

ISSN 0387-1118

三菱製鋼技報 VOL.39 2025

三菱製鋼技報

VOL.39 2025

三菱製鋼技報

第39卷（通巻第47号）2025年

目 次

■卷頭言	1
小倉潤司	
■寄稿	
・素材メーカーにおける機械学習技術の活用	2
日本大学 教授 平山 紀夫	
・走査透過電子顕微鏡観察に基づくばね鋼の旧 γ 粒界微細化に向けた取り組み	11
北海道大学 教授 坂口 紀史、名誉教授 松浦 清隆	
名古屋大学 助教 齊藤 元貴	
山岡 拓也	
■技術報告	
・Ni基超耐熱合金Alloy718粉末試作品の積層造形体評価[第2報]	21
北川 尚美	
北海道大学 教授 坂口 紀史、名誉教授 松浦 清隆	
名古屋大学 助教 齊藤 元貴	
・VIM装置の800kgインゴット製造と窒素コントロール	25
鈴木 牧生	
・解析技術を活用したガスアトマイズ粉末製造	28
山田 武利	
・懸架ばねにおける $\cos\alpha$ 法を用いた三軸応力解析の有効性	32
山崎 智裕	
金沢大学 名誉教授 佐々木 敏彦	
・タンディッシュ誘導加熱装置導入による品質改善	36
松平 光	
■製品紹介	44
・トラック用後付けアイドリングストップエアコン「一刀涼暖」	
・磁選機新製品紹介	
・窒化用鋼の紹介	
■設備紹介	52
・3Dスキャナによる評価事例紹介	
■改善事例紹介	54
・ノーコードツール導入による業務改善(Smart Innovator)	
・Power Platformを用いたローコード薬品管理システム開発	
■産業財産権登録情報	63
■編集後記	64

IMITSUBISHI STEEL TECHNICAL REVIEW

Vol. 39 (Con. No. 47) 2025

CONTENTS

■ Foreword	1
Junji OGURA	
■ Contribution	
· Utilizing machine learning technology at a materials manufacturer	2
Nihon University, Professor Norio HIRAYAMA	
· Toward refinement of prior γ grains in steels based on scanning transmission electron microscopy	11
Hokkaido University, Professor Norihiro SAKAGUCHI	
Professor Emeritus Kiyotaka MATSUURA	
Nagoya University, Assistant Professor Genki SAITO	
Takuya YAMAOKA	
■ Technical Report	
· Evaluation of additive manufacturing of Ni-based super-heat-resistant alloy "alloy718" powder prototype [second report]	21
Naomi KITAGAWA	
Hokkaido University, Professor Norihiro SAKAGUCHI	
Professor Emeritus Kiyotaka MATSUURA	
Nagoya University, Assistant Professor Genki SAITO	
· VIM equipment 800 kg ingot production and nitrogen control	25
Makio SUZUKI	
· Gas atomized powder manufacturing using CFD analysis	28
Taketoshi YAMADA	
· Effectiveness of tri-axial stress analysis using $\cos\alpha$ method for suspension spring	32
Tomohiro YAMAZAKI	
Kanazawa University, Professor Emeritus Toshihiko SASAKI	
· Improvement of Casting Quality by Introducing a Tundish Induction Heating System	36
Hikaru MATSUHIRA	
■ Products	44
· Aftermarket Idling-Stop Air Conditioner for Trucks — 'Ittō Ryōdan'	
· Magnetic separators	
· Nitrided Steels	
■ Equipment	52
· Utilizing 3D Scanners in Leaf Spring Measurement	
■ Improvement case studies	54
· Revolutionizing Business Operations via No-Code Solution Deployment (Smart Innovator)	
· Low-Code Chemical Management System Development Using Power Platform	
■ Industrial Property Rights	63
■ Editor's Note	64

卷頭言

平素より三菱製鋼技報をご愛読いただき、誠にありがとうございます。今年度よりCTOを務めることになった小倉です。私は3年前、三菱製鋼の研究所である技術開発センター長に就任いたしましたが、今後は全社的な視点から当社の技術的な取り組みを推進してまいります。なお、この度お届けする最新号では、日本大学の平山教授ならびに北海道大学の坂口教授をはじめとする皆様にご寄稿いただきましたこと、心より感謝申し上げます。

今年度は、2023年中期経営計画（以下、中計）の最終年度であると同時に、次期中計の策定に向けた準備を進める重要な年になります。これまでの基盤事業や戦略事業の成果を振り返り、それに発展させることで、2030年に目指す企業像に向けた具体的な道筋を描いていく必要があります。

特に注力しているのが、「エンジニアの育成」と「人的資源の最適活用」です。「基盤事業の稼ぐ力」の強化と「戦略事業の育成」の両立を目指す中で、エンジニアリングの重要性を改めて認識しています。新たな製品や技術を生み出すには、顧客ニーズを的確に捉え、それを具現化できるエンジニアが不可欠です。また、技術開発力の向上には、単なる人員増強にとどまらず、従業員一人ひとりの意識改革や体系的な育成プランの策定が必要です。

今後は需要の高い分野での人員増強、新規事業創出に向けた機械設計エンジニアの強化、さらには既存事業部門と機器事業部門の連携強化など、多角的な施策を実施してまいります。これらの取り組みによって、2030年に向けた持続可能な成長の基盤を築いていきます。また、ESG（環境・社会・ガバナンス）対応やDX（デジタルトランスフォーメーション）といった新たな課題にも積極的に取り組み、AIやデータ活用を通じた効率化とスピードアップを推進しています。

本技報が、当社のエンジニアリング活動に対する読者の皆様のご理解を深め、引き続きのご支援を賜る一助となれば幸いです。今後とも三菱製鋼をどうぞよろしくお願ひ申し上げます。



技術開発センター
センター長 小倉 潤司

素材メーカーにおける機械学習技術の活用

日本大学 生産工学部 教授、次世代複合材リサーチ・センター長 平山 紀夫
Norio Hirayama

Utilizing machine learning technology at a materials manufacturer

Synopsis:

The scope of application of machine learning in manufacturing is extremely diverse, including quality prediction and defect detection, predictive maintenance, manufacturing process optimisation, supply chain efficiency, and the exploration and design of new materials. Among these applications of machine learning technology, one example that has a significant impact on the development work of materials manufacturers is machine learning for predicting structure, composition, and function from a database of material properties. In this paper, Chapter 2 provides a brief introduction to the relationship between machine learning and deep learning. Chapter 3 provides an easy-to-understand explanation of neural networks (NN), a representative deep learning technique, and RBF interpolation, a representative non-deep learning technique, as machine learning techniques that are useful for exploring, designing, and developing new materials. In Chapter 4, we will introduce analysis cases where these three machine learning techniques have been applied to predict material compositions and process conditions in the materials industry, such as iron and steel, materials, and pharmaceuticals. Through these cases, we will clearly explain how machine learning technology can be utilised to address manufacturing processes that were previously only understood through the experience and intuition of skilled craftsmen, such as ‘what materials to mix and in what proportions to produce a desired product.’

1. はじめに

近年、世界的に機械学習の導入を検討している企業が急速に増加しており、我が国の製造業においても機械学習が本格的にビジネスに利用されはじめている。機械学習はデータ分析手法の一つとして定義され、収集したデータを機械が自動で学習し、データの背景にある規則や行動様式を検出する仕組みである。製造業における機械学習の応用範囲は、品質予測・不良品検出、予知保全、製造プロセスの最適化、サプライチェーンの効率化、新素材の探索・設計等、非常に多岐にわたる。これらの機械学習技術のなかでも、素材メーカーの開発業務にとって非常にインパクトのある活用例としては、材料特性のデータベースから構造・成分・機能を予測するための機械学習が挙げられる。特に最近では、人工知能(AI)による計算科学の自動化やテキストマイニングで得られた大量のデータを利用した機械学習による材料探索など、データ科学を使った新材料開発の手法であるマテリアルズインフォマティクス(Materials informatics: MI)に注目が集まっている。

本稿では、第2章で機械学習とディープラーニング(深層学習: Deep Learning)、そして最適化との関係性について

簡単に紹介する。そして、第3章では新素材の探索および設計・開発に有用と思われる機械学習として、深層学習の代表的な手法であるニューラルネットワーク(NN)と、非深層学習の代表的な手法としてRBF補間にについてわかりやすく解説する。その後、第4章で、製鉄、素材、製薬などの素材メーカーにおける材料配合・工程条件の予測手法として、これらの機械学習を適用した解析事例を紹介する。この事例を通して、「どんな材料を、どんな割合で混ぜて、どのような加工条件で製造するのか」など、今まででは熟練技能の継承により決定していた製法に対して、機械学習の技術がどのように活用できるかわかりやすく解説する。

2. 機械学習、深層学習(Deep Learning)と最適化

本章では、原材料の成分比率や加工条件のデータベース(入力変数)から加工素材の様々な特性や機能(出力変数)を予測する際に重要となる、変数間の因果関係、機械学習とディープラーニング(深層学習: Deep Learning)、そして最適化との関係性について解説する。

2.1 機械学習と代理モデル

ここでは、機械学習についてその概念について簡単に説明する。機械学習とはデータを分析する方法のひとつで、データから機械が自動で「学習」し、データの背景にあるルールやパターンを発見する方法で、データを収集、そのデータに基づいてルールを構築、そして新しいデータを予測する、という3つのステップで計算が進行する。主な手法として、線形回帰、ロジスティック回帰、サポートベクターマシン(SVM)等が挙げられる。線形回帰モデルによる出力変数 y の予測は、「最小二乗法」による係数決定の一般的な手法として古くから広く用いられている。また最近では、非線形性の強い実験データを回帰分析して特性予測を行うため、多項式関数やガウス型基底関数を用いた非線形回帰モデルも広く用いられている。これらの機械学習の特徴としては、少ないデータでも精度をだすことができ、モデルが比較的解釈しやすいといった点が挙げられる。

これらの非線形回帰モデル等の機械学習モデルを用いるメリットとしては、入力変数 x と出力変数 y との関係を実際の実験や現場での製造データから取得するのではなく、予め限られたデータから機械学習により近似数理モデル(代理モデルあるいはサロゲートモデルと呼ばれる)により実験や現場での製造を行わずに短時間かつ低コストで予測することにある。このような代理モデルを用いると、この後で述べる最適化のプロセスで出力変数 y (目的関数とも呼ばれる)を計算する際の計算コストが大幅に削減でき、高速かつ低コストに最適解を見つけることができる。このように、機械学習により関数をサロゲートモデルに置き換えて最適化を行うアルゴリズムをサロゲート最適化と呼んでいる。なお、出力変数 y が入力変数 x に依存して決まるとき、出力変数 y は x の関数 $y=f(x)$ と表し、機械学習と最適化のなかでは、入力変数 x はパラメータ、決定変数、説明変数、独立変数、特微量等、様々な呼び方がされる。また、出力変数 y も出力変数、目的変数、従属変数と呼ばれ、 $f(x)$ も関数、目的関数、出力関数等と呼ばれる。

2.2 入力変数と出力変数の因果関係について

原材料の成分比率や加工条件(プレス圧力値や加熱温度、加熱時間等)を入力変数 x 、加工された素材の物理的特性(硬度、弾性係数、熱伝導率、線膨張係数等)を出力変数 y として予測する場合を考える。この場合、原材料の成分比率や加工条件から加工された素材の物理的特性を試作や実験を行わずに機械学習を用いて予測できれば、開発業務が効率化でき製品開発の遅延やコスト超過を抑制できる。しかしながら、さらに重要なことは、加工された素材(製品)の物理的特性が最も適切な(優れた)値になるような原材料の成分比率や加工条件といった入力変数 x を探索することである。そのためには、最適化と呼ばれる処理が必要になる。最適化とは、「関数 $y=f(x)$ を最小化(あるいは最大化)する入力変数 x を見つける」ことである。図1に機械学習と最適化の関係を示す。

には、その入力と出力の関係は単なる偶然によるものか、共通の別の要因によるものである場合がほとんどであり、入力変数 x を制御することができないからである。

例えば、夏季の気温上昇率とエアコンの売上金額は相関関係があり、夏季の気温上昇率とアイスクリームの売上金額にも相関関係がある場合を想定してみる。このケースでは、エアコンの売上金額とアイスクリームの売上金額には相関関係が成立するが、エアコンの売上金額がアイスクリームの売上金額の増加を引き起こす直接的な原因にはなっていない。このような擬似相関の関係にある入力変数 x と出力変数 y の相関を機械学習等で予測する場合に限られる。機械学習で設定する場合の入力変数 x と出力変数 y の関係を予測と制御(最適化)の観点で整理したもの

表1. 入力変数 x と出力変数 y の関係

因果関係あり		因果関係なし	
x を制御できる	x を制御できない	y を制御できる	y を制御できない
y を予測し制御できる	y を予測できない	y は x の関数ではない	y を予測できる
機械学習と最適化	機械学習	x と y は独立である	機械学習

本稿の主題である「素材メーカーにおける材料配合・工程条件の予測手法としての機械学習」では、入力変数 x と出力変数 y の間には因果関係があり、尚且つ入力変数 x は制御することが可能な制御パラメータである。以上のように、入力変数 x が制御できる物理量でなければ、出力変数 y を予測できても次のアクション(最適化)が行えない点を再度、強調しておく。

2.3 機械学習と最適化

原材料の成分比率や加工条件(プレス圧力値や加熱温度、加熱時間等)を入力変数 x として、加工された素材の物理的特性(硬度、弾性係数、熱伝導率、線膨張係数等)を出力変数 y として予測する場合を考える。この場合、原材料の成分比率や加工条件から加工された素材の物理的特性を試作や実験を行わずに機械学習を用いて予測できれば、開発業務が効率化でき製品開発の遅延やコスト超過を抑制できる。しかしながら、さらに重要なことは、加工された素材(製品)の物理的特性が最も適切な(優れた)値になるような原材料の成分比率や加工条件といった入力変数 x を探索することである。そのためには、最適化と呼ばれる処理が必要になる。最適化とは、「関数 $y=f(x)$ を最小化(あるいは最大化)する入力変数 x を見つける」ことである。図1に機械学習と最適化の関係を示す。

以上のように、一般的なNNでは、順伝播により入力信号から出力信号を算出し、その出力と学習データの出力信号の誤差を損失関数により求める。そして、その誤差を誤差逆伝播により最小とするように最適化し、最適な重みパラメータとバイアスを決定する。そして、学習を完了し最適な重みパラメータとバイアスを持ったNNに未知の入力信号を与えると、順伝播により出力信号が算出され、これが予測値となる。なお、紙面の都合上、重みパラメータ w とバイアス b を更新するための最適化手法であるAdamアルゴリズムや局所解への収束対策として導入されたミニバッチ学習法等の重要な手法を解説していないが、多くの参考文献^{2)~5)}があるのでそちらを参照されたい。

3.2 放射基底関数 (RBF) 補間

RBF補間⁶⁾は、RBF (放射基底関数, radial basis function) を用いて離散的なデータの値を内挿補間して連続関数を構築する手法である。RBF補間は、NNと同様に離散データの分布に関する仮定を設けずに分析するノンパラメトリックな手法なため、異常値や離散データの分布形状に対して頑健であり、実際のデータの分布が仮定と異なる場合でも適切な結果を得ることができる。そのため、様々なデータに適用することが可能である。

RBF補間の定式化と計算手順を説明するために、多数の離散的なデータが含まれているデータセットを D とし、説明変数 x と目的変数 y が一対一の対応関係にあると仮定し、その対応関係を表す離散的なデータ $d_{(i)}$ を以下のように表す。

$$\mathbf{d}_{(i)} = \{\mathbf{x}_{(i)} \quad y_{(i)}\}^T, \text{ where } \mathbf{D} = \{\mathbf{d}_{(1)} \cdots \mathbf{d}_{(n)}\}^T \quad (6)$$

ここで、下付き添え字 (i) は i 番目のデータであることを示し、 $x_{(i)}$ と $y_{(i)}$ はそれぞれ i 番目のデータにおける説明変数と目的変数の値を示す。また、 n はデータ数である。このようなデータセットにRBFを適用して得られる補間関数 $f(x)$ は次式で表される。

$$f(\mathbf{x}) = \mathbf{k}(\mathbf{x})^T \mathbf{w} \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{k}(\mathbf{x})$ は n 行のカーネルベクトルであり、カーネル関数⁷⁾ $k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_{(i)})$ を用いて次式で定義した。

$$k(\mathbf{x}) = \{k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_{(1)}) \cdots k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_{(n)})\}^T, \quad (8)$$

$$\text{where } k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_{(i)}) = \exp \left\{ -\left(\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_{(i)}\|}{\beta} \right)^2 \right\} \quad (9)$$

ここで、 $\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_{(i)}\|$ は \mathbf{x} と $\mathbf{x}_{(i)}$ のユークリッドノルムであり、 $\beta \in \mathbb{R}$ は補間関数 $f(x)$ の応答を調整するハイパー・パラメータである。一方、 $\mathbf{w} = (w_1 \cdots w_n)^T \in \mathbb{R}^n$ は重み係数ベクトルであり、以下の式を解くことで得られる⁸⁾。

$$(\mathbf{K}^T \mathbf{K} + \eta \mathbf{I}) \mathbf{w} = \mathbf{K}^T \mathbf{y} \quad (10)$$

ここで、 $\mathbf{y} = (y_{(1)} \cdots y_{(n)})$ はデータセットに含まれる目的変数の離散値を並べたベクトルであり、 \mathbf{I} は恒等行列である。また、 \mathbf{K} は n 行 n 列のカーネル行列であり、次式で定義した。

$$\mathbf{K} = [\mathbf{k}(\mathbf{x}_{(1)}) \cdots \mathbf{k}(\mathbf{x}_{(n)})]^T \quad (11)$$

さらに、式(10)左辺の η は補間関数 $f(x)$ がデータセットに含まれる目的変数 $y_{(i)}$ に過適合(オーバーフィッティング)することを抑制するために導入された正則化パラメータであり、式(9)のパラメータ β と共に最適な値を決定する必要がある。この2つのパラメータの組 (β, η) を、以降ではパラメータセットと呼ぶことにする。

これらのパラメータセットの値を決定する場合には、補間関数がデータセットに含まれる全てのデータを適切に表現できるだけでなく、データセットに含まれない未知の値を持つ説明変数が入力された場合でも、目的変数を適切に予測することが可能でなければならない。新たなデータ $d_{(i)}$ が容易に得られる場合には、式(6)のデータセット D のデータと重複しないテストデータを多数用意し、式(7)の補間関数がそのテストデータに整合するように最適化することで、パラメータセット (β, η) を決定することができる。しかしながら、データ $d_{(i)}$ を実験結果からサンプリングする場合、利用可能なデータ数には制限があり、多数のテストデータを新たに用意することは現実的に不可能である。このように利用可能なデータ数が限られている場合のパラメータセットの値を決定するための有効な方法として、交差検証(k-Fold Cross Validation)⁹⁾と呼ばれる手法を用いることができる。

交差検証とは、データセット D を n_{fold} 個のバッチと呼ばれる小規模なデータセットに分割して、そのうちの一つをテストデータとして用いる手法である。具体的には、式(12)の最適化問題を解くことで、RBF補間のパラメータセット (β, η) の最適な値 $(\hat{\beta}, \hat{\eta})$ を決定する。

$$(\hat{\beta}, \hat{\eta}) = \arg \min_{\beta, \eta} L(\beta, \eta) \quad (12)$$

ここで、 $L(\beta, \eta)$ は交差検証を実施することで得られる損失関数であり、式(13)で定義している。

$$L(\beta, \eta) = \frac{1}{n_{fold}} \sum_{i=1}^{n_{fold}} e_i(\beta, \eta) \quad (13)$$

式(13)の e_i は式(14)に示すように、 i 番目のバッチをテストデータとして用いた場合の誤差関数の値を示している。

$$e_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} (f(\mathbf{x}_{(j)}) - y_{(j)})^2 \quad (14)$$

ここで、 n_i は i 番目のバッチに含まれるデータの数である。また、 $x_{(j)}$ 、 $y_{(j)}$ はそれぞれ i 番目のバッチに含まれる j 番目のデータの説明変数と目的変数である。式(14)で e_i を計算する際に用いる補間関数 $f(x)$ は、 i 番目のバッチ以外の全てのデータを用いて、式(7)から式(11)を計算することで構築される。

以上で定義した最適化問題を満たすパラメータセット (β, η) を差分進化アルゴリズム¹⁰⁾等の最適化手法によって探索して決定する。交差検証の流れをステップごとにまとめて図5に示す¹¹⁾。

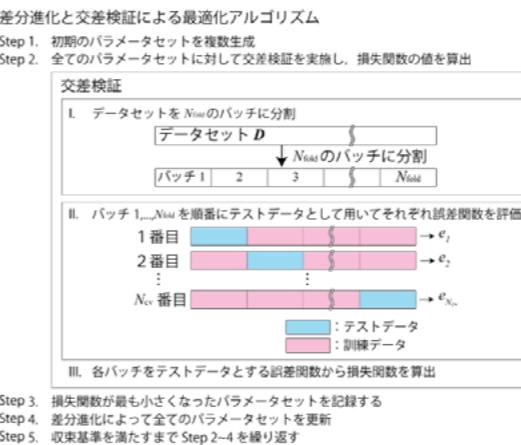


図5 差分進化と交差検証を用いたRBF補間のハイパー・パラメータの最適化¹¹⁾

4. 機械学習による加工素材の物理特性の予測

本章では、機械学習が素材メーカーの開発業務、特に製品である加工された素材や部材の物理特性の予測にどのように応用できるか、NNとRBF補間を用いて具体的に解説する。

4.1 材料配合・工程条件の計測データ

素材メーカーでは、多数の原材料を組み合わせ・調合し、そして様々な加工条件下で製品となる素材や部材を製造している。多数の原材料を組み合わせて調合する場合でも、各原材料(構成相)の材料定数に、それぞれの体積含有率を乗じて、加工後の素材の材料定数を単純な複合則で推定できる場合も多い。しかしながら、相転移や化学反応を伴うような材料配合や加工条件の下では、ある条件を境

にして、材料の状態(相)が非線形かつ不連続に劇的に変わることがある。そのような場合には、体積分率による単純な複合則では加工後の素材や製品の特性を予測することは困難である。特に、非常に多くの原材料、そして加工条件が複雑に組み合わされる製造プロセスでは、最適な配合条件や加工条件を探索することは困難を極める。

本稿では、このような加工(製造)後の製品(素材や部材)の状態(相)が非線形かつ不連続に変わることを想定し、原材料データと加工条件を仮想的に設定している。今回の事例では、7つの原材料の配合比率と焼成温度を加工条件として、加工後の製品となる素材や部材の品質項目として5つの機械的特性が要求されていると仮定した。そして、これらの製造現場での計測データセット(以下、訓練データ)を100パターン用意し、NNとRBFによる機械学習を行った。その後、学習後のNNとRBFに対して、学習をさせていない未知の20パターンの原材料の配合比率と焼成温度の組み合わせ(以下、テストデータ)を入力し、製品となる素材や部材の品質項目が予測できるか検証した。今回の事例で学習に使用した製造現場での訓練データの想定例として、表3に入力である原材料と加工データ、表4に出力である製品素材の物性データを示す。

表3 検証で使用した原材料と加工データ(入力)

INPUT	1	2	3	4	5	6	7	8
種別	原材料A	原材料B	原材料C	原材料D	原材料E	原材料F	原材料G	焼成温度
No.1	18.81	8.70	13.42	9.98	25.86	0.85	0.23	455.68
No.2	30.25	0.00	3.80	6.51	7.81	31.69	3.17	199.14
No.3	18.60	10.98	13.19	6.52	29.44	0.00	1.18	429.91
No.4	41.67	29.38	1.45	0.38	0.98	0.00	9.10	190.94
No.5	18.17	7.73	18.27	18.36	7.68	1.59	0.00	467.40
No.6	31.12	0.00	2.86	11.09	9.93	22.63	2.38	306.91
No.7	33.68	0.00	0.99	9.16	7.12	30.64	0.00	209.68
No.8	27.88	6.03	3.95	6.83	21.35	14.43	1.23	324.48
No.9	20.68	3.37	3.91	11.14	21.57	17.46	1.09	354.94
No.10	33.94	0.00	2.03	7.03	13.84	25.99	0.00	256.54
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
No.96	22.31	5.04	16.35	17.02	10.93	1.66	0.00	487.31
No.97	18.74	0.00	24.44	3.30	5.92	15.73	15.20	419.37
No.98	27.42	26.29	13.87	8.52	14.67	0.00	13.36	306.91
No.99	5.40	18.30	14.48	8.88	10.01	6.71	13.94	315.11
No.100	8.39	18.58	12.24	11.32	4.77	6.81	14.15	310.43

表4 検証で使用した製品素材の物性データ(出力)

OUTPUT	1	2	3	4	5
種別	物性値A	物性値B	物性値C	物性値D	物性値E
No.1	4.10	3.68	1.97	1.51	5.19
No.2	3.92	2.80	5.41	1.47	6.63
No.3	4.10	4.02	2.04	1.85	4.64
No.4	2.97	2.95	0.70	1.82	2.21
No.5	4.19	4.70	1.40	0.16	4.97
No.6	4.01	3.51	5.06	1.34	6.07
No.7	3.90	3.44	5.13	2.66	6.30
No.8	4.31	3.68	3.58	1.82	6.85
No.9	4.10	3.98	4.14	1.52	6.30
No.10	3.98	3.51	4.71	2.02	6.19
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
No.96	4.04	4.36	1.47	0.55	5.19
No.97	3.95	4.33	4.63	1.75	5.96
No.98	3.90	3.86	3.16	1.41	5.52
No.99	3.92	3.66	4.07	1.37	5.96
No.100	3.75	3.38	3.93	1.09	5.52

4.2 NNによる加工素材の物理特性の予測結果

はじめに、3.1節で述べたNNを用いて、表3の入力データと表4の出力データの関係性を学習させた。このときのニューロンの学習過程を図6に示す。横軸は学習の繰り返し回数(Epoch)、縦軸は式(2)で示した損失関数の値であり、訓練データに対する誤差を表している。

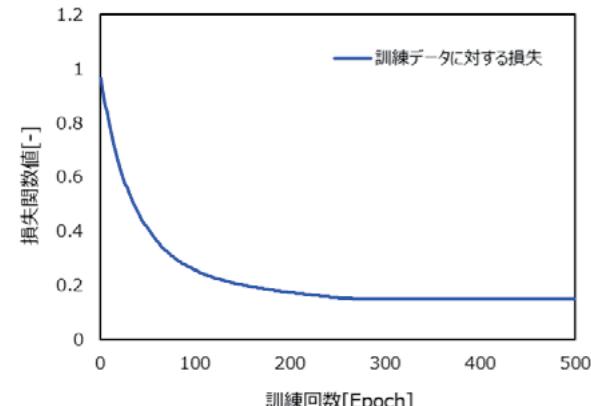


図6 NNの学習過程

訓練初期では急峻な下降を示しており、NNモデルが入力と出力との関係を効率的に学習していることが分かる。その一方で、訓練回数が200 Epochを超えると、訓練データに対する損失はほぼ一定の値に収束していることが分かる。これはNNが過学習に陥らず、安定した予測を行っていることを示している。

次に、この学習済みのNNに学習をさせていない未知の20パターンの原材料の配合比率と焼成温度の組み合わせのテストデータを入力し、それぞれのテストデータに対して、出力データである製品素材の物性値が実測値と比較してどの程度の精度で予測ができるか検証を行った。検証に使用した評価指標としては、平均二乗誤差平方根(Root Mean Squared Error: RMSE)、平均絶対誤差(Mean Absolute Error: MAE)および決定係数(Coefficient of Determination: R^2)の3つである。20パターンのテストデータを学習済みのNNに入力して得られた各物性値(A～E)のRMSEとMAEの平均値を表5にし、それぞれの物性値の実測値(真値)と予測値の散布図と決定係数 R^2 の平均値を図7に示す。すべての物性値(A～E)において、RMSEおよびMAEの値は非常に小さく、 R^2 値も0.84～0.88の範囲に収まっており、今回の学習済みNNが良好な予測精度を有していることがわかる。

表5 NNによる各物性値に対する予測性能

	RMSE	MAE
物性値A	0.1195	0.0792
物性値B	0.1462	0.0964
物性値C	0.1282	0.0861
物性値D	0.1326	0.0902
物性値E	0.1238	0.0814

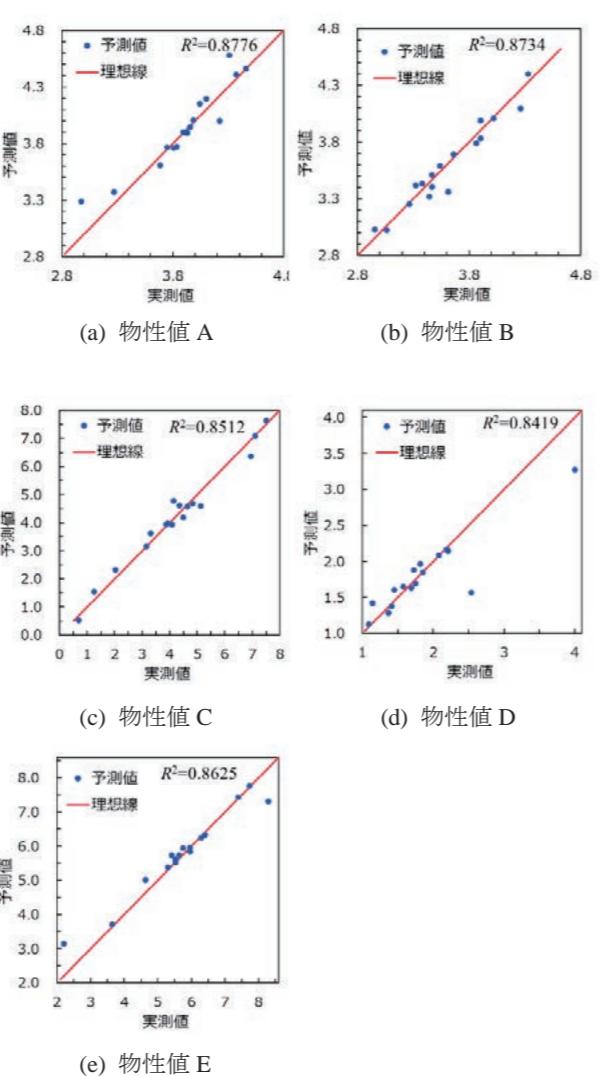


図7 NNによる各物性値の真値と予測値の散布図

4.3 RBFによる加工素材の物理特性の予測結果

次に、4.2と同様に、20パターンのテストデータを3.2節で述べたRBF補間で得られた各物性値(A～E)のRMSEとMAEの平均値を表6に示し、それぞれの物性値の実測値(真値)と予測値の散布図と決定係数 R^2 の平均値を図8に示す。

