【論文】

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 —丹沢と房総の比較を例として—

田中 靖・隈元 崇

Landslide Detection from SPOT Images with GIS for Quantitative Analysis of its Occurrence Behavior

Yasushi TANAKA, Takashi KUMAMOTO

Abstract: The aim of this study is to make a quantitative analysis with respect to landslide occurrence behavior by using GIS. First, simplified ortho correction technique for SPOT images without orbit data is newly developed in this study. Next, brightness correction is carried out to the SPOT images. Finally, tests for algorithms of the automatic detection of landslides were iterated till the best-fit is derived. Comparing with the result from aerial-photo interpretations in the training area, the hit ratio in number of landslides are about 73% in Tanzawa region and 52% in Boso region, respectively. However, error detection mostly occurs at small landslides, and the landslides with over 2000m² are detected correctly.

The relation between the cumulative number of landslides and the landslide area follows power function, therefore the behavior of landslide occurrence might relate to the model of self-organized critical phenomenon. On the basis of this assumption, it may be inferred that landslide occurrence is complicated interaction of elements. Thus, the prediction of individual landslide occurrences and its magnitude might be impossible by seeking a few parameters. When those relations are examined in detail, we can see the bending point that can divide all data into two segments. Then, the value of threshold is statistically obtained by calculating Akaike Information Criterion (AIC) : 7500m² in Tanzawa and 5100m² in Boso. Because the bends are observed in both regions, it can be inferred that there is a different mechanism for landslide occurrence between large landslides and small landslides.

Keywords: 斜面崩壊 (Landslides), 簡易正射補正 (Simplified Ortho Correction),
数値標高モデル (DEM), 規模頻度分布 (Magnitude-Frequency Distribution)

1. はじめに

斜面崩壊の発生については、発生箇所の地形、標高や勾配、または地質や植生というような土地条件の記載や、あるいは規模と頻度の関係など様々な研

究が行われてきた。その成果として、斜面崩壊の性質や分布に地域的偏りがある（例えば、古谷,1996）ことが定性的に明らかとなってきたが、異なる地域の定量的な比較を行った研究例は少ない。その原因の一つとして、土地条件を記載する統一的なデータの不足があげられる。野外での勾配計測を例にとると、計測者や計測方法によって値は変化しやすく、統一的な勾配分布図を作成することは小地域を対象とした場合でも困難である。加えて、崩壊地の地形計測を統計的に処理するためには、その周辺の崩壊

田中：〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1
東京大学大学院理学系研究科地理学専攻博士課程
Graduate School of Science, Department of Geography,
University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo
Tel. 03-5841-4073
E-mail : yasushi@geogr.s.u-tokyo.ac.jp

が起こっていない箇所との比較が必要となるため、対象地域はおのずと広範囲となり実測はより困難となる。

この問題を解決するためには、DEM（数値標高モデル）および GIS（地理情報システム）を利用することが有効である。国土地理院によって全国整備の完了した 50m メッシュ標高データ（以後、50m-DEM）の持つ最大の意義は、崩壊を議論するための地形勾配を計測するのに十分な空間解像度を持ったデータであるということである（野上, 1995）。地形の勾配はその土地の条件（崩壊だけではなく、土壌、土壌水分量、植生、人間による土地利用等）に直接影響を与える重要な地形計測量であり、50m-DEM の完備によってこれらの関係を広範囲にわたってコンピュータ上で解析できるようになった。

