

貯水池操作支援システム総合化のためのダム操作規則参照用推論エンジンの設計

Design of an Inference Engine for Dam Operational Rules
for Synthesized Reservoir Control Support System

高棹琢馬*・堀 智晴**・荒木千博***

By Takuma TAKASAO, Tomoharu HORI and Kazuhiro ARAKI

A generalized inference engine which takes charge of application of dam operational regulations is designed for a synthesized reservoir control support system. First, the common expression and logical mechanics of operational regulations established for dam reservoirs in Japan are extracted. Second, an inference engine which can treat these logics such as the mutual reference among the provisions of regulations is explored. The system designed here enables us to accommodate each provision of dam operational regulations into a rule as it is, which will be a useful tool not only for inference itself but for providing support information.

key words: reservoir operation, artificial intelligence, decision support system

1. はじめに

貯水池の操作において、洪水あるいは渇水といった非常事態の中での操作が難しいことはいうまでもない。このような認識から、主として、洪水あるいは渇水状態を対象とした貯水池操作支援システムが検討され、製作されてきた^{1) - 8)}。これらの中には、既に実証試験や試験運用といった段階に達しているものもある⁸⁾。

ところで、貯水池の運用そのものは一年を通じて休むことなく行なわれており、貯水池操作に携わる実務者の負担軽減や信頼生向上のためには、洪水・渇水状態を包括しつつ、年間を通じてその支援を行なえるシステムが望ましい。例えば、洪水制御に特化したシステムでは、いつからそのシステムを使い始めるのか、また、渇水状態において洪水が予想されるような事態が生じた場合にはどのように対処するのか、といった点について問題が残ることになる。また、洪水と渇水では対象とする現象の時間スケールも異なるため、両者の結合に際してはこの点も注意しなければならない。したがって、通年のダム貯水池操作を支援するシステムを考える際には、洪水や渇水状態を扱うシステムの他に、両者をどのように結合するか、また、通常の操作の際の手順をどのようにシステムに取り込むかといった問題を解決する必要がある。

さて、筆者らは従来、洪水調節ダムの操作を対象した支援システム開発の方法論について考察し、ダム毎に定められた操作規則をいわゆる AI 技術によってルールベース化するとともに、規則適用にあたって現状では実務者の判断に委ねられている条件部を、各種観測情報や予測情報を用いて推論するシステム設計手法を提案した⁴⁾。さらに、現状では経験的知識から各種降雨・流量予測モデルまで様々な情報提供システムが

* 正会員	工博	京都大学教授	工学部土木工学教室	(〒606 京都市左京区吉田本町)
** 正会員	工博	京都大学講師	工学部土木工学教室	(同上)
*** 学生会員		京都大学大学院生	工学研究科	(同上)

存在することを考慮し、これらを不完全な知識源による証拠提供であると見なし、例えば、複数の流出予測モデルによる予測結果を、Dempster & Shafer の証拠理論を用いて合成する多段階知識システム構成を開発している⁷⁾。

このように、操作規則の検索・抽出とその適用支援とを区別してシステム化する方法は、通年にわたる貯水池操作の支援や複数ダムの操作支援を考える上でも適していると考えられる。しかし、以上の枠組で通年にわたるダム操作の支援を実現するには、洪水時のダム操作の規則だけでなく、すべての規則を格納・利用できる枠組が必要になる。また、支援情報の提供という側面からは、ダム操作規則の性質上、現在の状態が対応する規則の条文や適用条文がそのまま表示できる機能を備えなければならない。これには、ダム操作規則を原文に忠実な形で、特に各条文と1対1の対応を保って、ルールベース化しておくことが必要になってくる。ところが、現在、市販されているAIソフトウェアは、そこで扱われる知識形態を限定することができないため、一般的なルール表現機能しか持たないことが多い。このため、これらを使用する場合には、推論エンジンの持つ機能にあわせてルール表現を工夫・変更することにより、操作規則のルールベース化を行なわざるを得ない。この結果、作成されたルールベースは、もとの操作規則とは全く異なった表現や構成になってしまう。また、筆者らが従来作成した推論エンジンも、洪水制御部分の規則のみを扱うためのもので、細則などを含む規則体系のスムーズなルール化という点では問題があった。そこで本研究では、通年にわたる複数ダムの貯水池操作支援を念頭におき、これを実現する基礎として、ダム操作規則参照用汎用推論エンジンを開発する。

