

鉄鋼生産における計測制御システムのあゆみ

服部正志

新日本製鐵(株)設備技術センター
システム制御技術部長

Masashi Hattori

Step of Measuring and Control System on Steel Production

1 変わりゆく鉄鋼生産システム

1960年代の半ばより日本における鉄鋼の生産量は飛躍的に増大し1980年代に至ってアメリカを抜いて自由世界最大の生産国となった。この飛躍的増大は計測制御システムを始めとする電子制御装置の発展に支えられた面が大きい。図1¹⁾に鉄鋼の生産性とドライブシステムを含む計測制御システムの発展を示す。

ドライブシステムはM-G (モーター・ゼネレータ方式) から半導体をもちいたサイリスタ・レオナード (直流電動機)、マイコンによるDigital-ASR (速度制御)、直近では高性能の交流可変速ドライブへと発展し電動機の大容量化と高速度制御性により大量生産・板厚精度向上に大きく貢献してきた。

多数のハードワイヤードリレー (機械的動作機構を伴う有接点リレー) とアナログ制御系で構成されていた工場の運転制御をつかさどる統括制御システムも70年代のプロセスコンピュータの出現により、電気制御 (E)、計装制御 (I) とプロセスコンピュータ制御 (C) で構成されるように

なった。さらに80年代になつてのマイクロコンピュータの急速な発展に伴って電気制御はシーケンス (順序起動制御) のみを扱うシーケンサー、演算機能を含むプログラマブル・コントローラへ、計装制御は多数の制御ループを1台で扱うDCS (Distributed Control System) へとソフト化していった。EIC各制御機能はそれぞれ個別な用途として開発されて来たため当初はEIC個別に完結する形態であったが、まず同一メーカー内でのEIC統合システムが実現し、その後、監視のみと限定された形ではあるが、EICが個別のメーカーの場合にもEIC統合システムが実現されるようになってきた。

これらマイクロコンピュータによる進化は操作監視機能の面でも著しく、無数のハンドルと速度調整バーニヤ (速度調節器)、アナログ・メーター類で構成されていた何mにもおよぶ大型操作盤もソフト化しCRTとタッチスイッチに変わりコンパクト化した。さきに述べたEIC統合システムの結果、運転操作者へEIC共通CRTによる総合情報提供が運転者により身近に、かつ密度の濃いものとなりワンマンオペレーションを推進してきた。このように、コンパクト

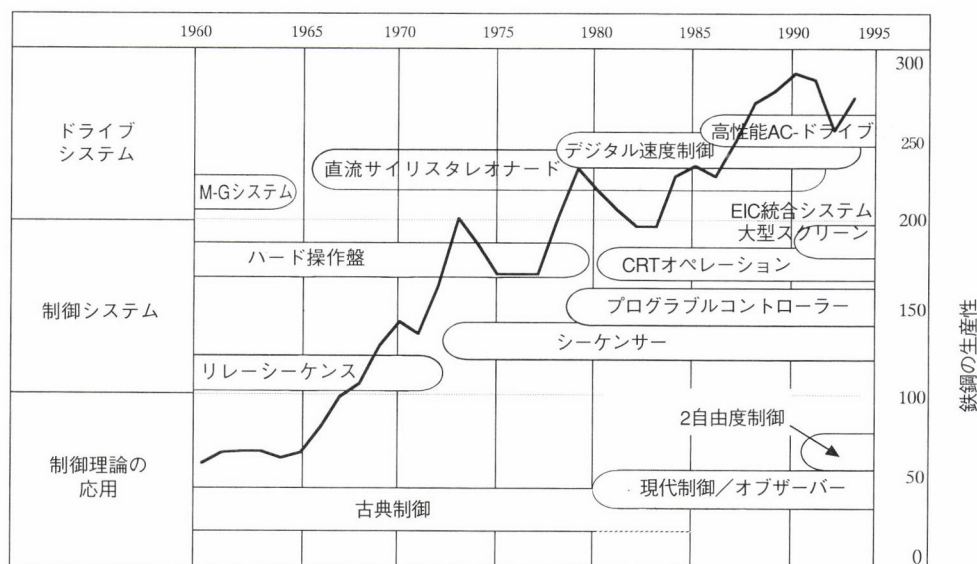


図1 鉄鋼の生産性とパワーエレクトロニクスの関係

ト化されたCRT操作盤と70インチの大画面表示で構成される操作室は従来の3K職場の延長にあった悪環境からリラックススペース、植木を配置したアメニティーを考慮した部屋へと大きく変革した。最新の運転室の様子を図2²⁾に示す。

