

# 地形学・水文学における地理情報の処理手法について

## - 数値地形モデルを用いた流域地形計測の試み -

中山 大地

千葉大学環境リモートセンシング研究センター

小寺 浩二

法政大学文学部地理学教室

地形学、水文学などの地球科学分野では、近年地理情報システム（GIS）を用いた解析が行われるようになってきた。GIS で扱うデータにはベクトル型データとラスター型データがあり、ラスター型データには衛星画像や数値地形モデルなどがある。地形学、水文学の分野では DEM から流路網を抽出し、これを用いて地形計測を行ったり流出モデルを構築するといったことが必要になる。流路網と絡めた場合、DEM はラスター型データにも関わらず、ネットワークの構造を持つことになる。このため、画像解析によく使われるフィルタ型の演算だけでは処理をすることができなくなる。そこで、本稿では流路ネットワークと DEM を使った地形解析の実際について述べ、そのアルゴリズムを紹介する。

### 1 はじめに

地形学や水文学などの分野では、近年、地形図や土地条件などをデジタル化したデータを用いた解析が多く行われるようになってきた。そして、これらの解析に際しては、一般に地理情報システム（Geographical Information System; GIS）と呼ばれるシステムを用いる[1]。GIS で扱うデータ形式には大きく分けて二種類ある。一つは行政界・河川網・道路などの、長さや方向を持つベクトル型データで、もう一つは衛星画像などに代表される、空間を任意のグリッドで区切ったラスター型データである。

ラスター型データには、衛星画像のほかにも地表面を任意のグリッドに区切り、その交点の座標と標高を羅列したデータである数値標高モデル（Digital Elevation Model; DEM）などがある。日本において、DEM は、国土地理院が主体となったプロジェクトにより 1970 年代から整備され、現在は 250m グリッドのものが日本全国を網羅し、さらに細かい 50m グリッドのデータが順次刊行中である。

地形学や水文学などの分野では、従来は印刷された地形図をもとにして各種の地形計測、流出モデルが構築されていた。しかし、DEM と GIS を用いれば手作業の代わりにコンピュータを用いた解析が可能になる。特に流域を対象とした地形計測や流出モデルの構築には流路網の抽出が必須になるが、これらを手作業で行うと膨大な時間を必要とする。DEM と GIS を用いて自動的に流路網を抽出し、地形計測を行うことが可能になれば作業時間が短縮され、広範囲を精度よく解析することが可能になる。ただし、現在の GIS は一般的な定型作業を行うことに主眼が置かれており、研究目的などの特殊な用途には対しての機能は十分ではない。

例えば、ラスター型データを処理する GIS は、衛星画像解析を主体としたものが多く、画像処理によく見られるフィルタ機能を主として持っているものが多い。しかし、地形学や水文学の分野で DEM を活用するとすると、流路網を扱わざるを得なくなる。DEM から流路網を作成する研究は 1980 年代から行われてきており、作成さ

れた流路網は流下方向マトリクス（Drainage Direction Matrix; DDM）と呼ばれるラスター型のデータとなる。流路網は文字通りネットワークの一種であり、合流点と合流点の間の河道をリンク、合流点をノードとみなすことができる。すなわち、DDM はラスター型のデータにもかかわらず、上流から下流への方向性を持つネットワークとして考えられる。このような特性を持つ DDM に対しては流路網に沿った処理を行わなければならない。例えば、流路に沿って流域の平均傾斜がどのように変化するかといったことを計測するには、対象範囲に同じ操作を行うフィルタのみでは不可能である。そこで、本稿では数値標高モデルから作成した流路網を用いた地形の解析手法について紹介し、そのアルゴリズムを解説する。

### 2 DEM を用いた解析

#### 2.1 流路網の抽出

地形学や水文学にとって、流路網は重要なデータの一種である。印刷地形図上での流路網の抽出にはさまざまな方法があるが、一般的には、等高線などを元にして谷の地形に相当する部分を流路として抽出する[2]。DEM も等高線と同様に標高情報を持っているため、これを用いて流路を求めることが可能である。

