

三角形要素網による流域地形の 数理表現に関する研究

立川康人¹・椎葉充晴²・高棹琢馬³

¹正会員 博士(工学) 京都大学助教授 防災研究所水害研究部門(〒611 宇治市五ヶ庄)

²正会員 工博 京都大学教授 防災研究所水害研究部門(〒611 宇治市五ヶ庄)

³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 京都市左京区吉田本町)

実流域の流域地形構造にできるだけ忠実な分布型降雨流出シミュレーションモデルを構築することを目的とし、数値地形情報を用いて雨水の流動場を三角形要素網によって自動的にモデル化する手法を提案する。本手法は、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ことに特徴がある。ここでは、流域地形の数理表現手法における本手法の位置付けを明確にし、流出場のモデル化のための計算機アルゴリズムおよびその実流域への適用例を示す。

Key Words : basin topography, DEMs(digital elevation models), triangulated irregular network-DEM, distributed rainfall-runoff model

1. はじめに

流域に降った雨はさまざまな過程を経て河道に到達する。これまで、その過程を説明する多くの理論が発表してきた。そのなかでも特に石原・高棹が、出水過程の本質が雨水の流動であるという観点にたち山腹斜面を主な対象として中間流出理論^{1),2)}を展開し、降雨から流量への変換系を統一的に表現したこと³⁾は非常に意義深い。これらの研究はその後に発表された "variable source area concept" (たとえば Betson & Marius⁴⁾, Dunne & Black⁵⁾) を説明することをすでに可能としており、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・椎葉は河道網構造にしたがって雨水を逐一追跡するための出水解析法^{6),7)}を提案し、さらに、地形パターン関数という形で流域の地形効果を導入した雨水流モデル^{8),9)}を提案して、より流域の地形構造を考慮した形で、斜面・河道網系の流出を扱う研究を進めてきた。

ここまで的研究により、流域の物理的構造を直接組み込んだ出水モデルを構成し、地形構造と出水特性との関連を解明するという目的に対して、

- 実際の河道網構造に即した河道流の追跡法
- 種々の斜面形状に対応した雨水流法

が構築され、地形構造と流出との関連が論じられた。ただし、地形パターン関数を導入した雨水流モデルは、実際の山腹斜面の形状を取り込んだ形では展開されていないので、より流域地形構造に即した流出モデルを構成するためには、実際の斜面形状を直接組み込んだ斜

面上の流れのモデルを構成する必要がある。

このためには、流域内部のさまざまな山腹の斜面形状を扱えるように流出場を設定しなければならない。地形図をもとに河道の位置情報を取得することは大した作業ではないが、斜面形状となると試験地規模の小流域でもかなりの作業を要し、さらに流域規模となると、手作業ではほとんど不可能である。しかし、幸いなことに今日の電子計算機の発展に合わせて国土数値情報等^{10),11)}のデジタル化された地理的情報が整備され、一般にも公開されるようになっている。この数値地理情報を情報源として流出場をモデル化することを考えれば、流域規模で実地形に即した流れの場のモデルを構成することも不可能ではない。

以上のことを背景に、筆者らは、実流域の地形構造にできるだけ忠実な分布型降雨流出モデルを構築することを目的とし、数値地形情報を用いて雨水の流動場を三角形要素網によってモデル化する手法を提案してきた^{12),13),14),15),16),17)}。本論文では、これまでの研究をまとめて流域地形の数理表現手法における筆者らの手法の位置付けを明確にするとともに、これまでに改良してきた流出場のモデル化のための計算機アルゴリズム、およびその実流域への適用例を示す。ここで構成する流出場のモデル化手法と流れのモデル化手法と結合することによって、流域地形形状に即した流出シミュレーションシステムを構築することになる。

以下、次章で実際の山腹斜面がどのような形状をしているか、地形図をもとに読み取った例を示す。このことが以下の研究を進める上での動機となっている。次

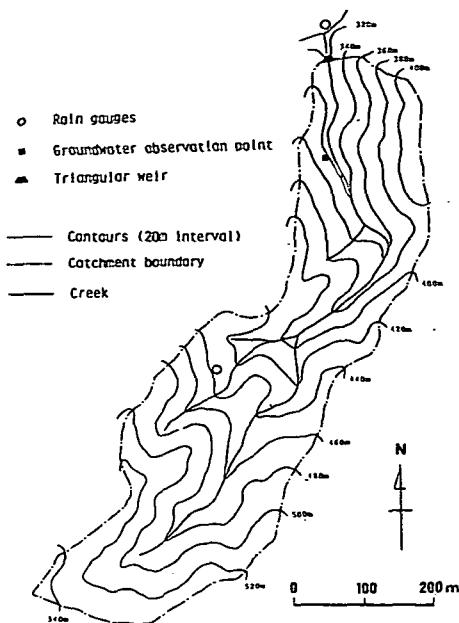


図-1 荒川試験地の概略

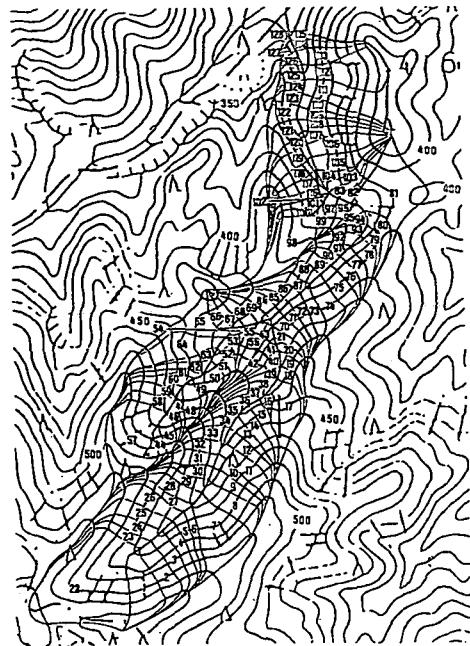


図-2 荒川試験地の斜面分割

に流出場の構成に関するこれまでの研究成果を整理した上で、本論で提案する三角形要素網による流域地形のモデル化手法と他の手法との違いを述べ、本手法を実現するための計算機アルゴリズム、および実流域への適用結果を提示する。

2. 流域斜面特性の抽出

実際の流域斜面はどのような形状をしているだろうか。地形図をもとに手作業で斜面形状を計測し、それらの特性を抽出してみよう。ここでは、以下の手順で山腹斜面を斜面要素に分割し、各斜面要素の形状を計測した¹⁸⁾。

- (a) 河道上に一定の距離ごとに分点を設定する。
- (b) これらの分点から河道の両側の斜面をさかのぼる最急勾配線（等高線を垂直に横切る線）を描く。
- (c) 最急勾配線は分水界に漸近しながら流域内で最も標高の高い点まで遡ることに注意して、隣合う最急勾配線と最急勾配線の間の距離が非常に小さくなれば最急勾配線は一致するものとする。
- (d) 隣合う最急勾配線と河道にはさまれた斜面を1つの斜面要素とする。

図-2は、国土地理院発行の1/25,000地形図を用いて、荒川試験地梅ヶ谷流域(0.184km²)¹⁹⁾（図-1）の斜面を分割した例であり、各斜面要素の番号を図中に

