

水工学シリーズ02-A-1

流域水循環の数値モデルの進歩と今後の課題

京都大学防災研究所 助教授

立 川 康 人

土木学会
水理委員会・海岸工学委員会
2002年9月

流域水循環の数値モデルの進歩と今後の課題

Progress of Mathematical Modeling of Watershed Hydrology and its Perspective

立川 康人

TACHIKAWA Yasuto

1. はじめに

20世紀後半、国土数値情報などの数値地理情報の整備や地理情報システムといった地理情報を取り扱うソフトウェアの開発、レーダー雨量計を始めとする水文量の時空間観測システムの進展により、分布型流出シミュレーションモデルが現実のモデルとなる周辺環境が著しく発展した。このような周辺環境の進展と、それまでの水文素過程に関する観測・モデル化、および分布型流出モデル構築の構想とが結びつき、流域の状況に即して水循環を再現し予測しようとするシミュレーションシステムの開発が大きく前進した。こうした取り組みは水量のみならず、土砂動態や物質循環を再現・予測しようとする分野でも積極的に行われており、さらに対象とする流域規模も水文試験地レベルから大陸規模の河川流域にまで広がっている。

こうした中で、分布型流出シミュレーションモデルを構成する基本式や構成要素のサイズに関連するスケールの問題は、従来より重要な課題として認識されてきたが、確立した考え方が明らかとなっているわけではない。スケールに関連して分布モデルのパラメータの決定法も課題として残されている。また、これまでの集中型モデルと比較して、どのような場合にどの程度、分布型モデルは性能が向上しているのかという評価も十分ではない。水工現場で分布型流出システムが実際に用いられるようになるためには、これらの課題を解決してシステム構築の指針を明確にしていかなければならない。

本稿では、まず 2. で 1980 年代以降を中心として流域水循環の数値モデルの発展の道筋を筆者なりにまとめてみる。次に 3. で分布型流出予測システムの課題について述べ、最後に 4. で分布型流出予測システムの利用を考えた河川計画手法の新たな展開について考えてみたい。

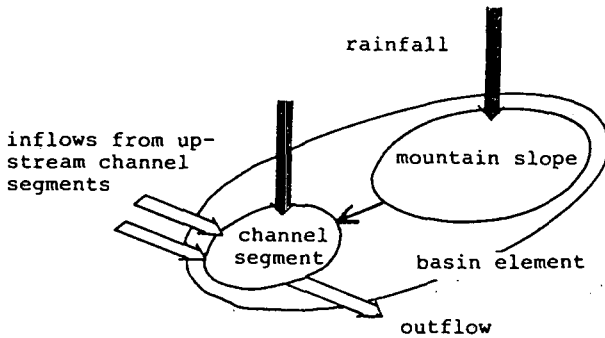
2. 流域水循環の数値モデルの発展

2.1 二種類のモデル構成法

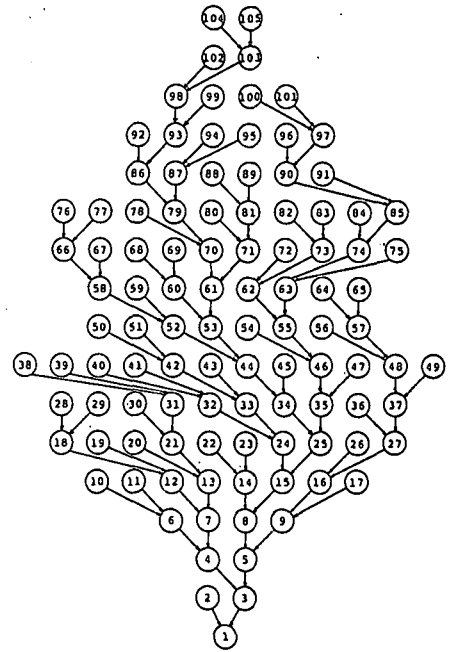
(1) 流域分割・結合型モデル

流出モデルの基本的な構成法は、流域をいくつかの構成要素に分割し、そこでの水文過程をモデル化してそれらを空間的に結合することによって全体の水循環を表現する方法である。ここではこうしたモデルを「流域分割・結合型モデル」と呼ぶことにする。

我が国では、高棹¹⁾が矩形斜面と河道とからなる基本的な流域モデルでの流れを kinematic wave モデルで表現し、降雨から流出への変換過程の基本的な特性を明らかにした。次に、中間流出理論^{2),3)}を展開し、降雨から流出への変換系を統一的に表現することに成功した⁴⁾。これらの研究はその後に発表された "variable source area concept" (たとえば Betoson and Marius⁵⁾、Dunne and Black⁶⁾) を説明することを可能としており、物理的水文学の先駆けとなる研究であった。その後、これらの研究を基礎として、高棹・椎葉は河道網構造を数理的に表現す



(a) 単位流域の雨水の流れ



(b) 荒倉流域の河道網構造

図-1 流域分割・結合型モデルの例。椎葉によって構築された分布型流出モデル⁸⁾

る手法を考案し^{7),8)}、これをもとに由良川上流荒倉流域 (159km²) を対象とした分布型流出モデルを構築した^{8),9)}。図-1 に椎葉が示した流域モデルの概念図を示す。このモデルでは 105 個の単位流域からの流れを kinematic wave モデルで追跡し、それらを河道網を通して結合することによって全体の流れを表現した。このモデルにより、河道網構造を導入することによってピーク流量が 30%程度減少することが明らかとなった。

この形式のモデル化手法では、流域境界によって定まる水文学的な分割流域を一つの計算単位とし、基本的にはそれらを一次元的に結合することで全体の流れを追跡する。分割流域に適用する流出モデルとしては、kinematic wave モデルを始めとして、貯留関数法やタンクモデルなどの集中型モデルを用いることも考えられる。

計算方法としては通常、シミュレーション期間のすべての計算を上流の分割流域から行い、その結果をそれに接続する下流の分割流域の境界条件として与え、順次最下流の分割流域まで計算する方法を取る。この場合、ある分割流域での計算を行う前にその分割流域に流入する流量系列を求めて計算機メモリに記憶しておかねばならない。どれだけの流量系列を記憶しておかねばならないかは、分割流域の計算順序に依存するため、計算順序の決め方が重要になる。高棹・椎葉⁷⁾は、使用する記憶容量が最小となるような分割流域の計算順序の決定方法を提案し、一つの分割流域からの流量系列を記憶するために必要な記憶容量を一記憶単位とすると、最大位数分の記憶単位を用意しておけばよいことを証明した。後に陸ら¹⁰⁾はこの方法を拡張し、一つの合流点に三つ以上の分割流域が合流するような多分木構造の場合について最適な計算順序の決定方法を示した。

(2) 流域一体型モデル

流域分割・結合型モデルによる流出計算法は、電子計算機の利用以前から考えられてきた伝統的な方法であるが、これとは別に、最初から電子計算機の利用を意識したモデル構築の構想が Freeze and Harlan¹¹⁾ によって提案された。彼らが構想したモデルの概念図を図-2 に示す。この構想では、流域分割は水文学的な流域単位としてなされるのではなく計算上の空間的な格子として分割され、初期・境界条件のもとに質量保存則、運動量保存則からなる偏微分方程式を解くことによって水の移動が計算される。こうしたモデルをここでは「流域一体型モデル」と呼ぶことにする。

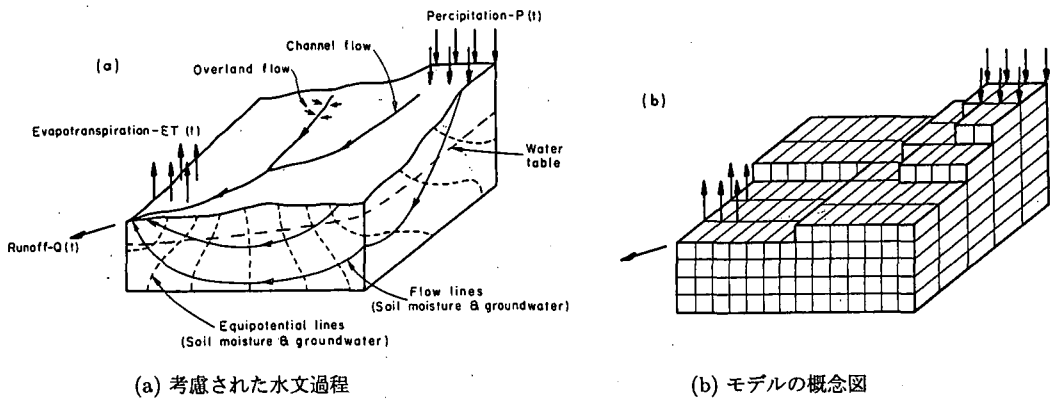


図-2 Freeze and Harlan によって構想された分布型流出モデル¹¹⁾

Freeze and Harlan はこの論文で以下のことが課題となるであろうと述べた。

- 水文素過程を物理的に数式で表現することは可能か。それらの水文素過程の各要素間の相互作用は十分理解されているか。それらの数式表現を用いて水文過程全体を表現する水循環シミュレーションは可能か。
- モデルの動作を支配するパラメータの正確な測定または推定は可能か。また、必要となるデータは膨大なものとはならないか。
- 計算機資源の問題は将来、解決されるか。水文シミュレーションは非常に高価なものになるのではないか。

これらの課題は現在においても、物理的な基礎を持つ水文モデルを構築しようとするときに直面する問題である。ここで物理的な基礎を持つモデルとは、kinematic wave model のように水移動が質量保存則や運動量保存則などの物理的な背景を持つ数理モデルによって表され、モデルパラメータが物理的な意味を持ち、かつそのモデルパラメータの値がチューニングすることなく決められることを志向するモデルである。

この構想に沿った代表的なモデルとして SHE, Système Hydrologique Europ'een^{12),13)}がある。SHE は、地表面過程・地表面流・地中流・地下水流・河川流を担当するサブモデルで構成され、それぞれのサブモデルが関連する状態量を互いに参照しながら計算を進めていく。計算方法としては、各計算ステップごとに流域全体の水移動が一体として一度に計算され、順次時間更新していくという形になる。

2.2 数値地形モデルを用いた流域地形の数理表現と地形解析

こうした水文モデルの開発や構想が進む中で、水文観測技術の発達・地理情報の整備・電子計算機の発展といった周辺技術が1980年代以降に急速に進んだ。特に、数値地形モデル (DEM, Digital Elevation Model) の整備・公開が進んだことにより、従来、膨大な手作業によって行われていた地形解析や流域場のモデル構築が、電子計算機を用いて行われるようになった。

(1) 流域地形の数理表現

流域地形を計算機を用いて表現しようとする場合、地形はある規則にしたがって離散的に取得される標高値の集まりで表される。その表現方法を数値地形モデル (DEM, Digital Elevation Model) と呼ぶ。DEM は流域地形をどのような形式で表現するかによって

- グリッドモデル (Grid Based DEM)
- 等高線図モデル (Contour Based DEM)
- 三角形網モデル (Triangulated Irregular Network DEM)

に分類することができる^{14),15)}(図-3参照)。

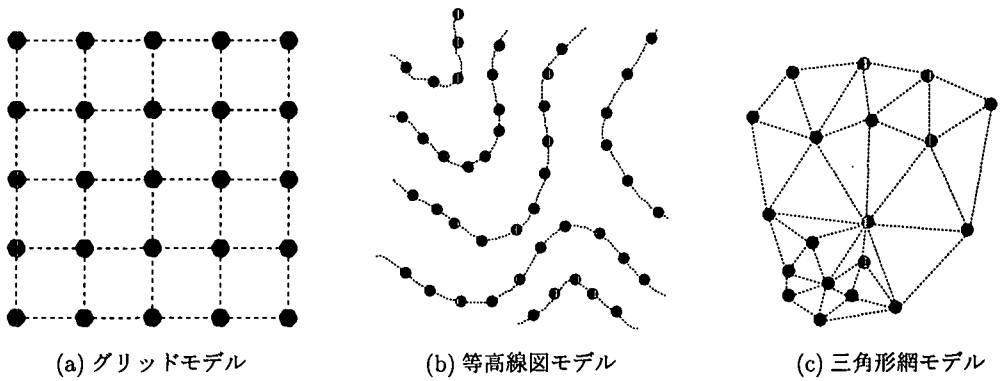


図-3 流域地形の数値表現

グリッドモデルによる方法は、縦横に区切った格子点での標高を用いて地形を表現する方法である。国土数値情報など、一般に利用できるデータはこの形式で整備されることが多い。格子点は平面座標上で規則的に配置されているので行列形式で扱うことができ、電子計算機による処理が容易という利点がある。しかし、格子点間隔が種々の解析結果に影響を及ぼすこと、流れを1次元的に取り扱う場合は通常、雨水の流れ方向は一方向に限定されること、窪地が発生した場合の根本的な解決が難しいこと等の欠点がある。

