高度制御技術による省エネルギーソリューション

Energy-saving Solutions by Advanced Process Control (APC) Technology

若杉 宏之 *1　　末吉 一雄 *1
WAKASUGI Hiroshi　SUEYOSHI Kazuo

石油精製プロセスなどの連続プロセスの設備は，エネルギーを大量に消費する装置であると同時に，これまでにも省エネルギーを目的とした活動が積極的に取り組まれてきた。近年，環境問題が注目を集めており，環境問題対策としての省エネルギーは古くて新しいテーマである。高度制御技術は，こうした取り組みの中で大きな成果を残してきた技術の1つである。本報告では，横河電機の高度制御への取り組みを紹介し，さらに省エネルギーに貢献する高度制御の適用例を紹介する。

Equipment for continuous processes such as petroleum refining consumes much energy, and various energy-saving activities have been carried out. In recent years, energy conservation is attracting attention globally as a solution for environmental issues. Advanced process control (APC) is one technology which has been greatly contributing to energy conservation. This report describes Yokogawa's activities relating to APC and its applications.

1. はじめに

横河電機は高度制御（Advanced Process Control）において，1999年からShell Global Solutions International B.V. (以下SGSI) とアライアンスを提携し，共同で製品開発を行ってきた。この提携により，SGSIの30年以上に及ぶ800例以上のプロジェクト実績と，当社のプロセス制御市場での豊富な実績を融合させることができ，高度制御技術の提供体制を強固なものとした。技術提携によって開発された製品には，以下のものがあり，2009年現在，世界で250システム以上の稼動実績がある。

1) Exasmoc：多変数モデル予測制御パッケージ
2) Exarqe：オンライン性状推定パッケージ
3) Exaspot：オンラインリアルタイムオプティマイザ
4) Exacoast：制御機能ブロック群
5) PCTP (Process Control Technology Package)：
Exasmocのオフライン機能, Exarqeのオフライン機能，制御性監視診断（MD: Monitoring and Diagnosis）を含むパッケージ群

高度制御技術は，通常，運転の効率化に伴う利益最大化を目的として導入されるもので，言うまでもなく省エネルギーが主な目的となることが多く，これまでも多くの実績を残してきている。一方，「地球温暖化対策」が世界的な命題として注目を集めており，CO_2 排出量削減に着目した省エネルギーへの取り組みがあらゆる分野で加速している。プロセス制御の分野においては，高度制御技術が果たすべく役割は今後さらに大きくなる。

本報告では，当社の高度制御における取り組みを紹介し[(1)]，さらに省エネルギーの観点から，高度制御の適用例を紹介する。

2. 高度制御とは

対象プロセスが運転限界値を持ち，その運転限界値を超えない範囲で可能な限り余裕を小さくすることで省エネルギーを実現する場合を例に，**図1**を用いて高度制御とは何かを説明する。

図1のトレンドデータで，左側の振幅の大きい期間は，高度制御OFF（高度制御の導入前）の状態である。この期間は，流量，温度，レベル，圧力などの基本的な制御ループはDCS (Distributed Control System) などで制御しているが，それらの設定値を運転員が手動で調整して，省エネルギーなどの目的を実現している。そのため，一般にデータのばらつきが大きく，不測の変動に備えて，運転限界値に対して余裕を持たせて運転することになる。

高度制御を導入すると，制御性の向上が期待できるため，“高度制御ON”の期間に示すようにデータのばらつきが小さくなる。データのばらつきが小さくなることで，運転限界値との間の余裕が大きくなることから，最適化制御によって，“最適化制御ON”の期間に示すように，より運転限界に近づけることが可能となる。

