

TIN-DEMデータ形式を用いた流域場情報システムの開発

Development of a basin geomorphic information system using a TIN-DEM data structure

高棹琢馬*・椎葉充晴**・立川康人***・大江郁夫****

By Takuma TAKASAO, Michiharu SHIIBA, Yasuto TACHIKAWA and Ikuo OOE

A geographic information system in hydrologic modeling, BGIS(Basin Geomorphic Information System) is presented for modeling a river basin using a TIN-DEM(Triangulated Irregular Network - Digital Elevation Model) data structure. BGIS is made up by four modules, (1) a module for making a triangle based terrain model, (2) a module for joining isolated vally segments to a channel network, (3) a module for getting rid of pits, (4) a module for subdividing triangular facets. Using a data set processed with BGIS, a watershed source area for any segments in a stream network can be delineated. BGIS was applied for Inakawa basin(54.0km²) and Arakawa experimental basin(0.184km²).

keywords : GIS, TIN-DEM, watershed modeling, disributed rainfall-runoff model

1. はじめに

流域斜面のどのような地形量が雨水流出にどの程度影響しているかを評価するためには、実地形の地形形状を忠実に取り込んだ雨水流出モデルが必要になる。この雨水流出モデルを構築するためには、まず、流域地形を忠実に表現する流域場のモデリング手法を開発することが基本となる。本研究の目的はこのモデリング手法を開発することである。

地表面の標高データを利用し地形形状をモデル化する手法として、[1]等高線図モデル、[2]グリッドモデル、[3]三角形網モデル、が従来より提案されている¹⁾²⁾。最近、国土数値情報のメッシュ標高データ・流路位置データなどの数値地形情報を利用して流出モデルを構築する研究、河川流域の地形形状を解析する研究が盛んに行われているが、これらの研究も流域場の表現手法によって、等高線図モデルを流出解析に応用した研究³⁾⁴⁾、グリッドモデルを流出モデルまたは流域地形解析に応用した研究⁵⁾⁻¹¹⁾、三角形網モデルを流出解析または地形解析に応用した研究¹²⁾⁻¹⁵⁾に分類される。これらの3つの数値地形モデルを雨水追跡のモデル化に利用する場合の得失をまとめると表-1 のようになる。

*	正会員	工博	京都大学教授	工学部土木工学科	(〒606 京都市左京区吉田本町)
**	正会員	工博	京都大学助教授	工学部土木工学科	(同上)
***	正会員	工修	京都大学助手	工学部土木工学科	(同上)
****	学生員		京都大学大学院	土木工学専攻	(同上)

表-1 雨水追跡のモデル化から見た数値地形モデルの比較

数値地形モデル	モデル化の方法	利点	欠点
等高線図モデル Contour based DEM	等高線上の点を代表点とし地表面を表す。	・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。	・流域規模でモデル化する場合、データ数が膨大となる。 ・複雑な地形に対応できない可能性がある。
グリッドモデル Grid based DEM	流域にかけたメッシュの格子点を代表点とし地表面を表す。	・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位置の対応がとりやすい。 ・電子計算機での処理が容易である。	・流れ方向が4または8方向に限定される。 ・窪地の根本的な解決が困難。
三角形網モデル Triangulated Irregular Network DEM	流域を三角形要素網で覆い、三角形要素の頂点を代表点とし地表面を表す。	・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可能である。 ・河道、流域界を三角形要素の辺として表すことができる。	・流域を三角形要素で矛盾無く覆うシステムが必要となる。

等高線図モデルは、データ量が膨大となり、流域規模でのモデル化には向かない。モデル化が容易であること、データの加工が容易であることを考えると、三角形網モデルまたはグリッドモデルが流域規模での雨水追跡のモデル化に向いている。三角形網モデルで地形を表現すると、実際の地形形状に即した雨水の流れ方向を表現できるという利点があり、また、窪地の発生など実際の地形形状とモデルでの地形形状が異なる場合、実際の地形形状に照らしあわせて、新たに頂点を追加して三角形を再構成することにより、実地形に即した地形モデルを構成できるという利点がある。一方、グリッドモデルはデータ構造が簡単で取扱いやすいが、窪地が発生した場合、メッシュ格子点の標高を修正するか、または、逆流を許すなど便宜的な方法しか取ることができない。流域の地形量を多数の流域で統計的に調べる場合ならば、実地形の形状とモデルでの地形形状に多少の乖離があってもいいのかもしれないが、筆者らは、対象とする流域において、地形形状が雨水の流出に影響するのかわからないのか、影響するならばどのような地形量が重要かを明らかにしたい。したがって、対象とする流域において、窪地等が発生して実地形と矛盾が起こる場合には、実地形にあうように地形形状を修正できるモデルが望ましい。

