

運転制御分野におけるプロセスシステム工学の活用

住友化学工業(株) 生産技術センター
巒 義 則

Application of Process Systems Engineering to Plant Operation and Control

Sumitomo Chemical Co.,Ltd.
Process & Production Technology Center
Yoshinori KUTSUWA

Process Systems Engineering (PSE) has made progress as a new discipline to establish theories and methods for decision making at all the stages of plant life cycle (planning, design, management, operation, control and maintenance of process systems). Recently the main research field of PSE has been shifted from process design to plant operation and control in response to the change in needs of chemical process industries. This paper reviews the key technologies of PSE and their applications to industrial chemical plants, and touches upon some difficult problems and further development.

はじめに

1970 年前後から新しい学問体系として発展してきたプロセスシステム工学(Process Systems Engineering ; 以後、PSE と略す)は、プロセス産業における様々な工学的意志決定の問題を合理的に解決するための具体的な方法論を追求する工学である¹⁻³⁾。化学工学、システム工学、コンピュータを要素として、現象を数学的な方程式で表現し(モデリング)、それをコンピュータで解いて現象を明らかにし(シミュレーション)、ある評価を最もよくすること(最適化)が基本である(第1図)。PSE は、いわゆるプラントのライフサイクルにおける計画、設計、運用、運転・制御、管理・保全など様々な段階を対象としているが、当初は設計に関連する分野を中心に研究、適用されてきた。その後、プロセス産業におけるニーズや環境の

変化もあって運転制御の分野へと展開し、現在では実用レベルに達した技術も多く生まれている。ここでは、社内での運転制御問題に対する取り組みに焦点をあて、PSE の要素技術およびその活用事例を紹介し、併せて今後の課題と展望について述べる。

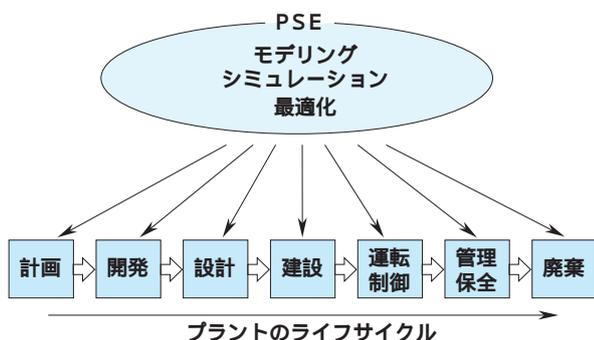
プラント運転制御の目的

近年の化学産業を取り巻く環境の変化⁴⁾から、プラントの運転制御に対してもますます要求レベルが高まり、次のような取り組み、問題解決が求められている^{5,6)}。

- ・安定運転 - 外乱 / 条件変更に強く、人の手を借りない
- ・限界運転 - 設備能力を最大限まで引き出す
- ・最適運転 - 省エネ、高収率、高品質のための運転条件の決定とその維持
- ・操作自動化 - オペレータ手動操作介入 / 監視負荷の軽減
- ・品質安定化 - 品質のばらつき減少
- ・ロス削減 - 銘柄切り替え時間短縮と格外品の最小化
- ・異常診断 - 異常 / 故障の検出とそれへの対応策の決定
- ・環境保全 - 排出NO_x、CO₂、COD などの削減

PSE は、これらの目的を達成するために、様々な局面における意志決定を効率よく行うための技術を与える。それらの各要素技術について簡単に説明する。

第1図 PSE とプラントのライフサイクル



運転制御分野のPSE要素技術

1. ダイナミックシミュレーション技術⁷⁻⁹⁾

時間軸を考慮したモデルを用いて、プロセスの時間的な挙動を表現するのがダイナミックシミュレーション技術であり、制御系の構築時に利用されることが多い。制御構造や制御パラメータの設計には系の動的な挙動の把握が必要であるが、直接操業データからこれを得るには、実プロセスにステップ外乱などを与え、その応答を取得するのが一般的である。しかし、この外乱によって操業が乱されるため、長時間のテストが許されなかったり、操業上(安全上)の制約から小さな外乱しか加えられなかったりなどして、十分なデータ取得が難しいことが多い。実プロセスの代わりに、そのモデル上でオフラインで検討できれば、プロセスに乱れを与えることはない。オフライン、オンラインにかかわらず様々な利用目的が考えられる。

