each workpiece and loading object by utilizing a function that reproduces the track of component installation. This has prevented reworking due to defects during prototype assembly. In equipment suitability verification, a function that easily and accurately reproduces the behavior of nut runners having complex joints has enabled confirmation of the reachability of the fastening area by considering the range of motion, as well as the determination of interference among the arm, head, and workpiece. Furthermore, recycling the parts allocation data used in preliminary verification before prototyping for the mass-production model has enabled the parts-dispatch information and work instructions to be created beginning at the design stage, leading to concurrent production preparation, and the shortening of development lead time.

### 検索用キーワード

デジタルツイン, コンカレント化, フロントローディング, 生産準備, 仮想組立検証, 設備検証, 作業指示書

まえがき = 建設機械業界では、国土交通省によるi-Constructionの推進によりICT施工などの新工法への対応や自動化の推進、環境・リサイクル事業への分野拡大が進んでおり、開発機種数が増加傾向となっている。

また、アジア地域を代表する新興市場ではシェア競争に対応する必要があり、市場ニーズに応じた機械を短期で開発・供給する必要がある。

さらに近年では、排ガス規制に対応するための後処理装置、安全対策用のオプション装置、電子制御機器類の搭載が必要となっており、部品点数増加と機械構造の複雑化につながっている。

以上より近年の製品開発においては、ラインナップ数拡大のための多品種開発、シェア拡大のための開発工期短縮、複雑化した機械構造に対する高精度な検証に加え、部品点数増加への効率的な検証といった、相反する課題への対応が急務となっている。

コベルコ建機株式会社（以下、当社という）の油圧ショベル事業では、上記の課題を解決するために開発プロセスの計画段階から製造品質の作り込みの実現を目指

す、コンカレントエンジニアリングに取り組んでいる（図1）<sup>1)</sup>。

この取り組みのうちの一つに、生産部門担当者が3Dモデルを活用して組立検証を行う仮想組立検証がある。この仮想組立検証を進めるために、2016年頃よりエンジニアリングチェーン変革活動を進めてきた。この活動では開発から製造までの一連の業務に、3Dモデルを活用

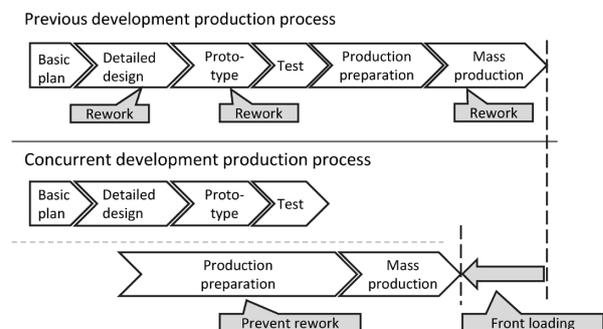


図1 開発と生産準備のコンカレント化  
Fig.1 Concurrent engineering of development and preparation of production

\*1 コベルコ建機株 生産本部ものづくり推進部 (現 KOBELCO CONSTRUCTION MACHINERY SOUTHEAST ASIA CO., LTD.)

\*2 コベルコ建機株 生産本部ものづくり推進部

したデジタルツインによる効率化を可能とするプラットフォームとして3DEXPERIENCEと、その中のソフトウェアツールであるDELMIAを試験的に導入した。2017年には仮想組立検証業務と工程設計業務へ本格導入し、業務プロセスの革新を図った。翌年にはDELMIAとERP（Enterprise Resource Planning）システムの製造実行領域の組立方案と呼ばれるマスターとの間で工程データを連携する機能を開発し、組立方案マスターの登録に必要なデータ変換作業を自動化した。2020年以降はユーザ機能の改修を実施し、操作性の改善や工程データの流用性向上、各種チェック機能の拡充を図った。2023年には3DEXPERIENCE専用のプログラム開発ツールを導入し、組立性検証・工程データ作成業務における詳細な要望に対して自社内でプログラム開発が可能となった。

本稿では、3DEXPERIENCE DELMIAを活用した生産準備領域での仮想組立検証と工程設計における業務改善事例を紹介する。

## 1. 生産準備プロセスの役割と業務概要

最初に、当社における生産準備段階のプロセスについて触れておく。

設計部門で詳細設計が完了し、他部門へ公開された試作3Dモデルを使って、まず生産準備部門で作業区画、製品自体の成立性、設備や工具との適合性の検証が並行して行われる。

作業区画の検討では、製造ラインの負荷を考慮したサブアセンブリ構成の決定や外注の可否確認を行う。

製品の成立性検証では、組立時に部品同士の干渉が発生しないか、組立に必要な作業空間が確保できるか、部品加工公差を考慮して組立が可能かなどのポイントを多角的な視点から検証し評価を行う。

設備や工具との適合性検証では、トルクや取り付け寸法などの設計情報を満たすための設備や治具工具類の準備、設備と製品の干渉、設備の可動域が十分に足りるかを確認する。

一連の検証が完了した後は試作組立に移り、実機を組み立てながら仮想組立検証で吸い上げきれなかった不適合を抽出する。抽出された不適合が設計部門で修正された後、2Dの量産図面が出図される。生産準備部門では量産図面を基にして組立ラインの作業指示書を作成する。この作業指示書は部品取り付け時の作業性、取付順序、部品の共通性を考慮した最適作業単位に分割し組立方案としてドキュメント化され、組立方案番号と呼ばれる管理番号にて管理される。この組立方案番号に対して作業名称を定義し、この作業で組立を行う部品番号と数量、どの作業区で施工するかをERPのマスターデータベースに登録する。このマスターデータから作業指示書専用フォーマットが出力可能で、注記やトルク情報は図面から抽出し、この専用フォーマットへ転記する。このようにしてPC上で作成された作業指示書は印刷後に各現場の作業区へ配布、各班でファイリングと管理が行われる。

## 2. 改善事例と効果

つぎに、生産準備プロセスにおける3DEXPERIENCE DELMIAを活用した業務改善事例を記載する。

### 2.1 成立性検証

試作3Dモデルは各要素別に担当者が分業し同時並行で作成しており、完成状態に至るまでに要素間の部品配置や形状をミリ単位で細かく調整しながら進めている。そのため、更新情報が担当者間で適切に連携されなかった場合、3Dモデルが位置ずれを起こした状態のまま設計され、製品完成状態で部品干渉が発生することがある。干渉は試作組立時に不適合として発覚することがあるため、組立性検証に入る前にこれらの初期干渉を抽出し、設計情報を修正しておく必要がある。

初期干渉の抽出には、静的干渉シミュレーション機能を用いて機械的にチェックを行う。干渉がある場合、部品同士の組合せが結果一覧として表示され、結果を選択することで干渉部にフォーカスし詳細状況を確認することができる。3DEXPERIENCE導入前では目視で干渉を探していたため、機械深部や複雑な構成になっている部分で確認漏れが発生していた。本機能の導入により、数千点ある部品の中から品質不良につながるモデル干渉を数分程度で抽出できるようになった（図2）。

### 2.2 組立性検証

製造ラインで部品を取り付け/搭載する作業において、周囲との干渉が無いかな動的な干渉確認を行う必要がある。組立性検証では大きく油圧継手の取り付け性、搭載物の干渉、搭載ルート、設備適合性などを確認している。本節ではこれら四つの検証作業における改善について記載する。

#### 2.2.1 油圧継手の組立性確認

製造ラインでの作業負担を抑えるために、油圧継手は事前に取り付け可能な最大の単位で仮組を行う。仮組された油圧継手はコントロールバルブなどの油圧機器に取り付ける際、最大回転半径が増加することにより周辺の継手類と干渉するケースがある。従来では回転操作による確認作業において、部品表（BOM：Bill of Materials、以下BOMという）の構成によっては別アセンブリに所属する複数の継手を同時に操作することができない場合があるため、干渉確認作業の支障となっていた。

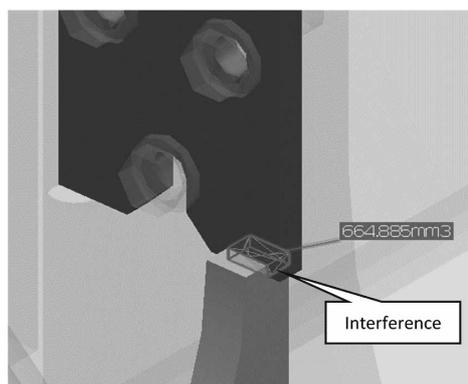


図2 部品寸法不良が原因で発生した干渉  
Fig.2 Interference caused by defective component dimensions

3DEXPERIENCE DELMIAではトラックと呼ばれる部品の軌跡作成機能を使用することで、BOM構成に依存することなく継手の取り付け作業が再現可能となり、干渉確認作業の手間が大幅に簡略化された。また干渉判定機能を併用することで、回転動作をシミュレーションで再現しながら、干渉が発生した際にアラートで確認できるようになった。

### 2.2.2 機器搭載時の干渉確認

エンジンやラジエータなどの大型機器は寸法の大きさや取り付け順序の関係で、前工程で取り付けされた部品を避けながら搭載しなければならない。そのため、搭載時に周辺機器との干渉を入念に確認する必要がある。また、重量が大きくクレーンでの吊り作業となるため、吊り姿勢に制限を掛けながら検証を行う必要がある。

大型機器の搭載性確認では、継手干渉と同じく軌跡作成機能と干渉検出機能、さらに軌跡に制限を掛けたうえでルートを最適化するツールを併用することで、搭載の可否と干渉回避のための最適ルートを素早く判定することができる(図3)。

### 2.2.3 製造設備との適合性確認

据付型ナットランナーなどの複数の関節をもつ設備の干渉確認作業では、製品と設備の3Dモデルの位置合わせと姿勢調整において大きな労力を伴っていた。これに対し、機構再現機能を使用することで、複数関節をもつアームの動きが再現できるようになり、位置合わせに要する時間を大幅に削減することが可能となった。また可動域情報を事前定義しておくことで、実現不可能な姿勢になった場合にアラートを表示することができる。これ

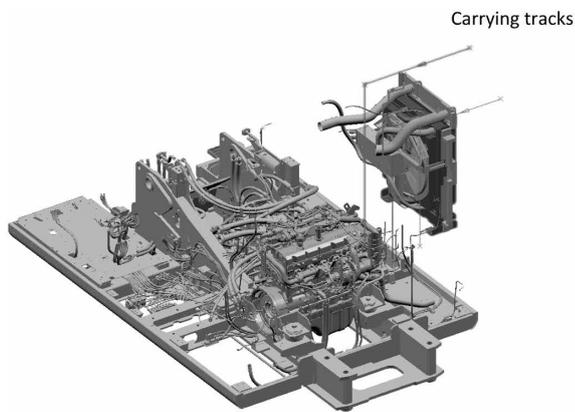


図3 大型搭載機器の干渉検出

Fig.3 Interference detection for large-scale onboard equipment

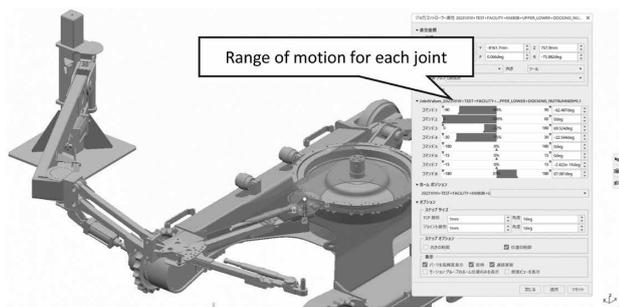


図4 機構定義機能を使用した設備可動域検証

Fig.4 Verification of equipment range of motion using the mechanism definition function

らのサポート機能によって、従来の検証に比べて確認作業時間を約9割短縮することができる(図4)。

### 2.3 工程データの作成

生産準備部門で全ての検証が完了後、設計部門にて不適合を修正し、修正された3Dモデルを基にして工程データの作成が生産準備部門で行われる。工程データはERPの組立方案マスターに登録されることにより、各作業区への部品払出設定や作業指示書の元データとして重要な役割を担っている。

まず仮想組立検証段階では部品取り付け順序や物流、作業区、作業工数などの検討を行うために、大まかな部品割付で工程データが作成される。その後、量産3Dモデルがリリースされると流用機能により試作モデルから工程データを自動で引き継ぎ、組立方案と作業指示書の作成作業が行われる。しかし、量産3Dモデルがリリースされた後でなければ工程データ作成に着手できないため、量産出図から組立方案作成完了までのリードタイムが長くなっているという課題があった。現在は試作前段階で作成した工程データを活用することができるため、量産出図後のリードタイムが短縮されるようになった(図5)。

作業指示書は要領図と部品リストから構成されている。要領図は各組立方案における部品取り付け対象部品を明示し、さらに前作業工程にて既に組立てられた部品を背景として表現することにより、部品の組立完了状態を表したものである。従来では要領図を作成するために3D-CADを使い、ある組立方案にて組立する部品と関係のない部品については製品全体の3Dモデルのパーツを一つずつ手作業で非表示にしていたため膨大な時間を要していた。3DEXPERIENCE DELMIAでは、プロダクトフローと呼ばれる作業順序を3Dモデルで定義する機能により、各組立方案の部品取り付け状態を簡単に表示することができるため、要領図作成作業の効率化に繋がった(図6)。

### 2.4 自動化プログラムによる作業性改善

各業務において、属人的な作業を簡略化するための自動化プログラムを開発し、業務改善を行った。この自動

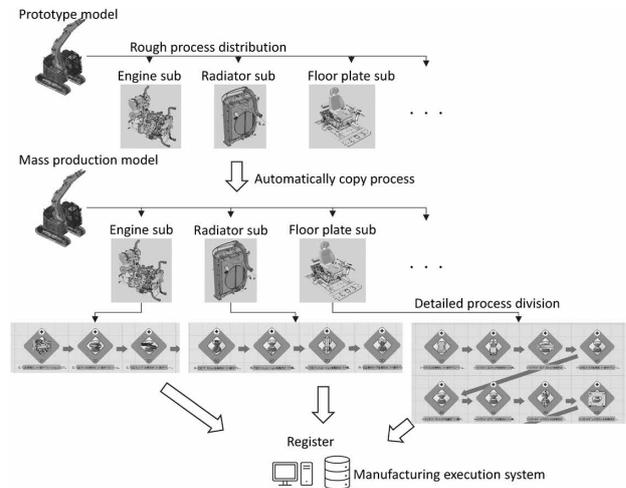
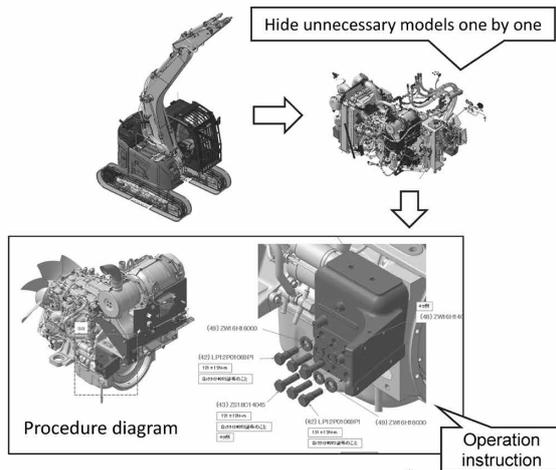


図5 工程データを活用したフロントローディング

Fig.5 Front-loading using process data

### Previous procedure for creating outline diagrams



### Current procedure for creating outline diagrams

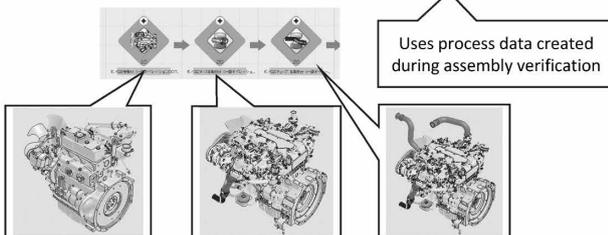


図6 従来と現在の要領図の作成方法

Fig.6 The way of making work instruction figure in previous and current

化プログラムは内製した。

成立性検証では干渉が生じた部品の組合せ全てが結果表示されるが、その中でもボルト、ナット、油圧継手はねじ部の噛み合い部分について現物は隙間なしで接触しているのが正常である。しかし、おねじの3Dモデルは外径、めねじの3Dモデルは谷の径で円柱状にモデリングしているため、干渉として出力されてしまう。そのため、おねじとめねじの組合せサイズ間違いである3Dモデル上の干渉と正常である場合の3Dモデル上の干渉を区別する必要があった。これに対して、あらかじめ正常な組合せの干渉体積をデータベース化しておき、自動化プログラムによって照合させることで品質不良につながる組合せだけを抽出することができるようにした。これによって干渉結果の確認件数の大幅な削減につながった(図7)。

継手取り付け検証における取付軌跡作成作業では、一定の角度で継手を回転させながら螺旋状の軌跡を再現する必要があるため、検証の準備作業に時間が割かれていた。自動化プログラムでは、選択した継手のねじ長さを考慮して自動的に取付軌跡を生成することで、手作業での作成を廃止できた(図8)。

工程データ作成業務においては、既にERPの組立方案マスターに登録されている類似のデータを活用して、自動的に組立方案を生成する機能を作成した。これによって、組立方案の作業名称や部品払出先の入力の手間が減ったほか、作業の抜け漏れを防ぐといった効果があった。

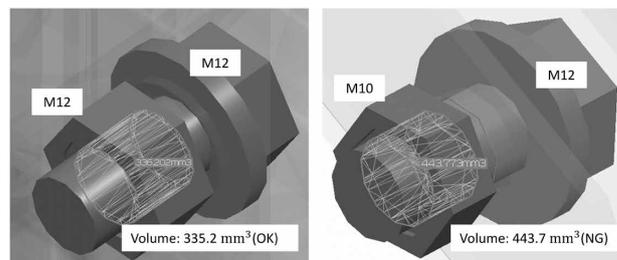


図7 正常な干渉と不具合に繋がる干渉

Fig.7 Normal interference and interference that leads to failure

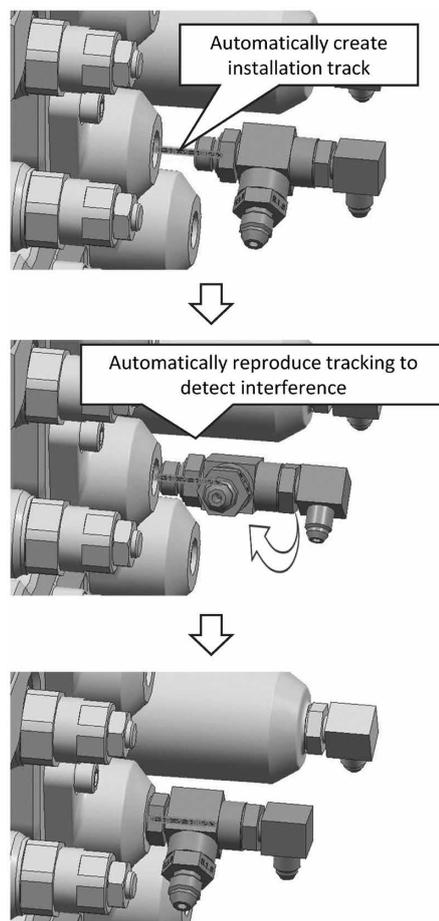


図8 自動作成されたトラック

Fig.8 Auto-created track

## 3. 今後の展望

前章で紹介した種々の機能により、開発プロセスの改善を行ってきた。いっぽうで、依然として生産準備領域における課題は山積しており、対応が必要となっている。本章では、今後の当社の取り組みについて記載する。

### 3.1 検証業務自動化に向けた取り組み

検証業務においては、作業者の経験や勘に依らない定量的な判断基準が必要となる。現状は、過去の品質不適合事例を基にして設計基準などが作成されているが、設計業務においては各基準を人が確認しながら製品設計を行っている。そのため、見落としリスクが存在しており、試作段階で問題が発覚し手戻りとなる事例がある。

これらの手戻りを防止するためには、設計業務において部品選定、3Dモデル作成、製図の至る所でチェックを実施する必要があり、今後は設計基準をはじめと

する各基準や製造制約，設備条件をシステム上で扱えるようにするためにデータベースを構築する。このデータベースを活用して人の目で確認をしていた検証作業を系統的に判定し，設計作業をサポートする仕組みを作成していく。

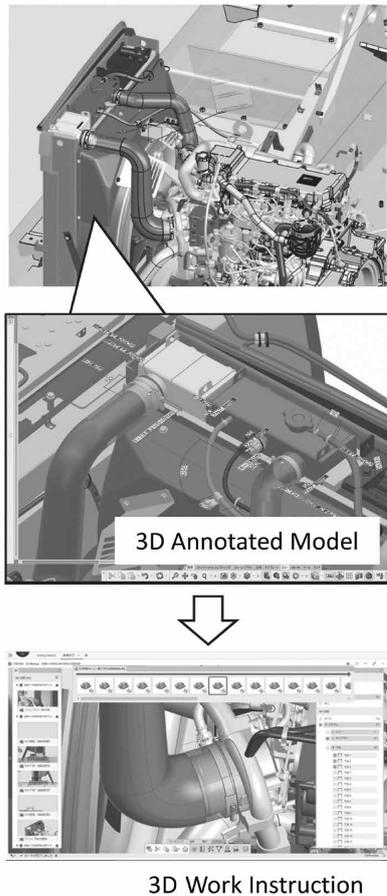


図9 3DAモデルと3D手順書

Fig.9 3DA Model and 3D Work Instruction

### 3.2 組立作業指示書作成の自動化に向けた取り組み

当社では将来的に3DA（3D Annotated）モデルデータの運用が検討されている。3DAモデルとは3Dモデルに設計管理情報を持たせたデータセットのことであり、3DAモデルはモデル作成時の寸法や拘束条件をそのまま作業指示として利用できるため、現状の2D図面作成工数と比較して大幅に作業時間を短縮することができる。とされている。

この3DAモデルがもつ設計管理情報を作業指示書に直接利用することで、従来行っていた組立指示情報の転記作業を簡略化し、さらなる量産準備リードタイム短縮を目指す（図9）。

また、組立方案の作成を自動化するため属人的となっている作業分割単位のルール，判断基準を標準化しデータベースとして蓄積していく。さらに，現在は紙媒体として生産現場に配布している作業指示書をデジタルデータのまま現場で利用するための活動を進めていく。

むすび＝近年のDX化はすさまじいスピードで進化しており，ものづくりにも大きな変化をもたらしている。当社でも様々な角度からDX化を進めているが，まだまだソフトとハード，運用としくみがうまく連携出来ていない部分もある。これらの課題に対して引き続き取り組んでいき，より効率的な開発プロセスの構築を目指したいと考えている。また，エンジニアリングチェーン変革に引き続き取り組み，試作レスやバーチャルでの組立など，モデルベースでのものづくり検証の拡大にもチャレンジしていく所存である。

#### 参考文献

- 1) 小島賢太ほか, R&D神戸製鋼技報, 2018, Vol.68, No.1, p.23-26.

(技術資料)

## ロボット溶接のさらなる自動化に貢献するDX技術

木村雄士\*<sup>1</sup>・日高一輝\*<sup>1</sup>・東良敬矢\*<sup>1</sup>・澤川史明\*<sup>2</sup>・新井敦士\*<sup>1</sup>・小向航平\*<sup>1</sup>

### Digital Transformation (DX) Technology Contributing to Further Automation of Robotic Welding

Yuji KIMURA・Kazuki HIDAKA・Takaya HIGASHIRA・Fumiaki SAWAKAWA・Atsushi ARAI・Kohei KOMUKAI

#### 要旨

情報通信技術やDX技術が発展する中、これらの技術を用いて生産現場の自動化・省人化の加速が期待されている。当社では、溶接業務の自動化を目指し、溶接ロボットをはじめとする多くの機能開発に注力してきた。しかし、溶接ロボットシステムの導入に伴い、教示作業やメンテナンスなど人手を要する作業が新たに生じている。この課題に対し、DX技術を用いてこれらの人手作業を削減することで、溶接ロボットシステムの導入効果を今まで以上に高め、お客様の生産性向上に貢献する。当社では、ARCMAN™ Offline Teaching SystemとDX技術を連係させることで、人手作業である教示作業を削減する溶接プログラム自動生成機能やケーブルシミュレーション機能を開発した。さらに、ロボットシステムへレーザーセンサ、パス間温度センサ、ARCMAN™ Viewと連携したカメラを接続することで、溶接に必要な測定の実現した。

#### Abstract

Information and communication technologies, as well as DX technologies, are advancing, raising expectations for the acceleration of automation and labor-saving in production sites. Kobe Steel has been focusing on the development of various functions, including welding robots, aiming at automating welding operations. However, the introduction of welding robot systems has created new tasks requiring manual work such as teaching and maintenance. Using DX technology to reduce this manual labor can further enhance the effectiveness of introducing welding robot systems, contributing to increased productivity for our customers. Combining the ARCMAN™ Offline Teaching System with DX technology, Kobe Steel has developed new functions for automatically generating welding programs and simulating cable behaviors to reduce manual teaching work. Furthermore, connecting laser sensors, interpass temperature sensors, and cameras linked with ARCMAN™ View to the robot system has automated the measurements required for welding.

#### 検索用キーワード

自動化, 省人化, ティーチレス, レーザセンサ, パス間温度センサ, ARCMAN™ Offline System, ARCMAN™ View

ま え が き = 当社では建築鉄骨、建設機械、橋梁、造船などの産業で多く適用されている中厚板向けに、溶接ロボットシステムを開発・販売しており、溶接工程の自動化・省人化を通じてお客様の生産性向上に貢献している。これらの産業で製作される部材の溶接では、ワークサイズが大きく組立誤差によって部材間に隙間が生じたり、多層盛り溶接により繰り返し熱が加わることで熱ひずみが生じたりすることで、溶接の狙い位置がずれて健全な溶接が行えない場合がある。また、建築鉄骨分野では入熱量やパス間温度管理の基準が定められており、毎回手動で温度計測を行う必要がある。

これらの課題に対して、溶接ロボットシステムにレーザーセンサや非接触温度センサなどを接続し、形状や温度を測定および自動制御することで、さらなる溶接の自動化を進めている。レーザーセンサはレーザー光を用いてルート間隔を計測し、計測結果に基づき最適な溶接条件を自動で選択するもので、従来熟練工が半自動溶接で行っていた隙間埋め溶接の自動化が可能になる。また、二種類の計測方法を搭載しており、計測箇所に応じて適切な方法を適用することでタクトタイムを最小化できる。いっ

ぽう、温度センサを用いることにより、パス間温度の測定および管理が自動化されるため、サイクルタイムの削減や省人化による生産性の向上につながる。

このように溶接ロボットシステムと測定技術を組み合わせることで自動化を推進してきた。いっぽうで、溶接ロボットシステムの導入により、従来の手溶接作業では不要だった教示作業やロボットの操作、センシング失敗やワイヤ詰まりなどに代表される短時間で設備復旧が回復可能な故障であるチョコ停からの復帰作業など、新たな人手作業が必要となる。このような人手作業を削減するために、教示作業をサポートするARCMAN™<sup>注1)</sup> Offline Teaching System(以下、KOTS™<sup>注2)</sup>という)や、ロボット生産の可視化やチョコ停時間の低減に活用できるARCMAN™ Viewを開発および提供している。

本稿1章では、KOTS™にDX技術を組み込むことで教示作業時間の削減を実現した事例を紹介する。2章以降では各種センサを使用し、ロボット溶接のさらなる自

脚注1) ARCMANは当社の登録商標(第1715437号)である。

脚注2) KOTSは当社の商標である。

\*<sup>1</sup> 溶接事業部門 技術センター溶接システム部 \*<sup>2</sup> 溶接事業部門 技術センター溶接システム部 (現 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター)

動化および効率化した実例を紹介する。

## 1. ARCMAN™ Offline Teaching System

本章では溶接ロボットシステム ARCMAN™ 専用のオフラインシミュレータである KOTS™ の活用事例などについて紹介する。KOTS™ は、ARCMAN™ 本体以外に周辺装置や搭載したワークの動きも再現することができるソフトであり、事前の適用検討など様々な場面で活用されている<sup>1)</sup>。

### 1.1 溶接プログラム自動生成機能

溶接ロボットはあらかじめ教示されたデータに従って動作するため、同じワークを大量に生産する場合には高い生産性を発揮する。しかしながら、一つ一つ異なる形状のワークを生産する場合には、それぞれについて教示データを作成する必要があるため、生産性を高めることが難しいという問題を抱えていた。

当社はこの問題を解決するために、溶接プログラムの自動生成機能を開発した。これは熟練教示作業者の教示方法をルール化し、そのルール・システム構成・溶接施工情報などから溶接プログラムを自動で生成する機能である。これにより、ティーチング経験が乏しいオペレータでも簡単に溶接プログラムを作成可能となり、これまで二日かかっていた教示作業を、一日に短縮することができるようになった。

### 1.2 ケーブルシミュレーション

KOTS™ のオプションとして、ケーブルシミュレーション機能がある。これは ARCMAN™ に搭載するタッチケーブルの動き、ロボットアームへの巻き付きや閉所空間進入時のワークとケーブルの干渉を、KOTS™ 上で確認することができる機能である<sup>2)</sup>。とくに閉所空間への進入時のケーブル動作を実機で確認する場合、ケーブルとワークの干渉によりロボットへ予期せぬ負荷がかかり、ロボットやワークの破損につながる可能性がある。従来は、二日程度をかけて、ロボットの姿勢ごとに CAD 上で逐一ケーブル形状をモデリングして、干渉の有無を確認していたが、KOTS™ によりあらかじめ干渉可能性のある動作に内在するリスクの評価が行えるようになるため (図 1)、検討時間が半日程度に削減できるようになった。

