

洪水制御支援のためのメタ知識とその利用法に関する研究

高棹 琢馬・椎葉 充晴・堀 智晴

A STUDY ON META-KNOWLEDGE SYSTEM FOR FLOOD CONTROL SUPPORTING

By *Takuma* TAKASAO, *Michiharu* SHIIBA and *Tomoharu* HORI

synopsis

The aim of this study is to design meta-knowledge systems, which are important elements in hierarchical structuring method of knowledge-based systems for flood control supporting. First, the functions of a meta-knowledge system are clearly defined from the viewpoint of effective utilization of incomplete knowledge. Then an inference mechanism of the system is proposed based on Dempster & Shafer's probability theory. Reliability index of subordinate knowledge-based systems is also introduced as meta-knowledge. The inference system designed here is applied to the flood control supporting of Amagase dam reservoir for the verification of the theory.

1. 序 論

洪水時の貯水池操作を支援する情報の必要性は従来から強く認識され、そのためのシステムの開発が鋭意進められてきた。降雨や流量・水位の観測網の充実、流出モデル・流出予測システムの開発はその中心であり、これら技術の発達がさまざまな貯水池操作支援情報の提供を可能にしてきた。さらに、流出予測の技術が進歩すると同時に、制御理論を用いる実時間最適操作手法についても多くの研究がなされてきた。実時間最適操作手法は、観測情報と確率的予測情報の有効利用という点で優れており、貯水池操作の自動化を追求し、その理想像を与えるものである。しかし、現実には、多くのダム貯水池において、予め定められた操作規則に基づく操作が行なわれており、確率的予測情報と完全にリンクした最適操作が実現している状況ではない。この現行操作方法と理想型操作との溝が、観測・予測技術の進歩とは逆に、貯水池操作を困難視させる要因となってきている。観測情報や予測情報の有効利用技術である実時間最適操作手法が実管理に導入されていない結果、増大する支援情報をいかに実際の操作に役立てるのかといった技術が、結局、現場の人間に依存することになってしまい、そのことが、責任問題とも絡んで現場技術者の負担となっていると考えることができる。人工知能技術を用いた洪水制御支援システムに対する期待もこのような背景から出てきたものである。

さて、現在行なわれている貯水池管理の現状を見れば、そこには、さまざまなレベルの観測情報・予測情報が混在していることがわかる。さらに、観測技術の進歩が、豪雨-出水現象をさまざまな側面から計測することを可能にしたことに伴い、降雨予測・流出予測の手法も多数提案されている。これら観測・予測技術の利用の程度は、個々の貯水池によって異なるが、新技術の利用が今後進んでいくことは間違いない。したがって、貯水池管理に携わる人間に求められていることは、多数の情報から有効なものを選択し、それを組み合わせて操作のための判断を行なうことである。ただし、現在利用可能な情報は、どれも完璧なものとはいえない。したがって、この判断プロセスでは、程度の差はあれ不完全な知識に基づく複数の情報の質を評

価しながら結論を出す、という機能が必要になる。言い替えれば、特定の情報源（例えば予測モデルなど）の用いている手法に直接依存しない判断論理が、貯水池操作に関わる意思決定プロセスのモデル化に必要なことになる。

筆者らは、以上の視点から、特定の解析法を仮定しない判断論理、言い替えれば、手法の異なる降雨・流量予測モデルを複数利用できるような判断プロセスのモデル化手法として、多段階知識ベース構成法を提案するとともに¹⁾、そのソフトウェアとしての実現方法を示した²⁾。これは、貯水池の操作規則が実務者に要求する判断に対する支援を行なう推論単位を、利用できるデータや手法ごとに複数の独立した下位知識システム群とそれらを統括するメタ知識システムに分割した構造にすることで、不完全な知識の積極的活用と、システムの成長を可能にしようとするものである。この方法に従えば、例えば、新たな流出予測システムを導入するような場合でも、既存の下位知識システムには手を加えず、新たなシステムを下位知識システム群に加え、メタ知識システムを更新することで、既存の論理を含んだ形でシステム全体の更新が可能である。しかし、従来の構成法においては、メタ知識システムは、下位知識システムの出力する確信度を重みづけ平均することしかしておらず、不完全な知識の積極的利用という点では十分とはいえなかった。

そこで、本研究では、多段階知識ベース構成法におけるメタ知識システムについて、その果たすべき役割を、知識の性質とシステムの成長の可能性といった2つの視点から考察した上で、その推論機構を設計する。

2. 洪水制御支援のための多段階知識ベース構成法とその問題点

高棹¹⁾は、現在までに提案されている貯水池操作支援知識ベースシステムについて、知識の獲得および構成といった観点から考察し、今後、ダム操作支援知識ベースシステムが実用的なものになっていくための条件として、

1. 現時点での実務者の知識を格納しているだけでなく、降雨予測や流出量予測といった新しい技術やシステムを利用するための知識を容易に格納することのできる環境を持っていること、
2. 知識を構成する論理が理解しやすい構造であること、
3. 各ダムに定められている操作規則の遵守を保證する知識構成であること、

が必要であることを示した。そして、これらの条件を満足するための方法として、**Fig. 1**のような多段階知識ベース構成法を提案した。

図中、レベル0に対応する知識システムは、観測データと予測情報が混在している状態である。また、レベル1は、実務者が観測データに重きをおいた判断を行なっているレベルを想定し、観測データのみから判断する知識システムの集合を考え、雨量や流量についての情報の種類に応じて、複数の知識システムを用意し、異なるデータをもとに同一の判断項目について各々異なる出力をさせるようにしている。そして、メタ知識システムを、最終的な結論を出す上位の知識システムとして用意し、下位知識システム群の持つ知識の特性や重要性を判断する、いわゆるメタ知識を持たせるようにしている。レベル2では、新たに予測情報が利用可能となったレベルを想定し、予測情報を用いて推論を行う知識システムを設計し、これをレベル1の段階の下位知識システム群と並列に配置し、メタ知識システムを更新するという過程を踏むことで、新たな知識構成を実現できるようにしている。

