

## 特集：KOBELCOのマテリアリティと価値創造を支える21のコア技術

ページ

1	(巻頭言) 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
3	(解説) KOBELCOグループのグリーン社会への貢献を支えるコア技術	出浦哲史
8	(解説) 安全・安心なまちづくり・ものづくりに貢献するコア技術	岡崎喜臣
13	(解説) 未来へのソリューション提供とコア技術	梶原 桂
17	(解説) 素材系分野のものづくりを支える溶解・鋳造・溶接技術	石田 斉
23	(解説) 金属中介在物の制御技術を用いた高信頼性製品の創出	足立毅郎
28	(解説) 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
33	(解説) 高機能な表面の創製により安全・安心な社会に貢献する金属表面制御技術	武田実佳子・小澤敬祐・河盛 誠・高橋佑輔・佐藤俊樹
38	(解説) KOBELCOの電子材料機能発現技術	田内裕基・越智元隆・釘宮敏洋
43	(解説) 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・日野 綾・村田祐也・森田晋也
48	(解説) KOBELCOのものづくりを支える高度計測技術	迫田尚和・岡本 陽・芦田 強・桑名孝汰
53	(解説) 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・沖田圭介・高嶋康人
58	(解説) 『静かに安全にそして効率良くものを動かす』振動・音・動的特性の制御技術	山口善三・岡田 徹・菅野直紀
64	(解説) グリーン社会実現に向けた生産プロセスと製品を支える熱・流体制御技術	朴 海洋・藤澤 亮・関山和英・茂渡悠介
68	(解説) 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・藤井康之・柿本英樹・吉岡典恭・山本雄也
74	(解説) 機械製品を高精度・高効率に操り省エネに貢献する電気・磁気制御技術	寺尾泰昭・河合宏明・森田晋也・林 俊平
79	(解説) 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・江口 徹・逢坂武次・檜崎博司・加茂和史
84	(解説) 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・梅田豊裕・岩谷敏治・井筒理人
89	(解説) 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・友近信行・檜崎博司
94	(解説) 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
98	(解説) 溶接コア技術の開発と社会実装	清水弘之
105	(解説) 還元鉄製造技術を活用したグリーン社会への貢献	王 昌麟
110	(解説) サステナブル社会の実現を支える吸着分離・触媒反応技術	藤浦貴保
116	(解説) CN社会実現に貢献するカーボンリソース転換・利用技術	木下 繁・宍戸貴洋・堺 康爾
121	神戸製鋼技報掲載 KOBELCOのマテリアリティと価値創造を支える21のコア技術関連文献一覧表 (Vol.62, No. 2 ~ Vol.72, No. 1)	

《FEATURE》 21 Core Technologies Supporting KOBELCO's Materiality and Value Creation

- 1 21 Core Technologies Supporting KOBELCO's Materiality and Value Creation  
Yuichiro GOTO
- 3 Core Technologies Supporting Kobelco Group's Contributions to Green Society  
Dr. Tetsushi DEURA
- 8 Core Technologies Ensuring Safety and Security in Community Development and Manufacturing  
Yoshitomi OKAZAKI
- 13 Kobelco Group's Core Technologies: Providing Solutions for Future Society  
Dr. Katsura KAJIHARA
- 17 Melting, Casting, and Welding Technologies Supporting the Art of Manufacturing in Materials Business  
Dr. Hitoshi ISHIDA
- 23 Creation of High-Reliability Products Using Technology for Controlling Inclusions in Metals  
Takeru ADACHI
- 28 Metallographic Structure Control Technology Contributing to Development of New Metallic Materials to Meet Social Demands  
Dr. Toshio MURAKAMI
- 33 Metal Surface Control Technology Contributing to Safe and Secure Society through the Creation of Highly Functional Surfaces  
Dr. Mikako TAKEDA · Takahiro OZAWA · Dr. Makoto KAWAMORI · Dr. Yusuke TAKAHASHI · Toshiki SATO
- 38 Development of Functional Electronic Materials at KOBELCO  
Yuki TAUCHI · Dr. Mototaka OCHI · Dr. Toshihiro KUGIMIYA
- 43 Atomic-scale Physical Analysis for Material Development  
Yuki TAUCHI · Dr. Aya HINO · Dr. Yuya MURATA · Shinya MORITA
- 48 Advanced Measurement Technology Supporting KOBELCO's Manufacturing  
Naokazu SAKODA · Akira OKAMOTO · Tsuyoshi ASHIDA · Kota KUWANA
- 53 Predictive and Evaluative Technologies Based on Structural Mechanics and Strength of Materials for Structural Failures to the Safety of Society  
Dr. Junya NAITO · Dr. Keisuke OKITA · Dr. Yasuhiro TAKASHIMA
- 58 Technology to Control Vibration, Noise, and Dynamics Characteristics for Quiet, Safe, and Efficient Machinery  
Dr. Zenzo YAMAGUCHI · Dr. Toru OKADA · Dr. Naoki SUGANO
- 64 Thermal and Fluid Control Technologies Supporting Production Processes and Products to Realize Green Society  
Dr. Haeyang PAK · Dr. Ryo FUJISAWA · Dr. Kazuhide SEKIYAMA · Dr. Yusuke SHIGETO
- 68 Manufacturing Technology Delivering Safety to Society. Metal Processing Technology  
Dr. Koichi AKAZAWA · Dr. Yasuyuki FUJII · Dr. Hideki KAKIMOTO · Noriyasu YOSHIOKA · Yuya YAMAMOTO
- 74 Electric and Magnetic Control Technology for Manipulating Machinery Products with High Precision and Efficiency, Contributing to Energy Savings  
Yasuaki TERAU · Dr. Hiroaki KAWAI · Shinya MORITA · Shumpei HAYASHI
- 79 Process Control Supporting Ever-changing Manufacturing  
Dr. Tomoyuki MAEDA · Dr. Toru EGUCHI · Taketsugu OSAKA · Dr. Hiroshi NARAZAKI · Kazufumi KAMO
- 84 Decision Support Technology for Controlling Complex Manufacturing (Operations Research Technology)  
Hideo IKEDA · Dr. Toyohisa UMEDA · Dr. Toshiharu IWATANI · Rihito IZUTSU
- 89 Application Technologies of Data-driven Science and AI that Evolve Alongside Humans  
Ryo KATAYAMA · Dr. Nobuyuki TOMOCHIKA · Dr. Hiroshi NARAZAKI
- 94 Servicing Technology Contributing to the Realization of Business Model Transformation  
Yuichirou SOU
- 98 Development and Practical Applications of Welding Core Technologies  
Dr. Hiroyuki SHIMIZU
- 105 Utilizing Reduced-Iron Manufacturing Technology to Contribute to Green Society  
Shourin OH
- 110 Adsorptive Separation and Catalytic Reaction: Indispensable Technologies for Sustainable Society  
Dr. Takayasu FUJIURA
- 116 Carbon Resource Conversion and Application Technology Contributing to Realization of Carbon-neutral Society  
Shigeru KINOSHITA · Takahiro SHISHIDO · Koji SAKAI
- 121 Papers on Advanced Technologies for 21 Core Technologies Supporting KOBELCO's Materiality and Value Creation in R&D Kobe Steel Engineering Reports (Vol.62, No. 2 ~Vol.72, No. 1)

(巻頭言)

# 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

執行役員 技術開発本部長

## 21 Core Technologies Supporting KOBELCO's Materiality and Value Creation

Yuichiro GOTO



当社グループは1905年の創業以来120年近くの歴史を通して、多様な事業領域で社会やお客様のニーズを満たすための事業活動を通じて培った多様な技術を保有しており、2014年技術開発本部においてそれらを21のコア技術として分類し、様々な事業課題やお客様の課題解決に活用しつつ育成してきた。当社グループは大きく素材系事業、機械系事業、電力事業の三つの事業セグメントを有する企業であり、21のコア技術はこの三つのセグメントでの活動から派生した技術に加え、ものづくりに係る共有の技術群から成る。その適用範囲は当社グループ内部における製品開発やものづくりはもちろん、二次加工メーカーのお客様における課題の解決におよぶ場合もある。そのため、この整理は広くお客様にもご紹介しながら、社内外のコミュニケーションツールとしても定着してきた。(図1)

世の中の変化は大きく激しく、予測も困難になっている。こうした中で、変化に適応しながらも決して流されることなく、社会における自らの役割や使命を見定め持続的な成長を果すために、当社グループは「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かなえられる世界」をKOBELCOの実現したい未来として掲げる現在の企業理念を2020年に制定した。さらに2021年5月には持続可能な社会の実現に向け、社会課題の解決や新たな価値創造を通じて収益力を確保しつつ持続的に成長し、中長期的な企業価値向上を目指すために当社グループが取り組むべき重要課題として、五つのマテリアリティを特定し公表した。五つのマテリアリティ

は、三つの価値創造領域、二つの経営基盤領域の重要課題から構成される。(図2)

本特集は、このうちとくに三つの価値創造領域である「グリーン社会への貢献」、「安全・安心なまちづくり・ものづくりへの貢献」、「人と技術で繋ぐ未来へのソリューション提供」のそれぞれにおいて、21のコア技術がどのように活用され、どのような可能性を開くのか、お客様をはじめ多くの方々に当社グループをさらに知っていただくための試みとしてまとめたものである。

当社グループは、草創期のごく短期間のうちに現在の事業の原型となる事業を次々に立ち上げた歴史がある。いわゆる事業の成熟に伴う多角化ではなく、その時代の社会の発展に欠かせない鉄鋼・鋳鍛鋼や、銅・アルミ・チタンといった非鉄金属、産業機械などに係る事業を次々と興していった。これらは当時の日本にとって重要な分野であり、国産化が悲願とされる分野でもあった。最初から社会の実用に供されることが求められていたため、国内に無い技術は海外にも求めた。その流れは現在にも続いており、素材・機械・電力の各分野で当社グループが提供する技術・製品・サービスは社会インフラに結びつくものが現在でも多く、お客様は世界各国にも広がっている。

どの分野も社会インフラや産業の基礎を支える素材や

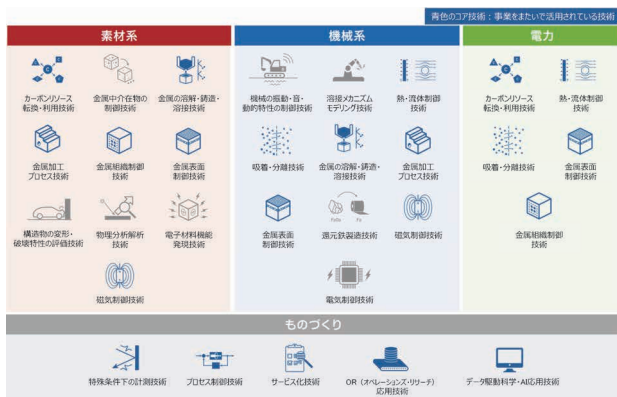


図1 21のコア技術  
Fig.1 21 Core technologies



図2 KOBELCOグループのマテリアリティ  
Fig.2 Materiality of the KOBELCO group

機械が大半であるため、最終製品としてあまり目立ちはしないが、製品機能としての高い信頼性や工業製品としてお客様に提供するための高い技術力がどの分野にも共通に求められた。さらに実際にそれらが機能を発揮するのはお客様の製品の内部やお客様の工場・フィールドであり、素材の使い方や二次的な加工に係るソリューション、機械装置の保全・メンテナンスや時に当社グループの製品とお客様の生産設備との間で生じる様々な課題を解決するためのソリューションも必要とされた。当社グループが現在保有するコア技術は、こうした言わば社会における「実用の世界」への適用を通じて試され、育まれてきたのだと捉えている。

このように当社グループが長年身を置いてきた、「実用の世界」にも近年大きな変化が訪れ、その変化は速度を増している。一つは「先端技術の世界」。この世界はこの数十年で劇的に進歩した科学技術の恩恵を背景に、技術によって達成できる範囲も深さも大きく広がってきた。そして「持続可能性の世界」。この世界は我々や我々のお客様が住む実用の世界で重んじられる経済合理性をいったん脇においてでも、自然界における人間社会の持続可能性に焦点を当てる価値観である。さらに、デジタルやAIなど新技術によるものづくりの抜本的進化を価値観とする「プロセス変革の世界」。これは第四次産業革命なども表現されるが、ものづくりのプロセスの変革がものづくりの方法を進化させるだけでなく、ビジネスモデルそのものにも深く影響をおよぼし始めている。(図3)

ただ、こうした大きな変化の中でも確かであると思われるのは、先端技術、持続可能性、プロセス変革といった価値観レベルでの大きな変革であってさえも、最終的には実用の世界の価値観、すなわち経済的な成立性や信頼を置くことができる品質、といった価値観と交わり、それを確かなものになければ社会に広げていくことは難しい、ということである。その交わりの過程で、様々な実験的な試みがこれからもより大きな規模で広範囲に行われる。それでも我々のお客様や、社会が住む実用と

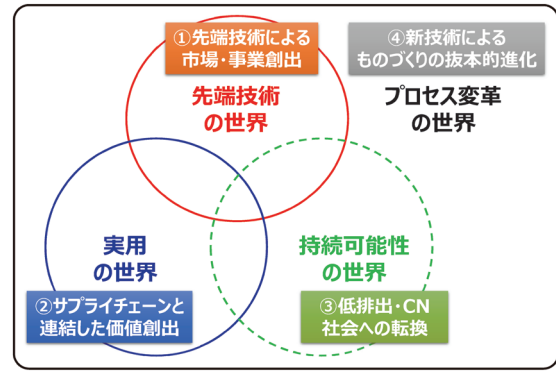


図3 社会課題の解決につながる4つの価値観  
Fig. 3 Four values that lead to solving social issues

いう世界における原則から逃れることはできない。これから我々技術陣に求められるのは、社会にとってより望ましい先端技術や、資源リサイクルやCNをはじめとする持続可能性の世界、プロセスの変革を如何に実用の世界に近づけていくことができるか、またそれを受け入れることができるように、実用の世界を変化させていくことができるか、その知恵と技術なのだ考える。お客様や社会の課題の中に身を置きながら、21のコア技術を掛け合わせ、世の中に存在するより広範な技術との共創も通じてそれをしっかりと考えていきたい。

本特集では、実用の世界、先端技術の世界、持続可能性の世界、プロセス変革の世界という社会課題の解決につながる四つの価値観の中で生まれ、最終的には実用の世界に焦点を合わせ、試される当社グループの21のコア技術を再整理した。そして21のコア技術それぞれが、どのようにKOBELCOが掲げる価値創造領域の三つのマテリアリティにつながっているのか、そのつながりの今とこれからについて展望を含めまとめた。お客様をはじめ関係各位から忌憚（きたん）のないご意見をいただくとともに、本特集が、個社では取組みの完結し得ない、これからのより大きな社会課題の解決に向け、ステークホルダの皆様と対話を進めるための一助となれば幸いである。



(解説)

# KOBELCO グループのグリーン社会への貢献を支えるコア技術

出浦 哲史\*<sup>1</sup> (博士(工学))

## Core Technologies Supporting Kobelco Group's Contributions to Green Society

Dr. Tetsushi DEURA

### 要旨

当社グループでは素材・機械・電力にまたがる幅広い事業活動を通じて、グリーン社会に貢献する多様な技術・製品・サービスを提供してきた。2050年のカーボンニュートラルへの挑戦に向けては、これまで培ってきたコア技術群の活用や掛け合わせによる当社グループならではのCO<sub>2</sub>削減ソリューションの創出に積極的に取り組んでいる。

### Abstract

Throughout its diverse business activities spanning materials, machinery, and electric power supply, the Kobelco Group has offered a wide range of technologies, products, and services that contribute to a green society. In pursuit of the challenges of achieving carbon neutrality by 2050, the Kobelco Group is actively engaged in creating unique CO<sub>2</sub> reduction solutions by leveraging and combining the core technologies it has cultivated over time.

### 検索用キーワード

カーボンニュートラル, CO<sub>2</sub>排出削減, MIDREX, 水素, バイオマス, CCUS, プロセス機器, 資源循環

まえがき = 2015年、COP21でパリ協定が、国連サミットでSDGsがそれぞれ採択されて以降、先進国における気候変動への取り組みが一気に加速している。日本でも「2050年カーボンニュートラル」を宣言しており、政府のグリーン成長戦略においては「温暖化への対応を、経済成長の制約やコストとする時代は終わり、国際的にも、成長の機会と捉える時代に突入」とされている。

当社グループでは、マテリアリティ（重要課題）の一つに「グリーン社会への貢献」を掲げ、「カーボンニュートラルへの挑戦」として、気候変動対応と資源循環対応への取り組みを統合的に進めている。当社グループは生産プロセスでのCO<sub>2</sub>排出量の多い事業者であると同時に、

CO<sub>2</sub>削減への貢献度の高い技術・製品・サービスを数多く保有しており、表1に示すように「生産プロセスにおけるCO<sub>2</sub>削減」および「技術・製品・サービスによるCO<sub>2</sub>排出削減」という二つの側面で、2030年目標および2050年ビジョンを、それぞれ設定している<sup>1)</sup>。2050年までのカーボンニュートラル実現に向けては、グループが保有する多様な事業と技術の掛け合わせによる当社ならではの新たなイノベーション創出を目指している。

本稿では「グリーン社会への貢献」に向けた当社グループならではの取り組みを、それを支えるコア技術と共に概説する。

表1 KOBELCOグループにおける2030年目標および2050年ビジョン<sup>1)</sup>  
Table 1 Kobelco Group's targets for 2030 and a vision for 2050<sup>1)</sup>

	2030 Targets	2050 Vision
Reduction of CO <sub>2</sub> emissions in production processes	30-40% (compared with fiscal 2013)	Taking on the challenge of realizing carbon neutrality
Contribution to reduction of CO <sub>2</sub> emissions through technologies, products, and services	61million tons	100 million tons or more

\*1 技術開発本部 機械研究所

## 1. 製鉄プロセスにおけるCO<sub>2</sub>削減への取り組み

鉄鋼業からのCO<sub>2</sub>排出量は、国内における産業部門のCO<sub>2</sub>排出量の40%（我が国全体の排出量の14%）を占める<sup>2)</sup>。当社グループにおいても<sup>1)</sup>、製鉄プロセスのCO<sub>2</sub>削減はカーボンニュートラル実現に向けての大きな課題であり、独自のCO<sub>2</sub>削減ソリューションの開発に積極的に取り組んでいる。

### 1.1 MIDREX<sup>®</sup>プロセスによる直接還元鉄製造

当社グループ独自のCO<sub>2</sub>削減ソリューションの核となる技術は、天然ガスを用いた直接還元製鉄法として豊富な実績を有するMIDREX<sup>®</sup>プロセスである。本プロセスは1970年代に海外プラント事業を積極推進する過程において、天然ガスが豊富な中東地域で受注した一貫製鉄所の鉄源製造手段としてMidrex社から導入したプロセスであり、その将来性を見越して1983年に同社を買収した。当時は直接還元鉄プラントの黎明（れいめい）期であり、当社も技術開発を支援しながら、プロセスの完成度を高め、実績を積み上げてきた結果、現在は世界の直接還元鉄の約6割（天然ガスベースでは約8割）が本プロセスによって生産されている。鉄鉱石の還元材として天然ガスを利用することから、CO<sub>2</sub>排出量の少ない製鉄プロセスとして近年、注目度が高まっており、さらなるCO<sub>2</sub>削減に向けた100%H<sub>2</sub>還元技術も既に商業化フェーズにある。

### 1.2 高炉での直接還元鉄多配合技術

直接還元鉄（以下、還元鉄）は、不純物の少ない清浄鉄源として主に電炉原料として利用されてきたが、当社では還元鉄の高炉利用にも積極的に取り組んでいる。2023年には、加古川製鉄所の実機高炉にMIDREX<sup>®</sup>プロセスで製造された還元鉄（HBI：Hot Briquetted Iron）を多量装入することで還元材としての石炭使用量を低減し、高炉からのCO<sub>2</sub>排出量を従来比で約25%削減できる技術を実証した<sup>3)</sup>。これは大型高炉での安定操業を維持しながらのCO<sub>2</sub>削減量としては世界最高水準の実績である。高炉HBI多量装入は当社独自の高炉操業技術によって実現したものであるが、これはコストダウンを主目的とした高難度の操業諸元、すなわち「高炉業界トップレベルの限界操業」を長年にわたり追求してきた過程で蓄積された技術である。具体的には、安価原料を使いこなし、還元材比（溶銑（ようせん）1トンあたりの還元材総重量）も変えながら、熱制御を安定化するために開発された「コークス中心装入」や「ペレット多配合」などの技術群であり、装入物分布による通気制御や実機評価手法など独自のノウハウがそれにあたる。これらの独自見解が、CO<sub>2</sub>削減を主目的とした高炉HBI多量装入時にも大いに活用されており、大型高炉で前例のない還元鉄装入量を達成すると共に、同一投入量で比較した場合においても、従来他社実績を上回るCO<sub>2</sub>削減を実現した。

### 1.3 製鉄プロセスからのCO<sub>2</sub>削減を支えるコア技術

MIDREX<sup>®</sup>プロセスは、制約条件の異なる世界中のお客様のニーズに合わせて還元ガス組成や還元鉄品質を対応させる柔軟性が強みの一つであり、本特集号で取り

上げる「還元鉄製造技術」や「熱・流体制御技術」などのコア技術が、多様なニーズに合わせたプロセス条件の最適化に貢献している。

HBI多配合時の高炉は限界操業に近く、今後CO<sub>2</sub>削減と安定操業・コストアップ抑制を実現するためには、AI操炉による炉況予測やセンシング技術の革新が不可欠である。本特集号では、次世代の高炉操業を下支えする「プロセス制御技術」や「特殊条件下での計測技術」、「データ駆動科学・AI応用技術」などのコア技術についても紹介する。

## 2. プロセス機器によるグリーン社会への貢献

当社グループは1915年に国産初の高圧空気圧縮機を製造して以来、石油精製や製鉄、ガス・エネルギーなどの産業プロセスに欠かせない「プロセス機器」を数多く商品化してきた。主要メニューである圧縮機、冷凍機、ヒートポンプ、熱交換器（気化器など）、水電解水素製造装置、グラスライニング反応容器などのプロセス機器に関しては、いずれも業界トップクラスの技術を保有しており、環境変化に合わせた付加価値の高い製品・サービスを提供し続けている。

グリーン社会においては、産業プロセスの大きな変化が想定されるが、当社グループは多様なプロセス機器開発を通じて蓄積してきた経験と技術力を活かすことで、今後のプロセス変革にも柔軟に対応することができる。さらに、エンジニアリング事業で培ったプロセスエンジニアリングや運転マネジメントのノウハウも活用することで、次世代エネルギーやカーボンリサイクルのサプライチェーンへの大きなソリューション提供者にもなり得る。本章では代表的な当社プロセス機器と、それらの掛け合わせによる当社グループならではのトピックスを紹介する。

### 2.1 CO<sub>2</sub>削減に貢献する当社グループのプロセス機器

当社のプロセスガス圧縮機事業の特長は主要な圧縮方式（スクリュ・ターボ・レシプロ）を全て設計・製造が可能である。環境規制を背景とした需要拡大が見込まれるLNG運搬船エンジン燃料ガス用圧縮機においても、低圧スクリュ機から高圧レシプロ機までメニュー化しており、幅広いニーズへの最適な選択肢を提供することができる<sup>4)</sup>。そのほかにも、二酸化炭素貯留（CCS：Carbon Capture and Storage）用途に用いられるCO<sub>2</sub>圧縮機の省エネルギー化を狙いとして、ターボ圧縮機一種である増速機内蔵型遠心圧縮機の高圧CO<sub>2</sub>対応を実現し、従来の1軸型遠心圧縮機よりも動力消費量を削減することに成功した<sup>5)</sup>。

当社はLNG気化器のトップメーカーでもあり、国内外へ多数の納入実績がある。最近では省エネルギー化を狙いとした冷熱有効活用のニーズが高まっており、気化時の冷熱回収に適した中間媒体式気化器（IFV：Intermediate Fluid type Vaporizer）の導入を検討する案件が増えている。将来のカーボンニュートラル社会に向けては、LNGから液化水素への燃料転換も想定されるが、これまでIFV方式の液化水素気化器は無かった。そ

ここで当社ではLNG気化器で培った技術を活用したIFV方式の液化水素気化器の実証を推進している<sup>6)</sup>。

(株)神鋼環境ソリューション(以下、SKS)では、固体高分子電解質膜(PEM: Polymer Electrolyte Membrane)を用いて水道水から高純度水素ガスを製造する水電解水素製造装置(商品名HHOG: High-purity Hydrogen Oxygen Generator)を1990年代に開発・商品化した。当初は半導体・電子産業や金属熱処理向け工業ガスのオンサイト供給を主用途としており、既に200基を超える国内トップの安定稼働実績が強みである。最近ではカーボンニュートラルを背景にエネルギー用途向けの需要が急拡大しており、今後は電解電力として再生可能エネルギー(以下、再エネ)を利用した「CO<sub>2</sub>フリー水素(グリーン水素)」のニーズも増加すると想定される。再エネ利用時の課題は、再エネ由来電力の変動に水電解反応をいかに追従させるかであるが、当社グループでは、環境省プロジェクトにて、再エネ+水電解によるグリーン水素安定製造の実証に成功した<sup>7)</sup>。

今後も当社グループでは、カーボンニュートラルに向けた化学・エネルギープロセスの変革に必要な、特長あるプロセス機器を通じて、グリーン社会に貢献していく。

## 2.2 当社プロセス機器を組合せた「ハイブリッド型水素ガス供給システム」の実証

当社グループでは、カーボンニュートラル社会における「安定かつ安価な水素供給」というソリューション提供を狙いに、「ハイブリッド型水素ガス供給システム」の実証を推進している<sup>8)</sup>。このシステムは、当社グループが強みを持つ、以下の三つの技術より構成されている。

- ① IFV方式の極低温液化水素気化器
- ② 再エネを活用した水電解水素製造装置
- ③ “創る・使う”を監視制御する運転マネジメント

具体的には、図1のように、液化水素の気化器と再エネ+水電解装置をパラレル配置した「ハイブリッド型」の水素供給システムによって、コストミニマイズと再エ

ネ特有の供給不安定性の解消の両立を図っている。加えて、液化水素の気化時に発生する冷熱を、工場内設備冷却や空調、ヒートポンプなどに利用するなど、お客様のプロセス効率向上・省エネルギー化にも対応可能である。

## 2.3 CO<sub>2</sub>削減に貢献するプロセス機器の開発を支えるコア技術

既述のように、カーボンニュートラルを背景とした、各産業分野におけるプロセス革新に伴い、「プロセス機器」への要求スペックも変化し、過去に経験のない設計仕様・運転条件への対応も増えている。いっぽうで、「プロセス機器」のトラブルは、グリーン社会の基盤を支える産業プラントの停止につながることから、高い「信頼性」と「安定性」が求められる。また、プロセス機器はプラントのエネルギー消費において大きな割合を占めており、「省エネルギー性能」も重要である。

過去実績をベースに対応することの多いプロセス・機器の設計において、未経験条件に対応するためには、事前にプロセス機器類の挙動を数値解析ベースで予測、あるいは要素試験で評価するなどして、要求性能を満たせるようにプロセスや機械設計を適正化する必要がある。

本特集号で紹介する「機械の振動・音・動的特性の制御技術」、「熱・流体制御技術」、「吸着・分離技術」は、いずれもこれらの課題に対応するために不可欠のコア技術であり、当社のプロセス機器によるグリーン社会への貢献に寄与している。

## 3. 電力事業CO<sub>2</sub>削減に向けた取り組みとコア技術

当社グループでは電力事業におけるカーボンニュートラルへの挑戦を宣言し、CO<sub>2</sub>削減に向けた取り組みを強化している<sup>1)</sup>。神戸発電所では、発電所で発生する蒸気を有効活用して周辺地域に熱供給を行っており、地域全体でのエネルギー有効利用を検討している。さらに、バイオマス燃料混焼やアンモニア混焼などのCO<sub>2</sub>削減技術による世界最先端の環境性能を具備した都市型火力発電所を目指しており、技術革新に合わせて段階的にアンモ

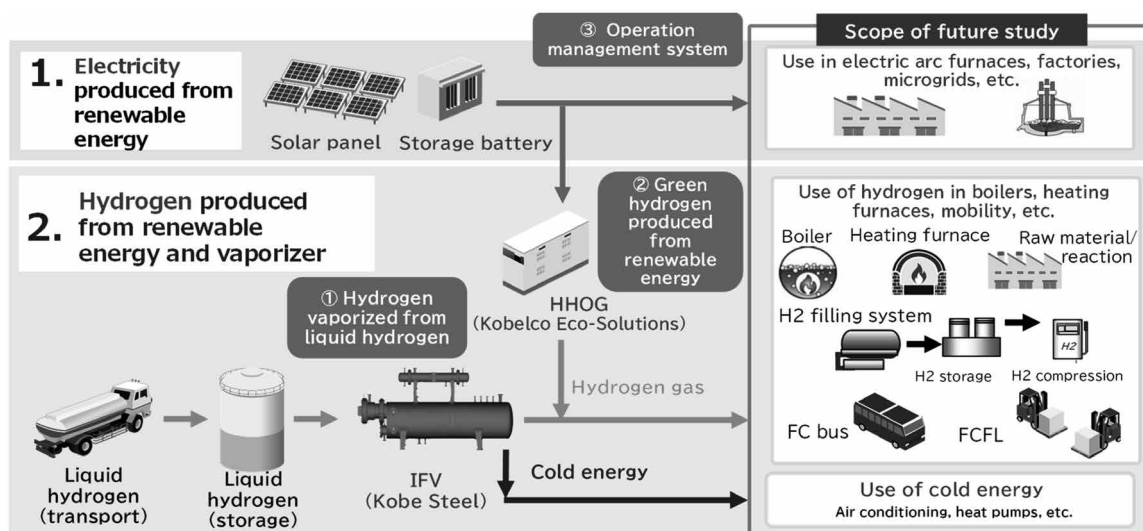


図1 ハイブリッド型水素ガス供給システムの概念図<sup>8)</sup>

Fig.1 Conceptual diagram of hybrid-type hydrogen gas supply system<sup>8)</sup>



ニア混焼率を拡大しながら、最終的にはアンモニア専焼への挑戦を掲げている。真岡発電所では、高効率GTCC（ガスタービンコンバインドサイクル）を採用し、CO<sub>2</sub>排出量の少ない発電によるエネルギー安定供給を継続しながら、将来的には、カーボンニュートラル都市ガスの活用も視野に入れている。

電力事業のCO<sub>2</sub>削減においても、当社グループの技術の掛け合わせが活かされている。その一例がエンジニアリング事業と電力事業の連携で推進している神戸発電所での地域バイオマス活用である。当社エンジニアリングセグメントのSKSでは、長年の実績を有する水処理プラント事業において、下水汚泥の有効利用による温室効果ガス排出削減に取り組んでおり、2021年度には国内最大級の下水汚泥燃料化事業を関西地区で受注した<sup>9)</sup>。この下水汚泥由来のバイオマス燃料を、火力発電所の燃料として混焼利用することで、地域の資源循環とCO<sub>2</sub>排出量削減に貢献することができる。

バイオマス燃料は、既存の火力発電設備が活用可能なため、CO<sub>2</sub>削減手段としての期待も大きい。バイオマス固有の燃焼特性や排ガスの触媒性能影響などを事前に見極める必要がある。当社グループでは、バイオマス燃料の安全かつ安定的な利用に資する評価・解析技術を保有している。これは、過去に海外での低品位炭活用の実証プロジェクトを通じて得られた独自のコア技術である<sup>10)</sup>。

神戸発電所は、都市型発電所として国内最高水準の環境設備を導入し、20年以上に渡って、環境配慮を最優先としながら地域へのエネルギー安定供給を実現してきた。長年に渡る環境優先操業を通じて蓄積してきた種々の技術は、将来のCO<sub>2</sub>削減に寄与するバイオマスやアンモニアの活用においても大きな強みとなる。

本特集号では、「カーボンリソース転換・利用技術」、「熱・流体制御技術」、「吸着・分離技術」など、これまでの電力事業を支え、将来のCO<sub>2</sub>削減にも貢献するコア技術について紹介する。

#### 4. 生産プロセスで発生する副産物の再資源化

当社グループでは、限りある資源を有効に活用するために、廃棄物の発生抑制（reduce）、副資材の再利用（reuse）に取り組むとともに、生産工程の副産物を別用途の資源として再生利用する（recycle）、いわゆる「資源循環」にも積極的に取り組んでいる<sup>1)</sup>。

副産物の発生量が多い鉄鋼アルミ事業部門における再資源化（製品化）の代表例は鉄鋼スラグである。当社における鉄鋼スラグ製品の歴史は長く、1976年には自社スラグ製品の外販事業を本格的に開始し、これまでに、路盤材、コンクリート用高炉スラグ細骨材、高炉スラグ微粉末、土木用材料などの商品化を進めてきた。スラグリサイクルにあたっては、用途別の環境基準値や要求品質に合わせた事前処理が必要であり、「信頼されるKOBELCOのスラグ製品」の厳格な品質管理に努めている<sup>11)</sup>。例えば、転炉や溶銑脱りん炉から発生する「製鋼スラグ」は主にアスファルト舗装の路盤材としてリサ

イクルされているが、スラグ中に含まれる酸化カルシウム（CaO）がアスファルト施工後に水分と反応して膨張すると、アスファルト隆起につながる可能性がある。そのため、出荷前スラグに蒸気エージング処理を十分に施してあらかじめ水和物に改質しておくことで、アスファルト施工後の膨張を抑制している。

当社の鉄鋼アルミ事業部門では、事業所間をまたいだユニークな資源循環フローとして、アルミ板主力工場の真岡製造所（栃木県）のアルミ溶解プロセスで発生したアーク炉灰を、鉄鋼主力工場の加古川製鉄所（兵庫県）の製鋼プロセスにおける副資材（脱硫剤）として再利用している<sup>12)</sup>。製鋼プロセスで発生した脱硫スラグはさらに上流の製鉄プロセス（焼結鉱）に再利用し、最終的には「高炉スラグ」となり、高付加価値のセメント原料として外販される。一般的な産業間リサイクルにおいては、相対的に製品価値が低下する「ダウンサイクル」が多いが、このように事業やプロセスの多様性を活かしたユニークな資源循環フローを構築することで、より付加価値の高い用途への「アップサイクル」も可能となる。

当社グループでは、製鋼スラグを利用したCO<sub>2</sub>固定化プロセス（CCUS：Carbon dioxide Capture, Utilization and Storageの一種）の開発にも取り組んでいる。これは、前述の路盤材用途において課題となる製鋼スラグ中の遊離石灰（CaO）に着眼したものである。まず、使用済の製鋼スラグから、独自溶媒を用いてCaOを選択的に抽出する。さらに、このCaO含有溶媒に産業工場からの排ガスを反応させることで、排ガス中のCO<sub>2</sub>を高純度の炭酸カルシウム（CaCO<sub>3</sub>）として固定化することができる。これは、製鋼スラグの資源循環（路盤材の膨張抑制）と温暖化抑制（CO<sub>2</sub>固定化）の両方に寄与するプロセスであり、現在、技術開発を推進中である<sup>13)</sup>。

むすび=本稿では当社のマテリアリティである「グリーン社会への貢献」という観点で、当社グループが保有する技術・製品・サービスによるCO<sub>2</sub>削減ソリューションについて概説した。今後、カーボンニュートラルに挑戦し、我々のビジョンを達成するためには、新たなイノベーションの創出が必要であり、その核となるのが、本特集号で取り上げる当社の多様なコア技術群である。

本稿で紹介したグリーン社会への貢献事例は、いずれも単独のコア技術だけでなく、複数のコア技術の掛け合わせで実現したものである。本特集号で取り上げる技術の多様性や、本稿で紹介した「技術の掛け合わせ」による新たな製品・サービスの発想は、いずれも当社グループの多様な事業機会を通じて獲得した当社ならではの技術資産であり、難度の高い課題解決において、大きな強みになるものと確信している。

当社は、そのグループ企業理念において「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」ことを使命・存在意義として掲げている。我々は、今後も、コア技術のさらなる高度化と融合を図り、グリーン社会に貢献する新たな価値創出につなげていく所存である。



## 参 考 文 献

- 1) KOBELCOグループ統合報告書2023. [https://www.kobelco.co.jp/about\\_kobelco/outline/integrated-reports/files/integrated-reports2023.pdf](https://www.kobelco.co.jp/about_kobelco/outline/integrated-reports/files/integrated-reports2023.pdf). (参照2023-12-07)
- 2) 経済産業省. 「トランジションファイナンス」に関する鉄鋼分野における技術ロードマップ. 2021年10月. <https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211027002/20211027002-1.pdf>. (参照2023-09-04)
- 3) 神戸製鋼所. プレスリリース. 2023年10月. [https://www.kobelco.co.jp/releases/1214019\\_15541.html](https://www.kobelco.co.jp/releases/1214019_15541.html) (参照2023-10-25)
- 4) 高木一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2020, Vol.70, No.1, p.20-23.
- 5) 馬場利秋ほか. R&D神戸製鋼技報. 2020, Vol.70, No.1, p.75-80.
- 6) 神戸製鋼所プレスリリース. 2022年5月. [https://www.kobelco.co.jp/releases/1210224\\_15541.html](https://www.kobelco.co.jp/releases/1210224_15541.html). (参照2023-09-04)
- 7) 藤澤彰利ほか. R&D神戸製鋼技報. 2020, Vol.70, No.1, p.3-6.
- 8) 神戸製鋼所プレスリリース. 2022年5月. [https://www.kobelco.co.jp/releases/1210227\\_15541.html](https://www.kobelco.co.jp/releases/1210227_15541.html). (参照2023-09-04)
- 9) プレスリリース. 神鋼環境ソリューション. 2022年3月. <https://www.kobelco-eco.co.jp/topics/news/2021/20220302-1.html>. (参照2023-09-04)
- 10) 神戸製鋼所プレスリリース. 2008年12月. [https://www.kobelco.co.jp/releases/2008/1181098\\_14784.html](https://www.kobelco.co.jp/releases/2008/1181098_14784.html). (参照2023-09-04)
- 11) 山中量一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.2, p.19-25.
- 12) 足立毅郎ほか. “KR脱硫におけるアーク炉灰の利用”. 材料とプロセス. 2017, Vol.30, No.1, p.251.
- 13) 神戸製鋼所プレスリリース. 2021年10月. [https://www.kobelco.co.jp/releases/1209639\\_15541.html](https://www.kobelco.co.jp/releases/1209639_15541.html). (参照2023-09-04)

(解説)

# 安全・安心なまちづくり・ものづくりに貢献するコア技術

岡崎喜臣\*<sup>1</sup>

## Core Technologies Ensuring Safety and Security in Community Development and Manufacturing

Yoshitomi OKAZAKI

### 要旨

当社グループは、輸送機分野、生活基盤分野、エネルギー・インフラ分野において産業を支える素材やキーコンポーネントを提供し続けてきた。創業してまもない黎明（れいめい）期に素材系と機械系という異なる領域に事業を展開し、種々の領域で求められるニーズに対応するために獲得してきたコア技術群は当社グループならではのものである。これからもコア技術を高度化させることにより、私たちの暮らしを支える製品群の創出、地域社会へのエネルギー安定供給を通して安全で安心なまちづくりを支えるとともに、私たちの製造現場のみならずお客様現場の安全性と生産性の向上に貢献していく。

### Abstract

The Kobelco Group has been consistently providing materials and key components that support industries in the transportation sector, life sector, and energy-infrastructure sector. These core technologies were acquired by Kobe Steel during its early years when it ventured into diverse areas like materials and machinery. They were developed to address a wide range of needs across various fields and are unique to the Kobelco Group. The Group is committed to further enhancing these core technologies, with the aim of supporting the creation of products that are fundamental to our daily lives. This commitment ensures the safety and security of our communities by providing stable energy supplies to local societies. Additionally, the Kobelco Group will contribute to improved safety and productivity within our manufacturing facilities and at its customers' sites.

### 検索用キーワード

安全性、信頼性、輸送機、エレクトロニクス、エネルギー、インフラ、ものづくり

まえがき＝当社グループでは、グループ企業理念の冒頭に実現したい未来として、「安全・安心な暮らしの中で、今と未来の人々が夢や希望をかなえられる世界」を掲げている。創業以来、日本の豊かさの源泉となる技術領域を設定し、国内で製造することを目指して技術開発を推進してきた歴史が今につながり、さらに地球規模の大きな環境変化も見据えて発展させることが求められる。

当社は1905年の創業から118年にわたり、お客様が必要とする製品をお客様とともに造り提供してきた。その事業形態は、鉄鋼アルミ・素形材・溶接からなる素材系事業と、機械・エンジニアリング・建設機械からなる機械系事業、さらに電力事業の3事業を柱としており、現在は図1に示した七つのセグメントで事業を推進している。その歴史は1900年代初頭まで遡り、重工業を中心とした事業領域で「国内初」となる事業化や製品群の開発を成功させてきた（図2）。これら製品群が自動車や機関車などの完成品ではなく、最終製品の機能に不可欠な部品・コンポーネントであったことも特徴である。各セグメントのお客様は多岐にわたり、当社グループは様々な分野におけるお客様の動向やニーズを把握することで、幅広い視点から製品・サービスを提供してきた。こうした多様な事業の中で培ってきた21のコア技術で、将来にわたってお客様の多様なニーズに応え続け、お客

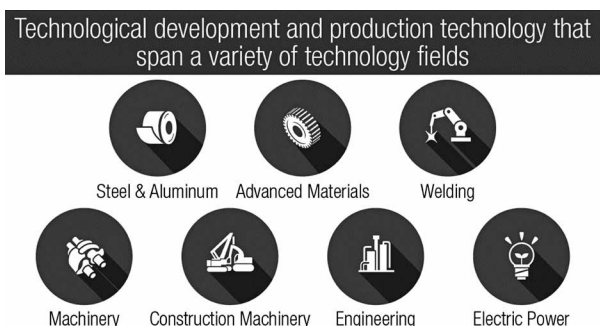


図1 KOBELCOグループの事業領域  
Fig.1 Business segments of Kobelco Group

様の製造現場の安全性と生産性や、人々の安全・安心で豊かな暮らしの実現に貢献するという視点で2021年に設定したマテリアリティの一つが「安全・安心なまちづくり・ものづくりへの貢献」である。

当社グループのお客様を市場分野別に見ると、Mobility（輸送機分野）、Life（生活基盤分野）、Energy & Infrastructure（エネルギー・インフラ分野）の三つに大別することができる。「安全・安心なまちづくり・ものづくりへの貢献」は、こうした分野のお客様の多様なニーズに応じた製品・サービスの提供を通して、様々な社会課題の解決に貢献していくとする当社グループの社会への約束でもある。そのためには、お客様に安心して

\*<sup>1</sup> 技術開発本部 材料研究所

製品を使用していただくことが大前提であり、製品の信頼性・生産性を担保するものづくり力も重要で、多様な事業に関わる長年の技術開発を通じて培ってきた21のコア技術は、当社グループのものづくりにおいて活用されてきた。本稿では、各市場分野とものづくりにおける安全・安心の観点での取組みと、これを支えるコア技術について概説する。

## 1. 輸送機分野（自動車・船舶・鉄道・航空機）で暮らしを支える製品メニューとコア技術

### 1.1 自動車

人々の暮らしに最も身近な輸送機である自動車分野では、地球環境に関する規制強化を背景とした軽量化と、衝突時の安全性確保が求められる。社会が自動車に求める要求は変化し続け、適用される材料も新たなものが開発されてきた。当社グループは、高強度化に優れた鉄鋼と、軽量であることが特長のアルミ合金の両素材を扱う金属材料メーカーである。1990年代末から伸ばしてきた薄板ハイテン需要に対応して2004年には当時世界最高強度となる1,470 MPa級冷延ハイテンを開発するいっぽうで、並行してフード、パンパ、サスペンションアームへの適用を可能とする高強度アルミニウム合金を開発するなど、多面的な材料技術で軽量化と安全性向上に貢献してきた。お客様が求める材料を提供するには、強度や延性など材料の力学特性を支配する金属組織の制御が重要となる。これを実現するコア技術は「金属組織制御技術」と、金属組織を解析する「物理分析解析技術」で、材料の種類によらず共通的に取り組んできた。産業利用に広く普及する鉄鋼とアルミ合金は、結晶構造や強化機構など微視的には大きく異なる素材であるが、それぞれについて原子レベルで制御する幅広い技術知見を蓄積していることが当社グループの強みといえる。さらにお客様に対し、適材適所に材料を選択する考え方を示すソリューション技術にも注力しており、これらの技術群が当社グループのマルチマテリアル戦略を支えている。また、ボルトやばねに適用される特殊鋼線材については、使用中の折損を撲滅することが極めて重要であり、鋼材中に含有される粗大な非金属系介在物は折損リスクを高めるこ

とから、コア技術「金属中介在物の制御技術」を磨き上げてきた。

### 1.2 船舶

暮らしの物流を支える船舶分野では、船体、機関および諸設備について、海上で安全に航行し、かつ人命の安全を担保することが求められる。当社グループは、鑄鍛鋼、厚鋼板、溶接、機械など多様な製品メニューを提供し船舶の安全・安心に貢献してきた。エンジンなど船舶推進に関わる部品では、高強度かつ高纯净度を実現した高疲労強度クランク軸などを提供し、船体向けには船体用厚鋼板や溶接材料などを提供している。これらの材料開発は、「金属組織制御技術」、「物理分析解析技術」、「金属中介在物の制御技術」などのコア技術が支えている。また、溶接事業は船舶分野から創業した事業であり、建造時のお客様の動向やニーズにも精通しており、溶接システムや溶接施工プロセスなど、材料以外の技術領域も含めて船舶の信頼性向上に貢献している。これを可能としたのは、「金属の溶解・鑄造・溶接技術」、「溶接メカニズムモデリング技術」などのコア技術である。機械製品では、船舶用マイクロチャンネル熱交換器（DCHE）を提供しているが、これは50年以上の熱交換器製作を通して構築した技術に基づき、コンパクト化と高信頼性の両立を実現したものである。また当社グループはスクリュ式、ターボ式、レシプロ式の3機種を提供する世界有数の圧縮機メーカーでもあり、LNG燃料船にはボイルオフガスを圧縮するBOG圧縮機を提供するなど、各船舶に対し最も高効率で高信頼となる圧縮機を納入している。これらを支えるコア技術は、構造物の安全性担保のための「構造物の変形・破壊特性の評価技術」、機械製品の低振動化と低騒音化を実現する「機械の振動・音・動的特性の制御技術」、機械製品・プロセスの効率化・高性能化のための「熱・流体制御技術」である。

### 1.3 鉄道

国内の長距離・大量輸送手段である鉄道分野では、新幹線など高速車両を中心に軽量材料適用が進展しており、各種アルミ合金部材を提供している。高速車両では、軽量化と安全性の両立に加えて、軽量化によって増大する振動騒音低減のため、静音化を兼備させる技術も求め

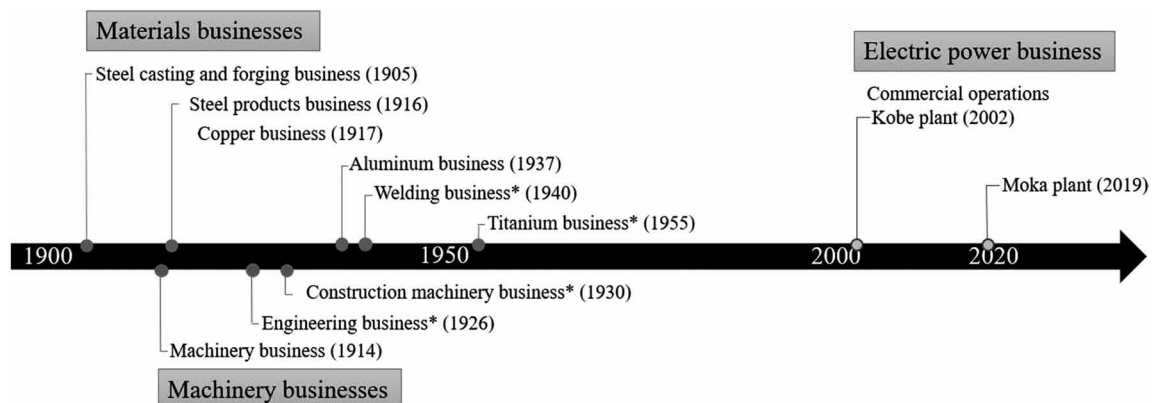


図2 KOBELCOグループの歴史（\*は国内初の事業）  
Fig.2 History of Kobelco Group (\*Japan's first industrialization)



られる。これに対して、アルミ合金に制振樹脂を貼付して遮音性を高めた制振形材や、アルミ板に微細な穴を多数開けることで吸音性を付与した多孔吸音板を実用化してきた。これら静音化を可能とする技術は「機械の振動・音・動的特性の制御技術」である。また、新交通システムのパイオニアとして、沖縄国際海洋博覧会で国内初の新交通システム<sup>1)</sup>を納入して以来、無人運転システム(信号保安、自動運転、運行管理などのシステム)のエンジニアリングを手掛けている。

#### 1.4 航空機

国際的な人々の移動手段の要である航空機分野では、機体、エンジン、装備品すべてに卓越した安全性が求められる。とくに高温高圧下で猛烈な振動にもさらされるジェットエンジンは、軽量化と耐久性を高度に両立させる必要があり、これに適用する素材の一つとしてチタン合金を提供している。当社グループはチタン合金を溶解から鍛造まで対応できる一貫生産メーカーであり、チタン鍛造品、板製品など各種素材を提供している。また、極限まで軽量化を追求する航空機分野では、多数の部品から製造されてきた組立品を一体で製造できる鋳造品が適用され、アルミ合金、マグネシウム合金など軽量金属の鋳造品を開発し貢献してきた。これらの材料開発を支えてきたコア技術は、自動車同様、「金属組織制御技術」、「物理分析解析技術」と、「金属の溶解・鋳造・溶接技術」である。

### 2. 生活基盤分野で暮らしを支える製品メニューとコア技術

当社グループは、飲料用ボトル缶用のアルミ合金、めがね・腕時計用のチタン合金など、人々の生活基盤に欠かせない素材も提供している。社会とともに変化していく素材への要求に対応し続け、その領域は構造材料に留まらず電子材料にもおよぶ。

#### 2.1 半導体

暮らしになくてはならないパソコンやテレビ、スマートフォンなどの液晶製品や、プリンタなど身近なエレクトロニクス製品の機能向上にも当社グループの部品や技術が活かされている。1989年の光磁気ディスク用ターゲット開発に端を発してターゲット事業(株式会社コベルコ科研)を本格化し、1990年以降、半導体デバイス、製造プロセス開発にも取り組み、装置事業展開や評価・分析解析基盤の構築を進めてきた。DRAM事業からは撤退したものの、その後も半導体プロセスに必要となるターゲット材料や検査機器、プロセス機器部品などの事業を継続している。現在では高度分析技術や検査技術と組み合わせ、半導体材料をデバイスとして構成したときに発現する機能を評価・解析する「電子材料機能発現技術」として再構成し、2000年以降にFPD(フラットパネルディスプレイ)向けターゲット材料<sup>2)</sup>を開発し同事業を躍進させている。ここで獲得したより高度な原子レベルの「物理分析解析技術」や計算科学などの技術基盤は、超ハイテンや高強度アルミなど構造材料の差別化にも必須な技術として現在に至っている。

#### 2.2 医療機器

ガス分離装置で培ってきた極低温技術を基盤に構築した超電導関連では、1980年より金属系超電導線材の販売を開始し、1989年より事業会社としてJASTEC(ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社)を設立し、独自開発の熱間静水圧押出による複合線材の均一加工技術を活用して事業展開してきた。超電導マグネット製造技術とあわせてNMR(核磁気共鳴)やMRI(磁気共鳴画像)に適用され、医療分野で幅広く製品展開している。これらの取り組みは「電気・磁気制御技術」の発展と共にある。

### 3. エネルギー・インフラ分野で暮らしを支える製品メニューとコア技術

#### 3.1 土木・建築

大型建築物、橋梁(きょうりょう)など土木・建築分野は、人々の安全・安心な暮らしの土台となる領域で、構造物の信頼性と長寿命化が求められる。

当社グループでは2002年に国内初となる780MPa級建築構造用厚鋼板<sup>3)</sup>を開発したが、これは阪神・淡路大震災を機に高まった高耐震性能ニーズに応えた商品であった。そのほか溶接部の安全性に優れた多様な鋼板と溶接材料を開発しているが、鋼構造物の安全性向上には鋼板の変形・破壊の素過程の制御が重要である。この観点で、材料の損傷評価技術、数値シミュレーションなど、「構造物の変形・破壊特性の評価技術」によって信頼性を担保した部材を提供してきた。また、部材を組み立てる鉄骨工場での溶接工程を自動化するための溶接用ロボットシステムも手掛けており、製造現場の安全・安心にも貢献している。

同じく2002年にライフサイクルコストを30~50%低減させる橋梁向け塗装用高耐食厚鋼板<sup>3)</sup>を開発している。錆(さび)の進行を遅らせたことがポイントで、錆の形態を精緻に制御する「金属表面制御技術」をキーテクノロジーに、高輝度放射光(SPring-8)を用いた局所解析技術などから得た知見を基に独自の表面形態制御技術を確立してきた。鋼板の力学特性のみならず、使用環境も考慮して寿命向上を図る技術であり、信頼性担保に大きく貢献している。

油圧ショベルや大型クレーンなどの建設機械においては、強度確保、振動制御、低騒音化、乗り心地改善、最適油圧制御、省エネ化など、多種多様な観点でお客様の安全・安心に貢献してきた。この分野では「機械の振動・音・動的特性の制御技術」や「構造物の変形・破壊特性の評価技術」などのコア技術が重要な役割を果たしてきた。今や私たちの暮らしの中で当たり前となったエンジンと電動機によるハイブリッド技術を、他社に先駆けて搭載した世界初のハイブリッドショベル開発にも成功している<sup>4)</sup>。ここで活用されるコア技術は「電気・磁気制御技術」である。

#### 3.2 産業インフラ

発電所や製鉄所など各種プラントの心臓部ともいえる圧縮機を提供してきた。機械事業の祖業でもあり、100



年以上の歴史と、通算10,000台以上を製造・販売した実績がある。とくにメタンの液化温度（-161.5℃）で安定して動作する高圧LNG・BOG圧縮機開発に1990年代前半から取り組み、1996年以降、LNG受け入れ基地に多数納入してきた。海上の石油・ガス生産設備など、非常に過酷な環境においても安定した稼働を実現している。また、樹脂用大型混練造粒装置は世界中に納入実績があるトップシェア製品で、年間8,000時間の連続使用が可能な耐久性と高生産性を最大の特長としている。とくにポリエチレン向けでは、世界のプラントの半分以上のシェアを獲得している。

### 3.3 社会インフラ

上下水道処理設備をはじめとする幅広い水処理技術、環境にやさしい廃棄物処理技術を保有している。これらの製品群は、いずれも社会インフラや工業プラントにおける非常に重要なコンポーネントであり、高性能に加えて極めて高い信頼性と耐久性が要求される。ここでも前節の建設機械と同様、信頼性・安全性の担保のための「構造物の変形・破壊特性の評価技術」、機械製品の低振動化と低騒音化を実現する「機械の振動・音・動的特性の制御技術」、機械製品・プロセスの効率化・高性能化のための「熱・流体制御技術」に関するコア技術の下支えにより、お客様の信頼に込めている。

### 3.4 電力

当社グループの多角化は21世紀に入っても進展し、製鉄事業における石炭インフラや自家発電で蓄積してきた操業ノウハウを最大活用した新規事業として、2002年に神戸製鉄所（現在の神戸線条工場）内に神戸発電所を建設し、電力供給事業を開始した。電力需要地に近接する都市型発電所として最高水準の環境対策を実施しており、送電ロスが極めて少なくクリーンで高効率な電力供給が可能で、都市部の電力自給率向上に寄与している。この神戸発電所が順調に稼働する中、2011年の東日本大震災によって臨海部の多くの発電所が停止した状況から、東日本地区における電力供給事業の可能性について検討を開始し、真岡製造所に隣接した工業団地に内陸大型火力発電所を2019年に開所した。真岡発電所は、都市ガスの供給を受け、最新鋭のガスタービン・コンバインドサイクル発電方式による国内最高レベルの効率で発電している。電源立地の分散化による電力インフラの強靱化（きょうじんか）に資する事業として、国土強靱化（内閣官房）およびエネルギー基盤の強靱化（経産省）の民間取組事例にも選定されている<sup>5)</sup>。これらを支えるコア技術群には、「カーボンリソース転換・利用技術」、「熱・流体制御技術」、「吸着・分離技術」「金属表面制御技術」がある。今後もこれらコア技術の高度化と新たな技術基盤の構築を進め、地域社会への電力の安定供給で貢献するとともに、バイオマス燃料混焼の開発実証、アンモニア混焼・専焼の検討などを通してカーボンニュートラルにも挑戦していく。

## 4. 安全・安心なものづくりを支えるコア技術

素材や機械製品を扱う様々なお客様に当社製品を安心

してお使いいただき、またタイムリーに製品を提供するためには、自社のものづくり力向上も重要である。当社グループのものづくりを支えるコア技術は、素材や機械など複数事業を推進する中でシナジー効果を発揮しながら高度化してきた。

### 4.1 素材のものづくり

素材系事業の各種金属材料の製造工程では、素材を高温に加熱して溶融凝固させるプロセスや、高温で熱間加工を実施するプロセスなど、高温環境での工程が必須である。これらの製造工程を制御するため、温度や形状を計測する「特殊条件下の計測技術」、燃焼制御や流動制御のための「熱・流体制御技術」を開発してきた。また製鉄所の高炉など長時間連続運転する設備を、正確に、効率よく、安全に動かすためコア技術「プロセス制御技術」もある。そして素材のプロセス制御で培った技術を、機械製品の設計やプロセスの自動化に展開し、材料と機械の両面からプロセス技術を高度化することで社会とお客様の多様なニーズに込めてきた。

### 4.2 機械のものづくり

機械メーカーとしての業種には冷間圧延機など金属加工機械もある。1980年代、情報機器の普及に伴って電子材料の生産が急拡大し、寸法精度が高い冷間圧延機が求められるようになったとき、当社はいち早く金属の板材を高精度で製造する機械設備を開発した。いっぽうで当社は金属板材を製造する素材メーカーで、金属加工設備を利用するユーザでもある。圧延プロセスを制御するためのコア技術「金属加工プロセス技術」は、その両方の立場の中で鍛えてきたものである。

機械部品の製造工程においては、素材を切削するプロセスが不可欠である。当社は機械系事業に加えて、過去には工具事業も有しており、当社グループにおけるものづくりのために機械加工における「金属加工プロセス技術」を多面的に高度化してきた。機械部品の製造において、対象物の被削性を実加工の前に予測し、最適な切削条件と工具設計を実現する工程設計を可能としている。また社内で培った難加工素材の加工技術を、お客様のものづくりを支えるソリューション技術として発展させている。

### 4.3 生産管理

当社グループは複数事業を有すると同時に、各事業体の品種構成が多様であることも特徴である。必然的に強化してきた技術に、大規模かつ複雑な生産工程において、納期達成や在庫最小化などトータルに最適化し意思決定を支援する「OR（オペレーションズ・リサーチ）応用技術」がある。生産プロセスの変革に対しても有効な技術で、2017年に神戸製鉄所の製鉄・製鋼工程を停止し加古川製鉄所に集約したが、その実現にあたって果たした貢献は大きい。工場における製造プロセスや物流最適化の取組みは、近年では、商品・サービスのライフサイクルの各過程で排出された温室効果ガス量を追跡しCO<sub>2</sub>量に換算して表示する、CFP（カーボンフットプリント）を算出・分析するモデル構築にも応用している。

素材系事業では、高温・高速の圧延プロセスなどを制

御するプロセスコンピュータや生産管理システムなど、生産プロセスの制御や管理に広くシステム技術を活用してきた。情報通信技術の進展により、大量データの蓄積や収集、計算処理の高速化が可能となり、さらにネットワーク技術や機械学習技術も大きく進化しており、これらの進化を確実に取り込むための「データ駆動科学・AI応用技術」によって、多様な事業プラントを効率的かつ環境負荷を小さくして操業することが可能となっている。

また、冒頭に述べたとおり、当社はお客様の生産・製造プラントを支える産業機械や設備プラントなどのキーコンポーネントを提供してきたが、これらは25～50年の間、安定的に稼働し続けることが求められる。設備の保守点検や交換部品の提供などアフターサービスもお客様の安全・安心に重要となる。多様な製品群をグローバルに展開する当社では、これらの効率化も至上命題であり、蓄積してきた手法やノウハウをICT活用でプラットフォーム化して高度化・効率化する「サービス化技術」へと発展を遂げている。歴史的にモノ売りを中心に技術的な発展を遂げてきた当社であるが、現在はこれらのコ

ア技術によって、お客様がモノを使用する環境において獲得できる価値に焦点を当てた活動が可能となっている。これからは当社グループの社内だけではなく、お客様と市場との対話を活性化して新たなビジネスモデルの提案を目指していく。

**むすび**＝当社グループは創業以来、人々の暮らしを豊かにするために、産業を支えるキーコンポーネントを提供し続け、その中で21のコア技術を鍛えてきた。これからも将来にわたってお客様の多様なニーズに応え続けるために、広い裾野を有する当社グループのコア技術群を縦横に組み合わせながら、社会の安全・安心な暮らしを支えていく。

#### 参 考 文 献

- 1) 神戸製鋼所. プレスリリース. 2006年3月6日  
[https://www.kobelco.co.jp/releases/2006/1175166\\_14786.html](https://www.kobelco.co.jp/releases/2006/1175166_14786.html).  
(参照2023-08-24)
- 2) 中井淳一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2005, Vol.55, No.2, p.138-142.
- 3) 大宮良信ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.1, p.40-45.
- 4) 鹿兒島昌之. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.1, p.14-18.
- 5) 藤尾明久ほか. R&D神戸製鋼技報. 2020, Vol.70, No.1, p.108-112.

(解説)

# 未来へのソリューション提供とコア技術

梶原 桂<sup>\*1</sup> (博士(工学))

## Kobelco Group's Core Technologies: Providing Solutions for Future Society

Dr. Katsura KAJIHARA

### 要旨

当社グループは、現在および未来の社会課題を解決するソリューションを提供している。カーボンニュートラルの実現に向けては、自動車分野における軽量化や電動化に貢献するための材料とソリューションの提案を進めている。また将来の日本の労働力人口の減少により懸念されているものづくり力の維持・強化の課題に対しては、熟練工の技能を補うための溶接システムやデジタル化の開発も進めている。これらの活動は、当社の素材系、機械系の事業で長年培ってきた多彩なコア技術とそれらの掛け合わせ、組み合わせに基づいている。

### Abstract

Kobelco Group is dedicated to providing solutions for current and future societal challenges. In pursuit of achieving carbon neutrality, the Group is advancing proposals for materials and solutions that contribute to weight reduction and electrification in the automotive sector. Additionally, to address concerns about maintaining and strengthening Monozukuri (manufacturing) capabilities in the face of Japan's declining labor force in the future, the Group is also developing welding systems and digitization to complement the skills of workers. These activities are based on a diverse range of core technologies that Kobe Steel has cultivated in its material and machinery businesses and their combination over the years.

### 検索用キーワード

軽量化, 電動化, 溶接システム, デジタル化, ものづくり

まえがき = これまでも未来を予測することは困難であったが、持続的な成長を目指すためには、様々な領域で起こりうる未来を洞察して、変化に対応していかなければならない。未来に起こる社会問題は、既に始まっており、地球温暖化の影響に起因する極端な異常気象による災害の頻発や干ばつによる食糧危機、海面上昇による居住地喪失などの問題がクローズアップされている。これを受け、その主原因である温室効果ガスを低減させる取り組み、いわゆる「カーボンニュートラル化」へ価値観が急速に転換している。また人口や労働力の変化も、市場、社会、経済におよぼす最も根本的な影響因子である。世界的には、人口増加による水や食糧の不足などの問題が議論になっているが、日本では、人口減少と超々高齢化社会による労働力の急速な減少により、全ての産業分野で事業の持続性が懸念されている。それによる社会保障の財政基盤悪化や経済成長の鈍化は、既に起こり始めている社会問題である。いっぽうで、従来の技術の延長では予測できない、指数関数的に成長していく「エクスポネンシャル・テクノロジー」と呼ばれる革新的な技術群が様々な分野で起こり始めている。人工知能、VR、量子コンピュータ、機械学習、自動運転車、材料科学など

で活発な技術開発と社会実装が進んでいる。これらの革新的な技術が融合した形で実用化され、当たり前のように活用される社会がどのような姿になるのか、想像していくことが必要である。

当社グループでは、これら大きな変化と予測不能な未来の社会課題に対応していくために、素材の使い方やお客様を含めたものづくりの変化に対応した機能を当社製品に加えて、その機能をお客様の製品や製造プロセスの変革に最大限活用するための「ソリューション」を提供していく取り組みも進めている。その基盤となるのは、素材系、機械系の各事業領域で長年蓄積してきた多種・多様なコア技術であり、それらを掛け合わせるものが切り口となっている。鉄鋼・アルミ・チタン・銅・溶接材料などの素材系技術、産業機械・圧縮機・建設機械などの機械系技術、そして、それぞれの事業の製造現場を支えているものづくり技術がある。加えて、これら素材や機械製品をお客様で効果的に活用していただくために、探索段階から設計、製造、サービスに至る実際の課題に対する「ソリューション」についても提供を進めてきた。本稿では、これまでのソリューション活動の事例と未来に向けた展望について解説する(図1)。

\*1 技術開発本部 ソリューション技術センター



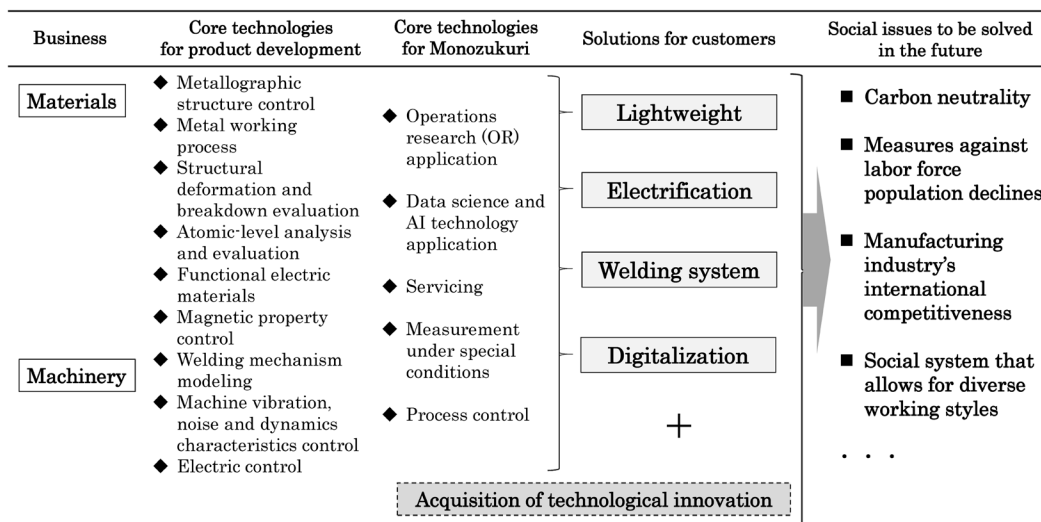


図1 未来の社会課題の解決に向けたソリューション提供  
 Fig.1 Providing solutions for the future society by Kobelco Group's core technologies

## 1. 「軽量化ソリューション」を支えるコア技術

自動車の温室効果ガス排出量削減に貢献するため、車体軽量化や電動化に必要な材料提供に長年取り組んでいる。自動車の軽量化は、従前からのガソリンエンジン車の燃費向上だけでなく、ハイブリッド車の燃費向上にも重要な役割を果たすとともに、電気自動車の航続距離延伸にも効果がある。当社ならではの「軽量化ソリューション」としては、鉄鋼、アルミなどおのおの材料中心の軽量化提案だけでなく、鋼とアルミやそのほかの材料（樹脂なども含む）の特徴を活かして、部品ごとに適材適所の材料を適用した構造設計、加えて異種材料を接合した構造設計の提案も進めていることが特長である。また足回り部品であるアルミ鍛造サスペンションやアルミ押出加工品のバンパなどの事業も手掛けている。このように、当社グループでは、お客様視点で車種に応じた安全性能、軽量化、コストを両立させる最適な材料と軽量化ソリューションを提供する「マルチマテリアル戦略」を推進してきた<sup>1)</sup>。

これらの「マルチマテリアル戦略」を強化するために、技術開発本部では、2014年に機械研究所の中にマルチマテリアル構造・接合研究室を設置し、鉄鋼やアルミの事業部門の研究者も含めた数人の部署としてスタートさせた。そして部門横断的な取り組みとして、これまでにない技術・製品を生み出せることを確認し、マルチマテリアルの技術・製品の開発を本格的に活動させるために、2017年に「自動車ソリューションセンター」として組織を独立させた。さらに2020年には将来に向けた自動車以外の社会分野への貢献も企図して「ソリューション技術センター」と名称を変更して、組織体制を変化させてきた。

「軽量化ソリューション」を支えるコア技術には、軽量化材料の開発を支える「金属組織制御技術」や軽量化部品の設計や性能（耐衝撃性能など）に求められる要件を満たすための「構造物の変形・破壊特性の評価技術」がある。これには、土木や建築分野での構造物における

線材、厚板、アルミ製品の適用を通して開発してきた数値解析シミュレーションや実験による構造性能評価技術が基盤となっている。また圧縮機などの機械製品や建設機械の構造設計に有効な構造最適化技術に加えて、振動・騒音の制御に対して古くから技術開発に力を入れてきた「機械の振動・音・動的特性の制御技術」も、自動車部品の軽量化設計に活用している。そして、ものづくりの現場で培ってきた「金属加工プロセス技術」も、部品製造や組立工程における成形加工、切削、接合工程での問題の解決策として整備してきた。

未来の社会課題の解決に向けて、自動車業界では、カーボンニュートラル化に向けた「脱炭素社会」への動きが加速しており、製造プロセス全体で温室効果ガス排出量の規制に対応していくことが求められている。当社グループでは、材料製造時の生産プロセスにおける温室効果ガス排出量を削減した鋼材やリサイクルしたアルミ材料を多くの部品に活用することを目指す「軽量化ソリューション」へ技術開発の取り組みを進めている。例えば、アルミをはじめとする軽量化材料では、鋼材に比較して製造時のCO<sub>2</sub>排出係数が大きくなる傾向にあるが、軽量化によって走行時のCO<sub>2</sub>排出量を削減することに寄与する。したがって、環境負荷低減を目指した自動車部品の材料選択と最適な構造設計のプロセスでは、これらの材料ごとの特徴を加味して、ライフサイクル全体での環境負荷を評価することが不可欠である。そこで、軽量化材料の活用により、自動車のライフサイクル全体での温室効果ガスの排出量を評価する技術、ライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment）として、トータルで環境負荷を評価し、適材適所の材料の提案につなげていく<sup>2)</sup>。

## 2. 「電動化ソリューション」を支えるコア技術

自動車や機械製品では、電動化シフトも加速しており、早期実現に向けた技術開発のスピードも速い。それに対して電動化部品の効率化を助ける磁性材料の開発と提供も推進している。電動車における直流系電動品（ソ



レノイド、電動スイッチなど)に用いられる純鉄系軟磁性材料などの線条製品、高速・高トルク用途のモータやトランス用途に用いられる磁性鉄粉、そして燃料電池スタック用チタンといった様々な製品が自動車の電動化の促進に貢献している。ここで、磁性材料の提案においても、材料の提供だけでなく、材料の磁気特性が電動部品に使われた時の性能(効率、損失評価など)をシミュレーションにより予測し、お客様に効果的に使用いただくための磁性のソリューション技術の開発が重要になっている。

当社グループでは、磁性材料のマーケティングとソリューション活動を加速させるために、2021年に鉄鋼アルミ事業部門、素形材事業部門、技術開発本部から集結して、「磁性材マーケティング開発室」を発足させた。同組織により、それまで個々に動いていた事業部門(線材条鋼、鉄粉)と技術開発部門が一緒になって、お客様への提案活動を開始した。さらに現有の材料製品だけに留まらず、お客様自身もまだ見えていない潜在的なニーズを掘り起こすこともミッションとして取り組んでいる。例えば、純鉄系軟磁性材料の磁性細線の特長を活かして、電磁鋼板を使わないモータコアを設計し、薄型・高性能化(低速、高トルク化)を実現できるアキシシャルギャップモータの開発も進めている。

「電動化ソリューション」を支えるコア技術には、金属材料の事業と技術開発の基盤として必須な「物理分析解析技術」や「電子材料機能発現技術」がある。また磁性材料を活用した電動部品の性能向上につなげる指針を得るための「電気制御技術」や「磁気制御技術」も必要な要素である。これらの電気制御や磁気制御にかかわるコア技術は、当社の圧縮機、建設機械などの機械系事業で培ってきた技術だが、機械製品で用いられるモータなどの電動部品を使用する立場からも知見を身につけてきた<sup>3)</sup>。

さらに独自の電動部品の開発も始めている。近年では、従来品と比べて発生可能な電磁力を3倍以上に高める「3次元磁極構造」を用いた電動アクチュエータ技術を開発した。本技術を実用化させることで小型かつ高トルクのモータが実現でき、従来型では性能が発揮できなかった分野への参入を期待している。例えば、ものづくりの現場において、油圧や空圧を動力源とするプレス装置を電動化させることにより、きめ細かな動作を可能とする成形加工を実現させていきたい。お客様と共創しながら、磁性材料・磁性ソリューション・デバイスの三位一体で取り組み、自動車、輸送機全般、産業機械の電動化による側面からも、カーボンニュートラルの実現に貢献していく。

### 3. 「溶接ソリューション」を支えるコア技術

当社グループの溶接事業は、1930年(昭和5年)の被覆アーク溶接棒の生産に始まる。以来、国内外の産業・ファブリケータとともに新しい溶接技術の開発・実用化を進め、社会の発展に大きく貢献しながら、溶接材料ならびに中厚板溶接用ロボットシステムの分野では国内ナ

ンバーワンの地位を堅持してきた。これまでも国内建築鉄骨分野では、工場溶接の自動化・ロボット化が進められてきたが、近年は、人手不足を背景に、現場溶接の自動化も進められている。さらに、海外においても多様な自動溶接技術のニーズが増えてきている。それに対して、当社の溶接事業部門では、溶接ロボット、溶接電源・装置、溶接材料、溶接プロセスなどの溶接技術を統合して顧客課題を解決する溶接ソリューション事業を展開している<sup>4)</sup>。

「溶接ソリューション」を支えるコア技術として、「溶接材料の最適化」が基盤にある。機械的性質や、ビード形状・外観などが良好となる溶接金属を形成する化学成分を有し、デジタル電源の制御に呼応して溶滴が安定して形成・移行し、長時間の安定した溶接が実現できるような溶接材料となっている。また「溶接メカニズムモデリング技術」として、デジタル電源がある。電流波形とワイヤ送給速度を制御することで溶滴の形成と移行を最適化し、安定した溶け込みとビード形状、高速溶接、低スパッタ・ヒュームを実現している。

生産性向上と作業者の安全衛生を確保するための「溶接ロボット」の重要度も増している。その主な構成要素のひとつとして、アーク做い機能がある。溶接時のワイヤビギング動作により、対象ワークとの距離変化により生じた微小な電流変化を検知し、溶接線のズレを検出し補正するもので、他社ロボットでは実現できない安定した高品質な溶接を実現している。また、溶接ロボットでは、溶接前に溶接ワイヤによるタッチセンシングを行い、ワークの位置を検出している。このときロボットを高速動作させると急停止した際の振動や行き過ぎによるワイヤの変形が発生し、溶接位置の検出精度が低下する。これに対して検出時に振動を抑制しながら逆方向にワイヤを移動させる軌道計画を瞬時に立案することにより、停止時間0秒によるタッチセンシング時の急停止振動抑制を実現している。さらに、センサによる位置検出機能も搭載している。アーク做いの適用できないくら型溶接のような複雑な溶接線に対して、レーザーシート光で断面形状を計測し、先端ズレ補正技術との融合により、単一の做い補正では実現が難しい高い精度での検出を可能にしている。

今後は、異次元の少子化により、人手不足がさらに深刻化することが予想される。技能を有した溶接技術者の減少に加え、その技能継承の難しさの観点からも、自動化・ロボット化をさらに加速させる必要がある。また自動車の動力源がレシプロエンジンから電気モータに替わっても、塩害腐食、軽量化、耐疲労性など足回り部品に求められる特性に変化はない。したがって、現状の電着塗装性良好な溶接材料や高強度鋼材向け溶接材料にさらに新たな価値を付加し、自動車分野へ溶接ソリューションを展開していくことも考えている。

### 4. 「デジタル化ソリューション」を支えるコア技術

ものづくりの製造現場や業務のデジタル化を推進することは、効率的な生産活動を実現するためだけでなく、

新たな価値の創造につなげていくために必要不可欠である。当社グループでは、DX（デジタル・トランスフォーメーション）を推進し、加速させるために、2021年に、技術開発本部の中に「デジタルイノベーション技術センター」を設立した。同センターのミッションは、お客様や社会のニーズを起点に、デジタル技術で業務変革や価値創造を推進する当社グループのDX戦略において、先進技術の開発と事業適用で変革を先導することにある。グループの機能分担センターとして、DXに関する最新技術の取り込みと技術の担保に加えて、データ利活用の人材育成、データ活用基盤の整備にも取り組んでいる。

「デジタル化ソリューション」を支えるコア技術においても、素材系・機械系の製造業として、ものづくりの現場で技術開発を進めてきた生産管理技術、制御技術、計測技術が基盤であり、これらの専門家集団が起点となり、新たなデジタル化、AIの技術開発と利活用技術の開発を推進している<sup>5)</sup>。「オペレーションズ・リサーチ（OR）応用技術」は、複雑で巨大な製鉄所の操業の自動化や最適化の取り組み、生産管理業務へのコンピュータ活用の歴史から端を発している。「データ駆動科学・AI応用技術」も1980年代の計算科学の発展により、物理モデルによる材質の制御、プラント操業や機械製品の動作制御への適用と応用により構築してきた基盤技術であり、機械学習の発展に伴い、進化しているAI技術の取り組みへとつながっている。近年では、材料開発において、統計分析などを活用したインフォマティクス（情報学）の手法「マテリアルズ・インフォマティクス（MI）」を導入している。大量のデータの分析と機械学習から、目標特性を得るための成分設計や製造条件の最適化を迅速に進める材料開発を、鋼材、アルミ、銅などへ展開するとともに、新材料の探索の試みを進めている。

また「サービス化技術」について、お客様との相互のコミュニケーションとして営業、マーケティング、開発、設計、製造、サービスなどバリューチェーン全体をデータをつないだプラットフォームを構築している。代表的な取り組みとして、お客様との接点強化では、受注・納期情報、生産管理、操業状況などを工場・サプライチェーン全体で連携させて、多品種変量工場の生産マネジメントの整備を順次進めている。AI・ICTを活用した設

計効率化など、お客様・開発・製造をデータでつなぐことで業務を変革させ、新しい価値の提供を目指している。ものづくりの現場においても、デジタル技術を駆使して多品種プロセスを高度化し、工場全体をつないで自動化・最適化を推進し、安全・高品質・効率的な製造現場の実現にむけて取り組んでいる。

ものづくりを支える要素基盤の一つである「特殊条件下の計測技術」として、様々な材料や大型構造物の表面および内部品質を担保するための非破壊検査技術や、高炉など高温・粉じんなどの過酷環境下におけるプロセス計測技術、数十mサイズの圧延機の動的挙動からサブnmサイズのシリコンウェーハ平坦度を評価する表面形状計測技術などがある。いずれも特殊な用途・環境条件下における独自の計測技術であり、ものづくりの現場へ「デジタル化ソリューション」を推し進めるための必要なコア技術である。

このように「デジタル化ソリューション」は、あらゆる分野の課題解決に有効である。社会全体でデータ化が急速に進んでおり、「データ」という経営資源を最大限に活用していくことは、未来の社会課題を解決するための不可欠な要素であることは言うまでもない。社会の変化をチャンスと捉えて、デジタル技術による業務変革と価値創造に挑戦していく。

**むすび** = 未来の社会課題の解決に対して、当社グループの長年の事業を通じて構築してきた「点」のコア技術を複数掛け合わせて、実用の世界で活躍する製品・技術・サービスに役立つ「面」の技術として構築し、さらにお客様の事業に貢献することのできる「立体」的なソリューションへと発展させていく。

#### 参 考 文 献

- 1) R&D神戸製鋼技報「特集：自動車軽量化」. 2019, Vol.69, No.1.
- 2) 江崎澄代ほか.「自動車部品の材料選択・構造設計への環境負荷評価の適用」. 第18回日本LCA学会研究発表会. 2023年3月, 2-B3-02.
- 3) R&D神戸製鋼技報「特集：社会の多様なニーズを支える機能性材料とそのソリューション」. 2022, Vol.71, No.2.
- 4) R&D神戸製鋼技報「特集：溶接・接合技術」. 2018, Vol.67, No.1.
- 5) R&D神戸製鋼技報「特集：ICT活用」. 2018, Vol.68, No.2.

