



特集記事・12

鉄鋼業におけるAI・IoT技術の最前線

鉄鋼製造プロセスにおける システム・計測制御技術

Development of Systems, Instrumentation and Control Technologies for Steel-making Processes

新日鐵住金(株)
技術開発本部 プロセス研究所
計測・制御研究部長

中川 繁政
Shigemasa Nakagawa

新日鐵住金(株)
設備・保全技術センター
システム制御技術部長

吉沢 一郎
Ichiro Yoshizawa

1 緒言

世界経済の成熟を背景として、新興国を中心に最新鋭の製鉄設備導入が進んでいる。日本の鉄鋼会社の主要製鉄設備の多くは高度経済成長期に建設され既に40年以上稼働しているが、生産性・品質・納期などの面で各国の新鋭設備との競争に耐えなければならない。これを実現するため、鉄鋼製造プロセスのシステム制御技術、計測技術及び制御技術は、着実に進化しながらその要請に応じてきた。

鉄鋼各社では1960年代に業務管理の高度化目的での計算機利用が広まったが、間もなく製造現場で電気・計装制御装置と組み合わせた3階層の生産制御システム (Fig.1) の原型が生まれ、1968年にはオンラインリアルタイムによる一貫生産管理を実現した君津製鉄所が誕生した。その後の演算速

度、通信速度、データ容量の大幅な増加や関連装置のデジタル化、周辺ソフトウェア技術の進展によって、鉄鋼製造プロセスは高機能化を進めてきた。

本稿ではこれまでの新日鐵住金(株)におけるシステム・計測制御技術を顧みつつ、インダストリー4.0^{*1}時代を迎えた今後の展望を述べる。

2 鉄鋼におけるシステム制御技術の進歩¹⁾

2.1 制御用計算機の導入・拡大

鉄鋼設備での大規模で且つ複雑な操業を最適化するため、新日鐵住金では古くより最新技術の導入を進めてきた。1970年代には現場で24時間リアルタイム稼働される制御用計算

Classification		System Configuration	Main Functions
Level 3	B/C		Production scheduling Stock yard management Logistic control Process order scheduling etc..
Level 2	P/C		Process control - °C, mm, % Automatic operation - tracking, flow Operator guidance - order, know-how Data gathering - process, quality
Level 1	Electrical, Instrument		Line drive control, sequence control Motor drive, hydraulic control Flow, temperature, concentration control

Fig.1 Control system architecture of steel production process

*1 第4次産業革命とも言う。2011年にドイツ政府が提唱。

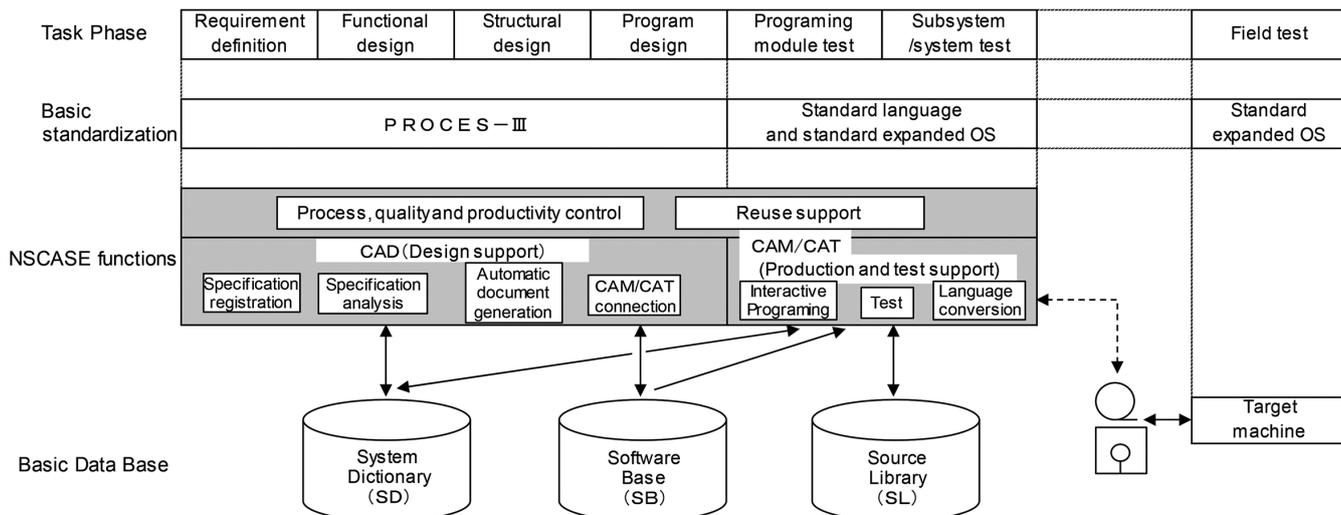


Fig.2 Functional configuration of NSCASE

機、いわゆるプロコン技術が確立し、計画された生産スケジュールに基づくプロセスへの自動設定や、プロセスデータの自動採取による操業・品質管理など、既にFA (Factory Automation)・CIM (Computer Integrated Manufacturing) の概念を現実し、その機能を担う制御用計算機への期待とともにソフトウェア量は増加し続けていた。

1980年代に新日鐵住金ではこのソフトウェアが鉄鋼製品の競争力の要になると認識し、ソフトウェア生産支援ツールであるNSCASE (Nippon Steel Computer Aided Software Engineering System) を開発²⁾ (Fig.2)、自社内にソフトウェアの効率的生産体制を構築した。更に1980年代後半、それまでの多くの計算機利用経験を元に、拡張性・オープン化など独自コンセプトの産業用コンピュータを開発³⁾、NSCASEと組合わせたシステム商品として外販にも取り組んだ。このように1990年代にはハードウェア・ソフトウェア両面の社内生産が可能となり、様々なプロセスへ多様な制御アプリケーションが導入されていった。

2.2 制御用計算機の利用範囲の拡大

1970年代の制御用計算機(プロセスコンピュータ、以下、プロコン)は、上位の生産管理と下位の制御装置の間で、上位から下位への自動設定や、下位から上位への現場データの伝送蓄積が基本機能であった。その後プロコン演算能力の向上により、従来アナログアンプで行っていたダイナミック制御もプロコンでのデジタル制御に置き換えられるようになり、1980~90年代に盛んに研究されていた現代制御理論の

実装が連続焼鈍処理設備における板温制御など当時の最新革新プロセスの実現を支えるとともに、熱延や転炉の最適制御や冷延でのファジィ制御なども実用化され⁴⁻⁶⁾、品質やコスト競争力を支えた。また、1980年代後半からの第2次AI (Artificial Intelligence) ブームでは、エキスパートシステムによる操業支援やニューラルネットを応用した異常予知など、オペレータを支援する様々な技術が開花した⁷⁻⁹⁾。

電気制御装置や計装制御装置のデジタル化は、当初部品点数削減やアナログアンプ特有のドリフト・ノイズ対策など保守管理ニーズが主体であったが、計算機能力の向上とともに新しい制御方式や言語開発も進んでいった¹⁰⁾。電気 (E) 計装 (I) プロコン (C) の機能の高度化が進んだ1980年代の半ばには、これらの機能を統合する”EIC 統合システム”の概念が生まれ、1980年代後半にはシングルベンダの、1990年代前半にはマルチベンダのEIC 統合システムが実現された^{5,11)}。その後2000年代にはEICは再び独自技術に特化した装置へと向かったが、汎用通信ネットワークを用いた密結合システムへと進化した。

2.3 システム制御装置への汎用技術の浸透

能力向上とともに計算機は次第に小型化・安価化が進み、1990年代後半には家庭でも高性能なパーソナルコンピュータ (PC) を扱える時代になった。基本ソフトウェアのOS (Operating System) としてWindows^{®*2)} やLinux^{®*3)} が登場したこの頃、新日鐵住金では独自計算機ハードウェア製造から汎用のオープン系システム活用へと舵が切られた。

*2 Windowsは、Microsoft Corporationの登録商標。

*3 Linuxは、Linus Torvaldsの登録商標。

汎用システムでの24時間稼働及び秒オーダーの応答性実現と、ベンダ毎のハードウェア・OS差の吸収によるソフトウェア製作効率向上を目的に、NSCASEを拡張した制御用ミドルウェア (NS SEMI SYSTEM^{*4}) を開発¹²⁾、1997年にWindows-NT PCサーバを君津の連続鋳造設備制御へ、2001年にLinuxサーバを君津の高炉制御へそれぞれ初適用し着実にオープン系システムの適用拡大を進めてきた (Fig.3、Fig.4)。

近年ではセンサ入力からプロコン処理、出力まで20msec未満を達成した高速プロセス入力機構を開発し、高速な厚板プロコンや大規模な熱延プロコンなどを含む全プロコン領域での適用が可能となった (Fig.3)。また一部のプロコンでは汎用の仮想化基盤の適用が進み、更にビッグデータ解析や機械学習など先端機能の活用も始まっている¹³⁾。

