

洪水制御支援のためのエキスパート システムに関する基礎的検討

高棹 琢馬・椎葉 充晴・堀 智晴

FUNDAMENTAL STUDY ON AN EXPERT SYSTEM FOR FLOOD DISASTER PREVENTION

By *Takuma TAKASAO, Michiharu SHIIBA and Tomoharu HORI*

Synopsis

The aim of this study is to establish a fundamental framework of the expert system to store, adjust and commonly utilize the knowledge and skill of river managers for flood disaster prevention. First, we show the total structure of the system in proper correlation with the data acquisition systems and the existing rainfall and runoff prediction systems. Second, the inference engine, which can treat the hierarchical knowledge to reduce the computational time of matching rules and data, is developed based on the production system. Third, the knowledge base for reservoir control is hierarchically structured and expressed in the form of production rules. Last, this expert system is applied to a real reservoir system for the discussion about future improvement.

1. 序 論

近年、洪水予測・制御に関する技術は、気象衛星、レーダ雨量計、AMeDAS等の近代観測技術の発展に支えられて、急速に発展しつつある。ところが、これら近代観測技術を備えた施設の配備が進むにつれ、河川管理者が洪水時に処理しなければならない情報の量は増加の一途をたどっている。すなわち、豪雨時に河川管理者は、時々刻々得られる雨量・流量の観測値および予測値といった定量的情報、さらに避難水防活動の進捗状況、過去の被災状況等の定性的情報を総合的かつ即時的に処理し、制御や管理のための判断を行うことが求められている。ところで、現在の河川管理システムでは、これら情報処理の技術は個々の河川管理者の資質や経験に負うところが大きいため、河川管理に関する定量的あるいは定性的な情報を処理するための経験・知識は蓄積・普遍化されにくく、河川管理のための共有財産とはなりにくいのが現状である。したがって、これら情報処理や意志決定を支援するシステムの必要性は極めて高いと考えられる。

一方、知識の蓄積・整理や定性的情報の処理の技術に関しては、最近、知識工学の分野で研究が進められており、医療や計算機の故障あるいは原子炉の故障に対する診断分野において開発が試みられている。土木工学の分野においても、構造物の設計、災害の復旧や交通情報の提供を支援¹⁾するシステムの研究が知識工学の考え方をういて進められつつある。知識工学における情報処理の考え方の特徴は、問題解決のために使われるであろう知識を一定の形式で記述し計算機上に知識ベースとして格納することによって、推論の流れを制御する部分とは独立に知識を管理しようとするところにある。したがって、知識の変更・

整理が行い易いとともに、個々の人間の持っている知識や経験を追加することが容易であり、知識の蓄積や普遍化に適しているという利点がある。

以上の点を考慮すれば、河川管理の分野においても、洪水あるいは渇水の管理に必要な定量的・定性的情報の処理や意志決定の技術を知識ベースとして整理するとともに、雨量や流量等の情報収集システムと結合したいわゆるエキスパートシステムを構築することができれば、管理ミスを防ぐとともに、知識の保守、管理及び蓄積を容易にし、問題解決能力の成長する河川管理システムを構築することができると考えられる。そこで本研究では、上記の洪水制御支援のためのエキスパートシステムの構築に向け、その基礎段階として、既存の洪水管理用ソフトウェアや情報収集システムとの整合性に留意したシステムの骨格と推論機構の構成を中心に検討を行い、今後の開発の基礎となるソフトウェアを開発する。

2. エキスパートシステムによる問題解決へのアプローチ

2.1 知識工学とエキスパートシステム

知的情報処理に関する研究の分野には、現在、2つの流れがある。1つは人間の知的活動のメカニズムそのものを研究対象とする分野で認知科学 (Cognitive Science) と呼ばれている。これに対し、人間の持つ知識を計算機上にデータ (知識ベース) として蓄え、現実の問題を解くためのマン・マシンシステム (エキスパートシステム) の開発を目的とする分野が知識工学 (knowledge engineering) と呼ばれている。知識工学は、スタンフォード大学の Heuristic Programming Project を通じて 1971 年 E. Feigenbaum によって提唱され、人工知能の応用分野として急速に発展しつつある。

知識工学における問題解決へのアプローチの方法では、問題解決に必要と考えられる知識をルールベースとして計算機上に蓄積し、このルールベースとは別に、推論を制御する機構を設けることにより知識の追加・再編・変更を容易にしているのが特長である。これに対し、従来の FORTRAN 等の手続き型言語を用いたシステムでは、問題解決のための知識と、その知識を利用する部分、さらに、両者が参照するデータがプログラムの中に一体化されて組み込まれており、後に、システムの改良・拡張が必要となった際にプログラムあるいはシステム全体を見直すことが必要になるため、知識の追加・変更が容易でないこと、知識の追加によってプログラムが巨大化していくこと等の難点がある。さらに、数値化されず文の形で記述されるような定性的な知識については従来のプログラミング言語では取り扱いにくいため、リスト処理言語と呼ばれる Lisp が開発され多用されている。近年、エキスパートシステム開発のための言語として、Lisp 以外に PROLOG, OPS 5, OPS 83, SMALLTALK なども開発されているが、本研究では、推論機構の作成が最も柔軟に行い得るという点に注目し、Lisp を採用することにした。

2.2 プロダクションシステム

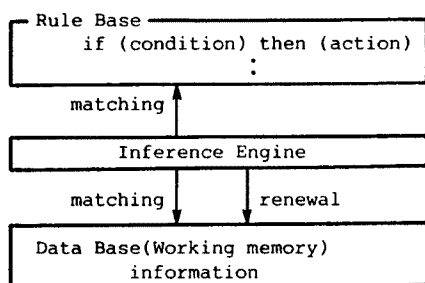


Fig. 1. Schematic structure of production system.

