

流域地形の新たな数理表現形式に基づく 流域流出系シミュレーションシステムの開発

市川 温¹・村上將道²・立川康人³・椎葉充晴⁴

¹正会員 修士(工学) 京都大学助手 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

²非会員 修士(工学) 潜水建設 (〒 105-8007 東京都港区芝浦 1-2-3)

³正会員 博士(工学) 京都大学助教授 防災研究所水災害研究部門 (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

⁴正会員 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

雨水が集まりながら流下していく過程だけではなく、逆に雨水が広がりながら流下していく過程も表現することのできる新たな地形数理表現形式を基礎として、流域流出系シミュレーションシステムを開発する。はじめに、シミュレーションシステムの基礎となる地形数理表現形式の概要を説明する。つぎに、本シミュレーションシステムの詳細について述べる。とくに、斜面の長さや勾配、接続関係、流出計算順序など、流出計算で必要となる情報を数値地形モデルから算出するプロセスと、表面流・中間流統合型 kinematic wave モデルを用いて山腹斜面からの流出量を計算するプロセスについて詳しく説明する。最後に、本シミュレーションシステムを実際の流域に適用した結果を示す。

Key Words : *digital topographic model, concentration and divergence of water flow, runoff simulation system*

1. はじめに

流出現象のモデル化に数値地形モデルを取り入れた研究が行なわれるようになって久しい。これまで、数値地形モデルを利用した数多くの流出モデルが提案され、また、それに基づいて種々の解析が行なわれてきた。一般に、標高データはグリッド形式で整備されていることが多いため、データ処理が容易であるという利点から、グリッド型数値地形モデルをベースに流れのモデルを構築した例が多い。なかでも、雨水は各格子点の最急勾配方向に流下すると考えることで、流域全体の雨水流下経路(落水線)を決定し、流出追跡計算を行うという方法がしばしば用いられている。この方法は、データ処理が容易であることのほかに、流れのモデルを一次元で考えればよいため、モデルの構成が単純になるという点で非常に有効であるといえる。

しかし、この方法は、各格子点での流下方向が最急勾配方向の一方向に限定されるため、基本的に雨水が集まりながら流下していく機構しか表現できず、逆に雨水が広がりながら流下していく機構をモデルに取り込むことができない。このことを考慮し、筆者らは、データ処理が容易であるというグリッド型数値地形モデルの利点をいかしつつ雨水が集中・発散する過程を表現することのできる新たな地形数理表現形式と、その地形データセットを生成する具体的な作業アルゴリズムを提案している¹⁾。本論文では、筆者らの提案する地形

数理表現形式を基礎として開発した流域流出系シミュレーションシステムについて説明する。まずはじめに、本研究で用いる地形表現形式の概要を説明し、つぎに、この地形表現形式を基礎とした流出系シミュレーションシステムの詳細について述べる。最後に、本システムを実際の流域に適用した結果を示す。

2. 用いる地形表現形式の概要

ここでは、筆者らの提案する地形表現形式¹⁾の概要を説明する。あとで述べる流域流出系シミュレーションシステムは、本地形表現形式をベースとして構成される。

図-1は、円錐状の仮想的な地形を、筆者らの提案する地形表現形式でモデル化したものであり、図-2は、同じ地形を落水線によってモデル化したものである。

筆者らの提案する地形表現形式の最大の特徴は、ある格子点からの雨水流下方向が複数存在することである。落水線によるモデル化では、各格子点における雨水流下方向が最急勾配で下る方向の一方向に限定されているため、斜面の途中からスタートする流水線が多数存在しており、このような発散地形における雨水流下方向が適切にモデル化されているとはいえない。一方、筆者らの提案する地形表現形式では、各格子点からの雨水流下方向を複数許すことによって、すべての流水線が山頂を出発点としており、発散地形における雨水流下方向をより適切に表現している。

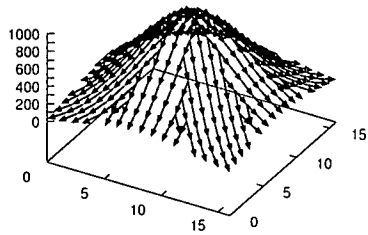


図-1 筆者らの提案する地形表現形式による発散地形のモデル化

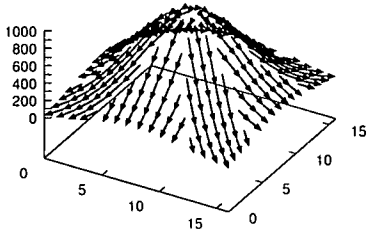


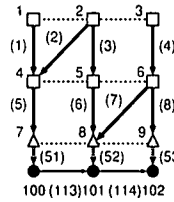
図-2 落水線による発散地形のモデル化

発散型の地形をより適切にモデル化しようとする試みは他にもいくつかみられる(たとえば, Quinn *et al.*²⁾, Costa-Cabral and Burges³⁾, Tarboton⁴⁾など)が, 流れが必要以上に発散したり, 流れ方向の決定方法が, これまでしばしば利用されてきた落水線によるものとは本質的に異なるために, 落水線をベースに研究・開発を進めてきたユーザーには受け入れられにくいという問題があった。筆者らは, 落水線によるモデル化がこれまでよく利用されてきたという事実を重視し, 落水線の考え方を拡張することによって, 発散型の地形にも対応できる地形数値表現形式を提案している。本形式においては, 各格子点における雨水流下方向は次の二つの規則によって決定される。

