

細密 DEM に関する研究展望

中山 大地 (京都大学防災研究所)

隈元 崇 (岡山大学理学部)

1999年に国土地理院により日本全国50mグリッドのDEMの整備が完了したが、より細密なDEMに関する需要も高まりつつある。特に、空中写真や高解像度衛星から細密DEMを作成することは、海外など、既存のDEMがない地域において重要である。反復的な観測によって細密DEMを作成・比較すれば、時系列的な地形変化を検討することも可能になる。また、レーザなどにより収集されたサブメーター・スケールの超高解像度DEMが一般的になれば、さらに詳細な地形解析が可能になる。DEMはラスタ型データであるが、画像解析的な処理では十分な解析を行うことができず、流路網というネットワーク構造を加味した解析を行う必要がある。特に、人間社会に脅威を与えるような急速度の地形変化、たとえば土壌侵蝕や地すべりなどをDEMを用いて解析する際には、この手法が有効になる。本稿ではDEMを用いて流域単位で地形量を計測する手法について述べる。

1. 環境解析におけるDEMの意義

地形学や水文学の手法を用いて環境解析を行う際には、DEMやDEMから抽出された流路網などの基礎データが不可欠である。この種のデータを用いて各種の地形量を求めることにより、特定の場所で行われた現地観測の結果をモデルにあてはめ、より広範囲に適用することが可能になる。例えば、ある流域で実際に観測された流出について地形量を用いてモデル化すると、観測が行われていない流域での流出を予測することができる。すなわち、スポット的に求められたパラメータを広域に広げることができる。

2. 細密DEMの整備状況

図1に現時点で入手可能なDEMの特性を示す。それぞれのDEMについて、解像度、データ収集の反復性、利用の手軽さの3点を評価した。日本では国土地理院による50mグリッドDEMの刊行が1999年に完了した。このDEMは世界的に見ても精度が高く、これが全国的に整備されたことは評価できる。また、これ以前に日本全国をカバーしていた250mグリッドDEMを用いた場合には、微分的な操作で得られる傾斜量などの地形量の信頼性に疑問があったが、50mグリッドのDEMは、この問題をある程度解決する解像度を持っている。しかし、50mグリッドDEMでも、解析の種類によっては絶対的な解像度が足りないことがある。また、最新の地形図に基づくDEMのみが整備されているため、時系列的な標高の変化を追跡することはできない。これらの問題を解決するためには、反復的な観測により取得されたデータから、任意の解像度でDEMを作成することが必要になる。

このための最適な方法は、空中写真を用いてDEMを作成することである。また、広範囲を扱う場合には、ステレオ視できる衛星

画像(SPOT, JERS-1 OPSなど)を用いることもできる。しかし、これらはデジタル写真測量のためのシステムを必要とするため、誰でもすぐにDEMを作成できるわけではない。また、作成するDEMの空間解像度が高くなるほど、地上基準点(GCP: Ground Control Point)の位置情報などの精度が要求される。GCPについては、最近価格が安くなってきたGPSにより精度よく取得することが可能になりつつあるが、まだまだ一般的ではない。また、基本的に写真測量の手法を用いてDEMを求めるため、DEMの精度が元になる画像の質に強く依存する。当然ながら、画像上に雲が浮かっていたり、山の影などで画像が黒くつぶれている場所などは、補間による標高値しか求められない。一方、合成開口レーダー(SAR)で求められた画像を干渉させて標高を求める方法、すなわちインターフェロトリーを用いれば、雲や山影などの影響を受けることなくDEMを作成することが可能になる。しかし、これにも単純な画像解析のシステムではない特別なシステムが要求されるため、簡便な方法とは言い難い。可能であれば、衛星による観測のプロダクトの一つとして、精度の評価がなされたDEMが定期的に供給さ

