京都大学防災研究所年報　第39号 B-2　平8．4
Annuals, Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 39 B-2, 1996

構造的モデリングシステムにおける要素間反復計算の実現と河道網流れの追跡計算への適用

椎葉充晴・市川　温・柴田　研・榊原哲由・村上将道・高棹琢馬

ITERATIVE COMPUTATION AMONG ELEMENTS IN THE OBJECT-ORIENTED HYDROLOGICAL MODELING SYSTEM AND CHANNEL NETWORK FLOW ROUTING

By *Michiharu* SHIIBA, *Yutaka* ICHIKAWA, *Gen* SHIBATA, *Tetuyosi* SAKAKIBARA, *Masamichi* MURAKAMI, and *Takuma* TAKASAO

Synopsis

The present Object-oriented Hydrological Modeling System (OHyMoS) does not have the function to iterate computation while exchanging information among element models. So if one tries to compute, for example, channel network flow using the present OHyMoS, the related variables must be treated in one element.

We thought the function for iterative computation very useful for us to make a river basin runoff model and added the function to OHyMoS. This paper explains how we realized this new function and how we apply it to channel network flow routing.

1. 序　論

1.1　構造的モデル化法・構造的モデリングシステム

ある流域の水文モデルを作成する際，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，構造的モデル化法と呼ぶ[1)]。構造的モデル化法には次のような利点がある。

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立作業となる（**Fig. 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（**Fig. 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。このようにして，水文モデルに構造的モデル化法を適用するために開発されたのが構造的モデリングシステムである。

1.2　現在の版の構造的モデリングシステムの問題点

現在の版の構造的モデリングシステムでは，複数の要素モデル間で情報を交換し合いながら計算を反復する機能は提供されていない。そのため，例えば，Fread の河道流追跡モデル FLDWAV[2)] のように，各河道

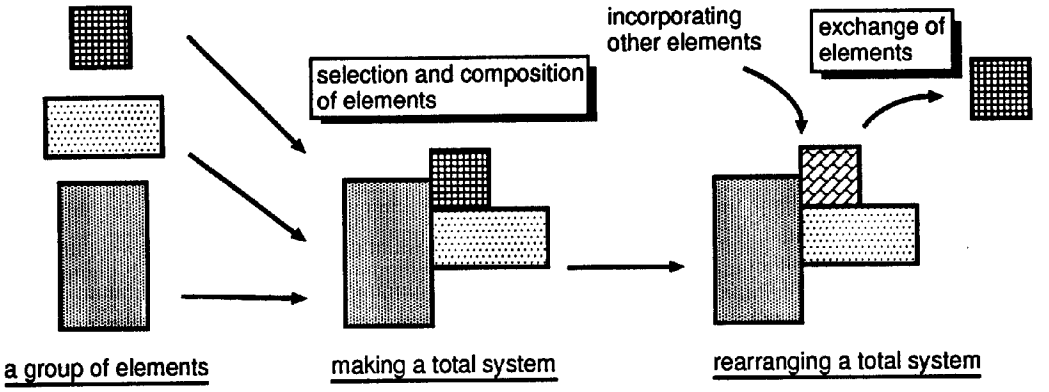


Fig. 1 Composition work and exchange work

区分の流れを陰形式の差分方程式を解くことにし，河道網の流れを計算するためにRelaxation法を用いる方法を現在の構造的モデリングシステムに組み込もうとすると，関係している河道網の状態量を一つの要素モデルの中で取り扱わざるを得ない。できれば，個々の河道区分を一つの要素モデルとして扱う方が，全体の構成も分かりやすい。

そのために，本研究では複数の要素モデル間で情報を交換し合いながら計算を反復する機能が河川流域のモデルを作成する上で基本的に重要であると考え，現在の構造的モデリングシステムに追加することにした。

2. 要素間反復計算の実現

2.1 構造的モデリングシステムの概要

(a) 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，複数の要素間での入出力関係，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。

そのために構造的モデリングシステムでは，以下の方法が採用されている。

(1) 要素モデルの統一仕様を基本型要素モデルElementとして定義する。

(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。

(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。更に (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。従って，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，構造的モデリングシステムではコンピュータ言語としてオブジェクト指向言語が利用されている。

(b) システムの説明

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。実際の数理計算を行うのは要素モデルであり，全体系モデルが行うのは，(1) ユーザーとの対話作業，(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理計算は行わない。

また，構造的モデリング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。

部分系モデルも全体系モデルと同様，原則として独自の数理計算は行わず，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。

構造的モデリングシステムでは，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 Sub_system・基本型全体系モデル Total_system が作成されている。

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に，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が用いられる。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される。同様に，部分系モデルの入出力には中継端子が，全体系モデルの入出力には入力端子・出力端子が用いられる。

構造的モデリングシステムにおいてはデータの授受は原則として端子による通信で行われる。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，その計算を行うまで分からない，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された。

2.2 要素間反復計算

前節で述べた現在の版の構造的モデリングシステムでは，要素モデルが互いに通信しあって計算を進めていく機能はあるが，計算を反復するという機能は備わっていない。反復計算をしたければ，計算に関係する状態量は全て同一の要素モデルに含まれていなければならない。しかし，それでは河道網流れなどを計算する際，個々の河道区分を一つの要素として扱うことができず，全体の構成も分かりにくくなる。

そのために，本研究では複数の要素の間で情報を交換しながら計算を反復する機能が，河川流域のモデルを作成する上で基本的に重要な機能であると考え，従来のシステムに追加することにした。以下にその内容を説明する。

(a) fixed_time 及び target_time について

要素間反復計算の実現のために，今回，要素モデルに fixed_time，target_time という概念を導入した。

fixed_time とは，要素の状態が確定している時刻のことで，この時刻より前の状態量は変更されない。

target_time とは，反復計算目標時刻のことであり，反復計算する要素モデルは fixed_time から target_time までの間の状態量を，収束するまで繰り返し計算する。この収束条件は，各要素モデルで自由に決めることができる。

fixed_time から target_time までの間は1ステップで進む必要はなく，time_step を適当に設定して細かく進むことも可能である。例えば，fixed_time から target_time までの間を1時間として，その間を15分きざみで計算することもできる。この場合は time_step を $60 \times 15 = 900$ (sec) とする。ただし，current_time（要素モデルの計算の現在時刻）＋ time_step は target_time を越えてはならない。

(b) 反復計算の進め方

Fig. 2 を用いて説明する。

(a) 反復計算する要素群に対して共通の反復計算目標時刻 target_time が設定されているとする。

(b) 反復計算する要素群は target_time に向けて計算を進める。

(c) 反復計算する要素が全て target_time に到達したところで，それらを所有する部分系／全体系が収束をチェックする。

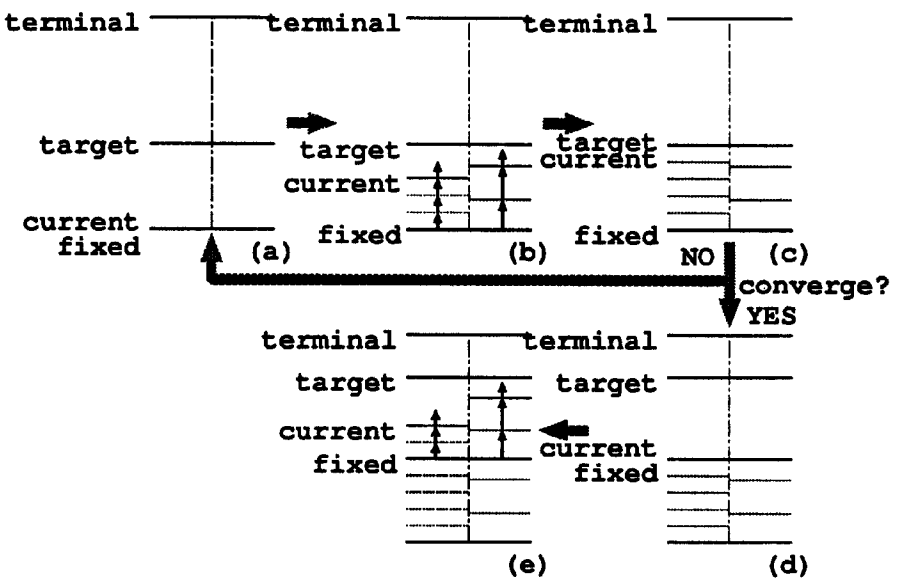


Fig. 2 The way of iterative computation

(**d**) 収束していたら，要素にたまったデータを出力し，target_time，fixed_time を更新して，(**e**) 次のステップに向かう。もし収束していなければ，(**a**) 要素の current_time をもとに戻し，再び反復計算させる。