- ・新設プラントの制御系設計
- ・既設プラントの操作性/制御性の解析、改善、最適化
- ・運転条件変更に対する非定常状態の推定、予測
- ・リアルタイム最適化
- ・運転支援/ガイダンス
- ・スタートアップ/シャットダウン手順合成
- ・オペレータトレーニング

ただし、モデリング自体が非常に困難な場合や、作られたモデルが複雑すぎたりスティフな(大きく異なる時定数をもつ)系になったりして解くのが難しいこともある。そのような場合にも効率的なモデリングを支援してくれる汎用シミュレータが十数年前から開発され機能拡張が進んでいる。Aspen Custom Modeler(Aspen Technology社)、HYSYS.Plant(Hyprotech社)などがその代表例である。

2. プロセスデータ解析技術¹⁰⁻¹²⁾

プロセスから得られる豊富なデータから雑音を除去し(フィルタリング)、それに含まれる意味のある信号を抽出したり、プロセス変数間の因果関係を見つけたりするのがデータ解析技術であるが、時系列の過去の値をベースにモデルを作成すれば将来のプロセス状態を予測することもできる。雑音などの確率的な不規則変動を示すデータの解析には統計的なアプローチが有効である。フィルタリングの代表的な手法には移動平均やカルマンフィルタなどがあるが、最近ではウェブレットの適用例もでてきている^{13,14)}。多変数間の相互相関解析には、多変量解析法として主成分分析法(PCA)やPartial Least Squares(PLS)などがある^{15,16)}。時系列モデルとしては、自己回帰(AR)や自己回帰移動平均(ARMA)などの離散時間モデル

以外に、PLSやニューラルネットワークも使われる^{17,18)}。それらのデータ解析手法をパッケージソフト化したものに、MATLAB(MathWorks社)やProcess Insights(Pavilion Technologies社)などがある。このように、データから有効な情報を引き出す考え方(データマイニング)は、プロセスの異常検出・原因解明、モニタリング、将来予測など、適用範囲は幅広く、実用的な技術と期待されている¹⁹⁾。

3. アドバンスト制御技術²⁰⁻²²⁾

化学プラントでは、制御方式としてPID制御が最も多く用いられ、制御ループの90%以上の適用実績をもつ。この理由の一つは、PIDパラメータのもつ物理的な意味が明確であり、しかも制御構造が簡単であることにある。しかし、モデル無しおよびシングルループの限界から、多変数、非線形性、大きな遅れやむだ時間、相互干渉、負荷変更、時変なプロセスパラメータなどへは対応能力が低い。それらの欠点を補った制御方式がアドバンスト制御である。アドバンスト制御は、単純なPID制御に何らかの改良を加えたり(ギャップ付き、サンプル値、2自由度、ゲインスケジューリングなど)、現代制御理論や経験・知識に基づくモデルを用いたり(非干渉制御、適応制御、モデル予測制御^{23,24)}、ファジィ制御²⁵⁾、学習制御^{26,27)}、最適化制御^{28,29)}など)して、制御対象の特性に適應するようにした技術である。現在世界的に2000以上のプロセスで実稼働しているモデル予測制御は、DMC plus(Aspen Technology社)、RMPCT(Honeywell社)、SMOC(MDC Technology社)など、また最適化制御は、RT-OPT/DMO(Aspen Technology社)、Profit.MAX(Honeywell社)、HYSYS.RTO+(MDC Technology社)などのパッケージソフトとして開発されている。

4. 異常診断技術³⁰⁾

異常診断は、対象プロセスに何らかの異常が発生したとき、それを迅速に検知し、その原因を解明し、その結果に基づいてプロセスに対する適切な処置を決定するという一連の手続きを指す。プロセスから得られたデータから雑音を除去してその特徴を抽出するには、前述のデータ解析技術や信号処理技術が活用される¹⁹⁾。また、潤滑油の分析などには化学分析技術が使われることもある。抽出された特徴から異常の有無を判断するには基準(しきい値)が必要であり、その良し悪しが判定の正確さを決定する。異常と判断された場合には、その原因を推定し、それへの対応措置を選択する。異常原因を推定する方法には、経験的手法(デシジョンテーブル、パターン認識³¹⁾など)、論理的手法(物理モデル、統計モデル、符号付き有向グ

