

分散協調問題解決モデルを用いた洪水制御支援システムの設計

高棹琢馬・椎葉充晴・堀 智晴・佐々木秀紀

DESIGN OF FLOOD CONTROL SUPPORT SYSTEM BASED ON A DISTRIBUTED KNOWLEDGE-BASE MODEL

By *Takuma TAKASAO, Michikaru SHIIBA, Tomoharu HORI and Hideki SASAKI*

Synopsis

In this study, we design a flood control support system based on a distributed knowledge-based model, which can deal with various types of information necessary for flood control and facilitates changes, additions and corrections of the knowledge base. The system proposed here is composed of five distributed knowledge-based systems, each of which comprises an inference engine, a data base and a knowledge base of a production system and deal with a partial issue of the flood control problem. The whole back up information for flood control is made in the process of the inference in each knowledge based-system and communication among them and provided to the user through a graphical display system. This flood control support system is applied to the real reservoir system for the discussion about future improvement.

1. 序 論

洪水の管理は、雨量・流量・水位等の観測データによる現状把握に始まり、これら定量的データをもとにした予測計算、観測データ・予測データと洪水制御規則との照合を経て、意志決定、及びその関係方面への指示に至る極めて多種・多量の情報処理を伴うプロセスから成る。このプロセスの中で要求される意志決定は、洪水の状況に応じて過去の出水経験や避難・水防活動の進捗状況、さらに気象情報をも考慮に入れた総合的なものであるとともに、管理の時間的な遅れが生じないよう即時的なものであることが要求される。さらに、以上の一連の現状把握から意志決定、指示・連絡に至るまでのプロセスは、洪水の継続期間中一定時間間隔あるいは不規則に繰り返されるものであるため、洪水の管理に携わるものは長時間極度の緊張状態に置かれることになり、情報の見落とし等に伴うミスを起こす危険にさらされることにもなる。したがって、これら洪水制御を総合的に支援するシステムの必要性は極めて高い。

ところで、洪水制御を総合的に支援するためには、定量的情報のみならず、定性的な情報の処理や言語形式で表される規則や知識をも包含した情報の処理技術が必要であるとともに、支援システム稼働後も新たな知識を容易に追加できることが必要である。そこで、筆者ら¹⁾は、洪水管理の際に必要な知識をプロダクションルールの形式で計算機上に記述・整理し、洪水時に時々刻々得られる流量・水位などの観測データ・予測データを用い、知識ベースに基づく推論を行うことによって各時刻のダム操作を支援するシステムについて検討してきた。特にその中で、既存のソフトウェアとの整合性に留意した洪水制御支援システムの全体構成を示すとともに、知識の整理に関してはルールベースの階層的構成を提示し、ルールのモジュール化による知識の追加・保守の利便性と推論速度の向上を図っている。しかし、洪水管理に用

いるべき情報やそれらを処理する知識は、今後も増加の一途をたどると考えられるため、総合的な判断を行いうるシステムを構築するためには、さらなる知識の整理・分類と、分類された1つの知識グループの独立性を高める工夫を進めなければならない。そこで本研究では、知識工学で言う分散協調問題解決モデルを導入することにより、知識群のグループ化と各知識グループの独立性を高めることを狙ったシステム設計を行う。さらに、支援システムからの情報が河川管理者にとって容易に理解できなければ、緊迫した状態での即時的な意志決定を行うことは不可能であることも考慮し、より効果的に洪水制御を支援できるような画面表示システムを構築することも試みる。

2. 分散協調問題解決モデルに関する検討

2.1 分散協調問題解決モデルと洪水管理

1. で述べたように、洪水時の河川管理において処理すべき定量的情報・定性的情報は増加の一途をたどると考えられる。このように今後さらに複雑化・大規模化が進んでいく可能性のある問題に対処するための知識システムの構築手法の一つとして、問題解決に必要な情報を整理分類し、それぞれについてその情報を単独で処理することが可能な知識システムを構成し、それらが協調しあって合目的な問題解決に当たるといものが考えられる。このように、協調し合う知識システムの集団を採用することによって、単独の知識システムでは解決の困難な、あるいは事実上不可能な問題を効果的に解決することを目指したモデルを分散協調問題解決モデルという²⁾。

本研究で用いる分散協調問題解決モデルの枠組みを Fig. 1 に示す。各知識システムは各自の担当する部分問題を処理するための知識ベースと推論機構を持った1個のエキパートシステムであるとともに、他の知識システムとの通信のためのインターフェースを備えている。また、複数の知識システムが推論過程において同じ情報を必要とする場合に備えて全ての知識システムから参照・変更可能な共有データベースを用意しておく、共有データベースは、知識システム間の比較的多量のデータ交換をとまなう通信の手段として用いられるほか、黒板モデル³⁾における黒板の機能を果たすこともできる。全体的な推論は、次の手順で進められる。推論開始の指示を推論システムが受けると当面の問題を解決するための知識システムが推論を開始する。推論中の知識システムが他の知識システムによる判断を必要とする場合や、処理を他の知識システムに引き渡す必要が生じた場合には、該当する知識システムに推論指令を送る。指令を受けた知識システムは自己の知識ベースに基づく推論を行い、その結果を共有データベースに書き込み、必要に応じて他の知識システムを起動する。以上の各知識システム内における推論と知識システム間の通信といった過程を繰り返すことにより与