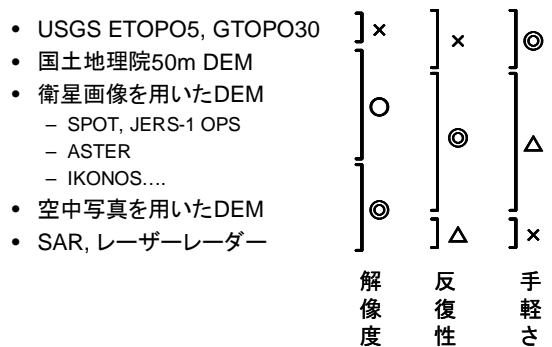


図1 代表的なDEMの特性

れることが望ましい。

1999年12月に打ち上げられた Terra には、日本が開発した ASTER というセンサが搭載されている。この ASTER には JERS-1 と同様にステレオ視バンドが観測可能であり、プロダクトとして日本全国の 30m 解像度絶対 DEM と東アジア地域の相対 DEM の刊行が予定されている。また、フランスの SPOT でも、2001年打ち上げ予定の SPOT5 にて HRS という新しいステレオ視センサが搭載され、垂直方向の相対精度が 5m から 10m という DEM が供給される予定である。

3. DEM から計算できる地形量の例

日本などの湿潤気候下では、河川の営力が地形に与える影響が大きい。したがって、流域単位や流路網に沿う形で様々な地形量を取得することが望ましい。ここでは、DEM を用いて仮想流路網(DDM: Drainage Direction Matrix)を計算し、流域単位で各種の地形量を計測する方法について紹介する。

DEM から求められる地形量には、グリッドごとの地形量(局所地形量)と流域を代表する地形量(流域地形量)がある。局所地形量は主に DEM に窓領域を設定してフィルタをかける手法で求める。局所地形量の中でも DDM に沿って計算をするものを流路地形量と呼ぶ。流路地形量には流路網自体の幾何的な特徴をあらゆる地形量が含まれる。流域地形量は DDM から流域を抽出し、その流域内での局所地形量および流路地形量の各種統計量を求めたものである。流路地形量と流域地形量は、単純なフィルタリングによって求まる地形量ではなく、流路網というネットワークを意識して計算される必要がある。このため、DEM を用いた地形量の計測は (1)DEM から局所地形量を求める、(2)DEM から DDM を求める、(3)DEM と DDM から流域地形量と流路地形量を求める、という順番で処理を行う必要がある。以下、この順番にしたがって代表的な地形量の求め方について紹介する。なお、一部の地形量の求め方は、野上ほか(1998)に具体的に述べられている。

(1) 局所地形量

● 接峰面高度・接谷面高度

接峰面は侵食前の地表を想定した仮想面であり、接谷面は侵食が進んだ状態の仮想面を表す。地形図を用いた接峰面の一般的な求め方には、等高線の屈曲から一定の幅を持つ谷を埋める谷埋め法と、単位方眼内の最高標高を求めて等高線を書く方眼法がある。DEM を用いて接峰面を求めるには、この二つの方法とは異なるアプローチを取る。

まず、(1)DEM 上に窓領域を設定し、この中心グリッドに窓領域内の平均標高を代入する。窓領域を 1 グリッドずつ移動して DEM 全体でこの計算を行う。その後、(2)元の DEM の標高値と平均の標高を比較し、平均標高の方が元の標高値よりも低くなっ