以上の理由により、流れのモデルと結合することを前提として流域場を実地形に忠実に表現する手法としては、地表面を面として近似する三角形網モデルが最も適している。対象とする流域において、窪地等が発生して実地形と矛盾が起こる場合には、実地形にあうように三角形要素を再構成するようなシステムを開発し、実地形に即したモデルを構成すればよい。作業量は対象とする流域によっては多くなるかもしれないが、1回だけやればよいことであり、流出計算のたびにやる必要はない。しかし、ただ三角形で地表面を覆えばよいのではなく、河道網構造および河道網に接続する斜面を認識できるデータ形式で流域場を表現する必要がある。このような流域場のモデル化手法として、筆者らは、メッシュ標高データと河道の点列のデータを情報源とし、これらのデータから流域を三角形要素の集合体として表現するアルゴリズムおよびデータ構造を提案してきた¹²⁾¹³⁾。

本研究では、対話的な三角形要素生成システム、対話的な窪地解消システムなど流域場を三角形要素網で表現するための一連のアルゴリズムを全て計算機プログラムとして実現し、木曽川上流の伊奈川流域(54km²)および荒川試験地(0.184km²)に本システムを適用した。その結果を報告する。

2. データ構造

流域場を表現するために、本システムによって最終的に作成されるデータは1つの流域に対して、

表-2 流域場情報システムによって構成されるデータ構造

(a) 三角形要素のデータ構造

三角形	メッシュ番号	頂点番号	隣接三角形番号	辺の性質	辺の属性	法線ベクトル
a	1	1 2 10	NULL b e	3 1 2	0 2 4	-0.71 0.71 0.07
b	1	2 11 10	a f c	2 1 3	4 1 4	-0.71 0.71 0.07
c	1	11 5 10	b m d	1 3 3	4 3 4	-0.89 -0.41 0.09

辺の性質: 1 流出辺, 2 流れに平行な辺, 3 流入辺

辺の属性: 1 谷, 3 河道, 4 斜面, 5 尾根, 0 メッシュをかけた範囲の境界

(b) 頂点座標のデータ構造

頂点番号	座	標
1	25.00	100.00 301.25
2	50.00	100.00 287.55
3	75.00	100.00 288.89
⋮	⋮	⋮

(c) 河道網のデータ構造

リンク番号	下流リンク番号	上流リンク番号	河道を構成する頂点番号
1	NULL	2 3	10, 11, 12
2	1	NULL	12, 13, 14
3	1	NULL	12, 15

- [1] 頂点の座標を記録するデータセット
- [2] 三角形要素の情報を記録するデータセット
- [3] 河道網構造を記録するデータセット

からなる。図-1のように流域を三角形要素で表現したときのデータの例を表-2に示す。図-1(a)中の番号は各頂点に付けられた番号であり、英字は各三角形要素を表している。図-1(b)は河道網を表している。表-2(a)は三角形要素の情報を記録したデータセットの例であり、表-2(b)は各頂点の座標を記録したデータセットの例である。このデータセットでは、各三角形要素の属するメッシュ番号、三角形要素を構成する頂点番号、隣接する三角形要素番号、三角形要素の辺の流入属性、三角形要素の辺の属性、法線ベクトルを記録している。ここで辺の流入属性とは、辺から雨水が流入する可能性があるか流出する可能性があるかを示す属性であり、法線ベクトルと辺の方向ベクトルの外積をとれば簡単に算定できる。例えば、図-2の辺 ab は他の三角形要素に雨水が流出する辺なので流出辺であり、辺 bc、辺 ca は他の三角形要素から雨水が流入する可能性がある辺なので流入辺である。辺の属性とは、辺が河道、尾根、谷、斜面のどれを構成するのかを示す属性である。河道を構成する辺は始めからわかっているので、辺には河道という属性が設定されるが、辺が尾根か、谷か、斜面かは、辺の流入属性をもとに決定する。隣あう三角形要素が共有する辺の流入属性が、どちらの三角形要素から見ても流出辺ならばその辺は谷であり、流入辺であればその辺は尾根になる。一方が流入辺でもう一方が流出辺ならばその辺は斜面の途中にある辺である。表-2(c)は河道網構造を記録するデータセットの例である。表中のリンクとは、水源または合流点から合流点または流域下端までの河道部分を表す。リンクには番号が付けられており、各リンクの上下流のリンク番号、リンクを構成する頂点の番号が記録されている。

