



入門講座

制御技術編 -2

製鉄業における制御理論の応用

藤井克彦 (株)神戸製鋼所 技術開発本部 常任顧問
Katsuhiko Fujii

Application of Control Theory in Steel Industry

1 鉄鋼プロセス制御の概要

本講座の第1回では、コンピュータ技術の発達と制御技術の進展、古典制御から状態変数を用いた制御、制御対象のモデリング手法、などについて概説した。今回は、鉄鋼プロセスにおいて、制御理論がどのように活用されているかを、事例を交え、具体的に述べることにする。

1.1 60年代以降の制御理論の進展と応用を鳥瞰する

すでに紹介した状態変数を用いた制御は、60年代に、最適レギュレータやカルマンフィルタとして体系化された。これとは別に70年代には古典制御の単ループの制御系を周波数領域で拡張した非干渉制御が登場し、これら2つの流れを総称して多変数制御と呼ばれるようになった。

鉄鋼プロセスにおける多変数制御の応用をみると、マイクロプロセッサの発展と相俟って、60年代後半からカルマンフィルタによる状態推定を中心として、転炉製鋼などの制御に徐々に適用されていった。また、タンデム圧延機のように多スタンドにおける寸法、形状の制御には、その間の干渉を考慮した多変数制御が有効であることから、70年代後半より多くの開発事例をみるに至った。80年代に入ると、モデルの不確かさを考慮した制御として、ロバスト制御が登場した。中でも、 H^∞ 制御は周波数領域において制御系が設計できる手法である。従来、現代制御理論では制御系を時間領域で設計することから、古典制御理論とは設計思想において一線を画していたが、 H^∞ 制御の出現によって両者が大きく接近することとなった。鉄鋼プロセスでは、90年代に入り、連铸や熱延の制御に適用事例が登場している。

一方、AI（人工知能）技術は、人間の思考や現象をルールベース（if/thenで記述されたプロダクションルール群）で表現し、人に替わって推論するエキスパートシステムとして工業分野においても期待が高まった。プロセス制御の分野では、AI技術は、系の非線形性の悪影響によるシステムの不安定化を防止し、適正な応答性を確保するための技術として、80年

代後半より活用されている。ファジィ推論によって圧延特性の複雑さと非線形性を考慮した板厚制御システムや、ニューロネットワークによってストッパーの非線形性を克服した連铸の铸型内湯面レベル制御システムが開発された。なお、本号では制御理論の適用例について述べ、AI技術の応用については、次回に詳述することとする。

1.2 鉄鋼プロセスの特徴

製鉄プロセスでは、以下に述べる問題点や課題があり、単純な制御では精度向上に限界がある。

- (1) 高炉の内部現象や圧延の塑性加工特性などに多くの非線形性がある。また、設備としても、油圧系のヒステリシス、電気系の飽和特性、といった非線形性を有する。(非線形性)
- (2) 高炉の棚つり、連铸の铸込み開始、圧延の噛込み・尻抜け、加減速といった非定常状態が多い。(非定常性)
- (3) 高炉内部状態や鋼材内部温度など、測定できない状態量が多い。(非観測性)
- (4) 圧延の板厚制御と張力制御との相互干渉が寸法や形状制御の安定性を阻害する。(干渉性)
- (5) 圧延における制御点と計測位置との移送によるむだ時間、あるいは鋼材の加熱・冷却時の時定数が多い。(遅れ現象)

1.3 モデル化の重要性

前回第5章で述べたように、制御理論を適用して制御則を設計しようとする、対象の数理モデルをどのように構築するかと云う問題に直面する。対象の数理モデルに基づいて制御アルゴリズムを導き、シミュレーションによって制御性能を検証して、実プラントに適用するという手順をとる。ところが、基準となるモデルに基づいて設計した制御則を用いると、シミュレーションでは効果を発揮するが、実プラントに適用すると閉ループ系の性能劣化が予想を上回ることがしばしばある。これは、モデルとプラントの誤差が、ロバスト安

定を保証する限界を超えているからである。(ここで、ロバスト安定とは、モデル化誤差の上限が分かっている場合に、フィードバック系が安定であることをいう。)

モデルを構築する方法としては、(1) 制御対象の物理モデルを理論式で記述する解析的アプローチ、(2) 制御対象に印加された入出力信号から、主に線形の一次結合式によって特性を推定する方法(理論)、がある。(1) は正統的なモデル化の方法でモデリングと呼ばれる。大方の場合は、詳細な物理モデルを基に線形化や低次元化を行い、いわゆる制御系設計のための制御モデルを構築する。(2) はシステム同定といわれ、構築されたモデルはそのまま線形制御系の設計に用いられ、適応制御におけるオンライン同定に活用される。どちらの方法を採用するかについては、一般的な法則は存在しない。