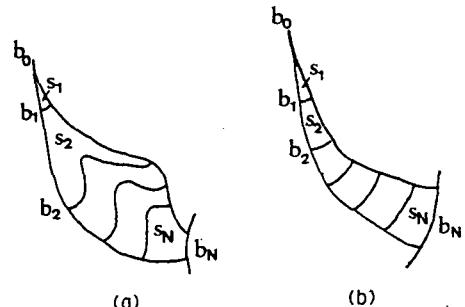


図-3 斜面要素の形状

示している。河道上に設定した分点の間隔は20mであり、分割斜面の個数は128個となった。斜面要素の形状は図-3の(a)谷型斜面、(b)尾根型斜面のどちらかの形状を示すことがわかる。地形図上でプラニメータを用いて斜面要素のデータ

- 斜面要素内の等高線の長さ（斜面幅）， $b_i, i = 1, \dots, N$
- 斜面要素内のとなりあう等高線ではさまれた部分の面積， $S_i, i = 1, \dots, N$

を測定し、これらの測定結果をもとに分割斜面の面積 S_i 、等高線間の平均距離 l_i 、平均斜面長 L 、平均斜面

幅 B を

$$S = \sum_{i=1}^N S_i \quad (1)$$

$$l_i = \frac{2S_i}{b_i + b_{i-1}} \quad (2)$$

$$L = \sum_{i=1}^N l_i \quad (3)$$

$$B = \frac{S}{L} \quad (4)$$

として求めた。

得られたデータを整理して斜面要素の平均斜面長と面積の関係を図-4に示す。図中、黒丸は図-2の分割図から判断して谷型斜面と思われる斜面要素を表し、白丸は尾根型斜面と思われる斜面要素を表している。図中の番号は図-2の斜面要素のうち、谷型斜面に付けて番号を示す。一点鎖線は斜面要素が長方形であると仮定した場合の斜面長と面積の関係であり、この線によって谷型斜面と尾根型斜面をだいたい分離することができる。谷型斜面の個数は13個であって個数は少ないものの、全流域面積のうち約37%を占めていた。この図から以下のことを読み取ることができる。

- 斜面要素は様々な形状をとり、谷型斜面と尾根型斜面に大きく分類できる。
- 谷型斜面は個々の面積が大きく、全流域面積に占める割合も比較的大きい。
- 谷型斜面と尾根型斜面は斜面長が同程度の長さであり、斜面幅の変動が流出形態を考える上で重要なである。

収束する山腹斜面において表面流が発生しやすいとする Dunne & Black の観測結果⁵⁾、山腹斜面の形状が A 層の存在と関連して流出の特徴に大きな影響を与えることを示した高樟・椎葉の研究^{8),9)}、荒川試験地を対象として流域を部分円錐形斜面の集合で表現した砂田の流出シミュレーション結果²⁰⁾など、いずれも山腹斜面での流出現象を考える場合、流域斜面上の流下方向が収束するような形状をしているか、それとも流下方向が発散して行くような形状をしているかが重要な意味を持つことを指摘している。

これらの研究成果と実際の斜面形状の計測結果から判断して、斜面形状が流出に影響を及ぼしているのは明かである。しかし、流域規模で斜面形状を考慮した流出モデルを実現しようと考えると、上記のように手作業で斜面形状を計測するのは不可能である。山腹斜面での雨水の流れを考慮した形で流出場を数理的に表現し、山腹斜面特性を自動的に抽出することを考えねばならない。

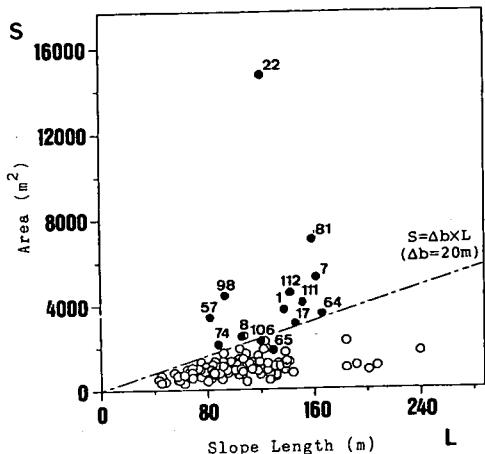


図-4 平均斜面長と面積の関係

3. 流域地形の数理表現

流域地形に則した流出モデルを構成するためには、流域地形に則した流出場のモデルを構成し、それを土台として斜面上の雨水の流動を取り扱う必要がある。こうしたことを目的とし、近年の電子計算機の発達、地理情報システムなど地理データを扱うソフトウェアの充実、国土数値情報等の数値地形情報の整備等を背景として、数値標高データを用いた流域地形の解析や流出シミュレーションシステムの構築が多数行なわれるようになっている。本章では、数値地理情報を降雨流出モデルの構築または流域地形解析に利用した研究成果を簡単に振り返り、本研究で提案する手法との違いを明かにしておく。

(1) 流域地形の数理表現と分布型流出モデル

流域地形は、ある規則に基づいて離散的に取得される標高値の集まりで表現され、その表現形式を数値地形モデル (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²¹⁾ (図-5 参照)。

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

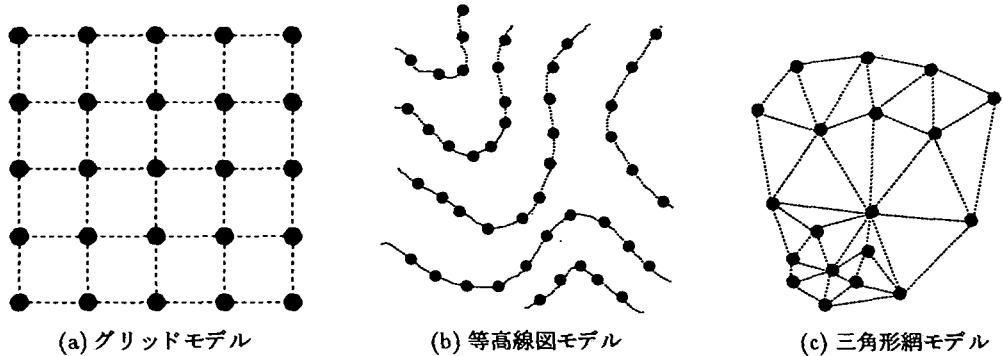


図-5 流域地形の数理表現

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雨水の流れ方向が限定されること、窪地が発生した場合に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。

これらの表現形式を利用して、地形解析や地形特性の抽出を目的とした研究、流出場のモデル化および流出シミュレーションシステムの構築を目的とした研究が多数なされている。グリッドモデルを利用した研究は、O'Callaghan & Mark²²⁾が格子状に配列された標高データから河道網を抽出する計算機アルゴリズムを提案して以来、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の開発や、抽出された河

道網を用いて河川流域の地形形状を解析する研究等、地形解析および地形特性の抽出を目的として盛んに行われるようになった^{23),24),25),26),27),28),29)}。また、グリッドモデルを用いて流出シミュレーションシステムの構築を目的とした研究としては、代表的なものにSHE(Système Hydrologique Européen)³⁰⁾があり、各水文過程を総合的に結合した流出シミュレーションシステムを実現している。BevenとKirkbyによって提案されたTOPMODEL(Topography-based hydrological model)³¹⁾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を構成する研究も多くなされ、Woodら³²⁾はそれを利用して、流出現象のスケール効果を述べている。また、陸ら^{33),34),35)}はグリッドモデルによって決定される雨水の流れ方向にしたがって、雨水を逐一 kinematic wave モデルを用いて追跡するシステムを構築しており、流出モデルに適したグリッドモデルの構成法³⁶⁾についても言及している。

