

協調問題解決型洪水制御支援環境の設計

A Flood Control Support Environment Based on Cooperating Knowledge-based Systems

京都大学工学部 高 棹 琢 馬 Takuma TAKASAO

京都大学工学部 椎 葉 充 晴 Michiharu SHIIBA

京都大学工学部 堀 智 晴 Tomoharu HORI

京都大学大学院 佐々木 秀 紀 Hideki SASAKI

We design a flood control support environment, which is composed of the Inference System (IS) and the Procedural Knowledge System (PKS). PKS deals with problems which can be solved mathematically, while IS takes charge of problems which needs a knowledge-based approach. IS is composed of self-contained knowledge-based systems, each of which is an expert system to deal with a partial issue of flood control problems. Knowledge-based systems are classified into two types according to the problem type to be treated: a system which has a deterministic inference process based on a production system and one with a fuzzy inference process.

Keywords: flood control, expert system, dam operation, distributed knowledge-base model, object-oriented programming

1. 序 論

ダムによる洪水の管理は、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のon-line予測、観測データ・予測データとダム操作規則との照合を経て、放流量の決定とそ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。したがって、洪水制御を総合的に支援するためには、降雨・流量の確率予測のように主として数学的なモデル化の適した定量的かつ手続き的なデータ処理と、河川管理者個人の資質や経験に依存する定性的な情報処理との両者を統合したシステムが不可欠である。医療診断用エキスパートシステムの開発で用いられているようないわゆるAI的手法のみによって、洪水制御を支援しようとする試みは現実的とはいえない。本研究では、特にこの点に注意し、定量的情報を数学的アルゴリズムに基づいて処理する手続き型知識システムと、ダム操作規則のように言語形式で表される知識や河川管理者の経験といった定性的な知識に基づく処理を行う推論システムとの両者が、オンラインで結合され、互いに情報の交換を行いながら総合的な洪水制御支援を行う環境を提案する。さらに、推論システムの設計においては、取り扱う知識が定性的・断片的であり、多量であること、出水の経験等により追加・更新されることを考慮し、取り扱う問題を複数の部分問題に分割し、推論システムの中に各部分問題を処理することのできる独立した知識システムを複数存在させる構造を採用する。以上のように、上位レベルでは、手続き型知識システムと推論システムの協調、下位レベルでは推論システム内部の知識システム群による協調を軸とすることによって、洪水制御の実状に即した支援を行いうる環境を構築することを試みる。

2. 洪水制御支援環境の全体構成

洪水時におけるダム操作は、気象情報や流量、雨量といった情報から、ダム流入量や下流評価地点の水位を予測し、ダム操作規則に基づいて今後の放流量を決定するという流れからなる。したがって、これら一連のプロセスを支援する環境を設計するためには、次の点に注意しなければならない。

- (1) 降雨・流量の確率予測のように主として数学的なモデル化の適した定量的かつ手続き的なデータ処理を行うシステムと、ダム管理規則や河川管理者個人の経験といった言語形式で表される知識による情報処理を担当するシステムとがオンラインで結合され、自動的かつ高速で情報の交換が行えること。

- (2) データ収集システムから洪水制御支援システムへのデータ転送が自動的に進めること（大量のデータ入力を伴うシステムでは即時的な判断の支援は難しい）。
- (3) ユーザーが限られた時間内で必要な情報を正確に把握できるような画面表示システムを備えていること。

