

# アドバンスト制御とシミュレーションの実用化の概要

太田 徳二(おおた とくじ)

竹山 良雄(たけやま よしお)

## 1 まえがき

デジタル制御装置の機能と信頼性が向上し、しかも安価になってきたので、広い分野で利用されるようになった。その結果、従来のアナログ制御装置では実現の困難だったアドバンスト制御の実用化が進んでいる<sup>(1)-(5)</sup>。

その中で、現代制御理論に基づく高度の制御方式も工業的に利用されるようになった<sup>(6)</sup>。富士電機においても、従来からアドバンスト制御の実用化に積極的に取り組んでいるので、この機会に表1と表2の内容の具体例について特集した。「理論と実際のギャップ」がよく指摘されているが、実際の工業プラントでの適用例を具体的に紹介することによって、現状の技術レベルを認識して頂くとともに、実際に納入できる制御システムについて御理解頂けるように工夫したつもりである。

なお、「アドバンスト制御」という呼称が明確な定義に基づいていないので、普通に使っている際の内容から、以下のように考えることとし、いわゆる制御理論によるものだけでなく、表1と表2に示したようなAIを利用したものも含めている。

- ・単純(1入力1出力で制御パラメータの固定された)PID制御より進歩した連続事象形制御。
- ・単純な(オン・オフ信号の固定されたロジックによる)シーケンス制御より進歩した離散事象形制御。
- ・単に実用的効果があったというだけでなく、その根拠が明らかで汎用性がある。
- ・ハードウェアが新しくなっただけで実現された場合には、アドバンスト制御とは呼ばない。

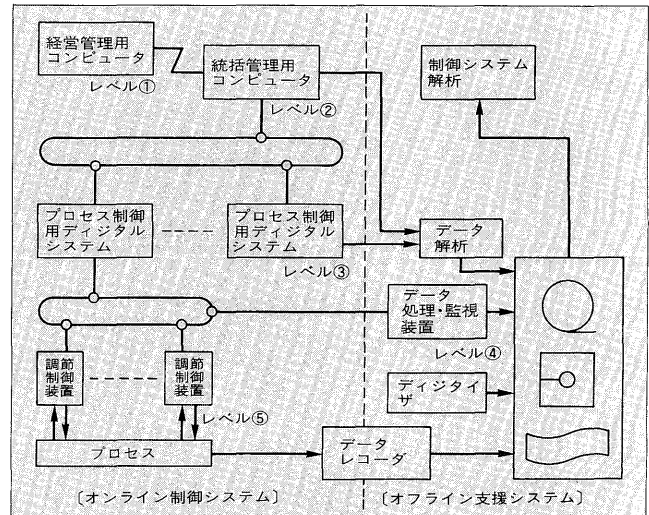
## 2 アドバンスト制御適用の動向

本稿では概要のみをまとめているので、詳細については各稿を参照して頂きたい。

### 2.1 現状の適用例の傾向

近年の適用例増加では、次のような傾向が目される。

図1 アドバンスト制御のためのオンラインシステムとオフラインシステムの構成



- (1) 高度情報化社会に対応した傾向
- (2) アナログ調節制御装置からデジタル調節制御装置への変更に対応した傾向
- (3) 省力化に対応した傾向
- (4) 省資源に対応した傾向
- (5) 現代制御理論の発展に対応した傾向
- (6) モデリング技術の進歩に対応した傾向

### 2.2 アドバンスト制御適用のねらい

従来の制御方式からレベルアップする際のねらいは、次のようなものである。

- (1) プラント設備を替えることなく、効率向上、運転の信頼性向上を実現する。
- (2) 設備能力の上下限により近い条件での操業を可能とする。
- (3) 定格運転では安定であるが、低負荷運転では不安定なプロセスの、全範囲での安定化を行う。
- (4) 操業レベルの変更、生産品種の変更を円滑にし、変更作業所要時間を短縮する。
- (5) 経験豊富なエキスパートのオペレーション方式を定常



