



入門講座

制御技術編 - 3

人に学ぶ制御技術とその応用

藤井克彦

(株)神戸製鋼所 技術開発本部 常任顧問

Katsuhiko Fujii

Expert Control Technology and Its Application

1 人に学ぶ制御技術の登場と台頭

コンピュータの産業应用については過去2回の講座で紹介したように、60年代に入り積極的な活用が開始され、鉄鋼プロセスでも制御技術が驚異的な進展を見せた。しかし、非線形性や非正常性のある対象については制御理論の適用に限界があるため、制御技術者は制御理論の進展を待望しながらも、他の分野の研究成果の応用を模索し始めた。この間、人工知能の分野ではファジイ理論、神経回路分野で基礎研究が着実に進展しており、一般社会への登場が準備されている。80年代に入りコンピュータではカバーできない部分を補う形で知識工学（エキスパートシステム）技術の実用化を皮切りとして、各種技術の産業应用が試みられた。我が国の鉄鋼業でもエキスパートシステム、ファジイ論理およびニューラルネットモデル等応用人工知能の鉄鋼プロセスへの適用が開始された。応用人工知能による制御は、人間固有のノウハウや知識をモデル化し、有効に利用するとの観点に立っており、いわば「人に学ぶ制御」と言うことができる。今回は、産業で应用されている人工知能技術を概説し、鉄鋼のプロセス制御において、この技術がどのように活用されているかについて事例紹介を行う。

2 応用人工知能技術の概要

本章では、応用人工知能として代表的なファジイ論理、エキスパートシステムおよびニューラルネットワークについて概説する。

2.1 ファジイ論理⁽¹⁾

1973年にカリフォルニア大学のザデー教授が提唱したファジイ論理は、物事を1か0（白か黒）と割り切らず中間の状況を認めるもので、曖昧さを定量的に表現する方法を提唱している。ところで、人間は何事においても自己の判断をもとに行動をきめているが、同一の行為でも人それぞ

れに行動の内容に違いがある。ファジイ論理では曖昧さを含む自己の行動指針をファジイルールと呼ぶルールで表現する。以下ではファジイ論理を構成するメンバーシップ関数とファジイ推論について説明する。

(1) メンバーシップ関数

ファジイ論理ではメンバーシップ関数を用いて人の選好特性を定量的に記述する。メンバーシップ関数は、制御の基準となる評価値を0～1間の値をとる連続関数で表現するものであり、その関数の形により人の選好特性を表現する。図1(a)は人の体感気温をメンバーシップ関数で表した例である。図中のメンバーシップ関数の形は固定したものではなく、個人の好みにあわせて自由に設定すればよい。したがって、微妙な個人差を定量的に表現するのに大変便利である。また、確信度の形で評価するため、「大変暑い」、「少し暑い」、「あまり暑くない」などのあいまい表現もできる。

(2) ファジイ推論

ファジイ推論では、ファジイルールを参照しながら推論を行う。ファジイルールは『if (A), then (B)』の形をとる。ここで、(A)と(B)はそれぞれ、if文の条件部（前件部と呼ぶ）および、then文の条件部（後件部と呼ぶ）に対応する状態AおよびBのメンバーシップ関数の値（評価または確信度）である。与えられた入力に対しif文の条件が成立するファジイルールが抽出・参照され、then文に書かれている推論や命令が実行される。ファジイルールは多数用意されているため、参照時に該当するルールが複数個になることもある。この場合には、図1(b)に示すように、対応する複数個のルールの後件部の内容を総合的に判断して結論とする。