電気制御装置・計装制御装置においても汎用化の流れが

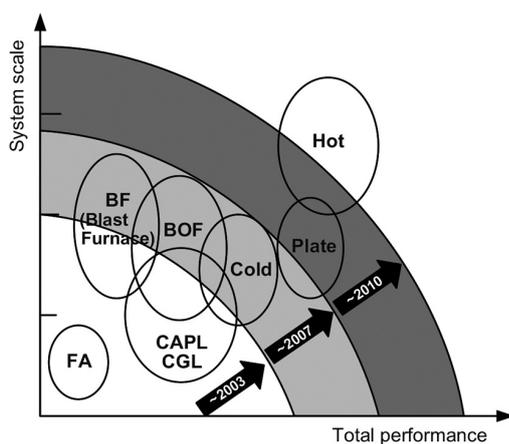


Fig.3 Expansion of open system applied process

生まれた。主に鉄鋼プラント電気制御用に開発されたPLC (Programmable Logic Controller) と一般産業用途向け汎用シーケンサの能力は、2000年代には演算速度・データ容量の面でほとんど差が無くなり、残る課題はソフトウェア生産性と保守性となっていた。新日鐵住金が開発したIEC61131-3言語ベースの電気PLCソフトウェア設計製作技術 (E-CASE)¹²⁾はこの問題を解決し、モデル部品の充実化と”プラントシミュレータ”と”仮想プラント画面”を用いたバーチャル試運転システム¹⁴⁾によって、鉄鋼プラントの電気制御装置として汎用シーケンサが採用されるようになった (Fig.5、Fig.6)。計装制御装置も同様に計装ソフトウェア製作支援ツール (計装CASE) と汎用制御装置による汎用化が進んでいる¹³⁾。

2.4 先進IT利活用技術の進展¹⁵⁾

2000年代にはスマートフォンなどのIT (Information Technology) 応用機器が日常的に使用され、大衆向けのゲームやウェブ市場の広がりが様々なベンダの参入を呼び、新しい高速演算処理装置やオープンソフトウェア技術の出現を促してきた。この時代、これらの新技術を鉄鋼製造プロセス現場へ応用するソリューション技術展開が盛んに行われた。

鉄鋼の操業においては、その日の製造内容における作業ポイント (ノウハウ) を熟知したベテランが、製造スケジュール用紙にノウハウを記入し、各ポジションのオペレータへ配布し指示していた。また、技術部門や品質部門からの操業改善や製造方法への指示連絡も、指示書などの文書に記載され各職場へ配布していた。IT 応用機器の出現でデジタル情報を容易に現場へ持ち出せるようになったことにより、従来紙で行っていた指示を必要な時に提示するとともに作業履歴をノウハウとして蓄積する操業ナビゲーション (Fig.7) が実現