ラフ³⁰⁾、フォルトツリー³²⁾など)、知識工学的手法(エキスパートシステム)がある。

社内活用事例

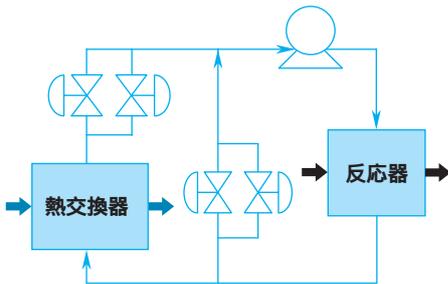
1. ダイナミックシミュレーションによる制御系設計

前工程の反応器切り替え時にフィードに大きな変動を伴う蒸留塔では、オペレータが測定値(フィード流量、塔底/回収部中段/塔頂温度、塔圧など)を総合的に判断してスチーム量や還流量を頻繁に操作していた。そこで、ダイナミックシミュレーション上でフィード流量、スチーム量、還流量などに変化を与えて系の動特性を確認しながら、最終的に、回収部中段温度 - スチーム量および塔頂温度 - 還流量の各カスケード制御、フィード流量からスチーム量へのフィードフォワード制御からなる制御系を構築した。それを対象の蒸留塔に組み込んだ結果、負荷下げや負荷上げに対して安定した自動運転が可能となった。

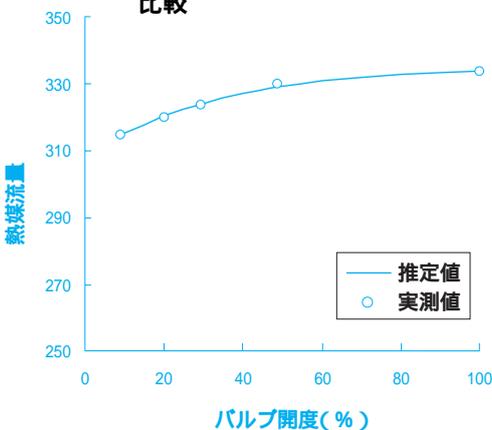
2. オンラインシミュレーションによる運転支援

第2図のような熱媒を循環させて反応器の除熱を行うプロセスにおいて、その運転状態は、反応器の流量、モル比、温度などから算出した反応熱量と、熱媒側は適当な流量計がないためその温度とによって監視されていたが、精度に問題もあり十分ではなかった。対