鉄鋼プロセスのモデル化手法を大別すると、製鉄、製鋼工程では、炉内温度などが3次元的に分布していることから、システム同定を用いる場合が多い。一方、圧延工程では、制御量が寸法、形状などで構成された集中定数系で記述される

ことから、モデリングによる場合が多い。何れにせよ、線形化や低次元化によって誤差が生じる。圧延機で考えると、荷重、温度、張力は相互に相関があり、一部には陰関数でモデリングされる。しかし、制御理論を適用するには、状態空間モデルとして、すべての動特性を一階の微分方程式群で記述する必要がある。そこで、相関関係の一部を断ち切り、また、省略することで、状態空間モデルを構築するが、これらは全て誤差要因となる。問題は、その誤差がフィードバック制御で安定化する範囲内にあるかどうかである。言い換えると、圧延機的最適制御によって系の安定化や最適化が達成される場合には、ロバスト安定性が保証されていることを意味する。

1.4 工程別に制御の特徴を考える

鉄鋼プロセスにおける制御理論と知的制御技術の適用事例を表1にまとめて示す。本表によって鉄鋼プロセス制御の概要を以下に述べる。

(1) 製鉄工程を代表する高炉では、熱や化学反応を含めた、分布定数系、強い非線形、時変、複雑大規模系が特徴で

表1 鉄鋼プロセス制御における制御技術の応用事例

	製鉄	製鋼	圧延・加熱炉
最適制御(O) 非干渉制御(D)	熱風炉熱量制御(O)	転炉OGガス制御(O) 連铸2次冷却制御(O)	AGCゲイン最適化(O) 熱延ループ制御(O,D) 熱延仕上げ板幅制御(O) 熱延仕上げ板厚制御(O) 冷延タンデム板厚制御(O) 冷延ミル板厚制御(D) 線材寸法制御(O) 棒鋼ミル張力制御(D) 加熱炉制御(O)
適応制御(A) 状態・パラメータ推定(P)	高炉炉況推定(P)	転炉成分・温度推定(P)	熱延ループ制御(A) 熱延巻取温度制御(A) 冷延ミル板厚制御(A) 冷延ロール偏心制御(P) 冷延形状制御(P)
ロバスト制御 外乱推定制御(RD) H^∞ 制御(H) 予測制御(RP)	高炉炉熱制御(RP)	連铸湯面レベル制御(RD,H)	熱延ループ制御(RD,H) 冷延加減速板厚制御(RD) 圧延機軸振動抑制(RD) 連続焼鈍炉板温制御(RP)
知的制御 エキスパートシステム(ES) ファジィ推論(F) ニューロ応用(N)	高炉操業支援(ES) 高炉炉熱制御(ES,F) 高炉炉況診断(N) 焼結返鉍制御(F) 焼結焼上制御(N)	転炉吹錬制御(ES,F) 連铸湯面レベル制御(N)	厚板パススケジュール(F) 熱延板厚セットアップ(F) 冷延タンデムセットアップ(F) CGLメッキ付着量制御(F) 加熱炉燃焼制御(ES)

ある。この工程では、古くから操業オペレータの勘を含めたノウハウと経験による制御が実施されており、操業ノウハウが豊富ともいえる。従来より、時系列モデルによる統計解析によって内部状態を推定し、操業ガイダンスとする事例や制御理論の適用によって高炉の予測制御を試みる事例があったが、80年代に、エキスパートシステム、ファジィ推論、ニューロネットワークといった知識工学を応用したシステム造りが盛んになった。現在は、操業ノウハウの整理とそのメンテナンスが課題であり、学習やデータベース技術を応用した操業支援システムとしての確立が期待されている。

- (2) 製鋼工程では、転炉と連铸が主たるプロセスとなる。転炉では、炭素を中心とした成分調整が最大の課題である。制御の主体は、静的な計画問題として捉えられるが、一部には、逐次パラメータ推定手法の適用がみられる。一方、連铸では、品質の高位安定化が課題である。铸型内湯面レベル制御や二次冷却水制御に最適制御やロバスト制御の適用がみられる。また、湯面レベル制御では、非線形を克服するためにニューロ・ファジィを適用した事例もある。
- (3) 圧延工程は、厚板、熱延、冷延の、圧延機制御のみならず、加熱炉や表面処理工程においても、制御理論を主体とした様々な制御手法が適用されている。圧延工程の特徴は、圧延の塑性加工特性、油圧系をはじめとした機械系の動特性など、理論解析や実験によって数式モデルが構築される部分が多いことである。また、線形・時不変としてモデリングしても、ある程度の近似精度を保てる。一方、制御理論の適用にはモデル（特に線形化したモデル）が不可欠である。そこで、これらのモデルを用いて制御系を構築し、実機に適用することによって品質・歩留りが向上した事例を数多くみることができる。熱延仕上げ圧延機のルーパー制御に最適制御やロバスト制御を適用し、張力やルーパー高さの安定化を図った事例、また熱冷延のタンデム圧延機の干渉（板厚と張力制御の干渉、およびスタンド間の相互干渉）の悪影響を除去し、板厚や張力制御の高精度化を図った事例などが特徴的である。特に、熱延ルーパーにおける制御理論の適用事例を比較すると、各手法の特徴をより詳細に理解できる。