DEM を用いた流路網の抽出の場合は、グリッド間の標高差を用いる。すなわち、水が一番低いところに流れるという原理を応用する。このためには、任意のグリッド周囲 8 点の標高をチェックし、下向き最大の標高差を示す方向に水を流す。しかし、これだけでは流路網を作成することはできない。例えば、最大標高差を示す方向が複数あった場合にどの方向に流すかを決定しなくてはならない。また、平野などの平坦値では、データ上標高差がない場合が考えられ、流路を設定することができなくなる。このような場合に単純に乱数を用いて流下方向を設定してしまうと、流路の交差やループが発生する可能性がある。さらに、実際の地表面を離散的にサンプリングすると、どうしても DEM 上に凹陷地ができてしまう。このような凹陷地に水が流れてきた場合、流路はそこから流れ出ることができなくなり流路が中断する。

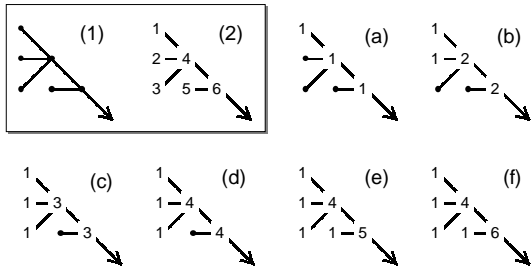


図1 流域面積の計算アルゴリズム

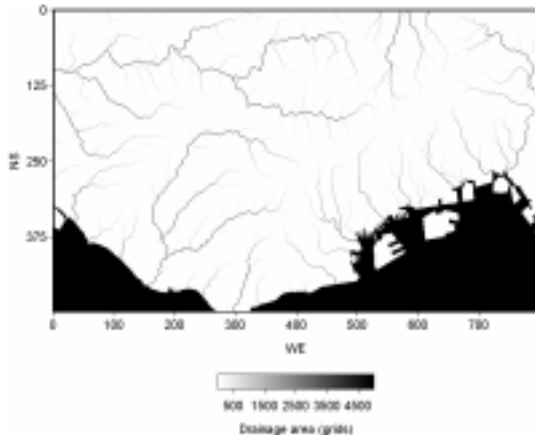


図2 計算された流域面積

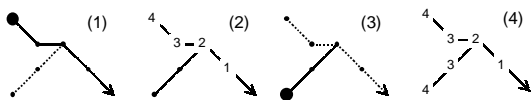


図3 流路ジェネレーションの計算アルゴリズム

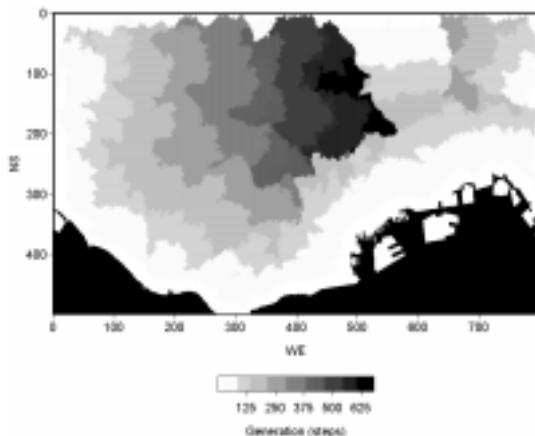


図4 流路ジェネレーションの計算結果

DDM は実際の流路網をシミュレートしたものであるため、実際の流路網と同様に源流から海（もしくはDEMの端）まで、流路の中断やループなど無しにたどれない。これらの問題を解決するためのアルゴリズムは多くあるが、代表的なものは洪水型アルゴリズム

