

補足 制御について

4．制御システムの拡張

4．1 アドバンスト制御

4．1．1 制御システムの階層構造

コンピュータの高速化・大容量化・低価格が進み、従来ではアナログで構築されてきたプラントの計装システムが急速にデジタル化されている。またプラントの大規模化に伴い、大量の計装機器・制御機器のプラントへの導入が、デジタル化の流れを強力に推し進めている。コンピュータ導入によりプラントの自動運転が可能となり、大量の機器データの処理やプラント運転員への情報提供が容易にできるようになった。つまりコンピュータがなければ、大規模プラントの運転はできないのである。

計装システムがデジタル化されるということは、プラントの各種の測定値（温度、圧力、流量、などなど）がデータとしてコンピュータの中で容易に処理できるということである。今日では、このようなデータの宝庫であるコンピュータを使い、コンピュータの特徴である大量データの高速度計算という特性を活かした、新たなプラント制御理論がいろいろと考え出されている。

また今日のプラントは、経済問題や環境問題など世界的な潮流を反映し、エネルギー消費量削減・品質向上・生産量増加など、これまで以上に厳しい条件での設計が求められている。これらの課題を実現するため、プラント全体の挙動を考慮するような制御理論に注目が集まっている。

このようにいろいろな背景から、さまざまな制御理論がコンピュータを利用して実現されており、図1に示すように、1つのプラントにいくつも制御理論が適用されている。これらの理論は互いに対立するものではなく、階層構造を形成して補完し合う関係にある。図1に示した各階層について、次節以降で説明する。

=== メモ： ===

- ・従来のPID制御はなくなる。
- ・PID制御の上位に、モデル予測制御などの部分最適化をめざした制御システムが構築される。
- ・その上位に、プラントワイドコントロールなどの全体最適化をめざした制御システムが構築される。
- ・将来の方向性として、アドバンスト制御理論を階層的に実装していくのではないかと。

4．1．2 計装機器 / 制御機器

プラントを実際に制御する機器である。例えば流量を制御する場合、流量計（計装機器）を使って流量を測定し、バルブ（制御機器）を使って流量を操作している。プラントを正常かつ安全に運転するために、なくてはならない機器である。プラントの大規模化により大量の計装機器・制御機器が導入されている。

4．1．3 データ変換（処理）

計装機器で測定されるアナログデータは、コンピュータで利用できるようにデジタルデータに変換される。

このようなAD変換は今でこそ当たり前の技術であるが、以前はアナログ測定値を基にアナログコントローラで処理し、制御機器へアナログ信号を渡していた。コンピュータの普及とともにデジタル技術が実用化され、プラント制御分野においてもこの技術が適用された。

コンピュータシステムをプラント制御へ導入することはプラントの信頼性に大きく影響することから、耐障害性などを十分考慮したDCS (Distributed Control System) と呼ばれるプラント計装・制御専用コンピュータが開発された。DCSの開発はプラントのデジタル化を加速し、いろいろな変化が起こった。

=== メモ： ===

(1) ヒューマン・マシン・インターフェースの向上 (記録計からCRTへ)

==> プラント運転、モニタリング、が容易になる

(2) 時系列データの保管 ==> プラントの分析に利用

(3) 離散値制御理論の発展 (モデル予測制御など)

- ・DCSの位置付け

- ・パッケージソフトウェアの位置付け

- ・実際には収集した生データは、ノイズ除去処理、統計処理 (平均、分散、など)、などいろいろな加工を施されて保管される。

- ・周波数領域への変換 (FFT)、ウェーブレット?

- ・また、測定できない数量は、他の測定データから推定される。

- ・モニタリングは必要、プラント適切な運転のため

- ・過去の運転データを利用して、トラブルの分析、いろいろな評価を行なう。

4.1.4 PID制御

デジタル化技術が普及されるまでは、計装機器のアナログ出力を基にアナログPIDコントローラで制御機器への信号を計算していた。DCS導入に伴い、プラントの計装・制御システムのデジタル化が進み、PID制御もデジタル化された。

PID制御の仕組みを図2に示す。制御変数と設定値との偏差に対し、比例 (P: proportion)・積分 (I: integration)・微分 (D: differentiation) の各演算を行ない、演算結果に基づいて制御機器を操作する仕組みをPID制御と呼んでいる。直感的には、比例項は現在の偏差の大きさに対応する量を、積分項は過去の偏差の累積値に対応する量を、微分項は未来の偏差の変化予測に対応する量を意味する。すなわち、過去・現在・未来の三要素のバランスを見て次に行なうべきことを決定するという、人間の判断と同様のことを自動的に行なっているのがPID制御であると言える。