(解説)



## 素材系分野のものづくりを支える溶解・鋳造・溶接技術

石田 斉\*<sup>1</sup> (博士(工学))

### Melting, Casting, and Welding Technologies Supporting the Art of Manufacturing in Materials Business

Dr. Hitoshi ISHIDA

#### 要旨

溶解・鋳造・溶接技術は、KOBELCOグループの多様な素材系事業のものづくりを支える重要なコア技術として、鉄鋼、アルミ、銅、鋳鍛鋼、チタン、溶接の各分野の特徴に応じて技術開発が進められてきた。さらに近年では、原料品位の劣質化が進展し、CO<sub>2</sub>削減や資源循環の観点でのリサイクル素材の使用拡大が急速に求められており、将来のカーボンニュートラルに向けた技術開発も数多く行われている。これら各素材系分野の溶解・鋳造・溶接技術の進展と将来に向けた取り組みを紹介する。

#### Abstract

Melting, casting, and welding are essential core technologies that support the art of manufacturing in the Kobelco Group's diverse materials businesses. Technological development has been promoted, considering the unique characteristics of each field: steel, aluminum, copper, cast & forged steel, titanium, and welding. In recent years, there has been a degradation in the quality of raw materials, leading to rapid demand for the expanded use of recycled materials from the perspective of CO<sub>2</sub> reduction and resource circulation. Numerous technologies are currently being developed with the aim of achieving carbon neutrality in the future. This article introduces the progress and future efforts related to melting, casting, and welding technologies in each materials business.

#### 検索用キーワード

溶解, 精錬, 鋳造, 溶接, 割れ, アーク炉灰, CCIM, ESW

まえがき = KOBELCOグループは、鉄鋼材料、アルミ、銅、チタンなどの非鉄材料、溶接材料などの多岐にわたる素材を有する特徴あるメーカーとして、自動車、航空機、造船、鉄道、食品容器、エレクトロニクス、建築土木などを主なお客様としている。特徴ある技術・製品・サービスの一例として、特殊鋼線材や高張力鋼板（ハイテン）、自動車用アルミパネル板、自動車サスペンション用アルミ鍛造部品、クランクシャフト、アルミディスク材、半導体用リードフレーム材、銅めっきなしソリッドワイヤなどがあげられる。これらの金属材料は、輸送機、社会インフラ、産業インフラに活用され、長年にわたり人々の「安全・安心なまちづくり・ものづくり」を支えてきた。いっぽう近年では、原料高や資源調達のリスクが強まるとともに原料品位の劣質化が進展している。このため、将来のカーボンニュートラルに向けたCO<sub>2</sub>削減、ならびに資源循環の観点でのリサイクル素材の使用拡大が急速に求められており、「グリーン社会への貢献」や「未来へのソリューション提案」の観点でも、技術開発が行われている。

これら素材系分野のものづくりにおいて、金属材料の溶解鋳造プロセスは素材の生まれとなる工程であり、製品品質の良し悪しを左右する出発点であるともいえる。また、素材同士をつなぎ合わせる溶接プロセスは構造材

に不可欠な工程であり、強度・延性・じん性への高い信頼性が要求される。当社の溶解・鋳造・溶接技術の特徴は、(1) 高温冶金現象に基づく精錬反応を制御し所望の成分に調整しつつ、不要な成分・ガス・介在物などの不純物を除去して高纯净度化する「溶解技術」、(2) 割れや鋳造欠陥の防止、結晶粒の微細化、凝固組織の制御などを図りながら高品質な素材として固める「鋳造技術」、(3) 溶解と鋳造を同時に制御して接合し、高品質で高効率かつ作業性に優れる「溶接技術」、である。これらの技術は、当社の多様な素材系事業のものづくりの競争力を支えるコア技術として、創業以来、鉄鋼、アルミ、銅、鋳鍛鋼、チタン、溶接の各分野の特徴に応じて開発が進められ、相互に磨き上げてきた。さらに将来に向けて、自社もしくはサプライチェーン全体でのCO<sub>2</sub>削減を実現し、不純物を多く含む低品位原料を使いこなすための「溶解・鋳造・溶接技術」の革新にも取り組んでいる。

本稿ではこれら各素材系分野のものづくりを支える溶解・鋳造・溶接技術と将来に向けた取り組みを紹介する。

#### 1. 素材系分野の溶解・鋳造・溶接技術

1章では、鉄鋼、アルミ、銅、鋳鍛鋼、チタン、溶接の各分野について、共通するコア技術を基盤に、材料ご

\*<sup>1</sup> 技術開発本部 材料研究所



とに異なる製造プロセスの特徴に応じて多様な形で発展を遂げてきた、溶解・鋳造・溶接技術を紹介する。

### 1.1 鉄鋼

鉄鋼分野において、神戸製鉄所（現・神戸線条工場）では線材・棒鋼、加古川製鉄所では、鋼材3品種（線材・棒鋼、薄鋼板、厚鋼板）を生産してきた。しかし、生産性とコスト競争力を強化し、お客様の要求品質に応える高付加価値化を実現するため、製鋼分野における高度な溶解・鋳造技術を開発・適用し、上工程の集約を推進した。2014年に新溶銑処理工場を稼働させ、2017年の上工程集約以降に機械攪拌（かくはん）式脱硫設備（以下、KRという）、転炉型脱りん炉の各2基体制を構築した。また、2次精錬工程では、溶鋼処理能力の高い取鋼製煉炉（以下、LFという）と真空脱ガス装置（以下、RHという）を用いた方式を採用し、連続鋳造工程では全鋼種を高生産性、高歩留まり、高品質で鋳造できる5ストランドブルーム連铸機（以下、6CCという）を新設した。これらプロセスごとの取り組みにより、小ロット多品種である線材、棒鋼などの特殊鋼製品を高品質・低コストで大量に生産できるようになった<sup>1)</sup>。

これらの製鋼工程における溶解鋳造のコア技術として、高品質で高効率な溶鋼処理を実現するため、平衡論や速度論に基づく高温冶金反応制御技術、水モデルや流動凝固解析<sup>2)</sup>などの化学工学的な実験解析技術を構築しており、脱硫、脱りんなどの反応効率向上や窒素制御、清浄化を図っている。つぎに、これらのコア技術による製鋼プロセスの変革を詳細に解説する。

新溶銑処理工場では、KRと転炉型脱りん炉を新設して脱珪（だっけい）、脱硫、脱りん、脱炭を機能分担し、プロセス高効率化と溶銑処理能力向上を図った（図1）。これにより、転炉における脱珪・脱りん負荷を軽減することができ、吹錬時間短縮による粗鋼生産能力の向上を果たしている。

脱硫技術では、強攪拌による反応効率向上を狙い、水モデル実験や5t KR試験で脱硫剤の分散性に及ぼすインペラ回転数と浸漬深さの影響を明らかにし、安価な石灰、アルミ灰を使用して高効率な脱硫を可能にしている（図2）。脱りん技術においても、反応速度式や水モデル実験で底吹き攪拌効果の最大化、底吹高流量下でも長寿命化を可能とする底吹き羽口耐火物仕様の最適化を行う

	Before	After	Improvement
De-Si	Temperature decrease and reaction rate unstable FeO (Solid)	Temperature increase and reaction rate stable Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> powder (Solid), O <sub>2</sub>	Heating by gas oxygen ⇒ Heat loss decreased ⇒ High efficiency reaction for De-S ⇒ Iron yield increased
De-S	Compensation for low stirring energy by expensive flux CaC <sub>2</sub>	Strong stirring by impeller CaO	Strong stirring ⇒ High efficiency reaction for De-S ⇒ Low cost
De-P	Compensation for low stirring energy by lengthening of treatment time CaO-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> flux	Strong stirring by bottom blowing gas N <sub>2</sub> (Gas)	Strong stirring ⇒ High efficiency reaction for De-P ⇒ Iron yield increase

図1 溶銑処理プロセスにおける機能分担とその効果

Fig.1 Improvement by allotment of refining function in hot-metal pretreatment

ことで、高効率な脱りん反応を実現している<sup>3)</sup>。

その他KRでは、省スペースでの前後スラグ分取を可能とする設備配置によるスラグ利材化の最適化や、2章で詳述する当社真岡製造所で発生するアーク炉残灰利用技術<sup>4), 5)</sup>を確立した。脱りん炉では、炉内付着地金の溶解技術やスラグ冷却促進技術を確立するとともに、シミュレーションを用いて物流の最適化を図った<sup>6)</sup>。

2次精錬工程では、RHにて窒素濃度を所定範囲内に制御するため、独自の工夫を施して、環流ガス種、ガス流量、槽内真空度、溶鋼成分などの影響を考慮した窒素濃度予測計算システムを構築した（図3<sup>7)</sup>。またLFでは、スラグ巻き込みによる清浄度悪化の懸念に対して、スラグ設計と攪拌条件を組み合わせることにより、清浄化処理、介在物制御、S濃度制御を実現した。これらのLF、RHなどを用いた溶鋼処理技術により、介在物制御<sup>8)~10)</sup>や超清浄鋼<sup>11)</sup>などの高品質鋼の製造を可能としている。溶鋼処理を済ませた後、6CCでは、安定流動制御と小ロット対応が可能な大型タンディッシュ設計、冷却速度の多様化に加えて冷却の均一性と良好なメンテナンス性を兼ね備えた3次冷却設備により、高品質・高機能を有した各種特殊鋼生産を可能にしている。

将来に向けては、製鋼分野におけるこれらの高度な溶

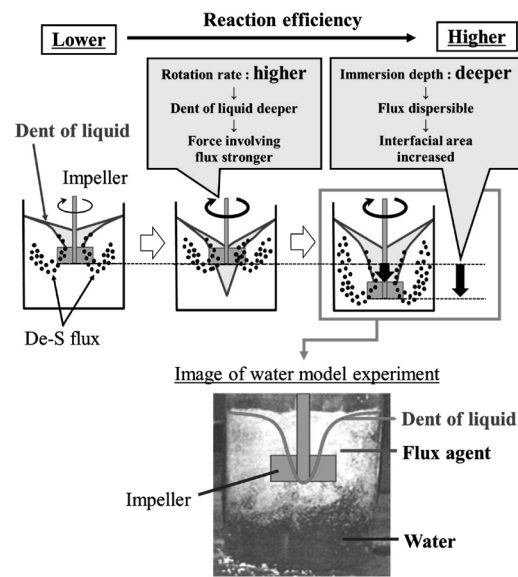


図2 インペラ回転数と浸漬深さが脱硫剤巻き込み挙動におよぼす影響

Fig.2 Influence of rotation speed and immersion depth of impeller on dispersion of desulfurization agent

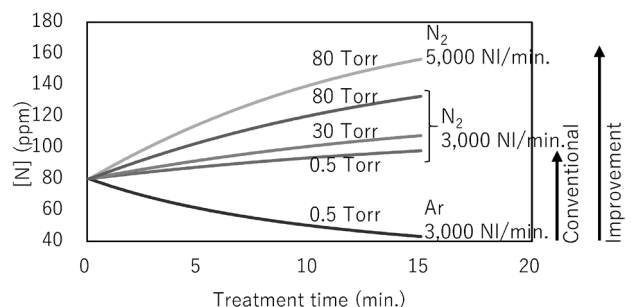


図3 RH環流条件が[N]挙動に及ぼす影響（計算結果）

Fig.3 Influence of RH treatment conditions on [N] contents (calculation results)



解・鋳造技術を活用するとともに、高度なAI技術の活用を含めて技術レベルの向上を図り、お客様の要求品質に応える高付加価値化を実現する。さらにカーボンニュートラルへのニーズに対しても、業界に先駆けた低CO<sub>2</sub>高炉鋼材 (Kobenable Steel) を拡販するとともに、電炉による高級鋼製造に向けて、低品位原料やスクラップなどの多様な原材料の使いこなしに必要な溶解・鋳造技術の開発を推進していく。

## 1.2 アルミ

アルミ分野において、真岡工場は型材や板製品の製造を行っており、溶解炉、保持炉、DC (Direct Chill) 鋳造機、国内最大級の広幅圧延機などを有し、飲料用缶材や磁気ディスク用サブストレート材、自動車用パネル材を生産している。また、大安工場は航空機部品製造で培われた鋳鍛造技術を有し、油圧鍛造品、砂型鋳造品、自動車用アルミ足回り鍛造品などの一貫生産体制を確立し、長府工場でも世界トップクラスの技術力を誇るアルミ押出材を製造している。

一般にアルミ溶解工程は、溶解炉、保持炉、脱ガス装置、フィルタの設備を用いて、原料の溶解、成分調整、溶湯温度調整、溶湯清浄化が行われる。合金の迅速溶解と溶湯清浄化を低コストで達成するためには、とくに不純物除去の溶湯処理工程に高度な精錬技術が必要となる。アルカリ金属、水素、介在物などの不純物を除去するため、保持炉でのフラックス精錬、脱ガス装置による水素ガス、介在物除去、フィルタ処理による介在物ろ過などの技術が挙げられる<sup>12)</sup>。溶解精錬後のアルミの連続鋳造方法は、DC鋳造が用いられる。基本原理は1935年に発明されたものであり、国内展伸材の主要プロセスとなっている。鋳造プロセスでは、鋳塊形状、凝固組織の確保を行い、とくに、割れや鋳造欠陥の防止、結晶粒の微細化、形状寸法精度の確保などの技術が必要となる<sup>13)</sup>。

これら溶解鋳造の課題に対し、溶湯清浄化に向けた高温冶金反応制御技術やDC鋳造割れ防止のための熱応力解析技術など、高度な溶解・鋳造技術を開発し、お客様の要求品質に応える高付加価値化に貢献している。鋳造技術の一例を示すと、大型の矩形 (くけい) DC鋳造の鋳造割れのほとんどは鋳塊の表面から始まる表面割れであり、当社は割れ防止の鋳造技術を長年にわたって蓄積してきた。表面割れの起点は固液共存域で発生していることから、同温度域で表面から鋳塊が割れるメカニズムを熱移動と凝固過程を考慮して推定するとともに、合金組成による鋳造割れ抑制ポイントについて検討し、対策を実施している<sup>14)~17)</sup>。

具体的には、半凝固部のデンドライトが収縮することでひずみが生じ、特定の固相率領域でのひずみ量の大きさおよびひずみ速度の差で割れが生じると仮定し、収縮ひずみ量を表す割れ伝播パラメータ $\Delta T_{II}$ と固相率変化に対する温度勾配を用いて割れ感受性を表す割れ起点パラメータ $\Delta R_{II}/\Delta T_{II}$ で整理した。複数の合金組成について、3段階の鋳造速度 (60 mm/min, 80 mm/min, 100 mm/min) での割れ発生の有無を◎○△×で評価した結果、

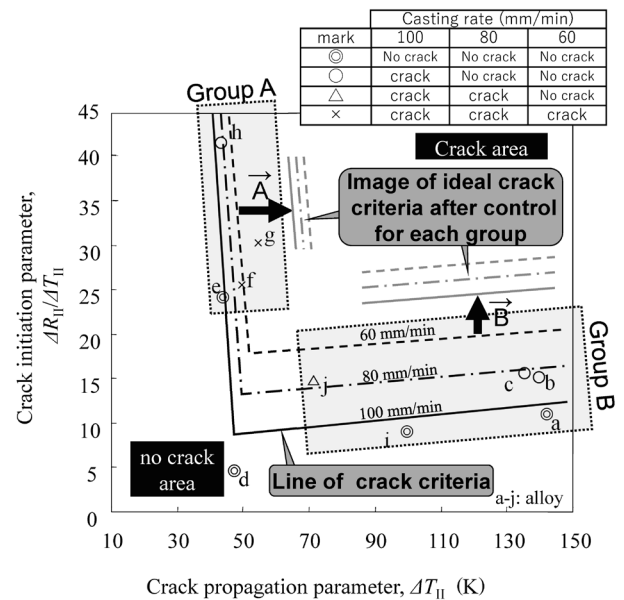


図4 各割れ感受性評価パラメータによる各種合金の割れ感受性評価結果と各グループの割れ防止の考え方

Fig.4 Crack sensitivity evaluation of each alloy by crack sensitivity parameter and crack prevention concept for each group

各鋳造速度においてこれら二つのパラメータが大きい領域で割れが発生しやすいことを明らかにした (図4)。このように割れ感受性を定量的に表現することで、割れ発生モードが異なる合金種に対しても、割れを抑制する考え方を明示可能とした。

今後も高度化する要求品質に応えるため、溶解・鋳造プロセスの品質向上、安定化に向けて一層の技術開発を進めている。近年、アルミ分野でもお客様のCO<sub>2</sub>削減要求が強く、社内外スクラップ活用や副産物リサイクルの潮流が加速している。当社ではカーボンニュートラル社会に向けて、アルミスクラップリサイクルの技術開発にも積極的に取り組んでおり、当社独自の特徴ある溶解鋳造技術をさらに発展させていく。

## 1.3 銅

銅の溶解プロセスについて、長府製造所の溶解炉はシャフト炉とコアレス炉の二種類がある。シャフト炉は溶解能力が大きいことから、量産用の主力溶解炉として使用されている。シャフト炉は原料を効率良く溶解できるが、成分調整ができないため、電気保持炉で所定の成分に調整されたのち鋳造される。長府製造所ではKFC<sup>®</sup>注1) (高導電性耐熱合金) を主体とする純銅系合金の製造に使用している。コアレス炉は誘導加熱で原料を溶解する。コアレス炉は種湯が必要なく、室温から原料を溶かすことが可能で、一般的には少量多品種の溶解に適しており、NiやFeといった高融点金属の溶解も得意な特徴を生かして、KLF<sup>®</sup>注2) (高強度・高導電性銅合金) 並びにCAC<sup>®</sup>注3) (高強度・高加工性銅合金) シリーズの溶解に使用している。

銅溶解鋳造においても、平衡論や速度論に基づく高温冶金反応制御技術、シミュレーションなどの実験解析技

脚注1) KFC<sup>®</sup>は当社の商標である。

脚注2) KLF<sup>®</sup>は当社の商標である。

脚注3) CAC<sup>®</sup>は当社の商標である。

術を構築し、高纯净度化や铸塊品質向上を図っている。

健全な铸塊を得るには、溶解铸造段階でガスや介在物の少ない清浄な溶湯を作る必要がある。品質不良の原因となる $H_2$ ガス、水蒸気、 $CO_2$ ガスなどを極力排除すべく、原料から設備、炉内雰囲気まで管理し高品質な製品製造に対応している。また、連続铸造では熱間圧延を前提にして、断面が矩形で長さが4~6 mの铸塊を製作している。铸塊品質に関わる铸型の設計や铸造条件について、旧来は経験やトライアンドエラーによるところが大きかったが、最近では凝固・熱応力解析技術の進歩により、シミュレーションによってモールド形状や铸造条件を決定できるようになっている<sup>18), 19)</sup>。それにより、中高温脆性によって铸塊の段階で割れやすい合金系の製造、铸塊内部の欠陥の抑制、表面品質の向上などが可能となり、数多くの品種を生産することに対応できる体制となっている。近年では、さらなるシミュレーション技術の進展とともに铸造プロセスをより詳細に解析可能となっているが、実験技術においてもSPring-8の放射光を活用した微視的な凝固現象のその場観察にも取り組んでおり、ミクロ偏析が铸造割れに及ぼす影響などの理論的解明も進展している。今後も、鋼分野は自動車電動化や半導体需要拡大などにおけるお客様の価値向上に向けて、高度な解析技術や実験技術に裏付けられた高品質の素材を提供し、新たなカーボンニュートラルのニーズにも応えていく。

#### 1.4 铸鍛鋼

铸鍛鋼事業は当社創業と同時に铸物生産から出発し、そのうち船舶用品を加え、現在は一体型/組立型クランク軸の大型铸鍛鋼品を主力製品とする国内唯一の舶用品フルラインナップに対応している。なかでもクランク軸はエンジンの主要部品であるがゆえに高強度、高疲労強度が要求されることから、溶解铸造プロセスにおける高纯净度化技術が不可欠である。ここに当社の高度な溶解・铸造技術と介在物制御技術を適用することで不純物元素の低減、介在物混入・生成の抑制を実現し、国内外のお客様から高い信頼を獲得している。

溶解工程において、クランク軸内の不純物元素を低く抑えるためには、とくにりん、硫黄の除去や脱ガス処理が重要である。当社では、1988年ごろまでは出鋼脱ガス法と呼ばれる製鋼プロセスが用いられてきたが、1993年に取鍋精錬炉（真空保持炉）を設置し、電気炉から一度溶鋼を取鍋に受け、取鍋内で精錬を行う炉外精錬法が適用されている。これにより、電気炉内では限界があった硫黄などの不純物元素や酸素などのガス成分の除去が可能となり、クランク軸をはじめとする大型铸鍛鋼品の高品質化に寄与している<sup>20)~22)</sup>。また、介在物制御技術の詳細は本紙別報をご参照いただきたいが、疲労破壊の起点となる介在物の低減を目的とし、不純物元素の低減や精錬条件の最適化、造塊条件の改良を進め、高纯净度化技術を開発した<sup>23)</sup>。高纯净度鋼では、現用清浄度鋼に対して20%以上、従来鋼に対して最大40%近く疲労強度が向上し、設計に用いる疲労強度の算出時に使用する係数k-factorについて全船級協会からk=1.15の承認取得を完

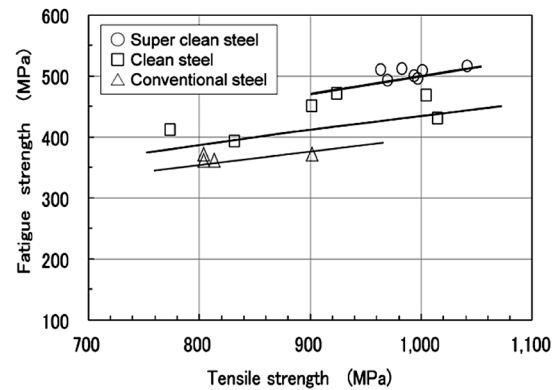


図5 一体型クランク軸用高纯净度鋼の疲労強度  
Fig.5 Fatigue strength of super clean steel for solid type crankshaft

了している。これにより、当社材は通常値（1.00）に対し設計段階で疲労強度において15%の余裕度が認められ、エンジンの高出力化、コンパクト化が図られることが期待されている（図5）<sup>24)</sup>。

将来のカーボンニュートラルに向けた電気炉のスクラップ利用拡大による $CO_2$ 削減や、資源循環の観点で副産物の利活用においても当社技術の活用が可能である。今後も低品位原料の使いこなしと高纯净度化の両立を推進し、船舶品の安全・安心なものづくりに向けた生産性向上、品質安定化に取り組み、輸送機器の社会変化に伴うニーズに応えていく。

#### 1.5 チタン

当社チタン事業は、スクラップチタンの安定溶解技術とコイル圧延技術により大量生産を可能にし、チタンを日本で初めて実用化した会社として日本のチタン産業をリードしてきており、お客様との強固な関係と豊富な納入実績を有する。チタンは酸素などと反応しやすい活性金属であることから、真空アーク溶解（以下、VARという）、および2章で詳述するコールドクルーシブル誘導溶解（以下、CCIMという）などの特殊な溶解・铸造技術を開発し、特殊溶解環境下での高温冶金反応制御技術、偏析制御技術を構築し、お客様の要求品質に応える高付加価値化を実現してきた。

VAR法は、スポンジチタンを合金原料とともにプレス成形してブリケットとし、これを溶接して棒状の消耗電極とする。真空または不活性ガス雰囲気下の水冷銅るつぼ内で、消耗電極と溶湯表面との間にアークを発生させ、その熱により消耗電極を溶融して溶滴として落下させる。溶湯プールは一方向凝固に近く、铸塊表面品質改善のために静磁場を付加して溶湯プールを回転攪拌することなども行われる。一回の溶解だけでは铸塊の合金成分均質化が不十分なため、初回溶解の铸塊を消耗電極として再度溶解する二重溶解が一般的であり、とくに高品質を要求される航空宇宙材料では三重溶解も行われる。

本溶解法は消耗電極表面と溶湯プールが近い距離で対面する配置となるため、熱放射ロスが少なく電力消費量の少ないことが特徴であるが、スクラップなどを原料として利用しにくいことが課題であった。そこで当社独自技術として、一次溶解において消耗電極と銅るつぼ壁との間（100 mm程度）からスクラップ細片などを連続的



に装入し高効率で均質に溶解する技術（神戸法）を実用化し、これにより溶解所要時間を50%、電力消費量を60%程度にまで低減している<sup>25)</sup>。さらにVAR鑄塊偏析予測モデルを開発し、VAR鑄塊の非定常部の濃度変化を考慮することで、鑄塊全体にわたる成分分布を予測し鑄塊品質の向上につなげている<sup>26)</sup>。

## 1.6 溶接

当社の溶接事業は、国内で唯一、溶接材料、ロボットシステム、電源、施工法のトータルメニューを有し、材料、システム、プロセスの組み合わせによる多様な溶接ソリューションの提案を行っている。その歴史は、1940年に始まって以来、産業のキーテクノロジーである溶接技術の開発をリードし、各産業の進歩に伴い変化する顧客ニーズに対応してきた。長年にわたり蓄積された多岐にわたる溶接コア技術の詳細は本号「溶接コア技術の開発と社会実装」p.98~104をご参照いただくとして、ここでは、安全・安心なものづくりに向けた溶接金属の凝固割れ改善技術の事例を紹介する。

溶接現象も局所的に見れば、接合部の溶融池で溶解と鑄造が同時に起こっており、鉄鋼材料などの高温冶金反応と凝固挙動を制御するコア技術が活用できる。TiO<sub>2</sub>系FCW（フラックス入りワイヤ）は、全姿勢溶接作業性が良好であるため造船・橋梁（きょうりょう）分野で広く用いられているが、片面突合せ初層溶接部の溶接においては凝固割れが発生しやすい傾向にあり、凝固割れの抑制に取り組んだ<sup>27)</sup>。まず、脱酸元素の存在状態を考慮した凝固割れ評価式を新たに構築した。凝固割れ感受性をより正確に評価するうえで、ミクロ偏析に加えて溶接金属中に含まれる酸化物の存在状態を考慮し、化合物を形成しやすい強脱酸元素の影響を明らかにした。また、鋼材やアルミの凝固割れ感受性の評価にはミクロ偏析を考慮した各種モデルが提案されているが、ミクロ偏析に加えて、新たにTiO<sub>2</sub>系FCWで形成されている溶接金属部に含まれる強脱酸元素の酸化物の存在状態を考慮した凝固割れ評価式を構築した<sup>27)</sup>。さらに、鋼材やアルミで行われる不均質核生成による凝固組織微細化の知見をもとに、非金属介在物を活用した溶接金属の凝固組織制御に着眼し、TiNに加え、Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub>でも炭素鋼溶接金属の等軸晶化が可能であることを明らかにして、凝固割れ抑制指針を示した。

その他にも、溶接材料の様々な品種に対して、多様な用途や環境での使い方に合致した素材系事業の知見や溶解鑄造のコア技術を活用した溶接材料設計に取り組んでおり、今後も複数の素材系事業を有する当社の特徴を活かして溶接技術を進歩させていく。

## 2. 未来に向けた溶解・鑄造・溶接技術の最新事例

「安全・安心なまちづくり・ものづくり」、「グリーン社会への貢献」および「未来へのソリューション提案」の観点で、とくにカーボンニュートラルに向けたCO<sub>2</sub>削減ニーズや、生産プロセスで発生するリサイクル材の資源循環を進めるための溶解・鑄造・溶接技術開発の最新事例について紹介する。

### 2.1 アーク炉灰を利用した溶銑脱硫技術の開発

複数の素材系事業を有する当社ならではの資源循環の事例として、溶解プロセスで発生する副産物の利活用における鉄鋼事業とアルミ事業がコラボレーションした取り組みを紹介する。加古川製鉄所の製鋼における脱硫プロセスでは、石灰に加えてアルミ灰（金属アルミニウム、アルミナ含有）を溶銑に添加して機械攪拌し、脱硫促進している。いっぽう、真岡アルミ工場では、溶解工程で生成するアルミドロス（金属アルミニウムと酸化物の混合物）からの効率的な金属アルミニウム回収、回収後の残灰の無害化処理と再資源化を目的とした回転式アーク炉を実用化している<sup>28)</sup>。残渣として発生するアーク炉灰は、一般的なアルミ灰と比べて、脱硫に有効な金属アルミニウムが少なく、代わりに窒化アルミニウム（AlN）が多いという課題があったが、この脱硫剤利用に着想し、アーク炉灰の脱硫剤利用条件を明確化することで、事業所間の副産物リサイクルを実現した<sup>29)</sup>。

アーク炉灰の脱硫効率を300 kg ラボ試験で検証した結果、脱硫初期の脱硫速度はアルミ灰に劣るものの、石灰-50%アーク炉灰の使用により、10 min 処理で[S] 0.005 wt% 以下を達成できることを確認した。さらにアーク炉灰の脱硫寄与メカニズムについても検証したが、AlNは溶銑中で分解することで脱硫に有効なAl濃度を上昇させ、またその傾向は高温ほど顕著であることを確認した。以上をふまえて、加古川製鉄所における機械攪拌脱硫における脱硫剤へのアーク炉灰配合設計手法が確立されている。

本成果は、複数の素材系事業を持つ当社ならではの事業所間連携の事例であり、鉄鋼とアルミニウムの溶解鑄造技術に精通しているからこそ可能な着想ともいえる。また、新技術を当社グループ内で量産実証したうえで、社外展開できることも強みであり、リサイクルや資源循環においてお客様が抱える様々な課題に対して、当社の技術力を生かした貢献を目指していく。

### 2.2 CCIM溶解鑄造技術の開発

チタンアルミ金属間化合物基合金（TiAl）は、Ni基合金に比べて密度が約半分と軽量であり、かつ高温強度に優れることから、近年の燃費削減ニーズやカーボンニュートラルに向けたCO<sub>2</sub>排出抑制を背景に、民間航空機用ジェットエンジンの低圧タービンプレードへの採用が進んでいる。TiAlは融点が高く、溶融温度では激しく酸化されやすい非常に活性な合金であり、溶解には様々な溶解技術が用いられるが、ここではコールドクルーシブル誘導溶解法（以下、CCIM法という）における最近の技術開発成果を紹介する<sup>30)</sup>。

CCIM法は、鉄鋼材料の溶解で一般的な真空誘導溶解法の耐火物をつぼを、水冷銅製の多数のセグメントで構成されるつぼに置換した溶解法である。本溶解法はVARなどと異なり、全原料を一括溶融する方式であり、溶湯成分の調整などが容易となるため合金の溶解に適している。CCIM法でのTiAl溶解における課題は、成分均質性と高歩留まりを両立する溶解鑄造プロセス、および低コスト化と低CO<sub>2</sub>化を実現するためのスクラップ



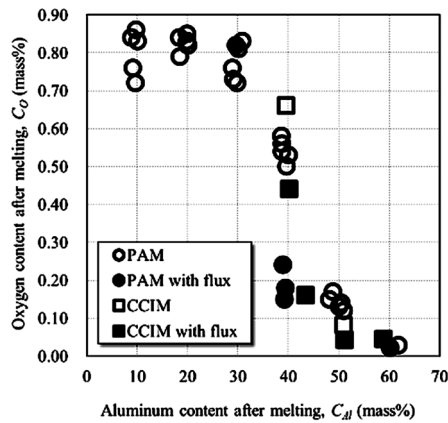


図6 フラックス添加時の溶融TiAl中脱酸挙動のAl濃度依存性  
Fig.6 Effect of aluminum content on deoxidation behavior in molten TiAl with flux addition

処理プロセスの基盤技術の確立であった。成分の制御技術を高度化するため、溶解中のオンラインの迅速分析技術を開発して、Al濃度ばらつきを狭幅制御することが可能となった。また、鑄造速度を制御することにより、鑄造欠陥のない鑄塊を製造できることを明らかにし、鑄造歩留まりを改善した。さらに、SDGsにおける資源循環促進の観点からスクラップなどをリサイクルする場合、活性金属であるチタンにおいては不純物元素としてとくに酸素の除去が重要な課題であるため、TiAl金属間化合物を題材に新たな脱酸技術の開発に取り組んだ。熱力学的な観点ではTi-Al-O三元系状態図において、アルミ濃度が30~40 mass%以上になると金属間化合物中の酸素溶解度が著しく低下することに着目し、CCIM法あるいはPAM (Plasma Arc Melting) 法を用いたTiAl溶解中にアルミニウムを高濃度で添加すること、さらにフラックスを添加することによる脱酸プロセスの有効性を実証した(図6)。

本成果は、TiAlのCCIM法による高度な特殊溶解技術に加えて、スクラップリサイクルを最大活用できる新たな付加価値を加えたものであり、ほかのチタン合金にも活用できる技術である。航空宇宙分野をはじめとするチタン使用のニーズが拡大していく中、ますます求められるカーボンニュートラルに向けたCO<sub>2</sub>削減、SDGsにおける資源循環促進の取り組みとともに今後の実用化に向けた発展が期待できる。

### 2.3 新エレクトロスラグ溶接法の開発

立向自動溶接としてエレクトロスラグ溶接法(以下、ESW法という)の適用拡大が期待されており、新たなESW法(SES<sup>TM</sup>注4)31)の開発が行われている。溶接作業性の改善、高品質化、自動化における溶接作業の負荷軽減と脱技術化に役立てる施工法であり、その取り組みの中で9%Ni鋼への適用可能性も見出した32)。

新ESW法の特徴として、エレクトロスラグ溶接の長所(スパッタやヒュームが少なく、耐風性が良好)を維持しながら、短所(溶接長の制限)を克服しており、スラグ浴制御機能に、水冷摺動(しゅうどう)銅板方式を採用することで、長尺溶接が可能となっている。トーチ

のオシレート範囲が拡張され、1パスで溶接可能な最大板厚が80 mmとなっており、極厚板溶接において、良好な溶込みと溶接性が確保されている。板厚30 mmの9%Ni鋼板を12%Ni系溶接材料でESW試験評価した結果、良好なビード外観を示し、溶接金属の引張強さと低温じん性も向上した。

近年、天然ガスから排出されるCO<sub>2</sub>をオフセットする新たな取り組みとして、カーボンニュートラルLNGの導入が始まっており、その手段の一つとしてCO<sub>2</sub>回収・貯留が期待されている。液化CO<sub>2</sub>貯蔵タンクには、9%Ni鋼の適用が計画されているが、極低温用鋼の適用可能性も高まっている。また、洋上風力発電設備などの再生可能エネルギーにおける極厚板の高エネルギー溶接施工への適用も期待される。今後もエネルギー分野に向けた高品質、高エネルギー溶接施工を提案し、CO<sub>2</sub>循環のインフラ構築へのより一層の貢献が期待できる。

むすび=溶解・鑄造・溶接技術は、KOBELCOグループの多岐にわたる素材のものづくりを支える技術として、各事業分野のニーズに応じて開発が進められてきた。未来に描くカーボンニュートラルや資源リサイクルによる持続可能な世界の実現に向けて、素材系事業の多様な技術力を融合して溶解・鑄造・溶接技術を発展させ、CO<sub>2</sub>削減や資源循環のニーズに応えていきたい。

### 参考文献

- 1) 浜田 努. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.2, p.3-8.
- 2) 仲山公規ほか. R&D神戸製鋼技報. 2001, Vol.51, No.3, p.2-8.
- 3) 齋藤幸介ほか. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.2, p.32-36.
- 4) 渡辺大輔ほか. Iron Steel Technology. 2018, Vol.15, p.74.
- 5) 西村友伸ほか. R&D神戸製鋼技報. 1997, Vol.47, No.3, p.31-34.
- 6) 岩谷敏治. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.68, No.2, p.29-35.
- 7) 吉田康将ほか. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.2, p.26-31.
- 8) 木村世意ほか. R&D神戸製鋼技報. 2004, Vol.54, No.3, p.25-28.
- 9) 木村世意ほか. 鉄と鋼. 2002, Vol.88, No.11, p.53.
- 10) Tomoko SUGIMURA et al. ISIJ International. 2011, Vol.51, No.12, p.1982.
- 11) 太田裕己ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.1, p.98-101.
- 12) 高橋功一. 軽金属. 2015, Vol.65, No.10, p.518-522.
- 13) 高橋功一. 軽金属. 2015, Vol.65, No.11, p.599-603.
- 14) 森下 誠ほか. R&D神戸製鋼技報. 2008, Vol.58, No.3, p.23-28.
- 15) 森下 誠ほか. 軽金属. 2009, Vol.59, No.8, p.417-423.
- 16) M. Morishita et al. Mat. Trans. 2011, Vol.52, No.2, p.166-172.
- 17) 森下 誠ほか. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.2, p.18-23.
- 18) 竹内勝彦ほか. 伸銅技術研究会誌. 1998, Vol.37, p.182-188.
- 19) 石飛秀樹ほか. 伸銅技術研究会誌. 1998, Vol.37, p.189-194.
- 20) 森 啓之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2000, Vol.50, No.3, p.41-45.
- 21) 岡村正義ほか. R&D神戸製鋼技報. 1983, Vol.33, No.3, p.3-7.
- 22) A. Suzuki. 10th International Forging Conference Sheffield. 1985.
- 23) 篠崎智也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.1, p.94-97.
- 24) 藤綱宜之. R&D神戸製鋼技報. 2016, Vol.66, No.1, p.2-6.
- 25) 草道龍彦ほか. R&D神戸製鋼技報. 1999, Vol.49, No.3, p.13-14.
- 26) 横山 弘ほか. R&D神戸製鋼技報. 2005, Vol.55, No.3, p.57-60.
- 27) 島本正樹ほか. R&D神戸製鋼技報. 2013, Vol.63, No.1, p.32-36.
- 28) 徳田健二. 軽金属. 2009, Vol.59, No.11, p.652-653.
- 29) Takero Adachi et al. "Utilization of low-grade aluminum ash for mechanical stirring desulfurization process". 7th International Congress on Science and Technology of Steelmaking. Venice. 13-15 June 2018. Organized by ASSOCIAZIONE ITALIANA DI METALLURGIA. ICS081.
- 30) 松若大介ほか. R&D神戸製鋼技報. 2020, Vol.70, No.2, p.27-31.
- 31) 柿崎智紀. ほうだより. 2020, Vol.507, p.2-6.
- 32) 柿崎智紀ほか. 溶接学会誌. 2021, Vol.90, No.6, p.18-23.

脚注4) SES<sup>TM</sup>は当社の商標である。

(解説)



## 金属中介在物の制御技術を用いた高信頼性製品の創出

足立毅郎\*1

### Creation of High-Reliability Products Using Technology for Controlling Inclusions in Metals

Takero ADACHI

#### 要旨

介在物は金属製造工程において金属中に生成・混入する物質のことであり、その制御は素材の特性を決定付ける重要な因子の一つである。介在物制御技術は、介在物徹底除去による金属の高清浄度化技術、介在物物性制御による無害化技術、介在物の形態・分散制御による活用技術の三つに大別される。これらの技術は素材安定性能やものづくりにおける生産性の確保につながるとともに、金属製造工程における副産物中の鉱物相制御に応用することで副産物資源化を促進し、グリーン社会構築にもつながる技術である。本記事では、その開発の歴史および今後の展望を、当社を代表する製品群に即して概説する。

#### Abstract

The term “inclusions” refers to substances that are generated or mixed into metals during metal manufacturing processes, and their control is an essential factor in determining the material's properties. Inclusion control technology can be broadly categorized into three types: technology for thoroughly removing inclusions to enhance metal purity, technology for controlling inclusions to render their properties harmless, and technology for controlling the morphology and dispersion of inclusions for utilization. These technologies contribute to ensuring material stability and productivity in manufacturing processes and promote the utilization of by-products by applying them to mineral phase control of the by-products in metal manufacturing processes, thereby contributing to the advancement of by-product resource utilization and the establishment of a green society. This paper provides an overview of the history of the development and future prospects of these technologies, focusing on product lines representative of Kobe Steel.

#### 検索用キーワード

介在物, 鋼材品質, 清浄度, 清浄化, 無害化, 微細化, 鉱物相, スラグ

まえがき = 素材系事業を核とする当社の初めてのビジネスは、1905年の船舶用大型鋼塊品であり、そこから派生し1920年に鉄鋼線材・棒鋼の生産を開始した。現代においても、一体型/組立型クランクシャフトや自動車エンジン用弁ばね用鋼といった高い信頼性が求められる分野でイニシアチブを握っているが、これら製品の品質は鋼材中の「介在物」を制御する技術によって支えられている。

介在物は鋼材中に存在している酸化物、硫化物、窒化物などの非金属化合物である。鋼材中に介在物が存在すると、低温環境下での衝撃による破壊や、繰り返し応力による疲労破壊、線材製品の伸線・撚線（よりせん）加工における断線といった問題につながる。

介在物の起源は、溶鋼再酸化、耐火物の混入、精錬時のスラグ巻き込みといったものから、脱酸生成物（低炭素鋼において脱炭吹錬の後に脱酸素素を加えるときに生成する酸化物）まで、多岐にわたる。とくに脱酸生成物に関しては工程上不可避免的に生成・混入するものであることから、除去ではなく「微細化・無害化」を志向している。いっぽう、介在物が常に素材の特性に悪影響を及

ぼす訳ではなく、介在物を起点とした鋼材組織制御や、被削性改善の観点で介在物を利用する技術も開発されるなど、特性向上のために積極活用されることもある。

以上のことから介在物のコントロールは素材の成績を決定づける重要な因子の一つであり、有害な介在物を可能な限り除去して高清浄度化するとともに、無害化や積極利用する介在物に関しては所望の組成・サイズに制御して素材中に保持させる技術が必要である。本技術は、素材品質の安定性や、ものづくりにおける生産性の確保に必要な不可欠な技術であり、当社マテリアリティに掲げる「安全・安心なまちづくり、ものづくりへの貢献」につながる。本稿では、当社を代表する製品群において、介在物の制御技術がどのように培われ適用されてきたか、および今後の展望を概説する。

#### 1. 鋼材の高清浄度化技術：鋳鍛鋼、軸受鋼

当社の手掛ける鋳鍛鋼製品は素材系事業の中でも最も歴史が古く、1914年には当時国内最大の1,200トンプレスを用いた大型クランク軸を製造するなど、産業化が悲願であった分野に積極果敢に挑戦してきた。今日では、

\*1 技術開発本部 材料研究所



一体型／組立型クランク軸などの長い経験と技術力に裏打ちされた船舶に欠かせない大型製品を生産している。

鑄鍛鋼の製造プロセスは、銑鉄／スクラップなどの原料を溶解し、溶鋼処理を経て鑄造したあと、高温プレスにより製品を形作っていくものであるが、精錬の際には製品の疲労強度を著しく悪化させる粗大な介在物の生成を抑制しなければならない。鋼塊の高清浄化のためには、介在物源となる硫黄や酸素を除去する必要がある。このため当社高砂製作所では、1993年に炉外精錬法の適用を開始し、スラグ反応の促進と氧化物系介在物の浮上分離を両立し得る攪拌（かくはん）条件を確立することで、高清浄度鋼の製造を可能としている<sup>1)</sup>。

また、製品保証の観点から製品中の介在物を検査する方法も求められる。当社は、一体型クランク軸に対し独自の自動超音波探傷装置を開発し、品質の担保と省人化を実現している。詳細は、本号p.50-51、「KOBELCOのものづくりを支える高度計測技術」を参照されたい。

ほかにも介在物制御による高清浄度を適用した素材の例として、軸受鋼が挙げられる。軸受鋼は産業機械に欠かせない重要素材であり、転動疲労寿命を確保するために高い清浄度が求められる。転動疲労寿命を低下させる非金属介在物としては $Al_2O_3$ 系介在物が代表的だが、同時にCaO含有介在物も問題となる。当社では、その生成または混入起源の解明のために、実機トレーサー添加試験および速度論的な解析を実施した。その結果、CaO含有介在物の生成起源はスラグ巻き込みであることを突き止め、巻き込み対策および介在物浮上促進対策の適用により、介在物個数を約1/4に低減させることが可能となった<sup>2)</sup>。

加えて、高清浄鋼では鋼材中の酸素濃度が数ppmと低い場合、微量な介在物量ならびにサイズを正確に把握する評価手法が求められる。この目的においては被検量の大きい酸分解による化学抽出分離法が適しているが、

CaO含有介在物は酸に対して化学的に不安定という問題があった。そこで当社グループでは、塩化第一鉄を用いて鋼材を溶体化して介在物を抽出するスライム法に注目し、溶体化処理温度とpHを適正化することにより、数kg単位の鋼材からCaO含有介在物を抽出・分析できる手法を開発した<sup>3)</sup>。

さらに、溶鋼中の介在物の浮上分離挙動を検討するため、数値計算による流動シミュレーションも活用している。鋼の連続鑄造機においては、鑄型内に流入した介在物が凝固時に鋼塊中に捕捉されないよう除去する必要があり、そのために電磁攪拌装置の使用条件や浸漬ノズル形状の検討がなされている。これらの対策による効果を可視化するために、溶鋼流動シミュレーションにより連鑄機内での介在物の運動挙動予測を行っている<sup>4)</sup>。

また、介在物は凝集体による浮力差を利用して分離させることが可能であるが、この挙動を再現するために、表面性質（濡れ）も考慮した介在物の乱流凝集のモデル化を行い、溶鋼流動と連成する技術を開発した。本技術は連続鑄造機のタンディッシュなどにおける凝集分離挙動の検討に活用している（図1）<sup>5)</sup>。この図から、下流に行くに従い単一粒子の個数が凝集進行により減少し（図1(a)）、凝集した粒子が増加（図1(b)）していることが確認できる。

本章で述べたような介在物制御による高清浄度は、鋼本来の性質を引き出すために不可欠な技術である。例えば鑄鍛鋼製品が多く使用される船舶・エネルギー分野では、カーボンニュートラルを始めとした資源問題の高まりを受け、船舶大型化による輸送効率の向上がより一層求められる。鋼材を軽量化しつつ疲労強度や衝突安全性を確保するためには、介在物制御により鋼材の性能を引き出し、それを保証する評価・検査技術の要求が増すことは明らかであるため、本技術の継続的な高度化を行っていくことで、安全・安心な社会に貢献していく。

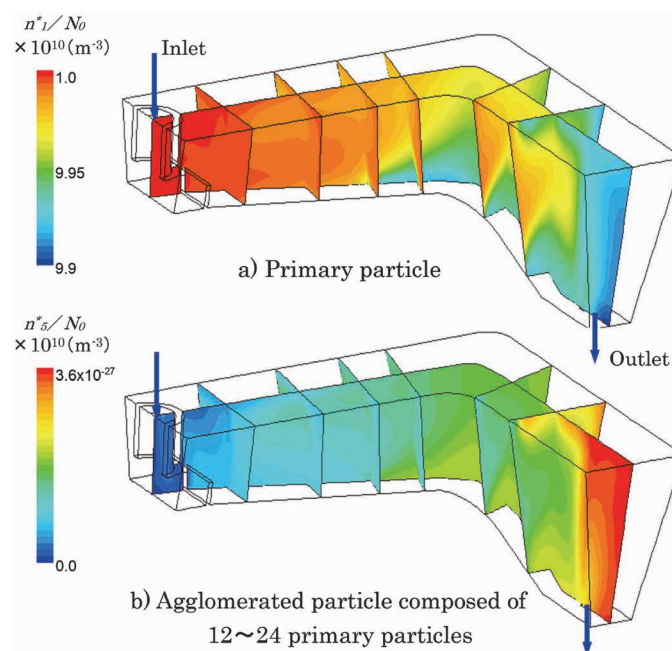


図1 3CCタンディッシュ内の介在物の凝集体グループごとの個数濃度分布（初期濃度で規格化）  
Fig.1 Distribution of number of inclusions in 3CC tundish (Normalized by initial concentration)



## 2. 介在物の微細化・無害化技術：線材

線材製品は、タイヤ補強材として使用されるスチールコード、エンジンの吸・排気運動を支える弁ばね用鋼など、疲労強度・耐へたり性とといった面で高い水準の信頼性が要求される部材に多く使用されている。なかでも当社が高いシェアを誇る弁ばね用鋼（図2）は、数千回/分という高い繰り返し荷重のなかで、高い疲労特性が要求される。従来は材料の強度自体が最終製品の特性を支配していたが、1970年にJIS化された1900 MPa級Si-Cr鋼オイルテンパー線の開発をきっかけに、介在物起因の折損問題が顕在化した<sup>6)</sup>。

弁ばね用鋼やスチールコードには強度を確保するために0.5~0.8%程度の炭素を含む高炭素鋼線材が使用される。この線材を製造する際、鋼中の溶存酸素を低減するためにCa, Al, Mn, Siなどの脱酸元素を添加する処置を行うが、これによって生成した酸化物系介在物が、製品中に粗大な介在物となって残存すると折損起点となる。脱酸処理による酸化物系介在物は不可避免的に生成するものであり、除去が困難なことから、線材製品においてはその影響を無害化するために、加工工程において介在物を延伸微細化させ、破壊起点とならないよう対策をとっている。

延伸微細化のされやすさは介在物種により異なり、とくに $Al_2O_3$ のような硬質介在物は微細化されにくいことが分かっている。このため高強度が要求される弁ばねでは脱酸元素としてシリコン添加を採用し、さらにCaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系のスラグと反応させることで介在物を(Ca, Mn, Mg) O-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系低融点組成に制御し、微細化されやすい物性を持った介在物とする技術が適用されて

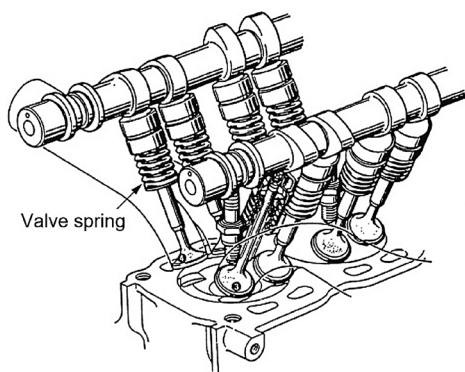


図2 自動車用エンジンに組み込まれた弁ばね  
Fig.2 Valve springs built into automobile engine

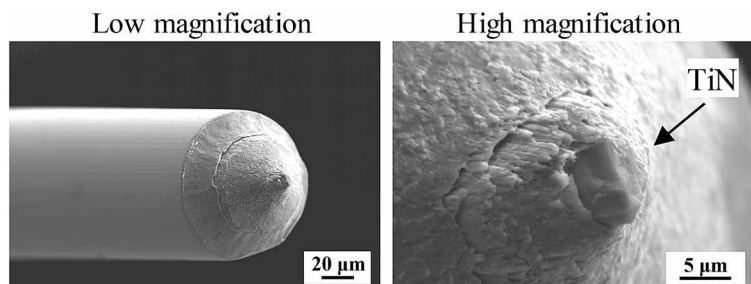


図3 窒化チタンを起点とする極細線の断線破面  
Fig.3 Fracture surface of fine wire starting from TiN

いる。

介在物中の $Al_2O_3$ 成分が上昇すると微細化されにくくなることから、溶鋼中の溶存Al成分とスラグの反応による $Al_2O_3$ 生成を回避する必要がある。この反応を熱力学的に検討するためには、溶鋼中Al濃度の分析技術が必要であるが、酸溶解⇒ICP発光分光分析による分析方法では、介在物中の $Al_2O_3$ も一部が溶解されてAl濃度として検出されてしまうという問題があった。

そこで当社では、試料表面へのイオン照射に呼応して放出される二次イオンを質量分析する、二次イオン質量分析計(SIMS)<sup>7)</sup>を活用し、ppmオーダーの微量な溶存Al濃度を測定することで、 $Al_2O_3$ 介在物の生成条件を詳細に検討し、鋼材成分設計に活用している<sup>8)</sup>。

さらにこのSIMS分析技術を他元素にも適用し、溶存Ca濃度と介在物との反応の速度論的解析にも活用している。これにより、スチールコードにおける介在物の高CaO組成への改質は溶存Caと介在物との反応ではなく、巻き込みスラグとの合体の寄与が大きいと結論付け、これに基づき溶鋼攪拌を最適化し、よりスラグを巻き込みやすいように溶製を行っている<sup>9), 10)</sup>。

いっぽう、高炭素鋼線材は用途拡大に伴い細線化も進んでおり、その一例であるシリコンインゴット切断用ワイヤにおいては50~130 μmの極細線が要求される。従来は30~50 μm程度の $Al_2O_3$ などの非金属介在物を起因に折損していたものが、細線化に伴い5~20 μm程度の微細なTiN介在物によっても折損することが確認された(図3)。

TiNは次章で述べるように、溶接・厚板分野では組織微細化のために積極活用されている。この開発において獲得したTiN生成制御に関する知見は、超極細高炭素鋼線材におけるTiN生成抑制にも応用されている<sup>11)</sup>。さらに、凝固現象も考慮した熱力学検討の結果、TiNの生成はマクロ偏析によるTi溶質の濃化によるものであると推定しており、この仮説を裏付けるためのppm~ppbオーダー溶存Ti濃度分析に関して上述した二次イオン分析装置が活用されている。また、TiNの抽出分離のために確立した酸溶解法と大気雰囲気処置を組み合わせた独自の抽出技術には、長年開発してきた化学抽出分離技術のノウハウが活かされている。このように、様々な製品を開発する中で培った介在物制御・評価技術が脈々と受け継がれ、新たな製品の創出へとつながっている。

### 3. 介在物の活用技術：厚鋼板，溶接材料，快削鋼

当社は1986年に加古川製鉄所で厚板工場を稼働させ、造船、建築、橋梁（きょうりょう）、エネルギー、産業機械といった分野に様々な高機能厚鋼板を供給している。厚鋼板は需要家において溶接接合により構造物に作り上げられることが一般的であり、施工コスト低減、工期短縮のために、大入熱溶接に対応できる厚鋼板が求められる。溶接熱影響部（HAZ）では入熱により組織が変化して靱性（じんせい）が低下するという問題に対し、当社では析出物（介在物）であるTiNを積極活用して靱性を改善するKST（Kobe Super Toughness）処理を技術の核として厚鋼板を製造してきた。鋼材中のチタンおよび窒素成分比の適正化によりTiNを鋼材中に微細分散させ、靱性低下要因となるオーステナイト粒粗大化を抑制することができる。加えて当社では、50 kJ/mmを超える大入熱溶接においてTiN微細分散の阻害要因となる $\delta$ フェライト温度域を狭幅化する合金成分設計により、**図4**のとおり大入熱溶接においてもTiN平均粒径 $\bar{d}$ を低減し、微細分散を実現できる厚板商品の開発に成功している<sup>12)</sup>。

いっぽう、当社は溶接ワイヤの開発および製造も手掛けている。溶接ワイヤのなかでもチタニヤ（TiO<sub>2</sub>）を用いたフラックス入りワイヤ（FCW）は全姿勢溶接作業性が良好という特徴を有しており、造船・橋梁分野で広く用いられている。しかしながら、一般的にチタニヤ系FCWはソリッドワイヤと比べて高温割れ感受性が高く、凝固時に割れが発生しやすいという弱点を有していた。

この凝固割れを抑制するために、厚鋼板でも述べたTiN介在物を不均質核生成の核として活用し、凝固形態を柱状晶から等軸晶に遷移させる手段が報告されている。しかし、TiNを生成させるために窒素濃度を高めると、窒素ガス起因の気孔欠陥が発生しやすいという問題が生じるため、TiN以外の酸化物系介在物を活用した技術を検討した。この結果、TiO<sub>2</sub>を凝固組織制御に活用して凝固割れ感受性を改善できることが明らかとなり、製品設計に反映した<sup>13)</sup>。

ほかにも、介在物を積極活用した例として快削鋼が挙

げられる。快削鋼は油圧部品などに使用される鋼材で、高精度の切削加工が要求されることから被削性が重要となる。被削性の改善にはPbの添加が有効であるが、環境への負荷が大きい。そこで、MnSを大型・球状化して鋼中に分散させることで被削性改善に有効な微小クラック発生サイトとして活用するコンセプトの材料設計を行い、Pbフリー快削鋼の開発に成功している<sup>14)</sup>。

上述した介在物活用による鋼材特性の発現のように、これからの時代に求められる材料に対して、まだ発見されていない介在物による特性改善が発見される可能性も十分に考えられる。これまで述べてきた介在物制御は、そうした介在物の有用性をいち早く捉え、用途に応じた形態制御を実現することで、新製品の創出に貢献できる技術である。

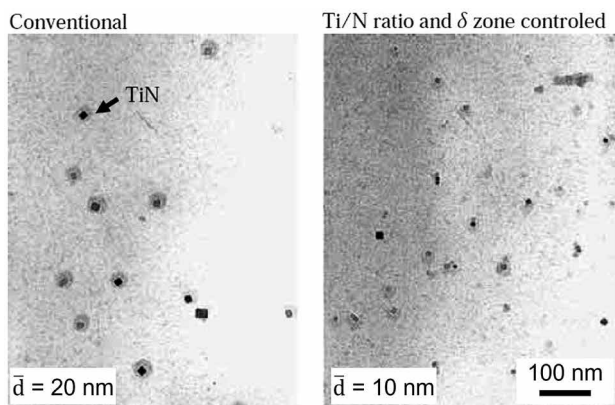
### 4. 介在物制御技術の将来展望

製鉄業における中長期的な課題は、カーボンニュートラルならびに資源循環型社会への転換に向けて低CO<sub>2</sub>鉄源である直接還元鉄や鉄スクラップを多量使用できる溶解、精錬、鑄造プロセスを開発していくことである。このとき、鋼材中の介在物は原料やプロセスによって変化するため、環境の変化に応じて介在物の影響を抑制するための制御技術が必要となる。

評価技術の観点からは、例えばスクラップに含まれ精錬除去が難しいCu、Snなどの元素（トランプエレメント）を迅速に検出する技術が確立されれば、より広範な原料を受け入れることができるようになる。

さらに、介在物制御技術は鋼材中に目標組成・サイズの化合物を保持させる技術ともいえるが、この対象を鉄鋼副産物であるスラグに応用することで、スラグの再資源化に有効な「鉍物相制御技術」にも波及させることができる。例えば、製鋼スラグの用途である路盤材における膨張抑制の観点で、膨張を引き起こす鉍物相の特定により資源化も考慮したスラグ設計が可能である<sup>15)</sup>。また、当社はスラグ中のCa分を利用してCO<sub>2</sub>をCaCO<sub>3</sub>炭酸塩として固定化し、CO<sub>2</sub>削減とCa分の再資源化を行うCCUS技術にも取り組んでいるが<sup>16)</sup>、このプロセスの抽出工程においてCa分を抽出しやすいスラグを製造するために鉍物相制御技術が有効と考えられる。以上のことから、介在物制御技術はカーボンニュートラル下における鋼材品質保持、ならびに副産物資源循環の促進の双方に寄与することができ、素材の信頼性のみならず当社マテリアリティ「グリーン社会への貢献」にも通じていく技術であるといえる。

最後に、本稿では鋼材に関する介在物制御技術について概説したが、これ以外にアルミ、銅、チタン、マグネシウムなどの多様な素材を扱う当社グループにおいて、本技術は、素材の品質を担保しさらには資源環境に対応しながら副産物リサイクルを推進していく土台のひとつとなる重要な技術である。本技術を軸に、当社グループのシナジーを発揮していくことで、時代の要求に応じた多様な素材製品の創出とグリーン社会の構築に貢献していく。



**図4** TiN分散形態に及ぼすTi/Nバランス、合金成分の影響  
**Fig.4** Influences of Ti/N ratio and alloying elements on dispersion of TiN particles

むすび=材料開発においては、2章の線材で述べたTiN起因折損のように、高機能化要求に伴い、従来にはなかった問題が次々と発生する。当社における介在物制御技術は、新たな課題が顕在化するたびにその介在物起源を特定したり、従来見えなかったものを評価できるようにしたりと、長きにわたる開発のなかで継続的に進化してきた。このことが当社のオンリーワン製品を支える重要な技術群の構築につながっている。

今後もカーボンニュートラルや資源問題など、社会環境の変化に伴い材料に求められる特性の大きな変化が予想される。これからも本稿で述べた介在物制御技術を核に、KOBELCOならではの新たな材料を世に送り出すことで社会の発展に貢献していく。

#### 参 考 文 献

- 1) 篠崎智也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.1, p.94-97.
- 2) 太田裕己ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.1, p.98-101.
- 3) (株)神戸製鋼所. 神崎祐一ほか. 鋼中のCaO含有介在物の分析方法. 特開2002-340885. 2002-11-27.
- 4) 中岡威博. 特殊鋼. 2004, Vol.53, p.17.
- 5) 中岡威博. R&D神戸製鋼技報. 2006, Vol.56, No.1, p.40-43.
- 6) 茨木信彦. R&D神戸製鋼技報. 2000, Vol.50, No.3, p.27-30.
- 7) 山元清史ほか. R&D神戸製鋼技報. 1998, Vol.48, No.3, p.72-76.
- 8) 富岡活智ほか. CAMP-ISIJ. 1995, Vol.8, No.1, p.186.
- 9) 木村世意ほか. CAMP-ISIJ. 2003, Vol.16, No.4, p.840.
- 10) 木村世意ほか. R&D神戸製鋼技報. 2004, Vol.54, No.3, p.25-28.
- 11) 杉谷 崇ほか. R&D神戸製鋼技報. 2021, Vol.71, No.1, p.70-75.
- 12) 大宮良信ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.1, p.40-45.
- 13) 島本正樹ほか. R&D神戸製鋼技報. 2013, Vol.63, No.1, p.32-36.
- 14) 坂本浩一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2006, Vol.56, No.3, p.35-39.
- 15) 佐々木達弥ほか. CAMP-ISIJ. 2020, Vol.33, No.2, p.520.
- 16) 佐々木達弥ほか. Journal of the Society of Inorganic Materials. 2023, Vol.30, No.423, p.47-52.



(解説)



## 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\*<sup>1</sup> (博士(工学))

### Metallographic Structure Control Technology Contributing to Development of New Metallic Materials to Meet Social Demands

Dr. Toshio MURAKAMI

#### 要旨

当社は金属材料の総合メーカーとして、社会の様々な要望に応えるために、鉄鋼、アルミニウム合金、銅合金、チタン合金、溶接材料といった各種金属材料の性能改善を進めるための要素基盤技術として金属組織制御技術の高度化を進めてきた。ここでは、持続可能な社会に貢献する軽量化ソリューションの取り組みとして自動車用超ハイテンならびにアルミニウム合金の開発を、安全・安心なまちづくりへの貢献の取り組みとして厚鋼板・溶接材料の開発を、金属組織制御技術の取り組みの事例として紹介する。また、今後、想定される大きな社会変化に対応するために今後の金属組織制御技術の方向性について述べる。

#### Abstract

Kobe Steel, as a comprehensive manufacturer of metal materials, has been advancing the refinement of metallographic structure control technology as a fundamental technology to enhance the performance of various metal materials, including steel, aluminum alloys, copper alloys, titanium alloys, and welding materials, in order to meet the diverse demands of society. This paper presents examples of the company's initiatives: the development of ultra-high-strength steel and aluminum alloys for automotive applications as part of its efforts towards weight-reduction solutions that contribute to a sustainable society, and the development of thick steel plates and welding materials, working toward the creation of safe and secure communities. These examples serve to showcase the application of the metallographic structure control technology. Furthermore, the paper discusses the future direction of this technology as an effective response to anticipated significant societal changes.

#### 検索用キーワード

金属組織制御技術, 鉄鋼材料, アルミニウム合金, 軽量化

まえがき = どのような製品でも、その製品を構成する素材が必要になり、用途や性能、機能、コストなどの様々な観点から、どの素材を使用するか選択される。その中でも金属材料は、種類によって強度や延性・韌性（じんせい）、導電性、熱伝導性などの性能が多様であるとともに、良好な性能を比較的安価に、多量に供給できることが特長となっている。そのため、周期的に新素材ブームが生じて一部の用途が置き換わっても、金属材料の重要性は変わらず、社会を支える重要な素材であり続けている。金属材料が活用され続けているのは、性能が優れるだけでなく、社会構造の変化に伴い、高まる要求に応えるために、絶え間なく改善が進められてきたことが一つの要因と考えられる。

当社では、金属材料の総合メーカーとして、鉄鋼材料（線材条鋼、厚鋼板、薄鋼板、鍛造鋼品、鉄粉）、アルミニウム合金（アルミ板、アルミ鍛造品、アルミ押出材）、銅合金、チタン合金、溶接材料といった各種金属材料を生産し、自動車、鉄道車両、船舶、航空機などの輸送用機械、建設用・建築用金属製品、産業用機械、電気機械、電子部品・デバイス・電子回路などの様々な産業に提供して、最終製品に活用されている。これらの製品に適用

される金属材料の性能のうち、高強度化と成形性などの変形特性を両立できれば、自動車に代表される輸送用機械の重量低減を実現することで走行時の燃費改善によるCO<sub>2</sub>排出量を低減、持続可能な社会の実現に貢献することができる。また、韌性や疲労特性に代表される構造材料の信頼性に関わる性能を高めることができれば、最終製品の信頼性を高め、より安全でより安心な社会に貢献することができる。

金属材料の性能はその成分に加え、金属中の「組織（microstructure）」と呼ばれるミクロンオーダーからナノオーダーの結晶分布状態が支配している。そのため、様々な金属材料の性能を制御するための「金属組織制御技術」は当社の金属材料製品の競争力を支える重要な要素基盤技術の一つである。

金属組織制御技術は、基本的に金属中の組織を要求特性に応じて、成分設計や加工、熱処理により適切な状態に制御する技術であるが、対象とする要求特性や材料に応じて制御すべき観点が変化する。例えば、自動車の骨格部品のように複雑な形状の部品に成形加工され、衝突時のエネルギー吸収のために変形する部位に適用される場合は高強度と延性を同時に確保する必要がある。そのた

\*<sup>1</sup> 技術開発本部 材料研究所

めには、高強度だが延性が低い組織と低強度でも延性の高い組織を混在させるような組織制御や、金属結晶の方向を変形しやすいようにコントロールするような組織制御が活用される。いっぽう、建築物や船舶など、使用中に壊れてはいけないう構造物に適用される場合は、靱性、疲労特性などの構造物の信頼性に関わる性能が求められるため、金属組織の均一性や結晶粒の微細化など破壊を抑制する組織制御が活用される。

そのほかにも、主に高強度化と相反する性能である耐水素脆化特性、伸線性、易加工性と両立が求められる場合や、高温環境で活用される材料の場合は高温強度や耐クリープ特性、機能系の電磁気特性や熱伝導性などの様々な性能に対して、それぞれに応じた組織制御技術が求められ、所望の組織を実現するための技術開発を進めてきた。

本報告では、金属組織制御技術のうち、持続可能な社会を実現するための軽量化ソリューションおよび安全・安心で持続可能な社会の実現につながる取り組みについて紹介する。

## 1. 持続可能な社会を実現するための軽量化ソリューションに向けた金属組織制御技術

持続可能な社会を実現するための一つの取り組みとして、地球温暖化を緩和するためにCO<sub>2</sub>排出量低減を進めることが求められている。このうち、国内の2割弱を占める輸送部門、とくに自動車のCO<sub>2</sub>排出量を抑制することは重要な取り組みの一つとなっている。この取り組みにおいて、走行時のCO<sub>2</sub>排出量低減を実現するには、自動車の軽量化による燃費向上が重要となる。その実現に向け、当社では素材メーカーとしての軽量化ソリューション技術構築を進めており、その中心的な取り組みとして軽量化材料を創出するための金属組織制御技術の深化を進めてきている。

代表的な取り組みとしては、自動車用高強度鋼板、いわゆる超ハイテンの開発があげられる。自動車の衝突安全性能の確保と軽量化の両立には骨格部品用材料の高強度化が必要で、そのため、高強度で成形可能な延性を同時に確保した鋼板を実現するための技術開発に取り組んできた。1980年代には強度と延性の兼備を狙い、軟質なフェライトと硬質なマルテンサイトを混在させたDual Phase 鋼 (DP 鋼) の検討が進められた<sup>1), 2)</sup>。DP 鋼では強度を確保しながら、延性の指標で強度と相反するとされている伸びと伸びフランジ性を両立させるための組織制御技術を開発した。具体的にはフェライトとマルテンサイトの分率、マルテンサイト中のC濃度、さらにマルテンサイト中の炭化物サイズの制御による伸びと伸びフランジ性のバランスの向上である<sup>3), 4)</sup>。

いっぽう、さらなる延性向上のニーズに対し、残留オーステナイト (以下、残留 $\gamma$ ) の加工誘起変態を活用したTRIP 鋼が候補と考えられていたが、TRIP 鋼は伸びが良好だが伸びフランジ性が比較的低位となる。この原因は残留 $\gamma$ が塊状に存在するためと考え、信州大学との共同研究を通じて、残留 $\gamma$ を微細に分散させる組織制御技

術を開発した。その結果、焼鈍前組織をマルテンサイトとして、マルテンサイトのラス間に残留 $\gamma$ を微細に分散させたTAM 鋼 (TRIP aided Annealed Martensite 鋼)<sup>5), 6)</sup>や、母相をベイニティックフェライトとし、ベイニティックフェライト間に残留 $\gamma$ を微細に分散させたTBF 鋼 (TRIP aided Bainitic Ferrite 鋼)<sup>7)</sup>という組織コンセプトを構築した。このコンセプトを各種強度クラスに適用し、伸び-伸びフランジ性バランスに優れた980 MPa 級鋼 (図1)<sup>8)</sup>、1,180 MPa 級鋼<sup>9)</sup>、1,470 MPa 級鋼<sup>10)</sup>といった材料を開発した。

また、さらなる軽量化に向け第3世代超ハイテン (Generation 3 もしくは 3rd Generation)<sup>11)</sup>と呼ばれる、比較的省合金で強度-延性バランスに優れた高強度鋼板に関する研究が盛んとなり、国内でも国プロジェクトにて引張強度1.5 GPa - 伸び20%を目指した取り組みが進められた。当社ではこのプロジェクトの中で、中高炭素鋼を用いて、残留 $\gamma$ の増加と安定度の制御<sup>12)</sup>や、Q&P プロセスの適用による微細化により目標の強度-伸びを達成し、さらに伸びフランジ性も兼備できる組織制御技術を開発した<sup>13)</sup>。本技術の実用化には種々の課題が残されているが、ここで開発した組織制御技術を活用しながら、将来のさらなる軽量化に資する鋼板の提案に繋げていく。

自動車車体軽量化に対して、もう一つ有力な材料としてアルミニウム合金があげられる。アルミニウム合金は鋼材に対して、剛性同等とした際の重量を1/2にできることから、とくに剛性が必要なパネル材、例えば、フード、トランクリッド、バックドア、ルーフなどに適用が広がっている。パネル材に求められる材料特性としては、強度、成形性、ヘム曲げ性と呼ばれる折り曲げ後に

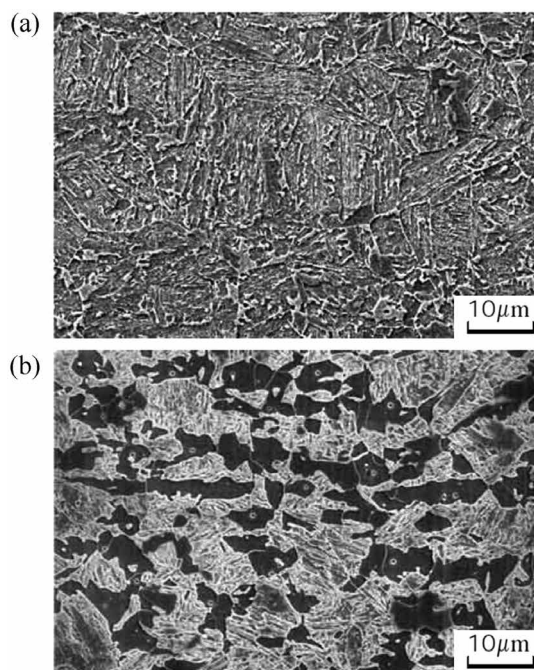


図1 (a) 開発980 MPa級鋼 (TBF 鋼)、  
(b) 従来980 MPa級鋼 (DP 鋼) のSEM組織写真  
Fig.1 SEM micrographs of (a) developed 980 MPa grade steel (TBF steel),  
(b) conventional 980 MPa grade steel (DP steel)



押し潰す加工特性、成形後の表面品質などがあげられる。ここでは強度、とくに塗装焼付後の強度確保のための組織制御技術、および、プレス成型後の表面品質のための組織制御技術について述べる。

パネル材の中でも、車体の外側に適用されるアウトパネル材は、機能、デザインの両面から形状が決定されるため、複雑な形状に精度よく成形できることが求められる。そのため、成形時には低強度であること、いっぽう、最終製品に対しては、へこみに対する耐性の評価指標である耐デント性のために高強度であることが求められる。自動車の製造工程ではプレス成型後に塗装焼付と呼ばれる170~180℃程度で数十分加熱される工程が存在し、この加熱工程で硬化する性能をバークハード (BH) 性と呼ぶ。成形時の強度が低くても、BH性が高ければ製品強度が高められるため、BH性を高めるための研究が活発に進められている。

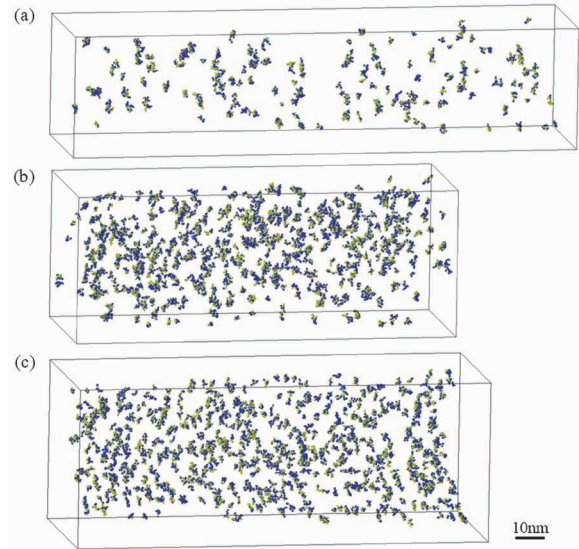
塗装焼付熱処理で強度が向上するのは、熱処理中に析出物やクラスタと呼ばれるナノスケールの組織が形成されるためである。BH性向上には、予備時効や、予備時効と予ひずみの組合せが有効<sup>14)~16)</sup>であり、各項目を最適化すればBH性が最大化できる。いっぽう、BH性を支配するクラスタは溶質元素 (6000系アルミニウム合金ではMg, Si) や原子空孔が集まった数nm程度の微小な組織であり、汎用的な微視構造を観察する手法である透過型電子顕微鏡 (TEM) では明確に観察できない。そのため、3次元アトムプローブと呼ばれる原子配置を3次的に観察する技術を活用し、**図2**に示すように熱処理過程でのクラスタの形成挙動を解析<sup>17), 18)</sup>した。その結果、予備時効を施すことで自然時効に比べてMg/Si比が0.4超のクラスタの数密度が増加し、時効時に強度向上に寄与する $\beta''$ 相に遷移することでBH性が向上することを示した。

プレス成型後の表面品質に関する課題としては、6000系Al-Mg-Si合金板材においてプレス成型後に表面にリジングマーク (もしくはローピング) とよばれる模様が生じる場合があり、自動車のアウトパネルに適用するためには、外観品質の観点からリジングマークの形成を抑制することが求められている。

リジングマークが形成される原因として、金属の変形能の異方性があげられる。金属の変形は転位と呼ばれる結晶の連結性が乱れた領域が形成、移動することで生じる。アルミニウムでは転位の移動できる方向が鋼に比べて限られており、転位が移動できる方向に応力を加えると変形しやすいが、変形方向がずれると変形しにくくなる。このように変形方向と結晶方向の関係によって変形しやすさが変化する。リジングマークの発生にはCube方位と呼ばれる張出性の向上に有効な集合組織の存在が影響している。

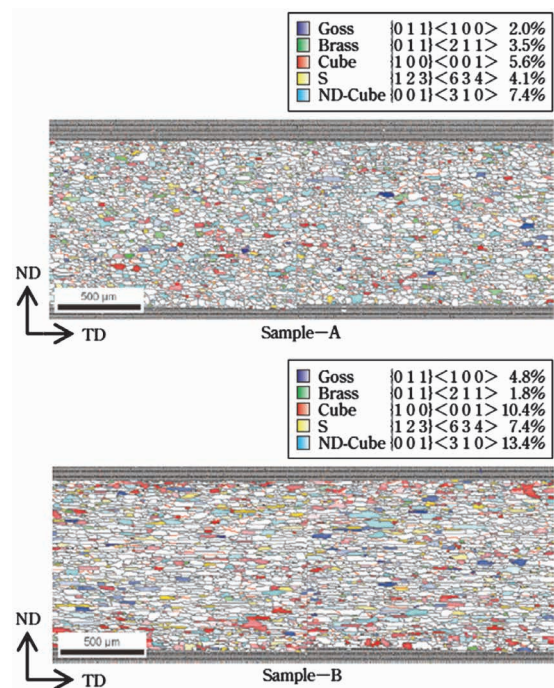
集合組織は、熱間圧延や冷間圧延の過程で変形に優位な結晶方位の組織が発達し、さらに、その加工組織から圧延過程やその後の熱処理時に再結晶と呼ばれる加工ひずみが含まれない結晶粒が形成される過程で、特定の方位の結晶粒の形成や成長が優先されることで生じる。そ

のため、アルミの製造工程における冷間圧延<sup>19)</sup>や溶体化処理<sup>20)</sup>、さらにその前工程である熱間圧延工程も含めた熱延工程での集合組織の制御技術を構築した。また、結晶の変形能の異方性を考慮した結晶塑性理論を用いて解析する技術を構築し、リジングマークが形成される集合組織状態がGoss方位やCube方位と呼ばれる集合組織の偏在が要因であることを示した (**図3**)<sup>21)</sup>。これらの知見を活用し、リジングマークを抑制しながら成形性に良好なアルミパネルを実現する組織制御技術を構築してきている。



**図2** 3次元アトムプローブによるMg-Siクラスタの三次元分布図 (緑: Mg原子, 青: Si原子)  
(a) 自然時効 10.8 ks, (b) 360 ks, (c)  $2.8 \times 10^4$  ks

**Fig.2** Atom maps showing 3D elemental distribution of Mg (green) and Si (blue) atoms of Mg-Si cluster in the specimens natural-aged for (a) 10.8 ks, (b) 360 ks, (c)  $2.8 \times 10^4$  ks observed by 3D atom probe



**図3** アルミパネル材のSEM-EBSD解析結果  
(a) リジングマーク抑制, (b) リジングマーク発生  
**Fig.3** SEM-EBSD maps of aluminum sheets (a) without ridging and (b) with ridging



そのほかにも、ばね鋼の耐水素脆化特性や耐へたり性制御のための結晶粒微細化や析出物制御<sup>22), 23)</sup>, 5000系アルミ板のセレーション抑制のための析出・クラスタ制御<sup>24), 25)</sup>, アルミ鍛造材の予備時効短時間化のための二段時効を活用した析出制御<sup>26)</sup>, アルミ押出材の耐衝撃性改善のための再結晶集合組織制御<sup>27)</sup>, 車載用電装部品用端子向け銅板の強度, 導電率, 耐力力緩和特性の両立のためのNi, P複合添加による転位の引きずり抵抗の活用<sup>28)</sup>や析出物分散状態の制御<sup>29)</sup>など, 高強度化と, 強度と相反する各種特性の両立を狙った組織制御技術を開発し, 自動車軽量化に貢献してきている。