太田 徳二

昭和38年入社。コンピュータを利用したアドバンスト制御システムの研究開発と、技術計算の管理に従事。現在、富士ファコム制御(株)第一システム開発部長。



竹山 良雄

昭和44年入社。大形コンピュータによるプロセス制御技術の研究解析とソフトウェアの開発業務に従事。現在、富士ファコム制御(株)第一システム開発部部長代理。

表1 アドバンスド制御の実用化支援ツール

ツ　　ール	アドバンスド制御設計用対話 形ソフトウェア SAPL	二方向適応制御システム GISTLAX	評価関数による 位置決め制御システム	汎用ファジィコントロー ルシステム FRUITAX	プロセス制御用AIツ ール EIXAX	物流制御システム構築ツ ール ΦNET	AIアドバンスド制御用ワーク ステーション
支援対象の制御方式	古典制御から現代制御までの 制御方式を汎用的に支援	非線形PID制御	非線形PI制御	ファジィ制御	知識工学	知識工学	古典制御から現代制御までの 制御方式を汎用的に支援
使用される制御理論 情報処理理論、数式	解析、シミュレーション、最 適調整、同定など一般	ゲインスケジューリング形 適応制御	変分法 PI最適調整	ファジィ理論	エキスパートシステム、 最適化OR技法	ベトリネット AI、物流解析	解析、シミュレーション、最 適調整、同定など一般、AIも 利用
適用効果の大きい プロセスの特徴	多数の要因の干渉性 長い無駄時間	高頻度の操業条件変更 特性の経年変化	非線形特性	あいまいな複数の要因 長い無駄時間、多様な外乱	オペレータの介在	きめ細かい物流管理 多品種の物流、無人化	流体輸送などの長い無駄時間、 頻度の高い手動操作
ツールの目的	大量のデータ処理 種々のシミュレーション	非線形特性と経年変化への対 応	ショックレスな位置決 め制御系の設計	自動化による操業の安定	プラント運転の自動化 操業最適化	物流計画、スケジューリ ング、物流制御	アドバンスド制御を実施する ための解析、設計、構築
改善対象となる従来 の制御方式	相互干渉のあるPID制御系 設定値変更と再調整の多い系	PID制御	減速率一定方式による 位置決め制御	マニュアルオペレーショ ン	手動運転・プログラム 制御	シーケンス制御 ルール形制御	相互干渉のあるPID制御系 設定値変更と再調整の多い系
改善されるべき制御 上の問題点	干渉、不安定性	プロセス特性の変化	安定限界	手動制御、適用範囲がせま い	手動運転の精度の悪さ	自動化が困難	干渉、不安定性、非線形、経 年変化
改善されるべき操業 上の問題点	調整時間 操業のばらつき、不安定性	負荷変動時における制御性の 劣化	減速開始時のショック、 停止誤差、制定の遅延	個人差大	操業状態の不均一性	設備稼働率の低下 渋滞の発生	調整時間、異常時の操作
アドバンスド制御方 式の技術・特徴	古典制御から現代制御までの データ解析を体系化	論理形適応制御	評価関数による最適速 度の決定	制御規則による動作	現状操業の取組み 容易な制御規則調整	ネットワーク技術とAI技術 の結合	オンラインデータによるモデ ル化、アドバンスド制御設計
プロセスモデル	伝達関数、状態変数モデル、 ARモデル	伝達関数	伝達関数	なし	簡単な数式モデル	ネットワーク・モデル ルール・モデル	ARモデル、伝達関数、 状態方程式
データ解析項目 シミュレーションに よる解析項目	プロセスモデルの同定 制御パラメータの決定 安定領域	オフライン同定 パラメータ適応形との比較	プロセスモデルの同定 減速率一定方式による 位置決め制御との比較	入力変数の決定 制御構造の決定 制御規則の調整・検証	数式モデルの推定 ルール・モデルの動的、 機能確認	処理時間、稼働時間 設備能力の診断 運用方法の妥当性	プロセスモデルの同定 制御方式、パラメータ最適化、 ルールの検証
実用化の際のオンラ インシステム	制御用プロセスコンピュータ、 DCS	デジタル計装装置	HDC-500	プロセスコンピュータ パーソナルコンピュータ	制御用プロセスコンピ ュータ	制御プロセスコンピュータ	ワークステーション、 DCSとのネットワーク結合
自動/手動 制御周期	手動 1秒～1時間	自動 0.2～1.0秒	自動 50～100ミリ秒	自動 30秒～30分	自動 30秒～10分	自動 1秒～1時間	手動 1秒～1時間
適用上のポイント	方式と手法の選択	適応指数の選定	境界条件の決定	制御規則の作成	ルール・モデルの向上	ネットワークとルールの分析	方式と手法の選択
適用上の問題点	制御アルゴリズムの簡略化、 高速化	同定結果の評価方法	加速状態からの位置決 め	手入力項目の存在	推論時間の短縮化	ユーザーデータベースとの 整合	DDC装置との整合
バックアップ方式	PID制御、マニュアル制御	オペレータの判断	PI制御	オペレータの設定	オペレータの介入	マニュアル	PID制御
制御性の改善効果	安定性の向上 制御精度の向上	制御偏差減少	安定限界の領域拡大	最適操業の自動化 制御偏差の減少	制御偏差の減少	フレキシブルな操業の実現	安定性の向上、制御精度の向 上、自動運転領域の拡大
操業上の改善効果	最適操業 自動化の推進	負荷変化率の向上	ショックレス 停止精度の向上	製品品質の向上 省力・省エネルギー	最適操業の自動化	設備稼働率の向上 生産効率の向上	安定操業、異常時対応、 オペレーションの水準向上
将来技術	数式処理の導入、AI化	複合制御システムへの拡張	最適制御方式の導入	制御規則の学習機能	ルール・モデルの学習	ネットワーク	制御系設計エキスパートシ ステム