一方、広域を対象とした崩壊や地すべり（ランドスライド）に関する研究では、現在でも空中写真判読によって崩壊地を認定し、その場所を地形図上に移写する方法が主流である。しかし、50m-DEM の 1 グリッドは 2.5 万分の 1 地形図上で約 2mm 四方の解像度があるため、この解像度に耐えうる精度で崩壊地分布図を作成することは困難であるうえに、その作業量は膨大なものとなる。この問題の解決のための一方法として、人工衛星からのリモートセンシング画像や数値標高データ（DEM/DTM）を用いて地すべり地、あるいは地すべり危険地を抽出する試みが行われてきた。例えば、瀬戸島ほか（1991）は、新潟県の第三紀地すべりを対象に、空間解像度約 20m の SPOT マルチスペクトルデータと DEM を用いて、地すべり地の抽出に関する研究を行った。この研究では、既往の地すべり分布図を用いてその場所の分光反射率や地形計測を行い、崩壊の素因として考えられるいくつかのファクターが同じような傾向を示す場所を地すべり地として認定するという方法によって、約 70% という的中率を得た。しかし、解像度上の制約もあり、SPOT 画像から抽出に用いた情報は植生指標のみであり、また、もとの地すべり地分布を既往の分布図に頼っているため SPOT 画像から抽出したものとは言い難い。高木・村井（1994）では、四国の破碎帯地すべりを対象に

DTM 及び Landsat TM 画像と建設省によって指定された地すべり防止区域の分布状況を考察した。さらに、解析範囲の全画素に対して簡便法を用いて地すべり危険度の判定を試みた。地すべり地の分布にいくつかの定性的な特徴を指摘したものの、検証データとして用いた地すべり防止区域とは、準用河川、鉄道などがあり、人家 10 戸以上、農地 10ha 以上に被害を及ぼすおそれがあるという基準にしたがって指定された地域（建設省河川局砂防部, 1994）であるため、これを検証データとするのは不適当である。これらの研究をふまえ、今後の地すべり/崩壊研究の基礎資料蓄積のためには、画像処理による崩壊地抽出手法の確立が待たれる。

本研究では、これらの研究よりも高解像である空間解像度約 10m の SPOT パンクロ画像と空中写真を用いて解析を行った。このような高解像度のデータを活用するためには GIS 上での正確な位置情報の補正（重ね合わせ）が不可欠となる。従来、衛星データはアフィン変換や多項式近似によるリサンプリング処理によって任意の地理座標に合った形に変換されて解析が行われる。これらは、既に確立された技術として GIS パッケージに取り込まれている。しかしながら、空中写真や今回用いた斜め撮影の SPOT 画像のような比較的大縮尺の画像データは、地形の起伏によって生じる大きな歪みを持っており、前述したような補正法では解析に十分な精度での重ね合わせは不可能で、また、そのような機能が備わっている GIS パッケージであったとしても、正確なカメラデータや軌道情報を必要とする。これら全ての条件をクリアするためには、通常大きなコストがかかるだけでなく、使用できるデータもかなり狭い範囲に限定されることになる。そこでまず、安価で市販されている代わりに衛星の軌道情報が付属しない SPOT 画像データに簡易的な正射補正を行い、数値標高データと正確に重ね合わせる方法と結果を紹介する。次に斜面方向に関する消影処理とその妥当性を検討した後、ここまでの補正で得られた画像から斜面崩壊地の自動抽出の方法を探る。最後に、自動抽出によって得られた崩壊地の分布データを用いて、発生様式の特徴を定量的に検討する。

2. 研究対象地域の地形と崩壊

国土地理院発行の2.5万分の1地形図図幅で丹沢山地の「大室山」「青野原」「中川」「大山」と房総半島の「鹿野山」「久留里」「鬼泪山」「坂畑」を研究対象地域とした(図1)。これら二つの地域は関東地方の代表的な崩壊多発地帯であるが、その分布や性質が地質や地形の影響を受けている事が従来から指摘されている(例えば吉中・風間, 1973)。

丹沢山地は関東地方で最も代表的な崩壊頻出地として知られている。この地域の地質は、丹沢層群と総称される新第三紀前期から中期にかけての地層を、石英閃緑岩を主とする丹沢トナール岩複合岩帯が貫くように分布する。起伏量に富む地形に加え、強い造山運動を受けて風化に弱い地質である事が崩壊が起こりやすい原因であると考えられている(神奈川県, 1986, 1987)。

