

水工学シリーズ02-A-7

A I 水工学の展望

株式会社建設技術研究所東京本社 次長

伊 藤 一 正

土木学会
水理委員会・海岸工学委員会
2002 年 9 月

AI 水工学の展望

Approach to Hydraulic Engineering by AI Technology

伊 藤 一 正
Kazumasa ITO

自然現象の記述にはニュートン以来の数学モデルの適用が中心であり、水工学においても例外ではない。しかし、数学モデルでの記述は想定された境界条件と多くの実験により確認された事象が対象となり、複雑な事象、実験の不可能な事象等に対しては異なるアプローチが不可欠である。

このための技術の一つとしてAI (Artificial Intelligence : 人工知能) 技術がある。特にコンピュータの処理速度の向上に伴い、より複雑な事象のシミュレーションや画像・音声などの情報を問題解決の手段として利用できるようになってきている。

AI 水工学では、コンピュータを通して人の思考過程や振る舞いを再現し、問題解決を行おうとする試みである。ここでは、ダム管理の問題を事例に、AI 技術を適用し実時間での問題解決を行う方法への適用の有効性を通じて、AI 水工学の可能性を論じたい。

1. はじめに

ダム管理では経験により獲得された知識が操作判断に大変有効で、これら知識の体系化と流通はダム管理の高度化への基礎となる技術でもある。以下に、各節の概要を示す。

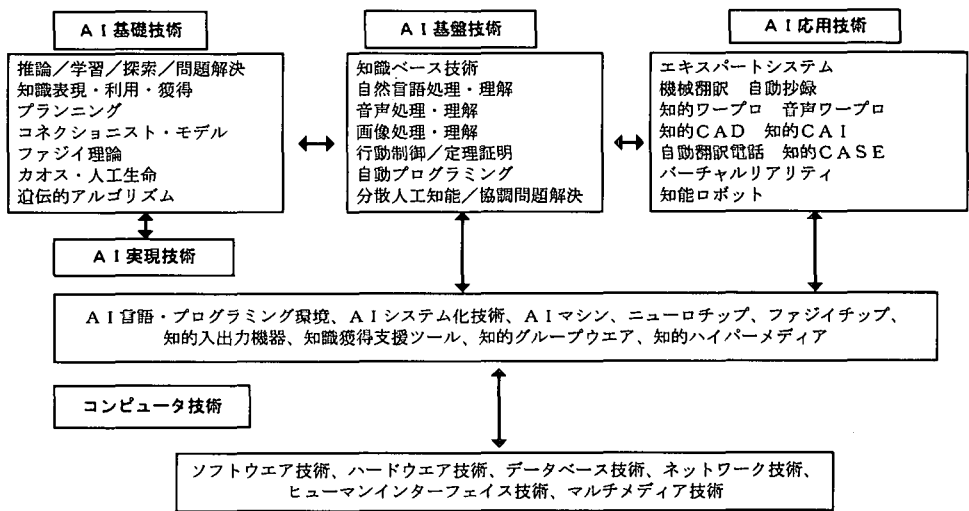
最初に、ダム操作の分野等に適用可能なAI 技術の概要を示す。次いで、ダム管理の現状と支援システムの概念を説明する。これらを基に、貯水池操作の詳細、支援システムの詳細を次の順に示す。

まず第一に貯水池操作における詳細な管理タスクを分類・整理し、省人力と安全性確保という相反する課題の解決にAI 技術が適用可能であることを示す。支援システムの基本構成では、実例に基づき、監視情報に基づく現象の把握方法、監視データと推論に基づく操作計画の立案、推論結果の利用者への伝達の方法などタスクフローに基づくシステム構成を提示する。一方、タスクフローに従う手法とは別に専門家の問題解決手順から得られる知識を体系化して、的確な判断を行う過程をシステム化する方法を示す。この中では知識表現の手法として、ファジイ推論とニューラルネットワーク手法を用い、両手法による放流量決定モデルを詳述した。

2. AI 技術の概要

AI (Artificial Intelligence) とは人間の行う知的活動をコンピュータによって実現することといわれ、研究開発の結果は常に過大な期待をもたれ続けている。しかし、知的な活動は時代とともに変化し高度化するため、対象問題も常に変化し進化する性格を有している。このようなAI 技術の全体像は図2-2のようにまとめる事ができる¹⁾。

ここに示されたAI 技術分類のなかから、水工学や水資源システムに適用されるのはAI 実現技術を用いたAI 応用技術であり、具体的にはAI 言語、ファジイ、ニューロなどの実現技術を用いたエキスパートシステムや知的システムの開発などである。エキスパートシステムは、ここ10ヵ年の間に水資源問題においても注目を集め、数多くのシステムが開発され実用に供されてきた。そのなかの代表的なシステムの機能は表-1のとおりである。



図－1 AI 技術の概要

表－1 水資源問題を対象としたエキスパートシステムの例

システム名	開発者	機能	ハードウェア	ソフトウェア	利用者
HYDRO	SRI International	HSPF モデルパラメータ算定	Mainframe	INTERLISP	Hydrocomp Inc. U.S.Geological Survey
FLOOD ADVISOR	Uni. of British Columbia	流量の計算	VAX	C	
RAISON	National water Resources Inst. Burlington	酸性雨の解析	Micro	C	National Water Research Inst.
HYSIZE	Tudor Engrg. Co., San Francisco	水力発電所の位置の選定	VAX	FORTRAN	Tudor Engrg. Co.
EXSRM	U.S. Agricultural Research Service	SRM モデル検証	Symbolics 3670	ART	U.S. Agricultural Research Service
WATQUAS	University of Waterloo	水質評価	VAX	C	Ontario Ministry of Environment
SISES	RFT Associates	場所選択	Micro Vax	PASCAL	
ARIANE	IREQ, Quebec	発電運用計画	Mainframe		Hydro-Quebec
RRA	University of Colorado	土地開発管理	Micro Vax	PC+	U.S. Bureau of Reclamation
DMWW	University of Colorado	源流設計	Micro Vax	PC+	U.S. Bureau of Reclamation
WMS	University of Washington	低水管理	Micro Vax	INSIGHT 2+	Seattle Water Department
ESSEM	Environment Canada	流量計測	Micro Vax	PROLOG	Environment Canada, Water Res. Branch
JOE	Manitoba Hydro	発電運用	Micro Vax	GEPSE	Manitoba Hydro

(1) エキスパート・システムにおける知識表現

エキスパートシステムは特定の分野の専門家（エキスパート）に代わって判断のための情報やアドバイスを提供できるコンピュータシステムと言え、AI の応用技術の一つである。

エキスパートシステムの構成は大きく知識ベースと推論エンジンからなり、専門家の持つ多くの知識を知識ベースに格納しておき、適宜それを表現する機能（推論エンジン）とにより構成される。

知識ベースは知識を格納するデータベースである。通常のデータベースとの違いは単に事実だけでなく、規則なども含めて格納することにある。このような知識ベースを構築するためには知識の表現方法が問題となり、

プロダクションシステム²⁾、意味ネットワーク³⁾、フレーム⁴⁾、黑板モデル⁵⁾、オブジェクトモデル⁶⁾等による表現などが用いられる。

①プロダクションシステム

プロダクションシステムは知識を「IF ～ THEN」形式のルールで記述し、図-2の仕組みで構成される。ここで、ルールベースはルール形式で記述された知識を格納する知識データベースで、ワーキングメモリはプロダクションシステムの動作を保持する記憶領域である。ルールの基本的な動きはワーキングメモリの内容がルールの前提部を満たしていれば結論部の動作を実行しワーキングメモリの内部を書き換えることである。インタプリタは推論エンジンとも呼ばれ、ルールを選択・適用し、状態を変化させて行く機能を有し「認知-実行サイクル (Recognize-Act Cycle)」と呼ばれるシーケンスに基づきルールの評価を実行し「認知-実行」サイクルの動作によるワーキングメモリの変化が次サイクルで新たにルール群により評価を受け、ワーキングメモリの更新が継続される。

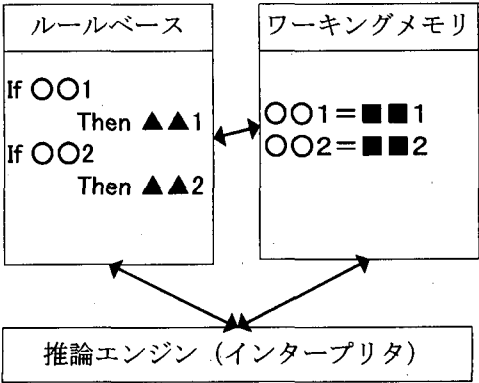


図-2 プロダクションシステムの基本構成

②意味ネットワーク

意味ネットワークは人間の記憶構造の表現方法として提案された手法である。人間の頭の中で「物」や「事柄」、「概念」などに関する記憶はばらばらに存在するのではなく、あるまとまりと関係によって組織化されているとの考え方を基礎とするものである。意味ネットワークでは事象を節点（ノード）と枝（リンク）からなる図的なネットワークで表現する。節点は「物」、「事柄」、「概念」などを表わし、枝は節点の関係を表現している。このような特徴から意味ネットワークは知識を組織化し人間にとって理解しやすい図的なネットワークで書き表せるものを対象とすることとなる。しかし図上のネットワーク表現は計算機上で、そのまま取り入れる事ができず、LISPで代表されるリスト構造での表現に切り替えなければならないなど、十分な活用が難しいこともあって、その考え方は次第にフレームに置き換えられていった。