## 2. 安全・安心なまちづくりに貢献する金属組織制御技術

大型構造物である建築物, 橋梁などには厚鋼板が使用され, 厚鋼板同士をつなぐために溶接材料が用いられる。近年, 都心部中心にビルの高層化や, 鋼構造物の構造の合理化などに対応するため, 材料の高強度化が進められてきた。また, 建設コストの観点から溶接施工の生産性を高めるため, 溶接時に加える熱エネルギー(入熱量)を高め, 一度の溶接で多量の溶接材料を溶かす大入熱溶接への対応が求められてきた。

厚鋼板の高強度化や溶接の大入熱化を進める際の課題としては, 靱性の確保があげられる。靱性とは破壊に対する抵抗力の評価指標であり, 構造物が急激に脆性(ぜいせい)破壊することを避けるために必要な特性である。脆性破壊が大災害につながる事例としては, 米国の戦時標準船 Schenectady 号の事故<sup>30)</sup>が有名なので, 参考にさせていただきたい。大型構造物でこのような破壊が起こると社会的に多大な影響を及ぼすため, 鋼材はもちろん溶接部の靱性を確保することが必要不可欠となっている。

鋼材の靱性を支配する組織因子としては, 脆性き裂が進展する際の単位となる結晶粒径が最も重要なパラメータであり, 結晶粒径が微細なほど靱性が向上する。また, 破壊の起点となる鋼中の硬質な第二相組織の微細化および低減も, 靱性向上に有効な手段となる。

いっぽう, 厚鋼板の溶接部では, 溶接時の高温にさらされる熱影響部(Heat Affected Zone, HAZ)において, 高温相であるオーステナイトが生成するとともにオーステナイト結晶粒の粗大化が進行し, その後の冷却中にオーステナイト結晶粒界からフェライトやベイナイトといった組織が粗大に形成されることで靱性が劣化する。

そのため, HAZの靱性確保の手段としては, 溶接時の高温におけるオーステナイト結晶粒の粗大化を分散粒子によるピン止め効果を活用して抑制するか, 冷却中の変態挙動を制御してフェライト, ベイナイト組織を微細に形成させることが有効な手段となる。当社では, この二つを組み合わせ, 高温で安定なTiNをピン止め粒子として活用するとともに, 図4に示すように組織が微細な低炭素ベイナイトを活用した組織制御技術を構築し, 大入熱HAZ靱性が良好な高強度鋼を開発した<sup>31), 32)</sup>。また, ピン止め効果を高めるためにTiNを微細化して

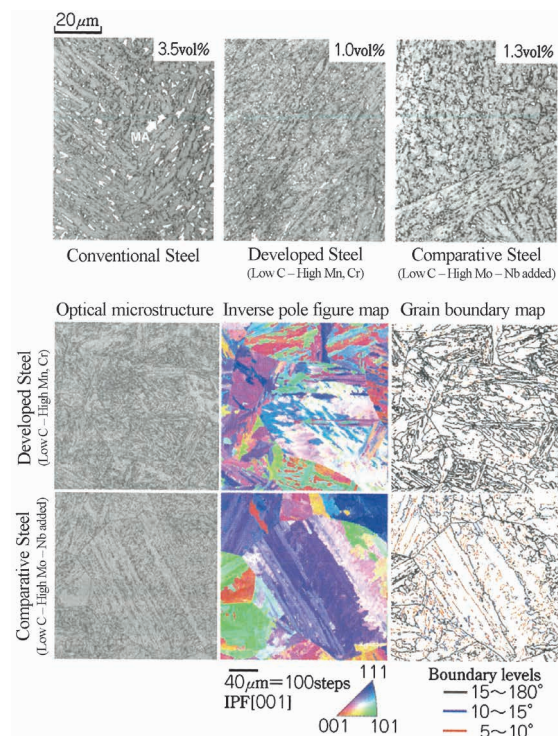


図4 再現熱サイクル材の光学顕微鏡像とEBSD解析結果  
Fig.4 Optical microstructure and EBSD analysis results of simulated HAZ (Heat Affected Zone)

TiN粒子数を増やす方法として, Tiの拡散速度が速くTiNが粗大化しやすい $\delta$ フェライト温度域を小さくする成分設計<sup>33)</sup>や, 酸化物を起点に形成される粗大なTiNを低減するため, Ca添加により酸化物を改質する技術<sup>34)</sup>を開発し, さらなるHAZ靱性向上を実現した。

冷却時の変態による組織微細化の手段としては, オーステナイト粒内に変態核となりうる粒子を分散させて, 粒内からも組織を形成させる方法も知られている。このような観点では, 粒内核生成サイトとしてBNを分散させ大入熱溶接に対応した鋼板<sup>35)</sup>や, Ti・希土類元素(REM)・Zrの複合酸化物を活用したHAZ組織微細化技術<sup>36)</sup>を開発した。

このような粒内核生成の技術は, 酸化物が多量に含まれる溶接金属で積極的に活用されている。例えば, 高強度鋼用溶接金属において,  $MnTi_2O_4$ <sup>37), 38)</sup>を粒内核生成サイトとして活用することで, 組織微細化を可能にし, 靱性に優れた溶接金属を実現した。また, 溶接金属にLiを添加することで, いっそうの組織微細化と靱性向上が得られることを見出している<sup>39)</sup>。

本章で述べたように, 鋼材, 溶接材料の両面から, 大型建築物, 橋梁(きょうりょう)などの構造物において使用素材の高強度化と大入熱溶接に対応した靱性確保により, 安全・安心なまちづくりを, より効率的に実現できる金属組織制御技術を構築してきた。近年, 高度経済成長期に建設された構造物の老朽化が進んでおり, 次の50年, 100年の社会インフラの安全性の実現が求められている。これまでの靱性という観点だけでなく, 疲労や腐食に代表される長期信頼性に必要な特性を兼ねるための技術開発を進めている。

### 3. 今後の金属組織制御の方向性

これまで述べたように様々な課題にこたえるために金属材料の開発を進めてきたが、要求性能のレベルが高くなってきており、それに対応するための金属材料開発の難度が高まっている。いっぽうで社会変化が加速してきており、新しい金属材料の開発にかかる時間の短縮が求められている。そのような状況に対応する一つの方向性として、金属組織の形成や得られた金属組織の材料特性を物理現象に基づいて計算する組織予測技術や特性予測技術を深化させてきた<sup>40)~43)</sup>。これにより、冶金現象に対する理解を深めるとともに、成分・プロセスから金属組織、そして材料特性を定量的に予測できるようになることで、技術者の知識や経験に加え、計算技術も活用しながら材料開発を進めることを目指している。

また、近年のデジタルトランスフォーメーション(DX)の流れの中、材料技術のDX化としてMI(Materials Informatics: 機械学習に代表される情報科学を活用した材料開発支援技術、もしくは、Materials Integration: 材料科学の理論、実験、解析、シミュレーション、データベース、データマイニングなどを融合した材料開発支援技術)と呼ばれる技術領域が注目されている。金属材料の分野では、実験データを多量に採取することが困難であるため、純粋なデータ駆動型MI技術はハードルが高いと考えられており、これまでに培ってきた予測技術を併用しながらMIを活用することが有用と考えられる。その事例として、厚鋼板の溶接熱影響部を対象に、組織形成挙動や形成した組織から靱性を予測する技術に機械学習を組合せ、所定の溶接条件に対して特性・合金コストなどの目標値をインプットすることで、その目標を満足できる成分を提示できる開発支援技術を構築した<sup>44)</sup>。このような技術をさらに高度化させていくためには、材料特性に関わる各種情報を定量化し、データ解析に用いることができるようにする必要がある。特性を支配する組織画像などの定量化技術や物理分析解析技術などの関連する要素基盤技術と連携しながら、金属組織制御技術の高度化を図っていく。

むすび=以上のように、安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献するために、継続的に金属組織制御技術を発展させてきた。本稿では自動車車体軽量化、大型構造物を対象にした組織制御技術を解説したが、そのほかにも、航空機(チタン、アルミ)や船舶(厚鋼板、溶接材料、鍛造鋼品)などのほかの輸送用機械の軽量化、自動車の内燃機関(線材・条鋼)の効率化やエネルギー産業(厚鋼板、溶接材料)における発電効率の向上、さらに各種金属製品を用いた製品の製造工程の省工程化によるCO<sub>2</sub>削減への貢献など、多岐にわたる領域においても活用してきている。

引き続き、現在取り組んでいる課題解決に向けた技術のブラッシュアップを進めていくが、将来想定される大きな社会変化、例えばカーボンニュートラルに向けた水素・アンモニアや再生可能エネルギーの活用拡大、自動

車のEV化/FCV化に代表される輸送機器の脱化石燃料化、次世代空モビリティの実現、宇宙産業の発展などの中で金属材料がこれまでと異なる環境や用途で使用されることが想定され、従前とはことなる取り組みも必要になってくる。例えば、極低温や超高温に代表される各種極限環境での性能発現、電磁気特性をはじめとした新機能の付与、画期的な比強度や比剛性の実現など、これまでとは異なる観点での特性が要求されることも想定される。そのような課題の変化に対しても対応可能な性能を有する金属材料を創出・提供しつづけることで、安全・安心で持続可能な社会基盤構築に貢献できるように、金属組織制御技術の高度化を進めていく。

#### 参考文献

- 1) 宮原征行ほか. R&D神戸製鋼技報. 1985, Vol.35, No.4, p.92-96.
- 2) 田中福輝ほか. R&D神戸製鋼技報. 1992, Vol.42, No.1, p.20-23.
- 3) 村上俊夫ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.2, p.61-64.
- 4) 村上俊夫ほか. 鉄鋼材料の組織と延性破壊研究会報告書. 日本鉄鋼協会, 2014, p.57.
- 5) K. Sugimoto et al. ISIJ International. 2002, Vol.2, p.910.
- 6) 橋本俊一ほか. 鉄と鋼. 2002, Vol.88, p.400.
- 7) K. Sugimoto et al. ISIJ International. 2004, Vol.44, p.1608.
- 8) 三浦正明ほか. R&D神戸製鋼技報. 2007, Vol.57, No.2, p.15-18.
- 9) 村田忠夫ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.17-20.
- 10) 粕谷康二ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.2, p.36-40.
- 11) E. De Moor et al. Iron and Steel Technology. 7 (2010), p.133.
- 12) 村上俊夫. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.1, p.29-32.
- 13) 新構造材料技術研究組合. 革新構造材料とマルチマテリアル輸送用機器の軽量化のための材料・接合・設計技術-下巻 プロジェクト成果総覧. 2023, オーム社, p.2-9.
- 14) 増田哲也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.2, p.13-17.
- 15) 増田哲也ほか. 軽金属. 2011, Vol.60, p.283.
- 16) Y. Takaki et al. Materials Transaction, 2014, Vol.55, p.1257.
- 17) 有賀康博ほか. R&D神戸製鋼技報. Vol.66, No.2, p.42-47.
- 18) 有賀康博ほか. 軽金属. 2017, Vol.67, p.144.
- 19) 松本克史ほか. R&D神戸製鋼技報. 2004, Vol.54, No.3, p.47-50.
- 20) 松本克史ほか. 軽金属. 2005, Vol.55, p.113.
- 21) 小西晴之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.2, p.39-42.
- 22) 増本 慶ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.1, p.67-70.
- 23) 吉原 直ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.1, p.54-58.
- 24) 松本克史ほか. 軽金属. 2015, Vol.65, p.331.
- 25) K. Matsumoto et al. Materials Transaction, 2016, Vol.57, p.1101.
- 26) 堀 雅是ほか. R&D神戸製鋼技報. 2020, Vol.70, No.2, p.7-11.
- 27) 伊原健太郎ほか. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.2, p.43-47.
- 28) 野村幸矢. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.2, p.53-58.
- 29) 穴戸久郎ほか. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.2, p.63-67.
- 30) 金沢 武. 高圧力. 1966, Vol.4, p.16.
- 31) 畑野 等ほか. R&D神戸製鋼技報. 2004, Vol.54, No.2, p.105-109.
- 32) 山口徹雄ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.2, p.16-19.
- 33) 高岡宏行ほか. CAMP-ISIJ. 2007, Vol.20, p.1226.
- 34) 加藤 拓ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.2, p.32-35.
- 35) 高橋祐二ほか. R&D神戸製鋼技報. 2008, Vol.58, No.1, p.42-46.
- 36) H. Nako et al. ISIJ International. 2015, Vol.55, p.250.
- 37) 岡崎喜臣ほか: 溶接学会論文集. 2009, Vol.27, p.131.
- 38) H. Nako et al. ISIJ International. 2014, Vol.54, p.1690.
- 39) 伊藤孝矩ほか. 溶接学会全国大会講演概要. 2020, Vol.107, p.62.
- 40) 難波茂信. R&D神戸製鋼技報. 2001, Vol.51, p.37.
- 41) 村上俊夫ほか. R&D神戸製鋼技報. 2008, Vol.58, No.1, p.13-17.
- 42) 逸見義男ほか. R&D神戸製鋼技報. 2020, Vol.70, No.2, p.47-51.
- 43) 堤 一之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2021, Vol.71, No.1, p.19-23.
- 44) 井元雅弘ほか. R&D神戸製鋼技報. 2021, Vol.71, No.1, p.31-36.



(解説)



## 高機能な表面の創製により安全・安心な社会に貢献する金属表面制御技術

武田実佳子\*<sup>1</sup>(博士(工学))・小澤敬祐\*<sup>1</sup>・河盛 誠\*<sup>1</sup>(博士(工学))・高橋佑輔\*<sup>2</sup>(博士(工学))・佐藤俊樹\*<sup>1</sup>

### Metal Surface Control Technology Contributing to Safe and Secure Society through the Creation of Highly Functional Surfaces

Dr. Mikako TAKEDA・Takahiro OZAWA・Dr. Makoto KAWAMORI・Dr. Yusuke TAKAHASHI・Toshiki SATO

#### 要旨

安全・安心な社会の実現に向けては、金属材料が使用されるインフラ、環境・エネルギー設備の長寿命化や、自動車の環境負荷低減と安全の両立など、様々な課題がある。これらの解決には、材料の表面で生じる腐食や水素脆化の克服が重要であり、耐腐食・耐水素脆化特性に優れた金属材料が求められている。いっぽう、耐腐食性、耐摩耗性、抗菌性などの機能を材料の表面に新たに付与する表面処理技術も、多様化・高度化したニーズに対応した金属材料の提供に果たす役割は極めて重要である。本稿では、金属の表界面反応の制御により高機能な表面を創製し、安全・安心な社会に貢献する「金属表面制御技術」について紹介するとともに、本技術を活用した取り組み事例について解説する。

#### Abstract

In order to achieve a safe and secure society, various challenges exist, such as extending the lifespan of infrastructure, environmental & energy facilities that use metallic materials, and achieving both reduced environmental impact and enhanced safety of automobiles. Addressing these challenges requires overcoming corrosion and hydrogen-embrittlement occurring on material surfaces, and metallic materials with excellent corrosion and hydrogen-embrittlement resistance are highly sought after. Meanwhile, surface treatment technologies that provide functions such as corrosion resistance, wear resistance, and antibacterial properties to material surfaces play a crucial role in responding to diversified and sophisticated needs for metallic materials. This paper introduces the "Metal Surface Control Technology," which creates highly functional surfaces through the control of metal surface reactions; and discusses examples of initiatives utilizing this technology to contribute to a safe and secure society.

#### 検索用キーワード

金属材料, 表面, 腐食, 水素脆化, 表面処理

まえがき = 鉄鋼, アルミニウム, 銅, チタンなどの金属材料は、様々な環境での使用の際に、材料の表面にさびが生じる腐食や、水素が材料に侵入して脆化(ぜいか)する水素脆化が発生し、製品の品質や寿命、信頼性が低下する問題が生じることがある。そのため、これら材料が使用される橋梁(きょうりょう)、道路、トンネルなどのインフラや環境・エネルギー関連設備の長寿命化、自動車の環境負荷低減に伴う車体軽量化と安全の両立、さらには水素社会の実現に向け耐腐食・耐水素脆化特性に優れた金属材料が求められている。また菌やウイルスの感染に対する不安解消など、安全・安心な生活環境のニーズの高まりに対応する抗菌・抗ウイルス表面処理や、自動車・機械製品やその部品に使われる金属材料を守り、寿命や信頼性を高める耐摩耗・耐熱コーティング、さらには様々な用途に応じて高導電性・高密着性などの特性を発現させる表面処理のニーズが高まっている。

このような多様化、高度化したニーズに応え、安全・安心な社会の実現に貢献する材料を提供する“金属表面制御技術”として、当社では、

(1) 金属における表界面反応を制御し、寿命や信頼性

を高める、「腐食・水素脆化抑制技術」

(2) 表面処理により高機能な表面を作り、金属材料の特性を向上させる「高機能皮膜形成技術」に取り組んでいる。

本稿では、「腐食・水素脆化抑制技術」、「表面処理による高機能皮膜形成技術」についての紹介と将来に向けての取り組みについて解説する。

#### 1. 腐食・水素脆化抑制技術

##### 1.1 安全・安心な社会実現のための耐食材料設計と腐食予測技術

近年、高度経済成長期に集中的に整備された橋梁、道路、トンネルなどの社会インフラ老朽化が進む中、ばく大な維持管理・更新にかかる費用が見込まれ、インフラの長寿命化、ライフサイクルコスト低減化ニーズに応える高耐食鋼の需要は今後ますます増大すると予想される。またCO<sub>2</sub>削減に向けては、自動車などの輸送機の軽量化の要求に伴う鉄鋼製品の高強度化により、従来以上に腐食疲労、遅れ破壊など環境脆化感受性が高まることから、環境脆化へのより優れた対策を講じた高耐食鋼が

\*<sup>1</sup> 技術開発本部 材料研究所 \*<sup>2</sup> 技術開発本部 材料研究所 (現 事業開発部)



求められる。

当社でも橋梁用耐候性鋼<sup>1)</sup>や造船用耐食鋼<sup>2)</sup>、自動車用高強度懸架ばね鋼<sup>3)</sup>など、環境脆化に対応する多くの高耐食鋼を商品化し、様々なニーズに応じてきた。高耐食鋼の開発においては、表界面の反応生成物である「さび」の成分や微細構造とその形成過程に支配される腐食現象を正確に評価し、制御することがポイントとなるため、当社ではさび生成のメカニズムまで踏み込んだアプローチを行っている。例えば、自動車用高強度懸架ばね鋼においては、鋼材の局部的に腐食した箇所から発生する「腐食疲労」が大きな課題であったが、さびを鋼材中の合金元素により耐食性の高い非晶質さびに改質することで局部腐食を抑制する技術を当社で開発し、高強度懸架ばねの実用化に成功している<sup>3)</sup>。いっぽう、橋梁用材料としては、Cr、Cu、Ni、Tiなどの耐食元素を微量添加してさびを改質した耐候性鋼<sup>1), 4)</sup>を実用化している。

安全・安心で持続可能な社会実現に向けては、超長寿命インフラを実現可能とする従来比2倍以上の耐食性を有する高耐食材料の開発を目指し、当社では高輝度放射光(SPring-8)や機械学習を駆使したさびの微細構造解析技術に取り組んでおり、1.1.1項にて詳細に報告する。

さらに2050年カーボンニュートラル実現に向けて、当社が神戸市で運転する総発電規模270万kWの石炭火力発電所のCO<sub>2</sub>排出量削減を達成すべく、バイオマス燃料やアンモニアといった低炭素燃料と石炭の混焼に向けた取り組みを進めている。当社では、電力供給の安定性に影響を及ぼすことが無いよう、低炭素燃料使用時の腐食抑制技術と腐食診断技術の高度化に取り組んでおり、1.1.2項にてその詳細を報告する。

### 1.1.1 高耐食材料開発のためのさび微細構造解析とさび生成予測技術の開発

安全・安心で持続可能な社会に貢献する長寿命耐食鋼材の開発には、これまで十分に明らかにされていなかったさびの微細構造を可視化し、その形成過程を明らかにすることで、さび成分を精密に制御して、耐食性をさらに向上させることが重要である。いっぽう、腐食寿命の診断においては、数十年におよぶ実環境での暴露によるさびの微細構造のデータベースが必要となるが、膨大なデータを蓄積するのは極めて困難である。

そこで当社では、高輝度放射光計測の特徴である高分解能、ハイスループット性、XRD(X線回折:X-ray diffraction)とXAFS(X線吸収微細構造:X-ray absorption fine structure)などの同時計測機能に着目し、大型放射光設備SPring-8を活用したさびの微細構造とその形成過程に関するデータベース構築と腐食寿命の予測技術の検討を進めており、本項では最新の取り組み事例を紹介する。

大気環境下で生成するさびには $\alpha$ -、 $\beta$ -、 $\gamma$ -FeOOHなどのいわゆる“赤さび”と“黒さび(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)”，さらに、さびの結晶になる途中段階である“非晶質さび”が知られており、様々なさび形成モデルが提案<sup>5), 6)</sup>されている。例えば、図1(a)は炭素鋼におけるさび形成モデルを、

図1(b)は耐食鋼におけるさび形成モデルを示しているが<sup>6), 7)</sup>、これらのモデルは数年~数十年におよぶ長期間の大気腐食や、厳しい腐食促進試験により生成したさびの一部を分析することで提案されたものがほとんどであり、さびの二次元構造、とくに耐食性発現効果の高い非晶質さびの生成過程を直接観察した例は非常に少ない<sup>8)</sup>。そこで当社では、SPring-8において二次元計測可能なイメージング放射光測定技術を構築し、得られた数十万点におよぶビッグデータに対し機械学習を適用することで、“非晶質さび”を含むさび中の詳細なさび分布の可視化に初めて成功した<sup>7)</sup>。図2(a)はイメージングXRDによる各さびの結晶の分布を、図2(b)はイメージングXAFSによる各さびの結晶・非晶質双方を含む分布を示している。本結果より、結晶の“赤さび”と、非晶質の“黒さび”の分布が明らかとなり、非晶質さびの形成過程の解明につなげている。さらに、放射光測定により取得したさびの微細構造・生成過程と鋼材組織のデータを機械学習により対応づけた学習モデルを用いて将来のさび生成挙動の予測を行い、予測結果は実測結果と非常によく一致することを確認している(図3)<sup>9)</sup>。

橋梁などのインフラ材料、自動車など輸送機器に用いられる高強度材料、さらには、新エネルギーである水素・アンモニアの製造・貯留・輸送に関わる設備においても、安全・安心に利用可能な高耐食鋼材と腐食診断技術が求められる。今後、放射光や機械学習を駆使したさび解析技術の高度化を進め、腐食診断による予知保全技術の開発につなげていく。

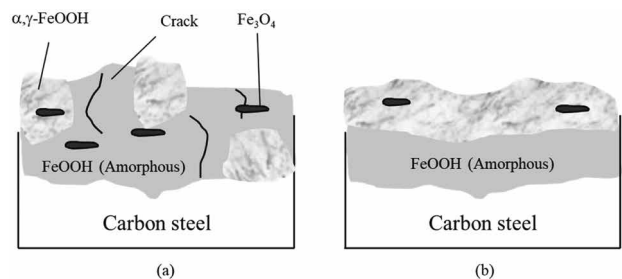


図1 さびの形成機構の模式図 (a) 炭素鋼 (b) 耐食鋼  
Fig.1 Schematic representations according to Misawa et al.<sup>4)</sup> of rust layer models on (a) plain carbon steel (b) anti-corrosion steel

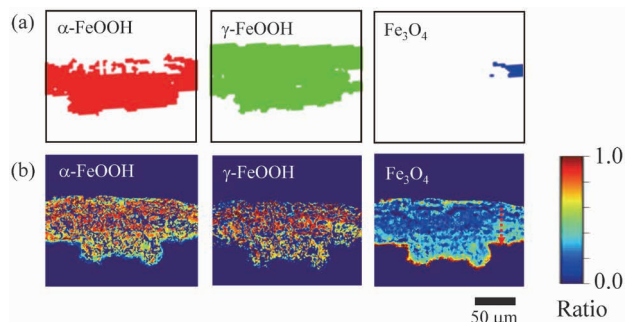


図2 放射光によるさび中における各さびの分布状態の可視化 (a) イメージングXRD, (b) イメージングXAFS (さび部分を抽出してグラフ化)  
Fig.2 Compared reconstructed rust maps using (a) imaging XRD and (b) imaging XAFS (Rust areas are extracted and graphed)

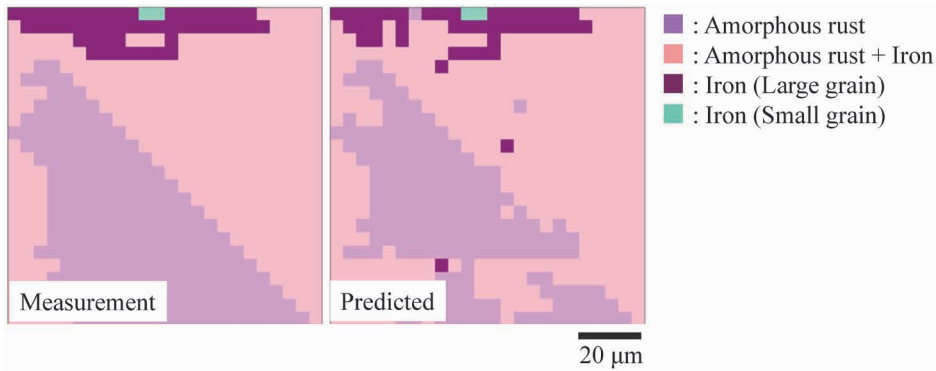


図3 24時間後のさび形態の実測・予測の比較結果  
 (予測結果：さびの生成過程と鋼材組織の情報から機械学習により推算)  
**Fig.3** Comparison of measured and predicted rust morphology after 24 hours  
 (Estimation by machine learning from rust formation process and steel structure information)

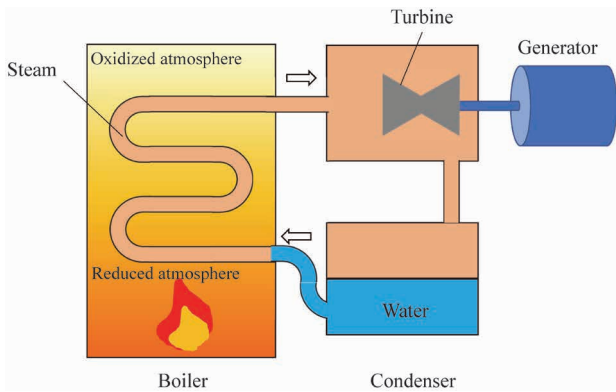


図4 火力発電所ボイラ部模式図と腐食雰囲気  
**Fig.4** Schematic diagram of boiler section of thermal power plant and corrosive atmosphere inside the boiler

### 1.1.2 CO<sub>2</sub>削減と電力安定供給を両立させるための腐食抑制技術

火力発電所のボイラや熱交換器などの設備は、バイオマス混焼に伴い、通常より過酷な高温腐食環境にさらされるが、その腐食挙動は十分明らかにはなっていない<sup>10)</sup>。当社ではバイオマス環境下における高温腐食挙動をあらかじめ予測する技術の構築を進めている。設備損傷を未然に防ぐ予防的保全が機能すれば、電力の安定供給が可能となる。本項では、バイオマス混焼を模擬した環境下での高温腐食の評価事例について紹介する。

図4に火力発電の模式図とボイラで想定される腐食環境を示す。ボイラにおいては、燃焼部(図中下側)は硫化水素などの“還元性雰囲気”であり、「硫化水素腐食」が生じる。また下流側(図中上側)では“酸化性雰囲気”となり、ガス中の水やSO<sub>x</sub>を原因とする酸化による腐食が生じる。ガス温度が低下すると、気体に含まれる塩分が熱交換器などの材料表面に付着し、「熔融塩腐食」と呼ばれる局所的な激しい腐食が生じ、さらにバイオマス燃料中に多く含まれる塩素分がガス化し、熔融塩中に溶け込んで、腐食性の高い塩化鉄の熔融塩を生成することで腐食を加速させる。

熔融塩腐食の極端な例として、塩分量を大きく変化させたときの腐食量と腐食形態の変化およびその模式図を図5、6に示す<sup>11)</sup>。図5の写真中に示す緑部は腐食によ

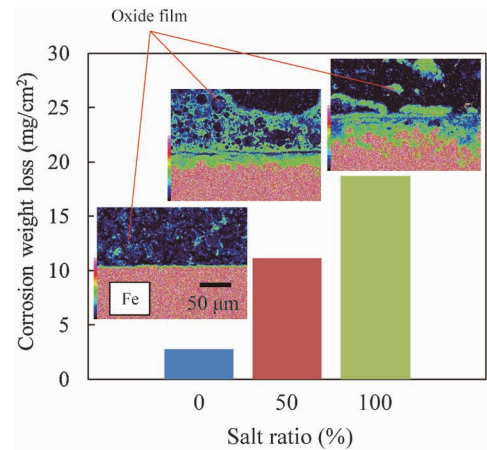


図5 高塩素環境下での塩分比率と腐食量、腐食形態  
**Fig.5** Corrosion amount and corrosion structure change as ratio of salt content in high chlorine environment

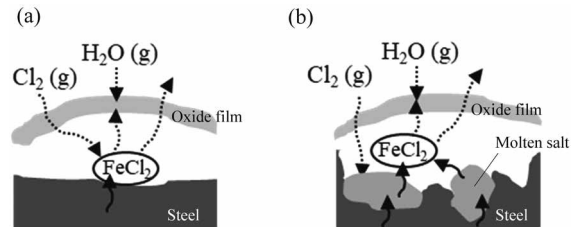


図6 ガス中塩分量増加による腐食形態変化の模式図  
 (a) 塩分量少, (b) 塩分量多  
**Fig.6** Schematic diagrams of change in corrosion form with increasing salt content  
 (a) low salt content, (b) high salt content

り生成したと考えられる酸化物であるが、塩分が存在しない場合はほとんど腐食が進行せず、塩分が増加すると腐食量は増加していくことがわかる。また塩分増加により表面に空隙が多い酸化皮膜が生成し、鋼材内部は境界に沿って腐食が進展していくことがわかる。図6に示すように、ガス中の塩素ガスが増加した場合には、熔融塩中に気相中の塩素ガスが溶け込むことで高い腐食性と揮発性を有する塩化鉄の熔融塩が生成、短時間で揮発しガスとなって空隙の多い酸化皮膜が形成し、鋼材内部への腐食が進展したと考えられる。

このようにバイオマス燃料使用環境を模擬した高温腐食挙動を評価し、メカニズムを解明することで、燃料中



に含まれる腐食成分の適切な制御などの腐食抑制策を予防的に講じることが可能となり、安定な電力供給の実現が可能である。

今後は1.1.1項でも述べた高輝度放射光計測と機械学習を高度化するとともに、低炭素燃料使用時の過酷環境下での高温腐食挙動の直接観察を早期に実現し、豊富な腐食データベースに基づく高精度な腐食寿命予測による予知保全技術を構築、CO<sub>2</sub>削減および電力の安定供給に貢献していく。

## 1.2 材料の高強度化、水素社会実現のための耐水素脆化材料開発と水素脆化抑制技術

CO<sub>2</sub>や材料使用量の削減など環境負荷低減に貢献する高強度鋼の実用化や水素社会の実現に向けては、耐水素脆化特性に優れた材料の開発や水素脆化抑制技術が求められている。

水素脆化のメカニズムとしては、環境から材料に侵入した水素が、応力やひずみの分布や材料組織の影響を受けて拡散・集積し、き裂発生および進展することで破断に至ることが知られている<sup>12)</sup>。水素脆化のメカニズムを理解し、耐水素脆化特性に優れた材料を開発するためには、材料、環境、応力・ひずみの各影響因子に対する水素評価技術の開発が重要となる。水素脆化現象の把握に向けた課題として、水素脆化を引き起こすppmオーダーの微量水素は定量が難しいこと、応力やひずみの分布に伴い複雑に変化する水素の分布評価が難しいこと、水素が室温でも容易に拡散し経時変化を把握する必要があることなどが挙げられ、これらを明らかにするための技術開発が必要になる。そこで当社では、「材料の微量水素評価技術<sup>13)</sup>」、「応力・ひずみの影響把握のための水素脆化評価<sup>14)</sup>・水素分布可視化技術<sup>15), 16)</sup>」、「環境の把握のための水素侵入in-situ測定技術<sup>17)</sup>」などの水素評価技術開発を進めている。これら技術を活用して高強度ボルト用鋼や超ハイテンなどの各種高強度鋼を開発、実用化を進めており、安全・安心なまちづくり、ものづくりに貢献していく。水素社会に向けては、水素の製造から輸送・貯蔵、利用に至るまでの高圧・液体水素用タンク、水素を利用する燃料電池など、水素を利用するインフラ材料における水素脆化の克服が鍵となるため、水素脆化評価技術のさらなる高度化を進める。

以上のように、腐食・水素脆化抑制技術は、電気化学や材料化学、力学など様々な学問領域が絡み合う金属表面制御技術であり、最先端の分析解析技術と計算科学を組み合わせながら、当社グループの鉄鋼、アルミ、チタンなどの素材や機械、エンジニアリング、電力など幅広い製品、プロセスに活用する重要な技術として、変遷していく社会ニーズに応じた研究開発を進め、安全・安心な社会の実現に貢献していく。

## 2. 表面処理による高機能皮膜形成技術

表面処理とは、材料や部品の表面に対して特殊な処理を施し、耐摩耗性やしゅう動性、耐熱性、導電性、潤滑性、耐食性、塗膜密着性、抗菌性などの機能を有する「高機能皮膜」を表面に形成させて、材料の特性を高める技

術である。表面処理には、めっきや化成処理、陽極酸化、溶射、塗装などのほか、気相コーティングであるPVD (Physical Vapor Deposition: 物理気相成長)、CVD (Chemical Vapor Deposition: 化学気相成長) など、さまざまな手法がある。製造後の製品に高い信頼性や高機能を新しく付与できることから注目度の高い重要な技術として、当社においても様々な表面処理技術を蓄積、高度化してきた。当社グループは鉄鋼、アルミ、銅、チタン、溶接材料など、多様で高度な材料技術を有しており、表面処理技術との掛け合わせにより、材料、素形材や機械製品の価値を向上させることで、様々な社会課題の解決に貢献している。

当社の表面処理を活用した製品では、電気化学や薄膜技術などを結集させ、多層化・複合化や成分の制御により、さまざまな機能を発現させる皮膜を形成させている。例えば、有機・無機複合皮膜を活用した「耐食性、塗装性、加工性に優れたクロメートフリー表面処理鋼板」や、特殊合金めっきによる「抗菌性、防カビ性を高めた高機能抗菌めっき技術KENIFINE™ (ケニファイン)」、皮膜の多層化による「優れた親水性、耐食性および加工性を有するプレコートアルミフィン」、原子・分子単位の皮膜形成による「高耐久化、低摩耗化、高寿命化を実現するPVDコーティング装置・表面処理技術」などがある。これらはいずれも表界面を精緻に制御する高度な表面処理技術で独自の高機能皮膜を形成させた特徴ある製品である。

さらに、次世代の接合技術として注目が集まる接着接合において、最先端の分析・解析技術や計算科学を活用して、金属材料の界面で接着力が発現するメカニズムを解明し、接着強度を長期安定化する金属材料の表面処理技術を開発している。具体的には、放射光を用いた「硬X線電子分光法 (HAXPES: Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy)」により、接着剤と金属材料の界面で化学的な相互作用が強化して接着力が発現するメカニズム<sup>18), 19)</sup>を明らかにしている。さらに、独自の分子動力学と第一原理計算のハイブリッド量子古典シミュレーションにより、古くから知られる「水分による接着力低下現象」を分子、原子レベルで再現し、接着界面に水が吸着すると界面の化学的な相互作用が阻害されて接着強度が低下するメカニズムを理論的に解明<sup>20)</sup>している。これらの知見が金属材料の接着接合への信頼を高め、より良い製品が開発されるための一助となることが期待される。

カーボンニュートラルを目指した水素社会の到来に向けては、燃料電池自動車 (FCV) の技術開発が進む中、固体高分子型燃料電池 (PEMFC) 1台当たり数百枚以上搭載される金属セパレータには、表面導電性と耐食性を兼備し、かつ、プレス成型可能な表面処理 (プレコート) が要求される。当社では、ナノサイズのカーボンと酸化チタンの複合皮膜を活用した「導電性と耐食性を兼備した燃料電池セパレータ用NCチタン」と「チタン箔コイルへのRoll to Roll型連続成膜プロセス」を開発し、世界で初めてプレコート型セパレータ基材、Nano-



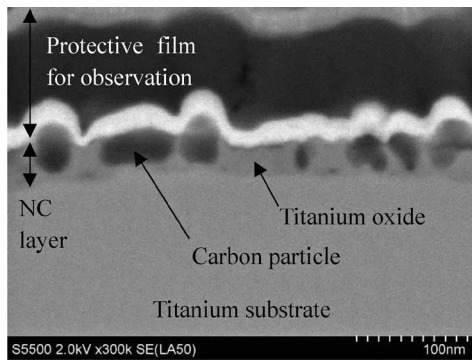


図7 NCチタン皮膜の断面構造  
Fig.7 Cross-sectional SEM image of NC titanium

Carbon composite coat (NC) チタンを実用化した<sup>21)</sup>。以下、NCチタンについて詳細に解説する。

図7にNC皮膜の断面の構造を示す。NC皮膜の構造はチタンとの密着の役割を果たす酸化チタンと、通電パスの役割を果たすカーボン粒子からなり、チタンの表面導電性を改善している。

NC皮膜の形成機構について以下に述べる。高温の大気圧雰囲気ではチタンは酸素の内方拡散により表面からチタン内部側に酸化皮膜が成長するが<sup>22)</sup>、特定の低酸素分圧下で、チタンが外方に拡散して表面上に酸化皮膜が成長する現象が発見されている<sup>23)</sup>。このチタンの外方酸化現象を活用して、あらかじめチタン表面に塗工したカーボン粒子を酸化チタン中に取り込んだ膜がNCである。また、高密着性を有する酸化チタンにより、NCが剥離しないプレス成型が可能で、NCの割れにより露出したチタン基材部分はチタン自身の耐食性を活用することにより、プレス成型可能な表面処理（プレコート）を実現した。競合材のステンレスでは、皮膜のピンホール部や基材露出部から電池特性劣化につながる鉄イオンの溶出<sup>24)</sup>、<sup>25)</sup>が懸念されるため、プレコートの実用化は難しい。NCにより、プレス成型後に1枚ずつハンドリングして表面処理を行う低生産工程が省略され、セパレータの生産性向上にも貢献している。

NCチタンは、2020年12月に発売されたトヨタ自動車(株)の燃料電池自動車“MIRAI”のセパレータ基材として独占供給されている。今後、自動車だけでなく鉄道、船舶、航空機用の燃料電池への活用が期待される。

このように表面処理技術は表界面のミクロな制御が材料特性の成否を分けるため、当社では高度な分析解析技術や計算科学を取り入れてメカニズムを解明しながら、信頼性の高い高機能皮膜を形成する技術の構築を進めている。今後も当社グループの特徴である多様で高度な材料技術と表面処理技術の掛け合わせで、様々な社会ニーズに対応する高機能材料を創出し、安全・安心な社会への貢献を目指す。

むすび=本稿では高機能な表面を創製する金属表面制御技術について概説した。鉄鋼、アルミ・銅合金、チタンといった金属材料を輸送機器や社会インフラに適用する際には、安全性や長寿命化の観点からは従来以上に耐食性に優れた材料、さらにメンテナンスコスト削減の観点からは高精度な寿命診断技術が求められるため、当社の腐食・水素脆化抑制技術をさらに発展、高度化していく所存である。また、多様な社会ニーズに応える機能性材料の開発には、表面処理技術の役割も大きく、当社が保有する多様で高度な材料技術との掛け合わせで新たな価値創出を実現していく。今後も、金属表面制御技術を活用した高付加価値材料の創出に加え、高度な分析解析や計算科学を駆使した精緻な評価技術により材料の信頼性、安全性を評価し、安全・安心な社会に貢献し続けていく。

#### 参考文献

- 湯瀬文雄ほか. R&D神戸製鋼技報. 2015, Vol.65, No.1, p.6-10.
- 阪下真司ほか. R&D神戸製鋼技報. 2008, Vol.58, No.1, p.32-35.
- 中山武典ほか. R&D神戸製鋼技報. 1997, Vol.47, No.2, p.47-53.
- 鶴野達二ほか. 日本金属学会会報. 1971, Vol.10, No.5, p.308-315.
- U. R. Evans. Nature. 1965, Vol.206, p.980-982.
- T. Misawa et al. Corrosion Science. 1971, Vol.11, No.1, p.35-48.
- 小澤敬祐. 電気化学. 2022, Vol.90, No.1, p.21-25.
- 原 修一ほか. 日本金属学会誌. 2007, Vol.71, No.3, p.346-353.
- 小澤敬祐ほか. 材料と環境2020予稿集, 2020-5-20/22, 腐食防食学会, 2020, s20c306.
- H. P. Nielsen et al. Progress in Energy and Combustion Science. 2000, Vol.26, No.3, p.283-298.
- 野口雄也ほか. 材料と環境 - 第68回材料と環境討論会 講演大会論文 -. 2022, Vol.71, No.6, p.183-186.
- 南雲道彦. 水素脆性の基礎. 初版. 内田老鶴圃, 2008, p.219.
- M. Kawamori et al. ISIJ int. 2022, Vol.62, No.8, p.1731-1740.
- J. Kinugasa et al. ISIJ Int. 2021, Vol.61, No.4, p.1071-1078.
- M. Kawamori et al. ISIJ Int. 2021, Vol.61, No.4, p.1159-1161.
- J. Kinugasa et al. ISIJ Int. 2021, Vol.61, No.4, p.1091-1098.
- M. Kawamori et al. Corrosion Science. 2023, Vol.219, 111212.
- 高橋佑輔ほか. 表面技術. 2021, Vol.71, No.4, p.238-241.
- 高橋佑輔ほか. R&D神戸製鋼技報. 2023, Vol.72, No.1, p.130-136.
- 尾形修司. FOCUS事例集2022年4月号. 【ものづくり】金属素材間の接着接合の現象解析.
- 長田 卓. R&D神戸製鋼技報. 2022, Vol.71, No.2, p.78.
- K. Hauffe, Oxidation of metals, Plenum Press, Springer New York, 1965, p.217.
- T. Sato et al. Ti-2007 Sci. & Technol., Japan Inst. of Met. 2007, p.1679-1682.
- W. Li et al. Diamond Relate. Mate.2021, Vol.118, 108503.
- Y. A. Dobrovolskii et al. Russian J. General Chem. 2007, Vol.77, p.752-765.

(解説)



## KOBELCOの電子材料機能発現技術

田内裕基\*1・越智元隆\*1(博士(工学))・釘宮敏洋\*2(博士(工学))

### Development of Functional Electronic Materials at KOBELCO

Yuki TAUCHI・Dr. Mototaka OCHI・Dr. Toshihiro KUGIMIYA

#### 要旨

拡大する電子デバイスの性能を向上させるうえで、電子材料のもつ機能を最大限に発揮させることが重要となる。そのため、素材開発に際してはデバイス製造プロセスやデバイス構造を考慮することが必要であり、当社は製造プロセス開発、デバイス評価技術の構築をあわせて進めてきた。酸化半導体材料の開発では素材単体の電気特性評価に加え、薄膜トランジスタの作成、評価を進めデバイス特性と材料の特性の相関を明らかにした。また光ディスク用記録膜の開発では材料開発とあわせて記録信号特性評価を進めた。お客様に安心して使っていただく電子材料素材の開発のための要素技術について解説する。

#### Abstract

To enhance the performance of expanding electronic devices, maximizing the functionality of electronic materials is crucial. Hence, when developing these materials, it is essential to consider the device manufacturing process and device structure. Kobe Steel has thus been simultaneously advancing the construction of manufacturing processes and device evaluation technology. In the development of oxide semiconductor materials, Kobe Steel has not only conducted electronic evaluations of individual materials, but has also proceeded with the creation and evaluation of thin-film transistors, revealing the correlation between device characteristics and material properties. Furthermore, in the development of recording films for optical disks, Kobe Steel has conducted recorded signal evaluations in conjunction with materials development. This paper explains the essential technologies for developing electronic materials that customers and users can confidently rely on.

#### 検索用キーワード

電子材料, TFT, 酸化半導体, 素子, PITS, 光ディスク, 記録膜

まえがき = 情報端末機器の多様化やAIの進展、自動車のEV化など、今後もエレクトロニクス社会に関連する技術の適用は進展・拡大していくのに伴い、それらを支える電子デバイス特性の要求もますます高まっていくであろう。同時にそうした要求の実現には、電子デバイスを支える素材、つまり電子材料のもつ機能を最大限に発現させる技術が欠かせない。そのためには、まず物性が見える化、次に原子レベルでの材料設計、そして顧客に提供した素材の物性が電子デバイスや部材レベルとして維持できること、が重要となる。

当社の電子材料開発の取り組みは、1980年代の光磁気記録媒体用磁性材料スパッタリングターゲット材料の開発をはじめとし<sup>1)</sup>、ダイヤモンド薄膜およびデバイスの開発<sup>2)</sup>や半導体製造装置用アルミ電極の表面処理開発<sup>3)</sup>などへ拡大してきた。中でも薄膜形成に用いられるスパッタリングターゲット材料は、光記録媒体用反射材料、フラットパネルディスプレイ (Flat Panel Display, 以下FPD) 用のアルミ合金配線材料、酸化半導体材料へと対象を広げている。これら電子材料は原子レベルの材料設計による物性制御を実施しており、あわせてユーザーに提供した素材の物性値が電子デバイスや部材レベルとして維持できることが重要となってきた。

図1に当社の電子材料開発の考え方と関連する要素技術を示す。一般に、これまで素材メーカーは電子材料をユーザであるデバイスメーカーや部材メーカーに提供し、デバイスメーカーはその素材を用いて電子デバイスを製造し、評価を行ってきた。この過程には、提供した材料の物性がユーザサイトでの電子デバイス製造において維持できるかが問題となる。お客様で所望の特性が得られなかった場合、素材メーカーは電子デバイスの製造プロセスに問題があるのか、素材そのものに問題があるのかを切り分けることが難しい。その場合、素材メーカーでも評価技術力を高めユーザ目線で自ら評価できることが必要とされる<sup>4)</sup>。そこで当社では図1に示すように、顧客サイトで行う電子デバイス試作と電子デバイス評価環境を自社内に構築し、電子デバイス特性の良否判断を自ら行うこととしている。不良の場合、材料起因なのか、製造プロセス起因なのかを切り分けるだけでなく、電子材料の機能発現を維持するための製造上のキープロセスや条件を見出し、これをお客様に情報提供することも行っている。これによってユーザサイトでの電子デバイス製造条件の最適化を大幅に短縮することも可能である。

本稿では、こうした当社の電子材料開発における要素技術と、要素技術を用いた材料開発の考え方について概説

\*1 技術開発本部 応用物理研究所 \*2 技術開発本部 企画管理部

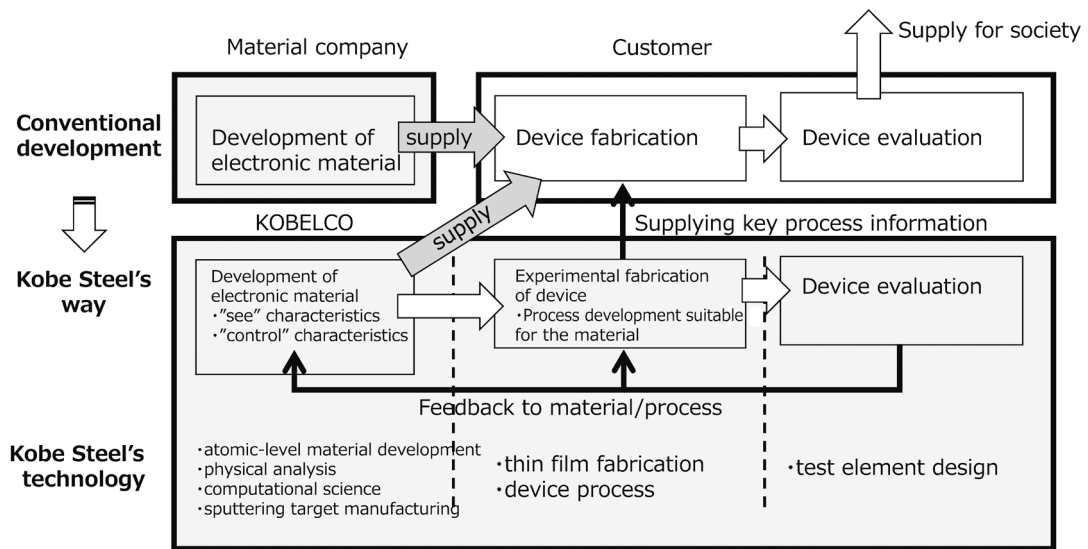


図1 当社の電子材料開発におけるプロセスと要素技術の関係  
Fig.1 Kobe Steel's R&D process for electronics material and technology

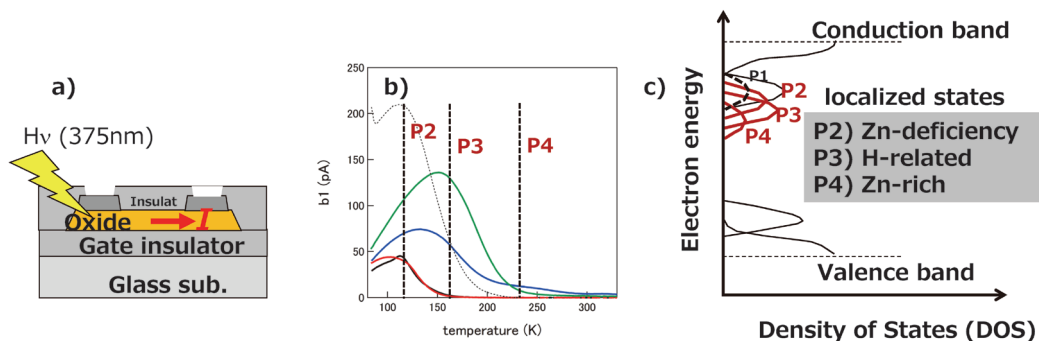


図2 PITSによる解析例<sup>5),6)</sup>, a) PITS測定のための評価用テストエレメント, b) 作製条件の異なる試料のPITS評価結果, c) PITSから得られた情報をもとにした電子状態図

Fig.2 Example of PITS analysis<sup>5),6)</sup>, a) test element for PITS, b) comparison of PITS result with different test element fabrication processes, c) band structure diagram deduced from PITS analysis

し、量産採用いただいた適用例として、「FPD用酸化物半導体材料の開発」と「光ディスク用記録膜材料の開発」について紹介する。

## 1. 電子材料機能発現のための要素技術

適用例を紹介する前にここでは電子材料機能発現のための要素技術を紹介する。当社の電子材料開発の考え方は前述のとおりであるが、図1の下段に示すとおり、電子材料開発、電子デバイス試作、電子デバイス評価それぞれに、要素技術が必要となる。

### 1.1 電子材料開発

電子材料開発に必要な要素技術として図1左のように、原子レベルの材料設計技術や物理分析技術、場合によっては計算科学や、スパッタリングターゲット製造技術が必要となる。ここで最大のポイントは物性に見える化であり、物理分析技術や計算科学がそれにあたる。物理分析技術といっても欠陥や原子の配列を直接的にみる技術もあれば、欠陥準位など電気的な欠陥としてみる技術もある。また直接測定や観測することが難しい物性値であれば、第一原理計算などを用いて計算する計算科学も重要となってきている。

物性に見える化の例として、PITS (Photo-Induced

current Transient Spectroscopy) による酸化物半導体材料の欠陥解析の例を図2に示す。PITSによる解析方法<sup>6),7)</sup>は割愛するが、図2 a)に示すような評価用テストエレメントに対してPITSによる解析を実施した結果が図2 b)である。図2 b)の縦軸は欠陥密度の量に対応し、横軸の温度は活性化エネルギーに対応する。この解析によって、図2 c)に示すように、酸化物半導体材料の電子状態解析が世界で初めて可能となり、図中に示すように欠陥がZnなどの材料起因によるものと水素(H)など酸化物半導体材料周辺の材料による製造プロセス起因によるものとの切り分けが可能となった。

### 1.2 電子デバイス試作および評価

電子デバイスの良否を判断するうえで必要なデバイス試作技術および評価技術を素材メーカーである当社が保有していることが当社の特徴である。電子デバイスは何層かの薄膜を積層する構造が多く、薄膜形成技術やそれらをパターニング (フォトリソとエッチングを繰り返す工程) する技術を用いて試作する。薄膜の積層はパターニング工程を繰り返すことによって得られ、これに必要な設備、クリーンルームを当社では保有している。実際にユーザサイトで製造される電子デバイスには、トランジスタ、センサ、有機EL素子、光記録媒体などさま



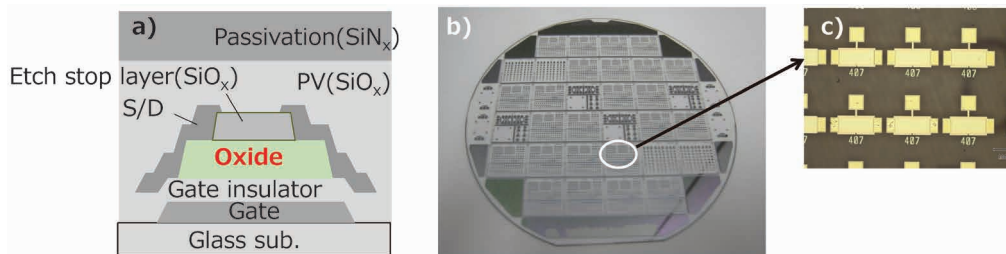


図3 薄膜トランジスタの評価用テストエレメントの設計例, a) 薄膜トランジスタの断面構造, b) 6インチガラスウエハに試作した薄膜トランジスタなどの評価用テストエレメント, c) 薄膜トランジスタの光学顕微鏡像

Fig.3 Example of test element design for TFT evaluation, a) sectional structure of TFT, b) test element for TFT evaluation on 6-inch glass, c) Optical microscope image of TFT

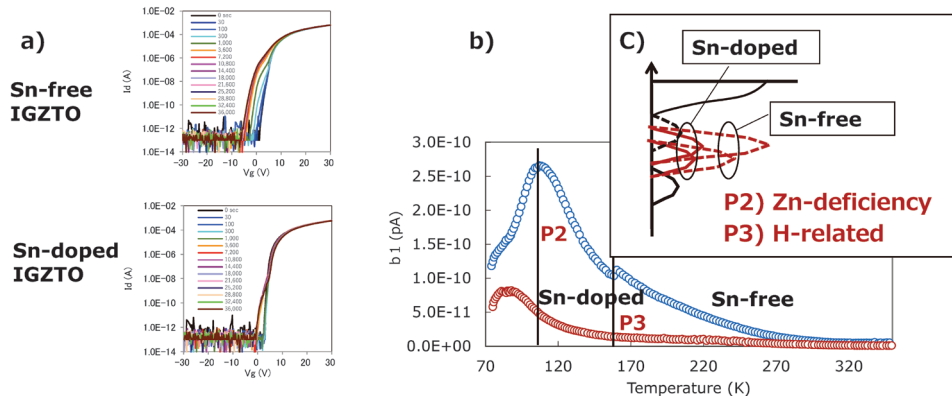


図4 当社が開発したSn-doped IGZTOの特性, a) 薄膜トランジスタの信頼性試験結果 (上はSn-free, 下はSn-doped), b) PITS解析例, c) PITS解析から得られる電子状態図

Fig.4 Transfer characteristic of KOBELCO's Sn-doped IGZTO TFTs, a)NBITS test (upper: Sn-free, lower: Sn-doped IGZTO), b) PITS analysis (blue: Sn-free, red: Sn-doped IGZTO), c) Band structure diagram of IGZTO deduced from PITS

さまざまである。デバイスの種類や構造が変われば、そこに用いられる薄膜の組成やパターンも異なり、当社ではデバイスに合わせた試作が可能である。

図3は薄膜トランジスタの評価用テストエレメントの設計例を示している。図3 a)は薄膜トランジスタのテストエレメント断面構造図であり、b)はガラスウエハ上に試作した薄膜トランジスタのTEG (Test Element Group) である。TEGとは、電子デバイスの評価のためにさまざまな特性を個別に見える化する手法である。

さまざまな特性とは、電気抵抗率の線幅依存性、コンタクト抵抗率のコンタクト面積依存性、トランジスタの電流-電圧特性のゲート長依存性などである。評価の対象に応じて素子の形状や構造を個別に設計しており、1枚のウエハ上に構造の異なる素子を形成している。このように、デバイス試作技術と同様評価する対象に合わせてTEGを設計する。

## 2. 電子材料機能発現技術の適用例の紹介

本章では電子材料機能発現技術の適用例として、FPD用酸化物半導体材料の開発と、光ディスク用記録膜材料の開発について紹介する。

### 2.1 FPD用酸化物半導体材料の開発

FPDはスマートフォンやタブレットに代表されるIT製品の根幹であり、近年は高精細化や低消費電力化だけでなく、折りたたみ可能なものやウェアラブル向けなどの新しい機能も提案されている。ここではコベルグループが開発し、すでにFPDメーカーにて量産採用が拡大

している酸化物半導体材料 (In-Ga-Zn-Sn-O: IGZTO) について紹介する。

東京工業大学の細野名誉教授が開発した酸化物半導体材料 (In-Ga-Zn-O: IGZO)<sup>8)</sup> はアモルファス構造を有しながら、電子移動度が  $8 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  と高いこと、ワイドギャップ材料であるためリーク電流が極めて低いことが最大の特徴であり、広くFPDの画素を駆動するスイッチングトランジスタに採用されてきた。さらに電子移動度が向上すれば、トランジスタの微細化によって高精細化やディスプレイの狭額縁化などが進むなど大きなメリットがあり、FPDメーカーから我々素材メーカーへの要求が高まっていた。いっぽうで高移動度化は信頼性の低下につながるトレードオフの関係が認められており<sup>9)</sup>、これをブレークスルーする技術が望まれていた。

図4に当社が開発したSn-doped IGZTOの特性と、Sn-free IGZTOとの比較を示す。図4 a)はドレイン電流とゲート電圧の関係である。あるゲート電圧を境にドレイン電流が流れる良好なスイッチング特性が得られているが、ここに375 nmの光を長時間照射していくと、立ち上がりのゲート電圧、つまりしきい値電圧が負側にシフトする現象がみられている (詳しくはNBITSという信頼性試験<sup>10)</sup>によるもの)。しきい値シフトはSn添加によって抑制されていることがわかる。このしきい値シフトは図2 c)でも言及したP2やP3と呼ばれる欠陥が多いことが原因であり、これらをいかに抑制するかがポイントであった。材料探索の過程において、P2と呼ばれるZn起因の欠陥はSnをドーピングすることで抑制で

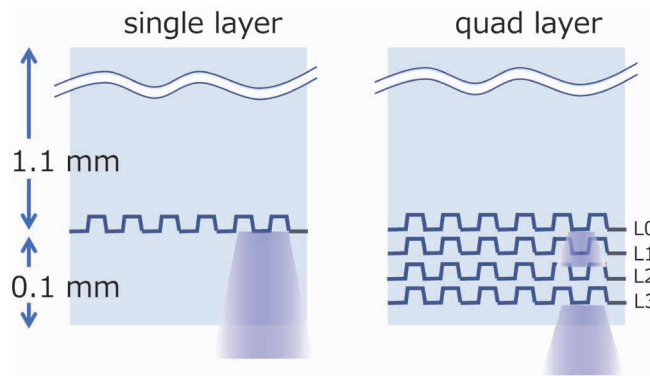


図5 1層ディスクと4層ディスクの構造  
Fig.5 Structure of single layer disk and quad layer disc

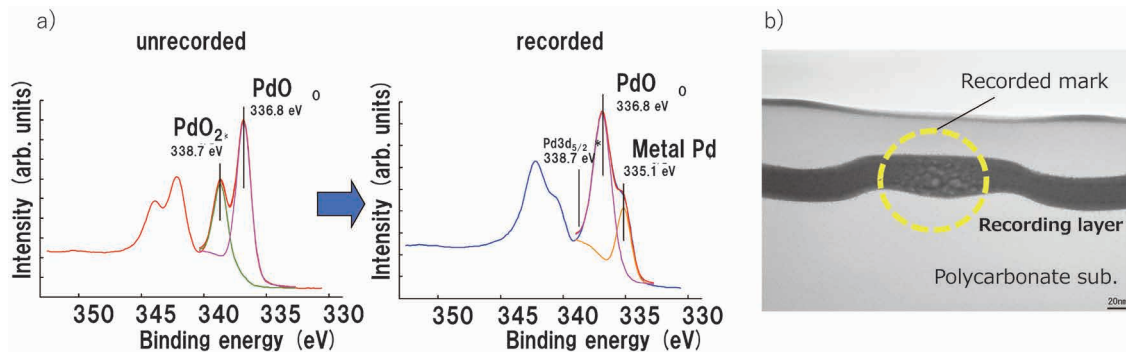


図6 未記録部と記録部のXPS分析結果と記録部分の断面TEM像, a) XPS分析結果, b) 断面TEM像  
Fig.6 XPS analysis of unrecorded and recorded area and sectional TEM image of recorded disc, a) XPS analysis, b) Sectional TEM image

きること、またP3と呼ばれるH起因の欠陥はSnのドーピングと水素をともなう製造プロセスの最適化で抑制できることをPITS分析により見出すことに成功した。図4 b)の解析のとおりSn添加によって欠陥密度に相当する縦軸の値を低減し、PITSの結果から想定される電子状態図(図4 c))のように欠陥の制御を可能にした。その結果、Sn-doped IGZTOでは量産レベルでも問題とならないしきい値シフト量に抑えることができ、電子移動度は従来のIGZOの3倍を超える $29 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を実現することができた<sup>11)</sup>。また水素をともなう製造プロセスの最適化も重要であることから、これらの情報はユーザーサイトであるFPDメーカーとも情報共有を進め、短期間での採用につながった。

## 2.2 光ディスク用記録膜材料の開発

情報のデジタル化に伴い爆発的に増加しているデータの長期的な保管には、従来の磁気テープに加え光ディスクが選択肢の一つであり、ディスクの記録密度の増加が求められている。光ディスクはこれまでにCD、DVD、Blu-rayディスクとその記録容量を拡大してきた。CD-RやDVD-R、BD-Rといった記録型ディスクの記録ではレーザーの熱で光学特性が変化する記録膜材料が用いられている。その記録膜には有機色素材料や相変化材料が使われてきたが、いずれも入射したレーザー光を信号として取り出すために反射層としてアルミ合金や銀合金の層が必要である。図5に単層ディスクと多層(4層)ディスクの構造を示す。記録密度の増加には記録レイヤの多層化が手段となるが、反射層が存在すると反射層で光が吸収され、奥の層への記録が難しいという問題があり、新た

な構造や材料が望まれていた。

この課題に対し、当社は反射と記録を兼ねる高屈折、低消費係数かつ熱で分解する無機系材料として酸化物材料に着目し探索を進めた結果、従来に無い新たな材料としてPd酸化物系材料を開発<sup>12)</sup>した。同材料の酸化状態の見える化手段として、未記録部と記録部のXPS分析を実施した結果を図6 a)に示す。未記録部には反応性スパッタリングにより形成された過酸化物のPdO<sub>2</sub>が認められるが、記録後にはPdO<sub>2</sub>は無く、金属Pdが認められる。このことからレーザーによる熱でPdO<sub>2</sub>が分解し、金属Pdに還元されたことがわかる。この状態変化によって光学特性が変化する。さらに断面TEMを用いて実際の記録部分を直接観察した結果(図6 b)), Pd過酸化物の分解による酸素放出によって記録部がポーラス構造になっており、かつ体積膨張していることを確認した。前記の酸化物から金属への状態変化による光学特性変化に加え、膜形態および膨張による光学的な干渉が組み合わさって記録による反射率変化を引き起こしていることがわかり、記録のメカニズムを証明している。

さらに、記録膜材料としては光学的、化学的性質を満たすだけでなく、記録媒体として良好な信号特性や耐環境性を確保することも必要であり、媒体作製技術、信号特性評価技術を導入し材料開発を進めた。図7には各種検討材料における記録パワーと、ジッター<sup>13)</sup>の関係をグラフにしたものである。ジッターは記録された信号の立ち上がり、立ち下りのタイミングの基準周波数からのずれを標準偏差としてあらわしたものであり、小さいほど良好な信号となる。今回は評価用テストエレメント

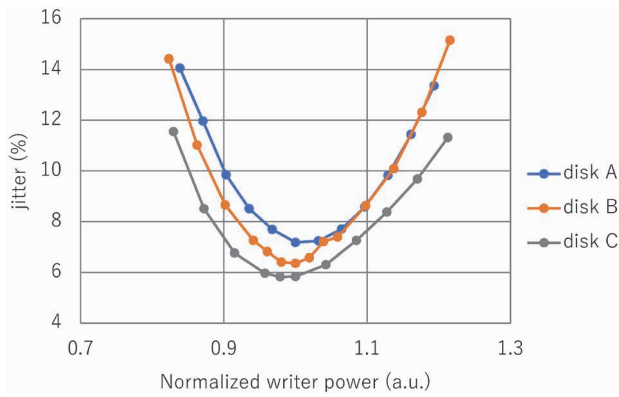


図7 各種検討材料における記録パワーと信号品質の関係

Fig.7 Relationship between signal quality and write power on various materials

として図5の左に示す1層ディスクそのものを自社で作成し、ジッターを評価し良好な材料組成の記録膜材料を開発した。その後実施いただいたお客様での成膜およびディスク作製、信号特性評価においても良好な特性を再現でき、本材料は多層Blu-rayディスクの記録材料として実用化された。

このように、材料の探索、物理分析による物性値の見える化、評価用テストエレメントを用いたデバイス特性検証を自社サイトで一貫して行うことにより、お客様にとってより使いやすい材料の提供ができた好例であるといえる。

むすび= IoTの拡大に伴い、電子機器が飛躍的に増加する中、機器の性能向上に寄与できる材料が果たす役割はより大きくなるであろう。材料のもつ物性値をデバイスレベルや部材レベルまで維持しつつ、その物性値がデバイスの機能として最大限に発現できる素材を提供することが素材メーカーとしての使命でもあろう。

当社の電子材料機能発現技術により、電子材料の設計と製造、電子デバイスの試作と機能特性評価まで、一貫して開発できる環境を今後も維持・発展しながら、材料を使っていただく電子デバイスメーカーだけでなく、さらにその電子デバイスを使うお客様が安心を大前提として使っていただける材料を引き続き提供していきたい。

#### 参考文献

- 1) 吉川一男ほか. R&D神戸製鋼技報. 1989, Vol.39, No.4, p.12-15.
- 2) 小橋宏司. R&D神戸製鋼技報. 1989, Vol.39, No.4, p.43-45.
- 3) 久本 淳ほか. R&D神戸製鋼技報. 1998, Vol.48, No.3, p.84.
- 4) 岩間公秀. 知的資産創造. 2006, 7月号, p.80-93.
- 5) 高原輝行ほか. 粉体粉末冶金協会講演概要集. 1994, 春季, p.262.
- 6) Hino et al. JVST B32. 031210 (2014).
- 7) K. Hayashi et al. Jpn. J. Appl. Phys.56, 03BB02 (2017).
- 8) K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano and H. Hosono. Nature. 432, 488-492 (2004).
- 9) Yu-Shien Shiah et al. Nature Electronics. 4,800-807 (2021).
- 10) JH Stathis and S Zafar. Microelectronics Reliability. vol.46, No.2, p.278-286 (2006).
- 11) M. Ochi et al. Proc. IDW'18. p.308 (2018).
- 12) 株式会社神戸製鋼所, 田内裕基および志田陽子, 光情報記録媒体, 特許第4969624号, 平成24年7月4日
- 13) 久保田重夫. 光学. 1983, Vol.12, No.6, p.437-443.



(解説)



# 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\*1・日野 綾\*1(博士(工学))・村田祐也\*1(博士(工学))・森田晋也\*1

## Atomic-scale Physical Analysis for Material Development

Yuki TAUCHI・Dr. Aya HINO・Dr. Yuya MURATA・Shinya MORITA

### 要旨

安全・安心な社会の実現およびグリーン社会に向けた金属素材開発において、高強度化や高耐食化を図るには金属組織のコントロールが重要であり、そのコントロールの対象は原子サイズオーダーへと微細化している。組織を観察することは特性発現に向けたキーであり、原子レベルで観る・測ることが求められる。これらを可能にする当社の物理分析解析技術の取り組みとして、放射光X線や3次元アトムプローブの活用、軟X線発光分光、走査型透過電子顕微鏡を用いたエネルギー分散型X線分光解析の適用を進めてきた。また第一原理計算を用いた組織予測にも取り組んでいる。CNに向けて大きな変化を迎える中、物理分析解析技術で次代の素材開発を支えていく。

### Abstract

In the pursuit of realizing a safe and secure society and advancing toward a green society through the development of metallic materials, it is essential to achieve higher strength and corrosion resistance by controlling the microstructure. This control has been miniaturized to the atomic scale. Observing microstructure is key to expressing desired properties, and observing and measuring at the atomic level is required. As part of Kobe Steel's efforts to enable these capabilities, the company has been utilizing techniques such as synchrotron radiation X-ray, three-dimensional atom probes, soft X-ray emission spectroscopy, and energy-dispersive X-ray spectroscopy using scanning transmission electron microscopes. Furthermore, Kobe Steel is also engaged in microstructure prediction using first-principle calculations. Amidst the significant changes toward achieving carbon neutrality enabled by these technologies, Kobe Steel will strive to support the development of next-generation materials through its physical analysis techniques.

