

流出系の構造的モデル化システムについて

高棹 琢馬・椎葉 充晴・堀 智晴・立川 康人・
市川 温

OBJECT-ORIENTED HYDROLOGICAL MODELING SYSTEM

By *Takuma TAKASAO, Michiharu SHIIBA, Tomoharu HORI,*
Yasuto TACHIKAWA and Yutaka ICHIKAWA

Synopsis

Regarding the runoff system as a set of dynamic elements which communicate with one another, we develop a new system for modeling the runoff system.

In our system, the basic and common operations in runoff simulation, such as initialization of states, giving the values of parameters, giving and receiving data, setting time steps, are standardized and modeled as functions of the "base model" of runoff elements. The users only have to derive their models from the "base model" and do not need to write the codes for the basic and common operations as stated above.

Our system is so flexible that it can treat various types of communications among elements. As an example, a model for simulating the flow in a river network is shown.

1. は じ め に

わが国では、水資源問題や流域計画などに適用できる一般的な流域規模の水文モデルはまだ開発されていない。本研究は、一般的な流域規模の水文モデルを開発していくための基礎となるシステム—構造的モデル化システム OHyMoS (Object-oriented Hydrological Modeling System)—を提案するものである。

流出現象には、降雨、降雪、遮断、蒸発散、表面流、浸透、中間流、地下水流、河道流下過程など多くの要素過程が関係している。個別の水資源問題では、その中の特定の要素を特に重視したり、とりあげる要素は同じでも異なった取り扱いをしたりするために、構成される水文モデルは非常に多様であり、その個数は研究者の数だけ、あるいは研究機関の数だけあるということになりやすい。

通常は他の機関で作成されたコンピュータモデルのコードを解読することは容易でないで、モデルの適用性の検証は最終的な適用結果の比較というコンテスト形式で実行するしかない。また、モデルの一部を取り出して分析的な検討をしたり、他の機関のモデルを採り入れて、よりよいモデルをつくるというようなことをしたくとも、そのモデルの入出力方式や操作方式を詳細に理解し、それに合わせて自分のモデルを作らなければならないため、その作業は非常に煩雑になり、現実的にはほとんど不可能となってしまっている。これは、客観的かつ科学的な水資源の評価という点から、大きな問題である。

研究機関が共同して一つの標準的なモデルを作れば問題は解決するかというと、そうでもない。構成される水文モデルの多様性は、水文流出現象が多くの要素過程からなっていることに根ざしているのであるから、標準的なモデルを作成したとしても、一時的なものにしかならないし、あまり使われないということになるであろう。

水文流出現象が多くの要素過程からなっていることを考慮し、科学的な客観性を確保するには、モデルを標準化するのではなく、水文モデルの構成方法を共通にし、モデル構成の基盤となるシステムをつくる必要がある。すべてのモデルが共通の仕様にしながら作られ、動作すれば、モデル相互を比較したり、交換することも容易であろう。

このシステムとモデルの関係は、コンピュータの OS (オペレーション・システム) とアプリケーションの関係によく似ている。共通の OS 上で動作するように作られているからこそ、さまざまなアプリケーションは交換され、比較され、発展してきたのである。もし、共通の基盤となる OS が存在しなければ、各アプリケーションは機種に依存することになり、異なる機種間ではアプリケーションを交換したり、比較することができなくなる。また、各機種ごとに同じような機能を持つアプリケーションを開発しなければならなくなり、非常に生産性が悪い。現在的水文モデル開発環境は、コンピュータの世界になぞらえれば、まさしく OS の存在しない状態といえよう。

いま一度繰り返すが、本研究の目的は、水文モデルを開発していくための共通の基盤となる方法・システムを提案することである。

2. 構造的モデル化システム

構造的モデル化システムが水文モデル開発の共通の基盤たるためには、どのような特徴を持っていないかならなければならないであろうか。1. で述べたように現時点では、モデルの一部分を取り出して分析的な検討をしたり、他の機関のモデルの成果を自分のモデルに組み込むといったことが容易にはできない。このような問題を解決するため、構造的モデル化システムはつぎのような条件を満たしていなければならない。

条件 1 : 個々の要素で、固有の時間・空間スケールで分析する必要があるれば、そうすることができる。

条件 2 : 特定のモデルを想定したモデル化の方法をとらず、要素モデルをとりかえることができるようになっていく。

このような条件から、要素モデルは機能的に完結していて、他の要素モデルや全体系モデルから独立していることが求められる。説明のため、A, B という二つの要素モデルを考えよう。A の動作に B の機能が必要だとすれば、A と B は切り離して扱うことができない。つまり、この二つの要素モデルは常にペアで扱わねばならない。とすれば、A だけ、あるいは B だけを取り出して分析したり、交換するといったことができなくなる。したがって、まえの二つの条件を満たすことができない。条件を満たすためには、A と B が互いに機能的に独立している必要がある。

