

記号推論とニューラルネットワークによる 洪水時電力ダム操作支援

DECISION SUPPORT SYSTEM FOR HYDRO-POWER DAM OPERATION
DURING FLOOD

BY SYMBOLIC REASONING AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

岡明夫¹・堀智晴²・上坂薫³・小尻利治⁴・椎葉充晴⁵

Akio OKA, Tomoharu HORI, Kaoru KAMISAKA, Toshiharu KOJIRI and Michiharu SHIIBA

¹正会員 工修 (株) ニュージェック (〒113-0024 文京区西片1丁目15-5)

²正会員 工博 京都大学 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 関西電力株式会社 (〒530-8270 大阪市中之島3-3-22)

⁴正会員 工博 京都大学 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

⁵正会員 工博 京都大学 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

A decision support system for hydropower dam operation is designed in this study based on crisp reasoning by production system and on artificial neural network. At the first step of the designing, symbolic reasoning is adopted to express the provisions of dam operational regulations and related manuals; each provision is translated into computer compatible rule in if-then form and stored in rule bases. Then an inference engine is designed to extract appropriate rules and apply them. Object-oriented designing using C++ is adopted for the inference. Artificial neural network is introduced to extract and express the operators' knowledge and policy. Based on several records of actual operation, the network structure is defined and its parameters are determined.

Key Words : reservoir operation, hydropower dam, decision support system, production system, Artificial neural network

1. 序論

日本の電力ダムの大半は洪水調節容量を持たず、「川の従前の機能の維持」や「上下流の事故防止」のために、操作員は個々のダムで設定された規程を遵守しなければならない。電力ダムの洪水に対する制御方法は、規程によって次の3つの段階から構成されている。

- 1) 洪水到達前に予備放流によって貯水位を低下させる,
- 2) 指定した水位(予備放流水位)で水位を固定する,
- 3) 水力発電のため洪水後に貯水位を増加させる。

以上の操作は、ダム管理所に備え付けられた高機能卓からの観測値に基づいて、操作員によって実行されている。つまり操作は操作員の知識と経験に大きく依存することになる。現在まで、大抵の洪水の場合、比較的うまく貯水池は操作されているものの、流入量のような情報の不確定要素のため、電力ダムの洪水時操作の困難さ

は依然として指摘されつづけている。さらに、近い将来、熟練した操作員が不足するであろうことも危惧され始めている。また、ダム貯水池周辺の環境が年々複雑になってきている。河川の下流域に多くのレクリエーション施設が建設され、事故の潜在的危険性は高まっているといっても過言ではない。したがって、現在の操作員の持つ知識をシステム化し、高機能操作卓の示す洪水観測値や予測値を、的確にゲート操作に結びつけるためのシステムに対する必要性はきわめて高い。

操作員の経験や知識をシステム化し貯水池操作に役立てようとするアプローチでは、いわゆる人工知能(AI)手法を用いる方法が提案されている。利水ダムを対象とするものには、岩下らのファジィ推論を用いた発電用ダム集中制御システム¹⁾や、推論法とファジィ分割による推論結果の差異について検討したもの²⁾がある。また、洪水調節ダムを対象として、既往の洪水ハイドログラフをいくつかのパターンに分類しておくことで、ファジィ推

論によって放流量を決定するシステム³⁾、複数の知識システムによる協調推論により操作を支援するシステム⁴⁾、予測情報を与える部分システムを不完全な知識源とみなし、これらを複数組み合わせることでより信頼性の高い結論を得ようとするシステム⁵⁾などが提案されている。

本研究では、発電用ダムが、操作規程とそれに付随するマニュアル類といった文書化された知識と、操作員自身の持つ知識との組み合わせによって操作されていることに着目し、記号推論とニューラルネットワークを組み合わせることによって操作を支援するシステムを構築することを試みる。具体的には、まず、操作規則参照を行う知識システム設計の基本となるプロダクションシステムの推論エンジンを、汎用性と推論速度の向上のため、C++を用いて設計する。次に、定水位制御モードにおける操作員の挙動を模擬するニューラルネットワークを設計する。

2. 意思決定支援システムの全体構成

電力ダム操作に用いられる知識は2つに大別できる。ひとつはダム操作規程や関連マニュアルから構成されたもの、もうひとつは経験に基づく知識である。前者は言語形式で表現されており、一方後者はルール形式で表現することが困難であり、知識を抽出・利用するためには様々なタイプの方法を考慮しなければならない。

