



入門講座 制御技術編-1

制御技術の歴史と制御理論の発展

藤井克彦
Katsuhiko Fujii

(株)神戸製鋼所技術開発本部 常任顧問

Historical Prospects of Control Theory and Technology

1 はじめに

日本の鉄鋼業は数多くの技術革新を実現し世界のトップの座を維持している。これには自動化技術の果たした役割は極めて大きいものがある。しかし、今後の業界の趨勢は予測を許さないものがある。明日の鉄鋼業を発展に導くためには、より一層の生産性向上、高品質化の実現が必要である。そのためには鉄鋼業に従事する人々が広く自動化技術に対する認識と理解を持つことが大切であると考ええる。

そのために本稿では、鉄鋼業の立場に立って既に成果を上げている制御技術、今後役に立つ制御理論について、3回にわたって解説することとする。なお、紙面の都合で詳細に記述することができないので、基本的な考え方について触れることにする。詳細についてはそれぞれの参考文献を参照していただきたい。

1.1 鉄鋼業は制御技術の優等生、しかし・・・

日本の鉄鋼業では多数の先駆的制御技術者の努力によって生産工程の自動化、効率化に取り組んでこられた。1960年代にはいち早く計算機制御を導入し、品質・歩留まり向上や生産性向上に効果を発揮した。さらに、高品質、多品種少量生産のプロセスイノベーションを実現し業界のトップの地位を維持している。現在は転炉、圧延機など各プロセスでの自動化はほぼ完成し、多くの研究報告がある。これらの成果に裏打ちされ、他の製造業全体に対しても学協会などを通じて先導的役割を果たしている。

しかし、鉄鋼プロセスは巨大なシステムであり多変数相互干渉系で、かつ非線形性の強い系である。さらに、高温、悪環境の工程であるため計測できない状態量が多いなど、制御技術者が乗り越えなければならない峠が沢山ある。これに対しては熟練者による勘と経験に頼った制御が行われているのが現状である。また、各プロセスの自動化だけでなく生産ライン全体の最適化も実現しなければならない課題である。

1.2 計測・自動制御に関する専門学会の現状

計測自動制御学会、システム制御情報学会などわが国には

専門の学会があり、活発に活動している。'95年北海道で開催された計測自動制御学会学術講演会では、発表件数674件、参加者1200名と盛会であった。しかし、提案型の発表が多く、抽象的で現場のニーズに答えられるものは少ないように見受けられる。玉石混交で、本物と偽物（実用化できないもの）とを区別する必要がある。

日本鉄鋼協会では春秋の講演大会で制御技術の応用を主とした事例報告が行われている。実際の課題と、その解決法を知る場として大いに活用するべきであると考ええる。

1.3 制御技術、制御理論は実学である

制御技術、制御理論は現場のニーズから生じた学問である。理論体系が整備されることによって、広い分野への適用が可能となった。しかし、その後数理学者の参加によって理論は整備されたが、抽象化され難解な表現となった傾向がある。『最近の制御理論は役に立たない』と言う人がいる。これらの理論不信論者には次の2種類がある。理解する能力、努力不足による食わずぎらいの人と、十分理解した上で役に立つかどうか判断できる人である。利用する企業側では後者の意見を傾聴し、選別する必要がある。

また、最近のコンピュータの発展、普及にともなって、従来実用化には不向きと考えられていた手法も利用できる時代になりつつあることも注意する必要がある。

2 自動化技術の推移とコンピュータの発展、普及

将来制御技術を活用するためには、それらの技術が過去にどのような経過をたどって発展してきたかを知ることが有用である。図1に制御技術の変遷とコンピュータとの関係を示す。コンピュータの発展が制御技術の進歩に大きな役割を果たしていることが見られる。制御技術とコンピュータ技術とは二人三脚で発展してきたのである。