2 最適制御の応用

2.1 最適制御とは

最適制御は、1960年にKalmanによって確立された¹⁾。最大の特徴は、すでに述べたように、制御対象の動特性を一階の微分方程式群で記述した状態空間モデルにある。状態空間モ

1.微分方程式によるモデリング

2.状態方程式の構築

$$\begin{cases} \dot{X}(t)=A(t)X(t)+B(t)u(t) \\ Y(t)=C(t)X(t) \end{cases}$$

3.評価関数の設定

$$J=\int_0^{\infty}\{X^T(t)QX(t)+u^T(t)Ru(t)\}dt$$

4.リカッチ方程式の解法

$$A^TP+PA-PBR^{-1}B^TP+C^TQC=0$$

5.最適制御入力の設定

$$u(t)=-R^{-1}B^TPX(t)$$

図1 最適レギュレータによる制御系の設計手順

デルでは、その形から明らかなように、多変数系をも同様の形式で記述できる。すなわち、その形態の中で、相互干渉を自然に記述していることになる。また、状態空間モデルによると、内部状態の情報を用いた制御として、状態フィードバック制御が実現できる。状態ベクトルは、システムの過去から現在に至る全情報を包含しており、モデルが正確であれば、状態フィードバック制御によって理想的な制御が可能となる。図1に設計方法の手順を示す。鉄鋼プロセス制御では、多くの操作量と制御量を扱う干渉系の事例が多くみられる。具体的には、冷延の板厚・張力の多変数制御や棒鋼ミルの寸法制御システムがある。欠点としては、評価関数における重み係数の設定に明確な指針がないこと、状態変数を観測できない場合には推定機構が必要なことなどがある。なお鉄鋼以外にも、航空機、自動車、ロボット、化学プラントなど、多くの産業分野で活用されている。

2.2 圧延機の最適制御²⁾

鋼板や帯鋼の圧延機では、一般に油圧圧下によるAGC (Automatic Gauge Control) によって板厚制御が行われている。特に、ゲージメータAGCでは、ゲージメータ式と呼ばれる板厚モデル式によって出側板厚を予測し、その偏差が零になるようにフィードバック制御を行う。そこで、板厚精度を向上させるためには、AGC系の動特性を材料硬度（塑性係数）によらず、常に最適化する必要がある。ここでは、最適レギュレータを用いて制御ゲインの最適設計を行った例について述べる。

図2に実機システムと適用結果を示す。また、本技術の特徴と成果を以下に述べる。

- (1) モデルは、圧延特性解析から得られた理論式を線形化した圧延特性モデルと油圧圧下系の動特性で記述される。
- (2) 最適レギュレータを用いて最適制御ゲインを解析的に導

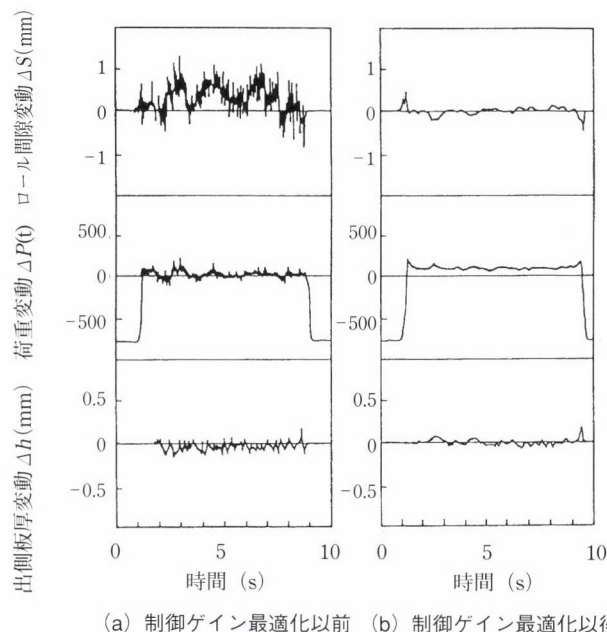
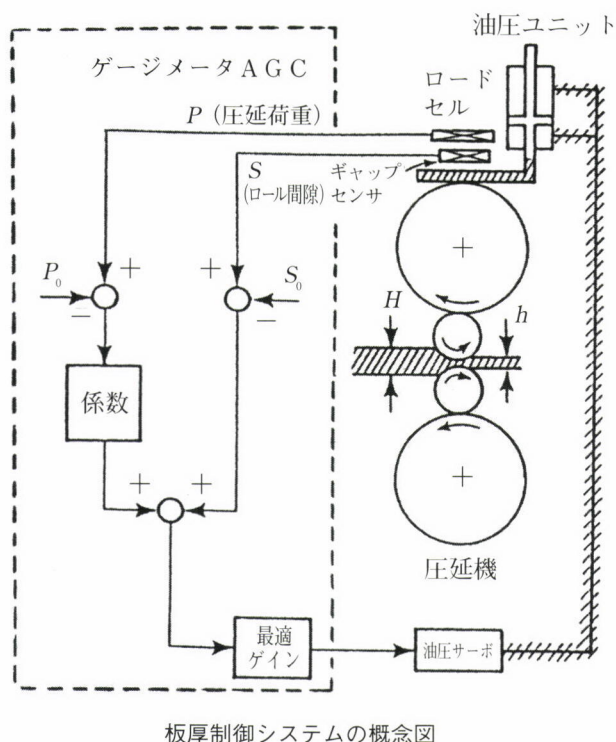