表6から明らかなように、RMSEおよびMAEの値はNNよりも小さく、図8に示した相関図においても、 R^2 値が0.97～0.99とほぼ1に近い高い相関を示した。今回例示した計測データの予測では、深層学習であるNNよりも非深層学習であるRBF補間による予測の方が、予測精度が高い結果となった。しかしながら、NNの中間層の層数等の調整を行うことで、NNにおいてもより高い予測精度を実現できると思われる。

表6 RBFによる各物性値に対する予測性能

	RMSE	MAE
物性値A	0.0204	0.0531
物性値B	0.0253	0.0473
物性値C	0.1546	0.2868
物性値D	0.0359	0.0972
物性値E	0.0456	0.0965

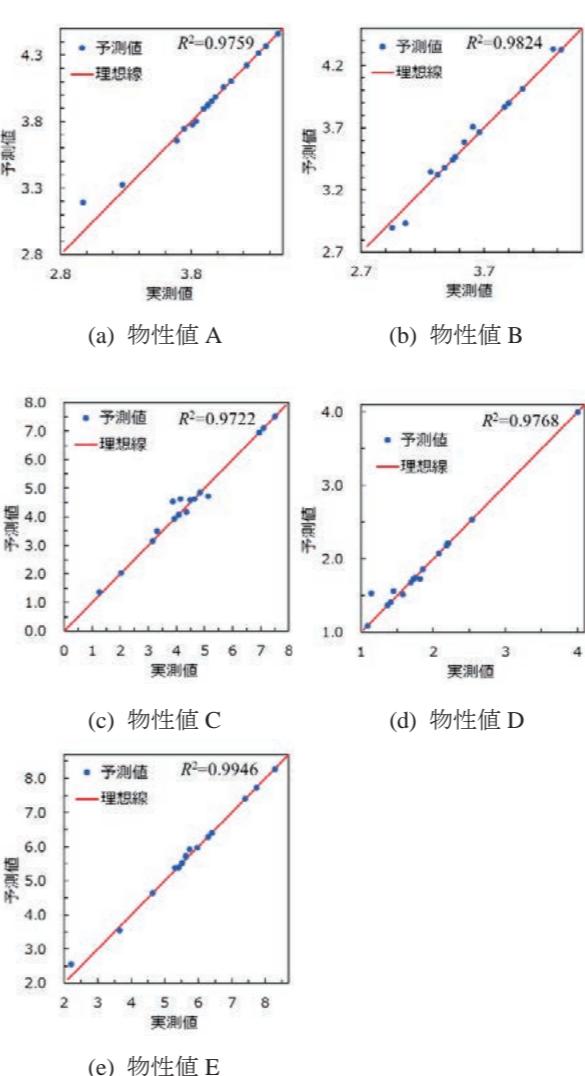


図8 各物性値の真値と予測値の散布図

また、図9には各物性値間の相関関係を示す。図9のコンターレベルは、それぞれの物性値間で-1.0の負の相関から+1.0の正の相関の強さを示している。今回の物性値では、物性値Cと物性値Eは強い正の相関があり、物性値Cと物性値Bには弱い負の相関があることがわかる。この場合、物性値Cと物性値Bには正の相関関係がないため、どのような原材料と加工条件の組み合わせを選んでも、同時に特性向上させることができない等の知見を得ることができる。

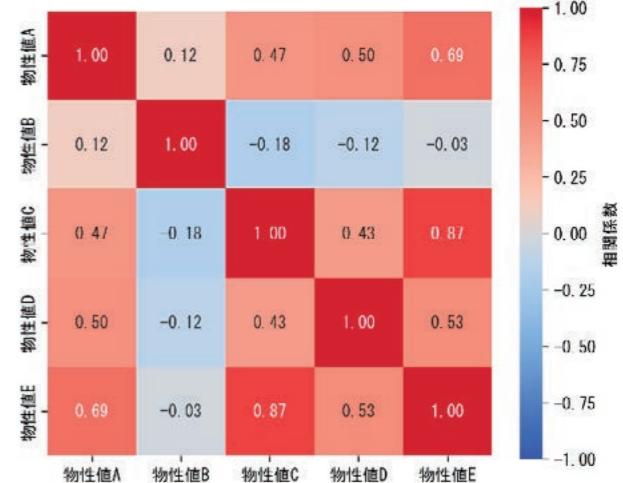


図9 各物性値間の相関関係

5.まとめ

本稿では、新素材の探索および設計・開発に有用と思われる機械学習として、深層学習の代表的な手法であるニューラルネットワーク(NN)と、非深層学習の代表的な手法としてRBF補間について、その計算手順を解説した。そして、製鉄、素材、製薬などの素材業界における材料配合・工程条件の予測手法として、これらの機械学習を適用した解析事例を紹介した。この事例を通して、これまでには熟練技能の継承により決定していた製法に対して機械学習の技術を用いることで、より精度が高く見通しの良い予測に基づいた決定ができることがわかる。

このように、機械学習による技術は、これまで製造業が有していた経験や勘に基づき言語化や文書化が難しい個人的な知識である暗黙知(Tacit Knowledge)を、言語や数式、マニュアルなどで表現できる形式知(Explicit Knowledge)に変換できる可能性を秘めている。経済産業省の調査によれば、製造業の約70%が「技術・ノウハウの伝承が不十分」と回答し、暗黙知の喪失が深刻な問題となっている。機械学習による技術だけではなく、DX(Digital Transformation)の推進により、これまでの日本の製造業の強みであった、暗黙知の豊かさを可能な限り形式知に変換し、組織の資産として共有・活用できる仕組みづくりが極めて重要であると思料している。

走査透過電子顕微鏡観察に基づくばね鋼の 旧γ粒界微細化に向けた取り組み

坂口 紀史^a、松浦 清隆^b、齊藤 元貴^c、山岡 拓也^d

Norihito Sakaguchi, Kiyotaka Matsuura, Genki Saito, Takuya Yamaoka

Toward refinement of prior γ grains in steels based on scanning transmission electron microscopy

Synopsis:

The refinement of prior austenite (γ) grains is an extremely effective method of improving the toughness of steels. This study focused on the pinning effect of micro-precipitates, which are widely used for γ grain refinement. The formation process of micro-precipitates (mainly AlN) during heat treatment was evaluated using microstructural observations with STEM and STEM-EDS. We found that MnS began to precipitate near the cementite/ α -Fe matrix interface at around 550°C, alongside cementite precipitation, as the temperature of the solution-treated steel increased continuously up to 800°C. Fine AlN then precipitated near the cementite/ α -Fe matrix interface as the temperature increased further. STEM *in-situ* heating observations confirmed that these fine intragranular precipitates effectively pinned the γ grain boundary after reverse transformation.

1. 緒言

自動車の足回りや建設車両に用いられるばね鋼では、高い弾性限、優れた疲労特性、大きな衝撃値、寸法精度が高いことなど、複数の性質が同時に要求される¹⁾。特に高強度化と韌性向上の双方を満たすことが重要であり²⁾、これらを両立するには旧 γ 粒の微細化が極めて有効であることが知られている³⁾。そのため、今まで様々な結晶粒微細化手法を用いた材料開発が進められている⁴⁾。その一つは“Zenerのピン止め効果”と呼ばれる析出物や第二相粒子を利用した粒成長の抑制メカニズムであり、Zenerは結晶粒サイズとピン止め粒子の関係式として次式を導いた⁵⁾。

$$\bar{R} = \frac{4\bar{r}}{3f}$$

ここで、 \bar{R} は平均の結晶粒半径、 \bar{r} は分散した粒子の平均半径、 f は粒子の総体積分率である。この式より、析出物あるいは第二相粒子の体積分率が一定であれば、よりサイズが小さい粒子を高い数密度でマトリクスに分散させることができれば微細化が進むことになる。すなわち、析出物を利用する場合は、熱処理過程でいかに析出核を多発させ析出物の数密度増加と微細化を同時に図るかがポイントとなる。そのため、熱処理過程における析出物の核形成サ

イトの同定や析出温度の把握といった析出メカニズムの解明は必要不可欠である。

材料のミクロ組織解析において、従来の透過型電子顕微鏡法(TEM)に加えて最近では走査透過電子顕微鏡法(STEM)の利用が拡大している。TEMとは異なりSTEMでは観察試料面上に細く収束した電子線を走査しながら照射し、透過した電子線強度を信号として像を形成する。そのため、エネルギー分散X線分光法(EDS)との相性が良く、STEM観察と同時に材料を構成元素の濃度分布をSTEM-EDSマップとして取得することも可能である。特に近年の球面収差補正技術の発展とシリコンドリフト検出器(SDD)の開発により、EDS分析に要する時間は十~数百分の一程度まで高速化され、限られた条件ではあるが検出限界は百ppm以下にも達する⁶⁾。よって、従来は困難であった鋼中に分散したnmオーダーの析出物のEDS分析が優れた空間分解能で可能となっている。また、サンプルを支えるTEM用ホルダーにおいても技術的な進展があり、最近ではMEMS技術を利用してサンプルへのバイアス印加や急速加熱・冷却過程を高分解能かつドリフトレスで観察可能なシステムが提供されている。これにより、酸化物ナノチューブの相変態過程⁷⁾や鋼のペイナイト逆変態⁸⁾といった現象をTEMあるいはSTEMの時間・空間分解能で観察することも行われている。

a)北海道大学 大学院工学研究院 教授

b)北海道大学 大学院工学研究院 名誉教授

c)名古屋大学 大学院工学研究科 助教

d)三菱製鋼株式会社 技術開発センター

本研究では、SUP12ばね鋼を対象に、溶体化熱処理後の昇温中における微細析出物の形成過程について、熱処理後のミクロ組織をSTEM観察するとともにSTEM-EDS分析により内部のミクロ組成分布を二次元画像化することで、熱処理過程で形成される様々な析出物の析出サイトの同定やその時間変化を調査した。さらに、加熱ホルダーを利用しての高温でのその場STEM観察により、これら微細析出物が粒界ピン止め粒子として有効的に作用するかどうかを検討した。

2. 実験方法

供試材としてSUP12ばね鋼(0.55C-1.55Si-0.8Mn-0.001S-0.8Cr-0.025Al-0.003Ti-0.003N(質量%))を用いた。この鋼より切り出したサンプルをAINやTi(C,N)、MnSの固溶温度域にあたる1300°Cで溶体化処理した後、800°Cに設定した塩浴中に所定の時間浸漬し、塩浴から取り出し後に急冷した。図1に本試験での熱処理条件を示す。さらに、ダミーサンプルを用いて評価した塩浴中の浸漬時間とサンプル温度の関係を図2に示す。熱処理後のサンプルを切断し、集束イオンビーム(FIB)加工装置を用いてTEM観察用薄片を作製した。鋼中の微細析出物の観察・分析には球面収差補正器と4本のEDS検出器を備えたSTEMを用い、

加速電圧300kVで明視野(BF-)および環状暗視野(ADF-)STEM観察ならびにSTEM-EDS分析を実施した。

さらに、MEMSチップタイプのSTEM用加熱ホルダーを用いて、加熱に伴う鋼の $\alpha \rightarrow \gamma$ 逆変態過程および γ 相中の結晶粒界移動過程をその場観察した。

溶体化温度 : 1300°C
析出熱処理 : 800°C
浸漬時間 : 10, 40, 160, 640, 2560 s

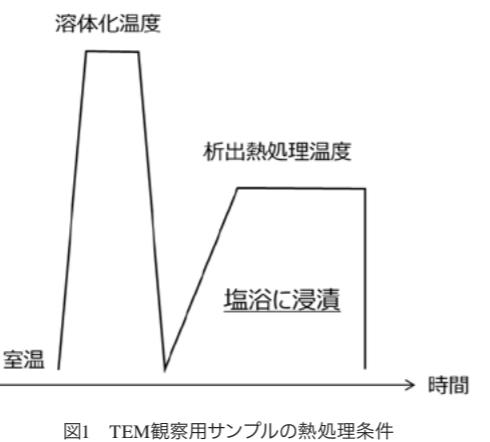


図1 TEM観察用サンプルの熱処理条件

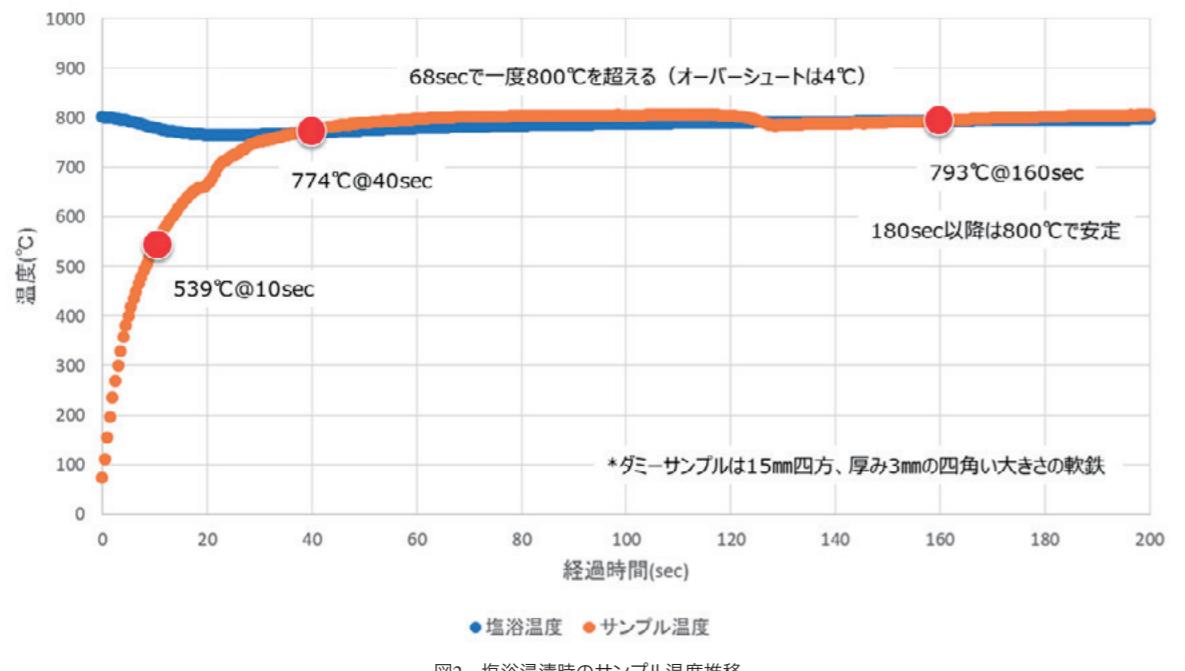


図2 塩浴浸漬時のサンプル温度推移

3. 結果と考察

3.1 微細析出物の形成過程

はじめに、溶体化処理後に800°Cの塩浴に浸漬し10、40および160秒間析出熱処理したサンプルにおけるADF-STEM像とSTEM-EDSマッピング結果について議論する。図3(a)に示すとおり、溶体化処理後の急冷により初期組織はマルテンサイトであったものが、塩浴に10秒間浸漬することで主にラス境界にセメンタイトが析出していた。図2より、この時点でのサンプル温度は539°Cと推定され、炭素を過飽和固溶したマルテンサイトの分解速度とセメンタイトの析出速度は非常に速いことが示唆される。また、セメンタイト中にはCrおよびMnが濃縮していた。これに対して、Al、TiおよびNに大きな濃度変化は見られず、Al、Tiとともに α -Feマトリクスに過飽和固溶したままであることが推察される。また、MnおよびSのマップにおいて、赤矢印で示した箇所で両元素が著しく濃縮していた。その大きさは10nm程度であり、これは析出したMnSであると考えられる。同様のMnS析出物は別箇所でも見られ、いずれもセメンタイトに張り付くように析出していた。これはセメンタイト/ α -Feマトリクス界面がMnSの優先析出サイトであることを意味している。図3(b)は塩浴中に40秒間浸漬した場合の観察結果であり、このときサンプルの温度は774°Cに達している。マトリクスはなお α -Feであり、セメンタイトが球状に粗大化していく傾向が見られる。MnおよびSのSTEM-EDSマップより、多数の微細なMnSがセメンタイトを覆うように析出する様子が確認できる。それに加えて、AlとNが所々で濃縮していた。これらはAIN析出物と考えられ、その大きさは約20nm程度であった。MnSほどはっきりとは

しないが、AINもセメンタイト周辺に偏在しているように見られることから、やはりセメンタイト/ α -Feマトリクス界面がAINの優先核形成サイトになっていることが示唆される。また、Alの濃縮部ではTiの濃縮も確認できることから、AINはわずかにTiを固溶した(AI, Ti)Nとして存在していると考えられる。さらに160秒間塩浴中に浸漬したサンプルより得た結果を図3(c)に示す。図2より、サンプル温度は浸漬後60秒で800°Cに達しており、浸漬中に $\alpha \rightarrow \gamma$ 逆変態が完了し、その後の急冷により再びマルテンサイト変態した組織となっている。一方、セメンタイトの分解スピードはそれほど速くないと考えられ、球状化したセメンタイトがなお所々に残存していた。一方、MnSあるいはAINのサイズや空間分布は40秒間浸漬したサンプルとほとんど変わりなく、これら微細析出物の核形成はおもに α -Feで生じ、 γ -Feに変態後は異なる析出物の形成は起こっていないと考えられる。同様に、800°Cにおいては析出物の粗大化あるいはオストワルド熟成の速度は十分低いことがうかがえる。図4には、さらに長時間塩浴中に浸漬後のミクロ組成変化をまとめて示した。640秒間浸漬後もなお球状のMn濃縮箇所が確認できるが、すでにセメンタイトは分解しておりMn(ならびにCr)の偏析が残された状態である。2560秒間浸漬後はこれら溶質元素の偏析も完全に解消されている。一方、AIN等の微細析出物については、640秒間浸漬後まではその数密度や分布は大きく変わらないが、2560秒間浸漬後にはやや数密度が減少する傾向が見られた。これはオストワルド熟成が進んだことを意味している。適切な熱処理時間・温度を選定することで、微細なAINを高密度に分散させつつマトリクスを完全にマルテンサイト化することが可能となる。

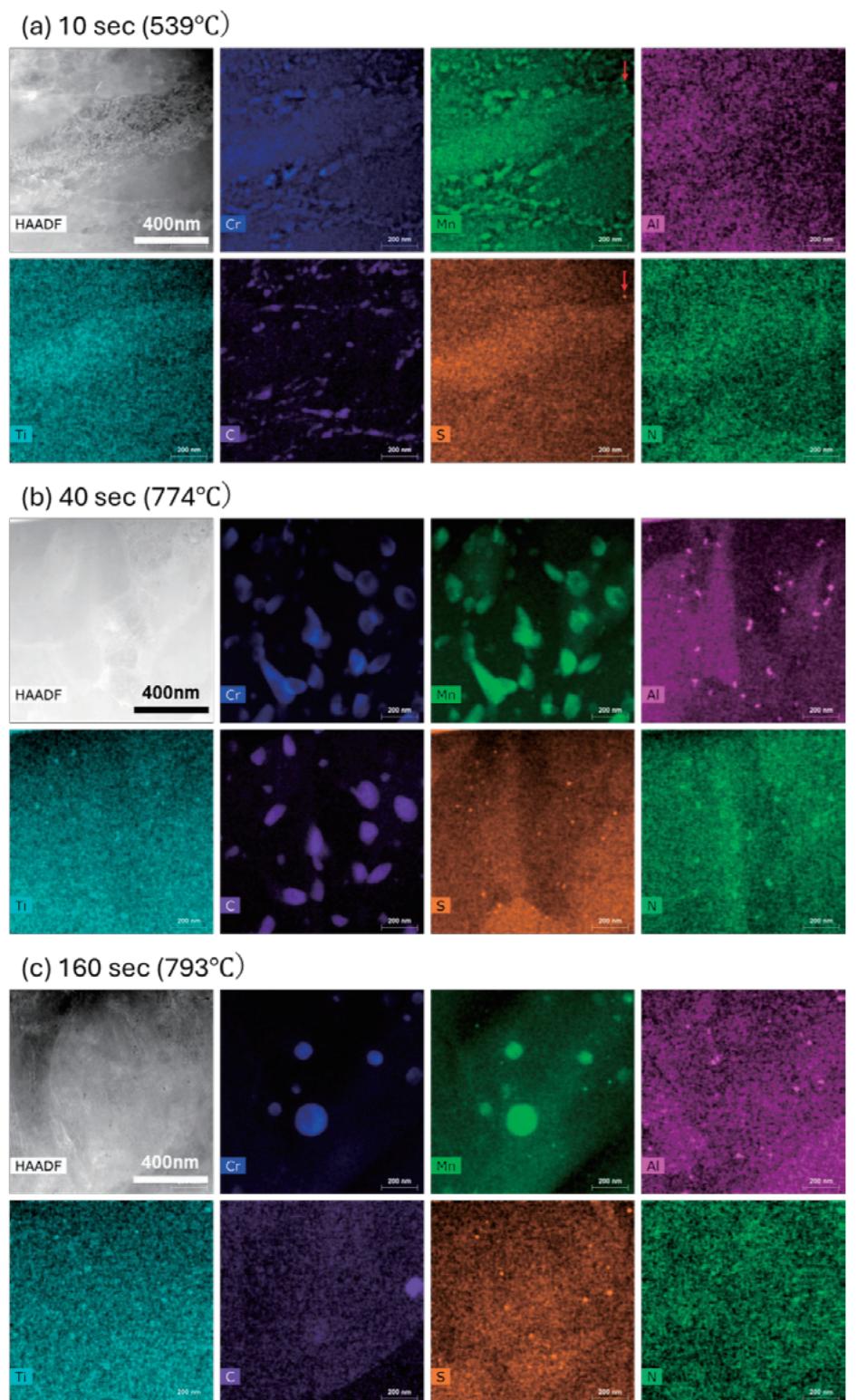


図3 析出熱処理した鋼のHAADF-STEM像と各元素のSTEM-EDSマップ。塩浴への浸漬時間はそれぞれ(a) 10sec, (b) 40sec, (c) 160secである。サンプル温度はそれぞれ549°C, 774°C, 794°Cに相当する

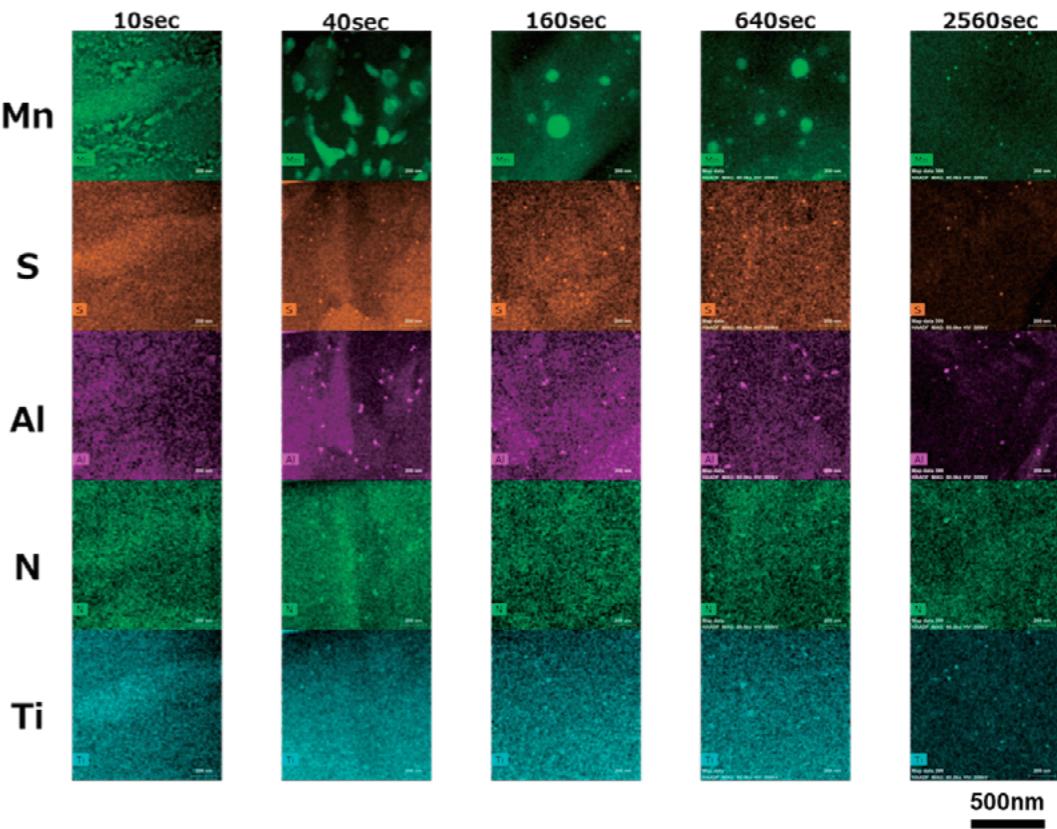


図4 塩浴中に各時間浸漬した鋼のHAADF-STEM像とSTEM-EDSマップ

3.2 高温での相変態および粒界移動過程のその場観察

前節の結果より、適切な熱処理条件を選択することでAINを微細にマトリクスに分散させることができた。本節ではさらに、これら微細析出物が結晶粒微細化、特に高温での結晶粒界のピン止めにどのように役立つかを、加熱STEMによるその場観察で明らかにすることを試みる。観察結果に先立ち、加熱STEM用のサンプルについて概説する。一般的なFIB加工により作製されたサンプルの大きさは $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m} \times 0.2\mu\text{m}$ 程度であり、これをメッシュに固定してSTEM観察する。一方、これをそのまま加熱して観察するとサンプルの湾曲やメッシュとの反応などが生じてしまい、場合によっては材質も大きく変化してしまう。これ为了避免のため、本研究では図5に示すような手順で加熱用サンプルを作製した。あらかじめサンプルから $20\mu\text{m} \times 10\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ のブロック状スラブを切り出し、この一部分($5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$)のみを厚み $0.3\mu\text{m}$ まで薄片化した。これを加熱ホルダー用MEMSチップのヒーター部に固定することで、観察部の湾曲や変質を抑えた加熱STEM観察が可能となった。実際の観察例を図6に示す。観察はBF-STEMモードで行い、スキャン速度は1秒/フレームに設定した。マルテンサイト組織を有するサンプルを室温から $25^\circ\text{C}/\text{秒}$ の昇温速度で加熱したところ、 675°C から 700°C への昇温中に観察

領域の下部が大きさ $\sim 1\mu\text{m}$ 程度の複数の γ 結晶粒に変化した。さらに 725°C まで昇温したところ新たな γ 結晶粒が生成し、観察領域全体が γ 結晶粒で覆われ、 $\alpha \rightarrow \gamma$ 逆変態が完了した。その後 800°C までの昇温中に大きな組織変化は見られなかった。そのまま 800°C にサンプル温度を保持しつつ、特定の結晶粒界に着目して4秒/フレームのスキャン速度で観察を始めたところ、移動中の結晶粒界が微細析出物でピン止めされる様子が観察できた。その結果を図7に示す。観察開始から132秒経過後の画像において、赤矢印の方向に伸びた白線が結晶粒界である。その左わきに白点状のコントラストでAIN析出物の存在が確認できる。次のフレームでは粒界はやや左側に移動し、さらに140秒経過後には粒界と析出物の位置が重なった。その後しばらく観察を続けたが、この粒界は止まつたままであった。すなわち、熱処理過程で析出した微細なAINは粒界のピン止め粒子として効果的に作用することが実証された。図8に示すように、このピン止めは216秒経過後まで続いた。ただし、208秒経過後の画像を見ると、粒界は析出物の左側に接しており、216秒経過後には粒界がやや逆くの字の形状に変化した。次のフレーム(220秒)では粒界がピン止めしていた析出物から離れて左側に移動し、再び直線状に変形した。その後、粒界はそのまま析出物から離れていった。一方、粒内にはまだ多数の微細な析出物が形成している。そこで、観

察モードをHAADF-STEMに変更して観察を続けた。このモードでは微細析出物は黒い粒子として、結晶粒界は黒線として観察される。図9に示すとおり、大部分の粒界上に微細析出物が重なっており、粒界が効果的にピン止めされていることがわかる。また、赤矢印の部分では粒界三重点と析出物が重なっていた。この部分を観察し続けると、280秒から284秒にかけて粒界三重点がピン止めから外れ、黄矢印の部分まで移動した。黄矢印の周辺には微細な析出物が点在しており、これらの析出物が再び粒界およびその三重点をピン止めしたと考えられる。以上より、熱処理条件を最適化してAINなどの微細析出物を高密度に分散することで、旧γ粒界の微細化および鋼の韌性向上を図ることが可能となる。