日本のダム操作規程は法律の一種と位置付けられており、それを破ることは厳格に禁止されている。したがって、操作規程に基づいた推論過程には不確実性は許されない。それゆえ意思決定支援システムにおいてこれらの操作規程を利用する方法として、プロダクションシステムによるクリスプな推論を採用する。このシステムは、主に、洪水の状況に応じて制御モードを決定する。一旦制御モードが決定されれば、ゲートの開度（閉度）は観測値や予測値をもとに決定される必要がある。この過程は観測値や予測情報のもつ不確実性に大きな影響を受けるとともに、操作員の経験が重要な過程でもある。このような曖昧さに対処すべく、操作員の知識や経験を利用

すべくニューラルネットワークを導入する。したがって、ダム操作支援システムはプロダクションシステムによる記号推論システムとニューラルネットワークによる定水位制御支援システムとで構成されることになる。

3. 操作規程参照のための記号推論システム

(1) 操作モードの決定に必要な知識構成

すでに著者らは、ダム操作に関する部分的な問題を受け持つ分散した知識ベースシステムによる協調した推論を提案してきた^{4,5)}。この推論システムにおいては、ダム操作に必要な知識は次の2つに分類される。貯水池の操作規程と、その各条文を適用するにあたって実務者が自ら行わなければならない判断を支援する知識である。また、不完全な知識群から知識を利用するための知識ベースシステムの階層的設計法も提案した⁵⁾。これは、同じ問題に対して異なった知識を複数の知識システム群とそれら下位知識システム群の性能に関する知識をもつメタ知識システムを用意し、下位知識システム群が導出した結論に生じた競合をメタ知識システムによって解消しようとするものである。

電力ダム貯水池の操作規定にこれらの手法を適用することで、図-1に示すように5つの知識ベースシステムが必要であることがわかった。ダム操作規程を利用した知識ベースシステムは、洪水の状況に応じて適切な操作モードを選択するための推論を行うが、推論過程で、厳しい洪水の生起する可能性の判断、洪水の危険が明確であるかどうかの判断、流入量ピークの判断、放流により下流に急激な水位変化を引き起こすかどうかの判断、貯水位が固定水位より下にあるとき、放流あるいは放流しないで貯留するかどうかの判断が必要になった場合には、それぞれ該当の知識システムに推論を依頼する。そしてこれらシステム間の情報交換を制御するために議長システムを導入した。

