石油精製プラントにおける インテリジェント制御の適用事例について

谷　哲次

1. はじめに

石油精製業は典型的な装置産業であり，生産性や品質の向上，操業の安定化，省力化の実現などを目的に，積極的にプラント自動化技術を採用してきた．しかしながら，すべてが完全に自動化されているわけではない．その理由には，現実のプロセスが複雑すぎ，簡単にはモデル化できないことや，制御に必要な変数のすべてが測定できるようにはなっていないことなどが挙げられる．特に，原料切り替えや運転モード変更などの過渡状態においては，装置の物理的制約や外乱があるうえに，系のダイナミクスが時間遅れを持ち，かつ非線形的に変化するために，自動化が困難となることが多い[1]－[3]．

このような困難さがあるにもかかわらず，熟練オペレータは，温度・圧力・流量などの運転変数を安定化させるために，その前提となる運転条件やプロセスの状態を認識し，知識・経験を活かして適切な判断や操作を行っている．

そこで近年，ニューラルネットワークやファジィ理論などのソフトコンピューティング技術[4]を活用して，熟練オペレータの知識・経験を計算機上で再現することにより，従来の手法では自動化が困難であった箇所の自動化が試みられている[5]－[8]．

さらに，現場で新しい制御システムを導入する際，望まれる事項は，制御性能の向上だけでなく，その制御ロジックがシンプルで現場に馴染みやすいこと，環境変化や条件変更にも耐える頑強性があること，新制御システムの開発から稼働までを低コストで実現できること，かつ，制御機器，知識を含め現在まで蓄積した資産を活用できることなどである．

そのような事例から，弊社で適用した灯軽油脱硫装置の原料切り替え制御[9]を紹介する．実際の現場では，広く使用されているPID制御だけでは制御性能に不満が残る場合においても，熟練オペレータはそのプロセスの状態や制御動向を観測し，経験を加味して，PID制御器の制御目標値を適切に変更して制御性能を満足させていることが多い．そこで，この制御システムは，「熟練オペレータの推論や判断」に着目して自動化を達成したものである．

2. 灯軽油脱硫装置の原料切り替え制御

2.1 灯軽油脱硫装置の概要

石油精製で得られる主要な製品に灯油と軽油がある．灯軽油脱硫装置は，常圧蒸留装置から留出する未洗灯油，未洗軽油を水添処理（脱硫，脱臭，脱色など）して，製品としての灯油や軽油を製造する装置である．灯軽油脱硫装置の概要を図1に示す．未洗の灯油，または軽油は水素を添加され，原料加熱炉で昇温されリアクタ（反応塔）に送られる．リアクタで脱硫され，セパレータ，フラッシュドラムを経て，ストリッパに送られる．ストリッパでは，フラッシュドラムで分離できなかった硫化水素，軽質炭化水素を除去し，引火点などの性状を調整された脱硫灯油，脱硫軽油は製品となってストリッパ塔底から抜き出される．原料である未洗灯油と未洗軽油の切り替えは，生産計画に基づき行われる．

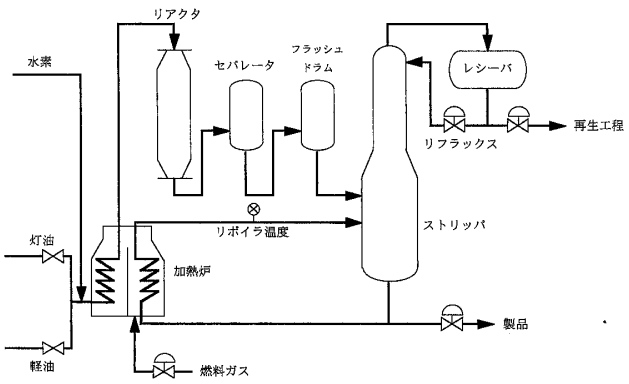


図1　灯軽油脱硫装置の概要

たに　てつじ
出光興産㈱　製造部　システム技術センター
〒299-0107 市原市姉崎海岸 2-1

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

2.2 問題の背景

定常運転時，このプラントは完全自動化されて運転されている．しかしながら，未洗灯油と未洗軽油の切り替え時は，組成が異なる2つの油種をオン・オフ的に切り替えるため，その変動がストリッパのレシーバに直接影響を与え，レシーバレベル（観測点）を急変させていた．