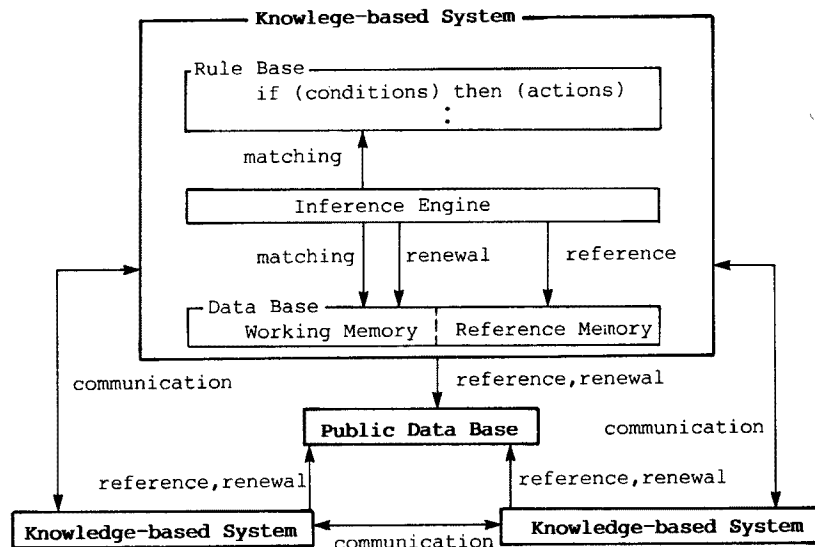


Fig.1. Typical structure of a distributed knowledge-base model based on a production system

えられた問題に対する解を得るための全体的な推論が進められることになる。

分散協調問題解決モデルを洪水制御のためのダム管理に導入するにあたっては、ダム管理問題をいくつかの部分問題に分割し、各部分問題を処理することのできる知識システムを構築していくことが必要である。これら知識システムには、例えば、ダム操作規則として明文化されたものを知識として持ち、実際の操作と規則との照合を行う知識システム、ダムへの流入量を監視し流入量をもとにしてダム操作へのアプローチを行う知識システム、ダムの貯水量・流入量・雨量などから判断したダムの安全性をもとにして放流量へ働きかける知識システム、ダム下流にある都市を流れる河川の状態を把握し、その都市の安全性を確保するようにダムを操作するための知識システム、ダム下流各地点の避難・水防活動の進行状況が放流量の変化に対応できる状態かどうかを判断する知識システム、等が考えられる。

分散協調問題解決モデルを用いることにより、解決すべき問題が大規模化・複雑化した場合、新たに解決することが必要になった部分問題に対する知識システムを追加・生成することにより比較的容易にそれに対処することができると考えられる。洪水管理において、意志決定問題が今後さらに複雑化・多面化することが確実であると思われることから考えると、分散協調問題解決モデルを、洪水制御支援システムの推論システムに導入することはその対応策として適しているといえる。

2.2 プロダクションシステム

知識システム開発の際に、知識の表現および推論の方法として最もよく利用されるのはプロダクションシステムである⁴⁾。プロダクションシステムは推論エンジン、ルールベース、データベースの3つの要素から構成されている (Fig. 1内の個々の知識システムはプロダクションシステムによって構成されている)。

推論エンジンはルールベースとデータベースをもとに推論活動の流れを管理する部分である。ルールベースはプロダクションルールの集合である。プロダクションルールとは、

(if 条件部 then 実行部)

の形でルールを表現するものであり、条件部は1つ以上の条件文から成っており、実行部は1つ以上の実行文から成っている。

純粋なプロダクションシステムにおけるデータベースは、推論対象の現在の状態を記述する事実情報を格納する部分であり、この中の情報とルールの条件部が照合され、マッチしたルールの適用により内容が書き換えられていく。ところで、洪水制御問題を対象とする場合、流量データや水位データ等推論過程で必ず必要となるとともに推論過程で書き換えられることのない数値データが存在するが、これらの数値データをもデータベースに記述すると推論効率の低下につながるという欠点があるため、本研究では、推論実行における計算・判断に必要な数値データを格納する部分として参照用メモリーを、ワーキングメモリーとは別に用意することにした。

推論は上記三者が相互関連して次のように進められる。まず、データベース内に格納された事実情報をもとに、推論エンジンは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。次に選び出されたルールの結論部が実行され、データベース内に最初に格納されていた事実情報は新たな情報に書き換えられる。この一連の作業を認知-実行サイクルと呼び、1つのサイクルで書き換えられた情報に関し、さらに適用すべきルールがないかが検索され、次のルールが適用されていくことにより推論が進められていく。

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えること、if-then形式のルールは、断片的な知識でも整理しやすいこと、さらに、ルールの意味が理解しやす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やすいことなどが挙げられる。

逆に短所としては、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に、ルール数が増加す

ると実行速度が低下すること、ワーキングメモリー内のデータを書き換えていくので規模が大きくなると思われ副作用を起こす可能性があることなどが挙げられるが、これらの短所についてはルールのモジュール化や、分散協調問題解決モデルの導入により克服する方法を検討する。

2.3 オブジェクト指向

分散協調問題解決モデルを用いたシステムを計算機上に実現するためには、計算機上に複数の知識システムを同時に生成するとともに、個々の知識システムができるだけ独立して推論を行えるように閉じた構造となっている必要がある。ここで、閉じた構造とは、外部からの推論依頼とその返答方法のみを他のシステムとのインターフェースとして定義し、内部構造は他のシステムには依存しない、いわば、ブラックボックス的な構造のことである。このような考え方をオブジェクト指向という⁵⁾。オブジェクト指向言語の特徴は、プログラミングにおける全ての要素（データや概念）をデータとそれに対する手続きを持ったオブジェクトと考えるところにある。オブジェクト指向言語を用いると、知識システムを1つのオブジェクトとして定義することで、複数の知識システムを同時に計算機上に生成することが容易に行える。しかも知識の変更・追加があったとしても、そのオブジェクトの定義を変更・追加することで、全てのエキスパートシステムの知識を変更・追加したことになり、容易に対処できる。