図2 最適レギュレータによる圧延機の板厚制御

出する。

- (3) 評価関数は出側板厚偏差と入力ペナルティ項の自乗積分の和とする。
- (4) 制御ゲインを未知数として構成したリカッチ方程式を解析的に求解することで、最適制御ゲインを圧延特性パラメータ（材料硬度を表す塑性係数やミル定数）と動特性を表すパラメータ（油圧圧下系を2次遅れ系で近似したモデルにおける減衰係数）で表現する。
- (5) 最適ゲインの適用により、圧延材料が変わっても、常に最適な応答性を得る。
- (6) 厚板仕上げミルに適用した結果、従来に比べ、板厚変動を35パーセント改善できた。

3 パラメータの逐次推定と適応制御の応用

3.1 適応制御とは

制御系の設計は、すでに述べたように、古典制御、現代制御を問わず、モデルが出発点となる。仮に、モデルの精度が十分に得られたとしても、実際の制御対象の中には、その動特性が変動する場合がある。動特性の変動が比較的小さい場合には、フィードバック制御の外乱抑制機能によって、制御量を目標値付近に制御できる。しかし、その変動が大きい場合には、変動前のモデルにより固定された制御則では期待した効果が得られず、場合によっては不安定化することもある。そこで、制御対象の動特性を表わすモデルパラメータの変動

を逐次推定手法によって時々刻々推定し、その情報に基づいて制御則を自動調整して制御系の動特性を常に適正化する手法が考案された。これは、制御対象の動特性の変化に制御則を適応させる意味から、適応制御と呼ばれる。図3に逐次推定アルゴリズムを説明し、図4に適応制御の概略を示す。

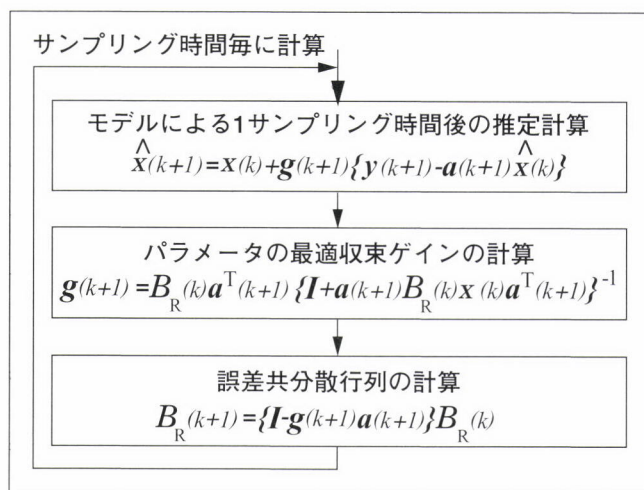
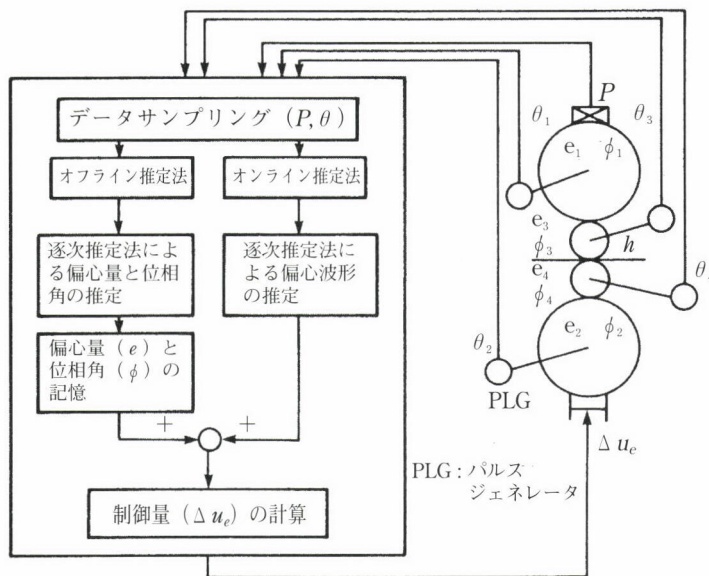


