

報などを主要な対象として具体的な研究を進めており、1994年から関係各社間によるEDIが開始されている。

このように、『鉄鋼EDI』は研究・構想期から実施フェーズへと進展してきたことから、鉄鋼ネットワーク研究会では、平成6年1月、これまでの研究会組織を発展的に改組、鋼材倶楽部・鉄鋼流通情報化委員会の下に『鉄鋼EDIセンター』を設置し、標準の整備・普及と鉄鋼EDIの促進に努めている。

### 5.2.5 今後の展望

鉄鋼における情報技術は、生産管理や本社の基幹系の業務に積極的に生かされ、鉄鋼生産技術進歩の一翼を担い、他の産業界にも少なからぬ貢献をしてきた。しかし、これは工場生産に直接・間接に関わる情報処理分野であり、マネジメン

ト層やスタッフの業務改革に積極的に貢献するシステムには残念ながら至っていないように思う。1992年頃からBPR<sup>11)</sup>がアメリカから言われ始めた。一方鉄鋼業界全体も業務改革が各社進行している。このことは、生産プロセスの生産性は世界最先端をいくが、スタッフも含めた生産性は、今後大いに改善の余地があることを意味している。そのためには、情報技術が、生産だけでなくスタッフの業務系にも高度に適用されるべきであろう。鉄鋼が、これまで得意とした生産管理や基幹システムなどの分野から、コンピュータの新しい利用形態(思考支援、グループ・コミュニケーション、DB高度利用など)へ今後さらに展開していくものと思われる。

<sup>11)</sup> BPR: Business Process Reengineering.

## 5.3 定着化する AI 技術

### 5.3.1 AI 技術のトレンド

「知識は力なり」—1980年代のいわゆる「AIブーム」は、E. Feigenbaum (Stanford 大学) のこの言葉から始まったといってもよいであろう。それまでの「人工知能」は、「論理計算」や「探索」など、どちらかと言えば理論的な領域にとどまっていた。しかし、「人工知能」を実用的な技術にするためには、適用分野の「知識」をコンピュータに集積することこそが重要だ、との主張のもとに「知識工学」という新しい技術領域も生み出された。それに伴い、数多くのエキスパートシステム開発のためのソフトウェアツール(AIツール)や、推論や知識表現に関する各種の手法が提案された。

鉄鋼業を初めとする生産現場には多くの「ノウハウ」が存在する。物理モデルやアルゴリズムにより十分にモデル化できない部分については、熟練した人間が最終的な調整、介入を行う—このような現実が、「人工知能」あるいは「知識工学」に対する人々の期待を大きなものにした。そして、鉄鋼のみならず、さまざまな分野で数多くのエキスパートシステムの開発が試みられた。

AIブームからほぼ10年たった今、「エキスパートシステム」は、問題をたちどころに解決する「魔法の技術」ではなく、むしろ、知識を見だし、検証し、記録し、整理・体系化し、そして標準化する、といった地道な「知識獲得」プロセスを支援するための技術である、との見方が広まりつつある。近年では、「知識ベースの開発」を効率的に行うための機械学習あるいは知識獲得支援技術への関心が高まっている。

一方、「AI」は、従来避けられていた「不良構造的」な問題の解決方法に関する研究の動機づけにもなり、エキスパートシステムに加え、ニューラルネット、ファジィ推論などの新技術の適用が積極的に行われた。例えば、制御においては、

これまで線形モデルに基づく線形制御が主流であったが、「AI制御」あるいは「インテリジェント制御」と呼ばれる分野では、制御対象の非線形特性や非定常といった、従来の理論的枠組みでは捉えにくいような問題に対して、AI技術の適用が試みられた。例えば、多層ニューラルネットワークやファジィ推論を用いた非線形特性のモデリングや制御に関する研究が関心を集めた。これらの方法は、従来の線形制御では対応が不十分であった課題に対する解決方法として注目され、高炉、焼結、圧延などの多様な分野で実用性の検証が行われている。また、工程計画における「組み合わせ最適化問題」のような、多大な計算が要求される問題を現実的な計算時間で解くために、遺伝子的アルゴリズム(GA)やシミュレーテッドアニーリング(SA)法といった新しい手法の適用が試みられている。

### 5.3.2 鉄鋼における AI 技術の適用

鉄鋼製造プロセスにおいて、1980年代中ごろから急速にAI技術の開発、実用化が進んだ。その要因は、以下のように大別される。

① マイクロプロセッサの発展と相俟って、高速・高性能の計算機が登場し、生産現場におけるAI利用の環境が整備された。

② エキスパートシステムとともにファジィ推論、ニューラルネットワーク技術の進展によって製鋼や圧延工程を中心に知識ベースシステムの応用、適用範囲が拡大した。

③ 高炉などの複雑なシステムの操業支援や系の非線形性を考慮した制御技術としてAI手法が製鉄、製鋼、圧延プロセスなどに適用され、安定操業、品質・歩留り向上に寄与した。また、製鋼、圧延工程などの大規模な工程計画問題にも適用され、短時間でこれらの工程計画が作成されるように

Table 5.1. AI applications in iron and steelmaking plants.