エキスパートシステムの構築に際して、知識の記述や推論の機構としてもっとも広く採用されている方法にプロダクションシステム²⁾がある。プロダクションシステムは、処理対象のデータを種々の規則を用いて書き換えて行くことにより推論を進める方法であり、Fig. 1 に示すようにルールベース、データベース (ワーキング・メモリ)、推論エンジンと呼ばれる3つのサブシステムからなっている。

ルールベースは、推論に用いられるルール群を格納する部分である。プロダクションシステムにおけるルールは、主に、データベース内のデータを書き換える為の規則という形で整

理され、

IF (条件) THEN (結論・行為)

という前提→結論の対として記述されている。また、データベースは、推論対象の現在の状態を記述する事実情報が格納されている部分であり、推論の進行に応じてその内容が書き換えられていく。推論エンジンは、推論活動の流れを管理する部分である。

上記三者が相互に関連して、推論は次のように進められる。まず、推論エンジンは、データベース内に格納されている事実情報をもとに、ルールベース内を検索し、条件部が事実情報と一致するルールを選び出す。次に、選び出したルールの結論部を実行することにより、データベースに最初に格納されていた事実情報を新たな情報に書き換える。これら一連の作業は認知—実行サイクルと呼ばれ、一つのサイクルで書き換えられた情報に関してさらに適用すべきルールがないかどうかを検索し、次のルールを適用していくことによって推論が進められる。

プロダクションシステムの長所としては、ルール部の独立性が保たれており、ルールの追加、変更が比較的容易に行い得ること、IF-THEN形式のルールは断片的な知識でも整理し易いこと、さらに、ルールの意味が理解し易いため簡単な説明機構を別に用意することにより、推論の筋道をたどり易いことなどが挙げられる。逆に、短所として、ルールとデータの照合がその実行時間の大部分を占めるため、ルール数が増加すると実行速度が低下することがある。本研究では、4. でルールのモジュール化を図ることによりこれらの短所を克服する方法を考察する。

3. ダム管理におけるエキスパートシステムの意義について

洪水時のダム管理は、その放流操作によって下流地点の流量を調節し洪水災害を防ぐとともに、ダム構造物自体の安全をも確保しなければならず、これらを適切に行うために管理主任技術者をおくことが義務づけられている³⁾。さらに、各ダムにはその操作が安全、容易かつ確実に行われることを目的とした操作規則が定められている。操作規則は、過去の出水やその制御の記録、あるいは同一流域内に存在する他のダム群の操作との相互関係を配慮して定められたものであって、エキスパートシステムを構築しようとする立場からみれば、操作規則自体が一つの知識ベースであるということが出来る。しかし、洪水調節の方法が操作規則として一旦明文化されてしまうと、往々にして固定化し、規則制定時以後に明らかになったり獲得されたりした知識が洪水調節の運用に生かされないといった事態も生じ得る。さらに、操作規則といえども、その適用を行う際には、河川管理者の判断を要求している部分があり、これらの判断を行う技術は、雨量や流量の予測技術とともに、河川管理者個々の資質や経験によることも少なくない。したがって、洪水の制御に関して河川管理者が持つ知識や経験を一定の形式で整理し蓄積することができれば、出水の経験を共通の財産とすることができ、その機能を次第に成長させていくことが可能となるとともに、管理に伴うミスをも防ぐことができると考えられる。

一方、ダム貯水池の操作は、規則に基づくものの他に、数値シミュレーションによる実時間最適操作があり、これまでにDP理論を用いる方法を中心に種々の方法が検討されている⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾。これらの方法は、降雨予測や流量予測の成果を取り込みつつ時々刻々最適な洪水調節の解を求め実行していく、いわば適応制御方式であり、ある意味では、操作規則にもとづく現行方式とは相対するものである。この点について、稲田⁶⁾は、操作規則による操作を通常操作とし、計画規模を上回るような洪水に対しては、最適操作を用いるべきであるとして、両者の淀川流域への適用を通じてその関係を議論している。しかし、ダム貯水池の計画段階では、一定率放流方式が仮定されてその調節効果が評価されることが多く、完成後の操作方式も、この計画段階における評価と対応したものにすることが必要であること、あるいは、新たな操作方法を導入した場合の責任の所在などの問題もあり、未だ放流量の決定の中心は、各ダムに設定された操作規則によ

る方法が中心を占めている。

したがって、今後、これら貯水池制御に関する研究の成果を実河川管理の分野に広く適用していくためには、雨量や流量の予測手法や各種制約条件下での放流量最適化方式をも一つの知識ととらえルールベース化する一方、各種最適化方式によるアウトプットと操作規則との対応も含め、河川管理者の経験・知識を付加した総合的な判断を行うための知識、言い替えれば知識を利用するための知識を備えたエキスパートシステムの開発が不可欠となると考えられる。