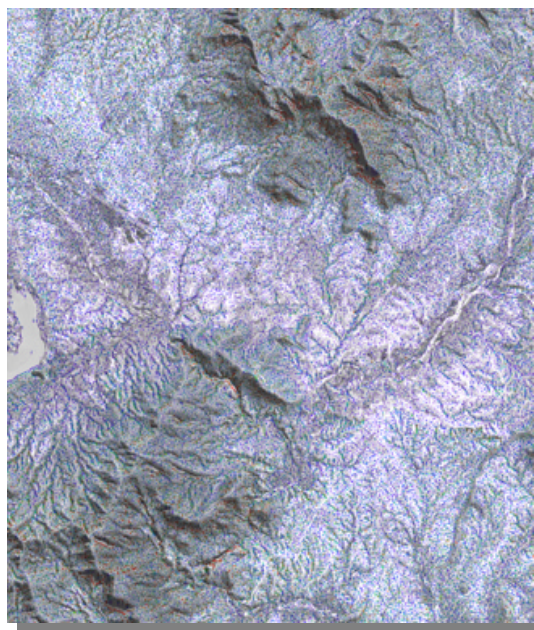


図2 局所地形量(侵食高)の例

青くなるほど侵食高が低く、赤くなるほど高い

ているグリッドに元の標高値を代入する。これをすべてのグリッドで行う。上記の(1)及び(2)を繰り返す。接峰面の標高の変化が少なくなれば計算は終了である。このアルゴリズムでは、周囲と比較して標高の高いグリッドの標高はそのまま保存されるが、相対的に低くなっているグリッドの標高は増加する。すなわち、高いところから低いところに土砂が移動するというプロセスを逆にシミュレートしたものになる。また、設定する窓領域の大きさを変えることにより、埋める谷のスケールを変えることが可能になる。

接谷面の計算では、手順(2)において低くなっているグリッドに元の標高を代入するかわりに、高くなっているグリッドに元の標高を代入する。これにより、低い部分は低いまま保存され、高い部分を低くすることができる。

● 侵食高・未侵食高

侵食高と未侵食高は、接峰面高度と現地表面高度の差、現地表面高度と接谷面高度の差で求まる。両者は相関がよく、一般的に山地部で大きな値を取る。また、侵食高および未侵食高にグリッドあたりの面積を乗じることにより、侵食量と未侵食量を求めることができる。

(2) 流路地形量

● DDM の計算

DEM から DDM を計算する方法は 1980 年代から様々なものが提案されているが、基本的なアルゴリズムは注目するグリッドとその周囲 8 グリッドの間の最大流下方向をつなげていく方法である。しかし、この方法では凹陥地において流路が中断したり、平坦

地では流下方向が求まらないという問題が残る。すべての流路網作成アルゴリズムはこの問題を解決し、流路の中断、ループ、分岐のない流路網を反復計算により求めている。このためのアプローチとしては、凹陷点の標高を順次上げて凹陷地から水が溢れることをシミュレートした Nogami (1995) の洪水流下法などがある。また、なるべく DEM の標高値を変えないように流路網を探索する手法として、遺伝的アルゴリズムを用いた中山 (1999) のアルゴリズムなどもある。

- 流路次数

流路網の位相幾何的な特性を表した地形量としては、Horton (1945) の法則を Strahler (1945) が拡張した「Strahler の流路次数」が一般的である。しかし、この流路次数は自然の流路を対象としたものなので、DDM にそのまま適用することはできない。たとえば、Strahler の流路次数では同じ次数の流路が合流した場合にのみ合流後の次数が上がるとなっている。これは同時に合流する流路が 2 本という前提に立脚している。しかし、8 方向検索の DDM の場合には、3 本以上の流路が同時に合流する可能性がある。そこで本研究では、合流時に最大流路次数を示す流路が 2 本以上あった場合には、合流後の流路次数をさらに 1 つ上げるという形で Strahler の流路次数を拡張した。また、水文地形学の分野では 0 次流路という概念がある。これは 1 次流路(最上流部の流路)のさらに上流に、1 次流路を発生させるための非恒常的な流路があるという概念である。すなわち、0 次の流域で集水された降水が集まり 1 次流路が始まる。手作業により地形図から流路網を抽出した場合、等高線の屈曲具合(谷の深さ)などから 0 次流路と 1 次流路を区別することが可能である。しかし、周囲 8 グリッドとの比高で一意に流路網が設定される DDM では、実際よりも多くの流路が抽出されてしまう。これを防ぐために、中山(1999)はしきい値を設定して最適な流路網を抽出する手法を求めた。その結果、50m 解

