

# ふえらむ

Bulletin of The Iron and Steel  
Institute of Japan

Vol.26 / No.4/ 2021

(一社)日本鉄鋼協会会報

ISSN 1341-688X

## Techno Scope

期待される水素エネルギーの活用

## 入門講座

インフォマティクス入門ー7

ものづくり分野における能動学習

(名古屋工業大学 竹内一郎)

# NIRECO

私たちは制御技術を通じ、  
社会への貢献をめざしています。

# 技術と信頼。

鉄鋼の歴史とともに歩んで  
六十余年。

変遷する時代の中にあっても

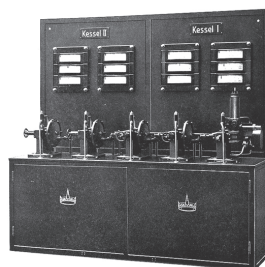
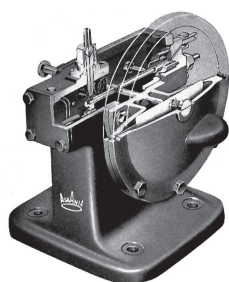
技術と信頼を理念に、

お客様にとってご満足の

いただける制御技術の提供と、

さらなる技術革新を

私たちは、めざしています。



自動制御の先駆けとして。

油圧噴射管式自動制御装置の国産化を実現して以来、  
高炉の温度管理・容量制御、圧延行程での鋼板走行自動制御とその品質管理、生産材の成分分析など  
鉄鋼分野におけるプロセスオートメーションの発展に携わり、  
生産活動における自動化・省力化・標準化という自動制御技術を鉄鋼産業界とともに開拓してまいりました。

## 株式会社ニレコ

●製品についてのお問い合わせは プロセス営業部

八王子事業所 〒192-8522 東京都八王子市石川町 2951-4 TEL.(042)660-7353

大阪営業所 〒564-0062 大阪府吹田市垂水町 3-18-33 TEL.(06)6190-5552

九州営業所 〒803-0822 北九州市小倉北区青葉 2-5-12 TEL.(093)953-8631

URL <https://www.nireco.jp> E-mail [info-process@nireco.co.jp](mailto:info-process@nireco.co.jp)

## C O N T E N T S

### 目 次

|              |                                                                                                             |     |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Techno Scope | 期待される水素エネルギーの活用 .....                                                                                       | 170 |
| 連携記事         | 水素ステーションへの低合金鋼適用拡大の取り組み<br>～水素ステーション用蓄圧器開発例と高圧水素ガス中の<br>材料評価試験模擬検討例～<br>高木周作、岡野拓史、高野俊夫、松原和輝、西原佳宏、野崎彩花 ..... | 174 |
|              | 高圧水素用高強度ステンレス鋼の溶接技術開発<br>浄徳佳奈、中村 潤、小薄孝裕、平田弘征、大村朋彦 .....                                                     | 181 |
| 展望           | <Techno Scope 連動記事><br>地球温暖化防止のための水素技術に関する今後の展望<br>矢部 彰、佐伯祐志、仁木 栄 .....                                     | 187 |
| 入門講座         | インフォマティクス入門ー7<br>ものづくり分野における能動学習<br>竹内一郎 .....                                                              | 195 |
| 躍動           | 非定常温度場プロセスの理解と制御を目指して<br>鈴木飛鳥 .....                                                                         | 201 |
| 私の論文         | 変形を伴うコークス層と分散相による閉塞<br>夏井俊悟 .....                                                                           | 208 |
| 解説           | 受賞技術ー32<br>鉄道用低騒音歯車装置の開発<br>木村 誠 .....                                                                      | 212 |
|              | 研究会成果報告ー30<br>エリアセンシング手法を用いた知能化設備異常診断<br>玉置 久、飯塚幸理 .....                                                    | 215 |
| 会員へのお知らせ     | .....                                                                                                       | 224 |

\*ふえらむ電子版 (<https://y100.isij.or.jp/ferrum/>) では、著者よりカラーで提供された図をカラーの状態でご覧いただけます。

2019年2月号より、冊子版を希望者へ無償配布しています（会員限定）  
配布を希望されない方は、会員グループ ([members@isij.or.jp](mailto:members@isij.or.jp)) へ連絡ください



# 期待される水素エネルギーの活用

水素は今、クリーンなエネルギー源として大きな注目を集めている。水素を製造し、輸送し、活用するために、これまでのエネルギーと異なる様々な技術の開発が進められている。

普及が進む水素ステーション。燃料電池自動車および燃料電池バスに対応するステーションの建設も進んでいる(写真は東京ガス豊洲水素ステーション)。  
写真提供: 東京ガス(株)

## CO<sub>2</sub>排出ゼロのキーテクノロジー

2020年12月、政府は「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を発表した。これは、2050年にカーボンニュートラルにする、との方向性を明らかにしたものであり、これを実現するための具体的な目標として、水素活用を進め、運輸や産業部門での利用を加速させ、化石燃料に匹敵する水準までコストを下げ、化石燃料をやむなく使う場合はCO<sub>2</sub>の回収・再利用を促す、とされている(図1)。

そこで今、水素を活用する「水素社会」への期待が高まっている。水素の最も大きな特徴は、エネルギーとして利用してもCO<sub>2</sub>を排出しないことである。水素を燃焼してエネルギーを得る時、排出されるのは水のみなので環境負荷が低くて済む。

水素製造時にCO<sub>2</sub>が排出されては水素燃焼時にCO<sub>2</sub>を排出しない特徴があり活かされないが、例えば、再生可能エネルギーを使って水素を製造すればCO<sub>2</sub>の排出を抑制できるし、化石燃料から水素を製造する場合でも、その際発生するCO<sub>2</sub>を分離、回収し地中に貯留するCCS(Carbon Capture and Storage)を活用すれば、CO<sub>2</sub>排出量を少なく抑えられる。

また水素は、さまざまな資源を原料として作ることができることも、大きな特徴である。水を電気分解する方法だけでなく、石油や天然ガスなどの化石燃料、メタノールやエタノール、バイオマス、下水汚泥、廃プラスチックなどから作ることができる。また製鉄所や化学工場の副生ガスとしても得られる。海外の未利用エネルギーや豊富な再生可能エネルギーを利用して、安価な資源から水素を

作り利用することができれば、低コスト化が図れるとともに、エネルギー調達先の多角化が図れる。しかしながら、世界的に見ても水素を化石燃料などに替わるエネルギーとして本格利用した実績はまだない。

現在、水素の利用として期待されている分野の一つは、燃料電池自動車(FCV)や燃料電池バス(FCバス)の燃料である。FCVなどに搭載されている「燃料電池」に水素を供給して電気をつくり、自動車の動力に利用する。乗用車やバスだけでなく、フォークリフトなどの産業用車両での水素利用もすでに始まっている。

このほか、家庭用燃料電池の「エネファーム」も水素を利用している。都市ガスなどから水素を取り出し、空気中の酸素と化学反応させて発電し、同時に発生する熱を給湯などに利用する。

## 水素をコンパクトに貯蔵、輸送

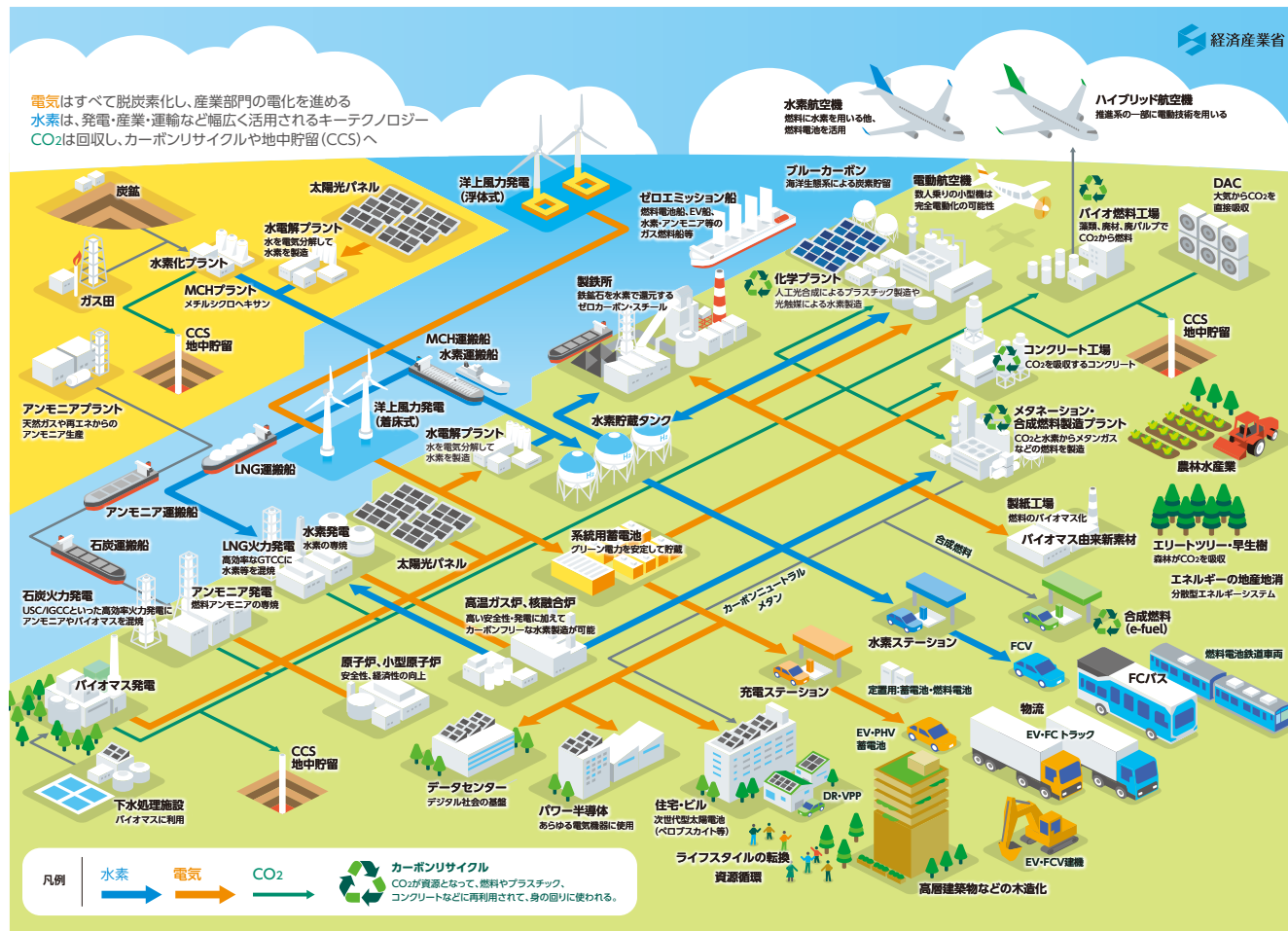
水素は密度が低い気体なので、製造後に常温、常圧の状態のまま保管するには非常に大きなスペースが必要となる。そこで、水素を貯蔵するためには、いかにコンパクトにできるかが重要となる。代表的な方法としては、高圧で圧縮して貯蔵する、低温で液化して貯蔵する、金属などに吸蔵・吸着させて貯蔵する、他の分子に変換して貯蔵する、などがある。

このうち、広く使われているのが、気体のまま高圧で貯蔵する方法である。一般に高圧容器には鉄鋼材料が使われるが、高圧水素の場合には、容器材料の鉄の原子半径に比べ水



## ■ カーボンニュートラルの産業イメージ(図1)

2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指して、水素は幅広く活用されるキーテクノロジーに位置付けられている。(図中の青矢印が水素活用のルートを示す)



経済産業省資料を元に作成

素の原子半径がたいへん小さいため、鉄鋼材料の粒界等に水素原子が集積して脆くなるという、水素脆性の問題がある。そこで高圧水素容器には、特殊なステンレス鋼や高分子複合材などが使われる。

水素は、 $-253^{\circ}\text{C}$ 以下に冷却すると液化して体積が約800分の1になる。液化して貯蔵する場合は、中空部を真空にした断熱容器に入れて貯蔵する。しかし貯蔵中に外部から侵入する熱によりわずかに気化するので、気化した水素ガスを安全に取り除く技術などが必要となる。

また、水素を吸収、放出する特性を持つ水素吸蔵合金を使用する方法もある。水素吸蔵合金は、身近なところではニッケル水素電池の負極材として利用されている。金属以外では、カーボンナノチューブなどでも水素を吸着させて貯蔵する方法が研究されている。

貯蔵した水素を運ぶ手段としていろいろな方法が検討されている。高圧水素や液化水素の場合、一般には特殊な設

備を備えた専用車や専用運搬船で輸送される。都市ガスのように水素専用のパイプラインを使う方法は設置コストがかかるため、現在は化学工場敷地内で輸送する、などの近距離利用に限定して利用されている。

さらに、製造した水素を、他の物質と化学反応させて化合物に変えて貯蔵、輸送し、利用先で再び水素へ戻すという方法も開発されている(詳しくは後述)。

## 国際連携による水素のサプライチェーン

日本では、世界に先駆けて「水素社会」を実現するべく、国やさまざまな企業が実証実験などを進めている。ここでは新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の水素エネルギー利活用の実証事業を紹介する。

## ●世界初の「液化水素運搬船」が水素を日本へ

水素を、品質が低いなどの理由で利用されていないエネルギー源から作ることができれば、低コストでエネルギーを安定的に確保することができる。

技術研究組合CO<sub>2</sub>フリー水素サプライチェーン推進機構(HySTRA)では、低品質であり、揮発ガス分の多い石炭である「褐炭」を活用し、オーストラリアで水素を製造し、日本へ運ぶことを目指した「褐炭水素プロジェクト」(未利用褐炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事業\*)が進められている(図2)。褐炭は、空気に触れると自然発火するおそれがあるため輸送が困難で、これまで利用先が限定されてきた。オーストラリアに埋蔵されている褐炭の量は日本の総電力量の240年分を発電できる量に相当する。発生するCO<sub>2</sub>は分離・回収し、海底下の帯水層などの深さ1,000 m以上の地層に貯留する。

製造した水素を日本へ輸送する実証実験も進められている。-253℃に冷却して液化した大量の水素を長距離輸送するために開発が進められてきたのが液化水素運搬船であり、2019年、世界初の液化水素運搬船「すいそ ふろんていあ」が進水した。2020年には液化水素運搬船向け「海上輸送用

液化水素タンク」の搭載が完了し、近くオーストラリアから日本に水素を運んでくる予定である。

## ●ブルネイで水素化プラントを開設し日本へ輸送

ブルネイ・ダルサラーム国(以下、ブルネイ)と日本を結んで、次世代水素エネルギーチェーン技術研究組合(AHEAD)による、「有機ケミカルハイドライド法による未利用エネルギー由来水素サプライチェーン実証事業\*」が行われた(図3)。

この事業では、水素を芳香族化合物と化学反応させることにより、取り扱いやすい常温で液体の脂環化合物にして貯蔵や輸送を行う「有機ケミカルハイドライド法」を用いた実証実験を行った。具体的には、気体の水素と液体のトルエンを化学反応させ、メチルシクロヘキサン(MCH)という液体の化合物にする。MCHは、水素ガスに比べ体積が約500分の1になり、常温・常圧のままガソリンなどの石油製品と同様に、安定的に既存インフラを利用して輸送することができる。

2019年11月には、ブルネイでトルエン「水素化プラント」を稼働し、製造したMCHを日本に向けて輸出した。また、日本に輸送されたMCHから水素を分離する「脱水素プラント」は2020年4月に本格稼働し、世界初の国際間水素サプライチェーンを実現して、2020年12月末に運用を完了した。実証事業実績としては、約100 tの水素を貯蔵、輸送、供給した。これは燃料電池車約2万台に充填できる量に相当する。

\*新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業

### ■ 海外から液化水素を日本へ運ぶ 褐炭水素プロジェクト(図2)

オーストラリアの褐炭から水素を製造し、液化水素として日本に運ぶことを目指す。褐炭のガス化技術、液化水素の長距離大量輸送技術、液化水素の荷役・貯蔵技術などの実証を進めている。



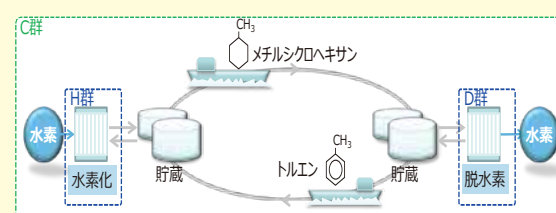
液化水素運搬船への液化水素タンク搭載



神戸空港島液化水素受入基地

資料提供：技術研究組合CO<sub>2</sub>フリー水素サプライチェーン推進機構(HySTRA)

### ■ 有機ケミカルハイドライド法で 水素を貯蔵・輸送(図3)



有機ケミカルハイドライド法によるサプライチェーン

ブルネイにおいて天然ガスからの改質水素を、トルエンに化合しMCHとして、常温・常圧で輸送する。水素化・脱水素化プラント及び輸送チェーンの運用技術などの実証を実施した。



脱水素プラント(川崎市)

資料提供：次世代水素エネルギーチェーン技術研究組合(AHEAD)

## 鉄鋼業が注目する水素利用

鉄鋼業にとって、水素利用はCO<sub>2</sub>排出削減を進めるためのキーワードとなっている。

CO<sub>2</sub>排出削減は世界共通の目標である。日本でも産業部門、運輸部門など各方面でCO<sub>2</sub>排出削減の取り組みが進んでおり、鉄鋼業でもCO<sub>2</sub>排出削減に取り組んでいる。

高炉で鉄鉄を製造する際には、還元材としてコークス(炭素)を用いるため、製造時にCO<sub>2</sub>を排出することは避けられない。また今後、少なくとも2050年までの鉄鉱石から製造する鉄鋼の世界での需要は、現在とほぼ同程度と見込まれているため、CO<sub>2</sub>排出が低い方法で鉄鉱石還元を進めていく必要がある。

鉄鉱石からの鉄鋼製造においてCO<sub>2</sub>排出低減をする手段として、CCSがある。また、CO<sub>2</sub>を化学品や燃料に変換して再利用するCCU(Carbon Capture and Utilization)もある。

他に有力視されている手段として、水素による鉄鉱石還元がある。これは現在のコークスや天然ガスといった炭素主体の還元に替わって水素を還元材として利用するもので、排出されるのはCO<sub>2</sub>ではなく水である。

しかし水素の利用には、解決すべき課題がある。まず水素の

価格である。国内の水素の価格は現状では100円/Nm<sup>3</sup>-水素(1,000円/kg-水素)程度だが、日本鉄鋼連盟の試算(長期温暖化対策ビジョン2018年による)では8円/Nm<sup>3</sup>-水素(80円/kg-水素)程度でないと、現在の原料炭を用いた鉄鋼生産と同等の経済性が実現できない、と試算されている。

また水素の供給量にも問題がある。国内の標準的な製鉄所で600万t/年の鉄鉄を製造する場合、水素による還元では約60万t-水素/年が必要と言われるが、現在日本国内で生産されている水素量は150万t-水素/年でしかない。つまり、現在の国内の全製造水素量を合わせても製鉄所2〜3箇所しか賄えないことになる。

量の問題だけでなく、炭素による還元とは異なり、水素還元は吸熱反応であるため、いかに熱補償するか等の技術開発も求められる。

すでにヨーロッパでは、水素還元製鉄の開発が着手されているが、実現までには長い時間がかかると見られる。水素を利用したゼロカーボン・スチールの実現を目指して、世界の鉄鋼業が新たな取組を始めている。

### ● 長期温暖化対策となる超革新技術開発

日本鉄鋼連盟発表の長期温暖化対策ビジョン「ゼロカーボン・スチールへの挑戦」では、2100年までに鉄鋼業のCO<sub>2</sub>排出量をゼロにするための方向性が示されている。

|                |                                                       | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 | 2100 |
|----------------|-------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| COURSE50       | 所内水素(COG)利用による高炉内の水素還元比率アップ 高炉ガスからのCO <sub>2</sub> 分離 | R&D  | 導入   |      |      |      |
| Super COURSE50 | 外部水素利用による高炉によるさらなる水素還元比率アップ(大量の水素供給が可能となる前提)          | R&D  | 導入   |      |      |      |
| 水素還元製鉄         | 石炭を利用しない水素還元製鉄                                        | R&D  | 導入   |      |      |      |
| CCU            | 副生ガスからのカーボンリサイクル                                      | R&D  | 導入   |      |      |      |
| CCS            | 副生ガスからのCO <sub>2</sub> 回収                             | R&D  | 導入   |      |      |      |

(日本鉄鋼連盟長期温暖化対策ビジョン「ゼロカーボン・スチールへの挑戦」2020年6月修正版を元に作成)

## 水素ステーションの普及を目指す

政府は、水素エネルギーの利活用を支援するため、「水素基本戦略」や「水素・燃料電池戦略ロードマップ」など、将来目指すべきビジョンと行動計画を示している。こうした取り組みの一つに、水素ステーションの普及・整備支援がある。水素ステーションの普及は着実に進んでおり、2020年1月には、FCVだけでなくFCバスにも対応する「東京ガス豊洲水素ステーション」が開所し、東京都が普及を推進しているFCバスへの水素の供給が見込まれている。

また、遠隔監視された水素ステーションで、セルフでの充填を可能とする「セルフ化」の検討も行われている。水素ステーションには、水素を昇圧するコンプレッサー、水素を蓄えておく蓄圧器、水素を冷却するプレクーラー、水素を車に充填するためのノズルを備えた

ディスペンサーなどが設置されている。日本では作業の安全性の点から、水素の充填作業は従業員が行うのが原則だが、ヨーロッパなどではセルフの水素ステーションが普及しつつあり、日本でも「セルフ化」に向けた安全対策の検討が進められている。

水素ステーションの設備に使われる金属材料は高圧の水素ガスに接するため、耐水素脆化性および引張強さにすぐれていることが求められ、オーステナイト系ステンレス鋼を始め各種の鉄鋼材料の検討が進められている(詳細は連携記事参照)。これからの普及が見込まれる水素ステーションでは、今後もさまざまな技術開発が期待されている。

日本は、水素エネルギーに関連する高度な技術を蓄積してきた。クリーンな水素社会を実現するため、日本の鉄鋼材料技術の果たすべき役割は大きい。

●取材協力 日本製鉄(株) ●文 杉山 香里



## 連携記事

# 水素ステーションへの低合金鋼適用拡大の取り組み

～水素ステーション用蓄圧器開発例と高圧水素ガス中の材料評価試験模擬検討例～

Expansion of Application of Low Alloy Steels to Hydrogen Filling Stations

～Examples of Development of Pressure Vessel for Hydrogen Filling Station and Investigation of Emulating Evaluation Technique for Mechanical Properties of Low Alloy Steel in High Pressure Hydrogen Gas～

JFEスチール(株)  
スチール研究所  
部長

高木周作  
Shusaku Takagi

JFEスチール(株)  
スチール研究所  
主任研究員

松原和輝  
Kazuki Matsubara

JFEスチール(株)  
スチール研究所  
主任研究員

岡野拓史  
Hiroshi Okano

JFEスチール(株)  
スチール研究所  
研究員

西原佳宏  
Yoshihiro Nishihara

JFEコンテナ(株)  
シニアフェロー

高野俊夫  
Toshio Takano

JFEスチール(株)  
スチール研究所  
研究員

野崎彩花  
Ayaka Nozaki

## 1 はじめに

地球温暖化抑制のため、種々の取り組みが行われている。その一つとして、水素エネルギー社会の構築がある。日本は水素エネルギー社会構築に必要な水素製造・貯蔵・輸送・使用のそれぞれの分野で世界最先端の技術開発および実用化に向けた活動を行うとともに、毎年、水素閣僚会議<sup>1)</sup>を主催し、世界の水素社会構築連携を主導している。

国内では、水素・燃料電池戦略ロードマップが策定され、2019年改訂版<sup>2)</sup>では2020年目標として水素ステーション160か所、燃料電池自動車(Fuel Cell Vehicle:FCV)4万台が目標とされた。2020年時点実績は、水素ステーションは135箇所開所<sup>3)</sup>し、目標に近い箇所数となっている。一方、FCVは4000台程度にとどまった。しかし、社会的に低炭素化を進める動きを鑑みると、今後はバス・トラック等の公共用や産業用を中心に普及が進むと考えられる。その動きを加速するためには、水素ステーション数を増加させ、水素充填の利便性を向上させる必要がある。水素ステーションの普及には、国内では4～5億円といわれているステーション建設コストの低減が必要であり、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のプロジェクトでは、2013～2020年度に水素ステーション建設コストを2億円以下<sup>4)</sup>とする目標で種々の技術開発が行われており、現在も一部継続中である。

鉄鋼材料の観点では、水素ステーション機器への高強度低

合金鋼の適用の検討が進められている。低合金鋼は水素原子が鋼中へ侵入することで材質が劣化する水素脆化現象が発現するリスクがある<sup>5)</sup>。一般的に面心立方構造を有するオーステナイト系ステンレス鋼は水素脆化が発現しづらく、体心立方構造を有する低合金鋼は水素脆化が発現しやすい。水素脆化発現を回避するためにはオーステナイト系ステンレス鋼の使用が好ましいが、高コストであるため、低合金鋼の利用検討が行われている。鋼材中への侵入水素量が多いほど水素による材質劣化が大きくなるが、鋼中への水素の固溶量はSievertsの法則に従って決まる<sup>6)</sup>ため、水素圧力が高いほど材質劣化度合いが大きくなる。そのため、低合金鋼の水素ステーションへの適用は慎重に検討されてきた。従来の40MPa仕様水素ステーション(FCV充填圧35MPa)実用化時には、高圧ガス保安法一般高圧ガス保安規則(一般則)例示基準が改訂され、高圧水素ガスの蓄圧器に使用可能な低合金鋼として、安全検査を前提としてSCM435の使用が承認された。さらに商用化が本格化し82MPa(FCV充填圧70MPa)仕様水素ステーションの実用化時には、改めて一般則例示基準が改訂されたが、主としてオーステナイト系ステンレス鋼の適用範囲が規定された。同時期に、蓄圧器用途を主に低合金鋼の安全使用についても研究されたが、蓄圧器の設計や製造工程によって低合金鋼に対する水素脆化影響が変化するため、蓄圧器の実用化には一品毎に有識者により安全性が検証される事前評価申請の対象とされた。そのため、水素ステーション



用蓄圧器は受注から製造までの納期の長期間化と高コスト化が避けられなかった。NEDOの前記プロジェクトで、82MPa水素ステーション用蓄圧器用途を想定し、低合金鋼の安全利用を可能とするための技術基準（安全要件）を明確化することがテーマとされて、必要なデータ採取<sup>7)</sup>が行われた。その結果、現在では、水素蓄圧器等を対象として低合金鋼への安全要求が明確になり、水素ステーションの低コスト化につながっている。

本稿では、水素ステーションへの低合金鋼適用拡大の例として、JFEスチール（株）とJFEコンテナ（株）が共同で開発した低合金鋼を用いた水素蓄圧器<sup>8,9)</sup>について紹介する。また、今後、さらに高圧水素分野への鉄鋼材料の適用拡大を目指し、NEDOプロジェクトで実施された、高圧水素ガス中の鋼材特性評価を簡便に行うための手法検討状況を簡単に述べる。

## 2 低合金鋼を用いた水素ステーション用蓄圧器

### 2.1 蓄圧器の役割と種類<sup>\*</sup>

水素ステーションでの機器構成例を図1に示す。ステーションでは、ステーション外部から運搬された水素ガスもしくはステーション内で製造された水素を圧縮機で昇圧して蓄圧器に圧力82MPa（約800気圧）で蓄え、圧力・温度を制御するディスペンサーを介して70MPa仕様FCV車載容器に水素を充填する。充填圧力を70MPaとすることで、FCVは乗用車ではガソリン車並みの航続距離を獲得している。水素蓄圧器に用いられる圧力を検討する際には、ガソリン車で燃料をフル充填するために必要な時間と同等の約3分で水素充填が完了できることを目標とし、安全検証を経て82MPaの蓄圧器が選定された経緯がある。蓄圧器からFCVに水素充填すると蓄圧器内の圧力が低下するため、次の充填に備えて蓄圧器に水素を追加し昇圧する。そのため、蓄圧器には圧力変動が生じ、その変動に対して所定の回数まで破壊しない設計が必要である。先述のNEDOプロジェクトでは蓄圧器開発

目標として、高圧水素ガスの圧力変動回数10万回以上使用可能<sup>4)</sup>であることが要求された。

圧力容器には、図2に示すように、Type1からType4の4種類の様式がある。Type1は鋼製、Type2は鋼製ライナの胴部を炭素繊維強化型樹脂（Carbon Fiber Reinforced Plastics：CFRP）で補強したもの、Type3は金属（アルミ合金もしくは鋼）製ライナの全周をCFRPで補強したもの、Type4は樹脂ライナの全周をCFRPで補強したもの、である。日本ではType1からType3が水素ステーション用蓄圧器として使用され、Type4は軽量という特徴を活かし、車載用途に用いられている。Type1およびType2蓄圧器では圧力を鋼により保持しているが、Type3蓄圧器では圧力の大部分をCFRPに分担させ、アルミ合金もしくは低合金製のライナの機能はガスの透過を抑制することが主であるため薄肉設計となっている。そのため、Type3はType1、Type2と比較して軽量であり運搬が容易であるが、同一圧力変動範囲での蓄圧器使用可能回数は、Type1およびType2がType3より多いと考えられる。Type1からType3の蓄圧器の選択はステーションの運用条件によって異なると考えられる。

### 2.2 高強度低合金鋼を用いた水素ステーション用蓄圧器例

本節では高強度低合金鋼を用いた水素ステーション用蓄圧器の素材および構造の特長の例を述べる。

| 種類  | Type1                                                                                | Type2                                                                                 |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 素材  | 鋼                                                                                    | 鋼 x CFRP(フーブラップ)                                                                      |
| 模式図 |  |  |
| 種類  | Type3                                                                                | Type4                                                                                 |
| 素材  | 金属(Al or 鋼) x CFRP(フルラップ)                                                            | 樹脂 x CFRP(フルラップ)                                                                      |
| 模式図 |  |  |

図2 圧力容器の種類

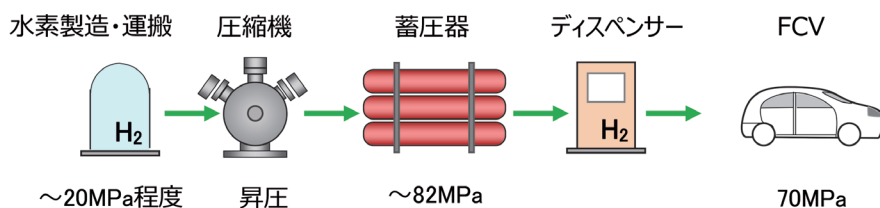


図1 水素ステーションの機器構成

<sup>\*</sup> 法規制上、Type1～Type4の呼称は容器保安規則（容器則）で規制される移動する容器に対して用いられる。定置式の蓄圧器は特定設備検査規則（特定則）で規制されるため、厳密には蓄圧器構造の呼称も異なると思われるが、本稿では一般に呼称されているType1～Type4という用語を用いる。

## 2.2.1 水素ステーション用蓄圧器に適用される高強度低合金鋼

水素ステーションの構成は多様であるが、ステーションで製造した、もしくは外部より受け入れた水素ガスを一旦40MPa程度の圧力に昇圧して蓄える蓄圧器と、その後、さらに82MPaまで昇圧して蓄える蓄圧器がある場合が多い。いずれの蓄圧器にもCr-Mo系の低合金鋼、具体的にはJIS-SCM435もしくはJIS-SNCM439が用いられる。しかし、水素ガスが金属材料表面に触れると、図3に示すように、金属材料表面で水素分子が水素原子に乖離し材料中に侵入する。低合金鋼では、侵入した水素原子が多いほど水素脆化が顕著に発現し、材質が劣化する。図4にJIS-SNCM439鋼 (Fe-0.40% C-0.23% Si-0.71% Mn-1.76% Ni-0.74% Cr-0.22% Mo, 引張強さ928MPa) の105MPa水素ガス中の低ひずみ速度引張試験 (Slow Strain Rate Technique : SSRT) 結果および疲労試験結果<sup>10)</sup>を示す。SSRTのひずみ速度は $1.0 \times 10^{-5}$ /s、疲労試験の応力比は-1で行った。SSRTでは大気中と水素ガス中で応力-変位曲線は重なっているが、水素ガス中での破断変位は大気中と比較して低下している。疲労限については105MPa水素ガス中では大気中と同程度であったが、低サイ

クル疲労となる応力域では、水素ガス中の破壊寿命は大気中よりも短時間化した。また、松尾ら<sup>11)</sup>は、SCM435鋼を用いて115MPa水素ガス中で疲労き裂進展試験を行い、高圧水素ガス中の疲労き裂進展速度が大気中よりも加速するがこの加速率に上限値が存在し、その上限値は30倍程度であることを明らかにしている。これらの結果が示すように、高圧水素ガス中では低合金鋼の材質の一部は劣化する。水素脆化が発生しない低合金鋼を開発できれば好ましいが、技術的ハードルが高く、近未来に建設される水素ステーションへの適用は見通せない。そのため、このような低合金鋼の特性を理解した上で水素ステーションへの適用を可能とするための検討がNEDOプロジェクト<sup>7,12)</sup>で行われている。具体的には、高圧水素ガス中で各種データを採取し、蓄圧器等への適用の考え方が議論され、その結果が、一般財団法人石油エネルギー技術センター (Japan Petroleum Energy Center : JPEC) によりまとめられ「水素スタンドで使用される低合金鋼製蓄圧器の安全利用に関する技術文書」JPEC-TD 0003 (2017)<sup>13,14)</sup>として発行されている。また、この技術文書と整合する形で日本高圧ガス保安協会 (KHK) 発行の「超高圧ガス設備に関する基準」KHK S0220 (2020)<sup>15)</sup>の中に高圧水素蓄圧器に関する基準が記載されている。

上記JPEC-TD0003 (2017) では、低合金鋼を水素インフラに適用するために、表1に示す内容を規定している。蓄圧器等のインフラに用いられる素材は、引張強さが水素影響を受けない範囲に制約され、「設計圧力以上の試験圧力で水素ガス中SSRTを実施し、不活性ガス中のSSRTの最大荷重点を超過すること」を要求している。また、10万回以上の圧力変動を受ける蓄圧器の使い切り寿命を考慮するため、水素ガス中の疲労限が大気中 (不活性雰囲気中) に比較して低下せず、さらに2倍以上の安全裕度を有した設計が要求された。さらに万一疲労き裂が進展した場合の安全も考慮し、破壊前漏洩の成立も検証するように要求している。

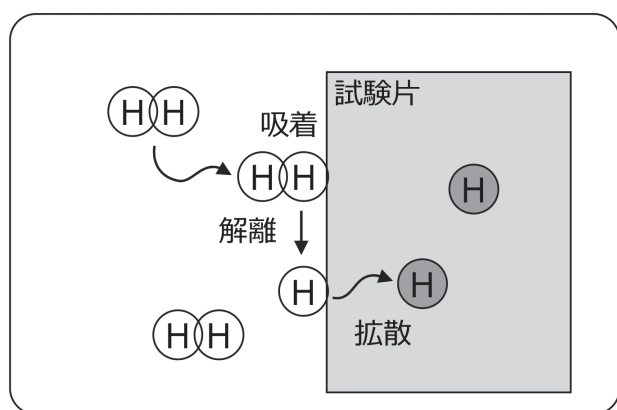


図3 高圧水素ガス中での鋼材中への水素侵入の模式図

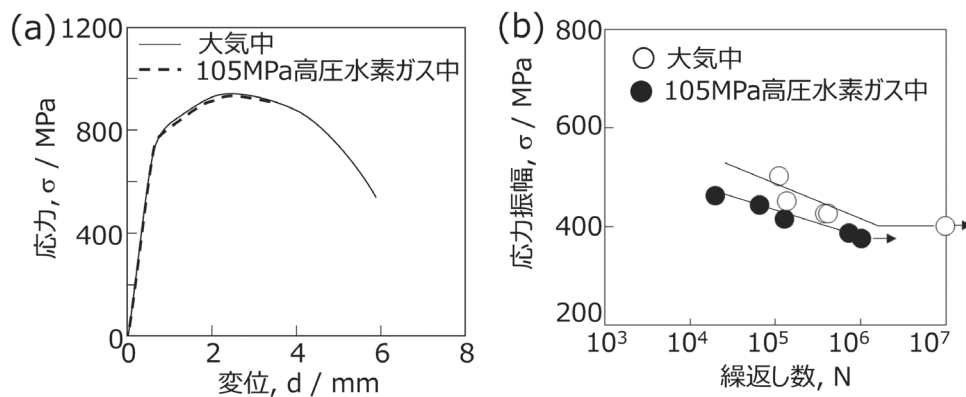


図4 105MPa 高圧水素ガス中及び大気中における低合金鋼の (a) SSRT および (b) 疲労特性

「設計圧力以上の試験圧力で水素ガス中SSRTを実施し、荷重-変位曲線が不活性ガス中の最大荷重点を超過すること」という要求と「水素ガス中の疲労限が大気中（不活性雰囲気中）に比較し低下しない」という要求は、降伏強さ、引張強さ、疲労限が大気中と水素ガス中で変化しないことを担保しているため、従来の設計基準と同様の考え方が高圧水素蓄圧器に関しても適用が可能となると考えられる。上記条件を満たす材料としては、KHKS0220 (2020) <sup>15)</sup> においてSCM435鋼もしくはSNCM439鋼での熱処理や強度範囲が例示されている。

## 2.2.2 高強度低合金鋼を使用した水素ステーション用蓄圧器例

本節では、高強度低合金鋼を使用した水素ステーション用蓄圧器例として、JFEスチール（株）とJFEコンテナ（株）が共同開発した蓄圧器（以降、JFE製蓄圧器と記載）に関して紹介する。JFEコンテナ（株）では表2に示す3種の蓄圧器製品を製造・販売している。Type1、Type2蓄圧器の構造の模式図とType2蓄圧器の外観を図5<sup>8)</sup>に示す。サイズはタイプによって異なるが、直径300～400mm程度、長さ4～6m

程度、内容量200～400L程度である。本蓄圧器は端部を縮径しないストレート型の形状としていることが特徴である。圧力容器は端部を鍛造もしくは絞り加工によって縮径し、封止部の負荷応力を低減するボンベ型が多い。一方、本蓄圧器は封止部が大口径であることで、定期実施が義務付けられている蓄圧器内面の健全性確認のための開放検査を実施しやすくなる。また、端部の縮径を行わないため、シームレス鋼管をそのまま機械加工することで容器を製造でき、低コスト化が可能となる。また、大口径のため、ボンベ型の場合と比較して熱処理時に高冷却速度での焼き入れが可能となるため、高強度で均一な材質を達成しやすい。

JFEスチール（株）では、蓄圧器開発にあたり、まず、高圧水素ガス中下での特性劣化の少ない鋼材組織を検討した。その結果の一例を示す。JIS-SCM435鋼を焼き入れ焼き戻し処理を行って、TS900MPa級で炭化物分散状態の異なる鋼を作製し、105MPa高圧水素ガス中でSSRTを行った。図6に供試材のSEM組織、得られた応力-変位曲線および大気中の変位に対する高圧水素ガス中の変位の割合<sup>8)</sup>を示す。炭化物を均

表1 蓄圧器に低合金鋼を適用するために必要な高圧水素ガス中の特性例

| 試験     | 高圧水素ガス中の必要特性                                           |
|--------|--------------------------------------------------------|
| SSRT試験 | 設計圧力以上の試験圧力で水素ガス中SSRTを実施し、荷重-変位曲線が不活性ガス環境の最大荷重点を超過すること |
| 疲労試験   | 水素ガス中の疲労限が大気中（不活性雰囲気中）に比較し低下しないこと                      |

表2 JFE製水素ステーション用蓄圧器

| 容器タイプ | 特長    | 運転圧力範囲例   | 設計圧力   | 設計係数  | 使用可能回数 | 定期自主検査 |
|-------|-------|-----------|--------|-------|--------|--------|
| Type2 | 広圧力範囲 | 35-93 MPa | 99 MPa | > 3.0 | 12万回   | 6万回    |
| Type1 | 汎用長寿命 | 50-82 MPa | 95 MPa | 2.4   | 55万回   | 22.5万回 |
| Type1 | 大容量   | 15-45 MPa | 50 MPa | >3.0  | 21万回   | 10.5万回 |

