

コンピュータを利用したアドバンスト制御の適用技術

*太田 徳二(おた とくじ)

① まえがき

半導体製造技術の目ざましい発展によって、コンピュータの性能が非常に進歩した。価格が下がり、信頼性が向上したので、プロセス制御の現場に直接的に導入できるシステムが製作され、実プロセスで広範囲に使用されている^{(1),(2)}。

その結果、高度の演算と多量のデータ処理をリアルタイムで実行できるので、進歩した制御理論を実用化する際のハードウェアの制約は取り除かれ、適用するための制御技術と具体的なシステムに実装するためのソフトウェア技術が重要な役割を演じている⁽³⁾。

一方、制御理論の分野では、1960年代に近代制御理論が発展し、近年では適応制御理論が広く研究されている⁽⁴⁾、アドバンスト制御の適用が促進され、その成果も多数紹介されている^{(5)~(7)}。

この動向に着目して、富士電機はアドバンスト制御の実用化を積極的に推進している。現実のプロセス制御システムを利用して、制御理論の適用効果を対象プロセスの特性に対応させるための技術を、できるだけ多くの側面から考察し、具体例と対応させて紹介する。

② アドバンスト制御のためのコンピュータシステム

超大形の汎用コンピュータが経営管理用に普及し、同時

に小形で手軽なコンピュータがデジタルコントローラとして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、下位の制御装置に指令を与えるプロセスごとの決定制御システムと、それらの幾つかを統括管理する大規模のプロセス

図1 アドバンスト制御のための分散形コンピュータシステム

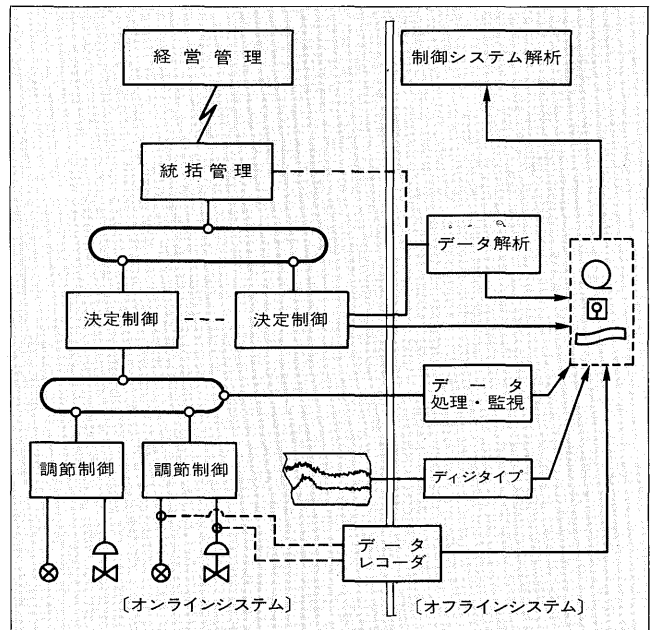


表1 アドバンスト制御実現のためのコンピュータシステム

処理レベル	コンピュータの種類	富士電機のシステム	アドバンスト制御の処理内容	適用技術
経営管理	大形ビジネス用	Mシリーズ	操業管理との整合	大容量データ処理 ファイル処理
統括管理	大形プロセス用 中形ビジネス用	Sシリーズ Mシリーズ	数理計画形最適化 スケジューリング	対話型処理 ファイル処理 階層的多重処理
決定制御	プロセス用	Sシリーズ Uシリーズ FASMIC G	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
調節制御	マイクロコンピュータ	MICREX-P(PCS) MICREX-E(HDC) CC-F	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
制御システム解析	科学計算用	Mシリーズ Sシリーズ	シミュレーション 理論的解析計算 制御系設計	グラフィック端末処理 図形処理 文書処理
データ解析	バックエンドコンピュータ	FASMIC G	統計解析 トレンド作図 プロセス特性推定	要因分析 誤差解析 モデリング
データ処理	パーソナルコンピュータ	Lシリーズ	データ伝送 データ変換 多変数形監視表示	数値解析 信号処理・ノイズ除去