| Purpose  | Process   | Applications   | Year                                    | Method |       |       |                      |
|--|---|--|---|--------|-------|-------|----------------------|
|  |   |  |   | Expert | Fuzzy | Neuro | Others               |
| Operation  | Sintering   | System for guidance of sinter return rate                          | 1990                                    |        | ○     |       | Case based reasoning |
|  |   | System for prediction of sinter quality                            | 1991                                    | ○      |       |       |                      |
|  | Blast furnace   | Diagnosis of abnormality in blast furnace                          | 1986                                    | ○      |       |       |                      |
|  |   | Control of furnace temperature in blast furnace                    | 1987                                    | ○      |       |       |                      |
|  |   | System for supporting operation                                    | 1990                                    | ○      | ○     | ○     |                      |
|  |   | Guidance for burden distribution in blast furnace                  | 1991                                    |        |       |       |                      |
|  |   |  |   |        |       |       |                      |
|  | Continuous casting  | System for supporting tapping operation                            | 1992                                    | ○      |       |       |                      |
|  |   | Diagnosis of continuous casting operation                          | 1989                                    | ○      |       |       |                      |
|  |   | System for prediction of break out                                 | 1990                                    |        |       | ○     |                      |
|  |   | Diagnosis and prediction of product quality                        | 1992                                    | ○      |       |       |                      |
|  | Hot rolling   | System for supporting in cast scheduling                           | 1992                                    | ○      |       |       |                      |
|  |   | Guide for discharging from reheating furnace                       | 1989                                    | ○      |       |       |                      |
|  | Cold rolling  | System for diagnosis of cold rolling process                       | 1991                                    |        | ○     |       |                      |
|  | Continuous annealing  | System for inspection of surface defects                           | 1993                                    |        |       | ○     |                      |
|  | Shipping  | System for supporting shipment on carrying vessel                  | 1986                                    | ○      |       |       |                      |
|  | Energy  | System for supporting steam use                                    | 1988                                    | ○      |       |       |                      |
|  | Others  | System for diagnosis of cold rolling process                       | 1991                                    | ○      |       |       |                      |
|  |   | Diagnosis of benzene recovery                                      | 1992                                    | ○      |       |       |                      |
|  | Controlling   | Coke   | Control of heat combustion in coke oven | 1991   |       | ○     |                      |
| System for heat pattern recognition in sintering |   |  | 1991                                    |        |       | ○     |                      |
| Sintering  |   | Control of combustion in sintering                                 | 1991                                    |        | ○     | ○     |                      |
|  |   | Control of NO <sub>x</sub> concentration in waste gas of sintering | 1992                                    | ○      |       |       |                      |
|  |   |  |   |        |       |       |                      |
| Blast furnace                                    |   | Control of combustion in hot blast stove                           | 1993                                    |        | ○     |       |                      |
|  |   |  |   |        |       |       |                      |
| Converter  |   | Control of automatic distribution of LD gas                        | 1986                                    |        | ○     |       |                      |
|  |   | Control of level in gas holder                                     | 1989                                    |        | ○     |       |                      |
|  |   | Control of LD gas recovery   | 1991                                    |        | ○     |       |                      |
| Continuous casting                               |   | Control of molten metal level in mold                              | 1989                                    | ○      |       | ○     |                      |
|  |   |  |   |        |       |       |                      |
| Hot rolling                                      |   | System for dynamic setup in hot rolling                            | 1989                                    |        | ○     |       |                      |
|  |   | Control of coiling temperature                                     | 1991                                    |        |       | ○     |                      |
| Plate rolling                                    |   | Control of cooling bed in plate mill                               | 1991                                    | ○      |       |       |                      |
| Cold rolling                                     |   | Control of shape by coolant  | 1989                                    |        |       |       |                      |
|  |   | Prevention of interference between gage and tension control        | 1991                                    |        | ○     |       |                      |
|  |   | Prediction of rolling load by cold rolling setup model             | 1991                                    |        | ○     |       |                      |
|  |   | Dynamic shape control in cold rolling                              | 1992                                    |        | ○     |       |                      |
|  |   | Pre-set shape control in cold rolling of stainless steel           | 1993                                    |        |       | ○     |                      |
|  |   |  |   |        |       |       |                      |
|  |   |  |   |        |       |       |                      |
| Continuous annealing                             |   | AI system for operation of continuous annealing furnace            | 1993                                    | ○      |       |       |                      |
|  |   | Control of strip temperature in continuous annealing furnace       | 1993                                    | ○      |       |       |                      |
| Galvanizing                                      |   | Control of coating weight in hot dip galvanizing                   | 1990                                    | ○      |       |       |                      |
|  |   | Feedback control in galvannealing furnace                          | 1993                                    |        | ○     |       |                      |
| Shape rolling                                    |   | System for optimum sawing of shapes                                | 1985                                    |        | ○     |       |                      |
|  | Control of reheating furnace for shapes                     | 1992   | ○                                       |        |       |       |                      |
| Bar rolling                                      | Control of discharging pitch from reheating furnace of bars | 1989   | ○                                       |        |       |       |                      |
| Pipe making                                      | Control of induction heat input for electric pipe welding   | 1991   |   | ○      |       |       |                      |
| Others   | Control of iron oxide roaster                               | 1993   |   | ○      |       |       |                      |
| Conveying  | Plate mill  | Control of conveying of plate to cooling bed                       | 1989                                    | ○      |       |       |                      |
|  |   | Control of coil conveying  | 1989                                    | ○      |       |       |                      |
|  | Galvanizing   | Management of conveying and storage yard of coils                  | 1992                                    | ○      |       |       |                      |
|  |   | Control of finishing and conveying of billets                      | 1984                                    | ○      |       |       |                      |
|  |   | Operation planning of coil carrier                                 | 1990                                    |        |       | ○     |                      |
| Planning   | Raw materials   | Planning system for coal conveying in raw materials yard           | 1990                                    | ○      |       |       |                      |
|  |   | Plan-making system for layout in raw materials yard                | 1991                                    | ○      |       |       |                      |
|  | Coke  | Planning system for operation of coal screening conveyers          | 1991                                    |        | ○     |       |                      |
|  |   | System for weekly schedule making of continuous casting            | 1992                                    | ○      |       |       |                      |
|  | Continuous casting  |  |   |        |       |       |                      |
|  |   |  |   |        |       |       |                      |
|  | Hot rolling   | Supporting system for assignment of reserved slabs                 | 1989                                    | ○      |       |       |                      |
|  |   | Scheduling of roll shop  | 1993                                    | ○      |       |       |                      |
|  | Cold rolling  |  |   |        |       |       |                      |
|  |   |  |   |        |       |       |                      |
|  | Finishing   | Optimum combination of recoiling in finishing line                 | 1991                                    | ○      |       |       |                      |
| Shipping   | Planning system for operation in ocean liner wharf          | 1989   | ○                                       |        |       |       |                      |
| Pipe making                                      | System of allotting seamless pipes                          | 1990   | ○                                       |        |       |       |                      |
|  | Integrated system managing blast furnace to mills           | 1990   | ○                                       |        |       |       |                      |
| Others   | Cold rolling  | Failure diagnosis in hydraulic system of cold rolling mill         | 1989                                    | ○      |       |       |                      |
|  |   | Diagnosis system of cold rolling equipment                         | 1991                                    | ○      |       |       |                      |
|  |   | Diagnosis system of continuous annealing equipment                 | 1989                                    | ○      |       |       |                      |
|  | Continuous annealing  |  |   |        |       |       |                      |
|  |   |  |   |        |       |       |                      |
|  | Shapes  | System for quality designing of shapes                             | 1991                                    |        | ○     | ○     |                      |
|  | Pipe making   | Gain adjustment of hydraulic unit of Mandrel mill                  | 1990                                    | ○      |       |       |                      |
| Others   | Remote monitoring system of in house facilities             | 1988   | ○                                       |        |       |       |                      |
|  | Planning system for melting procedure in steelmaking        | 1991   | ○                                       |        |       |       |                      |

