

## 解説

受賞技術 - 39

# 過酷な環境に適応した計測・制御による 高強度鋼板の熱間圧延技術

Hot Rolling Technology for High Tensile Strength Steel Sheets Using  
Instrumentation and Controls Adapted to Harsh Environments

日本製鉄(株)  
プロセス研究所 計測・制御研究部  
上席主幹研究員

伊勢居良仁  
Yoshito Isei

日本製鉄(株)  
東日本製鉄所 薄板部  
部長

焼田幸彦  
Yukihiko Yakita

日本製鉄(株)  
プロセス研究所 計測・制御研究部  
主席研究員

鷺北芳郎  
Yoshiro Washikita

日本製鉄(株)  
薄板事業部 薄板技術部  
部長代理

近藤道範  
Michinori Kondo

## 1 はじめに

近年、地球環境問題への注目から、自動車に対する燃費向上の要求が高まり、素材となる鋼板の薄手化、高強度化が進んでいる。これらの鋼板は熱間圧延工程を経て製造されるが、高強度鋼板は、変形抵抗が高く板厚が薄いため、蛇行なく平坦な形状で圧延することが難しい、圧延後に冷却する際には、強度や加工性などの機械特性が温度履歴に敏感に左右されやすいうえに、温度制御が難しいという特徴がある。このため、品質の確保が難しく、生産性や製造歩留まりが低いという問題があった。日本製鉄は、これらの問題を解決するため、高温、振動、大量の冷却水と粉塵が存在する過酷な熱間圧延環境に適応し、最高速度 27 m/s、最高温度 1000 °C の鋼板を対象とした冷却帯内温度計、平坦度計、蛇行計の計測器群と、高度制御方法を開発した。開発技術は、高強度鋼板の品質、製造歩留まり、生産性を飛躍的に向上させ、自動車の燃費向上と鉄鋼製造プロセスの CO<sub>2</sub> 排出削減により、地球環境問題に貢献している。また、自動制御の適用は熟練作業者の減少に対応し、日本の国際競争力向上にも寄与している。これらの成果により、本技術は第 68 回(令和 3 年度)大河内記念生産賞を受賞している。本稿では、開発技術の概要について報告する。

## 2 開発の背景と目標

### 2.1 研究開発の背景

#### 2.1.1 自動車の燃費向上のための高強度鋼板の適用拡大

近年、CO<sub>2</sub> 排出抑制への対応として、自動車の燃費向上が求められている。燃費向上には車体の軽量化が有効であり、搭乗者の安全性に関わる車体の強度を確保しつつ軽量化するために、使用する鋼板の薄手化、高強度化が進んでいる<sup>1)</sup>。このため、鉄鋼メーカーには、高強度鋼板の製造量の拡大と、より薄くて強度が高い高強度鋼板の開発が求められている。

#### 2.1.2 新興国に対する国際競争力強化の要求

21 世紀に入り、新興国において著しい経済発展が起これ、鋼材の需要増加に対応して世界の粗鋼生産量は大きく増加し、競争が激化している。このため、日本の鉄鋼業には、付加価値の高い高機能鋼材の提供による差別化と、生産コストの大幅な削減による国際競争力の強化が求められている。さらに、日本の製造業では、熟練作業者の大量の定年退職により、日本のものづくりの強みであった熟練作業者の技能に依存した操業は維持できなくなりつつある。特に、薄手、高強度鋼板を熱間圧延する際には、鋼板の平坦度の悪化や蛇行が起これやすく、圧延機操作の自動化が強く求められている。

### 2.1.3 鉄鋼製造プロセスにおける温室効果ガス排出削減の要求

鉄鋼業からのCO<sub>2</sub>排出量は産業全体の40 %、日本国内の全排出量の14 % を占め<sup>2)</sup>、CO<sub>2</sub>の排出削減は大きな課題である。熱間圧延プロセスを含む下工程の排出量は、上工程に比べ少ないとはいえ、他業種の排出量に匹敵する。地球環境を守るという社会的責務を果たすために、下工程の中核である熱間圧延プロセスにおいてもCO<sub>2</sub>の排出削減が必要である。