4. ダム操作支援エキスパートシステムの構築

4.1 システムの全体構成

通常、洪水時のダム操作においては、河川管理者は一定時間間隔で送られてくる気象情報や雨量、流量データをもとにして、ダムへの今後の流入量やダム下流の評価地点の流量を予測するとともに、これらのデータをダム管理規則に照らし合わせることにより、洪水調節計画を立てて放流量を管理している。したがって、これら一連の手続きをエキスパートシステムとして構成するためには以下の点に注意する必要がある。

- (1) 雨量予測や流量予測などの定量的情報を処理するシステムは既に開発され各管理者レベルで使用されているものが存在すると考えられるから、新たに構成される支援システムは、これら既存の定量的情報処理システムとのインターフェイスが容易でなければならない。
- (2) 洪水管理において意志決定の基礎となる定量的情報は、テレメータ等から一定時間間隔ごとに自動的に送られてくるものであり、これら情報収集システムとの結合が容易でなければならない。
- (3) 時々刻々の放流量を決定するだけでなく、今後の放流計画を立てるためには、現在行った意志決定が一定時間後にどのような結果を引き起こすかを必要に応じてシミュレーションできるものでなければならない。

本研究では、以上の点を考慮し Fig. 2 に示すシステム構成をとることにした。まず、データ収集システムとの整合性を保つためデータの転送されてくる時刻と推論の開始すべき時刻を管理し、新たなデータが入手された場合に推論実行部が推論を実行する環境を整理する。推論実行部では、転送されてきた雨量・流量データを基に放流量管理ルール群に基づく推論を行い推薦すべき放流量を決定する。推論の過程で流量など今後の予測値が必要になれば、ユーザーにその旨を通知するとともに、推論環境を保存し推論の実行を一時中断してシステムの管理を手続き型知識システムに引き渡す。手続き型知識システムは、収集されたデータをもとにダムへの流入量や下流地点の流量の予測を行うソフトウェア群からなり、計算結果をユーザーに通知するとともに、ファイルを通じて計算結果を推論システムに返す。推論システムでは、ユーザーからの要求を受け、手続き型知識システムからの出力結果を情報に加えさらにルールに基づいた推論を実行する。以上の手順で支援システムは新たな情報を入手するたびにルール群に基づいた推論を行い、推薦するダムの放流量、その放流量を採用した際の下流地点の流量・水位の予測結果を表示し、一つの推論サイクルを終了する。

本研究では、推論システムを SONY Tektronix 人工知能開発システム 4404 上に FRANZ LISP を用いて実現するとともに、流出予測を行う手続き型知識システムを SONY Tektronix ワークステーション 4132 上に FORTRAN を用いて構成し、これら両システム間のデータのやりとりをユーザーを介した形あるいはファイルの転送といった形にすることで、実河川管理システムとの対応を図っている。各河川管理所レベルでは手続き型情報処理システムの大部分を既存のソフトウェア群と置き換えることにより容易にシステム構成を行うことができる。

さらに (3) の問題に対処するため、推論システムでは、ユーザーへの問い合わせの際に、命令に応じ

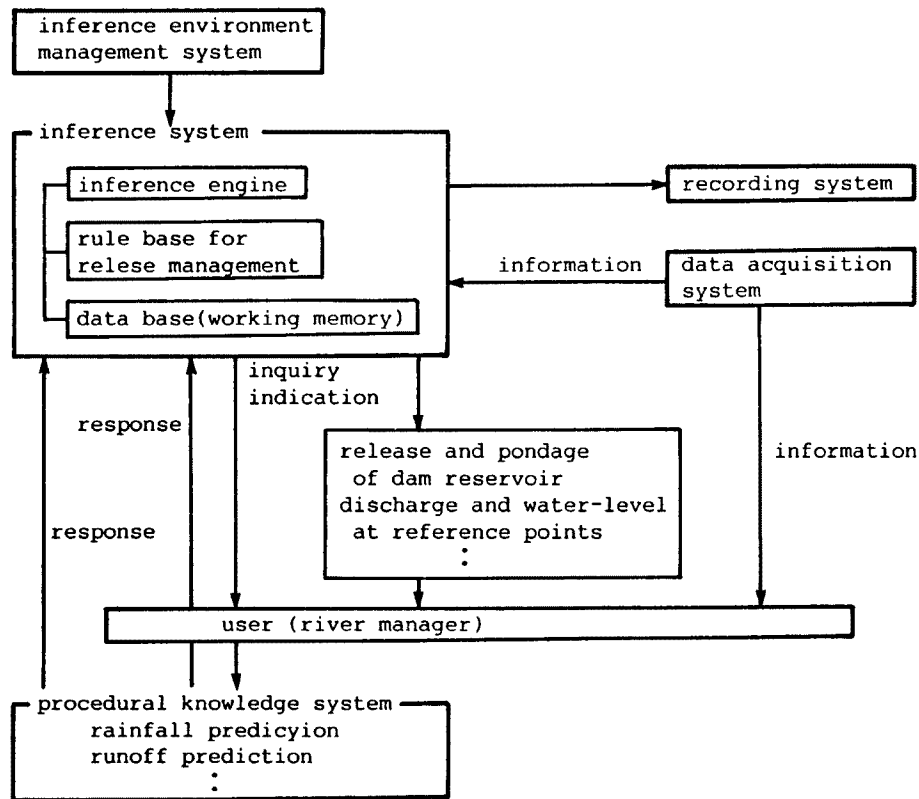


Fig. 2. A whole structure of the expert system for flood disaster prevention.