規則 1 各格子点において, その周りに位置する格子点のうち, 最急勾配で下る方向に位置する点とを結ぶ線を流水線とする。

規則 2 各格子点において, その周りに位置する格子点のうち, 最急勾配で上る方向に位置する点とを結ぶ線も流水線とする。

規則 1 は, 落水線によるモデル化で用いられるものである。しかし前述したように, この規則だけでは, 発散型地形を適切にモデル化することができない。そこで, 規則 2 を用いることによって, 発散型地形に応じた流水線を生成し, 規則 1 で生成された流水線に追加している。こうすることで, 落水線モデルを無理なく拡張し, 斜面上で雨水が流下して集まる過程だけではなく, 発散する過程も表現できるようにしている。



1~9, 100, 101, 102 ノード番号

(1)~(8), (51), (52), (53), エッジ番号
(113), (114)

□ 流域点 → 斜面素片
△ 河道横流域点 → 河道点と河道横流域点を結ぶエッジ
● 河道点 → 河道点と河道点を結ぶエッジ

図-3 地形モデルの模式図

以上のようにしてモデル化された地形は, ノードデータセット・エッジデータセットという形で記録される。ノードとは, 標高値の与えられている点のことで, 格子点と同義である。ノードには流域点と河道点の二種類がある。エッジとは, ノードとノードを結ぶ線のこと, 流水線と同義である。エッジには, 流域点と流域点を結ぶエッジ(このエッジのことを以下では斜面素片とよぶ), 河道点と河道点を結ぶエッジ, 河道点と河道横流域点(河道点と同位置に置かれた流域点)を結ぶエッジの三種類がある。たとえば, 図-3のような地形モデルに対するノードデータセット・エッジデータセットはそれぞれ表-1, 表-2 のようになる。

これら二つのデータセットを組み合わせることで, 斜面素片どうしの接続関係, 斜面素片と河道網の接続関係, 斜面長, 斜面勾配など, 流れのモデルが必要とする情報を容易に得ることができる。

以上をふまえて, 次章では, 本地形表現形式を基礎とした流域流出系シミュレーションシステムについて説明する。

3. 流域流出系シミュレーションシステム

本研究で開発する流域流出系シミュレーションシステムは以下の 6 サブシステムから成る。

- (1) 流域地形データセット生成システム
- (2) 流域分割システム
- (3) 発散型地形処理システム
- (4) 流出計算用データセット作成システム
- (5) 山腹斜面系流出計算システム
- (6) 河道流追跡計算システム

以下, それぞれの作業内容について説明するが, (1) 流域地形データセット生成システム, (3) 発散型地形処理システムについては, 前章の記述ならびに既報¹⁾に重

表-1 ノードデータセット

ノード番号	ノードタイプ	ノードの個別情報				
1	1	65.0	20.0	110.0	100.0	
2	1	75.0	20.0	120.0	100.0	
3	1	85.0	20.0	95.0	100.0	
4	1	65.0	10.0	105.0	100.0	
5	1	75.0	10.0	90.0	100.0	
6	1	85.0	10.0	74.0	100.0	
7	1	65.0	0.0	68.0	100.0	
8	1	75.0	0.0	65.0	100.0	
9	1	85.0	0.0	58.0	100.0	
100	2	65.0	0.0	68.0		
101	2	75.0	0.0	65.0		
102	2	85.0	0.0	58.0		

表-2 エッジデータセット

エッジ番号	エッジを構成するノードの番号	エッジタイプ	エッジの個別情報	
1	1 4	1	10.0	133.3
2	2 4	1	14.1	83.3
3	2 5	1	10.0	100.0
4	3 6	1	10.0	133.3
5	4 7	1	10.0	133.3
6	5 8	1	10.0	100.0
7	6 8	1	14.1	83.3
8	6 9	1	10.0	133.3
51	7 100	2		
52	8 101	2		
53	9 102	2		
113	100 101	3	10.0	
114	101 102	3	10.0	

なる部分が多いため、ここでは詳しく述べずに概念的な説明にとどめる。(6) 河道流追跡計算システムについても、他の文献^{(8),(9)}に記述しているため、本稿では詳しく述べることはしない。

(1) 流域地形データセット生成システム

2. で述べた地形表現形式にしたがって対象流域の地形をモデル化し、流域全体のノードデータセット・エッジデータセットを作成する。ただしここでは、流水線の決定に際して、前述の規則 1 の適用（すなわち、落水線によるモデル化）にとどめておく。このようにする理由については (2) で説明する。

(2) 流域分割システム

一般に流域流出系をモデル化する場合は、対象とする流域の大きさにもよるが、対象流域をいくつかの部分流域に分割し、それぞれに対して流出モデルを適用することが多い。流域の構造の骨格となっているのは河道網であるから、この分割作業は河道網を基準として行なうのが普通である。つまり、流域内を流れる河

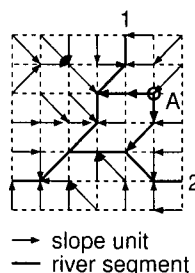


図-4 複数の集水域に属する点

道網をいくつかの部分河道網に分割し、各々の部分河道網の集水域を部分流域とする方法である。

本シミュレーションシステムの基礎となっている地形表現形式では、ノードデータセットとエッジデータセットの組合せで斜面素片どうしの接続関係および斜面素片と河道網の接続関係を把握することができる。そこで、まず、対象とする流域の河道網をいくつかの部分河道網に分割し、各部分河道網に流入する斜面素片から上流に次々と遡ることで各部分河道網の集水域を特定する。そして、流域全体のノードデータセット・エッジデータセットから各集水域の情報を抽出して各集水域ごとのノードデータセット・エッジデータセットとして書き出す。このようにすることで、対象とする流域をいくつかの部分流域に分割することができる。