図をご覧になれば全体の流れがご理解いただけると思うが、一時期を画したと考えられている事項について簡単に説明する。

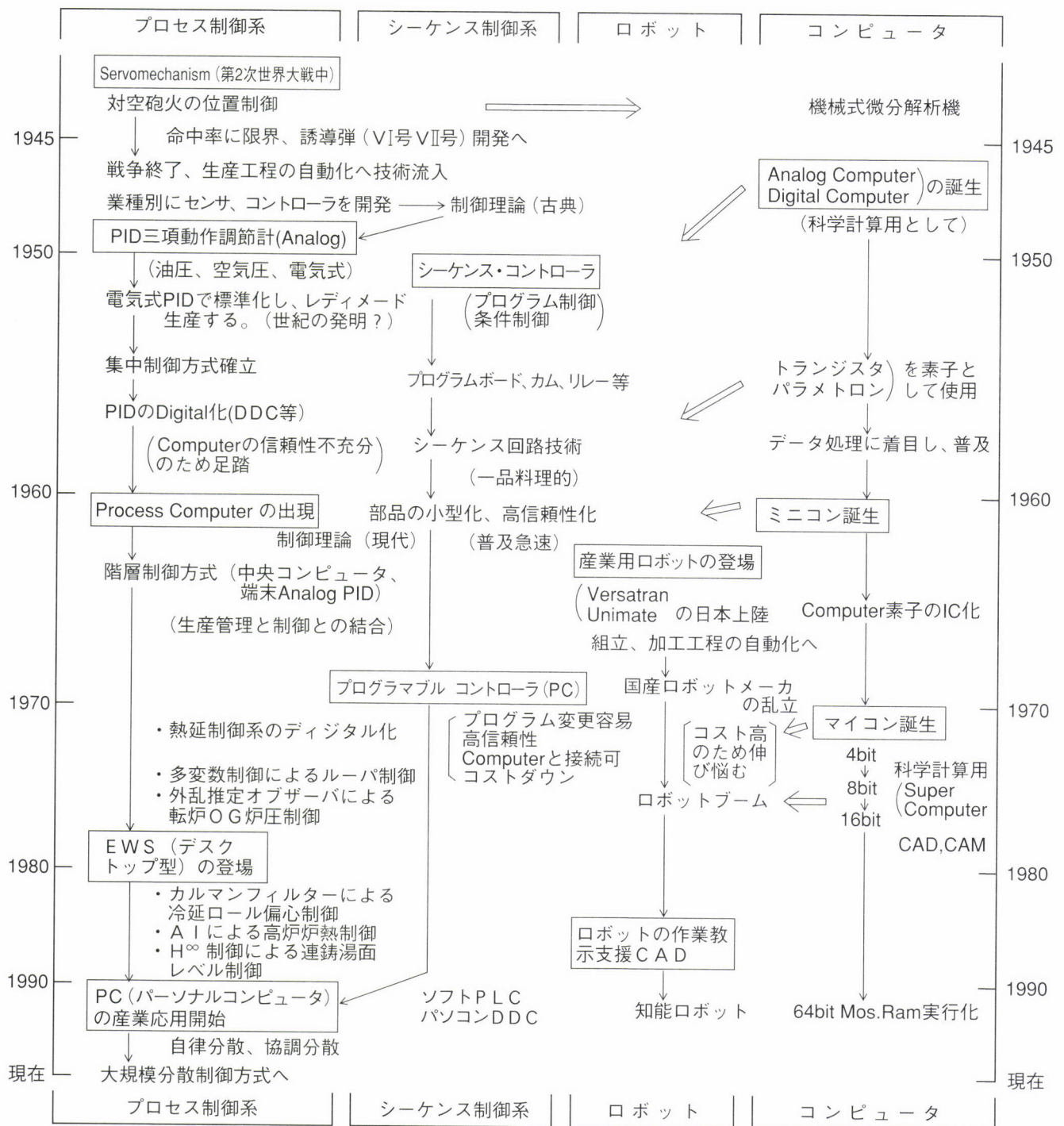


図1 自動化技術の推移とコンピュータ

2.1 サーボメカニズムと微分解析機

自動制御装置の草分けとしては種々のものが伝えられているが、第二次世界大戦中に開発された対空砲火の位置制御の技術が、戦後大きな技術革新の火種となった。弾を命中させるために弾道の方程式（微分方程式）を速やかに、精度良く解く機械式微分解析機は今日のコンピュータの源流と見なされるものである。砲身の位置制御技術は戦後工業生産に転用されサーボメカニズムとしてオートメーション時代の基礎技術となった。

