

JFE スチールにおける計測制御技術の進歩

Progress of Instrumentation and Control Technology in JFE Steel

浅野 一哉 ASANO Kazuya JFE スチール スチール研究所 主席研究員・博士 (工学)
飯塚 幸理 IIZUKA Yukinori JFE スチール スチール研究所 計測制御研究部長・博士 (工学)

要旨

高品質の製品を安定的に製造するために計測制御技術が果たすべき役割は大きい。本稿では、JFE スチール統合後の 10 年間に於ける計測制御技術分野の進歩について、その背景と技術動向を振り返る。高機能製品の造り込みや品質保証、環境保全、省エネルギー、設備安定稼働など、さらに重要性を増したニーズに対し、計測はシーズの進歩を活用して高度化を図り、制御は従来の適用分野の枠を越えて技術の展開を図ってきた。多数の具体例とともに開発した技術を概説する。

Abstract:

Instrumentation and control technology has played a key role in stable manufacturing of high-quality steel products. This paper overviews the progress of instrumentation and control technology in JFE Steel in recent 10 years and reviews its background and technical trends. In order to meet continuing increased needs for the technology, instrumentation technology has been improved by applying recent developments in its seed technology, and control technology has been extended to newly emerging fields. The developed technologies are described with many specific examples.

1. はじめに

鉄鋼業が多品種少ロット生産の時代になって久しく、お客様の多様なご要求にお応えすべく高品質の製品を必要に応じて必要な量だけお届けすることがますます重要になっている。そのため、種々の製品の肉材質や外面特性、寸法形状などの品質の管理と保証、製造工程における品質造り込みと安定操業のための計測制御技術、さらには生産リードタイムを短縮し、お客様に製品を確実にお届けするための生産計画・物流計画技術のレベルアップが強く求められるようになっており、種々の技術開発を進めてきた。

生産計画・物流計画については JFE 技報 No. 28 に販売・生産・物流一貫管理技術特集号^{1,2)}が組まれているため、それを参照していただくこととし、本稿では計測と制御の技術の進歩について述べる。

2. 計測制御技術を取り巻く潮流と技術動向

JFE スチール発足後 10 年が経過した。この間の計測制御技術を取り巻く潮流と技術動向について振り返ってみたい。

JFE グループ誕生 (川崎製鉄と NKK の統合) 前の川崎製鉄技報 Vol. 31 No. 1 (1991 年発行) に、「計測・制御研究 10 年の歩み³⁾」が掲載されている。当時は薄板を中心とす

る高付加価値製品の生産比率増大、熱間圧延、連続焼鈍、ステンレス鋼製造ラインなどの大型設備の新設の流れに呼応して、製品の肉材質、表面品質をオンラインで連続測定するニーズや製品の品質向上、設備の安定稼働のニーズが高まり、新たな計測制御技術および装置開発が多く実施されていた。

計測では、レーザ機器、撮像素子、超音波送受信素子の高性能化、信号・画像処理装置の高速化などにより、より高性能なオンライン計測のための開発環境が整備された。また、鉄鋼プロセス特有の悪環境下での測定や製品特性変動が測定に及ぼす影響を低減するための計測のロバスト化も指向され、複合化・融合化計測、知能化技術の適用が行なわれた。制御では、ロバスト制御をはじめとする最新の制御理論やいわゆる FAN (ファジィ制御、人工知能、ニューラルネットワーク) などの基礎技術を実システムに適用しようとする機運が高まるとともに、その設計、解析のためのソフトウェアが充実して強力なツールとなり、アドバンスド制御の実プロセスへの適用が大きな潮流となった。このように、ハードウェアとソフトウェアの両面におけるシーズ技術の進歩に後押しされる形で新技術開発が行なわれたのが特徴であった。

一方、ここ 10 年間は大きな設備の新設は一段落し、既存の設備をいかに安定的に稼働させ、高品質の製品を造り込むかに重点が置かれるようになった。さらには、お客様のニーズに対応した新製品開発の効率化やその安定製造、製造工

程で発生する CO₂ 削減やさらなる省エネルギーなど環境負荷低減のための制御技術開発が求められるようになった。

計測では、高精細 CCD（電荷結合素子）、フェーズドアレイ技術の発展に代表されるようにデバイスの高性能化、高密度化が一段と進むとともに、PC や専用プロセッサによる信号・画像処理が年を追って高速化しており、高速高分解能な多点・多元計測技術が適用可能となった。また、高機能材へのシフトにより、スペックギャランティーからパフォーマンスギャランティーに移行が進んでおり、そのための検査技術の開発も潮流となっている。