*富士ファコム制御(株)第一システム開発部

スコンピュータシステムに大別される。

リアルタイム処理用として、このような四つの階層レベルを持ったオンラインシステムがあるのと同様に、アドバンスト制御の実現をサポートするオフラインシステムも階層構造となるので、アドバンスト制御システムの構築に必要な機能を分散させて図1の構成で考えることにする。それぞれのレベルに適したコンピュータは表1のように整理されるが、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、その分散された機能に実際のコンピュータを対応させている。そのため、表1の区分と機能仕様とは必ずしも一致していない。

個別機能をこのように独立させたシステムとともに汎用的なシステムも製作されているが、コンピュータが低価格で小形になり、独立化とオンライン化が進んでいる。しかも、制御システム構築作業をユーザーが実行する例が増加して、メーカーの中で蓄積していた適用技術をコンピュータに実装して納入するという事も進行している。

③ 適用されるアドバンスト制御

実プロセスに適用されるアドバンスト制御方式には多くの種類があるので、次のような項目を考慮して選択する。

(1) 制御の目的

- (a) 決定論的/確率論的
- (b) 定常状態/過渡状態
- (c) 単目的/多目的
- (d) 安定性/速応性
- (e) 定値制御/追値制御/終点制御

(2) プロセスの特徴

- (a) 単変数/多変数
- (b) 線形/非線形
- (c) 連続/バッチ
- (d) むだ時間、干渉性の有無
- (e) 外乱、ノイズの大きさと頻度

(3) プロセスモデルの種類

- (a) 数式形/ルールベース
- (b) 動的/静的

- (c) 物理モデル/回帰モデル
 - (d) モデルの精度
 - (e) パラメトリック/ノンパラメトリック
- (4) 制御の位置づけ
- (a) 統括管理/決定制御/調節制御
 - (b) 直接制御/監視制御/オペレータガイド

このような観点から基本動作に着目して、実プロセスに適用されるアドバンスト制御を制御理論的に表2に分類した。どの場合にも、制御状態の改善目標を適切に設定し、必要なプロセス特性のモデルを作成することが基本となる。

④ 制御パラメータの調整と適応化

制御対象のプロセスの中には非線形特性を持つものが多いので、非線形特性を代表する変数を指数に選んでグラフにすると、制御パラメータの最適値は図2の(a)のような場合が多い。ところが、パラメータが固定の装置を使用するとせいぜい(c)にしかできず、調整が不十分であると更に(d)となってしまう。したがって、(c)を実現するためのオ