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少ない。O'Loughlin³⁷⁾、Mooreら³⁸⁾は、等高線データをもとに最急勾配線を電子計算機を用いて追跡し、隣り合う最急勾配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、Mooreら³⁹⁾は、さらに自動分割された流域ごとに雨水の流れをkinematic wave モデルで追跡するシステムを提案している。三角形網モデルをもとにした研究としては、Palaciousら⁴⁰⁾は河道、尾根を自動的に抽出するアルゴリズムを提案しており、Vieux⁴¹⁾、Googrichら⁴²⁾は三角形網で構成した流出場において、二次元のkinematic wave式を構成して流出シミュレーションを行なっている。これらに対して、高樟ら^{14),15),16)}、Tachikawaら¹⁷⁾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

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、流れ方向が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。 陸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"> 最急勾配方向ととも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。

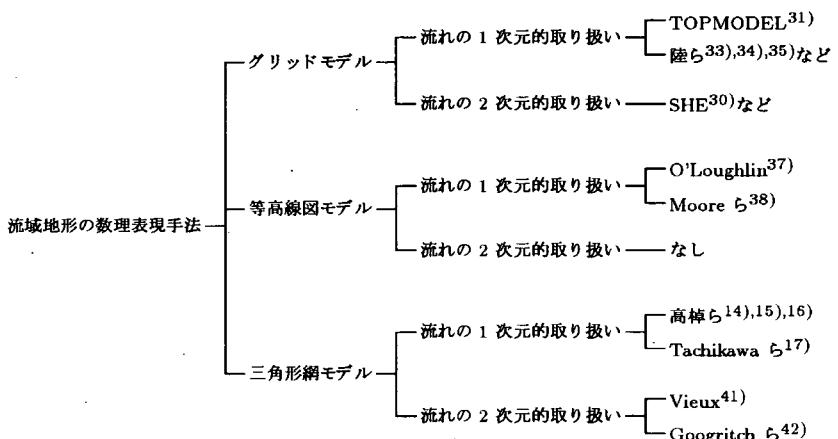


図-6 数値地形モデルを用いた流出シミュレーションモデルの分類

角形網を構成するシステムを開発している。これらの研究をさらに

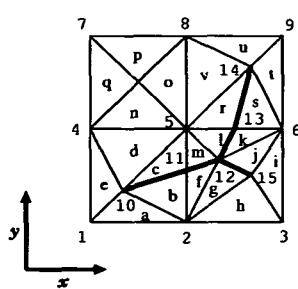
- 斜面を分割して流れを1次元的に取り扱う方法
 - 対象とする領域をグリッド網または三角形網で多い、流れを2次元または3次元的に取り扱う方法
- に分類して整理すると、図-6 のようになる。

(2) 三角形要素網による流域地形の数理表現の提案

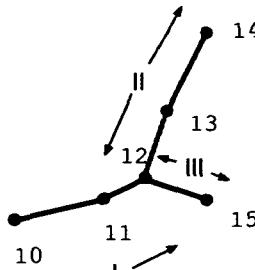
流域地形を山腹斜面形状や河道網構造に即して数理的に表現し、流出現象を再現できる流出シミュレーションシステムを構成するというのが本研究の目的である。さらに、流域全体で見た場合、流域地形のどのような諸量が流出形態を支配しているかを探り、それをもとに合理的な流出モデルの集中化手法を考えたい。山腹斜面での流出現象を考えると、斜面形状が流下方向に収束していく形状をしているか、それとも発散していく形状をしているかが重要な意味をもっている。したがって、流域地形のどのような諸量が流出形態を支配

しているかを探ろうとする場合、個々の斜面要素の形状を抽出できるように流出場のモデルを構成すべきである。このような立場にたった場合、もっともふさわしい流域地形の表現形式はどうあるべきだろうか。

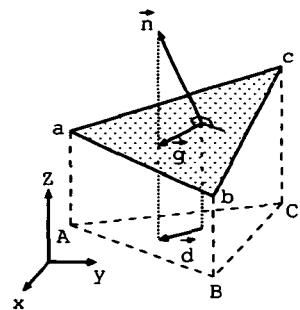
流れを二次元的または三次元的にとらえる場合は、対象とする領域全体をグリッド網または三角形網で覆つてそこでの流れを支配する偏微分方程式を数値的に解くことになり、斜面要素の形状を抽出することは意図されない。流れを一次元的に取り扱うことを前提として、各表現形式を振り返ってみると、等高線図モデルは山腹斜面上での雨水の流下方向にしたがって斜面を分割できる点で、流域地形に即した流出場のモデルを構成できるが、流域規模でのモデル化には向かないという欠点を有する。グリッドモデルはデータ構造が簡単で取扱いやすいが、山腹斜面も含めて流域全体を河道と考えることになるため、本研究の立場とは異なる。一方、三角形網モデルは、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



(a) 流域の三角形要素表現



(b) 河道網構造



(c) 三角形要素の形状

図-7 三角形要素による流域の表現

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。斜面上の雨水は、斜面を構成する各三角形平面の最急勾配方向に流れると考えることになる。流域斜面を面として表現するためにグリッドモデルのように流れ方向は限定されない。したがって、流域規模で実地形に即して流域地形を表現する形式としては、三角形網モデルが最も適している。

ただし、ただ単に三角形網で流域を覆えばよいのではなく、雨水が斜面を流下・流集していく過程を取り扱えるように三角形網を構成しなければならない。このためには、三角形要素の最急勾配方向をもとに、各三角形要素で雨水が流出する辺が一つだけになるように、さらには流入する辺も一つだけとなるように三角形要素を構成すると都合がよい。この方針にしたがって三角形要素を構成すれば、河道区分を含む三角形要素から始めて、各三角形要素にその雨水が流れ込む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斜面要素を特定することができ、その斜面要素の形状を計測することができる。さらに、一般に利用できるデータがメッシュ形式で整備され公開されていること、地形、地質、土地利用、衛星画像など異なるデータ間の位置関係を把握するという点においては、メッシュ形式のデータが扱いやすいことを考えると、メッシュ形式のデータをもとに三角形網を構成することが望ましい。また、河道網の位置情報を用いて、河道が三角形要素の辺となるように三角形網を構成すべきである。以上の点を踏まえ、

- グリッドモデルを構成する格子点、河道上の頂点をもとに三角形要素群を作成する。
- 三角形要素間での雨水の授受を扱うことができるよう、雨水は三角形要素の最急勾配方向に流れると考え、三角形要素のただ一つの辺からだけ雨水が流出するように三角形要素を細分割する。目的によっては流入する辺も一つとなるように三角形要素を構成する。

- 河道網構造及び河道網に接続する山腹斜面群を認識できるデータ形式で三角形網を表現する。
- という方針にしたがって、三角形網モデルを構成することを提案する。

4. 三角形要素網による流域地形の表現形式とその実現

三角形要素網によって流域場を表現するための具体的なデータ構造を示し、このデータ構造を持つデータセットを生成するための一連の計算機アルゴリズムを示す。

(1) データ構造

流域場を表現するために、各三角形要素で雨水の流出する辺が一つとなるように生成されるデータセットは、一つの流域に対して、

- 頂点の情報を記録するデータセット
- 河道網の情報を記録するデータセット
- 三角形要素の情報を記録するデータセット

から構成される。図-7に示す流域を例にとると、表-2、表-3、表-4に示すデータセットで流域を表現することになる。図-7中、(a)に示す番号は各頂点に付けられた番号、英字は各三角形要素を表している。(b)は河道網を表しており、ローマ数字は河道区分につけられた番号である。ここで河道区分とは、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網の一部分を表す。(c)は個々の三角形要素の形状である。