## 2.2 研究開発の目標

薄鋼板を製造する熱間圧延工程では、加熱した鋼片を粗圧延機と仕上圧延機で所定の板厚に圧延した後に、ランアウトテーブル上で冷却してコイル状に巻き取る。強度や加工性などの機械特性が優れた鋼板を製造するには、冷却時の温度履歴を緻密に制御して金属組織を造り込む必要がある。しかし、薄手、高強度鋼板は、機械特性が温度履歴の影響を受けやすく、また巻取温度が低いため、温度制御が難しい。さらに圧延時には、高圧下率、高荷重であるために伸び率が板幅内で不均一となりやすく、鋼板の先尾端において鋼板の蛇行や平坦度の不良が生じる。これらは生産性や製造歩留まりの悪化につながるだけでなく、鋼板の機械特性を悪化させ、プレス加工時の成形不良などの品質低下を生じさせる。

仕上圧延機の入側で、粗圧延された鋼片を接合、連結して圧延するエンドレス圧延方法は課題解決の一助となりえるが、大規模な設備投資が必要であり、多品種小ロット生産には向かず、また、冷却温度不良の根本対策にはならない。そこで、本研究開発では、高強度鋼板の熱間圧延時の問題を、独自の計測器を用いた自動制御の導入により解決することを目指した。このような、最も製造が難しい、薄手、高強度鋼板を対象に開発した技術は、すべての鋼板の製造に適用でき、大きなメリットを享受できる。開発目標は、①高強度鋼板の品質向上（機械特性値の標準偏差を20 % 減少）、②製造歩留まりの向上（歩留まりロス20 % 減少）、③圧延能率の向上（単位時間当たりの圧延量(t/h)を20 % 向上）、④自動化の推進（平坦度制御と蛇行制御を100 % 適用）、⑤稼働率の向上（通板トラブルによる圧延ロール交換回数20 % 減少）の5項目とした。

## 3 開発の経過

本技術は、冷却履歴制御、平坦度制御、蛇行制御の3つの先進計測・制御技術から構成されている。これら完成された3つの技術は、1999年から2010年にかけて、旧住友金属工業の鹿島熱延工場において開発・実用化され、2012年10月の旧

新日本製鐵との会社統合後、旧新日本製鐵の5か所の熱延工場へ展開されて現在に至っている。3つの技術のうち、蛇行制御は、高強度鋼板だけではなく通常材の圧延時にも有効であり、生産性の改善に大きく寄与することから、最初に研究開発に取り組んだ。つぎに、高強度鋼板の機械特性を向上させる冷却履歴制御、最後に歩留まり向上に最も寄与する平坦度制御を研究開発して、本技術を完成させた。

## 4 開発の内容と特長

### 4.1 開発技術の特長

図1に、本技術の3つの柱である冷却履歴制御、平坦度制御、蛇行制御の適用個所と、計測と制御の構成を示す。それぞれの計測技術と制御技術は、独創的なアイデアと工夫により実現した3点の特長をもつ独自開発技術である。一点目の特長は、多品種小ロット生産に適した既存バッチ圧延方式に適用でき、大規模投資が不要なことである。二点目の特長は、鉄鋼プロセス環境に適応したコンパクトかつロバストな独自開発の計測装置を使用することである。三点目の特長は、従来把握できなかったプロセス情報を定量的かつ高応答に測定して新制御に適用することである。

### 4.2 開発技術を構成する要素技術

#### 4.2.1 冷却帯内温度計（ファウンテン・パイロメータ）を用いた冷却履歴制御

従来の放射温度計は、冷却水を排除した限られた非冷却ゾーンにしか設置できず、冷却時の温度履歴を知る手段がないため高精度な温度制御ができなかった。そこで、冷却帯内の大量の冷却水が存在する環境において、最大27 m/sで搬送される高温の鋼板温度を高精度に安定測定できる革新的な温度計測装置（ファウンテン・パイロメータ）を開発した<sup>3)</sup>。従来型の放射温度計では、熱放射光を吸収・散乱させる水を排除して測定光路を確保するが、本温度計では、噴水状の水パージを行って、その水を、熱放射を透過させる安定した導光路として活用する。このため、放射光のうち、水の分光透過率が高い波長を検出するように構成した。鋼板冷却中は、飛散する大量の冷却水滴が熱放射を吸収・散乱させるが、噴水状水パージを、鋼板裏面から離れて光量が確保できる有効視野角度を満たすようにノズルから噴流させることにより、吸収・散乱の影響を抑制し、安定測定を可能にした。これにより、従来は、全長約100 mのランアウトテーブルの途中の1、2か所の非水冷ゾーンに設置した温度計による情報しか利用できなかったが、冷却帯内に設置された複数の温度計の情報が利用できるようになった。