一方、制御の 10 年間の進展を一言で言うとするれば、あらゆる方向への拡大ということになる。製品材質のようにオンライン測定が困難な制御対象への展開、プロセス個別の制御から製造工程の一貫制御への拡張、お客様のご要求に対応した品質設計のようなオフライン業務や操業・設備安定化のための異常予知技術など、従来の制御技術の枠を越えて拡大を図ってきた。操業データベースの充実や PC の計算速度向上により、高いモデル精度を常に保つための統計的モデリング技術も盛んに適用されるようになった。

これらの詳細については、3, 4 章で述べる。

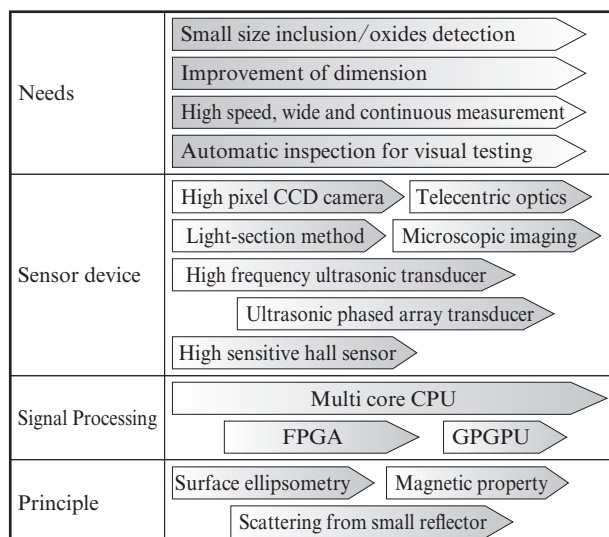
3. 計測技術

3.1 計測技術の進歩

計測技術は、光や超音波、電磁気を利用したセンサ、信号や画像の処理、データ処理などの要素技術で構成される。いずれも電子デバイスが用いられ、技術の進歩が著しい分野である。計測技術の開発にあたっては、これら最新の要素技術をいち早く取り込むことで新しいニーズに対応した高度化を図ってきた。

図 1 に計測技術におけるトレンドを示す。鉄鋼製品の高品質化を背景として、欠陥検出能向上、寸法精度向上、高速・広域・連続計測、目視自動化といったニーズが高まっている。これらに対し、光画像分野では CCD 撮像素子の高画素化と高速化が顕著であり、レーザなど周辺デバイスの汎用化・安価化も進んだ。超音波分野では振動子の高周波化やアレイ化が進んだ。信号処理やデータ処理に関しては、PC が大幅に高速化しており、以前は専用プロセッサが必要だった場面も多くは PC で足りるようになってきた。FPGA (Field-programmable gate array) や GPGPU (General-purpose computing on graphics processing units) のようにソフト的に柔軟にカスタマイズ可能な専用プロセッサも発展しており、特殊な信号処理を比較的容易に実現できるようになった。さらに、これらのハードウェアの進歩に加えて、材料表面の光学特性や、超音波の伝搬散乱特性、磁気特性といった物理的考察に基づくアプローチが計測技術開発の鍵となっている。

以下では、製品分野別ニーズの視点から、JFE スチール



CCD: Charge coupled device
 CPU: Central processing unit
 FPGA: Field-programmable gate array
 GPGPU: General-purpose computing on graphics processing units

図 1 計測技術のトレンド

Fig. 1 Trend of instrument technology

における計測技術の開発事例について述べる。

3.2 技術開発事例

3.2.1 薄板表面検査

薄板の表面欠陥はプレス時の割れや外観不良につながり、品質保証上重要な対象である。JFE スチールでは、製造中高速に流れる鋼板の表面欠陥を確実に検出するために、光学式表面検査装置の開発導入を進めてきた。当初はレーザ光の欠陥における回折を利用した方式から始まり、現在では高精細カメラ方式が主流となっている。

表面品質向上の流れの中で、レーザ方式で検出可能な明瞭な凹凸欠陥のみならず、自動車用溶融亜鉛めっき鋼板では模様のように見えるコントラストの薄い欠陥も検出対象となってきた。このような薄い欠陥検査における課題は、油付着などによる無害模様との識別である。この課題に対し、無害模様部が誘電体からの反射であることに着目し、図 2 に示す 3 チャンネル偏光式鋼板表面検査装置「デルタアイ[®]」を開発した⁴⁾。本技術の実用化により、目視に代わる自動検査が可能となり、信頼性の高い全長全幅検査を実現した。