図2 非線形プロセスでの制御パラメータの最適値

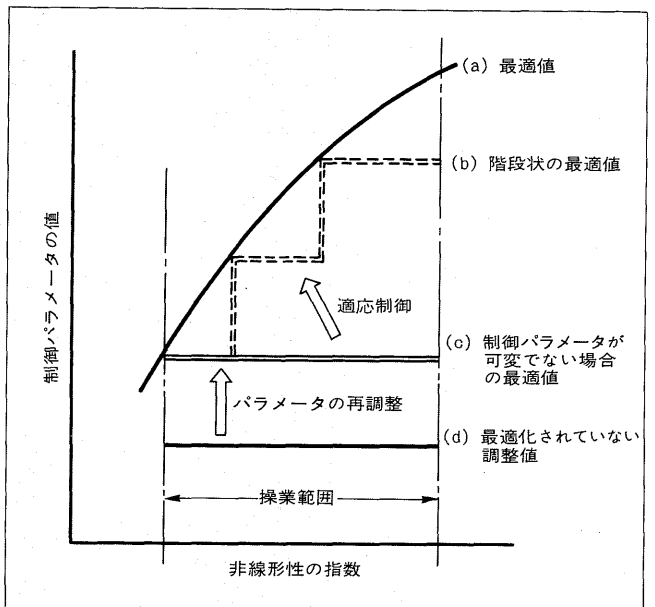


表2 実プロセスに適用されるアドバンスト制御

制御方式の型	アドバンスト制御方式	機能・特徴	適用技術	適用効果の大きいプロセスの特徴
古典制御理論型	非線形PID フィードフォワード むだ時間対策 非干渉制御	状態に合った可変ゲイン 外乱情報による予測動作 モデルによる動作安定化 制御動作の個別独立化	プロセスの特性把握・モデル化 動特性式の近似表現 外乱の予測 むだ時間の推定	目標値から離れた時の特殊性 大きながた・ヒステリシス 大きな時間遅れ 少変数の相互依存
近代制御理論型	多変数最適制御 オブザーバ利用 予測制御 極配置制御	モデルによる最適操作 計測不能な変数を推定して改善 実運転データによる状態推定 制御結果の振動条件を設定	プロセスモデルの作成 評価式の最適設定 推定則の条件設定 モデル式の高度処理	多変数の相互依存 センサの設置が不可能 ランダムは多数の要因 電機・機械系の明確な特性
数理計画法型	大規模線形計画法 非線形・整数計画法 多目的最適化	多数の制約条件で最適化 現実に即した最適化 対話型処理で妥協案を作成	適切なモデル作成 問題の簡略化表現 条件・結果の表示	数値認定の可能な多数の要因 物流管理・操業計画 スケジューリング
ルール型	ファジイ制御 知識工学システム	ルールを基準として動作 従来操業の最善を自動化	現状ルールの聞きとり・抽出 ルールモデル作成のデータ処理	あいまいな要因 オペレータの介在

<注> どの制御方式に対しても、制御パラメータの調整自動化と適応化の効果は大きい。

ートチューニングが普及し、(a)又は(b)を実現するための適応制御方式が進展しつつある⁽⁹⁾。^{(4),(8)}

このような制御パラメータの最適化の方式は、近代制御理論型のみならず古典制御理論型についても各方式ごとに利用できる⁽⁹⁾ので、表2では取り上げていない。種々のアドバンスト制御に対して適応方式が研究され、実績が増加している^{(4),(8)}ので、適応方式には次のように豊富な種類がある。

- (1) プロセス特性：非線形特性/変動特性
- (2) 最適パラメータ：算出して設定/オンラインで計算
- (3) プロセス特性推定方式：特定の変数の代数式で計算/同定理論式に基づく収束計算

進歩した基本的制御動作を具体化しても、その動作に必要なパラメータがプロセスの特性に合致していなくては効果を発揮しない。従来は、この最適化作業が現場の技術者にゆだねられていた⁽⁹⁾ので、プロセスの運転開始が非常に遅れたり、不十分な調整で操業されたりしていた。そのために、パラメータの最適化によって制御結果が改善される事例は非常に多い。

⑤ オンラインシステムの形態

オフラインの情報処理は専門的技術者に頼ることができるので、その処理の一時的な中断は可能である。しかし、オンラインシステムに実装してプロセス制御の現場で使用する機能については、利用形態と信頼性に対して詳細な検討が必要であり、制御装置の性能として強化されなくてはならない付帯的内容が多い。総合的には、このような機能が制御システムの有用性を左右することになるので、ハードウェアとソフトウェアの量は制御アルゴリズムの基本部分より多くなる。

コンピュータの能力が飛躍的に向上したとはいえ、演算とデータ伝送の速度については適切な制御演算周期を実現するのに余裕があるわけではない。メンテナンスと現場のオペレータとの対話用インタフェースも工夫し、実績を重ねて使いやすくする必要がある。

このような項目を考慮してコンピュータを選定し、オンラインシステムを設計するので、アドバンスト制御の中のどの部分をオンライン化するか⁽⁹⁾の選択にあたっては、表3のような事項を考慮している。完成されたシステムが安定に動作するとともに、システムの構造が理解しやすくなく

てはならない。また、蓄積されたアルゴリズムとデータは貴重なプロセスのノウハウであるから、異なるシステム間でのポータビリティのある形式が望ましい。近年では、このような点について配慮し、言語・テーブル構造・ファイル処理方式が改良されている。

⑥ アドバンスト制御の適用例

アドバンスト制御を適用した例を表4に示す。

ユーザーをはじめとして、社外の方々との共同研究によって適用したものと、社内で完成させて納入させて頂いたものがあり、どの場合にも、科学計算用コンピュータによる詳細なシミュレーション解析を実施している。