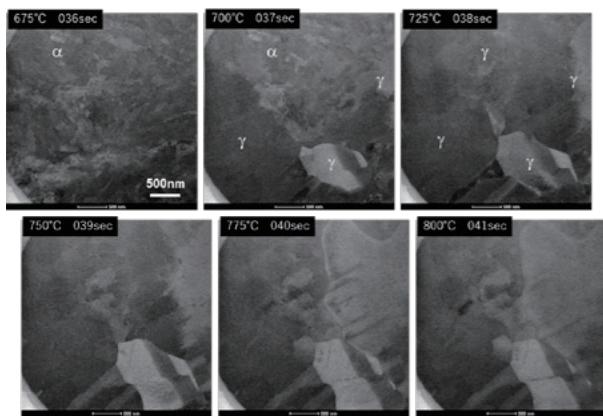


図6 加熱STEMによる $\alpha \rightarrow \gamma$ 相変態過程のその場観察結果

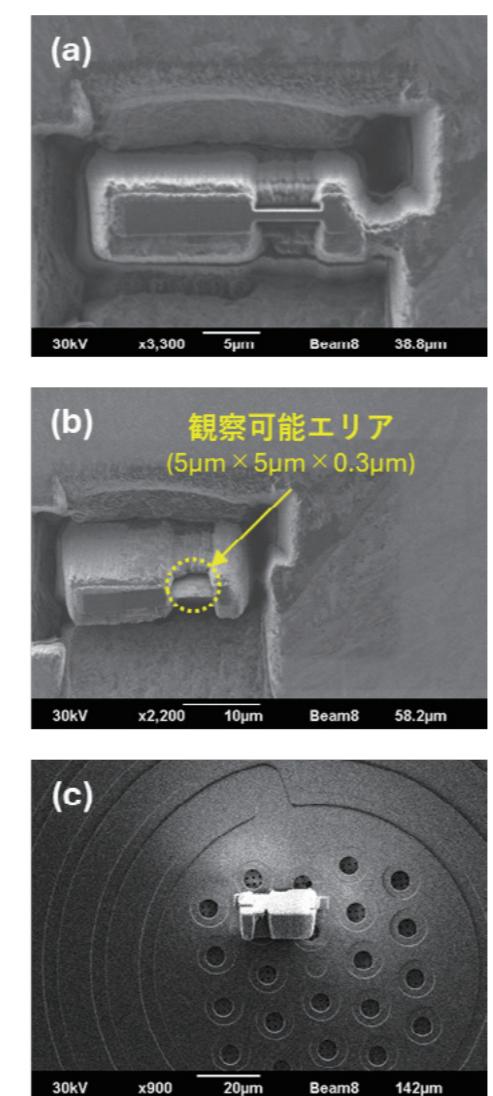


図5 加熱TEM用サンプルのFIB加工過程。(a) パルク加工後, (b) 観察面薄片化後, (c) MEMSチップへの貼り付け後

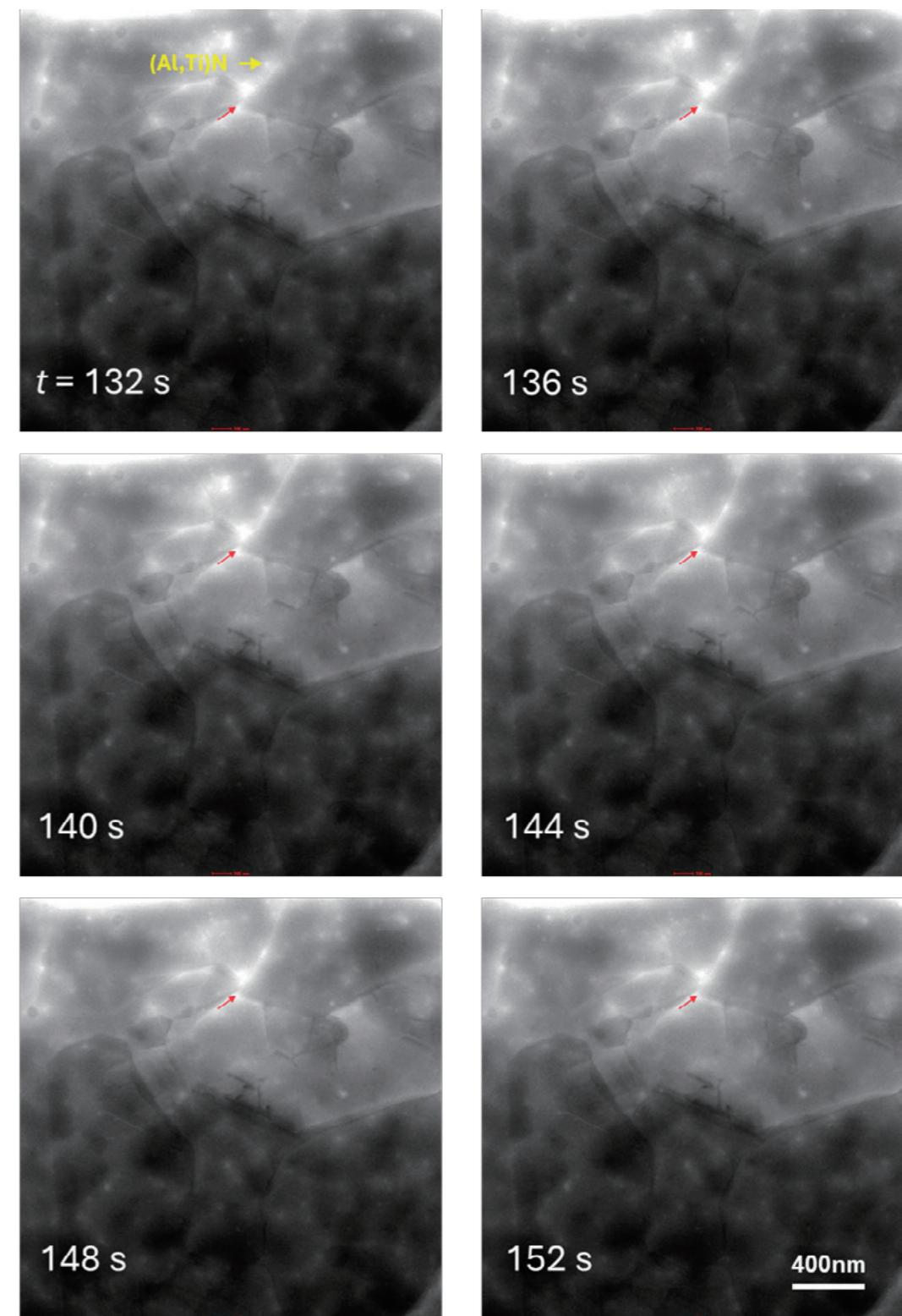


図7 γ 粒界移動とピン止め過程のその場観察結果 (800°C)

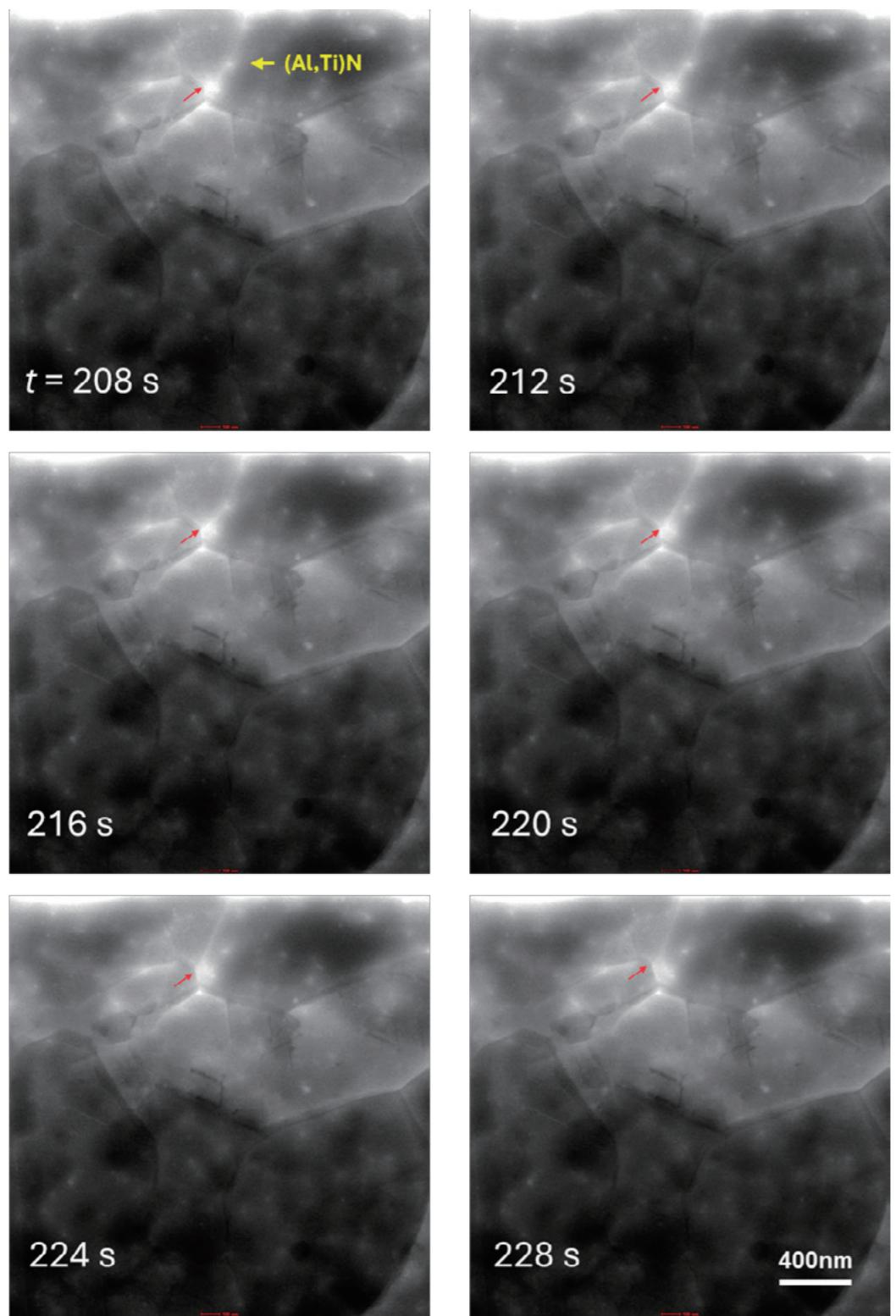


図8 ピン止めからのγ粒界離脱過程のその場観察 (800°C)

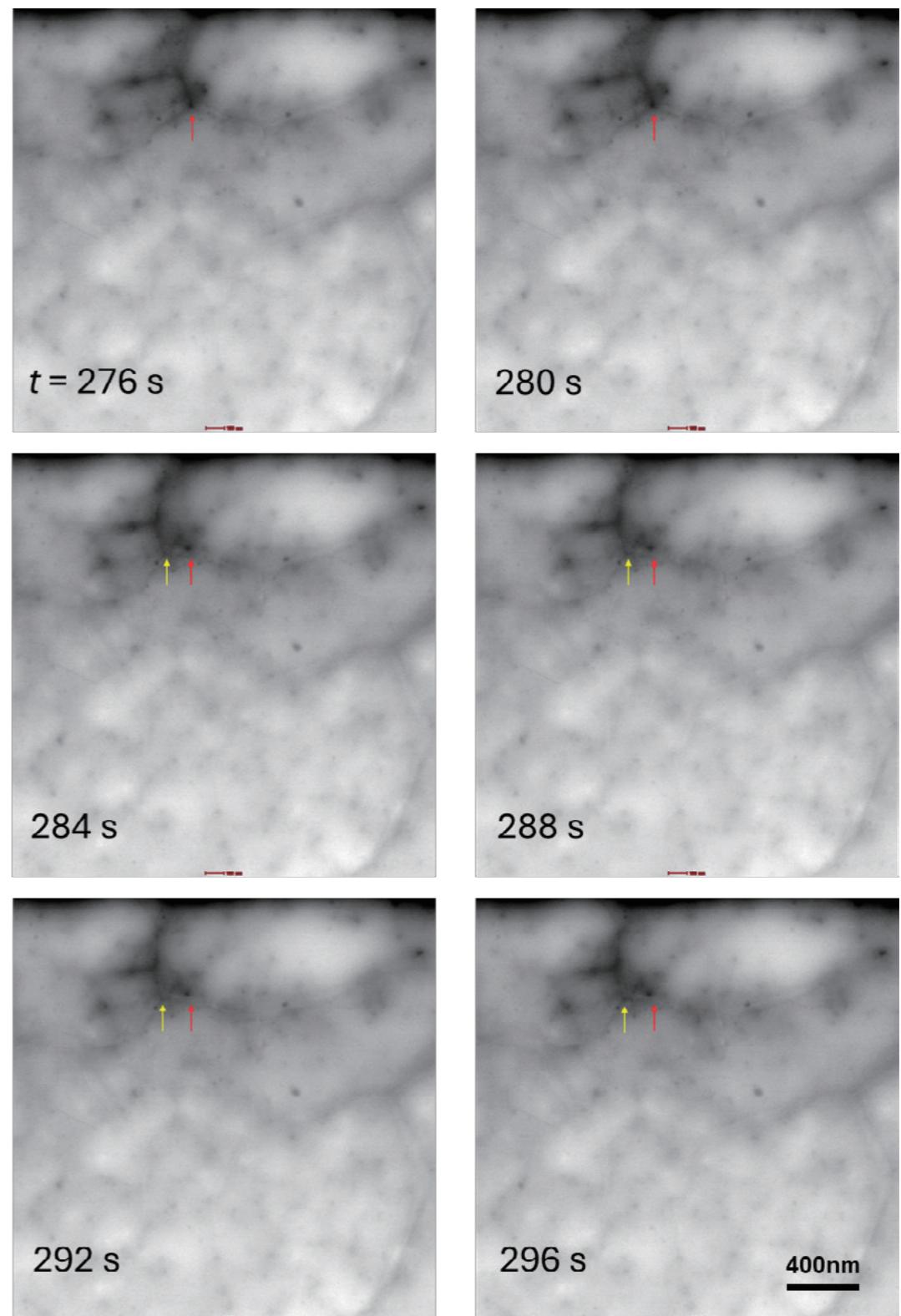


図9 繰り返しピン止めされるγ粒界のその場観察 (800°C)

4. 結言

謝辞

本研究ではSUP12ばね鋼の熱処理中の微細析出物形成過程について、熱処理後の微細組織をSTEM観察すると同時にSTEM-EDS分析を実施し、析出サイトの同定や析出物形成過程を調査した。さらに、加熱ホルダーを利用した高温でのその場STEM観察により、これら微細析出物による粒界ピン止め効果の実証を試みた。以下に結果をまとめます。

- (1) 溶体化熱処理したSUP12ばね鋼を再加熱した場合、セメントタイトの析出とともに550°C付近からセメントタイト/ α -Feマトリクス界面近傍でMnSが析出し始める。
- (2) さらに昇温を続けると微細なAINがセメントタイト/ α -Feマトリクス界面近傍で析出する。
- (3) $\alpha \rightarrow \gamma$ 逆変態後は新たな析出物の核形成はみられず、長時間高温に保持し続けるとオストワルド熟成による粗大化が生じる。
- (4) 粒内に存在する微細析出物が逆変態後の γ 粒界をピン止めする様子が加熱STEMその場観察により確認された。一度ピン止めから外れた γ 粒界は移動していくが、新たな微細析出物に再びピン止めされて移動を止める様子が繰り返し観察された。

本研究を遂行するにあたり、北海道大学大学院工学研究院の田中由紀子研究員、小針笑美子研究員には多大なるサポートをいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 増田智一, ふえらむ 21 (2016) 17–24.
- 2) 篠口光樹, 特殊鋼 68 (2019) 33–35.
- 3) 泉田寛, 河部望, 山尾憲人, 村井照幸, ばね論文集 49 (2004) 21–26.
- 4) 津村輝隆, 鎌田芳彦, 田ノ上修二, 大谷泰夫, 鉄と鋼 70 (1984) 203–210.
- 5) C. S. Smith, *Trans. AIME*, 175 (1948) 15–51.
- 6) 福永啓一, 近藤行人, 顕微鏡 53 (2018) 134–139.
- 7) C. Qiu, L. Schaffer, M. Li, M. Paulose, J. Tam, S. Chen, P. K. S. Nonis, A. Lim, J. Y. Howe, O. K. Varghese, *Materials Today Nano* 31 (2025) 100654.
- 8) A. Królicka, M. Sikora, F. G. Caballero, A. M. Žak, *Nano Today* 61 (2025) 102637.

Ni基超耐熱合金Alloy718粉末試作品の積層造形体評価[第2報]

北川 尚美^a、坂口 紀史^b、齊藤 元貴^c、松浦 清隆^d

1. 緒言

近年注目されている3Dプリンターを使用した金属積層造形法、またはAM(Additive Manufacturing)技術とも呼ばれる手法は複雑形状を製造でき、ニアネットシェイプで部品を作れることから難加工材を用いた造形が可能になる^[1,2]。主に耐食部品(鋼種:SUS630やSUS316L等のステンレス)、金型(鋼種:マルエージング鋼)、高温部品(鋼種:Ni基超合金)といった様々な用途で利用され、用途に応じた鋼種が使われている^[1-3]。

一方、他の造形方法に比べて冷却速度が速く、バルク材にはなかったような析出物が現れ強度低下に繋がったり、鋼種によっては割れが生じたりする可能性がある^[4]。

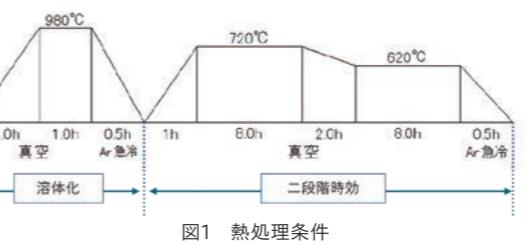
Ni基超耐熱合金Alloy718に注目し調査を行っている。前回報告^[4]では粉体中のSi量が多いとLaves相中のSi濃度が高くなり、ギブス自由エネルギーが低下、Laves相が安定化し固溶の駆動力が低下し溶体化後も残存、高温クリープ強度に影響するという結果が得られた。これはSiによるLaves相安定の文献とも符合していた^[5,6]。本研究ではSi量を減少させた後の金属組織について調査を行った。

2. 試験方法

2.1. 造形方法

積層造形には多くの手法があり、今回はその中でも最も国内で普及しているL-PBF法(またはSLM法)を採用した。L-PBF法は敷き詰めた金属粉末にレーザーを照射し溶融させ、それを繰り返すことで造形していく方法である^[1,4,7,8]。

今回は粉末の差による造形体を比較するため造形条件は同一条件に設定した。詳細は表1に示す。加えて、造形後は溶体化時効処理を施した。熱処理条件については、純正粉のデータシートに記載されている図1に示す通り実施した。



a) 技術開発センター研究第三グループ

b) 北海道大学 大学院工学研究院 教授

c) 名古屋大学 大学院工学研究科 助教

d) 北海道大学 大学院工学研究院 名誉教授

表1 造形パラメータ
(高速度カメラの結果より計測)

積層厚さ (μm)	レーザー斑点径 (μm)	レーザー走査幅 (mm)	走査速度 (mm/sec)
40	80	10	943.6

2.2. Alloy718

Alloy718は析出強化型Ni基超耐熱合金の一種である^[2,9,10]。ジェットエンジンの圧縮機後段の動翼・静翼、ターピンケーシングなどに用いられている。Ni基超耐熱合金は一般的にAl含有量が高く、高強度材料のものが多く、急冷凝固の際に割れ感受性が高く溶接割れを引き起こしやすい。Alloy718はこのAl含有量が約0.6%と低く高温強度も比較的低いため、溶接性の良さが知られている。しかし、熱伝導率が鋼の約1/4と低いため加工中のひずみ硬化を生じやすく難削材として知られている。ゆえに溶接性の良く、難削材であるAlloy718は国内外問わず積層造形のパラメータレシピが開発されている^[2,9]。

2.3 使用粉末

粉末はガスアトマイズ方式で製造したものを使用した。金属積層造形で使用される粉末は真球度が高く、サテライトのない粉末が要求される。さらにL-PBF方式で使用される粉末は粒径20–45 μm のものが要求される^[3]。

前回報告で使用した粉末(以下MGA粉末)とSi量を減らすことによってLaves相の安定化を低減させ溶体化処理で固溶することを狙った粉末(以下MGA(低Si)粉末)の組成を表2に示す。

2.4 調査内容

造形体を溶体化時効熱処理し、高温クリープ試験を実施した。試験の条件について、試験温度は649°C、試験応力は689MPa。加重方向は積層方向。試験片は円柱形状($\phi 10 \times L25$)に造形した後、図2に示すようなサンプル形状に加工して試験を実施した。試験数は各サンプルN=2。本研究では、MGA、MGA(低Si)、MGA(低Si低C)のサンプルを加重せず一定応力で試験した。なお、前回報告^[4]における

試験では、試験開始23h後、8h以上の間隔を空けて、応力を34.5MPa刻みで増やしていたため、MGAの試験結果は前回報告と本研究で異なっている。

加えて別途造形したサンプルについてSEM、STEM-EDXによる組織観察も実施した。

表2 Alloy718 化学成分

	化学組成															
	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	Ti (%)	Co (%)	Nb+Ta (%)	Fe (%)	Al (%)	O (ppm)	N (ppm)
MGA	0.010	0.22	0.01	0.016	0.005	0.01	53.14	18.31	3.02	0.95	<0.01	5.02	18.8	0.49	110	160
MGA(低Si)	0.011	0.01	0.01	<0.002	0.002	<0.01	53.44	19.02	3.00	1.02	0.02	5.20	17.67	0.49	89	94
MGA(低Si高C)	0.055	0.01	0.01	<0.002	0.002	<0.01	53.85	19.03	2.97	0.98	0.01	5.30	17.41	0.40	152.2	130

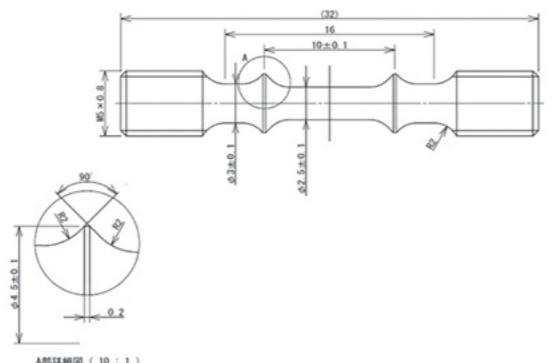


図2 高温クリープ試験片

3. 試験結果と考察

3.1. 高温クリープ破断試験結果

高温クリープ破断試験結果を図3に示す。(N=2平均)。MGA粉末造形サンプルが破断時間12.7hであることに対しMGA(低Si)粉末造形サンプルは60.5hとクリープ強度が向上していることが分かった。伸びについては1.2%が2.4%に向かっている。

3.2. 組織観察

溶体化時効後の組織は図4に示す。MGA(低Si)粉末造形サンプルについては粗い通り塊状Laves相が溶体化後に消失していることが分かった。しかし、δ相について粗大に析出している状態が目立つ。

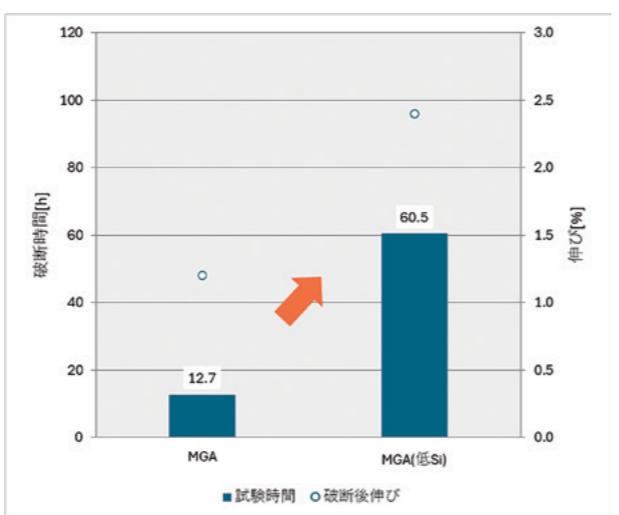
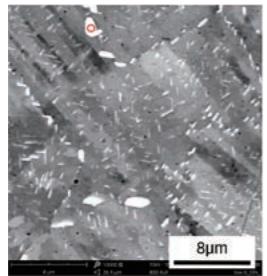


図3 高温クリープ破断試験結果



Phase	[at%]							
	Nb	Al	Ti	Fe	Cr	Mo	Si	Ni*
分析値 母相	3.07	1.00	1.10	17.08	19.39	2.09	0.48	55.55
析出物	13.70	0.59	2.43	5.68	5.68	1.75	0.60	69.47
文献値 ^[11] Y	1.97	0.74	0.52	23.80	22.00	2.41	0.64	47.92
δ	20.40	0.80	3.00	5.30	3.40	2.20	0.10	64.80
Laves	18.80	0.10	0.60	15.00	15.30	10.20	4.50	35.50

*文献値のNiの値は他元素の残部

図4 MGA (低Si) 粉末造形サンプル溶体化時効後組織 SEM写真

4. 考察

Si量を少なくすることで粗い通り溶体化後にLaves相が残存しない組織を得ることができ、高温クリープ試験で破断時間、伸び、絞りいずれの値も良化することが分かった。しかし、δ相が粗大に析出していることが目立つ。

この粗大化したδ相を改善することでさらなる機械的特性の良化が見込めるとして、δ相出現プロセスを探るため、表3において各析出物の組成を示す^[11]。δ相はNb20.40%、MCがNb14.60%と多くを占める。その次にMGA粉末の組成を使い非平衡状態での各相の析出量を計算した結果を図5に示す。

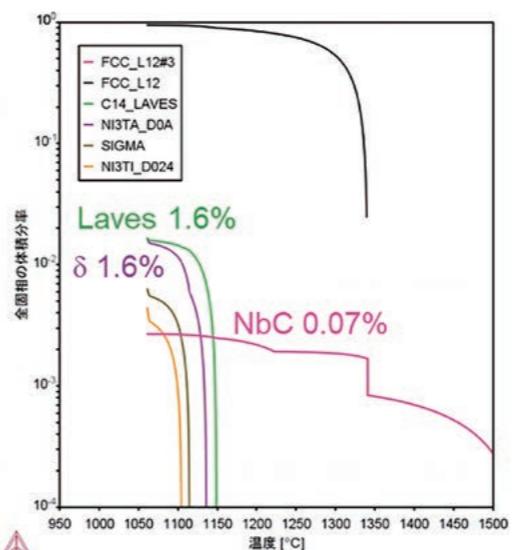


図5 MGA粉末の組成より計算した非平衡状態での各相体積分率

これを見ると、δ相よりも前にMC、すなわちNbCが晶出していることが分かる。ここで、δ相を粗大化させないために先行してNbCを積極析出させδ相の体積分率減少させることを改善策と置いた。NbCを積極析出させるためNb添加量を増やすとC添加量を増やすということが考えられるが、Nbは表3にも示す通りLaves相にも多く含まれるためここではCを増やすことで改善を狙った。

表3 各相の組成^[11]

Phase	[at%]						
	Nb	Al	Ti	Fe	Cr	Mo	Si
Y	1.97	0.74	0.52	23.80	22.00	2.41	0.64
Y'	10.20	8.00	9.40	2.15	0.50	0.49	0.35
Y''	25.10	0.44	4.92	0.86	0.76	1.05	0.01
δ	20.40	0.80	3.00	5.30	3.40	2.20	0.10
Laves	18.80	0.10	0.60	15.00	15.30	10.20	4.50
MC	14.60	0.10	80.00	0.90	1.90	0.50	1.90

4.1. C量增加におけるδ相量変化予測

熱力学計算ソフトThermo-Calc(データベースTCNI10)を用いて平衡計算で溶体化温度980°Cにおけるδ相とNbCの体積分率をMGA粉末とMGA(低Si)粉末、MGA(低Si)粉末組成にC量を0.05wt%まで増やしたものと比較したものを表4に示す。MGA粉末は、C濃度が低いが、同時にNbの添加量が少ないため、Nbを多く含むδ相の体積分率が低くなっていることが分かる。MGA(低Si)粉末は、980°Cにおけるδ相の体積分率が最も高く、Cが低いためNbCの体積分率は低くなっている。MGA(低Si)粉末組成にC量を0.05wt%まで増やしたものはNbC量が増えδ相が減っている。

表4 計算に用いた組成とδ相とNbCの計算で得られた体積分率

	化学組成		980°Cにおける体積分率	
	C[wt%]	Nb[wt%]	NbC[vol%]	δ相[vol%]
MGA	0.010	5.02	0.150	2.80
MGA(低Si)	0.011	5.20	0.100	3.50
MGA(低Si)-0.05C	0.050	5.20	0.460	2.40

4.2. C変更品の高温クリープ強度

表4で計算した、MGA(低Si)粉末組成にC量を0.05wt%まで増やしたものに組成を合わせ、製造した(以下MGA(低Si高C)粉末)。この組成を表2に示す。この粉末を表1と同じ条件で造形、高温クリープ試験を実施した。その結果は図6の通りである。MGA(低Si)粉末造形サンプルが破断時間60.5hであることに対し、MGA(低Si高C)粉末造形サンプルについては83.8hとクリープ強度が向上していることが分かった。伸びについては2.4%が2.9%に向かっている。以上の結果よりC量を増やすことで高温クリープ強度の向上がみられた。

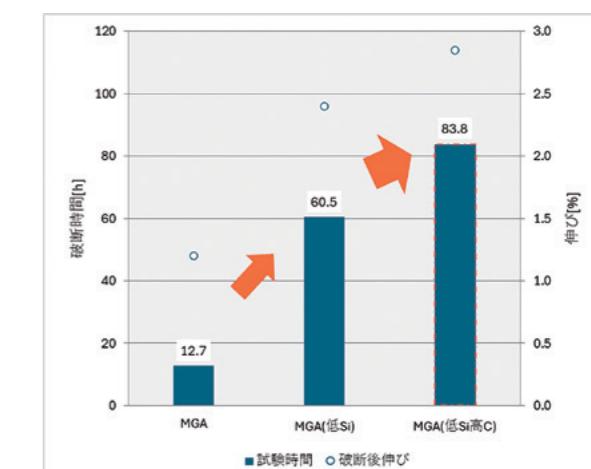


図6 高温クリープ破断試験結果

5. 結言

今回、積層造形用Alloy718粉末を試作し、造形体を比較調査した。以下の結果が得られた。

- 1) Si量を減らすことでLaves相の安定化を低減させ溶体化処理で固溶することを狙った粉末(MGA(低Si)粉末)を作成し積層造形(L-PBF法)で造形した。
- 2) MGA(低Si)粉末造形サンプルを溶体化時効処理したところ狙い通りLaves相が固溶していることが確認できた。しかし、δ相がまだ粗大に存在していた。
- 3) δ相を改善することでさらなる機械的特性の良化を狙うため、C量を増やしNbCを積極析出させてδ相の体積分率を減少させようとした。計算上Cを0.05wt%まで増やすと、3.50vol%から2.40vol%まで減少する予測される。
- 4) 実際にMGA(低Si)粉末組成にC量を0.05wt%まで増やしたものに組成を合わせた粉末(MGA(低Si高C))を製造し積層造形、熱処理、高温クリープ破断試験を行ったところ狙い通りクリープ強度の向上がみられた。以上の結果よりSi量を適正化することで高温強度が確保可能であることが分かった。さらにC量を多く添加することでNbCを積極析出させδ相の体積分率減少させることを狙い、高温クリープ強度向上させた。SiとCは高温特性に大きく影響を与える元素となり、実用上は適正な管理を行う必要がある。今回は粒界析出物のコントロールに注目したが今後は粒内組織にも注目し、粉末特性/組成などの更なる改善検討を行い、L-PBF用粉末の改善を進める。