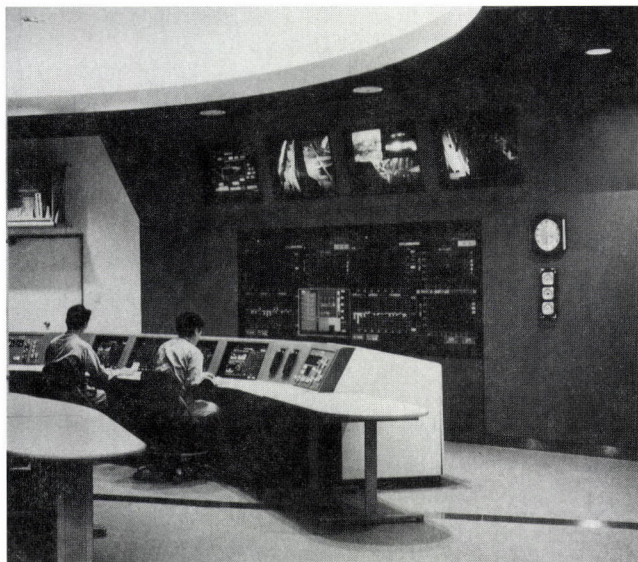


図2 最新の焼結運転室

以上、制御と監視・操作を含めた一連のEIC制御システムの発展の様子を図3³⁾に示す。この図でわかるように、現在ではハード機器のオープン化により、異なるメーカー間でもEIC統合が可能な形となり、より安価で高性能なEIC統合システムに変化しつつある。

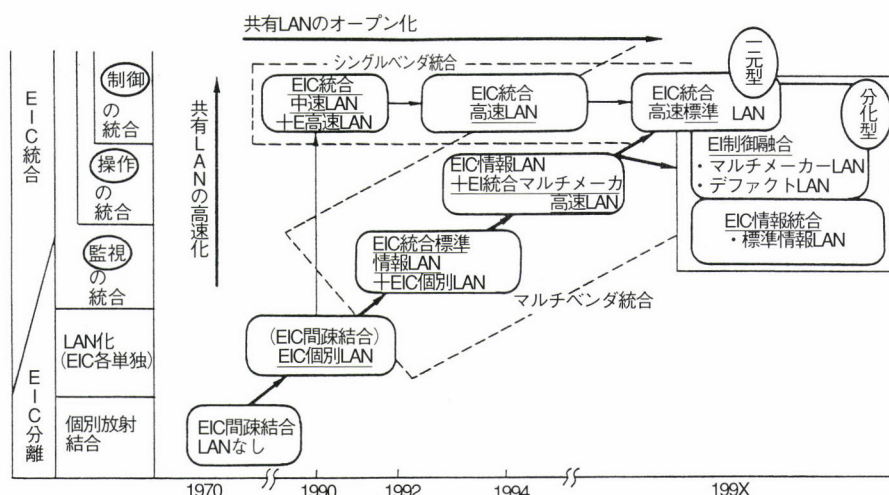
また、プロセスオートメーションの根幹の一つである計測の面にもエレクトロニクスの急速な発展は大きな影響を与えた。温度、圧力などの従来測定的主流を占めていた物

理量測定から、最近ではマイクロコンピュータの発展により、光による銅板からの膨大な反射光を高速で瞬時に処理し、銅板の形状、疵などの複雑な要素も測定出来るようになった。また、人間の頭脳に相当する制御の分野でも検出量、操作量が各1入力であったものが多入力化すると同時により安定的なロバスト制御に移行して制御の質が向上し、加熱炉の燃焼効率の向上などに寄与してきた。さらには人間の優れた機能により近い形であるAI、ファジィなどより知的制御なシステムが実現し、高炉などの大規模な情報システムを安定的に運転できるように成ってきた。本文ではこれらのなかより (1) 高機能ドライブシステム、(2) 表面疵検査装置、(3) 知能化する制御システムに的を絞って紹介する。

2 高機能ドライブシステムによる鉄鋼製品寸法精度の変革

製鉄プロセスの下流工程は金属ロールにより銅を成形・引き延ばしするプロセスといえる。この過程では金属ロールの回転が最重要課題である。ここではロールを回転させるドライブシステムの変遷とその効果を概観したい。

回転数を変化させて使用する電動機には古くから直流電動機が用いられてきた。直流電動機は供給電圧を可変することで回転数をかえることができる。昭和40年代までの直流電動機ドライブシステムは回転式の発電機と電動機の組み合わせ (M-Gセットと呼称) により回転数を可変するものであった。このシステムは発電機の界磁電流を変化させて発電電圧を制御するため急速な速度変動、負荷変動への追従が困難であった。さらに多くのスペースを必要とするものであった。昭和40年代にはいり半導体 (サイリスタ)