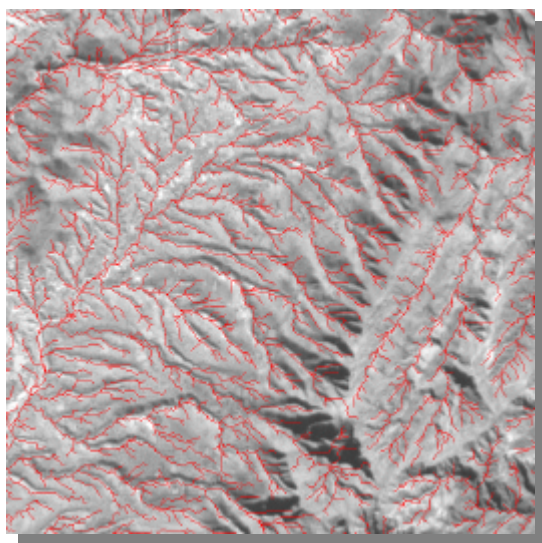


図 3 流路網の例

像度の DEM から得られた DDM を 1/25,000 地形図から手作業により抽出した流路網に一番近くするためには、DDM の 2 次以上の流路のみを用いるのが望ましいことがわかった。

- 流域面積・流路ジェネレーション

流域面積は、任意のグリッドより上流側の総グリッド数を表すものである。この値にグリッドあたりの面積を乗じることにより実面積を求めることができる。流域面積は、流域の自動抽出を行う際に単位流域の大きさを決める指標として用いることができる。同じ規模の流域が順次合流すると仮定すると、流路に沿った流域面積は下流に向かうにつれて $2n$ 倍になっていくため、 2^n グリッドをしきい値とするのが妥当とされている(吉山 1990)。また、 n と流域面積に基づく流路次数も吉山(1990)によって提唱されている。

流路ジェネレーションは、各グリッドから図端もしくは海までの距離を表している。海を侵食基準面として仮定すれば、流路ジェネレーションは侵食基準面からの距離と考えることができる。

- (3) 流域地形量

- 分岐比

流路の分岐比は、ある流域における次数別の流路数の比である。たとえば、1 次・2 次流路の分岐比は 2 次流路一本あたりの 1 次流路の数をあらわし、2 次・3 次流路の分岐比は、3 次流路一本あたりの 2 次流路の数をあらわす。平均分岐比はこれらの次数別分岐比の平均値となっている。分岐比は地質や地形によって異なるが、多くの河川では 4.2 程度になることが知られている(徳永 1966 など)。

- 流路頻度

流路頻度とは、単位面積あたり何本の流路があるかを示す指標である(高山 1974)。地形図を用いた計測では、流路頻度よりも流路密度を用いるほうが一般的である。流路密度は水系図に方眼をかけ、方眼の各辺を横切る流路数をカウントすることで求められるが、DEM と DDM を用いてこれを求めるのは困難である。例えば DDM の流下方向は 8 方向であるため、方眼の辺に沿った流路の処理が難しい。また、流路密度をこの定義で求めたとしても、ある窓領域内の地形量を表しているにすぎない。DDM を用いる利点は、任意の流域や流路を区切ることができることであり、これを活かして水系の密度を評価する際には、流域内の流路数を流域面積で除した流路頻度を用いたほうが妥当である。

- 流域平均比高・流域体積・流域起伏数

流域を構成するグリッドと流域出口のグリッドの標高差の流域内平均が流域平均比高である。値が大きいほど流域内の比高が大きく、地形が険しい流域である。

この流域平均比高に流域面積を乗じて流域体積を求めることができる。流域体積は任意のグリッドを流域の出口とした場合に、その流域を構成する山体の体積となる。

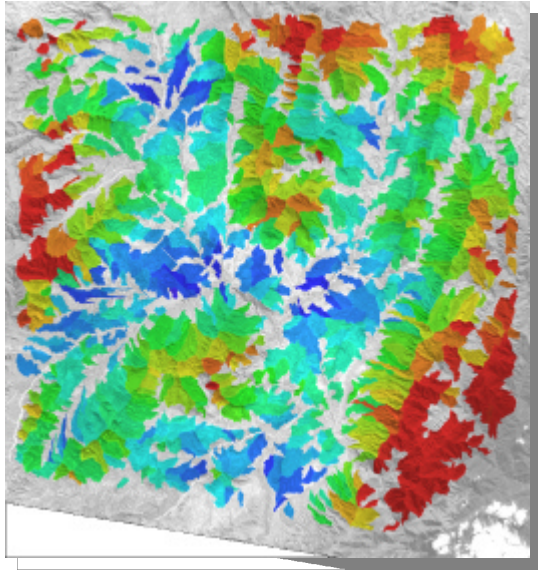


図4 流域地形量の例（流域平均侵食量）

青くなるほど流域平均侵食量が小さく、赤くなるほど大きい

さらに、流域体積を流域面積の1.5乗で除することにより、流域起伏数を求めることができる(吉山, 1990)。この値は無次元となり、一種の流域内平均傾斜を表す指標となる。DEMから直接傾斜を計算する場合には、結果がグリッド間隔に強く依存するが、流域起伏数を用いるとこの問題を回避することができる。