参考文献

- [1] 2023年版 3Dプリンタ/造形機の国内市場, マイクロジェット,(2023)
- [2] 久世哲嗣:山陽特殊製鋼技報, 27(2020), 33
- [3] 京極秀樹, 池庄司敏孝:金属3D積層造形のきそ, 日刊工業新聞社, (2017)
- [4] 北川尚美:ガスマトライズ量産装置、三菱製鋼技報第38巻2024年,p21
- [5] 中澤崇徳, 伊達新吾, 天藤雅之, 山崎政義:鉄と鋼, 91(2005)8, 670,
https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.91.8_670
- [6] 伊勢田敦朗, 西洋志, 吉川州彦:鉄と鋼, 76(1990)12, 2190,
https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.76.12_2190
- [7] 平田好則et al.:第10回溶接連合講演会「入門:金属3Dプリンター技術」-AMを始める人に向けて-, (2024)
- [8] 大崎元嗣:電気製鋼, 92(2021), 1, 19
- [9] 堀川将大:修士学位論文, 首都大学東京大学院, (2017),
<https://tokyo-metro-u.repo.nii.ac.jp/records/6204>,
(accessed 2024-6-25)
- [10] 田中良平, 一ノ瀬幸雄, 木村啓造, 根岸朗, 渡辺治:金属材料の辞典, 朝倉書店, (1990)
- [11] G.D.Smith, S.J.Patel : "THE ROLE OF NIOBIUM IN WROUGHT PRECIPITATION-HARDENED NICKEL-BASE ALLOYS", Superalloys 718, 625, 706 and Derivatives 2005, (2005)135

VIM装置の800kgインゴット製造と窒素コントロール

鈴木 牧生^a

1. 緒言

2019年5月に千葉製作所AMセンター室に導入されたVacuum Induction Melting 装置(以降VIM)では、以下の方案確性に取り組んでいる。

- ① 精密鋳造用マスターヒートの製造方案
- ② 社内開発用素材での活用検討

2022年技報にて①について報告した。今回は②について主に論じる。



図1 VIM装置全景写真

2. VIM装置の特徴

VIMは、真空中もしくは不活性ガス雰囲気中で、溶解炉体に巻かれたコイルに電流を流してジュール熱を発生させ、炉体内部の材料を溶解し鋳込みを行う装置である。主な特徴は以下のとおりである。

- ① 溶解重量1.5ton-3ton
- ② 高真空中、もしくは不活性ガス中で溶解可
- ③ 高さ3.5mのモールドチャンバーを保有

メルトチャンバーのコイル内の原材料を溶解し、溶湯の調整を行う(図2a)。その後、タンディッシュチャンバーから挿入したタンディッシュを介して鋳型に溶湯を鋳込む。鋳型内で冷却することで鋳型形状に応じた鋼塊形状を得る事ができる(図2b)。溶解重量は1.5tonのライトチャージから最大3tonまで対応可能である。最大1Pa以下の真空度を確保でき、また不活性であるArガス雰囲気下での溶解にも対応しており、ガス成分の低減や特殊超合金の製造に適しているといえる。マスターヒート(素材成分を調整した精密鋳造用溶解材料)は分注器を介して内径Φ84~Φ130mmのパイプに鋳込むことで得られる。鍛造用インゴットは、内径Φ380、高さ1mの800kgインゴットケースに鋳込むことで得ることができる。

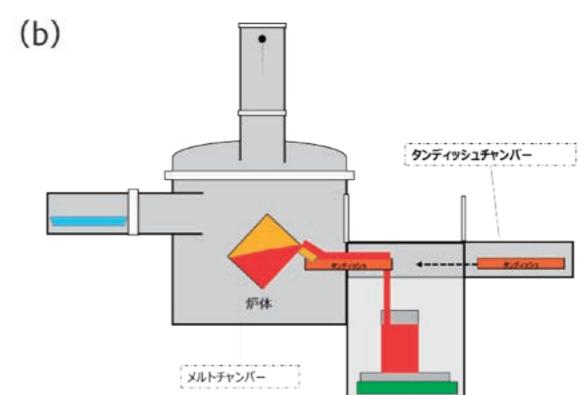
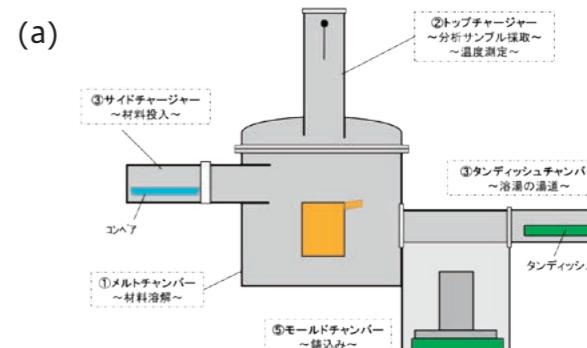


図2 VIM装置模式図 a)通常時 b)鋳込み時

3. VIM製品紹介

3.1. 精密鋳造用マスターヒート

2019年から現在までの開発により、以下への対応が可能となり、精密鋳造メーカーへの販売開始を進めている(2022年度の技報に詳細を掲載しており、本稿では割愛する)。

対応可能鋼種

- ・Ni基 In713C, Hastelloy-X

- ・Co基 X-45

マスターヒートサイズ

- ・ $\phi 84$ 、 $\phi 100$ 、 $\phi 130$



図3 マスターヒート(Niベース、 $\phi 100$)

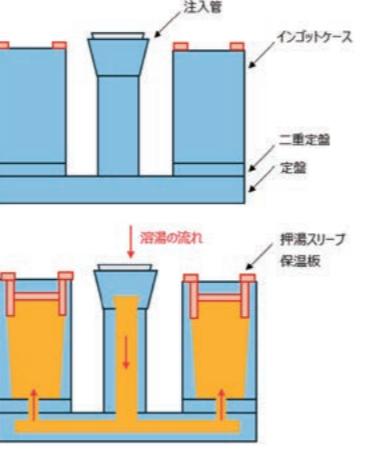
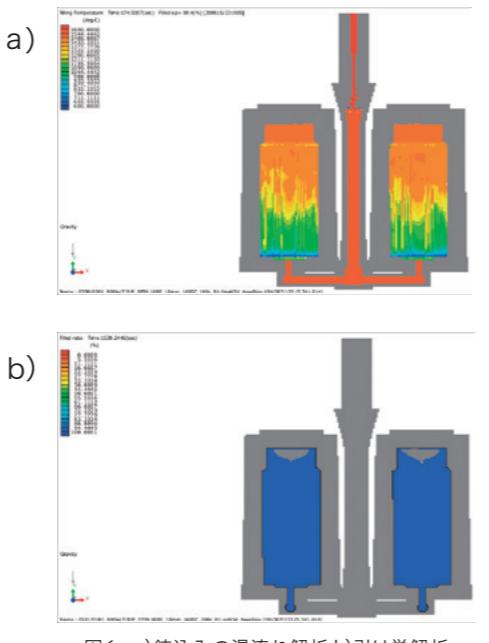


図4 800kg下注ぎ鋳型模式図



図5 800kg下注ぎ鋳型実物写真
(黄色丸: 押湯スリーブ)



4.2. 成分コントロール

真空中での溶解において、不純物元素(主にガス)の低減が図れる一方、蒸気圧の関係から低沸点の金属元素が蒸発しやすい傾向にある。特に減耗が顕著な窒素やアルミニウムについては溶解・鋳込み中に炉中サンプリングを行い、減耗量の傾向を取得する。類似鋼種または含有率が近い場合には、取得した減耗曲線を参考に減耗量の予測が可能である。

4. 試験方法

4.1. 造塊のシミュレーション

インゴット造塊の課題には、粗大な引け巣の発生、インゴット内のカーボン成分の偏析、インゴット表面肌の問題がある。対策として下注ぎインゴットを導入した(図4)。インゴットケースの上部には押湯スリーブと保温板を取り付け、押湯部分を保温することで引け巣の発生およびカーボン成分の偏析の抑制を図った(図5)。加えて、下注ぎ方案についてシミュレーション解析を行い、インゴット内に内在する引け巣を検証してから試作を実施した(図6)。

5. 試験結果

4章で述べた方案にてインゴットを製造し、各種評価を行なった。その結果を以下に示す。

5.1. インゴットの健全性確認

製造したインゴットを縦に2分割し、製品部と押湯部に引け巣が内在しているか観察を行った。押湯部には引け巣の内在が認められたが、製品部に内在する引け巣は微小であることを確認した。

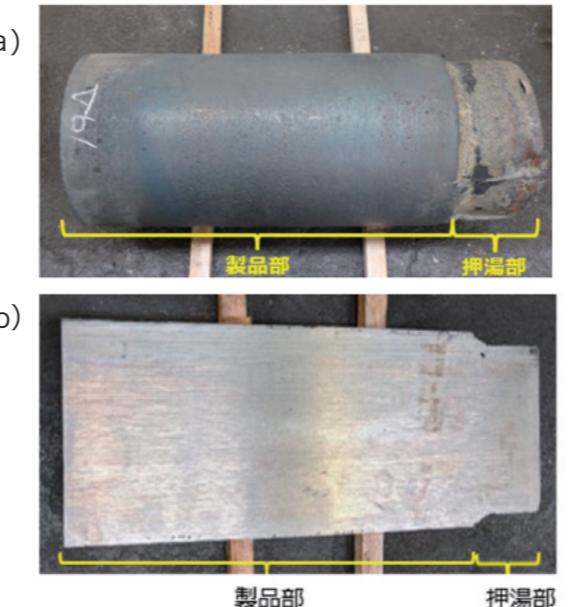


図7 a)800kgインゴット b)断面写真

5.2. 成分コントロールと減耗予測量の習得

VIMでは窒化物(N-Mn, N-Cr, N-Si)を追加装入することで窒素成分を添加している。しかし、真空状態で添加すると、溶鋼内の窒素成分が蒸発てしまい、窒素成分のコントロールが困難になってしまう。そのため、メルトチャンバー内にArガスを封入し、大気圧に近い状態にする必要がある。メルトチャンバーにはArガスを最大14kPaまで封入可能である。これはチャンバー間に設置されている真空ゲートが差圧14kPaまで耐える設計であるため、封入圧に制限がある。今回は窒素の成分規格下限46ppm、上限70ppmの鋼種に対し、Arガス封入圧を10kPaに設定し、窒素を200ppm添加した後の減耗量を調査した結果を報告する。あわせて、窒化物添加歩留のデータも示す。

図8に窒化物添加後の減耗推移を示す。このグラフから、溶鋼中の窒素量が時間の経過に反比例して減少していることが読み取れる。これにより、時間ごとの窒素減耗量を予測でき、狙いの時間に出鋼することで窒素成分を規格範囲内に収めることが可能となった。

続いて、窒素規格と窒化物の添加歩留との関係を表1に

示す。他元素の成分調整が完了した後に窒化物を追加装入し、その後炉中分析を行わずに出鋼することを条件にデータを収集した。表1から、窒素規格範囲により添加歩留が上下する傾向があることが確認できる。この傾向を活用することで、未経験の鋼種を溶解する際にも、表1のデータを照合して窒素添加歩留を予測し、適切な添加量を設定することが可能となった。

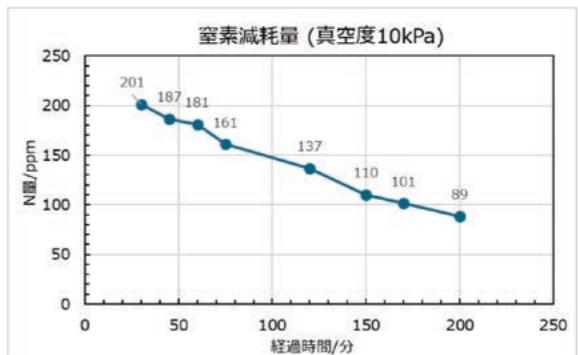


図8 窒素減耗量 (真空度10kPa)
表1 窒素規格ごとの添加歩留
(Arガス封入圧 10kPa)

鋼種	窒素規格	添加歩留
No.1	200~250 ppm	9~11 %
No.2	110~135 ppm	19~22 %
No.3	45~70 ppm	25~30 %

6. 本研究の成果と今後の展望

本研究にて以下の項目が可能となった。

- 800kgインゴットの製造方案の解析と習得
- 窒素含有量45~250ppmのコントロール技術

以前は窒素規格範囲と添加歩留の過去データを照合し、予測に基づいて窒化物を追加装入している。追加装入後は炉中分析を行わずに出鋼しており、溶解後に最終成分分析を実施している。各元素の減耗曲線を把握することで時間とともに減耗する量がある程度予測でき、成分コントロールの精度を上げることが可能となった。

現在、マテリアルインフォマティクスの導入を検討しており、今後はその解析技術も活用することで、鋼種成分規格から各元素の添加歩留を事前に高精度で予測することを目指す。これにより、試作回数の削減とともに、安定した成分コントロールの実現が期待される。また、今後は習得できた上記の溶解・造塊技術を活かし、社内材料開発のスピードアップと外販に向けたニーズ把握・提供に向けてVIMを活用していく。

解析技術を活用したガストアマイズ粉末製造

山田 武利^{a)}

1. 緒言

ガストアマイズ粉末の用途としてHIPや溶射用として使用されているが、近年は3D積層造形用としての研究開発が進んでいる。金属積層造形技術は、三次元の複雑形状部品を短時間で製造できることから、医療や航空宇宙などの分野で注目されている。このような新しい加工技術は、ニッケル系合金やチタン系合金のような難加工性材料について有効な加工法となることが期待されている。金属積層造形として使用される際に要求される基本的な粉末特性は以下3点である。

- ① 流動性がよいこと
- ② 不純物が少なく清浄度が高いこと
- ③ 粒径が均一で分布幅が狭いこと

粉末の製造方法にガストアマイズ法、プラズマアトマイズ法、遠心アトマイズ法などがある。工業的な生産性の観点からガストアマイズ法で製造される粉末が採用されることが多い。ガストアマイズ法は、坩堝内で溶解した溶湯をタンディッシュノズル(TDノズル)から自由落下させ、その溶湯流を高速ガス噴流で微細な溶滴に噴霧させる製造法である。噴霧された溶滴は、回収タンク内で冷却された後、回収される。図1にガストアマイズ機構の模式図を示す。

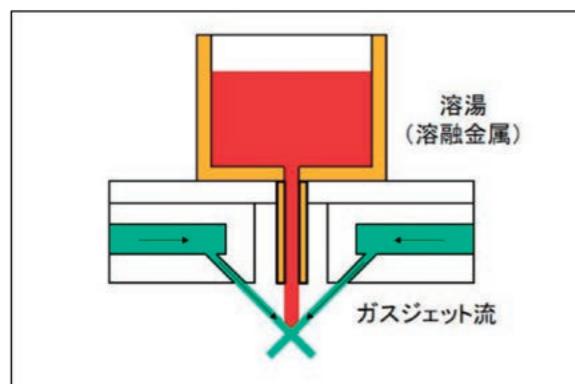


図1 ガストアマイズ模式図

図1に示すように、噴霧された溶滴は表面張力により球状化し、同時に低酸素雰囲気で冷却されるため表面の酸化も抑制される。

ガストアマイズ法で製造される粉末は、溶湯の噴霧過程が一定でないため粒度分布が広くなる。

粒度分布の測定にはレーザー散乱式粒度分布測定装置(マーバーン社製:Mastersizer 3000)を用いられることが多い。粒度評価には体積基準の平均粒径(D50)が多用され、一例として図2に製造したガストアマイズ粉末の粒度分布の測定結果を示す。平均粒径(D50)は、約40 μm 品である。

金属積層造形は造形方式により使用される粒度が異なる。簡単ではあるが、PBF方式とBJ方式に使用される粉末粒径を説明する。PBF方式では62 μm 以下の粉末が用いられ、リコート時の流動性やレーザー照射時のフューム発生を考慮し、10 μm 以下は除去されることが多い。BJT方式はパウダーベッドに樹脂と混合した金属粉を噴霧して成形体を作製し、乾燥・脱脂・焼結を行う方式で、20 μm 以下の粉末が用いられる。図2に積層造形に使用される各粒度領域の例を示す。

PBF用として使用する場合、均一な粒径となるよう微粉と粗粉を除去する粒度調整が必要になる。

また、微細な粉末(PBFやBJTで使用される微細粉末)を製造する際には、粉末同士の凝集も課題となる。

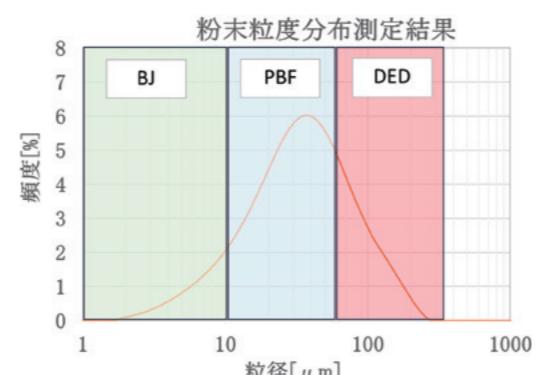


図2 積層造形に使用される各粒度領域

2. 当社のガストアマイズ粉末

当社はガストアマイズ粉末の製造装置として、溶解重量(Fe換算)250 kgの量産炉と20 kgの試作炉の2基を保有している。いずれの装置も真空溶解・不活性ガス噴霧方式であり、低酸素かつ球状の粉末を製造できる。金属積層造形で使用される耐熱鋼合金やマルエージング鋼は、酸化しやすいAl、Tiを含有するが、当社設備では酸素との反応を最小限に抑制し、安定した組成での粉末製造が可能である。製造される粉末は球状であるため流動性と充填密度に優れる。そのため高密度な造形体の成形に有利となる。

ここまで簡単に装置の説明をしたが、以下3章に流体解析(CFD)を使用した溶湯噴霧に関するアトマイズ条件の適正化、4章にタンク内循環ガスシステム(アトマイズされた溶融液滴の凝集を抑えるシステム)について紹介する。

3. アトマイズ条件の適正化

3.1 製品粒径に影響する各パラメータ

ガストアマイズ法で製造される粉末の平均粒径は、溶湯の物性値(密度、粘性、表面張力)や出湯速度に加え、噴射ガスの流速・流量に依存する。条件パラメータは多岐にわたる。ガスノズルはガス流量と流速を決定する重要な要素であり、供給ガス圧、配管径・接続方法、ガスジェット孔の断面積、噴射角度等も主要なパラメータである。これらは溶湯流の粉碎に大きく影響するため、狙った粒度分布の粉末を製造するためには、ガストアマイズ条件の適正化が必要となる。

3.2 アトマイズ条件の適正化の方法

出湯速度は、単位時間当たりに溶湯ノズル内を通過する溶湯流量で定義され、溶湯ノズルの内径・全長、溶湯温度、ガス噴流の引込圧などに依存する。ガス流量は、単位時間当たりのガス消費量で定義され、ガスジェット孔の断面積やガスノズルに供給されるガス圧に依存する。噴霧に使用するガス流量はノズル断面積とガス圧で決まる値である。

出湯速度とガス流量の比は重要な指標である。この比が大きい場合(溶湯量がガス量に比べて大きい)は、溶湯を微細な溶滴まで分裂できず、大粒径のまま冷却され、回収粉末の平均粒径が大きくなる。反対に、この比が小さい場合は微細化できるが、アトマイズ時間が長くなり、試験中のノズル内凝固や過大なガス消費が問題となる。

これらの課題を解決するためシミュレーション技術を活用して、溶湯温度、ガスノズル形状を適正化した。

出鋼温度の適正化については、坩堝の形状および坩堝上部・下部の温度を測定し、凝固解析による溶湯の出鋼シミュレーションを行った。出鋼口で閉塞することが無いよう、出鋼温度(TD内への鉄込温度)を決定した。

また、ガスノズルの形状の適正化については、図3にCFD解析結果の一例を示す。噴霧される溶融状態の粒子を球体として近似し、噴霧現象を解析した。噴霧の現象を可視化することで、TDノズルから出鋼する粒子がガスジェットの条件変更によりどのように飛散されかを把握することができる。前述した各種パラメータを変更して、粒子の挙動の計算を行った。ガスノズルの形状、ノズルノズルへ供給するガス圧や雰囲気圧等の境界条件及び、溶湯や不活性ガスの物性値を各種設定し、噴霧のシミュレーションを行い、多数のパラメータの傾向把握することができる。

CFDを活用することで、溶解アトマイズの試験工数を減らし、早期の条件適正を行うことができる。



図3 CFD解析結果の一例

3.3 高速度カメラによるアトマイズ観察

各種シミュレーション技術を活用することで、多くのパラメータの中から試験条件を適正化することができた。この適正化できたアトマイズ条件にて、MGA-718の溶解アトマイズ試験を行った。ガス噴流による溶湯分裂の撮影するために、高速度カメラ（フォトロン社製：FASTCAM SA-Z）を使用した。

高速度カメラの撮影は露光時間が短いため、本来強い照明が必要であるが、溶湯の発光を利用して照明なしで撮影できる。回収タンクの観窓から、出湯と同時にアトマイズによる噴霧の撮影を開始した。坩堝内で溶解した溶融状態のMGA-718がTDノズルから自由落下し、高速ガスジェット流で噴霧される様子が観察できる。

実機で撮影した画像を図4に示す。出湯開始の時間を0.001秒とすると、不活性ガスの噴射は0.024秒から一部の溶湯の噴霧が開始されていることがわかる。出湯開始から0.072秒には、溶湯流がガスジェットにより均等に噴霧されていることがわかる。このようにして一連の噴霧の様子を確認することができる。

実機による高速度カメラの観察から、流体解析結果の噴霧の傾向と同様であることを確認できる。

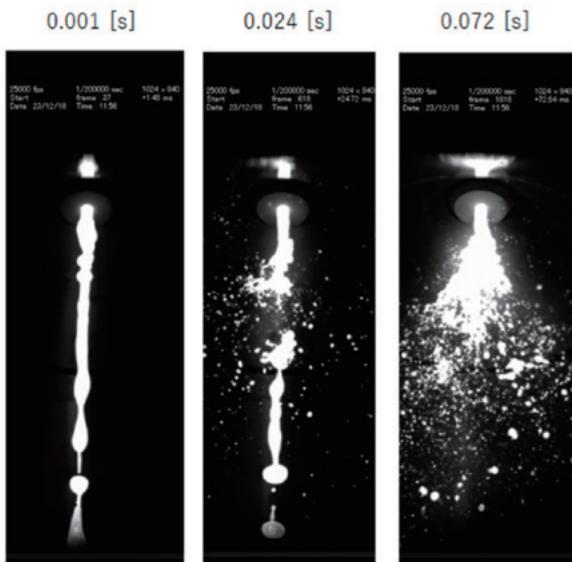


図4 高速度カメラによるアトマイズ観察

4. タンク内循環ガスシステム

実際にアトマイズされた粉末をSEMで観察すると、粒子同士が凝集していることがある。この凝集した粒子が生成される機構は、次のように説明される。TDノズルから出鋼した溶湯がガスジェット流で噴霧される際に、タンク内に浮遊する粒子と衝突して凝固するために生成する。この粉末同士の凝集は比較的微細な粉末で発生することが多い。凝集した粉末は、流動性や充填性を悪化させてしまうため、積層造形時の造形体の不良原因となる。

当社ガストマイズ装置の特徴として、噴霧に使用する不活性ガスの一部をサイクロンから回収タンク内へ戻し、タンク内部の内周に沿って気流をつくる循環システムがある。このガス循環システムにより、凝固した微粒子は回収タンク内を滞留することなく、回収タンクからサイクロン側へ回収される。循環ガスシステムの簡単な模式図とCFDによる流体解析の結果を図5に示す。

流体解析の条件設定には、タンク形状や噴霧ガスの流量、回収タンク循環するガス流量、タンク内の圧力の実機での値を使用した。また、解析によるシミュレーションを行うことで、タンク内のガス気流を計算できる。タンク底部から上部へ戻されるガス流は、回収タンク側面から循環するガス気流に巻き込まれる形で、タンクの側壁に沿って安定した気流を形成していることが確認できる。

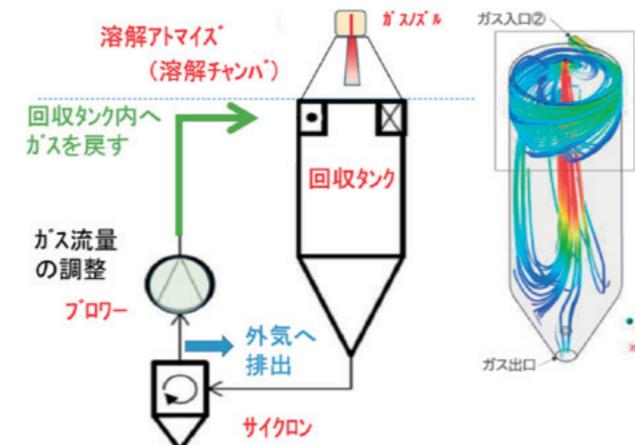


図5 回収タンク内への噴射ガス循環

サイクロンから排出されるガスの一部をタンク内へ循環するガス流量を調整するためにプロワを使用する。粉末同士の凝集状態を確認するため、プロワの出力を調整しない条件と調整した条件の2通りの溶解アトマイズ試験を行った。

回収したMGA718粉末の形状をSEMで観察した結果を比較したところ、サイクロンからタンク内へ循環するガス流量を調整することで、微粒の凝集が低減できることが確認できた。実際の粉末のSEMの観察結果の比較を図6に示す。

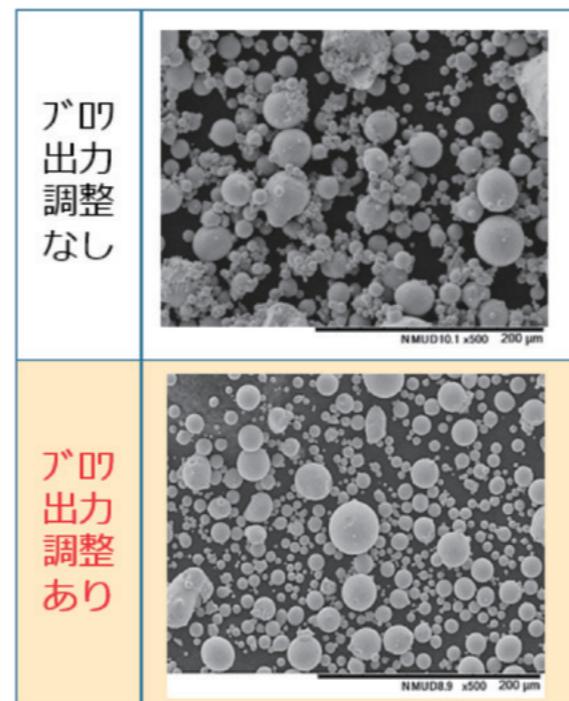


図6 粉末のSEM写真

5. 結言

これまで説明してきた当社ガストマイズ装置に関する要点について以下にまとめる。

- ①ガストマイズ設備の溶解量は、20 kg/chの試作装置と250 kg/chの量産装置である。
- ②流体解析を活用してアトマイズ条件を適正化を行い、実機の試験にて高速度カメラ観察から効果の検証を行った。
- ③ガス循環システムを採用することで粒子同士の凝集を抑えた粉末の製造が可能である。

当社では流体解析技術や実機での現場観察を併用して、お客様のニーズに合った粉末を提供できるよう開発を進めています。

参考文献

- [1] H. Lubanska, Journal of Metals, 22 (1970), 45.
- [2] 山田武利:ガストマイズ製法による合金粉末、特殊鋼 Vol.65 No4(2016年)
- [3] 石井友也:ガストマイズ量産装置、三菱製鋼技報 第37巻(2023年)
- [4] 松下祐基:3D積層造形用粉末、三菱製鋼技報 第38巻(2024年)

懸架ばねにおけるcos α 法を用いた三軸応力解析の有効性

Effectiveness of tri-axial stress analysis using cos α method for suspension spring

山崎 智裕^a、佐々木 敏彦^b

1. 緒言

近年、地球環境保護や燃費向上を目的とした自動車の軽量化要求が高まり、懸架ばねに対する軽量化ニーズも一層強まっている。特にハイブリッド車や電気自動車では、重いバッテリの搭載により車体全体でのさらなる軽量化が必要であり、ばね設計の高度化や製造技術の高精度化が重要な課題となっている。

ばねの軽量化技術の一つとして、ショットピーニング(以下SP)工法がある。SPは大小任意の鋼球もしくは非鉄材を高速でばねに打ち付けることで、表面に圧縮の残留応力を付与する工法である。この圧縮の残留応力は、ばねの寿命に大きく寄与するため、ばね全体に最適な残留応力を付与することが望まれる。

残留応力の非破壊測定手法としてX線応力測定が一般的に用いられる。その一手法であるcos α 法は、単一入射X線を用いて二次元検出器で取得した回折環の格子ひずみの情報から残留応力を決定することができ、短時間測定且つ装置の小型・軽量化といった特長を持つ。これらの特長は、測定対象となる供試品の大きさを制限することなく測定することができ(測定自由度が高く)、懸架ばねや大型対象物の残留応力測定など多くの工業分野で活用されている。

筆者らはこれまで、様々なSP処理やblast処理を施したばね鋼の残留応力測定結果を報告してきた^{1),2)}。X線応力測定はX線の侵入深さが数μm～数十μmと浅いため、通常は平面応力状態を仮定して解析される。一方で、SPの施工条件(投射方向や角度)によってはX線侵入領域に面外せん断応力(τ_{xz} および τ_{yz})が発生し、平面応力仮定に基づく評価では誤差を招く可能性がある。正確な残留応力を判断するには、三軸応力解析を適用することが重要である。