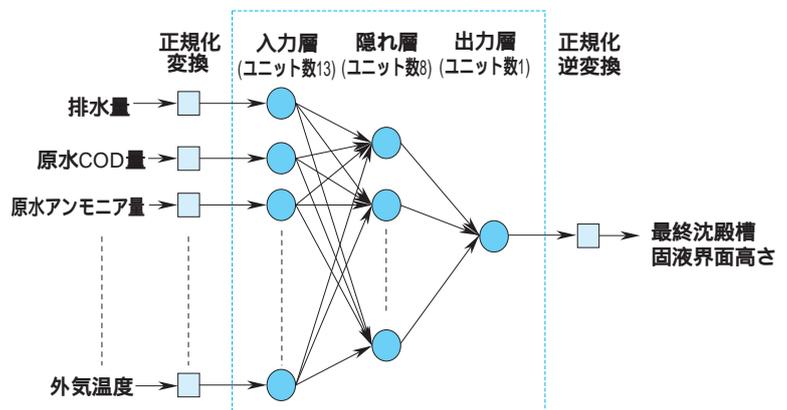
第2図 反応器除熱プロセス



第3図 熱媒流量の推定値と実測値の比較



第4図 ニューラルネットワークモデル



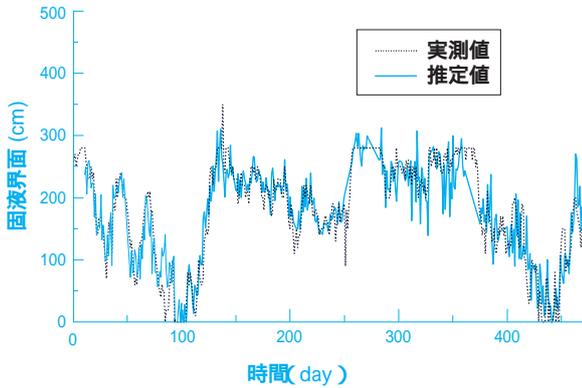
象プロセスは熱媒が閉じた配管内を循環する完全な閉システムであり、熱バランスは熱交換器出口、パイパス配管に設置された4つのバルブで調整される。このような完全循環系ではポンプ吐出圧と各配管・機器圧損とのバランスが取れているため、各バルブ開度を与えればシミュレーションによって未測定の流れも算出することができる。このように推算した熱媒流量と実測した流量を比較した結果、広範囲で一致することを確認した(第3図)。この熱媒流量と温度から算出される除熱量と反応熱量の差や熱交換器の総括伝熱係数の推移などをリアルタイムに表示することによって、反応状態の変化、センサー異常、設備劣化などを早期に発見できる運転支援システムを開発した。

3. プロセスデータ解析の運転制御への応用

排水の活性汚泥処理装置において、最終沈殿槽の汚泥浮上(キャリアオーバー)は代表的な問題の一つであるが、プロセスが複雑なため容易にその原因を特定できず、対処法がない状況であった。そこで、ニューラルネットワークによって実操業データを解析してキャリアオーバーの原因を特定し、対処する方法について検討した。対象プロセスには74項目の流量や成分などの変数が存在したが、尖度、歪度、ヒストグラムなどの統計量や相関係数、さらに装置上、運転上の重要性などを考慮して、排水量、原水COD量、原水アンモニア量、外気温度など13変数に絞り込んでニューラルネットワークモデル(第4図)を構築し、固液界面の変化をうまく再現できることを確認した(第5図)。このモデルを使って汚泥界面の変化に大きく影響する変数を見つけ、そのうちリン酸投入量を選んで実際に調整することによって汚泥界面の安定性を改善することができた。

また、燃焼設備の排熱を利用した濃縮設備は他プロセスからの排水を濃縮するための設備(第6図)であるが、燃焼炉の燃料、排水フィード、気象条件な

第5図 モデル推定値と実測値の比較

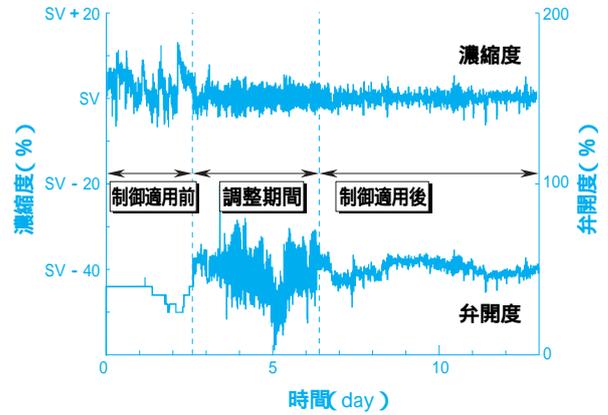


どの外乱のため安定した操業を行うのが難しいプロセスであった。このような対象には、外乱要因を事前に捉えて外乱が濃縮度に影響を与える前に、排ガスフィード量をバイパス弁によって操作し対処することが望ましい。このフィードフォワード制御にはプロセスを精度よく表現できるモデルが必要であるが、対象プロセスには外乱変数が多く、その中から重要な外乱を特定することが難しかった。そこで、濃縮度の挙動を正確に推定できるニューラルネットワークモデルを構築し、大きな影響を及ぼす外乱変数(燃烧空気流量や燃烧炉温度など)を特定した上で、実機データを回帰した濃縮度予測モデルを作成した。このモデルをフィードフォワード制御として組み込み、さらに未知の外乱やモデル誤差に対処できるようにフィードバック制御を付加した制御系を用いることによって、濃縮度を安定化することができた(第7図)。