薄板の表面欠陥の中には、ロールに異物が付着することにより、目視でも認識が難しい極めて薄い欠陥が生ずる場合がある。この欠陥の凹凸は数マイクロメートル程度しかなく、検査員が砥石をかけた後に初めて明瞭に目視検査が可能となる。この欠陥に対し、鋼板へロールで異物が転写されるといことから考察を行ない、鋼板に生じたひずみを磁気で検出する方法を着想した。微小な磁場変動の検出に適したホール素子を用いた漏洩磁束探傷法に、周期性を利

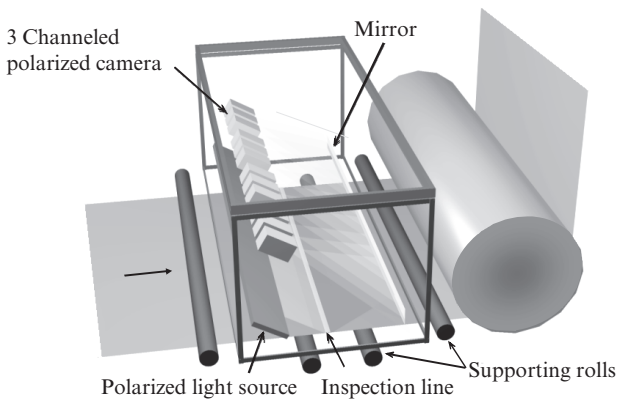


図2 3チャンネル偏光式表面欠陥検査装置

Fig. 2 Surface inspection system using 3 canneled polarized light

用した S/N (信号対雑音比) 向上手法を組合せ、砥石掛けレベル欠陥のオンライン検査を実現した^{5,6)}。

熱間圧延ステンレス鋼板では表面に残存する $100\ \mu\text{m}$ オーダの微小なスケール残りが外観上の課題となる。従来は抜き取りの目視ルーベ検査が行われてきたが、これを全長連続検査するために、リング照明と顕微撮像を用いた高精度表面検査装置を開発、実機化している⁷⁾。

3.2.2 薄板内部介在物検査

薄板内部の微小な非金属介在物は、絞り加工時の割れや貫通の原因となるため、特に缶用鋼板において厳格な品質保証が要求される。JFE スチールでは、漏洩磁束探傷方式の介在物検査装置を1990年代に開発、冷間圧延鋼板の検査に導入してきた。さらに、冷間圧延前の熱間圧延酸洗板における微小介在物検査に取り組み、高周波ラインフォーカス振動子アレイによる超音波探傷法を開発、実用化している⁸⁾。体積 $5 \times 10^{-5}\ \text{mm}^3$ の微小介在物が検出可能であり、本装置による介在物情報を製鋼工程に迅速にフィードバックするためのトレンド管理システムも構築し、製鋼段階での品質向上を図っている⁹⁾。

3.2.3 溶接鋼管の溶接部検査・計測

溶接鋼管の溶接部は品質の要となる部位であり、JFE スチールでは溶接部の検査技術、プロセス監視技術の開発に取り組んできた。ここでは HFW 鋼管 (HFW: High-frequency electric resistance welded pipe) での例を紹介する。

HFW 鋼管は高周波抵抗溶接により熱間圧延鋼帯から連続的に造管して製造される鋼管であり、生産性に優れるとともに、良好な低温靱性を得ることができる。溶接部の信頼性をさらに高めるため、ビード形状計、スパークセンサ、微小酸化物検出可能なアレイ超音波探傷技術を開発し、図3に示す総合的な溶接部 QA/QC (品質保証・品質管理) システムを完成させている。

