

## 第3章 地表水・地下水結合解析に関する研究

### 3.1 地表・地下水結合解析の背景および目的

一般的に、河川流等の地表面における開水路流動と地下で生じる多孔質媒体あるいはき裂系岩盤内の浸透流は、同一の解析において取り扱われることは少ない。その理由としては、元来微分方程式形が異なること、流速が数オーダー異なることから安定した解を得るための時間的な許容離散化幅が、開水路流れににおいては浸透流解析と比較してかなり短いことがあげられる。

しかしながら、大規模な水循環系の水収支を考える上では、両者を同時に解析し、その上で地下水汚染までを取り扱う手法である。そのため、本章では、統一的な流動の数学モデルの構築を行い、室内実験、数値実験、現位置流出解析を通して、適用性の検討を行う。

その前段階として、本節では既存の地表流および地下水浸透流の基本方程式についての考察および、現在行われている両者の結合解析手法に関して、その概要と問題点について考察する。一般には、地表流は開水路流れの基本方程式の近似形、地下水に関しては、いわゆる飽和・不飽和浸透流解析を用いて解析される。1970年代から、降雨から地下への鉛直浸透、河川への流出、河川の流動という一連のサイクルを統合して解析する試みは行われている。しかしながら、後述するように現状の研究では、地表水の流動は多くの場合 Kinetic Wave 近似でモデル化されているため、地表水的主要流路となる河床の勾配が変化する場合には対応が不可能である。また、既往の方法では、基本的に地表水の流動と地下水は個別にモデル化されており、鉛直浸透によって結合されている。しかしながら、実際の河川においては側方の地盤から河川への流出、あるいは高水時には側方地盤への流出、堤内貯留が重要となる。既往の方法ではそれらの要素をモデル化することは困難である。

#### 3.1.1 地表水流動に関する既往の研究

**基礎方程式** 地表水の流動は、水深が浅く波長が長い波の伝播と考えることができる場合には、いわゆる浅水長波近似が成立し、流れと直交方向および鉛直方向の流速成分が無視できるため、基本的には式 (3.1) で示される自由面を持つ運動方程式で記述される。

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g S_0 - \rho g \frac{\partial h}{\partial x} - F \quad (3.1)$$

上記の運動方程式において、 $u$  は主流動方向への流速、 $\rho$  は水の単位体積重量、 $g$  は重力加速度、 $S_0$  は斜面勾配、 $F$  は、流動に対して底面から受ける抗力である。流れの代表長さを、水深  $h$  とした際の Reynolds 数 ( $= \frac{uh}{\nu}$ ,  $\nu$ : 動粘性係数) が大きく、流れが乱流と考えられる場合、流体の粘性による抵抗が生じる領域はいわゆる粘性底層の領域に限られるが、これは底面の水深に対する相対的な粗度に影響され、一義的には決定できないため、ここでは粘性による影響を独立したものではなく、底面からの抵抗に含めている。流体が底面から受ける抗力は、一般化した形では、以下のように定義される。

$$F = \rho g S_f \quad (3.2)$$

ここで  $S_f$  は、摩擦損失勾配と呼ばれる底面とのエネルギー損失を総称した量である。式 (3.1) を水深方向に平均し、平均流速  $\bar{u} (= \int_0^h u(y) dy)$  に関する運動方程式の形に変形すると、以下の平均流速公式が導出される。

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = \rho g S_0 - \rho g \frac{\partial h}{\partial x} - \rho g S_f \quad (3.3)$$

この、平均流速を用いた運動方程式は、Saint-Venant の式と呼ばれている。この式中の左辺第2項は慣性項に相当し、右辺第2項は圧力項に相当する。この式から、各項に共通する密度  $\rho$  を省略し、降雨あるいは支川、地下との流出入等、主流動方向の流速成分が無視できる系外とのやりとりが存在する場合には、流出入量を  $q$  とすると、流出入による運動量変化を考慮して、平均流速公式は以下のように示される。

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g (S_0 - S_f) - \frac{q \bar{u}}{h} \quad (3.4)$$

以下の式では、特に断りがない場合、流速  $u$  は平均流速  $\bar{u}$  を示すものとする。その際に、図 3.1 に示すような開水路流れにおいて、平均流速  $u$  は、流量  $Q$  と断面積  $A$  から以下のように表される。

$$u = \frac{Q}{A} \quad (3.5)$$

ここで、 $Q$ : 断面を通過する流量、 $A$ : 通水断面積

また、開水路を表す代表長さとして、通水断面積と潤辺長  $S$  より以下のように径深  $R$  を定義する。

$$R = \frac{A}{S} = \frac{A}{2h + W} = \frac{Wh}{2h + W} \quad (3.6)$$

一方、平均流速  $u$  と摩擦損失勾配、径深等の関係としては、多くの実験的な研究が行われているが、実際には、以下の2種類の公式が広く用いられている。

**Chézy の平均流速公式** Chézy 公式は、平均流速  $u$  を以下の形で表したものである。

$$u = C \sqrt{RS_f} \quad (3.7)$$

ここで、 $C$  は Chézy 係数と呼ばれる係数である。この形を変形すると、

$$S_f = \frac{u^2}{C^2 R} \quad (3.8)$$

となり、摩擦係数を  $f'$  とした場合の Darcy-Waisbach の式

$$S_f = \frac{f' u^2}{R 2g} \quad (3.9)$$

と同型となるため、平均流速を用いた地表流の解析手法に関する研究（例えば、Liggett & Woolhiser 1967, Woolhiser & Liggett 1967）では、後述の Manning の平均流速よりも多く用いられている。

**Manning の平均流速公式** Manning 公式は、粘性底層の厚さが表面の粗度と比較して小さい、いわゆる粗面水路の乱流において、水路面の粗さを表す粗度係数  $n$  を導入した以下のような実験式である。

$$u = \frac{1}{n} R^{2/3} S_f^{1/2} \quad (3.10)$$

ここで、 $n$  は  $[L^{-1/3}T]$  という次元を持つ。Manning 公式を用いると、摩擦勾配  $S_f$  は、

$$S_f = \frac{n^2}{R^{4/3}} \cdot u^2 \quad (3.11)$$

で表される。Manning 公式は一般に実現象を良く表現しているため、現在では実務分野では広く利用されている。

実際の解析では、(3.3) と、以下に示す連続方程式を連立させ、断面積  $A$ （矩形水路の場合には水深  $h$ ）および平均流量  $Q$ （同様に平均流速  $u$ ）についての微分方程式を解く形となる。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3.12)$$

矩形水路の場合には、式 (3.12) は、以下の式と同等となる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (uh)}{\partial x} = 0 \quad (3.13)$$

**地表水流動の近似解法** 前項に示した開水路の連続方程式および運動方程式を数値的に解く方法として、一般的な差分法等の離散化手法によって解く方法 (Liggett & Woolhiser 1967, Amein, 1968) や、特性曲線法によって解く方法 (Woolhiser & Liggett 1967) が古くから提案されている。しかしながら、特に離散化解析を行う際に、運動方程式の全ての項に対して離散化を行うと、場合によっては振動解が生じたり、解析が発散することがある (Liggett & Woolhiser 1967)。多くの場合には、流動への寄与が低いと考えられる項を無視した近似解法が用いられる。以下に、一般的に用いられている近似解法と、本研究において用いた Itoh *et. al.*, (2000), Tosaka *et. al.*, (2000) による近似解法を示す。

**Kinematic Wave 近似** Kinematic Wave 近似（運動波近似）とは、Lighthill & Whitham (1955) で示されている近似解法であり、水路勾配  $S_0$  の寄与が他に比べ十分に大きい場合、(3.3) 中の慣性項および圧力項を無視する近似解法である。すなわち、運動方程式は

$$\frac{\partial u}{\partial t} = g(S_0 - S_f) \quad (3.14)$$

ここで、微小区間内での定常流を仮定すると、加速度項 ( $= \frac{\partial u}{\partial t}$ ) を無視することができ、

$$S_f = S_0 \quad (3.15)$$

となる。流速  $u$  で移動している座標系上に水深  $h$  の波が波速  $\sqrt{gh}$  で移動する場合に、固定座標系から見ると、波速は、 $u+c, u-c$  の2方向の流速を持つが、Kinematic Wave 近似は、波を非変形とし、波速を下流方向への流速  $u$  と等しいと仮定した近似である。この場合、式 (3.10) で示した Manning の平均流速公式は、以下のように示される。

$$u = \frac{\sqrt{S_0}}{n} \cdot R^{2/3} \quad (3.16)$$

従って、流速  $u$  を水深  $h$  のみで記述できるため、式 (3.16) を連続式 (3.13) に代入することにより、水深のみの微分方程式を得る。

**Diffusion Wave 近似** Diffusion Wave 近似（拡散波近似）も、Kinematic Wave 近似と同様に、局所的な定常流と、下流方向のみへの波の伝播を仮定した近似法である。適用条件の詳細に関しては後述するが、この近似は流速が比較的小さい場合に適用される。そのような条件下において Kinematic Wave 近似において無視した水深勾配の寄与度が無視できない場合に Diffusion Wave 近似においては、運動方程式 (3.3) から、加速度項、慣性項を無視し、以下の式のような近似を行う。

$$S_f = S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3.17)$$

この場合も、Kinematic Wave 近似と同様に、運動方程式と平均流速公式より水深  $h$  と流速  $u$  の関係式を導出し、それを連続方程式に代入することにより、水深のみの微分方程式を得ることができる。

### 3.1.2 地下水流動に関する既往の研究

飽和帯および不飽和帯における地下水の流動に関しては、多くの研究が行われている。飽和帯の地下水流動に関しては、一般に水を微圧縮性を仮定し、Darcy 則と連続の式から導き出される以下の拡散型微分方程式が基礎方程式として用いられている。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.18)$$

ここで、 $k_{x,y,z}$  :  $x,y,z$  方向の透水係数 [ $LT^{-1}$ ]、 $S_s$  : 比貯留係数 [ $L^{-1}$ ]

$h$  は、全水頭であり、 $z$  軸を鉛直上向きに取れば、以下のように長さの時限を持つ圧力水頭  $P$  と位置水頭  $z$  の和として表現される。

$$h = z + P \quad (3.19)$$

一方、不飽和帯においては、構成則として、透水係数が水飽和度  $S_w$  の関数であるとの仮定の下で Darcy 則を一般化した Buckingham の式 (Buckingham 1907) が用いられている。

$$q = -k(S_w) \text{grad} h \quad (3.20)$$

不飽和帯においては、貯留項を水分容量（体積含水率）の変化と見なすことができるため、不飽和帯における浸透の基礎方程式として、以下に示す Richards の方程式 (Richards 1931) が導かれる。

$$\frac{\partial S_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k(P) \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k(P) \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k(P) \frac{\partial P}{\partial z} \right) + \frac{\partial k(P)}{\partial z} \quad (3.21)$$

ただし、ここでは等方性を仮定して示している。また、圧力水頭  $P$  は、不飽和帯では負の毛管ポテンシャルとなり、体積含水率  $\theta$  と一義的な関係を仮定している。以上の飽和帯、不飽和帯の流動方程式をまとめると、いわゆる飽和・不飽和浸透流解析の基礎方程式として、以下の式が導かれる (Bear 1972)。

$$S(S_w) \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_0 r(S_w) \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_0 r(S_w) \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_0 r(S_w) \frac{\partial P}{\partial z} \right) + q \quad (3.22)$$

式 (3.22) 中の  $r(S_w)$  は、水飽和度  $S_w$  における不飽和透水係数  $k(S_w)$  の飽和透水係数  $k_0$  に対する比を示す。また、左辺の係数  $S(S_w)$  は、以下の式によって決定される。

$$S(S_w) = \begin{cases} \frac{\partial S_w}{\partial P} & \text{if } S_w < 1.0 \\ S_s & \text{if } S_w = 1.0 \end{cases} \quad (3.23)$$

式 (3.22) は、圧力水頭  $P$  に対して非線型方程式となっているため、この式を数値的に解く場合には、Newton-Raphson 法等の反復法を用い、1 タイムステップにおいて圧力水頭  $P$  が収束するまで、繰り返し計算を実施する。

また、登坂他 (1996) では、地下の流体流動として以下に示すような 2 相流動系の基礎方程式を用いている。本論文においても、地下の流体流動はこの方法を基としている。

地表面付近の不飽和帯から地下深部の飽和帯までの地下水流動を、空気-水の2相圧縮性流体流動としてモデル化すると、空気および水の各相の流動は、連続の式および Darcy 則を基に以下に示す基礎方程式で表現される。

$$\nabla \cdot \left( \frac{K k_{rg}}{\mu_a B_g} \nabla (P_g - \rho_g g z) \right) - q_g = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\phi S_g}{B_g} \right) \quad (3.24)$$

$$\nabla \cdot \left( \frac{K k_{rw}}{\mu_w B_w} \nabla (P_w - \rho_w g z) \right) - q_w = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\phi S_w}{B_w} \right) \quad (3.25)$$

ここで、 $K$  : 浸透率 [ $L^2$ ]、 $k_{rp}$  ( $p=a, w$ ) : 各相の相対浸透率 [-]

$\mu_p$  ( $p=g, w$ ) : 各相の静粘性係数 [ $ML^{-1}T^{-1}$ ]、 $B_p$  ( $p=g, w$ ) : 各相の容積係数 [-]

$k_{rp}$  ( $p=g, w$ ) : 各相の相対浸透率 [-]、 $P_p$  ( $p=g, w$ ) : 各相の圧力 [ $ML^{-1}T^{-2}$ ]

$\rho_p$  ( $p=g, w$ ) : 各相の密度 [ $ML^{-3}$ ]、 $g$  : 重力加速度 [ $LT^{-2}$ ]

$z$  : 深度 [ $L$ ]、 $q_p$  ( $p=g, w$ ) : 流入・流出量 [ $T^{-1}$ ]、 $S_p$  ( $p=g, w$ ) : 各相の飽和度 [-]

$t$  : 時間 [ $T$ ]、 $\phi$  : 間隙率 [-] である。

なお式中の添字  $g, w$  はそれぞれ空気相、水相を示す。

以上の式 (3.24), (3.25) において未知数は、各相の圧力および飽和度となる。ここで、未知数の間に、以下の関係式を導入する。

$$P_w = P_g - P_c(S_w) \quad (3.26)$$

$$S_w + S_g = 1.0 \quad (3.27)$$

ここで、 $P_c$  : 毛管圧力 [ $ML^{-1}T^{-2}$ ]

以上の式 (3.26), (3.27) を基礎方程式 (3.24), (3.25) に代入することにより、2種類の未知数 ( $P_g, S_w$ ) に対する2つの微分方程式が、以下に示すように表される。

$$\nabla \cdot \left( \frac{K k_{rg}}{\mu_a B_g} \nabla (P_g - \rho_g g z) \right) - q_g = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\phi (1.0 - S_w)}{B_g} \right) \quad (3.28)$$

$$\nabla \cdot \left( \frac{K k_{rw}}{\mu_w B_w} \nabla (P_a - P_c - \rho_w g z) \right) - q_w = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\phi S_w}{B_w} \right) \quad (3.29)$$

上に示した基礎方程式中に示されている各相の容積係数  $B_p$ 、相対浸透率  $k_{rp}$ 、および毛管圧力  $P_c$  は、あるコントロールボリュームでは、それぞれ圧力および水の飽和度の関数として表現される。代表的な水飽和度と相対浸透率の関係、水飽和度と毛管圧力の関係を、それぞれ、図 3.2~3.3 に示す。

以上の基礎方程式の内、水相の流動方程式 (3.29) における、 $x$  方向の流量は 1 次元 Darcy 則としては以下のように表される。

$$Q_w = -K^* \cdot A^* \cdot f_1 [P_g] \cdot f_2 [S_w] \cdot f_3 [P_g, S_w] \quad (3.30)$$

式 (3.30) 中の各項は、以下の通りである。

$$K^* = K_x, A^* = A_{x\perp}, f_1 [P_g] = \frac{1}{\mu_w B_w}, f_2 [S_w] = k_{rw}, f_3 [P_g, S_w] = \frac{\partial \Psi_w}{\partial x} \quad (3.31)$$

ここで、 $A_{x\perp}$  は流動方向と直交する断面積、 $\Psi_w$  は、 $\Psi_w = P_w - \rho_w g z$  で表される水相のポテンシャルである。以上の式 (3.28), (3.29) を、コーナーポイント格子を用いた有限差分法によって空間的に離散化する。また、

### 3.1.3 地表水・地下水結合解析における既往の研究事例

降雨から、地下への浸透、地表面流動、河川への流出を一連のシステムとして捉え、モデル化する手法は、要素としての表面流の発生に関しては、地表の浸透能を上回る降雨が表面を流出するという Horton 型の表面流発生メカニズム、不飽和帯における鉛直浸透、Richards の式から求められる不飽和鉛直浸透理論に基づいている。Henderson & Wooding (1964) は、Kinematic Wave 近似による地表流と地表面からの水供給による地下水流によるハイドログラフの解析を行った。また Smith & Woolhiser (1971) は、鉛直浸透問題と Kinematic Wave 近似による地表流流動の問題に対し、両者を Discharge によって連結させ、差分法を用いた数値解析によって解き、12m の浸透水路を用いた室内実験、および 30m × 12m の小実験流域での試験に対する適用を実施している。

その後、分布型物理モデルや、集中型モデルを用いた浸透および流出の解析におけるモデルが提案されている。Loague & Freeze (1985) は、いくつかの集中型モデルと、地下水浸透を簡略化した Engman & Rogowski のモデルを、同一の実験流域において比較しているが、特に物理的モデルは、降雨や水理特性の空間分布の影響によって、現実を反映した結果となっていないことが指摘されている。また、Woolhiser (1996) も物理モデルの利用においては、得られた観測データに対し適切なスケールでのモデルを作成することが、信頼性の高い結果を得るために重要であることを指摘している。

その他、浸透-流出結合モデルにおける最近の研究事例としては、Bourroui *et. al.*, (1997) による農学分野における 3 次元モデル等いくつかあげられるが、基本的なモデル化手法は、Kinematic Wave 近似と Richards の式を用いたものであり、河川の表現、様々な汚染物質による地下水汚染問題への拡張性等には問題が多い。

最近では、登坂他 (1996) において、Diffusion Wave 近似を線形化した地表流の近似手法を、2 相流の地下水流動と同形式で定式化し、結合解析を行い、サイトスケールの解析においても安定した解を得ている。

登坂他 (1996) は、Diffusion Wave 近似を結合解析に導入する場合、式 (3.42) に示したように、非線型性が強い形式となり、時間ステップの取り方によっては収束性に問題が生じる場合があるため、線形化 Diffusion Wave 近似として Diffusion Wave 近似を変形した式を導入している。

Manning の式を変形すると、地表水の流量は以下のように表すことができる。

$$Q = v h W = \frac{h W}{n} R^{2/3} S_f^{1/2} = \frac{1}{n} \frac{R^{2/3}}{S_f^{1/2}} S_f \quad (3.32)$$

ここで、基本的に  $S_f$  は Diffusion Wave 近似と同様に水路勾配、水深勾配の和と近似するが、Kinematic Wave 近似が成立するという条件では、Diffusion wave 近似の  $S_f$  を水路勾配のみで近似することも可能であるため分母の  $S_f$  に関しては  $S_f = S_0$  と近似し、

$$Q = \frac{1}{n} \frac{R^{2/3}}{\sqrt{S_0}} h W \left( S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad (3.33)$$

と表すこともできる。

これを変形すると、

$$Q = - \frac{\mu_w B_w}{\rho_w g n \sqrt{S_0}} \left( \frac{W H}{2H + W} \right)^{2/3} \cdot W H \cdot \frac{1}{\mu_w B_w} \cdot S_w^{5/3} \cdot \left( \frac{2H + W}{2S_w H + W} \right)^{2/3} \cdot \frac{\partial \psi_w}{\partial x} \quad (3.34)$$

各項に分類すると、

$$K^* = \frac{\mu_w B_w}{\rho_w g n \sqrt{S_0}} \left( \frac{W H}{2H + W} \right)^{2/3}, A^* = W H, \\ f_1 [P_w] = \frac{1}{\mu_w B_w}, f_2 [S_w] = S_w^{5/3} \left( \frac{2H + W}{2S_w H + W} \right)^{2/3}, f_3 [P_w, S_w] = \frac{\partial \psi_w}{\partial x} \quad (3.35)$$

となる。これから、上述の2相浸透流解析と同形となるため、共通の解析を行うことが可能となる。

ここで、水相の圧力に関しては、Diffusion Wave 近似と同様の擬似的毛管圧力を用いて算出される。式 (3.35) 中の各項は、数値解析上、Diffusion Wave 近似と同様に、離散化格子形状、各時間および非定常計算ステップでの水飽和度（水深）等から計算する事が可能である。式 (3.34) は、式 (3.42) と比較すると、流量がポテンシャル勾配に比例する形となっており、地下水流動の構成則である Darcy 則と同様の形となっている。また、式 (3.35) 中の  $K^*, A^*, f_1, f_2$  の各項は、それぞれ擬似的な浸透率、流動断面積、粘性・圧縮率項、相対浸透率項に相当し、地下の2相浸透流解析と同形式となっている。

ただし、式 (3.34) 中の擬似的浸透率項の分母に水路勾配  $i$  の平方根が含まれているため、水路勾配が0の場合、すなわち平坦な水路においては擬似的浸透率が無限大となり計算が不可能となる。実用上、以下に示すように水路勾配が一定値  $\epsilon$  以下となる場合には、擬似的浸透率の計算において水路勾配を固定し、平坦斜面にも適用可能な形を取っている。 $\epsilon$  の値としては、例えば  $1.0 \times 10^{-5}$  程度を採用している。

$$S_f = \begin{cases} \frac{\partial Z}{\partial x} & \text{if } \frac{\partial Z}{\partial x} > \epsilon \\ \epsilon & \text{if } \frac{\partial Z}{\partial x} \leq \epsilon \end{cases} \quad (3.36)$$



この考え方は、Kinematic Wave 近似に対しても適用可能である。

Manning の式に Kinematic Wave 近似を導入して流量を表現すると、以下のようになる。

$$Q = v h W = \frac{h W}{n} R^{2/3} i^{1/2} = \frac{1}{n} \frac{R^{2/3}}{S_0^{1/2}} i \quad (3.37)$$

線形化 Diffusion Wave 近似と同様に変形すると、

$$Q = -\frac{\mu_w B_w}{\rho_w g n \sqrt{S_0}} \left( \frac{W H}{2H + W} \right)^{2/3} \cdot W H \cdot \frac{1}{\mu_w B_w} \cdot S_w^{5/3} \cdot \left( \frac{2H + W}{2S_w H + W} \right)^{2/3} \cdot \left( -\frac{\partial Z}{\partial x} \right) \quad (3.38)$$

ここで、地表流を計算する層における気相の圧力は常に大気圧であるため、以下の関係が成立する。

$$-\frac{\partial Z}{\partial x} = \frac{\partial P_g}{\partial x} - \frac{\partial Z}{\partial x} \quad (3.39)$$

計算上、Kinematic Wave 近似を用いる際に、擬似的毛管圧力を 0 と仮定すれば  $P_w =$  大気圧であり、 $\frac{\partial P_w}{\partial x} = 0$  となるため、線形化 Diffusion Wave 近似と共通の手法で解くことが可能である。

### 3.1.4 本研究の目的

冒頭にも述べたように、地表流・地下水流結合解析に関しては、地表流の数学的表現の問題、および河床と地下とのインターフェース部分のモデル化の問題が、既往の解析手法における最大の問題点と考えられる。従って、本研究では、地表水・地下水結合解析におけるより現実的なモデル化を目標とし、Diffusion Wave 近似による地表水のモデル化および河床部分の物理的モデルの改良の 2 点を主要課題として開発を行った。

## 3.2 地表水の流動に関する解析手法の開発

ここでは、前出の登坂他 (1996) および Tosaka *et al.*, (2000) を基に、更に発展を加えた解析手法の提案を行う。

本研究では、Tosaka *et al.*, (1999) に基づき地表流の解析を地下水浸透流解析と統一的に扱うために、地表流解析における Diffusion Wave 近似を変形し、2 相浸透流解析と同等の形式とした。以下に各近似手法における定式化の結果を示す。

Diffusion Wave 近似を適用する場合には、エネルギー勾配  $S_f$  は、水路の標高および間隙水圧で表すと、以下のような式で表現される。

$$S_f = \frac{\partial Z}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial P_w}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial x} = -\frac{1}{\rho g} \left( \frac{\partial P_w}{\partial x} - \rho_w g \frac{\partial Z}{\partial x} \right) \quad (3.40)$$

式(3.40)を Manning の式(3.10)に代入し、流速を流量の形に変形する。その際に、格子厚さを  $H$  として

$$S_w = h/H \quad (3.41)$$

という関係を導入すると、Diffusion Wave 近似における流量は、以下のように表される。

$$Q = -\frac{\mu_w B_w}{\rho_w g n} \left( \frac{WH}{2H+W} \right)^{2/3} \cdot WH \cdot \frac{1}{\mu_w B_w} \cdot S_w^{5/3} \left( \frac{2H+W}{2S_w H+W} \right)^{2/3} \cdot (\rho_w g)^{1/2} \left| \frac{\partial \psi_w}{\partial x} \right|^{1/2} \operatorname{sgn} \left[ \frac{\partial \psi_w}{\partial x} \right] \quad (3.42)$$

式(3.42)中の  $\operatorname{sgn} \left[ \frac{\partial \psi_w}{\partial x} \right]$  は、 $\frac{\partial \psi_w}{\partial x}$  が負の場合は-1、正の場合は1となる。式(3.42)中の各項を以下のように考えることにより、本式は、式(3.30)と同型式の式と考えることができる。

$$\begin{aligned} K^* &= \frac{\mu_w B_w}{\rho_w g n} \left( \frac{WH}{2H+W} \right)^{2/3}, A^* = WH, \\ f_1[P_w] &= \frac{1}{\mu_w B_w}, f_2[S_w] = S_w^{5/3} \left( \frac{2H+W}{2S_w H+W} \right)^{2/3}, \\ f_3[P_w, S_w] &= (\rho_w g)^{1/2} \left| \frac{\partial \psi_w}{\partial x} \right|^{1/2} \operatorname{sgn} \left[ \frac{\partial \psi_w}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (3.43)$$

これからも分かるように、式(3.42)は、ポテンシャル勾配の  $1/2$  乗の項を含んでいる。しかしながら、数値的には Newton-Raphson 法による反復解法等を用いることで解くことが可能である。また、地表面の擬似的な浸透率、断面積 ( $K^*, A^*$ ) は、数値解析においては解析格子の離散化形状からあらかじめ計算することが可能である。また、圧力依存項  $f_1$  および擬似的な相対浸透率項  $f_2$  項は、各時間ステップ、反復ステップにおける  $P_w, S_w$  および離散化格子形状から計算することが可能である。

ここで、式(3.42)中の圧力は水相の圧力  $P_w$  であるが、計算によって求められる圧力は空気相の圧力  $P_g$  であり、地表流が発生する格子においては常に大気圧となっている。従って、水圧は擬似的な毛管圧力 ( $P_c^*$ ) を導入することによって求める。

擬似的な毛管圧の考え方を図-3.4に示す。擬似的毛管圧力は図-3.4のように水深と格子中心深度から決定される。地表流の領域においては、水深を水飽和度で近似することが可能であるため、格子中心の  $Z$  座標を  $Z_c$  とすると擬似毛管圧力は以下に示す式で決定される。

$$P_c^* = \rho g (Z_c - h) = \rho g H (0.5 - S_w) \quad (3.44)$$

この擬似毛管圧を導入することにより、解析上、水深の差によって地表流をスムーズに生じさせることが可能となる。

次節に示すように、本論文の Diffusion Wave 近似および登坂他(1996)の2種類の近似モデルでは Diffusion wave 近似が最も適用性が広い。しかし、他のモデルも次節に示す条件を満たす場合には適用可能であり、計算の安定性は Diffusion wave 近似よりも優れているため、2相浸透流の3次元地下水解析プログラムにおいて、適切な方法を選択しながら地表・地下水流の結合解析を行う必要が有る。

### 3.3 近似モデルの適用性検討

#### 3.3.1 適用性に対する数学的考察

Liggett & Woolhiser (1967) 等多くの研究において、平均流速による運動方程式 (3.4) は、等流水深  $H_0$ 、等流流速  $V_0$ 、単位流路長あたりの供給量  $q$  および流路長  $L_0$  を用いて以下のように無次元化された上で特性曲線法によって検討されている。

$$\frac{\partial u_*}{\partial t} + u_* \frac{\partial u_*}{\partial x} + \frac{1}{F_0^2} \frac{\partial h_*}{\partial x} = \kappa \left( 1 - \frac{u_*^2}{h_*} \right) - \frac{u_*}{h_*} \quad (3.45)$$

ただし、 $u_* = \frac{u}{V_0}$ ,  $h_* = \frac{h}{H_0}$  であり、 $F_0$  および  $\kappa$  は以下の式で与えられる無次元量である。

$$F_0 = \frac{V_0}{\sqrt{gH_0}} \quad (3.46)$$

$$\kappa = \frac{S_0 L_0}{F_0^2 L_0} \quad (3.47)$$

すなわち、 $F_0$  は定常状態における Froude 数に相当する。

Govindaraju *et. al.*, (1988) によれば、Kinematic Wave 近似の成立条件は、式 (3.45) の  $\kappa > 50$  の場合であり、Diffusion Wave 近似は、 $F_0 < 0.8$  かつ  $F_0^2 \kappa \gg 1$  の場合に成立するとされている。前者の条件は、加速度項、慣性項、水深勾配に比べ、水路勾配が十分に大きいことを示し、後者は、加速度項、慣性項に比べ水深勾配、水路勾配が十分に大きいことを示している。Kinematic wave 近似が成立するためには、前提として、Diffusion wave 近似が成立するという条件がある。

一例として、利根川流域を取り上げると、中流の栗橋観測点で流路長 190km、流域面積 8588km<sup>2</sup>、平均流量 135m<sup>3</sup>/s というデータを用い、平常時の川幅を 50m と推定した場合の、河床勾配と  $F_0, \kappa$  の関係を図-3.5 に示す。

これから、ほとんどの場合は Kinematic Wave 近似が成立する領域であり、なお、河床勾配が 0.02 以上の場合には Diffusion Wave 近似が効果的であることが示されている。

登坂他 (1996) の線形化 Diffusion Wave 近似は、数学的には以下の近似を行っていることと同値である。

$$\sqrt{S_f} = \frac{S_f}{\sqrt{S_f}} \approx \frac{1}{\sqrt{S_0}} \left( S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad (3.48)$$

これを Diffusion Wave 近似の式に代入すると、

$$S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{S_0} \left( S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 = \frac{\partial h}{\partial x} \left( 1 - \frac{1}{S_0} \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 0 \quad (3.49)$$

この近似が成立するためには、 $\frac{\partial h}{\partial x} \approx 0$ , または  $S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} \approx 0$  が成立する必要がある。ただし、後者の場合は流速=0の条件となるため自明であり、前者からこの近似が成立するための条件は、水深勾配が十分小さいという条件となる。これは、Kinematic Wave 近似が成立するための条件と等価である。

ただし、Kinematic Wave 近似においては、水路勾配が急変する部分においては流量の連続性を保つために水深が急変する。線形化 Diffusion Wave 近似は水深勾配も考慮する事ができるため、水深も漸変する現実的な解析結果を得る事ができる。

### 3.3.2 Diffusion Wave 近似の適用性確認

Diffusion Wave モデルの適用性は、Ponce & Simons (1977), Ponce *et. al.*, (1978), Akan & Yen (1981), 前出の Govindaraju *et. al.*, (1988) 等によって確認されている。ここでは、前述したような浸透流との連成問題への適用をターゲットとした数値解析における適用性の確認を行う。

Diffusion Wave 近似の適用性は、簡便なモデルにおいて近似を行わない運動方程式の解と比較する事で実施した。適用性確認には、岩佐 (1995) に示されているモデルを用いた。モデルは、Manning の粗度係数 0.025、傾斜 0.001 の無限長の単斜面である。このモデルに対し、上流側に図-3.6の実線で示す経時変化を与え、4000m 下流側における流量経時変化を解析した。岩佐 (1995) は、式 (3.4) に対し、特性曲線法を適用し、空間分割 400m、時間分割 30sec において、図-3.6 中に破線で示した下流端流量を得ている。また、時間間隔をこれ以上長くすることにより解析の安定性が失われる事を示している。一方、本研究では、同条件で計算を行うために、空間分割 400m で解析を行った。時間分割は 1/1000 日 (84.6 秒)、1/100 日 (846 秒) で解析を実施した。Diffusion Wave 近似による解析結果を図-3.7 に示す。時間間隔 1/10 日においては、解析の安定性は十分得られるものの、入力する上流側の流量の再現性が低下するため、適切な解は得られない。

図中には岩佐による特性曲線法の解も併記している。この結果より Diffusion Wave 近似を 2 相浸透流と類似形で表現した本数値解析手法の妥当性が確認された。また、岩佐によると  $\Delta t$  が 30 秒以上では安定しないとされているが、本解析手法では少なくとも入力側の流量経時変化を再現する時間間隔であれば Newton 法の反復 2 回程度で安定して解く事が可能である。

## 3.4 室内および数値実験による検討

前節で提案した地表水・地下水結合解析において、特に問題となるものは地表水の流動解析の妥当性である。本節では、地表水流動解析に関して、室内実験結果を用いた検証を行ったうえで、フィールドサイズの数値実験を行い、地表水・地下水結合解析の妥当性の検討を行う。

### 3.4.1 室内実験を用いた地表水流動解析の妥当性検討

前述したように、本研究では地表水流動の運動方程式の近似手法として、Diffusion Wave 近似、線形化 Diffusion Wave 近似、Kinematic Wave 近似の3種類の近似手法を導入した。ここでは、Tosaka *et. al.*, (1998) に示されている水路を用いた室内実験結果を用いて、解析手法の検証を行った。図-3.8に実験水路の概要を示す。実験水路は、図にも示したように、単一斜面および複合斜面の2種類を用いた。水路長は、単一斜面の場合が2m、複合斜面の場合が、1mずつ3段の水路としている。水路幅はそれぞれ4.5cm、単一斜面の傾斜は2.74度、複合斜面は、上流から4.7度、0度、7.6度の3段階の斜面を結合している。

それぞれ初期状態は水深0の乾燥状態とし、単一斜面モデルにおいては、最上流から  $6.64\text{cm}^3/\text{s}$  の流量の水を6秒間、複合斜面モデルにおいては、同流量の水を21秒間供給し、最下流部における流出量変化を経時的に測定した。測定結果を図-3.9および図-3.10に示す。

実験は、同一条件でそれぞれ3回および2回行い、ほぼ再現性のある結果を得ている。これから、水の到達に要する時間は複合斜面モデルで、単純斜面モデルの約2倍を要し、流量逓減も同様である。以上の実験結果に対し、ここでは、Diffusion Wave 近似および線形化 Diffusion Wave 近似の2種類の解析手法を適用し、解析手法の妥当性検証を行った。

図-3.11および図-3.12に、それぞれのケースにおける実測流量と解析結果を比較したものを示す。解析を行う際の入力パラメータである Manning の粗度係数は、単一斜面モデルの線形化 Diffusion Wave 近似でフィッティングを行った結果である  $0.012(\text{m}^{-1/3}\text{s})$  を用いた。また、単一斜面モデルでは、Kinematic Wave モデルでの解析結果も併記した。

結果として、単一斜面モデルでは、Diffusion Wave, 線形化 Diffusion Wave, Kinematic Wave の全てのモデルにおいて、同一の Manning 係数でほぼ同様の結果が得られ、室内実験結果を十分再現しているものとなっている。同様に、複合斜面モデルにおいても Diffusion Wave, 線形化 Diffusion Wave モデルの両者でほぼ同一かつ、室内実験とも調和的な結果が得られた。

複合斜面モデルにおける Diffusion Wave モデルおよび Kinematic Wave モデルによる水深分布を図-3.13に示す。Diffusion Wave モデルがスムーズな水深分布を示しているのに対し、Kinematic wave モデルでは中間の水平部分では水が流動できず、勾配変化点において滞留してしまい実験の再現は不可能である。

この結果より、Diffusion Wave モデルおよび線形化 Diffusion Wave モデルは、本実験のような複合斜面でも実験結果と比較して妥当である事が示された。

### 3.4.2 実スケールの数値実験による検討

次に、実際の問題に近い、より大スケールのモデルを用いた数値実験によって、本研究の解析手法の妥当性検討を行った。モデルの形状および解析格子分割を図-3.14に示す。ここでは、地表面の浸透率を0とした地下水流を考慮しない場合と、地下への浸透を考慮した場合の2種類の解析を実施した。

本モデルは、斜面および2個所の窪地から構成されているモデルである。降雨供給は、図-3.14中のモデル左端に連続的に供給した。従って、地表あるいは地下を流動した水は、第一に左側の窪地に流出し、次に右側を満たすことが予想される。地下浸透を許すモデルにおける地下の浸透率は、地盤全体の1/10を土壤と考え $10\mu m^2$ 、それ以外を $1\mu m^2$ と設定した。また、地盤中のirreducible water saturationは0.1として計算を実施した。また、モデル中に3点の水深測定点を設定した。それらの点の位置は、図-3.14中に併記した。

第一に、地表面を不透水としたケースにおける、Diffusion Wave近似を用いた解析による水深測定点における水深経時変化を図-3.15に示す。この結果は、降雨が左方の窪地に直接供給された場合とほぼ調和的な結果を示している。また、このケースにおけるモデル全体の水深変化模式図（水飽和率変化）を図-3.16に示す。

一方、同様な地表面を不透水としたモデルにおいて線形化Diffusion Wave近似を用いた場合の水深測定点での水深経時変化を図-3.17に示す。このケースにおいては、図に示されるように、左方の窪地に降雨が貯留される状況は、Diffusion Wave近似と同様の結果を示すが、左方の窪地から右方に水が越流する際に、計算が不安定となっている。これは、水平面上の地表水流動における数値的な取り扱いに起因するものと考えられる。このような特殊なケースにおいては、線形化Diffusion Wave近似が適用できない場合もありうる。

次に、地表面からの浸透を許容するケースにおける計算結果を示す。図-3.18に代表点3点における水深経時変化を示す。これを、不透水地表面の結果である図-3.15と比較すると、全ての降雨が一旦地下に浸透し、窪地に流出する形となっているため、各地点での貯留開始時間、水深の上昇速度ともに明らかな遅延効果が現れている。また、同一地点における地下水位の経時変化を図-3.19に示す。この図から、Point 1における地下水位は徐々に上昇し、地下水位が地表標高に到達した段階から、地表への流出が開始することがわかる。同様の状況は、右方のPoint 3においても見受けられる。地表面からの降雨浸透を許容するモデルにおける水飽和率分布を図-3.20に示す。

以上から、地表水流動と地下水流動を統一的に扱う本手法を用いることで、両者において現実的な解析結果を得ることが可能であることが示された。また、地表水の流動に関しては、Diffusion Wave近似を用いることで、全てのケースに関して、現実的かつ室内実験と調和的な結果を得ることができる。線形化Diffusion Waveモデルでは、特殊な場合には安定した解が得られなくなる場合がある。しかしながら、Diffusion Wave近似は、線形化Diffusion近似と比較して、微分方程式の非線型性が強くなるため、一般的に収束が遅くなる。実際の問題への適用に際しては、地形データから越流可能性の有無等を判断した上で、解析に用いる近似解法を選択する必要がある。

### 3.5 数値解析における河道表現手法に関する研究

河川流動の数学的なモデル化の妥当性に関しては、前節までに述べてきたように、運動方程式の水深方向への積分であるいわゆる浅水長波近似が成立する場合においてはDiffusion Wave近似によって流動は問題なく再現できる事が示された。