PID制御は古典的な手法であるが、製造現場では効果的な手法として評価されており、非常に多くのプラントに導入されている。今後さまざまな制御手法が導入されても、PID制御はなくなることはないと考えられる。

=== メモ： ===

- ・制御ループ

- ・実際には、PとDの制御が多い

- ・液面位置は流量の積分。コントロールはどうやるの？

4 . 1 . 5 部分（単位工程）最適化制御

1つのプラントは複数の単位工程から構成されることが多い。例えば、最終製品を製造するために、3回の蒸留が必要な場合、投入された原料は3つの蒸留棟を通過する。これを3つの単位工程から構成されると見ることができる。

それぞれの単位工程では、さまざまな制御変数が存在し、制御変数はそれぞれのPIDアルゴリズムにより制御されている。多くの場合、プラント運転員が経験などに基づきPIDの目標値を設定しており、その設定値が一番適切な値であるという保証はない。

プラント運転員にとっては、オフスペック製品を出さないように慎重に運転することが一番の目的かもしれない。しかし、そのためにエネルギーを多く消費したり、製造量を抑制したりしているかもしれないのである。また、人間が一度に多くの制御変数の関係を考えてそれぞれの目標値を設定することは至難の業である。今日のプラントには、世界的な経済問題や環境問題などの要求から、適切な運転が求められており、人間の操作によらずに多変数に対応した最適設定値を計算するような制御理論が求められている。

このような多変数最適化の要求に対応する制御理論として、現代制御理論最適化・モデル予測制御・最適化ベースプラントワイドコントロールの3つの手法を紹介する。

=== メモ： ===

- ・単ループの制御から多変数制御へ、アナログからデジタルへ
- ・最適化
- ・生産量拡大 / 品質向上 / コスト削減などの効果が期待される。
- ・デジタルデータを活かした制御手法（離散値モデル）

(1) 現代制御理論：最適化

多変数の最適化の理論として最初に紹介するのは、現代制御理論に基づいた最適化手法である。現代制御理論の成果の1つであり、理論的には非常にスマートな手法である。

現代制御理論という名前は、前述したPID制御をはじめとする古典制御理論と対比するためにつけられた。古典制御理論は第2次世界大戦中に目覚ましい発展を遂げたが、その理論的基盤は通信や電気回路の分野で発展した周波数領域における解析にあり、制御対象の入力と出力のみに注目した理論であった。1950年代から、最短時間で目標に達する最短時間制御問題や、使用するエネルギーを最小にする最適制御問題などが研究されるようになった。その結果、最適制御問題では制御系は内部状態を含めたモデルを用いて表現されるようになった。このような内部状態まで考慮した制御理論を現代制御理論と呼んでいる。

以下に、最適制御問題について簡単に説明する。制御対象は次の状態方程式で表現されるとする。

$$dx / dt = Ax + Bu$$

$$y = C x$$

ただし x : 状態変数、 u : 入力変数 (操作変数)、 y : 出力変数 (制御変数)

A 、 B 、 C : 行列

このように、現代制御理論はベクトルと行列で表現される理論であり、すなわち多変数を一度に考慮することのできる理論である。ここで、次の式を最小にする制御を考える。

$$J = \left(1 / 2 \right) \int \left(x^T Q x + u^T R u \right) dt$$

ただし Q 、 R : 行列

この式は 2 次形式評価関数と呼ばれ、これを最小化することは、エネルギー消費を最小にしながら状態変数をゼロにすることを意味している。この制御問題の解は次のように求められる。

$$u = - R^{-1} B^T P x$$

ただし P : リカッティ方程式の定常解 ($A^T P + P A + Q - P B R^{-1} B^T P = 0$ を満たす P)

これは、内部状態 x にある定数を掛けて入力にフィードバックすることを意味している。

簡単な説明であるが、このアルゴリズムにより得られる状態フィードバックにより、最適化が実現されるわけである。このアルゴリズムをプラント制御に利用できれば、プラントの最適運転が可能になるはずである。しかし、この理論はプラント制御には用いられていない。なぜか？理由は簡単である。プロセスプラントでは最初の前提となる状態方程式を定式化する段階が困難である。