図2は、鋼板の金属組織を積極的に造り込むための重要な

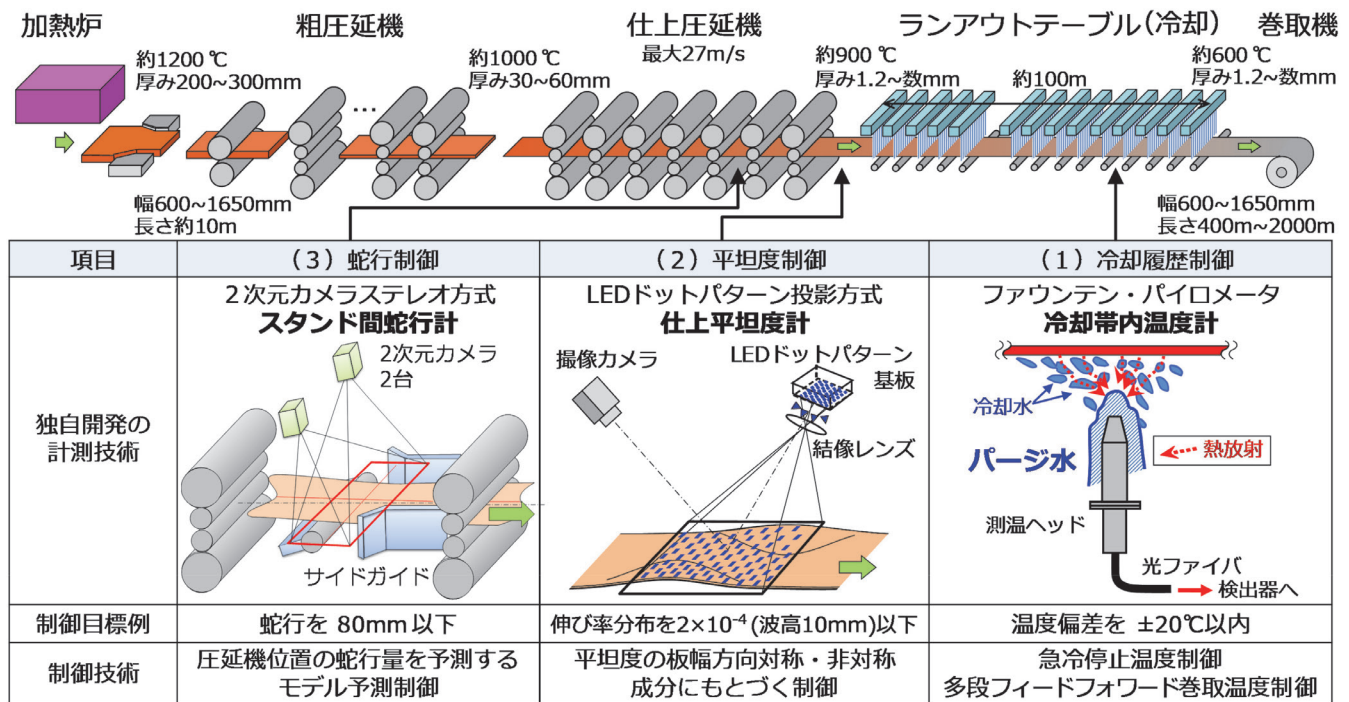


図1 過酷な環境に適応した計測・制御による高強度鋼板の熱間圧延技術 (Online version in color.)

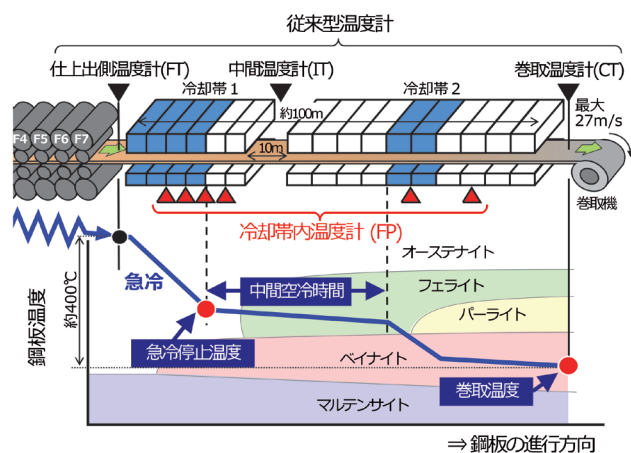


図2 ファウンテン・パイロメータを活用した冷却履歴制御の構成 (Online version in color.)