なった。

鉄鋼製造プロセスにおける主な AI 適用事例を Table 5.1 に示す。Table 5.1 は、日本鉄鋼協会「材料とプロセス」において公表されたものをもとに作成されている。

製鉄所での活用のされ方に基づいて、AI 応用事例を、

- 1) 操業支援システム
- 2) 搬送・物流制御システム
- 3) プロセス制御システム
- 4) 工程計画システム
- 5) その他

に分類している。

「操業支援システム」は、オペレータへの操業ガイダンスを行うことを目的とするものであり、高炉を初めとして上工程における事例が多い。「搬送・物流制御システム」は、物流制御ロジックにルールベース推論などの AI 手法を活用したものであり、コイル搬送を中心に活用されている。制御系に推論結果を出力するものは「プロセス制御システム」に分類されており、熱風炉、転炉を初めとして、連铸、圧延、連続焼鈍ラインにいたるまでの各工程で活用されている。「工程計画システム」には、組み合わせ探索などの OR 手法と AI 手法の融合を特徴としたものを集めており、適用対象は製鋼から圧延、精整ラインまでの工程計画問題に及んでいる。設備診断あるいは品質設計などは、「その他」に分類されている。

以下では、上記各々の分野における事例とその特徴を概観する。

(1) 操業支援システム

高炉に代表される複雑な反応を有するプロセスは、数式モデルによる系の記述が困難である。そのため、従来よりオペレータの経験とノウハウに基づく操業が行われてきた。1980年代後半には、熟練オペレータの不足に対応し、安定操業を確保するために高炉、焼結、転炉プロセスなどで AI を応用した操業支援システムが開発された。また、高炉では、ファジィ推論による炉熱変化の予測技術やニューラルネットワークを用いた炉壁温度分布などの認識技術が開発され、エキスパートシステムと合わせて高炉操業の知能化技術として体系化された。

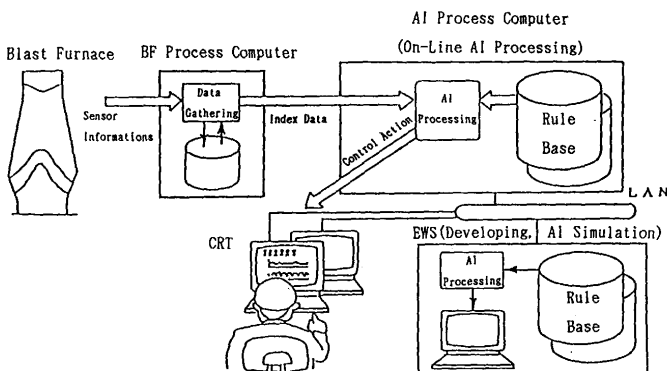


Fig. 5.9. Outline of expert system for blast furnace. (Kobe Steel Eng. Rep., 44 (1994), p. 10)