シングルベンダ統合；同一メーカーの製品による統合システム
マルチベンダ統合；異なるメーカーの製品による統合システム
デファクトLAN；事実上の標準となっているLANで例えばEthernetなど市場シェアをとることによって標準的となったLAN

図3 EIC統合システムの進化の二つの流れ

を用いた電力変換装置が発明され、昭和43年、八幡製鉄(株)棒鋼ラインに鉄鋼業界では始めて用いられて以来、その優れた制御性能により安定した運転が行える、さらに優れた速度応答性による寸法精度の向上が望まれる、その上、静止機器であるため従来の発電機の機械的摺動機構(コミュテーター)に於ける摺動子(ブラシ)の定期的交換からの開放による保守の革新的改善により以後の設備は、このサイリスタ式直流ドライブシステムにとってかわった。

サイリスタ式直流ドライブシステムは以後今日まで多用されてきたが、電圧発生制御ロジックにアナログアンプを多用しているため、アンプを構成する電子部品の経年変化により発生電圧が変動する(ドリフト)というトラブルが発生し、このドリフトを零とするための保守が必要となった。一方、時期を同じくして電子機器の発達が進んでおり、このドライブシステムの分野にもデジタル化が進み昭和56年に川崎製鉄(株)の冷延工場ですべて全デジタル速度制御装置が適用されている。このデジタル化によりドリフトの心配も無くなるとともに、故障時のデータもデジタル情報として大量に記憶出来るようになり保守性が大幅に向上した。さらに、デジタル化は制御量、操作量ともに小さなインクリメントのデジタル量で示すためにその値がアナログのような曖昧値でないため繰り返し精度の向上をもたらし、従来と比較してより精密な制御が出来るようになった。

近年まで直流駆動システムが鉄鋼圧延プロセスの主流を占めてきたが、最近の半導体の進歩、マイクロプロセッサの急激な進歩によりこの世界も一変することになる。

直流電動機は機械的整流機構(コミュテーター)により回転子の磁極の極性を切替えている。このコミュテーターは機械的ゆえに機械的摺動時に火花が発生する。切り替わり頻度が多いほど、また切替え電流が大きいほど火花が大きくなる。このため速度制御応答、電流制御応答を向上させようとしても整流の限界により希望数値まで向上できなかった。一方、圧延機のドライブシステムとしては薄鋼板の製品品質向上のため更に厳しい応答性を要求されてきた。直

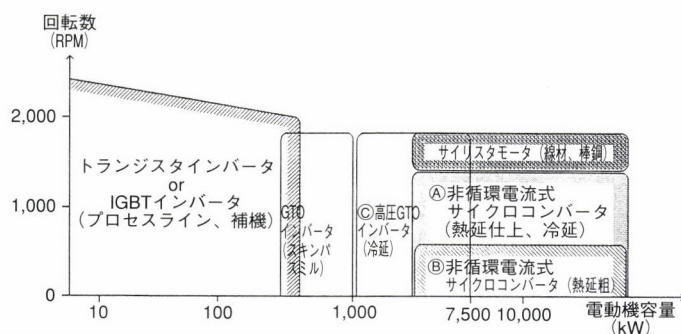


図4 鉄鋼業における交流可変速ドライブの適用範囲

流電動機にたいして交流電動機は回転数の変更が容易でないため一定回転であるポンプ・ファンなどにしか用いられていなかった。しかし、マイクロプロセッサがドライブシステムに適用されはじめて、従来は理論はあっても計算が複雑であるため現場機器として工業化できなかった交流電動機の可変速度化を可能とした。その方式は交流から直接交流可変電圧をつくるサイクロコンバータである。このドライブシステムは長年の直流可変速ドライブを凌駕する性能を持っていることが検証され、昭和61年に川崎製鉄(株)の冷間圧延機に初めて適用³⁾されている。以来多くの圧延機で多用され、いまでは、装置の性能、機械的堅牢さ、などにより圧延機駆動になくてはならないものになった。最近では応答性の高性能に加えて、電源品質(力率、高調波)の優れた交流ドライブシステムとしてGTO(Gate Turn off thyristor)インバータ方式の適用が盛んに成ってきた。これらの種々のACドライブシステムの適用範囲を図4に示す。

2.1 ドライブシステムが鉄鋼製造に及ぼす変革

自動車用鋼板、電磁鋼板などの薄板の板厚精度にたいする要求は近年ますます厳格化している、なかでも電動機の鉄心として使用される電磁鋼板は多数枚の鋼板を電磁氣的損失を低減するために積層して使用される、例えば0.8mm⁴⁾の鋼板を300mm積層するばあいだと375枚必要となる。この時板厚精度を0.5%とするとなんと板2枚分(1.5mm)もの積層厚の差が発生する。