近年では、短時間測定且つ高い可搬性を活かし、鉄道レールや製造工程でのインライン測定の事例も報告されている。当社製品においてもインラインでの残留応力測定を見据えた基礎的検証を進めている。本報では、供試品の姿勢が測定値に与える影響を明らかにするため、従来通りサンプルを設置した場合と、意図的に供試品を傾斜させた場合で比較し、cos α 法による平面応力測定評価と三軸応力解析を適用した基礎的検証結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 供試品

供試品には、ばね鋼SUP9材を用いた。まず8t×70×300mmの板材を880°C×13.5分の熱浴条件で焼入れ処理を行い、その後460°C×60分で焼戻し処理を行った。焼戻し後、ワイヤー放電及び研削加工で3t×20×150mmの供試品形状に加工し、加工後は供試品全面を表面から0.5mm化学研磨処理を行い、加工時のひずみを除去した。その後、リファインテック製の高速精密切断機RCA-136にて20×20mmサイズに切断し、blast処理を行った。

2.2 ブラスト処理

blast装置は新東工業製KENX-1を使用し、メディアは粒径φ0.425mmのサンゴバン製Zirshot-Z425を用いた。投射圧は0.35MPa、ノズル径はφ8mmとし、図1に示す垂直Z方向から投射距離100mmで5秒間処理した。

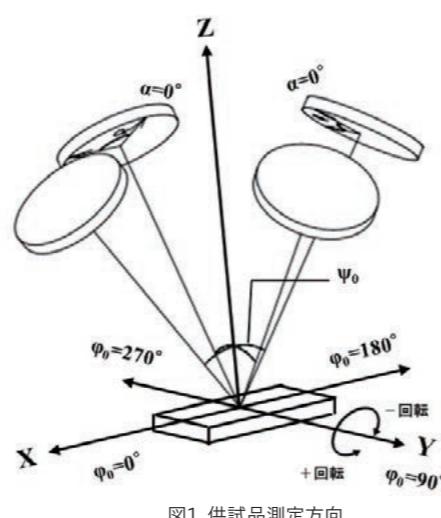


図1. 供試品測定方向

2.3 X線応力測定

X線応力測定には、パルスティック工業製のμX360sを用いた。X線入射角度(ψ_0)は、供試品が水平状態(回転なし)の時に $\psi_0=35^\circ$ とした(図2)。供試品を長手X方向($\phi_0=0^\circ$ および 180° 方向)に1度ずつ回転させ、長手X方向と幅Y方向の4方向($\phi_0=0, 90, 180, 270^\circ$ 方向)から測定を行った。供試品の回転は最大で±10度とした。

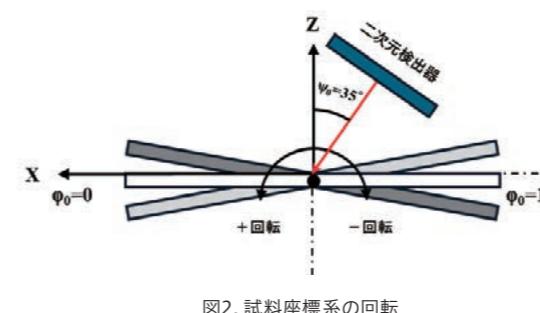


図2. 試料座標系の回転

$$(\sigma_x - \sigma_z) = -\frac{E}{(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\psi_0 \sin 2\eta} \cdot B_1$$

$$B_1 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial a_1(0)}{\partial \cos \alpha} \right)_{\psi_0 > 0} + \left(\frac{\partial a_1(180)}{\partial \cos \alpha} \right)_{\psi_0 > 0} \right] \quad (5)$$

$$(\sigma_y - \sigma_z) = -\frac{E}{(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\psi_0 \sin 2\eta} \cdot B'_1$$

$$B'_1 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial a_1(90)}{\partial \cos \alpha} \right)_{\psi_0 > 0} + \left(\frac{\partial a_1(270)}{\partial \cos \alpha} \right)_{\psi_0 > 0} \right] \quad (6)$$

3. X線応力解析(cos α 法)

式(1)にcos α 法を拡張した三軸応力測定法の基礎式を示す。ここで n_1, n_2, n_3 は方向余弦、EはX線的ヤング率、 ν はX線的ポアソン比、 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ は応力成分を示す。また、 ψ_0 は試料法線方向からのX線入射角、 ϕ_0 はX軸と応力測定方向とのなす角、 η はBragg角θの余角である($\eta=\pi/2-\theta$)。

$$\varepsilon_\alpha = \sigma_x \frac{1}{E} [n_1^2 - \nu(n_2^2 + n_3^2)] + \sigma_y \frac{1}{E} [n_2^2 - \nu(n_3^2 + n_1^2)] + \sigma_z \frac{1}{E} [n_3^2 - \nu(n_1^2 + n_2^2)] + \tau_{xy} \frac{2(1+\nu)}{E} n_1 n_2 + \tau_{yz} \frac{2(1+\nu)}{E} n_2 n_3 + \tau_{xz} \frac{2(1+\nu)}{E} n_1 n_3 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} n_1 &= \cos \eta \sin \psi_0 \cos \phi_0 - \sin \eta \cos \psi_0 \cos \phi_0 \cos \alpha - \sin \eta \sin \psi_0 \sin \alpha \\ n_2 &= \cos \eta \sin \psi_0 \sin \phi_0 - \sin \eta \cos \psi_0 \sin \phi_0 \cos \alpha - \sin \eta \cos \psi_0 \sin \alpha \\ n_3 &= \cos \eta \cos \psi_0 + \sin \eta \sin \psi_0 \cos \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

本報では、長手X方向($\phi_0=0^\circ$ および $\phi_0=180^\circ$ 方向)および幅Y方向($\phi_0=90^\circ$ および $\phi_0=270^\circ$ 方向)における応力解析方法を適用した。三軸応力成分である τ_{xz} および τ_{yz} は佐々木らによる歪み感度の影響を考慮³⁾して以下の式(3)および(4)から求めた。 $(\tau_{xz}$ は $\phi_0=90^\circ$ および $\phi_0=270^\circ$ 方向の回折環を使用し、 τ_{yz} は $\phi_0=0^\circ$ および $\phi_0=180^\circ$ 方向の回折環から算出した)。三軸応力($\sigma_x - \sigma_z$ および $(\sigma_y - \sigma_z)$)は以下の式(5)、式(6)より求めた。ここで、 α は回折環の中心角、 a_1 および a_2 はcos α 法で導入されるパラメータである。

$$\tau_{xz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\cos \psi_0} \cdot B'_4$$

$$B'_4 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial a_2(90)}{\partial \sin \alpha} \right)_{\psi_0 > 0} - \left(\frac{\partial a_2(270)}{\partial \sin \alpha} \right)_{\psi_0 > 0} \right] \quad (3)$$

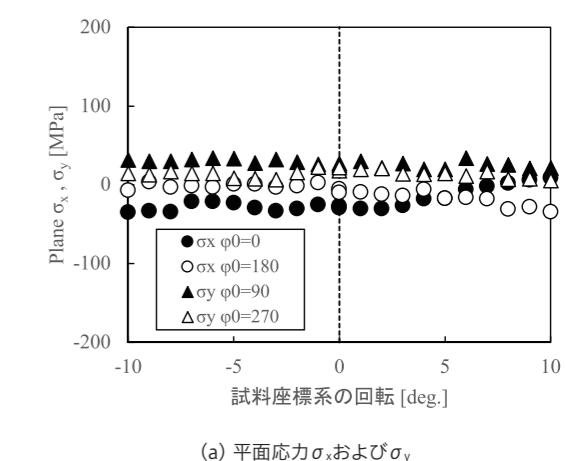
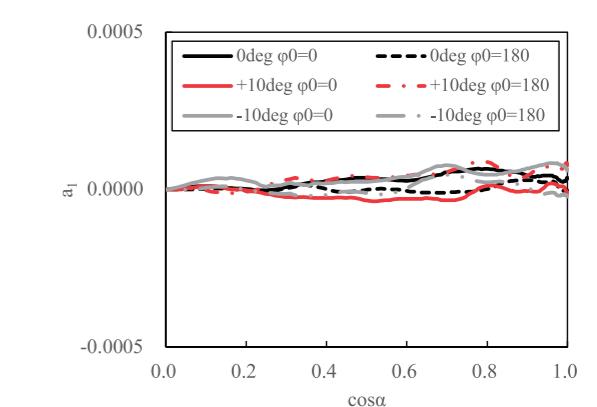
$$\tau_{yz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\cos \psi_0} \cdot B_4$$

$$B_4 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial a_2(0)}{\partial \sin \alpha} \right)_{\psi_0 > 0} - \left(\frac{\partial a_2(180)}{\partial \sin \alpha} \right)_{\psi_0 > 0} \right] \quad (4)$$

4. 実験結果

4.1 ブラスト処理前

図3(a)にblast処理前の長手X方向および幅Y方向の平面応力 σ_x および σ_y を、図3(b)に供試品を回転させない状態(傾斜0度)および±10度回転させた場合の a_1 -cos α 線図を示す。供試品の回転によらず平面応力は±40MPa以内であった。長手X方向および幅Y方向で測定方向による応力差も小さく、cos α 線図も概ね傾き0を示し、測定方向による差は見られなかった。

(a) 平面応力 σ_x および σ_y (b) a_1 -cos α 線図図3. ブラスト処理前の平面応力および a_1 -cos α 線図

a. 技術開発センター 研究第一グループ グループ長

b. 金沢大学 名誉教授

図4(a)には面外せん断応力 τ_{xz} および τ_{yz} を、図4(b)には三軸応力解析で算出した応力($\sigma_x - \sigma_z$)および($\sigma_y - \sigma_z$)を示す。面外せん断応力 τ_{xz} および τ_{yz} は供試品の回転に影響せず、概ね数MPaであった。同様に三軸応力解析で求めた($\sigma_x - \sigma_z$)と($\sigma_y - \sigma_z$)に関して同様に供試品の回転の影響は小さい。

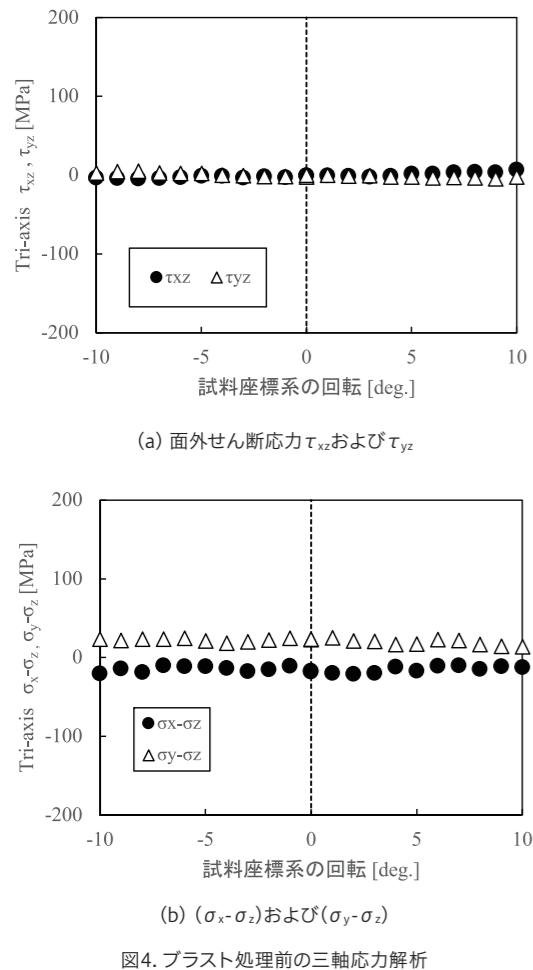


図4. ブラスト処理前の三軸応力解析

4.2 ブラスト処理後

図5(a)にブラスト処理後の長手X方向および幅Y方向の平面応力 σ_x および σ_y を、図5(b)に供試品を回転させない状態(傾斜0度)および±10度回転させた場合の a_1 -cos α 線図を示す。供試品を回転させない状態では長手X方向および幅Y方向の4方向の応力値は一致しているが、回転が大きくなるほど長手X方向の $\phi_0=0^\circ$ と $\phi_0=180^\circ$ 方向の平面応力差が大きくなり、最も回転させた場合(±10度)では約200MPaも平面応力に差が生じた。図5(b)より、供試品を±10度回転させた場合の長手X方向の a_1 -cos α 線図は、測定方向でcos α 線図の傾きが一致していない。供試品を+10度回転させた場合は、 $\phi_0=0^\circ$ 方向のcos α 線図の傾きが小さく、反対に-10度回転させた場合では $\phi_0=180^\circ$ 方向のcos α 線図の傾きが小さい。供試品を回転させる方向によって、平面応力の大小関係が反転していることがわかる。

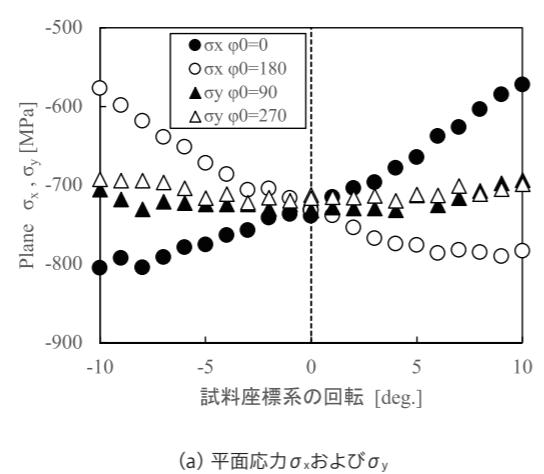
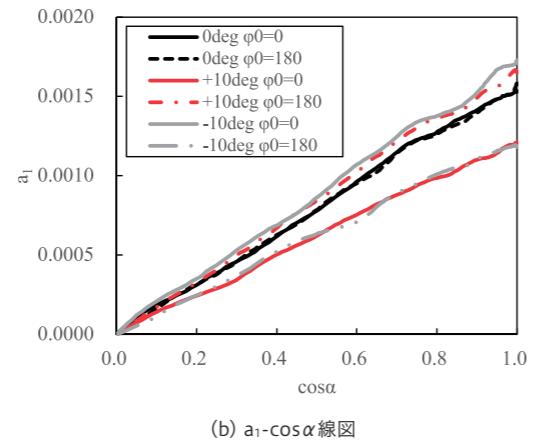
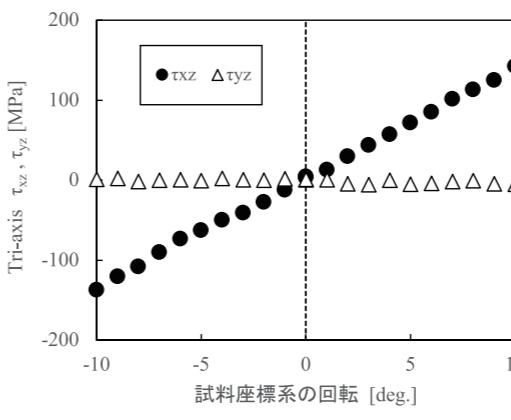
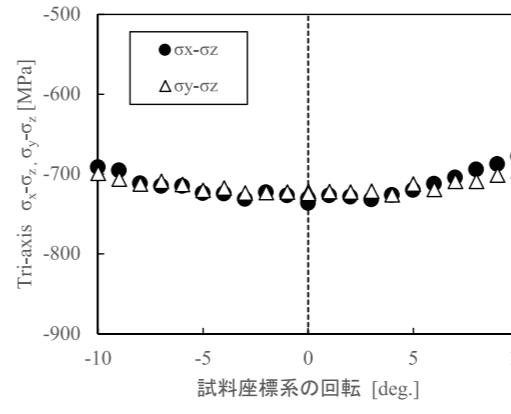
(a) 平面応力 σ_x および σ_y 図5. ブラスト処理後の平面応力及び a_1 -cos α 線図

図6(a)にはブラスト処理後の面外せん断応力 τ_{xz} および τ_{yz} を、図6(b)には三軸応力解析で求めた応力($\sigma_x - \sigma_z$)および($\sigma_y - \sigma_z$)を示す。面外せん断応力 τ_{yz} はブラスト処理後も供試品の回転に影響せず概ね数MPaであった。一方で、 τ_{xz} においては、供試品の回転に応じた符号の τ_{xz} が確認され、供試品の回転が大きくなるほど絶対値が大きくなる傾向を示した。この結果は、著者らが過去に報告したショットピーニング処理方向によってばね鋼の表面近傍に塑性流動が生じ、それに応じた面外せん断応力が付与された結果と類似する¹⁾。供試品の回転により測定位置ではあたかも塑性流動が生じた状態となり疑似的な三軸応力状態が発生したと推定する。

図6(b)より、三軸応力解析で求めた($\sigma_x - \sigma_z$)および($\sigma_y - \sigma_z$)は、概ね-700MPaの残留応力値を示し、平面応力測定でみられた評価誤差を解消した。詳細にみると、供試品を回転させない状態に対して±10度回転させた場合は約40MPaほど小さい残留応力値を示している。これは、供試品を回転させたことでX線の照射範囲内で試料距離の違いが応力値に影響を及ぼしたと推定する。

(a) 面外せん断応力 τ_{xz} および τ_{yz} (b) ($\sigma_x - \sigma_z$)および($\sigma_y - \sigma_z$)

5. まとめ

本報では、量産でのインライン測定を見据えて、供試品の試料座標系を意図的に回転させた場合において、一般的なcos α 法の平面応力測定と三軸応力解析を適用した結果を検証した。ブラスト処理を行わない供試品においては、試料座標系の回転の影響は小さい。一方で、ブラスト処理を施した供試品においては、試料座標系の回転に応じて測定方向で平面応力に顕著な差が生じ、回転が大きくなるほど平面応力の差は拡大した。三軸応力解析を行うことで疑似的な τ_{xz} が消え、平面応力測定結果と近い($\sigma_x - \sigma_z$)を導き出せた。特に±5°程度の試料座標の回転であれば、平面応力と概ね同等の値を示した。

SP処理やブラスト処理によって表面に残留応力が生じた供試品に対して、cos α 法の三軸応力解析を適用することで、面外せん断応力の影響を考慮したより正確な残留応力評価が可能である。特に、ばねのインライン測定や大型・湾曲形状を有する構造物のように、従来のように供試品の厳密な水平出ししが困難な場合において、本手法は有効である。cos α 法の三軸応力解析は、実用的且つ正確な応力を見極めるツールとして有効であり、今後も様々な分野での活用が期待される。

参考文献

- 1) 山崎智裕、曾田裕二、山岡拓也、佐々木敏彦、cos α 法によるショットピーニング処理したばね鋼表面の残留応力評価、日本機械学会論文集A編、Vol.87、No.894 (2021)、論文ID:20-00390
- 2) 山崎、懸架ばねにおけるX線残留応力測定cos α 法の有効性、非破壊検査、Vol.69、No.12、2020、pp.597-599
- 3) 佐々木敏彦、高橋俊一、佐々木勝成、小林裕一、エアーディテクタ方式のX線三軸応力測定法の改良に関する研究、日本機械学会論文集A編、Vol.75、No.750 (2009)、pp.219-227.

タンディッシュ誘導加熱装置導入による品質改善

松平 光^{a)}

1. 緒言

三菱製鋼室蘭特殊鋼株式会社では、機械構造用炭素鋼、機械構造用低合金鋼、ばね鋼、軸受鋼といった特殊鋼の製造を主体として、粗鋼約64千トン/月の製造能力を有している。

昨今のカーボンニュートラル(CN)や省エネルギー化の促進に伴い、軸受鋼の軽量化、長寿命化等が求められており、材料内部の不純物(介在物)や酸素含有量の低減が必要不可欠である。

本報告では軸受鋼の高清浄度鋼製造を目的としてタンディッシュ(TD)誘導加熱装置を導入による鉄片品質向上について報告する。

2. 設備概要

図1に当社製鋼工場のプロセスフローを示す。日本製鉄㈱北日本製鉄所の転炉・電気炉より出鋼・一次精錬された溶鋼を当社にてLF、RHで二次精錬後、BLCCにて鋳造を行なう。表1にBLCCの設備概要を示す。

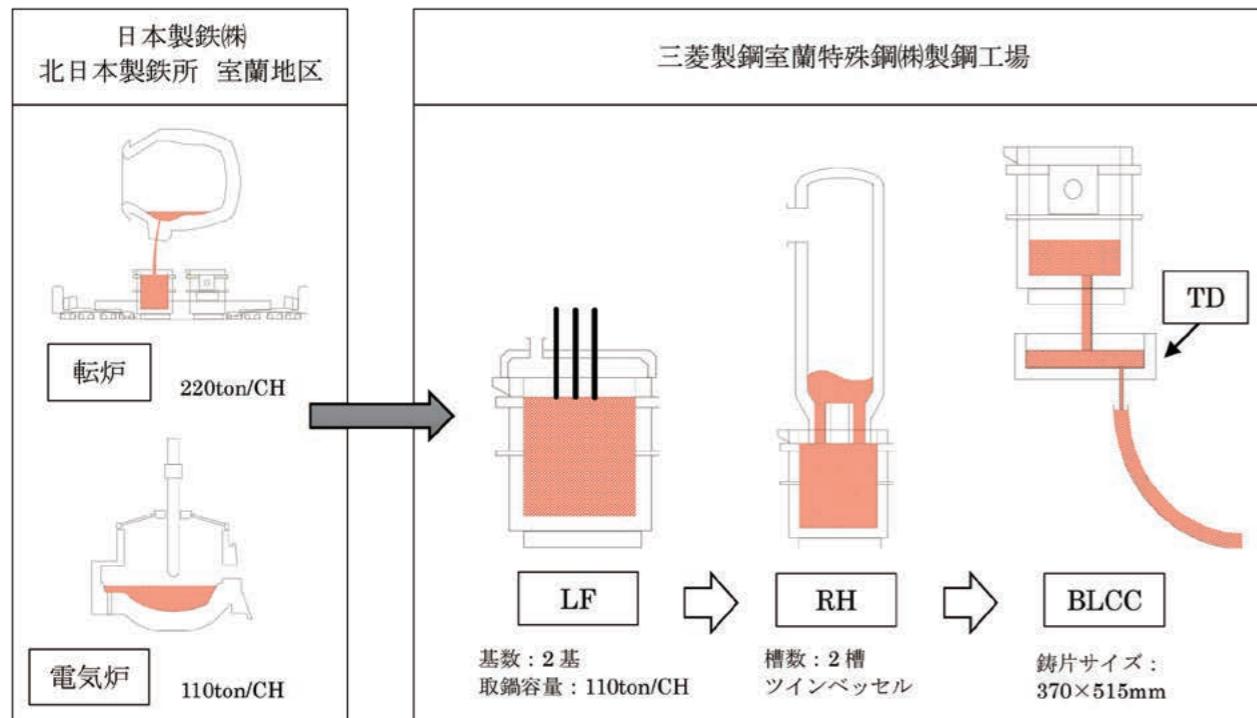


図1 当製鋼工場の製造プロセス

表1 BLCC主設備仕様

項目	仕様	項目	仕様
型式	全弯曲 4点矯正	二次冷却	エアミスト 5.5 mm
マシン R	16 m	平均鋳造速度	0.63 mm/min
ストランド数	2	TD 容量	Max. 21ton
鋳片サイズ	370×515 mm	軽圧下帯	有
電磁搅拌	モールド		

a) 三菱製鋼室蘭特殊鋼株式会社 製造部 製鋼グループ グループ長

3. TD誘導加熱装置導入

3.1. 現状の課題

当社では従来、軸受鋼の製造を行っているが、以下の課題点がある。

- 既設TDは加熱装置が無いため安定鋳造のためにTD内溶鋼温度を比較的高くする必要がある。
→中心偏析の悪化。(図2、3)
- 既設TDは取鍋(LD)注入室から鋳込み室までが一体の形状となっている。(図4)

→非金属介在物の叩き込み・浮上分離不足。(図5)

従来、清浄度向上の対策を実施してきているが、さらなる改善のためにTD誘導加熱装置の導入を検討した。

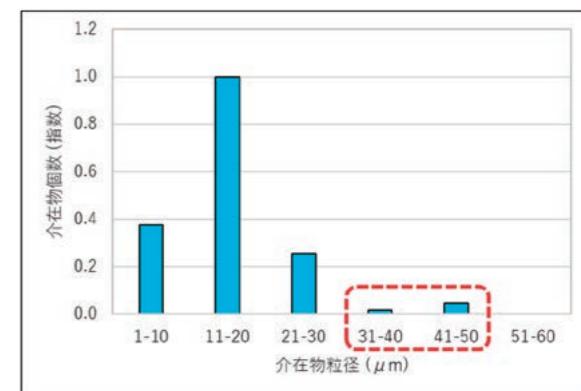


図5 介在物の粒度分布(既設TD)

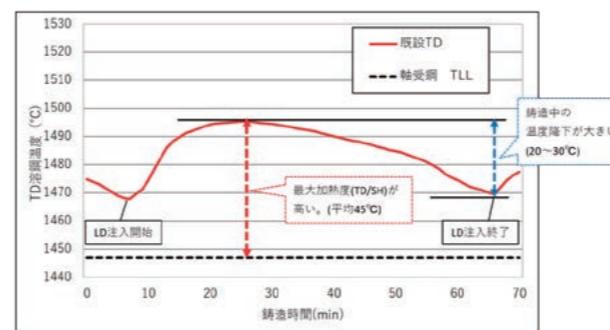


図2 TD内溶鋼温度推移(既設TD)

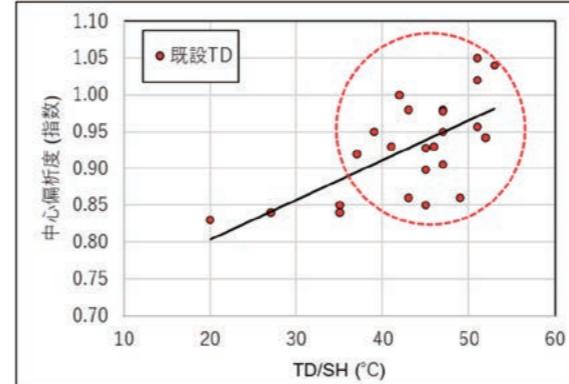


図3 TD/SHと中心偏析度の関係(既設TD)

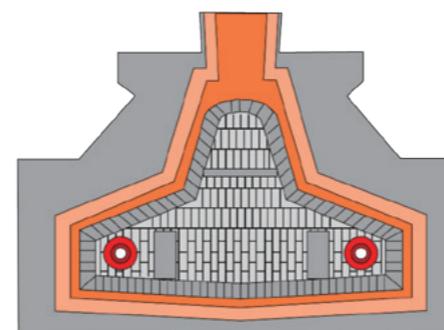


図4 既設TD模式図

3.2. 装置概要

3.2.1. 誘導加熱装置

TD内溶鋼の加熱方式としては誘導加熱方式とプラズマ加熱方式がある。プラズマ式と誘導加熱方式の特徴を表2に示す。今回の主目的は介在物の低減であるため、TD内で溶鋼介在物浮上分離効果を考慮し、誘導加熱方式を採用した。

TD誘導加熱装置の模式図・原理図¹⁾をそれぞれ図6、7に示す。TD誘導加熱装置とはTD内に誘導加熱コイルを配置し、電流を印加することにより加熱孔(以下:スリーブ)を通過する溶鋼をジュール熱により加熱する装置である。

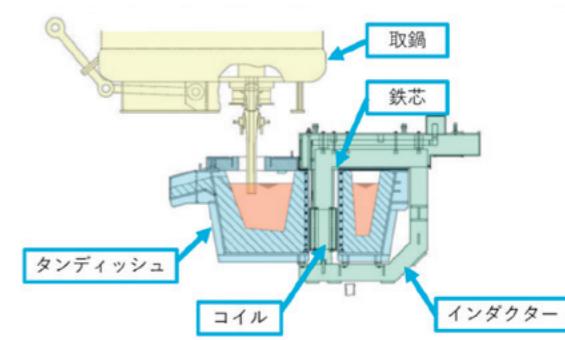


図6 誘導加熱TD模式図

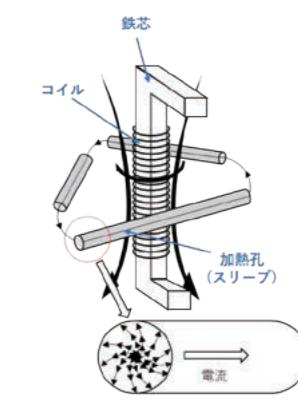
図7 誘導加熱原理図¹⁾

表2 TD加熱方式の比較表

項目	プラズマ方式	誘導加熱方式
加熱方法	TD上方から挿入した プラズマトーチにて溶鋼を加熱	TD内に内蔵した 誘導加熱コイルにて溶鋼を加熱
加熱効率	約30~70°C	約90°C
均温性	湯面直下で約200°C	電力投入2~3分で均一化
溶鋼品質	プラズマ熱による介在物の偏析が 懸念される	溶鋼攪拌力により介在物の除去効果が 期待できる
加熱装置取付	設備スペース:小 導入コスト:安価	設備スペース:大 導入コスト:高価
運転安定性	電力コントロールが困難	温度フィードバックによる 高精度な温度制御性

3.2.2. 誘導加熱TDの効果

スリープ加熱式の誘導加熱TDを使用することで介在物・偏析の低減に効果がある。

介在物低減について、スリープ加熱式TD誘導加熱装置では、溶鋼がスリープを通過する際に作用する電磁力(ピンチ力)によって介在物は外周へ移動しスリープに捕捉される。また捕捉されなかった介在物についてもスリープを出た時に、熱対流による上昇流が生じ、介在物の浮上分離を促進する効果がある。

偏析については、誘導加熱装置によりTD内での溶鋼加熱が可能となるため、既設と比較して過熱度を小さく維持したままで低温铸造が可能となり等軸晶の拡大・中心偏析低減に効果がある。

3.3. 誘導加熱TD加熱容量

誘導加熱装置を導入するにあたり、加熱能力を(1)式を用いて試算・検討した。

既設TDでの溶鋼温度降下(30°C)の半分(15°C)の昇温させるためには、式(1)より533kWとなるため余裕をもって600kWを選定した。

$$P(kW) = \text{連続铸造量}(\text{ton}/\text{min}) \times \text{昇温值}(^\circ\text{C}) \times \text{溶钢比热}(kWh/\text{T}^\circ\text{C}) \times 60(\text{min}/\text{h}) \div \text{電力効率} (\approx 0.9) \quad \dots (1)$$