このレシーバレベルを調整するための主たる操作点はリボイラ温度であり，副としての操作点はリフラックス量である．また，製品性状を満足する範囲内で，リフラックス量は少ない方が省エネルギーとなり，望ましい．

平常運転時は，PID制御によりレベル調整が十分可能である．しかし，原料切り替え時は，次のような理由からレベル調整の自動化はできず，完全自動化の障害となっていた．

- 灯油と軽油が混在している過渡状態であり，応答特性が非線形性を持つ．
- 操作点のリボイラ温度とリフラックス量は干渉する．
- リボイラ温度調整に対するレシーバレベルの応答に大きな時間遅れがある．したがって，レベルの状態を見て温度調整を行っていたのでは対応が遅い．
- リアクタの原料加熱炉はストリッパの加熱炉を兼用しており，原料加熱炉の温度上昇（あるいは降下）は，リボイラの温度上昇（あるいは降下）操作に対し大きな外乱となる．
- セパレータ，フラッシュドラム，レシーバに十分な容量の余裕が無く，過渡状態の変化を吸収できない．

2.3 解決の方法

レベル調整の自動化にはストリッパのリボイラ温度の調整が重要なポイントとなる．しかし，原料が灯油と軽油の混合状態にあり，しかも塔頂温度，処理量，リフラックス量などの因子が複雑に絡みあっているため，プロセスの挙動をモデル化することは難しい．

一方，熟練オペレータとの討議の結果，概略のリボイラ温度推移を予想して，レシーバレベルの圧力，リフラックス量などからプロセスの状態を経験的に判断して，リボイラ温度を手動調整することにより，レシーバレベルを安定化させていることが分かった．

そこで，ニューラルネットワークにより原料切り替え時の熟練オペレータの運転操作の挙動を同定して，代表的なリボイラ昇温・降温曲線を決定することを着想した．

このリボイラ昇温・降温曲線は，代表的な原料油を通油したケースであるため，実際の運転においては原料油性状の変化に応じた温度設定の補正が必要である．そこで，この運転ノウハウをファジィ制御規則にまとめ，ファジィ推論を用いて温度を補正することとした．これらのシステム化の流れを図2に示す．

2.4 制御システムの構成

開発した制御システムは，予測部と補正部の2つのブロックから構成されている（図3）．予測部は，熟練オペレータの運転手法を模倣し，代表的な運転パターンをニューラルネットワークを用いて整理・分析し，制御の基準値を決定する．補正部では，実際の運転状態と代表的な運転状態の差異からファジィ推論を用いて制御の基準値を補正する．そして，PID制御器の制御目標値として補正後のリボイラ温度値を与える．予測部と補正部の詳細を次に述べる．