3. 流域場情報システムの実現

システム全体の構成を図-3に示す。前処理システムは、流域場情報システムへの入力データセットを作成するシステムである。流域場情報システムとは2.で示したデータを作成するシステムであり、5つのモ

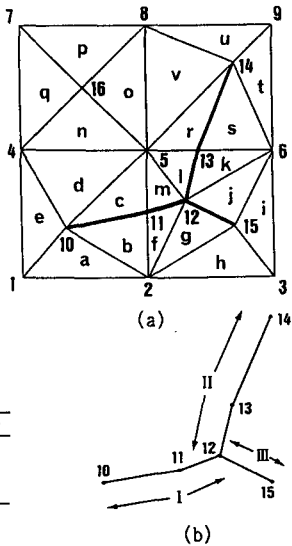


図-1 三角形要素による流域の表現
(a) 流域の三角形要素表現
(b) 河道網構造

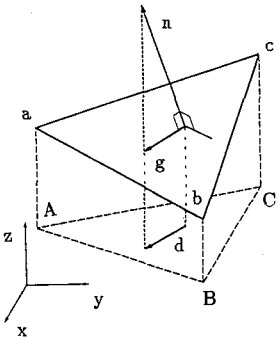


図-2 三角形要素の模式図

ジュールからなる。地形解析システムとは、流域場情報システムで作成したデータを用いて、流域の様々な地形の所量を求めるシステムである。

3. 1 前処理システム

前処理システムでは、流域場情報システムへの入力となるデータ

[1]メッシュ標高データ

[2]流路位置データ

を作成する。メッシュ標高データは、対象流域を覆う領域に等間隔のメッシュをかけ、国土数値情報の標高データファイルからメッシュ格子点の標高を内挿して作成したデータである。また、流路位置データは、国土数値情報の流路位置データファイルの河道とメッシュ標高データの各辺との交点を求め、その交点によって河道網を表現するデータである。タブレットから読み取って作成した等高線データと河道の位置を表す点列のデータからこの2つのデータを作成するシステムも用意している。

3. 2 流域場情報システム

流域場情報システムは5つのモジュールで構成される。

[1]メッシュ標高データと流路位置データをもとに流域を三角形要素で

覆うモジュール

[2]河道上の頂点の標高値がそのまわりの頂点の標高値と矛盾しないよう

に標高を設定するモジュール

[3]窪地を解消するモジュール

[4]流域内部の谷が河道と接続するように河道網を再設定するモジュール

[5]三角形要素が1つだけ流出辺を持つように三角形要素を細分割するモジュール

(a) 流域を三角形要素で覆うモジュール

メッシュ標高データと流路位置データをもとに流域を三角形要素で表現するためのデータセットを作成する。図-4に、三角形要素を作成する簡単な例を示す。図中に示したx-y軸は水平面内の座標軸を示している。頂点A～Fはメッシュ標高データの頂点であり、線分MNは河道である。メッシュABEFのように河道が横切らないメッシュでは、メッシュ中央に頂点Lを追加し、メッシュを4個の三角形要素に区分する。追加した頂点の高度は周囲の頂点のデータを使って内挿するものとする。メッシュBCDEのように河道がメッシュを通る場合は、河道とメッシュ辺との交点を頂点に加えて、河道が三角形の辺になるように、メッシュをいくつかの三角形に分割する。

メッシュを河道が通るパターンは、図-4に示した形に限られず、メッシュ間隔が大きいと、メッシュを多数の河道が通ったり、メッシュ内に複数の河川合流点があるなど複雑なパターンが起こり得る。これら複雑なパターンが生じるのはまれであって、それらを自動的に検出し、電子計算機と対話しながら分割していくようにする方が現実的である。したがって、これらの複雑なメ