表4の転炉廃ガス回収圧力制御について、アドバンスト制御の結果を従来制御の結果と対比させて図3に示す。

この制御システムでは、製鋼反応によって発生するCOガスを燃焼させないで回収することを目的として、転炉の上にフードを設置する。その際に、鉄鉱石の投入量の変動を代表とする多くの外乱によってCOガスの発生量に変化し、それによってフード内の圧力が変動してガスの吹き出しとか空気の流入が起こる。これを防ぐために、圧力を一定にするようにガスホルダへの吸引量を制御している。

図3で明らかのように、最適制御中の方が外乱は急激で大きいにもかかわらず、ガス圧力の変化が小さくなっている。この例の場合には、アドバンスト制御を適用したことにより制御動作が強められ、しかもプロセスの特性変化に対して安定(ロバスト)であるために、改善効果によってガスの回収率が約2.2%向上し、転炉が大形であることから金額換算すると約2億円/年にもなる。

新制御システムを設計し、適用効果と注意すべき事項をあらかじめ評価するためには、オンラインモデルとは異種のシミュレーションモデルが必要である。逆に、その詳細モデルから近似とか線形化してオンラインモデルを作る場合も多い。オンラインシステムの性能とか制御結果に対する要求が変われば、オンラインのモデルは変化していく。また、評価すべき内容に対応して、シミュレーション用の詳細モデルの仕様を変更する必要がある。

ハードウェアの時代からソフトウェアの時代へと移行している現代において、蓄積した経験をいかに顕在化し、制御装置に反映させるかが課題である。アドバンスト制御が更に広く利用されるために、具体化の際に必要な制御技術

表3 オンラインシステムの形態

オンラインシステムの形態	必要なシステム機能	バックアップ対策	オンライン化の効果
A 制御出力演算	汎用的演算 定数テーブルの書換	異常状態用のルール形制御 起動停止用の切換	定周期の高精度制御動作 演算結果の再現性の保証
B 定形モデルによる適応	高速・高精度演算 テーブル構造の柔軟性	準最適値への回避 全領域で安定なパラメータの保持	正確な適応動作の自動化 急速な条件変化に対応
C プロセス特性の推定	対話処理用の表示画面 大量のデータアクセス	オペレータの監視・設定 標準条件による操業	異常データの確実な判定 異常検知・設備診断へ発展
D 制御システムの設計	シミュレーション 対話型グラフィック処理	特に必要としない 接続された他のシステムとの切換	制御システムの早期改善 制御システムの理解向上