一方房総半島は、急峻な山もなく、崩壊現象と最も関係の深い急傾斜地の分布も限られている。しかし、現実には昭和45年、翌46年、平成元年に見られる大規模な崩壊を例として、斜面崩壊の頻度の高い地域である(千葉県, 1976a, 1976b)。鹿野山地域から九十九谷地域の地形は、鹿野山を形成する岩宿層とその南側で接する栗倉層・岩坂層の周辺を境としてその様子が大きく異なっている。これは、前者は降雨が地下へ浸透しやすいため相対的に山が高く残っているのに対して、後者は泥質の地層からなり表流水に富むため谷が発達し、丘陵状を呈するためである。古谷・大倉(1992)は、前述の3回の災害

図1 調査地域および周辺の地形概要

(国土地理院 250m メッシュ標高
データ KS110-1 により作成)

時における崩壊地の分布と地質の検討から、この地域の崩壊現象が地質を反映した組織地形形成と切り離せない関係であることを指摘している。

3. 使用データ・ソフトウェアの概要

解析に用いたデータは、「数値地図 25000 : 地図画像」、「50m 標高メッシュデータ」(共に日本地図センター)、「メッシュ版 SPOT 衛星画像『日本データセット』」, パンクロマチック, 空間解像度約 10m, 房総; 1993 年 2 月 4 日撮影, 丹沢; 1993 年 11 月 1 日撮影」(CRC 総合研究所)、「Landsat TM 画像, 空間解像度約 30m, 房総; 1993 年 10 月 28 日撮影, 丹沢; 1995 年 11 月 19 日」(リモート・センシング技術センター) および空中写真(房総; 1989 年国際航業撮影千葉県南部災害空中写真, カラー, 約 1 万分の 1, 丹沢; 1993 年国土地理院撮影, 白黒, 約 1 万分の 1) である。これらのデータを、画像処理ソフト Imagine 8.3 (ERDAS 社) と GIS ソフト ArcView 3.0a (ESRI 社) および自作プログラムを用いて解析した。

4. 解析方法

4.1. SPOT データの地形による歪みの補正 (簡易正射補正)

空中写真や衛星画像と各種地理情報を GIS 上で統合するためには、センサの性能やプラットフォームの姿勢、および地形の起伏によって生じる画像の歪みを補正する必要がある。このような補正を行うには通常専用の設備やソフトウェアを必要とする。これに対して平野(1998)は、空中写真画像の撮影方向が鉛直下向きであることを条件として成立する簡便な方法を提案した。しかし、本研究で用いた SPOT 画像は斜め撮影であるうえに、撮影時の衛星位置や撮影角度に関する情報も明らかにされておらず、この方法をそのまま適用することは不可能である。そこで、画像の歪みを 50m-DEM による地形計測と併用できる精度で補正するための C プログラムを開発して用いた。

まず、衛星の位置 $P(P_x, P_y, P_z)$, DEM 上の一点 $D(D_x, D_y, D_z)$, D が実際の画像上で投影されている点 $S(S_x, S_y)$, D を P からオルソ補正の基準面に

$P : (P_x, P_y, P_z)$: 衛星（視点）の位置
 $D : (D_x, D_y, D_z)$: DEM上の一点
 $S : (S_x, S_y)$: DEM上の一点が投影されている位置
 $S' : (S'_x, S'_y)$: DEM上の一点が投影される理論上の位置
 e : 基準面標高 ε : 誤差

図2 正射補正原理

投影した時の理論上の点 $S' (S'_x, S'_y)$, 基準面の標高 e を図2のようにおく。ここで基準面は画像の投影面と同一と仮定し、対象地域の最低標高点の高度とした。このとき、DEMの各点の基準面からの標高 z は

$$z = d_z - e$$

となる。

SPOT画像上で地図画像と対応がつく複数の点それぞれについて、 P から D を見通して投影された S' とSPOT画像上の対応点 S との誤差 ε は、三平方の定理より

$$\varepsilon^2 = \left(\frac{(S_x - D_x)P_z - (S_x - P_x)z}{P_z - z} \right)^2 + \left(\frac{(S_y - D_y)P_z - (S_y - P_y)z}{P_z - z} \right)^2$$