(c) Element に追加されたデータメンバ・メンバ関数

基本型要素モデル Element に追加されたデータメンバ及びメンバ関数は以下の通りである。

time_t fixed_time：反復計算において状態が確定している時刻（sec）。

time_t target_time：反復計算目標時刻（sec）。

time_t Fixed_time (void)：fixed_time を返す。

time_t Target_time (void)：target_time を返す。

void Cur2fix2tar (void)：fixed_time, target_time を current_time に一致させる。要素間反復計算を行う要素では，void Set_initial_state (FILE*) で current_time が初期設定された後にこの関数を呼ぶ必要がある。

virtual Boolean Renew_current_time (void)：current_time を更新する。

virtual void Rewind_current_time (void)：current_time を fixed_time に戻す。

virtual void Renew_fixed_time (void)：fixed_time を更新する。

virtual void Initialize_target_time (void)：target_time を初期化する。

virtual void Renew_target_time (time_t)：target_time を更新する。

virtual time_t Calculate_iteration_step (void)：反復計算目標時刻を返す。

Boolean Work2(void)：反復計算要素用 Work の例。

virtual Boolean Do_you_reach_target_time (time_t)：反復計算が target_time に到達したかどうかを判断する。

vitual Do_you_converge (void)：状態量の計算の収束を判定する。

virtual void Flush_data (void)：反復計算目標時刻までのデータの出力と，不要になったデータパックの処理をする。

virtual void Send stocked_data (void)：反復計算目標時刻までにたまったデータを出力する。

(d) Sub_system に追加されたデータメンバ・メンバ関数

基本型部分系モデル Sub_system に追加されたデータメンバ及びメンバ関数は以下の通りである。

void***iterator_array：反復計算する構成要素を記憶する配列へのポインタ。

int number_of_iterator_sets：反復計算する要素群の数。

int* number_of_iterators：要素群を構成する要素の数。

void Initialize_iterator_array (void)：iterator_array を初期化する。

virtual void Register_iterators (void)：反復計算する構成要素の登録インタフェイス。

Boolean Register (int, ...)：反復計算する構成要素を iterator_array に登録する。

Boolean Do_you_reach_target_time (int)：反復計算する要素群が反復計算目標時刻に到達したかどうかチェックする。

Boolean Do_you_converge (int)：反復計算する要素群の収束をチェックする。

void Rewind_current_time (int)：反復計算が収束しなかった要素群に対して Rewind_current_time を実行するように命令する。

void Flush_data (int)：反復計算する要素群に fixed_time から target_time の間のデータを出力させる。

void Renew_fixed_time (int)：反復計算する要素群に fixed_time を更新させる。

void Renew_target_time (int, time_t)：反復計算する要素群に target_time を更新させる。

void Initialize_target_time (void)：反復計算する要素群に target_time を初期設定させる。

time_t Calculate_iteration_step (int)：反復計算する要素群に time_t Element::Calculate_iteration_step (void) を実行させ，それらの戻り値の内，最小のものを返す。

Boolean Init (char*, int, int, int, char*)：データメンバの初期化を行う。number_of_iterator_sets が追加されたことに対応している。

Sub_system (char*, int, int, int, char*)：コンストラクタ。number_of_iterator_sets が追加されたことに対応している。

3. 要素モデル FLDWAV の構築

3.1 アルゴリズム

河道網流れの追跡計算を行う要素モデル FLDWAV の基本的なアルゴリズムを以下に示す。なお，文献[3]を参考にした。

2つの保存式からなる Saint-Venant 式

質量保存則：

$$\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{\partial (A+A_0)}{\partial t}-q=0 \quad \cdots\cdots (1)$$

運動量保存則：

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial (Q^2/A)}{\partial x}+gA\left(\frac{\partial h}{\partial x}+I_f\right)=0 \quad \cdots\cdots (2)$$

を河道網流れの基礎式として採用する。

ここで $I_f=n^2|Q|Q/(A^2R^{4/3})$ は摩擦勾配を表す。

また，x は水路の縦軸方向の距離を，t は時間を，Q は流量を，A，A_0 はそれぞれ active, inactive な断面積を，h は水深を，R は径深を表している。

この (1)，(2) 式の両辺に Δx_i をかけ，4点重み付け陰型差分近似を用いると次の (3)，(4) 式を得る。

$$\theta(Q_{i+1}^{j+1}-Q_i^{j+1}-q_i^{j+1}\Delta x_i)+(1-\theta)(Q_{i+1}^{j}-Q_i^{j}-q_i^{j}\Delta x_i)$$

$$+\frac{\Delta x_i}{2\Delta t^j}[\{(A+A_0)_{i+1}^{j+1}+(A+A_0)_i^{j+1}\}$$
$$-\{(A+A_0)_{i+1}^{j}+(A+A_0)_i^{j}\}]=0 \quad \cdots\cdots(3)$$

$$\frac{\Delta x_i}{2\Delta t^j}\{(Q_{i+1}^{j+1}+Q_i^{j+1})-(Q_{i+1}^{j}+Q_i^{j})\}$$
$$+\theta\left\{\left(\frac{Q^2}{A}\right)_{i+1}^{j+1}-\left(\frac{Q^2}{A}\right)_i^{j+1}\right\}+(1-\theta)\left\{\left(\frac{Q^2}{A}\right)_{i+1}^{j}-\left(\frac{Q^2}{A}\right)_i^{j}\right\}$$

$$+g/2\{\theta(A_{i+1}^{j+1}+A_i^{j+1})+(1-\theta)(A_{i+1}^{j}+A_i^{j})\}$$
$$[\{\theta(h_{i+1}^{j+1}-h_i^{j+1})+(1-\theta)(h_{i+1}^{j}-h_i^{j})\}$$
$$+\Delta x_i/2\{\theta(I_{fi}^{j+1}+I_{fi}^{j+1})+(1-\theta)(I_{fi}^{j}+I_{fi}^{j})\}-i_0\Delta x_i]=0 \quad \cdots\cdots(4)$$

ここに，Δx_i：計算断面間隔，Δt^j：時間間隔，θ：差分近似の重み付け係数（$0.5\leq\theta\leq1.0$），i_0：河床勾配，添字$i=1,2,\cdots,N-1$（N：断面の数）は計算断面の位置を示す。

(3)，(4) 式によって$2(N-1)$個の条件式が得られ，これらに上下流端での境界条件2つを加えることによって$2N$個の未知量（h_i^{j+1}，$Q_i^{j+1}\,|\,i=1,2,\cdots,N$）を求めることができる。