高炉操業支援エキスパートシステムの事例を Fig. 5.9 に示す。高炉では、操業の安定化のために炉熱を適正に維持することが不可欠である。そこで、炉熱変化を予測し、その予測値に基づいて送風温度の調節などの適切な制御アクションを取る必要がある。

炉熱変化の予測モデルについては、高炉内部の反応が非常に複雑であり、十分な精度をもつ物理モデルや統計モデルが存在しない。そこで、操業者のノウハウをルールベース化した推定・予測システムを構成した。推論処理にあたっては、柔軟性および高速性において優れたファジィ推論が用いられた。また、炉頂ガス温度分布データなどのデータ認識に、ニューラルネットワークの技術が応用されている。ニューラルネットワークによるデータ分類事例を Fig. 5.10 に示す。本事例は、炉況判断にニューラルネットのパターン認識能力を活用した事例である。すなわち、ガス成分やステープ温度の計測データが、あらかじめ学習された 8 パターンのいずれに該当するかをニューラルネットが判断する。

制御モデルについても、炉熱予測・推定システムと同様、熟練オペレータの経験と知見をルール化し、ファジィ推論手法が適用されている。このような予測モデルと制御モデルの組合せによる高炉炉熱制御システムは、鉄鋼各社で開発・適用され、高炉の安定操業に寄与している。また、操業支援に留まらず、最近では、自動制御システムとして運用される開発事例もある。

さらには、高炉操業支援の一環として、上記の AI 技術や事例ベース推論を用いた装入物の分布制御や出鉄作業ガイダンスなどのエキスパートシステムの開発事例が報告されている。

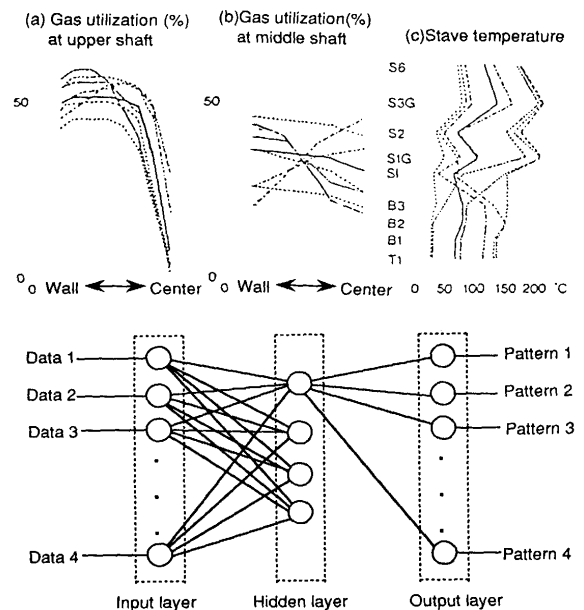


Fig. 5.10. Data classification using neural network. (101st Instrumentation and Control WG 101-1-1, ISIJ, (1990))

(2) 搬送・物流制御システム

製鉄所の物流・搬送ラインでは、従来、シーケンサの簡単なロジックによる制御が主流であったが、製造ラインの多品種少量化に起因して分岐・合流を含むラインの制御に高度な判断が必要となった。そこで、1980年代半ばより、種々の状況に柔軟に対応できるシステムとして、エキスパートシステムを用いた物流・搬送制御システムの開発が盛んとなった。エキスパートシステムの採用は、開発効率とシステムの保守性の向上にも寄与している。

① ビレット精整物流制御エキスパートシステム

ソフトウェアの生産性の向上、製品品質の向上を目的として、製鉄所の実ラインに初めてエキスパートシステムが導入された事例である。ビレット工場精整ラインは、圧延後のビレットの検査、手入れ、仕分けを行うラインである。手入れラインのレイアウトを Fig. 5.11 に示す。エキスパートシステムは、各ブロックごとのビレットの有無やグラインダー作

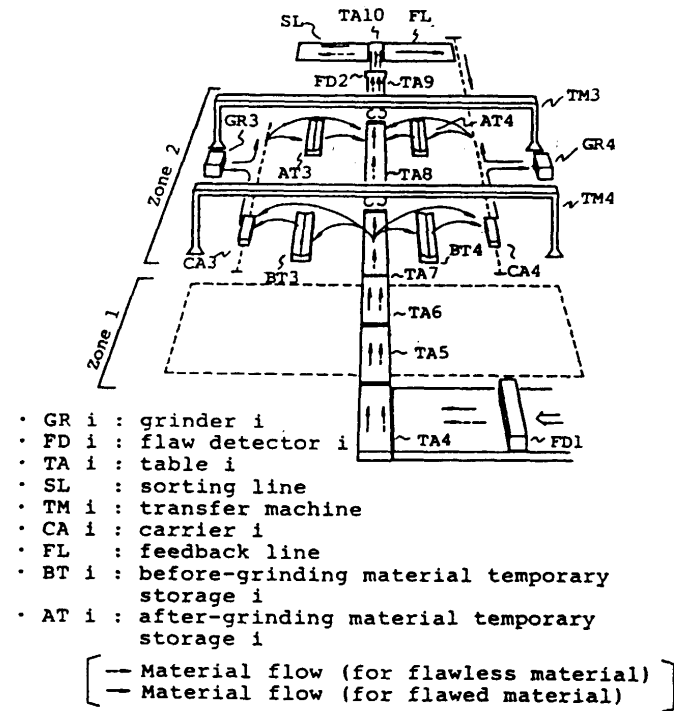


Fig. 5.11. Outline of billet grinding line. (Trans. SICE, 21 (1985), p. 1116)