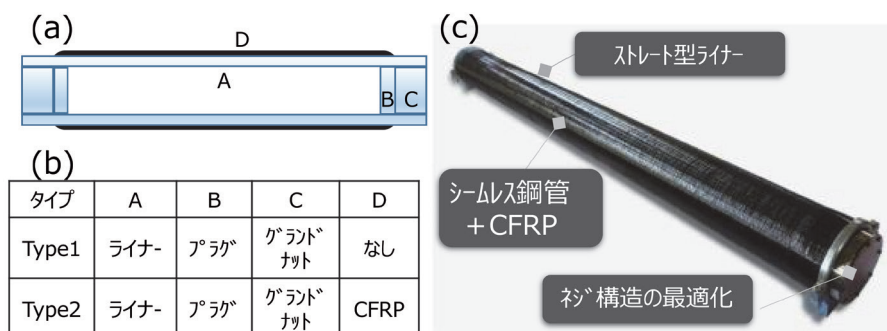


図5 JFE製蓄圧器の (a) 断面模式図、(b) 構成と (c) Type2蓄圧器の外観



一に分散させた鋼は不均一分散させた鋼よりも高压水素ガス中の伸びが優れていた。また、大気中の伸びに対する高压水素ガス中の伸びの割合でも、炭化物均一分散鋼が70%、炭化物不均一分散鋼は60%で、炭化物均一分散した鋼の特性が優れていた。これらの結果から、炭化物均一分散した組織が高压水素ガス中での特性に優れることが明確となった。この差が生じる理由は今後さらに調査が必要であるが、例えば、図7<sup>8)</sup>に示すように、炭化物が均一分散することで水素の局所的な集積が抑制されることが考えられる。炭化物分散状態のコントロール手法は種々あるが、例えば、焼き入れ焼き戻しにおいては、炭化物均一分散組織を得るためには、焼き入れ時の冷却速度を十分に確保してマルテンサイト単一組織を得ることが挙げられる。JFE製蓄圧器は大口径であるため、鋼素材を製造する際に冷却速度の確保が行いやすく、均一なマルテンサイト組織を得やすい。実際にJFEスチール(株)知多製造所において表1の特性を満足する高压水素ガス中下で優れた材質を示す高強度低合金シームレス鋼管を製造し蓄圧器に適用している。

一方、大口径の蓄圧器は、プラグと呼ばれる蓋を保持するためのネジ部にかかる応力が高くなるため、高応力に耐えるネジ部の設計が必要となる。ネジ部は形状の最適化を検討した結果、ネジ底曲率半径の最適化等により、ネジ底に発生する応力を低減し、目標であった10万回を超えて使用可能な容器を開発した。

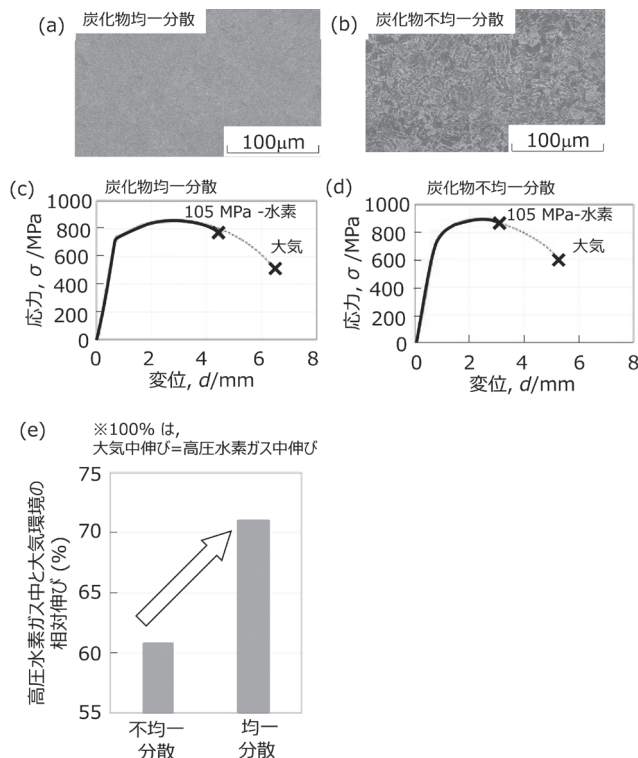


図6 高压水素ガス中のSSRT試験結果に及ぼす炭化物分散状態の影響

また、鋼製ライナにCFRPを巻き付けたType2複合容器蓄圧器製造においては固有の課題がある。複合容器では、CFRPを巻き付けた後に100℃以上に温度を上げて樹脂を硬化させる。その後室温まで冷却すると、鋼製ライナの熱膨張係数がCFRPの熱膨張係数よりも大きいため、樹脂の効果処理温度から室温までの鋼製ライナの収縮がCFRPよりも大きく、鋼製ライナとCFRPの間に隙間が生じる。隙間が生じた状態ではCFRPに応力分担がなされないため、CFRPを巻き付けた効果が得られない。複合容器としての性能を十分に活かすためには隙間を極力低減することが必要である。図8<sup>8)</sup>に蓄圧器に内圧を付与し、CFRP外面のひずみをひずみゲージにより計測した結果を示す。隙間低減処理を行わない場合は、圧力が35MPa程度でひずみゲージからの出力が確認された。鋼製ライナが内圧によって膨張し、35MPa程度でCFRPに接触したと考えられる。一方、隙間低減処理を行った場合は、内圧が10MPaですでにひずみゲージの出力が確認されている。JFE製Type2蓄圧器は、水素ステーション用Type2蓄圧器としては国産で初めて実用化され、2020年12月25日に開所した豊田豊栄水素ステーションで使用されている<sup>16)</sup>。今後はType2蓄圧器が普及するにつれて、Type1蓄圧器とType2蓄圧器の得失が明確となり、適材適所の使用が

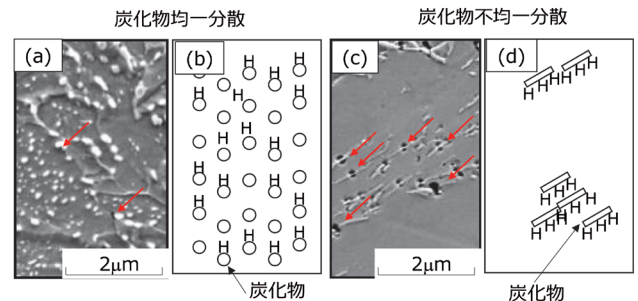


図7 炭化物分散状態が(a), (c) 真ひずみ0.21で変形後のボイド生成におよぼす影響と(b), (d) 鋼中の水素原子分布の推定図

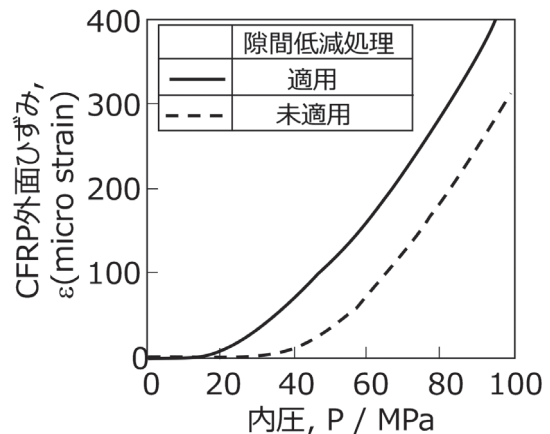


図8 Type2蓄圧器への負荷内圧と外面ひずみの関係

広がり、水素ステーションのコスト低減に一層寄与できると考えられる。

### 3 高圧水素環境下での鋼材特性評価の簡便な模擬手法検討

今後、水素ステーション建設コストをさらに低減するためには、種々の鋼を開発し材料データを採取していく必要がある。そのための大きな課題として、高圧水素ガス中での材料試験が困難であることが挙げられる。100MPaを超える高圧水素ガス中での材料試験には、防爆構造の試験室を備え、高圧ガス保安法に則した管理体制が必要である。そのような体制をとれる機関は少なく、通常の大学や企業では高圧水素ガス中での試験実施が困難である。そのため、もし、高圧水素ガス中の材料特性を高圧水素ガスを用いずに得られる手法が開発できれば、本分野の水素脆化現象を研究対象とする研究者が増え、鋼材開発も加速される可能性が高い。そのためNEDOでは「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業」(2018年度～2020年度)において、高圧水素ガス中での機械的特性をより汎用的かつ低コストで採取する手法の確立を目指した取り組みが行われている<sup>17)</sup>。その一つが、「連続陰極水素チャージ法による水素インフラ用鋼材の水素特性判断の簡易評価手法の開発」である。

陰極チャージ法は、電気化学反応を利用して鋼材中に水素を導入する手法の一つである。溶液中に浸漬した鋼材をカソードにして通電することで、鋼材表面から水素原子を侵入させることができる。水素侵入の模式図を図9に示す。図3に示した高圧水素ガス中の水素侵入と比較すると、いずれの環境でも水素が水素原子として鋼中に侵入するため、陰極チャージ法を用いて鋼材中に侵入させる水素量を高圧水素ガス中と同じ量に制御できれば、高圧水素ガス中と同等の材料特性を陰極チャージ法を用いて採取できる可能性がある。ただし、陰極チャージ法では水素チャージ後に溶液から試験片

を取り出して材料試験を行うと、試験開始時に高圧水素ガス中と同量の水素量に制御したとしても、試験中に水素が大気中に逃散し水素量が減少するため、同等の評価ができない可能性が高い。そのため、高圧水素ガス中の材料試験を模擬するためには、サンプルを溶液に浸漬して陰極チャージを行ったまま、SSRTや疲労試験を行う必要がある。この手法を連続陰極チャージ法と呼称する。本章では連続陰極チャージ法を用いた材質評価検討結果の一例を報告する。

供試材は、焼き入れ焼き戻しで作製したTS900MPa級SNCM439鋼(Fe-0.40% C-0.23% Si-0.71% Mn -1.73% Ni-0.73% Cr-0.22% Mo)を用いた。この鋼は105MPa水素ガス中では、0.38ppmの水素が侵入した。ただし、0.38ppmの値は、試験片を105MPa水素ガス中で96時間暴露した後、試験機から試験片を取り出すまで42分要した後に、水素分析に供して得た水素量である。この鋼を(1M NaOH+0.3% NH<sub>4</sub>SCN)水溶液に浸漬し、電位を変化させて陰極チャージを行った結果を図10に示す。図10の水素分析結果は、高圧水素ガス中と条件を合わせるため、陰極チャージ終了後、42分間室温で放置したのちに水素分析に供して得た値である。105MPa高圧ガス中と同等の水素が侵入する電位は-1.125V(vs SHE)であった。そのため、陰極チャージを-1.125V(vs SHE)の条件で行いながらSSRTを行えば、105MPa高圧水素ガス中と同等の結果が得られる可能性がある。図11<sup>18)</sup>に、大気中、105MPa高圧水素ガス中および-1.125V(vs SHE)の電位での連続陰極水素チャージ中でのSSRT結果を示す。水素ガス中および連続陰極チャージ中では大気中よりも破断変位が低下し、水素脆化が発現した。また、高圧水素ガス中と連続陰極チャージ中では破断変位はほぼ同じであった。また絞り値を測定した結果、高圧水素ガス中で29%、連続陰極チャージ中で27%とほぼ同等の結果であった。しかし一方、応力-変位曲線において、高圧水素ガス中では900MPa程度から一気に破断しているのに対し、連続陰極チャージ中では、荷重が

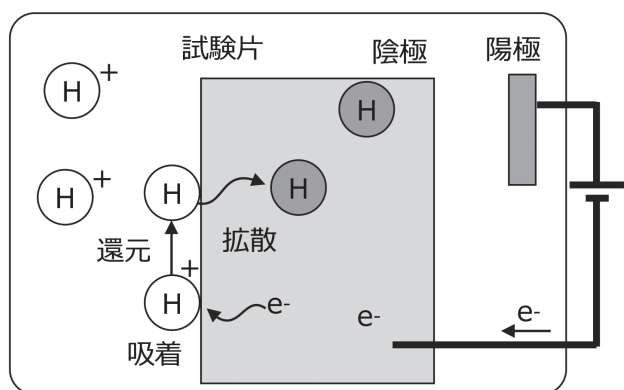


図9 陰極チャージ法による水素侵入の模式図

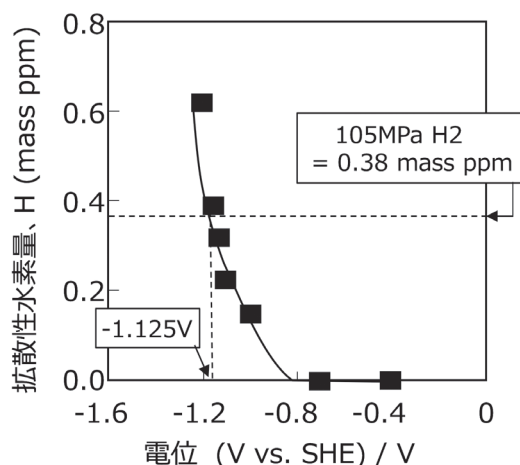


図10 SNCM439鋼の水素侵入量におよぼす電位の影響

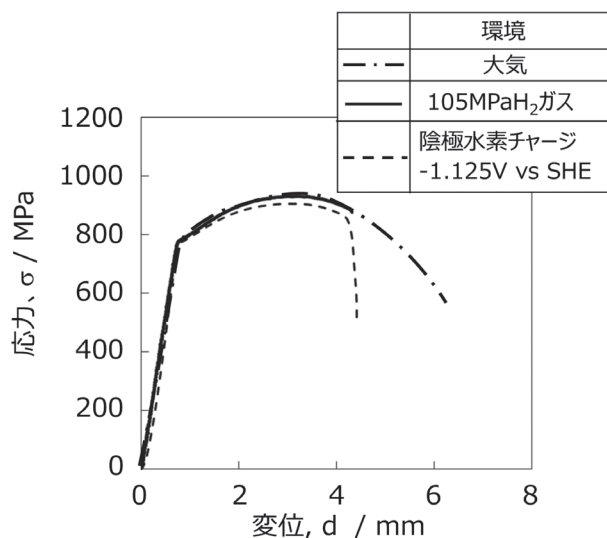


図11 連続陰極チャージ法と高圧水素ガス中のSSRT試験結果の比較

500MPa程度まで下がってから破断している。この違いの原因は現在解析中である。前述の通り、高圧水素ガス中で使用可能な低合金鋼の条件は、荷重-変位曲線が不活性ガス中のSSRTの最大荷重点に達する前に荷重点を超過すること、という点である。この観点では、連続陰極チャージ法でも高圧水素ガス中と同等の評価結果を得ることができると考えられる。一方、破断する応力が異なる点では、鋼材が局所変形を始めてからの変形挙動が高圧水素ガス中と連続陰極水素チャージ中で異なる可能性がある。今後、疲労試験結果等も確認しながら、両者の相違を明確化し、連続陰極チャージ法により高圧水素ガス中の特性を模擬できる範囲を示していく予定である。

## 4 まとめ

本報では、水素ステーション建設コスト低減のために鉄鋼材料が貢献している例として、JFEスチール(株)とJFEコンテナ(株)が共同で開発した低合金鋼を用いた水素ステーション用蓄圧器について紹介した。また、今後、さらに高圧水素分野への低合金鋼の適用拡大のための基盤構築の一環としてNEDOプロジェクトで行われている、高圧水素ガス中での低合金鋼の材料特性をより汎用的かつ低コストで評価できる手法の確立を目指した取り組みの一例として、「連続陰極水素チャージ法による水素インフラ用鋼材の水素特性判断の簡易評価手法の開発」の検討状況を簡単に紹介した。鉄鋼材料は今後も進化を続け、低炭素化社会での各種インフラ構築に貢献していくことを確信している。

## 謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技

術総合開発機構のプロジェクト「水素利用技術研究開発事業」(2015年度～2017年度)および「超高压水素インフラ普及技術研究開発事業」(2018年度～2020年度)の一環として行われたものである。

## 参考文献

- 1) [https://www.nedo.go.jp/events/report/ZZHY\\_00007.html](https://www.nedo.go.jp/events/report/ZZHY_00007.html), (accessed 2021-01-07)
- 2) <https://www.meti.go.jp/press/2018/03/20190312001/20190312001.html>, (accessed 2021-01-07)
- 3) [https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/suiso\\_nenryo/pdf/018\\_01\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo/pdf/018_01_00.pdf), (accessed 2021-01-07)
- 4) 「水素利用技術研究開発事業」事業原簿【公開】，(2017/7/28)
- 5) 例えば，南雲道彦：水素脆性の基礎，内田老鶴圃，(2008)
- 6) 例えば，松山晋作：遅れ破壊，日刊工業新聞社，(1989)
- 7) 「水素利用技術研究開発事業」事後評価報告書，平成30年3月
- 8) 岡野拓史，高木周作，松原和輝，石川信行，竹村泰昌，影山泰輔，戸田祐貴，高野俊夫：まてりあ，60 (2021)，113.
- 9) <https://www.jfecon.jp/news/210126.html>, (accessed 2021-03-07)
- 10) A.Nagano, H.Okano, K.Matsubara, N.Ishikawa and T.Takano: PVP2018-84726 Proc. ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference PVP 2018, Prague, (2018)
- 11) T.Matsuo, J.Yamabe, Y.Fukushima, S.Matsuoka and Y.Murakami: J. Soc. Mater. Sci. Jpn., 59 (2010), 924.
- 12) 平成25年度～平成29年度成果報告書 水素利用技術研究開発事業 燃料電池自動車及び水素供給インフラの国内規制適正化，国際基準調和・国際標準化に関する研究開発 水素ステーション用金属材料の鋼種拡大に関する研究開発
- 13) 「水素スタンドで使用される低合金鋼製蓄圧器の安全利用に関する技術文書」JPEC-TD 0003, (2017)
- 14) [https://www.pecj.or.jp/japanese/committee/pdf/jpec-t\\_d\\_0003.pdf](https://www.pecj.or.jp/japanese/committee/pdf/jpec-t_d_0003.pdf), (accessed 2021-01-07)
- 15) 「超高压ガス設備に関する基準」KHK S0220 (2020)
- 16) <https://www.jfe-steel.co.jp/release/2020/12/201225.html>, (accessed 2021-01-07)
- 17) [https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP\\_100144.html](https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100144.html), (accessed 2021-01-07)
- 18) 西原佳宏，野崎彩花，岡野拓史，高木周作：CAMP-ISIJ, 34 (2021)，188, CD-ROM.

(2021年1月14日受付)



## 連携記事

# 高圧水素用高強度ステンレス鋼の溶接技術開発

Development of Technologies of High-strength Stainless Steel for High Pressure Gaseous Hydrogen Environments

日本製鉄(株)  
技術開発本部  
主任研究員 浄徳佳奈  
Kana Jotoku

日本製鉄(株)  
技術開発本部  
上席主幹研究員 平田弘征  
Hiroyuki Hirata

日本製鉄(株)  
技術開発本部  
主幹 中村 潤  
Jun Nakamura

日本製鉄(株)  
技術開発本部  
リーディングリサーチャー 大村朋彦  
Tomohiko Omura

日本製鉄(株)  
技術開発本部  
主幹研究員 小薄孝裕  
Takahiro Osuki

## 1 はじめに

水素は、化石燃料に替わる環境負荷の低い次世代エネルギーとして期待され、その利用に向けて様々な取り組みが行われている。日本国内では、水素を動力源とする燃料電池車(以下FCV (Fuel Cell Vehicle) と称する)の商用発売を受けて、燃料供給基地となる水素ステーションの建設が急ピッチで進められている。一方で、FCVの普及には、航続距離の延長が必要不可欠であり、そのためには水素ステーションのガス圧を70MPa以上に高圧化する必要がある<sup>1)</sup>。

水素ステーションで使用される金属材料は高圧水素ガスに曝されるため、優れた耐水素脆化特性が必要となる。水素脆化とは、金属材料中に水素原子が入り込み、材料の変形を阻害して脆化する現象である。従来、水素環境下で使用可能な鋼材は、高圧水素環境下においても材料特性が劣化しないオーステナイト系ステンレス鋼であるSUS316LやA6061-T6(溶体化処理後時効したAl-Mg-Si合金)に限定されてきた。国内では、特に水素脆化が起り易い低温領域においてNi当量(= [Ni] + 0.65 [Cr] + 0.98 [Mo] + 1.05 [Mn] + 0.35 [Si] + 12.6 [C], [ ] は各元素の質量%)  $\geq 28.5\%$ を満足するSUS316Lのみが使用可能であった<sup>2)</sup>。しかしながら、SUS316Lは強度が低いため、70MPa以上の水素ガス圧力下でガソリンと同等の充填時間を確保可能な流路面積を確保する場合、配管の厚肉化による大型化が不可避である。そこで、SUS316Lを冷間加工にて高強度化したままで使用されていたが、配管締結時に溶接した場合、溶接部の強度が低下するため、機械継手にて締結する必要がある。そのため、ステー

ション建設に多数の機械継手を必要とし、かつ水素リークに対する懸念もあることから、溶接施工可能な高強度材料およびそれに適した溶接材料が望まれていた。

このような背景を受け、当社では、SUS316Lの約1.6倍となる引張強さ800MPaを有し、かつ高圧水素環境下に対応できる優れた耐水素脆化特性も有する鋼材を開発した。本鋼は、固溶窒素を活用することにより、冷間加工による高強度化ではなく、溶体化熱処理ままで高強度を達成しているため、溶接施工可能な鋼材となっている。そこで、母材同等の高強度と耐水素脆化特性を両立する溶接施工技術の開発を、ノンフィラー溶接およびフィラー溶接のそれぞれにおいて取り組んだ。

## 2 高強度と耐水素脆化特性の両立

本開発鋼の化学成分を表1に示す。本鋼の成分設計の特徴は、SUS316Lと同等のNi添加量とし、CrやMn, Mo添加量を適正化、かつNi当量 $\geq 32.1\%$ を確保し、N含有量を従来のステンレス鋼よりも高くすることで、目標の引張強さ800MPaと優れた耐水素脆化特性を両立した点である。本開発鋼は、溶体化熱処理を行い、Nによる固溶強化ならびにNbおよびV炭窒化物の析出強化により高強度化を図ったオーステナイト系ステンレス鋼である。

オーステナイト系ステンレス鋼の水素脆化特性は、オーステナイト安定度を表す指標の一つとしてNi当量式(= [Ni] + 0.65 [Cr] + 0.98 [Mo] + 1.05 [Mn] + 0.35 [Si] + 12.6 [C], [ ] は各元素の質量%)により整理することができる<sup>3)</sup>。高圧ガス保安

表1 化学成分 (mass%)

| C     | Si   | Mn   | Ni    | Cr    | Mo   | V     | Nb    | N    | Ni 当量   |
|-------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|---------|
| 0.005 | 0.2  | 4.3  | 12.0  | 21.5  | 1.5  | 0.15  | 0.15  | 0.25 | ≥ 32.09 |
| -0.06 | -1.0 | -6.0 | -13.5 | -23.5 | -3.0 | -0.30 | -0.30 | -0.4 |         |

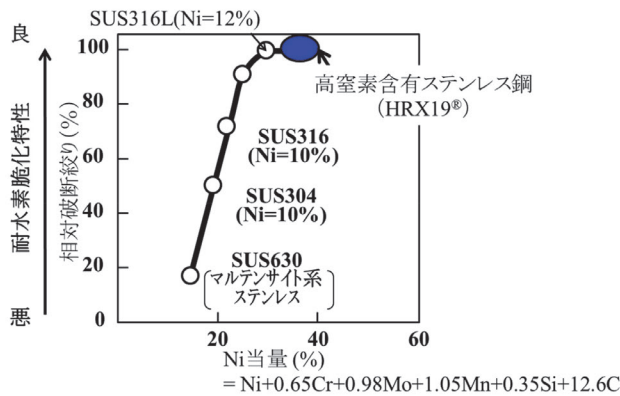


図1 耐水素脆化特性に及ぼすNi当量の影響

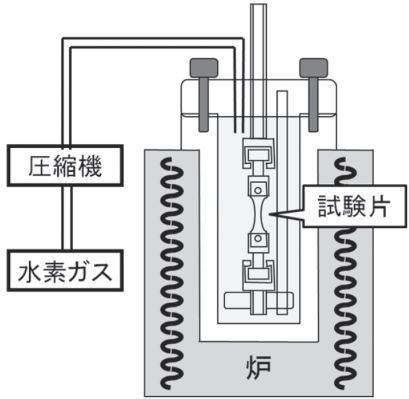


図2 SSRT試験機の構成

法では、 $-10^{\circ}\text{C}$  以下の高圧水素環境下で使用可能な SUS316L ではNi当量 $\geq 28.5\%$ を満足することが規定されている<sup>2)</sup>。図1は各種ステンレス鋼の水素脆化特性に及ぼすNi当量の影響を示す。Ni当量が増加するとオーステナイト安定度が高くなり、ひずみ誘起マルテンサイト変態が抑制されるため、耐水素脆化特性が向上することがわかる。しかしながら、高窒素含有ステンレス鋼の水素脆化特性はNi当量での整理が困難であり、塑性変形時の転位構造がプラナー化してすべり変形が局在化するため、水素脆化特性が低下することが報告されている<sup>4)</sup>。そこで本開発鋼は、合金元素量のバランスを最適化して転位構造をセル化することで、耐水素脆化特性が向上することに成功した<sup>5)</sup>。

### 3 本鋼の耐水素脆化特性

高圧水素環境下での金属材料の水素脆化特性の評価には低ひずみ速度引張試験 (Slow Strain Rate Test : SSRT) が用いられる<sup>6,8)</sup>。試験機の構成を図2に示す。SSRTでは、板状もしくは丸棒状の引張試験片を水素中および大気中 (もしくは不活性ガス中) で低ひずみ速度で引張り、絞りや伸びの値を比較する。一般的に、大気中 (もしくは不活性ガス中) での絞りの値に対する水素中の絞りの値の比を示す相対破断伸びが高いほど耐水素脆化特性に優れる。試験は、定格荷重10kNの試験機を用い、 $-40^{\circ}\text{C}$  から  $150^{\circ}\text{C}$  では最大90MPa、 $-50^{\circ}\text{C}$  では100MPaにて実施した。尚、ひずみ速度は  $3.0 \times 10^{-6}/\text{s}$  とした。

図3は高圧水素中におけるSSRTの結果を示す。比較として、Ni当量28.9%のSUS316Lの結果も併せて示す。Ni当量

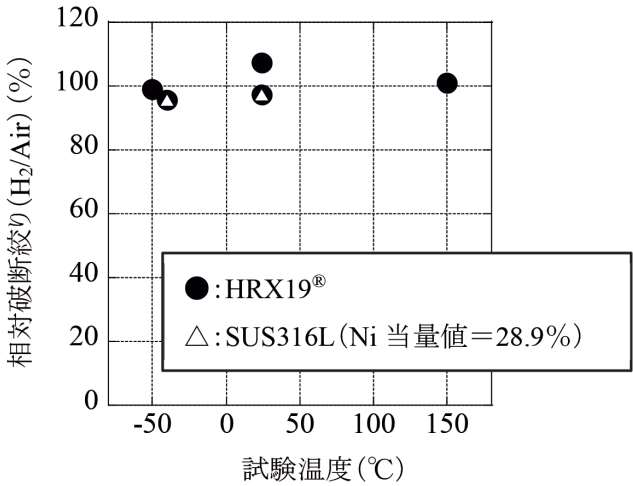


図3 相対破断伸びの温度依存性

が32.1%以上の本開発鋼は、 $-50^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ の広い範囲で相対破断伸びが90%を超えており、Ni当量28.9%のSUS316Lと同等以上の優れた耐水素脆化特性を有している。

### 4 本開発鋼の溶接技術開発

本開発鋼を溶接するためには、溶接継手においても、母材と同等の強度と耐水素脆化特性を確保する必要がある。強度確保には、母材と同じく固溶窒素を活用し、耐水素脆化特性の確保には、溶接金属において耐水素脆化特性を低下させると考えられる $\delta$ フェライト<sup>9)</sup>を抑制することで、高強度と耐水素脆化特性を両立した。本報では、溶接材料を使用しない

ノンフィラー溶接および溶接材料を使用するフィラー溶接の溶接技術について述べる。

#### 4.1 ノンフィラー溶接

薄肉の鋼管や銅板では溶接材料を用いずに、溶接施工される場合がある。本検討では、板厚2.2mmの本開発銅板を用いて、ノンフィラーGTAW (Gas Tungsten Arc Welding) による突合せ溶接継手を作製した。溶接入熱は0.3～0.5 kJ/mmとし、シールドガスは純ArおよびAr+N<sub>2</sub>混合ガス (N<sub>2</sub>: 2～8 vol.%) を用い、バックシールドガスは純N<sub>2</sub>を用いた。

シールドガス中の窒素混合率および溶接入熱を変化させた溶接継手の引張試験結果を図4に示す。いずれの入熱においても、シールドガス中の窒素混合率2 vol.%までは引張強さは大きくなり、その後飽和した。一方、シールドガス中の窒素混合率が同じ場合、0.3～0.4 kJ/mmのノンフィラー溶接継手の方が引張強さは高く、母材の目標引張強さである800 MPaを満足した。以上より、同窒素混合率で溶接する場合、溶接入熱が小さい方が高強度化には有利であると考えられる。図5は、0.4～0.5 kJ/mmのノンフィラー溶接継手の溶接金属中の $\delta$ フェライト量を測定した結果を示す。純Arの

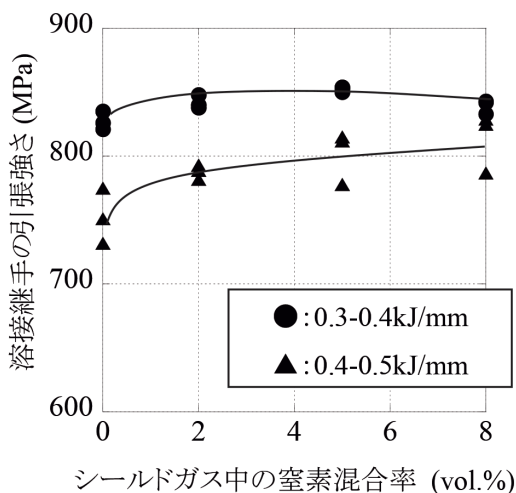


図4 溶接継手の引張試験結果

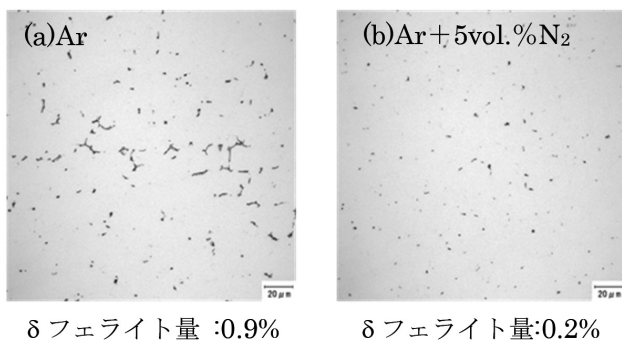


図5 高入熱条件 (0.4～0.5 kJ/mm) の溶接金属組織と $\delta$ フェライト量

シールドガスを使用した場合では、 $\delta$ フェライトが若干残存するものの、シールドガス中の窒素混合率が5 vol.%を超えるとほぼオーステナイト単相となった。そのため、 $\delta$ フェライト相の分散強化が消失して、窒素量の増加による固溶強化が相殺されるため、更なるシールドガス中の窒素混合率の増加による、引張強さが変化しなかったと考えられる。

図6は、ノンフィラー溶接継手の耐水素脆化特性を評価した結果を示す。いずれの溶接条件においても、相対破断値が80%以上であり、優れた耐水素脆化特性を示した。そのため、本開発銅をノンフィラー溶接する場合は、入熱0.4 kJ/mm以下かつシールドガス中に窒素を混合させることが、母材と同等の引張強さと耐水素脆化特性の両立する上で望ましいことがわかる。

#### 4.2 フィラー溶接

ノンフィラー溶接にて全肉厚の溶融が難しい場合は、溶接材料を用いたフィラー溶接が用いられる。本開発銅と同等の性能を有する溶接材料を探索するため、板厚4 mmの本開発銅板の端面にU開先を機械加工により設け、表2に示す汎用ステンレス溶接材料を用いて、GTAWによる突合せ溶接継手を作製した。使用した溶接材料の径は1.2 mmである。尚、溶接入熱は0.4～0.8 kJ/mmとし、シールドガスは純ArおよびAr+N<sub>2</sub>混合ガス (N<sub>2</sub>: 2～8 vol.%) を用い、バックシールドガスには純N<sub>2</sub>を用いた。溶接パス間温度は150℃以下とし、溶接パス数は4パスにて溶接した。

シールドガス中の窒素混合率を変化させ、かつ溶接材料YS309LMoを用いて作製した溶接継手の引張試験結果および溶接金属中の窒素量を分析した結果を図7に示す。供試した引張試験片は余盛りを削除した。尚、破断位置はすべて溶接金属であったことから、得られた溶接継手の引張強さを溶

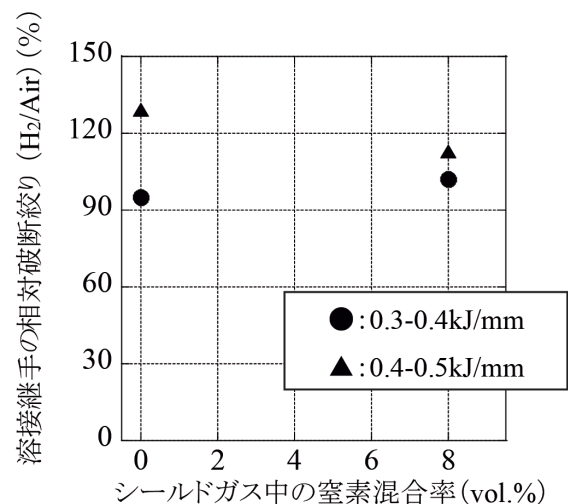


図6 相対破断値に及ぼす溶接条件およびシールドガスの影響



表2 溶接材料の化学成分 (mass%)

| 溶接材料     | C    | Si  | Mn  | Ni   | Cr   | Mo  | N    | Ni 当量 |
|----------|------|-----|-----|------|------|-----|------|-------|
| YS309LMo | 0.02 | 0.5 | 1.5 | 13.8 | 23.4 | 2.2 | 0.08 | 33.2  |
| YS308H   | 0.06 | 0.4 | 2.0 | 10.2 | 19.7 | -   | 0.03 | 26.0  |
| YS308N2  | 0.07 | 0.2 | 2.1 | 9.7  | 21.4 | -   | 0.15 | 26.8  |

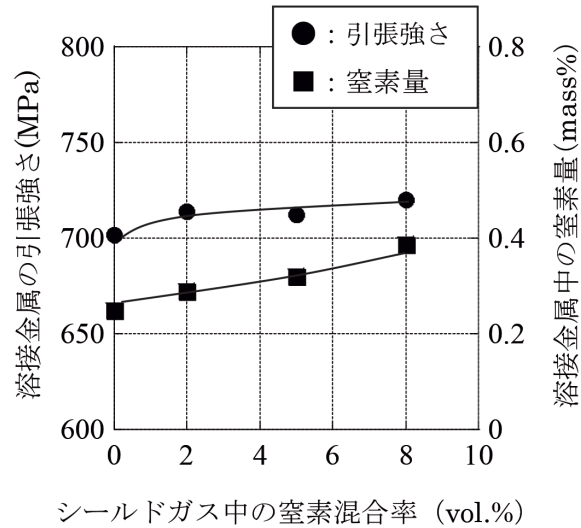


図7 溶接金属の引張強さおよび窒素量に及ぼすシールドガス中の窒素混合率の影響 (YS309LMo)

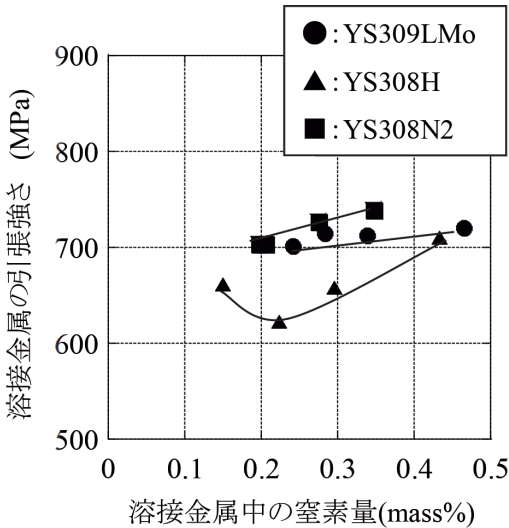


図8 溶接金属の引張強さと窒素量の関係

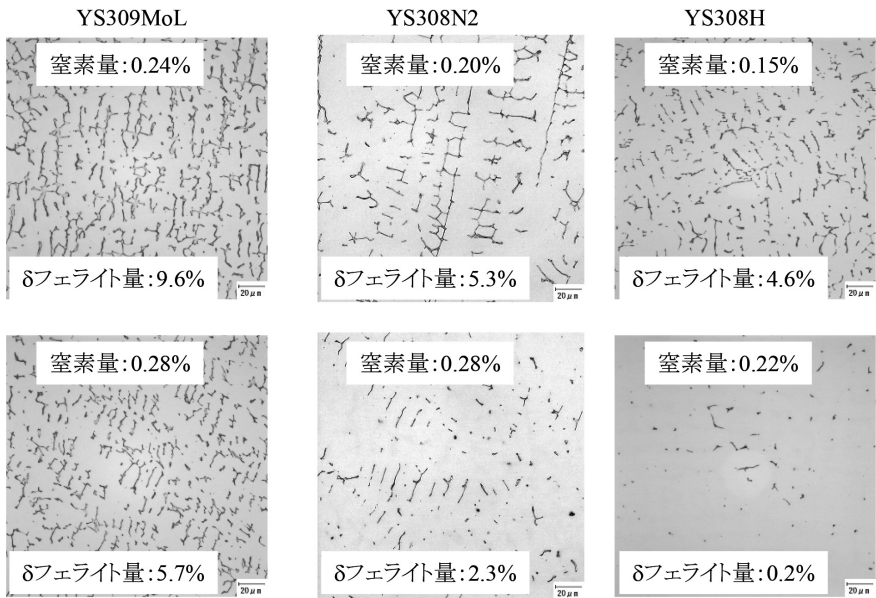


図9 溶接金属のミクロ組織

接金属の引張強さとして整理した。シールドガス中の窒素混合率の増加により、引張強さは増加するが、シールドガス中の窒素混合率が2 vol.%を超えると引張強さの増加は緩やかになった。一方、溶接金属中の窒素量は、シールドガス中の窒素混合率の増加とともに増加した。図8に、各種溶接材料

を使用した場合の溶接金属中の窒素量と引張強さの関係を示す。尚、破断位置はすべて溶接金属であったことから、得られた溶接継手の引張強さを溶接金属の引張強さとして整理した。YS308N2を用いた溶接金属の引張強さは、YS309LMoを用いた場合と同じく、溶接金属中の窒素量増加に伴って

増加した。YS308Hを用いた溶接金属の引張強さは窒素量の増加に伴って減少し、窒素量が、0.22mass%を超えると逆に増加することがわかった。すなわち、溶接材料の種類によって、引張強さに対する窒素の影響が異なった。オーステナイト系ステンレス鋼の引張強さは、固溶元素量、 $\delta$ フェライト量および双晶間隔が影響するため<sup>10)</sup>、溶接金属中の $\delta$ フェライト量を比較した。図9に溶接金属のミクロ写真と $\delta$ フェライト量を示す。溶接金属中の窒素量が低い場合、いずれの溶接材料を用いた場合でも、5～10%程度の $\delta$ フェライトが残存していた。そのため、同程度の窒素量および $\delta$ フェライト量であることから、溶接材料の違いによる溶接金属の引張強さの差は窒素以外の固溶元素の影響によると考えられる。一方、窒素量が増加すると、YS309LMoおよびYS308N2溶接材料を用いた場合は、数%程度の $\delta$ フェライトが残存したが、YS308H溶接材料を用いた場合は0.2%と極少量の残存しか認められなかった。このことから、YS308H溶接材料を用いた場合、溶接金属中の窒素量が0.22mass%までの窒素量の増加により、 $\delta$ フェライトが減少して $\delta$ フェライトによる分散強化が減少したため、引張強さが低くなったと考えられる。しかしながら、窒素量が0.22mass%を超えると $\delta$ フェライトによる分散強化は消失し、窒素による固溶強化が増加するため、窒素量の増加とともに引張強さが上昇した。その結果、YS308H溶接材料を用いた場合の溶接金属の引張強さと窒素量の関係は、YS309LMo溶接材料およびYS308N2溶接材料を用いた場合と異なった挙動を示したと考えられる。

以上より、フィラー溶接金属の高強度化には $\delta$ フェライトの分散強化および窒素による固溶強化の組み合わせが重要であることが明らかとなった。しかしながら、今回検討したいずれの汎用ステンレス溶接材料を用いた場合、母材の目標引張強さである800MPaに未達であった。そのため、溶接材料の更なる高強度化を図るべく、最もNi当量が高いYS309LMo溶接材料の固溶窒素量を増加する最適化学成分を検討した。従来、溶接金属中の窒素吸収については多くの研究がなされており、溶接金属中の窒素量に及ぼす合金元素の影響は、平衡窒素溶解度に及ぼす影響とほぼ同様であると言われている<sup>11,12)</sup>。式(1)に示す溶融鉄合金における窒素吸収反応の平衡定数 $K$

