

上下水道における知識工学応用

Knowledge Based Systems for Water Resource Management and Control

知識工学は、熟練技術者の持つ専門的知識を計算機に与えることによって、人間の高度な判断処理を計算機に代行させようとする技術である。この技術によって、上下水道施設の運用管理の高水準化が図られるとともに、運用段階で得られる様々な知見の蓄積とその活用が容易となる。日立製作所では、専門的知識を計算機に入力し活用するためのソフトウェアEUREKA-IIを開発し、これを制御用計算機HIDIC V90シリーズやエンジニアリングワークステーションESシリーズなどに搭載した。上下水道分野での応用として、受変電設備や自家発電設備を対象とした予防保全、故障時の処置ガイダンス、更に、上水道配水管網エンジニアリング(管網特性同定)などを実用化している。

船橋誠壽* *Motohisa Funabashi*

鈴木正義** *Masayoshi Suzuki*

笠井武郎** *Takerô Kasai*

福原雅之*** *Masayuki Fukuhara*

1 緒言

上下水道プロセスは、社会現象、自然現象への依存度が高く、更に、流体的、(生)化学的現象を扱うため、その運用は極めて困難である。的確にプロセスを運用し、更には施設を管理するためには、長期間にわたっての経験の蓄積とその活用が不可欠である。更に、これらの貴重な経験は正しく継承されてゆかねばならない。特に、下水道分野では、今日、強力に普及率を高めようとしている。長年にわたって蓄積した経験を、新設の施設の運用管理のために的確に移転することが重要である。

数式モデルに代表される細密な知識ではなくて、経験的な知識、定性的な知識を扱う技術として、知識工学が大いに期待されている。知識工学や、これを支える人工知能科学、更に計算機ハードウェアは格段に進歩した。これによって、数値計算機能ではなくて、三段論法的な推論や、連想に似た機能を計算機に実行させることが可能となってきた。日立製作所では、早くから人工知能、知識工学の重要性に着目し、1960年代から独自技術の育成を目指して基礎研究を進めてきた。1984年には、世界に先駆けてリアルタイム制御分野で知識工学を実用化している¹⁾。

上下水道の計算機制御でも、先進的な実用展開を図り、1986年には浄水場受変電設備の故障時ガイダンスシステムを実現した²⁾。本論文では、知識工学の基本概念と上下水道分野での適用課題について述べる。更に最近の実用化事例として、下水道ポンプ所設備診断、及び上水道配水管網エンジニアリングへの知識工学応用について紹介する。

2 知識工学の概要

知識工学は、人間の知的活動を計算機に代行させようとするものである。知的活動のすべてを計算機に代行させること

は不可能に近いが、有用性の高い専門的知識の計算機移植が可能となってきた。このようにして、計算機に専門家と同水準の高度な判断処理を行わせるシステムは、一般に専門家(エキスパート)システムと呼ばれる。

このような、知的活動の計算機移植がなぜ実現できるようになったかは次のように考えられる。計算機が生まれた当時の計算機に対する命令は、機械語そのものであった。その後、技術計算に都合のよいプログラム言語としてFORTRANが生まれた。同様に、目的に応じて様々な言語が生まれている。これらは、それぞれの計算機の適用分野で、どのような言語が望ましいかという検討から生まれ出たものである。知識工学が実用の域に達し始めたというのも、数値計算などによらない人間の思考がどのようなものであるか、この思考論理を計算機に移植するにはどうすればよいか、ということに関して心理学及び計算機科学が明らかにし始めたということによって(図1)。具体的には、ルールとかフレームといった知識の表現方法を用いた人間の思考過程のモデルが提案され、このモデルに基づくと比較的容易に思考過程が計算機によって模擬できること、更に、人間の持っている複雑な知識は一挙に計算機に移植できず、段階的にならざるを得ないという課題にも対応可能であることが実証され始めたことである。

ルールやフレームといった知識の表現方法を用いて推論を進める人間の知的機能を、計算機プログラムによって模擬したものは推論エンジンと呼ばれる。推論エンジンは、人間の推論機能を模擬するものとして極めて重要であるが、これだけでは有用性が低い。そのために、知識を計算機に適切かつ効率よく与えられるように支援する機能として知識インタフェースが、更に、推論の過程でプロセスやオペレータとデータをやり取りするプロセスインタフェース、オペレータイン