③フレーム

フレームは1975年にMITのM. Minskyが提案したもので、「フレームとは、状況を表現するためのデータ構造であり、各フレームにはスロットとして複数の情報が付加されている。この情報の中には、そのフレームの使い方に関する情報もあれば、次に何が起こりそうかに関する情報、この予測が外れた時に取るべき行動に関する情報がある。」と述べている⁴⁾。

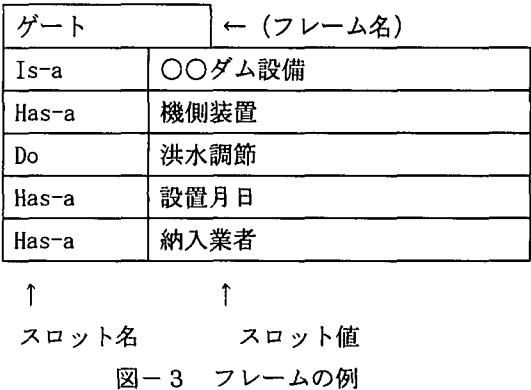
Minskyはフレームの役割を次のように説明している。「人は新しい場面に出会うとき（あるいは、現在の問題に対する見方を根本的に変えようとするとき）、記憶のなかからフレームと呼ばれる一つの基本構造を選び出す。これは過去に記憶された一つの枠組みであり、その詳細は必要に応じて現実に合わせて変更される」⁴⁾。フレームにおけるスロット名は意味ネットワークのリンクに相当し、スロット値は意味ネットワークのノード名に相当する。意味ネットワークでも上位のノードの持つ性質が下位ノードに引き継がれるように、フレームでもIs-aスロットで指定される上位フレームの性質が継承される。

フレームシステムではプロダクションシステムのような汎用の推論エンジンは持たない。しかし、スロット名に手続き名を書き、スロット値の参照に合わせて外部手続きが起動されて、その結果がスロット値に反映される仕組みを有しており、フレームを作成したり、削除したり、検索したりする手順をプログラミング

することにより、各フレームが有する外部手続きも連動して起動されることとなり、一種の推論構造となる。フレームシステムでは必要な外部手続きを最初の段階で整備する事が必要となるなど、初期の開発に労力を要するが、推論の仕組みを問題に対応して組み込む事ができるなど、知識のメンテナンスが容易になる特徴を有する。(図－3 参照)

④黒板モデル

黒板（ブラックボード）モデルはカーネギーメロン大学の音声理解システムHEARSAY-IIで開発された知識表現・推論の方法である⁵⁾。基本的な構造は分割され



たワーキングメモリと複数のプロダクションシステム、各プロダクションシステムの起動を制御する機構からなる。黒板モデルでは黒板と呼ばれる共通のデータ領域があり、この黒板を介して分割された各プロダクションシステムの知識の集合が協調的に機能する仕組みである。従って、このモデルでは問題を階層にわけて取り扱う事ができ、分類された各階層の知識を知識源（Knowledge Source:KS）と表現し、各知識源が協調して問題の解決を進めてゆく。知識源での知識の記述は黒板をワーキングメモリとするルールである。

⑤オブジェクトモデル

フレームの考え方をさらに進めたモデルとしてオブジェクトモデルがある。オブジェクトとは図2－7に示すように、内部状態とメッセージを受けた時に行うべき動作、動作を実施する時の操作の手続きを内部に持ったモジュールである。言いかえると、データとその操作に必要なプログラムをあわせ持ったモジュールである。

オブジェクトモデルには以下に示す4項目の重要な特徴がある。

- 1) オブジェクトモデルでは共通項を持つグループをクラスと呼ぶひな型を用意して構造化する。クラスにはそのグループに共通する動作がメソッドとして定義される。クラスはひな型であり、ひな型から実際に使用するオブジェクトをインスタンスとして生成し、インスタンスもオブジェクトとなる。
- 2) クラスは性質を継承する機能を持つ。これは、差分プログラミングの機能に類似しており、新しいクラスを作るときに、類似の性質をもつクラスがすでにあれば、そのクラスをスーパークラスとして指定し、自分自身には変更点だけを記述することにより、新しいクラスを定義する方法である。
- 3) カプセル化という機能があり、メッセージの受け手にメソッドが記述されていることにより、送り手は受け手の動作がブラックボックスとなる。つまり、メッセージに対して何をすべきかは送り手は知る必要がない。
- 4) 同じメッセージを受け取っても生成したインスタンス毎に類似ではあるが異なった動作を行わせる事が可能であり、このことを多様性（多態性）と言う。つまり、クラスにおいてインスタンスを生成する場合に拡張性が高くなり、知識表現の自由度が高い。

図－4に見られるように、オブジェクトは問題をモジュール化し、これらのモジュールの中に手続き的知識も記述可能であるし、性質の継承性は知識の階層構造化を可能とし、記述の重複を避けられることから、表現が簡潔になる。さらに、知識は部品化されるばかりでなく再利用も可能となり、知識ベースとして使い回しも可能となる等の利点がある。

⑥ニューラルネットワーク

ニューロコンピュータは生物の神経細胞（ニューロン）の持つ基本的な機能をモデル化して開発されたものである⁷⁾。

図-5はニューラルネットワークモデルの概念を示したものである。左側からの入力 $X_1 \sim X_n$ に対して $W_1 \sim W_n$ のパラメータを乗じて総和を求め、総和 Y に対して $Z=f(Y)$ の関数による出力が得られることを示すもので、このような機能を持つニューロンの連結からなるニューロコンピュータは、連結の方法によって異なる機能を持つ。一定方向に信号が伝達する階層型のネットワークでは学習が可能で、すべてのニューロン間で信号をやりとりするネットワークでは連想や組合せ最適解の推定などが可能である。

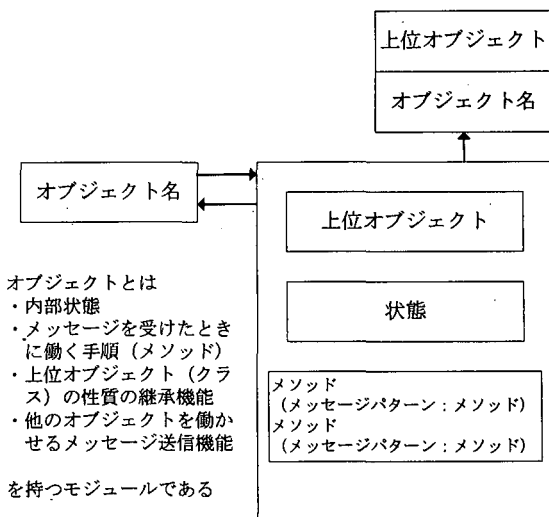


図-4 オブジェクトモデルの構造

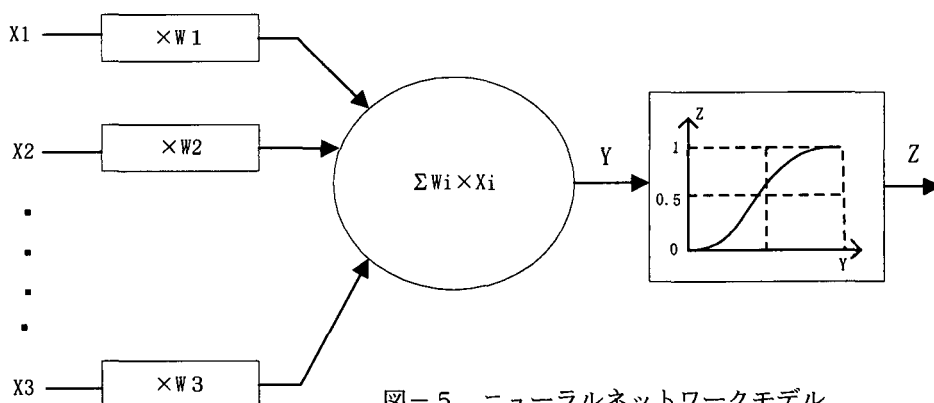


図-5 ニューラルネットワークモデル

⑦ファジイ理論

ファジイ理論は1965年に Zadeh によって提案されたファジイ集合論 (Fazzy Sets)⁸⁾に端を発し、その後ファジイ・アルゴリズムの考え方を1968年に、1973年にファジイ推論が提案された。そして、ロンドン大学の Mamdani 教授がファジイ推論の具体的なアルゴリズムを提案し⁹⁾、産業界に応用されるようになっていった。

1)ファジイ集合^{10),11)}

ファジイ集合は、対象とする各要素がどの程度その集合に属するのかを帰属度関数（メンバーシップ関数）で表す。この関数は図-6に示すような関数で、横軸は要素を、縦軸は帰属度（そのファジイ集合に属する度を0から1で表したもの）を表し、この関数とファジイ集合は1対1に対応する。

2)ファジイ推論¹²⁾

ファジイ制御則は「もし～ならば～せよ」の形の言語的なルールを組み合わせた形で表現できる。この「～」の部分は、ファジイ集合によって表現できる。ファジイ推論は、ある事実が与えられたときに、このようなルールを適用して、一つの結論を導くものである。2値論理の場合は命題（ルール）と事実が与えられ、事実と前件部が一致すれば、その命題の後件部が結論となる。一方、ファジイ推論では、事実と前件部は完全に一致する必要はなく、前件部とは少し違った事実から、後件部とは少し違った結論が導き出される。

このファジイ推論の計算には多くの方法が提案されているが、ファジイ制御則を IF～THEN 形式のファジイ規則で表現し、Mamdani が提案した方法の用いられる事が多い。

このファジィ推論の計算には多くの方法が提案されているが、ファジィ制御則を IF～THEN 形式のファジィ規則で表現し、Mamdani が提案した方法の用いられる事が多い。