### 1.3 多品種少量生産へのロボット適用

溶接プログラム自動生成機能によって、ワークモデルと溶接施工情報から溶接プログラムを自動で出力できるようになり、多品種少量生産のワークごとに人が教示を行う必要がなくなった。現在も建設機械分野に焦点を当てて、溶接プログラム自動生成機能の開発を続けている。今後は、落橋防止向け鋼製セグメントをはじめとする、様々な溶接へと対象を拡大するべく開発に取り組んでいく (図 2)。さらに、当社ではシミュレーション環境と現場環境の差を減らし、現場での教示修正を削減する取り組みとして、溶接ロボットシステムの機体誤差補正機能や、さらなるセンシング機能を開発している。将来的には、CAD データから溶接プログラム自動生成機能で教示プログラムなどを自動生成し、ロボットシステ

ムと関係させることで、溶接工程の完全自動化を実現することが最終目標である。

### 1.4 KOTS™ を利用した社内作業効率化の取り組み

当社では、事前にお客様の状況を把握して、最適な溶接ロボットシステムを提案している。このためには、対象ワーク形状に適したロボットやスライダ、ポジションなどの選定と、それらの組み合わせや配置を決定する必要があるが、その検証には膨大な時間を要する。とくにロボット溶接が可能かどうかを判断するための教示プログラム作成が、機器配置設計時間の大部分を占めている。この問題を解決するために溶接プログラム自動生成機能を利用することで、溶接プログラム作成時間の短縮と作成する溶接プログラムの品質均質化が可能となり、検証時間の削減と品質向上につながった。

また、当社建築鉄骨向け溶接ソフトウェアでは、コラムや仕口などあらかじめワークの寸法が分かるものについては、それらを入力することで教示プログラムが自動で生成される<sup>3)</sup>。このソフトウェアで生成した教示プログラムの動作確認に KOTS™ が利用可能であり、実システムや様々な大きさの実ワークを用意せずに動作確認できる。また、今まではシミュレーションできなかったロボット機能であるワイヤタッチセンシングを、KOTS™ 上で使用できるように開発したことで、ワークのズレを想定したセンシング動作の確認まで KOTS™

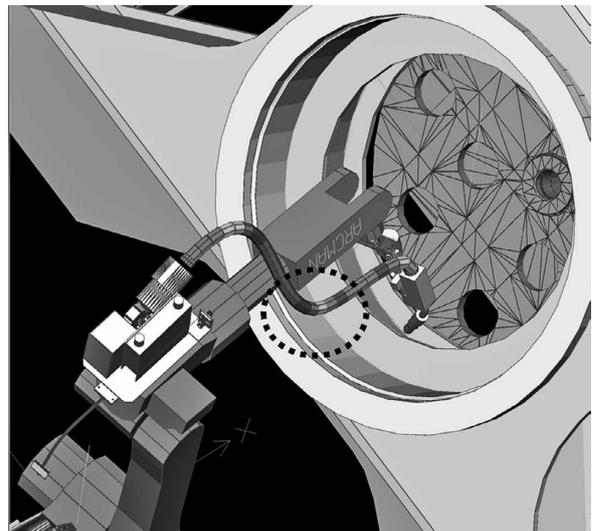


図 1 ケーブルシミュレーションおよび曲率表示  
Fig.1 Cable simulation and curvature display

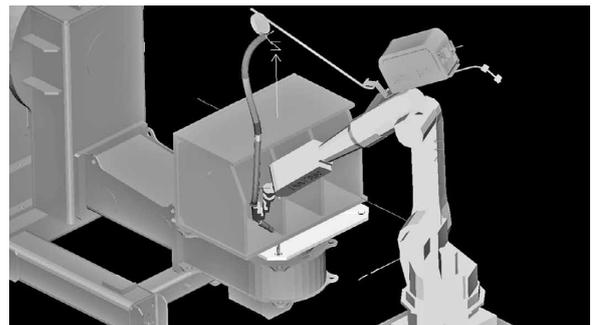


図 2 落橋防止装置向け適用検討  
Fig.2 Feasibility study for application to anti-dropping bridge devices

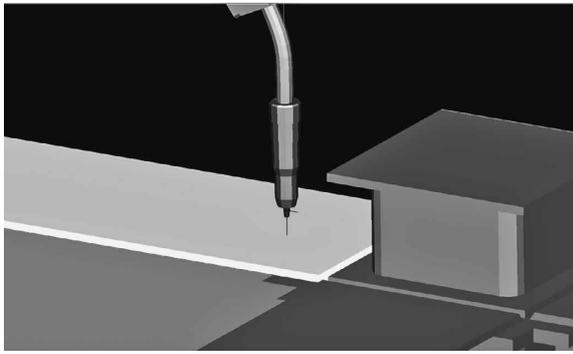


図3 三方向センシングシミュレーション  
Fig.3 3-way sensing simulation

上で可能となった。これにより、溶接プログラムの自動生成関連ソフトウェアの開発工数や、ワーク購入費などを削減することができた(図3)。

これらの技術を活用することで溶接自動化を実現する最適なシステムをお客様に提案可能にしていきたい。

## 2. センシング技術

当社の溶接ロボットには、特別な測定機器を必要としないワイヤタッチセンシングや、開先形状の歪みや変形を補正するアークセンサといったセンシング技術が備わっている。しかし、これらのセンシング技術では複雑な開先形状が測定できないなどの課題がある。また、特定の溶接対象物には温度管理の規定があり、ロボットによるさらなる溶接自動化の妨げとなっていた。これらの課題を解決するために開発した、レーザセンサによる複雑な開先を有する難溶接の自動化や、温度センサを活用した建築鉄骨向け溶接自動化の事例について紹介する。

### 2.1 レーザセンサ

レーザセンサは、レーザ光を開先や溶接部材に照射することで、ワイヤタッチセンシングでは計測できないような様々な形状の開先を高速に計測することができるものである。レーザセンサの特長として、ワイヤタッチセンシングでは隙間の計測ができなかったフレア開先や、T継手を含めた幅広い継手に対し、高精度の計測が可能であることが挙げられる。また、小型のレーザセンサを採用することで、狭隙部でも安定したセンシングを行うことができるという特長も有している<sup>4)</sup>(図4)。

#### 2.1.1 自動化難溶接への適用

中厚板分野におけるワークの多くが大型な構造物のため、歪みや組み立て誤差により溶接線に意図せず隙間が生じる場合がある。従来は、ロボット溶接の前工程にて、この隙間を人による半自動溶接で埋める必要があった。これに対し、レーザセンサを用いて隙間の計測を行い、ロボットに隙間を埋める溶接を担わせることで、作業者の負荷を低減できるようになった。この機能は、レーザセンサによる計測結果を、あらかじめ作成した隙間の幅に応じた溶接条件(データバンク)から、ロボットが最適な条件を選択することで自動化を実現するものである(図5)。

#### 2.1.2 レーザセンサを利用したタクトタイム短縮

レーザセンシングでは、ライン状のレーザ光を開先に



図4 レーザセンサ付き溶接トーチ  
Fig.4 Welding torch with laser sensors

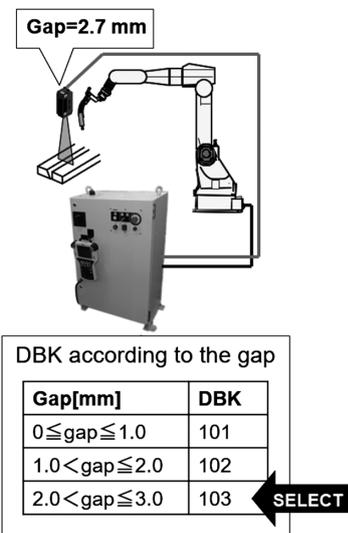


図5 レーザセンサを利用した溶接条件切替  
Fig.5 Switching welding conditions using laser sensors

対して照射し計測を行うことで、ワイヤタッチセンシングに比べて複数回の検出動作が不要となる。従来のワイヤを用いたルートギャップの測定では、三回の検出動作が必要になるため、約10秒の時間を要するのに対し、レーザセンシングを用いると1秒と測定時間が10分の1になる。このレーザセンシングでは、走査計測とワンショット計測の二種類の計測方法が利用可能である。走査計測では、レーザセンサを溶接線方向に一定距離走査させて複数の計測データを取得し、平均化した結果を出力する。これにより溶接によるワーク開先内部、あるいは表面へのヒュームやスパッタなどの付着や、加工や組み立て時についたキズなどによる誤計測の影響を低減することができる。いっぽうでワンショット計測では、走査動作なしに一点でのみの計測を行うため、より高速な計測が可能となる。これらは専用命令により、計測箇所に応じた適切な計測方法を選択することが可能である。

### 2.2 パス間温度センサ概要

建築鉄骨分野ではパス間温度の管理基準が定められており、次のパスを溶接する直前に、所定の位置の温度を

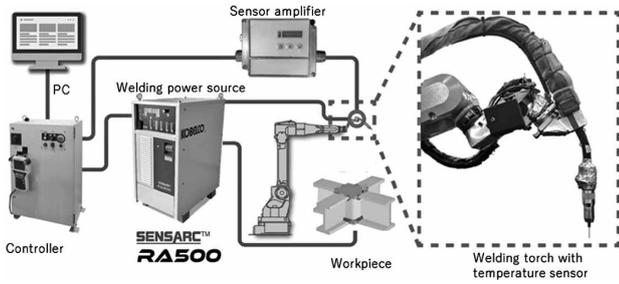


図6 温度センサを用いたシステム構成  
Fig.6 System using temperature sensors

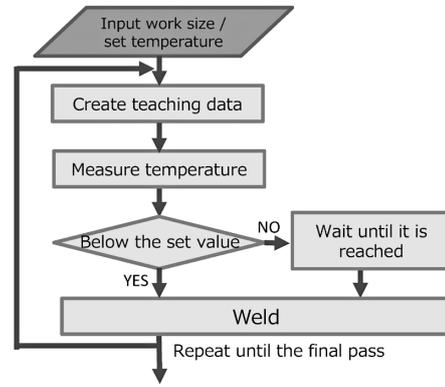


図7 温度測定ワークフロー  
Fig.7 Temperature measurement workflow

人が温度計または温度チョークを用いて測定するのが一般的である。これにより、パス間温度が管理基準以下になっていることを確認した後、次のパスの溶接を開始する。

鉄骨溶接ロボットシステム向けに開発したパス間温度測定機能は、これまで人が実施していたパス間温度の測定と管理を自動化したものである。本機能により作業によるパス間温度の測定が不要となるため、その時間をほかの作業に活用することによるサイクルタイムの短縮や、確実なパス間温度管理による溶接継手品質の安定化が期待できる<sup>5)</sup>。また、パス間温度測定のために、作業者が安全防護柵の中に入る必要がなくなるため、安全性の向上も実現できる。

本機能を搭載したシステムについては、既にSグレードの鉄骨製作工場を保有する鉄骨ファブリケータなどで実際に導入されている。

### 2.2.1 システム構成

パス間温度測定機能のシステム構成を図6に示す。非接触型の温度センサが、ロボットの手首付近の溶接動作に影響のない位置に取り付けられているため、温度センサとトーチを持ち替える動作は不要である。いっぽう、温度センサから取得したデータは、センサアンプとコントローラを経由してPCに送信され、測定した温度はPCモニタと教示ペンダント画面で確認できる。

### 2.2.2 パス間温度測定フロー

パス間温度測定機能の処理フローを図7に示す。ロボットは、溶接開始直前に測定箇所へ移動して温度を測定する。ここで設定値より温度が高い場合は、設定値以下になるまでロボットが待機する。測定中の温度は、PCの画面で確認でき、測定した温度が設定値以下になるとロボットが溶接を開始する。これを最終パスまで繰り返す。

### 2.2.3 パス間温度の記録

本溶接ロボットシステムには、溶接電流、アーク電圧、入熱量などを自動で記録し、施工レポートとして出力する機能がある。従来は、この施工レポートにあるパス間温度の欄に、人が測定したパス間温度を記入、もしくはPCから入力する必要があったが、本機能を使用すると、測定したパス間温度のデータが自動で入力されるようになるため、入力作業の削減や入力ミスの防止につながる(図8)。

工事名称				作業日		2022/06/30	
柱番号				ロボット名称		オペレータ	
継手名				記録者			
母材	部位	コラム					
板厚	32mm	ルート間隔	8.9mm	積層図			
開先角度	35°	溶接姿勢	下向き姿勢				
溶接材料	規格						
	ワイヤ径						
	メーカー						
管理	バス間温度	250℃					
	溶接入熱	30000J/cm		11層16パス			
パス	区分	溶接電流(A)	アーク電圧(V)	溶接速度(cm/min)	溶接入熱(J/cm)	バス間温度(℃)	
1	直線	318	34.8	24.0	27666	100℃以下	
	コーナ	301	33.3	24.0	25058		
2	直線	295	35.8	26.8	23644	100℃以下	
	コーナ	289	34.4	26.2	22767		
3	直線	280	36.0	26.3	22996	100℃以下	
	コーナ	289	35.1	25.2	22480		
4	直線	283	35.7	25.3	23959	102	
	コーナ	280	35.1	24.1	24468		
5	直線	282	34.8	32.7	18006	100℃以下	
	コーナ	270	34.2	32.1	17259		
6	直線	288	35.1	30.7	19756	113	
	コーナ	270	34.7	31.1	18075		
7	直線	286	35.1	29.7	20280	134	
	コーナ	281	34.4	28.6	19594		
8	直線	286	35.1	28.2	21358	136	
	コーナ	259	34.8	28.0	19313		
9	直線	290	35.2	30.1	20348	116	
	コーナ	289	34.7	28.9	18731		
10	直線	282	35.2	28.5	20897	137	
	コーナ	259	34.5	27.6	19425		
11	直線	283	34.9	30.0	19753	157	
	コーナ	274	34.6	30.0	18960		
12	直線	277	35.2	27.1	21587	152	
	コーナ	264	34.6	26.4	20760		
13	直線	256	33.6	32.4	15928	126	
	コーナ	247	33.6	30.0	16598		
14	直線	270	33.3	31.3	17235	132	
	コーナ	231	33.4	27.9	16592		
15	直線	284	33.6	31.6	16842	145	
	コーナ	235	33.6	27.8	17041		
16	直線	254	33.9	28.7	17395	143	
	コーナ	245	33.7	26.3	18836		

図8 施工レポート例  
Fig.8 Welding procedure report example

## 3. ARCMAN™ View

本章では、溶接ロボットシステムの稼働データを集積し、溶接・生産データの見える化を行うことで、チョコ停や溶接不良の解析、および生産管理を支援するARCMAN™ PRODUCTION SUPPORT<sup>6)</sup>のオプション機能であるARCMAN™ Viewの活用事例について説明する。

### 3.1 ARCMAN™ Viewの概要

ARCMAN™ Viewはネットワークカメラにより稼働中のロボットをリアルタイムに映像表示したり、その映像を録画したりすることが可能になるオプション機能である(図9、図10)。

### 3.2 ARCMAN™ Viewによる安全な作業への貢献

ARCMAN™ Viewの特長として、常にロボットに搭載された溶接トーチ先端が映るように、カメラが追尾す

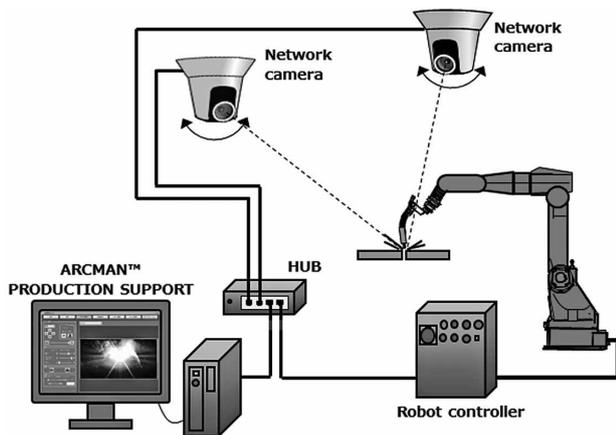


図9 ARCMAN™ View システム構成  
Fig.9 ARCMAN™ View system configuration



図11 柵外からの操作例  
Fig.11 Sample of remote operation outside the fence



図10 ARCMAN™ View 画面イメージ  
Fig.10 Sample image of ARCMAN™ View

る機能が挙げられる。本機能により、手動でカメラを動かさずとも常に溶接トーチ先端周辺の状態をPCのモニターで確認することができ、モニター越しでのロボット操作も可能となる<sup>7)</sup>。

このようなモニター越しでのリモート操作を活用することで、例えば従来は安全柵の中に入ってロボットを目視しながら操作する必要があるような状況でも、柵の外側から安全に操作することができる(図11)。実際に導入いただいた鉄道車両メーカーでは、高所溶接中にチョコ停が発生した際に、ARCMAN™ Viewのモニターを見ながら安全柵外から復帰作業を行ったという事例もある。

### 3.3 ARCMAN™ Viewによる溶接評価

ARCMAN™ Viewの新機能として、溶接中の画像からスパッタに該当する部分を判別し、ピクセル数を数値としてリアルタイムに表示し、ログデータとしての保存を行うスパッタ量計測機能を開発した(図12)。本機能により、溶接条件や溶接状態に伴うスパッタ量の増減を簡単に数値化することができ、条件変更時の結果確認作業時間の短縮や、溶接不良の検知につながる事が期待できる(図13)。

むすび=本稿では、DX技術を活用した溶接ロボットシステムの教示機能や測定技術について紹介した。国内の

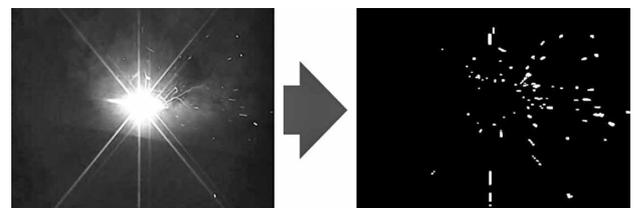


図12 スパッタ検出イメージ  
Fig.12 Image of spatter detection

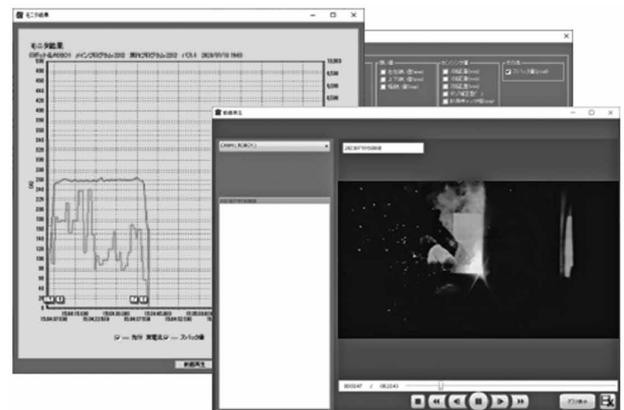


図13 スパッタ量の表示イメージ  
Fig.13 Image of spatter amount display

少子高齢化が進む中、生産現場における自動化や省人化へのニーズは、今後さらに高まると予想される。この背景を踏まえ、人手不足の解消と作業者を重労働から開放することを目指し、溶接プロセスの自動化と品質向上に注力することで、お客様の生産性と安全性の向上に貢献していく所存である。

### 参考文献

- 1) 泉 敏之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2013, Vol.63, No.1, p.94-98.
- 2) 福永敦史ほか. R&D神戸製鋼技報. 2023, Vol.72, No.1, p.21-26.
- 3) 松村浩史. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.3, p.67.
- 4) 東良敬矢. ほうだより技術がいど. 技術レポート. 2019, Vol.60, 2019-5.
- 5) 新井敦士. ほうだより技術がいど. 技術レポート. 2023, Vol.64, 2023-2.
- 6) 福永敦史ほか. R&D神戸製鋼技報. 2013, Vol.63, No.1, p.99-103.
- 7) 小池 武ほか. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.68, No.2, p.59-62.

(解説)

# バーチャルトレーニングシステムによる溶接の技能伝承

青山雄一郎<sup>\*1</sup>

## Transferring Welding Skills through Virtual Training System

Yuichiro AOYAMA

### 要旨

若手の溶接士がベテランから、直に指導や手ほどきを受ける機会が減っている昨今において、VR（バーチャルリアリティ）技術を活用した訓練シミュレーターを開発することで、ベテランによる指導訓練の代替になると考えた。検証の結果、アーク溶接については、従来の実技訓練と同等の教育成果が認められた。さらには、他の支店や工場といった遠隔地にいる若手溶接士への実技指導や、ほかにも練度が求められる手技（運動技能）への展開の可能性について考察した。

### Abstract

In recent years, fewer opportunities have been provided for young welders to receive direct guidance and training from veterans. To address this issue, a training simulator using virtual reality (VR) technology was developed to serve as an alternative to instruction and training provided by veterans. Verification results show that, for arc welding, the educational outcomes are equivalent to those obtained by traditional practical training. Further possibilities include providing practical instruction to young welders in remote locations, such as other branches or factories, and expanding the training to other techniques that require a high skill level (e.g., motion skills).

### 検索用キーワード

技能伝承, 溶接, 溶接訓練, バーチャルリアリティ, アーク溶接, 炭酸ガスアーク溶接, TIG溶接

まえがき＝株式会社神戸製鋼所のグループ会社である(株)コベルコE&M（以下、当社という）は、製鉄（せいせん）・製鋼設備にケミカルプラント、火力発電設備の建設と設備保全を担っており、製缶組立や設備補修はもとより、配管加工に従事する溶接士を大勢擁している会社である。昨今の労働人口減少、製造業における定期採用の難しさ、そして若手社員の早期離職という問題を解決するために、若手溶接士の早期戦力化が喫緊の課題となっていた。

このような中、経験の浅い若手溶接士の習熟日数を短縮し、なおかつ早い段階で「ものづくり」の楽しさを体感してもらうことを目的にVR溶接トレーニング（以下、ナップ溶接トレーニングという）を開発し、2020年より販売するに至っている。

このナップ溶接トレーニングは、ベテラン溶接士の手技をバーチャルな空間に3Dモデルを使って再現・可視化することで、溶接技術の習得を可能にした。また、溶接時のアーク光を消すことや、溶接時の動きを可視化し、何度でも繰り返し見ることができるようになるなど、従来おこなっていた実習訓練では不可能だった様々なことを実現している。当然のことながらバーチャルトレーニングであるため、時間や場所を問わないことも利点の一つである。

本稿では、ナップ溶接トレーニングの概要と今後の展望について紹介する。

## 1. OJTの機能不全

いま社内において、中核として活躍しているベテラン溶接士たちは、「若手の頃に古参のベテラン溶接士から薫陶を受け、また彼らの背中を見て学んできた世代」である。彼らは終身雇用制度の下で、長期にわたる師弟関係を背景にした「伝統的徒弟制度」（狭義のOJTである）で技能を受け継いできた最後の世代と言える。そこでのOJTによる学びの機序というものは、若手溶接士がミスをしたその瞬間に、ベテラン溶接士が的確なアドバイスを若手溶接士に伝え、そうでないときは、ただ見守るという指導法である。

そしてここで重要なのは、この若手溶接士にとっての学びのタイミングがいつ起こるか判らない、何日も一緒に過ごしていて、ほんの一瞬というケースもあるということである。したがって、ベテラン溶接士と若手溶接士がともにいる時間が長いことが、このOJTが機能するための必要条件なのである。もちろんのこと、観察眼と指導力がベテラン溶接士に求められるのは言うまでもない。ところが、溶接士不足が深刻化する現状において、上述したような環境を作り出すことは非常に難しい。そ

<sup>\*1</sup>(株)コベルコE&M 経営企画部

ここで我々は、ナップ溶接トレーニングの開発に際し以下の点を重視した。

(1) 若手社員が継続して溶接訓練に取り組むことができるよう、容易に成長が実感できる。

(2) 社員同士の深いつながり、一体感や共感が得られるようなコミュニケーションの機会が生まれる。

このように、高度技能の伝承ツールとしてではなく、早く現場に出てもらい、若手溶接士に「やりがい」を感じて「すばらしい仕事」だと思ってもらうために、従来のOJTを補完するツールとして、ナップ溶接トレーニングの開発と運用を目指した。

## 2. ナップ溶接トレーニング導入による効果

ナップ溶接トレーニングを導入することで期待される効果を列挙する。

まず、ベテラン溶接士の手技をVRヘッドセットで、色々な視点から繰り返し再現できる。現実の溶接では、強いアーク光のまぶしさ、遮光保護面に遮られてベテラン溶接士の手元とホルダーやトーチで行う手技を見ることができない。ナップ溶接トレーニングでは、アーク光を消し、かつベテラン溶接士の体を消すことでホルダーやトーチの動きだけを再現し、ベテラン溶接士の視点で観察することを可能にしている。もちろん、火傷や眼炎(雪目と同じ)を心配することなく、色々な角度からも観察できる。

つぎに、自分が溶接しているときの動きを後からVRヘッドセット上で再現できる。若手溶接士が行う溶接の様子を記録しておき、後からVRヘッドセットで再現できる。若手溶接士が自分自身の出来栄を振り返ることはもちろんのこと、ベテラン溶接士がこれを確認して指導ポイントや勘所を伝えることができる。

また、アーク長、溶接棒の移動速度や角度など運棒データを元に採点される。VRヘッドセットとあいまってゲーム感覚で行うので、飽きることなく練習のモチベーションが維持できる。同じ溶接を繰り返し何度も体験することができるため、各自の習熟度に応じたペースで学ぶことができる。各自の採点結果を披露し合うことからコミュニケーションが活発になり、若手溶接士同士の一体感醸成につながる。

さらに、好きな場所、時間に、安全に練習ができる。現実の溶接では、たとえ保護具を装着していても飛散するスパッタやスラグで火傷する、溶接直後の母材に触れて火傷する、アーク光を直視して眼炎になる、溶接棒先端に触れて感電する、など枚挙にいとまがない。したがって、初学者の溶接訓練ではベテラン溶接士がマンツーマンに近い状態で立ち会わなければならない。また、溶接機材などが使える訓練場所やベテラン溶接士の確保など、どうしても訓練日時が限定されてしまう。

この問題に対し、ナップ溶接トレーニングでは、VRヘッドセットと溶接棒ホルダーもしくは溶接トーチとノートパソコンを用意すれば、そこが訓練場所となる。十数人の若手溶接士を一人のベテラン溶接士が空調の効いた会議室で教えることも可能となる。

最後に、練習用の母材や溶接棒などのコストが発生しない。VR技術で実現した訓練ツールなので、母材も溶接棒も仮想であり、繰り返し練習しても消費しない。これら部材の費用もさることながら、置場や在庫管理から解放されるため、訓練計画を立案する者からすると大きなメリットである。

## 3. ナップ溶接トレーニングの概要

ナップ溶接トレーニングは、被訓練者が装着するVRヘッドセット(図1)、溶接ホルダーや溶接トーチを模した専用アタッチメント(図2)、およびパソコンにインストールする溶接VRプログラム(図3)から構成される。実際の溶接に近づけるためにこの専用アタッチメントは、アーク溶接用のホルダー、半自動炭酸ガスアーク溶接用のトーチ、TIG溶接用のトーチと3種類を用意



図1 VRヘッドセット  
Fig.1 VR headset

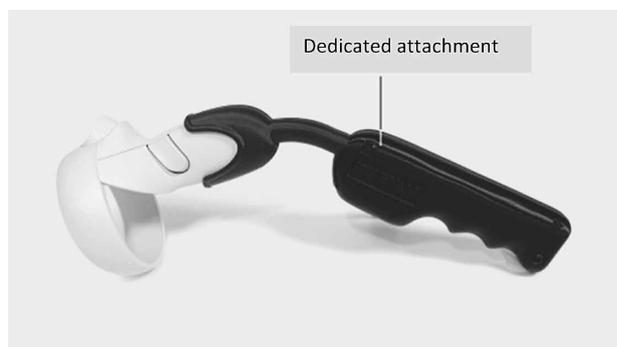


図2 専用アタッチメント  
Fig.2 Dedicated attachment



図3 溶接VRプログラム  
Fig.3 VR program for welding

表1 溶接メニュー  
Table 1 Welding menu

Welding conditions	Arc welding	Semi-auto welding	TIG welding
Welding position	Flat, Horizontal, Vertical		
Plate thickness	9 (mm), 19 (mm)		4.5 (mm)
Wire diameter	3.2 (mm), 4 (mm)	1.2 (mm)	2.4 (mm)
Base material shape	Bead on, Fillet, Groove		

している。

溶接の初心者を対象として下向突合せアーク溶接から始めて、熟練溶接士からの使用感を聴き取りながら溶接条件や溶接種類を増やしてきた(表1)。図4にVRヘッドセット上で見えるメニュー画面を示す。

ここで、ナップ溶接トレーニングが実現したソフトウェアについて紹介する。現実の溶接では、強いアーク光のまぶしさで溶接箇所が見えない、ベテラン溶接士の溶接手技を学ぶ場を設けてもベテラン溶接士の背中や遮光保護面、皮手袋に遮られて運棒を見るができないという問題がある。ナップ溶接トレーニングでは、アーク光を消し、ベテラン溶接士の体を消すことで、トーチの動きだけを再現することができる(図5)。この機能は、ベテラン溶接士の溶接を再現する場面だけではなく、自身の溶接時と同様に可能である。

また、このナップ溶接トレーニングには採点機能が実装されている。これは、アーク長、スピード、ビードの向きを評価して点数化したナップ溶接トレーニング独自の機能である(図6)。実際の溶接では、目視によるビード外観検査結果や、X線による内部欠陥の検査結果などを総合的に評価しなければならないが、ナップ溶接トレーニングでは、即座に採点結果が表示される。VRヘッドセットとあいまってゲーム感覚で行え、飽きることなく練習のモチベーションが維持できる。また、各自の採点結果を元に会話が弾み、溶接士同士の一体感醸成に役立っている。

ナップ溶接トレーニングの最大の売りは、訓練場所を問わないことである。図7は、溶接の座学と実習を同じ教室で行った事例である。

最後に、ナップ溶接トレーニングを使って新人教育を行った結果を紹介する。9名の新卒採用者を、ナップ溶接トレーニングを使って教育する5名、もう一つは従来の実技実習を行う4名の二組に分けて、その効果を確かめた。両方の習熟度を正しく比較するためにナップ溶接トレーニングを使って教育する組についても、その日の最後に実際に溶接を行わせて採点した。その結果は、図8に示すとおり、バラツキを考慮すると両者には差異がない。すなわち、火傷や危険が無く、一度に多くの未経験者が練習でき、空調の効いた会議室で幾度も繰り返し練習できるというナップ溶接トレーニングの有効性が実証できたといえる。もちろん、母材や溶接棒といった消耗品が不要になることによる経費削減効果もある。