* 日立製作所システム開発研究所 ** 日立製作所大みか工場 *** 日立製作所システム事業部

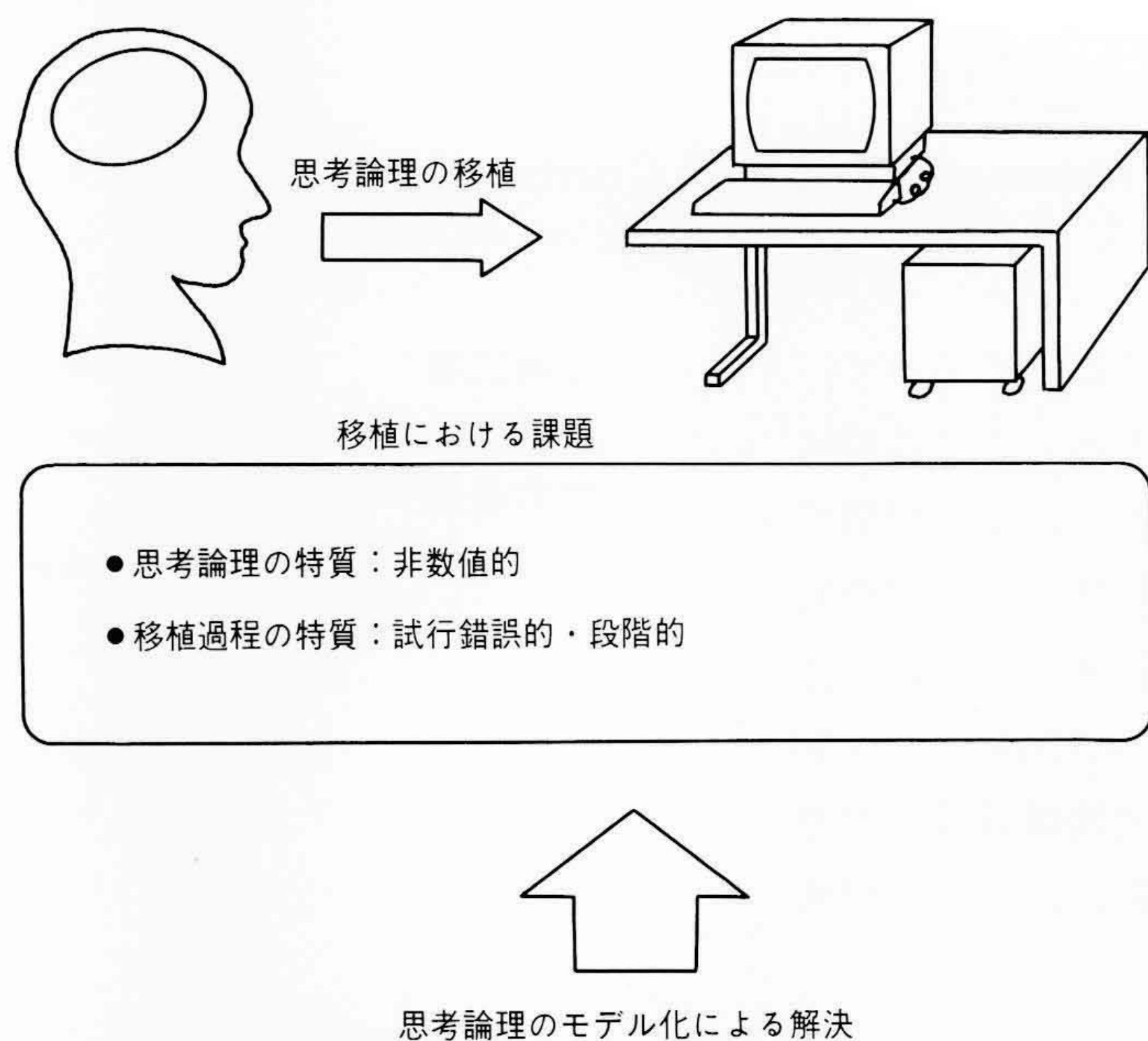


図1 思考論理の計算機移植における課題 人工知能・計算機科学の研究によって思考論理のモデル化が図られ、計算機への移植が可能となってきた。

タフェースが開発されるようになってきた。このような、推論エンジンや各種インタフェースを統合したプログラムは知識処理システム構築ツールと呼ばれ、このツールへ問題に応じた専門的知識を入力するだけで、故障診断とかプロセス運転といった専門的機能が計算機システムに実現できるように

なった(図2)。

日立製作所では、このようなツールとしてEUREKA-II (Electronic Understanding and Reasoning by Knowledge Activation-II)と呼ぶプログラムを開発している。このプログラムは、世界に先駆けてリアルタイム制御分野での知識工学応用システムを実用化し^{1),4)}、更にその応用展開を図ってきた経験⁵⁾を踏まえて作成したもので、次のような特徴を持っている(図3)。

(1) 制御分野の諸課題に適した知識の記述方法、利用方法

プラントの操業ノウハウ、因果関係及び機器の構成を日本語ふう記述でき、これらを組み合わせて種々の前提条件から結論を求めたり(前向き推論)、結論を仮定して前提条件の成否を調べる(後ろ向き推論)などができる。プロセス制御に適したFuzzy(ファジィ)推論も実行可能である。

(2) リアルタイム制御に適用可能な高速推論アルゴリズム

制御分野での実用性という面での決定的要因である推論処理性能の確保を目指して、独自の推論エンジンの実行処理アルゴリズムを開発し、高速性及び知識の規模に依存しない応答性能を実現している。