電気回路や機械の世界では、制御しようとする対象が物理的な微分方程式で表現しやすく、そのモデルを基に状態方程式を生成することが容易である。それと比較して、プロセスプラントの挙動を微分方程式で表現することは大変困難である。

最初の状態方程式さえできれば後はほぼ自動的に解を得られる理論であるが、状態方程式が立てられないために現代制御理論をプロセスプラント制御に応用することは困難なのである。

(2) モデル予測制御

次に紹介するのは、モデル予測制御と呼ばれる手法である。この手法では、実プラントのインパルス応答やステップ応答を測定し、測定結果に基づいて離散線型時系列モデルを構築し、このモデルから導かれる予測式を用いて制御系を設計する。コンピュータのプラントへの導入およびデジタル技術の発展ベースに、時系列モデルを制御理論に取り込むことが可能となった。これまでの数式モデルではなく、時系列モデルを取り入れたことがコンピュータの発展とあいまって発展した理論である。

現代制御理論と同様にベクトルと行列で表現される多変数対応の手法であるが、現代制御理論と比較して非常に現実的な理論であると評価され、現在さまざまなプロセスプラントに適用されている。現実的な手法であると言われる理由としては、制御アルゴリズムを理解しやすいことと、モデルが多少いい加減でもある程度の結果を期待できることであると思われる。

=== メモ： ===

- ・多変数制御：現代制御理論からモデル予測制御へ、数式モデルから時系列データモデルへ
- ・部分最適をめざし、PID制御の上位として導入される制御システムである。
- ・時系列データのモデルを持つ。
- ・実績のある制御方法である。

(3) プラントワイドコントロール：最適化ベース定常状態アプローチ

多変数の最適化の理論として最後に紹介するのは、プラントワイドコントロールと呼ばれる手法である。プラントワイドコントロールにはいくつもの手法があり、広い意味で言うと前述のモデル予測制御もこのカテゴリーに含まれる。ここでは、最適化ベース定常状態アプローチの手法について説明する。

本手法はプロセスプラント制御を念頭に置いて研究されている手法であり、汎用的な利用を目指した現代制御理論とは異なる。この手法では、次のような仮定を前提としている。

- 対象となるプラントは、非線型ダイナミックモデルで表現可能である。
- 結果として得られた制御系は、プラントのダイナミックシミュレーションによりさらに評価される。

このように、ダイナミックシミュレーションを用いて制御系を評価するなど、個々のプラントの特性に深く依存する手法である。

・ プラントワイド制御系の例：

いくつかの基本的な手法を組み合わせることで構築される。この手法の目的は、プラントワイド制御系の構造についていくつかの候補を作成することである。作成された候補は、さらに非線型ダイナミックシミュレータを使って評価され、実プラントに適用されることになる。

・本手法では、次のような手順を実施する。

1. エンジニアリング分析（製品流量および製品成分比を操作するための変数決定）
2. 線形化状態空間モデルの生成
3. 最適化手法を使った制御系構造の候補の選択
4. 可制御性ツールを使った制御系構造の候補の絞り込み
5. 定常状態シミュレーションおよびダイナミックシミュレーションによる制御系構造の候補のテスト

=== メモ： ===

- ・今後の課題
- ・非線型制御、ニューラルネット、がキーポイント？
- ・線形計画法？ 生産品目・生産量の決定？
- ・最適化の流れ、部分最適から全体最適へ
- ・離散値制御（デジタル直接制御）