て現在の推論環境を保存したまま、仮に、時刻を前に進めて流出予測の結果等を用いて将来の任意の時刻までの推論過程をシミュレーションすることができる機能を付加している。

4.2 推論機構の開発

推論システムは、データ収集システムから得られた現在の雨量・流量などの事実情報とルールベース内に格納されているルールの条件部を照合し、ルールの結論をデータベースに対して適用することによって推論を行い、推薦すべき放流量を決定する部分である。洪水制御の分野では、推論の基本となる事実情報は、テレメータ等から送られてくる各地点の雨量・流量あるいは水位などであり、比較的その種類・数が限定されているため新たな情報収集が困難なこと、また、推論を行い決定した行動が次の時刻の行動に影響を与えることなどを考慮し、推論機構として事象駆動型のプロダクションシステムを採用する。

特に本研究では、今後のルールの蓄積や変更に対応できるとともにより柔軟なルール記述を可能にするため、2.2で述べたプロダクションシステムの基本的な認知—実行サイクルに次の機能を付加した推論エンジンを開発した。

- (1) データベース内のデータとルールの照合に際して、記号データの完全一致だけでなくルールの条件部にワイルド・カード（照合に際してその記号の照合は行わない）を使用できる。
- (2) ルールの条件部に変数の使用を許し、照合に際してデータベース内のデータを変数に代入し、ルールの結論の実行時にそれらの変数の値を参照・使用することができる。
- (3) ダムの貯水量の計算等比較的単純でルールを変更しても変化しない知識は直接 Lisp で記述した関数を使用することを想定し、ルールの実行部だけでなく条件部でも関数の実行を指示することができる。

- (4) データベース内の事実情報とルールの照合にかかる時間を節約するため、毎時刻固定的に得られる流量水位等の情報はデータベースに記述するのではなく専用の変数に代入して保存し、ルールの条件部および実行部に記述する関数から直接その値を利用できる機能を付加している。
- (5) ルールが大規模化・複雑化した場合に備え、ルールベース内のルールを分類しいくつかのグループとし、推論の進行に応じてこれら複数のルール群を切り替えて使用できるようにすることによって、ルール群の保守の利便性を高めるとともにルールとデータの照合にかかる時間の節約を図っている。

4.3 知識ベースの構成

洪水の制御とりわけダム操作に関しては、実河川では個々のダムの放流規則に基づいて放流量が決定されること、河川管理者が比較的短期に移動することなどから、医療分野のようにエキスパートが存在するかどうかが問題であるが、放流規則自体例えば「ダムの流入量が最大に達した後……」というように管理者の判断を前提にしたものが多々あり、実際の操作は河川管理者が、入手した雨量・流量情報、予測値及びその精度等を基に総合的な判断を行って放流量を決定していると考えられる。そこで本研究では、ダム操作のためのルール群を、ダム操作規則に定められた放流管理ルールを基本として5つのグループに分割し Fig. 3 に示す構成を取ることにした。

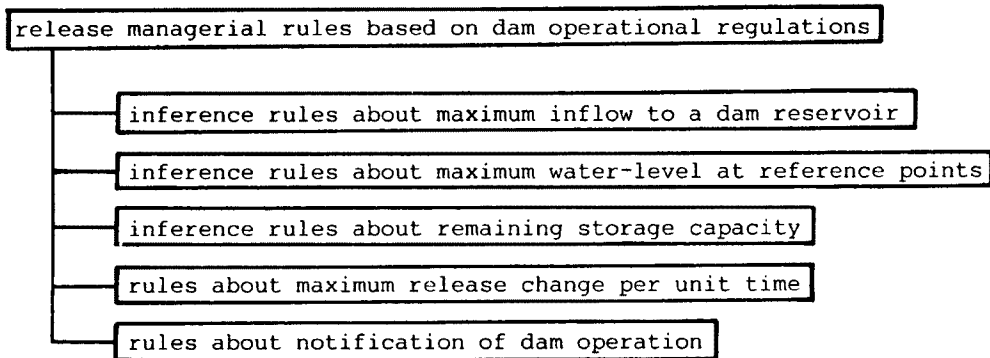


Fig. 3. A knowledge base of the expert system for dam control.

まず、操作規則に明確に規定されている放流方式については「ダム操作規則による放流量管理ルール」の部分に整理し、規則が管理者に要求する判断をサポートするルール群及び付随的な規則をその下位レベルのルール群としてルールベースを構成する。下位レベルのルールには、「評価地点の水位最大の判断ルール」、「ダム流入量最大の判断ルール」、「ダム貯水量を考慮したダムの安全性に関するルール」、「単位時間当りの放流量の増減限界に関するルール」、「放流連絡等通知に関するルール」がある。これらの下位ルールのうち前三者がいわゆるエキスパートの判断をモデル化する部分であって、雨量・流量の観測結果や予測結果およびその精度をもとにし、評価地点の水位が最大に達したと判断してよいかどうか、ダムへの流入量が最大に達したと判断してよいかどうか、あるいは、ダム貯水池に今後流量調節のための十分な空き容量があるかどうかの判断の支援を行なう知識からなる。以上のようにルールをその性質に応じて分割、階層化することにより、ルールとデータの照合に要する時間の短縮を図るとともにルールの書換えや追加等ルールの成長のための作業の簡単化を図っている。

