

分布型流出モデル構築のための流域地形の数値モデルに関する研究

高棹 琢馬・椎葉 充晴・立川 康人

A TOPOGRAPHIC BASIN MODEL FOR BUILDING A DISTRIBUTED RAINFALL-RUNOFF MODEL

By *Takuma TAKASAO, Michiharu SHIIBA and Yasuto TACHIKAWA*

Synopsis

To make a distributed rainfall-runoff model, it is very important to build a numeric model for topographic surface of a basin which takes account of the direction of water flow.

In this paper a topographic surface is represented numerically using a data structure of a Digital Elevation Model (DEM) formed by a Triangulated Irregular Network (TIN). Landscapes are modelled as a set of contiguous non-overlapping triangular facets whose vertices are made up by points on regular grids and points on river segments. Those triangular facets are subdivided, if needed, so that each of them has only one edge through which water flows out.

1. 序 論

1.1 研究の目的

国土数値情報などの数値地形情報、ランドサットなどの地球観測衛星からのリモートセンシングデータによる土地被覆情報、レーダー雨量計などの広域的な雨量観測体制の整備等、流域に関する地理的情報・気象水文観測情報が収集・整備され、電子計算機によるこれらのデータの取扱いが可能となっている。流域に関する情報を取り入れた分布型の洪水流出モデルが実用的なモデルとなる条件が整ってきているのである。

分布型流出モデルにおいて、これらの情報を注ぎ込む土台となるモデルが流域場の地形形状を表現するモデルである。流出現象を説明する場合、地形形状の影響を無視したモデル化は考えられない。したがって、できる限り実地形での雨水の流れに忠実に、流域場をモデル化する必要がある。それではいったい、どれくらい精度で流域場をモデル化することが適切なのだろうか、どれくらいの精度で流域場に関する情報を取得する必要があるのだろうか。流出シミュレーション結果に要求する精度、対象とする流出現象の時間的スケール・空間的スケールに応じて、適切な集中化の指標を明らかにしなければならない。これらの問題を議論するためには、まず初めに流域の微地形をも表現し得るような実地形に即したモデルを構成し、それをもとに議論する必要がある。

そこで、本研究では、流域場に関する時間的・空間的な情報をいかに分布型洪水流出モデルに組み込むかを念頭におき、数値地形情報によって流域場をできるだけ実地形に忠実に、すなわち雨水の流れに即してモデル化する手法を提案する。

1.2 流出モデルへの数値地形モデルの適用とその問題点

地表面の標高を数値的に表して地形を表現するモデルを DEM (Digital Elevation Model) と呼ぶ。地表面を数値的に表すためのモデルとして、従来からいくつかの DEM が提案されており、それらは、次の 3 つに分類できるようである¹⁾²⁾。

[1] 等高線図モデル (Contour based DEM)

[2] グリッドモデル (Grid based DEM)

[3] 三角形網 (TIN) モデル (Triangulated Irregular Network DEM)

いずれも地表面上の何点かを代表点として選び、代表点の 3 次元座標で地表面を表現する方法である。方法の違いは代表点の選び方の違いによる。

等高線図モデルによる方法は地形図の等高線上の点を代表点とし、等高線をそのまま線の情報として電子計算機に入力する方法である。等高線図モデルを流出解析に応用した研究として O'Loughlin らの研究³⁾がある。彼らは等高線データをもとに最急勾配線を追跡し、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いる。雨水の流下方向を重視している点で魅力的な研究であるが、等高線が入り組んだ複雑な地形では、最急勾配線を矛盾なく追跡することが難しく、流域規模で流れの場のモデルを構成するには不向きである。

グリッドモデルによる方法は縦横に区切った格子点を代表点として地形を表現する方法である。代表点は平面座標上で規則的に配置されているので、電子計算機による処理が容易である。グリッドモデルを流出解析に応用した研究として小池らの研究⁴⁾がある。100 m 間隔のグリッドモデルと実河道データから擬河道網を算出し、格子点間の雨水の流れを Kinematic wave 法で計算している。グリッドモデルをもとにした流域場のモデルは、国土数値情報の標高データファイルなどメッシュデータが整備され一般に公開されていること、レーダー雨量情報・ランドサット情報との位置関係をはっきり決めることができること、電子計算機での取扱いが容易であること等を考えること、非常に有力なモデルである。しかし、雨水の流れを考える場合、流下方向は隣接するメッシュ区画への 4 ないし 8 方向に限定されるという欠点がある。

TIN モデルによる方法は、代表点を三角形要素の頂点とし三角形要素の集合で地表面を表現する方法である。代表点の選び方は任意であり複雑な地形形状をしている部分では代表点を密にとるなど、代表点のサンプリングの密度を空間的に変化させることも可能である。また、山頂・峠・河道上の点などを代表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すことができる。Palacios-Velez らは TIN モデルを利用して河道と尾根を自動的に抽出するアルゴリズム⁵⁾を提案している。また、Jett ら⁶⁾は TIN モデルによって流域をデータベース化するシステムを提案している。TIN モデルを用いた流域場のモデル化は最も柔軟性があり、等高線図モデル・グリッドモデルの持つ問題点を解決するモデルであると考えられる。

1.3 TIN-DEMデータ形式による流域地形表現の提案

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っている。収束する斜面では、雨水の流れが流集するために斜面の下部で地表面流が発生しやすいのに比べて、発散する斜面では、地表面流が生じ難い。高棹・椎葉⁷⁾は、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指摘している。したがって、できるだけ、斜面形状を忠実に表現し得るような地形表現モデルが望ましい。