しかし，これらの式は非線形であり，直接解を求めるのは困難である。そこでNewton-Raphson法を用いる。

3.2 Newton-Raphson法

Newton-Raphson法は非線形の連立方程式に対して，推定値（X^k）の近傍でテイラー展開し，その推定値からの差（ΔX）についての線形の連立方程式を作り，それを解くことによって新たな推定値（$X^{k+1}=X^k+\Delta X$）を得る。これを収束するまで繰り返すことによって解を求める方法である。

$$J'(X^k)\Delta X=-f(X^k) \quad \cdots\cdots(5)$$
$$(\Delta X=X^{k+1}-X^k)$$

ここで，J'はヤコビ行列を，X^kは未知量の推定値を，ΔXは解の補正量を，X^{k+1}は次の推定値（$=X^k+\Delta X$）をそれぞれ表している。

そこで，(3)，(4) 式にNewton-Raphson法を用いて変形すると，以下のようになる。

まず，(3)，(4) 式の左辺をそれぞれF_i，G_iとすると，

$$F_i(Q_{i+1}^{j+1},\ h_{i+1}^{j+1},\ Q_i^{j+1},\ h_i^{j+1})=F_i(\hat{Q}_{i+1}^{j+1},\ \hat{h}_{i+1}^{j+1},\ \hat{Q}_i^{j+1},\ \hat{h}_i^{j+1})$$
$$+\Delta Q_{i+1}\left(\frac{\partial F_i}{\partial\hat{Q}}\right)_{i+1}^{j+1}+\Delta h_{i+1}\left(\frac{\partial F_i}{\partial\hat{h}}\right)_{i+1}^{j+1}$$
$$+\Delta Q_i\left(\frac{\partial F_i}{\partial\hat{Q}}\right)_i^{j+1}+\Delta h_i\left(\frac{\partial F_i}{\partial\hat{h}}\right)_i^{j+1}=0 \quad \cdots\cdots(6)$$
$$G_i(Q_{i+1}^{j+1},\ h_{i+1}^{j+1},\ Q_i^{j+1},\ h_i^{j+1})=G_i(\hat{Q}_{i+1}^{j+1},\ \hat{h}_{i+1}^{j+1},\ \hat{Q}_i^{j+1},\ \hat{h}_i^{j+1})$$
$$+\Delta Q_{i+1}\left(\frac{\partial G_i}{\partial\hat{Q}}\right)_{i+1}^{j+1}+\Delta h_{i+1}\left(\frac{\partial G_i}{\partial\hat{h}}\right)_{i+1}^{j+1}$$
$$+\Delta Q_i\left(\frac{\partial G_i}{\partial\hat{Q}}\right)_i^{j+1}+\Delta h_i\left(\frac{\partial G_i}{\partial\hat{h}}\right)_i^{j+1}=0 \quad \cdots\cdots(7)$$
$$(i=1,2,\cdots,N-1)$$

となる。(hat ^ は推定値を表す。$(\partial F_i/\partial\hat{h})_{i+1}^{j+1}$は$\partial F_i/\partial h_{i+1}^{j+1}$において$h_{i+1}^{j+1}=\hat{h}_{i+1}^{j+1}$を代入した値$\partial F_i/\partial h_{i+1}^{j+1}\,|_{h=\hat{h}}$である。)

また，上流端での境界条件は流入の時間的変化で与えられるため

$\nu = 0,1,2,\cdots,j,j+1,\cdots$ とすると

$$Q_1^{\nu} - Q_1(\nu\Delta t) = 0 \quad \cdots\cdots (8)$$

また，下流端での境界条件は本流と支流の場合で異なり，本流の場合は等流条件を境界条件とし，支流の場合は水深の時間的変化を境界条件とする。

本流の場合：

$$Q_N^{j+1} - \frac{B_N}{n} \cdot i_0^{1/2} \cdot (h_N^{j+1})^{5/3} = 0 \quad \cdots\cdots (9)$$

(n：マニングの粗度係数，$R \simeq h$)

支流の場合：

$$h_N^{\nu} - h_N(\nu\Delta t) = 0 \quad \cdots\cdots (10)$$

ゆえに，(8)，(9)，(10) 式の左辺をそれぞれ F_0，G_N^m，G_N^b とすると，

$$F_0(Q_1^{j+1}) = F_0\{Q_1((j+1)\Delta t)\} + \Delta Q_1\left(\frac{\partial F_0}{\partial \hat{Q}}\right)_1^{j+1} = 0 \quad \cdots\cdots (11)$$

$$G_N^m(h_N^{j+1},\ Q_N^{j+1}) = G_N^m(\hat{h}_N^{j+1},\ \hat{Q}_N^{j+1})$$

$$+ \Delta Q_N^{j+1}\left(\frac{\partial G_N^m}{\partial \hat{Q}}\right)_N^{j+1} + \Delta h_N\left(\frac{\partial G_N^m}{\partial \hat{h}}\right)_N^{j+1} = 0 \quad \cdots\cdots (12)$$

$$G_N^b(h_N^{j+1}) = G_N^b\{h_N((j+1)\Delta t)\} + \Delta h_N\left(\frac{\partial G_N^b}{\partial \hat{h}}\right)_N^{j+1} = 0 \quad \cdots\cdots (13)$$

となる。

よって，ヤコビ行列 $J'(X^k)$ は次のようになる。ただし，行列の中の空白部分は全て 0 である。

$$\begin{bmatrix}
\left(\frac{\partial F_0}{\partial \hat{Q}}\right)_1^{j+1} & 0 & & & & & \\
\left(\frac{\partial F_1}{\partial \hat{Q}}\right)_1^{j+1} & \left(\frac{\partial F_1}{\partial \hat{h}}\right)_1^{j+1} & \left(\frac{\partial F_1}{\partial \hat{Q}}\right)_2^{j+1} & \left(\frac{\partial F_1}{\partial \hat{h}}\right)_2^{j+1} & & & \\
\left(\frac{\partial G_1}{\partial \hat{Q}}\right)_1^{j+1} & \left(\frac{\partial G_1}{\partial \hat{h}}\right)_1^{j+1} & \left(\frac{\partial G_1}{\partial \hat{Q}}\right)_2^{j+1} & \left(\frac{\partial G_1}{\partial \hat{h}}\right)_2^{j+1} & & & \\
 & \left(\frac{\partial F_i}{\partial \hat{Q}}\right)_i^{j+1} & \left(\frac{\partial F_i}{\partial \hat{h}}\right)_i^{j+1} & \left(\frac{\partial F_i}{\partial \hat{Q}}\right)_{i+1}^{j+1} & \left(\frac{\partial F_i}{\partial \hat{h}}\right)_{i+1}^{j+1} & & \\
 & \left(\frac{\partial G_i}{\partial \hat{Q}}\right)_i^{j+1} & \left(\frac{\partial G_i}{\partial \hat{h}}\right)_i^{j+1} & \left(\frac{\partial G_i}{\partial \hat{Q}}\right)_{i+1}^{j+1} & \left(\frac{\partial G_i}{\partial \hat{h}}\right)_{i+1}^{j+1} & & \\
 & & \left(\frac{\partial F_{N-1}}{\partial \hat{Q}}\right)_{N-1}^{j+1} & \left(\frac{\partial F_{N-1}}{\partial \hat{h}}\right)_{N-1}^{j+1} & \left(\frac{\partial F_{N-1}}{\partial \hat{Q}}\right)_N^{j+1} & \left(\frac{\partial F_{N-1}}{\partial \hat{h}}\right)_N^{j+1} \\
 & & \left(\frac{\partial G_{N-1}}{\partial \hat{Q}}\right)_{N-1}^{j+1} & \left(\frac{\partial G_{N-1}}{\partial \hat{h}}\right)_{N-1}^{j+1} & \left(\frac{\partial G_{N-1}}{\partial \hat{Q}}\right)_N^{j+1} & \left(\frac{\partial G_{N-1}}{\partial \hat{h}}\right)_N^{j+1} \\
 & & & & A & B
\end{bmatrix}$$