5. 適用と考察

5.1 適用流域と対象洪水

4. で構成した洪水制御支援のためのエキスパートシステムを、淀川流域宇治川に位置する天ヶ瀬ダムの管理を例にとり適用を行う。対象となる流域は、Fig. 4 に示すように、天ヶ瀬ダムへの流入部から木津川、木津川との三川合流地点を経て枚方にいたる部分である。適用洪水は1982年の10号台風によるものであり、天ヶ瀬ダムへの流入量、宇治発電所の放流量、桂川からの流入量として納所地点の流量、木津川からの流入量として八幡地点の流量は流量観測テレメータの値をそのまま用いることにした。また、淀残流域からの流入量は槇尾山、宇治発電所および淀地点の流量のテレメータ値から逆算して推定するとともに、枚方残流域からの流入量は、枚方地点の流量のテレメータ値から枚方上流河道の貯留関数を逆算することにより河道上流端流量をもとめ、これと高浜地点の流量のテレメータ値とを比較することにより推定した。

5.2 エキスパートシステム開発過程での洪水管理モデル

本研究で開発した洪水制御支援システムは、時々刻々得られる雨量・流量等の情報をもとに、知識ベースに蓄えられたルール群に基づいて、各時刻において適すと考えられる放流量を推論によって求め、放流量管理を支援するものであり、河川管理の現場では、Fig. 2 に示した構成で運用されることを想定している。したがって、開発するシステムをより現実的なものとするためには、Fig. 2 に示す洪水管理システムの内、データ収集に関する部分は計算機上でのシミュレーションによって構成しなければならない。そこで本研究では、エキスパートシステム開発過程における洪水管理モデルとして、天ヶ瀬ダムの流入量をエキスパートシステムに転送する部分と推論により決定されたダム放流量を受けて下流地点の流量・水位を再現する部分をワークステーション上でのシミュレーションで構成し、Fig. 5 に示す構成として適用を行う。まず、データ収集シミュレータでは、

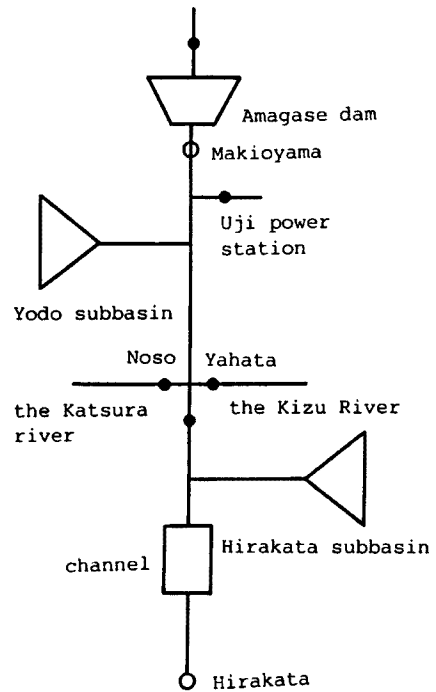


Fig. 4. Schematic of applied dam reservoir system.

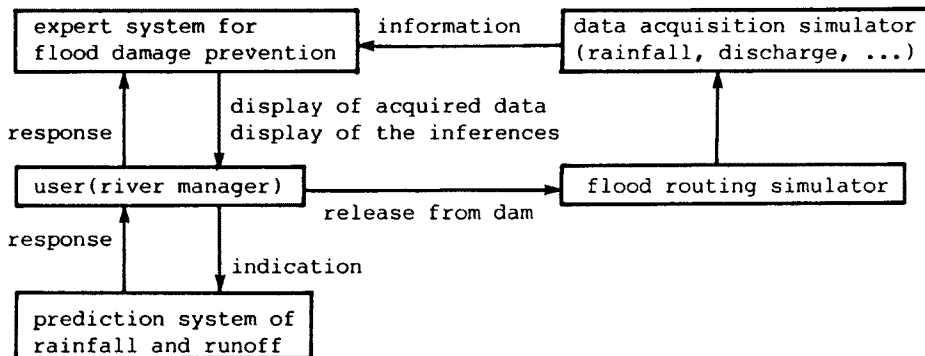


Fig. 5. The river management model in the development stage of the expert system for flood damage prevention.

天ヶ瀬ダムの流入量の実績値と洪水追跡シミュレーションの結果を受け、時間の経過にともなって、現時刻におけるダム流入量、ダム貯水量、槇尾山地点の流量、枚方地点の水位のデータをファイル転送の形で、4404上で稼働している推論システムに引き渡す。推論システムでは、新たなデータが転送されて来たことを確認し、転送されてきたデータをもとにルールに基づいた判断を行い推薦すべき放流量を決定し表示する。ワークステーション上の洪水追跡シミュレータでは、決定された放流量をもとにダム下流から枚方地点までの洪水追跡計算を行い、その結果をデータ収集システムに引き渡す。以上のモデル構成は、洪水の実現象の部分の推論システムが稼働している計算機とは別の計算機上でシミュレートすることにより、河川管理の現場との対応を図ったものである。本適用例では、ダムの放流量の単位時間当りの増減量がダム直下流の槇尾山地点の流量に応じて制限されることから、放流量管理のための推論は15分間隔で行うものとし、データ収集シミュレータからのダム流入量、貯水量、枚方地点の水位の転送は、テレメータが通常1時間単位でデータを転送して来ることを想定し、1時間間隔とした。