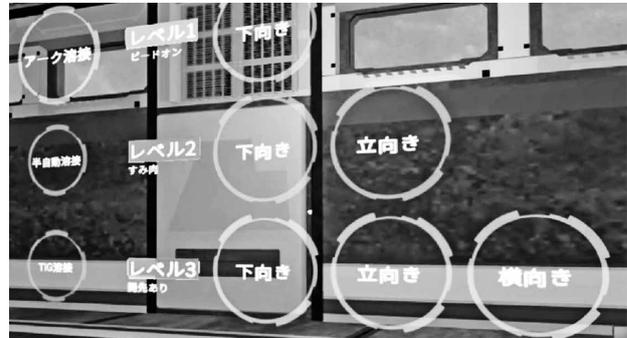


図4 設定画面  
Fig.4 Setting screen



図5 TIG溶接でアーク光を消した画像  
Fig.5 Image without arc with TIG welding

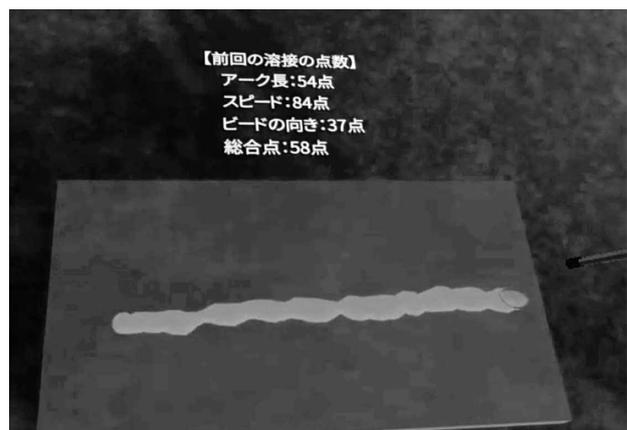


図6 点数表示  
Fig.6 Score display



図7 ナップ溶接トレーニングによる実習風景  
Fig.7 Training status with Nap Welding Training System

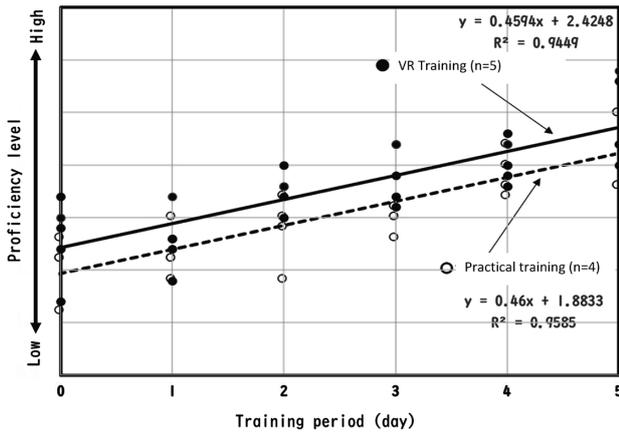


図8 VRと実技による習熟度合の比較  
Fig.8 Comparison of proficiency level through VR and practical skills

## 4. 今後の展望

### 4.1 海外展開

2022年に米国アトランタで開催された北米最大の金属成形、溶接、仕上に関する展示会「ファブテック (FABTECH)」への出展を皮切りに、2023年度より本格的な海外展開を開始した。展示会の反応は上々であり、技能訓練は国境を超えると実感している。海外には先行する競合製品も存在しているが、ナップ溶接は「価格競争力」、「持ち運びの手軽さ」、「技能のリアルさ」の点で優位性があると考えている。

### 4.2 社内での最大限の活用

まずは、社内で十分に使いこなすことを目指している。新入社員研修で使用して3年目になるが、「VRでの訓練とは別に、アークを発生させる練習をすると習熟が速くなる」ことや、「受講者同士で点数を競い合わせると上達が早くなる」、「目が疲れる人がいるので、定期的な休憩が必要」など、VR訓練のノウハウも蓄積しつつある。新入社員以外にも活用の幅を広げるなど、社内で徹底的に活用していく。

### 4.3 溶接における機能の拡充

社内も含めユーザの声を取り入れ、新しい機能を実装していく。母材の形状としては、パイプ溶接の実装を進めたい。また、業種別に溶接の特徴を理解し、各業種に特化した訓練ツールも検討していきたい。さらに、遠隔地にいる研修生が、VRを介して熟練工の指導が受けられるような、VRならではの機能の拡充も考えている。

### 4.4 溶接以外の技能訓練への展開

当社には、ガス溶断、機械仕上げ、芯出しなど習熟する必要のある技能が多数あり、自社として技能訓練の課題が存在している。その課題に対してVR技術を活用して訓練ツールとして展開していきたい。溶接のような動作を伴う訓練はもちろんだが、手順を覚えるタイプの技能訓練にもVRは有効である。技能士試験が存在する技能など、基本的なものから順次検討を進めていきたい。

むすび=ベテラン溶接士による若手溶接士の指導機会が減少する中で、技能伝承の手段として、安全に練習が行えること、ゲーム感覚で楽しんで取り組むことができること、訓練場所が制約されないことなどから、VR技術を応用した溶接シミュレーターを開発し検証を続けてきた。その結果、本論で述べたとおり、技能伝承の手段としてVR技術が期待できる。当社には、習熟する必要のある技能が多数あり、自社として技能訓練の課題が存在している。今後は、適用範囲を拡げて、その課題を解決していきたい。

最後に、ナップ溶接トレーニングの開発にあたり、イマクリエイト株式会社・CTO員川崎仁史氏には、多大なご助言、ご協力を頂いた。ここに感謝の意を表す。

(解説)

# サービス業務DXによる「持続可能なKOBELCOらしいアフターサービス体制」の実現

宗 陽一郎\*<sup>1</sup>

## Realizing “Sustainable KOBELCO-like After-sales Service System” through Service Process Digital Transformation (DX)

Youichirou SOU

### 要旨

当社ではカスタムメイドな非汎用産業機械や設備プラントを設計・製造し、販売している。一般に25～50年の間、お客様のものづくり現場で使い続けられる製品であり、販売後も設備点検や部品交換などのメンテナンスからオーバーホールまで幅広く、お客様のものづくり全般における様々な技術的相談や協力支援にアフターサービスという形で応え続けてきた。本稿では、お客様やビジネスパートナーを含めた「当社産業機械群のアフターサービス業務における関係者間コミュニケーションやコラボレーション」の変革を狙いとした、サービス業務DXを通じて「持続可能なKOBELCOらしいアフターサービス体制」の再構築に関する取り組みを紹介する。

### Abstract

Kobe Steel designs, manufactures, and sells custom-made nonstandard industrial machinery and plant equipment. These products are generally used for 25 to 50 years at the customer's manufacturing site. Even after the sales, Kobe Steel continues to provide a wide range of after-sales services, from maintenance such as equipment inspections and part replacement to overhauls, responding to requests for various technical consultations, and cooperative support for customers' manufacturing in general. This paper introduces the company's efforts to construct a “sustainable after-sales service system that is characteristic of KOBELCO” through service process DX, to transform communication and collaboration among stakeholders, including customers and business partners, in the after-sales service work of KOBELCO's industrial machinery.

### 検索用キーワード

産業機械、メンテナンス、オーバーホール、DX、ICT、プラットフォーム、ビジネスモデル、エコシステム

### まえがき＝「機械事業アフターサービス・ビジネスにおける業務DX推進」の取組経緯

モノからコトへのパラダイムシフトが進む中、当社ではメーカーとしての強みを活かしながら、従来の「モノづくりを中核とした生業」から「モノとコトを融合した事業構造への変革」が事業課題である。

本実現には自社の強みの棚卸や再生を進めながら、コト的価値提供の市場・お客様接点となるアフターサービス・ビジネスの強化拡大が鍵となる。今後国内市場が縮小する中、海外市場をさらなる成長機会として捉え直し、サービスを起点としたものづくり企業としてのビジネスモデル変革を推進する必要がある。

当社では、お客様の生産・製造プラントで、お客様のものづくりを裏方として支える、カスタムメイドな非汎用産業機械（以下、生産財という）を設計・製造し、販売している。これらはお客様ごとに一品一様な設計仕様であり、高性能・高信頼性・長寿命が求められる製品群である。一般に25～50年の間、お客様のものづくり現場で使い続けられる製品であるため、販売後においても、交換部品の供給やものづくり全般における様々な技術的相談や協力支援に「アフターサービス」という形で応え続けてきた。製品群が一品一様な仕様であるため、

当社のアフターサービスは、設備点検や部品交換などのメンテナンスからプラントを一時停止して分解検査・補修する「オーバーホール (overhaul)」まで幅広く対応し、お客様の生産・製造プラントの最適経営に産業機械メーカーの立場から関わってきた。いっぽうで、アフターサービスの業務内容はこれまで当社内において標準化が進みやすく、属人性が強い形態であった。

本稿では、MBAホルダ兼ICTエンジニアである筆者が社内DXコンサルタント的立ち位置・役割にて取り組んだ、当社機械事業でのアフターサービス・ビジネスモデル変革に関する取り組み「サービス業務DX」について紹介する。<sup>1)～3)</sup>

### 1. サービス業務DX①：「業務内容・業務プロセス」のデジタル標準化と整流化の推進（「サービス業務遂行ノウハウや品質管理手法」のプラットフォーム化）

「生産財」と呼ばれる産業機械や設備プラントは一般に高額設備であり、それ故に永く安定的に使い続けられる必要がある。そのため当社では、お客様設備の状態を定期的に分解検査し、必要に応じて適切な処置を行うメンテナンスサービスを提供してきた。また当社が製品供

\*1 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター

給した産業機械やプラントは、お客様の工場プラントにおける生産製造活動の中核的設備として使用されることが多く、メンテナンスによる設備停止は生産製造活動の機会損出を意味する。そのため限られた工期の中で、メンテナンスサービスをミスなく確実に遂行し、もしイレギュラ事象が発見された時には、早期に原因を特定し問題解決や応急処置を図ることが求められる。

お客様の設備状態を問診して、必要に応じて適切な一次処置ができる人材を育成し組織化することはメーカーとしての責務であり、長年日本のメーカーでは「現場力」として蓄積し伝承されてきた。当社においても、工場内での製造組立業務に一定期間従事した後、先輩らにより蓄積/代々受け継がれてきた経験知を情報として持つてお客様の設備メンテナンス現場に派遣するOJT形式で伝承してきた。しかし、これまでは伝承方法の標準化/形式知化が進まなかった。

当社機械事業では、2017年より、これまで現場内で蓄積伝承されてきたメンテナンスサービス業務遂行のノウハウにICTを活用した見える化を推進するとともに、お客様を含めたメンテナンス業務に関わる全てのステークホルダーをICT仮想空間でつなぐことによる「メンテナンスサービス品質向上」の取り組みを開始した。

本取り組みでは、メーカーが保有する設計および製造ノウハウを源泉とした「設備点検メンテナンス作業の品質指標化」を推進し、これら指標を基にメンテナンスサービスの業務プロセスと業務内容を構成しなおし、サービスの提供内容と結果をお客様と相互確認しながら（提供プロセスの可視化）、最適設備保全計画を議論し遂行する「共創型メンテナンスサービス」を実現するためのサービス業務オペレーションシステムを実現した（図1）。

## 2. サービス業務DX②：「アフターサービス・ビジネス手法」のデジタル標準化と整流化の推進（「設備機械メンテナンス手法」のプラットフォーム化）

当社内では従来、アフターサービスは製品（モノ）拡販のための「手段」や「付帯的業務」といった位置づけで関係者の中で捉えられ、それ故に「製品（モノ）」に替わるコト的価値を提供する」といった意識が根付きにくく薄かった。そのため提供価値内容の定義も曖昧となり、提供形態やプロセスも標準化が進まず属人的な形で価値提供が行われてきた。

サービス業務DX推進では、提供価値そのものの再定義（主要な提供価値内容の明確化）を行い、その上でICTを活用してのアフターサービス・ビジネス手法の標準化と整流化（プラットフォーム化）を推進した。

複数の産業機械メニュー群を有する当社の特徴/強みを活かし、最新のシステム構築手法であるアジャイル方式を取り入れ、産業機械アフターサービス・ビジネスごとに組織知として蓄積されてきた設備機械メンテナンス手法のあぶり出しを推進した。具体的には、まず一つの産業機械製品メニューでのアフターサービスの提供内容とその提供プロセスでプラットフォーム化を図る。そのプラットフォームを業務分析ヒアリングシートにして他製品メニュー群のアフターサービスの業務内容や提供プロセスの分析/あぶり出しを行い、産業機械製品別の「アフターサービス・ビジネス手法（設備機械メンテナンス手法）」としてのデジタル標準化と整流化を推進する。その上で共通サービスビジネスシステム化を推進した（図2）。



図1 「サービス業務遂行ノウハウや品質管理手法」プラットフォーム  
Fig.1 Service operation system

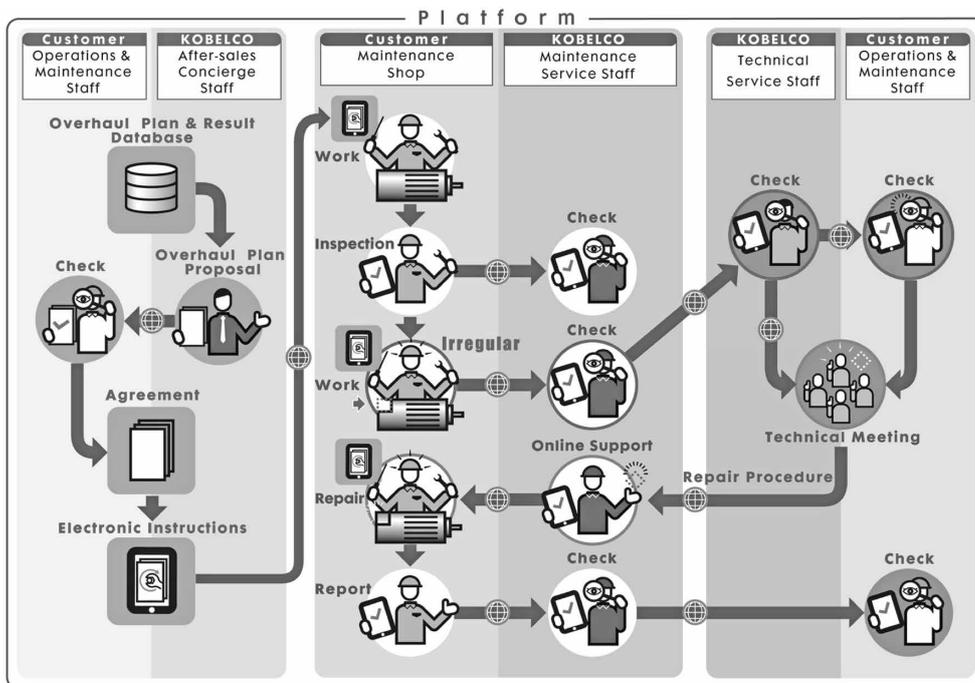


図2 「アフターサービス・ビジネス手法」プラットフォーム  
Fig.2 Service business system

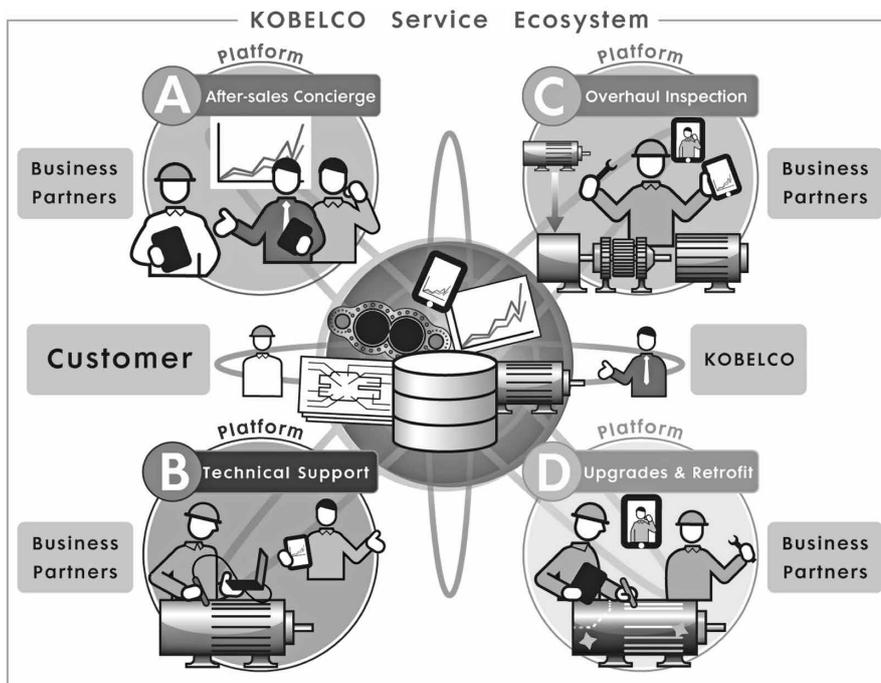


図3 非汎用カスタムメイド産業機械の共通コアサービス内容  
Fig.3 After-sales service menu

現在、当社は複数の産業機械のサービスビジネスシステムとして運用を開始しており、本プラットフォームを媒体にしてお客様およびビジネスパートナー（グローバルなKOBELCOアフターサービス網を構築するためのサービス工場やサービスエンジニア）とつながり、全世界でお使いいただいている当社の産業機械やプラントの連続安定操業に取り組んでいる。

### 3. サービス業務DX③：ビジネスモデル強化手法としてのサービス業務組織知共有化推進

DX推進の結果、非汎用カスタムメイド産業機械の4

種類（A/B/C/D）の共通コアサービス内容（提供価値）を確認した（図3）。いっぽうで、産業機械製品ごとにサービス業務遂行内容／やり方の違いもあぶり出した。

当社産業機械製品群は、①市場に製品供給している設備機械数、②設備機械ごとのサービス売上単価、および③サービス提供体制、などの観点により幾つかのグループに大別できるが、グループごとにアフターサービス・ビジネスの収益最大化のために拡張強化すべきサービス内容は異なり、取るべきマーケティング手法（お客様との関係性マネジメント手法）も異なる。「サービス業務遂行内容／やり方」や「収益最大化のためのサービス内

容／マーケティング手法」の産業機械製品間での差異は、各産業機械のお客様プラント内での使われ方／設備重要性や産業機械製品の構造的特性に起因するものではあるが、逆に組織知として相互共有しあうことで、各産業機械製品のアフターサービスの業務内容やそのプロセスの品質向上につながる可能性がある。現在、産業機械製品別での「アフターサービス・ビジネス手法（設備機械メンテナンス手法）」の組織知共有を通じてのアフターサービス・ビジネスモデル強化を進めている。

今回のサービス業務DX推進では、ICTを媒体にして、長年「現場力」として蓄積し伝承されてきた組織知やノウハウを効果的かつ高速にあぶり出し、集積化と共通プラットフォーム化を進め、当社機械事業でのアフターサービス・ビジネスモデル強化手法として展開しながら、サービス業務従事者の働き方やマインドセット、およびビジネスモデルの変革を推進している点が特徴とも言える。

#### 4. 持続可能な「KOBELCOらしいアフターサービス体制」の実現に向けて

当社機械事業では、「選ばれ続けるKOBELCO」をコンセプトに、アフターサービス・ビジネスモデルの強化に取り組んでいる。カスタムメイド産業機械アフターサービスでは、工場内で産業機械の製造組立業務に一定期間以上従事している社員をスーパーバイザー（以下、SVという）としてお客様現場に派遣する形態を取ってきた。派遣されたSVは、数週間から数箇月の間、お客様の工場やプラント内に滞在し、現場作業員への機械の据付けや操業メンテナンスに関する技術指導や点検保守作業の技術支援に従事する。そしてSVは、お客様の現場マネージャー、現場作業員、当社サービス部門スタッフの様々な関係者と多様かつ的確なコミュニケーションやコラボレーションを行いながら、ものづくり現場目線でお客様設備の「かかりつけ医」として業務遂行する。当社製品寿命は25～50年と長いと、製品が据付けられ稼働を開始し廃却されるまでの期間に、同じ一人のSVがお客様設備を見守り続けることには必ずしもならないが、代々SV間でお客様設備の特性や癖、メンテナンス時の記録や注意点を引き継ぎながら、お客様設備プラントの連続安定操業実現に役立ってきた。このSVをお客様接点としたお客様設備の「かかりつけ医」的サービス提供形態こそが、「KOBELCO（メーカ）らしい価値提供形態」と考える。

しかし、労働人口の減少や働き方変革といった昨今の

社会環境変化の中で、「KOBELCO（メーカ）らしい価値提供形態」の維持が難しくなりつつある。今回のサービス業務DX推進により、お客様や当社ビジネスパートナーを含めた「当社産業機械群のアフターサービス業務における関係者間コミュニケーションやコラボレーション」のためのデジタル標準化と整流化が実現された。これにより、お客様設備を、お客様とともに、末永く安心で安定的に使用し続けていただくための「持続可能なアフターサービス提供体制」の再構築を開始した。

#### むすび＝未来に向けて

当社はメーカ故に生み出した非汎用産業機械やプラントを、最適かつ効率的に操業しメンテナンスする上での技術的ポイント（要所）を熟知している。これらの知識や経験ノウハウを、Team神戸、Team兵庫、Team関西、Team日本、Team〇〇として相互共有する仕組みの構築を推進することで、当社のお客様のためのサービスから、当社パートナーのお客様のためのサービス、そして社会のためのサービスへと広げ、「安心安全なまちづくりものづくり」にも貢献できるのではないかと考える。

今回のサービス業務DXを通じて、これまで当社内で蓄積してきたお客様設備のメンテナンス手法やそのメニュー内容（業務プロセスや手順）を、ICTプラットフォームを媒体にしてサービス工場やサービスエンジニア等のビジネスパートナーに公開（オープン標準化）することにより、全世界のビジネスパートナーとともに、当社お客様の生産製造プラントの連続安定操業を実現するためのアフターサービスを協働で推進する仕組み「KOBELCOサービスエコシステム」の土台が完成した。

今後本仕組みを媒体にしてお客様も含めた全世界のビジネスパートナー群とつながり、またビジネスパートナーから提供いただく保有技術を取り入れながら連携し新しい共創協働形態を探ることにより、お客様とともに新たな社会価値を創造していく「価値共創型サービスビジネスモデル」を実現していきたい。

#### 参考文献

- 1) 立本博文. プラットフォーム企業のグローバル戦略. 有斐閣, 2017.
- 2) 宗陽一郎. 非汎用産業機械アフターサービス事業のグローバル展開強化を見据えた、ICTビジネスプラットフォーム化. 国際ビジネス研究会 第29回全国大会 自由論題報告 A会場(No.2). 2022.
- 3) 宗陽一郎. 「価値共創マーケティング」視座からのカスタムメイド産業機械事業の再考. 日本マーケティング学会 カンファレンス・プロシーディングス. 2023, Vol.12, p.172-178.

(技術資料)

# 利用者の声をもとに開発 クレーン施工計画支援ソフトウェアK-D2PLANNER®

岡本真典\*<sup>1</sup>・岡田 哲\*<sup>1</sup>・高松伸広\*<sup>1</sup>・多々川都央\*<sup>1</sup>

## User-Centered Design of K-D2PLANNER® Crane Construction Planning Support Software

Masanori OKAMOTO・Satoshi OKADA・Nobuhiro TAKAMATSU・Hiroo TATAKAWA

### 要旨

2023年4月、国土交通省からBIMの適用方針が示され、ゼネコンなどでは設計、施工、維持管理の全てのプロセスをつなぎ、効率化のための取り組みが加速している。コベルコ建機㈱は、設計、施工のプロセスをつなぐ施工計画プロセスに焦点を当て、その課題解決を目指すクレーン施工計画支援ソフトウェアK-D2PLANNER®を利用者の声をもとに開発した。施工プロセスにおけるクレーンと構造物の干渉や、必要なクレーン能力・接地圧の確認、施工手順の共有化により現場の手戻りを防止し、工期の遅延や追加コスト発生を抑制する効果が期待できる。また、モデル作成の効率化による施工計画コスト、最適クレーン選定による施工コスト削減など、生産性向上に寄与するとの評価をいただいた。

### Abstract

In April 2023, the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism announced its guidelines for the application of Building Information Modeling (BIM). In response, general contractors and others are accelerating their efforts to connect all the processes of design, construction, and maintenance to improve efficiency. Based on user feedback, Kobelco Construction Machinery has developed K-D2PLANNER®, software to support crane-construction planning, focusing on connecting the design and construction processes and aiming to solve the challenges of that process. The expected results include preventing interference between cranes and structures during the construction process, confirming the required crane capacity and ground pressure, and commonizing construction procedures to prevent the need for reworking at the site, as well as suppressing construction delays and the incurrence of additional cost. It is also presumed that streamlining model creation can reduce the costs of construction planning, and selecting the optimal crane can reduce execution costs, contributing to increased productivity.

### 検索用キーワード

クレーン施工計画, BIM施工計画, クレーンBIM, 揚重計画

まえがき = 国土交通省は建築分野におけるBIM (Building Information Modeling) の活用推進を図るため、2019年にBIM/CIM推進委員会を設置し、2023年4月より小規模を除く全ての公共事業でBIMの原則適用の方針が示された。建築分野ではBIMの活用が進んでいるが、クレーンを使用した鉄骨建て方の施工計画では、まだBIMの活用は十分とは言えない。こうした中、ゼネコンなどではBIMの活用推進を図るための専門部署を設置し、設計・施工・維持管理の全てのプロセスをつなぎ、さらにこれらプロセスの効率化のための取り組みを加速している。

コベルコ建機㈱は主にクレーンを使った鉄骨建て方において、設計プロセスと施工プロセスをつなぐ施工計画プロセスに焦点を当て、施工計画プロセスの課題を整理し、当該課題の解決を目指したクレーン施工計画支援ソフトウェアK-D2PLANNER®<sup>注1)</sup>を開発した。本稿では本ソフトウェアの機能と施工計画での効果について紹介する。

脚注1) K-D2PLANNER®はコベルコ建機㈱の登録商標である。

## 1. クレーン施工における課題<sup>1)</sup>

BIMは、総合設計事務所などでの設計プロセスでは約80%、施工プロセスでは約50%の割合で導入されている。いっぽう、設計と施工プロセスをつなぐ施工計画においてはBIMの活用が進んでおらず、鉄骨建て方でのクレーン施工では、以下のような課題が生じている。

### 1.1 現場の手戻り

施工プロセスにおいて、例えば、先に構築された鉄骨構造物にクレーンのブームや旋回体が接触することが現場作業途中で判明すると施工が止まり、設置された構造鉄鋼物を一度撤去するなど、大幅な手順の見直しや工期遅延を余儀なくされるといった手戻りが生じる。

また、クレーンの設置場所の地耐力が適切でない場合、建て方作業を止めて敷き鉄板の敷設や地盤補強などの工事を行う必要が生じる。これらの手戻りは、工期遅延や追加コスト発生を引き起こす。

### 1.2 施工計画の効率

施行図面や労働安全衛生法第88条の建設工事計画届

\*<sup>1</sup>コベルコ建機㈱ 新事業推進部

などの資料作成は、施工計画プロセスにおいて時間を要する作業の一つである。とくに建設工事計画届においては、クレーン施工計画が必要であり、これらに必要な断面図、能力図などを作成するにあたっては、クレーンに関する仕様や能力などの情報を別途参照する必要がある。これには作業者の知識や経験が求められることに加え、多くの時間が必要となる。

また、現場で施工の手順や注意点を共有、議論する場として、施工検討会などが開催されているが、二次元の図面などによる説明では認識の共有に時間を要し、さらには、参加者の理解に齟齬が生じる可能性がある。

### 1.3 施工計画におけるBIMの導入課題

BIMを施工計画プロセスに活用することにより、前述のような手戻りを抑制できる可能性はあるが、鉄骨構造物の設計に使われる建築CADは、その主目的である設計機能を充実させているいっぽう、必ずしもクレーン施工計画での使い勝手がよいものとはなっていない。施工計画プロセスで建築CADを使用するにあたっては、建築CADや施工計画、施工自体に関する経験や知識、さらにクレーンの仕様や能力などのクレーンの運用に関する知識が求められる。

すなわち、施工計画プロセスでのBIMの活用にあたっては、これらの知識と経験を兼ね備えた人材が必要となるいっぽうで、このような人材の教育には時間を要する。

## 2. K-D2PLANNER<sup>®</sup>の概要

K-D2PLANNER<sup>®</sup>は、建築系3D-CADであるAutodesk社製Revit (Autodesk社の登録商標) にアドインして利用するクレーン施工計画支援ソフトウェアである。クレーンの三次元形状や当該クレーンの仕様、および能力情報を備えたBIMモデル、またクレーンを使った施工計画の効率化を実現するための種々の機能を備えている。

以下に本ソフトウェアの主な機能、特徴について説明する。

### 2.1 直感操作

建築構造物の施工計画には、3Dの施工計画図が用いられる。

3Dでの施工計画図には、建築構造物に加え施工を行うクレーンなどの重機、施工計画に必要なクレーン能力、建物資材重量などの情報が含まれている。

Revit上でクレーンを使った施工計画用3D図面を作成する場合、通常図1に示すクレーンBIMモデルの各パラメータを個別に変更し、クレーンの姿勢を吊り対象の資材に合わせて調整する必要がある。また、当該姿勢の成立性も都度確認する必要がある。作業が煩雑であった。

K-D2PLANNER<sup>®</sup>では、吊りたい資材をRevit上で選択(クリック)するだけで、クレーンの姿勢は自動的に変更される。このとき資材の形状に合わせて玉掛用吊りワイヤーは推奨される吊り角度である60度の状態でフック位置が決定され、資材の上面からフック高さまでの間が干渉エリアとして画面上に表示される(図2)。こ