2.4.1 予測部

熟練オペレータは，処理量，リフラックス量，原料切り替え後の経過時間などからリボイラ温度を事前に手動調整することで，レシーバレベルを適切に制御し

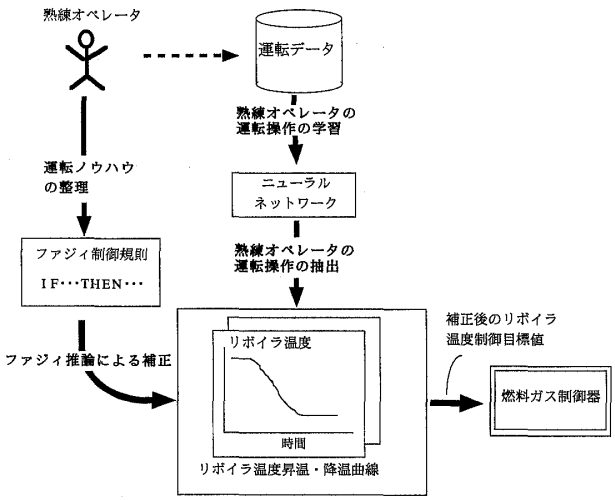


図2 システム化の流れ

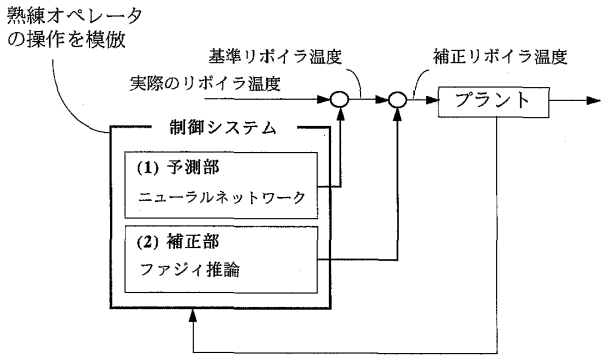


図3 制御システムの構成

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

ている．そこで，代表的な温度調整パターンを決定するために，3階層のニューラルネットワークを用いた．入力層は経過時間，処理量，リフラックス量，製品抜き出し量，レシーバレベルの5点とし，出力をリボイラ温度とした．使用したニューラルネットワークの概要を図4に示す．

熟練オペレータの油種切り替え直後からプロセスが落ち着くまでの運転データを学習用のデータとし，学習方法は誤差逆伝播方法（バックプロパゲーション法）[10]を採用した．この学習済みニューラルネットワークに対して，理想的なリフラックス量やレシーバレベルを入力して，経過時間を増加させていくと図5のような代表的なリボイラ昇温・降温曲線を抽出することができる．

2.4.2 補正部

ニューラルネットワークで抽出した代表的なリボイラ昇温・降温曲線は，代表的な原料油を通油したケースであるため，実際の運転においては原料油性状の変化に応じた温度設定の補正が必要である．この温度補正は，レシーバレベルおよびリフラックス量の必要量を保ちながら図3の補正部で行われる．

レシーバレベルの変動を早期に検知するプロセス変数として，塔内圧力変動に着目した．塔内圧力変動は，主にリボイラの熱量変化を表していることから，圧力変動を抑えた運転となるようファジィ推論を用いて温度を補正した．

使用したファジィ制御規則を図6に示す．ファジィ推論方法は，高木・菅野型[11]を採用した．この高木・菅野型ファジィ規則は後件部に線形関数を持つルールであり，前件部が示す場面ごとに線形関数の引数を変更できる1種の区間線形化法ともいえる．例えば，リフラックス量があまり多くない（レシーバレベルの調整に余裕がある）場面では，その補正値はリフラックス量の関数として表現しているが，リフラックス量が多い（レシーバレベルの調整に余裕が無い）場面では，早めに変動を抑えるべく，リフラックス量と塔内圧力の関数として表現している．

2.5 制御結果

開発した制御を弊社の灯軽油脱硫装置に適用した結果，原料切り替えの自動化を図ることができた．その一例として，軽油から灯油への切り替え時の運転状況を示す．

図7(a)は本システム導入以前の手動調整のレシーバレベル状況である．レベルは50%から85%の範囲で振れている．一方，図7(b)は本システムによる制御結果である．システムはリボイラ温度を連続的に，かつ緩やかに変化させて調整している．その結果，レシーバレベルも50%から60%の範囲におさまり安定している．

また，図8(a)は手動調整時のリフラックス量である．運転可能なレンジ上限に張り付くこともあった．一方，図8(b)は本システムによる制御結果であり，少ないリフラックス量で制御できており，省エネルギーにも貢献している．