(2) 操作規程参照作業のための推論エンジンの設計

操作規程を計算機上に実現したシステムの中に取込むためには、操作規程を計算機可読形式で表現し、与えら

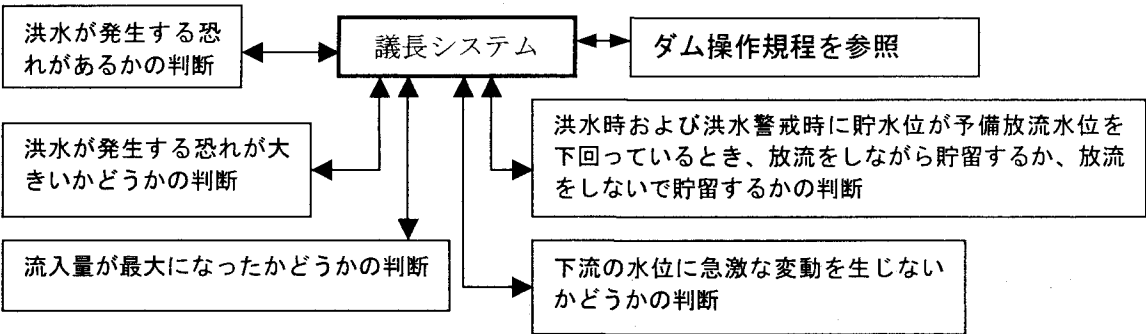


図-1 電力ダム操作に必要な知識ベース

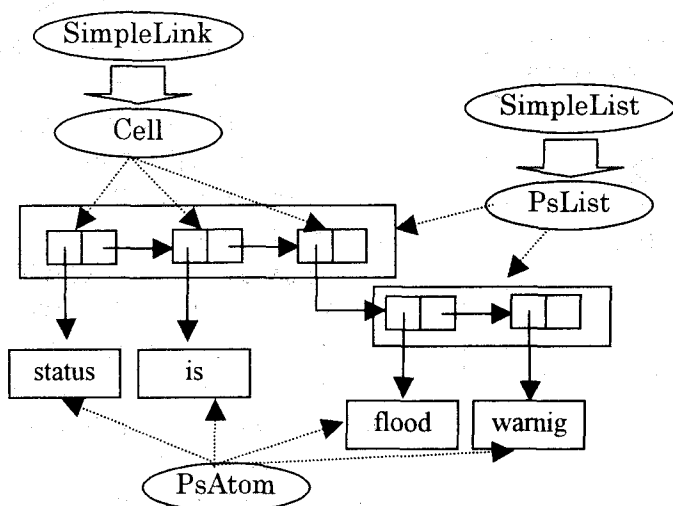


図-2 C++によるリスト構造のオブジェクト指向表現

れた条件の下で適用すべき条文を抽出できるシステムが必要である。貯水池操作規程の条文には、その条文を適用する際の条件と、その条件が成立した際に行うべき操作内容が記述されている。したがって操作規程参照システムを開発するには、推論形式としてプロダクションシステムが適している。シンボルやリストの処理といったプロダクションシステムを実現する上で必要になる機能を持つ推論エンジンを実現する手段として、オブジェクト指向プログラミング手法を用いた。

なお、筆者の一人は、既に天瀬ダムを対象とした協調問題解決型洪水制御支援システムの開発過程において、ダム操作規則の条文をプロダクションシステムで表現し推論するための推論エンジンをLisp言語を用いて開発している⁶⁾が、本研究では、推論速度の向上とより一般性を高めるためにVisual C++によりダム操作規程参照推論エンジンを開発した。

a) 操作規程表現のために必要なデータ構造

ダム操作規程のプロダクションルール化には、記号を主体としたリスト構造が必要である。リスト構造とは、(status is (flood warning)) といった表現で表されるデータの列のことであり、この場合、status, is, (flood warning)といった2つの記号と一つのリストが一方方向に連なったデータ構造を表している。(flood warning)も2つの記号からなるリストであり、リストはこのように入れ子構造も表現できる必要がある。ダム操作規程を表現する場合、例えば、上記のリストは「洪水警報が発令されているとき」といった一つの条件を表すことになる。

本来Lisp言語では元々シンボルやリストの処理機能を有しているが、C++言語を用いるためには、推論エンジンの設計そのものを行う前に、推論エンジンの開発に不可欠なリスト処理などのデータ構造の定義を行うクラスを作成する必要がある。そこで本研究では、図-2に示すように SimpleLink, Cell, SimpleList, PsAtom,

PsListといった5つのクラスでリスト構造を実現した。図中では、楕円が作成したクラスを表しており、楕円間のボックス矢印がクラスの継承関係を、破線矢印がインスタンスの生成を表している(例えば、status というオブジェクトは、クラスPsAtomのインスタンスとして作成されている)。クラス「SimpleLink」は、リスト構造を表現する基本となる単位を表すもので、次の「SimpleLink」のオブジェクトを指すポインタを持つ。クラス「Cell」はクラス「SimpleLink」の派生クラスで、「SimpleLink」の定義に加えて、リスト内部に格納されるオブジェクトに対するポインタを持つ。リスト内部に格納されるオブジェクトは、数値であったり文字列であったりするように、データ型を一つに定めることが出来ないで、

クラステンプレート機能を用いて、「Cell」のインスタンスを生成する際に格納すべきオブジェクトの型を指定できるようにしている。そして一連の「Cell」の先頭をさすポインタを持つものとしてクラス「SimpleList」を定義した。この「SimpleList」がクラス構造を表す基本となるクラスということになる。

さて、上記クラス「SimpleList」があらゆるオブジェクトを格納することができるが、これだけではプロダクションルールを実現するには無理がある。例えば、推論時にリストに格納されている数値データを用いた演算が必要になる場合があるが、上記のデータ型を後で知ることが難しい。ところで、推論に用いられるデータの要素は通常、数値と記号との2種類であることがほとんどである。そこで本研究では、この二者を型情報を含めて表現するため、クラス「PsAtom」を作成している。