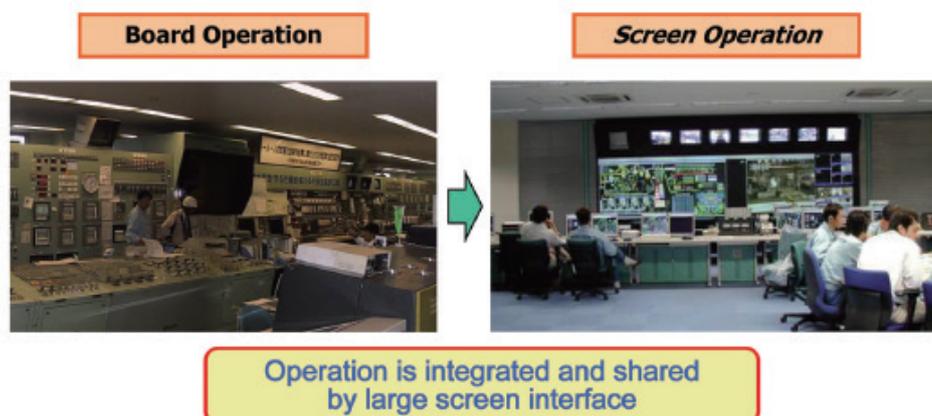


Fig.4 New IT application for Kimitsu Works-No.4 BF

*4 NS SEMI SYSTEM は、新日鐵住金 (株) の日本における登録商標。

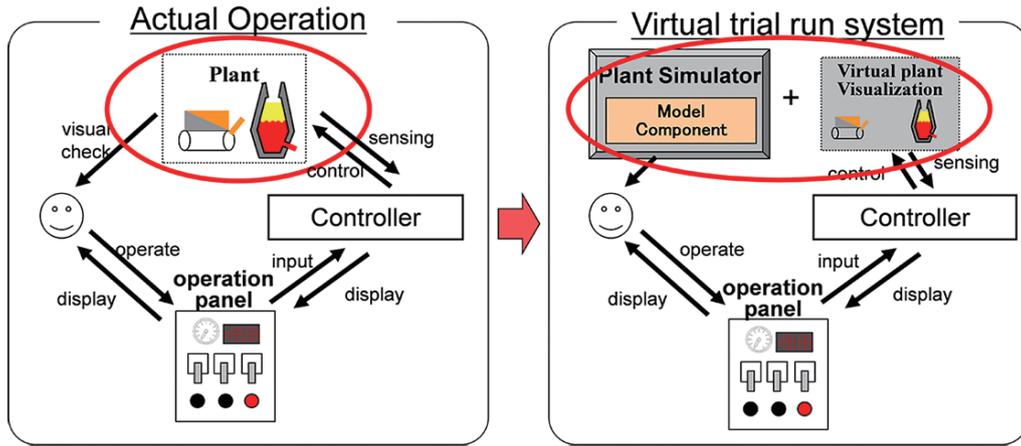


Fig.5 Outline diagram of virtual trial run system

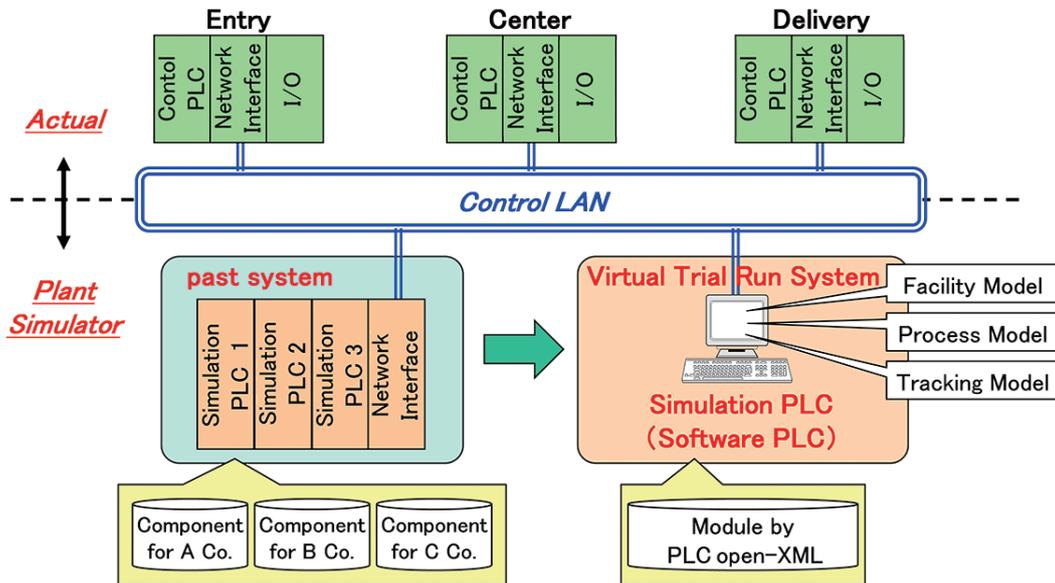


Fig.6 Virtual trial run system with software PLC

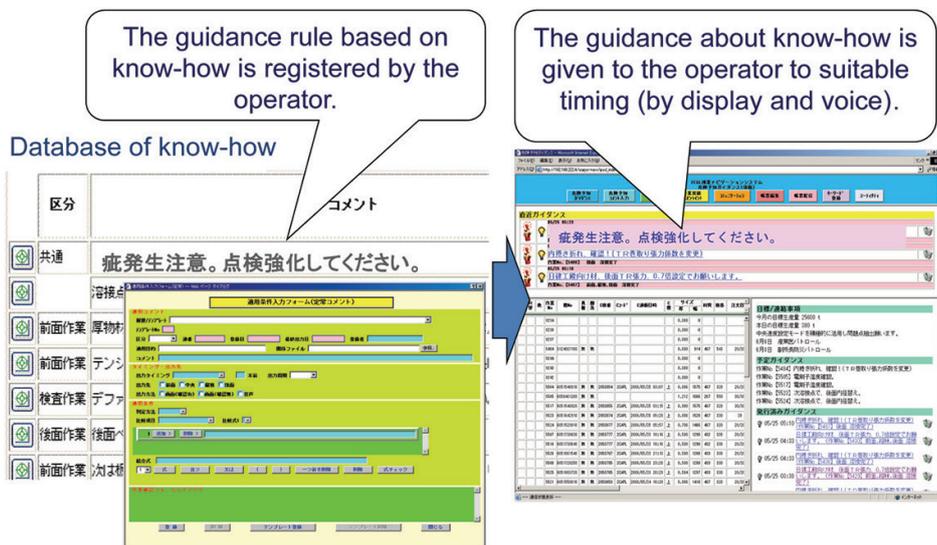


Fig.7 Navigation system for factory operation

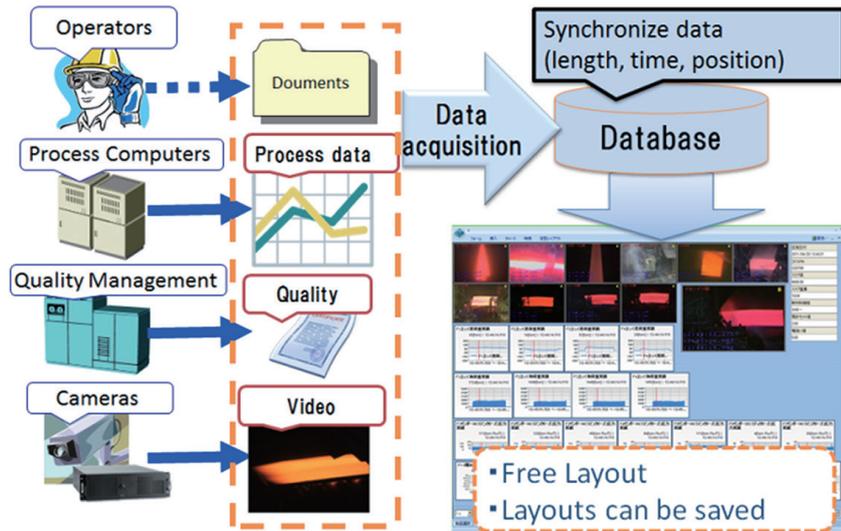


Fig.8 Sample image for integrated analysis

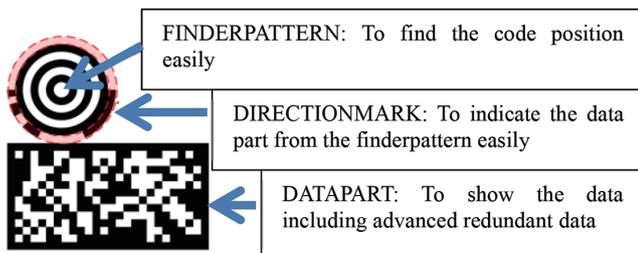


Fig.9 Structure of TEX Code



Fig.10 Sample of simultaneous multi recognition

され、様々な鉄鋼製造プロセスへ適用されていった。

また操業トラブルの原因究明などの操業解析では、プロセスデータのチャート挙動や、操業日誌、品質情報や監視カメラの映像を用いた複合的な解析を実施していた。しかしこれらのデータは別々のデータベースに散在していることが多く、解析前にまずシステム毎に収集したデータベース上の時刻のずれなど、プロセスデータとの合理的な関係を示すデータ位置合わせを行う必要がある。この作業は解析に先立ち多大な手間をかけて行っていたが、Fig.8に示す操業解析支援システムを開発したことで複数システム間での時刻差や位置の修正作業を自動化し、解析者が容易に複数のデータベースからデータを複合して利用出来るようになった。

中間製品の現品識別管理へも新しい技術の適用が拡大した。新日鐵住金では、マーキングし難い現品や雨、汚れ、錆など自動識別を阻む要因が多く人手作業が残っていたが、日鉄住金テックスエンジ(株)が開発したTEXコード(Fig.9)に着目し現品識別強化に取り組んだ。明暗差の激しい屋外の巡回自動読み取り、大量本数の複数読み取り(Fig.10)、暴露による錆や模擬降雨での読み取り試験において良好な結果を得ている。

2.5 高速・大規模演算能力の活用¹⁶⁻¹⁹⁾

鉄鋼特有の大規模複雑なプロセスにおいて、大量なセンサ情報や品質管理データを大画面で3次元立体的表現する表示技術が実用化されてきた。高炉操業では炉内の温度分布や圧力分布の可視化^{1,18)}(Fig.11)により、操作してからプロセス状態が変化する推移過程を容易に把握出来るようになり、オペレータの世代交代の中で操業技術レベルの確保に活用されている。また原料ヤード管理では紛体である原料の3次元山形状の中で、異なる銘柄の上被せ状況の可視化(Fig.12)が可能となった²⁰⁾。これらの技術は現実のプロセス状態を計算機上でリアルタイムで3次元管理するものであり、インダストリー4.0でいうところのCPS(Cyber Physical System)を先駆的に実現したものである。

汎用PCの演算能力とソフトウェア技術は、リアルタイム観測制御システムの開発にも活用された¹⁷⁾。産業用PLCの高信頼性と定時刻性を、高い数値演算能力と柔軟なソフトウェア開発環境を持つ汎用PCと組み合わせることで、高度な

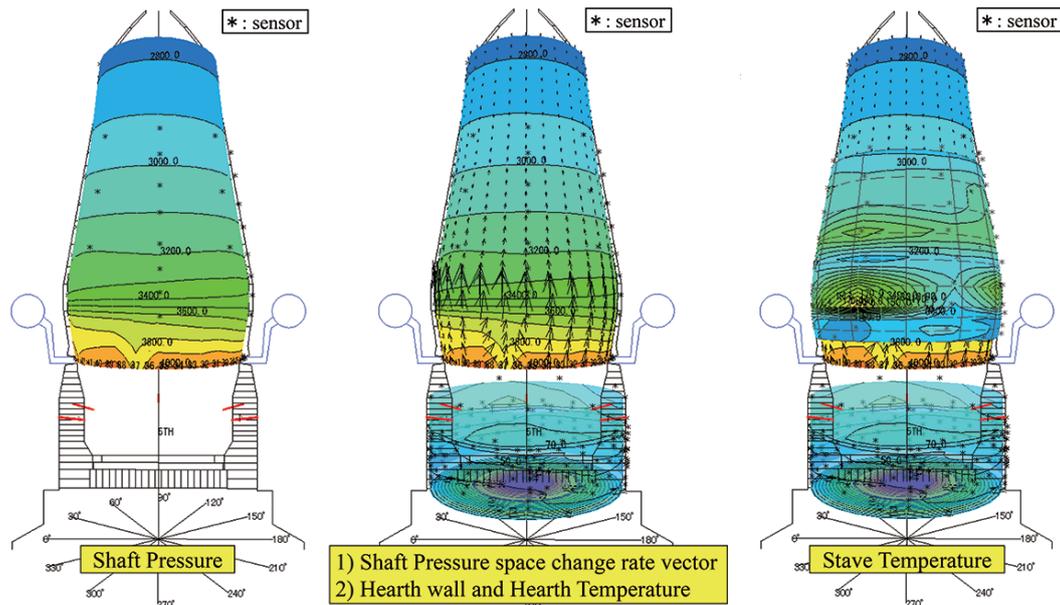


Fig.11 3-D visualizing technology for blast furnace status

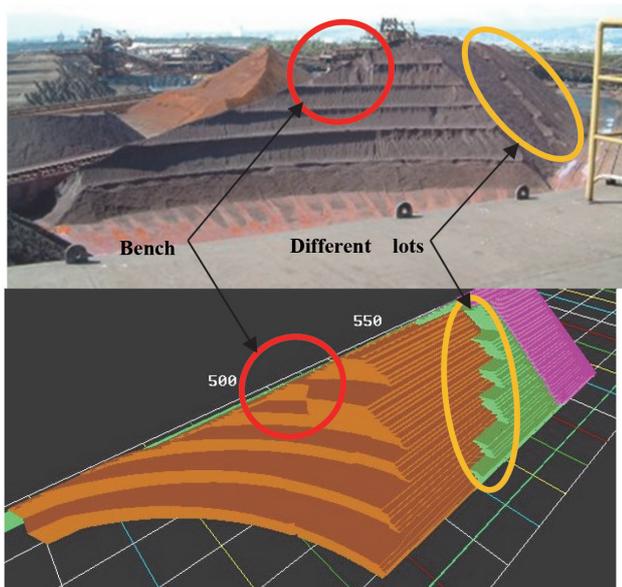


Fig.12 Example of 3-D mapping system

モデル計算に基づくプロセス観測や、観測結果を用いた高度制御運転をmsオーダーで実現できる。

このシステムでは、PLC 内部のセンサ計測値や制御出力のデータをリアルタイムでPCへ取り込み、PC内のプロセス解析モデルを用いて逐次操業分析を行うことが出来る。Fig.13においてプロセス解析モデルを構築するPC1は通常のPCであるため、MATLAB[®]*5などの汎用ツールを用いた