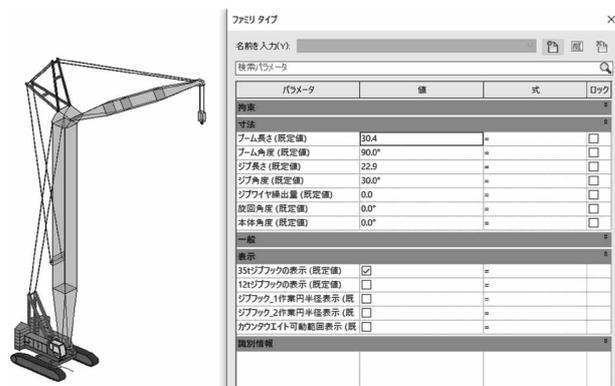


図1 クレーンBIMモデル  
Fig.1 Crane BIM model

れにより、吊り上げ時に資材がほかの構造物などに接触する可能性を視覚的に確認することができる(図3)。

なお、この干渉エリアは、資材が吊り状態で回転した場合の接触の可能性も検討できるよう、資材の中心点から平面視で最も遠い資材の端部を半径とした円柱状での表現もできる(図4)。

また、図5に示すとおり指示されたクレーンの姿勢状態において、作業範囲、最大作業範囲、および最少作業範囲(図中の円、円柱)も視覚的に表示できることに加え、クレーンが構造物の中に入り施工するシーンでの干渉チェックに備え、後端半径の領域(図6の円柱・円)も表示できる。

さらにユーザインタフェースは、機能の認識を促すアイコンや各状態での数値データをクレーンのイメージ図に合わせて表示することで、クレーンの各部の名称などを熟知していない建築CADオペレータでも直感的に操作可能である(図7)。

### 2.2 シミュレーション

施工計画者は、クレーンを使って安全に施工するためにクレーンの負荷率・接地圧の確認およびクレーンと構造物の干渉の確認を行っている。負荷率はクレーンがどの程度の荷重を扱えるかを示す指標で、例えば負荷率を超える荷重を扱った場合にクレーンの転倒など事故が生じる可能性がある。また接地圧はクレーンが地面に与える圧力のことで、地盤に与える圧力が大きすぎる場合、地盤の沈下によるクレーン転倒の可能性もある。

K-D2PLANNER<sup>®</sup>を活用することで、鉄骨BIMモデル上で確認したい資材を選択(クリック)するだけで負荷率や接地圧を自動的に演算し表示できる。これにより施工計画時にクレーンの種類や仕様、また対象資材やその吊り状態など条件を変更しながら、容易にトライアンドエラーを繰り返してその成立性を検討できる。加えてクレーン設置位置の地盤補強や敷き鉄板の厚さなどの検討にも活用でき、能力表や2D-CADを用いた施工計画に比べて大幅な作業の時間の短縮と計画精度の向上が期待できる。

また近年、プレキャストコンクリート資材の活用が増えており、取扱う資材重量が増加している。クレーンは資材重量に応じてクレーンブームにたわみが発生する。クレーンの施工計画において、たわみを考慮せずにクレ

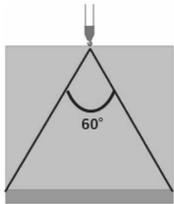


図2 吊ワイヤー範囲  
Fig.2 Area of wire

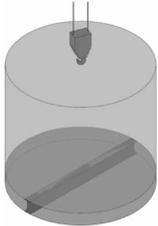


図4 円柱表示  
Fig.4 Cylinder expression

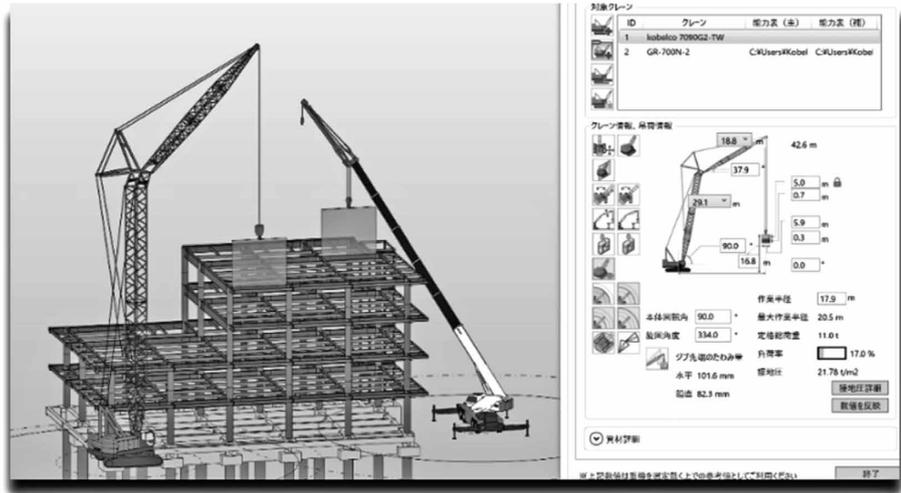


図3 K-D2PLANNER® 動作イメージ  
Fig.3 Lifting image on K-D2PLANNER®

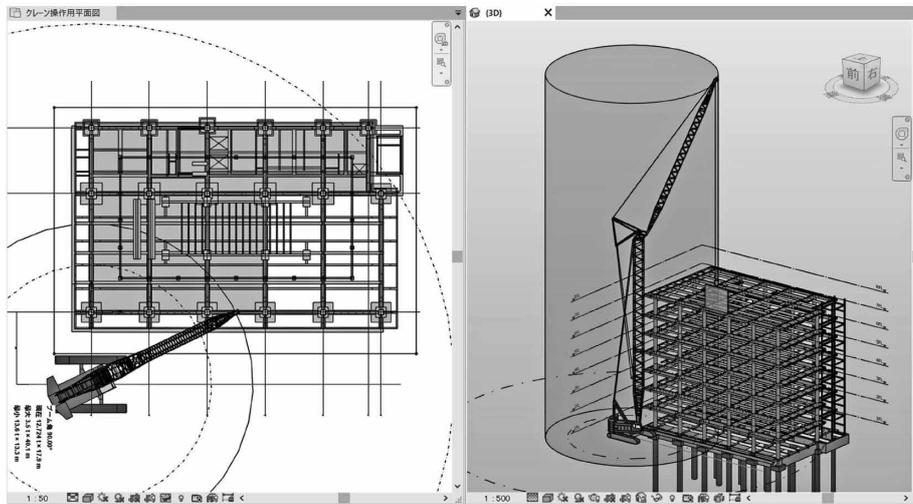


図5 最大・最小作業半径  
Fig.5 Maximum or minimum working radius

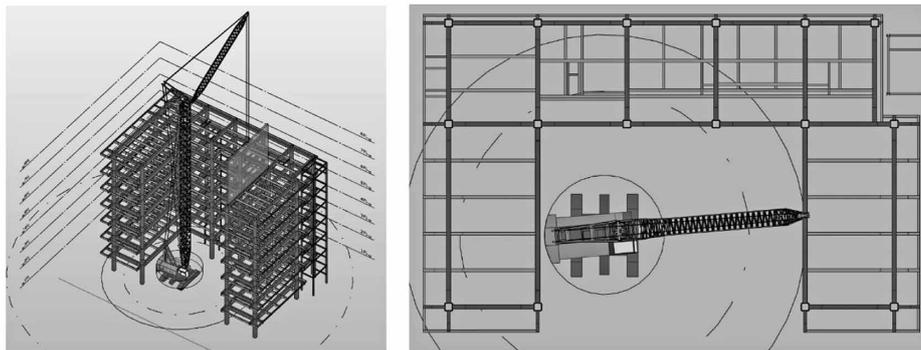


図6 旋回半径領域  
Fig.6 Turning area view

ームと建物を接近させた計画にすると実際に資材を吊り上げた際に発生するたわみによって、クレーンームと構造物が干渉する恐れがある。

K-D2PLANNER®を活用すると吊り上げ資材の荷重に応じたクレーンのたわみを視覚的に表示できる。図8はたわみを考慮したシミュレーションを実施した例で、ジブ先端のたわみが水平方向に1,812.2 mm、鉛直方向に1,693.9 mm発生し、この結果構造物とームおよびジブ

との距離が2,419 mm、3,366 mmに接近することを示している。このように仮設部材である足場とクレーンームの干渉確認・離隔距離の算出を、熟練者の経験に頼ることなくたわみを考慮して行うことができる。

さらに施工ステップごとに時系列に検討内容を登録することで、例えば各施工ステップでの鉄骨構造物の組み上がり状態に対して、鉄骨構造物とクレーンのームや旋回体との干渉の有無を視覚的に確認できる。

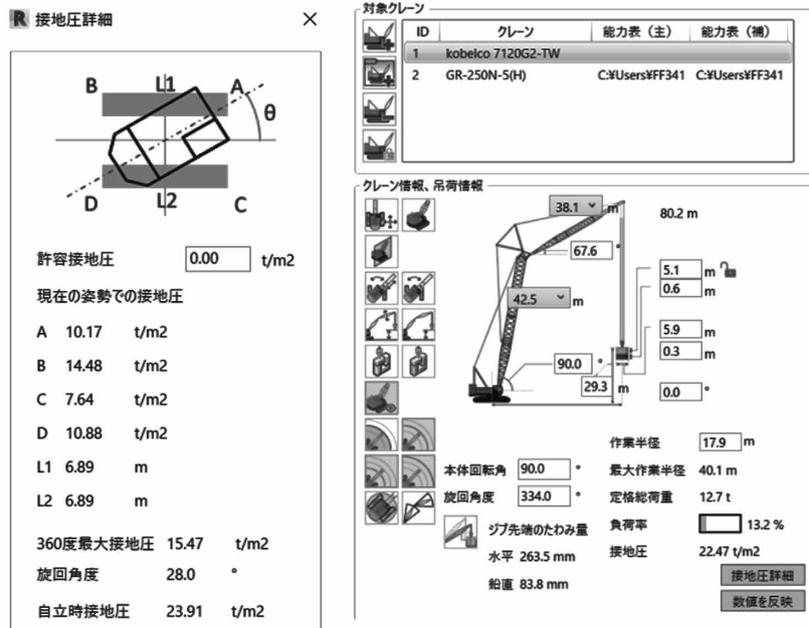


図7 ユーザインタフェース  
Fig.7 User interface

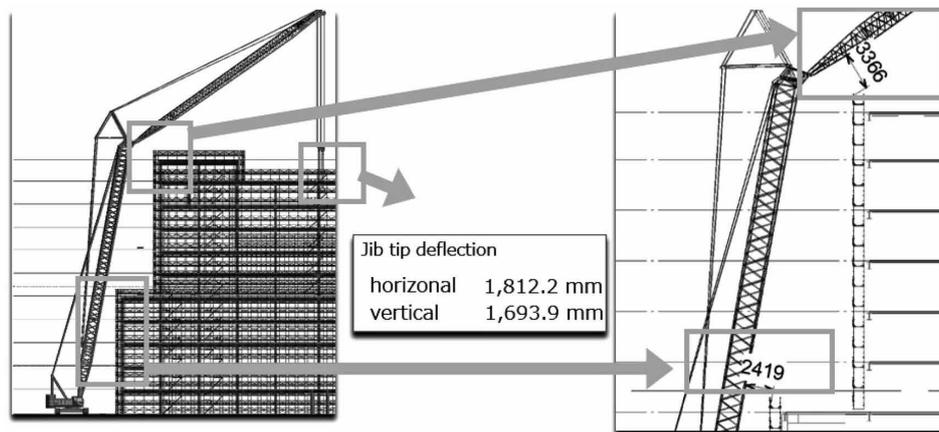


図8 たわみを考慮した干渉チェック  
Fig.8 Interference check with deflection

### 2.3 施工図面の作成

建築施工において施工図は、構造物に対するクレーンの設置位置、ブーム長さや作業半径などの施工に必要な情報が含まれており現場の作業員同士で情報共有し、ミスなくスムーズに工事を行うために重要である。K-D2PLANNER<sup>®</sup>では、吊りたい資材を選択し断面図作成アイコンを押すだけで、クレーンのブーム方向に沿った断面図が自動的に作成できる。さらにクレーンの作動範囲図も重畳表示でき、例えば労働安全衛生法第88条で定められる建設工事計画届などにこれらを活用できる(図9)。

### 2.4 様々なクレーンへの対応

K-D2PLANNER<sup>®</sup>にはコベルコ建機(株)の主なクローラークレーン(50~500 tクラス)のクレーンBIMモデル(以下、既登録クレーンBIMモデルという)があらかじめ登録されており(図10)、利用者はこれらの既登録クレーンBIMモデルを本CADソフトウェア上に選択的に読み込んで使用できる。既登録クレーンBIMモデルは能

力情報を有しており、オペレータはとくに意識することなく負荷率の演算結果を知ることができる。

また、(株)タダノのラフテレーンクレーン・オールテレーンクレーン(13~700 tクラス)、(株)加藤製作所のラフテレーンクレーン・オールテレーンクレーン(13~400 tクラス)、住友重機械建機クレーン(株)のクローラークレーン(55~500 tクラス)についても既登録クレーンBIMモデルとして準備されており、日本国内の多くの現場の施工計画に活用できる(図11)。

これら以外のクレーン、例えばタワークレーンなども施工計画には用いられるが、一般社団法人日本建設業連合会の旗振りにより建設機械メーカ各社が用意しているクレーンBIMモデルや、ゼネコンなど施工計画を行う企業が自ら作成したクレーンBIMモデルについても、一部加工が必要ではあるがソフトウェア上に取り込んで使用することができる。ただし、コベルコ建機(株)のクレーンBIMモデル以外については接地圧・たわみの自動計算を行うことはできない。

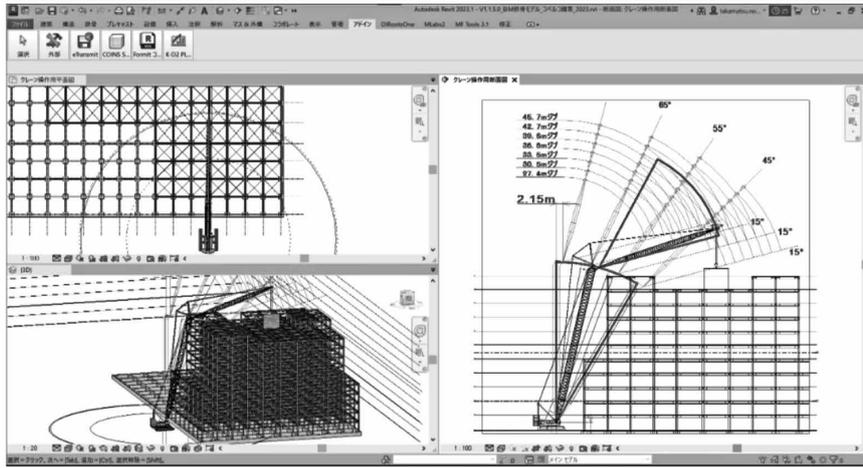


図9 断面図でのクレーン作業範囲図  
Fig.9 Crane operating range on cross-section view



図10 コベルコ建機モデル  
Fig.10 KOBELCO models

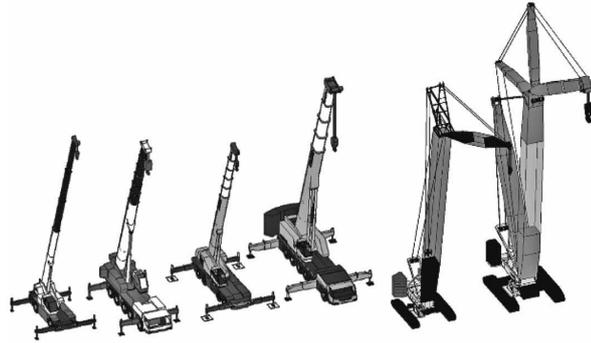


図11 その他クレーンモデル  
Fig.11 Other models

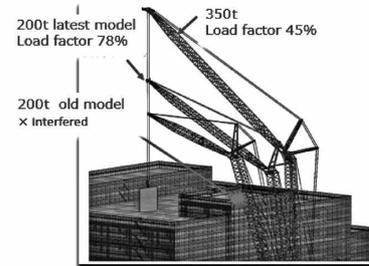
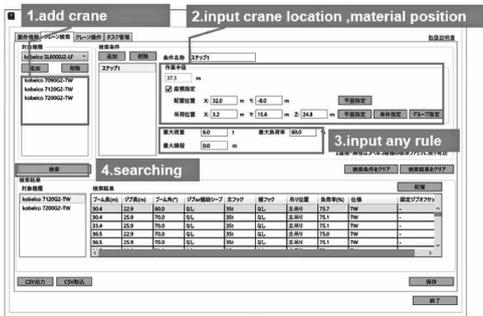


図12 クレーン検索画面と結果  
Fig.12 Crane search interface and result

## 2.5 クレーン選定のサポート

施工にあたり、クレーンの能力が不足すると施工期間中にクレーンの入れ替えが発生し、施工期間に悪影響を及ぼす。また、能力が大きすぎると施工コストが高くなるため適切なクレーンの選定をする必要がある。

Revit上でクレーンの設置位置を定め、吊りたい資材を指定すれば、当該資材の座標情報を読み込んで、この条件で成立するクレーンおよび仕様を検索することができる。なお条件は複数設定することができ、設定した全ての条件で成立するクレーンおよび仕様を検索できる。図12では例として200t旧型、200t新型、350tの三種から選定した際、それぞれの負荷率および構造物とクレーンの干渉の有無が確認できる。このように成立する最適クラスのクレーンを選定でき、設置場所、組み立て分

解に必要な敷地面積の最小化だけでなく施工コストの最少化の検討をサポートする。

## 2.6 プレゼンテーションでの活用

K-D2PLANNER<sup>®</sup>では、3Dの施工計画図を施工ステップごとに並べた時系列情報を加えた四次元情報として登録できる。これを活用することで施工計画の検討結果をいつでも視覚的に再現できる。例えば図13のように、狭小地で建物周辺にクレーンを配置することができず、建物を奥から施工し手前方向に建て逃げするような施工手順を施工検討会などのプレゼンテーションで活用すれば、設計施工計画の情報をクレーン施工計画プロセスで共有でき、情報伝達の効率化と現場の認識不足による手戻り防止が図れる。さらに、Autodesk社製Navisworks (Autodesk社の建築用3D-CADでプロジェクト全体像

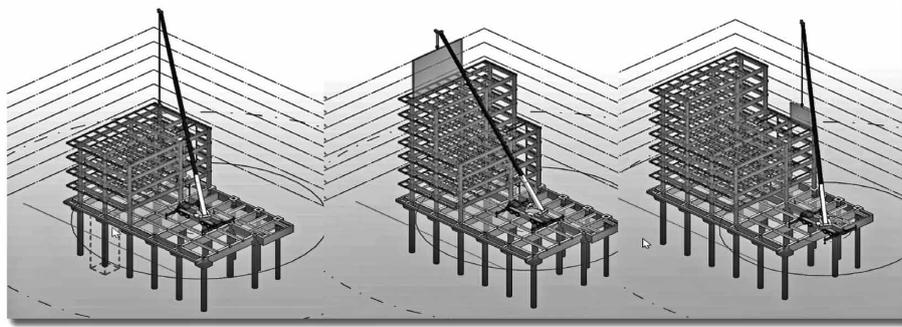


図13 施工ステップ図  
Fig.13 Construction procedure

が見えるビューワー) というビューワーソフトウェアに施工ステップを出力することができ、施工現場で簡単に四次元情報に基づく施工計画を共有できる。

### 3. 施工計画での効果

クレーン施工計画プロセスでの活用を推進するにあたり、一部のゼネコンなどと導入効果を検証し、評価者より以下のような効果が確認できた。

- ・導入効果①：3D-CADでクレーンの施工計画を行うためには、クレーン本体のモデリングが必要になる。これには専門知識が必要であり、モデルの作成にあたっては一機種あたり約20万円程度の費用が必要となる。また新機種や廃番が発生した場合にはメンテナンスも必要となる。これに対してK-D2PLANNER<sup>®</sup>にはコベルコ建機(株)、(株)タダノ、住友重機械建機クレーン(株)、(株)加藤製作所の国内主要建機メーカーから販売されているモデルが登録されており、合計57機種である1,140万円分のモデル作成および維持コストの削減可能である(図14)。

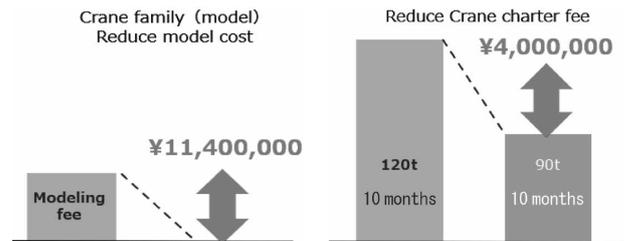


図14 導入効果1  
Fig.14 Benefit 1

図15 導入効果2  
Fig.15 Benefit 2

- ・導入効果②：K-D2PLANNER<sup>®</sup>を使った最適サイズのクレーン選定により、例えば120 tクラスのクレーンが90 tクラスに変更となった場合、移動式クレーンに係るオペレータ付き建設機械賃貸料金のコストは、建築物価2023年2月号より120 t吊り240万円/台・月から90 t吊り200万円/台・月に低減可能となる。10箇月稼働する現場であれば400万円の効果を見込む(図15)。

- ・導入効果③：K-D2PLANNER<sup>®</sup>活用で作業時間はモデリング時間が無くなること、施工検討作業が40%削減され結果として作業時間が66%の削減が見込まれる(図16)。

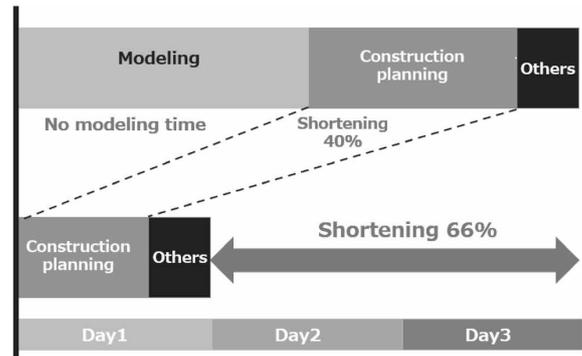


図16 導入効果3  
Fig.16 Benefit 3

さらにこれら以外にも、施工計画者の熟練度に頼ることなく施工計画の品質を検証できることで、施工計画および施工自体の品質向上と手戻り防止によるコスト削減効果に期待が高いという評価を得た。

また、K-D2PLANNER<sup>®</sup>のようなアドインソフトウェアを使うことで施工計画におけるBIMの活用が容易となる。ゼネコンなどではBIMの施工計画プロセスへの導入ハードルが下がり、BIMの活用推進を加速できるとの期待も寄せられている。

むすび＝設計・施工から維持管理までをBIMを活用して行うことで、今後の建築施工は大きく変化していく。

K-D2PLANNER<sup>®</sup>は建築CADを使ったクレーン施工計画を行うにあたり、専門的な知識や経験を過度に必要とせず、直感的な操作性と必要な情報を容易に取得できるようにすることで、設計と施工をよりシームレスにつないでいくことを目指したものである。現在ゼネコンからプラント・橋梁土木など幅広いお客様に導入をいただき、様々な指摘や提案を受け様々な機能に反映している。しかしながら、まだ十分に利用者のニーズに応えられていない面もあり、また利用者の増加に伴い新たな課題が顕在化してくることも予測される。今後改善や機能追加を図るとともに、効果計測基準の研究も継続し、引き続き建設施工におけるBIM活用の促進について貢献していく。

#### 参考文献

- 1) 一般社団法人日本建設機械施工協会. 建設機械施工. 2023, Vol.75, No.1, p.41-44.

(技術資料)

# マテリアルDXに向けたマテリアルズ・インフォマティクスの紹介

古賀健治\*<sup>1</sup> (博士(工学))・狩野恒一\*<sup>1</sup>・大政和之\*<sup>2</sup>・加々尾慎哉\*<sup>2</sup>

## Introduction to Materials Informatics for Material DX

Dr. Kenji KOGA・Koichi KANO・Kazuyuki OMASA・Shinya KAGAO

### 要旨

マテリアルDXは、研究者やエンジニアが材料の性質や挙動を理解し、最適な設計を行うための包括的なプラットフォームとして注目を浴びている。このプラットフォームは、様々な材料の特性を予測し、製造プロセスにおける影響をシミュレートすることで、高度な材料設計を支援している。

本稿では、金属3D積層造形の中でも非常に高い自由度を持ち、異なる材料を同一試料内で組み合わせ可能なDirect Energy Deposition (DED) 方式を用いた実験技術と量子シミュレーション（第一原理計算）技術をもとに、Fe-Co-Ni系の軟磁性材料の材料探索を行った事例について紹介する。

### Abstract

Material DX is attracting attention as a comprehensive platform for researchers and engineers to understand materials' properties and behavior and achieve optimal design. This platform supports advanced material design by predicting the properties of various materials and simulating their impact on the manufacturing process. This paper introduces an example of a material search for a Fe-Co-Ni-based soft magnetic material. The search uses quantum simulation technology (first-principles calculation) and experimental technology based on the Direct Energy Deposition (DED) method. The DED method, among other 3D additive fabrications, offers a high degree of freedom and allows the combination of different materials within a given sample.

### 検索用キーワード

マテリアルズ・インフォマティクス, 金属3D積層造形, 第一原理計算, 磁性材料, ハイスループット計算

まえがき = 最近、文部科学省はマテリアルDX（材料デザイン・イノベーション基盤技術）のプラットフォーム活用を提唱している<sup>1)</sup>。マテリアルDXは、材料研究開発のリードタイム短縮と新規材料創出を促進するために、最先端の分析解析技術やデータベースの活用を主眼としている。

このプラットフォームは、分析解析技術によって得られた多岐にわたる材料データを活用する。X線回折、赤外分光、電子顕微鏡などの技術を駆使して、材料の構造や特性に関する情報を収集し、そのデータを統合することで新たな洞察を得る。これにより、効率的な材料設計プロセスが可能となる。

また、分析解析のリードタイム短縮を実現するために、高速かつ効率的なデータ処理手法や試作技術が開発されている。ハイスループットな試作・評価技術は、大量の材料の評価を迅速に行うことを可能にし、データ生成技術の向上によって数値計算がより精密になっている。

本稿では、文部科学省が推進するマテリアルDXの理念に基づき、軟磁性材料を対象とした計算科学的アプローチと積層造形技術を組み合わせたハイスループットな試作手法に焦点を当て、予測結果の検証手法について紹介する。

## 1. マテリアルDXに向けた計算科学的アプローチ

本章では、計算科学的アプローチとして、ナノシミュレーション技術の一つである第一原理計算を活用した事例について述べる。

第一原理計算は、実験データに合わせるための調整パラメータを用いず、原子の種類と位置だけで電子状態を計算でき、得られた電子状態から体積弾性率や磁気特性などさまざまな物性値を算出することができる。

計算の対象はFe-Co-Niの3元系であり、考慮する結晶系はBCC (Body-Centered Cubic) と FCC (Face-Centered Cubic) 構造として磁化の網羅的な計算を実行した。DFT (Density functional theory) 手法は、KKR (Korringa-Kohn-Rostoker) を採用した<sup>2), 3)</sup>。計算パッケージとしてはAkaiKKRを使用し、不純物の取り扱いにはCPA (Coherent Potential Approximation) を適用した<sup>4), 5)</sup>。CPAはUnit Cell内で不規則的な配置による影響を平均的な有効媒質に置き換えて合金ポテンシャルを決定するため、合金系の計算が可能である。この方法により、各計算モデルの対称性を考慮して1原子のみとして扱うことができる。

図1に第一原理計算を用いたBCC構造とFCC構造の磁化の計算結果を示す。なお、コンタ図は後述する補間

\*<sup>1</sup> (株)コベルコ科研 計算科学センター \*<sup>2</sup> (株)コベルコ科研 材料ソリューションセンター

モデルを適用した。

BCC構造の計算結果においてはFe-rich領域で最も磁化が大きく、Co-rich、Ni-rich領域の順に磁化が減少している。FCC構造の計算結果はFe-rich領域では磁化が消失していることがわかる。

コンタ図の作成では、FCC構造の磁化における不連続性が問題となるため、第一原理計算結果から得られた各エネルギーと磁化を用いて補間モデルの構築を行っている。図2(a)、(b)にFCC構造の磁化について、深層学習モデルとサポートベクターマシン回帰(以下、SVRという。)モデルを2通りで検討した結果を示す。

深層学習モデルのアーキテクチャは、入力層から複数の中間層を経由して出力層へと進む構造で、各層には活性化関数としてSwishを採用しており、組成比を入力として受け取り、エネルギーや磁化の予測値を出力する。なお、中間層である全結合層は6層である。

SVRモデルは、カーネルにはRBFカーネルを採用し、正規化パラメータC、カーネル係数gamma、不感帯 $\epsilon$ についてグリッドサーチによる探索を実施した。具体的にはCは(1, 10, 100)、gammaは(0.1, 1, 10, 100)、 $\epsilon$ は(0.001, 0.01, 0.1)を対象とした結果、Cは10、gammaは10、 $\epsilon$ は0.01が探索された。そのうえで図2の結果を比較した時、(a)は良好な予測精度が確認されるいっぽうで、(b)は特に磁化が0および最大値に近い領域で予測精度が著しく悪化している傾向が確認された。これは不連続領域付近でのモデル追従性が悪化しているものと解釈される。これらの結果より、本研究における予測モデルでは深層学習モデルを採用した。

図2(c)は、深層学習モデルによる補間精度の検証

結果を示している。訓練データセットには、CoとNiの組成比が0%から100%までの10%刻みで分布する66点が含まれている。いっぽう、テストデータセットは、CoとNiの組成比が約14.29%(100/7%)から約85.71%(600/7%)の範囲の15点で構成されている。ここでテストデータは訓練データの組成範囲内にあるものの、具体的な組成比の値は訓練データには含まれていないことに注意が必要である。このように異なる組成比を用いることで、モデルの汎用性と補間能力を評価している。