ここで，$2N$ 行目の $(A,\ B)$ は下流端での境界条件を表し，

本流の場合：

$$(A,\ B) = \left(\left(\frac{\partial G_N^m}{\partial \hat{Q}}\right)_N^{j+1},\ \left(\frac{\partial G_N^m}{\partial \hat{h}}\right)_N^{j+1}\right) \quad \cdots\cdots (14)$$

支流の場合：

$$(A,\ B) = \left(0,\left(\frac{\partial G_N^b}{\partial \hat{h}}\right)_N^{j+1}\right) \quad \cdots\cdots (15)$$

と表される。更に ΔX は，

$$\Delta X = [\Delta Q_1 \Delta h_1 \Delta Q_2 \Delta h_2 \cdots \Delta Q_i \Delta h_i \Delta Q_{i+1} \Delta h_{i+1} \cdots \Delta Q_{N-1} \Delta h_{N-1} \Delta Q_N \Delta h_N]^T$$

となり，$f(X^k)$ は，

$$f(X^k) = \begin{bmatrix} F_0(Q_1((j+1)\Delta t)) \\ F_1(\hat{Q}_1^{j+1},\ \hat{h}_1^{j+1},\ \hat{Q}_2^{j+1},\ \hat{h}_2^{j+1}) \\ G_1(\hat{Q}_1^{j+1},\ \hat{h}_1^{j+1},\ \hat{Q}_2^{j+1},\ \hat{h}_2^{j+1}) \\ \vdots \\ F_i(\hat{Q}_i^{j+1},\ \hat{h}_i^{j+1},\ \hat{Q}_{i+1}^{j+1},\ \hat{h}_{i+1}^{j+1}) \\ G_i(\hat{Q}_i^{j+1},\ \hat{h}_i^{j+1},\ \hat{Q}_{i+1}^{j+1},\ \hat{h}_{i+1}^{j+1}) \\ \vdots \\ F_{N-1}(\hat{Q}_{N-1}^{j+1},\ \hat{h}_{N-1}^{j+1},\ \hat{Q}_N^{j+1},\ \hat{h}_N^{j+1}) \\ G_{N-1}(\hat{Q}_{N-1}^{j+1},\ \hat{h}_{N-1}^{j+1},\ \hat{Q}_N^{j+1},\ \hat{h}_N^{j+1}) \\ G_N \end{bmatrix}$$

となる。

ただし，$2N$ 行目の G_N は

・本流の場合：

$$G_N = G_N^m(Q_N^{j+1},\ h_N^{j+1}) \quad \cdots\cdots (16)$$

・支流の場合：

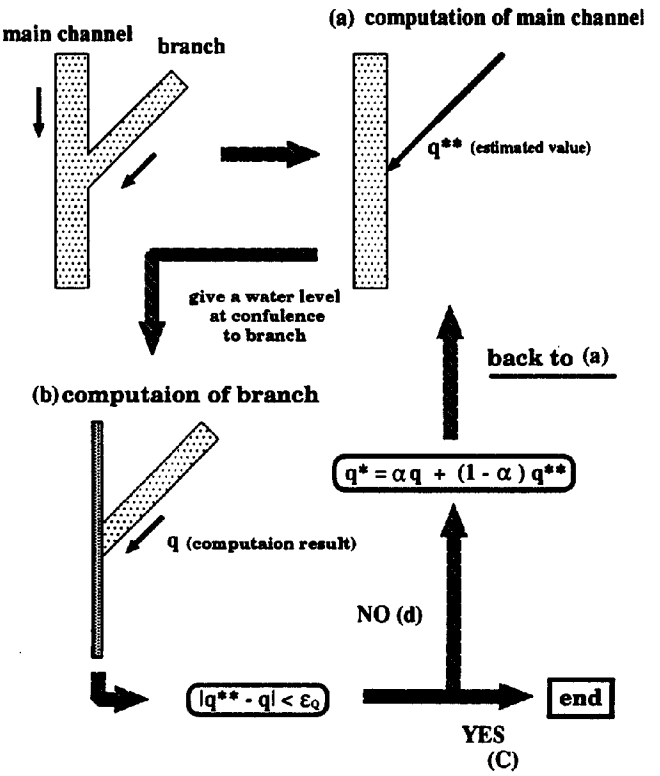
$$G_N = G_N^b(h_N((j+1)\Delta t)) \quad \cdots\cdots (17)$$

以上より，(11)，(12) or (13)，(6)，(7)，式は (5) 式のように表される。

後はガウス消去法* などを用いて ΔX を求め，$X^{k+1} = X^k + \Delta X$ として，これを収束するまで繰り返して未知量を求める。

3．3　Relaxation 法

今回のモデルでは合流点での計算に Relaxation 法を用いる。Relaxation 法とは，未知量を既知のものであると仮定して計算を行ない，得られた結果と始めの推定値に重みを付けて新しい推定値を仮定し，再び計算を行なう。これを推定値と計算結果との差が小さくなるまで繰り返して未知量を求める方法である。以下にアルゴリズムを示す。（**Fig. 3** 参照）



Fig．3　The algorithm of Relaxation method

*例えば，「科学技術計算ハンドブック[4]」など

(a)　合流点における支流からの流入量を q^{**} と仮定し，この q^{**} を用いて本流の計算を行う。

(b)　(a) の結果から得られる合流点の水位を用いて支流の流れを計算し，計算によって得られる支流からの流入量 q を求める。

(c)　$|q - q^{**}| < \varepsilon_Q$ となれば終了。(ε_Q：収束判定値)

(d)　収束しなければ，新たな横流入量の推定値 q^* を，$q^* = \alpha q + (1-\alpha)q^{**}$ として，再び本流の計算からやり直す。(α：重み係数 $|0.6 \leq \alpha \leq 0.8$ 程度が良いとされている。)

3.4　要素モデル FLDWAV の仕様

要素モデル FLDWAV の仕様は以下のようになっている。(**Fig. 4** 参照)

受信端子　受信端子の個数は2個である。受信端子 A は上流からの流量を，受信端子 B は斜面からの流量を受け取る。

送信端子　送信端子の個数は4個である。$A_{1\sim3}$ の3個の送信端子はそれぞれ各時間，各断面の流量，水深，フルード数を送信する端子であり，送信端子 B は最下流端の流量を送信する端子である。

直接通信　直接通信する相手の数は，本流の場合，自分に流入する支流の数だけだが，支流の場合は，自分が流入する地点でも直接通信を行なうので，(自分に流入する支流の数＋1)になる。