は式(2)および式(3)で表わさせる<sup>13)</sup>。

$$1/2N_2(\text{gas}) = N(\text{in liquid metal}) \dots\dots\dots (1)$$

$$K = a_N \cdot (P_{N_2})^{-1/2} = f_N \cdot [\%N]_e (P_{N_2})^{-1/2} \dots\dots\dots (2)$$

$$\log K = -518/T - 1.063 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $a_N$ は溶融合金中の窒素活量、 $f_N$ は溶融鉄合金中の窒素の活量係数、 $P_{N_2}$ は雰囲気中の窒素分圧(atm)を示す。式(2)および式(3)より、溶融鉄合金中の溶解窒素量は式(4)のように表わされる。

$$\log[\%N] = -518/T - 1.063 - \log f_N + 1/2 \cdot \log \sqrt{P_{N_2}} \dots\dots\dots (4)$$

以上より、温度 $T$ 一定および窒素分圧 $P_{N_2}$ を一定とした場合、溶融鉄合金中の溶解窒素量は $f_N$ を小さくすると増大する。このことから、溶接金属においても $f_N$ が小さいほど窒素の溶解度を高めることができると推定される。ここで、活量係数項は粉川らの報告<sup>12)</sup>にあるように、溶融鉄合金中のほかの合金元素の相互作用助係数と濃度から記述できる。

以上より、YS309LMo溶接材料をベースに $f_N$ および添加窒素量を変化した溶接材料を作製し、溶接金属中の窒素量と引張強さの関係を調査した。作製した溶接材料成分を表3に示す。

板厚12mmの汎用ステンレス鋼板の端面にV開先を機械加工により設け、径1.2mmのスプール形状に加工した溶接材料を用い、GTAWにより開先内に多層溶接した。尚、溶接入熱は、0.9kJ/mmとし、シールドガスには純Arを使用し、パス間温度は150℃以下に管理した。全溶着金属の中央部から、溶接線に平行に引張試験片およびSSRT試験片を採取した。

図10は、溶接材料中の $f_N$ を変化させた場合の溶着金属中の窒素量と引張強さの関係を示す。溶接材料中の $f_N$ が小さくなると、溶接金属中の窒素量は増加して引張強さは向上し、符号a以外の溶接材料において、母材の目標引張強さである800MPaを達成した。加えて、溶接金属の $\delta$ フェライト量を測定した結果、いずれの溶接金属にも5～15%の $\delta$ フェライトが残存した。多量の残存 $\delta$ フェライトは耐水素脆化特性を低下させる懸念があるため、SSRTを用いて耐水素脆化特性

表3 試作した溶接材料成分 (mass%)

| MARK     | C     | Si   | Mn   | Ni   | Cr   | Mo   | N    | $f_N$ | Ni 当量 |
|----------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| a        | 0.008 | 0.38 | 2.34 | 12.5 | 24.2 | 2.81 | 少    | 0.098 | 33.7  |
| b        | 0.005 | 0.06 | 2.37 | 12.3 | 24.5 | 2.97 |      | 0.091 | 33.7  |
| c        | 0.009 | 0.39 | 2.35 | 12.6 | 24.4 | 2.81 | 多    | 0.097 | 33.9  |
| d        | 0.007 | 0.05 | 2.45 | 12.3 | 24.7 | 2.96 |      | 0.090 | 33.9  |
| YS309LMo | 0.02  | 0.50 | 1.50 | 13.8 | 23.1 | 2.20 | less | 0.110 | 33.0  |

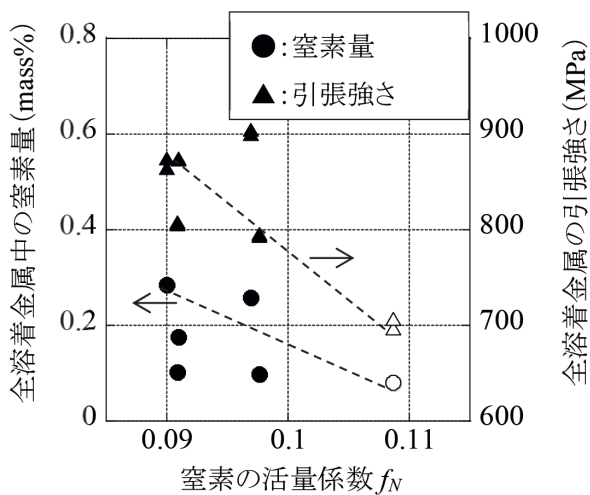


図10 全溶着金属における窒素量および引張強さに及ぼす窒素の活量係数の影響 (open: YS309LMo)

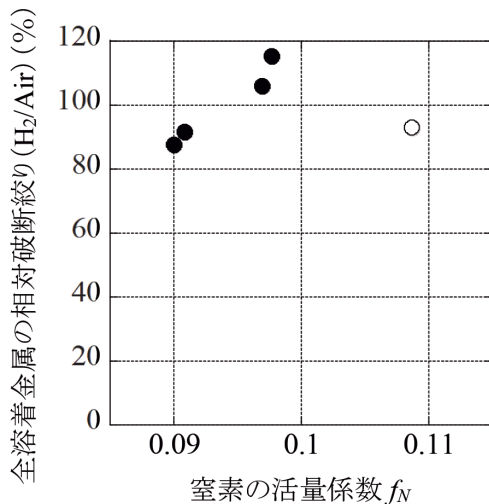


図11 全溶着金属の相対破断伸びに対する窒素活量係数の影響 (open: YS309LMo)

を評価した。図11は、引張強さが800MPa以上であった符号b, cおよびdでのSSRTによる耐水素脆化特性を評価した結果を示す。窒素により高強度化し、かつ数%のフェライトを含む溶接金属においても、相対破断伸び80%以上を確保し、優れた耐水素脆化特性有していることがわかった。そのため、本開発鋼をフィラー溶接施工する場合、YS309LMo溶接材料の使用およびシールドガス中に窒素を混合させることが望ましく、さらに本報で検討した高窒素含有ステンレス溶接材料を使用することが、溶接金属において母材と同等の引張

強さと耐水素脆化特性の両立する上で望ましいことがわかる。

## 5 まとめ

高圧水素ステーション用材料として、高強度であり、耐水素脆化特性に優れたHRX19<sup>®</sup>の溶接技術を開発した。

- 1) 本開発鋼をノンフィラー溶接する場合に、母材の目標引張強さである800MPaと優れた耐水素脆化特性を両立するためには、入熱0.4kJ/mm以下かつシールドガス中に窒素を混合させることが望ましいとわかった。
- 2) 本開発鋼をフィラー溶接する場合には、本報にて最適化した高窒素含有ステンレス溶接材料を使用することで、母材と同等の性能を有することがわかった。

## 参考文献

- 1) 例えば、2012年版水素燃料関連市場の将来展望, 富士経済
- 2) 山田敏弘, 小林英男: 高圧ガス, 49 (2012), 885.
- 3) 平山俊成, 小切間正彦: 日本金属学会誌, 34 (1970), 507.
- 4) H.Nakagawa: Proceeding of ASME PVP, (2007), Paper No.2007-26462.
- 5) 中村潤, 浄徳佳奈: ふえらむ, 21 (2016) 1, 6.
- 6) 大村朋彦, 小林憲司, 宮原光雄, 工藤赳夫: 材料と環境, 55, (2006), 139.
- 7) 大村朋彦, 小林憲司, 宮原光雄, 工藤赳夫: 材料と環境, 55, (2006), 537.
- 8) 大村朋彦, 中村潤: 配管技術, 53 (2011) 1, 51.
- 9) M.I.Luppo, A.Hazarabedian and J.O-Garcia: Corros. Sci., 41 (1999), 87.
- 10) F.B.Pickering: Physical metallurgy and The design of steel, Applied Science Pub., (1978), 231.
- 11) T.Kuwana, H.Kokawa and Y.Nakaya: Q. J. Jpn. Weld. Soc., 10 (1992) 3, 403.
- 12) H.Kokawa: J. Jpn. Weld. Soc., 72 (2003) 5, 112.
- 13) 石井不二夫, 萬谷志郎, 不破佑: 鉄と鋼, 68 (1982) 10, 1551.

(2020年12月25日受付)





&lt;Techno Scope 連動記事&gt;

# 地球温暖化防止のための水素技術に関する 今後の展望

Hydrogen Technology for Sustainable Society  
-Current Status and Future Perspectives-

新エネルギー・産業技術総合開発機構  
技術戦略研究センター  
エネルギーシステム・水素ユニット フェロー

矢部 彰  
Akira Yabe

新エネルギー・産業技術総合開発機構  
技術戦略研究センター  
エネルギーシステム・水素ユニット ユニット長

仁木 栄  
Shigeru Niki

新エネルギー・産業技術総合開発機構  
技術戦略研究センター  
エネルギーシステム・水素ユニット 研究員

佐伯祐志  
Hiroshi Saeki

## 1 地球温暖化対策技術としての 水素技術と水素技術の全体俯瞰

水素の持つ地球温暖化対策技術としての特徴は、利用時にCO<sub>2</sub>を出さないこと。つまり、水素発電など燃焼時にCO<sub>2</sub>を出さないこと。燃料電池など、酸素と反応してCO<sub>2</sub>を出さずに電力を発生できること。また、還元剤として水素を利用するなど、産業利用においてもCO<sub>2</sub>排出削減が可能であることが挙げられる。また、製造する時にCO<sub>2</sub>フリーで製造可能であることも重要である。つまり、再生可能エネルギーから水

電解で水素発生が出来ること。また、化石燃料から水素を取り出し、出てくるCO<sub>2</sub>を地中貯留や化成品の合成に利用して固定化することにより、CO<sub>2</sub>フリーで製造可能であることも特徴となる。さらに長距離大量輸送・貯蔵が可能であることも大きな特徴である。つまり、パイプラインや高压タンクで、また、液化水素として長距離大量輸送・長期間貯蔵が可能であること。また、アンモニアや有機ハイドライドなどの他物質に変換して輸送・貯蔵が可能であることも特徴として挙げられる。図1に地球温暖化対策技術としての全体像を示すが、2050年にカーボンニュートラルの実現という、温暖化効

### CO<sub>2</sub>フリーで水素は製造可能

- 再エネで水電解して水素発生
- 化石燃料から水素を取り出し、出てくるCO<sub>2</sub>を固定化（地中貯留・利用）

### 水素は輸送・貯蔵ができる

- 水素として長距離大量輸送・長期間貯蔵が可能（パイプライン、高压タンク、液化輸送）
- 他物質に変換して長距離大量輸送・長期間貯蔵が可能（アンモニア、有機ハイドライド）

### 水素は利用時にCO<sub>2</sub>を出さない

- 燃焼時にCO<sub>2</sub>を出さない（水素発電など）
- 酸素と反応して電力を発生（燃料電池など）
- 還元剤として水素を利用するなど、産業利用においてもCO<sub>2</sub>排出削減が可能。

**CO<sub>2</sub>排出をゼロにするためには、水素は重要技術の一つ。**

図1 地球温暖化対策としての水素技術

果ガスの実質排出量をゼロにするためには、水素は最も重要な技術の一つである。

水素技術を全体俯瞰してみると、図2のように、大きく製造技術、輸送・貯蔵技術、利用技術の3つの技術分野に分けられる。CO<sub>2</sub>フリー水素製造は、CO<sub>2</sub>回収・利用・貯蔵技術（CCUS）を活用して化石燃料から製造する技術と、水電解等を使用し、再生可能エネルギーから製造する技術からなる。また、輸送・貯蔵技術は、パイプラインや圧縮空気や液体水素の形での輸送・貯蔵と、水素を有機ハイドライド、アンモニア等の他物質の形に変換して、輸送・貯蔵する技術がある。CO<sub>2</sub>フリー水素のコスト低減には、この水素製造技術と水素輸送・貯蔵技術の両方が重要である。さらに、水素利用技術は、水素発電等のエネルギー転換技術、燃料電池自動車等の運輸技術、製鉄、燃料・化学品製造、石油精製などの産業技術、また、業務・家庭用の定置用燃料電池技術などがある。水素利用技術は、従来の技術を水素の利用で代替する技術であり、従来の技術のコストから、求められる水素のコストが決められる。水素発電の場合は、LNG発電を代替する技術、水素還元製鉄の場合は、コークスやCOガスによる鉄鉱石の還元の代替技術である。

図3に、水素コスト低減に向けた方向性を示す。国の水素基本戦略では、水素でLNG火力発電を代替することを目指して、将来の目指すべき姿として、20円/Nm<sup>3</sup>のコストを目標としている。また、その途中の2030年には、30円/Nm<sup>3</sup>を目指しており、現状100円/Nm<sup>3</sup>である水素コストを、将来

的には1/5以下にすることを目指している。さらに、水素製造方法によるコストの違いも大きく、水素製造コストの低減が重要な課題となる。副生水素や化石燃料改質は確立された技術であり、目標達成には低コストCCSの実現が必要である。また、再エネ＋水電解は、CCSによらずコスト削減が可能であるが、革新的技術開発が必要である。他の方法としては、海外の低コスト水素の輸入があり、そのためには、低コスト輸送技術開発が必要である。

2 水素に関する各国の政策

各国の政策は、図4に示すように、日本が世界初の水素国家戦略として「水素基本戦略」を2017年に策定した。日本に続く形で、フランス・韓国が、また、2020年に入ってドイツ、EU等でも前倒しで戦略が発表されている。コロナウィルスの影響もあり、大幅な経済活動の低下が生じているが、その回復を、「グリーンリカバリー」と呼ばれる環境問題の回復を目指す投資を促進する方法で実現しようとしており、水素への積極的な投資も含まれており、活発な最新動向となっている。

また、IEAによる水素レポートが、日本で開催されたG20（2019年6月）にあわせて、水素の規模拡大に向けた7つの重要なレコメンデーションを含んだ「The Future of Hydrogen」として発表された。

具体的な推奨される方策として、(1) 長期のエネルギー戦略における水素の役割を確立すること。(2) クリーン水素に

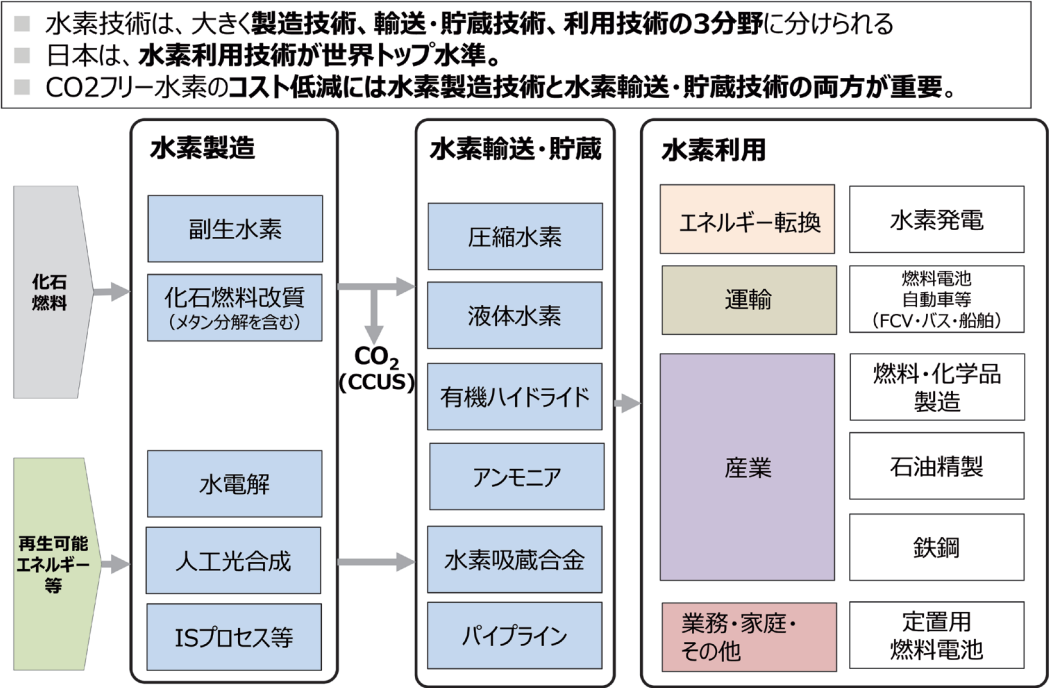


図2 水素技術の全体俯瞰

- ① 副生水素や化石燃料改質は**確立された技術**であり、目標達成には**低コストCCS実現が必要**
- ② **再エネ+水電解**は、CCSによらずコスト削減が可能 → **革新的技術開発が必要**
- ③ 他の道としては、**海外の低コスト水素の輸入**（**低コスト輸送技術開発が必要**）がある

## 水素基本戦略のシナリオ 1)

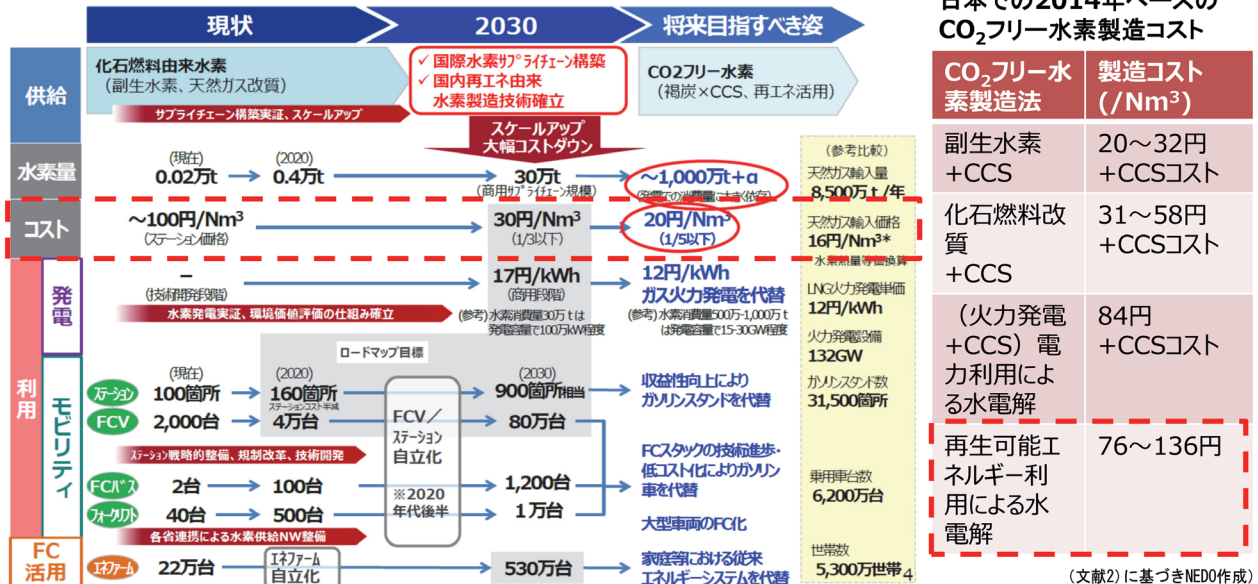


図3 水素コスト低減に向けた方向性

- 日本が世界初の水素国家戦略として「水素基本戦略」を策定
- フランス・韓国につぎ、今年に入ってドイツ、EU等でも前倒しで戦略を発表
- 更に中国でも水素に関する産業計画を公布予定（一部計画は発表済み）

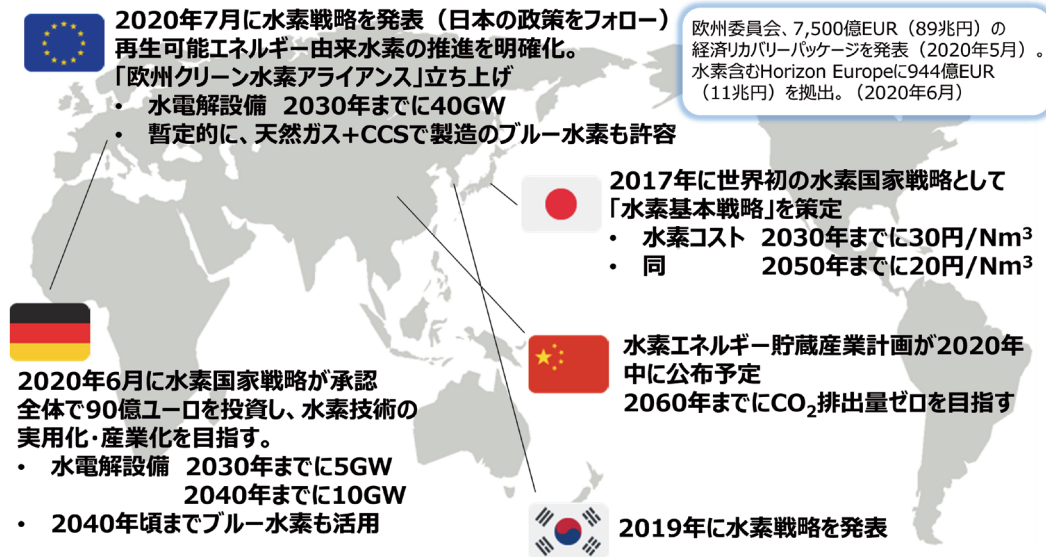


図4 水素に関する各国政策

対する商業的な需要を喚起すること。(3) 先発者の投資リスクへの対応をすること。(4) コスト削減をもたらすR&Dを支援すること。(5) 不必要な規制上の障壁の撤廃および基準の整合化をすること。(6) 国際的な連携と進捗の把握を行うこと。(7) 今後10年にわたって、機運をさらに盛り上げてい

くための4つの機会へのフォーカス。つまり、既存の多くの港を低コストで低炭素な水素のハブに変化させること。クリーンな水素供給を促進するため既存のガスインフラを活用すること。燃料電池車により競争力を持たせるため、輸送手段、貨物運送、輸送経路への支援をすること。さらに、国際的



な水素貿易を始動させるための航路を確立することである。

3 CO<sub>2</sub>フリー水素製造技術の概要

CO<sub>2</sub>フリー水素製造技術の概要を図5に示す。再エネ電力を用いた水電解等によるCO<sub>2</sub>排出量が少ない水素製造技術の開発・実証が国内外で精力的に推進されている。

水電解水素製造技術の概要を図6に示すが、水電解水素製造には、現状5kWh/Nm<sup>3</sup>の電力が必要であり、運転費に相当している。理論値3.5 kWh/Nm<sup>3</sup>に向け、必要電力量を低減する技術開発が行われている。また、水電解装置のシステムコストの開発目標値は、固定費として8.5円/Nm<sup>3</sup>である。これは、水素燃料電池・戦略ロードマップ<sup>3)</sup>より、水電解装置が22万円/Nm<sup>3</sup>/hで、設備利用率30%、稼働年数10年を仮

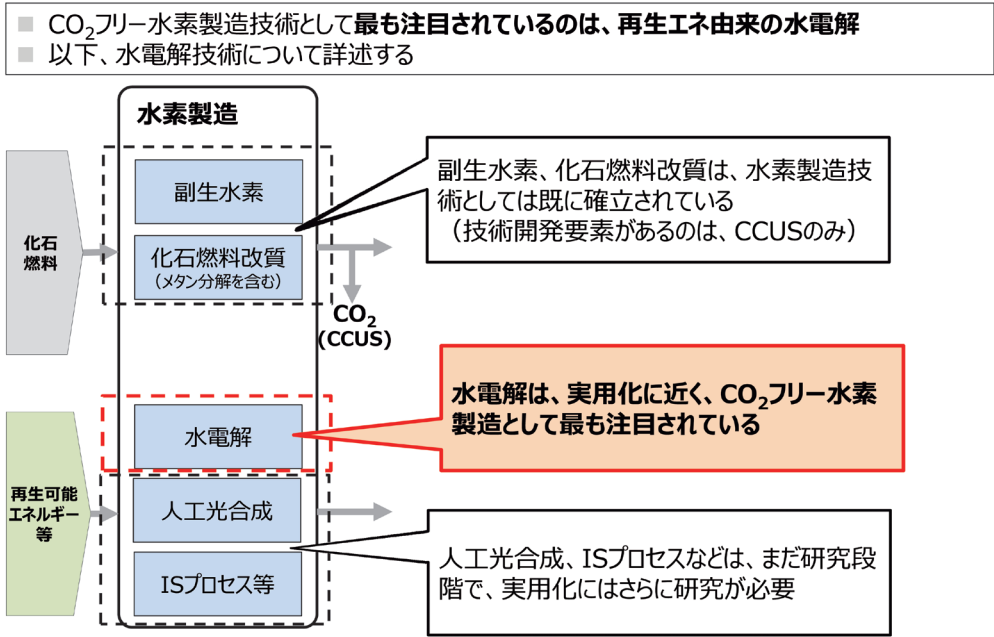


図5 CO<sub>2</sub>フリー水素製造技術の概要

- 再生可能エネルギー由来電力を用いた水電解等による、CO<sub>2</sub>フリー水素製造技術の開発・実証が国内外で推進されている
- 水電解水素製造には、**現状5kWh/ Nm<sup>3</sup>の電力が必要(運転費に相当)**。理論値3.5 kWh/ Nm<sup>3</sup>に向け、**必要電力量を低減する技術開発**が行われている。
- 水電解装置のシステムコストの開発目標値は、**固定費は8.5円/ Nm<sup>3</sup>※**であるが、**現状は約2倍**。触媒の改善、高圧化、高安定性能化などで、**コスト低減を図る技術開発**が行われている。  
※ 22万円/Nm<sup>3</sup>/h<sup>3)</sup>で、設備利用率30%、稼働年数10年を仮定し試算。
- CO<sub>2</sub>フリー電力のコストに大きく影響を受けるため、**水素コストには、大きな地域差が生じる**
  - ー 例えば、安い再生可能エネルギー由来電力のもと、中東では16～41円/ Nm<sup>3</sup>、欧州では30～39円/ Nm<sup>3</sup>という水素製造コスト試算<sup>4)</sup>もなされている



再生可能エネルギーを利用した世界最大級の水素製造施設「FH2R」完成<sup>5)</sup>  
※1スタックサイズで10MW＝世界最大規模  
2000Nm<sup>3</sup>/h規模で、高稼働率と低電力化を目指す

図6 水電解技術開発の概要

定し試算したものである。しかしながら、現状は約2倍であり、触媒の改善、高圧化、高安定性能化などで、コスト低減を図る技術開発が行われている。

CO<sub>2</sub>フリー電力のコストに大きく影響を受けるため、水素コストには、大きな地域差が生じる。例えば、安い再生可能エネルギー由来電力のもと、中東では16～41円/Nm<sup>3</sup>、欧州では30～39円/Nm<sup>3</sup>という水素製造コスト試算も、最近、IEA等でなされている<sup>6)</sup>。

また、アルカリ型水電解、固体高分子型水電解が大規模実証され、福島に、再生可能エネルギーを利用した世界最大級の水素製造施設「FH2R」が完成している。この水電解装置は、アルカリ型水電解装置で、1スタックサイズで10MWと世界最大規模であり、2000Nm<sup>3</sup>/h規模で、高稼働率と低電力化を目指している。さらに、革新型水電解として、固体酸化物型水電解やアニオン交換膜型水電解なども研究されている。

## 4 水素の輸送・貯蔵技術の概要

水素輸送・貯蔵技術の概要を、図7に示す。水素発電などのように大量に水素を利用するためには、国内の再生可能エネルギーによる水素製造だけではまかないきれないことから、海外の低コストなCO<sub>2</sub>フリー水素を大量に輸送してることが重要になる。また、クリーン水素の国際的なサプライチェーンを構築するには、水素の長距離輸送技術が極めて重要である。日本は、長距離海上輸送に係る技術開発・実証を

世界に先駆けて実施しており、国際水素サプライチェーン構築を先導していると言えることが出来る。また、そのための水素キャリアとして、液体水素、有機ハイドライド、アンモニアを活用する方法が、積極的に研究開発されている。

図8に、水素の輸送・貯蔵に関する取り組みと水素キャリアの特徴を示すが、液体水素、有機ハイドライド、アンモニアの3種類の水素キャリアは、それぞれ、特徴と課題がある。具体的には、液体水素は、従来、輸出することが出来なかった豪州の粉状の褐炭を改質し、CO<sub>2</sub>はCCSで地中貯留し、生じた水素を液化して、輸送する技術開発を行っている。また、有機ハイドライドは、ブルネイでガス改質水素を製造し、CO<sub>2</sub>はCCSで地中貯留し、生じた水素を有機ハイドライドであるメチルシクロヘキサンに変換して、長距離輸送し、利用地で熱を供給することにより、水素とトルエンに分離し、利用する研究開発が行われている。さらに、アンモニアは、サウジアラビア等の油田地帯で、改質して水素を製造し、CO<sub>2</sub>は地中貯留し、水素をアンモニアの形に変換して、長距離輸送し、アンモニアの形で燃焼させて、CO<sub>2</sub>を排出しないエネルギーシステムを実現する研究開発が行われている。

いずれの水素キャリア技術も、輸送効率の向上と輸送コストの低減という大きな課題を抱えており、積極的な技術開発がなされている。さらに、ノルウェーなどの再生可能エネルギーの多い国、また、地盤が強固でCCSを積極的に推進している国も、水素輸出に対する関心が高まっている。

- 海外の低コストなCO<sub>2</sub>フリー水素の輸入のため、**長距離大量輸送技術**が注目されている
- 以下、主として水素の長距離大量輸送技術について詳述する

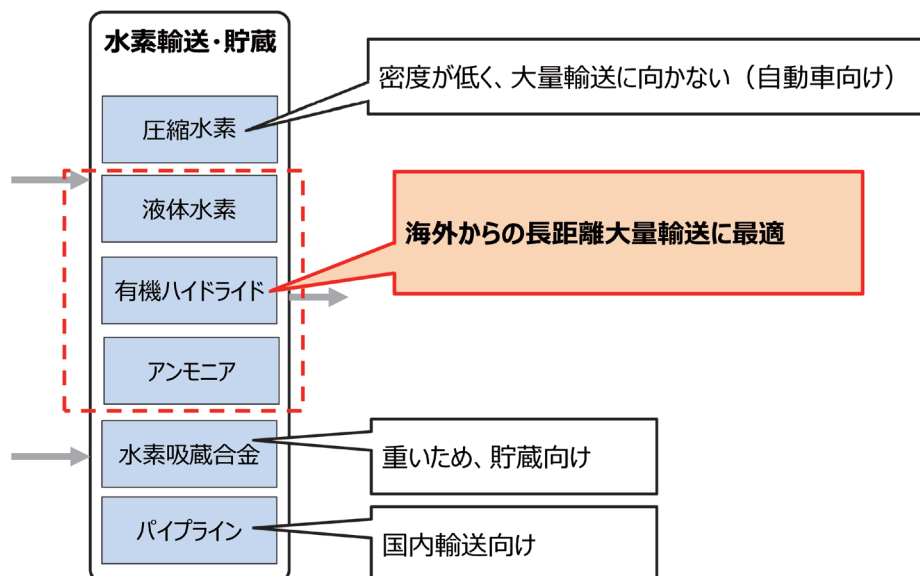


図7 水素の輸送・貯蔵技術概要

5 水素利用技術の概要と全体動向

水素利用技術の概要を図9に示すが、水素需要は2050年までに、エネルギー転換、運輸、産業、業務・家庭・その他の4分野で大幅な需要拡大が見込まれている。具体的には、水素発電などのエネルギー転換分野、燃料電池を活用する乗用

車、バス、トラック、船舶などの運輸分野、また、製鉄や石油精製、燃料・化学品製造などの産業利用分野、さらには、業務・家庭用の発電装置、熱供給装置としての役割を果たす定置用燃料電池分野である。なお、水素利用技術に関しては、需要の拡大が見込まれる4分野それぞれに関連する日本のプレイヤーも多く、日本がリーディングポジションにあると考える

- クリーン水素（CO<sub>2</sub>フリー水素）の国際的なサプライチェーンを構築するには、水素長距離輸送技術が極めて重要。日本は、長距離海上輸送に係る技術開発・実証を世界に先駆けて実施
- サウジ、ノルウェー、豪州など資源国において水素輸出に対する関心が高まっている。

水素キャリアの特徴

| 水素       | キャリア | 特徴と課題                                               | プレイヤー           |
|----------|------|-----------------------------------------------------|-----------------|
| 液化水素     |      | 圧縮水素の1/800の体積。高純度水素の供給に適する<br>液化効率の向上とボイルオフガスの低減が課題 | 川崎重工、岩谷産業、他     |
| 有機ハイドライド |      | 常温・常圧の液体化学品として、ケミカルタンカーによる輸送が可能<br>脱水素時の熱の確保が必要     | 千代田化工建設、ENEOS、他 |
| アンモニア    |      | 他のキャリアと比較して体積水素密度が高い<br>臭気、急性毒性があり取扱に留意             | 日揮HD、産総研、他      |

資源国の水素輸出への関心

| 資源国     | 水素輸出への関心                                                    | 関連する日本プレイヤー |
|---------|-------------------------------------------------------------|-------------|
| サウジアラビア | 原油からの水素製造（EOR+CCS）、再エネ利用＋水電解を用いたCO <sub>2</sub> フリー水素の輸出    | 日揮HD        |
| ノルウェー   | 水電解や天然ガス改質等で製造した水素をパイプラインや船舶で輸出する可能性に言及                     |             |
| 豪州      | 褐炭の改質+CCS利用の水素を液化して輸送                                       | 川崎重工        |
| ブルネイ    | ブルネイでガス改質水素を製造し、有機ハイドライドであるメチルシクロヘキサンに変換して輸送し、日本で水素とトルエンに分離 | 千代田化工       |

図8 水素の輸送・貯蔵に関する取り組み、キャリアの特徴<sup>6)</sup>

- 水素需要は2050年までに、エネルギー転換、運輸、産業、業務・家庭・その他の4分野で大幅な拡大が見込まれる。
- 水素利用技術は、日本がリーディングポジションにあり、需要の拡大が見込まれる4分野それぞれでプレイヤーが存在。

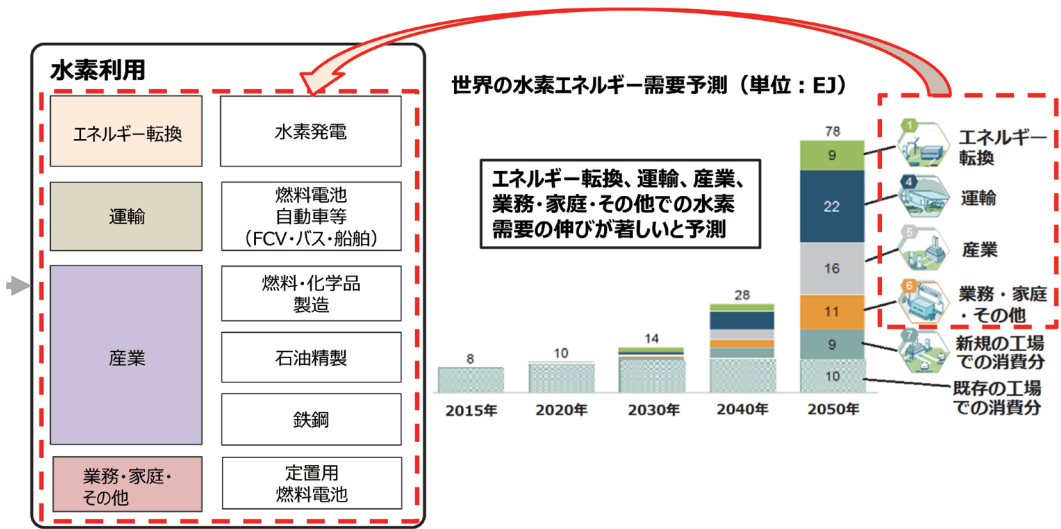


図9 水素利用技術の概要<sup>7)</sup>



ことが出来る。

水素利用技術の全体動向を、図10に示すが、水素利用技術に関して重要な点は、水素を導入して、他の手段の代替を図り、CO<sub>2</sub>の排出削減を目指すので、どの技術を代替するかで、水素に求められるコストが異なってくる点である<sup>8)</sup>。現在の水素基本戦略の目標コストである20円/Nm<sup>3</sup>は、水素発電の場合を対象に、LNG火力発電を水素発電で代替する技術に対して、LNGと同じ発電量を、同じコストで、水素により実現するために必要となる、水素に求められるコストである。同じように考えれば、水素還元製鉄の場合には、コークスやCOガスによる鉄鉱石の還元の代替技術として水素による還元を使うことを考えれば、求められる水素のコストは、一例として、8.5円/Nm<sup>3</sup>と試算されている。これは、水素発電に比べて、一層低コストの水素が求められることになり、水素のコスト低減をより一層推し進める技術開発が求められることになる。ただし、水素製造技術で説明したように、再生可能エネルギーを活用し、水電解装置で水素製造する方法で、将来、水素製造コストが大幅に低下する可能性のある地域が存在することが指摘されている。これは、再生可能エネルギー活用による水素製造で、低コスト水素を製造できる地政学的に有利な地域が世界に存在することを意味しており、世界的な視野で、世界の各地域の水素製造コストを考えながら、技術開発の将来を検討することが重要となる。

エネルギー転換技術である水素発電技術は、NEDOプロジェクトで水素ガスタービンに係る技術開発、実証を実施中である。三菱パワーは、オランダのヌオン・マグナム発電所(1系列440MW)で、水素専焼転換へのフィージビリティスタディを実施し良好な結果を得ている。また、課題としては、

燃焼振動対策・低NO<sub>x</sub>・高効率化が挙げられる。さらに、米国から水素ガスタービンを受注しており、将来は水素100%での運転を目指して技術開発を進めている。また、Siemens, 川崎重工業等も技術開発中である。

また、運輸技術である燃料電池自動車技術では、日本は、世界に先駆け量産型FCVを2014年に市販し、信頼性と生産性の向上を目指した技術開発を行っている。燃料電池に関して、日本の強みは、高度な解析技術と、世界に先駆け量産型FCVを販売し社会実装で培った「技術課題」を把握していることである。産学官が連携し、「協調領域」の技術課題を広く産業界やアカデミアと共有し、燃料電池解析評価プラットフォーム構築などで技術開発を推進している点、また、技術開発を担う人材を育成している点が特徴である。なお、日本を含む欧米、中国等の世界では、FCトラック、FC鉄道車両、FC船、FCフォークリフトを含む多用途展開が加速している。

水素還元製鉄を含む革新製鉄技術としては、製鉄プロセスでの水素利用等の産業利用を見据えたプロジェクトも国内外で開始されている。NEDOプロジェクトであるCOURSE50プロジェクトにおいて、高炉をベースとする水素還元製鉄技術の開発及びCO<sub>2</sub>分離回収技術の開発が進行中であり、鉄鉱石の水素活用還元技術の試験高炉(実炉の1/500のスケール)による水素還元製鉄の実証試験にてCO<sub>2</sub>排出の10%削減を確認し、高炉ガスに適したCO<sub>2</sub>分離回収技術の開発により、実炉へ適用することでCO<sub>2</sub>排出量30%低減を目指している。また、将来的に製鉄プロセスからCO<sub>2</sub>発生をゼロにするための調査研究に着手している。なお、アルセロールミタルを中心とした欧州では、高炉利用、ガスによる直接還元、電解還元等の複数のアプローチを検討している。

| 水素利用技術      |          | 国内外の動向                                                                                                                                                                                            | 国内プレイヤー        |
|-------------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| エネルギー<br>転換 | 水素発電     | NEDOプロジェクトで水素ガスタービンに係る技術開発、実証を実施中。三菱パワーは、オランダのヌオン・マグナム発電所(1系列440MW)で、水素専焼転換へのフィージビリティスタディを実施し良好な結果を得る。(課題: 燃焼振動対策・低NO <sub>x</sub> ・高効率化) また米国から水素ガスタービンを受注。将来は水素100%での運転を目指す。Siemens, 川崎重工業等も開発。 | 三菱パワー、川崎重工     |
|             | 燃料電池自動車等 | 日本は、世界に先駆け量産型FCVを販売し、社会実装で培った技術課題を把握。更に、燃料電池反応機構を研究するための高度計測技術、解析技術を有する。日本を含む世界(欧米、中国)では、大型商用車を含む多用途展開が加速。                                                                                        | トヨタ自動車、本田技研工業  |
| 産業          | 石油・化学    | 石油の脱硫、アンモニア製造などに水素を使用。昭和電工は、使用済みプラスチックから水素を製造し、アンモニア製造や、ホテル設置の業務用燃料電池への供給に使用。                                                                                                                     | 昭和電工、他         |
|             | 鉄鋼       | NEDOプロジェクトであるCOURSE50プロジェクトにおいて、鉄鉱石の水素活用還元技術の試験高炉での実証試験を終了、実炉への適用が進行中。欧州でも、アルセロールミタルが複数のアプローチを検討中。                                                                                                | 日本製鉄、JFEスチール、他 |
| 業務・家庭・他     | 定置用燃料電池  | 日本は、世界に先駆けて家庭用燃料電池「エネファーム」を市場投入。業務用は米国(Bloom Energy)が先行するが、日本でも本格普及が始まる。今後は発電効率が高く、コストダウンの可能性が高いSOFC型が主流に。                                                                                        | 富士電機、三菱パワー、他   |