ただ、この作業を行なう際に、各格子点で流下方向が複数許されていると問題が生じる。たとえば図-4において、点 A（およびその上流域）は、河道区分 1 の集水域に属するとともに、河道区分 2 の集水域にも属することになる。原理的にはそれで正しいのだが、上述の流域分割作業を行なううえでは支障となる。そこで本システムでは、(1) で述べたように、対象流域の地形をまずは落水線でモデル化しておくことにする。こうすることで、各ノード・各エッジは必ずいずれかの集水域に属することになり、この問題を回避することができる。発散型地形への対応は次の (3) で行なうことにする。

(3) 発散型地形処理システム

(2) で作成した各部分流域のノードデータセット・エッジデータセットに対して前述の規則 2 を適用し、発散型地形を表現するための流水線を追加する。

(4) 流出計算用データセット作成システム

(3) で作成した各部分流域のノードデータセットおよびエッジデータセットには、流れのモデルを適用するうえで必要十分な情報が含まれているものの、様々

な形態での利用可能性を残しておくために汎用的な形式となっている。ここでは、ノードデータセット・エッジデータセットから流出モデルで利用しやすい形式のデータセットを作成する。具体的には両データセットから、

- 各エッジの位置、勾配
- エッジ間の接続関係
- 斜面素片の流出計算順序

を求め、別の形式のデータセットとして記録しておく。

a) 各エッジの位置、勾配の算出

エッジデータセットには、各エッジごとに、長さ、面積および両端のノードの番号が記録されている。しかし、流れのモデルを適用する上で基本的な地形量といえるエッジの勾配については記録されておらず、また、他の空間的データ、たとえばレーダ雨量データなどと重ね合わせる際に必要となるエッジの位置についても明示されていない。

一方、ノードデータセットには、各ノードの x, y, z 座標が記録されている。そこでノードデータセットを参照することによって、各エッジの勾配ならびに上下端の位置座標を求め、表-3 に示すフォーマットのデータセットとして記録しておく。このデータセットを edge format V.4 データセットとよぶことにする。ちなみに、表-3 は、表-1 と表-2 に示した両データセットから生成されたものである。表-3 の各カラムの意味は次の通りである。

- (a) エッジ番号
- (b) エッジ上端のノード番号
- (c) エッジ上端の x, y, z 座標
- (d) エッジ下端のノード番号
- (e) エッジ下端の x, y, z 座標
- (f) エッジタイプ
- (g) エッジの長さ ((f) が 2 のときは何も書かない)
- (h) エッジの勾配 ((f) が 2 のときは何も書かない)
- (i) エッジの面積 ((f) が 2 あるいは 3 のときは何も書かない)

表中のエッジタイプが 1 となっているものが斜面素片である。斜面素片に対しては、その長さ、勾配、面積が記録されている。エッジタイプが 2 のものは、斜面と河道の接続関係を示すための仮想的なエッジであるので、長さ、勾配、面積については空欄となっている。エッジタイプが 3 のものは河道を表すエッジで、長さ、勾配が記録されている。

b) エッジ間の接続関係の導出

edge format V.4 データセットを生成したことによって、流れのモデルで必要となる基本的な地形量が明らかとなった。次に必要となるのは、エッジ間の接続関係を知ることである。

edge format V.4 データセットには、各エッジの上端と下端のノードの番号と位置が記録されているだけで、各エッジの上下流に位置するエッジの数や番号は明示されていない。次のステップでエッジの流出計算順序を決定するためには、エッジ間の接続関係を明らかにしておく必要がある。具体的には、まず、edge format V.4 データセットから、あるエッジの上端のノードを上端か下端のいずれかに持つエッジを探してその個数と番号を記憶する。同様にして、そのエッジの下端のノードを上端か下端のいずれかに持つエッジを探してその個数と番号を記憶する。最後に、その結果を表-4 に示すフォーマットのデータセットとして記録しておく。このデータセットを edge connection V.4 データセットとよぶことにする。ちなみに、表-4 は表-3 に示したデータセットから生成されたものである。表-4 の各カラムの意味は次の通りである。

- (a) エッジ番号
- (b) エッジ上端のノード番号
- (c) エッジ上端の x, y, z 座標
- (d) エッジ下端のノード番号
- (e) エッジ下端の x, y, z 座標
- (f) 上流側エッジの数
- (g) 上流側エッジの番号 ((f) 個並べて書く; (f) が 0 のときは何も書かない)
- (h) 下流側エッジの数
- (i) 下流側エッジの番号 ((h) 個並べて書く; (h) が 0 のときは何も書かない)
- (j) エッジタイプ
- (k) エッジの長さ ((j) が 2 のときは何も書かない)
- (l) エッジの勾配 ((j) が 2 のときは何も書かない)
- (m) エッジの面積 ((j) が 2 あるいは 3 のときは何も書かない)

エッジ間の接続関係以外の情報 (カラム (a)~(e), (j)~(m)) については edge format V.4 データセットからそのまま転記する。また、下流側エッジの番号の欄 (カラム (i)) において、番号が正のものと負のものがあるが、これは、いま対象としているエッジの下端ノードに対して、流入する方向で接続しているものには正号を、流出する方向で接続しているものには負号を付けるという規則で記述しているためである。たとえば、表-4 を見ると、エッジ 1 の下端には 2 つのエッジが接続しており (カラム (h))、その番号は -5, 2 となっている (カラム (i))。ここでいま一度 図-3 を見てほしい。エッジ 1 の下端では、エッジ 2 とエッジ 5 が接続しているが、エッジ 2 は、エッジ 1 の下端に対して流入する方向で接続しており、エッジ 5 は流出する方向で接続している。この違いを表すためにエッジ番号に符号を付けているのである。

