山地の地形計測のための DEM の解像度に関する一検討

An examination of DEMs resolution for geomorphometry of mountain topography

田中 靖*・大森 博雄**

Yasushi TANAKA and Hiroo OHMORI

Abstract: The effects of changes in DEM resolution on Japanese mountain topography are examined from the viewpoints of geomorphometry. First, in order to examine the influence of resolution on the histogram of slope angles, the changes in the descriptive statistics value as a function of resolution are plotted. As a result, DEM with 25-m resolution or more high-resolution DEM should be used when calculating slope angles. Next, we examined the appropriate resolution from the viewpoint of magnitude-frequency distribution of landslides that greatly contributing to slope formations in Japanese mountains. From this examination, it was clarified that 5 to 10-m resolution DEM is needed to observe slope forms in and around landslide area. However, more high-resolution DEM is preferred to analyze the detail of landslide topography. At last, we evaluate the effects of DEM resolution using the accuracy of drainage network construction. We could judge that the 10-m DEM is enough to extract the drainage network for practical applications. From these results, we need 25-m DEM at least, and about 5 to 10-m DEM ideally for geomorphometry in Japanese mountains. Therefore, it is desired to be equipped with around 5 to 10-m DEM acquired by direct measurement for geomorphology.

1. はじめに

空間情報の数値情報化が進展してきた1970年代以降、その基礎データである地形情報は、地形そのものの理解を深めるばかりでなく、その他の地理情報をより正確に把握する上でも重要であるため、多くの国や地域でその整備が行われてきた。日本においては、全国を約250m 間隔のグリッドでカバーした250m-DEMが、1978年に国によって整備されて以降、コンピュータを用いた地形分析が急速に進展した（大森，1985）。しかし、実用上の精度の問題から、山地斜面の勾配を

適切に求める程度の解像度を持つ DEM が要望され、1999年には国土地理院によって全国の50m-DEMの整備が完了した。これにより、地形図を用いて地形計測を行っていた時代に比べれば、広域的で再現性の高い高精度の地形計測が可能になった。さらに最近では、デジタル写真測量や航空機レーザースキャナの技術の普及によって、より高解像度の標高データの利用も可能になりつつある。例えば、東京近辺の都市域については、航空機レーザースキャナによって取得された標高データに、手作業で補正が行われた 5 m-DEM が、既に CD-ROM で販売されている。このデータから作成した図（図1）を見ると、例えば渋谷付近のように最終間氷期に形成された段丘面群が最終氷期の海面低下に伴って谷が刻まれている様子や、品川駅西側の縄文海進時の旧汀線など、都市化が進んで把握することが難しい東京の地形の特徴が明瞭に表現されている。しかし、この図では、所々に小規模な人工物や樹木の樹冠に起因していると思われる不自然な凸凹（例えば明治神宮周辺）や、新宿の東京都庁付近のような大規模な建物の標高を補正したことによって生じる不自然

* 駒澤大学文学部地理学科

Department of Geography, Komazawa University
〒154-8525 東京都世田谷区駒沢1-23-1

** 東京大学大学院新領域創成科学研究科

Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo
〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1

な平坦面も見られる。このように、DEM が高解像度になればなるほど、目的に応じてどのようにデータを整備すべきか、また、必要とされる解像度・精度などについて慎重な検討を行う必要があることが分かる。この問題に関しては、人工物の存在しない山地斜面の地形を計測する際にも同様のことが言える。さらに、地形データを扱う方法には、メッシュ型の DEM の他に、対象領域内のランダムな計測箇所を三角形群で表現する TIN がある。TIN は、一つのデータ範囲内であっても、地形の特徴に応じて解像度を変化させることができるという利点があるが、それでも、対象とする地形に応じてどの程度のサンプリング間隔でデータを取得する必要があるのかという問題に関しては、同じ問題を抱えている。