〈注〉 AからB, C, Dと機能が追加されるのが普通であるが、表4の例のように特殊な形態もある。

表4 アドバンス制御の適用例

適用例	転炉廃ガス回収 圧力制御	圧延機インパクト ドロップ制御	セメントキルン 温度制御	都市水道 需要予測配水制御	総合発電機制御 (TAGEC)	鉄鋼酸素プラント エネルギー運用	浄水場 薬品注入制御
アドバンス制御 の方式	むだ時間補償最適 制御+PI制御	オブザーバ利用 フィードフォワード	離散形自己回帰 多変数最適制御	カルマンフィルタ 利用の需要予測	適応形多変数最適 レギュレータ	非線形数理計画法 最適オペガイド	ファジィ推論形 オペガイド
適応制御機能	あり	なし	なし	あり	あり	あり	あり
従来の制御方式	PI制御	PI速度制御	マニュアル制御	オペレータの設定 移動平均法	PID制御 V, fの個別制御	オペレータの設定 酸素過剰生産	注入率式の使用 オペレータの設定
従来の制御方式の 問題点	外乱抑制効果が少 制御の不安定振動	かみ込み時速度低下 歩留りの低下	対応操作の遅延 製品品質の低下	予測誤差が大きい ポンプの起動停止	設備能力の余剰性 電力長周期動揺	酸素放散量が 不適切な装置選択	大量降雨時に弱い 個人差が大きい
アドバンス制御 の方式の特長	PI制御との協調 多段むだ時間制御	負荷外乱の予測 フルオーダー OB*	多変数最適制御 出力フィードバック	予測式の自動修正 配水パターン併用	機器モデルの同定 摂動法線形モデル	実時間オペガイド 多変数大規模問題	現状操業の取込み 容易な制御則調整
プロセスモデル	伝達関数モデル	伝達関数モデル	ARモデル	ARMAモデル	物理モデル	静的モデル	論理モデル
シミュレーション による解析項目	ロバストネス 重み係数の設定	速度低下幅の評価 OBゲインの調整	変数と次数の決定 重み係数の設定	モデルの次数 因子の選択	変数の選定 重み係数の設定	最適化モデル決定 生産計画処理方法	制御構造の設計 推論演算則の調整
制御性の改善効果	安定性の向上 制御偏差の減少	寸法精度向上 速度偏差の減少	安定性の向上 自動運転領域拡大	予測誤差の減少 欠測データの補てん	安定性の向上 制御偏差の減少	装置運転の安定化 長期的効率向上	最適操業の自動化 制御偏差の減少
操業上の改善効果	ガス回収率向上 運転の自動化	ミスロールの減少 操業の安定化	燃料節減 操業者の負荷軽減	ポンプ省電力 漏水量を削減	系統安定度向上 設備利用効率向上	放散量の減少 運転費用最小化	処理水質の向上 凝集剤使用量減少
オンラインシステム	MICREX-E (HDC)	DDC-レオナード MICREX-E (HDC)	Uシリーズ	Uシリーズ Sシリーズ	MICREX-P (PCS)	Uシリーズ	C180
制御周期	0.2秒	3.3ミリ秒	1分	10分, 1時間	20ミリ秒	割込み, 2時間	20分
入力/出力点数	2入力/1出力	2入力/1出力	5入力/3出力	5~3入力/1出力	2入力/2出力	39入力/39出力	7入力/1出力
オンラインの形態**	A, B	A	A	C, D	A, B, C	C	A, D
バックアップ方式	ゲインの自動決定 目標値の自動変更	PI速度制御 外乱予測なし	ロジック制御 対話型設定	設定値保持 オペレータの設定	PID調節器	オペレータの設定 対話型設定変更	注入率式の計算 オペレータの設定
汎用化の発展方向	不安定現象の検出 ゲインの自動切換	適応オブザーバ 圧延系の総合制御	操業異常の検知 同定作業の自動化	当日の修正予測 次数自動選定	多機情報同時制御 発電所の総合制御	モデルの自動作成 問題簡約技術蓄積	制御則の自動作成 知識工学の導入
その他の特長	PI制御	プリント板に実装 トルクセンサ機能	推定誤差自動評価 モデル信頼性監視	パターン自動作成 需要予測模擬機能	ゲイン実時間計算 水系応答の考慮	大量のデータ処理 豊富な対話画面	対話型制御則改善 制御状況の模擬
参考文献	川合成治ほか： OG炉圧制御への最 適制御理論の適用、 鉄と鋼, 70, 9, pp. 1256 ~ 1261 (1984)	竹山良雄ほか： 圧延機速度制御に おけるオブザーバ の適用 第22回 SICE 講 演会予稿集, pp. 171 ~ 172 (1984)	T. Ohta et al. : Real Time Digital Systems for the Cement Industry, IFAC Symp., in Mexico (1983)	黒谷憲一ほか： 上水道の配水プロ ック化と配水調整、 富士時報, 56, 4, pp. 276 ~ 284 (1983)	植木芳照ほか： 発電機励磁/ガバ ナ多変数最適制御、 電気学会論文誌 B, 104, 11, pp. 733 ~ 740 (1984)	津田宗ほか： 製鉄所における酸 素プラント最適運 用システム、富士 時報, 57, 9, pp. 526 ~ 529 (1984)	伊藤修ほか： ファジィ理論の浄 水場薬品注入制御 への応用、システ ムと制御, 28, 10, pp. 597 ~ 604 (1984)

〈注〉 *: OBはオブザーバの略, **: オンラインの形態の記号は表3と対応している。

図3 アドバンス制御の適用結果 (転炉廃ガス回収圧力制御の例)