表-2は頂点の情報を記録するデータセットの例であり、各頂点番号とその三次元座標が収められている。表-3は河道網構造を記録するデータセットの例である。表中には各河道区分の上下流の河道区分番号、河道区分を構成する頂点の番号が記録されている。上下流の河道区分が存在しない場合は、NULLが記録される。

表-4は三角形要素の情報を記録したデータセットの

表-2 頂点の座標を記録するデータセット

頂点番号	座標		
	x	y	z
1	25.00	100.00	301.25
2	50.00	100.00	287.55
3	75.00	100.00	288.89
:	:	:	:

表-3 河道網構造を記録するデータセット

河道区分番号	下流河道区分番号	上流河道区分番号	河道を構成する頂点番号
I	NULL	II, III	10, 11, 12
II	I	NULL	12, 13, 14
III	I	NULL	12, 15

表-4 三角形要素の情報を記録するデータセット

三角形	頂点番号	隣接三角形番号	辺の出入属性	辺の構成属性	法線ベクトル
a	1, 2, 10	NULL, b, e	2, 3, 1	0, 4, 2	-0.71, 0.0, 0.07
b	2, 11, 10	f, c, a	3, 1, 3	2, 3, 4	-0.71, 0.71, 0.07
c	11, 5, 10	m, d, b	3, 3, 1	2, 2, 3	-0.89, -0.41, 0.09
:	:	:	:	:	:

辺の出入属性 : 1:流出辺, 2:流れに平行な辺, 3:流入辺

辺の構成属性 : 0:メッシュをかけた範囲の境界, 1:谷, 2:斜面, 3:河道, 4:尾根

例である。各三角形要素ごとに、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、三角形要素の辺の出入属性、三角形要素の辺の構成属性、三角形要素の面の法線ベクトルの値が反時計まわりに記録されている。

ここで辺の出入属性とは、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ものであり、法線ベクトルと辺の方向ベクトルとの外積を求ることによって決定できる。たとえば、図-7(c)で $\triangle abc$ 上の雨水は辺 ab を通って流出するが、これは、 $\vec{g} \times \vec{ab}$ の z 成分が正となる場合である。逆に辺 bc 、辺 ca からは $\triangle abc$ に雨水が流入する可能性があり、この場合は $\vec{g} \times \vec{bc}$ の z 成分、および $\vec{g} \times \vec{ca}$ の z 成分は負となる。この値が 0 となる場合は、対象とする辺が最急勾配方向と並行で、この辺を通して雨水の出入りがない。雨水が流出する辺、流入する辺、流出も流入もしない辺をそれぞれ流出辺、流入辺、流れに平行な辺と呼ぶことにする。

辺の構成属性とは、辺が河道、尾根、谷、斜面のどれを構成するかを識別するものである。辺が尾根か、谷か、斜面かは、辺の出入属性をもとに決定することができる。隣合う三角形要素が共有する辺の出入属性が、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である。一方が流出辺で他方が流れに平行な辺、または一方が流入辺で他方が流れに平行な辺である場合はそれぞれ谷、尾根と考える。また、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り、斜面を構成する辺であることがわかる。河道を構成する辺は始めからわかっているのでその辺には河道という属性を設定する。

ソースデータセット

- メッシュ形式の標高データ
- 河道網の位置を表わす点列のデータ



三角形要素網生成システム

- 前処理サブシステム
- 三角形要素生成サブシステム
- 河道の標高を決定するサブシステム
- 窪地を解消するサブシステム
- 流域内部の谷を連結するサブシステム
- 三角形要素を細分割するサブシステム
- 三角形要素を再細分割するサブシステム



三角形網モデル

- 頂点の情報を記録するデータセット
- 河道網の情報を記録するデータセット
- 三角形要素の情報を記録するデータセット

図-8 三角形要素網生成システムの流れ

(2) データ生成のための計算機アルゴリズム

前節で説明したデータセットは初めから存在するものではなく、ある手続きを踏むことによって生成される。現状で一般に入手可能となるように整備されている数値地理データは国土数値情報であるため、国土数値情報のメッシュ形式の標高データと河道網の位置データを入力として前節で説明したデータセット群を生成するシステムを構築した。三角形網モデルを構成するデータセットは図-8 に示す 7 つのサブシステムを用いて順にデータを加工することによって生成される。

a) 前処理サブシステム

前処理サブシステムでは、三角形要素網生成システムへの入力となる

- メッシュ形式の標高データ

• 河道網の位置を表わす点列のデータ

をもとに三角形要素網を構成するための準備を行う。具体的には、メッシュ形式の標高データ、河道網の位置データから対象とする流域のデータを切り出し、標高データを構成するメッシュの各辺と河道位置の点列のデータとの交点を求める。以降、求めた交点を結んで得られる線分の集まりを河道網とみなし、その線分を一辺として三角形要素を構成する。図-9はそれを模式的に表現したものである。なお、交点の標高はメッシュを構成する辺によって隔てられる河道位置の頂点の標高を線形内挿して決定する。

b) 流域を三角形要素で覆うサブシステム

前処理サブシステムで作成したデータを入力として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。三角形分割は以下の方法にしたがって行う。

- 格子点を頂点とするメッシュを基本単位に一つのメッシュの中で三角形要素を作成する。
- メッシュ内に河道が存在しない場合は、メッシュ中央部に新たに頂点を設定し、三角形要素を作成する。
- メッシュ内を河道が通過する場合は、一つの三角形要素の複数辺が河道とならないように、また三つの頂点がすべて河道上の点とならないように三角形要素を作成する。

このサブシステムは、メッシュ内に河道が存在しない場合は、自動的に三角形要素を作成する。メッシュ内に河道が存在する場合も、できるだけ自動的に三角形要素を作成するが、河道がメッシュを横切るパターンが複雑で自動分割が不可能と計算機システムが判断した場合は、オペレータが対話的に三角形要素の構成法を計算機システムに指示を与え、三角形要素分割を行う。

図-10に三角形分割の模式図を示す。図-10(a)は計算機システムが自動的に三角形要素を生成できるパターンのメッシュの例であり、

- メッシュ内に河道が存在しない場合(図-10(a)の左側のメッシュ)
- メッシュ内に河道区分が1つだけ存在する場合(図-10(a)の右側のメッシュ)

である。これ以外の図-10(b)に示すようなパターンの場合、すなわち

- メッシュ内に河道区分が2つ以上存在する場合(図-10(b)の左側のメッシュ)
- メッシュ内に合流点が存在する場合(図-10(b)の右側のメッシュ)

は全て対話的に処理する。これらを自動的に処理できるようなサブシステムを構築することも考えられるが、河道がメッシュを通過するあらゆるパターンに対応するためにはアルゴリズムが複雑になること、またこの

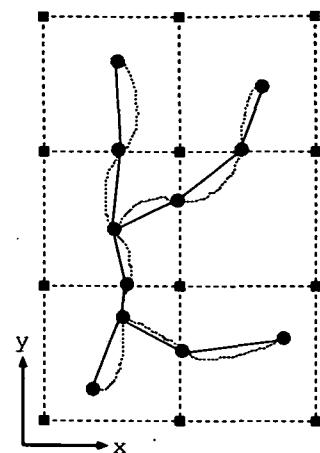


図-9 前処理システムによる河道網データの設定

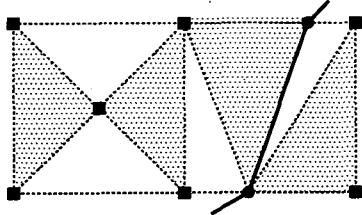
のようなパターンのメッシュの個数がそれほど多くはないことを考え、対話的に処理するサブシステムを構成する方が合理的と判断した。

