解説

ファジィ理論の産業への応用[†]

廣田 薫^{*1} 菅野 道夫^{*2}

1. はじめに

ファジィ集合の論文が L. A. Zadeh カリフォルニア大学教授により発表されたのが 1965 年¹⁾、その後ファジィアルゴリズム²⁾、ファジィ推論³⁾の論文が発表され、1974 年になってロンドン大学の E. H. Mamdani 教授によりファジィ推論をチームエンジンの自動運転に適用する実験が行われ⁴⁾、ファジィ理論の制御応用の見通しが与えられた。1970 年代後半には、ファジィ制御の産業応用 R&D が活性化した。そして、1980 年になってデンマークのセメント会社 F.L. Smidth 社が、自社のセメント工場に 16 ビットのミニコンを用いてセメントキルン(粘土や石灰岩からセメントの粉を作る粉体の炉)のファジィ制御自動運転を開始した⁵⁾。これが、ファジィ理論の産業応用事例第 1 号であり、1980 年がファジィ産業応用元年であると言ってよい。

こうして、1980 年に入ってファジィ産業応用が始って約 10 年、その間に産業応用事例の件数は百件を越えた。しかも、その大半は日本企業による事例であることは、特筆すべき事である。

本稿では、なるべく広い観点からそれらについてサーベイし、現状における問題や将来展望等についても解説する。

2. 応用のレベル

一般に 1 つの新しい考え方が提示され、それが本当に実り多い成果を得るためには、実際にそれが役に立つ応用につながる事が必要条件となる。しかし、1 口に応用と言っても、種々のレベルがある。理論寄りの研究にのみ関心を示す(特に若手の)研究者の中には、その辺の問題意識があまり無いように見える人々も多く、それらの人々と議論をしてもなかなかかみあわない。そこで、問題点を明確にするために、その辺をはっきりさせる事から始めよう。

理論から実用化応用への過程を考えた場合、“応用”のレベルを、次の 3 つのステージに分けて考える事ができるだろう。

第 1 ステージ 例題としての基礎応用

1 つの新しい理論や方法論を提案し、その有効性を検証してその新しいアイデアをアピールするための応用。従って、わかりやすさが重要であり、応用の規模はある程度小さくてもかまわない。

“～理論とその応用”というような類いの大学関係研究者の論文等には、多く見られる。前述の Mamdani 教授の 1974 年の論文⁴⁾などは、この 1 つの例と言ってよい。

第 2 ステージ R&D のための開発応用

産業応用実用化等を目差して、大学と企業の共同研究や、企業等の研究所や開発部門等で見られる応用。性能やコストなどの面で、この途中で企画自体が中止になるようなことも多いが、これが最終段階にまで進んだ場合には技術的には製品化

[†] Fuzzy Theory and Its Industrial Applications
Kaoru HIROTA and Michio SUGENO

^{*1} 法政大学 工学部
College of Engineering, Hosei University

^{*2} 東京工業大学大学院 総合理工学部研究科
Graduate School of Tokyo Institute of Technology

等も可能なレベルに達している。また、内容がハイクラスなものであったりすると、その成果や内容が、次のステージに進むまで公表されないという場合も多い。富士電機㈱が、1983年ころの時点における秋田市の浄水場で行っていた水処理ファジィ制御のフィールドテストなどがこの例といえよう。

第3ステージ 産業システムや製品としての実用化応用

R&Dが終了し、営業レベルでの見通しもつき、実際の製品や産業応用システムとして稼働のレベルにある応用。このレベルでの主要な課題はコストパフォーマンスである。従って、第1レベルの応用とは性格もかなり異なる。大学よりはむしろ企業等での応用である。日本の大学の研究者などには、このレベルでの応用の重要さや難しさを理解しない(あるいはしようとしない)者も多いが、米国等の大学ではこのレベル迄問題意識を持つ研究者も多い。日立製作所の1987年ころの仙台市営地下鉄のファジィ制御自動運転(1987年7月15日より営業運転開始)の応用研究などがこのレベルといえよう。

以上のように、応用のレベルを便宜上3段階に分けた場合、産業応用という言葉は、第2ステージの後半から第3ステージの段階をさすものと考えてよいだろう。以下では、このような観点から、ファジィ理論の産業応用を分野別にサーベイしていくことにする。