2.2 エキスパートシステム⁽²⁾

エキスパートシステムは1985年に第9回人工知能国際会議で、カリフォルニア大学のファイゲンバウム教授により知識工学の名称で提唱され、一躍世界の注目を浴び、AI

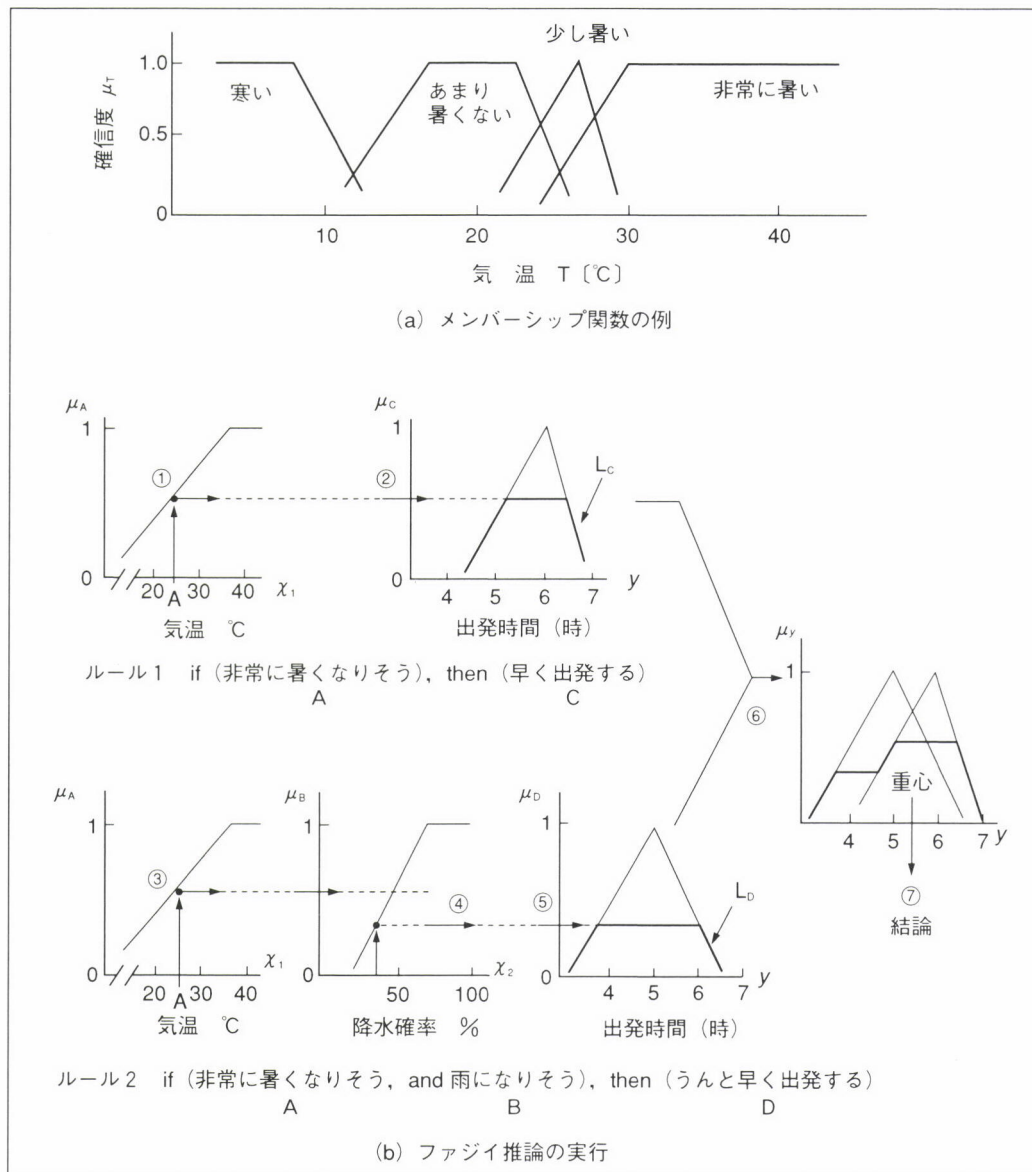


図1 出発時間を決定するファジィ推論

(Artificial Intelligence: 人工知能) ブームを引き起こした。エキスパートシステムでは、専門家や熟練者の知識・ノウハウをコンピュータに記憶させておき、必要な時に取り出し利用することにより専門家と同等の判断ができる。

(1) エキスパートシステムの構造

エキスパートシステムは図2に示すように、知識ベース、推論機構、ワーキングメモリ、情報提供・説明機構、ユーザインターフェイスから構成されている。知識ベースは専門家の知識やノウハウをルールやフレームの形に表現し、これを蓄積管理する部分である。フレームはMIT (マサチューセッツ工科大学) のミンスキー等により提案された知識表現の方法で図3に説明している。