さらに、筆者らは、多段階知識構成を用いて協調問題解決型洪水制御支援環境を構築し、それを淀川流域の天ヶ瀬ダムの洪水制御に適用した²⁾。そこでは、各下位知識システムに0～1の確信度を出力させるようにし、それを実際の現象と比較して重みづけ平均することで、各下位知識システムの出力を重ね合わせ、それをメタ知識システムの出力としている。しかし、この方法には以下の問題がある。

1. 1：1や1：4のような重み付けの表現に対する根拠がはっきりしていない。
2. 下位知識システム群のうち、能力の高い知識システムが高い確信度を出したとしても、他の知識シス

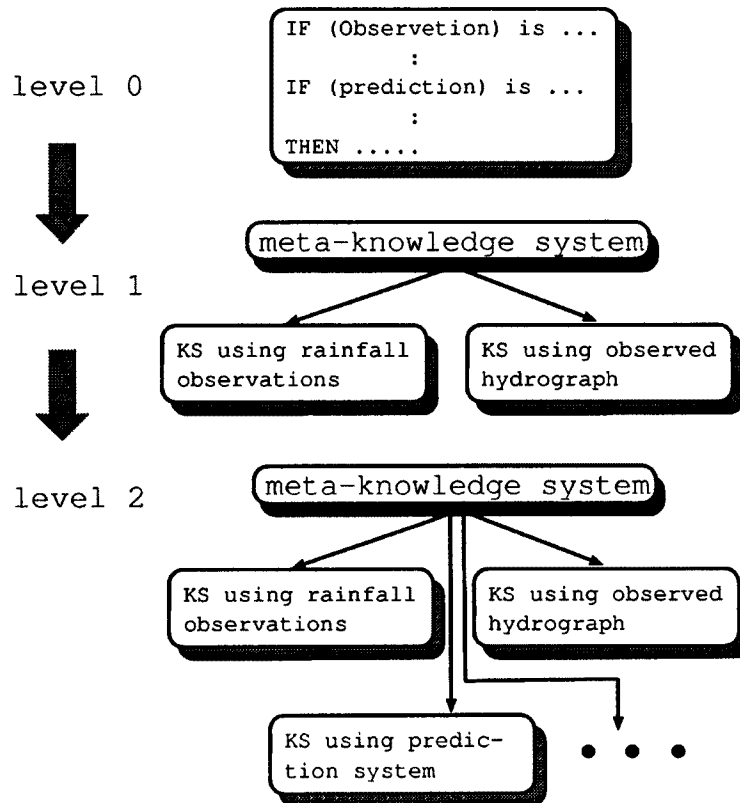


Fig. 1 Hierarchical Structuring Method of Knowledge-based Systems for Flood Control Supporting

テムの出力によってその値は減少することになる。このことは、メタ知識システムが扱う知識（つまり、下位知識システム）が増えたとき、場合によっては推論能力の低下を招く可能性があることを示している。

3. 下位知識システムの出力の形式が一定になるように知識を加工する必要がある。今後導入が期待される予測情報は、確率分布を出力するなど、様々な形式の出力が予想されるが、それらをシステムに取り込む際に、一定の出力形式に加工し直さなければならない。

そこで、本研究ではこれらの問題を解決するために、多段階知識ベース構成法におけるメタ知識システムの推論機構について考え、特に、ダム操作支援知識システムの成長の可能性という観点から考察を加える。

3. メタ知識システムの設計

3.1 洪水制御支援のためのメタ知識

メタ知識システムの最大の役割は、下位知識システムの出力する確信度間の矛盾を解消し、担当する判断項目について、信頼性の高い結論を導き出すことにある。下位知識システムの出力する確信度間の矛盾は、それらシステムの能力の違いや使用するデータのの違いに依存して生じるものである。言い替えば、下位システムが、担当する判断項目に関して不完全あるいは一面的な知識しか持たないことによって、矛盾が生じるともいうことができる。したがって、これら下位知識システム間の矛盾を効果的に解消するためには、

メタ知識システムが、各下位知識システムの能力に対する評価をその知識ベースに備えている必要がある。

また、下位知識システムの追加によってシステム全体を成長させることを考えると、メタ知識システムは新たに利用可能となったデータを用いる知識システムが追加されたとき、最低でも、追加される以前の推論能力を保証するような推論機構でなければならないといえることができる。多段階知識構成法では、現時点の知識構成を包含した形で、新しい知識システムが追加された後のレベルでの知識を構成することのできるような環境を提供している。したがって、メタ知識システムにおいても、新たな知識システムが追加される以前の推論能力を保証するような推論機構でなければ、システム全体として信頼性を保証することはできない。さらに、知識システム追加にともなうメタ知識システムの更新を容易にするといった意味から、また、実務者の判断論理との整合性を合わせる意味からも、統一的な意味を持ち、ある程度簡単にメタ知識システムを更新できるような推論機構であるほうが望ましい。

一方、洪水予測に関しては、決定論的に1つの流量値を与えるレベルのものから、流量の生起分布を与えるもの、さらには、ハイドログラフの生起分布を与えるもの³⁾まで提案されており、メタ知識システムは、これら多様な形態の予測システムからの出力や、実務者の経験的手法による予測情報を統一的に自分の推論に利用できる構造を持っていなければならない。特に、降雨や洪水予測技術の進歩が決定論的方法から確率論的方法への道を進んでいることを考慮すると、これら新しい予測モデルの出力をいたずらに加工することなく利用できることも必要である。

以上の分析から、メタ知識システムは、

1. 下位知識システムが矛盾した結果を出力したとき、それを解消する機能をもっていること、
2. 新たに下位知識システムが追加されたときも、追加される以前の推論能力を保証することができるような機能をもっていること、
3. 様々な形態の予測モデルに対応できること、

といった機能を備えていなければならないことがわかる。筆者らが既に用いた重みづけ法は、上記の条件を満足しているとはいえない。特に、システムの成長に関する条件である2、3については、重み付けでは対応することが非常に難しい。