そこで、筆者らは、流域地形を表現するデータ形式としては、TIN-DEM 形式によるのがよいと考えている。TIN-DEM 形式で地形を表現する場合、三角形要素での法線ベクトルや最急勾配方向は容易に求められる。したがって、最急勾配方向を基本にして、流域斜面を小斜面に分割していくという O'Loughlin らの方法³⁾が容易に適用できる。先に述べたように、等高線データの輸入は非常に煩雑であり、

また、複雑な地形の場合、等高線データから最急勾配方向を求めて行くのは簡単でない。

基本的には、TIN-DEM形式を採用するが、上述したように、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することが重要であり、そのために、各三角形要素で雨水が流出していく辺が一つだけになるような分割方法を採用することを提案する。このような方針にしたがって分割されていれば、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地域を求めることができる。

しかし、各要素の間の位置関係を容易に表すという点においては、TIN-DEMデータ形式はグリッドモデルより劣っている。グリッドモデルでは、二次元配列を用意し、格子点位置を添字で、標高を配列の値で表現するのが普通であり、各格子点の間の距離の関係は、添字の違いから簡単に求められる。このような取り扱いの簡便さから、空間的に分布する値のデータはグリッドデータあるいはメッシュデータとして整理されることが多くなってきた。衛星データ、アメダスやレーダ雨量計のデータもメッシュデータに変換されて利用されることが多い。地形や地質のデータもメッシュデータの形で整理されている。流下方向を重視するために地形表現の形式としてはTIN-DEMデータ形式を採用するが、メッシュデータを効果的に利用することができるようにすることも必要である。

そのため、まず、グリッドデータを基本として、格子点を代表点に含めることにし、各メッシュの内部を分割する三角形要素を考えることにする。各三角形要素がどのメッシュを分割してできたかを知っていれば、降雨や地質などのデータがメッシュデータの形で与えられても、容易に利用することができる。

実際には窪地でないのに窪地が現れる場合や実際は分流域ではないのに分流域が現れる場合など、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場合にも、新たに代表点を加えて三角形要素を作成しなおせば良い。

以上の点をふまえ、本研究では次の二段階の作業で対象とする流域のTIN-DEMデータを作成することを提案する。

- [1] グリッドモデルを構成する格子点・河道上の点をもとに三角形要素群を作成する。
- [2] 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。

この二段階の作業で得られる三角形要素群により、地形形状を効果的に表現することができる。

2. TIN-DEM データ作成アルゴリズム

2.1 アルゴリズムの概要

TIN-DEMデータを作成するために次の順序で作業をおこなう。

- [1] 入力となるメッシュ標高データと流路位置データの作成。
- [2] メッシュ標高データと流路位置データをもとにした三角形要素群の作成。
- [3] 一つの辺からだけ雨水が流出するような三角形要素の細分割。

[1][2]のデータ作成手法は、高棹・椎葉⁸⁾⁹⁾が提案している手法と基本的な枠組は変わらないが、あらゆる地形形状に合理的に対応できるようにアルゴリズムを改良している。[3]は新たにシステムを発展させた部分である。これにより、雨水の流下・流集していく経路や流出への寄与域を特定することが簡単にできる。

2.2 メッシュ標高データと流路位置データ

TIN-DEMデータを作成するためのもととなるデータがメッシュ標高データと流路位置データである。本研究では、メッシュ標高データを作成するシステムとして、イメージスキャナを利用して作成するシス

テム・デジタイザを利用して作成するシステム・国土数値情報（標高データファイル）から作成するシステムを用意している。また、流路位置データを作成するシステムとして、デジタイザを利用して作成するシステム・国土数値情報（流路位置ファイル）から作成するシステムを用意している。

（１）メッシュ標高データ

メッシュ標高データとは、流域に矩形のメッシュをかけ、メッシュ交点の位置の標高値を記録したデータである。メッシュは対象とする流域を完全に覆うように十分広く取る必要がある。

（２）流路位置データ

流路位置データは、河道の位置を表す点列の座標、合流点・河道の上下流端点の標高、河道区分の接続関係を記録したデータである。

河道区分とは河道の上下流端と合流点、または合流点と合流点を結ぶ河道上の点の集合である。河道上の点は下流から上流に向かって一連の番号をつける。河道区分にも一から始まる一連の番号をつけ、各番号の河道区分に上流から流入してくる河道区分があるか、あるとすればそれらが何番の河道区分であるか、下流に河道区分があるとすればそれは何番の河道区分であるかを記録している。

2.3 三角形要素の作成

流出する辺がただ一つである三角形要素で TIN-DEM データを作成する準備として、グリッドモデルを構成する格子点・河道上の点をもとに三角形要素群を作成することを考える。

（１）河道点の探索

各メッシュの内部を分割して三角形要素を作成するためには、各メッシュの辺と河道上の点の交点をもとめ、この交点と格子点で三角形要素を作成すればよい。この交点を河道点と呼ぶことにする。メッシュ標高データと流路位置データをもとに、河道の通過するメッシュについて、河道点を順次求める。河道点を求めた後は、河道の位置を表す点列は、河道上の点ではなく河道点で表すことになる。これらの河道点の標高は三角形要素作成が完了した後、河道点のまわりの代表点の標高と矛盾がないように設定する。

