

6.3 制御技術の進展

本節では、近年の制御理論の進展とその適用事例を紹介する。また、残された課題をプロセスの非線形性の克服と操業ノウハウと制御理論の融合とし、その課題の達成に係わる最近の制御手法とその動向について述べる。

6.3.1 制御技術の歩みと適用事例の概要

(1) 制御技術の歩み

1960年代に開花した現代制御理論は、動特性の構造を内部の状態変数で構成された状態空間モデルで表現することの特徴としている。その形式の美しさと多変数制御系への展開の期待から、80年代になると、多くの適用事例を生むことになった。また、状態変数を確定的に推定するオブザーバの手法は、多方面で応用されてきた。同時期には、モデルのパラメータの変化を推定しつつ制御器のゲインを調整する適応制御の手法も登場した。その後に登場したロバスト制御は、モデルの不確かさに着目し、ロバスト安定を確保することを主眼にした制御系の設計手法である。なかでも、 H^∞ 制御は、ロバスト制御の象徴的な方法として注目された。また、システムの構造を変えることによって、その状態をある切り替え面上に拘束し、平衡面に収束させることを特徴とするスライディングモード制御に代表される可変構造制御 (Variable Structure System) も、ロバスト制御の一環として適用されてきた。

制御対象の動特性のモデリングについては、非線形性を含む物理モデルを線形化して用いる手法や、ステップ応答法などのシステム同定手法が基本となる。また、線形時系列モデルに基づく逐次型のパラメータ推定法も、オンラインモデリングの手法として活用されてきた。それとは別に、80年代には、人工知能を応用した制御システムが登場した。なかでも、ファジィ推論やニューラルネットを用いた学習型の人工知能技術が登場すると、制御分野における応用が多く見られるようになった。

(2) 適用事例の概要

制御理論は、圧延機制御の分野にその適用事例が多くみられる。圧延機の特性を、圧延荷重やミル剛性を線形近似した静的なモデルと電気油圧系や張力発生機構の動特性を近似した動的モデルの組み合わせで表現し、これらを対象として、最適制御やロバスト制御などを適用した板厚や張力制御システムが数多く開発された。熱延ルーパーは、最適レギュレータや H^∞ 制御の代表的な適用対象となった。ルーパーが、板張力とループ量 (ルーパー高さ) の干渉する2変数を制御することを目的とする設備であることから、現代制御の特徴である多変数制御の対象として、多くの適用事例を生んだ。また、逐

次パラメータ推定手法を応用したロール偏心制御やオブザーバの手法によるロータ軸の振動抑制も現代制御の応用事例である。ロバスト制御については、 H^∞ 制御が、熱延ルーパーの高さ制御や連鑄の湯面レベル制御に適用された。湯面レベル制御では、湯面の波立ちやバルジングなど、モデル化が困難な誤差要因を考慮することで、安定な制御が達成できた。

一方、高炉は、複雑大規模系であり、制御理論を適用するためのモデルの構築が極めて困難である。そこで、1980年代になると、人工知能技術や知識情報処理の適用がはじまった。エキスパートシステムによる高炉の操業支援システムやニューラルネットワークによる炉況診断システムなどが応用事例である。

6.3.2 制御技術の課題と施策

操業の安定化した定常状態 (例えば、圧延速度が一定) では、ほぼ自動制御が確立されている。しかし、起動時や終了時といった非線形・非定常の状態では、外乱や系の変動が大きく、線形制御では対応できない。現状は、オペレータの経験や操業ノウハウに依存した手動や介入操作で対応する場合が多い。ロバスト制御は非線形特性によるモデルの不確かさは考慮するものの、線形モデルを用いた制御であり、その問題を完全に解決したとは言えない。また、操業ノウハウをルール化することによる操作の自動化が試みられたが、プロセスの物理特性や制御特性に基づかないことから、ルールに普遍性が無く、オペレータに替わって自動制御を達成するには至らない。ここでは、制御対象の持つ非線形性の克服と操業ノウハウを考慮した制御システムの開発を課題として取り上げる。以下に、課題達成に期待される技術とその応用について述べる。

(1) 非線形系の制御

非線形制御に関する研究の歴史は古いが、一般的な手法として体系化できていない。また、その取り扱いに多くの手順や計算を必要とすることから、実機への適用は進まなかった。近年、非線形最適化アルゴリズムの研究や最適化などの計算機ソフトパッケージの開発が進み、一部の非線形性に対しては、実機化も可能な制御システムが登場してきた。ロバスト制御の進展として、ゲインスケジューリング制御の適用が期待される。本制御は、制御対象のパラメータ変動に応じてコントローラを切り替える手法であり、非線形領域を含めた制御対象の広い変動範囲に対応できる。具体的には、非線形性を含んだシステムを線形パラメータ可変 (Liner Parameter Varying) で記述できれば、線形行列不等式 (Liner Matrix Inequality) を解くことで、ゲインスケジューリング制御のためのコントローラを設計できる。この解法には、凸計画法などの数値計算アルゴリズムが適用でき、効率よく制御系を