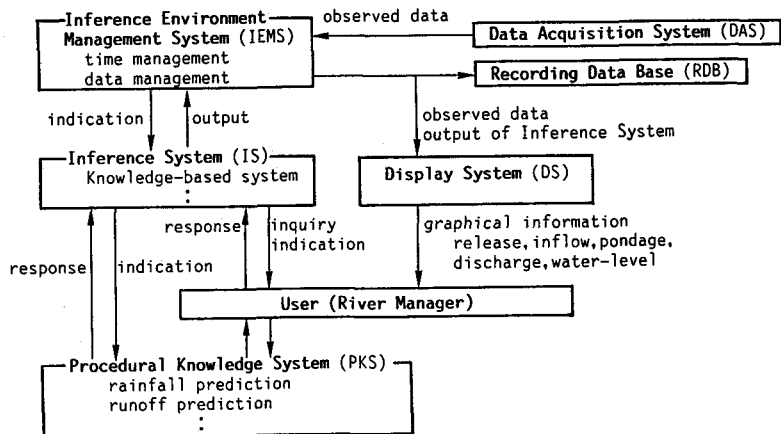


Fig. 1 Whole structure of the flood control support environment

Fig. 1に示す全体構成をとる。推論環境管理システム(IEMS)は、データ収集システム(DAS)から新たなデータが送られてきた時点で推論システム(IS)が推論を実行する環境を整える。ISは、転送されてきた流量、水位データをもとに放流量管理ルール群に基づいて支援のための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、手続き型知識システム(PKS)を呼び出す。PKS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・水位の予測を行うソフトウェアから成り、計算結果をISに返す。推論システムは返された情報を用いて推論を続行する。推論が終了するとIEMS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(DAS)に情報を表示するよう指令を出す。DASは与えられた情報を基に、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、数値等を表示する。以上で1つの支援サイクルが終了する。

本環境は、PKSとISとを異なるCPU上に配備することにより、処理負荷を分散させ即時的な支援情報の提供を可能にしている。また、各河川管理所が流出予測のソフトウェア等を既に持っている場合には、手続き型知識システムを既存のソフトウェアで置き換えれば良く、容易にシステムを構築することができる。

3. 推論システムの設計

3.1 推論システムの枠組み

洪水の制御は多種多様なタイプの情報の処理単位から構成され、各単位における情報の処理活動やその結果が有機的に絡み合って最終的な制御に対する意志決定や活動が行われている。また、これら洪水制御の際に処理すべき情報は今後増加することも考えられる。したがって、問題の複雑化及び大規模化に応じて、支援能力の成長するシステムを設計しなければならない。このためには、洪水制御問題を情報の処理単位という観点から部分問題に分割して、各部分問題を単独で処理することのできる知識システムを作成し、これら知識システムの集団が協調して合目的な問題解決に当たるといった枠組みを考える必要がある。協調し合う知識システムの集団を用いることにより、単独の知識システムでは解決の困難な問題を効果的に解決することを目指したモデルを協調問題解決モデルという¹⁾。

協調問題解決型モデルを用いた推論システムの構成をFig. 2に示す(Fig. 2は、天ヶ瀬ダムの管理を例にとって作成した推論システムの構成である)。本推論システムは、次の5つの知識システムから構成されている。まず、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(KSDOR)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(KSM1D, KSMWL, KSRCR)を用意している。さらに、単位時間当りのダムの放流量の増減に関する制限事項