3.4. 誘導加熱TD形状検討

TDに誘導加熱装置を導入するためにはTD内に鉄芯・コイルを設置する必要があり、既設TDの形状をそのまま流用した場合はTD内溶鋼量が減少してしまう。その結果TD内溶鋼滞在時間が短くなり、介在物浮上分離効果が弱くなる可能性があるため、誘導加熱装置を導入しつつTD内溶鋼量を既設と同程度に確保するためにはTDの形状変更が不可欠である。

TD内容量アップの形状変更案を図8に示す。図に示すように既設のTDはT型のTDを採用しており、5つの形状変更案を検討した。

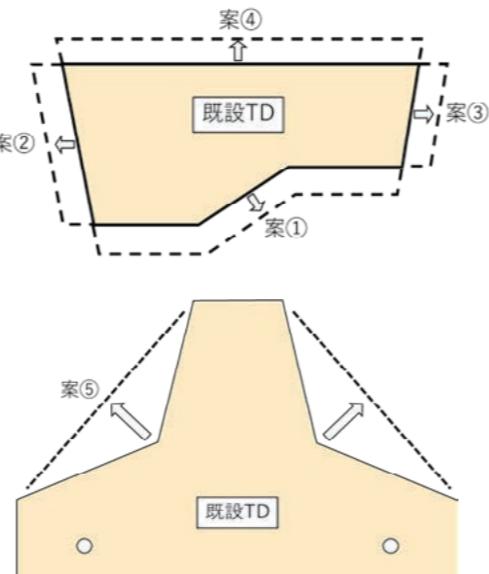


図8 TD形状変更案

案①: TD深バス化、案②: 長壁スライド、案③: 注入壁スライド、案④: 上方拡大、案⑤: T型からおにぎり型に変更となっている。各案の検討結果を表3に示す。

表3 TD形状変更による問題点

案	改造内容	設備改造規模	特記
①	深バス化	大	TDフレームの改造が必要
②	長壁スライド	大	
③	注入壁スライド	大	
④	上方拡大	大	取鍋との干渉によりロングノズルが短くなる
⑤	おにぎり型	小	TD改造のみで対応可

単位体積当たりのエネルギーE

$$E = 12mv^2 \times 1V \quad \dots (2)$$

取鍋SN(スラインディングノズル)内流速v

$$v = \frac{Q}{S \times \rho} \quad \dots (3)$$

連続体となる溶鋼重量m

$$m = Q \times t \quad \dots (4)$$

単位時間、単位体積当たりの攪拌エネルギーU

$$U = \frac{E}{t} = \frac{Q}{2V} v^2 = \frac{Q}{2V} \left(\frac{Q}{S \times \rho} \right)^2 \quad \dots (5)$$

U: 単位時間・単位体積当たりの攪拌エネルギー [J/m³·s]

V: TD注入室容積 [m³]

Q: 取鍋スループット [kg/s] t: 時間 [s]

S: 取鍋SN流路面積 [m²] m: 質量 [kg]

v: 取鍋SN内流速 [m/s]

ρ: 溶鋼比重 [kg/m³]

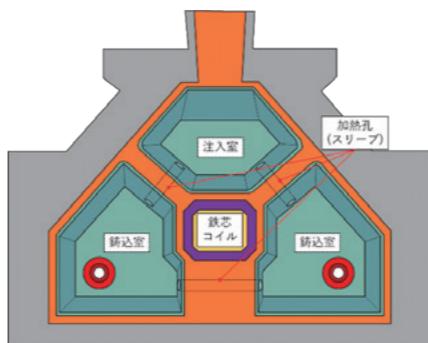


図9 誘導加熱TD模式図(おにぎり型)

表4 誘導加熱TD設備仕様

インダクタ定格	600kWh/1200V, 50Hz
制御機能	自動温度制御
	手動切り替え
	過ピンチタップ制御

TDスラグの巻き込みは、LD溶鋼がLD注入室へ入った際の溶鋼流の乱れが原因となりやすく、溶鋼流の乱れを抑えるには注入室の容積を大きくし攪拌エネルギーを小さくする必要がある。攪拌エネルギーの計算に(2)~(5)式を使用し、TDのLD注入室へ流入するLD溶鋼の模式図を図10、既設・誘導加熱TDのLD注入室の単位時間・体積当たりの攪拌エネルギーを図11に示す。

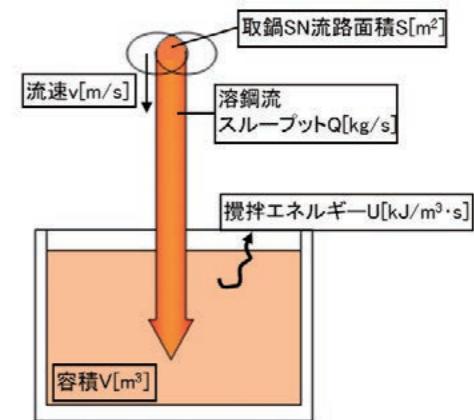


図10 LD注入室へ溶鋼流の模式図

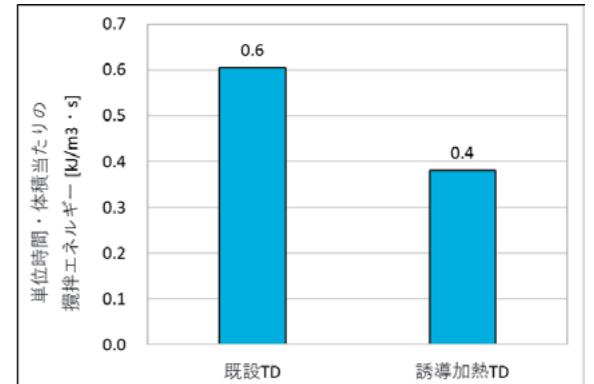


図11 注入室単位時間・体積当たりの攪拌エネルギー

図11より既設TDと比較して注入室の攪拌エネルギーは小さくなっている。注入室内での攪拌による捲込まれスラグをより抑制することができる。また、誘導加熱TDはLD注入室と鋸込み室が分断されており、下部に設置したスリーブを通じて溶鋼が流れるため、既設と比較してLD注入により叩き込まれたスラグ等は鋸込み室に流出しやすくなる。

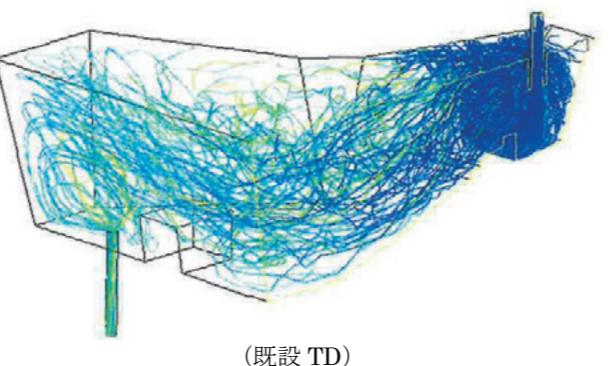
検討した誘導加熱TDの流動解析を実施し介在物除去効果のシミュレーションを実施した。流動解析条件を表5、結果を表6、図12、13に示す。

表5 流動解析条件

スループット量	2ストランド合計 2.2 ton/min
溶鋼温度	1530 °C
溶鋼密度	7200 kg/m ³
溶鋼湯面位置	TD海面から 728 mm
介在物径	100 μm, 50 μm, 5 μm
介在物物性	密度 2700kg/m ³ , 比熱 913J/kg·K

表6 流動解析結果

	既設 TD	誘導加熱 TD
誘導加熱 (IH)	無	有
溶鋼出口温度	1527.1	1541.9
介在物流出割合 (%)	12.22	0.06
浮上介在物割合 (%)	87.8	99.8



(既設 TD)

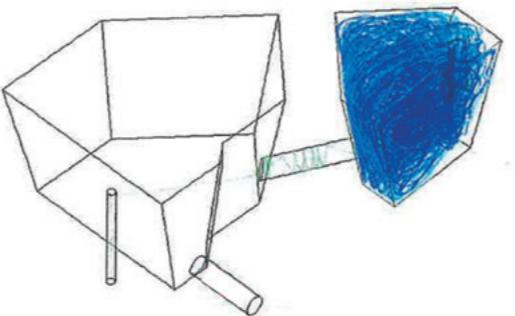


図12 流動解析結果比較(流線図)

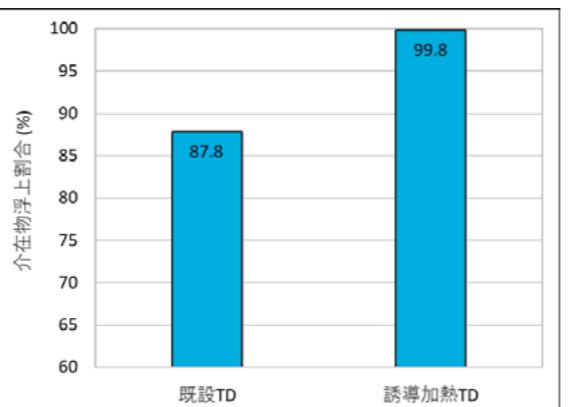


表6より既設TDと比較すると溶鋼出口温度が15~16°C程度上昇しており誘導加熱による昇温効果がシミュレーションで確認できた。また、介在物流出割合(出口に到達した介在物割合)、浮上介在物割合(湯面に当たった介在物)、浮遊介在物(600secの時点で流出も浮上もしなかった介在物)についても既設TDと比較して良好な結果が得られた。

4. 誘導加熱TD試験結果

4.1. 中心偏析

誘導加熱TDでのTD内溶鋼温度変化を図14に示す。また加熱出力と昇温効果を図15に示す。

図14より既設TDと比較してLD注入開始～終了までの溶鋼温度を最大で20°Cほど低温で保持しつつ鋸造可能となった。図15より低TAPでは加熱による上昇より溶鋼温度低下が大きいが、TAP3でつり合いがとれ、それ以上のTAPでは昇温効果が見られた。それに伴い、溶鋼温度降下も小さくなっている。約10°Cほどの温度降下となった。

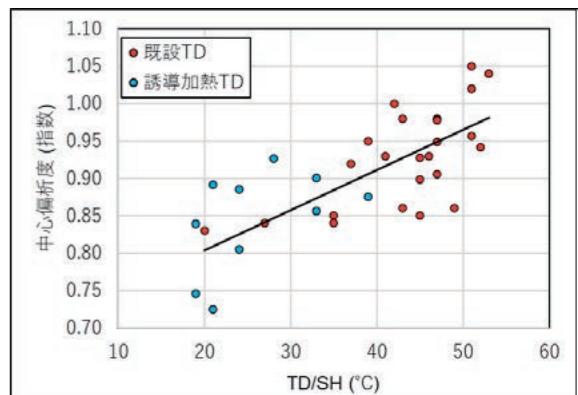


図16 TD/SH と中心偏析度の関係

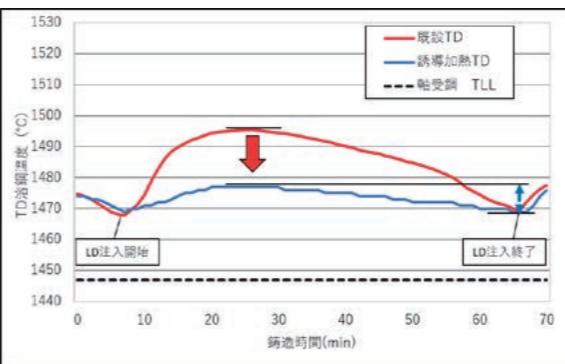


図14 TD内溶鋼温度推移比較

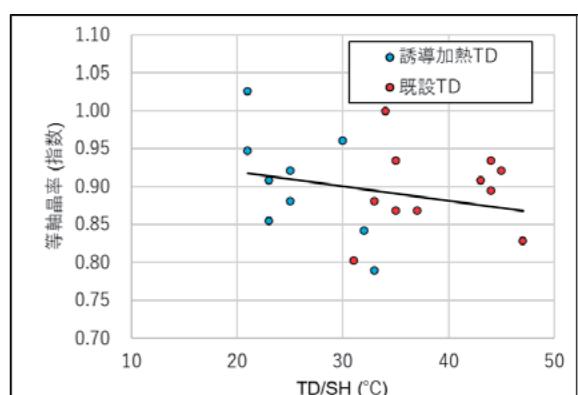


図17 TD/SH と等軸晶率の関係

4.2. 鋸片品質

誘導加熱TDを使用した際の鋸片酸素結果を図に推定最大介在物結果を図18、19にそれぞれ示す。図18より既設TDと比較すると鋸片酸素値の平均値はほぼ差はない結果となった。最大値に関してはIHTDを使用することにより良化傾向が見られており、それに伴い酸素値のバラつきが低減されていた。図19より既設TDと比較して推定最大介在物粒径の平均値は小さくなっていた。また、最大値が大きく低減されており誘導加熱TDによる巨大介在物の浮上分離・除去の効果が確認できた。

誘導加熱による介在物除去効率の一例を図20に示す²⁾(条件:表7)。図より介在物粒径が大きくなるほど加熱孔での除去効率が高くなっている。粒径60μm以上の介在物はスリーブの出口に至るまでに95%以上除去できていた。この一例のように溶鋼がスリーブを通過する際に巨大介在物が捕捉除去されることにより、既設と比較して推定最大介在物粒径の最大値が小さくなっていると推測できる。

誘導加熱TDの鋸込み室の流動解析を図21に示す。図よりスリーブを出した溶鋼は加熱されたことにより上昇する流れが発生している。これにより介在物の浮上分離が促進され既設TDと比較して介在物結果が良化したと考えられる。

既設TD、誘導加熱TD鋸造時に鋼中に残存した非金属

介在物の組成分布を図22、23に示す。なお図22はCaO-Al₂O₃-SiO₂状態図、図23はCaO-Al₂O₃-MgOの状態図を示す。

図22より既設TDと比較して誘導加熱TDではSiO₂の含有量が小さくなっていた。過去の調査結果より20 μm以上の粒径の大きい介在物にはCaO、SiO₂の含有量が高くなることが分かっている。これらの結果と推定介在物粒径結果より誘導加熱TDの効果により巨大介在物の除去効果が出ていると判断できる。図23より既設TDと比較して誘導加熱TDではMgOの含有量が大きくなっていた。誘導加熱TDは既設TDよりも複雑な形状をしており、既設TDのようにウェア耐火物として煉瓦を使用することができないため、ウェア耐火物として不定形耐火物を使用しているが、煉瓦と比較して耐溶損性に劣るため鋳造中に溶損したTDウェア耐火物の影響によりMgOの含有量が大きくなつたと考えられる。

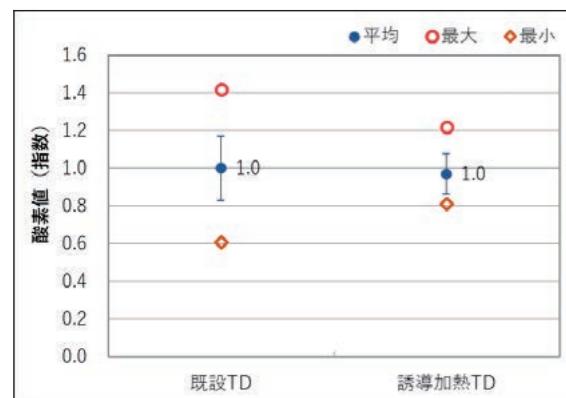


図18 鋳片酸素値結果

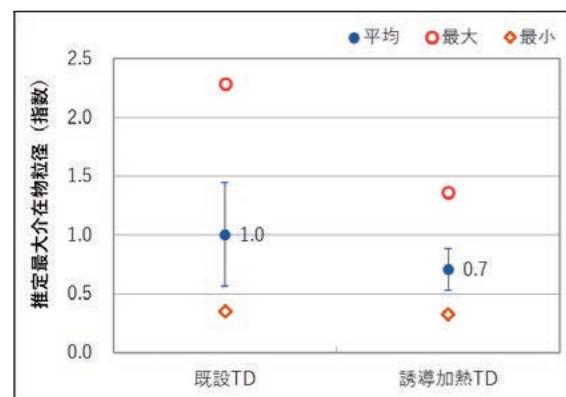


図19 推定最大介在物結果

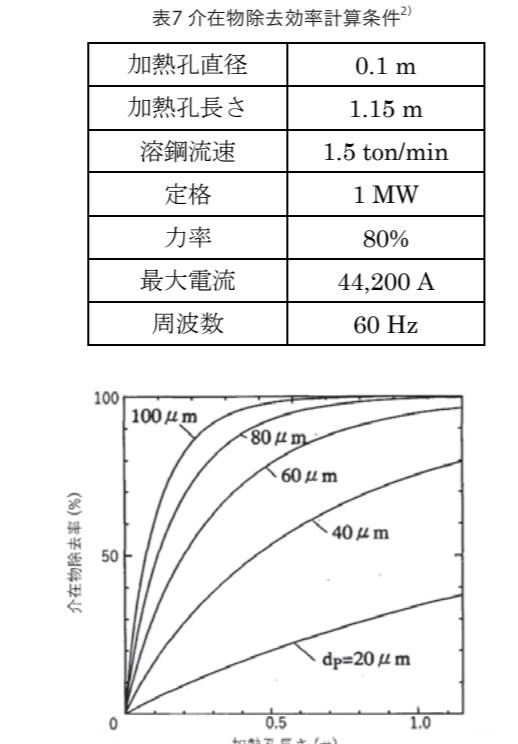
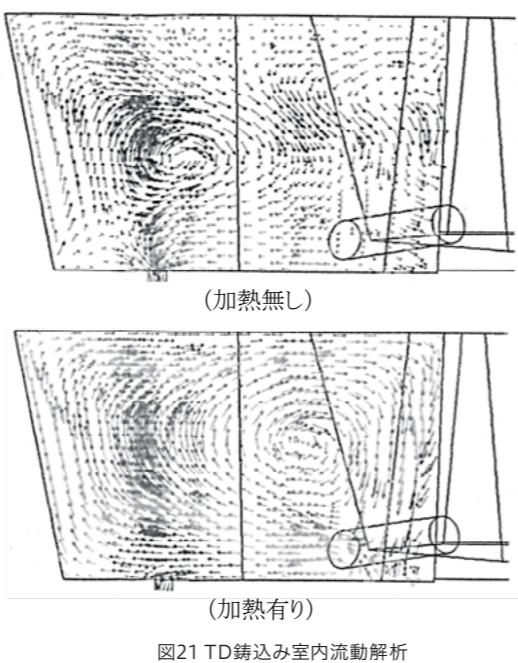
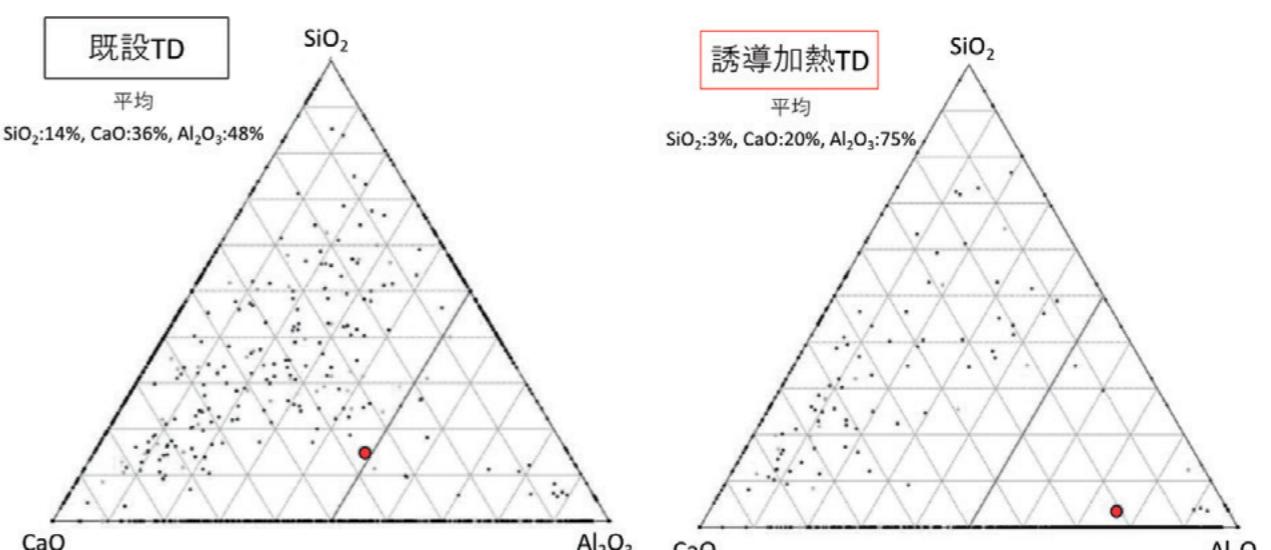
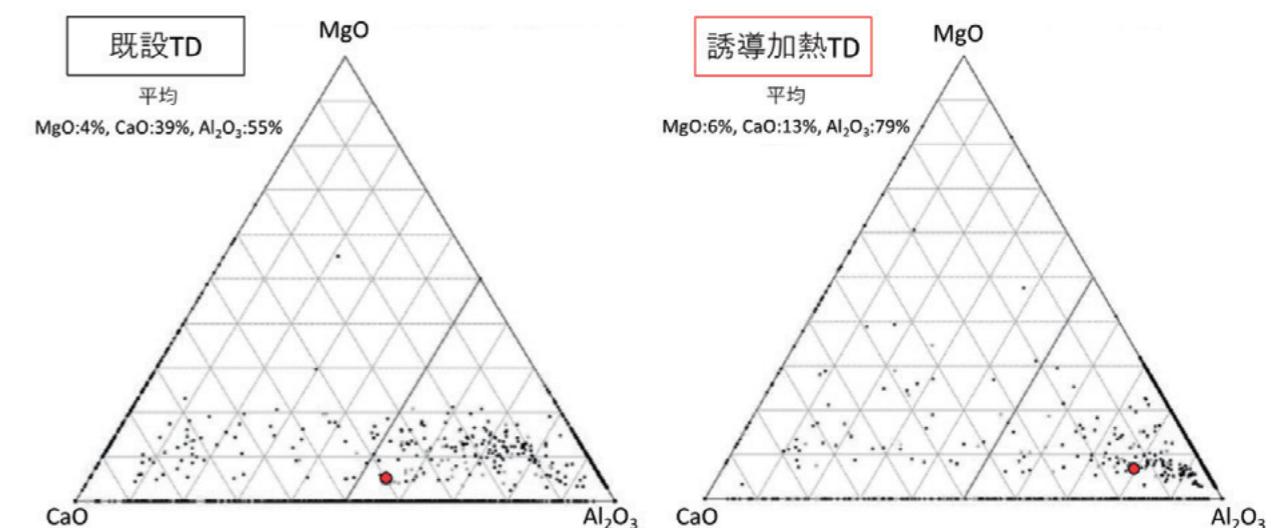
図20 介在物粒径による除去効率²⁾

図21 TD鋳込み室内流動解析

図22 介在物組成 (CaO-Al₂O₃-SiO₂)図23 介在物組成 (CaO-Al₂O₃-MgO)

5. 結言

鋳片品質向上のために誘導加熱TDを導入・実試験を実施し以下の知見を得た。

- 1) 誘導加熱TDを使用することにより低温鋳造が可能となり、中心偏析度が9%改善した。
- 2) 誘導加熱TDを使用することにより酸素値のバラつきが約40%改善された。
- 3) 誘導加熱TDを使用することにより推定最大介在物粒径が平均で約30%改善され、バラつきも約60%改善された。

参考文献

- 1) 川上 潔、北出 真一、畠山 俊明、高須 一郎:山陽特殊製鋼技報, Vol.20 (2013) No.1
- 2) 谷口 尚司、J.Keith BRIMACOMBE :鉄と鋼, Vol.80, (1994)

トラック用後付けアイドリングストップエアコン「一刀涼暖」

1. はじめに

トラック業界の課題のひとつとして、荷待ちや車内仮眠時にエンジンをかけたまま休憩することで発生する排ガスや騒音の環境問題がある。それを解決できるのが、現在当社で開発中のアイドリングストップ時にも使用可能なトラック用後付けエアコン「一刀涼暖」である。

2. アイドリングストップエアコンの電源について

電源は車両バッテリーまたは後付けバッテリーに対応する。製品使用中、ある電圧まで低下すると自動停止する保護回路を内蔵しているため、車両走行に支障をきたさない。

また、後付けバッテリーを装着した場合、車両走行時に、車両バッテリーの充電が完了すると、後付けバッテリーへの充電に切り替わる仕組みになっている。

これにより、アイドリングストップの状態でも安全かつ快適に使用できる。

3. 製品特長

従来品は、冷房機能のみ搭載されているが、図1で示すように「一刀涼暖」は製品名のとおり、1台で冷房と暖房をこなす業界初のアイドリングストップエアコンである。暖房機能を付加するためにヒーターを用いた構造が特許取得済みである。

従来の暖房用アイドリングストップ製品は燃料系のため燃料タンクからの配管工事が必要であり、燃焼による暖房は安全性に課題があった。

一方、一刀涼暖は、冷房と同様に、バッテリーを電源としているため、火災の心配がなく安全に使用できる。

また、1台あれば季節に関係なく冷暖房を使用できるため、コスト面や季節変わりのメンテナンスの心配もない。



図1 製品特長を示したカタログ表面

4. 製品構成

図2で示すように、トラックキャビン内に取り付ける室内機、キャビン後側に取り付ける室外機(上側取付タイプも設定)、室内機と室外機を繋ぐ配線、バッテリーへの配線および操作リモコンで構成されている。

図3で示すように、室内機下側にはフィルターを備えた吸い込み口が設けられ、上側より風が吹き出す。中央のツマミで冷暖房機能を切り替える構造になっている。

室外機にはコンプレッサーが搭載され、冷媒を循環させ熱交換を行うことで冷房が可能である。



図2 製品構成を示したカタログ裏面

5. あとがき

今後の地球温暖化の進行を考慮すると、環境対策商品の市場規模はさらに拡大が見込まれる。運送会社においても企業価値向上のためのサステナブルな取り組みや燃料費削減による収益改善、ドライバーの職場環境改善などが求められており、近年のドライバー不足にも対応できるため注目が高まっている。

ユーザーの期待に応えるためにも、早期製品化に向けて、開発を進めていきたいと考えている。

(部品事業部 東日本販売部 マネージャー 小川 学)

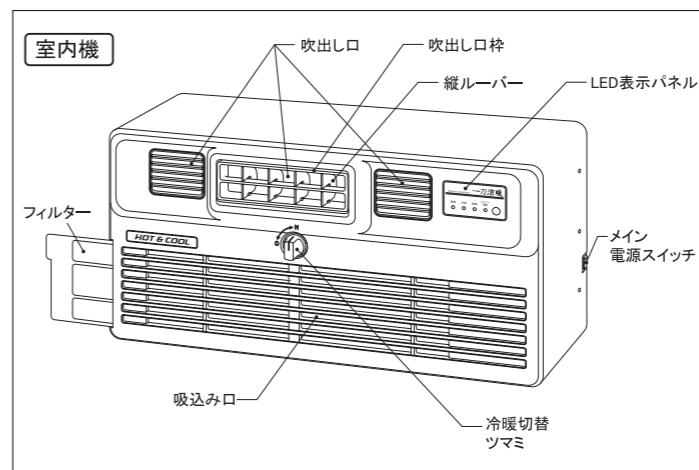


図3 室内機の各部名称

磁選機新製品紹介

1. まえがき

磁選機は磁力をを利用して金属を回収する選別装置である。三菱長崎機工は自治体ごみ処理施設や民間金属リサイクル業者向けに磁選機を販売している。昨今のリサイクル需要の高まりにより市場は益々拡大しており、資源循環型経済の実現にも大きく寄与できる製品である。

近年はCO₂削減を目的とした省エネ機器や金属回収量増加を目的とした高性能機器、原料毎に選別する高度選別対応機器の需要が高まっている。

当社では、これらの多様化するニーズに対応すべく、新製品開発及び新技術導入に取り組んでいる。以下にこれらの取り組みについて紹介する。

2. 新製品及び新技術導入

2.1 高磁力永磁式吊下磁選機

2.1.1 吊下磁選機

吊下磁選機は主に鉄の回収に用いられる。図1に吊下磁選機の外観写真を示す。吊下磁選機は図2に示すように処理物搬送コンベヤ上部に設置し、機器中央の磁石ケース部から発生する磁力で磁性物を吸着回収、コンベヤベルトで自動排出する。永久磁石を使用した永磁式とアルミコイルを使用した電磁式がある。

永磁式は安価なフェライト磁石を使用し、構成部品も少ないため機器コストが抑えられるが、電磁式と比較して磁束密度が低い。一方、電磁式は電磁石が高価であり、電源整流装置等の付帯部品も多いため、機器コストが高い。また、電磁石の電力消費により、ランニングコストも高くなる。



図1 電磁式吊下磁選機(左)及び永磁式吊下磁選機(右)

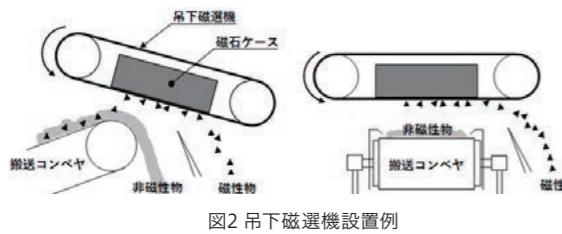


図2 吊下磁選機設置例

2.1.2 新製品開発

従来の永磁式吊下磁選機の短所であった磁束密度の低さを補い、高磁力を有する永磁式吊下磁選機を開発した。図3は新製品と従来製品の磁石ケース中心直下における磁束密度の比較を示す。実用想定位置として、磁石ケース底面からの距離Z=300[mm]とした場合、新製品の磁束密度は従来永磁式の約1.7倍、電磁式の1.5倍高い磁束密度となっている。