50m-DEM が整備されはじめた当時、50m という解像度の持つ意味は、日本の山地斜面の勾配を評価することができる解像度であるとされた(野上, 1995)。しかし、計算した結果を崩壊のような地形と関係の深い諸現象と重ねて表現するときや、斜面中における勾配の変化を詳しく計測しようとするとき、50m という解像度では不十分であることも従来から指摘されていた(e.g., Iwahashi et al., 2001; 高橋ほか, 2003)。これは、50m-DEM から日本の山地域の陰影図を作成して観察した結果からも明らかである。しかし DEM の解像度は、単に、より高解像であればよいというわけでもない。平坦面の上に落ちている小さな石の勾配や、樹冠面に起因する細かい凹凸を検知できたとしても、それらによる急勾配は地形計測において意味があるとは言えないからである。すなわち、大地形を扱うのか、斜面形を扱うのか、それとも地すべりに伴う小崖のような小規模な地形を扱うのかというように、検討対象とする地形が特徴的に持っている波長(スケール)に対して、適切な DEM の解像度を設定する必要がある。

これらの点を考慮し、山地斜面の土砂移動や地形の形成過程を論じるためには、主に以下の二つの条件を満たす解像度の DEM が必要であると考えられる。第一の条件は、DEM から近似的に求められる勾配とラブラシアンを、崩壊や地すべりといった現象との関連性を検討するのに適した解像度で求めることができることである。この二つの値は、地形が地形を変化させる力を定量的に見積もるための必須のパラメータであり、地形変化モデルの検討の際にも必要とされる。これら二つのパラメータは高度データ群を微分すること

によって求められるが、このような微分値の精度は、当然のことながら元々のデータである DEM の空間解像度と精度に依拠している。例えば勾配の分布は、DEM の高解像度化に伴い平均値が高くなり、標準偏差も大きくなることが指摘されている(Gao, 1997)。しかしこの検討は、等高線ベクターデータの補間処理から作成した任意の解像度の DEM を用いたもので、直接測量による高解像度データを用いた検討ではない。このような検討は、まず直接測量によって詳細な DEM を作成し、そこから解像度を落としながら行なう必要があろう。

第二の条件は、山地域の流路網および小流域を正確に定義できることである。流路は地形単位を確定する上での重要な位置情報であり、流域は地形の動態を探る上での基本単位である。現在では、DEM から自動的に流路網や流域を定義する方法はある程度確立された技術である(e.g., 野上, 1998; 中山, 1999; 白沢ほか, 2000)。しかしながら、これらの方法を 50m-DEM に適用して流路網を計算すると、山地の小流域では流路がしばしば尾根線を越えてしまうといった問題が生じることが知られている。しかもこれは、アルゴリズム的な問題ではなく、データの解像度に依存する問題である。

本研究では、地形計測において、これら DEM の解像度の違いによって生じるいくつかの問題解決への一つのアプローチとして、山地地形の地形計測学的立場から地形計測に適した DEM の解像度に関する検討を行う。前述したように、このような検討には直接測量の精度の高い高解像度 DEM を必要とする。本研究では、そのためのデータとしてデジタル写真測量によって作成した山梨県早川町の雨畑ダム流域の 5 m-DEM (Tanaka, 2001)を用いる。この DEM は、縮尺約 1.5 万分の 1 のカラー空中写真(国土地理院 1976 年撮影)から、商用デジタル写真測量システムの一つである VirtuoZo (Supresoft 社)を用いて作成したものである。写真測量によって作成した DEM の精度評価は簡単ではないが、入力パラメータの精度に対する DEM の精度の感度や、イメージマッチングの精度を実験的にシミュレーションした結果(田中ほか, 2001)から、絶対的精度で約 0.9m (1 σ) 程度と考えられる。Mikhail et al. (2001) も指摘するように、写真測量の絶対的な精度はそれほど良くないが、相対的な精度はこれよりも良いと判断される。実際、得られた DEM を観察する

と、この地域の地形的な特徴である、尾根線付近に分布する比高数メートルの逆向きの小崖なども表現できている。ただしこのようにして作成したデータは、その作成方法から樹木のあるところでは樹冠面の計測を行っていて、厳密な意味での地表面の標高を計測したものではない(e.g., 杉盛ほか, 2003; 大森ほか, 2004)。そのため、この DEM では樹冠面の凹凸も表現されている。しかし本研究では、取得した 5 m-DEM を用いて 1 m 解像度の精度の良いオルソ画像も取得している。したがって、地表面被覆と DEM による地形計測結果の空間的な対応関係も検討することができ、樹冠面の凹凸と地形の区別は可能である。そこで、統計、オルソ画像との比較、そして地形と関連性の深い現象の規模の三つの視点から、前述した二つの条件を満たすために要求される DEM の解像度について検討してみる。