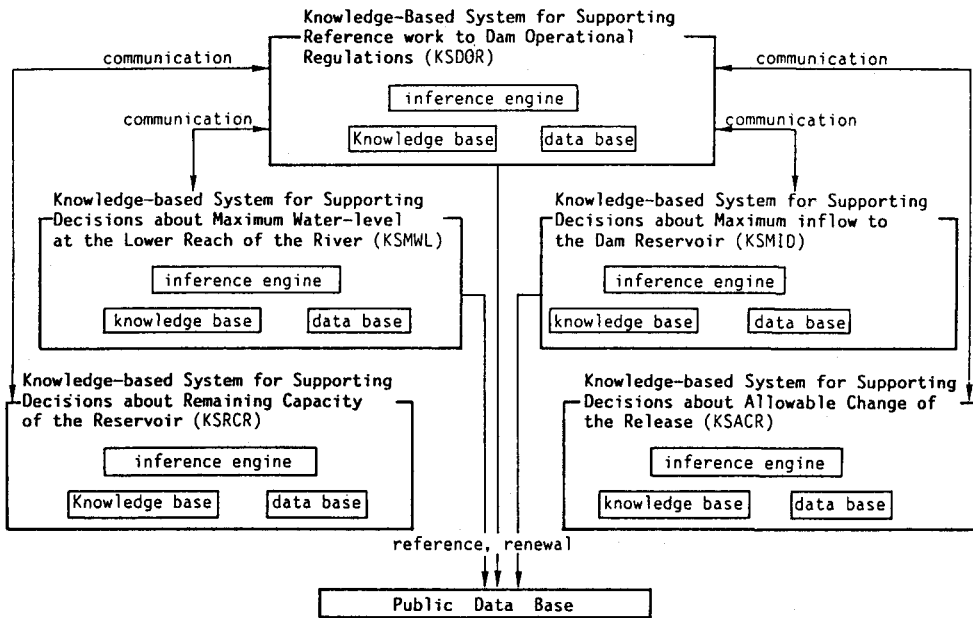


Fig. 2 Framework of the inference system

を知識ベースに持つシステム (KSACR) 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。各知識システムは、それぞれ推論エンジン、知識ベースが分離した構造を持つ1個のエキスパートシステムであり、これら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が進められる。まず、推論システムが推論開始の指令を受けると、KSDORが推論を開始する。推論の過程で流入量最大、下流地点の水位最大、ダムの安全性、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協力を依頼する。協力を依頼された知識システムは、受け取ったメッセージの内容及び共有データベースの内容を参照し、各々の知識ベースに基づき回答を決定するための推論を行う。推論の過程で流量等の予測値が必要になれば、PKSを呼び出し、自動的に予測計算を依頼する。予測結果が得られれば、さらに推論を続行し推論結果を依頼元の知識システムに回答する。以上の手順で最終的に必要な支援行為を決定して、1つの推論サイクルを終了する（なお推論過程における情報交換の具体的な例については文献2)参照）。

このように、河川管理の現場で行われているダム操作決定のための様々な情報処理を支援するシステムを、協調問題解決型モデルの枠組みを用いて設計することにより、今後新たな知識の追加あるいは変更が必要になった場合でも、該当する知識システムのみバージョンアップあるいは知識システムの追加を主に考えるだけでよく比較的容易に推論システム全体のレベルアップを図ることができる。

3.2 各知識システムの設計

3.1で導入した知識システムは、扱う知識によって次の2つのグループに分けることができる。1つは、確定的なプロダクションルール³⁾から成る知識ベースに基づいて推論を行うものであり、もう一つは、ファジプロダクションルール⁴⁾を知識ベースに持ち、ファジ推論によって情報を処理するものである。前者に属する知識システムには、KSDOR、KSACRがある。また、手続き型知識システム(PKS)が予測値とその分散を与えるような確率的な流出予測モデルを備えている場合には、ピーク流量の最大時刻や将来流入量に関する判断は、本来、確率をもとに行うべきであり、KSMID、KSRCR、KSACRは前者に属する。しかし、PKSが確率的な流出予測ソフトを備えていず、将来の流量を何ケースかシミュレーションするだけで、その精度まで与えないような場合には、不完全な情報を基にした推論を行う必要があり、これら3者は、ファ

ジイ推論を行うシステムとする必要がある。そこで、本研究では、洪水制御支援に必要な知識システムとして、確定的なプロダクションルールによる推論を行う知識システムとファジイ推論を行う知識システムの両者を設計する。

(1) 確定的なプロダクションルールによる推論を行う知識システム

本知識システムは、ルールベースが通常のプロダクションルールからなる知識システムである。プロダクションルールは、次の形式で知識を表す。

if (x_1 is A_1) {& (x_2 is A_2) ... } then (y_1 is B_1) {& (y_2 is B_2) ...}

ここで、確定的とは、ルール条件部とデータが記号的に完全一致したときにのみ、そのルールが採用されることを意味する（洪水制御を対象としたプロダクションシステムの具体的な推論の進め方は文献5)参照）。本研究では特に知識システム間の情報交換を可能にするため、次の特徴を持つ推論機構を開発した。