*1 グローバル営業本部
プロダクションエクセレンスソリューションセンター

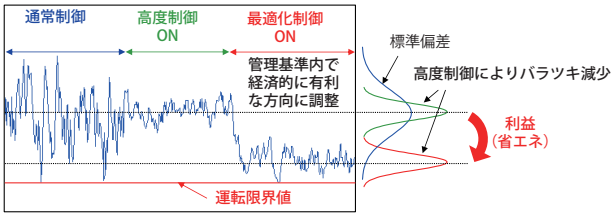

図 1 高度制御とは

このように，高度制御とは，制御性を向上させることだけが目的ではなく，最適化の方向に自動的に近づけることによって，省エネルギーなどの効果を最大限得ることを目的とした制御である。

高度制御は，増産や省力化などに限らず，上記の通り，省エネルギーを目的とした制御にも適用しやすく，これまでも多くの実績を残している。

3. 横河電機の高度制御

図 2 に，横河電機の提供する高度制御製品の構成例を示す。薄青色の部分が，高度制御関連製品である。ここでは，それらの製品の特徴・機能の概要を説明する。

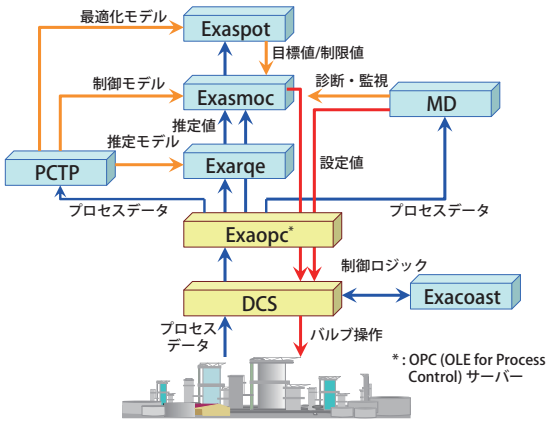

図 2 当社の高度制御製品の構成例

3.1 多変数モデル予測制御パッケージ（Exasmoc）

高度制御を実現するための中核となる製品が，Exasmoc である。[2), 3)] Exasmoc では，**図 3** に示すように，対象プロセスを多入力多出力モデルで表現し，数ステップ先のプロセスの挙動を予測して制御を行う。操作変数（MV: Manipulated Variable）および外乱変数（DV: Disturbance Variable）を入力とし，制御変数（CV: Control Variable）を出力とする。

Exasmoc のコントローラは制御変数を設定レンジ内に維持すると共に，出力数と入力数との差の自由度を用いて，各種制約条件の下，目標関数の最大最小化（最適化機能）を行うことができる。制御アルゴリズムの中に最適化機能を内蔵するため，制御性の向上と最適化の両方を同時に実現できる。従って，現在では，“ 高度制御を導入すること ” は，“ 多変数モデル予測制御を導入すること ” とほとんど同義といえる。

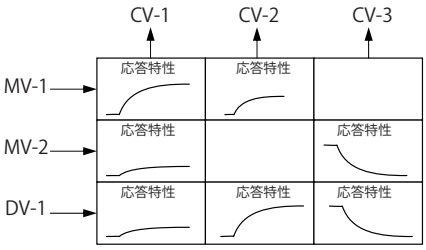

図 3 予測モデル概念図

3.2 オンライン性状推定パッケージ（Exarqe）

制御対象は，品質管理上の指標にしたがって制御すべきであるが，指標とすべき適切なプロセス値がオンラインで測定されない場合も少なくない。Exarqe は，各種指標とすべきプロセス値をオンラインで推定することができ，石油・化学業界では，引火点，リード蒸気圧，オクタン価，メルトインデックス（樹脂の流動性），密度などの推定に古くから使用されている。[3)]

推定計算にオンラインデータを用いることにより，分析計が持つ分析時間遅れを除去することができる。さらに，オンライン分析計，分析結果などの値で推定値の補正（アップデート）を行う機能を持つため，長期間メンテナンスが不要となる。この推定値を制御に用い，**図 4** に示すような制御性の改善を図ることができる。