表2 アドバンスト制御の実用例 (その1:上段, その2:下段)

実用例	同期発電機の適応制御システム	水道におけるアドバンストコンピュータシステム	流入下水プロセスのアドバンスト制御
プロセスの特徴	発電プロセス	流体過渡現象プロセス, 圧力伝播	雨水流入プロセス, 汚水流入プロセス
主要なプロセス変数	有効電力, 電圧	圧力, 水量, 水質, 水位, 天候	雨量, 水量, 水位, 天候
制御の目的	安定運転	操業の安定, 運転費用の低減	操業の安定化と適正化
アドバンスト制御方式	セルフチューニング形適応制御 最適レギュレータ	ARモデルによる最適制御 ファジィ制御, DP法, LP法	ARモデル ファジィ制御, DP法
適応制御機能	セルフチューニング方式	需要予測逐次カルマンフィルタ	予測パラメータの自動同定
従来の制御方式	PID制御	PID制御, オペレータ手動運転	オペレータの手動運転
制御上の問題点	設備余力の必要性 電力長周期動揺	物理モデルの作成困難(水質) 無駄時間が大きい(水系運用)	物理モデルの作成困難(雨水) 最適化の演算時間大(汚水)
操業上の問題点	制御パラメータ選定	個人差大	迅速な対応(雨水)
アドバンスト制御方式の技術・特徴	適応制御, 最適レギュレータ	予測制御(需要予測+運用計画) AIによる制御規則決定・ガイド	予測とファジィとの組合せ(雨水) 予測とDPとの組合せ(汚水)
プロセスモデル	物理モデル	需要予測モデル, 水系モデル	ARモデル, 貯水槽モデル, ポンプモデル
データ解析項目 シミュレーションによる 解析項目	オンライン同定 制御パラメータの決定 安定度限界の確認	予測モデルのパラメータ同定 運用計画の最適化 管網の流量・圧力分布の推定	ARモデルのパラメータ同定 水位変化・ポンプ吐出量・降雨強度の推定 (雨水)・ポンプ運転計画(汚水)
オンラインシステム	発電機制御用マイクロコンピュータ	コンピュータ+DCS	統括制御用プロセスコンピュータ
自動/手動 制御周期, 入出力点数	自動 0.02秒, 入力2, 出力2	自動 20分~1時間	自動 5分(雨水) 1回/1日(汚水)
適用上のポイント	オンライン同定	予測精度 圧力操作点・監視点の配置	予測精度(雨水, 汚水) 制御ルールの整理・構築(雨水)
適用上の問題点	荷重係数調整	制御規則を簡単に決められない パラメータの正確な把握が困難	流入パターンの予測が困難(汚水) 降雨強度の突発変化時の応答性(雨水)
バックアップ方式	PID制御	オペレータによる手動運転	オペレータによる手動運転
制御上の改善効果	安定性向上, ロバスト性向上 制御偏差減少	安定給水, 省資源の実現 漏水防止, 薬注の最適化	汚水吐出量の平滑化 熟練オペレータと同等の運転操作
操業上の改善効果	設備利用率向上, 系統安定度向上	個人差小, 情報サービス	省エネルギー, 操業の安定化と適正化
将来技術	大規模化	画像処理技術との整合, 制御規則・運転ルールの自動学習	完全自動化(オンライン化)