以上のことから、分散協調問題解決モデルを構成するためにはオブジェクト指向型言語を用いるのが適当であると考えられる。そこで、本研究では、複数のオブジェクトを同一画面に表示できるなど、画面表示機能の優れたオブジェクト指向型言語 Smalltalk-80⁶⁾を用いて、分散協調問題解決モデルによる推論システムを構成することにした。

3. 洪水制御支援システムの設計

3.1 システムの全体構成

1. でも述べたように、洪水制御のための意志決定においては、極めて多種・多量の定量的・定性的情報を取り扱う必要がある。これらの情報は、降雨現象あるいは流出現象の物理的・確率的な機構に関する理解に立脚したアルゴリズムによる処理が適しているものと、言語形式等で表現された知識に基づく処理方法が適しているものに大別することができる。降雨予測・流量予測等は、主として前者の方法で研究が進められ処理のためのアルゴリズムが開発されている⁷⁾。一方、ダム操作規則や洪水制御のための種々のマニュアル類、管理者の経験に基づく知識などの利用は後者の取り扱いによらねばならない。支援システムの設計に際しては、数値計算を主とするアルゴリズムで表される知識と言語形式で表される知識の特徴と役割を調和させていく必要がある。そこで本研究では、特に以下の点に注意してシステムの設計を行った。

- (1) 雨量予測や流出予測など数値情報を処理する定量情報処理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結合が容易でなければならない。
- (2) 洪水制御における意志決定は限られた時間内で行わなければならないので、ユーザーが容易に情報を把握できるような表示方法にしなければならない。

以上の点を考慮して、本研究では 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、環境管理システムで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は推論実行部が推論を実行する環境を整える。推論実行部では、転送されてきた流量、水位データをもとに知識ベースに基づいて推論を行い必要な支援行為を決定する。推論の過程で流量などの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、手続き型知

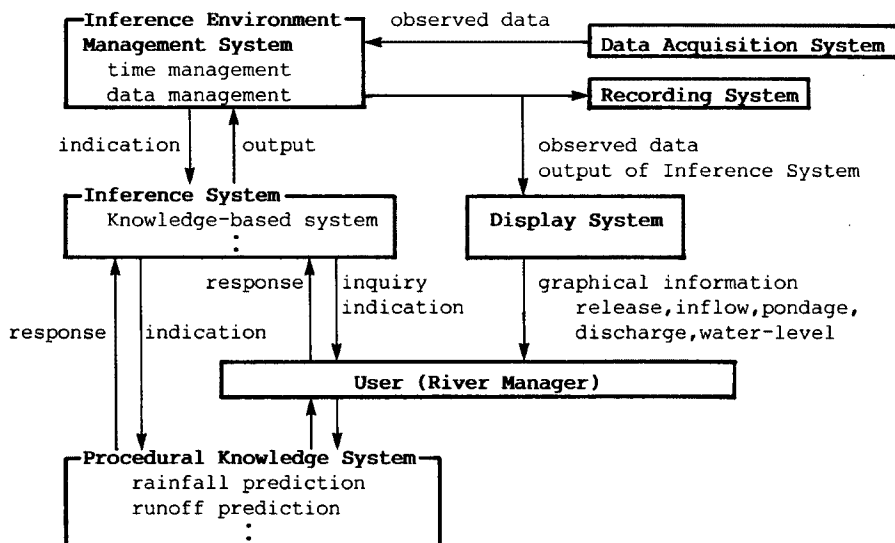


Fig. 2. Whole structure of the flood control support system.

識システムを呼び出す。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水位の予測を行うソフトウェア群から成り、計算結果を推論システムに返す。推論システムは返された計算結果を用いて更に知識ベースに基づいた推論を続行する。推論が終了すると環境管理システムは観測値と計算結果を行動記録データベースに記録するとともに、画面表示システムに情報を表示するよう指令を出す。画面表示システムは与えられた情報をもとに、流入量、放流量、下流地点の水位、ダム貯水量のグラフおよび、数値を表示する。以上で1つの支援サイクルが終了する。

本研究では、推論システム、画面表示システムをSONY Tektronix 人工知能開発システム 4404 上に Smalltalk-80 を用いて実現するとともに、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 77 を用いて構成し、これらのシステム間のデータのやり取りをRS-232C インターフェースによるファイル転送という形にすることで、実河川管理システムとの対応を図っている。各河川管理所では定量的情報処理システムの大部分を既存のソフトウェア群で置き換えることによって、容易に支援システムを構成することができる。

3.2 分散協調問題解決モデルを用いた推論システムの構成

推論システムは、現在の流量、下流地点の水位などの事実情報をもとに、知識ベースもとづく推論を行い、推薦すべき放流量を決定する部分である。本研究では知識の改正・追加や、洪水制御に影響を与える要因の追加を容易し、今後システムが成長し複雑化することに対応できるよう、分散協調問題解決モデルを導入し、Fig. 3 に示す5つの知識システムからなる推論システムを構成した。

これら5つの知識システムのうち、ダム操作規則の参照を伴う情報処理については、ダム操作規則を知識ベースとして持つ知識システムが中心となって支援を行う。また、規則が管理者に要求する判断を支援する知識システムとして、それぞれダム流入量が最大に達したか、評価地点水位が最大に達したか、今後ダムに洪水調節を行う十分な空き容量があるかといった判断を支援する知識をそれぞれ知識ベースとして持つ知識システムを用意している。さらに、単位単位時間当りのダムの放流量の増減に関する制限事項を知識ベースに持つシステムは必要に応じて前4者による放流量の代替案に対し、増減量が適正かどうかの判断を支援する。以上の5つの知識システムが相互に協調することによって、支援情報を提供するための推論は次のように進められる。まず、ダム操作規則に明文化された範囲の放流量決定を行う知識システムが推論開始の指示を受けると、ルールベースに蓄えられた知識をもとに推論を行うが、その過程で、流入

