

TIN-DEMデータ形式による流域地形の表現について

A numeric representation of a topographic surface using a TIN-DEM data structure

高埴琢馬*・椎葉充晴†・立川康人‡

By Takuma TAKASAO, Michiharu SHIIBA and Yasuto TACHIKAWA

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

The objective of this work is to represent the landscapes numerically using Triangular Irregular Network Digital Elevation Model data structure. 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.

Keywords: topographic analysis of river basins, TIN-DEM, direction of water flow, distributed rainfall-runoff model

1. はじめに

国土数値情報などの数値地形情報、レーダー雨量計などの広域的な雨量観測体制の整備によって、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た。本研究ではこのような条件を背景とし分布型洪水流出モデルを構築するために、流域地形形状を直接組み込むことによって流域場を表現する方法を提案する。

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 Digital Elevation Model (DEM) 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⁾。

[1] 三角形網モデル (Triangular Irregular Network DEM, TIN-DEM)

[2] 等高線図モデル (Contour based DEM)

[3] グリッドモデル (Grid based DEM)

いずれも地表面上の有限個の点を代表的な点として選び、代表点の3次元座標を用いて地表面を表現する方法である。基本的には、上記の分類は代表点の選び方を基準にしている。

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できる。また、山頂・峠・河道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。等高線図モデルやグリッドモデルと異なり、地表面を面として表現しようという考え方が明確である。Palacios-Velez らは TIN モデルを利用して河道と尾根を自動的に描くアルゴリズム²⁾を提案している。

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

*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 (〒606 京都市左京区吉田本町)

‡正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)

る。彼らは等高線データをもとに最急勾配線を追跡し、隣合う最急勾配線にはさまれた小斜面での雨水の流出過程を考えることによって表層の飽和帯の変化を分析している。

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。100m 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。

また、河谷⁵⁾は、多角形要素を用いて流域を表し要素の大きさが流出解析に及ぼす影響を調べている。

等高線図モデルをもとにした O'Loughlin らの研究は流れ方向を重視している点で魅力的な研究であるが、流域規模で流れの場のモデルを考える場合、等高線を入力することは非常に煩雑であり、データ数も膨大となる欠点がある。一方、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られ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などを考えると、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、流れ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。

2. 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、流域斜面上の流れ方向が収束するような形状をしているか、それとも流れ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。このように、山腹斜面の形状は、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。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。すなわち、斜面を斜面として扱うのが望ましい。

そこで、筆者らは、流域地形を表現する形式としては、基本的には TIN-DEM 形式によるのがよいと考える。TIN-DEM 形式で地形を表現する場合、面の法線ベクトルや面の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 らの方法が容易に適用できる。先に述べたように、等高線データの入力は大変であり、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、河道に接した三角形要素から始めて、各三角形要素の上流側に位置する三角形要素を次々とたどって行くことによって、その河道部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、2次元配列を用意し、格子点位置を添字で、配列の値で高度が表現されるように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。このような取扱の簡便さから、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。流出現象の特徴から地形表現の形式としては TIN-DEM データ形式を採用したが、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、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、比較的容易に利用することができる。

以上の観点から、本研究では次の2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・山頂・峠・河道点（河道とメッシュとの交点・合流点・上流端・流域下流端）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1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。

3. TIN-DEM データ作成アルゴリズム

3.1 三角形要素の作成

図1に、グリッドモデル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～Fはグリッドモデルの格子点であり、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、メッシュ中央に代表点Lを追加し、メッシュを4個の三角形に区分する。追加した点の高度は周囲の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代表点に加えて、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1に示した形に限られず、グリッドの間隔が大きいと、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⁶⁾。今のところ、これらの複雑なパターンにも対処できる一般的な自動分割プログラムを作成するに至っていない。しかし、そうした複雑なパターンが生じるのは希であって、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と考えられる。

3.2 三角形要素の細分割

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、次の手順で、前節で述べた方法で作成した三角形要素群を細分割する。

[1] 三角形要素上での雨水の流下方向の算定

図2に示すように、三角形要素の法線ベクトル 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。

[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。図3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からは雨水が流れ出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。