等高線図モデルによる方法は、地形図の等高線に沿った点での標高を記録し地形を表現する方法である。等高線をもとに雨水の流れ方向(最急勾配方向)を決定し、それによって斜面を分割するなど、水文学的には重要な利点を持つ表現手法だが、流域規模でのデータ取得に非常に多大な作業を要すること、データ量が膨大となること、解析に多大な計算が必要となる等の欠点を持つ。

三角形網モデルによる方法は、地表面を三角形網で覆い、その頂点の標高によって地形を表現する方法である。三角形の覆い方は任意であり複雑な地形形状をしている部分では三角形網を密に設定するなど、頂点のサンプリング密度を空間的に変化させることができる。また、山頂・峠・河道・尾根上の点などを頂点として選ぶことによって河川・流域界を三角形要素の辺として表し、流域を面と線で表現することができるなど、流域地形に即して地形を表現できる利点を持つ。さらに、流れ方向(最急勾配方向)も簡単に得ることができる。しかし、単に流域を三角形網で覆うだけでは、三角形網間での雨水の授受を取り扱うことが難しいという欠点がある。

雨水追跡のモデル化という観点から、これらの3つの数値地形モデルの得失をまとめると表-1 のようになる。

(2) 地形解析と流域場のモデル構築

グリッド型のDEMを加工して流れ方向を決定し、河道を抽出するアルゴリズム開発はO'Callaghan and Mark¹⁶⁾によって始められた。O'Callaghanらアルゴリズムの基本的な構成は、まず各格子点に隣接する格子点の中で最も標高の低い格子点を探索して下流の格子点とし、次に各格子点の上流にある全ての格子点の個数を求めてその値がある値以上ならば、その格子点より下流を河道と考えるというものである。この場合、本来、窪地ではないにも関わらず窪地となってしまう格子点が現れ、その格子点の影響で水流の方向が現実と著しくかけ離れてしまうことがある。そこで、事前に窪地を除去する作業が行なわれる。O'Callaghanらの研究の後、グリッドモデルから河道網を抽出する新たなアルゴリズムがBand¹⁷⁾、野上¹⁸⁾、Hutchinson¹⁹⁾など数多く提案された。また、抽出された河道網を用いた地形解析や流出特性との関連がTarboton *et al.*²⁰⁾、山田²¹⁾、宝²²⁾,²³⁾,²⁴⁾、藤田²⁵⁾など盛んに研究された。さらに、ある格子点からの雨水の流れを一方向に限るのではなく、発散型地形での流れを表現するために多方向への流れを表現するアルゴリズムもQuinn *et al.*²⁶⁾、Costa-Cabral *et al.*²⁷⁾、Tarboton²⁸⁾、椎葉²⁹⁾によって提案された。椎葉らの流域モデル²⁹⁾を図-4に示す。

等高線図モデルを利用して流出場をモデル化した研究としてはO'Loughlin³⁰⁾、Moore *et al.*³¹⁾の研究がある。これらのモデル化システムでは、電子計算機内部で等高線に垂直な線を自動的に生成して流域を分割し、そこで

表-1 流出モデルへの利用から見た数値地形モデルの比較

数値地形モデル	地形の表現方法	利点	欠点
グリッドモデル Grid based DEM	流域にかけたメッシュの格子点の標高によって地表面を表す。	<ul style="list-style-type: none"> ● 電子計算機での処理が容易である。 ● この形式でデータが整備されることが多い。 ● 空間的に分布するデータはメッシュ形式で整理されることが多く、データ間の位置の対応がとりやすい。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 流れを1次元的に取り扱う場合、流れ方向は通常4または8方向に限定される。 ● 格子点間隔が種々の解析に影響を及ぼす。 ● 窪地の根本的解決が難しい。
等高線図モデル Contour based DEM	等高線上の点の標高によって地表面を表す。	<ul style="list-style-type: none"> ● 最急勾配方向をもとに流域斜面を部分斜面に分割することにより流れ方向に即したモデル化が可能である。 	<ul style="list-style-type: none"> ● データ量が膨大となる。 ● 流域規模での適用が難しい。
三角形網モデル Triangulated Irregular Network DEM	流域を三角形要素網で覆い、三角形の頂点の標高によって地表面を表す。	<ul style="list-style-type: none"> ● 流れ方向は限定されず、かつ簡単に求められる。 ● データのサンプリング密度を局所的に変化させることができる。 ● 河道、流域界を三角形要素の辺として、斜面を三角形要素の面として表すことができ、流域地形を線と面で表現できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 単に流域を三角形網で覆うだけでは、三角形網間での雨水の授受を取り扱うことが難しく、雨水の流れを考慮した形で三角形網を構成するシステムが必要となる。

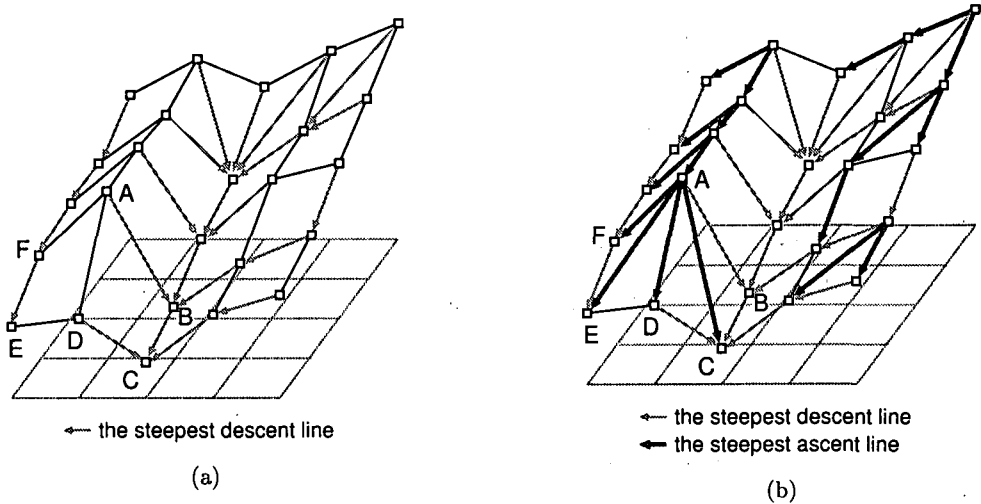


図-4 (a) 一つの格子点から最急勾配方向にのみ雨水が流れるとした場合の流域モデル。通常この形式のモデルがよく使われる。(b) 椎葉らはこのモデルにさらに最急勾配の登り方向を加えることにより、一つの格子点から多方向の流れを表現するより実地形に即した流域モデルを考案した²⁹⁾。

の地形形状をもとに飽和領域の位置と大きさを予測することを可能とした。一方、三角形網モデルをもとに河道・尾根を自動的に抽出する研究が Palacios-Velez *et al.*³²⁾によって行なわれた。立川ら^{15),33)}は、流出場での流れを一次元的に取り扱うために単に流域を三角形網で覆うのではなく、三角形網間での雨水の授受を扱うことができ、かつ河道網構造を認識する形で三角形網を構成するシステムを開発した。

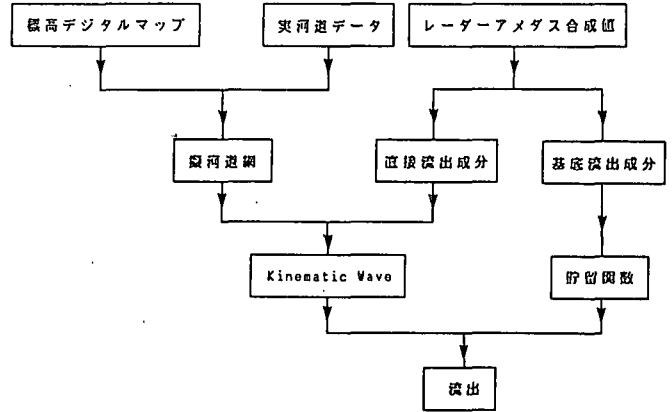
2.3 流域水循環の数値モデルの発展

(1) 流域分割・結合型モデル

流域分割・結合型のモデルでは、地形特性に応じて定まる水文学的な流域単位を基本的な構成要素とする。通常、雨水の流れは構成要素ごとにサブシステムとして表現され、それらを連結して全体の水移動が表現される。この形式のモデルとして、砂田・洪³⁴⁾は試験流域を対象として分割斜面を円錐斜面で近似し、そこでの流れを kinematic



(a) 流域モデル



(b) 流れのモデルの概念図

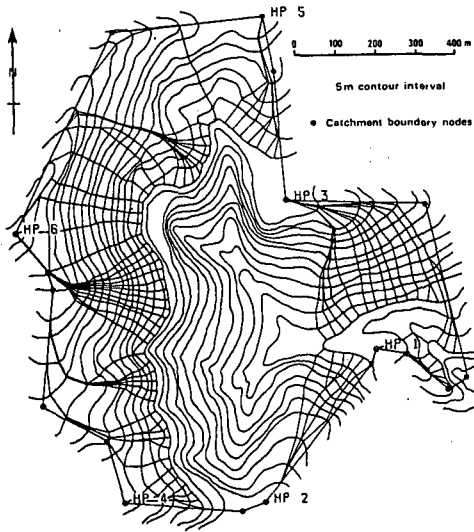
図-5 グリッド型モデルによる流れのモデルの構築例。陸らによるモデル³⁵⁾。

wave model で追跡して流域条件の空間分布と流出特性との関連を論じた。こうしたモデルを流域規模に展開するためには、地形データを計算機で処理して流域場のモデルを自動的に構築する工夫が必要になる。前節で述べたように、流域場のモデリング手法が非常に発展したため、これらの場のモデルを土台として数多くの分布型流出システムの開発が進められた。

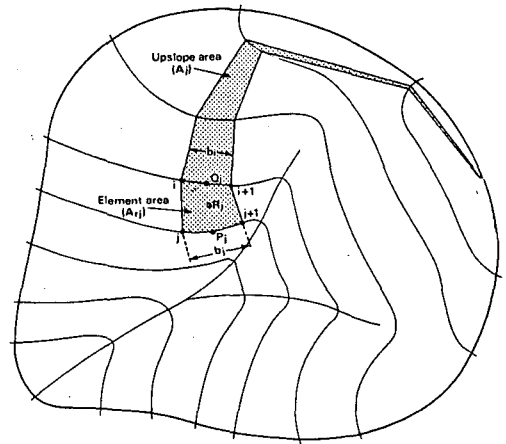
まず、グリッド型 DEM を用いたモデルが多数開発された。図-5 に陸らのモデル^{35),36)}を示す。彼らは DEM で構成される各格子を流域単位と考へ、それらを結ぶ流路網を DEM から作成した。そしてその流路網に沿う流れを kinematic wave モデルを用いて追跡し、レーダー雨量に対応した洪水予測システムを開発した。その後、児島ら³⁷⁾など多くの同様のモデルが開発された。また市川・椎葉らは、多方向への流れを考慮した流域モデル²⁹⁾をもとに、地形の発散の効果を考慮した流れのモデル³⁸⁾を開発した。

こうしたモデルはさらに拡張され、水量だけでなく水質も対象とするモデルが張ら³⁹⁾、小尻ら^{40),41)}によって開発された。また、流域全体の土砂移動を評価するモデルが砂田ら^{42),43),44)}、市川ら⁴⁵⁾、Takara *et al.*⁴⁶⁾によって構成された。必ずしも数値地形情報の利用を前提としたものではないが、江頭ら⁴⁷⁾、高橋ら⁴⁸⁾も流域全体を対象とする土砂動態モデルを開発している。また、小池ら⁴⁹⁾は分布型融雪流出モデルを構築し、陸ら⁵⁰⁾はこのモデルを発展させた。このモデルでは計算された融雪量が実測流量をよく説明するだけでなく、計算された積雪域と衛星リモートセンシングによって観測された積雪域とが非常によく対応することも確認され、水文量の時空間分布を考慮した分布モデルならではの高度なモデル開発が実現した。