2. ダム操作規則参照用推論エンジンの設計

2.1 設計方針

一般にダム操作規則は法律の一種であり、その表現そのものは確定的なものである。また、確定的な知識の表現・利用にはプロダクションシステムが適しているといわれている。もともと、プロダクションシステムは知識を IF-THEN 形式のルールで表現・蓄積し、入力となる事実をこれらルールを用いて三段論法に似たプロセスで書き換えていくことにより、結論を導き出す推論技法である。この方法は、種々の推論手法のなかでもエキスパートシステムの開発に最も広く用いられているが、特に一般のプロダクションシステムでは、一組の事実(状態)に複数のルールがマッチした時の競合解消や、推論時の副作用を以下に抑えるかといった点に工夫が必要であり、様々な方法を用いて競合解消などの機能を実現したいいわゆる AI ツールも種々提供されている。しかし、これらの問題に関する一般的な解決法が確立されている訳ではなく、通常、ルールベース作成時に使用する推論エンジンの機能に応じて、ルールの表現方法を工夫することによって個別に対応するのが現状である。筆者らが、開発・使用してきた推論エンジンもその使用場面が洪水時に限られていたため、操作規則をルール化する際の表現法でこれらの問題に対応せざるを得ないものであった。したがって、ルール化にあたり、複数の規則条文をまとめたり、規則そのものをルール化するのではなく、条文から推定される状況を予め書き出し、それをルールの形にするという作業が必要であった。

ところが、洪水制御に限られた操作規則だけでなく、ダム操作全般にわたる規則体系をルールベース化するためには、上記のような対処方法は不適切である。これには、次の3つの理由がある。

1. システムを構築する側が一時的に操作規則の条文を解釈すると、間違ったルールを作成しかねない。
2. また、1. のようにして作成した個々のルールが正しかったとしても、ルール数が増えた場合、推論の際に副作用を生じる可能性がある。
3. 操作規則各条文とルールが1対1に対応していない場合、支援情報にその根拠、すなわち、どの規則に基づいた結果なのかといった情報を付加することが困難になる。

1., 2. の問題は、システムの信頼性といった観点から極めて重大である。特に、全規則をルール化する場

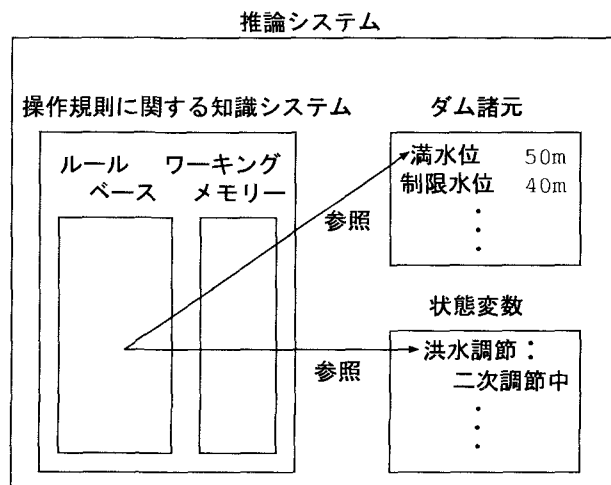


図-1 システムの概念図

合にはルール数が大きくなるため問題が多い。また、3. は、支援情報の提供といったユーザインターフェースを考える際に問題となる。操作規則が法律に基づくものであることを考えれば、推論結果とともにそれがどの条文に基づくものか、また、その条文はなぜ適用されたのかを示す必要がある。したがって、操作規則参照用の推論エンジンは、規則の原文をできる限り忠実にルール化できるものでなければならない。

幸い我国のダム貯水池の場合、その規則の構成や表現要素は基本的に似通っており、その中で用いられている述語や論理構成は限られている⁹⁾。したがって、まず操作規則の基本的な表現を扱える推論エンジンを設計し、オブジェクト指向プログラミング手法を用いてこれを実現すれば、特定のダム貯水池においては、その機能を継承することによって特定機能の付加も容易になる。そこで、以下では、一般にダム操作規則の持つ表現形式や論理構成の要素を取り上げ、これを処理する推論エンジンの設計法を考察することにする。