図3の部屋はフレームモデルの属性値を変化させること

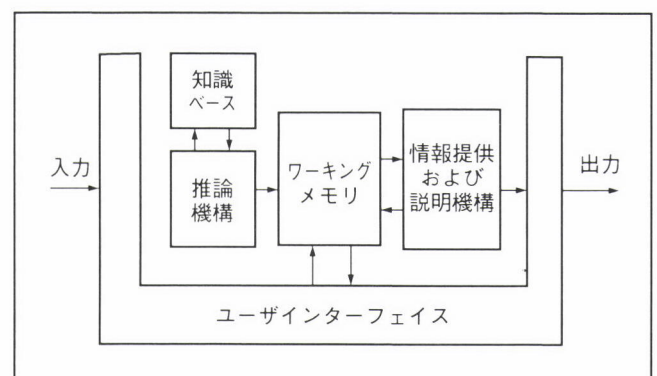


図2 エキスパートシステムの構成

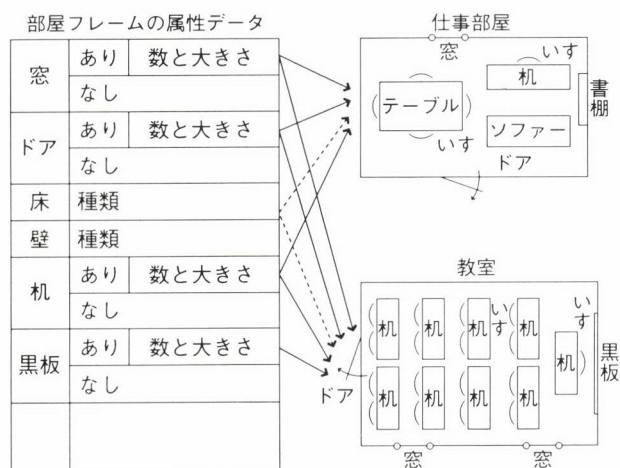


図3 フレームによる部屋の属性表現

によって、「仕事部屋」、「教室」、「応接間」等と定義することができる。**推論機構**は知識ベース内の知識と外部情報を用いて推論し、目的に合った結論を導き出す演算部分である。**ワーキングメモリ**は入力データ、推論の途中データを記録管理するメモリ領域である。**情報提供・説明機構**ではワーキングメモリに蓄えられた推論結果を、その結論が得られた理由や付随情報とともに提供する。**ユーザインターフェイス**はワーキングメモリや情報提供部のデータを読みだしたり外部情報をワーキングメモリに書き込むためのユーザ向け情報伝達手段である。ユーザインターフェイスには知識を追加修正するための知識登録機能を含む場合もある。

(2) 知識表現と推論

知識は大別して、メタ知識と呼ばれる共通不偏的な知識とオブジェクト知識と呼ばれる対象の問題に固有の知識から成る。**メタ知識**は知識を性格付けるカテゴリに対応し、**オブジェクト的知識**はカテゴリに分類された知識集合の各要素に対応する知識である。また知識はその性格により、浅い知識と深い知識に区別されることがある。**浅い知識**は表層知識とも呼ばれ、汎用性には乏しいが専門家の長年の経験を通じて獲得された経験則である。これに対して**深い知識**とは、物事の原理や対象の構造分析から導かれる汎用性のある知識である。

このような知識を表現する方法については多くの提案がなされているが、以下ではプロダクションルールについて紹介する。**プロダクションルール**による知識表現では、知識は『if <条件>, then <結論・行動>』のルールの集合として表される。ここで、条件部は複数事象の真偽評価の組み合わせから成る。たとえば、<体温が38度以上>で、かつ<頭痛がする>、または<せきが出る>のように、AND/OR論理の組み合わせで構成される。一方、結論・行動部は条件部が成立した場合に導かれるべき結論または行動を示してい

る。たとえば、<風邪の疑いあり(確信度=0.8)>・<風邪薬を飲め(確信度=1.0)>のようになる。エキスパートシステムでは、知識構造・表現形式に適した推論処理を実行する。ここでは、if-thenタイプの知識の推論処理である**プロダクションシステム**について説明する。プロダクションシステムの基本形を図4に示した。図に示すように、本システムは、①ルールのif部参照・判断、②ルールを用いた結論部の導出、③ルールの実行とその結論にもとづくワーキングメモリの更新を行う部分から構成されている。

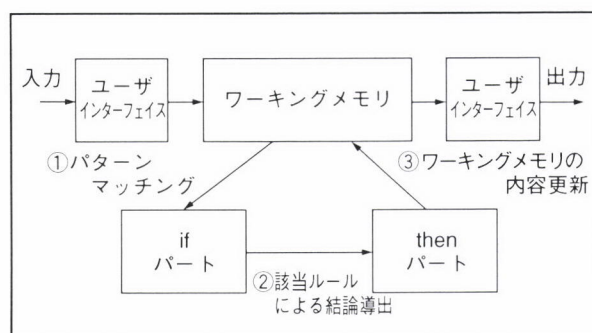


図4 エキスパートシステムにおける推論の流れ

2.3 ニューラルネットワーク⁽³⁾

ニューラルネットワークは生物の神経回路網からヒントを得たもので、その回路の実現形は1950年代にパーセプトロンとして提唱されていたが、1986年にカーネギーメロン大学のルンメルハルト教授が階層型ネットワークと逆伝搬学習則とを発表し、応用性の高さから注目を浴びるに至った。このモデルは、回路の結合荷重が学習により調節されることと、非線形特性が取り扱えることに特長がある。ニューラルネットワークは神経回路網に対応して多数のニューロンとニューロン同士を結合するアークおよびアークの通信容量に相当する結合荷重から構成される。最近では、階層型ニューラルネットワークだけでなく、相互結合型や繰り返し結合型等の種々のニューラルネットワークモデルが提案されている。

(1) 逆伝搬学習則階層型ネットワークモデル

一般的には、バックプロパゲーションモデルと呼ばれることが多い。このモデルはある入力データに対する好ましい出力データが分かっている場合に有効である。構成は、図5に示すように各ニューロンはネットワーク状の階層構造に結合しており、入力データは加工されつつ入力層から出力層へと伝達される。このモデルではニューロン同士の結合荷重を学習することにより、目的に合致したネットワーク構造を実現することができる。学習とは基本パターンのデータをネットワークに入力したとき、出力値が好まし