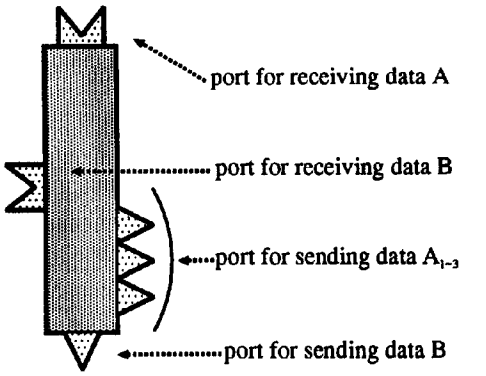


Fig. 4　The specification of element model FLDWAV

パラメタ　パラメタは，水路長(m)，水路床勾配，マニングの粗度係数，計算時間間隔(sec)，反復計算時間間隔(sec)，差分近似の重み付け係数，計算断面数，反復計算の重み係数 (Relaxation 法)，支流の数の9つと，計算断面の位置 (m：上流端からの距離) と各支流の流入する位置 (m：上流端からの距離)，水路幅(active)(m)，水路幅(inactive)(m) である。また，入力されたパラメタの数が合わない時や，計算断面の位置の数が計算断面数と一致しない場合にはエラーメッセージが出るようになっている。

初期状態量　初期状態量は，計算開始時刻(sec)，斜面からの横流入量(m^3/sec)，各断面での流量(m^3/sec)，及び水深(m)，支流からの横流入量(m^3/sec) である。

上流端条件　上流端の境界条件は流入ハイドログラフである。

Fig. 5 に，モデルの接続例を示す。

要素 A は支流を持たない本流を，要素 B は支流を一つ持つ本流を，要素 C は支流を表すモデルである。ただし，最下流端での流量を送信する端子以外の送信端子(**Fig. 4** における送信端子 $A_{1\sim3}$)は省略されている。入力1からは，本流における上流からの流量の時間的変化を，入力2,3,4からは，斜面からの横流入量を，入力5からは，支流における上流からの流入の時間的変化を入力し，出力1から最下流端での流量の時間的変化を出力する。

また，それぞれの要素における各時間，各断面の流量，水深，フルード数のデータも **Fig. 4** における送信端子 $A_{1\sim3}$ を出力ファイルに接続することによって得ることができる。

4. 反復計算機能の検証及び実流域への適用

本章では反復計算機能を検証するために，仮想の河道に対して追跡計算を行うと共に，実際の河川にも適用して考察を行う。

4. 13 機能の検証

適用した河道の形状を **Fig. 6** に示す。ただし，2本の支流はどちらも同じ形状で，斜面からの流入はないものとする。また，カッコ内の数値は計算開始時刻の流量を表す(m^3/sec)。

本流の計算条件は次のようである。河道長は10000 m，河床勾配は0.0005，マニング数は0.03，計算時間間隔は60 (sec)，反復計算時間間隔は60 (sec)，差分近似の重み付けファクターは0.6，計算断面数は23，反復計算の重み係数は0.7，支流の数は2，支流の流入位置は4000 m，8000 m，水路幅は200 m とした。

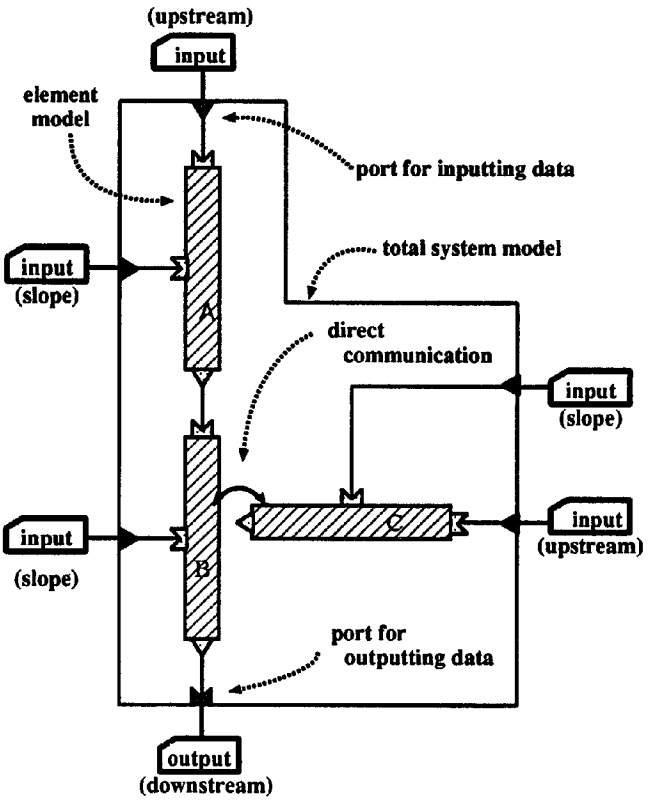


Fig. 5　The connection exmple of element model FLDWAV

支流の計算条件は次のようである。河道長は5000 m，河床勾配は0.0005，マニング数は0.03，計算時間間隔は60 (sec)，反復計算時間間隔は60 (sec)，差分近似の重み付けファクターは0.6，計算断面数は12，支流の数は0，水路幅は150 m とした。

上流端の流入ハイドログラフは次の通りである。なお，支流モデルの流入ハイドログラフはどちらも同じものを用いている。

本流モデル　平常時：150 (m^3/sec)，ピーク時：300 (m^3/sec)

支流モデル　平常時：100 (m^3/sec)，ピーク時：200 (m^3/sec)

また，ピーク時間は次のようにした。

テストA　本流モデル：21600 (sec)，支流モデル(上流側)：14400 (sec)，支流モデル(下流側)：7200 (sec)

テストB　本流モデル：7200 (sec)，支流モデル(上流側)：14400 (sec)，支流モデル(下流側)：21600 (sec)

テストAの流入ハイドログラフ及び最下流端での流量を **Fig. 7** に，**テストB**の流入ハイドログラフ及び最下流端での流量を **Fig. 8** に示す。

Fig. 7 と **Fig. 8** を比較すると，流入ハイドログラフの大きさは等しくとも，ピークを迎える時間の違いによって本流の最下流端ではピーク流量の大きさに違いが出ることが分かる。また，より細かく分析するために次のようなテストも行った。**テストA′**は，**テストA**において，本流の流入を0としたもので，**テストB′**は，**テストB**において，両方の支流からの流入を0としたものである。**テストA**の最下流端での流量及び**テストA′**の最下流端での流量を **Fig. 9** に，**テストB**の最下流端での流量及び**テストB′**の最下流端での流量を **Fig. 10** に示す。