- 1)同時に複数のルールがデータに適合したときには、より新しいデータに適合するルールを採用することによりルール間の競合を解消する。これにより、推論結果は知識ベース内のルールの記述順序に依存せず、知識ベースの構築・変更が容易になる。
- 2)本システムの知識ベースは、確定的なプロダクションルールから構成されているが、推論過程で参照するデータがファジイ推論を行う知識システムの出力である場合、確信度を持つデータを扱う必要が出てくる。例えば、KSMIDがファジイ推論を行う知識システムである場合、その出力は、流入量ピークは既に過ぎた（確信度0.8）、ピークはまだ過ぎていない（確信度0.2）といった結論を返す。したがって、本システムは、相反する2つのデータに基づいて推論を行わなければならない。このとき、知識システムは、各データに対し各々別の推論プロセスを作成し、前者のデータに基づく結論と後者に基づく結論の両方を導き、各結論に基となるデータの持っていた確信度を結論に与える。もし、ルールの条件部が2つ以上あり、これに適合するデータが確信度を持つものである場合には、結論は、適合するデータの確信度の積とする。以上の方法で、確信度付きのデータを扱えるようにすることにより、本知識システムとファジイ推論を行う知識システムの通信・協調が可能になる。

(2) ファジイ推論を行う知識システム

ファジイ推論を行う知識システムを設計する際に、最も問題になるのは、ルールの作成法である。ファジイルールが本来関係が明確でない事象間の結び付きを記述するものである以上、ルール作成を実務者へのインタビューをもとに行うにしても、ルールの作成・変更を容易にする枠組みがなければ、システムの成長は期待できない。そこで、本研究では、ファジイルールの作成の際に、各条件が結論に対して持つ重要性を表す重みを導入し、これを河川管理者に決めさせることにより、自動的にルールを生成するシステムを作成した。以下、KSMIDをファジイ推論を行う知識システムとする場合を例にとってその概要を述べる。

KSMIDでは、前件部変数として、予測モデルの精度に関する評価(x_1)、5時間分の予測流入量の最大値と現在までの最大流入量に対する比(x_2)、現在までの最大流入量の生起時刻からの経過時間(x_3)、現在の降雨量(x_4)を、後件部変数として、流入量ピークが過ぎたと考えられる度合(y_1 , $-1 \leq y_1 \leq 1$ で1に近いほど流入量ピークが過ぎたと考える度合が高い)を用い、ルールを次の形式で表す。

if (x_1 is A_{1j}) & (x_2 is A_{2j}) & (x_3 is A_{3k}) & (x_4 is A_{4l}) then (y_1 is B_m)

各変数のファジイ分割はTable 3(a)に示すものとする。本ルールは、予測モデルの精度に関する評価が高いときには、予測モデルによって得られた情報(x_2)に重きをおいた判断になり、予測モデルの信頼性が低くなるにしたがって、その他の要因(x_2, x_3)に重きをおいた判断になるという考え方をモデル化したものである。そこで、ピークの前後を評価する変数 y_1 を次式で表す。

$$y_1 = \alpha \cdot x_2 + \beta \cdot x_3 + \gamma \cdot x_4, \quad \alpha + \beta + \gamma = 1, \quad \alpha, \beta, \gamma > 0$$

α, β, γ はそれぞれ各前件部変数が結論に対して持つ重みであり、実際には実務者へのインタビューをもとに決定すれば良い。 α, β, γ が予測モデルの各評価(A_1, A_2, A_3)ごとに決められれば、 x_2, x_3, x_4 に

Table 3(b)に示す値を代入して y_1 の値を計算する。得られた y_1 の値に対し、予めファジィ分割 B_1, B_2, B_3, B_4 の範囲を決めておけば、前件部の各変数に対するファジィ分割の組合せに対応して後件部の値が決まり、推論規則が決定される。