このことを背景として、薄板を製造するプロセスである連続冷間圧延機における高性能ドライブシステムの適用効果を概観する。図5は連続冷間圧延機の3スタンド分をしめす、上下ロールの間隙は油圧圧下制御装置でまたロール周速度はミルモータの速度制御装置で目標値に制御される。

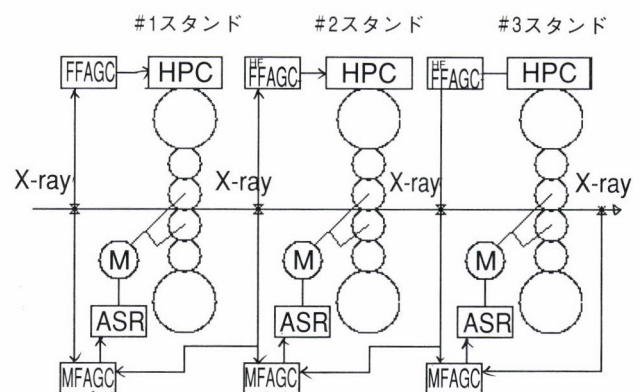


図5 連続冷間圧延機の制御システム
FF-AGC; フィードフォワードAGC
HF-FF-AGC; 高周波フィードフォワードAGC
MF-AGC; マスフローAGC
HPC; 油圧圧下装置
ASR; 速度制御系
M; モーター
X-ray; X線式板厚計

冷間圧延機はスタンド間の板に張力をかけた状態で圧延する。各スタンドのロール間隙で板厚をつくりだすことが基本であるが、熱延コイルの板厚変動、冷延ミル内各スタンドのロール偏芯などにより圧延中の鋼板に板厚変動が有るため、各スタンドの圧下、ロール速度による板厚制御により所定の板厚精度を確保する。連続冷間圧延機は各スタンドのロール間隙のみでなく張力の板厚にあたえる影響が大きいことが特徴である。すなわち図5の2スタンドのロール間隙を瞬間的に狭めると2スタンド出側の板厚は薄くなると想定できるが、じつは、2スタンドを圧下したことにより2スタンド入側の張力が増加するため、その張力の影響で2スタンド出側板厚は思ったほど薄くならない。これを補償するためには圧下による張力上昇分だけ2スタンドのロール周速を速めてやる必要がある。このために圧下装置と同時にロール駆動装置の速度応答性が重要となる。以下その効果について概観する。

当初の圧延機では圧下機構が電動機によるものであったため応答性が遅かった、またロール駆動装置もM-GSetであったため板厚精度は1.35%というレベルであった。油圧圧下装置が開発されてくると熱延コイルの板厚変動を消去するため最初のスタンドにのみ油圧圧下を適用した。これにより相当な効果がみられたが、厳格化する板厚精度要求には耐えられず、種々の板厚制御（AGC）が各スタンドに適用されるようになった。最近の圧延機は全スタンドに油圧圧下装置と全ロール駆動にACドライブシステムを適用するようになった。図6にミルモータの速度精度、速度制御応答の歴史的変化とそれに対応した板厚精度の関係を示す。M-G Setしかなかった昭和40年代前半までは板厚精度はせいぜい1.35%程度であったが、サイリスターレオナード装

置が出現すると1.0%に、デジタル化すると0.9%に、ACミルモータが出現してからは0.5%になんと当初の1/3にまで板厚精度が向上してきており、ドライブシステムの高性能化効果が明白である。

3 ますます知能化する制御システム

鉄鋼製造設備の頭脳部分である制御システムにおいては、当初は加熱炉の燃焼制御などのシングルループ制御としてPIDに代表される古典制御が使われてきた。その後一入力一出力の制御では全ての変動に対して十分な制御ができないとの発想から多変数をマトリクス的に処理する現代制御理論が鋼板厚み制御などに適用されて効果を発揮した。さらに、数理計画法による最適制御に加え、'80年代後半より熟練オペレータのノウハウのシステム化を狙ったエキスパートシステム(以下ES)や、プラントや制御系の非線形性を補完するファジィ制御、計測データのパターン分類等にはニューラルネットといった最新の手法を、実プロセスに適用してきた。

'90年代前半で人工知能を応用したシステムが新日鐵(株)一社だけでも100件を越えたが、最近では計算機能力の向上にあわせて、図7にしめすように、単一手法だけではなく各手法の特性を生かしたハイブリッド型で、ますます知能化した制御システムが増えている。また製鉄業はある一面で輸送業と呼ばれるほど、各工程内外に於て、多量で重い原材料、仕掛かり品、製品の物流搬送作業が多く、生産管理系を含めたトータルでのコスト最適化が図れる物流制御が着目されており、リアルタイムでの離散系シミュレーション手法や、組み合わせ最適化手法の研究開発が進んでいる。