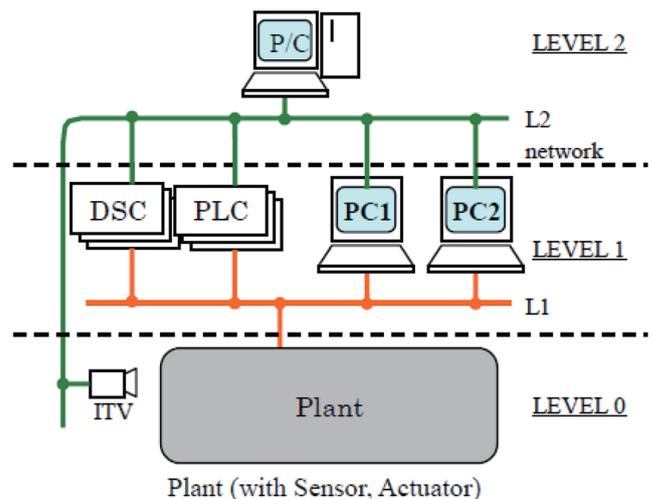


Fig.13 New real-time observer and control system

実時間オンラインプロセスシミュレーションも可能である。また解析の結果新たな制御方式を適用する場合、Fig.13のPC2内に制御ロジックを組み込んでおき、PC1 - PC2間で情報交換してオフライン制御シミュレーションを行ってみて、良好な場合PC2の出力をプラントへ適用することで容易にオンライン化できる。このようにプロセス観測及び運転制御の実装が飛躍的に容易になる仕組みを実現し製造プロセスへの適用も進んでいる¹⁷⁾(Fig.14)。

更に近年は大量のデータを様々な条件下で演算し最適な解を得る超大規模演算型のリアルタイム制御も、汎用並列

*5 MATLABは、The Math Works、Inc. の登録商標。

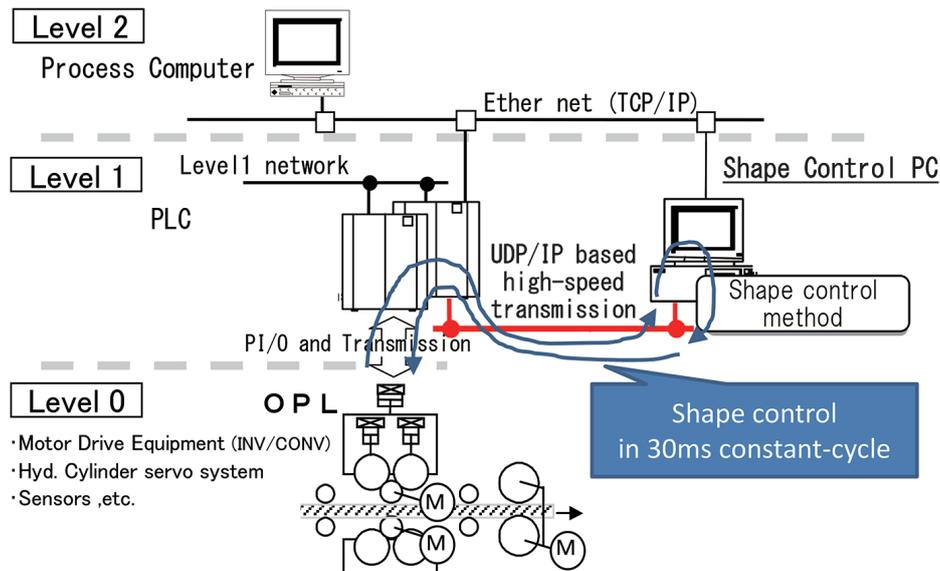


Fig.14 Example of the application of new real-time control system in Plate Leveler

	1960's	1970's	1980's	1990's	2000's	2010's
Management Priority	Productivity expansion	Energy saving, downsizing	High-mix low-volume production	Laborsaving	High quality, generation change	Globalization, eco process, advanced IT
Instrumentation	Point and intermittent sampling	Noncontact measurement	Hi-speed digitization	Multi-dimension, mass data analysis	Advanced sensing with machine learning	
Control	Data logger	Individual control	Quality control	Total automation	Optimization control	Intelligent automation, data-driven control

Fig.15 Trend of instrumentation-control technology

演算処理装置であるGPGPU (General Purpose Graphics Processing Unit) を用いて実装され、厚板セットアップ計算¹⁹⁾ や熱風炉の最適操業条件計算などで実用化されてきた。このほか超高解像度デジタル画像をリアルタイムで処理する計測技術の実用化など、ハードウェア・ソフトウェアの進化は鉄鋼製造プロセスのシステム制御技術を大きく変革してきた。

3 鉄鋼における計測制御技術の進歩

3.1 計測制御技術の変遷

鉄鋼製造プロセスは、その過程において物理的・化学的・熱力学的・冶金的な変化が混在し、相互干渉しながら進んでいくため、非常に複雑なダイナミクスを持ったプロセスである。また、鉄鋼における計測制御は、高温、高圧、多塵という悪環境下で実現していく必要がある。時々刻々と状態変化する物体を悪環境下で高精度に計測し、鉄鋼製品を安定的に大

量生産するために、新日鐵住金では、早くから高精度計測技術の開発と、物理モデル計算や制御理論を取り入れたプロセス制御技術の開発に取り組んで来た (Fig.15)。1980年代以降、2000年代にかけて、多様化するユーザーニーズへの対応、省エネルギー、更なるコストダウン要請に応えるため、計測技術は、点から面、立体へと多次元化し高精度化されるとともに、大量の計測情報を見える化する可視化技術も実現されてきた。また、制御技術では、個別機能制御から品質作り込み制御へ、さらには総合自動制御、最適化制御へと進展した。2000年以降、画像計測技術の進展、プロセス計測における先進センサの開発、先進センサを活用したプロセス制御技術、プロセスモデル高度化、アドバンスト制御応用、オンライン最適化技術、データモデリング技術などの開発が、活発に行われてきた。以下では、計測制御技術の近年の開発事例について記す。

3.2 画像計測²¹⁾

画像計測では、高温対象物を取り扱う上工程において、高炉羽口カメラの画像を2次元特徴平面上にマッピングする技術を用いた高炉羽口画像定量化技術²²⁾や、高炉から流出する1500℃の溶銑・スラグ混合流体の温度や流量などを熱画像 (Fig.16、Fig.17) から求める複合的な画像計測技術²³⁻²⁵⁾が開発された。

下工程の熱延ミルにおける画像計測では、仕上スタンド間の悪環境下で鋼板の蛇行量を高精度に測定する2次元カメラによるステレオカメラ方式蛇行計²⁶⁾ (Fig.18 左) や、LED光源により鋼板に投影されたパターンを計測して平坦度を計測するLEDドットパターン投影式平坦度計^{27,28)} (Fig.18 中央) が実用化された。

また、変調レーザ光源とTDI (Time Delay Integration) カメラという独自の光学系を用いて通常の光切断法に比べ10倍以上高速な連続形状測定技術²⁹⁾や、溶剂量定量化を目的と

した縦横光切断法による鋳片形状測定技術³⁰⁾も開発された。

3.3 先進センサを活用したプロセス制御技術

熱延ミルにおいて、独自開発した先進センサを活用したプロセス制御の例を Fig.18 に示す。

仕上圧延機の蛇行制御においては、スタンド間に設置したカメラ方式蛇行計 (Fig.18 左) を用いてモデル予測制御 (MPC : Model Predictive Control) (Fig.19) により鋼板尾部の蛇行を抑制する技術²⁶⁾が開発された。

仕上圧延機の形状制御では、仕上圧延機出口のLEDドットパターン投影式平坦度計 (Fig.18 中央) を用いて計測した鋼板の平坦度を対称成分と非対称成分に分解し、仕上圧延機のベンダ圧力とレベリングをフィードバック制御する形状制

