

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

A Runoff Simulation with Structural Hydrological Modeling System

高棹琢馬*・椎葉充晴**・市川 温***

by Takuma TAKASAO, Michiharu SHIIBA, and Yutaka ICHIKAWA

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.

keywords : Structural hydrological modeling system, Object oriented programming, Base model

1. はじめに

ある流域の水文モデルを作成するとき、その流域を斜面・貯水池・河道・蒸発散・地下水流・…といった水文要素に分割し、それらに対応する要素モデルをその相互関係に応じて再構成する、という方法が考えられる。このように、水文系内部の水文学的な構造を反映させて水文モデルを作成する方法を、以下、**構造的モデル化法**と呼ぶ。構造的モデル化法には以下の利点がある。

第一に、水文学では多くの要素モデルが既に開発されているので、全体系モデルの作成作業は、必要な要素モデルを選んでパラメータ・初期値を設定し、それらを水文系の構造に応じて構成する“組み立て作業”となる(図-1)。第二に、土地利用の変更によって流域の一部の水文特性が変化したり、あるいは一部の水文要素に対応する新しい要素モデルが提案され、全体系モデルを修正する必要が生じた場合でも、全体系モデルの修正は対応する要素のみを変更する“交換作業”となる(図-1)。

現在、水文シミュレーションでは計算機による数値解析を多用しているので、構造的モデル化法を計算機シミュレーションに適用すれば、計算機上で水文モデルを作成・修正する作業の効率を向上できる。そこで本研究では、水文モデルに構造的モデル化法を適用するための**構造的モデリングシステム**を開発した。

構造的モデリングシステムに関する一連の研究として、1992年に基本概念を提案し、原型版を作成した。1993年には改良版及び要素モデルライブラリを作成した。1994年には1993年版をさらに改良し、構造的モデリングシステムを完成させた。

本論文では構造的モデリングシステムの概要について説明し、さらに1994年版システムを用いた流出シミュレーション例を提示する。

2. 既存のモデル・モデリングシステムの問題点

従来提案されてきたモデルの中にも、例えばHEC-1, HSPFなどのように、特定の要素に対していくつかのモデルが用意されており、適当な要素モデルを選択できるものがある¹⁾。

こうしたモデルでは、開発機関により提供された要素モデルを使用する限り、要素モデルの作成作業、

* 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 京都大学助教授 工学部 土木工学教室
(同上)
*** 学生員 京都大学工学部大学院修士課程
(同上)

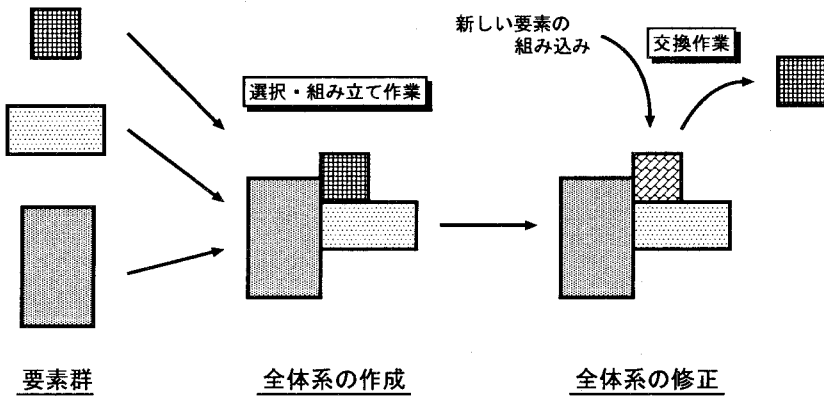


図 - 1 組立作業・交換作業

プログラミング作業からユーザーが解放される、という利点がある。

しかし、ユーザーが新たな要素モデルを独自に開発し、これを開発機関から提供されたモデルと接続して用いようとするとき、問題が生じる。両者の間で整合のとれた接続を行なうためには、提供された要素モデルの入出力方式や、全体系モデルによる各要素モデルの操作方式に合わせてモデル化、プログラミングを行なわなければならないからである。このためには、提供されたモデルのソースコードを詳細に理解する必要があるが、こうしたモデルの多くは開発段階以降、度重なる改良あるいは適用範囲の拡大を経てきており、そのソースコードは膨大であることが多い。したがって、ユーザーによる新しいモデルの追加は実質的に不可能であり、同様の理由から、提供されたモデルの修正も困難である。