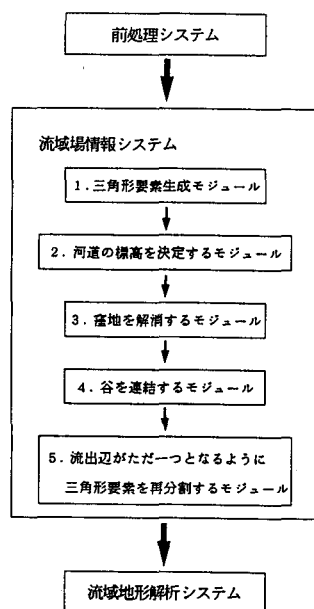


図-3 システム全体の構成

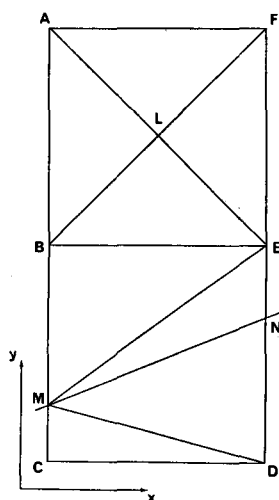


図-4 メッシュの三角形要素分割

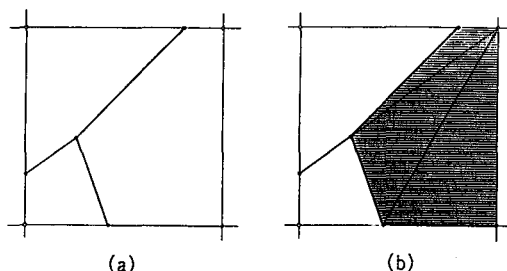


図-5 対話的にメッシュを三角形分割する例
(a) システムが検出した複雑なパターンのメッシュ
(b) 対話的な三角形要素分割

ッシュだけは自動的に検出し、オペレータが必要に応じて頂点を追加し、メッシュを三角形要素に分割するシステムを構成した。図-5 (a)はシステムが検出した複雑なパターンメッシュの例であり、カーソルで必要な頂点の位置を指示し、三角形要素への分割を指示して図-5 (b)のようにメッシュを分割する。太線は河道を表し、図中の斜線部は分割が確定した三角形要素を表す。

(b) 河道上の頂点の標高を設定するモジュール

流路位置データを構成する河道の点列とメッシュ辺との交点の標高は、河道の点列のデータから線型内挿によって求めている。したがって、本来、谷となるはずの河道上の辺が、谷とならない場合が現れる。そこで、河道となる三角形要素の辺が谷とならない場合、河道が必ず谷となるように、河道を構成する頂点の標高を調整する。

(c) 窪地を解消するモジュール

複雑に等高線が入り組んでいる場合や、メッシュ間隔が大きい場合、図-6の頂点Aのように、実際には窪地でないのに窪地となる場合がある。窪地とは、周りのどの代表点よりも標高の低い点であり、一度、雨水が流れ込むとそこからでることはできない。そのままにしておくと実際の雨水の流れとモデルでの雨水の流れが著しく異なることになる。

数値地形モデルを利用して雨水の流れを取り扱う場合に必ず直面する問題であるが、グリッドモデルでは、本質的な解決は難しく、格子点の標高を調整することによって解決するなど、便宜的な方法をとらざるをえない。一方、三角形要素で流域を表現する場合、新たに頂点を加えて三角形要素を作成しなおすことによって、合理的に対処することができる。そこで、窪地を自動的に検出し、実地形にあうようにオペレータが頂点を追加して、三角形を再構成し、窪地を解消するシステムを開発した。図-7は、システムが検出した窪地とそのまわりの三角形要素を表示し、新たに入力する頂点の位置を十字カーソルで指示した例である。この後、標高を入力して三角形要素を再構成する。窪地解消のアルゴリズムを示す。