図10 水素利用技術の全体動向

産業用の石油・化学分野に対しては、石油の脱硫、アンモニア製造などに水素を使用している。昭和電工は、使用済みプラスチックから水素を製造し、アンモニア製造や、ホテル設置の業務用燃料電池への供給に使用しており、15年以上の運転実績を有する世界で唯一のプラントである。

業務・定置用の燃料電池に関しては、日本は、世界に先駆けて家庭用燃料電池「エネファーム」を、2009年に市場投入した。業務用は米国のBloom Energyが先行するが、日本でも本格普及が始まる状況で、富士電機、三菱パワーなどで中大型機の開発が進んでいる。定置用燃料電池では、発電効率が高く、非白金触媒でコストダウンも可能なSOFC型が主流と考えられる。また、開発ターゲットは、2040年以降の次世代に、発電効率65%以上であり、業務用では中大型機の開発や、複合システムの開発が進むと考えられる。

## 6 水素技術に関する今後の展望のまとめ

地球温暖化防止のための水素技術に関する今後の展望をまとめると以下ようになる。

- 水素は、運輸、電力、産業分野など、多くの分野の脱炭素化に貢献可能である。
- 社会実装に向けては、CO<sub>2</sub>フリー水素の低コスト化が重要であり、日本は世界に先立って「水素基本戦略」を打ち出した。
- 再エネ由来のCO<sub>2</sub>フリー水素のコストは、CO<sub>2</sub>フリー電力のコストに大きく影響を受けるため、大きな地域差が生じる点に留意する必要がある。
- 日本は、水素輸入時に必要となる長距離輸送等の要素技術を開発し、国際水素サプライチェーンを構築することを目指しつつ、多くの水素輸送技術に注力している。
- 水素利用技術においては、水素発電で日本企業の技術が海外プロジェクトで活用されている例もあるなど、リーディングポジションにいる。

■ 日本には、水素技術にかかる代表的な企業や研究者が多く、カーボンニュートラルの実現に向けた様々な水素技術の開発においてリーダーシップを発揮することが期待されている。

### 参考文献

- 1) 水素基本戦略, 経済産業省, (2017), <https://www.meti.go.jp/press/2017/12/20171226002/20171226002.html>
- 2) 水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ第5回資料, 経済産業省, (2014), [https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso\\_nenryodenchi/suiso\\_nenryodenchi\\_wg/005\\_haifu.html](https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/suiso_nenryodenchi_wg/005_haifu.html)
- 3) 水素燃料電池戦略ロードマップ, 経済産業省, (2019), <https://www.meti.go.jp/press/2018/03/20190312001/20190312001.html>
- 4) The Future of Hydrogen, IEA, (2019), [1USD = 110円で換算]
- 5) NEDO HP URL : [https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101293.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101293.html), (アクセス日: 2020年3月7日)
- 6) グリーンイノベーション戦略推進会議第2回ワーキンググループ, 資料4-1技術開発に関する説明, NEDO, (2020年8月21日), [https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/green\\_innovation/002.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/002.html)
- 7) Hydrogen Scaling Up, Hydrogen Council, (2017), <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>
- 8) エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会報告書, 経済産業省・文部科学省, (2019年6月), <https://www.meti.go.jp/press/2019/06/20190610002/20190610002-1.pdf>

(2021年3月2日受付)



# 入門講座

インフォマティクス入門ー7

## ものづくり分野における能動学習

Active Learning for Manufacturing

竹内一郎

Ichiro Takeuchi

名古屋工業大学  
工学研究科 教授

理化学研究所 革新知能統合研究センター  
データ駆動型生物医科学チーム  
チームリーダー

### 1 はじめに

さまざまな科学技術分野で機械学習を用いたデータ駆動型アプローチが注目を集めている。機械学習には教師なし学習や強化学習など様々な問題設定があるが、本稿で紹介する能動学習 (Active Learning) は最も代表的な問題設定である教師あり学習の枠組の一つである。教師あり学習とは、入力データと出力データのペア (訓練事例と呼ばれる) が与えられた状況で、入出力関係を近似する関数をみつける問題である。科学技術分野の様々な問題が教師あり学習として定式化できる。例えば、実験科学において、実験条件を入力、実験結果を出力と考えると、これまでに行った実験から実験対象に関する知識を得るプロセスは教師あり学習と解釈することができる。教師あり学習では、より多くの訓練事例が利用可能であればあるほど、より複雑な関数を高精度に推定できる。例えば、さまざまな分野で活用が進む深層学習モデルは複雑な入出力関係を高精度に近似できることが知られているが、その学習には、大量の訓練事例が必要となる。

多くの実験科学では、実験に一定のコストがかかるため、膨大な訓練事例 (実験条件と実験結果のペア) を得るのは難しい。そのため、できるだけ少ない訓練事例で、できるだけ高精度に入出力関係を近似できるような工夫が必要となる。そのような工夫の一つとして、訓練事例を能動的に選択するアプローチが考えられる。これは、実験科学の例を用いれば、多数の実験条件 (入力) の候補のなかから、実際に実験を行う (関数を評価して出力を得る) ものを能動的に選択することを意味する。このように、訓練事例を得るコストが大きい場合、訓練事例を能動的に選択しながら機械学習を行うアプローチは能動学習と呼ばれている<sup>1,2)</sup>。実験条件を系統的に決める一連の方法は実験計画法と呼ばれており、能動学習

は広い意味での実験計画の一種と解釈することができる。伝統的な実験計画では一連の実験を開始する前にすべての実験条件を決めてしまう場合が多いが、能動学習では実験対象のモデルを逐次的に更新しながら適応的に実験条件の選択が行われる。特に、材料科学分野では、材料情報学 (Material Informatics) と呼ばれる分野が注目を集めており、能動学習を用いた効率的な材料探索などの研究が行われている (例えば、3,4))。

### 2 問題設定

ここで、本稿で考える問題設定を整理しておこう。読者が直観的に理解しやすいように、仮想的な実験計画問題を考えることにしよう。可能な実験条件が  $N$  通りあり、それらを、 $x_1, x_2, \dots, x_N$  と表すことにする。実験条件を  $x_i$  とした実験を実際に行って実験結果  $y_i$  を得るプロセスを  $y_i = f^*(x_i)$  と表すことにする。ここで、 $f^*: x_i \mapsto y_i$  は実験プロセス全体を表す関数であるので、 $f^*$  がどのような関数であるのかは (実験を通して部分的にしか) わからないとし、 $f^*(x)$  を計算するコスト (すなわち、実験条件  $x$  で実験を行うコスト) は大きいものとする。ここでの目的は、すべての  $N$  通りの実験を行わず、できるだけ少ない実験回数で研究対象である実験プロセス  $f^*$  に関する知識を得ることである。この目的を実現するため、 $N$  通りの実験条件のうち、どの実験条件をどの順番で試すべきかを決めることを実験計画という。

以上の実験計画問題を能動学習の言葉で表現すると以下のようなになる。実験条件  $x \in X$  は入力変数、実験結果  $y \in Y$  は出力変数と呼ばれ、 $x$  から  $y$  を得るための関数  $f^*: X \rightarrow Y$  が学習の対象となるブラックボックス関数である。ここで、 $X$  と  $Y$  は、それぞれ、入力  $x$  と出力  $y$  のとりうる値の集合である。入



力集合  $X$  が有限集合の場合 (すなわち、可能な実験条件がリストアップされている場合) をプール型能動学習と呼び、 $X$  が連続集合の場合 (すなわち、可能な実験条件の範囲が与えられている場合) をクエリ型能動学習と呼ぶ。本稿では、 $N$  通りの実験条件を考えているため、入力集合が  $X = \{x_1, \dots, x_N\}$  と表されるようなプール型能動学習を考えることになる。出力集合  $Y$  が連続集合の場合を回帰問題、離散集合の場合を分類問題と呼ぶが、本稿では、出力空間が実数空間  $Y = \mathbb{R}$  である場合、すなわち、実験結果が数値として表される場合に限定して考察を行う。

以下、能動学習の基本的な流れを説明しよう。能動学習のステップを添字  $t = 1, 2, \dots$  を使って表すことにする。ステップ  $t$  において、すでに関数評価が行われた入出力事例、すなわち、すでに実験が行われた実験条件をラベルあり事例 (labeled instance) と呼び、まだ関数評価が行われていない入出力事例をラベルなし事例 (unlabeled instance) と呼ぶ<sup>\*</sup>。ステップ  $t$  におけるラベルあり事例の集合を  $L^t$ 、ラベルなし事例の集合を  $U^t$  と表すことにする。以上の表記を用いると、能動学習の基本的な流れは図1のアルゴリズムのようになる。能動学習アルゴリズムを特徴づけるのはアルゴリズムの5行目における関数  $\alpha: X \rightarrow \mathbb{R}$  である。この関数  $\alpha(x)$  は獲得関数 (Acquisition Function) と呼ばれ、入力  $x$  においてブラックボックス関数  $f^*$  を評価して出力  $f^*(x)$  を得ることがどれほど有益であるかを定量化するものである。したがって、どのようなタスクを解くかによって、どのような獲得関数を使うべきかが異なる。本稿では、代表的な能動学習のタスクとして、関数推定 (Function Approximation)、最適化 (Optimization)、レベル集合推定 (Level Set Estimation) の3つを考え、それぞれのタスクにおいてどのような獲得関数を用いるべきかを説明する。

**Input:** 可能な実験条件:  $\{x_1, \dots, x_N\}$   
 1: 機械学習モデル  $f$  を初期化  
 2:  $t \leftarrow 0, L^t \leftarrow \emptyset, U^t \leftarrow \{1, \dots, N\}$   
 3: **while** 停止条件を満たす **do**  
 4:   **for**  $i \in U^t$  **do**  
 5:     獲得関数  $\alpha(x_i)$  を計算  
 6:   **end for**  
 7:    $i^t \leftarrow \operatorname{argmax}_{i \in U^t} \alpha(x_i)$   
 8:    $y_{i^t} = f^*(x_{i^t})$   
 9:    $t \leftarrow t + 1$   
 10:    $L^t \leftarrow L^{t-1} \cup \{i^t\}, U^t \leftarrow U^{t-1} \setminus \{i^t\}$   
 11:    $\{(x_i, y_i)\}_{i \in L^t}$  を訓練データとして機械学習モデル  $f$  を再学習  
 12: **end while**  
**Output:** 研究対象  $f^*$  に関する所望の知識

図1 能動学習の基本的な流れ

### 3 ガウス過程モデル

能動学習においては、ブラックボックス関数  $f^*$  の代わりに数理モデル  $f$  を導入する。適切な獲得関数を設計するにはモデルの不確実性を定量化できることが望ましいため、ベイズ統計の考え方に基づくモデルが有益である。本稿では、ガウス過程モデル (Gaussian Process Model: GP Model) と呼ばれるベイズ統計モデルを例として用いることにする。ガウス過程モデルは、関数に対する正規分布と解釈でき、平均関数  $\mu(x)$  と共分散関数  $k(x, x')$  によって特徴づけられる。平均関数  $\mu(x)$  は  $f$  の平均的なふるまいを表し、共分散関数  $k(x, x')$  はカーネル関数とも呼ばれ、2つの入力  $x$  と  $x'$  の類似度を表している。入力  $x$  が数値ベクトルとして表現されている場合には、例えば、RBFカーネル

$$k(x, x') = \exp\left(-\frac{\|x - x'\|^2}{2\ell^2}\right)$$

などが用いられる。ここで、 $\ell$  は関数の滑らかさに関するハイパーパラメータである。一方、入力  $x$  が数値表現できない場合 (例えば、文字列やグラフなどの構造データ) であっても、適切にカーネル関数を決めることができれば、ガウス過程モデルを利用することができる。

ガウス過程モデルでは、ベイズ統計の考え方に基づくモデルであり、事前知識を導入することができる。ラベルあり集合 (すでに実施した実験条件と実験結果) が与えられたもと、それぞれの入力  $x$  に対する出力の予測分布は

$$f(x) \mid \{(x_i, y_i)\}_{i \in L} \sim \mathcal{N}(\mu_L(x), \sigma_L^2(x))$$

と正規分布として与えられる。ここで、平均  $\mu_L(x)$  と分散  $\sigma_L^2(x)$  はカーネル関数値やラベルあり集合の出力を用いて解析的に表現することができる。

図2はガウス過程モデルの例を示している。横軸と縦軸は、それぞれ、入力と出力を示しており、入力が近いほど共分散 (カーネル関数) が大きいことを想定している。 $N = 25$  個の四角は実験条件と実験結果のペアの集合  $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N$  を表している。これらのうち、グレーの四角は実際に実験を行ったラベルあり事例を表し、白い四角はまだ実験を行っていないラベルなし事例を表している。ラベルあり事例に基づいて推定されたガウス過程モデルの予測平均と不確実性が、それぞれ、青色の曲線、青色の領域で表されている。ガウス過程モデルは、特定の入力に対する予測分布が正規分布で表されるようなモデルとなっている。図2には、3つの入力に対する予測分布が赤い曲線で示されている。

<sup>\*</sup> ここで、ラベルとは関数の出力  $y_i$  を意味している。これは、クラス分類問題において、出力  $y_i$  がラベルと呼ばれることが多いためである

## 4 関数近似のための能動学習

ブラックボックス関数全体に関する知識を得たい場合は関数近似の問題と解釈することができる。関数近似とは、すべての入力におけるブラックボックス関数の値をできるだけ精度よく知ることである。関数近似問題は以下のように定式化される：

$$\hat{f} = \underset{f}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^n (f^*(x_i) - f(x_i))^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $f^*$ はブラックボックス関数である。プール型能動学習では、すべての実験を行えば、当然ながら、すべての関数値を知ることができる。関数近似のための能動学習の目的はできるかぎり少ない試行回数で、式 (1) の目的関数を小さくすることである。

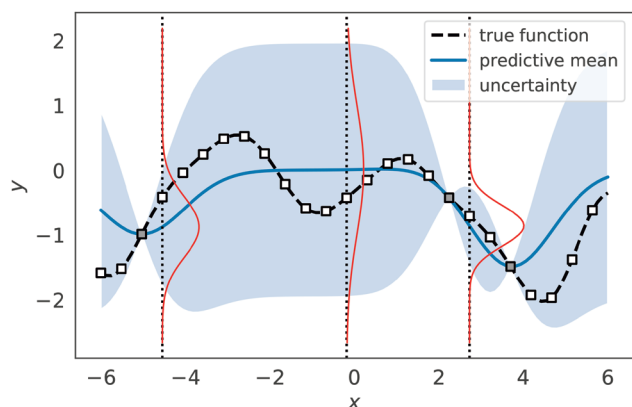


図2 ガウス過程モデルの例

ガウス過程モデルにおいては、各入力に対する不確実性が分散関数によって定量化されているので、関数近似のための能動学習における獲得関数では、不確実性サンプリング (Uncertainty Sampling) と呼ばれる獲得関数

$$\alpha_{\text{US}}(x) = \sigma_L(x)$$

が用いられることが多い。ラベルなし集合に含まれるすべての入力におけるガウス過程モデルの不確実性を計算し、それが最大となるような入力を選ぶことになる。

図3は不確実性サンプリングの獲得関数の概念と簡単なデモを表したものである。不確実性サンプリングでは、青い領域で示されているガウス過程モデルの不確実性をそのまま獲得関数として用いる。図のデモからわかるように、不確実性サンプリングでは、できるだけ均等に入力が選ばれる。これは、ガウス過程モデルの分散関数がカーネル関数によって定量化された共分散によって特徴づけられるため、すでに観測されたラベルあり集合の点からより遠い点の分散が大きくなるためである。また、ガウス過程モデルの分散関数  $\sigma(x)$  はラベルあり集合の観測値  $y_i$ ,  $i \in L$  に依存していないことに留意されたい。これは、関数推定においては、必ずしも逐次的に入力の選択を行う必要がないことを示唆している。関数評価を行う回数 (何回実験ができるか) が決まっていれば、入力の集合をあらかじめ決めることができる。実際、不確実性サンプリングの考え方は、機械学習分野で新たに考案されたものでなく、伝統的な実験計画法分野で古くから確立されているものである。

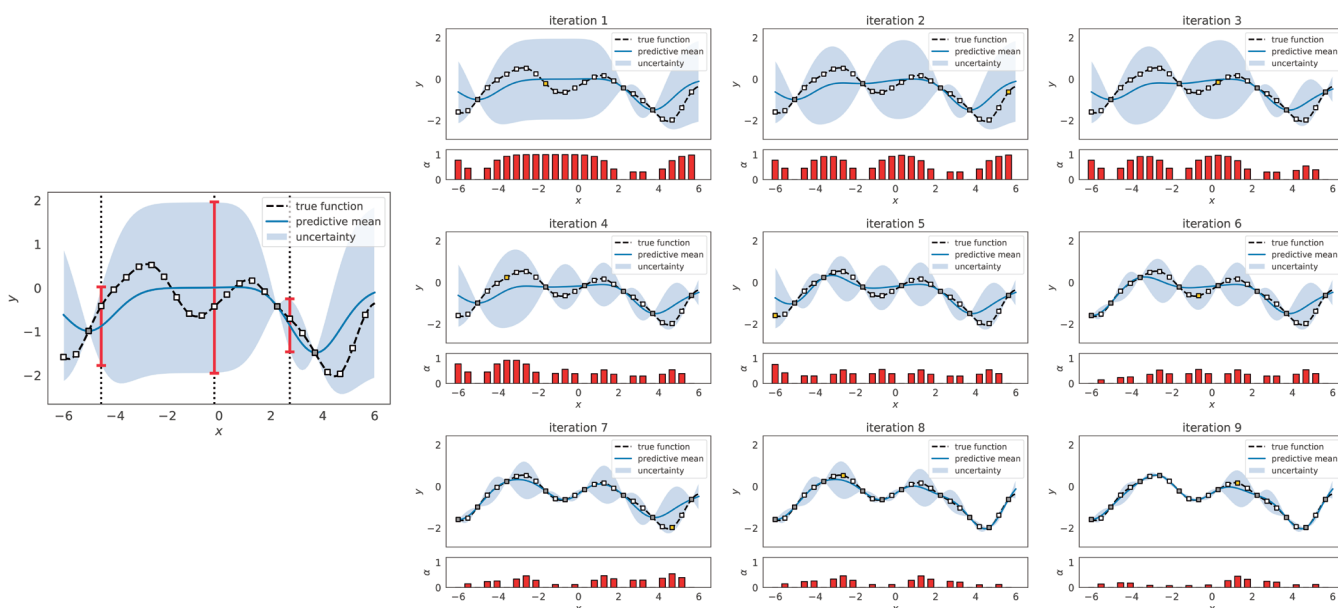


図3 (左) 不確実性サンプリングの獲得関数の概念図。不確実性サンプリングでは、不確実性の大きな点を選択される。  
(右) 不確実性サンプリングにおけるガウス過程モデルと獲得関数の推移の例

## 5 最適化のための能動学習

必ずしもブラックボックス関数のすべてを知る必要がなく、なんらかの指標が最適となるような入力（実験条件）をみつきたい状況では、最適化のための能動学習が有益である。ガウス過程モデルに基づく能動学習において最適化を行う枠組はベイズ最適化 (Bayesian Optimization) と呼ばれ、活発に研究が行われている<sup>5,6)</sup>。例えば、材料科学分野における材料探索問題では、もっとも高い物性値を持つ材料をできるだけ少ない実験回数で見つけ出したいというニーズがある。また、機械学習分野では、モデルの最適なハイパーパラメータをできるだけ少ない回数の学習で見つけ出したいというニーズがあり、ベイズ最適化はその基本ツールとなっている。

最適化のための能動学習は、入力候補点のなかから、最もブラックボックス関数値が大きくなるものを見つけることであるので、

$$\hat{x} = \operatorname{argmax}_{x \in X} f(x)$$

をできるかぎり少ない試行回数で求めることが目的となる。最適化のための能動学習では、これまでに見つかった最良の値 (Current Best : CB)

$$y_{CB}^t = \max_{i \in L^t} f^*(x_i)$$

よりもよい値をとりうる入力を探すことになる。最適化のための能動学習には様々な指標が提案されているが代表的なものは以下の2つである。1つ目は改善確率 (Probability of Improvement (PI)) と呼ばれるもので、 $y_{CB}^t$  よりもよい値を

とる確率を指標とする。入力  $x$  に対する予測分布が  $f(x) | \{(x_i, y_i)\}_{i \in L^t} \sim \mathcal{N}(\mu_L^t(x), \sigma_L^2(x))$  と表されることを利用して

$$\alpha_{PI}(x) = \Pr(f(x) > y_{CB}^t | \{(x_i, y_i)\}_{i \in L^t})$$

と定式化される。

PIに基づく基準では、 $y_{CB}$  より少しでもよい出力をとる確率が高い場合にも獲得関数の値が大きくなるが、問題によっては、新たな実験による改良の程度が重要なこともある。そのような場合、改善期待値 (Expected Improvement : EI) と呼ばれる指標が使われる。EI指標は

$$\alpha_{EI}(x) = \mathbb{E}[\max\{0, f(x) - y_{CB}^t\}]$$

と定式化される。

ベイズ最適化の獲得関数について議論される際、探索 (exploration) と搾取 (exploitation) のトレードオフを考慮する必要がある。探索 (exploration) とは不確実性の高いところを重視する考え方で、搾取 (exploitation) とは関数値が大ききところを重視する考え方である。もしも、ブラックボックス関数モデルの平均関数のみしか使わなければ、平均関数値が最大となる入力を選ぶ選択肢しかないが (搾取)、分散関数を使えば不確実性が大きいために改善の可能性が残されている点を選ぶこと (探索) も可能である。

図4は最適化のための獲得関数の概念と簡単なデモを表したものである。最適化問題においては、現時点での最良解  $y_{CB}^t$  より大きな値をとる確率やその期待値に基づいて入力を選択されるため、左の図の赤く塗られた部分の確率や期待値が獲得関数となる。図のデモからわかるように、最適化のための

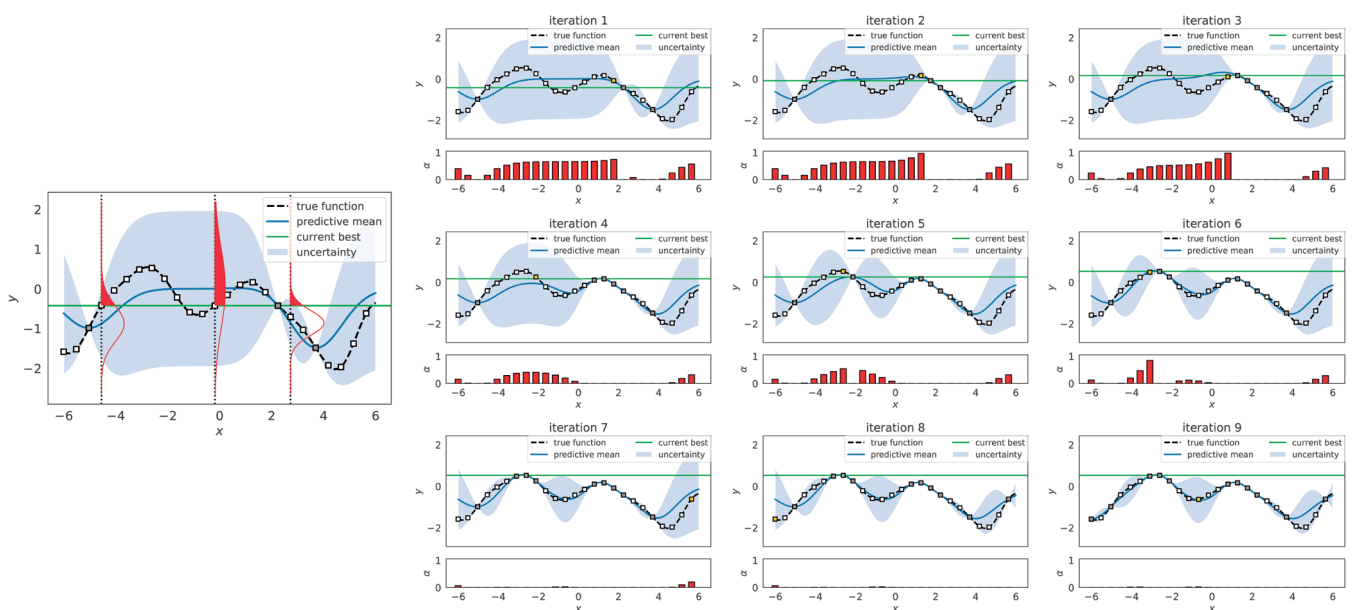


図4 (左) ベイズ最適化のための獲得関数(Probability of Improvement:PI) の概念図。この獲得関数では、これまでの最良のものよりもよい値が得られる確率が最大の入力を選択される。(右) ベイズ最適化(PI) におけるガウス過程モデルと獲得関数の推移の例



能動学習では、図3の関数近似問題と異なり、値が低いところでは不確実性があっても選択されず、値が高いところを重点的に探索していることがわかる。

## 6 レベル集合推定のための能動学習

様々な分野において、特定の性能を満たすような入力条件を同定したい問題がある。例えば、製品の性能が一定値以上となるような使用条件をみつけることは工業製品の品質管理の基本である。このような問題はレベル集合推定 (Level Set Estimation : LSE) と呼ばれ、ブラックボックス関数値  $f^*(x)$  がある閾値  $\theta$  よりも大きな入力の集合

$$\{x \in X | f^*(x) \geq \theta\}$$

をできるかぎり少ない試行回数で推定することが目的となる<sup>7,8)</sup>。ここで、 $\theta$  はあらかじめ指定される閾値であり、 $f(x) \geq \theta$  となるような入力の集合を求めることが目的となる。

LSEのための能動学習法には複数の方法が提案されているが、本稿では、最も基本的なアプローチである Straddle と呼ばれる方法を紹介する。レベルセット推定の目的は、各入力における出力が閾値  $\theta$  より大きいか小さいかを推定することであるので、その不確実性は

$$\alpha_{\text{LSE}}(x) = \min \left\{ \max \left\{ 0, (\mu_L(x) + \beta \sigma_L^2(x)) - \theta \right\}, \max \left\{ 0, \theta - (\mu_L(x) - \beta \sigma_L^2(x)) \right\} \right\}$$

と定式化でき、これをそのまま獲得関数として利用できる。

ここで、 $\beta > 0$  はハイパーパラメータであり、例えば、 $\beta = 3$  とすると、出力の不確実性を  $\pm 3\sigma$  の範囲で考えることに相当する。この指標は、閾値を下回ると思われる場合に関数値が上回る可能性、閾値を上回ると思われる場合に関数値が上回る可能性を表しており、すべての入力においてこの指標が 0 となった段階で、(指定された信頼度で) すべての入力が閾値を下回るか上回るかを確定できたことになる。

図5はレベルセット推定のための獲得関数の概念と簡単なデモを表したものである。図のデモからわかるように、レベルセット推定のための能動学習では、閾値より明らかに小さな値をとる点や大きな値をとる点は、たとえ不確実性が大きくても選ばれず、閾値付近の値をとり上回るか下回るか不明な点を重点的に選択していることがわかる。

## 7 まとめ

様々な分野で機械学習を活用したデータ駆動型アプローチが有望視されているが、ものづくりなど訓練事例の取得にコストがかかる分野では、能動学習が有効に利用できる。能動学習は訓練事例を能動的に選択しながら機械学習を行う枠組であるが、入力を実験条件、出力を実験結果と考えると、実験計画法的一种と解釈することもできる。能動学習のアルゴリズムは、次にどの入力を選ぶべきかを決定するための獲得関数によって特徴づけられるため、タスクに応じた獲得関数を設計する必要がある。獲得関数を設計する際には、ブラックボックス関数に関する不確実性を知ることが重要であるた

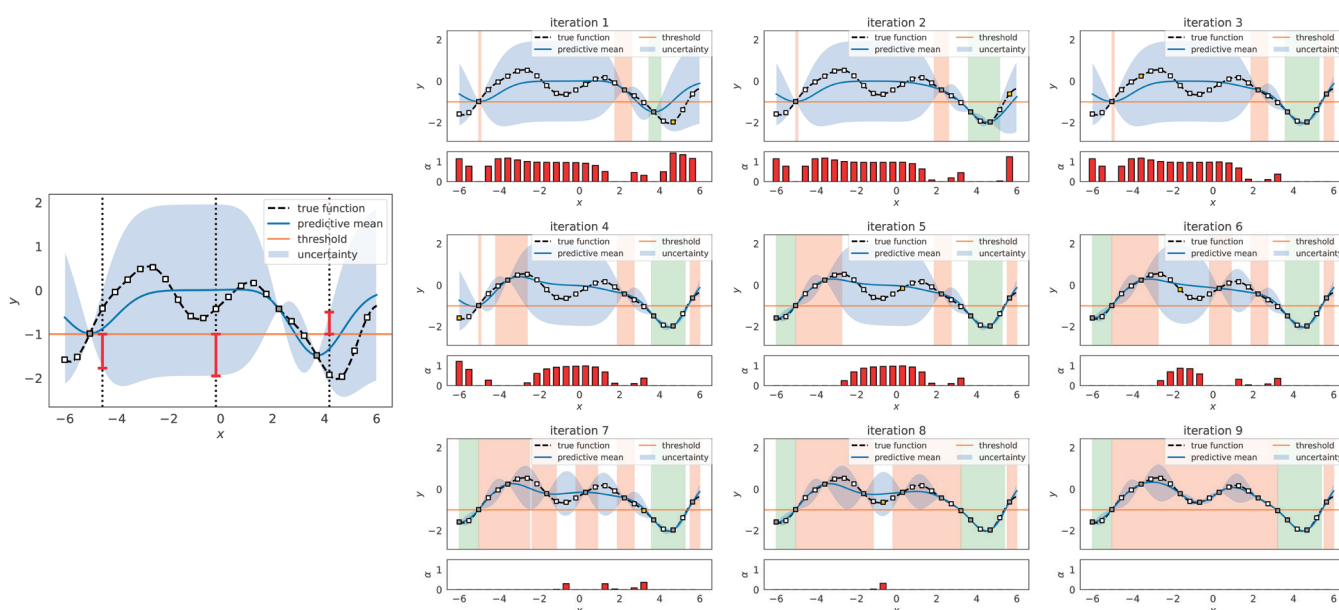


図5 (左) レベルセット推定のための獲得関数の概念図。レベルセット推定では、閾値を上回るか下回るかの不確実性が最大の入力を選択される。  
(右) レベルセット推定におけるガウス過程モデルと獲得関数の推移の例。薄い赤色と緑色で示された領域は閾値を上回る可能性と下回る可能性が極めて高いと判定された領域を示している

め、ガウス過程モデルなどのベイズ統計の考え方に基づくモデルが有効利用できる。本稿では、関数近似、最適化、レベル集合推定の3つのタスクを考察し、それぞれのタスクに応じた獲得関数を使うことによって異なる入力を選ばれることを確認した。能動学習を活用することで、これまでは専門家の知識や経験に基づいて行ってきたことを、系統的かつ効率的に行えることが期待される。

#### 参考文献

- 1) B.Settles : Active Learning Literature survey, Technical Report, University of Wisconsin-Madison Department of Computer Sciences, (2009)
- 2) Y.Inatsu, M.Karasuyama, K.Inoue, H.Kandori and I.Takeuchi : Neural Computation, 32 (2020) 10, 1998.
- 3) K.Kanamori, K.Toyoura, J.Honda, K.Hattori, A.Seko, M.Karasuyama, K.Shitara, M.Shiga, A.Kuwabara and I.Takeuchi : Phys. Rev. B, 97 (2018) 12, 125124.
- 4) R.Jalem, K.Kanamori, I.Takeuchi, M.Nakayama, H.Yamasaki and T.Saito : Sci. Rep., 8 (2018), Article number 5845.
- 5) J.Snoek, H.Larochelle and R.P. Adams : In Advances in Neural Information Processing Systems, (2012), 2951.
- 6) S.Iwazaki, Y.Inatsu and I.Takeuchi : AI & Statistics (AISTATS), (2021)
- 7) B.Bryan, R.C Nichol, C.R Genovese, J.Schneider, C.J Miller and L.Wasserman : Advances in Neural Information Processing Systems, 18 (2005), 163.
- 8) Y.Inatsu, M.Karasuyama, K.Inoue and I.Takeuchi : Neural Computation, 32 (2020) 12, 2486.

(2020年11月16日受付)



## 躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

# 非定常温度場プロセスの理解と制御を目指して

For Understanding and Controlling Processes with Non-steady Temperature Fields

鈴木飛鳥 名古屋大学  
大学院工学研究科  
Asuka Suzuki 助教

## 1 はじめに

筆者が所属する材料複合工学研究グループでは、鉄鋼やアルミニウムなどの金属をベースとする材料の組織制御、ポーラス化、複合化などを行う様々なプロセス（熱処理、鋳造、焼結、固液界面反応、化学反応、付加製造法 (Additive Manufacturing)）について研究を実施している。その中でも本記事においては、化学反応と付加製造法の2つについて述べる。これら2つのプロセスには、プロセス中に温度場が急変するという特徴がある。その特徴ゆえに興味深い構造・性質を持った材料を合成できる反面、現象の理解や制御が難しい。

化学反応プロセスでは、原料となる金属粉末間で強い発熱を伴う「燃焼合成反応<sup>1)</sup>」を利用する。このプロセスは原料粉末のうち低融点な金属の融点まで加熱すると、急速に化学反応が進行し、高融点化合物を省エネルギー・短時間で合成できる。特に、反応性の高いAlやTiを含む化合物 ( $\text{Al}_3\text{Ti}$ ,  $\text{TiAl}$ ,  $\text{Al}_3\text{Ni}$ ,  $\text{NiAl}$ ,  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{TiC}$ , など) を作製する上で有効な方法である。一方、このプロセスでは作製される材料が気孔を含む多孔質なものとなることが知られている<sup>1)</sup>。そこで、我々はそうした気孔を積極的に活用した材料開発を推進している。また、現象の理解や制御のため、多元系計算状態図やその場観察技術などを活用した研究を実施している。

付加製造法は近年注目されている3Dプリンタで用いられるプロセスである<sup>2)</sup>。従来のプロセスでは、切断や切削など材料から不要な部分を取り除くことで製品の形に製造していたのに対し、付加製造法では材料を付加していくことで目的の形状の製品を作製する。その最大の利点は従来の製法で実現できなかった非常に複雑な形状・トポロジーを持った製品を製造できることである。当研究グループで主に研究している付加製造法の手法は「粉末床溶融結合 (Powder bed fusion, PBF) 法」である。この方法では、原料となる金属粉末を造形領域に数十  $\mu\text{m}$  程度敷設し、レーザーもしくは電子

ビームを用いて局所的に溶融・凝固させる。これらを繰り返すことで三次元的な造形物を得る。また、この方法はレーザーや電子ビームによる局所的な急速加熱とその後の急冷・指向性凝固によって特徴的な微視組織が形成され、特異的な特性が発現することが知られている<sup>3)</sup>。当研究グループでは、レーザーを用いるPBF法 (LPBF法) により形成される微視組織の特徴を理解し、制御する研究を実施している<sup>4,7)</sup>。また、LPBF法では緻密で健全な造形物を得るために、多岐にわたる造形条件 (レーザー出力、走査速度、スポット径、ハッチ距離、粉末積層厚さ、など) を最適化する必要がある。我々はこうした造形条件を効率的に最適化する方法の開発にも取り組んでいる。特に、複数の造形条件を包括する新規プロセスパラメータの開発や機械学習をはじめとするデータ科学の活用を行っている。

本記事では、上述のような化学反応プロセスおよび付加製造法に関する当研究グループの成果の一部について簡略的に紹介する。

## 2 化学反応プロセスによる多孔質構造を介した金属/樹脂接合技術

近年、自動車をはじめとする輸送機器の軽量化が急務となっている。そこで、鉄鋼材料だけでなく、アルミニウム合金や炭素繊維強化樹脂 (Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP) などを適材適所に使用する「マルチマテリアル構造<sup>8,9)</sup>」が検討されている。そこで、異種金属および金属と樹脂の接合技術が重要となる。金属と樹脂を接合する技術としては、接着剤による接着、ボルトやリベットなどを用いた機械的締結、金属上に形成した微細な凹凸と樹脂を絡み合わせるアンカー接合が挙げられる<sup>10,11)</sup>。

当研究グループでは、アンカー接合の強度向上を目的とした研究を推進している。特に、金属基板上に3次元的なトポ



ロジーをもつポーラス構造を形成し、そこへ樹脂を含浸させた「相互浸透層<sup>12,13)</sup>」を介した接合方法を提案している。これにより、あらゆる方向に高強度な接合の実現を目指している。このとき、金属基板と強固に接合されたポーラス構造を形成するプロセスが重要となる。

「1. はじめに」で述べたように、燃焼合成反応は原料粉末間の強い発熱反応を利用するプロセスであり、合成される材料は多孔質となる。したがって、金属基板上で燃焼合成反応を誘起すれば、ポーラス構造の形成と同時に反応熱による基板との接合が期待できる (Fig.1 (a))。このとき利用する燃焼合

成反応を一般化して表記すると以下ようになる。

$$M + \alpha(Ti + nX) = M + \alpha TiX_n + \alpha Q \text{ kJ} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、Mは基板のベースとなる金属元素 (FeやAl)、XはBまたはCである。TiとXからTiB<sub>2</sub>やTiCなどのセラミックスを形成する際の反応熱を利用する。当研究グループでは、Fe系ポーラス構造を作製する際はFe-Ti-B粉末、Al系ポーラス構造を作製する際はAl-Ti-C粉末を用いている。基板表面全体にポーラス構造を作製する際には全体加熱を行い、基板上に敷設した原料粉末すべてを反応させる。一方、基板の特定

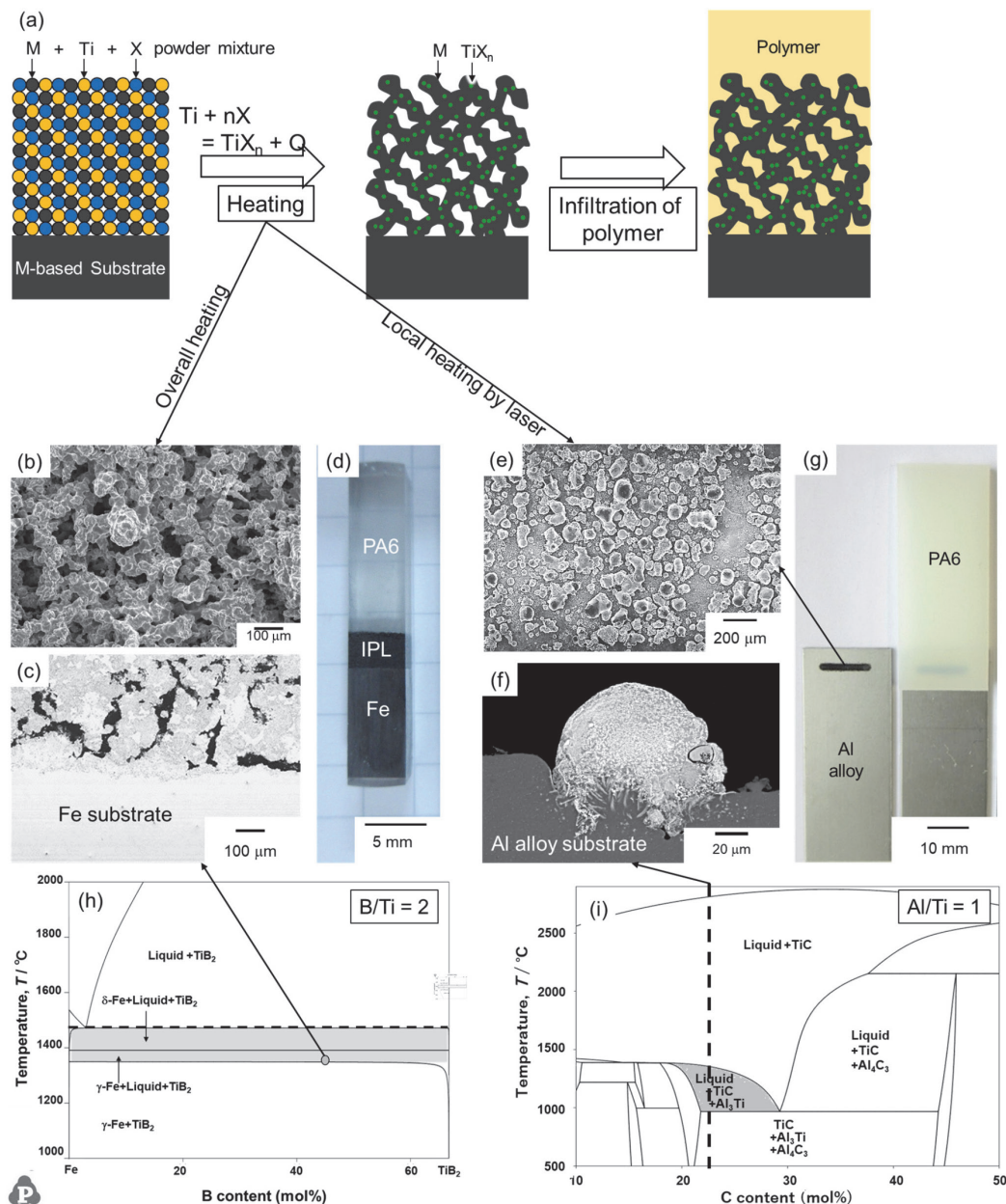


Fig.1 (a) Schematic illustrations showing metal/polymer joining via porous layers synthesized through in-situ exothermic reactions, (b, c, e, f) SEM images of surfaces and cross-sections of the porous layers fabricated through (b, c) overall heating and (e, f) local laser heating, (d, g) photographs of the joints via the porous layers, and vertical sections of equilibrium phase diagrams for (h) Fe-Ti-B ternary system at B/Ti = 2 and Al-Ti-C ternary system at Al/Ti = 1.

