



特集記事・1

ここまできた鉄鋼の計測・制御・システム技術

ここまできた鉄鋼の計測・制御・システム技術

Recent Advances in Measurement, Control and System Technology for Steel Industry

計測・制御・システム工学会 部会長
京都大学 情報学研究科
システム科学専攻 教授杉江俊治
Toshiharu Sugie(株)神戸製鋼所 技術開発本部
生産システム研究所 制御技術研究室
主任研究員西田吉晴
Yoshiharu Nishida新日本製鐵(株)
環境・プロセス研究開発センター
計測・制御研究開発部 主幹研究員永田泰昭
Yasuaki NagataJFEスチール(株) スチール研究所
主任研究員北條成人
Shigeto Hojo

1 はじめに

鉄鋼業における高品質化、安定生産、低コスト化の全ての根幹に関わるものとして計測・制御・システム技術がある。これらの技術なしにはそもそも鉄鋼生産自体が不可能であるが、新材料の開発や高温プロセスにおけるイノベーションなどに比較して、一般技術者からはその効果が見えにくく、過小評価される傾向にある。これらの技術の近年の進展には目を見張るものがあり、「縁の下の力持ち」であるにとどまらず、資源の少ない我が国が世界をリードし、低炭素化社会実現などのグローバルな要請に応えるためのブレイクスルーを産み出す可能性が最も高いキーテクノロジーであるといっても過言ではない。

計測・制御・システム技術の底流にあるのはシステム科学的アプローチ、すなわち、数理モデル表現を一つのプラットフォームとした定量的・系統的なアプローチである。これらは特定分野のみで蓄積され用いられる技術ではなく、多分野にまたがる分野横断性を有する。このため一般にその真の価値が理解されにくい面があるが、いわば機械、電気、材料物理といった伝統的な分野を縦糸とすれば、横糸としてこれらを結びつけるものであり、全体を強固に発展させるのに不可欠な要素といえよう。たとえば、制御技術では、制御すべき対象の特性を(個体力学、流体力学、電磁気学など種々の学理に基づいて)数理モデルに翻訳し、数学的な枠組みの中で(数理最適化や確率統計などの道具を自在に用いながら)制御方策を系統的・定量的に定める。そして、その方策を実世界の形態に応じて具体的な制御器として実装する。このため数理モデルから制御方策を導出する手法を開発すれば、具体的な対象の属性(力、熱、電気、流体)に依存することなく、汎用性のある制御原理が得られる。このような手法そのものの普遍性や適応対象の広さといった点は計測やシステム技術においても同様である。

本稿では、急速に発展している計測・制御・システム技術が、鉄鋼業において具体的にどのような成果をあげてきたのかを例示しながら、現在の到達点と今後の方向性について述べる。

2 鉄鋼業における計測技術

2.1 計測技術の重要性

日本の鉄鋼業の競争力強化のためには、製造条件の安定化による製品品質のばらつき低減、製品の信頼性確保、低コスト高速高効率操業などへのためみない努力が不可欠である。従って鉄鋼製造プロセスには高度な制御性がますます要求されることとなり、制御ループへの正確でタイムリーな情報を提供する役割を担う計測技術は、鉄鋼業におけるキーテクノロジーと考えられる^{1,2)}。

また、日本の鉄鋼業の競争力強化のためのもう一つの側面では、新しい高付加価値材を安定的に製造可能な高度な鉄鋼製造プロセスを実現していく必要があるが、そのためには複数センサの情報融合化・高速処理などが不可欠となり、計測技術の重要性が今後さらに増すと思われる。

2.2 近年における計測技術開発の成果例

鉄鋼業において重要な役割を担う計測技術は、ベースとなるIT技術やセンサ技術の急速な進化による成果を享受しながら高度化が図られている。近年における開発成果は参考文献1)や3)に詳しく整理されているため、ここでは代表的な開発成果の一部を紹介したい。

まず、コークス炉内部を高精度に計測し診断する技術が開発され注目されている⁴⁾。コークス炉で発生するコークス押出し不良等の生産障害を低減しコークス炉の稼働年数の延長を実現するためには、コークス炉内部の観察・評価が必要であるが、1000℃を超える高温環境内で、かつ空間幅が0.4m