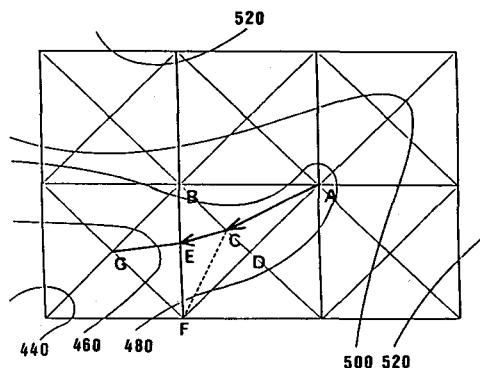


図-6 窪地解消の模式図

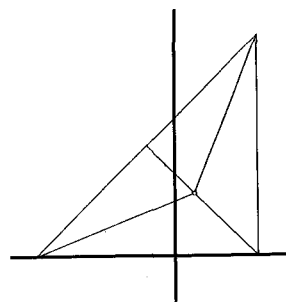


図-7 システムが検出した窪地

- [1] 標高が、隣接するすべての頂点の標高よりも低い頂点（窪地）を探す（図-6の頂点A）。
- [2] 地形図より、流下方向と交差すると考えられる頂点を、[1]で探索した頂点の対辺上に設定し（図-6の頂点C）、地形図より妥当な標高値を設定する。この頂点を用いて、三角形要素を新たに作成する（図-6では、三角形ABC, ACD, BFC, CFDを新たに作成する）。
- [3] 新しく設定した頂点到隣接するすべての頂点の標高を調査し、この頂点が窪地であるかどうかを判定する。窪地でなければ、作業を終了する。窪地であれば、[2]に戻る。

(d) 河道網を再設定するモジュール

流域内には谷となる辺が多数数えられる。これらの谷が河道網とつながっていない場合、その谷に流入する雨水が、流域内部の河道網に流入するのに対象流域外に流れるのかが判定できない。例えば、図-8において、斜面の流下方向が図中の矢印の方向である場合、谷となる辺aeに接続する三角形要素acb, abeに流入する雨水は河道網に流入するの、それとも流域外に流れ

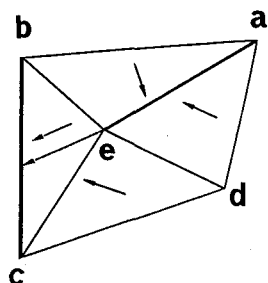


図-8 河道網と連結しない谷の模式図

出るのかわからない。そこで、谷の最下端の頂点 e から最急勾配方向に下り、その谷が河道網に到達するかどうかを判定する。最急勾配方向に下った結果、河道網に到達すれば、その谷および河道網に到達するまでの経路を河道網の一部として考え河道網を再構成する。図-9に河道網を再構成する例を示す。図-9(a)の実線は再構成前のリンクであり、点線は河道網に接続しない谷を示す。谷の再下端から下って、河道網に到達する場合は図-9(b)のように谷および谷までの経路を河道網と考え、

リンク番号を新たに設定する。谷から最急勾配方向に下がる場合には、三角形要素を細分割しながら下り、新たに河道網の一部を形成する三角形要素の辺には、河道の属性を設定する。

(e) 三角形要素を再分割するモジュール

以上の準備をもとに流出辺がただ一つとなるように三角形要素を細分割する。三角形要素の細分割は、すべての頂点からそれを含む周りのすべての三角形要素について、最急勾配方向に登る線分を次々と追跡しながらおこなう。ただし、細分割によって新たにできる頂点についてはこの作業を行う必要はない。図-10は三角形要素の細分割の模式図である。図中の細矢印は雨水の流下方向を表し、太矢印は頂点から最急勾配方向に登る線分を表す。細分割のアルゴリズムを次に示す。

- [1] 頂点からそれを含む三角形要素内の最急勾配方向に登り、対辺との交点を求める(図-10の頂点 e)。
- [2] 求めた交点が頂点、または、頂点に非常に近い場合は頂点に登ったと考えて追跡をやめる。
- [3] 交点が対辺上にある場合は三角形要素を分割する(図-10で三角形 cbd を cde と ceb に、三角形 abd を eda と eab に分割する)。
- [4] 求めた交点が尾根の辺上にあれば追跡をやめる。
- [5] そうでなければ、交点から次の三角形要素上で最急勾配方向に登り、新たに辺との交点を求める(図-10の点 f)。
- [6] [2] に戻る。