(4) ニューラルネットコントロール、非線型最適化

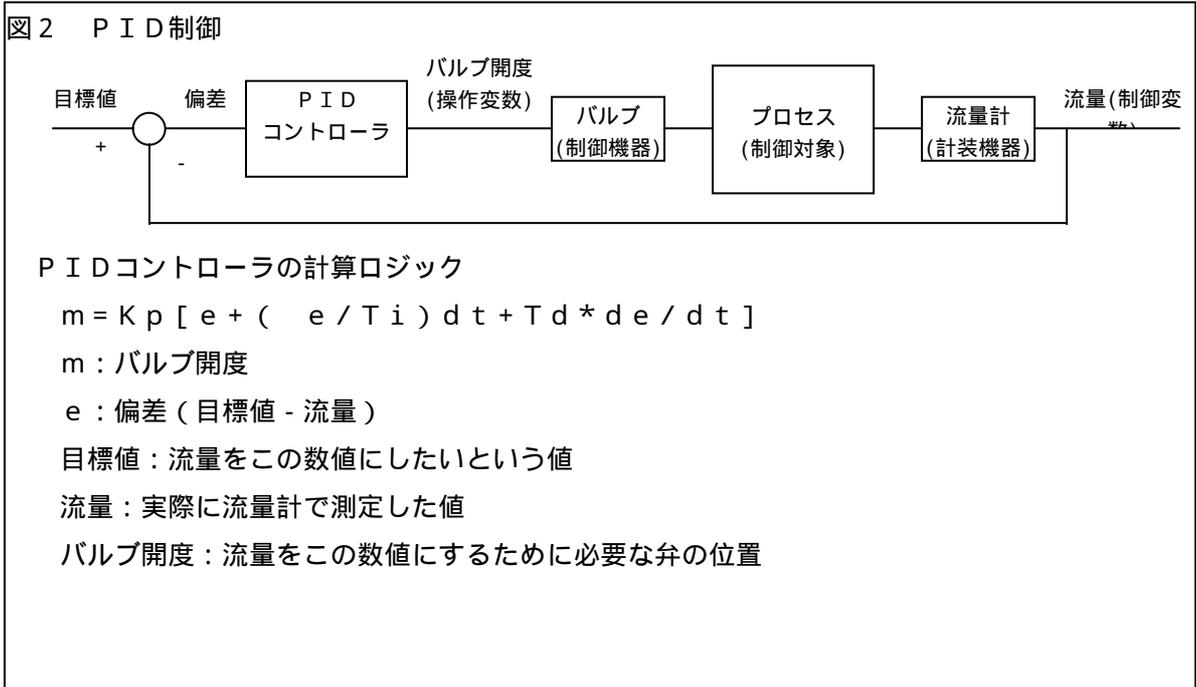
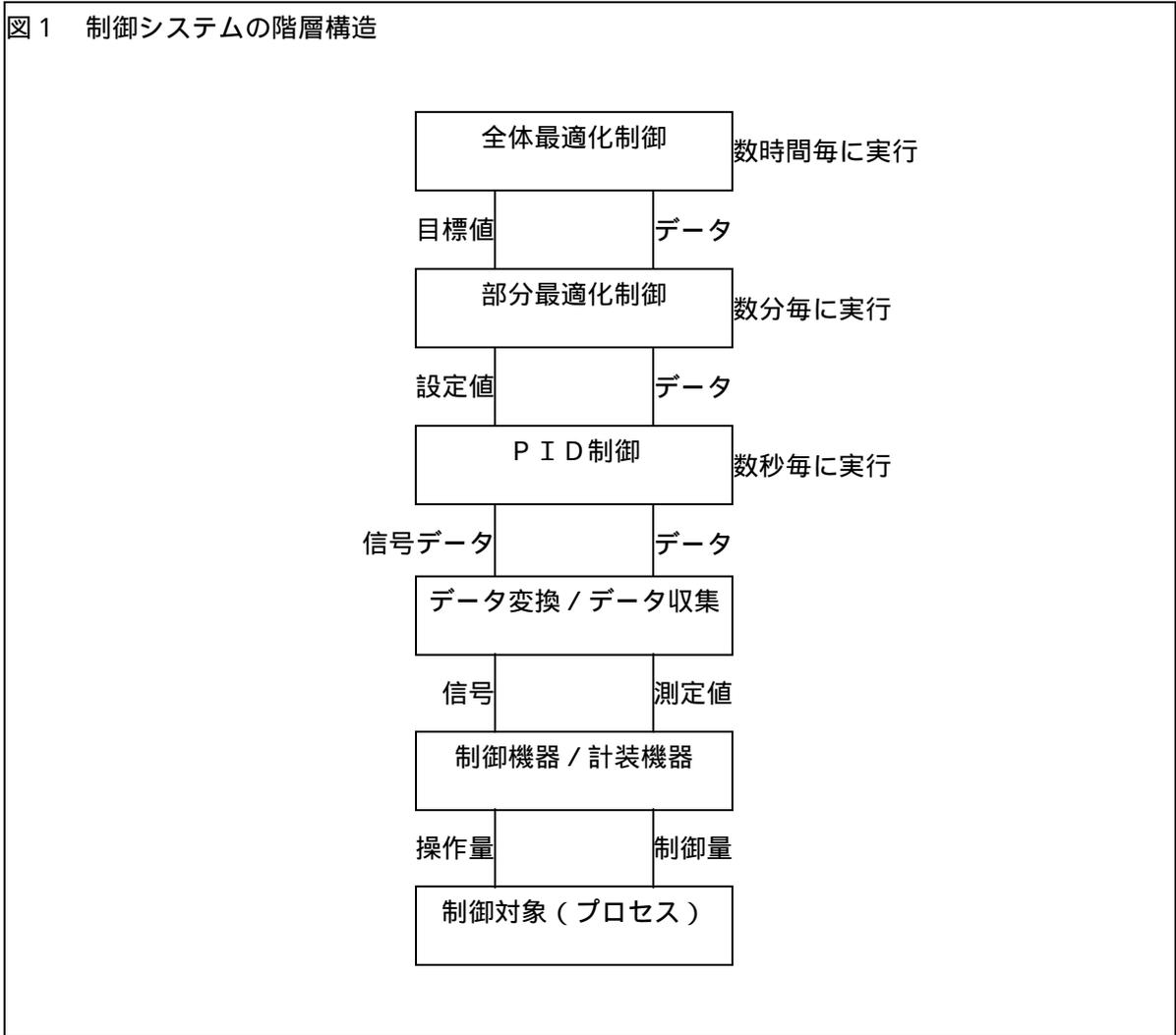
・非線型、離散値、多変数