図-11はシステムが実際に検出した複雑なパターンのメッシュの例であり、マウス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-12のようにメッシュを分割する。メッシュ内部を通る線は河道を表し、図-12中の斜線部は分割が確定した三角形要素を表す。図中の斜線部がメッシュを完全に覆うとそのメッシュでの作業が完了した事になる。このサブシステムのアルゴリズムを以下に示す。

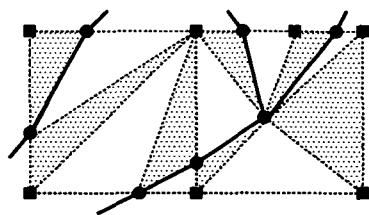
- 1) 全てのメッシュを、自動的に三角形要素を作成するメッシュ(自動型メッシュ)と対話的に三角形要素を作成するメッシュ(対話型メッシュ)に分ける。
- 2) 対話型メッシュを表示し、三角形要素を作成するために新たな頂点を設ける必要があるかどうかをオペレータに尋ねさせる。もし必要であればオペレータがマウスで新しい頂点を加える。
- 3) 2)で加えた頂点によって自動型メッシュと判定していたメッシュで自動的に処理できなくなるメッシュが現れるか判定し、もし現れればそのメッシュを対話型メッシュとする。
- 4) 自動型メッシュを三角形要素に自動的に分割する。
- 5) 対話型メッシュをオペレータが三角形要素に分割する。

c) 河道上の頂点の標高を設定するサブシステム

河道位置の点列のデータに格納されている標高のデータは、メッシュを構成する頂点の標高データとは独立して取得されているため、河道の標高が周りのメッシュを構成する頂点の標高よりも高く設定されている場合



(a) 自動的に三角形要素を生成するメッシュの模式図



(b) 対話的に三角形要素を生成するメッシュの模式図

図-10 三角形要素作成の模式図

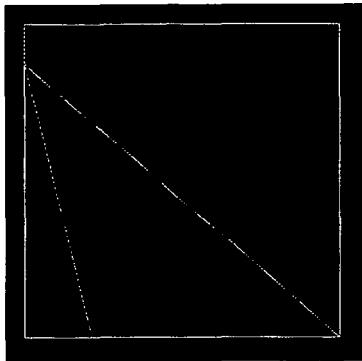


図-11 対話的に三角形要素を生成するメッシュの例

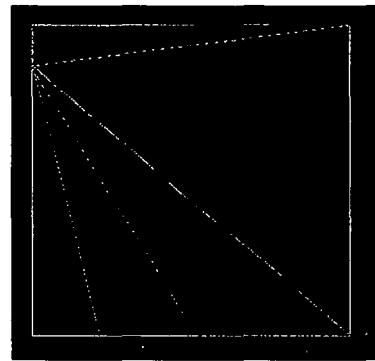


図-12 対話的に三角形要素を生成した結果

など、データ間で整合性がとれていないことがある。河道を構成する頂点の標高は河道位置の点列のデータとともに線型内挿によって設定しているので、この場合は、河道を構成する辺は必ず谷にならなければならぬのにそとはならなくなってしまう。そこで、このシステムでは河道となる三角形要素の辺が谷とならない場合、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。このサブシステムのアルゴリズムを以下に示す。

- 1) 上流の河道区分を構成する頂点の標高を調整した後、下流の河道区分の作業を行なうように、河道区分の作業順を決める。順番は 図-13 に示すように、最下流端を持つ河道区分を出発点とし、常に河道区分を左側に見ながら河道区分のまわりを河道区分に沿って移動し、各河道区分を最後に通るときに順番付けを行う。このように番号を付けると上流側の河道区分の順番を設定した後に下流の河道区分の順番を設定することになる。
- 2) 各河道区分に対して河道区分の上流端とその一つ下流側の頂点で構成される辺から順に処理する。まず、下流側の頂点の標高が上流側の頂点よりも高い場合があれば、あらかじめ設定した微小な勾配を持つように下流側の頂点の標高を下げる。次に、

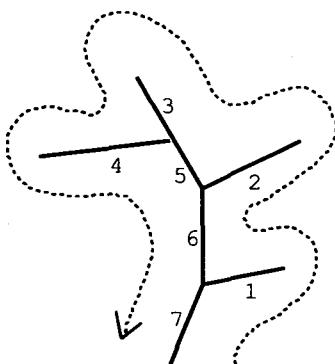


図-13 河道区分の作業順の決定

その辺が谷となっているかを調べる。谷でなければ、それらの頂点の標高から同じ値を減じてその辺が流れに平行な辺となるような下げ幅を算定し、その値を両頂点の標高から差し引く。さらにあらかじめ設定した微小な値だけ標高を減じることにより、その辺は確実に谷となる。順に下流側の辺を処理し、一つの河道区分についてこの作業が完了したら次の河道区分に進む。

- 3) すべての河道区分について完了したら終了。

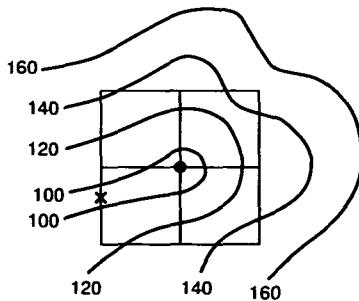


図-14 窪地が発生する例

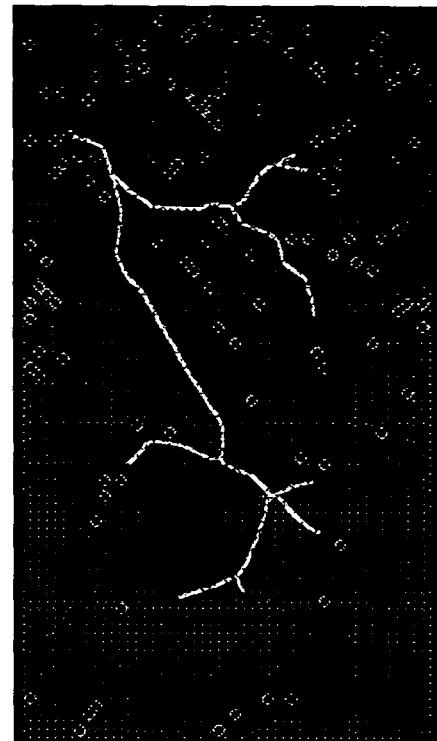


図-15 システムが検出した窪地

としてシステムに認識させ、作業を終了する。

全ての窪地について作業が終れば、このサブシステムを終了する。ただし、明らかに流域外に存在する窪地は必ずしも解消する必要はない。なお、窪地を解消する過程で、河道上に頂点を作成した場合は、その頂点が窪地となって河道網の標高に矛盾がおこる場合があるので、c) で説明した標高を調整するシステムを用いて再度河道区分の標高値を決定し直す。

e) 河道網を再設定するサブシステム

流域内には谷となる辺が多数表れる。これらの谷が河道網と繋がっていない場合(例えば図-16 の破線 gkl)、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か対象流域外に流れ去るのかが判定できない。そこで、図-16 に示すように、谷 gkl の最下端の頂点 g 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。このような河道と結びつかない谷は、豪雨時には水みちが発生して雨水が河道に流れ込むものと考える。なお、谷が河道に到達する場合は、谷から最急勾配方向に下がるとときに三角形要素を細分割しながら下る。

d) 窪地を解消するサブシステム

地形の複雑さに比べて標高データのメッシュ間隔が大きい場合、実際には窪地でないのに窪地が発生する場合がある。例えば、図-14 に示す中央の黒丸は本当は窪地でないにもかかわらず、メッシュ間隔が実地形を表現するには大きすぎることによって窪地となってしまう例である。窪地とは、周りのどの頂点よりも標高の低い頂点であり、一度、雨水が流れ込むとそこから出ることはできない。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取らざるをえない。一方、三角形要素で流域を表現する場合、地形図などを参考にオペレータが本来標高の低い地点(図-14 の点X)に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可能である。図-15は東京大学愛知演習林白坂流域(0.88km^2)において本システムが検出した窪地(図中の丸印)を示したものである。これらの窪地を一つ一つ順に窪地とそのまわりの三角形要素を表示させて、新たに入力する頂点の位置をマウスで指示し、その頂点の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以下に示す。