（２）三角形要素作成

メッシュ格子点と河道点を代表点として三角形要素を構成する。三角形要素はメッシュ内部であればどの様に作ってもよい。

Fig. 1 に、これらの代表点から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。点 A から点 F はメッシュ格子点であり、点 M, N は河道点である。線分 MN は河道を表す。ここでは、メッシュ ABEF のように河道が通過しないメッシュでは、メッシュの中央に代表点 L を追加し 4 個の三角形要素に分割することにする。追加した点の標高は周囲の格子点の標高の平均値とした。メッシュ BCDE のように河道が通過するメッシュでは、河道点とメッシュ格子点をもとに、河道が三角形の一边となるように、メッシュをいくつかの三角形要素に分割する。

ところが、メッシュを河道が通過するパターンは、Fig. 1 に示した形に限られず、一つのメッシュを多数の河道が通過したり、一つのメッシュ内に複数の合流点があるなど複雑なパターンが起こり得る。高棹・椎葉ら⁸⁾⁹⁾は、このような場合も計算機上で自動的に対処するアルゴリズムを提案しているが、考え得るすべてのパターンに対応しているわけではない。このようなメッシュは非常に数が少ないと考えられるので、自動的に対処することを考えるよりも、オペレータが電子計算機と対話的に三角形分割を指示することができるようなシステムを実現する方がよい。そこで、三角形要素作成に必要な代表点をマンマシンのように新たに登録し、三角形要素を作成することにした。このシステムを用いれば、どのような複雑パターンのメッシュでも対処することができる。

（３）河道点の標高の設定

流域全体の三角形要素群を作成した後、河道点の標高を求める。上流端・合流点・流域下流端の標高を基準にして、河道点に接続する周りの代表点のすべての標高に対して矛盾が生じないように、上流から順

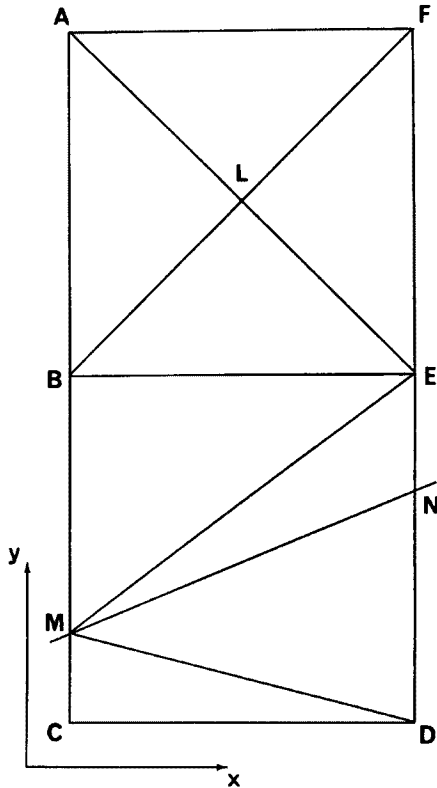


Fig. 1. Division of a mesh into triangular elements.

くなるようにの標高を設定する。もし、その河道点が標高をもともと持っており、なおかつその標高が今、求めた標高よりも低ければ、もとの標高を採用する。

- [3] 今回、標高を設定した河道点 (Fig. 2 の点 C) と、一つ上流側の河道点 (Fig. 2 の点 B) にはさまれる辺が、谷になっているかどうかを判定する。その辺が谷であれば、[6] に行く。
- [4] 谷でなければ、谷になるまで一つ上流側の河道点 (Fig. 2 の点 B) の標高を低くし、一つ上流側の河道点 (Fig. 2 の点 B) と、二つ上流側の河道点 (Fig. 2 の点 A) にはさまれる辺が、谷になっているかどうかを判定する。その辺が谷であれば、[6] に行く。
- [5] 谷にならない場合は、一つ上流側の河道点 (Fig. 2 の点 B) を低くした分だけ、上流側の河道点 (Fig. 2 の点 A より上流の河道点) の標高を全て低くする。[1] に戻る。
- [6] 標高を求めた河道点が、リンクの下流端の河道点なら一連の作業を終了する。そうでなければ、[1] に戻る。

2.4 三角要素の細分割

三角形要素の1つの辺だけから雨水が流出するようにするため、前節で述べた方法で作成した三角形要素群を、次の手順で細分割する。

- (1) 三角形要素上での雨水の流下方向の算定

Fig. 3 に示すように、三角形要素の法線ベクトル

に標高を設定する。基本的には、対象とする河道点に隣接する代表点で、一つ下流の河道点だけを除いた代表点の標高のうち、最も低い標高よりも、さらにある一定の値だけ低くなるように決める。

ところが、このようなルールだけで標高を決めると、地形形状によっては本来、河道であった部分が河道ではなくなってしまう場合がある。Fig. 2 にその例を示す。図中、点 A, B, C は河道点であり、河道点 A が最も上流の河道点であることを想定している。図中の矢印は雨水の流下方向を表している。河道点 B の標高を点 A, D, E のいずれよりも低く設定して、辺 AB を谷にすることができる。しかし、河道点 C の標高を、河道点 B, D, E の標高よりも低く設定しても、辺 BC を谷にできない場合がある。このような場合には、特別な配慮を必要とする。

河道点の標高を設定するアルゴリズムを次に示す。リンクの上流端・合流点・下流端の標高は、あらかじめ決定しておくことが前提となる。

- [1] 一つ下流側の河道点を探索する (Fig. 2 の点 C)。
- [2] 対象とする河道点 (Fig. 2 の点 C) に隣接するすべての代表点で、一つ下流の河道点を除いた点 (Fig. 2 の点 B, D, E など) の中で、最も低い標高よりも、さらにある一定の値だけ低