この規則は、エッジ上端における接続関係を表す際

表-3 edge format V.4 データセット

(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)
1	1	65 20 110	4	65 10 105	1	10	0.5	133.3
2	2	75 20 120	4	65 10 105	1	14.1	1.064	83.3
3	2	75 20 120	5	75 10 90	1	10	3	100
4	3	85 20 95	6	85 10 74	1	10	2.1	133.3
5	4	65 10 105	7	65 0 68	1	10	3.7	133.3
6	5	75 10 90	8	75 0 65	1	10	2.5	100
7	6	85 10 74	8	75 0 65	1	14.1	0.638	83.3
8	6	85 10 74	9	85 0 58	1	10	1.6	133.3
51	7	65 0 68	100	65 0 68	2			
52	8	75 0 65	101	75 0 65	2			
53	9	85 0 58	102	85 0 58	2			
113	100	65 0 68	101	75 0 65	3	10	0.3	
114	101	75 0 65	102	85 0 58	3	10	0.7	

表-4 edge connection V.4 データセット

(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)
1	1	65 20 110	4	65 10 105	0		2	-5 2	1	10	0.5	133.3
2	2	75 20 120	4	65 10 105	1	-3	2	-5 1	1	14.1	1.064	83.3
3	2	75 20 120	5	75 10 90	1	-2	1	-6	1	10	3	100
4	3	85 20 95	6	85 10 74	0		2	-7 -8	1	10	2.1	133.3
5	4	65 10 105	7	65 0 68	2	1 2	1	-51	1	10	3.7	133.3
6	5	75 10 90	8	75 0 65	1	3	2	-52 7	1	10	2.5	100
7	6	85 10 74	8	75 0 65	2	4 -8	2	-52 6	1	14.1	0.638	83.3
8	6	85 10 74	9	85 0 58	2	4 -7	1	-53	1	10	1.6	133.3
51	7	65 0 68	100	65 0 68	1	5	1	-113	2			
52	8	75 0 65	101	75 0 65	2	6 7	2	-114 113	2			
53	9	85 0 58	102	85 0 58	1	8	1	114	2			
113	100	65 0 68	101	75 0 65	1	51	2	-114 52	3	10	0.3	
114	101	75 0 65	102	85 0 58	2	52 113	1	53	3	10	0.7	

にも適用されている。たとえば、図-3において、エッジ2の上端ではエッジ3が接続しているが、エッジ2から見てエッジ3は流出する方向で接続している。そこで、表-4のエッジ2の行を見ると、カラム(g)には3ではなく、-3と記録されていることがわかる。この規則を用いることで、エッジ間の流出入関係を明確にすることができる。

c) 斜面素片の流出計算順序の決定

b) で導出したエッジ間の接続関係をもとに、斜面素片の流出計算順序を決定する。

斜面素片における流出計算は、上流側の斜面素片から下流側の斜面素片へと順に行なわれるので、上で作成した edge connection V.4 データセットを流出計算が可能な順に並び替え、再び edge connection V.4 形式で書き出す。具体的な手順は以下の通りである。

まず、河道点と河道横流域点を結ぶエッジ(エッジタイプ2)からスタートして、縦型探索(たとえば奥村⁵⁾など)の要領で次々と上流の斜面素片をたどっていく。流域最上流の斜面素片に到達したら、一つ下流の斜面素片に戻り、上流に位置する他の斜面素片をたどって

いく。このようにして、行きつ戻りつしながら斜面素片群をくまなく探索し、ある斜面素片に再び戻ってきたときに、その斜面素片に計算順位をつける。こうすることで、任意の斜面素片より上流に位置する斜面素片には、必ずその斜面素片より早い計算順位がつけられることになる。始点のエッジまで順位がつけられれば、次の河道点と河道横流域点を接続するエッジを始点として同様の手続きを繰り返す。対象とするデータセットに含まれる全ての斜面素片および河道点と河道横流域点を結ぶエッジに順位がつけられれば、その順位にしたがってデータを書き出す。河道点と河道点を結ぶエッジ(エッジタイプ3)については、ここで示す流れのモデルとは独立した別のモデルで計算することを想定しているため、順位付けを行わず、すべての斜面素片および河道点と河道横流域点を結ぶエッジのデータを書き出したあとに追加して記録するだけとする。

表-5は表-4に示したデータセットを上記の手続きにしたがって並べ替えたものである。各カラムの意味は表-4と同じである。

以上で流れのモデルを適用するうえで必要な情報が

表-5 計算可能な順に並べ替えた edge connection V.4 データセット

(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)
1	1	65 20 110	4	65 10 105	0		2	-5 2	1	10	0.5	133.3
2	2	75 20 120	4	65 10 105	1	-3	2	-5 1	1	14.1	1.064	83.3
5	4	65 10 105	7	65 0 68	2	1 2	1	-51	1	10	3.7	133.3
51	7	65 0 68	100	65 0 68	1	5	1	-113	2			
3	2	75 20 120	5	75 10 90	1	-2	1	-6	1	10	3	100
6	5	75 10 90	8	75 0 65	1	3	2	-52 7	1	10	2.5	100
4	3	85 20 95	6	85 10 74	0		2	-7 -8	1	10	2.1	133.3
7	6	85 10 74	8	75 0 65	2	4 -8	2	-52 6	1	14.1	0.638	83.3
52	8	75 0 65	101	75 0 65	2	6 7	2	-114 113	2			
8	6	85 10 74	9	85 0 58	2	4 -7	1	-53	1	10	1.6	133.3
53	9	85 0 58	102	85 0 58	1	8	1	114	2			
113	100	65 0 68	101	75 0 65	1	51	2	-114 52	3	10	0.3	
114	101	75 0 65	102	85 0 58	2	52 113	1	53	3	10	0.7	