3. 構造的モデリングシステムの基本的条件及び構築方法

計算機上で構造的モデル化法を実現するためには少なくとも、複要素間の入出力関係、入出力方法を定義して各要素を接続し、構成された全体系を円滑に運用できるようにする必要がある。更に全体系の一部の要素が交換されたり、一部の要素間の接続関係が変更されても、全体系の円滑な運用を保証しなければならない。

また2.での考察から、構造的モデル化法をより実用的なものとするためには、新しく開発された要素モデルの導入が容易であることが望ましい、という

知見も得られた。

以上より構造的モデリングシステムが基本的に満たすべき条件をまとめると、

条件 1：要素モデルの入出力機能、運用手続きを統一する。

条件 2：統一仕様を利用者に公開する。

条件 3：統一仕様に基づいた要素モデルの作成を容易にする。

条件 4：要素モデル独自部分の定義が、統一仕様により限定されない。

となる。

条件 1, 2 の実現は、既存のモデル・モデリングシステムでも可能である。例えば、統一仕様を詳細に記述したマニュアルを公開すればよい。しかし、この方法では2.で述べたモデリングシステムの欠点は改善されない。さらに、個々の要素モデル作成者自身が統一仕様にあわせてプログラミングしなければならない、要素モデルの統一仕様に関する信頼性を保証できない。また、統一仕様に変更が加えられた場合、新しいシステムに合わせて個々の要素モデルを変更しなければならない。したがって、従来型のモデリングシステムで条件 1 から条件 4 の全てを実現することは、システム構築の手法上、根本的に困難と考えられる。

そこで本研究では、特に条件 3, 4 に留意し、構造的モデリングシステムの開発にあたり、以下の方法を採用した。

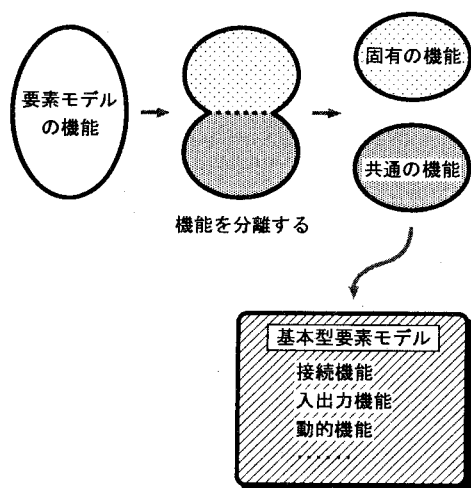


図-2 基本型要素モデルの作成

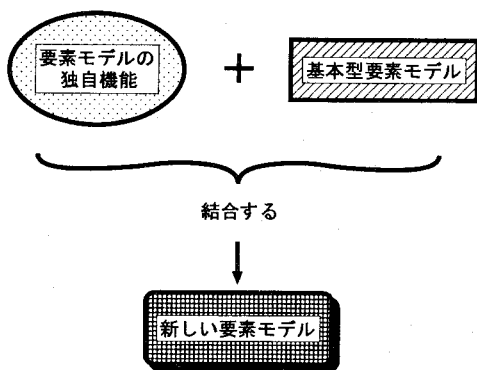


図-3 各要素モデルの作成

- (1) 要素モデルの統一仕様を基本型要素モデルとして定義する(図-2 参照)。
- (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の独自機能を付加して作成する(図-3 参照)。
- (3) 全ての要素モデルは、基本型要素モデルの部分を共有する。

(1) により基本型要素モデルと各要素モデルの独自部分との結合で、各要素モデルで容易に統一仕様を実現できる。また(2)により各要素モデルで任意の機能を付加できるので、先の条件4を満足できる。さらに(3)により統一仕様の改良は基本型要素モデルの改善・交換で対応できる。したがって、統一仕様が変更されても、個々の要素モデルを修正する必要はない。