一方、グリッドモデルを利用した研究と比べると等高線図モデルまたは三角形網モデルを利用した研究例は多くはないが、地形特性をより忠実に反映させるためにアイデアに富むモデル構築が進められた。図-6に O'Loughlin³⁰⁾、Moore *et al.*³¹⁾ のモデルを示す。彼らは、等高線データをもとに最急勾配となる流線を電子計算機を用いて追跡し、隣り合う流線にはさまれた部分流域で表層の飽和帯の変化を分析しており、この流域分割手法を基本として雨水の流れを kinematic wave モデルで追跡するシステムを提案した⁵¹⁾。三角形網モデルをもとにした研究としては Palacios-Velez *et al.*^{32),52)}、立川ら^{15),33)}の研究がある。Palacios-Velez らは河道・尾根を自動的に抽出するアルゴリズムを提案し、それをもとにした流れのモデルを構築した。立川らは、三角形網モデルを用いてそこでの流れを一次的に取り扱うために図-7に示すような地形表現手法とその生成アルゴリズムを開発した。このモデルでは、流域は単に三角形網で覆われるのではなく三角形網間での雨水の授受を一次的に扱うことができ、かつ河道網構造を認識する形で三角形網が構成される。次にこれを基にした分布型流出モデルを構築し、流域地形表現手法の違いがシミュレーション結果に及ぼす影響を分析した⁵³⁾。

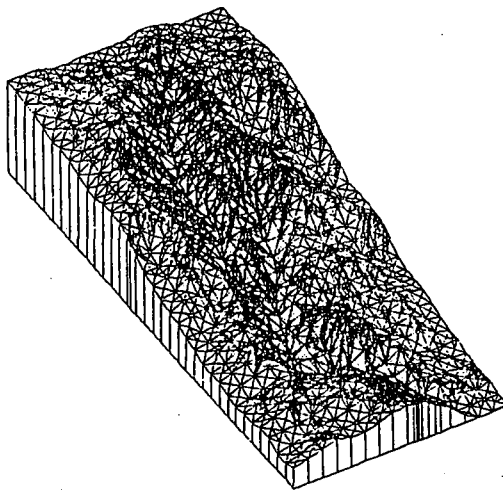


(a) 流域モデル

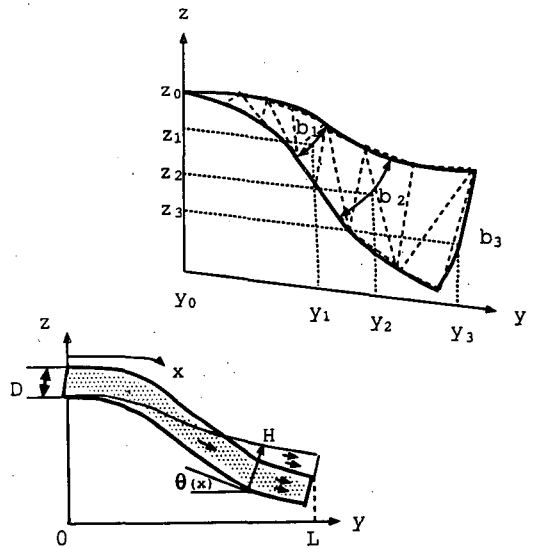


(b) 流れのモデルの概念図

図-6 等高線図モデルによる流れのモデル構築例。Moore *et al.* によるモデル³¹⁾。



(a) 流域モデル



(b) 流れのモデルの概念図

図-7 三角形網モデルによる流れのモデル構築例。立川らによるモデル^{15),53)}。

(2) 流域一体型モデル

流域一体型モデルとしては、Freeze and Harlan¹¹⁾ によって提案されたモデル構想を実現したモデルとして SHE^{12),13)} が成功を収めた。このモデルでは 図-8 に示すように降雨から流出に至る様々な水文素過程がサブシステムとして組み合わせられた形で全体システムが構成されており、河川水位と地下水位などサブシステム間で関連する水文量は、互いに状態量を参照しながら矛盾なく計算されるように設計されている。この形式を持つモデルとして、Herath *et al.*⁵⁴⁾ は人工経路を含む都市の水循環モデルを構築し、Jha *et al.*⁵⁵⁾ は同様のモデルをタイ国のチャ

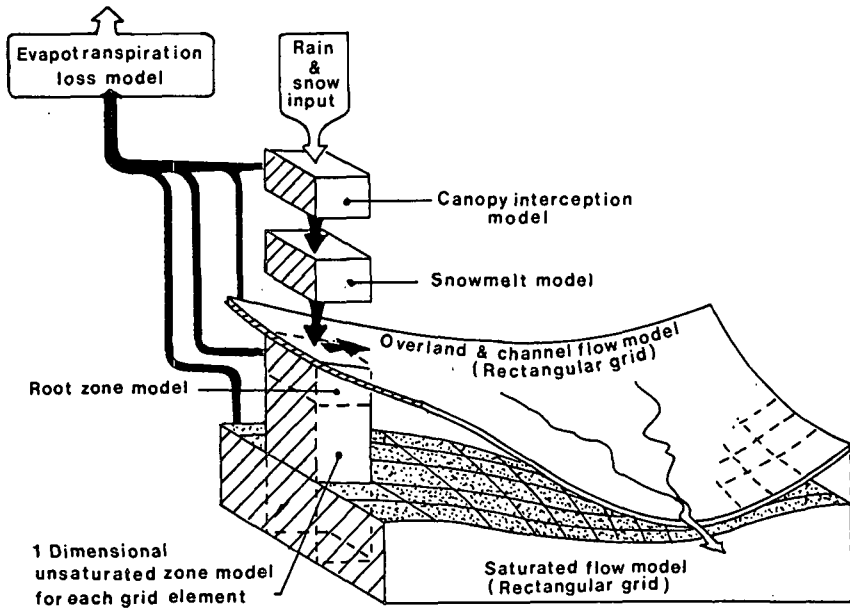


図-8 SHE のモデル構造¹³⁾

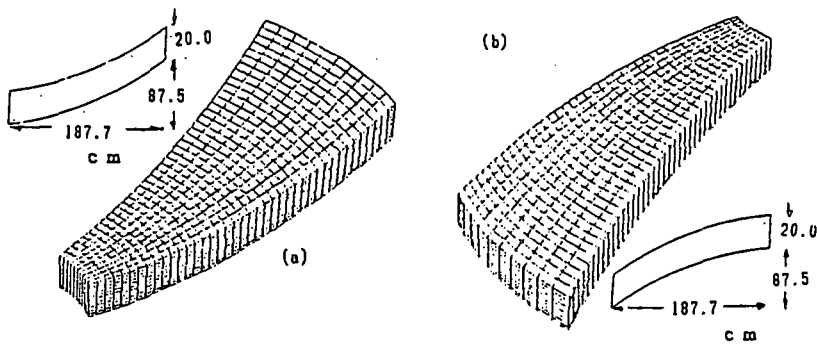
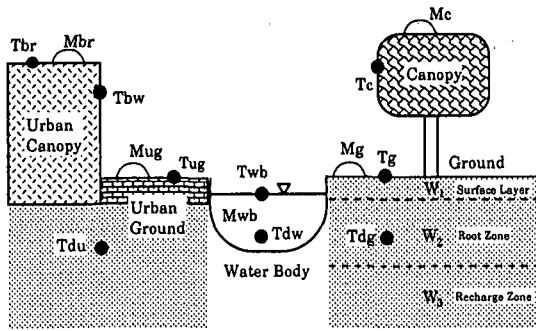


図-9 渡辺・日野⁶¹⁾が対象とした三次元斜面地形。

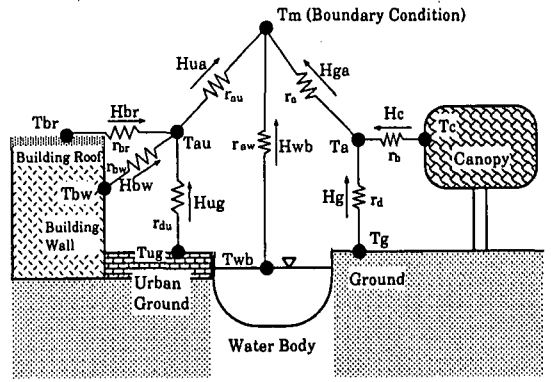
オブラヤ河上流域に適用した。また、買らは都市河川流域を対象とした総合的な水・熱循環解析モデル (WEP モデル) を開発し、将来の都市化に伴う水循環の変動^{56),57)}や流出抑制施設の効果⁵⁸⁾を分析した。また、戸田ら⁵⁹⁾、川池ら⁶⁰⁾は、氾濫解析、河道流れ、下水道流れを含めた総合的な治水評価モデルを構築した。このような、治水を含めた都市環境を総合的に評価し得るモデルは、都市の治水機能を向上させ都市環境を再生していく上でますます重要性が高まるであろう。

一方、渡辺・日野⁶¹⁾は対象領域を三次元的な格子で覆って、そこでの飽和・不飽和流を解く物理的モデルを開発した。彼らは 図-9 に示す斜面形状での流れを解いて、山腹斜面形状と流出特性との関連を論じた。また、Vieux⁶²⁾、Googritch *et al.*⁶³⁾は、三角形網で構成した流出場において二次元の kinematic wave 式を有限要素法で解いて流域全体の水移動を表現した。道上ら⁶⁴⁾も、山腹崩壊の誘引となる斜面流れを地形に即して把握することを目的として、三角形網モデルをもとにした 2 次元計算スキームを提案している。

Boundary Condition : T_m e_m u_m $F_{A,at}(0)$ $F_{t,d(0)}$ P
 ● Z_m (Reference Height)



(a) 大気境界条件と予報変数



(b) 顕熱フラックスと抵抗の概念図

図-10 SiBUC のモデル構造⁶⁸⁾

(3) 陸面過程モデル

陸面での水・熱エネルギーフラックスの推定の良し悪しが気象予測シミュレーションに非常に大きな影響を与えることが指摘されるようになり、大気循環モデルやメソ気象モデルの最下層を受け持つモデルとして陸面過程モデルが盛んに研究されるようになった。このモデルは一般に SVAT (Soil Vegetation Atmosphere Transfer Scheme) と呼ばれる大気-植生-土壌間での水・熱エネルギーのやり取りを表現するモデルであり、SiB (Simple Biosphere Scheme)⁶⁵⁾や BATS (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme)⁶⁶⁾と呼ばれる地表面過程モデルが開発された。SiB では地表面上のキャノピー層、地表面下の三層の土壌層を考え、各層での温度と水分量を未知量とする熱収支式と水収支式とを連立させて、潜熱フラックス、顕熱フラックスを求める。田中ら^{67),68)}は、都市域を含む領域にもこうしたモデルを適用できるように SiB を改良して SiBUC を開発した。SiB 自身は SiB2⁶⁹⁾ として発展し、光合成による植生の二酸化炭素の吸収の効果をとり込むようになった。また、新井ら⁷⁰⁾、田中ら⁷¹⁾は、東南アジア域で支配的な水田での地表面フラックスをより良く推定するために SiB2 の改良を図った。一方、Noilhan and Planton⁷²⁾は SiB よりも非常に少ないモデルパラメータで地表面過程を表現するモデルを開発した。このモデルはオクラホマ大学で開発されているメソ気象モデル ARPS⁷³⁾の地表面過程モデルに採用されている。

陸面過程モデルは、気象予測モデルの地表面過程を表現するだけでなく、水文モデルにも導入されている。たとえば、上記の WEP モデル^{56),57)}は Noilhan and Planton のスキームを一部採用して顕熱・潜熱量を推定している。また、椎葉ら⁷⁴⁾は Noilhan and Planton のスキームと表層の斜面流れとを結合したモデルを構成している。

(4) 大河川流域を対象とするモデル

気象予測モデルや陸面過程モデルによって予測された水文学量を河道追跡モデルを介して任意の地点での河川流量に変換し、将来の水資源予測や洪水予測に利用するという研究、あるいは河川流量を用いて気象予測モデルや陸面過程モデルを検証するという研究が多数行われるようになった。この背景には、気象予測や水循環予測のシミュレーション技術の発展とともに、衛星リモートセンシングデータから物理量を抽出するアルゴリズム開発の進展とデータセット作成、全球を対象とする地形データや河道網データセットの整備、これまでにない規模の計算量・データ量を処理する計算機技術の発展などがあった。また、GAME (GEWEX Asian Monsoon Experiment; アジアモンスーンエネルギー・水循環研究観測計画)^{75),76)}という国際プロジェクト研究が日本の気象・水文関係者の主導で企画・遂行されたこともこの分野の研究を進める大きな原動力となった。