- 1) 全ての窪地を探索し、順に窪地とその窪地を頂点とするすべての三角形要素を表示させる。
- 2) 地形図を参考にして、本来、谷筋が通っているところと三角形要素の辺との交点上に新たに頂点を設け、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。
- 3) 新しく設定した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。窪地であれば2)に戻る。河道を構成する辺上に頂点を新しく設定した場合はその頂点を河道区分を構成する頂点

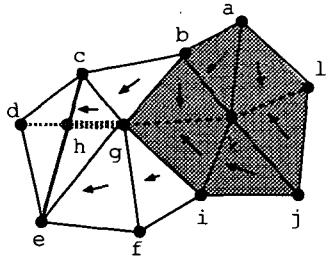


図-16 河道網と繋がらない谷

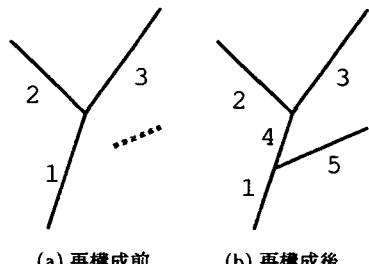


図-17 河道網の再設定

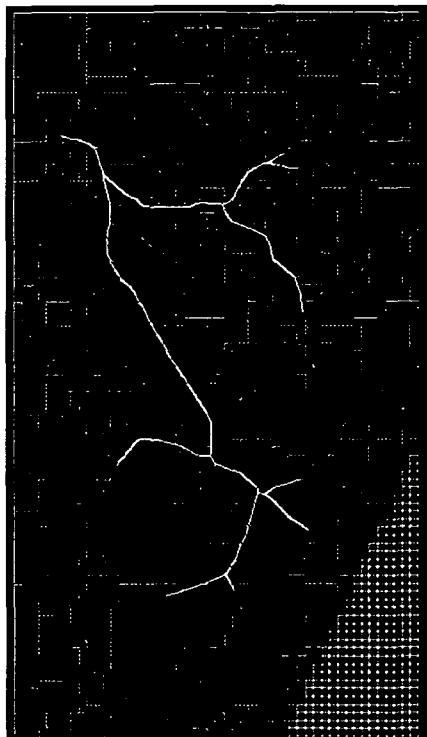


図-18 河道網を再構成する前

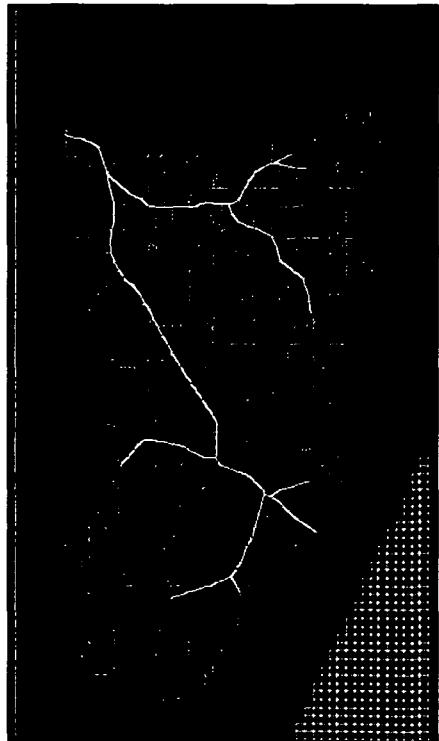


図-19 河道網を再構成した後

その際、新たに河道網の一部を形成する三角形要素の辺には、河道の属性を設定し、図-17 に示すように河道網構造を再構築する。図-18 は白坂流域における河道網を再構成する前の河道網と谷を表しており、図-19 は河道網を再構成した後の河道網を表す。以下にこのサブシステムのアルゴリズムを示す。

- 1) 谷となる辺を探査し、その辺を構成する頂点を記録する。
- 2) 1)で求めた頂点をもとに一つながりの谷の最上流の頂点と最下流の頂点を探す。
- 3) 谷の下端の頂点から最急勾配方向に降りる。
- 4) 流域内部の河道に到達した場合、三角形要素を生成しながら河道に到達するまで最急勾配方向に降

りる。なお、三角形要素の生成の仕方は次節 f) と同様である。

- 5) その谷を新たに河道網に加え河道網を再構成する。
- f) 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サブシステム

任意の河道区間に対応する流出寄与域を特定するために、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、すでにその頂点から最急勾配方向を登って三角形要素を細分割をしているのでこの作業を行う必要はない。

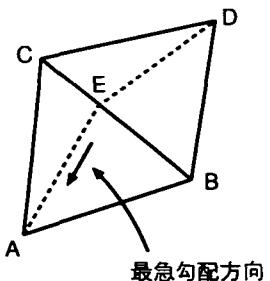


図-20 三角形要素の細分割

細分割のアルゴリズムを図-20 を使って説明する。

- 1) 頂点 A から頂点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 E を求める。
- 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し、 $\triangle ABE$, $\triangle AEC$, $\triangle BDE$, $\triangle EDC$ を生成する。
- 4) 求めた交点 E 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。
- 6) 2 に戻る。

g) 流入辺がただ一つとなるように三角形要素を再細分割するサブシステム

f) までの過程で作成したデータセットを用いることにより、流出寄与域の特定、任意の対象地点に対応する流域(流域界)の自動決定が可能となる。また、流域内部の尾根、谷の位置を自動的に抽出することも可能となった。ただし、分割した斜面要素の形状に即して雨水を一次元的に追跡することを念頭におくと、O'Loughlin³⁷⁾が等高線図モデルで行ったように、同じ頂点から発する二本の隣合う流線(最急勾配線)によって斜面を分割して斜面要素を構成すべきである。このためには、流出辺、流入辺ともにただ一つとなるように各三角形要素を構成すればよい。

そこで、このサブシステムでは、さらに流入辺がただ一つとなるように三角形要素を細分割する。基本的なアルゴリズムは、f) と同様である。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、三角形を細分割しながら最急勾配方向に降りる。もし河道に到達した場合は、そこから最急勾配方向に登る線分を次々と追跡しながら三角形を再分割する。以下に再細分割のアルゴリズムを示す。

- 1) 全ての頂点を出発点として、その頂点を含む三角形要素内の最急勾配方向に降りながら、三角形要素を生成する。三角形要素の生成法は f) と同様である。

- 2) 三角形要素を生成しながら下がった結果、河道に到達した場合は河道に新たに設けた頂点を河道網に登録し、対岸の斜面を同様のアルゴリズムで三角形を分割しながら最急勾配方向に上る。