このようなことをふまえて、本研究ではモデル構成の仕様を以下のようにした。

1. 水文流出モデルの構造を要素モデル群の階層構造として抽象化した。つまり、要素モデルを複数相互に接続することで全体系のモデルを構成するとした (Fig. 1)。全体系モデルの作成・修正作業は、それぞれ、要素モデルの組立・交換作業となる。
2. 水文系モデルの要素モデルとして普通に要求されるような動作、すなわち、パラメタ値の設定、状態量の初期化、計算時間の更新などを標準化し、こうした機能のみを持つ『基本型要素モデル』を定義した (Fig. 2)。個々の要素モデルは、基本型要素モデルに各要素モデル独自の機能を付加して作成することとした (Fig. 3)。ここでいう『標準化』とは、その機能の運用手続きを統一するだけで、その機能の内容を統一することではない。機能の内容は個々の要素モデルで独自に定義することができる。
3. ある要素モデルの出力データを他の要素モデルが入力データとして利用するという関係を、端子によるデータ授受の関係としてモデル化した。端子によるデータ授受では対処できない場合に対応するため、要素モデル同士が、端子を通さずに、直接データを交換する直接通信の機能を実現した。

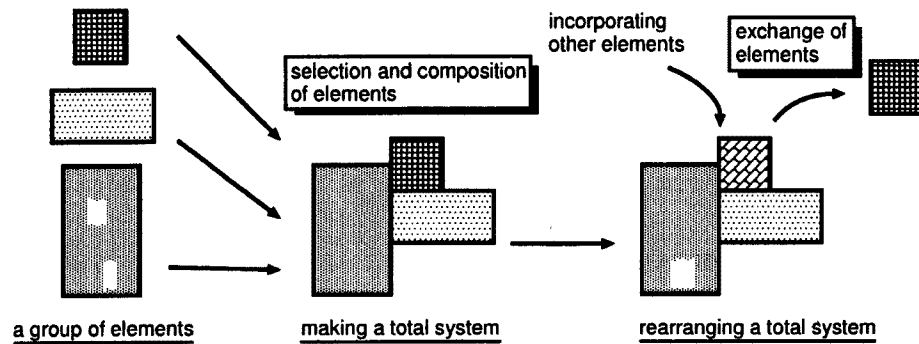


Fig. 1. Structure of a total system model

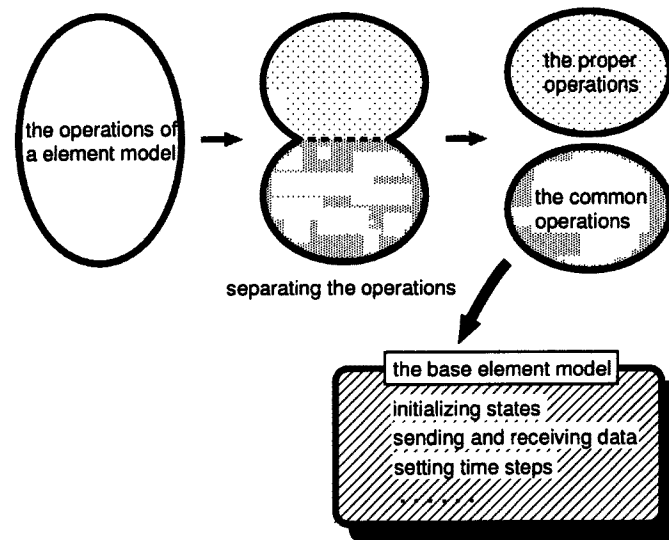


Fig. 2. Abstract base element model

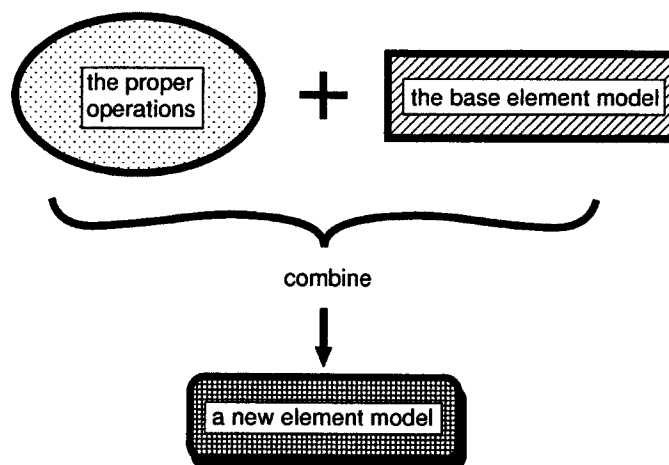


Fig. 3. Building of a new element model

これらの仕様のうち、一つ一つの要素モデルを機能的に完結させるうえでもっとも重要なのは、二つめの、『要素モデルの仕様』である。その意義と実現方法について、次に詳しく述べる。

3. 要素モデルの仕様

一つ一つの要素モデルを、機能的に完結させ、互いに独立とするためには、要素モデルの仕様として、

各要素モデルは、自分の動作に必要な機能をすべて自前で備える

ということを実現すればよい。つまり、機能を“自給自足”させるわけである。必要なものは自分でそろえ、他のモデルに頼らないようにすれば、要素モデルは機能的に独立したものとなる。