本ツールは、制御用計算機HIDIC V90シリーズや、エンジニアリングワークステーションESシリーズなどに搭載し、様々な分野で実用システムが構築されている⁵⁾。

3 上下水道における知識工学応用

知識工学は、人間の知的業務を計算機で実行させることによって、人間をより創造的な業務に携わらせると同時に、知識の計算機による継承を目指した技術である。このような観

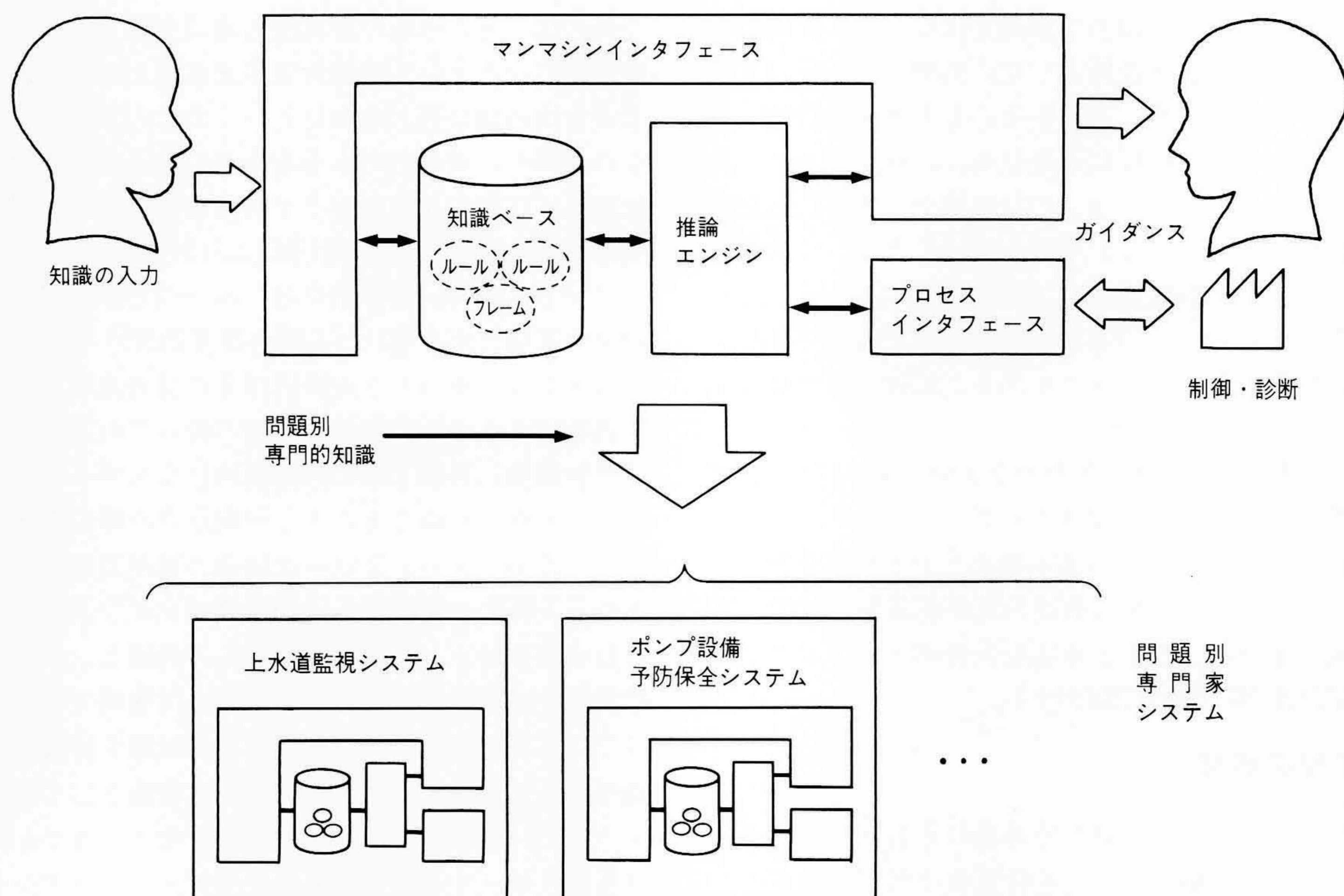


図2 知識処理システム構築用ツールの構造 知識の容器である知識ベース、推論エンジン及び外部インタフェースから成り、具体的な知識を与えることによって応用システムとして機能する。