すべて整ったことになる。

(5) 山腹斜面系流出計算システム

各部分流域ごとに、斜面素片における雨水の流れを、表面流・中間流統合型 kinematic wave モデル⁶⁾で上流側から逐一追跡計算する。

a) 基礎方程式

表面流・中間流統合型 kinematic wave モデルの基礎方程式は以下の2式で与えられる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \quad (1)$$

$$q = \begin{cases} ah, & (0 < h < d) \\ \alpha(h-d)^m + ah & (h \geq d) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 h : 水深 [m], q : 単位幅流量 [m²/sec], t : 時間 [sec], x : 空間座標 [m], r : 降水強度 [m/sec], $\alpha = \sqrt{\sin\theta/n}$, θ : 斜面勾配 [rad], n : Manning の粗度係数 [m^{-1/3} sec], m : 定数 [-] (> 1), $a (= k \sin\theta/\gamma)$: 地中水実質流速 [m/sec], k : 透水係数 [m/sec], γ : A 層空隙率 [-], $d (= \gamma D)$: A 層の空隙部分の深さ [m], D : A 層厚 [m] である。

ここで、伝播速度 $c = dq/dh$ として、上式を変形すると、

$$\frac{\partial q}{\partial t} + c \frac{\partial q}{\partial x} = cr \quad (3)$$

となる。

b) 差分解法

式(3)を差分法によって解くことを考える。まず、対象とする斜面素片に $s+1$ 個の計算断面を設ける。斜面素片の長さを L とすると、隣り合う計算断面間の距離 Δx は L/s として与えられる。対象とする斜面素片の計算断面 i における時刻 $t = j \cdot \Delta t$ での流量を $q_{i,j}$ ($i = 0, 1, \dots, s$) と書くことにする。

いま、時刻 $j \cdot \Delta t$ において、すべての計算断面での流量が既知であるとする。さらに、斜面素片上端(計

算断面 0) における時刻 $(j+1) \cdot \Delta t$ での流量 $q_{0,j+1}$ も既知であるとする。実際、(4) c) で決定した順序にしたがって流出計算を行なうのだから、ある斜面素片の計算を行なう時点では、その斜面素片の上流域の計算はすべて終わっており、その斜面素片への流入量は既知となっているはずである(対象とする斜面素片が流域最上流に位置する場合は $q_{0,j+1} = 0$ とする)。

式(3)を Beven⁷⁾が提案した手法を参考にして以下のように差分化する。

$$\begin{aligned} & \frac{q_{i,j+1} - q_{i,j}}{\Delta t} + \\ & \theta c_{i-1/2,j} \left(\frac{q_{i,j+1} - q_{i-1,j+1}}{\Delta x} - r \right) + \\ & (1 - \theta) c_{i-1/2,j} \left(\frac{q_{i,j} - q_{i-1,j}}{\Delta x} - r \right) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

となる。ここで、 $c_{i-1/2} = 0.5(c_i + c_{i+1})$, θ は時間重み係数である。式(4)の未知量 $q_{i,j+1}$ に関する項を左辺に移項すると、

$$\begin{aligned} & q_{i,j+1} \left(1 + \theta c_{i-1/2,j} \frac{\Delta t}{\Delta x} \right) = \\ & q_{i,j} + \theta c_{i-1/2,j} \Delta t \left(\frac{q_{i-1,j+1}}{\Delta x} + r \right) \\ & - (1 - \theta) c_{i-1/2,j} \Delta t \left(\frac{q_{i,j} - q_{i-1,j}}{\Delta x} - r \right) \end{aligned} \quad (5)$$

となる。式(5)の左辺の係数は、時刻 $(j+1) \cdot \Delta t$ の時点では既知であるから、 $q_{i,j+1}$ の値は即座に求まる。この計算をすべての計算断面に対して繰り返し行なう。

ひとつの斜面素片の流出計算を終えたら、斜面素片下端での単位幅流量に斜面素片の幅をかけて全幅流量に変換し、これを下流に位置する斜面素片の上端に与えて同様に流出計算を行なう。

以上の計算手続きを(4) c) で決定した順に全ての斜面素片に対して適用することによって、河道に接続しているすべての斜面素片からの流出量を求め、これらをすべて足し合わせて当該部分流域からの流出量とする。

c) 分流の扱い

本研究で用いる地形数表現形式では、発散型の地形に対応するよう拡張されているため、一つの格子点から複数の斜面素片が発する場合もありうる。それゆえ、流れのモデルにおいても、雨水が合流を繰り返して流下するという過程だけではなく、一つの斜面素片を流下してきた雨水が分流して下流側の斜面素片に流入するという過程も扱うことができるように拡張しておく必要がある。

まず単純なケースとして、ある格子点から二つの斜面素片が発する場合を考える。その格子点に流入してきた流量を、下流の二つの斜面素片にどのように配分するか決めることができれば、あとは本節の a), b) に示した手順で流出計算を行なうことが可能である。

いま、ある格子点への流入量の総和を Q 、下流の二つの斜面素片への流出量を Q_1, Q_2 と書くことにすると、

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (6)$$

$$Q_1 = \alpha_1 Q, \quad Q_2 = \alpha_2 Q \quad (7)$$

と書くことができる。 α_1, α_2 を流量配分率とよぶことにする。当然のことながら、 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ である。

分流部での流量配分率は、本来、下流側斜面素片の幅や勾配、分岐する角度などの関数になっているはずだが、ここでは一案として、Manning 式を援用して下流側斜面素片への流量配分率を計算する方法を展開する。

