

# 上下水道施設運用への知識工学の応用

\*1 守本 正範(もりもと まさのり)

\*1 鬼塚 正徳(おにつか まさのり)

\*2 伊藤 修(いとう おさむ)

\*3 中峠 史朗(なかつたお しろう)

## 1 まえがき

上下水道施設の運用において、施設機器の故障診断やプロセス異常時の原因究明などの維持管理分野、あるいはプロセス制御分野においても数学モデルが作成できないとか、複雑すぎて使用できない分野などがある。これらの分野における諸問題を解決することが、上下水道施設をより一層合理的に運用するための今後の大きな課題であると考えられている。

本稿において、これらの問題を解決するために知識工学を応用した事例及び技法を紹介する。応用面に重点をおいた報告であるから、知識工学の説明については、「人間が持つ問題解決のための経験的な知識を積極的に利用することを前提とした応用人工知能に関する研究」という程度にとどめる。

知識工学の手法として、ファジィ理論の応用とエキスパートシステムの応用について述べる。ファジィシステムは、定性的な判断を、あいまいさを含んだ形で定式化し、定性的・定量的な入力に対し、定量的な形として出力する制御に適している。一方、エキスパートシステムは、複雑な論理(IF~THEN~のプロダクションルール)を知識ベースとしてもち、対話形式で推論する診断や設計問題に適する。

特徴としては、ファジィシステムがオンラインで答えを出すことを基本とし、オンラインでの解答が不十分なときに会話形式で解を補うのに対し、エキスパートシステムは会話形式で解を求めることを基本とし、プロダクションルールの「IF」にあたる条件がセンサーで得られる場合は、オンラインでの応答を可能としている。また、これらを実現するハードウェアは、両者とも大形コンピュータからパーソナルコンピュータまで適用範囲が広いことを利点としている。

上下水道への適用分野としては、プロセス制御、故障診断、各種機器設定システム、知的アラームガイダンス、設計支援システムなどがある。

## 2 ファジィ理論の応用

### 2.1 ファジィ制御システムの考え方

我々人間の行う知的情報処理はあいまいさを含み、明確に数式化することが困難である場合が多い。しかし、あいまいな判断であっても、人間は精度の高い判断を行っており、それと同じことがコンピュータで行えればその効果は大きいと言える。その方法の一つが、専門家の「勘や経験」

によるあいまいな判断手法(もし~ならば~を~せよ)を、そのまま制御規則という形(IF~THEN~)でモデル化し、制御や意思決定に活用しようとするファジィ制御システムである。

このシステムは1965年にカリフォルニア大学のL.A. Zadeh教授が提唱した「ファジィ理論」<sup>(1)</sup>に基づくもので、

IF 湯の温度=少し高い (もし湯の温度が少し高ければ)

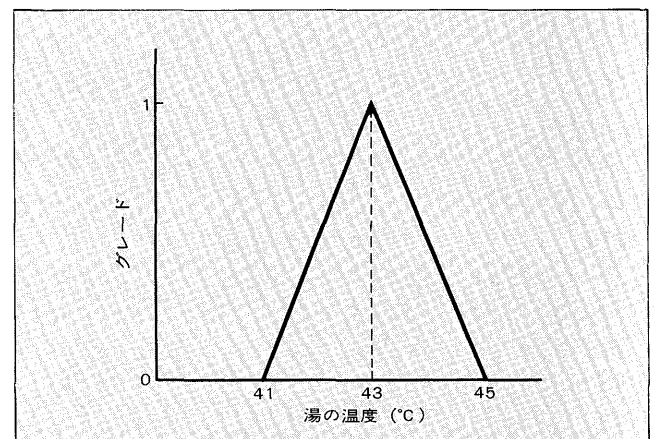
THEN 蛇口=少し開く (その時は蛇口を少し開く)

というように、計測値と操作量との関係を表現する。この時に用いる「少し高い、少し開く」などの量をファジィ変数と呼び、メンバーシップ関数で表す。例えば、図1が「湯の温度が少し高い」という概念を表しているとするれば、その意味は43度ぐらいであり、2度ぐらいの幅があることを示している。すなわち、横軸が計測値であり、縦軸はその概念の当てはまる度合を表している。1のとき完全に当てはまり、0のとき完全に当てはまらないとする。その間では関数の値に応じて当てはまるとしている。