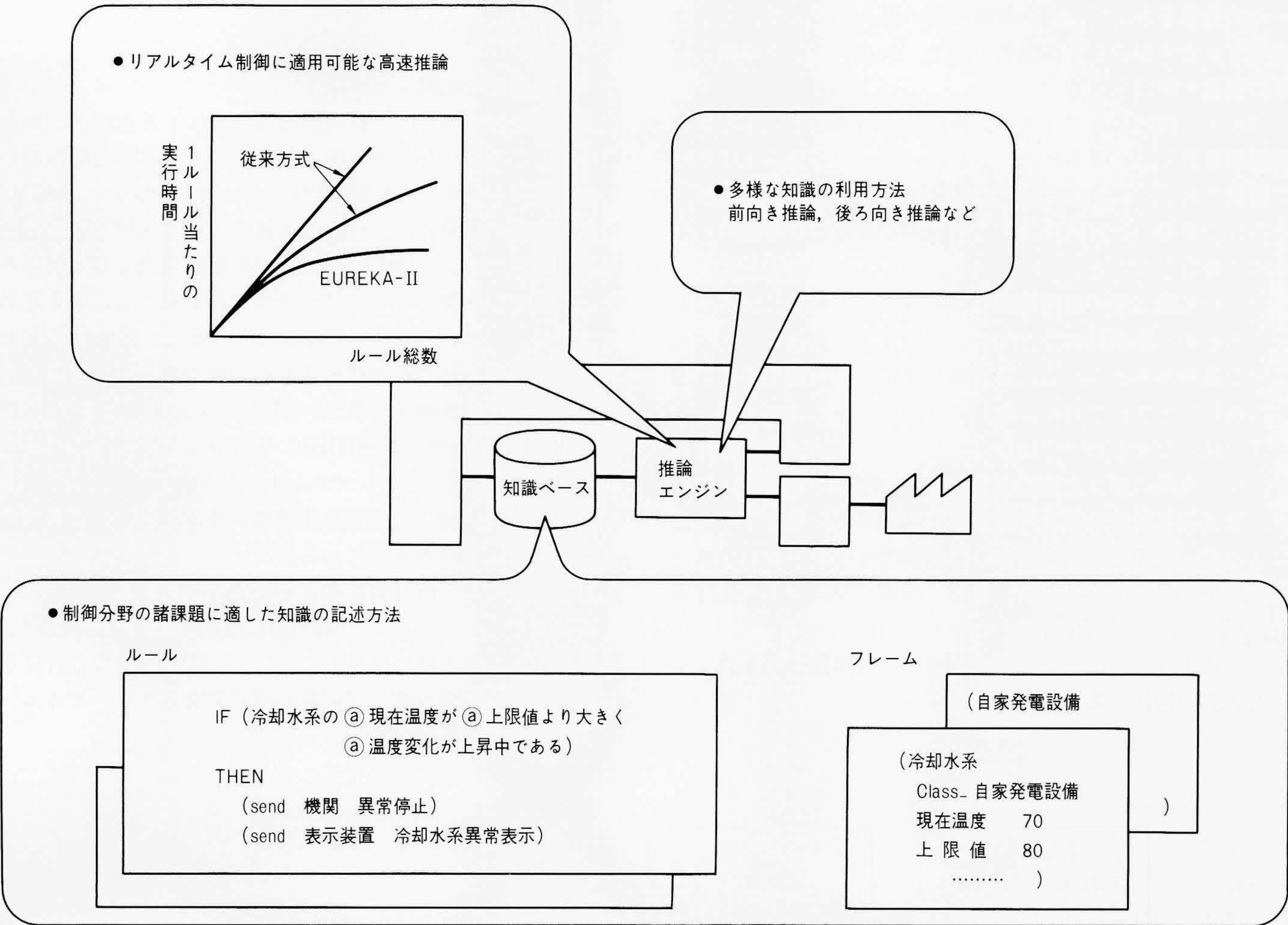


図3 EUREKA-IIの特徴 日本語ふう知識を記述することができ、これらを様々な形で利用できるとともに、ルールの総数によらない高速推論が実現できる。

表1 上下水道における知識工学応用課題例 経験的知識を計算機化することによって、様々な設備運用・管理・制御業務を向上させることができる。

適用課題（ねらい）	上水道分野	下水道分野
予測（統計的手法の限界打破）	● 需要予測	● 雨水ポンプ所流入予測
スケジューリング（数学的最適化計算の柔軟化）	● 水生産・送水計画（配分計画）	● ポンプ所群・ポンプ群の起動停止
プロセス制御（数式モデル化困難なプロセスへの経験的ノウハウの活用）	● 薬注制御	● 二次処理制御 ● 汚泥焼却制御
プロセス監視・維持管理（診断・管理ノウハウの蓄積・活用）	● 機器診断・予防保全	
プロセスエンジニアリング（エンジニアリングノウハウの活用・蓄積，数学的最適化計算の柔軟化）	● プロセス特性解析 ● プロセス構造最適化	

点に立つと、上下水道分野でも様々な適用が考えられる。これらの具体的な適用課題を表1に示す。

上水道での需要予測，下水道での雨水流入量予測といった機能を計算機で実現するために、これまでは統計的手法がしばしば用いられてきた。しかし、統計的手法は実績データに大きく依存するため、経験論理に基づくきめ細かな対応が困難である。知識工学は経験論理のプログラム化を可能とするものであり、従来手法の限界を打破するものと言える。