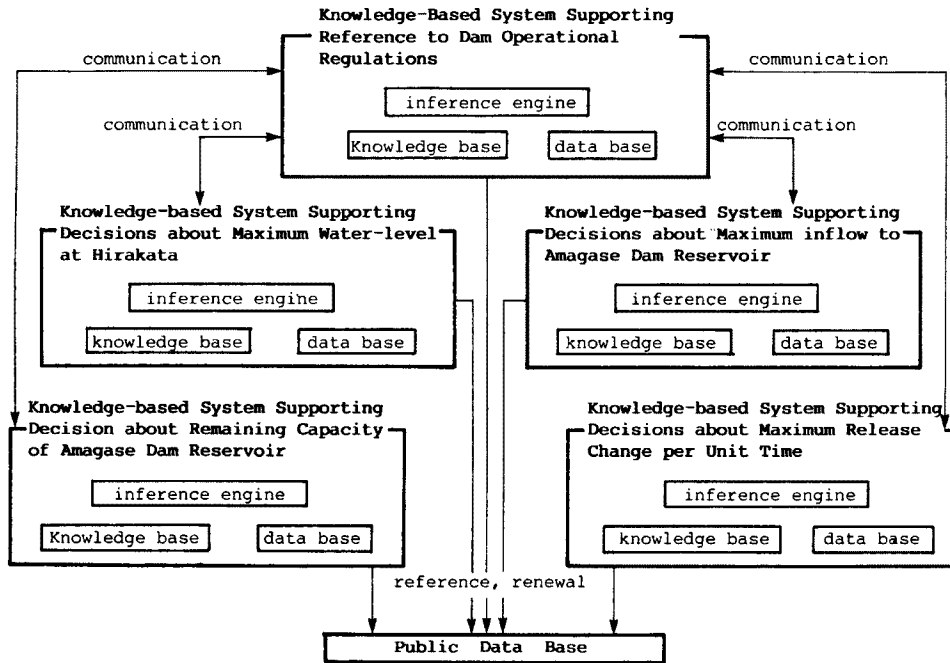


Fig. 3. Architecture of the inference system based on a distributed knowledge-base model.

量最大、下流地点の水位最大、ダム安全性、単位時間当りの放流量の増減限界を判断する必要性が生じた場合、それぞれの知識システムに通信して推論を依頼する。依頼された知識システムは受け取ったメッセージおよび共有データベースの内容を参照して必要な情報を入手し推論を行う。予測計算が必要な場合には、先に述べたように、手続き型知識システムを呼び出すことができる。推論終了時には、依頼元である知識システムに通信し、共有データベースを介して結果を報告する。ダム操作規則による放流量決定を行う知識システムは、この結果を受けて推論を続行し、最終的に最適であると判断される放流量を決定して、推論システムは実行を終了する。以上の推論過程から分かるように、分散協調問題解決モデルを用いたことにより、知識の変更・追加の必要が生じた場合でも、該当する知識システムの持つ知識の変更あるいは新たな知識システムの追加を考えるだけでよく知識の整理・追加が非常に容易になっている。

また、個々の知識システムは、推論エンジン、データベース、ルールベースを持ったプロダクションシステムからなっている。本研究で用いたものは事象駆動型推論を行うものであるが、純粋なプロダクションシステムに、以下の機能を追加したものである。

- (1) ルールの条件部に変数の使用を許し、ワーキングメモリーとルールの条件部との照合に際して参照用メモリー内の変数を代入し、推論実行時にそれらの変数の値を使用することが可能である。
- (2) ダムの貯水量計算などの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 Smalltalk-80 のプログラムを実行するメッセージで表現することを想定し、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。
- (3) ルールの複雑化・大規模化に備えて、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グループを切り替えて使用できる機能を持つ。

3.3 画面表示システムの構成

洪水制御において流入量・下流評価地点の水位・ダム貯水量といった意志決定の基礎となる定量的情報は、データ収集システムから一定時間間隔で自動的に送られて来るものであり、河川管理者はこれらの情

報をもとに限られた時間内で放流量の決定等洪水制御のための意志決定を行わなければならない。したがって、洪水制御における意志決定をより効果的に支援するためには現時点での情報を提供するだけでなく、できるだけ長時間におけるデータの推移状況、予測の推移、意志決定の推移が容易に理解でき、現時点までの意志決定が正しかったかどうかの判断や次の意志決定が行いやすいような情報表示方法をとらなければならない。

そこで本研究では、流入量の実測データと予測データ、放流量のグラフ、下流評価地点の水位のグラフ、ダム貯水量のグラフ、得られたデータの数値を同時に表示する画面表示システムを構成した。さらに、情報の理解が容易になるよう各グラフには、ダムの有効貯水量や警戒水位といったクリティカルな値と現在時刻を表す線も同時に表示することにしている。

新たな観測データ入手後、推論システムの実行が終了すると、推論環境管理システムは新たな情報と推論結果を画面表示システムに伝達し、それを受けて画面表示システムは、そのときに欠測ならば過去の観測データのうち最新のものを、データの更新があれば新たなデータを付け加えたものを自動的に画面に表示する。また、複数の画面の同時表示、操作の簡略化を実現することで、河川管理者の意志決定の際の負担を減少させることを図っている。現段階では、いったんシステムを起動させると画面は次々に自動的に更新され、その間にユーザーの操作が介入できないが、放流量の最終意志決定を行うのがユーザーであることから考えて、今後ユーザーの操作が介入できるようなシステムを開発することが必要である。