- 流域内の侵食の状態を表す地形量

流域平均侵食量は、単純に流域内の各グリッドの侵食量を流域面積で平均したものである。しかし、この地形量は流域の平均標高が高くなるほど大きくなる。このため、侵食量の標準偏差を流域平均侵食量で除して侵食量の変動係数を求め、流域内の侵食量のばらつきを示す指標として用いることができる。例えば、流域内に山地と平野を共に含む流域では、侵食量の変動係数が大きく、山地部と平野での侵食量のコントラストがはっきりする。一方、流域全体が平野もしくは山地のどちらかで構成されている流域では、侵食量の変動係数が小さくなり、流域全体において一様に侵食が進んでいることがわかる。

4. 細密DEMを用いた解析の今後の展望

環境解析にDEMを利用する場合、2点の問題が生じる。一つはDEMの空間解像度の限界であり、もう一つは時系列の欠如である。空間解像度に関してはレーザーレーダなどを用いて解決することができるが、これでは過去のDEMは作成できない。そこで、空中写真を用いたDEMの作成(たとえば佐野, 2000)が望まれる。仮に終戦直後に撮影された米軍の空中写真を用いてDEMを作成することが可能であれば、大規模地形改変前のDEMを作成することが可能になる。また、空中写真の時期を選んでDEMを作成すれば、地形変化を直接数値として求めることができる。また、

DEM作成時の副産物として求まるオルソ画像をDEMに重ねれば、空中写真の画像に標高を与えることができ、昔の地表の状態をより直接的に分析できる。また、大戦以前の地形変化が小さかったと仮定すれば、終戦直後の地形がそれ以前の百数十年間の地形を表すとみなせるため、古い地籍図や絵図などを併用することにより、江戸時代あたりまでの環境を復元できる可能性がある。そうすれば、近世以降の土地利用の変化といった、最近200年程度の環境変化と地形条件との関係について、かなりの精度で検討することが可能になると考えられる。

【文献】

- Horton, R. E. (1945): Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins: Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology, Geological Society of America Bulletin, Vol. 56, pp. 275-370.
- Strahler, A. N. (1952): Dynamic Basis of Geomorphology, Geological Society of America Bulletin, Vol. 63, pp. 923-938.
- 佐野滋樹(2000): デジタル図化機によるDEMの作成方法と精度. 『デジタル観測手法を統合した里山のGIS解析—東京大学空間情報科学研究センター公開シンポジウム—』, 杉盛啓明ほか編, 地域環境GIS研究会, 6-14.
- 徳永英二(1966): 豊平川の排水網構成とHortonの第一の法則の検討, 北海道大学地球物理学研究報告, Vol. 15, pp. 1-19.
- 高山茂美(1974): 河川地形, p. 67, 共立出版.
- 中山大地(1999): DEMからシミュレートした流路網と手作業により抽出した流路網の対比, 法政地理, Vol. 29, pp.28-37.
- 中山大地(1999): 遺伝的アルゴリズムを用いたDDM作成アルゴリズムの開発, GIS—理論と応用, Vol. 7, pp.27-35.
- Nogami, M. (1995): Geomorphometric measures for digital elevation models, Z. Geomorph., N. F., Suppl., Vol. 101, pp. 53-67.
- 野上道男・隈元 崇・中山大地・田中 靖・乙黒善宏(1998): DEMデータ処理技術講習会テキスト, 日本地形学連合・技術講習会委員会主催, 207p.
- 吉山 昭(1990): DEMを用いた流域の地形量の計測, 地学雑誌, Vol. 99, pp. 136-142.