と狭いため、従来技術ではその実現が困難であった。そこで開発されたのが、光学系の精緻な冷却機構等によりコークス炉内の大面積の炉壁の熱画像を撮像し、同時にレーザ光切断法で3次元プロフィールを測る装置であり、上記のような悪環境下において、煉瓦壁の表面を迅速かつ詳細に観察する技術を実用化している。図1は炭化室炉壁診断装置の構成、図2は炉壁の撮影画像例であり、目地や亀裂へのカーボン付着等を詳細に観察できている。本装置により診断精度が飛躍的に向上し、同時開発した補修装置と組み合わせて炉体保守体制を確立でき、コークス炉の稼動年数の延長に貢献している。

つぎに、ランアウトテーブルにおける鋼板温度の新しい計測技術⁵⁾について紹介する。これは高張力熱延鋼板の品質安定化を目的に、実用化されたものである。放射温度計は、測定対象からの熱放射を検出し温度に換算するものであるが、水滴が存在すると水による吸収・散乱のため熱放射が減衰し、

また時間的にも変動するため、水冷バンク内の鋼板の様に大量の冷却水が存在する場所での鋼板温度の高精度計測は従来困難であった。本開発では、熱放射の水による吸収が少ない二つの波長域を活用する手法や、水パージ形状の工夫等により、高精度な放射測温技術を実現している。図3は鋼板温度測定のための放射測温センサと、計測結果と数値解析結果との比較例を示しており標準偏差2.5℃を達成している。また、巻取温度制御方法も同時に開発し、従来発生していた巻取温度外れを抑制できおり、高張力鋼板の生産性向上、品質安定化に貢献する技術として今後の活用が期待されている。

上記二例のように高温かつ、粉塵・水蒸気が存在する悪環境下での計測技術の実現が近年強く求められている。そのため、最先端の高速画像処理やセンサアレイ化技術を駆使した計測技術や、マイクロ波を利用した計測技術の開発等も進められており、本特集号でもその開発事例が紹介されている。

2.3 計測分野における研究会活動

ここまでは鉄鋼業関連メーカによる自主開発の事例を紹介したが、日本鉄鋼協会計測・制御・システム工学部会計測フォーラムでは日本鉄鋼業の計測分野に関わる重要な共通課題をテーマに選定し、基盤技術の早期確立のため研究会活動を実施している。過去活動を実施した研究会としては、「鋼板表面の光学的特性のモデリング」研究会（1997年度～2000年度）、「内部欠陥検出の高精度化」研究会（2003年度～2006年度）、「設備安全性センシング技術の高度化」研究会（2006年度～2009年度）がある⁶⁻⁹⁾。

昨年度活動を終了した「設備安全性センシング技術の高度化」研究会では、配管等の製鉄所大型設備の効率的かつ高精度な検査手法や技術の確立を目的に活動を実施し、顕著な成果が得られた。製鉄所各種設備の老朽化・延命化・メンテナンス不足に起因した事故・トラブルが近年多く発生しているが、設備の安全確保は日本鉄鋼業の優位性を今後も維持