2.2 ダムの諸元に関わる表現

操作規則の条文の中には、表現形式自体はプロダクションルールに適合するものの、推論機構を考えるとIF-THEN形式の表現が不適切なものがある。その一つがダムの諸元である。これらは、規則中に「貯水池の満水位は標高〇〇メートルとする。」などと宣言的に書かれている。そこで、ダムの諸元を各ダム固有のデータとしてフレーム構造¹⁰⁾的に一括管理することを考え、その管理を推論システムに行なわせる。ダムの諸元は、その具体的な数値ではなく言葉として他の条文中に頻繁に出現する。そこで、ダムの諸元を言葉として含むプロダクション・ルールから、その具体的な数値を参照できるような機能を推論エンジンに持たせることにした(図-1参照)。こうすることによって、ある諸元の内容変更があったとしても、その諸元が関係する条文すべてを書き換える必要もなくなる。

2.3 条文間の相互参照機能

操作規則の条文の中には、「第〇条の規定により～の場合」といった表現が頻繁に現れる。これは条文間の相互参照を促すものであるが、その意味は一つではなく、数パターンに分類することができる。そこで、

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{rule-1} & \text{if A then B} \\ \text{rule-2} & \text{if C then D} \end{array} \right.$$

というルールを例にとってこの表現の分類を行ない、それぞれについて考察する。

1. rule-1の条件部Aからrule-2を参照しており、現状態とrule-2の条件部Cの適合を調べ、適合しているならrule-1の行動部Bを実行するというタイプである。この時、rule-2の行動部Dも実行される。例え

ば、rule-1の条件部Aに、「第〇条（rule-2）の規定により洪水調節を行なう必要があるならば」とあった場合、rule-2を適用すべきならばrule-1の行動部Bを実行する。これは、推論エンジンにあるルールより他のルールの条件部を呼び出すメソッドを付加することにより実現できる。

2. rule-1の条件部Aからrule-2を参照しており、そこでrule-2が適用されたか調べ、適用されていたら直ちにrule-1の行動部Bを実行するというタイプ。この時、それぞれの条文を適用する順序はrule-2・rule-1であり、rule-1の適用に際して、rule-2の実行結果が必要になる可能性のある場合である。この例には「第〇条（rule-2）の規定により洪水警戒体制をとった時、ただちに次に定める措置をとらなければならない」がある。これに対応するため、推論中に適用された条文を記憶する機能を付加し、rule-2がその記憶の中にあればrule-1を実行する機能を、推論エンジンに持たせることにした。
3. rule-1の条件部Aからrule-2を参照しており、当該時刻以前の推論でrule-2が既に適用されたかを調べ、適用されていればrule-1の行動部Bを実行するというもの。2.との違いは、rule-2は既に現在時刻以前の推論時に適用されており、rule-1とrule-2では実行に時間差があることである。これは、例えば、既に洪水警戒体制をとっているかどうかなどがルールの条件部に存在する場合である。この場合、毎時刻の推論で現状態が警戒体制に該当するかどうかから判断するのではなく、現在の体制を前提とした推論が行なわれなければならない。これは、ダム貯水池の操作過程が不可逆的な状態変更を繰り返しながら進むものであることから生じる問題である。これについては、貯水池の操作状態を表す状態変数を導入することにより、次節で解決を図ることにする。

2.4 状態変数

一般に、貯水池操作の過程は不可逆な状態変化から構成されていることが多い。したがって、ルールベースから適用するルールを探す時に、現在の状態を知りたい場合が生じる。例えば、「洪水調節中」、「予備放流前」などが条文中に現れることは多く、推論開始時には当然それらがわかっているなければならない。また、洪水警報が発令されたとき洪水警戒体制をとるが、警報体制中、意思決定を行なうたびに警戒体制をとるわけではない。洪水警戒体制中であるなら、それを前提とした推論を行なわなければならない。

これに対処するために、推論開始時の貯水池の操作状態を表す変数（状態変数）を用意し、それらが値をもってから推論を開始することとする。状態変数はダムの諸元と同様に推論システムが管理する。推論中に、状態変数の値すなわち現在の状態を知る必要がある時、いつでもそれを参照できる機能を推論エンジンに持たせておく（図-1参照）。