ファジィ規則によるルールは以下のように表現される。

$$R_i : \text{ If } X_1 \text{ is } A_{i1} \quad \text{and If } \cdots \\ \text{and If } X_M \text{ is } A_{iM} \text{ Then } Y_i \text{ is } B_i$$

. . .

$$R_i : \text{ If } X_1 \text{ is } A_{i1} \quad \text{and If } \cdots \\ \text{and If } X_M \text{ is } A_{iM} \text{ Then } Y_i \text{ is } B_i$$

ここに、If の部分は前件部、Then の部分は後件部と呼ばれる。 i 番目の制御規則 R_i は、入力 X_1 が A_{i1} 、 $\cdots$ X_M が A_{iM} であれば、操作量 Y_i が B_i である事を意味している。 $A_{i1} \sim A_{iM}$ 、 B_i はファジィ集合である。

ここで、 $X_1 = e_1, \cdots, X_M = e_M$ なる入力を与えられたとき、 $B_1 \sim B_i$ を合成した後件部の結論 Y_c は図-7 のように求められる。

これより、事実 e が前件部 A に少しでも含まれれば、そのルールの後件部 B を反映した結論 B' が求められる事を示す。この方法では、事実 e が前件部 A に全く当てはまらなければ、結論は全ての X について値が 0 の合成メンバーシップ関数となる事を示している。

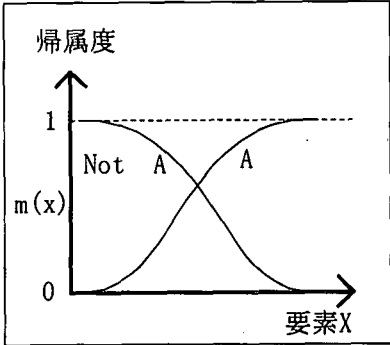
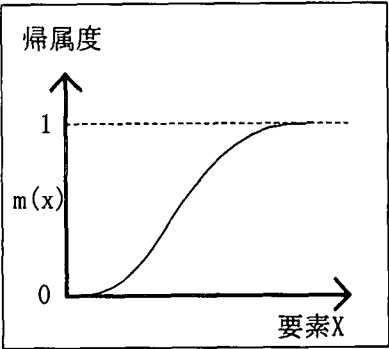


図-6 メンバーシップ関数の例

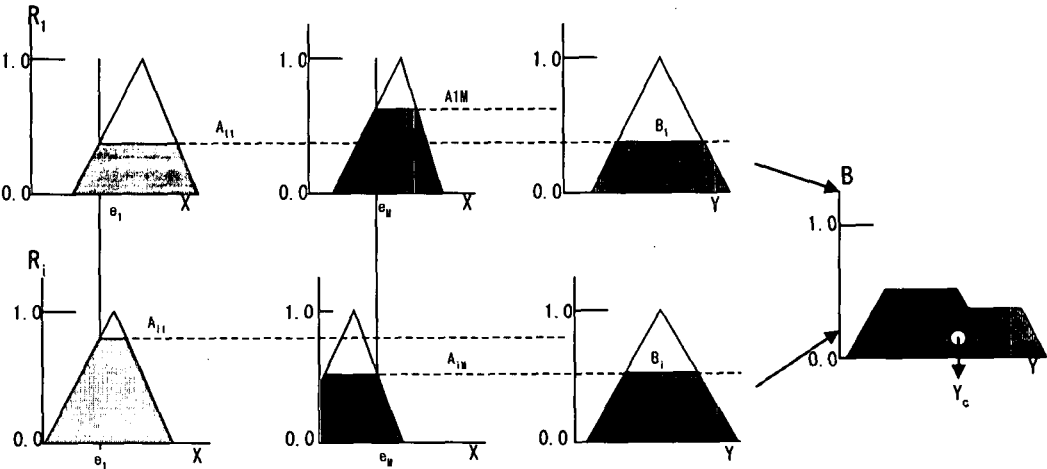


図-7 ファジィ推論の手順

3. ダム貯水池操作支援システム

(1) 概説

洪水時のダム操作は、河川法により規定されており、各ダムで事前に定めた操作規則に従って実施しなければならない。操作規則に基づくダム操作を行うためには治水と利水の両目的に対するダムの機能を満たすために、流入量予測などにより放流の開始時期や放流量を的確に判断し、放流の遅れによる調節容量の不足、過放流による災害の発生を防がなければならない。また、予備放流方式のダムにあっては洪水調節の必要が

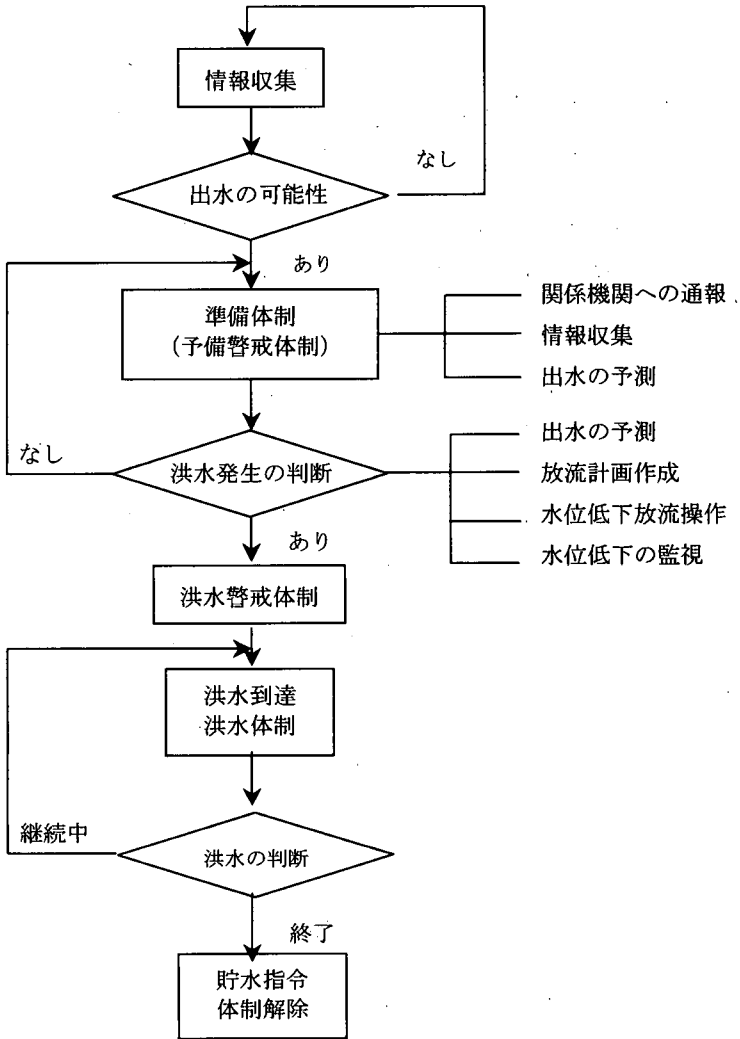
認められる場合は、予め水位を予備放流水位まで低下させ貯留水を放流しなければならない。このような洪水調節の基本となるのは降雨の予測、そして、これに基づく流入量の予測である。こうした予測を参考にダムは操作計画が立てられ、ゲート放流が行われてゆき、ダムの操作計画を決定するための参考としての“予測”は重要な情報である¹³⁾。

発電ダムにおいては、水資源の有効利用の観点から放流および貯留のタイミングが治水を目的とするダムとは異なる操作を要求される。洪水時に的確な操作を行うためには、ダムの流入量の把握を含む状況監視を行い、得られた事実を基に今後発生し得る事態を想定し、これに対処するための操作計画を立案しなければならない。また、複数ダム群の場合、全ダムの状況を勘案し各ダムの特性を考慮して水位低下操作、貯留操作に入る時期、貯留放流量を決定しなければならない、その判断は、経験豊富なダム管理主任技術者に委ねられている¹⁴⁾、¹⁵⁾。

出水時における発電用ダムの操作は概ね図－8の手順により実施される。従来、経験的な要素が多く、これら手順の定量化は難しいとされておりシステム化が進んでいなかった。ここでは、定量化されることにより安定した操作の可能となる項目を以下の3点に絞りシステム化を考える。

①体制移行の判断

放流操作を実施するためには、操作規則に基づく管理体制の確立が必要となり、そのためには、降雨状況・ダム流入量・貯水位・放流量などの情報を監視し総合的な判断が必要となる。これらの体制の確保が的確なタイミングで実施されなければ、以降の放流・貯留の操作が合理的かつ安全に実施し得ないものとなる。



図－8 出水時における発電用ダム操作の手順

②ダム流入量の予測

ダム流入量の予測値は体制の判断やゲート操作に直接用いられるものではないが、今後起こりうる事態を想定するための重要な情報である。一般に、流入量予測には種々の手段があり、各々から種々の予測値を得る事が可能であるが、これらの予測値を基に事態をどのように判断すべきかは過去の経験による所が大きい。

③放流量および放流時期の計画策定

ダム流入量がダム操作規程により決められている洪水流量に到達する以前に、貯水位を河川の従前の機能を維持しうよう決められた水位（予備放流水位）にまで低下させるため、放流計画を立案しなければならない。

ダムゲートの操作は、当該操作の実施前に十分な時間的余裕をもって上下流の関係各機関に操作内容を連絡するとともに、上下流の安全を確認した後に実施されなければならない。これより計画の立案にあたっては、3～4時間以上のリードタイムが必要となり、2)の流入量の予測とも合わせ流域の状況、ダムゲート操作の状況等を総合的に判断した上でなければ実施の困難な事項である。