### 検索用キーワード

物理分析, 微細組織, 3DAP, 放射光, SXES, 第一原理計算, 炭素

まえがき = 当社は、マテリアリティ「グリーン社会への貢献」「安全・安心なまちづくり・ものづくりへの貢献」のもと、輸送機器、土木・建築、社会・産業インフラ、高機能材料などの分野において、鉄鋼やアルミニウムなどの金属材料をはじめとする多種多様な素材を開発し提供している。とくに、自動車をはじめとする輸送機器の軽量化、橋梁（きょうりょう）などの構造物の長寿命化といった社会課題解決のための素材特性改善要求は大きく、当社は金属構造材料を提供する素材メーカーとして、これらの要求を満足する新規素材開発、製造プロセス開発に力を入れてきた。輸送機器の軽量化、構造物の長寿命化を達成するために素材に求められるのは、『高強度』、『高耐食性』といった代表特性とそれに付随して生じるさまざまなほかの特性の向上である。これらの要求に対し、金属組織制御技術、金属表面制御技術、金属プロセス加工技術などのコア技術を高度化し適用するとともに、当社が提供する素材の多様性を生かしたマルチマテリアル化ソリューションを提案し応えている。

素材開発・プロセス開発において、『高強度』、『高耐食性』といった要求特性を発現させるためには、特性発現のメカニズムを解明し開発の指針を与えることが重要となる。また、新規素材の提案の際にも、その特性発現

メカニズムとあわせて提案することがお客様に安心して使っていただくための不可欠な要件となってきている。

これらのメカニズム解明のために重要かつ不可欠であるのが物理分析解析技術である。図1に、物理分析解析技術がどのように当社の製品を支えているのか、ひいては当社のマテリアリティにどうつながっているのかを示す。物理分析解析技術とは、物理分析手法を用いた測定に加え、その測定データを評価・解釈し、メカニズム

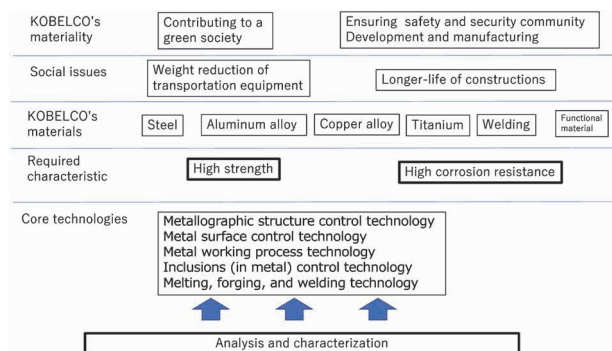


図1 素材開発・プロセス開発のためのコア技術群を支える物理分析解析技術

Fig.1 Physical analysis which support KOBELCO's core technology for research and development of materials and the process

\*1 技術開発本部 応用物理研究所

解明・モデル化する一連の技術を指しており、素材開発を共通的に下支えする技術である。『高強度』、『高耐食性』の要求レベルが増すにつれ、必要となる物理分析解析技術も常に改善が求められ、技術を磨いている。まさに、素材・プロセス開発のためのコア技術と物理分析解析技術開発は、社会課題解決に向けた両輪である。

本稿では、当社で開発・活用している物理分析解析技術の概要について述べた後、素材開発で活用した、あるいは素材開発のための基盤技術として開発した、物理分析解析技術のトピックスを紹介する。

## 1. KOBELCOの物理分析解析技術

図2は、横軸に構成要素の役割・位置づけを、縦軸に制御領域のサイズをとり、材料開発における当社の物理分析解析技術を示したものである。「観る・測る」ための技術が物理分析解析技術であり、電子線・イオンなどの荷電粒子やX線などの放射線をプローブとして被測定材料（試料）に照射し、反射あるいは二次的に発生した波や粒子のエネルギーなどを測定することで試料の状態を評価する技術である。物理分析によって得られた結果を評価するためにデータ解析が行われ、近年では機械学習などが活用されている。さらに、データ解析から得られた現象や仮説について原子レベルで検証するのに計算科学が用いられる。

物理分析技術には、プローブの種類や検出する荷電粒子や電磁波などの種類、エネルギー範囲の組み合わせで種々の手法があり、材料組織・組成や表面形態、化学状態などを通じて特性劣化や特性発現のメカニズム解明に資するさまざまな情報が得られる。走査電子顕微鏡（SEM: Scanning Electron Microscope）のような表面形状をサブミクロンスケールで観察するもの、X線光電子分光法（XPS: X-ray Photoelectron Spectroscopy）のような試料表面の化学結合状態を評価するものなどが代表例である。

鉄鋼やアルミニウム合金材料の『高強度化』においてはその変形、破壊の観点から組織制御技術が重要となるが、制御する対象組織は母材組織から粒界や原子構造へと微細化の一途をたどっており、また、それに伴い添加量や偏析量といった制御すべき量が極微量化している。これに対応して物理分析技術の開発を行っているが、当社ではとくに、微細組織解析のための物理分析技術として、放射光を用いた分析や3次元アトムプローブ（3DAP: Three-dimensional atom probe）に着目し、いち早く導入・開発を進めてきた。さらに、微小領域の炭素分布評価のためのSEM-SXES（Soft X-ray Emission Spectroscopy）や、微量元素定量化のためのSTEM-EDS（Scanning Transmission Electron Microscopy - Energy Dispersive X-ray Spectroscopy）などの開発も併せて進めてきた。

放射光とは、加速した電子を磁場によって方向を変える際に発生する光であり、兵庫県のSPring-8の放射光は世界最高レベルのエネルギーと輝度（実験室レベルのX線の10億倍）を誇っている。この放射光により、通

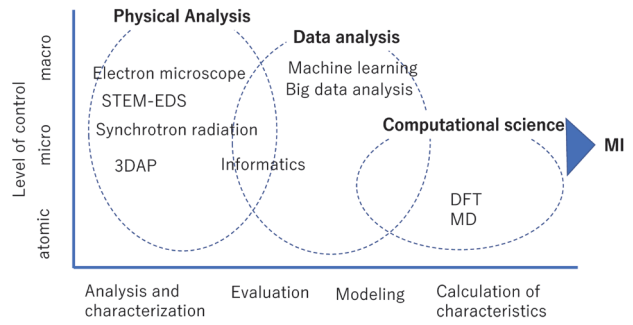


図2 物理分析解析技術の構成要素  
Fig.2 Elements of physical analysis

常では得ることのできない試料内部の情報や、微量含有元素の情報を格段に高い分解能で短時間に得ることができる。当社は1998年からSPring-8産業用専用ビームライン建設利用共同体に参画してビームラインを保有しており<sup>1)</sup>、多様な素材・プロセス開発に活用してきた。

例えば、高張力鋼板などの鋼材の『高強度化』においては、とくに水素脆化（ぜいか）による遅れ破壊割れが問題となるが、遅れ破壊感受性を評価するためには水素のトラップサイトとなる遷移金属炭化物を評価することが重要である。炭化物はナノメートル（nm）サイズの析出物であることもあり、鋼材中でどのような形態で分散しているかを評価する必要がある。当社のマルテンサイト鋼においては、微量な炭化物に着目し、放射光X線回折により遅れ破壊感受性を低減するC量とプロセス条件の検討に反映している<sup>2)</sup>。またTRIP（Transformation Induced Plasticity）鋼においても熱処理温度の違いによるオーステナイト中の固溶C量について放射光X線回折を用いて分析し、特性発現にむけた組織制御指針の策定に活用している<sup>3)</sup>。

3DAPは、材料内部の原子配置を3次元的にイメージングできる微細領域分析装置である。3DAPはnmオーダーの高い空間分解能と優れた質量分解能を併せ持っており、材料内部のクラスタ（添加元素原子のnmレベル集合体）や析出物などの検出・分析に威力を発揮する<sup>4)</sup>。例えば、自動車パネル用6000系アルミニウム合金について、ベークハード性に影響するMg-Siクラスタの数密度や組成を定量的に示すことを可能にし、適したクラスタが形成される熱処理条件の決定に活用している<sup>5)</sup>。

このような3DAPを用いた評価ではとくに、物理分析技術で観て、測ったデータをメカニズム解明につなげる、「評価・解釈」するためのデータ解析技術が大きな役割を果たしている。3DAPの測定において測定結果として得られる原子配置や元素情報の不確かさは避けられない。これを結晶学的情報にもとづいて補正し<sup>6)</sup>、さらにクラスタの数密度や組成を添加元素の原子間距離から統計的に解析する技術を開発することにより、測定された原子配置の信頼性を担保している。

また、昨今発展してきた機械学習や大量データ処理技術と物理分析とを融合した開発も進めている。例えば、鉄鋼材料はさびの進行を制御することが『高耐食化』に重要となるが、さびには種々の形態が存在し、分析や定



量化が難しかった。そこで、放射光X線による構造解析データをもとに機械学習を活用し、さびの状態を判別し、さび分布を可視化した。この結果がさびの形成機構の解明に役立っている。これについては本号「高機能な表面の創製により安全・安心な社会に貢献する金属表面制御技術」p.34～35を参考にされたい。

近年は計算機パワーを含む計算科学技術の発展も著しい。第一原理計算や分子動力学計算を用いて原子構造や物性予測ができるようになってきている。物理分析とデータ解析により「評価・解釈」された結果と、計算により推定される結果とを総合して現象理解やメカニズム理解を行うケースが増えており、計算科学技術も素材開発における開発指針を得るための必須のツールとなりつつある。

以上のように、当社の物理分析解析技術は、『高強度』、『高耐食性』といった目標特性達成に向けた素材・プロセス開発と二人三脚で進展してきた。また、物理分析技術に機械学習などのデータ解析技術、原子レベルの現象把握をサポートする計算科学技術との融合が昨今の流れであり、当社でも取り組みを始めている。

## 2. 原子スケール物理分析解析技術の活用事例

本章では、物理分析解析技術の活用事例として、TRIP鋼の『高強度化』開発で活用するSEM - SXESによる微小領域炭素分布評価技術、および、『高強度化』メカニズム解明の共通基盤として、STEM - EDSおよび計算科学による粒界偏析解析技術について紹介する。

### 2.1 軟X線発光分光 (SXES) による TRIP 鋼中の微小領域炭素量評価

自動車の軽量化のためには、高強度と高加工性を両立する鋼板が求められている。この特性向上には変態誘起塑性 (TRIP) 効果が有効であることが知られている。村上らは残留オーステナイト (残留 $\gamma$ ) 粒中の固溶炭素濃度を制御し、結晶粒ごとに不均一な固溶炭素濃度を持つ残留 $\gamma$ 粒を分散させることにより、強度-伸びバランスを向上できることを報告している<sup>7)</sup>が、残留 $\gamma$ 粒の炭素濃度の不均一性評価は従来手法では空間分解能、濃度分解能とも不足しており、新たな分析手法が求められていた。微細な残留 $\gamma$ 粒中の炭素濃度分析のために、空間分解能200 nm以下での炭素分析を可能とするSXES分析を開発した<sup>8)</sup>。

電子線の照射により内殻電子が励起された際、外殻電子の遷移に伴い発生する特性X線のうち、低エネルギーのX線を分析する手法がSXESであり、軽元素の分析や原子の結合状態評価が可能である<sup>9),10)</sup>。SXES分析にはSEM (JEOL製JSM-7100F) にSXES検出器 (JEOL製SS-94000) を搭載した装置を用いた。鋼材中の炭素分析においては測定時に生じる試料表面の炭素含有汚染を取り除くことが重要となる<sup>11)</sup>が、このためにGCIB (Gas Cluster Ion Beam) を照射し汚染の影響を低減しながらSXES測定を行った。

SXESを用いて炭素含有量が0.4 mass%の1.5 GPa級TRIP鋼の組織中残留 $\gamma$ 粒の粒ごとの固溶炭素量を評価

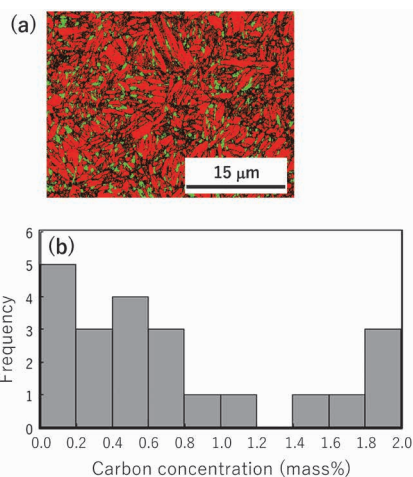


図3 残留 $\gamma$ 中のC量分析結果

(a) EBSDによるフェイズマップ  
(赤: 体心立方格子, 緑: 面心立方格子)

(b) SXESにより分析した残留 $\gamma$ 中炭素の頻度分布

Fig.3 Analysis of C concentration in retained  $\gamma$  phase

(a) Phase map image by EBSD

(red: body-centered cubic, green: face-centered cubic)

(b) histogram of C concentration in retained  $\gamma$  phase measured by SXES

した。EBSD (Electron Back Scattered Diffraction) によりフェライト ( $\alpha$ ) 粒と残留 $\gamma$ 粒をあらかじめ判別した上で、残留 $\gamma$ の固溶炭素量を測定した。EBSDマップを図3 (a) に、残留 $\gamma$ 粒の固溶炭素量の頻度分布を図3 (b) に示す。1.2 mass%の炭素を境にそれ以下とそれ以上の粒に分かれて存在していることが検出できた。

SXES分析は鋼材の特性を左右する炭素量の状態をミクロに判別できる有効な手段であり、SEMレベルの空間分解能である200 nm以下と0.1 mass%の濃度分解能を達成したことで、組織の強度への影響をより詳細に検討することが可能となった。SXES分析では炭素以外の軽元素、金属元素の分析も可能であり、析出物や腐食形態の観察にも応用が可能である。本技術を通じ、より安全・安心な材料、環境負荷の小さい材料の開発に貢献していく。

### 2.2 粒界偏析による脆化抑制に向けた分析解析、計算科学の取り組み

鉄鋼材料において結晶粒界は脆性 (ぜいせい) 破壊を起こしやすく、とくにPやSなどの不純物元素が粒界に偏析すると脆化しやすくなることがよく知られている<sup>12),13)</sup>。粒界脆化の抑制にはこれらの不純物をできるだけ低減するほか、不純物元素の粒界偏析に対するほかの鋼中添加元素の影響も考慮する必要がある。例えばMnはPと親和性が高く共偏析を促進することが知られており、合金元素の種類や量がPの粒界偏析に影響する。そのため、偏析の度合いを分析したり予測したりすることは、脆化を抑制した材料開発にとって本質的なものである。分析については、粒界の体積は材料全体に対して小さいため、微小領域の微量元素を評価することが必要で、非常に高い分解能が求められる。また予測については、PやSなどの添加元素は鋼中で炭化物や合金化合物を形成するため、実際の実験結果から原子間相互作用が粒界偏析におよぼす影響を定量的に評価することが難し



い。ここでは粒界偏析起因の脆化抑制に向け、STEM-EDSによる微量の粒界偏析評価技術と、第一原理計算を用いた添加元素の粒界偏析に与える影響や粒界強度への影響について、第一原理計算を適用した例を報告する。

### 2.2.1 鋼材におけるSTEM-EDSによる粒界P偏析量評価

微量の粒界偏析量を評価する手段としてはAES (Auger electron spectroscopy), 3DAP, STEM-EDSが挙げられる。AESは、比較的短時間で多数の粒界を測定できる利点があるいっぽうで、粒界割れが起きた破面を表面から測定することになるため、粒界割れ割合が小さく粒界粒内割れが混在し両者の判別が難しい材料の場合に、複数の測定箇所粒内割れ破面も含まれてしまい、粒界割れ割合に依存して粒界偏析量が過小評価される問題が指摘されている<sup>14)</sup>。3DAP, STEM-EDSは、AESのような問題はないが、それぞれ計数する信号の統計誤差、および、測定方法に起因する誤差がある。たとえばSTEM-EDSでは、試料への電子照射によって各原子から生じる特性X線の強度で濃度を測るが、特性X線は試料内で吸収されるため試料厚みに依存し誤差となる。またX線の吸収係数は元素ごとに異なり、これも誤差の要因である。これらの誤差を抑制するため、物質・材料研究機構と共同で大立体角EDS検出器および因子法の適用による高精度化に取り組んでいる。

吸収誤差を補正するには試料厚さを知る必要がある。従来、試料厚さの測定はEELS (Electron Energy Loss Spectroscopy) などの方法で、別途測定する必要があったが、当社ではEDS測定だけで試料厚さを測定することを目的に、提案された因子法<sup>15)</sup> という方法を利用している。この方法では測定したい元素を含み、かつ組成と密度と厚さが既知の標準試料を準備して、事前にEDS測定することにより、測定したい元素の量と電子照射量あたりX線量の換算係数因子を得る<sup>16), 17)</sup>。各元素の因子を準備しておけば、試料の測定点ごとの厚さを計算することができるので、試料厚さに依存する吸収誤差を補正することができる。図4にFe-1.44 wt%Mn-0.01 wt%P-2.23 wt%Crについて、溶体化後熱処理を加えた試料の粒界周囲のPマッピング結果を示す。

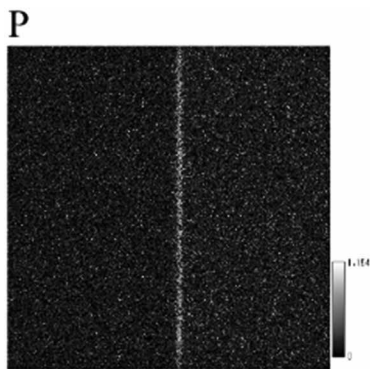


図4 粒界周囲のP組成マップ (測定領域100 nm × 100 nm)

Fig.4 Mapping image of P concentration around grain boundary (measured area: 100 nm × 100 nm)

約2 nm程度の幅にわたりPの偏析が確認できていることがわかる。図5に因子による吸収誤差補正のある場合と無い場合の、粒界に対し垂直な方向のP組成ラインプロファイルを示す。試料厚みによりこの場合、小さく見積られるP量がより正確に評価できることがわかる。P組成プロファイルから、粒界単位面積あたりの粒界偏析量 $\Gamma$  (atom/nm<sup>2</sup>) が得られる。今回の典型的な測定結果と、他研究機関の先行研究にて報告された結果の粒界偏析量 $\Gamma$ の統計誤差を比較するため、測定結果を表1に並べた。今回の測定では、大立体角EDS検出器を用いたことにより粒界偏析量 $\Gamma$ の統計誤差0.1 atom/nm<sup>2</sup> が得られており、他研究機関の報告に対して1/3程度に抑制されたことがわかる。

このように、大立体角をもつEDS検出器および因子による補正で従来報告されている手法<sup>18), 19)</sup> と比較し高精度な評価を可能にし、脆化やその抑制メカニズムの解明に貢献している。

### 2.2.2 Fe粒界におけるPと遷移金属元素の共偏析に関する第一原理計算

近年、計算機性能の向上や第一原理計算手法の開発が進み机上のコンピュータでも高精度な計算が可能となり、材料開発において大きな役割を果たすようになってきている。第一原理計算によって原子間の相互作用を解析すると、鉄鋼材料をはじめ金属材料における粒界共偏析に関するメカニズムの解明につながる。例えば粒界にある元素が偏析した際に別の元素の偏析を助長する方向なのか、抑制する方向なのか、また結合の強さがどう変化するのかを予測することが可能であり、より良い材料の開発指針となり得る。当社では、鉄鋼材料の強化などの目的で広く使われる遷移金属元素がPの粒界偏析に与える影響や粒界強度への影響について、第一原理計算を用い

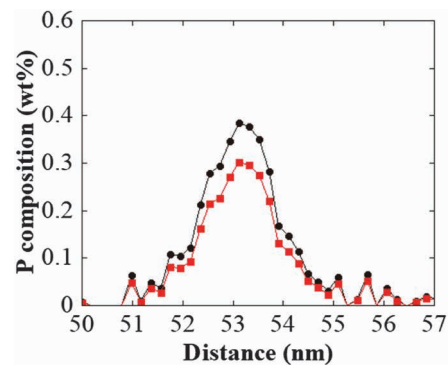


図5 吸収誤差の補正がある場合(黒)とない場合(赤)の粒界に垂直な方向にとったP組成のプロファイル

Fig.5 P concentration profile across grain boundary (black: absorption-corrected, red: absorption uncorrected)

表1 今回の測定と他研究機関の先行研究にて報告された粒界偏析量 $\Gamma$ 測定結果の比較

Table 1 Comparison of Grain boundary segregation  $\Gamma$  reported in this study and previous study on other research institutions

Reference	Method	Bulk material	Segregated element	$\Gamma$ (atom/nm <sup>2</sup> )
This study	STEM-EDS	Fe	P	0.7 ± 0.1 (3 $\sigma$ )
[18]	STEM-EDS	boron carbide	Si	0.7 ± 0.3 (3 $\sigma$ )
[19]	3DAP	Fe	P	0.6 ± 0.3 (1 $\sigma$ )

て評価してきており<sup>20)</sup>、計算手法および結果の例について紹介する。

図6に第一原理計算に用いた粒界モデルを示す。計算にはbcc-Fe $\Sigma$ 3(111)粒界モデル(原子数76)を用いた。中心部に粒界面を設定している。本モデルにて計算した粒界エネルギーは1.23 J/m<sup>2</sup>であった。粒界偏析サイトは図の0~3とし、ここにPとX原子としてCr, Mn, MoをそれぞれPと同時に配置し、粒界におけるP-X相互作用エネルギーや共偏析エネルギーを原子配置ごとに調べた。

これらの結果から、Pをサイト0および2に配置した際のP-X原子間相互作用エネルギーと原子間距離の関係を示したものを図7に示す。原子間距離が短い2.2 Å付近では斥力が強く、Mnでは2.6 Å, Cr, Moは2.8 Å付近で相互作用エネルギーがゼロになることが分かる。このように相互作用エネルギーがP-X原子間距離に依存すること、また添加元素で原子間距離への依存性にはあまり差がないこと、およびMnに比べCr, Moは斥力相互作用が強く、Pの偏析を妨げる方向であることが示唆される。実材料では添加元素の粒界偏析による粒界強化や炭化物、析出物形成による固溶量への影響などがあるものの、これらの計算結果と粒界の物理分析結果の比較から計算の妥当性や脆化抑制にむけて考慮すべき物理現象が明らかになると考えている。

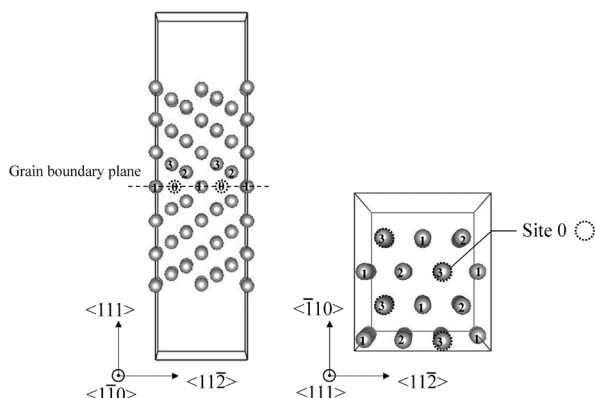


図6 第一原理計算に用いたbcc-Fe $\Sigma$ 3(111)粒界モデル  
Fig.6 bcc-Fe $\Sigma$ 3(111) grain boundary model for density functional theory calculation

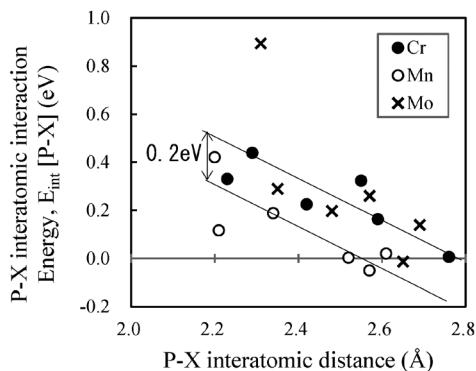


図7 粒界におけるP-X原子間相互作用エネルギーと原子間距離との関係

Fig.7 Relationship between P-X interatomic interaction energy and interatomic distance at grain boundary

むすび=「安全・安心なまちづくり・ものづくりへの貢献」,「グリーン社会への貢献」という当社のマテリアリティに対応するための素材開発において、原子スケールの物理分析解析技術がなぜ必要とされるのか、どのように活用されているのかを事例を交えて紹介した。輸送機器の軽量化や構造物の長寿命化のために素材にはさらなる高強度化,高延性化,高耐食化が求められるが、そのために制御すべき素材の組織や構造は原子レベルに変化している。さらに、これに伴い分析対象や分析データも非常に大きくなってきており、AIを活用した分析結果の解析高度化・高速化や、MIへの取組み加速によるハイスループットデータベース構築(計測インフォマティクス)について当社でも進めているところである。加えて、世界的にCNに向けた動きが活発化しており、安全安心な社会の前提がCNとなりつつあり、素材に求められる性能も水素社会対応や新エネルギー対応, CNプロセスなど、大きな変化を迎えている。これらの要求の中において、素材の性能を左右する原子スケールの挙動を評価する物理分析解析技術はより重要なものになると確信している。

物理分析解析技術はより安全・安心な素材を開発する上で必須な技術である。見えないものを見るようにすることは進むべき方向を選択するための道標となるものであり、技術を磨くことでCNに向けた素材の在り方をこれからも探索していく。

STEM-EDSによる粒界P偏析量評価は物質・材料研究機構の原徹グループと共同で実施しました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 産業用専用ビームライン建設利用共同体, サンビームとは, <https://sunbeam.spring8.or.jp/>. (参照2023-08-30)
- K. Shibata et al. Materials Science Forum. 2021, Vol.1016, p.1331-1336.
- T. Murakami. Materials Science Forum. 2021, Vol.1016, p.984-989.
- 有賀康博ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.42-47.
- Y. Aruga et al. Materials Science and Engineering:A. 2015, Vol.631, p.86-96.
- A. C. Day et al. Microscopy and Microanalysis, 2019, Vol.25, p.288-300.
- 村上俊夫. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.1, p.29-32.
- 日野 綾ほか. R&D神戸製鋼技報. 2021, Vol.71, No.1, p.53.
- 寺内正己ほか. 表面科学. 2015, Vol.36, No.4, p.184-188.
- 田中一英. 日本金属学会会報. 1976, Vol.15, No.12, p.753-761.
- M. Amman et al. Journal of Vacuum Science & Technology B. 1996, Vol.14, Issue1, p.54-62.
- 村上賀國ほか. 日本金属学会会報. 1981, Vol.20, No.9, p.784-793.
- 村上順一郎ほか. 鉄と鋼. 1987, Vol.73, No.1, p.191-198.
- A. Patridge et al. Surf. and Int. Anal. 18, 713 (1992).
- M. Watanabe et al. Journal of Microscopy, 2006, Vol.221, Issue 2, p.89-109.
- K. Yamada et al. e-Journal of Surface Science and Nanotechnology. 2020, 18, p.94-99.
- 山田敬子ほか. R&D神戸製鋼技報. 2021, Vol.71, No.1, p.58-63.
- C. J. Marvel et al. Ultramicroscopy. 2019, Vol.202, p.163-172.
- L. Zhang et al. Journal of Nuclear Material. 2019, Vol.523, p.434-443.
- 森田晋也. R&D神戸製鋼技報. 2021, Vol.71, No.1, p.3-7.

(解説)



# KOBELCOのものづくりを支える高度計測技術

迫田尚和\*<sup>1</sup>・岡本 陽\*<sup>1</sup>・芦田 強\*<sup>1</sup>・桑名孝汰\*<sup>1</sup>

## Advanced Measurement Technology Supporting KOBELCO's Manufacturing

Naokazu SAKODA・Akira OKAMOTO・Tsuyoshi ASHIDA・Kota KUWANA

### 要旨

計測技術は科学・ものづくり力の礎である。世界のインフラを支える基幹部品を幅広く供給する当社において、計測技術は安全・安心な製品と持続可能なものづくりを支える主要な要素基盤技術として、製品の安定供給や品質の作り込みに挑戦し続ける中で鍛錬され独自の発展を遂げた。今後も社会の根幹を支える基幹部品・製品群を安定供給し、あくなき品質・機能・性能要求の高度化に引き続き、またカーボンニュートラルへの挑戦やものづくり変革を通して持続可能な社会を実現するための計測技術の展望を述べる。

### Abstract

Measurement technology is the cornerstone of science and manufacturing prowess. At Kobe Steel, a company that supplies a wide range of critical components supporting the world's infrastructure, measurement technology has evolved through continuous challenges in ensuring stable product supply and quality enhancement. It has become an essential foundational technology that supports the creation of safe and sustainable products, contributing to the company's unique development. In the future, the company will continue to provide stable supplies of essential components and products that underpin society, meeting the ever-increasing demands for quality, functionality, and performance. This paper also discusses the outlook for measurement technology as Kobe Steel strives to achieve a sustainable society through challenges such as carbon neutrality and manufacturing transformation.

### 検索用キーワード

非破壊検査, 磁粉探傷検査, プロセス計測, 特殊環境下の計測技術, 自動化, DX, AI, 自動超音波探傷, 熱間

まえがき = 産業/科学技術の発展において、計測技術はその基礎をなす重要な役割を担ってきた。新たな計測技術が産業/科学の進展に寄与し、それらの進歩があらたな計測ニーズを生む。

世界のインフラを支える基幹部品を幅広く供給する当社において、計測技術は安全・安心な製品と持続可能なものづくりを支える主要な要素基盤技術として、製品の安定供給や品質の作り込みに挑戦し続ける中で鍛えられてきた。非破壊検査技術やプロセス計測技術はもちろん、例えばマイクロ波やミリ波による粉じん環境下における測距技術<sup>1)</sup>、大型構造物内の宇宙線による透視/可視化、1,300℃超の高温プロセスの遠隔リアルタイム測温センサ<sup>2)</sup>など、とくに汎用製品が存在しない、あるいはそのまま適用できないような特殊な用途・環境条件における計測技術においても独自の発展を遂げてきた。

非破壊検査技術は、長期の繰り返し負荷に耐えるため厳しくその表面および内部品質が求められる自動車エンジン用弁ばねや船舶エンジン用クランク軸といった製品品質の担保に適用されてきた。高温・粉じん・振動などの過酷・特殊な現場環境下におけるプロセス計測技術は、ものづくりにおける生産性向上や製品の作り込みの基盤であるとともに、現在では当社独自の高炉への直接還元鉄(HBI)多量装入によるCO<sub>2</sub>低減ソリューションなど

に不可欠な技術領域である。また、優れた製品特性を出すために複雑な形状を有する機械加工部品や鋳鍛造部品の高精度3D形状計測や、原子数層レベルのサブナノメートル精度が要求されるシリコンウェハ平坦度を評価する表面形状計測技術<sup>3)</sup>などの精密計測技術は、当社製品ならびにお客様の製品・ものづくりの安全・安心を支えている。

これらに加えて社会のデジタル化やAI技術が加速度的に進展する現在においては、その土台となるデータをフィジカル(現実)空間からサイバー(仮想)空間へ橋渡しする計測技術がますます重要な役割を担っていくと考える。将来の国内労働力人口減少に対する事業継続性の観点からも自動化・ものづくりDXは必須であり、高度なプロセス自動化を推進するには計測技術の継続的な高度化が不可欠である。

これらの背景のもと、当社では古くから計測技術の研究開発に力を入れ、その技術向上に努めてきた。本稿ではそれらの技術内容や応用例を解説する。

### 1. 非破壊検査技術

当社では1970年代に自社開発力の強化と技術総合力を発揮させる目的で技術開発本部が新設され、その中の検知・計測Grにおいて生産技術高度化のために高性能

\*<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



センサの開発などが行われていた。図1に約半世紀前の1972年に開発されたきず検知用光学センサを示す。現在のように容易・安価に撮像デバイスが入手できない中、時代を先取りして光学センサを応用した検査技術を独自に開発していた。以降、電磁波応用計測技術、画像処理技術、レーザや超音波応用計測技術の開発が進められ、渦流探傷、磁粉探傷、超音波探傷といった非破壊検査技術を高度化してきた。

ここでは線材・棒鋼製品への非破壊検査技術の適用例を示す。

### 1.1 線材・棒鋼製品の品質担保のための検査技術

当社線材・棒鋼製品は、高い市場占有率を誇っており「線材の神戸」として知られている。代表的な当社線条製品に冷間圧造用線材や軸受鋼などがあり、主に自動車向けで高信頼性が求められる部品に採用されている。これらの製品に求められる品質は年々厳格化される傾向にある。とくに圧延鋼材の表面・内部欠陥の残存状況は製品品質に大きな影響を与えるため、より上流側での早期発見・対策が重要であるが、鋼材温度が1,000℃に近い状態で加工される熱間圧延工程や検査対象が秒速数十メートルで高速に移動する中での検査は容易ではない。当社では熱間かつ高速に移動する線材圧延工程での検査にも取り組んでいるが、優れた特性と品質を担保するために、より上流側の半製品である鋼片に対する自動磁粉探傷検査を行っている。ここでは、その自動磁粉探傷検査について紹介する。

自動磁粉探傷装置の設備概要を図2に示す。磁粉探傷検査は以下の手順で行われる。

1. 強磁性体である検査対象に蛍光磁粉液を散布する。
2. 検査対象に磁界を加えることで磁化させる。
3. 磁化された検査対象の表面きず部に漏洩（ろうえい）磁束が生じ、そこに蛍光磁粉が吸着される。
4. 検査対象表面に紫外光を照射することで、きず部に吸着された蛍光磁粉が発光する。
5. 発光部を人が目視で確認またはカメラで撮像することできずを検出する。

当社は自動磁粉探傷検査装置の開発を1970年代から進めており、画像解析技術の高度化により複雑・不定形なきず検出率を向上させるとともに、図3のように実際のきずではない磁粉ノイズとの識別能を向上させることで過検知・誤検知も最小化している。

また、紫外光源の経時劣化や磁粉濃度変動といった検査時のばらつき要因に対しても、動的に画像処理のしき

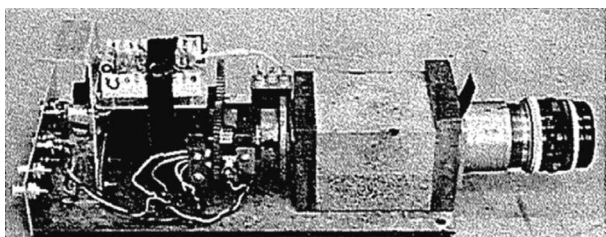


図1 キズ検知用光学センサ外観写真  
Fig.1 Photo of optical sensor for surface defect detection

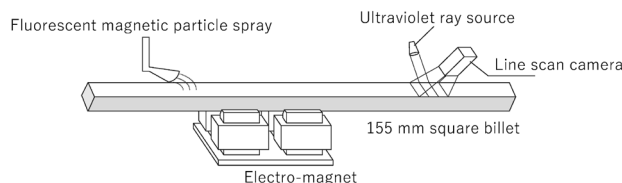


図2 自動磁粉探傷装置の設備概要  
Fig.2 Overview of automatic magnetic particle inspection equipment

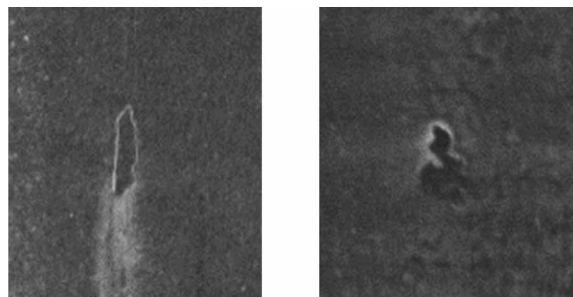


図3 判別の難しい疵（左）と磁粉ノイズ（右）の例  
Fig.3 Example of hard-to-distinguish defects (left) and magnetic particle noise (right)

い値を調整する機能によりロバスト性を高めている。加えて、センサデバイスの高感度化・高機能化や光源の高出力化、計算機の処理性能の向上といった世の中の技術進展を巧みに取り込むことで高精度な検査を実現している。<sup>4)</sup>

近年はソフトウェア、とくにAIの技術進展には目覚ましいものがある。当社においてもこれまで以上に高い製品品質を実現するために、AI判定の適用による検査技術の高度化も進めている。<sup>5)</sup>

## 2. プロセス計測技術

当社におけるプロセス計測は鉄鋼部門から始まり、そこで培った技術はアルミ・銅・チタンなどの非鉄金属の製造プロセスに横展開され、さらに機械部門における製品の高機能化や当社グループ企業の計測・検査装置の製品化へと広がっていった。<sup>6)</sup>

製造プロセス中での計測は、実験室などの理想環境下での計測とは異なり、製造現場特有の様々な外乱や制約を伴う。例えば鉄鋼では1,000℃超の高温プロセスが多数存在するため、耐熱性などの制約から汎用センサ類をそのまま適用できなかつたり、そもそも設置すること自体が困難だったりすることも多い。そこでセンサを熱輻射（ふくしゃ）から保護する耐熱設計技術/冷却構造設計技術や、粉じん・蒸気などからセンサおよび視野・視程を安定確保するためのエアパージといった、耐環境機能を付与するエンジニアリング技術を確立することで、精度などの基本性能に加えて、耐環境性・高信頼性・保全性を高次を実現している。こうした特殊環境下での計測技術は独自開発されたものであり、世の中に存在しないものが多く、競合に対する競争力の源泉でもある。

新たな計測技術の開発による新たなプロセス情報の獲得は、ときに革新的なプロセスの確立につながる。本章ではグリーン社会の実現へ向けた高炉CO<sub>2</sub>低減ソリューションを支えるプロセス計測技術について紹介する。

## 2.1 高炉HBI多量装入を支える溶銑（ようせん）温度連続測定技術

当社はこれまで高炉において、中心コークス装入技術<sup>7)</sup>、自社製造ペレットの使用技術、炉内降下プローブによる炉内温度分布測定技術<sup>8)</sup>をはじめとする炉内計測技術<sup>9)</sup>などを駆使して独自の操業を実現してきている。昨今ではグリーン社会の実現を見据え、2030年のCO<sub>2</sub>削減目標（▲30～40%：13年度比）へ向けた取り組みの一環として、高炉へのHBI多配合による低CO<sub>2</sub>操業技術を開発している。2020年10月、加古川製鉄所3高炉での約1カ月間にわたる実証実験の結果、高炉からのCO<sub>2</sub>排出量を決定づける還元材比を、518 kg/tから415 kg/tへと低減（CO<sub>2</sub>排出量：約▲20%）できることを立証するとともに、世界最小水準のコークス比（239 kg/t-溶銑）も達成している。

高炉HBIの多量装入を実現するには、エンジニアリング事業のMIDREXプロセスによるHBI製造技術と、鉄鋼事業における独自の高炉操業技術（高炉へのHBI装入技術、AIを活用した操炉技術、当社独自のペレット改質技術）という当社グループのキーテクノロジーの融合が欠かせない。

AI活用操炉技術では、炉熱の急激な変化を予測し適切なアクションを取るために5時間先の溶銑温度を予測する技術を開発しているが、正確な予測には溶銑温度の常時連続測定が重要な鍵を握る。これを実現するため、図4に示すとおり高炉出銑（しゅっせん）口から数m/秒で吐出される溶銑・溶滓（ようさい）の混相噴流（以降、出銑滓流）を高速度カメラで撮像し、放射測温の原理を用いて溶銑温度の連続測温を実現している。出銑滓

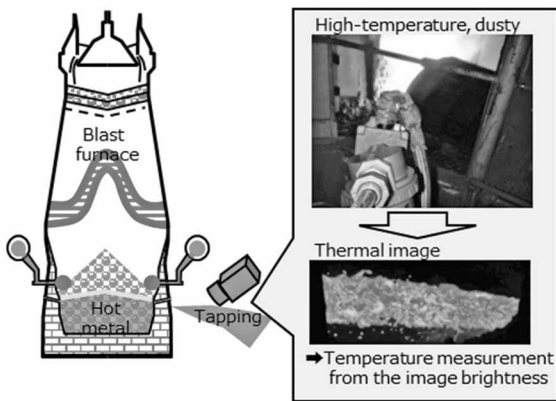


図4 高炉溶銑温度の連続測定

Fig.4 Continuous measurement of hot metal temperature at blast furnace

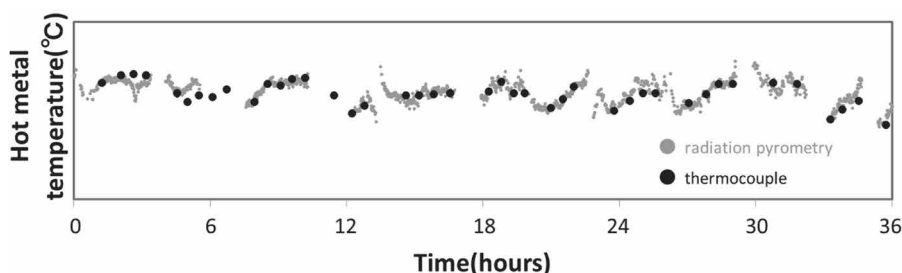


図5 実機高炉での連続測温結果

Fig.5 Continuous temperature measurement result in actual blast furnace

流は高温溶融状態にある溶銑，溶滓の放射率差により、図4の熱画像に示すようにマープル模様状に観測される。こうした特徴を踏まえて画像解析によって溶銑部を特定してその輝度を抽出することで、目的の溶銑温度の測定を可能にしている。

高炉出銑口での温度計測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。煙がある場合は溶銑部が実際より暗く観測されるため測温誤差が生じるが、時間変動する煙の影響を受けて溶銑部輝度値の時間変動も大きくなるため、画像処理によってこれを判別・検知し測定の安定性を担保している。

加えて本件の測定環境は、溶銑などの高温溶融物からの輻射熱や飛散物、粉じんなどがあり過酷である。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温度が上昇することによる故障や、粉じんなどがレンズに付着する光学障害によって、数日程度で熱画像が取得できなくなる。当社では独自のカメラ冷却機能や飛散物・粉じんを吹き飛ばすエアパージ機能を付与することで、半年以上メンテナンスフリーで良好な熱画像を取得し、安定的な測温を実現している。図5に放射測温結果を示す。熱電対による温度測定結果ともよい一致を示しており、測温精度10℃以下を達成している。

## 3. 働き方・プロセス変革を支える検査・計測技術

国内の労働力人口の減少が進む中で、とくに製造業の人手不足は他産業と比べても顕著に進んでいる。人手不足は事業継続性の観点からも無視できないリスクとして顕在化し始めており、ものづくりの自動化の取り組みは必須になりつつある。なかでも検査・計測には熟練技能を要する作業が多く、当社はこれまでも生産性向上、人による作業のばらつき低減、安全性向上などの観点から検査・計測の自動化に取り組んできた。ここではクランク軸の超音波探傷検査、火花試験、熱間鍛造物寸法計測の自動化事例を紹介する。

### 3.1 クランク軸の自動超音波探傷検査

当社が製造しているクランク軸は、ジャーナルと呼ばれる軸部にスローと呼ばれる偏心部材を焼ばめして作られる組立型クランク軸と、丸棒素材から鍛造して成型される一体型クランク軸に大別される。一般にクランク軸は長時間の繰り返し荷重に耐える必要があるが、例えば一体型クランク軸は近年のエンジン高出力化、コンパクト化に伴って、クランク軸のピンおよびフィレット部における表面および内部の厳格な品質管理が求められてい



る。かつてはいずれのクランク軸もすべての探傷面を手動で検査していたが、全面探傷には長時間を要し、探傷走査と探傷面の監視を確実に実施することは検査員に精神的かつ肉体的な負担をかけていた。そこで高速・安定に検査を行い、全面的検査結果を記録・保証する目的で、自走式で全面走査を行う自動超音波探傷装置を実用化し、クランク軸に求められる高い信頼性を支えている(図6)。<sup>10)</sup>

垂直探傷を例にとれば、検出範囲が中央の狭い領域に限られるため、小曲率半径を持つフィレット部の検査を行う物理的な探触子の接近限界のほか、探触子の走査ピッチを非常に細かく設定するなど作業上の配慮が必要となる。これらを手動で安定的に行うには検査員の負担が大きいため、フェイズドアレイ法を採用した独自の超音波探触子とその走査機構を開発した。これにより例えば探傷面が曲率を有していても、その表面から平底穴φ0.5mmの反射源をセクタスキャンと呼ばれる電子操作によって検出することが可能になった。概念図を図7に示す。<sup>11)</sup>

### 3.2 火花試験

熟練技能を要する検査の自動化の取り組み例として、近年急速に進化しているAI画像認識技術を活用した火花試験を紹介する。鋼材をグラインダに押し付けて生じる火花は、鋼種や含有元素の量によって特徴が異なる。

火花試験はこの火花の特徴を熟練者が見分け、鋼種を判定する試験であり、鋼材判定検査として古くから実施されているが、熟練技能を必要とする官能検査であり自動化が求められていた。従来は火花をカメラで撮像し、ルールベースの画像処理(パターンマッチングなど)により火花画像から破裂や流線を検出し、炭素量を推定する取り組みが行われてきた。しかし、合金元素(S, Cr, Mo, Ni)を含めた多様な合金鋼の鋼種判定には、ルールベースの画像処理では限界がある。そこで当社はAI画像認識技術を活用し、鋼材の炭素含有量を推定<sup>12)</sup>するだけでなく、合金鋼種も判定するAI画像認識技術<sup>13)</sup>を開発し、熟練技術のデジタル化と自動化に取り組んでいる。図8に鋼種判定フローの概念図を示す。入力された火花画像に対して、前段で炭素含有量を推定し、後段で合金鋼種を分類する畳み込みニューラルネットワークを構築することで高精度な鋼種判定を実現している。

### 3.3 熱間鍛造物寸法計測

安全や酷暑環境対策についても計測技術は貢献している。当社が製造している大型鍛造品、例えば石油精製用圧力容器(リアクタ)に用いられるシェルリング(直径4~6m)は、図9(1)に示すように、当社鍛圧工場の8,000tプレスにより所定の形状に鍛造され、その後、製品形状に切削加工される。プレス作業における形状確認方法として、従来はプレス直下の熱間鍛造ワーク(500

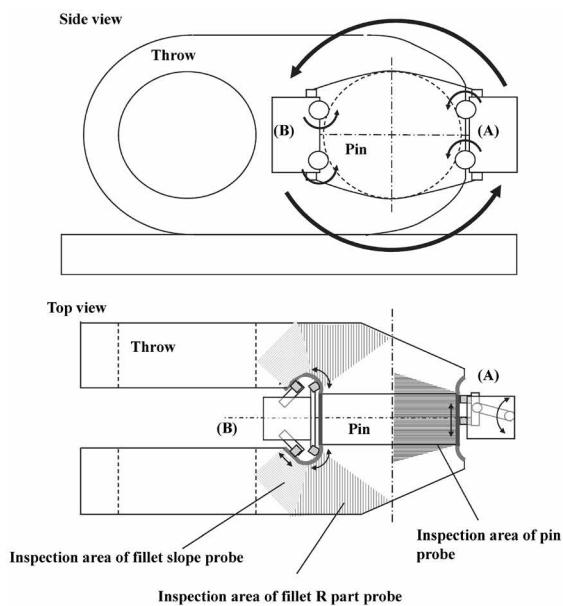
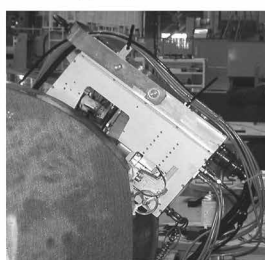


図6 組立型クランク軸のスロー自動超音波探傷装置<sup>10)</sup>  
Fig.6 Scanning system of built-up type crankshaft throw automatic ultrasonic inspection



(A) Pin probe scanner  
(B) Fillet probe scanner

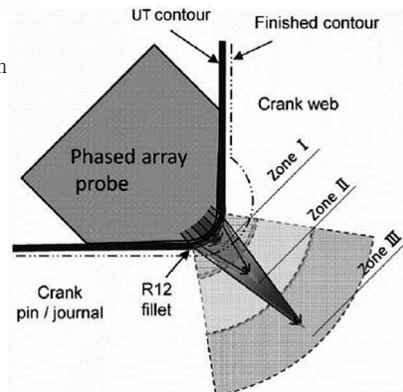


図7 フェイズドアレイ法におけるフォーカス模式図<sup>11)</sup>  
Fig.7 Focus pattern diagram of phased array



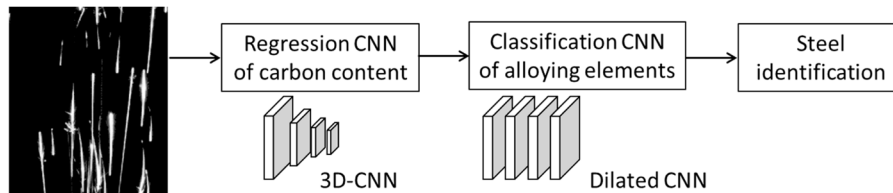


図8 火花画像の鋼種判定フロー<sup>13)</sup>

Fig.8 Schematic flow diagram of steel identification for spark images

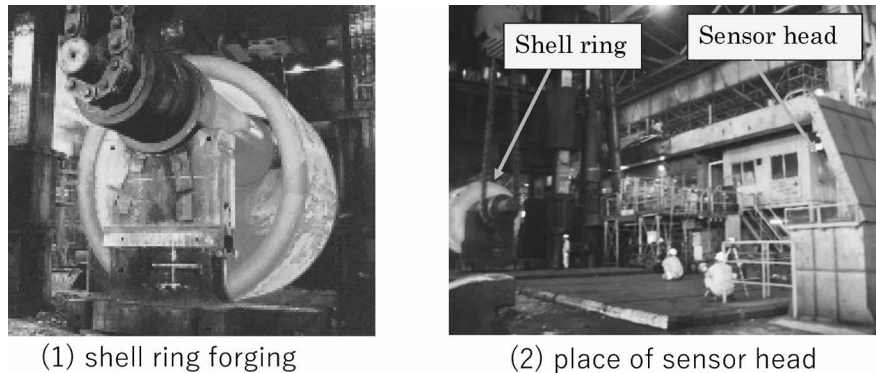


図9 シェルリング直径計測装置<sup>14)</sup>

Fig.9 Shell ring diameter measurement equipment

～900℃) に近づいてパスを用いた寸法測定を行っていた。しかし、この作業は酷暑環境で行われているため作業負荷が非常に高く、また人による計測ばらつきが大きかった。そこで離れた場所から安全にシェルリングの直径を高速・高精度に測定する目的で、図9(2)に示すステレオ法を用いた画像計測装置<sup>14)</sup>を開発・実用化した。また、その他の熱間鍛造品の寸法計測についても随時自動計測の取り組みを行っている<sup>15)</sup>。

**むすび** = 本稿では当社における非破壊検査技術、プロセス計測技術および自動化を支える検査・計測技術について紹介し、コア技術としての計測技術が安全・安心な製品と持続可能なものづくりを支え、貢献してきたことを述べた。

今後は持続可能な社会の実現へ向けて、例えば鉄鋼事業においては、電炉化など生産プロセスにおけるCO<sub>2</sub>削減への取り組みが加速し、製造プロセスの大きな変革が起こることも想定される。これに対して知能化をはじめとする計測技術の高度化、新プロセスへの基礎科学的理解および操業を高次に融合させることで、ものづくりの変革に貢献していく。

また近年のDXに加え将来の国内労働力人口減少で、ますます自動化ニーズは高まっている。とくに過酷な環境でありながら精緻なプロセスの制御が求められる当社のものづくりの現場では、これまで検査・計測技術を最大限活用してきたが、近年のロボティクスやAI技術の非連続的ともいえる大きな進歩により、これまで人にしかできないと言われてきた操業知を捉え、操ることができる可能性も広がっている。いっぽうで、プロセスも変化し続ける中、人ならではの適応力、創造力もより重

要になっている。高まる高付加価値への要求を、人知と最新の検査・計測技術の組み合わせによって如何に満たしていくか、その知恵と工夫が世界のインフラを支える基幹部品を幅広く供給する当社においてとくに重要となっていくと考える。

最後に、今後も社会の根幹を支える基幹部品・製品群を安定供給し、あくなき品質・機能・性能要求の高度化に 대응し続けるため、またカーボンニュートラルへの挑戦や持続可能な社会の実現へむけて、計測技術の高度化に努めていく所存である。

#### 参考文献

- 1) 川田 豊ほか、マイクロ波による高炉原料レベル計の開発。自動制御連合講演会前刷。1982, Vol.25, p.527-528.
- 2) 迫田尚和ほか、R&D神戸製鋼技報。2014, Vol.64, No.1, p.99-100.
- 3) 田原和彦ほか、R&D神戸製鋼技報。2015, Vol.65, No.2, p.87-91.
- 4) 前田 悟ほか、R&D神戸製鋼技報。2011, Vol.61, No.1, p.20-23.
- 5) 芦田 強ほか、欠陥画像認識への畳み込みニューラルネットワークの適用。材料とプロセス。第173回春季講演大会。日本鉄鋼協会。2017, Vol.30, No.1, p.293.
- 6) 川田 豊。R&D神戸製鋼技報。2007, Vol.57, No.3, p.1.
- 7) 松井良行ほか、R&D神戸製鋼技報。2005, Vol.55, No.2, p.9-17.
- 8) 小林 勲ほか、鉄と鋼。第73年(1987)第15号, p.2092-2099.
- 9) 松井良行ほか、R&D神戸製鋼技報。2007, Vol.57, No.3, p.2-11.
- 10) 岡本 陽ほか、R&D神戸製鋼技報。2005, Vol.55, No.3, p.16-21.
- 11) 和佐泰宏ほか、R&D神戸製鋼技報。2016, Vol.66, No.1, p.16-19.
- 12) 尾崎圭太ほか、ディープラーニングによる火花試験自動化技術の開発。材料とプロセス。第176回秋季講演大会。日本鉄鋼協会。2018, Vol.31, No.2, p.705.
- 13) 尾崎圭太ほか、ディープラーニングによる火花試験自動化技術の開発(II)。材料とプロセス。第177回春季講演大会。日本鉄鋼協会。2019, Vol.32, No.1, p.205.
- 14) 岡本 陽ほか、R&D神戸製鋼技報。2007, Vol.57, No.3, p.29-33.
- 15) 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)



## 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\*<sup>1</sup> (博士(工学))・沖田圭介\*<sup>2</sup> (博士(工学))・高嶋康人\*<sup>3</sup> (博士(工学))

### Predictive and Evaluative Technologies Based on Structural Mechanics and Strength of Materials for Structural Failures to the Safety of Society

Dr. Junya NAITO・Dr. Keisuke OKITA・Dr. Yasuhito TAKASHIMA

#### 要旨

当社製品や当社素材・素形材が使用されている最終製品の性能・品質・安全性の担保・向上に寄与してきたコア技術の一つである構造・材料強度に関する予測・評価技術について、構造力学および材料強度分野に分けて解説を行う。構造力学分野では、自動車車体の軽量化と衝突安全性を両立するための衝突評価技術、構造最適化技術、さらには、カーボンニュートラル社会の実現を見据えたライフサイクルにおける環境負荷低減(LCA)の観点を取り入れた部品提案についても事例を紹介する。材料強度分野では、冶金学的な因子である相変態を考慮した熱処理シミュレーションを活用した変形・組織予測および割れ予測技術を紹介する。また、材料組織設計と力学特性をつなぐマイクロメカニクス分野への取り組み事例を紹介し、新たな付加価値を持つ素材製品の創出、ものづくりの変革への可能性を展望する。

#### Abstract

This paper explains, divided into the fields of structural mechanics and material strength, predictive and evaluative technology related to the strength of structures and materials. This technology is one of the core technologies that have contributed to ensuring and enhancing the performance, quality, and safety of final products that utilize Kobe Steel's products and materials. In the field of structural mechanics, examples are introduced that encompass collision evaluation technology and structural optimization technology, aiming to balance weight reduction and collision safety in automobile body structures. Additionally, case studies are presented regarding component proposals that incorporate an environmental impact reduction perspective, with a view toward achieving a carbon-neutral society within the product's lifecycle (LCA). In the field of material strength, technology for deformation and microstructure prediction, as well as crack prediction, is introduced, utilizing heat treatment simulations that consider metallurgical factors such as phase transformation. Furthermore, case studies of efforts in the field of micromechanics, which bridge the connection between material structure design and mechanical properties, are introduced. This provides a glimpse into the potential for creating new material products with added value and the possibility of transforming manufacturing processes.

#### 検索用キーワード

構造力学, 材料強度, 軽量化, 構造最適化, 衝突評価, LCA, 相変態, 弾塑性力学, マルチスケール解析, 結晶塑性解析

ま え が き = 当社製品や当社素材・素形材が使用されている最終製品の性能・品質・安全性を担保・向上させるための技術開発は、当社グループのマテリアリティのひとつである「安全・安心なまちづくり・ものづくりへの貢献」の中で重要な役割を果たしている。このマテリアリティに関わるコア技術の一つは、「構造・材料強度に関する予測・評価技術」であり、構造物や金属製品の基本性能に関わる「構造力学分野」の技術と耐久性や安全性など、適用される材料との関わりが強い「材料強度分野」の技術に大別できる。

構造力学分野では、当社の線材、厚板製品が使用されてきた長大橋プロジェクト<sup>1)</sup>に代表される土木構造物を中心に、アルミ板やアルミ押出材などの軽量素材の建築物への適用<sup>2), 3)</sup>を通して、各種構造性能評価技術の開発を行ってきた<sup>4), 5)</sup>。これらの性能評価技術は当社グルー

プの(株)コベルコ科研の受託試験研究メニューとしても発展を続けている<sup>6)</sup>。また、構造最適化技術の開発にも取り組み、アルミサスペンション製品<sup>7)</sup>などの自動車部品の軽量化設計に活用している。

材料強度分野では、建設機械をはじめとする機械製品、鍛造鋼などの素形材製品の疲労寿命設計を通して、数値シミュレーションを活用した応力・ひずみの評価技術<sup>8)</sup>を開発してきた。また、当社素材を用いた加工製品状態での破壊問題に関しても、ぜい性き裂の伝播停止特性評価<sup>9)</sup>のような破壊力学的なアプローチに加えて、冶金学的な要素を加えた研究開発も行っており、マイクロ組織を考慮した疲労特性予測<sup>10)</sup>や靱性(じんせい)予測<sup>11)</sup>などの取り組みを破壊特性シミュレーション技術として発展させてきた。これらの強度・破壊に関する要素技術の多くは、力学的なアプローチに冶金学的な要素が加わ

\*<sup>1</sup> 技術開発本部 ソリューション技術センター \*<sup>2</sup> 技術開発本部 機械研究所 \*<sup>3</sup> 技術開発本部 材料研究所

ることによって独自のコア技術となった。当社が素材事業と機械・エンジニアリング事業の両方を有し、その要素技術開発を同時に担う組織があったことがこのコア技術を生み出す一因となっている。

本稿では、構造力学分野のコア技術の活用例として、自動車分野における軽量化設計に関する技術群を、また、材料強度分野のコア技術の活用例として、相変態を考慮した力学評価、破壊力学評価について解説する。また、構造力学・材料強度分野と材料の冶金学的な挙動や組織設計とをつなぐ技術として、マイクロメカニクス分野への取り組み事例とその将来についても展望することとした。

## 1. 材料特性を活かした構造部材の性能予測技術 (構造力学分野)

構造力学分野の予測・評価技術は、構造物の変形や耐荷力を数値シミュレーションで予測すること、および、その挙動を実験で再現し、安全性を検証することで発展してきた。近年、これらの技術は、主に自動車分野におけるソリューション技術提案で適用を拡大、進展しており、ここでは自動車分野における適用事例を紹介する。

### 1.1 自動車部品の衝突評価技術

環境負荷対策として、自動車車体の軽量化と衝突安全性を両立する車体設計を実現することが自動車メーカの継続的な課題であるが、自動車の衝突試験は1回につき車両1台の準備を必要とすることや試験そのものも大がかりな設備が必要である。そのため、車両の試作、衝突試験を実施する前段階として、個々の部品単位で車両衝突試験と同等の変形状態を再現できる試験評価を行いつつながら詳細検討することが有効である。

当社では、保有する衝突試験設備を活用した車体全体の衝突性能評価<sup>12)</sup>、<sup>13)</sup>とフルカー衝突シミュレーションの精度向上に取り組み<sup>14)</sup>、車体全体の衝突挙動へのノウハウを蓄積しつつ、部品単位での評価試験手法の開発を行ってきた。図1に側突時のフルカー衝突解析事例、部品単位(サイドシル)の衝突評価シミュレーション結果を示す。部品単位で切り出した際の境界条件の与え方を工夫することにより、試作部品での性能評価が可能となり、短時間で高精度な軽量構造の検討環境を実現している。

また、車体の軽量化と衝突安全性を両立させるには、

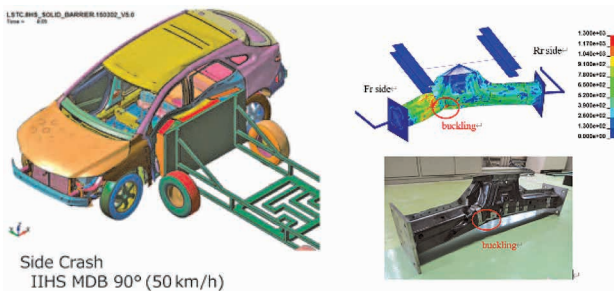


図1 フルカー衝突シミュレーションと部品単位衝突評価事例  
Fig.1 Full vehicle crash simulation and example of a part-unit collision evaluation

材料の高強度化が有効であるが、一般的に金属材料は高強度化に伴って延性が低下する性能相反性があるため、衝突時の材料破断を予測する必要がある。当社では、2章で述べる材料強度分野に関連する技術として、衝突時の材料破断挙動と相関の高い機械的特性を分析し<sup>15)</sup>、数値シミュレーション上で高精度に破断現象を予測する技術の開発<sup>16)</sup>も行っている。

### 1.2 自動車軽量化部品の開発・設計

鉄、アルミ両方の素材事業を有する当社では、自動車車体に使用される主要な金属である鋼材とアルミを平等に比較し、お客様の製品ニーズに合わせて材料の選択ができるソリューション提供を目指している。また、軽量化部品設計にあたっては、最適化解析手法を駆使し、製造上の制約条件などに開発者のノウハウや知見を加え、実用性の高い部品開発・設計を行っている。

図2に高強度鋼板製ロールフォームバンパとアルミ押出バンパを対象にパラメトリック最適化解析を適用した性能予測をもとに軽量化設計を実施し、重量と曲げ耐力を比較した事例を示す。図2左のように外形寸法が小さい断面では高強度鋼板とアルミ押出材に重量差異がなく、コスト観点で高強度鋼板が有利になり、図2右のように外形寸法が大きい断面では、軽量化効果はアルミ押出材のほうが高いことを示している。このように、高強度鋼板、アルミ押出材それぞれが有利な断面の外形寸法領域を明らかにしている<sup>17)</sup>。

図3に軽量化設計を行ったドアのLCA (Life Cycle Assessment) 分析事例を示す。鋼製、アルミ製、鋼と

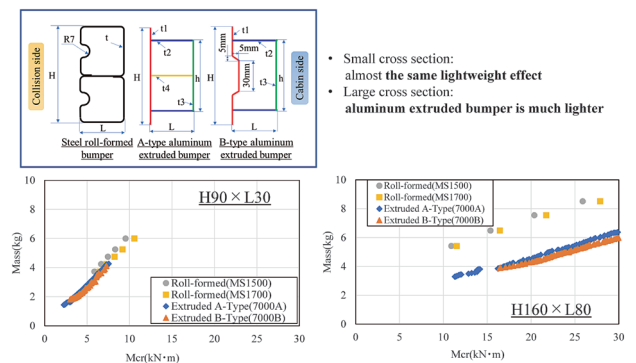


図2 高強度鋼板製バンパとアルミ押出バンパの最適設計事例  
Fig.2 Comparison between steel roll-formed and aluminum extruded bumpers with different external dimensions



図3 フロントドアの軽量化設計とLCA  
Fig.3 Design of light weight door and LCA



アルミを組み合わせたマルチマテリアルの3ケースのフロントドアの設計を行い<sup>18)</sup>、重量とライフサイクルにおけるGHG (Greenhouse Gas, 温室効果ガス) 排出量の比較を行っている<sup>19)</sup>。グラフ中の素材製造に着目すると鋼製が最もGHG排出量が少なく、アルミ製のGHG排出量が大きい、ライフサイクル全体ではアルミ製、マルチマテリアル製が鋼製よりも少なくなり、走行距離によってもその順位は異なる。そのため、今後は、①軽量化効果、②軽量化に要するコスト、これらに加えて③LCA (ライフサイクルでのGHG排出量) を加味した部品開発が必要と考えている。

## 2. 冶金学的因子を考慮した強度・破壊予測技術 (材料強度分野)

当社のコア技術の一つである金属製品と構造物の耐久性や破壊の予測および評価技術は、安全性と生産性の向上を果たすために活用される。強度や変形は弾塑性力学に基づく数値シミュレーションで予測できるが、熱処理や加工を施す製造工程においては、物性値の逐次変化や相変態が生じるため、それらを考慮することが重要である。当社では、浸炭や偏析、相変態などの冶金学的因子を考慮することで予測評価技術の高度化を進めてきた。また、破壊力学は、製品の損傷許容設計を可能にする技術であり、一般的には疲労き裂進展量の予測や製品に影響しないき裂を許容できるかの診断に利用されている。いっぽう、当社では金属組織制御などの材料工学もまたコア技術の一つとしている強みを活かし、破壊力学と材料工学を融合させて技術開発に取り組んでいる。ここでは、相変態を考慮した独自の強度・破壊予測技術の事例として、焼入れ時の変形・焼割れ防止や連続鋳造後の鋳片置割れ防止について紹介する。

### 2.1 相変態を考慮した焼入れ時の変形予測、組織予測

当社製品 (クランク軸、圧縮機の大型歯車など) だけでなく、当社素材を使っていただく場合 (自動車用歯車、軸材、ボルトなど) でも熱処理は行われる。熱処理によって不可避免的に生じる変形や残留応力を低減することは、製品品質の向上のために重要であり、そのための冷却プロセスや部品形状の影響把握が不可欠である。しかしながら、焼入れ中に生じる現象は、組織 (相変態)、

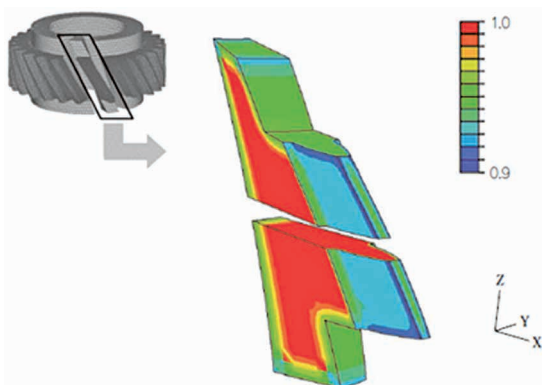


図4 浸炭歯車のマルテンサイト相分率の予測例  
Fig.4 Calculated result of martensite volume fraction of carburized gear

応力/ひずみ (力学)、温度 (伝熱) が相互に影響し合う極めて複雑なものとなる。そこで、これらを連成させた熱処理シミュレーションを開発し、社内製品の課題解決や、お客様へのソリューション提案に活用している。

図4は自動車用浸炭歯車に対する適用事例<sup>20)</sup>であり、浸炭シミュレーション<sup>21)</sup>と熱処理シミュレーションを組み合わせてマルテンサイト相分率を予測した例である。表面の浸炭層は炭素濃度が高く、マルテンサイト変態温度が低くなるため、表面の浸炭層の方が内部より遅れて変態膨張し、表層に圧縮残留応力が形成される。このように、冷却中の変形・変態の進行挙動を精査することで、熱収縮や変態膨張に起因した熱応力・変形の発生メカニズムが明らかとなり、それを制御するための材料特性、冷却プロセス、部品形状の具体化が可能となる。

上記の事例は、均一材料として扱ってきたが、大型鋳塊を扱う場合には、成分偏析が生じるため材料特性が不均一となり、焼割れの原因となる<sup>22)</sup>。そこで、新たな取り組みとして、上工程での組織影響を考慮し、偏析起因の局所的な応力も評価可能とすることで、割れ原因究明やその対策に向けた活用の検討を始めている。

### 2.2 連続鋳造スラブの置割れ予測と折損防止

線材、薄鋼板、厚鋼板といった当社の様々な鉄鋼製品は、連続鋳造したスラブやブルームなどの鋳片から圧延工程を経て製品化している。鋼の強度を高めるために合金元素の添加量を多くすると、鋳造後の冷却時に鋳片の置割れ<sup>23)</sup>が発生する頻度が増え、製造歩留の低下が課題となる。この割れを防止するには、冷却時に鋳片内部で生じる熱応力の制御が重要と考えられ、徐冷することで古くから経験的に対応していた<sup>24)</sup>。しかし、熱応力を内部残留応力として実測することは極めて労力を要する作業であり、冷却条件に応じて材質 (靱性) も変化することがあるため、定性的に安全側の対策を講じている状

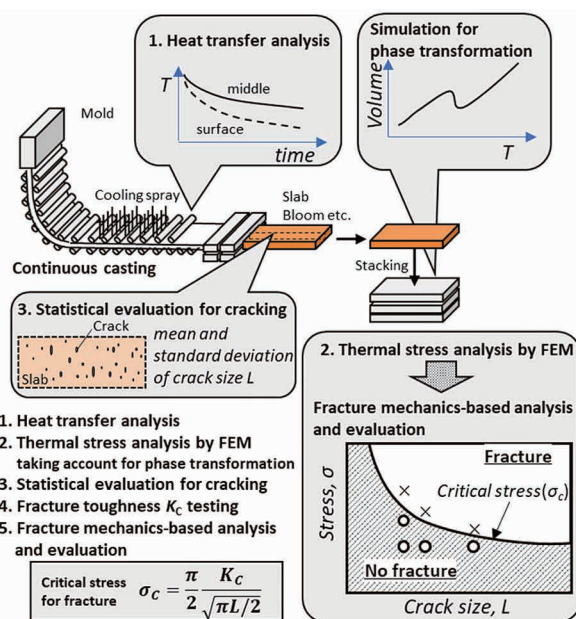


図5 凝固・伝熱・相変態を考慮した応力シミュレーションと破壊力学による連続鋳造材の置割れ予測評価技術

Fig.5 Fracture mechanics-based prediction for brittle fracture of slab account for thermal stress and phase transformation

況であった。鋳片に生じる熱応力の定量予測には、有限要素法による伝熱解析を単純に用いるのみでは適切に評価できず、鋳造した鋳片の冷却中に生じる相変態による発熱や膨張を考慮する必要がある。当社では、独自開発した伝熱・凝固解析ソフト<sup>25)</sup>や連続冷却中の相変態予測<sup>26)</sup>をはじめとする材料工学のコア技術を有しており、これらを活用することで鋳片内部の応力状態の定量化を数値シミュレーション的アプローチで可能とした。連続鋳造時の温度履歴を計算し、さらに、鋳造機を通過して切断された鋳片の放冷や段積み保管中の温度変化を伝熱解析しながら変態予測モデルを組み合わせる相変態挙動を考慮し、鋳片内部の応力状態を計算した。これにより、置割れに関する熱応力を定量的に扱うことができるようになった。

また、置割れは鋳片内部の微細な割れ（固液界面の凝固割れで、液相側から溶鋼が流れ込むため実態は割れでは無いが偏析している部分）を起点として生じる事実をふまえ、内部割れの発生頻度を統計解析し、その大きさに応じて破壊力学的アプローチで置割れの発生リスクを評価する技術<sup>27)</sup>を構築した。この技術（図5）では、前述の相変態を考慮して数値シミュレーションで求めた内部応力 $\sigma_c$ と、内部割れ長さ $L$ や鋳片の破壊靱性値 $K_c$ の関係を破壊力学で定式化し、それと実験結果が対応することを検証できている。置割れが発生しない冷却速度など管理すべき条件を明確化できる。このような技術は、鋳片の内部割れを起点とした置割れ防止だけでなく熱延開始時の表面からの孔空き防止にも活用でき<sup>27)</sup>、当社製品の製造歩留の改善や安全で合理的な製造工程管理を実現するに至っている。

### 3. 材料の微視構造を考慮した材料モデリング技術（マイクロメカニクス分野）

材料のマクロな機械的特性は、マイクロな金属組織から成り立っており、また、巨視的な破壊現象も元をたどれば、材料の微視的な欠陥からのき裂を起点としている。したがって、より複雑化する力学的な技術課題や多様化する材料ニーズに対する対応力、本質的課題解決に向けて、材料内部の微視組織を考慮した材料モデリング技術の高度化が必要である。そこで当社では、材料変形の不均一性を考慮した結晶塑性解析やマイクロとマクロをつなぐマルチスケール解析に取り組んできた。ここでは、それぞれの適用事例を紹介するとともに、今後の取り組みについて触れる。

#### 3.1 塑性加工における結晶塑性解析の適用事例

結晶塑性理論に基づく力学解析の特徴は、結晶構造の異方性を直接的に扱うことが可能であり、巨視的塑性応答と材料の微視的構造変化の関係を物理的意味が明確な力学量で記述できることである。軽量化に向けてますます厳しくなる展伸材の加工性スペックを満たす材料開発、あるいは成形条件の適正化に向けて、現在も様々な荷重経路に対応可能な結晶塑性構成則の高度化に取り組んでいる<sup>28)</sup>。

ここでは例として、けい素鋼板の単結晶体の引張試験

について紹介する<sup>29), 30)</sup>。引張軸と結晶方位のなす角 $\alpha$ を変えて引張試験したときの変形状態に関する実験結果と計算結果の比較を図6に示す。 $\alpha=90^\circ$ での板幅方向の局所変形、 $\alpha=0^\circ$ での板厚方向の局所変形、 $\alpha=45^\circ$ での斜め方向のせん断帯の発生という、それぞれの特徴を極めてよく表すことができている。本技術は、自動車パネル用の6000系アルミ板材において、成型加工後の表面に発生するリジングマークと呼ばれる模様への集合組織の影響評価や変形機構の解明に活用され、外観品質の向上に貢献している<sup>31)</sup>。

#### 3.2 材料の微視構造を考慮したマルチスケール解析

本手法の特徴は、各マイクロ組織の機械的特性を入力データとして計算することで、マクロな機械的特性を予測するだけでなく、材料内部で生じるミクロ的な力学現象まで分析できることである。当社では、金属組織の微視構造を数値化してモデリングする手法、および均質化弾塑性理論に基づくFEMコードを独自に構築している。ここでは、代表的な高張力鋼材のDual-phase鋼（以下、DP鋼）に対して、マルチスケール解析を適用し、マイクロ構造内の力学挙動を評価した例<sup>32)</sup>を紹介する。DP鋼はフェライト相とマルテンサイト相から構成される複合組織を有しており、各単相での引張試験結果を元にシミュレーションしている。図7(b)は伸び率20%時における相当塑性ひずみ分布を示しており、硬いマルテンサイト相が密集する領域近傍で、フェライト相に塑性ひずみが集中していることが分かる。また、マルテンサイト相にも数パーセントオーダーの塑性ひずみが生じており、単相材では極低ひずみで破断する同相でもDP鋼内では高い変形能があることが示唆された。このように、各相の機械的特性のみならず、それらの組織形状・サイズや分散状態などの相互作用の分析・評価が可能となるとともに、その結果として現れるマクロな機械的特性への影響も考察可能となる。これにより、所望のマクロな機械

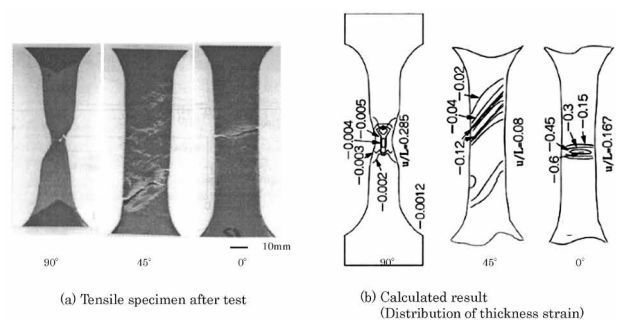


図6 けい素鋼板に生じる不均質変形  
Fig.6 Localized strain in tensile specimen of silicon steel sheet

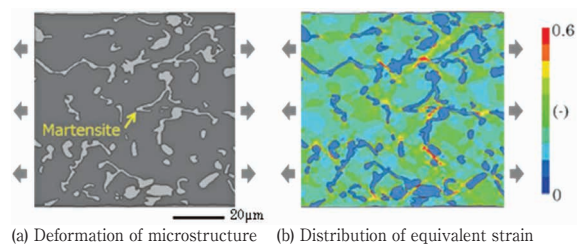


図7 ミクロ組織における変形状態（伸び率20%時）  
Fig.7 Deformation state of microstructure (at 20% elongation)



的特性を得るためのマイクロ構造を推定できるようになり、今後は組織制御技術と組み合わせた材料開発への適用を考えている。さらに、本技術の特徴を活かし、初期欠陥を含む素材マトリックスのマイクロ損傷挙動や、塑性加工中における介在物の変形・破壊挙動に関する解析・評価、およびそれによる素材内部品質の向上への適用検討も開始している。

**むすび**＝本稿では当社のコア技術の一つである「構造・材料強度に関する予測・評価技術」を、構造力学分野、材料強度分野に分けて各要素技術を活用例紹介とともに解説した。さらに、冶金学系のマイクロな領域とマクロな力学領域をつなぐマイクロメカニクス分野への取り組みについても述べた。マイクロメカニクス分野のコア技術に関しては、他のコア技術であるナノスケールの物理分析解析技術、さらには、マテリアルズインテグレーション<sup>33)</sup>との親和性が高く、ナノスケールからマクロスケールをつなげる横断的な予測・評価技術へ発展させることで、構造材における新しい材料コンセプト創出につながっていくと考えている。また、製造工程もつないだプロセスシミュレーションへの展開も構想しており、さらなる品質安定化や生産性向上も期待できる。新たな付加価値を持つ素材製品の創出、そのものづくりを通して、安全・安心な社会の発展に持続的な貢献を続けていきたい。

#### 参 考 文 献

- 1) 穂山正幸ほか. R&D神戸製鋼技報. 1999, Vol.49, No.2, p.2-7.
- 2) 橋村 徹ほか. R&D神戸製鋼技報. 2002, Vol.52, No.1, p.73-76.
- 3) 杵淵雅男ほか. R&D神戸製鋼技報. 2002, Vol.52, No.1, p.81-86.
- 4) 中川知和. R&D神戸製鋼技報. 2001, Vol.51, No.3, p.44-49.
- 5) 山田岳史ほか. 第六回道路橋床版シンポジウム論文報告集. 2008, p.231-236.

- 6) コベルコ科研. 事業概要. 機械・構造物分野一覧<https://www.kobelcokaken.co.jp/contract/machine/list.html>. (参照2023-06-08)
- 7) 細井寛哲ほか. R&D神戸製鋼技報. 2010, Vol.60, No.2, p.84-89.
- 8) 沖田圭介ほか. R&D神戸製鋼技報. 2016, Vol.66, No.1, p.12-15.
- 9) 田村栄一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.2, p.6-10.
- 10) 横幕俊典ほか. 日本機械学会論文集 A編. 1997, Vol.63, No.614, p.2114-2121.
- 11) 井元雅弘ほか. R&D神戸製鋼技報. 2021, Vol.71, No.1, p.31-36.
- 12) Watanabe, K. at el. SAE international, 2006, SAE Technical paper. 2006-01-1403.
- 13) 船田健介ほか. 自動車技術会論文集. 2022, 第53巻3号, p.535-540.
- 14) 内藤純也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.1, p.60-64.
- 15) 内藤純也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.69-75.
- 16) 鎮西将太ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.76-81.
- 17) 史棟 勇ほか. 自動車技術会論文集. 2022, Vol.53, No.4, p.796-801.
- 18) KOBELCOアルミ/鋼マルチマテリアル軽量ドア. <https://www.youtube.com/watch?v=GtsQNBSPPEw>. (参照2023-06-08)
- 19) 江崎澄代ほか. 第18回日本LCA学会研究発表会. 2023, 2-B3-02.
- 20) 沖田圭介ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.1, p.70-74.
- 21) 野村正裕ほか. R&D神戸製鋼技報. 1997, Vol.47, No.1, p.28-31.
- 22) 有川剛史ほか. 日本機械学会論文集. 2017, Vol.83, No.845, p.16-00442.
- 23) 山田利郎ほか. 鉄と鋼. 1982, Vol.68, No.11, p.S884.
- 24) 株式会社神戸製鋼所. 三宅和郎. 高張力鋼の連铸片の置き割れ防止方法. 特開2007-83274 (P2007-83274A). 2007-04-05.
- 25) 藪 忠司ほか. R&D神戸製鋼技報. 1987, Vol.37, No.4, p.99-100.
- 26) 村上俊夫ほか. R&D神戸製鋼技報. 2008, Vol.58, No.1, p.13-17.
- 27) 株式会社神戸製鋼所. 藪内 惇ほか. 高張力鋼のスラブの製造方法. 特開2023-47054 (P2023-47054A). 2023-04-05.
- 28) Hama, T. at el. Materials Transactions. 2021, Vol.62, No.8, p.1124-1132.
- 29) 小西晴之ほか. R&D神戸製鋼技報. 1997, Vol.47, No.1, p.47-51.
- 30) 北川 浩ほか. 日本機械学会論文集A編. 1995, Vol.61, No.590, p.2259-2263.
- 31) 小西晴之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.2, p.39-42.
- 32) 黒澤瑛介. R&D神戸製鋼技報. 2021, Vol.71, No.1, p.8-12.
- 33) 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」<https://www.jst.go.jp/sip/p05/index.html>. (参照2023-06-08)



(解説)



# 『静かに安全にそして効率良くものを動かす』 振動・音・動的特性の制御技術

山口善三<sup>\*1</sup> (博士(工学))・岡田 徹<sup>\*1</sup> (博士(工学))・菅野直紀<sup>\*2</sup> (博士(工学))

## Technology to Control Vibration, Noise, and Dynamics Characteristics for Quiet, Safe, and Efficient Machinery

Dr. Zenzo YAMAGUCHI・Dr. Toru OKADA・Dr. Naoki SUGANO

### 要旨

機械が動くとき必ず振動や騒音が発生するため、高品位な製品やサービスを提供するためには、振動や騒音をある一定以下に抑える必要がある。当社では、操業開始以来、本課題に対して「振動・音・動的特性の制御技術」を発展させながら取り組み続け、当社機械製品だけでなく、自社工場の安定操業、当社素材のお客様の課題解決など、広く安心な社会の実現に対して貢献してきた。本稿では、技術の概要の解説を通して、これまでの社会への貢献や今後のグリーン社会、安全・安心なまちづくり・ものづくりへの貢献についての展望を示す。

### Abstract

Machinery inevitably generates vibration and noise when in operation, and such vibration and noise must be kept below a certain level to provide high-quality products and services. Since its inauguration, Kobe Steel has been continuously working on developing "technology to control vibration, noise, and dynamics characteristics" to address these challenges. This contribution extends beyond Kobe Steel's machinery products to include stable operation in Kobe Steel's own factories and the resolving of challenges for users of Kobe Steel materials, contributing to the realization of a broader, secure society. This paper provides an overview of the technology, explaining the contributions made to society thus far, and offers a perspective on future contributions to a green society, safety, and security in urban development, and manufacturing.