大気循環モデルによる出力を河川流量に変換する研究としては、Miller *et al.*⁷⁷⁾ や鼎ら⁷⁸⁾の研究がある。鼎らは大気循環モデルの出力をオフラインで河道網モデルに入力して大陸規模河川のハイドログラフを算定し、河

Rivers in Asia on TRIP by 0.5°x0.5° mesh

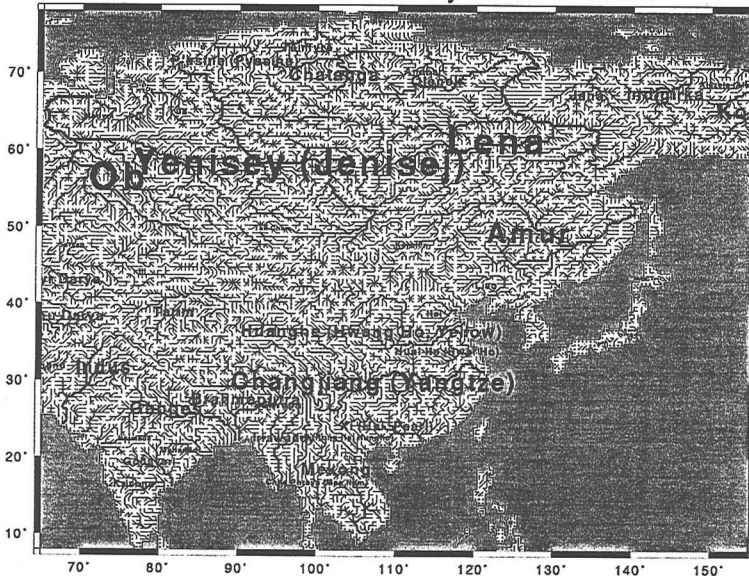


図-11 沖ら⁸⁰⁾によって作成された全球河道網データ TRIP (アジア域 0.5 度分解能)

道網モデルの有用性を確認した。沖ら^{79),80)}は 図-11 に示すグローバルな擬似河川流路網 (TRIP, Total Runoff Integrating Pathways) を用いて陸面過程モデルを河川流量を用いて検証し、また、グローバル流量データセットを構築して年河川流量の変動特性を解析している⁸¹⁾。

新たな河道モデルの開発や河道モデルの評価も行われた。高棹⁸²⁾は河道流れを対象として kinematic wave model をスケールアップする手法を考案し、立川^{83),84),85)}はそれを用いてチャオプラヤ河流域、中国淮河流域を対象とした水文モデルを構成した。さらに、Roshan *et al.*⁸⁶⁾ は GAME 再解析データ⁸⁷⁾を入力データとして立川らのモデルを用いて中国淮河流域での流量の再現を行い、流量の再現精度がかなり高いことを示した。Olivera *et al.*⁸⁸⁾はより詳細な地形データを利用したグローバルスケールでの河道追跡法を提案した。また、陸・本田⁸⁹⁾はグローバルスケールでの河道追跡モデルの性能比較を行った。

一方、従来の流域レベルのモデルが大陸規模河川にも適用されるようになってきた。Jha *et al.*⁹⁰⁾ は IISDHM (IIS Distributed Hydrological Model) をタイ国チャオプラヤ河ナコンサワン上流域に適用した。これは、空間分解能は 2km と非常に粗いものの SHE タイプのモデルを大河川流域に適用することを試みたものであった。また、敖⁹¹⁾、風間⁹²⁾はブロック化した TOPMODEL を用いてメコン河の流量予測を試みた。

2.4 様々な工夫

(1) 分布型流出モデルの集中化

対象流域の大きさとモデルの空間分解能とによっては、分布型流出モデルは非常に多くの計算を必要とする。計算量の多さはモデルを動作させて行く上で非常に大きな障害となるため、あるサイズごとに現象をまとめて表現し、そのサイズ毎に簡略化した計算方法を適用することが従来より考えられてきた。ある大きさと現象をまとめて表現することを集中化と呼び、この大きさを集中化スケールと呼ぶ。

分布型流出モデルを集中型モデルに変換した研究として、星・山岡⁹³⁾は kinematic wave モデルを基に、貯留量と流出量との二価性を表現する新たな貯留関数モデルを提案した。山田⁹⁴⁾は斜面長が短い場合を想定して定常状態を仮定し、kinematic wave モデルから貯留式を導出している。また、高棹・椎葉⁹⁵⁾は、多段貯水池モデルを用いて単一要素 kinematic wave モデルの集中化誤差構造を明らかにし、それを基に中北⁹⁶⁾は河道網モデルの

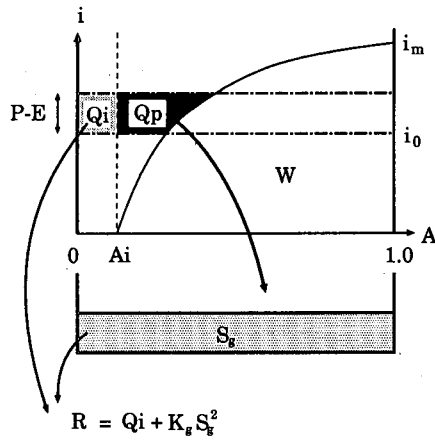


図-12 簡略化された新安江モデルのモデル構造¹⁰²⁾

集中化を議論した。また、高棹⁸²⁾は気象モデルと連携して大河川流域での河道網流れを追跡することを念頭に置き、河道流れのスケールアップを考えた。この手法ではある河道網区間ごとに河川流量が線形的に変化するという仮定を設け、時々刻々その変化率を更新することで巧みに計算量を減らすことに成功した。また、松林⁹⁷⁾は不飽和浸透理論を基礎とした集中化手法を考えた。市川^{98),99)}は、数値地形情報を組み込んだ山腹斜面系の分布型流出モデルを空間的に積分して、地形の空間分布特性を組み込んだ形で貯留量と流出量の関係を導き、分布型モデルを集中化することに成功した。

(2) 流域内部の水量の分布を確率的に取り扱うモデル

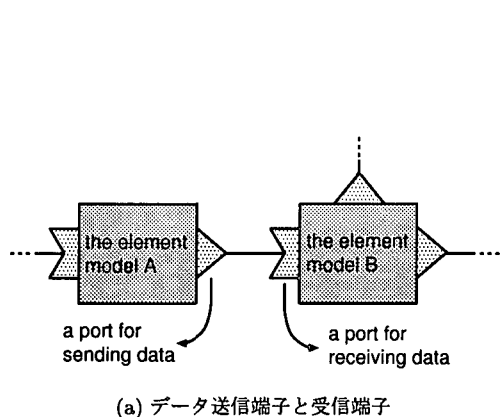
流域内部の水量の空間分布を分布関数という形で取り込む集中型モデルが開発された。このモデルでは、分布型モデルのように具体的にどの位置の流域条件がどうであるかという情報は考慮しないが、その流域条件が流域全体でどのように分布しているかという分布情報を組みこむ。図-12 にそうしたモデルの具体例を挙げる。このモデルは中国で開発された新安江モデル (Xinjiang Model)^{100),101)}をもとに Nirupama *et al.*¹⁰²⁾ が簡略化を図ったモデルである。図中の曲線が流域貯水能力の空間分布を表しており、この曲線と現時点での流域貯水量 W が直接流出量 Q_i 、間接流出量 Q_p を定めると考える。近藤¹⁰³⁾による新バケツモデルも同様の構造を持つモデルである。この形式のモデルは多数のマクロ的な水文モデル^{104),105),106),107)}に採用されている。

こうした流域の空間分布特性を分布関数として流出モデルに取り込む研究は、早くから我が国で行われてきた。平野¹⁰⁸⁾は斜面長の分布と到達時間の分布とを関連付け、その分布を組み込んだ形で流出モデルを考えた。山田^{109),110)}は時定数分布を取り込んだ流出解析手法を提案した。藤田¹¹¹⁾は流域内での斜面長分布を採り入れた貯留方程式の導出に成功した。この貯留式には斜面長の平均値と標準偏差がモデルパラメータとして取り込まれている。また、山田¹¹²⁾は、上記の新安江モデルと同様のモデルを、流域内での保水能の分布を採り入れた流出モデルとして早くから考案していた。

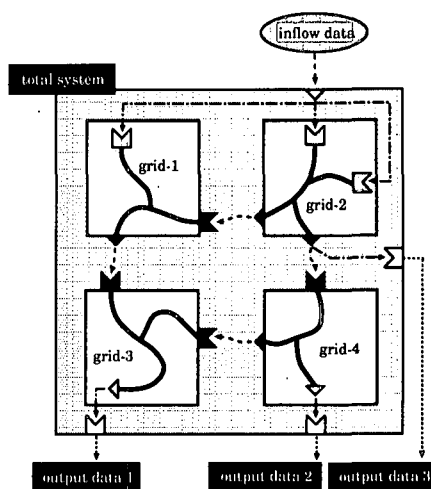
Beven や Kirkby¹¹³⁾によって提案された TOPMODEL もこの形式のモデルである。TOPMODEL では地形指標 (Topographic Index) の空間分布がまず求められる。次に、地形指標をある階級ごとに区分けし、階級毎に流出計算がなされ、それらを総合して全体からの流出が表現される。TOPMODEL は、当初、数値地形モデルを意識したものではなかったが、グリッドモデルを利用して TOPMODEL を構成する研究もなされている¹¹⁴⁾。

(3) モデルの開発ではなくモデリングシステムの開発

水文モデルは、幾つかの水文素過程のモデルの組み合わせ、さらにそれらの空間的な組み合わせから構成される。対象領域が広がり全体のシステムが複雑になると、要素となるモデルを自由に組み合わせることで全体の水文過程を表現することをサポートする機構が必要となる。単なるサブルーチンパッケージではなく、システムとし



(a) データ送信端子と受信端子



(b) 端子の接続と全体モデルの構築

図-13 OHyMoS の構造

で全体の動きをコントロールするモデリングシステムが重要となる。前述した SHE はこのような構想のもとにシステムが構築されており、目的に応じて要素となるモデルを選択して全体モデルを構築することできるように設計されている。ただし、SHE はソースコードが公開されておらず、モデルを選択して組み合わせるとしてもユーザーが独自に定義した要素モデルを導入することはできない。

椎葉・市川らは、ユーザー自身が要素となるモデルをプログラミングでき、かつそうした要素モデルを組み合わせさせて全体のシミュレーションモデルを容易に構成することを支援する OHyMoS (Object oriented Hydrological Modeling System)^{115),116)}を開発した。このシステムでは

- モデル状態量の初期化の方法
- モデルパラメータの設定方法
- 要素となる水文過程のプログラミングの方法

が規格化されている。図-13 に OHyMoS の構造を示す。左図のように、要素となるモデルには計算したデータを次の要素モデルに送信する送信端子と、他の要素モデルによって計算されたデータを受け取る受信端子を設定する。次にそれらの要素モデル間の接続関係を定義して全体のシミュレーションシステムを構成する。ユーザーは仕様に従った要素モデルのコーディングと接続関係の設定だけを考えればよく

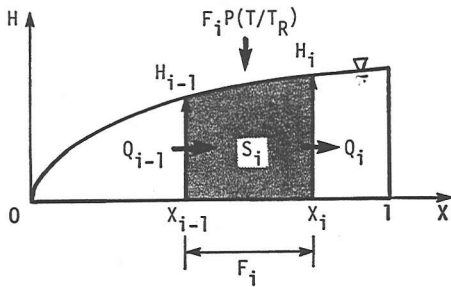
- 要素モデル間のデータの授受の具体的な手続き
- どの要素モデルから計算を開始するかといった計算順序の設定

などを行う必要がない。また、このシステムを利用すれば要素モデルの交換を非常に容易に行うことができる。OHyMoS は現在も更新中で、最新のプログラムは <http://wr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/ohymos.html> から取得することができる。