ところで、上に述べたメタ知識システムを持つべき機能は、人間が複数の証拠を得たときに、その証拠をもとに特定の結論を導き出す過程に類似しているといえることができる。例えば、上記条件1は、得られた証拠が示す内容が一致しない、あるいはいづれもが単独で1つの主張を裏付けられないような場合の処理に関する問題である。このように、人間が不完全な証拠からひとつの結論を導き出す過程を数学的にモデル化したものに Dempster & Shafer⁴⁾の確率理論がある。そこで、本研究では Dempster & Shafer の確率理論を利用することにより、メタ知識システムの必要とする推論機構のうち、下位知識システムの出力間の矛盾解消機能を実現するとともに、メタ知識として下位システムの信頼度を導入することで、システムの信頼性を保証するメタ知識システムを設計する。

3.2 Dempster & Shafer の確率論を用いた推論機構

人間が、複数の証拠に基づいてある命題が成り立つかどうかを推論する過程の数学モデルに、Dempster & Shafer の確率理論⁴⁾がある。これは、全体集合 Θ の部分集合で表される命題に対し、

$$\left. \begin{array}{l} m(\phi) = 0 \\ \sum_{A \subset \Theta} m(A) = 1 \end{array} \right\} \quad (1)$$

なる $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ を与えることにより、推論の過程を数学的に表現しようとするものである。関数 m は、基本確率分布 (Basic Probability Assignment) と呼ばれ、 $m(A)$ はある一つの証拠を得た時に、その

証拠が命題 A を真と主張する度合を表しており、 A の基本確率と呼ばれる。なお、 $m(A) \neq 0$ なる A は、焦点要素 (focal element) と呼ばれる。また、 m を用いて定義される次の関数、

$$Bel(A) = \sum_{B \subset A} m(B) \quad (2)$$

は、確信関数 (Belief function) と呼ばれ、基本確率分布 m によって表される証拠から、集合 A のなかに真実を含むと判断される度合を表す指標である。さらに、2つの独立な証拠が得られた場合に、各証拠に対応する基本確率分布の合成手法として、次の Dempster の結合則が提案されている。

$$m_3(A) = \frac{\sum_{\substack{i,j \\ A_i \cap B_j = A}} m_1(A_i) m_2(B_j)}{1 - \sum_{\substack{i,j \\ A_i \cap B_j = \phi}} m_1(A_i) m_2(B_j)} \quad (3)$$

ただし、 m_1, m_2 は、それぞれ、証拠 1, 2 に対応して与えられた基本確率分布であり、 m_3 は、2つの証拠を考慮した場合の基本確率分布である。

さて、多段階知識ベース構成法では、必要な判断項目に対して用意された下位知識システム群が、それぞれの入力情報および知識ベースの内容に応じて、その事象が成立すると考える度合を 0~1 の確信度で表現する形式をとっている²⁾。下位システムの出力する確信度は(1)式を満足しているので、基本確率分布として用いることができる。したがって、メタ知識システムにおいては、各下位システムが出力する確信度を、式(3)で合成していくことにより、最終的な、言い替えれば下位システムの主張すべてを考慮に入れた基本確率分布を求めることができる。

具体的な手順は次の通りである。例えば、流入量の最大時期を判定する知識システム群が、Fig. 2 のような構成をとっているとす。さらに、知識システム A, B がそれぞれ流入量が既に最大に達したという事象に対する確信度として、 c_A, c_B なる値を返したとしよう。メタ知識システムでは、知識システム A の回答に対して、

$$\left. \begin{aligned} m_A(\{t_p \mid t_p < t_c\}) &= c_A \\ m_A(\Theta) &= 1 - c_A \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

を与える。 m_A は、知識システム A の主張に対する基本確率分布であり、 t_p, t_c はそれぞれ流入量ピークの生起時刻、現在時刻である。 Θ は全体集合で、 $m_A(\Theta)$ は、ピークの生起時刻はわからないという事象に対する基本確率を表している。このように、 $1 - c_A$ を、 $\{t_p \mid t_p < t_c\}$ に割り当てるのではなく、全体集合に割り当てることにより、積極的に無知量を表現できるのが Dempster & Shafer の確率論の特徴である。知識システム B の出力に対しても、同様に m_B を定義すれば、(3)式によって、知識システム A, B 両方の回答を考慮した基本確率分布 m が次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} m(\{t_p \mid t_p \leq t_c\}) &= m_A(\{t_p \mid t_p \leq t_c\}) m_B(\{t_p \mid t_p \leq t_c\}) + m_A(\{t_p \mid t_p \leq t_c\}) m_B(\Theta) \\ &\quad + m_A(\Theta) m_B(\{t_p \mid t_p \leq t_c\}) \\ m(\Theta) &= m_A(\Theta) m_B(\Theta) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

さらに、知識システム C が加えられた場合にも、上の m と m_c の間で、同様な計算をすることで、知識システム A, B, C のすべての推論結果を総合的に判断した基本確率分布 m' を求めることができる。なお、下

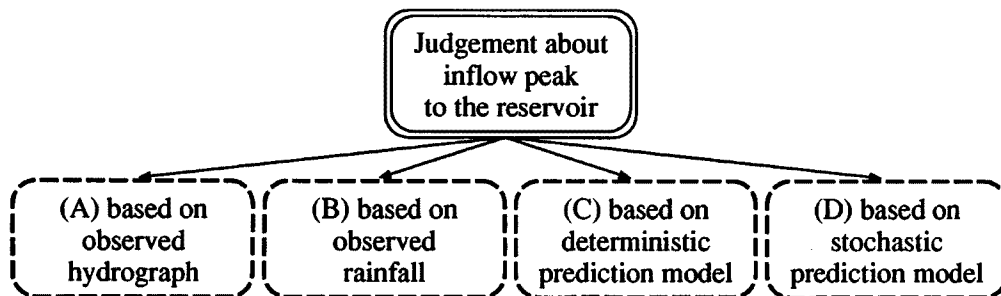


Fig. 2 Knowledge-based Systems for the Judgement about Inflow Peak

位知識システムに流入量ピークの生起時刻の確率分布を与えるような流出予測モデル (Fig. 2 の知識システム D) が与えられた場合は, その分布を m_D にそのまま置き換えて上の手順にしたがえばよい。したがって, 本方法によれば, いわゆる経験的知識を用いた知識システムの出力と, 確率予測システムの出力を互いに特殊な加工を施すことなく, 判断に役立てることができる。