「PsAtom」は実数データを文字列として持つとともに、それが整数・小数・記号のいずれかであるかという情報を持つクラスである。このクラスには、数値情報を表している場合には、四則演算や大小比較を行うための演算子を、また記号を表しているときには、一致するかどうかを判定するための演算子を定義している。したがってリストに格納するデータをこのクラスのオブジェクトに限定すれば、その要素間の演算が可能になる。ここでは、さらに格納データを「PsAtom」のインスタンスに限定したクラス「PsList」をクラス「SimpleList」の派生クラスとして定義し、このデータ構造を元にプロダクションシステムの推論エンジンを設計することにする。

b) 推論エンジンの設計

プロダクションシステムは、if-then形式で表現されたルールを基に、条件部の記号群が事実を表現する記号群と一致するかどうかをチェックし、一致したルールの結論部を元の実事を表すデータと置き換えることによって推論を進める方式である。

本研究では、この推論を実現するために、図-3に示

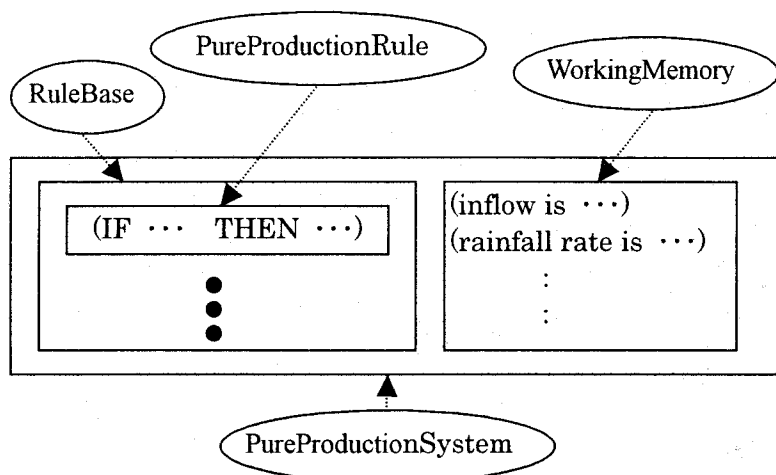


図-3 推論エンジンのオブジェクト指向設計

す「PureProductionRule」, 「RuleBase」, 「WorkingMemory」, 「PureProductionSystem」の4つのクラスを作成している。

「PureProductionRule」は、一つのプロダクションルールを表すクラスで、ルール名、条件部、実行部を管理し、プロダクションルールの条件部が事実情報と適合しているかどうかを調べる機能を持つ。条件部および結論部は、前項で作成したリスト構造を用いて表現する。また、単なる記号一致だけでなく、より強力なルール記述能力を持たせるため、ルール条件部に変数を記述し、条件のマッチングの際に得たデータを他の条件や結論部で参照することができる機能、条件部や結論部からユーザが定義したメンバ関数を呼び出す機能、複数のルールをandまたはorで結合する機能を付加している。

「RuleBase」は、プロダクションシステムのルール

ベースに相当するクラスで、個々のルールである「PureProductionRule」のインスタンスを格納し、ルールのうち与えられた事実情報に適合しているものを選び出す機能を持つ。またこのルールから呼び出される関数を管理するのもこのクラスである。

「WorkingMemory」は、事実情報をリスト形式で管理するクラスであり、プロダクションシステムのデータベースに対応する。クラス「PureProductionSystem」は、「RuleBase」, 「WorkingMemory」のインスタンスを格納し、「RuleBase」のインスタンスから「WorkingMemory」の内容に適合しているルールを得て、「WorkingMemory」のインスタンスに事実情報の更新を実行させる機能を持つ。

4. ニューラルネットワークによる定水位制御

洪水時の操作（予備放流、定水位操作、水位回復操作）の内、3つの制御モードの中では、特に定水位モードの操作が難しいということが多くの操作員によって報告されている。このモードでは、操作員はダムゲートから流入量と同じ量の水を放流すればよいはずである。しかし、操作卓で表示される観測流入量は、直接計測されたものではなく、水平湛水条件で作成された水位-容量関係から計算されたものであるため、多くの誤差を含んでいる。したがって、操作員は、高機能卓に表示される種々の観測値を、自己の知識に基づいて評価することにより、放流量を決定している。しかし、定水位モードでのダムゲート操作は、数分間隔という極めて短い時間ステップで行われているため、個々の判断の理由を操作員から得ることは難しい。また、一つの出水であってもゲート操作の記録は大量になり、操作員から放流量の決定方法を系統的に聞きだすことも不可能であった。