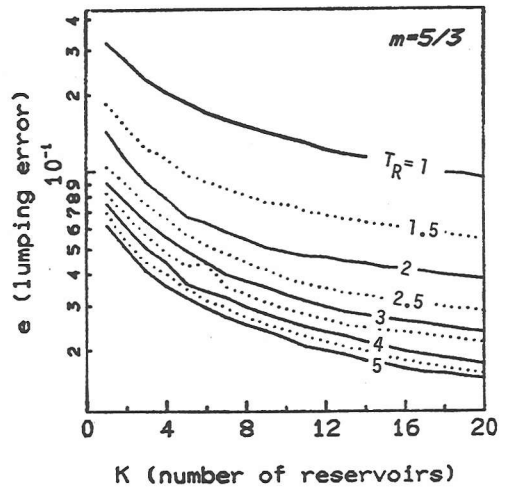
3. 分布型流出シミュレーションモデルの課題

3.1 スケールに関する問題

ある大きさを考え、その大きさの中で流出現象をまとめてモデル化する技術(分布型流出システムの集中化)について前節で簡単に触れた。この技術と同時に重要となるのが、その大きさ(モデルの基本構成要素の大きさ、集中化スケール)をどのように決定するかという問題である。高棹はこの問題を基準面積の問題¹¹⁷⁾と呼び、基準時間の問題とともに早くからモデル化の上での重要性を指摘した。



(a) 多段貯水池による kinematic wave 流れの表現



(b) 集中化スケールと集中化誤差の関係

図-14 集中化スケールと集中化誤差 (高棹・椎葉⁹⁵)

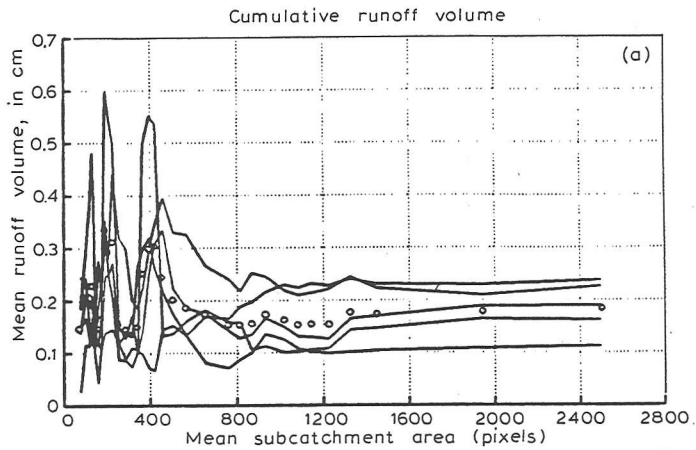


図-15 平均化スケールとピーク流出率の変動。Wood *et al.*¹¹⁸)は 1000 ピクセル (約 1km² に対応) 以上になると、計算結果が安定になることからこの大きさを代表基本流域 (REA) と考えた。

高棹・椎葉⁹⁵)は、多段貯水池モデルを用いて単一要素 kinematic wave モデルの集中化誤差構造を明らかにし、集中化誤差との関連で集中化スケールを論じて考え方の道筋をつけた。図-14 に高棹・椎葉の示した集中化誤差構造の解析例を示す。右図は降雨継続時間を表す指標 T_R ごとに集中化スケール (貯水池の個数) と集中化誤差 (kinematic wave model によって計算された流出量との違い) との関係を表している。集中化の誤差構造が明らかになれば、目的に応じてどの程度の集中化を考えればよいかの指標を得たことになる。

Wood ら¹¹⁸)は、そもそも水文モデルの基本要素というものは存在するのか、存在するとしたらその大きさはどれだけかという問題に対して、その大きさを REA, Representative Elementary Area と名づけ、TOPMODEL を用いて平均化の効果を論じて 1km² 程度が基本スケールとなることを述べた。結果の一部を図-15 に示す。この図で横軸は流出計算結果を平均する領域を示しており、平均する領域が 1000 ピクセル (約 1km² に対応) 以上になると個々の領域の特性によって決まる流出変動が見えなくなり、対象とする領域の全体的な特性に流出が支配

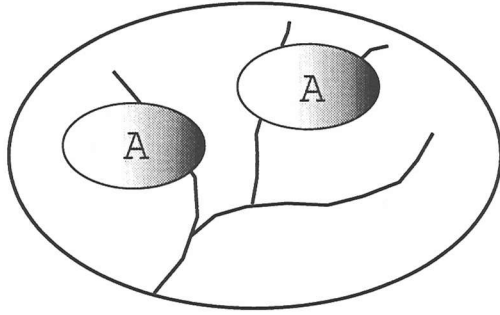


図-16 Geometrically Distributed と Statistically Distributed¹²²⁾

されるようになると考えられることから、彼らはこの大きさを代表基本流域 (REA) と考えた。しかしこれには異論もあり、Fan and Bras¹¹⁹⁾は結果が安定となるのは、平均化するサブ流域の個数の問題であって、絶対的な大きさを論じるのはおかしいと主張している。また、Wood 論文の共著者の Sivapalan 氏に聞いたところ、 1km^2 程度という値は見直す必要があるであろうとのことであった。一方、砂田ら¹²⁰⁾は、一様降雨の条件のもとで、モデルパラメータの値の感度が最も高くなる流域スケールを継続時間との関連で論じた。集中化スケールと集中化誤差との関連で、最近、市川ら¹²¹⁾はレーダー雨量の空間分解能がどの程度、河川流量のシミュレーション結果に影響するかを調査し、対象とする流域の大きさに応じてどの程度の分解能の降雨データが必要となるかを示している。また、Roshan *et al.*⁸⁶⁾は中国淮河流域を対象としたマクロスケールモデルを用いて、モデルに与える降水量と蒸発散量の時空間分解能が流出計算結果に与える影響を分析している。

椎葉¹²²⁾は、スケールの考え方として geometrically distributed と statistically distributed という二つの分布を考え、この境界となるスケールを見出すことを提案した。図-16 にその概念図を示す。図中の領域 A は流域の基本的な構成単位であり、たとえば Wood らの REA に対応する。この大きさで捉えられる現象は直接、流域規模での現象に関与し、領域 A が流域内部のどこに存在するかは重要であるとする。このスケールでの水文学量は geometrically distributed である。一方、領域 A の内部での水文学量は、その分布がどの位置のものであるかは重要ではなく、その領域内でどのように分布しているか (たとえば対数正規分布している等) が重要と考える。このスケールの水文学量は statistically distributed である。この境界をなすスケールがモデル構築の基本スケールとなる。立川ら¹²³⁾はこうしたサイズを見出すことを目的として、透水係数を発生させそれを空間上にランダムに割り付けた流域モデルを多数作成して流出計算結果を比較している (図-17)。それによると、降雨が空間的に一様という条件では 1km^2 程度の流域では流出計算結果にほとんど違いがでず、この大きさでは水文パラメータは statistically distributed という結果であった。

このようなスケールの問題は、流出モデルの集中化の問題として従来より取り上げられてきたが、水文モデルと気象モデルとの連携・結合を考える必要が出てきたことで、この面からもスケールの問題が大きくクローズアップされてきた。気象モデルの一つの計算格子内では、地形・土地被覆・土壌特性など地表面状態の空間分布は一様ではない。その不均一な場からどのように領域平均の潜熱輸送量や顕熱輸送量を推定するかが注目された。サブグリッドスケールでの空間分布を考慮したマクロ化の検討である。本来、空間分布している水文学量を領域平均値で取り扱うことに起因する誤差構造の導出、空間分布を考慮したモデル化手法の開発が進められた。以下に一例を示す。Entekhabi and Eagleson¹²⁴⁾はサブグリッド内の降水、土壌水分の空間分布を導入した水文過程の表現式を導出した。仲江川ら^{125),126),127)}は、表層土壌水分量、地表面温度が空間分布していることを考慮した領域蒸発散量算定式、水・熱移動式、領域平均浸透式を導出し、パラメータの集約化の方法を検討している。また、石平ら¹²⁸⁾は放射収支のマクロ化を検討した。

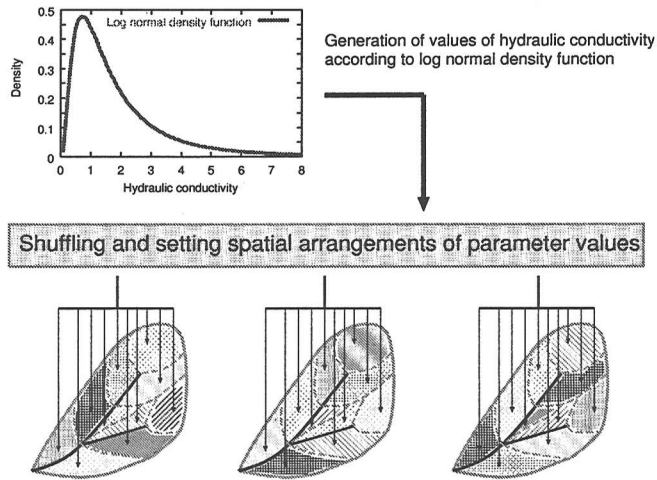


図-17 モデルパラメータの空間分布が流出計算結果に及ぼす影響を分析する流出シミュレーション¹²³⁾

3.2 モデルパラメータに関する問題

物理的な分布型モデルは、観測流量と計算流量とがよく対応するようにモデルパラメータの値をチューニングするのではなく、モデルパラメータの値を直接観測したりあるいはモデルパラメータと関連のある物理量を測定することによってモデルパラメータの値が決まることを理想とするモデルであるが、このようなパラメータの決定は容易ではない。最も大きな問題は、モデルパラメータの値がその値を代表させる大きさに依存してしまうことである。矩形で近似した斜面での流れを kinematic wave モデルによる地表面流でモデル化することを考えると、高棹・椎葉¹²⁹⁾が示したように雨量と流量とから決定できるのは $\sqrt{i}/(nL)$ であって、等価粗度 n の値を斜面長 L 、勾配 i と独立に得ることはできない。つまり、考える場のサイズや形状に流れのモデルパラメータ n の値が依存してしまう。落水線型の分布型流出モデルで空間分解能を変えると流出計算結果が異なること、あるいは空間分解能に応じて粗度を変更せねばならないことが報告されている^{36),37),130)}。SHE モデルも格子間隔を変更すると計算結果が大きく変わることが示されている¹³¹⁾。これらは基本的にはこうした事情によるものであろう。

Loague and Freeze¹³²⁾は回帰モデル、単位図法、矩形斜面を接続して kinematic wave モデルで雨水を追跡する物理モデルをそれぞれ三つの小流域に適用してその性能を評価し、その結果、物理モデルの予測結果は非常に悪かったことを報告した。その後、Loague¹³³⁾は浸透に関する現地観測データを加えて物理モデルを再評価したが、その性能は多少改善されたに過ぎないことを示した。彼はこの結果から、物理的基礎を持つモデルが成功するためには適切なモデルのスケールをどのように設定するかが基本的な問題であること、モデルのスケールと観測のスケールとは異なることが通常であり、両者のスケールが異なる時観測のみからモデルパラメータを決定することは非常に難しいことなどを述べた。

洪水流出をモデル化する場合、しばしば中間流と地表面流とからなるモデルを用いる。このモデルでは、中間流はダルシー則、地表面流は Manning 式を用いて表現する。このとき、観測流量に合うようにモデルパラメータを決定すると、透水係数の値は現地の土壌サンプルによって得られる値の一桁から二桁程度大きな値となることをしばしば経験する。洪水時には土層中の大空隙を高速に流れる雨水が大量に発生するため、モデルの透水係数は大きな値を取ることになると理解されるが、このような透水係数を土壌サンプルから得ることはできない。モデルで用いられる透水係数は斜面全体を代表する透水係数であり空隙での早い流れの効果も含めたそれであるが、観測で得られる透水係数は斜面よりもはるかに小さなスケールでのそれである。そこで測定される透水係数から、豪雨時を対象とするような斜面全体の透水係数を推定することは難しい。

3.3 モデル開発の目的の確認と性能評価の必要性

ここで、これまでに試みられてきたモデル開発の目的を再確認し、目的や条件に合わせてどのような流出モデルが要求されるか、どのような流出モデルが能力を発揮するかを改めて考えたい。流出モデルの目的は言うまでもなく以下のようであろう。

- 1) 河川計画・土工施設の設計のために河川流量を予測すること
- 2) 予警報発令のために実時間で河川流量を予測すること
- 3) 将来の流域の自然の変化や社会変動が、水循環や洪水流出に与える影響を事前に評価すること
- 4) 水文観測が疎な地域での水循環予測に寄与すること
- 5) 水文観測とそれを説明するモデル化を通して、流出過程や物質の循環過程をより理解すること