この状態変数を利用することにより、前項3.に述べたタイプの推論を実現することができる。例えば、「第〇条の規定により洪水調節を行なった後」というルールの場合には、現時点で第〇条の適用可能性を知りたいのではない。さらに、前回の推論で第〇条が適用されたか知りたいのでもなく、継続して行なわれてきた洪水調節が終了したかどうかを知りたいことになる。それは、洪水調節という名の状態変数の値が洪水調節後であるかそうでないかを調べることで知ることができる。

3. 適用例と評価

これまで述べてきた手法を用いて、淀川水系の天ヶ瀬ダムの操作規則を知識として持つ知識システムを作成した。天ヶ瀬ダムは琵琶湖のすぐ下流にあり、瀬田川洗堰の操作に影響を受けるので、その操作規則は他のダムのそれに比べてかなり複雑である。

今回は、操作規則の中でも最も詳しく記述されている洪水調節に対して推論を行なわせ、その推論過程を検証することにより、2.で提案した操作規則を検索するプロダクション・システムの性能を見ることとした。基本的な入力、日付・流入量・枚方地点の水位・貯水位とした。また状態変数は、体制・予備放流・洪水調節という名の三変数を用い（表1参照）、それぞれに様々なステージ（状態）を与えてみた。表-2はその結果

表-1 状態変数

変数名	値
system (体制)	normal (通常), flood-caution-system (洪水警戒体制)
pre-release (予備放流)	before (前), in (中), after (後)
flood-adjust (洪水調節)	before (前), first-adjust (一次調節中), second-adjust (二次調節中) stop-second-adjust (二次調節中止), third-adjust (三次調節中), after (後)

の一つで、二次調節に入るべきところの推論である。基本的なデータと実務者に要求される判断結果が入力されている（実際のシステムでは、これらは、それぞれの判断を支援する知識システムの出力として自動的に与えられる）。また、現状態が、洪水警戒体制中であること、予備放流後であること、洪水調節のうち一次調節中であることが、状態変数により表されている。以下、推論過程を検証して見よう。なお、各表中のルール番号はrule条項-号を表している。

まず、第1サイクルでは、流入量が毎秒900立メートル(inflow 900)、枚方地点の水位が4.8メートル(hirakata-level 4.8)、日付が10月3日(today 10 3)であることから、第3条第1号(rule3-1-1)、第2号(rule3-1-2)と第4条第1号(rule4-1-1)が適用されている。第3条第1号では、流入量が毎秒840立メートル以上のとき(一号洪水=flood-situation-1)、第3条第2号では、枚方地点の水位が警戒水位(4.5メートル)以上のとき洪水とする(二号洪水=flood-situation-2)と定義しており、条件と適合した。また、第4条第1号により、現在が洪水期間である(flood-period)ことがわかった。これにより、データ・ベースの内容が更新された。

次に推論サイクル2を見てみよう。「二号洪水である」(推論サイクル1の結果より)、「流入量が最大に達した後である」「枚方地点の水位が最大に達する前である」「二次調節のために必要な貯水池容量が不足しない」(入力による)、「一次調節中」(状態変数による)ということから、第16条第1項第2号ロ(rule16-1-2-B-a1)が適合する。第21条第5号(rule21-1-5)は、「第16条による洪水調節を行なうとき、放流することができる」と定めており、また第23条第1項第3号(rule23-1-3-a)は、「第21条第5号による放流を行なう場合、第16条による放流量から発電所の使用水量を控除した量をこえないようにしなければならない」と定めている。つまり、第23条第1項第3号から第21条第5号、第21条第5号から第16条と、二段階に参照が行なわれている。第16条第1項第2号が適合しているので、第23条第1項第3号も第21条第5号も適合することになる。さらに、現在水位が73.0メートルであることから、第21条第3号「洪水期間において水位が制限水位をこえるとき放流できる」と、第21条第3号を参照する第23条第1項第1号「第21条第3号による放流を行なう場合、流入量に相当する量から発電所の使用水量を控除した量をこえないようにしなければならない」が適合している。ところが、第7条には「洪水期間においては第16条の規定により洪水調節を行なう場合を除き制限水位をこえてはならない」と書かれている。今回の場合、第16条による洪水調節が必要であると判断しているので、制限水位をこえてもよい筈である。しかし、第21条は放流できる場合を定めている条文なので、今回適合したのは間違いではない。よって、推論サイクル2においてこれらすべてが適用され、ルール・ベースの内容が書き換えられた。そして、もうこれ以上の適用は不可能となり推論が終了した。推論結果を見ると、放流量として毎秒160立方メートルを推薦し、そのとき一次調節を終え二次調節に入ることを示している。さらに第23条第1項第1号、第23条第1項第3号による放流量の制限に関する事項を表示している。