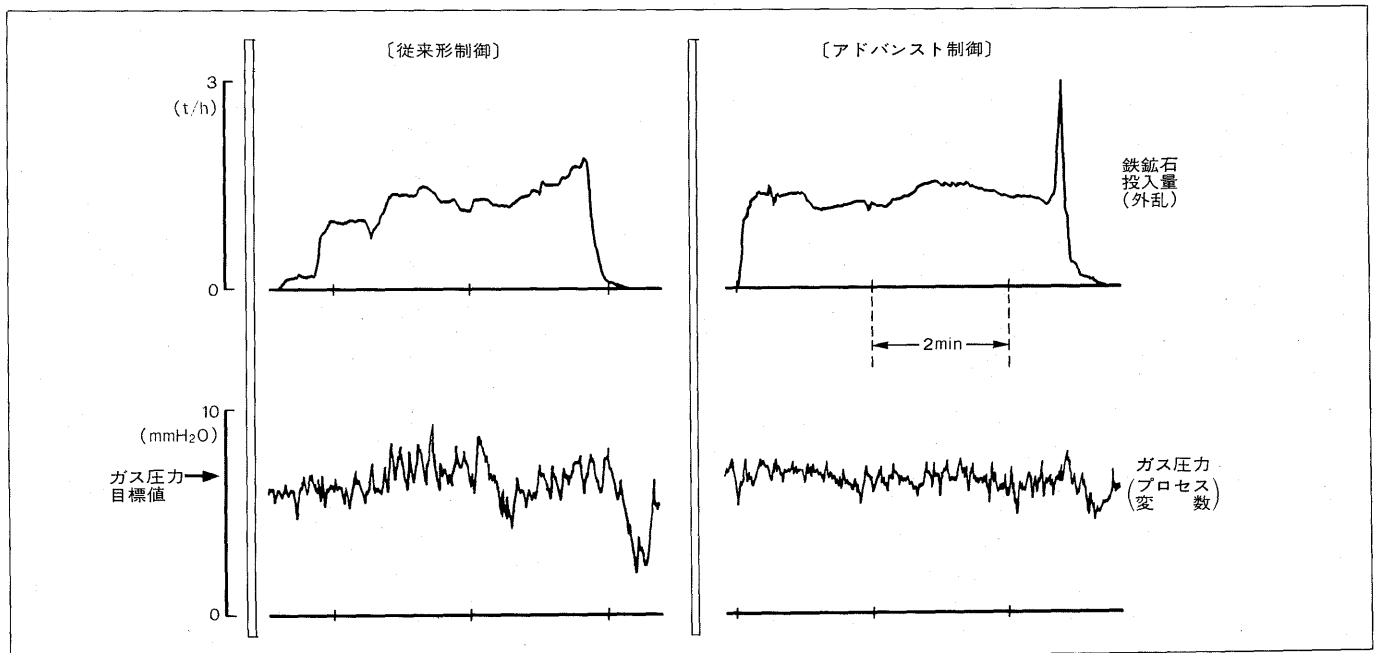


表5 アドバンス制御の適用の方向

特長的なアドバンス制御の機能	従来の方式	従来の問題点	アドバンス機能の効果	発展の方向
自動的最適調整 (オートチューニング)	試行錯誤的試験 類似経験の踏襲 上級技術者が担当	長い初期調整 不十分な調整 調整技術者の不足	最適調整の早期実現 容易なデータ収集 調整レベルの向上	セルフチューニング 特性変化の監視 適応制御へ発展
時系列データの利用	瞬時データ使用 フィルタリング 微分・積分動作	外乱に弱い 緩慢な微分動作 制御動作の遅延	ロバスト性 即応的制御動作 予測的制御動作	高級フィルタリング 異常データの自動検出 実時間オペガイド
多入力多出力の同時処理	個別信号処理 せいぜい2変数系 オペレータの介在	振動的な制御動作が発生 制御動作の遅延 判断ミスによる不注意事故	物理的因果律を利用 前工程情報の利用 無駄な操作の減少	プロセスの総合的最適化 オペレータの高度利用 広域ネットワークを利用
パラメータの適応	パラメータ固定 オペレータの設定 最悪の条件で調整	大きい制御偏差 不安定振動 自動制御運転の範囲を制限	最適な制御状態 操作条件の変更時間を短縮 操業方式の合理化	プロセス特性の自動推定 適応方式の誤差の検定 制御系改善案を自動探索
自動的数値計画型最適化	経験則で決定 簡易最適化計算 工程計画で指定	操業のばらつき 適用範囲の制限 現場では修正なしで操業	最適操業の実現 長期的判断による安定操業 条件変化に即応	経済情報の導入 経営管理との結合 工程変更の効果予測
制御方法の自動的学習	設計段階で決定 詳細な初期試験 熟練者の直感	実状への対応の遅れ 試験の長期化 不十分な状態認識	制御方式の早期改善 適切な条件設定 設備の有効利用	最適操業を判定・導入 原因と結果の関連を推論 理想操業の模擬試験