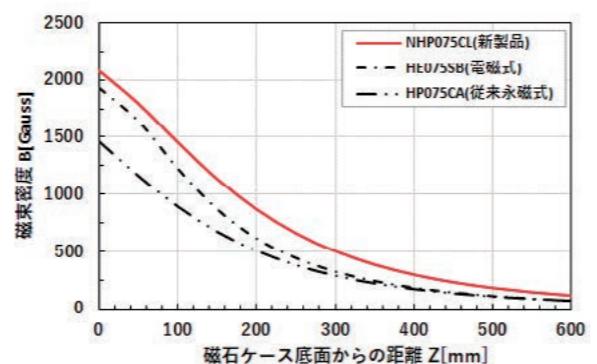


図3 同サイズ吊下磁選機の磁束密度比較

従来の永磁式吊下磁選機は汎用性が高いフェライト磁石を使用していたが、本製品は磁気特性に優れたネオジム磁石を使用した。また、磁石グレードを当社標準のN42からN52に変更した。N52は磁石単体での最大磁気エネルギー積が約52[MGOe]とN42と比較して20[%]高く、高磁力を実現できる。N52はN42と比較して約10[%]高価であるが、磁場解析による磁石ケース等の最適設計により、使用する磁石数量を当初の設計より20[%]低減できた。図4に磁場解析実施例を示す。

電磁式と比較して、磁気性能は向上し、イニシャル/ランニングコストは低減できるため、市場優位性の高い製品となった。

永久磁石ユニット製造において、当社は成型された磁石材料を購入し、磁石ケースに組込み後、社内設備で着磁する。新製品開発では、磁石グレードアップ及びボリュームアップに伴い、着磁機の高出力化、着磁スペース拡張が必要であった。そこで、着磁機設計を見直し、構成する電磁コイル及び電源設備の増強、ヨーク部の改造を実施した。図5に改造後の着磁機外観写真を示す。これにより、高磁力永磁式吊下磁選機の製造を可能にした。

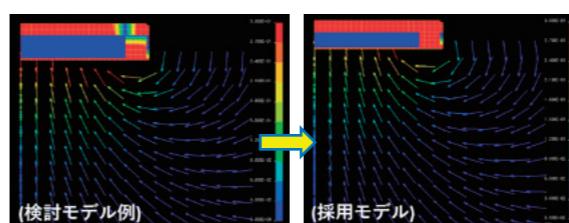


図4 磁場解析による最適設計実施例
(空間磁束密度ベクトル表示、対称条件による1/4モデル)



図5 改造後の着磁機外観
(三菱長崎機工 防振・磁選機工場に設置)

2.1.3 試作機製作、性能評価

本製品の試作機を製作し、性能評価を実施した。まず、試作機の磁束密度計測を行い、磁場解析による設計値と比較検証した。図6は磁石ケース直下領域における磁束密度分布の比較を示す。設計値と実測値との誤差は平均2%以下となっており、設計通りの磁気性能であることを確認した。

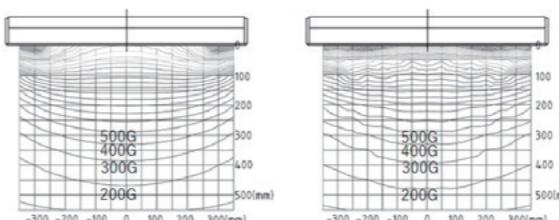


図6 磁石ケース直下領域における磁束密度分布比較
(左: 解析設計値 右: 実測値)

次にテストサンプルを用いた吸着テストを実施した。テストの様子を図7に示す。磁性物サンプルを磁石ケース下方の磁力影響が無い位置から徐々に近づけ、吸着した位置から磁石ケース底面までの距離Z'を測定した。試作機及び同サイズの電磁式を比較対象とした吸着テスト結果を表1に示す。全サンプルで試作機のほうが電磁式より離れた位置でサンプルを吸着できており、磁気性能の優位性を確認した。

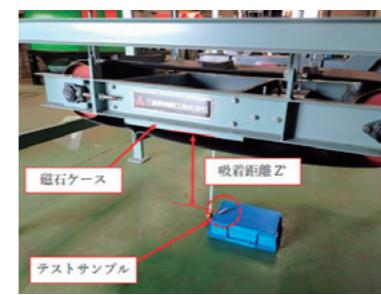


図7 サンプル吸着テストの様子

表1 サンプル吸着距離Z'比較

テストサンプル	電磁式 (HE075SB) [mm]	新製品永磁式 (NHP075CL) [mm]
六角ナット(M16, 30g/pc)	260	310
六角ナット(M8, 4g/pc)	230	280
ばね座金(M16, 11g/pc)	290	350
ばね座金(M8, 2g/pc)	280	350
六角ボルト(M16x100L, 181g/pc)	330	400
六角ボルト(M16x30L, 15g/pc)	330	400
乾電池(單一, 127g/pc)	220	250
乾電池(單二, 62g/pc)	220	250
乾電池(單三, 24g/pc)	240	270
ボタン電池(LR41, 1g/pc)	250	310
ボタン電池(LR44, 2g/pc)	250	300

2.1.4 市場投入

本製品は、本年4月より本格的に市場投入を開始した。従来の主要ターゲットである金属スクラップ分野だけではなく、木材、鉄鉱石関連分野や既設電磁式のリプレース等で引き合いを受けている。既に初号機を受注しており、納入に向けて製作を開始している。

顧客立会でのサンプルテスト実施やPR活動も進めており、更なる受注増加が見込める。

2.2 微小粒径用非鉄金属選別機

2.2.1 非鉄金属選別機

非鉄金属選別機はアルミや銅等の非鉄金属回収に用いられる。本機器は、コンベヤヘッドブーリ内部でN極S極を交互に配置した磁石ロータを高速回転させることで交番磁界が発生する。非鉄金属をコンベヤベルトで交番磁界内に搬送すると、渦電流が発生し、非鉄金属にも磁界が発生する。磁石ロータの交番磁界と非鉄金属の磁界が常時反発することで非鉄金属が前方へ飛び出す。一方、磁界の影響を受けない非金属は、ベルト速度に応じた放物落下となり、飛距離の差が生じるため非鉄金属のみを回収できる。(図8参照)

非鉄金属選別機の非鉄金属飛距離特性は次式で表される。

$$F \propto S \times t \times \frac{\sigma}{\rho} \times B \times p \times n \quad (1)$$

F : 非鉄金属が前方へ飛び出す力

S : 処理物の投影面積

t : 処理物の厚み

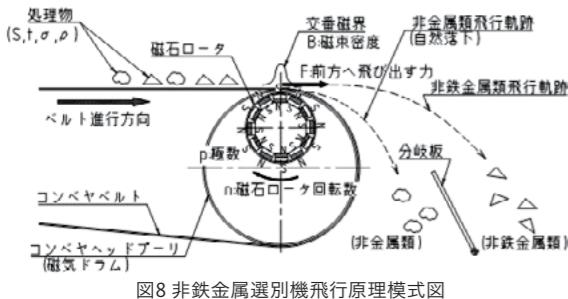
σ : 処理物の導電率

ρ : 処理物の密度

B : 磁束密度

p : 極数

n : 磁石ロータ回転数



当社の現行製品は、磁束密度Bと極数pが異なる2機種をラインアップし、処理物性状に合わせて機器選定している。

2.2.2 新製品開発

当社の非鉄金属選別機は高性能タイプでも処理物粒径10 [mm]以上を対象としていた。これは、粒径が小さいと非鉄金属に発生する渦電流が小さく、飛行距離が伸びず、選別が困難なためである。一方、昨今は焼却残渣やシュレッダーダストに含まれる微小粒径金属の回収需要が増加しており、非鉄金属選別機の高性能化が求められている。そこで5 [mm]以下の微小粒径を選別対象とした非鉄金属選別機を開発した。表2に新製品と現行製品の仕様比較を示す。

本製品は、式(1)に表される非鉄金属飛距離特性の内、機器性能因子である磁束密度B、極数p及び磁石ロータ回転数nを現行製品より向上させた。

表2 非鉄金属選別機仕様比較

機種 仕様	現行標準機 (MSHシリーズ)	現行高性能機 (MSKシリーズ)	新製品 (MSUシリーズ)
極数(p)[P]	12	16	28
磁石ロータ回転数(n)[min ⁻¹]	3000	3000	3500
周波数(=p*n/2/60)[Hz]	300	400	817
ベルト上の最大磁束密度(B)[Gauss]	2000	3000	4300

2.2.3 試作機製作、性能評価

本製品の試作機を製作し、耐久運転テスト及び性能評価テストを継続中である。図9に試作機の写真を示す。



図9 非鉄金属選別機試作機(左: 試作機全体 右: 選別部)

性能評価テストの経過報告として、5 [mm]以下の微小粒径サンプルの選別結果を表3に示す。現行高性能機を比較対象とした。回収率、純度は選別精度の一般的な評価指標で、数値が高いほど選別性能が優れている。回収率は投入

した非鉄金属全量のうち非鉄金属回収側に選別できた非鉄金属の割合、純度は非鉄金属回収側の非鉄金属の割合を示す。現行高性能機を比較対象とした場合、選別性能が大幅に向ふることを確認した。

表3 微小粒径サンプル選別結果比較

評価指標	機種 現行高性能機 (MSK345S)	新製品 (MSU575S)
回収率	75	95
純度	78	94

2.2.4 市場投入

本製品は、本年10月より市場投入を予定している。既に顧客向けサンプルテストを予定しており、拡販に向けてPR活動を進める。

2.3 センサー選別機

近年、海外の金属スクラップ輸入制限やりサイクル原料の品質要求の高まりにより、単一原料かつ高純度に回収する高度選別の需要が高まっている。高度選別は従来の磁石を応用した選別機だけでの対応が難しく、センサーやカメラを利用したセンサー選別機が必要となっている。

当社は顧客要求に応えるべく、処理物の色をカメラで認識し選別する中国メーカー製カラー選別機を5年前に導入した。ただし、色認識の単一機能だけでは、対応できる処理物が限られることが課題であった。

そこで、課題解決を目的として、金属センサー選別機とX線選別機を新たに導入した。今回導入した2機種はいずれも中国メーカー製であるが、現在、日本で販売されている日本製、ヨーロッパ製と比較し、性能面で遜色はない。一方、価格は1/3、納期は1/4程度であり、顧客が導入しやすい点がメリットである。低価格、短納期で競合メーカーとの差別化を図り、市場シェア獲得を目指す。

2機種ともテスト機導入を完了し、現在は顧客向けサンプルテストを順次実施している。

2.3.1 金属センサー選別機

金属センサー選別機は搬送コンベヤ部に金属センサーが内蔵されている。金属センサーは、磁界を利用して電磁誘導方式で、対象物が検出領域に侵入した際の磁界変化を検出し、金属を識別する。検出した金属をエア噴射で回収する選別装置である。(図10,図11参照)

廃プラスチックや木材等の燃料原料からの金属除去では、対象金属異物毎に磁選機や非鉄金属選別機など複数の選別機を設置する必要がある。金属センサー選別機は単体で、これら全金属異物の選別除去が可能である。その他、自動車シュレッダーダストや焼却灰からの金属除去等、幅広い分野で活用できる汎用性の高い装置である。

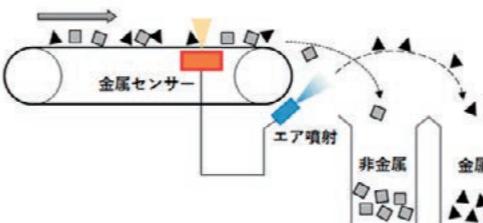


図10 金属センサー選別機イメージ図



図11 金属センサー選別機サンプルテスト機外観

2.3.2 X線選別機

X線選別機は搬送コンベヤ上部よりX線を照射し、高/低2種類のエネルギー帯で得られた透過画像を処理することで対象物を識別し、エア噴射で選別回収する。(図12,図13参照)

本製品は、X線の透過で原料の密度差を分析するため、軽金属(アルミ)と重金属(銅、真鍮など)の選別に適している。カラー選別機で対応困難であった表面色での判断が難しい処理物でも材質を識別することができる。その他、リサイクルプラスチックからの異物(金属、石、ガラス等)除去、アルミスクラップの鋳造品/板材選別などの用途例がある。

さらに、導入機はカラー選別機能も有した複合機であり、X線単機能、カラー単機能、X線+カラー両機能を選択して、様々な材質識別に適した選別装置となっている。

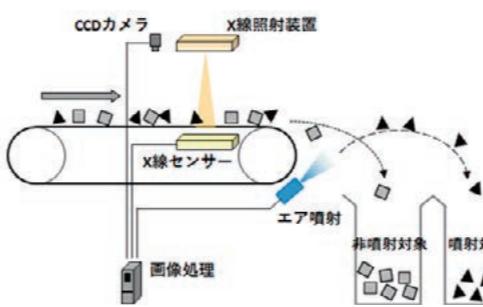


図12 X線選別機イメージ図



図13 X線選別機サンプルテスト機外観

3. あとがき

当社は、引き続き市場ニーズに合わせた新製品投入を進める。また、新製品である磁選機、非鉄金属選別機とセンサー選別機を組み合わせたパッケージ製品、選別ライン設備に取り組み、新しい市場への参入を目指す。

今後も多様化する市場ニーズを捉え、効果的なマーケティング戦略を構築し、新製品開発による拡販推進と社会貢献に取り組んでいく。

(三菱長崎機工株) 製造本部 防振・磁選機部
開発マーケティング課 有上 裕志)

窒化用鋼の紹介

1. まえがき

近年、機械部品に要求される耐摩耗性や寸法精度が高まっていることから、窒化を使用した機械部品が増えている。当社では表面硬度・硬化層深さ・切削性などの要求事項を達成するために、独自の窒化用鋼を開発・製造しているため、本稿で紹介する。

2. 窒化について

窒化とは、アンモニア雰囲気で鋼を加熱することで、鋼表面から活性窒素を拡散させ、アルミニウムやクロム、バナジウムといった元素と結合して高い硬度をもつ窒化物となることで高い表層硬度が得られる熱処理のことである。窒化で得られる硬化層は基本的に表層から0.5mm以下であり、最表層のみの硬化に留まるが、鋼種によっては1000HV以上の表面硬度を得ることができる。また、500～600°Cの変態点以下で熱処理を行うため、熱処理後の寸法精度が高いことや耐食性・耐熱性が高いことも利点として挙げられる。

図1に元素の添加量と窒化後の表面硬度の上昇量の関係を示す。^[1]また、図2に元素の添加量と窒化後の硬化層深さの関係を示す。^[1]アルミニウムは少量の添加で窒化後の表面硬度が大幅に上昇するが、硬化層深さは大幅に減少するという欠点も有しているが分かる。一方で、バナジウムは添加量に対して表面硬さの上昇量が大きく、硬化層深さも深くなることが特徴であることが分かる。このように、必要な表面硬度と硬化層深さによって添加元素の種類や量をコントロールすることが重要となる。

3. 当社窒化用鋼の紹介

当社窒化用鋼のラインナップを表1に示す。当社ではCr-V系、Cr-Mo系の窒化用鋼に加え、Cr-Mo-V系の析出硬化型の窒化用鋼も製造している。当社窒化用鋼はアルミニウムを含有しない化学成分で製造しているため、アルミニナ系の非金属介在物を低減でき、SACM645などのアルミニウムを含有している窒化用鋼と比較して、切削性に優れるという特徴を有している。本稿では特にSCR430VS1とMAC24について詳しく紹介する。

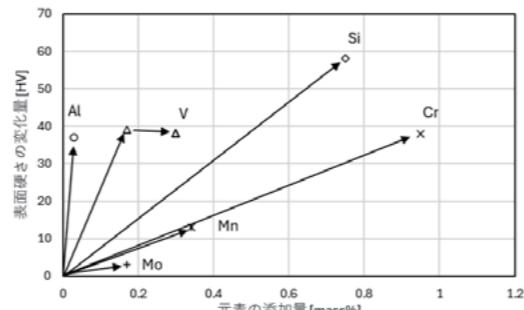


図1 元素の添加量と窒化後の表面硬度の関係^[1]

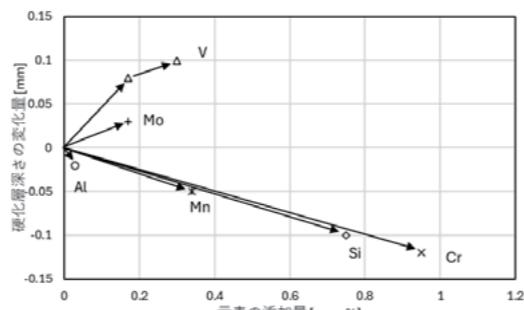


図2 元素の添加量と窒化後の硬化層深さの関係^[1]

表1 当社窒化鋼のラインナップ

鋼種名	成分系
SCR430VS1	Cr-V系
MAC24	Cr-Mo系
NT100	Cr-Mo-V系（析出硬化型）
NT200	Cr-Mo-V系（析出硬化型）

3.1 SCR430VS1

SCR430VS1はマンガン・クロム・バナジウムを添加・増量することにより窒化特性を確保しており、JIS鋼のSCM435HやSCM440Hの代替材として使用可能な窒化用鋼である。快削元素の硫黄を調整して添加することで切削性も付与している。

図3にSCR430VS1の調質材（焼入れ・焼戻し）と非調質材（熱間鍛造まま）、SCM435Hの調質材（焼入れ・焼戻し）のガス窒化後の断面硬度を示す。SCR430VS1の調質材はSCM435Hの調質材と比較して、同条件の窒化で表面硬度が高くなり、より深い硬化層が得られていることが分かる。また、SCR430VS1においては、調質材よりも非調質材のほうがより高い表層硬度と深い硬化層が得られていることが分かる。

以上の結果から、SCR430VS1はSCM435Hの代替材として使用可能であり、より短い窒化時間でもSCM435H

と同等以上の窒化性能が得られると言える。また、SCR430VS1は熱間圧延材のまま切削加工した製品や熱間鍛造ままの製品に窒化を行うことで、調質材よりも高い表層硬度・深い硬化層が得られることが期待される。

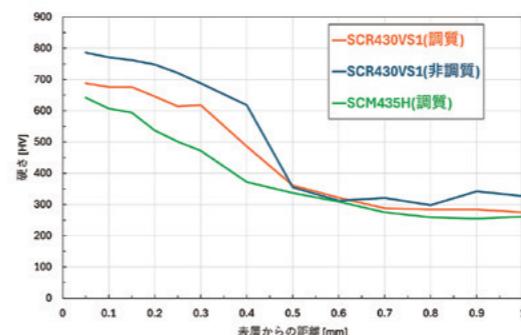


図3 SCR430VS1のガス窒化後の硬度

3.2 MAC24

MAC24はクロム、モリブデンを添加・増量することで窒化特性を確保しており、JIS鋼のSACM645の代替材として使用可能な窒化用鋼である。焼戻し軟化抵抗が大きいために高温強度に優れ、韌性に富んだ窒化層を形成するという特徴を有している。

図4にMAC24調質材とSACM645調質材のガス窒化後の断面硬度を示す。MAC24はSACM645と比較してアルミニウムを含有していないため、表層硬度は劣るが、表層から0.1mm以降ではSACM645と同等以上の硬度を示していることが分かる。そのため、窒化後に表面研磨の工程が入るような製品においては、MAC24はSACM645の代替材料として使用可能であることが分かる。

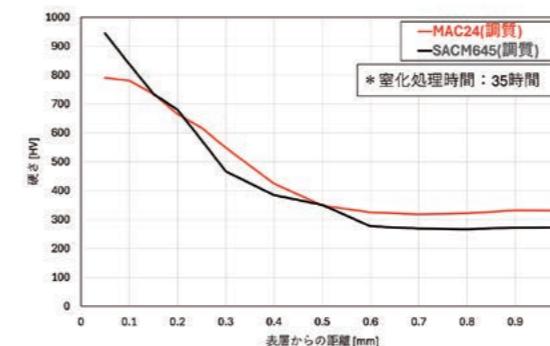


図4 MAC24のガス窒化後の硬度

3.3 NT100・NT200

NT100・NT200はCr-Mo-V系の窒化用鋼であり、窒化処理の温度域で時効硬化が生じる析出硬化型の窒化用鋼である。焼戻し軟化抵抗が大きいために高温強度に優れ、韌性に富んだ窒化層を形成するという特徴を有している。

通常の窒化用鋼は窒化処理後に熱処理を行うことができないため、窒化処理前の材料硬度が母材の硬度となる。しかし、母材硬度が高くなりすぎると機械加工が難しくなるため、母材硬度には限度がある。これに対してNT100・NT200は、窒化処理中に時効硬化で母材硬度を高めることができるために、通常の窒化用鋼と比較して高い母材硬度が得られるという特徴がある。

4. あとがき

当社窒化用鋼はJIS鋼のSCM435HやSCM440H、SACM645の代替材として使用可能な窒化性能を有しており、アルミニウムを含有していないため、切削性が良好で硬化層深さが深いという特徴を有している。当社窒化用鋼の中には、熱間圧延・熱間鍛造ままの状態で良好な窒化性能を示している鋼種もあるため、熱処理工程省略や窒化性能向上といったお客様のニーズに沿った提案を今後も継続していく。

(技術開発センター研究第二グループ 杉本 悠希)

参考文献

[1] 三菱製鋼技報, Vol.34 (2000), 3

3Dスキャナによる評価事例紹介

1. 諸言

近年、自動車をはじめとする輸送機器では軽量化ニーズが加速度的に高まっており、ばねも例外ではない。軽量化を達成するには材料・熱処理・成形プロセスの最適化だけでなく、設計段階からの精緻な形状評価が不可欠である。開発サイクルの短縮と品質向上は客先提案力向上に必須であり、とりわけ形状評価業務の高度化・迅速化が急務である。さらに設計精度は年々シビアさを増しており、高精度な設計を支えるには試作段階で取得する精密な実測データが求められる。

しかし従来の手測定は取得可能なデータが限定的であつたため、形状変更時の部門間調整に時間を要することがあった。そこで当社ではハンディタイプの非接触3Dスキャナを導入し、形状を3Dデータ化することで製造への迅速なフィードバックを実現した。

本稿では導入に至った経緯、装置構成、測定事例を紹介し、その有効性を検証する。

2. 導入前の課題

まず、本技術導入以前に顕在化していた課題を整理する。技術開発センターでは日常的に形状測定を実施しているが、従来手法には精度・効率の両面で次の問題があつた。

- ① 手作業測定のため、多くの時間工数を要した。
- ② 測定精度および再現性が作業者の熟練度に依存し、結果のばらつきが大きかった。
- ③ 測定結果を3Dデータとして蓄積していなかったため、試料廃棄後は再解析や比較ができず、データ再利用が困難であった。
- ④ 太巻ばねなど大型部品は物理的制約により測定自体が不可能であった。

以上の課題を抜本的に解消する手段として、ハンディ型非接触3Dスキャナの導入を決定した。

3. 3Dスキャナの仕様と優位性

機種選定にあたっては現場適合性・操作性・処理速度の観点から候補機を比較し、最終的に Artec 社製 Artec Leo(図1)を採用した。本装置はハンディ型ながら高精度・高速スキャンを実現し、現場での取り回しにも優れる。主な仕様は以下のとおりである。

- ・測定精度:0.1 mm
- ・スキャン速度: 3.5×10^7 点/s
- ・位置決め用マーカ不要で段取り時間を大幅削減
- ・ワイヤレス・片手操作により作業者負荷を軽減
- ・本体タッチパネルで取得状況をリアルタイム確認可能

これらの特徴により、現場での即応性と高い汎用性を両立している。



図1 Artec Leo 外観

4. スキャン手順とデータ処理フロー

次に、測定から解析までの標準フローを示す。

- ① 被測定物を複数方向から撮影し、全周の点群データを取得(所要約10 min)。
- ② 点群データを Geomagic Control X に取り込み、ノイズ除去・メッシュ化を実施して3Dモデルを生成。
- ③ 生成モデルとCADデータを重ね合わせ、差分解析・寸法計測・リバース解析を行う。

5. 3Dスキャナ活用によるメリット

導入効果は以下のとおりである。

- ① 形状測定時間を約1/4に短縮(15 h → 3.8 h/月)。
- ② スキャンデータをCAD化し、定量的指示を介して製造工程へ即時反映。
- ③ 3Dモデル化により実ばねを早期破棄でき、保管スペースを削減。
- ④ 太巻ばねや鋳鋼品など大型・複雑形状品へも適用可能。

6. 測定事例

3件の測定事例を示す。

- (1) 板ばね(図2)

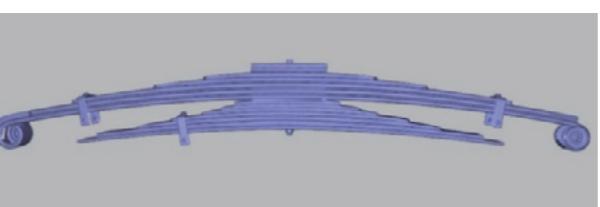


図2 板ばね

ベンチマーク品形状を迅速に確認し、3Dデータで長期保管。

- (2) 太巻ばね(図3)

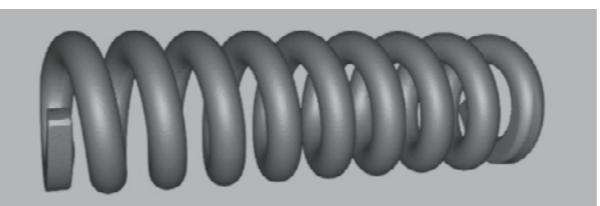


図3 太巻ばね

従来測定不能だったオープンエンド立上り部を3D化し計測。

- (3) スタビライザ(図4)



図4 スタビライザ

量産品のスキャンにより成形時スプリングバック傾向を把握。

7. 今後の活用展望

ばね製品で蓄積した測定ノウハウを基盤とし、設計・製造・保全の各フェーズで3Dスキャナ活用をさらに拡大する計画である。具体的な取組みと想定効果を以下に示す。

【設計フェーズ】

- ・リバース解析(図5)を活用し、試作品とCADデータの差分を自動抽出。設計妥当性を短時間で定量評価することで、図面修正サイクルを短縮する。

【製造・保全フェーズ】

- ・成形駆・芯金・金型の摩耗量を定期的に3Dスキャンし、トレンド管理することで予防保全を実現。突発停止の防止と治具寿命の最適化に寄与する。

【他分野への汎用展開】

ばね以外にも非接触測定ニーズは高く、次の応用が見込まれる。

・鋳鋼品・鋳型・中子などの寸法検査

・金属3Dプリンタ造形品の外観・寸法評価

・炉体およびインゴットケースの溶損量測定による耐火物寿命管理

これらの展開により、品質向上・設備稼働率の最適化・開発リードタイム短縮といった全社的な効果が期待できる。

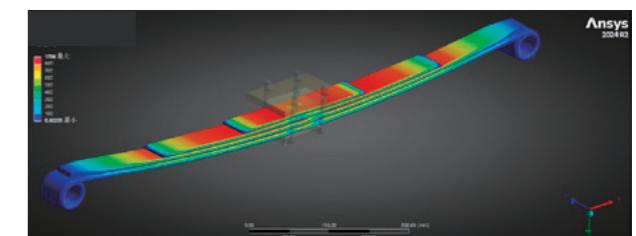


図5 リバース解析

8. 結言

ハンディ型3Dスキャナの導入により、非接触・高精度の形状測定とデジタルデータ蓄積が実現した。これにより製造フィードバックの迅速化、試作コスト削減、開発リードタイム短縮など多面的な効果が確認できた。今後は他工程への水平展開とデータ解析の高度化を進め、品質向上とDX推進に寄与していく予定である。

(技術開発センター研究第一グループ 吉野友梨)

ノーコードツール導入による業務改善(Smart Innovator)

1. Smart Innovator導入の背景と目的

Smart Innovatorとは、設定項目に必要な情報を入力することで業務アプリケーションを開発できるノーコードツールの一つである。このアプリケーションを用いることで複数の条件や評価結果などを体系的にデータとして蓄積し、膨大なデータを一元化することができる。このアプリケーションを導入することで、蓄積した膨大なデータの中から必要な情報を迅速に検索することにより、データの探索作業の効率化及び時間短縮を目指した。

2. ノーコードツールのメリット/デメリット

1) メリット

Smart Innovatorに代表されるノーコードツールのメリットはプログラミングのスキルが不要な点である。これにより、本来は必要となるプログラミング設計やコーディング、テスト期間の工数が大幅に減らせ、短期間での業務に合致したアプリケーションを開発することができる。また、工数を減らせたことにより、導入に必要なコストも大幅に低減される。また、運用中であっても業務の変更やユーザーニーズの変化に迅速に対応するための機能改善が可能である。

2) デメリット

ノーコードツールのデメリットとしては、プログラミングスキルを有する場合、プログラミングによって制御できる幅が小さく、定型的なことしかできず自由度が少ない場合がある。これにより、大規模なシステムで要求されることが多い複雑な機能・細かい要件には対応できないことがある。また、第三者が提供するプラットフォームを使用するため、データ管理やセキュリティに関する懸念が生じてしまう。

以上のようにノーコードツールにはメリット/デメリット双方が存在し、実際の環境に合ったツールを総合的に判断して選択することが重要である。弊社においてはDXに強い人材が限られているため、プログラミングスキルが不要なノーコードツールのSmart Innovatorを選択した。

3. 弊社でのSmart Innovatorの利用

弊社ではガストマイズ部門において、溶解・アトマイズの前工程と篩別・分級・ブレンドの後工程における操業データの一元化管理にSmart Innovatorを利用してしている。基本操作としては、メニュー画面(図1)から、製品スペックのデータベース化(製品マスタ、図2)と製造工程実績のデータベース化(製造工程実績、図3)の二つを選択できるようになっている。



図1 基本操作とメニュー画面

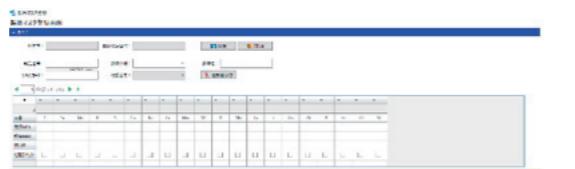


図2 製品マスタ登録画面



図3 製造工程実績登録画面

1) 製品スペックのデータベース化

製品スペックのデータベース化では「製品マスター」にて新鋼種/新製造条件の登録を行う。これにより各鋼種の製造条件の参照が可能となる。

2) 製造工程実績のデータベース化

製品歩留まりやアトマイズ時のガス圧力などの実績値など製造工程に関する実績を登録し、集積する。これにより、上記の製品スペックと合わせての管理が可能となっている。また、実績値の増減など可視化(グラフ化)により視覚的に表現することも可能である。