2.2 PID 三項動作調節計の発明

鉄鋼、石油、化学工業等各種産業で温度、圧力、流量等を制御するためのコントローラが個別に開発されていた。サーボメカニズムの原理を体系化した自動制御理論の確立により、各種のコントローラはいずれも P（比例動作）、I（積分動作）、D（微分動作）の三要素が用途により組み合わせられていることが明らかとなった。そこで、比例、積分、微分の 3 機能を備えたコントローラ（PID 三項動作調節計）をレディメイドで製作し、制御すべき各種物理量、化学量をコントローラ入力に変換するトランスデューサとを組み合わせることでプロセスの制御を可能にした。これらの調節計は用途に応じて油圧式、空気圧式、電気・電子式のものが製作されたが、その後半導体素子の進歩により小型で信頼度の高い電子式に統一された。

かくして PID 三項動作調節計は大量生産され自動化技術の普及を加速する原動力となった。

2.3 プロセスコンピュータの出現

コンピュータは、その素子の集積化（IC 化）により信頼度が飛躍的に向上し、生産ラインでオンライン使用できるようになった。アナログ型のコントローラもデジタル化（DDC）され本格的な計算機制御系が構成されることとなった。生産管理と自動制御とがコンピュータによって結合され、生産効率が格段に向上し、文字どおりのオートメーション時代が実現した。プロセス制御系だけでなく、シーケンス制御系もシーケンサーのプログラムをコンピュータソフトで実現することで適用効率が向上した。

かくして、大規模システムの制御や CIM（コンピュータを用いた生産情報の統合）化のための道具立てが揃ったこととなった。

2.4 鉄鋼プロセスの革新と制御技術の発展

最近 20 年間に鉄鋼プロセスの技術革新が実現し高い生産性とコスト競争力を確保した。連続化を目指して連続鋳造、連続圧延、連続焼鈍などが次々と実用化された。これに伴い高生産性のもとの高品質と高歩留まりが追求され各種制御技

術が開発適用された。すなわち、連鑄機の 2 次冷却水制御、モールド内湯面レベル制御、圧延機での压下系の油圧化とミル剛性可変化した走間板厚変更、連続焼鈍炉の炉温制御などが実用化されプロセスの技術革新を支えてきた。

また、材質面での圧延加速冷却による材質作り込みがあり鋼種統合化が実現しているが、この分野でもコンピュータ制御が寄与している。

3 フィードバック制御系の理論 (古典制御理論)

制御理論はシステムの特性を解析することが目的ではなく、その方法を逆に使用して制御システムを構成（シンセシス）するための理論である（図 2 参照）。図（a）に示すように特性既知のシステムにある原因（入力）が加わったときの結果（出力）を求めるのではなく、図（b）に示すように原因と結果とが与えられて、この関係を満たすようなシステムを構成する方法を与えるものである。