物理的なモデル化については、特に数 10km 四方にわたる広い流域を離散化して解析を行う時点で多くの問題が生じる。河川の物理的モデルに限定しても、離散化を行った時点で、河道は局所的な線分の連続したいわゆる”Polyline”としてモデル化され、局所的な河道幅は離散化格子の幅に固定される。実際には、人工的な改変が行われている部分以外は、流路は複雑な曲線状であり、流路幅も部分的に変化している。また、河川は一般的に周囲と比較して掘り込まれており、断面形状は様々な形状となっているにも関わらず、離散化モデル上は矩形水路として扱わざるを得ない。

ここでは、矩形開水路としての河川のモデル化をより自然に近づけるという観点から、複数層河道モデルの提案、および数値解析による河川流動再現における適用限界についての考察を行う。

### 3.5.1 複数層河道モデルによる流速表現手法の提案

地表・地下水流動の結合解析における空間的離散化の方法として、鉛直方向の最上部の 1 層は、大気層として気相の圧力は大気圧、水相の飽和度は 0 とし、基本的には第 2 層目を地表流が生じる層としてモデル化を行う (登坂他 1996)。一方、地表流における主要な流路である河道において、河床標高は一般に周囲の地表標高と比較して一段低くなっている。そのため、ここでは河道のモデル化手法として、河床標高を考慮したモデル化手法を開発し、河床標高を特に考慮しないモデル化手法と比較することとした (Itoh *et. al.*, 2000)。

河床標高を考慮したモデル化手法においては、河道部における地表流発生格子を 3 層目と考える。以降、ここで示すモデル化手法を 3L(3rd Layer) モデルと呼び、河床標高を特に考慮しないモデルを 2L(2nd Layer) モデルと呼ぶこととする。2 種類のモデル化手法での水の流れに関する模式図を図-3.21 に示す。

実際の河川と周辺地盤との水の流出入を考えると、2L モデルでは解析上周辺地盤内の水が直接河床格子へと移動することは不可能である。一方、3L モデルでは、周辺地盤と河床格子の間における直接的な水の移動をモデル化できるため、より現実に近いものと考えられる。本研究では、3L モデル適用にあたって、以下の制約条件を必要条件として導入した。

1. 河床上部の第 2 層に流入した水は速やかに第 3 層に流下する。
2. 河床部の第 3 層の水位が上昇し、第 2 層に到達した際には、第 2 層と第 3 層の流動方向の流速は等しい。

第一の条件は、河床部の離散化格子における鉛直方向の浸透率を非常に大きな値 ( $10^5 \text{md}$  程度) に設定することで実現される。また、第二の条件に関しては、以下のように対応する。

第 3 層が飽和し、第 2 層にオーバーフローした場合、第 3 層の Z 方向の層厚  $\Delta z_3$ 、浸透率  $K_3$  (前節で示した手法で格子形状から計算可能)、相対浸透率  $k_{rw3}(=1)$ 、容積係数  $B_{w3}$ 、粘性係数  $\mu_{w3}$ 、第 2 層 (水飽和度  $S_{w2}$ ) のそれぞれの物性を  $\Delta z_2, K_2, k_{rw2}, B_{w2}, \mu_{w2}$  とすると、第 3 層および第 2 層の流量は、流路幅  $\Delta y$  として以下の通りとなる。

$$q_3 = \Delta y \Delta z_3 \frac{K_3}{\mu_{w3} B_{w3}} \frac{\partial \Psi_w}{\partial x} \quad (3.50)$$

$$q_2 = \Delta y \Delta z_2 \frac{K_2 k_{rw2}}{\mu_{w2} B_{w2}} \frac{\partial \Psi_w}{\partial x} \quad (3.51)$$

第2層と第3層の流速が等しくなるという条件より、

$$q_2 = \frac{\Delta z_2}{\Delta z_3} S_{w2} q_3 \quad (3.52)$$

これから、

$$\frac{K_3 S_{w3}}{\mu_{w3} B_{w3}} = \frac{K_2 k_{rw2}}{\mu_{w2} B_{w2}} \quad (3.53)$$

ここで、地表流では、一般に水深は浅く水圧変化は無視でき、流体物性値 ( $\mu, B$ ) はほぼ一定であると考えられるため、第2層と第3層の流速を等しくするためには、

$$k_{w2} = \frac{K_2}{K_3} S_{w2} \quad (3.54)$$

以上のように、第2層における水相の相対浸透率を設定すれば、オーバーフロー時の条件に対応可能となる。

### 3.5.2 河道の空間的離散化による解析誤差に関する考察

本研究で開発を行った地表水・地下水結合解析を実際に行う場合、空間的な離散化は、地表水の流動層のみならず地下の必要深度まで3次元的に行うため、主に計算機記憶容量上の制限から、平面的な格子分割はある程度粗くならざるを得ない。具体的には、現状での最大規模の解析として、三次元格子数 300,000、平面格子数 50,000 程度が、記憶容量 512MB 程度の計算機においては限界となっている。従って、解析領域の拡大に従い、個々の格子のサイズは大きくならざるを得ない。また、地表流解析における抵抗を決定する Manning の粗度係数は、式 (3.10) に示したように無次元数ではなく、長さと時間の次元を持つ物理量である。従って、コントロールボリュームとなる解析格子の長さ、幅、水深に影響を受ける物性値である。ここでは特に空間的離散化の粗さ、すなわち格子の流動方向の長さが解析結果に及ぼす影響を数値実験によって解析する。数値実験には、勾配 1/100 の単一斜面の一次元モデルを用いた。斜面長は 1000m、Manning の粗度係数は河道を含めた斜面全体の平均として一般的に用いられる値である 1.0 とし、基本モデルとして 1m 間隔で離散化を行った細分化モデルを用い、その基本モデルに対して分割数を変化させた粗格子モデルを用いて比較計算を行っている。降雨は、モデルの上流部 10m に対し、第一段階として定常流状態を得るために、20mm/day の降雨強度で 200 日、引き続き 400mm/day の降雨強度で 5 日、20mm/day で 195 日という設定で解析を行った。

以上の設定において、線形化 Diffusion Wave 近似を用いた解析による、空間的離散化の影響による最下流での流出量時間変化を図-3.22 に示す。

図からも理解されるように、基本モデルである細分格子では、流量増加が降雨増加から約 1 日遅れて急激に現れ、流量逋減も比較的急であるのみに対し、解析格子を粗



くすることによって、流量増加開始、流量逡減開始の降雨増加からの遅延が少なくなり、増加・逡減傾向もよりなめらかな形となっている。基本モデルとの差異を表す指標として、流出量に非定常性が現れる時間 200 日から 220 日までの流出量の残差 2 乗和  $\sum_{t=200day}^{220day} (q_{coarse}(t) - q_{base}(t))^2$  を採用し、その値の格子分割による変化を示したものが、図－3.23 である。

全体としての流出量の残差 2 乗和で比較すると、基本モデルに対し 10 倍の粗さの格子分割程度までは、残差 2 乗和は小さいが、それ以上粗い離散化の場合、残差 2 乗和は急激に増加する。

ここで、Manning の粗度係数を一つのマッチングパラメータと考え、粗い離散化において、粗度係数を調整することで詳細な離散化と同様のハイドログラフが得られるか否かを検証する。

図－3.22 に示した 5 分割の解析結果に対し、実粗度係数 1.0 に対し、粗度係数を 0.5 ～ 1.5 の範囲で変化させ流出量を比較した。粗度係数 0.5 および 1.5 の場合における流出量経時変化を、図－3.24 に示す。また、図－3.23 と同様に、基本モデルとの残差 2 乗和の粗度係数による変化を図－3.25 に示す。

この結果より、粗格子モデルにおいて流量の残差 2 乗和は、本来の粗度係数である  $n = 1.0$  近辺で最小となることが示された。実際の大流域にこのような分布型流出モデルを適用する場合には、地表流が主に発生する河道の空間的離散化は全体領域の大きさと、解析に用いる CPU、メモリー等によって規制されるため、現実の河道の状況を細かく再現する事は不可能であり、ここで示した 5 分割程度の粗さで河道を表現する必要が生じることも多い。しかしながら、流量で比較する場合には、微細な河道形状変化 (断面積変化) は、流速に対するほど敏感ではないため大きな問題は無いと考えられる。

また、ここで行った数値実験では、空間的離散化粗さのみの影響で実際のハイドログラフにおける非定常の流量変化過程には影響は現れるものの、基本モデルと等しい粗度係数において、流量最大値等の水文解析において重要な解析結果に関してはほぼ再現可能であることが示された。

## 3.6 小流域における解析の適用とパラメータ影響評価

### 3.6.1 解析の目的と解析対象領域の概要

本解析モデルを実際の小流域における流出解析に適用し、実流域における解析手法および河道モデルの適用性の検討と、各パラメータの感度解析を行った。解析対象地域は、滋賀県にある京都大学桐生水文実験地である。

解析対象流域の地形および領域を、図－3.26 に示す。解析対象領域の流域面積は  $49,900\text{m}^2$ 、領域内の平均標高は 234m、最高地点標高は 258.1m である。本流域における年平均降水量は 1783mm である。

本地域において、京都大学森林水文研究グループが測定した流量データの中で、本研究では 1995 年において最大降水量を示す 5 日間の毎時データ、および 1995 年 1 年間の毎日データの 2 種類を解析に用いている。解析の第一段階として、入力パラメー

タの感度解析を行うために短期間のデータを用い、そこで短期間の流出量を最もよく再現するパラメータを用いて長期間の流出解析を実施した。5日間および1年間での計測された降水量、流出量を図-3.27および図-3.28に示す。

短期間の降雨-流出量データの特徴としては、5日間に4回の降水量ピークが存在し、流出量もそれぞれにピークを示していること、および降雨後の基底流量も段階的に増大していることがあげられる。

### 3.6.2 解析モデルの設定

3.6.1で示した解析領域に対して空間的な離散化を行い、図-3.29に示すようなコーナーポイント型差分格子を構築した。格子数は、 $39 \times 29 \times 5 = 7605$ である。解析モデル第1層は大気領域として、気相圧力が常に大気圧になるように設定されている。また、地表流は主にモデル第2層を流れるとされているが、前述したように河道に関しては第2層モデルおよび第3層モデルの両者を用い、両者の結果の比較を実施した。また、河道を第2層とする際は第3層すべて、河道を第3層とする場合は、河道以外の第3層すべては、土壌層として、第4層、5層と比較して浸透率を高く設定している。土壌層の厚さは、窪田他(1983)や金他(1988)における実測結果より、平均3mとして、全面に分布するものとしている。尾根を境界とする側面3面および底面に関しては、地表流および地下水流ともに不透水境界と設定し、流量計測点を含む残り1面に関しては定圧境界とした。また、初期条件は、解析モデル全面に対し、一定で年平均降雨量の供給を与え続け、流出量が測定の平均値と整合性が取れる範囲で一定となった時点をもって設定している。

### 3.6.3 パラメータ設定

本研究における流出解析において設定すべきパラメータのなかで、ここではManningの粗度係数、地表と地下との間の鉛直下向き相対浸透率、土壌の毛管圧力について感度解析を実施した。その他のパラメータは既存の測定事例から設定した(窪田他,1983,1987,金他1988,大手他1989)。それぞれのケース設定、およびその他パラメータ一覧を表-3.1に示す。なお、感度解析における河道部のモデルは第2層モデルを用いた。

地表と土壌間の相対浸透率として仮定した4パターンの下方向相対浸透率曲線を図-3.30に示す。また、土壌の毛管圧は、全く考慮しない場合と、図-3.31に示したパターンを考慮した場合の2種類について比較を行った。

また、実際の水文現象においては、降雨の樹冠遮断量や蒸発散量が重要なパラメータとなっている。本解析では、既往の実測結果(鈴木他1979a,1979b,Suzuki1980)からの平均値として、1日あたり3mm相当の量を、降雨より逡減させることによって、樹冠遮断および蒸発散を取り扱っている。

### 3.6.4 短期降雨データを用いたパラメータの影響評価

**粗度係数の影響評価** ここでは、河道部の粗度係数を水路の一般的な値である0.04に固定し、それ以外の土壌表面の粗度係数を1.0,5.0および20.0に変化させて解析を行っ

た。それぞれのケースにおいて解析されたハイドログラフを、実測値とあわせ図－3.32に示す。土壌上面における Manning の粗度係数を変化させることによって、河床に到達するまでの間、降雨が地下に浸透するか地表面を選択的に流れるかという状況が変化する。結果として、Manning の粗度係数が小さい場合には、降雨が主に地表面を流れるため、降雨に対する流出量の応答がより鋭敏になっている。そのため、現実には地下を流出するために生じる貯留効果が再現できず、4回の流量ピークそれぞれの大小関係もピーク降雨量を直接反映した形となっている。

図中に併記した実測ハイドログラフと比較すると、少なくとも、Manning の粗度係数が 20.0 の場合のみが、実測の流量ピークの大小関係を再現できている。従って、以下の影響評価解析においては粗度係数を 20.0 とした。

**地表からの下方向相対浸透率の影響評価** 地表からの下方向相対浸透率は、地表に溜まった降雨の地下への浸透のしやすさをコントロールするパラメータである。解析上では多孔質媒体中の相対浸透率と同様に、地表の水飽和率、すなわち水深と相対浸透率のテーブルの形で与えられる。ここでは、図－3.30に示した4種類のテーブルに対して比較を行った。4種類のテーブルでは、主に水深に対する相対浸透率の傾きを変化させている。

これらのテーブルを用いて解析を行ったハイドログラフを図－3.33に示す。これから、相対浸透率のテーブルを変化させることで、非定常過程の全体の傾向は変化しないが、流量ピークの値等の流量絶対値に大きな影響を及ぼす。具体的には、地下へ速やかな浸透をさせる場合には、流出量が小さくなる。地表流が発生する層における飽和度は計算上最大で 0.1 程度であるため、基本的には、飽和度 0.1 までの相対浸透率の値の大小で流出量が左右されている。また、実測と比較すると、この中で、No.3 および No.4 のケースが比較的実測と近い値を示している。

**表土の毛管圧力の影響** 表土が不飽和状態の場合、表土中の毛管圧力が発生することで、地表から地下への浸透量は上昇する。ここでの毛管圧力は、多孔質媒体中の多相流動と同様に、飽和度と毛管圧のテーブルとして与えられる。前項までの解析は、表土における毛管圧力は 0 として解析を実施した結果である。ここでは、図－3.31で示した一般的な毛管圧力曲線を組み込んだ場合の流出量への影響を評価した。

解析は、下向き相対浸透率曲線 No.3 および No.4 に対して実施した。それぞれのケースに対するハイドログラフ解析結果を図－3.34に示す。図中の No.3b および No.4b が、それぞれ前項の No.3, No.4 に毛管圧を付加したケースの解析結果である。これから、毛管圧を設定することで特にこの期間の前半部で、土壌の飽和度が比較的低い状況において、流出量を逡減させる効果が見られる。実測データと比較すると、この中では No.3b が最も実測値の再現性がよい結果を示している。

### 3.6.5 改良河道モデルが流出解析結果に与える効果

3.6.4において、モデル上の各パラメータの影響評価を行い、実測に比較的近いパラメータセットを得ることができたが、全体の傾向として特に流量の逡減傾向、基底流量の傾向が再現できていない。ここでは、前述した改良型河道モデルを適用し、より

実測値の再現性が高いモデルを得るための解析を実施した。前節で述べたパラメータは、最も実測を再現している No.3b と同じ値を用いた。改良河道モデルによる解析結果を図-3.35 に示す。結果として、流量逓減後の基底流量は河道第2層モデルと比較して実測と合致したものとなった。しかしながら、降雨時の流量ピークの値に関しては改善が見られない。基底流量は、表土のから河道に遅延を伴い流入する量で規定されるため、表土と河道の間の水の移動を解析上スムーズに行える改良河道モデルの方が、無降雨時の流動の実状をより反映したものとなっていると考えられる。

次に、解析結果を実測データにより近づけるため、前節で考慮していない土壌の浸透率および土壌の孔隙率は変化させた。結果として、浸透率は当初の値よりも1オーダー大きい  $4.7 \times 10^{-1}$  cm/s、孔隙率は0.8 という値を最適値として得た。孔隙率0.8 は見かけ上過大な値であるが、このモデルにおける表土の層での貯留効果は、さまざまなスケールの孔隙による貯留効果を含んだものとならざるを得ず、0.8 という孔隙率によって、実際の貯留能を表現しているものとする。改良型河道モデルによる解析結果を図-3.36 に示す。流量のピーク値に関しては特に最初のピークで実測との差異が見られるが、第2ピーク以降はほぼ実測と調和的な結果が得られている。これは、初期状態に対しての情報が不足しているため、初期モデルが十分に実際の状況を反映していないことが原因と考えられる。

以上から、改良河道モデルを適用した場合における改良前の河道第2層モデルと比較して特筆すべき相違は、流量逓減後の基底流量の値が、ほぼ実測と合致しているところである。改良型河道モデルにおいては、河道への地下水の主たる供給源である表土と河道との水の移動が、改良前と比べてスムーズにモデル化されているため、特に無降雨時の解析が実状を反映したものとなっている。

### 3.6.6 長期流出解析への適用

3.6.5 で得られた同一モデルに対し、1年間の日降雨データを入力して長期流出解析を行った。解析に際しては、一年間の降雨データを2回繰り返し入力、解析し、2年目の解析結果を採用した。適用したモデルは、河道第2層モデルの最適結果（図-3.34 の No.3b）、および改良河道モデルにおいてパラメータフィッティングを再度行ったモデル（図-3.36 の Improved model with new parameters）の2種類である。河道第2層モデルにおける長期流出解析結果を実測と合わせ、図-3.37 に、改良河道モデルの解析結果を同様に図-3.38 に示す。河道第2層モデルの結果では、全体に降雨時の流量が実測よりも大きく、特に秋において実測との差異が大きくなっている。一方、改良河道モデルでは、特に8月において流量が長期に逓減する期間を除いては、ほぼ実測の流量に合致した解析結果が得られている。

それぞれのモデルに関し、月ごとの流出量を図-3.40 に示す。これから、河道第2層モデルにおいては、前半の降雨に対する反応が大きく、実測と大きく異なることに対し、河床第3層モデルでは、ほぼ実測を再現する結果を得ている事が理解される。また、実測および各モデルにおいて、年間の積算流出量を図-3.39 に示す。この結果からも、河道第2層モデルは全体的に実測よりも大きな流出量を示しているのに対し、改良河道モデルがほぼ実測に近い結果となっていることが理解される。

降雨データを見ると、この年（1995年）において、桐生地域においては5月および

7月に多量の降雨が観測され、8月の降雨量が極端に少ない。そのため地表面近傍が乾燥し、また、降雨が少ないことで植物からの発散量も低下することで、通常年と比較して蒸発散量が低下した可能性が考えられる。解析結果が実測と合致しない理由としては、そのような蒸発散量の季節変化であると考えられる。

### 3.6.7 小流域への適用解析のまとめ

以上、実際の小流域に対し、本論文で示した地表水-地下水結合解析手法を適用し、各種パラメータの影響評価、および河道モデルの影響評価、実測値の再現解析を行った。その結果得られた知見を以下に示す。

1. Manningの粗度係数等直接地表面の流動に寄与するパラメータ以外にも、地表面から地下への浸透に関わる、相対浸透率あるいは毛管圧力等のパラメータが、流出量の経時変化に大きく関与する。
2. 河道第2層モデルに代え、改良型の河道第3層モデルを適用することで、解析における基底流量が大きく変化し、本研究における解析においては、より実測に近い結果を得ることができた。
3. 短期流出解析において実測を最も良く再現する最適モデルをそのまま長期流出解析に適用することにより、長期の流出解析においても一部を除き、実測流量をほぼ再現できる結果を得ることができた。

現在一般的に行われている流出解析においては、短期の高水時の解析と長期解析では異なるモデルを利用することが多い。それに対し、本研究では、両者で共通の物理モデルを用いた解析によって同等精度の結果を得ることができる。ここでの適用解析においては、地下水位あるいは土壌水分といった地下の水文データが得られていないため、流出量のみでの比較となった。3.5.2にも示したように、このような分布型モデルにおける流出量解析結果には、空間的離散化に伴う本質的な誤差が生じるため、流出量を完全に実測と合致させることの重要性は低い。また、実測と完全に整合性が取れるモデルが一意的に決定される保証はない。しかしながら、流出量のみに対してもかなり確度の高いモデルを得ることは可能である。また、地下水文データを用いることが可能であればより蓋然性の高いモデルを得ることが可能であると考えられる。

## 3.7 地表水・地下水結合解析の精度と適用性に関する考察

### 3.7.1 地表水・地下水結合解析の精度

本解析手法の地下水解析部分は、すでに貯留層工学の分野等で一般的に用いられている手法といえる。従って、精度上特に問題となるのは、地表水流動に関する解析であるが、3.4.1における室内水路実験との比較において示されていたように、本解析手法、特に Diffusion Wave 近似を用いて、パラメータフィッティングを行うことにより、実測データをほぼ再現することが可能である。また、Diffusion Wave 近似自体の精度に関しては、既往で多くの検討が行われている（例えば、Ponce *et al.*, 1978, Akan & Yen 1981, Vieira 1983, Govindaraju *et al.*, 1988）。一方、分布型モデルとして

数値解析を行うためにモデルを空間的に離散化せざるをえないことにより、3.5.2に示したように流出の非定常過程に対しては一定の誤差が生じることは避けられない。実際の適用においては、流量上昇、逓減時のデータを完全に再現することは本質的に困難であるが、少なくとも流量ピークの値、あるいは基底流量に関しては再現可能であり、非定常過程に関しても、誤差は流速、すなわち主に流路勾配に依存する可能性が高く、流速が速い場合には実測を十分な精度で再現することが可能であることが推定される。

### 3.7.2 本解析手法の適用性について

多相流動による地表水・地下水結合解析手法は、河川流域における流出解析に対しては、実際の流域への適用により有効性が確認されたが、将来的には、河川における様々な対象に対しても有効な手法となりうる。例としては、砂防計画においては降雨による河川のハイドログラフと地下水位上昇による斜面崩壊、土砂生産が重要なファクターであるが、これらは現状では個別にモデル化され、計算されている。ここで提案した解析手法を用いることで、この2種類の現象を共通のモデルで同時に解析することが可能となる。また、近年大規模公共事業において周辺環境への配慮の必要性が増大しているため、例えばトンネル掘削によって地下水のみならず地表の河川への影響が問題となる場合が多い。現状では多くの場合3.1.2で触れた飽和・不飽和浸透流解析を用いることが多いが、これはあくまで地下水への影響のみを評価するもので、地表水への影響を直接的に評価することは不可能である。一方、本解析手法は、地下における人工構造物の、地下水・地表水の流動状況に対する影響を直接評価することが可能であるため、このような問題に対しても有効である。

その他の適用範囲として、本解析手法を地球科学的視点から重要な洪水解析に適用する研究も行っている (Komatsu *et al.*, 2000)。同様に、より実用的な見地から、洪水の予測手法としても有効な解析手法と考えられる。

## 3.8 地表水・地下水結合解析に関するまとめと今後の課題

ここでは、大流域における水理環境解析を目的とする本研究において重要な基礎をなす地表水・地下水結合解析についての説明、室内実験および数値実験による適用性検討、河道表現に関する考察、および実際の小流域に対する適用例を示した。地表水・地下水結合解析に関する研究結果を以下にまとめる。

- 地表流における Diffusion Wave 近似の結合解析への導入

Diffusion Wave 近似を2相浸透流と類似形式に変形し、結合解析に導入する事により、地表面形状がどのような場合においても、地表流に関して安定した解を得る事が可能となった。また、Diffusion Wave 近似の2相流表現の妥当性は、室内実験および特性曲線法との比較によって検証された。

- 河床部における複数層河道モデルの導入および実サイトでの流出解析への適用  
河床部の空間的離散化手法として、複数層河道モデルを開発し、解析に組み込

んだ。また、実サイトにおける短期、長期の流出課程の再現解析に複数層河道モデルを適用し、従来の河道第2層モデルと比較してより適切な同定結果を得た。

また、今後の課題としては、本解析手法を広域に適用する際の空間的離散化の問題があげられる。異なる大きさ、形状の離散化格子が混在する場合には、より複雑な誤差が生じる可能性がある。従って広域のモデルを作成する際には、全領域に渡り可能な限り均等かつ直交性を保ちながら空間的離散化を行う必要がある。

また、解析誤差の問題を別としても、広域で複雑な地形、地質、土地利用状況を有する場合、その領域に対し効率的に空間的離散化を行うことは、本来重要である解析自体、あるいは解析結果の評価を十分行うために重要な技術である。複雑な線形の河道や流域境界のような情報から構造化格子を手動で生成することはほぼ不可能な作業であるが、一般に入手可能な数値地形モデルのデータを無加工で利用しても流動を現実的に再現しているとは認められない。このため、一般に入手できるデータから、解析開始までをいかに短時間で行うかが、最終的な物理モデルの精度を決定すると考えられる。この方法に関する新たな手法の提案は、第4章において行う。

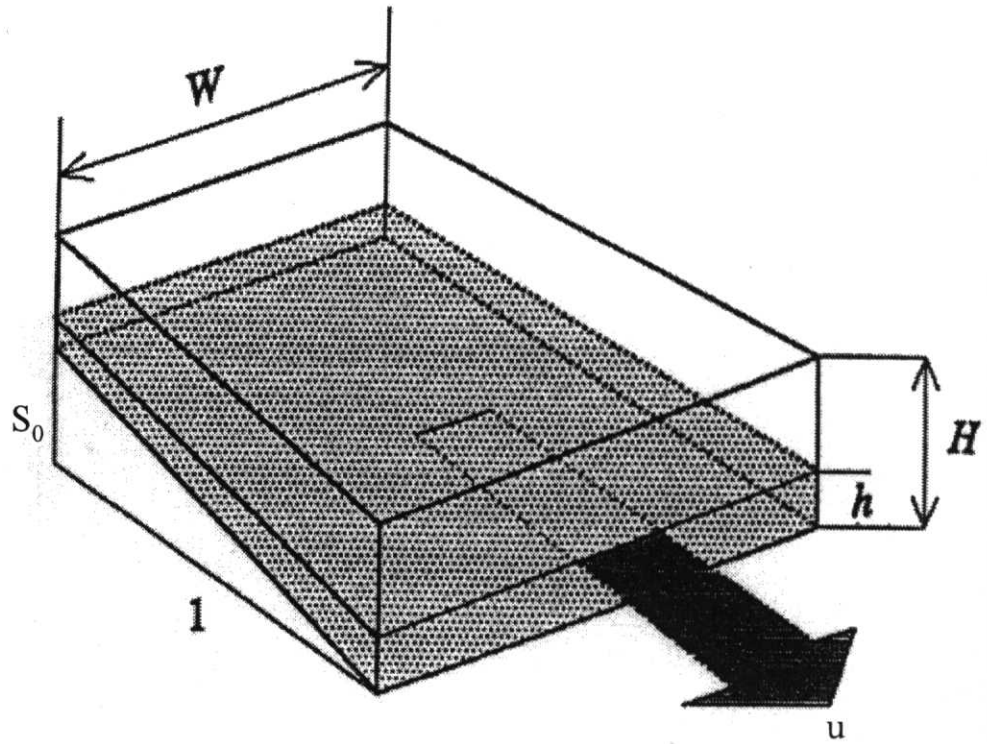


図-3.1 開水路における流動の模式図(登坂他1996)

Fig. 3.1 A schematic view of flow in open channel (from Tosaka et al., 1996)



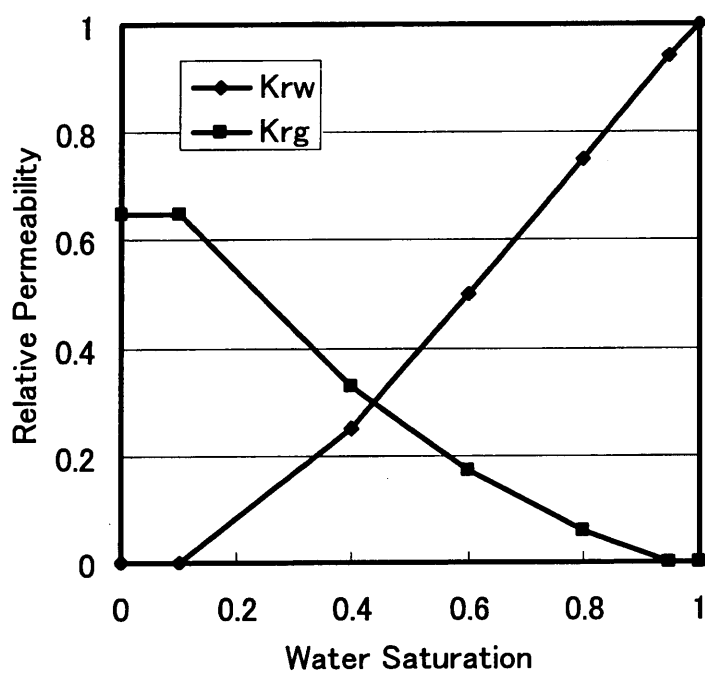


図-3.2 水飽和度と相対浸透率の関係の代表例

Fig.3.2 An example of relationship between water saturation and relative permeability in 2 phase flow simulation

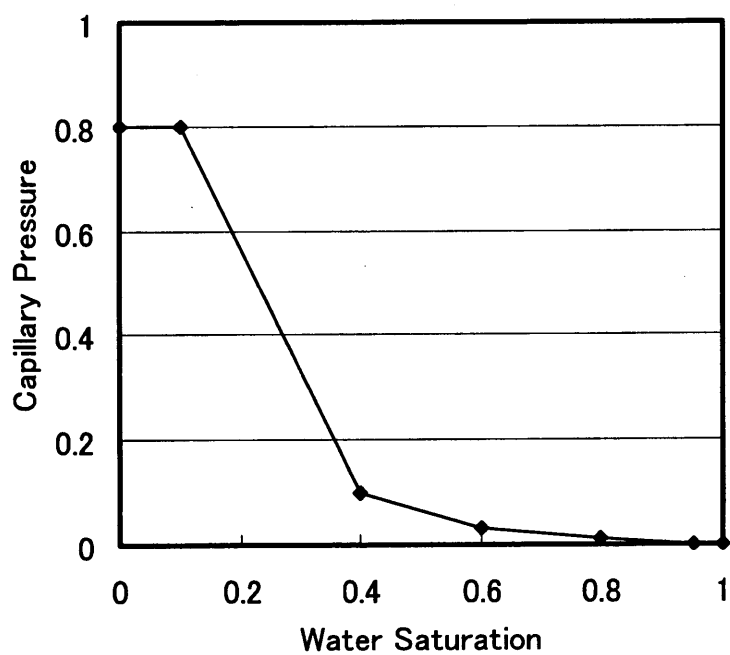
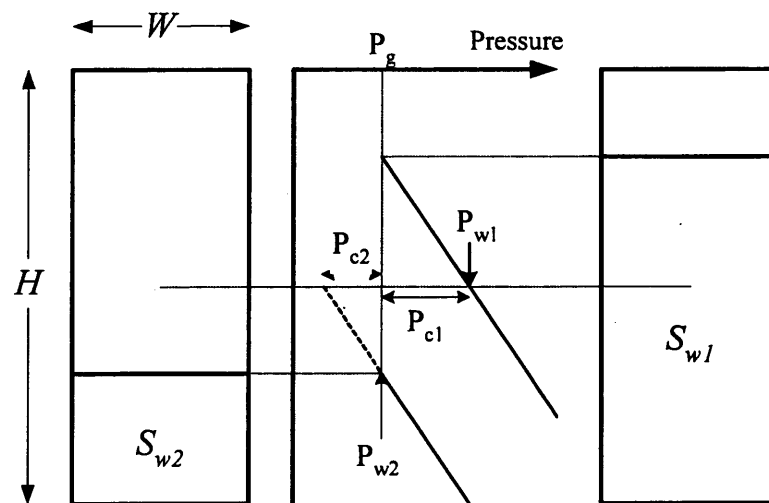


図-3.3 水飽和度と毛管圧力の関係の代表例

Fig.3.3 An example of relationship between water saturation and capillary pressure in 2 phase flow simulation



Real Line : Water Phase Pressure Distribution

$P_{w1,2}$  : Water Phase Pressure at Grid Center

図-3.4 地表流における擬似的毛管圧力概念図 (登坂他1996)

Fig. 3.4 A schematic view of pseudo capillary pressure in surface flow (from Tosaka et. al., 1996)

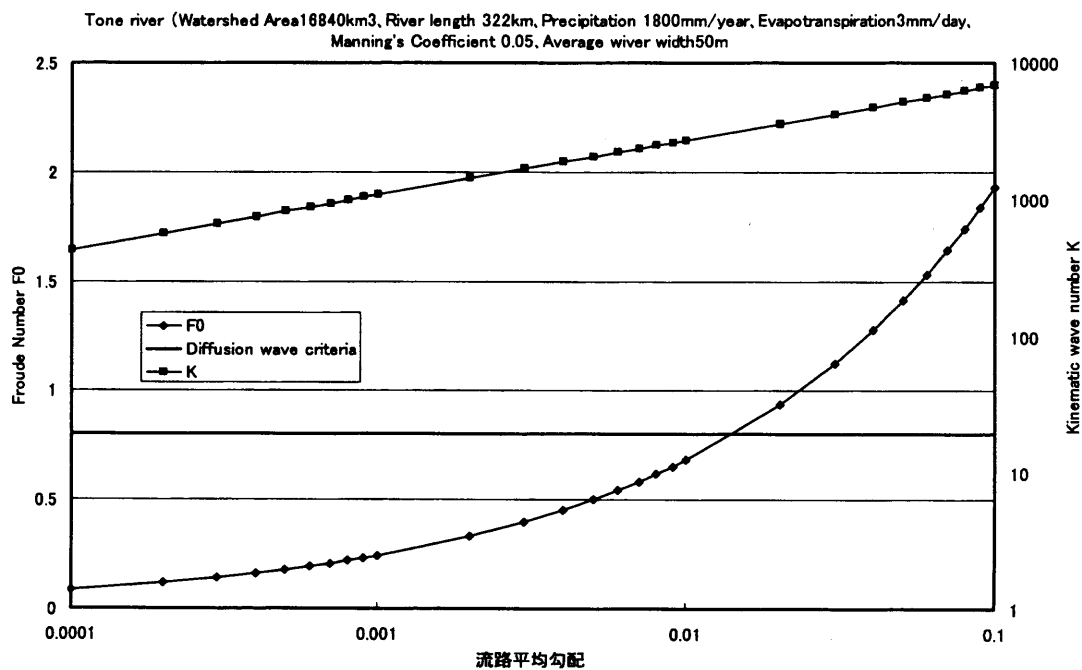


図-3.5 利根川を例とした河床勾配とFroude数、Kinematic Wave数の関係

Fig.3.5 Relationship between riverbed gradient and Froude number( $F_0$ ), Kinematic Wave number ( $k$ ). Thick line shows the  $F_0$  criterion for diffusion wave approximation .

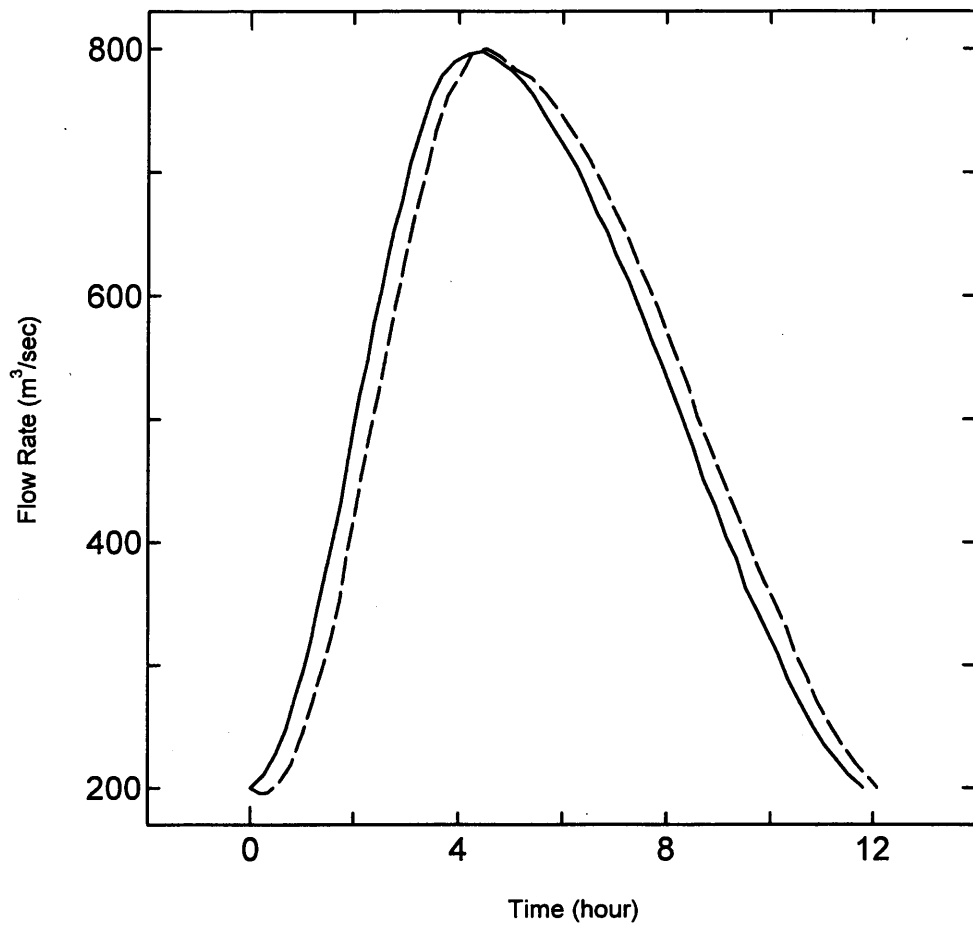


図-3.6 岩佐(1995)による特性曲線法による流出解析の例 (実線:上流側流量、点線:4000m下流における流量計算結果)

Fig. 3.6 Hydrograph calculated with the method of characteristics by Iwasa (1995). Real line : upstream hydrograph,, Dot line: calculated hydrograph at 4000m down stream.