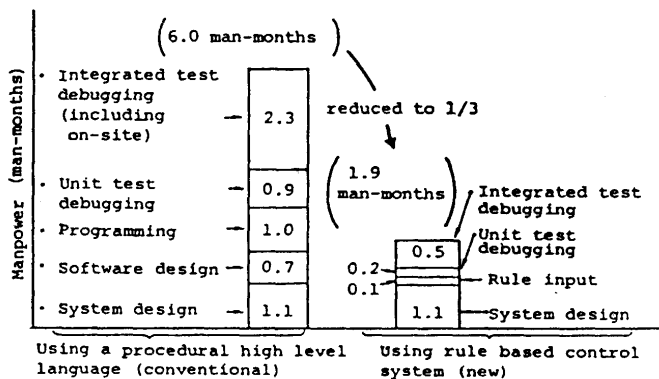


Fig. 5.12. Decrease of software development cost. (Trans. SICE, 21 (1985), p. 1120)

業の開始・終了時間などのプロセス状態の認識と、グラインダーによる手入れラインの自動化システムに対して、搬送テーブルの発信、停止などの制御指令を出力する。推論処理の高速化に関する種々の配慮がなされた結果、実機化が達成された。エキスパートシステムの適用によるソフト開発の工数低減効果を Fig. 5.12 に示す。ここでは、従来に比べて開発工数が 1/3 に低減できたと報告されている。

② EGL (電気メッキライン) コイルの搬送制御エキスパートシステム

EGLヤードは、CAL→EGL, EGL→CPL (梱包ライン) 間のコイル搬送基地の役割を持つ。本事例では、物流の変更、追加に対して容易に対応できるシステムを構築することを目的として、エキスパートシステムを適用した。実機のシステム開発において、ソフトウェアの生産性が極めて高いことが確認できたと報告されている。

(3) AIによるプロセス制御

圧延の寸法制御や連铸の湯面レベル制御などの動的制御の分野では、制御理論の応用によって制御精度が向上してきた。一方、AI技術は、系の非線形性に起因してシステムが不安定になることを防止し、適正な応答性を確保するための技術として期待されている。圧延の板厚制御の分野ではファジィ推論を応用し、圧延特性の複雑さや非線形性を考慮した制御システムが開発された。また、ストッパー方式の連铸機では、ストッパーの非線形特性を克服するため、ニューラルネットワークを用いたレベル制御システムが開発された。

① ファジィ推論による熱延の板厚制御システム

熱延仕上げミルでは、通板性や歩留りの向上を図るために、圧延材先端部の板厚制御精度の向上が重要課題である。仕上げミルでは、ミルセットアップ制御により、圧延理論に基づいたモデル式を用いて圧延前にロール間隙、圧延速度が決定される。しかし、圧延のモデルにはパラメータの推定誤差があるため、圧延時にミルセットアップの修正機能が必要となる。本事例のダイナミックミルセットアップ修正システムは、ファジィコントローラとコントローラの学習モデルで構成されている。制御システムの構成を Fig. 5.13 に示す。ファジィコントローラでは、中間スタンドのモデルによる圧

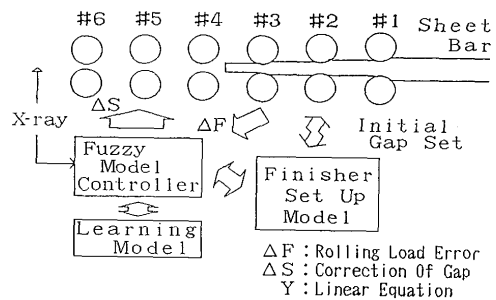


Fig. 5.13. Outline of thickness control system in hot coil rolling using fuzzy reasoning method. (103rd Instrumentation and Control WG 103-3-8, ISIJ, (1991))

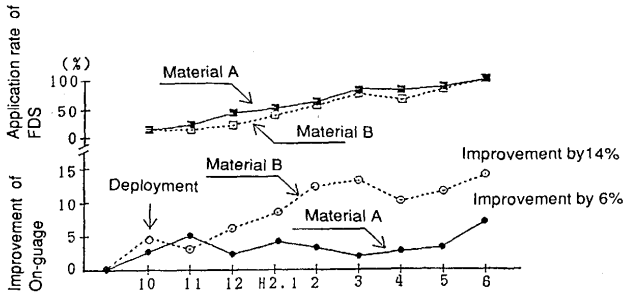


Fig. 5.14. Results of thickness control system in hot rolling using fuzzy reasoning technique. (103rd Instrumentation and Control WG 103-3-8, ISIJ, (1991))