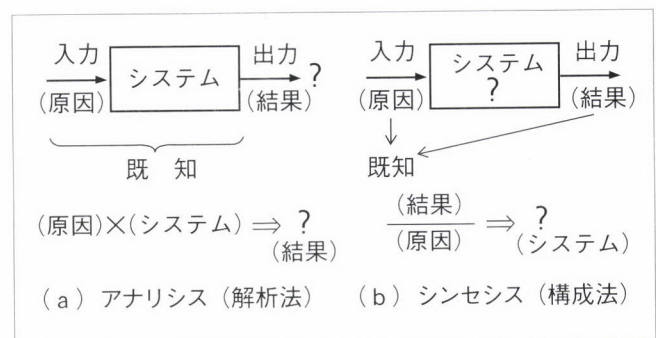


図2 アナリシスとシンセシス

3.1 システムの表現法、伝達関数

制御系は時々刻々変化する入力または外乱に対して、望ましい出力が得られるように構成することを目的としているた

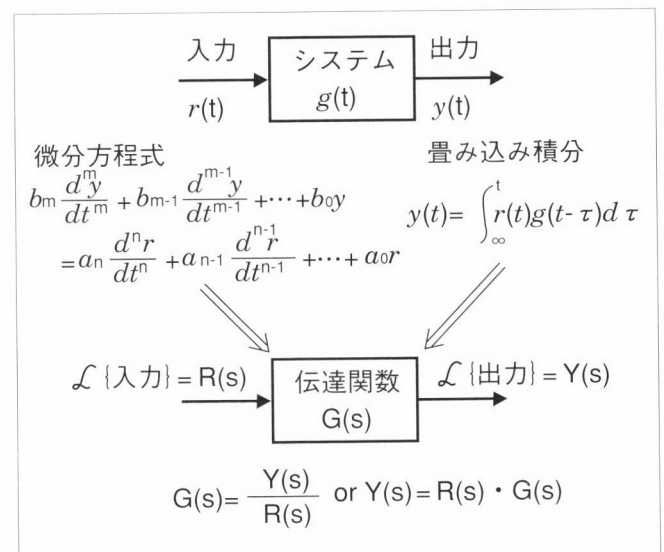


図3 伝達関数

め、システムの動的特性に着目する必要がある。それには微分方程式で表現されるのが普通である。しかし、シンセシスのためにはこの方程式の解を求めるのではなく、ラプラス変換することにより代数方程式として入出力関係を表現する伝達関数を定義する。また、時間領域での入出力関係は畳み込み積分で表現することもできるが、これもラプラス変換することにより簡単な有理式となり、伝達関数が定義できる。(図3 参照)

3.2 周波数領域でのシステム表現法

電子回路理論で用いられている手法を利用したものである。入力信号として正弦波形を加えたときの入出力信号の振幅比及び位相差に着目する。入力信号の周波数を 0 から無限大まで変化させたときの振幅比及び位相差の変化から周波数特性としてシステムの特性を表現する方法である。周波数 0 から無限大まで変化させる操作によって動特性の情報が得られる。(図4 参照)

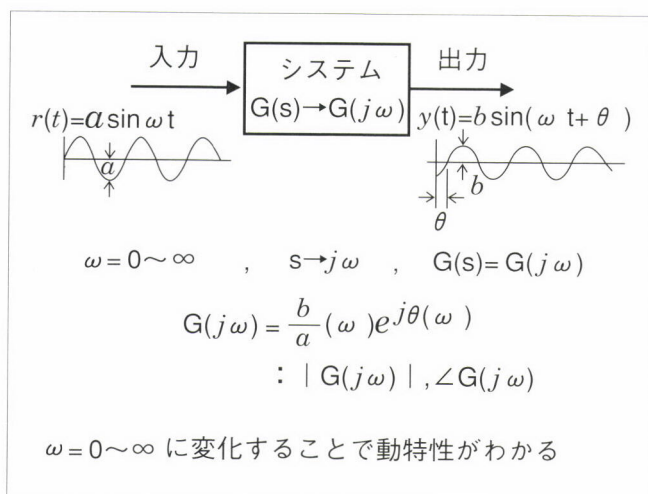


図4 周波数伝達関数

3.3 不規則入力信号からのシステム表現法

システムが既に操業状態にある場合にその入出力信号からシステムの特性を表現する方法が考案されている。操業時入力及び出力信号がそれぞれ定常不規則過程の条件を満足していると仮定して、入力信号、出力信号の自己相関関数及び入出力信号の相互相関関数を計算する。この操作は不規則信号から雑音成分を除き信号成分を取り出すためのものである。これらの相関関数からスペクトル密度を求めると、システムの特性を表現することができる。なお、これらの操作には複雑な計算を伴うので計算機の援用が必要である。(図5 参照)