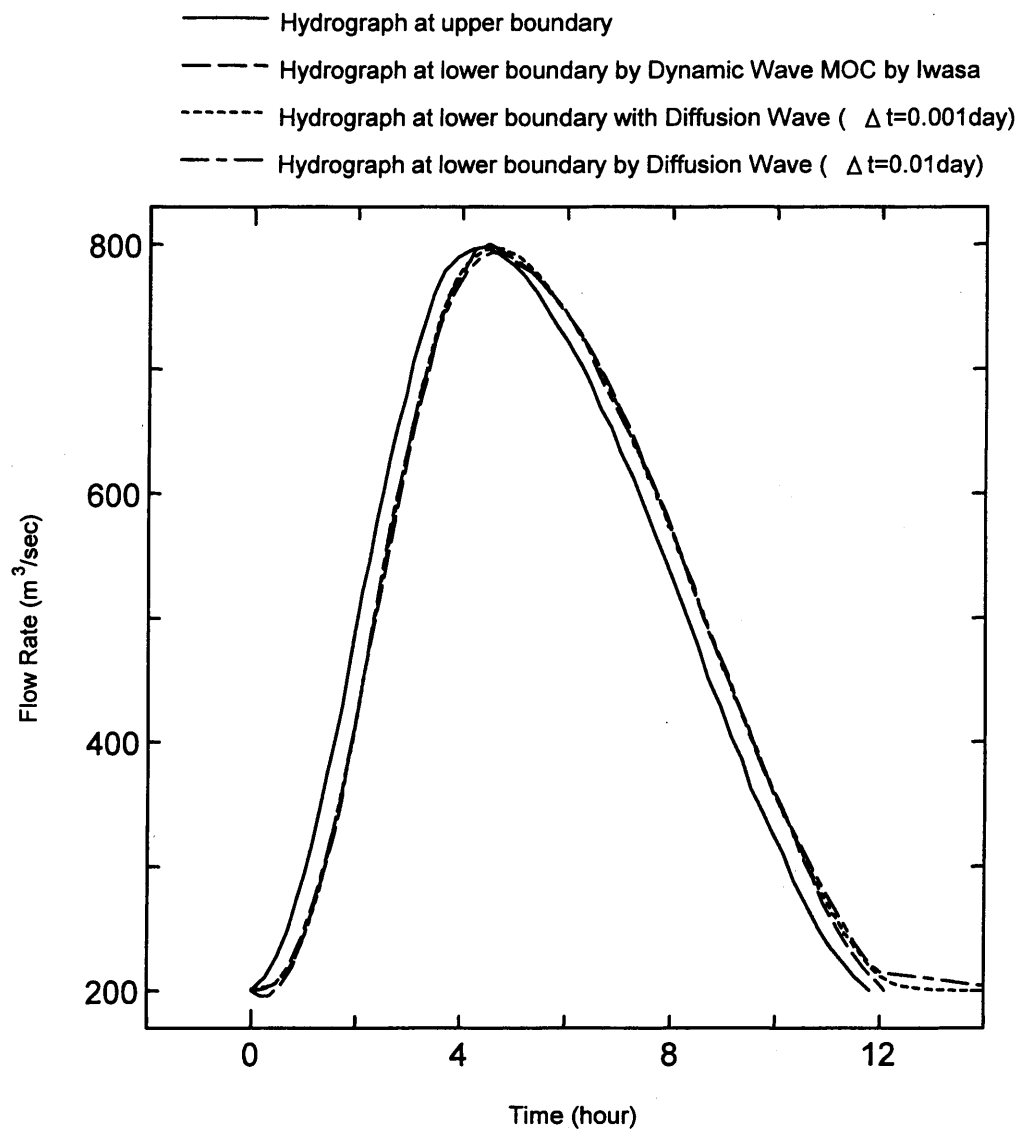
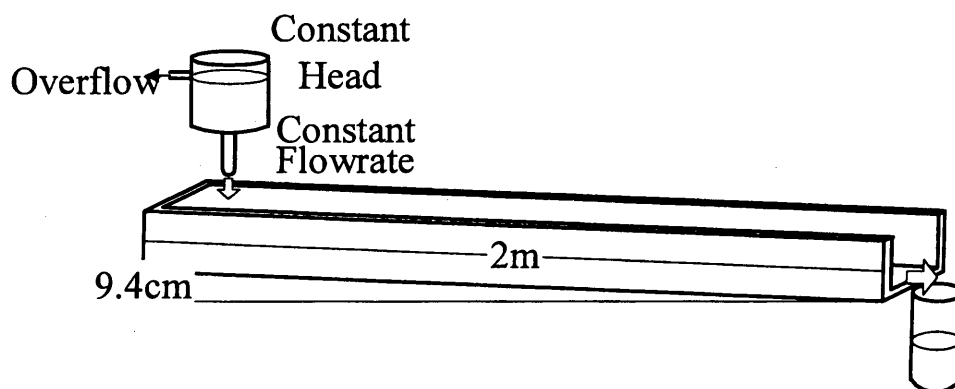


図-3.7 岩佐(1995)のモデルに対する2相流型Diffusion Wave 近似適用結果

Fig.3.7 Calculated hydrograph with the model by Iwasa (1995). Real line:upstream hydrograph, Dash line: downstream hydrograph with MOC, Dot line : downstream hydrograph by 2-phase type diffusion wave analysis with  $\Delta t=0.001$  day. Dot dash line : 2-phase type diffusion wave analysis with  $\Delta t=0.01$  day.

## (1) Single Slope Model



## (2) Multi-Slope Model

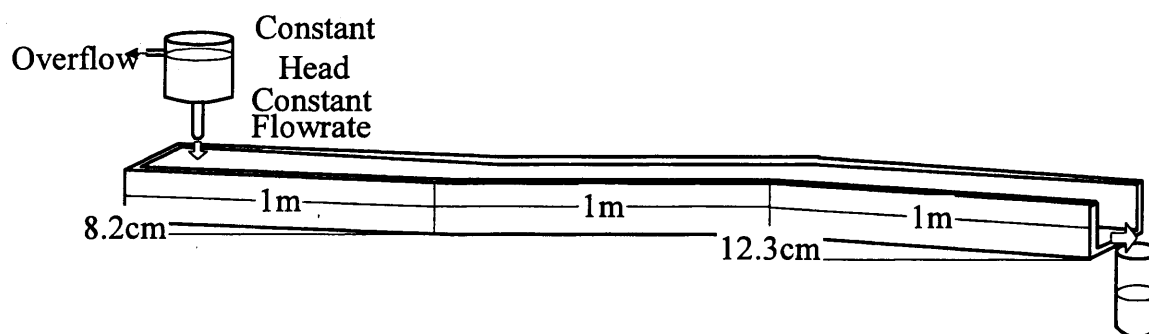


図-3.8 水路実験装置模式図 (a)単一斜面モデル (b)複合斜面モデル  
(Tosaka et al., 2000)

Fig.3.8 Experimental open channel models for the verification of numerical simulation. (a) shows the single slope model, and (b) shows the multi-slope model.  
(from Tosaka et al., 2000)

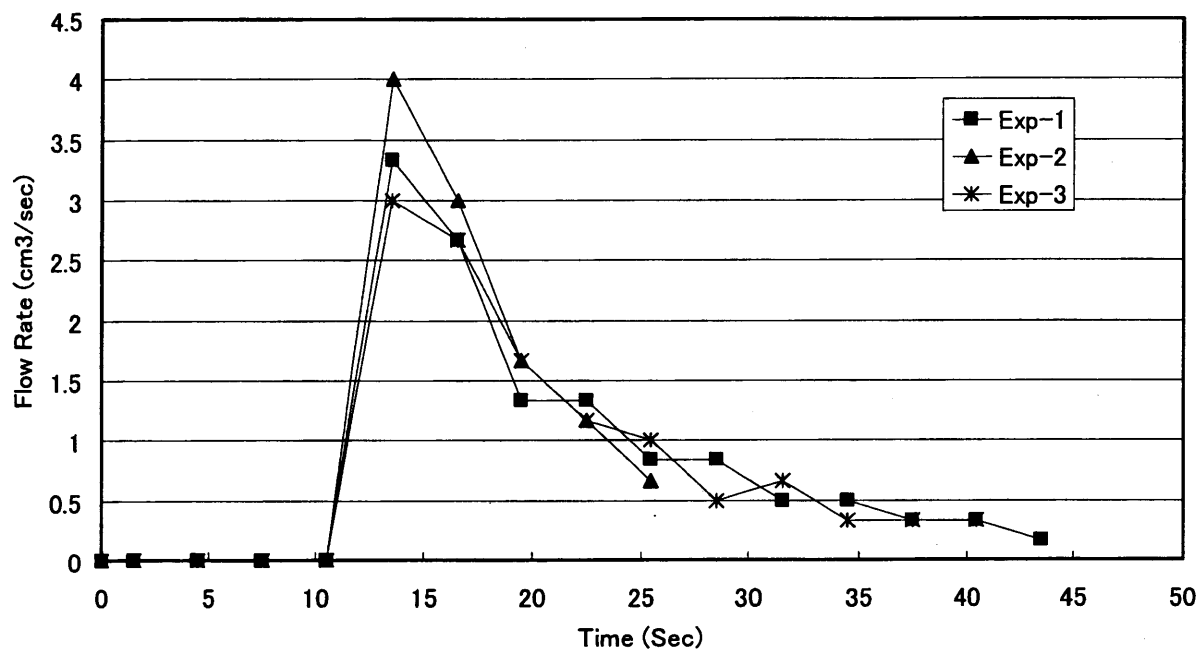


図-3.9 単一斜面モデルにおける下流端流出量の経時変化

Fig.3.9 Measured transient flow rate at the lower boundary in the experiment with single slope model. 3 times of experiment was carried out and plotted.

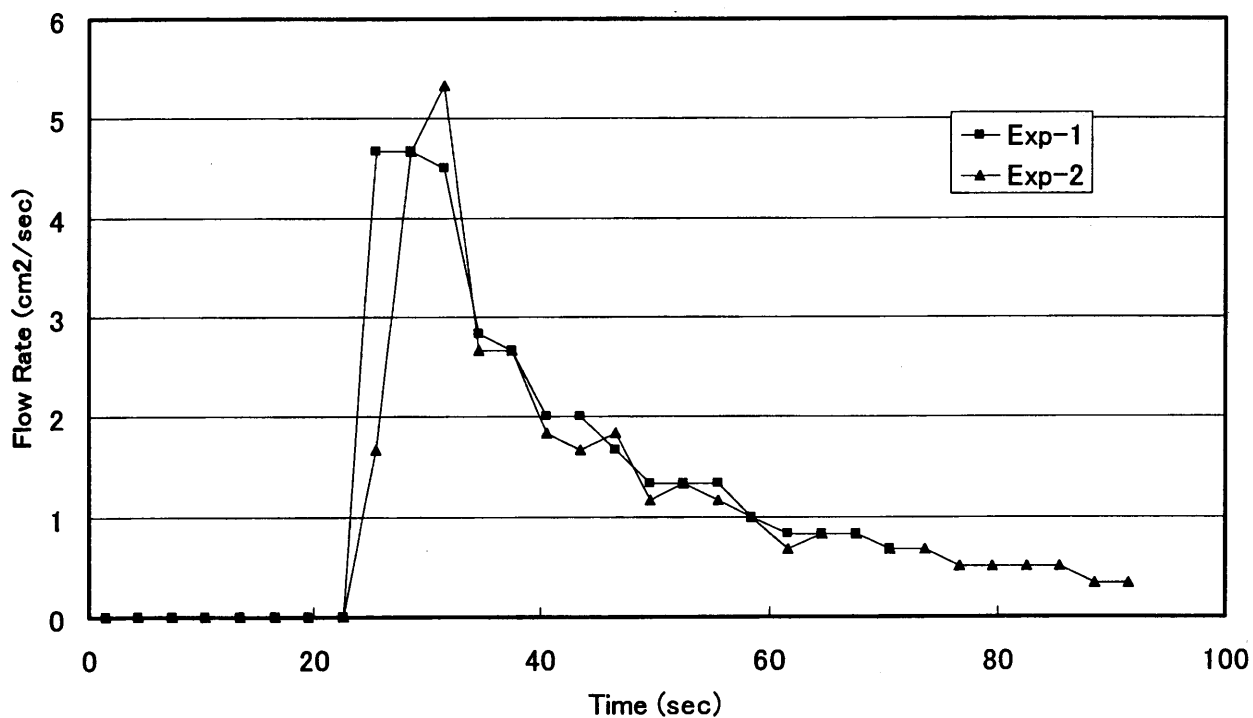


図-3.10 複合斜面モデルにおける下流端流出量の経時変化

Fig.3-10 Measured transient flow rate at the lower boundary in the experiment with combined slope model. 2 times of experiment was carried out and plotted.

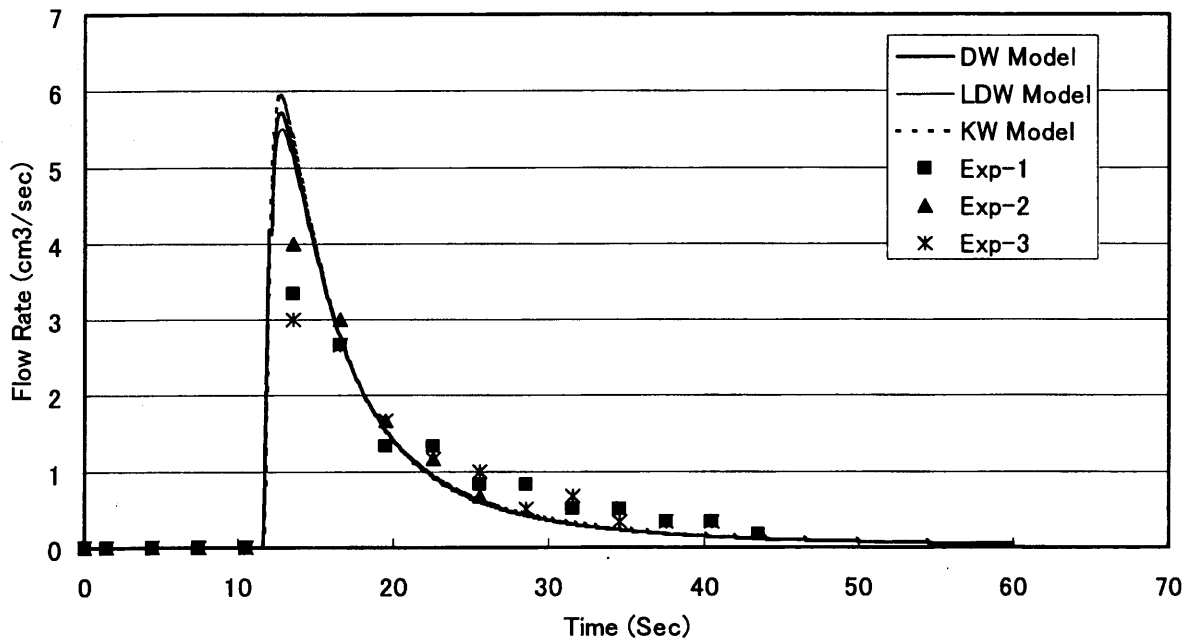


図-3.11 単一斜面モデルにおける実測と解析流出量の比較

Fig.3.11 Calculated and measured transient flow rate at the lower boundary of the single slope model experiment. Solid thick line shows the result with linealized diffusion wave model, Solid thin line shows the result with diffusion wave model, dot line shows the result of kinematic wave model.

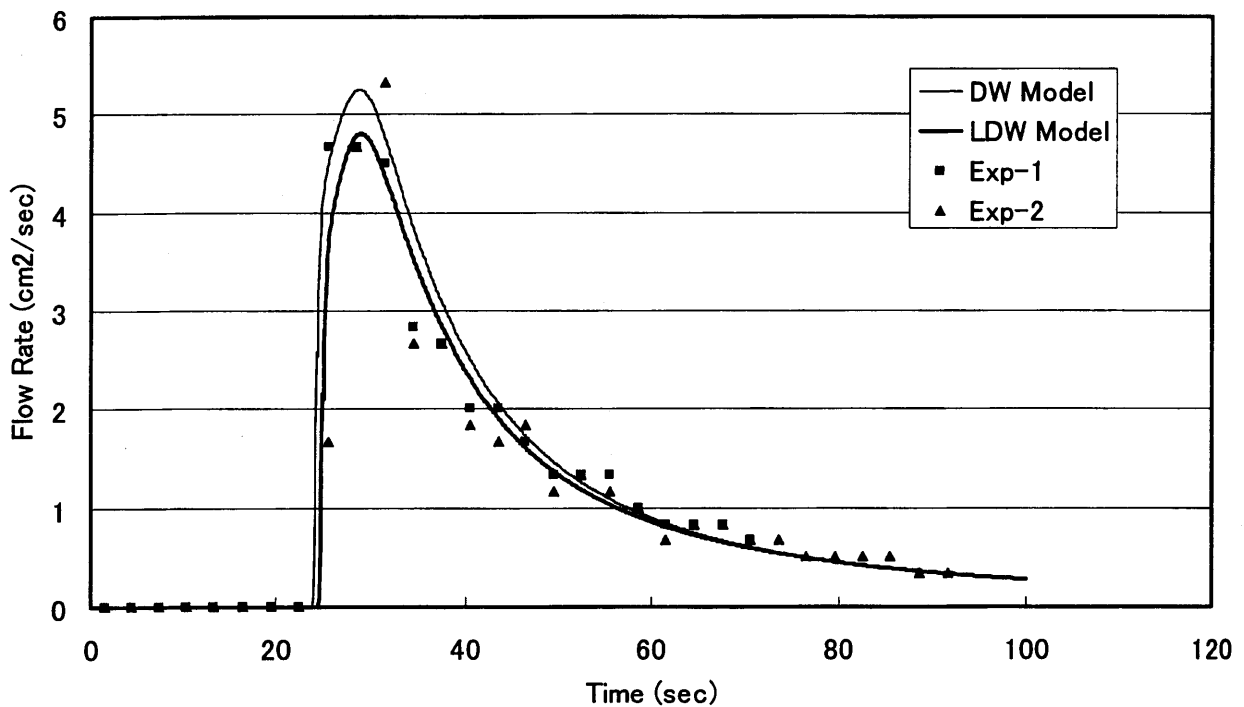


図-3.12 複合斜面モデルにおける実測と解析流出量の比較

Fig.3.12 Calculated and measured transient flow rate at the lower boundary of the combined slope model experiment. Solid thick line shows the result with linealized diffusion wave model, Solid thin line shows the result with diffusion wave model.



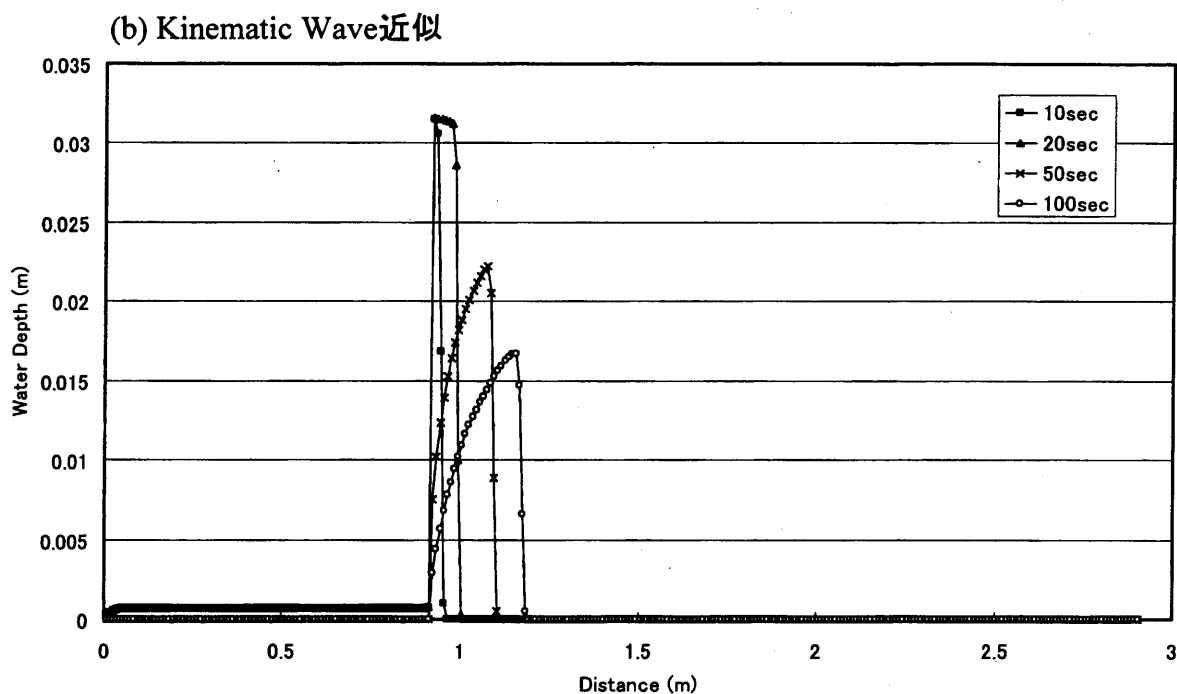
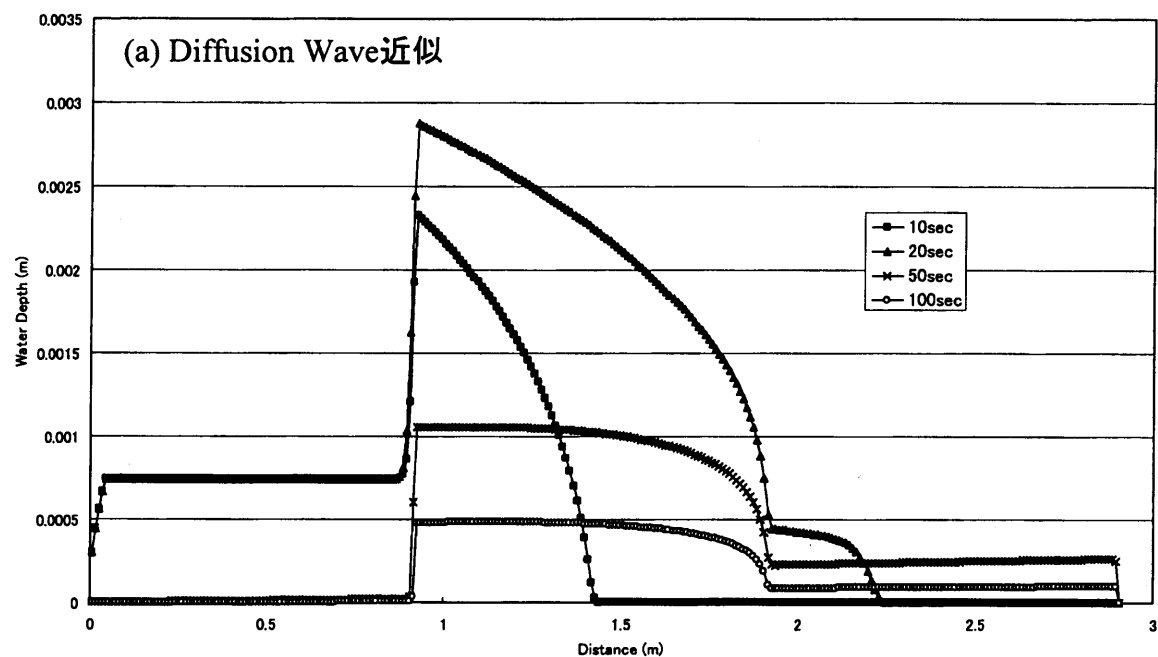
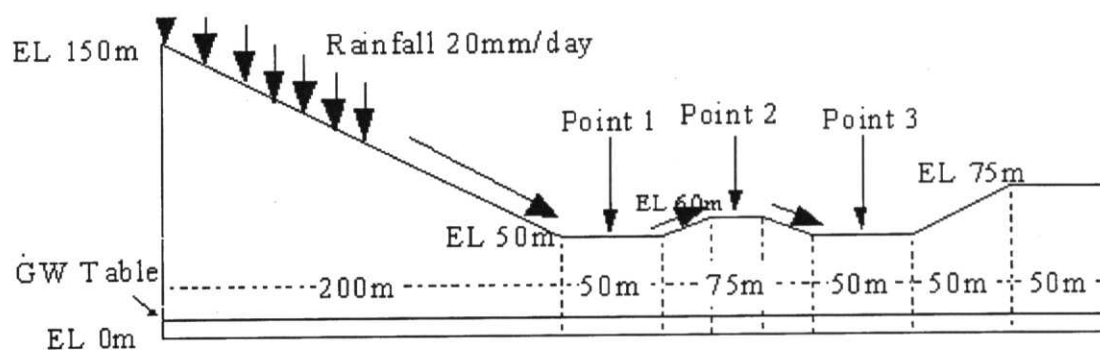


図-3.13 複合斜面モデルにおけるDiffusion WaveおよびKinematic wave近似での水深分布計算結果

Fig.3.13 Calculated water depth distribution in combined slope model with Diffusion wave and kinematic wave model. In kinematic wave model, Water depth at the point of gradient change, water depth can not be calculated appropriately.

(a) Geometry



(b) Finite Difference Grid System

Surface Soil

Rock

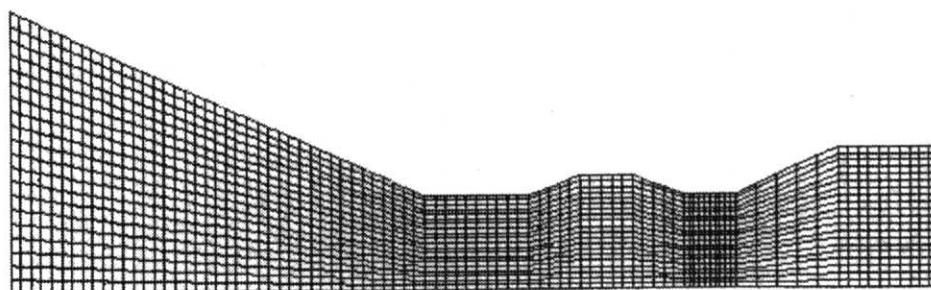


図-3.14 実スケールによる数値実験モデルの概要図および差分格子分割図

Fig. 3.14 The field scale numerical experiment model (a) shows the schematic view of the model, in this figure, 3 point for water depth measurement is located, and (b) shows the Finite difference grid system for calculation. Both impermeable and permeable surface cases were calculated.

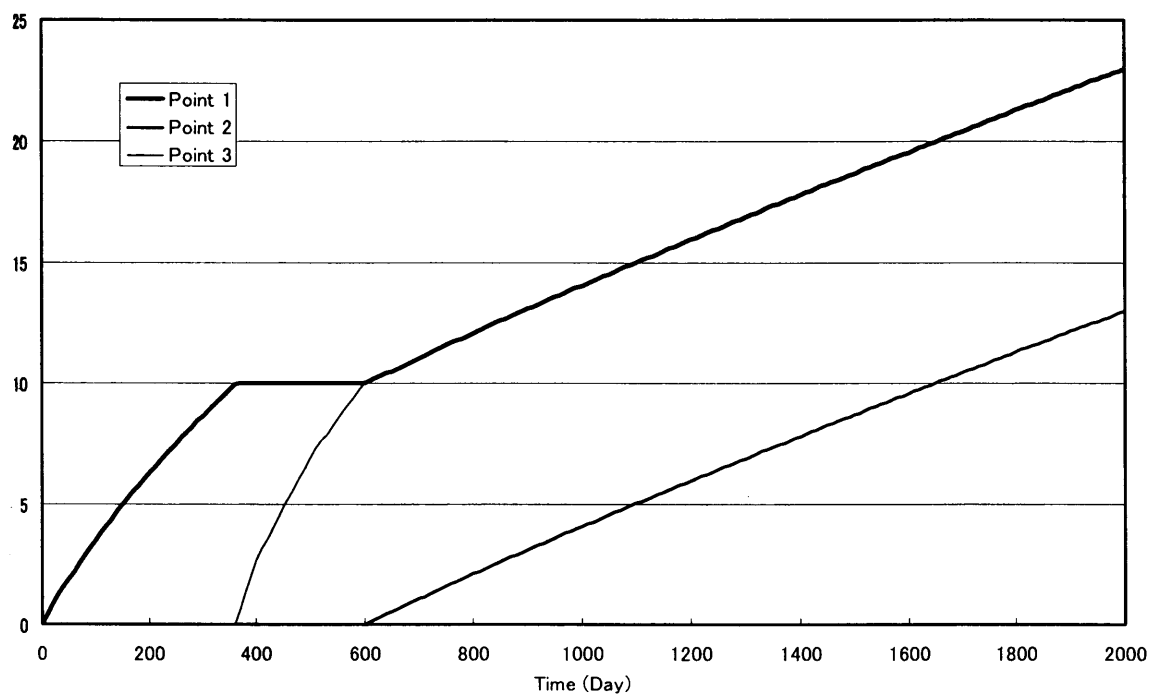


図-3.15 地表面不透水モデルにおけるDiffusion Wave近似による代表点での水深経時変化

Fig.3.15 Calculated transient water depth change calculated with diffusion wave approximation in impermeable surface case.

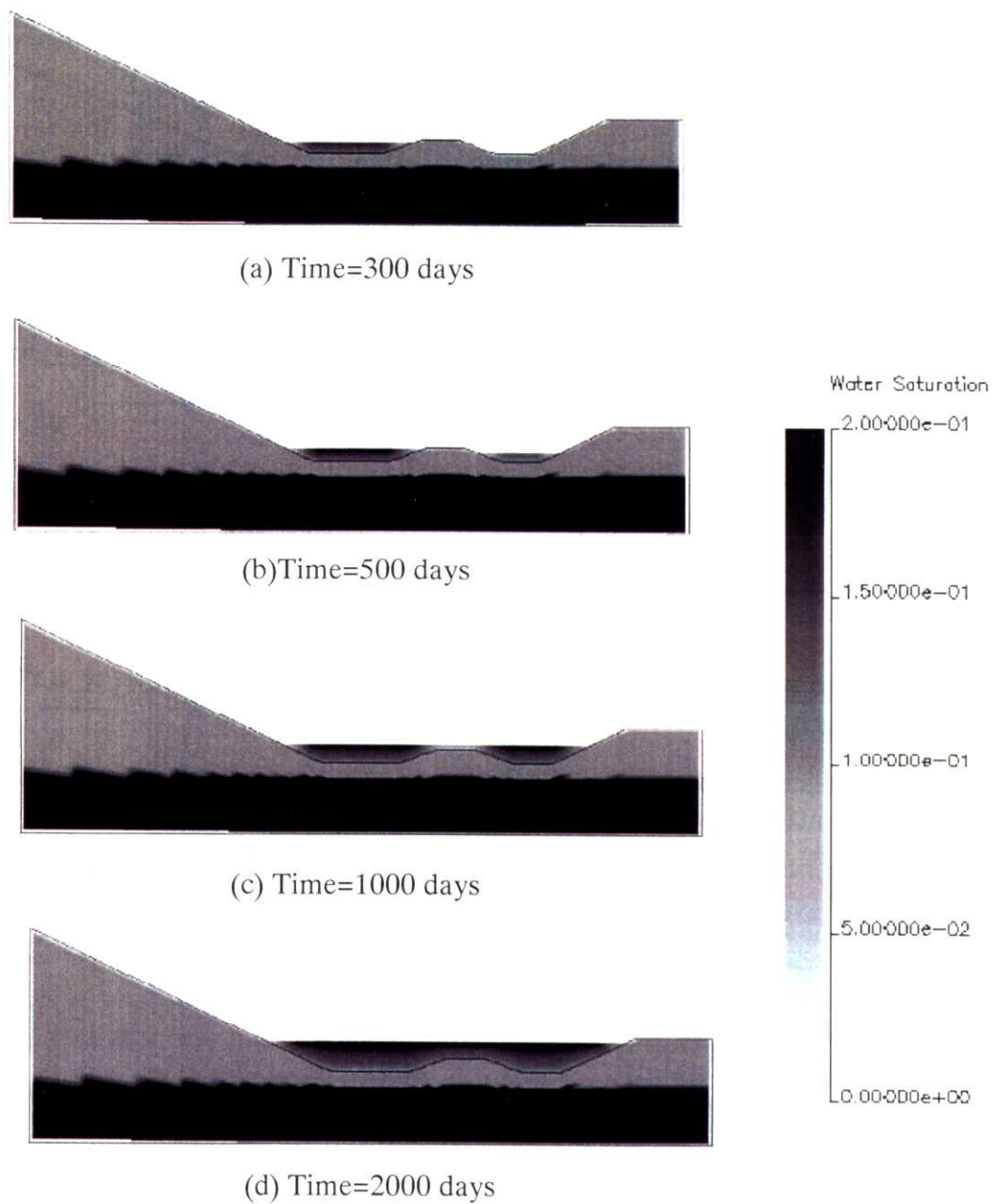


図-3.15 地表面不透水モデルにおけるDiffusion wave近似での経時的飽和度分布

Fig.3.15 Calculated water saturation distribution with diffusion wave approximation in impermeable surface case. Water saturation at the surface means the depth of water on surface.

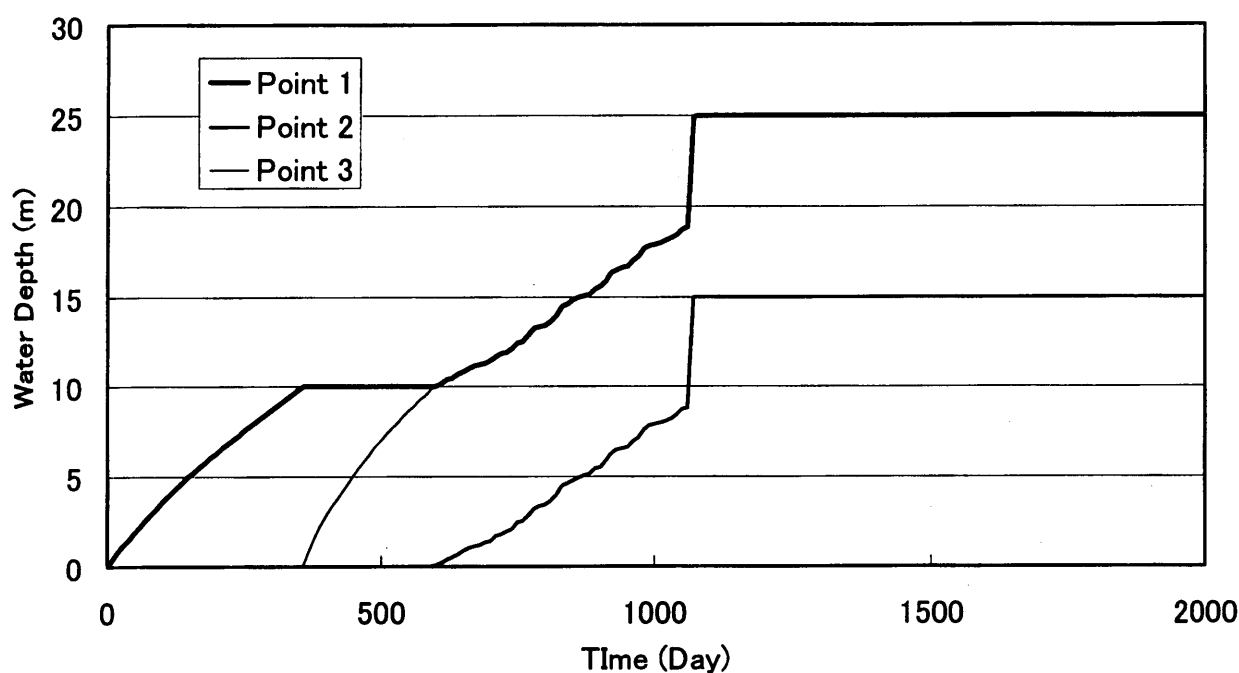


図-3.17 地表面不透水モデルにおける線形化Diffusion Wave近似による代表点水深経時変化解析結果

Fig.3.17 Calculated transient change of water depth at measuring points with linealized diffusion wave approximation in impermeable surface case.

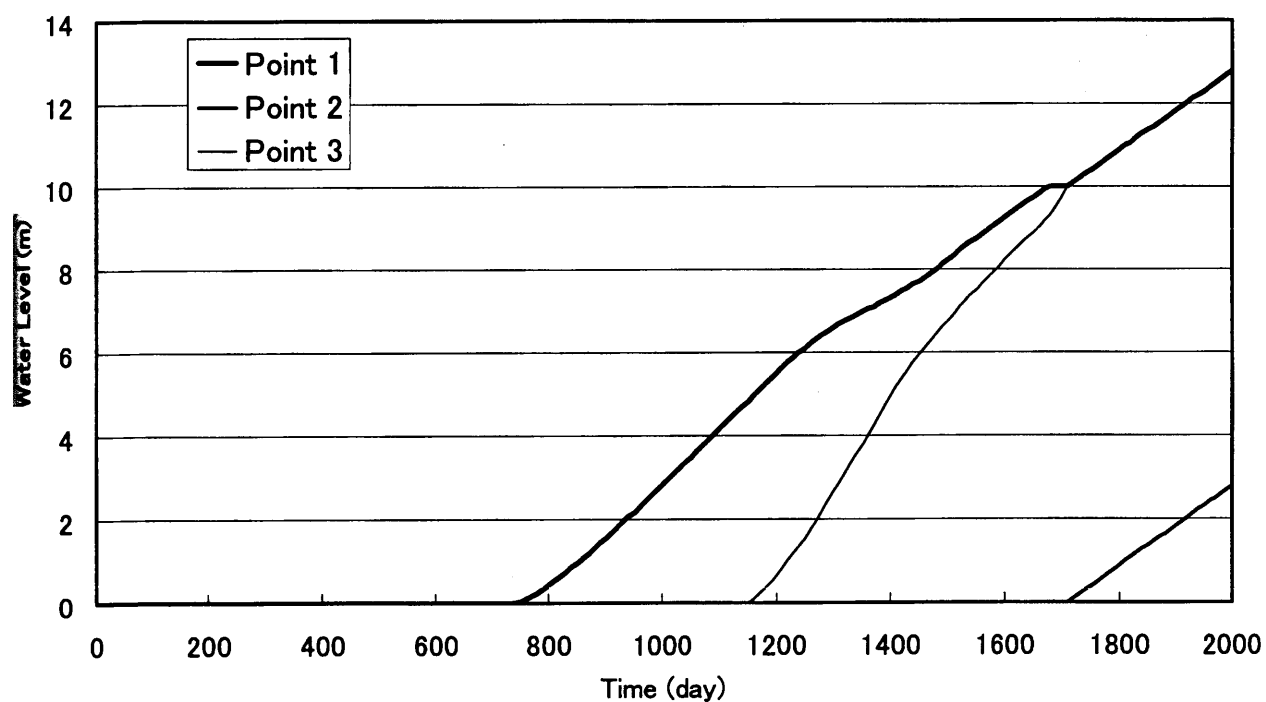


図-3.18 地表面浸透モデルにおける代表点水深経時変化解析結果

Fig.3.18 Calculated transient change of water depth at measuring points in permeable surface case.

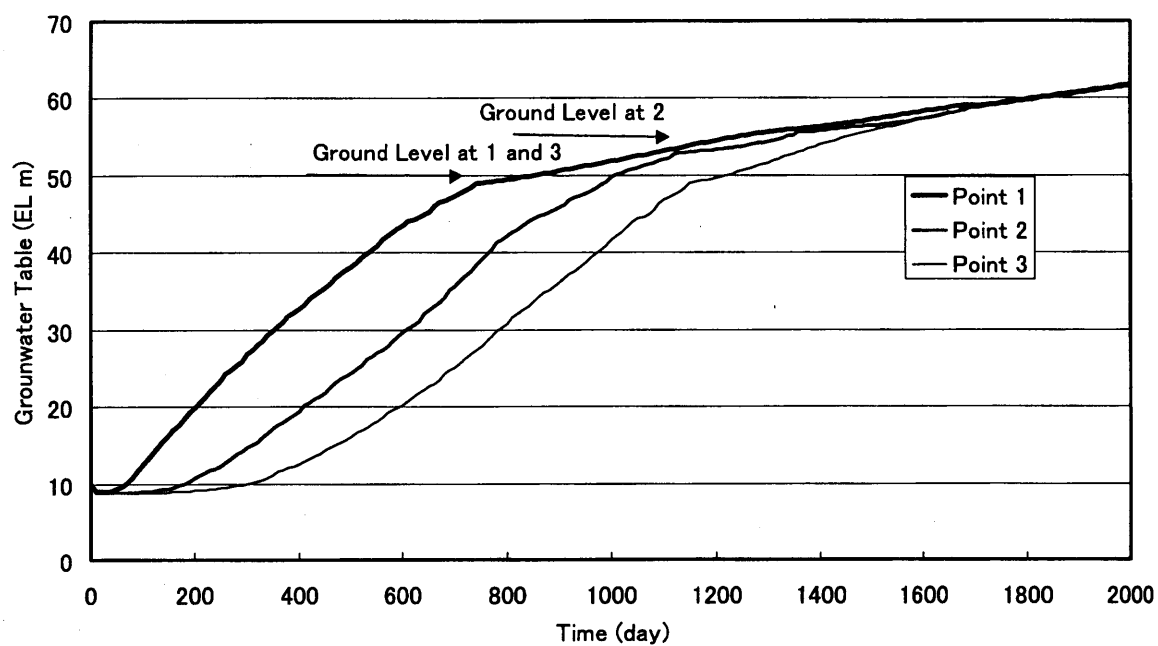


図-3.19 地表面浸透モデルにおける代表点地下水位経時変化図

Fig.3.19 Calculated transient elevation of groundwater table in permeable surface case.