[3]である。流域地形計測や分布型流路モデルの構築はこのDDMとDEMを用いて行われる。

## 2.2 流域面積の計算

印刷地形図を用いた場合に、流域面積はある任意の地点（たとえばダム、河川の合流点など）のみでしか計測できなかったが、DDMを用いれば、DDMの全てのグリッドについて流域面積を求めることができる。任意のグリッドの流域面積は、そのグリッドよりも上流にあるグリッドの数に1グリッドあたりの面積を乗ずればよい。しかし、多くのDEMは緯度経度を等分して作成しているため、四辺の長さは等しくない。たとえば国土地理院発行の50mグリッドDEMの場合は、東西方向の長さが2.25秒、南北方向の長さが1.5秒となっている。厳密には標準楕円体を用いて一辺の長さを求めなくてはならないが、地球を球体で近似して求めても大きな差はなく、緯度が同じであれば同じ長さを用いても問題はない。従って、流域面積を求める際にはグリッドの数をカウントすることが重要になる。以下にそのアルゴリズムについての解説をする。

例として図1の(1)のようなDDMを考える。このDDMは4個の源流と2個の合流点からできている。最下流の流域出口の流域面積は、上流のグリッドの総数に流域出口自身を加えた数である6グリッドになる。各グリッドの流域面積を求めるには、各グリッドからDDMに沿って流下しながら、流域面積を入れる配列に1を加算していく方法を用いる。(2)にあるように、最初は1のグリッドからスタートし、DDMに沿って流域の出口までたどり、その際に通過するグリッドに1を加える(a)。海もしくは図端に到達したら、(2)の2のグリッドからスタートし、同様に通過するグリッドに1を加えていく(b)。すべてのグリッドにおいてこの作業をくり返し海までたどると、最終的に流域面積が入った配列を得ることができる(f)。海もしくは図端に到達したかどうかを判断するには、次の流下グリッドが海もしくは図端かどうかを判断する。

この例ではある流域について流域面積を求めたが、実際にはDDM全体について同じ計算を行う。サンプルとして神戸・淡路島地域の50mDEM(800\*500グリッド)について計算を行ったものを用意した(図2)。各グリッドの流域面積は白から黒になるにしたがって大きくなる。この流域面積図を適当なしきい値で区切り、しきい値以上のグリッドに色をつければ流路網の図になる。流域面積の最大値は西端に近いグリッドで229,690グリッド(約574.2km<sup>2</sup>)となっている。ただし、このような比較的小さい範囲のDDMでも、流域面積は大きな値になるので、流域面積を格納する配列の型には注意を要する。

## 2.3 流路ジェネレーションの計算

図端もしくは海から各グリッドまでのDDMに沿った距離のことを流路ジェネレーションと呼ぶ。一枚のDDMについて求めた流路ジェネレーションは、DDMの大きさに依存する値(大きなDDMほどジェネレーションの最大値が大きくなる)であるため、求めたジェネレーションの値そのものは意味をなさない。しかし、流域内の各グリッドのジェネレーションと流域出口グリッドのジェネレーションの差をとることで、流域出口からの距離を求めることができる。このように、ある点からの相対的な値に変換することによりジェネレーションの利用範