図4 製造工程実績一覧

現在、試験研究の研究速度を促進させるべく運用しており、特にアトマイズ条件模索時にはグラフを利用して条件の最適化を図っている。また、試験結果集約が完了しているため、今後も是正を繰り返しながら完成を目指す。

4. 導入効果と課題

1) ノーコードツール導入効果

Smart Innovatorの導入により、これまで各担当者によって散逸的に管理されていた操業データの保存場所や形式が統一され、検索に要する時間が大幅に短縮された。従来は、データが複数の形式(例:Excelファイル、PDF、写真データ)で保存されており、必要な情報を探し出すのに多くの時間と手間を要していた。しかし、Smart Innovatorではこれらのデータをそのままの形で挿入し、一元管理できるようになった。これにより、操業データの統合的な活用が可能となり、業務効率が大きく向上している。

また、統一されたデータ環境により、業務関係者がツール上で製造条件や成果をグラフ化することで、視覚的に比

較・分析できるようになった。特に、製造条件の最適化を求める場合では、試験結果や実績値を直感的に理解できるため、意思決定のスピードが向上している。さらに、これまで別々のファイルやフォルダに保存されていた製品情報や特性評価(例:PDFや写真データ)についても、検索時間を大幅に短縮することができた。これにより、作業者のスキルや経験に依存することなく、効率的かつ効果的なデータ活用が可能となっている。管理者側も実績データの見える化が容易になったことで、開発進捗がいつでも確認でき、開発の方向性を判断するためのツールとしても活用している。

導入効果は単なる業務効率化にとどまらない。データの一元化と可視化により、マテリアルインフォマティクスの活用が検討段階にある点も大きな成果である。製造条件と製品特性を結び付けることで、条件最適化を進めるための基盤が整った。これにより、研究開発や製造現場における知見の蓄積が加速し、今後のさらなる効率化や高度化が期待される。

2) ノーコードツールの課題

一方で、Smart Innovatorの導入にはいくつかの課題も残されている。現在、ガストマイズ部門での運用に限定されており、他部門への展開が遅れている状況である。その背景には、ノーコードツールの開発や運用を担う人材の不足がある。導入部門では一定の成果を上げているものの、他部門で同様のツールを展開するためのリソースが不足しており、全社的な普及には至っていない。

さらに、不具合が発生した場合の対応体制にも課題がある。現在のところ、管理者ツールを編集するスキルを持つ人材が限られており、トラブルシューティングが難しい状況である。特に、ツールの継続的な運用においては、管理者がシステムを適切に維持し、必要に応じて改修できる体制が不可欠であるが、そのスキルを有する人材が不足していることが問題となっている。

これらの課題を解決するためには、社内での研修プログラムの実施といった、デジタル人材の育成が重要である。以上のように、Smart Innovatorの導入は多くの効果をもたらしている一方で、課題も明確化している。これらの課題を解消することで、ノーコードツールの可能性をさらに広げ、全社的なDX(デジタルトランスフォーメーション)の推進に貢献することが期待される。

5.まとめと今後の展望

従来は担当者ごとに管理されていた実験データを一元管理するため、Smart Innovatorを導入した。本ツールはノーコードで作成可能なため、プログラミング知識が無くとも使用できる。現在、ガスアトマイズ部門にのみ導入しており、装置に関する各種データ（鋼種情報、アトマイズ条件、成分分析結果など）をSmart Innovator上で一元管理する体制を整備した。これにより、従来は担当者ごとに分散していたデータの可視化が可能となり、トレーサビリティの向上とともに、品質管理や製造工程改善における意思決定の迅速化が実現した。

今後は、この仕組みを他部門の製造設備にも展開する計画である。具体的には、ガスアトマイズ装置と同様AMセンター室に併設されている技術開発センター内（3ton VIM装置、他）への導入も進め、その後、他事業部への普及を検討していく。

（技術開発センター研究第三グループ
倉持 有希、岩田 啓佑、鈴木 牧生）

また、蓄積された膨大なデータをマテリアルインフォマティクスの手法に基づいて解析し、材料開発の効率化と新素材の探索を加速させる方針である。特に、AIや機械学習を活用した予測モデルの構築により、試作回数の削減や開発期間の短縮が期待される。

さらに、Smart Innovatorを現場レベルで活用できるよう、現場担当者が自らデータ入力やアプリケーションの改善を行える環境づくりを進めている。その一環として、デジタル人材の育成にも注力しており、ITパスポート、G検定やDS検定の受験料補助やテキストの配布、ITスキルやデータリテラシーの向上を図る研修プログラムの整備を進めている。これにより、現場主導の継続的な改善活動が促進され、組織全体としてDX推進に取り組んでいく。

改善事例紹介

Power Platformを用いたローコード薬品管理システム開発

ローコード導入の利点、コスト、およびガバナンスに関する考察

I. はじめに

近年、顧客のニーズ多様化や発展的な製品の需要が高まっており、より複雑な材料やプロセスを検討する必要が出てきている。材料とプロセスは相互に関係するため、検討すべき内容は多岐にわたる。技術開発センターではこのような材料とプロセスに関する研究を中心とする業務として取り扱っている。

一方で、研究に関する薬品・部品の在庫管理や装置メンテナンスなどの雑務も多く、前記の通り本来の研究業務の負荷が徐々に増している中で、業務に集中する時間を圧迫しがちな要因となっている。そのため、今回はこの雑務の一つである「薬品の管理業務」に焦点を当て、当社が2023年に導入済みの既存システムであるMicrosoft 365を活用して、薬品オンライン管理システムを作成し、業務負荷の軽減を図った。

薬品管理システムには市販品も存在するが、導入前には現在の業務へのマッチ度や業務フロー変更に対応するカスタマイズ性を調査し、かつ現場で試用して業務担当者の実際の負荷や運用上の課題を洗い出す必要がある。近年、「DX疲れ」という言葉も登場しており、無闇にツールを導入することは調査や業務関係者の疲弊を招く可能性がある。この点から、新たに大規模なシステム導入を必要とせず、柔軟な対応も可能なMicrosoft 365のPower Platformを用いた。

本稿では、Power Platformに含まれる機能のうち、ローコード開発ツールであるPower AutomateとPower Apps、Microsoft 365の情報共有プラットフォームであるSharePointを使用した、薬品オンライン管理システムの構築の概要を紹介し、利点と課題について論じる。

II. 開発目標の設定

開発にあたり、以下の2点を暫定的な目標として定めた。

- ① 現在の業務フローを踏襲した自動化システム
- ② 市販システムの最低限の機能を模倣する

まず、「①現在の業務フローを踏襲した自動化システム」について、薬品納品から廃棄までの業務フローを整理した（図2-1）。

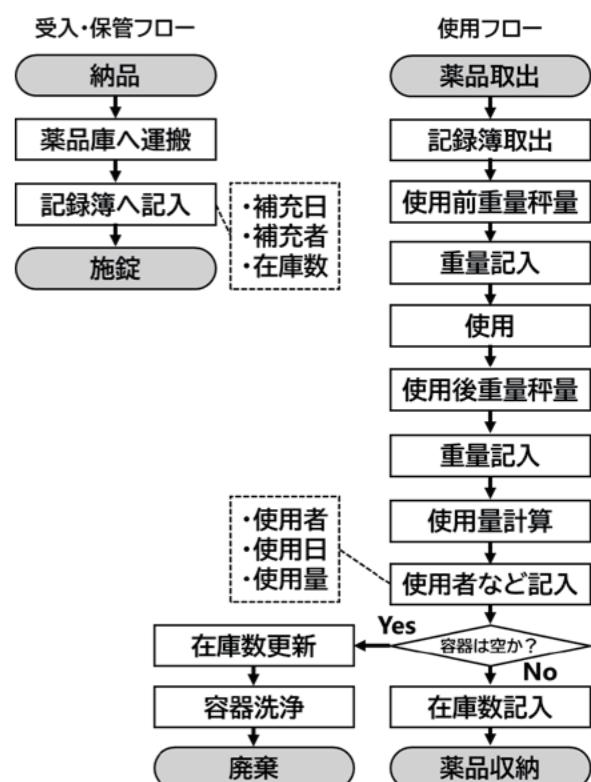


図2-1 従来業務フロー図

従来の業務フローには、手記入によりヌケモレや計算間違いなどのミスが発生しやすい部分があった。使用日や使用量、在庫数などの記入がミス頻発部であり、これらを自動化することで従来フローの変更を抑えつつ、ミスの低減を図った。

次に、「②市販システムの最低限の機能を模倣する」について、市販システムにどのような機能が備わっているか調査した。大部分の市販システムに共通する機能は以下の4つである。

・薬品情報の登録、検索機能

・薬品へのID付与、読み取り機能

・保有薬品のデータベース機能

・薬品注文と配送状況管理機能

以上のうち、「薬品注文と配送状況管理機能」については、当社で開発中の購買システムとの連携が必要で開発工数が増加するため、今回の開発から除外した。

また、「薬品へのID付与」は現在の業務フローと異なる作業が発生する。ここで、IDを付与せずにシステムを構築する利点と欠点とを以下に整理する。

(利点)

・ID発行の手間が無く、検収時の手続きがスムーズ

(欠点)

・個々の薬品の管理状況を追跡不可

・複数容器で納品される薬品の使用量が把握困難

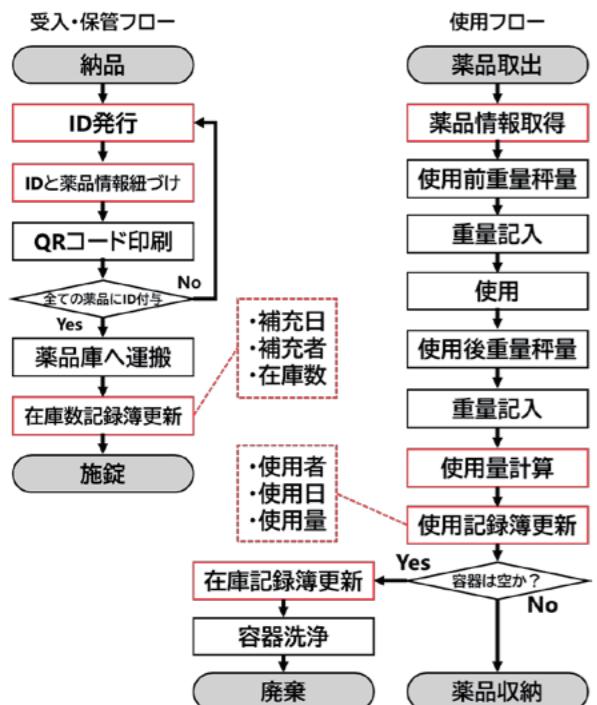


図2-2 目指す業務フロー図

技術開発センターには多数の薬品が複数の容器で納品されることから、欠点がもたらす悪影響が利点を上回ると考え、ID付与を業務フローに組み込むことにした。

開発したシステムを組み込んだ業務フローを図2-2に示す。自動化した作業は赤枠で示す。

本システムの開発費用と維持費用は以下に基づいて求めた。

$$(開発費用) = (\text{労務費}) * (\text{開発時間})$$

$$(維持費用) = (\text{Power Apps月額費用}) - (\text{一般ライセンス費用})$$

III. 環境構成

開発環境は以下のツールを用いて構成した。

【データベース: SharePoint】

テスト運用のため、筆者個人のテスト用サイトを立ち上げた。リスト機能を用い、薬品データベースを構築した。薬品リストと在庫リストの2つのリストを用意した。各リストの整理カテゴリは以下の通りである。

薬品リスト: 薬品名、薬品庫、薬品番号

在庫リスト: ID、薬品名、保管庫、登録者、登録日、廃棄

(ON/OFFチェック)、廃棄日、使用記録(.csv添付)

【データ入力: Power Apps】

Power Appsを使用して以下の画面を準備した。

図3-1に示すトップ画面は各機能へのハブ機能を持つ。なお、画面下部にある「廃液登録」「廃液排出」については、薬品の登録・使用と同様挙動のため、解説を省略する。

【データ入力: Power Apps】

Power Appsを使用して以下の画面を準備した。



図3-1 トップ画面

図3-2に薬品登録画面を示す。この画面上で入荷年月日を選択すると、IDが(日付+連番)で自動出力される。薬品庫と薬品名は選択式で、「薬品リスト」を参照している。「登録」ボタンを選択すると、納品された薬品の情報が「在庫リスト」へ登録される。

図中では、7月31日に入荷された薬品のうち、3本目にあたるエタノールの登録場面を示している。

図3-2 薬品登録画面

入荷年月日	2025年7月31日
生成ID	2025-07-31-C-003
入庫先薬品庫	A.調査室
薬品名	エタノール(特級)-500cc
薬品番号	7
登録 削除 在庫リスト 印刷	

図3-2 薬品登録画面

図3-1の「薬品使用・廃棄」を選択すると図3-4に示すコード読み取り画面に移動する。「バーコードリーダー」ボタンの選択でカメラが起動し、コードを読み取る。読み取ったIDから「在庫リスト」が参照され、薬品情報が表示される。

図3-4 コード読み取り画面

バーコードリーダー	
Code-ID	2025-07-31-C-001
薬品名	ドータイト D-550-20g
保管庫	B.破壊調査室
薬品番号	3
使用 廃棄 在庫リスト	

図3-2の「印刷ボタン」の選択で図3-3の「印刷画面」に移動する。在庫リストへの登録日を選択すると、その日に「在庫リスト」に登録された薬品の一覧が表示される。「Export」ボタンを選択すると、薬品の情報がcsvファイルとして出力される。

図中では7月31日に登録された3本の薬品の一覧を表示している。

図3-3 印刷画面

登録日	2025年7月31日
2025-07-31-C-001	ドータイト D-550-20g
2025-07-31-C-002	ショコマ250BC-20g
2025-07-31-C-003	水酸化ナトリウム(一般)-500g
Excel出力 Excelファイル表示 リストを開く	

図3-3 印刷画面

「使用」ボタンの選択により、図3-5に示す使用画面に移動する。使用画面では、「使用前重量」と「使用後重量」、「使用用途」を入力する。使用量は自動計算される。「使用記録入力」ボタン選択により、「在庫リスト」内の当該薬品に対応して、使用記録がcsvファイルとして添付される。

図中では図3-4で読み取ったドータイトの使用記録が入力されている。

図3-5 使用画面

Code-ID	2025-07-31-C-001
使用前重量(g)	20
使用後重量(g)	15
使用量(g)	5
使用用途	SEM観察
使用記録入力 在庫リスト	

【データ参照・操作:Power Automate】

Power Appsの画面に入力した情報をcsv変換し、リストへの添付を行う。Power Apps内にあるPower Automateとのコネクタを使用した(図 3-6)。

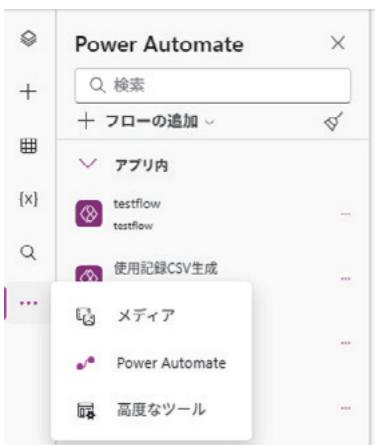


図 3-6 Power Apps内のAutomate表示

Power AppsからPower Automateを起動すると、Power Appsで入力したデータのデータ型と変数名の設定が行える(図 3-7)。



図 3-7 Power Automateデータ設定画面

Power Appsで入力したデータのデータ型と一致するように選択を行い、コネクタ「添付ファイルの作成」からリストに添付する。

【コード提案:exaBaseAI】

当社で利用している生成AIプラットフォームである。Power AppsとPower Automateのそれぞれでコードを考える必要があったため、会話ベースでコード生成を依頼するのに用いた。いくつかの生成AIを利用できるが、筆者はGeminiを利用した。

【コード印刷:テプラクリエイター®】

KING JIMのフリーソフトである。コード化した薬品情報をテプラとして印刷するために使用した。印刷レイアウトは保存可能である。前記の印刷画面にてcsv出力した薬品情報を、図 3-8の下部に表示されているExcelライクな表に貼り付けることで、QRコードやIDなどの情報が表示される。



図 3-8 テプラクリエイター

【コード読み取り:Windowsカメラアプリ】

Windows端末標準搭載のカメラアプリである。図 3-4の「コード読み取り画面」のボタン操作で起動される。

IV. 開発システム概略

システムの動作概略図を以下に示す。

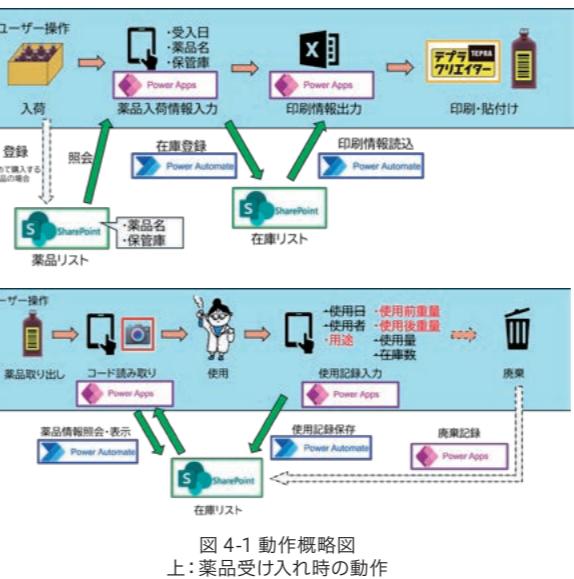


図 4-1 動作概略図
上: 薬品受け入れ時の動作
下: 薬品使用時の動作

ユーザーの操作は水色の枠で囲われた操作となる。ユーザー操作を下記にまとめる。

- ・入荷情報入力(入荷日、薬品名、保管庫)
- ・印刷情報出力
- ・印刷、貼付け
- ・コード読み取り
- ・使用記録入力(使用前後重量、用途)
- ・廃棄情報登録

以上から、市販システムの最低限の機能を模倣しつつ、現状の薬品管理フローを踏襲したオンライン管理システムの作成が可能であることが示された。

また、当システムの開発費用は、IIで定めた計算式から、以下の通り求めた。

(開発費用) = ~¥300–400K

(維持費用) = ~¥1K–2K/Month

開発時間の内訳は以下のとおりである。

- 10hr: QRタグ使用可能か検証
(ID⇒コード化可否・印刷可否など)
- 10hr: 現状の薬品管理フローの洗い出し
- 5hr: リストの置き場所・リスト形式検討
(薬品リスト・在庫リスト)
- 30hr: フロー基礎完成
(ID生成⇒印刷⇒読み取り⇒使用記録・廃棄)
- 45hr: 追加機能開発・デバッグ
(ユーザー取得、CSV化など)

V. 開発の利点と課題

今回のシステム開発における最大のメリットは、導入コストが圧倒的に低い点である。

既存の薬品管理システムにはサブスクリプション型と買い切り型が存在し、サブスクリプション型であれば¥30Kから¥90K程度、買い切り型であれば¥1M超程度の費用が発生する。買い切り型と比較した場合、1ヶ月程度の開発期間でシステムを導入できれば、市販の買い切り型システムよりも費用を抑えられる。また、維持費用も月額数千円程度と安価であり、1人の開発者が複数のシステムを開発することで1システムあたりの維持費用をさらに抑制できるという利点も挙げられる。

さらに、ローコードツールの特徴である、ドラッグ＆ドロップ式のインターフェースやビジュアルプログラミングによって、開発におけるデザイン工数を大幅に削減できる。また、コードの仕組みが専門家でなくとも直感的に理解しやすく、ヒューマンエラーの発生を抑制できる点も特筆すべきである。

例えば、入荷日の選択で使用するカレンダー操作を例に挙げる。従来のプログラミングでは、以下の6つの手順を踏む必要がある。

- ①HTMLやCSSを使用してカレンダーを作成
- ②日付選択機能の実装、
- ③日付情報の取得、
- ④データ型設定、
- ⑤選択時のイベント管理、
- ⑥データ連携

一方でPower Appsでは日付選択可能なカレンダーをドラッグ＆ドロップで配置できるため、上記①～③の手順が省略され、④～⑥の主要な作業に集中できる。これらの作業においても、「選択した場合」「決定した場合」といった動作条件があらかじめ設定されており、また特定のデータ型のみしか入力できないように設定されているため、ミスが発生しにくい構造となっている。

一方で、課題として以下の2点を挙げる。

1つ目は、あらかじめ用意されたコードやデータ型に起因する、意図した挙動を実現するための、「迂回策(ワークアラウンド)」が必要となる場合がある点である。これにはある程度のコーディング知識が求められる。具体例として、薬品使用記録を入力する際、SharePointに添付されているファイルを取得し、その内容にPower Appsで入力した内容を書き込むケースを考える。直接Power Appsのコード欄からSharePointリストを参照して添付ファイルを取得し書き込むことはできないため、以下の3段階のルートをたどる必要があった。

1. Power Automateでリスト項目参照操作や添付ファイルのメタデータの取得

2. Power Appsに戻って入力項目のデータ型の再設定

3. テーブルとして挿入する

しかし、この挙動は不安定であることが判明し、さらなる代替策の検討を要した。このような「迂回策」を講じるには、一定のコーディングに対する理解が必要である。関連する情報（記事や動画など）はインターネットで容易に参照できるため、柔軟な運用を目指すには常に学習しながら開発を行う姿勢が求められる。

この点において、生成AIの活用が極めて有効であった。会話ベースで意図する挙動を相談し、迂回策の提案を受けることが出来た。生成AIを自身の理解を補完するツールとして活用することで、開発効率をさらに向上できる可能性を実感した。

2つ目の課題は、リスク管理およびガバナンス体制の早急な整備が必要である点である。今回のシステム開発では使用するアプリや連携先について、社内システム部に確認しながら慎重に進めた。しかし、今後開発が推進されるにつれて、IT管理者が全体像を把握・管理できないシステムや、作成者の不在により保守が困難となる「野良アプリ」と称されるものが大量に発生する可能性がある。この「野良アプリ」が引き起こす弊害として、一般的に、アクセス連鎖によるセキュリティリスク（例：データ漏洩）や、組織内データが部門・チームごとに孤立して管理される「データのサイロ化」などが挙げられる。

「野良アプリ」の発生を防ぐためには、開発ルールの策定、開発ドキュメントの作成、共同開発・共同所有体制の推進などが不可欠である。

VI. 結言

本稿では、研究所の業務負担軽減を目的とし、Microsoft 365のPower Apps、Power Automate、SharePointを活用した薬品オンライン管理システム開発について述べた。市販品の導入コストおよび導入時間を考慮し、既存の業務フローを踏襲しつつ、ID管理やオンラインでの在庫監視といった最低限の機能を備えたシステムの開発を目標とした。

本システムの開発費用は、筆者の労務費を基準に算出し、市販システムの維持費や導入費と比較して大幅なコスト削減が見込まれることを示した。

ローコード開発ツールの活用により、専門知識がなくとも直感的に開発を進められる利点がある一方で、複雑な動作の実現には一定のコーディング知識が求められる場合がある。この問題に対しては、生成AIの活用が有効な解決策となった。

今後は、開発ルールの策定や共同開発体制の整備を進め、「野良アプリ」の発生を抑制するガバナンス体制を構築することが喫緊の課題である。これらの取り組みを通して、現場目線でのシステム開発を推進し、「DX疲れ」に陥ることなく、持続可能な業務変革を実現することを目指したい。

（技術開発センター 研究第一グループ 山口 聰一郎）

産業財産権登録情報

2024年度登録分

(1)特許

No.	登録番号	代表図	発明の名称	発明者	概要
1	B7469532		FRP板ばね及びその製造方法	吉野 友梨 佐野 正典 佐山 博信 川尻 剛大 ほか (日本大学と共同開発)	強化繊維（ガラス繊維、炭素繊維など）を引きぬいて供給し、2種類以上のマトリックス樹脂用液体（リサイクル性に優れた熱可塑性樹脂など）と混合・含浸させ、マンドレルに巻き付けて積み重ね、加熱による一次硬化後・切断・プレス成形などの工程を組合せることによって高い生産性と耐クリープ特性を両立したFRP板ばねと、その製造方法。
2	B7472332		軽金属製の車両用熱間回転鍛造ホイールリム製造方法	嶋田 唯幸 東 龍一郎 森 康永	マンドレルを使って成形することで、円周上に織目線が形成され、形状の自由度が高く、寿命も優れた車両用熱間回転鍛造ホイールリムを製造する方法。

(2)登録商標

No.	登録番号	登録商標	呼称	商品及び役務の区分並びに指定商品又は指定役務
1	6863001	一刀涼暖	イットーリョーダン	第11類 乗物用エアコンディショナー、乗物用換気装置及び空調設備、工業用暖冷房装置、業務用暖冷房装置、家庭用暖冷房装置、家庭用電熱用品類、暖冷房装置及びその部品・附属品、換気（空気調和）用の設備及び装置、ストーブ類（電気式のものを除く。）、暖房ボイラー用給水装置、太陽熱利用温水器

※車載用エアコンの商品名として使用予定

（技術開発センター 管理・知財グループ 鈴木 謙太郎）

編集後記

「三菱製鋼技報」をご高覧いただき、誠にありがとうございます。

本号が皆様の日々の研究・実務に少しでも寄与できれば幸いです。近年、技術革新とビジネス環境の変化は一層速まり、材料・製造・品質管理の高度化が企業競争力の要となっています。とりわけ生成AIの実用化が進むことで、研究開発の手法やデータ利活用のあり方が大きく変わりつつあり、実践的な知見の共有が一層重要になっています。本誌はそうした変化を踏まえ、皆様のご意見を大切にしながら、最新動向にも目を向けつつ、更に良質な成果を的確に発信できるよう努めてまいります。

最後になりますが、論文をご寄稿いただいた執筆者の皆様、査読・編集にご尽力くださった社内外の関係者、制作に携わったスタッフに深く感謝申し上げます。読者の皆様からのご意見やご提案は、今後の誌面づくりの貴重な糧となります。引き続きご支援ご鞭撻のほど、よろしくお願い申し上げます。

(技術開発センター シニアマネージャー 兼 管理・知財グループ長 佐野 正典)

三 菱 製 鋼 技 報

第39巻(通巻第47号)

2025年11月28日発行

(非売品)

本書掲載の記事、写真等の無断転載を禁じます。

©MITSUBISHI STEEL MFG. CO., LTD. 2025

発行人 技術開発センター長
小倉 潤司

編集責任者 佐野 正典

編集委員 青山 俊文 木下 侑尋
山岡 拓也 横田 雅博
宮田 将晴 寺本 友理香
鈴木 謙太郎

発行所 東京都中央区月島4-16-13 Daiwa月島ビル
三菱製鋼株式会社
電話 03(3536)3118(広報・IR部)

印刷所 京都府京都市伏見区下鳥羽東芹川町33
株式会社グラフィック
電話 050(2018)0700

三菱製鋼株式会社

〒104-8550 東京都中央区月島4-16-13 Daiwa月島ビル
TEL(03)3536-3111 FAX(03)3533-3123
<https://www.mitsubishisteel.co.jp>

●事業部門

鋼材事業部

〒104-8550 東京都中央区月島4-16-13 Daiwa月島ビル
TEL (03)3536-3151 FAX (03)3536-3155

ばね事業部

千葉製作所 〒290-0067 千葉県市原市八幡海岸通1-6
TEL (0436)40-1111 FAX (0436)40-1120

素形材事業部

広田製作所 〒969-3471 福島県会津若松市河東町広田字六丁405
TEL (0242)75-3111 FAX (0242)75-2619

部品事業部

東日本販売部

札幌サービスセンター
〒004-0002 北海道札幌市厚別区厚別東二条2-3-25
TEL (011)809-6700 FAX (011)898-1780

苫小牧サービスセンター
〒053-0056 北海道苫小牧市あけぼの町4-9-62
TEL (011)809-6700 FAX (011)898-1780

盛岡サービスセンター
〒020-0832 岩手県盛岡市東見前9-135-1
TEL (019)637-3780 FAX (019)637-3650

仙台サービスセンター
〒983-0013 宮城県仙台市宮城野区中野2-4-9
TEL (022)259-1621 FAX (022)259-1630

新潟サービスセンター
〒950-1132 新潟県新潟市江南区丸潟新田728-1
アライドコーポレーション内1F
TEL (025)280-7981 FAX (025)280-7985

東京サービスセンター
〒272-0127 千葉県市川市塩浜3-15
TEL (047)306-0337 FAX (047)306-0338

西日本販売部

名古屋サービスセンター
〒459-8001 愛知県名古屋市緑区大高町字寅新田108
TEL (052)625-2095 FAX (052)625-2090

北陸サービスセンター
〒920-0348 石川県金沢市松村6-112 大西運輸西営業所内
TEL (076)200-6485 FAX (076)200-6635

大阪サービスセンター
〒532-0035 大阪府大阪市淀川区三津屋南3-20-42
つばめ急便大阪ロジスティクスセンター内
TEL (06)6302-5101 FAX (06)6302-5104

岡山サービスセンター
〒710-0803 岡山県倉敷市中島1376
TEL (086)460-1755 FAX (086)460-1756

広島サービスセンター
〒732-0066 広島県広島市東区牛田本町6-1-27
うしたみらいビル6階G号室
TEL (082)502-7680 FAX (082)222-6223

福岡サービスセンター
〒812-2112 福岡県糟屋郡須恵町植木128
TEL (092)687-5432 FAX (092)687-5434

福岡営業所 〒812-2112 福岡県糟屋郡須恵町植木128
TEL (092)687-5431 FAX (092)687-5433

部品販売部
〒272-0127 千葉県市川市塩浜3-15
TEL (047)306-0387 FAX (047)306-0388

●関連会社

三菱製鋼室蘭特殊鋼株式会社

〒050-0087 北海道室蘭市仲町12
TEL (0143)41-2800 FAX (0143)41-2869

三菱長崎機工株式会社

〒851-0301 長崎県長崎市深堀町1-2-1
TEL (095)871-2211 FAX (095)871-2104

菱鋼運輸株式会社

〒272-0127 千葉県市川市塩浜1-9-3
TEL (047)307-1116 FAX (047)307-2020