ポイントである、急冷停止温度、中間空冷時間、巻取温度を高精度に制御する、冷却履歴制御の概要である<sup>4)</sup>。図中冷却帯のハッチングされた部分が冷却している領域を示す。急冷停止温度制御では、圧延速度に応じて移動する急冷停止位置に追従するように、冷却帯内にある複数の温度計のなかから適切な冷却帯内温度計を選択してフィードバック制御する方法を開発した。また、巻取温度制御では、熱流束が不安定になる温度領域まで鋼板を冷却しすぎないように、冷却帯内温度計の測定値を使って温度履歴を多段階に軌道修正するフィードフォワード制御を開発した。冷却帯内温度計を

用いた冷却履歴制御の実用化により、鋼板の温度履歴が初めて正確に制御可能になったとともに、高強度鋼板の巻取温度の $\pm 20^\circ\text{C}$  適中率が約7% 改善し、通常材と同等の精度に向上した。

#### 4.2.2 仕上平坦度計 (LEDドットパターン投影方式) を用いた平坦度制御

従来の平坦度計は、圧延時の平坦度不良の板波が定在すると精度が悪化すること、鋼板鏡面性が高いと測定が不安定になること、の2つの問題があった。そこで、鋼板に周期的な光ドットパターンを広範囲 (板幅方向1.8 m×圧延方向1.0 m) に投影し、鋼板の表面角度分布に応じて変化するパターンピッチ分布を、2次元カメラにて撮像して解析、測定する平坦度計を開発した<sup>5)</sup>。投影パターンとしては、空間分解能を下げずにハレーションを防止できる千鳥状が最適であることを見出し、近年開発された約1 mmの高輝度パワーLED素子1200個を、電子部品実装技術を用いて基板上に精密に2次元配列することにより、最高温度950°Cの熱間鋼板の表面でも明瞭に観察できる光ドットパターンを形成することに成功した。また、撮像タイミングのみLEDを点灯する電圧供給回路を開発することにより、高密度で大量に配列したLEDからの発熱を実用可能レベルに抑制した。新開発のLED平坦度計は、鋼板の上下変動や蛇行、板波の状態によらず、最大27 m/sで圧延される鋼板の伸び率の板幅内分布を高精度に測定でき、従来は人の目と経験で判断していた平坦度を、安定的

に定量的に測定できるようになった。

図3に、平坦度制御の構成を示す。仕上圧延機出側に設置した平坦度計で測定した伸び率の板幅内分布を、対称成分と非対称成分に分離し、圧延機の圧延ロールの湾曲度と上下ロールの平行度を独立操作することにより、鋼板を自動的にフラットに修正する<sup>6)</sup>。 $10^{-4}$  オーダーの微小な伸び率の板幅内分布を制御するため、操作量を単位量変更したときの平坦度変化をオンラインで予測計算する物理モデルを開発し、その予測値を用いて操作量を適正化するように制御系を構成した。これにより制御ゲインが常に適正化されるようになり、すべての鋼板を対象とした自動平坦度制御が24時間トラブルなく適用できるようになった。その結果、圧延後の急峻度が1%以上の板波形状が大きい鋼板の割合が従来に比べ90%以上減少した。

#### 4.2.3 仕上スタンド間蛇行計（2次元カメラステレオ方式）を用いた蛇行制御

熱延仕上スタンド間は、蒸気や粉塵が多いこと、設置空間が狭いことから、従来のラインセンサである板幅・蛇行計は適用できない。そこで、2次元カメラを用いて、過酷な環境下の撮影画像から鋼板エッジ位置を検出することにより、高速で走行する鋼板の蛇行を測定する仕上スタンド間蛇行計を開発した<sup>7)</sup>。2次元画像内の複数の情報を補完し合うことによって、部分的に鋼板エッジ画像が不明瞭になる場合でも、鋼板のエッジを正確に検出する方法を確立した。また、2台のカメラを用いたステレオ立体視により、鋼板のエッジ位置を3次元座標として計測することで、カメラを板幅方向の中央に置く必要がなくなり、設置位置の自由度が高くなった。さらに、粉塵の付着防止機能と高温環境から保護する冷却機能を備えたフードレスの小型カメラBOXを開発し、数か月間ノーメンテナンスで使用可能になった。これらの結果、蒸気や粉塵が多く、設置空間も限られている仕上スタンド間に蛇行計を設置することが可能になり、過酷な環境下における