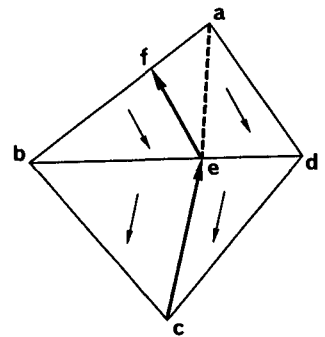


図-10 三角形要素の細分割

4. 流域場情報システムの適用

本システムを木曽川上流の伊奈川流域(54.0km²)、野洲川支川の荒川上流域の荒川試験地(0.184km²)に適用した。流域場情報システムのそれぞれのモジュールでデータを加工した後の三角形要素の個数、頂点の個数を表-3に示す。伊奈川流域ではメッシュサイズ500mで総メッシュ数546個のうち対話的に処理する必要があるメッシュは17個、総頂点数1123点のうち窪地は5点、同様に荒川試験地ではメッシュサイズ25mで

表-3 各モジュールによるデータ加工後の頂点数と三角形要素数

モジュール	伊奈川流域		荒川試験地	
	頂点数	三角形要素数	頂点数	三角形要素数
三角形要素生成モジュール	1123	2146	1058	2016
窪地を解消するモジュール	1151	2202	1071	2042
谷を連結するモジュール	1185	2240	1100	2100
三角形要素を再分割するモジュール	3900	7682	3304	6483
メッシュサイズ	500 m		25 m	
窪地数	5 個		2 個	

総メッシュ数510個のうち対話的に処理する必要のあるメッシュ数15個、総頂点数 1058点のうち窪地は5点であった。システムと対話的に処理する必要のあるメッシュ数、窪地の個数は、流域面積・流域の地形形状の複雑さ・メッシュサイズに関係するすると考えられるが、今回、対象とした流域では作業量は非常に少なかった。

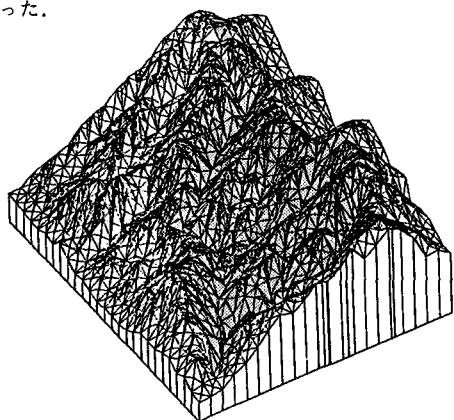


図-11 伊奈川流域の流域内部の三角形要素

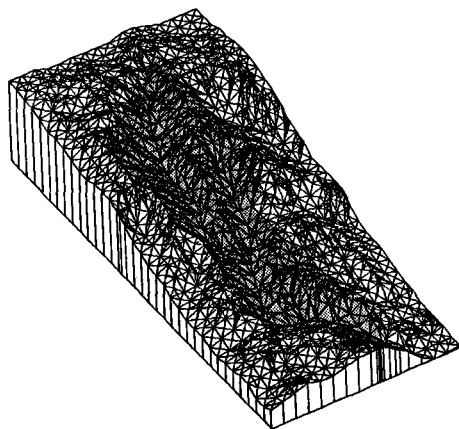


図-12 荒川試験地の流域内部の三角形要素

5. 流域地形解析システム

流域場情報システムで作成されるデータセットをもとに流域内の所量を求めるシステムの1つとして河道網の任意の河道区分に流入する三角形要素を特定するシステムを開発した。三角形要素の情報を記録するデータセットでは、三角形要素のどの辺が河道網を構成するかわかっている。したがって、河道に直接、接している三角形要素からはじめて、各三角形要素にその雨水が流入する三角形要素を次々とたどって行くことによって、その河道区分への斜面流出に寄与するすべての三角形要素を探索することができる。対象としている流域の下流端より上流にあるすべての河道区分についてこの作業を行えば、この河道網に寄与するすべての三角形要素が探索できる。河道網に流入する三角形要素と流入しない三角形要素の境界の辺を連ねた線が流域界を表すことになる。図-11および図-12は伊奈川流域及び荒川試験地において、河道網に流入する三角形要素を表示したものである。