[3] 三角形要素の各辺が尾根であるか谷であるかの判定

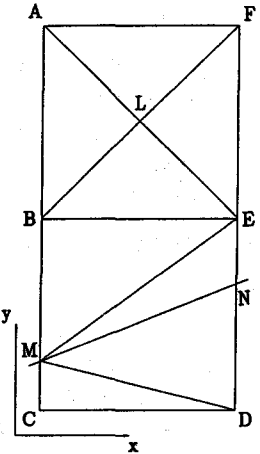


図-1 TIN-DEM データ形式による流域の三角形要素分割

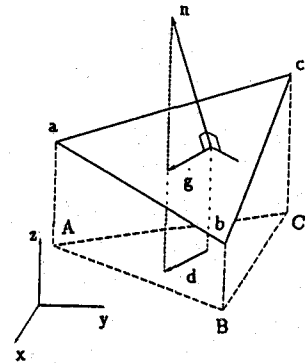


図-2 流下方向の算定

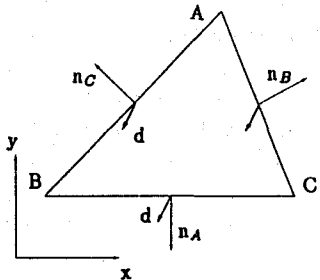


図-3 流出辺・流入辺の算定

図4に尾根・谷を判定するための模式図を示す。
(a)のように隣合う三角形要素の共通の辺が共に流入辺ならばその辺は谷である。(b)のように隣合う三角形要素の共通の辺が共に流出辺ならばその辺は尾根である。

[4] 三角形要素の細分割

以上の準備をもとに流出辺がただ1つとなるように三角形要素を細分割する。細分割は、三角形要素の頂点から最急勾配方向に登る線分を次々と追跡しながら行う。

細分割するためのアルゴリズムを次に示す。

- 頂点から最急勾配方向に登り、対辺との交点を求める(図5の点F)。
- 求めた交点をもとに三角形要素を分割する。図5で三角形ABCは三角形ABFと三角形BCFに分割される。
- 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。交点が頂点に非常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(図5の点E)。
- 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(図5の点E)とその交点の辺上にない頂点(図5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。図5で三角形ACDは三角形AFEと三角形FCEと三角形CDEに分割される。
- (c)に戻る。

すべての三角形要素の頂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頂点についてはこの作業を行う必要はない。

図6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頂点から出発した最急勾配方向に登る線である。

4. 荒川試験地への適用

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⁷⁾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 0.184km² の山間地小流域である。図7の(a)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。図7の(b)は三角形要素を細分割する準備として、細分割する前の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 25m 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。図8は図7の(b)を3次元的に表示したものである。図9は流出辺がただ1つとなるような三角形要素で流域を表現したものである。