そこで本研究では、操作記録から操作員の知識を推定して表現する方法として、3層のニューラルネットワークを採用することにする（図-4）。入力層には、操作員からの聞き取り調査（操作時に主にどのデータを重視しているかの聞き取り）をもとに、7種類のデータ（(1)放流量、(2)目標水位と現水位との偏差、(3)瞬時水位と平均水位との偏差、(4)桃山堰堤（ダム上流に位置する）越流量、(5)伊奈川ダム（上流に位置する他のダム貯水池）からの放流量、(6)ダムサイトの雨量強度、(7)阿寺川（ダムサイトの上流支川）の流出量）を採用する。なお、図-4は、各データとも1時刻の

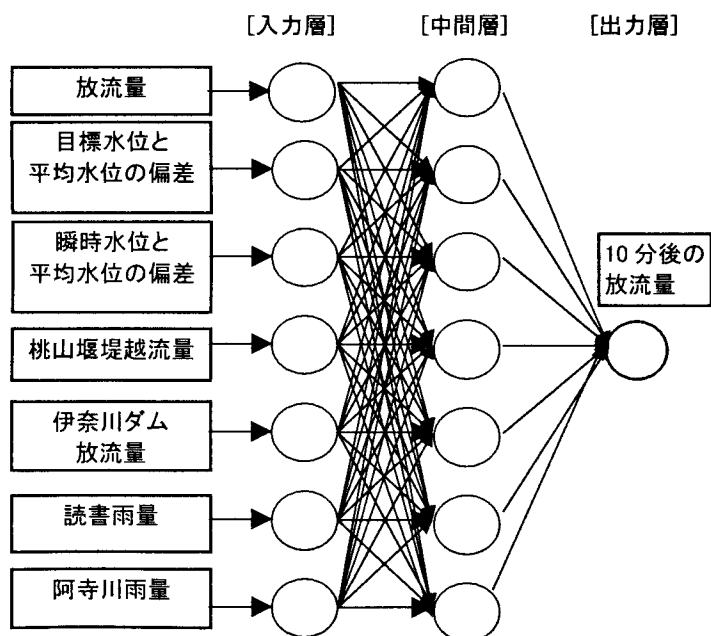


図-4 定水位制御のニューラルネットワーク

みの値を入力とする場合の構造であるが、遅れ時間をどれくらい考慮するかというオプションも考えられる。そこで、本研究では、入力の変数に対して、現時刻のみの値を用いるもの（7入力）と、現時刻およびその10分前のデータを用いるもの（14入力）とを検討対象とする。

5. 適用と考察

(1) 対象ダム貯水池の概要

本章では、本論文で設計した意思決定支援システムを木曽川の上流に位置する流域面積1,342km²の読書ダム貯水池に適用する。読書ダムは関西電力所管の水力発電ダムであり1995年に導入された高機能卓が設置されている。流入量などのデータが1分あるいは10分毎に記録されている。

高機能卓には流入量の値に基づいてゲート操作を半自動的に行う自動制御機能が付加されている。しかし、読書ダムのような集水面積に対して貯水容量が小さいダムでは、洪水時に貯水池の水面勾配を無視できず、湛水面積に貯水位変化を掛けて流入量を見積もる方法では、正確な流入量の把握が困難になってくる。また容量の小さいダムでは出水時に水面が振動する傾向もあって、現状の水位すら把握しづらいこともある。こうしたダムでは、自動制御機能を利用したゲート制御は熟練操作員の操作とは大きく異なる操作となり、ハンチング（開閉を繰り返す状態）の発生等も見うけられるため、自動制御機能を有効利用できない場合が多いのが実情である。

(2) 推論エンジンによる操作規則参照

前述のダム操作規則参照推論エンジンを用いて、読書ダムの既往洪水（1998年6月）を対象として1時間単位でシミュレーションを行った。なお入力データは貯水位、流入量、放流量、注警報とし、現時点の流入量が10分後

も同じであると仮定し10分後の放流量を推定した。

3章で設計したプロダクションシステムに操作規定の一部をルールとして格納し、推論を行った結果を図-5に示す。図-5より、全体として、操作員による操作実績に比較的近い放流量を導出できているといえる。しかし、急激な流入量変化のある場合には貯水池水位が大きく変動する結果となっている。また、操作規程の条文の内、制御に直接関係する部分のみをルール化したため、一部ルールが不足し操作規程を完全に参照できない箇所があった。操作規程は各諸元、状態、措置を規程しており、状態と措置はリンクした構造となっている。そのため単一的に操作規程をルールベース化するのではなく、状態と措置を分離し相互参照するシステムを構築する必要がある。