図2(c)に示すテストデータを用いた予測結果では、決定係数が0.995と非常に高い予測精度を達成している。これは訓練データと異なる組成比に対しても、深層学習モデルが高い予測精度を維持できることを示しており、モデルの汎用性と信頼性を示唆している。

図3に、第一原理計算の結果を基にランダムスピン状態と強磁性状態のエネルギー計算からランダムスピン解のエネルギーを求め、キュリー温度( $T_c$ )を算出した結果を示す。例えば、BCC構造のFeが100%の組成の $T_c$ は約1,488 Kである。これは一般的に知られているFeの $T_c$ の約1,043 Kよりも高い値である。実際の $T_c$ は、有限温度における物質の振る舞いを反映したものであるが、本計算結果は0 K(絶対零度)の条件下におけるものであり、温度依存性を直接的に考慮することが困難なため、差異が生じたものと考えられる。なお、有限温度におけるハイゼンベルグモデルを適用することで $T_c$ の計算精度が向上する可能性がある。

BCC構造の場合、Niが主成分の領域での $T_c$ の最小値は約62 Kと低い温度となる。FCC構造の場合、Coが主成分の領域で $T_c$ の最大値は約1,228 Kで高い値となる。

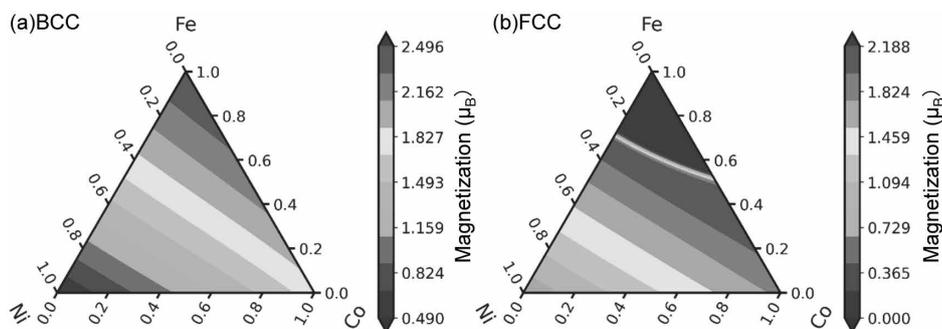


図1 KKR-CPA法を用いたBCC構造とFCC構造の磁化のコンタ図  
Fig.1 Contour plots of magnetization for BCC and FCC structure calculated using the KKR-CPA method

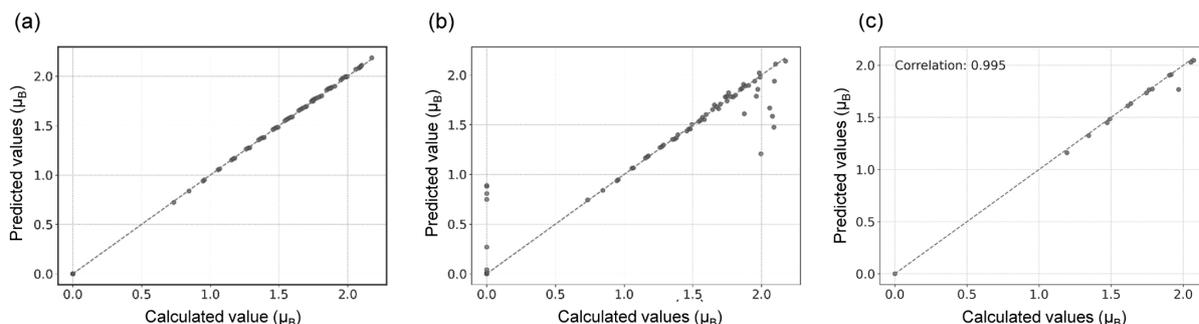


図2 実測値と予測値の磁化の散布図  
(a) ディープラーニングモデル (b) サポートベクターマシン回帰モデル (c) ディープラーニングモデル(テストデータ)

Fig.2 Scatter True vs. Predicted magnetization  
(a) Deep learning model (b) SVR model (c) Deep learning model (Test data)

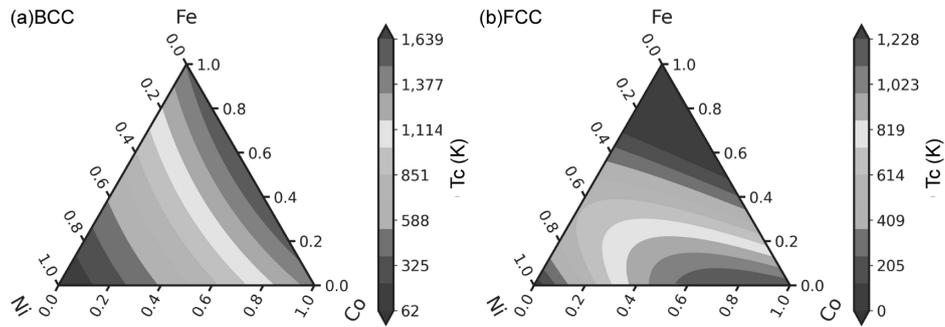


図3 KKR-CPA法を用いたBCC構造とFCC構造のT<sub>c</sub>のコンタ図  
 Fig.3 Contour plots of Curie temperature for BCC and FCC structure calculated using the KKR-CPA method

いっぽう、Niが主成分の領域でT<sub>c</sub>の最小値は0 Kとなっており、この値は磁気的な寄与が認められないことを示す。

これらの結果から磁化の不連続問題があるFCC構造においても、第一原理計算結果から得られた各エネルギーおよび磁化を用いて補間モデルを構築することにより、磁化におよぼす組成のスクリーニングが可能であることが示された。

また拡張として、分子場近似を用いて各組成と相においてT<sub>c</sub>を算出し、有限温度における磁化の振る舞いを詳細に予測することが可能である<sup>6)</sup>。ただし、分子場近似の精度上の問題で実験との乖離(かいり)がある。

このように第一原理計算を用いて網羅的に磁化やT<sub>c</sub>の計算が可能となり、材料探索の効率化を図ることができる。

## 2. マテリアルDXに向けた金属3D積層造形活用

### 2.1 積層造形法の活用

積層造形法(AM: Additive Manufacturing)は、3D形状データから直接製品を製造できるため、多品種同時製造や複数部品からなる製品の一体成形、複雑形状の部材の成形が可能という特徴があり、その普及が進んでいる。とくに金属AMは、形状制御と組織制御を組み合わせた機能制御を実現でき、新しい機能創造プロセスとして期待されている。主要な金属AM方式の一つであるPBF(Powder Bed Fusion)では、金属粉末を使い、EB(Electron Beam)やLB(Laser Beam)を走査して粉末を溶融・堆積し、三次元造形物を形成する。PBFは高精度な造形を得意とするいっぽうでスループットが低いいため、小さな部材に向いている。大型部材の製造に適したAMとしてDED(Directed Energy Deposition)方式がある。

DED方式では、複数の粉末を同時に使用できるタイプがあり、レーザー造形部に送り込む数種類の粉末の速度を個別かつ連続的にプログラム制御することが可能である。これにより、組成の自動制御が可能となっており、組成調整のための作業者の手動干渉が減り、積層造形の効率と制御精度が向上する。したがって、組成が連続的に変化した材料試作の効率アップにもつながる。

DED方式は、組成の自動制御を応用して、異なる材料の組み合わせや、試作物内で複数の部品を一度に製造

することが可能である。軟磁性材料の傾斜材は、磁場を効率的に制御することができ、今後電子機器や電気機器などの応用分野で重要な役割を果たすと考えられる。本章では、軟磁性材料を対象としてDED方式を用いた傾斜材の作製および評価について紹介する。<sup>7)~13)</sup>

### 2.2 原料粉末および装置・作製条件

軟磁性材料の傾斜材の作製では、ガスアトマイズ法で作成されたパーメンジュール(Fe-Co-V)粉末とパーマロイ(Fe-Ni-Mo)粉末を用いた。粒形サイズは45~150 μmである。また、積層造形用のベースプレートにはSS400材を用いた。

使用した装置は、三菱重工工作機械株式会社(現在のニデックマシンツール株式会社)製指向性エネルギー堆積法(DED方式)の金属3DプリンタLAMDA200である。造形条件として、レーザー出力は1,000 W、ノズルの稼働速度は800 mm/min、レーザー径はφ2 mmとし、粉末キャリアガスおよび積層箇所のシールドガスはArとした。

本事例では、A:パーメンジュール(Fe-Co-V)粉末とB:パーマロイ(Fe-Ni-Mo)粉末を使い、A:B=①0:100、②25:75、③50:50、④75:25、⑤100:0(wt%)のAとBの組成を変化させた5相の積層造形材(傾斜材)を作成した。造形サイズはおおよそ□40 mm×40 mmであり、高さは45 mmである。図4に試作品(左上図)、

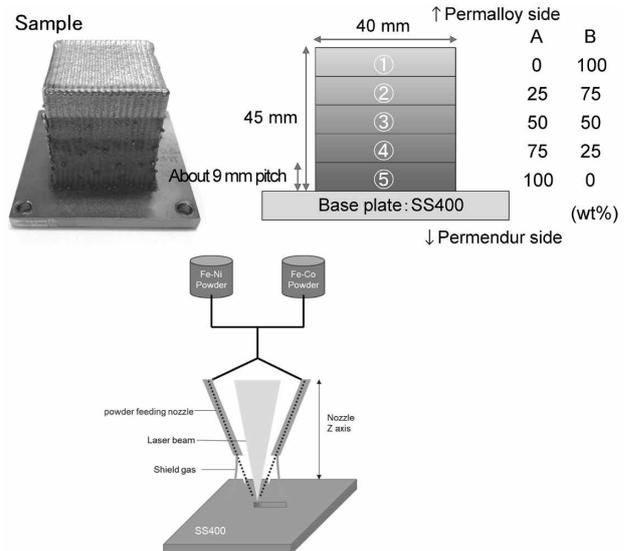


図4 試作品、積層造形イメージおよびDED方式の模式図  
 Fig.4 Sample, Layered Additive Manufacturing Imagery and DED Methodology Schematic<sup>8)</sup>

積層造形イメージ（右上図），DED方式の模式図（下図）を示す。

積層造形後の傾斜材は，均質化処理として2段階熱処理を実施している。一段階目は加熱速度200℃/hrで700℃まで昇温して2 hr保持し，その後炉冷とした。二段階目は加熱速度120℃/hrで820℃まで昇温して10 hr保持し，その後500℃まで100℃/hrで冷却した後炉冷とした。

### 2.3 評価方法

作製した傾斜材材料の評価は，XRD（X-ray diffraction）による結晶構造解析，EPMA（Electron Probe Micro Analyze）による組成分布，ピッカース硬さ分布，リング試験片を用いた直流磁気測定，EBSD（Electron Back Scattered Diffraction Pattern）による結晶サイズ評価を行った。図5にXRD分析結果，EPMA分析結果，硬さ分析結果を示す。

図5右上に日本電子株式会社製EPMA分析装置によるライン分析結果を示す。AとBの組成を変化させた5相の傾斜材（A = ①0：100，②25：75，③50：50，④75：25，⑤100：0（wt%））が作成できており，粉末の混合比率を予定どおりに変化させた積層造形ができてることが示された。

図5左下に，株式会社リガク製SmartLab（全自動多目的X線回折装置）による二次元検出器を用いたXRDライン分析結果を強度マップとして示す。傾斜材の先端

のパーマロイから末端のパーメンジュールまで1 mmピッチで測定データ取得を行った。パーメンジュール側の結晶相はBCC構造であり，パーマロイ側の結晶相はFCC構造であることを確認した。さらに，FCCとBCC構造の混相領域が認められた。

図5右下の硬さ分布の測定結果から，FCCとBCC構造の混相領域付近で硬さが増大するという特異的な変化も認められた。また，BCC構造がリッチな方が硬いという特徴が認められた。

図6はリング試験片を用いた試料No.1～No.5の直流磁気特性評価を示す。AからBへ変化するにつれて最大磁束密度も増加する傾向がある。FCCとBCC構造の混相領域付近である試料No.4に関しては，他の試料と比較して保磁力（残留磁束密度）が10倍以上となっており，他の試料より高い保磁力を有している。また，比透磁率も1/10以下であり，他の試料に比べて低いという特異的な変化を示した。

図7，図8に代表例として試料No.2，試料No.4のEBSD分析結果を示す。図9にEBSD分析から見積もった平均結晶粒径サイズを示す。なお，平均結晶粒径は面積寄与率に基づくArea fraction法で算出した結果である。FCCとBCC構造の混相領域付近である試料No.4の粒径サイズは試料No.1が数百マイクロメートルに対して，数十マイクロメートルであることがわかる。

図7に示す試料No.2のIPF Map（ND方向）には円弧

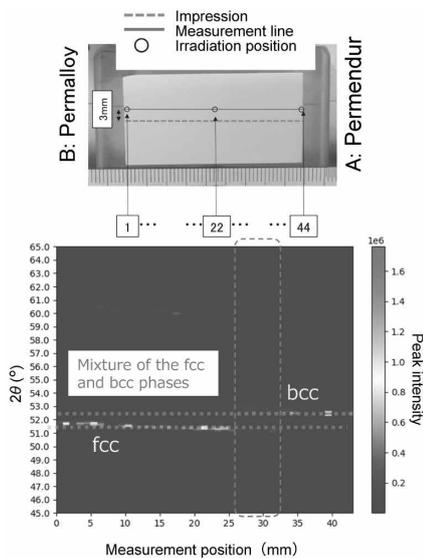


図5 XRD, EPMA および硬さの実験結果  
Fig.5 Experimental results of XRD, EPMA and Hardness

Sample No.	Maximum magnetic density	Residual magnetic flux density	Coercivity	Maximum permeability
	$B_m$ (T)	$B_r$ (T)		
1	0.96	0.55	39	9,436
2	1.18	0.51	115	2,057
3	1.50	0.64	148	2,132
4	1.30	0.65	1,943	170
5	2.26	0.73	159	2,095

\*Maximum magnetic field  $H_m$  10000(A/m)

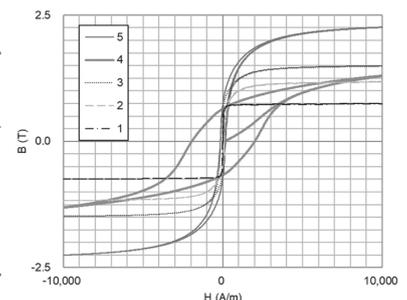


図6 磁気特性の実験結果  
Fig.6 Experimental result of magnetic property

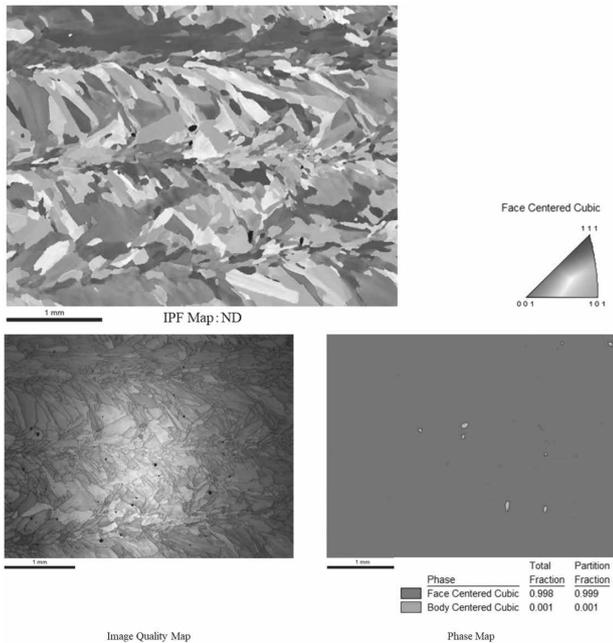


図7 試料No.2のEBSD分析結果  
Fig.7 EBSD Analysis Results of Sample No.2

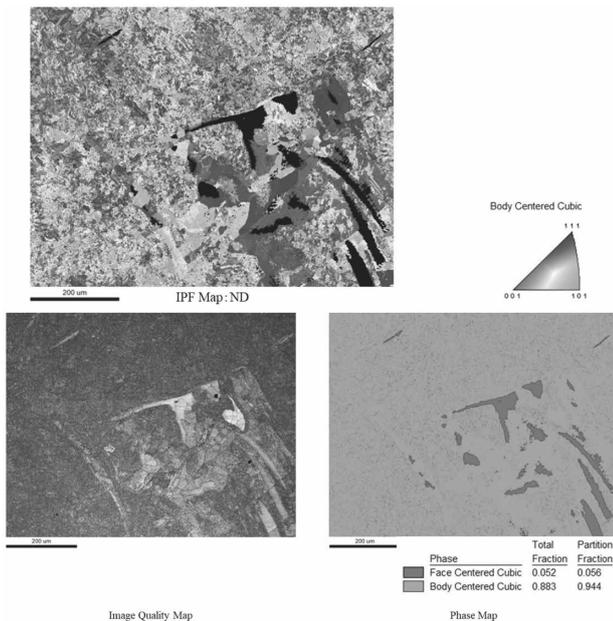


図8 試料No.4のEBSD分析結果  
Fig.8 EBSD Analysis Results of Sample No.4

からなる鱗(うろこ)状形態が観察され、溶融プール構造となっている。走査レーザー照射部に積層粉末が局所溶融・凝固を伴った溶融プール形状となっていると考えられる。図8のEBSD分析結果から試料No.4には材料の結晶構造変化に伴った再結晶と考えられる微細化が認められた。特異的な硬さ分布の変化は、試料No.4の組織の微細化によるものと考えられる。

試料No.4が他の試料と比較して保磁力の増大、比透磁率の低下が認められている理由も微細組織を呈していることによると推察される。微細化による表面積および微細粒子の粒界同士の界面効果の増加により、磁壁のピンニング効果で保磁力が増大し<sup>14), 15)</sup>、磁束の伝達が障害されることに起因して透磁率が低下したと思われる。

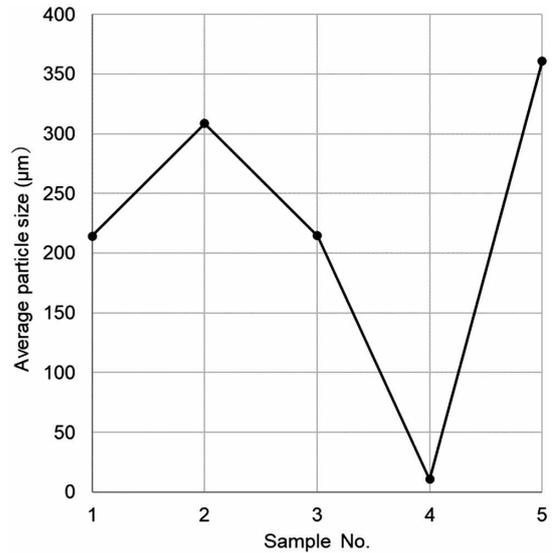


図9 平均結晶粒径サイズの比較  
Fig.9 Comparison of average grain size

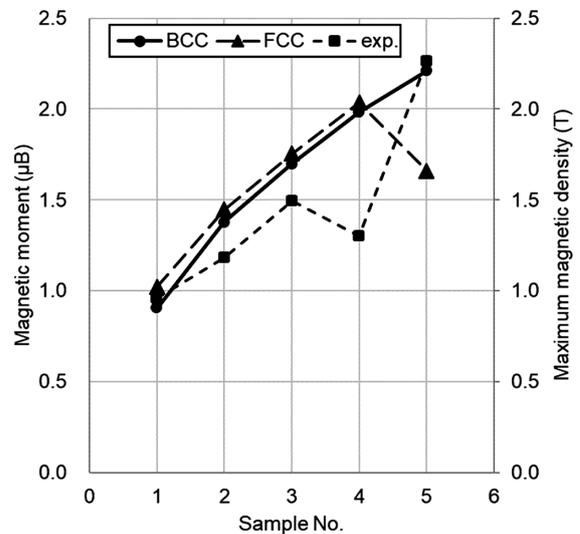


図10 磁気特性の実験結果と計算結果の比較  
Fig.10 Comparison of experimental and calculated magnetic properties

図10は、EPMA分析結果の組成情報を基に第一原理計算を用いたBCC構造とFCC構造の磁化の計算結果と実験で得られた最大磁束密度の比較である。磁気モーメントと最大磁束密度の間には密接な相関が存在することが広く認識されている。これは磁気モーメントが物質の磁性を示す基本的な物理量であり、その総和が磁化を構成し、さらに磁化が磁束密度に直接影響を与えるためである。

計算結果は、単相構造(BCC構造もしくはFCC構造)の領域(No.1~No.3, No.5)において実験結果の傾向と一致している。しかし、BCC構造とFCC構造の混相領域における変化については、現行の計算では十分に説明できない。

このようにパーメンジュールとパーマロイの組成を変化させたことで、FCCおよびBCC構造を持つ単相サンプルでは、上述した第一原理計算による計算科学アプローチと良好な相関が見られることと、複雑な組織構造を有する混相領域では第一原理計算による計算科学アプロ

一チだけでは磁気特性の変化を完全に説明できないことを一度の試作で明らかにすることができた。計算で予測できる領域を増やし、よりスループットを高めるためには、マイクロマグネティックシミュレーションを活用し、磁性材料の組織予測や磁気ダイナミクスの理解を深める必要がある。特に金属3D積層造形によって得られる磁性材料の組織と磁気特性の変化について、より詳細な予測を行うことが期待される。

**むすび** = 今回、マテリアルDXとして第一原理計算を用いた網羅的な探索および金属3D積層造形を用いた軟磁性材料の傾斜材を試作・評価する手法の活用事例を紹介した。

第一原理計算を用いた計算科学アプローチを活用することで、網羅的な材料探索が可能である。また、金属3D積層造形手法の一つであるDED方式を使用した傾斜材は単一のサンプルから複数の異なる組成物の特性に関する情報を取得できる。金属3D積層造形手法を用いて効率的な実験を活用した第一原理計算結果の検証により、計算結果の妥当性を確認した上で網羅的スクリーニングが可能となる。また、第一原理計算結果を傾斜材試作にフィードバックすることで、さらなる効率化と最適化が可能と思われる。

## 参 考 文 献

- 1) 文部科学省. マテリアルDXプラットフォーム構想実現のための取組.  
[https://www.mext.go.jp/content/20201223-mxt\\_kibanken01-000011734-10.pdf](https://www.mext.go.jp/content/20201223-mxt_kibanken01-000011734-10.pdf), (参照2023-12-21).
- 2) J. Korringa. *Physica*. 1947, Vol.13, p.392.
- 3) W. Kohn and N. Rostoker. *Phys. Rev.* 1954, Vol.94, p.1111.
- 4) P. Soven. *Phys. Rev.* 1967, Vol.156, p.809.
- 5) H. Ehrenreich and L. M. Schwartz. in *Solid State Physics*. Vol. 31, edited by H. Ehrenreich, F. Seitz, and D. Turnbull (Academic, New York, 1976).
- 6) P. Weiss. *J. Phys. Theor. Appl.* 1907, Vol.6, p.661.
- 7) A. Paganotti et al. *J. Alloy. Compd.* 2019, Vol.811, 152029.
- 8) V. Chaudhary et al. *J. Alloy. Compd.* 2020, Vol.823, 153817.
- 9) A. Paganotti et al. *Mater. Chem. Phys.* 2021, Vol.261, 124215.
- 10) L. Tan et al. *Sci. Rep.* 2022, Vol.12, 9504.
- 11) W. Teh et al. *Addit. Manuf.* 2022, Vol.58, 102983.
- 12) T. Nishimura et al. *Corros. Sci.* 2000, Vol.42, p.1611.
- 13) R. S. Sundar and S. C. Deevi, *Int. Mater. Rev.* 2005, Vol.50, p.157.
- 14) W. Everhart et al. *Appl. Sci.* 2019, Vol.9, 3701.
- 15) R. H. Yu et al. *J. Appl. Phys.* 1999, Vol.85, p.6655.

(論文)

# 触媒粒子形状を考慮した固定層触媒反応器のモデリング

高岸洋一\*<sup>1</sup>(博士(理学))・松岡寛和\*<sup>1</sup>・馬場亮平\*<sup>1</sup>・山下岳史\*<sup>2</sup>

## Modeling of Fixed-bed Catalytic Reactor Considering Pellet Particle Geometry

Dr. Yoichi TAKAGISHI・Hirokazu MATSUOKA・Ryohei BABA・Takeshi YAMASHITA

### 要旨

2030年ネットゼロ達成へ向けて、CO<sub>2</sub>を再利用可能な燃料物質へと変換する固定層触媒反応器の高効率化が求められている。これまで、触媒層を均質体とみなした化学反応・流体・温度を考慮した数値シミュレーションが活用され、ガス温度や流量が反応効率に与える影響が考察されてきた。これに対し、近年ペレットサイズ、形状に対する感度解析や最適化を目的として、それに必要なペレット触媒の3次元充填構造を考慮した連成モデルを提案している。本稿では、メタノール合成およびメタン合成を対象としたシミュレーションモデルの構築および圧力損失・反応効率を両立する多目的最適化の事例を紹介する。

### Abstract

To achieve net-zero emissions by 2030, the efficiency of fixed-bed catalytic reactors that convert CO<sub>2</sub> into reusable fuel substances must be improved. Hitherto, numerical simulations considering chemical reactions, fluids, and temperature, treating the catalyst layer as a homogeneous body, have been utilized. These simulations have examined the impact of gas temperature and flow rate on reaction efficiency. Recently, coupled models that consider the 3D filling structure of pellet catalysts have been proposed for sensitivity analysis and optimization of the pellet size and shape. This paper introduces a case study on the construction of a simulation model for methanol synthesis and methane synthesis, as well as multi-objective optimization aiming both to deal with pressure loss and achieve reaction efficiency.