・これまでの制御理論は線型という仮定の上に構築されてきた。実際の制御対象の大半は非線型であるが、線型近似して制御理論を適用し、それなりの効果を達成することができた。しかし非線型制御対象を非線型のまま処理することは制御工学の 1 つの目標であり、運転の最適化が達成される可能性がある。

4 . 1 . 7 プラント設計への影響？

=== メモ： ===

- ・センサ位置はプロセス屋が決める。制御屋の仕事は？
- ・制御効果によるプラント機器サイズを小さくできる？
- ・滞留を小さくできる？
- ・安全設計との関係 == > 制御性と安全性、安定性の保証
- ・将来の制御と人間 / 運転の役割：完全自動制御プラントは可能か？



4 . 2 情報システムとの連携

世の中ではコンピュータシステムがいろいろなところで利用されている。連続プロセスの工場を持つ製造業においても、これまで説明した制御システムの他にもいろいろな形でコンピュータシステムを利用している。これらのコンピュータシステムは互いに独立していることが多いが、これからはいろいろなシステムが連動して機能する時代へと突入する。図3は、図1の制御システムとは別の次元にシステムを拡張・階層化し、情報システム（管理システム）とデータを連携することを示している。

制御システムのところで記述したように、デジタル化技術の進歩がこのような拡張をもたらしたと言える。実プラントの測定値はアナログ信号であるが、これをデジタル化してコンピュータに取り込むことができたことが、制御システムと情報システムとの融合を可能とした。

4 . 2 . 1 製造管理システム

- ・ 製造管理システムは工場毎、全社基幹システムは全社で1つ
- ・ 収集データをモニタリングし、監視画面に表示する
- ・ データに異常が発見された場合には、設定された場所にアラームを表示する
- ・ 製造実績を管理する
- ・ 生産管理システムが作成する工場毎の生産計画から、実際の製造状況を考慮して製造スケジュール（運転モードの切替え時期、製造数量、など）を作成し、オペレータに通知する
- ・ 製造数量データなどを基に、各種の管理レポート（製造日報、製造月報、など）を生成する
- ・ 重要なプロセスデータをデータウェアハウスに保管し、プロセスエンジニアの分析要求に応じたデータを提供する。
- ・ データマイニングツールを用いて、各種データの関係などを調べる
- ・ ヒューマンマシンインターフェース：画面の要件はさまざまである。原子力などでは、とにかくフェールセーフの運転が求められる。プラントでも海外では誰でも使えるわかり易い画面が求められる。日本のプラントでは、ベテランオペレータが機能を最大限に使いこなせるような画面が求められる。

4 . 2 . 2 全社基幹システム

- ・ お金の管理
- ・ 生産管理：全社生産計画と製造管理システムで管理している製造実績を基に各プラントの生産計画を作成、需要予測
- ・ 在庫管理：製品数量の管理（製造実績から通知される）、原料在庫の管理、原料の発注 / 購入
- ・ 製品の需要予測などに基づく、全体最適化（制御システム）が可能か？