斜面素片上の流れは幅広矩形水路上の薄層流として扱うことが可能なので、 Q_1, Q_2 は Manning 式を使って以下のように表される。

$$Q_1 = \frac{\sqrt{I_1}}{n_1} B_1 h_1^{5/3} \quad (8)$$

$$Q_2 = \frac{\sqrt{I_2}}{n_2} B_2 h_2^{5/3} \quad (9)$$

n_i, B_i, h_i, I_i ($i = 1, 2$) は、それぞれの斜面素片における Manning の粗度係数、斜面幅、水深、斜面勾配である。

ここで、分流点では下流側斜面素片上端の水深が一致していると仮定すると、 $h_1 = h_2$ である。この関係を用いると、流量配分率 α_1 は以下のように表される。

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{Q_1}{Q} = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} \\ &= \frac{\frac{\sqrt{I_1}}{n_1} B_1 h_1^{5/3}}{\frac{\sqrt{I_1}}{n_1} B_1 h_1^{5/3} + \frac{\sqrt{I_2}}{n_2} B_2 h_2^{5/3}} \\ &= \frac{\frac{\sqrt{I_1}}{n_1} B_1 h_1^{5/3}}{\frac{\sqrt{I_1}}{n_1} B_1 h_1^{5/3} + \frac{\sqrt{I_2}}{n_2} B_2 h_1^{5/3}} \end{aligned}$$

$$= \frac{\frac{\sqrt{I_1}}{n_1} B_1}{\frac{\sqrt{I_1}}{n_1} B_1 + \frac{\sqrt{I_2}}{n_2} B_2} \quad (10)$$

同様に α_2 も以下のように表される。

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \frac{Q_2}{Q} = \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} \\ &= \frac{\frac{\sqrt{I_2}}{n_2} B_2}{\frac{\sqrt{I_1}}{n_1} B_1 + \frac{\sqrt{I_2}}{n_2} B_2} \quad (11) \end{aligned}$$

一般に、ある格子点から N 個の斜面素片が分岐しているとして、第 i 番目の斜面素片への流量配分率 α_i は次式で表される。

$$\alpha_i = \frac{\frac{\sqrt{I_i}}{n_i} B_i}{\sum_{j=1}^N \frac{\sqrt{I_j}}{n_j} B_j} \quad (12)$$

以上に述べた方法は、流量配分率が地形量と Manning の粗度係数のみから決定されるため、非常に簡便である。しかし、流れのモデルの基礎式としては Manning 式を用いているわけではないので矛盾している。今後は、流れのモデルの流量流積関係式を用いて流量配分率を計算する方法についても検討する必要がある。

(6) 河道流追跡計算システム

各部分流域で計算された斜面系からの流出量を河道網への側方流入量として河道流を追跡計算する。河道流追跡モデルとしては、kinematic wave モデル、河道網集中型 kinematic wave モデル⁸⁾、河道網系 dynamic wave モデル⁹⁾ 等が利用可能である。

4. 実流域への適用

以上述べてきた流域流出系シミュレーションシステムを実際の流域に適用する。対象流域は大戸川流域（建設省大鳥居流量観測所より上流）である（図-5）。大戸川は淀川水系瀬田川の支川で、流域全体の面積は 189.5 km²、大鳥居地点より上流では 148.9 km² である。

(1) 流域地形データセットの生成

まず、大戸川流域の地形をモデル化し、流域全体のノードデータセット・エッジデータセットを作成した。地形モデル作成のソースデータとしては、国土地理院数値地図 50 m メッシュ（標高）と、国土数値情報 KS-271（河川単位流域台帳）、KS-272（流路位置）を使用した。

(2) 流域の分割

つぎに、大戸川流域の地形データセットを七つの部分流域のデータセットに分割した。図-6 に流域分割の

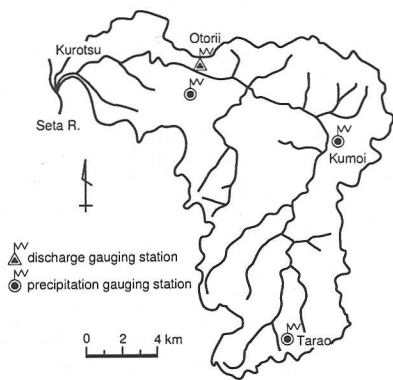


図-5 大戸川流域

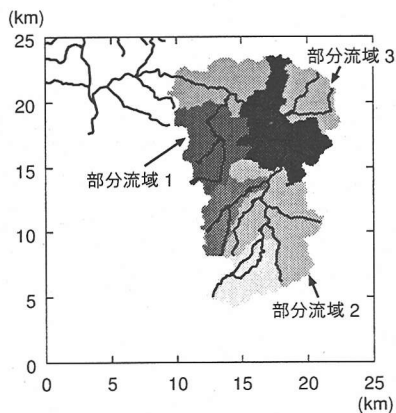


図-6 流域の分割

様子を示す。

(3) 発散型地形の処理

分割してできた各部分流域のノードデータセット・エッジデータセットに、発散地形を表現するための流水線を追加した。図-7, 8 は、大戸川上流の一支川集水域の地形モデルを拡大して表示したものである。図-7 は、発散地形を表現する流水線を追加する前のもの、図-8 は流水線を追加した後のものである。図-8 の黒のやや太い実線が追加された流水線である。