しかし、このようにすると、水文系モデルの要素モデルとして普通に要求されるような共通で基本的な機能、たとえば、パラメタ値の設定、状態量の初期化、計算時間の更新などといったものについては、各々の要素モデルで同じ機能を繰り返し定義しなければならなくなる。これでは非常に効率が悪い。

だからといって、こうした機能をサブルーチンとしてあらかじめ用意しておき、各要素モデルはそれを利用することになると、モデルの独立性が失われてしまう。

そこで本研究では、2. で述べたように、『基本型要素モデル』を作成した。基本型要素モデルは、水文系モデルの要素モデルとして普通に要求されるような共通で基本的な機能のみを持つ、抽象的な要素モデルである。基本型要素モデルは、要素モデルとして最低限必要とされる基本的な枠組を提供する。すべての要素モデルは、この基本型要素モデルをもとにつくられる。具体的には、基本型要素モデルに、各要素モデルが独自に必要な機能を追加して作成される。こうすることで、各要素モデルは、自分の動作に必要な機能をすべて自前で、しかも効率的に備えることができる。

さらに、このようにすることで別のメリットも生じる。それは仕様に沿った要素モデルの作成を容易にかつ確実にこなうことができるというものである。

共通な仕様にあわせて要素モデルを作成することは、基本型要素モデルを利用しなくても可能である。仕様について詳細に記述したマニュアルを公開すれば良い。しかし、これでは個々の要素モデル作成者自身が仕様にあわせてプログラミングしなければならないので、モデル作成者の負担は軽減されないし、要素モデルの仕様に関する信頼性も保証できない。加えて、仕様が変更されたとき、新しい仕様にあわせて個々の要素モデルを修正しなければならない。したがって、マニュアルを公開するという方法はあまり有効とはいえない。

基本型要素モデルを利用して各要素モデルを作成することにすれば、仕様は基本型要素モデルの機能としてすでに実現されているので、モデル作成者は仕様をほとんど気にかけることなく、要素モデルの独自部分のプログラミングに集中することができるし、要素モデルの仕様も確実に保証される。仕様の変更にともなう要素モデルの修正作業も必要なくなる。

以上述べたことを実現するため、本研究ではコンピュータ言語としてオブジェクト指向言語を利用した。これはオブジェクト指向言語がクラス・継承・多態性という概念を備えており、構造的モデル化システムを実現する上で有利であると考えたためである。以下、これらの概念とその利用方法について簡単に説明する（これらの概念についての詳細な説明は『オブジェクト指向プログラミング¹⁾』を参照されたい）。

クラス：あるデータ群とそれら进行操作する関数群を一つのパッケージにまとめたものをいう。このデータ群をデータメンバ、関数群をメンバ関数と呼ぶ。要素モデルは状態量やパラメータといったデータ群を、水文特性を表現する数式群で操作することによって計算を行なうので、状態量やパラメータをデータメンバ、数式群をメンバ関数とすれば、要素モデルをクラスで表現することがで

きる。

継 承：A, B という二つのクラスを考える。クラス B がクラス A のデータメンバ、メンバ関数に加え、B 独自のデータメンバやメンバ関数を持っているとする。ここで、クラス B を作成するとき、クラス A と独立して作成するのではなく、クラス A から“派生”させることができる。B が A から派生していることを宣言しさえすれば、B のプログラムで A のデータメンバ、メンバ関数を繰り返し定義する必要はない。B のプログラムでは、A から派生したという宣言と、B 独自のデータメンバ、メンバ関数についての記述さえ行えばよい。このとき A をベースクラス、B を派生クラスという。このように派生宣言を行なうだけで B が A の機能を引き継ぐことを継承という (Fig. 4 参照)。

本研究では、基本型要素モデルをベースクラスとして作成し、その派生クラスとして具体的な要素モデルを作成することとした。これにより、要素モデル作成者は、基本型要素モデルから派生したことを宣言するだけで、基本的で共通な機能を要素モデルに備えることができ、プログラミング効率を高めることができた。

多態性：クラス A, B が全く同じ機能を備える場合には継承を利用すればよいことがわかった。しかし、機能によっては、A, B ともにその機能を備えることがわかっていても、その内容までは同一に定義できないものもある。例えば、全ての要素モデルがその水文特性に応じて数値計算を行なう機能を備えるのはわかっているが、その内容は当然ながらそれぞれ異なる。しかし、『水文学的な計算を行なう』ということに関しては共通であり、その手続きを統一することで利便性・汎用性を高めることができる。

このように、クラスのメンバ関数の使用方法のみを規格化し、その操作により実現される内容を個々の派生クラスごとに定義できることを**多態性**という。多態性を利用すれば、例えばさきほどの『水文学的な計算機能』に関して、基本型要素モデルでは『Calculate』という名前にすることだけを決めておき、その内容については、基本型要素モデルから派生した各要素モデルで独自に定義することができる。