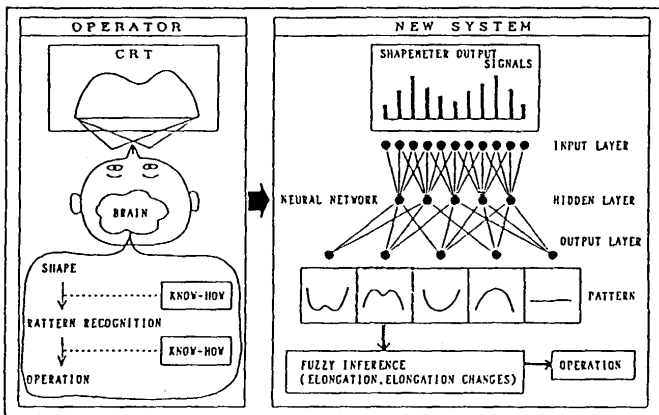


Fig. 5.15. Outline of AI shape control in cold rolling. (CAMP-ISIJ, 5 (1992), p. 1398)

延荷重の予測値と実績値の誤差に対してファジィ推論を適用して仕上げミル出側の板厚偏差を予測し、偏差が零になるように各スタンドのロール間隙をオンライン修正する。また、学習モデルでは、板先端部がミル出側の X 線板厚計を通過後に実績板厚偏差に基づいてロール間隙修正モデルのパラメータの逐次学習を行う。本システムの適用率と板厚精度管理範囲内の的中率の推移を Fig. 5.14 に示す。本システムの適用率の上昇に伴い、板厚精度管理範囲内の的中率が 6~14% 向上したと報告されている。

② AI を用いた冷延の形状制御システム

冷間圧延では、AI を用いた形状制御の事例が報告されている。ミル形式 (タンデムミル, 多段ミル) や操作端 (クーラント, 機械的操作端) の違いによりそれぞれ特徴を有しているが、その多くは形状検出器の出力をもとにしたフィードバック制御である。

タンデム圧延機の最終スタンドの 6 段圧延機に AI を適用した事例を以下に述べる。ここでは、ニューラルネットワークとファジィ推論の手法を用いて、ワークロールベンダと圧下位置の自動制御を行っている。本制御は、形状パターンの判定とその結果を用いた各アクチュエータの操作量の算出からなり、この制御ルールはオペレータの操作方法をもとに構築している。制御システムの概略図を Fig. 5.15 に示す。ニューラルネットワークによって形状のパターン判定を行っ

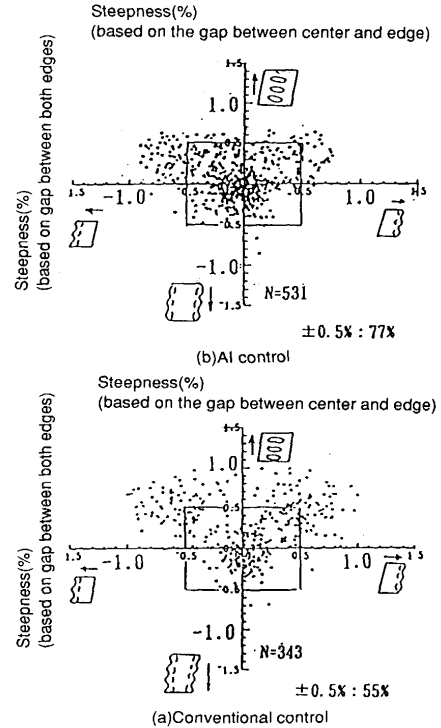


Fig. 5.16. Results of AI shape control in cold rolling. (Proc. 100th Memorial Symp. of Rolling Theory Comm, (1994), p. 98)

ており、圧延中の鋼板の形状が、事前に設定された代表的な形状パターンのいずれに最も近いかを判断する。判定されたパターンによって、使用するアクチュエータおよび現在の形状の大きさ (伸びの程度) を表す代表値の算出方法を決定する。例えば、判定された形状パターンが M 型であったなら、クォータ部とエッジ部の伸びの差、およびセンター部とクォータ部の伸びの差を形状の大きさを表す代表値とする。さらにその代表値の時間変化を求め、これらを変数としてファジィ推論の手法を用いて各アクチュエータの操作量を求める。この操作量演算機能は、各形状パターンごとにルールを持っている。また、形状の時間変化を考慮して操作量を決定しており、操作量の過不足がなく適切な形状修正を行うことができるとしている。以上の新形状制御システムの実機適用結果を Fig. 5.16 に示す。これにより本制御が従来方法に比べ形状のばらつきが約 20% 改善されていることが認められる。

(4) 知能化技術を応用した工程計画

製鋼や圧延の工程計画問題において、OR 技術にエキスパートシステム技術やファジィ推論技術を用いて設計者の経験や知見を反映させ、より短時間に最適計画を導出する実用的なシステムが開発された。