(4) 流出計算用データセットの作成

各部分流域のノードデータセット・エッジデータセットを 3. (4) で示した手順にしたがって処理し、流出計算用地形データセットを作成した。

(5) 山腹斜面系での流出計算および河道流の追跡計算

3. (5) で示した手法を用いて各部分流域からの流出量を計算し、これを側方流入条件として河道流の追跡

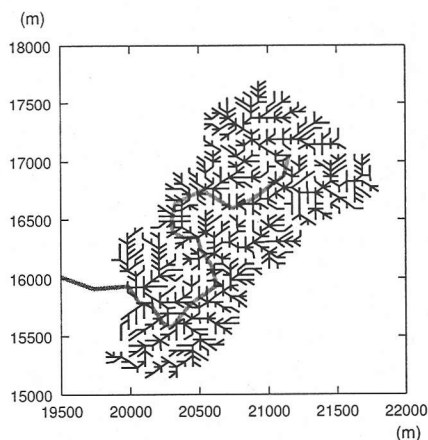


図-7 発散地形を表現する流水線を追加する前の地形モデル (黒の細い実線は落水線、灰色の太い実線は河道を表す)

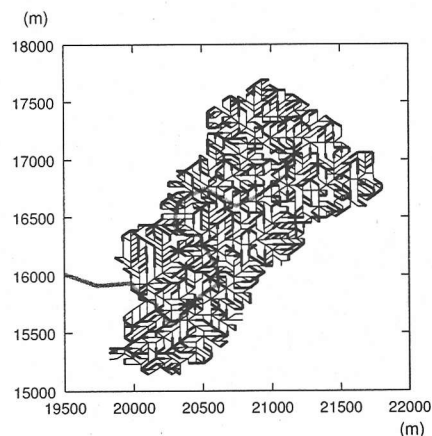


図-8 発散地形を表現する流水線を追加した後の地形モデル (黒のやや太い実線が追加された流水線)

計算を行なった。河道流の計算には河道網集中型 kinematic wave モデル⁸⁾を使用した。表面流・中間流統合型 kinematic wave モデルのパラメタ値としては、 n : $0.6 \text{ m}^{-1/3} \text{ sec}$, m : 1.667 , k : 0.015 m/sec , γ : 0.15 , D : 1.0 m を用い、河道網集中型 kinematic wave モデルのパラメタ値として、粗度係数: $0.05 \text{ m}^{-1/3} \text{ sec}$ を用いた。これらの値については、文献^{6),10)} を参考に決定した。

また降水データとしては、建設省所管の大鳥居、雲井、多羅尾の各観測所で得られたデータを使用した。

(6) 流出計算結果

図-9 は、1982年8月1日から3日にかけての出水(ケース1)に対する計算結果である。流域を構成する七つの部分流域から三つの部分流域(図-6中の部分流

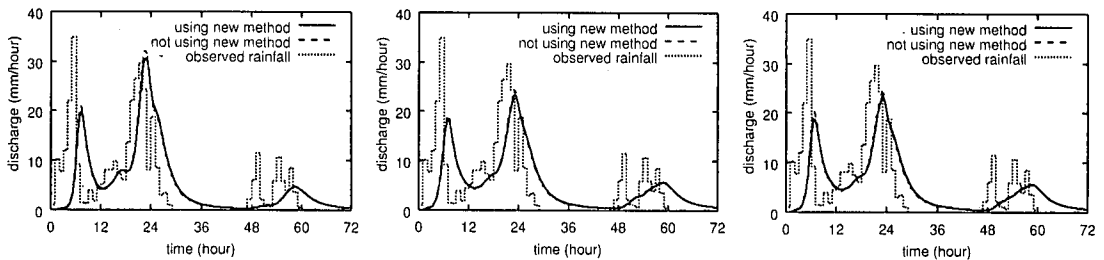


図-9 斜面域下端での流出ハイドログラフ (ケース 1) (左から順に, 部分流域 1, 2, 3)

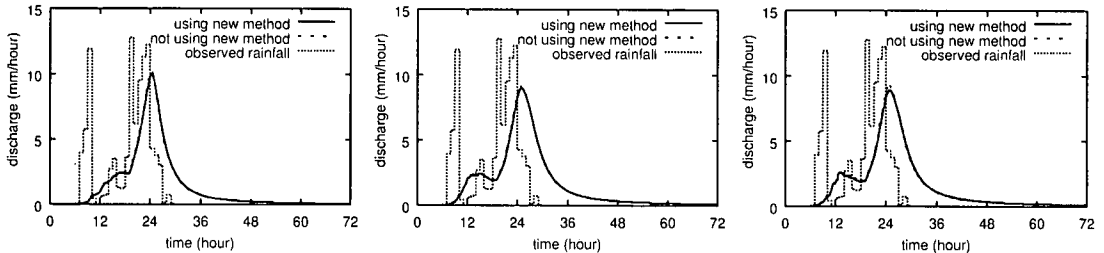


図-10 斜面域下端での流出ハイドログラフ (ケース 2) (左から順に, 部分流域 1, 2, 3)

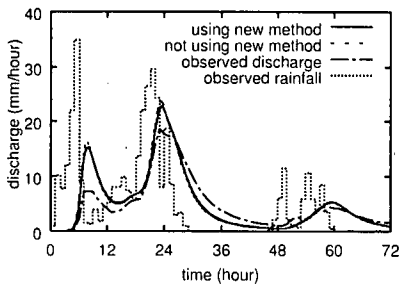


図-11 ケース 1 における流域下端での計算流量と観測流量

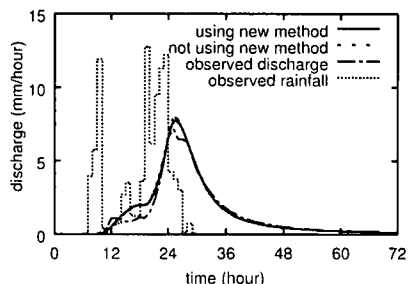


図-12 ケース 2 における流域下端での計算流量と観測流量

域 1, 2, 3) を取り出し, それらにおける斜面域下端での流出ハイドログラフ (実線) を示している。また, 比較のため, 従来の落水線モデルによる計算結果もあわせて示している (図中の破線のハイドログラフ)。実線と破線を比較すると, いずれの部分流域でも, ほぼ重なってはいるがピークの部分で実線のほうが若干低くなっていることがわかる。これは, 発散地形に対応するように斜面素片を追加したことによって, 雨水の流下に伴う集中だけではなく発散も表現されるようになったためにピーク流量が低減したものと考えられる。