本研究で用いたオブジェクト指向言語は C++ である。C++ は、C 言語をオブジェクト指向言語に対応できるよう拡張したものである。基本的な文法が C 言語と共通しており、一方、C 言語は FORTRAN

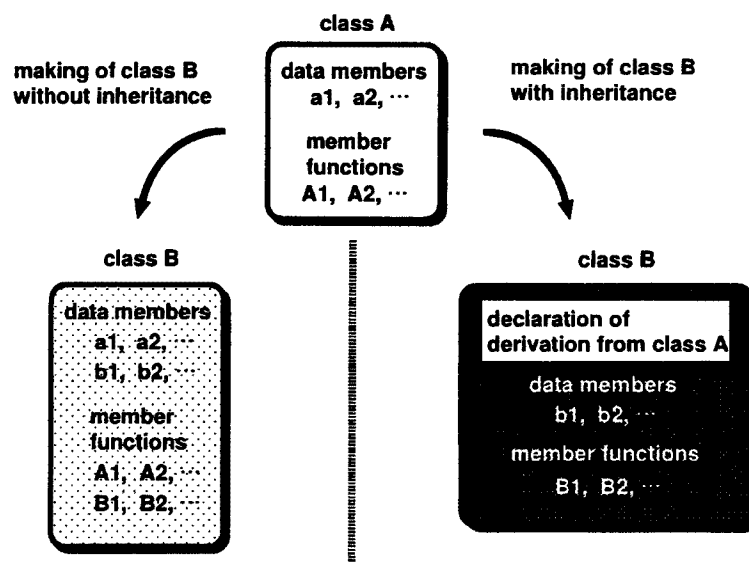


Fig. 4. Inheritance

と並び数値計算では主流の言語である。本研究で開発する構造的モデル化システムは、多数の利用者に提供し、また提供された利用者が独自に要素モデルを作成する事を想定しているので、C++は他のオブジェクト指向言語に比較して最適と考えられる。

4. 構造的モデル化システムを利用したモデルの構成

4.1 概要

Fig. 5 は、構造的モデル化システムを利用した、一般的なモデルの構成を示したものである。

2. で述べたように、構造的モデル化システムでは、対象とする流域の流出現象の構造を抽象化し、流出現象を構成する要素過程のモデルを計算機上で接続して全体系モデルを作成する。したがって、実際の数値計算を行なうのは要素モデルであり、全体系モデルが行なうのは、(1) ユーザーとの対話的作業、(2) ファイルとのデータの授受、(3) 自分の構成要素に対する計算実行命令の3作業で、原則として独自の数値計算は行なわない。どちらかといえば、流出シミュレーションを管理するというような役割をもつ。

また、本システムには部分系モデルという概念も存在する。部分系モデルは全体系中の一部分系に対応するモデルで、自身を構成する要素群あるいは部分系群とその接続を定義して表現される。

例えば、土中の水理をモデル化することを考える。土中水の卓越した流れとして中間流と地下水流の2つの現象が存在するが、それぞれの現象を要素モデルとして実現し、これらの接続関係を部分系モデルとしてあらかじめ定義しておけば、土中の水理を扱うたびに2つの要素を接続する必要がなくなり、利便性が向上する。

部分系モデルも全体系モデル同様、原則として独自の数値計算は行なわず、構成要素・部分系に対して計算実行命令を送るだけである。

本システムでは、部分系モデル・全体系モデルも要素モデル同様、種々の部分系、全体系に応じて利用者が任意に作成でき、かつ一方では、利便性・汎用性を高めるため一定の手続きで運用できるように、基本型部分系モデル・基本型全体系モデルを作成した。

また、2. で述べたように、要素モデル間のデータの入出力は、端子によるデータの授受としてモデル化されている。また、水文シミュレーションで用いられるデータには様々な構造のものが考えられるが、