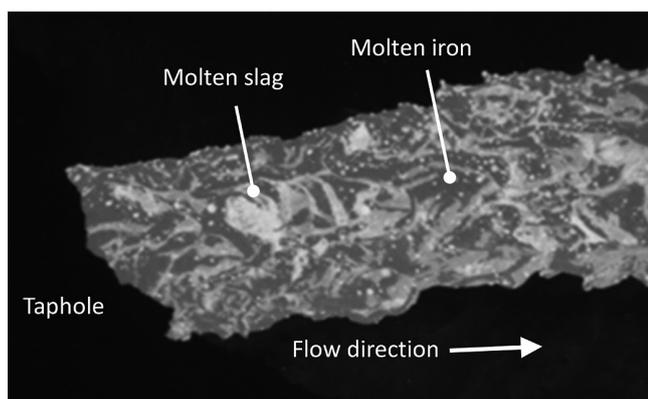


Fig.16 Example of thermal image of molten iron stream

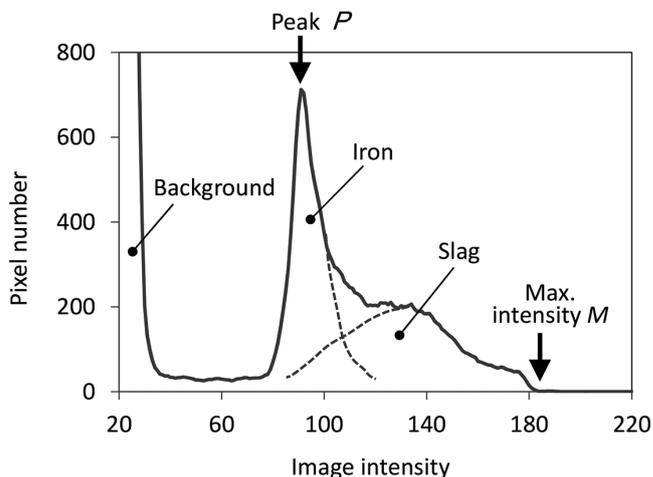


Fig.17 Histogram of thermal image

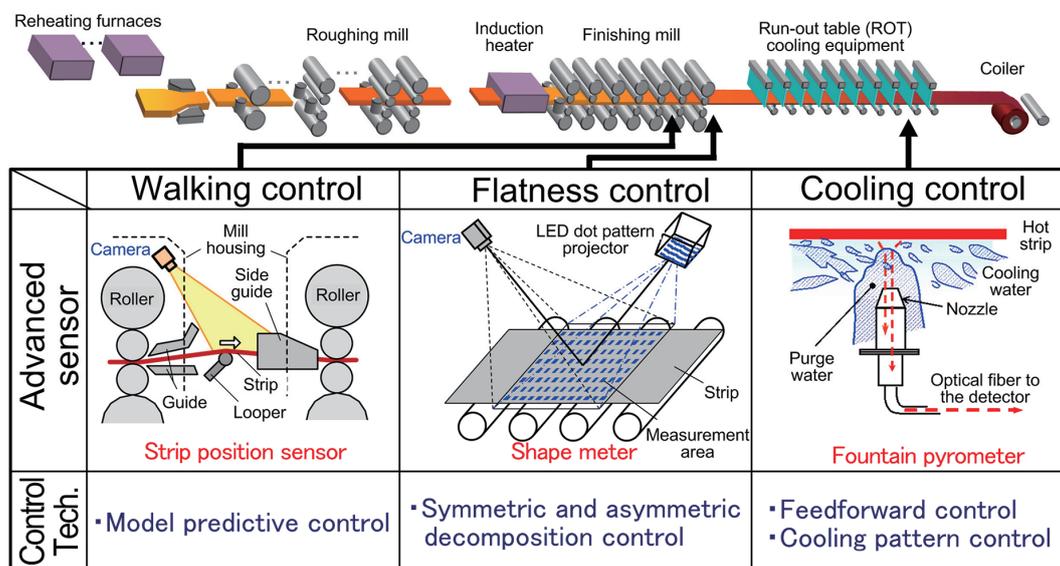


Fig.18 Development of advanced sensors and control technologies (Kashima hot strip mill)

御技術³¹⁾が開発実用化された。

また、新たな温度計測技術として、大量な冷却水が存在する熱延ミルのランアウトテーブル内において鋼板温度を高精度に計測できる温度計（ファウンテン・パイロメータ）³²⁾（Fig.18 右）が開発され、本温度計を活用した冷却制御技術³³⁾が実用化された。この技術は冷却途中の鋼板を测温し、サンプリング点（制御点）の巻取温度を予測しながら制御点を目標巻取温度とするように冷却水量をフィードフォワード制御するものである。ファウンテン・パイロメータは、巻取温度だけでなく、鋼板の冷却過程における急冷停止温度と中間急冷時間を狙い通りに制御するダイナミック冷却履歴制御^{34,35)}にも活用されている。

3.4 プロセスモデル高度化

プロセス制御では、製造設備の設定制御が生産性向上や品質向上に重要な役割を果たすため、設定制御モデルの高精度化の取り組みが行われて来た。熱延仕上げミルでは、分割モデルを用いた高精度オンライン板プロフィール予測モデル³⁶⁾が開発され、熱延ハイテン製造技術の高度化に寄与している。また、厚板ミルの加速冷却装置においては、数値流体解析とラボ実験に基づいて開発されたノズル噴流の水冷熱伝達モデルをもとにした高精度な冷却制御技術³⁷⁾が開発実用化された。

3.5 アドバンスト制御応用

アドバンスト制御応用としては、連続鋳造において、Qパラメータアプローチによる連続鋳造湯面レベル制御³⁸⁾が開発された。これは、既存制御器に自由パラメータQを含む

フィルタを配置し、系の感度関数に任意の周波数重みを重畳可能とするもので、周波数重みが外乱周波数を中心周波数とするノッチフィルタの特性に近づくように自由パラメータQを設計することで周波数レベル変動を低減するものである。また、冷延タンデムミルでは、一般化予測制御（GPC：Generalized Predictive Control）による形状フィードバック制御³⁹⁾が開発され、タンデムミルの形状工程能力の向上に寄与した。可逆式冷間圧延機においても、拡大最小2乗法によるARMAXモデル（Auto Regressive Moving Average model with eXogenous input）の同定方法を用いて板厚制御応答特性を同定する技術⁴⁰⁾が開発され、板厚精度の向上に寄与した。

3.6 オンライン最適化制御^{41, 42)}

オンライン最適化制御の例として、熱風炉を対象として、熱風炉制御シミュレータと最適化アルゴリズムを組み合わせることで、設備制約条件を守りながら熱効率が最大となる燃焼パターンを効率的に決定する手法について述べる。

熱風炉は、燃焼室、蓄熱室、ミックスチャンバー及びこれらを連結する配管で構成され（Fig.20）、熱風炉の操業では、燃焼期と送風期が周期的に繰り返される。熱風炉は通常3～4基設置されており、各々時間をずらして燃焼期と送風期を繰り返すことによって高炉に連続して熱風を吹き込む。

シミュレータは、熱風炉プロセスの伝熱や燃焼による動特性をモデル化した熱風炉プロセスモデルと、実機のプロコンと計装の制御機能をモデル化した熱風炉制御モデルの組み合わせで構成されている。