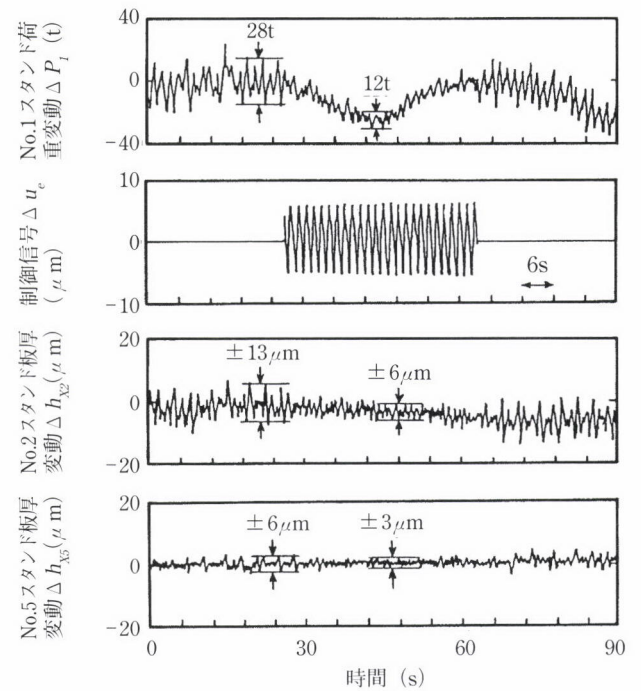
図3 パラメータの逐次推定アルゴリズム

1. 逐次推定機構の構築
2. 制御ゲインの設計
3. シミュレーションによる安定性の確認

図4 適応制御系の設計手順

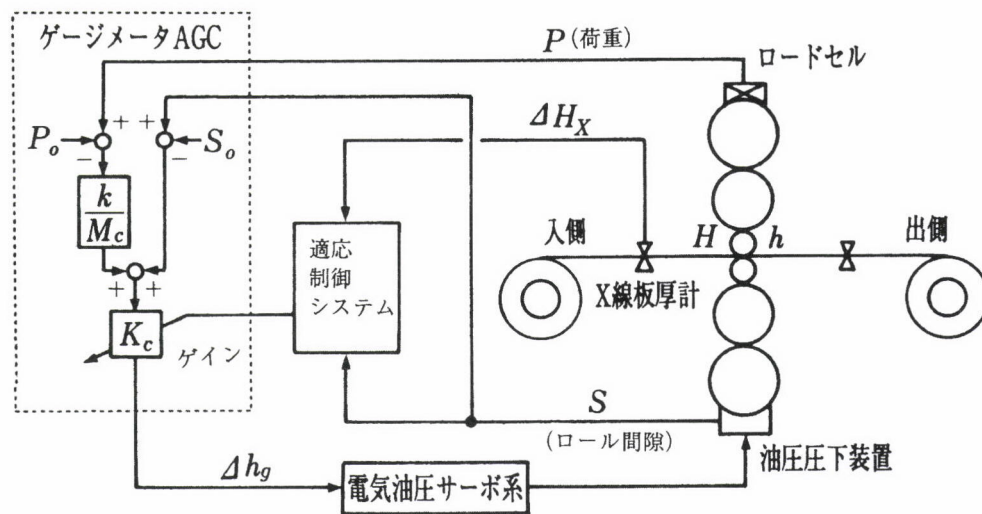


ロール偏心制御システム

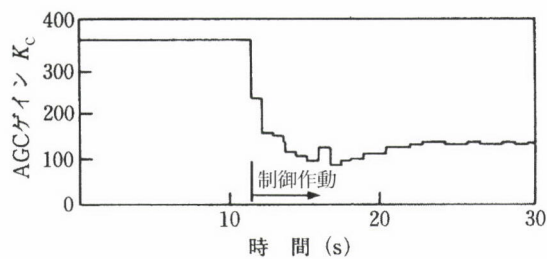
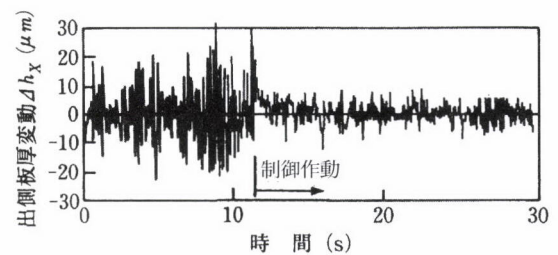