HFW 溶接では、高周波抵抗加熱で溶融させた板端面を突き合わせ、アブセットにより酸化物の含まれる溶鋼を排出す

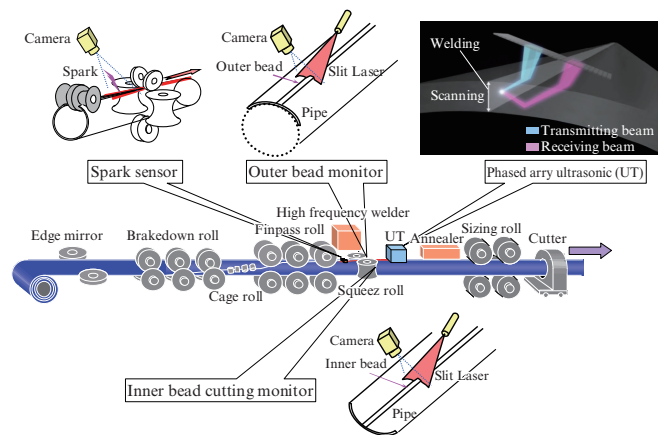


図3 HFW 鋼管の総合 QA/QC 技術

Fig. 3 Total quality assurance (QA)/quality control (QC) technology for high-frequency electric resistance welded pipe (HFW pipe)

ることで高品質な溶接部を造り込む。したがって、ビード形状は入熱状態の管理に重要である。そこで、光切断法を用いたビード形状計測装置を開発した。この方法は、スリットレーザー光を測定対象に照射し、スリット光の形状をカメラで撮影して認識した後、座標変換を行なって3次元形状を算出する方法である。外面ビード形状計¹⁰⁾ および内面ビード切削監視¹¹⁾ として実機化している。

溶接時には稀にスパークが生じることがある。これは突合せ部に何らかの異物が混入して電流路が短絡するためと考えられており、このスパークを全長にわたって監視する技術を開発した。スパークの画像を色分解して解析した結果、スパーク時には青色成分の光量が卓越していることを見出し、CCD カメラに短波長透過フィルタを組合せることで信頼性の高いスパーク検知を実現した¹²⁾。

溶接時に酸化物が排出されず残存すると、溶接部の靱性を劣化させることになる。酸化物の状態と溶接品質との関係について研究を進めた結果、数マイクロメートルサイズの微小酸化物の密度が低温靱性に影響すること、これを集束した超音波探傷で評価可能であることを見出し、フェーズドアレイ技術を応用した点集束ビームタンデム探傷技術を開発した¹³⁾。溶接品質の評価は、これまでシャルピー衝撃試験など抜き取りの機械試験でしかできなかったが、本技術の開発により、品質に影響する酸化物の状態を全長にわたって評価できるようになった。

以上の技術は低温靱性に優れた電縫鋼管「マイティーシム[®]」¹⁴⁾ に適用され、電縫鋼管の信頼性を飛躍的に高めている。

3.2.4 鋼材および条鋼における検査・計測

レールの内部欠陥保証には超音波探傷が適用され、特に頭頂部は広い探傷カバー範囲と高い検出能が要求される。そこで、フェーズドアレイ技術によるセクタスキャン方式を

開発した。探傷カバー範囲を従来の50%から80%に高め、より信頼性の高い品質保証を実現している¹⁵⁾。

厚板の板厚保証ではレーザー距離計を用いた厚さ計を開発した。直接板厚の情報を得る従来の γ 線方式と異なり、レーザー距離計と表裏面への距離情報から板厚を求めるため、精密な校正の開発が実用化の鍵である¹⁶⁾。

棒鋼分野では平行投光光学系と画像処理を用いたロール配置ガイダンス装置を開発¹⁷⁾、ロール配置の精密化による寸法精度向上に活用されている。

3.2.5 環境計測および設備診断

製鉄所では、粉塵の飛散対策を適切に行なうため、定期的に粉塵の監視を実施している。より有効な対策を講じるためには粉塵の種類を判別する必要がある。そこで、リング照明および赤外透過光による顕微撮像とカラー画像分析に基づく粉塵種別装置を開発¹⁸⁾、活用中である。

製鉄所ガス配管の健全性を確保することは製鉄所の安定稼働のみならず災害防止の上でも非常に重要である。簡便に精度良く配管内面の孔食状況を診断可能なアレイ型超音波厚さ計と、従来検査が難しかった管台部上の配管腐食を非開放非破壊で診断可能な超音波検査技術を開発した¹⁹⁾。製鉄所各種配管設備の診断、補修へ活用が進められている。