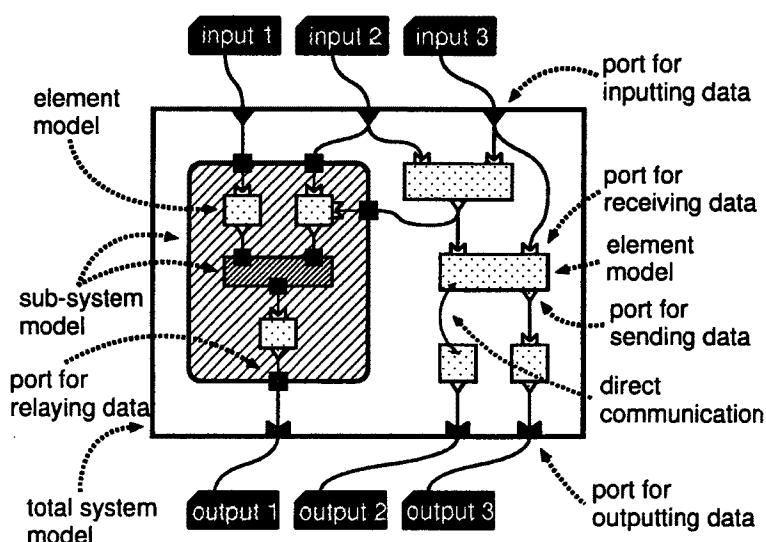


Fig. 5. General composition of a total model with OHyMoS

普通、水文系内部の状態は時々刻々変化しており、それを記録するデータは、ある時刻とその時刻における何らかのデータ値の対となっているのが一般的であると思われる。この一般的なデータ構造を本研究ではデータパックとしてモデル化した。このようにすることで、データ入出力方法が統一され、要素モデル間の接続が非常に簡潔なものとなる。例えば、要素モデルの入力は受信端子を用いたデータパックの受信により、出力は送信端子を用いたデータパックの送信により実現する。部分系モデルや全体系モデルの入出力についても同様で、部分系モデルの入出力には中継端子を、全体系モデルの入出力には入力端子・出力端子を用いている。これらのデータパックモデル・端子モデルについても、基本型モデルを作成したので、新規に定義するデータ型に対応するデータパック・端子モデルを、ユーザーが任意に作成することができるようにしている。

本システムでは、データの授受を原則として端子による通信で行う。しかし受信側の計算において、送信側のどのデータが必要なのか、その計算を行なうまでわからない、という場合、単に送信されてきたデータを受信する、端子による通信では対処できない。このような場合に対応する通信方法として、受信側が送信側に対して送ってもらうデータを指定する、直接通信によるデータの授受にも対応できるようにした。直接通信については、あとの『5. 計算例』でもう少し詳しく説明する。

4.2 ユーザーによるモデルの作成

本システムでは、4.1で挙げた基本型モデルを継承すれば、任意のモデルを作成できる。ここでは最も重要と思われる要素モデルの作成方法について説明する。

要素モデルを表すクラスの作成に必要な作業は次の通りである。

- (1) 基本型要素モデルを継承する。
- (2) 受信端子・送信端子をデータメンバとして定義する。
- (3) 受信端子・送信端子を登録する関数を定義する。
- (4) パラメタ・状態量をデータメンバとして定義する。
- (5) パラメタを設定する関数、状態量を初期化する関数を定義する。
- (6) 初期の送信を行う関数を定義する。
- (7) 次の計算のためのタイムステップを算出する関数を定義する。
- (8) 1ステップ分の計算を実行するか判断する関数を定義する。
- (9) 1ステップ分の計算・送信を行う関数を定義する。
- (10) 初期化後の一連の計算作業を行う関数を定義する。

4.3 シミュレーションのながれ

標準的なシミュレーションのためのメインプログラムのながれをFig. 6に示す。本システムでは、各構成要素は全体系・部分系によって操作されるので、メインプログラムでは全体系への命令を記述するだけでよい。

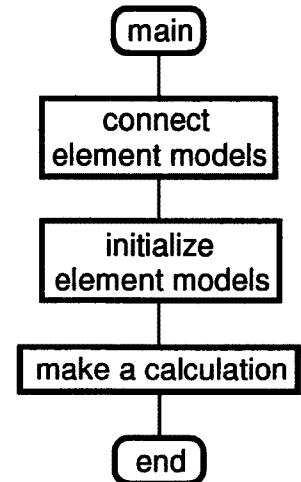


Fig. 6. Standard flowchart for the simulation

5. 計算例

本システムを用いた計算例として、河道網の流出解析を行なった例を示す。

従来、河道網の流出解析はグラフ理論を援用して行なわれることが多かったが⁹⁾、本システムを用いれば、グラフ理論の助けを借りることなく、河道網の流れを計算することができる。また、以下にも述べる

が、この計算は直接通信機能を用いた例でもある。

Fig. 7 に示すような仮想的な河道網を考え、これを4つの河道要素に分割し (Fig. 8)、それぞれに対応する要素モデルを接続して全体系モデルを作成した (Fig. 9)。

適用した要素モデルはすべて dynamic wave モデルを用いて洪水流を追跡する河道モデルである。dynamic wave モデルの数値計算法としては、leap-frog 法、Lax-Wendroff 法、特性曲線法、有限要素法などいくつか挙げられるが、ここでは特性曲線法を用いることにする。それはこの方法が dynamic wave による影響の伝播という水理学的特徴をもっともよく表現しているからである。なお、以下の記述は文献^{6),7)}を参考にした。