4. おわりに

本研究では、貯水池操作支援システムの総合化に必要なダム操作規則参照用汎用推論エンジンを開発した。こうしたソフトウェアの開発作業は、実際に貯水池操作支援システムを検討する上で開発工程の一つのネックになっているとも考えられるので、ここで開発したシステムはソースレベルで公開する。なお、現在完成

表-2 二次調節に入る際の推論状況

入力	(today 10 3) (inflow 900) (hirakata-level 4.8) (storage-level 73.0) (after inflow-peak) (before hirakata-peak) (enough second-capacity-before-second-adjust)	
状態変数	(system flood-caution-system) (pre-release after) (flood-adjust first-adjust)	
推論過程	適用したルール	データベース
(サイクル1)	rule3-1-1	(flood-period) (hirakata-level 4.8) (flood-situation-2) (inflow 900)
	rule3-1-2	(flood-situation-1) (storage-level 73.0) (after inflow-peak)
	rule4-1-1	(before hirakata-peak) (enough second-capacity-before-second-adjust)
(サイクル2)	rule16-1-2-B-a1	(can release) (can release) (in second-adjust) (after first-adjust) (release 160) (hirakata-level 4.8) (inflow 900) (flood-situation-1)
	rule21-1-3-a	
	rule21-1-5	
	rule23-1-1	
	rule23-1-3-a	
推論結果	(can release) (can release) (in second-adjust) (after first-adjust) (release 160) (hirakata-level 4.8) (inflow 900) (flood-situation-1)	
注意事項	(restriction “release < (inflow – water used by power station)”) by rule23-1-1 (restriction “release < (rule16 – water used by power station)”) by rule23-1-3-a	

しているのは lisp バージョンであるが、汎用 WS 用に C++ バージョンも製作中であり、併せて公開したい。

参考文献

- 1) 高埴琢馬・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, pp.357-368, 1988.
- 2) 神田徹・井辻英雄・上田至宏：ダム洪水調節操作支援エキスパートシステムについて，水文・水資源学会誌第 2 巻 2 号, pp.33-39, 1989.
- 3) 小尻利治・藤井忠直：知識ベースを用いた貯水池のファジイ実時間操作に関する研究，水工学論文集第 34 巻, pp.601-606, 1990.
- 4) 高埴琢馬・椎葉充晴・堀智晴・佐々木秀紀：協調問題解決型洪水制御支援環境の設計，水工学論文集第 34 巻, pp.595-600, 1990.
- 5) 岩下修・西川和也・福西祐・日向博文：ダム集中制御のためのエキスパートシステムの開発，水工学論文集第 34 巻, pp.583-588, 1990.
- 6) 池淵周一・小尻利治・宮川裕史：中・長期予報を利用したダム貯水池の長期実時間操作，京都大学防災研究所年報第 33 号 B-2, 1990.
- 7) Takasao, T., M. Shiiba and T. Hori : Hierarchical structuring of knowledge-based systems for flood control supporting, Applications of Artificial Intelligence in Engineering IX, pp.379-386, 1994.
- 8) 伊藤一正・秋葉務・吉田勲：AI によるダム管理の事例，水資源システムの高度利用化に関するシンポジウム，水文・水資源学会, pp. 69-76, 1995.
- 9) 建設省河川局開発課（監修）：ダムの管理例規集 昭和 60 年版，山海堂, pp.579-580, 1985
- 10) 斎藤正男・溝口文雄：知的情報処理の設計，コロナ社，1982.