タンデム圧延機における実機適用結果

図5 逐次推定法によるロール偏心制御



ゲージメータAGCと適応制御システム

(a) AGCゲイン K_c の適応修正状況

(b) 冷延レバースミルの出側板厚

適用結果

図6 適応制御による冷延ミルの板厚制御

3.2 逐次推定法によるロール偏心制御³⁾

ここでは、適応制御で用いられるパラメータの逐次推定法によるロール偏心制御技術を紹介する。

圧延機のロールには、固有の幾何学的な偏心が存在する。偏心はロール一回転毎の周期的外乱であるため、高周波の板厚変動を引き起こす。また、前項のAGCでは、偏心に対しては誤制御となる。そこで、ロール偏心を補償することによって板厚精度の向上をはかる必要がある。すなわち、各ロールの偏心量と位相角を推定し、圧延時にこれらの推定量に基づいて予測制御を行なう。ここでは、偏心量と位相角の各パラメータの推定に、適応制御で用いた逐次推定法を適用する。

図5に実機システムと適用結果を示す。本技術の特徴と成果を以下に述べる。

- (1) 偏心による荷重変動を各ロールの幾何学的偏心によって形成される正弦波の重ね合わせでモデル化する。
- (2) 上記モデルをベクトル表示し、偏心量と位相角で構成される未知ベクトルを図3の逐次推定法によって時々刻々推定する。
- (3) 推定されたパラメータを用いて各ロールの偏心量を予測し、その値に応じて圧下量を操作して、偏心を補償する。
- (4) 冷延タンデムミルに適用した結果、ロール偏心による板厚変動を1/2以下に抑制できることを確認した。

3.3 適応制御による冷延ミルの板厚制御⁴⁾

前項に述べたように、ゲージメータAGCの最適制御ゲインは、塑性係数や減衰係数で記述されるが、塑性係数は帯鋼内の熱分布によって変動する。また、減衰係数やミル定数も経時的に変化する。そこで、動特性の変化を時々刻々推定し、その情報によって制御ゲインを適応修正する。これによってAGC系の動特性を帯鋼内のパラメータ変動に煩わされず、常に最適な状態に維持することができる。

図6に制御システムと適用結果を示す。また、本技術の特徴と成果を以下に述べる。

- (1) 予めAGC系の伝達関数を差分によって離散値化し、逐次推定に用いる線形予測式を導出する。
- (2) 板厚計による入り側板厚変動とロール間隙変動のデータを用いて、線形予測式の係数パラメータを逐次推定する。
- (3) 推定されたパラメータを用いてAGCの制御ゲインを制御周期ごとに適応修正し、最適な値に逐次更新する。
- (4) 冷延ミルに適用した結果、板厚変動が適用前に比べて1/2に低減できることを確認した。

4 ロバスト制御の応用

4.1 ロバスト制御とは

最適制御の特徴は、状態空間モデルに基づく制御系の設計にある。言い換えると、モデルの精度に強く依存した設計法である。ところが、用いられるモデルには、線形化の際に無視した非線形性の影響、低次元化や経年変化に起因した不確かさが存在する。これによって、理論的に得られるはずの性能が実現できない場合がある。そこで、モデルの不確かさを考慮した制御として、ロバスト制御が登場した。一つの方法としては、モデルの不確かさを、システム方程式の係数行列の変動分で定義した上で、その最大特異値で定量化する。ロバスト制御は、この許容範囲内でシステムの安定性を保証し、応答性の仕様を満たすことを特徴とする。中でも、 H^∞ 制御はロバスト制御の最も注目される技術である。 H^∞ 制御の特徴は、直感的に理解し易い周波数領域においてロバスト制御系が設計できる点にある。この手法では、 H^∞ ノルムと呼ばれる尺度でモデルの不確かさ（最大特異値）を定める。これを用いて、周波数領域において外乱抑制性と目標値追従性を定める感度関数と、ロバスト安定化のための相補感度関数の特性を設計する。これによって、要求仕様に合致する制御系が設計できる。図7に H^∞ 制御による設計方法を説明する。応用事例としては、非線形性を予め見積もることが比較的容易な、熱延ルーパー制御、連铸鋳型内湯面レベル制御、などがある。鉄鋼プロセス以外では、モータの速度制御や自動車のサスペンション制御に適用されている。