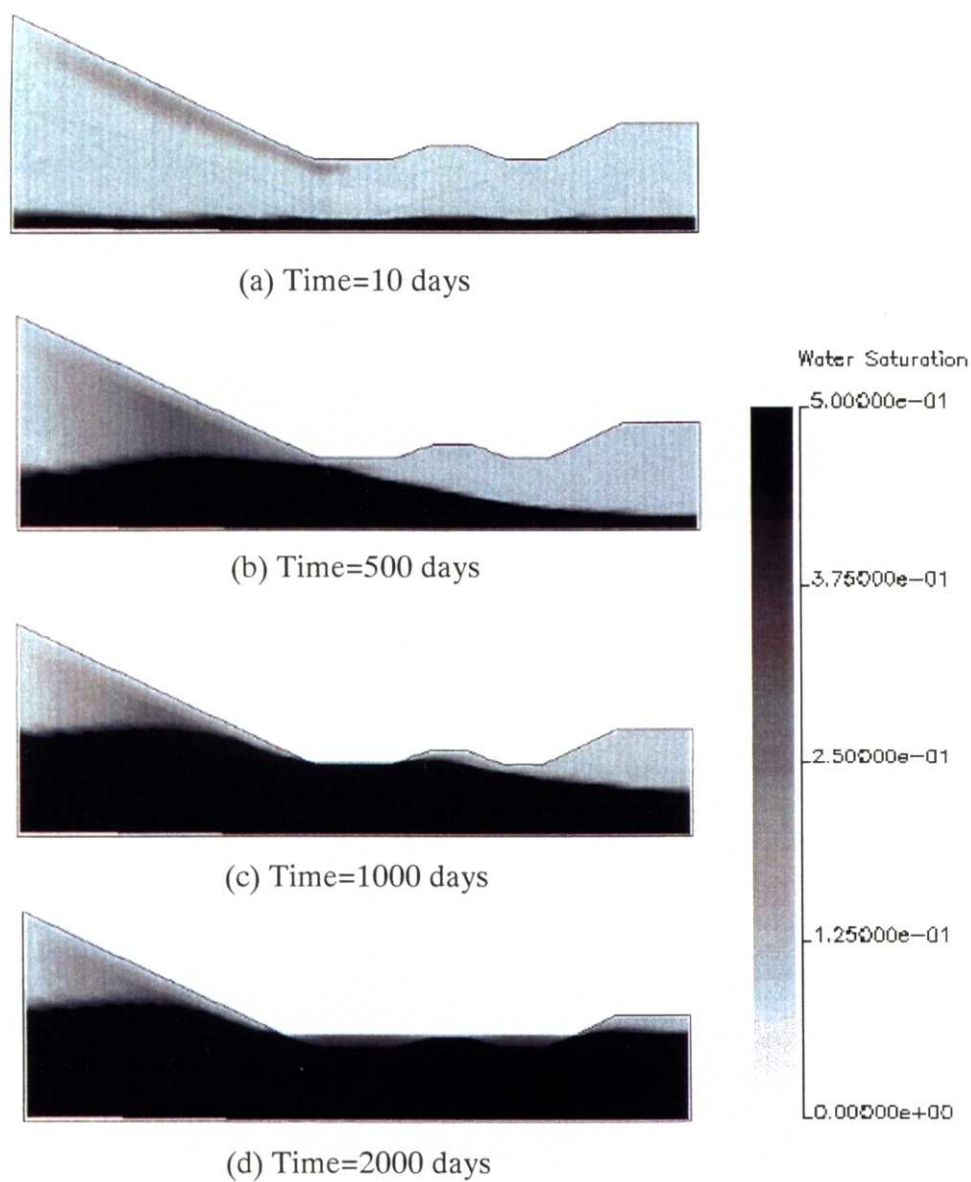


図-3.20 地表面浸透モデルにおける経時の水飽和率分布図

Fig.3-20 Calculated transient water saturation distribution in permeable surface case.

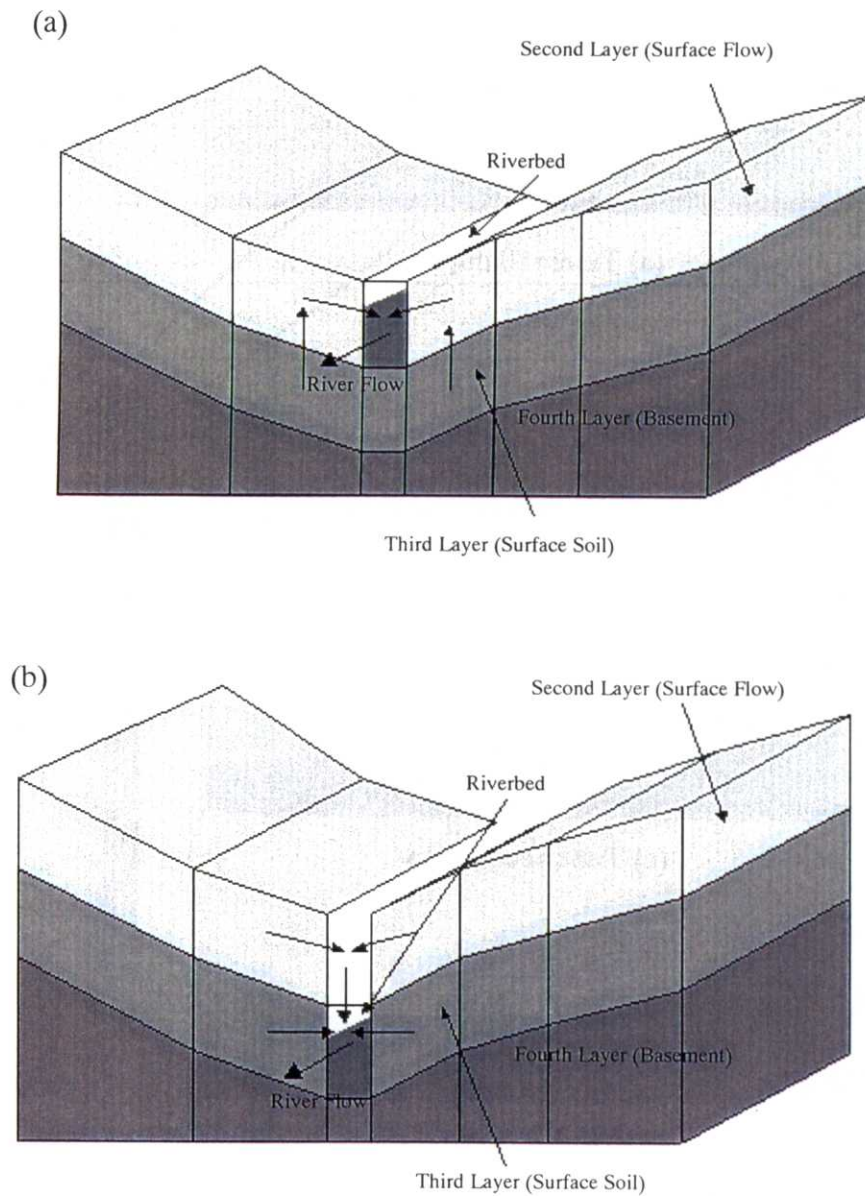


図-3.21 河床部の離散化における2種類のモデル化手法  
(a)第2層河床モデル、(b)第3層河床モデル

Fig.3-21 A schematic view of discretization model of river grid. (a) shows the grid model, in which the 2nd layer is modeled as the river, (b) shows the model, in which the 3rd layer is modeled as the river.



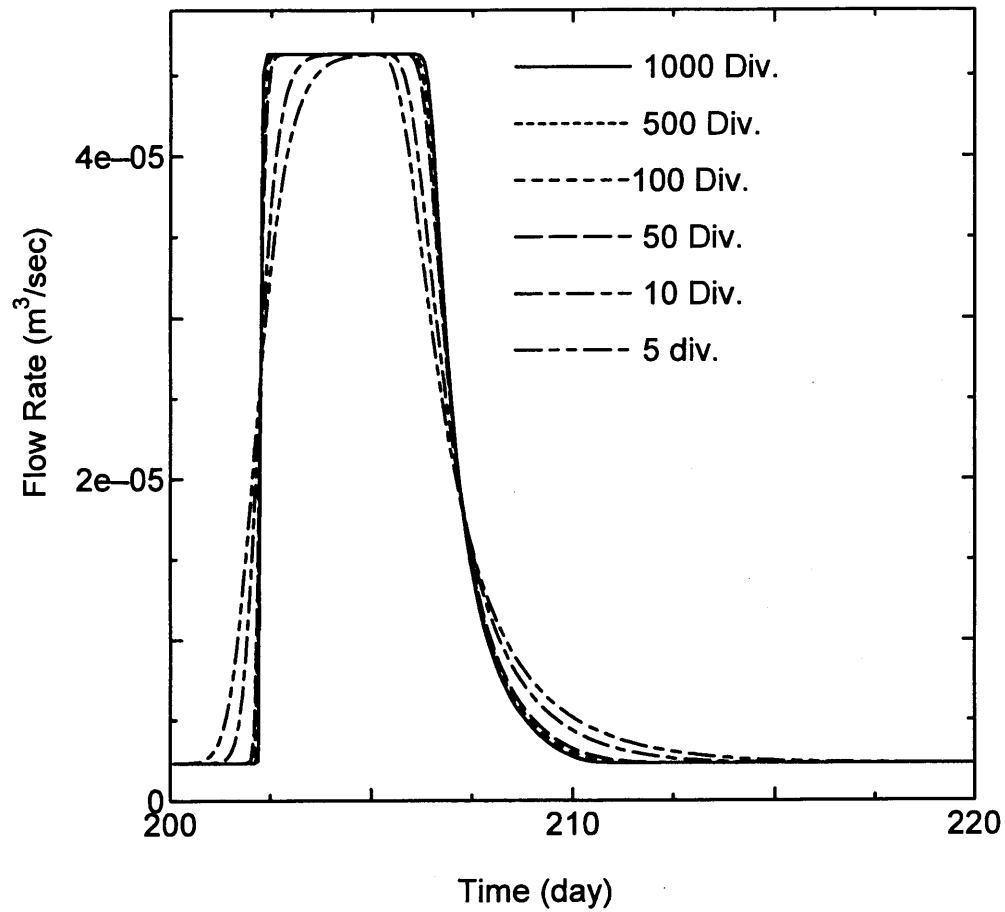


図-3.22 空間的離散化精度を変化させた場合の流出量解析結果への影響  
( $\tan \theta = 0.01$ , Diffusion wave 近似)

Fig.3-22 Calculated hydrograph change according to spatial discretization with diffusion wave approximation. ( $\tan \theta = 0.01$ )

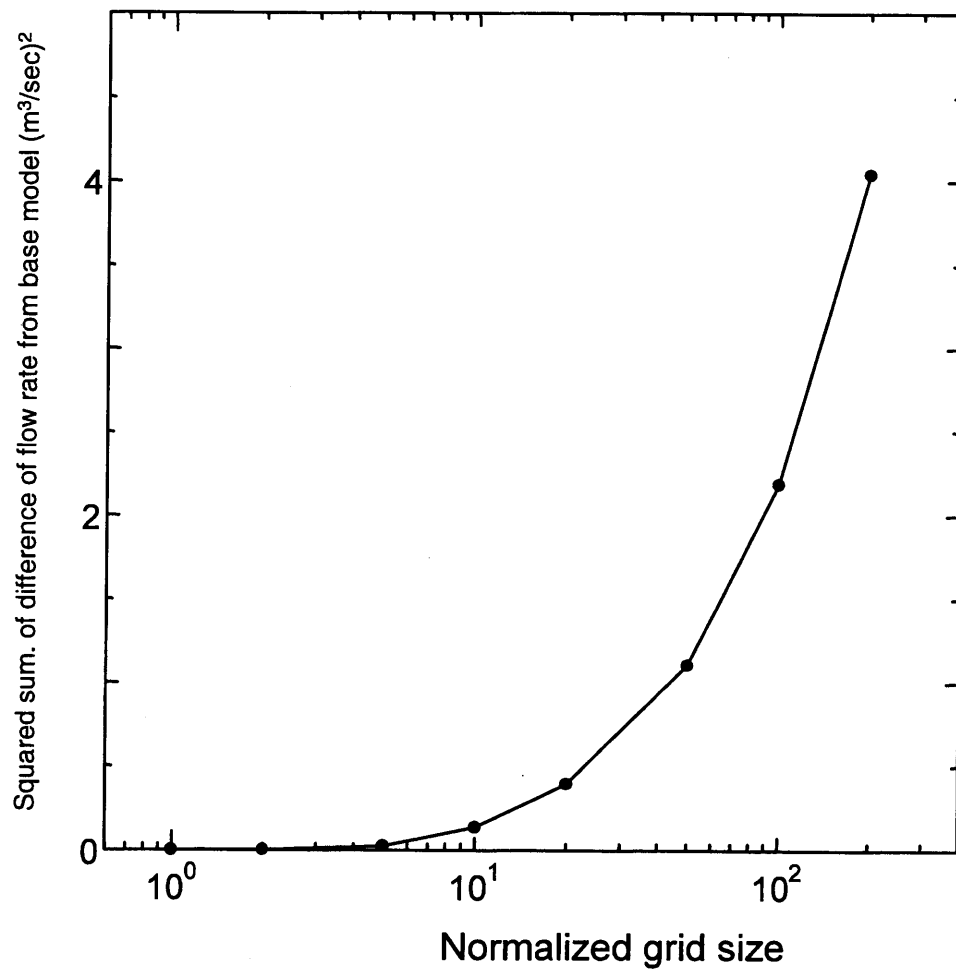
[ $1 \times 10^{-9}$ ]

図-3.23 空間的離散化の粗さによる流出量の残差2乗和の変化

Fig.3-23 Influence of grid size to the squared summation of residual between flow rate calculated in fine model and coarse model

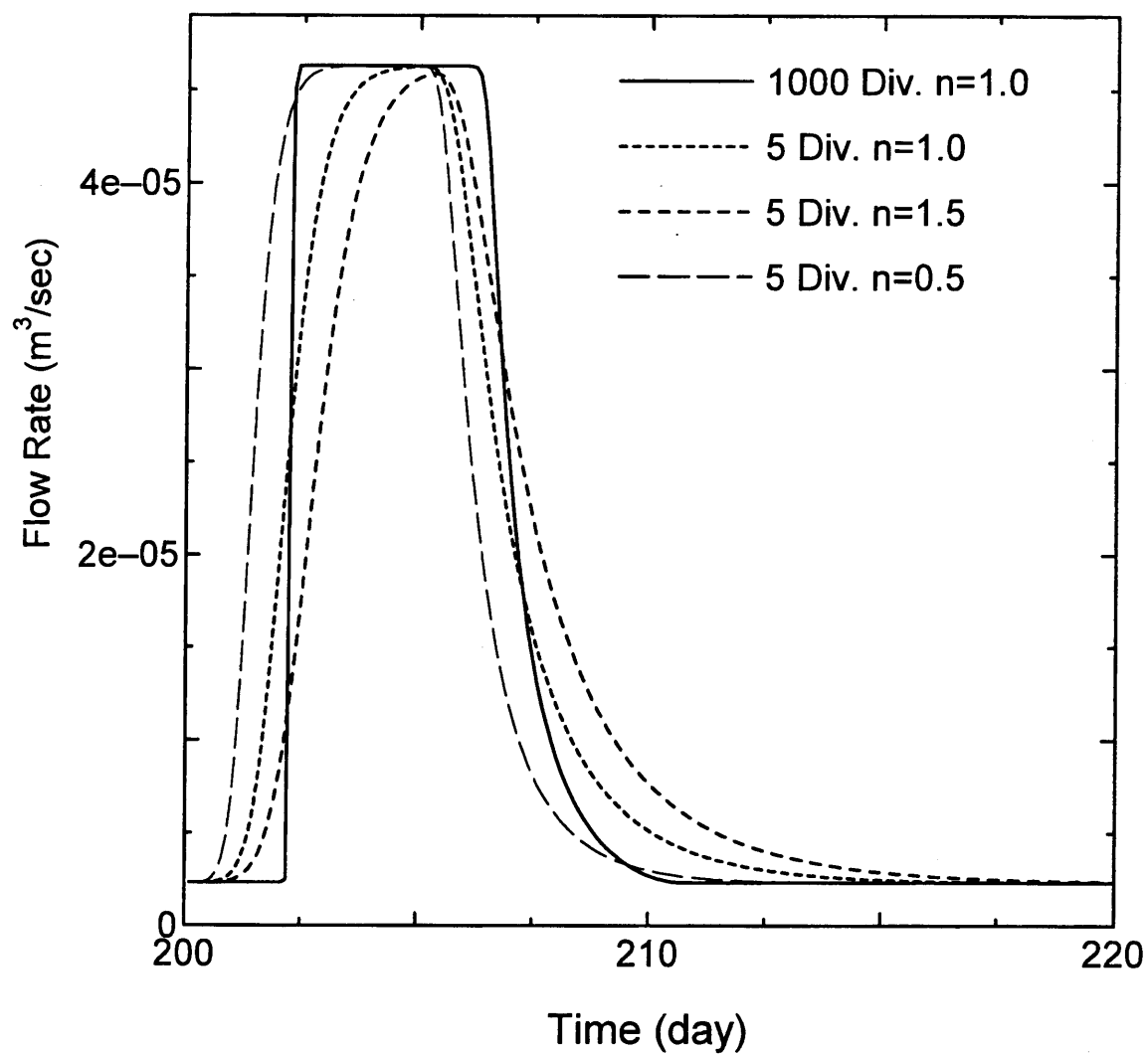


図-3.24 5分割粗格子モデルにおける粗度係数調整による流量の変化

Fig.3-24 Change of the hydrograph with the tuning of Manning coefficient in coarse model.

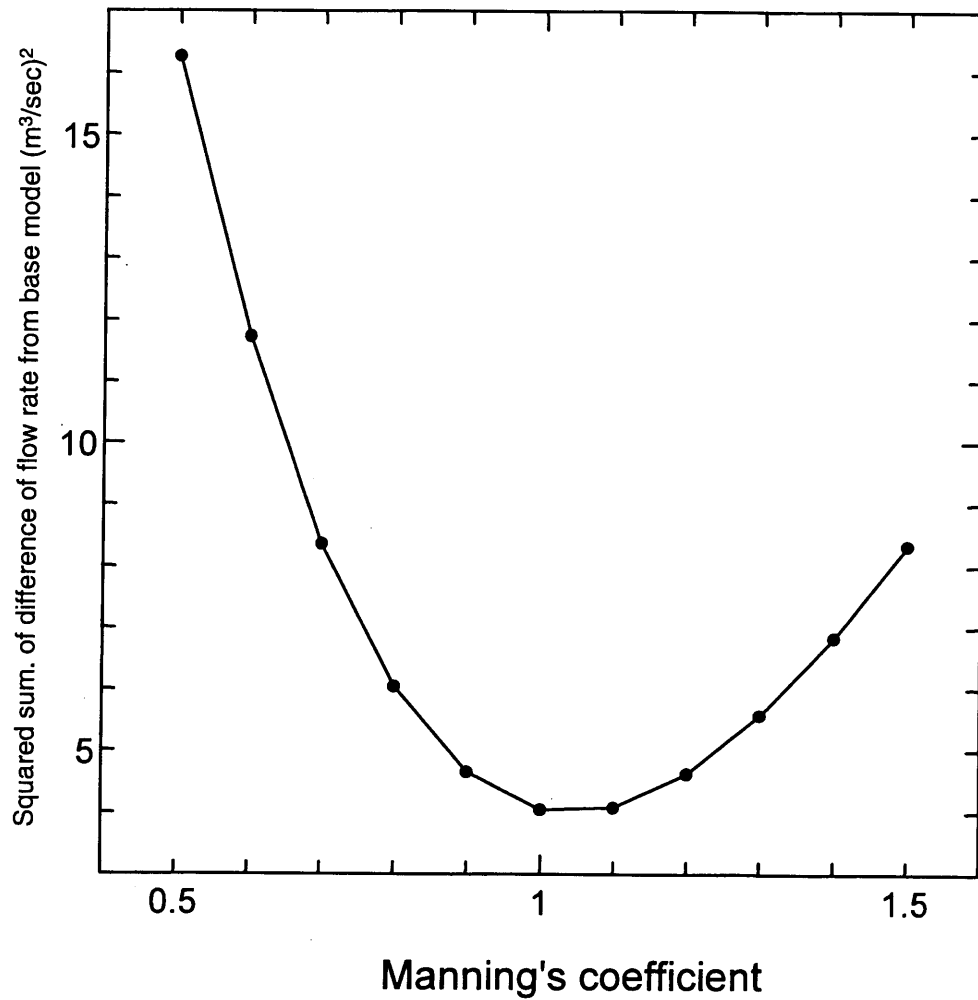
$[1 \times 10^{-9}]$ 

図-3.25 5分割粗格子モデルにおける粗度係数調整による残差2乗和の変化

Fig.3-25 Change of the squared summation of residual between flow rate calculated in fine grid model and coarse grid model with the tuning of Manning coefficient in coarse model.

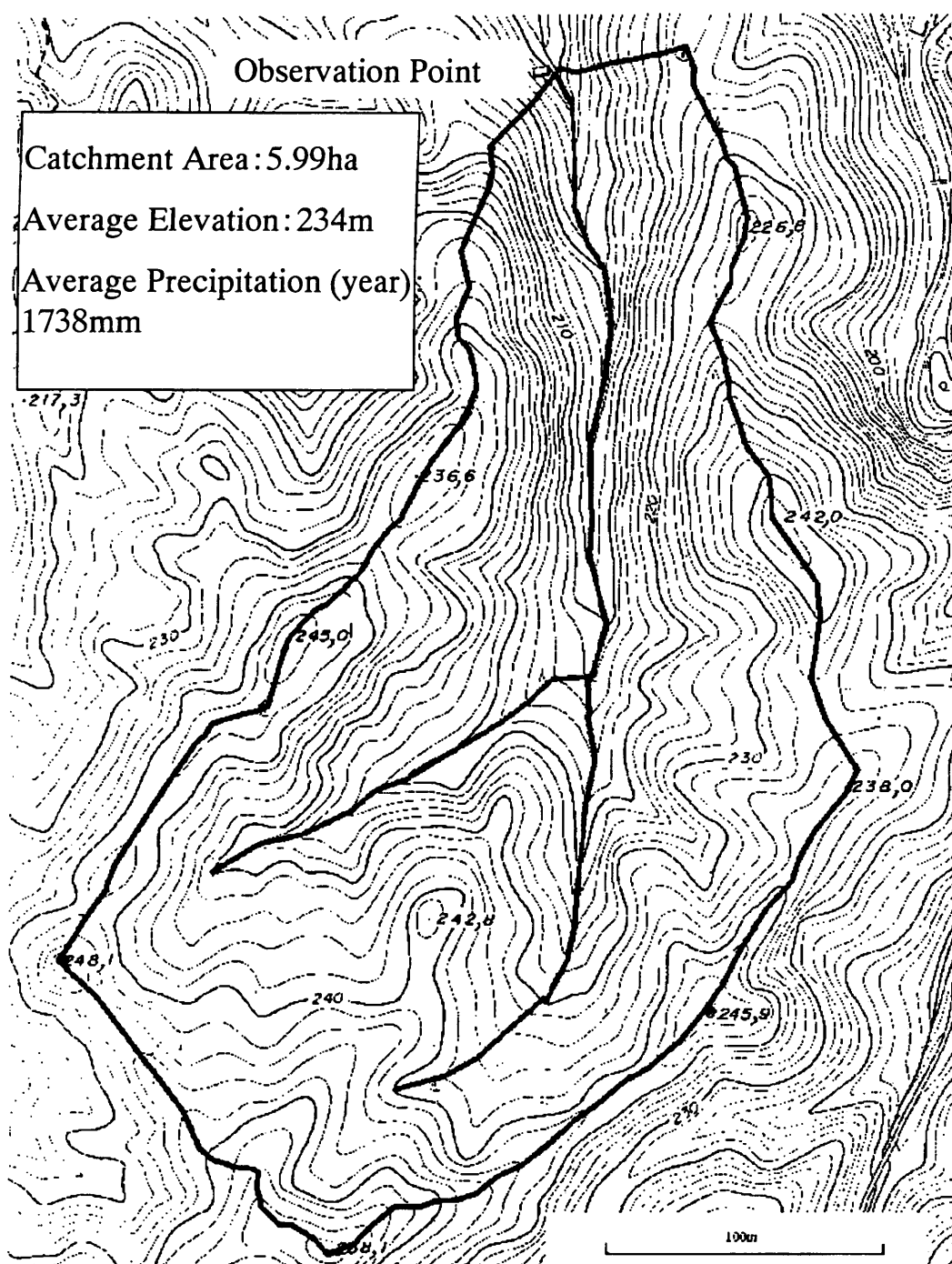


図-3.26 小流域における解析対象領域地形図(京都大学桐生水文実験地)、図中に流域境界および河道、流量観測点を示す。

Fig.3-26 Geographical map of the studied catchment area (Kiryu experimental catchment). Catchment boundary, river, and flow rate observation point are shown in this figure.

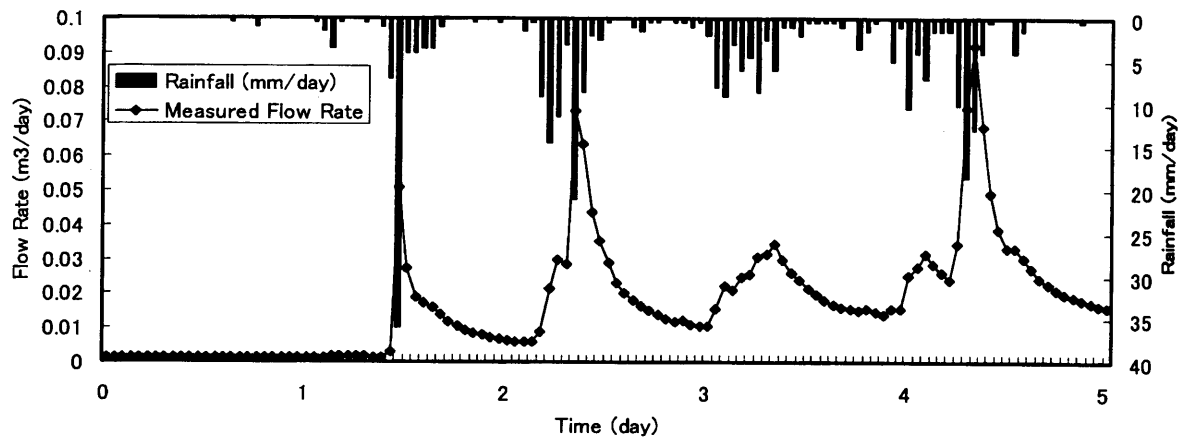


図-3.27 1995年における最大降水量を示す5日間における降水量-流出量の変化

Fig.3.27 Measured rainfall and flow rate in five days with maximum cumulative rainfall in 1995.

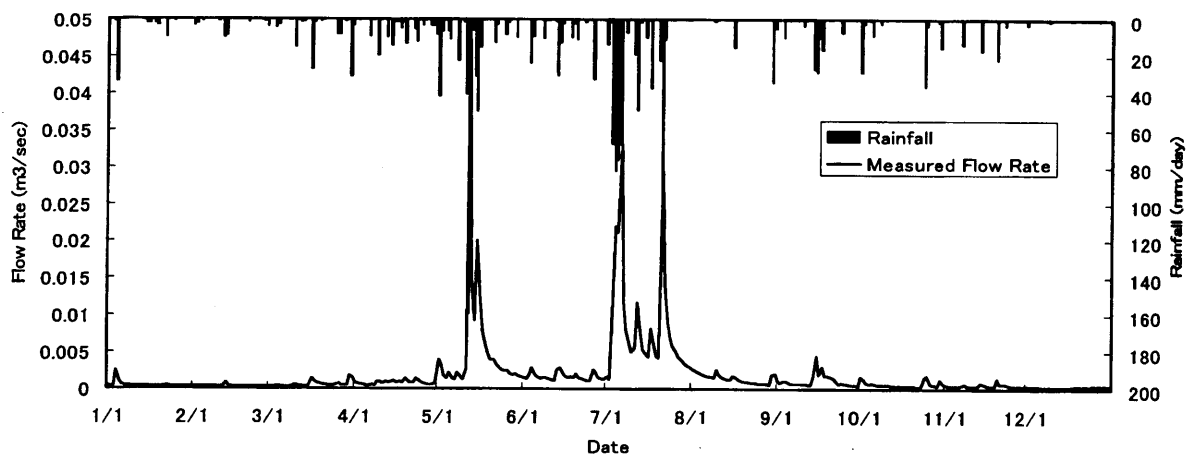


図-3.28 1995年における1年間の降水量-流出量の変化

Fig.3.28 Daily measured rainfall and flow rate in 1995.

$39 \times 39 \times 5$  gridblocks for  $450\text{m} \times 300\text{m}$  region

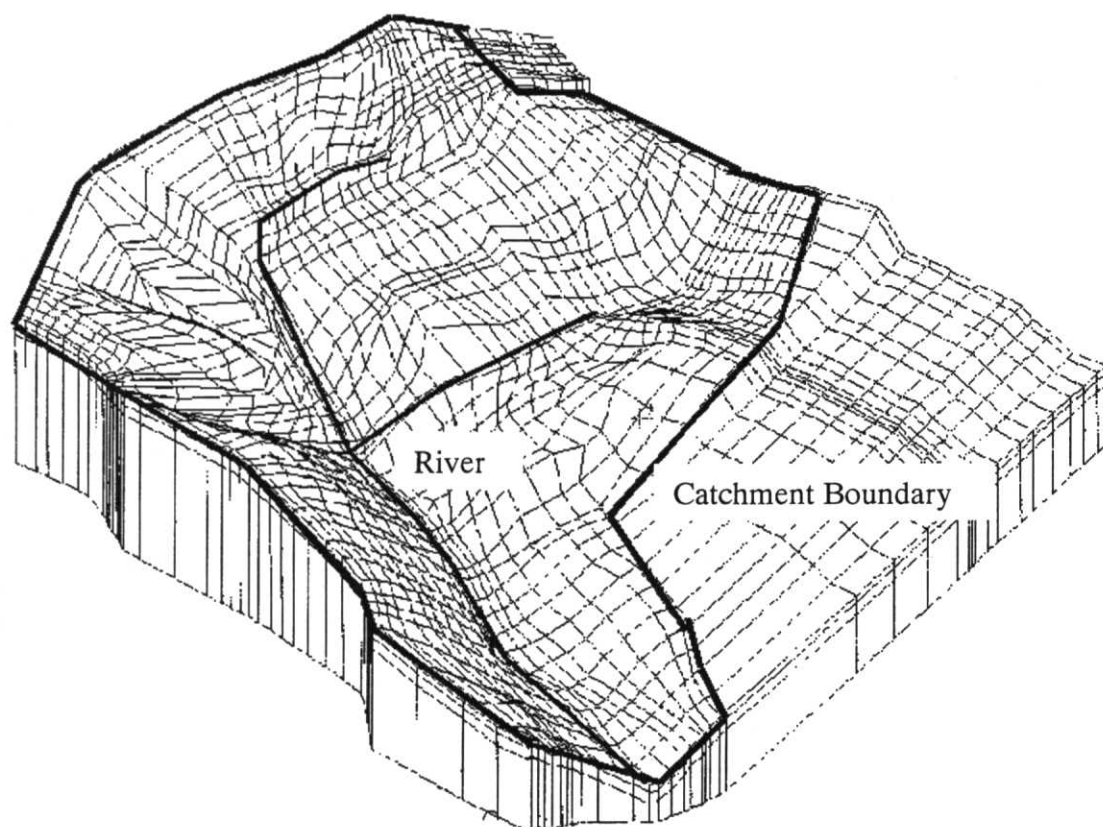


図-3.29 桐生水文試験地における解析用3次元格子分割図( $39 \times 39 \times 5$ 格子)

Fig.3.29 Finite difference grid system for Kiryu experimental catchment  
( $39 \times 39 \times 5$  grids for  $450 \times 300\text{m}$  region)

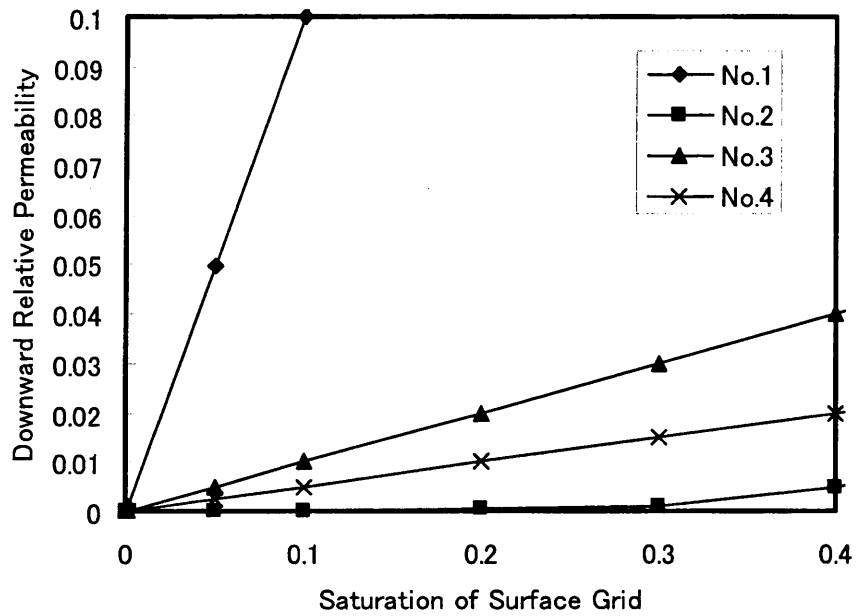


図-3.30 流出解析に用いた地表面からの鉛直方向下向き相対浸透率曲線

Fig.3.30 4 patterns of downward relative permeability curve between surface layer and soil used in numerical simulation

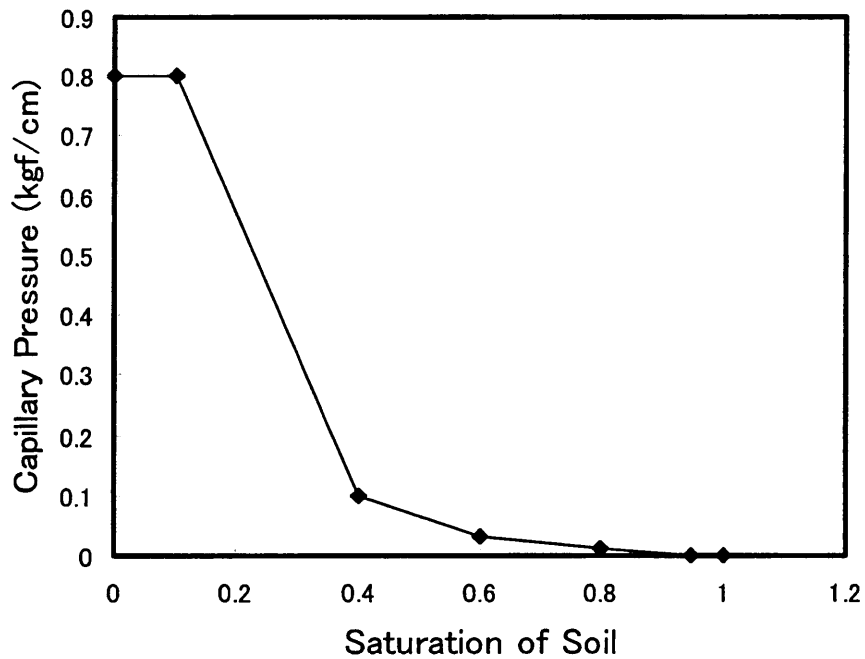


図-3.31 流出解析に用いた土壌の毛管圧力曲線

Fig.3.31 Capillary pressure curve of soil used in numerical simulation



表－ 3.1 解析で用いたパラメーター一覧表

Table. 3.1 Hydraulic properties used in numerical simulation. Relative permeability, capillary pressure, Manning's coefficient are examined by several cases.

Properties	Used Value
Average soil thickness	3m (Kubota <i>et al.</i> , (1983), Kim <i>et al.</i> , (1988))
Hydraulic conductivity	$4.7 \times 10^{-2}$ cm/s for soil (Ohte <i>et al.</i> , 1989) $1.0 \times 10^{-4}$ cm/s for rock
Porosity of soil and rock	0.45 for soil (Kubota <i>et al.</i> , 1987) 0.1 for rock
Relative permeability between surface and soil	4 patterns
Capillary pressure of soil	2 patterns
Manning's coefficient	1.0 , 5.0 , 20.0 for soil surface 0.04 for riverbed

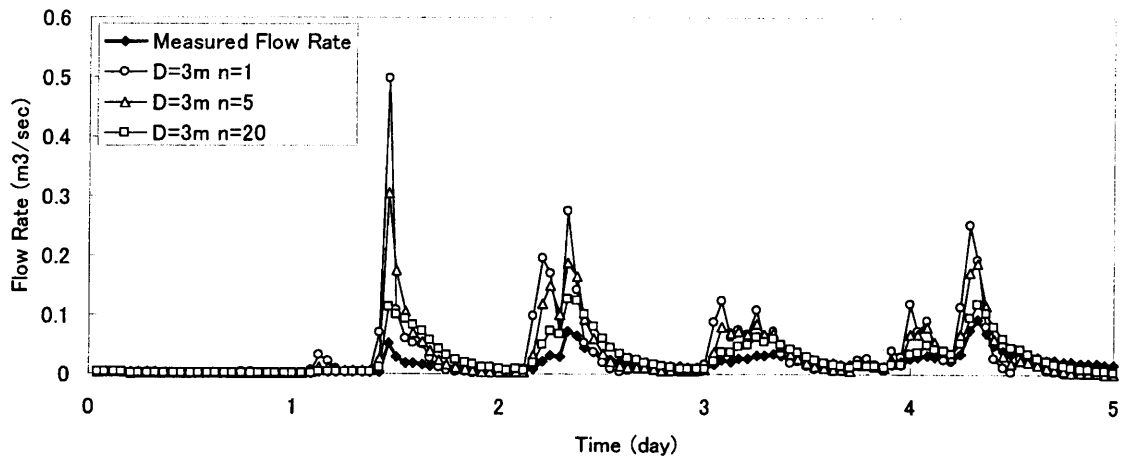


図-3.32 地表面のManning粗度係数を変化させた場合の流出ハイドログラフ

Fig.3.32 Calculated hydrograph patterns according to the Manning's coefficient of soil surface.

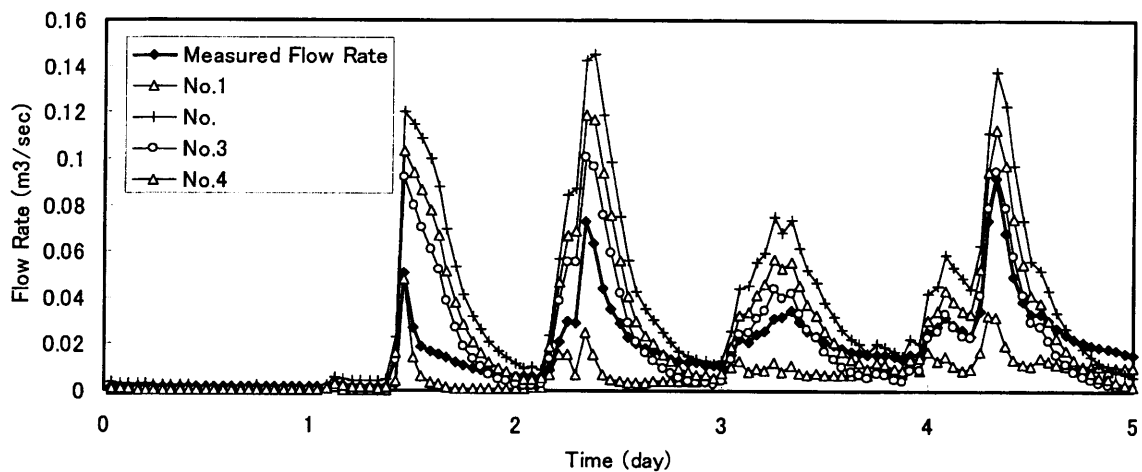


図-3.33 地表面からの鉛直下向き相対浸透率を変化させた場合の流出ハイドログラフ

Fig.3.33 Calculated hydrograph patterns according to the downward relative permeability curve between surface flow and soil.