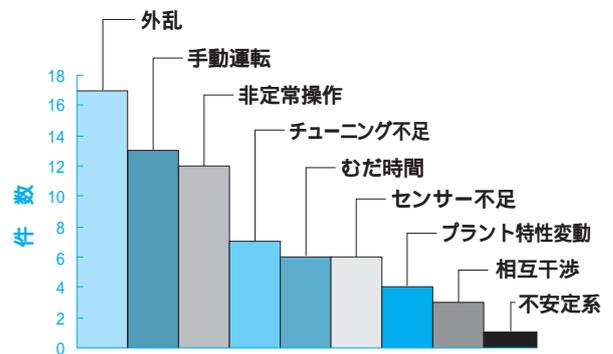
4. モデル予測制御による蒸留塔の運転安定化

第8図は全工場を対象に蒸留塔の制御における問題点について調査を行った結果であるが、フィード組成

第7図 実設備への制御適用結果

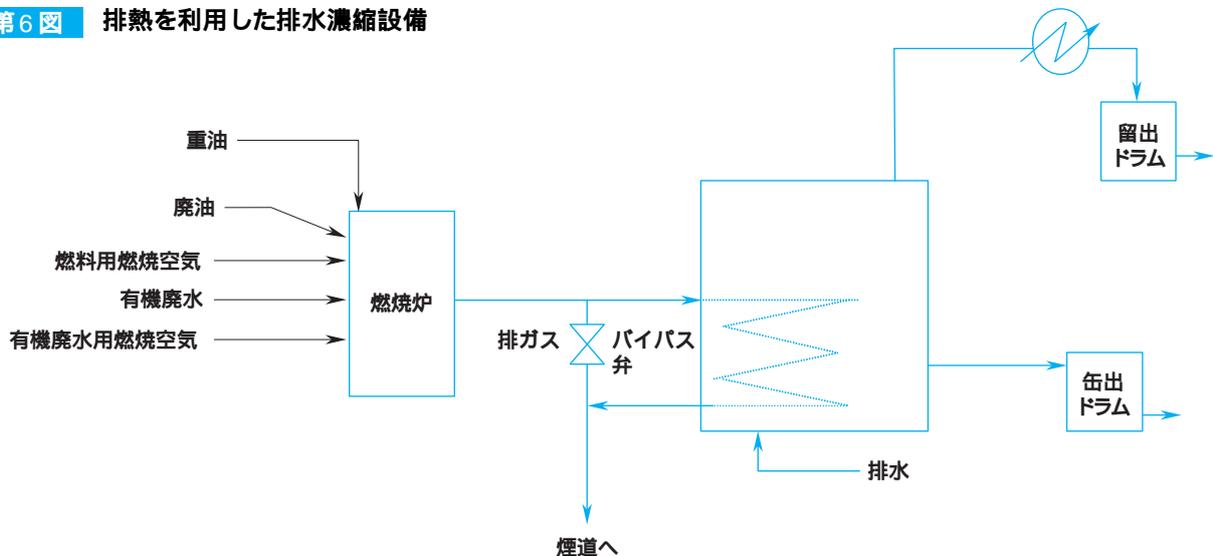


第8図 蒸留塔制御の問題点



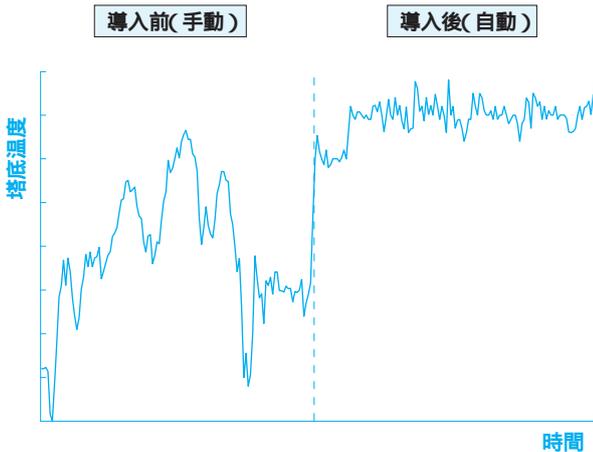
変動などの外乱、負荷変更時などの非正常操作、むだ時間や相互干渉などのため、標準的なPID制御では対応しにくく、手動操作を余儀なくされている。そこで、これまで外乱や負荷変更に対してスチーム量などが手動で調整されていた精留塔において、塔底温度制御にモデル予測制御を導入したところ、導入前と比べて温度の振れを1/3以下にすることができた