以上の手順で, すべての下位知識システムの推論結果を考慮に入れた基本確率分布が求まれば, (2)式によって, 現時点で既に流入量は最大に達したという事象に対する確信関数の値を求めることができ, この値をもとにメタ知識システムは最終の判断をすることになる。

3.3 知識システムの信頼度とその利用

前節で, メタ知識システムの推論機構を Dempster & Shafer の確率論をベースに設計した。これにより, 経験的知識による推論結果と確率論的流出予測システムの出力とを統合的に判断に役立てることができるようになった。ただし, 推論機構の設計に用いた Dempster の結合則 (3式) は, もともと独立な証拠に基づく 2つの基本確率を合成するために提案されたものであって, 洪水制御の場合にはこの仮定が満足されているとは言えない。なぜなら, 仮に下位知識システム間で推論に用いる情報が異なっていたとしても (例えば, 一方のシステムでは流量データのみを用い, 他方は雨量データのみを用いるなど), これらデータは基本的に洪水流出という一つの自然現象を異なる側面からとらえているに過ぎないからである。したがって, 前節で提案した方法は最終的な基本確率分布や確信関数の値を過大に与える可能性がある。また, 各下位知識システムの知識ベースはいずれも完全とはいえないので, 信頼性の低いシステムが誤った判断を行なった場合には, その結果がメタ知識システムの推論結果に大きな影響を与えることになってしまう。したがって, メタ知識システムにおける推論結果の信頼性を高めるためには, 下位知識システムの能力に対する評価をその推論過程に反映させる必要がある。

これには, 2つの方法が考えられる。一つは, 下位知識システムに対して正答率のような信頼性基準をあらかじめ決めておき, これを満足するように知識ベースを設計する方法である。もう一つの方法は, 下位知識システムの信頼性に対する評価指標を作成し, メタ知識システムの推論過程においてこの指標を用いつつ下位システムの出力確信度を変更して用いる方法である。前者は, 知識システムを導入する際の基準を予め決めておくという点で比較的わかりやすいが, 将来どのような知識システムが追加されるか想定できないケースも多く, 基準の見直しなどの必要性が出てくる可能性も少なくない。また, 一律に基準を設けることは特定の事象にのみ有効な知識システムを排除することにもつながりかねない。例えば, ハイドログラフの立上り部では比較的良く合うが, 全体としてみた場合にはあまり良く合わないと言ったような流出予測モデルは, 否定されることになる。一方, 後者の方法では, メタ知識システム内に記憶された下位システムの能

力に対する評価をもとに、逐次、そのシステムの出力を変更しつつ推論に用いるため、推論効率の点からは前者に劣るが、下位システムの設計時には特に基準を意識する必要はなく、将来的な知識システム追加にも柔軟に対応することができる。また、メタ知識システムにおける評価の方法を工夫することにより、特定の下位システムが得意とする場面ではその評価を一時的に高くして使うなどといったことも可能になる。そこで、本研究では、能力評価の柔軟性に着目して後者の方法を採用することにする。

ところで、洪水制御を考える場合には、判断すべき項目が時間的に不可逆であることに注意しなければならない。各下位知識システムは、洪水の継続中連続して、自分の判断すべき現象に対する確信度を出力することになる。したがって、もっとも望ましいのは、判定すべき現象が生じた時に確信度が高くなり、それ以前は低い値を出力するという姿である。判定すべき現象が生じた際に高い確信度を出力しても、それ以前にその値に近い確信度を与えたりすれば、それは、信頼性の高いシステムとはいえない。そこで、本研究では、下位知識システムの信頼性を次の2つの指標でとらえることにする。

1. 推論回数に対する、知識システムが間違いでない出力を示した回数の割合（推論回数10回中、2回間違った出力を示せば0.8となる）
2. 判断項目の現象が実際に起こった時刻以前の知識システムの最大出力で、実際に現象が起こった時刻のシステムの出力を割ったもの（例えば、ピーク生起時期判断の知識システムにおいて流入量ピーク生起時期以前の最大出力が0.8で、実際のピーク生起時期の出力が0.4のときは0.5となる。なお、この値が1より大きいときは1とみなす）

1. は、例えば人間が他人の話を用いるかしないかを決めるとき、「彼の話は2回に1回はウソだから5割ぐらい信用する」といった類の判断に対応する。2. は、そのシステムの出力値が、判定すべき現象が生起する前と後で、どの程度の差を持っているかを表す指標である。そして、1., 2. の積をその知識システムの信頼度と定義することにする。

以上の考え方によれば、Fig. 2の知識システムAの信頼度が p_A と与えられたとすると、式(4)で与えられる基本確率は、

$$\left. \begin{aligned} m_A(t_p | t_p < t_c) &= c_A p_A \\ m_A(\Theta) &= 1 - c_A p_A \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

のように修正されることになる。すなわち、知識システムAの出力する確信度は、メタ知識システムが持つシステムAの信頼性に対する評価値 p_A 分だけ割り引いて評価され、その分無知量に対する基本確率の値が増加することになる。

なお、下位知識システム的能力に対する評価値は、例えば、洪水期間中一定とすることもできるし、知識システムの特徴に応じて洪水期間を複数に分割して与えておいても良い。さらに、この評価値は、過去の出水データに対して該当する知識システムを適用して求めておく他、洪水中にオンラインで修正しつつ用いることも可能である。

4. 適用と考察

4.1 適用システムの概要

ここでは、3.で設計したメタ知識システムを淀川流域天ヶ瀬ダムの洪水時操作を支援するシステムに適用し、その有効性と問題点を考察する。なお、貯水池操作支援のための推論システムの全体構成はFig. 3に示す通りである。本研究では、多段階知識ベース構成の内、メタ知識システムの構成に重点をおいているので、以下、「貯水池流入量の最大時期を判断する知識システム群」と、「下流基準地点水位の最大時期を判