5. 実流域への適用と流域特性の自動抽出

前章で展開したアルゴリズムを順に用いてデータを加工することによって、最終的に各三角形要素は、その三角形から雨水が流出する辺がただ一つとなるように、さらには、流入する辺、流出する辺ともにただ一つとなるように生成される。流域の自動決定等の地形特性の抽出が目的であれば流出辺が一つとなるように三角形要素を構成すればよく、斜面要素の形状を重視して流出モデルとの結合を考えるために流入辺も一つとなるように斜面要素を構成することになる。これらのデータセットを用いれば、河道を構成する辺を持つ三角形要素からはじめて、その三角形要素に雨水が流れ込む三角形要素を次々たどることにより、その河道を構成する辺への流出寄与域を求めることができる。対象とする流域および流域界を特定する場合は、流域下端よりも上流にある河道網を辺に持つ全ての三角形を出発点として、それらに寄与する三角形要素群を求めればよい。得られたデータセットを用いれば

- 尾根の位置、谷の位置
- 標高、斜面方位等の空間分布図
- 河道までの流下距離の分布図

などの空間的分布図も容易に得られる。以下に実流域への適用例を示す。荒川試験地と伊奈川流域は流出辺がただ一つとなるように三角形要素を構成した結果を示したものであり、白坂流域は流入辺もただ一つとなるように三角形要素を構成した結果である。

(1) 荒川試験地への適用

図-21 は荒川試験地梅ヶ谷流域 (0.184km^2) の上流域付近の $1/25,000$ 地形図である。この地形図からメッシュ形式の標高データ (25m 間隔) と河道位置の点列のデータを読み取り、それらのデータをソースデータとして対象流域を三角形要素網で表現した。図-22 は作成した三角形要素の流下方向と尾根・谷を図示したものである。図中の矢印は流下方向を表し、太い実線は尾根を、実線は谷を表している。図-23 は荒川試験地梅ヶ谷流域の上流部において河道に寄与するすべての三角形要素を示したものであり、黒い部分が流域内部を表す。図-24 は荒川試験地梅ヶ谷流域全体の流域を自動抽出した結果である。

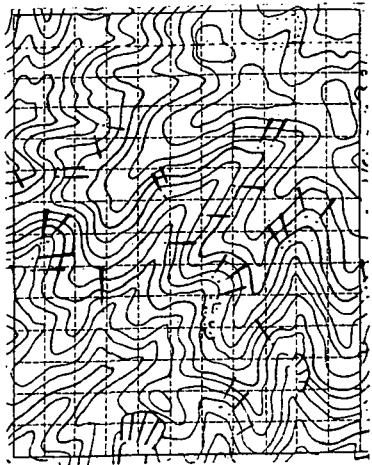


図-21 荒川試験地上流域の地形図

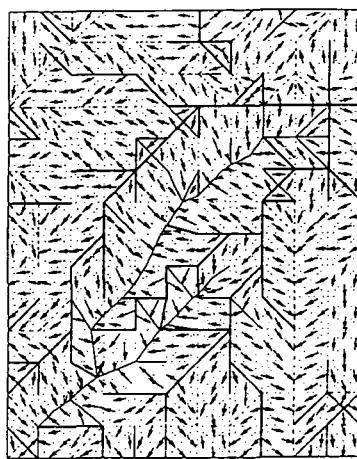


図-22 雨水の流下方向と尾根・谷

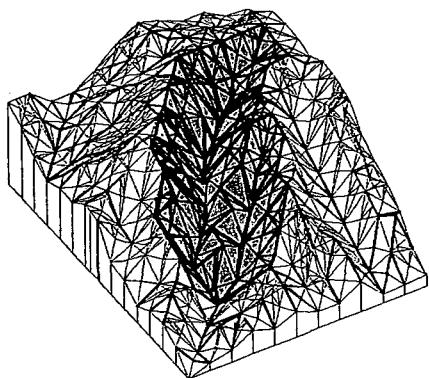


図-23 荒川試験地上流域の三角形分割

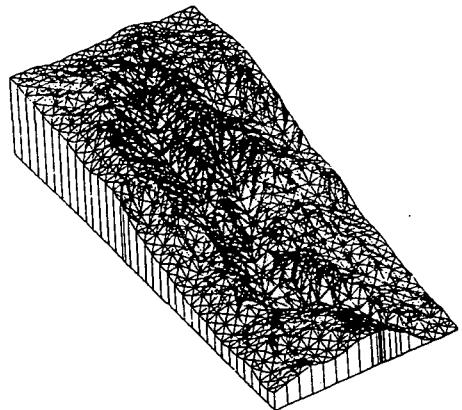


図-24 荒川試験地の三角形分割

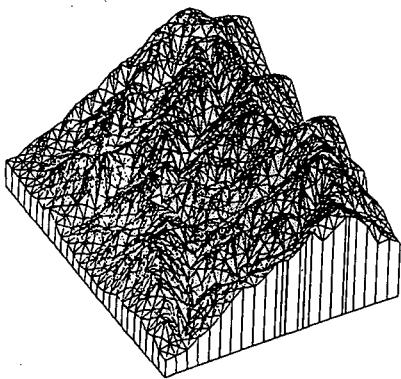


図-25 伊奈川流域の三角形分割



図-26 伊奈川流域の斜面方向の分布

(2) 伊奈川流域への適用

国土数値情報の標高データファイルと流路位置ファイルを入力データセットとして、木曾川上流域の伊奈川流域 (54.0 km^2) に適用した。図-25 は流域を三角形

要素で表現した例であり、標高データのメッシュ間隔を 500m に内挿して作成した。図-26 は地形特性の空間分布図の一例として斜面の向いている方位を表示したものである。

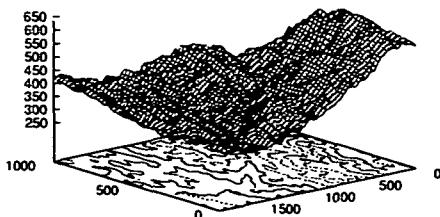


図-27 白坂流域の概略図

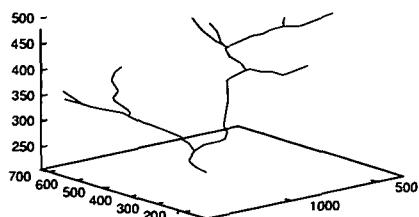


図-28 河道網の概略図

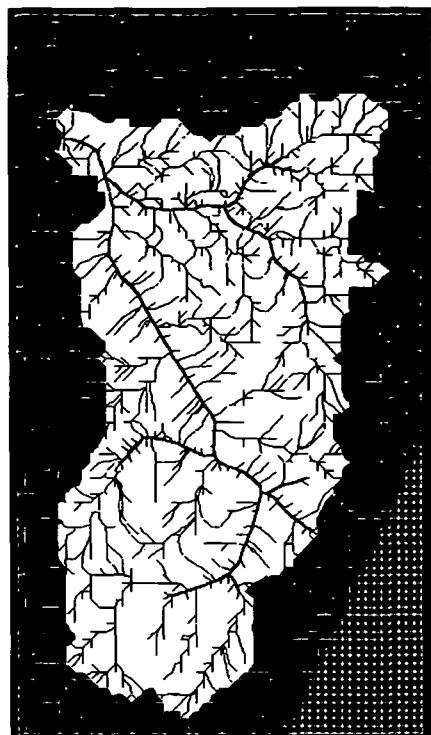


図-29 白坂試験地の流域界の自動抽出

(3) 白坂流域への適用

愛知県瀬戸市にある東京大学愛知演習林白坂流域は、集水面積 0.88 km^2 で流域内の高低差は約 330m、溪流源点からの水系長は 1320m である。また、山腹斜面および渓流部は植生が密集しており、平均傾斜角は 25 度で、地形的には急峻で V 字型渓谷をしている^{43),44)}。図-27、図-28 に入力データとして用いた空間分解能 20m のメッシュ標高データ、および 1/5,000 都市計画図をもとに読みとった流路位置の点列のデータを示す。