① 製鋼~圧延一貫スケジューリングシステム

本事例は、高炉~熱延までを対象に、日程レベルおよび実行レベルの作業計画を作成するスケジューリングシステムであり、次の三つのサブシステムからなっている。

A) 高炉~転炉間の各溶銑予備処理プロセスのスケ

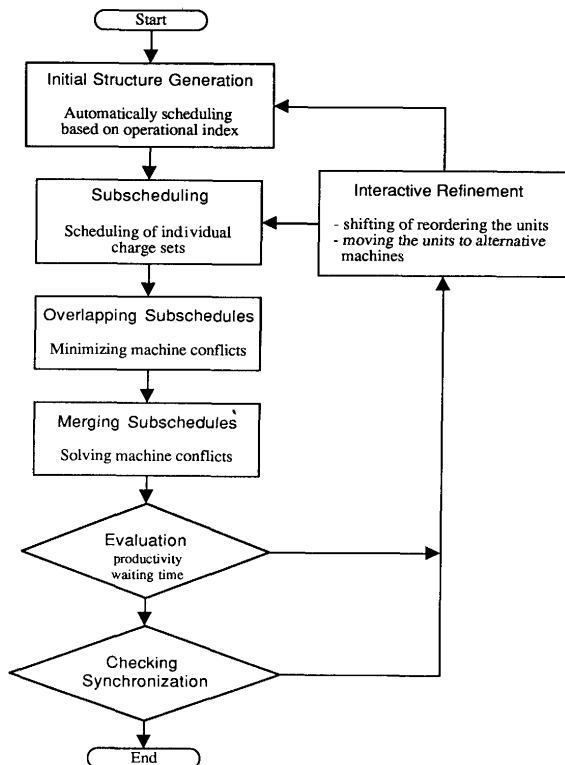


Fig. 5.17. Steel making scheduling flow. (Industrial Engineering for Iron & Steel Industry, 32 (1994), No. 3, p. 59)

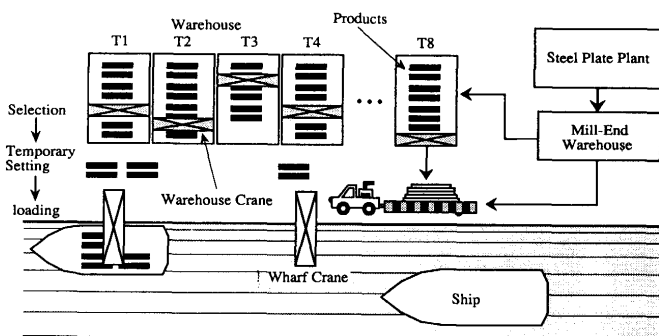


Fig. 5.18. Outline of steel plate shipping work on the wharf. (IEE of Japan, Technical Meeting on Metal Industry Div. Vol. MID-90 (1990), No. 1-5, p. 15)

ジュールと、必要な溶銑の種類と量を決定する溶銑スケジューリングシステム

- B) 転炉出鋼チャージ単位に転炉～铸造までのプロセスごと処理順序を決定する製鋼スケジューリングシステム
- C) 铸造される鋼片に対して、熱延加熱炉への挿入順序を決定するとともに、鋼片在庫量を予測する連铸～圧延スケジューリングシステム

本システムでは、オペレータとの対話性、あるいは操業に変動が発生した際の迅速な再スケジューリング機能を重視している。Fig. 5.17 に一貫スケジュール作成のフローを示す。まず、製鋼スケジューリングシステムにより、各連铸機での作業順序が 1) 連铸の生産量、2) ネックプロセスの稼働率、3) 直行率そして 4) 連铸機の優先率を考慮して自動編成される。

そして、必要に応じてオペレーターによるマニュアル修正がなされた後、各プロセスの負荷計算や溶銑処理設備の競合解消が行われる。この結果をもとに、溶銑スケジューリングシステムおよび連铸～圧延スケジューリングシステムが、溶銑需給バランスや圧延工程との同期化のチェックを行う。不具合な点があれば、再び連铸計画のマニュアル修正が行われる。本システムの適用により、計画作成時間の短縮（3 時間から 20～30 分）、操業変動時の迅速なリスケジューリングが可能になったほか、エネルギーコストの削減、設備の稼働率の向上などの効果が得られたと報告されている。

## ② エキスパートシステムを使った厚板出荷沿岸作業計画

出荷沿岸作業計画とは、出荷指令の出された製品群を岸壁に仮置した後、指定された船に積み込む作業のことである。Fig. 5.18 に出荷岸壁作業での作業状況を示す。本事例では、日々の出荷命令に対する製品の荷揃い状況や積み込み予定船の到着予定時刻をもとに、各船舶が使用する岸壁やクレーンの使い方、および未予約船の到着希望時刻を決定する。その際、各出荷品に付された雨濡れ不可などの取扱条件や納期、および船の大きさによる岸壁への接岸条件などが制約となる。また、船の停泊時間最小化やクレーン・倉庫の作業効率最大化などが評価指標として用いられる。本システムでは専門家が問題を解決する過程を探索木で表現し、分枝限定法、すなわち枝の生成（船の割り付け）と限定（不要な枝の生成の抑制）をノウハウを用いて効率化している。例えば、「現時点が船 X の最遅積み込み開始時刻の 2 時間前を過ぎていれば、船 X を最優先とする」というノウハウにより、納期制約を持つ船を早く割り付けることになり、探索が効率化される。

本事例の特徴は、ノウハウを活用するエキスパートシステム手法と分枝限定方法という OR 手法が融合されている点にある。本システムにより、計画精度の全体的向上、滞船料の削減などが実現できたと報告されている。