4. 適用と考察

4.1 適用流域と対象洪水

3. で構成した洪水制御支援システムを、淀川流域宇治川に位置する天ヶ瀬ダムの管理に適用し、それによって得られる問題点について検討を行う。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・桂川との三川合流を経て枚方に至る部分である。適用洪水は、近年の大きな洪水のうちで洪水制御が適切に行われ流域の被害を防ぐことのできた、1982年の10号台風によるものである。天ヶ瀬ダムへの流入量、宇治発電所の放流量、および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、テレメーター値を用いている。また、枚方上流河道は、次の貯留関数モデルによった。

$$S(t) = KQ^p(t) - T_a \cdot Q(t)$$

$$dS(t) / dt = I(t) - Q(t)$$

ここに、 $S(t)$ 、 $Q(t)$ 、 $I(t)$ はそれぞれ時刻 t での貯留量、流出量、流入量であり、パラメータの値は、 $K = 1500$ 、 $p = 0.60$ 、 $T_a = 0.0$ 、また遅滞時間は0時間を用いた⁸⁾、さらに、淀残流域からの流入量は、横尾山、宇治発電所および淀地点の流量から逆算して求めた。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ー値をもとに、枚方上流河道の貯留関数を逆算することにより、河道への流入量を求め、これと三川合流地点の流量と比較することにより推定した。

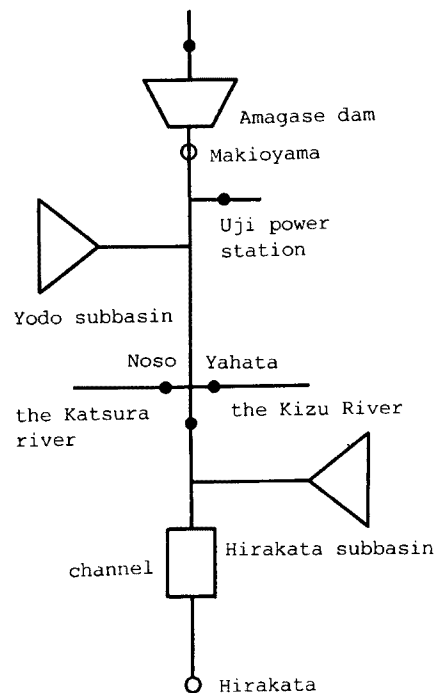


Fig. 4. The applied reservoir system.

4.2 支援システム開発過程における洪水管理モデル

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、流量などの情報をもとに、あらかじめ知識ベース内に設定されたルールにもとづいて、各時刻でのダムの放流量の決定を支援するシステムであり、河川管理の現場での洪水管理業務においては、Fig. 2に示す構成で運用されることを想定している。したがって、支援システム開発過程においては、データ収集システムと、決定されたダム放流量を受けて下流地点の流量・水位を再現し新たなデータを作り出す部分をシミュレーションで構成しなければならない。そこで本研究では、ワークステーション4132上に洪水追跡シミュレータとデータ収集シミュレータを構成し、4404上で稼働する推論システムと自動的に通信させる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、天ヶ瀬ダムの流入量データおよび洪水追跡シミュレータの結果を受けて、時間の経過にともない、現時点のダム流入量、ダム貯水量、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きたことを確認し、そのデータをもとにルールにもとづいた推論を行い推薦すべき放流量を決定する。洪水追跡シミュレータでは、決定された放流量をもとに、ダム貯水量の計算および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ミュレータに引き渡す。以上のモデル構成は洪水の実現象の部分、推論システムの稼働している計算機とは別の計算機でシミュレートするとともに、テレメータによるデータ収集をファイル転送という形でシミュレートすることにより、現実の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たり(15分)の増減量がダム下流の榎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た。また、データ収集シミュレータからのダム流入量、貯水量、枚方地点水位の転送は、テレメータが1時間単位でデータを転送してくる場合と、15分単位でデータを転送してくる場合を想定して、1時間間隔と15分間隔の2通りで行うことにし、それぞれの適用結果を比較・考察することにした。

ダム放流量の決定に際しては、今後のダムへの流入量や基準地点での流量や水位の予測値を得ることが意志決定のための重要な情報になる(例えば、流入量が最大に達したか、あるいは、今後の洪水制御に対してダムの調節容量に余裕があるかどうかなどの判断は、流量予測の結果と現在までの流量の経験から河川管理者が総合的に行っているのが現状であろう)。したがって、ダム放流量管理ルールに流量の予測値を用いたルールを加えるためには、データ収集、洪水追跡のモデルの他、過去の雨量・流量情報をもとに、推論システムの要求する流量予測値を計算するシステムを構成しなければならない。流出予測に関しては種々の方法が提案されているが、ここでは簡単のため、流量予測シミュレーションを行うことにする。

流量予測シミュレーションの方法としては、時刻 n の実測流量 q_n に対して、正規分布 $N(0, \sigma^2)$ に従う乱数 v_i ($i=1, \dots, m$)を発生させ、 m 時間後の予測値 x_{n+m} を次式で求める。

$$x_{n+m} = q_{n+m} + \sum_{i=1}^m a^{m-i} v_i \quad (a: \text{定数})$$

このとき予測値 x_{n+m} の分散は、 v_i がそれぞれ独立であることに注意すると、

$$\text{Var}[x_{n+m}] = \sigma^2 \cdot \sum_{i=1}^m a^{2(m-i)}$$

$$\text{Cov}[x_{n+k}, x_{n+l}] = \sigma^2 \cdot \sum_{i=1}^k a^{k+l-2i} \quad (\text{ただし } k < l)$$

したがって、 x_{n+k} 、 x_{n+l} の相関係数 $\rho_{k,l}(k \neq l)$ は、

$$\rho_{k,l} = \frac{\sum_{i=1}^k a^{k+l-2i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^k a^{2(k-i)} \cdot \sum_{i=1}^l a^{2(l-i)}}$$

となる、本研究では、 $a=1$ として、

$$\rho_{k,i} = \sqrt{k/l}$$

とし、 $\sigma=q_n/10$ とした、以上の方法を用いると各予測値の間には一定の相関関係があることになる。

以上のように、流量シミュレータを設定すると、予測精度を制御できるため、予測精度とルールとの関係を分析することができ、予測精度に応じた推論のためのルールを検討するのに適している。