従来の燃焼制御方法では、燃焼ガスの流量及び温度は、通常、燃焼の開始から終了まで一定の目標値で制御されてい

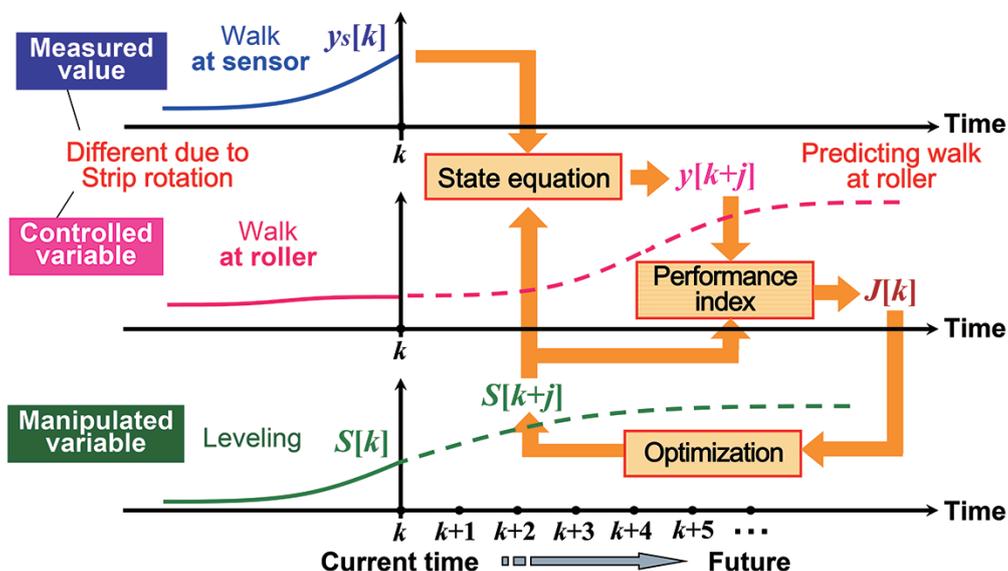


Fig.19 Walking control by using model predictive control

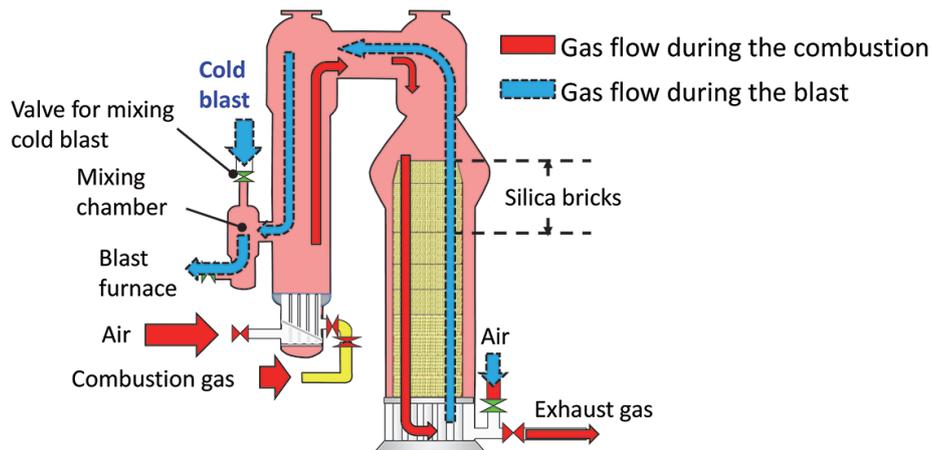


Fig.20 Image of hot stove

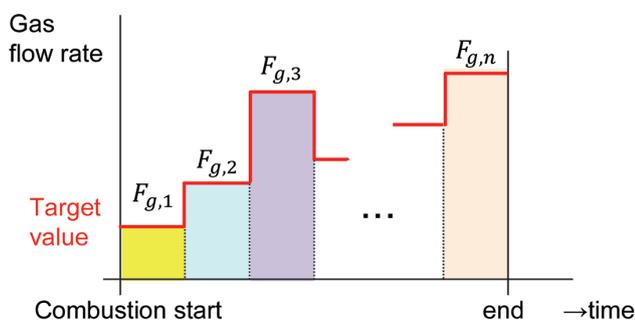


Fig.21 Combustion pattern (example of gas flow rate)

る。新たに開発した燃焼制御方法では、燃料ガス発熱量、燃料ガス流量、ドーム温度などの燃焼制御操作量の目標値を燃焼時間中に可変とすることを前提に、燃焼開始から終了までの時間を複数に分割し、各時間帯で異なる目標値を設定することにより1個の燃焼パターンを構成する (Fig.21)。

熱効率で定量化されるような制御性能を向上させる燃焼パターンを決定する問題は、燃焼パターンを変化させながら熱風炉制御シミュレータでプロセス状態量の時間変化を予測計算し、制御性能が最良となる燃焼パターン (以下、最適燃焼パターン) を決定する最適化問題となる。

Fig.22 に示すように、全体制御構造は、熱風炉制御シミュレータと最適化アルゴリズムから構成される。シミュレータを用いた燃焼パターン最適化は非線形最適化問題となり、最適化アルゴリズムには遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) を用いた。具体的には、1) GA で燃焼パターンの候補解 (個体) を生成し (Fig.23)、各個体を用いて熱風炉運転時のプロセス状態をシミュレータで予測する、2) 得られた予測結果で評価関数の値を計算し、評価値が小さい個体を選択した上で、残った個体に遺伝子操作 (交叉や突然変異) を行うことで、次世代のパターン候補解を作成する。以上の計

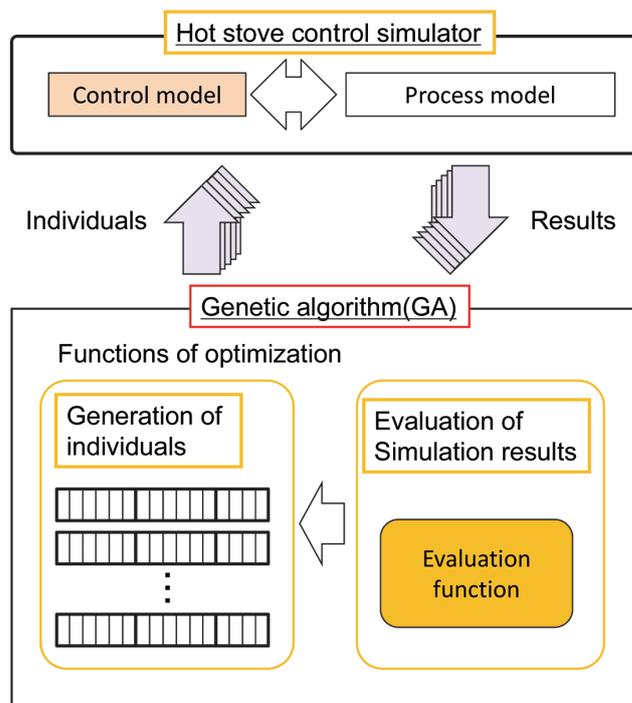


Fig.22 Structure of combustion pattern optimization

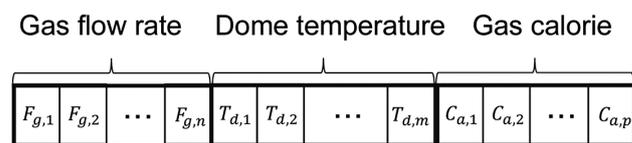


Fig.23 Example of an individual

算をGAの世代数分繰返し、評価値が最小となる解を最適燃焼パターンとして決定する。

最適燃焼パターンの一例を Fig.24 に示す。候補解の中から珪石レンガ温度の制約条件を満たした上で排ガス温度が最小

となる最適解が得られている。

本方法による燃焼パターンを用いて実機試験を行った結果、排ガス温度が従来制御より低下し、熱効率が向上した結果が得られた。本方法は、現在、新日鐵住金の熱風炉設備にて実用化されている。

3.7 データモデリング技術⁴³⁾

IT 技術、AI 技術の進歩を背景に、鉄鋼業においても、蓄積された大量データの解析に基づくプロセス改善が大いに期待されている。しかしながら、実際のプロセス改善を達成するには、原理原則に基づいて開発してきた物理モデルや、現場の操業知見との親和性の高い手法が求められる。以下では、物理モデルと統計モデルの強みを生かすデータモデリング技術について述べる。

3.7.1 物理モデルの統計モデルによる補正技術

物理モデルの誤差を統計モデルで補正し、モデルの予測精度を向上させる技術として、中径シームレス鋼管ミルの鋼管の収縮率予測を対象に精度向上に取り組んだ事例を記す⁴⁴⁾。

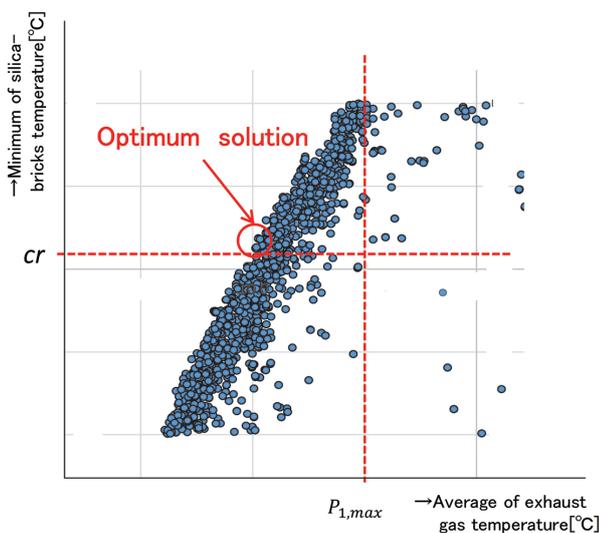


Fig.24 Candidates and the optimum solution

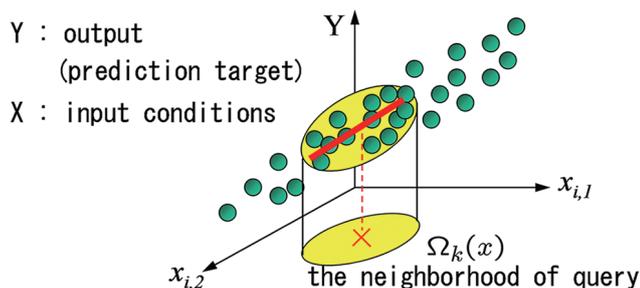


Fig.25 Case-based modeling

Fig.25 に、過去の経験値、実績値、入出力関係に基づいてプロセスをモデル化する事例ベースモデリング (JIT モデリング) の概念を示す。データベースに蓄積された過去事例の中から、クエリー (操業条件) の近傍に含まれる類似事例を抽出し、近傍内データの予測誤差を最小化する局所モデリングによりモデル出力を生成する。本対象では、従来の制御モデルの出力を活用した上で、残ったモデル誤差を事例ベースモデリングで予測することを考える。近傍設定の予測精度への影響を調べた結果を Fig.26 に示す。Fig.26において、(a) は補正を付加しない物理モデル単体の予測精度を表し、(b) は物理モデルの誤差を事例ベースモデリングを用いて予測し補正テーブル値を自動生成した場合の精度を表す。従来精度に対して、自動補正を付加することで予測精度が向上していることが分かる。また、近傍を広く設定した場合にはヒストグラムの山が緩やかになり (Fig.26 (c))、近傍を狭くすると急峻になる (Fig.26 (d))。近傍を狭くすると予測精度は向上するが、蓄積データに異常値が含まれている場合には悪影響を受け易くなるので注意が必要である。