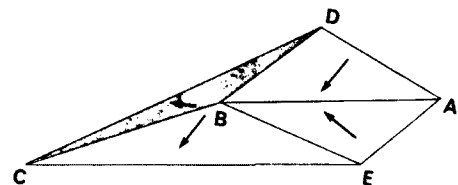


Fig. 2. An example of setting up an altitude of a channel point.

n を鉛直方向に射影してできるベクトル g が流下方向を与える。図中、 z 軸は鉛直上向きにとられている。流下方向の水平面内の成分は、さらに g を水平面に射影したベクトル d である。Palacios-Velez ら⁵⁾、高棹・椎葉ら⁸⁾⁹⁾ は、三角形要素上で勾配を表す関数の極値を求めることにより流下方向を求めているが、法線ベクトルによって求めた方が取扱いが簡単である。また、いったん法線ベクトルを求めて記憶しておけば、次項からの計算に都合がよく、数値計算上の矛盾もおこらない。

(2) 三角形要素の各辺が流出辺であるか流入辺であるかの判定

流出辺とは辺から雨水が流出する可能性のある辺であり、流入辺とは辺に雨水が流入する可能性のある辺である。また流下方向に平行な辺は雨水の流出入がなく、この辺を流れに沿う辺と呼ぶことにする。これらは周囲の三角形要素には無関係に決定される。Fig. 4 に流出辺・流入辺を判定するための模式図を示す。図中ベクトル d は雨水の流下方向であり、 n_A , n_B , n_C は各辺に立てた外向き法線ベクトルである。辺 BC からは雨水が流れるので流出辺である。辺 AB, 辺 CA には雨水が流れ込む可能性があるので流入辺である。各辺が流出辺であるか流入辺であるかは、雨水の流下方向ベクトルと各辺にたてた外向き法線ベクトルとの内積が正か負かで簡単に判定できる。求めた内積が正ならその辺は流出辺であり、負ならその辺は流入辺であり、0 ならばその辺は流れに沿う辺である。

(3) 三角形要素の各辺が尾根であるか谷であるかの判定

Table 1 に、三角形要素の各辺が尾根か、谷かを判定するための組み合わせを示す。隣合う三角形要素の共通の辺が共に流入辺、または一方が流入辺でもう一方が流れに沿う辺ならばその辺は尾根である。また、隣合う三角形要素の共通の辺が共に流出辺、または一方が流出辺でもう一方が流れに沿う辺ならばその辺は谷である。

(4) 窪地の解消

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、Fig. 5 の点 A のように、代表点

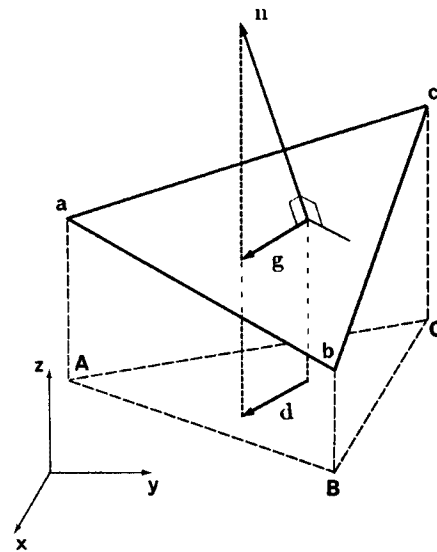


Fig. 3. Calculation of the direction of water flow.

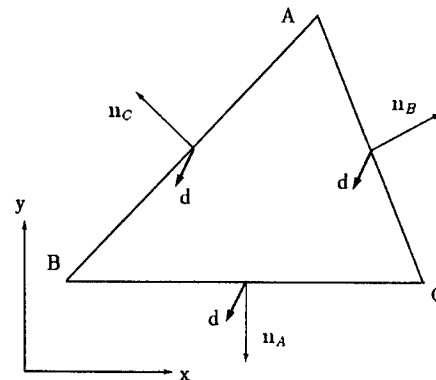


Fig. 4. Judgement whether inflow edge or outflow edge.

Table 1. Classification of a edge of a triangular element

	outflow edge	edge along the stream line	inflow edge
outflow edge	valley segment	valley segment	—
edge along the stream line	valley segment	—	ridge segment
inflow edge	—	ridge segment	ridge segment

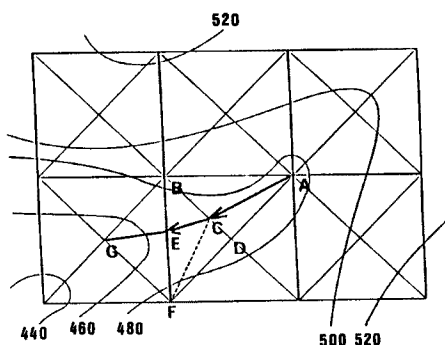


Fig. 5. Schematic representation for getting rid of a pit.