1.伝達関数によるモデリング($P(s)$)

2.感度関数の導出

$$S(s) = \frac{I}{I - P(s)K(s)}$$

3.相補感度関数の導出

$$T(s) = \frac{P(s)K(s)}{I - P(s)K(s)}$$

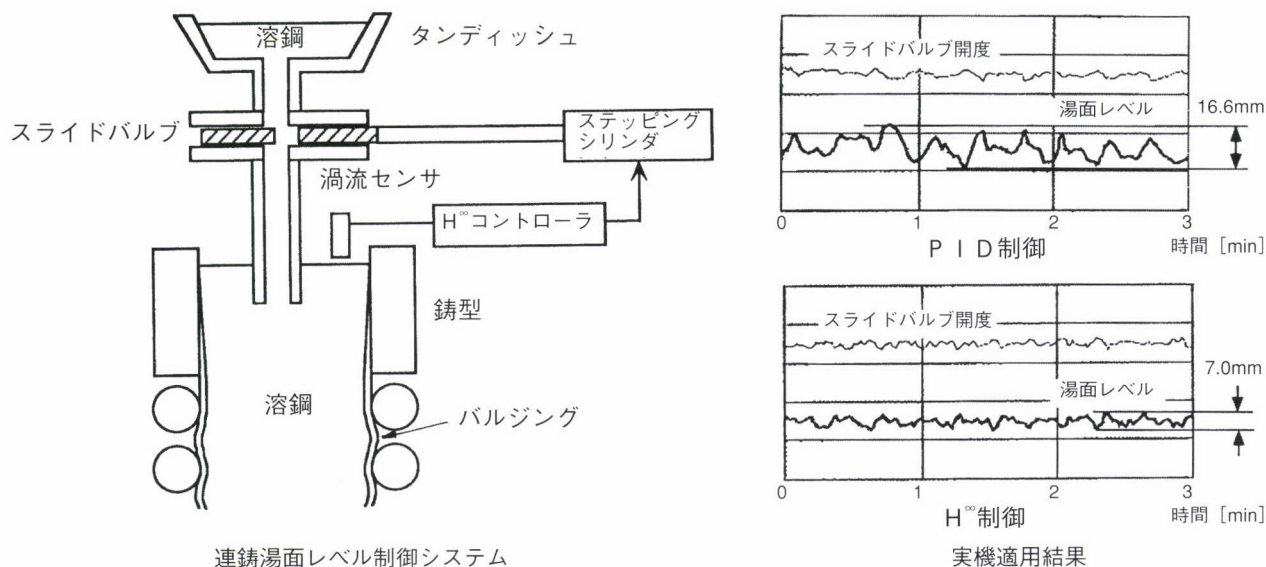
4.混合感度問題を満たす制御器($K(s)$)の設計 (リカッチ方程式の解法)

$$\left| \begin{array}{c} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)T(s) \end{array} \right|_\infty < I$$

図7 H^∞ 制御による設計方法

4.2 ロバスト制御による連铸の鋳型内湯面レベル制御⁵⁾

連铸の鋳型内湯面レベル制御精度は、鋳片の品質や操業の安定化に大きな影響を与える。タンディッシュから鋳型への溶湯の注入は、スライドバルブによって操作される。系の動特性を考察すると、スライドバルブの非線形性に加え、バル

図8 H^{∞} 制御による連鑄の湯面レベル制御

ジングによる低周波外乱が存在する。そこで、 H^{∞} 制御によって、ロバスト安定を達成し、低周波外乱を抑制する制御系を設計する。

図8に制御システムと適用結果を示す。また、本技術の特徴と成果を以下に述べる。

- (1) 鋳型を積分特性で表し、ステッピングシリンダと渦流センサの特性を一次遅れ＋無駄時間系で近似することで、伝達関数による動特性モデルを構築する。
- (2) 感度関数は外乱（バルジングなどによる変動）を入力とし湯面レベルを出力とする伝達関数となり、相補感度関数は外乱を入力とし、制御器の出力信号を出力とする伝達関数となる。
- (3) 混合感度問題では、感度関数と相補感度関数をそれぞれの重み関数で整形する。ここでは、バルジングによる低周波外乱を抑制するため、感度関数に対応する重み関数において、低周波領域のゲインを大きくする。
- (4) スラブ連鑄機に適用したところ、従来のPID制御に比べ、湯面変動を1/2に低減できることが分かった。

5 制御理論応用の課題と展望

5.1 制御理論・制御技術の進展

制御手法としては、現在、化学プロセスにおいて適用が進んでいる予測制御が注目される。図9によって予測制御手法の概要を説明する。システム同定によって線形予測モデル（時系列モデル）を求めておく。一方、現在時刻を k とし、目標値（ $y_s(k)$ ）に対して、制御量を安定に収束させる希望の軌道（ $y_d(k)$ ）を予め与えておく。予測モデルと希望の軌道を用い、最適制御と同様に評価関数を設定して最小化するこ