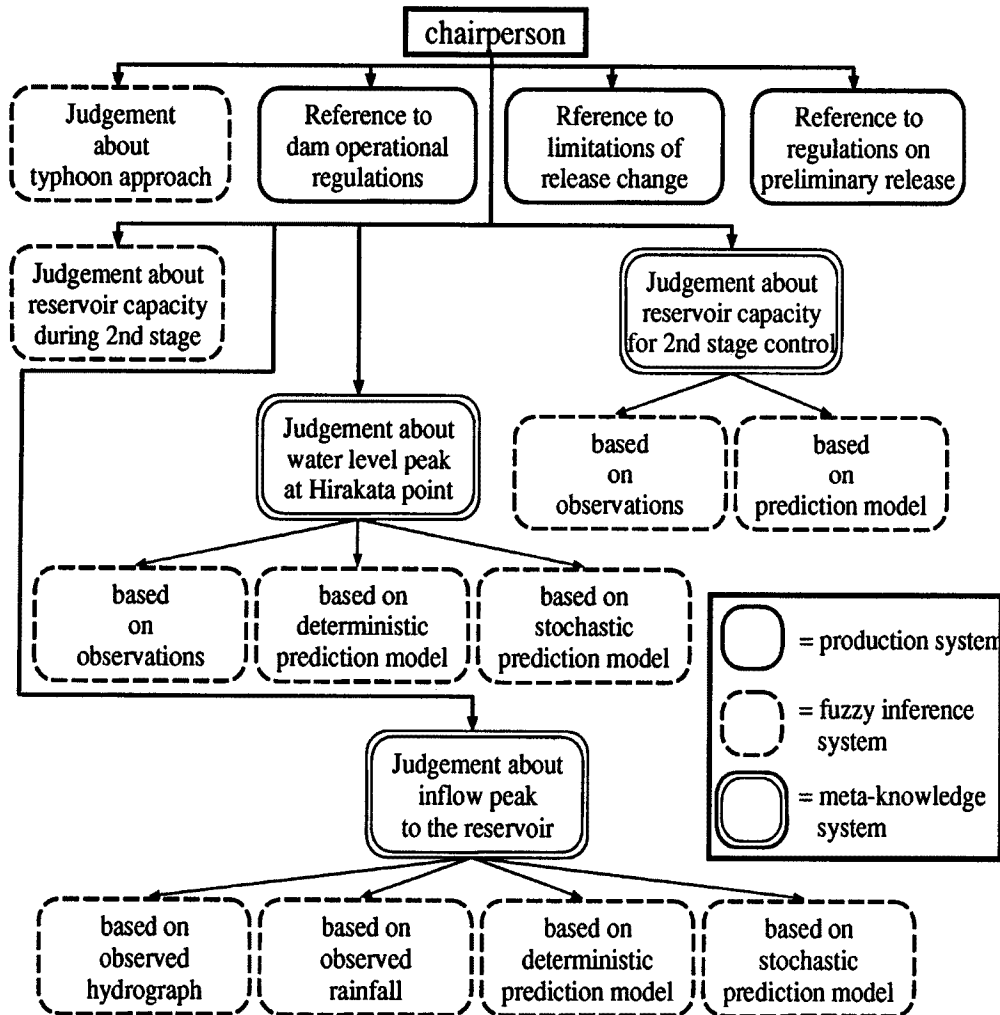


Fig. 3 Total Structure of the Inference System

断する知識システム群」についてその挙動を分析することにする。

4.2 貯水池流入量の最大時期を判断するメタ知識システム

貯水池流入量の最大時期の判定は、天ヶ瀬ダムの洪水調節が一次調節から二次調節⁵⁾に移るタイミングを考える際に重要になる判断項目である。この判断を行なうため、

1. 観測ハイドログラフの形状から流入量ピークを判断する知識システム
2. 観測流域降雨量から判断する知識システム
3. 決定論的流出予測システムの出力をもとに判断する知識システム
4. ハイドログラフの確率予測を行なうシステム

の4つの下位知識システムを用意している。知識システム1, 2は、実務者による経験的な判断に対応するレベルであり、3, 4は流出予測システムの導入あるいは追加のレベルに対応したシステムである。知識シ

Table 1 Calculation of Reliability index of a Knowledge-based System

Typhoon data	maximum inflow m^3/s	peak time	number of inference times (A)	output at peak time (B)	number of mistakes (C)	max output before peak (D)	C/A	B/D	$(1-C/A) \times B/D$
T6524	1528	21	24	0.5	0	0.319	0	1.57 (1.0)	—
T7220	1281	16	17	0.5	0	0.490	0	1.57 (1.0)	—
T8210	1207	47	54	0.483	1	0.406	0.019	1.19 (1.0)	—
Total			95	1.483	1	1.215	0.011	1.0	0.989

システム1は、入力として観測最大流入量・観測最大流入量からの経過時間・観測最大流入量と現在の流入量との差・観測最大流入量までの流入量増加率の4変数を取り、流入量ピークが過ぎたという事象に対する確信度を出力するファジィ推論システムである。知識システム2は、前件部変数に、過去3時間の観測降雨量の変化・観測最大降雨量と現在降雨量の比の2変数を取り、同様な確信度を出力するファジィ推論システムである。また、知識システム3は、決定論的に予測された流量系列から同様な確信度を出力するファジィ推論システムであり、知識システム4は、ピーク生起時刻の確率分布を出力するシステムである。なお、これら知識システムの詳細については文献²⁾を参照されたい。また、ここでの流量予測には、実績値を平均とした乱数を発生させることにより流量予測システムの挙動を模擬する方法をとっている。

さて、以上の下位知識システムを念頭においてメタ知識システムを作成する。本適用例では、各下位知識システムの信頼度の決定に65年24号、72年20号、82年10号の3台風による出水のデータを用いた。**Table 1**は、ハイドログラフの形状から流入量ピーク生起時期を判断する知識システムの信頼度を算定するために必要な項目を、各台風データごとに抽出したものである。この表より、流入量ピーク生起時刻の出力より大きな値を、それ以前の時刻において示したケースは全くなく、ピーク生起時刻以後にピーク生起時刻の出力より小さな値を示したのが82年10号台風のデータにおいて、1ケースあるのみであることがわかる。したがって、流入量ピーク生起時刻以前の最大出力に対する、流入量生起時刻の出力の割合(表中B/D)は、各台風データで1.0以上となり、全体としての値は1.0とみなすことができる。さらに、全体としての有効推論回数に対する割合は0.011となる。このことから、信頼度は $(1-0.011) \times 1.0 = 0.989$ になり、かなり高い信頼度を示すことがわかる。同様にして知識システム2, 3, 4の信頼度を求めた結果、それぞれ、0.598, 0.305, 0.982という値を得た。