過去の水文データが十分収集されている流域ならば、1)2)の目的を達するためには、必ずしも物理的な分布モデルを用いる必要はない。従来の集中型モデルや集中型モデルを空間的に配置したモデルで十分目的を達することができるかもしれない。ただし、しばしば経験するのは集中型モデルのパラメータの最適値が出水ごとに変わることである。分布型のモデルを考え水文量の空間分布を組み込むことで、モデルパラメータの変動が小さくなるかも知れない。どのような条件のときにどのようなモデルを採用すべきか、集中型モデル、分布型モデルの性能を比較・評価し、その違いが発生する機構を明らかにしてモデル構築の指針を明確にしていく必要がある。

一方、3)4)5)の目的を達成しようとする、物理的な分布型モデルの利用を考えないわけにはいかない。過去の水文データがないとモデルパラメータの値を決定することができないモデルではこれらの目的を達成しようがない。もちろん、前節で述べたように、物理的モデルのパラメータ値はモデルのスケールと絡んで物理的な観測のみから決定することは容易ではない。ただし、ある流域で成功した物理的な分布モデルが他流域でも成功することは十分考えられるし、あるスケールのもとではという条件は付くものの、成功したモデルをもとにモデルパラメータの標準値をある程度定めることはできるであろう。

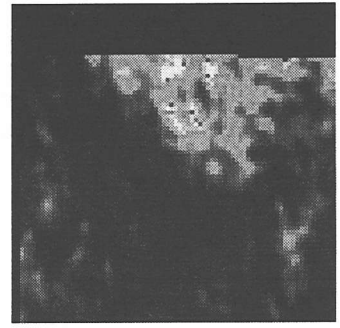
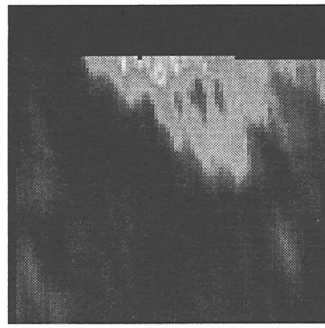
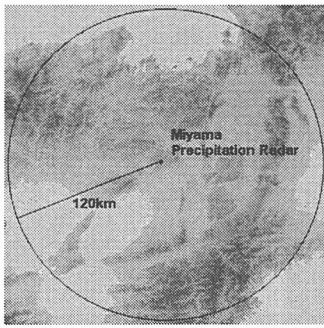
全球を対象とする気象モデルや衛星リモートセンシング技術の発展により、基本的にまったく水文量の推定値や観測値のない地域は地球上に存在しなくなっている。分解能に関しても、広域のモデルで得られた推定値を境界条件として、ネスティングによりさらに細かい空間分解能でのシミュレーション値が得られるようになっている。こうした気象予測技術、リモートセンシング技術の発展と物理水文モデルとの連携・結合により、水文観測のない、あるいは水文観測の非常に疎な地域での水文予測が将来可能になるかもしれない。今後、さらに地球上の人口が増加し水災害や水資源の問題はますます顕になってくるであろう。同時に多くに人間が生きているにもかかわらず、水文観測が疎な地域はますます増加していくであろう。そうしたときに、こうした技術が真に求められることになる。また、これに応えることが水文学の使命である。

4. 分布型流出予測システムの利用を考えた河川計画手法の新たな展開

スケールの問題やモデルパラメータの問題、モデルの性能評価などこれから解決すべき問題はあるものの、少なくとも 1) 50m 分解能の地形データを用いた流域モデルの構成、2) その流域モデルに対応する流れのモデルの開発、3) レーダー雨量計による数 km 数分の時間空間分解能の雨量データの観測、4) 十数年間のレーダー雨量データの蓄積、は確実に実現されている。分布型流出予測システムの利用を前提とする河川計画手法の新たな展開を図るべき時にきている。

4.1 分布型システムとレーダー雨量を用いた実時間流出予測

レーダー雨量計を用いた短時間降雨予測手法と分布型流出モデルとを組み合わせた実時間洪水予測システムを実現していく必要がある。このとき、予測システムは降雨の予測誤差と流出モデルのモデル誤差とを組み込んで、予測値と合わせてその予測誤差分散も提供できるものでなければならない。降雨の予測誤差を考えるために、立



(1) 深山レーダー雨量計観測域

(2) 観測降雨場

(3) 模擬発生された降雨場

図-18 予測降雨場と模擬発生させた予測降雨場。1989年9月5日12時での移流モデルによる1時間先までの予測平均降水量と模擬発生させた1時間平均降水量。

川ら¹³⁴⁾は短時間降雨予測として椎葉らによる移流モデル¹³⁵⁾の予測誤差構造の統計的な性質を調べ、その誤差を確率場としてモデル化して降雨場を発生させることを考えている。多数の降雨場を発生させ流出シミュレーションを実行してそれぞれの降雨場に対応する予測流量を得ることにより、流量を確率的に予測することができると考えるからである。図-18に観測降雨場と模擬発生させた降雨場の一例を示す。一方、藤田ら¹³⁶⁾は分布型流出システムにカルマンフィルター理論を導入した実時間予測システムを提案し、流量の予測精度の向上を図っている。これらを組み合わせた手法を考えていく必要がある。

4.2 人間活動による流水制御・水利用の影響を陽に取り入れた流出予測システムの開発

現状の水循環を再現するシミュレーションモデルを持つことが、将来の流域の水循環を予測するための基本となる。このシミュレーションモデルは、水工施設が設置されその治水効果が発揮されている流域を対象とする場合は、ダム等による流水制御をモデル内に取り込んでいる必要があるし、また農業による利水の影響を考慮したモデルでなければならない。治水計画を考える場合も、高度に開発された流域に対しては、人間活動の影響を陽に取り入れた流出モデルを構築し、それを基本として河川計画を動的に考えていく必要があると思われる。洪水防御計画は、基本的に水工施設が河川に設置されていないという前提のもとに流出モデルを用いて対象地点の基本高水を算出し、洪水流量を安全に流下させることができるように流域内の水工施設を設計するという手順を取る。この方法は水工施設がほとんど設置されていない流域に対しては有効な計画手法であるが、都市化や水工施設の設置状況に応じて現況をモニタリング・モデル化しつつ計画を動的に考えていくことも重要であろう。

4.3 降水の時間空間分布をより考慮した河川計画

計画降雨は、ある超過確率を持つ流域平均雨量を決定し、流域平均雨量がその値になるように実績の降水量データを引き延ばすという手法を用いて決定する。このように決定した降水量の時空間分布は、実際に起こるかもしれない時空間分布の組合せのうちのある一例に過ぎない。降水量の時空間分布が異なれば、流域平均雨量が同じでも、流出量は異なることが予想される。レーダー雨量計のデータが十数年分蓄積してきたことを考えると、それから降雨の時空間特性を解析し、その特性に応じて降雨を発生させる確率モデルを考えて、それと分布型流出モデルとを組み合わせることで、計画の対象となる河川流量を算定することが考えられる。降雨場を発生させる確率モデルとしてはポイントプロセス理論を用いたモデル¹³⁷⁾が従来より開発されてきており、最近ではランダムカスケードモデルを用いた研究¹³⁸⁾も行われている。流水制御の効果を陽に考慮した分布型流出予測システムを構成し、それと確率的な降雨場の発生システムとを組み合わせることで実際の流域条件に対応した河川計画の方法論を検討していく必要がある。

5. おわりに

本稿では、1980年以降を中心として、水循環の数値モデルの発展の流れをまとめ、問題点と今後の課題について述べた。できるだけ多くの文献を紹介することに重点を置いたので個々の詳しい内容に触れることはできなかった。それぞれの文献を参照していただきたい。なお、この分野の研究をレビューした文献として、高棹代表の科学研究費報告書「流出現象の物理機構に関する研究」¹³⁹⁾や日野らの著書「洪水の数値予報」¹⁴⁰⁾がある。また、Singh and Woolhiser¹⁴¹⁾も最近、水文モデルに関して包括的なレビューを行っている。本稿では特に椎葉による「分布型流出モデルの現状と課題」¹²²⁾を参考にした。

参考文献

- 1) 石原藤次郎・高棹琢馬：単位図法とその適用に関する基礎的研究，土木学会論文集，第60号別冊，pp. 1-34, 1959.
- 2) 石原藤次郎・高棹琢馬：中間流出現象とそれが流出過程に及ぼす影響について，土木学会論文報告集，第79号，pp. 15-21, 1962.
- 3) 高棹琢馬：出水現象の生起場とその変化過程，京大防災研究所年報，第6号，pp. 166-180, 1963.
- 4) 石原藤次郎・高棹琢馬：洪水流出過程の変換系について，京大防災研究所年報，第7号，pp. 265-279, 1964.
- 5) Betson, R. P. and Marius, J. B. : Source Area of Storm Runoff, *Water Resources Research*, vol. 5, no. 3, pp. 574-582, 1969.
- 6) Dunne, T. and Black, R. D. : Partial Area Contribution to Storm Runoff in a Small New England Watershed, *Water Resources Research*, vol. 6, no. 5, pp. 1296-1311, 1970.
- 7) 高棹琢馬・椎葉充晴：河川流域の地形構造を考慮した出水系モデルに関する研究，土木学会論文報告集，第248号，pp. 69-82, 1976.
- 8) 椎葉充晴：流出系のモデル化と予測に関する基礎的研究，京都大学学位論文，1983.
- 9) 高棹琢馬・池淵周一・椎葉充晴：河道網構造を考慮した河川流域の出水解析法に関する研究，京都大学防災研究所年報，第20号 B-2, pp. 185-199, 1977.
- 10) 陸晏皎・早川典生・小池俊雄：河道網構造に基づく最適追跡順番の決定法，土木学会論文集，第473号/II-24, pp. 1-6, 1993.
- 11) Freeze, R. A. and Harlan, R. L. : Blueprint for a Physically-Based Digitally-Simulated Hydrologic Response Model, *Journal of Hydrology*, vol. 9, pp. 237-258, 1969.
- 12) Abbott, M. B., J. C. Bathurst, J. A. Cunge, P. E. O'Connell, and J. Rasmussen : An Introduction to the European Hydrological System-Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and Philosophy of a Physically-Based Distributed Modelling System, *Journal of Hydrology*, vol. 87, pp. 45-59, 1986.
- 13) Abbott, M. B., J. C. Bathurst, J. A. Cunge, P. E. O'Connell, and J. Rasmussen : An Introduction to the European Hydrological System-Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: Structure of a Physically-Based Distributed Modelling System, *Journal of Hydrology*, vol. 87, pp. 61-77, 1986.
- 14) Moore, I. D., Grayson, R. B., and Ladson, A. R. : Digital Terrain Modelling : A Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications, *Terrain Analysis and Distributed Modelling in Hydrology* (ed. Beven, K. J. and Moore, I. D.), John Wiley & Sons, pp. 7-34, 1992.
- 15) 立川康人・椎葉充晴・高棹琢馬：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，No. 558/II-38, pp. 45-60, 1997.
- 16) O'Callaghan, J. F. and Mark, D. M. : The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data, *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, vol. 28, pp. 323-344, 1984.
- 17) Band, L. E. : Topographic Partition of Watersheds with Digital Elevation Models, *Water Resources Research*, vol. 22, no. 1, pp. 15-24, 1986.
- 18) 野上道男・杉浦芳夫：パソコンによる数値地理学演習，古今書院，1986.
- 19) Hutchinson, M. F. : A New Procedure for Gridding Elevation and Stream Line Data with Automatic Removal of Spurious Pits, *Journal of Hydrology*, vol. 106, pp. 211-320, 1988.
- 20) Tarboton, D. G., Bras, R. L., and Rodriguez-Iturbe, I. : The Fractal Nature of River Networks, *Water Resources Research*, vol. 24, no. 8, pp. 1317-1322, 1988.
- 21) 嶋田啓一・山田 正・藤田睦博・洪 廷芳：流域の地形特性が降雨流出特性に及ぼす影響について，第32回水理講演会論文集，pp. 43-48, 1988.
- 22) 宝 馨・高棹琢馬・溝淵伸一・杉原宏章：コンピュータを用いた水文地形解析序論，京都大学防災研究所年報，第31号 B-2, pp. 325-340, 1988.
- 23) 高棹琢馬・宝 馨・溝淵伸一・杉原宏章：国土数値情報を用いた水文地形解析に関する基礎的研究，京都大学防災研究所年報，第32号 B-2, pp. 435-454, 1989.