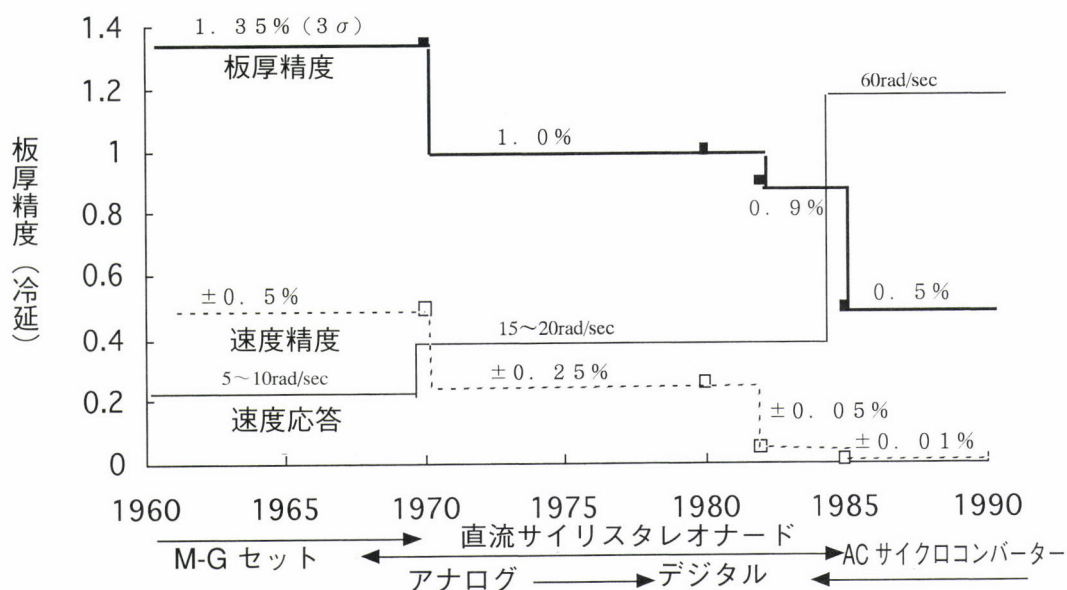


図6 冷延鋼板における板厚精度の向上とミルモーター性能向上の歴史

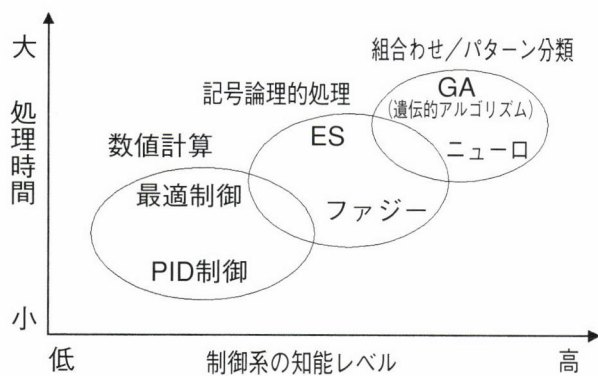


図7 知的制御技術の位置づけ

3.1 ES・ニューラルネット融合型高炉制御システム^{4),5)}

高炉プロセスは、高圧・高温下での熱化学反応で、内部状態を直接計測できないためプロセスのモデリングが非常に難しく、熟練オペレータの経験・勘への依存度が高かった。この高炉操業知識を普遍化し、操業の安定化を図るため制御型ESが開発されている。炉熱制御のための「短期管理」、時定数の大きい炉況の制御のための「中長期管理」、吹き抜け防止のための「極短期管理」から構成される。「短期管理」については98%以上の的中率を維持している。更に、微粉炭吹き込み量、送風湿分、送風温度等については直接ESによる自動制御を実現している。