図2は制御に応用した例である。操作量を決める知識ベースとして定性的表現を用いた制御規則が複数用意されている。プラントの状態に関する多くの情報を用い、制御規則に基づいてファジィ推論により少数の操作量を決定する。ファジィ推論では、制御規則の照合操作を行うのではなく、すべての制御規則を評価し、その有効度に応じて操作量を演算する。情報の集約、あいまい量のままの演算、操業データからの制御規則の作成が可能という特長がある。

富士電機ではこのファジィ制御を容易に使用できるように、汎用ファジィコントロールシステムを開発し、実プラントでの実用に供している。

図1 湯の温度が少し高いというメンバーシップ関数の例



\*1 総合技術第二部 水処理技術部

\*2 システム本部 第一システム開発部

\*3 システム本部 第一システム部

図2 ファジィ制御のブロック図

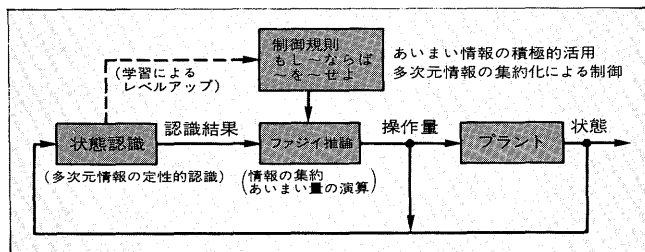
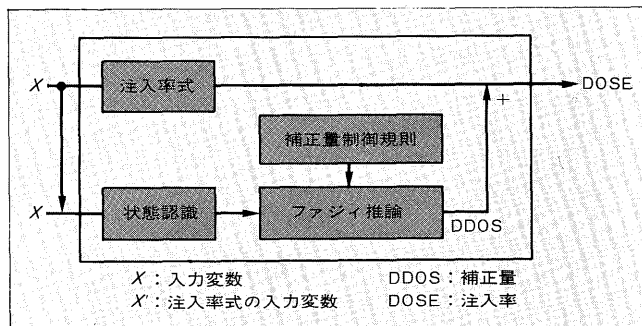


図3 注入率の演算方法



## 2.2 上下水道施設運用への応用

### 2.2.1 浄水場薬品注入制御への応用

浄水場の薬品注入率の決定は非常に重要なプロセスでありながら、モデル化が難しく、まだ熟練オペレータの勘や経験に頼っている場合が多い。そのため、図3に示すように過去のデータから統計処理によって得られた注入率式の値をベースに、それだけでは対処できない部分（例えば、濁質の急変時凝集状況が悪いなどの処理状況の判断に基づく部分）をファジィ推論により、補正量を推論して加えるシステムを開発した。補正量の決め方のノウハウが制御規則としてモデル化されている。

図4は熟練オペレータの実注入率とファジィコントローラの推論値を比較するために行ったテスト結果の一部である単なる注入率式と比較して、熟練オペレータの実注入率に近い結果が得られた。また、沈殿池上澄液濁度を制御目標としたとき、熟練オペレータよりも良い注入を行う回数の多いことも確認できた。

### 2.2.2 雨水ポンプ制御への応用

下水処理における雨水ポンプの運転は、ポンプ井水位による制御や流入量予測に基づく制御が行われている。しかし、降雨量が多いときなどでは、熟練オペレータの判断による手動操作を行っている場合が多い。この理由としては、  
(1) 急激な流入量の変化に対して、ポンプ井水位の変動のみの計測ではポンプ操作がどうしても遅れてしまう。  
(2) 雨水の流入量の変化を的確に予測するモデルを作成するのが難しい。

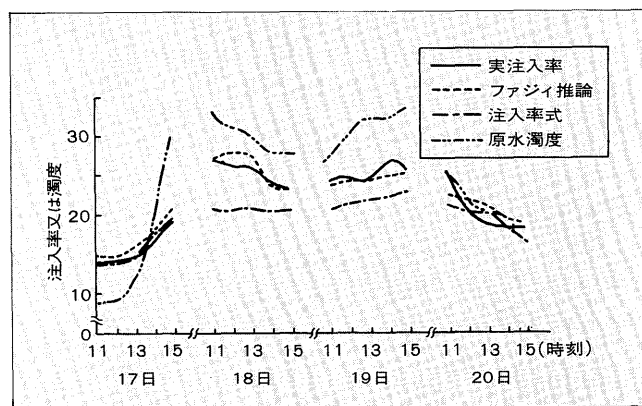
があげられる。そのため、熟練オペレータは降雨の状況、ポンプ井水位の変動、ポンプの運転状況など沢山の情報を的確に判断して雨水ポンプの運転を行っている。