3. プロセス制御応用

ファジィ産業応用事例第1号がSmidth社のセメント工場のプロセス制御であったように、ファジィ制御応用が最も活発な分野であり、多数の事例が存在する。

その基本的考え方は、以下のようなものである。まず、現場のオペレータ(エキスパート)の行っているプロセス制御システムの運転知識を、IF~THEN…形式のファジィプロダクションルールで表現する。もちろん、この作業は、知識工学的技能とファジィ

ィ制御の深い知識が必要であり、そう簡単な事ではない。しかし、とてつなくベテランオペレータと同等以上の良く整理された知識ベースを作成して計算機に記憶する。プロセス制御応用に使用する計算機は、計算能力自体は16ビットパソコン程度のものが多いが、悪環境下での24時間連続運転等も考慮して、信頼性はかなり良好なものが必要である。さて、実際の運転では、センサや操作員の観測情報とルールを近似照合して、制御操作を決定し、サーボモータ等のアクチュエータを動作させるということを、各サンプリング周期毎に繰り返し繰り返し実行する。しかしプロセス制御の場合は、その制御周期は比較的ゆっくりで(1秒前後程度以上)小規模なコンピュータシステムによるソフトウェア対応が可能である。

具体的事例は実に多数あるが、主要なものをいくつか列挙紹介しよう。

Smidth社方式のセメントキルンは、その後西独や米国・ギリシャ等で多数使用されている。類似なものが、英国Blue Circle社からもLINKmanの名で市販されている。セメントキルン以外のプロセスでもいくつかの実績を持つが、セメントキルンに関しては、NOxの排出量を従来形制御に比べて1桁少くするなどの実績が評価されて1988年度のPollution Abatement Awardを受賞している。また、インドでもJ.K.White Cement Inc.でファジィ制御のキルンが稼働している。日本では、セメントキルンに関しては、大阪セメント等が独自に開発して実績を持っており、そのソフトは系列会社のOCエンジニアリングからORPXの名前で市販されている。また、それと類似なものがIHIからIRPXの名前で市場に出ている。

セメントキルン以外にも炉のファジィ制御の例は多い。例えば、三菱重工横浜研究所が開発した都市ゴミの焼却炉がある。季節等によって水分の大小など複雑な要因のある都市ゴミを、なるべく層の厚さを一定にして焼却するノウハウが、ルール型ファジィ制御でうまく自動化されている。また、日本電気硝子によるガラス溶融炉の温度制御

では、人間のオペレータ以上の成果をあげている。また、陶磁器を焼く炉では、微妙な温度調整が着色やデザインを決定することになるが、そのノウハウをファジィルールで表現することなども一部で試みられ始めている。

水処理プロセスのファジィ制御では、富士電機の例がよく知られている。浄水場の薬品注入作業はプロセスのモデルが無く、経験や勘に基づいたフィードフォワード制御が必要になる。経験が5年程度は必要とされる現場オペレータの知識を基本的には10ヶ程度のファジィルールで表現し、水を浄化するファジィ制御の技術がすでに相模原浄水場等で稼働している。また、富士電機では、雨水の処理等でもファジィ技術の理用を検討している。地下に埋められた2 km程度の雨水用配管にたまった雨水をポンプでくみ出す際、なるべくポンプのオンオフ回数を少なくし、かつ、しとしと雨や豪雨のときなどダイナミックな変動に対応するため、ルールセットを切り換えて使うファジィ適応制御などが検討されている。

鉄鋼関係の事例も多い。NKK 福山では第5高炉の制御にC F (certainty factor) 的発想によるファジィ制御を適用している。また、新日鉄では冷延工程のセットアップにファジィ制御を利用する方式を、川崎製鉄では均一な焼結鉱を作るプロセスの制御にファジィ技法を取り入れる方式を開発している。