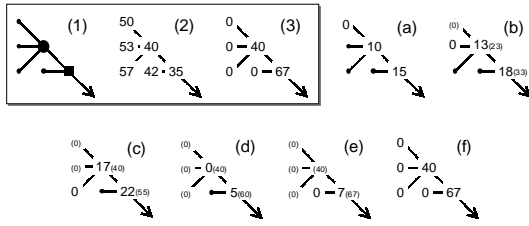


図5 山体体積の計算アルゴリズム

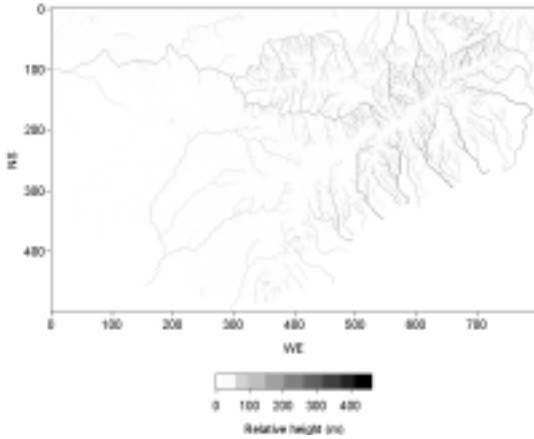


図6 流域平均比高の計算結果

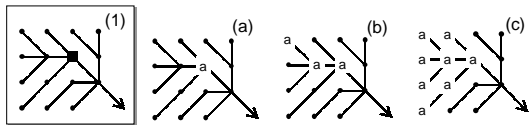


図7 流域の抽出アルゴリズム

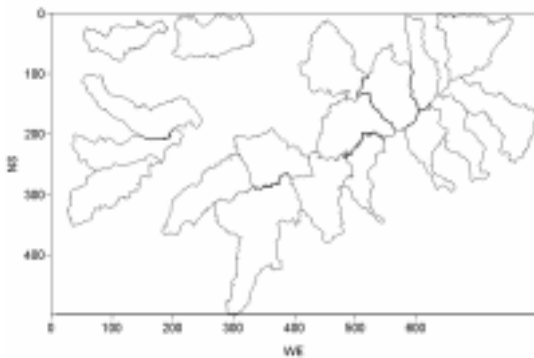


図8 流域の抽出結果

囲は広がる。

流路ジェネレーションを求めるアルゴリズムは以下のようなになる。(図3)。作業の前段階として、流路ジェネレーション配列の図端と海のグリッドにジェネレーション1を入れ、その他のグリッドに0を入れて初期化する。次にジェネレーションが求まっていないグリッド(ジェネレーション配列が0のグリッド)からDDMに沿って

図端もしくは海、またはジェネレーションが求まっているグリッド(すなわちジェネレーション配列が0以外のグリッド)まで流下する(1)。この際にたどったグリッドの座標を保存しておく。次に保存してある座標を戻りつつ、ジェネレーション配列に値を書き込んでいく(2)。この時、到達した先が海ならば1から始まり、ジェネレーションが既知のグリッドならばそのジェネレーションの値から始まって1ずつ増やしていく(3, 4)。ジェネレーションが求まっていないグリッドを探し、(1)~(2)の作業を繰り返してすべてのグリッドについてジェネレーションを求める。最後にすべてのグリッドから1を引いて(海や図端のグリッドのジェネレーションが1になっているため)完成である。

計算結果を図4に示す。黒のグリッドほどDDMに沿って「奥」にあるグリッドであり、六甲山地の北側斜面と南側斜面でジェネレーションの値が異なり、海までの距離が北側斜面と南側斜面で大きく違うのがわかる。

#### 2.4 山体体積・平均比高・平均傾斜の計算

流域面積や流路ジェネレーションは、時間をかければ印刷地形図から手作業により計測することができた。しかし、DEMを用いないとほとんど計測不可能な地形量として、山体の体積を挙げることができる。特にDDMと組み合わせると流路に沿った計算を行なうことにより、任意のグリッドよりも上流側の山体の体積を求めることができる。この場合の体積とは、上流側のグリッドと注目しているグリッドの標高の差(すなわち比高)をDDMに沿って積算したものであり、単位はグリッド数に高さに乗じたものになる。流域単位の山体体積は、流域を構成するグリッドと流域出口のグリッドとの比高を積算したもので計算できる。