高炉ESは、前記のESで全てのセンサ情報を判断できるようになった訳ではない。その一つが、ステープ温度の円周方向パターン、ゾンデによる半径方向のガス利用率パタ

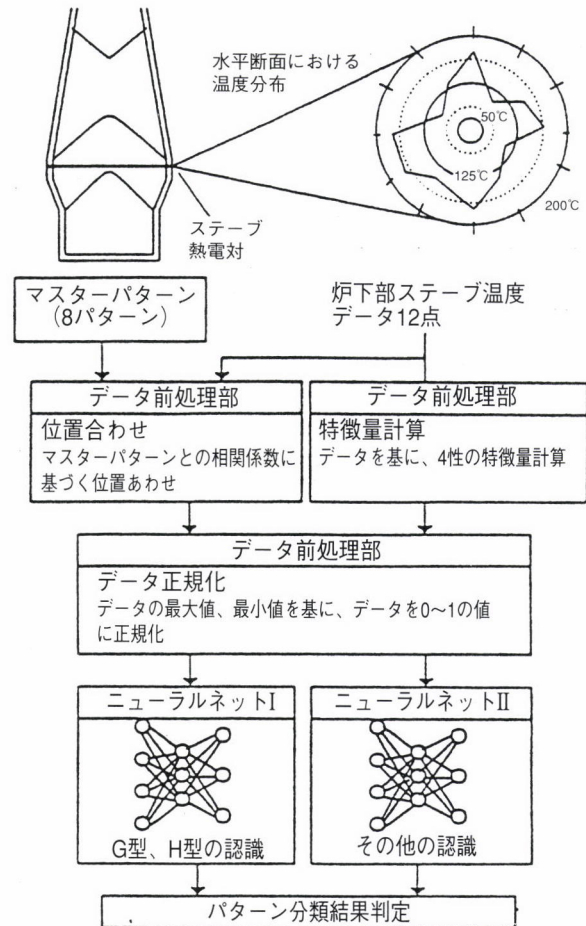


図8 高炉ステープ円周温度パターン分類

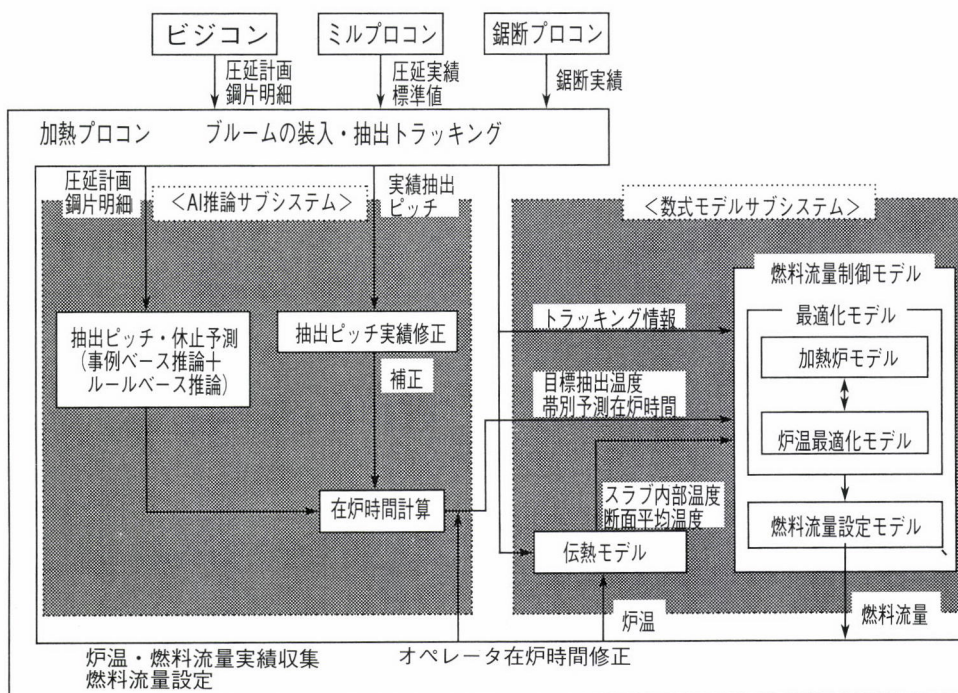


図9 型鋼 加熱炉燃焼制御システム

ビジコン；ビジネスコンピューター
…ブルームの材質、加熱温度指定、圧延計画などの生産管理を行うコンピューターシステム

ミルプロコン；圧延プロコン…ブルームの温度、寸法などにより決められた寸法となる様に圧延機に速度、圧下位置などの指令を行うコンピューターシステム

ーンといった視覚的に判断しているパターン分類である。熟練オペレータは、これらのパターンが過去のどのパターンに近いか直感的に判断し、炉内のガス分布や活性状況を推定し操業に役立てていた。この直感的に判断する機能としてニューラルネットを高炉ESの前処理として適用している。図8に示すように、ステーブ温度の測定結果を円周方向パターンに展開し、過去の事例にもとづいたマスター・パターンとの相関係数をとり円周方向における温度変化点の位置合わせ、円周方向12点の温度偏差など4種類の特徴量を計算した後、特性を変えて学習させた2種類の3層階層型ニューラルネットにより、8パターンに自動分類する。熟練オペレータと同等の認識率を達成し、高炉ESの適用率の向上に寄与している。