の箇所にもみポーラス構造を作製する場合には、レーザによる局所加熱を利用する。

一例として、Fe基板表面のFe-Ti-B粉末を全体加熱して作製したFe系ポーラス構造および樹脂との接合体をFig.1 (b-d) に示す。基板と接合した複雑な連通型ポーラス構造 (Fig.1 (b, c)) と樹脂のアンカー接合により、接合界面と垂直方向に母材の樹脂強度に近い強度が実現できることが示されている<sup>14)</sup>。こうしたポーラス構造形成の背景には、式 (1) に包括した化学反応の素過程が関与している。金属材料の組織変化を理解する際に重要となるのが状態図である。特に近年は熱力学データベースが整備され、多元系状態図を精度よく予測できるようになってきた。化学反応プロセスも大きな発熱による試料の温度変化はあるものの、その本質は原子拡散に伴う組織変化であり、状態図は有用である。全体加熱の場合には、反応による最高到達温度とその温度における相平衡の関係が重要であると考えられる。Fe-Ti-B三元系状態図において ( $\gamma$ - or  $\delta$ -) Fe相が液相と平衡できる温度 (Fig.1 (g) 灰色部) に最高到達温度を制御すると、Fig.1 (b) に示すような原料粉末同士が連結し、かつ基板と良好に接合したポーラス構造を合成できることが明らかになっている<sup>15)</sup>。

一方、Al基板上的Al-Ti-C粉末を局所加熱して作製したポーラス構造をFig.1 (e-g) に示す。このプロセスでは、基板表面のポーラス構造は粒状生成物からなる凹凸に近い構造となっており、3次元的な構造を得るにはさらなる構造制御が必要である。一方で、界面と平行方向のせん断強度について従来のアンカー接合よりも高い強度を実現している<sup>16)</sup>。レーザによる局所加熱の場合には、レーザによる入熱の方が反応熱よりも大きいため、原料粉末が溶融した後の凝固過程が重要となる。ポーラス構造を構成する粒状生成物はTiCが連結したネットワーク構造が骨格となることが分かっている<sup>16)</sup>。つまり、加熱時および凝固時にTiCが優先的に形成する必要がある。さらに、基板との接合については第二晶として $\text{Al}_3\text{Ti}$ が形成することが望ましい。 $\text{Al}_3\text{Ti}$ は原料粉末に含まれるTiと基板のAlとの反応により生成し、ポーラス構造と基板を良好に接合させるためである。Fig.1 (h) の破線部のような組成をもつ粉末にレーザを照射することで、上述の凝固過程を経て基板と強固に接合したポーラス構造が形成し、高強度な金属/樹脂接合が実現できる。

### 3 燃焼合成発泡法によるポーラス $\text{Al}_3\text{Ti}$ の構造制御

燃焼合成反応では、反応熱を制御することで、内部にガスを含む閉気孔型のポーラス材料を作製できる<sup>17)</sup>。例えば、Al-Ti- $\text{B}_4\text{C}$  からなる混合粉末を加熱すると、Alの融解を起点に反

応が開始し、 $3\text{Al} + \text{Ti} \rightarrow \text{Al}_3\text{Ti}$ 、 $3\text{Ti} + \text{B}_4\text{C} \rightarrow 2\text{TiB}_2 + \text{TiC}$  の2つの反応が生じる。2つ目の反応も強い発熱を伴う反応のため、Tiと $\text{B}_4\text{C}$ の添加量を調整することで、系全体の反応熱を制御できる。これらの反応により、 $\text{Al}_3\text{Ti}$ が融解するまで温度が上昇すると、Al粉末の表面に付着したアルミナ水和物または内部に固溶した水素ガスにより発泡に至る (Fig.2 (a-f))。作製されるポーラス金属は $\text{Al}_3\text{Ti}$ を母相とし、 $\text{TiB}_2$ やTiCなどのセラミック粒子が分散した複合材料となる (Fig.2 (g,h))。 $\text{Al}_3\text{Ti}$ はAlと同程度の密度 ( $3.4\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) でありながら、高融点 ( $1340^\circ\text{C}$ )、高剛性 (剛性率:  $93\text{GPa}$ )、かつ耐酸化性に優れた金属間化合物である<sup>18)</sup>。この $\text{Al}_3\text{Ti}$ を母相とするポーラス金属は輸送機器の剛性補強部材や工業炉等の耐熱断熱材としての応用が期待できる。しかしながら、燃焼合成反応が不可逆かつ急速に反応するため、ポーラス金属の特性を支配する気孔構造の制御が難しい。そこで、著者らは透過X線を用いた発泡過程のその場観察に取り組んでいる (Fig.2 (i-o))。これにより、発泡後に内部に気孔が形成され、合体や破裂により崩壊する様子がその場観察できる (Fig.2 (m-o))。また、発泡する前に試料にわずかな体積変化が生じることが明らかになった (Fig.2 (i-l))。この体積変化の要因は、上述の2つの燃焼合成反応が劇的に生じる起点が前者はAlの融解 ( $660^\circ\text{C}$ )、後者は $\text{Al}_3\text{Ti}$ の融解 ( $1340^\circ\text{C}$ ) であるという違いによりもたらされることが組織観察などから明らかになった。現在、著者らは均一かつ微細な気孔構造を作製するために、液相の見かけ粘性を増加させる増粘剤を添加した場合のその場観察なども実施している。

また、 $\text{Al}_3\text{Ti}$ は結晶構造が対称性の低い $\text{D0}_{22}$ 型であることに起因して脆性的であり、ほとんど塑性変形能を示さない<sup>19)</sup>。一方、 $\text{Al}_3\text{Ti}$ に第三元素 (Cr, Mn, Fe) などを添加することで、対称性の高い $\text{L1}_2$ 型の結晶構造となることが知られており、緻密材料では塑性変形能の改善も報告されている<sup>20)</sup>。著者らは燃焼合成反応によるポーラス $\text{L1}_2$ 型 ( $\text{Al}, \text{X})_3\text{Ti}$  ( $\text{X} = \text{Cr}, \text{Mn}, \text{Fe}$ ) の合成に現在取り組んでいる。これにより、mmオーダーのポーラス構造の制御と同時に、nmオーダーの結晶構造や $\mu\text{m}$ オーダーの微視組織を制御し、目的とする特性を持った材料の合成を目指している。

## 4 LPBF法のプロセスパラメータ設計

LPBF法において緻密な造形物を得るための造形条件最適化に広く用いられるプロセスパラメータに体積エネルギー密度 (Volumetric energy density, VED) がある。VEDは以下の式で表される<sup>21)</sup>。

$$\text{VED} = \frac{P}{v \cdot S \cdot t} \quad (2)$$



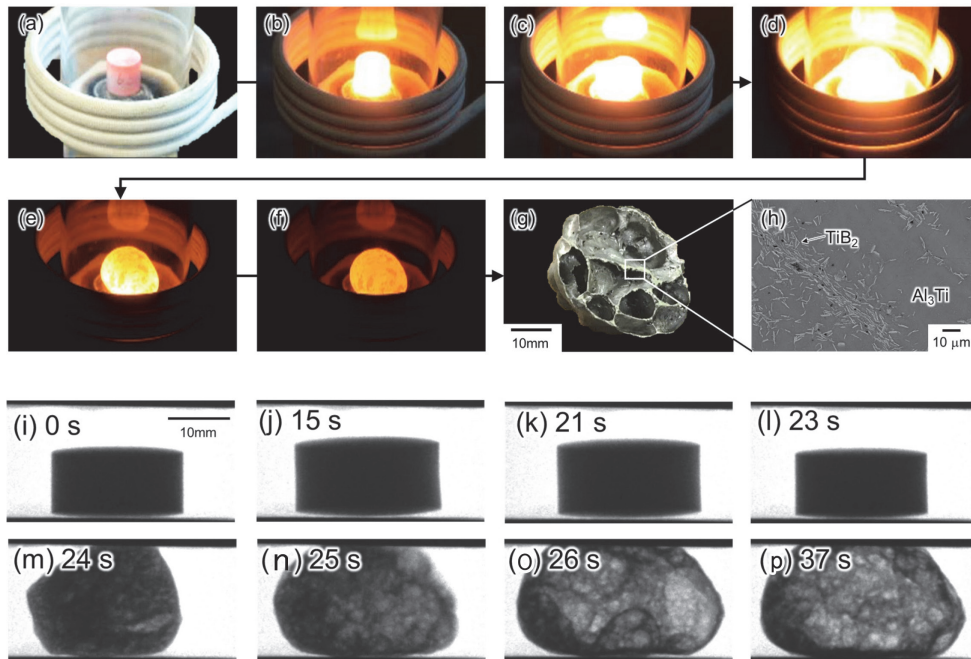


Fig.2 (a-g) Photographs showing (a-f) combustion foaming behavior and (g) porous Al<sub>3</sub>Ti, (h) SEM image showing the microstructure in the porous Al<sub>3</sub>Ti, and (i-p) X-ray radiography images showing the volume change of the sample and formation of pores inside the sample.

ここで、 $P$ はレーザ出力、 $v$ は走査速度、 $S$ は隣接レーザトラックの間隔、 $t$ は粉末積層厚さである。VEDは単位体積あたりのエネルギーに相当する次元をもち、造形を完了するまでに要した単位体積当たりの全投入エネルギーとしての物理的意味を持つ。著者らは $S$ と $t$ を固定し、 $P$ と $v$ を広く変化させて作製したマルエージング鋼造形体の相対密度を評価した (Fig.3) (文献22) からの引用改編)。VEDは $S$ と $t$ が固定される場合には、 $P \cdot v^{-1}$ に簡略化できる。Fig.3 (c) は相対密度と  $P \cdot v^{-1}$  の関係を示している。 $P \cdot v^{-1}$  の増加に伴って相対密度が増加する傾向を示したものの、同じ  $P \cdot v^{-1}$  であっても大きな相対密度のばらつきが存在することが分かる。つまり、造形体の相対密度を整理する指標として、VEDは必ずしも適切ではない。そこで、著者らはレーザ溶接の分野で用いられている以下の Deposited energy density (DED) <sup>23,24)</sup> に着目した。

$$DED = \frac{AP}{\sqrt{\pi \cdot D \cdot v \cdot \sigma^3}} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $A$ はレーザ吸収率、 $D$ は熱拡散率、 $\sigma$ はレーザスポット径である。DEDも単位体積あたりのエネルギーに相当する次元を持つ。DEDでは、レーザがある一点に照射されている時間  $\tau$  を定義し、その時間で熱が伝わる深さ ( $(D \tau)^{0.5}$ ) を含む円柱領域を単位体積と考える (Fig.3 (b))。つまり、レーザ照射中に熱が分配される領域の入熱量を示すパラメータである。 $P$ と $v$ のみを変化させた場合、DEDは  $P \cdot v^{-0.5}$  に近似

できる。Fig.3 (d) に相対密度とDEDに基づく  $P \cdot v^{-0.5}$  の関係を示す。Fig.3 (c) に比べて、データのばらつきは小さくなり、おおむね一つの曲線で相対密度の変化を整理できることが分かる。すなわち、積層造形体の相対密度を整理するパラメータとしては、 $P \cdot v^{-1}$  に比べて  $P \cdot v^{-0.5}$  の方が適切である。

一方で、DEDも積層造形のプロセスパラメータとして必ずしも完全ではない。DEDはレーザ溶接の分野で提唱されたパラメータであるため、接合部にレーザを一度だけ走査することを想定して定式化されている。そのため、積層造形において重要な条件である隣接レーザトラックの間隔 ( $S$ ) や粉末積層厚さ ( $t$ ) が含まれていない。現在、著者らはDEDの拡張を検討し、 $S$ や $t$ の寄与を内包するプロセスパラメータの開発に取り組んでいる。

また、こうした多数のパラメータを最適化する際に有用となるのが、機械学習をはじめとするデータ科学である。データ科学は近年急速に発展し、データ駆動型の材料開発を行うマテリアルズインフォマティクス (MI) が推進されている<sup>25)</sup>。著者らも機械学習を活用した造形条件の最適化に取り組んでいる。一例として、Al-12Si合金積層造形体のニューラルネットワークによる相対密度予測について述べる。Fig.4 (a) に示されるようなレーザ出力と走査速度で造形したAl-12Si合金のうち、灰色で示されるデータをニューラルネットワークへ学習させ、黒色で示されるテストデータを予測させた。なお、斜線で示されたプロットは造形途中で試料の形状が崩れ



てしまったものであり、そうしたデータは仮想的に相対密度を0.6として入力している。Fig.4 (b) にテストデータの実測値のニューラルネットワークによる予測値を  $P \cdot v^{-0.5}$  に対して整理した結果を示す。実測値において、広い条件で作製したAl-12Si合金の相対密度は概ね  $P \cdot v^{-0.5}$  に対してに整理できるが、一部外れているデータ（灰色の領域）があることが分

かる。これは広いレーザ条件のもとでは、 $P \cdot v^{-0.5}$  もすべてのデータを整理することはできないことを表している。一方、ニューラルネットワークによる予測値は、 $P \cdot v^{-0.5}$  に対して整理できる実測値を精度よく予測している。また、外れているデータに関する予測精度は高くないが、「 $P \cdot v^{-0.5}$  に対して整理できない」という点は予測されている。つまり、相対密

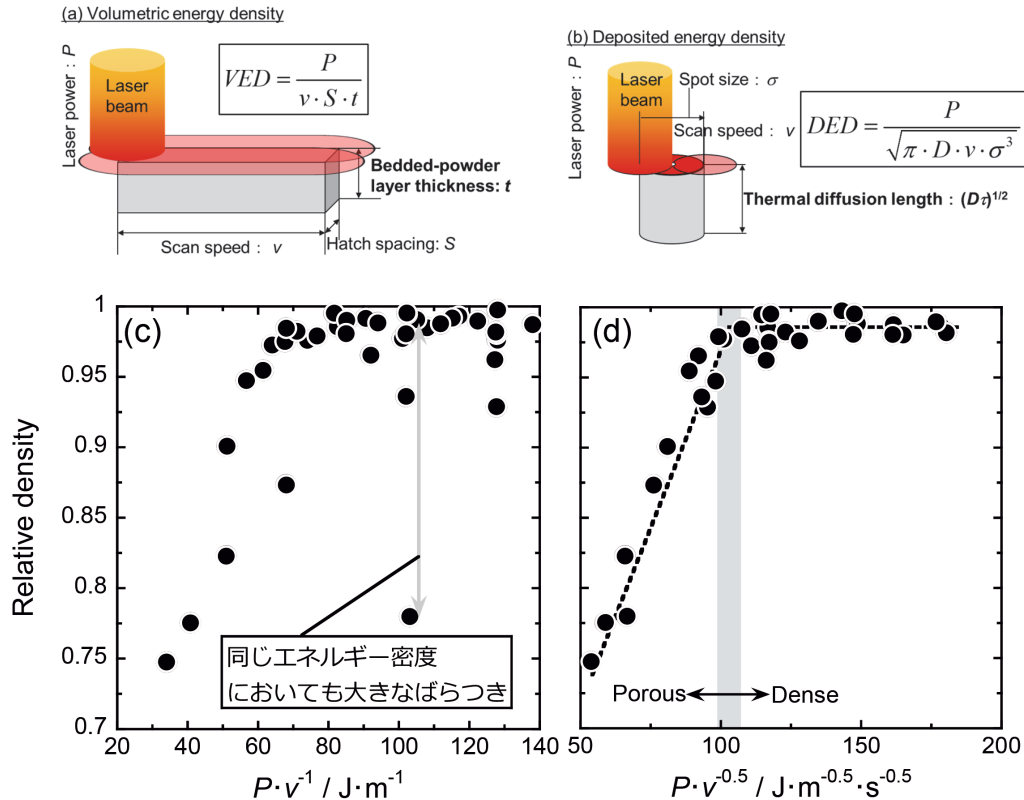


Fig.3 (a, b) Schematic illustrations of heat input models assumed in volumetric and deposited energy densities (VED and DED) and (c, d) changes in the relative density of laser powder bed fused maraging steels as a functions of (c)  $P \cdot v^{-1}$  based on VED and (d)  $P \cdot v^{-0.5}$  based on DED.

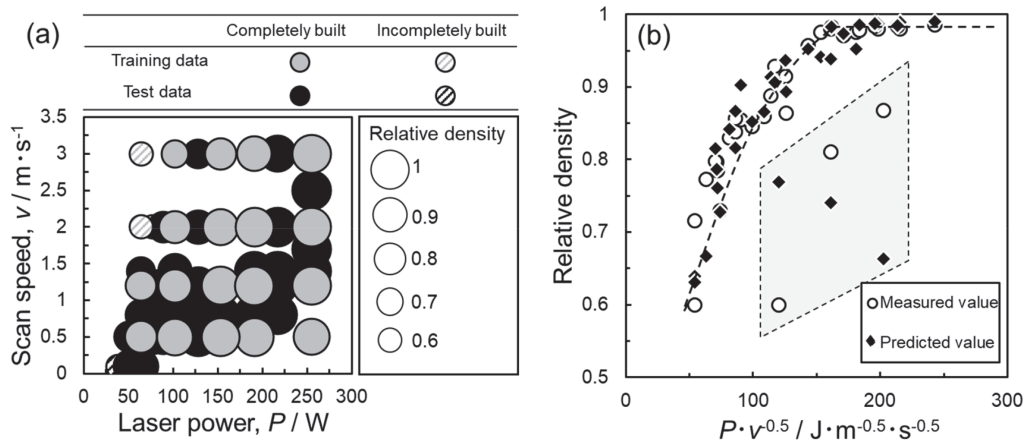


Fig.4 (a) Data set of relative density of laser powder bed fused Al-12Si alloy for training and tests. (b) Change in the measured relative density for test data and the values predicted by a neural network as a function of  $P \cdot v^{-0.5}$ .

度がほぼ1となる条件と同一の $P \cdot v^{0.5}$ において、緻密な造形物とならない条件の存在を予測している。

現在は可能な限り少数の実験データから精度良く造形物の相対密度を予測する手法の開発に取り組んでいる。その際にはDEDのような物理的意味のあるパラメータの存在が重要であると考えている。こうしたパラメータにより、各造形条件の重要性の本質を理解できるためである。DEDの拡張とデータ科学の適用の両方のアプローチから少数の実験データによる高精度予測が可能になりつつある。

## 5 おわりに

化学反応プロセスおよび付加製造法に関する当研究グループの取り組みとして、金属/樹脂接合、高融点ポラス金属の合成、積層造形プロセスパラメータ設計に関して紹介した。化学反応プロセスおよび付加製造法には、プロセス中に温度場が急変するという共通点があり、複雑な現象を支配する因子の理解や制御が困難となっている。一方で、金属材料学の基本となる状態図や、その場観察やデータ科学などの先端技術をフル活用することで、現象の理解・制御を行うことは十分に可能である。また、有限要素法やフェーズフィールド法などの計算科学も複雑なプロセスをモデル化し理解する上で重要となる<sup>26,27)</sup>。実験、計算科学、データ科学を組み合わせることで、複雑なプロセスの理解と制御を目指していきたいと考えている。

## 謝辞

本研究の成果の一部は、公益財団法人科学技術交流財団共同研究推進事業および知の拠点あいち重点研究プロジェクト(Ⅱ期およびⅢ期)の支援の下、得られたものである。ここに特記して謝意を記す。

## 参考文献

- 1) 日比野敦, 渡辺龍三: 日本金属学会誌, 55 (1991) 11, 1256.
- 2) 小泉雄一郎, 千葉晶彦, 野村直之, 中野貴由: まてりあ, 56 (2017), 686.
- 3) 木村貴広, 中本貴之: 粉体および粉末冶金, 61 (2014), 531.
- 4) 高田尚記, 生出佳, 小林卓哉, 鈴木飛鳥, 小橋眞: 粉体および粉末冶金, 66 (2019) 12, 573.
- 5) N. Takata, M. Liu, H. Kodaira, A. Suzuki and M. Kobashi: Additive Manufacturing, 33 (2020), 101152.
- 6) N. Takata, R. Nishida, A. Suzuki, M. Kobashi and M. Kato: Metals, 8 (2018), 440.
- 7) A. Suzuki, K. Sekizawa, M. Liu, N. Takata and M. Kobashi: Adv. Eng. Mater., 21 (2019), 1900571.
- 8) 藤本雄一郎, 漆山雄太 監修: 自動車のマルチマテリアル戦略 材料別戦略からイザイ接合, 成形加工, 表面処理技術まで, NTS, (2017)
- 9) K. Nagatsuka, D. Kitagawa, H. Yamaoka and K. Nakata: ISIJ Int., 56 (2016), 1226.
- 10) S.T. Amancio-Filho and J.F. dos Santos: Polym. Eng. Sci., 49 (2009), 1561.
- 11) A. Suzuki: Material Stage, 19 (2019) 2, 16.
- 12) A. Suzuki, Y. Arai, N. Takata and M. Kobashi: J. Mater. Proc. Tech., 254 (2018), 338.
- 13) A. Suzuki, Y. Arai, N. Takata and M. Kobashi: J. Mater. Proc. Tech., 262 (2018), 11.
- 14) A. Suzuki, K. Noritake, N. Takata and M. Kobashi: J. Mater. Proc. Tech., 288 (2021), 116843.
- 15) A. Suzuki, K. Noritake, N. Takata and M. Kobashi: Adv. Powder Tech., 30 (2019), 2101.
- 16) S.-G. Kim, A. Suzuki, N. Takata and M. Kobashi: J. Mater. Proc. Tech., 276 (2020), 116388.
- 17) N. Kanetake and M. Kobashi: Scr. Mater., 54 (2006), 521.
- 18) M. Sujata, S. Bhargava and S. Sangal: ISIJ Int., 36 (1996) 3, 255.
- 19) 山口正治, 中村藤伸, 白井泰治: 軽金属, 38 (1988) 4, 228.
- 20) 間淵博, 中山豊: 日本金属学会会報, 30 (1991) 1, 24.
- 21) 京極秀樹, 池庄司敏孝: 図解 金属3D積層造形のきそ, 日刊工業新聞社, (2017)
- 22) A. Suzuki, R. Nishida, N. Takata, M. Kobashi and M. Kato: Additive Manufacturing, 28 (2019), 160.
- 23) U.S. Bertoli, A.J. Wolfoer, M.J. Matthews, J.-P. R. Delplanque and J.M. Schoenung: Mater. Des., 113 (2017), 331.
- 24) D.B. Hann, J. Lammi and J. Folkes: J. Phys. D: Appl. Phys., 44 (2011), 445401.
- 25) 足立吉隆, 新川田圭介, 奥野晃弘, 弘川奨悟, 田口茂樹, 定松直: 鉄と鋼, 102 (2016) 1, 47.
- 26) Y. Zhao, Y. Koizumi, K. Aoyagi, D. Wei, K. Yamanaka and A. Chiba: Additive Manufacturing, 26 (2019), 202.
- 27) 野本祐春: まてりあ, 57 (2018) 9, 426.

(2020年12月21日受付)

## 先輩研究者・技術者からのエール

名古屋大学 名誉教授

**鈴** 木飛鳥先生は小職の退職直前の博士後期課程の学生です（親しみをこめて鈴木君と呼びたいのですが、既に活躍されている教育・研究者であり、敬意を表して鈴木先生と記します）。鈴木先生は、大学院時代に水素透過膜の研究をしていました。従来、水素透過膜の透過能はジーベルツの法則とフィックの法則に基づいた指標で評価されていましたが、それでは説明できない例が多く存在しました。そこで、鈴木先生は、水素の化学ポテンシャル勾配を用いた新たな指標を定式化し、それにより例外なく水素透過能が評価できることを示しました。加えて、この指標に基づいて多くの実験結果を整理し、遷移金属透過膜の設計指針も提案しました。これらの業績は彼の優れた洞察力に基づくものです。透過膜の研究に関して、小職が「Pd以外の有望な金属を透過膜として利用する際に、水素分子を解離するためのPdコーティングが施されているけど、金属表面での水素解離の本質が明確になれば、コーティングが不要になるだろうね。」と鈴木先生に話したことがあります。しかし、それについては持ち越しとなりました。というのも、鈴木先生は博士後期課程を短縮修了後、直ちに助教として、現在所属する小橋・高田研究室でプロセス関連の研究に取

組むことになったためです。

鈴木先生は、反応焼結法をはじめとする様々なプロセスとそれに基づく材料開発という新たな研究を始めてからほぼ5年ですが、既に輝かしい業績を挙げています。その一部は、本誌の「非定常温度場プロセスの理解と制御を目指して」の記事に記されています。この題目のように、材料におけるプロセス研究の難しさは、様々な要因が複雑に絡み合った結果として製品が出来上がることや、プロセス最適化のためのパラメータがしばしば製造プロセスおよび製品のサイズに依存することにあります。上述の記事には、レーザーを用いた粉末床溶融結合法に基づく製造法が紹介されており、緻密な造形物を得るためのプロセスパラメータとして、従来とは異なる新たなパラメータが示されています。そこには、現れる現象の奥に潜む学理を見出そうとする姿勢と、これまで培った確かな洞察力が感じられます。さらに、実験のみならず、近年めざましく発展している機械学習の手法も取り入れ、反応焼結法に基づいた造形プロセスの分野に新風を吹き込もうとしています。まさに今、鈴木先生は躍動しており、今後のさらなる飛躍が期待されます。

村田 純教

トヨタ自動車（株） 素形材技術部・グループ長

**化** 学の力を駆使した鈴木先生の研究は、素形材分野における成形時の加熱を少なくし、CO<sub>2</sub>を低減したり、高付加価値な物質をインプロセスで生成したりすることを可能にするなど多岐に渡る応用力を秘めていると思っています。時には当初の研究目的と異なった思わぬ材質が生まれることや、特殊な複合界面により期待以上の特性を得られることなどがあり、ワクワク感が絶えません。更に計算を活用して複雑な反応を予測・考察・解明し、予測や偶然を必然にする計算力・考察力には、いつも感銘を受け学ばせていただいています。

溶融金属と固体との界面反応、3D積層の粉同士の反応、発泡金属生成時の反応等の研究は、新素材の創出や接合界面の最適化など良い製品をつくるための価値が生まれますが、実用化までに長い年数を要することもあり、産業界とのニーズのマッチングを共に考えていくことが必要だと思っています。

とある日、鈴木先生の新素材向けの研究から生産技術の改善のつながる身近な価値を生み出す思わぬきっかけをいただいたことがあります。

素形材関係の製造現場の困りごとの一つとして、加工点における素材との凝着があります。例えば金型表面への素材の凝着防止のために素材と反応しづらい表面処理

を施工しているにも関わらず素材の一部が金型に凝着してしまうことがあります。さらに、凝着防止の表面処理に潤滑剤を併用したら余計に凝着が多くなった不思議な経験が過去にあり、原因不明のまま数年前に迷宮入りした困りごとがありました。ところが、近年の鈴木先生の研究であるアルミニウム合金溶湯と異種材の複合化の研究がきっかけで、潤滑剤の主成分が凝着の原因になっていることが明らかになりました。思わぬ発見に関係者一同で大変驚き、将来に向けた大きなヒントを得ることができ、皆で喜び合い、これこそが産学連携の醍醐味の一つだと深く感じました。

ムダの無い研究開発も大切ですが、ニーズを多く抱えた産業界と緻密に論理的に究明する研究チームが一体となることで、思わぬ価値を数多く生み出していけるのではないかと思います。鈴木先生は、常に前向きで正直に事実を追求し、難しい研究内容を分かり易く、和やかに説明いただけるので、会話も弾み、新しい発想や応用が連鎖的に出てきます。これから多くの企業との産学連携を通じ、皆で切磋琢磨し、楽しい会話を重ね、我が国の素形材を支える基盤技術が鈴木先生の化学と計算で数多く創出されることを期待し、エールのコメントとさせていただきます。

古川 雄一





## 私の論文

今振り返ってみて、行間にこめた思い、エピソード

# 変形を伴うコークス層と分散相による閉塞

Clogging of Coke Bed due to Its Deforming and Dispersed Phase

夏井俊悟  
Shungo Natsui

東北大学  
多元物質科学研究所  
助教

## 1 はじめに

2017年に刊行されたふえらむ Vol.22, No. 4「私の論文」に続いて、この度再び本企画に寄稿させていただく機会を頂戴した。本誌面を多分に拝借し、再び著者個人の視点から研究紹介する貴重な機会であり、まずは関係各位に深く御礼申し上げます。本稿は、令和元年度俵論文賞受賞論文「回転強度試験における時系列3D scanningと固気液三相の移動解析によるコークス変形が及ぼす充填層内流れ特性評価」について紹介する。高炉下部の特有の現象、特に「種々の変形していくコークス群と充填構造の変化」「融体のホールドアップと気相閉塞」といった大変複雑な問題を定量的かつ動力的に記述したい、との思いから本論文を執筆するに至っている。特に、実験データを動力学モデルに反映していく一連の方法について解説する。まず、この研究に取り組む背景、続いて、論文の概要を説明した後、今後の発展性について述べさせていただきます。

## 2 研究に至るまで

本研究は、2015～2018年に実施されたJFEスチール（株）北海道大学包括連携プログラム内にて実施された。当時、北大鈴木亮輔教授が主体となって行ってきた共同研究がちょうど区切りとなり、バトンを渡していただいた形で本共同研究が始められた。包括連携においては、経験の多い先生方が研究代表者となることが多く、当時教員歴3年の若手にこのような大きなチャンスを与えて下さった鈴木先生の懐の深さには感謝の念に堪えない。しかも製鉄部門研究のため、本論文

の共著者である照井光輝氏、柏原佑介氏、最近では村尾明紀氏にもご協力頂く機会にも恵まれ、共研テーマすら当初完全な手探り状態であった当方との打ち合わせのため札幌まで足を運んで頂いたり、実験の知見収集のための福山地区訪問にご対応いただくなど多々ご配慮いただいた。研究方針を入念に議論して、本研究の目的を、「高炉下部の通気・通液特性を計算可能な数値モデルを開発し、その挙動解析を行うこと」、「モデルによる結果から通気・通液性の新評価指標を提案し、安定操業技術の向上を図ること」に定め、研究を実行できる状態にはなったが、中々壮大な目的であり、正直なところ現在も道半ばどころか手探り状態にある。本論文では、様々な思案の結果、北大で行っていた数値解析とJFE社で実施されている実験技術とを結ぶアイディアに至り、共著者各位には快くご賛同いただいて、以降示すような新たな取り組みを実行するに至った。

## 3 本研究の背景

高炉におけるコークスの役割は、酸化鉄の還元、炉内の熱発生源、そして充填構造の通気・通液性を確保するための構造体とされている。近年では、低コークス比操業によってコークスへの負荷が増大して、劣化・摩耗による炉全体の通気抵抗増加が懸念されている。さらに、鉄やスラグなど溶融体が生成する融着帯以下の領域で、小粒径コークス充填層の自由空間を溶融体が占有することにより、通気性が著しく低下することが知られる<sup>1)</sup>。最近では、コークス・鉱石混合層形成による融着帯での通気性確保などの方策が検討されている<sup>2,3)</sup>。ただし、今後の不透明な原料事情も相俟って、鉱石の

\* [今回の対象論文]

夏井俊悟, 澤田旺成, 照井光輝, 柏原佑介, 菊地竜也, 鈴木亮輔: 「回転強度試験における時系列3D scanningと固気液三相の移動解析によるコークス変形が及ぼす充填層内流れ特性評価」, 鉄と鋼, Vol.104 (2018), No.7, pp.347-357 (第82回俵論文賞受賞)

軟化溶融現象は複雑化し、その適用範囲については未だ議論の余地が残っている。通気性の動力学的理解に基づくプロセス設計を実行するには、原料粒子スケール以下の移動現象を直接評価する方法が求められる。

高炉用コークスの品質評価として、タンブラーなどを用いた回転強度試験がある。回転強度試験では、規定の容器内にコークス試料を装入し、規定の速度・回転数で回転した後、所定の篩い分けを行い、一定径以上の歩留を強度指数 (DI, TI, CSR) として評価している。本研究は、回転強度試験におけるコークス形状の非定常な変化を追跡し、それらで形成される高炉内での充填層構造と周囲流れ場を直接解析してはどうか、との発想に基づいている。近年では、ラボレベルで購入可能な3D スキャナでも、サブミリオーダーの解像度で物理形状データを出力することができる。これを用いて詳細なコークス表面情報を数値力学モデル解析に反映できれば、将来的に各強度指数のコークス群が形成する充填構造、局所空隙形状および融液・気相流れの関係について検討し、充填層構造内の流れを直接評価可能ではないかと考えた。

## 4 本論文の概説

回転強度試験法においては、落下衝撃が比較的低いタンブラー試験機を採用して、回転数毎のコークスの微妙な形状変化を追跡することとした<sup>4)</sup>。一定強度のコークスを38~50 mmで篩分けを行い、代表的なコークスに $\phi$  1 mmの貫通孔を開け、そこに糸を通して結びつけたものをマーカーとして、所定の回転数 (100, 200, 300, ..., 1000 rev) まで回転させた。各回転数で静止後、代表コークスの3次元表面形状を評価したところ、突起状部位の破壊が優先的に進行、一方で進展した内部亀裂が破断の起点となって体積破壊による変形も生じており、複雑な形状変化の情報を次のように数値シミュレーションに取り入れたことが本手法の特徴と言える。その概略図をFig.1に示す<sup>5)</sup>。まず、得られた3D表面形状データにLevel set関数と呼ばれる物体内部では正、外部では負となる関数を適用して、正の粒子のみ配置することでFig.1bのように固体形状を正方格子の上に数値化できる<sup>6)</sup>。次に、multi-sphere (MS) -DEMによって形状の情報を有するコークス群の運動を解析して充填層構造を得る<sup>7)</sup>。MS-DEMは、その名の通り固体形状に合致するように複数の粒子を配置し、重心からの距離を保持することで複雑形状固体の運動を解析する方法である。これを各コークス形状に適用して充填過程を計算すればFig.1cに示すような結果が得られる。この充填層構造は高炉下部レースウェイ直上付近を模擬した粒径分布であり、本論文では、重力方向に滴下する溶融体と気相のカウンターフローを評価した。溶融体は一般に連続流体と

して運動を記述されてきた<sup>8)</sup>が、充填層構造内を通過するときには自由表面形状が大きく変化して、分散相を多く形成するため、Fig.1aに示すように流動を有限個の粒子運動で近似するSPH法<sup>9)</sup>を適用して、分散流体と連続流体を明示的に区別することなく解析を行った (DEMやSPHはいわゆるfully-Lagrange型の解法である。一方で、気相はコークスと溶融体の間を満たしているため、空間を正方格子で離散化して運動を解いたほうが都合がよく、Euler型の解法のSMAC法を採用した)。一連の解析は、例えばFig.1d, eに示すような結果を与える。このように一部を切り出して可視化してみると、溶融体が滴下することにより空隙が専有され、気相の流れが制限されることが明確に理解できる。

定常状態にある十分に大きい流量の液相の供給を止め、静的になったときの液相体積分率を静的ホールドアップ、 $hs$ という。 $hs$ は、充填層構造内の通液性および通気性における重要な指標である。本計算では非濡れのコークス表面を仮定して解いたところ、コークスの変形が進行するとともに $hs$ はわずかな減少傾向を示した。粒子径が小さくなると毛管長以下のスケールの空隙 (ボトルネック) が多くなり、 $hs$ が増加すると考えられたが、その逆の傾向を示す結果であった。そこで得られた滞留液滴について、個別の体積および接触するコークスを追跡したところ、各コークス粒子径・形状に応じた $hs$ サイトを形成することがわかった。初期コークス層では、液滴はコークス平面上に扁平になって存在しており、一方で、変形後コークス層中において、液滴は主に空隙のボトルネック中に補足されるようにシフトした。平均液滴体積は $hs$ との相関が見られ、滞留する個々の液滴体積が $hs$ を決定する主要な因子と考えられる。一方で、コークス変形の進行とともに単位体積当たりの液滴数は増加した。粒子径および球形状の変化により液滴の滞留形態が変化し、その違いが気相流れに及ぼす影響は無視できないものと推察された。

Fig.2に液相の有無による流れ場の変化を示す。Fig.2a, bには、一例として、タンブラー回転数 $N=1000\text{rev}$ で存在する空隙に補足された静的 $hs$ サイト周りを拡大表示した。空隙を液滴が占有することによって、流れていた気相のパスが限定されることがわかる。この液滴による閉塞効果は、充填物のサイズや形状に依存する。本論文では、コークスの変形の違いが流速の変化に大きく影響することを言及した。すなわち、変形前の大粒径コークスは、空隙を液が占有するが主流に顕著な影響を与えないが、変形後のコークスは、粒径と球形状が低下して、粒子間隙が狭く、この領域を液滴が占有することによって同じ $hs$ でも流れを大きく変化させる。このような流速分布の変化は圧力勾配を増大させる方向に働き、すなわちFig.2cに示すように、Ergunの式<sup>10)</sup>で理論的に予測された充填層の圧損量に液 $hs$ の影響を考慮しても、計算で得

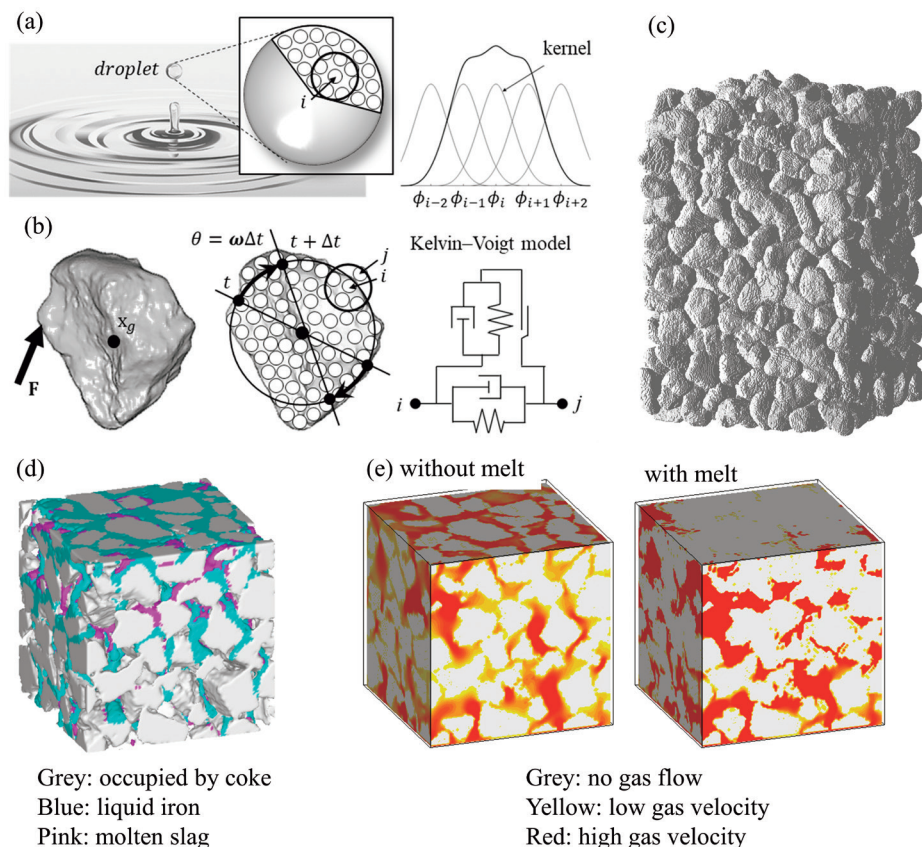


Fig.1 Euler-Lagrange coupling dynamics model for multiphase flow in coke bed. a) Description of the distribution of a physical quantity using the SPH kernel function, b) Assembly configuration for packing simulation of non-spherical solids, c) Calculated cokes packed bed structure, d) Molten iron and slag distributions, e) Gas velocity distributions with or without melts.