上水道の配分計画，下水道でのポンプ所群，あるいはポンプ群の運転計画といったスケジューリング的課題に対しては、これまで数理計画技法の適用が試みられてきた。しかし、これらの数学的最適化手法は運用上の各種の制約を考慮しきれず、計算機による計画結果が実際の運用感覚にマッチしないという問題が発生することもあった。知識工学的なアプローチによれば、数学的な運用最適化に対する前提条件の柔軟な変更，最適化計算結果の設備実態に合った修正，絞り込みが達成可能となる。

プロセス制御は(生)化学的反応を相手にするだけに、その計算機化は極めて困難あるいは制御品質の向上は難しいという状況にある。しかし、製鉄所での高炉プロセス操業エキスパートシステム開発の成功例は⁷⁾，このような困難さに対して

一つの光明を与えている。知識処理の導入によって、上下水道でプロセス安定化、経済性の向上、スループットの向上などの前進が期待される。

プロセス機器のリアルタイム診断、予防保全といった計算機応用業務では、長年にわたる経験ノウハウの積み上げが特に重要である。知識工学的なプログラミング手法による診断、予防保全機能の計算機化は、このような段階的な機能向上に極めて適合している。

以上の知識工学の適用課題はリアルタイム処理に関するものであるが、管網計算などエンジニアリング業務についても種々な適用が考えられる。設計的な課題への知識工学応用は最も難しいとされており、現状では、あらゆる課題に対して効果を見いだせるわけではない。しかし、数式的な最適化計算では、実際の様々な制約を満たすのが困難であるのに対して、数式的な計算処理と知識工学的な処理とを融合することによって、現実性の高いあるいは経験的な知見を取り入れた設計結果を得る機会が多い。更に、経験的な知見を導入することによって、最適化計算の効率を大幅に向上したり、以下で述べるように、従来の最適化計算では実際上解き得なかった課題を解決することもできる。

4 応用事例

(1) 浄水場監視制御システム²⁾

大規模な浄水場では、監視制御項目数は1万点以上に及んでいる。このような多量の項目を監視し、個々の故障信号から故障箇所を判断し、処置を下すことは容易ではない。特に、停電や主機の故障では、一度に大量の状態変化信号や故障信号が報告される。この状況では、真の故障原因を短時間に判断し、適切な処置をとるのはベテラン運転員といえども容易ではない。このために、受変電設備を対象に、故障診断のための知識処理システムが開発された。機器からの信号組み合わせに応じて、故障箇所がどこかを特定するルール知識が約200個集められ、制御用計算機HIDIC V90/50に蓄えられて故障時に備えられている。このシステムは、その先進性が評価され、昭和62年度に、地方公共団体電算職員等表彰式で、優秀情報処理システム賞を受賞している。