Fig. 9 及び **Fig. 10** によって，テストA，テストBのそれぞれの出力結果に見られる二度のピークは，

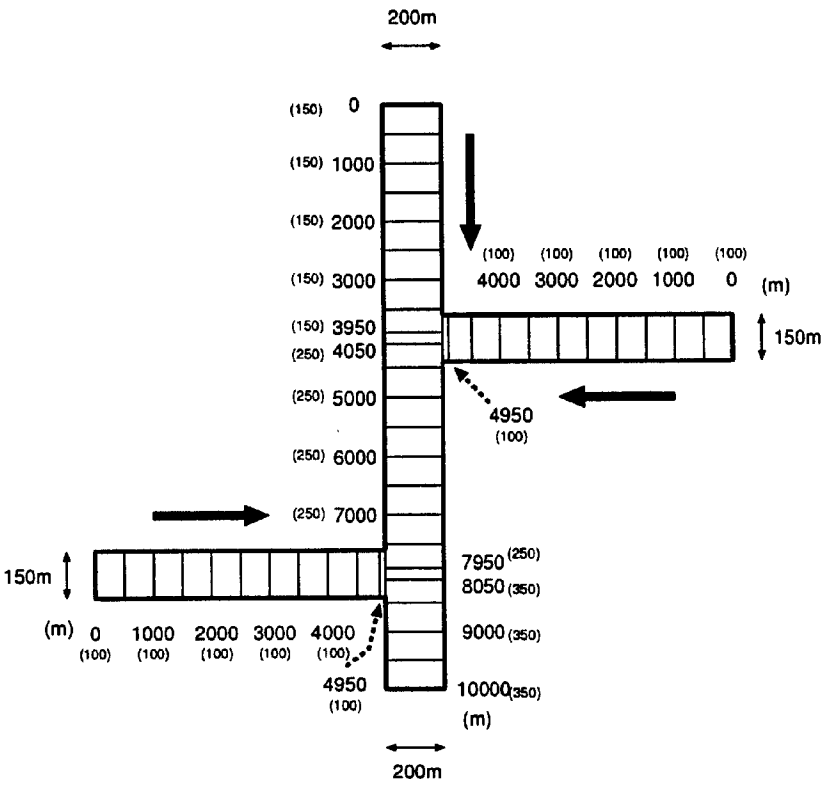


Fig. 6　The configuration of the tested river system

本流からの流入のピークと支流からの流入のピークとの間の時間差によるものであることが分かる。

4. 2　実流域への適用

実流域への適用例として，Columbia-Willamette 川の追跡計算を行う。

適用した河道の形状を **Fig. 11** に示す。ただし，カッコ内の数値は計算開始時刻の流量を表し(m^3/sec)，斜面からの流入はないものとする。

本流の計算条件は次のようにした。河道長は 200000 m，河床勾配は 0.000011，マニング数は 0.03，計算時間間隔は 600 (sec)，反復計算時間間隔は 600 (sec)，差分近似の重み付け係数は 0.6，計算断面数は 42，反復計算の重み係数は 0.7，支流の数は 1，支流の流入位置は 85000 m，水路幅は 400 m とした。

支流の計算条件は次のようにした。河道長は 40000 m，河床勾配は 0.000011，マニング数は 0.03，計算時間間隔は 600 (sec)，反復計算時間間隔は 600 (sec)，差分近似の重み付けファクターは 0.6，計算断面数は 12，支流の数は 0，水路幅は 300 m とした。

上流端の境界条件は次の二通りで行った。

【Case 1】 **本流モデル**平常時：500 (m^3/sec)，ピーク時：1000 (m^3/sec)
　　支流モデル平常時：300 (m^3/sec)，ピーク時：600 (m^3/sec)

【Case 2】 **本流モデル**平常時：500 (m^3/sec)，ピーク時：1000 (m^3/sec)
　　支流モデル平常時：100 (m^3/sec)，ピーク時：200 (m^3/sec)

また，ピーク時間は全て 43200 (sec) である。Case 1，及び Case 2 の流入ハイドログラフをそれぞれ **Fig. 12**，**Fig. 13** に示す。

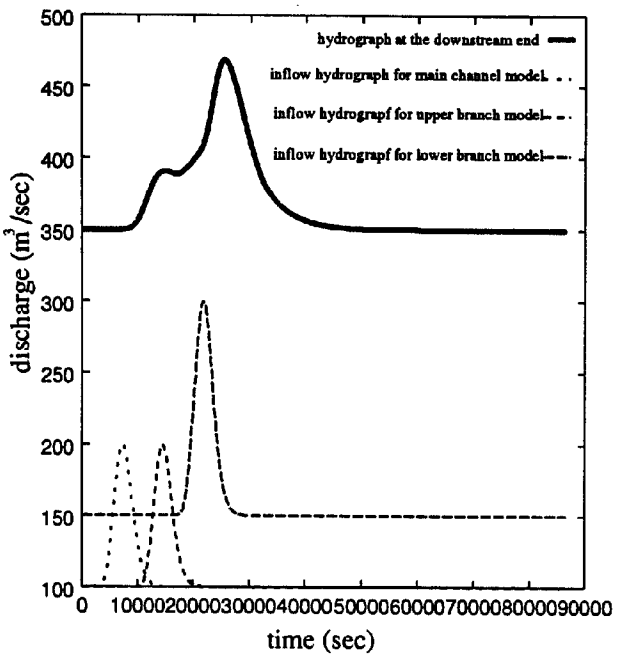


Fig. 7 Inflow hydrographs for test run A and simulation result

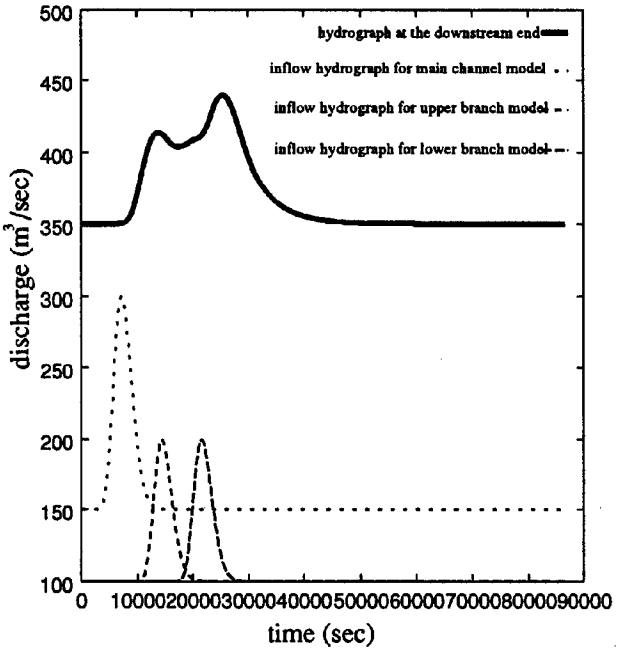


Fig. 8 Inflow hydrographs for test run B and simulation result

シミュレーションの結果を **Fig. 14**, **Fig. 15**, **Fig. 16** に示す。**Fig. 14** はCase 1の本流における流量の時間的変化を表し, **Fig. 15** はCase 2の本流における流量の時間的変化を, **Fig. 16** は両ケースの合流点直前の断面での本流の流量の時間的変化を表している。なお, **Fig. 14** 及び **Fig. 15** の中の距離は, 上流端からの距離を表している。

Fig. 14 を見ると合流点直前の断面を除く断面では合理的な結果が得られている。しかし, 合流点直前の断面(太字部分：84800 m)では流量が減少しているところがある。また, **Fig. 15** においても同じような現象が見られる。そのため, Case 2におけるそのような現象が見られるあたりの時間(40200 sec)の水位の変化をプロットしてみた。その結果が **Fig. 17** である。

この **Fig. 17** を見ると, 合流点直前の水面勾配は合流点直後の水面勾配に比べて, 小さくなっているのが分かる。これは支流が流入することによって, 本流が流れにくくなっていると考えられる。また, **Fig. 16** によればCase 1よりもCase 2の方が流量の減少の度合いが小さいことから, 84800(m)付近で見られる流量の減少は支流が合流することによる影響であると推察される。

5. 結論及び今後の課題

第4章によって, 要素間反復計算機能が正しく動作することと, 実際の河川における追跡計算にも適用が可能であることが示された。

今後の課題としては次のようなことが考えられる。

(a) 下流端での境界条件を, 流れを等流とみなして流量と水深の関係式を用いる方法と, 下流側から水深を受け取るという方法のどちらでも自由に選択できるようにする。