を円滑にガイドして、データ採取から新方式設計までの作業を支援する機能を、理解しやすい形式で装備した制御システムの研究開発を富士電機で推進している。

現状のシステムは、アドバンス制御を実現する機能を持つに至ったものの、適用のために必要な支援機能は非常にまれにしか装備されていない。この点を考慮して、制御システム設計のために社内で使用してきたソフトウェアを商品化し、ユーザーに納入することにした¹⁰⁾。

7 アドバンス制御の適用の拡大

アナログの制御装置がデジタルに置き換えられ、アドバンス制御が可能になった。更にコンピュータの性能が向上しつつあり、より高いレベルのアドバンス制御の実現を促進している。

この中で、アドバンス制御が持つ新しい要因を表5のように整理してみると、現実のプロセスにおいて、適用効果の期待できるものが多いことがわかる。

現代は省資源と省エネルギーの時代だと言われている。新原理を基礎とした新しい工業プロセスが登場することはまれになり、既存のプロセスの有効利用を旨とする技術が必要となってきている。しかも、情報社会化が進みコンピュータが身近で使えるので、現状の問題点を解析してプロセスの数式モデルを作ることが容易になり、その成果をネットワークによって他のシステムへ伝送できる。

更に、第5世代コンピュータの研究が進められており、知識工学の適用が始まって、エキスパートシステムが各方面で試行されている。その中には、制御装置の現地調整技術をシステム化した例もあるので、アドバンス制御適用技術をまとめたエキスパートシステムも夢とは言えない。

8 あとがき

制御理論を実用化し、従来の制御方式より進んだアドバ

ンス制御を実施する活動は、国内・国外、産業界・学界、ユーザー・メーカーで幅広く進められている。その動向を、制御用ソフトウェアを開発してコンピュータ制御システムとしてまとめるメーカーの立場から展望した。プロセス制御の質の向上に努力されている方のお役に立てば幸いである。

この領域は急速に進歩している。その速さに対応して使いやすい機能を充実させるとともに、個別機能を統合化しやすいシステムの開発に心がけていく所存である。

最後に、アドバンス制御実現の動きを理解され、多大な御指導と御協力をいただいた関係各位のおかげで本稿をまとめられたことを報告し、お礼を申し上げる。

参考文献

- (1) 分散形計算機統括制御システム特集, 富士時報, 57, 3 (1984)
- (2) 分散形デジタル計装特集, 富士時報, 56, 12 (1983)
- (3) プロセス制御技術特集: 富士時報, 57, 9 (1984)
- (4) Adaptive Control (Special Issue), Automatica, 20, 5 (1984)
- (5) 北森俊行監修: デジタルシステムによるアドバンスコントロール実例, 第1巻, 計装, 臨時増刊号 (1981-3) 第2巻, 計装, 臨時増刊号 (1983-2)
- (6) 制御理論と実システムへの応用, 計測自動制御学会シンポジウム資料 (1983-6)
- (7) 黒岩重雄ほか: デジタル制御システムによるアドバンス制御の実現, システムと制御, 26, 11, pp. 716~724 (1982)
- (8) 太田徳二ほか: ゲインスケジューリング形適応制御の応用, システムと制御, 27, 5, pp. 335~343 (1983)
- (9) Y. Nishikawa et al.: A Method for Autotuning of PID Control Parameters, Automatica, 20, 3, pp. 321~332 (1984)
- (10) 太田徳二・竹山良雄: システム解析ソフトウェア(SAPL), 富士時報, 57, 3, pp. 212~213 (1984)



*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。