(2) 貯水池操作支援システムによる効果

貯水池の運用・操作は、ダム管理主任技術者の判断と指示及び操作員の操作によって実施される。この判断機能を計算機上に実現するためには、ダム管理主任技術者の判断基準や特性を定性的及び定量的に分析し、AI技術を応用したシステムとしての構築が不可欠となる。さらに、これらの知識がシステム化されることにより、以下の効果が期待できる。

① ダム管理主任技術者の経験と判断方法の保存・継承

貯水池操作の知識を整理しシステムに蓄えることにより、知識の保存・継承が行われる。

② ダム管理主任技術者の判断支援

判断に必要な知識・行為をデータベース化し参照可能とすることにより、新任のダム管理主任技術者の判断支援に応用可能である。

③ ダム管理主任技術者の教育訓練への応用

判断規則がデータベースに構築されるため、システムを利用することにより、新任のダム管理主任技術者の教育訓練に応用可能である。

このように、貯水池操作支援システムは操作を支援するのみでなく、日常の教育訓練、さらには、ダム管理主任技術者の知識・技術の継承保存が可能と言えるものであり、開発の意義は大きい。

(3) 貯水池操作における基本タスクと支援システムの機能

洪水時の貯水池操作は、“どのような事態が生じようとも操作を中断するという事は許されない”という厳しい条件が課せられている。また、下流に被害が生じないように、定められた貯水池操作規程に基づき、的確な操作を行うことが求められている。さらに、発電専用貯水池では、水資源の有効利用の観点からも放流及び貯留に厳密なタイミング判断が要求される。

① 貯水池操作における基本的なタスク

ダム管理主任技術者は洪水時に「状況を判断して適切に処理する、管理（操作）の目標を立てる」ことが要求される。また、「適切な処理」を評価する事もでき、評価の結果から、操作の修正及び修正結果の予測を行いつつ制御を進める。さらに、その結果から、目標の再設定、目標と実際の差の再評価が繰り返されることとなる。

② 貯水池操作支援システムの持つべき機能

ダム管理では各種観測データから状況判断を行い操作量を決定している。したがって、「来るべき出水の流入量があらかじめ正確に予測できれば、管理上の効果が非常に大きい」と言うことができる。貯水池操作支援システムではこの点に注目し、ダムの流入量を予測する必要性が大きい。その機能が実現できれば大出水の場合には治水的立場から流水を安全に流下させる対策を検討し、中小出水と予測された場合は、利水面での運用を重視するという方針をとる事も可能となる。このため、貯水池操作支援システムは以下のモジュールにより構成することが効果的となる。

1) 流入量予測システム

2) 放流量シミュレーションシステム

(4) 支援システムの概念設計

①推論機構の概説

エキスパートシステムは、対象とする問題領域の知識や事実を利用して推論を行い、専門家と同等の問題解決能力を持つシステムで、従来の手続き型システムと異なり、知識を中心としたシステムとなる¹⁶⁾。その構成は、知識を管理する知識ベースと知識を利用して推論を制御する推論機構から成り、これらが完全に分離されていることによってシステムの開発や改良が容易となる特徴を持つ。すなわち、エキスパートシステムは知識ベースと推論機構が分離されているため、知識の組み込みや入れ換えで済む¹⁷⁾。(図-9参照)

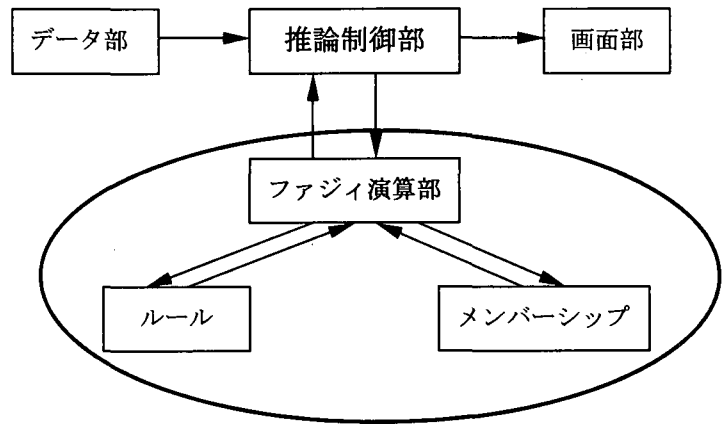


図-9 支援システム概念図

はち、エキスパートシステムは知識ベースと推論機構が分離されているため、知識の組み込みや入れ換えで済む¹⁷⁾。(図-9参照)

②推論の仕組み

ここで提案する推論方法はフレームを基礎とする黒板モデルとOPS系言語¹⁸⁾処理で用いられているプロダクションモデル¹⁹⁾を組み合わせ、各空間(監視、計画、実行)をフレーム⁵⁾(黒板)に見立てて表現し、フレーム内でのルールの実行および黒板間の遷移はプロダクションシステムを適用するモデルを提案する。

4. タスク分析とドメイン知識に基づく放流操作立案(支援)システムの例

(1) システムの機能概要

ここでは、予備放流を規則とするダム操作について、特に、治水容量を全く持たず、確実に洪水時に貯水位を低下させることの必要な発電ダムを事例に操作支援システムを構成した例を示す。

表-2 ダム管理支援エキスパートシステムの機能

機能	支援項目	支援概要	画面表示
状況監視機能	・水文気象情報及びダム諸データの提供	・雨域の位置、移動速度、強度を広域的に監視 ・気象注意報、警報の監視 ・台風位置、予想経路の監視 ・上流観測所降雨量及び上流観測所流量の増加、減少傾向の監視 ・ダム諸量の監視	・状況監視画面 ・ダム総合管理画面
体制設置・解除喚起機能	・ダム操作ルールに準拠し、水文気象情報に基づいた体制設置、解除の喚起	・「洪水の恐れ」等を数値で表す確信度の計算 ・水文気象データに基づいた体制設置、解除の判断 ・体制設置・解除の必要性の喚起(必要性の理由も表示)	・確信度表示画面 ・体制設置、解除喚起画面
放流・貯留計画策定機能	・上流の水文気象現象、流量傾向等からの流量予測に基づいた洪水流量到達時刻の予測 ・各ダムの放流貯留計画の策定 ・台風予報円の位置に基づいた放流貯留計画の策定	・各ダムへの流入量の予測(Fuzzy推論、ニューロ等を利用) ・洪水流量到達時刻の予測 ・予備放流水位到達目標時刻の計算 ・各ダムの上乘せ放流量の計算	・流入量予測画面 ・放流貯留計画画面 ・放流貯留シミュレーション画面

発電ダムの場合、洪水時におけるダム管理においてダム管理主任技術者には水文・気象情報に基づく管理体制の設置・解除、放流・貯留計画の策定などを迅速かつ的確に判断することが要求される。このため、ダム管理支援エキスパートシステムには、ダム管理主任技術者がダム操作の判断を行う上で必要となる表-2示す状況監視機能、ダム管理体制設置・解除判断支援機能、放流・貯留計画策定支援機能を構築する。

(2) 洪水時のダム操作判断支援機能

①管理体制の設置・解除判断支援機能

貯水池操作支援システムの中心機能には、体制の判断、体制移行の指示、状態の監視があり計画立案及び操作判断がある。これらの判断は操作内規（操作規則に則った操作を実施するために、具体的手順を定めた規則）では、「予め出水が予想される場合」は準備体制に入り「洪水発生のおそれが多い場合」は警戒体制、「洪水発生・出水のおそれがない場合」は体制解除などと定めている。しかし、「予想される場合」や「おそれが多い場合」は出水の規模や気象条件により、同一ダムであっても判断の異なる事象となる。従って、経験を有するダム管理主任技術者であれば、容易に判断が可能であるが、経験の少ない管理者や、かつて経験した事のない出水の場合などにおいては、判断の困難な事象となる。

ここではダム管理主任技術者の体制判断の方法を数値モデルとして表現するために、判断のためのルールを抽出し、各ルールに確信度を設け、確信度の変化から判断を出力する機構を用いる。ダム管理主任技術者から抽出したルールは上流域の降雨状況、上流ダム流入量の増加傾向、雨域の位置と強度及び台風の位置等をはじめとして、表－3に示す項目である。これらのルールに対して、確信度を設定し、各ルールの確信度の総和の変化から、判断を出力する。表－3は各判断を行うための知識を整理した結果である。

各々の確信度を算定するための説明要因と重み及び体制設置の必要性をうながす基準となるしきい値は、過去の洪水時のダム管理主任技術者の的確な判断結果に一致するよう調整して設定した。その結果、当該ダム流域の場合は出水予備警戒体制設置確信度のしきい値が 0.3、洪水警戒体制設置確信度のしきい値が 0.7、出水予備・洪水警戒体制解除確信度のしきい値が 0.5 の場合に既往出水時の判断内容の説明を可能とするものとなった。

表－3 出水予備警戒体制・洪水警戒体制設置・解除の条件

管理体制設置・解除	管理体制設置・解除の条件
出水予備警戒体制設置	(各条件のいずれかが該当した時) ・大雨・洪水注意報が発令された場合 ・連続雨量が 30mm を越えた場合 ・上流合算流入量が 100m³/s を越えた場合 ・上流観測所のいずれかの連続雨量が 15mm 以上でかつ、出水予備警戒体制設置確信度 0.3 以上となった場合
洪水警戒体制設置	(各条件のいずれかが該当した時) ・大雨・洪水警戒報が発令された場合 ・最上流ダム流入量が 150m³/s を越えた場合 ・洪水警戒体制設置確信度が 0.7 以上となった場合
洪水警戒体制解除	(全ての条件が該当した時) ・大雨・洪水警戒報、警戒報が解除された場合 ・貯水開始流入量以下となった場合 ・出水予備・洪水警戒体制解除確信度が 0.5 以上となった場合
出水予備警戒体制解除	(全ての条件が該当した時) ・上流合算流入量 100m³/s 以下となった場合 ・最上流ダム流入量 150 m³/s 以下となった場合 ・出水予備・洪水警戒体制解除確信度が 0.5 以上となった場合