と表される。最小二乗法でこの誤差 ε^2 が最も小さくなるように P_x, P_y, P_z に関する偏微分方程式を解き、得られた P の座標を用いてDEM上の各点に対応する基準面上の位置 S' を計算する。この S' の輝度を対応するDEMの位置に移動することで簡易正射補正画像を得ることができる。実際の補正作業では、DEMは50m-DEMを変換後の画像の地上解像度に合わせて、SPOT画像では10m、空中写真では2mのDEMを共一次内挿法によって作成し、 S

図3 簡易正射補正の効果

丹沢山地・檜洞丸山周辺（DEMから発生させた等高線とSPOT画像を重ね合わせたもの。）

および S' の座標値はArcView上で計測した値を使用した。

図3(a)は50m-DEMからArcView3を用いて発生させた等高線に補正前のSPOT画像を重ねたもの、図3(b)は簡易正射補正を施した画像を重ねたものである。例として等高線から読み取れる尾根線を図中に直線で示した。(a)では等高線と尾根線が東西方向に約600m、南北方向に約200mずれているが、(b)では一致しており、この簡易補正は十分有効である。補正後の計算上の誤差は、SPOT画像、空中写真とも最大約3ピクセル以内であった。この精度は、50m-DEMによる地形計測値を解析に用いるには十分な精度であると判断した。

4.2. 消影処理（輝度補正）

衛星に搭載されているセンサーは、太陽光が地表面で反射した輝度を測定しているため、斜面方向や斜面勾配の影響を強く受ける。今回使用したSPOT画像は、午前10時頃撮影されたものであるため、相対的に南斜面が明るく（輝度が高く）北斜面が暗い（輝度が低い）。本研究では輝度をパラメータとして崩壊地の抽出を行うため、このような影響を取り除く輝度補正（消影処理）を行う必要がある。こ

ここでは前述した方法で既に画像の正射化と DEM との重ね合わせ処理が行われているので、これに Lamberitan Reflectance Model (Colby, 1991) を用いて輝度補正を行った。

BV_n = BV_ob / cos i

BV_n：地形効果の補正を行った輝度値
BV_ob：観測された輝度値
cos i：入射角
ここで、

cos i = cos (90° - θ_s) cos θ_n + sin (90° - θ_s) sin θ_n cos (φ_n - φ_s)

θ_s：太陽高度（天頂角：度）
φ_s：太陽方位角（北から時計回り：度）
θ_n：地表面傾斜角（斜面勾配：度）
φ_n：地表面方位角（北から時計回り：度）
である。もし、斜面傾斜が 0 の場合には

cos i = (90° - θ_s)

となる。
計算に必要な斜面の方位角および斜面勾配は、岩橋（1994）と野上（1995）を参考に周囲 8 点の DEM 値から平均的な仮想面（傾向面）を作成して計算した。太陽の天頂角，方位角については近藤（1994）に示された近似式を用いて求めた（表 1）。

表 1 SPOT 画像の撮影日時と推定される撮影時太陽位置

	撮影日	撮影時刻	太陽位置	
			天頂角	方位角
丹沢	1993年1月11日	午前10時30分±20分	56°	153.4°
房総	1993年2月 4日	午前10時30分±20分	58°	152.5°

4. 3. 輝度補正についての妥当性の検討

輝度補正の効果を検討するために、輝度補正の前後の画像について、横軸に斜面の方位角の余弦、縦軸に輝度を取った散布図を作成した（図 4）。ここで、横軸の斜面の方位角は、太陽の位置から正対する方向を基軸とし、そこから時計回りに計測した。

補正前の散布図（図 4 (a)）では、太陽の方位角

図 4 輝度補正の妥当性の検討
(図 5 の画像について、横軸に方位角，縦軸に SPOT 画像の輝度をプロット。 a：補正前 b：補正後)