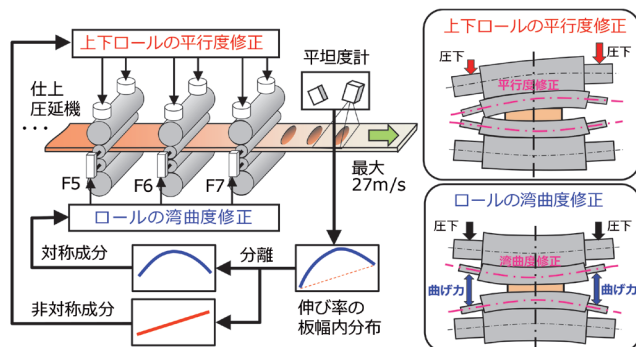


図3 自動平坦度制御の構成 (Online version in color.)

安定した高精度な蛇行測定が実現した。

通常の制御系は、操作量の修正量を決定するために、制御量を測定するのが一般的である。しかし、蛇行制御の場合は、制御量である圧延機位置の蛇行量を測定するよりも、制御効果がより大きくなる最適な蛇行量測定位置があることを見出した。この最適測定位置での蛇行測定は、開発した蛇行計が小型で設置自由度が高いことによって実現できた。ただし、これにより、測定した蛇行量が、制御量である圧延機位置の蛇行量と異なるという新たな問題が生じるようになった。この問題を解決するため、図4に示すように、圧延機上流の最適測定位置で測定した鋼板の蛇行量から、将来、圧延機位置で生じる蛇行量を予測し、予測した将来の圧延機位置の蛇行量が最小になるように、上下圧延ロールの平行度（具体的にはレベリング量）の最適値を求めるというモデル予測制御を応用した方法を開発した。本技術により、鋼板の蛇行測定値を用いた蛇行制御が、24時間トラブルなく適用できるようになった。これにより、蛇行によって鋼板端部が折れ込んだ状態で圧延される「絞り込み」と呼ばれる通板トラブルにつながる、鋼板とサイドガイドの接触の発生率が、従来の差荷重の測定値を用いた蛇行制御に比べて74%減少した。

## 5 開発の成果

### 5.1 鹿島熱延工場における成果

#### ① 高強度鋼板の品質向上

冷却帯内温度計を用いた冷却履歴制御により、圧延速度の加減速によらず温度履歴を正確に制御できるようになり、鋼板の機械特性が全長にわたって均一化した。590 MPa級析出強化型高強度鋼板の引張強さの例では、従来に比べて引張強さの標準偏差は25%減少した。さらに、延性に大きな影響を与える中間空冷時間が適切に確保されたことで加工性も改善

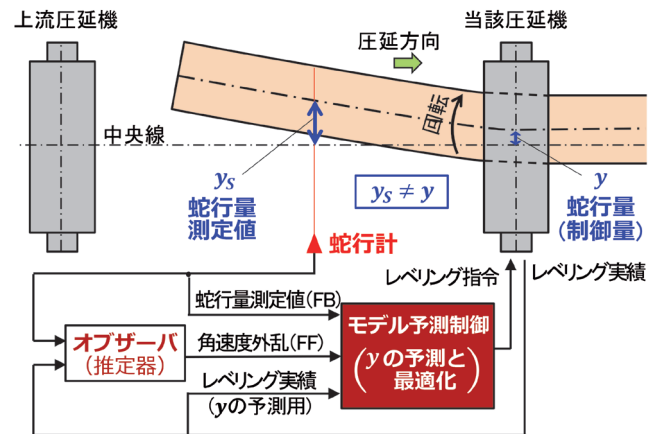


図4 モデル予測制御を適用した蛇行制御の構成 (Online version in color.)