- 24) 宝 馨・高棟琢馬・杉原宏章：数値地形情報に基づく河川流域のフラクタル次元について，水工学論文集，第 35 卷，pp. 135-142, 1991.
- 25) 藤田睦博・道口敏幸・榎国夫：小流域の疑似河道網と流出，水工学論文集，第 35 卷，pp. 149-154, 1991.
- 26) Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P. and Planchon, O. : The Prediction of Hillslope Flow Paths for Distributed Hydrological Modeling using Digital Terrain Models, *Hydrological Processes*, vol. 5, pp. 59-80, 1991.
- 27) Costa-Cabral, M. and Burges, S. J. : Digital Elevation Networks (DAEMON): A Model of Flow Over Hillslopes for Computation of Contributing and Dispersal Areas, *Water Resources Research*, vol. 30(6), pp. 1681-1692, 1994.
- 28) Tarboton, D. G. : A New Method for the Determination of Flow Directions and Upslope Areas in Grid Digital Elevation Models, *Water Resources Research*, vol. 33, no. 2, pp. 309-319, 1997.
- 29) 椎葉充晴・市川 温・榎原哲由・立川康人：河川流域地形の新しい数値表現形式，土木学会論文集，No. 621/II-47, pp. 1-9, 1999.
- 30) O'Loughlin, E. M. : Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis, *Water Resources Research*, vol. 22, no. 5, pp. 794-804, 1986.
- 31) Moore, I. D., O'Loughlin, E. M., and Burch, G. J. : A Contour-Based Topographic Model for Hydrological and Ecological Applications, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 13, pp. 305-320, 1988.
- 32) Palacios-Velez, O. L., and Cuevas-Renaud, B. : Automated River-Course, Ridge and Basin Delineation from Digital Elevation Data, *Journal of Hydrology*, vol. 86, pp. 299-314, 1986.
- 33) Tachikawa, Y., Shiiba, M., and Takasao, T. : Development of a Basin Geomorphic Information System using a TIN-DEM Data Structure, *Water Resources Bulletin*, vol. 30, no. 1, pp. 9-17, 1994.
- 34) 砂田憲吾・洪 廷芳：流域斜面特性の分布が直接流出に及ぼす影響，第 30 回水理講演会論文集，pp. 50-60, 1987.
- 35) 陸 旻皎・小池俊雄・早川典生：分布型水文情報に対応する流出モデルの開発，土木学会論文報告集，第 411 号/II-12, pp. 135-142, 1989.
- 36) 陸 旻皎・小池俊雄・早川典生：レーダー雨量情報に対応する分布型流出モデルの検討，第 33 回水理講演会論文集，pp. 91-96, 1989.
- 37) 児島利治・寶 馨・岡 太郎・千歳知礼：ラスタ型空間情報の分解能が洪水流出結果に及ぼす影響について，水工学論文集，第 42 卷，pp. 157-162, 1998.
- 38) 市川 温・村上将道・立川康人・椎葉充晴：流域地形の新たな数値表現形式に基づく流域流出系シミュレーションシステムの開発，土木学会論文集，No. 691/II-57, pp. 43-52, 2001.
- 39) 張 旭紅・首藤伸夫・石川忠晴：国土数値情報を用いる流出および濁質発生量の解析，水工学論文集，第 36 卷，pp. 665-670, 1992.
- 40) 小尻利治・東海明宏・木内陽一：シミュレーションモデルでの流域環境評価手順の開発，京都大学防災研究所年報，第 41 号 B-2, pp. 119-134, 1998.
- 41) 小尻利治・小林 稔：GIS を利用した分布型流出モデルによる水量、水質の推定，河川技術論文集，vol. 8, pp. 431-435, 2002.
- 42) 砂田憲吾・長谷川 登：国土数値情報に基づく山地河川水系全体における土砂動態のモデル化の試み，土木学会論文集，No. 485/II-26, pp. 37-44, 1994.
- 43) 砂田憲吾・塩沢みゆき・加藤克夫：大規模土砂生産による流域水系河床変化の伝播特性について，水工学論文集，第 40 卷，pp. 843-848, 1996.
- 44) 砂田憲吾・小松勝彦・小林 弘：流域全体の土砂動態モデルに関する基礎的検討，水工学論文集，第 44 卷，pp. 729-734, 2000.
- 45) 市川 温・佐藤康弘・椎葉充晴・立川康人・宝 馨：山地流域における水・土砂動態モデルの構築，京大防災研究所年報，第 42 号 B2, pp. 211-224, 1999.
- 46) Takara, K., Nakayama, D., Tachikawa, Y., Sayama, T., Nakagawa, H., Satofuka, Y., Egashira, S., and Fujita, M. : A Rainfall-Sediment-Runoff Model in the Upper Brantas River, East Java, Indonesia, *DPRI Annuals*, Kyoto Univ., no. 44B-2, pp. 247-258, 2001.
- 47) 江頭進治・松木 敬：河道貯留土砂量を対象とした流出土砂の予測法，水工学論文集，第 44 卷，pp. 735-740, 2000.
- 48) 高橋 保・井上素行・中川 一・里深好文：山岳流域における土砂流出の予測，水工学論文集，第 44 卷，pp. 717-722, 2000.
- 49) 小池俊雄・陸 旻皎・早川典生・古谷 健・石平 博：積雪高度分布を考慮した総合的融雪流出解析，水工学論文集，第 39 卷，pp. 79-84, 1995.
- 50) 陸 旻皎・小池俊雄・早川典生：アメダスデータと数値地理情報を用いた分布型融雪解析システムの開発，水工学論文集，第 42 卷，pp. 121-126, 1998.
- 51) Moore, I. D. and Grayson, R. B. : Terrain-based catchment partitioning and runoff prediction using vector elevation data, *Water Resources Research*, vol. 27, no. 6, pp. 1177-1191, 1991.
- 52) Palacios-Velez, O. L., and B. Cuevas-Renaud : SHIFT: a distributed runoff model using irregular triangular facets, *Journal of Hydrology*, vol. 134, pp. 35-55, 1992.
- 53) 立川康人・原口 明・椎葉充晴・高棟琢馬：流域地形の三角形要素網表現に基づく分布型降雨流出モデルの開発，土木学会論文集，No. 565/II-39, pp. 1-10, 1997.

- 54) Herath, S., Musiaké, K., and Hironaka, S. : Simulation of Natural and Artificial Water Cycle Using a GIS Based Distributed Model, Proc. of International Workshop on Macro-scale Hydrological Modeling, Nanjing, China, pp. 98-101, 1996.
- 55) Jha, R., S. Herath and K. Musiaké : Development of IIS distributed hydrological model (IISDHM) and its Application in Chao Phraya River Basin, Thailand, *Annual Journal Hydraulic Engineering, JSCE*, 41, pp. 227-232, 1997.
- 56) 賈 仰文・倪 广恒・河原能久・末次忠司 : 都市河川流域の水循環解析と雨水浸透施設の効果の評価, 水工学論文集, 第 44 卷, pp. 151-156, 2000.
- 57) 末次忠司・河原能久・賈 仰文・倪 广恒 : 都市河川流域における水循環解析の総合解析モデルの開発, 土木研究所資料, 第 3713 号, 2000.
- 58) 賈 仰文・倪 广恒・木内 豪・吉谷純一・河原能久・末次忠司 : 分布型モデルを用いた都市河川流域における流出抑制施設の効果の比較, 水工学論文集, 第 45 卷, pp. 109-114, 2001.
- 59) 戸田圭一・井上和也・村瀬 賢・市川 温・横尾英男 : 豪雨による都市域の洪水氾濫解析, 土木学会論文集, No. 663/II-53, pp. 1-10, 2000.
- 60) 川池健司・井上和也・戸田圭一・中川吉人 : 寝屋川流域を対象とした都市域の氾濫解析, 河川技術論文集, vol. 8, pp. 37-42, 2002.
- 61) 渡辺明英・日野幹雄 : 一般座標系を用いた 3 次元不飽和浸透流モデルによる流出解析-地形がハイドログラフに与える影響について-, 第 31 回水理講演会論文集, pp. 71-76, 1987.
- 62) Vieux, B. E. : Geographic Information Systems and Non-point Source Water Quality and Quantity Modelling, *Hydrological Processes*, vol. 5, no. 1, pp. 101-113, 1991.
- 63) Goodrich, D. C., Woolhiser, D. A., and Keefer, T. O. : Kinematic Routing Using Finite Elements on a Triangular Irregular Network, *Water Resources Research*, vol. 27, no. 6, pp. 995-1003, 1991.
- 64) 井戸俊介・道上正規・宮本邦明・檜谷 治 : 任意 3 角形平面スキームを用いた地下水・地表水の流出解析法, 水工学論文集, 第 46 卷, pp. 157-162, 2002.
- 65) Sellers, P. J., Mintz, Y., Sud, Y. C., and Dalcher, A. : A Simple Biosphere Model (SiB) for Use within General Circulation Models, *Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 43, no. 6, pp. 505-531, 1986.
- 66) Wilson, M. F., Henderson-sellers, A., Dickinson, R. E. and Kennedy, P. J. : Sensitivity of the Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) to the Inclusion of Variable Soil Characteristics, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol. 26, pp. 341-362, 1987.
- 67) 田中賢治・池淵周一 : 都市域・水体をも考慮した蒸発散モデルの構築とその琵琶湖流域への適用, 京都大学防災研究所年報, 第 37 号 B-2, pp. 299-313, 1994.
- 68) 田中賢治・中北英一・池淵周一 : 琵琶湖プロジェクトの陸面過程モデリング, 水工学論文集, 第 42 卷, pp. 79-84, 1998.
- 69) Sellers, P. J., Dandall, G. J., Collatz, G. J., Berry, J. A., Field, C. B., Dazlich, D. A., Zhang, C., Collelo, G. D., and Bounoua, L. : A Revised Land Surface Parameterization (SiB2) for Atmospheric GCMs. Part 1: Model Formulation, *Journal of Climate*, vol. 9, pp. 676-705, 1996.
- 70) 新井崇之・金 元植・沖 大幹・虫明功臣 : 熱帯水田への SiB2 の適用と水田スキームの導入, 水工学論文集, 第 44 卷, pp. 175-180, 2000.
- 71) 田中賢治・石岡賢治・中北英一・池淵周一 : 水田・湖面における熱収支の季節変化-琵琶湖プロジェクトより-, 京都大学防災研究所年報, 第 44 号 B-2, pp. 427-443, 2001.
- 72) Noilhan, J. and Planton, S. : A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models, *Monthly Weather Review*, 117, pp. 536-549, 1989.
- 73) Center for Analysis and Prediction of Storms (CAPS), The University of Oklahoma : http://www.caps.ou.edu/ARPS/index_flash.html
- 74) 金澤瑞樹・澤井信宏・椎葉充晴・立川康人・市川 温 : 大気・陸面過程を内包した山腹斜面水文モデルの河川流域への適用, 京都大学防災研究所年報, 第 43 号 B-2, pp. 217-223, 2000.
- 75) 安成哲三 : アジアモンスーン エネルギー・水循環研究観測計画 (GEWEX Asian Monsoon Experiment; GAME), 天気, 41, pp. 15-20, 1994.
- 76) 安成哲三 : GAME 強化観測期間 (IOP) を迎えて, 天気, 45, pp. 7-20, 1998.
- 77) Miller, J. R., G. L. Russell and G. Caliri : Continental-scale river flow in climate models, *J. Climate*, 7, pp. 914-928, 1994.
- 78) 鼎信次郎・西尾 健・沖 大幹・虫明功臣 : AGCM-流路網モデルによる世界の大河川の流出ハイドログラフ, 水工学論文集, 39, pp. 97-102, 1995.
- 79) 沖 大幹・西村照幸・ポールディルマイヤー : グローバルな河川流路網情報 (TRIP) を利用した年流量による地表面数値モデルの検証について, 水文・水資源学会誌, 10(5), pp. 416-425, 1997.
- 80) 沖 大幹 : <http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~taikan/TRIPDATA/>
- 81) 沖 大幹・虫明功臣 : グローバルな河川流量データセットの構築と年河川流出量の変動特性の解析, 水工学論文集, 43, pp. 151-156, 1999.