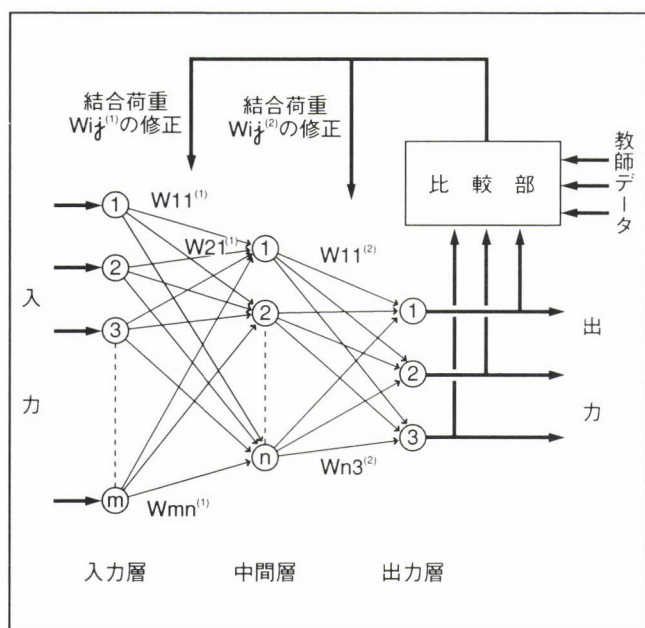


図5 バックプロパゲーションモデル

い値（教師データという）に近づくようにニューロンの結合荷重を修正することを言う。この修正方法は、出力値と教師データの誤差を上流側に逆伝搬させることからバックプロパゲーションと呼ばれている。

(2) その他のネットワークモデル

前述したバックプロパゲーションモデル以外にも、種々のネットワークモデルが提案されている。その中でも比較的よく用いられているモデルとして、自己組織化特徴ネットワークモデルとホップフィールド型ネットワークモデルがある。前者は開発者の名を冠してコホーネン型ネットワークモデルと呼ばれることがある。これは、入力データが全てのニューロンに伝達され、ネットワーク自身が閉じた相互結合型のもので、ばらばらのデータを自動的に層別する機能がある。後者は対象の特性を表すエネルギー関数をネットワーク回路で表現し、その極値への収束を自動的に行わせるもので、スケジューリング問題で実用化されている。これらの内容については文献を参照されたい。なお、これらのネットワークモデルでは、前述のバックプロパゲーションモデルが教師データを用いニューロンの結合荷重を学習する「教師付き学習」であるのに対し、入力データをネットワークに与えれば、ネットワーク自身が結合荷重を学習する「教師なし学習」が行われる。

3

人工知能技術を用いた鉄鋼プロセスの制御事例

以上に述べた各種知能化技術は鉄鋼の各プロセスの制御で利用されている。以下では、当社におけるこれら技術の

適用事例を紹介する。

3.1 ファジィ・エキスパートシステムによる高炉炉熱制御⁽⁴⁾

一貫製鉄所では高炉が休むことなく銑鉄を生産し、下工程に銑鉄を供給し続けている。したがって、高炉の安定操業維持は製鉄所運営のきわめて重要な課題である。高炉操業では、炉熱の安定化が要求されるが、高炉はきわめて高温かつ大規模な分布系であるため、炉内の状況を計測することが困難である。

このため、炉口部での排ガスの温度・圧力分布、炉外壁部温度計測等の外層部情報で炉内状態を推定し操業している。高炉の炉熱変化は炉底から排出される溶銑の温度で推定できる。炉熱の安定化のためには溶銑の温度変化を予測し、これを一定に維持することが必要である。高炉の炉熱形成のメカニズムについては冶金反応工学的に研究され、溶銑温度の変化に及ぼす各種操炉要因の影響が明らかにされている。すなわち、長期モデルと呼ばれる比較的緩やかな溶銑温度の変化について、予測モデルが開発され炉熱の安定化に使用されている。ところで、炉内では長期に亘り形成された炉内付着物が剥離し落下したり、送風の局所吹き抜けにより炉内反応が急変することがあり、これに対する診断と対応が必要である。

(1) ファジィ推論による炉熱診断

炉熱診断には操業者の定性的な評価に基づく部分があり、ファジィ論理の適用が有効である。炉熱診断用ファジィールの一例を以下に示す。

(ルールi)

if <(ソリューションロスカーボン量が少し高い)>
and <(炉頂ガス中 N_2 (%) 量が低い)>
then <(炉熱は少し低い)>

このように、測定量に対して「少し高い」や「非常に低い」等の曖昧表現を含んで診断ルールが記述されている。このような複数の診断ルールを組み合わせ総合的な炉熱診断を行っている。

(2) 炉熱制御エキスパートシステム

通常、熟練操業者は計測データから診断した炉熱だけでなく、そのときの炉況、設備条件、生産計画などを総合的に判断して炉熱調整のアクションを行っている。炉熱アクションを行うための操業知識の種類を以下に示す。すなわち、①炉熱調整が必要と判定された場合、現在のタイミングでアクションが必要か否かを判定する知識、②アクションが必要と判定された場合、どのアクション手段が最適かを選択するための知識、③炉熱診断の結果に適合したアクション量を決定する知識である。以上に述べた炉熱の診断