3.4 フィードバック制御系

与えられた設定値（希望する値）にシステムの入出力（制御量）を近づけたり、外乱の影響を打ち消すためには出力を入力側に戻す（フィードバック）構成がとられる。これがフィ

ードバック制御系である。(図6 参照)

制御系の各構成要素は抽象化した数学モデル（伝達関数）で表現し、信号の流れにもとづいた制御系全体の構成をブロック線図で描く。

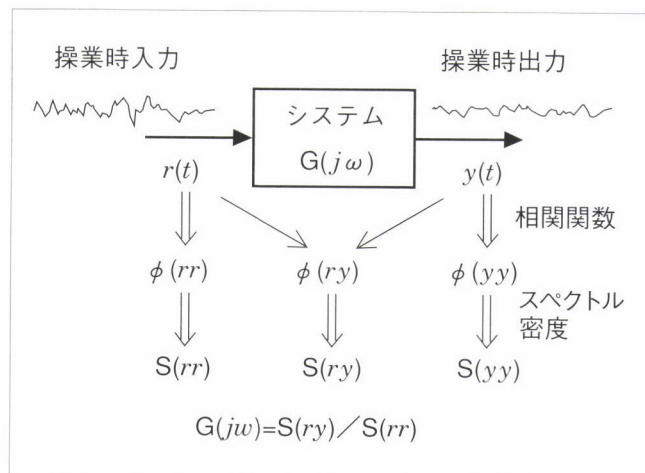


図5 操業時入出力からの伝達関数の導出

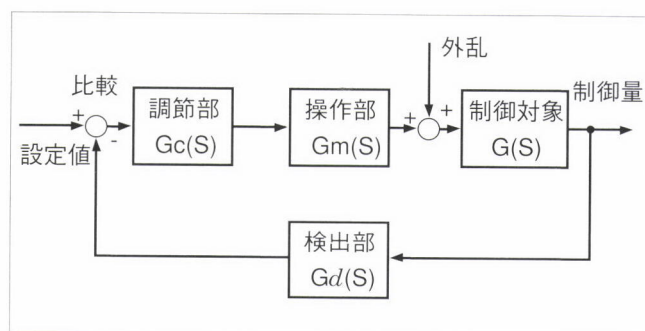


図6 フィードバック制御系のブロック線図

3.5 制御系の設計法

フィードバック制御系が最適な条件を満たすように調節部のパラメータを設定したり、補償要素を付加することを制御系の設計（シンセシス）という。これらの操作の指針を与える手法としてナイキスト線図、ボード線図などが考案されて

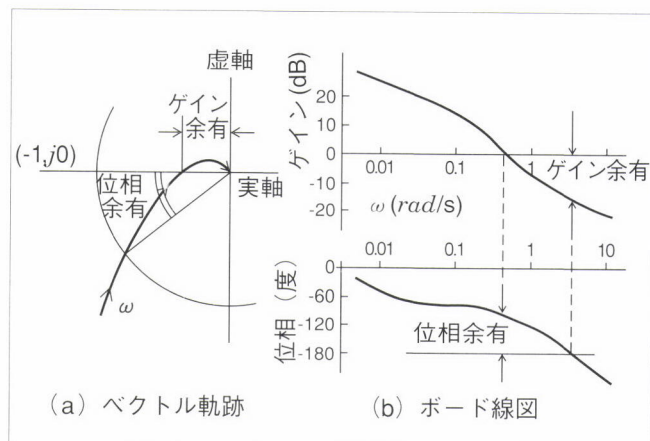


図7 制御系設計法

いる。いずれもフィードバック制御系のフィードバックループを切り離し、オープンループの伝達特性から、位相余裕、ゲイン余裕などのパラメータを目安として、フィードバックループを構成したときの系の特性が最適な状態になる条件を推定するものである。(図7 参照)