4.3 ダム操作ルールの構成

本研究におけるダム操作規則は、淀川流域の宇治川にある天ヶ瀬ダムの操作規則⁹⁾を基にして以下のものを作成した。その概要は次のようである。

- (1) ダムへの流入量が $840 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上の時は、 $840 \text{ m}^3/\text{s}$ を放流する。
- (2) 枚方地点の水位が警戒水位 (4.5 m) 以上の時は次による。
 - a. 流入量が $840 \text{ m}^3/\text{s}$ を越え、最大に達するまでは、 $840 \text{ m}^3/\text{s}$ の流水を放流する。
 - b. 流入量が最大に達した後で枚方地点の水位が最高に達するまでは $160 \text{ m}^3/\text{s}$ の流水を放流する。ただしこの調節（「2次調節」）を行うために必要なダム容量が不足すると予想される場合には、2次調節開始時刻を遅らせることができる。また2次調節中にダムの容量が不足すると予想されれば、2次調節を止めることができる。
 - c. 枚方地点の流量が最大に達した後は、 $840 \text{ m}^3/\text{s}$ を上限として放流量が流入量に等しくなるまで放流する。
- (3) (1) および (2) にあてはまらないときは、放流量が流入量に等しくなるまで放流する。

以上の規則の概念図が Fig. 5 である。

また、ダムからの放流量を変更すると、流水の状況に著しい変化が生じることもあるため、放流量を決定して直ちにその放流量に移行できるものではなく、関係機関への放流連絡やダム下流への警告等を行う必要がある。そこで、そのために要する時間を30分と仮定し、推論において決定した放流量に移行するのは30分後とすることにした。

放流量の決定において、管理者の判断の必要なところは、ダム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、ダム容量が不足する可能性があるか、の3点である。これらの判断は、河川管理者が降雨・流量（水位）の観測値、および予測値という定量的情報に、そのときの状況という定性的情報を加えて行うものであり、1.に既に述べたように個々の河川管理者の資質や経験に負うところが大きい。本研究では各知識システムの知識ベースにおいて、次のように判断ルールを設定した。

まずダム流入量が最大に達したかどうかの判断は、一定時間毎にデータ収集システムから得られるダム流入量の観測値が、5時間後までの予測値（1時間

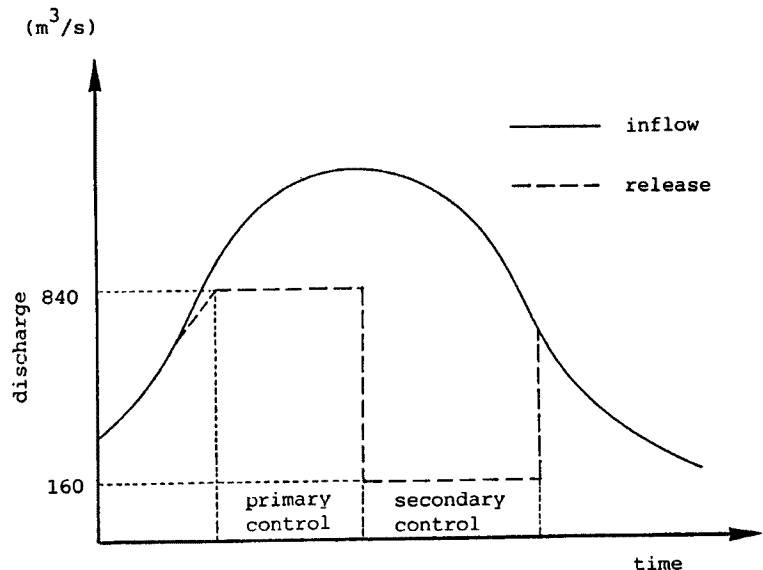


Fig. 5. Schematic representation of flood control regulations of Amagase dam reservoir.

単位) の全ての値よりも上回った場合に、流入量が最大に達したと判断することにした。

次に、枚方地点の水位が最大に達したかどうかの判断についても流入量最大の判断規則と同様に、5時間先の全ての予測値よりも観測値が上回った場合に、水位が最大に達したと判断することにした。ここで5時間としたのは、予測値の精度を検討するための第一段階としてである。

そしてダム容量が不足する可能性があるかどうかの判断の規則は、実験的に次の3通りの考え方をそれぞれ採用して、それぞれの規則によるシステムの実行結果の違いを見ることにした。(ただし、推論を行う時刻から30分先までは前回、前々回の推論で放流量が決定されている。)

(Rule No. 1) <2次調節前>

推論時刻の30分前から5時間先までの間に2次調節を行うとし、流入量には予測流入量を適用して、5時間先までのダムの貯水量が有効貯水量 ($2.0 \times 10^7 \text{ m}^3$) をこえるとき、ダム容量が不足する可能性があると考ええる。

<2次調節中>

2次調節を今後1時間続けるとしたときに、ダムの貯水量が有効貯水量を越えるとき、ダム容量が不足すると考える。

(Rule No. 2) <2次調節前>

推論時刻の30分前から2次調節を行うとして、15分間隔でダムの貯水量を計算し、それが有効貯水量を越える直前の予測流入量が $840 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上である場合、または $840 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下であっても有効貯水量を越える時刻が推論時刻から2時間30分以内であれば、ダム容量が不足する可能性があると考ええる。