第6図 排熱を利用した排水濃縮設備



(第9図)。また、塔内の変動が抑えられたことによって還流比を下げる事ができ、スチーム原単位を減らし、省エネにもつながった。さらに、塔底温度の安定化、適正化によって、品質のばらつきは導入前よりシャープになり、全体として純度を上げることもできた。

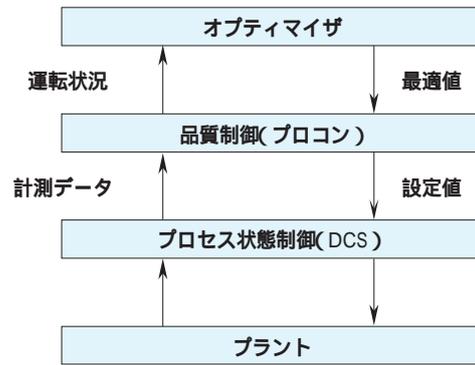
第9図 蒸留塔温度制御の安定化



5. ポリマープラントにおける銘柄切り替え最適化制御
 ポリオレフィンやポリスチレンなどのポリマープラントでは、大型の連続重合工程で頻繁な銘柄切り替えが行われており、その銘柄切り替え時に多くの格外品が発生している。しかし、操業条件と製品の品質との関係は多変数対多変数で、しかも非線形性が強く、さらに遅れやむだ時間が大きいため、銘柄切り替え時の品質制御は非常に難しい問題である。そのため、オペレータの経験に頼って手動操作で調整されており、省力化への障害になっている。また、運転可能な限界条件に対して余裕をもった運転にならざるを得ず、格外品の発生量だけでなく、生産性や原単位などの観点からみても最適な運転が実現できていない。

これらの問題を解決するため、第10図のような階層型最適化制御システムを開発し、ポリスチレンプラントに適用した。まず、プロセスデータの多変数解析を行い、プラント全体に渡る種々のプロセスモデルを構築した。次に、ダイナミックシミュレーションを活用して最下位のプロセス状態制御から順次上位に向かって制御系の設計やチューニングなどを進めた。プロセス状態制御ではPID制御が主に使われているが、定常状態での安定性を重視したチューニングのため、銘柄切り替え時の追従性が十分でないものが多かった。そこで、ギャップ付きPID制御やフィードフォワード制御の設計、制御周期の最適化、PIDパラメータの再チューニングなどを行った結果、十分な制御性が得られた。品質を制御するには非線形性および多変数を扱えるアドバンス制御が必要であり、作成したプロ

第10図 階層型最適化制御システム



セスモデルに基づく制御アルゴリズムを構築した。この制御では品質の状態フィードバックが必要であるが、直接計測するセンサーがプロセス内に存在しないため、シミュレーションによって間接的に推定し、フィードバックしている。最上位の最適化では、運転可能限界および品質規格の制約条件の下で最適な切り替え軌道を算出する。この最適化問題を、軌道の関数形を予め決めてその関数の係数を求める問題として定式化し、非線形計画法によって解いた。本システムによって格外品ゼロを実現するとともに、オペレータの少数化などの省力化、生産性や原単位の向上に貢献できた。