次に、実際に以上の知識システム群にリアルタイムの判断を行なわせてみる。ここでは、適用対象洪水を82年10号台風とし、知識システムの信頼度導入の効果と下位知識システムを追加した際の挙動を分析するため、信頼度については、用いない場合と、上で求めた値を適用した場合との2ケースに、また、使用する下位知識システムについては、

case1 予測情報を用いることができず、経験的判断に頼っている段階、多段階知識構成法のレベル1に相当する、

case2 流入量などの決定論的予測情報を入手できる状況になった段階、レベル1からレベル2への移行に相当する、

case3 確率予測システムの情報を使えるようになった段階、レベル 2 におけるシステムの追加に相当する、
の 3 段階に分けて計算を行なった。

まず、信頼度をメタ知識として持たず、下位知識システムの出力をそのまま Dempster の結合則で結合した場合の結果を **Fig. 4** に示す。図中、Total Confidence はメタ知識システムの出力を、From Graph, Rain, Prediction1, 2 は、それぞれ、ハイドログラフの形状、観測降雨、決定論的流出予測モデルの出力、確率的流出予測モデルの出力から判断を行なう下位知識システムの出力を表している。

同図より、**case1**、**case2** では、メタ知識システムの出力は、全ての時刻において下位知識システムの出力値より高い値を示していることがわかる。これは、両ケースともに、下位知識システムが、ピークを過ぎたという事象に対する確信度を出力するのみなので、基本確率に変換した場合に他の知識システムの出力を否定するような焦点要素を持たないからである。また、**case3** では、流入量ピーク生起時刻の確率分布を用いる知識システムの出力が 0 のときは他の知識システムの出力に関係なくメタ知識システムの出力も 0 となっている。これは、今回用いた流入量ピーク生起時刻の確率分布を用いる知識システムが、信頼度を加味しておらず、わからないを意味する要素、すなわち全集合 Θ に対する基本確率が 0 であり、他の知識システムの出力を完全に否定していることになるからである。

次に、メタ知識システムの最終的な性能を見てみよう。実際の流入両ピークの生起時刻は 8 月 1 日 23 時であるにもかかわらず、メタ知識システムの出力は、8 月 2 日 9 時 30 分に 0.45、流入量ピーク生起時刻の 1 時間前に既に 0.6 を超えるなど、間違った時期にかなり高い値を示していることがわかる。このことから、信頼度をメタ知識として採用しないまま、下位知識システムの出力を Dempster & Shafer の確率理論の枠組に入れることは問題があることがわかる。

次に、信頼度をメタ知識として持った場合 **Fig. 5** についてみてみよう。まず、流入量ピーク生起時刻でのメタ知識システムの出力は、**case1**、**case2**、**case3** のいずれのケースにおいても、信頼度をメタ知識として持たない場合とほとんど変わらない。それに対し、流入量生起時刻以前のメタ知識システムの出力は、信頼度をメタ知識として持たない場合は、**case1** では 0.83 (8 月 1 日 14 時 30 分)、**case2** では 0.92 (8 月 1 日 9 時 45 分)、**case3** では 0.45 (8 月 1 日 9 時 15 分) であるのに対して、信頼度をメタ知識として持つ場合は、**case1** では 0.61 (8 月 1 日 16 時 15 分)、**case2** では 0.61 (8 月 1 日 16 時 15 分)、**case3** では 0.29 (8 月 1 日 9 時 45 分) となり、間違った時期の出力は信頼度をメタ知識として持っている場合の方が、かなり低くなっていることがわかる。また、下位知識システムを追加に伴うメタ知識システムの出力の変化を見ると、実際の流入量ピーク生起時刻 (8 月 4 日 23 時) におけるメタ知識の出力は、**case1** で 0.59、**case2** で 0.61、**case3** で 0.73 と下位知識システムの追加に伴い、確実に確信度を増していることがわかる。

さらに、メタ知識システムが「流入量ピークが過ぎた」と決定する時期について、その判断基準を

1. メタ知識システムの出力が 0.8 を超えたときピークは過ぎたと結論づける、
2. 過去の台風データにメタ知識システムを適用したときの、流入量ピーク生起時刻における出力の平均 (今回のケースでは、**case1** で 0.671、**case2** で 0.689、**case3** で 0.641 となった) を超えたとき決定する、

の 2 種類を設定して考えてみる。

まず、判断基準値を 0.8 とした場合、**case1** では 8 月 2 日 4 時 45 分に、**case2** では 8 月 2 日 4 時 30 分に、**case3** では 8 月 1 日 23 時 15 分にメタ知識システムが「流入量ピークが過ぎた」と結論づけており、実際の流入量ピーク生起時刻 8 月 1 日 23 時 00 分と比べると、下位知識システムを追加に伴い、時間的にも推論能力の向上が見られる。

また、メタ知識システムの判断基準値を 2. の基準値とした場合、**case1** では 8 月 1 日 23 時 15 分、**case2** では 8 月 1 日 23 時 30 分、**case3** では 8 月 1 日 23 時 00 分にピークが過ぎたと判定することになる。