入力データセットの河道区分の個数は 15 個であったが、最終的に作成されたデータセットでは、河道区分の個数は 1151 個となった。前章での図-15、図-18、図-19 は同流域を対象として、最終的なデータセットを作成するための途中段階を示したものであり、図-29 は流域内部を自動的に抽出した結果である。

6. おわりに

本論では、実際の流域地形形状に即して流域場をモデル化する手法として、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表現する手法を提案した。ここでは、まず、実際の山腹斜

面がどのような形状をしているか、地形図とともに読み取った例を示した。このことが本論で示した流域地形の数理表現手法を提案する動機となった。次に、流出場の構成に関するこれまでの研究成果を整理した上で、本論で提案した三角形要素網による流域地形のモデル化手法と他の手法との違いを述べ、本手法を実現するための計算機アルゴリズム、および実流域への適用結果を示した。

本手法が他の数値地形モデルと異なる特徴をまとめて示すと以下のようである。

- グリッドモデルによる流出場の表現手法は、流域を斜面も含めて“線”で表現することになるが、三角形網モデルによる手法では尾根、谷、河道を“線”で、斜面を“面”で表現することができる。
- 単に流域を三角形の集合体で表現するのではなく、三角形網間での雨水の授受を扱うことができ、かつ多数の斜面要素とそれらを繋ぐ河道網を認識できる形で三角形網を構成している。
- その結果、最急勾配線によって斜面を分割することができる。
- 上述の斜面分割は等高線図モデルを用いても可能であるが、特にデータソースの点、すなわち、三

角形網を構成するために、一般にデータ整備が進んでいるメッシュ標高データと流路位置データを情報源としている点で本手法は有利である。

なお、窪地については、自動的にそれを処理する手法はとらず、オペレーターが対話的に計算機プログラムに指示して、地形図等を参考に三角形要素を再構成して対処するという手法を取った。メッシュサイズが小さくなれば、窪地数も減ると期待したが、筆者らが対象とした流域では必ずしもそうではなく、多少の作業を見込まねばならない状況であった。ただし、一つの対象流域に対して一回だけやればよい作業であるので、それほど問題視する必要も無いと考えている。

この流域の表現手法によって、流域斜面の傾斜、方位、標高などの分布図の作成や、流域内の谷・尾根の位置、流出寄与域(流域界)の自動的な抽出が可能となり、また、流出寄与域を構成する個々の斜面形状特性(斜面勾配および斜面幅の変動)を自動的に算定することが可能となった。ここで構成した流出場のモデル化手法と流れのモデル化手法とを結合することによって、流域地形形状に即した流出シミュレーションシステムを構築することになる。

謝辞：本研究は文部省科学研究費試験研究B(代表：椎葉充晴)、総合研究A(代表：西尾邦彦)および河川情報センターの補助を受けて行なわれた。また東京大学愛知演習林のDEMは宇宙開発事業団によって作成されたものを用いた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Betson, R. P. and Marius, J. B. : Source area of storm runoff, *Water Resources Research*, vol. 5, no. 3, pp. 574-582, 1969.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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、京大防災研究所年報、第20号B-2, pp. 185-199, 1977.
- 8) 高棹琢馬、椎葉充晴：Kinematic Wave法への集水効果の導入、京大防災研究所年報、第24号B-2, pp. 159-170, 1981.
- 9) 高棹琢馬、椎葉充晴、宝馨：流域地形効果を導入した雨水流モデル、水資源研究センター報告、京都大学防災研究所、第2号、pp. 23-29, 1982.
- 10) 国土庁計画調整局、建設省国土地理院：国土数値情報、大蔵省印刷局、1987.
- 11) (財)日本地図センター：数値地図ユーザーズガイド、日本地図センター、1992.
- 12) 高棹琢馬、椎葉充晴、立川康人、山口昌利：流域地形構造を考慮した流域場モデルの自動生成、京大防災研究所年報、第32号B-2, pp. 415-433, 1989.
- 13) 高棹琢馬、椎葉充晴、立川康人：流域微地形に対応した準3次元流出モデルと流域規模モデルの自動作製、第33回水理講演会論文集、pp. 139-144, 1989.
- 14) 高棹琢馬、椎葉充晴、立川康人：TIN-DEM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.
- 15) 高棹琢馬、椎葉充晴、立川康人：分布型流出モデルのための流域地形の数値モデルに関する研究、京都大学防災研究所年報、第34号B-2, pp. 163-175, 1991.
- 16) 高棹琢馬、椎葉充晴、立川康人、大江郁夫：TIN-DEMデータ形式を用いた流域場情報システムの開発、水工学論文集、第36巻、pp. 677-684, 1992.
- 17) 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.
- 18) 高棹琢馬、椎葉充晴、立川康人：流域微地形に対応した準3次元流出モデル、京大防災研究所年報、第31号B-2, pp. 341-355, 1988.
- 19) 京都大学防災研究所水文学部門：荒川試験地水文観測資料、1976.
- 20) 砂田憲吾：洪水の数値予報、第7章、森北出版、pp. 100-119, 1989.
- 21) 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.
- 22) 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.
- 23) Band, L. E. : Topographic partition of watersheds with digital elevation models, *Water Resources Research*, vol. 22, no. 1, pp. 15-24, 1986.
- 24) 野上道男、杉浦芳夫：パソコンによる数理地理学演習、古今書院、1986.
- 25) 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.
- 26) 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.
- 27) 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.
- 28) 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.
- 29) 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.
- 30) Bathurst, J. C. : Physically-based distributed modelling of an upland catchment using the systeme hydrologique europeen, *Journal of Hydrology*, vol. 87, pp. 79-102, 1986.

- 31) Beven, K. J., Kirkby, M. J., Schofield, N., and Tagg, A. F. : Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three U. K. catchments, *Journal of Hydrology*, vol. 69, pp. 119-143, 1984.
- 32) 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.
- 33) 陸晏皎, 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.
- 34) 陸晏皎, 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.
- 35) 陸晏皎, 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 卷, pp. 161-166, 1991.
- 36) 陸晏皎, 小池俊雄, 早川典生, 市波克洋, 石平博 : 分布型流出解析のための谷(尾根)筋を考慮したグリッド型 DEM 作成法の開発, 水工学論文集, 第 39 卷, pp. 127-132, 1995.
- 37) 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.
- 38) 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.
- 39) 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.
- 40) 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.
- 41) 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.
- 42) 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.
- 43) 芝野博文 : 水源帶における流出過程に関する研究(I), 東京大学農学部附属演習林報告, 第 78 号, pp. 305-378, 1988.
- 44) 李憲浩 : 林相の経年変化が水流出特性に及ぼす影響, 東京大学農学部附属演習林報告, 第 86 号, pp. 77-178, 1991.

(1996. 6. 7 受付)

A TIN-BASED TOPOGRAPHIC MODELING FOR A DISTRIBUTED RAIN-FALL RUNOFF MODEL

Yasuto TACHIKAWA, Michiharu SHIIBA and Takuma TAKASAO

A geographic information system in hydrologic modeling, BGIS(Basin Geomorphic Information System) is presented for topographic modeling of a river basin. BGIS is a set of computer programs which model natural landscapes using TIN-based DEMs and partition a catchment taking account of the direction of water flow for dealing with water movement one-dimensionally. BGIS is applied to some watershed basins in Japan, and it is confirmed that the system is a powerful tool to examine the effect of spatial variability of topography on runoff characteristics.