(2) 放流・貯留計画策定支援機能

支援システムの二番目の機能として放流及び貯留量を判断する計画策定支援機能がある。計画策定支援機能では、台風情報、ダム諸量、上流域雨量データをオンラインで入手し、10 分間隔毎に流入量予測計算を行

い、その結果から放流を開始する時刻とダムからの放流量を算出し、ダム管理主任技術者に提供する。

流入量の予測については、貯留関数法をはじめとして、簡易的な予測手法を含む複数の予測計算結果を導出し、それらの結果から降雨の傾向等を評価材料に、当該降雨時における予測値をファジィ推論を用いて補正する方法で設定する方法をモデルとして構築し、情報提供を行う。

①ファジィ推論による流入量予測

ファジィ推論により流入量を予測するために、基本とする予測値は表－４に示す３手法で算定するものである。３手法の予測結果は洪水の立ち上がり時では、図－１０すようにばらつきが生じるが、経験豊富なダム管理者は３手法の算定結果に上流域の降雨状況、ダム流入量情報を加味して判断を可能としている。ここでは、その方法と同様となるよう予測流入量の決定方法をファジィ推論によりルール化し、的確な出水予測の総合判断の支援が可能なシステムとして構成する。

３手法により得られた予測結果を決定する方法は、次の４つの要素をファジィ集合で表し、If Then 形式でルール化するものである。ファジィ推論の制御アルゴリズムは、

If $R(t)$ is A_i and $QI(t)$ is B_j and $\Delta QY(t)$ is C_k
Then $\alpha(t)$ is Z_{ijk}

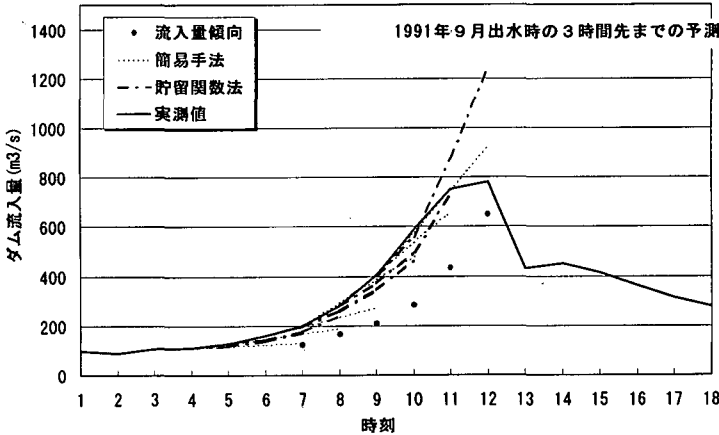
と表す。ここに、 $R(t)$ は、上流域流域平均雨量 (mm/hr)、 $QI(t)$ はダム流入量(m³/s)、 $\Delta QY(t)$ は３方式の３時間後の予測結果の差(最大値－最小値：m³/s)、 $\alpha(t)$ は、３手法の３時間後の予測結果の算術平均値 (ただし、予測結果の最大値の 50%以下のものは平均対象から除外する) に対する補正倍率(0.7～1.3)とした。 A_i 、 B_j 、 C_k 、 Z_{ijk} は、各要素のファジィ集合であり、メンバーシップ関数で表した。If部の各要素の確からしさをメンバーシップ関数で求め、Min・Max・重心法により Then 部の３手法の予測の平均値に対する補正倍率を算出している。前件部の適合度 W_{ijk} は、式 (1) で求め、

$$W_{ijk} = \min\{A_i(R), B_j(QI), C_k(\Delta QY)\} \tag{1}$$

算術平均値に対する倍率 $\alpha(t)$ は、式 (2) で求める。

$$\alpha = \frac{\sum_{i,j,k} W_{ijk} Z_{ijk}}{\sum_{i,j,k} W_{ijk}} \tag{2}$$

このようにして求めた３時間後のファジィ推論による予測流入量と実測値の関係は高い相関が得られる。



図－１０ 予測手法による予測のばらつき

表－４ 予測３手法の概要

手法	概要	基本式	備考
流入量傾向予測	ダム流入量の３時間前から現時刻の変化が今後３時間先まで続くという仮定で予測を実施	$Q(t+3) = (Q(t) - Q(t-3)) + Q(t)$ $Q(t)$: 生坂ダム流入量 t : 時刻	- ダム流入量情報のみで同推定する方法。 - 雨量情報、上流ダム情報欠測時においても予測可能。
簡易予測	上流ダム流入量をもとに当該ダム３時間後流入量を予測する手法	$QI(t+3) = \alpha \{QN(t) + QT(t)\} + QR(t)$ $\alpha = \{QI(t) - QR(t-3)\} / \{QN(t-3) + QT(t-3)\}$ $QI(t)$: ダム流入量 $QN(t)$: 上流 A1 ダム流入量 $QT(t)$: 上流 B1 ダム流入量 $QR(t)$: 支川流量 α : 定数 t : 時刻	- 上流ダムから当該ダムまでの到達時間を考慮し、上流ダムの現時刻流量が３時間後に当該ダムに到達するものとして流入量を推定する方法。 - 雨量情報が得られない場合においても予測可能。
貯留関数法による予測	以下の情報を用いて貯留関数法により７時間先までの流入量を予測 - テレメータ観測雨量、7マス雨量観測所雨量 - ティーセン法による流域平均雨量(欠測補填) - 上流ダム放流量 - 予測雨量(3時間先): 気象協会より流域平均雨量として配信される	$S = K Q^P$ $ds/dt = Re - Q$ S : 流域貯留高(mm) Q : 流出高 (mm) Re : 有効降雨量(mm) K 、 P : 定数	- ダム上流域雨量情報、上流ダム放流量情報を基に、流入量を推定する方法。 - 予測雨量を入力することにより、水位低下に必要な7時間先までの流入量を予測可能。

②ニューラルネットワークによる長時間の流入量予測

対象ダムの予備放流操作に要する時間（常時満水位から予備放流水位まで低下させるのに必要な時間）は、既往洪水の実績によれば6～7時間必要であり、よりの確な予備放流水位低下開始判断には、7時間程度先までの精度の高い流入量予測が必要となる。貯留関数法を用いれば予測雨量を入力することにより7時間先の予測流入量の算定は可能であるが、近年の出水における予測雨量の精度は、表－５に示すように、予測時間が長くなるとその精度が低下している事がわかる。このため、貯水池操作に適用するためには貯留関数法のみで7時間先の流入予測を精度高く行うことは難しいと判断される。

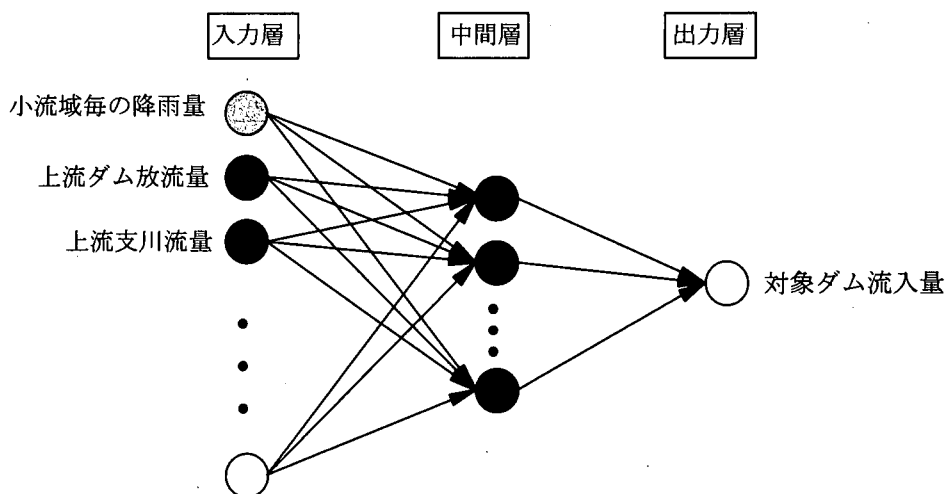
長時間のダム流入量予測を行うためには、上流域の予測雨量だけでなく、上流域の雨量、上流ダムの放流量、ダムの流入量、およびこれらの諸量の変化傾向と、7時間後までのダム流入量の関係を、過去に発生した出水を学習することによって再現することのできるニューラルネットワークモデルを適用した。

ニューラルネットワークは、既知の入力データから、調整した重みとしきい値を使用して、未知の出力データを算出させることができる。このことを図－１１に示すように流入量予測に応用すると、気象要素・雨量・上流ダム放流量と流入量のデータを学習ネットワークに与え、気象要素・雨量と流量の相互関係を学習し、重みとしきい値を指定された誤差範囲内に収まるように調整することになる。次に、気象要素・雨量を入力し、予測ネットワークと調整した重みとしきい値を使用し、ダム流入量を出力させる。

対象ダムの7時間先の流入量を予測するためには、前述のとおり現時刻から4時間先までの予測降雨量の情報が不可欠である。しかし、予測降雨量は2～3時間先の値でも、その精度が高いと言えないため、入力データとしてこれらの予測降雨量はいわず、予測降雨量と関連性の高い情報で代替する手法を適用した。さらに、流入量決定の因子として降雨量以外に、毎時入手の可能な過去6時間の上流ダムの放流量、過去6時間の主要支川での流量、過去3時間のダムの流入量を与えるものとした。これらの情報に加えて予測降雨量に関連する台風を例にすれば、中心気圧、中心の予想位置などの因子によりモデルを構築し、予測結果の精度を評価した。