2. DEM の解像度の変化に伴う地形表現の変化

2.1 斜面勾配

DEM から斜面の勾配を求めて解析を行った研究例は多い。ところが、勾配の計算方法がそれぞれ異なるため、たとえ DEM の解像度が同じであってもその結果を単純に比較することはできない。ここでは、実際に地形学的検討が行われた研究例(野上, 1999; Katsube & Oguchi, 1999; Iwahashi et al., 2001)を参考に、注目点の周囲 8 点の標高値を用いて以下の定義・方法に基づいて斜面勾配を求めた。

行列上の任意の点 (n 行 m 列) の標高を $h(n, m)$ とするとき、その地点の勾配 $s(n, m)$ は、

$$s(n, m) = \tan^{-1} \sqrt{\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\left(\sum_{n=1}^{n+1} \{h(n, m+1) - h(n, m-1)\}\right) / 3}{2d_x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial y} = \frac{\left(\sum_{m=1}^{m+1} \{h(n+1, m) - h(n-1, m)\}\right) / 3}{2d_y} \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 d_x は東西方向の格子点間距離、 d_y は南北方向の格子点間距離である。

図2 DEM の解像度が斜面勾配計測値におよぼす影響。各解像度における計測値のヒストグラムを相対頻度で表示。

はじめに、5、10、25、50m の各解像度における勾配分布のヒストグラムの変化を示す(図2)。この地域の勾配の分布は、ここで示したいいずれの解像度においても正規分布に近い形を示す。これらの平均や標準偏差は、前述の Gao (1997) と同様に高解像度になるにつれて平均値・分散ともに大きくなっている。これは、5 m-DEM で45°から65°で表現されるべき規模の小さな斜面が、解像度が粗くなるにつれて38度前後のクラスにまとめられてしまうことを示している。

解像度により勾配の計測値の分布がどのようにに変化するかをさらに詳細に検討するために、図3に平均傾斜(a)、標準偏差(b)、歪度(c)、尖度(d)、およびそれぞれのレンジ(最大値-最小値)の変化を示した。この計算においては、もとの 5 m-DEM からは、サンプリング位置をずらすことにより 10 m-DEM で 2²個、15 m-DEM では 3²個というように同一解像度の DEM が複数得られる。そこでこの図においては、これらの平均値を△印で示し、そのレンジをエラーバーで示した。

平均勾配は解像度が高くなるにつれて確実に急になる。その変化は、なめらかな曲線で近似できるほど一定である。標準偏差、歪度および尖度については、二つの明瞭な値となる解像度の存在を見出すことができる。一つは75m 付近である。この解像度よりも粗い時、エラーバーの大きさが急激に大きくなる。すなわち、同じ範囲、同じ解像度の DEM であっても、ど

図3 DEMによる斜面勾配計測値への解像度の影響。各解像度における勾配計測値の記述統計値の変化：(a)平均値，(b)標準偏差，(c)歪度，(d)尖度。エラーバーは、サンプリングの基準点を变化させたときの最大値と最小値を示す。

の地点を基準としてサンプリングするかによって値が大きく変わってしまうことを示している。もう一つは25m付近で、この解像度付近に計測値の変曲点が存在する。

この結果は、25mを単位として実斜面を検討する場合と、75mを単位として実斜面を検討する場合とでは、性質の異なる地形が検討されることを示唆している。前者は一つの尾根－谷底を結ぶ斜面をいくつかに区切る単位であり、侵食前線等による斜面の区分を示唆する。後者は、尾根－谷群で構成されるこの地域の起伏に卓越する波長よりも大きい波長の地形を表す解像度になると推察される。このことから、この流域の山地斜面の検討を有効におこなうためには、一つの斜面をいくつかに区切ることができる格子間隔25mよりも高解像度のDEMを用いることが好ましいことが分かる。また、25mよりも高解像度のDEMから求めた勾配の値は線形に変化していること(図3(a))から、解像度5m程度のDEMを用いた時に求められる地