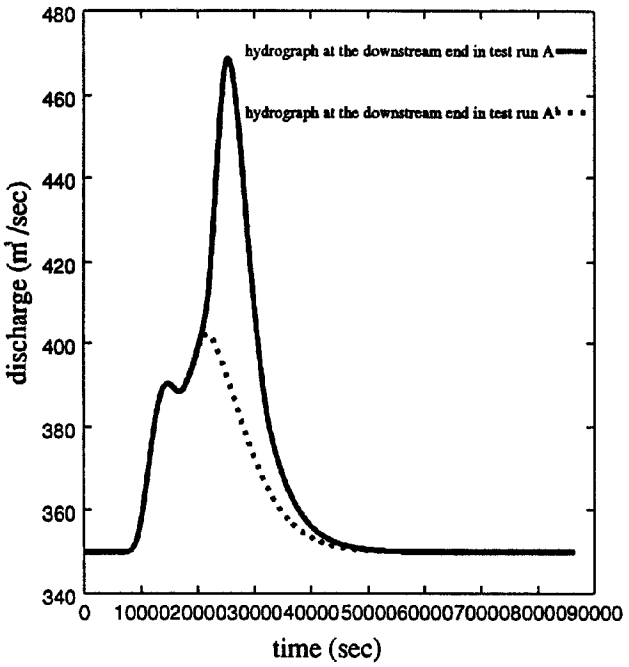


Fig. 9　Hydrographs at the downstream end in test run A and test run A'

(b)　本流と支流との扱いが平等であるようなモデルに改良する。

(a) については，現在のモデルでは本流モデルの下流端境界条件は等流での流量-水深関係式，支流モデルの下流端境界条件は本流から水深を受け取る，というように決まってしまっている。これをどのモデルに対しても自由に下流端条件を選択できるように改良する必要がある。しかし，下流端条件が変わるたびにモデルを作り変えるのでは効率が悪い。そこで，基本となる抽象的なクラスを作り，そのクラスを継承してモデルを作るようにすれば作業の効率も良く，また，より多様な河道網に対しての適用も可能になる。

また，(b) については，現在のモデルでも十分正確に河道網流れを計算できることは第4章で示した。しかし，支流を横流入として扱うのではなく，本流と支流を区別せずに，対等に扱うモデルも検討する必要があると思われる。

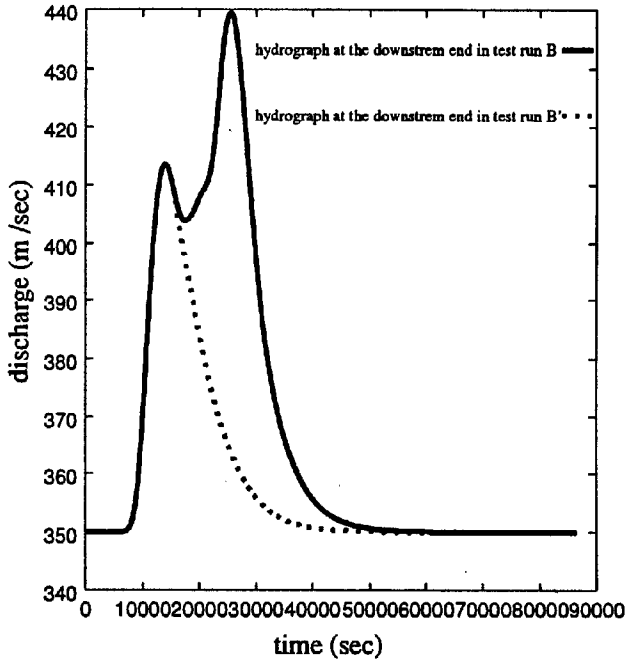


Fig. 10　Hydrographs at the downstream end in test run B and test run B'