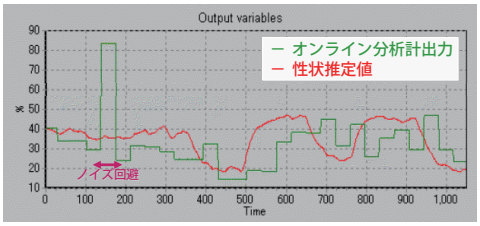

図 4 オンライン性状推定結果の例

3.3 オンラインリアルタイムオプティマイザ（Exaspot）

石油・化学業界等の大規模で複雑なプロセスには，全体最適のための上位機能として Exaspot を活用する。全体最適の結果は，例えば**図 2** の例では，時々刻々変化する状況を考慮して運転限界値を常に最適に維持する機能に相当する。エチレンプラントなどの大規模プロセスや工場全体の省エネルギーを実現のために必要となる。

Exaspot は，プロセスの運転データを定期的に収集し，内蔵する物質収支，熱収支計算等に基づくプロセスユニットモデルを用いて，運転コスト最小などの経済性の観点での最適運転設定値を計算し，下位に位置する Exasmoc コントローラや DCS の PID 制御機能ブロックに設定値を与える。

3.4 制御ファンクションブロック群（Exacoast）

SGSI での長年の実績をベースに，用途に特化した以下に示すような制御機能を，当社の DCS である CENTUM のフィールドコントロールステーションの機能ブロックとして提供している。

1) 加熱炉パスバランス制御（ZBALANCE）
2) 蒸留塔トレイロード推定（ZCTL）
3) 多重測定点の検定機能（ZMVC）
4) 均流液面制御（ZSSVC）

ここでは，大きな省エネルギー効果が期待できる加熱炉パスバランス制御（ZBALANCE）の機能を説明する。

加熱炉は，燃料を大量に消費する装置であり，制御による省エネルギーの効果も大きい。ZBALANCE は，**図 5** に示すように，加熱炉内の配管ごとの流量を調節し，出口温度のばらつきを小さくするよう制御する。

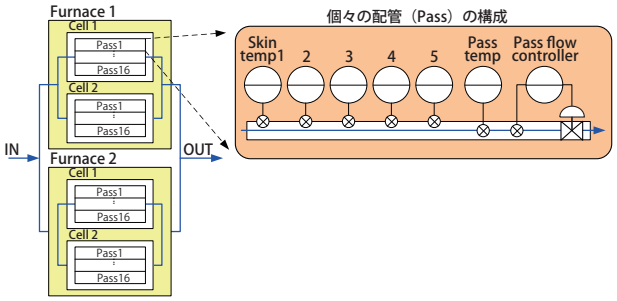

図 5 加熱炉パスバランス制御（ZBALANCE）概念図

一般に，加熱炉の中の燃焼が均一でない等の理由により，複数の配管への熱の移動は配管ごとに違うため，各配管へ同一の流量を流すと各配管の出口温度は違ったものになる。このことは，安定運転の観点からは問題視されないことが多いが，各配管の出口温度をできるだけ均一にする制御を行うことは，熱効率の良い配管で多くの熱交換を行うことになり，省エネルギーの観点から効果が大きい。さらに，温度のばらつきが小さくなることは，スキン温度（配管の表面温度）などの上限値の管理を容易にする。

3.5 制御性監視診断（MD）

省エネルギー効果を期待して高度制御を導入した場合は，その制御性を維持することが重要となる。そのためには常時監視できる指標を定義することが重要である。高度制御の稼働率は，現場が制御動作を受け入れている度合いを正確に反映しているので，稼働率を監視，診断することで制御性の維持を図ることができる。

ＭＤは，稼働率として以下の統計量を計算する。

- Comply
  制御変数が，期待した範囲内にある時間の割合
- NotComply
  制御変数が，制御中ではあるが，期待した範囲に収まらない時間の割合
- Off Control
  制御変数が，制御中ではない時間の割合
- Out Service
  システムのメンテナンスなど，制御変数が，使用できない時間の割合