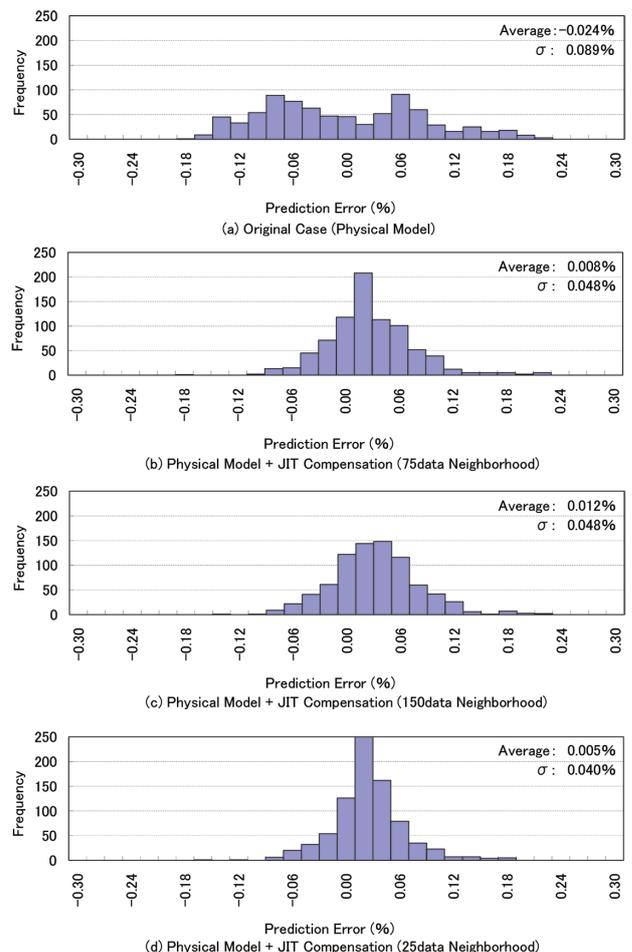


Fig.26 Relationship between setting of neighborhood and prediction errors

3.7.2 自動層別による統計モデル構築手法

鉄鋼製造プロセスにおいては、適切な物理モデルがない、もしくは物理モデルがあっても実プロセスへのパラメータ調整が難しいため、操業実績データから求めた回帰式などの統計モデルで制御モデルを作成しているプロセスも多い。統計モデルの多くは、製造条件などで層別した複数のモデルを用いている。しかしながら、層別条件などのモデル構築は、人の経験や試行錯誤に頼っているため、モデル調整の作業負荷が高く、製造品種の多様化などに伴う精度劣化が課題となっている。このため、過去の操業データを用いて、適切な層別を自動的に作成し、回帰モデルを構築する手法を開発した⁴⁵⁾。

本手法のモデル式を以下に示す。

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^M \hat{y}_i \Phi_i(\vec{u}) = \sum_{i=1}^M (w_{i0} + w_{i1}u_1 + \dots + w_{ip}u_p) \Phi_i(\vec{u}) \dots\dots\dots (1)$$

操業因子 $\vec{u} = (u_1, \dots, u_p)$ で構成される入力変数空間は、M個の局所領域に分割され、各局所領域では品質 y と操業因子 \vec{u} の関連を線形式でモデル化する。全体モデルは非線形の活性度関数 $\Phi_i(\vec{u})$ を重みとした各線形モデル $\hat{y}_i = w_{i0} + w_{i1}u_1 + \dots + w_{ip}u_p$ の和で表される。活性度関数 $\Phi_i(\vec{u})$ は線形モデル \hat{y}_i の寄与を表し、 \hat{y}_i が支配的な領域では1、ほとんど影響の無い領域では0に近い値を取り、任意の \vec{u} に対し $\sum_{i=1}^M \Phi_i(\vec{u}) = 1$ とする。Fig.27 は、2変数の空間を3つの領域に分割する活性度関数の例であるが、領域の境界が滑らかな活性度関数により、全体モデルも連続かつ滑らかな特性を表現することが可能である。入力変数空間の局所領域への分割は、全体領域から始めて任意の領域を2分割する方法の中から精度が良くなる分割を順次選択しながら、必要なモデル精度が得られるまで実施する (Fig.28)。

本手法を熱延ミルの仕上圧延時における幅変動予測モデルに適用した。幅変動予測値は粗圧延出側の目標幅に反映さ

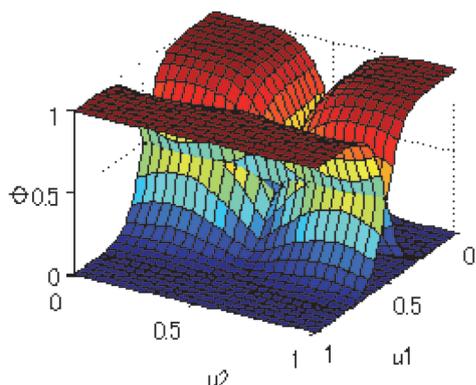


Fig.27 Example of weight function

れるが、粗圧延条件が決定される加熱炉抽出時点では、仕上圧延条件が不確定なため、物理モデルの適用が難しく、従来から重回帰モデル (材料により3区分) を使用していた。本手法を適用した結果、6つの局所領域 (M=6) からなるモデルを自動構築し、幅変動予測精度を8%向上させることができた。

4 インダストリー4.0 時代を迎えて¹⁾

2011年にドイツで提唱されたインダストリー4.0は、近年になって産業界への応用の期待が一気に高まっている。AIやIoT (Internet of Things) という言葉には期待感が先行しているためやや現実とかけ離れた意味合いが含まれるものの、これまで同様に計算機及びネットワークの進化が鉄鋼製造プロセスのシステム・計測制御分野を更に発展させることは間違いない。以下では、今後、鉄鋼製造プロセスにこれらの技術がどのように用いられて行くのか、について述べてみたい。

2016年のハノーバーメッセや2017年のCeBITなど、海外の展示会ではスマートファクトリの実現を目指した様々な技術が紹介されている。例えば、デジタルツイン (計算機空間上の現実の計算モデル) やCPS技術を用いれば従来は出来なかった製造に関する様々な情報を効率的に活用できるようになる。また、深層学習、仮想現実・拡張現実表示デバイス、第5世代移動通信システム (5G)、量子コンピュータなど、近い将来に現場活用が期待される多くの新技術が、自動運転やロボット技術等などの開発応用事例とともに紹介されている。

計算機の黎明期から一貫してその時代の最先端技術を活用してきたユーザーとして、鉄鋼製造プロセスの技術者はやや違った視点からインダストリー4.0を眺めるべきである。い

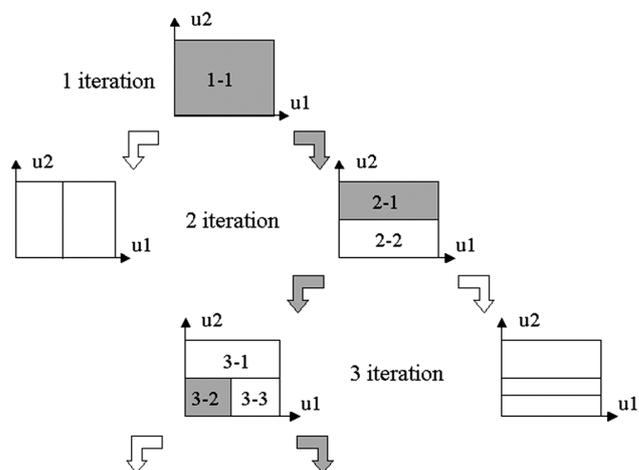


Fig.28 Partitioning of input variable space

いわゆるデジタルツインとは、制御の世界では規範モデルやシミュレータそのものであり、またCPSも古くから行われていたCIMの応用の延長の姿と言えよう。最近注目を集めている深層学習も機械学習の一手法であり、これも古くから鉄鋼製造プロセスで用いられていた数多の数学的手法の中の1つの拡張とみなせる。

一方、鉄鋼の技術フィールドにIT系の新しいメンバーが加わり解決手段の選択肢が拡大していること、及び参加メンバーの増加によりソフトウェアの開発効率を抜本的に向上させるツールや仕組みが自由に使えるようになったという事実は、鉄鋼製造プロセスのシステム・計測制御分野の進化発展に大いに役立つはずである。これまでアプリケーション毎に個別検討・製作していた技術開発用ソフトウェアも、様々なベンダが提供する汎用ソフトウェアの組合せで容易に構築出来るようになり、また計算機本体も個別のハードウェアを必要とせず超高速計算機を多くのアプリケーションで共有できるようになるであろう。またこれらに対応するためのシステム基盤技術、ソフトウェア基盤技術も進化して行くと思われる。

ますます高い精度や信頼性を求められる計測制御分野では、設計する技術者が因果関係を理解できることが重要であり、今後も当面は数学的手法に基づく仕組みが主流であろう。その上で計算機の能力を活用したデータ駆動型設計手法や、スパースモデリング・圧縮センシングなどのデータ活用手法を用いて大規模なデータを高度に効率的に活用する技術が実用化されてゆくであろう。これにより高精細なカメラ映像などの汎用入力デバイス情報からの多変量定量値の同時計測及び計測不能な物理量のリアルタイム推定や、複数のプロセスを跨いだ複雑な大規模制御系でのリアルタイムフィードバック制御が実現し、より高精度・高品質・高付加価値の鉄づくりが実現されてゆくと考えられる。