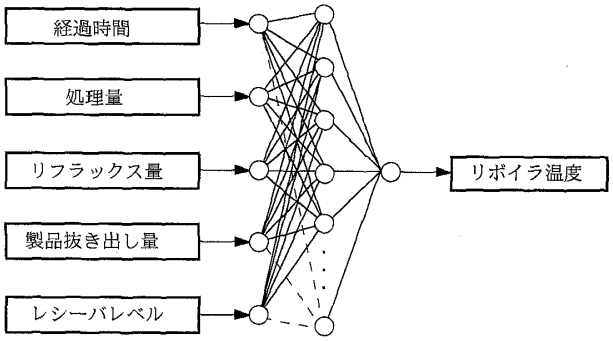


図4　ニューラルネットワークの概要

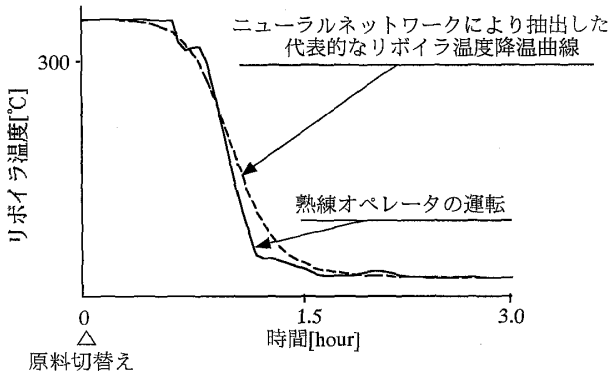


図5　リボイラ温度降温曲線の例

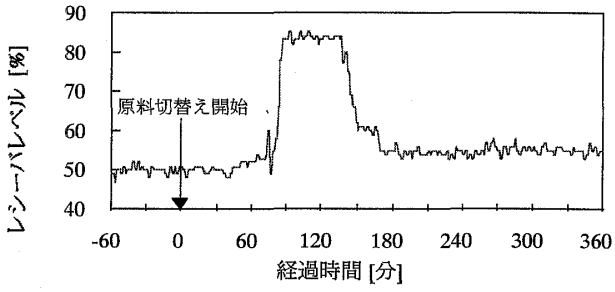
ルール番号	If（前件部）	Then（後件部）
1	R is N	$\Delta T=\alpha_1 R \quad +\gamma_1$
2	R is Z	$\Delta T=\alpha_2 R \quad +\gamma_2$
3	R is P and DP is N	$\Delta T=\alpha_3 R+\beta_3 PR+\gamma_3$
4	R is P and DP is Z	$\Delta T=\alpha_4 R+\beta_4 PR+\gamma_4$
5	R is P and DP is P	$\Delta T=\alpha_5 R+\beta_5 PR+\gamma_5$

R：現在のリフラックス量と目標値との差
DP：塔内圧力の変化量
PR：塔内圧力
ΔT：リボイラ温度の補正温度
$\alpha_i, \beta_j, \gamma_k$：定数