4. 制御技術

4.1 技術開発の方向性の変化

プロセス制御の開発では、まず制御対象の動特性を記述するモデルを作成し、次いで所望の制御特性を得るためのコントローラ的设计を行なう。前述の論文³⁾で開発例として述べられているのは、連铸モールド内湯面レベル制御と熱間仕上張力・ループ制御である。これらの制御対象は、物理現象の考察によってモデルのフレームを作成できる。制御系設計のためには、モデルのパラメータを精度よく求める必要があるが、鉄鋼プロセスの場合、直接測定できないパラメータがあるためにモデルと実プロセスとの間に mismatches が生じる。この mismatches を制御対象の不確かさとして考慮することにより、不確かさが存在しても制御系が所望の特性を持つように制御系を設計するための理論がロバスト制御理論であり、前記の2つの開発例はいずれもそれに依拠している。

一方で、ロバスト制御理論は、制御対象の不確かさが存在する場合の制御性能の限界を明示するものでもある。制御理論を適用して新しい制御系を構築しても、不確かさが大きい場合には期待通りの性能向上効果が得られないことも明らかになった。1980年代から90年代にかけて盛んに行なわれた制御理論の適用という観点からの鉄鋼プロセス制御開発が2000年代に入って不活発になったのは、上記のような背景があるものと考えられる。

このような閉塞的な状況を打破するため、JFE スチールで

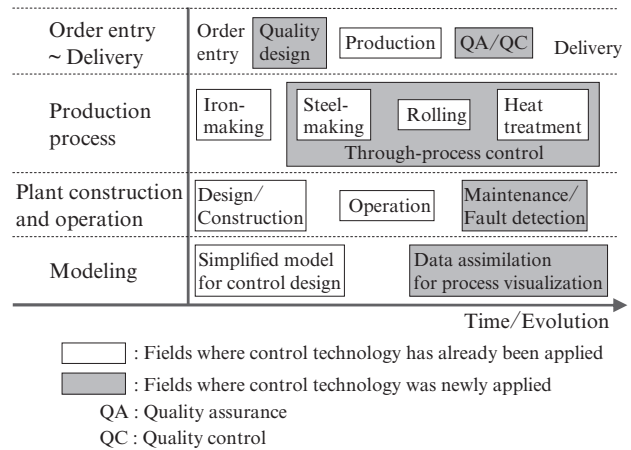


図4 制御技術の適用範囲の拡大

Fig. 4 Expansion of application fields of control technology

は制御技術の幅を拡大し、より広い視点から技術開発を行なってきた。図4は、さまざまな観点から適用範囲の拡大を示したものである。以下、それについて述べる。

4.2 技術開発の広がり

4.2.1 ソフトセンサ技術

従来の制御系における制御量(制御したい物理量)は、圧延材の寸法形状、温度、張力、湯面レベルのように、十分な精度でオンライン測定できることを前提としていた。ところが、製品の機械特性(引張強度、降伏応力、伸びやすさ、などの材質)はオンラインで連続的、安定的に計測することは困難であるが、製品品質管理における最も重要な項目の一つであり、制御技術が対応すべき制御量である。また、上工程のプロセスにも直接測定が困難であるが、管理、制御すべき量が存在する。図5は、各プロセスの制御項目の可視性、すなわち測定しやすさについてまとめたものである。

このような直接測定しにくい制御量に対処するため、ソフトセンサにより制御量を推定し、それに基づいて制御を行なう技術を開発した。ソフトセンサとは、制御量を推定するモデルと、そのモデルの入力変数のセンサ測定値を融合させることにより、直接測定できない量を推定するものである。

ソフトセンサを用いた材質制御では、まず製鋼後の鋼の成分、圧延条件、冷却条件などから材質を推定するモデルを作成する。鋼の成分の分析値が得られたら、このモデルを用いて所望の材質に制御するための圧延条件、冷却条件を求め、フィードフォワード制御を行なう。この材質制御は、厚板および薄板で実用化されている。図6に厚板の例²⁰⁾を示す。

また、この材質モデルは、お客様から受注した製品に対して各プロセスにおける製造条件を決定する品質設計にも適用されている²¹⁾。従来は、製造プロセスと製品についての知識が豊富な熟練設計者が決定していたが、モデル活用

		Good ← Visibility → Bad	
		Continuously measurable	Intermittently/ partially measurable
		Hardly measurable	
Blast furnace		Liquid iron temp. Burden profile	Temperature distribution
Refining		Temperature Chemical components	
Continuous casting	Molten steel level	Solidification point	Molten steel flow
Rolling	Temperature Dimention/Shape Tension	Mechanical properties	