(2) 下水道ポンプ所設備故障ガイダンスシステム

都市域での下水道ポンプ所設備は、特に雨水排除が重要な使命である。出水時には確実にポンプを動作させなければならない。このため、ポンプ作動の中心であるディーゼルエン

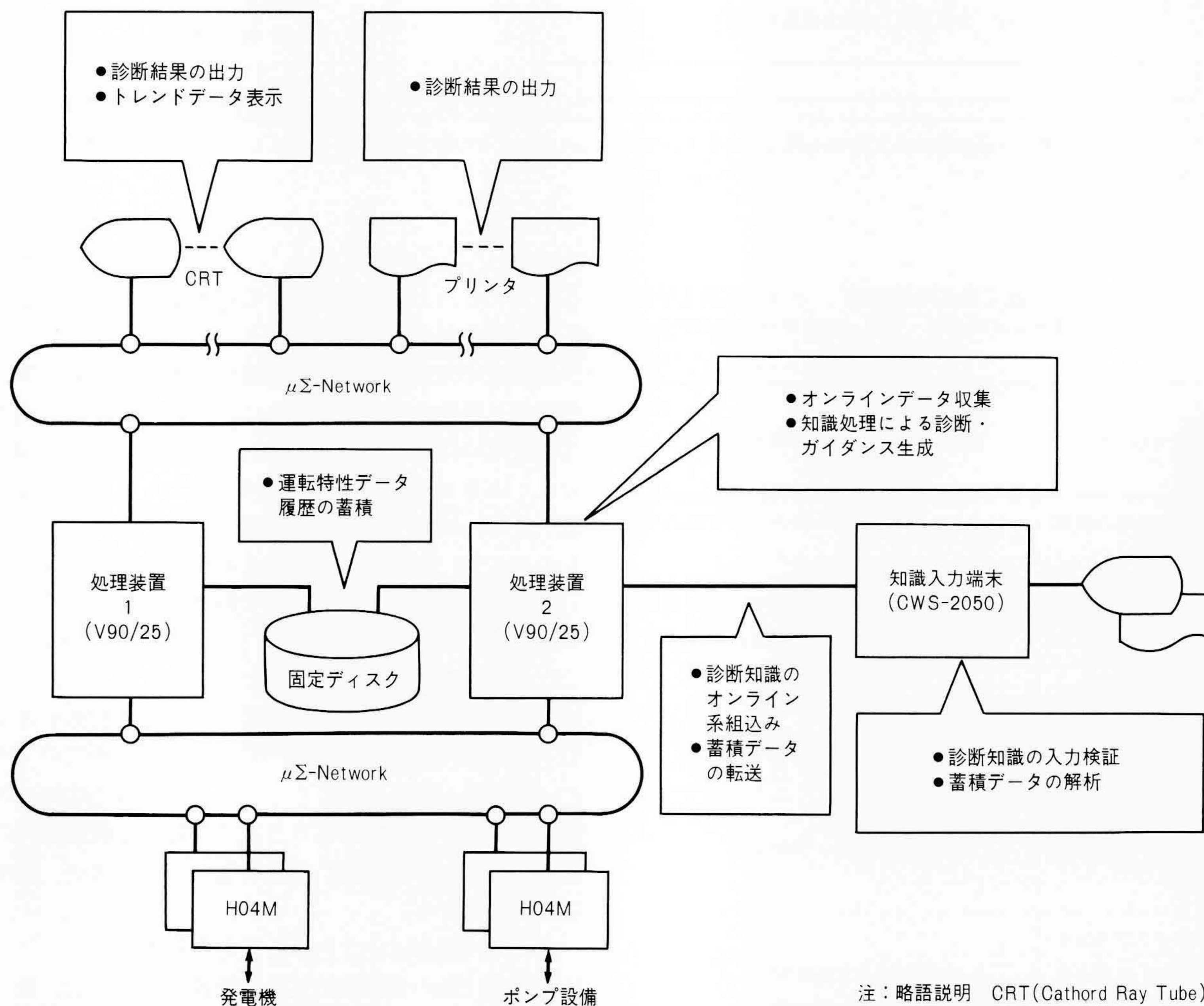


図4 下水道ポンプ所設備故障ガイダンスシステムの構成 診断知識はワークステーションから入力し、検証結果を制御用計算機HIDIC V90/25に転送する。オンライン診断結果はCRT、プリンタに出力される。

表2 予防保全の内容 系統別に待機中、運転中の状態が綿密に診断される。

系 統	内 容
機 関 ・ 発 電 設 備	● ディーゼル機関各部の音響データや運転特性データなどと負荷との相関から診断 ● 発電機の電流・電圧・電力・周波数などから運転状態を診断
始動空気・給排気系統	● 空気槽圧力や圧縮機運転状態から診断
燃 料 系 統	● 燃料槽液位、秒送ポンプ状態から診断 ● 燃料油圧力、フィルタ差圧などから運転状態を診断
冷 却 水 系 統	● 一次、二次冷却水水槽の液位、ポンプ運転状態から診断 ● 一次、二次冷却水の温度、圧力、差圧などから運転状態を診断
潤 滑 油 系 統	● 潤滑油などの液位、温度から診断 ● 潤滑油の温度、圧力、フィルタ差圧から運転状態を診断

ジン発電機に対する予防保全システム、更に、受電設備やポンプ設備の故障時の処置をガイダンスするシステムが開発された。このシステムでの知識処理導入のねらいは、従来のプログラミングでは記述が難しかった保全知識や故障時での処置ガイダンス知識を計算機化することを可能にすること、更に、プロセス運用の過程で得られる様々な知見を即座に計算機化して、段階的にシステムを成長させてゆけるようにしておくことである。

本システムは、図4に示すように、制御用計算機HIDIC V 90/25の二重系とワークステーションCWS2050から成ってい

る。制御用計算機ではプロセスデータのオンライン収集・加工、予防保全・診断を実行する。ワークステーションでは、診断や故障時のガイダンスをするための知識の入力や検証ができるようになっている。予防保全の具体的な内容を表2に示す。機関・発電系、空気系など、設備の系統別に綿密な診断知識が計算機化されている。オンラインデータから設備故障の兆候を検出して、対応処置をガイダンスすることによって、設備保全の専門家でなくても適切な対応がとれるようになっている。

(3) 上水道配水管網の管路抵抗値の推定⁸⁾

上水道配水管網の流量・圧力分布の計算は、管網設備の計画・運用制御で必ず(須)である。計算上の基本的パラメータである管路抵抗値は、理論的には管路寸法によって決まる。しかし、実現象を計算で的確に模擬するには、管網の流量・圧力の計測値から抵抗値を推定することが不可欠である。ところが、これらの計測値は極めて限られた地点でしか得られない。一方、推定すべき抵抗値はすべての管路にわたり極めてその数が多い。このため、従来の数学的手法では管網全体にわたる抵抗値を推定することは不可能である。