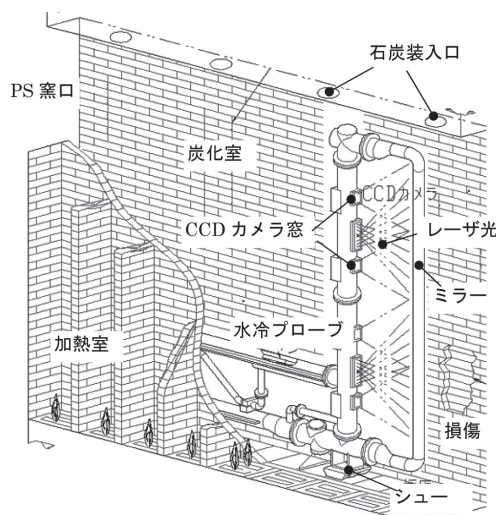


図1 炭化室炉壁診断装置の構成



図2 炉壁の撮影画像例

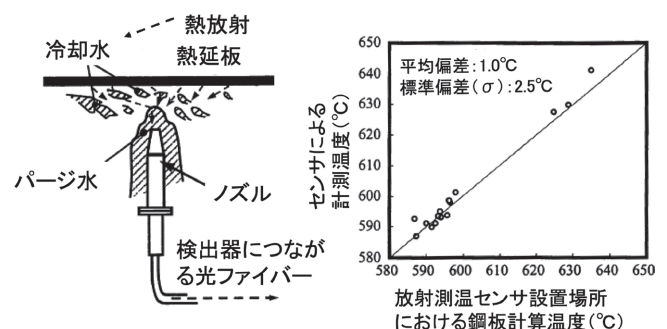


図3 鋼板温度測定のための放射測温センサと、計測結果と数値解析結果との比較例

していくための業界共通の重要課題である。本研究会では、大型構造物の減肉・き裂・疲労の評価技術開発に取り組み、広域を効率的に探傷可能な超音波探傷（ガイド波）の高精度化、高リフトオフで探傷可能な電磁気探傷の開発、疲労応力記憶スマートセンサの開発等の多くの成果を得ている。一例として、数mも離れた距離から探傷するガイド波の高度信号処理により欠陥サイズ・形状を同定できる解析技術が考案されており、本技術の展開により製鉄所配管の損傷箇所・損傷程度を定量的・高効率・低コストに計測する装置が将来実現できると期待されている。

今後新たな研究会活動により、たとえば、ネットワークセンシング、高速高密度センサデバイスといった官学の先端的研究の成果を展開した新計測技術の確立・実用化が期待される。

3 鉄鋼業における制御技術

鉄鋼プロセスは物理的／化学的／熱力学的／冶金的な変化が混在・相互干渉しながら進行する非常に複雑なプロセスであり、高品質・安定生産・環境調和の実現は制御技術抜きでは考えられない。また「グローバル化の進展」「環境負荷低減」などの鉄鋼業を取り巻く環境変化に伴い、先端制御技術に対するニーズはますます高まっている。

3.1 PID制御（1入力1出力）からアドバンスト制御へ

PID（Proportional-Integral-Derivative）制御は最も一般的な制御で、操業条件毎に制御ゲインを変更することで、複雑な鉄鋼プロセスにおいても幅広く適用されている。しかし制御精度を維持するためには経時変化に対応した小まめなゲイン修正が必要で、メンテナンス性が悪い。また（1つの入力で1つの出力を制御する）1入力1出力の制御対象にしか対応できない、などの欠点を抱えている。

日本の鉄鋼業ではPID制御のこれらの欠点を補うべく、先進のアドバンスト制御をいち早く実用化することで、世界トップクラスの高品質・安定生産・環境調和を実現し、日本産業界において制御技術分野の牽引役を努めてきた。

3.2 複数の要求を同時に実現（多入力多出力）

タンデム圧延機では「板厚変動の抑制」「張力変動の抑制」「ルーパーの安定化」「荷重制約を守る」「電流制約を守る」「圧延の高速化」など複数の要求（出力）が存在し、複数の入力を組み合わせる事で、これらの要求を同時に実現するILQ（Inverse Linear Quadratic）設計法に基づくAGC（Automatic Gauge Control）やミルバランス制御¹⁰⁾などが実用化されている。一般に（複数の出力を複数の入力で制御する）多入力

多出力系の制御はLQ設計法（指定した評価関数を最適化する設計法）のようにパラメータ調整が難しく実用化が進まなかった。ILQではLQの逆問題を利用することで、所望の応答となるパラメータへの調整が容易なことから実用化が進み、複数の要求を同時に満足できるようになった。

ILQのタンデム圧延機への適用結果を図4に示す。従来、電流が定格をオーバーすると減速するしかなかったが、複数の入力が自動的に連携し、スタンド間で負荷分散することで、減速せずに定格電流内での高速圧延が実現されている。

3.3 周波数毎に特化して制御精度向上

複数の出力を同時に制御できるようになると、つぎは更なる精度向上が要求される。その一つの答えが周波数毎に特化することである。連続鋳造機の湯面レベル制御では鋳造速度の高速化に伴い、特定の周波数で変動するバルジングによるレベル変動が大きな問題となっていた。従来の制御手法は全ての周波数に一律に作用する制御手法であったが、ロバスト制御¹¹⁾（本特集号「ロバスト制御を活用した連続鋳造機湯面レベル制御」記事参照）やQパラメータ設計¹²⁾では特定の周波数に特化し、その周波数での制御性能を最大化することで、バルジングによるレベル変動を飛躍的に抑制できるようになった。Qパラメータ設計の適用結果を図5に示す。本設