形量やその分布は、25m-DEMで求められる値に、定数を掛けることによってある程度予測できると推察される。

次に、オルソ画像上との比較から解像度の影響を検討してみる(図4)。様々な地形条件での検討を行うために、山地上流域から生産される土砂によって埋積された河床、段丘および斜面を含む、南北1,300m、東西1,900mのエリアをとりあげ、解像度の異なる画像間で比較してみた。25mよりも低解像度のDEMで求めた勾配(b)、(c)では、段丘崖や河床間際の急崖を表現することができない。10m-DEM(d)では、空中写真判読から観察される急崖の分布と視覚的に近くなる。5m-DEM(e)になると、尾根線上の平坦部の形なども精度良く再現出来ている。しかし一方で、斜面途中の勾配の変化には不自然さを感じるところも出てくる。

2.2 ラブラシアン

次に、ラブラシアン(勾配の変化率、斜面の曲率)

を定義する。これについても、勾配と同様にいくつかの方法(岩橋, 1994; 野上, 1999; Katsube & Oguchi, 1999) が提示されている。このうち、画像処理で用いられるエッジ抽出の方法が、アルゴリズムが簡便なうえに、地形の解析にも有用であることが指摘されている(e.g., 岩橋, 1994) が、この方法は格子点間距離で値を規格化しない方法であるために、解像度の異なるデータを比較することができない。そこで、本研究では特に野上(1999)を参考に、注目点の周囲4点の標高値を用いて以下の定義・方法によってラプラシアンを求めた。

行列上の任意の点(n 行 m 列)の標高を $h(n, m)$ とすると、その地点のラプラシアン $l(n, m)$ は、

$$l(n, m) = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{h(n, m-1) + h(n, m+1) - 2h(n, m)}{d_x^2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{h(n-1, m) + h(n+1, m) - 2h(n, m)}{d_y^2} \quad (6)$$

で与えられる。ここでの定義(式(5), (6))より、負で凸型斜面、正で凹型斜面を示し、絶対値が大きいほど屈曲の度合いが大きい。解像度によるラプラシアンの

ヒストグラムの変化を図5に示す。ラプラシアンは0を中心にほぼ対象形の分布を示し、その違いは尖度によって表される。図5において、解像度が高くなるにつれて頻度分布は急激に裾広がりに変化し、ラプラシアンの計測値は勾配以上に解像度の影響を受けることがわかる。

次に、勾配と同様にオルソ画像との比較から解像度の影響を検討してみる(図6)。ここでは、各解像度における計測値の分布の 1σ より絶対値が大きな値に色をつけて表現した。まず、50m(b)や25m(c)といった低解像度での計測の場合、その多くは、凸部は山地小流域を区切る尾根線に、凹部は谷線に分布する。それに対し、10mよりも高解像度のDEMによる結果(d), (e)では、段丘崖を表現するの凹凸の組み合わせや、急斜面を削る谷の凸部、斜面中の傾斜の変換点を表現することが可能であることが分かる。しかし、5m解像度(e)での計測値の分布をさらに詳細に検討すると、場所により樹冠面の凹凸と地形の凹凸とが混在している。陰影図とオルソ写真から、人間がこの違いを区別するのはそれほど難しくはない。しかし、DEMを用いた地形計測から、これらの違いを自動的に区別することは今のところ難しい。

2.3 流域内の崩壊地規模と対応

勾配やラプラシアンのような局所領域の物理量の地形形成上の意味や、現実の地形変化を検討する上で重要な地形は、日本の山地域では崖崩れや地すべりといった崩壊地形である。そこで、この地域の崩壊地形の規模にもとづいて、地形解析に必要なとされる解像度について検討する。

図7には、雨畑ダム流域内で観察される崩壊の規模と累積頻度の分布図を示した。崩壊地の読み取りは空中写真判読によって行い、1m解像度のオルソ写真上に崩壊域をプロットすることにより、550箇所の崩壊地を抽出した。図7において、崩壊地面積が $10^2 - 10^3 \text{m}^2$ の間で傾きが緩くなるのは、データ作成時の取りこぼしであると考えられるため、このデータの信頼域は、累積頻度曲線の屈曲点よりも右側のおおよそ 700m^2 (約25m四方)よりも規模の大きな崩壊であると判断される。