図5 主なプロセスの可視性

Fig. 5 Visibility of steel processes

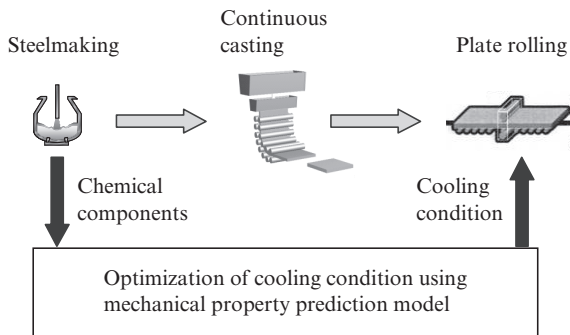


図6 厚板材質制御

Fig. 6 Mechanical property control system for steel plates

より精密な品質設計が可能となった。これも制御技術の適用範囲の広がりを示すものである。

別のソフトセンサの例として、連続鋳造におけるモールド内の定在波推定²²⁾が挙げられる。前述の湯面レベル制御は、モールドに流入/流出する溶鋼流量変動を外乱オブザーバで推定し、それを相殺することによって湯面変動を防止するものであり、一種のソフトセンサであった。一方、モールド内には自励振動によるスロッシングが発生し、湯面が振動することがあり、定在波と呼ばれている。定在波による湯面変動は溶鋼のマスフロー変動によるものではないため、スライディングノズルの操作はむしろ逆効果であり、湯面の不安定化を招く恐れもある。しかし、湯面測定値だけでは定在波とそれ以外の湯面変動を区別して制御することはできず、従来は適切な対処方法がなかった。

開発した制御系では、オブザーバによって定在波成分を抽出し、湯面測定値から定在波成分を除去した信号を湯面制御に用いている。これによって湯面制御によって定在波が助長されることはなくなり、湯面制御ゲインを高く設定することができるので湯面変動は低減され、鋳片品質が向上した。

また、内部が限定的にしか観測できないプロセスの可視

化にもソフトセンサ技術は有効である。シャフト炉の例²³⁾では、データ同化と呼ばれる手法によりモデルと部分的なセンサ情報を融合させ、炉内全体の状態を推定することを可能としている。

4.2.2 操業データ活用によるモデリング技術

制御精度向上のためには、操業中に実施するダイナミック制御とともに、操業の前に操作量の初期設定を行なうセットアップ制御のレベルアップが重要である。圧延では、精緻な圧延理論が構築されており、それを活用したセットアップモデルが整備されている。一方、前述のように上工程プロセスでは操業中には測定困難な制御量があり、操業条件を事前に精度よく設定することが重要であるが、物理モデルだけでは十分な精度が得られない場合がある。また、4.2.1項で述べた製品の材質予測についても、金属学モデルだけで操業条件、材料組織、機械的性質を結びつける実用的なモデルを構築することは困難である。

このような物理モデルだけでは十分な精度が得られない場合に用いられてきたのが統計モデルである。前述の論文ではニューラルネットワークが取り上げられており、これも一種の統計モデルと言えるが、入出力間の非線形特性を適度に調整することが難しく、その後はほとんど使われなくなった。これに対し、JFE スチールではJIT (Just-in-Time) モデルを適用し、その展開を図ってきた。

JIT モデルは、1998～2000年に活動が行なわれた一般社団法人日本鉄鋼協会計測・制御・システム工学部会「鉄鋼プロセスのモデリングと制御」フォーラムの中の圧延セットアップモデルの学習と更新ワーキンググループにおいて、東京大学(当時)の木村英紀教授によって紹介されたのを端緒とする。セットアップの都度、蓄積された操業データ中の過去の事例と今回の設定条件との類似度を評価し、類似度が高い事例の重みを大きくして行なうので、操業データベースを適切に更新しておけば常にモデル精度が確保され、非線形性にも対応できる。適用例は、材質制御^{20, 21, 24)}、インペラー脱硫モデル²⁵⁾、熱間圧延仕上荷重モデル²⁶⁾、厚板の幅モデル²⁷⁾、オペレータ操作のモデリング²⁸⁾など多岐に渡っている。詳細は、本特集号の別稿²⁹⁾を参照いただきたい。

4.2.3 単一プロセスの制御からプロセス一貫制御へ

鉄鋼製品を製造する個々のプロセス内ではそれぞれ制御ループが設けられており、制御量を目標値に一致させるべく制御が行なわれている。一方、製品は複数のプロセスを経由して製造されるものであるから、それらを一貫で管理し、制御することによってさらなる品質向上を図ることができる。所与の目標値に合わせるのではなく、目標値自体を変更する一つ上の階層の制御と見こともできる。