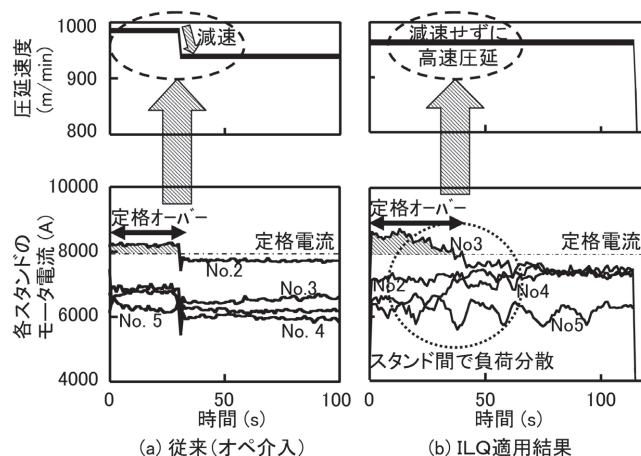


図4 電流が定格をオーバーしても減速せずに高速圧延

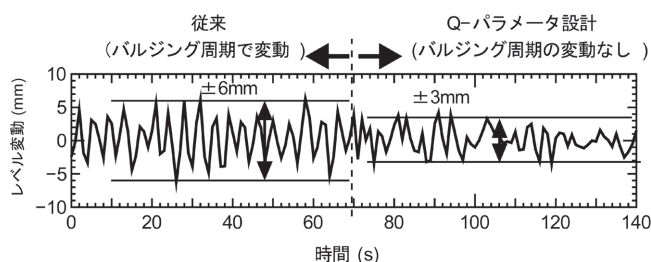


図5 バルジングによる湯面レベル変動を完全に抑制

計法によってバルジング周期の変動が完全に抑制されている。

3.4 モデルの精度アップで制御精度向上

ILQやQパラメータ設計などのアドバンスト制御では制御対象のモデルに基づいて制御が行われる。モデル精度が高ければ高いほど制御性能も高くなるため、制御技術においてコントローラ設計と同様に、モデリング手法は非常に重要な技術である。モデリング手法は制御対象や取得データの特性に応じて適材適所種々の手法が適用され、制御精度向上に大きく貢献している(表1参照)¹³⁻¹⁶⁾。

近年適用件数が増加しているJITモデリングは本会の研究会活動で開発され、大量のデータを有効活用することで非線形な対象でも局所的に線形化してモデリングできる優れたものである。JITは鉄鋼プロセスでの実用化(本特集号記事参照)に加え、他産業でも適用が進んでおり、その研究会活動は制御技術分野のみならず、他産業の発展にも大きく貢献している。

3.5 更なる高品質・安定生産・環境調和に向けて

上記アプローチ以外に、将来の挙動をモデルに基づいてオンラインで予測しながら制御するモデル予測制御(本特集号記事参照)や、大量データを活用した統計解析手法に基づく高炉などの操業監視システム¹⁷⁾など、最近の傾向としては大量のデータとモデルを活用した制御手法やシステムが多数実用化され、高品質製品の安定・高効率生産・環境負荷低減に大きく貢献している。

さらに計測・制御・システム工学部会の制御フォーラム研究会では現在「バラツキの制御」をキーワードに研究開発に取り組んでおり、圧延分野では寸法制御から鋼板冷却制御の高度化(2.2節で紹介した鋼板温度計測技術を活用)¹⁸⁾などの高品質作込み制御への展開が進められている。鉄鋼プロセスにおける制御技術は、バラツキの制御、品質作り込み、工程間最適化、操業診断・操業安定化などを視野に、高品質・安定生産・環境調和に向けた取り組みを加速させている。

表1 各種モデリング手法の鉄鋼プロセスへの適用事例

手 法	適用対象	備 考
ARMAX※1	圧延機動特性の閉ループ同定	今まで不可⇒可
GP※2	圧延荷重の未知の非線形性	予測誤差19%減
2次計画	転炉合金量の制約付非線形性	合金鉄コスト3%減
JITモデリング※3	転炉吹込O ₂ の局所線形モデル	吹込O ₂ 変動25%減
	厚板TSの局所線形モデル	予測誤差53%減
	厚板板幅の局所線形モデル	制御誤差20%減

※1 Auto-Regressive Moving Average model with exogenous input.