(3) ニューラルネットワークによる定水位制御

ここでは、4章で構造を決定したニューラルネットワークの同定を行い、どの程度操作員の判断を再現できるかを検証する。用いたデータは、1996年の三出水（6月および8月二出水）、1998年一出水、1999年三出水（いずれも6月）の合計7つの既往洪水データである。このうち、1996年8月の出水を検証用データとし、ネットワークの同定には、残り6個の出水データを用いることにした。

ネットワーク構造のオプションとして、入力変数に現時刻のデータのみを用いるものと、現時刻 t および1ステップ前（ $t-10$ ）の14個の入力を持つものを用意した（変数の説明は前章参照）。さらに、それぞれについて、中間層のニューロン数を、入力層のニューロン数と同じにするタイプと、入力層のニューロン数の2倍にしたものについて検討することにする。

また、バックプロパゲーション法によるネットワークパラメータ同定イテレーションでは、誤差曲面の最急勾配方向にどの程度の幅を進めて探索を行うかといった問題がある。どの程度の

探索幅が適切かといったことは、誤差曲面の形状に依存するため、ここでは、探索幅を1, 0.1, 0.001の3種類を取り、同定計算を行った。結局同手計算の総ケース数は12通りとなる。

以上の方法で、同定計算を行った結果、キャリブレーション用の6出水データに関しては、入力層のニューロンが14個（現時刻および1時刻前のデータ

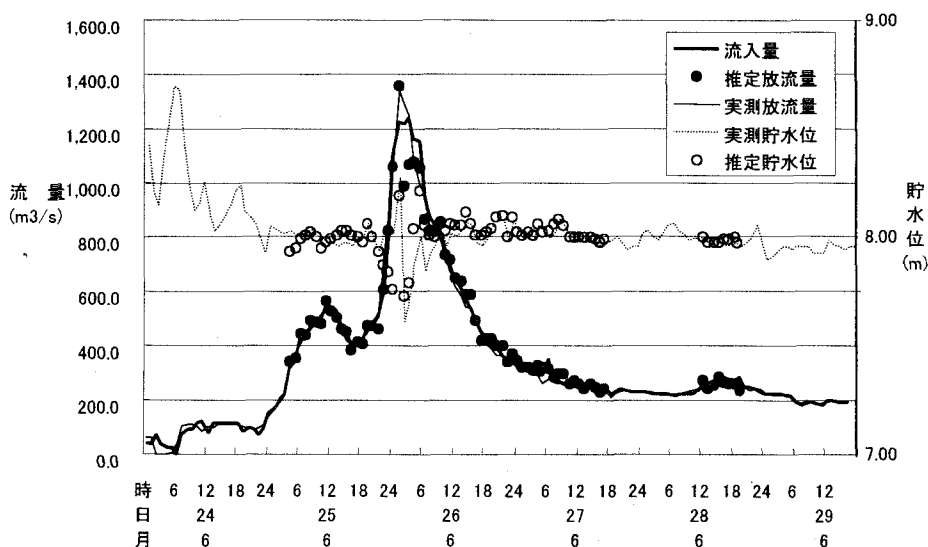
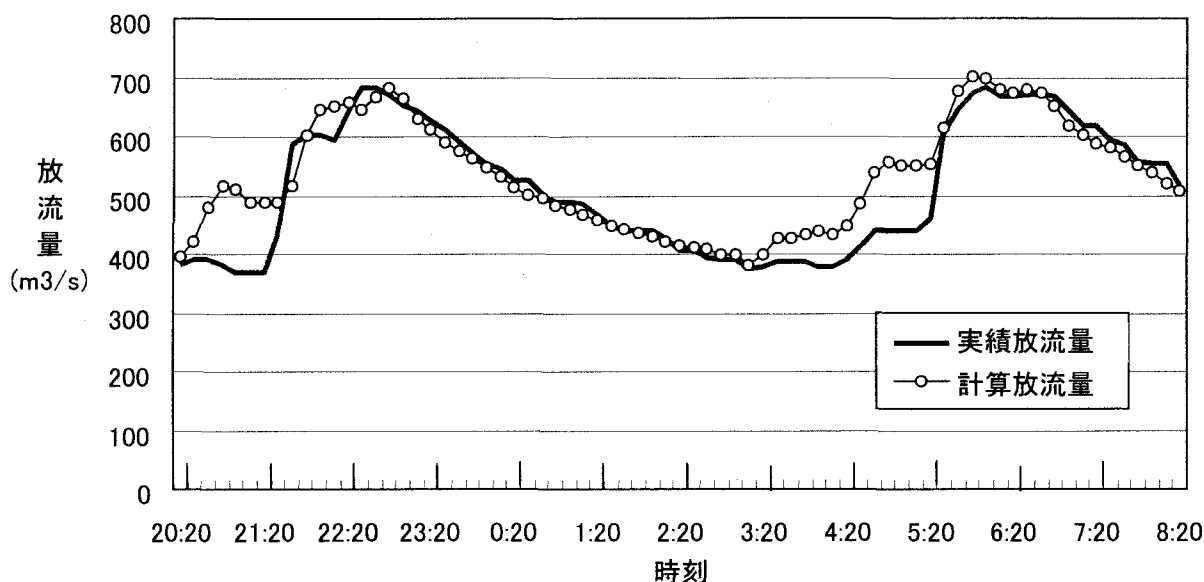