3.2 制御モデル・事例ベースES融合型形鋼加熱炉燃焼制御システム

加熱炉による燃焼制御は、伝熱理論にもとづく鋼材温度推定、炉温設定制御等で高精度化が進められてきたが、形鋼プロセスでは、頻繁に形替えや試圧延、予備材処理が行われるため、モデル計算の前提条件となる、加熱炉装入時点での各スラブ毎の抽出ピッチの正確な予測が困難であった。この抽出ピッチの予測にESを適用しようとしたが、従来のESのみでは、知識獲得負荷の増大、知識ベースの肥大化といった限界があるため、各操業フェーズ毎に抽出ピッチ予測に関する知識を事例データベースに登録し、オンラインで類似事例を推論により求める事例ベース推論を用いたESと、数式モデルによる燃焼制御モデルを融合した制御システムにより解決した。この方式だと、通常のESでルール数が数千と膨大になるところが約200で構築でき、知識ベース構築・保守の効率化が実現できた。この事

例知識ベースは、抽出ピッチに影響を与える要因を影響度1～5段階レベルで特徴づけ類似例の検索ができるようになっている。概略構成図を図9に示す。抽出ピッチ予測の実行手順は、図9に示すように、完全に一致していない過去の事例がなくても、類似事例の抽出が可能な手順になっており、新品種への対応が可能である。また事例学習機能により、経時的知識変化への対応と予測精度の向上を達成している。各スラブの加熱炉装入時点での在炉時間予測精度は10分以内で、加熱炉原単位向上と自動化実現が達成できた。

4 官能検査に近づく表面疵検査装置

鉄鋼プロセスの計測は、品質管理・自動化・設備監視を目的とし、その対象は溶鋼や鋼板の温度、スラブやストリップの寸法・形状から表面疵・内部欠陥と多岐にわたる。

一方、近年のエレクトロニクス技術の急速な技術革新は、主にコンピュータ処理の高速化・取り扱うデータ量の拡大を可能にした。この革新は、鉄鋼の計測制御技術にも計り知れない影響をおよぼした。特に鉄鋼製品の表面欠陥を検査する自動表面疵検査システムでは、センサ検出信号からの膨大な情報量にもかかわらず、画像処理技術の飛躍的な発達により、二次元的処理を即座に行うことができるようになった。

鋼板表面の疵欠陥はオペレータによる官能検査が主であり、物理定量的な指標が設定されていない。そのため自動疵検査装置のロジック判断した結果と基準となる人の官能判断とを合わせ込むという難しい問題が残る。これを満足させるためには、できるだけ得られた情報をもらさず有効

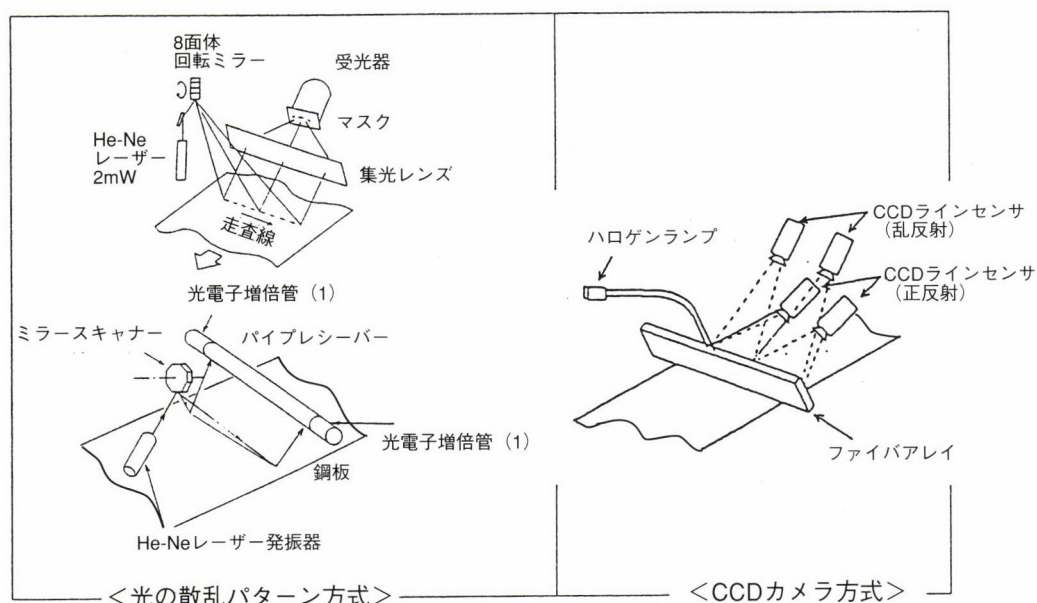


図10 疵検査装置の概略構成図

に活用できる超高速画像処理機能が必要となる。

これに対し、CCDカメラ方式（従来は光の散乱パターンを評価する方式が主）に加え、オブジェクト単位で疵種判定が可能な超高速画像処理装置を備えた疵検査装置が開発され、実機化されている。以下にこれらの新しい機能を有した疵検査装置を中心に最近の技術の紹介をする。