図5は山体体積の定義である。(1)のようなDDMがあり、各グリッドの標高が(2)のようになっているとする。この時、各グリッドにおける山体の体積は(3)のようになる。(1)の印の山体体積は、上流側のグリッドとそのグリッドの比高の積算

$$(50-40)+(53-40)+(57-40)=40$$

で求めることができ、印のグリッドも同様に

$$(50-35)+(53-35)+(57-35)+(40-35)+(42-35)=67$$

と計算できる。

具体的なアルゴリズムは以下のようなになる。まず、左上のグリッドからDDMをたどって流下する。この時、通過するグリッドには最初のグリッドと通過するグリッドの比高を加算していく。例えば左上のグリッドの標高は50m、一つ下流のグリッドの標高は40mなので、このグリッドには(50-40)mの10mを加算する。次のグリッドの標高は35mなので、ここには(50-35)mの15mを加算する(a)。これを図端もしくは海に到達するまで行なう。海に到達したら、次のグリッドからたどり始めて比高を加えていく。各グリッドの数値はスタートしたグリッドからの比高であり、括弧内は積算した比高である(b~e)。この作業をすべてのグリッドについて行なえば、最終的に(f)のような各グリッドごとの山体体積を求めることができる。

山体体積は流路に沿って上流から下流に向かい一意に増加する値であるため、可視化されたイメージは流域面積とほとんど変わらない。このように、山体体積は流域面積と非常によい相関があるので、山体体積そのものはあまり用いず、次に述べる流域平均比高や険しさの指数

として用いるほうが良いと考えられる。

体積を面積で除せば高さが求まる。つまり山体体積を流域面積で割れば、任意のグリッドよりも上流の平均比高を求めることができる。図 6 が平均比高を表したものである。この図からは、同じ六甲山地から流れる河でも、神戸の方に流れる川のほうが平均比高の大きいことがわかる。すなわち、神戸側に流れる川のほうが流域面積に比べて山の高さが高い。

さらに体積を体積で除せば無次元の量になる。つまり山体体積と流域面積の 1.5 乗の比は無次元量であり、任意のグリッドよりも上流の平均傾斜を表している。これは流域の陰しさの指数[4]として求められているもので、流路の勾配とよい相関があるとされている。

## 2.5 流域の抽出

これまで解説してきたプログラムは DEM 全体に対して処理を行ったものであるが、実際に地形量を計測する際には、ある範囲ごとに計測を行うことが多い。例えば 1km 四方の統計量であったり、ある行政区域内の地形量などが考えられるが、日本などの湿潤地域では流域単位に計測を行うことが、地形学・水文学的な視点からは、最も適当であると考えられる。なぜなら、流水などの地形を形成する営力は、分水界の内側のみ働き、外の流域には影響を与えることがほとんどないからである。

DDM から流域を抽出するアルゴリズムは比較的単純である。基本的には流域の出口のグリッドに流れ込むすべてのグリッドを抽出し、これらのグリッドに同じ ID をつければよい。流域が複数あるときには、流域ごとに ID をユニークなものにする。

詳しいアルゴリズムを図 7 に示す。まず (1) のような DDM を想定し、のグリッドを出口とする流域を抽出する。(1) まず、このグリッドに流域 ID を入れる (a)。(2) 流域 ID が割り振られていないグリッドから、流域 ID が割り振られているグリッドもしくは図端や海までたどる。その際にたどった座標を記憶しておく。たどり着いた先が海や図端だったら、記憶していた座標を消去して(2)を繰り返す。流域 ID がついているグリッドであったら、記憶しておいた座標のグリッドに同じ ID を埋め込む (b)。(3) この作業を全グリッドについて行う (f)。

図 8 に流域抽出の例を示した。この例では、流域面積が 4,096 ~ 8,192 グリッド (約 10km<sup>2</sup> ~ 20km<sup>2</sup>) の流域を自動的に抽出したものである。このような使い方をすれば、同程度の大きさの流域を自動的に抽出し、これを対象として地形を計測したりすることが可能になる。しかし、これらの図をみてもわかるように、図端にかかっている流域は隣の図幅にまたがっている可能性があるため、実際の解析に用いることはできなくなる。