	Control Performance				Benefits	
Date	Comply	Not Comply	Off Ctl	Out Srv	Realized	PONC
2005-01-03	35	38	27		$7,155	$3,721
2005-01-04	33	39	27		$7,154	$3,722
2005-01-05	36	36	27		$7,155	$3,721
2005-01-06	36	36	27		$7,150	$3,721
2005-01-07	37	36	27		$7,155	$3,721
2005-01-08	37	35	27		$7,155	$3,721
2005-01-09	37	35	27		$7,154	$3,722
	Avg. Control Performance				Avg. Benefits	
	Comply	Not Comply	Off Ctl	Out Srv	Realized	PONC
	36	36	27		$7,154	$3,721

図 6 MD の稼働率レポート例

図 6 は，上記の指標を時系列で表示した稼働率レポートの例で，レポートは Web 配信できる。図の Comply の比率が高いほど高い稼働率であるため，制御性が良いと判断できる。また，図の右半分の “Benefits” の項目には，省エネルギーにより得られる利益が表示される。これは，上記の統計量に単価を定義しておくことで，現在の運転状態から計算される。

4. 省エネルギーを目的とした高度制御の適用例

4.1 石油・化学プロセスでの適用例

石油・化学プロセスで，省エネルギーを目的として高度制御を適用する例を以下に紹介する。実際には FCC (流動接触分解装置：Fluid Catalytic Cracker) などでは，プロセスユニット毎に設計することが多いが，他のプロセスへの展開の可能性を考えて，ここでは装置ごとの適用例を紹介する。

■ 加熱炉

加熱炉はエネルギーを大量に消費する装置で，省エネルギーを目的とした制御は古くから多く実施されてきた。以下に代表的な 2 例を示す。

- パスバランス制御

3.4 項で説明したとおり，加熱炉内の配管の各出口温度のばらつきを小さくすることは省エネルギーの観点から大きなメリットがある。当社では，前述の ZBALANCE 機能を始めとした省エネルギーに多くの実績がある。

- 排気ガス中の酸素濃度制御

燃料と共に炉に送られる空気は，燃焼に最適な酸素以外はすべて無駄に温められた排気ガスとして放出される。従って，排気ガス中の酸素濃度を監視して，過剰に空気

を炉に送らないよう制御することは省エネルギーに効果がある。単純な炉であれば，PID 制御で十分な場合もあるが，炉内圧力も同時に監視するなど，多変数制御が必要な場合には，Exasmoc を適用することで，省エネルギー効果が期待できる。

■ 蒸留塔

蒸留塔は，石油・化学プロセスでは非常に多く用いられている装置の一つで，エネルギーを大量に消費する装置でもある。

塔頂と塔底の相互干渉が強く，時定数が長く，挙動が非線形なため，PID 制御などの 1 入力 1 出力制御では制御性の向上を図ることが非常に難しく，省エネルギーよりも装置の安定が優先される制御が多く見られた。

しかし，Exasmoc と Exarqe を連携させた高度制御により，装置の安定化だけでなく，リボイラースチームの削減，リフラックス量の削減，塔頂圧力の低下など，省エネルギーを目的とした制御の実現を考慮した設計が可能となる。そのため，石油・化学プロセスでの高度制御の適用の多くは蒸留塔を対象としており，実績は非常に多い。**図 7** に，蒸留塔への高度制御適用例を示す。