一方、近年の発展が著しい深層学習を用いたAI技術も一定の規模では鉄鋼製造プロセスへ応用されるであろう。過去の大量な操業データを予め学習しておくことで、システムが想定し得る範囲ではAIが人に変わり操業することが出来るようになる。一方、システムへの過度な依存にならぬよう注意も必要である。鉄鋼では1980年代の第2次AIブームの時代に様々なAIシステムを導入し活用してきた経験が有り、現在の第3次AIブームでの予兆診断や操業支援技術への展開でも、これまでの経験を活かし効率的で実用的な技術を確立してゆくことが重要である。

また、無線技術も近年急速に発展しており、その進展を注目すべき技術である。高速大容量無線通信や広域高信頼通信技術などを用いて大量にばら撒いた無線センサの情報を収集すると同時に、高性能計算機を用いた超高速演算処理でプ

ロセスの状態を把握出来るようになることで、従来操業オペレータが手間暇掛けて確認していた多くの作業は自動化されてゆくと考えられる。大容量データベースを用いて時系列情報を有効活用することで将来の変化の予測も可能となり、設備機器の不具合や設備稼働状態の変化、製品の品質指標の推移など、実際に不具合が顕在化する前に自律的に自動修正される技術も一つずつ確立されてゆくであろう。更に、個人に装着するデバイスを用いて作業員位置やバイタル情報を収集し安全見守りや作業を遠隔支援するシステムや、作業員の動きを分析し評価する技術などは既に新日鐵住金グループ内でも検証を開始¹⁶⁾しており、今後設備と人の動きを総合的に最適化するアルゴリズムも実用化されてゆくと考えられる。

5 結言

新日鐵住金におけるシステム・計測制御技術のこれまでの開発の歴史及び近年の取り組みを述べた。この分野は計算機技術の進化と切っても切り離せず、計算機技術の更なる進化による新しいデバイスの出現やソフトウェア技術、アルゴリズム技術の発展が、鉄鋼製造プロセスにおけるシステム・計測制御技術の役割をますます高めてくれるものと確信する。

参考文献

- 1) 吉沢一郎, 中川繁政: 新日鐵住金技報, 411 (2018), 2.
- 2) 米倉秀春, 河原健次, 増谷修, 福岡康夫, 網矢博昭, 松木純一, 脇阪信治: 製鉄研究, 336 (1990), 52.
- 3) 加藤正造, 安藤喜司夫, 安田隆春: 新日鐵技報, 341 (1991), 51.
- 4) 広浜茂, 久々宮明, 厚見直, 金本通隆, 吉田透, 上田裕二郎, 日野俊喜, 衛藤周次郎: 製鉄研究, 317 (1985), 25.
- 5) 服部正志: 新日鐵技報, 364 (1997), 1.
- 6) 長谷川明彦, 瀧文男: 製鉄研究, 339 (1990), 53.
- 7) 塩田久仁夫, 福島徹二, 関任利, 今田邦弘, 古牧育男, 古田和昭, 小野創, 後川隆文: 製鉄研究, 339 (1990), 1.
- 8) 小南秀隆, 内藤修治, 鎌田憲幸, 浜口千代勝, 田中健彦, 遠藤秀一: 製鉄研究, 339 (1990), 31.
- 9) 吉井寿昭, 山田稔久, 高橋重弘, 富沢正宣, 加藤正造: 新日鐵技報, 346 (1992), 23.
- 10) 町田精孝, 執行正謙, 伊藤正巳, 藤本潔, 伊藤伸一, 山本康弘, 浜本浩明, 中原昌彦, 赤松信夫: 第193回西山記念技術講座, (2007), 151.
- 11) 服部正志, 谷口政隆, 小野寺有司, 植山高次, 古野英樹, 蔵田喜輝, 大西忠治, 寺崎忠男: 製鉄研究, 339 (1990), 46.
- 12) 住田伸夫, 上之俊昭: 新日鐵技報, 379 (2003), 7.

- 13) 住田伸夫, 堤泰伸, 遠山治幸, 高橋政之: 新日鉄住金技報, 411 (2018), 16.
- 14) 堤泰伸: CAMP-ISIJ, 27 (2014), 794, CD-ROM.
- 15) 原田稔, 加藤健太, 深見慎太郎, 山下英隆: 新日鉄住金技報, 411 (2018), 25.
- 16) Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation: CeBIT 2017, Hannover, 2017-3, Deutsche Messe AG.
- 17) 空尾謙嗣, 星野毅夫, 山中祥史: 新日鉄住金技報, 411 (2018), 49.
- 18) 伊藤雅浩, 井上雅貴: 新日鉄住金技報, 411 (2018), 72.
- 19) S.Takeshima, M.Sakamoto, Y.Segawa, D.Nakagawa, S.Higashi, Y.Yamada and T.Otsuka: The 10th International Rolling Conference and The 7th European Rolling Conference, June, (2016)
- 20) 姫野文一, 安波利明, 伊藤洋平, 徳永三男, 清野等, 木村信一: 新日鉄住金技報, 411 (2018), 85.
- 21) 今野雄介, 伊勢居良仁, 杉浦雅人: 新日鉄住金技報, 411 (2018), 64.
- 22) 今野雄介, 杉浦雅人, 村松真臣, 道園紘行, 上瀧晴雄: CAMP-ISIJ, 27 (2014), 326, CD-ROM.
- 23) M.Sugiura, Y.Ootani and M.Nakashima: SICE Annual Conference 2011, (2011), 472.
- 24) M.Sugiura, A.Shinotake, M.Nakashima and N.Omoto: Int. J. Thermophysics, 35, (2014), 1320.
- 25) 杉浦雅人, 中嶋正人, 羽場隆介: 第57回自動制御連合講演会, (2014), 367.
- 26) 鷺北芳郎, 伊勢居良仁, 武衛康彦, 齊藤憲幸: 鉄と鋼, 95 (2009) 1, 43.
- 27) 加藤朋也, 中田武男, 大杉正洋, 伊勢居良仁: CAMP-ISIJ, 24 (2011), 888, CD-ROM.
- 28) 伊勢居良仁, 加藤朋也, 大杉正洋, 太田武: 鉄と鋼, 105 (2019) 1, (早期公開), doi: 10.2355/tetsutohagane.TETSU-2018-099.
- 29) 今野雄介, 内藤修治: CAMP-ISIJ, 18 (2005), 333.
- 30) A.Hibi and Y.Konno: CAMP-ISIJ, 30 (2017), 548, CD-ROM.
- 31) 太田武, 加藤朋也, 中田武男, 大杉正洋, 渡部敦, 伊勢居良仁: CAMP-ISIJ, 25 (2012), 352, CD-ROM.
- 32) 本田達朗, 植松千尋, 橘久好, 中川繁政, 武衛康彦, 阪上浩一, 高橋秀之, 木村和喜: 鉄と鋼, 96 (2010) 10, 592, CD-ROM.
- 33) 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) 8, 463.
- 34) 中川繁政, 橘久好: 計測自動制御学会論文集, 45 (2009) 4, 233.
- 35) 橘久好, 中川繁政, 植松千尋, 本田達朗, 辻村潤一, 松本和男: CAMP-ISIJ, 25 (2012) 2, 1026, CD-ROM.
- 36) 福島傑浩, 鷺北芳郎, 佐々木保, 中川繁政, 武衛康彦, 焼田幸彦, 柳本潤: 鉄と鋼, 100 (2014) 12, 1499.
- 37) 中川繁政, 橘久好, 角谷泰則, 原口洋一, 小林一暁, 中村修, 児嶋次郎, 磯部現, 矢澤武男: 計測自動制御学会論文集, 50 (2014) 6, 487.
- 38) 北田宏: 計測自動制御学会論文集, 39 (2003) 5, 487.
- 39) 安藤正樹: CAMP-ISIJ, 20 (2007), 305.
- 40) 鷺北芳郎, 角谷泰則, 木村和喜: 鉄と鋼, 90 (2004) 11, 941.
- 41) 高橋知子, 藤井章: CAMP-ISIJ, 29 (2016), 131, CD-ROM.
- 42) 藤井章, 藤井知子, 宮崎裕之, 伊藤雅浩, 本田基樹: 新日鉄住金技報, 411 (2018), 90.
- 43) 森田彰, 岩村建, 岸真友, 北田宏, 中川義明, 中川繁政: 新日鉄住金技報, 411 (2018), 96.
- 44) 岸真友, 木村和喜, 山本茂: 計測と制御, 44 (2005) 2, 116.
- 45) 森田彰, 和嶋潔, 坂部健太: CAMP-ISIJ, 26 (2013), 854, CD-ROM.

(2018年9月26日受付)