このような複雑な判断方法を、そのままプログラムとしてコンピュータで実現するのは難しい作業となる。それを実現する一つの方法として、熟練オペレータの複雑な判断方法を制御規則でモデル化し、ファジィ制御による雨水ポンプ制御がある。

ファジィ制御のフローは図2と同じである。ポンプ井水位の計測値に加えて、他のポンプの運転状況、上流における雨水の流況・降雨強度の計測値、あるいはそれらの推移に対して、雨水ポンプの操作を指示する制御規則を用意する。コントローラは計測されたそれらの情報を用いて、ファジィ推論を行い、雨水ポンプの操作量を出力する。

この方法により、複雑な状況判断を必要とする雨水ポン

図4 フィールドテスト結果の例



プのコンピュータによる制御の実現が期待できる。

### 2.2.3 故障診断への応用

上下水道施設の運用においても、設備の故障を発見し、適切な処置を講じる故障診断技術、又は故障の発生を早期に予測する予防診断技術は大変重要な技術である。しかし、現状では熟練者の勘や経験に多くの部分を依存している。

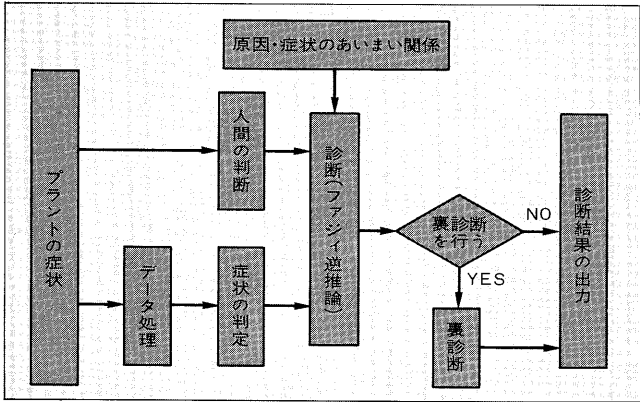
故障診断では症状自身が不正確で、原因と症状の関係は必ずしもはっきりしていないような場合が多い。そのため、発生した異常を原因と症状の因果関係をたどることにより解明するのは難しい作業となる。しかも、そのあいまいさを無理やり確定値に直すことは診断結果を大きく間違えるおそれを含んでおり、あいまい情報をそのまま使用する診断システムが必要となる。ここでは、故障診断システムにファジィ理論を応用する方法について述べる。

ファジィ故障診断システムは、あいまいな症状から原因を推論するファジィ逆推論及びある症状に対するすべての原因を見つける裏診断により、故障箇所を発見することを目的とするシステムである。図5に処理フローを示す。プラントの状態を計測し、データ処理（データ変換、スペクトル解析など）の後、症状の判定、ファジィ逆推論・裏診断を行い結果を出力する。このとき、熟練オペレータの勘や知識である原因と症状のあいまい関係（異常の原因と症状の因果関係を0から1の数値で表したもので、症状が必ず起こる場合は1、よく起こる場合は0.7、まれに起こる場合は0.3などとなる）が用いられる。

ファジィ故障診断システムの機能として、

(1) オンラインデータを解析し、現在の設備状況及び状況

図5 ファジィ故障診断の処理フロー



- 推移を自動的に判断する。
- (2) 計測できない項目はオペレータが判断して入力することにより、診断情報として扱う。
  - (3) あいまい関係を用いて、入力されたあいまいな症状から原因を推論する。
  - (4) 推論結果に自信のない場合は、裏診断により、ある症状を引き起こすすべての原因を知ることができるため、設備の再チェック項目がしぼれる。
  - (5) 実績に基づいて、あいまい関係を改良することにより、診断精度を上げる。
- などがあり、熟練オペレータと同等の診断が期待できる。

③ エキスパートシステムの応用

3.1 エキスパートシステム

3.1.1 エキスパートシステムとは

人工知能 (AI : Artificial Intelligence) システムにおいて、最も期待の大きく、実用化されつつあるのが、エキスパートシステムに関連したものである。<sup>(4)</sup>

エキスパートシステムとは、ある分野の専門家から得た特定の問題領域の専門的な知識や、専門家が経験を通して獲得したノウハウをコンピュータに取り込むことにより、専門家に代行して問題解決できるシステムである。