および制御方法を用いた炉熱制御システムの構成を図6に示す。本システムは炉熱の自動制御を行うものではなく、ファジイ論理による炉熱の診断結果と、エキスパートシステムによる炉熱の制御ガイダンスとを示すものである。本システムの適用結果を表1と図7に示す。表1は実アクションとガイダンスの対応関係を示したもので98.1%と良好な対応を示している。また、図7に示すようにエキスパートシステムの適用により溶銑温度が安定に推移していることが分かる。

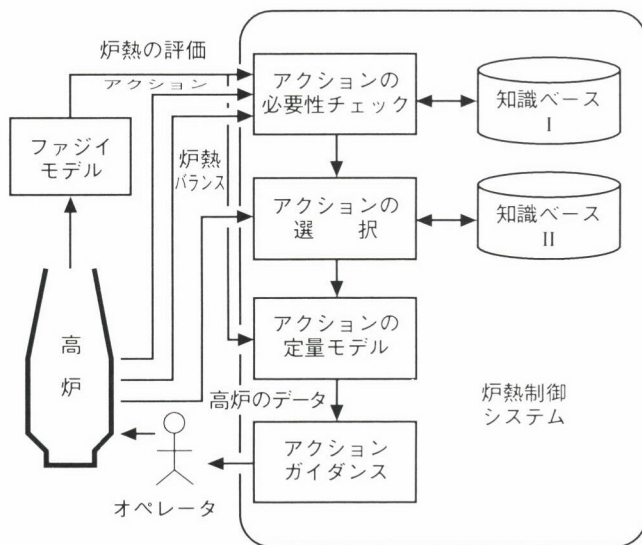


図6 高炉炉熱ガイダンスシステムの構成

表1 炉熱制御ガイダンスシステムの適用結果

適用結果	N数	比率(%)
ガイダンス結果とアクションが一致	1412	98.1
アクションしたがガイダンスはなかったもの	12	0.8
ガイダンスしたがアクションがなかった	16	1.1
合計	1440	100.0

3.2 ファジイ多目的最適化による

熱延のパススケジュール計算⁽⁵⁾

熱間タンデムミルでは同一のミルで多数の鋼種やサイズの圧延加工を行う。このため、コンピュータを用いた設定計算システムが開発され、指令書に対応してパススケジュール（各スタンドのロール間隙やロール速度等）の計算を行っている。その際、操業方針の変化が設定計算に反映されなければならない。すなわち、日々変化する圧延要求に対応して設定計算が追従する仕組みが必要である。

(1) ファジイ多目的関数

パススケジュールの設計条件と目的は大別すると以下の5種類に分けることができる。①仕上げ板厚が公差内に入り、かつ目標厚みに極力近いこと、②仕上げミル出側の材料温度が許容される公差内に入り、かつ目標温度に極力近いこと、③圧延材の形状（平坦度）が良好であること、④生産性が高いこと、⑤生産コスト（圧延に要するエネルギー）が低いこと。その他、各スタンドの圧延荷重、圧延動力、ロール回転数等が機械的制約を満たすことも必要である。ここでは、これら5項目の目的を定量化するため、それぞれの目標達成度を表すメンバシップ関数を定義する。これらのメンバシップ関数の例を図8に示した。ここで示したメンバシップ関数の形状と値は過去の圧延データと、パススケジュール設計者、操業者の選好を反映して決定した。

(2) 最適パススケジュールの計算

ファジイ多目的計画法によって最適パススケジュールを求めるためには、圧延機の総合特性を表す数学モデルを連成させつつ、パススケジュール設計者の主観を反映したメンバシップ関数を導く。それを用いてパススケジュールを最適化する決定変数（各スタンドのロール間隙やロール速度等）を求める。最適化手法としては非線形数学式の連成系に適用が可能な一般化縮小勾配法を用いる。なお、メンバシップ関数が5種類あるため、最適化のためには5つの