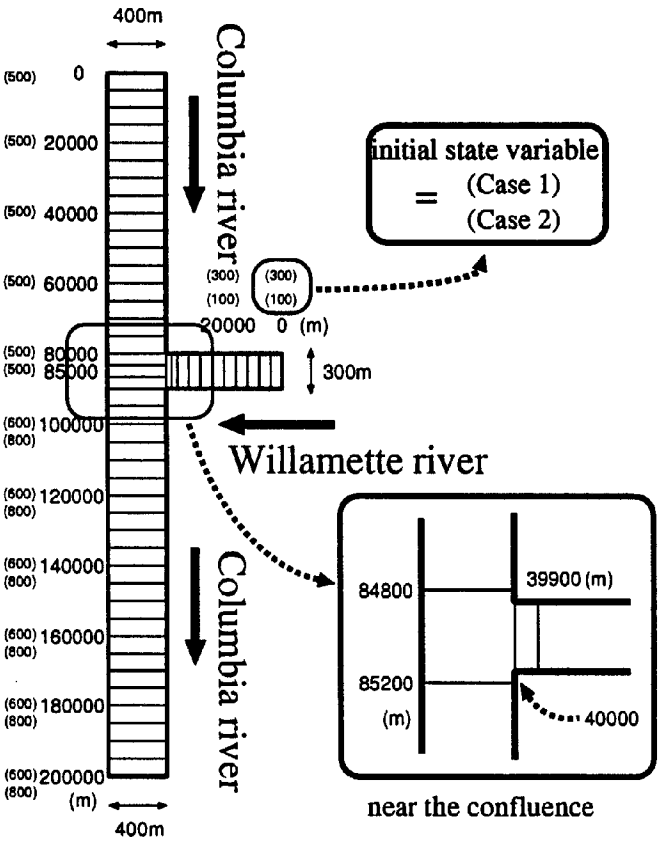


Fig. 11 The configuration of Columbia-willamette river

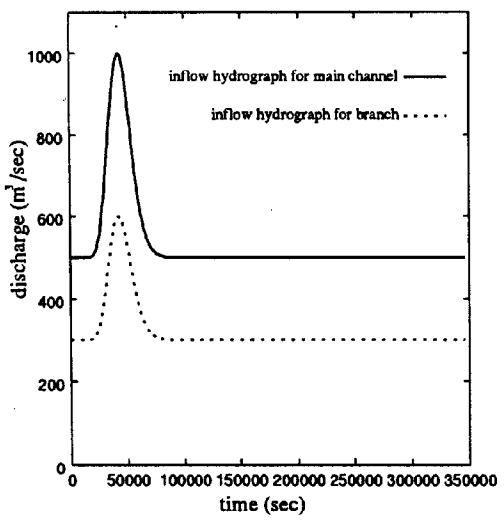


Fig. 12 Inflow hydrographs for Case 1

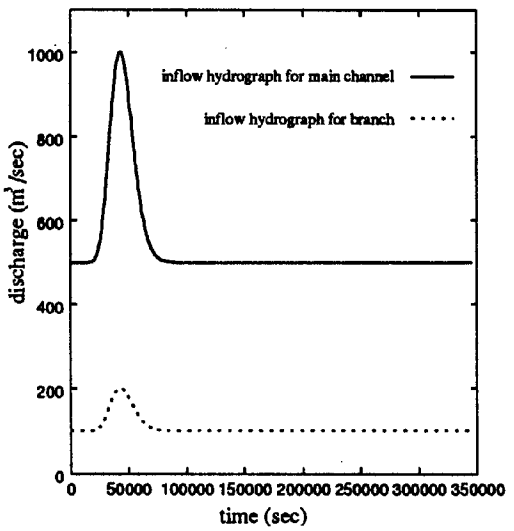


Fig. 13 Inflow hydrographs for Case 2

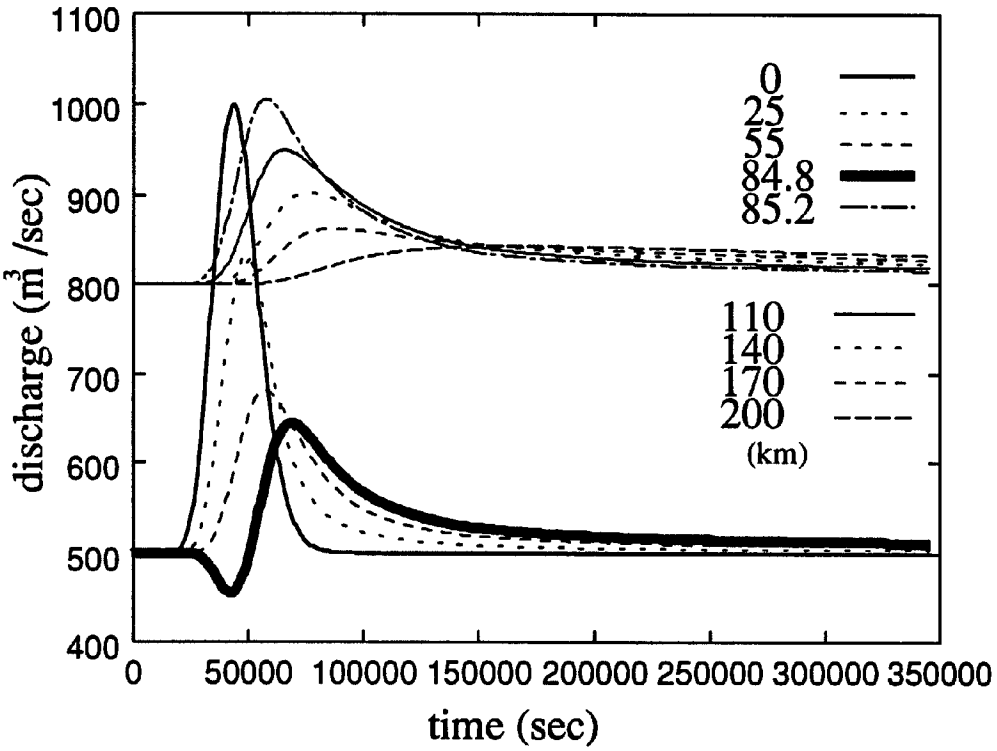


Fig. 14　Hydrographs at various sections in Case 1

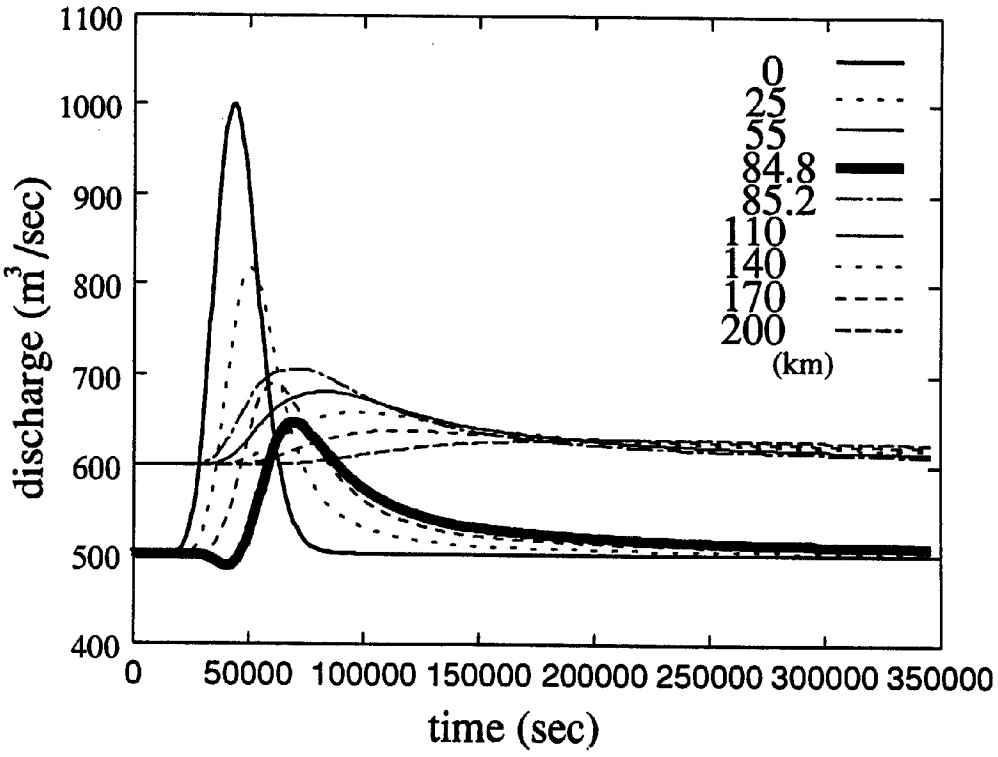


Fig. 15　Hydrographs at various sections in Case 2

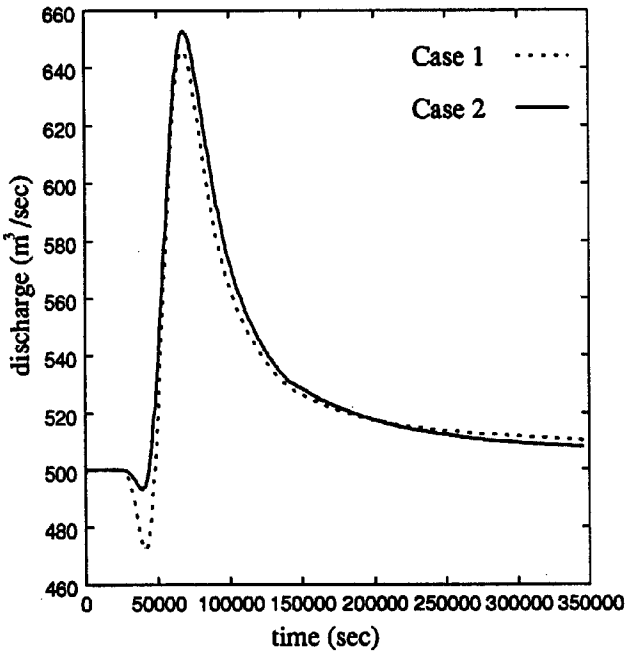


Fig. 16 Hydrographs at the confluence in Case 1 and Case 2

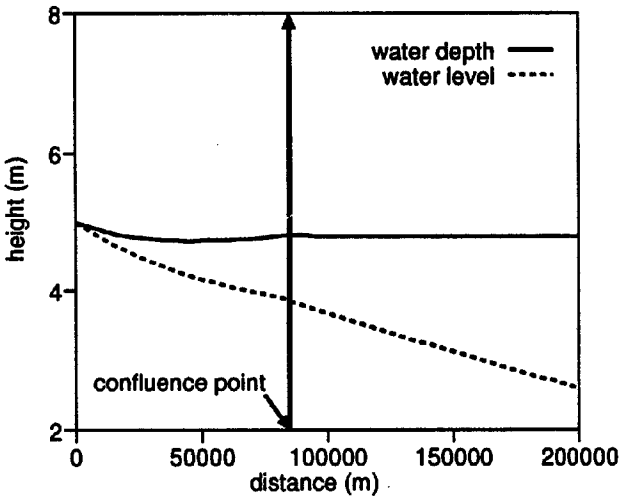


Fig. 17 The change of water level at 40200 sec

参考文献

1) 鈴木俊郎：流出系の構造的モデリングシステムの開発，京都大学大学院工学研究科修士論文，1994.
2) D. L. Fread: Channel routing, chapter14 in Hydorological Forecasting, John Wiley & Sons, 1985.
3) 土木学会：水理公式集-昭和60年版-，技報堂，1985.
4) 戸川隼人：科学技術計算ハンドブック，サイエンス社，1992.