表－５ ダム上流域流域平均予測雨量精度
(予測値と実測値の相関係数による比較)

対象出水	予測時間		
	1時間後	2時間後	3時間後
1994.5.14 出水	0.788	0.789	0.634
1993.9.9 出水	0.683	0.595	0.153



図－１１ ニューラルネットワークの構造

ここで、実測雨量と流量の入力に当たり、過去の時間数は次のように定めている。

- ◎雨量：降雨量は地表面に到達した後、強い降雨は３時間程度で河道に到達することが既往の観測記録から把握できるが、弱い降雨の場合は流出量が小さくなり流下速度も小さく、到達時間が長くなることが想定される。このため、ここでは強い降雨時の到達時間の２倍となる６時間前までの降雨を入力の対象とした。
- ◎流量：上流ダムからの放流量及び上流で合流する支川の流量は降雨の場合と同じように、到達時間を考慮して６時間前までの観測値を用いるものとする。当該ダムの流入量は流量増減の変化パターンを把握出来る最小単位である過去３時間の値を用いるものとした。

降雨量を予測する場合の因子は気象の要因（台風、融雪）別に様々な事項が上げられる。ここでは、前述の入力項目に加え気象要因別の入力項目について検討を行い、それぞれのニューラルネットワークにおける予測洪水量を評価してモデルの合理性を検討した。

１)融雪性洪水に関連する要因

融雪現象に関連すると考えられる気象要因を気温、風向・風速・日射量とし、さらに融雪量ポテンシャルを把握する要素として積雪量を取り上げた。これらのうち、アメダス情報等よりオンラインデジタル情報として得られる下記の要因を融雪性洪水用の入力とした。

- ・気温、風速、日照時間、積雪量

２)台風時の降雨に関連する要因

台風による降雨の場合、台風の経路(現在位置・今後の予測位置)と台風の規模が大きな関連要因と考えられる。これらはいずれもデジタル情報として得られるため、下記の要因を台風洪水用の入力とした。

- ・台風の現在位置、台風の予測位置、台風の中心気圧

なお、梅雨などの前線性洪水に関連する要因については、前線による降雨量が前線の位置、移動方向により定義されると考えられるが、前線位置や移動方向はオンラインデジタル情報として得ることが難しいという問題点があるため、前述の各気象要因共通の入力項目のみとした。図－１１に示したニューラルネットワークモデルの構造に従い、検討した項目を入力し７時間先までの洪水流出量を出力しニューラルネットワークモデルの精度を評価した。学習に用いた気象要因別の洪水データは以下のとおりである（表－６参照）。

ダム操作に対する社会の要請は、多岐に渡るようになっており、意思決定に至る過程では支援システムの整備が求められている。洪水時のダム操作においては、極めて複雑かつ逼迫した状況の中で、ダム本体はもちろん周辺および下流の安全性確保のために迅速・的確な判断が要求される。操作支援システムはこのような問題に適用可能であり、その判断過程を実時間で支援するシステムとして有効であることを本研究で基礎的に確かめることができた。

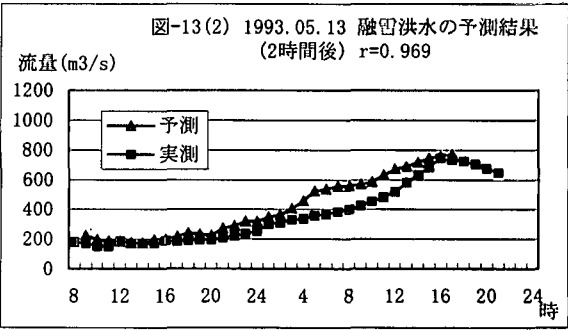
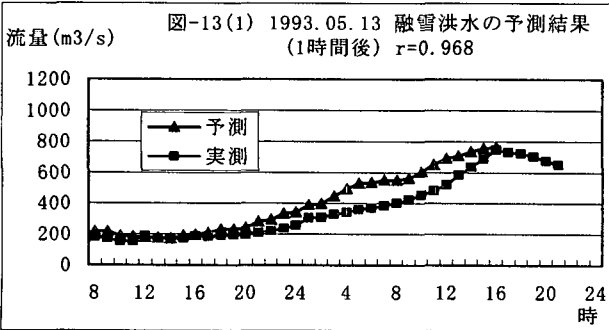
一定の洪水調節容量を有効に利用し、所期の調節効果を発揮するとともに、超過洪水に対しても適切なゲート操作が安定的に行い得るようにし、ダムの効用が遺憾なく発揮できることがダムによる洪水調節上の課題である。特に、洪水時のダム操作は、短時間において行われるもので、迅速かつ的確な判断が要求される。また、放流量決定には、この決定に関する因子、たとえば、雨量・流入量・流入波形・貯水量・調節可能容量などを十分に利用するのが一般的にいて合理的といえよう。このためには、これらに関する情報の利用方法のルール化を図ることが必要となる。個人の能力や経験に負うところが大きかったこれまでの方法に対し、得られた知識・経験を集積し、普遍化していくとともに実用化していくことが望まれている。このため、ダム貯水池操作支援システムの開発とか、ファジイ理論やニューラルネットワーク方法をダム貯水池の実時間操作に適用するための研究が必要である。

③放流・貯留計画の策定方法

前線性降雨時の場合、エキスパートシステムはダム管理主任技術者が従来行ってきた方法を基本として、予測流入量と過去の最急勾配波形の流入量の比を求め、最急勾配波形時の放流量にその比を乗じてダムからの放流量を判断する。

前線性降雨時の場合、エキスパートシステムはダム管理主任技術者が従来行ってきた方法を基本として、予測流入量と過去の最急勾配波形の流入量の比を求め、最急勾配波形時の放流量にその比を乗じてダムからの放流量を判断する。

一方、台風の接近による降雨の場合には、一たびダム流域が暴風雨圏内に入ると、たちまちのうちに洪水流量に達してしまう恐れがある。このため、エキスパートシステムにおける上乘せ放流量の算定は前述した流入量予測によらず、ダム管理主任技術者の経験的判断方法によることを基本とする。まず、過去の台風の位置と洪水発生との関係を分析し、ダムに洪水をもたらす可能性が高い台風の危険区域を設定した。放流量の設定にあたっては、台風進路の予報円がこの危険区域に到達するまでの時間内にダム水位を予備放流水位に低下させることとし、このために必要な上乘せ放流量を算定することとした。



図一 1 3 融雪洪水 1—7 時間先予測結果 (1)

表－6 (1) 前線性洪水予測用モデル学習対象洪

対象洪水年月日	対象ダムピーク流量	対象時間数
1993年7月12日	820m ³ /s	71
1993年8月15日	733m ³ /s	95
1995年7月07日	1、095m ³ /s	71
1996年6月18日	223m ³ /s	71
1996年6月25日	1、040m ³ /s	66

表－6 (2) 融雪性洪水予測用モデル学習対象洪

対象洪水年月日	対象ダムピーク流量	対象時間数
1997年4月07日	545m ³ /s	95
1997年5月09日	840m ³ /s	71

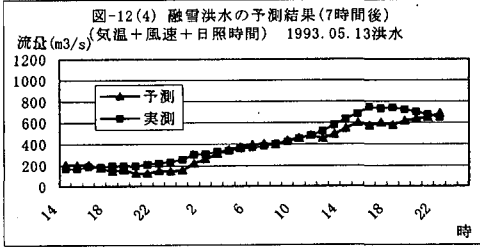
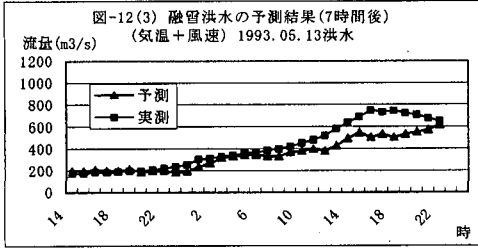
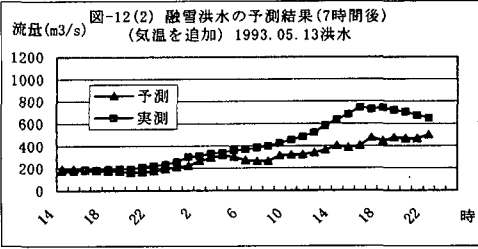
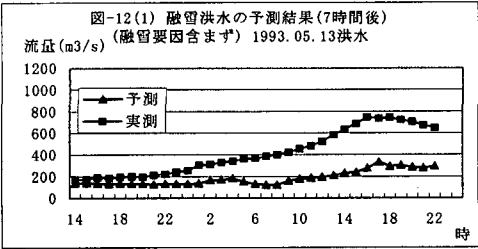
表－6 (3) 台風性洪水予測用モデル学習対象洪

対象洪水年月日	対象ダムピーク流量	対象時間数
1993年9月03日	215m ³ /s	24
1993年9月08日	615m ³ /s	71
1994年9月29日	592m ³ /s	71