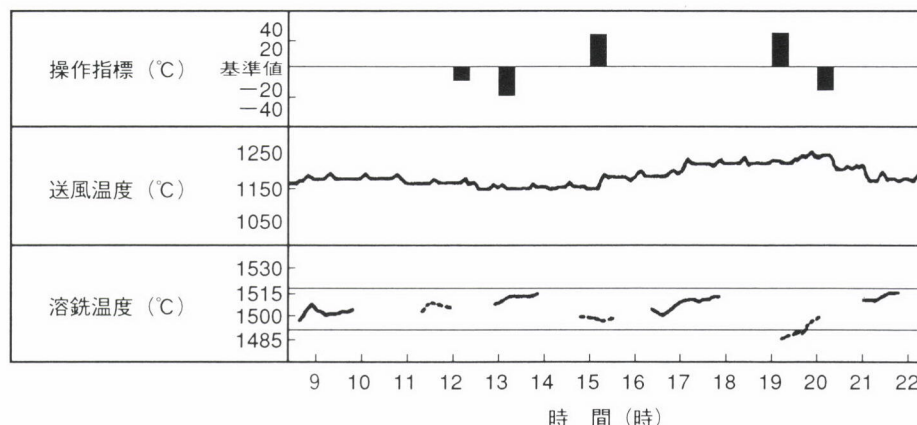


図7 高炉炉熱制御システムの適用効果

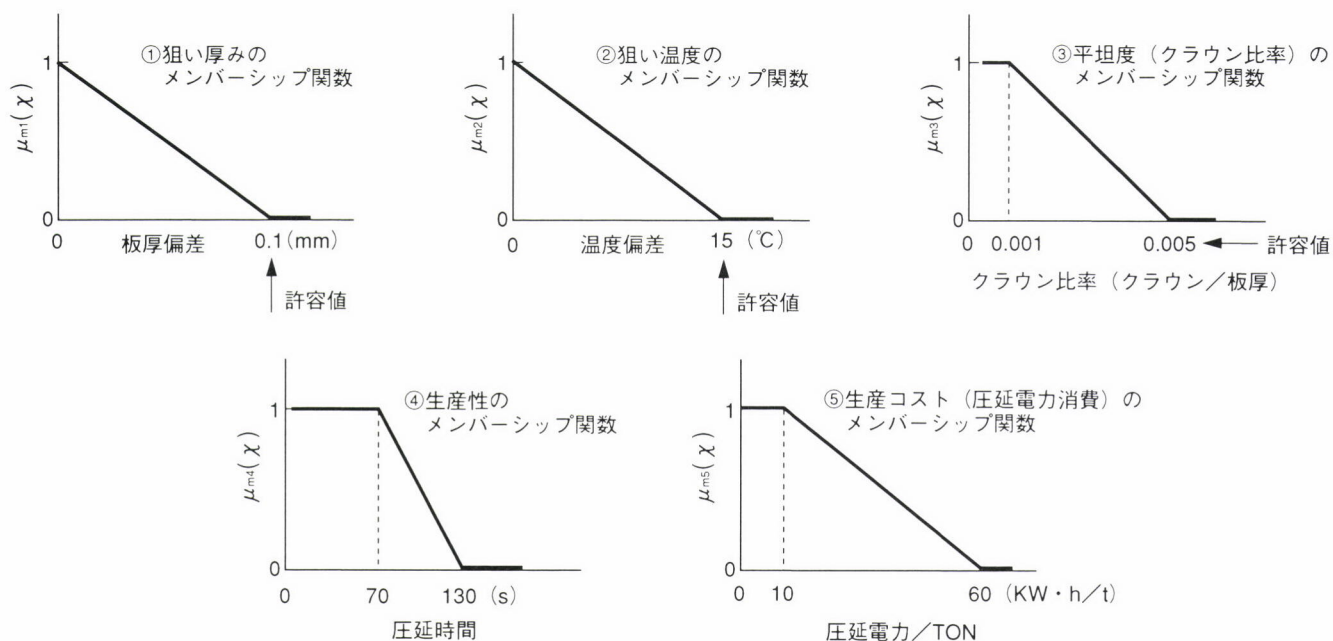


図8 ミルセッティングにおけるファジィメンバーシップ関数

うちどの項目を重視するかをあらかじめ指定する必要がある。5項目はそれぞれのメンバーシップ値により定量化されているので、それらの目標値を与え、それらの目標値とメンバーシップ値との差を最小化することにより最適化が達成できると考える。それぞれのメンバーシップ関数を $\mu_{mi}(x)$ とし、それぞれの目標値を μ^*_{mi} とすれば、最適化計算の目的関数を

$$\text{Minimize } \sum_i \{ \mu^*_{mi} - \mu_{mi}(x) \}$$

とすればよい。図9に最適化計算結果の一例をしめす。図中のケース1は目標板厚と板形状を重視した結果であり、ケース2は生産性を重視した結果である。

2つのケースで上流側スタンドでの压下スケジュールが異なる様子がわかる。

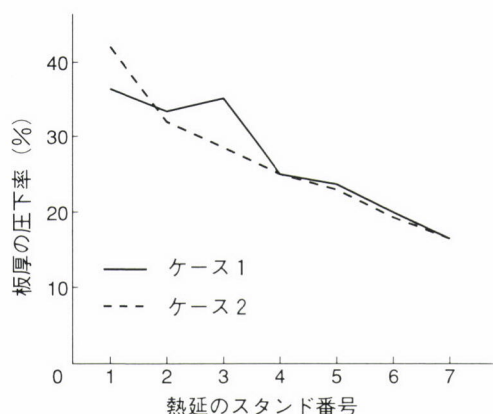


図9 最適化の計算結果

3.3 ニューラルネットワークによる

連続鋳造機の湯面レベル制御⁽⁶⁾

連続鋳造機のモールド内湯面が変動するとスラグの巻き込みによる表面傷の発生があるため鋳造品の品質が悪化する。このため、モールド内の湯面レベルを一定に維持する制御が行われている。年々厳しくなる品質要求に対応してゆくため、従来の制御システムの制御性能の強化が必要となっている。