5.3 ダム操作ルール

まず、「ダム操作規則に基づく放流量管理ルール」については、天ヶ瀬ダムの操作規則⁹⁾をもとにして以下のものを作成した。

- (1) ダムへの流入量が840 m³/s以上のときは、840 m³/sを放流する。
- (2) 枚方地点の水位が警戒水位を越えた時、
 - (a) 流入量が840 m³/sを越え、最大に達するまでは840 m³/sを放流する。
 - (b) 流入量が最大に達した後、枚方の水位が最大に達するまでは160 m³/sを放流する（これを2次調節と呼ぶ）。ただし、2次調節に必要なダムの空き容量が不足すると予想されるときにはこの調節の開始時刻を遅らせることができる。
 - (c) 枚方地点の流量が最大に達した後には840 m³/sを限度として放流量が流入量に等しくなるまで放流する。
- (3) (2)、(3)にあてはまらないときは放流量が流入量と等しくなるまで放流する。

また、放流量の連絡、およびダムのゲート操作を行うために必要な時間を考慮し、推論で決定された放流量に実際に移行するのは放流量決定時刻の30分後とした。

上記放流規則の中で放流量の決定において管理者の判断が必要とされるのは、ダムへの流入量が最大に達したか、枚方地点の流入量が最大に達したか、今後の調節に必要な貯水池容量が不足する可能性があるかどうかの三点である。これらの判断は、管理者が降雨・流量の観測値・予測値といった定量的情報に加え、過去の出水経験や被災状況等の定性的情報を参考にして行うものであり、その判断の適否は既に述べたように個々の河川管理者の資質や経験に依存する。本適用例では、開発の第1段階として、流量、水位の最大については過去3時間のデータがすべて減少傾向を示したときに、既に最大に達したと判断することにした。ダムの空き容量については、推論時のダム流入量が2時間後まで続くことと仮定して判断することにした。また、ダム容量が不足するかどうかについての判断は、次の手順で判断した。推論を行う時刻から30分先までの放流量は既に前回（15分前）および前前回（30分前）の推論サイクルで決定されているから、現時刻で決定する放流量を30分前から2時間先まで適用するものとし、流入量については推論時の流入量が2時間続くことと仮定して2時間後のダムの貯水量を計算し、この値がダム貯水池の容量を越えるとき、ダム容量の不足する可能性があるものとする。

以上の判断はすべて推論時刻およびそれ以前の定量的情報のみによっており、雨量・流量等の予測や定性的情報をも加えたルールにしていく必要があるが、本研究の目的が洪水制御支援のためのエキスパートシステムの構築に必要な基本ソフトを開発しシステム構築上の問題点を探ることにあることから、上記ルールの適用結果を通じて今後の改良方向について議論することにする。

5.4 システムの挙動と適用結果

まず、知識ベース内のルール群に基づくシステムの推論の流れを具体的に検討する。例として、8月2日6時15分における放流量決定のための推論を取り上げる。この時刻にデータ収集シミュレータから転送されてきたデータを Table 1 に示す。さらに、この時刻の推論の各ステップでのデータベースの内容と適用されたルールのうち主なものを Fig. 6 に示す。以下、Fig. 6 にしたがって推論の流れを見ると次のようになる。

- (1) 推論にはいる前のデータベースの内容は推論環境管理部によって 'init' とされている。この時点で新しくデータが転送されてきたことが確認されたので推論を開始することにし、データベースに次の処理を記述する (*move, *add-db はデータベースの記述の削除及び追加のために作成した関数である)。この時点で使用しているルール・セットは推論の準備と放流量管理規則に関する Rule-1 である。
- (2) 転送されてきたデータを取り込み (*file-access 2), 次の処理をデータベースにかく。
- (3) まず枚方の水位が警戒水位以上なのでデータベースにその旨記述し (hirakata-over), 次のチェック項目を加える (hirakata-check, qin-start) とともに使用するルール群をダムへの流入量の最大に関するルール・セット Rule-qin に切り替える。
- (4) 流入量が既に最大に達したかどうかの判断を行う (*after-max-p). \$qin-vector は過去の流入量データを保存している変数である。ここでは、既に過

Table 1. Aquired data at 6 : 15 on the August 2

dam inflow	737m ³ /s
flow discharge at Makioyama	840m ³ /s
water-level at Hirakata	5.0m
pondage of dam reservoir	1.53×10 ⁷ m ³