### 検索用キーワード

固定相触媒反応器, メタン合成, メタノール合成, ペレット触媒, シミュレーション, 最適化

ま え が き = 温室効果ガス排出の削減が急務である現在、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) を燃料に変換可能なカーボンリサイクル技術が注目されている<sup>1)</sup>。カーボンリサイクルは、CO<sub>2</sub>の分離・回収、貯蔵などの様々な技術を含むが、とくにメタンやメタノールなど再利用可能な燃料へ変換する触媒反応の効率化技術は、リサイクルプロセス確立のための鍵となる技術として活発な研究が行われている。

触媒反応器内では、温度、圧力、濃度に依存する多様な反応が生じるため、副反応を抑制し、目的とする反応生成物を高い効率で得るための触媒層の設計が必要である。これまで、化学反応・流体・温度解析を統合した数値シミュレーションが利用され、ガス温度や流量が反応効率に与える影響が検討されてきた。しかしながら、単純化のため充填構造を均質体に近似したモデルが使用される場合が多く<sup>2)~4)</sup>、3次元充填構造内の詳細な反応、流れ、温度分布の予測が困難であった。

これに対し、近年ペレットサイズ、形状に対する感度解析や最適化を目的として、それに必要なペレット触媒の3次元充填構造を考慮した連成モデルを提案している。本稿では、メタノール合成およびメタン合成を対象とした固定層触媒反応器の化学反応、流動、伝熱の連成モデルの構築事例をそれぞれ紹介する。さらに、ペレットサイズや形状に対する感度解析、圧力損失と反応効率

を両立させる多目的最適化の事例についても報告する。

## 1. 固定層触媒反応器を用いた燃料ガス合成

固定層触媒反応器とは、触媒を充填した容器内に原料を流通させ、化学反応によって目的とする生成物を得る装置である。流通式であるため連続運転が可能であり、低コストでの運用が可能であるなどの特徴が挙げられる。しかし、a) 大きな吸熱/発熱反応に対する熱マネジメントが必要、b) 副反応の抑制、c) 原料に含まれる不純物や副反応による触媒劣化への対応といった課題がある。

目的とする生成物を高効率で生産するためには、反応器内での現象の予測、すなわちa) 最適な反応場の形成を実現する触媒種の選定 (形状、担体、活性種、助触媒)、b) ミクロの領域での熱物質収支の把握、c) 触媒劣化メカニズムの把握と対策など、多様な観点からの解析と最適化が求められる。

## 2. 反応器内のメタノール合成シミュレーション

図1(a)に示すような反応器内に充填した典型的な固定層触媒を対象とし、ペレット形状を考慮した3次元のメタノール合成シミュレーションモデルを構築した。反応器の形状は管型、触媒ペレット形状は球体を仮定し

\*<sup>1</sup> (株)コベルコ科研 計算科学センター \*<sup>2</sup> (株)コベルコ科研 化学分析センター

た。ここでは、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) と水素 (H<sub>2</sub>) からメタノール (CH<sub>3</sub>OH) の生成反応, 細孔を有する担体 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) に触媒金属 (Ni) が均一に担持された粒子をそれぞれ想定した。反応器内の全てのペレット粒子サイズは等しいと仮定した。ここでは、ペレットサイズの違いが生成効率に与える影響を調べるため、粒子サイズの異なる3ケースについて計算を実施し、結果を比較した(図1(b))。

## 2.1 計算方法

球形のペレット粒子を反応器内にランダムに配置し、充填構造を模擬した。ここでは、COガスからのメタノール合成反応 (CO + 2H<sub>2</sub> → CH<sub>3</sub>OH), CO<sub>2</sub>ガスからのメタノール合成反応 (CO<sub>2</sub> + 3H<sub>2</sub> → CH<sub>3</sub>OH + H<sub>2</sub>O) および逆シフト反応 (CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> → CO + H<sub>2</sub>O) をそれぞれ考慮した。ただし、中間体の反応は直接モデル化せず総括反応とした。

$$r_{CH_3OH} = k_1 P_{CO} P_{H_2} \left( 1 - \frac{1}{K_1^{eq}} \left( \frac{P_{H_2O} P_{CH_3OH}}{P_{H_2} P_{CO_2}} \right) \right) \dots (1)$$

$$r_{CO_2} = k_2 P_{CO_2} \left( 1 - K_2^{eq} \left( \frac{P_{H_2O} P_{CO}}{P_{H_2} P_{CO_2}} \right) \right) \dots (2)$$

$$k = A \exp(B/RT) \dots (3)$$

$$K^{eq} = 10^{(A/T-B)} \dots (4)$$

ここで、 $r$ ,  $k$ ,  $K^{eq}$ ,  $P$  はそれぞれ反応速度, 反応速度定数, 平衡定数, 分圧であり、添字は反応生成物の化学種を表す。試用した各種パラメータは典型的な値を用いた(表1)<sup>4), 5)</sup>。反応器内の濃度場, 温度場, 流れ場を予測するため、化学反応, 物質の輸送, 熱伝導方程式, ナビエ・ストークス方程式の非定常連成解析を行った。解析条件を表2に示す。反応器入口には温度および流入速度境界を設定し、CO<sub>2</sub>およびH<sub>2</sub>のガスを流入させた。計算にはCOMSOL Multiphysics™ ver.5.6を採用した。

## 2.2 計算結果

定常状態のメタノールの濃度分布 (モル分率), 中央断面上の分布を図2に示す。流入口から流れる原料ガスが触媒を介して反応し、メタノールが生成される様子が3次元情報として確認できる。また、ペレットが小さくなるに従って流出口のメタノールの生成量は増加する傾向が見られた。図3にペレット半径と流出口の平均のメタノールの濃度との関係を示す。縦軸はメタノールのモル分率を表しており、以下で定義した。

$$x_{CH_3OH} = \frac{c_{CH_3OH}}{c_{tot}} \dots (5)$$

$x_{CH_3OH}$  はメタノールのモル分率,  $c_{CH_3OH}$  はメタノールの濃度,  $c_{tot}$  は各濃度の総和を表している。球状のペレットサイズが小さいほど反応効率は向上しており、反応器体積中のペレットの比表面積の影響と考えられる。この傾向は、従来型の均質化モデルを用いた既報と一致している<sup>5)</sup>。

中央断面上における定常ガス流速分布 (絶対値) を図4(a)に示す。なお、速度は入口速度で除することで無次元化している。ペレット触媒の充填構造の影響を受け、不均一な流れ場が形成されている。とくに、壁面近傍や狭窄 (きょうさく) 領域 (図4矢印) で相対的に速

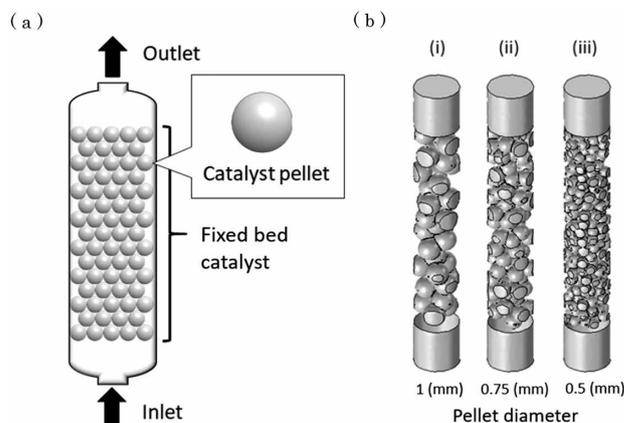


図1 (a) 固定層触媒反応器の概念図, (b) さまざまなペレットサイズにおけるモデル形状  
Fig.1 (a) Schematic image of fixed bed catalytic reactor, (b) Model geometries with various pellet size

表1 反応速度パラメータ  
Table 1 Kinetic parameters

	A (-)	B (-)
Kinetic constant $k_1$ (mol/kg s bar <sup>2</sup> )	0.499	17,197
Kinetic constant $k_2$ (mol/kg s bar <sup>2</sup> )	$6.62 \times 10^{-11}$	124,119
Equilibrium constant $K_1^{eq}$ (bar <sup>-2</sup> )	3,066	10.592
Equilibrium constant $K_2^{eq}$ (bar <sup>-2</sup> )	2,073	2.029

表2 メタノール合成シミュレーションの条件  
Table 2 Conditions in methanol synthesis simulations

	(i)	(ii)	(iii)
Pellet radius (mm)	1	0.75	0.5
Volume ratio of pellets (%)	48.6	52.8	59.4
Inlet temperature (°C)	210		

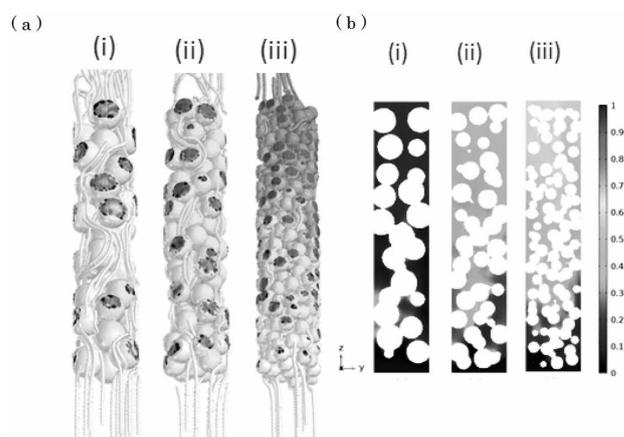


図2 シミュレーションにより予測した定常状態における反応器内のメタノール濃度  
(a) 3次元ペレット表面, (b) 反応器断面  
Fig.2 Simulated stationary methanol concentration  
(a) Three-dimensions (pellet surface), (b) cross-section

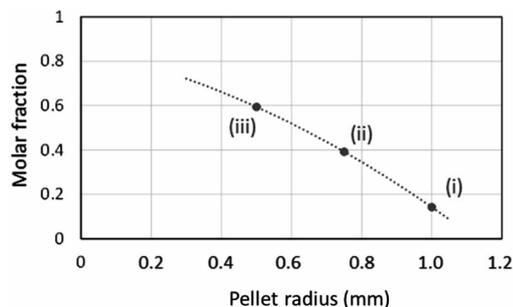


図3 シミュレーションによる反応器出口のメタノール平均濃度とペレット半径との関係

Fig.3 Relationship between simulated average methanol concentration on outlet plane and pellet radius

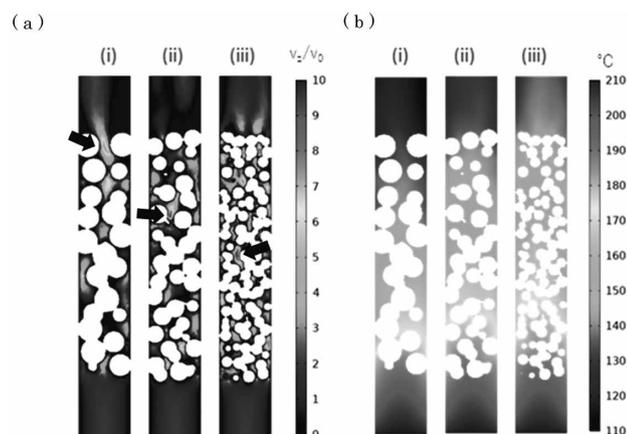


図4 シミュレーションにおける反応器断面における (a) 定常速度分布, (b) 定常温度分布

Fig.4 Cross section of (a) simulated static flow velocity, (b) simulated static temperature distributions

い流れが発生しており、よどみや渦が発生し得ることが示唆される。

図4 (b) は中央断面上での温度分布である。各流出口の平均温度は (i), (ii), (iii) それぞれ117.4℃, 127.9℃, 133.1℃であり、ペレットの半径が大きい方が入口温度(210℃)からの減少が大きい傾向となった。それぞれの空隙率は (i), (ii), (iii) の順で大きくなるため、ガス流量は (i) が最も多く、結果としてガスによる熱拡散により出口付近の温度が低くなったものと考えられる。

このように、反応器内のペレット触媒の3次元充填構造を考慮することで、反応場、流れ場、温度場の詳細な予測が可能となり、印加圧力や加熱温度だけでなく、ペレット形状や充填率などさまざまなパラメータの感度解析が可能となる。

### 3. メタン合成シミュレーション

メタネーション反応 ( $\text{CO}_2$  から  $\text{CH}_4$  への変換) を対象とした、触媒粒子形状の最適化スキーム構築を検討した。2章に記載と同様に各化学種の拡散と化学反応を考慮した反応流解析モデルを構築し、モデルから触媒粒子形状と反応器性能 (圧力損失, 収率) を関連付けるデータベースを構築したうえで、最適な触媒粒子形状を探索した。なお、ここでは粒子径が正規分布に従うと仮定し、粒子形状パラメータとして粒子径の平均および標準偏差に着目した。

### 3.1 計算方法

触媒粒子は2章と同様とし、気体は原料と生成物の5種のガス ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ) の混合物かつ定常流れを想定した。触媒粒子内部では、水蒸気改質反応 ( $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + 3\text{H}_2$ ), 水性ガスシフト反応 ( $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$ ), グローバル水蒸気改質反応 ( $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$ ) をそれぞれ考慮した<sup>6)</sup>。なお、ここでは反応器内の触媒粒子充填密度が均一であると仮定し、2章の解析モデルの触媒領域の一部を切り出しモデル化した。これにより計算負荷の大幅削減が実現された。ただし、反応器の内壁近傍は充填率が不均一である場合が多いため、本モデルの適用範囲外となる。また、モデル領域を超えて湾曲する流れは考慮されないため、屈曲率が高い構造 (領域幅を超える粒子サイズ, 高充填率構造など) への適用には注意を要する。既報<sup>7), 8)</sup>に基づき、以下の手順に沿って最適な形状パラメータ (粒子径の平均および標準偏差) を探索した。

- (Step-1) 探索範囲内の様々な形状パラメータにおいて反応流解析を実行する
- (Step-2) 計算結果を抽出し、データベースを構築する
- (Step-3) 重要度分析により重要度の高い形状パラメータを特定する
- (Step-4) パレート解となる構造を分析し、最適構造に必要な条件を推定する

### 3.2 計算結果

#### 3.2.1 球充填構造データベース構築

直方体領域  $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$  の領域に対し、粒子のランダムパッキング処理<sup>6)</sup>を行った。Z+方向からZ-方向へランダム生成された粒子が降下する処理を繰り返し、粒子がZ+方向境界に到達した時点で処理を終了した。生成される粒子径は正規分布に基づいて決定した。

構築したデータベースの一部を表3に示す。ここでは、平均粒子径の間隔の目安を0.5 mm程度とし、計266の構造を構築した。構造数が多いほどデータベースの質も向上するが、計算負荷との兼ね合いからこの構造数を決定した。また、一般に表面積が大きいほど反応量は増加するが、摩擦によるエネルギー損失などにより圧力損失も上昇する。すなわち、収率と圧力損失はトレードオフの関係にあると考えて良い。これらの散布図を図5に示した。なお、プロット点の色は平均粒径に対応している。左上側であるほど圧力損失が小さく、収率が高い。すなわち、最も左上側の集団がパレート解となる。推測されるパレートフロントを点線で示した。

パレート解となる平均粒径は必ずしも小さい値ではなく、探索範囲である5 mm~13 mmの構造でそれぞれ存在する。ただし、平均粒径が小さいほどバラつきが小さくなり、パレートフロントに近づく頻度が高い。この結果は、平均粒径が小さいほど反応表面積が大きく、効率的な反応が達成されやすいことを示している。また、パレートフロントが非線形であることも重要な点である。触媒層における圧力損失が0.1 Pa以下に比べて、0.1 Pa以上では傾きが緩やかになっており、これ以上粒径を小

さく設計しても収率上昇より圧力損失上昇の影響が強くなることを示している。最も表面積の大きい平均粒径5 mmの系において、出口におけるCO<sub>2</sub>濃度が入り口の1/5程度の値であったことから、ガス種の供給がメタン合成反応を律速するためと考えられる。

### 3.2.2 データベースの分析

圧力損失とCH<sub>4</sub>の収率に対する各形状パラメータの相関係数を計算した(図6)。なお、前項で考察したとおり、触媒層の表面積や充填率がこれらに影響すると予想されるため、形状パラメータとして充填構造内の粒子の表面積(総和)と充填率の算出値を加えた。圧力損失と収率の傾向は類似しており、この2変数の相関係数は0.916であることから裏付けられる。また、2変数ともに平均粒径に対して強い負の相関がみられる。これは平均粒径が小さいほど表面積が大きくなり、気体と触媒粒子間の接触界面が増えるためと考えられる。実際、表面積に対しての相関係数は約0.9であり、強い正の相関を持つことがわかる。いっぽうで、標準偏差や充填率に対しては比較的弱い負の相関となる。また標準偏差に対する相関係数の絶対値は収率の方が高くなる点は興味深い。充填構造に対する感度は収率の方が高く、粒度分布のパラッキの影響を受けやすいことが示唆される。この理由は次のように定性的に説明される。粒子径のばらつきは触媒表面積のばらつきをもたらす。触媒層の圧力損失の主要因が摩擦損失であると仮定すると、その値は層流では表面積にほぼ比例するだろう。いっぽう、収率はガス種の供給にも依存するため、表面積増加に伴う有効反応面積は漸減し、比例定数が低下する。

また、充填率に対しての相関が弱く、本解析では充填率よりも粒子形状の方が圧力損失や収率に大きな影響を与える可能性がある。ただし、ここで見られた傾向は計算条件範囲に限定されることに注意が必要である。非球体を含む粒子形状や粒子径範囲、想定する化学反応などによって個別に検討すべきであり、これらは今後の課題である。

表3 構築したメタン合成シミュレーション・データベース (一部)  
Table 3 Database of methane synthesis simulations

#	Structure parameters		Output parameters	
	Average particle diameter (mm)	Standard deviation (mm)	Pressure loss (Pa)	Yield of CH <sub>4</sub> (-)
1	6	1.10	0.164	0.763
2	11	0.902	0.0823	0.595
3	5	0.175	0.183	0.789
4	9	1.51	0.113	0.666
5	11	2.81	0.113	0.614
:	:	:	:	:
266	8	0.696	0.126	0.705

むすび=本稿では、最近提案しているペレット触媒の3次元充填構造を考慮した連成モデルについて、メタノール合成およびメタン合成プロセスを例に、ペレットサイズ、形状に対する感度解析例を紹介した。本モデルにより、反応器内の反応場、流れ場、温度場の詳細な評価が可能となり、印加圧力や加熱温度に加えて、ペレット形状や充填率などさまざまなパラメータの感度解析が可能となる。また、シミュレーション結果のデータベース化および分析により、反応器設計における重要な指標である圧力損失や収率などのパレート解の探索が可能となることが示された。ただし、本稿で紹介した反応流解析モデルでは、メタノール合成、メタン合成いずれも触媒粒子形状を球と仮定したが、すでに新技術として表面積を増やすために円柱、穴あき円柱などの形状も実用化されている。今回構築したスキームを球以外の形状最適化にも適用可能であると考え、今後はこれを実証する予定である。

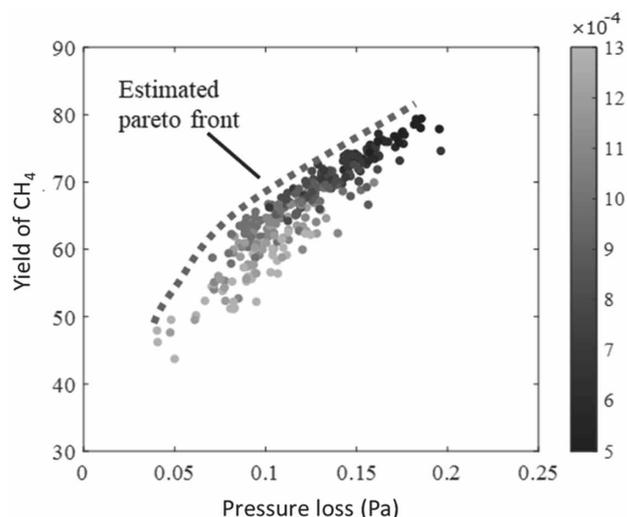


図5 シミュレーションのデータに基づくメタン収率と圧力損失の関係  
Fig.5 Simulated relationship between methane yield and pressure loss

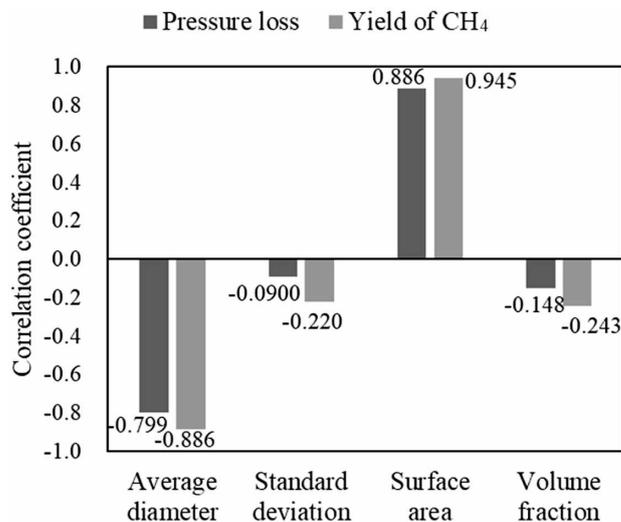


図6 シミュレーションのデータに基づく圧力損失とメタンの収率に対する各構造パラメータの相関係数

Fig.6 Simulated correlation coefficient of structural parameters for pressure loss and methane yield

## 参考文献

- 1) Y. Kato. Carbon Recycling for Reduction of Carbon Dioxide Emission from Iron-Making Process. ISIJ International. 2010, 50, 181-185.
- 2) J. Ahn et al. Development of Pilot-Scale CO<sub>2</sub> Methanation Using Pellet-Type Catalysts for CO<sub>2</sub> Recycling in Sewage Treatment Plants and Its Validation through Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling. Catalysts. 2021, 11, 1005.
- 3) A. Krammer, Peham et al. 2D heterogeneous model of a polytropic methanation reactor, Journal of CO<sub>2</sub> Utilization. 2022, 62, 102059.
- 4) B.S.Adji et al. Simulation of Methanol Synthesis from CO<sub>2</sub> Hydrogenation in a Packed Bed Reactor Using COMSOL Multiphysics. International Journal of Engineering Research and Technology. 2019, 12, 12, 2592-2599.
- 5) M. Shahrokhi et al. Modeling, simulation and control of a methanol synthesis fixed-bed reactor. Chemical Engineering Science. 2005, 60 4275 - 4286.
- 6) W. Sheu et al. Transient reaction phenomena of sorption-enhanced stream methane reforming in a fixed-bed reactor. International Journal of Hydrogen Energy. 2022, 47, 4357.
- 7) Y. Takagishi et al. Machine Learning Approaches for Designing Mesoscale Structure of Li-Ion Battery Electrodes. Batteries. 2019, 5, 54.
- 8) T. Yamanaka et al. A Framework for Optimal Safety Li-ion Batteries Design using Physics-Based Models and Machine Learning Approaches. J. Electrochem. Society. 2020, 167, 100516.

(解説)

## お客様情報共有基盤の構築と今後の情報活用の展望

菅野翔太\*1・佐藤拓也\*1・加藤 拓\*2

### Building Customers' Information Sharing System and Future Prospects for Information Utilization

Shota KANNO・Takuya SATO・Taku KATO

#### 要旨

当社では、多種多様な事業分野のお客様から得た情報を、事業を横断して共有し、利活用することで、当社の総合力を活かしたソリューションの提供を目指している。しかしながら、情報を共有する仕組みが構築されていないため、2023年1月にお客様対応変革プロジェクトを立ち上げ、お客様から得られた情報を全社で共有/蓄積するシステムの構築を検討してきた。当プロジェクトでは、事業部門を巻き込み議論を重ねて業務・システム要件を整理することに加え、システムの定着、利活用を促進する活動を検討し、2024年4月からシステムの利用を開始した。本稿では、基盤構築の目的と経緯、プロジェクト推進の課題とその対応を解説し、最後にシステムを活用した将来の展望について述べる。

#### Abstract

Kobe Steel aims to provide solutions to leverage its comprehensive strengths by sharing and utilizing customers' information in a wide variety of business fields across the entire company. Originally, the company had not established a system for sharing information. However, in January 2023, a customer response transformation project was launched to build a system for sharing and accumulating information obtained from customers. This project involves organizing the requirements for business and the system through extensive discussions among the business sectors. In addition, activities to promote the establishment and utilization of the system have been contemplated, and the system has been used since April 2024. This paper explains the purpose and background of the foundation construction, the challenges of project promotion, and their solutions. Finally, it discusses the prospects of using the system.

#### 検索用キーワード

SFA, CRM, 情報共有, 新たな価値創造, DX

ま え が き = 当社のDX戦略は「2050年を見据えたカーボンニュートラルの実現をはじめとする社会課題をお客様と解決する、製品並びにソリューションのプロバイダーを目指す」を基本方針とし、三つのSTEPで推進している。STEP1では、「積極的かつ勇猛果敢な“デジタル化”」として社員が自らの力でデジタル化による業務効率化を実現できるようにするため、「ITツール活用による業務効率化」と「DX人材育成」に取り組んでいる。STEP2では、「“デジタル化”を基軸にしたKOBELCOの変革」としてデータや分析ノウハウを一元管理し、そのデータを活用することで製品開発の効率化・高度化やものづくり強化を目指す。そうすることで、「統合データ管理による迅速な意思決定」や「開発・製造プロセスの効率化」に取り組む。STEP3の「DXによる“KOBELCOらしさ”の追求」では、STEP1およびSTEP2の推進によって生み出されるリソースや統合管理された資産を活かし、社会課題の解決や新たな価値を創造していくことを掲げている。ここでいう資産とは、技術資産（コア技術、開発インフラ）とビジネス資産（ネットワーク、お客様データ、知的財産）を指す。技術資産の活用はAIによる高

炉操業支援などの取り組みがある。いっぽう、ビジネス資産の活用はまだ取り組みが少なく、今後、重点的に取り組む方針で、中でも、お客様から得た情報（お客様データ）の活用を優先的に取り組むこととしている。これは、DX戦略の基本方針にも示す通り、お客様と社会課題を解決するための製品やソリューションを提供していくためには、お客様のニーズや課題を捉えることが最初の活動として重要となるからである。ただ、当社の現状は、お客様から得られた情報をそれぞれの事業部門でのみ蓄積、活用するケースが多く、事業部門を越えて十分に情報を共有、活用するには至っていない。そのため、特定の事業部門が把握したお客様の課題や困りごとがほかの事業部門に情報共有され、ほかの事業部門の製品・サービスに反映してお客様にご提案するケースは少なく、多様な事業を営む当社の強みを十分に発揮できていない。このような問題を解決するため、2023年1月にお客様対応変革プロジェクトを発足した。本稿では、プロジェクトの発足からこれまでの活動の経緯と今後の展望を解説する。

\*1 IT企画部 \*2 事業開発部

# 1. 当社の課題とお客様対応変革プロジェクトの発足

## 1.1 当社を取り巻く環境

カーボンニュートラルに代表されるように、外部環境変化は多様化し、社会やお客様が抱える課題は大きく変化している。その変化していく課題を正確に把握し、お客様に適切なソリューションを提案することで、新しい価値をお客様に提供し続けることは企業の持続的な成長に欠かすことはできない重要な活動と認識している。さらに、近年、大きな外部環境変化として、デジタル技術の進歩がある。2018年9月に経済産業省からDXレポートが発行されて以来、デジタルガバナンス・コードやDX認定制度などの制度面の整備が進んでおり、日本企業全体でDXの推進が活発になっている。情報・通信業界に限らず、当社のような製造業でもDX認定を取得する企業が増えている。今後、製造業におけるデジタル技術の発展がますます加速することが予測され、それに伴い、新たな価値提供ができるよう、デジタル技術を活用したソリューション提案も強化していくことが必要である。

## 1.2 当社の課題

当社の中期経営計画（2021～2023年度）では、最重要課題として、「安定収益基盤の確立」、「カーボンニュートラルへの挑戦」を掲げている。これを実現するために「経営基盤強化」を着実に遂行することを目標に、「経営体制の見直し」、「DX戦略推進」、「多様な人材の活躍推進」、「信頼向上プロジェクト」に取り組んでいる。その中でも、「DX戦略推進」では、お客様起点で新たな価値を創造し、社会・お客様課題を解決することを目指している。当社は図1に示すような多様な事業を営む企業体である。その強みを活かすため、DX戦略では、STEP3で示しているように、統合されたビジネス資産を活用することでKOBELCOらしさである総合力を発揮することを目指している。ビジネス資産の中でも、お

客様の情報を活用するための情報蓄積・共有を行う仕組みは自動車分野、建築分野、造船分野など一部の分野にとどまっている。事業部門を横断した情報活用を進めていくことが当社の課題である。

## 1.3 お客様対応変革プロジェクトの発足とスコープ

当社は、1.2節でも述べたとおり多様な事業群、お客様群を抱え、有機的に結びついた企業体である。要素技術、流通面、商品化技術、工場・事業所の運営など、事業部門内の組織だけでなく、お客様のニーズや課題に合わせ、部分的あるいは幅広く、事業部門をまたいで有機的に結び付いている。有機的に結び付いた企業体である強みを活かし、企業価値を向上させていくためには、各事業・組織で得られた様々なお客様課題・ニーズを共有する基盤構築が必要なことは前述したとおりである。この基盤は全事業部門共通のシステムとしなければならない。しかし、全事業部門共通のシステムを構築するには、事業特性に起因する管理項目を全事業部門とすり合わせる必要がある。それには多くの人的リソースや時間を要し、煩雑なシステムとなるため、利用しにくくなることが多い。そのため、当社では各事業部門の事情に合わせ、各事業部門がシステムを構築していることが多い。情報共有基盤の構築には、全事業部門で共通のシステムを構築する観点とお客様と接点を持ち、情報を収集し、入力する実務の観点どちらも検討が必要である。その際には、それぞれの事業で管理しているお客様の個人情報や秘密情報も同様に守られなければならない。さらに、全社目線で推進する必要があるが、当社にはその推進に適している組織がない。当社は経営の重要な方向性の決定とリスクマネジメントを含むモニタリングを担う「取締役会」がある。この「取締役会」から社長が選任される。さらに、社長を始めとした取締役で構成する「経営審議会」にて経営に関する重要な事項や取締役会付議事項を審議する体制になっている。そこで本活動を経営基盤強化の活動と位置づけ、経営審議会直下にお客様対応変革

Material	 Steel & Aluminum	Wire rod (wire, bar steel), thin plate (hot-rolled, cold-rolled, surface treated), thick plate, aluminum plate, and other products (steel scraps, milling for castings, milling for steelmaking, slag products)
	 Forges and foundries	Cast and forged steel products, aluminum alloy and magnesium alloy castings, titanium and titanium alloy products, aluminum alloy forged and processed products, aluminum extrusions and processed products, copper rolled products, iron powder
	 Welding	Welding materials (various coated arc welding rods, wire for automatic and semi-automatic welding, flux), welding robots, welding machines, various welding robot systems, welding-related testing, analysis, and consulting services
Machinery	 Machinery	Energy and chemical-related equipment, nuclear-related equipment, tire and rubber machinery, resin machinery, ultra-high pressure equipment, vacuum coating equipment, metal processing machinery, various compressors, refrigeration equipment, heat pumps, various plants (steel rolling, non-ferrous, etc.), various internal combustion engines, special alloys and new materials (target materials, etc.), analysis and analysis of various materials
	 Engineering	Various plants (reduced iron, pelletizing, petrochemical, nuclear-related, water treatment, waste treatment, etc.), civil engineering, new transportation systems, chemical and food-related equipment
	 Construction machinery	Hydraulic excavators, mini excavators, environmental recycling machinery, crawler cranes, wheel cranes, DX solutions
Electric power	 Electric power	Power supply, heat supply
Other		High-pressure gas container manufacturing industry, superconducting products, general trading companies

図1 当社の事業概要

Fig.1 Outline of our business

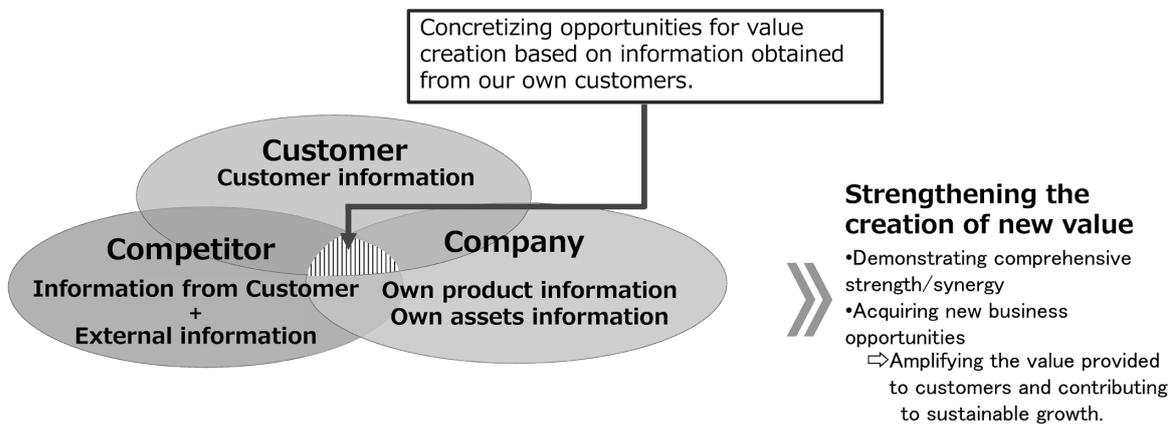


図2 お客様対応変革プロジェクトの目的とアプローチ  
 Fig.2 Purpose and approach of "customer response transformation project"