以上が制御理論の骨子であるが、線形連続システムのみでなく非線形制御系、サンプル値制御系などの設計にも本手法の拡張が試みられている。

終わりに、圧延工程におけるフィードバック制御系の典型的な例を図8に示しておく。図は5スタンド・タンデムミルで4および5号スタンドのモータ電圧を調整して4、5スタンド間張力を変化させることにより5号出側板厚を一定に制御する回路の一例である。5号出側にX線厚さ計を設置し、検出された厚さの偏差信号はPI動作調整回路を通じてミルモータの速度にフィードバックされている。

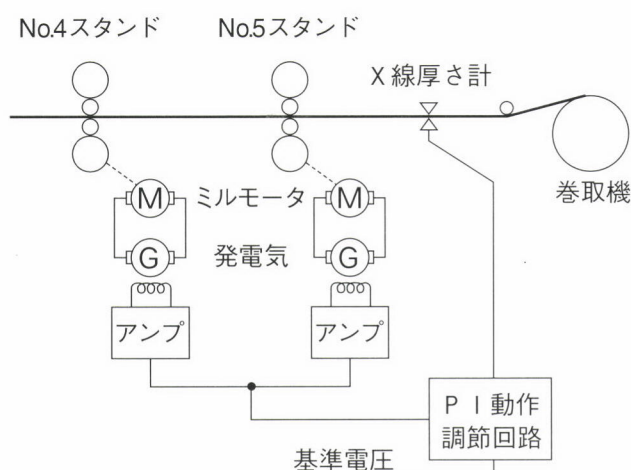


図8 張力制御AGC回路の例

4 状態変数による制御理論

米国とソ連（現在のロシア）との宇宙競争時代にロケットの軌道制御を目的として、フィードバックにとらわれずに最適制御解をもとめる一般的な理論が注目された。この理論は状態ベクトルを用いてシステムを表現することにより非線形系を含む一般力学系の理論を制御の分野に応用したものである。この理論はフィードバックを基本にした理論とは異質のもので、近代制御理論と名づけて従来の理論と区別している。

4.1 フィードバック制御理論からの脱皮

伝達関数によるシステム動特性の表現法には以下に述べるような限界があり、それらが自動化技術拡大の隘路となっ

いた。すなわち、

- (1) 伝達関数によって入力に対するシステムの出力を求める方法では、システム内部の状態を知ることができない。
- (2) 伝達関数は1個の入力と1個の出力間の応答を規定するもので、多入力多出力のシステムを取り扱うのに不向きである。
- (3) 伝達関数は線形システムに対して定義されたもので、非線形システムには適用できない。

これらの限界を越えるケースに対しては状態変数によるシステムの表現法を採用すべきである。

4.2 状態変数によるシステムの表現法

図9に示すようにシステムを多入力多出力の系であると想定し、 r 個の入力群 $u_1 u_2 \cdots u_r$ を r 次元の入力ベクトル $\mathbf{u}$ 、 m 個の出力群 $y_1 y_2 \cdots y_m$ を m 次元の出力ベクトル $\mathbf{y}$ 、システムの状態を現す n 個の変数 $x_1 x_2 \cdots x_n$ を n 次元状態変数ベクトル $\mathbf{x}$ とし

$$\text{状態の運動方程式} \quad \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$$

$$\text{出力の方程式} \quad \mathbf{y}(t) = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$$