前述の材質制御はこの考え方に基づいており、製鋼プロセスの操業結果に基づいて圧延以降の操業条件を変更することにより、製造プロセス全体で材質変動を抑制し、高品質の製品を造り込むことを可能にしたものである。

また、複数プロセスの操業データの変動を同時に監視すれば、品質異常につながる要因を早期に検出できるようになるが、データ項目が膨大になり、要因ごとに管理範囲を設定する従来の管理方法では対応が困難である。そこで、多変量統計的プロセス管理 (Multivariate statistical process control, MSPC) を適用した薄鋼板品質操業管理システム³⁰⁾を開発した。MSPCでは、主成分分析を用いていくつかの統計量を算出し、その変動を監視することで異常検出能力を高めるとともに効率的な管理ができる。薄鋼板品質操業管理システムでは、製鋼、圧延、焼鈍などの工程を自動的に一貫管理ができるようになっており、品質安定化に貢献している。

4.2.4 設備・操業のトラブルの予兆検出

設備や操業のトラブルは、製品品質の低下や生産の停止によるお客様へのデリバリーの遅延につながるものであり、早期検出、できれば事前の予兆検出によるトラブル抑止が望ましく、そのためのセンサやシステムの開発に注力している。連続焼鈍炉における板破断予知技術³¹⁾では、正準相関分析とよばれる統計的手法を適用した。これにより、操業変数間の関係だけでなく長手方向の関係を抽出し、正常時の関係からの変化を監視することにより検出性能を高めることを可能とした。

コークス炉では、原料組成、乾留条件、炉壁性状などにより、乾留後のコークスを押し出す際に要する力が変動する。極端な場合、通常の設備では押し出すことができなくなる恐れがあり、操業トラブルにつながる。それを防止するため、押出性を予測するモデル³²⁾の開発が行なわれている。操業データベースの項目から統計的手法によってモデルの説明変数を選択することにより実用的な押出性予測式を得ている。

5. おわりに

この10年間のJFEスチールにおける計測制御技術の進歩を概括してきた。前述の論文³⁾では、今後求められるものとして、労働人口減少に伴う設備や検査の自動化、環境への配慮や設備長寿命化のためのプロセス状態監視・設備診断、高付加価値製品に対する材質計測、プロセス横断的な制御が挙げられており、これまでの技術開発はこれらのニーズにマッチしたものである。

今後は製品のさらなる高品質化、高強度化、高機能化に対応するため、計測制御技術に対するニーズも必然的に高まると予想される。このような製品の造り込み過程では、制御量を目標値に厳密に合わせることが求められ、そのためのプロセス計測技術および制御技術を一段とレベルアップする必要がある。また、個々の製品の製造工程を一貫で管理し、製造履歴をトレースする仕組みを用いて品質管理や造り込みを行なうにあたっては、膨大な操業データをハンドリング