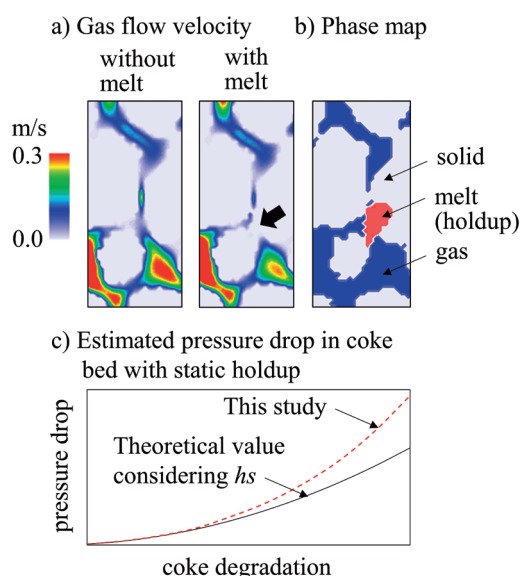


Fig.2 Gas distributions with or without holdup melts in coke bed.

られた圧損量の方が大きくなる傾向が得られる。同じ  $h_s$  サイトにおいても空隙および滞留液滴の形状によって充填層内圧力損失に与える影響が異なることが示唆された。

## 5 今後の展望

充填層内気流パスの流れは等価ではなく必ず偏流するので、空隙を形成する立体構造の幾何学的特徴をすべて考慮した数値解析を実行すれば、局所閉塞やフラッディングを予測することができるはずである。一方で、高炉内充填物はコークスや鉱石など化学反応を伴うため、突発的に生じる条件を定量的に考慮することは未だに困難である。そこで我々は、反応後強度毎のコークスの変形データを取得し、これに対応する閉塞解析手法の確立を目指している<sup>11,12)</sup>。この研究では、発生した粉の重力落下、コークス間のブリッジングとすべり、これらによる空隙の狭隘化の進行、そして圧力損失が増大していく過程を可視化して理解を深めていくことが期待できる。最近では、齋藤泰洋先生に情報の提供を頂き、充填層構造の通気性定量化に取り組み、コークス内部の空間評価に用いられている解析手法の“burn アルゴリズム”<sup>13)</sup>を用いて、空隙の幾何的データに基づく通気性評価を行った。このような幾何データ解析を用いると、固気界面に作用するせん断応力によるエネルギー損失過程を積算して圧損を評価でき、また空隙の詳細な形状変化から、単純な粉化量のみではなく個々の



コークスの配置・変形・移動の過程を合わせて考えなければ圧損が決まらないことを再認識することができる<sup>14)</sup>。さらに、充填層構造安定性の定量化には、粒子間の交差点（インターセクション）の応用数学的取り扱いにより、中長期的な空隙の不均一性を多角的に評価することで、閉塞条件を見出していくことも間違いなく有用と考えている<sup>15,16)</sup>。一方で、機械学習の代表的な手法であるDeep Learningによって、人間が認識するのが難しいコークスの破壊のような3次元の非線形現象においても、強度と変形パターンを結びつけられることが確認できた<sup>17)</sup>。適切な問題設定と対象範囲を与えたAIは極めて有用で、力学的な原理として解釈できなくとも、未知のコークス層閉塞を予測できるかもしれないと個人的には思っている。

プロセス解析においても、コンピューティングパワーの増大とともに実験や動力学シミュレーションから得られたデータの分析の重要性が高まってきた。Fig.3に近年よく描かれているサイバーフィジカルループ<sup>18)</sup>をコークス層の閉塞問題に当てはめて示した。理論に基づくモデリング、実験・観察、シミュレーション、データ解析のループを形成することで、複合的な現象に対する知識の統合が実感として得られると思われる。すなわち、固体力学に基づいた（理論）コークスの熱間強度（実験値）を得て、コークス群の3D充填構造と動的挙動（計算）を求めた後、閉塞や破壊パターンなどの予測を行う（データ解析）など、一連の解析ループが高度に機能すれば、プロセス工学において極めて強力な手法と言える。本論文では、実験結果とデータ処理、数値解析という方法を採用したが、将来、それぞれの垣根が薄れ、あるいは有機的な結びつきが強まったアプローチや概念が生み出されていくと予想される。最後に、伊藤公久先生がご執筆された解説記事<sup>19)</sup>を引用すれば、「金属精錬に携わる技術者・研究者は、あらゆる手法を駆使して、（原材料の多様化やCO<sub>2</sub>排出量削減など困難な問題に）立ち向かわなくてはならない」一方で、「我々金属精錬の研究者は、対象となる現象についての正しい物理的・化学的理解を怠らず、慎重に（新たな手法の）適

用を進めることが肝要」である。これを戒めとして各位のお叱りを賜って、今後も新たな技術に心を躍らせ現象理解を少しでも深化できたら望外の幸である。そして、目標のひとつである「モデルによる結果から通気・通液性の新評価指標を提案し、安定操業技術の向上を図ること」の達成は、残念ながらまだまだこれからである。より速い、より機能的な、より低コストで、より柔軟なプロセス解析を目標に研究を継続したい。

## 参考文献

- 1) N.Standish : Nature, 202 (1964), 587.
- 2) K.Terui, K.Ichikawa and Y.Kashihara : ISIJ Int., 60 (2020), 463.
- 3) 柏原佑介, 岩井祐樹, 佐藤健, 石渡夏生, 佐藤道貴:鉄と鋼, 102 (2016), 661.
- 4) A.R.Powell and D.W.Gould : Ind. Eng. Chem., 20 (1928), 725.
- 5) S.Natsui, K.I.Ohno, S.Sukenaga, T.Kikuchi and R.O.Suzuki : ISIJ Int., 58 (2018), 282.
- 6) M.Sussman, P.Smereka and S.Osher : J. Comput. Phys., 114 (1994), 146.
- 7) J.F.Favier, M.H.Abbaspour-Fard and M.Kremmer : J. Eng. Mech., 127 (2001), 971.
- 8) P.R.Austin, H.Nogami and J.I.Yagi : ISIJ Int., 38 (1998), 246.
- 9) J.J.Monaghan : J. Comput. Phys., 110 (1994), 399.
- 10) S.Ergun : Chem. Eng. Prog., 48 (1952), 89.
- 11) 平井東, 夏井俊悟, 埜上洋 : 材料とプロセス, 32 (2019), PS-15, CD-ROM.
- 12) 平井東, 夏井俊悟, 埜上洋 : 材料とプロセス, 33 (2020), PS-4, CD-ROM.
- 13) 内田中, 山崎義昭, 松尾翔平, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之, 濱口眞基 : 鉄と鋼, 105 (2019), 957.
- 14) 平井東, 夏井俊悟, 埜上洋 : 材料とプロセス, 34 (2020), 494, CD-ROM.
- 15) S.Natsui, A.Sawada, H.Nogami, T.Kikuchi and R.O.Suzuki : ISIJ Int., 60 (2020), 1453.
- 16) H.Nogami and T.Yamawaki : ISIJ Int., 60 (2020), 1560.
- 17) 夏井俊悟, 平井東, 埜上洋 : 材料とプロセス, 34 (2020), 492, CD-ROM.
- 18) G.Schirner, D.Erdogmus, K.Chowdhury and T.Padiri : Computer, 46 (2013), 36.
- 19) 伊藤公久 : まてりあ, 54 (2015), 436.

(2020年12月1日受付)

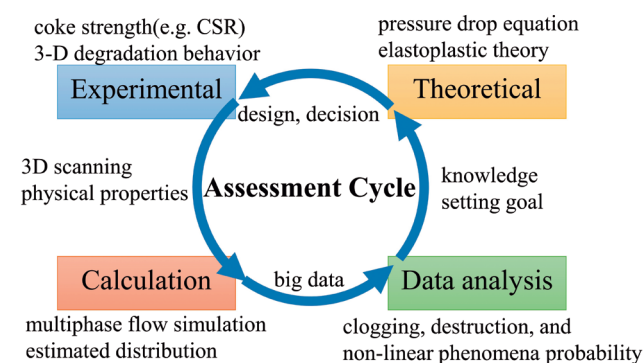
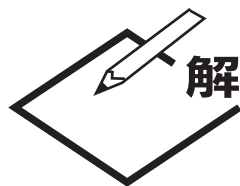


Fig.3 Concept of loop analysis for complex clogging in coke bed structure.



## 解説

受賞技術 - 32

# 鉄道用低騒音歯車装置の開発

Development of Low Noise Gear Unit for Railway Vehicles

木村 誠

Makoto Kimura

日本製鉄（株）

関西製造所 鉄道車両品製造部

輪軸設計室 室長

## 1 はじめに

鉄道は他の交通機関に比べてエネルギー効率がが高く、迅速な大量輸送手段であることから、社会的役割への期待は非常に大きく、安全性に加えて環境規制や乗り心地改善に向けた車内外低騒音化が必須である。特に、在来線や民営鉄道は住宅地域に隣接した鉄道網であるため、沿線の居住環境改善に向けた車外騒音低減が必要である。

日本製鉄はこれらのニーズに応える低騒音の鉄道用歯車装置を開発した。

## 2 鉄道車両用歯車装置の特長

鉄道車両は2台の台車によって支えられており、各台車には2対の輪軸（車輪と車軸を合わせた呼称）が組み込まれている。鉄道車両はモータの回転数が歯車装置によって最適な回転数に減速され、これが輪軸に回転力として伝えられるこ

とによって走行する（図1、図2）。

この歯車装置は、車軸に圧入された大歯車と、モータの回転力を伝える小歯車からなる1段減速機である。変速機構を使用せずに、広範囲な駆動トルク域や車両速度域を担う機能部品であり、かつ周囲に遮蔽物がないため、その騒音が車内外に直接伝わるのが大きな特徴である。

## 3 開発の背景

低騒音化の対策は、一般に筐体の板厚を大きくする、あるいは防音材を取り付ける等の構造変更が有効であるが、歯車装置は鉄道用台車の足回り部品であるため、重量や寸法に制約が課せられ、このような対策は容易ではなかった。

従来から歯車装置は多くの騒音発生機構を有することが知られていた。これに対して、当社はまず独自の実体評価試験を継続的に行うことにより、歯車装置を構成する歯車による噛み合い起振力が騒音の主要因であることを明かした。次

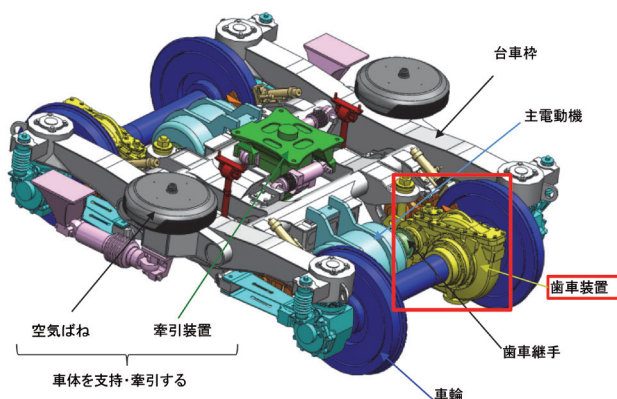


図1 鉄道用台車の構成

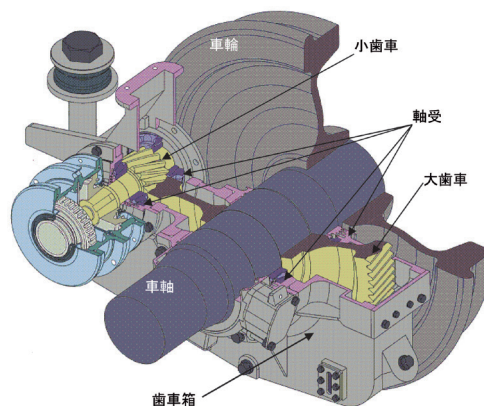


図2 歯車装置の構成

にその噛み合い起振力低減に向けた抜本的対策として歯車の3次元歯面修整に基づく新しい設計手法を考案した。これにより、従来にはない低騒音性能を有する歯車装置を実現した。

## 4 開発内容

### 4.1 騒音発生要因の分析

歯車装置の騒音の測定は、従来から回転試験機（装置の作動状況を確認する装置）または実車走行試験で評価するしかなかった。しかしながら、前者の評価では、実車走行条件で騒音を測定することができず、後者の評価では、歯車装置以外にも多くの騒音の発生源があり外乱も大きいと、歯車装置の騒音のみを分離して評価することができなかった。

そのため、歯車装置単体の騒音を評価することを目的に、世界で初めて（注）鉄道用歯車装置専用の無響室負荷試験機<sup>1)</sup>を導入した。この試験機は40dBの暗騒音環境で、実体の歯車装置に車両走行時のトルクを与え、最高速度500km/hまでの評価試験を行うことができる（図3）。

これにより、継続的に試験を行った結果、種々の騒音要因を見いだした。そのなかで、特に従来の車両では正確に把握できていなかった歯車の噛み合い音が、歯車装置の騒音の大部分を占めることを明らかにした（図4）<sup>2)</sup>。そこで、この歯車噛み合い音の低減対策を最重点課題として対策検討を行った。（注：当社調べ）

### 4.2 噛み合い音の発生機構

歯が噛み合った状態で負荷がかかると、歯が変形して駆動軸と被駆動軸の回転角にずれが生じる。この回転角のずれ量は歯の変形抵抗を表すばね剛性で決定される。歯車が運転中にはこのばね剛性の変動に伴って回転角のずれの大きさが変動し、振動を励起する力、すなわち振動起振力が発生する。

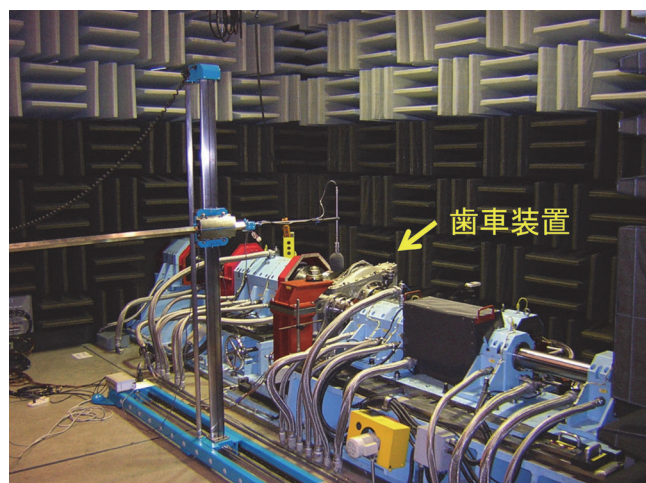


図3 無響室負荷回転試験機

この振動起振力が噛み合い音の主原因である。従って、歯車装置の騒音を低減するためには、この振動起振力を低減することが必要である。

### 4.3 3次元歯面修整に基づく新設計手法の考案

歯車では衝撃的な接触によって生じる歯の損傷や加工誤差に起因する歯先の干渉を避けるために、歯面修整と呼ばれる歯面の微細な調整加工が施される。鉄道分野では、従来から過去の経験に基づいた歯面修整が行われ、必ずしも振動起振力を低減できていなかった。

そこで、歯面の接触シミュレーション技術に基づいた詳細な解析を行い、振動起振力が歯当たり面の接触率や実噛み合い率（歯面修整を考慮して求めた噛み合い率）との相関が高いことを見だし、このような解析を重ねることにより、振動起振力を低減可能な歯面修整の設計手法を考案した（図5、図6）。

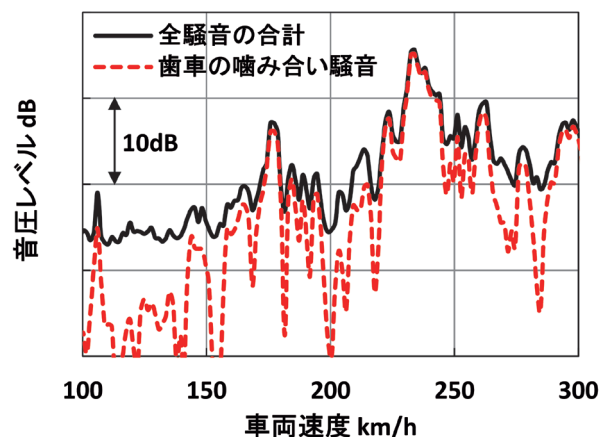


図4 歯車装置の騒音分析結果例

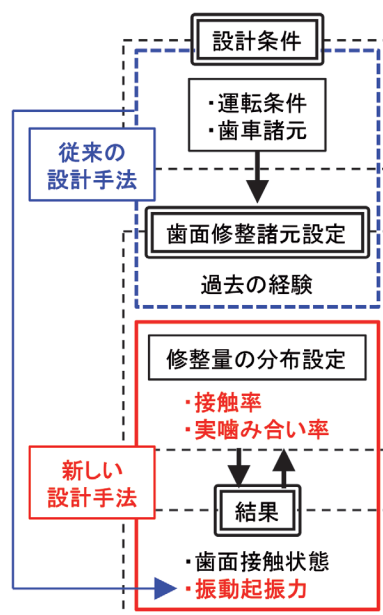


図5 設計フローの比較



| 項目   | 従来の手法          | 新しい手法                                                                   |
|------|----------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 修整方法 | 2次元修整          | 3次元修整                                                                   |
| 修整位置 | 歯幅両端、<br>歯先、歯元 | 噛み合い<br>接触線両端<br><br>噛み合い進行方向<br>噛み合い接触線<br><br>歯幅方向<br>歯たけ方向<br>歯面修整範囲 |
| 修整量  | 多い             | 少ない                                                                     |

図6 設計手法と修整範囲の比較

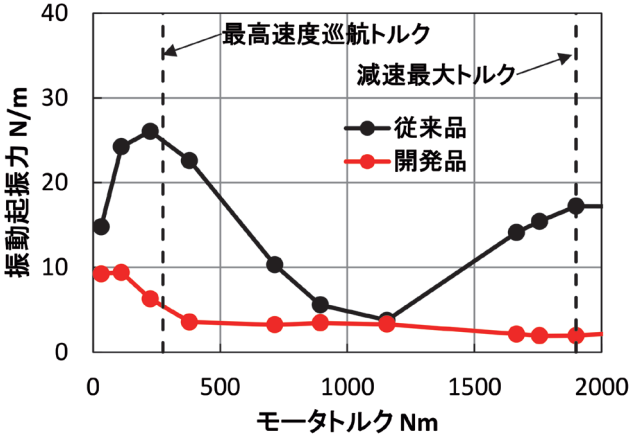


図7 モータトルクと振動起振力の関係

従来の歯面修整形状では、歯幅方向の両端部と歯たけ方向の歯先と歯元部の領域で、一様に歯面修整を施していた。さらに、歯端部当たり回避を重視し、歯面修整量を大きく確保しているため、歯車の実噛み合い長さは歯面全体を有効に活用できていなかった。

これに対して、新しい歯面修整形状では、主に噛み合い接触線方向両端部に歯面を修整し、また歯面修整量を小さくしているため、実噛み合い長さを確保でき、歯面全体を有効に活用できる広い歯当たりが得られている。

4.4 製造技術

これまでに述べた3次元歯面修整歯車を実用化するためには、極めて狭い寸法範囲で高精度に修整研削を行うことが要求される。

この課題に対して、歯面と研削砥石の接触線の動きを適切かつ厳密に制御することにより目標精度を達成することが可能となり、量産加工技術を確立した。

5 実用上の効果

新しい設計手法により歯面を修整した試作品を開発し、無響室負荷回転試験機によって評価するとともに、従来品と比較した。その結果、広いモータトルク範囲で振動起振力低減効果を確認でき(図7) さらに、最大15dBの大幅な低騒音化を実現できた(図8)。

これにより、電鉄事業者各位へのサンプル出荷を行い、高い評価を頂くことができたため、2013年から量産を開始した。それ以降、従来品の交換用歯車と新造歯車装置の出荷累計を年々伸ばしており、新幹線を含む高速車両や首都圏通勤車両に採用頂くとともに、現在はほぼすべての新設計車両に採用頂いている。

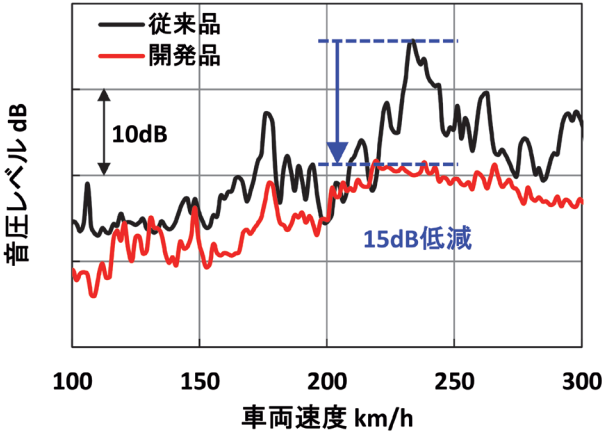


図8 開発品の騒音低減効果

6 結言

3次元歯面修整技術によって得られた15dBの低騒音化効果を有する鉄道用歯車装置を実現した。

本開発品は、歯車装置構造を変更することなく、既存歯車を本開発品に交換するだけで車内外の騒音を大幅に低減できるため、例えば防音カバー等の歯車装置以外の車両防音対策をとる必要がなく、また沿線住民への環境改善に向けた遮音壁や吸音壁の設置が不要となり、費用対効果の面でも非常に有用な技術である。今後も、本技術の適用拡大を進めていく。

参考文献

- 1) 乾利一, 南秀樹: 第11回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, 電気学会, (2004), 491.
- 2) 近藤修, 藤本隆裕, 木村誠, 南秀樹: 第22回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, 日本機械学会, (2015), 3703.

(2020年10月27日受付)



## 解説

研究会成果報告 - 30

# エリアセンシング手法を用いた 知能化設備異常診断

Intelligent Anomaly Diagnosis for Steel Works by Using Area Sensing

神戸大学  
大学院システム情報学研究科  
教授

玉置 久  
Hisashi Tamaki

JFEスチール(株) スチール研究所  
サイバーフィジカルシステム研究開発部  
部長

飯塚幸理  
Yukinori Iizuka

## 1 はじめに

「適応的エリアセンシング手法を用いた知能化設備異常診断」研究会 I は、日本鉄鋼協会 平成27年度 研究会 I として採択され、製鉄所の異常予兆監視技術の高度化を目的として、2016年3月から2019年2月まで3年間の活動を行った。

日本国内の製鉄所は、建設されてから概ね40年～50年が経過し、老朽化が進んでいる。主要な生産設備については定期的な老朽更新がなされてきているが、原料コンベアや各種配管、クレーンなどの基盤インフラ設備については対象範囲が非常に広く、老朽更新を行うにしても大きな投資と期間を要するため、現状では監視を強化しながら部分的な補修や更新が行われている。原料ヤードを例にとると、その面積は数 $\text{km}^2$ 、コンベアの数100以上におよび、その監視負荷は非常に大きい。このため、監視範囲の拡大・高密度化が喫緊の課題となっている。また、「監視」結果から「異常」やその「予兆」を検出することも必要となる。

このような背景のもと、日本鉄鋼協会「計測・制御・システム工学部会」では、基盤インフラ設備を対象として、効率良くかつ精度良く監視できる技術開発の検討を、計測フォーラム、制御フォーラム、システムフォーラムの3フォーラム合同で進め、本研究会の提案に至ったものである。本研究会では、センシングから異常予兆の検出と判断まで3分野を統合したトータルシステムを念頭に置き、要素技術として、(1) カメラによる微小変位高精細エリアセンシング、(2) 設備老化モデルによる設備の老化と病気の峻別、(3) データ学習による時系列データの変化点検出、を研究開発項目として研究会活動を進めた。以下、本研究会の概要と成果について紹介する。

## 2 研究会の概要

### 2.1 製鉄所の診断ニーズと手法

老朽化した設備の診断においては構造物の減肉や疲労の有無と程度を把握することが重要である。減肉は超音波探傷によって定量的な検査ができるが、本研究会で対象とした基盤インフラ設備はその範囲が非常に広大な領域にわたり、スポット的な手法では検査できる空間と時間は極一部に限定される。このため現状でも目視検査の役割は大きい。領域と頻度を増やすには監視負荷が増大するという課題がある。振動測定やひずみ測定は構造物の損傷を常時監視する手法として期待されているが、既存手法はいずれも点測定である。そこで、本研究会では画像を用いることで振動とひずみを面測定可能な手法に着目し、研究に取り組むこととした。Table1に、監視対象と現状のセンシング技術、研究会で目指す範囲を示す。

センシングの次に必要なことは、センシングデータから異常予兆を検出し、それが異常であると判断することである。従

Table1 Monitoring objects and sensing method.

| Objects        | Conventional method              | Problem          | The research consortium               |
|----------------|----------------------------------|------------------|---------------------------------------|
| Vibration      | Accelerometer                    | Point monitoring | Mirror-drive High-speed Active Vision |
| Motion         | Visual monitoring                | Monitoring load  |                                       |
| Displacement   | Strain gauge                     | Point monitoring | Sampling Moire Method                 |
|                | Laser Doppler Vibrometer         | Point monitoring |                                       |
|                | Digital image correlation method | Responsiveness   |                                       |
| Thinning Crack | Visual monitoring                | Monitoring load  | Estimate by the above method          |
|                | Ultrasonic testing               | Point monitoring |                                       |

来は、しきい値を定め、それを越えた場合に異常と判断するといった方法が一般的である。しかしながら、設備診断において異常が起きることは稀なため、未知の異常を検出しなければならず、しきい値を定めることが難しい。このためのアプローチとして、本研究会ではモデルベースでのアプローチとデータ学習によるアプローチの2手法で取り組むこととした。

Fig.1に、本研究会で目指すトータルシステムの概念を示す。画像による振動・変位のエリアセンシングデータを取得し、モデルベースアプローチおよびデータ学習アプローチで未知の異常を検出する。本研究会ではこのようなトータルシステムを念頭に各要素技術の研究を実施した。

2.2 研究会の体制と活動

Table2に、研究会の体制を示す。計測・制御・システムの3グループ体制で各要素技術の研究を進め、全体研究会で相互の議論を行った。主査は玉置久（神戸大学）、代表幹事は佐々木純（新日鐵住金、～2016年9月）、飯塚幸理（JFE スチール、2016年10月～）、幹事（副）中川繁正（新日鐵住金、2016年10月～）である。

全体研究会は製鉄所の見学も含め、計14回実施し、鉄鋼協会の講演大会において4回の討論会を開催した<sup>1-20)</sup>。研究成果は、鉄と鋼の特集号（Vol. 106（2020）, No. 2）<sup>21-24)</sup>で公開されている。

3 カメラによる微小変位高精細エリアセンシング

振動モニタリングは構造物の損傷を検知する手段の一つであり、従来から加速度センサなど接触型のセンサが適用されている。しかしながら、接触型のセンサで全体の計測を行うためには複数の場所にセンサを設置する必要があり、設置コストや工事期間がかかる問題があった。遠隔から測定する手法としてレーザー振動計があるが、点測定の問題がある。こ

れに対し、近年は動画解析による振動計測手法が進展しており、非接触での面測定の研究が進展している。本研究会ではこの手法に着目し、特にサブmmオーダーの微小変位、数10Hzオーダーの振動の遠隔エリアセンシングの実現を目指し、「ミラー駆動型高速アクティブビジョン」と「サンプリングモアレ法による時系列変位計測」の研究を進めた。

3.1 カメラによる微小変位高精細エリアセンシング<sup>21)</sup>

Fig.2に、「ミラー駆動型高速アクティブビジョン」の測定概念を示す。高速USBカメラ（1440×1080画素、273fps）、望遠レンズ（150-600mm、F5-6.3）、2自由度ガルバノミラー、制御用PCから構成される。ガルバノミラーは望遠レンズの前に配置され、制御用PCからの電圧指令によりパン軸・チルト軸に対応して角度制御可能なミラーでカメラ視点を最大40度変えることができる。切り替え時間は10度以内であれば、1ms以内である。

撮影と処理の流れはFig.2に示す通りである。(1) まず、ミラー操作によりパノラマ画像を生成する。(2) 次に振動計測を行うべき対象を定め、その部分の動画撮影を行うパン・チ

Table 2 Research item and members.

| グループ | 研究項目                  | 委員                                                                             |
|------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 計測   | カメラによる微小変位高精細エリアセンシング | 石井抱（広島大）<br>藤垣元治（福井大）<br>松田浩（長崎大）<br>鳥越一平（熊本大）<br>伊藤友彦（JFE スチール）<br>岡本陽（神戸製鋼所） |
| 制御   | 設備老化モデルによる設備の老化と病気の峻別 | 浅井徹（名古屋大）<br>金子修（電通大）<br>北村章（鳥取大）<br>津田和呂（JFE スチール）<br>岸真友（新日鐵住金）              |
| システム | データ学習による時系列データの変化点検出  | 倉橋節也（筑波大）<br>小野功（東工大）<br>玉置久（神戸大）<br>森田彰（新日鐵住金）                                |

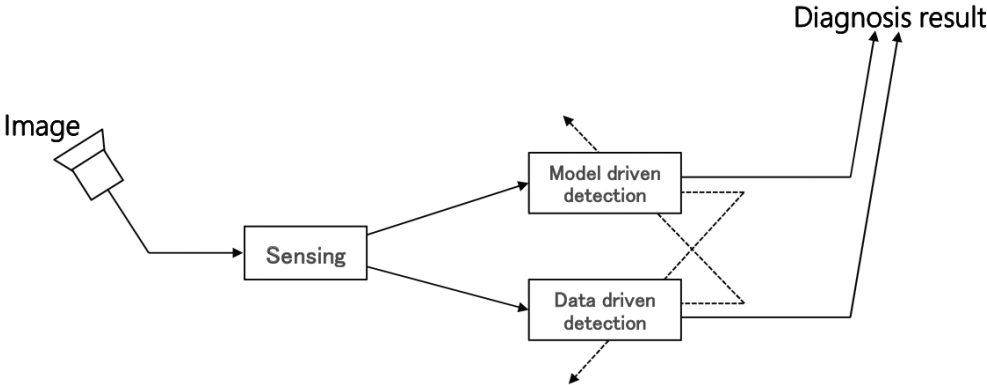


Fig.1 Concept of the intelligent anomaly diagnosis system.



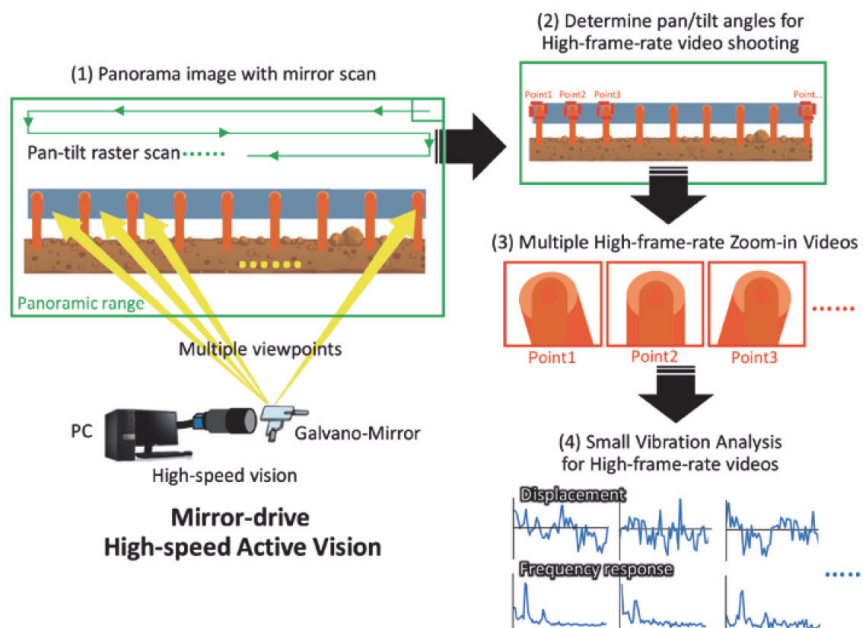


Fig.2 Concept of Mirror-drive High-speed Active Vision.

ルト角を $N$ 個設定する。(3)  $N$ 個の位置を対象に、高フレームレートで動画を撮影する。(4) 各動画像にて、画像相関法 (DIC) などのアルゴリズムにより微小変位を求める。さらにその変位に対してFFTによる周波数解析を行う。

この手法を用いて、製鉄所内の稼働中ベルトコンベアに対して振動測定を行った。測定装置を、制御用PCも含めて可動ワゴンの机面に固定し、ベルトコンベア正面から5m離れた位置に設置した。望遠レンズの焦点距離を150mmとした。5m先において、 $16.4 \times 12.3\text{cm}$ の範囲に対する解像度が $0.114\text{mm}/\text{画素}$ となる ( $1440 \times 1080$ 画素)。時間間隔 $6.25\text{ms}$ 、走査ステップ角 $\Delta \theta_{\text{pan}} = 1.88$ 度、 $\Delta \theta_{\text{tilt}} = 1.41$ 度のミラー走査により、水平22視点 $\times$ 垂直29視点の計638枚の画像を撮影し、 $31,680 \times 31,320$ 画素のパノラマ画像に合成した。Fig.3 (a) にパノラマ画像を示す。さらに、この画像に含まれている5本のローラー支柱 (No.1, No.2, No.3, No.4, No.5) 付近を高フレームレート撮影すべき領域として指定し、160fpsで動画撮影を行った。一例として、No.1支柱付近の撮影例をFig.3 (b) に示している。

さらに、解析結果の一例として、Fig.4に、No.1支柱付近に対する結果を示す。水平方向および垂直方向いずれも振幅 $0.05\text{mm}$ 前後の振動が観測され、ピーク周波数が $10\text{Hz}$ および $26\text{Hz}$ 前後に観測されている。このうち、 $26\text{Hz}$ のピークは稼働ワゴンに設置された制御用PCからの振動であることがその後のラボ実験で確認されており、 $10\text{Hz}$ のピークがコンベア支柱の振動を捉えているものと考えられる。この他にコンベアベルトの位置や厚みなどの動的挙動の計測にも成功している。



(a) Panoramic image and selected positions to be observed

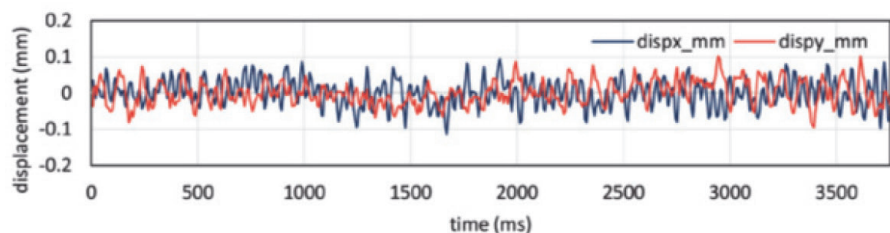


(b) Captured high-frame-rate image to be observed

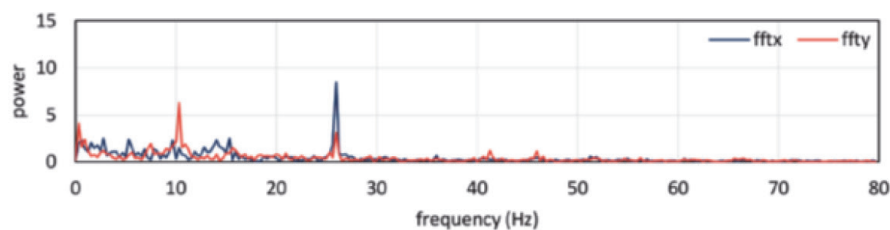
Fig.3 Panoramic image and high-frame-rate image.

### 3.2 サンプリングモアレ法による時系列変位計測<sup>22)</sup>

サンプリングモアレ法は、2次元格子の画像から $x$ 方向と $y$ 方向の位相分布を求める手法である。Fig.5に画像処理の流れを示す。(a) まず二次元格子画像を撮影する。(b)・(c) 次



(a) Pillar displacements in horizontal and vertical direction



(b) Frequency responses of pillar displacements

Fig.4 The results of a field test.

に、 $x$ 方向、 $y$ 方向それぞれ一方に平滑化を行った画像を生成する。(d)・(e) 格子の画素数に近い整数 $N$ で間引き処理を行う。この際、間引く位置を1画素ずつ変化させることによって、 $N$ 枚のモアレ画像を得る。(f)・(g) これらに対し、位相シフト法を適用し、位相分布を求める。求めた位相差から、以下の式により変位が求められる。

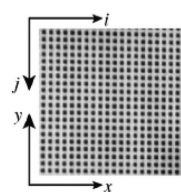
$$d_x = \frac{p_x}{2\pi} \Delta\phi, d_y = \frac{p_y}{2\pi} \Delta\phi \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $d_x$ ,  $d_y$ は変位、 $p_x$ ,  $p_y$ は格子ピッチ、 $\phi_x$ ,  $\phi_y$ は位相差である。

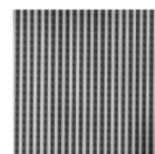
以上の処理をリアルタイムに実行可能とするのが、サンプリングモアレカメラである。このサンプリングモアレカメラは、CMOS撮像素子、FPGA (Field Programmable Gate Array)、メモリー、USBインターフェース、電源ユニットで構成され、本研究で用いたものは、2048×2048pixelsの最大サイズのとき14fps、128×128pixelsの小サイズのとき230fpsの速度で位相差分布をリアルタイムに出力することができるものである。

サンプリングモアレ法で得られる変位の分布を微分することによって、ひずみや回転角を得ることができる。カメラの向きや収差による影響を考慮し、 $i$ 方向の角度 $\alpha_i$ と $j$ 方向の角度 $\alpha_j$ をそれぞれ変位 $d_y$ の $x$ による偏微分、 $d_x$ の $y$ による偏微分として求め、それらの平均値として回転角が求められる。

Fig.6に、製鉄所内の稼働中ベルトコンベアに対して測定を行った際の配置を示す。対象としたベルトコンベアは、前節3.1で述べたものと同じである。2本の支柱に対してピッチ2.0mmの二次元格子を貼り付け、約5m離れた位置からそれ



(a) Original 2-D grating image



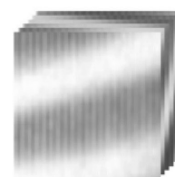
(b) Grating image obtained after smoothing process in the y-direction



(c) Grating image obtained after smoothing process for the x-direction



(d) Phase-shifted sampling moire images produced from (c)



(e) Phase-shifted sampling moire images produced from (d)



(f) x-directional moire phase distribution



(g) y-directional moire phase distribution

Fig.5 Phase analysis for 2-D grating with sampling moire method.

ぞれの支柱を撮影するようにサンプリングモアレカメラを左右2台設置した。レンズの焦点距離400mm、露光時間1ms、

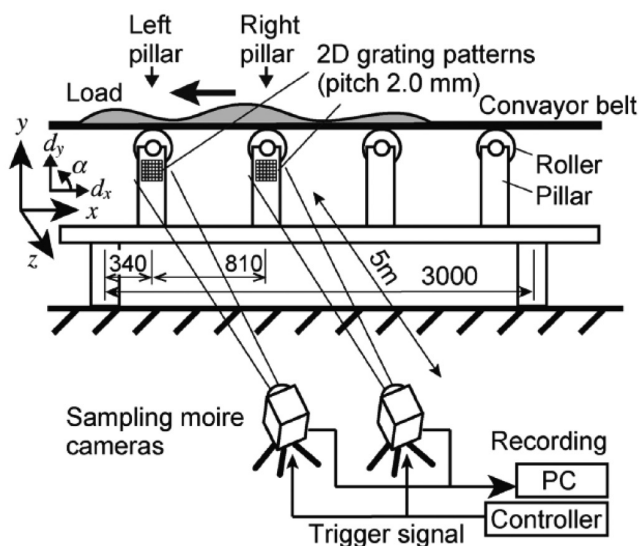


Fig.6 Setup for a field test.