エキスパートシステムの代表例として、感染症の診断システム“MYCIN”、質量分析データから有機化合物分子式を求める“DENDRAL”などがある。

3.1.2 エキスパートシステム開発法

エキスパートシステムを開発するには、

- (1) 知識の獲得
- (2) 知識の表現
- (3) 知識の利用

を的確に行う必要がある。

知識の獲得とは、AI 言語とよばれる LISP や PROLOG を扱うシステムエンジニア (KE : Knowledge Engineer) が、専門家と協力しあい、専門知識の概念、関係、流れを明らかにすることである。

知識の表現法とは、専門知識をどのようにモデル化し、コンピュータに記憶するか (知識ベース化) という問題で、

プロダクション型 (IF… , THEN… の形式で記述) と、フレーム型 (知識を単位化し、階層ネットワーク化する) モデルなどがある。

これら知識ベース化した専門知識を用いて、与えられた問題を解決する推論機構が知識の利用で、前向き推論 (診断に適している) と後向き推論 (設計に適している) がある。また、事実情報と知識源 (KS : Knowledge Source) を列挙し、共通推論の場として黒板モデル (BB : Black Board) を用いる方法もある。

現在、エキスパートシステムの開発効率を上げるため、汎用の推論機構と知識ベースエディタを有する開発支援ツールを使用するのが一般的となった。

3.1.3 エキスパートシステム構築用ツール

エキスパートシステム開発支援ツールとして ESHELL<sup>(5)</sup> (expert shell) と COMEX (compact knowledge based expert system) を紹介する。

ESHELL は、多段の問題解決に強い黒板モデルを用い、プロダクション型知識ベースとフレーム型知識ベースを扱う機能追求型ツールである。図6に処理概念図、図7にエキスパートシステム構築概要を示す。

大形コンピュータ (M シリーズ)、スーパーミニコンピュータ (S シリーズ) で動作し、他言語 (FORTRAN など) とのインタフェースや日本語処理機能 (JEF : Japanese Extended Feature) などが用意されている。