以上の方法を用いれば、実務者がどの条件に重きをおいて判断するのかという方針を抽出することができる。したがって、実時間で洪水制御

に関する判断を支援するだけでなく、様々な流入量系列について判断をシミュレートして結果を示し、河川管理者に自分の判断の傾向や誤りを自覚させることができ、管理者自身も判断基準を変更していくといった洪水制御訓練用シミュレータとして使用することもできる。

4. 適用と考察

開発したシステムを、淀川流域宇治川に位置する天ヶ瀬ダムの管理に適用する。対象流域はFig. 3に示すように天ヶ瀬ダムへの流入部から木津川、桂川との合流を経て枚方に至る部分である。適用洪水は1982年10号台風によるものである。本適用例では推論システム、画面表示システムをSony Tektronix人工知能開発システム4404上にオブジェクト指向言語Smalltalk-80⁶⁾を用いて実現するとともに、天ヶ瀬ダムの放流量をうけて枚方地点までの流量・水位を再現する部分は貯留関数法による洪水追跡シミュレータとして、流量や水位等のデータを支援システムに転送する部分はデータ収集シミュレータとしてそれぞれ同社製ワークステーション4132上に構成した。また、既存の手続型システムに対応するものとして流量予測シミュレータをワークステーション上に構成している。なお、本適用例では天ヶ瀬ダムの放流量の15分当りの増減が横尾山地点の流量に応じて制限されることから放流量決定支援のための推論は15分間隔で行う。

また、3. 1で定義した各知識システムのうちKSDORのもつべき操作規則には、天ヶ瀬ダムの操作規則⁷⁾を参考に次の規則を用いた。すなわち、ダムへの流入量が $840\text{m}^3/\text{s}$ 以上あるいは枚方地点の水位が警戒水位(4.5m)以上の場合に放流量を $840\text{m}^3/\text{s}$ にカットする一次調節と、流入量が最大に達した後、枚方地点の水位が最大に達するまで放流量を $160\text{m}^3/\text{s}$ にカットする二次調節からなる操作規則である。

システムの運用例として、KSMID、KSMWL、KSRCRを確定的なプロダクションルールによる推論を行う知識システムとした場合の制御結果をFig. 5に示す。用いた知識ベースの概要は次の通りである。KSMIDは以後5時間までの流入量予測値が現在までの流入量の最大値を越えなければ流入量が最大に達したと判断する。ダム流入量の最大時期については以後5時間までの流入量予測値が現在までの流入量の最大値を越えなければ流入量が最大に達したと判断する(KSMID)。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時間先までの全ての予測値よりも既に得られた観測値の内最大のものが上回った場合に、水位が最大に達したと判断する(KSMWL)ことにした。また、KSRCRは推論時刻の30分先から2次調節を行うものとして、流入量予測値を用いて15分間隔でダムの貯水量を計算し、それが有

Table 1 (a) Fuzzy scopes of input and output variables

x_1	good(A_{11})	medium(A_{12})	bad(A_{13})			
x_2	small(A_{21})	one(A_{22})	large(A_{23})			
x_3	short(A_{31})	medium(A_{32})	long(A_{33})			
x_4	much(A_{41})	little(A_{42})	none(A_{43})			
y	small(B_1)	rather small (B_2)	medium(B_3)	rather large (B_4)	large(B_5)	

Table 1 (b) values of x_2, x_3, x_4 used in making fuzzy rule set

	A_{21}	A_{22}	A_{23}		A_{21}	A_{22}	A_{23}		A_{21}	A_{22}	A_{23}		
x_2	1	0	-1		x_3	-1	0	1		x_3	-1	0	1

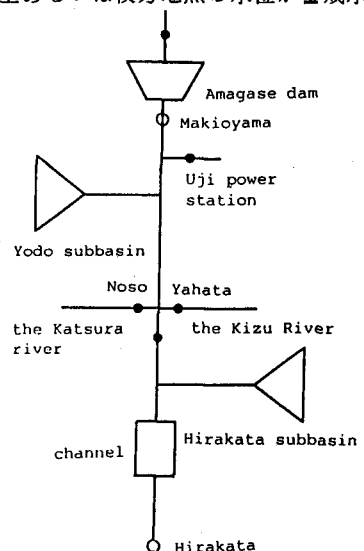


Fig. 3 The applied reservoir system

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の1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られる。2次調節中は2次調節をあと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。