と表現する。上式は1階の微分方程式であるから、その解は簡単に求まる。

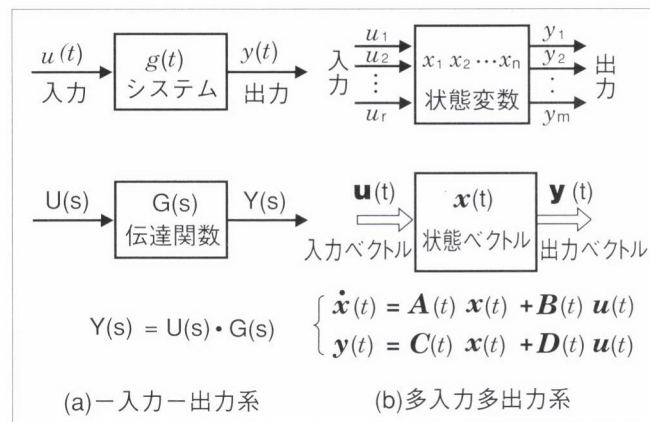


図9 多入力多出力システムの状態変数表示

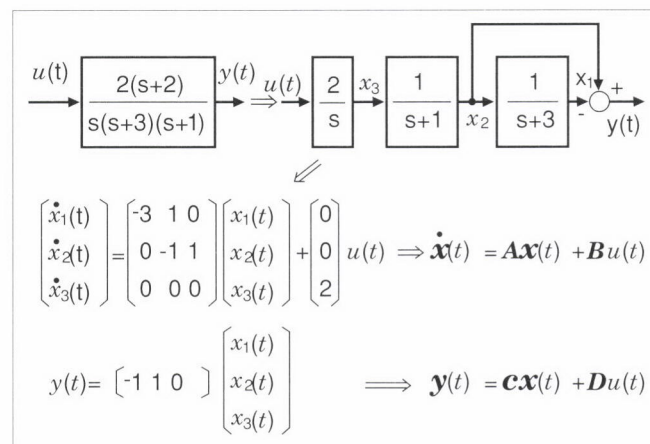


図10 伝達関数から状態方程式への変換

なお、伝達関数、ブロック線図で表現されたシステムと状態方程式表現との関係を理解していただく為に、ブロック線図で示されたシステムから状態方程式を求めた例を図10に示す。ブロック線図の出力側から順次 x_1 、 x_2 、 x_3 と状態変数を定めている点に注意されたい。

4.3 現代制御理論の効用

状態方程式でシステムを表現することによって、以下に示すような展開が可能になった。

- (1) リアプノフの安定定理・・・非線形を含む極めて一般的な力学系の安定を論じる方法を提案した。しかし、リアプノフ関数の存在を前提としたもので、この定理を用いて直ちに安定判別ができるというものではない。
- (2) 最適制御理論・・・ベルマン(米国)はダイナミック・プログラミングというコンピュータ演算形式の手法で離散時間過程の最適制御理論を提案した。ポントリアギン(ソ連)は連続時間過程の最適制御理論を確立した。これは、変分法を基礎とする厳密な理論で最大原理という定理に集約した。
- (3) 可制御性、可観測性・・・カルマン(米国)は状態変数によるシステムの記述によって、内部変数(状態変数)と外部変数(入力と出力)との相互関係から解析、設計が可能な条件を明らかにした。
- (4) 大規模システムへの適用・・・鉄鋼業のような多入力多出力で大規模なシステムの制御問題を取り扱うには状態変数を用いた表現が適している。しかし、従来のフィードバック制御理論で処理できるシステムが沢山実在していることも忘れてはならない。
- (5) 内部状態に着目した制御系の構成・・・状態変数により、内部状態の情報が得られるので、非干渉システムの設計や根配置を考慮したシステムの設計を容易にした。また、オブザーバ(状態観測器)、カルマンフィルタを用いて予測制御、適応制御など新しい制御システムの構成を可能にした。
- (6) フィードバック制御理論との融合・・・最近ではフィードバック制御理論と状態変数制御理論との区別が消えて適応制御理論やロバスト制御理論が盛んに採用されるようになってきている。

5 制御対象のモデリングと同定

前章までで制御理論の基本的な事項について述べた。しかし、制御理論はいずれもシステムの数学モデルが与えられたとして、その最適解を求める方法を与えるものである。しかし実際には制御対象が簡単に、正確に数学モデルで表現され