する技術が必要となる。こうしたニーズに対応すべく、新たな計測制御技術の開発、実用化に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 亀山恭一ほか. JFE スチールにおける販売・生産・物流一貫管理技術の歴史と展開. JFE 技報. 2011, no. 28, p. 1-4.
- 2) 山口収ほか. 生産計画・物流計画への最適化およびシミュレーション技術の応用. JFE 技報. 2011, no. 28, p. 23-28.
- 3) 虎尾彰ほか. 計測・制御研究10年の歩み. 川崎製鉄技報. 1999, vol. 31, no. 1, p. 79-83.
- 4) 風間彰ほか. 鋼板表面欠陥の偏光反射特性の解析とその高速検査技術への応用. 鉄と鋼. 2004, vol. 90, no. 11, p. 870-876.
- 5) 腰原敬弘ほか. 漏洩磁束法による鋼板凹凸表面欠陥の検出法の基礎検討. CAMP-ISIJ. 2014, vol. 27, p. 331.
- 6) 松藤泰大ほか. 漏洩磁束法による鋼板凹凸表面欠陥検査システムの連続焼鈍ラインへの適用. CAMP-ISIJ. 2014, vol. 27, p. 797.
- 7) 高田英紀ほか. ステンレス酸洗鋼板の微小スケール残り検査装置の開発. JFE 技報. 2015, no. 35, p. 28-32.
- 8) 高田一ほか. 超音波プローブアレイを用いた薄鋼板のオンライン内部探傷技術. 鉄と鋼. 2004, vol. 90, no. 11, p. 883-889.
- 9) 荒谷誠ほか. 東日本製鉄所(千葉地区)で構築した絞り再絞り缶(DRD缶)用ぶりき原板介在物検査システム. JFE 技報. 2006, no. 12, p. 22-26.
- 10) 児玉俊文ほか. 電縫鋼管溶接ビード形状オンライン計測技術の開発. CAMP-ISIJ. 2004, vol. 17, p. 968.
- 11) 児玉俊文ほか. 電縫鋼管内面ビード切削形状オンライン計測技術の開発. CAMP-ISIJ. 2005, vol. 18, p. 1153.
- 12) 児玉俊文ほか. 画像処理による電縫溶接のスパーク検知技術の開発. CAMP-ISIJ. 2014, vol. 27, p. 369.
- 13) 飯塚幸理ほか. フェーズドアレイ超音波探傷を用いた電縫管溶接部高感度検査装置の開発. CAMP-ISIJ. 2011, vol. 24, p. 247.
- 14) 井上智弘ほか. 溶接部品質に優れたラインパイプ用電縫鋼管「マイティシーム®」の開発. JFE 技報. 2012, no. 29, p. 17-21.
- 15) 柳田靖夫ほか. フェーズドアレイ超音波法によるレール広断面探傷装置. JFE 技報. 2007, no. 15, p. 28-31.
- 16) 手塚浩一. 厚板せん断ライン用レーザ方式板厚計の開発. JFE 技報. 2015, no. 35, p. 22-27.
- 17) 児玉俊文ほか. 平行投影撮像と画像データ処理によるカリバーロールミル配置ガイダンス装置の開発. 第28回センシングフォーラム資料. 2011, p. 219-223.
- 18) 梅垣嘉之ほか. カラーおよび透過画像解析による製鉄由来粉塵の分類と定量化. JFE 技報. 2015, no. 35, p. 33-38.
- 19) 飯塚幸理ほか. ガス配管管台周り検査技術の開発. JFE 技報. 2011, no. 27, p. 15-19.
- 20) 茂森弘靖ほか. 局所回帰モデルを用いた厚鋼板の材質制御. CAMP-ISIJ. 2006, vol. 19, no. 5, p. 945.
- 21) Shigemori, Hiroyasu et al. Optimum quality design system for steel products through locally weighted regression model. Journal of Process Control. vol. 21, p. 293-301.
- 22) 島本拓幸ほか. 定在波モデルを用いた連铸モールド湯面レベル安定化技術. CAMP-ISIJ. 2014, vol. 27, p. 334.
- 23) Hashimoto, Yoshinari et al. Online heat pattern estimation in a shaft furnace by particle filter logic. The Sixth International Conference on Advances in System Simulation SIMUL 2014. Nice, France, 2014. (in print)
- 24) 茂森弘靖ほか. 局所回帰モデルを用いた冷延鋼板材質制御システム. CAMP-ISIJ. 2013, vol. 26, p. 853.
- 25) 茂森弘靖ほか. 局所回帰モデルを用いたインペラー脱硫制御システム. CAMP-ISIJ. 2009, vol. 22, p. 1057.
- 26) 久山修司ほか. 熱延仕上圧延荷重モデルに対する学習制御. CAMP-ISIJ. 2014, vol. 27, p. 791.
- 27) 茂森弘靖ほか. Just-In-Time モデルを用いた厚板の幅制御. JFE 技報. 2007, no. 15, p. 1-6.
- 28) 平田丈英ほか. 操業成績に基づくオペレータ操作のモデリング. CAMP-ISIJ. 2014, vol. 27, p. 337.
- 29) 茂森弘靖. Just-In-Time モデリングによる高精度プロセス制御技術の

実用化と全社展開. JFE 技報. 2015, no. 35, p. 8-13.

- 30) 茂森弘靖ほか. 多変量統計的プロセス管理による薄鋼板品質操業管理システム. CAMP-ISIJ. 2012, vol. 25, p. 1030.
- 31) 平田丈英ほか. 正準相関監視による CAL 板破断予知技術. CAMP-ISIJ. 2010, vol. 23, p. 1050.
- 32) 橋本佳也ほか. コークス炉における押出性予測式の構築. CAMP-ISIJ. 2014, vol. 27, p. 333.



浅野 一哉



飯塚 幸理