### 5.3.3 AI 技術の課題と展望

鉄鋼分野における AI 技術の応用事例について述べてきた。課題として、以下のような点が挙げられる。

まず、エキスパートシステムの一般的課題として、システムの開発、保守における高工数および高コストの問題がある。当初、エキスパートシステムは「プログラミング不要」であり「知識を入力するだけで動く」ので「開発が容易」との主張がなされた。しかし、実際に開発、運用を経験してみると、知識を抽出、体系化し、信頼性の高い知識ベースを開発するのは、多大な時間と労力が必要であることがわかった。この課題を解決するためには、ソフト開発の効率を上げるためのインターフェイス向上のみならず、不完全な、あるいは競合の存在するような知識のもとでの推論方法、また機械学習といった新しい AI 技術の進歩が必要である。

次に、実行速度に関しては、近年のハードウェア技術の進

歩は著しく、これがAI技術の実機適用を加速してきた。しかし、AIシステムと従来の情報あるいは制御システムの結合が進むにつれて、外部記憶容量や実行速度に対する要求は一段と高いものになっているため、ハードウェアのよりいっそうの進歩が望まれる。

制御分野においては、従来の制御理論では対応が不十分であった非線形あるいは非定常な特性に対し、AIは効果的であると考えられる。AI手法と制御理論を融合した技術により、制御精度を向上させ、よりいっそう自動化を推進できるものと期待される。

計画分野においては、大規模な組み合わせ問題を効率的に解くために、最適解に到達する過程を生物の遺伝子操作に見立てたGA (Genetic Algorithm 遺伝子的アルゴリズム) の適応が近年試みられている。また、計画問題においては、

トータルCIM化の発想が必要である。すなわち「最適」を考える視野を、各ライン、各工程レベルから、工場レベルへ広げていく必要があり、また、大規模システムである製鉄所における「最適性」の意味をその時々環境に応じて評価する必要もある。さらには、突発事象の生起時に、どのようにオンラインでリスケジューリングを行うかという問題もある。このように、局所的最適性を有機的に結合し、計画システムに柔軟性を持たせるためには、生物型あるいは自律分散システムといった分散型AIのアプローチも有効であろう。

製鉄所における自動化のいっそうの推進、制御精度向上によるコスト低減および品質向上を実現していくにあたって、AIは要素技術として重要な役割を果たすものと考えられる。今後いっそうの技術開発が期待される。

## 5.4 実用化する制御理論

### 5.4.1 制御理論の最近の動向

制御理論の発展の歴史について概観してみると次のようになる。

フィードバック制御の実質的な発端は産業革命時に現れた蒸気機関の调速機である。制御工学搖籃期における制御系に対する要求は運転の自動化と定常偏差の除去が主で、速応性の改善はハードウェアの改良によるということであり、制御系の補償動作は比例または積分で可調整パラメータはゲインだけという状況であった。理論的な研究としては、微分方程式で記述された制御系の安定判別法としてRouth, Hurwitzによる代数的条件が導かれた。

1930年代から制御対象が伝達関数で表現され、制御系の特性解析や安定判別が周波数領域で行われるようになり、安定性についてはゲイン余裕・位相余裕という評価規範ができるとともに、定常応答と速応性とを分離して改善する方法が明らかになり、位相進み・遅れ補償要素などを使って速応性の改善が行われるようになった。

1960年代に登場したのが現代制御理論である。そこでは制御系を連立した1階の微分方程式の組で記述される状態空間で表現し、これをもとに時間領域で制御系の解析・設計するものである。最適レギュレータ、オブザーバ、カルマンフィルタ、非干渉化制御、極指定などの制御系設計法、あるいは可制御性・可観測性やシステムの正準構造分解・最小実現など制御系の構造に関する理論など理論としては画期的な進歩を遂げた時期であった。しかしながら、実プロセスへの適用に関していえば、数少ない先進的な試みを除けば余り普及することはなく、工学としての有用性については懐疑的な印象を持たれた時期でもあった。

実用化を阻害した要因としては、理論研究において想定さ

れた実用上の要求がまだ現実の急務になっていなかったこと、実装技術が未成熟であったこと、数値計算法・CAD (計算機援用設計) といった環境づくりが不十分であったこと、さらに理論としても周波数領域での設計法を十分に包含できなかったことが挙げられる。

1980年代には周波数領域における設計法と状態空間における理論が融合した統一的な理論である $H^\infty$ 制御理論の構築が進められた。その発端は、1981年にZamesによって提案された $H^\infty$ ノルムを評価基準とする感度最小化問題である。 $H^\infty$ 制御理論により周波数領域における制御系設計を体系的に行う手法、ロバストな制御系を構成する手法が確立され、近年その実プロセスへの適用が進められている。

このほか、ロバスト適応制御、フィードバックと状態変数変換を用いた空間線形化による非線形制御、多重周期サンプル値制御、スライディングモード制御などが制御理論の最近の話題である。

### 5.4.2 制御理論の鉄鋼プロセスへの適用

日本の鉄鋼業は1960年代にいち早く計算機制御を取り入れ、自動化による生産性の向上、品質向上、歩留りなどの製造諸元の向上などの効果をあげてきた。さらに最近では高品質、多品種・小ロット、短納期など需要家ニーズの高度化に伴い制御技術の重要度はますます増加してきている。このような要請と相俟って、例えばタンデム圧延機のように本質的に多変数系として取り扱うべき対象が鉄鋼製造プロセスに多いこともあって、現代制御理論の適用が積極的に進められてきた。

ここでは、次の三つのプロセスを対象にした制御理論の適用例について少し詳しく述べる。

- CC モールド湯面レベル制御