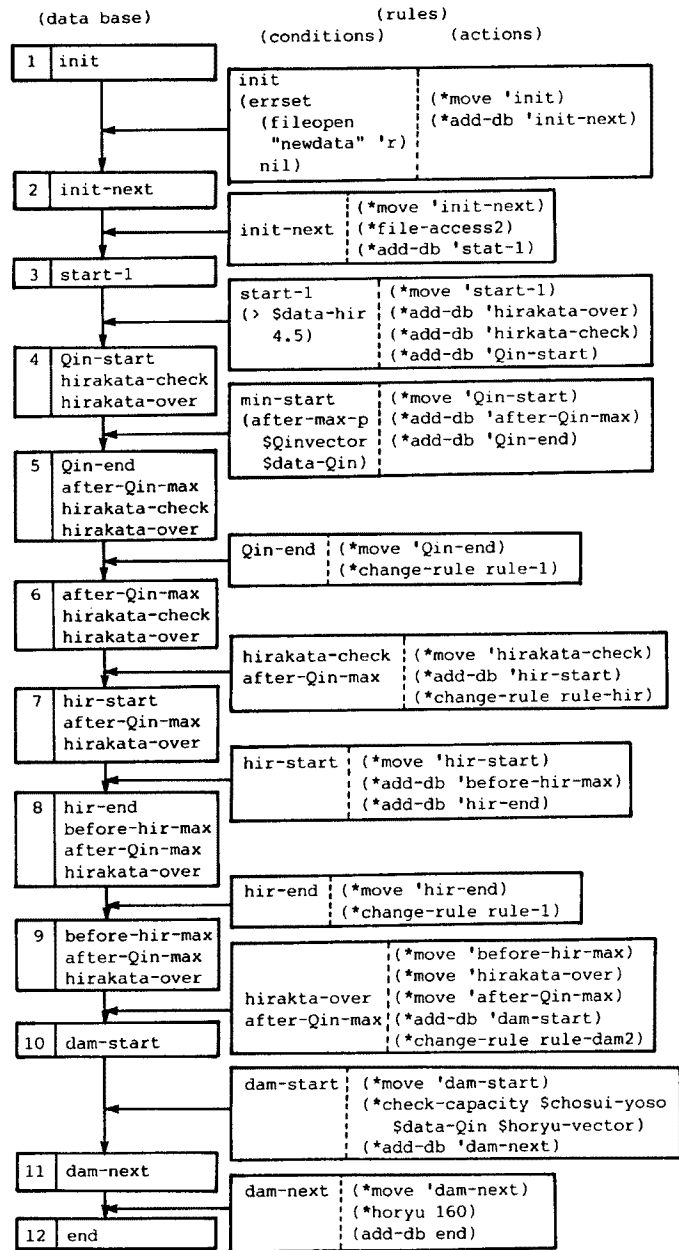
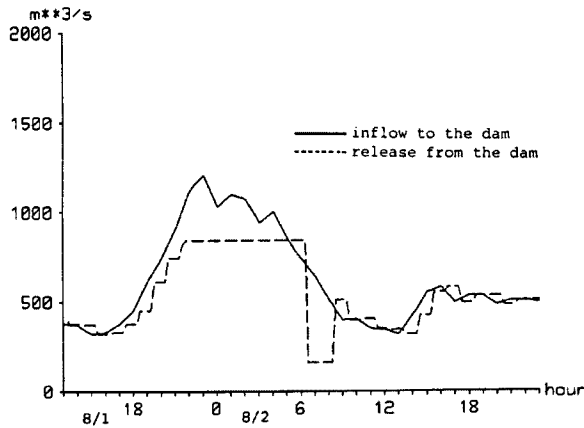
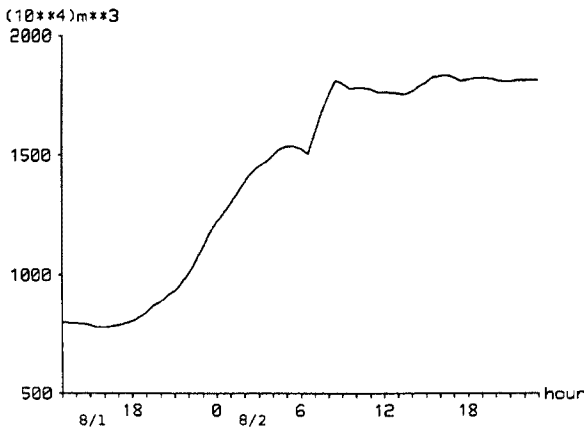


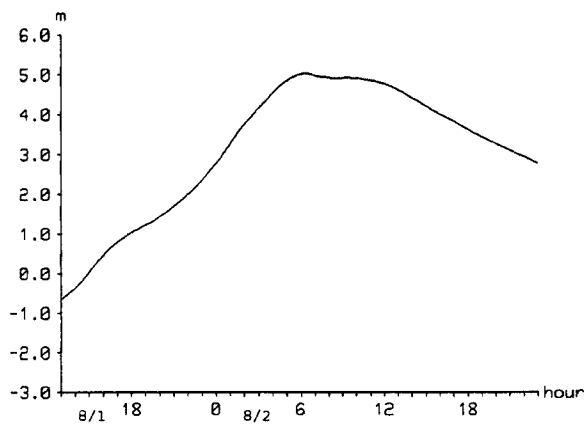
Fig. 6. The inference process of the decision on the release.



(a) inflow to and release from Amagase dam reservoir.



(b) pondage of dam reservoir.



(c) water-level at Hirakata.

Fig. 7. The results of dam controls by the expert system.