Fig. 5によれば、実際の流入量ピークの生起時刻より2次調節開始時刻が遅れているが、これは、ピークの判断が予測に頼らざるを得ないものであるため若干の遅れが出るということと、早い段階では2次調節に必要な容量が不足するとの判断があったためである。しかし、洪水終了後のダム貯水量をみるとまだ若干の余裕があり、容量判断のための知識ベースの改善が必要と考えられる。

次に、画面表示システムによる支援情報の表示例をFig. 6に示す。本研究では、出力画面を4つのウィンドウにわけ、それぞれ、流入量の観測値および決定された放流量、枚方地点の水位、ダムの貯水量を表示する構成としている。もちろん、推論結果を表示するだけでなく、その理由等を示すことが望ましいので、現在、理由表示を含めた画面表示システムを開発中である。

5. 結 語

本研究では、数学的モデル化の可能な問題を処理する手続き型知識システムと言語形式で表現される知識の利用機構である推論システムとの協調と、推論システム内部での知識システム間の協調を軸とした協調問題解決型洪水制御支援環境の設計を行った。また、知識システムに、確定的なプロダクションシステムによる推論を行うものと、ファジィ推論を行うものの両者を導入することにより、実務者の意志決定過程を計算機上に再現する方法について検討した。今後、実用化に向けてさらに部分システムの改良を進めていくつもりである。

【参考文献】

- 1)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.
- 2)高棹琢馬・椎葉充晴・堀智晴：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，京都大学防災研究所年報第32号B-2，1989，pp.401-413.
- 3)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.
- 4)水本雅晴：ファジィ理論とその応用，サイエンス社，1988.
- 5)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.
- 6)Adele Goldberg・David Robson：Smalltalk-80 言語詳解，相磯秀夫監訳，オーム社，1987.
- 7)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

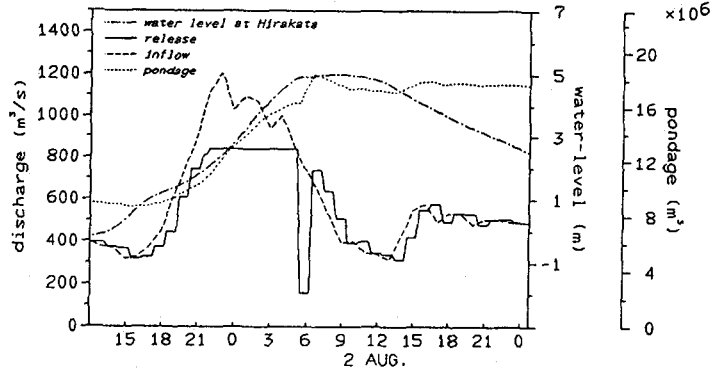


Fig. 4 Typical result of reservoir control

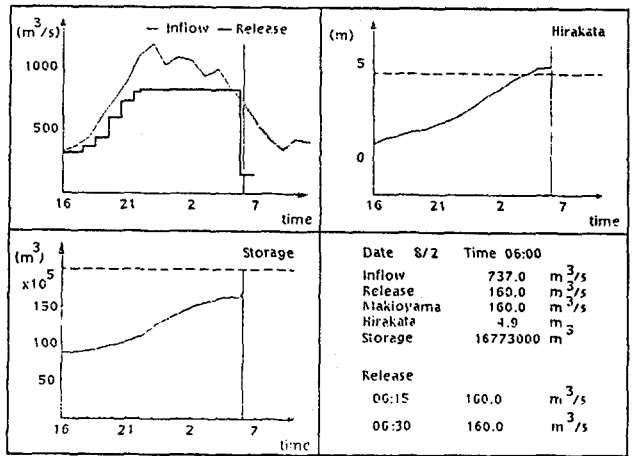


Fig. 5 Typical output of the display system