プロジェクトを立ち上げることで本活動を推進する組織を構築した。

図2にお客様対応変革プロジェクトの目的とそのアプローチを示す。多様な事業を活かした新たな価値創造を目的とし、そのためには他部署の情報や最新の外部情報のような「新たな気づき」を入手する必要があると考えた。お客様や業界を軸として、全社の活動を可視化し、組織を越えて容易にコミュニケーションを取れるようにすることで「総合力の発揮」が実現可能となる。そこで、「新たな気づき」、「総合力の発揮」の実現に向けて、以下に示す3つの活動に取り組み、3C（Customer：お客様情報、Competitor：競合・外部情報、Company：自社情報）の情報基盤構築を目指す。お客様から獲得した情報を全社に共有し、その情報を活用する「お客様情報の共有・利活用」を情報基盤の土台の活動と位置付ける。これに、ニュースなど広く発信される情報を取捨選択して受信する「最新外部情報（2次情報）の提供連携」、自社の製品やサービスを一元管理し、誰でも閲覧できるようにする「自社製品・サービス見える化」を加え、活動する。以下では、とくに「お客様情報の共有・利活用」の取り組みを中心に報告する。

## 2. 情報共有手段の検討

本章では、「お客様情報の共有・利活用」の最適な共有手段の検討過程を解説する。本プロジェクトでは、はじめに情報共有のあるべき姿を設定し、つぎに、どのような情報を誰に対して、どのように共有すべきかについて検討を進めた。具体的な手段を比較検討した結果を最後に解説する。

### 2.1 情報共有のあるべき姿

全社に共有すべき情報としてはどのお客様のどの組織・どの職位の課題かを明確にすることが重要である。そのため、「お客様の企業および人物の基本的な情報」、直接の会話の中から獲得できた「お客様との対話で得られた情報」を土台に情報集約を試みた。これらの情報を積極的に入手するため、社内業務に費やしていた時間を削減し、お客様との接点に掛ける時間にシフトしていく必要がある。したがって、お客様との接点が一番多い営業職の業務を効率化することも重要である。そこで、本

プロジェクトでは、これら2つの情報を共有すべき情報と定義し、それらの情報をお客様ごと、案件ごとに蓄積し、かつ営業の業務効率を向上することが可能となる情報共有システムを導入することにした。

### 2.2 お客様の企業・人物・案件・活動の共有

情報を共有するためには、正確に情報を管理できる状態にする必要がある。まず、お客様の企業および人物情報を正確に管理できる手段を検討した。その中でもお客様からいただく名刺にはお客様の企業および人物情報が正確に記されているため、名刺情報をお客様情報の入り口にすることとし、名刺管理サービスを導入することにした。複数の名刺管理サービスを比較し、Sansan（Sansan株式会社の商標）を導入することにした。Sansanは専用のスキャナによるAIでの文字認識と人的チェックを組み合わせることで文字識別精度が非常に高い。また、帝国データバンクの情報を付加する機能があり、たとえ社名変更や統廃合があっても帝国データバンクの企業コードによって、過去の社名と現在の社名を対応させることができる。これにより、社名が変わっても、同じお客様であることを認識することができるようになり、継続した対応につなげられる。

つぎに、「お客様との接点から得られる情報」を蓄積、共有する方法を検討するため、要件を整理する。第一に、お客様から得た情報の取り扱いについて検討した。お客様から得た情報は誰に対しても開示できるものではなく、範囲の限定を必要とするものがある。このため、「情報の閲覧範囲を限定できる仕組みを構築すること」が必須と考えた。第二に、前述したとおり、他事業部門の情報であっても理解や活用をしやすいするために「お客様とその案件ごとに情報を入力・閲覧できる機能」が必要である。最後に、これらの情報を名刺情報から構築したデータベースに紐づけすることが必要であると考えた。これらの要件を満足できるツールとして、二つの方法を検討した。一つ目は社内ですでに活用しているツールでの代替やシステムを自社で構築する方法である。二つ目はSales Force Automation（以下「SFA」）やCustomer Relationship Management（以下「CRM」）のようなシステムを導入する方法である。SFAは営業支援システムと呼ばれ、営業メンバーの行動管理や商談の進捗を管

理するシステムである。CRMは顧客関係管理と呼ばれ、お客様との関係性やコミュニケーションを管理し、自社の従業員とお客様との関係を管理するシステムである。当プロジェクトでは、SFAとCRM両方を兼ね備えたシステムを構築する必要があり、本来は別のツールではあるが、本稿では以降、SFA・CRMと記載する。

はじめに、社内で既に活用しているノーコード・ローコードツールの活用や自社でシステムを開発する場合を検討した。「情報の開示範囲の限定」と「お客様とその案件ごとに情報を入力・閲覧」を両立するシステムの構築を具体的に検討する。例えば、「情報の開示範囲の限定」において、当社の場合は事業部門・ユニット・部署単位での制御を基本として、複数事業部門をまたいだプロジェクト単位や担当のお客様やエリア単位など、柔軟にアクセス権限の範囲を設定できる仕様にする必要がある。この実装には、ツールやシステムのユーザ情報にユーザ（利用者）の所属情報を持たせ、所属情報に応じたアクセス制限を施せる仕様や個別にアクセス制御した場合の処理を検討し、開発するが、工数が膨大になることが予測された。また、「お客様とその案件ごとに情報を入力・閲覧」を実現するには、システムのメンテナンスを継続していく必要がある。例えば、お客様2社が合併した場合、合併前の2社の案件を合併後の会社の案件として集約し、合併前のお客様とのやり取りも確認できる状態にする必要がある。Sansanの帝国データバンクの企業コードを使えば、合併前後のお客様を対応させることはできるが、案件データの集約はシステム運用で反映させる必要がある。これらの検討によって、初期コスト、ランニングコストともに膨大になることが試算された。これに加えて、ユーザの要望や事業方針に基づいて機能を強化する場合、システムを熟知していなければ難しく、対応できる人員の確保ができない問題が発生することが見込まれる。さらに、Sansanのデータを連携する手段も開発しなければならない。

いっぽう、SFA・CRMは「情報の開示範囲の限定」と「お客様とその案件ごとに情報を入力・閲覧」が基本機能でそろっている。そのため、基本機能よりも細やかな情報の開示範囲の限定やユーザの所属に応じて必要な入力項目を変化させる機能に代表される追加機能をカスタマイズすればよい。そのため、自社でシステムを開発する場合に比べてコスト負担が小さく、重要な機能であるSansanとの情報連携も基本機能として具備していることも評価できる。また、今後、このお客様情報共有基盤に蓄積した情報を活用していくための機能を追加していきたい。例えば、お客様の関心を探し、お客様に合わせた提案（マーケティング）や、製品・サービスを提供後におけるお客様からの問い合わせと当社の対応の管理（アフターサービスの管理）の機能を追加したい。お客様にとってこれまで以上の価値を提供できるように発展させることを見据え、これらの機能を基本機能として備えているSFA・CRMを導入することにした。

### 2.3 導入するシステムの選定

つぎに、SFA・CRMの中から導入するシステムの種

類を検討した。名刺管理システムと同様に、SFA・CRMは世の中に多く存在するため、シェアが高く、他社の導入事例が豊富なサービスを抽出し、システムの機能面・非機能面、コスト面を中心に比較検討した。機能面・非機能面の評価では、要求事項をピックアップし、Must・Wantの2種類に分け、それぞれに3段階の重要度（大・中・小）をつけ、評価を行うことにした。評価にあたり、有識者へのヒアリングおよびSFA・CRMのサービスを提供する会社にデモをしていただくなど、調査を行った。そして、要求事項がMustの項目の一つでも満足しないサービスは除外し、総合評価が最も高いサービスを選択した。最終的に、本プロジェクトの目的に合致する機能を基本機能として多く備えており、拡張性にも富んでいるSalesforce（Salesforce, Inc.の商標）に決定した。Salesforceは世界で15万社以上が導入し、シェアは19.5%あり<sup>1)</sup>、当社のような製造業も多く導入している。サービス提供会社として多数の事例を経験し、SFA・CRMの構築や活用の知見が多いことも選定した理由の一つである。

2.2節で説明したSansanはあらかじめ名刺管理の要件が定義されており、ユーザ側はサービス導入後すぐに使うことができる。いっぽう、Salesforceはお客様との対話から得られる情報をどのような切り口で記録するか（課題、製品など）をユーザ側で決める必要がある。本章では、Salesforceの導入において発生した問題とその対応を解説する。

## 3. Salesforce導入の問題と対応

Salesforceを導入するにあたり、「全社プロジェクトの推進（事業部門をまたがる情報共有）」、「システム構築」、「導入後の定着化」の3点で問題が発生した。その具体的な問題と解決方法に関して解説する。

### 3.1 全社プロジェクトの推進

当社には、事業部門をまたいだプロジェクトを実行した事例は少なく、事業部門を巻き込み、共同でプロジェクトを推進することに苦慮した。本節では、事業部門から提起された課題とその解決方法について記載する。

Salesforceはお客様との接点が多い営業職が利用することを基本と考えた。はじめに業務の目的とそれを実現するために必要な機能や条件である「業務要件」とシステムに必要な仕様となる「システム要件」の検討を開始した。素材・機械・電力と異なるビジネスモデルを有する当社においては、事業部門によって営業スタイルが異なる。要件を共通化していくためにはそれぞれの特性を正確に把握する必要がある。全事業部門の営業を統括する組織を新設する代わりに、事業部門を巻きこんだバーチャル組織を検討した。

プロジェクトの推進には、①プロジェクトでの決定事項を事業部門内で指示命令が適切にできる人材、②各事業における営業経験が豊富な人材が必要であると考えた。①に関して、当社の場合、事業部門の指示命令系統は事業部門内である事が大半である。そのため、各事業部門長を本プロジェクトの責任者とした。また、事業部

門長が、事業部門内において本活動を推進する役割を担う推進リーダーを任命することで、責任者を通じて指示命令を出せる体制とした。②に関しては、推進リーダーが各ユニットから業務設計に知見が深く、事業部門内の営業担当の意見を取りまとめることができる調整能力に長けた営業職を指名した。これにより、業務要件・システム要件の検討において、案件の管理に必要な項目はもちろんのこと、実際の業務、例えば定例会議に必要な項目を過不足なく要件として抽出することができた。加えて、的確に事業部門内で調整がされ、業務要件の検討を滞りなく進めることができた。

### 3.2 システム構築

システム構築で苦慮したポイントは、「プログラム開発の最小化」、「情報のアクセス制限」、「全事業部門で共通のシステム」、の3点である。次項以降でそれぞれの課題とその対策を詳細に記載する。

#### 3.2.1 プログラム開発の最小化

本システムの構築にあたり、プログラム開発は最小限にする方針とした。以下に理由を2点示す。1点目は、Salesforceは、ユーザから寄せられた要望や最新の技術動向に基づいて最適な機能にアップデートし続ける特長がある。これによって、例えば、昨今、目覚ましく成長するAIに代表される最新技術が導入され、業務変革に大きく貢献するメリットを享受できる。これは自社でシステムを開発すると得られないメリットである。しかし、プログラム開発した機能はアップデート対象にならないことが多く、そのメリットを享受できない。2点目は、各事業部門で機能を拡張する際、開発したプログラムであれば、個別に機能を拡張する手段を検討する必要があるため、時間を要する。お客様を取り巻く環境は刻一刻と変化しており、それに伴ってお客様からの要望に対応するために機能拡張が必要となった際に、迅速に完了させることができない。そのため、プログラム開発は可能な限り排除し、Salesforceの基本機能を最大限に活用する方針とすることで柔軟に機能拡張が行えるようにした。プログラム開発を最小にするための具体的な問題として、要件定義の中でSalesforceの基本機能では、事業部門の営業職が提示した要望を完全には実現できない場合がある。このとき、単に事業部門が要望した機能が実現できないことをそのまま伝え、あるいは制限事項を示すだけでなく、そもそもの要件事項の見直しを行った。ほとんどの場合は基本機能の組み合わせで、実現したかった要件を満たすことができた。一例として、Salesforceに登録した情報を関係者にメールで発信する機能を要望されたケースを以下に示す。Salesforceの基本機能には、あるユーザから別のユーザに対して能動的にメールを配信する機能がない。いっぽう、Salesforceには、自分が欲しい情報を検索する条件を設定し、該当する情報が登録されると自動で通知される機能（レポート機能）がある。当社では、通常、情報発信者が能動的に関係者に情報を発信することがほとんどであり、この機能では営業担当者の要望を完全には満足しない。しかし、レポート機能で条件を設定すれば、部下から上司へ

の週次報告などの業務を削減できる効果がある。また、その条件設定も操作を習得すれば容易にできることをデモンストレーションし、双方が納得する形でプログラム開発ではなく、基本機能（レポート機能）を活用することができた。これらの活動を通じ、単なるシステム構築ではなく、営業担当の既存業務を変革するマインドの醸成につなげることができた。このように、実際の活動は、基本機能を組み合わせながらその要求を満足する代替案を事業部門に提案した。具体的には、サンプル画面を作成、提示して、事業部門の営業担当者に確認をとりながら、双方で徹底的に協議をした。一貫してツールの基本機能を活用する方針が進めることで、先述のような効果を生んでいる。実際の画面を営業担当者に確認すると、基本機能でも十分に必要な機能を満足できる場合が多い。この進め方により、営業担当者システム開発者の双方が納得する形でプログラム開発を最小限に抑えることができた。結果として、後述するアクセス制御を除き、機能全体の約9割を基本機能の組み合わせで実現することができた。

#### 3.2.2 情報のアクセス制御

お客様から得られる情報には、お客様との契約の中で社内でも開示範囲が限定されている情報や、行政機関などから入手した機微な情報などを含むことがある。つまり、全社員がアクセス可能な情報とアクセス範囲を限定する必要がある情報が混在しているため、事業部門を横断して情報を共有することを目的としていながら、情報を適切な範囲にしか開示しないという相反する仕組みも構築する必要がある。前述のとおり、プログラム開発は最小限にする方針としていたが、情報のアクセス制御はSalesforceの基本機能だけでは実現が難しい。このため、例外的にプログラム開発を行わざるを得ない部分であった。システム構築で最も苦勞し、工夫を凝らした点でもある。本稿では代表的な対応策を2例紹介する。

一つ目は、データの格納先（テーブル）を全社員に共有する情報と制限する情報で分けし、情報の項目単位にアクセス制御ができる仕様にしたことである。お客様から伺った情報のうち、秘密にすべき情報は案件ごとに異なる。Salesforceの基本機能は、すべての案件の特定の項目に一律の条件でアクセス制御をすることは基本機能で可能である。しかし、案件ごとにアクセス制限を行う項目を柔軟に変化させるような高度なアクセス制御は基本機能では実現が難しい仕様である。そのため、例えば、あるお客様から、製品・サービスの利用状況に関してヒアリングした情報を関係者だけに制限する必要がある場合、お客様からヒアリングした製品・サービスの利用状況に関して、共有範囲を関係者に限定しなければならない。この手段として、製品・サービスの利用状況に関する情報は「アクセスを制限する情報を格納するテーブル（以下、非公開テーブル）」に移行し、そのほかの情報を「全社員に共有する情報を格納するテーブル（以下、公開テーブル）」に移行する仕組みを構築した。この仕組みを実現するポイントは、この二つのテーブルに格納した情報を同一の情報とみなすように関連付けを行

うことである。関連付けを行う仕組みはSalesforceの基本機能にはないため、開発をする必要がある。この関連付けをしないと、ある情報を公開から非公開に変更する場合にそれぞれのテーブルが同期せず、情報を損失する、適切なアクセス制限ができないなど問題が生じる。また、ユーザが閲覧するときには、一つの案件の情報として統合し、アクセス可能な情報はその詳細な内容が閲覧できる必要がある。閲覧権限がない情報には閲覧制限が掛かっているということが分かるデータの見せ方をするためにも二つのテーブルの関連付けは必要である。この開発をすることで、公開テーブルは全社員にアクセス権限を付与することで情報共有が可能になり、非公開テーブルは、項目単位で適切な範囲にアクセス制限をかけることが可能となる。

二つ目の例は、何らかのプロジェクトが立ち上がり、お客様と秘密保持契約を締結するなど情報を開示できる範囲が決まっている場合、情報を閲覧可能なユーザのみで構成する「チーム」を作成できる仕様にしたことである。Salesforceの基本機能にチームを作成する機能があり、一緒に案件を担当するメンバーをチームに指名することで、案件の進捗状況を管理しやすくする機能である。この機能を応用して、情報のアクセスコントロールに活用した。特定のメンバーだけに開示すべき案件の「チーム」にメンバーを追加すると、指定されたメンバーとその上位職だけに情報を制限する仕様を開発した。これらのプログラム開発と基本機能を組み合わせることで、適切なアクセス制御ができるシステムを実現し、事業をまたいだ情報共有とおお客様の個人情報や秘密情報の管理を両立するシステムとすることができた。また、今後のバージョンアップや拡張性への影響を最小限に抑えるために、基本機能を組み合わせることを基本とし、影響が少ない箇所のみプログラム開発を施している。

### 3.2.3 全事業部門で共通のシステム

全事業が同じシステムに情報を入力・集約するには、情報の項目の整合性をとる必要がある。事業によってビジネススタイル、製品・サービスが異なり、各事業で必要な情報が異なるため、全事業で共通した入力項目を抽出するのもに苦慮した。また、共通項目以外に各事業が個別で入力が必要な項目もある。これらの項目を羅列しただけでは、ほかの事業部門が独自に必要な項目がノイズとなり、ユーザの利便性を損なう可能性がある。この課題に対する解決策として、はじめに、全事業部門の共有項目と事業部門が独自に追加したい項目を切り分けて整理した。例えば、お客様との活動において、どの事業部門であっても、お客様の企業名や担当者名は入力が必要であるので「共通項目」とした。いっぽう、各事業部門に特有な情報を管理したい場合、例えば、製品番号、材質、販売先の業界などは事業によって異なる。これらは、それぞれの事業部門の「独自項目」として整理した。システムへの反映として「共通項目」は全ユーザにアクセス権限を付与して表示した。「独自項目」はユーザ情報から所属している事業部門を判定し、その事業

部門の「独自項目」だけを表示する仕組みにすることでノイズを低減し、ユーザの利便性を高めた。これにより、一つのシステムで事業を越えて共有すべき「共通項目」と各事業部門に必要な「独自項目」を漏れなく入力することができ、お客様対応変革プロジェクトで掲げる目的を実現しつつ、事業部門の業務システムとして成立させることが可能となった。

### 3.3 導入後の定着化

当社では、各事業部門の業務課題を解決するために各事業部門でシステムを構築するケースが多い。そのようなシステムは業務フローに組み込まれた設計になるため、システム利用の定着がしやすい。Salesforceは、事業部門をまたいで共有するシステムであるが、業務フローを考慮したシステムではない。そのため、メールやチャットのような既存のツールを継続して使用する可能性がある。したがって、各社員に本プロジェクトの目的を理解いただいた上で既存ツールとの使い分けを、事務局としてガイドしていく必要がある。現段階では、詳細なプランを検討中であるため途中段階の構想を記載する。主な施策として、エバンジェリストと呼ばれる事業部門の活用推進リーダーの任命、業務への組み込みを検討しており、それぞれの状況を説明する。エバンジェリストとは、各事業部門内でSalesforceの効果的な活用方法の検討やその啓蒙（けいもう）、また、事業部門内でシステム改善要望を取りまとめる役割を担う。各事業部門から、営業経験が豊富で周囲の社員を巻き込むことができる影響力のある社員をエバンジェリストとして任命する。Salesforceの機能や効果的に活用する方法、ポイントなどを事業部門内で伝道する役割を担うことで、各事業部門の状況を踏まえた活用推進ができると期待している。いっぽう、エバンジェリストに対して、ユーザからの質問や不満が集中してしまうことも想定し、エバンジェリストの悩みや活用方法を相談し合うコミュニティを設定するなどエバンジェリストをフォローする体制の構築も検討している。例えば、ある事業部門のエバンジェリストが悩みを投稿すると事務局もしくはほかの事業部門のエバンジェリストが回答する仕組みが構築できれば、悩みを共有するだけでなく、早期解決につながる可能性が高くなると考えている。つぎに、「業務への組み込み」では、営業業務をSalesforceの機能で最大限に代替することを検討している。例えば、営業会議を開催する際、資料作成に多くの時間を要している。Salesforceにお客様情報が蓄積できていればSalesforceのレポート機能やダッシュボード機能を活用することで資料作成の時間を短縮できる。このように、Salesforceで日常の業務を効率的に行えるような仕掛けの検討を進め、議論に時間を使う業務スタイルにシフトしていく。当社では、定着化がプロジェクト成功の鍵になると考えており、例えば、お客様への訪問頻度に応じて社員を分類し、システムの利用状況をモニタリングする。具体的には、毎週、お客様を訪問する社員は最低でも週に1回はログイン、情報を入力することを指標とし、その達成可否を確認していく。未達成の場合、システム利用に関する課題をフ

フォローし、システム開発しない範囲で改善を図っていく。また、Salesforceに入力した情報を指定した条件で一覧にする「レポート機能」や情報の件数を可視化する「ダッシュボード機能」などを設けた。高度に情報を活用して業務を行う習熟度が高いユーザーをシステムログなどでピックアップし、応用した活用方法の教育を開催するなど継続した活動にしていく。

#### 4. 今後の展望

Salesforceは2024年2月に一部の事業部門、2024年4月から全事業部門で利用を開始した。本章では、Salesforceを使うことによる短期的な展望と中長期的な展望について記載する。

##### 4.1 短期的な展望

本システムを導入した目的は新たな価値創造であるが、3.3節に記載した通り、業務への組み込みを行い、ユーザーがシステムを活用することを目指し、それにより確実に情報を蓄積することを狙っている。そのため、短期的な展望は、業務で本システムが活用され、情報管理が共通基盤で出来ることによる効率的な会議や報告運用ができる状態を目指す。

##### 4.2 中長期的な展望

当社の多様なシーズを生かした新たな提案・社会課題の解決を推進していく。具体的には、「お客様情報の共

有・利活用」以外の「最新外部情報（2次情報）の提供連携」、「自社製品・サービス見える化」を推進し、3Cの交点を探る事で、当社が新たな価値を創出できる領域を見つけ出し、社会課題の解決につなげていく。また、多様な製品・技術を抱える有機的に結合している企業体としての能力を最大限生かしてお客様の課題を総合的に解決できるソリューションプロバイダを目指す。

**むすび**=本稿では、事業部門・ユニットを横断して、お客様情報を共有するための基盤を構築するに至った経緯や課題、その解決方法、また、今後の展望について解説した。短期的には、情報管理を一か所に集約することによる効率的な会議や報告運用ができる状態を目指す。中長期的には、お客様から得た一次情報と外部から得た二次情報双方から必要な情報を抽出できる仕組みや自社製品・サービスを網羅的に把握できる仕組みを構築する。こうすることで、お客様に最適なソリューションの提案、新たな価値の創出を実現し、社会課題の解決に挑み続けていく。

#### 参考文献

- 1) Salesforce.公式ホームページ.  
<https://www.salesforce.com/jp/campaign/worlds-number-one-CRM/> (参照2024-04-12)

(解説)

# KOBELCO 未来協働研究所が目指すもの

友近信行\*<sup>1</sup> (博士(情報学))

## Aim of KOBELCO Future Pioneering Co-Creation Research Center

Dr. Nobuyuki TOMOCHIKA

### 要旨

KOBELCOが有する多種多様なものづくりの経験と、大阪大学の先端技術・科学力との掛け合わせによる新規事業創出を目的に設立したKOBELCO未来協働研究所について概説した。本研究所は、産学連携の大学組織でありながら、設立当初からソリューション事業の創出を目指している点が特徴であり、KOBELCOのマテリアリティやDX戦略、大阪大学の中長期的な経営ビジョンとも整合している。最初のプロジェクトとして、切削加工とプレス成形加工の2分野での事業開発とソリューション開発に着手しているが、その理由や共創プロセスについても触れた。また、KOBELCOの既存事業のビジネスモデル変革やDX推進への相乗効果を期待として述べた。

### Abstract

This article provides an overview of the KOBELCO Future Pioneering Co-Creation Research Center (KFPC), which has been established to create new businesses by combining KOBELCO's diverse manufacturing experience with Osaka University's advanced technology and scientific capabilities. While the KFPC is a university organization for industry-academia collaboration, it has been focused on creating solution businesses since its establishment. This is a unique characteristic of the KFPC and aligns with KOBELCO's materiality and DX strategy, as well as Osaka University's medium- to long-term management vision. The first projects involve business and solution development in the fields of cutting processing and press forming, and the article also discusses the reasons for these fields and the co-creation process. Additionally, the article discusses the possibility of synergistic effects for KOBELCO's existing business model transformation and DX promotion.

### 検索用キーワード

KOBELCO 未来協働研究所, 大阪大学, 産学連携, 新規事業創出, ソリューション事業, デジタル化, DX, 部品産業, 切削加工, プレス成形加工

まえがき=ものづくり産業にとって、現場で働く人々の成長促進と開発・製造プロセスの技術革新によるQCD改善は継続的に取り組むべき必須の活動である。近年、少子高齢化による労働力減少が一段と進む中、脱炭素化など急激な事業環境変化にも直面しており、これら必須の活動はもちろん、ビジネスモデルの転換も含めた新たな価値創造の重要性はさらに増している。

そこで、ものづくりを支え変革に導くためのソリューションを産学連携で共創し、社会実装を目指す組織として、2022年10月に大阪大学産業科学研究所(以下「産研」と表記)の中に、KOBELCO未来協働研究所(以下「未来研」と表記)を設立した。

本稿では、まず未来研の概要と設立の背景・目的を述べる。また、当社と大阪大学それぞれの意義を示し、未来研が共同研究の延長の産学連携とは異なることを強調する。そして、事業創出に向けた最初のターゲット分野とプロジェクトの内容、未来研の共創プロセスに触れる。最後に、未来研の目指すものと期待を述べる。

## 1. KOBELCO 未来協働研究所とは

未来研は「大阪大学×KOBELCO」で新たなソリューションを事業として創出する共創の場である。大阪大

学のAIをはじめとする先端技術・科学力と、当社グループの多種多様でリアルなものづくり経験との掛け合わせで、主に製造業が抱える課題を解決するソリューションを生み出し、事業を立ち上げて社会に実装していくことを目指している。ビジョン・ミッションは図1の通りで、3年間で新事業の核となるソリューションを創出することを目標としている。

ここで、大阪大学の協働研究所について説明する<sup>1)</sup>。協働研究所とは、企業から資金や研究者を受け入れて大阪大学の組織としてキャンパス内に研究拠点を設置し、産学連携で共同研究を推進する制度である。大学内に独立した研究拠点を設けることで、大阪大学の研究者と柔軟かつ迅速に共創できることが特徴である。2023年10月現在、24の協働研究所が設置されている。

通常、当社のような製造業は、工学研究科の中に要素技術差別化のための協働研究所を設置するような例が多い。しかし、未来研は産研という様々な学術領域の横断的な機能を持つ附置研究所の中に拠点を構え、設立当初から新規事業創出に軸足を置き、社会に役立つソリューションの共創を目標に掲げている点が特徴である。

未来研の体制は、産研の第1研究部門知能推論分野(現関西大学)の鷲尾隆教授が所長を務め、筆者が大阪大学

\*<sup>1</sup> 大阪大学 KOBELCO 未来協働研究所



図1 KOBELCO未来協働研究所のビジョンとミッション  
Fig.1 Vision and mission of the KOBELCO Future Pioneering Co-Creation Research Center : KFPC

に特任教授（常勤）として出向する形で副所長を務めている。大阪大学からは主にAI・機械学習を専門とする教員が5名前後、当社からは技術開発本部員を中心に約20名が関与しており、うち4名が未来研に駐在する形で活動している。

## 2. 設立の背景と意義

### 2.1 設立の背景

未来研設立の背景としては以下が挙げられる。

- ① 当社の持続的成長のためには、既存事業の延長線上での成長だけでなく、新たな価値を創造し新規事業の芽を創出し続けることが必要なこと。
- ② 新たな価値創造には、社外の多様な組織・人材との積極的な連携と協働が不可欠であること。
- ③ 幅広く多様な組織・人材と共創するには、総合大学の持つ求心力や中立性が有効と考えられること。

加えて、素材から機械まで多様な事業を営む企業としての当社は、広範な産業分野におけるリアルなものづくりを経験し、現場・現物・現実の様々な課題に対して真摯に向き合い幅広いソリューションを開発し、事業課題の解決に適用してきた<sup>2)</sup>。また、素材の有効活用や付加価値向上、機械装置の生産活動のために、社内はもちろん、サプライチェーンの関係先にもソリューションを提供してきた。そして、それらの結果として、多種多様なコア技術を蓄積してきた<sup>3)</sup>。これらのソリューションや技術をさらに広範な産業分野に役立てることで社会の発展に貢献しつつ、当社の持続的成長にも寄与できるのではないかと、という想いが一つの動機となり未来研設立につながった。

### 2.2 KOBELCOにとっての意義

当社グループはサステナビリティ経営を推進しており、事業活動を通じて社会課題を解決することで、持続的な成長と中長期的な企業価値向上を追求している<sup>4)</sup>。「KOBELCOの使命・存在意義」にも「個性と技術を活かし合い、社会課題の解決に挑みつづける。」とあるように、多事業領域で培ってきた資産を、当社の組織や常

識の枠にとらわれず、社会課題の解決に向けて新規事業を共創する場が未来研である。

また、未来研は当社グループのマテリアリティの一つ「人と技術でつなぐ未来へのソリューション提供」にも沿ったものである。大学というインタフェースを通して多種多様な人材・企業・団体ともつながりソリューションを共創および実証することに意義がある。

さらには、当社グループのDX戦略のSTEP3「DXによる“KOBELCOらしさ”の追求」の中で「新たな価値創造のための仕組み構築」を掲げており、未来研は新たな価値共創の仕組みの一つとしても位置付けられる。以上のように、未来研は、当社グループのサステナビリティ経営の中で、マテリアリティやDX戦略とも密接に関連した活動となっている。

### 2.3 大阪大学との連携の経緯と意義

1931年設立の大阪大学は、日本を代表する総合大学の一つであり、11学部・15研究科・6附置研究所を有し、約3,300名の教員<sup>5)</sup>が所属している。産学連携先の選定において、大学の規模や専門技術の網羅性は重要であるが、大阪大学は他大学に率先して全学で組織的に企業との研究連携体制を確立してきたこと<sup>6)</sup>、「Industry on Campus」というコンセプトが産学連携制度のベースにあること<sup>7)</sup>は一つの判断材料となった。