とで、目標軌道に最適に収束させる入力を求めることができる。この入力式に過去の入出力値（ $u(k)$ と $y(k)$ ）を代入して、プラントに対する未来の入力（ $u^*(k)$ ）を時々刻々求め、制御を行う。本手法は、予測をともなう制御であることから、大きな時間遅れをもつプロセスの制御に有効とされている。また、希望の軌道を与えることで収束性を調整し、モデル化誤差を考慮できることから、ロバスト制御の範疇とも考えられる。鉄鋼プロセスでは、高炉の炉熱制御やクーラントによる圧延の形状制御などにその応用が期待される。

また、制御系設計技術としては、凸関数計画法を用いた数値解析アプローチによるLMI（Linea Matrix Inequality）手法が注目される。LMIによれば、制御系に要求される非線形性などの仕様をより直接的に扱うことができる。例えば、圧延機のロール間隙の操作や連鑄のスライディングバルブの操作に見られるように、制御器から発生される操作量には飽和回路が設定される。LMI手法によって、飽和性を考慮した最適制

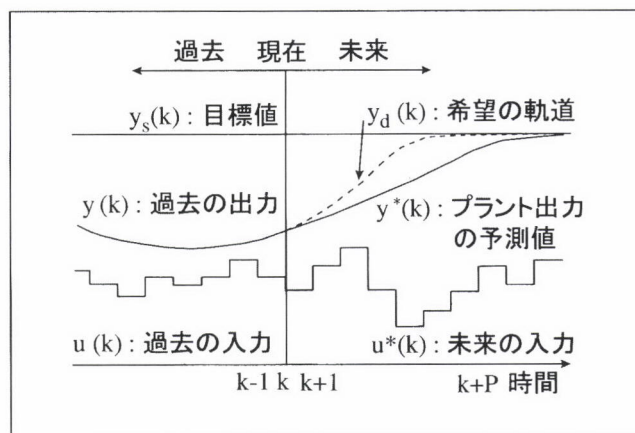


図9 予測制御の概念

御系の合理的な設計が可能となる。

なお、近年、状態空間モデル、最適レギュレータ、からLMIに至るまで、制御系設計用ソフトパッケージが充実しており、今後ともこの傾向が継続するであろう。適切な制御手法を選択できれば、効率的に制御系が設計され、シミュレーションでその性能が検証できる。問題は、如何に適切なツールを選択するか、である。

5.2 モデル化の課題

設計用ツールは整備されつつあるが、モデル化の課題は残る。すなわち、物理モデルを基に、制御に必要な情報の欠落を最小限に止め、メンテナンスが簡便で高精度の制御モデルを構築すること、またロバスト性が議論されるに至り、モデルと実プラントの誤差を見積もることが課題となる。それには、現象と物理モデルとに精通した制御対象の知識と制御理論、制御技術の融合が必要となろう。日本鉄鋼協会 計測・制御・システム工学部会では、制御モデルの標準化とデータベース化を目的とした「鉄鋼プロセスの制御モデル」フォーラム（座長：東京大学 木村英紀教授）を発足させ、産学共同による横断的な検討を行っている。

一方、モデル化は困難と考えられている対象を如何に制御するかも残された課題である。典型的な事例は、非定常現象と呼ばれる状態の制御であり、高炉の棚つり現象や熱延ルーパーの突発的なハンティング現象は、これにあたる。今後も継続してモデル化を押し進める研究を基本とするが、至らぬ部分はAI技術を用いた知的制御を活用し、補間することが有効となる。知的制御については、次回の講座で詳述する。

参考文献

- 1) R. E. Kalman : Bol. Soc. Mat. Mexicana, vol. 5 (1961) , pp. 102 ~ 119
- 2) 北村章, 能勢和夫, 小西正躬, 中田隆正 : システム制御情報学会論文誌, 2巻5号 (1989) , pp. 147 ~ 154
- 3) 北村章, 高橋哲也, 能勢和夫, 小西正躬, 菊地弘介 : システム制御情報学会論文誌, 2巻9号 (1989) , pp. 287 ~ 300
- 4) 中山万希志, 北村章, 能勢和夫, 小西正躬 : 第27回計測自動制御学会学術講演会予稿集 (1988) , pp. 481 ~ 482
- 5) 村上晃, 西田吉晴, 三木尚司, 松浦徹, 中尾勝 : 第16回自動制御連合講演会予稿集 (1993) , pp. 195 ~ 196

(1996年10月31日受付)