図7の崩壊地面積が約 700m^2 以上の部分では直線回帰が可能で、規模と累積頻度の関係は従来から指摘されているようにべき乗側に従う(e.g., 平野・大森,

図5 DEMの解像度がラプラシアン計測値におよぼす影響。各解像度における計測値のヒストグラムを相対頻度で表示。

図7 流域内で観察される崩壊地の規模と累積頻度の関係。

1989; Sugai et al., 1994; 田中・隈元, 2000)。その傾きは、赤石山地全体の地すべりの規模と頻度の関係を検討した結果 (e.g., Sugai et al., 1994) と比べて急である。すなわち、この流域では地形変化に対する小規模な崩壊の寄与が、赤石山地全体と比較して相対的に高いことが特徴である。また、流域内で観察される崩壊のうち、最大クラスに属するものでも 10^5m^2 以下程度であることから、この崩壊分布データから崩壊地形を詳しく検討する場合、 $10^3\text{--}10^4 \text{m}^2$ 程度の大きさの崩壊地形を丁寧に計測する必要があると考えられる。

$10^3\text{--}10^4 \text{m}^2$ の面積は、5 m-DEM では40~400ピクセルに、10m-DEM では10~100ピクセルに相当する。崩壊地内の統計分析には10個以上のピクセル数が望ましい。したがって、崩壊地の主要な地形要素である崩壊裸地や、崩壊前の斜面の平均的な勾配の推定には10m-DEM 程度の解像度で良いと判断される。もちろん、滑落崖のような崩壊地そのものの細かい地形要素の区分には、それよりも高解像度のDEMが必要になることが分かる。また、表層崩壊のような小規模な現象の地形変化を検討するためには5 m-DEMでも十分とは言えないし、その場合には、樹木高度等の適切な補正方法も要求されることになろう。

3. 流路網の構築

DEMによる流路網の構築は、現在ではある程度確立された技術であり、各種商用GISソフトウェアにも地形解析機能の一部として実装されている。そのアルゴリズムは、大まかにはDEMから計算される最大傾斜方向を順次つないでいくというものであり、これであまりくれない平坦地や凹地については、その地点の標高をかき上げしたり、乱数により流下方向を決定することにより処理されることが多い。いずれにせよ、アルゴリズムの細部の違いに関わらず、日本の山地域では国土地理院の50m-DEMで、ある程度実用性のある流路網を構築できることは既に知られている。

ところで、最近、水循環と地形変化の相互作用を明らかにすることを目的とした水文地形学分野 (恩田ほか, 1996) の研究が活発に行われている。これらの研究では、ある特定の山地の小流域を研究対象とし、現場でのきめ細かな各種観測が行われている。こうした水文地形学が対象とする小流域は主に、 10^5m^2 以下であり、これは50m-DEMでは4~40ピクセルの大きさに相当する。DEMを用いて流域を定義する際には、ある程度以上のピクセル数が必要であることは言うまでもない。実際、洪水法 (野上, 1998) を用いて50m-DEMで流路を求めると、図8に示すように、流路の上流端 (図8では、流域面積40ピクセル以上の流水線を示している) の一部において、2.5万分の1地形図で表現される尾根を越してしまうといった不都合な点がいくつか生じている。流路は、いったん狂いが生じると、次々と狂いを発生させる性格をもつので、上流から適切に流域を抽出する必要がある。このような流域抽出のしきい値については、例えば吉山 (1990) による検討があり、2の累乗にするのが妥当としているが、妥当なピクセル数についてはよく分かっていない。

ここで、10m-DEMを用いて構築した流路網を図9に示す。流路網に付けられた色は、それぞれのピクセル上における、そのピクセルよりも上流の流域面積を示す。この精度を、地形図とオルソ写真を組み合わせて検討した結果、水色で示される 0.1km^2 (10m-DEMで1,000ピクセルに相当) 以上流域面積を持つ流路は、概ね正確に抽出されていると判断できた。すなわち、流路網の抽出においては、信頼できる精度が期待できるのは概ね1,000ピクセル以上の流域面積を持つ流路