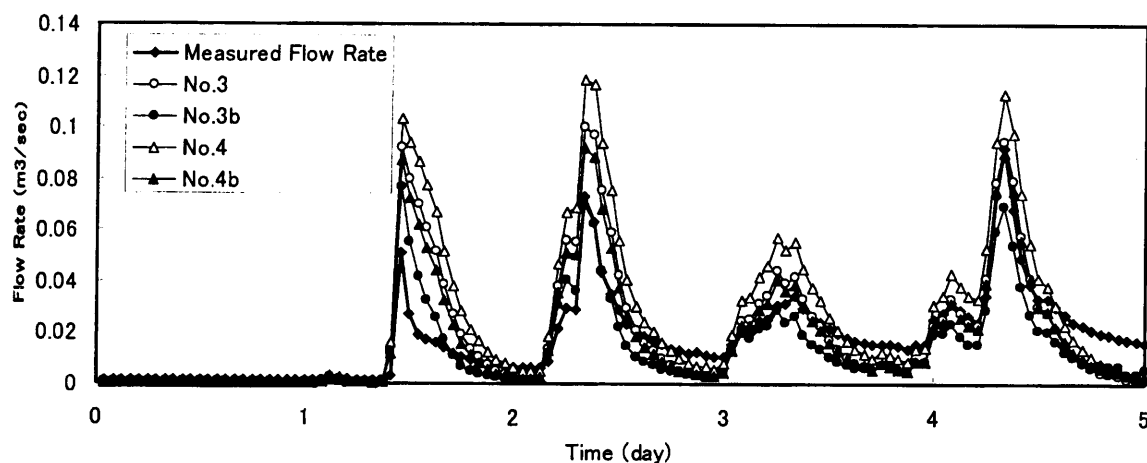


図-3.34 土壌の毛管圧を考慮した場合の流出ハイドログラフ

Fig.3.34 Calculated hydrograph according to capillary pressure of soil. Calculations were carried out to the case No.3 and No.4 of relative permeability pattern. No.3b and No.4b shows the result of calculation considering the capillarity.

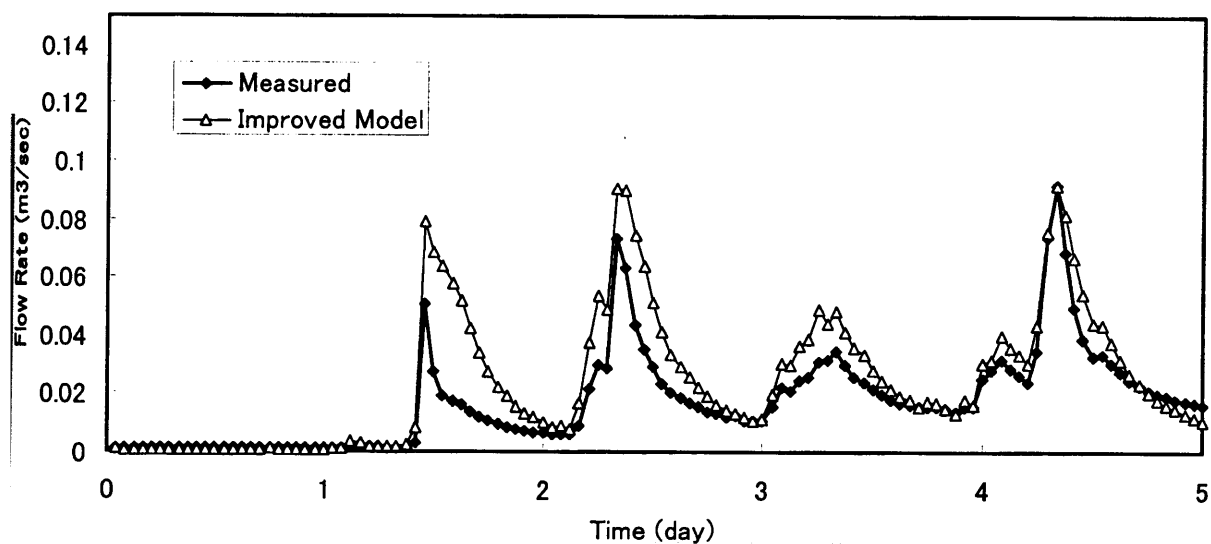


図-3.35 改良型河道モデルを用いた流出解析結果

Fig.3.35 Result of numerical runoff analysis with the improved riverbed model

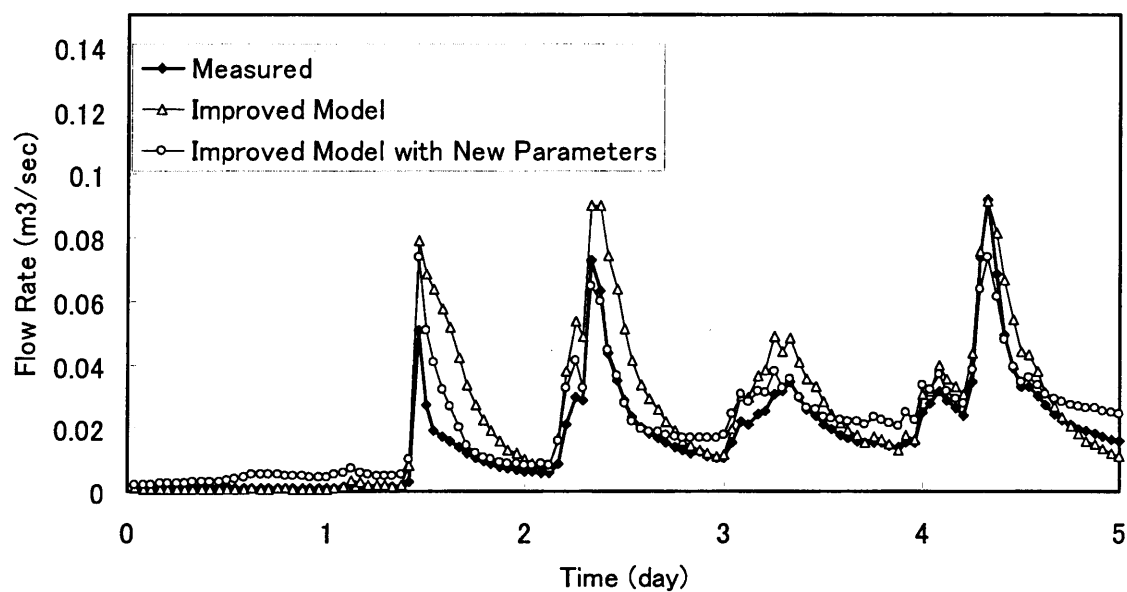


図-3.36 改良型河道モデルによるパラメータフィッティング後の短期流出ハイドログラフ再現結果

Fig.3.36 Result of numerical runoff analysis with improved riverbed model and parameter re-considering. Permeability of surface soil:  $4.7 \times 10^{-1}$  cm/sec. Porosity of soil : 0.8

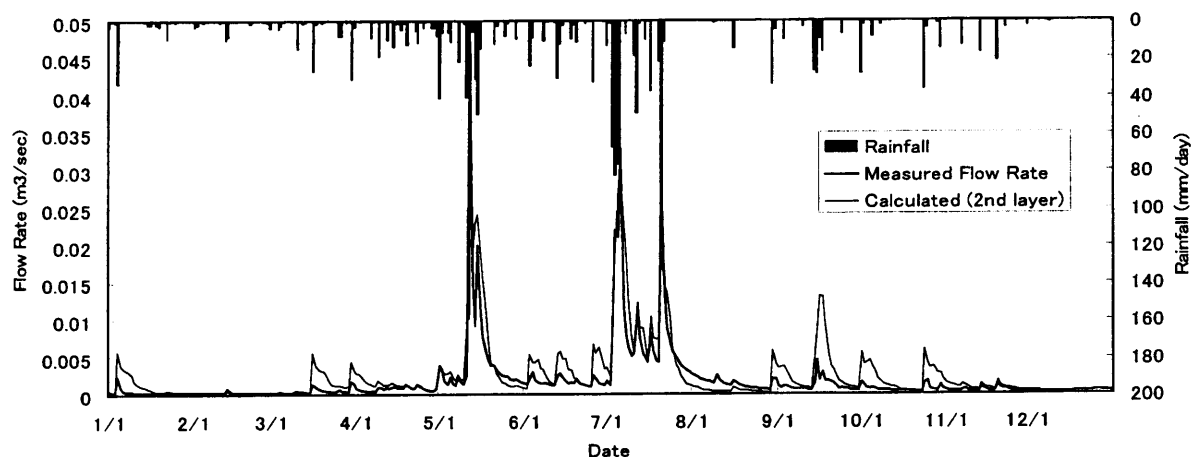


図-3.37 河道第2層モデルを用いた長期流出解析結果

Fig.3.37 Result of long term numerical runoff analysis with second layer river model

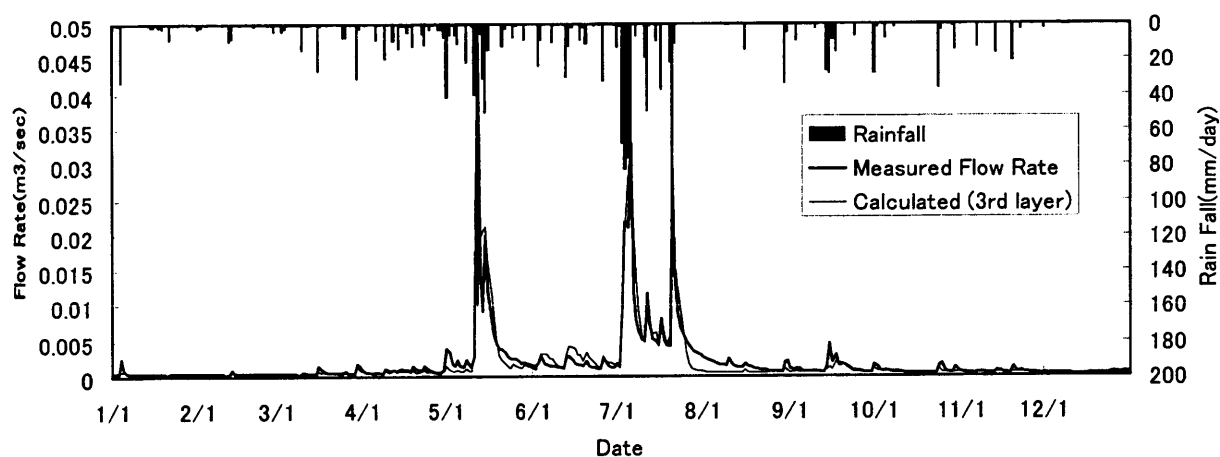


図-3.38 河道第3層モデルを用いた長期流出解析結果

Fig.3.38 Result of long term numerical runoff analysis with third layer river model

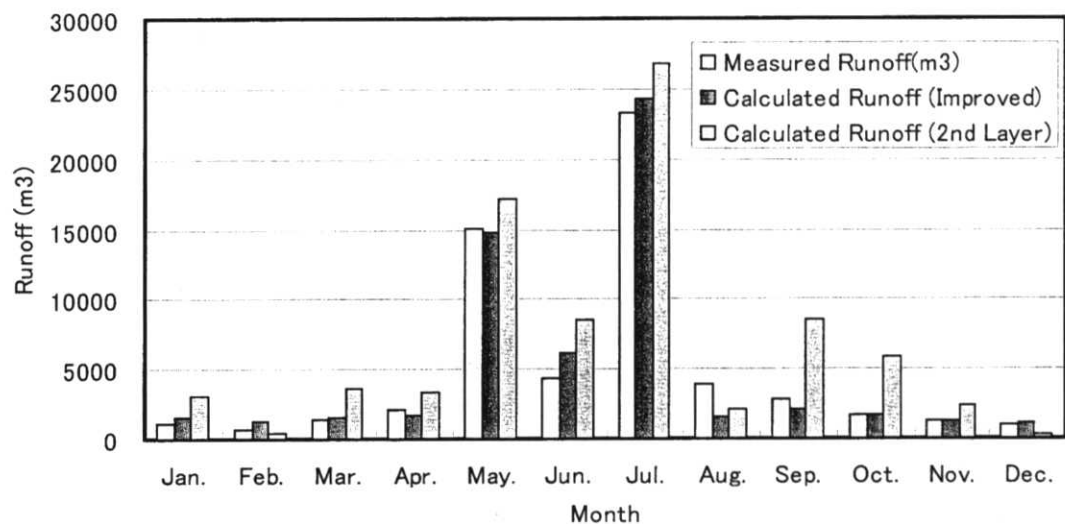


図-3.39 長期流出解析における実測及び解析の月別流出量変化

Fig.3-39 Measured and calculated monthly runoff in long term analysis

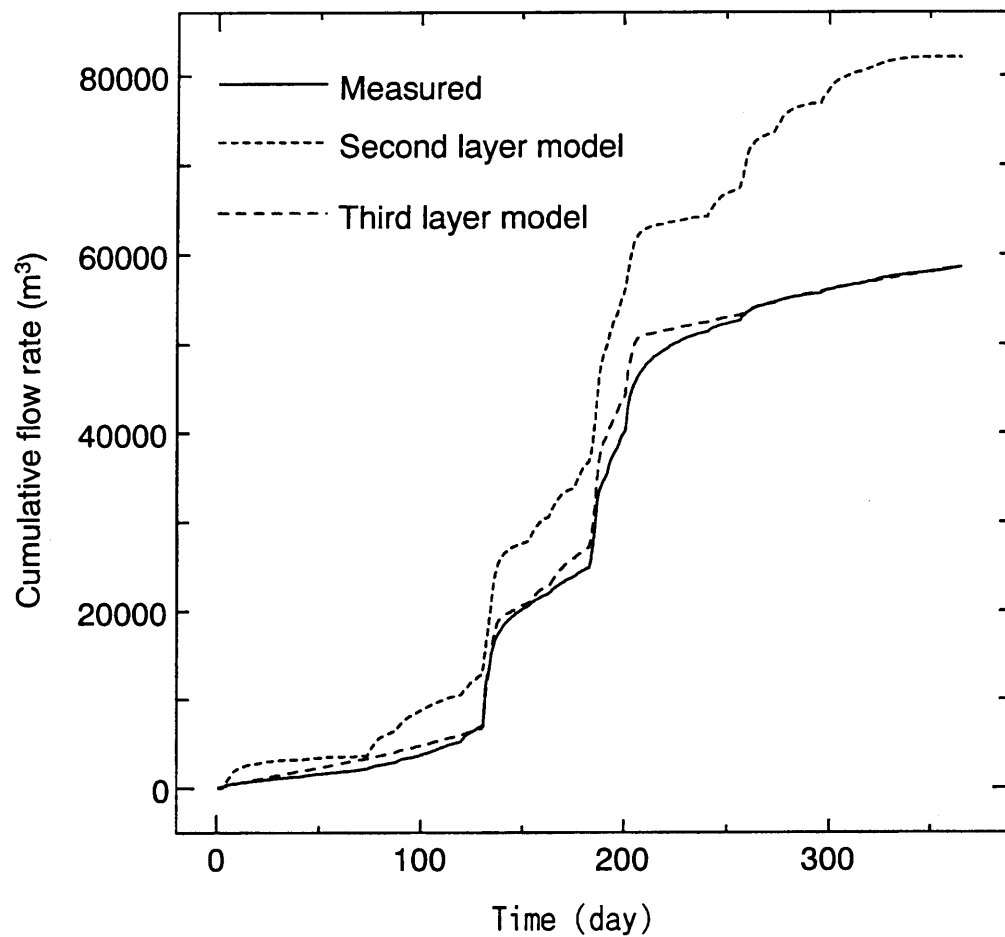


図-3.40 長期流出解析における河床第2層モデルと河床第3層モデルの積算流量による比較

Fig.3.40 The measured and calculated long term cumulative flow rate. The Third layer model shows better accordance with measured flow rate than the second layer model.

## 第4章 広域における空間的離散化手法に関する研究

### 4.1 研究の背景

本研究で対象としている、地表流も含めた水理解析、あるいは地下水汚染解析の場合、最小で数 100m×数 100m から、最大で数 10km×数 10km の領域が解析の対象となる。また、地表面の標高差も、都市部の地下水汚染解析であればほとんど平坦な場合もあるが、流出解析の場合には、比高差で 1000m におよぶ場合も存在する。一般的に解析領域の境界は分水線をとるため、境界線は平面的に複雑な形状をしている場合が多い。また、河川、断層等の自然構造、あるいはトンネル等の人工構造物を線形としてモデルに組みこむ必要があり、解析格子の形状が内部の状況によっても規制される。

一般的に解析領域内で最も局所的変化が激しい要素は地表面地形であるといえる。現状において簡便に入手可能な地形データは、国土地理院の約 50m 間隔での DEM(デジタル地形モデル) であるが、例えば数 10km×数 10km の領域に対して、50m 間隔の地形データをそのまま用いた格子を生成する事はメモリーの制約上不可能である。また、50m 格子を基に平面的には長方形の格子を生成することは、解析対象領域の形状によっては、解析に利用しない格子が大量に生成されるため好ましくない。

ここでは、複雑な領域境界、内部境界形状をもち、かつ地形地質条件に対応したような水理解析に適する解析格子を自動的に生成する手法の開発を行った結果を示す。

### 4.2 研究の目的と現状

#### 4.2.1 研究の目的

前章までに示した数値解析手法を実際の現場に適用する際には、多くの場合人為的なインパクト(例えば大規模構造物の建設や地下水汚染の浄化対策)による現況の変化状況を予測する事を目的とする場合が多い。また、対象とする解析領域も、インパクトの大きさ、あるいは対象とする時間スケールによって拡大している。そのような解析を行う場合、解析結果の信頼性を向上させるための第一段階は、人為的インパクトを与える前の現況データをいかに再現するかという問題である。そのためには水理的パラメータの再考慮は当然であるが、解析境界の再評価、空間的離散化のやり直し等のステップが必要となる場合が多い。そのような需要のもとでは、効率的に解析を行うことが、解析試行回数を増大させ、最終的には解析の信頼性を向上させる。

現実の数値解析手順の中で、非常に時間を要する段階として、空間的離散化格子の



作成があげられる。特に数千  $\text{km}^2$  オーダー以上の広い領域を解析対象とし、平面的に 5,000~10,000 の解析格子を作成する場合、手作業では数週間を要することもしばしばである。実際に手動で数千  $\text{km}^2$  オーダーの領域に対し格子分割を行った例を図-4.1に示す。この段階は解析自体は動いていないため、解析の信頼性向上に寄与していない。また、この例の場合等、手動で格子分割を行った場合には格子の面積にもばらつきが大きく、直交性も明らかに悪く解析に適さない格子である事が直感的に推察される。本研究では、離散化格子の生成段階を効率化する事を目標として、効率的な自動格子生成手法に関する研究も行っている。また、格子生成の効率化のみでは無く、解析誤差を低減させるためにはどのような格子形状が必要であるかを把握することで、自動格子生成によって解析結果の信頼性向上あるいは計算速度向上にも寄与することが可能であるとも考えられる。

#### 4.2.2 自動格子生成に関する既往の研究

地盤工学分野に限らず、機械工学、航空工学等の分野において数値解析手法が広く用いられるようになってとともに、解析の効率化、あるいは流体力学等時々刻々変化する場に対応するために、自動格子形成手法に関する研究が広く行われている。特に複雑な形状を持つ領域に対しては、有限要素法のような非構造格子を用いる方が対応し易いために、有限要素法を対象とした自動格子分割手法が多く研究されている。古くから用いられている方法としては、デローニー三角形分割による方法や前進先端法等の方法が広く用いられている(数値流体力学編集委員会,1995)。同様の目的の研究は、現在でも特に3次元化という意味で盛んであり、例えば、Calvo & Idelsohn(2000)では、複雑な境界形状を持つ3次元モデルをあらかじめ設定した境界上の固定点をもとに小領域に分割し、最終的に6面体メッシュに分割するアルゴリズムの提案を行っている。また、Tang *et al.*,(2000)では任意多面体の四面体への幾何学的自動分割アルゴリズムの研究を行っている。また、Yoshimura *et al.*,(1999)では、2次元領域内における四辺形要素の生成において前進先端法を改良し、ファジー理論を導入する事によって外部および内部の境界から幾何学的な拘束条件の元で四辺形を自動生成する方法である。

一方、差分法、有限体積法で用いる構造格子の生成において最も多く用いられている方法は、Eriksson(1982)による Tranfinite 補間に代表される代数的補間方法や、物理空間  $(x, y, z)$  から計算空間  $(\xi, \eta, \zeta)$  への写像関係を連立偏微分方程式を用いて求める方法がある。後者は、Poisson 方程式のような楕円型偏微分方程式を用いる方法(Thompson *et al.*,1977)、格子線の直交条件、格子体積の一定条件を用いた双曲型偏微分方程式を用いた方法(Steger & Chaussee 1980)に分類される。最近では、Chiba *et al.*,(1998)において、3次元の複雑な境界形状を持つ領域を Poisson 方程式を用いて、長方形以外の計算空間への写像変換を行うことで、内部の空洞部等への対応を果たしている。

また、流体力学、水理学の分野に注目すると、近年研究が進んでいるものとして、いわゆる解適合格子があげられる。解適合格子とは、変数(圧力あるいは流速)の勾配が一定となるように格子を変形する方法である。解適合格子には、格子のトポロジーを変化させず、格子点をバネで繋がった系とみなして移動させて全体を変形させる方

法 (Nakahashi & Deiwert, 1986) や、格子の局所的細分化がある。後者は主に有限要素法に用いられてきたが、最近では第2章で述べた浅水長波近似の流動解析における有限体積法に適用した研究事例 (Causon *et al.*, 2000) がある。

流出解析を対象とした格子生成に関しては、例えば立川他 (1997) の研究がある。ここでは、河道網データと等高線データから、流域を地形再現性の良いを三角形要素に分割し流出解析を行う方法である。また、登坂他 (2000) においては、質点-バネネットワークモデルを用いて、地形を考慮した格子生成を行っている。

#### 4.2.3 既往の研究における問題点

既往の研究は、主に機械工学、材料工学分野で進められているため、複雑な形状を持つ均質材料を対象としているものが多い。一方、水理解析においては地質的な制約による材料の物性分布形状複雑であること、および領域形状以外の条件として、領域内の地形等の3次元制約条件が加わる。従って、従来の手法のような均質材料を対象とした分割手法を単純に適用しても、格子分割は可能となるものの、例えば地形の再現性が考慮されなければ、解析精度の向上にはつながらない。

本研究では、特に水理解析を対象として、地形、地質等の3次元条件を考慮しつつ、解析格子を効率的に自動生成する手法の開発を行う。

### 4.3 数値解析における格子分割の影響

地形を含む3次元曲面に対し、2次元差分格子分割を行う場合、格子のコーナーポイントを地表面と一致させる形で格子を生成せざるを得ない。しかしながら、解析上、圧力等の変数は格子の中心点で代表させる。格子が粗い場合には、地表面と格子中心点の標高が一致しない場合が生じる。離散化の段階で、ある程度の誤差が生じることは避けられないが、格子中心点と地形データとの乖離が少ないほうが、解析の精度上望ましい事は言うまでもない。

従って、本研究では、以下の地形再現指標 (Index of Topography:  $I_T$ ) を定義し、地形再現性の評価を行う。

$$I_T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_{gc}(i) - z_{org}(i))^2 \quad (4.1)$$

ここで、 $z_{gc}$  はコーナーポイントの座標から計算される格子中心点の標高、 $z_{org}$  はデジタル地形データ等の地形データから求められる格子中心点の座標である。例えば、図-4.2のような1次元流路を考えた際に、流路の総延長沿いに等分割を行ったモデルと水平に等分割したモデルの2種類の離散化手法によって、分割数と地形再現指標の関係は、図-4.3に示すようになる。分割数5あるいは10という極端に粗いケースに関しては両者ともほぼ同等の地形再現性を持つと考えられるが、分割数20以上では両分割手法の間に明瞭な差が生じる。

一方、本研究では通常長方形(直方体)格子を用いた差分解析ではなく、コーナーポイント型の変形差分格子を用いた積分型の差分法を用いた離散化を行っているた

め、解析誤差は、格子形状によっても生じる。積分型差分法において、各格子間の Transmissivity は図-4.4に示すように、各方向ごとに分解して求めている。すなわち、図中の格子1、2の Transmissivity を  $T_{12}$ 、 $T_{21}$  とすると、格子ごとの調和的な積分から、 $A_{01}$  と  $A_{02}$  が異なる場合には

$$T_{12} = K_1(A_{01} - A_1)/\log(A_1/A_{01}) \quad (4.2)$$

$$T_{21} = K_1(A_{02} - A_2)/\log(A_2/A_{02}) \quad (4.3)$$

となり、 $A_{01}$  と  $A_{02}$  が等しい場合には、

$$T_{12} = K_1 A_{01} \quad (4.4)$$

$$T_{21} = K_2 A_{02} \quad (4.5)$$

となる。

格子間の Transmissivity  $T$  は、以下の調和平均で求められる。

$$T = \frac{L_1 + L_2}{\frac{L_1}{T_{12}} + \frac{L_2}{T_{21}}} \quad (4.6)$$

以上の方法は、流量の連続性を保つものであるが、格子形状の直方体からのずれが大きくなると、格子間の通過量の和と対応する貯留項中の格子体積の誤差が大きくなり、解析精度は低下する。

境界形状、あるいは内部の境界となる河川等の一次元形状が複雑な形状をしている限りは、格子形状は単純な長方形にはなりえない。しかしながら、格子形状に起因する領域全体の解析誤差を最小化するためには、各格子の形状を可能な限り長方形に近づける、すなわち、各格子辺がなす角度を直角に近づけ、相対する辺の長さを可能な限り等しくすることが必要である。

## 4.4 質点-バネ-流体モデルによる格子生成手法

### 4.4.1 モデルの概要

以上より、少なくとも平面的な地表面上の格子形状としては、以下の条件および形状が望ましい事が理解された。

- コーナーポイントのみではなく、格子中心が地表面（得られる地形データ）上に存在する。
- 平面形状が可能な限り長方形に近く、格子が直交性を有している。

第一の条件は、基本的に地形に沿って離散化を行うこと、すなわち標高変化が激しい部分には平面的に密に、勾配が緩く、勾配変化が小さい部分には相対的に粗く格子を配置する事で対応が可能である。また、第二の条件は、平面的に格子の相対する辺の長さを等しく、各格子の面積を等しくするような拘束条件のもとで格子を生成する事で、同様の効果が得られる。そのため、本研究では、質点-バネ-流体モデルを開発した。

登坂他 (1999) では、質点-バネネットワークモデルによる格子生成手法を提案している。これは、コーナーポイントに質点、格子の各辺にバネを配置し、各質点にかかる X,Y 方向の力がつりあう点にコーナーポイントを配置するという方法である。質点-バネネットワークモデルの模式図を図-4.5 に示す。この方法は比較的単純なメカニズムを用いる事で上述した適切化の条件に近い結果を得る事ができる。しかしながら、境界形状の凹凸が大きい場合には、その凹部等で図-4.6 に示すように、コーナーポイント位置の修正段階において、格子のオーバーラップが生じる。そのばあいには、バネの長さによる力のつりあいのみでは修正が不可能となることがある。

本研究では、上記の問題を解決するために、格子のオーバーラップを抑制し、かつ格子形状に関する適切性の条件をより強く反映させる手法として、コーナーポイント間のバネにプラスして格子自体も内部に仮想的な気体を包む2次元容器と考え、体積を保ちつつ変形を許容するモデルの開発を行った。質点-バネ-流体モデルは、解析領域内にあらかじめ解析格子のコーナーポイントを配置し、コーナーポイントに作用する力のつりあいを解く事によって DEM の斜面上に最適なコーナーポイント配置を決定する方法である。

質点-バネ-流体モデルにおいて、質点と想定したコーナーポイントに作用する力は、コーナーポイント間を連結するバネと、格子内部に設定した流体の圧力によるというモデルを設定する。コーナーポイント間を連結するバネは0長バネと仮定し、バネによって作用する力は、コーナーポイント間の距離と方向によってその大きさおよび方向が決定される。また、格子内部の流体の圧力は、格子の面積に依存し、格子の各辺と垂直方向に、両端のコーナーポイントに等価な集中荷重が作用すると仮定する。そのため、流体圧に起因する力は、格子の面積、コーナーポイント間の距離、方向によってその大きさと方向が決定されるという仮定を行う。格子の1辺を形成する2コーナーポイントに対して作用する力の模式図を図-4.7 に示す。その際に各点がコーナーポイント間を連結するバネから受ける力 ( $F_{s1,2}$ ) を式 (4.7),(4.8) に、格子内部の流体圧 (P) による力 ( $F_{v1,2}$ ) を、式 (4.9),(4.10) に示す。ただし、ここでは、図-4.7 中に矢印で示した力の X,Y 方向ごとの力を下沿え字によって示した。

$$F_{s1x} = -F_{s2x} = kl \cos \theta \quad (4.7)$$

$$F_{s1y} = -F_{s2y} = kl \sin \theta \quad (4.8)$$

$$F_{v1x} = F_{v2x} = \frac{1}{2}lP(A) \cos (\theta + \pi/2) \quad (4.9)$$

$$F_{v1y} = -F_{v2y} = \frac{1}{2}lP(A) \sin (\theta + \pi/2) \quad (4.10)$$

ここで、 $l$  はコーナーポイント間の距離 (m)、 $\theta$  はコーナーポイント間を連結する辺と X 軸の成す角度、 $k$  はコーナーポイント間を連結するバネのバネ定数 (N/m) であ

る。また、格子内の流体は気体を想定し、流体圧 (P)(Pa) は、面積 (A)(m<sup>2</sup>) によって以下のように表されるようにモデル化した。

$$P = CA_0/A \quad (4.11)$$

ただし、C は流体の体積と圧力の関係を表す係数 (Pa)、A<sub>0</sub> は流体圧が C と一致する基準面積 (m<sup>2</sup>) である。

以上に示した力は1格子の1辺の両端2点における力を示したものであるが、実際には一つのコーナーポイントは隣接する四つのコーナーポイントとの間をバネで結合され、同じに四つの格子によって共有されている。従ってコーナーポイントを連結するバネからは、それぞれ四つの隣接コーナーポイントとの距離と方向による力  $F_{s1}, F_{s2}, F_{s3}, F_{s4}$  を受け、格子内部の流体からは、それぞれの要素の面積と各辺の長さ、方向による力  $F_{va1}, F_{va4}, F_{vb1}, F_{vb2}, F_{vc2}, F_{vc3}, F_{vd3}, F_{vd4}$  を受ける。また、このモデルでは、各コーナーポイントが配置されている斜面から垂直効力を受け、それを X, Y 方向に分配した力を加味する。

質点-バネ-流体モデルにおいて、あるコーナーポイントに生じる力の分布を図-4.8に示す。ここで、図中の各辺と X 軸が成す角度を、図中に示したように  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$  とすると、図中の点 i における X, Y 方向の力のつりあいは以下の式で表される。

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^4 (F_{sj} \cos \theta_j) \quad (4.12) \\ & + F_{va1} \cos(\theta_1 + \pi/2) + F_{vb1} \cos(\theta_1 - \pi/2) \\ & + F_{vb2} \cos(\theta_2 + \pi/2) + F_{vc2} \cos(\theta_2 - \pi/2) \\ & + F_{vc3} \cos(\theta_3 + \pi/2) + F_{vd3} \cos(\theta_3 - \pi/2) \\ & + F_{vd4} \cos(\theta_4 + \pi/2) + F_{va4} \cos(\theta_4 - \pi/2) + F_{gx} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^4 (F_{sj} \sin \theta_j) \quad (4.13) \\ & + F_{va1} \sin(\theta_1 + \pi/2) + F_{vb1} \sin(\theta_1 - \pi/2) \\ & + F_{vb2} \sin(\theta_2 + \pi/2) + F_{vc2} \sin(\theta_2 - \pi/2) \\ & + F_{vc3} \sin(\theta_3 + \pi/2) + F_{vd3} \sin(\theta_3 - \pi/2) \\ & + F_{vd4} \sin(\theta_4 + \pi/2) + F_{va4} \sin(\theta_4 - \pi/2) + F_{gy} = 0 \end{aligned}$$

ここで、バネから受ける力  $F_s$  の下添え字  $j$  は、それぞれ力が働く辺を示す。また、流体圧に起因する力  $F_v$  の下添え字 (a, b, c, d) は、コーナーポイントを共有している格子を示し、同じく下添え字 (1, 2, 3, 4) は流体圧を分配した辺を示す。 $F_{gx}$  および  $F_{gy}$  は、コーナーポイントに作用する垂直効力の x, y 成分であり、以下の式で表される。

$$F_{gx} = mg \cos \theta_z \sin \theta_x \quad (4.14)$$

$$F_{gy} = mg \cos \theta_z \sin \theta_y \quad (4.15)$$

ただし、 $m$  は質点の質量 (kg)、 $g$  は重力加速度 ( $m/s^2$ )、 $\theta_z$  はコーナーポイントが配置されている斜面の最急降下方向ベクトルが水平面となす角度、 $\theta_x, \theta_y$  は最急降下方向ベクトルが  $x$  軸、 $y$  軸となす角度である。

コーナーポイント間の距離は、コーナーポイントの 3 次元座標から単純に計算される。また格子  $k$  の面積 ( $A_k$ ) は、図-4.9 に示すように対象とする格子を 3 角形に分割し、それぞれの 3 角形の 3 次元空間内での面積 ( $A_{k,i}, i=1,4$ ) と、それぞれを水平面に投影した 3 角形の面積 ( $A_{k,ip}, ip=1,4$ ) から以下のように計算する。

$$A_k = \frac{(A_1 + A_2 + A_3 + A_4)}{2} \quad (4.16)$$

$$A_{k,ip} = A_{k,i} A_{k,ip} / |A_{k,ip}| \quad (4.17)$$

なお、それぞれの三角形の面積は、頂点の座標から外積によって求める。

以上の方法で格子面積を求めることによって、前述のようにコーナーポイントがオーバーラップした場合には三角形の面積が負の値となり、流体圧による力はオーバーラップを修正する方向となる。

コーナーポイント間のバネによる力のつりあいは、単純に考えればコーナーポイント間の距離を等しくする効果を生じ、格子の面積による力のつりあいを考慮する事は、格子面積を等しくする効果を持つ。すなわち、以上のつりあい式を解く事によって、最も単純な場合正方形に近づけることが可能である。実際には、構造格子においては、領域全体の幅に関わらず、一定の方向には同一数の格子を配置する必要があるため、バネ定数  $k$ 、あるいは流体の体積と圧力の関係を表す係数  $C$  を調整する必要がある。

以上の解析において、水平座標 ( $x, y$ ) が決定されれば、DEM によって  $z$  座標を決定する事が可能である。従って、式 (4.13), (4.14) で示した力のつりあい式のうち、コーナーポイント間のバネによる力の項は、対象とするコーナーポイントおよび隣接する 4 点の  $x, y$  座標の関数である。また、流体圧から受ける力は、格子の面積に依存し、格子の面積は、対象とするコーナーポイントおよび周囲のコーナーポイント 8 点の  $x, y$  座標の関数となる。以上のつりあい式を解き、各コーナーポイントの平面座標を求めることによって格子が自動生成されるが、以上のつりあい式は対象コーナーポイントと周囲 8 点の平面座標に関する非線型方程式となっているため、解析上は適当な初期コーナーポイント配置から Newton-Raphson 法によって最適格子配置を決定する。

また、境界上のコーナーポイントは固定点となるように、Newton-Raphson 法によって  $x, y$  座標の修正量を求める際のヤコビ行列中で対応する主対角項を大数 ( $1.0 \times 10^{30}$  程度) で置換し、結果として修正量が 0 となるような操作を行った。

#### 4.4.2 数値実験による格子適切性の検討

ここでは、数値実験により、前述の質点-バネ-流体モデルによる格子生成の有効性、適用限界の確認を行った。領域形状は、図-4.10に示すような単純な形状とした。なお、ここでは単純化のため、領域内の標高分布は考慮していない。

ここでの問題設定は、この領域を $2 \times 3$ の格子に分割することである。第一に、この領域に対し、図-4.11に示したように、境界上にコーナーポイントを配置し前節末尾に示した方法によって固定した。

従って、位置が未定のコーナーポイントは2点となる。ここでは、未定点2点の初期位置がそれぞれ領域内に存在する場合、領域外に存在する場合に対して解析を実施した。なお、コーナーポイント間のバネ定数、格子内の流体の体積と圧力を表す係数は各要素に対し同一の値としている。なお、式(4.11)における基準格子面積 $A_0$ は、格子を生成する領域全体の面積を格子の個数で割った値とした。

第一に、未定点の初期位置が解析領域内に存在する場合の結果を示す。ここでは、図-4.12に示した初期位置から、前述の方法で力のつりあい点を反復的に求めた。図-4.13は、格子間のバネ定数のみを正值とし、流体圧を0とした場合の最終的な格子形状であり、図-4.14は、逆に流体圧のみで変形を行った場合の最終形状である。流体圧のみを利用した場合には、理想的な格子形状が得られているが、コーナーポイント間のバネのみによるつりあいでは、本モデルにおけるX方向のコーナーポイント間の距離がY方向と比較して相対的に長い為、つりあい点が領域外に出てしまい、格子としては不適切な形状となっている。この状態をコーナーポイント間のバネのみで解消するためには、バネ定数を方向ごとに変化させる必要があるが、領域形状が複雑となる場合には対処が困難となる。

次に、未定点の初期位置を解析領域外に設定したケースに対し、質点-バネ-流体モデルを適用した結果を示す。図-4.15に反復段階における格子生成状況を示す。ここではコーナーポイント間のバネのバネ定数は0として解析を実施した。質点-バネ-流体モデルの場合には、ここで示したような比較的単純なケースに関しては、未定点の初期位置を領域外に設定しても最終的に適切な格子形状が生成されることが示された。ここで、格子内の流体の体積と圧力の関係を表す係数 $C$ は、最終格子形状への収束早さに関係する。このケースにおいて、反復変形の際の打ち切り誤差は $1.0 \times 10^{-3} \text{m}$ と設定している。格子内流体の体積と圧力の関係を表す係数 $C$ と反復回数 $n$ の関係を図-4.16に示す。このケースでは、 $C$ と反復回数 $n$ の間に両対数で負の傾きの直線関係が見られる。本モデルのような単純なモデルの場合には、圧縮性流体のみを用い $C$ を大きくしておけば最も効率的である。しかしながら地形データを持つ現実の問題に適用する際には、1回の反復でコーナーポイント位置の修正量が大きくなる事によって解が振動する危険が大きい。一方、流体圧のみを用いた場合には、途中段階の格子形状によっては、コーナーポイントのXあるいはY座標が格子面積に対して感度が低い場合があるため、Newton法で形成されるマトリックスの主対角項が卓越しない可能性があり、解の精度が低下する恐れがある。そのため、確実に主対角項が卓越するバネネットワークモデルを付加し、解の安定性を図る必要がある。