した。

## ② 製造歩留まりの向上

冷却帯内温度計を活用した巻取温度制御により、高強度鋼板の巻取温度の制御精度は、通常材並みに改善した。また、平坦度制御により、鋼板がフラットに圧延されることで、冷却むらが減少した。これにより、巻取温度外れによる歩留まりロスが70% 減少し、鋼板がランアウトテーブルを走行する際の擦り疵などの平坦度不良に起因した歩留まりロスが30% 低減した。蛇行制御により、絞り込みトラブルによって生じたロール損傷部が鋼板に転写されてできる鋼板表面疵による歩留まりロスが85% 低減した。これらを足し合わせると、開発着手前に比べて歩留まりロスは32% 低減した。

## ③ 圧延能率の向上

蛇行制御の導入によって、絞り込みトラブルが減少して鋼板が安定化した。さらに、冷却履歴制御と平坦度制御の導入によって、冷却温度精度が圧延速度に左右されなくなった。これにより、圧延速度が通常材に比べて遅い高強度鋼板の需要が増加していく状況においても、圧延アイドル時間の短縮と最高圧延速度の増速（従来の22 m/sから27 m/sへ増速）が実現した。その結果、鹿島熱延工場の単位時間当たりの圧延量は、670 t/hから800 t/hへと20% 増加し、世界トップクラスの年間550万tの鋼板の熱間圧延が可能となった。

## ④ 自動化の推進

独自開発の計測器により安定した測定が可能になり、従来不可能であった全圧延材への平坦度制御、蛇行制御の適用が実現した。操業作業者の負荷が減少しただけでなく、定量的な測定評価と制御理論にもとづく制御手法により、従来よりも高精度に自動化できた。

## ⑤ 稼働率の向上

蛇行制御により圧延ロールの損傷頻度が減少したため、製造休止につながるロール交換の回数が67% 減少し、稼働率が約0.3% 向上した。

## 5.2 社会的課題への貢献

開発した計測器はコンパクトで設置が容易であり、日本製鉄の6か所の熱延工場へ展開・導入されている。現時点で、国内で製造される49% の鋼板に本技術のいずれかが適用されており、本技術は鋼板の高品質化と生産性向上に大きく寄与している。

本技術により、自動車燃費向上のための高強度鋼板の増産要求に応え、高品質な鋼板を安定して供給した。さらに、既存設備を使用し大きな設備投資なしに、熟練作業者に頼って

いた高強度鋼板の圧延作業を自動化することで国際競争力向上に貢献した。製造歩留まり、稼働率、圧延能率の向上により、熱延工場におけるCO<sub>2</sub>排出を削減し、さらに、自動車の燃費向上を通して、自動車からのCO<sub>2</sub>排出にも貢献している。

## 6 おわりに

新しい計測技術の発明により従来把握できていなかった製造プロセスの情報を得ることができれば、起こっている現象の解明や新しい制御の考案につながり、生産性の向上や高度な製品の作りこみに寄与できる。鉄鋼プロセスにおける計測技術は、物理的な計測の原理にもとづき、最新の電子デバイスや信号処理を適用し、長年の研究開発で蓄積した環境対策などの周辺技術を組み合わせ、挑戦的な実機試験と綿密な解析により得られた新しい知見を反映することで、鉄鋼特有の製造プロセスとその過酷な環境に適応し、時代の要求とともに進歩してきた。今後の鉄鋼業が直面する課題として、よりいっそうのCO<sub>2</sub>排出削減による環境負荷低減があげられる。その課題の解決過程においても、計測・制御技術が、生産性を確保し、高品質な製品を生産するうえで重要であり続け、進歩し続けることを期待する。

## 参考文献

- 1) 薄鋼板成形技術研究会：プレス成形難易ハンドブック（第4版）、日刊工業新聞社、(2017)、10.
- 2) 国立環境研究所：2019年度（令和元年度）の温室効果ガス排出量（確報値）について、環境省、(2021)。
- 3) 本田達朗，植松千尋，橘久好，中川繁政，武衛康彦，阪上浩一，木村和喜，高橋秀之：鉄と鋼，96（2010），592.
- 4) 中川繁政，橘久好，本田達朗，植松千尋：計測自動制御学会論文集，46（2010），463.
- 5) 伊勢居良仁，加藤朋也，大杉正洋，太田武：鉄と鋼，105（2019），20.
- 6) 太田武，加藤朋也，中田武男，伊勢居良仁，大杉正洋，相原康宏，渡部敦：計測自動制御学会産業応用部門講演論文集，2012（2012），1.
- 7) 鷺北芳郎，伊勢居良仁，武衛康彦，斉藤憲幸：鉄と鋼，95（2009），43.

(2022年12月26日受付)