図1 国土地理院発行の5m-DEMから作成した地形陰影図（東京南東部周辺）

図4 DEMの解像度が斜面勾配計測値におよぼす影響の空間的検討。(a)テスト地域の1m解像度オルソ写真, (b)50m, (c)25m, (d)10m, (e)5m

図6 DEMの解像度がラプラシアン計測値におよぼす影響の空間的検討。(a)テスト地域の1m解像度オルソ写真。図(b)から(e)は、各解像度での計測値のヒストグラムにおいて、分布の 1σ 範囲外の部分（黄：凹型斜面、赤：凸型斜面）の空間分布を示す。(b)50-m ($\sigma=0.019$), (c)25-m ($\sigma=0.046$), (d)10-m ($\sigma=0.119$), (e)5-m ($\sigma=0.165$)

図8 DEMによる自動流路構築状況の一部分。黄色の大きめの四角の連なりが、国土地理院50m-DEM, 小さな四角の連なりが10m-DEMでの構築結果。10m-DEMでの流水線の色は流域面積を示し、凡例は図9に対応。基図は2.5万分の1地形図。

図9 10m-DEMを用いた、雨畑ダム流域全体の流路網の構築結果。陰影図は、流路網の構築に用いたのと同じ10m-DEMから作成。流路網の線の色は、各ポイントにおける流域面積を示す。

であり、これは10m-DEMで 10^5m^2 の流域ということになる。したがって、10mの解像度があれば、水文地形学的な研究成果をDEMによる地形計測と重ね合わせていくことができる。10m-DEMで作成した流路網は、図8上にも示してある。前述の50m-DEMでは適切に構築できなかった流路も、10m-DEMでは正確に抽出できていることが分かる。また、1,000ピクセルというピクセル数は、流域の地形量を評価する際に、サンプル数の観点からも十分である。

4. ま と め

山地地形、特に斜面の土砂移動や地形形成過程を論じるのに適したDEMの解像度について、地形学的観点から検討した。必要とする解像度は、厳密にはそれぞれの研究ごとに異なることは明らかであり、安易な一般化は危険である。しかし、現実の地形や地形変化営力として働く現象のスケールと、解像度のバランスを考慮することで、目安をつけることが出来る。

まず、解像度の変化にともない、勾配・ラプラシアン計測値のヒストグラムがどのように変化するかを検討した。その結果、山地斜面の地形を正確に把握するためには、25mよりも高解像度のDEMが必要であることが分かった。日本の場合、解像度が25m程度よりも詳細であれば、一つの単位斜面をいくつかに区切って検討することができる。一方で、75mよりも粗くなると、平均的な尾根-谷の組み合わせの周期を超えてしまうことになり、個別地点における微分的な評価は意味をなさない。

次に、流域内に卓越する崩壊地規模の分布から、崩壊地の地形計測に必要とする解像度について検討した。この結果、崩壊地を含む周辺の平均的な地形を観察する場合でも、最低5~10mのDEMを必要とし、崩壊地内部の地形分類など、崩壊発生機構の基礎データとして地形を観察するためには、より詳細なDEMを必要とすることが分かった。

最後に、流路網の構築の精度という視点から、必要とする解像度を検討した。水文地形学的には、上流の小流域を正確に定義できる解像度のDEMが必要となる。対象としている流域の面積と、流域抽出に必要なピクセル数の関係から、10m程度の解像度のDEMがあれば、流路網はこれらの研究での実用的なレベルで抽出できることが分かった。

以上をまとめると、山地地形の計測には最低25m、理想的には5~10m程度の解像度のDEMが必要である。しかし、この程度の解像度では、崩壊地内部の細かい地形区分までは行うことが出来ない。また本研究で対象とした地域は、日本で最も地形が急峻な地域の一つであるが、日本の丘陵地のような地域の地形を詳細に観察しようとする場合には、急峻な山地域よりも若干高解像度のDEMが必要になると予想される。したがって、これらのような場合にはより詳細なDEMの取得方法から検討する必要がある。一方では、高解像度になるにつれて、樹冠のノイズなど地形を計測するには不都合な要素も増える。したがって、これらに対する補正法の開発を進めながら、5~10mの実測による精度の高いDEMの整備が期待される。