※2 Genetic Programming.

※3 Just-In-Time modeling.

4 鉄鋼業におけるシステム技術

4.1 鉄鋼業におけるシステム技術の必要性・重要性

システム技術とは、複数の要素(これには設備や人間も含む)を組み合わせで一つの機能を効率よく働かせるための技術である。その実現には、前章までに記述した計測・制御技術に加えて、数理的なモデルによる表現や、計算機技術と最適化技法が必要である。今日の複雑化した生産・物流計画を効率的に運用してゆく上で、システム技術は重要かつ不可欠な要素となっている。

実際、鉄鋼業のシステムにおいては、注文ロットと製造ロットのサイズが異なる上、注文の多品種・多仕様・小ロット化が進みながらも全体としては大量生産という特徴がある¹⁹⁻²¹⁾。たとえば厚板生産では、1日当たり大体2,000枚の注文を400枚のスラブ(製造ロット)に集約する素材計算を行うが、歩留、単重、納期などの評価指標は互いにトレードオフ関係にある。生産量の拡大と仕様の多様化が進む中で、膨大な組み合わせ問題を人手作業だけで解くには限界があり、適切なモデル化と効率の良い解法を与えるシステム技術の必要であることが理解されよう。

4.2 システム技術の具体的な成果

鉄鋼業では早くから積極的にコンピュータを導入しており、たとえば「君津AOL(All On Line)システム」(1968年)²²⁾は、世界初のオンライン生産管理システムであることは良く知られている。その後の発展、特に1990年代以降のダウンサイジング・演算速度の高速化・パソコンとインターネットの普及などにより、最適化技法を用いて生産・物流問題を解決するためのインフラが整ってきたことで、システム技術の適用事例が数多く報告されるようになってきている。例をあげると、厚板板取最適化システム²³⁾は、先に述べた素材計算に対して最適化技法(数理計画:混合整数計画法)を適用し、生産量重視や歩留(コスト)重視など、環境変化により評価指標間のバランスが変動する場合でも柔軟に対応できるものとなっている。

最適化技法にはさまざまな種類があるが²⁴⁻²⁶⁾、以下では生産計画と物流計画の適用事例を紹介する。

4.2.1 出鋼順編成計画立案支援システム²⁷⁾

対象となる製鋼工程は、転炉1基、二次精錬設備7基、連続鑄造機3基からなり、1日約40チャージを出鋼するものである。計画期間は7日で、各圧延工場からの鑄造要望(圧延予定)に基づいて、転炉から連続鑄造機までの各工程の開始・終了時刻をチャージごとに決定する。設備競合・休止、特殊材の前後処理、複数同時鑄造、時刻指定及び前日計画

の接続などの制約条件を満たした計画結果を、出鋼チャージ(ch)数、二次精錬の待ち時間、代替処理工程発生数で評価する。

最適化技法(GA: 遺伝的アルゴリズム)を用いて、複数(本例では200個)の初期解から解の改善を繰り返す。制約条件を満足する初期解だけを選択し、解の改善においても制約条件に基づく修正を加えることで、実行可能性を保証できるように工夫している。

実適用の結果、人手作成と同じch数ながら二次精錬の待ち時間を2分/ch短縮し、二次精錬の標準工程以外の代替処理工程選択も1.6ch/日削減して処理コストを抑制できた。また本例では、多様な実行可能解群の中から生産量優先や操業コスト削減優先などの操業指標に適した計画をオペレータが選択できる画面を用意して(図6)、操業環境変化に強い実用的なシステムとしている。

4.2.2 鋼材出荷バース(停泊位置)のスケジューリング²⁸⁾

対象となる6ヵ所の国内向け作業バースには、1日当たり30隻前後の内航船が入港する(図7)。バーススケジューリングでは、荷役予定船舶に対する作業バースと、各作業バースでの作業開始・終了時刻を決定する。