図-5 プロダクションシステムによる放流量の導出結果



を入力とするもの), 中間層の個数が28個のネットワークが, 最も小さい同定誤差を与えることがわかった. 図-6は, 同定に用いなかった出水データ(1996年8月28日20時20分から29日8時20分)に対して, 残り6出水のデータを用いて同定したニューラルネットワークによって放流量を計算した結果である. 図-6から, ニューラルネットワークによる計算値が, 実操作員の決定した放流量と比較的良好一致を示していることがわかる. しかし, 21時付近と6時付近の2箇所, ニューラルネットワークによる放流量と実務者による放流量との間に比較的大きな違いが見られ, いずれの時刻付近ともニューラルネットワークによる計算放流量が実務者による値を上回っている. この2つの時刻付近では, ダムサイトで比較的高い雨量が記録されており, ニューラルネットワークによる放流量決定計算では, 強降雨に敏感に反映したため, 実績よりも大きな放流量を導いた可能性が高い. 今後, ネットワークの構造決定に遺伝的アルゴリズムを導入すること等でこの欠点を補正していく予定である.

6. 結論

本研究では, 洪水時の電力ダム操作のための意思決定支援システムに関して,

1. 遵操作規程やマニュアル類をコンピュータに格納し, 状況に応じて適切な事項を抽出するプロダクションシステムを開発した. 特に, 汎用性と推論速度の向上を目的とし, C++を用いて操作規程参照用推論エンジンを作成した.
2. 定水操作モードにおける放流量の決定問題には, 実務者からの直接的な知識獲得が困難であるという特性を考慮し, ニューラルネットワークによるモデル

化を試みた. 単純な3層ネットワークに対して, 6出水データを用いてパラメータを同定した結果, 検証用データに対しても比較的実務者の意思決定に近い判断を行うネットワークを作成することができた.

なお, 今回の検討は, ダム操作支援システムの一部についてのみであったが, 操作規程等マニュアル類の参照と定水位操作のモデル化は, 発電用ダムの洪水時操作を支援する上で重要な要素であり, 記号推論とニューラルネットワークの併用というアプローチの有効性は確認できたといえる.

参考文献

- 1) 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.
- 2) 長谷部正彦・長山八州稔・桑川隆徳: ファジイ理論のダム操作支援システムへの応用について, 水工学論文集, 第37巻, pp.69-74, 1993.
- 3) 小尻利治・藤井忠直: 知識ベースを用いたファジイ貯水池操作に関する研究, 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開発, 水工学論文集, 第34巻, pp.595-600, 1990.
- 5) Hori, T. and T. Takasao: Synthesized decision support system for reservoir control based on integrated use of incomplete knowledge sources, Proc. of Int. Conf. on water resources and environment research, Vol. II, pp. 111-118, 1996.
- 6) 高埴琢馬・堀智晴・荒木千博: 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開発エンジンの設計, 水工学論文集, 第40巻, pp.57-63, 1996.

(2000. 10. 2受付)