が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き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。グリッドモデルでは、雨水の流れを取り扱う場合に必ず発生する問題であるが、格子点の標高を調整することによって解決するなど、本質的な解決は難しい。しかし、TIN-DEMでは、新たに代表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。解消のアルゴリズムを次に示す。

- Fig. 5. Schematic representation for getting rid of a pit.
- [1] 標高が、隣接するすべての代表点の標高よりも低い代表点を探す (Fig. 5 の点 A)。
- [2] 地形図より、流下方向と交差すると考えられる点を、[1] で探索した代表点の対辺上に設ける (Fig. 5 の点 C)。その標高は地形図より妥当な値を設定する。新しくこの点を代表点に登録し、この点と窪地であった点の2つを用いて三角形要素を新たに作成する (Fig. 5 では、三角形 ABC, ACD, BFC, CFD を新たに作成する)。
- [3] 新しく設けた代表点に隣接するすべての代表点の標高を調査し、この点が窪地であるかどうかを判定する。窪地でなければ、一連の作業を終了する。窪地であれば、[2] に戻る。
- (5) 分流出点の解消

〔2〕 地形図より、流下方向と交差すると考えられる点

[3] 新しく設けた代表点に隣接するすべての代表点の標高を調査し、この点が窪地であるかどうかを判定する。窪地でなければ、一連の作業を終了する。窪地であれば、[2]に戻る。

(5) 分流点の解消

地形形状によっては Fig. 6 の点 D のように、代表点が分流点となる場合がある。分流点とは、雨水の流れ方向が複数の方向にわかれる点である。代表点が、谷を構成する辺の下流側の点であると同時に、別の谷を構成する辺の上流側の点を複数かねている場合に分流点となる。分流点を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が、窪地と同様に、新たに代表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。分流点解消の手法としては、実際の流下方向に分流点よりも低い標高で代表点を設け、流れの方向を修正する方法がある。分流点解消のアルゴリズムを次に示す。

- [1] 谷が流入する点に、複数個の流出する谷が接続するような代表点を探す (Fig. 6 の点 D)。
- [2] 地形図よりこの代表点の周囲の地形形状を参照し、実際の流下方向に雨水を流下させるように、この代表点の一つ上流側の代表点 (Fig. 6 の点 A) の対辺に新たな点を設ける (Fig. 6 の点 C)。新しくこの点を代表点に登録し、分流出点であった点とともに三角形要素を作成する (Fig. 6 では、点 A と点 C によって三角形 ABC と ACD が作成され、点 C と点 F によって三角形 CFD と CBF と BEF が作成される)。
- [3] 新しく設けた代表点に隣接するすべての代表点の標高を調査し、この点から流下する代表点があるかどうかを判定する。存在すればこの点と流下方向に存在する代表点を用いて三角形要素を作成し (Fig. 6 では、点 F と点 G によって三角形 FEG と FGD が作成される)、一連の作

[2] 地形図よりこの代表点の周囲の地形形状を参照し、実際の流下方向に雨水を流下させるように、この代表点の一つ上流側の代表点 (Fig. 6 の点 A) の対辺に新たな点を設ける (Fig. 6 の点 C)。新しくこの点を代表点に登録し、分流出点であった点とともに三角形要素を作成する (Fig. 6 では、点 A と点 C によって三角形 ABC と ACD が作成され、点 C と点 F によって三角形 CFD と CBF と BEF が作成される)。

[3] 新しく設けた代表点に隣接するすべての代表点の標高を調査し、この点から流下する代表点があるかどうかを判定する。存在すればこの点と流下方向に存在する代表点を用いて三角形要素を作成し (Fig. 6では、点Fと点Gによって三角形FEGとFGDが作成される)、一連の作

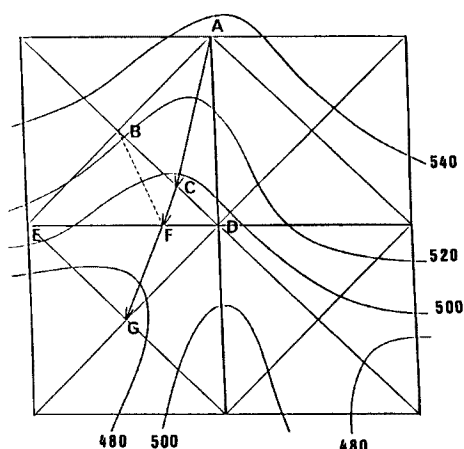


Fig. 6. Schematic representation for getting rid of a point which separates water flow.

業を終了する。存在しなければ, [2] に戻る。

窪地・分流点を解消するためには, 電子計算機と対話形式で新たな代表点を加えて三角形要素を作成しなおす手法が合理的であると考えている。電子計算機のモニターに尾根・谷・河道・窪地を表示して, 地形図を参照しながら新たな代表点を対話形式で入力するならば, 判断を誤ることも少ないだろうが, このような対話的なシステムはまだ実現できていない。

(6) 三角形要素の細分割

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, すべての代表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。**Fig. 7** は三角形要素の細分割の模式図である。図中の矢印は雨水の流下方向を表す。細分割するためのアルゴリズムを次に示す。

- [1] 任意の代表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 (**Fig. 7** の点 **F**)。
- [2] 求めた交点をもとに三角形要素を分割する (**Fig. 7** で三角形 **ABC** を三角形 **ABF** と三角形 **BCF** に分割する)。
- [3] 求めた交点が尾根の辺上, または三角形要素の頂点上にあれば追跡をやめる。交点が頂点に近い場合も頂点にあると考えて追跡をやめる。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 (**Fig. 7** の点 **E**)。
- [4] 求めた交点をもとに三角形要素を分割する。分割の方法を統一するために, 新しく求めた交点 (**Fig. 7** の点 **E**) とその交点の辺上にはない頂点 (**Fig. 7** の点 **C**) を結ぶ線分を, 細分割によってできる三角形要素の辺とする (**Fig. 7** で三角形 **ACD** を三角形 **AFE** と三角形 **FCE** と三角形 **CDE** に分割する)。
- [5] [3] に戻る。