#### 4.4.3 領域境界、内部ライン上の固定点配置手法

質点-バネ-流体モデルでは、分水界としての外部境界や河川等の内部の特定ライン等、確実にコーナーポイントを配置したいライン上の点はあらかじめ固定する。一方、質点-バネネットワークモデルでは、領域境界上のコーナーポイントに、境界線上の1次元的な自由度を与え、境界上のコーナーポイントと内部点を交互に解く方法も提案されている(登坂他 1998)。しかしながら、流体モデルを組み合わせの場合、交互に解く事が困難となるため、あらかじめ境界上の適切な位置に固定点を配置した方が計算効率上有効な手法と考えられる。

そのため、本論文では、あらかじめデジタル化した閉曲線としての外部境界あるいは曲線としての内部の特定ライン沿いに、コーナーポイント間の3次元的な距離が等しくなるように固定点を配置する。この方法を用いる事によって、少なくとも外部境界および河道部等に関しては、前出の地形再現度も高く精度の高い離散化が可能となる。

#### 4.4.4 前処理による安定性向上と効率化

数値実験において述べたように、流体モデルは領域形状によっては内部未定点の初期位置が領域外に存在する場合においても適切な結果を出し得る。しかしながら、未定点の初期位置が最終的に期待されるコーナーポイント配置と大きく異なる場合には格子生成に要する計算の反復回数が増大し効率が悪化する事、分水界としての外部境界の外側における地形は格子形成と無関係であることから、現実には内部未定点が領域外に存在する場合には適切な格子が形成される保証は無い。従って、現実には反復解法の初期段階において、未定点の初期位置を領域内部に配置することが重要となる。領域の外部境界形状が比較的単純な形状の場合は、全未定点を領域内部に配置する事は比較的容易であるが、外部境界の形状が凹型の場合等では、単純な方法で未定点初期位置を領域内部に配置する事は困難である。

本研究では、境界形状に関わらず未定点の初期位置を必ず領域内に配置するために、前処理としてラプラス方程式の有限要素法による数値解析を用いる未定点配置方法を導入した。用いる式は、最も単純なラプラス方程式、

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (4.18)$$

である。

ここで、 $\phi$ は仮の変数である。また、前処理における境界条件は、図-4.17に示したようなディリクレ境界条件を用いた。

前処理の過程を実際の例をもとに図-4.18に示す。処理の第一段階としては、対象領域を含む領域に規則的に仮想点を配置した上で領域外に存在する点を排除する。次に、中野、藤井(1988)のアルゴリズムに従い、残されたランダム点データから領域内を3三角形分割し、有限要素法の三角形要素を生成する。その際に、境界が凹型形状の場合は領域外に要素を生成する可能性があるため、要素重心の平面座標が領域外となっている要素を排除する。最後に、ディリクレ境界条件のもとでラプラス方程式の解析を行った結果から、解析結果のコンターを作成し、コンター上にコンター沿いの



長さが等しくなるように未定点の初期位置を設定する。コンターは必ず領域内に引かれるため、以上の方法によって、未定点の初期設定位置は必ず領域内部となる。

## 4.5 データ処理全体の流れ

前節で示した各要素技術を用いて、ここでは、地形データの取得から解析までの流れをシステム化した。ここで示すデータ処理の流れを図-4.19に示す。ここでは、データ処理の各段階についての詳細を示す。

### 1. 地形データの抽出と解析領域、内部境界の設定

地形データに関しては、現在日本国内に関しては国土地理院刊行の1/25,000地形図に対応した50mメッシュのデジタル標高データ(DEM)が市販されており、解析対象領域が数kmオーダーであって、格子の一边が100mオーダーの大きさとなる場合には問題が無い。対象領域がそれ以下の大きさで、格子の一边が10mオーダーとなる場合には、50mメッシュでは相対的にデータが粗すぎるため、より小縮尺地形図からのデジタル化が必要となる。また、解析領域は分水線を閉曲線として、内部境界は主要な河道およびトンネル等モデルに確実に反映させる必要が有る特定ラインを曲線としてデジタル化する。

同時に、格子生成を行う際の4隅の点、すなわち、格子数が $NI, NJ$ 個とした場合には、 $(1, 1), (NI + 1, 1), (NI + 1, NJ + 1), (1, NJ + 1)$ の4点のデジタル化を行う。これらの端点は、領域境界上の点列に自動的に的に挿入される。

解析領域および内部特定ラインを抽出した一例を図-4.20に示す。

### 2. 解析領域のサブ領域への分割

次に、解析領域の境界線および河川等の内部の特定ラインを用い、解析領域を図-4.20に示すように小領域に分割する。これは、データ処理プログラムにおいて自動的に実行される。この際に、それぞれの小領域内におけるI,J方向の分割数をあらかじめ設定した上で入力する。また、内部特定ラインは、地質境界、分水線のような幅を持たない境界線かあるいは河川、トンネルのような幅を持つ格子の場合があり、幅を持つ格子の場合は、境界線に直交する幅の格子を最終段階で生成する。

### 3. 内部格子の生成

境界の設定、小領域への分割が終了した時点で、各小領域ごとに、前述の境界上コーナーポイントの配置、有限要素法による前処理、および質点-バネ-流体モデルによる格子生成を実行する。

### 4. 生成格子のチェック

本ステップでは最終的に生成された格子が、少なくとも格子の全てのオーバーラップ無く、かつ $2\pi$ を超える角度もなく生成されているか否かを確認する。格子のチェックは、4辺形格子を2分割して形成される3角形4種類の水平面への投影面積を、外積を用いて計算した結果の正負で行う。チェックの結果、不適切格子が生成されてい

る場合には、不適切格子周辺の格子における格子内の流体の体積と圧力に関する係数  $C$  を増した上で格子生成を再度実行する。

#### 5. 格子の3次元化

以上の格子生成は、最終的な解析効率に最も影響を及ぼすと考えられる地表面を対象とした準3次元的な格子生成である。しかしながら、実際の解析は3次元格子を用いて実施する。従って、地表面に対する格子を地下の地質構造に従って3次元化する必要がある。比較的単純な成層構造の場合には、各地層境界の標高を、地表面において生成した格子のコーナーポイントにおいて計算し、鉛直方向の解析格子数で分割する。また、地層の尖滅に対しては、鉛直方向の分割の際に、尖滅した先の部分には一定厚さのダミー格子を発生させ、材料は実際のその場所における地層とする。断層等の複雑な構造の場合には、最終的な3次元格子構造を生成した上で、物性分布によって地質構造を再現する。

### 4.6 最終格子形状の診断アルゴリズム

前節の流れで、解析可能な十分条件を満たした格子が生成可能である。しかしながら、本研究の最終目的は、本章の冒頭で述べたように解析の精度、効率という点で有効な格子を生成する事である。質点-バネ-流体モデルの開発はそのための手段であるが、ここでは、最終的に生成された格子形状の診断を行うアルゴリズムの開発もあわせて行った。解析の精度、効率には、始めに考察したように生成された格子の地形再現度と格子の変形度が大きく影響する。格子の地形再現度は、本章前半で導入した地形再現指標を、以下の式で2次元に拡張して用いる。

$$I_T = \frac{1}{n_x \cdot n_y} \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} \left( \frac{z_{i,j} + z_{i+1,j} + z_{i+1,j+1} + z_{i,j+1}}{4} - z_{DEM}(i,j) \right)^2 \quad (4.19)$$

また、格子の変形に関しては多くの方法をとることが可能と考えられるが、本論文では、個々の格子形状の診断に一般座標系における座標変換マトリックス (Jacobian) を用いた方法を開発した。

一般座標系においては、図-4.21で示される物理空間  $(x,y)$  から計算空間  $(\xi,\eta)$  への変換係数マトリックス ( $\mathbf{J}$ ) は、以下のように表される。

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_2 - x_1 + x_3 - x_4}{2} & \frac{y_2 - y_1 + y_3 - y_4}{2} \\ \frac{x_4 - x_1 + x_3 - x_2}{2} & \frac{y_4 - y_1 + y_3 - y_2}{2} \end{pmatrix} \quad (4.20)$$

一般座標系における座標変換は、格子の回転と変形の両者の影響を合わせたものである。ただし、本研究で対象とする格子形状の適切性は、格子の変形のみを対象とするもので、格子の回転に関しては問題とならない。そのため、ここでは変換係数マトリックスを以下のように分解する。

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_r \cdot \mathbf{J}_D \quad (4.21)$$

ここで、 $\mathbf{J}_r$  は変換係数マトリックスの格子回転に関する係数マトリックス、 $\mathbf{J}_D$  は格子変形に関する係数マトリックスである。次のステップとして、変換係数マトリックスから回転に関するマトリックスを取り除く。

図-4.22 に示す格子中心を通る基線を設定すると、基線が X 軸と成す角度  $\theta$  から、回転に関する変換マトリックスは、以下のように表される。

$$\mathbf{J}_r = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (4.22)$$

従って、格子変形に関する係数マトリックスは、以下のように計算される。

$$\mathbf{J}_D = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{x_2 - x_1 + x_3 - x_4}{2} & \frac{y_2 - y_1 + y_3 - y_4}{2} \\ \frac{x_4 - x_1 + x_3 - x_2}{2} & \frac{y_4 - y_1 + y_3 - y_2}{2} \end{pmatrix} \quad (4.23)$$

格子変形に関する変換マトリックスのうち、主対角要素は単純な拡大・縮小を表す項であり、例えば単純な長方形格子の場合も 1 とはならない項である。従って、座標の変形を評価するためには、格子変形に関する係数マトリックスの非対角成分で評価する必要がある。ここでは、格子変形評価指標  $I_D$  として、以下のように対角成分に対する非対角成分の大きさをを用いる。

$$I_D = \sum \frac{b^2 + c^2}{a^2 + d^2} \quad (4.24)$$

この指標を用いる事で、例えば格子が長方形あるいは正方形の場合には  $I_D = 0$  となり、また変形の度合いが大きくなると  $I_D$  も大きくなるため格子変形の指標としては適切である。一例として、前出の図-4.15 のモデルにおいて、格子圧縮率 1.0 の場合における反復による格子変形評価基準の推移を図-4.23 に示す。 $I_D$  の値は、初期の反復段階で、領域外のコーナーポイントが領域内に移動する際に急激に低下し、最終的に収束するまでの間に漸減することが示される。これから、本指標は格子の形状を適切に評価する指標であると考えられる。

## 4.7 実際の流域に対する適用

ここでは、以上の方法を実際の河川流域において適用した例を示す。対象流域は図-4.20 で示した流域であり、対象領域は約 50km×30km の領域である。国土地理院の DEM より抽出した地形を図-4.24 に示す。ここではこの流域に対し平面格子数で 70×20 の格子を作成する。格子生成における小領域は前出の図-4.20 で示した 6 領域である。

図-4.25 にそれぞれの領域において前処理を行った結果としての格子生成の初期モデルを示す。境界形状の複雑さから、前処理を行った後にも格子の辺が成す角度が  $2\pi$  を超える不適切格子が生じている。

以上の前処理を行った上で、質点－バネ－流体モデルを用いて格子生成を行った。なお、格子内の流体の体積と圧力の関係を表す係数  $C$  とコーナーポイント間のバネ定数  $k$  は同一として解析を行った。

各領域における格子生成結果を図－4.26 に示す。ここで設定した  $50\text{km} \times 30\text{km}$  の領域に対し 1400 の格子生成を行うのに要した時間は、約 4 時間であった。通常の手動格子分割を行う場合には、数日を要する。従って、格子生成の効率は大きく向上したといえる。

また、一例として領域 2 における格子形状評価指標の推移を図－4.27 に示す。前処理による格子配置が比較的最終形状に近いものであるため、格子形状指標は格子生成の反復過程においてわずかに低下するに留まっているが、格子形状が徐々に直交に近くなっていることが示された。

## 4.8 本研究における自動格子生成手法に関するまとめ

従来の自動格子生成手法では導入が困難であった地形の影響を導入した格子生成を可能にし、かつ不適切な格子を生じさせない格子生成手法として、質点－バネ－流体モデルを開発し、数値実験および実際の流域への適用を行った。本手法は、水理解析において地形の起伏を空間的に離散化するために生じる解析誤差を最小とすることが期待される。また、手動格子分割で 1 週間以上を要した作業が 1 日以下で完了するという状況であり、解析の効率化に対して多大な寄与をするものである。

また、本研究においては、問題設定から格子生成完了に至るまでの一連の作業をシステム化し、方法論を確立した。格子生成の最終段階として、生成された格子に対する形状診断アルゴリズムの開発も実施し、その結果を用いて格子生成における解析パラメータの再検討、格子の再生成および比較が容易となり、解析結果の精度向上にも貢献するものである。

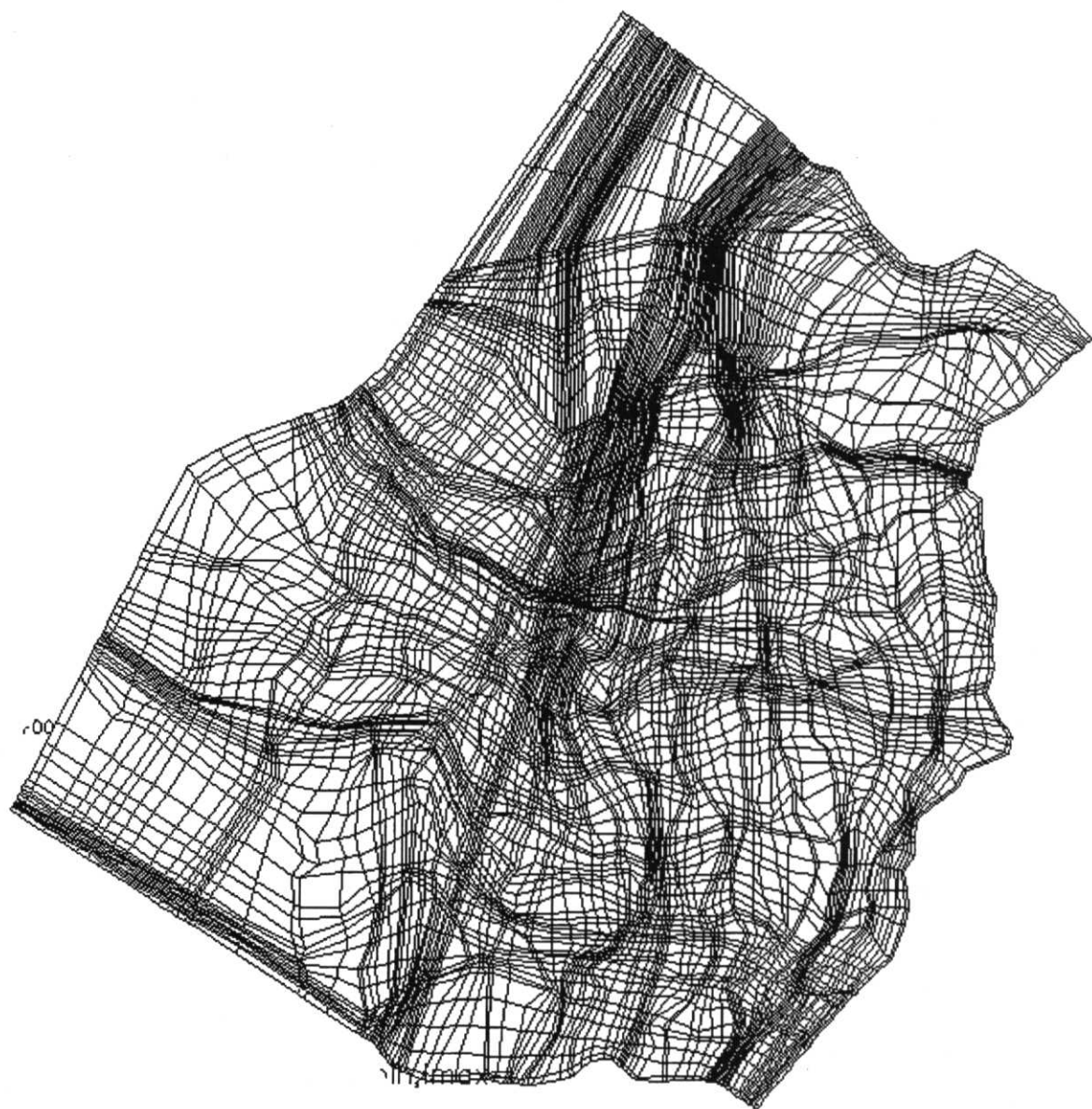


図-4.1 手動による広域の格子分割例  
Fig.4.1 An example of grid system with manual construction

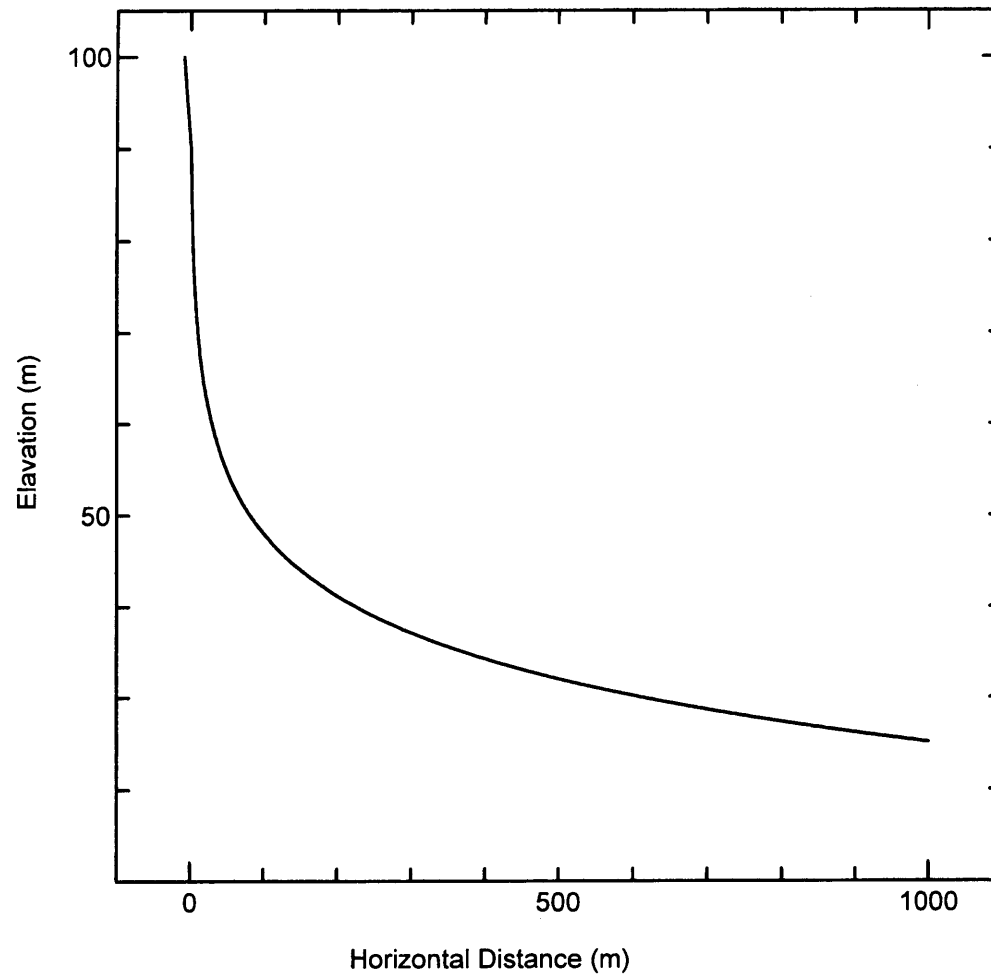
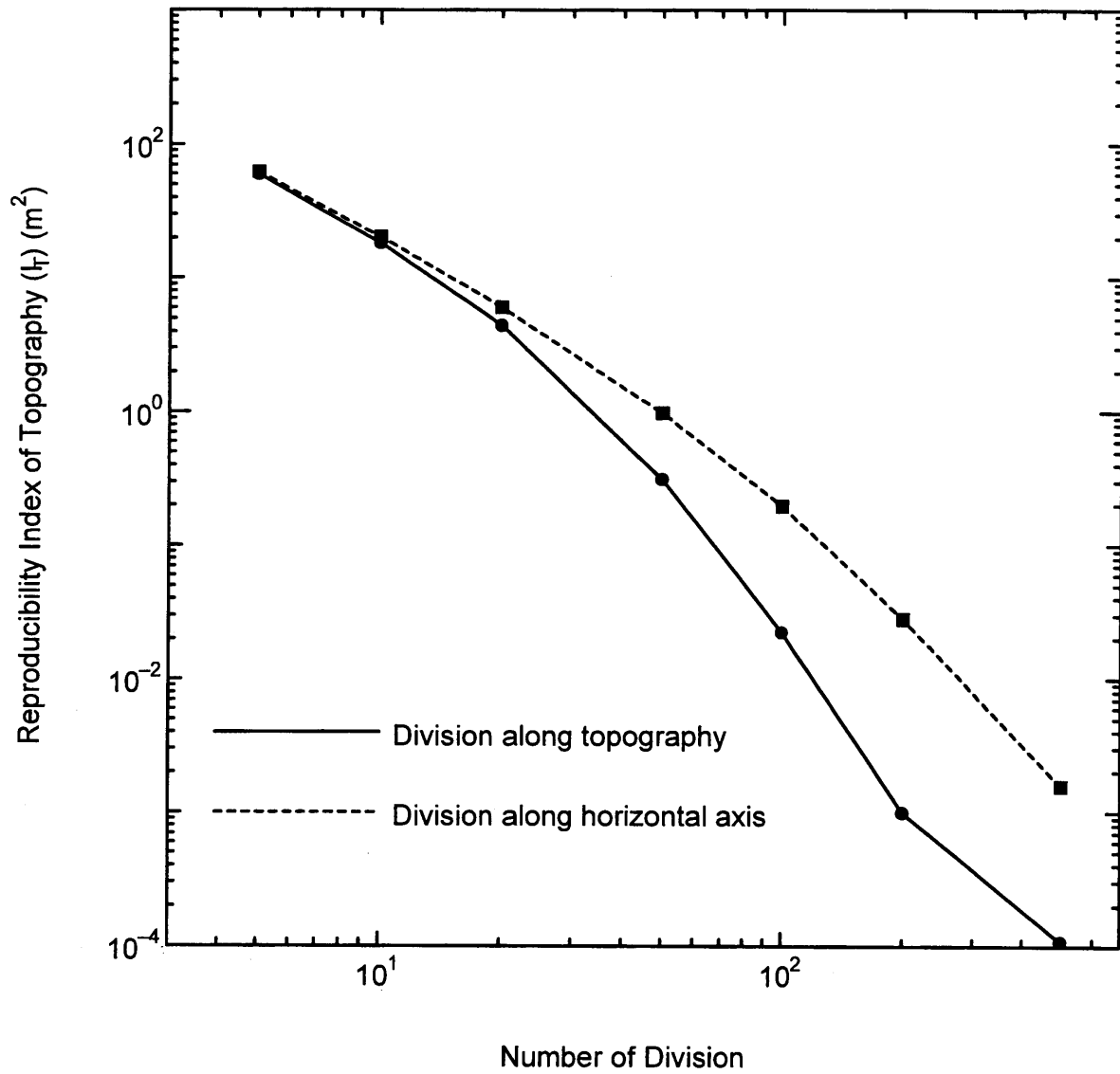


図-4.2 数値実験に用いた水路断面図

Fig.4.2 Cross section of flow path for numerical experiment



図一4.3 格子分割数による地形再現指標の推移

Fig.4.3 The relationship between number of division and index for topographical modeling

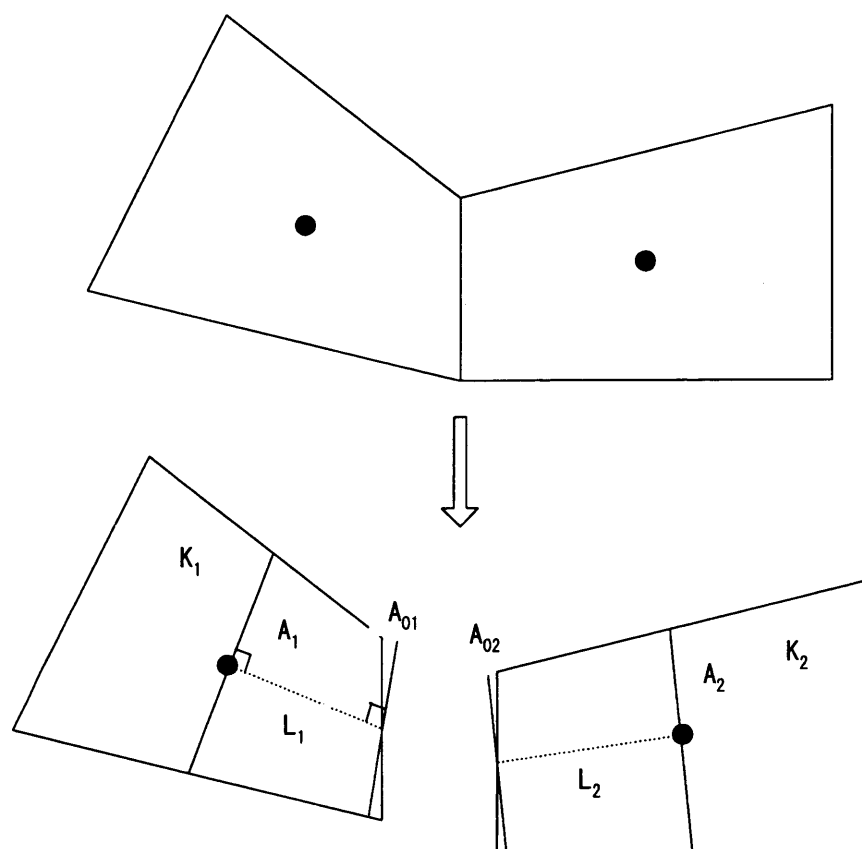


図-4.4 変形格子におけるTransmissibilityの算出方法模式図

Fig.4.4 A schematic view of transmissibility calculation in hexahedron grid system



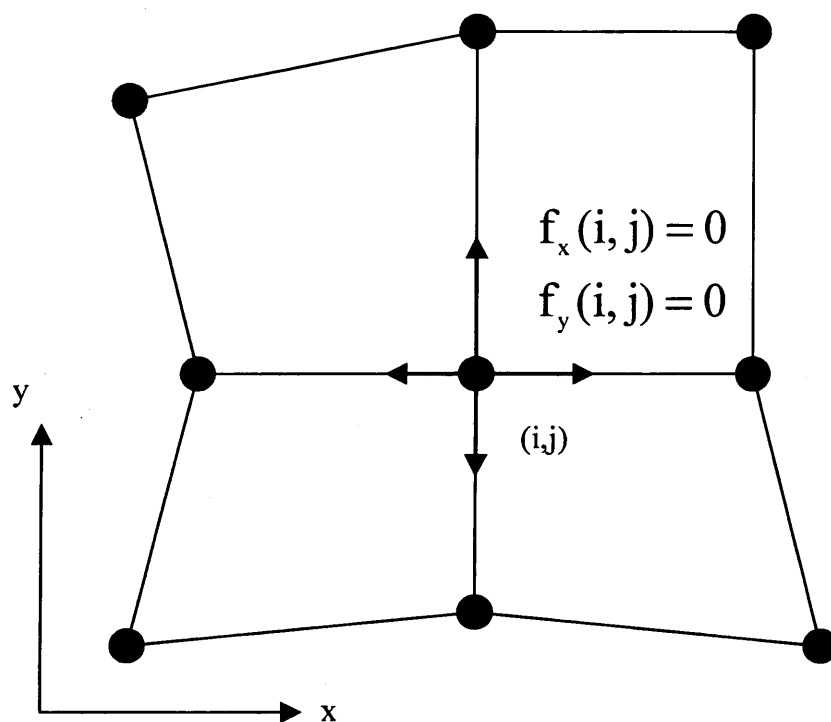


図-4.5 質点-バネネットワークモデルの模式図  
Fig.4.5 A schematic view of spring-mass network model

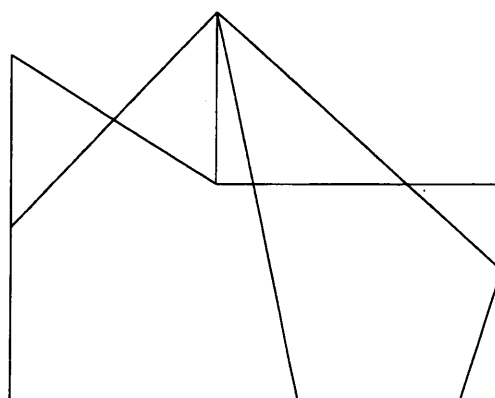


図-4.6 質点-バネネットワークモデルにおける格子点のオーバーラップ  
Fig.4.6 A schematic view of overlap problem in spring-mass network model

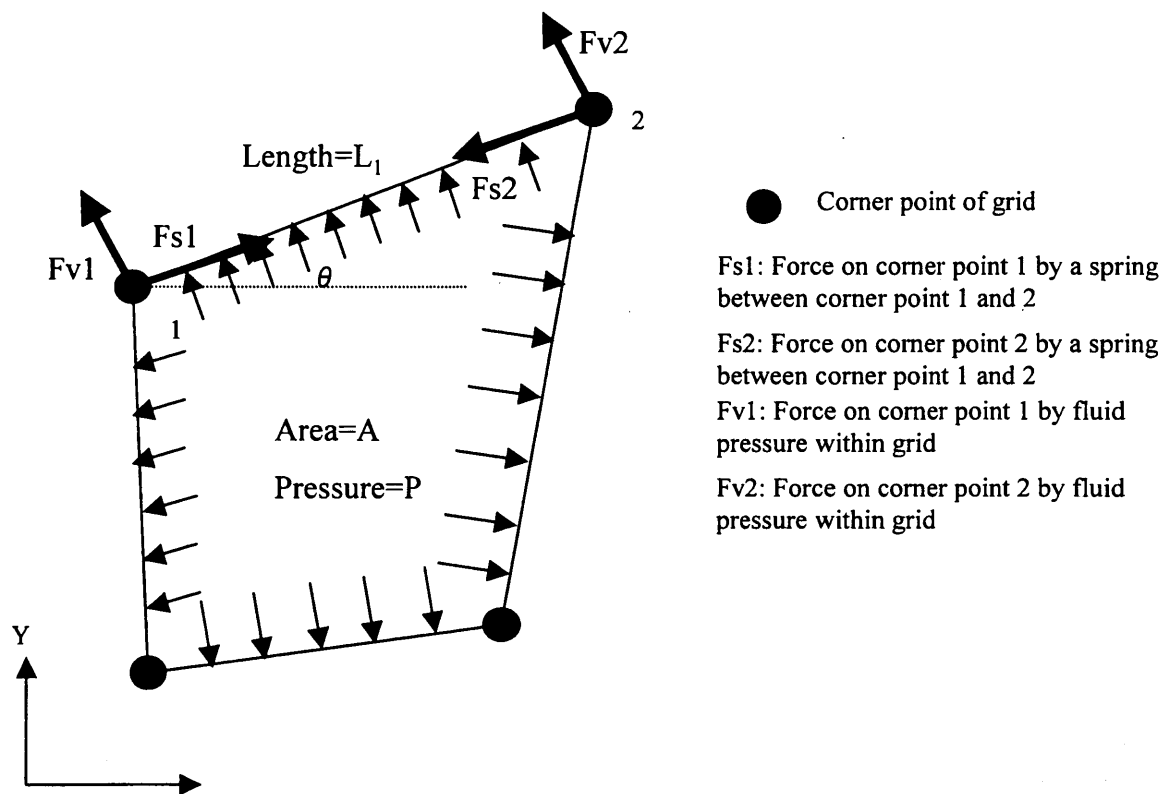


図-4.7 1格子の1辺2コーナーポイントに対する力の作用状況モデルの模式図

Fig.4.7 Schematic view of force distribution model to 2 corner points of 1 side in single grid

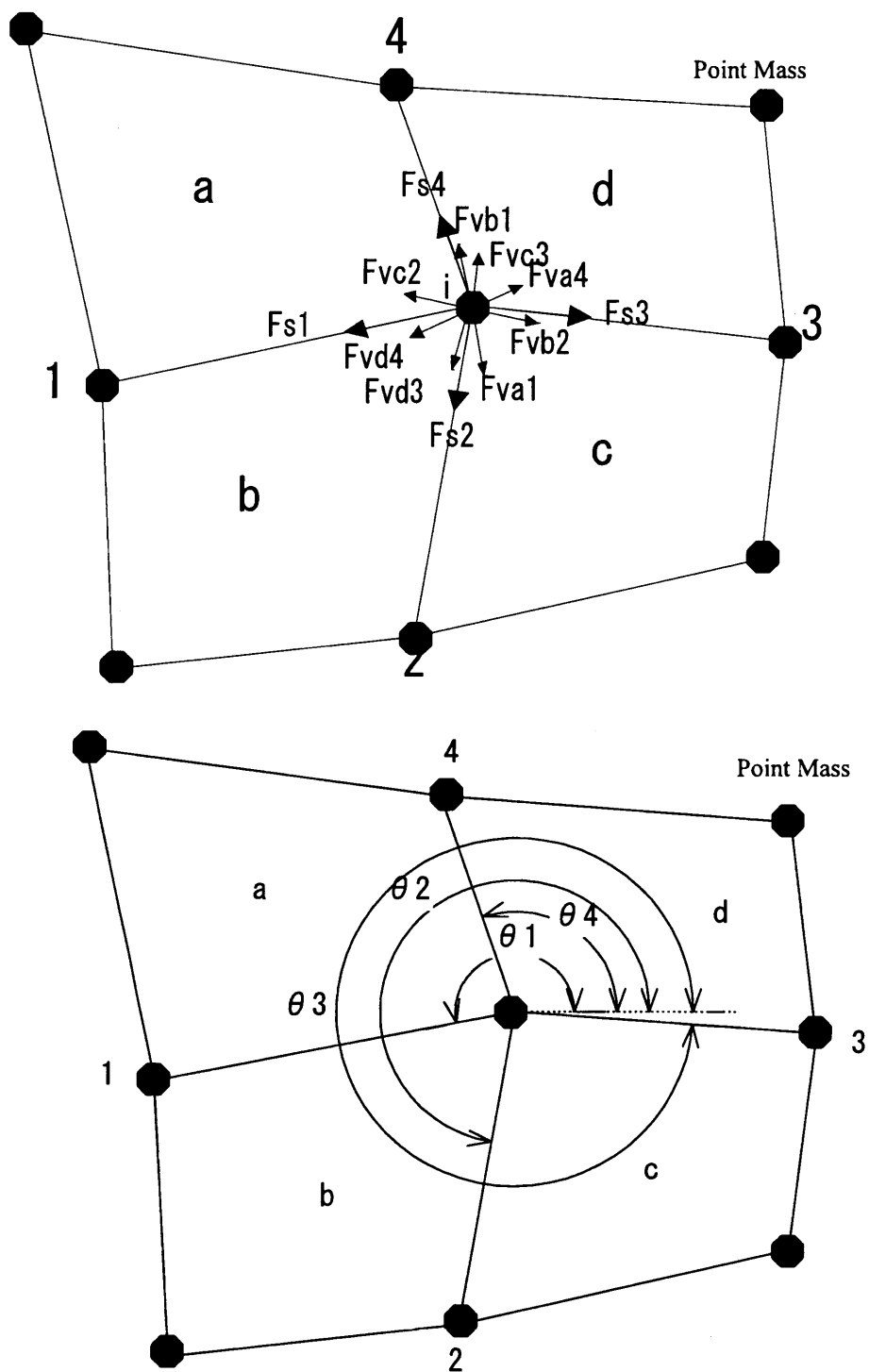


図-4.8 質点-バネ-流体モデルにおけるコーナーポイントにおける力の分布図  
 Fig.4.8 Distribution of force at a corner point in spring-fluid combination model

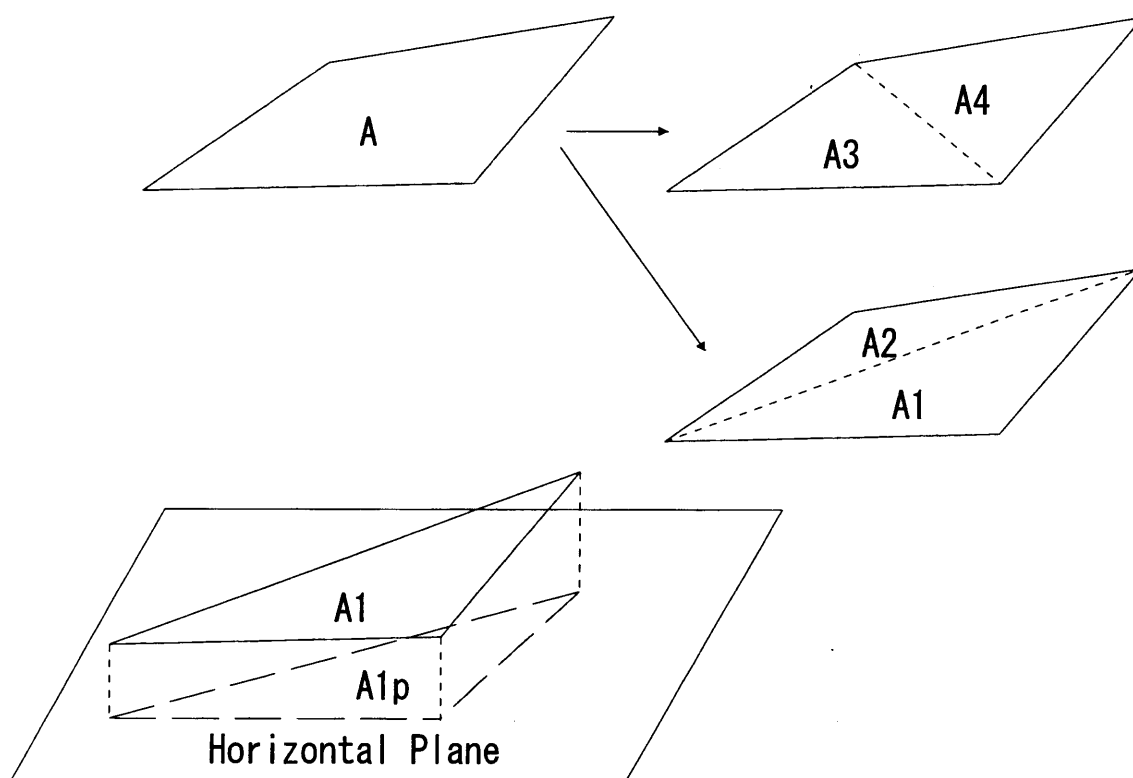


図-4.9 地形上の格子における格子面積算出方法模式図

Fig.4.9 A schematic view of area calculation in grid on the topographical surface

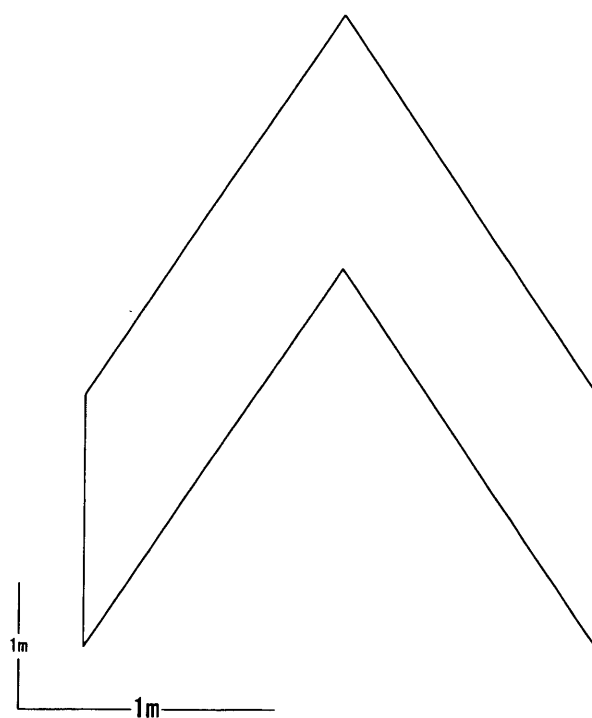


図-4.10 格子生成数値実験に用いた領域境界  
Fig.4.10 Boundary for numerical experiment of grid generation with mass-spring-fluid model