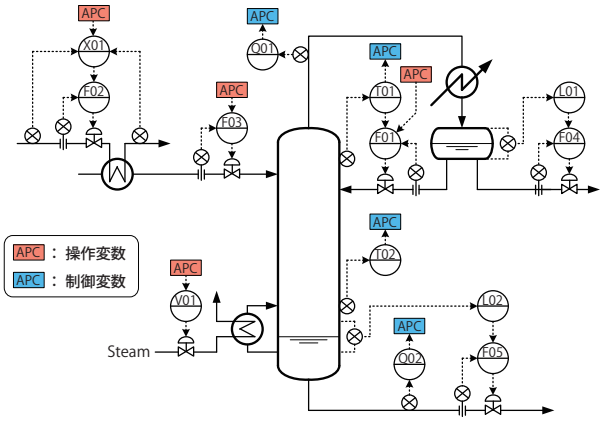

図 7 蒸留塔への高度制御適用例

■ 反応装置

化学プロセスだけでなく，石油精製プロセスでも，CCR (連続触媒再生式接触改質装置：Continuous Catalyst Regeneration) ，FCC，水素化脱硫など，多くの反応装置が存在する。反応装置の運転では，温度，圧力などを最適な反応状態に近い範囲で運転することが最も省エネルギー効果が大きい。そのため蒸留塔と同様に高度制御の導入により，安定化と同時に省エネルギーを考慮した制御を実現することできる。石油精製プロセスでは類似した反応プロセスが多く，ノウハウを蓄積しやすく，これまでに多くの反応装置への高度制御の適用例がある。

■ コンプレッサー

コンプレッサーは，大きいものでは消費電力も大きく，必要最小限での運転が省エネルギーとなる。例えば，夏場の昼間は最大能力での運転が必要でも，夜間になれば，余裕が出てくる。高度制御を適用し，常に必要な能力を監視することで，過剰な能力での運転を避け，省エネルギーを実現できる。

4.2 石油・化学以外のプロセスでの適用例

横河電機では，石油・化学プロセス以外にも，多くの高度制御の納入実績がある。前項で説明した加熱炉，コンプレッサーへの高度制御の適用は，石油・化学プロセス以外でも多い。以下にそれら以外の代表的な例を紹介する。

■ ユーティリティ設備（ボイラー・タービン・発電機）

ユーティリティ設備は，工場内に蒸気と電力を供給するための設備で，買電価格に応じて運転負荷を切り替える運用によって省エネルギーを図っている。ボイラー・タービンの効率を線形近似できれば，Exasmoc による高度制御は，内蔵する線形計画法による最適化機能によって，買電単価に応じた最適な負荷となるような制御を可能とする。

■ 電解槽

電解槽は，大量に電力を消費するプロセスである。しかし，一日の中でも電力単価に応じた運転を行うため，運転変更による外乱が多く，さらに無駄時間が長いなど，従来の制御では安定化すら困難であった。しかしながら，高度制御は，安定制御を行なうと同時に，電力消費量を下げるため電解槽温度ができるだけ管理値上限となるような制御を可能とする。

5. おわりに

高度制御は，石油精製プロセスを始めとする連続プロセスでは古くから広く用いられており，省エネルギーに多大な貢献をしてきた。ここで紹介した高度制御は，大型連続プロセスに限られたものではなく，広く製造装置に適用できる可能性をもつ。またコンピュータのハードウェアの価格と信頼性の向上により，導入コストは年々下がっている。未だ導入に消極的なユーザも多いが，本報告が導入のきっかけになることを期待している。

参考文献

(1) 高津春雄，“ 高度制御・最適化ソリューション ”，横河技報，Vol. 50，No. 3，2006，p. 87-90
(2) 寺島信彦，高津春雄，岡田賢司，“ 多変数最適予測制御パッケージ ‘Exasmoc’”，横河技報，Vol. 45，No. 3，2001，p. 173-178
(3) 池谷祥宏，寺島伸彦，クーリナビーイエン，“ 高度制御パッケージ Exasmoc R3 と Exarqe R3 の機能連携による超深度脱硫プロセスへの高度制御の適用 ”，横河技報，Vol. 47，No. 4，2003，p. 137-140

* Exasmoc，Exarqe，Exaspot，Exacoast，CENTUM，Exaopc は，横河電機㈱の登録商標です。