実用例	電動機応用プラントへのオブザーバの適用	知的エネルギー管理制御システム	密閉OGにおけるアドバンスト制御の適用
プロセスの特徴	電動機制御, 圧延設備張力制御	ユーティリティ(主に製鉄所)	ガス圧力伝播
主要なプロセス変数	電流, 速度, 負荷トルク	ガス流量, 蒸気流量	圧力
制御の目的	速度変動抑制, 張力推定	操業の安定, 自動制御	ガス回収率の向上
アドバンスト制御方式	離散形最小次元オブザーバ	数理計画法, 統計解析法	離散形最適制御
適応制御機能	なし	なし	ゲインスケジューリング形適応制御
従来の制御方式	PI制御	手動設定, 個別プログラム対応	PI制御
制御上の問題点	負荷変動時の電動機速度の変動 張力検出器のノイズ	プログラムのロジック化 物理モデルの作成	プロセス特性の突変
操業上の問題点	速度変動による製品品質劣化, 張力変動	頻繁な装置の更新, 増設される設備への対応	密閉操業不能, ガス回収率低下
アドバンスト制御方式の技術・特徴	オブザーバの次数低減 アルゴリズムの簡略化	ルールとモデルの併用 モデル係数の自動チューニング	予測制御との組合せ 論理形適応制御
プロセスモデル	伝達関数	静的物質収支モデル	伝達関数
データ解析項目 シミュレーションによる 解析項目	モデルパラメータの同定 オブザーバゲインの調整 パラメータの最適化	非線形最小二乗近似 運用ルール 近似モデル	オフライン同定 感度解析, 外乱周波数の推定 制御パラメータ決定
オンラインシステム	MICREX 電動機制御用マイクロコンピュータ	プロセスコンピュータ サイドエンドプロセスコンピュータ	デジタル計装装置
自動/手動 制御周期, 入出力点数	自動 5~50ミリ秒, 入力2, 出力1	自動 1分	自動 0.2秒, 入力2, 出力1
適用上のポイント	ゲイン及びパラメータの決定	実運用ルールの構築	論理形適応制御のパラメータ調整
適用上の問題点	機械系とモデルの不一致	操業予定と実操業との不一致	プロセス特性突変時の対応
バックアップ方式	PI制御, 張力フィードフォワード制御	オペレータ設定	PI制御
制御性の改善効果	電動機速度の変動抑制, 張力の安定化	安定操業	制御偏差減少, 安定性向上
操業上の改善効果	製品品質(形状:幅, 高さ)の向上	省エネルギー, 省力化	エネルギー回収の向上, 歩留りの向上
将来技術	適応制御を組み込んだオブザーバ	需要予測とその修正方式, 操業予定のファジィ修正	論理形適応制御の汎用化

表2 アドバンスト制御の実用例 (その3)