ESHELL でエキスパートシステムを構築するには、専門家以外に UTI-LISP が扱える KE が必要である。

COMEX は、専門家自身で開発が容易にでき、かつ実用的機能を発揮することを主眼としたツールである。図8に知識の構造と推論過程を示す。

COMEX は、選択型問題に適したクライテリア論理を基調とし、FORTRAN でインプリメントしたツールであり、次のような特長がある。

- (1) 大規模な知識ベース表現と整理しやすい管理形態をも

図6 処理概念図

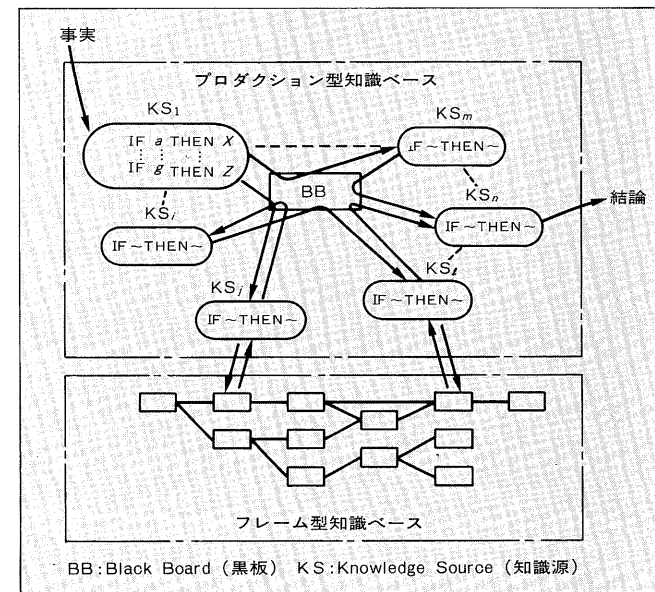


図7 エキスパートシステム構築概要

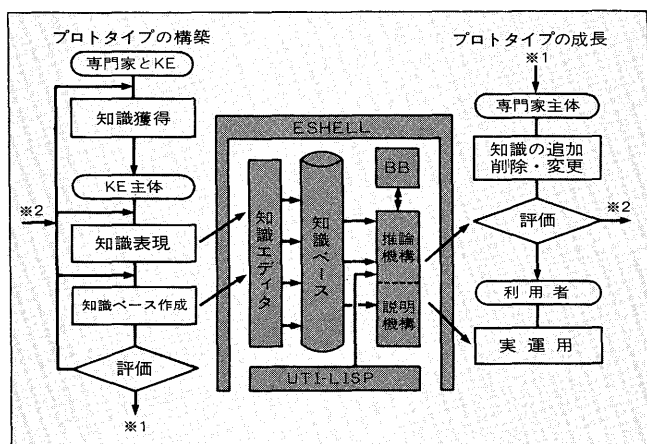
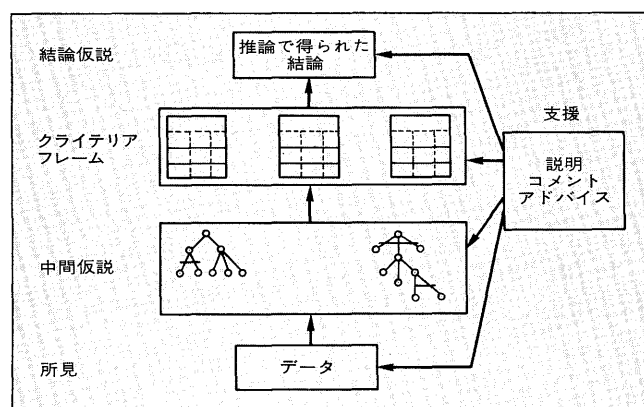


図8 COMEXにおける知識の構造と推論過程



つ。

〔入力：200|中間仮説：200|結論：100〕×〔知識ベース〕

- (2) コンピュータになじみのない人にも容易に構築できる。  
(クライテリアフレームのみで構築可能)
- (3) Mシリーズ、Sシリーズからパーソナルコンピュータまで適用範囲が広い。
- (4) 日本語が使える。
- (5) 応答性が高い。

## 3.2 上下水道施設運用への応用

### 3.2.1 各種機器選定エキスパートシステム

ポンプやバルブは多種多様な形状・規格・用途・設置環境基準などがあり、これらの中から最適なものを選択するエキスパートシステムである。ポンプ・バルブの規格変更や新機種追加などがあった場合に、知識エディタを使い、容易に追加・変更できるのがCOMEXの特長である。

### 3.2.2 故障診断

注入機、バルブ、プロア、ポンプなど機械設備における経年変化、点検による劣化状況、故障状況を入力し、予防保全や故障診断を行うエキスパートシステムである。

COMEXによる高圧回転機の絶縁診断システム<sup>(6)</sup>では、絶縁専門家に代行できることが確認されている。

### 3.2.3 知的アラームガイダンス

監視・制御用コンピュータによる警報メッセージ（重軽故障、上下限など）を拡充し、同時複数発生における相関性のチェック、優先レベルをつけた適正な対応や処置の指示など、プロセス異常時の運用経験を生かした柔軟な、さめの細かいオペレータガイダンスシステムが構築できる。なお、COMEXはオンライン入力処理との結合が可能であり、応答性も高い。

### 3.2.4 設計支援用エキスパートシステム

管網設計は、水圧の適正保持と有収率の向上のため、非常に重要な設計であり、水道検針データ・漏水調査データなどの大量データ処理解析による有収率の把握、管網計算による配管設計や適正圧力解析、地震や湯水発生時の安定供給を確保するための設計など、高度な技術知識と経験が要求される。

配水区域のブロック分け、管更生や新規配管布設の検討、管網内における流量・圧力計や水圧調整弁の適正設置など、設計を支援するエキスパートシステムが考えられる。

## 4 あとがき

既に実プラントに適用されその効果を実証されたもの、まだ実証前のものなど各種の応用面を報告したが、知識工学が問題解決のための万能の道具ではありえず、適用分野の性格をみきわめることが重要であると考えられる。しかしながら、この応用技術は上下水道施設に適用され、その効果を着実に示しつつあり、制御理論・数値計画法を応用した運用制御と、更には図面管理・地図管理システムと融合され、体系化されたときには、施設運用の形態も一変し、多様で有機的なつながりをもった施設運用システムが構築されるであろう。

## 参考文献

- (1) L.A.Zadeh: Fuzzy Sets, Information and Control, 8, pp.338~353 (1965)
- (2) 菅野道夫ほか: 汎用ファジィコントロールシステム, 富士時報, 58, 4, pp.307~314 (1985)
- (3) 柳下修ほか: 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)
- (4) 上野晴樹: AIソフトの潮流, PIXEL, 39, pp.191~194 (1985)
- (5) 宇佐見仁英: 黒板モデルを採用した商用AIツール「ESHELL」, NIKKEI COMPUTER, 97, pp.157~167 (1985)
- (6) 伊藤欣二郎ほか: COMEXによる高圧回転機の異常診断システム, 情報処理学会第26回全国大会, pp.977~978 (1983)



＊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。