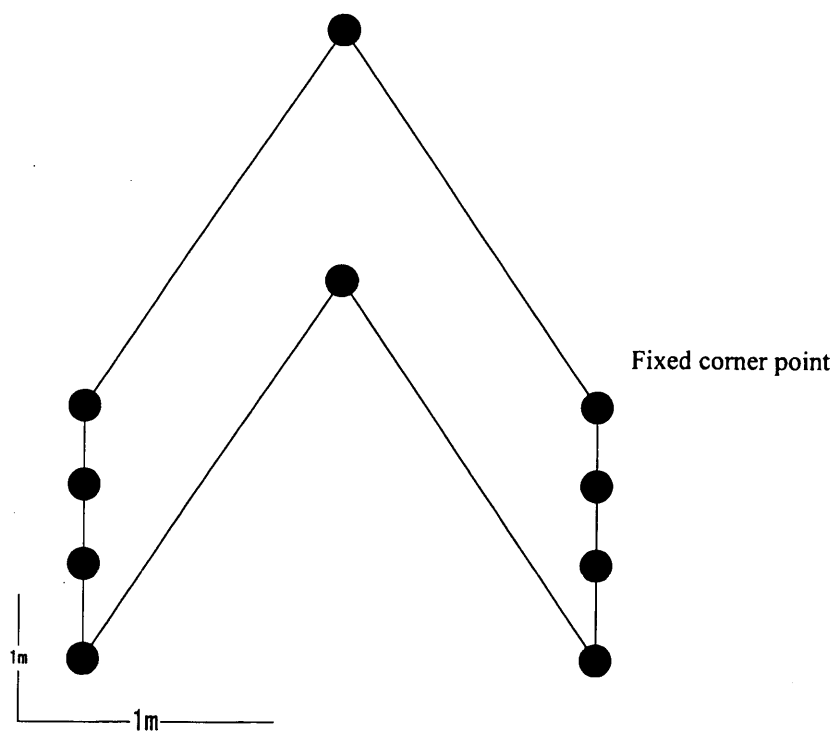


図-4.11 領域境界上の固定点配置  
Fig.4.11 Location of fixed corner point on the boundary

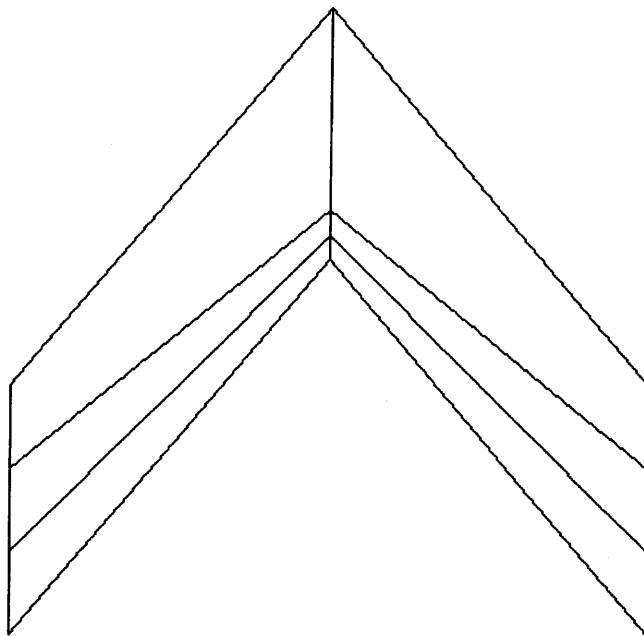


図-4.12 格子生成数値実験における初期格子形状モデル  
Fig.4.12 Initial corner point location model in numerical experiment of grid generation

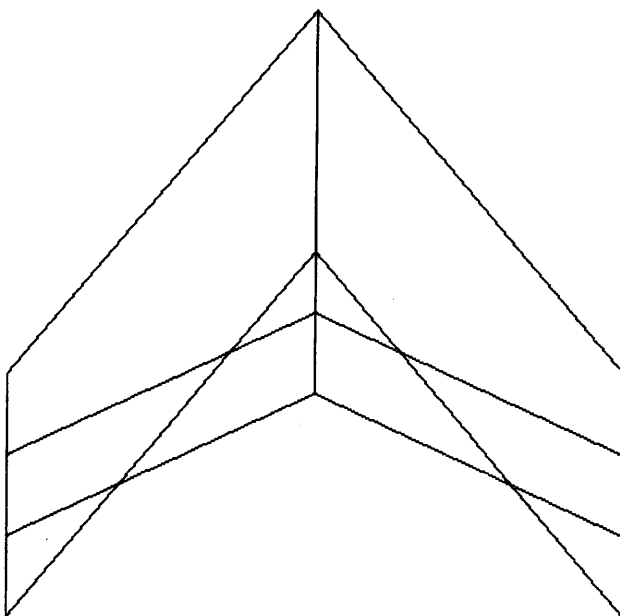


図-4.13 質点-バネネットワークモデルによる最終格子生成結果  
Fig.4.13 The result of grid generation with spring mass network model

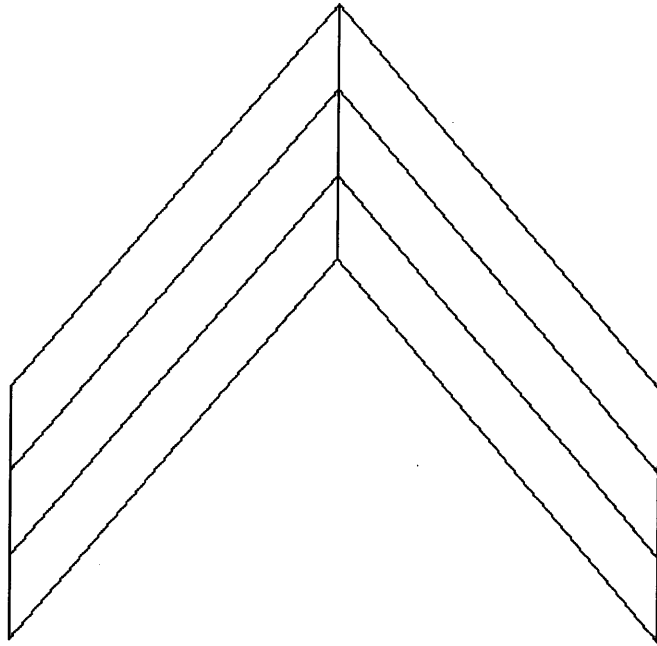


図-4.14 質点-バネ-流体モデルによる最終格子生成結果  
Fig.4.14 The result of grid generation with mass-spring-fluid model

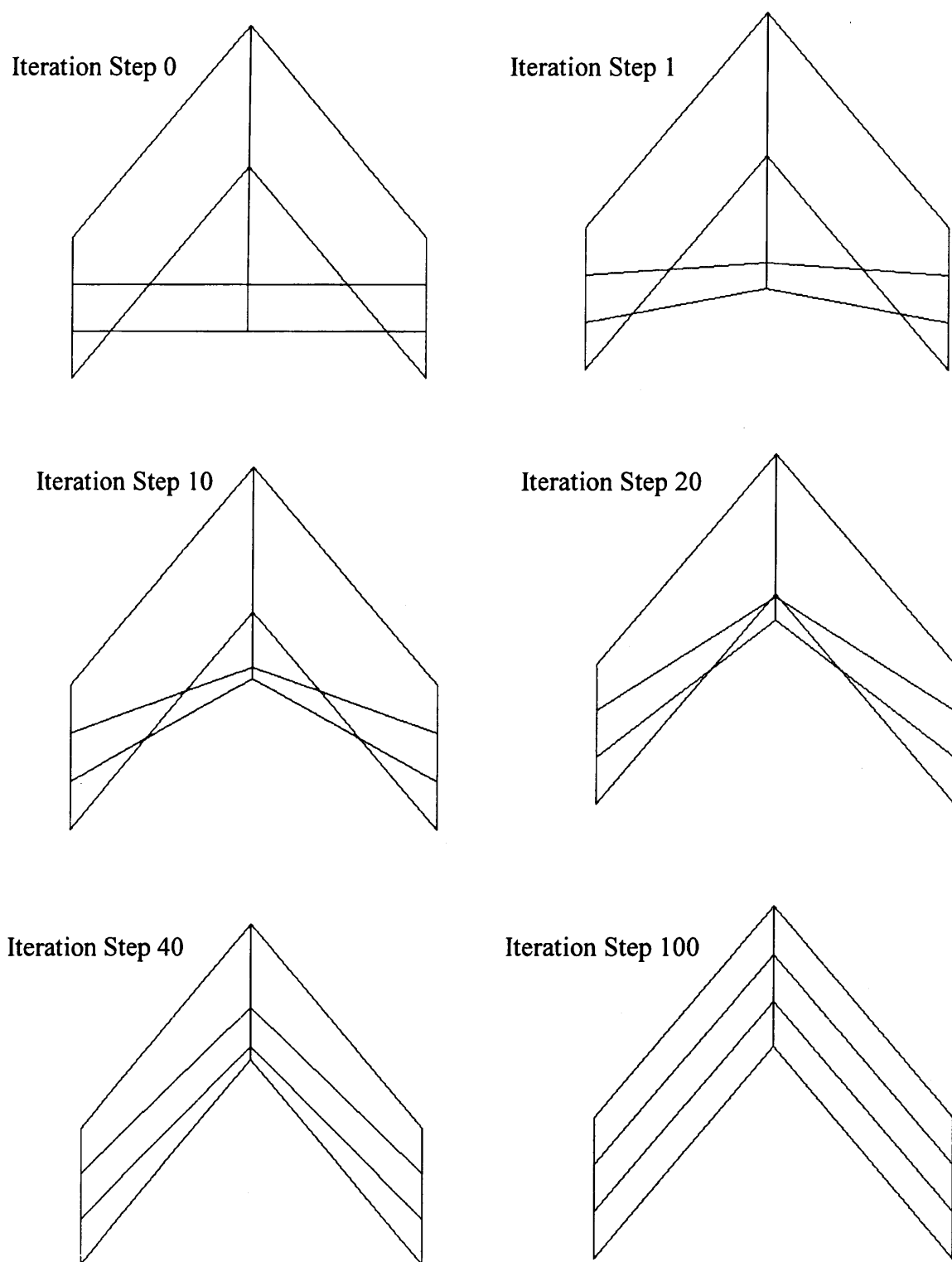


図-4.15 未定点の初期位置が領域外に存在する場合の質点-バネ-流体モデルによる格子生成状況  
 Fig.4.15 Grid generation status with mass-spring-fluid model with exterior initial free corner point



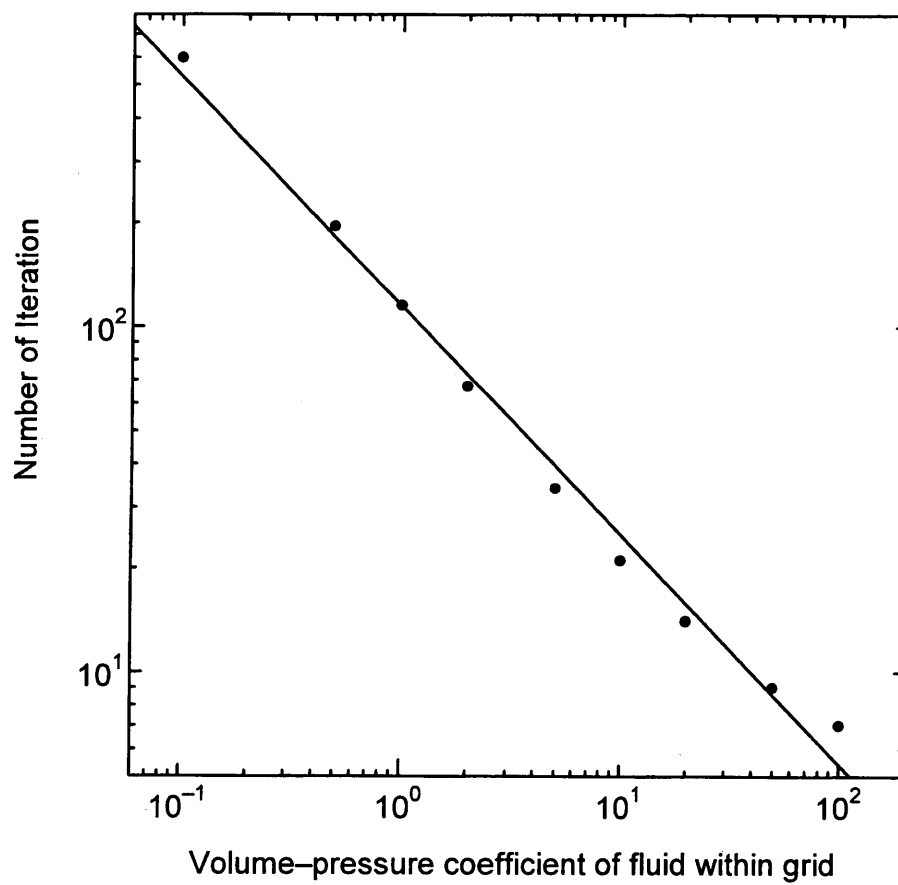


図-4.16 格子内の流体の体積と圧力に関する係数と反復回数の関係

Fig.4.16 The relationship between volume-pressure coefficient of fluid within grid and the number of iteration for grid generation

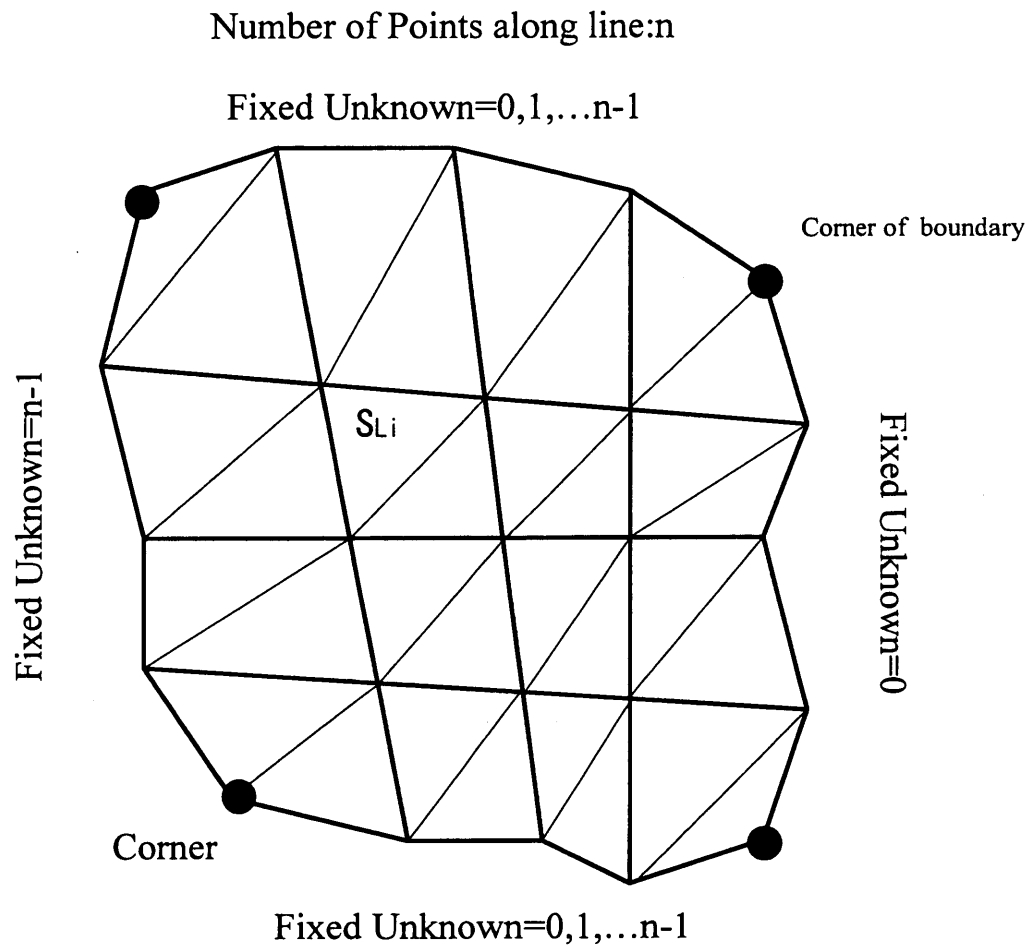


図-4.17 ラプラス方程式を用いた前処理における境界条件の設定

Fig.4.17 Boundary condition setting with Laplace equation in the preconditioning of grid generation

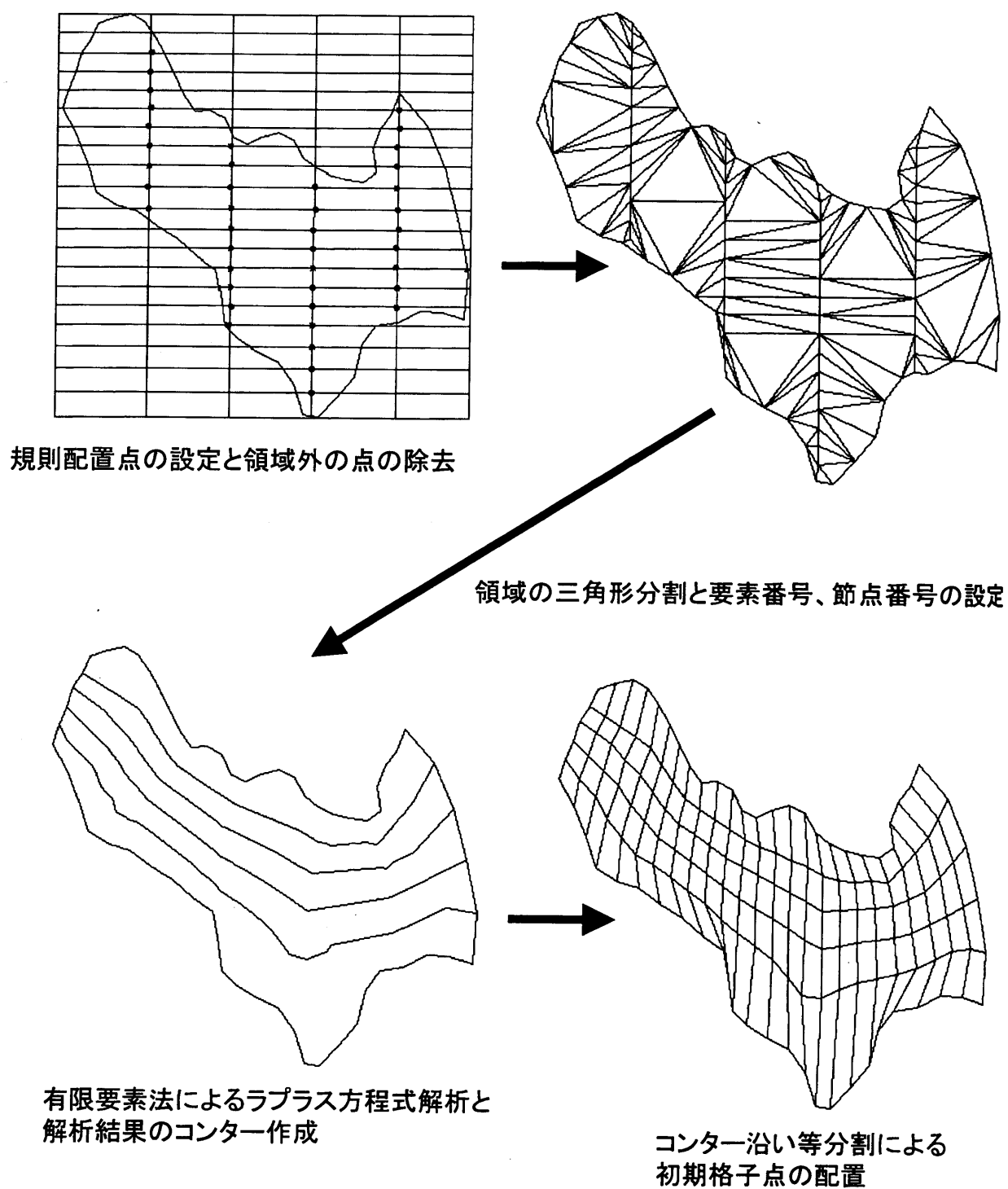
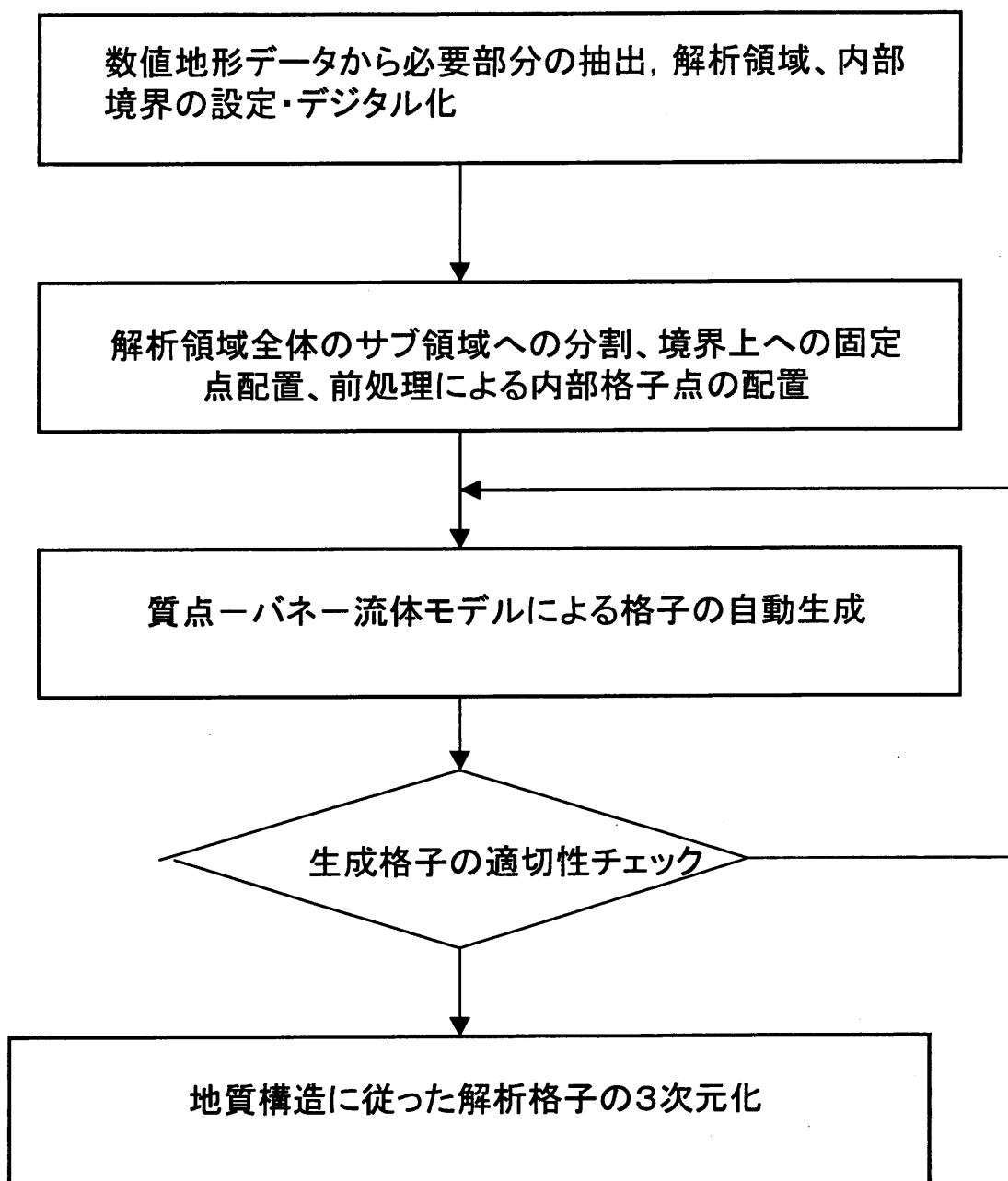


図-4.18 ラプラス方程式を用いた前処理における処理の流れの一例  
 Fig.4.18 An example of data processing in preconditioning with Laplace equation and Finite Element Method



図－4.19 格子生成プロセス全体におけるデータ処理の流れ  
Fig.4.19 A flow chart of data processing in data acquisition and grid generation

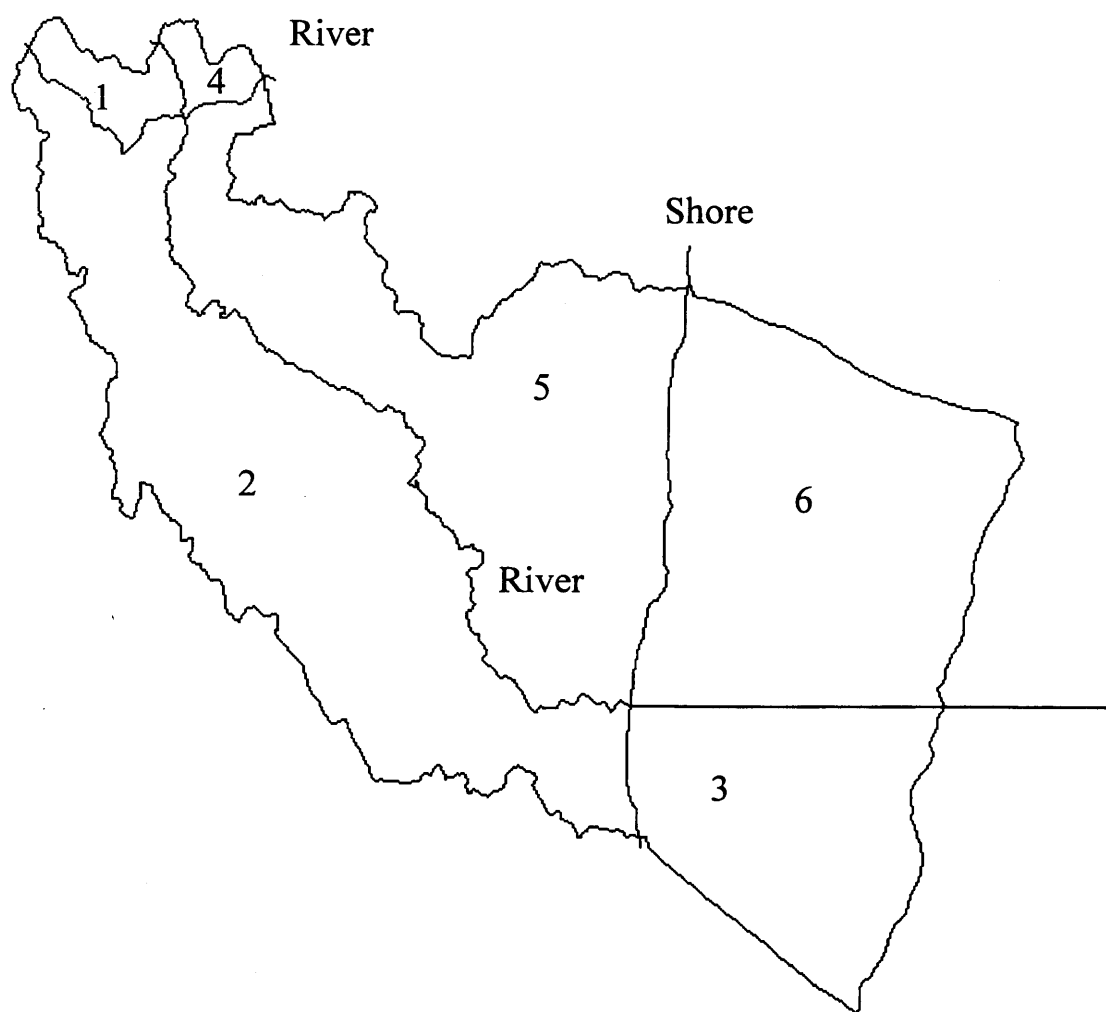
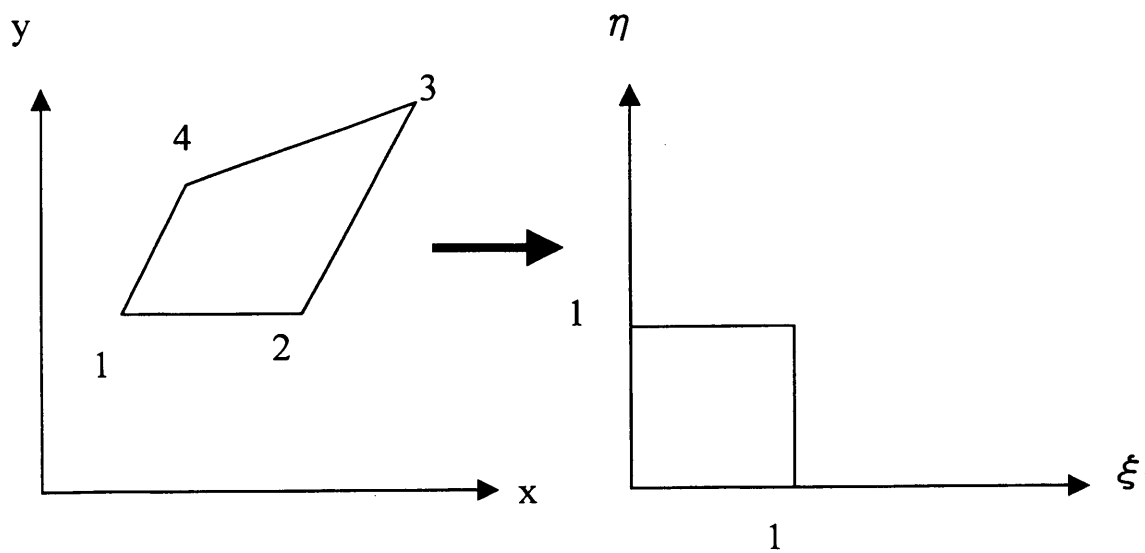
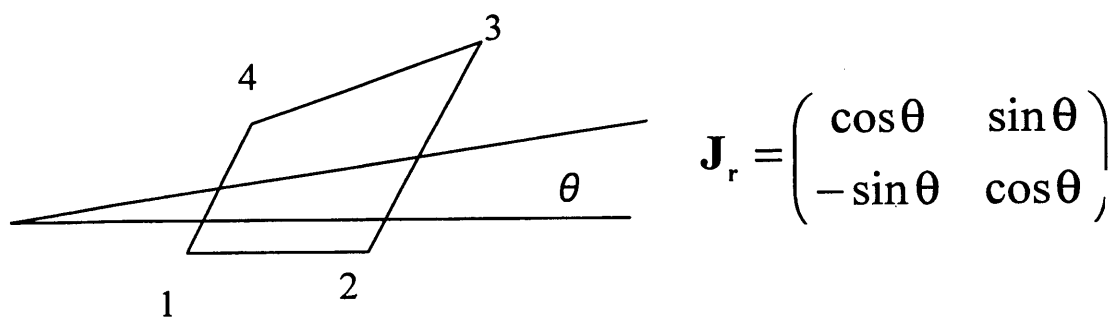


図-4.20 解析領域の外部および内部境界抽出の一例  
Fig.4.20 An example of data acquisition of outer and inner boundary in calculated region



図－4.21 一般座標系における物理空間から計算空間への座標変換模式図  
 Fig.4.21 A schematic view of transformation from physical coordinate system to numerical system in generalized grid system



図－4.22 座標変換係数マトリックスにおける回転成分と変形成分の評価手法  
 Fig.4.22 A schematic view estimation of rotation and deformation factor in transformation matrix

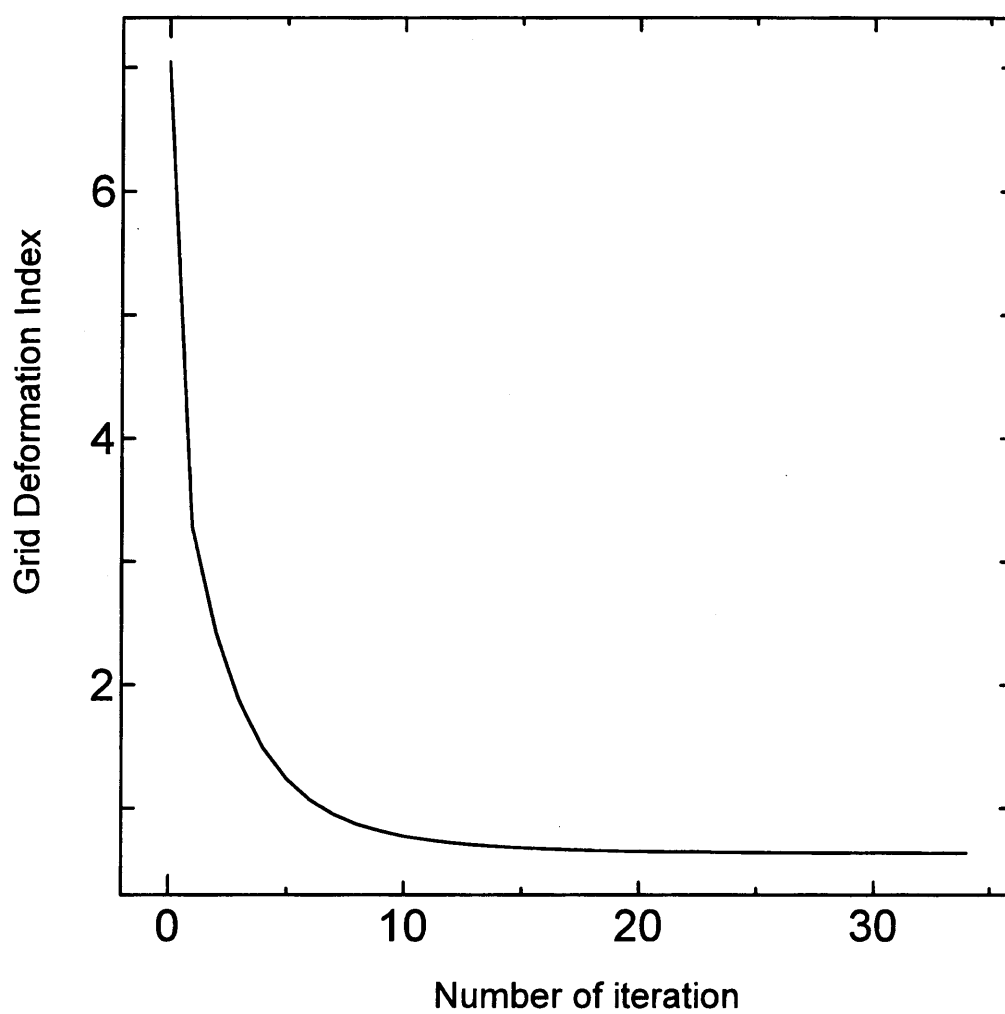
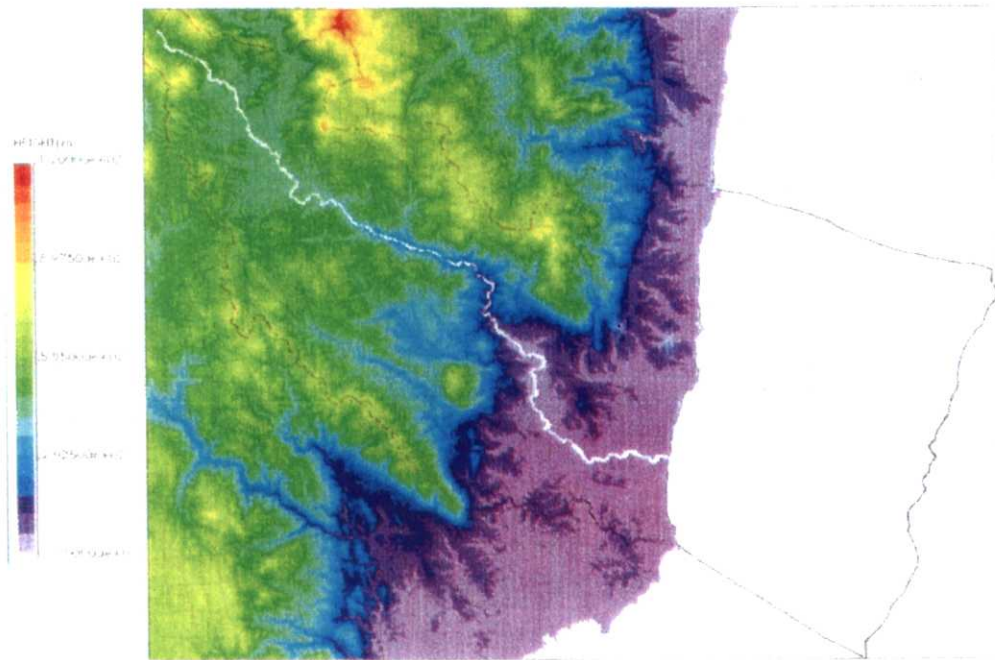


図-4.23 数値実験モデルにおける反復過程での格子変形評価指標の推移

Fig.4.23 A change of deformation index in the iteration of grid generation in numerical experiment



図一4.24 自動格子分割を用いた地域の地形図

Fig.4.24 Topography of studied region for automatic grid generation



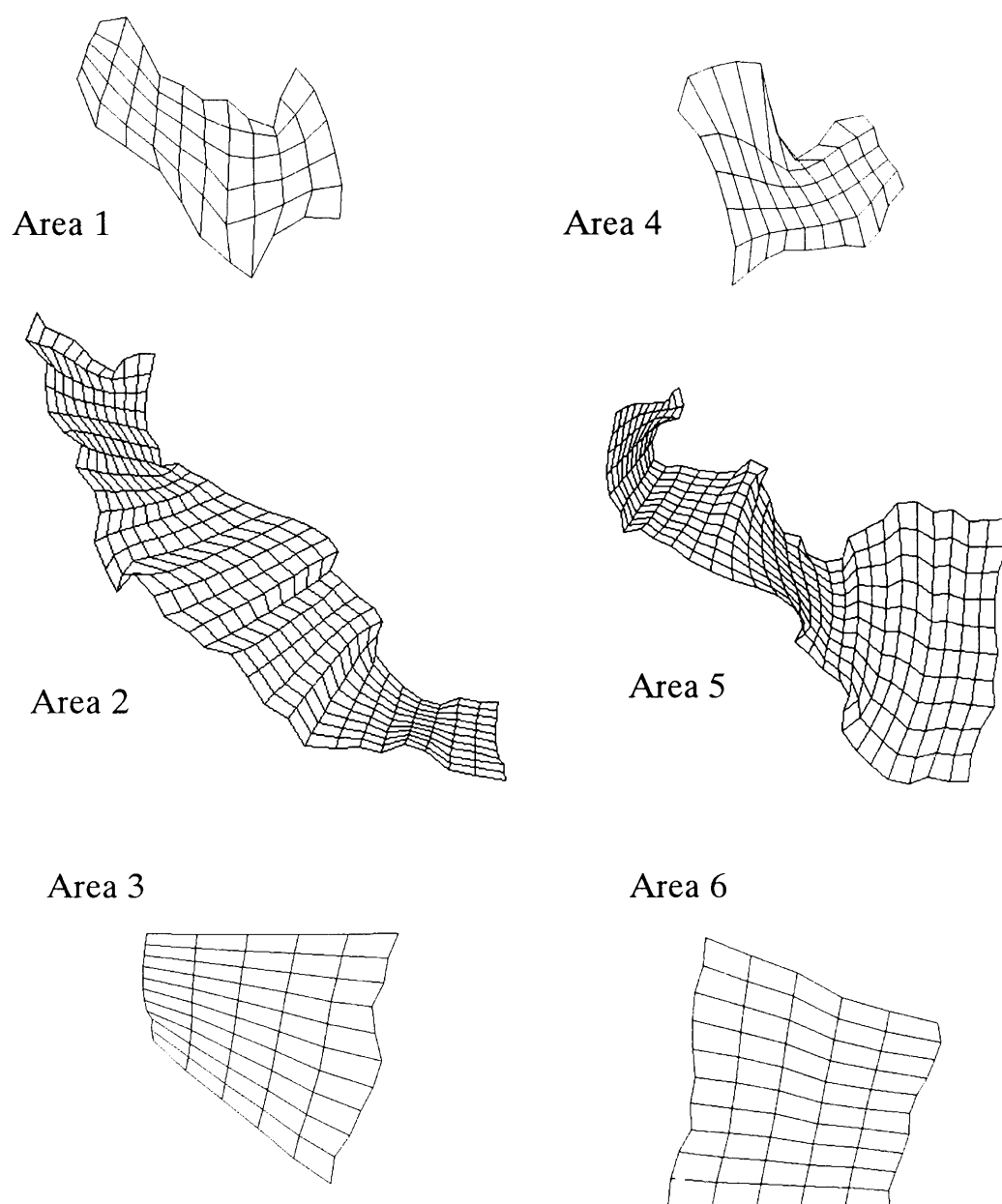


図-4.25 実流域における格子分割の前処理結果

Fig.4.25 Preprocessed grid system in actual watershed, all corner points of grids is placed inside the boundary