日本甜菜糖では、日立製作所と共同で、甜菜ダイコンから糖分を抽出する蒸留塔の制御にファジィ制御を適用し、実際に稼働している。

グリーンシステム(株)では、ランダムメッキラインのファジィ制御システムを開発している。

4. 交通・建設関係のファジィ制御

この分野のファジィ制御の適用例も多い。その多くは、やはりルール形ファジィ制御である。

まず、一般にも最も良く報道されている例が、日立製作所の開発した仙台市営地下鉄南北線のファジィ制御自動運転であろう。ベテラン運転手の

運転制御則を、基本的には24個程のファジィルールで表現しておき、100ミリ秒に1回の割で3秒先の状況を予見しながらスムーズな運転を実現している。札幌等で既に行われているPID制御による自動運転と比べて、安全性・乗り心地、消費電力量、停止精度、駅間平均走行時間等いずれにおいても、有意な差を出しており好評である。東京の新設路線等でも、導入が積極的に検討されているようである。高速道路等のトンネルの排ガス換気システムも北九州地区(日立製作所)や北陸地区(東芝)等で稼働を開始している。ここでは、トンネル内排ガス濃度に応じて、電力消費量をおさえつつオンオフ回数も少なくすることなどがポイントである。

車関係でも、カーエレクトロニクスに関連して、各社がファジィ制御の導入を積極的に計っている。既に(部分的に)報告されている成果としては、すべり易い路面でも尻を振らずにすみやかに停止するアンチスキッドブレーキング、負荷変動にダイナミックに追従する学習型定速走行制御、燃料噴射時期の制御、自動変速装置の制御などがある。

エレベータの群管理運転でも、日立製作所・三菱電機・東芝などで開発しており、平均待ち時間や平均乗車時間なるべく少なくするなどの成果をあげている。具体的に新宿に完成する予定の新都庁の建物等への導入も、積極的に検討されている。また、そのような日本の動きに、米国のOTISのエンジニアも強い関心を示していた(3rd IFSAの会場での筆者の一人との討論)。

明電舎では、浚渫船の自動運転で実績をあげている。不規則な波の動きの上に浮かんでいる浚渫船における浚渫作業は、従来人間の操作に頼るしかなかったのであるが、ルール形ファジィ推論の導入により世界で初めて自動運転の実現に成功している。既に志布志湾での浚渫作業を終了している。

東京電力では、トンネル掘削におけるシールド工法にファジィ制御を適用し、自動化に成功している。その技術は奥村組にも供与されており、東京の都営地下鉄12号線の建設工事等でも利用さ

れている。

貨物等のコンテナクレーンの運転に関しても、日立製作所や石川島播磨重工業などで開発を進めており、振れを少なくしたり障害物の回避などでファジィ制御が効果を発揮している。

また大型設備から小型設備へのファジィ制御応用も進んでおり、例えば松下住設の家庭用給湯器では、ルール数 14 で快適な温度のお湯を供給できる。また三菱重工も温度設定が柔軟に対応可能な家庭用エアコンを開発している。これらは共に 1989 年 10 月から市場に出荷される予定である。

5. ファジィ制御の開発環境

ファジィ制御システム構築用のツールも商品として多数提供されるようになった。ファジィコントローラのシェル自体は、さほど難しいものではなく、多少の知識があれば構築可能である。(逆に言えば、極めて難しい内容であれば、実用化がこれほど急速に進むことはなかったであろう。)しかし、手軽に使える開発環境が提供されることは、ファジィ制御の普及という観点から好ましいことである。

市販されている開発環境の多くは、特定の問題に対して開発を進め成功した後に、その特定の問題のルールを除き、ユーザが自らの問題に関するルールを入力できるように汎用の開発環境としたものが多い。(つまり、エキスパートシステム MYCIN をシェル化した EMYCIN と同じような手順で開発されている。)

国内で最初に商品化された開発環境は、富士電機の汎用ファジィコントロールシステム FRUITAX であり、1985 年に市場に投入されている。16 ビットのプロセスコンピュータを母体として、プログラムでファジィ推論を実行できるようにしたシステムである。プロセス制御の用途には、このようなソフトウェア対応のものが多く発表されている。つまり、実行時の推論速度が高々数 FLIPS (fuzzy logical inferences per second) 程度で十分な場合が多く、そのような場合にはハ