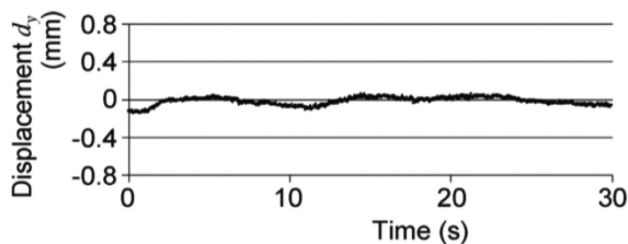
フレームレート 80fps で撮影を行ない、撮影された画像のうち、領域サイズ 416×416 画素を抽出して変位の解析を行なった。

Fig.7 に、測定例としてコンベアの荷重が連続的な場合の支柱 1 の  $y$  変位およびその周波数解析結果を示す。0.1mm 程度の振幅変化があり、「ミラー駆動型高速アクティブビジョン」の測定結果でも見られた 10Hz のピークが観察された。荷重が断続的な場合は 0.4mm 程度の変位があり、Fig.8 に示されるように、左右 2 本の支柱がわずかに回転していることが観察された。両者の挙動の違いは梁の位置から支柱までの距離によって説明できるものである。

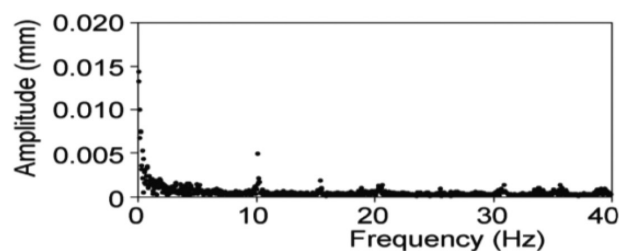
## 4 設備老化モデルによる設備の老化と病気の峻別<sup>23)</sup>

センシングデータから異常を検出する方法に関し、本研究会ではモデルベースによるアプローチとデータ学習によるアプローチで研究を進めた。本章では前者のモデルベースアプローチについて述べる。

データから異常を検出する方法として、何らかのしきい値を設けて観測値がそれを越えるかどうかの判定を行う手法が一般的である。あるいは、カルマンフィルターの出力における事前推定値と観測値との間の差の急激な変化などを検出する方法もある。これらの手法で観測値の変化に敏感に反応するように検出システムを設計すると、設備の経年劣化などの事前に想定される変化（老化）に対して頻繁にアラームを発生させることになる。一方、変化に対して鈍感になるように設計すると、本当に検出したい異常（病気）を見逃すリス

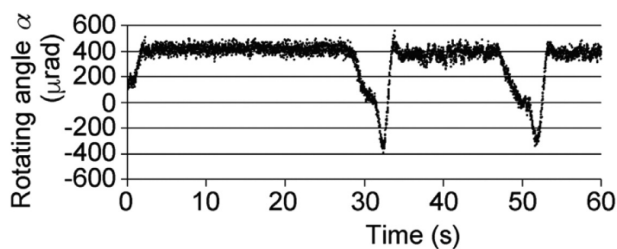


(a) Measured displacement for the y direction

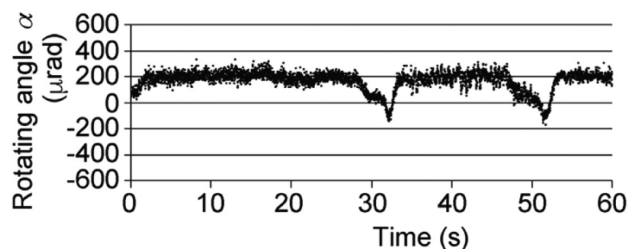


(b) Frequency analysis of displacement for the y direction

Fig.7 The result of a field test.



(a) Left Pillar



(b) Right Pillar

Fig.8 Measured rotating angles while two loads were carried intermittently.

クが高くなる。そこで、本研究では、事前に想定される変化をモデルに組み込むことで、観測値から想定外の変化の存在を検出する手法に関する研究を行った。設備の診断においては、対象が動的システムとなるので、任意の時間区間のデータを用いて診断する際には初期状態の推定も必要となる。そこで、初期状態・パラメータ・入力を同時に推定する手法が提案されている。

Fig.9 に、本検出法の枠組みを示す。事前に想定される変化も含め、対象となる設備のモデルを構築する。実際の設備か



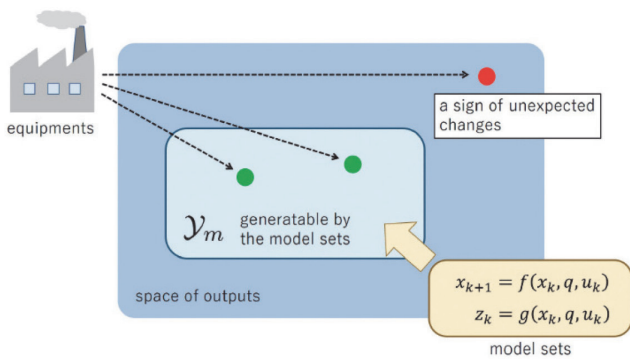


Fig.9 Framework of the diagnosis using model sets.

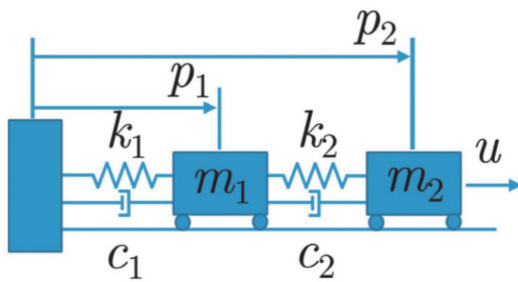


Fig.10 Spring-mass-damper system used as the numerical example.

ら得られる出力が想定領域  $\mathcal{Y}_m$  に属していれば設備は正常であり、そこから外れていれば想定していない変化が生じていると判断される。この枠組みを実現するため、初期状態・パラメータ・入力を推定対象として、モデルの出力誤差の最小化問題を考える。具体的には、出力データ  $y_r$  とモデル出力  $y$  との間の誤差：

$$e = \{e[0], \dots, e[N-1]\} \quad (2)$$

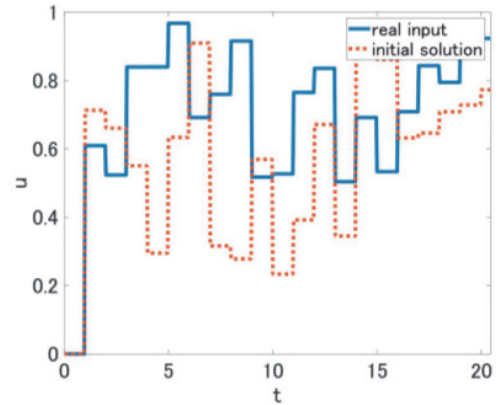
$$e[k] = y[k] - y_r[k] \quad (k = 0, \dots, N-1) \quad (3)$$

の大きさを以下の評価関数  $J$

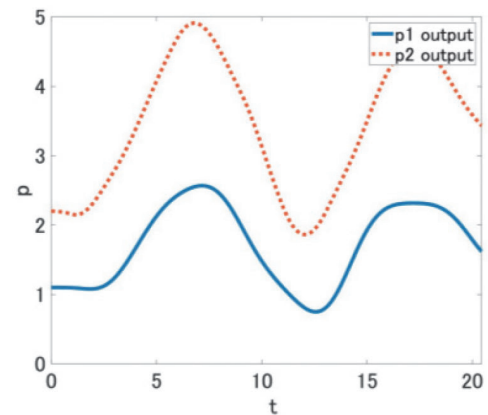
$$J(x_e, q_e, u_e) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \|e[k]\|^2 \quad (4)$$

で評価し、状態変数  $x_e$ 、パラメータ  $q_e$ 、入力  $u_e$  をガウスニュートン法に基づいて求める方法を提案している。

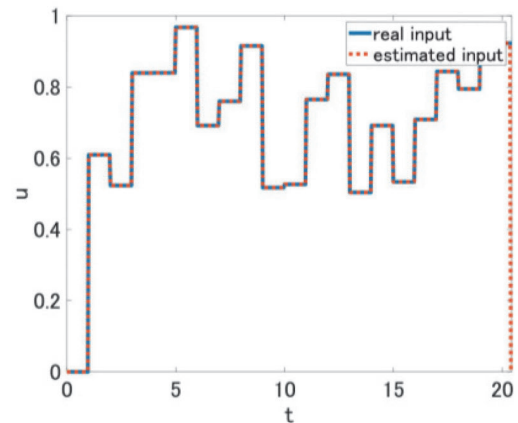
本手法の有効性を検証するため、Fig.10に示す2慣性系のバネ定数推定の数値計算を行った。Fig.11 (a) の実線で示される外乱を入力し、その出力 (Fig.11 (b)) から、上記の手法で推定を行った。このときの入力の推定結果がFig.11 (c) の



(a) True input for the system and the initial input for optimization



(b) Output data obtained from the system



(c) Estimated input given by the optimization

Fig.11 The result of a numerical simulation.

ようになっており、与えた外乱と良く一致していることがわかる。ここで、出力データを生成する際のバネの自然長とバネ定数を変化させて評価関数  $J$  を求めた結果を、Fig.12 (下側の曲面) に示す。この結果から、バネ定数  $k_1$  (ここでは変化することが想定されるパラメータ：老化) の変化に対して  $J$  が変化しないのに対し、自然長  $l_{01}$  (異常として変化：病気) に対しては大きく変化している。このことから、評価関数  $J$  を観察することによって、想定外の変化が生じていることの

検出が可能であることがわかった。

本手法は、出力データにノイズが乗る場合についても考察され、誤差 $\epsilon$ にローパスフィルタを適用するとともに、入力に帯域制限をかける推定方法が示された。Fig.12 (上側の曲面) に示されるように、ノイズがない場合よりも推定精度が鈍るものの、自然長に対して評価関数値が増大しており、変化を検出できていることが確認できた。

## 5 データ学習による時系列データの変化点検出<sup>24)</sup>

本章では、データ学習アプローチによる異常検出手法について述べる。

時系列データから異常検知を行う計算手法は種々の例があり、ガウス混合分布などを用いて外れ値を検出する方法や、異常変数の選択手法に対応したマハラノビス=タグチ法、時系列上の急激な変化を観測する変化点検出などが一般的に適用されている。また、隠れマルコフモデル (Hidden Markov Model ; HMM) を利用した異常検知技術も発展してきており、正常・異常状態の背後にある真の状態を推定することができる点で優れているが、周波数帯域や分布モデルなどのハイパーパラメータの最適化に課題があった。そこで、本研究会では、隠れマルコフモデルを利用した異常検知技術について、新たなモデル評価基準の提案と実データでの検証を行った。

隠れマルコフモデルは、時系列データの特徴パターンをモデル化する手法の一つである。このモデルの基盤となっているマルコフ連鎖モデルは、未来の状態が現在の状態の値だけで決定される独立なものとするモデルだが、現在の状態が直接観測可能であるという前提がある。一方、隠れマルコフモデルでは状態は直接観測される必要はなく、確率事象だけ

が観測されることをモデル化している。式 (5) およびFig.13に、隠れマルコフモデルの表現および時系列データを対象とした一般的な構成をそれぞれ示す。

$$p(S|\pi, A) = p(s_1|\pi) \prod_{n=2}^N p(s_n|s_{n-1}, A) \quad (5)$$

ここで、SおよびAは、それぞれ状態変数 (ベクトル) および状態遷移確率行列である。また、 $\pi$  は初期状態 $S_1$ を定めるパラメータである。

コンベア設備の振動データなどの場合、振動発生源や固有振動数によって観測される周波数が異なってくることが予想されるが、事前にどの周波数領域が怪しいのかを特定することは困難である。そこで、本研究では長時間継続する時系列データを連続的に周波数解析ができるウェーブレット解析手法 (ウェーブレット変換) を適用し、それぞれの解像度波形に対して隠れマルコフモデルを適用することによって、未知の異常データの検出を行なう方法を提案している。その際、多重解像度解析の解像度レベルや隠れマルコフモデルに用いる分布の形状と分布の数など、多くのハイパーパラメータが存在するため、以下の式 (6) を評価関数として、変数・ハイパーパラメータの推定を行うようにしている。

$$eval = \max_{i,j \in S, i \neq j} \frac{p(i,j)}{p(i,i)} \quad (6)$$

ここで、Sは状態の集合、 $p(i,j)$  は状態 $i$ から $j$ への遷移確率である。

本手法の有効性を確認するため、製鉄所のコンベアの振動を「サンプリングモアレカメラ」で測定したデータを用いた (Fig.14)。Fig.14の時系列データにおいて、前半は在荷、後半は空荷で、上から変位、速度、加速度である。このデータから

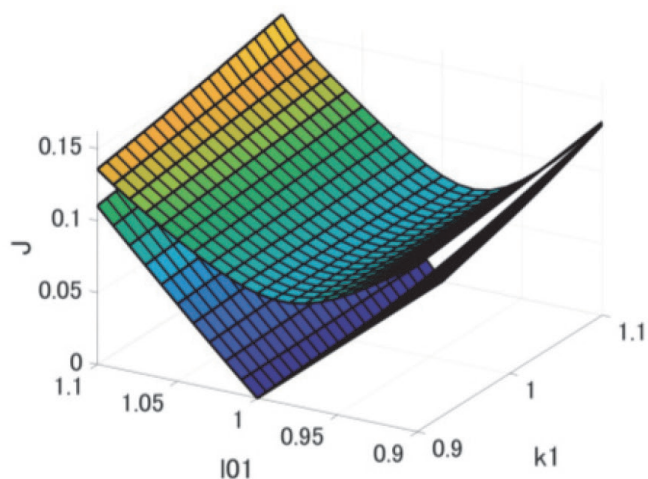


Fig.12 Values of the objective function for each  $k_1$  and  $l_{01}$ .

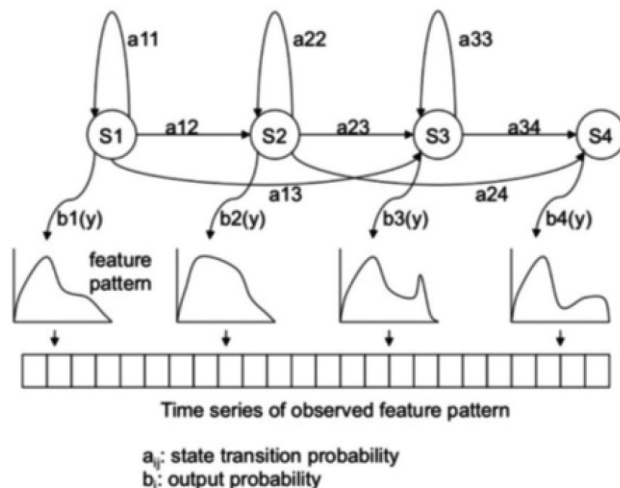


Fig.13 Hidden Markov Model.

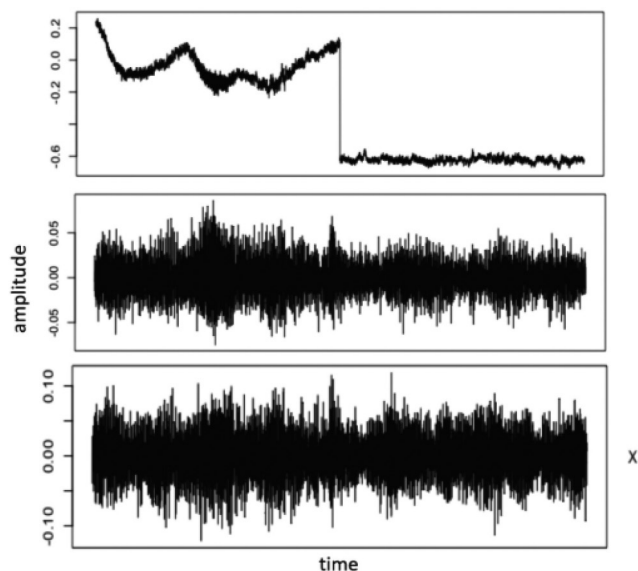


Fig.14 Vibration data (load/empty), displacement (above), velocity (middle), acceleration (lower).

隠れマルコフモデルの状態遷移図を求めたものをFig.15に示す。変位と加速度データについては、在荷の前半と空荷の後半の状態をほぼ正確に推定することができていることがわかる。

この結果は、事前に2状態が存在するという情報を得た上でのモデル化であるが、実際には状態が分からない中で監視を行う必要がある。このような状況に対して、正常であることが分かっている時系列データから作成したモデルと、未知の時系列データから作成したモデルとの状態遷移確率の違いを見ることによって、未知の正常ではない状態を発見することができることも示された。

## 6 おわりに

「適応的エリアセンシング手法を用いた知能化設備異常診断」研究会の概要と成果について述べた。エリアセンシングについては、「ミラー駆動型高速アクティブビジョン」、「サンプリングモアレ法による時系列変位計測」によって、サブmmオーダー、10Hz台の微小振動・変位を5m離れた遠隔から検出できることが確認された。センシングデータから異常検出する手法については、モデルベースアプローチとデータ学習によるアプローチの2手法で取り組み、「想定される変化を含むモデルの初期状態・入力・パラメータを同時に推定する手法」により老化と病気を峻別できる可能性を確認し、「ウェーブレット変換を適用した隠れマルコフモデル」により時系列データから未知の異常データを検出できる見込みを得た。

今後、製鉄所での実用技術としていくために、エリアセンシング技術については小型可搬な装置の開発と揺らぎなどの

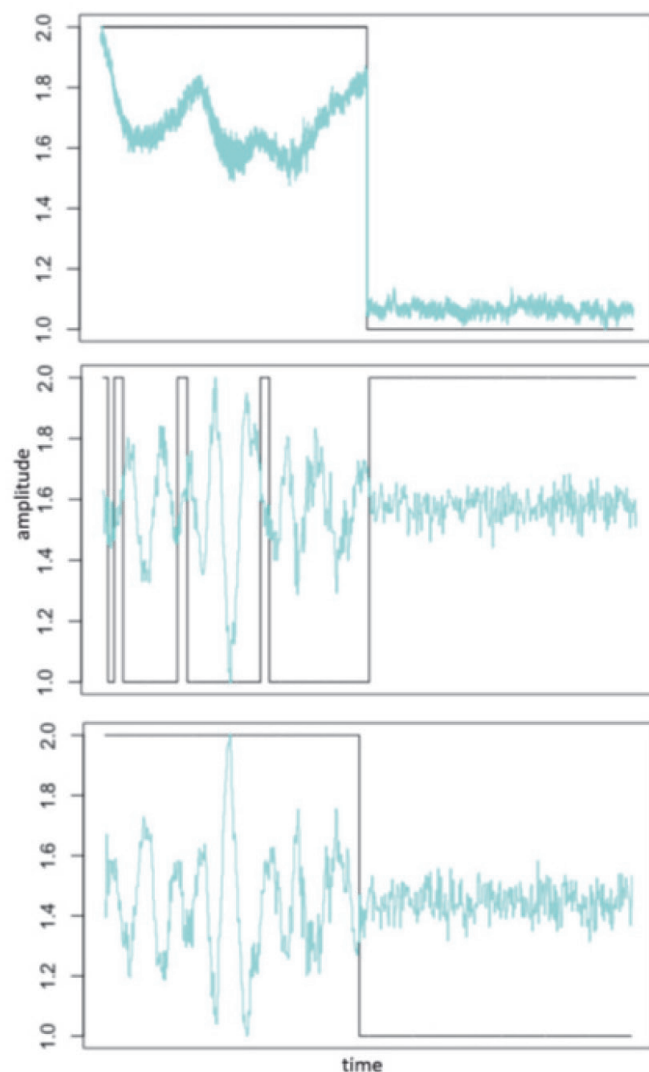


Fig.15 The result of HMM analysis. displacement (above), velocity (middle), acceleration (lower).

外乱に対する対策、振動データから構造損傷を検出するための3D形状データに基づくモデルベースアプローチおよび／あるいはデータベースアプローチによる診断技術の開発、さらにはトータルシステムの構築が課題として挙げられる。これらの課題に取り組むべく、日本鉄鋼協会「制御技術部会」からの推薦により研究会Ⅱ「エリアセンシング技術による製鉄所設備診断（主査：石井抱・広島大、副主査：伊藤友彦・JFEスチール（株））」が2019年度から3年間の計画でスタートしている<sup>25)</sup>。

このような技術開発を通して製鉄所全域スマートモニタリングが実現されれば、現行の目視点検あるいは部分的なセンシングから、より広範囲で高密度な診断ができるようになる。原料コンベアや各種配管、屋外のクレーン、煙突などの老朽化部位を、足場を組むことなく遠隔から診断できるようになれば、診断コストが大幅に削減されるとともに、より多



くの箇所の診断が可能になる。また高所での作業を削減できれば安全面でのメリットも得られる。さらに基盤インフラ設備だけでなく、圧延機やテーブルローラなどの生産設備への適用も考えられ、今後の進展が期待される。

最後に、本研究会の活動にあたって、計測・制御・システム工学部会をはじめ制御技術部会・設備技術部会など多くの技術者・研究者の方々から、また鉄鋼協会事務局の皆様方から多大なご支援とご指導を頂きましたことお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 玉置久：CAMP-ISIJ, 29 (2016), 466, CD-ROM.
- 2) 石井抱：CAMP-ISIJ, 29 (2016), 467, CD-ROM.
- 3) 金子修：CAMP-ISIJ, 29 (2016), 471, CD-ROM.
- 4) 浅井徹：CAMP-ISIJ, 29 (2016), 473, CD-ROM.
- 5) 小野功, 倉橋節也：CAMP-ISIJ, 29 (2016), 474, CD-ROM.
- 6) 玉置久：CAMP-ISIJ, 30 (2017), 470, CD-ROM.
- 7) 松田浩, 山口浩平, 西川貴文, 木本啓介, 河村太紀, 西行健：CAMP-ISIJ, 30 (2017), 471, CD-ROM.
- 8) 浅井徹：CAMP-ISIJ, 30 (2017), 475, CD-ROM.
- 9) 倉橋節也, 小野功, 戸田浩司：CAMP-ISIJ, 30 (2017), 477, CD-ROM.
- 10) 藤垣元治, 中嶋友朗：CAMP-ISIJ, 30 (2017), 481, CD-ROM.
- 11) 玉置久：CAMP-ISIJ, 31 (2018), 421, CD-ROM.
- 12) 藤垣元治, 中嶋友朗：CAMP-ISIJ, 31 (2018), 422, CD-ROM.
- 13) 石井抱, 唐正密, 島崎航平, 姜明俊, 高木健：CAMP-ISIJ, 31 (2018), 426, CD-ROM.
- 14) 浅井徹：CAMP-ISIJ, 31 (2018), 429, CD-ROM.
- 15) 小野功, 倉橋節也：CAMP-ISIJ, 31 (2018), 431, CD-ROM.
- 16) 玉置久：CAMP-ISIJ, 32 (2019), 412, CD-ROM.
- 17) 石井抱, 唐正密, 島崎航平, 姜明俊, 高木健：CAMP-ISIJ, 32 (2019), 413, CD-ROM.
- 18) 藤垣元治, 中嶋友朗：CAMP-ISIJ, 32 (2019), 415, CD-ROM.
- 19) 浅井徹：CAMP-ISIJ, 32 (2019), 418, CD-ROM.
- 20) 小野功, 倉橋節也：CAMP-ISIJ, 32 (2019), 420, CD-ROM.
- 21) 唐正密, 島崎航平, 姜明俊, 高木健, 石井抱, 古賀掲維, 松田浩:鉄と鋼, 106 (2020) 2, 61, <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2019-059>.
- 22) 藤垣元治, 中嶋友朗：鉄と鋼, 106 (2020) 2, 71, <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2019-081>.
- 23) 浅井徹, 山川雅文, 奥田真由, 津田和呂, 金子修, 岸真友, 東俊一, 有泉亮：鉄と鋼, 106 (2020) 2, 80, <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2019-061>.
- 24) 倉橋節也, 小野功：鉄と鋼, 106 (2020) 2, 91, <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2019-066>.
- 25) 石井抱：CAMP-ISIJ, 33 (2020), 535, CD-ROM.

(2021年2月12日受付)

## 会員へのお知らせ目次

|                                                |      |
|------------------------------------------------|------|
| 行事等予定                                          | 224頁 |
| 総合                                             |      |
| 第182回秋季講演大会 講演募集案内                             | 226頁 |
| 論文へのCCライセンス付与と本会への転載許可依頼手続きについて                | 228頁 |
| イベント情報                                         |      |
| 鉄鋼工学セミナー「専科」 2021年度受講のご案内                      | 229頁 |
| 第241回西山記念技術講座開催のお知らせ「先端鉄鋼製精錬プロセス技術における基礎と実践研究」 | 230頁 |
| 人材募集案内                                         | 232頁 |
| 次号目次案内                                         | 233頁 |
| 会員欄(入会者・死亡退会者一覧)                               | 235頁 |

## 行事等予定

太字は本会主催の行事。国際会議で○は協会にてサーキュラー等を入手できます。  
行事等の詳細は、本会ホームページ、★印はイベントカレンダーリンク先URLをご参照ください。  
他団体主催の行事は中止や延期になっていることもありますので、主催者等にご確認願います。

|                | 行事(開催地/詳細掲載号および頁)                                                                                                                                                                             | 主催者               | 問合せ・連絡先                                                                                                                                                    |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>2021年4月</b> |                                                                                                                                                                                               |                   |                                                                                                                                                            |
| 9日             | 第29回日向方斉メモリアル国際会議助成申請締切(3号158頁)                                                                                                                                                               | 日本鉄鋼協会            | 学術企画グループ Tel. 03-3669-5932                                                                                                                                 |
| 30日            | [ISIJ International]第61巻(2021年)第12号特集号「Development and Comprehension of Novel Experimental Technology for High Temperature Processing (高温プロセスのための新規実験技術の開発と解釈)」再募集(発刊延期・原稿締切延長)原稿募集締切(3号159頁) | 日本鉄鋼協会            | 九州大学 大野光一郎<br>Tel. 092-802-2938<br>ohno.ko-ichiro.084@m.kyushu-u.ac.jp<br>Korea University Joonho Lee<br>Tel.82-2-3290-4051, 3287<br>joonholee@korea.ac.kr |
| 30日            | [ISIJ International] 第62巻(2022年) 第2号 特集号「Lamellar structure in structural metallic material and its mechanical property (構造用金属材料における層状組織とその力学特性)」原稿募集締切(10号655頁)                              | 日本鉄鋼協会            | 国立研究開発法人物質・材料研究機構<br>木村勇次 Tel. 029-859-2123<br>kimura.yuuji@nims.go.jp                                                                                     |
| <b>2021年5月</b> |                                                                                                                                                                                               |                   |                                                                                                                                                            |
| 6日             | 第182回秋季講演大会討論会・国際セッション申込締切(本号226頁)                                                                                                                                                            | 日本鉄鋼協会            | 学術企画グループ Tel. 03-3669-5932<br>academic@isij.or.jp                                                                                                          |
| 15, 16日        | ★第140回春期大会《オンライン開催》                                                                                                                                                                           | 軽金属学会             | Tel. 03-3538-0232 jilm1951@jilm.or.jp                                                                                                                      |
| 19~21日         | ★第33回「電磁気関連のダイナミクス」シンポジウム(SEAD33)(群馬)                                                                                                                                                         | 電気学会              | Tel. 042-628-4719 sead33@ml.gunma-u.ac.jp                                                                                                                  |
| 20日            | 第182回秋季講演大会一般講演・予告セッション・共同セッション・学生ポスターセッション申込締切(本号226頁)                                                                                                                                       | 日本鉄鋼協会            | 学術企画グループ Tel. 03-3669-5932<br>academic@isij.or.jp                                                                                                          |
| 21, 28日        | ★第6回マルチスケール材料力学シンポジウム《オンライン開催》                                                                                                                                                                | 日本材料学会            | Tel. 075-761-5321 jimu@office.jsms.jp                                                                                                                      |
| 25~27日         | ★第58回 日本伝熱シンポジウム《オンライン開催》                                                                                                                                                                     | 日本伝熱学会            | Tel. 03-3259-7919 symp2021@htsj-conf.org                                                                                                                   |
| 26~28日         | ★第26回計算工学講演会(福岡)                                                                                                                                                                              | 日本計算工学会           | Tel. 03-3868-8957 office@jcses.org                                                                                                                         |
| 26~28日         | ★自動車技術展 人くるまのテクノロジー展2021 横浜                                                                                                                                                                   | 自動車技術会            | Tel. 03-3262-8211 tenjikai@jsae.or.jp                                                                                                                      |
| 26日~7月30日      | ★自動車技術展 人くるまのテクノロジー展2021 Web《オンライン開催》                                                                                                                                                         | 自動車技術会            | Tel. 03-3262-8211 tenjikai@jsae.or.jp                                                                                                                      |
| <b>2021年6月</b> |                                                                                                                                                                                               |                   |                                                                                                                                                            |
| 3~5日           | ★2021年度春季講演会《オンライン開催》                                                                                                                                                                         | 日本塑性加工学会          | Tel. 03-3435-8301 fuchibe@jstp.or.jp                                                                                                                       |
| 4日             | ★混相流レクチャーシリーズ46 情報科学の混相流への適用(東京)                                                                                                                                                              | 日本混相流学会           | Tel. 06-6466-1588 office@jsmf.gr.jp                                                                                                                        |
| 14~16日         | ★第77回学術講演会(茨城)                                                                                                                                                                                | 日本顕微鏡学会           | Tel. 03-6457-5156<br>jsm-post@microscopy.or.jp                                                                                                             |
| 14~18日         | ★5th ESTAD(European Steel Technology and Application Days) The Brewery Conference Centre Stockholm, Sweden                                                                                    | Jernkontoret      | Bo Larsson Tel. +46 18 67 10 34<br>estad2021@akademikonferens.se                                                                                           |
| 22日            | ★センシング技術応用セミナー(大阪)                                                                                                                                                                            | センシング技術応用研究会      | Tel. 0725-51-2534 sstj@tantai.tri-osaka.jp                                                                                                                 |
| 23~25日         | ★第8回 関西 高機能金属展(大阪)                                                                                                                                                                            | リードエグジビションジャパン(株) | 弟子丸英樹 Tel. 03-3349-8568<br>deshimaru@reedexpo.co.jp                                                                                                        |
| 25~27日         | ★スケジューリング国際・シンポジウム2021《オンライン開催》                                                                                                                                                               | スケジューリング学会        | Tel. 052-832-3295 office@scheduling.jp                                                                                                                     |

|                 | 行事(開催地/詳細掲載号および頁)                                                                                                                                                               | 主催者                     | 問合せ・連絡先                                                                      |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 30日             | 第241回西山記念技術講座「先端鉄鋼製精錬プロセス技術における基礎と実践研究」(本号230頁)《オンライン開催》                                                                                                                        | 日本鉄鋼協会                  | 育成グループ Tel. 03-3669-5933                                                     |
| 30日～7月2日        | ★自動車技術展 人くるまのテクノロジー展2021 名古屋                                                                                                                                                    | 自動車技術会                  | Tel. 03-3262-8211 tenjikai@jsae.or.jp                                        |
| <b>2021年7月</b>  |                                                                                                                                                                                 |                         |                                                                              |
| 7～9日            | ★第58回アイソトープ・放射線研究発表会《オンライン開催》                                                                                                                                                   | 日本アイソトープ協会              | Tel. 03-5395-8081 happyokai@jrias.or.jp                                      |
| 8, 9日           | ★第41回防錆防食技術発表大会(東京)                                                                                                                                                             | 日本防錆技術協会                | Tel. 03-3434-0451 jacc@mbf.sphere.ne.jp                                      |
| 8, 9日           | ★第31回環境工学総合シンポジウム2021《オンライン開催》                                                                                                                                                  | 日本機械学会                  | Tel. 03-5360-3505 kankyosympo2021@jsme.or.jp                                 |
| 14～16日          | ★メンテナンス・レジリエンスOSAKA2021(大阪)                                                                                                                                                     | 日本能率協会                  | 根本・小坂橋<br>Tel. 03-3434-1988 mente@jma.or.jp                                  |
| 18～23日          | 第47回鉄鋼工学セミナー(栃木 3号161頁 申込締切4月27日)                                                                                                                                               | 日本鉄鋼協会                  | 育成グループ Tel. 03-3669-5933                                                     |
| <b>2021年8月</b>  |                                                                                                                                                                                 |                         |                                                                              |
| 4, 5日           | ★第30回日本エネルギー学会大会(富山)                                                                                                                                                            | 日本エネルギー学会               | Tel. 03-3834-6456 taikai30sanka@jie.or.jp                                    |
| 22～24日          | ★混相流シンポジウム2021(大阪)                                                                                                                                                              | 日本混相流学会                 | Tel. 06-6466-1588 office@jsmf.gr.jp                                          |
| 31日             | 「ISIJ International」第62巻(2022年)第5号 特集号「Frontier in characterization of materials and processes for steel manufacturing (鉄鋼材料に資するキャラクタリゼーションとプロセス解析のフロンティア)」原稿募集締切(1号46頁)        | 日本鉄鋼協会                  | 千葉大学 藤浪真紀<br>Tel. 043-290-3503<br>fujinami@faculty.chiba-u.jp                |
| <b>2021年9月</b>  |                                                                                                                                                                                 |                         |                                                                              |
| 1～3日            | ★第34回秋季シンポジウム 耐火物テクノロジーセッション(山梨)                                                                                                                                                | 日本セラミックス協会              | 耐火物技術協会<br>Tel. 03-3572-0705 hosoda@tarj.org                                 |
| 2～4日            | 第182回秋季講演大会(愛知 本号226頁)                                                                                                                                                          | 日本鉄鋼協会                  | 学術企画グループ Tel. 03-3669-6932<br>academic@isij.or.jp                            |
| 8～10日           | ★2021年度工学教育研究講演会(長野)                                                                                                                                                            | 日本工学教育協会、<br>北陸信越工学教育協会 | 日本工学教育協会 川上理英<br>Tel. 03-5442-1021 kawakami@jsee.or.jp                       |
| <b>2021年10月</b> |                                                                                                                                                                                 |                         |                                                                              |
| 11～14日          | ★第8回アジア粉体工学シンポジウム(The 8th Asian Particle Technology Symposium)(大阪)                                                                                                              | アジア粉体技術シンポジウム国際組織委員会    | Tel. 072-254-9305<br>apt2021@chemeng.osakafu-u.ac.jp                         |
| <b>2021年11月</b> |                                                                                                                                                                                 |                         |                                                                              |
| 3～6日            | ★The 16th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (16th ISEM '21-Hanoi, Vietnam)                                                   | 日本実験力学学会                | Tel. 025-368-9310<br>office-jsem@clg.niigata-u.ac.jp                         |
| 15～18日          | ISSS-2021 The 6th International Symposium on Steel Science(京都)                                                                                                                  | 日本鉄鋼協会                  | 豊橋技術科学大学 戸高義一<br>todaka@me.tut.ac.jp                                         |
| 25日             | 鉄鋼工学セミナー「材質制御専科」(東京 本号229頁 申込締切10月22日)                                                                                                                                          | 日本鉄鋼協会                  | 日本製鉄(株) 明石透<br>Tel. 070-3914-4741<br>akashi.m5b.tohru@jp.nipponsteel.com     |
| 28日～12月2日       | ★The 9th International Symposium on Surface Science (ISSS-9)(香川)                                                                                                                | 日本表面真空学会                | Tel. 03-3812-0266 iss9@jvss.jp                                               |
| 30日             | 「鉄と鋼」第108巻第8号特集号「高純度合金鋼溶製」原稿募集締切(10号655頁)                                                                                                                                       | 日本鉄鋼協会                  | 東北大学 三木貴博 Tel. 022-795-7307<br>miki@material.tohoku.ac.jp                    |
| <b>2021年12月</b> |                                                                                                                                                                                 |                         |                                                                              |
| 1～3日            | ★第12回 環境調和型設計とインバースマニファクチャリングに関する国際シンポジウム(EcoDesign2021)(奈良)                                                                                                                    | エコデザイン学会連合              | EcoDesign2021事務局 Tel. 06-6879-7260<br>ecodesign2021_secretariat@ecodenet.com |
| 8～10日           | ★第8回 高機能金属展 幕張メッセ                                                                                                                                                               | リードエグジジションジャパン(株)       | 弟子丸英樹 Tel. 03-3349-8568<br>deshimaru@reedexpo.co.jp                          |
| 14～17日          | ○CUUTE-1 The First Symposium on Carbon Ultimate Utilization Technologies for the Global Environment(奈良)                                                                         | 日本鉄鋼協会                  | CUUTE-1事務局<br>cuute-1@nta.co.jp                                              |
| <b>2022年2月</b>  |                                                                                                                                                                                 |                         |                                                                              |
| 28日             | 「ISIJ International」第62巻(2022年)第12号 特集号「Advanced Carbon Utilization Technologies and Processes for Sustainably Prosperous Society (持続可能な豊かな社会のための先進炭素利用技術とプロセス)」原稿募集締切(10号656頁) | 日本鉄鋼協会                  | 北海道大学 能村貴宏<br>Tel. 011-706-6842<br>nms-tropy@eng.hokudai.ac.jp               |



|                 | 行事(開催地/詳細掲載号および頁)                                                          | 主催者    | 問合せ・連絡先                                   |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------|
| <b>2022年5月</b>  |                                                                            |        |                                           |
| 29日～<br>6月1日    | The 7th International Conference on Advanced Steels (ICAS2022) (筑波)        | 日本鉄鋼協会 | ICAS2022事務局<br>ICAS2022Tsukuba@nims.go.jp |
| <b>2022年9月</b>  |                                                                            |        |                                           |
| 4～8日            | ★アルミニウム合金国際会議(ICA) (富山)                                                    | 軽金属学会  | Tel. 03-3538-0226 sec.icaal8@pcojapan.jp  |
| <b>2022年11月</b> |                                                                            |        |                                           |
| 22～25日          | The 1st International Symposium on Iron Ore Agglomerates (SynOre2022) (島根) | 日本鉄鋼協会 | SynOre2022事務局<br>synore2022@issjp.com     |

## 総 合

### 第182回秋季講演大会 講演募集案内

※講演大会、学生ポスターセッションの開催方法ならびに大会参加申込方法については今後変更になる可能性があります。あらかじめ、ご了承ください。最新情報はホームページにてご確認ください。

<https://www.isij.or.jp/meeting/index.html>

■会期：2021年9月2日（木）～4日（土）

■開催地：名城大学 天白キャンパス（名古屋市天白区）

#### 1. 講演内容：

鉄鋼およびその周辺領域に関連がある**オリジナルな内容**に限ります。

#### 2. 講演資格：

講演発表者は**本会個人会員**に限ります。非会員（依頼講演を除く）で発表を希望される方は、早めに所定の入会手続きをお済ませ下さい。なお、著者（発表者と共著者を合わせて最大6名まで）の半数以上を本会個人会員として下さい。

#### 3. 講演時間：

一般講演の発表時間は**15分**、質疑討論時間は**5分**です。討論会、国際セッションの場合は、座長のプログラミングにより若干時間が異なります（目安時間：発表時間および質疑討論時間を含め、20～30分）。全会場、PCプロジェクターを用いての発表となります。会場には発表用PCの用意はありません。発表者は必ずご自身で発表用PCをご持参下さい。

#### 4. プログラム：

- ・ホームページ上に、プログラム速報版を6月中旬に掲載し、7月上旬に最終版を掲載します。また印刷版プログラムを「ふえらむ」8号に同封してお送りします（会員のみ）。
- ・プログラムおよび講演原稿は、第182回秋季講演大会講演概要集「材料とプロセス（CD-ROM）」Vol.34（2021）No.2に掲載します。
- ・「材料とプロセス（CD-ROM）」の年間予約・都度予約された会員に「材料とプロセス（CD-ROM）」のWeb公開を実施します。公開期間は**2021年8月18日（水）～9月6日（月）**を予定しております。

#### 5. 講演申込方法：後述の提出期限までに、下記の手順で申込を行って下さい。

- ①第182回秋季講演大会 講演申込みページ（<https://www.isij.or.jp/meeting/2021autumn/submission.html#submission>）の「講演申込み」をクリックして下さい（外部のサイトへ移動します）。
- ②講演申込登録サイト（<https://www.gakkai-web.net/isij/>）が表示されますので、「新規登録」を選択して下さい。
- ③講演区分の選択画面が表示されますので、討論会／国際セッション／一般講演／予告セッション／共同セッションの中から希望する講演区分を選択して下さい。
- ④講演情報入力画面が表示されますので、必要事項を選択・入力して下さい。
- ⑤登録が正常に受け付けられると、登録完了画面が表示されると同時に受付完了の電子メールが配信されます。受付番号とパスワードが記載されていますので、大切に保管して下さい（今後の登録内容の確認・修正や講演原稿送信等に必要です）。

#### 6. 講演原稿作成・提出方法：講演申込登録サイトから、後述の提出期限までに講演原稿を送信して下さい。

- ・原稿枚数：A4サイズ1枚（討論会、国際セッションは4枚以内）。
- ・ファイル形式：PDFのみ
- ・ファイルサイズ：2MB以下（討論会、国際セッションは5MB以下）

#### 【注意事項】

- ・ホームページに、『講演原稿の書き方』を掲載していますので、ご参照下さい。
- ・国際セッションの講演申込および原稿は英語で作成願います。
- ・締切後は、自己都合による原稿差し替えおよび取消は一切お受けいたしません。必要な所属機関内の手続き等をお済ませの上、原稿を提出願います。

## 7. 講演申込および講演原稿の提出期限：

一般講演、予告セッション、共同セッション：2021年5月20日（木）17：00まで

討論会、国際セッション：2021年5月6日（木）17：00まで

※開催日程の都合上、例年よりも早く提出期限を設定しておりますので、ご注意願います。

## 8. その他：

- ・投稿原稿の著作権（著作権法第27条または第28条に規定する権利を含む）は受付年月日より本会に帰属します。「材料とプロセス」の発行日は、8月17日です。
- ・申込データをもとに講演プログラムを作成します。プログラムには、氏名、所属、題目、発表時間、発表会場が掲載されます。プログラムは、ホームページ上での公開、「材料とプロセス」への掲載を行います。なお、申込データは講演大会に関する業務以外には使用しません。
- ・共同セッションのみ、公開から一年間に限り概要を金属学会講演ウェブサイトに掲載いたします。