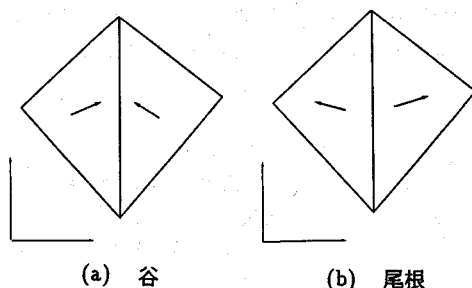


図-4 尾根・谷の判定
→ : 雨水の流れ方向

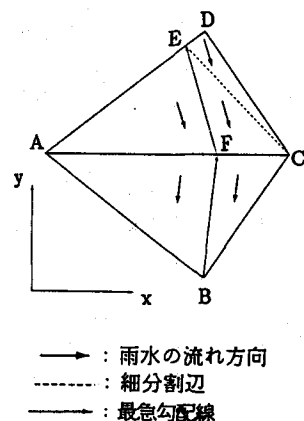


図-5 細分割の模式図

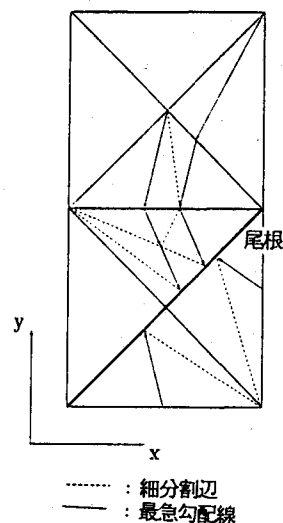
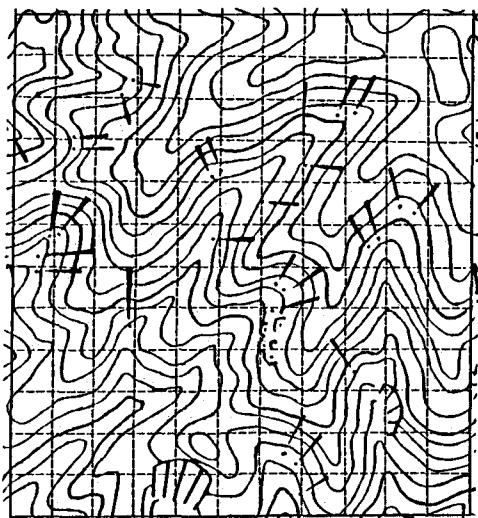
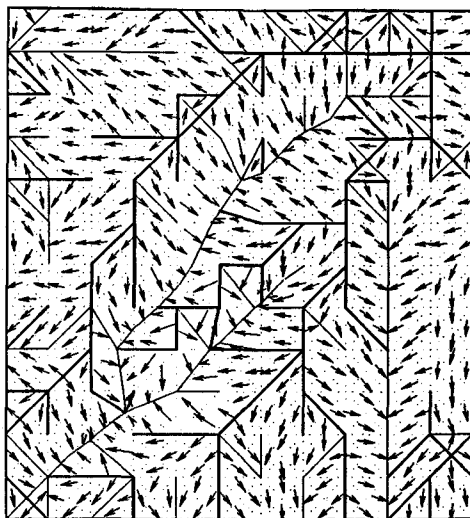


図-6 三角形要素の細分割の例



(a) 対象流域の地形図



(b) 雨水流下方向と尾根・谷

図-7 荒川試験地梅ヶ谷流域の雨水流下方向と尾根・谷の表示

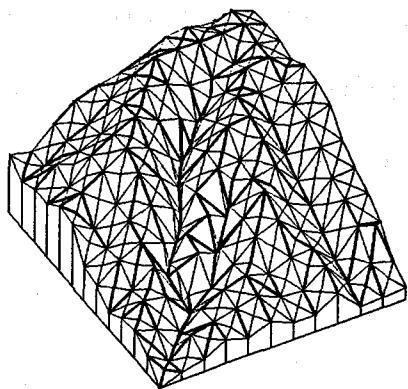


図-8 梅ヶ谷流域の立体的表現

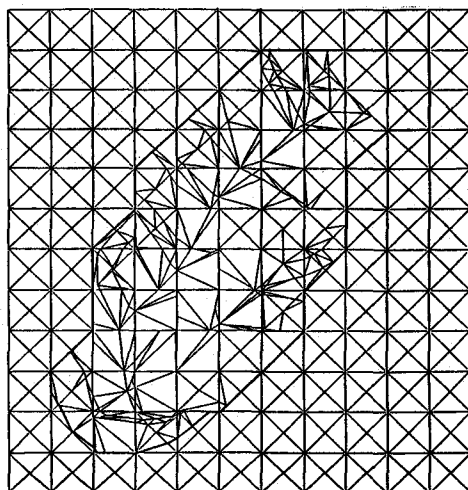


図-9 梅ヶ谷流域の細分割表示

5. 終わりに

本研究では、流れ方向を重視するために、1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、そのアルゴリズムの骨子を示した。

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、雨水の流れ方向を限定する必要がある。
- [2] 三角形要素は1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比較的簡単にできる。

- [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ことができる。
- [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。

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と考えられる。TIN-DEM データ形式のデータ表現とマンマシンの処理システムは、グリッドモデルを用いている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今後の課題としたい。

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氏、大江郁夫氏に感謝する。

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 IV-5, pp.10-11, 1990.
- 2) 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.
- 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) 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) 川谷健：多角形格子モデルによる流域地形の評価について，土木学会第44回年次学術講演会，pp. 116-117，1989.
- 6) 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回年次講演概要集，II-46, pp. 144-146, 1990.
- 7) 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.