今後の課題と展望

1. プラントワイド制御³³⁾

省エネや品質向上など高レベルの要求のためプラントのインテグレーションはますます進み、多くのリサイクル系を含んだ構成となっている。このようなプラント全体について制御系を設計する際様々な制御構造が考えられるが、各々の装置の制御系設計の寄せ集めではプラント全体として見たとき合理的でないばかりか、運転自体できなくなることもある。プラントを構成している個々の装置の制御系を組み立てその結果として全体が構築されるのではなく、逆に装置間のつながりや各装置での要求および制御機能を考慮してプラント全体をみて制御系全体を設計することが重要である。最近ではプラント全体を一度にコンピュータ上でシミュレーションできる場合もあり、プラントワイドな観点から決めた制御構造を現実に近い環境で仮想テストすることも考えられる。

2. プロセス設計とプロセス制御の統合^{33,34)}

プロセス設計と制御には密接な関係があり、制御性能はプロセス設計自体にも依存するため、制御で解決できない問題でも設計で容易に解決できる場合も

ある。設計時に制御性能まで考慮したプラント設計を行うことによって、制御しやすいプラントが実現できると考えられる。新規プラント起業時におけるコンカレントエンジニアリングやスタートアップ/シャットダウン手順の最適化などで、ダイナミックシミュレーションを利用した取り組みを始めている。

3. 制御器性能のオンライン評価

プラントの運転中、オンラインで制御器の状態を常時監視し、多くの制御器の中から再調整が必要なものをオペレータに提示することができれば、早期に性能の低下を発見し、対応することができる。最近、制御器の性能評価に対して、測定値に含まれる振れの大きさに基づいた指標が提案されている³⁵⁾。最小分散制御を適用した際に実現可能な偏差の分散より現状の偏差の分散の方が大きければ、その制御器には再調整の余地があり、現状の分散が実現可能な分散とほぼ等しいのに要求される分散より大きければ、制御系自体の見直しや外乱の抑制などが必要であると判断される。

4. 操業データとモデルのリンク

最近、プラントデータ収集・管理システム(PI(OSI Software 社)など)が導入され、いつでもどこでもどのプラントのデータもリアルタイムで見ることが可能になってきた(プラントデータのオープン化)。これらの豊富なデータをいかにうまく利用して、運転の合理化、効率化につなげていくかが次の課題であり、現在取り組み中である。プロセスデータとモデルをリアルタイムに比較することによる状態モニタリングや異常検出・診断、シミュレーションとのリンクによる未測定プロセス変数の推定(ソフトセンサー)³⁶⁾など、モデリング技術の活用が考えられる。

5. 定量的なリスク解析・安全性評価

近年、プラントの安全ライフサイクル管理という概念が注目され、プラントのリスクベース評価が設備維持に関する費用と性能の関係を解析する手法として期待されている³⁷⁻³⁹⁾。リスクベース評価では、対象プラントにおける異常原因の影響度や異常伝播速度などが指標として使われる。異常を想定したダイナミックシミュレーションによってそれらの指標を定量的に評価できる可能性がある。

おわりに

2000年7月に米国で開催されたPSEの国際会議(PSE2000)⁴⁰⁾では、プロセスデータ解析やアドバンス制御などの理論やアルゴリズムに関する基礎研究、応用研究と並んで、プラントワイド制御や設計と制御

の統合、さらに製品設計やサプライチェーンマネジメントへの寄与など、運転制御問題の枠組みを広げる展開も見られ、PSEのさらなる進化が期待される。一方、現実の運転制御の高度化にはその土台となるバルブや計器など計装の整備が不可欠であり、しかもプラントの運転には必ず人間が介在するため、現場が理解し、納得する問題解決でなければならない。引き続き、制御の足周りのレベルアップを図りながら、現場に受け入れられるPSEの積極的な活用に取り組んでいきたい。