作業可能バース、作業者数、作業時間帯、天候などの制約条件を考慮し、船舶の運航効率、岸壁での作業効率、出港納期遅れの3つの評価指標の総和が最小になる計画を作成

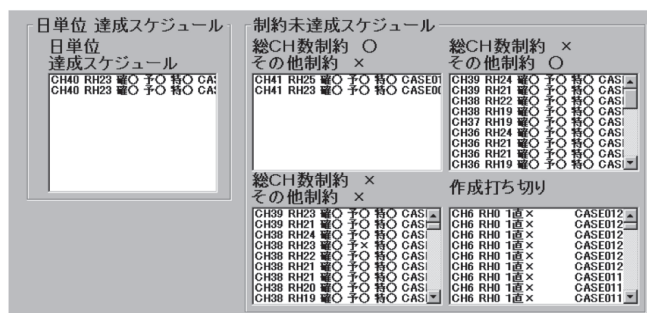


図6 計画結果の確認画面

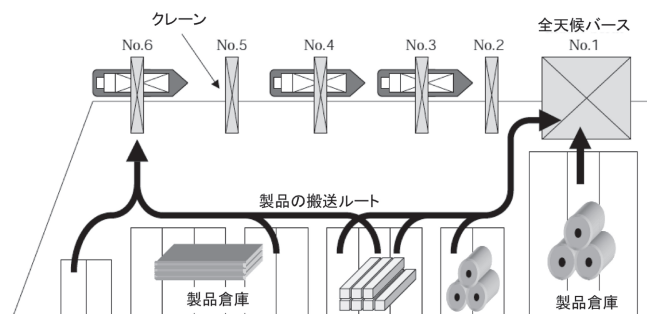


図7 鋼材出荷バースと物流概要

する。そして、数理計画(分枝限定法)とシミュレーション(作業バース荷役)を併用して計画を改善する。

荷役優先順に従って作った初期計画を起点に、船舶割付を変更(分枝操作)して探索を行い、もし評価指標が大きい(悪い)場合には途中で探索を打ち切る(限定操作)。船舶数が増えると組み合わせの数が指数的に増加するので、評価指標の増加予測コストを導入して探索打ち切りを早い段階で可能にすることで、計算時間を1/10以下に短縮できるようになった。

数理計画とシミュレーションの併用は、本特集号の「時間分割繰り返し型生産・物流最適化による原料一貫物流システム」でも採用されており、混合整数計画法と詳細物流シミュレーションとを組み合わせ、大規模生産物流問題を解いている。

4.3 システム技術分野の研究会活動

IT時代を背景にスタートした最初の研究会(1998~2001年)では生産・運用・物流計画問題を対象にしたモデル化と最適化に注目し、単一工程から複数工程へと大規模化する問題に対応するための方法論の研究を行った。その成果もあり、製造ラインの自動化は近年著しく進んでいる。しかし、一方で高度な判断を要求される材料設計、設備診断、操業オペレーションなどの業務は、依然として熟練者の経験やノウハウに頼っている。ハイテン(高張力鋼)製造などに代表される日本鉄鋼業の強さの源泉は、まさにこの熟練者スキルにある。

そこで以降の研究会(2004年~)では人に焦点を当て、熟練者スキルの伝承や人材育成といった人の業務に注目し、個人の知識を組織的に共有して高次の知識を生み出すナレッジマネジメント、ユーザの分身(代理)として自律的・能動的に活動してサービスを行うソフトウェア構築技術であるエージェント技術を切り口に、「人とシステムの協調」のあり方を研究している。

操業・保全の分野では、すでに適用事例としてITを活用した操業ナビゲーションシステム²⁹⁾がある。また本特集号の「製鉄所における技能継承活動支援のためのeラーニング活用事例」は、ITを活用して管理監督者の負荷を軽減しつつ人材育成を促進する仕組み作りの事例である。

熟練者の操業ノウハウを計算機上に蓄えて活用する手法としてはAI(人工知能)が知られており、多くの適用事例が報告されてきた。しかし知識獲得そのものや獲得した知識の環境変化へ追従の困難さが課題となっている。本特集号の「製鉄所における技能継承活動支援のためのeラーニング活用事例」は、最適化技法(分類子システム)を適用してこの課題を解決する新たなアプローチである。

今後のシステム技術は、いっそう人間要素を取り込み、「人とシステムの協調」から人間判断と自動化が共生する新しい「人を育てるシステム」へとさらに進化させる必要がある。そしてこのようなシステム技術こそが将来の競争力を高めるものと期待されている。