実用例	連続焼鈍炉板温制御	セメントプラントのアドバンスト制御	ロボットマニプレータのアドバンスト制御
プロセスの特徴	熱プロセス	化学反応, 熱プロセス	力学プロセス
主要なプロセス変数	温度, ガス流量, ラインスピード	温度, 電力, 圧力	力, 位置, 速度, 加速度
制御の目的	操業の安定	操業の安定	位置決めの高速度
アドバンスト制御方式	可変ゲイン, フィードフォワード制御 スミスの無駄時間補償	ARモデルによる最適制御	適応制御, パラメータ推定
適応制御機能	ゲインスケジューリング形適応制御	なし	ゲインスケジューリング形適応制御
従来の制御方式	PID制御	マニュアル制御	PD制御
制御上の問題点	通板条件切換時のゲイン変化	物理モデルの作成困難 プロセス内の干渉	プロセスの非線形特性 振動
操業上の問題点	通板条件切換 外乱による操業の不安定性	対応操作の遅延	位置決め時間が長い
アドバンスト制御方式の 技術・特徴	予測制御との組合せ 論理形制御との組合せ	多変数最適制御 出力フィードバック制御	カルマンフィルタによる負荷の推定 負荷による適応制御
プロセスモデル	熱伝導モデル	ARモデル	機械力学モデル
データ解析項目 シミュレーションによる 解析項目	物理モデル定数決定 可変ゲイン, スミス法 フィードフォワード方式の効果	ARモデルの同定 変数・次数の決定 荷重行列の決定	モデルパラメータの同定 PID制御と適応制御の差異 負荷推定の誤差評価
オンラインシステム	デジタル計装装置	直接制御用プロセスコンピュータ	パーソナルコンピュータ
自動/手動 制御周期, 入出力点数	自動 0.2秒, 入力3, 出力2	自動 1分, 入力5, 出力3	自動 10秒, 入力2, 出力2
適用上のポイント	適応制御のパラメータ調整	ARモデルの妥当性	推定パラメータの決定
適用上の問題点	物理モデルの定数の求め方	長時間の同定信号印加	適正なサンプリング間隔の確保
バックアップ方式	PI制御	論理形制御, 対話形設定	なし
制御性の改善効果	安定性の向上	安定性の向上, 自動運転領域の拡大	制御偏差減少, 整定時間短縮
操業上の改善効果	品質向上, 歩留りの向上	燃料節減, オペレータ負荷軽減	作業の高速度化, 振動抑制
将来技術	モデル簡略化, 学習制御	ファジィ制御の共用	振動防止の拡張

表3 アドバンスト制御実現のためのハードウェア

制御レベル	特徴的な機能の位置づけ	利用されるコンピュータの種類	アドバンスト制御 のための処理内容	適用技術
① 経営管理用	企業経営のための情報処理を行う	大形ビジネス用コンピュータ	操業管理との整合	大容量データ処理 ファイル処理
② 統括管理用	プロセス制御を統括し, 経営 情報処理とのインタフェース となる	大形プロセス用コンピュータ 中形ビジネス用コンピュータ	数理計画形最適化 スケジューリング	対話形処理 ファイル処理 階層的多重処理
③ プロセス制御用	プロセス制御のための汎用性 のあるコンピュータ	プロセス用コンピュータ	設定値計算 適応化計算 関数計算, 行列計算	高精度計算 テーブル処理 多周期定時処理
④ データ処理・監視	プロセス制御の特定用途向け の機能を持った情報処理装置	プロセス用 パーソナルコンピュータ	プロセス特性推定 統計解析 データ変換・伝送	要因分析, ノイズ除去 モデリング, 信号処理 多周期定時処理
⑤ 調節制御	プロセスに直結したデジタル 制御装置	デジタル制御装置	四則計算 ベクトル計算 フィルタリング	高速近似計算 テーブル処理 定周期処理

表の中のコンピュータに対応する富士電機の制御装置は, 次のとおりである。  
 大形ビジネス用コンピュータ……………Mシリーズ, VPシリーズ  
 中形ビジネス用コンピュータ……………Mシリーズ  
 大形プロセス用コンピュータ……………Mシリーズ, Aシリーズ  
 中形プロセス用コンピュータ……………Aシリーズ, Sシリーズ, Uシリーズ  
 小形プロセス用コンピュータ……………Aシリーズ, Uシリーズ, FASMIC-G, MICREX  
 プロセス用パーソナルコンピュータ……………Lシリーズ, MICREX, FPCC-10  
 プロセス制御用マイクロコンピュータ……………MICREX(OCs, PCS, HDC), CC-F, 分野別マイクロコンピュータ