## 学生ポスターセッション発表募集案内

当会では、多くの学生に春秋の講演大会での発表の機会を提供するために、学生ポスターセッションを開催しています。学生の方々が、研究途上の結果でも気軽に話題として発表されるよう希望します。実施要領は以下の通りです。

- 1. 発表資格：**会員・非会員を問わず学生（大学・大学院・短期大学・高等専門学校あるいはそれに準ずる学校）に限ります。
- 2. 発表申込方法：**後述の提出期限までに、下記の手順で申込を行ってください。
  - ①第182回秋季講演大会 講演申込みページ (<https://www.isij.or.jp/meeting/2021autumn/submission.html#submission>) の「学生ポスターセッション発表申込み」をクリックして下さい（外部のサイトへ移動します）。
  - ②学生ポスターセッション発表申込登録サイト (<https://www.gakkai-web.net/isij/poster>) が表示されますので、「新規登録」を選択して下さい。
  - ③発表情報入力画面が表示されますので、必要事項を選択・入力して下さい。
  - ④登録が正常に受け付けられると、登録完了画面が表示されると同時に受付完了の電子メールが配信されます。受付番号とパスワードが記載されていますので、大切に保管して下さい（今後の登録内容の確認・修正やアブストラクト送信等に必要です）。
  - ⑤申込締切の約2週間後に、第182回秋季講演大会 学生ポスターセッションホームページ (<https://www.isij.or.jp/meeting/2021autumn/student-poster.html#ps>) に、ポスター発表番号、参加スケジュール等を掲載しますのでご確認ください。
- 3. アブストラクトの作成・提出方法：**

学生ポスターセッション発表申込登録サイトから、後述の提出期限までにアブストラクトを送信して下さい。

  - ・原稿枚数： A4サイズ1枚
  - ・ファイル形式： PDFのみ（2MB以下）

なお、提出いただきました原稿は第182回秋季講演大会講演概要集「材料とプロセス（CD-ROM）」Vol.34（2021）No.2に掲載いたします。指導教官が非会員の場合は掲載されませんので、指導教官の方は必ずご入会下さい。
- 4. 発表申込およびアブストラクトの提出期限：2021年5月20日（木）17:00まで**
- 5. 展示：**ポスター1発表ごとに、パネル1枚を準備します。展示・発表は講演大会2日目午後に行います。
- 6. 表彰：**審査員の投票により優秀ポスターを選出の上、賞品を贈呈します。
- 7. 参加賞：**

1年間の学生会員資格を進呈いたします（既に学生会員の場合は、さらにもう1年間の学生会員資格）。非会員の方につきましては、申込締め切りの約2週間後に学生ポスターセッションホームページに入会手続き方法を掲載しますので、手続き方法を確認後、入会申込をお願いいたします。

なお、一般講演、予告セッション、共同セッション、討論会、国際セッションを聴講するには、学生会員としての講演大会参加費が必要です。

## 討論会／予告セッション／国際セッション／共同セッション募集案内

討論会、予告セッション、国際セッションおよび共同セッションにつきましては、インターネット申込開始に合わせ、鉄鋼協会ホームページに3月下旬よりテーマ内容を掲載する予定ですのでご確認ください。

## 講演大会参加方法のご案内

講演大会に参加する場合、講演概要集「材料とプロセス（CD-ROM）」（参加費含む）の購入とネームカードの着用が必要です。今回は新型コロナウイルス感染防止対策として、**当日参加申し込みを見合わせる可能性があります。詳細が決まり次第、ホームページにてご連絡いたします。**年間予約をしていない方は、事前申込（都度予約）をお願いいたします。

「材料とプロセス」は、次の方法で購入できます（講演発表者も「材料とプロセス（CD-ROM）」の購入が必要です）。

### 1. 都度予約申し込み：（受付期間 2021年5月13日（木）～8月19日（木））

- ・オンラインクレジットカード決済または銀行振り込みでお支払いができます。

- ・インターネットでの受付となります。
- ・「材料とプロセス」は講演大会終了後に郵送いたします。講演大会期間中は、「材料とプロセス」Web公開をご活用ください。
- ・2021年会費納入済みの本会個人会員が対象者です。

「材料とプロセス」都度予約価格  
(2021年秋季講演大会参加費を含む) ※消費税等込

|               |               |
|---------------|---------------|
| 正・準・賛助・外国会員   | 6,200円/（1大会分） |
| 学生会員、海外在住学生会員 | 2,100円/（1大会分） |

## 2. 日本金属学会との相互聴講申し込み：

別途、ホームページでご連絡いたします。

## 論文へのCCライセンス付与と本会への転載許可依頼手続きについて

2021年4月1日より、本会が著作権を保持する全ての論文誌掲載記事は、CCライセンス（通常CC BY-NC-ND）を付与した扱いになります。なお、2020年10号以降はCC BY-NC-NDが付与されていますが、著者の希望によりCC BYを付与している場合があります。

CCライセンスを採用している記事は、採用されているCCライセンスの条件の範囲内で利用するのであれば、本会への転載許可依頼は不要となります。下表に従い、必要な場合はお手続きをお願いいたします。

本会論文誌掲載記事の転載許可依頼の要・不要について  
(CCライセンスの条件の範囲内での利用の場合)

| 論文誌刊行号<br>年月日   | 2021年3月31日まで | 2021年4月1日以降 |
|-----------------|--------------|-------------|
| 1980年7月以前       | 要            | 不要          |
| 1980年8号～2020年9号 | 要            | 不要          |
| 2020年10号以降      | 不要           | 不要          |

転載許可が不要だからといって、勝手に利用してよいものではありません。利用条件をご確認下さい。本会で採用しているCC BY-NC-NDとCC BYにおける条件は以下のとおりです。

CC BY-NC-ND (表示 - 非営利 - 改変禁止) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ja>

表示 : 適切なクレジット (著作権者、作品タイトルなど) の表示が必要です。

非営利：営利目的でこの資料を利用することはなりません

改変禁止：この資料を改変することはなりません。

※クレジット表示を適切に行い、非営利目的で、改変せずに利用するのであれば、自由に利用、再配布ができます。

CC BY（表示のみ） <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>

※クレジット表示を適切に行いさえすれば、改変はもちろん、営利目的での二次利用も許可されています。

～・～ CCライセンスとは ～・～・～・～・～・～・～・～・～・～・～・～・～・～・～・～・～・～・～・～・～・～

CC（クリエイティブ・コモンズ）ライセンスとは、インターネット時代のための新しい著作権ルールで、作品を公開する作者が「この条件を守れば私の作品を自由に使って構いません。」という意思表示をするためのツールです。

CCライセンスを利用することで、作者は**著作権を保持したまま作品を自由に流通させることができ**、受け手は**ライセンス条件の範囲内で再配布や改変などをすることができます**。

また、CCライセンスは、学術雑誌のオープンアクセス化におけるライセンスとして、世界的にデファクト・スタンダードとなっているため、真に「オープンアクセスジャーナル」と称するためには、インターネット上で無料でアクセスできる以外に、二次利用の範囲・条件を明示するCCライセンスの付与が必須であり、本会論文誌の最大の課題でもありました。



## **本会論文誌掲載記事の著作権について**

1980年8月より、本会論文誌の掲載記事は、その著作権を著者から本会に譲渡していただいています（Crown Copyrightなどの理由により著作権の譲渡が困難であった記事については、記事pdfのトップ頁の脚注に記載があります。また2020年10号からはCCライセンスの著作権保持者が本会と記載されていません。これらの記載内容に十分ご注意ください）。

本会に著作権譲渡がされていなかった1980年7月以前の記事は、本会ジャーナルやWebサイトにて譲渡をお願いし、異議がある場合は2021年3月31日期限でご連絡をお願いしていました。2021年3月12日時点では異議のご連絡をいただいた記事はございませんので、本会が刊行した論文誌の掲載記事の著作権はほぼ全てにおいて本会が保持することになります。

## **論文誌過去記事全てへのCCライセンス付与について**

著作権者は著作物にCCライセンスを付与することができますので、2021年4月1日を機に、本会論文誌が著作権を保持する論文やレビューなどの掲載記事には全て、CC BY-NC-NDを付与することといたします。

ここで言及している論文誌とは、以下のものが対象です。

和文誌「鉄と鋼」、「鉄と鋼」

欧文誌「ISIJ International」、「Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan」、  
「Tetsu-to-Hagané Overseas」、「Tetsu-to-Hagané Abstracts」

なお、「鉄と鋼」、「ISIJ International」の両誌掲載記事は、2020年10月よりCCライセンス（通常はCC BY-NC-ND）を付与し、論文本体にもそのCCライセンスのマークを記載しています。2020年10月以降の掲載記事は、著者のご希望によりCC BY-NC-NDではなく、CC BYへの変更を可能としています。

## **イベント情報**

### **鉄鋼工学セミナー「専科」 2021年度受講のご案内**

鉄鋼工学セミナー「専科」では、鉄鋼分野の将来を担う熱意のある中堅技術者の人材育成強化を目的とし、高い専門性を有する技術者・研究者を育成するために、より現場に密着した技術に関わる講義や、専門性を高めるような講義を企画しています。2021年度は、「凝固専科」、「精錬プロセス解析専科」、「製鋼熱力学専科」、「強化機構専科」、「水素脆化専科」、「材質制御専科」の6テーマの参加者募集をいたします。このうち今回は、I「材質制御専科」につきまして皆様にお知らせ申し上げます。

なお、実施するにあたり、感染対策には十分留意いたしますので、以下の案内を参照され、奮ってご参加下さいますよう、宜しくお願い申し上げます。

#### **I「材質制御専科」受講のご案内**

1. 期日：2021年11月25日（木）13：00～26日（金）13：00

2. 会場：日本鉄鋼協会 第1・2会議室

〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町3-2-10 鉄鋼会館5階 TEL.03-3669-5933

※地図をご参照下さい。http://www.tekko-kaikan.co.jp/access/access.html

#### **3. 講義の概略：**

日本の鉄鋼業は高級鋼の製造で国際競争力を維持強化する戦略を打ち出している。この戦略を支えるには材質制御技術の向上が不可欠である。材質制御技術とは組織制御による特性の造り込み技術を意味し、鉄鋼材料の組織は主に再結晶、変態、析出の3つの冶金現象を有効に使うことで創り込まれている。

本専科ではこれから研究開発の中核になる世代の若手研究者を対象に、組織制御の基礎と応用について説明する。基礎編では、再結晶、析出、変態のメカニズムを理解すると共に、定量的な解析を可能にする物理モデルについて説明する。また、応用編では今までに創出された画期的な鉄鋼材料がどのような発想と基盤研究に基づいて開発されたかを組織制御の視点で説明する。

<講義目次>

##### **1. 熱力学の基礎**

西沢先生の「ミクロ組織の熱力学」をベースに析出、変態、粒界偏析など組織制御に関連する熱力学を説明する。

##### **2. 析出の機構とモデル化**

溶解度積、合金炭窒化物の溶解析出、複合析出、相界面析出、セメントタイトの時効析出などを説明する。

##### **3. 変態の機構とモデル化**

マッシュ変態、フェライト変態、パーライト変態、ベイナイト変態、マルテンサイト変態の機構について

説明する。また、3元系のパラ平衡、局所平衡についても説明する。Solute drag理論の説明とC律速変態にSolute drag効果を考慮する方法についても紹介する。

##### **4. 逆変態の機構とモデル化**

逆変態ならびに2相域加熱のメタラジーについて説明する。

##### **5. 回復・再結晶の機構とモデル化**

冷延材の再結晶、熱間再結晶、熱間変形抵抗、熱間プロセスでの組織微細化技術などについて説明する。

##### **6. 高度な組織制御による材料開発**

**4. プログラム概略：**

11/25 (木) 13:00集合 11/26 (金) 9:00 ~ 13:00 講義  
13:10 ~ 18:00 講義 集合写真撮影、アンケート収集後、解散

**5. 講師：**瀬沼武秀（岡山大学客員研究員）

**6. 幹事：**明石透（日本製鉄：本コースの円滑な運営のための世話役）

**7. 募集定員：**12名（定員オーバーの場合や参加資格を満たさない場合はお断りすることがあります。）

**8. 参加資格：**国内に生産拠点を有する維持会員企業に属する日本鉄鋼協会個人正会員  
国内に生産拠点を有する維持会員企業の推薦を受けた企業会員（日本鉄鋼協会個人正会員）  
日本の大学に属する若手教員（日本鉄鋼協会個人正会員）  
上記の中で、鉄鋼工学セミナー修了者または同等以上の経験・能力を有する方

**9. 費用（税込）：**受講料 26,000円（＊本会維持会員会社所属の方、大学若手教員）  
36,000円（＊上記以外の方）

※当日現金支払いをお願いいたします。なお、宿泊は各自でご手配願います。

**10. 申込締切日：**2021年10月22日（金）期日厳守

※キャンセルは2021年11月15日（月）までにお願いいたします。

**11. 申込方法：**本会ウェブサイト上の申込書に入力し、送信して下さい。

「材質制御専科」申込書 [https://y100.isij.or.jp/acceptance/senka\\_Zaishitsuseigy/default.htm](https://y100.isij.or.jp/acceptance/senka_Zaishitsuseigy/default.htm)

**12. 問合せ先（幹事）：**日本製鉄（株）技術開発本部 プロセス研究所 鋼圧一貫研究部 上席主幹研究員 明石透  
TEL：070-3914-4741 / FAX：0439-80-274 / E-mail：akashi.m5b.tohru@jp.nipponsteel.com  
〒293-8511 富津市新富 20-1

## 第241回西山記念技術講座開催のお知らせ「先端鉄鋼製精錬プロセス技術における基礎と実践研究」

### 講座の視点

鉄鋼に関する学問は、いまだ絶え間ない進歩を続けている。その進歩はより細分化され、複雑化しており、専門性がより重要となっている。しかしながら、鉄鋼学の基礎を十分に会得せずに専門性を高めることはできない。また、鉄鋼の技術者にとって基礎学問から実践研究を一貫して学び直すことは、技術革新のきっかけにも繋がり、本技術講座の趣旨にも沿うものと考えられる。

そこで、中堅以上の技術者を対象に、凝固を含む製鉄・製鋼プロセス分野における基礎学問から実践研究への展開を理解するための講座を企画する。各80分間の講座のうち、基礎の最先端を大学講師に60分間ご講演頂き、実践研究例を企業講師に20分間ご紹介頂く。なお、今回と同様の学び直しを趣旨として、2022年春に「鉄鋼材料」に関する技術講座を企画中である。

**1. 日時：**2021年6月30日（水）9：00～17：55

**2. 形式：**オンライン開催（Cisco Webex Meetingsを使用）

**3. プログラム**

**司会者：**村上太一（東北大学）

**1）9：00～10：20 脱りんを中心とした高度精錬技術における熱力学**

東京工業大学 科学技術創成研究院 教授 小林 能直

日本製鉄（株）技術開発本部 プロセス研究所 製鋼研究部 主幹研究員 柿本 昌平

我が国の鉄鋼業の国際競争力の根幹を担ってきた高度精錬技術は、各元素ごとに発展し、また各濃度領域ごとに特徴的な指導原理を有しており、製品の高付加価値化および鉄資源の多様化などにも対応してきた。本講演では、不純物の極低減化、反応の高速化・高効率化、不純物含有鋼への対応の流れを振り返り、最大の課題である脱りん技術に戦略的指針を与える熱力学的な考え方について紹介する。スラグの脱りん能の評価指標である不純物キャパシティに着目し、キャパシティを増大させるためのファクター、種々のキャパシティ間の関係などを概説する。また、実際の脱りんプロセスにおける精錬技術展開について、CaO粉上吹き溶銑脱りんのスラグ組成やりん分配比の経時変化や、生石灰の溶融スラグへの溶解挙動に及ぼす $P_2O_5$ の影響などについて紹介する。

**2）10：20～11：40 状態図から読み取る製鉄プロセス中酸化物の状態**

東北大学 多元物質科学研究所 教授 植田 滋

山陽特殊製鋼（株）研究・開発センター 基盤研究室 プロセス研究グループ グループ長 吉岡 孝宜

状態図は物質が安定に存在する領域を示すものであるが、高炉や転炉などの高温プロセスにおける酸化物は反応を伴い非平衡状態である。従って、これらプロセス中の酸化物の状態を知るには、系の最終到達状態の情報（の一部）をもとに、変化する酸化物を読み取ることが求められる。本講演では製鉄・製鋼プロセスで扱う酸化物の状態とその変化を状態図から読み取ることを目指し、基礎的な2元系、3元系状態図の見方や、平衡状態図の測定方法、相の変化と状態図の関係について取り上げ、状態図等の使い方について説明する。

### 3) 12:25 ~ 13:45 製鉄反応の速度解析における未反応核モデルの実験

九州大学 大学院工学研究院 材料工学部門 准教授 大野光一郎

日本製鉄(株) 技術開発本部 プロセス研究所 製鉄研究部 首席主幹研究員 中野 薫

冶金プロセスの設計や操作条件の決定では、プロセス内で起こる現象を的確に把握する必要がある。ところがプロセス内では複数の現象が共存しており、オフライン試験や実機計測などから得られる情報には限りがあるため、数値計算による解析が一般的に行われる。本講演では、製鉄プロセスの数値解析に、最も一般的に用いられている「一界面未反応核モデル」を例として紹介し、その基礎学理を説明したのちに、応用例を紹介することで、製鉄反応の速度解析の基礎から応用までを復習する。

司会者：大野光一郎（九州大学）

### 4) 13:45 ~ 15:05 凝固過程におけるマクロ偏析の発達

京都大学 大学院工学研究科 材料工学専攻 教授 安田 秀幸

日本製鉄(株) 技術開発本部 東日本技術研究部 主幹研究員 村尾 武政

凝固過程で生じるマクロ偏析は、铸造後の加工過程や製品の品質に影響するため、限られたプロセス上のパラメータの中で抑制することが求められる。マクロ偏析の形成機構として固液共存域における溶質が濃化した溶鋼の流動を基礎に多くの研究がなされてきたが、固相の移動や変形も含めた固液共存域の変形に注目した研究も行われるようになった。本講演では、2D/3D観察結果も利用してマクロ偏析の形成機構を整理する。また、凝固・流動を考慮したシミュレーションによるマクロ偏析の解析についても紹介する。

### 5) 15:15 ~ 16:35 マルチフェーズスラグの流動を司る高温融体物性

九州大学 大学院工学研究院 材料工学部門 准教授 齊藤 敬高

日本製鉄(株) 技術開発本部 プロセス研究所 製鋼研究部 首席主幹研究員 内藤憲一郎

鉄鋼精錬プロセスにおいて副生されるスラグは基本的に均一な融体ではなく、未滓化のCaOやその反応生成物であるCaSや $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ および炭材などの固体、溶銑とスラグの反応により生成したCOガス等の気体、またフォーミングスラグによって巻き込まれた溶銑などの液体が、複雑に混在した高温複層流体を形成しており、これらが密接に関わる問題が散見される。ここでは、これらのマルチフェーズスラグの流動を司るレオロジー特性について、室温のモデルおよび高温におけるスラグでの測定例を概説するとともに、機械学習を用いた見かけ粘度の予測システムについて紹介する。また、スラグ中に分散した固相や気相などの第二相を、交流電場を用いてセンシングする技術についても言及する予定である。

### 6) 16:35 ~ 17:55 熱流体・粒子シミュレーションで何が見える？

東北大学 多元物質科学研究所 教授 埜上 洋

JFEスチール(株) スチール研究所 製鉄研究部 主任研究員 野内 泰平

近年の計算機能力の向上に伴って、粉粒体を取り扱う鉄鋼プロセスに対して、粒子法による流動・運動解析の応用が広がっている。従来の連続体を仮定したシミュレーションに対して、粒子追跡法は出力される情報は非常に膨大で、かつランダムな離散点の情報となるため、その中から必要な情報を読み解く作業が複雑で、結果の評価は見た目の評価にかたよりがちである。本講演では熱流体・粒子シミュレーションの基礎と、その結果からいかに定量的な情報を読み解くのかについて概説すると共に、企業における実用例について説明する。

### 4. 参加申込み

【申込方法】 オンライン講座のため、本会ホームページからの事前申込みのみとします。当日参加受付は行いません。

【支払い方法】 ①クレジットカードのオンライン決済 または、②郵便振替のいずれかの方法で、事前の入金をお願いします。

【締め切り】 申込、入金ともに6月16日(水)までに完了するようお願いします。

※入金の確認後、開催約1週間前にテキストと領収証を送付します。

※ご入金後の返金および当日不参加の場合の返金はいたしませんので、ご了承下さい。

※申込・支払い方法・オンライン受講についての詳細は、本会ホームページに掲載します。

### 5. 受講の注意点

第241回西山記念技術講座は新型コロナウイルス感染防止対策としてWeb配信により行います。

下記をご確認の上、申込をお願いします。

#### 1) 受講方法

- ・本講座は、Web会議システムCisco Webex Meetingsを使用して行います。
- ・Webex Meeting使用に関する利用環境は受講される方に整えて頂くことを前提にしておりますので、受講申し込みの前に使用可能かご確認をお願いいたします。
- ・受講の方法を記載した『聴講者マニュアル』は後日ホームページに掲載します。

#### 2) 受講環境

- ・ハウリング防止のため、イヤホン、ヘッドフォン、外付けマイクの使用を推奨します。

#### 3) 受講の注意点

- ・受信画像や発表資料の撮影・録画(画面キャプチャを含む)、録音、保存、再配布は禁止します。
- ・受講に必要なID、パスワード、接続先URL等は、参加申込された方のみ有効です。  
不特定多数を含む第三者に公開することはお止め下さい。不適切な接続が判明した場合、主催者側で切断する等の対応を取らせていただきます。
- ・Web会議システムへの接続にあたっては(所属、氏名)を入力していただきます。

(所属、氏名)は受講者相互に公開されます。正しく入力されない場合には、参加申込の確認が取れないことから主催者側で切断する等の対応を取らせていただきます。

・オンライン受講に際して万が一トラブル等が生じた場合、日本鉄鋼協会は参加費の返却その他の責任を負いません。

6. 参加費 (税込み、テキスト付)

会員8,000円、一般15,000円、学生会員1,000円、学生一般2,000円

注) 会員割引は個人の会員のみ有効です。協賛団体の個人会員、学生会員も含みます。

★テキストは、最終講座終了後残部がある場合、鉄鋼協会会員価格、一般価格で販売いたします。テキスト購入のお申込みは、本会HPをご覧ください。

問合せ先：(一社)日本鉄鋼協会 育成グループ  
TEL：03-3669-5933 E-mail：educact@isij.or.jp

人材募集案内

北海道大学大学院工学研究院 材料科学部門エネルギー材料分野 教員公募

募集人員：助教1名 (任期付)

所 属：北海道大学大学院工学研究院 材料科学部門エネルギー材料分野

専門分野：高温の材料化学・腐食科学を背景として物理化学、材料学に基づいた、高温過酷環境下で使用する耐高温酸化・腐食材料、コーティングや耐熱材料に関する研究分野

担当講義：大学院における材料科学専攻の演習科目、総合教育部における実験及び演習、学部における応用マテリアル工学コースの専門科目 (材料工学実験及び演習科目を含む)

応募資格：(1) 着任時に博士の学位またはPhDを有する方  
(2) 経験は問わないが、上記専門分野に関する研究と教育に意欲のある方  
(3) 日本語と英語のいずれによっても教育・指導ができる方

採用予定日：令和3年10月1日以降のできるだけ早い時期

公募締切：令和3年5月12日 (水曜日) 必着

提出書類：(1) 履歴書  
(2) 研究業績目録  
(3) 教育実績 ((1) - (3) は所定の書式あり)

(4) 主要論文3編の写し各1部  
(5) 採用された場合の研究計画 (2000 字程度)  
(6) 採用された場合の教育に対する抱負 (1000字程度)  
(7) 本人について参考意見を伺え方2名の氏名・所属・連絡先

提出方法：封筒表面に「材料科学部門助教公募2020-36」と朱記し、書留で郵送してください。

応募書類は原則として返却いたしません。

なお、応募書類は教員選考の目的以外には使用いたしません。

応募書類送付先：〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目  
北海道大学工学系事務部 総務課 (人事担当)  
TEL：011-706-6156, 6117, 6118

問合せ先：〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目  
北海道大学大学院工学研究院 材料科学部門  
部門長 大野 宗一  
TEL：011-706-6344  
E-mail：mohno@eng.hokudai.ac.jp

詳細につきましては以下のwebサイトを参照ください。  
<https://www.eng.hokudai.ac.jp/graduate/research/recruit/>



## 次号目次案内

\* 定期刊行物の掲載記事及び題目は変更になる場合があります。

## ふらむ Vol.26 (2021) No.5 掲載記事

### Techno Scope

装蹄師の技能が光る蹄鉄

### 連携記事

馬と蹄と蹄鉄にまつわるエトセトラ

..... 青木 修(日本装蹄協会)

2020年鉄鋼生産技術の歩み

..... 日本鉄鋼協会 生産技術部門

### 入門講座

### インフォマティクス入門-8

第一原理計算データを活用した材料探索

..... 田中 功(京都大学)

### 躍動

骨を埋める価値のある製鉄研究

..... 岩見友司(JFEスチール(株))

### 私の論文

中性子回折による鋼の高温相変態挙動その場計測

..... 友田 陽(産業技術総合研究所)

### 解説

### 受賞技術-33

新型高精度平坦度計を用いた高強度熱延鋼板製造技術の開発

..... 伊勢居良仁、他(日本製鉄(株))

## 「鉄と鋼」Vol.107 (2021) No.5 掲載記事

### 論文

### 製鉄

高炉の熱保存帯温度を低下する種々の塊成物の反応挙動

..... 樋口謙一、他

試験高炉における焼結鉱とペレットの混合原料の反応挙動

..... 樋口謙一、他

### 溶接・接合

Fe-Al接合界面反応とFeの再結晶挙動

..... 奥田金晴、他

### 表面処理・腐食

低合金鋼ラインパイプの硫化物応力腐食割れ挙動に及ぼす極表面硬さおよび硫化水素分圧の影響

..... 嶋村純二、他

### 相変態・材料組織

3%Si-Fe粗大結晶の圧延集合組織におよぼす初期方位と鋼中炭素の影響

..... 新垣之啓、他

### 力学特性

マルテンサイト逆変態を活用したスーパーインバー鋼の剛性と強度の同時最適化

..... 坂口直輝、他

## ISIJ International Vol.61 (2021) No.5 掲載記事

### Review

### Fundamentals of High Temperature Processes

CO desorption and absorption in molten steel: A review

Z. Liu *et al.*

### Regular Article

### Fundamentals of High Temperature Processes

Effect of viscosity on dynamic evolution of metallurgy slag foaming

B. Zhang *et al.*

On the CO desorption and absorption in liquid low-carbon steel

Z. Liu *et al.*

Evaporation behavior of Al and Sn from Ti-6242 alloy melt

H. Mizukami *et al.*

Surface structures of  $\text{CaFe}_2\text{O}_4$  (001), (100), (110) and (111): a density functional theory study

Z. Que

Accurate viscosity prediction for molten slags: a new model and database

R. Zhang *et al.*

Effect of Na Ions on melt structure and viscosity of  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$  by molecular dynamics simulations

X. Zhang *et al.*

Agglomeration characteristics of various oxide inclusions in molten steel containing rare earth element under different deoxidation conditions

W. Yeguang *et al.*

Phase relationship and activities of components in  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$  ternary system at 1573K

K. Iwahashi *et al.*

### Ironmaking

Effects of iron ores on the combustion behavior of coke and NOx emission during sintering process

Z. Que *et al.*

Investigation of fracture behavior in blending coke using the model compound of low-quality coal

Y. Matsushita *et al.*

Effect of basicity on metallurgical properties of fluxed pellets with high MgO content

Z. Yang *et al.*

- Effect of varied oxygen levels on the oxidation of a magnetite pellet bed during pot furnace induration A. Eriksson *et al.*  
Numerical investigation of hematite flash reduction-biomass steam gasification coupling process X. Wang *et al.*  
Gasification behavior of phosphorus during pre-reduction sintering of medium-high phosphorus iron ore H. Zuo *et al.*  
Iron ore sintering in milli-pot: comparison to pilot scale and identification of maximum resistance to air flow T. Singh *et al.*  
Effect of silica in ash of coke on carburization and melting of iron T. Murakami *et al.*  
Modeling of coke particle breakage in blast furnace considering pore structure by discrete element method K. Takahashi *et al.*

### Steelmaking

- Nitrogen solubility in liquid Fe-Nb, Fe-Cr-Nb, Fe-Ni-Nb and Fe-Cr-Ni-Nb alloys S. Yang *et al.*  
Evolution of inclusions with Ce addition and Ca treatment in Al-killed steel during RH refining process R. Geng *et al.*  
A novel model to design the equilibrium slag compositions for bearing steel: verification and application Y. Wang *et al.*  
Reaction behaviour between cerium ferroalloy and molten steel during rare earth treatment in the ultra-low carbon Al-killed steel M. Wang *et al.*

### Casting and Solidification

- Effect of cooling rate on the structure of CaO-SiO<sub>2</sub>-CaF<sub>2</sub>-based glassy mold flux J. Li *et al.*  
Quantitative analysis of solidification of compacted graphite irons – A modelling approach J. Lacaze *et al.*  
Interaction between M(C,N) and ferrite in electropulsing microalloyed steel Z. Zhu *et al.*  
Development technology for prevention of macro-segregation in casting of steel ingot by insert casting in vacuum atmosphere K. Isobe  
Time-resolved and in-situ observation of semisolid deformation in Al-Cu alloys with equiaxed and columnar grain structures by using a combination technique of 4D-CT and 3DXRD T. Narumi *et al.*

### Instrumentation, Control and System Engineering

- Surface defects classification of hot rolled strip based on improved convolutional neural network W. Wang *et al.*

### Chemical and Physical Analysis

- Improvement of bragg-edge neutron transmission imaging for evaluating the crystalline phase volume fraction in steel composed of ferrite and austenite H. Sato *et al.*  
Change of state of lime phase and inhibition of hydration reaction by coexisting oxides in steelmaking slag H. Eba *et al.*

### Forming Processing and Thermomechanical Treatment

- Ensemble learning based methods for crown prediction of hot-rolled strip G.-T. LI *et al.*

### Welding and Joining

- Effects of Mn and Al on acicular ferrite formation in SAW weld metal N. Fujiyama *et al.*

### Surface Treatment and Corrosion

- Adhesive scale formation on low silicon steel surface; characterization and mechanism M. Manna *et al.*  
Size effect on flow field and dynamic deposition of bottom dross in a molten zinc pot H. Fei *et al.*

### Transformations and Microstructures

- Resistance to temper softening of low carbon martensitic steels by microalloying of V, Nb and Ti Y. Zhang *et al.*  
Effect of the initial microstructure and thermal path on the final microstructure and bendability of a high strength ferrite-martensite dual phase steel H. Lan *et al.*  
Effects of the destabilisation heat treatments on the precipitation of secondary carbides and their effect on the corrosion of 27 wt.% chromium white cast iron Q. Hoang *et al.*  
Transformation delay and texture memory effect of columnar grained cast slab in low grades non-oriented electrical steels X. Wu *et al.*

### Mechanical Properties

- Effect of isothermal transformation treatment and tempering on the microstructure and hardness of a medium C and high Si steels G. Kafadar *et al.*  
Comparative study of microstructure-sensitive fatigue crack propagation in coarse- and fine-grained microstructures between stable and metastable austenitic stainless steels using miniature specimen A. Matsushita *et al.*

### Physical Properties

- Approximation and characteristic times in precipitation modelling R. J. Slooter *et al.*  
Estimation of solute carbon concentration by electrical resistivity measurement in martensitic steel T. Masumura *et al.*

### Social and Environmental Engineering

- Behavior of crack generation of slag in continuous solidification process of blast furnace slag Y. Ta *et al.*  
Selective separation of metallic Fe remaining in slags using electrical pulse disintegration H. Kubo *et al.*

### Note

### Mechanical Properties

- Quantitative evaluation of solute hydrogen effect on dislocation density in a low-carbon stable austenitic stainless steel K. Kamei *et al.*

会 員 欄

新規入会

相澤 巧  
阿賀 一朗  
芦塚 康佑  
安部 剛史  
池山 秀作  
石本 航太郎

井上 喬仁  
大宮 克己  
奥野 一樹  
金子 拓実  
川並 宏毅  
川人 悠生  
北市 和  
木村 智朗  
工藤 大輔  
藤原 彬  
小北 要平

五藤 太呂介  
小山 壮太  
佐藤 礼  
志岐 瑞帆  
周 裕雄  
杉山 佳祐  
鈴木 将史  
瀬尾 大成  
高辻 真太郎  
舘 幸生  
田中 佑良

辻 創太  
常陰 典正  
ティラティープウイ  
ワット プラモート  
寺田 喜満  
富岡 憲一郎  
中川 遼  
沙魚川 拓生  
波多野 翔太  
半田 圭  
冬島 拓実

堀 亜由美  
前田 和大  
松井 知己  
美藤 貴之  
宮村 康二  
宮本 尚輝  
村田 敬  
森谷 瞭  
安川 雅彦  
山本 賢太郎  
吉田 咲紀

ALLONI, Marco  
LEE, Chong Soo  
B.B.homecenter  
Pacific Sheet & Coil  
(Thailand) Co.,Ltd.  
SIAMCHAI  
STEELCO.,LTD  
TIW INDUSTRIES  
COMPANY LIMITED

ご冥福をお祈り  
申し上げます。  
井形 直弘  
根本 正



## 編集後記

今月号で特集する水素エネルギーの利活用は、環境意識の高まりを受けて最近、目にしない日はないほど注目されている話題である。鉄鋼業界としても水素社会に向けたインフラを始めとする新たな鉄需への期待と共に、我々自身も水素還元製鉄といった製鉄技術の大転換が社会から期待されている。これらの期待は、前者が主に発電用エネルギー源、後者がいわゆる還元材と異なるものの、共に地球温暖化ガスの排出を伴う炭素社会からの脱却を目指す流れに由来する。しかし問題は、水素が炭素のように単体では存在せず、大量製造・輸送にコストがかか

ることにある。

ところが目を転じると、実は宇宙の構成元素は重量比で約3/4が水素、約1/4がヘリウムで、この比率はビッグバンから殆ど変わっていないそうである。我々は全ての元素が恒星内部の核融合や超新星の爆発、最近では中性子星の合体で種々生まれたと聞いているが、宇宙規模では微々たるものらしい。即ち、我々の周りには（とは言っても星間ガスや星の雲としてだが）有り余るほど水素が単体で存在している。何とかこれらを利用して水素社会を築けないものか。（S.A.）

### 会報委員会（五十音順）

|      |                  |                  |                   |
|------|------------------|------------------|-------------------|
| 委員長  | 足立 吉隆（名古屋大学）     |                  |                   |
| 副委員長 | 堤 康一（JFEスチール（株）） |                  |                   |
| 委員   | 赤崎 兼宣（愛知製鋼（株））   | 赤松 聡（日本製鉄（株））    | 新井 宏忠（八戸工業高等専門学校） |
|      | 植田 滋（東北大学）       | 遠藤 理恵（東京工業大学）    | 金田 裕光（スズキ（株））     |
|      | 串田 仁（（株）神戸製鋼所）   | 佐藤 克明（日鉄鋼板（株））   | 諏訪 晴彦（摂南大学）       |
|      | 高谷 英明（三菱重工業（株））  | 鷹野 利公（産業技術総合研究所） | 寺田 大将（千葉工業大学）     |
|      | 戸田 佳明（物質・材料研究機構） | 松野 崇（鳥取大学）       | 水野 建次（日本冶金工業（株））  |
|      | 矢野 正樹（日本製鉄（株））   | 山口 広（JFEスチール（株）） | 山本 和巳（大同特殊鋼（株））   |

ふえらむ 定価 2,200円（税込）

Bulletin of The Iron and Steel Institute of Japan : Unit Price ¥2,000

2021年3月25日印刷納本、2021年4月1日発行（毎月1回1日発行）

編集兼発行人 東京都中央区日本橋茅場町3-2-10 鉄鋼会館5階

（一社）日本鉄鋼協会 業務執行理事・専務理事 脇本眞也

Tel : 03-3669-5933 Fax : 03-3669-5934（共通）

印刷所 東京都文京区本駒込3-9-3（株）トライ

### ©COPYRIGHT 2021 一般社団法人日本鉄鋼協会

複写をご希望の方へ

本会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、（一社）学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人日本複写権センター（（一社）学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体）と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません（社外頒布目的の複写については、許諾が必要です）。

権利委託先：一般社団法人学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル

TEL.03-3475-5618 FAX.03-3475-5619 E-mail : info@jaacc.jp

複写以外の許諾（著作物の引用、転載、翻訳等）に関しては、（一社）学術著作権協会に委託致していません。直接、本会へお問い合わせください。

また、アメリカ合衆国において本書を複写したい場合は、次の団体に連絡して下さい。

Copyright Clearance Center, Inc

222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA

TEL.1-978-750-8400 FAX.1-978-646-8600



# Minco ミンコ・熱電対とサンプラー

## 品質向上のパイオニア

### ■ ミンコサンプラー（製鋼 製鉄 試料採取用）

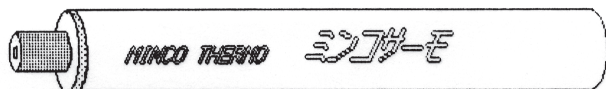


ミンコサンプラーの3つの大きな特徴 信頼性、作業性、安全性。  
炉外精錬装置 脱ガス装置 電気炉 レードル タンディッシュ CCモールド  
高炉出鉄樋 トピードカー 溶銑予備処理などあらゆる場所から採取できます

### ■ ミンコサーモ 消耗型熱電対

for IRONS, STEELS, FERROUS ALLOY

MMJ型 消耗型熱電対



TYPE R(13%) IPTS 1968  
白金・白金ロジウム

### ■ 標準試料

世界各国各社の製品を取り扱っております。  
化学分析用、発光分光分析用、蛍光X線分析用、英国BAS、米国NBS、  
BRAMMER、ALPHA、MINCO、カナダALCAN、ドイツBAM、  
フランスIRSID、スウェーデンSKF、他 ご用命下さい。

## 日本ミンコ株式会社

ISO9001:2000 認証取得

※お問い合わせは

本 社 〒341-0032

埼玉県三郷市谷中398番地1

TEL.048(952)8701 FAX.048(952)8705

URL <http://www.minco.co.jp>

東京事務所 〒166-0012

東京都杉並区和田3-36-7

TEL.03(5306)6265 FAX.03(5306)6268

MINCO U.S.A (WISCONSIN)

MINCO GERMANY (DÜSSELDORF)

MINCO AUSTRALIA (WOLLONGONG)



## AMT-GEGA社製 連铸用熱間切断装置

### ドイツ製乾式安全器、標準型と大容量型



LG/GRM/S : 切断酸素用



LG/GRM D : 燃料ガス用



LG/GRM : 加熱酸素用



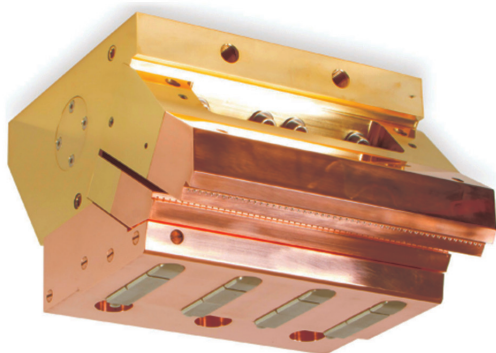
SIMAX 5 : 大容量型酸素用



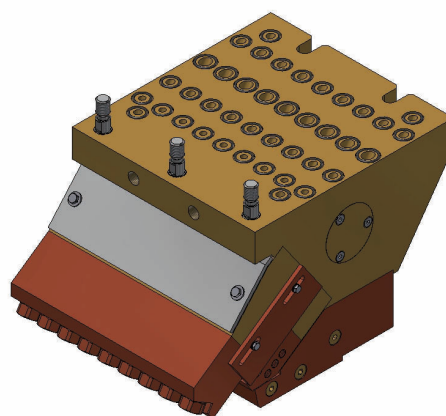
SIMAX 8 : 大容量型酸素用



DEMAX 5 : 大容量型燃料ガス用



従来の多孔式溶剤ユニット



メンテ性に優れた六角ノズルヘッドユニット



AMT Germany社の総販売代理店

株式会社 **トライメート**

〒194-0023 東京都町田市旭町1-6-11 コスモ・ミツイ  
PHONE: 042-727-2813 TELEFAX: 042-723-0803  
E-mail: trimates@blue.ocn.ne.jp