- 82) 高棹琢馬・椎葉充晴・市川 温: 分布型流出モデルのスケールアップ, 水工学論文集, 38, pp. 141-146, 1994.
- 83) 立川康人・市川 温・坂井健介・椎葉充晴: DCW と GLOBE データセットを用いた流出シミュレーションのための河道網データの生成 - タイ国チャオプラヤ川を対象として -, 水文・水資源学会誌, 11(6), pp. 565-574, 1998.
- 84) 坂井健介・立川康人・市川 温・椎葉充晴: 大河川流域を対象とした流出シミュレーションモデルの構築とそのチャオプラヤ川流域への適用, 水文・水資源学会誌, 12(1), pp. 39-52, 1999.
- 85) 立川康人・宝 馨・田中賢治・水主崇之・市川 温・椎葉充晴: 中国淮河流域における河川流量シミュレーション, 水文・水資源学会誌, 15(2), pp. 139-151, 2002.
- 86) Roshan, S., Tachikawa, Y. and Takara, K.: Effects of Forcing Data Resolution in River Discharge Simulation, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, vol. 46, pp. 139-144, 2002.
- 87) 谷田貝亜紀代他: GAME 再解析について, 水文・水資源学会誌, 13(6), pp. 486-495, 2000. 気象庁気象研究所のホームページ http://gain-hub.mri-jma.go.jp/GAME_reanal.html からデータをダウンロードすることができる。
- 88) Olivera, F., Famiglietti, J. and Asante, K.: Global-scale flow routing using a source-to-sink algorithm, Water Resources Research, 36(8), pp. 2197-2207, 2000.
- 89) 陸 昷皎・本田 諭: 総合的な河道追跡モデルの開発とその応用, 水工学論文集, 45, pp. 133-138, 2001.
- 90) Jha, R., S. Herath and K. Musiak: Application of IIS distributed hydrological model (IISDHM) in Nakhon Sawan catchment, Thailand, Annual Journal Hydraulic Engineering, JSCE, 42, pp. 145-150, 1998.
- 91) 敖 天其・竹内邦良・石平 博: 分布型モデル BTOPMC を用いたメコン河全流域の流出解析, 水文・水資源学会 2000 年研究発表要旨集, pp. 92-93, 2000.
- 92) Nawarathna, N. B., Kazama, S., and Sawamoto, M.: Evaluation of Reservoir and Irrigation Effect on Runoff Simulations in the Mekong River Basin, Annual Journal Hydraulic Engineering, JSCE, 46, pp. 289-294, 2002.
- 93) 星 清・山岡 勲: 雨水流法と貯留関数法との相互関係, 第 26 回水理講演会論文集, pp. 273-278, 1982.
- 94) 山田 正・石井文雄・山崎幸二・岩谷 要: 小流域における保水能の分布と流出特性の関係について, 第 29 回水理講演会論文集, pp. 25-30, 1985.
- 95) 高棹琢馬・椎葉充晴: 雨水流モデルの集中化に関する基礎的研究, 京都大学防災研究所年報, 第 28 号 B-2, pp. 213-220, 1985.
- 96) 中北英一・高棹琢馬・椎葉充晴: 河道網系 Kinematic Wave モデルの集中化, 京都大学防災研究所年報, 第 29 号 B-2, pp. 217-232, 1986.
- 97) 松林宇一郎・高木不折・吉田 直: 不飽和浸透理論に基づく斜面流出モデルの集中化について, 土木学会論文集, No. 497/II-28, pp. 11-20, 1994.
- 98) 市川 温・小椋俊博・立川康人・椎葉充晴: 数値地形情報と定常状態の仮定を用いた山腹斜面系流出モデルの集中化, 水工学論文集, 第 43 卷, pp. 43-48, 1999.
- 99) 市川 温・小椋俊博・立川康人・椎葉充晴・宝 馨: 山腹斜面流出系における一般的な流量流積関係式の集中化, 水工学論文集, 第 44 卷, pp. 145-150, 2000.
- 100) Zhao, R. J., Y. L. Zhang, L. R. Fang, X. R. Liu and Q. S. Zhang: The Xinanjiang Model, IAHS Publ., 129, pp. 351-356, 1980.
- 101) Zhao, R. J.: The Xinanjiang Model Applied in China, Journal of Hydrology, 135, pp. 371-381, 1992.
- 102) Nirupama, Y., Tachikawa, M. Shiiba and T. Takasao: A simple water balance model for a mesoscale catchment based on heterogeneous soil water storage capacity, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute Kyoto University, 45, pp. 61-83, 1996.
- 103) 近藤純正: 表層土壌水分量予測用の簡単な新バケツモデル, 水文・水資源学会誌, 6(4), pp. 344-349, 1993.
- 104) Wood, E. F., D. P. Lettenmaier and V. G. Zartarian: A land-Surface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation models, J. Geophys. Res., 97(D3), pp. 2717-2728, 1992.
- 105) Liston, G. E., Y. C. Sud and E. F. Wood: Evaluating GCM land surface hydrology parameterization by computing river discharge using a runoff routing model: Application to the Mississippi basin, J. Appl. Meteor., 33, pp. 394-405, 1994.
- 106) Xu, L., D. P. Lettenmaier, E. F. Wood and S. J. Burges: A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models, J. Geophys. Res., 99(D7), pp. 14,415-14,428, 1994.
- 107) Nijssen, B., D. P. Lettenmaier, Xu L., S. Z. Wetzel and E. F. Wood: Streamflow simulation for continental-scale river basins, Water Resour. Res., 33(4), pp. 711-724, 1997.
- 108) 平野宗夫: 山地小河川における流出過程について, 土木学会論文報告集, 308, pp. 69-76, 1981.
- 109) 山田 正: 山地小流域の瞬間単位図と斜面長分布の関係, 土木学会論文報告集, 308, pp. 11-21, 1981.
- 110) 山田 正: 時定数スペクトルを用いた山地小流域の洪水流出解析, 土木学会論文報告集, 314, pp. 87-98, 1981.
- 111) 藤田睦博: 斜面長の変動を考慮した貯留関数法に関する研究, 土木学会論文報告集, 314, pp. 75-86, 1981.
- 112) 山田 正・山崎幸二: 流域における保水能分布が流出に与える影響について, 第 27 回水理講演会論文集, pp. 385-392, 1983.
- 113) Beven, K. J., Kirkby, M. J., Schofield, N. and Tagg, A. F.: Testing a Physically-Based Flood Forecasting Model (TOPMODEL) for Three U.K. Catchment, Journal of Hydrology, vol. 69, pp. 119-143, 1984.

- 114) Quinn, P. F., Beven, K. J., and Lamb, R. : The $\ln(a/\tan\beta)$ Index : How to Calculate it and How to Use it in the TOPMODEL Framework, *Hydrological Processes*, vol. 9, pp. 161-182, 1995.
- 115) 高埯琢馬・椎葉充晴・堀 知晴・鈴木俊朗：流出シミュレーションモデル構成の新しい枠組, 水工学論文集, 第 37 卷, pp. 805-808, 1993.
- 116) 高埯琢馬・椎葉充晴・市川 温：構造的モデリングシステムを用いた流出シミュレーション, 水工学論文集, 第 39 卷, pp. 141-146, 1995.
- 117) 高埯琢馬：流出機構, 土木学会水理委員会夏期講習会テキスト, 水工学シリーズ, 67-03, 1967.
- 118) Wood, E. F., Sivapalan, M., Beven, K., and Band, L. : Effects of Spatial Variability and Scale with Implication to Hydrologic Modeling, *Journal of Hydrology*, vol. 102, pp. 29-47, 1988.
- 119) Fan, Y. and Bras, R. L. : On the Concept of a Representative Elementary Area in Catchment Runoff, *Hydrological Processes*, vol. 9, pp. 821-832, 1995.
- 120) 砂田憲吾・木村真章：水文学評価のための最適空間スケールに関する基礎的研究, 水工学論文集, 第 35 卷, pp. 675-678, 1991.
- 121) 市川 温・立川康人・堀 智晴・宝 馨・椎葉充晴：流出計算で考慮すべき降水空間分布スケールに関する基礎的研究, 水工学論文集, 第 46 卷, pp. 133-138, 2002.
- 122) 椎葉充晴：分布型流出モデルの現状と課題, 京都大学防災研究所水資源研究センター研究報告, pp. 31-41, 1995.
- 123) 立川康人・福満匡高・市川 温・椎葉充晴：パラメータの空間分布が流出シミュレーション結果に及ぼす影響について, 水工学論文集, 第 44 卷, pp. 43-48, 2000.
- 124) Entekhabi, D. and Eagleson, P. S. : Land Surface Hydrology Parameterization for Atmospheric General Circulation Models Including Subgrid Scale Spatial Variability, *Journal of Climate*, 2, pp. 816-831, 1989.
- 125) 仲江川敏之・沖 大幹・虫明功臣：線形化モデルによる地表面熱フラックスの集約化 I：領域平均地表面フラックス算定式と集約化規範の導出, 水文・水資源学会誌, 11(3), pp. 201-209, 1998.
- 126) 仲江川敏之・沖 大幹・虫明功臣：線形化モデルによる地表面熱フラックスの集約化 II：不均一な領域における地表面熱フラックスの集約化, 水文・水資源学会誌, 11(3), pp. 210-220, 1998.
- 127) Nakaegawa, T., Oki, T., and Musiake, K. : The Effects of Heterogeneity within an Area on Areally Averaged Evaporation, *Hydrological Processes*, 14, pp. 465-479, 2000.
- 128) 石平 博・小池俊雄・陸 晏皎・早川典生：陸面短波長放射収支のマクロモデル化-地形効果の領域平均化-, 水工学論文集, 第 39 卷, pp. 267-272, 1995.
- 129) 高埯琢馬・椎葉充晴：Kinematic Wave 法における場および定数の集中化, 京都大学防災研究所年報, 第 21 号 B-2, pp. 207-217, 1978.
- 130) 砂田憲吾・青木謙治・藤村拓夫：分布型流出モデルの応答に及ぼす流域要素スケールの影響について, 水工学論文集, 45, pp. 145-150, 2001.
- 131) Bathrust, J. C. : Sensitivity Analysis of the Système Hydrologique Européen for an Upland Catchment, *Journal of Hydrology*, vol. 87, pp. 103-123, 1986.
- 132) Loague, K. M. and Freeze, R. A. : A Comparison of Rainfall-Runoff Modeling Techniques on Small Upland Catchments, *Water Resources Research*, vol. 21, no. 2, pp. 229-248, 1985.
- 133) Loague, K. M. : R-5 Revisited, 2. Reevaluation of a Quasi-Physically Based Rainfall-Runoff Model with Supplemental Information, *Water Resources Research*, vol. 26, no. 5, pp. 973-987, 1990.
- 134) 立川康人・小松良光・宝 馨：移流モデルによる予測降雨場の誤差構造のモデル化と降雨場の発生, 京都大学防災研究所年報, 第 45 号 B-2, 2002, 印刷中.
- 135) 椎葉充晴・高埯琢馬・中北英一：移流モデルによる短時間降雨予測手法の検討, 第 28 回水理講演会論文集, pp. 423-428, 1984.
- 136) 藤田 暁・大東秀光・上坂 薫・椎葉充晴・立川康人・市川 温：分布型流出モデルに基づくダム流入量実時間予測モデルについて, 水工学論文集, 45, pp. 115-120, 2001.
- 137) Waymire, E. C., Gupta, V. K., and Rodriguez-Iturbe, I. : A Spectral Theory of Rainfall Intensity at the Meso- β Scale, *Water Resour. Res.*, vol. 20, no. 10, pp. 1453-1465, 1984.
- 138) Jothityangkoon, C., Sivapalan, M., and Viney, N. R. : Tests of a Space-time Model of Daily Rainfall in Southwestern Australia based on Nonhomogeneous Random Cascades, *Water Resour. Res.*, vol. 36, no. 1, pp. 267-284, 2000.
- 139) 高埯琢馬 (研究代表者)：流出現象の物理機構に関する研究 (60302067), 昭和 60・61 年度科学研究費補助金 (総合研究 A) 研究成果報告書, 1987.
- 140) 日野幹雄・太田猛彦・砂田憲吾・渡辺邦夫：洪水の数値予報 - その第一歩 -, 森北出版, 1989.
- 141) Singh, V. P. and Woolhiser, D. A. : Mathematical Modeling of Watershed Hydrology, *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, vol. 7, no. 4, pp. 271-292, 2002.