ード化しなくてもソフトウェア対応で十分だからである。

この種のソフトウェア対応の開発環境は、他にも OC エンジニアリング (ORPX システム)、石川島播磨重工業 (IRPX システム)、三菱電機、明電舎、ダイゲン等からも発表されている。

また、処理速度や大きさなどの点を考慮すると、当然のことながらそのアルゴリズムを回路化したハードウェア対応の開発環境が考えられる。チップ化する前には、大きさ等を問題にしなければ、個別部品を基板の上に実装する形式のものが考えられる。そのような個別部品によるハードウェア形の最初の商品は、立石電機から 1988 年春に FZ-1000 の名称で市場に出ている。(現在では、その後継機種が発表されている。)そして、同年秋には奥井電機の FOC-2001 A や日進電機等からも、製品が発表されている。

そして、その次の段階としては、チップレベルのファジィコントローラが考えられ、1989 年 2 月には、マイコム(株)からチップもサポートする開発環境が市場に投入されており、次いで立石電機・Togai Infra Logic (米国) 等でも準備を進めている。家庭電化製品や車など、コンパクトで高信頼性等が要求される大量生産の分野への適用が期待される。

6. エキスパートシステムへの応用と開発環境

意思決定支援システムをはじめとする AI 形エキスパートシステムへのファジィ応用も始まっている。例えば、運転手の運転サイクルや道路の渋滞状況等をファジィ的に記述して良好な運行ダイヤを編成するバス路線ダイヤ編成システムが、日本システム・東芝・京浜急行により作成され、DIAMAN の名称で東芝から市販されている。既に京浜急行を始め国内数社でダイヤ編成に利用されている。また、最近では株の売買をするシステムが、山一証券により開発され話題を集めている。これなどは、従来の知識表現技法では実現できなかった現場の専門家(ディーラーやトレーダー等)の

知識を、ファジィルールでうまく扱えるようにした例である。そして、セイコー電子工業では、腕時計のデザインにファジィ技術を導入している。この場合は工業デザイナーの感覚を文字板の色や字体・針の形などにどのように採用するかというところにファジィが利用されている。同じく人間の感性を表現するという点では、大日本印刷のカラー印刷の評価システムなどの例もある。また、新潟鉄工所では、ディーゼルエンジン監視システム TRUISTAX 等を開発している。

このような、具体的問題に即したファジィ形エキスパートシステムとあわせて、そのようなシステムを開発する構築ツールもいくつか見られるようになった。ただし、この分野に関しては、欧米が先行している。

最初の商品化された構築ツールは、米国カリフォルニア州マウンテンビューにあるディシジョンプロダクツ社から 1983 年に市販された意思決定支援システム REVEAL である。レストランの管理や VAX スーパーミニコンの管理などに用いられ好評を博し、1985 年にマクダネルダグラス社に REVEAL 部門は買い取られたのであるが、半年程度で経営に失敗し、現在では販売中止になっている。

2 番目に登場したのが、同じく米国アラバマ州のケンプカラウェイ心臓研究所から、1986 年に市販された FLOPS である。OPS 5 をファジィ拡張した IBMPC 用のツールであり、現在では NECPC 98 シリーズ版などの日本語対応版もナレッジウェル社(東京)から販売されている。

英国ブリストルの EQUIP AIR 社から 1987 年末に、同じくファジィ PROLOG を基本としたツール FRIL が市販されている。IBMPC 用から、SUN や VAX などのワークステーション版迄そろっており、評判も良く、現在では別会社に独立させた FRIL システムズ社から継続して市販されている。

1988 年 6 月には、日本からも脳力男(のりお)という名の PC 98 用ツールがブレインズ(社)から市販されている。現在では、脳力男から呼び出す

ことのできるニューラルネットのツール網力太(もりた)等も追加されている。また、同じく 1988 年末には、米国ロスアンゼルスの特ガイインフラロジック社から C 言語をファジィ拡張したファジィ C のコンパイラ(ファジィ C から C に翻訳するコンパイラ)も市販されている。IBMPC や NEC 98 用から NEWS や SUN のワークステーション版までである。