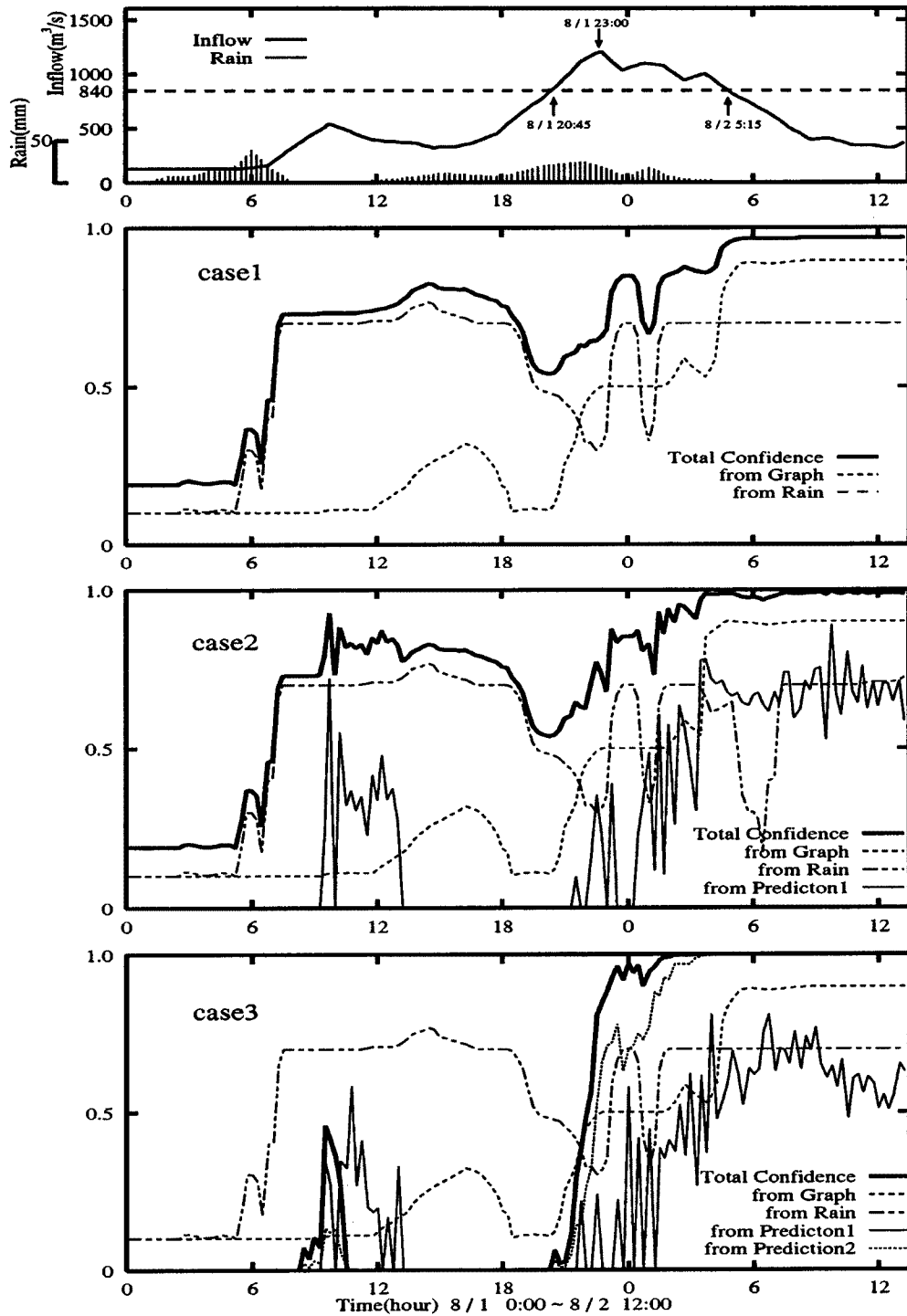


Fig. 4 Judgement about inflow peak (reliability index of subordinate systems is not used)