ニューラルネットワークモデルの予測の精度が、加える因子毎にどのように変化して行くかを融雪性洪水を対象として比較したものを以下に示す。これらの予測結果から、融雪性洪水では、観測所雨量や上流域の流量記録のみでの予測を行った場合には、パターンの再現が出来ていない（図－1 2（1））が、気温と風速のデータを加えると初期の流出量が合致し（図－1 2（3））、さらに日射量を加えると高い精度で再現できる（図－1 2（4））ことがわかる。ニューラルネットワークモデルを適用して予測した融雪洪水流出量の予測結果は図－1 3に示した。その結果は表－7のとおりである。表－7より、7時間後の予測精度は0.737から0.960と高い精度を有していることがわかる。この結果によって、構築したモデルは、台風性洪水、前線性洪水、融雪性洪水毎に分けて、3時間程度先の降雨量を予測しうる要素を抽出して、ニューラルネットワークモデルを用いて予測精度を検証した結果、十分適用可能な精度を有するものであることが確認できる。

表 4－7 予測結果比較表

降雨要因	相 関 係 数							備 考
	1時間	2時間	3時間	4時間	5時間	6時間	7時間	
前 線	0.992	0.991	0.989	0.981	0.970	0.954	0.928	95.7.03洪水
融 雪	0.968	0.969	0.974	0.977	0.980	0.972	0.960	94.5.13洪水
台 風	0.976	0.970	0.961	0.952	0.919	0.869	0.737	95.9.17洪水



図－1 2 融雪性洪水予測結果

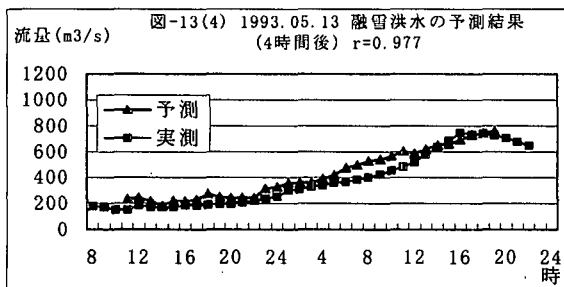
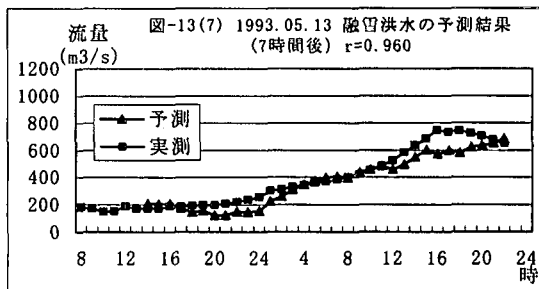
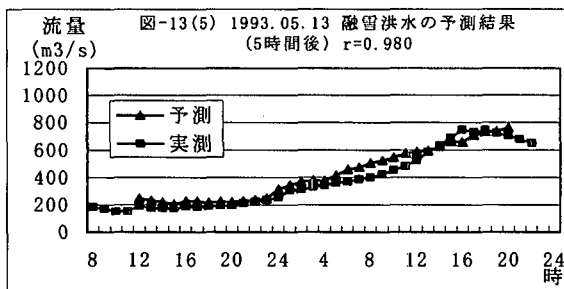
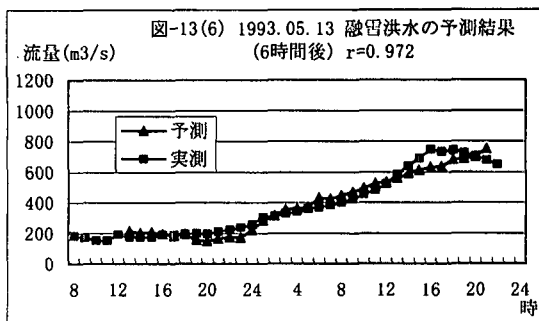
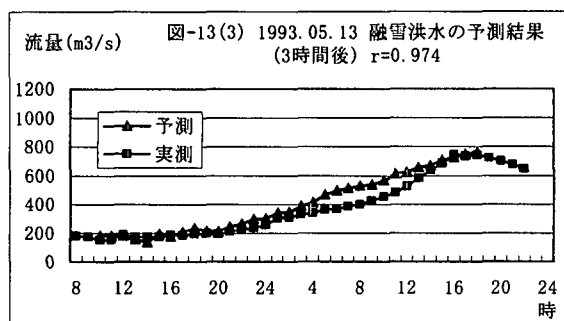


図-13 融雪洪水1-7時間先予測結果(2)

(4) システム適用結果

以上により構成した支援システムに、過去の2出水のデータを与え体制の設置・解除の判断及び放流・貯留計画策定結果について評価を試みた。

①管理体制の設置の結果の評価

1) 1991年9月出水

1991年9月18日に発生した洪水は、流量増加が急激で、洪水流量(800m³/s)を越える規模であった。表-8に実操作およびシステムにおけるダム管理体制設置時期の判断結果の比較を示す。また、図-14にダム管理体制設置・解除の確信度の算定結果を示す。表4-8に示すように、システム、実操作とも19日1時に予備警戒体制設置の必要性を判断している。システムは、出水予備警戒体制設置確信度を自動算出し、しきい値0.3となったこと、および19日1時上流観測所における累計雨量が15mmに達したことから、表4-3の体制設置・解除の判定条件に基づき予備警戒体制を設置する必要があることを判断した。

また、洪水警戒体制の設置については、上流域の雨量の増加とともにシステムの洪水警戒体制設置確信度は急激に上昇し、出水の立ち上がりの3時間前の19日5時には、しきい値0.7を超え、体制設置の必要性を喚起している。システムの判断した時刻は、実操作より30分早い結果となっている。

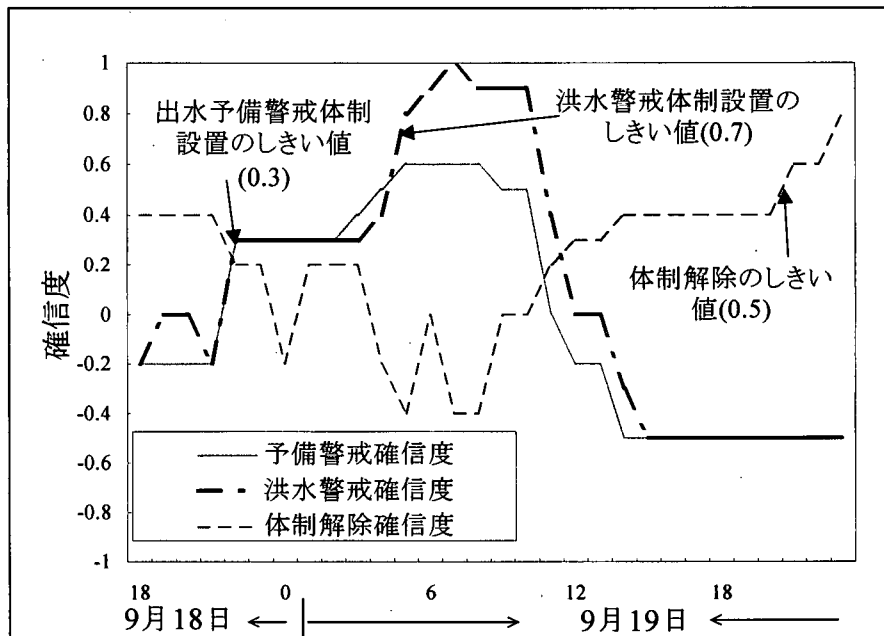
2) 1995 年 9 月 出水

1995 年 9 月 16 日に発生した出水は、数日間にわたる降雨によるものであり、洪水流量 $800\text{m}^3/\text{s}$ には到らなかった。表－8 および図－15 に実操作とシステムにおけるダム管理体制設置時期の比較および、ダム管理体制設置・解除の確信度の算定結果を示す。

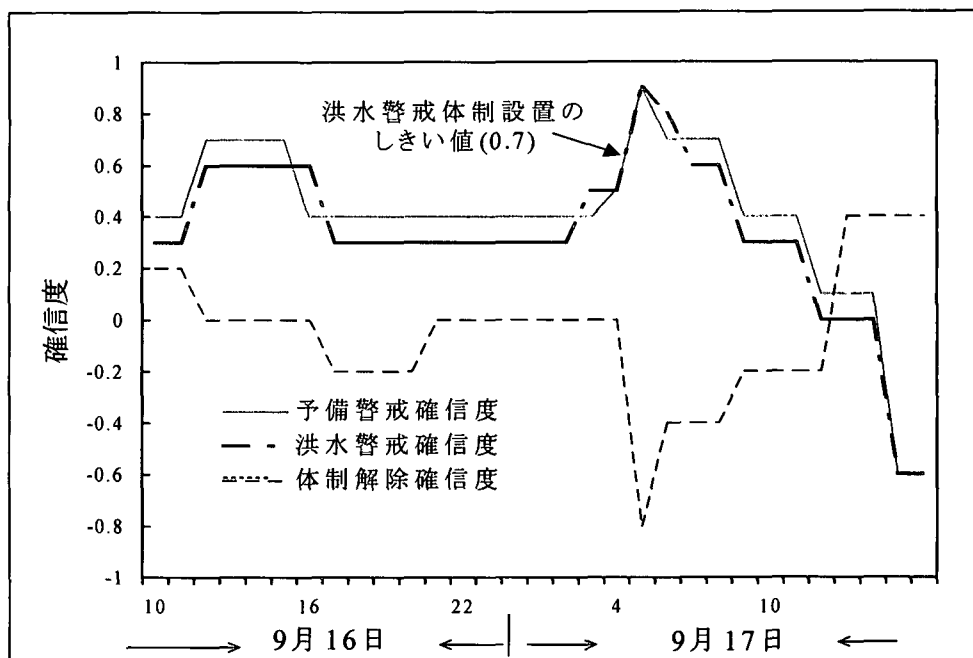
システムは、表－3 の条件に基づき上流観測所の連続雨量が 30mm に達した 9 月 15 日 9 時の時点で予備警戒体制の設置を判断し、ダム流入量が $150\text{m}^3/\text{s}$ を越えた 9 月 16 日 18 時に洪水警戒体制への設置を判断しており、実操作との時間差は 30 分から 1 時間程度であり、ほぼ同じタイミングでダム管理体制設置の必要性を判断している。