### 検索用キーワード

振動, 音, ダイナミクス, 安定稼働, 実験, 数値解析, シミュレーション

まえがき＝機械が動くとき必ず振動や騒音が発生する。振動が異常に大きくなると、最悪の場合には機械が破損しプラント停止や労働災害のリスクが発生する。騒音もまた、現場作業や周囲住民への肉体的、精神的苦痛につながるため、振動や騒音を一定の基準値以下とすることが機械・工場の安定操業の必須条件となる。本稿で解説する「振動・音・動的特性の制御技術」は、安定操業の実現に欠かせない振動・騒音の抑制技術（≒制御技術）であり、メーカーとして高品位な製品・サービスを提供する上で重要な基盤技術の一つである。

図1に機械製品の基本的な構成とともに本技術の概略を示す。機械製品は駆動部分に指令を送り、その駆動力が固体・液体・気体を介して伝達して所望の動作をするものである。そのため、結果として生じる振動や騒音を抑制するためには、振動・騒音の現象が最終的に現れる空間や構造・伝達系の適切な設計はもとより、駆動力の設計やそこに与える制御指令まで時には考慮する必要がある。当社では古くから「振動・音・動的特性の制御技術」の研究開発に力を入れており、運動の制御にまで立ち返り、その技術ポテンシャルの向上に努めてきた。

本稿では、①振動制御技術として、駆動系の制御から構造系への力の伝達を主に扱う範囲と、②騒音制御技術として主に構造の振動から空間への音伝達を取り扱う範囲に大別して、その解析技術や制御・改善技術を解説するとともに、それらを活用した「グリーン社会への貢献」の一例について紹介する。

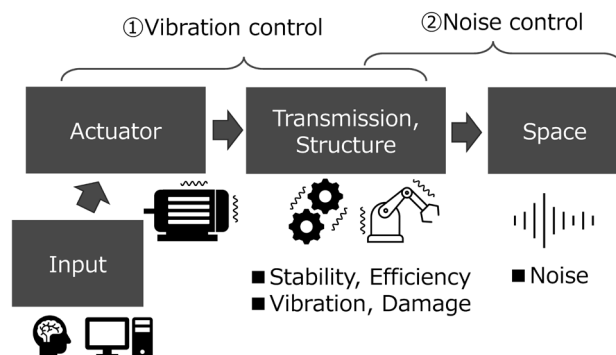


図1 機械の振動・音・動的特性の制御技術  
Fig.1 Machine vibration, noise, and dynamics characteristics control technology

\*1 技術開発本部 機械研究所 \*2 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター

# 1. 振動制御技術

## 1.1 振動制御技術の概観

振動制御技術は、「振動/動的特性の解析技術」と「計測分析技術」、それらに基づく振動低減技術を指す。当社では古くからこの振動制御技術に力を入れ、当社製品および生産設備の信頼性を確保してきた。コストダウン・生産性向上・省エネ/CO<sub>2</sub>削減などの観点から、製品・設備の高性能化や軽量化・高速化が進められる中、振動の課題も時代ごとに変化・複雑化し、これらに対応すべく振動制御技術の高度化を進めてきた。

当社の振動制御技術は、主に、圧縮機などの産業機械(図2(a)), プラントの配管や機器系, 建設機械に活用される。また、鉄鋼やアルミなどの生産工場においても、圧延やめっき加工などの機械設備(図2(b))の安定操業や生産性向上のための高速化などで貢献している。

近年では振動情報を機械設備の診断に利用し、当社の製鉄所や発電所の機械設備の保守管理の合理化や、当社機械製品の保守やリプレース提案などのサービス提供に資する技術開発にも積極的に取り組んでいる。

## 1.2 振動/動的特性の解析技術<sup>1)</sup>

振動現象の解明に不可欠な有限要素法(FEM)などの数値解析技術も、当社の振動への対応の歴史と深く関連している。代表的な汎用解析ソフトを取りそろえて精緻で大規模なFEM解析にも古くから取り組んでいるが、様々な振動現象の課題に高精度かつ効率的に対応するために、独自のソフト開発も行ってきた。当社製品の設計や振動課題の解決に焦点を絞ることで、汎用ソフトに比べ大幅な解析時間の短縮を可能としている。ここでは、自社開発ソフトや解析技術の一例を紹介する。

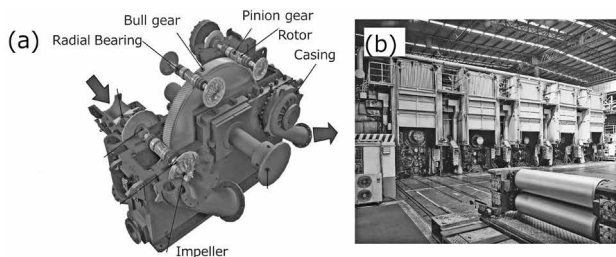


図2 当社における振動制御技術の対象の一例  
(a) 増速機内蔵型遠心式圧縮機, (b) 冷間 タンデム圧延機  
Fig.2 Targets of our vibration control technology  
(a) Integally geared centrifugal compressor  
(b) Cold tandem rolling mill

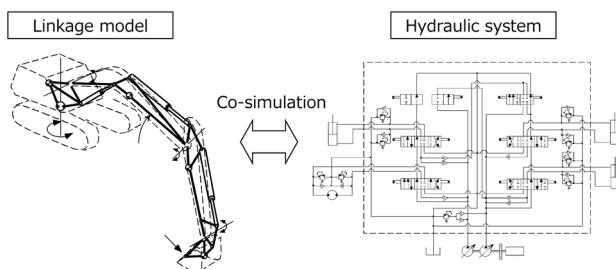


図3 リンクモデル-油圧システムの連成解析<sup>3)</sup>  
Fig.3 Co-simulation with linkage model/hydraulic coupling<sup>3)</sup>

## 1.2.1 動的システム挙動解析 (SINDYS)<sup>2)~5)</sup>

SINDYSは70年代後半に、油圧プレスなどの構造系と油圧流体・制御が連成した複雑な振動挙動を解くための独自技術が起源である。これを汎用動的現象解析システムとして開発を進め、大変位挙動する機構や制御系、熱流体なども包含した解析システムに発展させてきた。<sup>2)</sup>

とくにガタやストッパ、大変位などの強い非線形性を含む問題に対して、数値積分の工夫により効率的かつ高精度に解析できる点が特長であり、単に振動現象に留まらずロボットや油圧ショベルの動作解析などダイナミクス全般の現象の解析も可能である。例えば油圧ショベルでは、実掘削動作をシミュレーションすることで、各油圧機器や配管などの損失寄与度を明確化し、業界トップクラスの省エネ性能の実現に貢献した。<sup>3)</sup>(図3)

近年ではHILS (Hardware In the Loop Simulation) と呼ばれるリアルなハードウェアとバーチャルな数学モデルを連成させたシミュレータとしての活用<sup>4)</sup>やNASTRAN (構造解析)やSimulink (制御設計)といった他社汎用ソフトとの連携、油圧ショベルにおいて土の掘削性を解析するためにDEM (Discrete Element Method) との連成も可能としている。<sup>5)</sup>

## 1.2.2 圧力脈動解析 (PULSAS)<sup>1)</sup>

レシプロ式に代表される容積形圧縮機は間欠的な気体の吸込/吐出を行うため、その配管内には圧力脈動が発生し、配管などの振動の原因となる。当社では、1915年に国産第1号のレシプロ圧縮機を製造した歴史から、古くから圧力脈動の研究を行ってきた。PULSASは有限要素法によりこの圧力脈動を解析するソフトであり、API618規格(米国石油協会規格)の対応などの改良を加えながら、今日までに数百ケース以上の実プラントの設計と脈動対策に適用してきた。(図4)

## 1.2.3 回転機械ロータ系振動解析 (ROTAS)<sup>1)</sup>

回転機械は日本の経済成長とともに大型、高速、高出力化してきたが、いっぽうで振動問題との戦いでもあった。この対応として、1970年代後半に設計段階から回転軸の固有振動数や振動応答を机上検討して設計に反映できるソフトとして開発してきた。近年では、さらに合理的な設計を可能とするために、ギヤケーシングとの連成

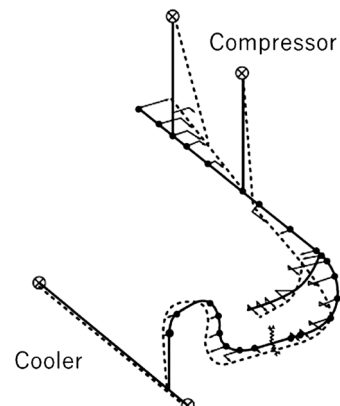


図4 圧力脈動による配管振動応答<sup>1)</sup>  
Fig.4 Piping vibration due to pressure pulsation<sup>1)</sup>

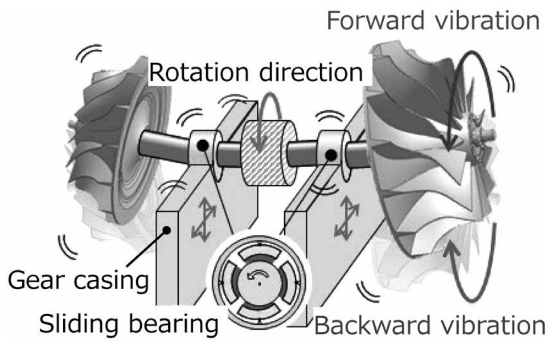


図5 ロータ系安定解析  
Fig.5 Rotor stability analysis

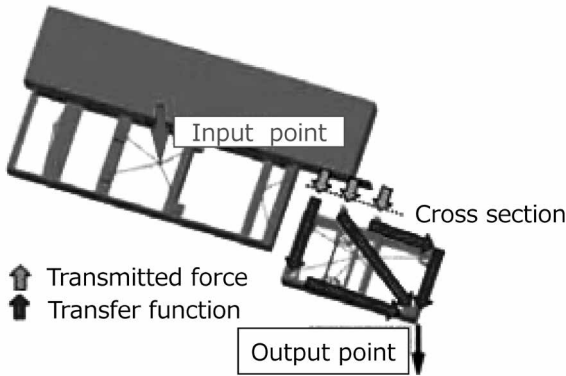


図6 FEM伝達経路解析<sup>6)</sup>  
Fig.6 Transfer path analysis using FEM<sup>6)</sup>

解析技術や、滑り軸受の動特性の高精度予測技術を開発している。(図5)

### 1.2.4 FEM伝達経路解析 (FE-TPA)<sup>6)</sup>

TPA (Transfer Path Analysis) は、加振源から評価点へ伝ばする振動に対し、寄与度の高い伝ば経路を特定する分析技術である。従来実験データに適用される本手法を数値解析 (FEM) 上に展開し、より精緻な寄与度の評価が可能な技術を開発した。効果的な構造変更が可能となり、クレーンの低振動化などに活用している。(図6)

### 1.3 振動計測分析技術

振動問題を扱う上ではその計測データの分析技術も重要である。代表的な振動分析であるFFTやフィルタ処理、モーダル解析などに対して、当社ではVIVIAN (VIsual VIBration ANalysis) と名付けたソフトを開発している (図7)。直感的な簡単操作や大量データの高速処理が特長であり、当社の振動分野の研究開発に欠かせない存在となっている。VIVIANをプラットフォームとして新しい分析手法を随時取り込み、各種多彩な振動分析を可能としている。本ソフトを通じてグループ会社を含めた社内各部署に分析技術の普及を図り、各事業での機械・設備の振動分析や試験評価などに活用している。

また、機械の状態監視などの設備診断技術に関しても、振動による損傷診断が可能なソフトを開発している。図8にその一例として、産業機械の減速機・軸受向けに開発したソフト画面を示す。当社製品を安心して使用してもらうための信頼性を担保する技術であり、当

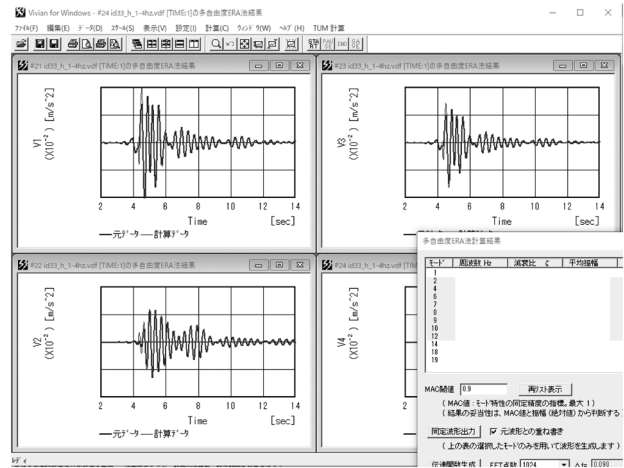


図7 VIVIAN (Visual Vibration Analysis)  
Fig.7 VIVIAN (Visual Vibration Analysis)

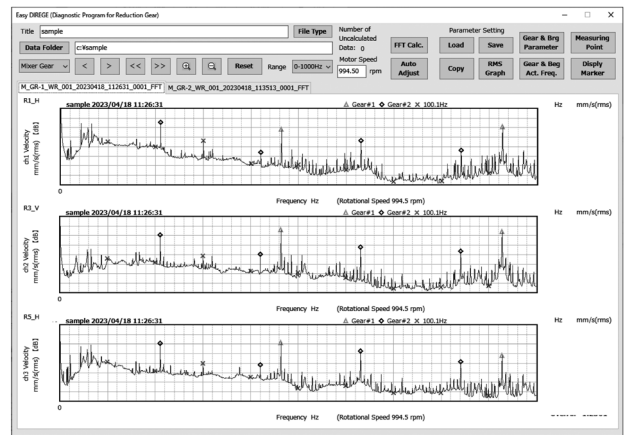


図8 設備診断ソフト  
Fig.8 Rolling bearing diagnostic software

社の製鉄所や発電所の安定操業への展開を進めている。

## 2. 騒音制御技術

### 2.1 当社における音響技術の発展

巨大な装置を駆使して生産活動を実施する当社は、地域社会との共生のため工場自体の低騒音化を進め、その過程で防音技術は発展してきた。日本経済の成長とともに、生活や職場の質が重視され静粛性がますます重要になり、建設機械や圧縮機では低騒音を特長とした商品を開発してきた。図9 (a) は、静音性・防じん性・メンテナンス性に優れた建設機械用エンジン冷却システムとして開発したiNDr (Integrated Noise&Dust Reduction cooling system) を搭載した極低騒音建設機械であり、お客様から高い評価をいただいている<sup>7), 8)</sup>。また、輸送機分野の軽量化はCO<sub>2</sub>排出低減の観点で重要な社会課題であるが、軽量化は振動・騒音の増大を招く場合が多い。当社では自社製品で培った低騒音設計技術を生かし、500系以降の新幹線に採用されている制振アルミ押し出し形材 (ダンシェープ・市村産業賞受賞)<sup>9), 10)</sup> の開発など、輸送機分野の低騒音化ソリューションをお客様に提供し、快適な移動とCO<sub>2</sub>排出低減の両面で社会に貢献している。(図9 (b))。さらに、後述する微細多孔吸音技術<sup>11)</sup>



を活用したエコキューオン<sup>12)</sup>をはじめとする防音製品も数多く開発してきた。

次節より、上記開発を支える音響の数値解析、実験技術、低騒音設計技術について紹介する。

## 2.2 音響解析技術<sup>13)</sup>

数値解析技術が発展しつつあった1970年代、当社においてもFEMによる音場解析技術を開発し、ジェットエンジンの地上消音設備などの低周波音低減の開発に活用した。いっぽう、可聴域の音響現象は、波長が短く解析モデルの要素数が膨大になるため、汎用品の製品開発に対して音場解析技術はまだ実用的ではなかった。当社は、1980年代に境界のみの要素分割で音場が解析できる境界要素法（BEM）をいち早く実用化したことで、数値解析技術を強みとして1990年代から様々な低騒音機械製品、防音製品を世に送り出してきた（図10（a））。また、2010年ごろには高周波における音と光の類似性に着目し、境界型数値解析の発展として音響ラジオシティを開発し、建設機械の低騒音設計<sup>7)</sup>に利用してきた（図10（b））。さらに、自社ソフトを保有することを強みに、製品の最適設計にも応用している<sup>14)</sup>。

## 2.3 音響実験・評価技術

数値解析技術とともに、実験による音響モデルの構築技術も古くから開発してきた。当社は、日本最大クラスの大規模半無響室（図11（a））を保有しており、建設機械、圧縮機など当社製品以外にも自動車、OA機器、橋りょう、住宅など様々な機械、構造物の音響性能を測定し、お客様へのソリューション提供を行うとともに、音響モデル構築のノウハウを蓄積してきた。

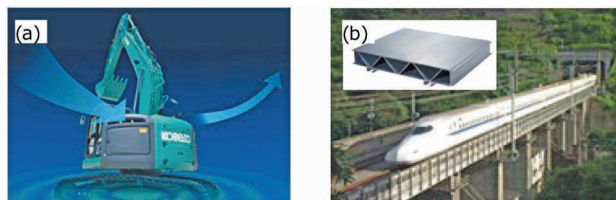


図9 音響技術の適用した製品開発例  
(a) iNDRを搭載した油圧ショベル<sup>8)</sup>  
(b) ダンシェーブ<sup>10)</sup>

Fig.9 Product development applying acoustic technology  
(a) Hydraulic excavator with iNDR<sup>8)</sup>  
(b) Damp-shape<sup>10)</sup>

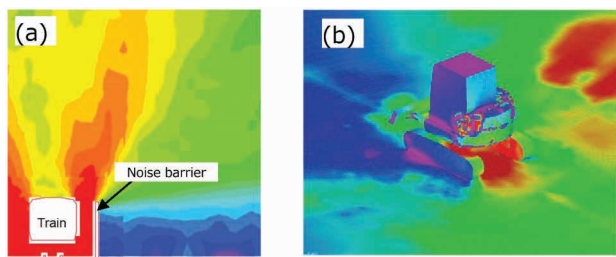


図10 音場解析技術  
(a) 防音壁の回折減衰（境界要素法）  
(b) 建設機械の騒音（音響ラジオシティ）

Fig.10 Numerical simulation of sound field  
(a) Diffraction attenuation of soundproof walls (BEM)  
(b) Noise from construction machinery (Acoustic Radiosity)

実験技術の中で最も重要な技術は、1.2節でも触れた伝搬経路解析（TPA）である。当社は本技術を世の中に先行して開発し、90年代には先に紹介したダンシェーブの開発に活用している。既存の車両の音響モデルを本技術により構築し（図11（b））、それをベースに速度が変化した場合やダンシェーブ採用時の車室内騒音を予測した。さらに予測結果を実際に音として再生する技術も同時に開発することで、車両制作前にお客様にダンシェーブの効果を体感していただき本製品の採用につなげた。

音は、最終的に人間の知覚・感性に関わるため、音の物理的側面だけでなく、心理的・生理的な影響についても長年研究を続け、建設機械のキャビンの居住性改善などに貢献<sup>7)</sup>してきた。現在では、音の知覚に関する知見を応用し、ベテラン検査員が知覚する微妙な音の変化を定量化し、労働人口が減少していく環境でも安定稼働を可能にする設備診断技術への応用を進めている。

## 2.4 静音デバイス設計技術

近年、音響メタマテリアルと呼ばれ、微小な共振・共鳴現象を周期的に配置することで、従来材料の音響性能を凌駕（りょうが）する構造の開発が活発化している。当社がいち早く実用化した微細多孔吸音技術（図12）も、音波が微細かつ周期的に配列された孔を通過する際の抵抗と共鳴を活用した吸音機構であり、音響メタマテリアルの一種である。この応用製品であるエコキューオンはアルミ板に微細な孔をあけて所望の吸音性能を発揮させている。産廃となる従来材（グラスウールなど）とは違いオールアルミでリサイクル可能であることを特長とする。今後も本分野の研究にも積極的に取り組み<sup>15)</sup>、サステナブルな材料で静かで快適な社会の実現に貢献していく。

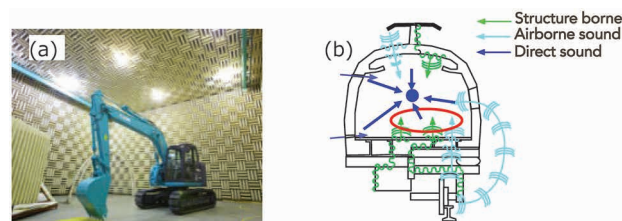


図11 音響実験／評価技術

(a) 大型半無響室、(b) 伝達経路解析

Fig.11 Acoustic experiment and evaluation technology  
(a) Large semi-anechoic room, (b) Transfer path analysis (TPA)

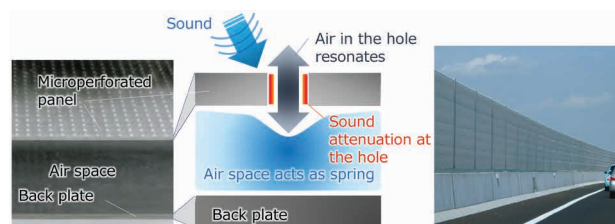


図12 微細多孔吸音技術とエコキューオン<sup>12)</sup>

Fig.12 Microperforated sound absorption technology and Eco Kyuon<sup>12)</sup>

### 3. グリーン社会を実現する圧縮機の商品開発への貢献

当社がグリーン社会の実現に貢献するためには、当社の機械製品の省エネ化だけでなく、CCS (Carbon Capture and Storage) やCCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage) など、CO<sub>2</sub>削減に直接貢献することも重要である。本章では、CCSやCCUSに用いられる増速機内蔵型高圧CO<sub>2</sub>遠心圧縮機の開発事例(図2(a), 図13)における振動制御技術の適用事例を紹介する<sup>16), 17)</sup>。

本開発の主な技術課題は①高圧下における構成部品の高強度化、②高圧状態での空力性能の向上、③ロータの振動に対する安定性向上、④高圧ガスのシール性能の向上であり、課題③が振動制御技術に大きく関係する。

遠心圧縮機はロータ(回転軸)に設けたインペラ(羽根車)を高速回転させ、遠心力によりガスにエネルギーを与えて増圧する機械である。ロータは滑り軸受で支持され、ケーシングとの隙間には圧縮ガスの漏れを抑える非接触シールが設けられる。

インペラや非接触シール部では、ロータに振動を生じさせる流体力が発生する。ガス的高圧化に伴いその力が増加し、条件によっては振動が増加し続ける不安定振動が発生するため、ロータの安定性を確保する設計が重要となる。本機械では「スワールブレーカ」と呼ばれるシ

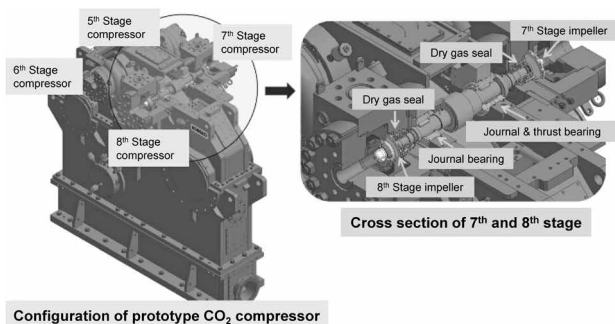


図13 増速機内蔵型高圧CO<sub>2</sub>遠心圧縮機<sup>16)</sup>  
Fig.13 Integrally geared turbo compressor for high-pressure CO<sub>2</sub><sup>16)</sup>

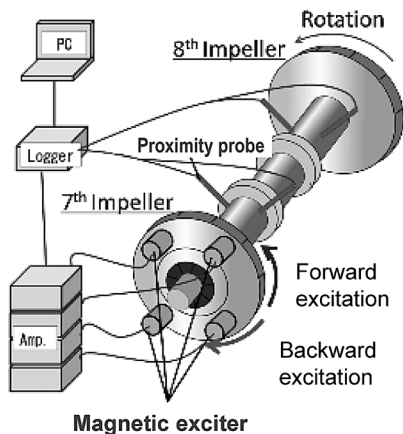


図14 磁気加振システム  
Fig.14 Magnetic excitation system

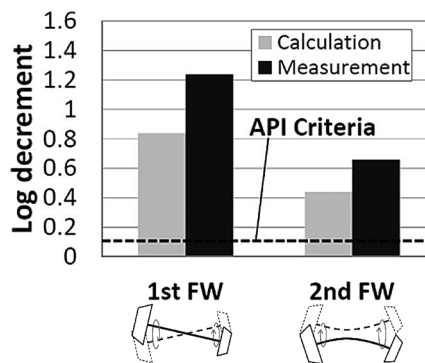


図15 ロータの対数減衰率  
Fig.15 Logarithmic decrement of rotor

ール流体力の低減機構や「高減衰軸受」などの振動対策を採用し<sup>17)</sup>、前述の振動解析ソフトROTASを用いて評価・設計を行った。

ロータの安定性は、高圧条件下で回転中のロータに振動外力を与え(加振)、そのときに生じるロータの振動振幅を計測し、その値を元に「対数減衰率」と呼ばれる安定性の指標値を算出することで評価できる。

ロータの加振方法として、外部から圧縮機全体を加振してロータを間接的に加振する従来技術に対して、図14に示す四つの電磁石の高速切替え動作によりインペラにモーメントを与えてロータを直接加振させる独自技術を開発した。従来技術に比べてロータ加振時の振動振幅が増加することにより対数減衰率の算出精度が大幅に向上し、信頼性の高い安定性の評価を可能とした。

図15に実験により算出した対数減衰率の結果を解析結果と並べて表示する。この値が大きいほど安定性は高く、負の場合に不安定振動が発生する不適切な設計となる。解析との若干の差異はあるものの、ロータ安定性の一般的な指標として用いられるAPIの基準値<sup>18)</sup>を大幅に上回り、十分な安定性を有することが実証できた。

本プロトタイプ機においてはそのほかの技術課題も克服、検証され、長期の運転となる実用化に向けて十分な信頼性を有することを実証できた。今後この高圧CO<sub>2</sub>圧縮機がCCSやCCUSなどへ活用されることによりCO<sub>2</sub>削減に大きく貢献することが期待される。

むすび=本稿では、「振動・音・動的特性の制御技術」が長く当社製品の安定稼働に貢献してきたことを述べてきた。今後も当社が目指す「グリーン社会への貢献」を、当社の機械製品の高度化、新メニューで実現する上では、安定稼働が絶対条件となるため、引き続き必要不可欠な技術と考えている。

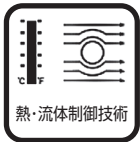
いっぽう、本技術は機械の安定稼働のみに有効な技術ではなく、交通騒音など環境騒音問題などの社会問題の解決や、かつては橋りょう<sup>19)</sup>などインフラの振動低減や劣化診断などでも貢献してきている。今後も広く未来の「安全・安心なまちづくり・ものづくり」に貢献する技術として本技術を発展させていきたいと考えている。

## 参 考 文 献

- 1) 今西悦二郎ほか. R&D神戸製鋼技報, 2001, Vol.51, No.3, p.50-57.
- 2) 頭井 洋ほか. 日本機械学会論文集C編, 1986, Vol.52, No.1, 483, 2814-2821.
- 3) 南條孝夫ほか. R&D神戸製鋼技報, 2007, Vol.57, No.1, p.48-51.
- 4) 森田 啓. R&D神戸製鋼技報, 2018, Vol.68, No.1, p.3-8.
- 5) 上村祥平ほか. 日本機械学会論文集C編, 2018, Vol.84, No.861, 17-00468.
- 6) 森 辰宗ほか. 日本機械学会論文集, 2018, Vol.84, No.865, 18-00168.
- 7) 中島 一ほか. R&D神戸製鋼技報, 2012, Vol.62, No.1, p.27-31.
- 8) KOBELCO Official Site. Corporate Social Responsibility. Sustainability Report.  
[https://www.kobelco.co.jp/english/about\\_kobelco/csr/environment/2008/1180572\\_12553.html](https://www.kobelco.co.jp/english/about_kobelco/csr/environment/2008/1180572_12553.html), (参照2023-8-29).
- 9) 田中俊光ほか. まてりあ, 1996, 第35巻, 第6号, p.725-727.
- 10) KOBELCO6 オフィシャルサイト. 技術製品情報. 特徴ある技術・製品・サービス. Mobility. 鉄道.  
<https://www.kobelco.co.jp/products/>, (参照2023-09-04).
- 11) 次橋一樹ほか. R&D神戸製鋼技報, 2014, Vol.64, No.2, p.90-95.
- 12) 日鉄神鋼建材株式会社. 製品一覧. 防音製品.  
<https://www.shinkokenzai.co.jp/products/soundproof/>  
(参照2023-8-29).
- 13) 田中俊光ほか. R&D神戸製鋼技報, 2001, Vol.51, No.3, p.58-63.
- 14) 田淵 聡. R&D神戸製鋼技報, 2018, Vol.68, No.1, p.9-14.
- 15) 田淵 聡ほか. 環境工学シンボ講演論文集 2021.31 (0), p.118.
- 16) 馬場利秋ほか. R&D神戸製鋼技報, 2020, Vol.70, No.1, p.75-80.
- 17) Baba.T et al., 48th Turbomachinery & 35th Pump Symposia, 2019.
- 18) API Standard 617 8th ed., American Petroleum Institute, 2014.
- 19) 本家浩一ほか. R&D神戸製鋼技報, 2003, Vol.53, No.1, p.64-68.



(解説)



## グリーン社会実現に向けた生産プロセスと製品を支える熱・流体制御技術

朴 海洋<sup>\*1</sup>(博士(工学))・藤澤 亮<sup>\*1</sup>(博士(工学))・関山和英<sup>\*1</sup>(博士(工学))・茂渡悠介<sup>\*1</sup>(博士(工学))

### Thermal and Fluid Control Technologies Supporting Production Processes and Products to Realize Green Society

Dr. Haeyang PAK · Dr. Ryo FUJISAWA · Dr. Kazuhide SEKIYAMA · Dr. Yusuke SHIGETO

#### 要旨

CO<sub>2</sub>削減などのグリーン社会への貢献に寄与する熱・流体制御技術は、創業以来、様々な生産プロセスや製品開発のなかで発展してきた。これらの技術は流動、化学反応、伝熱挙動が複雑に絡み合うため、内部現象を理解するための可視化やプロセスを最適化するための制御は容易ではなく、CFDによる熱流体解析が用いられてきた。本稿では、直接還元鉄プラントや高炉PCI、微粉炭ボイラのような高温反応を伴う生産プロセス、ヒートポンプや混練機、気化器のような機械製品における熱・流体制御技術の変遷について適用例を中心に紹介するとともに、カーボンニュートラル実現に向けた将来の展望について解説する。

#### Abstract

The thermal and fluid control technology contributing to a green society, such as CO<sub>2</sub> reduction, has, from its beginning, evolved in various production processes and product development. These technologies involve complex interactions of fluid dynamics, chemical reactions, and heat transfer behaviors. Therefore, using visualization to aid in understanding the internal phenomena and control for process optimization is a not straightforward task. Hence, thermal fluid analysis using computational fluid dynamics (CFD) has been employed. This paper focuses on application examples, centering on the evolution of thermal and fluid control technology in production processes involving high-temperature reactions such as those in direct-reduced iron plants, pulverized coal injection (PCI) in blast furnaces and coal-fired boilers, as well as machinery products like heat pumps, mixers, and vaporizers. Also provided is an explanation of the future prospects for achieving carbon neutrality.

#### 検索用キーワード

カーボンニュートラル、熱流体解析、高炉、直接還元鉄プラント、発電ボイラ、ヒートポンプ、混練機、気化器

まえがき＝当社は、機械系事業として圧縮機に代表される流体機械や、ヒートポンプ、混練機、熱交換器などの製品群を製造・販売するとともに、素材系事業としては製造設備である高炉や溶解炉、加熱炉、自家発電設備を保有している。いずれも熱・流動現象がプロセス性能や製品品質を支配しており、時代とともに高度化・複雑化する要求や現象に対して、熱・流体制御技術が重要な役割を担ってきた。とくに当社の製品ラインナップや生産プロセスでは、極低温から高温の幅広い範囲の温度領域や熱・流動に加えて化学反応も絡み合う複雑な現象を扱う場合が多く、熱・流体制御技術もこれらの特徴としている。例えば、省エネルギーと品質安定性、低NO<sub>x</sub>を追求した燃焼制御技術や、溶鋼中の介在物除去のための流動制御技術は、設備導入時の事前検討や操業改善とともに発展した。また、製品ラインナップを拡充する過程においても、伝熱・流動制御により、省エネ性と製品品質を両立できる多くの産業機械を市場に投入することができた。これらの発展に大きく寄与したのがCFD(Computational Fluid Dynamics)であり、当社は1960年代後半より、機械製品や製鋼プロセス向けのシミュレ

ーション開発に着手した。当社製品ラインナップの特徴である幅広い温度領域においては、例えば、LNG用気化器のようなマイナス百数十℃レベルから、建設機械や原子力容器での数十～数百℃<sup>1)</sup>、鋼の連続鍛造プロセス<sup>2)</sup>や廃棄物焼却炉<sup>3)</sup>のような1,000℃以上に至るまで、多種多様な現象解明を行ってきた。開発当初は、理論構築から始めて独自コードを開発してきたが、近年は汎用コードを応用したCFD技術や、汎用コードでは対応できない課題に対しては、独自コード群と最新技術を組み合わせながら、その適用範囲を拡大している。これにより、化学反応と熱流体挙動を連成させた還元鉄プラントの制御技術や、樹脂混練機の複雑な部分充満状態の解明により、品質と省エネを両立できる混練ロータ設計指針などの確立に寄与している。

現在、カーボンニュートラルの実現に向けて、省エネルギー技術に加え、水素やアンモニア、バイオマスなどへの低炭素燃料転換による脱炭素技術や、CO<sub>2</sub>固定・利用のような炭素隔離技術が注目されている。低炭素燃料への転換はそれぞれの化学的性質の違いにより、ボイラ・加熱炉での燃焼特性や鉄鉱石などの還元特性が大き

\*1 技術開発本部 機械研究所

く異なるため、バーナや原燃料供給方式などのプラント操業に関する新たな知見が必要となる。加えて、水素やアンモニアは物理的性質の違いにより、伝熱特性や流動挙動が大きく異なるため、機械製品の設計指針に大きく影響をおよぼす。本稿では、CO<sub>2</sub>削減に資する生産プロセスならびに製品開発における熱・流体制御技術の変遷について、適用事例を中心に紹介するとともに、グリーン社会の実現に向けた技術開発の将来展望について解説する。

## 1. CFDによる熱流体解析

### 1.1 直接還元鉄プラント

当社は2030年度目標として、生産プロセスにおけるCO<sub>2</sub>を30~40%削減、技術・製品・サービスによる61百万tのCO<sub>2</sub>排出削減貢献を掲げており、これらの実現に向けたキーテクノロジーの一つが、天然ガスにより鉄鉱石を還元するMIDREX<sup>®</sup>プロセスである<sup>4)</sup>。MIDREX<sup>®</sup>プロセスは溶融鉄こそ存在しないものの、流動、化学反応、伝熱挙動が伴う複雑なプロセスである。具体的には、焼成ペレットや塊鉄石が高温のシャフト炉内を下降する間に、天然ガス由来のH<sub>2</sub>リッチな還元ガスと接触して還元鉄となり、シャフト炉最下部から排出される。炉内ではCOやH<sub>2</sub>による還元反応のみならず、改質反応、シフト反応、炭化・浸炭反応が起こっている。こうした内部状態を適切に理解し、かつプロセスを高度化する手法として、CFDによる熱流体解析や各種反応モデル解析技術を構築している。なお、還元鉄反応に関する詳細なメカニズム解明については、本号「還元鉄製造技術を活用したグリーン社会への貢献」(p.105~109)を参照されたい。本CFDでは反応を連成解析する化学反応ソルバーを導入し、反応速度に影響を与える熱的挙動を解く熱流体解析ソルバーと組み合わせることで、図1に示す



図1 シャフト炉内解析結果の例  
Fig.1 Result of CFD analysis for shaft furnace

ようにシャフト炉内の温度や還元率を精度よく再現できるようになった。今後、さらなる低炭素化を目指し、水素直接還元製鉄(MIDREX H<sub>2</sub><sup>TM</sup>注1)のプロセス条件の最適化などに本技術を活用することで、カーボンニュートラル実現を目指していく。

### 1.2 ゴム・樹脂混練機

当社の産業機械の分野では、広範囲にわたる環境調和型の機械製品を製造・販売している。その中でタイヤ・ゴム機械は、難混練物質であるシリカを多く含む低燃費タイヤ向けの混練機開発を通じて、自動車燃費の向上によるCO<sub>2</sub>削減に貢献している。樹脂機械では、世界トップシェアのポリオレフィン製造用大型混練造粒機を軸に、製品品質と省エネ性を両立できる混練機や、それにより製造される自動車軽量化向けの高性能プラスチック製品によりCO<sub>2</sub>削減に貢献している。

混練機開発に不可欠なのは、混相流体の高度な解析技術であり、これらの開発にCFDが活用されてきた。樹脂やゴムのような高粘性流体を扱う装置では、混練機内部の材料温度や応力といった状態量を把握するために、これまで有限要素法(FEM)や有限体積法(FVM)といった格子法が一般的に用いられてきた<sup>5)</sup>。しかしながら、FEMやFVMでは混練機特有の部分充満状態(流体と空間が存在する状況)を取り扱うことが困難であり、粘性流体の分離や合流などの現象を定量的に評価することができなかった。当社は、混練機内の大きな自由表面変動を伴う部分充満流動に対して、VOF法(Volume of Fluid)や粒子法といった数値解析技術の独自開発を行うことで、従来明らかにされていなかった混練機内部の充満状態や副生成物に伴うプロセスの脱揮性能を評価できるようになった。図2は粒子法による解析結果の一例であり、樹脂の充満状態や混練状態を明確にすることで、CFDによる適正な運転条件の検討や混練ロータ形状設計を可能とした<sup>6)</sup>。引き続き、新たな数値解析技術と混練技術を用いて、樹脂やゴム材料の製造プロセスの省エネルギー化や高性能混練技術の開発を進めていく。

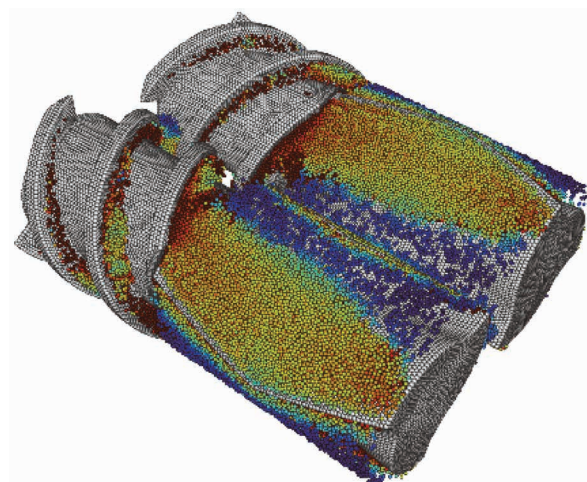


図2 樹脂混練機の部分充満解析結果の例  
Fig.2 Result of partially-filled simulation for mixer

脚注1) MIDREX H<sub>2</sub><sup>TM</sup>は当社の商標である。



## 2. 高温反応プロセスの最適化

### 2.1 高炉操業の低炭素化

高炉はコークスを使用し鉄鉱石の還元を行うプロセスであり、当社はCO<sub>2</sub>排出削減に資する取り組みを長年にわたり行ってきた。その一つが1983年に導入した高炉微粉炭吹込み（PCI: Pulverized Coal Injection）操業である。本技術は、還元材であるコークスを微粉炭に置き換えることで、高炉から排出されるCO<sub>2</sub>を低減できるが、ペレット多配合操業ゆえ、融着帯の形状制御と炉中心ガス流れの確保が、当社における安定操業上の技術課題となっていた。そこで、コークス中心装入による高炉内のプロセス制御技術や、微粉炭吹込み位置や羽口形状を数値解析やラボ実証により最適化することで、PCI操業時の炉況安定技術を確立した。その結果、1998年3月に加古川1高炉において、溶銑（ようせん）1tあたりの微粉炭吹込み量が254 kg/tとなる当時の世界記録を達成<sup>7)</sup>しており、2000年代には資源循環の観点から廃プラスチック吹込みのトライアルも行っている。さらに、2020～2023年にかけてMIDREX<sup>®</sup>技術で製造された熱間成形還元鉄（HBI: Hot Briquetted Iron）を高炉に多量装入することで、高炉からのCO<sub>2</sub>排出量の削減を実証した<sup>8)</sup>。今後も高炉でのCO<sub>2</sub>削減に向けて、引き続きバイオマスや還元鉄などの原料代替を実現可能とする要素技術の検証や、操業安定化に向けた技術確立を目指していく。

### 2.2 微粉炭ボイラの低炭素化

当社は製鉄所の自家発電のノウハウを活かし、2002年より神戸発電所（微粉炭火力）の営業運転を開始し、現在は2019年運転開始の真岡発電所（天然ガス火力）を含め、計394.8万kWの電力事業を行っている。微粉炭燃焼の高度化は、前述のPCI技術や焼却炉設計指針を確立するための都市ごみ燃焼シミュレーション開発を源流としており、2000年代の資源価格高騰時には亜瀝青（れきせい）炭や褐炭などの低品位石炭利用技術開発<sup>9),10)</sup>を、近年はカーボンニュートラル燃料利用拡大に向けた技術開発を行っている。

バイオマス燃料の利用拡大に向けて、灰性状の大幅な変化に伴うボイラの伝熱管壁への灰付着挙動を明らかにすることは特に重要である。一般的に灰付着挙動は、燃料性状（灰組成、灰融点など）やボイラ形状に依存する燃焼状態（温度、ガス組成、流速など）の影響を受けることが報告<sup>11)</sup>されているが、それらの影響因子を統合した評価指標がなかった。そこで当社は、微粉炭ボイラ向けCFDと灰の溶融状態を予測する熱力学平衡計算を組み合わせた独自の灰付着予測技術を構築した。具体的には、CFDにより伝熱管近傍のガス組成ならびに温度を予測し、それらを灰の融液計算の条件として入力することで、様々なボイラ形状や燃料条件のクリンカ生成特性を予測する技術を確立した。図3は様々な燃料種ならびに、それらの混合条件下における灰付着率（実測値）と灰中融液割合（計算値）の関係を示したものであり、灰中融液割合が基準値以上になると灰付着率が増加傾向になることがわかる。加えて、木質バイオマスや下水汚

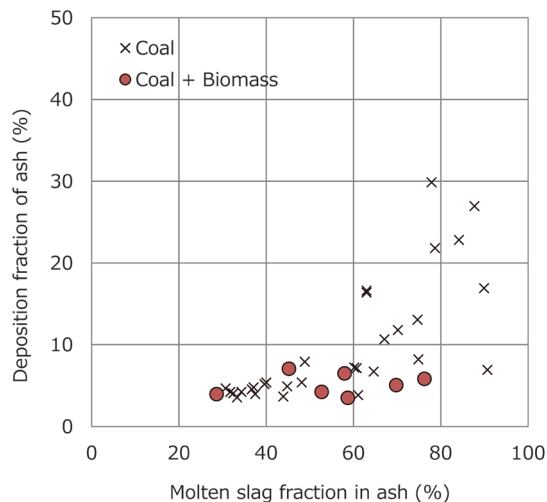


図3 灰中融液割合と灰付着率の関係

Fig.3 Relationship between molten slag fraction and ash deposition

泥炭化物のようなカーボンニュートラル燃料の混焼条件においても石炭と同様の傾向にあり、灰中融液割合が基準値以下となる混合条件（混焼率、混焼銘柄の組み合わせ）を事前予測することで、灰付着によるクリンカトラブルを回避できると考える。引き続き、様々なカーボンニュートラル燃料の燃焼特性を明らかにし、これを安定的に使いこなせる技術の確立を目指していく。

## 3. 流動・伝熱プロセスの最適化

### 3.1 ヒートポンプによる排熱利用

当社は、1915年に国産1号の高圧レシプロ圧縮機を製造して以来、圧縮機のみならず、その派生品として冷凍機、ヒートポンプの開発を行ってきた。1980年代後半には、オイルショックを契機として策定されたムーンライト計画内の「スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システム」に参画し、高効率ヒートポンプの開発に成功した。ここで獲得した高効率な半密閉スクリュウ圧縮機構や非共沸混合冷媒を採用したローレンツサイクル、小温度差熱交換器などのコア技術を応用し、現在では多種多様な高効率ヒートポンプを開発・販売している。図4に示すように、低温から産業用加熱に用いられる温水・蒸気といった幅広い供給温度に対応することで、工場の省エネルギーやCO<sub>2</sub>削減に貢献している<sup>12)</sup>。例えば、2019年にプラントエンジニアリングメーカーである木村化工機（株）と共同開発した95℃温水取出機では、エネルギー多消費工程である蒸発・蒸留工程において、従来品に比べ最大60%のCO<sub>2</sub>削減を達成することに成功している<sup>13)</sup>。

ヒートポンプをカーボンニュートラル実現に向けた化石燃料ボイラ代替とするためには、さらなる高温化や高圧縮比の達成が必要である。熱源となる外気温と出力温度の差を大きくするためには圧縮比を大きくする必要があり、当社製品は単段・二段のスクリュウ圧縮機を製品によって使い分けることで高い性能を実現している。加えて、ヒートポンプのような熱サイクル機器産業では、温室効果が高いフロン類の使用規制が進んでおり、GWP（Global Warming Potential）が1以下のHFO（Hydrofluoroolefin）



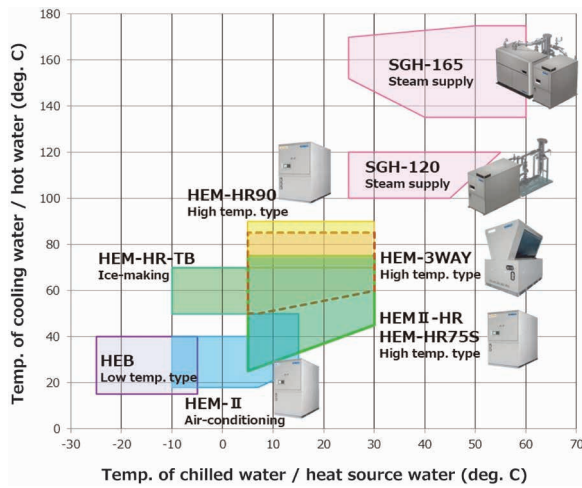


図4 当社ヒートポンプ製品の温度マップ  
Fig.4 Temperature map of product

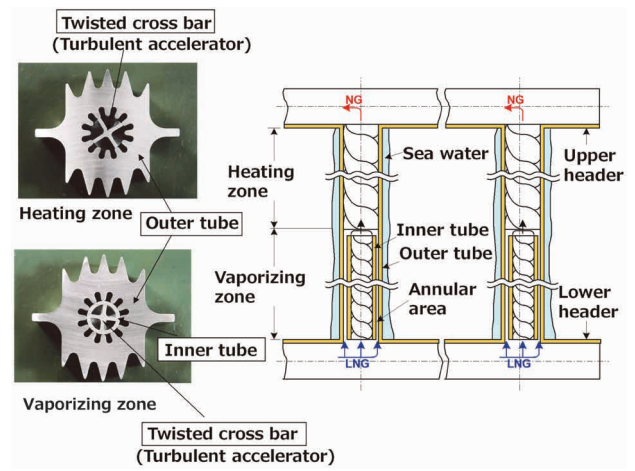


図5 SUPERORV®のパネル構造  
Fig.5 Panel structure of SUPERORV®

冷媒を採用した機種を順次投入している<sup>14)</sup>。今後も高効率・省エネ性に優れた製品によりグリーン社会の実現に貢献していく。

### 3.2 低温液体燃料気化器による低炭素化

当社は空気分離製造事業により蓄積した低温領域の技術・ノウハウを活用し、1960年代に熱交換器事業を開始した。コンパクトで多流体を同時に熱交換できるALEX®(アルミろう付熱交換器)に始まり、1970年代には、火力発電所のLNG転換に合わせて低温液体燃料用気化器事業に進出し、オープンラック式気化器(ORV)を開発、続いてLNG冷熱が利用可能な中間媒体式気化器(IFV)を大阪ガス(株)からの技術供与を受け、独自展開を図った。LNGなどの低温液体燃料用気化器には様々な種類があるが、ORVは海水を熱源とするためランニングコストが安く、大規模用途として最も採用されている方式である。開発当初、LNGと常温の海水の温度差は約180℃程度となるため、ORVの伝熱管表面に海水が着水することで有効伝熱面積が減少し、性能低下が課題となっていた。大阪ガス(株)と共同開発したSUPERORV®は、図5に示すように伝熱管の下部のみを二層構造にする画期的なアイデアで伝熱管外表面の温度低下を抑制し、加えて伝熱管1本当たりの気化能力を従来の約3倍に向上させたコンパクトでコストパフォーマンスも高い気化器となった<sup>15)</sup>。

現在、カーボンニュートラル実現に向け、国内外ではガスタービンの水素混焼・専焼実証が計画されており、当社もLNG気化器のトップメーカーとして、液体水素気化器の開発を進めている。現在、NEDO助成事業「未利用エネルギー由来の水素サプライチェーンの構築」の中で低圧・小型(1MPa以下、1,200Nm<sup>3</sup>/h)の液体水素気化器IFVを用いて、安定した気化性能と冷熱利用の実証試験を進めている。引き続き、高圧化・大型化の開発・実証を行い、国内外のカーボンニュートラルに貢献できる製品開発を行っていく。

むすび=本稿では、生産プロセスならびに製品向けの熱・流体制御技術の変遷と適用例について紹介した。これまで、化石燃料利用を前提とした省エネを中心にCO<sub>2</sub>削減に取り組んでおり、例えば1990年代の製鉄所の設備更新にあわせて、厚板や線材工場の加熱炉では低NO<sub>x</sub>バーナやリジェネバーナを導入し、最新の燃焼技術やCFD技術を確立してきた。機械製品開発においても、省エネや品質向上など、世の中のニーズに沿ったラインナップ拡充を図ってきた。今後、グリーン社会の実現に向けては、燃料転換による脱炭素化が社会価値となり、熱・流体制御技術のさらなる発展が不可欠である。引き続き、生産プロセスにおけるCO<sub>2</sub>削減や、製品・技術・ソリューションによるCO<sub>2</sub>排出削減貢献につながる技術開発を進めていく。

### 参考文献

- 1) 満田正彦ほか。R&D神戸製鋼技報。2001, Vol.51, No.3, p.69-73
- 2) 仲山公規ほか。R&D神戸製鋼技報。2001, Vol.51, No.3, p.2-8
- 3) 須鎗 護ほか。R&D神戸製鋼技報。2001, Vol.51, No.3, p.64-68
- 4) 原田孝夫ほか。R&D神戸製鋼技報。2005, Vol.55, No.2, p.128-132
- 5) M. Malik et al. Intern. Polym. Process. 2014, Vol.29, No.1, p.51-62
- 6) 関山和英ほか。R&D神戸製鋼技報。2018, Vol.67, No.2, p.26-29
- 7) 伊藤良二ほか。R&D神戸製鋼技報。2000, Vol.50, No.3, p.6-11
- 8) 神戸製鋼グループ プレスリリース。  
[https://www.kobelco.co.jp/releases/1214019\\_15541.html](https://www.kobelco.co.jp/releases/1214019_15541.html), (参照2023-10-25)
- 9) 秋山勝哉ほか。R&D神戸製鋼技報。2010, Vol.60, No.1, p.67-70
- 10) 朴 海洋ほか。R&D神戸製鋼技報。2014, Vol.64, No.1, p.22-27
- 11) Benson, S. A. et al. Fundamentals of coal combustion, Elsevier Science, 1993, p.299
- 12) 和田大祐ほか。R&D神戸製鋼技報。2013, Vol.63, No.2, p.51-55
- 13) 神戸製鋼グループ プレスリリース。  
[https://www.kobelco.co.jp/releases/1201980\\_15541.html](https://www.kobelco.co.jp/releases/1201980_15541.html), (参照2023-08-08)
- 14) 神吉英次ほか。R&D神戸製鋼技報。2020, Vol.70, No.1, p.65-68
- 15) 遠藤将夫ほか。R&D神戸製鋼技報。2005, Vol.55, No.2, p.119-121

(解説)



# 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\*<sup>1</sup>(博士(工学))・藤井康之\*<sup>1</sup>(博士(工学))・柿本英樹\*<sup>1</sup>(博士(工学))・吉岡典恭\*<sup>2</sup>・山本雄也\*<sup>1</sup>

## Manufacturing Technology Delivering Safety to Society. Metal Processing Technology

Dr. Koichi AKAZAWA・Dr. Yasuyuki FUJII・Dr. Hideki KAKIMOTO・Noriyasu YOSHIOKA・Yuya YAMAMOTO

### 要旨

当社グループの金属材料や産業機械は、人々の安全・安心な暮らしを支えてきた。金属材料の製造プロセスとして、多くの場合「圧延」「鍛造」などの熱間加工により、形状だけでなく性能、品質が作りこまれ、さらに「成形加工」や「切削加工」により、高精度な形状に仕上げられる。当社グループのものづくりには欠かせない、「圧延」「鍛造」「成形」「切削」を代表とする加工技術について、各コア技術の概要をこれまでの技術開発と実用例を交えながら説明する。さらに、『未来の安全・安心な社会の実現』にむけて必要不可欠であるものづくりの革新につながる新たな取り組みについても述べる。

### Abstract

KOBELCO Group's metal materials and industrial machinery have played a significant role in supporting people's safe and secure lives. The manufacturing process of metal materials typically involves hot processes such as "rolling" and "forging." These processes shape the materials and enhance their performance and quality. Additionally, high-precision shapes are achieved through "forming" and "cutting" processes. This paper explains the core processing technologies that are indispensable in KOBELCO Group's manufacturing, including "rolling," "forging," "forming," and "cutting." It provides an overview of these core technologies, complemented by descriptions of past technical developments and practical examples. Furthermore, it discusses new initiatives that contribute to the innovation of manufacturing, which is essential for realizing a safer and more secure society of the future.

### 検索用キーワード

ものづくり, 加工, 圧延, 鍛造, 成形, 切削

まえがき = 当社グループの金属材料や産業機械は、これまでに自動車、航空機、高層建築物、圧縮機など、輸送機器、社会インフラ、産業インフラに利活用され、人々の安全・安心な暮らしを支えてきた。当社グループが生産するこれらの素材/素形材、産業機械には当然のことながら品質や供給安定性など極めて高い信頼性が求められている。さらに、近年では、強度や大きさ、加工形状の複雑さなど素材/素形材に求められるニーズは増々高度化しており、この要求に応え続けていくためには、絶え間のない「ものづくり力」の向上が必須である。

金属材料の製造プロセスとして、溶解・精錬、鋳造などによって得られた素材を圧延、押出、鍛造などの高温での塑性加工により一次加工し、さらにそれらをプレス成形や伸線、冷間鍛造などの二次的塑性加工、さらには機械加工により最終製品にしている。多くの場合、「圧延」「鍛造」などの熱間加工により、形状だけでなく性能、品質が作りこまれ、さらに「成形加工」や「切削加工」により、高精度な形状に仕上げられる。これまでに当社は、鉄鋼、アルミ、銅、チタンなど素材の拡大に対応しながら、品質、機能、生産安定性を向上するための各加工技術に磨きをかけてきた。いっぽう、素材に求められる機能の向上は、同時に加工の難しさの増大を伴う

ことが多い。そのため、当社の社内製造工程で培った難加工素材に対する加工技術をお客様のものづくりを支える独自のソリューション技術として発展させ、お客様における素材の「使い勝手」の向上を支援している。さらに現在では、お客様と連携し、製造工程全体を俯瞰（ふかん）した課題解決を行うなど、社会からの高い期待に応えるべく技術開発活動を続けている。

本稿では、当社のものでなく、に「圧延」「鍛造」「成形」「切削」を代表とする加工技術について、各コア技術の概要をこれまでの実用例を交えながら説明する。さらに、未来の安全・安心な社会の実現にむけて必要不可欠であるものづくりの革新につながる新たな取り組みについても述べる。

## 1. 圧延

### 1.1 圧延技術

鋼材を中心に当社で製造される金属材料の多くが圧延加工を経て製品となる。圧延工程は、厚板、薄板、線材、棒鋼、形鋼などの各形状に加工するとともに、板厚などの寸法、形状、表面性状などを制御しつつ、材質を造り込む役割を担っている。また当社では、鉄鋼、アルミ、銅、チタンの板材、線材を製造しており、カーボンニュ

\*<sup>1</sup> 技術開発本部 材料研究所 \*<sup>2</sup> 技術開発本部 ソリューション技術センター



ートラル (CN) といった新たな社会課題も加わる中で、多岐にわたる製品品目において、生産性を担保しながら歩留まり良く製造するためには、圧延技術のさらなる高度化が必要となる。そのため実機現象を模擬した実験的検討、および複雑な圧延現象を忠実に再現する高度な圧延シミュレーションを駆使し圧延技術の高度化に取り組んできた。

本章では、これまで当社の圧延製品を支えてきた圧延技術と将来に向けた圧延技術開発についての事例を紹介する。

## 1.2 生産基盤を支える圧延技術

圧延時には板厚や表面性状を適切に制御すること、および材質の造り込みを適切に行うことが課題である。板厚の制御に関しては、アルミ熱間粗圧延を対象に、圧延機の初期設定 (セットアップ) 精度を改善すべく有限要素法 (FEM) と実験的検討から圧延温度、圧延荷重予測モデルを構築することで、高精度な板厚制御を実現し、歩留まり向上に寄与してきた<sup>1)</sup>。また形状制御では、ロールの弾性変形と熱変形、材料変形を連成したシミュレーションモデルを用い、ソフト面では自動形状制御システム (AFC)<sup>2)</sup>、ハード面では多段圧延機 (KST, KT)<sup>3)</sup> などの製品化を実現するとともに、圧延機メーカーとして培った本技術を活用し操業条件の適正化にも貢献してきた。表面性状制御では表面きずという必ずしも原因が明確でなかった課題に対し、スケールと圧延変形の両面からの基礎実験検討からきず発生メカニズムを明確化するとともに、自社開発の剛塑性三次元FEM解析を用い線材圧延のしわきずの発生予測、発生指標を導出し、きず発生率低減を実現した<sup>4)</sup>。材質の造り込みに関しては、結晶粒を微細化するために、必要な温度域で必要な圧下量を確保しつつ、同時に鋼板の平坦度も担保可能なプロセスメタラジー圧延技術を厚板圧延で実用化してきた<sup>5), 6)</sup>。

## 1.3 将来の社会を見据えた圧延技術の開発

昨今ではCNといった新たな課題も加わり、従来圧延製品に求められてきた特性以外の高機能、複合機能が求められてきており、それに対応するための特徴のある圧延技術開発にも取り組んでいる。

その一つは、圧延転写技術である。バイオミメティック材料に代表されるように、表面の微細な凹凸により撥水 (はっすい) 性、伝熱性、光学特性などの多様な表面機能を発現できることが知られている。当社では圧延の特徴である大面積、高生産性、低コストという強みを活かし、表面に微細な凹凸を転写する圧延転写技術を開発した。本技術をチタン薄板に適用し高伝熱チタン板 HEET<sup>TM</sup> の実用化に成功 (図 1) し、再生可能エネルギーの一つとして着目されている海洋温度差発電の実証プラントに国内で初採用されている<sup>7)</sup>。本製品は、海洋温度差発電用途のみならず、化学プラントや発電設備、大型輸送船など海水を用いて冷却、加熱を行う熱交換器への適用拡大が検討されている。

もう一つは、フレキシブルテーラードブランク圧延技術である。自動車軽量化に伴い、部位ごとに異なる特性

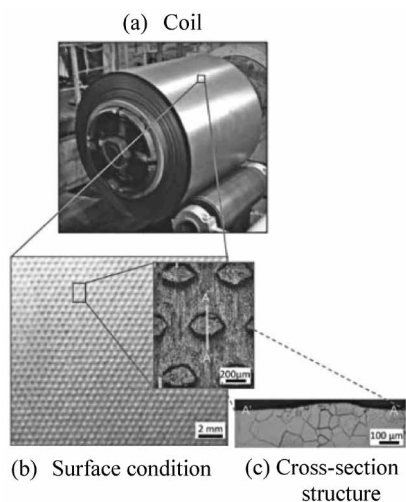


図 1 高伝熱チタン板 HEET<sup>TM</sup>  
Fig. 1 High heat-transfer titanium sheet HEET<sup>TM</sup>

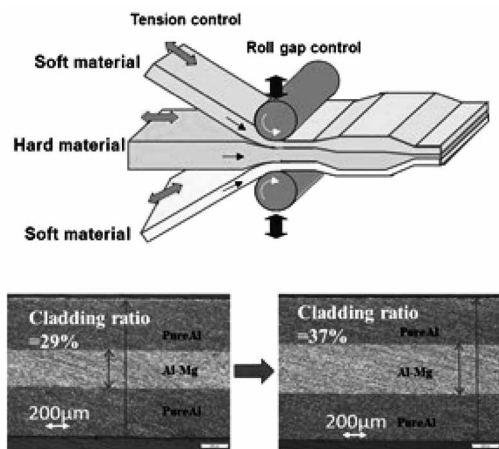


図 2 アルミクラッド材のクラッド比率の制御  
Fig. 2 Control of cladding ratio of aluminum clad material

(強度・延性) が求められる部材に対し、特性の異なる三種のアルミ材を冷間圧延接合し、かつ圧延中の張力を制御することでクラッド比 (各層の板厚比) をコントロールし、長手方向に機械的特性を制御可能なことを実証した (図 2)<sup>8)</sup>。今後、本技術の特徴を活かした複合材料の開発や用途展開が期待されている。

## 2. 鍛造

### 2.1 鍛造技術

当社で製造している代表的な素形材の製品を図 3 に示す。船舶用クランク軸<sup>9)</sup>では、世界のトップシェアを占め、自動車サスペンション用アルミ鍛造部品<sup>10)</sup>においては国内トップシェアを誇る。さらに、チタン合金の航空機部品<sup>11)</sup>では30年以上の納入実績がある。このように、船舶・自動車・航空機といった輸送機器の重要部品を、当社では国内最大級の大型プレス機を使用して効率よく鍛造加工している。

鍛造加工とは、工具である金型を使用して素材を変形させることで形成する加工方法で、 casting 時に生じた casting 組織を破壊して内部組織を均一化するとともに、製品形状を作り出す重要な役割がある。当社では、所定温度に素材を加熱して鍛造する熱間鍛造工程を実施している。



熱間鍛造工程は、素材歩留まりや後工程のコストに影響するため、出荷するまでのトータルコストを考慮して素材形状や金型形状を設計する必要がある。

鍛造工程を設計するためには、鍛造荷重や、欠肉/欠陥と言った鍛造形状を予測する必要がある。近年では、計算機の性能向上により、数値シミュレーション技術を活用することが一般的となっている。当社では、形状および材料の種類が多岐にわたるため、数値シミュレーション技術の高度化・予測精度の向上に注力するとともに、これを活用した工程設計を実施してきた。さらに近年では、当社へのものづくりに対する信頼と期待に応えるため、社内で培った数値シミュレーション技術をお客様の工程に適用するソリューション活動にも注力している。

本章では、数値シミュレーション技術を活用して、歩留まり向上を目的とした社内工程設計事例を紹介する。

## 2.2 数値シミュレーション技術を活用した鍛造工程設計技術<sup>(2), (3)</sup>

船舶用エンジンや発電機などに使用されているクランク軸は、製造方法によって一体型クランク軸と組立型クランク軸に分類されている。昨今、船舶業界ではエコシ



(a) 大型船舶用組立型クランク軸<sup>9)</sup>  
(a) Build-up type crankshaft for large ships<sup>9)</sup>



(b) 自動車サスペンション用アルミ鍛造部材<sup>10)</sup>  
(b) Aluminum forged parts for automobile suspension<sup>10)</sup>



(c) チタン合金製航空機用着陸装置部材<sup>11)</sup>  
(c) Titanium alloy aircraft landing gear parts<sup>11)</sup>

図3 当社で製造している代表的な製品

Fig. 3 Representative products manufactured by our company

ップの流れにより、環境規制の強化および運航時のエネルギー効率化の観点から、エンジンコンパクト化による燃料改善ニーズが高まっている。このようなニーズに対応するためには、高出力・高強度な軽量部材を供給する必要がある。

これに対し、当社の一体型クランク軸では鍛造-機械加工の一貫プロセスを有する強みを生かし、高纯净度鋼の開発やニアネット形状に鍛造できる世界で唯一のRR鍛造法の実用化によって、高負荷に耐えうるクランク軸の製造を可能にしている。

今後、当社はエンジンメーカーと共同で船舶の軽量化・コンパクト化の可能性を探り、お客様の発展に貢献していく。

図4にRR鍛造法における変形挙動を示す。この方法は、金型内にセットされた素材に対し、プレス機の圧下力をくさび機構によって素材の軸方向からの圧縮力に変換する。これにより、素材を軸方向に圧縮してバレル変形させ、予備変形を施したアームと呼ばれる部位を形成する。その後、上下方向からの圧下も加わり、ピン部が偏心されると同時に、軸方向の圧縮を引き続き行うことで、ピン軸・アーム・ジャーナル軸を一体で鍛造する。このように、RR鍛造法では材料流動が非常に複雑な特徴がある。

今回、数値シミュレーション技術を活用してRR鍛造法における歩留まり向上を目的に、素材・金型形状設計を実施した事例について簡単に紹介する。なお、詳細については参考文献<sup>(2), (3)</sup>を参照されたい。図5に素材投入量を削減し、金型形状を適正化して実機試作した結果を示す。その結果から、数値シミュレーションを活用することで、従来に比べて素材投入量を削減できることを

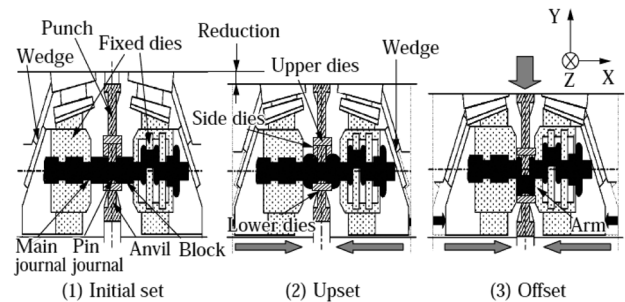


図4 RR鍛造法における変形挙動  
Fig. 4 Deformation behavior by using RR forging method



図5 実機試作で得られた鍛造形状  
Fig. 5 Actual forging shape

実証し、数値シミュレーション技術を活用した工程設計が有効であることを示した。

### 3. 板成形

#### 3.1 板材成形技術

当社素材分野の主力製品である薄鋼板やアルミ板材は、自動車産業との関わりが強く、当社は自動車車体部品の高機能化要求を技術革新の後押しにしてその高機能化を果たしてきた。さらに、素材開発に加えてその適用に不可欠となる成形技術の開発にも取り組み、高機能な材料の実用化や適用拡大を通じて自動車の安全性向上や軽量化の一端を担ってきた。板材成形品には、大量生産手段としての生産性や経済性に加え、成形性、寸法精度、表面性状など多様な製品品質が求められるため、成形プロセス中の板材の挙動、材質の変化、工具の変形を把握し、お客様の要求品質に応じた最適なプロセスを設計することが重要となる。

本章では、高機能材料の適用拡大や板材製品の品質向上により、自動車の安全性や軽量化を支えてきた当社の板材成形向け技術開発の取り組みについて紹介する。

#### 3.2 当社の板材成形向け技術開発の取り組み

当社は自動車車体部品向け素材の特性を活かした使い分けとして、骨格系部品に超高張力鋼板、パネル系部品にアルミ板の適用を提案している<sup>14</sup>。共通の品質課題となる成形時の割れ・しわに加えて、前者には寸法精度や工具の耐久性、後者には面性状や意匠性などの個別の品質課題があり<sup>15</sup>、部品ごとの要求品質を確保するための成形技術や評価技術の開発に取り組んでいる。最近の事例として、成形性の予測精度向上と寸法精度不良の対策提案を紹介する。

##### 3.2.1 成形性の予測精度向上

自動車部品の品質課題の早期解決にCAEを活用した事例が増えている。CAEモデルに成形限界線を組み込んだ成形性評価もその一つで、当社は実機フェーズの品質不具合低減に向けて成形限界線の精緻化に取り組んでいる。伸びフランジ変形においては二つの形態の割れがあることが報告されおり<sup>16</sup>、また伸びフランジ成形のように板面内にひずみ勾配が生じる素板端部の成形限界は、板材の機械的特性値だけでなく、ひずみ勾配の程度や打ち抜き条件にも依存することが知られている<sup>17</sup>。そのため、素材端部の成形限界は様々な加工条件を含む多くのデータベースから割れ形態ごとに同定して求める必要がある。そこで、割れ形態ごとの成形限界線を導出す

ることで成形性の予測精度の向上を図っている<sup>18</sup>。導出された成形限界線の例を図6に、これを伸びフランジ成形の板端部割れ予測に適用して実験結果と比較検証した例を図7に示す。図より、実験結果を精度よく予測できていることが確認できる。

##### 3.2.2 寸法精度不良の対策提案

寸法精度不良は、素板が成形プロセスの複雑多様な変形履歴を経る過程で内部に応力が発生し、それが離型時に弾性回復することによって生じる。その弾性回復量は降伏点に比例して増加するため、寸法精度不良は高強度材の適用を阻害する深刻な問題の一つとなっている<sup>19</sup>。したがって、対策には素板に発生する応力の抑制や相殺が有効と考えられ、当社は成形プロセスの改善によって応力を制御して寸法精度不良を低減することを目指している<sup>20</sup>。その一例として、屈曲した部品の寸法精度不良(キャンババック)を改善した事例を図8に示す<sup>21</sup>。図は離型後の製品変形の駆動力となる素板内の長手方向

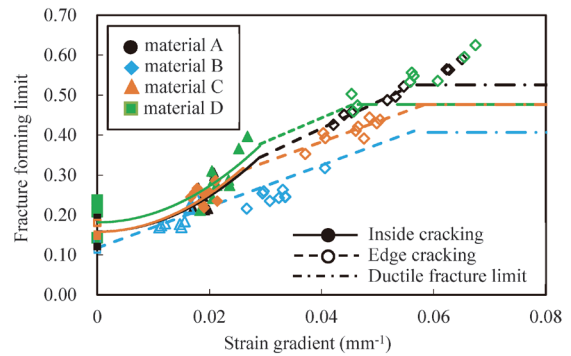


図6 割れ形態ごとに同定した伸びフランジ成形限界線  
Fig. 6 Fracture forming limit in stretch flanging by each fracture type

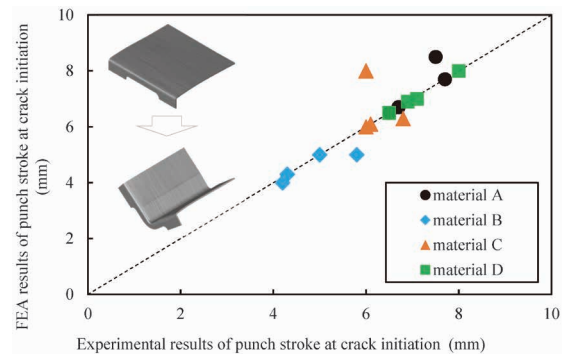


図7 割れ発生ストロークの予測結果と実験結果の比較  
Fig. 7 Comparison of FEA and experimental punch stroke at crack initiation

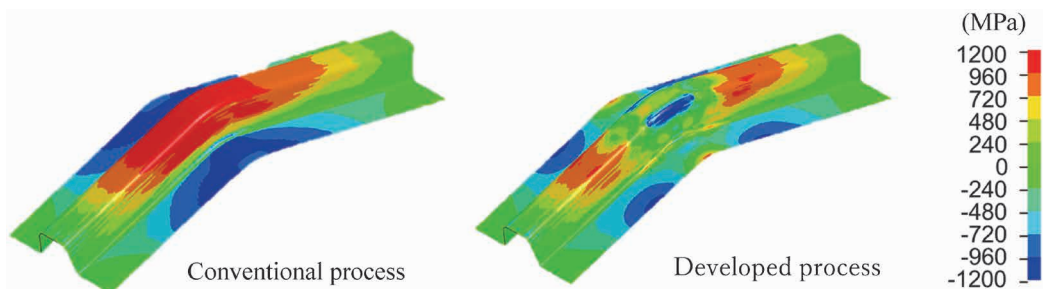


図8 従来工法と開発工法の応力分布の比較 (製品長手方向)  
Fig. 8 Comparison of stress distribution by conventional process and by developed process



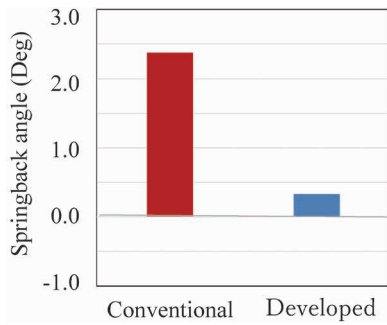


図9 従来工法と開発工法のキャンパーバック量の比較

Fig.9 Comparison of springback angle by conventional process and by developed process

応力分布を示している。本事例では寸法精度不良の主要因となる金型離型前の応力が屈曲天板部の引張り応力と同フランジ部の圧縮応力であることを特定し、それらを途中工程の材料挙動を制御することで低減した。その結果、図9に示すようにキャンパーバック量を改善させることができた。

## 4. 切削

### 4.1 切削技術

航空機部品、自動車部品などの機械部品は高い品質と精度が求められる。このような部品の加工には、生産性、精度、コストのバランスに優れた切削加工が必要不可欠である。当社の切削加工技術は古くは空気圧縮機やドリル工具などの国産化を推し進める中で発展し、さらに、顧客と連携したソリューション活動の中で成長してきた。いっぽう、近年はCNに向けた軽量化や高強度化、自動車の電動化に伴う部品構成の変化など、切削加工の対象物が大きな変革期にあることに加え、プロセスデータやAIの活用など、技術面も大きく変化している。これらに対応すべく、当社では試作実験による評価のほか、FEM解析による刃先現象の分析技術や振動理論を元にしたびり振動予測技術など、切削シミュレーション技術の開発を推し進めてきた<sup>22)</sup>。本章では、その具体例を紹介する。

### 4.2 シミュレーションやプロセスデータを活用した切削加工技術の高度化

#### 4.2.1 旋削加工時の切りくずの分断予測技術

旋削加工において切りくずが分断せず、装置に絡まると自動化の阻害要因となるほか、加工面への傷や工具の損傷原因となるため、処理性の高い分断した切りくずが生成されるよう、材料、切削条件および工具形状（チップブレイカ）を選定する必要がある。これを、簡便に素早く実施できるよう、切りくず分断予測技術の開発に取り組んだ。

切りくずは工具すくい面のチップブレイカと呼ばれる凹凸により曲げられ、切りくずに生じる曲げひずみが限界となる破断ひずみ  $\epsilon_c$  を超えると分断する。そこで、切削条件やチップブレイカ形状をもとに、切りくず形状を幾何学的に算出する手法を構築し、各切削条件における切りくずの分断可否を予測した。結果の一例を図10にコンタ図で示した。図中の赤色の破線よりも右上であ

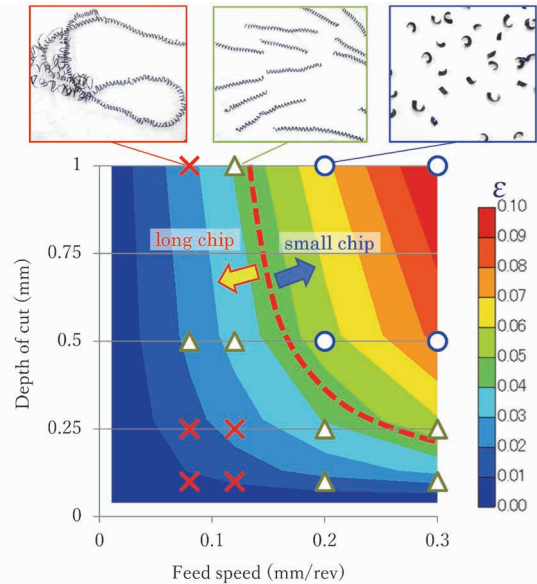


図10 切りくず分断予測結果と実験結果の比較

Fig.10 Comparison of chip breaking prediction results and experiment results

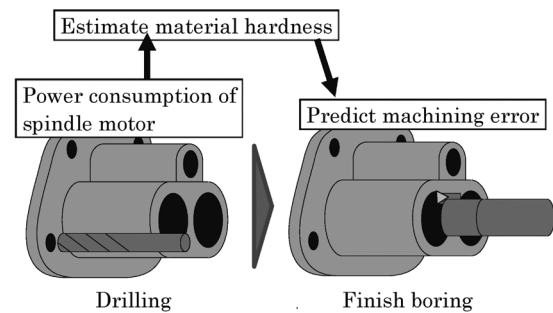


図11 加工誤差予測技術の概要

Fig.11 Overview of machining error prediction technology

れば分断、左下であれば連続するという予測に対し、○、△、×で示した実験結果はよく一致しており、有効な予測技術であることを確認できた。本技術により社内外の切削工程において切りくず処理性に問題が生じた場合に、迅速な切削条件および工具選定・ソリューション提案が可能となった。

#### 4.2.2 工作機械のモータ電力を用いた加工誤差予測技術

当社は産業用空気圧縮機を製造しているが、そこで多く使われる鋳鉄材は硬さがばらつきやすく、同一加工条件でも材料のばらつきにより加工精度が悪化し、修正加工が必要となるため、生産性の低下を招いてしまうことがある。仕上げ加工前に加工誤差が予測できれば、切削条件の調整により加工精度のばらつきを抑制できる。そこで図11に示すように仕上げ加工前のドリル加工時の主軸モータ電力から材料硬さを推定し、仕上げボーリング加工時の加工誤差量を予測した。さらに加工誤差量の予測結果から、送り速度を増減させて加工形状を目標どおりにするよう調整した結果を図12に示す。本技術により自動補正加工を行うことで、数 $\mu\text{m}$ レベルの高精度加工を手戻りによる追加工なしに実現でき、製造コストダウンや製造工程の少人化に貢献できることが明らかとなった。



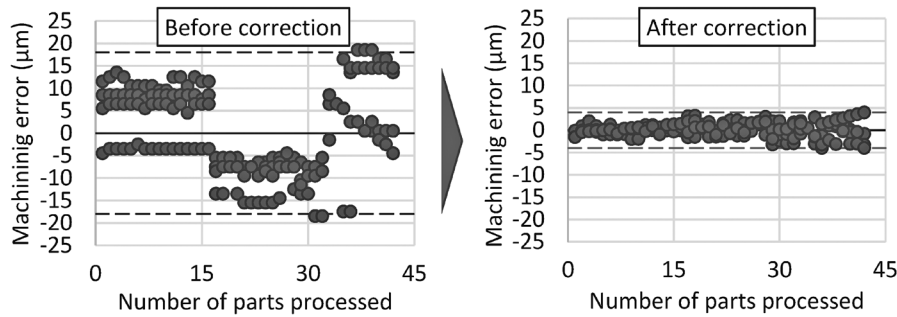


図12 自動補正による高精度加工の効果  
**Fig.12** Effect of high-precision machining by automatic correction

むすび= 今後、設備的に優位な新興国の台頭が予想される中、高機能な素材を高品質、高歩留まり、高生産性で加工する技術により、アドバンテージを確保し続けるとともに、より優位性のある新たな機能や付加価値を持った製品を開発していくことが重要である。その実現に向けて、前述した特徴のある加工技術を活用、進化させながら新たな機能性材料を創出し、カーボンニュートラル関連、エネルギー関連製品への展開を図っていく。

また、製品開発のサイクルが増々短縮される中、当社のみならず顧客の工程も含めた、工程設計や加工工程の効率化が求められている。しかしながら、今後日本国内では少子化による労働人口の減少が予測され、従来、技術者の経験に基づいて行われていた加工工程設計をより高度に実施することは困難になると予想される。この課題の解決には、従来手法では把握しにくい現象を可視化するセンシング技術やシミュレーション技術が求められ、これらの膨大な情報を適切に活用して新たな価値を創出する技術の確立が重要になると考えられる。例えば、ビッグデータやAI/MIを組み合わせることにより、製品の最終形状から歩留まりや機能を最大化する素材/加工工具の適正形状の導出など、目的に応じた工程設計を実現できることが期待される。さらに、一部では実用化されつつある、トレーサビリティや、装置/加工プロセスの異常検知・予防保全にも活用できるようになるだろう。いっばう、工程設計を高いレベルで実現するには、例えば、過去に経験のない素材や加工形状などへの対応が困難であるなど、解決すべき多くの課題がある。これについては当社が従来から蓄積してきた計算科学的な手法や数値シミュレーションなどの技術をうまく融合させることが重要だと考えている。

今後も各加工基盤技術の高度化に加え、多様なDXを通じて安全・安心な社会やCNの実現に貢献していく所存である。

#### 参考文献

- 1) 岩崎 慎ほか. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.2, p.2-7.
- 2) 前田恭志ほか. 塑性と加工. 1991, Vol.32, No.363, p.476.
- 3) 北川聡一ほか. R&D神戸製鋼技報. 1998, Vol.48, No.1, p.43-46.
- 4) 串田 仁ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.1, p.29-33.
- 5) 前田恭志ほか. CAMP-ISIJ. 2004, Vol.17, p.227.
- 6) 藤内秀人ほか. CAMP-ISI. 2001, Vol.14, p.1040.
- 7) 田村圭太郎ほか. R&D神戸製鋼技報. 2016, Vol.66, No.1, p.38-41.
- 8) 前田恭志ほか. 平成28年度塑性加工春季講演会. 2016, p.289.
- 9) 神戸製鋼所. 鑄鍛鋼製品 技術・製品情報. クランクシャフト. [https://www.kobelco.co.jp/products/casting\\_and\\_forging/index.html](https://www.kobelco.co.jp/products/casting_and_forging/index.html). (参照 2023-10-30).
- 10) 神戸製鋼所. アルミ・マグネシウム鑄鍛造品 技術・製品情報. アルミサスペンション. <https://www.kobelco.co.jp/products/magnesium/index.html>. (参照 2023-10-30).
- 11) 神戸製鋼所. エアバスA350XWB向け陸装置用チタン大型鍛造品の量産供給開始について. [https://www.kobelco.co.jp/releases/1195040\\_15541.html](https://www.kobelco.co.jp/releases/1195040_15541.html). (参照 2023-10-30).
- 12) 柿本英樹ほか. R&D神戸製鋼技報. 2005, Vol.55, No.3, p.26-32.
- 13) 柿本英樹ほか. 塑性と加工. 2006, Vol.47, No.548, p.829-834.
- 14) 内藤純也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.1, p.60-64.
- 15) 薄鋼板成形技術研究会. プレス成形難易ハンドブック. 第4版 (2017), p.209-215.
- 16) 伊藤泰弘ほか. 塑性と加工. 2010, 51-598, 1063-1067.
- 17) 飯塚栄治ほか. 塑性と加工. 2010, 51-594, 700-705.
- 18) 宮澤貞雄ほか. 第73回塑性加工連合講演会講演論文集. 2022, p.89-90.
- 19) 杉山隆司. 塑性と加工. Vol.46, No.534 (2005), p.552.
- 20) 山本倫明. R&D神戸製鋼技報. 2007, Vol.57, No.2, p.37-41.
- 21) 田中寛之ほか. 2019年度塑性加工春季講演会講演論文集. p.193-194.
- 22) 赤澤浩一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2006, Vol.56, No.1, p.49-53.

(解説)



## 機械製品を高精度・高効率に操り省エネに貢献する 電気・磁気制御技術

寺尾泰昭\*<sup>1</sup>・河合宏明\*<sup>1</sup>(博士(工学))・森田晋也\*<sup>1</sup>・林 俊平\*<sup>1</sup>



## Electric and Magnetic Control Technology for Manipulating Machinery Products with High Precision and Efficiency, Contributing to Energy Savings

Yasuaki TERAOKA・Dr. Hiroaki KAWAI・Shinya MORITA・Shumpei HAYASHI

### 要旨

当社グループの電気制御技術ならびに磁気制御技術は、半導体や磁性材、超電導といった先端の電子・磁性材料の開発とともに、それらを活用した機械製品の競争力強化や新製品開発を推進する中で育まれてきた。カーボンニュートラルを背景に輸送機を中心に電動化が急速に加速する中、需要変化に対応するためにも電気・磁気制御技術はさらに重要性を増す。本稿では、当社グループの電気制御技術および磁気制御技術の概要とともにおのこの技術トピックスを紹介する。

### Abstract

KOBELCO Group's electrical control technology and magnetic control technology have been nurtured alongside the development of cutting-edge electronics and magnetic materials, such as semiconductors, magnetic materials, and superconductors. These technologies have been instrumental in enhancing competitiveness and promoting the development of new machinery products utilizing these materials. With the backdrop of carbon neutrality, electrification, mainly in the transportation sector, is rapidly accelerating. In response to changing demand, electric and magnetic control technology has become even more crucial. This paper provides an overview of the KOBELCO group's electrical control technology and magnetic control technology, along with introducing various technical topics associated with each area.