すべての代表点にたいして以上の作業をおこない, 三角形要素を細分割する。ただし, 細分割によって新たにできる代表点についてはこの作業をおこなう必要はない。**Fig. 8** に細分割した例を示す。図中の太線は尾根であり, 矢印のついた折れ線は各代表点から出発した最急勾配方向に登る線である。

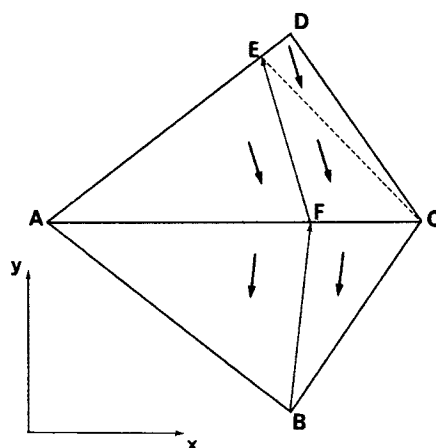


Fig. 7. Schematic representation of division of a triangular element into triangular elements which have one outflow edge.

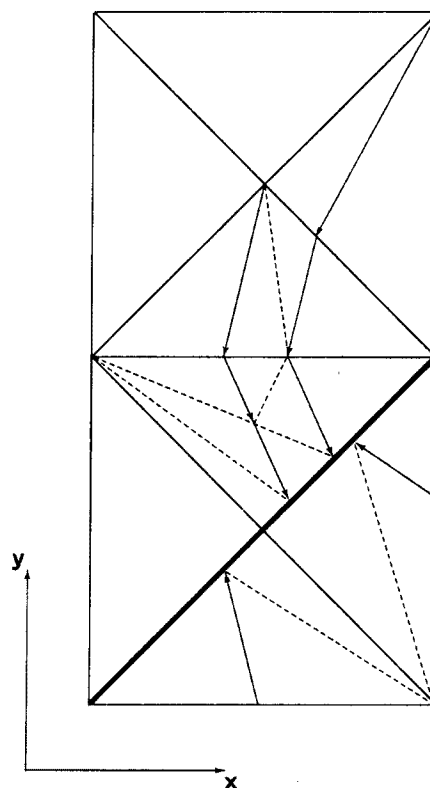


Fig. 8. An example of division of a triangular element into triangular elements which have one outflow edge.

2.5 流出寄与域の決定

(1) 河道網の拡充

流路位置データによって入力した河道は、当然、谷となるが、それ以外にも流域内には谷となる辺が表れる。これらの谷は、河道網とつながっているとは限らない。つながっていない孤立した谷を放置すると、その谷に寄与する三角形要素の雨水が、最終的にどの河道区分に流れ込むかが判定できない。そこで、これらの谷の最下流部に位置する代表点から最急勾配方向に、ほかの河道区分または谷に至るまで下ることによってこれらの孤立した谷を河道網に接続し、すべての三角形要素について雨水の流れ込む河道区分を確定する。データの統一性を保つため、三角形要素の細分割をおこなう手順と全く同様に、三角形要素を細分割しながら最急勾配方向に下っていく必要がある。

(2) 流域に寄与する三角形要素の探索

前述の方法にしたがって分割されていれば、任意の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のこの作業を行えば、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。これらがこの河道網の流域であり、流域を囲む周囲の辺を接続したものが流域界である。

3. TIN-DEM データ形式の荒川試験地への適用

3.1 対象流域の概要

本研究で提案した TIN-DEM データ形式を利用して荒川試験地梅ヶ谷流域¹⁰⁾の上流域を表現した。荒川試験地は野洲川の支川荒川西流の最上流部に位置し、その中で梅ヶ谷流域は流域面積 0.184 km²の山間地小流域である。Fig. 9 は梅ヶ谷流域付近の 25000 分の 1 地形図を拡大したものである。

3.2 TIN-DEMデータ形式による梅ヶ谷流域の表現

(1) 三角形要素の作成

国土地理院発行の 25000 分の 1 地形図をもとに、等高線と河道を読み取り、入力データであるメッシュ標高データと流路位置データを作成し、対象流域を三角形要素で表現した。Fig. 10 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。三角形要素はメッシュ間隔 25 m の格子点と河道点をもとに作成している。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。この流域では、河道と接続しない谷が 4箇所現れたため、最急勾配足向に河道に至るまで谷を延長して河道と接続した。窪地・分流域はともに現れなかった。

(2) 三角形要素の細分割と流出寄与域

Fig. 11 に示すように、(1) で得られた三角形要素群を細分割して、流出辺がただ一つとなるような三角形要素群で流域を表現した。黒く表示している部分は、対象流域の下流端より上流の河道に接続する三角形要素をもとに、その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、黒い部分と白い部分の境が流域界を表す。Fig. 12 は Fig. 11 を 3 次元的に表示したものである。

3.3 結果と考察

今回適用した流域では、地表面を表す代表点が窪地・分流域となるケースは現れなかった。電子計算機で対話的に窪地・分流域を処理する作業は少なく、オペレータに過度の負担がかかる心配はないと考えられる。しかし、地形が非常に複雑な場合、代表点のサンプリング密度が小さい場合など、問題となる代表点が現れるケースは確実に存在するため、それを解消するシステムが必要となる。