## 3 おわりに

以上、DEM を用いた地形計測について若干の解説を行った。DEM を用いる方法のメリットには、従来手作業により膨大な時間をかけていた地形計測を、短時間で広範囲を処理できるようになったことがある。しかし、DEM を用いた方法にも問題はあつた。例えば、これらはあくまでも一定のアルゴリズムに従って行った計算結果であり、従来の方法で計測された地形量と値が大きく食い違ったり、定義が異なるため同一には議論できないことなどである。この差を吸収するためにも、DEM を用いた方法と従来の方法を比較する必要がある。

一方で、DEM は印刷地形図、空中写真に次ぐ第三の基礎データとして、地形学、水文学などの地球科学分野から広く注目されている。この要望に答えるためには二つの道を模索する必要がある。一つは更なる高解像度データの整備である。たとえば小さな流域での流出モデルや崩壊などの地形計測には、50m のグリッド間隔ではグリッド間隔が広すぎる。局所的には 10m グリッドの DEM を作成している例もあるが、これらはあくまでもその場限りのデータであり、統一されたデータフォーマットは策定されていない。もう一つは全球規模のデータ整備の必要性である。大陸規模の大流域での陸面過程などを研究するには、全球規模のデータが必要になる。これに対しては米国 NOAA の NGDC (国家地球物理学データセンター) がプロジェクトを進めているが、各国の研究機関でもそれぞれ整備を行っている。最近ではこれらの計画を横断するような地球地図プロジェクトも行われているが、データの精度の点では疑問点も多い。

しかし、近い将来これらの問題も解決されるはずであり、今後の展開に期待するとともに、GIS と DEM に関する研究を一層活発に進めたい。

## 参考文献

- [1]中村衆栄ほか、“水文学における GIS の活用法に関する基礎的研究”、法政大学計算科学研究センター研究報告第 11 巻、1998 年。
- [2]島野安雄、“日本の河川流域における水系網の特性について”、地理学評論第 51 巻、1978 年。
- [3]野上道男、“細密 DEM の紹介と流域地形計測”、地理学評論第 68 巻、1995 年。
- [4]吉山昭、“河道の勾配と流域の地形特徴量との関係 - 国土数値情報を用いた計測 - ”、地理学評論第 67 巻、1994 年。

キーワード.

数値地形モデル (DEM) 流下方向マトリクス (DDM) 地形計測

-----

Summary.

**Methodology of Geographical Information Processing  
on Geomorphology and Hydrology  
- An Attempt to Measure Drainage Landforms based on Digital Elevation Model -**

Daichi Nakayama

Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University

Koji Kodera

Department of Geography, Faculty of Letters, Hosei University

Recent progress in computers and development of widespread spatial information enables us to use Geographical Information Systems (GIS) in earth sciences, such as geomorphology and hydrology. In general, GIS treat two kinds of data, raster type and vector type. Raster type data possess grid characteristics, and vector type data possess network ones. Satellite images and digital elevation models (DEM) are typical raster type data, and used as the basic dataset for geomorphology and hydrology. For geomorphology and hydrology, extraction of stream networks is one of important procedure to measure topographic characteristics and to construct runoff models. However, manual extraction of stream networks from topographic maps is very time consuming work. So automatic extraction of stream networks from DEM attracts attention of many researchers. Stream networks simulated from DEM are called as drainage direction matrices (DDM). DDM possess combination characteristics of grid characteristics of raster type and network one of vector type. Therefore, it is impossible to handle DDM with simple use of filter operators, which majorly used in image processing software and GIS. So we should consider both characteristics of vector and raster type data when we treat DEM and DDM. In this paper, we explain the basic algorithms to handle DEM and DDM in geomorphology and hydrology.

Keywords.

Digital Elevation Model (DEM), Drainage Direction Matrix (DDM), Topographic Measurement