に近い方向の斜面ほど輝度が大きいのが、補正後（図 4 (b)）ではこの傾向はほとんどない。それぞれの分布の回帰直線を求めると、補正前の -24.32 という傾きが、補正後は -1.4 となり、斜面方位による輝度の影響を十分小さくしている。図 5 に輝度補正前後の画像を示す。北東部の急峻な崖部など、一部完全には影を取りきれてはいないが、全体的には起伏の表現がおさえられた輝度補正の効果を確認できる。

図 5 輝度補正画像の比較
(丹沢山地・1/2500地形図「中川」に相当する地域、 (a)：補正前 (b)：補正後)

図6 崩壊地抽出手順

4.4. 崩壊地の抽出

ここまでの補正を行った SPOT 画像および Landsat TM データ、DEM を用いてコンピュータによる崩壊地の自動抽出を試みた。本研究では、山地域における、ある一定範囲の面積を有する裸地を崩壊地と考えることによってこれを行った。SPOT 画像中において、山地中の裸地は周辺よりも高い輝度で表現されている。したがって画像中の相対的に輝度の高い場所が崩壊地の候補として抽出されるが、当然それだけでは崩壊地以外の輝度の高い場所（例えばゴルフ場や砂取場）も抽出されることになる。そこで、面積、NDVI、斜面勾配の3つの指標を用いてこれらのような崩壊地以外の輝度の高い場所を取り除いた。その詳細を以下に示す。

まず初めに、丹沢、房総の両地域で教師エリアを設定し、空中写真判読を行って崩壊地分布データを作成した。空中写真判読による崩壊地の認定基準は、建設省国土地理院（1976）に従い、山腹斜面または崖の一部が急激に崩落した跡の地形を抽出した。ただし、本研究では前述の条件で SPOT 画像の画像処理によって抽出するという目的があるため、このうち崩壊地が裸地としてはっきりと認定できるものに限った。教師エリアは、丹沢山地の「中川」図幅内の畔ヶ丸山から権現山にかけての 12.25km^2 （SPOT 画像で $350 \times 350\text{Pixel}$ ）と、房総半島の「鬼沼山」図幅内の相川沿い、高塚から鹿原にかけての 12km^2 （同じく $300 \times 400\text{Pixel}$ ）の範囲内とした。この範囲内で丹沢山地では33ヶ所、房総半島では17ヶ所の崩壊地を抽出した（図7(a)、図8(a)）。

次に、これらの崩壊地を SPOT 画像上に重ね合わ

せ、その位置に対応する SPOT 画像の輝度の分布から崩壊地候補抽出のためのしきい値を決定した。この値を解析対象とする SPOT 画像全体に適用することで、崩壊地の候補である高輝度（画像上で白く見える）の Pixel を抽出した（図6(a)）。しかし、この段階では抽出されたものの中にゴルフ場、砂取り場、都市域および土木工事箇所等、崩壊地ではないものも含まれてしまっていた。

ゴルフ場や砂取り場に関して検討すると、その面積は対象地域で過去に報告されている現実の崩壊地

図7 丹沢での崩壊地抽出結果
(a)：空中写真判読による抽出
(b)：本研究での自動抽出

図8 房総での崩壊地抽出結果
(a)：空中写真判読による抽出
(b)：本研究での自動抽出

と比較して極端に面積の大きい箇所であった。そこで、崩壊地候補に対してラベリング処理を施した後、それぞれの連結成分の画素数カウントによる面積計測を行い、100ピクセル（10,000m²）以上のものは取り除いた。また、散在する3ピクセル（300m²）以下のものもSPOT画像からは読み取れない精度であると考えて取り除いた（図6（b））。