以上述べた方法を実現するため、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、構造的モデリング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*。

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なえばよい。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(図-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、ユーザーは派生宣言のみで統一仕様を実現でき、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

*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²⁾』を参照されたい。

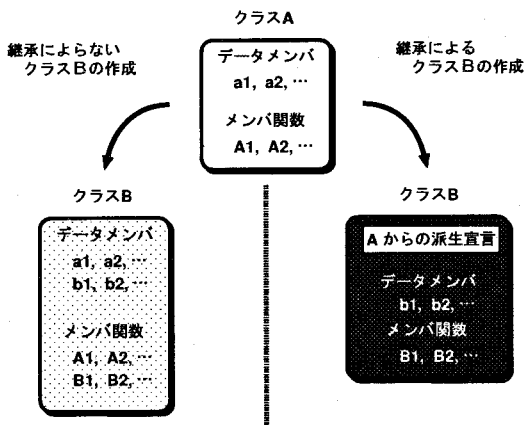


図-4 継承

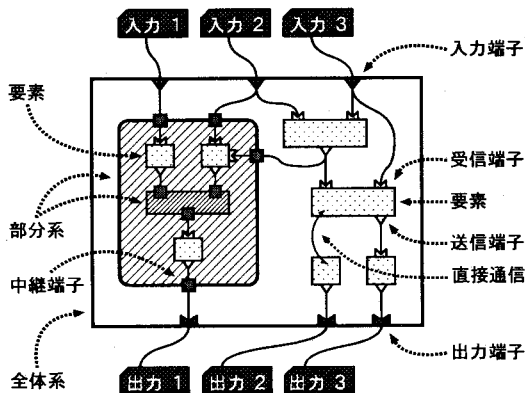


図-5 モデルの構成

わかっているが、その内容はそれぞれ異なる。しかし、『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。例えば、オブジェクト指向言語 C++ では『仮想関数』として実現されている。

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なので、基本的な文法が C 言語と共通しており、一方、C 言語は FORTRAN 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リングシステムは、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ため、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. 構造的モデリングシステムの構築

4.1 概要 以下、適宜図-5を参照されたい。

はじめにも述べたように構造的モデリングシステムでは、流域を水文要素に分割し、それらに対応する要素モデル群を計算機上で再構成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。

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、要素・部分系・全体系モデルのデータ入出力方法を統一し、各モデルの入出力機能の自由度を高めるため、規格化されたデータ構造を表現する**データパックモデル**と、データを授受する**端子モデル**を用いて入出力を行なうこととした。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。同様に、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、任意の構造のデータパックモデルと任意のデータパックを授受する端子モデルを、ユーザーが作成できる。

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。そこで例外的な通信方法として、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。

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) パラメータ・状態量を定義する。
- (5) パラメータを設定する関数、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図-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。

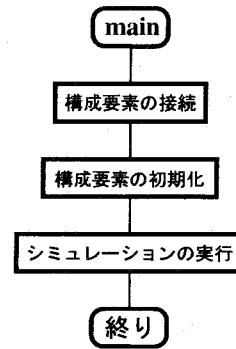


図-6 シミュレーションの標準的な流れ

5. 計算例

本システムを用いた計算例として、河道網の流出計算を行なった。

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⁵⁾、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。

図-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(図-8)、それぞれに対応する要素モデルを再構成して全体系モデルを作成した(図-9)。

適用した要素モデルはすべて dynamic wave 理論を用いて洪水流を追跡する河道モデルである。以下簡単に説明する。

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、上下流端での状態量の計算に必要なデータを上流側、下流側の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。