るとは限らない。数理学者は制御理論には興味を示すが、制御対象の数学モデルを作成することには関心を持たない。このモデルの作成は非常に労力を必要とし、また困難な作業であるが、現場の担当者が取り組まねばならない仕事である。しかも、モデルの精度が最終的な制御精度を左右するので精力的に取り組まねばならない作業である。

5.1 制御対象のモデリング

制御対象のあらゆる物理的、化学的知見を利用して動的な特性をモデル化するのであるが、その開発には多大な工数を要する。高炉または転炉の動的特性を数学モデルで表現する例を考えていただければ作業の困難さが理解できると思う。しかも、作成されたモデルは経時変化や操業形態の変化にも追従できる事が望まれる。

また、モデリングではある種の仮定に基づいて現象を数式化するのであるから、実現象との間に誤差が生じる。このため、制御系設計においてモデルの誤差を考慮しなければならない。ロバスト制御や適応制御の適用がこの面からも必要となってくる。

5.2 制御対象の同定

制御対象のモデリングが困難である場合は、許される範囲で特性既知の入力信号を加えて出力を計測し、その入出力関係から対象の動特性を推定する方法を採用する。

この場合、入力信号には出来るだけ広い周波数成分を含んだ信号を採用する。また、特定の入力を加えることが許されない場合は操業状態の入出力信号を利用することを考える。微弱なパルス列を入力する方法や、暗号信号を利用する方法も考案されている。(図11参照)

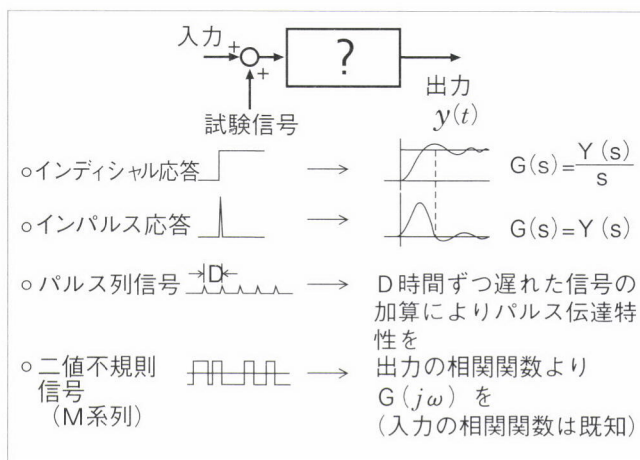


図11 システムの同定法の基本（隗より始めよ）

5.3 知識工学の利用

鉄鋼業の生産現場には多くのノウハウが存在する。物理、化学モデルでは十分にモデル化できない場合には、熟練した人間が最終的に調整、介入して処理している。この人間の知識を分析してモデル化を行う方法が研究されている。制御理論といえば数式ばかりが沢山出て来て理解するのにうんざりさせられたが、数式化できない人間の感性をモデル化する段階で、数式のない制御理論の時代となった。AI、エキスパートシステムなどが登場してきた。これらについては後に詳述する。

5.4 次回、次々回の予定

本稿ではフィードバック制御理論、近代制御理論、システムのモデリングについて、それぞれ基本的な事項について概説した。

次回、次々回は鉄鋼業において活躍している制御技術、明

目をめざして研究されている新しい技術について、具体例を引用しながら解説することとする。

参考文献

本稿は制御工学の基礎的な事項について述べたので全般にわたる参考書をあげる。

- 1) 近藤文次, 藤井克彦共著: 大学課程 制御工学, オーム社 (1995、25刷り)
- 2) 須田信英: 制御工学, コロナ社, (1989)
- 3) 増淵正美: システム制御, コロナ社, (1994)
- 4) 前田 肇, 杉江俊治共著: アドバンスト制御のためのシステム制御理論, 朝倉書店, (1994)
- 5) 鉄と鋼創立80周年記念特集号 第5章 計測・制御, Vol.81, No.4 (1995)

(1996年9月30日受付)