### 検索用キーワード

電気制御, 磁気制御, ハイブリッドシヨベル, 溶接電源, 3次元磁極構造, 超電導, 純鉄系軟磁性材

まえがき = 2000年代に入り、自動車を中心に環境へ配慮した低燃費化技術が注目を集めている。グリーン社会への貢献の観点から、当社グループでも油圧シヨベルのハイブリッド化といった電動化関連の取り組みを行ってきた。同時期に、1990年代頃まで取り組んできた半導体や情報通信分野の電子回路技術、FAロボットやシヨベルなどの産業機械を対象としたメカトロ制御の技術を活用し、電動機を駆動させるための制御や回路技術といったパワーエレクトロニクス分野の技術開発を本格的に開始した。併せて、当社グループで製造販売している純鉄系軟磁性材の性能を活かしたモータなどの電機部品の設計、評価技術の開発も進めてきた。

近年、カーボンニュートラルを背景に自動車などの輸送機分野を中心に電動化がいっそう加速する中、当社グループとしても需要変化に対応すべく磁性材料などの既存メニューの市場拡大や、高度な制御による機械製品の競争力強化を進めている。さらに当社独自の新規メニュー創出に加え、磁性材や電動機に関する技術でお客様の困りごとを解決するために、電動化ソリューション提供の強化にも取り組んでおり、電気・磁気制御技術は欠かすことのできないコア技術となっている。本稿では、こ

うした当社における電気・磁気制御技術の機械製品への応用、プロセス技術への応用、そして材料ソリューションへの応用を紹介する。

### 1. 電気制御技術

当社グループにおける機械製品を高速・高効率で電源駆動するための技術として、デジタル制御技術とパワーエレクトロニクス技術を電気制御技術群に位置付けている。

当社は古くから製鉄プロセスや大型プラントなどのプロセス制御の開発に取り組んできた。1980年以降、マイクロプロセッサ内蔵の高性能コントローラの登場により、システムの電気制御系の高応答化や高精度化のためにデジタル制御の製鉄現場への適用が活発化した。さらに機械事業部門における圧縮機などの回転機やFAロボット、建設機械などの産業機械の開発を通してデジタル制御の応用技術を高度化させてきた経緯がある。

1990年代には、当時の半導体事業を支える特定用途向け集積回路ASIC (Application Specific IC) の製品化技術やDSP (digital Signal Processor) を使った信号処理技術の活用展開に取り組んだ。その結果、情報通信分

\*<sup>1</sup> 技術開発本部 応用物理研究所

野では当時世界最小サイズの電池のみで駆動する高音質半導体オーディオ機器「SolidAudio Player」の上市といった先進的な取り組みにもつながった。2000年代に入り、そうした技術は建設機械用の新型コントローラ開発<sup>1)</sup>などにも展開され、量産製品における電子回路の最適化やコストダウン、品質安定化にも役立ててきた。さらに、2010年代にはそうした技術をハイブリッドショベル用インバータの開発や溶接プロセス制御用の電源プラットフォームにも応用展開し、パワーエレクトロニクス分野における高度な電流・電圧制御技術の獲得とともに、当社製品におけるパワーエレクトロニクス回路技術、制御技術のコア技術として確立するに至った。

近年、カーボンニュートラルによる電動化の進展に加え、当社機械製品の使いやすさや従来できなかった機能／コスト／価値をお客様に提供するためには電気制御技術は必須技術となってきている。素材事業、機械事業の両事業を有する当社において、電気制御技術は、機械を制御するためのパワーエレクトロニクスとしての活用だけではなく、溶接電源のようにものづくりのプロセスを直接制御する手段でもある。ここでは電気制御技術を活用した当社グループの機械製品の一例を紹介する。

### 1.1 油圧ショベルにおける電気制御

当社グループ会社のコベルコ建機（株）では、2000年代前半、排ガス3次規制に対応する新型ショベルを開発した。そこでは、前述の新型コントローラの開発と同時にその高い演算性能を駆使して、エンジン&油圧ポンプシステムとしての高効率運転制御技術と電磁弁制御による油圧回路の損失低減制御技術を開発し、従来の油圧ショベルより省エネ性能を20%向上させた新型油圧ショベルを上市した<sup>2)</sup>。

また、コベルコ建機の省エネショベル上市を皮切りに建機各社も省エネ建機を開発する中、コベルコ建機は建機各社に先駆け、世界初となるハイブリッド建機の開発に成功し、2009年にSK80H、2012年にはSK200H-9といったハイブリッド油圧ショベルを販売してきた<sup>3)</sup>。2016年には高出力で大容量のリチウムイオンバッテリーを初めて採用したSK200H-10（図1）を開発している<sup>4)</sup>。SK200H-10の開発では、省エネ性能の追究や作業能力の最大化を図る目的で、発電電動機、旋回電動機、および

リチウムイオンバッテリーユニットを内製化した。小型高出力化を達成するために、すべての機器は水冷システムを採用した。発電電動機では、三相交流同期形永久磁石方式の軸方向寸法約140mmの扁平（へんぺい）形状を採用し、エンジンと油圧ポンプ間へのビルトインを実現した。旋回電動機も旋回油圧モータ搭載場所に設置できるように小型高出力化を図った。インバータユニットにおいても、機体搭載性を確保するため、旋回電動機インバータと発電電動機インバータの一体構成を図った小型インバータユニットを新規で開発した。SK200H-10は従来の油圧ショベルに対して燃料消費量が17%低下しており、SK200H-9に対しても燃料消費量が12%低い結果が得られている。

### 1.2 溶接電源プラットフォームの開発

当社の溶接事業部門では、溶接材料とロボットシステムの双方を事業の柱として持つ強みを活かし、溶接プロセス全体でお客様へ価値を提供する溶接ソリューションとしての提案力を強化してきた。ソリューション提案を実現するために、材料とシステムの架け橋として必要となるのが溶接電源であり、パワーエレクトロニクス回路設計技術を駆使して実験開発環境としての溶接電源である、「溶接電源開発プラットフォーム」を開発した（図2）。本電源プラットフォームでは、DSPによる信号処理技術とFPGA（Field Programmable Gate Array）といった高速処理デバイスを活用したデジタル制御を実現し、開発者の溶接プロセスの制御アイデアを具現化するツールとして、新たな溶接プロセス開発の基盤となっ



図1 SK200H-10の外観  
Fig.1 Overview of SK200H-10

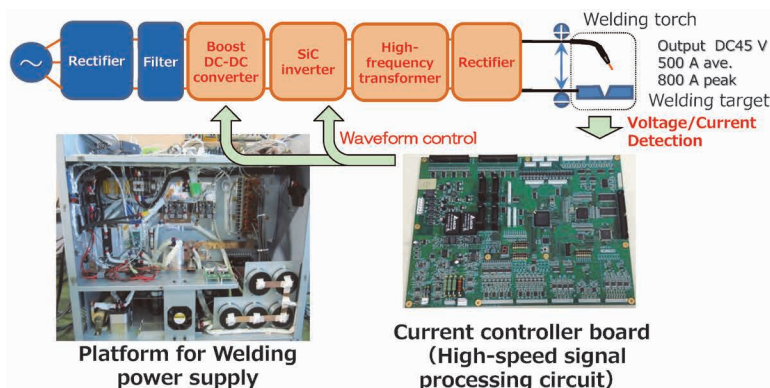


図2 溶接電源プラットフォーム  
Fig.2 Platform for Welding power supply



た。これらの取り組みを通じて400 A超の大電流でも緻密な出力制御が可能な新溶接電源“SENSARC™ RA500”や、溶接ワイヤの周期的な前進後退動作と電源出力を同期させ、溶滴の移行に慣性を利用した世界初のワイヤ送給制御プロセス“AXELARC™”を開発した(本号「溶接コア技術の開発と社会実装」p.99~100参照)。加えて、昨今ではパワー半導体素子の進化や制御CPU処理能力が増大する中、これらの技術を導入した小型化ならびに高速応答が可能な電源装置の開発も行っている<sup>5)</sup>。

## 2. 磁気制御技術

磁気制御技術は当社グループの磁性材料の特徴を最大限に引き出すために、材料開発や分析解析技術に加え、高度な電磁場設計技術と掛け合わせて特徴ある電機部品の製品開発やソリューション提案に取り組むものである。

当社グループでは線材条鋼、鉄粉といった純鉄系軟磁性材から超電導まで、様々な分野にわたる磁性材料の製造販売を行っている。線材条鋼分野では、1985年頃から優れた磁気特性と冷間鍛造性を有する純鉄系軟磁性線材ELCH2 (Extra Low carbon Cold Heading wire) の開発を進めてきた。高い磁束密度や加工性の良さから、ソレノイドバルブや電磁クラッチなどの直流駆動部品に広く採用されている<sup>6),7)</sup>。また、鉄粉事業においては1990年代頃からは表面に絶縁皮膜を有する鉄粉を圧縮成形した圧粉磁心の開発を進めてきた。磁性鉄粉は等方的な磁気特性を活かした高い形状自由度が強みであり、リアクトルでの実用化が進んでおり、モータへの適用拡大も目指している<sup>8)</sup>。自動車の電動化や電気機器の省エネ化が拡大する中、これら軟磁性材の成分設計・組織制御を最適化することで高磁束密度化と強度の両立する技術開発や、交流用途拡大に向けた鉄損低減技術として高耐熱の被膜開発を進めてきた。加えて、これら軟磁性材を適用したモータやソレノイド部品などの電磁部品を、高度な磁場解析技術を用いて設計、解析することで、お客様のニーズに合わせた最適な構造や加工プロセスの提案を行っている。また、当社の機械製品の競争力強化や新規メニュー創出の観点で、磁性材の特徴を生かした新たな電動機の開発にも取り組んでいる。

超電導分野の開発においては、1964年に超電導線材の基礎研究に着手して以来、2002年に超電導線材とマグネットを一貫して製造販売するグループ会社のジャパンスーパーコンダクタテクノロジー(株)(以下、JASTECという)を設立し、NMR (Nuclear Magnetic Resonance)、MRI (Magnetic Resonance Imaging)、研究用途を中心とした超電導マグネットと線材の事業を展開している。超電導線材では、フランスに建設中の国際熱核融合実験炉(ITER)プロジェクト向けに組織制御や交流損失低減技術を適用した高特性のNb<sub>3</sub>Sn線材を開発し、プロジェクト全体の約20%を供給した実績を持っている。超電導マグネットでは、磁石配置を最適化することにより、高磁場・高均一度設計技術を構築してNMRやMRIの製品化を進めるとともに、高超電導線材を適用した超高磁場コンパクトマグネットの開発にも取り組んでいる。ここでは、当社グループの磁性材のソリューション技術ならびに、磁性材を適用し新たに生み出された技術の一例を紹介する。

### 2.1 純鉄系軟磁性材のソリューション技術

磁性材料の磁気特性は、加工により生じるひずみや残留応力により変化するため、加工の影響を考慮した部品性能予測および最適な部品加工プロセスのソリューション検討を行っている。

カーボンニュートラルの観点から熱処理工程省略などによるエネルギー低減が求められている。このことを受け、磁気焼鈍を省略し冷間鍛造加工した状態のELCH2をソレノイド鉄心に適用することが可能か検討した。冷間鍛造ひずみが部品特性に及ぼす影響を解析するために、ひずみ分布をFORGE(鍛造解析ソフトウェア)で解析し、出力されたひずみ分布データをJMAG(電磁界解析ソフトウェア)に受け渡し磁場解析を実施した(図3)。その結果は、磁気焼鈍を省略しても従来品と同等の性能であることを示した<sup>9)</sup>。

今後、市場の拡大が予測される電動機分野においては、小型化や軽量化のニーズが高まっており、現在の主流であるラジアルギャップ型モータ(以下、RGMという)とは異なるアキシヤルギャップ型モータ(以下、AGMという)の開発が盛んに行われている。磁性鉄粉では形状自由度などの強みを活かしたAGMへの適用検

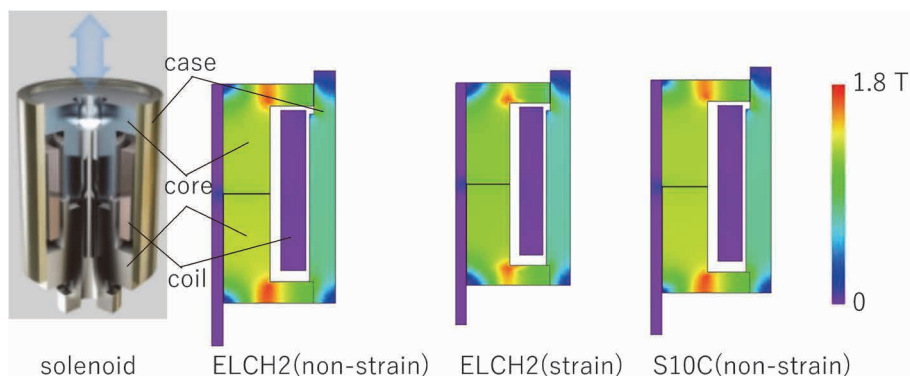


図3 磁束密度コンター図  
Fig.3 Contour diagram of magnetic flux density

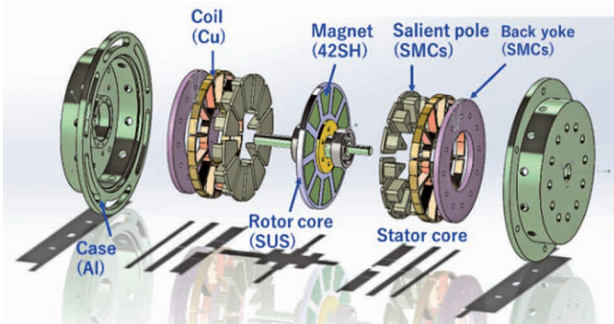


図4 アキシアルギャップモータの構成 (SMCsは圧粉コアの略)  
Fig.4 Axial-gap-motor configuration (SMCs is an abbreviation for soft magnetic powder composites.)

討を進めており (図4), JMAGを用いたモータの最適設計を行うとともに, 量産工程を想定した圧粉コア材の加工プロセスのモータ性能への影響を評価した<sup>10)</sup>。いっぽうで, ELCH2は前述したように優れた磁気特性を有する反面, 電気抵抗率が低く, モータの様な交流用途では磁性体中に生じる鉄損の増大を招く。磁気特性を維持し鉄損低減を狙ったELCH2細線を新たに開発し, これを適用した新たなAGMモータでは従来のRGMよりも小型軽量化できる可能性を示した<sup>11)</sup>。

これらの材料のさらなる性能向上およびモータへの活用提案によりカーボンニュートラルへの貢献を目指している。

## 2.2 三次元磁極構造を適用したモータ開発

電磁力による駆動方式の電動モータは油圧モータと比較して, 制御性の良さ, ロスの少なさ, 電源や補器を含めた装置全体のコンパクトさの点で重宝されるが, 油圧モータと比べると非力である代わりに, 高速域に優れた特性を持つことを生かした形でこれまで実用されてきた。いっぽう, 当社の建設機械や大型の圧縮機などの機械製品の駆動源には, 低速大トルク特性が要求されるものが多く, 高速域に優れた特性を持つモータに油空圧や高い減速比のギアといった機械的要素を組み合わせることにより, その性能が実現されている。しかし, 前記の組み合わせでは, ヒステリシス, がた, 摩擦などの非線形性が生じ, 制御性・動作精度や効率面で悪影響を及ぼす。そこで, これら機械的な非線形要因を極力排除することが可能な低速大トルク化の構造を検討した。

高速域での使用を前提とする電動機の制約を排し, かつ等方的な磁気特性を有する当社磁性鉄粉や純鉄材の特性を活かす発想を行い, 図5に示すような三次元的に磁束が通過する構成により, 電流への感应性を向上させた三次元磁極構造<sup>12)</sup>を考案した。この技術を用いた電動機は, 速度に起因する損失が大きくなるため, 高速域では不利になるいっぽう, 低速域においては従来に比べ少ない永久磁石量で大きな磁束変化を生じさせることで, 「小型軽量化」と「少ない電力で電磁力を向上する効果」の両立を実現した。

現在, 当社産業機械への適用を目指してギアなどを介さず直接駆動であって100 kNの電磁推進力を発生可能

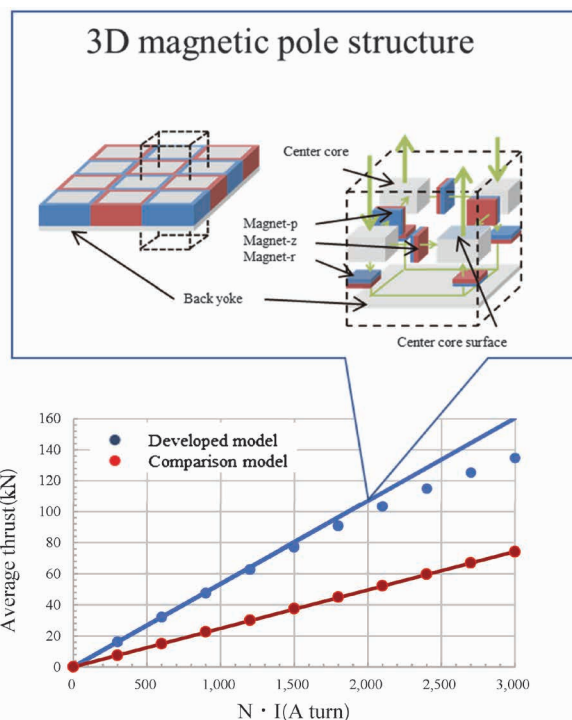


図5 三次元磁極構造とその適用モータ  
Fig.5 3D Magnetic pole structure and linear synchronous motor drives

な直動電動機の開発を進めている。

本技術は電動化や自動化, 省人化を背景に今後拡大が見込まれる電動機市場に対する独自の特徴あるシーズ技術である。瞬発動作の向上に向けて, ダイレクトドライブ化が望まれる用途向けを中心に技術開発を推進するとともに, 新たな事業機会を見出していく。

## 2.3 超コンパクト1 GHz NMR マグネットの開発

当社は2015年に (国研) 物質・材料研究機構, (国研) 理化学研究所, 日本電子 (株) とともに当時としては世界初となる超1 GHz (1.02 GHz) のNMRマグネットを開発した。マグネットが発する磁束密度が最も高くなる最内層部にビスマス系の高温超電導を適用することで実現した。2022年度には当社のグループ会社であるJASTECが理化学研究所, 日本電子, 東京工業大学らとともに, 前述の技術をさらに高度化することで, 従来機と比べて約10分の1の重量に抑えた世界最軽量・コンパクトな超1 GHzのNMR装置の開発に成功した (図6)<sup>13)</sup>。最内層に用いるビスマス系の高温超電導コイルの電流密度を従来機に比べ1.5倍とすることでマグネット全体における高温超電導コイルの磁場分担を50%以上に増やし, マグネット全体をコンパクト化した。いっぽう, 本構造では高温超電導コイルの中心部には100トン超と非常に大きな電磁力が印加される。コイルが破壊されないように, 高強度金属で補強された高温超電導線材を緻密に整列させて巻く技術を開発することで高電流密度を実現し, 大幅なコンパクト化に成功した。

今後も超電導線, マグネット双方での特性向上を進め超電導分野における最先端の技術開発に貢献していく。

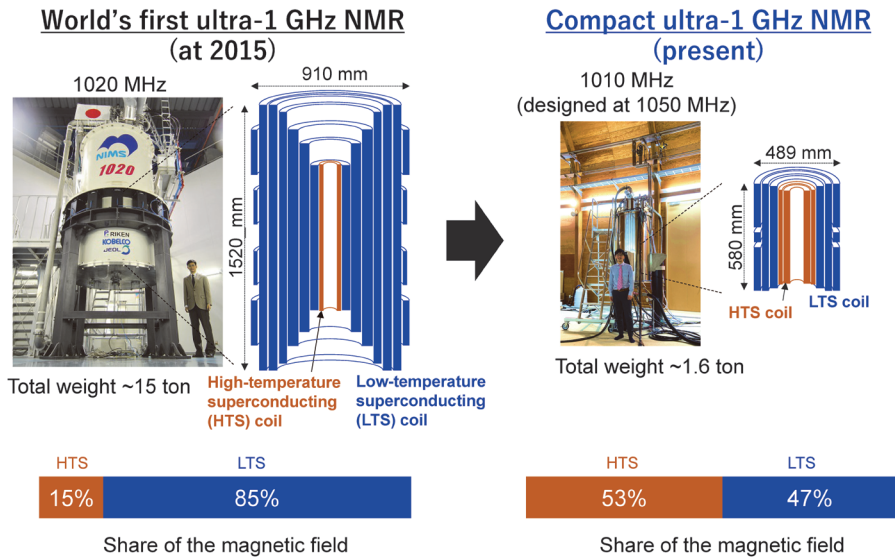


図6 超1 GHzのNMRマグネットの外観と超電導コイル断面  
 Fig.6 Overview and cross-section of ultra-1 GHz NMR

むすび = 当社グループにおける21のコア技術の電気制御技術ならびに磁気制御技術に関して、おのこの技術トピックスとともに紹介した。これらの技術をより一層深化させ、当社グループの製品の競争力強化を図るとともに、最先端技術への貢献、カーボンニュートラルの実現などの社会課題の解決に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 山下俊郎ほか. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.1, p.68-72.
- 2) 大谷和弘ほか. R&D神戸製鋼技報. 2007, Vol.57, No.1, p.52-57.
- 3) 鹿見島昌之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2007, Vol.57, No.1, p.66-69.
- 4) 山崎洋一郎ほか. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.68, No.1, p.43-47.
- 5) 橋本裕志ほか. 電気学会論文誌D. 2021, Vol.141, No.8, p.613-620.
- 6) 千葉政道ほか. R&D神戸製鋼技報. 2002, Vol.52, No.3, p.66-69.
- 7) 千葉政道ほか. R&D神戸製鋼技報. 2005, Vol.55, No.2, p.18-21.
- 8) 三谷宏幸. R&D神戸製鋼技報. 2015, Vol.65, No.2, p.12-15.
- 9) 笠井信吾ほか. R&D神戸製鋼技報. 2022, Vol.71, No.2, p.3-6.
- 10) 加藤弘樹ほか. R&D神戸製鋼技報. 2022, Vol.71, No.2, p.12-17.
- 11) 森田晋也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2022, Vol.71, No.2, p.7-11.
- 12) 林 俊平ほか. 電気学会論文誌D. 2019, Vol.139, No.7, p.645-651.
- 13) Y. Yanagisawa et al. "Present status of the development of a 1.3 GHz (30.5 T) LTS/HTS NMR magnet operated in the persistent-mode". Applied Superconductivity Conference 2022.



(解説)



## 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\*<sup>1</sup> (博士(工学))・江口 徹\*<sup>1</sup> (博士(工学))・逢坂武次\*<sup>1</sup>・檜崎博司\*<sup>1</sup> (博士(工学))・加茂和史\*<sup>1</sup>

### Process Control Supporting Ever-changing Manufacturing

Dr. Tomoyuki MAEDA・Dr. Toru EGUCHI・Taketsugu OSAKA・Dr. Hiroshi NARAZAKI・Kazufumi KAMO

#### 要旨

お客様の新たなニーズや製品およびそれらの変化に的確に対応するため、当社グループの生産設備・プロセスやプラント製品などの安定稼働、効率化を支えてきたプロセス制御技術の高度化に関して報告を行う。具体的には、歴史的な背景にふれながらプロセス制御技術の概要およびいくつかの最新事例を紹介しつつ、当社グループのマテリアリティ「グリーン社会への貢献」との関係性や将来のカーボンニュートラル社会への貢献についても展望する。

#### Abstract

This article reports on the advancement of process control technology that has been supporting the stable operation and efficiency improvement of production facilities, processes, and plant products within the Kobelco Group to accurately respond to the new needs of customers and changes in products and processes. Specifically, it provides an overview of process control technology, touching upon its historical background and introduces several recent cases. It also discusses the relationship between this technology and Kobelco Group's materiality, "Contributions to a Green Society," and offers insights into the contributions to a future carbon-neutral society.

#### 検索用キーワード

プロセス制御, 高炉, 圧延, 冷却, 製鉄, 廃棄物処理

ま え が き = 多種多様な事業・製品を有する当社グループでは、お客様が求められる新たなニーズや製品にタイムリーに対応しつつ高生産性かつ高歩留まりで製造するため、保有する各種生産設備・プロセスを効率的かつ安定的に稼働・運転させている。お客様ニーズに的確に対応するため、還元、燃焼、加熱、吸熱、塑性変形など様々な工程やそれらを組み合わせた多種多様なプロセスを適正に操業する必要があり、プロセス制御技術が活用されてきた。とくに鉄鋼業界ではほかの産業に先駆けて積極的に導入した計算機を活用し制御機能の高度化を進めてきた。当社においても同様に最適制御、ロバスト制御などを開発・実用化し、近年ではビッグデータ解析、AI活用も積極的に行い数々の実績を築きあげてきた。今後も「グリーン社会への貢献」や「将来の人口減における生産技術」に対応すべく、低CO<sub>2</sub>排出高炉操業技術や高効率ごみ発電プロセスなど、生産設備やプロセスが進化していく中でプロセス制御技術の高度化はますます重要になると考えられる。本稿ではこれら技術の概要と当社グループで長年取り組んできたプロセス制御技術の近年の具体的事例について紹介、解説を行う。

### 1. プロセス制御の概要

プロセス制御技術は製鉄プロセスや大型プラントなど

連続稼働設備のプロセス挙動の変化を迅速に察知して操作することで設備を効率的かつ安定稼働させる技術であり、ものづくり基盤を支える技術の一つである。ものづくりに求められるニーズが、「大量生産」から、「量から質へ」、「多品種少量化」、「難製造製品の増加」と時代とともに変化する中、当社グループでは、プロセス制御技術を高度化することで製造条件変更や新規プロセス商品化を実現し、お客様や社内工場ニーズの変化に対応してきた。

80年代頃大量生産の時代、鉄鋼他社同様に当社グループでは国内でも先駆的に計算機や自動制御(PID)をライン導入し、その適用先を拡大することでプロセス・設備の安定稼働、高歩留まり生産を実現しお客様への大量製品提供を可能とした。とくに、制御対象の物理(化学)現象をモデル化し計算機シミュレータを活用した最適制御技術により、各種板厚制御や温度制御などの圧延制御技術が実操業へ適用された<sup>1)</sup>。

その後、90年代後半に「量から質へ」の転換が始まった際、当社ではプロセス制御に最新技術を順次導入して対応を行った。具体的には、適応制御やロバスト制御を開発・実用化し<sup>2)</sup>様々な材料特性の作り込みを可能とした。さらには新たな学習機能開発やセットアップ計算モデル高精度化により、材料作り分け時のロット切り替え

\*<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

ロスを最小化した。これらにより、お客様ニーズ多様化による難製造製品の製造を可能とし、多品種少量/変量生産へのシフトを支えた。加えて、時系列データなどの複雑かつ大量の操業データをハンドリングしクラスタリングする技術の高度化に取り組み、転炉副原料投入システムやごみ焼却炉温度予測制御<sup>3)</sup>により鉄鋼品質向上や新規商品メニュー化を実現した。

その後、「多品種少量化」によるニーズの多様化や「難製造製品の増加」に対応する製造技術高度化要求が進み、さらなる安定生産、制御性能の高精度化を目指す中、当社グループはベテランオペレータの暗黙知の活用、自動化と技能の共存を指向した。センシング技術の信頼性向上、高精度化やストレージ装置大容量化を背景とした転炉副原料投入システムの高度化でのJIT (just-in-time) モデリング技術開発にて培ったデータハンドリング技術を活用し、過去の大量操業データから高類似度データを抽出することでベテランの経験情報を模擬する仮想経験情報を表現することに成功し、仮想経験情報を操業オペレータへ提示して判断を支援する当社独自の操業支援技術を開発した。自動制御ループの中に人の判断を含めた制御系とすることで自動化と技能を共存させ、ベテラン暗黙知を活用したものづくりを実現した。従来の自動化アプローチでは困難な課題であった製鋼工程温度予測や熱延工程の圧延セットアップ計算などへの適用<sup>4)</sup>により様々な製品製造を可能とし、ニーズの多様化を支えている。また、このコンセプトを拡張し、より高難易度な高炉操業への適用を進めることで、通気性可視化と炉熱変化予測の技術を確立し、他社に先駆けて実機適用を果たした。

現在、業界に先駆けて機械学習を「オンライン・プロセス制御」に取り込み、実操業で活用できる機械学習技術を構築中であり、引き続きプロセス技術の高度化を進めていく。今後、お客様が求める新たな製品・プラント特性や、当社における鉄鋼原料の質的变化、HBI (hot briquetted iron) 投入など原料系の変化などに技術開発でこたえ続けていく。その中で、プロセス制御は大型設備・プロセスを繊細に操作し材料やエネルギーのロスを最小化することで、きたるべき未来のカーボンニュートラル世界の実現に貢献しつづけていくものと考えている。

## 2. 高炉 “AI操炉<sup>®</sup>” の開発<sup>5)</sup>

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込んで鉄鉱石を昇温還元し、溶銑 (ようせん) を製造する固気向流型の巨大な反応容器である。高炉の安定操業には、向流移動層である充填層の通気性を安定させることと、炉熱 (溶銑温度) を一定レベルに保つことが重要である。炉熱制御で重要な役割を担っているのは操炉を行うオペレータであり、操炉オペレータは膨大な計測データを管理指標と照合し、経験というスパイスを付加して数時間後の炉内状況 (炉況) を予測し、溶銑温度が管理値範囲内に収まるよう操業条件変更を実施する (図1)。とくに大型

高炉での低コークス比操業は、熱慣性起因の時定数の大きさが災いとなり操炉アクションが遅延すると大きな炉況不調を招き易いことから、操炉オペレータにはより高度な判断能力が要求されている。

このような背景のもと、高炉でのCO<sub>2</sub>削減と究極の安定操業 (冷え込みゼロ、吹き抜けゼロ) を目的に、AI・数学モデル・計測端情報を融合した炉熱と通気性に関する“炉況予測”、さらに高度な“炉況制御”を行う“AI操炉<sup>®</sup>”を開発中である。以下では、主要技術の一つであるAIを活用した“炉熱 (溶銑温度) 予測技術”について紹介する。

溶銑温度の推定モデルは、炉下部の熱原単位変化量 $\Delta Q$ の総計より溶銑温度の変化量 $\Delta T_{pig}$ を求める炉熱過渡応答モデルである。モデルの入力情報は、操業条件変更アクションと炉内影響因子の熱原単位変化量、炉内残銑量、溶銑温度の過去実績データである。熱原単位変化量が溶銑温度変化へ反映される際に過渡応答の考え方を適用し、過渡応答曲線のモデルパラメータ $\theta$ をAIで逐次最適化した。

将来5時間の溶銑温度 (HMT) を予測した結果例を図2に示す。①時刻ゼロの時点で、モデルは将来5時間にかけて溶銑温度の急激な低下を予測している。②操炉オペレータが同タイミング以降で複数回の送風温度

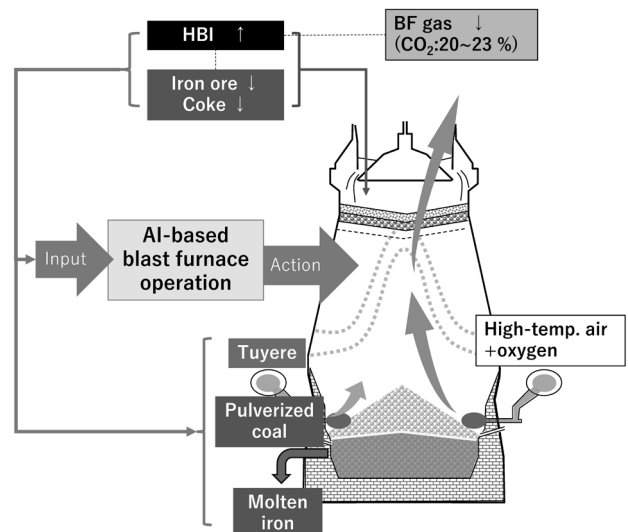


図1 AI操炉の概要

Fig.1 Outline of AI based blast furnace operation

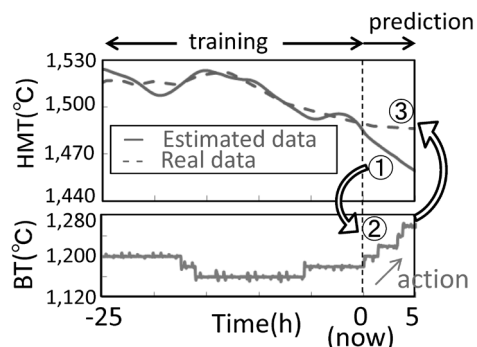


図2 溶銑温度予測の結果例

Fig.2 Result of HMT (hot metal temperature) prediction

(BT)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値範囲内に維持できており、予測モデルの妥当性を実証した。さらに、従来は浸漬型熱電対でバッチ計測した溶銑温度を教師データに用いていたが、出銑孔カメラで連続撮影した輝度画像から溶銑温度を連続算出できる技術を開発し、教師データに用いることで予測精度を飛躍的に改善した。

加古川製鉄所第3高炉でのHBI多量使用テストでは実際に本予測システムを活用し、低CO<sub>2</sub>高炉操業の実機で技術の実用性を実証した。世界中の高炉でCO<sub>2</sub>削減(HBI多量使用)を可能にする“AI操炉<sup>®</sup>”を目指して、現在も改良機能を開発中である。

### 3. 廃棄物プラント自動化機能の開発<sup>6)</sup>

当社グループ製品メニューに廃棄物焼却プロセスがある。これまでに当社グループでは安定稼働、排ガス環境負荷物質(CO, NO<sub>x</sub>)濃度低減や自動運転を支えるプロセス制御技術を多数開発しており、その一つに排ガスCO, NO<sub>x</sub>抑制自動化技術がある。

排ガス中の環境負荷物質濃度は常に変化する廃棄物性状の影響を受け操業中に急激に変化するため、その抑制と操作自動化が望まれていた。そこで、当社グループでは多岐にわたる変動要因を最新の機械学習を活用して表現し、プロセス情報からCO, NO<sub>x</sub>発生状況を高精度に予測する技術を開発した。本稿では、この技術で得られる予測結果を基に燃焼空気量を最適に制御する排ガスCO, NO<sub>x</sub>抑制自動化技術(図3)について報告する。

以下に、開発技術のフローを示す。

- (1) 機械学習(決定木)による排ガ斯特性のモデリング  
決定木を用いて過去の運転データを学習させ、CO, NO<sub>x</sub>が急変するタイミングを予測するロジックを構築する。これにより運転員が手動介入可否を判断可能とする。
- (2) オンデマンドな空気量制御の実行  
前述の予測ロジックによってCO, NO<sub>x</sub>の上昇を予測し、必要な排ガス抑制操作(溶融炉の一次/二次空気量の調整)を事前に行う。なお、操作介入は必要なタイミングのみとし、運転状態に与える影響を最小限に留め、運転の安定化を図る。

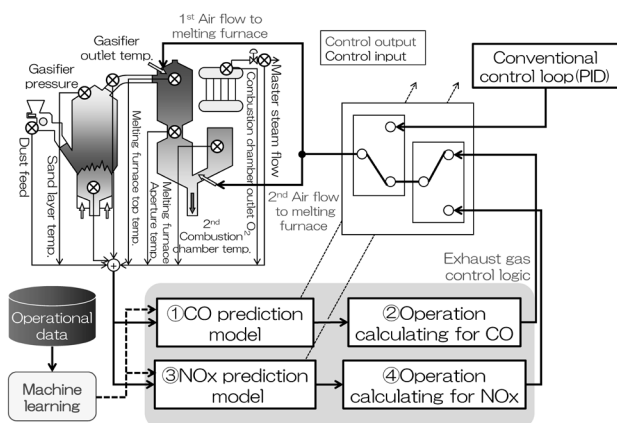


図3 開発制御システムの概要  
Fig.3 Outline of developed CO/NO<sub>x</sub> emission control system

表1 施設概要

Table 1 Outline of target plant

Disposal method	Fluidized-bed gasification and melting furnace
Disposal capacity	143 t/day (71.5 t/day * 2 Furnaces)
Exhaust gas cooling system	Waste heat boiler + Water spray
Steam conditions	350 °C * 4 MPa
Exhaust gas treatment method	Non-catalytic denitration + Bag filter + Catalytic reaction tower
Wastewater treatment equipment	Flocculation precipitation/Sand filtration + Membrane treatment equipment
Power generation	1,970 kW

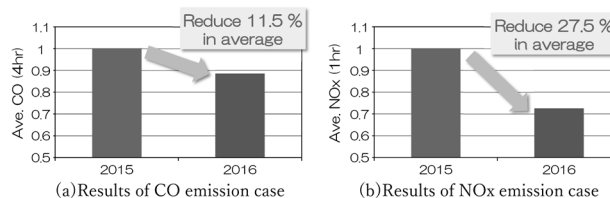


図4 開発システムによるCO, NO<sub>x</sub>抑制効果の評価結果

Fig.4 Results of CO/NO<sub>x</sub> emission control by developed control system

なおCO, NO<sub>x</sub>予測ロジックでは既知の反応、燃焼メカニズムを用いてガス化炉砂層温度や炉内圧力、燃焼炉出口酸素濃度などのプロセス情報から特微量を計算する中間処理を内包することで高精度な予測を実現している。

開発した制御システムを表1に示す施設(流動床式ガス化溶融炉)へ導入し、性能検証を行った。評価期間は2016年9月の一箇月とし、前年同時期の運転データを比較対象とした。なお、NO<sub>x</sub>抑制量は、触媒反応塔入口での分析装置の計測値で評価を行った。

図4に評価期間におけるCOの4時間平均濃度およびNO<sub>x</sub>の1時間平均濃度を前年同時期比として示す。図4から評価期間中のCO, NO<sub>x</sub>濃度は前年同時期に比べそれぞれ11.5%, 27.5%の低減効果が確認された。また評価期間における運転員の手動介入頻度はCOに対しては0回、NO<sub>x</sub>に対しては前年同時期に対して約半減となり、もう一つの目的である手動介入低減効果が得られた。なおNO<sub>x</sub>に関しては開発システムの空気量制御のほか無触媒脱硝制御があり、将来的にこれらの組み合わせにより手動介入頻度0の達成を見込む。

本開発技術によって当社グループの廃棄物焼却プラントの安定稼働を継続し、社会に対する環境負荷低減に貢献していく。

### 4. 熱延巻取り温度制御(CTC)における深層学習温度予測モデルの開発<sup>7)</sup>

本技術は、熱間圧延工程における巻取温度(coiling temperature, CT)の制御に、深層学習による鋼板温度予測モデルを導入することで、熱伝導方程式によるモデルを用いた従来技術と比較して、鋼板温度の制御精度を大幅に向上させたものである。

巻取温度は鋼板の材質特性に大きく影響し、さらなる品質改善には温度の高精度化が不可欠である。また、加工性の良い高強度ハイテン材の開発には、新たな成分設



計や冷却条件への柔軟な対応も要求されている。それに対して、従来の熱伝導方程式によるモデルが新材料の冷却条件に対応できない場合、モデル式の改良から着手するため多大に時間を要し、さらに、プロセスコンピュータでオンライン制御を行うには計算能力が制約となり、モデル簡略化が必要となるため多少精度が犠牲となる問題があった。また、モデルの調整パラメータ決定も操業スタッフの属人的なノウハウになっており、品質の安定化という観点で課題が残っていた。

比較的シンプルな構造のネットワーク構造を用いる深層学習であれば、温度予測時の計算量は少ないため、オンライン制御にも適している。しかしながら、一般的に深層学習などの機械学習手法は、訓練データの無い外挿領域に弱く、これまでは基準となる物理モデルと組み合わせさせて誤差のみを学習して補正する使われ方がほとんどであった。これに対して本技術では、図5に示すようにネットワーク構造に冷却設備におけるプロセスを表現しつつ、相変態の状態を中間特徴量として取り込むとい

う工夫を加えている。また、冷却過程の鋼板温度を表現する仮想温度計という概念を考案することで、画像分野において有効とされるデータ拡張手法を応用し、物理モデルと操業実績の限られたデータから多数の訓練データを生成することで、汎化性能の高い予測モデルの構築を実現した。

本技術によって、図6のように巻取途中で目標温度を変更した場合にも高い制御精度を確保でき、柔軟な冷却条件への対応力が向上した。また、精度改善や新たな材料への対応も、モデル式の改良を必要とせず、操業実績データを学習することで属人性の排除された持続的なモデル改善を積み重ねるようになり、製造の難しい高性能な鋼板の品質安定化や開発期間の短縮にも寄与している。

巻取温度制御以外にも従来の理論や知見に基づくプロセス制御技術だけでは対応の難しかった非定常部での制御に、深層学習やAIモデルを幅広く活用していく。

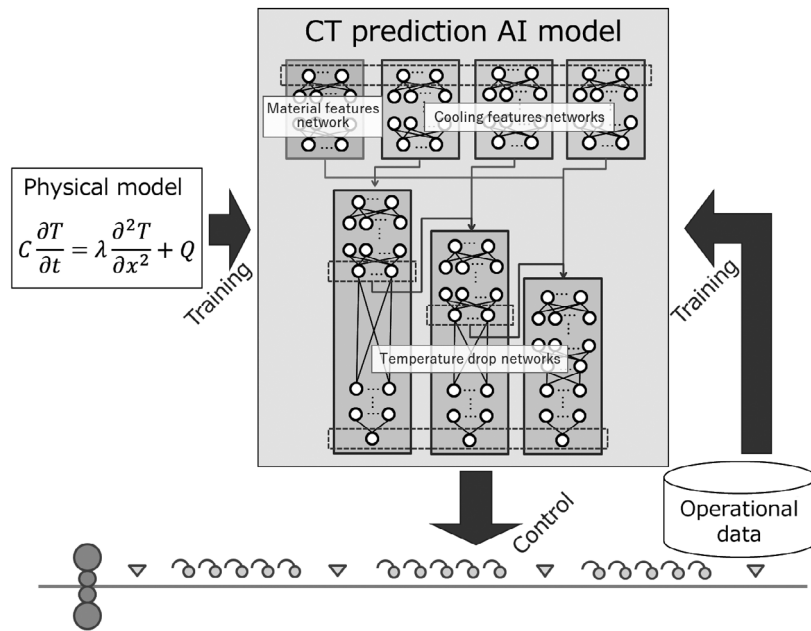


図5 AIを活用した巻取温度制御  
Fig.5 AI-based coiling temperature control

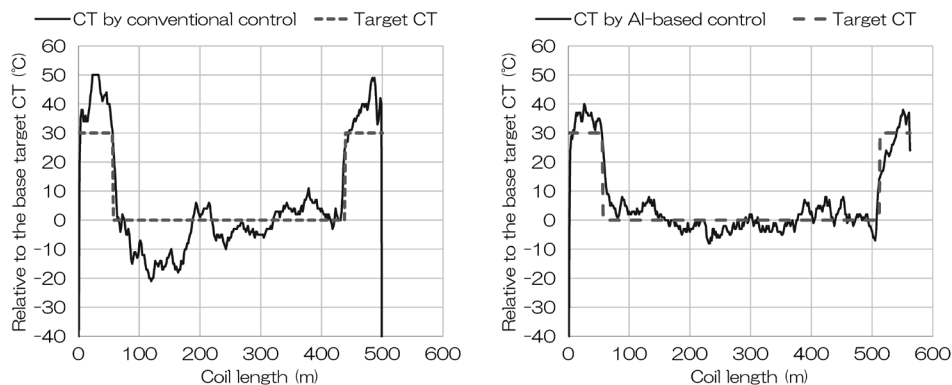


図6 従来制御とAIを活用した制御の比較  
Fig.6 Coiling temperature by using conventional and AI-based control

**むすび**＝本稿では、当社グループの一品一様なモノづくりを支えるプロセス制御技術の概略と具体的な開発事例および将来動向について紹介を行った。紹介した技術はいずれもプロセスの効率化と安定稼働に資する技術であり、お客様への高品質商品の提供を実現しグリーン社会への貢献を果たしている。今後も、変化し続けるお客様ニーズへこたえ続けるとともに来るべきカーボンニュートラル社会におけるものづくり実現にむけて、センシング技術やデータ分析技術など最新の技術を取り込みながら当社グループのプロセス制御技術は進化し続けていく。

#### 参 考 文 献

- 1) 北村章ほか. システム制御情報学会論文誌, 1989, Vol.2, No.5, P.147-154
- 2) 西野都ほか. システム制御情報学会論文誌, 1996, Vol.9, No.11, P.64
- 3) 友近信行ほか.R&D神戸製鋼技報. 2006, Vol.56, No.1, P.64-68
- 4) 経済産業省2012年度版ものづくり白書, 第1部, 第2章, 第3節, (2012), 154
- 5) 加茂和史ほか. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.68, No.2, P.7-11
- 6) 江口徹ほか. 神鋼環境ソリューション技報. 2017. Vol.14, No.1, p19-25
- 7) 逢坂武次ほか. 材料とプロセス. 2022, Vol.35, P.387-390

(解説)



## 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\*<sup>1</sup>・梅田豊裕\*<sup>1</sup>（博士（工学））・岩谷敏治\*<sup>1</sup>（博士（工学））・井筒理人\*<sup>1</sup>

### Decision Support Technology for Controlling Complex Manufacturing (Operations Research Technology)

Hideo IKEDA・Dr. Toyohisa UMEDA・Dr. Toshiharu IWATANI・Rihito IZUTSU

#### 要旨

当社は、複雑な製造プロセスにおける品質、コスト、納期（QCD）を管理するためにオペレーションズリサーチ（OR）に基づいた独自の意思決定支援技術を開発してきた。近年、製造業における意思決定の範囲は、単一の工場からサプライチェーンでつながった企業群へ、またQCDから環境影響に至るまで拡大している。このような複雑なビジネスエコシステムにおいて、新たな価値を創造する基盤として意思決定支援技術あるいはORの重要性が高まっている。本稿では、意思決定支援技術を構成する基盤技術と、KOBELCOの製造プロセスにおける役割を説明するとともに、実際の製造工場向けに開発されたソリューションを通じて、意思決定支援技術が提供する価値と可能性について説明する。

#### Abstract

Kobe Steel has developed its unique decision support technology based on Operations Research (OR) to manage quality, cost, and delivery (QCD) in complex manufacturing processes. In recent years, the scope of decision-making in manufacturing has expanded from single factories to interconnected networks of companies within supply chains, extending to considerations beyond QCD, including environmental impact. In such complex business ecosystems, the importance of decision support technology, or OR, as a foundation for creating new value has grown. This paper explains the foundational technologies that constitute decision support technology and their roles in KOBELCO's manufacturing processes. It also describes the value and possibilities offered by decision support technology through solutions developed for actual manufacturing facilities.

#### 検索用キーワード

意思決定支援技術、オペレーションズリサーチ、数理最適化、シミュレーション、充当最適化、機械加工、カーボンフットプリント

まえがき = 製造業へのコンピュータ活用の歴史において、鉄鋼業はその黎明（れいめい）期から先端を走っており<sup>1)</sup>、当社においても、ホストコンピュータによる生産管理が始まった1970年代から複雑で巨大な製鉄所の操業最適化の取り組みが開始された。当初は製鋼工程や出荷バースなど単一工程の生産計画の効率化を図る取り組みから始まったが、やがて、計算機能力が向上してくると、複数の工程が連結された人間では把握できない複雑な生産計画立案にも展開されるようになり、さらにシミュレーションによって生産性や物流搬送の変化を模擬できるようになると、新たな設備投資における事前評価や生産物流設計にも使われるようになった。

当社は、幅広い分野のお客様に対して技術・製品・サービスを提供しているが、個別の事業で見ると、同業他社と比べ相対的に規模が小さい中で事業展開を行っているケースが多い。そのものづくりは必然的に限られた製造リソースで多くの品種を製造する「多品種混流生産」になりがちであり、複雑な条件のもとでQCD（quality, cost, delivery）を安定してコントロールするためには、データに基づき設備投資や生産物流設計、日々の生産計

画に関わる意思決定を適切に行う必要がある。当社のOR（operations research）技術をベースとした意思決定支援技術（以下、意思決定支援技術（OR技術）と表記する）は、このような背景のもと当社事業モデルと連動して独自の発展を遂げてきた。

さらに、近年、デジタル化とグローバル化の進展により、サプライチェーンを構成する企業群は、より密接かつ複雑に連結されるようになるとともに、データの共有や活用によって自社だけではなしえないビジネスエコシステムとしての「最適化」が志向されるようになってきている。また、何をもって最適かを測る指標群も、従来のQCDに加え、「安全・安心なものづくりへの貢献」や「グリーン社会への貢献」など多軸的になりつつある。

当社の意思決定支援技術（OR技術）は、これら複雑で多様な現在のものづくりにおいて、当社、パートナー、さらにはお客様が連携してものづくりを最適化し、新たな価値を社会に提供していく基盤となりうる技術であり、様々な人の意志決定をデータで支える「ソリューション」として展開を図っている。

本稿では、これらの背景のもと、当社で蓄積してきた

\*1 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター



本技術を構成する要素技術を解説するとともに、実際の事例を通じて、本技術が提供する価値や未来の可能性についても示すこととする。

## 1. 意思決定支援技術（OR技術）の概要

本章では、意思決定支援技術（OR技術）の概要について述べる。

工場では、様々な工程を経て製品が生産されていく。これらの生産プロセスの順序やその中の制約条件を数式やルールで示したものを数理モデルと呼ぶ。OR技術は、数理モデルに基づいて最適な工場生産の条件を導き、あるいは、特定の選択肢を選んだ場合の将来の状態を予測評価することで意思決定を支援する技術であり、前者は数理最適化技術、後者はシミュレーション技術と呼ばれる<sup>2)</sup>。

### 1.1 数理最適化技術

数理最適化技術は、対象となる目的関数を最大化（あるいは最小化）するような決定変数のセットを、与えられた制約条件や決定変数の許容範囲（定義域）の中で求める技術である。

数理最適化技術の中で、決定変数が長さや量などの連続変数で、かつ、目的関数や制約式が直線関係で記述できる場合を「線形計画モデル」と呼び、例えば、複数の原材料の配合割合（決定変数）を、あらかじめ定められた品質条件（定義域）を守りつつ、コスト（目的関数）を最小化するように決定したい場合などに適用される。線形計画モデルの応用範囲は、製品構成、人員配置、在庫計画など幅広く、また、最適解を実用的な時間内で厳密に求めるアルゴリズムも広く研究されている。

いっぽう、当社のような金属産業の製造プロセスにおいて生産計画を立案する際には、ロット編成や設備での処理順序などの主要な決定変数が離散値となるため、その最適化手法は決定変数の組み合わせを探索する「組み合わせ最適化」となる。組み合わせ最適化では、一般に現実的な時間で最適解を探索することは困難であり、そのため、厳密な最適性は保証できないが準最適な組み合わせを効率的に得る探索手法を問題の特徴に合わせて適用する必要がある。また、実際の操業では、品質管理や生産設備に関する様々な制約が存在し、ルールでは記述できても数式による数理モデルとしては記述困難な場合も少なくない。

当社における数理最適化技術の開発では、多品種混流生産など当社のものでつくりの特徴に合わせたモデル化手法や探索手法を構築するとともに、制約判断や目的関数を仮想的な操業モデル、すなわちシミュレータで表現する手法も組み合わせ、現実的かつ表現力の高いアプローチを実現してきた。

図1に示す組立型クランクシャフトの主要部品であるスローの熱処理計画立案<sup>3)</sup>においては、熱処理炉ごとに熱処理時間枠（バッチ枠）を設定したうえで、処理対象である各スローをどのバッチ枠に割り当てるかという組み合わせ最適化を行うことになるが、各スローの大きさの違い、炉内での二段積みの可否、品質面での炉内

位置制約などの複雑な条件を考慮しつつ、バッチ枠への割り当てと炉内での配置を決定する必要がある。このケースでは、バッチ枠ごとのスローの割り当てをまず仮に決定し（図左上）、専用のシミュレータを用いて制約条件を満たす最適な炉内配置を探索（図右）、その結果より熱処理納期遅れとエネルギー原単位の重み和を目的関数として評価した後に（図左下）、再度異なるスロー割り当ての組み合わせを探索する、というサイクルで最適な熱処理計画を決定探索している。

### 1.2 シミュレーション技術

シミュレーション技術は、対象とする問題の決定変数の変化に対する将来や変化を予測し、評価する技術である。例えば、工場設備の新設や変更、生産計画や人員配置の変化に際し、それらの変化によって発生する対象の挙動を数理モデルに基づいて予測し、各種変更案を評価して優劣判断を行うために用いられる。

図2に示す架空の製鋼工場を例として、シミュレーション技術適用の実例を説明する<sup>4)</sup>。この工場は、トビードカーから溶銑（ようせん）を溶銑鍋に移動させる払出場（charging facility）、脱硫設備（De-S）、脱リン設備（De-P）、脱炭設備（De-C）から構成され、溶銑は、上記の順に処理されると共に、溶銑鍋は設備間をクレーン（crane）で搬送される。

シミュレータの構築にあたっては、まず、各設備の動作条件や処理時間をルールベースで記述し、これを決定変数として取り扱う。このうち、動作条件としては、処理順序や各処理における溶銑鍋の状態の条件、クレーン

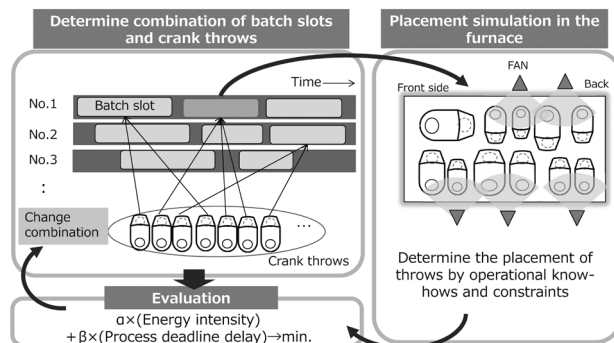


図1 熱処理バッチ編成の最適化の例  
Fig.1 Optimization of batch slots combination

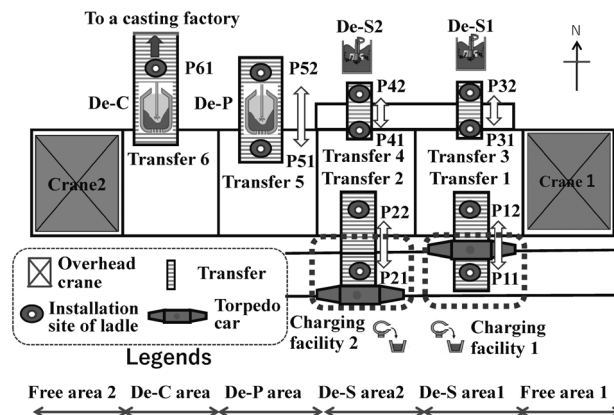


図2 製鋼工場のレイアウト例  
Fig.2 Layout of steel making plant for example study

など搬送設備の制約条件などがあり、また、処理時間は常に一定とは限らず、例えば、溶銑を鍋に移動させる払出時間は、トビードカー1台から供給する場合と2台からの場合の2か所のピークを持つ時間分布となるなど設備によって確率的に変動する場合もある。このような記述モデルにしたがい構築したシミュレータを用いて生産性を示す平均出鋼間隔などの目的変数を算出すると、決定変数として設定した各設備の諸条件が目標を達成しているかどうかを評価でき、未達であれば改善案を検討する、あるいは、複数の案があればその優劣を判断することができるようになる。

シミュレーション技術の適用方法としては、前節の事例のように、最適解探索プロセスの一部として決定変数から目標変数を得るための「演算モデル」として用いる場合と、上述のようにシミュレーション結果を見ながら、目標を達成するための設備増設や操業改善などの検討や判断に用いる場合がある。とくに大規模な新設備建設の場合などは、当初の段階では全ての論点を網羅することはできないが、一定の仮定を置いたシミュレーション結果を関係者と共有し、条件検討とシミュレーション評価を反復的に繰り返しながら検討を進めることで、当社固有のカスタマイズされた生産設備群の適切な設計・運用条件の意思決定を支援することができる。

## 2. 意思決定支援技術（OR技術）の事例

本章では、意思決定支援技術（OR技術）を用いて当社のものづくりにおける業務プロセスやビジネスモデルの変革へとつなげるソリューション事例をトピックスとして示す。

### 2.1 線材・条鋼分野における充当支援システム<sup>5)</sup>

当社では2017年に加古川、神戸の両製鉄所の上工程を加古川製鉄所に集約し、神戸製鉄所（現、加古川製鉄所神戸線条工場）で使用するビレットなどの半製品は、あらかじめ加古川で製造して神戸に搬送し、一定量保持した在庫の中から製造オーダーに引き当てる「在庫補填型」に移行した。それに伴い、統合後の加古川の大ロット生産のもと、必要最小限の半製品在庫で、神戸の特徴である小ロットでの特殊線条の生産に対応する新たな生

産管理技術が必要となった。

図3を用いて今回開発した充当支援システムの概要と充当最適化技術を解説する。加古川で製造されたビレット（図左）は、神戸（図右）に搬送され、半製品在庫として保持された後、製造オーダーに対して引き当てられる（これを充当と呼ぶ）。ビレット在庫は鋼種だけではなく、 casting タイミングや重量、成分、表面品質などの条件によって数本～数十本の「ロット」に分けて管理され、また、各オーダーは充当可能なロットについてそれらの条件に関わる仕様要求を持っている。ビレットは在庫ロットからオーダー要求を満たすように充当されるとともに（図右上）、残在庫の評価結果を基に次のビレット製造が計画されるが（図左下）、加古川から新たにビレットが補充されるには一定の期間が必要となるため、充当組み合わせは、今の在庫で現在のオーダーに対応するだけでなく、残在庫による将来オーダーへの対応力（在庫戦力度と呼ぶ）をも最大化する「組み合わせ最適化問題」となる。

本システムの最適化手法では、「現在オーダーへの充当完了率」と「将来オーダーのための在庫戦力度」の二種類を指標として定義し、「充当完了率」を重視した組み合わせを探索する「広域探索」と、広域探索の結果を初期解として「在庫戦力度」を向上させる「局所探索」を組み合わせるアプローチを取った。実装においては、まず「広域探索」で現在オーダーに対応可能な解を探索した後に、「局所探索」で在庫戦力度を向上させる近傍解を探すことで、制約時間内で実用上十分な解を確保できるようになった。

本システムにより、大ロットでコスト競争力の高い加古川の上工程と、小ロットの神戸の特殊線条生産とをビレット在庫を介して連動させることが可能となり、お客様の個別要求にカスタマイズされた高品質な特殊鋼を安定供給できるようになった。

### 2.2 高砂機械工場生産物流管理システム<sup>6)</sup>

当社の約200台の加工機を持つ高砂機械工場は、受注設計生産による多品種混流生産を特徴とするが、局所的な負荷変動による進捗遅れが課題となっていた。それに対し、リアルタイム進捗管理と、生産リソース配分の最

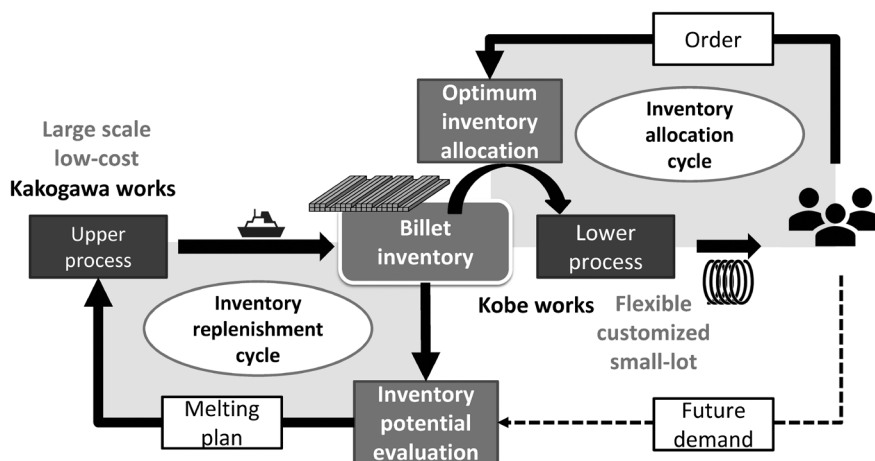


図3 充当支援システム概要  
Fig.3 Overview of inventory allocation guidance system



適化によって、安定生産を実現する生産物流管理システム（iLiss：innovation of logistics and intelligent scheduling system）を開発した。図4に示す本システムは、日程計画システム（iLiss-S：図左）と物流管理システム（iLiss-L：図右）から構成され、日程計画システムは、中長期（1箇月先以降）と短期（1箇月以内）に分かれた生産計画立案を、物流管理システムは、日程計画に基づく現場への作業指示と作業実績管理を行う。ここでは、日程計画システムのロジックについて解説する。

本日程計画システムは、まず中長期計画にて負荷調整を行い、その後、調整された負荷に対して短期計画を立案することで負荷変動に対応する。すなわち、中長期計画では、納期遵守を条件として、設備・作業者に作業を割り付け、能力を超過して割り付けられた作業（超過作業）を外注化候補として抽出し、外注加工パートナーとの分担計画を立案する。短期計画では、外注化判断後に残った内作作業について、設備・作業者の能力制約に従い実行可能な計画を立案する。

中長期計画で「超過作業」を抽出するシミュレーションロジックは下記の通りである。

- ①作業選択：未割り付けで、かつ、その部品の前作業が割り付け済みの作業から、納期余裕の最も小さい作業を優先的に選択する。
- ②作業の仮割り付け：選択した作業を、まず設備・作業能力の制約内で仮割り付けする。設備は利用可能な中で最も早く割り付けられるものを、作業者は作業できる設備数が少ない順に選択する。
- ③超過割り付け：仮割り付けした作業の終了時刻が最遅終了時刻（残り工程を標準作業時間で実施したとして納期に間に合う時刻）を超えない場合はそのまま確定する。超える場合は、最遅終了時刻に間に合う設備・作業者に、能力制約を無視し、「超過作業」として割り付けする。
- ④その後、全ての作業が割り付けられるまで、上記①～③を繰り返す。

このように、中長期計画の段階で「超過作業」を適切に抽出することで、計画の初期段階から外注化の調整・判断ができるようになった。さらに、物流管理システムによる全体の進捗状況の把握と合わせ、外注加工パートナーと効率的に連携したものづくりによって、受注設計生産による負荷変動の大きな多品種混流生産に対応できるようになった。

### 2.3 製品別CFP算出モデル

世界各国で取り組み強化が進むカーボンニュートラルに向け、当社においても、金属素材事業を想定した製品別CO<sub>2</sub>排出量（CFP：carbon footprint of production）を算出・分析するモデルを検討中である。これは、製品別原価管理モデルを拡張してCO<sub>2</sub>排出量として算出するものであり、従来のQCDに加え、将来的には環境負荷という観点でも個別製品を評価可能とすることを目的としている。

当社で検討中のCFP算出モデルを図5に示す。計算範囲としては、当社製品の製造から製品をお客様にお届けするまでとし、具体的には、原材料の調達、エネルギーの調達・使用、消耗品や副資材類の購入、廃棄物処理、外注加工、調達および製品納入時の輸送などを対象とした。

本モデルでは、四種類の入力情報（図左）を用いて計算することを想定する。

- ①エネルギー使用量：電力、LNG、灯油など、期間内に工場で利用したエネルギーの使用量。設備や部門単位で算出する。
- ②購買・発注情報：原材料、設備や部門別の消耗品類の購入、製品ごとの外注加工先、輸送先、輸送手段などの情報。事前にグルーピングした上で④のCO<sub>2</sub>排出係数とひもづける。
- ③製造中のマテリアルフロー：期間内に生産した製品の製造実績から素材の分割やりサイクルなどの流れと工程ごとの処理時間や重量のデータ。製品仕様と製造工程別に集計する。
- ④CO<sub>2</sub>排出係数：①②で設定した各項目の物流や設

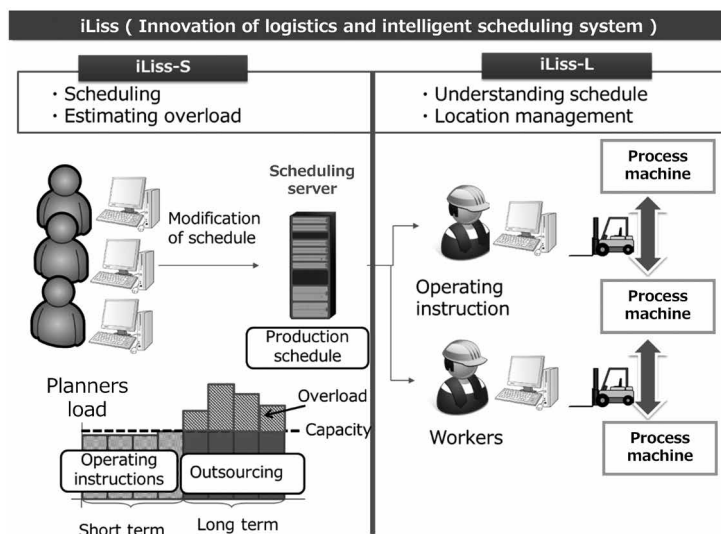


図4 iLissの概要  
Fig.4 Overview of iLiss



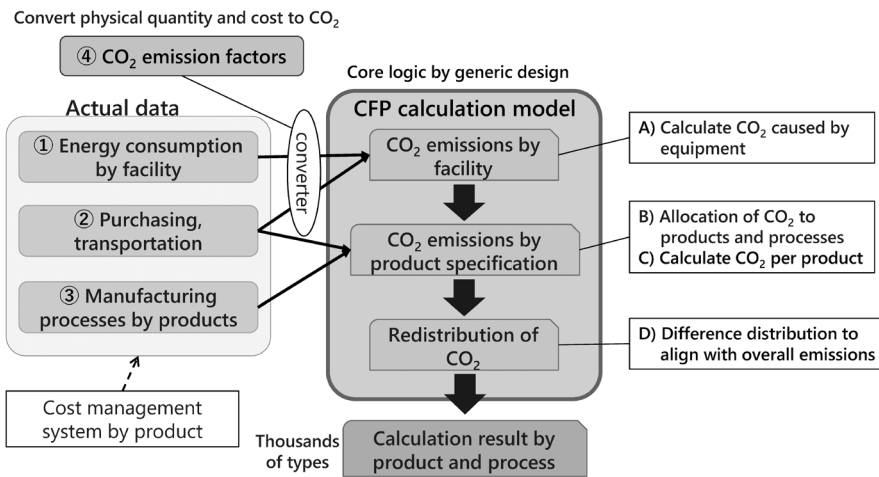


図5 CFP計算モデル  
Fig.5 Calculation model of CFP

備の情報を、CO<sub>2</sub>排出量に変換するための係数テーブル。産業技術総合研究所にて開発されたIDEAなど、標準的に利用される公開情報を使用する。

上記の入力情報を用い、下記の手順（図右）により算出を行う。まず、A) 設備別のCO<sub>2</sub>排出量の合計を算出し、B) それを各製品に対して使用実績に基づき配賦する。C) それにマテリアルフローによる金属素材あたりのCO<sub>2</sub>排出量を組み合わせて製品別CO<sub>2</sub>排出量を計算し、D) 必要に応じて再配賦して拠点全体との整合性を担保する。

このような算出モデルを用い、製品別CO<sub>2</sub>排出量をデータに基づき合理的に計算することができるようになると、まず、企業単体として、CO<sub>2</sub>排出量を基準に設備・工程設計・製品構成の検討・評価が可能となるとともに、サプライチェーン上の企業間でのデータ連携を通じ、製品製造プロセス全体としても評価が可能となる。このような算出モデルと最適化やシミュレーションなどの意思決定支援技術（OR技術）を組み合わせることにより、社会全体としてのCO<sub>2</sub>排出量削減にも貢献していけると考える。

**むすび** = 当社では、40年以上前から「ものづくり」においてOR技術をベースとした意思決定支援技術を活用してきた。当初は、単一プロセスのコスト、納期達成率などの単純指標の最適化、シミュレーションであったが、それが、複数プロセスに広がり工場全体の様々な指標を対象とし、あるいは社外のステークホルダも考慮した技

術に進展してきた。

20世紀までの「ものづくり」では、自社のQCDを考慮するだけで十分であったが、近年はESGを考慮した経営が必要となってきている。これらの課題は、自社だけではなく、当社のパートナーやお客様を含めたサプライチェーン全体で対応する必要性も生じてくるなど、意思決定支援技術（OR技術）で解決すべき課題はますます複雑になってきつつある。

いっぽう、本技術と関わるICT周辺技術では、従来では取得できなかった操業状態を詳細かつリアルタイムに取得できるIoT技術や、従来解けなかった複雑な問題を短時間で解ける量子コンピュータ、サプライチェーン上の複数の企業が適正に情報を共有するためのブロックチェーン技術など、多くの技術進展も生まれている。

このような状況変化に対し、当社では意思決定支援技術（OR技術）を様々な新技術と組み合わせ、より複雑で高度な社会課題に対して解決に取り組んでいきたいと考える。そして、それらを通じた当社の「ものづくり」の新たな価値を社会に提供する「ソリューション」としても具体化を図っていく所存である。

参 考 文 献

- 1) 井上義祐. 計測と制御. 1968, Vol.7 No.2 p.97-106.
- 2) 森戸晋ほか. オペレーションズリサーチ. 1998, Vol.43 No.2 P81-87.
- 3) 梅田豊裕ほか. 自動制御連合講演会. 2019, Vol.62 1D1-03.
- 4) 岩谷敏治ほか. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.68, No.2, p.29-35.
- 5) 白坂貴成ほか. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.2, p.73-78.
- 6) 井筒理人ほか. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.68, No.2, p.3-6.

(解説)



# 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\*<sup>1</sup>・友近信行\*<sup>1</sup>(博士(工学))・橋崎博司\*<sup>1</sup>(博士(工学))

## Application Technologies of Data-driven Science and AI that Evolve Alongside Humans

Ryo KATAYAMA・Dr. Nobuyuki TOMOCHIKA・Dr. Hiroshi NARAZAKI

### 要旨

高温かつ過酷な環境で精緻なものづくりを必要とする鉄鋼業、金属加工業では、古くから高度なモデルベース制御やセンシング技術、通信技術の製造プロセスへの適用に取り組んできた。そこに近年の情報通信技術の発展とともに大量の実績データから学習し高度な推論を可能とするデータ駆動科学の実践的活用が進んだことで物理や操業知を学びとり、人に提示することが可能なAIの仕組みがものづくり現場にも適用され始めた。本稿では、とくに近年変化の目覚ましいデータ駆動科学・AI応用技術の当社での応用と、それらを通じて得た人とAIとの協調的な関係について述べる。

### Abstract

The steel and metal processing industries, which demand precision manufacturing in harsh, high-temperature environments, have a rich history of actively exploring advanced model-based control, sensing technology, and communication technology. In recent years, the rapid progress in information and communication technology has enabled the learning of extensive performance data and has advanced inference capability. This has paved the way for the practical implementation of data-driven science, contributing to the development of AI systems capable of accumulating both physical and operational knowledge and presenting it to individuals. As a result, these AI mechanisms are now making their way into the manufacturing field. This paper delves into the recent and remarkable transformations in the use of data-driven science and AI technologies at Kobe Steel, shedding light on the collaborative relationship that has evolved between individuals and AI through these applications.

### 検索用キーワード

AI, データサイエンス, データ駆動科学, ICT応用

まえがき = 高温かつ過酷な環境で精緻なものづくりを必要とする鉄鋼業、金属加工業では、古くから圧延プロセス制御などを中心に生産ラインの自動制御に取り組んできた。当社においても例えば塑性加工の制御に必要な高度なモデルベース制御やセンシング技術、通信技術の製造プロセスへの適用に取り組んできた。

情報通信技術の発展とともに大量のデータ取得が可能になり、その活用はモデルベース制御から学習制御へと発展するとともに、近年では物理モデルのみに依らず操業者の高度な暗黙知の領域をデータとして取り込むことも可能となった。<sup>1)</sup> 大量の実績データから学習し高度な推論を可能とするデータ駆動科学の実践的活用が進み、人が積み上げた事前知識を組み込んだデータ駆動科学モデルは開発や設計といったデータの少ない領域にも適用され始めた。これら取り組みで実現された「データ駆動科学モデルにインプットとアウトプットの仕組みと事前知識を導入する仕組みとを備えたシステムおよび学習した結果得られるモデル」をAIとすると、AIは産業課題に応じて多様な形で実装され、物理や操業知を学びとり、人に提示することが可能な仕組みとしてもものづくり現場を支えるようになった。本稿では、当社における情報通信技術の産業応用からとくに近年変化の目覚まし

いデータ駆動科学・AI応用技術への取り組みの発展とその考え方、および当社が目指す人とAIの相互成長の実現に向けた最新の取り組みについて紹介する。

### 1. 当社におけるデータ駆動科学・AI応用技術の目指す姿

当社は鉄鋼、アルミ、銅などの素材系事業に加え、圧縮機や産業機械などの機械系事業、電力事業といった多種多様な事業・製品分野において、現場での緻密なものづくりからお客様のサプライチェーンへのタイムリーな製品供給までを担っており、自動制御とともに人による操業知が重要な役割を果たしてきた。可能な限りの自動化は大前提だが、そうしたものづくりの現場において、当社では、データ駆動科学・AI応用技術分野の果たすべき役割とは、図1に描いた「物理モデルの発展のみならず、人の操業知からも学習し、モデル化技術とあいまってさらに高度な操業につなげていく、いわば、人とAI・システムが相互に成長する未来」を実現すること、と捉えている。「人とAIの相互成長」との表現には、二つの含意がある。一つは、AIは人が明らかにしたより良い操業知を急速に学習し、人がより付加価値の高い業務に取り組むことを可能にするということ。もう一つは

\*1 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター

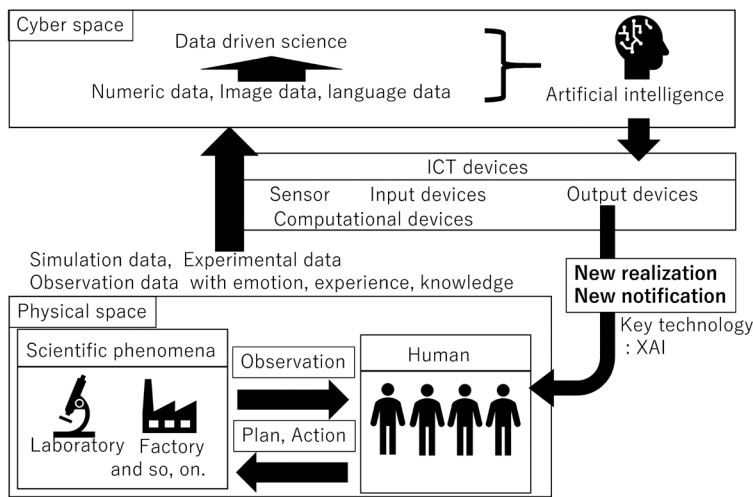


図1 人とAIがデータを通じて相互成長する仕組み  
 Fig.1 Human-AI interaction through various data

人の適応力・創造力の領域に今しばらくAIはおよばないと考えられるが、それをアシスト、拡張する形で人とAIの相互的な成長が続くであろうということである。こうした人とAIの相互成長の先に、人と技術がつながる未来へのソリューションを提供し、安全・安心なまちづくり・ものづくりへの貢献を果たしていきたい。

## 2. データ駆動科学・AI応用技術につながるICT活用の歴史

情報通信技術の発展に従い、表1に示すように当社においてもその活用の中心は変遷してきた。日本の鉄鋼業が世界の中でも大きな役割を果たしていた1980年代から1990年頃においては、鉄鋼業全体として効率よく大量の鉄を作るために合理化を図る武器として黎明（れいめい）期のデジタル技術をプロセス制御に適用し、実応用での成果を蓄積した<sup>2)</sup>。

1990年代から2000年代にかけては新興国での鉄鋼生産量が増大し、日本の鉄鋼業は高級鋼を含む多品種の生産と開発の効率化の推進に力を注いできた。様々な業種で製品の作り分けが進んだことで、自動化や効率化は極めて難しくなっていき、結果として製造オペレータに高度な技能と操業知が蓄積されることになっていった。

いっぽう、同時期の1990年代から2000年代にかけてインターネットの時代が到来したことで、それまではプロセスコンピュータの中に閉じていたデータを様々なデータとつなげることが可能となり<sup>3)</sup>、さらに、2000年代から2010年代にかけては、情報記録媒体の大容量化や

携帯電話の普及を含む無線通信技術の発展の恩恵を受け、大量のデータが操業の自動化に用いられるようになった。<sup>4),5)</sup> 情報基盤の発展により、工場の生産を様々なモデル化して高難度の自動化課題を解決する取り組みが広がり、ごみ焼却炉のように純粋な物理モデルでは表現の難しいプラントにおいて、操業データを用いて構築した多変数モデル予測制御を適用して自動化を実現した事例も生み出されるようになった<sup>6)</sup>。

また、過酷な金属素材の製造プロセスにおいては、データを獲得するハードウェアの応用力が競争力となる場面も多く、悪環境下での計測技術<sup>7)</sup>に無線通信技術を活用し、熱処理炉内のデータを取得する<sup>8)</sup>など、プロセスと人のコミュニケーションを支えるセンシング技術の発展もまたデジタル技術の発展とともに進化させてきた。

2010年以降、とくに過去10年はICT基盤を支える通信速度、情報記録密度、計算機能力といったハードとそれらに支えられるクラウドシステムなどの基盤がコモディティ化したこと<sup>9)</sup>、当社の産業機械製品<sup>10)</sup>や溶接システム製品<sup>11)</sup>のようものづくりの現場でのデータ活用を支援する製品が普及し、当社も含む各企業はビッグデータとデータ駆動科学の活用で競争の焦点を移し始めた。こうして、当社においてプロセス制御やオペレーションズリサーチで脈々と培ってきた機械学習や統計モデルなどデータ駆動科学を応用し、データに隠された操業知を読み取り、人と相互に発展するAIを開発する取り組みが始まった。

表1 ICT応用と当社モノづくりの変遷  
 Table 1 Changes in ICT application and our manufacturing

era	1980-1990	1990-2000	2000-2010	2010-2020
Key word of ICT	Computer communications Internet	Mobile phone Digital camera	Broadband	Smart phone Cloud system Bigdata, deep learning
Key word of manufacturing at our company	Mass production	High quality	High quality and multi-product low-volume manufacturing	Diversified added-value product
ICT applied to our manufacturing and product	Process computer	IT (Information technology) Signal processing Wireless communications	Data cooperation system Image processing	IoT, AI Analysis bigdata



### 3. データ駆動科学とドメイン知識を融合したAI

データ駆動科学の応用が発展するにつれ、物理モデルのように数式で表現できる現象にデータ駆動科学を適用することに加え、人に蓄えられた経験をデータ駆動科学モデルに取り込むことが可能となった。こうしたデータ駆動科学に塑性加工や流熱予測などの科学分野のドメイン知識を応用し、人が明らかにしたより良いやり方を学ぶ仕組みをもつAIについて、工場の操業と材料開発への適用事例から特徴を解説する。実際のプラントにおいて、各種センサの計測値や人が入力したデータは様々な現実から生まれる誤差要因を含み、かつ工場やプラントを多様な条件で操業する場合はデータの量も十分に確保できるとは限らないため、当社では様々な物理モデルを駆使して物理的な正しさを一定量担保しつつ、人の経験や物理則、すなわちドメイン知識を埋め込めるように工夫したデータ駆動型のモデルをもちいて物理と実際の操業の間を埋める技術を培ってきた。図2にはその一例を示している。図2下部に示すように、物理モデルで表現が難しい現実の揺らぎをデータ駆動型のモデルで合わせこみ、データ駆動型モデルに対しては未学習のデータ領域の安定性を物理モデルで確保することで、それぞれのモデルの長所を活かす。AIに搭載するモデルにおいて、物理モデルとデータ駆動型モデルのどちらに比重を置くかは対象を良く知る人のノウハウの再現しやすさから決定する。そうして得られたモデルと人との間に人が解釈しやすいアウトプットを備えることで、AIの出力を通じて人は多次元のデータを理解することができ、人が持つノウハウや経験と照合して、AIの出力と現実に行き違っていることの整合性や妥当性を評価することができる。

例えば、製鋼溶鋼温度予測技術の開発においては、人が操業の経験を上手く利用して温度を推定することに着目し、物理モデルから得られる温度予測に対し、操業実績データ間のデータ空間上の距離を利用して定義した操業の類似度に従って温度のばらつき要因の影響度に重みを付けることで、操業者の過去の知見と一致しやすかつ精度の高い温度予測技術を実現している<sup>12)</sup>。

材料設計に情報科学を活用する取り組みである

Materials IntegrationあるいはMaterials Informatics(以後MI)においても、蓄積された材料実験のデータベースから特性を予測する機械学習モデルを用いることにより、工場の操業へのデータ駆動科学の応用と同じく、物理モデルでは難しかった特性の予測や、所望の特性を得るためのプロセス条件を探索するAI、部品性能の予測モデルと素材特性の予測モデルをつなげたマルチスケールの予測モデルが構築されている。ただし、材料開発で用いるデータは、開発する材料の種類によっては実験機会が少なく、データの取得目的が実験ごとに多様化しており、工場の操業データと異なり少量かつ複雑なデータとなっている。また、実験条件やデータの取得項目が多岐にわたるため、データベースを作る際にテーブルの形を事前に統一することが難しく、データ駆動科学の応用が難しい分野の一つである。

そこで、当社では研究員が多様な目的で蓄積したデータを紐づけて保存し、MIに活用しやすい形に成形するデータベースシステムの開発から着手し、これまで研究員が個別に蓄積してきたデータを縦横に組み合わせる活用する開発用プラットフォームを構築し、DataLabと名前を付けて運用している。通常のデータベースとは異なり、厳密な事前定義を要しないことがDataLabの最大の特長であり、実験データの枝分かれや組み換えなどの複雑なデータの関係性に対応しながら分析用のデータを構築することができる。溶接材料を対象とした取り組みでは、実験データから得た機械学習モデルを材料開発に活用して、相反する性能を両立させた事例を報告している<sup>13)</sup>。

データ駆動型のモデル構築には先に述べた物理的知見とデータの特徴を融合させてモデルを構築する工夫として加法モデルやガウス過程回帰を用いたことが報告されているが、それに加えてデータとして取得できていない条件や物理現象を考慮しながら、データ駆動型モデルが提唱した材料を専門家が取捨選択することにより、効率よく試作を進めて従来材料の性能を向上することができる<sup>13)</sup>。

当社のMIの取り組みで構築した人とAIとの相補的な関係は、少量かつ複雑なデータを用いるモデル化の難しい研究、開発、設計といった領域においても計算科学や

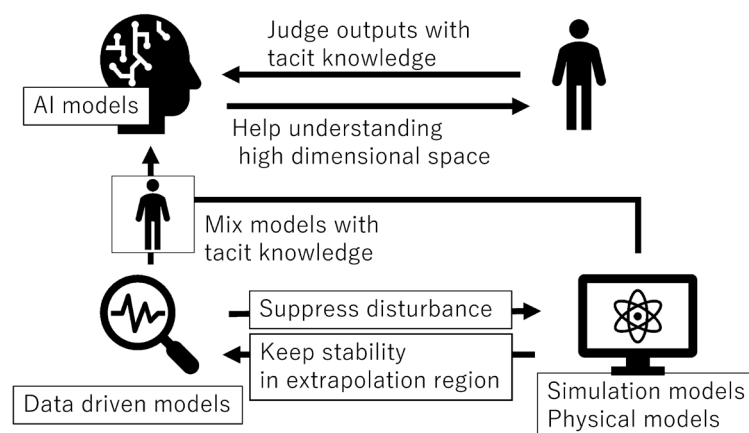


図2 人とAIの相補的な関係  
Fig.2 Complementary relation between AI and human

データ駆動科学を応用して新たな知見にたどり着くための一つの解であり、人とAIとが相互的に成長するための基本であると考えている。

#### 4. 次世代のものづくりを支える人とAIの相互理解

CCDカメラやCMOSカメラの発展と深層学習の登場により、画像データの活用が飛躍的に発展し、ものづくりの現場における官能評価の置き換えにも用いられるようになった。官能評価におけるデータ駆動科学ベースのモデル、とくに深層学習を用いた画像の判別モデルはこれまで述べてきた物理的背景のあるモデルとは異なり、厳密に従うべき法則はなく、出力も単純で、ツール類が豊富なこともあり非専門家でもモデルの評価が容易なことから適用範囲が広がったと考えている。昨今では深層学習を基礎とした生成系AIにより、人の指示に従ってAIがデジタルアートを作成するなど、データ駆動科学と人の関係性はより協調的な方向に変わりつつある。

しかし、官能評価値を用いて行う官能検査においてAIと人が協調的な関係性を得るには、判定結果の良否に加えて判定結果の乖離（かいり）に対する説明性が強く求められるため、一般的な画像AIの活用とは異なりAIの挙動を人が理解あるいは制御する技術が必要となる。そこで注目したのがAIに対して理解を深める技術として急速に発展しているXAI（eXplainable AI）に関する技術である。

世の中のXAIの取り組みには大きく分けて説明性の高いモデルを高精度化する取り組みと、説明性の低いモデルを理解する技術を作る取り組みがあるが、当社においては深層学習を利用した官能評価代替のための技術開発を進めていたこともあり、深層学習を代表する説明性の低いAIのモデルを理解する技術の応用に取り組んでいる。

当社で取り組んでいる説明性の低いAIモデルを理解する取り組みとしては、図3に示すように人がAIの出力を直接確認し、所望のふるまいをするようにAIの損失関数やハイパーパラメータを制御するCase1に該当する方法と、構築したAIが出力した結果を説明するための説明用AIを通じ、学習データを制御して説明用AIの

出力の変化を観察して理解するCase2に該当する方法とがある。

説明用AIを通じて学習データを制御することでAIのふるまいを理解した例としては、溶接自動化のための画像認識技術の開発での事例がある。溶接のトーチと母材が溶け合う領域である溶融池の特徴を認識するAIを構築したが、特定のデータで学習した場合に精度が極端に悪くなるという課題に直面した。この課題を解決するため、次の手順で深層学習モデルの挙動を理解する技術を開発した。まず、U-netのような、Encoder-Decoder構造を持つ深層学習モデルが注目している領域を可視化する手法（説明用のAI）を介して複数の注視領域マップ画像を作成する。ついで作成したマップ画像の一部を順次欠落させてAIの性能変化を算出してマップの重要度の順位付けを行う。この順位をもって画像のどの領域が隠されたかに応じてモデルの精度が変わる様子を追跡確認し、対話的にモデルが重要視している個所を理解することで精度改善を行った<sup>14)</sup>。この手法の手順は人同士で検査結果の技術伝承を行っていく際に、どこに注目するか、どういった見方をするかについて画像を指し示しながら伝えることと類似している。いわば、データを介して人とAIとの間で「意思の伝達」を行いながら開発をすすめていくこと、ともいえる。

後者のAIを構築する際に用いる損失関数を直接制御して意図どおりのAIを作る取り組みの事例としては、見逃しを制御するAIの構築方法を検討した事例がある。ある官能的基準により良品と不良品を判別する際、深層学習の判別モデルでは全体的に精度が良くなるように学習が進むというのが一般論である。しかし、当社のように、見逃しが下流の工程やお客様に悪影響を及ぼすことが分かっている場合には、見逃しには一定の要求仕様が定められていることが多く、例えばAIの見逃しをX%以下に制約した状態で不良品を良品としてしまう過検出を最小化したいという要求がある。そこで、当社では機械学習モデルのハイパーパラメータに確信度閾値（いきち）そのものを含めて損失関数を最適化するという手法を開発し、一般的な精度評価を元に調整されたモデルよりも制約条件下での精度が高いモデル構築が可能であることを確認している<sup>15)</sup>。本手法はまだ単純なモデルを対

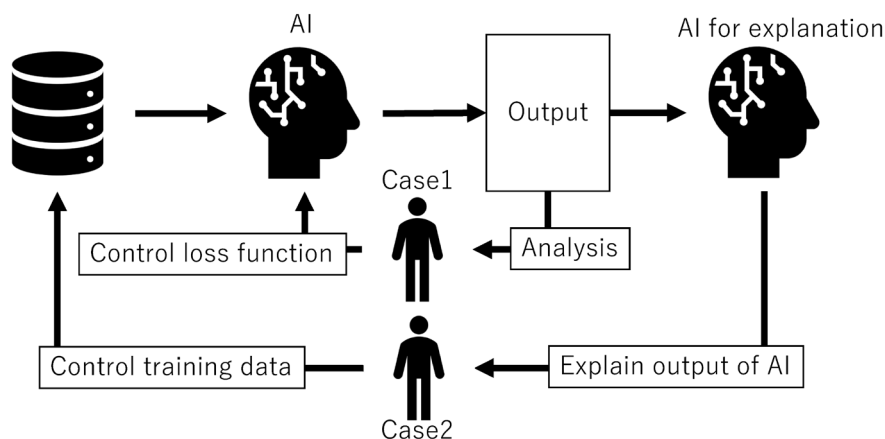


図3 説明性の高いAIの作り方  
Fig.3 How to create well explainable AI

象としたもので、実験的な取り組みではあるものの応用範囲は非常に広いと考える。

人依存のものづくりにおいてデータ駆動科学の適用を拡大していくためには、この人とモデルの相互理解やモデルへの意思の埋め込みが不可欠であり、今後もXAIは産業界を中心に発展を続けると考えられる。当社はXAIについての知見はまだ少なく、獲得すべき技術の方向性については明確な答えは定められていないものの、今後もものづくりにデータ駆動科学を応用していくために不可欠な技術として注目を続け、ものづくり現場に応用する力を高めていく。

## 5. データ駆動科学とAI応用の今後

このように、取得できるデータの種類が増え、データ駆動科学そのものが発展するに従い、人の暗黙知領域や言語化の難しい領域や物理モデルを作ることが難しい領域でのモデル化が可能になり、当社においても様々なものがデータ駆動科学のモデルでつながり始めた。しかし、大規模な生成系AIのサービスが提供され始めるなど、データ駆動科学とAIの技術の進化と拡大は目覚ましく、数年前には一部の研究者にしかできなかったことが、今やWeb上のアプリケーションにデータを与えるだけで非専門家にも実現できる世の中になった。今後もAIが広く産業のすそ野に広がっていくことは間違いなく、従来からの取り組みであるプロセスモデルやMIでのAI応用にて技術の深化を続けながらも、人材育成やデータ活用のための基盤を整備し、コア技術としてきたデータ駆動科学とAIの応用に関する知識や経験を多くの人材で共有することでデータ駆動科学を活用する総力を高めていく。

むすび=今後カーボンニュートラルに代表される新たな価値基準が次々と生まれる中で、モノの品質はその特性だけでなく、原料や作り方といった付加的な情報にまでおよぶ可能性があり、これまで以上にモノと情報を正確にひもづける必要がある。加えて、人に依存し、労働人口の減少により技術伝承が難しくなると言われる日本のものづくりにおいては、人とつながり始めたデータ駆動科学の応用力がいっそう重要性を増すと考える。いっばうで、広範かつ複雑な成長を見せる産業インフラでの経験不足や活用を推進する人材不足に悩む企業も多い。当社としては人とデータのかげ合わせで新たな価値を生む力、産業分野における「人とAIの相互成長」を一つのテーマとしながら、多様な産業ドメインに対する技術が集まる当社において培った技術を社会に提供し、次の100年も安全・安心で豊かな社会を実現するための日本のものづくり力の下支えに貢献していきたい。

## 参 考 文 献

- 1) 加茂和史ほか. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.68, No.2, p.7-11.
- 2) 北村 章ほか. 鉄と鋼. Vol.100 (2014), No.12.
- 3) 斉藤森生ほか. 計測と制御. Vol.29, No.6, p.535.
- 4) 薦田憲久ほか. IEEJ Journal. Vol.126, No.9, 2006, p.594.
- 5) 貝原保男ほか. R&D神戸製鋼技報. 2006, Vol.56, No.1, p.8-13.
- 6) 友近信行ほか. R&D神戸製鋼技報. 2006, Vol.56, No.1, p.64-68.
- 7) 伊勢居良仁ほか. 鉄と鋼. Vol.109, No.6, p.594-598.
- 8) 迫田尚和ほか. R&D神戸製鋼技報. 2014, Vol.64, No.1, p.99.
- 9) 総務省. 令和4年度版 情報通信白書.
- 10) 松本泰治ほか. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.67, No.2, p.97-100.
- 11) 小池 武ほか. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.68, No.2, p.59-62.
- 12) 友近信行ほか. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.68, No.2, p.36-40.
- 13) 谷口元一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2023, Vol.72, No.1, p.91.
- 14) 吉本達也ほか. 第25回情報論的学習理論ワークショップ. 講演概要. 1-016, 2022-11-21-23.  
<https://ibisml.org/ibis2022/posters/>
- 15) 田中哲夫ほか. Vision Engineering Workshop. 2022.12-8-9, 講演一覧 IS1-10.