5 おわりに

本稿では、日本の鉄鋼業における、計測・制御・システム技術の発展と成果の一端についてその概略を述べた。また、計測・制御・システム工学部会の研究会活動を含め、これらの技術が今後目指す方向についても触れた。計測・制御・システムの技術は今後ますます日本の鉄鋼業の発展に欠かせないものとなる。本特集号の他の記事とあわせ、これらの技術に興味をもち、その重要性を理解していただくきっかけとなれば幸いである。

参考文献

- 1) 安藤繁：鉄と鋼，90 (2004) , 860.
- 2) 岩村忠昭：平成20年度技術の系統化調査報告第13集，国立科学博物館，(2009) , 267.
- 3) 窪田淳之：第193回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，(2007) , 37.
- 4) 杉浦雅人，境田道隆，藤懸洋一：SICE第26回センシングフォーラム予稿集，(2009) , 165.
- 5) 本田達朗，植松千尋，橘久好，中川繁政，武衛康彦，坂上浩一，木村和喜，高橋秀之：鉄と鋼，96 (2010) , 592.
- 6) 計測・制御・システム工学部会「鋼板表面の光学的特性のモデリング」研究会成果報告書，日本鉄鋼協会編，(2001)
- 7) 計測・制御・システム工学部会「内部欠陥検出の高精度化」研究会成果報告書，日本鉄鋼協会編，(2007)
- 8) 計測・制御・システム工学部会「設備安全性センシング技術の高度化」研究会成果報告書，日本鉄鋼協会編，(2010)
- 9) 安藤繁：第193回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，(2007) , 1.
- 10) 村上晃，中山万希志，岡本充央，佐野研一，新谷裕和：システム制御情報学会論文誌，17 (2004) 10, 426.
- 11) 飯島慶次，水野浩，福田正親，門田淳一，近藤裕計，宮本明：材料とプロセス，12 (1999) 2, 290.
- 12) 北田宏：計測自動制御学会論文集，39 (2003) 5, 487.
- 13) 鷺北芳郎，角谷泰則，木村和喜：鉄と鋼，90 (2004) , 941.
- 14) 西野都，前田恭志，渡辺俊彦，北村章，森本禎夫，大江憲一：システム制御情報学会論文誌，14 (2004) 3, 138.
- 15) 三角龍平，松浦義和，木村世意，大森知美，西野都，北村章：材料とプロセス，11 (1998) 2, 261.
- 16) 水野浩，秋生賢吾，前田孝彦：材料とプロセス，20 (2007) 5, 955.
- 17) 伊藤雅浩，松崎眞六，内田健康，大貝晴俊：計測自動制御学会産業論文，8 (2009) 10, 82.
- 18) 橘久好，中川繁政，武衛康彦，焼田幸彦，岡田淳司：材料とプロセス，21 (2008) 2, 1141.
- 19) 夏目大介：鉄鋼業における生産管理の展開，同文館出版，(2005) , 3.
- 20) 中川義之：「鉄鋼業を革新するフレキシブルなシステム化技術フォーラム」第6回フォーラム資料，日本鉄鋼協会編，(2008) , 41.
- 21) 小西正躬：ふえらむ，10 (2005) 4, 329.
- 22) 相田洋，荒井岳夫：新・電子立国第5巻，日本放送出版協会，(1997) , 251.
- 23) 吉原孝次：厚板板取最適化システムの開発，第132回制御技術部会資料，日本鉄鋼協会編，(2004) .
- 24) 石川好藏：第193回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，(2007) , 115.
- 25) 小西正躬：「鉄鋼業を革新するフレキシブルなシステム化技術フォーラム」第4回フォーラム資料，日本鉄鋼協会編，(2004) , 1.
- 26) 黒田充，村松健児 編：生産スケジューリング，朝倉書店，(2002) , 19.
- 27) 藤井聡，新井幸雄：材料とプロセス，23 (2010) 1, 195.
- 28) 梅田豊裕，広瀬雄介，金村真三：神戸製鋼技報，56 (2006) 1, 14.
- 29) 大下功，下井辰一郎，中村英都：材料とプロセス，21 (2008) , 1, 281.

(2010年11月29日受付)