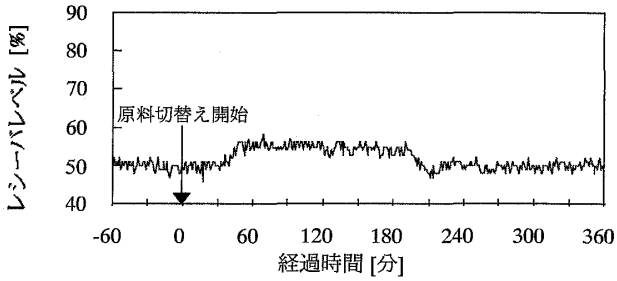
P：正
Z：ゼロ
N：負

図6　ファジィ制御規則

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

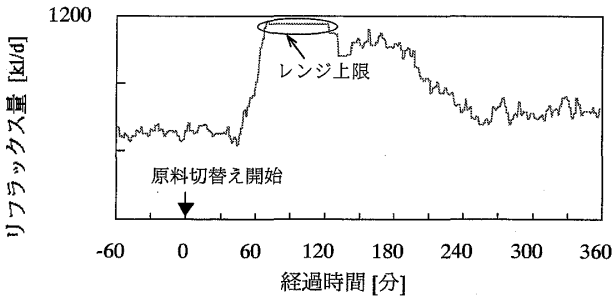


(a) 手動調整によるレシーバレベル

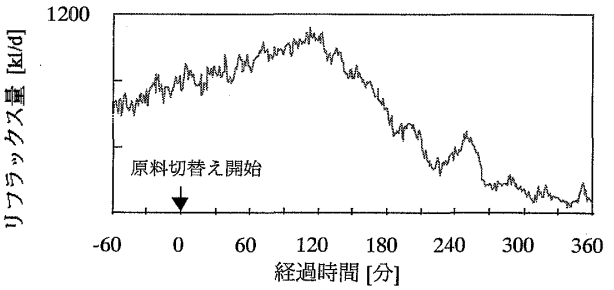


(b) システム導入後のレシーバレベル

図7　システム導入前後のレシーバレベルの比較



(a) 手動調整によるリフラックス量



(b) システム導入後のリフラックス量

図8　システム導入前後のリフラックス量の比較

経済的な効果として，原料切り替え時の投入エネルギーを約10%低減した．この原料切り替え自動化による作業時間の短縮は約500時間/年となった．

3.　まとめ

ニューラルネットワークやファジィ理論などのソフトコンピューティング技術を活用することにより，運転の自動化に成功した事例を紹介した．プロセスの応答特性を解析し，その逆応答をシステム化して制御を設計することも1つの方法である．しかし，紹介した事例は，原料切り替えという過渡状態での制御であり，従来技術では自動化が困難であった．そこで，プラントの運転に携わる人間の行動に着目し，それをシステム化して制御した．

制御システムの稼働後，成功の要因を振り返ると

・ロジックがシンプルで現場に馴染みやすく，現場の協力を得られたこと
・頑強性があり，種々の条件変化が伴う実務に耐えていること
・低コストで実現できたこと

などが挙げられる．

対象とする事象自体の解析が困難な場合，それに携わる人間の行動や思考を分析し活用する方法も有望な手法であり，ニューラルネットワークによる知識獲得などもその例である．現場的な手法ではあるが，着実に成果のあがる方法として本稿で紹介した．

今後も，ソフトコンピューティング技術を活用して，現場の課題を解決し，経営改善に繋がるシステムを構築していきたいと考えている．

参考文献

[1] 西谷紘一：プロセス制御系の設計―化学プロセス制御における最近の話題―，システムと制御，30-1，pp. 16-25 (1991)

[2] 山崎正尊：化学プラントの自動化，化学工学，57-12，pp. 884-887 (1993)

[3] 計測自動制御学会編：制御技術動向調査報告書，制御技術部会制御技術調査WG (1996)

[4] L. A. ザデー：ソフト・コンピューティング（その1，その2）日本ファジィ学会誌，7-2，262/267，7-3，pp. 530-536 (1995)

[5] 鎌田憲幸編：応用事例部門第2編　化学工業，ニューロ・ファジィ・AIハンドブック，計測自動制御学会監修，pp. 935-998，オーム社 (1991)

[6] 田中一男編：インテリジェント制御システム，共立出版 (1996)

[7] Andrzej Kraslawski: Fuzzy Computation in Practice-G7 Chemical Engineering, Handbook of Fuzzy Computation, Enrique H Ruspini etc. (ed.), IOP Publishing Ltd. (1998)

[8] Tetsuji Tani: Fuzzy Computation in Practice-G12 Oil Refining, Handbook of Fuzzy Computation,

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

Enrique H Ruspini etc. (ed.), IOP Publishing Ltd. (1998)
[9] 谷, 笹田, 津滝：非線形特性を持つ石油精製プラントにおけるニューラルネットワークとファジィ推論を融合した自動制御, 第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp. 597-600 (1996)
[10] D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, R. J. Williams: Learning International Representations by Error Propagation, in Parallel Distributed Processing, Vol. 1, MIT press, Cambridge, pp. 318-362 (1986)
[11] T. Takagi and M. Sugeno: Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control, IEEE Trans. Systems Man & Cybernetics, SMC-15, pp. 116-132 (1985)

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会. 無断複写・複製・転載を禁ず.