6. おわりに

メッシュ標高データと河道の点列のデータから流域を三角形要素の集合体としてモデル化するための計算機システムを実現した。特に、メッシュ内部を河道が複数通過し、三角形の分割を自動的に行うことが不可能とシステムが判断した場合には、オペレータが対話的に頂点を追加し三角形分割を指示できるようなシステムを開発した。また、モデル化した流域内部に窪地が存在する場合、実際の地形形状から判断してそれが本当に窪地でなければ、オペレータが対話的に頂点を追加し三角形を細分割指示して窪地を解消できるようなシステムを開発した。

冒頭でも述べたように、筆者らは、対象とする流域において地形形状が雨水の流出に影響するのかわからないのか、影響するならばどのような地形量がどのように影響を及ぼすのかを明らかにすることが最終的な目的である。そのために、実地形に忠実な地形モデルを構築するための手法を開発した。今回、本システムを適用した伊奈川流域、荒川試験地、ともに作業量は非常に少なかった。仮に作業量が多かったとしても、これらの作業は対象とする流域について一回だけ行えばいい作業である。流出計算のたびにやる作業ではない。作業量よりもむしろ、実地形の形状とモデルでの地形形状に乖離がある場合のほうが問題となる。

流域地形は空間上の三角形要素の連続した集合体として表現されることになるので、斜面の傾斜、方位、日射量などの算定が可能である。さらに、単に流域を三角形の集合体で表しているのではなく、三角形要素間で雨水がどのように授受されるかを考慮して三角形要素を構成するので、流域内の谷・尾根の位置、流域界も計算機内で自動的に算定することができる。

今後の課題は、斜面の様々な特性を算定する地形解析ツールを開発して流域地形の特性を抽出すること、流れのモデルを開発し流域特性と流出特性の関連を解析することである。

なお、本研究を進めるに当たり、(財)河川情報センターの補助をうけた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1)西尾崇・清水英範・柴崎亮介：3次元数値地図システムにおける地形表現に関する研究，土木学会45回
年次講演会，PS-5，pp.10-11，1990.
- 2)Jett, S. C., Weeks, A. D., Grayman, W. M. and Gates, W. E. : Geographic Information Systems in
Hydrologic Modeling, Proc. of the Hydrologic Transport Modeling Symposium, 10-11 December
1979, Hyatt-Regency Hotel, New Orleans, Louisiana, A. S. A. E., pp. 127-137, 1979.
- 3)O'Loughlin, E. M. : Prediction of surface saturation zones in natural catchments by
topographic analysis, Water Resources Research, vol 22(5), pp 794-804, 1986.
- 4)Moore, I. D. and Foster, G. R. : Hydraulics and Overland Flow, in Process Studies in
Hillslope Hydrology, John Wiley & Sons, (ed.) Anderson, M. G. and BURT, T. P., Chapter 7,
pp. 215-254, 1990.
- 5)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.
- 6)陸旻皎・小池俊雄・早川典生・益倉克成：分布型流出モデルのための河道特性の評価，水工学論文
集，第35巻，pp. 161-166，1991.
- 7)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.
- 8)宝 馨・高棹琢馬・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巻，pp. 135-142，1991.
- 9)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巻，pp. 149-154，1991.
- 10)Tarboton, D. G., R. L. Bras and I. Rodriguez-Iturbe : The Analysis of River Basins and
Channel Networks Using Digital Terrain Data, Dept. of Civil Engineering, M.I.T, TR No. 326,
Cambridge, Mass., 1989.
- 11)Wyss, J., Williams, E. R. and Bras, R. L. : Hydrologic Modeling of England River Basins Using
Rader Rainfall Data, Journal of Geophysical Research, vol 95, No. D3, pp 2143-2152, 1990.
- 12)高棹琢馬・椎葉充晴・立川康人：T I N - D E Mデータ形式による流域地形の表現について，水工学論
文集，第35巻，pp. 75-80，1991.
- 13)高棹琢馬・椎葉充晴・立川康人・大江都夫：流域地形の数値モデルに関する研究，水文・水資源学会
1991年研究発表会要旨集，pp. 206-209，1991.
- 14)Palacios-Velez, O. L., and B. Cuevas-Renaud: Automated river-course, ridge and basin
delineation from digital elevation data, Journal of Hydrology, vol 86, pp. 299-314, 1986.
- 15)Jones, N. L., Wright, S. G. and Maidment, D. R. : Watershed delineation with triangle-based
terrain model, J. Hydr. Div., ASCE, vol. 116(10), pp. 1232-1251, 1990.