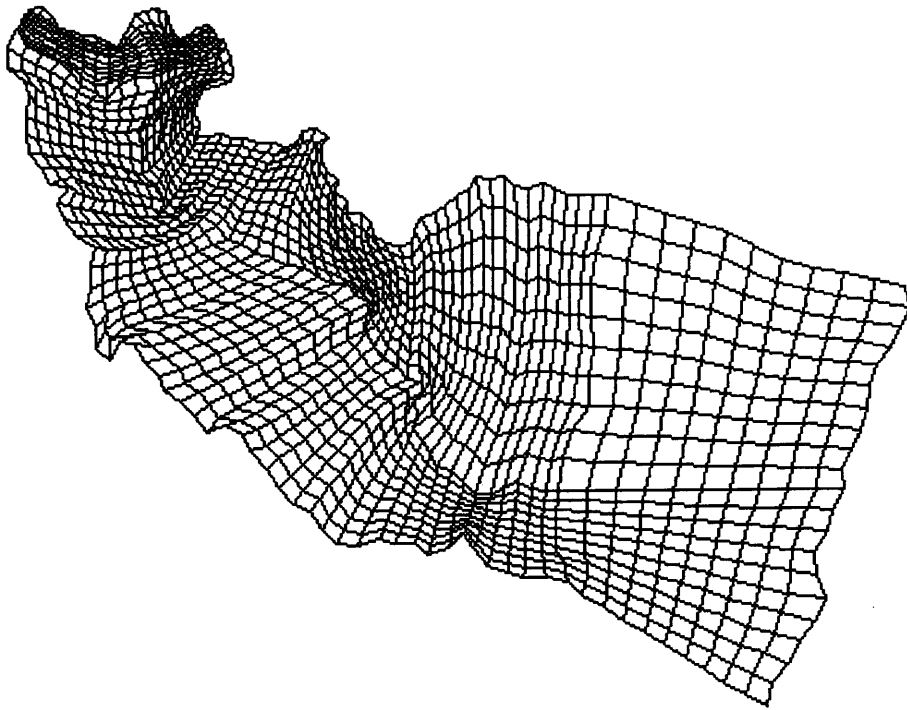


図-4.26 実流域における格子分割結果

Fig.4.26 Automatically generated grid system for actual watershed

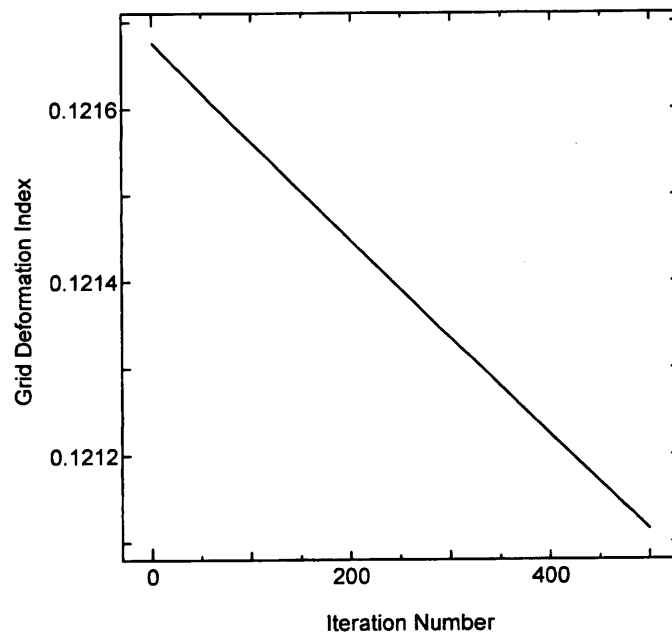


図-4.27 領域2における格子変形評価指標の推移

Fig.4.27 Transient change of grid deformation index of No.2 sub-region in iterative grid generation

## 第5章 本研究のまとめと今後の課題

### 5.1 本研究で得られた成果

本論文では、多成分流動解析手法を水文・水理学的な様々な現象に適用し、広域の水文現象から狭い範囲における地下水問題に対して総合的に解析を行う解析手法の開発を目的として、多成分流動解析手法の適用性検討から、新しいモデル化までの研究を行った。特に、本論文では、地表水-地下水流動の連成解析手法および揮発・溶解・吸着を含む地下水汚染解析手法のモデル化に対する多成分流動解析手法の適用を行った。また、解析の効率化、高精度化を目的として領域自動格子分割手法の開発を行った。以下に本研究の成果を各章の内容ごとに示す。

#### 1. 非定常溶解・揮発・吸着過程を含んだ土壌地下水汚染解析手法に関する研究

本論文では、石油、有機溶剤から硝酸性窒素に至るまで、様々な物質によって引き起こされる狭域から広域までの地下水汚染問題に対処するために、溶解、揮発、吸着の非定常過程を導入した多成分流動解析手法の適用を実施した。その結果、以下の成果を得た。

- 溶解、揮発、吸着の非定常モデルの構築

本論文では、第一に、短い時間スケールあるいは大きな空間スケールにおいて問題となる汚染物質の地下水への溶解、不飽和帯における揮発、土粒子への吸着現象を、相間の非定常拡散現象として定式化した基礎方程式を構築した。また、それぞれの非定常モデルを組み込んだ3次元多相流動シミュレータを開発した。

- 揮発現象の室内実験と非定常モデルの妥当性検討

非定常揮発現象に関して室内実験を行い、非定常揮発モデルを組み込んだ数値解析を用いた検討を行った。その結果、揮発現象に関しては非定常拡散過程と毛細管上昇に起因する液面移動現象を定量的に評価することで、実験値を妥当なパラメータによって再現する事が可能であることが示された。従って、非定常拡散モデルによる揮発現象のモデル化の妥当性が示された。一方、通常用いられている平衡モデルでは、透水性が低い Berea 砂岩では非定常モデルと明瞭な差が認められなかったが、透水性が高い標準砂においては妥当な範囲のパラメータでは実験値の評かが困難であった。

- 吸着現象の室内実験と非定常モデルの妥当性検討

溶液から土粒子への吸着仮定に関する室内実験を実施し、非定常吸着モデルの妥当性に関する検討を実施した。その結果、吸着現象に関しては初期段階における瞬時平衡とその後の緩慢な拡散過程の重ね合わせとして実験結果が評価可能であることが示された。これは、ミクロ的な視点による段階

的な拡散型吸着モデルと整合する結果といえる。その際の拡散係数は、2種類の土粒子材料でほぼ同じ値が得られ、全体的な吸着速度が比表面積によって支配されている事が示された。一方、初期段階での瞬時吸着量は、材料によって大きく異なり、初期の溶液濃度とほぼべき乗の関係があることが示された。

- 実際の土壌地下水汚染サイトへの適用

本論文で開発を行った溶解、揮発を含む土壌地下水汚染解析手法を、テトラクロロエチレンによる土壌地下水汚染サイトに適用した。ここでは、汚染物質の拡散過程および実際に実施している不飽和帯、飽和帯からの汚染空気、汚染地下水の抽出という浄化対策の解析を実施した。

その結果、汚染物質の拡散範囲、および浄化対策におけるモニタリング結果をほぼ再現する解析結果を得る事が可能であり、実際の汚染サイトにおける対策工の設計等への本解析手法の有効性が示された。また、実測および数値解析に共通して得られた結論として、飽和帯における揚水は汚染物質プールからの溶解の影響を受け、長期化する傾向にあることが示された。

## 2. 地表水・地下水結合解析に関する研究

本論文では、広域の水文流出過程を対象とした地表水・地下水結合解析に関する研究を実施した。その結果として以下の成果を得た。

- Diffusion Wave 近似の導入と妥当性検討

ここでは、地表流の運動方程式における Diffusion Wave 近似モデルに対して多相流動解析の定式化手法を適用し、多相型解析手法によるモデルの適用性確認を室内実験および数値実験の結果より考察した。

その結果、Diffusion Wave 近似を2相流形式で導入した解析手法によって、特性曲線解および室内実験の結果を十分に再現可能な結果を得る事ができ、多相流型の Diffusion Wave 近似の妥当性が示された。また、その他の近似手法の場合には、流路形状によっては適切な解が得られない場合もあることが示された。

- 多層型河道モデルの開発および実流域の流出解析への適用

自然河川と周囲の地下水との相互干渉をよりスムーズに表現するために、多層型河川モデルを提案し、洪水時にも解析が可能なモデルを開発してモデルに組み込んだ。

以上の河川流動モデル、および地下水との連結モデルを用い、実際の小流域における流出量計測結果への適用性の検討を行うと共に、現実には測定が困難と考えられる地表と地下との結合パラメータについての感度解析を実施した。その結果、実際の流出量を再現するためのパラメータセットの方法論が提案できた。また、前述の多層型河川流出モデルを適用する事で、特に再現が困難である流量の逓減傾向に関しても解析結果の再現性が向上することが明らかとなった。

## 3. 水理解析における自動格子生成手法に関する研究

本論文では効率的かつ精度を保つような自動格子生成手法に関する研究を行っ

た。その成果は以下の通りである。

- 質点－バネ－流体モデルの開発

複雑な境界形状、地形を持つような解析領域に対し、最適な構造格子を生成する手法として、本論文では質点－バネ－流体モデルの開発を行った。本手法は、格子点間の距離を等間隔に、かつ、格子の3次元的な面積を等しくする方向に格子を変形させる方法である。本論文では、簡単な数値解析を用いて本手法の有効性を確認した。また、自動格子生成における前処理として、有限要素法による Poisson 方程式の解を用いた格子点配置手法を組み合わせる事によって格子生成の効率が大きく向上することを示した。これによって、解析領域の設定から3次元的な格子生成までの一般的なデータ処理のフローが確立した。

- 最終生成格子形状診断アルゴリズムの開発および実流域への適用

最終的に生成された解析格子に対し、格子の適切性診断の一手法として、一般座標系での座標変換を応用した格子形状の観点から診断を行うアルゴリズムの開発を行った。この結果、生成された格子に対し、格子変形の度合いのみを適切に評価することが可能となり、生成格子の形状の評価が定量的に行えるようになった。

また、本論文で開発を行った自動格子生成手法を、実際の広流域に対し適用し、適切な平面格子を短時間で生成できる事を示した。

## 5.2 本研究に対する今後の課題と展望

以上、本論文においては、水循環過程の数学モデルにおいて、多相多成分解析手法を拡張する事により、地下水汚染解析および地表水－地下水結合解析を対象とした新しい解析手法を開発したが、本研究において残された課題も多い。

課題の第一は、解析の複雑化に起因するパラメータ設定の問題である。本研究の成果により特に地下水汚染に関しては、吸着、揮発、溶解という要素を組み込んだ解析が可能になった反面、解析が複雑化し入力パラメータの種類も増大している。それらのパラメータは、例えば揮発に関する速度係数、吸着の速度係数であり、一般的にデータベース化されていないものも多い。本論文で示したような室内実験がパラメータ決定の一方法となると考えられるが、一般に移流拡散問題においては拡散係数の空間スケール依存性が知られているように、本研究における揮発、溶解の問題についても揮発速度等の空間、時間スケールへの依存性が予測される。従って、現実の地下水汚染問題のように、室内実験スケールとは数十倍のコントロールボリューム内における現象に対するパラメータ設定に関しては問題が多い。

それ以外の例えば地表面流動におけるパラメータは、本論文3章に示したような感度解析と実際の測定データとのマッチング解析によって、より妥当性の高いパラメータを求める方法を適用せざるを得ないが、本研究によって、各パラメータの感度に関して一応の知見は得られていると考える。

原位置で計測されたデータに対してマッチング解析を行う際には、その計測データが全領域の中でどの範囲の物性に対して感度が高いということを定量的に把握する必

要がある。逆の意味においては、解析に対して効果的な調査を計画する必要がある。例えば水文流出解析における測定では、河川流量、あるいは地下水位等を計測するが、特に地下水位に関しては現状では予想される地質状況から経験的に決定されている。また、地下水汚染の調査においても、限られた費用、土地利用条件から最適な調査計画を立案する必要がある。そのためには、本研究で開発した要素技術を用いて、調査結果を逐次フィードバックしながら次段階の計測計画を立案することが重要な戦略に成り得る。その目的のためには、解析のより高速化、高精度化が課題である。

本論文で示した研究の最終的な方向は、水環境の総合的な評価である。本研究が将来進む方向として、例えば、人工構造物の建設による生態系まで含めた環境影響評価がある。そのためには、地下水、地質、生態も含めた環境という多方面の情報、技術を有機的に利用することが不可欠であり、水理、解析技術のみではなく、周辺技術との有機的な連携を進め、具体的な影響評価手法の開発を今後は進めるべきであろう。

## 参考文献

## 第 1 章

江頭進治, 芦田和男, 矢島啓, 高濱淳一郎 (1989):”土石流の構成則に関する研究”, 京都大学防災研究所年報, 第 32 号 B-2, pp.487-501

応用生態工学序説編集委員会 (編) (1997):”応用生態工学序説—生態学と土木工学の融合を目指して—”, pp.335, 大学図書

島谷幸宏, 萱場祐一 (1997):”河川の自然環境の保全とその構成”, 第 3 回河道の水理と河川環境シンポジウム論文集, pp.153-158, 土木学会

Abriola, L.M., & Pinder G. (1985a):A Multiphase Approach to the Modeling of Porous Media Contaminations by Organic Compounds. 1. Equation Development, *Wat. Resour. Res.* **21**, pp.11-18.

Abriola, L.M., & Pinder G. (1985b):A Multiphase Approach to the Modeling of Porous Media Contaminations by Organic Compounds. 2. Numerical Simulation, *Wat. Resour. Res.* **21**, pp.11-18.

Bear, J. (1972):”Dynamics of fluids in porous media”, pp.764, Dover.

Falta, R.W., Preuss, K., Javandel, I., Witherspoon, P.A., (1992a):”Numerical Modeling of Steam Injection for the Removal of Nonaqueous Phase Liquids from the Subsurface. 1. Numerical Formulation”, *Wat. Resour. Res.* **28**, pp.433-449.

Falta, R.W., Preuss, K., Javandel, I., Witherspoon, P.A., (1992b):”Numerical Modeling of Steam Injection for the Removal of Nonaqueous Phase Liquids from the Subsurface. 2. Code Validation and Application”, *Wat. Resour. Res.* **28**, pp.451-465.

Julien, P.Y. (1998):”Erosion and Sedimentation”, pp.280, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.

U.S.Environment Protection Agency (1998):”Permeable Reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation”, pp.88, USEPA.

Yang, C.T. (1996):”Sediment Transport”, pp.396, MacGraw-Hill.

## 第2章

飯山 敏道, 河村 雄行, 中嶋 悟 (1994): "実験地球科学" 第8章, 東京大学出版会, pp.185-223.

石井 一英, 古市徹, 田中信壽 (1998): 特性の異なる難溶性有機化合物原液の鉛直浸透挙動に関する実験的考察, 地下水学会誌, **40**, pp.105-120.

伊藤 一誠 (1997): "地下水汚染の数学的モデル化手法—多成分流動によるモデル化—", 月刊地球, **19**, pp.387-391.

江種伸之, 神野健二 (1995): 土壌ガス吸引時における有機塩素系化合物ガスの挙動について, 地下水学会誌, **37**, pp.245-254.

近藤 精一, 石川 達雄, 安部 郁夫 (1991): "吸着の科学", 丸善, 228p.

石油公団石油開発技術センター油層研究室 (1996): "新技術講座コア試験法"

登坂博行, 伊藤一誠, 蛭原雅之, 稲葉薫, 伊藤彰, 小島圭二 (1996): "多成分多相型移流拡散モデルによる包括的な地下水汚染解析", 地下水学会誌 **38**, pp.167-180.

平岡 正勝, 田中 幹也 (1996): "新版 移動現象論", 朝倉書店, 253p.

平久保 寧, (2000): "地下水汚染物質の固相への吸着過程に関する基礎的研究", 東京大学卒業論文.

松原 修, (1999): "揮発性物質の地層内挙動に関する研究", 東京大学修士論文.

Abriola, L.M., and Pinder, G., (1985a): "A Multiphase Approach to the Modeling of Porous Media Contaminations by Organic Compounds. 1. Equation Development", *Wat. Resour. Res.* **21**, pp.11-18.

Abriola, L.M., and Pinder, G., (1985b): "A Multiphase Approach to the Modeling of Porous Media Contaminations by Organic Compounds. 1. Numerical Simulation", *Wat. Resour. Res.* **21**, pp.11-18.

Banerjee, K., Chermisinoff, P.N., Cheng, S.L., (1997): "Adsorption kinetics of O-Xylene by flyash", *Wat. Res.*, **31**, pp.249-261.



- Bear, J., (1972): "Dynamics of fluids in porous media", 764p, Dover.
- Berner, R.A., (1980): "Early Diagenesis - A Theretical Approach," Princeton University Press.
- Bradbury, M.H., and Baeyens, B., (1999): "Modelling the sorption of An and Ni on Ca-montmorillonite", *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **63**, pp.325-336.
- Braida, W., and Ong, S.K., (2000): Modeling of air sparging of VOC-contaminated soil columns", *J. Cont. Hydrol.* **41**. pp.385-402.
- Brown Jr., G.E., Foster, A.L., Ostergren, J.D., (1999): "Mineral surface and bioavailability of heavy metals: A molevular-scale perspective", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **96**, pp.3388-3395.
- Falta, R.W., Preuss, K., Javandel, I., Witherspoon, P.A., (1992): "Numerical Modeling of Steam Injection for the Removal of Nonaqueous Phase Liquids from the Subsurface. 1. Numerical Formulation", *Wat. Resour. Res.*, **28**, pp.433-449.
- Falta, R.W., Preuss, K., Javandel, I., Witherspoon, P.A., (1992): "Numerical Modeling of Steam Injection for the Removal of Nonaqueous Phase Liquids from the Subsurface. 2. Code Validation and Application", *Wat. Resour. Res.*, **28**, pp.451-465.
- Fesch, C., Simon, W., Haderlein, S.B., Reichert, P., Schwarzenvach, R.P., (1998): "Non-linear sorption and nonequilibrium solute transport in aggregated porous media: Experiments, process identification and modeling". *J. Cont. Hyrol.*, **31**, pp.373-407.
- Fetter, C.W., (1998): "Contaminant Hydrogeology", Prentice Hall, 500p.
- Fine, P., and Yaron, B.,(1993): "Outdoor experiments on enhanced volatilization by venting of kerosene component from soil", *J. Cont. Hydrol.* **12**, pp.355-374.
- Fischer, H.B., (1967): "The mechanics of dispersion in streams", *J. of Hydraul. Div. ASCE*, **93**, pp.187-216.
- Galin, T., McDowell, C., Yaron, B.,(1990): The effect of volatilization on the mass flow of a non-aquaous pollutant liquid mixture in an inert porous medium : experiment with kerosene", *J. Soil. Sci.* **41**, pp.631-641.

- Geelhoed, J.S., Hiemstra, T., Van Riemsdijk, W.H., (1997): "Phosphate and sulfate adsorption on goethite: Single anion and competitive adsorption", *Gepchim. Cosmochim. Acta*, **61**, pp.2389-2396.
- Graton, L.C., and Fraser, H.J., (1935): "Systematic Packing of Spheres -With Particular Relation to Porosity and Permeability", *J. of Geol.*, **XLIII**, pp.785-909.
- Holman H.-Y. N., and Javandel, I., (1996): "Evaluation of transient dissolution of slightly water-soluble compounds from a light nonaqueous phase liquid pool", *Wat. Resour. Res.* **32**, pp.915-923.
- Huang, W., Yu, H., Weber Jr., W.J., (1998): "Hysteresis in the sorption and desorption of hydrophobic organic contaminants by soils and sediments. 1. A comparative analysis of experimental protocols", *J. Cont. Hydrol.*, **31**, pp.129-148.
- Huyakorn, P.S., and Pinder, G., (1983): "Computational Methods in Subsurface Flow", Academic Press.
- Itoh, K., Tosaka, H., Matsubara, O., Hirota, Y., (2000): "Numerical modeling of slightly soluble contaminant flow in unsaturated and saturated zone". *Groundwater Updates*, pp.357-362.
- Jarsjö, J., Destouni, G., Yaron, B., (1994): "Retention and volatilization of kerosene: Laboratory experiments on glacial and post glacial soils", *J. Cont. Hydrol.* **17**, pp.167-185.
- Jury, W.A., Spencer, W.F., Farmer W.J. (1983): "Behaviour assessment model for trace organics in soil: I. Model description", *J. Environ. Qual.* **12**, pp.559-564.
- Jury, W.A., Russo, D., Streile, G., El Abd, H., (1990): "Evaluation of volatilization by organic chemical residing below the soil surface", *Wat. Resour. Res.* **26**, pp.13-20.
- Konikow, L.F., and Breadhoeft, J.D., (1978): "Computer model of two-dimensional solute transport and dispersion in ground water", *USGS Techniques of Water-Resources Investigation*, Book.7 Chapter C2. 90p.
- Koikow, L.F., Goode, D.J., Hornberger, G.Z., (1996): "A Three-Dimensional Method-of-Characteristics Solute Transport Model (MOC3D)", *USGS Water-Resources Investigation Report*, 96-4267, 87p.

- Kousis, A.D., and Rodriguez-Mirasol J. (1998): "Hydraulic Estimation of Dispersion Coefficient for Streams", *J. Hydraul. Eng. ASCE*, **124**, pp.317-320.
- Langer, V.W., Novakowski, K.S., Woodbury, A.D., (1999): "Sorption of trichloroethene onto stylolites", *J. Cont. Hydrol.*, **40**, pp.1-23.
- Light, W.B., Chambré, P.L., Pigford, T.H., Lee, W.-L., (1990): "Contaminant dissolution and diffusional transport with a stationary preprecipitation front", *Wat. Resour. Res.* **26**, pp.1681-1685.
- Lin, S-Y., Tsay, R-Y., Hwang, W-B., (1996a): "Adsorption kinetics of soluble surfactants and the phase transition model 1. Theoretical simulation", *COLLOIDS AND SURFACES A*, **114**, pp.131-141.
- Lin, S-Y., Tsay, R-Y., Hwang, W-B., (1996b): "Adsorption kinetics of soluble surfactants and the phase transition model 2. Experimental demonstration of 1-decanol", *COLLOIDS AND SURFACES A*, **114**, pp.143-153.
- Liu, H., (1977): "Predicting Dispersion Coefficient of Streams", *J. of Environ. Eng. Div. ASCE*, **103**, pp.59-69.
- McQuivey, R.S., and Keefer, T.N., (1974): "Simple Method for Predicting Dispersion in Streams", *J. of Environ. DIV. ASCE*, **100**, pp.997-1011.
- Munns, D.N., and Fox, R.L., (1976): "The slow reaction which continues after phosphate adsorption: Kinetics and equilibrium in some tropical soils", *Soil Sci. Amer. J.*, **40**, pp.46-51.
- Morrissey, F.A., and Grismer, M.E., (1997): "Kinetics of volatile organic compounds sorption/desorption on clay minerals", *J. Cont. Hydrol.*, **36**, pp.291-312.
- Nakano, M. (1981): "Soil water movement during the first stage of drying of a moist sandy soil under a very low drying rate", *Soil Science*, **124**, pp.67-72.
- Ohora, T., and Okumura, K., (2000): "A case study using a soil gas extraction method for the remediation of a site contaminated by chloro-organic compounds", *Ground-water Updates*, pp.177-182.
- Price, H.S., Varga, R.S., Warren, J.E., (1966): "Application of oscillation matrices to diffusion-convection equations", *J. Math. Phys.*, **45**, pp.301-311.

- Reid, R.C., Prausnitz, J.M., Sherwood, T.K., (1958): "The properties of gases and liquids, Third edition", McGraw-Hill.
- Reichle, R., Kinzelbach, W., Kinzerbach, H., (1998): "Effective parameters in heterogeneous and homogeneous transport model with kinetic sorption", *Wat. Resour. Res.*, **34**, pp.583-594.
- Scheidegger, A.E., (1961): "General theory of dispersion in porous media", *J. Geophys. Res.*, **66**, pp.3273-3278.
- Sleep, B.E., and Sykes, J.F., (1993a): "Compositional Simulation of Groundwater Contamination by Organic Compounds 1. Model Development and Verification", *Wat. Resour. Res.* **29**, pp.1697-1708.
- Sleep, B.E., and Sykes, J.F., (1993b): "Compositional Simulation of Groundwater Contamination by Organic Compounds 2. Model Applications", *Wat. Resour. Res.* **29**, pp.1709-1718.
- Smith, J.T., and Comans, R.N.J., (1996): "Modeling the diffusive transport and remobilisation of  $^{137}\text{Cs}$  in sediments: The effects of sorption kinetics and reversibility", *Geochim. Cosmochim. Acta*, **60**, pp.995-1004.
- Snyder, J.K., and Wollhiser, D.A., (1985): "Effects of Infiltration on Chemical Transport into Overland Flow", *Trans. ASAE*, **28**, pp.1450-1457.
- Suzuki, M., (1990): "Sorption Engineering", Chemical Engineering Monograph 25, Elsevier, 295p.
- Tsakirogou, C.D., and Payatakes, A.C., (2000): "Characterization of the pore structure of reservoir rocks with the aid of serial sectioning analysis, mercury porosimetry and network simulation", *Advances in Wat. Res.* **23** pp.773-789.
- Van der Zee, S.E.A.T., (1990): "Analytical Traveling Wave Solutions for Transport With Nonlinear and Nonequilibrium Adsorption", *Wat. Resour. Res.*, **26**, pp.2563-2578.
- Wallach, R., (1998): "A small perturbations solution for nonequilibrium chemical transport through soils with relatively high desorption rate", *Wat. Resour. Res.*, **34**, pp.149-154.
- Weber Jr., W.J., Huang, W., Yu, H., (1998): "Hysteresis in the sorption and desorption of hydrophobic organic contaminants by soils and sediments. 2. Effects of soil

organic matter heterogeneity", *J. Cont. Hydrol.*, **31**, pp.149-165.

### 第3章

岩佐 義朗 (1995): "数値水理学", 214p, 丸善.

大手 信人, 鈴木 雅一, 窪田 順平 (1989): "森林土壌の土壌水分特性 (I) 飽和-不飽和特性の鉛直分布測定法と 2, 3 の測定結果", 日本林学会誌, **71**, pp.137-147.

金 載水, 窪田 順平, 鈴木 雅一, 福嶋 義宏 (1988): "桐生市検知の緩斜面における土壌水分と地下水の変動", 京都大学農学部演習林報告, **60**, pp.174-18

窪田 順平, 福嶋 義宏, 鈴木 雅一 (1983): "山地小流域源頭部の表層土における流出特性と土壌水分変動について - 滋賀県東南部の風化花崗岩における観測例 -", 京都大学農学部演習林報告, **55**, pp.162-181.

窪田 順平, 福嶋 義宏, 鈴木 雅一 (1987): "山腹斜面における土壌水分変動の観測とモデル化", 日本林学会誌, **69**, pp.258-269.

鈴木 雅一, 加藤 博之, 谷 誠, 福嶋 義宏 (1979a): "桐生試験地における樹冠通過雨量, 樹幹流下量, 遮断量の研究 (I) 樹冠通過雨量と樹幹遮断量について", 日本林学会誌, **61**, pp.202-210.

鈴木 雅一, 加藤 博之, 谷 誠, 福嶋 義宏 (1979b): "桐生試験地における樹冠通過雨量, 樹幹流下量, 遮断量の研究 (II) 遮断量の解析", 日本林学会誌, **61**, pp.391-398.

登坂 博行, 小島 圭二, 三木 章夫, 千野 剛司 (1996): "地表流と地下水流を結合した 3 次元陸水シミュレーション手法の開発", 地下水学会誌, **38**, pp.253-267.

日野 幹雄, 太田 猛彦, 砂田 憲吾, 渡辺 邦夫 (1989): "洪水の数値予報 ; その第一歩", 252p, 森北出版.

Akan, A.O., and Yen, B.C., (1981): "Diffusion Wave Flood Routing in Channel Networks". *J. of Hydraul Div. ASCE*, **107**, pp.719-732.

Amein, M., (1968): "An Implicit Method for Numerical Flood Routing", *Wat. Resour. Res.*, **4**, pp.719-726.

Bear, J., (1972): "Dynamics of fluids in porous media", 764p, Dover.

- Bouraoui, F., Vachaud, G., Haverkamp, R., Normand, B., (1997): "A distributed physical approach for surface-subsurface water transport modeling in agricultural watersheds", *J. of Hydrol*, **203**, pp.79-92.
- Buckingham, E., (1907): "Studies on the movement of soil moisture", *Bur. of Soils Bull.*, **38**, U.S. Dept. of Agriculture.
- Govindaraju, R. S., Jones, S.E., Kavvas, M.L., (1988): "On the diffusion wave model for overland flow 1. solution for steep slopes", *Water Resour. Res.*, **24**, pp.734-744,
- Henderson, F.M., and Wooding, R.A., (1964): "Overland Flow and Groundwater Flow from a Steady Rainfall of Finite Duration", *J. Geophys. Res.*, **69**, pp.1531-1540.
- Itoh, K., Tosaka, H., Nakajima, K., Nakagawa, M., (2000): "Application of surface-subsurface flow coupled with numerical simulator to runoff analysis in an actual field", *Hydrol. Proc.*, **14**, 417-430.
- Komatsu, G., Miyamoto, H., Ito, K., Tosaka, H., Tokunaga, T., (2000): "Comment on 'The Channeled Scabland: Back to Bertz?' by Shaw et al., 1999", *Geology*, **28**, pp.573-574,
- Miyamoto, H., Komatsu, G., Ito, K., Tosaka, H., Tokunaga, T., (1999): "Numerical simulations of Channeled Scabland flood: A terrestrial example of cataclysmic floods", *ISAS Lunar Planet. Symp.*, pp.48-51.
- Miyamoto, H., Komatsu, G., Ito, K., Tosaka, H., Tokunaga, T., (1999): "Numerical simulations of cataclysmic floods: A coupling model of surface and subsurface flow", *Bull. Ame. Astron. Soc.*, **31**, 1144.
- Miyamoto, H., Komatsu, G., Itoh, K., Tosaka, H., Tokunaga, T., Sasaki, S., (2000): "The formation of the Channeled Scabland: numerical reconstruction of water and comparison with field observations" submitted to *J. Geophys. Res.*.
- Liggett, J.A., and Woolhiser, D.A., (1967): "Difference Solutions of the Shallow-Water Equation", *J. of Eng. Mech. Div. ASCE*, **93**, pp.39-71.
- Lighthill, M.J., and Whitham, G.B., (1955): "On Kinematic Waves I Flood Movement in Long Rivers", *Proc. Royal Soc. of London*, **A229**, pp.281-216.
- Loague, K.M., and Freeze, R.A., (1985): "A comparison of rainfall runoff modeling techniques on small upland catchment", *Water Resour. Res.*, **21**, pp.229-248.

- Ponce, V.M., Li, R-M., Simons, D.B., (1977): "Applicability of Kinematic and Diffusion Models". *J. of Hydraul Div. ASCE*, **104**, pp.353-360.
- Ponce, V.M., and Simons, D.B., (1978): "Shallow Water Propagation in Open Channel Flow". *J. of Hydraul Div. ASCE*, **103**, pp.1461-1476.
- Richards, L.A., (1931): "Capillary condition of liquids through porous mediums", *Physics*, **1**, pp.318-333.
- Smith, R.E., and Woolhiser, D.A., (1971): "Overland flow in an infiltrating surface", *Water Resour. Res.*, **7**, pp.899-913.
- Suzuki, M., (1980): "Evapotranspiration from a small catchment in hilly mountains", *J. Jap. For. Soc.*, **62**, pp.46-53.
- Tosaka, H., Itoh, K., Furuno, T., (2000): "Fully coupled formulation of surface flow with 2-phase subsurface flow for hydrological simulation", *Hydrol. Proc.*, **14**, 449-464.
- Vieira, J. H. D., (1983): "Conditions governing the use of approximations for the Saint Venant Equation for shallow surface water flow", *J. Hydrol.*, **60**, pp.43-58.
- Woolhiser, D.A., (1996): "Search for Physically Based Runoff Model - A Hydrological El Dorado ?", *J. of Hydraul. Eng. ASCE*, **122**, pp.122-129.
- Woolhiser, D. A., and Ligett, J.A., (1967): "Unsteady one-dimensional flow over a plane: The rising hydrograph", *Water Resour. Res.*, **3**, pp.753-771.

#### 第4章

越塚 誠一 (1997): "数値流体力学", 培風館, 223p.

数値流体力学編集委員会編, (1995): "格子形成法とコンピュータグラフィックス", 数値流体力学シリーズ 6, 東京大学出版会, 184p.

立川 康人, 椎葉 充晴, 高埴 琢馬 (1997): "三角形要素網による流域地形の数値表現に関する研究", 土木学会論文集, **558**, pp.45-60.

登坂 博行, 岩井 卓, 伊藤 一誠, 長富 功 (1999): "バネ・質点ネットワークモデルを利用した水理適合格子システムの形成", 情報地質, **10**, pp.143-152.

- 登坂 博行, 岩井 卓, 伊藤 一誠, 長富 功, 小島 圭二 (1998): "水理解析における地形離散化手法に関する基礎的研究", 日本応用地質学会平成 10 年度研究発表会講演論文集, pp.285-288.
- 中野 司, 藤井 直之 (1988): "二次元分布データの処理システム (1) 二次元に不規則に分布する点の三角形分割", 情報地質, **13**, pp.1-16.
- Calvo, N.A., and Idelsohn, R., (2000): "All-hexahedral element meshing: Generation of the dual mesh by resurgent subdivision", *Comput. Methods in Appl. Mesh. and Eng.*, **182**, pp.371-378.
- Causon, D.M., Ingram, D.M., Mingham, C.G., Yang, G., Pearson, R.V., (2000): "Calculation of shallow water flows using a Cartesian cut cell approach", *Adv. in Wat. Resour.*, **23**, pp.545-562.
- Chiba, N., Nishigaki, I., Yamashita, Y., Takizawa, C., Fujishiro, K., (1998): "A flexible automatic hexahedral mesh generation by boundary-fit method", *Comput. Methods in Appl. Mech. and Eng.*, **161**, pp.145-154.
- Eriksson, L.E., (1982): "Generation of Bboundary-conforming grids around wing-body configurations using transfinite interpolation", *AIAA J.*, **20**, pp.1313-1320.
- Nakahashi, K and Deiwert, G.S. (1986): "Three-dimensional adaptive grid method", *AIAA J.*, **26**, pp.948-954.
- Steger, J.L., and Chaussee, D.S., (1980): "Generation of body fitted coordinates using hyperbolic differential equations", *SIAM J. Sci. Stat. Comput.*, **1**, pp.431-437.
- Tang, K., Chou, S-Y., Chen, L-L., Woo, T.C., (2000): "Tetrahedral mesh generation for solids based on alternating sum of volumes.", *Computers in Industry*, **41**, pp.65-81.
- Thompson, J.F., Thames, F.C., Mastin, C.W., (1977): "TOMCAT - A Code for Numerical Generation of Boundary-Fitted Curvilinear Coordinate Systems on Fields Containing Any Number of Arbitrary Two-Dimensional Bodies", *J. Comput.Phys*, **24**, pp.274-302.
- Thompson, J.F., Warsi, Z.U.A., Wayne Mastin, C., (1985): "Numerical Grid Generation -Foundations and Applications. (数値格子生成の基礎と応用)", (小国 力, 河村 哲也訳), 丸善, 336p.



Yoshimura, S., Wada, Y., Yagawa, G., (1999): "Automatic mesg generation of quadrilateral elements using intelligent local approach", *Comput. Methods in Appl. Mesh. and Eng.*, **179**, pp.125-138.

## 謝 辞

本論文は、筆者が昭和 63 年に東京大学大学院工学系研究科資源開発工学専攻修士課程を修了以来、応用地質株式会社において実施した研究開発の成果および平成 10 年 9 月からの東京大学への受託研究員としての派遣期間において研究に従事した成果をまとめたものである。

東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻、登坂 博行助教授には、筆者が就職してからもなお暖かい御指導をいただき、新しい研究テーマに対しても常に共同で取り組む機会を与えて頂いた。本論文も先生の厳しくかつ暖かい御指導の賜物であり、心より感謝する次第である。

同研究科、徳永 朋祥助教授には、お忙しい中、昼夜を分かたず有益な議論をして頂くとともに、論文全体にわたり、大変有意義な助言を度々頂いた。

同研究科、山富二郎教授、増田昌敬助教授、佐藤光三助教授、福井勝則助教授には、本論文に対して適切なお意見、ご指導を頂いた。心より感謝の念を表したい。

同研究科、宮本 英昭助手には、常に有益な議論を頂くと共に、地表流解析モデルの惑星科学への適用という新しい視点で共同研究をさせて頂いた。茂木 勝郎技官には、本論文の室内実験に対し、多大な御協力を頂いた。以上、応用地質学第二研究室のスタッフの方々無くしては、本論文の完成はありえないことであり、心より感謝する。

同研究室博士課程、岩井 卓氏（出光エンジニアリング株式会社）には、平日、休日の区別なく常に切磋琢磨し、励ましあう良き友人として感謝している。また、同研究室の学生であった、古野 貴史氏（(株)建設技術研究所）、松原 修氏（石油公団）、平久保 寧氏（東京大学大学院）には、本論文の実験部分を一部担当して頂いた。彼らの緻密な実験によって本論文の価値が上昇したことに感謝する。

応用地質株式会社取締役社長、大矢 暁氏には、筆者を受託研究員として 2 年間東京大学において研究に専念する機会を頂いた。本論文はその期間無くしては作成することが困難であった。会社としても多忙な中そのような貴重な機会を与えて頂いたことに対し、深く感謝の意を表するものである。

同社常任参与、近藤 達敏博士、西日本技術センター大塚 康範博士には、筆者が同社に入社以来、技術者としてのあり方をはじめ貴重な御指導を頂くとともに、自由な研究開発を行う環境を与えて頂いたことに深く感謝する。

同社技術本部岩盤技術部、富森 勲氏、松田 育子氏には、筆者が受託研究員で不在の間も多くの業務を遂行して頂き多大なご迷惑をおかけした。彼らの協力によって、本論文の完成はもとより、本論文の成果の今後の発展は期待できるものとなった。

最後に、本論文執筆中も遠くアメリカより愛情あふれる激励を与え続けてくれた妻、裕子に本論文を捧げるものである。

平成 13 年 筆者