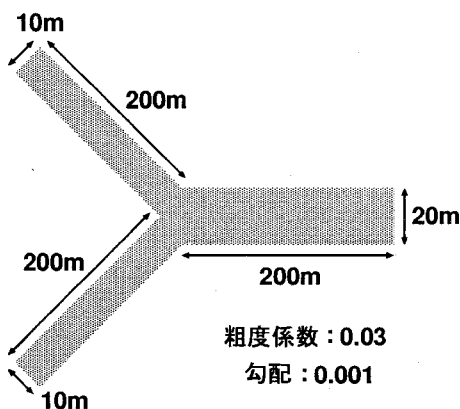


図 - 7 仮想河道網

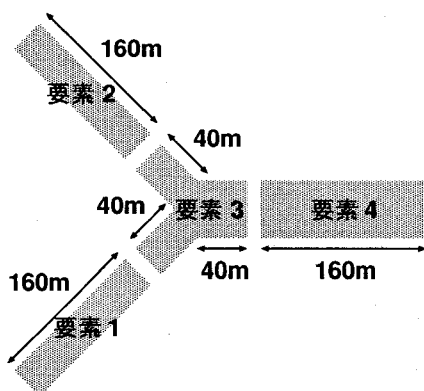


図 - 8 河道網の分割

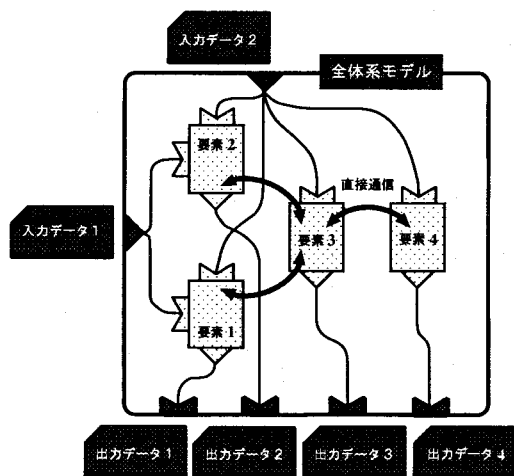


図 - 9 全体系モデルの作成

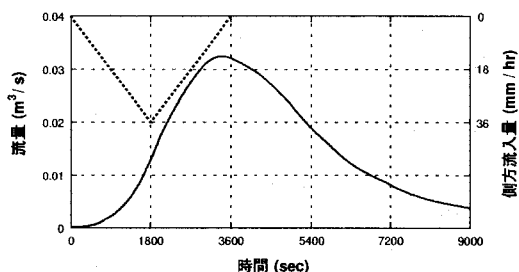


図 - 10 計算結果

6. おわりに

本論文では、構造的モデリングシステムについて概説し、ついで実際に要素モデルを作成、接続して流出シミュレーションを行なった例を提示した。

今後の課題として、まず、多数の要素を含み、内部で大量のデータが送信・受信されるような全体系の検証を行い、計算機のメモリと、構築し得る全体系の規模との関係を調査し、構造的モデリングシステムの能力・限界を確認する必要がある。

また、基本型全体系モデルに、シミュレーションの途中・シミュレーション終了時における全体系内部の状態を記録する機能を定義し、新しい入力データが得られるまでのシミュレーションの中断や、長時間(実時間)にわたる継続的シミュレーションのバックアップを可能にする必要がある。

更に、構造的モデリングシステムを LAN などを利用して配布し、多くの水文モデル作成者の利用に供したい。

参考文献

- 1) Victor Miguel Ponce : *Engineering Hydrology -Principles and Practices-*, chapter 13 : *Catchment Modeling*, pp.389-451, Prentice Hall Inc., New Jersey, 1989.
- 2) R. S. ウイナー・L. J. ビンソン (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.
- 3) 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.
- 4) 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クモデル, 京都大学工学部土木工学科卒業論文, 1994.
- 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, pp119-133, 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, pp187-200, 1976.
- 7) 土木学会編 : 水理公式集, 土木学会, pp206-219, 1985.

なお、これらの要素モデルの作成にあたっては、『開水路非定常流の数値計算法について⁶⁾』および『水理公式集⁷⁾』を参考とし、特性曲線法により洪水流を解析する手法を用いた。計算結果を図 - 10 に示す。