(解説)



## 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\*<sup>1</sup>

### Servicing Technology Contributing to the Realization of Business Model Transformation

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。サービス化技術とは、当社内アフターサービスビジネスDX推進結果から生まれた技術であり、お客様を含めた関係ステークホルダー間のコミュニケーションやコラボレーションを、ICTで円滑かつ効率的に行えるようにプラットフォーム化し、新しいビジネスモデルとしてのエコシステム構築をめざす技術である。

#### Abstract

Kobe Steel designs, manufactures, and sells custom-made, non-general-purpose industrial machinery and plant equipment. These products are typically used in our customers' manufacturing sites for 25 to 50 years. Even after the sale, Kobe Steel has continued to provide support through various technology consultations and cooperative assistance in all aspects of its customers' manufacturing endeavors, ranging from equipment inspection and parts-replacement to overhauling, under the framework of after-sales services. The servicing technology results from advancing After-Sales Service Business DX within the company. It aims to create a platform that facilitates smooth and efficient communication and collaboration among stakeholders, including customers, using ICT to establish an ecosystem as a new business model.

#### 検索用キーワード

産業機械、設備プラント、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 = 「サービス化技術」の誕生経緯

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や設備プラント（以後、「生産財」と呼ぶ）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。

製品群が一品一様な仕様であるが故、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の分解検査・補修といった「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らせていただいていた。

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にくく、一品一様で人に依存した属人性が強い形態であった。

モノからコトへのパラダイムシフトが進む中、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（アフターサービス）を

融合した事業構造への変革」を実現し、お客様のご要望に応え続けていくためには、「アフターサービスビジネスのDX推進」が急務となった。

サービス化技術とは、当社内でのアフターサービスビジネスのDX推進結果から生まれた新しい技術である。

#### 1. 「サービス化技術」の構成要素（技術の源泉とした当社グループ内の「組織的能力と知恵」）

サービス化技術は当社内でのアフターサービスビジネスのDX推進結果から生まれた技術であり、機械エンジニアリング企業である当社が、非汎用産業機械／設備プラント群をグローバルにビジネス展開する中で蓄積してきた以下の三つの「組織的能力や知恵」(ケイパビリティ)を、ICTを活用しビジネスシステム化したものである。

一つ目は、当社製品群のお客様への技術サポートのための、「全世界規模でのサービス工場／サービスエンジニアの育成管理手法」、二つ目は100年強のモノづくりの中で代々現場の中で人を介して受け継がれてきた「サービス業務遂行ノウハウや品質管理手法」、三つ目はアフターサービスを通じたお客様との価値共創により開発してきた、お客様設備機械を、できるだけ永く安定的にお使いいただくための「設備機械メンテナンス手法」である。これらを、ICTを活用してビジネスシステム化／

\*<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

プラットフォーム群化したものがサービス化技術である。

以下、各構成要素について概説する。

## 2. サービス化技術①：「サービス工場／サービスエンジニアの育成管理手法」プラットフォーム

当社建設機械事業では、ショベルやクレーンといった建設機械を、全世界の様々な建設工事現場、土木工事現場、鉱山・採石場に送り出している。とくに、建設機械は経済成長途上にある新興国での社会インフラ建設で重要な役割を果たしている。そこでは、日本とは異なる使われ方や想定以上の稼働時間にて使われることが多く、新興国の経済発展のスピードに対応するため、機械トラブル発生時には迅速かつ適切な技術サポートが求められる。そのため、当社建設機械をメンテナンスできるサービス工場やサービスエンジニアを早期に育成組織化し、技術サポート網を構築することが重要となる。

建設機械業界は、技術サポート網のグローバルな構築展開ノウハウを有する業界の一つとも言え、各社IoT化した建設機械からのデータも活用しながら、これまでノウハウ的に蓄積してきた全世界規模でのサービス工場とサービスエンジニアの育成管理手法のICTプラットフォーム化を推進してきた。

当社建設機械事業においても、オンライン（eラーニング形式）と各エリア拠点トレーニングセンターでの対面形式実習トレーニングを融合した育成システムの開発を2016年より着手した。サービスエンジニア候補の業務従事経験や保有スキルにより、パーソナルトレーニングメニューとして自動生成し段階的に育成していくICT手法を確立した。各市場参入エリアの限られたトレーナ人材でも効率のかつ効果的にサービス工場／サービスエンジニアの育成管理を推進可能な仕組み（図1）として、2018年より全世界規模で運用を開始している。

また当社は、建設機械業界競合他社と異なりコングロマリット（複合経営）企業としての特徴を活かし、建設機械事業で実用化したICTプラットフォームを、当社内非汎用産業機械やプラント建設事業のアフターサービスビジネスにも展開可能な形に標準ツール化し横展開を進めている。

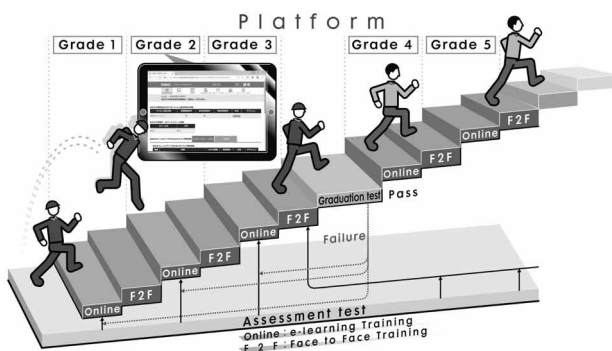


図1 「サービス工場／サービスエンジニアの育成管理手法」プラットフォーム

Fig.1 Service engineer training system

## 3. サービス化技術②：「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

「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失を意味する。それ故に、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、もしイレギュラー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、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カとしての責務であり、長年日本のメカでは「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させた後、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たせ、お客様の設備メンテナンス現場に派遣し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ノウハウの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での「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、メカ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業務プロセスと業務内容を構成しなおした。サービス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ICTプラットフォームとして実現した（図2）。

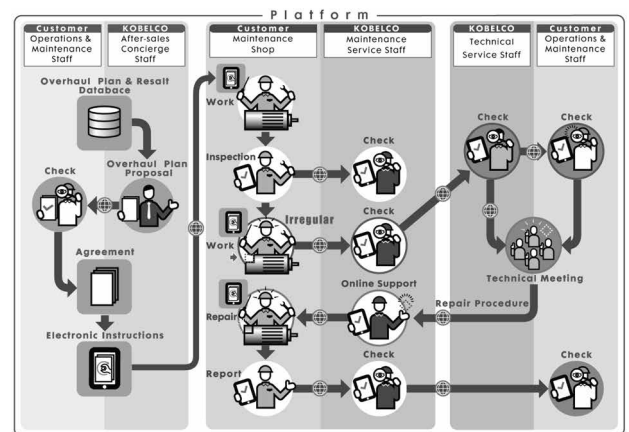


図2 「サービス業務遂行ノウハウや品質管理手法」プラットフォーム

Fig.2 Service operation system

現在当社複数産業機械およびプラント建設事業のサービスオペレーションシステムとして運用を開始し、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産業機械やプラントの連続安定操業に取り組んでいる。

#### 4. サービス化技術③：「設備機械メンテナンス手法」プラットフォーム

サービスは、モノとは異なり、人を媒体に行われる行為（プロセス）であり、それ故にサービスという価値を提供するためには、「サービス提供を行う組織や人材の育成管理」と「サービスが行われる場面の見える化と品質管理」が重要となる。前述の「全世界規模でのサービス工場／サービスエンジニアの育成管理手法」プラットフォーム化と、「サービス業務遂行ノウハウや品質管理手法」プラットフォーム化は、これらを実現するためのICT応用技術である。

また、サービスはモノのように計画的に生産し市場に

供給する体制を取りにくいビジネスであり、「ビジネス規模の拡大」が難しいと言われる。我々メーカは、販売後においても、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。その過程で、お客様機械設備をできるだけ永く安定的にお使いいただくためのメンテナンス・メニュー群（図3）を、お客様との共創を通じて開発し、価値提供してきた。これらのメンテナンス・メニュー群およびこれらを開発・提供するための仕組みが「設備機械メンテナンス手法」プラットフォームである。

前記の当社内サービス業務DXでは、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のアフターサービス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り、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業務内容や提供プロセスの分析／あぶり出しを進めた。そして、ICTによるプラットフォーム化により、あぶり出したサービスメニュー群の集積と統合、サービスエコシステム化（図4）を進めている。

サービスエコシステムとは、当社内で蓄積され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などのビジネスパートナーに公開（オープン標準化）し、全世界のビジネスパートナーとともに、当社お客様生産製造プラントの連続安定操業実現のためのアフターサービスを協働で推進していくための仕組みである。お客様も含めた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が保有する技術を提供いただき取り入れながら連携し新

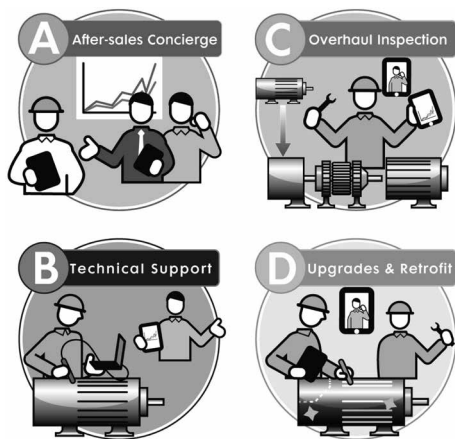


図3 メンテナンス・メニュー群  
Fig.3 After-sales service menu

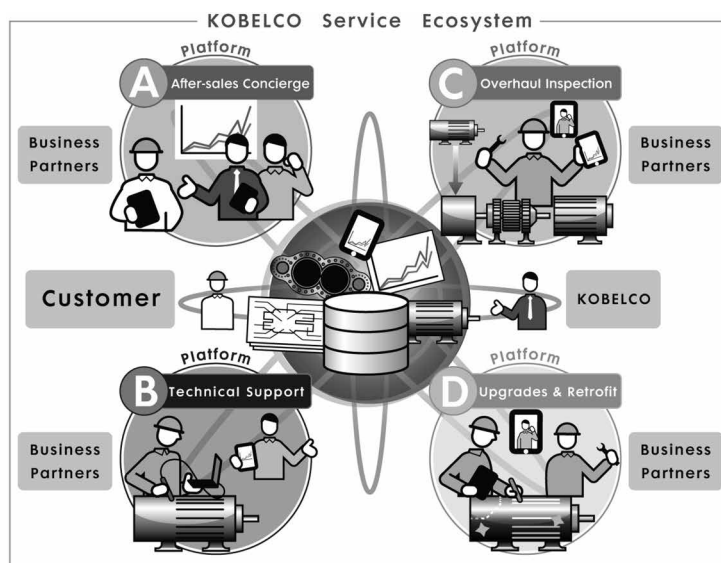


図4 KOBELCO サービスエコシステム  
Fig.4 KOBELCO service ecosystem



しい共創協働の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「価値共創ビジネスエコシステム構築」をめざすための仕掛けである。

## 5. 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の取り組み事例

最後に、当社機械事業での、「選ばれ続けるKOBELCO」実現をめざしたアフターサービス・ビジネスモデル強化に関する取り組み、「サービス業務DX推進」について紹介する。

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「付随的業務」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。本経緯を踏まえ、サービス業務DX推進では、最初に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を活用しての価値提供プロセスの見える化（プラットフォーム化）を推進し、プラットフォームをヒアリングシートの活用しながらアフターサービス・ビジネスモデル分析を進めた。

DX推進の結果、前記図3のA/B/C/Dのサービス内容は、非汎用カスタムメイド産業機械の共通コア提供価値ではあるが、産業機械製品ごとにサービス業務遂行内容／やり方に違いがあることが確認された。ま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され、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販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（顧客囲い込みアプローチ）も異なることが確認された。

「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、「選ばれ続けるKOBELCO」の実現のため、組織知として相互共有しあうことで、アフターサービス業務内容やそのプロセスの品質向上につながった。また、担当者が、これまで属人的に行ってきたサービスという行為（プロセス）そのものを、コトという新たな価値を生み出すためのお客様との共創活動として捉え直すマインドセット醸成にもつながった。

一般に組織はその形成発展過程で、「業務内容の標準化や整流化を繰り返しながら、業務ルーティン化」を推進し、その結果としての「プロセスやルーティンの集合体」が「組織的能力や知恵」（ケイパビリティ）として蓄積される。

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た点が特徴である。

### むすび＝未来に向けて

「サービス化技術」を媒体にお客様の「ものづくり／コトづくり」につながり、その中でお客様にとって「より良き」パートナーとして行動し信頼を得ていくとともに、ビジネスパートナーとの関係性も深めていくことにより、KOBELCOのマテリアリティ（安全・安心なまちづくりものづくり／未来へのソリューション提案／グリーン社会への貢献）は実現され得ると考える。

当社はメーカ故に、当社が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（ビジネスエコシステム）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拡げ、「安全・安心なまちづくり・ものづくり」にも貢献できるのではないかと考える。

加えて、当社が製造建設した産業機械やプラントは、世界の様々な国や地域の中で、お客様の社員、お客様のビジネスパートナー、地場企業の方々により操業&メンテナンスされながら、お客様生産製造プラントの中核設備として使用いただいているが、お客様を含めた様々なビジネスパートナーと共創協働しながら「安全・安心なまちづくりものづくり」の推進に取り組む中で、新たな価値／イノベーションを生み出すビジネスエコシステムとして進化させ、「未来へのソリューション提供」としての新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(2017).『プラットフォーム企業のグローバル戦略』有斐閣
- 2) 宗陽一郎(2018).「建設機械アフターサービス事業拡大のためのグローバルなサービス提供力の品質維持・強化に関する取組み」『国際ビジネス研究学会 第25回全国大会 自由論題報告 C会場 (No.7)』
- 3) 宗陽一郎(2018).「アフターサービスビジネス強化手法に関する1考察」『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』Vol.7, 346-352.
- 4) 宗陽一郎(2021).「サービスデザイン分野学術的知見/示唆を参考にしたアフターサービス業務DX」『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』Vol.10, 190-196.
- 5) 松崎和久(2022).『デジタル時代のエコシステム経営』同文館出版
- 6) 宗陽一郎(2022).「ケイパビリティ(組織的能力/知恵)起点のビジネスモデル・イノベーション創発に関する1考察」『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』Vol.11, 209-215.
- 7) 宗陽一郎(2022).「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」『国際ビジネス研究学会 第29回全国大会 自由論題報告 A会場 (No.2)』

(解説)



## 溶接コア技術の開発と社会実装

清水弘之<sup>\*1</sup> (博士(工学))

### Development and Practical Applications of Welding Core Technologies

Dr. Hiroyuki SHIMIZU

#### 要旨

鋼構造物を製造する中で、溶接に対する課題は多い。お客様は良好な品質の溶接継手を安定して高能率に得ることを求めている。溶接のプロセス、ロボット、材料が個々に優れていても、お客様の課題解決にならないことが多い。当社の溶接事業部門は、アーク溶接に関わるプロセス、ロボット、材料などの全ての技術を有し、お客様に溶接ソリューションを提供している。溶接ソリューションを構成しているこれらの三つの要素技術を例として、それぞれの領域におけるコア技術を紹介する。溶接事業のマテリアリティとして溶接ソリューションの社会実装事例も紹介する。

#### Abstract

In the process of manufacturing steel structures, there are numerous challenges related to welding. Customers expect to obtain welded joints with excellent quality in a reliable and highly efficient manner. Even if the welding processes, robots, and materials individually excel, they often do not fully address the challenges faced by customers. Kobe Steel's Welding Business possesses all the essential technologies related to arc welding, including processes, robots, and materials, providing welding solutions to customers. This article introduces, as examples, the core technologies in each of these areas that constitute welding solutions. It also presents the practical applications of welding solutions as an essential aspect of the materiality of the Welding Business.

#### 検索用キーワード

アーク溶接, 溶接プロセス, 溶接電源, 溶接機, 溶接ロボット, 溶接材料

まえがき = 当社の溶接事業部門では、単に溶接材料と溶接ロボットシステムの提供のみならず、多関節ロボット・小型可搬型ロボット・専用機・電源・プロセス・材料(棒、ワイヤ、フラックス、裏当)・消耗品など、アーク溶接に関わる幅広い技術を保有する溶接総合メーカーとして、カーボンニュートラルや安全・安心なものづくりに関するお客様の課題を解決する溶接ソリューションを提供している。溶接ソリューションを具現化し社会実装するために、ベースとなる溶接のコア技術は、以下の三つに大別される。

非常に高速に大電流を制御する溶接電源の「プロセス制御技術」、アーク熱を精度よくワークに位置決めするための溶接ロボットの「手先位置制御技術」、溶接機によるプロセス制御と溶接ロボットによる上記熱源移動にベストマッチする特性を材料に与える「溶接材料の最適化技術」である。

本報では、アーク溶接の一つであるMAG (Metal Active Gas) 溶接を例として、これら三つの技術の概要、社会実装した事例とともに、将来に向けた新たな開発とその方向性についても紹介する。

### 1. MAG溶接とCO<sub>2</sub>シールド

アーク溶接の中で市場規模が大きく、自動溶接に好適で、欧米中韓日で幅広く使用<sup>1)</sup>されているのはMAG溶接である。図1にMAG溶接の構成を示す<sup>2)</sup>。GMAW (Gas Metal Arc Welding) の一つであり、シールドガスにArなどの不活性ガスを用いるMIG (Metal Inert Gas) 溶接に対し、MAG溶接では100%CO<sub>2</sub>もしくはAr-20%CO<sub>2</sub>混合ガスのような活性ガスを用いる。連続的に送給されるワイヤ(陽極)は、①給電電極から受電してジュール発熱、②アーク放電によって熔融、③溶滴とな

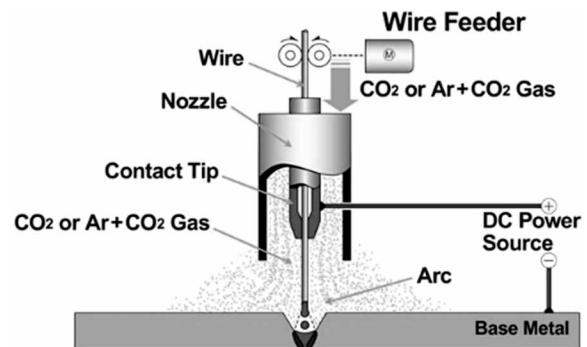


図1 MAG溶接の構成  
Fig.1 Configuration of MAG welding

<sup>\*1</sup> 溶接事業部門 技術センター (現 コベルコ溶接テクノ(株))

って落下，④溶融池，溶接金属を形成，⑤母材（陰極）=ワークを強固に溶接する。直径1.2 mm程度の細径ワイヤを使用すればジュール発熱を有効に利用することができ，アーク放電前にジュール発熱のみで鉄の融点近くまで予熱されるため溶融効率は高い。

1990年代にインバータ制御方式の溶接電源が普及し，ミリ秒の時間単位で溶接電流の出力制御が可能<sup>3)</sup>となった。溶接電流をパルス状に出力することで，ソリッドワイヤを用いた1パルスで1溶滴を移行させるパルスMAG溶接法が開発され，ロボットに搭載されて自動溶接法として実用化<sup>4)</sup>された。Ar-20%CO<sub>2</sub>やAr-数%O<sub>2</sub>などの混合ガスを用いて，今でも自動車の足回り部品や建設機械<sup>5)</sup>など，スパッタの発生を嫌う業界で多用されている。深冷空気分離で大気から生産されるArガス<sup>6)</sup>のコストは高い。加えてArリッチな混合ガスを用いたMAG溶接の最大の欠点は，図2(a)に示すように，高電流でも溶込み幅が狭く，多層溶接において溶接欠陥が発生しやすいことである。いっぽう，各種プラントから大気中に放出される排ガスから回収し精製されるCO<sub>2</sub>ガス<sup>7)</sup>は安価である。排ガス中のCO<sub>2</sub>ガスがCCUS(Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage)されるようになれば，CO<sub>2</sub>シールドは，Arシールドに比較してLCA(Life Cycle Assessment)指数は高くなるが，もともと大気中に放出されるCO<sub>2</sub>の一部を溶接用のシールドガスとして再利用しているため該指数は問題とはならない。100%CO<sub>2</sub>をシールドガスとするMAG溶接は建築鉄骨<sup>8)</sup>などの溶込みを重視する業界で広く使用されている。シールドガスを100%CO<sub>2</sub>とすると，溶滴の下先端(陽極)にアーク放電が集中するために，溶滴は大きく成長する。高温の大きな溶滴が溶融池(陰極)に落下すると溶融池は攪拌(かくはん)され，図2(b)に示すように，溶込み幅は広がる。その深く広い溶込みは，多層溶接をする場合に溶接欠陥を防止する最も有効な手段である。半面，大きく成長した溶滴が，過剰に揺動すると大粒のスパッタとなり溶融池周辺に飛散，付着する<sup>9)</sup>ため，美観，塗装性，機械的な締結性や摺動(しゅうどう)性を劣化させて問題となる。ジュール発熱を有効に利用する細径ワイヤを用いたMAG溶接の能率，溶滴移行の安定性，100%CO<sub>2</sub>シールドガスの大粒な溶滴による溶融池の攪拌と深溶込みなど，スパッタ，ヒューム，入熱，溶込み深さ，ワイヤ溶融速度などを制御し，高能率で高品質なアーク熱源，溶滴移行を実現するプロセスは常に求められている<sup>10)</sup>。

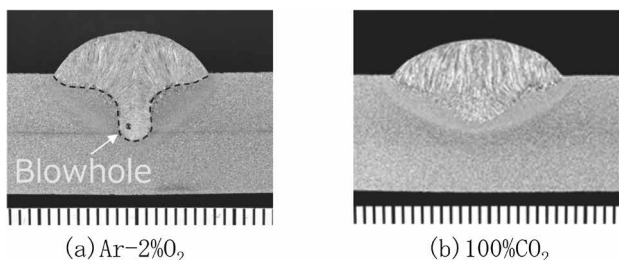


図2 シールドガスによる溶け込み形状の違い (300 A)  
Fig.2 Difference in penetration shape due to shielding gas (300 A)

## 2. 溶滴の形成と移行の制御技術

溶接ソリューションを実現するために重要なコア技術の一つ目は，100%CO<sub>2</sub>ガスを用いたMAG溶接の溶滴形成とその移行を制御する「プロセス制御技術」である。溶滴の形成と移行を制御することができれば，スパッタとヒュームを極限まで低減することができて，溶接環境が改善される。また溶融池を攪拌することで溶接欠陥を減らすこともできる。以下に溶滴の形成と移行の制御技術への取組みを紹介する。

### 2.1 2パルス1溶滴移行制御

2000年代に入ると，デジタル計測技術は急速に進歩し，溶接電流波形と溶滴移行動画を完全に同期して計測し，解析することができるようになった。当時，任意波形を自由に設定できるデジタル制御式の溶接電源は存在せず，トランジスタ式直流溶接電源(株ダイヘン製TR-800<sup>3)</sup>)を用いて，溶滴の形成と移行を異なる二つのパルスで個別に制御することでスパッタの大幅低減と深溶込みの両立を実現することに成功した<sup>11)</sup>。電流波形と溶滴の形成・移行を関連付ける制御波形<sup>12)</sup>の一例を図3に示す。大粒の溶滴を形成し，移行を安定化させ，スパッタ発生を低減し，安定して深い溶込みを得ることができている<sup>11)</sup>。この溶接方法は，デジタル制御式溶接機 SENSARC™ AB500にREGARC™プロセスとして溶接ロボットと組み合わせて実用化され社会実装されている。建築鉄骨市場を中心に評価されて，非常に高いシェアを得ている。

### 2.2 1パルス1溶滴移行制御

2005年にオーストリアのフロニウス社が，溶接電流のパルス制御とワイヤの送給制御を組み合わせることで，短絡により溶滴を安定して移行させるCMT(Cold Metal Transfer)プロセス<sup>13)</sup>を発表した。溶滴は自由落下ではなく，短絡を伴った表面張力により溶融池に移行し，低電流，低入熱，低熱ひずみで溶接できるために，鉄鋼，アルミニウムの薄板，希釈を嫌う肉盛，熱ひずみを嫌う積層造形などの溶接分野において高く評価されて世界で広く使用されている。

当社はデジタルで電流波形を自在に調整できる「溶接電源プラットフォーム」をまず開発した。デジタル制御であるために，外部の装置，例えばサーボモータを容易に同期させることができる。この溶接電源プラットフォームを用い，図4に示すようにワイヤ送給を正弦波状

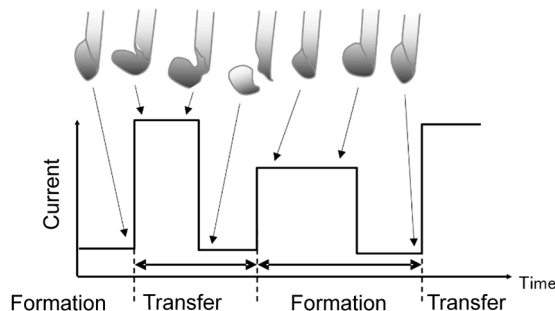


図3 100%CO<sub>2</sub>シールド2パルス1溶滴移行  
Fig.3 100% CO<sub>2</sub> shielding 2 pulses 1 droplet transfer



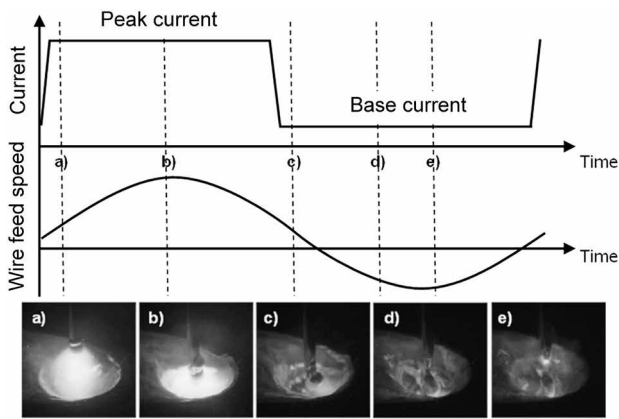


図4 100%CO<sub>2</sub>シールド1パルス1溶滴移行  
Fig.4 100% CO<sub>2</sub> shielding 1 pulse 1 droplet transfer

に前進・後退させ、電流波形をワイヤ送給波形の位相に同期したパルス電流波形とした。図4 a) ~ b) に示すように、ワイヤ先端に溶滴を形成しながらワイヤを前進させることにより、溶滴は溶融池方向へ加速される。その結果、図4 c) でワイヤ送給方向を反転後退させた後も、ワイヤ先端の溶滴は慣性によって溶融池方向へ動こうとする。このため、図4 d) において溶滴上部にくびれが形成され、図4 e) において短絡を伴わない溶滴離脱、すなわち1パルス1溶滴の規則的な自由落下に成功した。100%CO<sub>2</sub>シールドガスで形成される大きな溶滴を溶融池に慣性力で自由落下させるために、スパッタとヒュームの発生量は極小化し、溶融池は効率的に攪拌される。薄板の単層溶接から厚板の多層溶接まで、溶融池攪拌により溶込みの安定化、溶接欠陥の防止と消し込み、溶接ビード形状の安定化などが期待される。このプロセスをAXELARC™として商標登録、特許出願し、対外的に発表<sup>14), 15)</sup>した。今後、デジタル制御式溶接機SENSARC™ RA500に実装し上市を計画している。MAG溶接の従来概念を覆す社会実装技術として期待している。

### 3. 溶接ロボット制御技術

溶接ソリューションを実現するために重要なコア技術の二つ目は、溶接ロボットがワーク形状とその溶接線を認識して、手先位置を高精度に自在に制御する「手先位置制御技術」である。

ここでは、溶接ロボットの手先位置制御に用いられているコア技術として、1) 高精度ウィービング制御技術、2) 自動プログラミング技術、3) システム稼働モニタリング技術、4) 裏波溶接自動制御技術を紹介する。

#### 3.1 高精度ウィービング制御技術

自動車などの薄板溶接に使用する溶接ロボットは、始点から終点まで、所定の三次元軌道を一筆書きで一回トレースする。いっぽう、中厚板に使用する溶接ロボットは、溶融金属を幅広く溶着させ、ギャップや目違いを補って、溶接品質を確保するために、ロボット手先を教示点間の移動中に周期的に揺動させるウィービングという動作を行う。

溶接ロボットには、溶接を行いながらその溶接線を追

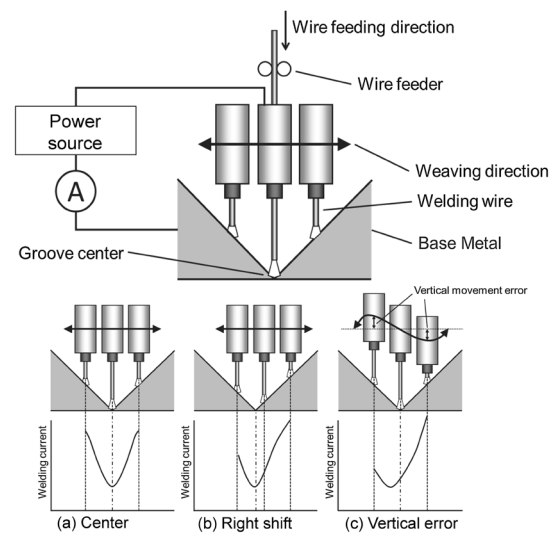


図5 アークセンサの構成と動作原理  
Fig.5 Arc sensor configuration and operating principle

従するアークセンシングという機能があり、ウィービング動作時の手先位置精度は、そのアークセンシングを実現する上で非常に重要な要素となる。図5は、アークセンシングの原理を示す。溶接電源は定電圧特性を有しているために、手先位置とワーク間の距離の変化は電流の変化として計測される。(a)はウィービング中心と開先中央が一致しており、(b)はウィービング中心が開先中央の右に移動している。溶接電流を検出することで開先中央を検知・追従することができる。いっぽう(c)のように外乱により手先が上下にずれるとアークセンシングの性能を低下させる。このように中厚板の開先溶接に使用するアーク溶接ロボットは、手先位置精度<sup>16)</sup>を高める必要があり、オブザーバなど多くの制御理論がロボットコントローラに実装されている。

#### 3.2 溶接対象物の認識と自動プログラミング技術

熟練溶接士の減少や溶接士の新規採用が難しいことも一因として、溶接ロボットの導入が加速している。一般的に、溶接ロボットシステムでは、システム据付後に、すぐさま稼働できるわけではなく、ロボットオペレータがロボットに動作を教える「教示作業」が必要である。いっぽう、お客様は据え付けた設備をすぐさま投資回収したいため、システムが設置されたその日から自動溶接を始めたいニーズがある。溶接箇所を人が教示することなく溶接プログラムを自動生成する「教示レス」<sup>17)</sup>はロボット溶接のコア技術であるが、業種によって教示レスの内容は異なっている。

まず、建築鉄骨分野は、溶接対象物が類似形状であるために、中厚板の溶接用ロボットメーカーとして長年の経験から蓄積されたロボット溶接施工技術と溶接対象物に応じたデータ生成アルゴリズムによりモニターの表中に詳細な寸法と板厚を入力することで教示レスは完成している。次に、橋梁・造船分野は、3D-CADと連携して教示レスを達成している。このシステムは、設計部門の3D-CADデータを用いて、溶接やロボット操作に関する専門知識を必要とせずに溶接箇所と溶接条件を自動的に設定する。溶接位置データが溶接ロボットシステムに

転送され、鋼材部品に適切な溶接ラインが自動的に割り当てられて溶接が始まる。

中厚板溶接で教示レスに残された分野は、建機・一般機械（鉄道車両、農機など）である。ワーク形状と溶接ラインは3D-CADデータに基づいて認識しているが、大型で複雑なワーク形状に対応した溶接プログラムを自動生成するためには、まず溶接ロボットの位置と姿勢、ポジシヨナの角度からプログラムの候補を生成し、候補からその溶接に適したプログラムを選定する必要がある。また溶接用ワイヤと電力を供給するケーブルが、大型で複雑なワークと干渉し、溶接姿勢によっては、ケーブルがロボット手先を邪魔して溶接できないこともある。建機・一般機械の教示レスを達成するためには、ケーブルの挙動も瞬時にシミュレーションし、確認する必要がある。これらの課題を解決すべく図6に示すように、熟練操作者の施工方法をルール化し、最適な溶接プログラムを独自指標で生成し、ポジシヨナ運動溶接や円周溶接などの高難度溶接にも対応可能な建機・一般機械向け教示レスシステムを社会実装している。

### 3.3 溶接ロボットシステム稼働状況の記録と監視

当社の溶接ロボットシステムでは、稼働監視ソフトウェアであるARCMAN™ PRODUCTION SUPPORTを用いることで、システムの稼働状態や溶接データを自動的に記録することができる。さらに2022年には、稼働データとネットワークカメラの動画情報を関連付けることができるARCMAN™ View<sup>18)</sup> 遠隔モニタリングシステムを上市した（図7）。

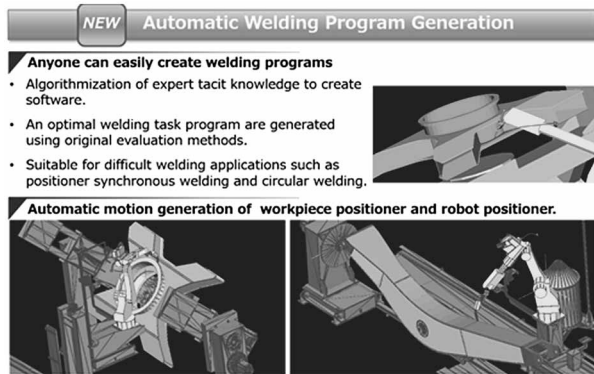


図6 大型で複雑なワーク形状に対応する溶接プログラムの自動生成  
Fig.6 Automatic generation of welding programs for large and complex workpiece shapes

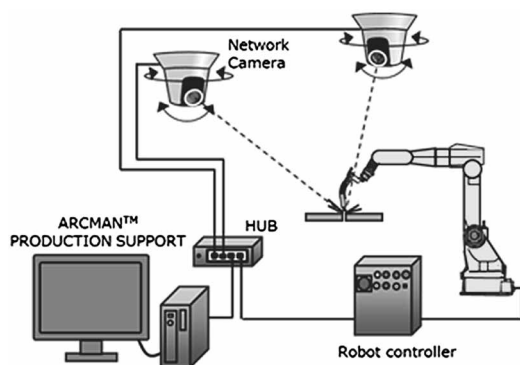


図7 ARCMAN™ View のシステム構成  
Fig.7 System configuration of ARCMAN™ View

ARCMAN™ Viewでは、ネットワークカメラを用いて、稼働中の溶接ロボットシステムをリアルタイムで録画し、突発的停止や溶接不良時の稼働データと動画を関連付け再生することができる。これらソフトウェアを用いることで、エラー発生時の溶接状態を動画で確認ことができ、突発的停止や溶接不良の詳細な原因を分析できる。また、ARCMAN™ Viewでは、カメラ画像を見ながらリアルタイムにロボットをリモート動作することも可能となる。生産中にロボットが停止した際に、ワークが高所にある場合などにはカメラにてロボット先端を見ながら復旧することができる。この機能を活用することで、安全柵外からのロボット操作が可能となり、高所などの危険な場所での作業も削減できている。

### 3.4 裏波溶接の自動化

溶接ワークの加工や組立のばらつきは、薄板の溶接よりも中厚板の溶接の方が一般的に大きい。溶接ワークが大きく複雑になればなるほど、具体的には自動車足回り部品よりも、建設機械の部材の溶接の方が、建設機械の部材よりも造船ブロックの溶接の方が、開先とルートギャップの精度を保つことは難しくなる。他熱源、例えば高エネルギー密度熱源であるレーザーと比較して、アークはエネルギー密度が低く、ウィービングすることによってギャップのバラツキに柔軟に対応し、高い技量が必要な溶接として知られる裏波溶接をも実現することができる。熟練の溶接士は溶融池と併せて開先形状とルートギャップを目視確認しながら臨機応変にウィービングし、さらに必要であれば溶接電流、電圧も調整する。溶接ロボットを用いて熟練の溶接士と同等以上の溶接をするためには、溶融池の状態を何らかの手段でセンシングし、ロボット手先位置をリアルタイムに制御する必要がある。これまで、溶融池をカメラにて撮像し二値化し、エッジフィルタ、ラベリングして、制御に必要な特徴量を抽出する手法が提案<sup>19)</sup>されているが、外乱が多く実用化できていない。そこで当社では、ディープラーニング技術、AI画像認識技術に着目して、図8に示す溶融池とその周囲の特徴量（ワイヤ先端、アーク中心、溶融池幅、溶融池先端幅）を抽出し、ルートギャップが変化した場合も追従制御することで、安定した裏波溶接に成功している<sup>20)</sup>。造船ブロックの外板溶接を想定すると、裏当材を用いれば片面多層溶接が可能であるが、溶接長は

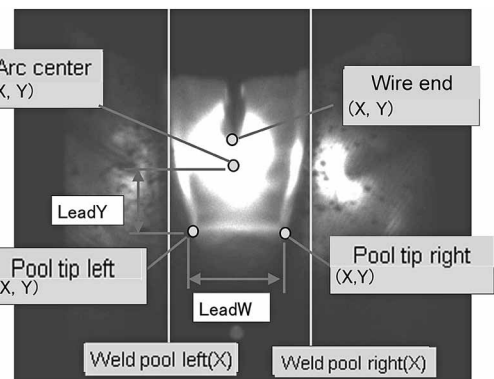


図8 溶融池と周囲の特徴量抽出  
Fig.8 Feature value extraction of molten pool and surrounding



10 mを越えて、ギャップは変動し、板厚方向の目違いは最大3 mmにもなり、加えて開先切断した時の汚れや付着物がある。これに対して、最新のディーブローニング技術を適用することにより認識精度やロバスト性を向上させ、ギャップ変動、目違い、付着物などの異常検知精度を高めている。計画では数年内に溶接ロボットへ搭載し、熟練溶接士と同等以上の高い品質で、造船ブロックの裏波溶接は自動化したい。

#### 4. 溶接材料の制御技術

1907年にスウェーデンのESABが被覆アーク溶接棒を発明した7年後、日本は長崎の造船所において鋼構造船を効率的に建造するために、被覆アーク溶接の研究が始まった。さらに、溶接材料を国産化するために、1930年に当社は被覆アーク溶接棒の生産を始めている。溶接材料の開発は、フラックスとその化学組成の探索から始まっている。1953年に米国でMAG溶接法が発明されると、ソリッドワイヤの鋼材化学組成の探索も始まった。100年以上にわたって、フラックスも含めた溶接材料の化学組成、溶接金属の化学組成と組織の最適化が続けられており<sup>21)</sup>、軟鋼はもとより、高強度鋼、耐熱鋼、高合金鋼の組成と組織の制御技術は成熟の域に達している。

現在においても、溶接材料と溶接金属の化学組成の調整ノウハウは溶接のコア技術である。マクロ的な化学組成調整に加えて、溶接用ワイヤの表面制御、MI (Materials Informatics) の活用、極微細組織制御が新たな「溶接材料の最適化技術」となってきた。以下に事例を紹介する。

##### 4.1 溶接用ワイヤの表面制御

従来から行われている溶接金属の機械的特性（強度、じん性など）、形状、外観、スラグ剥離を満足する化学成分の調整に加えて、溶接機の制御と溶接ロボットによる熱源移動に対して、従順に応答し、長時間の連続的かつ断続的な溶接を可能とするワイヤの表面制御技術は、その重要度を増している。

MAG溶接において、溶接ワイヤは給電電極から摺動（しゅうどう）接点を介して溶接電流を得る。摺動接点を仮に直径100 μmの円とし、300 Aの直流電流が給電電極から供給されると、接点における電流密度は $4 \times 10^4$  A/mm<sup>2</sup>にも達する。パルス制御すると溶接電流は変動し、送給制御すると摺動速度も変化する過酷な接点である。摺動接点が安定しないと、溶接電流や送給速度を変化させても、ワイヤ先端でのエネルギーがバランスせず、目的とする溶滴移行は実現できない。これに対して

ワイヤ表面の幾何学的形状と化学的狀態を適正に制御することで、パルス波形制御に適した優れた通電性、耐チップ融着性、およびワイヤ送給性を付与することができる。この技術を活用して長時間の連続的、断続的溶接に対して安定した特性を有するREGARC™専用ワイヤ（図9）が製品化されている。

##### 4.2 MIを用いた溶接材料組成の設計

計算機の高性能化やビッグデータの拡充、深層学習などの技術的ブレイクスルーを背景として、AI技術の産業応用事例が急速に増加している。AIは学習データから作成されたモデルで、人間の思考を再現する。このAI技術を材料開発に取り入れる考えがMI技術である。溶接材料開発において、①金属材料組成の成熟、②溶接材料のコモディティ化、③材料開発者の不足、技術伝承の不安が問題となっている。この問題に対し開発の効率化と設計力の強化手段としてMI技術に注力している。過去からの実験データと暗黙知を含む独自の溶接知見を最大限に活用する基盤を構築している。

溶接材料開発では材料の設計から溶接金属の機械特性まで順方向（→）に問題を計算する予測技術と、溶接金属の機械特性から材料の設計を逆方向（←）に問題を解く探索技術がある。また溶接材料開発は①設計すべき原材料配合、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溶接金属の機械特性（溶金特性）の各関係性を考慮しながら行っている。この溶接材料の特徴を考慮したMI技術として①～④の各関係を繋ぐ予測（→）・探索（←）技術（図10）を開発<sup>22)</sup>した。まず原材料から溶材成分の予測（→）は線形式で表せる特徴を活かして、いっぽう、溶材成分から原材料の探索（←）は凸最適化問題と捉えて手法開発した。

溶材成分から溶金成分、溶金成分から溶金特性の各予測（→）は複雑な溶接現象や材料組織形成が関わり明確



図9 REGARC™専用ワイヤ  
Fig.9 Dedicated wire of REGARC™

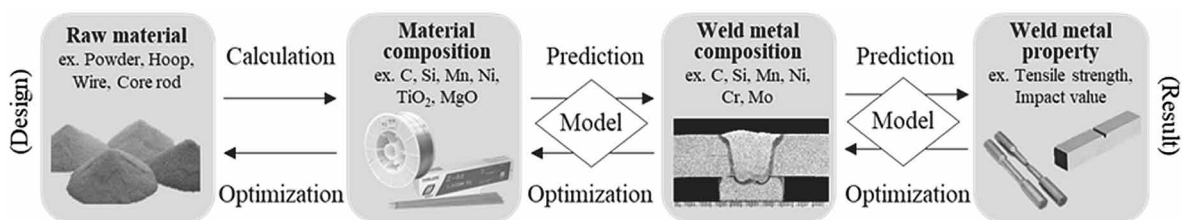


図10 MIを用いた溶接材料組成の設計  
Fig.10 Welding material composition design using MI



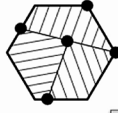
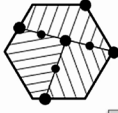


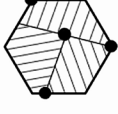
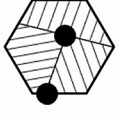
	As PWHT (760°C×4 h)	Short time aging (650°C ~5,000 h)	Long time aging (650°C 5,000~20,000 h)
W 2.8 mass%	Laves phase precipitates mainly at grain boundary 	New nucleation of Laves phase occurred 	Laves phase coarsened 
W 1.6 mass%	No precipitation of Laves phase 	New nucleation and coarsening of Laves phase occurred 	Laves phase coarsened 

図11 耐熱鋼溶接金属の微細組織制御  
Fig.11 Microstructure control of heat-resistant steel weld metal

な関係性を物理理論に従い構築することが難しいため、豊富な実験データから機械学習手法により予測(→)モデルを構築した。また、溶金特性から溶金成分、溶金成分から溶材成分の各探索(←)は学習モデルをベースに最適化することで実現した。

#### 4.3 微細組織の制御

日本のエネルギー基本計画<sup>23)</sup>は、石炭炊き火力発電を縮小し、火力発電を供給不安定な再生可能エネルギーの調整役として運用することを決めた。火力発電所の稼働と停止が頻繁となり、ボイラの熱疲労が問題となっている。

鋼材を高強度化、すなわちクリープ特性を向上させて、配管を薄肉化することで、熱疲労を改善することができる。ASME Gr.93鋼(9Cr-3W-3Co-Nd-B鋼)は従来の9Cr系耐熱鋼のクリープ強度やクリープ破断延性を改善した鋼種<sup>24)</sup>であり、固溶強化と析出強化の目的でタングステン(W)を添加しているが、溶接金属中のWは、その量に依存して析出形態が変化する。同鋼の溶接後熱処理、短時間稼働を想定したクリープ試験、長時間稼働を想定したクリープ試験後に詳細に組織を観察し、Laves相(Fe<sub>2</sub>W)が析出する場所と密度、成長、消失をW濃度で比較して図式化したものを図11に示す。Wを適正に調整することで、超々臨界温度650°Cでも良好なクリープ特性を示す金属組織的な裏付けを溶接金属で得ることに成功している。

#### 5. 溶接事業のマテリアリティ 社会実装例(図12)

(a)は、6軸多関節アーク溶接ロボットARCMAN<sup>TM</sup>A60、デジタル溶接機SENSARC<sup>TM</sup>RA500、炭素鋼ソリ

ッドワイヤFAMILIARC<sup>TM</sup>MG-56R(A)、炭酸ガスシールドMAG溶接プロセスREGARC<sup>TM</sup>を組み合わせた新鉄骨溶接ロボットシステム(NEW REGARC<sup>TM</sup>)で、首都圏の高層建築、大型の倉庫や工場などの柱、梁など、ファブリケータの工場内溶接において好評を得ている。当社は、約30年前より建築鉄骨分野の自動化に取り組んでおり、高能率・高品質な鉄骨ロボットシステムを継続して提供することで、国内シェアは9割に達する。

(b)は、小型可搬型アーク溶接用ロボットKI-700、デジタル溶接機SENSARC<sup>TM</sup>AB500、Ni基複合ワイヤPREMIARC<sup>TM</sup>DW-N609SVを組み合わせたLNGタンク立向溶接システムである。LNGは化石燃料の中でも炭酸ガス排出量を削減できることから伸長が期待されている。陸上・船上のLNGタンクを高能率に溶接する自動化技術を提供している。

(c)は、小型6軸多関節アーク溶接ロボットARCMAN<sup>TM</sup>A30、デジタル溶接機SENSARC<sup>TM</sup>AB500、複合ワイヤFAMILIARC<sup>TM</sup>DW-100Rを組み合わせた造船向け大組立溶接ロボットシステムである。人手不足が顕在化する造船ヤードの自動化ニーズに応えるため、様々なロボットシステムを商品化し、貢献している。

むすび=アーク溶接は安価、高能率で、薄~厚板まで全ての鋼材に対して優れた特性を有している。全世界で19億トン近く生産されている鋼材から構造物とするために、アーク溶接は必要不可欠であり将来も変わりが無い。溶接士の労働力不足を補うために、ヒトに代わって、ヒトを越えた溶接をするロボット、溶接の自動化ニーズはますます高くなると予測している。世界で唯一、アー

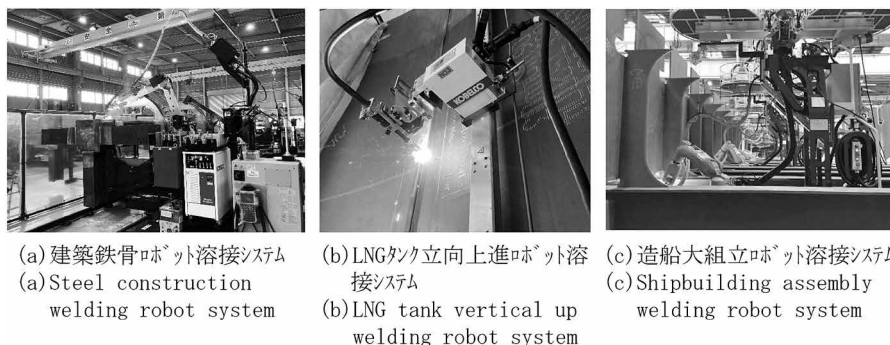


図12 溶接のマテリアリティ、社会実装例  
Fig.12 Welding materiality, examples of practical application

ク溶接に関する全ての技術を有する事業部門として、今後も溶接のプロセス制御、ロボット制御、さらに材料最適化に取り組み、溶接ソリューションとして社会実装してお客様の課題を解決したい。

#### 参 考 文 献

- 1) ウェルディングMART/2023, 溶接材料市場総論, 新報株式会社.
- 2) 日鉄ハードフェイシング(株). <https://www.nshard.co.jp/business/welding/mag/>, (参照2023-06-09).
- 3) 恵良哲生ほか. 溶接学会誌. 2012, Vol.81, No.1, p.5-15.
- 4) 松井仁志ほか. 溶接学会論文集. 1997, Vol.15, No.2, p.254-258.
- 5) 高野悠敬ほか. 溶接学会誌. 1993, Vol.62, No.6, p.448-454.
- 6) 船田一郎ほか. 石油学会誌, 1991, Vol.34, No.4, p.342-349.
- 7) 日本液炭(株). <https://www.n-eco.co.jp/co2/manufacture/>, (参照2023-06-09).
- 8) (一社)日本溶接協会. [https://www-it.jwes.or.jp/we-com/bn/vol\\_19/sec\\_4/4-2.jsp](https://www-it.jwes.or.jp/we-com/bn/vol_19/sec_4/4-2.jsp), (参照2023-06-09).
- 9) 池上祐一ほか. 溶接学会誌. 2006, Vol.75, No.7, p.570-574.
- 10) 溶接学会, 溶接法研究委員会. 溶接法ガイドブック7. 2012年, 『溶接プロセスの可視化・シミュレーション技術』. 黒木出版. p. II\_1-II\_25.
- 11) K. Yamazaki. Spatter and Fume Reduction in CO<sub>2</sub> Gas Shielded Arc Welding by Regulated Globular Transfer, IIW Doc. No. XII-1993-10. 2010.
- 12) 山崎 圭ほか. 溶接学会誌. 2015, Vol.84, No.4, p.239-243.
- 13) K. Himmelbauer. The CMT-Process - A revolution in welding technology, IIW Doc. XII-1875-05. 2005.
- 14) 北村佳昭ほか. 2022年溶接学会秋季全国大会講演概要集.
- 15) Y. Kitamura et al. IIW. Commission XII-2514-2022.
- 16) 小池 武. 2023, 学位論文「ロボットの周期運動における手先位置精度向上に向けた感度に基づく同定と制御」, 東京工業大学工学院機械系機械コース
- 17) 澤川史明. 2022, 溶接接合工学振興会第31回セミナー「中厚板大型ワーク溶接における教示レスを目指した取り組み」
- 18) 福永敦史ほか. R&D神戸製鋼技報. 2023, Vol.72, No.1, p.21-26.
- 19) 浅井 知ほか. 圧力技術. 2002, Vol.40, No.2, p.81-88.
- 20) 岡村 陽. システム/制御/情報. 2022, Vol.66, No.10, p.381-386.
- 21) 百合岡信孝. 新日鉄技報. 1995, Vol.355, p.1-5.
- 22) 谷口元一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2023, Vol.72, No.1, p.91-96.
- 23) 経済産業省エネルギー基本計画. [https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic\\_plan/](https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/), (参照2023-06-09).
- 24) 伊勢田敦朗ほか. 平成27年度火力原子力発電大会論文集. 2015, p.49-55.

(解説)



## 還元鉄製造技術を活用したグリーン社会への貢献

王 昌麟\*<sup>1</sup>

### Utilizing Reduced-Iron Manufacturing Technology to Contribute to Green Society

Shourin OH

#### 要旨

世界で温室効果ガスの削減取り組みが加速している。鉄鋼業は、温室効果ガスの一種である二酸化炭素を産業界で最も排出する業界の一つであり、脱炭素化が強く望まれている。今の鉄鋼生産の中心は高炉であるが、コークスや石炭を主な熱源や還元剤とすることが二酸化炭素排出量の多くなる原因である。当社では、脱炭素化に向け、還元鉄の高炉への多配合などにより高炉の還元剤比率を下げるといった二酸化炭素削減に向けた取り組みを着実に進めている。さらに、還元鉄製造技術や原料ペレットプラント操業、エンジニアリング事業で培ったノウハウや基盤技術を組み合わせ、鉄鋼業のカーボンニュートラル化に貢献していく。

#### Abstract

Efforts to reduce greenhouse gases are accelerating worldwide. The steel industry is one of the sectors that emit the greatest amount of carbon dioxide, a type of greenhouse gas, making its decarbonization highly desirable. Currently, the primary method of steel production is through blast furnaces, which rely on coke and coal as the main heat source and reducing agent, resulting in significant carbon dioxide emissions. Kobe Steel, in pursuit of decarbonization, is steadily implementing initiatives to reduce carbon dioxide emissions by lowering the ratio of reductant and incorporating more direct-reduced iron in the blast furnaces. Furthermore, by combining the company's expertise and fundamental technologies developed through reduced-iron manufacturing, raw material pellet plant operation, and engineering projects, Kobe Steel aims at contributing to the carbon neutrality of the steel industry.

#### 検索用キーワード

SDGs, カーボンニュートラル, CO<sub>2</sub>削減, MIDREX, HBI, DRI, 水素, 還元鉄, ペレット

まえがき = 世界の温室効果ガス（以下、GHGという）削減の取り組みが加速する中、日本でも2050年度のカーボンニュートラル（以下、CNという）が宣言された。産業の中でもGHG排出量の多い鉄鋼業を営む当社は、重要課題の一つとして「グリーン社会への貢献」を設定し、2050年の製鉄プロセスのCN化達成を目標に取り組みを進めている。

鉄づくりは、石や砂の形状をした「鉄鉱石」に含まれる酸化鉄から酸素を取り除く（還元反応）ことから始まり、このための装置として、一般的には高炉が用いられる（当社加古川製鉄所においても稼働中）。高炉は、低コストかつ大規模生産が可能な装置であり、製鉄所の心臓とも呼ばれるが、現在はコークス・石炭を主な熱源・還元剤とするため、原理的にGHGの一つである二酸化炭素（以下、CO<sub>2</sub>という）が発生する。これにより、鉄鋼業は最大のGHG排出産業の一つとなっており、排出量全体のおよそ7~11%を占める<sup>1)</sup>ため、脱炭素化が強く望まれている。CN製鉄の実現には、高炉の還元剤比を下げつつCO<sub>2</sub>回収技術を用いるか、別のCNなプロセスに置き換える必要がある。いっぽうで、鉄鉱石の品位低下など、従来からの課題もあるなど、鉄づくりにおい

ては様々な挑戦的な課題を解決する必要がある。

当社は、製鉄事業のみならず、還元鉄プラントや鉄鉱石ペレットプラントのプラントエンジニアリング事業も展開しており、お客様のニーズに合わせ、MIDREX<sup>®</sup>注1)、FASTMET<sup>®</sup>注2)、ITmk3<sup>®</sup>注3)、KOBELCOペレタイジングシステムなど、様々な還元鉄プロセスやペレタイジングプロセスを商品化している。鉄石の性状や炉内温度、ガス組成が異なる還元鉄プロセスの炉内反応を評価し改善につなげるため、様々な技術を当社は培ってきた。ここでは、還元鉄を含む当社製鉄プロセスに関する取り組みを支える技術について概説するとともに、これらの技術を用いた当社ならではのCN製鉄の実現に向けた取り組みについて紹介する。

#### 1. 当社製鉄プロセスの特徴と技術課題

当社は、鉄鉱石から鉄鉄、鋼塊を経て鋼材から最終製品まで製造する一貫製鉄所を運営しており、CO<sub>2</sub>削減努

脚注1) MIDREX<sup>®</sup>は当社の商標である。

脚注2) FASTMET<sup>®</sup>は当社の商標である。

脚注3) ITmk3<sup>®</sup>は当社の商標である。

\*1 技術開発本部 材料研究所



力を続けている。具体的には、高炉操業で培った炉内通気制御技術を活用した高炉への還元鉄投入（本号「KOBELCOグループのグリーン社会への貢献を支えるコア技術」p.4参照）や、自社ペレットプラントなどにおける原料の被還元性の向上によるCO<sub>2</sub>削減に取り組んでいる。

またいっぽうで、高炉と比較してCO<sub>2</sub>排出量が少ないMIDREXプロセスのエンジニアリング事業も展開しており、製鉄のCO<sub>2</sub>削減に寄与している。

MIDREXプロセスは、これまで電炉用鉄源向けの還元鉄プラントとして生産量を伸ばしている。還元鉄生産の中で60%のシェアを誇る安定したプロセスで、さらなるCO<sub>2</sub>削減に向け、天然ガスと水素を任意の割合で混合して運転できるMIDREX Flex<sup>TM</sup>注4)と、水素100%で操業するMIDREX H<sub>2</sub><sup>TM</sup>注5)も展開している。

高炉やMIDREXプロセスは、鉄鉱石から酸素を取り除く還元反応を起こすプロセスである。ここで、化学反応を取り扱う場合、化合物や圧力、温度が決まれば、反応の最終状態（平衡状態）は一意に決まるため、平衡状態に到達するプロセスでは、反応経路や速度を考慮する必要はない。しかし製鉄プロセスでは、平衡状態に到達する前に製品を回収するケースが多いため、品質は、反応経路や速度の影響を受ける。

高炉プロセスやMIDREXなどの還元鉄プロセス、ペレットプラントを有する当社では、様々な成分や性状を持つ原料を、還元溶融条件に合わせて設計することも含めたプロセス最適化を行ってきた。このために、上述の反応経路や速度の解析技術、また反応経路や速度に影響する原料性状を評価し解析する技術を開発してきた。以下2章では、マイクロマクロ的な原料や還元鉄性状の分析解析技術を、3章ではプロセス解析制御技術に関して述べる。

## 2. マイクロマクロ的な原料－製品性状の分析解析技術

### 2.1 原料－製品の鉱物相や性状の評価技術

原料の鉄鉱石形状は塊状、粉状など様々あり、塊状の鉱石はそのまま炉に投入される場合もあるが、粉状鉱石の直接炉内投入は、ガス通気性を悪化させ操業が不安定になる。このため、副原料も含めた焼成などの工程を経て、塊状にする前処理（塊成化）が行われている。この焼成時に、副原料と鉄鉱石の一部が反応し、複合的な酸化物（複合酸化物）が生成する。これらの生成量や組成などは、強度や還元溶融工程に影響を与えるため、量や組成のコントロールが大きな課題であり、これを評価するための技術を開発してきた。

特徴的な技術として、試料全体の複合酸化物を自動で同定する装置（鉱物粒子解析装置：MLA）を導入した。この装置は、画面全体の微小要素ごとにEDXスペクトルを取得しデータベースとの照合を経て鉱物相を特定す

るもので、画像中の鉱物を種類ごとに図示することが可能である（図1）。この解析と実験とを組み合わせることで、最適な原料配合レシピを迅速調査することが可能となった。例えば、この装置によるデータ収集解析の結果として、高炉装入原料である焼結鉱の原料配合レシピ設計最適化による大幅なコストダウンなどの成果を得ている。

また、還元溶融時には、原鉱石粒の大きさや、微量成分の種類・量の影響を受けることが分かっているため、反応途中の成分や性状の分析も行っている。図2はMIDREXプロセスの製品である還元鉄（以下、DRIという）を対象に、鉄鉱石ペレット銘柄を変え、条件を揃えて還元させた場合の未反応部の性状やその成分をマイクロマクロ的に調査したものであり、原料によって還元後の酸化鉄の存在の仕方が違うことを示している。反応途中のDRIにも同様の解析を行うことで、銘柄ごとの反応経路を明らかにしている。この情報は、MIDREXプロセスの還元シャフト炉内の反応評価や、後述する反応解析時のモデルやパラメータ設定の際に役立てている。

### 2.2 非破壊構造評価技術（X線CT）

焼結鉱・ペレットの物理的な性状（粒子の大きさ、空隙の繋がりなど）も反応に大きく影響を与える。この内部構造を調査する方法として断面観察が一般的であるが、断面観察では二次元的な情報しか得られず、粒子や

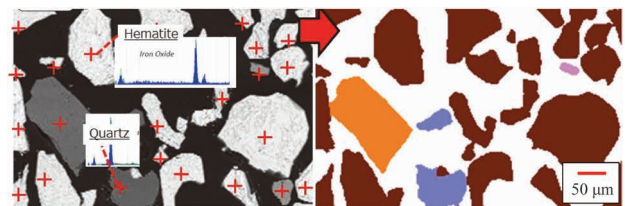


図1 MLA解析例  
Fig.1 Example of MLA analysis

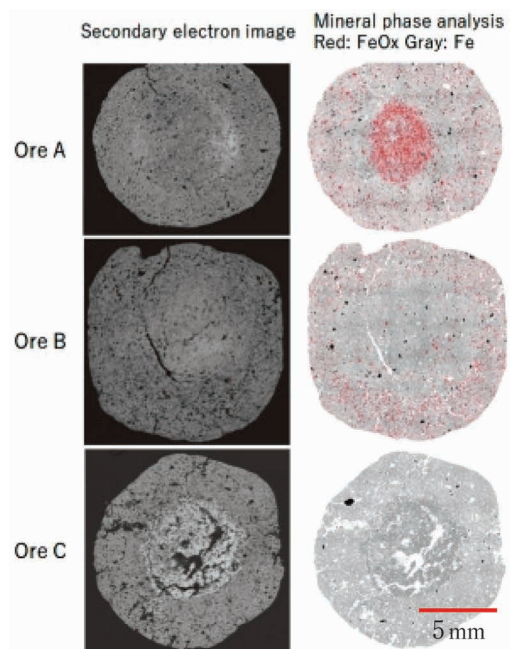


図2 MLAによるDRIの解析例  
Fig.2 Examples of DRI analysis by MLA

脚注4) MIDREX Flex<sup>TM</sup>は当社の商標である。

脚注5) MIDREX H<sub>2</sub><sup>TM</sup>は当社の商標である。

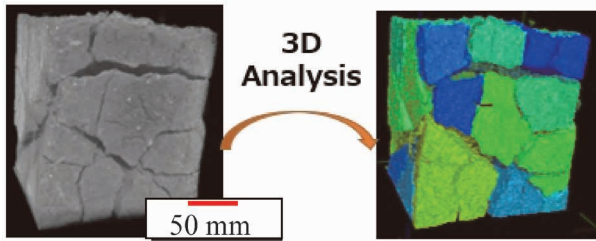


図3 X線CT解析事例  
Fig.3 Example of X-ray CT analysis

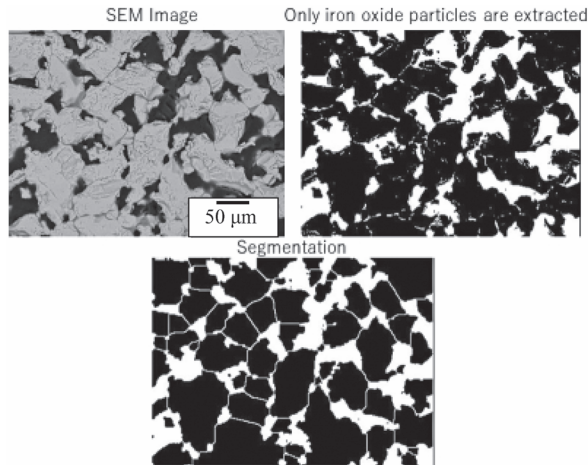


図4 酸化鉄ペレットの画像解析例  
Fig.4 Examples of image analysis of iron oxide pellets

空隙の三次元的な構造はわからない。そのため、非破壊で三次元的に塊の構造を評価できる、X線CTによる解析を行っている。その一例として、焼結鉱やコークスなどを、亀裂を境界とした領域に分割する処理を行ったものを図3に示す。このように、三次元的な画像を得た後に、後述の画像解析技術を用いて、粒子径や気孔径の分布など、物理的な性状を定量的に把握し、各種操業のボトルネック改善に役立てている。

### 2.3 画像解析技術

ここでは、前述の評価で得た画像や、それを重ね合わせて得た三次元的な情報を定量評価する画像解析技術の一例を紹介する。画像解析技術は、画像中の色調差や形状差などを用いて特徴的な粒子群に分類し、それらの位置関係や構造を数値的に解析するもので、例えば、ペレット中の酸化鉄、不純物、空隙などの粒の大きさやその分布を評価できる。この技術をペレットの解析に用いた事例を図4に示す。図4左上はSEMで取得した画像で、この画像中の白い部分が酸化鉄であり、この部分だけを黒く塗りつぶし抜き出すことで図4右上の画像になる。ここで、酸化鉄粒子は焼結し、繋がっているものの、局所的には粒の大きい(太い)部分と小さい(細い)部分が存在する。例えば、還元速度には粒の大きい部分が含まれる割合が影響する。これを評価する場合、一般的な画像解析では、ある一つの繋がった画素群は一つの粒子とみなされるため、画像を単純に解析するだけでは、粒子の大小に関する情報は得られない。そこで、粒子のくびれ部分を境界の始点として、解析上別々の粒子に分離するような手法(詳細は割愛)で画像を処理することにより、図4下の画像を生成し、この画像に対して画像解

析を行うことで、粒の大小を評価している。このような方法を用いて、酸化鉄や空隙などを同時に解析し、銘柄ごとに原料の物理的な特徴を定量評価しており、これと豊富な実機データとを照らし合わせることで、原料性状と製品品質を結び付けている。このデータを基に、原料の物理性状から実プラントでの製品品質を予想することが可能となっている。

## 3. プロセス解析制御技術

### 3.1 原料の塊成化工程における性状制御技術

塊成化工程の一つであるペレット製造では、粉状の鉱石を必要に応じ副原料と混合し、転動することなどにより団子状にしたのち、焼成する。この工程では、鉱石のもつ水分量の影響で、焼成時に急激に蒸発し破裂するなどの課題が発生する。これらの課題に対応するため、原料性状に応じた技術開発<sup>2)</sup>を行っている。また、焼成後ペレットの高炉での被還元性を改善するための副原料(ドロマイト)添加や粒径制御<sup>3)</sup>にも取り組んでいる。ほかにも高硫黄含有鉱石の使用に向けた排ガス中SO<sub>x</sub>の低減など様々な技術を開発してきた<sup>4)</sup>。今後も、ペレット性状制御技術や、2章で述べた原料評価技術と併せて、低品位化が予想される鉄鉱石を使いこなすための技術を継続して開発していく。

また、当社はペレット製造ノウハウを持つのみならず、ペレット製造設備(ペレットプラント)のエンジニアリング事業も行っている。当社ペレットプラントは転動しながら加熱するグレートキルン方式であり、すべてのペレットがほぼ均一に加熱され温度などの調整も容易である。このため、均一で高品質な製品ペレットを得られることが特徴である<sup>3)</sup>。さらに、お客様のニーズや鉱石性状に合わせた最適な提案ができるような体制も構築している。種々装置によるサンプルテストにより、指標となるペレット品質を確保しているか確認しながら、プロセス設計を行っている<sup>5)</sup>。

### 3.2 反応評価解析技術

MIDREXプロセスは、固体のペレットをシャフト炉に投入し、天然ガス由来の一酸化炭素と水素によりガス還元する。ここでの生産量は、シャフト炉の容積とペレットの炉内滞留時間により決まるため、滞留時間を短くすること、すなわち還元反応を速めることが生産性の向上に繋がる。原料ペレット性状により還元反応挙動は異なるため、これを把握し、これに応じて操業の改善につなげる目的で、図5のような試験装置により反応率の経時変化を評価している。この試験装置では、MIDREX炉内ガスや温度の経時変化をほぼ再現しながら、オンラインで重量測定することにより、反応の経時変化を測定できる。このような装置を用い、例えば100% H<sub>2</sub>条件下で起こる反応率データも収集して、適正な実機操業条件の設定に活用している。

さらに、原料銘柄によって反応率が変化するメカニズムを理解するため、また後述する実炉内反応の総合的な数値計算を行うために、反応速度解析も行っている。一例として、MIDREX還元反応について、ガス温度や組



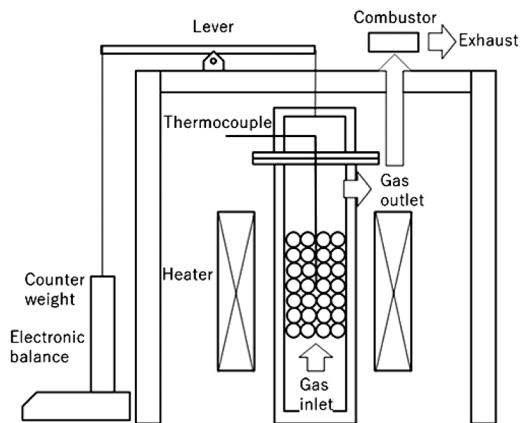


図5 MIDREX 基礎試験装置  
Fig.5 MIDREX basic test furnace

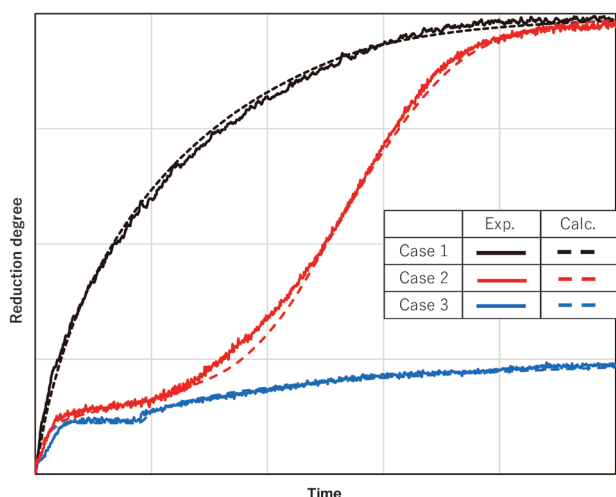


図6 反応速度解析例  
Fig.6 Example of reaction rate analysis

成による実験の還元曲線変化と反応速度解析による計算との比較を図6に示す。解析モデルや反応式などの詳細は省くが、2章1節で述べた原料評価技術も活用し、反応途中で起こる現象を確認しながら、現象に応じて適切な反応モデルやパラメータを設定している。温度やガス組成の広い範囲で、実炉のようなガス組成や温度が徐々に変化する複雑な条件においても、実験結果の再現に成功している。

### 3.3 実炉内反応の総合的な解析技術

実炉における品質と生産性の両立や改善のためには、炉内反応状況の理解が必須であり、その一つのツールとして、炉内の総合的な数値計算技術も開発している。実炉では、ある瞬間の反応により起こるガスや温度変化は、拡散や対流、伝熱などにより、次の瞬間のガス組成や温度などを変化させ、反応に影響する。この対流や伝熱などの影響を評価し、実炉全体の炉内反応を解析するために、前節で述べた反応解析技術と熱・流体解析技術との組み合わせが必要となる。詳細な解析方法の説明は省くが、例えばMIDREXプロセスのシャフト炉内状況の再現のために、CFD (Computational Fluid Dynamics) 計算による炉内の熱や流体流れと化学反応解析を連成した解析を行っている。この解析結果と実炉データの比較、前節で述べた反応解析技術を用いた検証を繰り返し

て各種パラメータを適正化しており、実炉の還元や浸炭等の反応率と、温度等の実測値を高い精度で再現できるようになった（本号「グリーン社会実現に向けた生産プロセスと製品を支える熱・流体制御技術」p.65参照）。この炉内総合解析シミュレーション技術は、各種プラントでの反応に関する課題の抽出や、反応を適正化するための操業条件の提示に活用している。

## 4. 製鉄プロセスのCN化に向けた当社の取り組み

現在の製鉄法の主流は高炉法であり、これは低コストかつ高いエネルギー効率で大規模に製鉄が可能で、高度に洗練されたプロセスである。しかしながら、すでに述べたとおり、現行では還元剤として石炭などの炭素源が用いられるため、GHGの一つであるCO<sub>2</sub>が原理的に発生する。鉄鋼業で発生するCO<sub>2</sub>の大部分は還元工程に由来するため、当社は高炉還元剤比低減のための還元鉄投入や原料被還元性向上の取り組みを行っている。そのうえで、将来のCN達成のためにはCO<sub>2</sub>回収技術（二酸化炭素回収・有効利用・貯留：CCUS）を導入するなど、いくつかの方法が考えられる。ここでは、MIDREXプロセスを用いたKOBELCOグループのCO<sub>2</sub>低減ソリューションについて述べる。

MIDREXプロセスは、3章2節で述べた通り、天然ガスを改質した一酸化炭素と水素を還元剤としているが、還元ガスの全量を水素ガスに置き換え（MIDREX H<sub>2</sub>プロセス）、再エネ電力やグリーン水素を活用することで、ほぼCO<sub>2</sub>排出量ゼロでの稼働が可能である。

技術的には、MIDREXプロセスのガスを水素100%に置換することで、炉内の吸熱反応の割合が従来よりも増え、温度バランスが変化するなど、いくつかの課題がある。しかしこの課題は、これまでのMIDREXプラント操業データやノウハウと、上述した様々な基盤技術を用いた将来の実機の炉内状況の予想とを組み合わせることで、解決できている。具体的には、ラボ試験と、炉内総合解析シミュレーション計算により、シャフト炉のデザインについて大幅な変更をしなくても、100%水素を適用してDRIを生産することが可能なことを検証した<sup>6), 7)</sup>。

また、MIDREX H<sub>2</sub>プロセスと電気炉とを組み合わせることで、使用電力のCO<sub>2</sub>負荷によって削減量は異なるが、現状の高炉-転炉プロセスで粗鋼を製造する場合と比べ、CO<sub>2</sub>排出量を80%以上削減することが可能である<sup>6)</sup>。

水素社会への転換は、地域の事情に応じて進行すると思われる。その多様なニーズに対応できるプロセスとして、天然ガスと水素操業の切り替えが可能なMIDREX Flexプロセスも保有している。現時点で当社グループは、スウェーデンのH2グリーンSteel社からMIDREX H<sub>2</sub>プロセスを、ドイツThyssenkrupp社からMIDREX Flexプロセスを受注しており、今後これらプラント操業データからフィードバックを受け、基盤技術並びに操業ノウハウをさらに更新し、CNな鉄源やそれを製造可能なプラントを市場に提供していく。



むすび=当社は、国内の一貫製鉄所で唯一、自社ペレットプラントを持つのみならず、実績のあるMIDREXプロセスなどの還元鉄製造プラントを市場に供給している。このような背景から、原料のミクロ的な解析技術、原料一粒に着目した実験技術や化学反応の速度解析技術、さらに、それらミクロ的な反応とマクロ的な反応を統合した、実炉内の総合解析シミュレーション技術という、原料から還元鉄までを一貫して評価・最適化できる技術を培ってきた。この技術群を背景に、水素社会への転換や変化する原料品位など地域の事情に応じて柔軟に対応できることが当社ならではの強みである。この強みを活かし、現在の高炉法に比べCO<sub>2</sub>を大幅に削減する方法の一つとして、MIDREX H<sub>2</sub>やMIDREX Flexプロセ

スの普及、並びにそこで製造される低炭素鉄源の市場への提供により、当社は製鉄プロセスのCN化に挑戦するとともに、鉄鋼業全体のCN化に寄与していく。

#### 参 考 文 献

- 1) <https://www.globalefficiencyintel.com/new-blog/2021/global-steel-industrys-ghg-emissions>, (参照2023-06-26)
- 2) 加藤嗣憲ほか. 材料とプロセス. 2020, Vol.33, p.23.
- 3) 笠井昭人ほか. 材料とプロセス. 2017, Vol.30, p.3.
- 4) 加藤嗣憲ほか. R&D神戸製鋼所技報. 2019, Vol.69, No.2, p.9-12.
- 5) 山口晋一ほか. R&D神戸製鋼所技報. 2010, Vol.60, No.1, p.12-21.
- 6) ビンセント シェヴリエほか. R&D神戸製鋼所技報. 2020, Vol.70, No.1, p.81-87.
- 7) 道下晴康ほか. ふえらむ. 2022, Vol.27, No.8, p.542-551.