加えて、

- ① 大学設立後のわずか8年後の1939年に産研を立ち上げ、産業に必要な自然科学の基礎と応用に関する研究を推進し、産業の発展に貢献してきたこと。
  - ② ソリューション共創のキーとなるAI・機械学習技術分野に強い研究者が一定数いること。
  - ③ 未来研所長の鷲尾隆教授とは10年以上前から技術指導・共同研究などで関係を構築してきたこと。
- など種々の特徴・背景があり、産研を拠点に未来研を設置することとなった。

大阪大学は、中長期的な経営ビジョン「OUマスタープラン2027」<sup>8)</sup>にて「社会を創造する」大学への転換を宣言している。研究成果を社会実装することで新たな課

題を発掘し、その解決に向けて基礎研究の深化と新研究領域の開拓が進み、得られた成果をさらに社会実装することで社会の創造と変革をリードするという「OUエコシステム」の実現を掲げている。未来研の取り組みは本構想とも合致するものであり、大阪大学にとっても意義ある活動になると期待している。

### 3. KOBELCO 未来協働研究所の活動

#### 3.1 最初のターゲット領域

未来研にて新規事業創出に取り組むにあたり、最初のターゲット領域はどこかを検討した。

図2は、経済産業省が2021年8月に公表した産業別統計表のデータに基づき作成した図表である。国内の産業別事業所数とその中で少人数事業所の占める割合をサプライチェーンの流れに沿ってネットワーク状に示したもので、図の左部分が素材産業、中央部分が部品産業(加工機械産業も含む)、右部分が機械製品産業となっている。

ネットワークの各ノードに示した産業別の数値のうち、左側の黒文字の数値は、従業者4人以上の事業所の数である。また、その右側の白抜き文字の数値は、従業者4人以上の事業所のうち100人未満の事業所の占める割合(すなわち比較的少人数の事業所の割合)を百分率で示したものである。

図から分かるように、左側の素材産業と右側の機械製品産業は事業所の数も小さく、従業者100人未満の事業所の割合も中央部に比べて小さい。すなわち、規模の大きな企業が相対的に多い。いっぽう、中央の部品産業は、事業所の数が桁違いに大きく、従業者100人未満の事業所の割合が95%以上と顕著に大きい。つまり、部品産業は規模の小さな企業が大半を占めており、素材から機

械製品を生み出すサプライチェーンの中で「ものづくりの多様性を担保する役割」を果たしている。

さて、機械製品産業においては、自動車産業に代表されるように機能やデザインの多様化が進んでいる。また、素材産業においても、機械製品の多様な機能やデザイン実現への要請に応える形で多様な素材の造り分けが進むとともに、脱炭素化や環境負荷低減に向けて使用原材料の変化が起きている。そして、それらサプライチェーン上流と下流の変化のしわ寄せが、中央部の部品産業に来る構造となっている。今後さらに上記の変化や労働人口低減が加速すると、ものづくりの多様性を担保している部品産業が立ち行かなくなり、日本のものづくり全体に大きな影響を与えかねない。

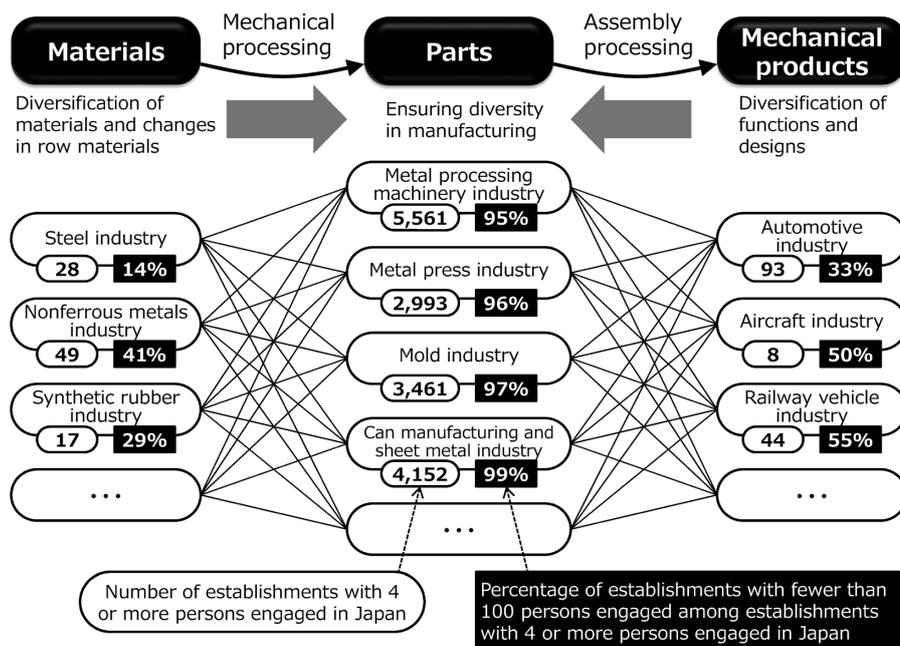
そこで、未来研では、まず部品産業に役立つソリューションの創造に着手することにした。

#### 3.2 最初に取り組むプロジェクト

部品加工分野において、当社で技術の蓄積やソリューション開発の実績があり、新規事業の核となる可能性のある分野として金属加工分野<sup>10)</sup>に狙いを定めた。具体的には、切削加工とプレス成形加工の二つを最初のプロジェクトに定めた。

切削加工プロジェクトでは、社内で実績を重ねた工具摩耗予測技術やびびり振動予測技術などを核に、切削条件最適化や加工工程全体の進化と成長に役立つソリューションを創出する。プレス成形加工プロジェクトでは、金型設計や手直し工程におけるシミュレーション活用や技能継承に役立つソリューションの創出に取り組んでいる。

両プロジェクトとも中堅中小企業の多い分野であるため、単一のアプリケーション提供に留まらず、技能継承や人づくりを絡めたソリューションが有効と考えてい



Calculated based on the METI report industry of the 2020 census

図2 国内産業別の事業所数(従業者4人以上)、および従業者4人以上の事業所のうち100人未満の事業所の割合  
Fig.2 Number of establishments and percentage of establishments with fewer than 100 persons engaged among establishments with 4 or more persons engaged at each industry in Japan

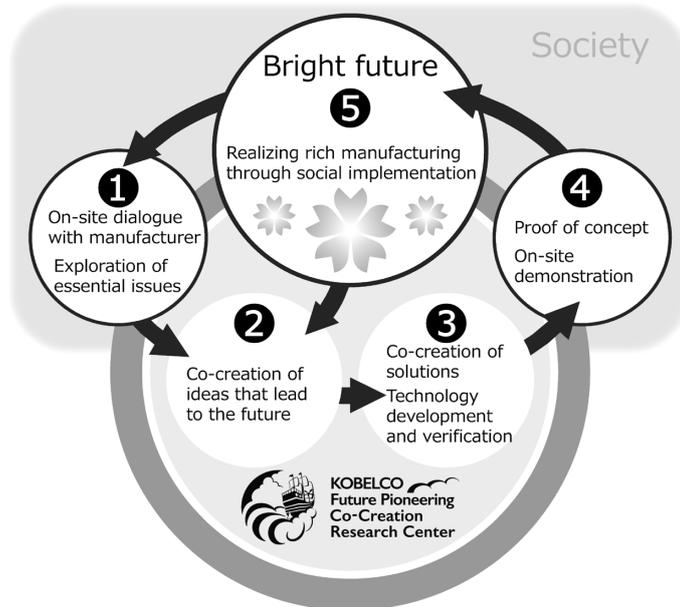


図3 KOBELCO 未来協働研究所の共創プロセス  
Fig.3 Co-creation process at the KFPC

る。加えて、素材から最終機械製品までのサプライチェーンを踏まえた上で、新たな価値につながるソリューションを目指している。

### 3.3 共創プロセス

ここで、未来研の共創プロセスを図3に示す。以下の五つのフェーズで活動を回していく。

- ① 本質的な課題（仮説）の探索  
経営者や現場責任者などとの対話やWEB調査などを通じて困りごとを把握し、それらのつながりや構造を分析することで、背景にある本質的な課題を探索する。この時点では真の課題かどうかは不明で仮説にすぎない。
- ② 未来に導くアイデアの共創  
フェーズ①での探索結果と実現したい未来の姿とから、「こんなことが価値になるのではないか」という仮説と、ビジネスモデルを含めたソリューションのアイデアを共創する。
- ③ ソリューションの共創および技術開発・検証  
フェーズ②のアイデアを実現するためのアプリケーションを共創する。そのために必要な技術があれば、その開発や検証も行う。
- ④ 実際の現場での試用・検証  
実証の賛同を得たパートナー企業とソリューションを試行し、想定どおりの価値を生みそうか、あるいは、新たな価値創造への気づきが得られないか検証する。
- ⑤ 社会実装による豊かなものづくりの実現  
ソリューションを広く社会に提供可能なように事業会社を立ち上げ、サービスの提供とアップデートを繰り返すことで、ものづくりの進化と発展に貢献していく。

なお、実際には①～⑤と一方向に進むのではなく、試行錯誤を繰り返しながらアジャイルに共創を進めていく

ことになる。

## 4. 今後の展望と期待

図4に示すように、当社の既存事業ではモノ売りに代表される従来型のビジネスモデルが主流である。当社グループのDX戦略においても、左下の領域を中心に地に足を付けて取り組んでいる状態であり、左上の領域にビジネスを転換するための経験やノウハウはまだ少ない。いっぽう、未来研は、既存事業で培ったソリューションや技術資産を、大阪大学をはじめとするパートナーとの共創を通して新たな価値に転換し、ビジネスモデルの創造と合わせて右上の領域での新規事業（デジタルソリューション事業）を創出することに取り組んでいる。

したがって、未来研の経験をいかに早く既存事業にも還元して役立てられるかもポイントとなる。とくに、大学に拠点を置く出島組織としての長所を活かし、以下に意識して取り組んでいく。

- ① 社外資源との掛け合わせと小回りの良さを追求する。
- ② 小さく素早く試行して提供先の反応を見ながら価値やビジネスモデル、ソリューションを柔軟に見直す。
- ③ 小さな成功を積み重ね、デジタルソリューション事業ならではの梃子（てこ）を効かせた事業拡大に挑戦する。

こういった実践と経験を蓄積し、そのプロセスで培った組織文化や成長した人材と合わせて既存事業に還元することで多方面での化学反応を起こし、当社が未来社会に提供できる価値をさらに拡大することを期待する。

未来研の取り組みは、2024年1月時点でソリューションとビジネスモデルの第一案を創った段階である。まだ手探りで試行錯誤の繰り返しではあるが、最初の成功事例創出に向け実践を積み重ねていくつもりである。

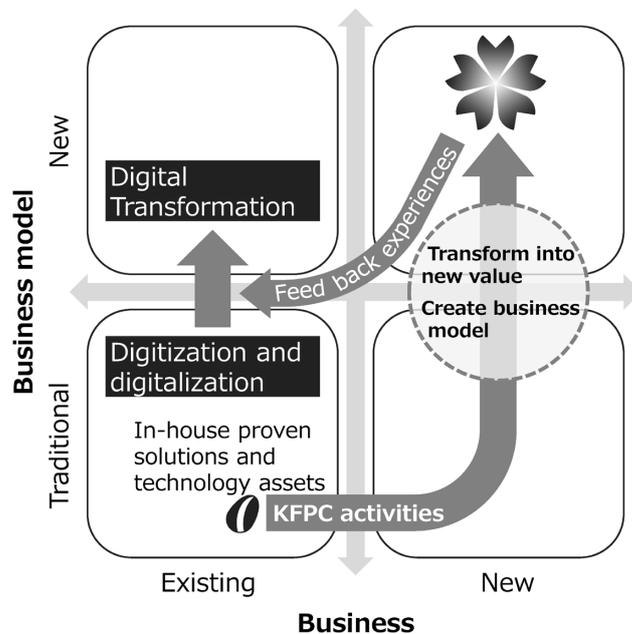


図4 KOBELCO 未来協働研究所の目指すものと果たすべき役割  
Fig.4 The KFPC's aim and role to play

むすび=本稿では、未来研の設立背景や目的、活動概要、今後の期待などについて述べた。大学との共創・協働で新規事業を創出するというチャレンジングな取り組みであるため、当社内でも大学内でもぶつかる壁は多い。しかし、一つひとつ乗り越えることで学習し、新たな景色と可能性が見えるようになってきている。中堅中小製造業との意見交換や業界団体との対話においても本活動への期待の声は予想以上に大きい。どのような価値を創造できるか、どのような実現手段があるか、大阪大学とも緊張感を持って毎週のように議論と協働を重ねてきている。

今後は、試作、試行・検証、ピボットのループを回しながらより実践的な取り組みにシフトするが、本活動が当社におけるDX加速の一つの契機となり、未来社会においてもインパクトある価値を創造し続けられる姿を目指していきたい。

#### 参考文献

- 1) 大阪大学共創機構. 協働研究所.  
[https://www.ccb.osaka-u.ac.jp/service/soshiki\\_kyodo\\_kenkyujo/](https://www.ccb.osaka-u.ac.jp/service/soshiki_kyodo_kenkyujo/), (参照2024-01-31).
- 2) 後藤有一郎. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.68, No.2, p.1-2.
- 3) 後藤有一郎. R&D神戸製鋼技報. 2024, Vol.72, No.2, p.1-2.
- 4) KOBELCOグループ 統合報告書. 2023, p.7.
- 5) 大阪大学. 教員に関する基礎データ.  
[https://www.osaka-u.ac.jp/ja/guide/outline/data/teacher\\_data](https://www.osaka-u.ac.jp/ja/guide/outline/data/teacher_data), (参照2024-01-31).
- 6) 杉山昌章. まてりあ. 2020, Vol.59, No.9, p.481-485.
- 7) 中野 節ほか. 産学連携学. 2015, Vol.12, No.1, p.10-16.
- 8) 大阪大学. OUマスタープラン2027.  
[https://www.osaka-u.ac.jp/ja/guide/strategy/ou\\_masterplan2027](https://www.osaka-u.ac.jp/ja/guide/strategy/ou_masterplan2027), (参照2024-01-31).
- 9) 経済産業省. 工業統計調査2020年確報産業別統計表.  
<https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kougyo/result-2/r02/kakuho/sangyo/index.html>, (参照2024-01-31).
- 10) 赤澤浩一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2024, Vol.72, No.2, p.68-73.

# R&D 神戸製鋼技報掲載 DXでめざすKOBELCOらしさ関連文献一覧表 (Vol.63, No.1~Vol.72, No.2)

## Papers on Advanced Technologies for Digital Transformation to Embody KOBELCO's Unique Value in R&D Kobe Steel Engineering Reports (Vol.63, No.1~Vol.72, No.2)

	巻/号
●KOBELCOのマテリアリティと価値創造を支える21のコア技術……………	72/2
21 Core Technologies Supporting KOBELCO's Materiality and Value Creation	
●KOBELCOのマテリアリティと価値創造を支える21のコア技術特集の発刊にあたって…………… 後藤有一郎	72/2
21 Core Technologies Supporting KOBELCO's Materiality and Value Creation Yuichiro GOTO	
●安全・安心で持続可能な社会を支える新素材の創出に貢献する金属組織制御技術…………… 村上俊夫	72/2
Metallographic Structure Control Technology Contributing to Development of New Metallic Materials to Meet Social Demands Dr. Toshio MURAKAMI	
●素材開発を支える原子スケールの物理分析解析技術…………… 田内裕基ほか	72/2
Atomic-scale Physical Analysis for Material Development Yuki TAUCHI et al.	
●KOBELCOのものづくりを支える高度計測技術…………… 迫田尚和ほか	72/2
Advanced Measurement Technology Supporting KOBELCO's Manufacturing Naokazu SAKODA et al.	
●社会の安全・安心に貢献する構造・材料強度に関する予測・評価技術…………… 内藤純也ほか	72/2
Predictive and Evaluative Technologies Based on Structural Mechanics and Strength of Materials for Structural Failures to the Safety of Society Dr. Junya NAITO et al.	
●社会に安全を届けるものづくり技術－金属加工技術－…………… 赤澤浩一ほか	72/2
Manufacturing Technology Delivering Safety to Society. Metal Processing Technology Dr. Koichi AKAZAWA et al.	
●変化し続けるものづくりを支えるプロセス制御…………… 前田知幸ほか	72/2
Process Control Supporting Ever-changing Manufacturing Dr. Tomoyuki MAEDA et al.	
●複雑な「ものづくり」をコントロールするための意思決定支援技術（OR技術）…………… 池田英生ほか	72/2
Decision Support Technology for Controlling Complex Manufacturing (Operations Research Technology) Hideo IKEDA et al.	
●人とともに発展するデータ駆動科学・AIの応用技術…………… 片山 亮ほか	72/2
Application Technologies of Data-driven Science and AI that Evolve Alongside Humans Ryo KATAYAMA et al.	
●ビジネスモデル変革実現に貢献するサービス化技術…………… 宗 陽一郎	72/2
Servicing Technology Contributing to the Realization of Business Model Transformation Youichirou SOU	
●溶接コア技術の開発と社会実装…………… 清水弘之	72/2
Development and Practical Applications of Welding Core Technologies Dr. Hiroyuki SHIMIZU	
●中厚板向け溶接ロボットシステムと前工程自動化新技術…………… 長島 稔ほか	72/1
Medium-to-thick Plate Welding Robot System and New Automated Pre-process Technology Minoru NAGASHIMA et al.	
●溶接ロボットシステム導入を推進するDX技術…………… 福永敦史ほか	72/1
Digital Transformation (DX) Technology to Promote Adoption of Welding Robot Systems Atsushi FUKUNAGA et al.	
●鉄骨溶接ロボットシステムの新商品紹介…………… 戸川貴雄ほか	72/1
Robotic Welding System with New Equipment for Steel Structures Takao TOGAWA et al.	
●溶接材料開発におけるMI技術の適用…………… 谷口元一ほか	72/1
Application of MI Technology to Process of Welding Material Development Genichi TANIGUCHI et al.	
●鋼板溶接熱影響部の相変態モデル構築とじん性予測…………… 井元雅弘ほか	71/1
Construction of Phase Transformation Model for Heat-affected Zone of Steel Plate Welds and Toughness Prediction Masahiro INOMOTO et al.	

- IoT(Internet of Things)を用いた汎用圧縮機のクラウドサービス「Kobelink™」…………… 森本光孝 70/1  
IoT-based Cloud Service “Kobelink™” for Standard Compressors Mitsutaka MORIMOTO
- 上工程集約に伴う加古川製鉄所第2分塊工場の増強 …………… 多比良知秀ほか 69/2  
Expansion of No.2 Bloom Mill of Kakogawa Works Associated with Consolidation of Upstream Operations at Kakogawa and Kobe Works Tomohide TAIRA et al.
- 切削シミュレーションを活用した棒鋼材料の切削条件設計技術…………… 山本雄也ほか 69/1  
Cutting Condition Designing Technique Based on Cutting Simulation for Wires and Rods Yuya YAMAMOTO et al.
- 自動車車体へのアルミ合金板適用に向けたソリューション技術…………… 赤崎圭輔 69/1  
Solution Technology for Applying Aluminum Alloy Sheet to Automobile Bodies Keisuke AKASAKI
- 自動車車体のマルチマテリアル化とそれを支える異材接合技術…………… 内藤純也ほか 69/1  
Multi-materialization of Automotive Body and Dissimilar Joining Technology to Realize the use of Multi-material Dr. Junya NAITO et al.
- ICT活用 …………… 68/2  
Utilization of ICT
- ICT活用特集の発刊にあたって …………… 後藤有一郎 68/2  
Progress of ICT Utilization in Kobe Steel Yuichiro GOTO
- 高炉吹き抜け予測方法…………… 加茂和史ほか 68/2  
Method for Predicting Gas Channeling in Blast Furnace Kazufumi KAMO et al.
- 溶接ロボットシステムにおけるICT活用 …………… 小池 武ほか 68/2  
Applications of ICT to Robot Welding System Takeshi KOIKE et al.
- 物流シミュレーション技術の開発…………… 岩谷敏治 68/2  
Development of Logistics Simulation Technology Dr. Toshiharu IWATANI
- 日暮里・舎人ライナー電気設備保守～現場保守端末へのタブレット活用～ …………… 友野利章 68/2  
Electrical Facility Maintenance for Nippori-Toneri Liner – Utilization of Site Maintenance Terminal based on Tablets Toshiaki TOMONO
- 開発プロセス変革：リードタイム半減に向けた取り組み…………… 小島賢太ほか 68/1  
Revolution of Development Process: Approach for Halving Lead Time Kenta KOJIMA et al.
- 機械稼働データを活用した予知保全の仕組の実現…………… 中川智廣ほか 68/1  
Realization of Predictive Maintenance System Utilizing Machine Operation Data Tomohiro NAKAGAWA et al.
- 1180MPa級合金化溶融亜鉛めっき鋼板 …………… 池田宗朗ほか 66/2  
Hot-dip Galvannealed Steel Sheet of 1180MPa Grade Muneaki IKEDA et al.
- 超高加工性1180MPa級冷延鋼板の特性 …………… 村田忠夫ほか 66/2  
Characteristics of 1180 MPa Grade Cold-rolled Steel Sheets with Excellent Formability Tadao MURATA et al.
- 自動車部品へのアルミ押出材の適用…………… 橋本成一 66/2  
Application of Aluminum Extrusion Materials to Automotive Parts Narukazu HASHIMOTO
- オフライン教示システムK-OTSの自動教示技術 …………… 泉 敏之ほか 63/1  
Automatic Teaching Technique for Off-line Teaching System K-OTS Toshiyuki IZUMI et al.
- アーク溶接ロボットにおける安定生産支援システム…………… 福永敦史ほか 63/1  
Stable Production Support System for Arc Welding Robot Atsushi FUKUNAGA et al.



## 主要事業内容

### ■鉄鋼アルミ

- 薄板製品
- アルミ板
- 線材・条鋼製品
- 厚板製品
- 鉄鋼スラグ製品

### ■素形材

- 鋳鍛鋼製品
- アルミ鋳鍛
- アルミサスペンション
- チタン
- 建材用チタン
- アルミ押出・加工品
- 銅板条
- 鉄粉製品

### ■溶接

- 溶接システム
- 溶接材料

### ■機 械

- 汎用圧縮機
- 回転機（非汎用圧縮機）
- タイヤ・ゴム機械
- 樹脂機械
- 高性能商品
- 圧延設備・プレス機械
- 超高压装置
- エネルギー・化学関連機器

### ■エンジニアリング

- 製鉄プラント関連
- 原子力プラント・機器
- 都市交通システム
- 水処理
- 廃棄物処理、リサイクル
- 冷却塔
- 医薬・ファインケミカル機械
- 水素発生装置
- エネルギー・化学プラント

### ■建設機械

### ■電 力

URL : 神戸製鋼ホームページ 技術・製品情報  
<https://www.kobelco.co.jp/products/>

QRコード :



QRコードはデンソーウェーブの登録商標です。

## 編集後記

<特集：DXでめざすKOBELCOらしさ>

\*デジタル技術を用いてビジネスモデルなどを抜本的に変革する「DX (Digital Transformation)」に取り組む企業を、経済産業省が「DX銘柄」として選定するなど、戦略的なデジタル技術の活用が企業の競争力に直結するようになってきました。

\*そのような中、今回、R&D神戸製鋼技報では、当社グループのDXの取り組みに焦点を当てた特集を企画しました。デジタル分野としては、Vol.68, No.2 / Dec. 2018「ICT活用」以来6年ぶりの特集となります。今回は単なるデジタル技術の開発や導入ではなく、デジタル技術を用いて私たちが目指す「KOBELCOの変革」を発信したいと考え、タイトルを「DXでめざすKOBELCOらしさ」としました。

\*当社グループでは、AX（「既存事業の深化」×「新規事業機会の探索」という「両効きの経営」）とGX（「CNへの挑戦」という事業戦略の両輪を具体化するための手段として、DXを推進しています。DXを通じて人材・環境・風土の各要素を強化し、変革を実現・加速・高度化さ

せ、社会課題の解決や新たな価値創出へつなげていきたいと考えています。

\*本特集では、自律的なDX推進を支援するためのローコード・ノーコード開発やデータ活用の基盤づくりから、各事業におけるデジタル技術を用いたものづくりの変革、お客様のニーズに合わせた製品開発を加速するMIや3D活用設計まで、当社グループのDXの取り組みを様々な観点からご紹介しています。また、アフターサービスなどお客様支援を通じた「コトづくり」や新事業創出のための産学協働の取り組みも取り上げました。

\*ものづくりをはじめ社会全体のデジタル化が進む中、デジタル技術をどのように活用していくかは、私たちの働き方やものづくりの方法だけではなく、サプライヤの皆様やお客様との連携強化、新たな価値の共創に至るまで、さまざまな変革に直結しています。

\*本特集の発刊が、様々なステークホルダの皆様との会話のきっかけとなり、新たな取り組みや価値の創出につながることを期待しています。

(池田英生)

## 次号予告

<特集：自動車用材料・技術>

\*近年、自動車業界は、CO<sub>2</sub>削減、電動化、自動運転、安全性向上、車体生産技術の変革、リサイクル促進、新興企業の登場、地政学的リスクなど、様々な事象に対応しなければなりません。まさに激動の時代を迎えています。

\*自動車産業は巨大であり、激動の時代を乗り切るための自動車メーカの事業戦略は、部品メーカ、設備機器メーカ、素材メーカ、ソフトウェア産業など多くの企業の事業戦略に影響を及ぼします。

\*当社グループにとって、自動車産業は最大の需要家、お客様であり、多くのビジネスユニットが国内外を問わず関わっています。当社ビジネスの代表である鉄鋼やアルミ合金といった素材分野では、数年前まで車体軽量化に貢献する超ハイテン鋼板やアルミ合金、あるいは活用ニーズの高い樹脂に関して、当社を含む素材産業は、その期待に応えるべく、研究開発と実用化に取り組んでいました。しかし、時代が変わった今日、軽量化素材

の提案だけではお客様の期待に応えることができなくなってきました。

\*新時代を迎えた自動車業界が求める複雑化したニーズに応えるには、(1) 銅、アルミ合金、銅合金、チタン合金の複数の素材、(2) 成形・接合の生産技術、(3) 破壊や電池特性などの試験評価、(4) 各種シミュレーション・AI技術、(5) LCA評価のような多岐にわたるソリューションの組合せが必要です。当社グループにとって、この変化はこれまで培ってきた様々な技術を総合的に発揮できる好機であり、現在、さらに未来の期待に応えるべく研究開発や提案活動を推進しています。

\*前回の自動車特集号は2019年に発刊され、今回が5年ぶりの特集となります。その間、コロナ禍という約3年にわたる未曾有の経験をしましたが、たゆまぬ研究開発活動の成果の一端を披露しますので、ご期待ください。

(鈴木励一)

## 《編集委員》

委員長	西野都
副委員長	池田雅男
委員	佐藤英生
	佐成統宣
	杉立宏毅
	鈴木志一
	高久真也
	中久保昌平
	永浜睦久
	本家浩一
	山本兼司
	渡辺憲一
	<五十音順>
本号特集編集委員	池田英生

## R&D<sup>®</sup> 神戸製鋼技報

第73巻・第1号 (通巻第250号)

2024年8月22日発行

年2回発行

非売品 <禁無断転載>

発行人 西野 都

発行所 株式会社 神戸製鋼所  
技術開発本部 企画管理部  
〒651-2271  
神戸市西区高塚台1丁目5-5

印刷所 福田印刷工業株式会社  
〒658-0026  
神戸市東灘区魚崎西町4丁目  
6番3号

お問合わせ先 コベルコビジネスパートナーズ(株)  
R&D神戸製鋼技報事務局  
〒651-0073  
神戸市中央区脇浜海岸通2丁目-2-4  
(株)神戸製鋼所 神戸本社ビル  
FAX(078)261-7843  
rd-office@kobelco.com

2024年 8 月 22 日

各 位

(株)神戸製鋼所  
技術開発本部

「R & D神戸製鋼技報 Vol.73, No.1」お届けの件

拝啓、時下ますますご清栄のこととお慶び申し上げます。

また平素は、格別のご高配を賜り厚くお礼申し上げます。

このたび、「R & D神戸製鋼技報 Vol.73, No.1」を発行しましたのでお届け致します。  
ご笑納のうえご高覧いただきましたら幸甚です。

なお、ご住所・宛先名称などの訂正・変更がございましたら、下の変更届に必要な事項を  
ご記入のうえ、FAXあるいはE-mailにてご連絡いただきますようお願い申し上げます。

敬 具

コベルコビジネスパートナーズ(株)  
R&D神戸製鋼技報事務局 行  
FAX (078)261-7843  
rd-office@kobelco.com

本誌お送り先変更届

	変 更 前	変 更 後
貴社名		
ご所属		
ご住所	〒	〒
宛名シール 番号	No. _____ ←(封筒の宛名シール右下の番号をご記入下さい)	
備 考		
本紙記入者	お名前：	E-mail： TEL：

**RE: Delivery of R&D Kobe Steel Engineering Reports, Vol.73, No.1**

Dear Sir or Madam,

We would like to express our sincere gratitude for your continued support and cooperation.

Attached please find Vol.73, No. 1 of the R&D Kobe Steel Engineering Reports.

If there is any correction or change of address, contact name, etc., please fill in the required information in the change notification below and contact us by fax or by e-mail.

Best wishes for your continued success,

Attention:

R&D Office, Kobe Steel Engineering Reports

Kobelco Business Partners Co., Ltd.

FAX: +81-78-261-7843

E-mail: rd-office@kobelco.com

**Change Notification**

	Before change	After change
Company name		
Department		
Address		
Address sticker number	No. _____ ← (Please fill in the right lower number on the address sticker)	
Remarks		
Person making this entry	Name :	E-mail :