概略装置構成を図10に示す。撮像システムは投光部をハロゲンランプと光ファイバースリットで構成し、受光部をCCDラインセンサによる正反射光、乱反射光を受光する方式で表裏計8台で構成されている。微小疵検出のための高輝度化と画像サイズの細分化を狙っている。信号処理部は専用ボードとEWSで構成され①生波形に対する多重しきい値処理②オブジェクト単位の特徴量抽出、疵判定が可能なリアルタイム超高速画像処理機能を実現している。これらの機能はCCD型検出端の機械可動部がなく、全面にわたり均一なレベルの信号が得られるという利点との組み合わせにより、過検出レベルや疵検出性能の改善に大きく寄与している。また、下地のノイズレベル変化に対応する疵弁別レベルの自動設定や、ロール欠陥による疵や押し疵の様な周期性欠陥検出のための自己相関検出技術などが採用されるようになり検出能力の向上が図られる様になっている。

更に2モードの疵画像表示機能（疵のリアルタイム表示、すでに通過した疵の記録表示）、トレンドマップ表示（現在から過去における時間に対応した疵の量の変化傾向を表示する）機能によりオペレータの疵確認支援機能も大幅に強化されてきている。本装置を設置し、オンラインでの検出性能評価をしたところ図11⁶⁾に示すように検出率は97.1%以上で、かつ過検出率（無害疵を有害疵として検知した割合）1.6%と非常に優れた結果となった。

これにより、ほとんど目視不可能な広幅・高速通板時（検査幅2000mm,ライン速度0～580mpm）においても高い品質保証が可能となっている。こうした機能強化の結果、冷延・表面処理鋼板用の表面疵検査装置はその検出能を確実に向上させ、無人化ラインの実現に一步近づいた。今後、高温のため自らも光を発していることにより投射光との識別が難しい、熱間疵などへの適用対象の拡大と検査員の省力を確実にするためには、悪環境下においても高感度の疵検出が可能なシーズ技術の探索、及びコストパフォーマンスにすぐれた廉価な疵検査装置の実現への取組が必要である。

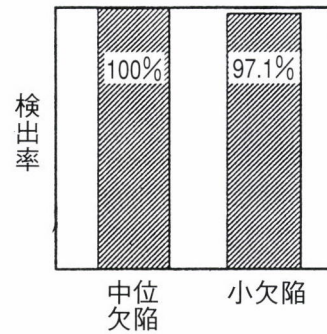


図11 鋼板表面欠陥の検出性能評価

5 まとめ

以上、鉄鋼の計測制御技術分野を代表する3つの技術テーマにまとをしぼって紹介した。これら計測制御技術をささえる共通技術としてはマイクロエレクトロニクスである。

最近のパソコンの発展にみられるようにこのマイクロエレクトロニクス分野はハード、ソフトともに爆発的な革新を継続している。このため計測制御技術分野も今後ますます革新していくものと確信している。われわれ鉄鋼の計測制御にたずさわる技術者としてはこの革新する計測制御技術を常に先取りして適用するとともに鉄鋼独自の分野に関するところは自ら開発することにより、一日も早い無人化工場の実現にむけて努力していきたい。本文が読者の参考となれば幸いである。

（図表のデータは、全国産業統計より計算したもの。）

引用文献

- 1) Azusa Tomiura;The Bread of Industry IPEC-Yokohama'95 Proceeding p.724
- 2) 白川芳幸、高橋俊博、中村誠、井上浩司、箴島恭一、磯野誠；マルチ映像を装備したマルチベンダーIEC統合システム；横河技報Vol.39(1995), No3, 4,p.170
- 3) 中北輝雄;次世代の鉄鋼システムの中における計装システムの姿;計装・9月号,p.76
- 4) 宮崎裕之、脇坂信治；AI技術の鉄鋼産業への応用;平成5年度電気学会産業応用部門全国,大会113巻12号, p.1344
- 5) 鉄恭秀、住田伸夫、脇坂信治ほか；パターン分類用ニューラルネットワーク構築支援ツールと鉄鋼での適用；平成5年電気学会全国大会
- 6) 田中宏幸、吉原敦；CCD超高速画像処理型疵検査装置のCAPLへの適用；「材料とプロセス」,Vol.8 No.2 (1995),p.370

(1995年10月20日受付)