去3時間の流入量が減少傾向を見せているため、最大に達していると判断しその情報をデータベースに加える (after-qin-max) とともに Rule-Qin による推論が終了したことをデータベースに加える (Qin-end)。

(5) 流入量に関する推論が終了したので推論の管理を Rule-1 に戻す。

(6) 次のチェック項目として、枚方の水位が最大に達したかどうか (hirakata-check) を検出し、使用するルールを枚方地点の水位最大に関するルール・セット Rule-hir に変更する。

(7) 枚方の水位が最大に達していないと判断された (Rule-hir の中で枚方の水位が最大に達した場合のルールに適合していない) ので、その旨をデータベースに加える (before-hir-max)。

(8) 枚方地点の水位最大に関する推論が終了したので、使用するルールを Rule-1 に戻す。

(9) 流入量が最大に達し、枚方地点水位がまだ最大に達していないと判断されたため、二次調節に関するルール (Rule-dam 2) を起動する。

(10) 二次調節に必要な容量が今後直ちに不足するような事態が生じないかを流入量が現在値を維持するという仮定のもとで2時間後の貯水量を予想し (* check-capacity), その値を変数 \$chosui-yoso に格納する。

(11) \$chosui-yoso の値から不足しないと判断されたので放流

量を $180 \text{ m}^3/\text{s}$ とする。

推論で決定された放流量は過去の流入量、放流量、貯水量、枚方の水位等の変化およびこの放流量を採用した際のダム貯水量、枚方地点の水位の予測値とともに表示される。この時点でユーザがエキスパートシステムの表示した情報を確認し、もし他の放流量を採用するのであればそれを入力することもできる。1回の推論に要した時間は概ね1秒程度であった。

上記の推論過程では、ダムへの流入量、貯水量、枚方地点の水位等毎時間固定的に利用する定量的情報はデータベースの中に記述するのではなく変数の値として保存し利用している。データベースの内容の変化を追って推論の流れを確認するという点からは推論に用いられる情報はすべてデータベースに明示されるほうがわかりやすいが、推論の速度を高めるという立場からはこの様に固定的に利用する情報は変数に代入し推論時に直接利用できる構造にする方が有利であろう。本適用例では、ルールは比較的単純なものとしたが、今後、さらに雨量・流量の予測値や定性的情報を利用するためのルールを整備していく必要があること、洪水制御のようにリアルタイムで推論を行わなければならない場合には推論の速度が実用上重要な問題となるであろうことを考慮すれば、このような推論速度の向上を図る工夫は不可欠である。

以上の推論を15分ごとに行い、1982年8月1日12時から2日23時までの放流量を決定した結果をFig. 7に示す。本適用例では、ダムへの流入量が最大に達したかどうかを過去の変化状況のみから判断しているため、二次調節に移る時期が実際に水位が最大となる時期よりも遅れている。流入量最大に関しては今後予測値を利用することを含めさらにルールの改善を図る必要がある。

6. 結 語

本研究では、洪水制御支援のためのエキスパートシステムの構築に向け、その基礎段階として、既存の洪水管理ソフトウェアや情報収集システムとの整合性に留意したシステムの全体構成と推論機構を中心に検討を行い、今後の開発の基礎となるソフトウェアを開発した。以下に得られた成果を要約する。

- (1) 洪水制御問題への知識工学的アプローチを試み、既存のデータ収集システムや定量的情報処理システムとの整合性を保持したエキスパートシステムの構成法を検討するとともにその概形を示した。
- (2) 推論エンジンとして事象駆動型のプロダクションシステムを採用し、洪水制御への適用を図るため、その基本的な認知—実行サイクルにルール内での変数の使用やルールをグループ化し必要に応じてグループを切り替えて使用できる機能を付加した推論エンジンを開発した。本推論エンジンは、洪水制御分野だけでなく、他分野でのエキスパートシステム開発にも使用できる一般的なものである。
- (3) ダム操作に関するルールを、ダム管理規則を中心として分類・整理するとともにプロダクションルールの形で記述し、実河川モデルに適用することによって、エキスパートシステムの河川管理分野への適用性について考察した。
さらに、今後の課題として、
- (4) 本研究で作成した知識ベースは、現在及び過去の定量的情報にもとづいて推論を行うものであり、今後、より高い処理能力を持ったシステムを構築するためには、雨量・流量の予測値や定性的情報を処理するための知識ベースを構築する必要がある。
- (5) 本研究では、洪水のピーク付近の制御を対象として適用を行ったが、今後、予備放流や洪水処理から低水処理への移行、さらには、台風や低気圧が日本に接近してきた時点から管理事務所のとるべき体制等、河川管理業務をトータルに支援できるエキスパートシステムについて検討を加えなければならない。
- (6) 知識ベースは、現場での利用を通じて改良されていくべきものである。したがって、知識ベースの改良をより容易にするためにはルールの書換え等を補助する機構を用意する必要がある。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費補助金（課題番号62601020，研究代表者：高棹琢馬）の援助を受けた。記して謝意を表す。

〈参考文献〉

- 1) 秋山孝正・堀田徹哉：交通制御エキスパートシステムについての考察，土木計画学・論文集5，pp.91-98，1987.
- 2) 斎藤正男・溝口文雄：知的情報処理の設計，コロナ社，1982.
- 3) 土木学会編：土木工学ハンドブック，中巻，p.1446，1974.
- 4) 高棹琢馬・瀬野邦雄：ダム群による洪水調節に関する研究（1）—DP利用とその問題点—，京都大学防災研究所年報，第13号B，pp.83-103，1970.
- 5) 小尻利治：ダム貯水池群による水量・濁質制御に関する研究，京都大学学位論文，1980.
- 6) 稲田裕：貯水池群による淀川水系の最適洪水調節に関する研究，京都大学学位論文，1976.
- 7) 椎葉充晴・高棹琢馬・張昇平・児玉好史：統計的二次近似手法を用いたダム貯水池群実時間操作，第31回水理講演会論文集，pp.293-298，1987.
- 8) 建設省近畿地方建設局淀川ダム統合管理事務所：淀川の洪水管理.