化する。

- (6) 最適調整作業を自動化する。
- (7) 自動運転領域を拡大する。
- (8) 無人化運転を実現する。

③ アドバンスト制御のためのハードウェア

超大形の汎用コンピュータが経営管理用に普及し, 同時に手軽なコンピュータが調節制御に利用されている。その

両極化する傾向の中間にあって、プロセス制御用のコンピュータも分極化し、プロセスごとの制御システムと、それらの幾つかを統括管理する大規模のコンピュータシステムに大別される。

制御用としてのこのような階層レベルと同様に、アドバンスト制御を実現する際の支援用のオフラインシステムも階層構造となるので、ハードウェアをまとめると図1のようになる。ここでは各レベルの機能要素が明確になることをねらって分離させ、それぞれのレベルに適したハードウェアを表3のように整理し、その分散された機能にふさわしい装置を対応させている。

#### ④ アドバンスト制御のためのエンジニアリング作業とコンピュータシミュレーションの利用

実用化のためには、制御理論に基づいた高いレベルの技術と、実プロセスに密接に関連したノウハウとが、適切に応用されなくてはならない。制御関係の技術者が担当するエンジニアリング作業としては、次のような項目がある。

- (1) プロセス特性の表現
- (2) 制御目標に適した最適調整
- (3) プロセス特性の推定
- (4) 特性表現式の近似と具体化
- (5) 非線形要因の分析
- (6) 操業条件の整理分析
- (7) 制御方式のパラメータ調整
- (8) 制御目標となる規範モデルの作成
- (9) 評価関数の重みの決定
- (10) 新方式の性能事前評価
- (11) 制御系の設計
- (12) プロセスの実運転データの収集と解析
- (13) 実運転方式との比較対照
- (14) 現場オペレータの作業分析
- (15) 外乱の特性推定

これらの項目が相互に関連を持つ中で、過渡現象としての制御性能を把握しなくてはアドバンスト制御の適用効果

を評価できない。そのために、実際上ではコンピュータシミュレーションが不可欠であり、表1と表2に示されているような項目を明確にすることに利用している。

#### ⑤ あとがき

アドバンスト制御といえば、高度の制御理論に基づいた方式を考えることが多い。そのために、大量のデータを解析し、特性を明確にすることが大きな課題であった。ところが、近年のAI技術の進展によって、複雑なデータプロセッシングをしないでも、現場のノウハウを制御方式に反映させてシステムを構築できるようになってきた。しかし、それらは真の意味では人間の知能を代行するまでには達していない状態で、まだルールプロセッシングが可能になっただけである。

データプロセッシングにおいて、制御理論の適用によってより良いシステムが設計できたように、ルールプロセッシングをより適切に実行するために、ここに述べる具体的実績を基盤にして、高度で信頼性の高いシステムを能率よく構築できるように努力していかなくてはならない。

ユーザー各位の御利用を期待するとともに、今後ますますの御指導をお願いする次第である。

#### 参考文献

- (1) 北森俊行監修：デジタルシステムによるアドバンストコントロール実例，計装，3月増刊号（1981）
- (2) 北森俊行監修：同第2巻，計装，Vol.26, No.3（1983）
- (3) 北森俊行監修：同第3巻，計装，Vol.30, No.10（1987）
- (4) 産業委員会：現代制御理論はいま，ここまで使える，計測と制御，Vol.24, No.9, pp.72-77（1985）
- (5) 児玉慎三・池田雅夫：制御理論と技術，システムと制御，Vol.30, No.1, pp.2-6（1986）
- (6) 四十万稔監修：図説「現代制御理論」入門，OHM（1987-5~1988-4）
- (7) 太田徳二：コンピュータを利用したアドバンスト制御の適用技術，富士時報，Vol.58, No.3, pp.222-226（1985）



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。