(1) ブルーム連鋳機モールド内湯面レベル制御

連鋳機ではタンデイッシュに溶鋼を一時的に蓄えたあと、鋳型内で冷却・凝固させ、ロールにより一定の速度で引き抜く。スラブ連鋳機では湯面レベルの制御をスライドバルブで行うのに対し、ブルーム連鋳機では湯面レベルの制御はストップにより行う。第2回目の講座で紹介したように、スラブ連鋳機の湯面レベル制御では、スライドバルブの流量特性の非線形性が見積もりが定量的に可能なため、ロバースト制御理論の適用が可能であった。これに対し、ストップによる注入量制御手段は大きな外乱に対応できるが、急峻な非線形特性があるため制御理論の適用が困難である。このため、以下に示すニューロ制御を適用した。上に述べたように、ストップ制御は急峻な非線形特性を有するため、従来のPID制御では湯面変動が大きくなる場合がある。一方、湯面レベル偏差によりロールの引き抜き速度を制御する場合は、非線形特性がないため安定した湯面レベルが得られる。しかし、速度変化は凝固状態を均一に維持するため大きくはとれないという制約があり、大きな外乱には対

応できない。この問題を解決するため、大きな外乱があっても速度変化が一定の制約内に納まるように、積極的に制御の平衡点を変化させることとした。すなわち、湯面レベルは緩やかに変化しても品質に影響する急峻な湯面変動は防止する方法である。

(2) ニューラルネットによる制御平衡点の移動

時々刻々の引き抜き速度と湯面レベルの変化傾向とを入力とし、溶鋼注入量調節量を出力とする階層型ニューラルネットを構成する。ネットワーク学習のための教師データは操業者の動作解析により作成した。このロジックを組み込んだ湯面レベル制御系の構成を図10に示す。この制御系を実機に適用した結果、図11に示すように顕著な改善効果が得られている。すなわち、湯面変動が従来法に比べ約3分の1に低減した結果安定な操業が実現し、鋳片表面の品質も改良された。

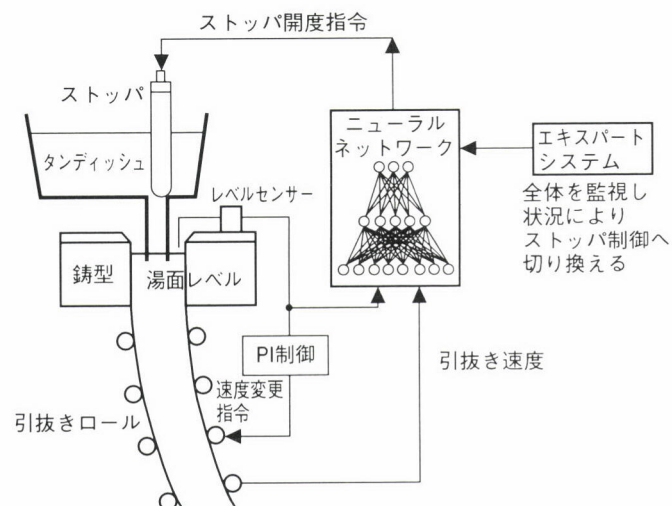


図10 ブルーム連鋳機の湯面レベル制御システム

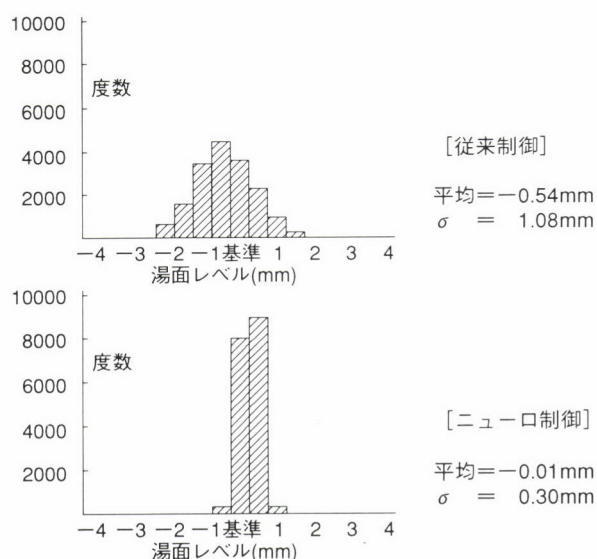


図11 ニューロ制御システムの適用効果

質も改良された。

4 応用人工知能技術の展望

今回は、応用人工知能と呼ばれるファジィ論理、エキスパートシステムおよびニューラルネットワーク技術を取り上げ、その鉄鋼プロセス制御への応用について紹介した。事例として当社での適用例を取り上げその紹介を行ったが、鉄鋼業界では各社でも同様の取り組みがなされ多くの事例が公表されている。今回紹介したように、本技術は各種プロセス制御への応用が試みられているが、従来の制御理論では対応が困難な非線形問題が解決できる期待がある。また、プロセス特性がモデル化出来ない悪構造と言われる対象の制御が可能となる可能性もある。現実問題の解決に際しては制御理論と知能化技術との使い分け、あるいは両者の組み合わせを行うことが有効と考えられる。