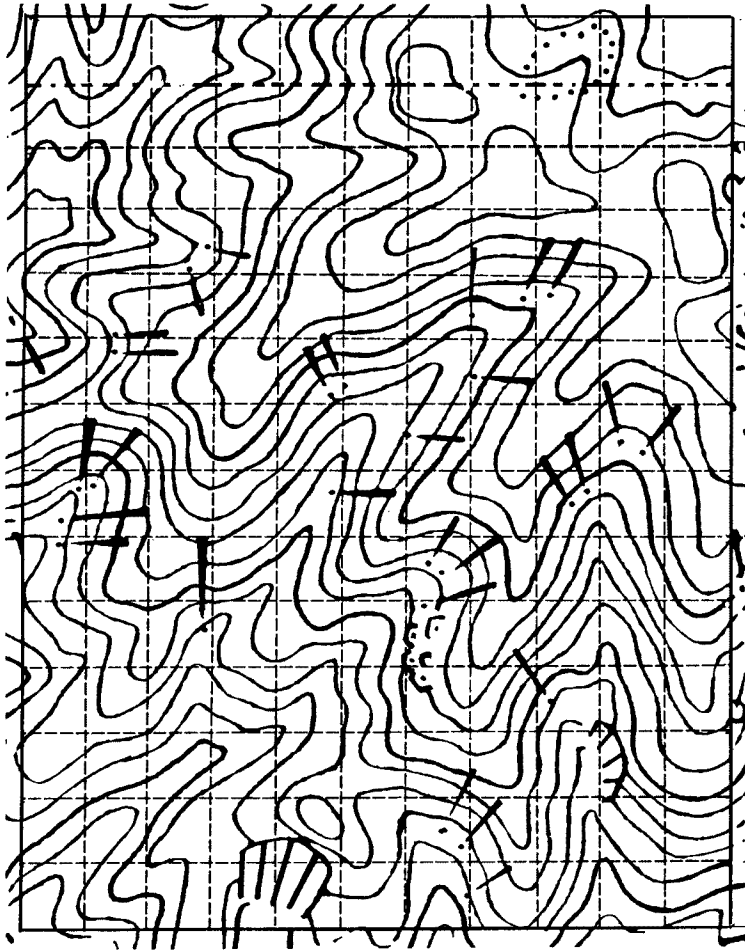


Fig. 9. The upper part of the Ara experimental basin.

4. 結 論

本研究では、実地形での雨水の流下方向にできるだけ忠実に流域場をモデル化するために、一つの辺だけから雨水が流出するような三角形要素で TIN-DEM データ形式を構成する手法を提案し、そのアルゴリズムを示した。

本研究で提案する TIN-DEM データ形式で流域を表現すると次の利点がある。

- [1] グリッドモデルと異なり、雨水の流下方向を限定する必要がない。
- [2] 三角形要素は一つしか流出辺をもたないので、流れのモデルを構築するときに都合がよく、雨水の流下・流集していく経路や流出への寄与域を特定することが簡単にできる。
- [3] メッシュデータをもとに三角形要素を作成するので、レーダー雨量情報やランドサット情報などのメッシュデータを利用するときに位置の対応が求めやすい。
- [4] 実際には窪地でないのに窪地が現れる場合など、実際の雨水の流れとモデルでの雨水の流れとが著しく異なる場合、新たに頂点を加えて三角形要素を作成しなおせばよい。

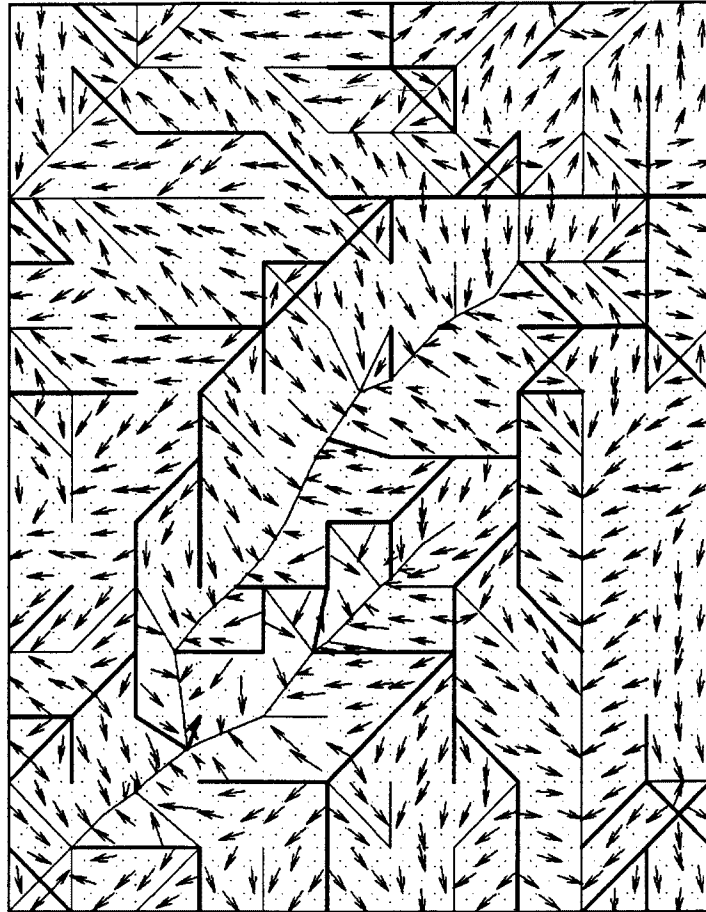


Fig. 10. The direction of water flow, the ridge segment and the valley segment in the upper part of the Ara experimental basin.