引用文献

- 1)高松 武一郎：計測と制御, 31, 108(1992)
- 2)松山 久義, 橋本 伊織, 西谷 紘一, 仲 勇治：“新体系化学工学プロセスシステム工学”, オーム社(1992)
- 3)橋本 伊織：化学工学論文集, 22, 973(1996)
- 4)高橋 正俊：日本学術振興会プロセスシステム工学第143委員会平成11年度第5回研究会資料(2000)
- 5)広井 和男：“デジタル計装制御システムの基礎と応用”, 工業技術社(1987)
- 6)松山 裕：“だれでもわかる自動制御”, 省エネルギーセンター(1992)
- 7)西谷 紘一：“化学工学会関西支部セミナー：シミュレーション技術の現状と将来”(1993)
- 8)越島 一郎, 仁井田 和雄：化学工学, 58, 170(1994)
- 9)服部 孝明, 杉森 久容：計測技術,(3) 1(2001)
- 10)橋本 伊織：“化学工学会展望シリーズ第5回プロセス制御技術1989”, p.13(1989)
- 11)大野 弘：日本学術振興会プロセスシステム工学第143委員会ワークショップNo.3テクニカルレポート(1989)
- 12)加納 学, 大野 弘, 長谷部 伸治, 橋本 伊織：計測自動制御学会論文集, 37, 160(2001)
- 13)大野 弘：日本学術振興会プロセスシステム工学第143委員会平成9年度第4回研究会資料(1997)
- 14)松尾 徹, 簗島 広泰, 高垣 仁：2000年度IMS研究成果講演論文集, p.5(2000)
- 15)M. Kano, S. Hasebe, I. Hashimoto, H. Ohno：Computers and Chemical Engineering, 25, 1103(2001)
- 16)大野 弘：日本学術振興会プロセスシステム工学第143委員会ワークショップNo.13テクニカルレポート(1995)
- 17)加納 学, 宮崎 浩一, 長谷部 伸治, 橋本 伊織：化学工学論文集, 24, 425(1998)
- 18)山本 順三, 佐々木 隆志, 花熊 克友, 中西 英二：

- 化学工学論文集, 24, 689(1998)
- 19) 山下 善之: 日本学術振興会プロセスシステム工学第143委員会ワークショップNo.21テクニカルレポート(2000)
- 20) D. E. Seborg, T. F. Edgar, D. A. Mellichamp (橋本 伊織(監修)): “プロセス・ダイナミクス&コントロール”, 工業技術社(1996)
- 21) 花熊 克友: 化学工学論文集, 22, 1263(1996)
- 22) 橋本 伊織: INTERMAC 99 特別講演会資料(1999)
- 23) 西谷 紘一: 計測と制御, 28, 996(1989)
- 24) 大嶋 正裕, 大野 弘: 日本学術振興会プロセスシステム工学第143委員会平成8年度第1回研究会資料(1996)
- 25) H. Kobayashi, H. Sugiyama, S. Kanazawa, T. Tani, T. Furuhashi: Proc. of 5th International Conference on Soft Computing(IIZU KA 98), p.704(1998)
- 26) 花熊 克友, 佐々木 隆志, 中西 英二: 化学工学論文集, 16, 51(1990)
- 27) 加藤 尚武: システムと制御, 35, 138(1991)
- 28) 栗山 隆文: 計装, 36(6), 71(1993)
- 29) 江本 源一: PETROTECH, 21, 573(1998)
- 30) 松山 久義, 大島 榮次: “化学プラントの異常診断”, アイピーシー(1991)
- 31) 轡 義則, 小島 光司, 松山 久義: 化学工学論文集, 14, 20(1988)
- 32) 熊本 博光, 井上 紘一: システムと制御, 24, 703(1980)
- 33) 橋本 伊織, 大嶋 正裕: システム/制御/情報, 38, 519(1994)
- 34) V. Bansal, J. P. Perkins, E. N. Pistikopoulos, R. Ross, J. M. G. van Schijndel: Computers and Chemical Engineering, 24, 261(2000)
- 35) B. Huang, S. L. Shah, E. K. Kwok: Automatica, 33, 1175(1997)
- 36) 橋本 伊織: 計測自動制御学会第22回制御技術研究会研究会資料(1999)
- 37) 高木 伸夫: 安全工学, 39, 55(2000)
- 38) 角田 浩: 第30回安全工学シンポジウム, OS6-4(2000)
- 39) 二宮 光良: 計装, 44(7), 43(2001)
- 40) PSE2000: Computers and Chemical Engineering, 24(Nos.2-7), Elsevier Science(2000)

PROFILE



轡 義則

Yoshinori KUTSUWA

住友化学工業株式会社
生産技術センター
主席研究員
工学博士