一次元解析法による開水路非定常流の基礎式は次のように表される。

連続式：

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad \dots\dots\dots (1)$$

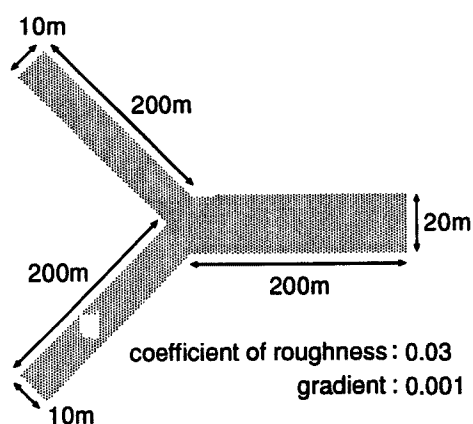


Fig. 7. Virtual stream network

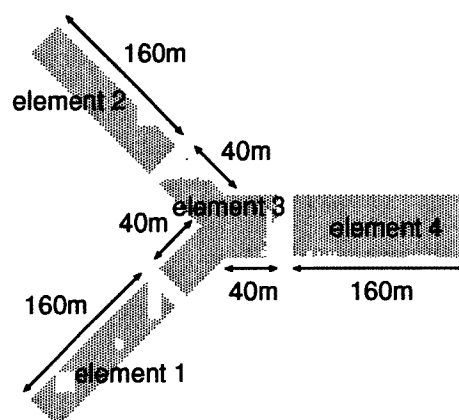


Fig. 8. Division of the stream network into four elements

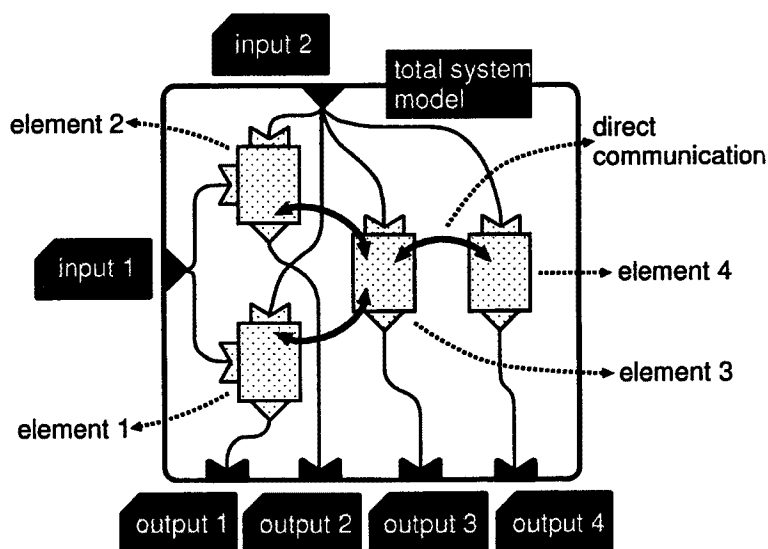


Fig. 9. Making of a total system model

エネルギー式：

$$\frac{\beta}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\alpha v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} = i_0 - I_f \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 A ：通水断面積、 Q ：流量、 q ：単位長さ当たりの横流入量、 $v=Q/A$ ：平均流速、 $i_0=\sin \theta$ ：水路床勾配、 I_f ：摩擦勾配で、抵抗則として Manning 公式を用いるとき $I_f=n^2|v|R^{4/3}$ (n ：粗度係数、 R ：径深)、 h ：水深、 α ：エネルギー係数、 β ：運動量係数、 x ：距離、 t ：時間である。

全エネルギー水頭 $H=\alpha Q^2/2gA^2+z+h \cos \theta$ (z ：基準面から水路床までの高さ)を導入すると (2)式は次のように書ける。

$$\frac{\beta}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} = -I_f \quad \dots\dots\dots (3)$$

(1), (3)式を特性曲線表示に改めると、特性曲線

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_{\pm} = \frac{\alpha+\beta}{2\beta} v \pm c \quad \dots\dots\dots (4)$$

に沿って、

$$\frac{1}{B} \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) + \left(\frac{\alpha-\beta}{2\beta} v \pm c \right) \left(\frac{\beta}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} + I_f \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$B = \frac{\partial A}{\partial h} : \text{水面幅}, \quad c = \left\{ \left(\frac{\alpha-\beta}{2\beta} v \right)^2 + \frac{gA}{\beta B} \right\}^{1/2}$$

となる。

流れが常流のときは $c > (\alpha+\beta)v/2\beta \simeq v$ であるから、

$$\text{正の特性曲線} : (dx/dt)_+ = (\alpha+\beta)v/2\beta + c > 0$$

$$\text{負の特性曲線} : (dx/dt)_- = (\alpha+\beta)v/2\beta - c < 0$$

となり、一方射流のときには、

$$\text{正の特性曲線} : (dx/dt)_+ > 0$$

$$\text{負の特性曲線} : (dx/dt)_- > 0$$

となるから、流れの状態によって境界条件の影響の仕方が異なる。このことに注意して (5)式を数値的に解く。以下の差分法は常流について述べる。

流れが常流のとき、正の特性曲線は上流から下流へと流下して伝えられる影響を表し、負の特性曲線は下流から上流へと遡上して伝えられる影響を表している。このことを考慮して (5)式の差分式を導く。上添字 n は時間ステップを表し、下添字 j は河道の上流から下流へとつけられた断面番号である。