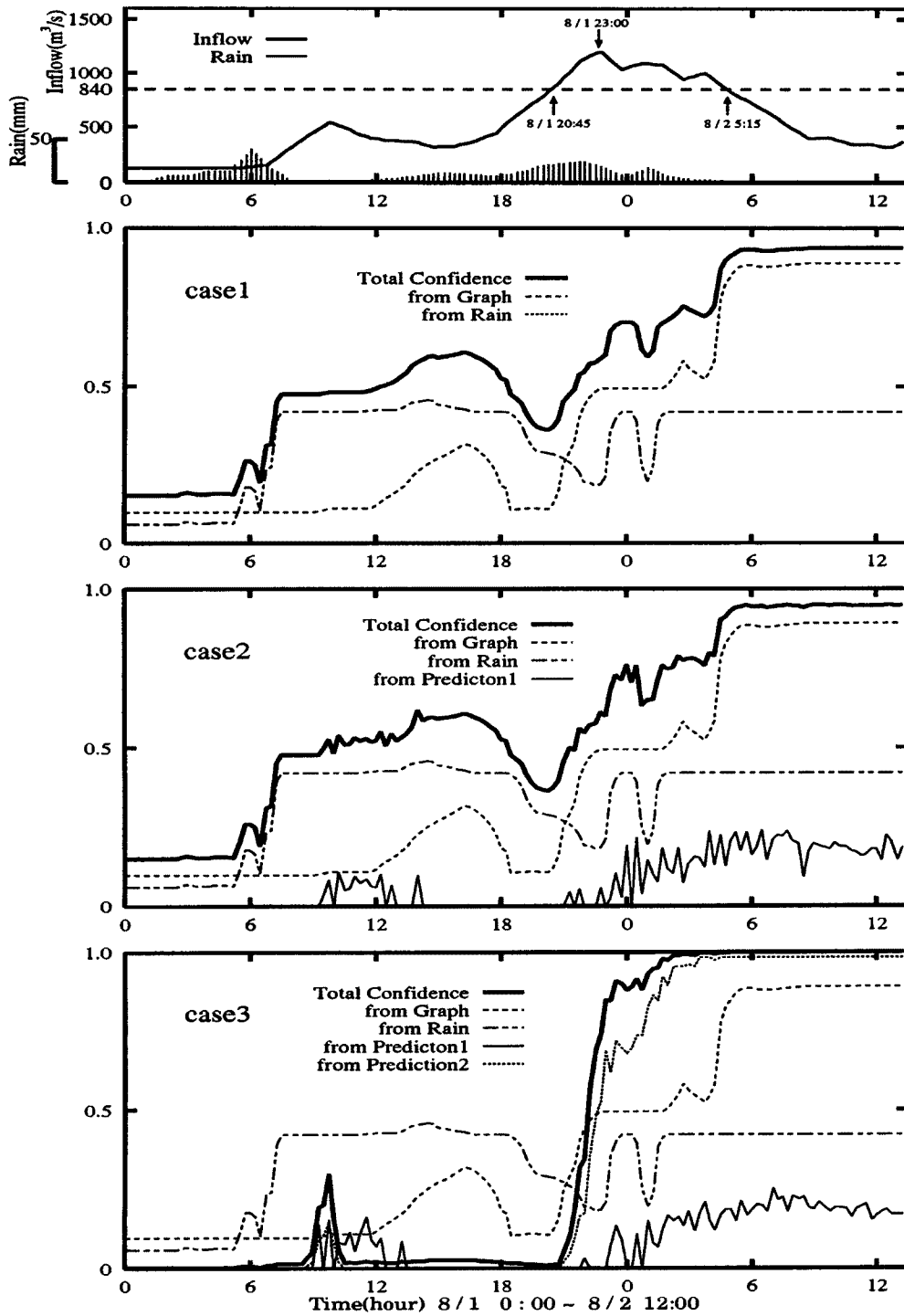


Fig. 5 Judgement about inflow peak (reliability index of subordinate systems is used)

この結果をみれば、実際の流入量ピーク生起時刻と比べてもかなりの精度で判断を行なっていることになるが、扱った台風データが少なかったこと、適用に用いた82年10号台風のデータも知識の獲得に用いたことを考慮すると、今後、更に適用例を増やして検討する必要がある。

4.3 下流地点水位の最大時期を判断する知識システム

下流評価地点(枚方地点)水位の最大時期の判断を行なう知識システム群は、メタ知識システムおよび、観測水位を用いる知識システム・決定論的水位予測システムの出力を用いるシステム・水位最大時刻の確率分布を与える予測システムの3つの下位システムから構成されている。観測水位のみを用いる知識システムは、前件部に観測最大水位からの経過時間と過去5時間の上流地点の水位変動の2変数を持ち、水位が最大に達したという事象の確信度を出力するファジィ推論システムで、実務者の経験的判断に対応するレベルのものである。前節と同様な手順で、各下位知識システムの信頼度を求めると、それぞれ、0.677, 0.485, 0.802となった。適用結果は、Fig 6のとおりである。

各ケースでの水位ピーク生起時刻は、**case1**では、8月2日5時30分で水位は4.95m、**case2**では、8月2日6時15分で水位は4.81m、**case3**では、8月2日6時15分で水位は4.81mとなっている。また、メタ知識システムが水位のピークは過ぎたと判断した時刻(確信関数の値が0.8を初めて越える時刻)は、**case1**では、8月2日16時45分で水位は3.96m、**case2**では、8月2日13時15分で水位は4.50m、**case3**では、8月2日10時15分で水位は4.75mとなっている。したがって、ピーク生起時期判断の時間的遅れは、**case1**で11時間45分、**case2**で7時間、**case3**で3時間となる。水位の変化は流入量の変化と異なり、非常に緩やかに変化するので判断の正当性を決定することは難しいが、ピーク生起時刻と判断時刻の時間間隔、水位の変化をみても、**case3**がピーク生起時刻に最も近い時刻に判断したといえる。

以上の結果をふまえると、今回、本研究でメタ知識システムで提案したメタ知識システムの推論機構を用いることで、下位知識システムが追加されても、効率的に推論を行ない推論能力を高めていくことがわかり、洪水制御支援知識ベースシステムの成長の可能性を示せたと考える。

5. 結 語

本研究では、多段階知識構成法による洪水制御支援システムの、重要な要素であるメタ知識システムについて、必要な機能を明らかにした。そして、それを実現するためのDempster & Shaferの確率理論と知識システムの信頼度を用いた、メタ知識システムの設計法を考察した。

以下、得られた成果をまとめておく。

1. 多段階知識構成法の中心部にあたるメタ知識システムの持つべき機能を、知識の性質・成長の可能性の両側面から考察することで、
 - (a) 下位知識システムが矛盾した結果を出力したとき、それを解消するための機能
 - (b) 新たに下位知識システムが追加されたときも、追加される以前の推論能力を保証することができるような機能
 - (c) 今後の導入が期待される確率予測手法などの出力は、加工することなくそのまま知識として用いることのできるような機能が必要であることを示した。
2. 上記の条件を満足するメタ知識システムを構築するために、Dempster & Shaferの確率理論をとり入れたメタ知識システムの推論機構を提案した。
3. メタ知識システムの持つ知識として、下位システムの信頼度という考えをとり入れ、メタ知識システムを設計する際の統一的な方針・基準を示した。
4. 具体的なメタ知識システムの設計方法を示すため、流入量ピーク生起時期を判断するメタ知識システ



Fig. 6 Judgement about Water Level Peak

ム・下流河川水位ピーク生起時期を判断するメタ知識システムを設計し、これを実流域に適用することで、不完全な知識を効果的に組み合わせた推論が可能であることを示した。

また、今後の課題としては以下の点が挙げられる。

1. 適用例では、実際に流出予測計算を行うのではなく、予測シミュレータを用いた分析に終わったが、システムをより現実的なものとしていくためには、実際に種々の精度を持つ流出予測ソフトウェアと組み合わせた分析を行う必要がある。
2. 本研究では、メタ知識システムの判断項目を、流入量や水位などの現象の判断に用いたが、今後、複数ダムの統合操作をも対象とした支援に本手法を適用するために、判断項目の対象を広げる必要がある。

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知識構成と獲得法に関する一考察，水文・水資源研究のための AI 技術の利用に関するシンポジウム論文集，水文・水資源学会，1992，pp.25-32.
- 2) 堀 智晴：洪水災害軽減のための流域-人間系のモデル化と管理に関する研究，京都大学博士論文，1993，pp.59-64.
- 3) 高棹琢馬・椎葉充晴・劉春燕・上林好之：降雨流出の実時間予測手法の形式について，水工学論文集，第34巻，1990，pp.79-84.
- 4) Glenn Shafer : A Mathematical Theory of Evidence, Princeton University Press, 1976.
- 5) 建設省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.