<2次調節中>

(Rule No. 1) と同様で、1時間続けるところを2時間で行う。

(Rule No. 3) <2次調節前>

(Rule No. 2) と同様の方法で、2時間30分のところを1時間30分で行う。

<2次調節中>

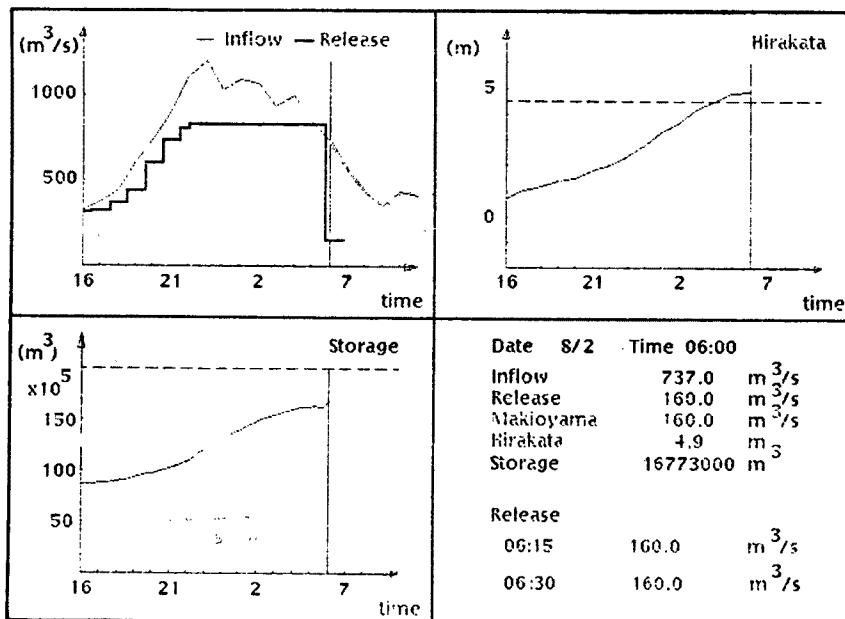


Fig. 6. Typical output of display system.

Table. 1. Results of reservoir control by different three rule bases

Rule No.	Case No.	Run No.	Secondary Control			Maximum Pondage of Amagase Dam		Highest Water-level at Hirakata	
			time		period (min.)	time	pondage ($\times 10^6 \text{m}^3$)	time	water-level (m)
			start	end					
1	1	1	8:30	10:30	120	16:30	1.76	7:00	5.06
		2	7:30	8:30	60	16:30	1.72	7:00	5.06
		3	6:45	9:45	180	16:30	2.02	6:30	5.04
		4	5:30	7:15	105	7:45	1.98	8:30	4.95
	2	1	5:00	6:45	105	6:45	1.94	8:15	4.95
		2	0	5:15	1.56	6:45	5.05
		3	6:15	6:30	15	6:30	1.59	7:15	5.03
		4	6:15	7:30	75	7:30	1.77	6:15	5.01
2	1	1	4:15	5:30	45	5:30	1.81	5:30	5.03
		2	5:15	5:45	30	5:45	1.75	5:45	5.04
		3	5:00	5:30	30	5:30	1.75	5:30	5.04
		4	4:45	5:15	30	5:15	1.75	5:15	5.04
	2	1	5:00	6:00	60	6:00	1.79	6:00	4.99
		2	4:30	5:00	30	5:15	1.68	5:15	5.03
		3	4:30	5:15	45	5:15	1.74	5:15	5.01
		4	4:45	5:30	45	5:30	1.74	5:30	5.01
3	1	1	6:30	6:45	15	6:45	1.64	8:15	5.05
		2	4:30	5:45	75	5:45	1.93	8:30	5.01
		3	5:30	6:30	60	6:30	1.84	8:15	5.00
		4	4:45	5:30	45	5:30	1.81	8:15	5.03
	2	1	4:30	6:00	90	6:00	1.91	8:30	4.98
		2	4:30	6:00	90	6:00	1.91	8:30	4.98
		3	4:30	5:00	30	5:15	1.68	8:00	5.03
		4	4:45	5:30	45	5:30	1.74	7:45	5.01

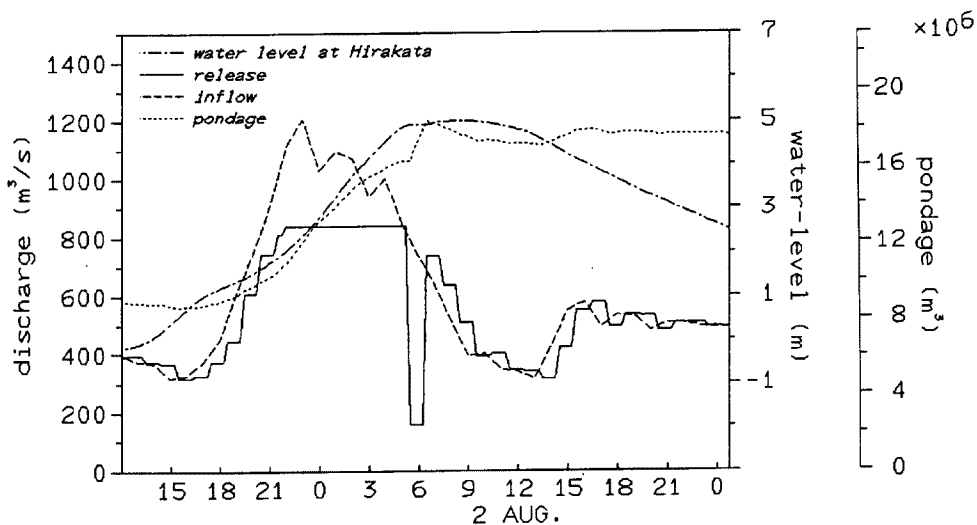


Fig. 7. Typical result of reservoir control by the flood control support system.