(解説)



# サステナブル社会の実現を支える吸着分離・触媒反応技術

藤浦貴保\*<sup>1</sup> (博士(工学))

## Adsorptive Separation and Catalytic Reaction: Indispensable Technologies for Sustainable Society

Dr. Takayasu FUJIURA

### 要旨

当社では、1980年代より吸着分離技術および触媒反応技術を練磨し、製鉄・化学工業における特長あるガス分離プロセスの実用化、火力発電所における環境保全などを通じて「グリーン社会への貢献」および「安全・安心なまちづくり・ものづくりへの貢献」を続けてきた。近年、カーボンニュートラルやサーキュラーエコノミーへの動きが加速する中、これまで捨てられていた資源を有効に利用し、環境負荷のより少ない持続可能な社会を実現する上で、「物質を高度に分離する」「物質を価値あるものに変換する」ための両技術はいっそう重要になるものと考えられる。本稿では、両技術への取り組みの変遷を適用例を挙げながら紹介し、将来に向けた展望に触れる。

### Abstract

Since the 1980s, Kobe Steel has been refining adsorption separation technology and catalytic reaction technology and has continued to contribute to a “Green society” and “the creation of safe and secure communities and manufacturing” through the practical application of distinctive gas separation processes in the steel and chemical industries, as well as environmental conservation in thermal power plants. In recent years, as movements towards carbon neutrality and a circular economy have accelerated, it is believed that these technologies, which involve highly separating substances” and “transforming substances into valuable entities, will become even more important in realizing a sustainable society with a reduced environmental burden while effectively utilizing previously discarded resources. This article introduces the evolution of both technologies and provides examples of their applications while discussing prospects for the future.

### 検索用キーワード

ガス分離, 圧カスイング吸着, PSA, CO吸着剤, 脱硝触媒, 寿命予測, 火力発電, CCU, 水電解, 水素製造

まえがき = 各種の工業プロセスや環境浄化プロセスにおいて、多くの成分からなる気体や液体から目的物質を分離し、除去、精製、濃縮、回収などを行うことは必須の操作であり、この操作には吸着剤を利用した吸着分離法が幅広く用いられている。また、化合物の合成（ないし分解）では、効率的に物質変換を行うため、ほとんどの場合で化学反応の活性化エネルギーを低下させ反応速度を速める触媒が用いられる。すなわち、吸着分離、触媒反応とも、各種プロセスの根幹を成す汎用的な技術として幅広く産業や社会で利用されている。

当社グループは、エンジニアリング事業において古くからガス分離装置・プラント事業を手掛ける中で、吸着分離方式のガス精製プロセスの開発・実用化に取り組み、精製ガスの純度や回収率に優れるプロセスとして各種工業用途に採用いただいている。また、化学プラントの設計・建設事業を通じて触媒反応技術に関する知見も豊富に蓄積し、エンジニアリング分野のみならず、高度な環境保全やプロセス機器開発など他領域への応用を進めている。これらの取り組みにおいて、吸着剤や触媒の基礎評価はもとより、ラボ試験やシミュレーションによるプロセス最適化、プラントシステムの設計・制御など、多

岐にわたる技術・ノウハウを要素基盤として構築し、当社ならではの新たな製品・プロセスの開発に活用している。

現行の製品・プロセスに加え、将来のカーボンニュートラル達成に向けた温暖化ガスの発生・拡散抑制やエネルギー転換、環境保全などの領域においても吸着分離技術および触媒反応技術がますます重要となることは論をまたない。当社グループにおいても両技術をいっそう競争力あるコア技術として高度化し、社会に役立つ製品・プロセスを提供し続けることが、マテリアリティとして標ぼうする「グリーン社会への貢献」および「安全・安心なまちづくり・ものづくりへの貢献」において不可欠である。本稿では、当社グループにおける両技術への取り組みの変遷をその応用製品・プロセスとともに紹介し、将来に向けた展望を述べる。

### 1. ガス分離・精製プロセス

当社が吸着分離技術に注力し始めたのは1980年代にさかのぼる。当時、加古川製鉄所では、転炉底吹きガスとしてアルゴン (Ar) ガスを用いていたが、Arガス価格が高く、コスト低減が課題となっていた。そこで、転

\*<sup>1</sup> 技術開発本部 機械研究所

炉副生ガス（LDG）中に多量に存在する安価な一酸化炭素（以下、CO）を高純度化して使用すべく、湿式法（気-液吸収）によりCOを分離回収する「COSORBプロセス」を技術導入し、1985年にプラント運転を開始した<sup>1)</sup>。その後、同プロセスの薬液成分を応用してCOを選択吸着する独自組成の吸着剤（以下、CO吸着剤）を関西熱化学（株）と共同で開発した。そして同吸着剤を用いた乾式法（気-固吸着）によりCOを高度分離・精製する「CO-PSAプロセス」を1989年に完成させ、加古川製鉄所にプラントを建設したのが、吸着分離をコアとしたプロセスプラント事業の始まりである<sup>2)</sup>。

1990年代以降は、CO-PSAプラント事業を継続しつつ、吸着分離に関する試験評価インフラや解析技術の拡充を図り、環境浄化用途や産業分野向けの新たなプロセスの開発に取り組んだ。とくに、2000年代後半からは、将来の水素社会の到来を見据えた水素精製プロセスや、石油化学工業においてエチレンなどの化合物を有効利用するためのオレフィンPSAなど、環境負荷低減や持続可能社会の実現に貢献する吸着分離プロセスの開発・実用化を進めている。

### 1.1 CO-PSAプロセス

上述の通り、本法は独自組成のCO吸着剤を用いてCOを高度に分離精製するプロセスである。本プロセスの基本フローシートを図1に示す<sup>3)</sup>。吸脱着の方式は圧力スイング法（Pressure Swing Adsorption；PSA）であり、CO吸着剤が充填された四つの吸着塔で昇圧→吸着→減圧→洗浄→脱着の操作を切り替えながら運転することで、純度99%以上のCOを80%以上という高い回収

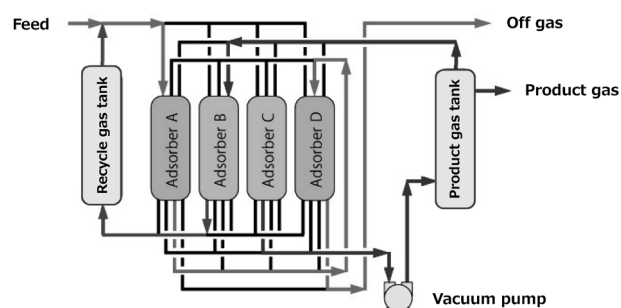


図1 PSAプロセスの基本フローシート  
Fig.1 Process flow sheet of pressure swing adsorption



図2 加古川製鉄所に建設された当社商用第一号のCO-PSAプラント  
Fig.2 Commercial CO-PSA plant installed in KOBEL STEEL Kakogawa works

率で連続的に得ることができる<sup>4)</sup>。CO回収・精製の多くは深冷分離法や湿式吸収法で行われているのに対し、本法は業界唯一の乾式によるCO精製プロセスであり、乾式であるが故、比較的設備が簡単で操業・管理が容易であることも大きな特長である。図2に、1989年に転炉副生ガスからのCO精製用として加古川製鉄所に建設した商用1号機のプラント外観を示す。1990年代以降、加古川製鉄所での増設や、化成品製造プロセス中のCOガス分離精製用など、累計で8件のプラントを納入し、各設備とも順調に運転を継続している。現在は（株）コベルコE&Mが事業所管して設計・製作・建設を行い、2019年、2023年にもプラントを建設している。

### 1.2 プロセスを支える要素・基盤技術

吸着分離技術を利用したガス精製プロセスの開発・設計では、吸着剤の基本性能を正確に評価する技術はもとより、その性能を引き出す吸着操作を適正化するプロセス評価技術、さらに想定要件（原ガス組成・ガス量、製品ガスに求められる純度、スループットなど）に合うプラントとして実機化するプロセス設計技術が不可欠である。

当社では、吸着剤性能評価や小スケールのプロセス評価を行う要素技術および試験評価インフラを備え、プロセス開発に役立てている。以下、上述したCO吸着剤およびCO-PSAを例に、性能評価および基本プロセス設計の実際を述べる。

CO吸着剤の外観を図3に示す。同剤は、CO吸着に適した細孔構造を有する多孔質アルミナ担体の表面に銅化合物（CuCl）を担持した組成であり、Cu<sup>+</sup>とCOが錯体を形成することでCOを選択的に捕捉する化学吸着剤の一種である。図4には、ゼオライトなどの物理吸着剤と比較した吸着機構の模式図を、図5には吸着物性測定装置にて実測評価したCO吸着剤の特性を示す<sup>5)</sup>。CO吸着剤は、PSAの実用操作圧の範囲において、ゼオライトなどの物理吸着剤に比較し3倍以上のCO吸着容量を有する。また、一般に物理吸着剤は選択吸着性に乏しくCO以外の物質も共吸着するのに対し、CO吸着剤はN<sub>2</sub>やCO<sub>2</sub>の共存下でもCOに対して高い選択吸着性を示す。

吸着剤の性能を把握した上で、プラントの設計諸元を決定するためのプロセス設計を行う。当社では、汎用的な単塔式の吸着装置のみならず、図6に示す4塔式のラボスケールPSA試験装置を活用し、シミュレーション

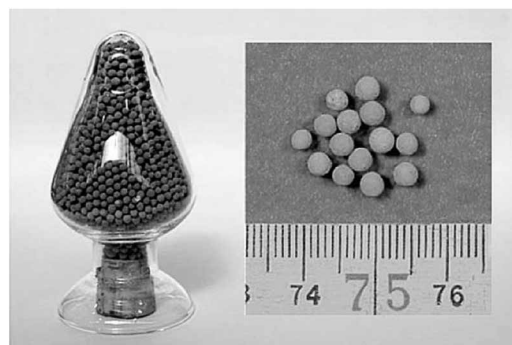


図3 独自開発のCO吸着剤  
Fig.3 Original CO adsorbent



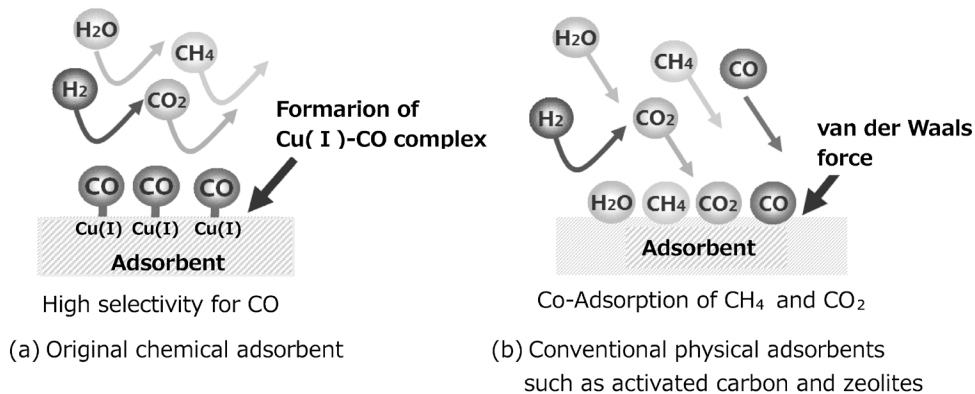


図 4 CO に対する吸着機構の模式図  
Fig.4 Illustrative scheme of adsorption mechanism for CO

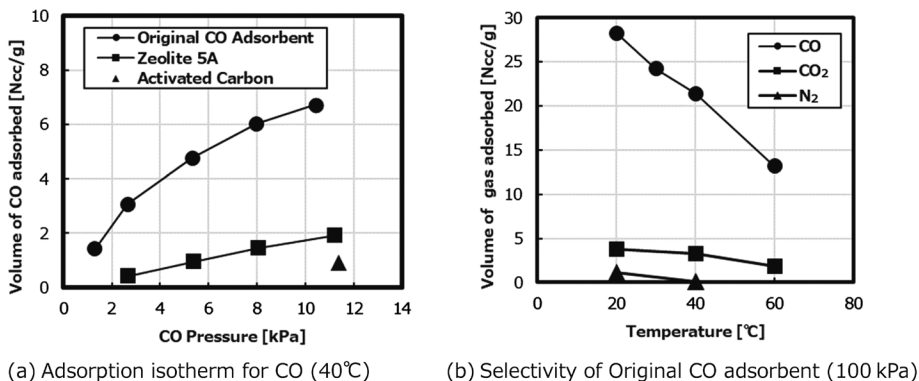


図 5 CO 吸着剤の代表特性  
Fig.5 Adsorption characteristics of original CO adsorbent

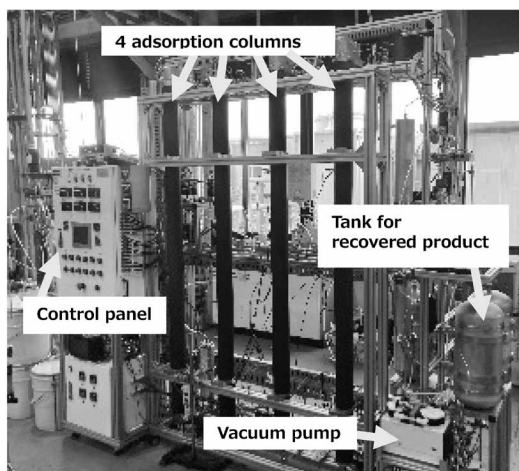


図 6 4 塔式 PSA 試験評価装置  
Fig.6 4-column PSA test apparatus

も併用して PSA プロセス特有の設計技術・運転ノウハウを蓄積している。すなわち、実機に即した昇圧→吸着→減圧→洗浄→脱着のサイクル試験を通じて吸着塔のサイジングや運転条件を最適化し、吸着後の系内に滞留する CO 以外の微量成分を効率的に排除するなど、当装置による試験・実証が全体プロセスの構築に大きな役割を果たし、元来トレードオフの関係にある製品ガスの高純度化と高回収率の両立を実現している。また、連続運転評価から吸着剤容量の経時変化を把握し設計に織り込むなど、当装置から得られるデータやノウハウがプロセスの長期信頼性担保にもつながっている。

### 1.3 新たな用途展開

#### 1.3.1 水素精製 PSA システム

2000 年代には、将来の水素社会の到来を見据え、CO 吸着剤を応用した燃料電池用水素向けの水素精製 PSA システム (H<sub>2</sub>-PSA) の開発に取り組んだ<sup>5)~7)</sup>。石油由来の改質反応ガスから燃料電池用水素を精製する場合、電池の被毒成分である不純物 CO を高度に分離除去する必要がある。CO 吸着剤は H<sub>2</sub> 雰囲気下でも CO に対する高い吸着選択性があり、いったん捕捉した CO の拡散も極めて低い。このため、水素供給設備の DSS (Daily Start & Stop; 日間起動停止) 運転において、起動後のガス組成安定化のためのアイドリングが不要であり、運転開始直後から ISO 規格 (CO 濃度 ≤ 0.2 ppm) を満たす水素の供給が可能である。また、汎用的な吸着剤を用いる PSA と比べ吸着剤量を減らせることで吸着塔をコンパクト化でき、高い水素回収率が得られることも特長である。当 PSA システムは、今後本格普及が想定される燃料電池向けや、CCU (Carbon Capture and Utilization) プロセスにおける CO<sub>2</sub> の水素還元など、水素が必要となる機器・プロセスへの用途展開を見込んでいる。

#### 1.3.2 オレフィン PSA プロセス

CO 吸着剤は、プラスチックや樹脂の原料となる低級オレフィン類 (二重結合を有するエチレン、プロピレンなど) も選択的に吸着できる<sup>8), 9)</sup>。当社と (株) コベルコ E&M は、CO-PSA プロセスの技術知見・ノウハウを基に、石油化学プラントの各種反応オフガス中の残留オレフィンを高純度・高効率 (純度 99% 以上、回収率

80%以上)で回収可能なオレフィンPSAプロセスを開発した。従来燃焼処理されていた混合ガスから付加価値の高い高純度オレフィンを回収でき、環境負荷の低減にも大きく貢献できる。また、FT反応によるオレフィン合成など、将来のCCU関連プロセスでの活用も期待できる。

## 2. 触媒寿命予測技術

触媒反応技術に関しては、1970年代以降の化学プラントEPC事業にて触媒反応プロセスが含まれる案件を多数手掛け、一部はお客様と共同での工業化も行う中で多くの知見を蓄積してきた。その後プラントエンジニアリング事業は縮小したものの、触媒反応に関する要素・基盤技術を主に技術開発本部で担保しつつ、火力発電所における環境保全技術や、新たな水電解プロセス機器の開発など、エンジニアリング事業以外の領域に应用の幅を広げている。

### 2.1 神戸発電所における高度脱硝・触媒寿命予測

当社の神戸発電所では、大気汚染防止の取り組みとして世界最高レベルの排ガス処理システムを稼働させている<sup>10),11)</sup>。石炭燃焼ガスに含まれる窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)は、脱硝触媒を充填した排煙脱硝装置において、外部から供給するアンモニア(NH<sub>3</sub>)と触媒上で高温反応させ、無害なN<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oに変換する(選択的接触還元法; Selective Catalytic Reduction)。図7に脱硝工程を含む火力発電所の排ガス処理フローを示す。脱硝性能や触媒の劣化進行度は、発電に使用する原料石炭の性状変動をはじめ当発電所固有の操業諸条件に左右される。そこで、当社では脱硝触媒の性能や劣化特性を評価する独自

技術を開発して高精度の触媒寿命予測を可能とし、安定した高度脱硝運転を継続している。

### 2.2 プロセスを支える要素・基盤技術

触媒反応の評価やプロセス設計は、吸着分離の場合と同様、触媒の基本性能・特性を評価した上で、ラボスケールでの反応プロセス評価、さらにスケールアップでの性能検証を経て実機設計というステップが必須となる。表1に、当社が保有する触媒反応関連の評価技術および試験インフラを示す。上述した脱硝触媒の性能評価用試験装置に加え、ペンシルスケール(数グラムの触媒使用量)にて高温高圧下における各種反応を評価する試験装置や、触媒を用いた電解プロセスの効率を評価する試験装置などを揃え、触媒性能把握やプロセスの基本設計に活用している。

図8に、脱硝触媒評価装置の外観を示す。当装置は、

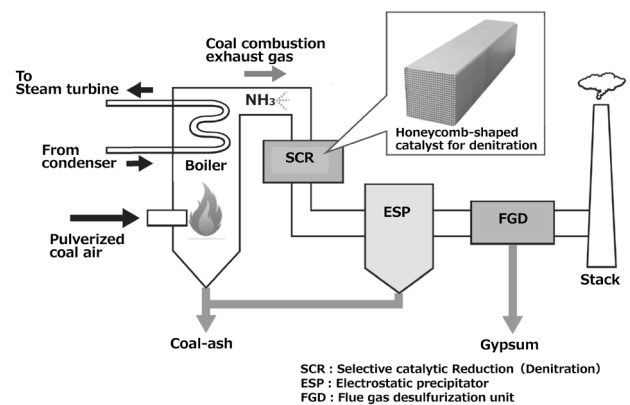


図7 神戸発電所の排ガス処理フロー

Fig.7 Process flow of exhaust gas treatment in Kobe Power Plant

表1 当社が保有する触媒反応関連の評価技術および試験インフラ

Table 1 Evaluation technologies and testing apparatus on catalyst reaction owned by Kobe Steel

Category	Evaluation/Analysis	Apparatus	Application
Catalytic reaction analysis	-Evaluation of low-concentration DeNO <sub>x</sub> reaction -Modelling of catalyst lifetime Prediction	-Lab-scale test equipment for selective catalytic reduction -4-column PSA test apparatus	DeNO <sub>x</sub> for powerplants and industries •Analysis on effect of types of coal •Catalyst performance
	-Evaluation of conversion and synthetic Reaction - CO <sub>2</sub> conversion - Hydrogen generation	-high temperature/high pressure catalyst test equipment	CCU (Carbon capture & Utilization) •Methanation •Reverse water gas shift reaction
Electrochemical reaction analysis	-Evaluation of electrolysis process efficiency - I-V characteristic - I-R characteristic	-Electrolytic process evaluation equipment	Water electrolysis process •PEM (Polymer electrolyte membrane) electrolysis •AEM (Anion exchange membrane) electrolysis

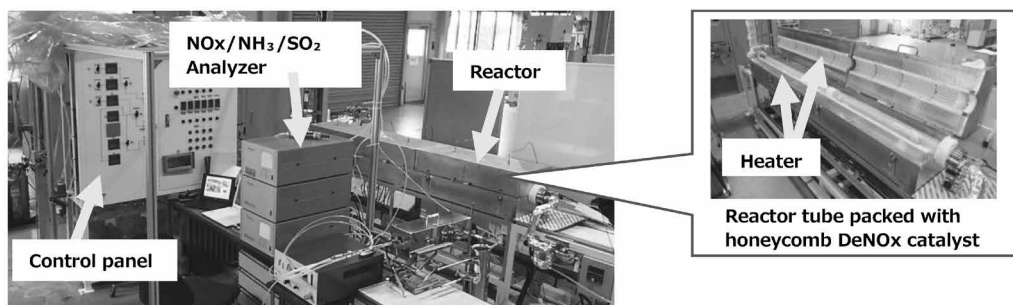


図8 脱硝触媒反応評価装置

Fig.8 Test apparatus for DeNO<sub>x</sub> catalyst reaction



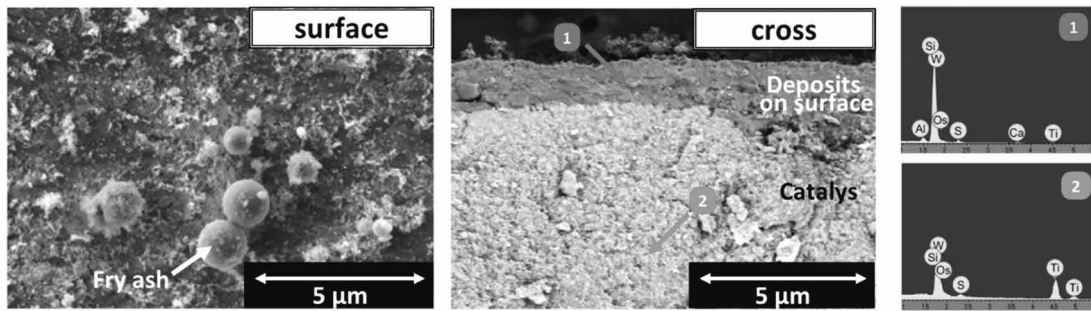


図9 使用した脱硝触媒表面のSEM観察およびEDX分析例  
 Fig.9 Example of SEM images and EDX analysis on surface of degraded DeNOx catalyst

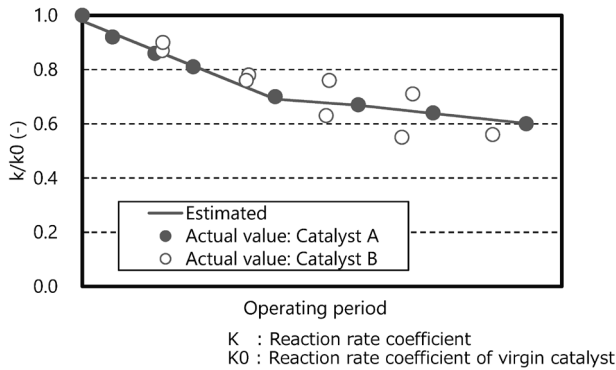


図10 脱硝触媒の使用期間に伴う反応速度定数の変化  
 Fig.10 Change of reaction rate coefficient of DeNOx catalyst with operating period

ハニカム型触媒の評価に特化した当社オリジナルの試験装置であり、実際の脱硝触媒と同じ全長の試料を装填した評価が可能である。また、高精度のガス分析装置を設けることで当社特有の極低NOx濃度域における触媒性能を評価でき、実機操業条件の適正化に役立っている。

触媒反応プロセスの多くは高温条件であることや、実際のプロセスガスには触媒を劣化（反応活性を低下）させる被毒成分が含まれる場合も多いことなどから、触媒評価においてはプロセスに供した触媒の分光分析や表面観察により性状変化を把握し、劣化要因を解析・特定することも極めて重要となる。図9に、火力発電所の排煙脱硝装置にて一定期間使用し性能低下した脱硝触媒のSEM観察およびEDX分析例を示す<sup>12)</sup>。触媒表面は石炭燃焼ガス由来のSiO<sub>2</sub>を主成分とする付着物で被膜状に覆われている。性能低下の主要因がこの被膜による触媒表面から内部へのガス拡散の障害であるものと特定し、継時的な付着物堆積の進行と性能低下の関係から性能予測モデルを構築した。図10に、触媒の使用期間（時間数は不記載）に対する反応速度定数変化の予測値と実測値を示す<sup>12)</sup>。予測値は実測値とよく一致しており、このモデルから触媒の寿命（性能下限に至る使用年数）を予測することができる。当社の神戸発電所ではこれを実適用して適切な触媒交換時期を決定し、脱硝装置の安定稼働と操業コスト低減の両立を実現している。

### 3. 将来に向けた展望

カーボンニュートラル（CN）やサーキュラーエコノミー（CE）の動きが加速する中、吸着分離技術や触媒反応技術の重要性が今後ますます高まることは間違いな

い。

当社においても、これまでに重ねた実績や両技術の要素・基盤を応用し、CNやCEに貢献しうる当社ならではの製品・プロセスの創出や用途展開を目指している。なかでも、国内外で技術開発が進むCCUでは、CO<sub>2</sub>の還元によるC1化合物（CO、メタン、メタノール）やオレフィンの合成プロセスにおいて、目的成分を効率よく分離回収することが全体効率や経済性を左右する重要な要素であり、回収ガスの高純度と高取率を特長とする当社PSAの適用が広がることが期待される。また、水素インフラ関連では、(株)神鋼環境ソリューションが1990年代に商品化し水電解水素製造装置として国内トップの実績を有する「HHOG（High-purity Hydrogen Oxygen Generator）」について、触媒反応評価技術などを活かしながら水素製造効率の向上や大容量化に取り組んでおり、ニーズが顕在化している再生可能エネルギーを利用した水電解による「グリーン水素」の普及に努めようとしている<sup>13)~15)</sup>。

上述の例に限らず、これまで培った吸着分離および触媒反応の技術基盤を今後いっそう強化しながら、CNやCEの進展に伴う需要拡大をビジネスチャンスとして捕捉していく。

むすび=当社グループは、1980年代から吸着分離技術および触媒反応技術をコアとした製品・プロセスを開発・実用化してきた。事業再編も含めた様々な変遷もありつつ、現在に至るまで多くのお客様にご評価いただける製品・プロセスを生み出してきた取り組みの一端を本稿にてご理解いただければ幸いです。

われわれの日々の生活が地球規模でのCO<sub>2</sub>排出削減や資源循環の動きと不可分になる中、両技術はこれらにまつわる課題を解決し、安全・安心で持続可能な社会の実現にいっそう資するものでなければならない。今後も両技術を深耕しながら、将来にわたって時代の要請に応える製品・事業の創出を目指す。

#### 参考文献

- 1) 小堺和泉ほか. R&D神戸製鋼技報. 1986, Vol.36, No.2 (1986), p.61-64.
- 2) 青方 卓ほか. R&D神戸製鋼技報. 1989, Vol.39, No.3 (1989), p.45-48.
- 3) コベルコE&M ホームページ.  
<https://www.kobelco-em.jp/product/plant/copsa.html>  
 (参照：2023-06-09).



- 4) 清水邦彦ほか. 新訂三版 最新吸着技術便覧. エヌ・ティー・エス, (2020), p.107-112.
- 5) 神戸製鋼所 ホームページ.  
[https://www.kobelco.co.jp/products/hydrogen\\_station/related\\_technologies/psa/index.html](https://www.kobelco.co.jp/products/hydrogen_station/related_technologies/psa/index.html) (参照: 2023-06-09).
- 6) 半谷広史ほか. 化学工学会秋季大会研究発表講演要旨集. Vol.48th (2016), p.E204.
- 7) 半谷広史ほか. 日本機械学会九州支部講演論文集. 2017, Vol.70th, p.53-54.
- 8) 松岡 亮ほか. 日本エネルギー学会大会講演要旨集. 2010, Vol.19, p.334-335.
- 9) 松岡 亮ほか. 化学工学会年会研究発表講演要旨集. 2011, Vol.76th, p.F118.
- 10) 青方 卓ほか. R&D神戸製鋼技報. 1997, Vol.47, No.3, p.9-12.
- 11) 木田 真ほか. R&D神戸製鋼技報. 2003, Vol.53, No.2, p.2-7.
- 12) 岡 高憲. 日本機械学会関西支部第19回秋季技術交流フォーラム エネルギー技術懇話会資料. (2018)
- 13) 中尾末貴ほか. 神鋼環境ソリューション技報. 2016, Vol.13, No.1, p.35-42.
- 14) 石井 豊ほか. 神鋼環境ソリューション技報. 2018, Vol.15, No.1, p.2-9.
- 15) 石井 豊ほか. R&D神戸製鋼技報. 2020, Vol.70, No.1, p.13-19.

(解説)



## CN社会実現に貢献するカーボンリソース転換・利用技術

木下 繁<sup>\*1</sup>・戸貴洋<sup>\*2</sup>・堺 康爾<sup>\*1</sup>

### Carbon Resource Conversion and Application Technology Contributing to Realization of Carbon-neutral Society

Shigeru KINOSHITA・Takahiro SHISHIDO・Koji SAKAI

#### 要旨

カーボンニュートラル実現には、CO<sub>2</sub>排出量削減やCO<sub>2</sub>固定化はもとより、石炭やバイオマスなどのカーボンリソースを循環利用することも重要である。当社グループは、これらのカーボンリソースを燃料製品や機能性炭素材へと循環利用しやすい形態へ転換する技術や、サステナブルな社会に必要な環境配慮型製品として安全に利用するための技術の開発に取り組んでいる。本稿では、このカーボンリソース転換・利用技術の概要およびアプリケーション事例について紹介するとともに、カーボンニュートラル社会実現に向けた技術開発の将来展望について解説する。

#### Abstract

To achieve carbon neutrality, it is essential not only to reduce CO<sub>2</sub> emissions and sequester CO<sub>2</sub>, but also to recycle carbon resources such as coal and biomass. The Kobelco Group is actively developing technologies to convert these carbon resources into easily recyclable forms, such as fuel products and functional carbon materials, as well as technologies to safely use them as environmentally friendly products required for a sustainable society. This paper introduces an overview of the technologies for the conversion and utilization of these carbon resources and provides application examples. It also discusses the future prospects of technology development aimed at achieving a carbon-neutral society.

#### 検索用キーワード

カーボンニュートラル, サステナブル, 石炭, バイオマス, 燃料, 機能性炭素材, 溶剤加熱抽出, プロセス設計

まえがき = 当社グループは2030年目標として生産プロセスにおけるCO<sub>2</sub>排出量30~40%削減、2050年ビジョンとしてカーボンニュートラル（以下、CN）への挑戦と達成を掲げ、低炭素社会や循環型社会への取組みを総合的に進めることにより、“SDGs達成・サステナブル実現”を目指している。

その達成に向けては、『再生可能エネルギー（太陽光・風力・地熱・バイオマスなど）利用』や『非化石燃料（水素・アンモニアなど）利用』のようにCO<sub>2</sub>排出量を削減すること、『二酸化炭素回収・貯留：CCS（Carbon dioxide Capture and Storage）』のように排出されたCO<sub>2</sub>を分離回収し、特定の空間内に閉じ込めることなどのアプローチに加え、人々の生活に必要な炭素資源をリサイクルによって賄い、化石資源の新規採掘量を抑制する『炭素資源循環利用』も重要なアプローチの一つである。

この炭素資源利用の転換期において、当社はコア技術の一つである『カーボンリソース転換・利用技術』を活用して、石炭やバイオマス資源（木質系、下水汚泥、食品廃棄物、農業残渣系など）、産業廃棄物（プラスチック、タイヤなど）などの炭素資源（カーボンリソース）を機能性炭素材（炭素繊維、電極材など）に転換して利用する取組みを推進している。

本稿では、カーボンリソース転換・利用技術の開発経

緯および概要を述べ、そのアプリケーション事例について紹介するとともに、サステナブル社会実現に向けた技術開発の将来展望について解説する。

#### 1. 当社における石炭技術開発の経緯

当社は、日本におけるエネルギーセキュリティ確保の観点から、未利用の低品位資源を改質して原料炭代替や燃料として利用するプロセスの開発に80年代から取り組んできた（図1）。ここで培われた技術が現在の「カーボンリソース転換・利用技術」の根幹となっている。そこで、本章では、当社における石炭技術開発の経緯に触れつつ、おのおのの技術の特徴について述べる。

##### 褐炭液化（Brown Coal Liquefaction；BCL）

第二次石油危機（1979年）を契機に石油代替燃料の開発機運が高まる中、当社は、コークス製造用原料炭の不足・価格高騰への対応策として取り組んでいた豪州ビクトリア褐炭からの溶剤精製炭（Solvent Refined Coal；SRC）製造技術を褐炭液化技術へと発展させた。

BCLは、褐炭を有機溶剤中で加熱脱水し、鉄系触媒と水素を用いて液化粗油に転換し、さらなる軽質化と精製処理を行い、ガソリンや灯油を得るプロセスである。豪州褐炭液化プロジェクトでの実証を通じて、高温・高圧スラリーハンドリング技術や油中脱水技術、水

\*1 技術開発本部 機械研究所 \*2 技術開発本部 機械研究所（現 技術開発本部 開発業務部）

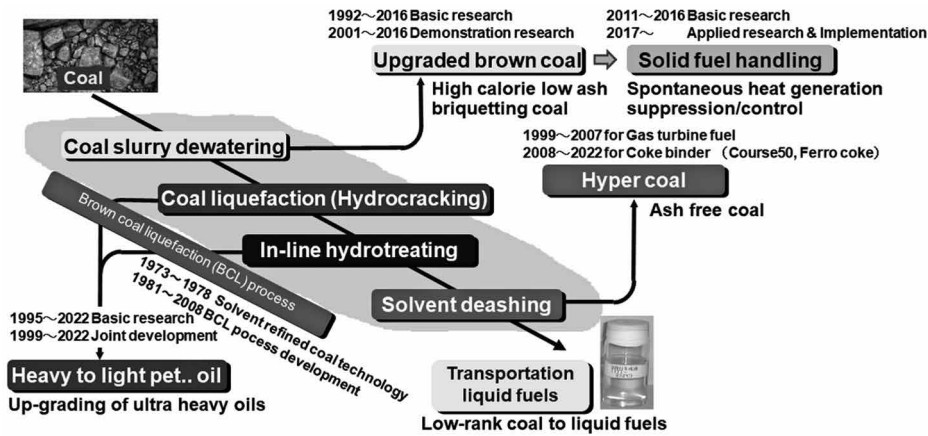


図1 石炭技術開発の経緯  
Fig.1 Background of coal technology development

素化分解技術，水素化処理技術，溶剤脱灰技術などを構築し，1990年代以降，これらの要素技術を応用展開した新しいプロセス開発も積極的に進めてきた<sup>1)</sup>。

### 改質褐炭 (Upgraded Brown Coal ; UBC)

2000年代に入ると，新興国の台頭とともにエネルギー需給量が大幅な増加傾向となり，石炭火力発電所で利用されるボイラ炭（瀝青炭（れきせいたん））の価格高騰に見舞われた。

当社は，褐炭や亜瀝青炭などの低品位炭を油中で脱水改質することによって発熱量および安定性を瀝青炭と同等レベルにまで高めるプロセスを開発した<sup>2)</sup>。さらには，安価かつ安定供給の実現に向けて取り組んだインドネシアでの600 ton-製品/dayの大型実証試験を通じて自己熱再生型油中脱水技術，粉体ハンドリング技術（粉砕，搬送，成型など），固体燃料評価技術，および石炭改質プロセス設計・制御技術などを獲得し，実用性を備えた技術へと高度化に取り組んだ<sup>3)</sup>。

### ハイパーコール (Hyper Coal ; HPC)

2000年代半ばには，世界的粗鋼生産量の増加に伴うコークス用原料炭価格の高騰に加え，中長期的には良質な粘結材資源の枯渇も懸念され，粘結炭使用量の削減や，従来はコークス材としての適用が困難とされてきた劣質炭の有効活用が課題と認識された。当社は，無灰かつ優れた軟化溶解性を有するHPCに着目し，ガスタービン用発電燃料の開発からコークス用粘結材の開発に転換した。

HPCは，石炭を溶剤中で加熱抽出（石炭の一部が溶解）して溶剤に可溶する有機成分と不溶な無機成分とを固液分離し，溶剤可溶有機成分から溶剤を除去して得られる無灰炭であり<sup>4)</sup>，小規模ラボ試験からベンチプラントでの連続プロセス実証を通じ，高温・高圧スラリーハンドリング技術や溶剤加熱抽出技術，沈降分離技術を強化した。

### 固体燃料ハンドリング技術

低品位炭のように高O/C比（石炭中に含まれる酸素と炭素の割合）や高比表面積を有する酸化特性の高い石炭は，瀝青炭と比較して自然発火しやすい傾向にある。当社は，低品位炭の自然発熱抑制という高難易度課題に対し，その発熱メカニズムを把握し，石炭の活性度を低

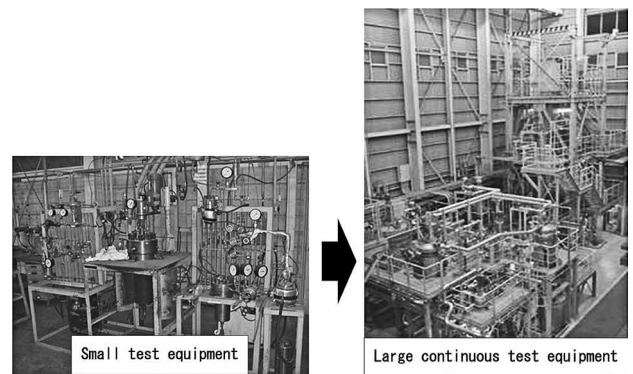


図2 高温高圧試験設備（試験インフラ一例）  
Fig.2 High temperature and high pressure test facility (example of test infrastructure)

減させるエージング（低温酸化）技術やパイル貯炭時の石炭温度を予測するパイルシミュレーション技術<sup>5)</sup>，自然発熱特性評価技術を開発した<sup>6)</sup>。

本技術は，当社石炭だき火力発電所が保有する石炭サイロでの発熱挙動を予測できるシミュレーションモデルへと改良され，実現場への適用を進め，新規銘柄の導入可否や運用方法提案への活用が可能となった。

### プロセス開発を支える試験インフラ

当社は，高温高圧試験も対応可能な複数種の試験設備（図2）とオペレーション人材を強みとし，プロセス開発のアイデアを机上検討／ピーカ試験から小型試験を経て実証レベル（ベンチ／パイロット）にスケールアップするまでの諸検討を行い，プロセス全体最適化やプラント概念設計検討を進めてきた。このほかにも，粉碎性評価装置や熱分析機器，物理分析機器などを備え，プロセス開発（製造技術）から製品の物性評価までを一貫して行える試験インフラを構築し，現在はカーボンリソース転換・利用技術の基盤として活用している。

## 2. カーボンリソース転換・利用技術

石炭や石油などの化石資源は，エネルギー用途に利用されるほかに，吸着材，プラスチック，合成繊維，合成ゴム，塗料など様々な製品や産業分野の原料としても利用されている。しかしながら，これらの物質は，循環して再利用されるものもあるが，最終的には焼却処理され，その場合はCO<sub>2</sub>が排出される。サステナブル社会実



現に向けては、エネルギー・燃料資源の脱炭素化のほかに、こうした製品や産業分野の原料の脱炭素化も求められる。

当社ではこれまで培った『カーボンリソース転換・利用技術』を活用して、バイオマスなどの化石由来ではない炭素資源を、発電燃料やコークス、機能性炭素材に転換する取組みを進めており（図3）、本章では、具体的な開発事例の一部を紹介する。

### 2.1 炭素繊維（カーボンファイバー）

炭素繊維とは炭素原子を集めた繊維であり、PAN系（アクリル繊維由来）とピッチ系（石炭、石油由来）の二種類が存在する。一般的に、炭素繊維は「鉄と比較して比重で1/4、比強度で10倍、比弾性率が7倍」という特徴を有し、航空機や自動車の軽量化によるCO<sub>2</sub>排出量削減や電気自動車の走行距離延長などに貢献可能な素材として位置づけられている。

石炭ピッチ系炭素繊維は、コークス製造（石炭乾留）時に得られる石炭ピッチを精製し、液体と固体の中間的物質に改質したものを原料とし、溶融紡糸法により得られた繊維を炭素化したものであり、リサイクル面とコスト面でそれぞれ課題を有している。

当社は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）の地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）において、京都大学が提案した『低品位炭とバイオマスのタイ国におけるクリーンで効率的な利用法を目指した溶剤改質法の開発』に参画し、HPCプロセスを用いたバイオマス原料への適用検討に取り組んだ。その結果、タイ産の低品位炭およびバイオマス廃棄物（稲わら）の原料特性に応じた加熱処理を行うことにより、所定の溶剤抽出物を得るとともに、自生留分（熱分解過程で生成する液体）を抽出溶剤として利用することで抽出率が向上する結果を得ており、本技術のバイオマスへの適用可能性を確認した。

また、京都大学では、得られた溶剤抽出物を原料に、既存の炭素繊維製造方法にて市販の炭素繊維と同等の強度や表面積などを有する炭素繊維を製造できることを確認した<sup>7)</sup>。本技術により得られたバイオマス由来の溶剤抽出物は、炭素繊維原料としての適用可能性が認められ、次節で述べる電極材用途などに展開している。

### 2.2 電気二重層キャパシタ

太陽光発電や風力発電など再生可能エネルギー由来の電力平準化などの用途への利用が期待されている電気二重層キャパシタ（以下、EDLC）は、電解液と電極表面に電気二重層を形成し充放電を行う蓄電デバイスである。エネルギー密度はリチウムイオン電池より劣るものの、長寿命や高速充放電可能といった特徴を有している。その容量は電極表面特性に大きく依存するため、電極材料には高い比表面積を有し、電気伝導性を示す材料が好ましい。

当社は大分大学と共同で、HPCから数nm以下のウルトラミクロ孔に富んだ細孔構造を有する多孔質炭素（図4）を得る技術を開発した。本技術は、HPCを有機溶媒（ピリジンなど）に溶解させて得られたHPC溶液

をHPC溶解性の乏しい水など（貧溶媒）に加え、瞬時に炭素前駆体を沈殿析出させた（以下、沈殿法）後に不融化処理と炭素化処理を行うものであり（図5）、薬剤などによる賦活処理を必要としないことが特徴となっている。この多孔質炭素粉末を用いたEDLC電極材を試作し、その充放電特性を評価した結果、市販品（活性炭）よりも高容量を有し、多孔質炭素粉末のEDLC電極としての利用可能性を見出した<sup>8)</sup>。

この多孔質炭素粉末の「比表面積が大きく、ウルトラミクロ孔が豊富」という特長を活かし、例えば、処理条件により細孔径を制御し、そのサイズに応じたガス種を選択分離することが可能なガス分離材（分子ふるい炭素）などへの用途展開を検討している。また、炭化度が低く、酸素含有量の多いバイオマス資源を用いた場合、より比表面積の大きい多孔質炭素粉末を得られる可能性があり、吸着性能が高く、かつ、再生可能な材料としての開発も進めている。

### 2.3 高炉コークス用粘結材（バインダ）

先に述べたような機能性炭素材を用いた炭素循環利用によるサステナブル社会実現に向けた取組みに加え、CNの観点からも、既存製鉄プロセスからのCO<sub>2</sub>排出量

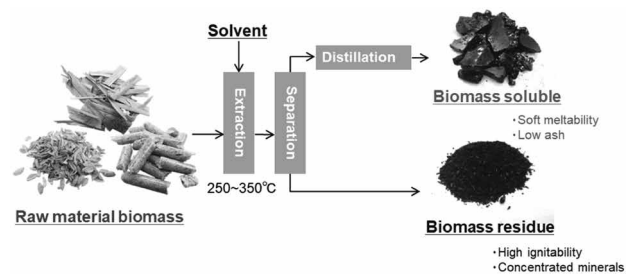


図3 カーボンリソース転換・利用技術の要素技術（一例）  
Fig.3 Example of elemental technology for carbon resource conversion and application technology

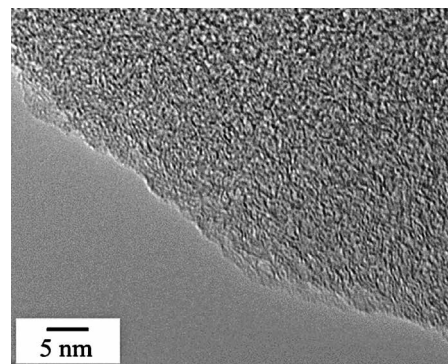


図4 沈殿法多孔質炭素のTEM画像  
Fig.4 TEM image of precipitated porous carbon

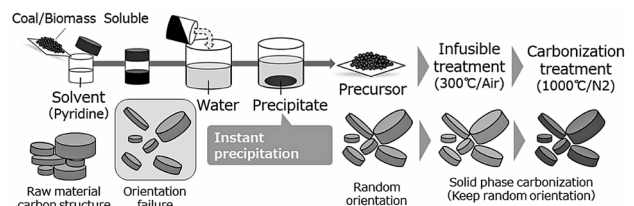


図5 沈殿法による多孔質炭素製造方法  
Fig.5 Porous carbon production method by precipitation method

削減も重要である。ここでは、低還元材比操業に求められる高強度コークスの開発事例を紹介する。

鉄鉱石を還元して銑鉄を製造する高炉では、鉄鉱石とコークスが交互に層をなすように炉内へ供給される。コークスは、鉄鉱石の還元材と熱源としての機能のほかに、高炉内の通気性を確保するスペーサとしての役割を担っている。とくに、銑鉄の製造効率向上やCO<sub>2</sub>削減の観点から低還元材比での操業が求められており、コークス投入量を低減しても炉内通気性を十分に確保できる高強度コークスの適用が重要である。

高炉用コークスは、粘結性の高い強粘結炭から低い非微粘結炭まで様々な原料炭を適宜配合して製造されるが、高強度コークスを製造するには、粘結性や炭化特性に優れた強粘結炭を多く配合する必要がある。しかしながら、強粘結炭は高価なうえに資源的制約もあり、非微粘結炭などの劣質炭の配合比率を上げ、かつ、要求強度を満足することが重要な課題であった。

当社が開発したHPCは図6のような炭素化合物の集合体(分子量:300~1,000程度)と推定され<sup>9)</sup>、溶剤抽出物であることから分子同士の結合力が弱く、優れた軟化溶解性を発現するという特徴を有する。HPCを添加すると配合炭の流動性が向上するため、一定量の一般炭を配合しつつ実用に十分な強度を有するコークスを製造することができる。また、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)からの委託を受け、国内鉄鋼関連会社4社が参画したCOURSE50<sup>10)</sup>では、高炉内における鉄鉱石水素還元を実現させるために必要な高強度コークス製造におけるコークス粘結材としてHPCを用いた低反応性高強度コークス製造技術を確立し、実コークス炉でのコークス製造試験および性能評価において、所定の目標強度を達成した<sup>11)</sup>。

また、コークス製造工程におけるCO<sub>2</sub>排出量を削減する方法としては、コークス炉の乾留温度低下、あるいは、原料炭にバイオマスを配合したコークス利用が考えられるが、いずれの場合においても、コークス強度の低下抑制が重要な課題の一つである。このような課題を解決すべく、例えば、石炭とバイオマス種(バイオマス炭化物含む)との相性を考慮した配合設計や事前処理(粉碎、アルカリ除去など)の実施、バイオマスから得られる溶剤抽出物のコークス用粘結材利用などに取り組んでいる。

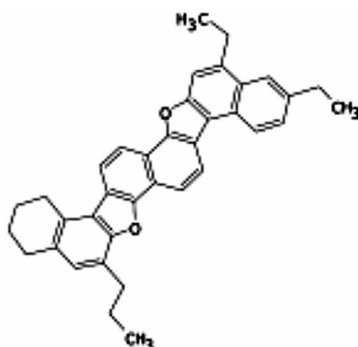


図6 HPCの推定分子構造

Fig.6 Estimated molecular structure of soluble fraction of HPC

### 3. サステナブル社会実現に向けた技術開発の将来展望

本章では、第1章や第2章で述べた技術開発を通じて獲得/強化してきた工業化プロセス設計基盤(インフラ設備、オペレーション人材、プロセス設計・評価手法など)を活用した新たな取り組み例を紹介する。

#### 3.1 サステナブル社会実現に向けたCN化への対応

経済産業省のカーボンリサイクルロードマップ(2023年6月策定)では、2030年の早期普及実現を目指し、水素が不要な技術として鉱物利用(コンクリート、炭酸塩など)が位置付けられている<sup>12)</sup>。

製鉄プロセスからの副産物である製鋼スラグには鉄鋼材料の不純物(P, Sなど)を除去するために必要なCaなどのアルカリ成分が多く含まれている。これらのアルカリ成分はCO<sub>2</sub>と反応しやすいことから、CO<sub>2</sub>固定化に有用な材料であることに着目し、当社グループでは、CNに寄与する技術として、NEDO委託研究『カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発/CO<sub>2</sub>排出削減・有効利用実用化技術開発』において、製鋼スラグを活用したCO<sub>2</sub>固定化技術(以降、スラグ炭酸化技術)の開発を進めている。スラグ炭酸化技術(図7)とは、製鋼スラグに含まれるCa成分を溶媒側へ抽出し、Ca成分を含む溶媒にCO<sub>2</sub>ガスを吹き込み、炭酸カルシウム(CaCO<sub>3</sub>)としてCO<sub>2</sub>を固定化する技術であり<sup>13)</sup>、本プロセスで得られる製品として炭酸カルシウムとCa抽出後スラグがある。

現在、スラグ処理量100kg/バッチでの試験を積み重ね、スケールアップデータの取得と製品サンプルの用途探索を進めている。炭酸カルシウムは、国内既存市場が480万トン規模であり、製紙や樹脂、塗料、建材などが主な用途である。本プロセスにて得られる炭酸カルシウムはCO<sub>2</sub>フリーとして位置づけられ、お客様製品の原料として利用いただくことによりCO<sub>2</sub>排出量の少ない製品としての活用が可能である。いっぽう、Ca成分抽出後スラグは路盤材などの既存用途での活用を見込んでいる。

#### 3.2 サステナブル社会実現に向けた資源循環への対応

プラスチック業界においては、「プラスチックに係る資源循環の促進等に関する法律(環境省、2022年4月施

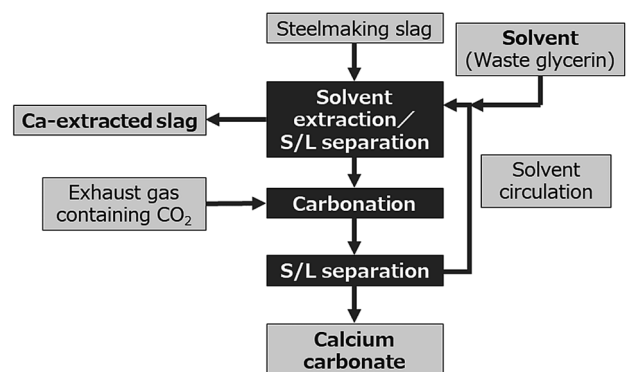


図7 鉄鋼スラグへのCO<sub>2</sub>固定化技術のブロックフロー図<sup>13)</sup>

Fig.7 Block flow diagram of CO<sub>2</sub> fixation technology for steel slag

行)<sup>14)</sup>」が施行され、航空機業界においては、国土交通省が日本のエアラインによる燃料使用量の10%を持続可能な航空燃料 (Sustainable Aviation Fuel ; SAF) に置き換えるという目標を設定するなど、各業界において炭素資源の循環利用が求められている。

このような動きに対し、当社が保有する加熱ろ過抽出技術や水素化分解/水素化処理技術などを活用し、廃プラや廃タイヤなどの精密熱分解制御によるポリマからのモノマ化、基幹物質への転換、バイオマス (木質、農業残渣など) のガス化、水素化処理&フィッシャー・トロプシュ (Fischer-Tropsch ; FT) 合成によるSAF製造技術の調査を進めている。

この他にも、パームヤシの空果房 (Empty Fruits Bunch ; EFB) の半炭化技術や水熱炭化技術による燃料化検討やコーヒーかすの油中脱水による燃料化などの知見をもとに、様々なバイオマス資源を溶剤抽出物や炭化物に転換し、製鉄プロセス用途 (還元鉄製造プロセス用浸炭材や電気炉加炭材など) への適用可能性を検討している。当社製鉄プロセスのCN化実現に向け、再生可能な固形炭素資源を活用し、CO<sub>2</sub>排出量削減に貢献していきたい。

**むすび**= 当社は、コア技術の一つである『カーボンリソース転換・利用技術』を活用して、石炭やバイオマスなどのカーボンリソースから機能性炭素材料に転換して利用する取組みを推進し、サステナブル社会実現に貢献していく。

さらには、これまで当社が培ってきた工業化プロセス設計基盤を活用し、サステナブル社会実現に向けた炭素資源の循環利用における新たな取組みを創出していく。

#### 参 考 文 献

- 1) 安室元晴ほか. R&D神戸製鋼技報. 2010, Vol. 60, No.1, p.55-61.
- 2) 杉田 哲ほか. R&D神戸製鋼技報. 2006, Vol.56, No.2, p.23-26.
- 3) 木下 繁ほか. R&D神戸製鋼技報. 2010, Vol.60, No.1, p.71-75.
- 4) 奥山憲幸ほか. R&D神戸製鋼技報. 2006, Vol.56, No.2, p.15-22.
- 5) 朴 海洋ほか. R&D神戸製鋼技報. 2014, Vol.64, No.1, p.22-27.
- 6) 池田志保ほか. 第59回石炭科学会議. 2022
- 7) 三浦孝一ほか. 国際科学技術共同研究推進事業終了報告書, 低品位炭とバイオマスのタイ国におけるクリーンで効率的な利用法を目指した溶剤改質法の開発, Copyright 2018 JST
- 8) 大隈翔太ほか. 第48回炭素材料学会年会. 2021
- 9) 濱口眞基ほか. 炭素TANSO No.257, 2013, p.149-156.
- 10) COURSE50ホームページ : <https://www.course50.com/>, 2023.8.7
- 11) 穴戸貴洋ほか. R&D神戸製鋼技報. 2010, Vol.60, No.1, p.62-66.
- 12) 経済産業省) カーボンリサイクルロードマップ : [https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/carbon\\_recycle\\_rm/pdf/20230623\\_01.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/carbon_recycle_rm/pdf/20230623_01.pdf), 2023.8.7
- 13) 神戸製鋼グループ プレスリリース : [https://www.kobelco.co.jp/releases/1209639\\_15541.html](https://www.kobelco.co.jp/releases/1209639_15541.html), 2023.8.7
- 14) 環境省ホームページ) プラスチックに係る資源循環促進法 <https://plastic-circulation.env.go.jp/>, 2023.8.7



# R&D 神戸製鋼技報掲載 KOBELCOのマテリアリティと価値創造を支える21のコア技術関連文献一覧表 (Vol.62, No.2~Vol.72, No.1)

Papers on Advanced Technologies for 21 Core Technologies Supporting KOBELCO's Materiality and Value Creation in R&D Kobe Steel Engineering Reports (Vol.62, No.2~Vol.72, No.1)

	巻/号
●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 Digital Transformation (DX) Technology to Promote Adoption of Welding Robot Systems Atsushi FUKUNAGA et al.	72/1
●溶接材料開発におけるMI技術の適用 …………… 谷口元一ほか Application of MI Technology to Process of Welding Material Development Genichi TANIGUCHI et al.	72/1
●接着接合の強度信頼性を担う金属表面制御技術…………… 高橋佑輔ほか Metal Surface Preparation Technology for Adhesive Joining Reliability Dr. Yusuke TAKAHASHI et al.	72/1
●社会の多様なニーズを支える機能性材料とそのソリューション…………… Functional Materials and Solutions for Diverse Needs of Society	71/2
●純鉄系軟磁性材料の鍛造加工ひずみの影響を考慮した磁場解析による効果検証…………… 笠井信吾ほか Benefit Estimation of Soft-magnetic Pure Iron by Magnetic Field Analysis Considering Effect of Forging Strain Shingo KASAI et al.	71/2
●純鉄系軟磁性細線を用いたアキシアルギャップ型モータ…………… 森田晋也ほか Axial-gap Motor Using Thin Wire of Soft-magnetic Pure-iron Shinya MORITA et al.	71/2
●圧粉コアを用いたアキシアルギャップモータの性能に及ぼす加工方法の影響…………… 加藤弘樹ほか Effect of Processing Method on the Performance of Axial Gap Motor with Soft Magnetic Powder Composites Dr. Hiroki KATO et al.	71/2
●耐食性・導電性と成形性に優れた燃料電池セパレータ用NCチタン …………… 長田 卓 Fuel Cell Separator with High Corrosion Resistance, High Conductivity and Good Formability Takahiko NAGATA et al.	71/2
●Fe粒界におけるPと遷移金属元素の共偏析に関する第一原理計算…………… 森田晋也 First-principles Calculations on Co-segregation of P and Transition Metal Elements at Fe Grain Boundaries Shinya MORITA	71/1
●均質化弾塑性FEMによるDual-phase鋼のマルチスケール強度解析 …………… 黒澤瑛介 Multiscale Elasto-plastic Finite Element Analysis of Dual-phase Steel Based on Homogenization Method Dr. Eisuke KUROSAWA	71/1
●鋳鉄鋳物部品の硬度予測技術…………… 堤 一之ほか Technology for Predicting Hardness of Cast Iron Parts Kazuyuki TSUTSUMI et al.	71/1
●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 Construction of Phase Transformation Model for Heat-affected Zone of Steel Plate Welds and Toughness Prediction Masahiro INOMOTO et al.	71/1
●軟X線発光分光を用いた残留オーステナイト中固溶炭素分析技術…………… 日野 綾ほか Technology for Analyzing Solute Carbon in Retained Austenite Using Soft X-ray Emission Spectroscopy Dr. Aya HINO et al.	71/1
●鋼材中の粒界偏析微量元素定量に向けたSTEM-EDS分析における $\zeta$ 因子測定技術 …………… 山田敬子ほか Zeta-factor Determination for Quantification of Grain Boundary Segregation of Trace Elements in Steel by STEM-EDS Keiko YAMADA et al.	71/1
●高炭素鋼線材の用途高度化に向けた微細TiN介在物評価技術…………… 杉谷 崇ほか Technology of Evaluating Minute TiN Inclusions in High-carbon Steel Wire Rod for Advanced Applications Takashi SUGITANI et al.	71/1
●自動車用サスペンション向けアルミニウム合金鍛造材の二段時効による高強度化…………… 堀 雅是ほか Strengthening of Aluminum Alloy Forgings for Automotive Suspension by Two-step Aging Masayuki HORI et al.	70/2
●TiAl基金属間化合物の溶解鑄造技術 …………… 松若大介ほか Melting and Casting Technologies for Titanium Aluminide Intermetallics Daisuke MATSUWAKA et al.	70/2

●大型鍛造シミュレータを活用したチタン合金の組織予測技術……………	逸見義男ほか	70/2
Prediction Technology of Titanium Alloy Microstructure Utilizing Large Forging Simulator	Yoshio ITSUMI et al.	
●燃料電池自動車向け再エネ由来水素ステーションの実証……………	藤澤彰利ほか	70/1
Demonstration of Hydrogen Refueling Station Using Renewable Energy for Fuel Cell Vehicles	Dr. Akitoshi FUJISAWA et al.	
●水素社会の到来を見据えた水電解式水素発生装置HHOGの開発状況……………	石井 豊ほか	70/1
Development Status of HHOG Aimed at Arrival of Hydrogen-Based Society	Yutaka ISHII et al.	
●LNG燃料船用圧縮機 ……………	高木 一ほか	70/1
Compressor for LNG-fuelled Ships	Hitoshi TAKAGI et al.	
●冷凍機・ヒートポンプの低GWP冷媒対応 ……………	神吉英次ほか	70/1
Refrigeration Unit and Heat Pump using Low GWP Refrigerant	Eiji KANKI et al.	
●高圧CO <sub>2</sub> ターボ圧縮機 ……………	馬場利秋ほか	70/1
Integrally Geared Compressor for High Pressure CO <sub>2</sub>	Toshiaki BABA et al.	
●ミドレックスプロセス—その進化と脱炭素製鉄への展望—……………	ビンセント シェヴリエほか	70/1
MIDREX <sup>®</sup> Process: Bridge to Ultra-low CO <sub>2</sub> Ironmaking	Dr. Vincent CHEVRIER et al.	
●国内初の内陸型火力発電所（真岡発電所）……………	藤尾明久ほか	70/1
Japan's First Inland Thermal Power Plant (Moka Power Station)	Akihisa FUJIO et al.	
●鋼材生産体制の概要……………	浜田 努	69/2
Outline of Steel Production System	Tsutomu HAMADA	
●ペレット製造プロセスにおける高S含有鉱石使用時の排ガスSO <sub>x</sub> 低減方法……………	加藤嗣憲ほか	69/2
Reduction of SO <sub>x</sub> in Exhaust Gas under Condition of Using Large Amounts S Rich Ore in Pellet Production	Tsugunori KATO et al.	
●加古川製鉄所における資源循環への取組……………	山中量一ほか	69/2
Effective Utilization of Byproducts at Kakogawa Works	Ryoichi YAMANAKA et al.	
●加古川製鉄所における特殊鋼生産体制の確立～第3溶鋼処理設備，第6号連続鋳造設備建設～ ……	吉田康将ほか	69/2
Establishment of Special Steel Production System at Kakogawa Works -Construction of No.3 Secondary Refining Equipment and No.6 Continuous Caster-	Yasumasa YOSHIDA et al.	
●新溶銑処理プロセス導入による高効率製鋼プロセスの構築……………	齋藤幸介ほか	69/2
Establishment of Highly Efficient Steelmaking by Newly Installed Hot-metal Pretreatment Process	Kosuke SAITO et al.	
●オーダーへの半製品在庫の最適充当技術の確立……………	白坂貴成ほか	69/2
Establishment of Optimization Technology for Assigning Billets to Orders	Takanari SHIRASAKA et al.	
●自動車軽量化……………		69/1
Automotive weight reduction		
●自動車用高強度鋼板の延性に及ぼす残留オーステナイト存在状態の影響……………	村上俊夫	69/1
Effects of Retained Austenite Conditions on Ductility of Advanced High Strength Steels for Automobiles	Dr. Toshio MURAKAMI	
●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		
●高砂機械工場新日程計画・物流管理システム……………	井筒理人ほか	68/2
Development of New Production Scheduling and Logistics System for Takasago Machinery Plant	Rihito IZUTSU et al.	
●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.	

● 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	
● 製鋼溶鋼温度ばらつき分布予測技術の開発	友近信行ほか	68/2
Development of prediction technique for temperature distribution of molten steel in steelmaking	Dr. Nobuyuki TOMOCHIKA 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.	
● 非線形連成システムシミュレーションの数値安定化技術を用いた電動機HILSシステム	森田 啓	68/1
Electric Motor HILS System Using Numerical Stabilization Technique for Simulating Nonlinear Coupled System	Kei MORITA	
● 進化的アルゴリズムによる減音効果と通気性を考慮した消音ダクトの設計技術	田淵 聡	68/1
Duct Shape Design Technology Based on Evolutionary Algorithm Considering Noise Attenuation Performance and Air Permeability	Satoshi TABUCHI	
● 20t級ハイブリッドショベルSK200H-10の開発	山崎洋一郎ほか	68/1
Development of 20-tonne Class Hybrid Excavator, SK200H-10	Yoichiro YAMAZAKI et al.	
● 粒子法に基づく樹脂混練機内の部分充満解析技術の開発	関山和英ほか	67/2
Partially Filled Flow Simulation Based on Particle Method of High-Viscosity Fluid in Mixer	Kazuhide SEKIYAMA et al.	
● 圧縮機の運転監視、保守診断システム	松本泰治	67/2
System for Monitoring Operation and Diagnosing Maintenance of Compressors	Yasuharu MATSUMOTO	
● 溶接・接合技術		67/1
Welding and Joining Technologies		
● 超高加工性1180 MPa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.	
● 自動車パネル用6000系アルミニウム合金のクラスタ形態と時効硬化性	有賀康博ほか	66/2
Cluster Morphology and Age-hardenability in 6000 Series Aluminum Alloys for Automotive Body Panels	Dr. Yasuhiro ARUGA et al.	
● ホットスタンプ部品の曲げ圧壊挙動と鋼材の機械的特性との相関	内藤純也ほか	66/2
Correlation between Side Impact Crash Behavior of Hot-stamping Parts and Mechanical Properties of Steel	Dr. Junya NAITO et al.	
● 高強度薄板金属材料の破断予測シミュレーション	鎮西将太ほか	66/2
Simulation to Predict Failure in High-Strength Steel Sheet	Shota CHINZEI et al.	
● 船用鑄鍛鋼品の技術開発	藤綱宣之	66/1
Development of Steel Castings and Forgings for Vessels	Nobuyuki FUJITSUNA	
● 固有ひずみ法を用いたクランク軸の残留応力推定技術	沖田圭介ほか	66/1
Prediction of Residual Stress in Crankshafts Using Inherent Strain Method	Dr. Keisuke OKITA et al.	
● 一体型クランク軸用自動超音波探傷装置	和佐泰宏ほか	66/1
Ultrasonic Test Apparatus for Integral-type Crankshafts	Yasuhiro WASA et al.	
● 熱交換器用高伝熱チタン板HEET <sup>®</sup>	田村圭太郎ほか	66/1
High Heat-transfer Titanium Sheet-HEET <sup>®</sup> - for Heat Exchanger	Keitaro TAMURA et al.	
● 次世代磁性材料「磁性鉄粉」への期待	三谷宏幸	65/2
Expectations for Next-generation Magnetic Material "Magnetic Iron Powder"	Hiroyuki MITANI	
● シリコンウェーハ用サブナノ精度サイトフラットネス計	田原和彦ほか	65/2
Site Flatness Measurement System with an Accuracy of Sub-nanometer Order for Silicon Wafer	Kazuhiko TAHARA et al.	
● ロングライフ塗装用鋼板 (エコビュー <sup>TM</sup> )	湯瀬文雄ほか	65/1
Steel Plate with Long-life for Painted Bridges (Eco-View)	Dr. Fumio YUSE et al.	
● 微細多孔吸音板を含む音場のシミュレーション技術と製品開発への適用	次橋一樹ほか	64/2
Research on Numerical Analysis Technique for Sound Fields Including Perforated Plate	Dr. Kazuki TSUGIHASHI et al.	



- 亜瀝青炭パイル内の自然発火予測手法…………… 朴 海洋ほか 64/1  
Evaluation of Spontaneous Combustion in Stock Pile of Sub-bituminous Coal Haeyang PAK et al.
- 1,300℃超の高温下にも耐える遠隔温度測定技術 …… 追田尚和ほか 64/1
- 高効率蒸気供給システム「スチームグロウヒートポンプ (SGH)」…………… 和田大祐ほか 63/2  
High Efficiency Steam Supply Heat Pump System; Steam Glow Heat Pump (SGH) Daisuke WADA et al.
- 炭素鋼溶接金属の凝固割れ感受性改善技術…………… 島本正樹ほか 63/1  
Technology for Reducing Solidification Cracking Susceptibility of Carbon Steel Weld Metal Masaki SHIMAMOTO et al.
- アルミニウム熱間粗圧延のセットアップのための温度・荷重予測モデル…………… 岩崎 慎ほか 62/2  
Models for Predicting Rolling Temperature and Rolling Load in Aluminum Plate Hot Rolling Process Makoto IWASAKI et al.
- 自動車パネル用Al-Mg-Si系合金のバークハード性に及ぼす予ひずみ付与と予備時効処理の複合効果…………… 増田哲也ほか 62/2  
Combined Effect of Pre-straining and Pre-aging on Bake-hardening Behavior of Al-Mg-Si Alloy for Automobile Body Panels Dr. Tetsuya MASUDA et al.
- 矩形アルミニウム合金DC鋳造における表面割れ発生予測と対策 …… 森下 誠ほか 62/2  
Methods of Predicting and Preventing Surface Crack During Rectangular Aluminum Alloy DC Casting Dr. Makoto MORISHITA et al.
- Al-Mg-Si合金板材に生じるリジング挙動の結晶塑性解析…………… 小西晴之ほか 62/2  
Crystal Plasticity Analysis of Ridging in Al-Mg-Si Series Sheet Alloy Dr. Haruyuki KONISHI et al.
- Al-Mg-Si合金押出材の再結晶組織に及ぼす押出温度の影響…………… 伊原健太郎ほか 62/2  
Effect of Extrusion Temperature on Recrystallization Textures of Extruded AA6005C Alloys Dr. Kentaro IHARA et al.
- 耐応力緩和特性を強化した端子用銅合金CAC5 …… 野村幸矢 62/2  
New Copper Alloy, CAC5, with Excellent Stress Relaxation Resistance for Automotive Electrical Connectors Dr. Koya NOMURA
- 端子用Cu-(Ni, Co)-P系合金の強度と導電率に及ぼす時効条件の影響 …… 宍戸久郎ほか 62/2  
Effect of Aging Conditions on Hardness and Electrical Conductivity in Cu-(Ni, Co)-P Alloys for Connectors Hisao SHISHIDO 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
- 高機能商品
- 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
- 化学・食品機械
- 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：KOBELCOのマテリアリティと価値創造を支える21のコア技術＞

\*今回、当社グループが特定している価値創造領域の3つのマテリアリティ（重要課題）「グリーン社会への貢献」「安全・安心なまちづくり・ものづくりへの貢献」「人と技術で繋ぐ未来へのソリューション提供」とこれを支える21のコア技術に焦点を当てた特集を組みました。これまでの当社技報では、特定の事業領域や技術領域における当社のアクティビティを紹介してきましたが、本特集では当社グループの特徴である幅広い事業展開を支える多様なコア技術について、その発展の歴史から現状、そして将来へ向けての展望を紹介することで、当社グループの保有する特徴ある技術の全体感を俯瞰（ふかん）してご理解いただける内容になっています。

\*まず前半では、当社グループの技術開発に対する歴史的背景やその特徴を俯瞰し、今後の方向性を展望しています。さらに価値創造領域における3つのマテリアリティそれぞれについて当社グループの取組みを技術的な側面から取り上げ、21のコア技術がどのように活用されているのかについて解説しています。

\*後半は21のコア技術それぞれについて

その内容を解説していますが、その特徴や強みのみならず、これらがどのような背景のもとに生まれ進化し現在に至ったか、そして将来に向けた可能性も含め、事例も交えながら紹介しています。

\*いずれも非常に幅広い内容を限られたページ数で解説させていただいた故、本記事だけでは説明が不十分な面もありますので、より詳細をお知りになりたい場合は本文内で引用している当社技報や学協会論文などの参考文献をご参照ください。

\*今後も当社グループは「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かなえられる世界」の実現に向け、マテリアリティに取り組んでいく所存ですが、当社グループのみでは完結できないより大きな社会課題の解決に向けては、お客様との連携もますます重要になってきます。本特集が当社グループの価値創造領域における取り組みや、これを支えるコア技術をご理解いただくための一助となればと考えておりますので、掲載した内容に関してご興味ございましたら、是非ご意見、ご感想をいただけますと幸いです。

（本家浩一）

## 次号予告

＜特集：DXで目指すKOBELCOらしさ＞

\*カーボンニュートラル社会への急激な移行、コロナ禍を契機とした産業構造の変化、高齢化社会による働き手の不足、地政学的リスクの高まりなど、世の中はめまぐるしいスピードで変化するとともに新たな社会課題が顕在化してきており、事業環境は不確実性が増してきています。

\*このような事業環境下において、KOBELCOグループが様々なステークホルダの皆様へ新たな価値を時代に先駆けて提供し続けていくためには、グループが保有する多種多様な技術資産、ビジネス資産を、データを基軸に整理しつつ、新たなデジタル技術や業務プロセス、ビジネスプロセスと結合させて変革を図るデジタル・トランスフォーメーション（DX）を進めることが大きな課題の一つとなっています。

\*次号特集「DXで目指すKOBELCOらしさ」では、素材系事業、機械系事業、電力事業などKOBELCOグループの幅広い事業領域における「DX」の事例を集めました。この特集では、人材育成からものづくりの変革、社会課題の解決や新たな価値の創造まで多様な「変革」の取り組みを紹介する予定ですが、このような変革の目指す方向の「総体」がこれからの「KOBELCOらしさ」を形作っていくものと考えます。

\*本特集号が、当社グループの「DX」事例の紹介にとどまらず、お客様やパートナー、地域社会の皆様や当社従業員など、様々なステークホルダの皆様と、KOBELCOと一緒に目指す「あした」に向けての「かけ合わせ」を考えるきっかけになればと願っています。

（池田英生）

## ＜編集委員＞

委員長	後藤 有一郎
副委員長	杵 淵 雅 男
委員	池 田 英 生
	佐 成 弘 毅
	杉 立 宏 志
	鈴 木 励 一
	高 久 真 也
	西 口 克 茂
	野 澤 健 太 郎
	本 家 浩 一
	山 下 俊 郎
	横 田 泰 之
	＜五十音順＞
本号特集編集委員	本 家 浩 一

## R&D 神戸製鋼技報

第72巻・第2号（通巻第249号）

2024年1月10日発行

年2回発行

非売品 <禁無断転載>

発行人 後藤有一郎

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1月10日

各 位

(株)神戸製鋼所  
技術開発本部

「R & D神戸製鋼技報 Vol.72, No.2」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.72, No.2」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 Report, Vol.72, No.2**

Dear Sir or Madam,

We would like to express our sincere gratitude for your continued support and cooperation.

Attached please find Vol.72, No. 2 of the R&D Kobe Steel Engineering Report.

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 Report

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 seal number	No. _____ ← (Please fill in the right lower number on the address sticker)	
Remarks		
Person making this entry	Name :	E-mail :