構築できる。

また、ロバスト制御の進展とともに、計算機科学と制御理論の融合をうたったハイブリッドシステムが注目されている。その大きなブレークスルーは、命題論理 (If～Then～形式) で記述される定性的な表現を、それと等価な混合整数型の不等式で記述できることにある。本手法の展開として期待されるのは、例えば、非線形性の一種である拘束条件を考慮した最適制御の実現である。本方法によれば、拘束条件の付きの制御系を区分的アファインシステムの集合として表現できるとともに、事前にマルチパラメトリック計画問題を解くことで、その区分ごとに、現代制御理論に登場する状態変数を用いた線形の制御則を得ることができる。例えば、連鋳のスライディングノズルや圧延機系の油圧サーボでは、必ず変位の上下限で制約を設けている。また、冷延タンデム圧延の張力制御では、板厚制御との干渉を緩和するために、いわゆる「リミット制御」が行われている。これは制御変数（出力）である張力を一定の範囲内に制御する方法であり、出力に拘束条件が施される。また、スタンド間張力を操作して板厚を制御する場合は、操作量（入力）に拘束をとともなう制御問題となる。

また、制御器の中では、内部の状態変数に関連する電流制約や電圧制約があり、トルクなど入力信号にも制約条件が付加される。一方、圧延の加減速部分では、操業の危険回避の意味からも操作量に拘束をとともなう。これらの部分では、拘束を考慮する最適制御により、更なる歩留まりや生産性の向上が期待できる。拘束条件を考慮した制御には、ハイブリッドシステム以外にも、リファレンスガバナといった制御の目標値を整形する手法もある。制御系の入出力で発生する拘束条件を考慮しつつ、安定化のみならず高応答の制御が期待されることから、実用化を目指した応用研究の進展が待たれる。さらには、命題論理をルールとしてみると、定性的な知識をルールとして表現できるなら、ハイブリッドシステムは、経験やノウハウと制御理論との融合を可能にする新たな施策となり得る。

(2) 非線形系のモデリングと学習

非線形系と線形系を組み合わせたクラスの非線形システムについて、システムをニューラルネットワークで同定する方法や進化型計算の一種である遺伝的プログラミング (GP: Genetic Programming) を用いてモデル化する研究が進んでいる。前者では、静的非線形要素と動的線形システムが直結した Hammerstein モデルで記述された非線形系についてシステム同定を行う。後者では、非線形システムを制御変数や物理変数で構成される関数形として同定する。本方法は、非線形のクラスを限定することではなく、動特性をも同定でき

ることを特徴とする。線形時系列モデルで近似した場合に比べ、低次数のモデルで近似できる可能性がある。圧延荷重の非線形モデリングに GP を適用した事例が報告されており、今後の進展が期待される。

一方、データ駆動型のモデリング手法として、ファジィモデリングがある。本手法は、ファジィ分割された領域に線形のモデルをフィッティングさせる方法であり、非線形系を区分的な線形モデルの集合で近似することを特徴とする。ファジィモデリングの方法は、すでに圧延制御の分野で応用されているが、分割に先見的知識があれば、今後とも有効な手法と考えられる。また、非線形系の局所的なモデリングやオペレータの操業ノウハウの学習には、強化学習が期待できる。強化学習は、人工生命の方法として、生物が環境との相互作用を通じて、マルコフ過程を前提とした教師なし学習を行うことを特徴としている。強化学習は、すでにロボットの学習制御や軌道のプランニングに応用されている。また、変化をとともなう環境や不確定な環境への適応能力があることから、拘束のある非線形系の学習やその予測能力に期待が持たれる。以上をまとめると、制御理論を核にしたシステム制御技術には、次のような展開が想定される。

- (a) ハイブリッドシステムの応用やゲインスケジューリング制御によって、拘束条件などの一部の非線形性を考慮した非線形制御システムが実現できる。例えば、圧延工程のうち、加速や減速時の自動制御が確立し、操業の安定化と品質や歩留まりの向上が期待できる。
- (b) ニューラルネットワークや GP を用いた非線形モデリングによって、モデル精度が向上する。これらのモデルは、非線形制御系の設計手法と組み合わせることで、新たなシステムを構築できる。また、圧延などのセットアップモデルの高精度化にも寄与すると考えられる。
- (c) 強化学習などの人工生命の手法による操業ノウハウのモデルやファジィモデリングによって形成される論理命題は、ハイブリッドシステムによって制御理論と融合され、ノウハウ融合型制御が可能になる。これによって、起動時や終了時の経験による介入操作の自動化が期待される。
- (d) ファジィモデリングや GP の手法による静的な非線形系のモデリングは、材料モデルの予測性を向上させることにも応用できる。これは、機械的性質などの品質の制御や新製品の量産化の加速につながる。