(Rule No. 1)と同様の方法で行う。

4.4 適用結果および考察

4.3で示した知識ベースを用いて本支援システムによる放流量決定を1982年8月1日12時から8月3日0時までについて行った。画面表示システムの出力結果の1例をFig. 6に、制御結果の一例をFig. 7に示す。また、各ケースに対する適用結果をまとめたものをTable 1に示す。Table 1中、Rule No. は4.2において設定したルールの番号を、Case No. 1はデータ収集時間間隔が1時間、Case No. 2は5分間隔であることを示す。なお、本研究では既存手続き型知識システムに対応する流出予測システムとして乱数発生による流量予測シミュレーションを行っているため、各ケースとデータ収集時間間隔に対し4回づつ適用を行っている(Table 1中第3カラムのRun No. が同一ルール同一データ入手時間間隔での適用番号を示す。また、Fig. 7はRule No. 3でデータ入手間隔15分(Case No. 1)の第1回目の適用(Run No. 1)によるものである)。Table 1から、まず、1時間ごとに流入量・水位のデータが更新される場合(Case No. 1)を見ると、(Rule No. 1)では得られた水位を平均すれば他の2つルールを用いた場合に劣りはしないが、これは1度だけ特に優れた結果が出た(Run No. 4)ためであり、その他の結果を見るとかなり枚方地点の水位が高かったり、貯水量がダム容量を越えたりする場合があります決して良い結果とは言えない。この様に水位を抑えきれない原因としては、(Rule No. 1)では2次調節に入る際に5時間先までの貯水量を計算してそれをもとにダムの安全性を判断しているため、ダムの安全性に関しては安全側過ぎるルールであり、2次調節にはいる時間が実際にはいるべき時間よりも遅れがちであるためと考えられる。しかし一旦2次調節にはいると1時間先という比較的短時間までの貯水量でダムの安全性を判断しているため、2次調節を比較的長時間にわたって行うという性質があり、予測値が実現値を下回った場合などにタイミングよく2次調節に入ればかなり良い結果が得られるのであろう。(Rule No. 2)および(Rule No. 3)は、どちらもコンスタントな結果が得られている。これは、予め2次調節を続ける時間を設定しておくのではなく、状況に応じて2次調節の可能な継続時間を予測し、それに基づいて判断を行っているためであろう。全体的に(Rule No. 3)の方がよい結果が得られているのは、(Rule No. 3)の方が(Rule No. 2)よりも2次調節に入りやすく出にくいからである。しかし、二山洪水等の様々な流出形態に対処するためには、今後、更に知識ベースのレベルアップを図っていく必要がある。15分ごとに流量・水位のデータが更新される場合(Case No. 2)について見ると、いずれのケースにおいてもデータ入手が1時間ごとのものよりもよい結果が得られている。もちろん、これは洪水の現況がより正確に把握できるために他ならないが、同一ルールでもデータ入手間隔の違いにより制御結果がかなり異なる場合があり、今後データ入手間隔と制御の支援方法との関連を含めた知識の獲得を図る必要がある。

5. 結 論

本研究では、洪水管理に必要な多様な情報処理形態に対応するとともに、知識の保守・管理の利便性を高め、問題の大規模化・複雑化にも対処するため、分散協調問題解決モデルを用いた、洪水制御支援システムをの設計を行い、実流域への適用を通じて、その適用性と問題点に関する検討を行った。

得られた成果としては、

- (1) 推論システムに分散協調問題解決モデルを導入するとともに、推論システムを構成する個々の知識システムをプロダクションシステムを用いて構成し、知識の追加・変更、問題の大規模化・複雑化への対応を容易にした。
- (2) 予測の精度が制御結果に与える影響が特に大きいことが分かり、今後予測値の利用に関するに

ルールについてさらに深く考察を加えるべきであることが分かった。

- (3) 推論結果が容易に把握できる画面表示を実現し、しかも更新されたデータが自動的に表示されるようにして意志決定の際の負担を減少させた。

が挙げられる。また今後の課題としては以下のことが挙げられる。

- (1) 推論を行う知識システムをさらに増やして様々な状況に対応できるシステムを構成する。
- (2) 現在は枚方地点水位のピークを抑えることを制御の目的としているが、本当に優れた制御とは何かを検討し、より優れた制御結果が得られるようルールを改良する。
- (3) 本研究で構成した画面表示システムでは推論の流れや理由付けを明確に把握することは難しいので、これが容易に理解できるような表示方法を考える。
- (4) 本研究で開発したシステムは起動後は自動的に推論を実行していくものであり、よりインタラクティブなシステムとして管理者の意見を反映した制御を実現するために、降雨や流入量の変化に対してフレキシブルに対応できる優れたユーザーインターフェイスを実現する。

本研究の一部は文部省科学研究費補助金（課題番号 63601021、研究代表者：高棹琢馬）の援助を受けた。また、本システムの適用に関しては建設省近畿地方建設局淀川ダム統合管理事務所からデータの提供を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 高棹琢馬・椎葉充晴・堀智晴：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，京都大学防災研究所年報第 31 号 B-2，1988，pp. 357 - 368.
- 2) 古川康一・溝口文雄：知識プログラミング，共立出版社，1988，p. 41.
- 3) 情報処理学会編：知識工学，オーム社，1987.
- 4) 安部憲広・滝寛知：エキスパート・システム入門，共立出版社，1986，p. 23.
- 5) B. J. Cox：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，1988.
- 6) Adele Goldberg・David Robson：Smalltalk-80 言語詳解，相磯秀夫監訳，オーム社，1987.
- 7) 高棹琢馬・椎葉充晴：状態空間法による流出予測—Kinematic Wave 法を中心として—，京都大学防災研究所年報第 23 号 B-2，1980，pp. 211 - 226.
- 8) 建設省近畿地方建設局淀川ダム統合管理事務所：淀川流水管理システム操作解説書，1985.
- 9) 建設省近畿地方建設局淀川ダム統合管理事務所：淀川の流水管理.