図-10 は, 1990年9月19日から22日にかけての出水 (ケース 2) に対する計算結果で, 図-9 と同じ部分流域の斜面域下端での流出ハイドログラフを示している。このケースにおいても, ケース 1 と同様, ピーク流量が低減する傾向が見られる。

図-11, 12 はそれぞれ, ケース 1, ケース 2 における流域下端での計算流量と観測流量を比較したもので

ある。実線が本研究で構築したモデルによる計算流量, 破線が落水線モデルによる計算流量, 一点鎖線が観測流量, ステップ状の点線が有効降雨である。計算流量と観測流量の一致の程度を Nash-Sutcliffe 指標で評価したところ, 従来の落水線モデルでは, ケース 1 に対して 0.647, ケース 2 に対して 0.919 であったが, 本研究で構築したモデルではそれぞれ 0.704, 0.933 となり, 今回の適用事例においては, 落水線モデルを若干上回る結果が得られた。

5. おわりに

本論文では, 筆者らの提案する地形数理表現形式¹⁾を基礎として開発した流域流出系シミュレーションシステムについて説明し, 実際の流域に適用した結果を示した。以下, 本論文の内容を要約し, 得られた成果をまとめる。

2. では本システムの基礎となる地形数値表現形式の概要を説明し, 3. で本システムの詳細について述べた。とくに, ノードデータセット・エッジデータセットから流出計算で必要となる情報を求めるサブシステムと山腹斜面からの流出を計算するサブシステムについて詳しく述べた。前者については, 各エッジの位置と勾配, エッジ間の接続関係, 斜面素片の流出計算順序を求める方法とそれらを記録するデータセットの具体的なフォーマットを示した。後者については, 雨水流れを記述する基礎式とその解法, ならびに, 一つの格子点から複数の斜面素片が分岐する場合の流量配分率を決定する方法を示した。4. では, 本システムを実際の流域に適用し, 従来の落水線モデルによる流出計算結果ならびに観測値と比較して, 発散型地形が流量波形に与える影響と観測値に対する再現精度を検証した。その結果, 本研究で構築したモデルでは, 落水線モデルにくらべてピーク流量が低減すること, 観測値の再現精度が若干向上することが明らかとなった。ただ, 両モデルの計算結果はほぼ同等といってもよいものであり, 落水線モデルに代えて, 本研究で構築したモデルを積極的に利用する強い根拠とはなりにくいかもしれない。しかし, 本研究で構築したモデルは, 落水線モデルに比べて, 流域の地形構造により忠実な形で流出系をモデル化しており, また, モデルの構造そのものが落水線モデルを拡張したものであるため, 落水線モデルを利用してきた研究者・実務者にも受け入れられやすいものと考えている。

最後に, 本研究で開発した流域流出系シミュレー

ションシステムの計算機プログラムソースコードは <http://fmd.dpri.kyoto-u.ac.jp/~flood/geohyomos/geohyomos.html> で公開していることを付記する。

参考文献

- 1) 椎葉充晴, 市川 温, 榊原哲由, 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. G21 / II-47, pp. 1 - 9, 1999.
- 2) Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P. and Planchon, O.: The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models, *Hydrol. Proc.*, 5, pp. 59 - 80, 1991.
- 3) Costa-Cabral, M. and Burges, S. J.: Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas, *Water Resour. Res.*, 30(6), pp. 1681 - 1692, 1994.
- 4) Tarboton, D. G.: A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models, *Water Resour. Res.*, 33(2), pp. 309 - 319, 1997.
- 5) 奥村 晴彦: C 言語による最新アルゴリズム事典, 技術評論社, 1991.
- 6) 椎葉 充晴: 流出系のモデル化と予測に関する基礎的研究, 京都大学博士論文, 1983.
- 7) Beven, K.: On the Generalized Kinematic Routing Method, *Water Resour. Res.*, 15(5), pp. 1238 - 1242, 1979.
- 8) 高棟 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, 第 38 巻, pp. 809 - 812, 1994.
- 9) 市川 温, 村上 将道, 立川 康人, 椎葉 充晴: グリッドをベースとした河道網系 dynamic wave モデルの構築, 水工学論文集, 第 42 巻, pp. 139 - 144, 1998.
- 10) 日野 幹雄, 太田 猛彦, 砂田 憲吾, 渡辺 邦夫: 洪水の数値予報, 森北出版, 1989.

(2001. 2. 15 受付)

DEVELOPMENT OF A BASIN RUNOFF SIMULATION SYSTEM BASED ON A NEW DIGITAL TOPOGRAPHIC MODEL

Yutaka ICHIKAWA, Masamichi MURAKAMI, Yasuto TACHIKAWA and Michiharu SHIIBA

A basin runoff simulation system is developed on the basis of a new digital topographic model which can describe both concentration and divergence of water flow. At first, the digital topographic model is briefly stated which is the basis of the runoff simulation system. At second, the runoff simulation system is elaborated, especially the data processing to extract the information used in a runoff model (slope length, gradient, connections among slope units, order of runoff computation, etc.) and the method to calculate runoff discharge from slope area by using kinematic wave model. Finally, the application results of the runoff simulation system are presented.