6.3.3 今後の展開への期待

制御理論を中心に、鉄鋼製造プロセスへの応用事例を鳥瞰した。また、非線形性の克服と操業ノウハウの考慮を課題として、その施策を展望した。制御理論を核とするシステム制

御技術は、系の動特性の支配による品質と歩留まりの向上効果のみならず、技能を技術として体系化することや、新製品・新商品の量産化への寄与も可能となる。そのためには、関連する分野との連携が必要となる。システム制御技術は、計測分野との連携のみならず、計算機能力のますますの向上を背景として、知識工学、プロセス解析技術、材料科学といった、多方面の分野との一層の連携により、新たなパラダイムを創出することが期待される。

6.4 システム技術の進展

1990年代に入り、半導体製造技術の飛躍的な進歩に伴い、コンピュータのダウンサイジングと演算速度の高速化が目覚ましい進行が計られた。この結果、大規模メモリの登場と低価格化が実現し、生産分野でもマルチメディア情報の利用に対する関心が高まってきた。1990年代後半になると、インターネットが普及しはじめIT時代の幕開けとなった。すなわち、パーソナルコンピュータの普及と、通信ネットワーク技術の進歩に支えられ、インターネットが従来の大学など特定のユーザによる利用から、一般社会でも利用され始めてきた。また、コンピュータ能力が増大したことにより、システム技術も理論中心の研究からシミュレーションをベースとしたシステム技術の開発に比重が移り、現実問題を解決するための技術が次々と登場した。以下では、システム技術の進展と鉄鋼業におけるシステム技術の活用状況について、現状と今後の課題を述べる。

6.4.1 過去10年間のシステム技術とその応用

(1) システム技術の進展

生産管理を支える主なシステム技術として、シミュレーション、最適化OR技法、AI・ヒューリスティック技術がある。シミュレーションでは、生産活動を計算機上で再現して事前に生産における課題が検討できるほか、生産条件の調整も可能となる。シミュレーションでは、設備制約や実際の生産管理におけるノウハウを反映することが容易なので効果的である。また、原材料の投入順や使用設備機械の選択の検討とスケジュール結果をガントチャートなどの図式で表示する汎用ソフトなどが開発され、鉄鋼だけでなく非鉄分野や、半導体など他の産業での適用も行われている。ところで、原材料の投入や使用設備の指定など、生産計画や生産スケジューリングにおいては現場特有の条件があり、従来から人間が操業経験を生かして適切な処置をしてきた。これらのディスパッチングと呼ばれる判断について、人間の知識を生かした方が現場に受け入れやすいとの観点からAI・ヒューリスティック技術の有効性を認め、シミュレーション技術やOR技法との組

み合わせにより実用的な生産管理技術を目指す動きもある。

一方、最適化OR技法については、数理的な取り扱いによる厳密な最適解の計算が可能なることから、大学を中心に研究が進められてきた。すなわち、対象を記述する制約条件を設定し、この制約下で目的関数を最大化あるいは最小化するシステム最適化の方法論について、目的関数の勾配に沿って探索を行う方法論が発展してきた。この結果、線形問題だけでなく、非線形関数で制約条件や目的関数が記述される非線形最適化問題の解法も開発されてきた。ところで、生産管理の問題では、機械の選択、注文の処理順などの整数変数を、生産量などの実数変数と同時に扱う混合整数計画問題の最適解を求める必要がある。これに対し、分枝限定法を中心にした解法が提案され、求解の高速化を図るための枝刈り法などの実用的な研究成果も報告されてきた。

(2) 鉄鋼での展開

鉄鋼業においても、システム技術を積極活用して生産管理技術の進展が図られてきた。鉄鋼の生産管理では、上工程から下工程まで複数のプラントでの生産計画やスケジューリングが行われる他、広大な工場内での製品横持ちの物流管制が課題である。このように、鉄鋼では生産管理業務の対象システムが大規模であることから、最適化技術の適用が困難と思われてきた。しかし、熱心な鉄鋼技術者により生産および物流計画の分野で対象を限定し最適化が積極的に試みられてきた。たとえば、コイル編成においてオーダの充当方法の最適化に対して数理計画法を適用する試みや、製鉄所内の機関車走行管制に分枝限定法を適用した計画システムの開発などである。その一方で、シミュレーション技術を積極的に活用して大規模な生産や物流管理の問題解決が図られてきた。

また、鉄鋼生産現場で蓄積されていた操業経験が直接利用できるAI・エキスパートシステムの利用が盛んに行われた。AI・ヒューリスティックスをコンピュータ上に移植する商用ソフトが開発販売されており、これらのソフトを活用した生産計画や生産スケジューリング、さらに工場内製品搬送や出荷管制システムが各社で開発され実用化されている。

6.4.2 最近のシステム技術の進展

(1) システム技術の進展

生産管理の課題を解決する上で不可欠のシステム最適化について、最適化メタ戦略と呼ばれる方法が種々提案され開発されてきた、これを用いて離散値システムの最適化法を効果的に行う方法が研究され実用化されてきた。組み合わせ最適化は、離散的に与えられた制約条件の下で、目的関数を最大あるいは最小にする数理計画問題である。近年、さまざまな経験的知識を有機的に結合し、より効率的に最適解を探索す