謝 辞

本研究には、文部科学省科学研究費補助金若手研究(B) No. 15700547「山地斜面の地形形成プロセス解明のための高解像度DEMの作成とその実用性の検討」(代表者：田中 靖) および同補助金基盤研究(c)(1) No. 16500647「物理モデルと統計モデルを融合したハイブリッド地形変化シミュレータの開発」(代表者：岡山大学・隈元 崇助教授)の一部を使用した。

(受付日2004.9.18, 受理日2005.1.14)

参考文献

- 岩橋純子, 1994. 数値地形モデルを用いた地形分類手法の開発, 京都大学防災研究所年報, 37(B-1), pp. 141-156.
- 大森博雄, 1985. 数値地形データと画像処理, 地形, 6, pp.225-244.
- 大森博雄・杉盛啓明・恩田裕一, 2004. 樹高分布を考慮した航空機レーザスキャナデータからの地表面高度の推定法, 画像ラボ, 15(6), pp.1-8.
- 恩田裕一・奥西一夫・飯田智之・辻村真貴編, 1996. 水文地形学, 古今書院, 東京, 267pp.
- 白沢道生・ブリマ オキ ディッキ・横山隆三, 2000. 50m メッシュDEMによる広域の水系抽出手法, 写真測量とリモートセンシング, 41(5), pp.35-44.
- 杉盛啓明・恩田裕一・村手直明・徳村公昭・大森博雄, 2003. 樹高の空間分布を考慮した航空機レーザスキャナデータからの地表面推定法, 写真測量とリ

- モートセンシング, 42(1), pp. 4-11.
- 高橋昭子・小口 高・杉盛啓明, 2003. ラスター型 DEM の解像度と地形表現力ー多摩地域を事例としてー, 地理学評論, 76, pp.800-818.
- 田中 靖・隈元 崇, 2000. GIS と画像処理による斜面崩壊地抽出法の開発と発生様式の定量的検討ー丹沢と房総の比較を例としてー, GISー理論と応用, 8 (1), pp. 1-10.
- 田中 靖・隈元 崇・中山大地, 2001. コンピュータ上の仮想地形を用いたデジタル写真測量の精度検討, 地理情報システム学会講演論文集, 10, pp.103-106.
- 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ー理論と応用, 7 (1), pp. 27-35.
- 野上道男, 1995. 細密 DEM の紹介と流域地形計測, 地理学評論, 68A, pp.465-474.
- 野上道男, 1998. DEM (数値標高モデル) から DDM (流水線図) を作成するアルゴリズムの改良と C 言語プログラム, GISー理論と応用, 6 (1), pp.95-102.
- 野上道男, 1999. 50m-DEM による地形計測値と地質の関係, 地理学評論, 72A, pp.23-29.
- 平野昌繁・大森博雄, 1989. 土砂移動現象における規模・頻度分布特性とその地形学的意義, 地形, 10, pp.95-111.
- 吉山 昭, 1990. DEM を用いた流域の地形量の計測, 地学雑誌, 99, pp.674-681.
- Gao, J., 1997. Resolution and accuracy of terrain representation by grid DEMs at a micro-scale, International Journal of Geographical Information Science, 11, pp.199-212.
- Iwahashi, J., Watanabe, S., Furuya, T., 2001. Landform analysis of slope movements using DEM in Higashikubiki area, Japan, Computers & Geosciences, 27, pp.851-865.
- Katsube, K., Oguchi, T., 1999. Altitudinal changes in slope angle and profile curvature in the Japan Alps: A hypothesis regarding a characteristic slope angle. Geographical Review of Japan, 72B, pp.63-72.
- Mikhail, E.M., Bethel, J.S., McGlone, J.C., 2001. Introduction to Modern Photogrammetry, John Wiley and Sons, New York, 479pp.
- Sugai, T., Ohmori, H., Hirano, M., 1994. Rock control on Magnitude-Frequency distribution of landslide. Transactions, Japanese Geomorphological Union, 15, pp.233-251.
- Tanaka, Y., 2001. 5-m DEM generation by Digital Photogrammetry and its application to terrain analysis in mountain region. Special Publication of the Geographic Information Systems Association, 1, pp.88-89.