また、最近では今回紹介した応用人工知能技術以外にGA (Genetic Algorithm: 遺伝的アルゴリズム)、カオスや、生物の細胞分裂を参考にした複雑系についての研究成果も出ているがこれらについては別の機会にゆずることとする。

5 本講座のまとめ

3回にわたって制御理論の原理と、その応用事例について解説した。制御理論はとかく難解であるとの批判を耳にするので、本講座では、実用性の高い手法に限定して、原理は基本的な事項のみの記述にとどめ、応用事例を挙げて理解を深めていただくよう努めたつもりである。

最後に、今後制御工学の分野を担当される方のために、現在この分野の抱えている問題点、留意点について述べ、稿を終わることとする。

(1) 流行にとらわれることなく、問題の本質をみる

制御理論を応用するにあたっては、世の中の流行、他社の動向に惑わされることなく、問題の本質を見極めた上で、最も適した、原則的な方法から入って行くことが、成功の秘訣である。複雑で、難解な理論を利用することが、立派な成果につながるとは限らない。

(2) 筋の良い理論を使うこと

学会などに出席すると、色々目新しい方法についての発表が溢れている。過去にも色々な方法が提案されたが、その多くは泡沫の様に短期間で消え去った。現在残っているものは現場のニーズに応えられるもののみである。

本物の理論を見つけることは、決して易しいことではないが、しかし重要なことである。企業における制御技術の

専門家は、新しい理論については、十分理解を深めた上で、自社で利用するか否かの判断を下すことを職務と考えられたい。その場合、現場の技術者に対して、単に新理論の受け売りをするのではなくて、現場向けにブレークダウンしたものを示す努力が必要である。

(3) モデルの重要性

本文でも再々述べたように、多くの制御理論の適用には制御する対象の数学モデルが存在することが前提となっている。しかも、そのモデルの精度が制御結果を左右すると言っても過言ではない。しかし、現在モデルを構成する方法に関する研究論文は極めて少ない。過去にはかなり注目された時代もあったが、現在では殆ど見かけない。一般的な手法が存在しないことと、地味な努力が必要なことがその原因であると考えられる。しかし、現場を持つ者にとっては放置できない問題である。

ただし、モデルの構造すら想定できない対象に対して人工知能技術の手法で表現できるようになったことは、大きな進歩と言うべきである。

(4) 制御システムのメンテナンス体制

制御対象プロセスの特性が変化したり、製造品種の変化により、過去に開発した制御システムについて再調整が必要となることが起こる。また、現在使用されている技術がブラックボックス的な取り扱いをされているため、開発された経緯や、開発過程で得られたノウハウが継承されているとは限らない。制御システムも生産プロセスの一部として設備化され、必要不可欠なものとなっているにもかかわらず、十分なメンテナンス体制が取られていないのが現状である。制御システムの有効な調整技術の開発が大切な事項である。また、メンテナンスを前提とした制御システムの開発を目指すことも必要である。

日本鉄鋼協会では学会部門の発足に合わせ、平成8年度から3年間の予定で多変数制御系の調整技術を取り上げ、研究が開始されたと聞いている。まことに時宜を得た活動でありその成果を待望するものである。

(5) 日本鉄鋼協会への期待

以上述べたことは、いずれも云うは易く、解決は困難な問題ばかりである。しかし、これらの中には鉄鋼各社共通の課題がかなりふくまれている。独自で解決されることも勿論結構だが、協力して問題解決に当たるのも一つの方法であると考ええる。上記諸問題について日本鉄鋼協会がリーダーシップを取り、衆知を集めて取り組まれては如何であろうか。

以上、少しでも読者諸兄のお役に立てばと念じつつ、3回にわたる入門講座の稿を終わる。

参考文献

- (1) 菅野道夫：ファジィ制御，(1988)，日刊工業新聞社
- (2) 上野晴樹：知識工学入門，(1986)，オーム社
- (3) 麻生英樹：ニューラルネットワーク情報処理，(1988)，産業図書
- (4) 松田浩一，田村直樹，小西正躬，北野新治，門口惟人，高見満矩：システム制御情報学会論文集，第4巻，第2号，Pp.86-94
- (5) 北村章，檜崎博司，小西正躬，坂和正敏：鉄と鋼，第79巻，第3号，Pp.100-106
- (6) 渡辺俊彦，大村佳也子，小西正躬，渡辺省三，古川和寛：第35回システム制御情報学会研究発表講演大会講演論文集，Pp.469-470

(1996年12月5日受付)