表－8 体制設置・解除タイミングの比較

	1991 年 9 月 出水		1995 年 9 月 出水	
	実操作	システム指示	実操作	システム指示
出水予備警戒体制の設置	9 月 19 日 01:00	9 月 19 日 01:00 (確信度 0.3 以上かつ上流観測所連続雨量が 15mm 以上)	9 月 15 日 08:30	9 月 15 日 09:00 (上流観測所連続雨量が 30mm 以上)
洪水警戒体制の設置	9 月 19 日 05:30	9 月 19 日 05:00 (確信度 0.7 以上)	9 月 16 日 17:00	9 月 16 日 18:00 (生坂ダム流入量 $150\text{m}^3/\text{s}$ 以上)



図－14 体制設置確信度の推移 (1991 年 9 月 出水)



図－１５ 体制設置確信度の推移（１９９５年９月出水）

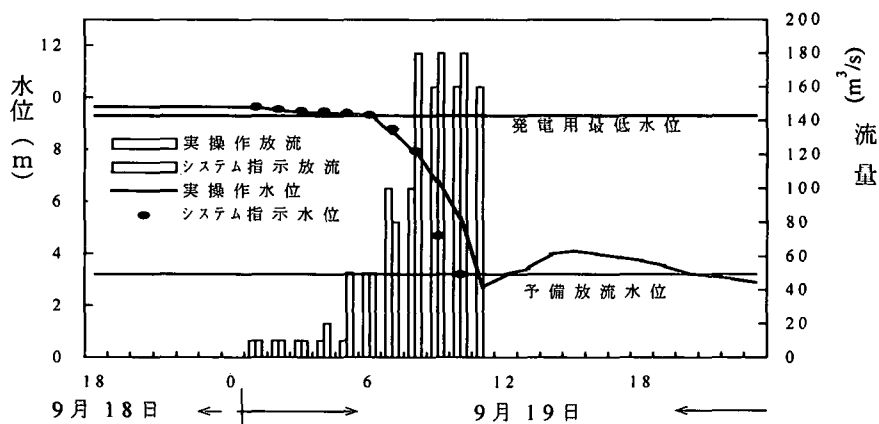
（２） 放流・貯留計画の策定結果の評価

１） １９９１年９月出水

図－１６に放流・貯留計画の策定状況を事例ダムでの実操作とシステム指示量を比較して示す。システムは、実操作よりやや早いタイミングで放流を行い、流入量が洪水流量の $800\text{m}^3/\text{s}$ に達する１時間前に貯水位を予備放流水位に低下している。

２） １９９５年９月出水

図－１７に放流・貯留計画の策定結果を、実操作とシステム指示量を比較して示す。システムは、実操作の上乗せ放流量に比べやや大きい放流量で放流を行い、早めに予備放流水位に達するような判断をしている。この結果は、当該台風の勢力が非常に強く（中心気圧 925hpa ）、ダム流域に向かった進路をとっていたことに起因するものと考えられる。



図－１６ 実操作とシステム指示量との比較（１９９１．９出水）

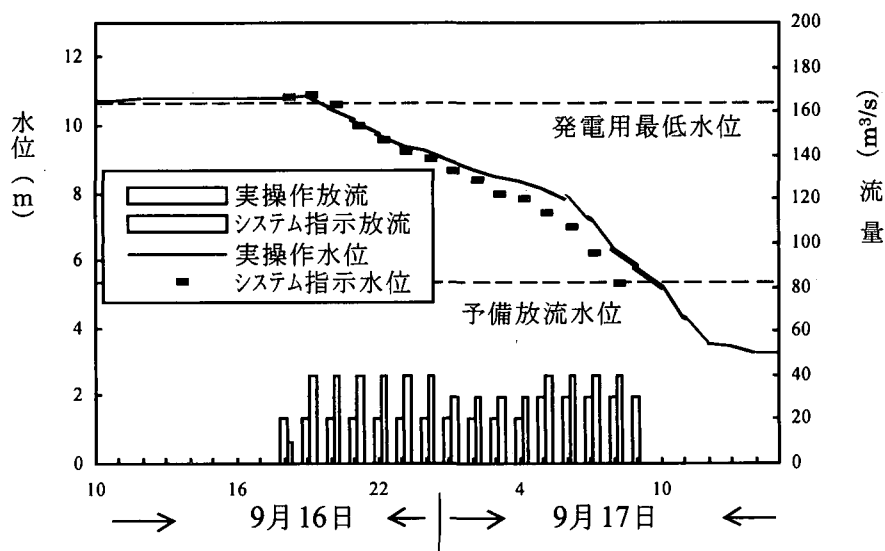


図-17 実操作とシステム指示量との比較(1995.9出水)

(3) システムの評価

1991年9月および1995年9月の2つの出水に対して、システムが判断する管理体制の設置時期および放流・貯留計画の策定結果は、経験豊富な技術者とほぼ同等であり、ダム管理主任技術者への効果的な支援が可能であると評価できる。

(4) 考察

本システムは、洪水時における複数ダムを管理するダム管理主任技術者を高度に支援するために開発したものである。特に、ダム操作の安全管理を基本に操作の簡便性、メッセージの判りやすさを十分に配慮して開発した。本システムにおける支援内容を、性質の異なる実洪水時における経験豊富なダム管理主任技術者の判断結果と比較した結果、ほぼ同等の判断内容を示しており、ダム管理の効果的な支援が行なえることが確認できる。

5. まとめ

近年、制御工学におけるファジィ理論・ニューラルネットワーク・オブジェクト指向などAI技術の発達にともない、水工学の分野でもAI技術を活用した貯水池操作モデルが数多く報告されている。しかし、それらはいずれも普遍的なシステムにはなっていないのが現状で、その理由として計算結果の分かりやすい解説と管理者への瞬時の対応が不充分であることが挙げられる。ここでは、貯水池操作をマスターした人工知能が存在し、それが熟練した管理者の代わりに適切な意思決定を行うプロトタイプと限定したうえでの意思決定支援システムを示したものである。

人間は既往の出水を自ら体験することにより、判断のために必要な情報をおのずと選択し判断できる知識として身につける事が可能である。その結果、様々な出水に対して的確な知識の適用を行い確実な操作が実現されてゆく。本論文では、このような人間の判断をシステム化できることを示し、また、その結果が実際の現象に有効に用いられているものでもある。

貯水池管理の問題は出水時という異常な状況下で、時々刻々と変化する状態に的確・迅速に対応する事が求められ、経験や知識が大きな効果を発揮する分野でもある。新しい世紀になり、AI技術のさらなる進展が予想されており、知識や知能がロボットとして再構築される事も話題になりつつある。経験・知識をシステム化し共有化できることは技術進展の最大の効用ともなり、水工学における知識システム、知識ロボットの具体化

の待たれるところでもある。

参考文献

- 1) AI 白書 (1991) : 人工知能の技術と利用、通商産業省機械情報産業局電子政策課監修、ICOT-JIPDEC AI センター編、財団法人日本情報処理開発協会発行、pp88-89
- 2) 小林重信 (1985) : プロダクションシステム、情報処理 Vol.26、pp1487-1496
- 3) S.M., Weiss, Kulilowski, C.A., and Safir.A. (1977) : "A Model-Based Consultation System for the Long Term Management of Glawcoma", Proceedings of IJCAI-77,pp826-831
- 4) M.Minsky(1979) : コンピュータビジョンの心理、白井・杉原訳、産業図書
- 5) L.D.Erman et al. (1980) : "The HEARSAY II speech understanding system : Integrating knowledge to resolve uncertainty." Computing Surveys,Vol12.2, pp213-354
- 6) Cox,B.J.(1988) : オブジェクト指向のプログラミング、前川守監訳、トッパン
- 7) 中野馨ほか(1989) : 入門と実習ニューロコンピュータ、技術評論社、pp28-48
- 8) L.A.Zadeh:Fuzzy Sets,Information and Control,Vol.8 (1965)
- 9) E.H.Mamdani and B.R.Gaines:Fuzzy Reasoning and its Applications, Academic Press (1981)
- 10) 西田俊夫、竹田英二 : 「ファジイ集合とその応用」、森北出版(1978)
- 11) 「特集 ファジイ理論と応用」、数理科学、No.284(1987)
- 12) 水本雅晴 : 「ファジイ理論とその応用」、サイエンス社 (1988)
- 13) 裏戸 勉(1993) : 洪水時のダム操作について、ダム技術、No.86、pp4-12
- 14) 中村隆幸・菅沼康男・伊藤一正・秋葉努(1993) : 出水時のダム放流操作を支援するエキスパートシステムの開発、第 18 回土木情報システム講演集、pp119-122
- 15) 菅沼康男・伊藤一正・秋葉努・榎間繁樹(1995) : ダム流入量予測へのニューラルネットワークの適用、水文・水資源学会 1995 年研究発表会要旨、pp194-195
- 16) 田中博・下井優一(1987) : エキスパートシステム構築の方法、パーソナルメディア
- 17) 室伏章郎(1986) : エキスパートシステムー理論と応用、日経マグローヒル株式会社
- 18) C.L. Forgy(1981) : OPS5 user's manual、Carnegi-Mellon Univ.、CMU-CS-81-135
- 19) 小林重信(1985) : プロダクションシステム、情報処理、Vol.26、pp1487-1496