正の特性曲線 $(dx/dt)_+$ に沿う関係：

$$\begin{aligned} & \frac{1}{B_j^n} \left(\frac{A_j^{n+1} - A_j^n}{\Delta t} + \frac{Q_j^n - Q_{j-1}^n}{\Delta x_{j-1}} - q_j^n \right) \\ & + \left(\frac{\alpha-\beta}{2\beta} v + c \right)_j \left(\frac{\beta}{g} \frac{v_j^{n+1} - v_j^n}{\Delta t} + \frac{H_j^n - H_{j-1}^n}{\Delta x_{j-1}} + \frac{I_{j,j-1}^n + I_{j,j-1}^n}{2} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

負の特性曲線 $(dx/dt)_-$ に沿う関係：

$$\frac{1}{B_j^n} \left(\frac{A_j^{n+1} - A_j^n}{\Delta t} + \frac{Q_{j+1}^n - Q_j^n}{\Delta x_j} - q_{j+1}^n \right)$$

$$+\left(\frac{\alpha-\beta}{2\beta}v-c\right)_j\left(\frac{\beta}{g}\frac{v_j^{n+1}-v_j^n}{\Delta t}+\frac{H_{j+1}^n-H_j^n}{\Delta x_j}+\frac{I_{j,j+1}^n+I_{j,j}^{n+1}}{2}\right)=0 \quad (7)$$

ただし、 Δx_j : 断面 j と断面 $j+1$ の間の区間距離、 q_{j+1} : この区間に流入する単位長さ当たりの横流入量である。

計算断面が上流端である場合は、下流から上流へ伝わる影響を表す (7) 式と境界条件から解が求められ、下流端である場合は、上流から下流へ伝わる影響を表す (6) 式と境界条件から解が求められる。

計算断面が分・合流点である場合は、

(1) 分・合流点における水位は、分・合流点を構成するどの断面においても等しい。

(2) 分・合流点において流量の連続性が成立する。

という二つの条件をみたすよう、収束計算を行なう。

計算断面が中間点 (境界条件が与えられている上・下流端のどちらでもなく、また分・合流点のどちらでもない断面) のときは、(6)、(7) 式を連立して未知量である v_j^{n+1} および A_j^{n+1} を求める。

ここで、河道要素モデルの接続部について考えてみる。Fig. 8 の要素 1 と 3 を例としよう。要素 1 の出力を 3 の入力として利用する場合、つまり、3 の状態が 1 に影響しないと仮定する場合、1 と 3 は端子によって接続すればよい。1 では流量・流積関係式などを、3 では 1 の出力をそれぞれ接続部の境界条件として用いて計算する。情報のながれは一方通行的である。

では、要素 1 と 3 が互いに影響するとしたら、どうしたらよいだろうか。1 の情報が 3 に伝わり、それをもとに計算された 3 の情報がまた 1 に伝わるというケースである。情報のながれが双方向である。端子による接続では、情報のながれが一方通行なので、対応できない。そこで用いられるのが、『直接通信』である。端子による通信では、情報は上流から下流へと『たれ流され』、受信側は送られてくるデータをただ受けとることしかできない。しかし、直接通信では端子による通信と違って、送ってもらうデータを送信側に対して、受信側が必要なときに指定・要求できる。

Fig. 10 を使って、より具体的に説明しよう。縦軸は時間、横軸は距離 (空間) を表している。要素 1 の時間的な差分間隔を Δt_1 、空間的な差分間隔を Δx_1 とし、要素 3 のそれらを、それぞれ Δt_3 、 Δx_3 としよう。Fig. 10 (a) では、要素 3 の方が要素 1 より計算が進んでいる。この時点で計算を行なうことができるのは、要素 1 である。なぜなら、要素 3 は要素 1 から時刻 t_3 での情報を得ることができないからである。要素 1 は要素 3 に対し、A でのデータを要求する。それに応じて要素 3 は、A でのデータを時刻 $t_3 - \Delta t_3$ と t_3 でのデータから線形内挿して求め、要素 1 に伝える。要素 1 は A でのデータと自身が持つデータを使って、時刻 t_1 での計算を行なう。

Fig. 10 (b) は、要素 1 が時刻 $t_1 + \Delta t_1$ での計算を終えた状態を示している。この時点で計算を進められるのは、要素 3 である。要素 1 は要素 3 から時刻 $t_1 + \Delta t_1$ での情報を取得できないからであ