これを解決する手段として、管網内の流量、圧力の相互的性質に関する先験的知識を用いて、効率的に抵抗値を推定する手法を開発した。これは図5に示すように、計算値と計測値との違いに応じて、抵抗値に関する仮定をどのように変更すべきかという知識を活用するものである。変更の度合を定性的に与えることによって、探索すべきパラメータの数を大幅に削減することが可能となり、通常の数学的な最適化手法が適用できるようになった。

具体的に、500ノード程度の管網に適用した結果を図6に示す。同図は、圧力計測点で計算値と実際の計測値との差が29.4 kPa (3 mAq) 以下にすることを目標に推定した結果である。この図から、抵抗値を正しく推定することによって、管網計算誤差が大幅に縮小されていることが分かる。これにより、開発した手法の有効性が確認され、現在では種々の実際的な配水管網エンジニアリングに適用されている。

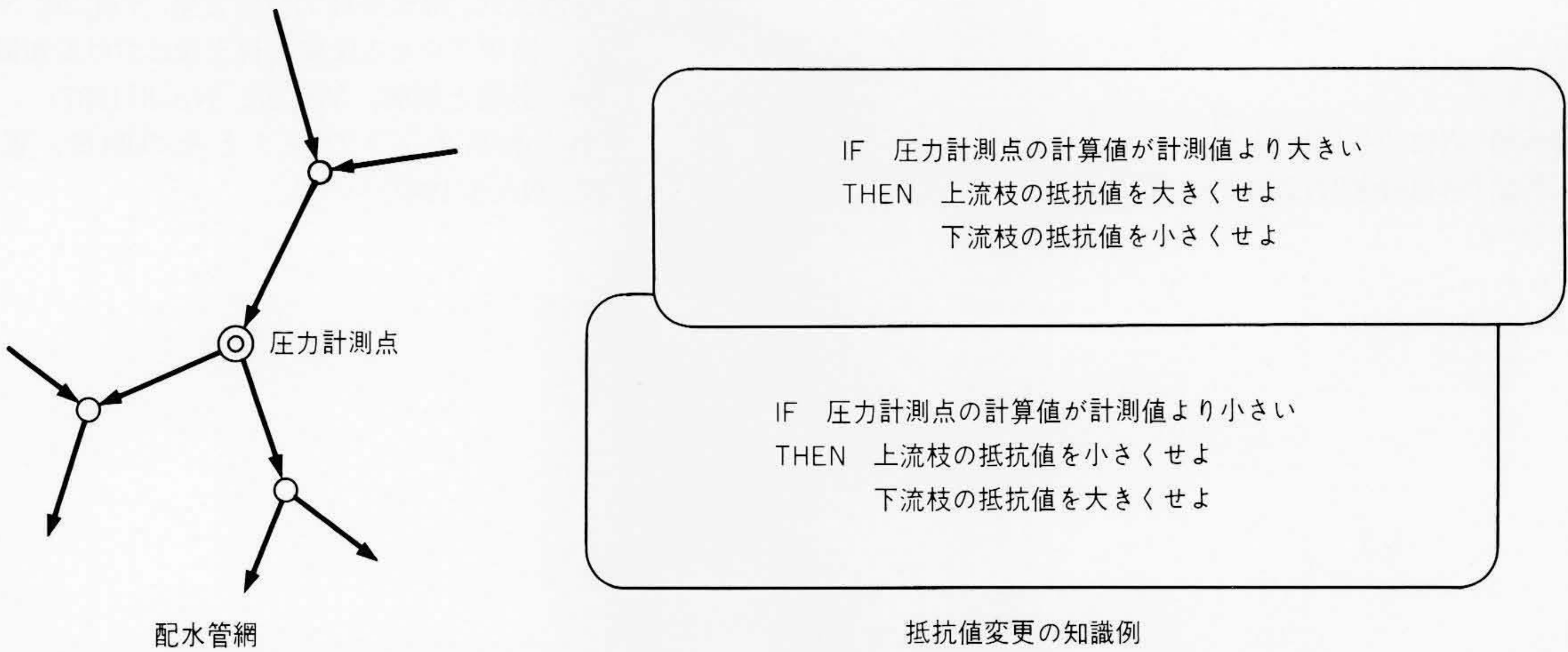


図5 管路抵抗値推定のための知識例 管網内の流量、圧力の性質に関する先見的知識を用いることによって、抵抗値推定を実用化した。

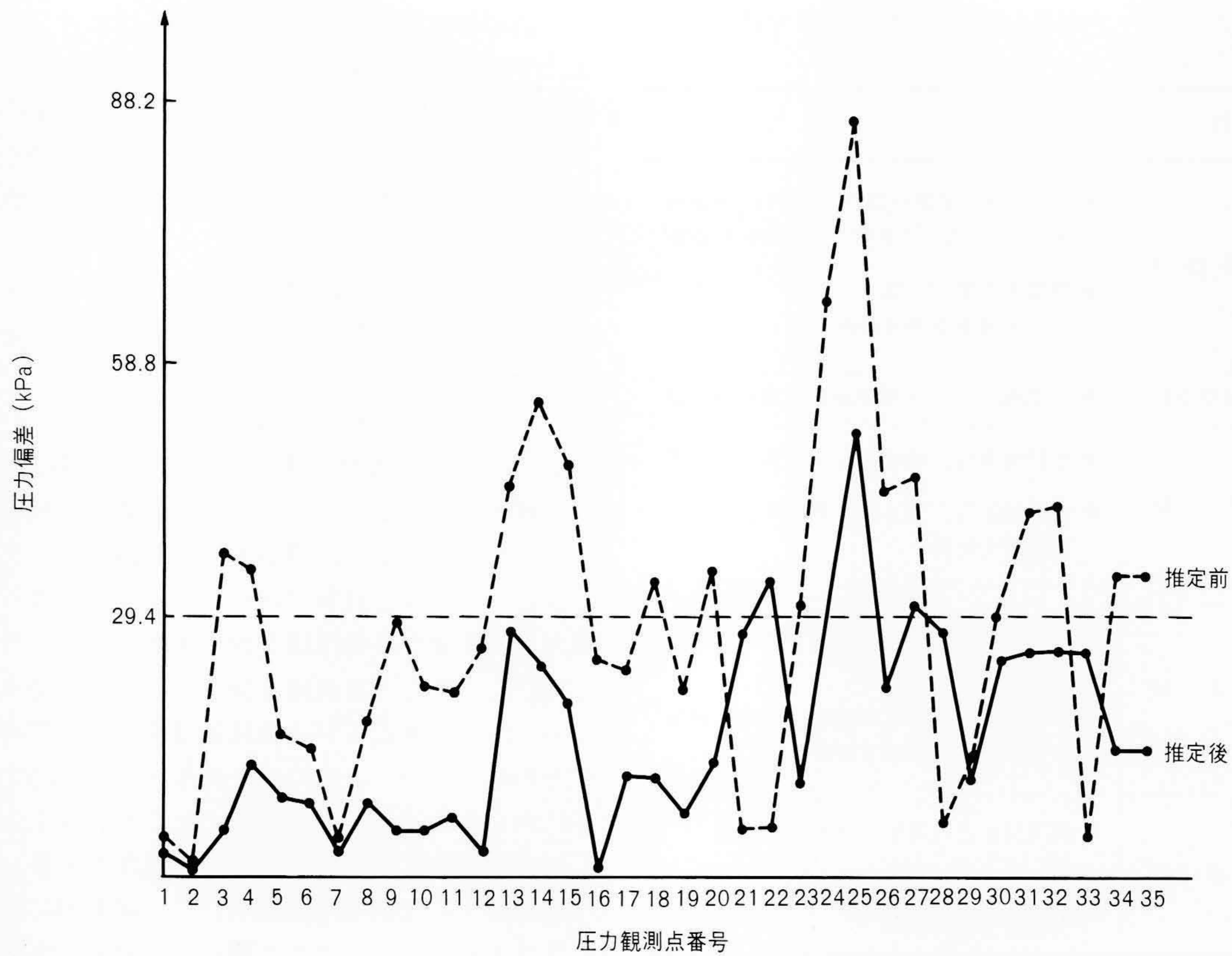


図6 管路抵抗値推定による圧力偏差縮小例
抵抗値推定によって、圧力の計算値と計測値との偏差が大幅に縮小された。

5 結 言