そして、1989 年 4 月には、日立製作所が従来からのエキスパートシェル ESKERNEL に、ファジィ推論機能を追加して強化したツールを市場に出している。

7. おわりに

ファジィ理論の産業応用は、日本を中心に制御分野を中心に普及してきた。日本以外の国としては、中国(PRC)でやはり制御を中心に応用が進んでいるが、それ以外の国ではまだ関心が低い。そのことは、1989 年 8 月に米国シアトルで開催された 3rd IFSA Congress の出席者 23 カ国 269 名のうち、日本からの参加者が 110 名と開催国米国の 87 名をぬいて第 1 位、第 3 位はイタリアの 11 名あとは 1 桁の参加者という状況がよく物語っている。しかも中国では天安門事件の影響も大きく、ファジィ応用を普及させるための日本の役割りと責任は極めて大きい。また、制御応用以外の分野への応用も、医療・デザイン・哲学・法律など多数の分野で開始されており、工業応用以外の分野への進出も日本ファジィ学会の重要な任務と考えている。

以上主要な事例を列挙して解説したが、記述できなかった事例もまだ多数ある。また、個々の事例をもう少し詳しく見るには事例を特集した⁶⁾以下の文献が役に立つものと考えられる。

参考文献

- 1) L.A.Zadeh: Fuzzy Sets, Information and Control, Vol.8, pp 338-353, (1965)

- 2) L.A.Zadeh: Fuzzy Algorithms, Information and Control, Vol.12, pp 94-102, (1968)
- 3) L.A.Zadeh: Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes, IEEE Trans. on Systems Man and Cybernetics, Vol.3, pp 28-44, (1973)
- 4) E.H.Mamdani, S.Assilian: An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller, Int. J. Man-Machine Studies, Vol.7, pp 1-13, (1974)
- 5) L.P.Holmblad, J.J.Ostergaard: Control of Cement Kiln by Fuzzy Logic, in Fuzzy Information and Decision Processes (M.M.Gupta, E. Sanches etc.), North Holland, pp 389-399, (1982)
- 6) 廣田： ファジィコンピュータファジィエキスパートシステム, トリケップス, (ホワイトシリーズ 82), (1988)
- 7) 廣田： ファジィシステムの実用化基礎理論と応用事例, 経営開発センター, (1989)
- 8) 寺野, 浅居, 菅野： 応用ファジィシステム入門, オーム社, (1989)
- 9) 廣田, 合原： ファジィ・ニューロコンピューティング, トリケップス(エクストラシリーズ No. 8), (1989 予定)
- 10) 廣田： ファジィ実用化応用技術実例集, ミマツデータシステム, (1989 予定)
- 11) ファジィ特集の雑誌： 計装(工業技術社)1988 年 5 月号, オートメーション(日刊工業新聞社)1988 年 6 月号, CAD&CIM(工業調査会)1988 年 秋号, 日本ロボット学会誌 1988 年 12 月号, 電気学会論文誌C 1989 年 5 月号, 情報処理学会誌 1989 年 8 月号, 計装(工業技術社)1989 年 8 月号, 計測技術(日本工業出版)1989 年 8 月号

(1989 年 9 月 12 日受付)

[問い合わせ先]

〒184 小金井市梶野町 3-7-2

法政大学 工学部 計測制御教室

廣田 薫

TEL: 0423-81-5341(内)304

FAX: 0423-85-9569

著者紹介

ひろた かおる
廣田 薫

法政大学 工学部 電気工学科 計測制御教室 昭和 54 年 東京工業大学大学院博士課程電気工学専攻修了、工学博士、現在法政大学助教授(工学部計測制御専攻)、画像、ロボット、ファジィ制御、エキスパートシステム等の研究に従事。
著書 Probabilistic Sets (Verlag TUV 西独)等約 20 冊、日本ファジィ学会、IFSA、IEEE 等会員。

すげの みちお
菅野 道夫

東京工業大学 大学院 総合理工学研究科 システム科学専攻、昭和 37 年東京大学理学部物理学科卒、同年三菱原子力工業(株)入社、昭和 40 年同社退社、同年東京工業大学工学部制御工学科助手、昭和 52 年東京工業大学大学院総合理工学研究科助教授、昭和 60 年同大学教授、現在に至る。工学博士、専門：ファジィ理論。