本研究では、TIN-DEM データ形式を構成するアルゴリズムのうち、メッシュ標高データ・流路位置データから三角形要素群を構成するシステムと、流出辺が一つとなる三角形要素に分割するシステムを計算機プログラム化し、実流域に適用した。適用した結果、梅ヶ谷流域では窪地・分流点は現れなかったが、それらを電子計算機で処理するシステムの構築が課題として残された。

TIN-DEM データ形式を用いる利点の一つとして、必要に応じて頂点を追加して三角形要素を作成しなおすことができることをあげた。とは言っても、それを自動的に実行することを考えるのはあまり現実的ではない。電子計算機上で地形解析のプログラムを実行し、メッシュ内に多数の河川合流点があったり窪地が生じたところなど人間のパターン認識の補助を必要とする部分を自動的に検出して表示し、オペレータが対話的に頂点を追加したり、三角形分割を指示することができるようなシステムを実現するのがよい。TIN-DEM データ形式のデータ表現とマンマシンのな処理システムは、グリッドモデルを用いて雨水の流れを考えるとときに直面する問題の多くを解決してくれるものと考えられる。

こうした対話的なシステムの構成を始めとして、流れのモデルとの結合、モデル化のスケールの問題、レーダー雨量情報・土地被覆情報を組み込んだ分布型流出モデルの総合化など今後の課題は多い。

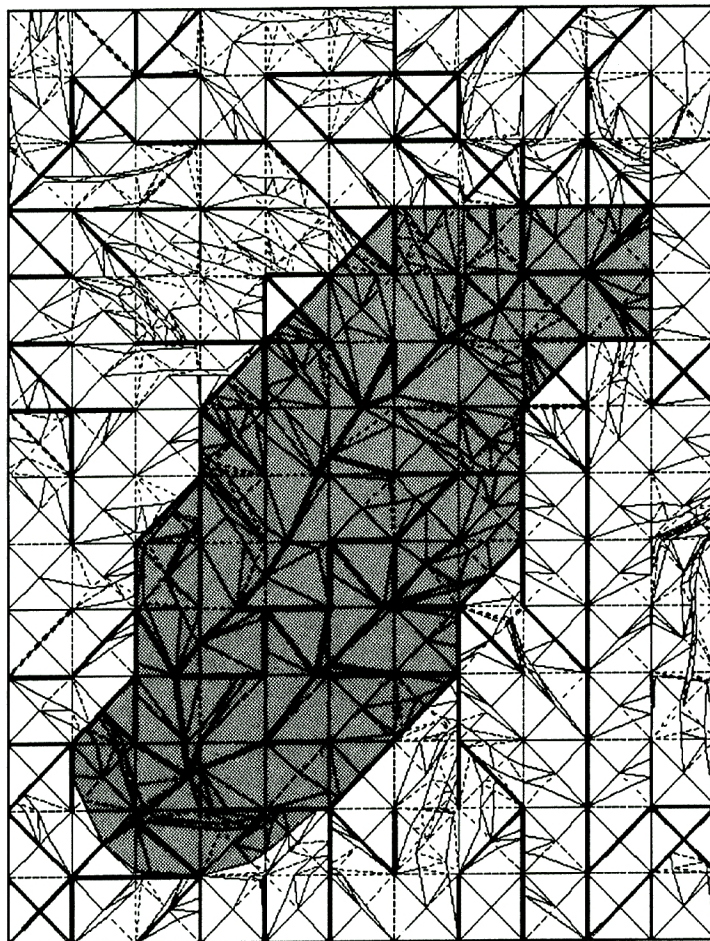


Fig. 11. Plane figure of the upper part of the ara experimental basin using TIN-DEM data structure.

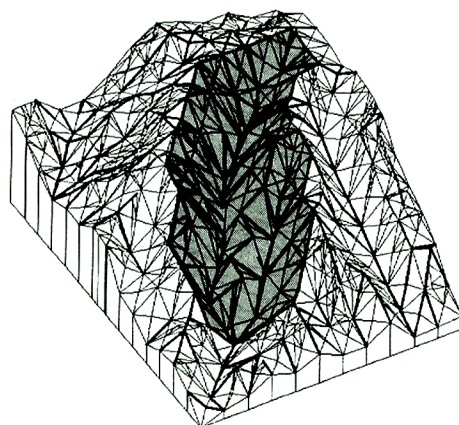


Fig. 12. Three dimensional representation of the upper part of the Ara experimental basin using TIN-DEM data structure.

なお本研究を進める上で多大な協力を得た京都大学大学院生の山口昌利君，大江郁夫君に感謝する。

参 考 文 献

- 1) Tarboton, D.G., R.L. Bras and I. Rodriquez-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.
- 2) 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回年次学術講演概要集第二部，PS 4-5，pp.10-11，1990.
- 3) O' Loughlin, E.M.: Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Chatchments by Topographic Analysis, Water Resources Research, Vol.22 (5), pp.794-804, 1986.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Jett, S.C., A.D. Weeks, W.M. Grayman and W.E. Gates: Geographic Information Systems in Hydrologic Modeling, Proc. of the Hydolorogic Transport Modeling Symposium, New Orleans, Louisiana, A.S.A.E., pp.127, 1979.
- 7) 高棹琢馬・椎葉充晴：Kinematic Wave 法への集水効果の導入，京都大学防災研究所年報，第24号B-2，pp.159-170，1981.
- 8) 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，京都大学防災研究所年報，第32号B-2，1989.
- 9) 山口昌利・高棹琢馬・椎葉充晴・大江郁夫：流域場モデルにおける要素生成の新しいアルゴリズム，土木学会45回年次学術講演会講演概要集第二部，2-46，pp.144-146，1990.
- 10) 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.