知識工学は、従来は困難であった知的業務の計算機化を図る技術である。3章に示したように、この技術が上下水道分野で効果を発揮すると期待される場面は極めて多い。このような知的業務の計算機化は一挙に達成できるものではないが、段階的に知識を加えてゆくことによって、上下水道設備の運用・管理・制御のあらゆる場面で、人間にとっての強力なパートナーとして成長させることが可能である。

参考文献

1) 日経産業新聞(昭和59年4月20日)

2) 日本経済新聞(昭和61年2月27日)

3) 鈴木, エキスパートシステムの上下水管理制御への応用, 昭62電気学会産業応用部門大会(昭62-9)

4) 都島, 外: 流れ作業ライン制御へのルール型制御方式の適用—製鉄所のビレット精整ライン制御への適用—計測自動制御学会論文誌, Vol.21, No.10(1985)

5) 船橋, 外: 知識処理システムとその構築支援ツール, 日立評論, 70, 5, 547~554(昭63-5)

6) 田野, 外: 知識ベースシステム構築用ツールEUREKAにおける高速処理方式, 情報処理学会論文集, Vol.28, No.12(1987)

7) 湯井, 外: 高炉プロセス操業監視支援における知識処理システムの適用, 計測と制御, Vol.26, No.8(1987)

8) 船橋, 外: 水系ネットワークとその制御, 電気学会誌, Vol.107, No.5(1987)