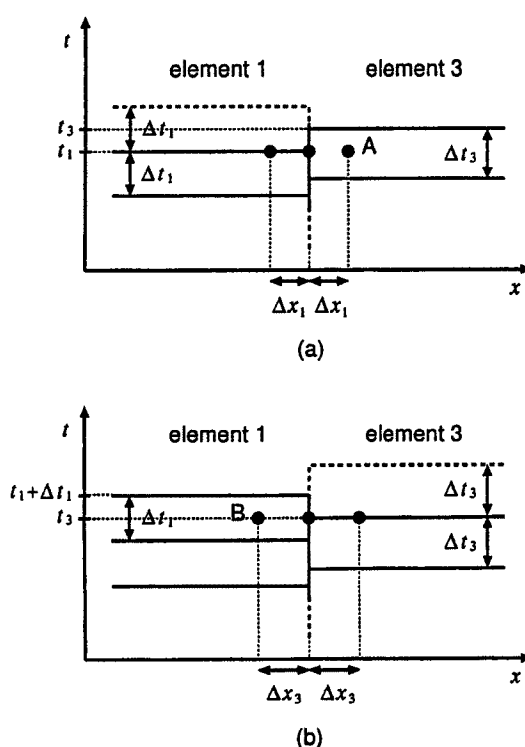


Fig. 10. Direct communication between element 1 and 3

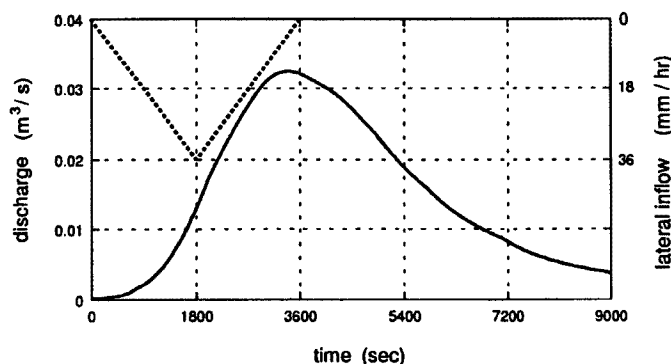


Fig. 11. Result of the simulation

る。要素3は要素1に対し、Bのデータを要求し、時刻 t_3 での計算を行なう。このように、必要なデータを必要なときに互いに要求しあいながら、計算を進めていく。どちらか片方が一方的に計算を進めていくのではなく、両者が歩調をそろえて計算を進めていく。

今回、シミュレーションに用いた河道要素モデルは以下の通りである。

要素1, 2：上流モデル 境界条件として上流端の流量ハイドログラフを受信端子から取得し、側方流入量を別の受信端子から取得する。さらに、下流端での状態量の計算に必要なデータを、下流側の要素から直接通信により取得する。

要素3：合流モデル 側方流入量を受信端子から取得し、端点での状態量の計算に必要なデータを、それぞれの端点で接続している要素から直接通信によって取得する。

要素4：下流モデル 境界条件として下流端における流量と水深とのあいだに関係式が与えられる。側方流入量を受信端子から取得し、上流端での状態量の計算に必要なデータを上流側の要素から直接通信によって取得する。

計算結果を Fig. 11 に示す。

6. お わ り に

構造的モデル化システムの特徴をまとめると、以下のようである。

- 要素モデルを組み合わせることで全体系モデルを構成するようになっている。
- 水文系モデルの要素モデルとして普通に要求されるような動作、パラメタの設定、初期値の設定、計算時間の更新などは、標準化されている。データの入出力機能は、新規にユーザが定義するデータ型に対しても対応できるようになっている。
- 要素モデルは、個々に独自の時間単位で計算を進めることができる。
- ある要素モデルの出力データを他の要素モデルが入力データとして利用するという関係は、端子によるデータ授受の関係としてモデル化されている。
- 端子によるデータ授受では対応できない場合に対応するため、要素モデル同士が直接データを交換する直接通信の機能がある。
- 流出系の最終状態をファイルに書きだし、後で、計算を再開することができる。

繰り返しになるが、本研究の目的は、一般的な流域規模の水文モデルを開発していくための基礎となるシステムを提案することであった。モデル構成の共通の基盤があることによって初めて、モデル相互の比較や、分析的な検討といったことが可能となる。また、システムそのものも多くの水文モデル作成者に利

用されることで、改良され、発展することができる。本研究で構成した構造的モデル化システム OHy-MoS-1 の最新版は、anonymous ftp で <ftp://rdpl.dpri.kyoto-u.ac.jp/pub> から取得できる。本システムが多くの利用に供することを切に願って、本論文の締めくくりとする。

参 考 文 献

- 1) R. S. ウイナー・L. J. ピンソン (前川 守 訳): C++ : オブジェクト指向プログラミング, 株式会社 トッパン, 1989.
- 2) 鈴木俊朗: 流出系の構造的モデリングシステムの開発, 京都大学工学部土木工学科修士論文, 1994.
- 3) 岸本好弘: 流出系の構造的モデル化法とダイナミックウェイヴモデル, 京都大学工学部土木工学科卒業論文, 1994.
- 4) 高棹琢馬・椎葉充晴・市川 温: 構造的モデリングシステムを用いた流出シミュレーション, 水工学論文集, 第 39 卷, pp. 141-146, 1995.
- 5) 例えば, 土木学会編: 土木工学における数値解析 / 流体解析編, 株式会社 サイエンス社, pp. 119-133, 1974.
- 6) 岩佐義朗・井上和也・片山 猛: 開水路非定常流の数値計算法について, 京都大学防災研究所年報, 第 19 号 B-2, pp. 187-200, 1976.
- 7) 土木学会編: 水理公式集, 土木学会, pp. 206-219, 1985.