次に、都市域に見られる輝度の高い場所を除去するため、同地域のLandsat TMのデータから計算される正規化植生指数（NDVI）を用いて山地域と都市域の区別を行い、後者に含まれる高輝度の範囲を取り除いた（図6（c））。これは、対象地域の都市域には大規模な崩壊が起こっていないという歴史的事実と、人間生活の営まれている都市域は、山地域に比べてNDVIが大局的に小さいという観察による。具体的には、地形図上で山地域と都市域をあらかじめ区分し、その領域界とNDVIによって区分される山地域と都市域の領域界がなるべく一致するしきい値を求めた。

最後に、山地内の土木工事等に伴う自然崩壊地以外の裸地（例えば砂防ダムや道路脇の斜面の吹き付け工事を行った場所）を取り除くため、斜面勾配が15°以下の地区についてマスク処理を行った（図6（d））。これは、教師データ内の土木工事に伴う裸地がDEMから計測した勾配の値で15°までの範囲に集中すること、逆に15°よりも小さい斜面では崩壊の分布は少ないことによる。よって、本研究は斜面勾配15°以下の場所で発生した崩壊については議論しない。

図7（b）、図8（b）に教師エリア内で最終的に得られた崩壊地分布を示す。

4.5. 教師エリアにおける自動抽出の正確性の検討

写真判読によって抽出した教師エリア内の崩壊地分布を、SPOT画像を用いてコンピュータ上で抽出した崩壊地分布と比較し、その妥当性を検討した（表2）。

崩壊地の数に関して、丹沢では教師データとして得た33ヶ所の崩壊地はSPOT画像上でも全て抽出されているが、それ以外に崩壊地ではない場所も12ヶ所抽出された。房総では、教師データとして

得た17ヶ所の崩壊地のうち15ヶ所が抽出され、それ以外に12ヶ所が誤って抽出されていた。これら誤って崩壊地として抽出された場所を現地調査で確認すると、砂防ダムや壁面の砂防対策を施した道路部分、それに急勾配の谷線中の一部などであった。特に房総地域において、道路周辺の誤判読が多かった。これは、急斜面に平坦面を作って壁面の大規模な工事が行われている道路などは、画像上で崩壊地に似た形状を呈し、さらに50m-DEMの解像度では急斜面と判定されてしまうため、前節の斜面勾配をパラメータとする除去処理もきかないためである。しかし、パラメータの値を15°よりも大きくしてしまうと今度は実際の崩壊地まで数多く取り除かれてしまうため、このしきい値を変更することはできなかった。

次に面積に関して検討するため、表2の脚注に示した定義で平均面積比を求めた。この結果、若干のバラツキはあるものの、全体的にコンピュータによって抽出された崩壊地は写真判読によって認定した崩壊地よりも20～30%程度小さめに抽出されていることが明らかとなった。これは境界部の認定が手作業に比べコンピュータ抽出ではシビアになった結果である。

誤抽出された箇所の各々の面積をSPOT画像上で計測すると、そのほとんどが20ピクセル以内であった。特に、丹沢では5ピクセル以内に集中した。これは、今回の方法では2000m²以下の小規模な崩壊地の抽出にはまだ問題を残すが、それ以上の中～大規模の崩壊地はほぼ正確に抽出されていることを

表2 教師エリアにおける崩壊地抽出結果の検討

	N_e	N_a	N_c	P	E_a
丹沢	33	45(21)	33(21)	73.3(100)	71.2(94.9)
房総	17	29(11)	15(8)	51.7(72.7)	84.9(93.4)

注) カッコ内は2000m²以上を対象とした場合の値

N_e : 空中写真判読による崩壊地数

N_a : コンピュータによって抽出された崩壊地数

N_c : N_a のうち N_e と一致した数（正答数）

P : 個数に関する正答率 (%) $P = N_c / N_a$

E_a : 平均面積比 (%) $E_a = \frac{\sum (S_a - S_c) \times 100}{N_a}$

S_a : 空中写真判読によって抽出した崩壊地の面積

S_c : コンピュータによって抽出された S_a に対応する崩壊地の面積

示す。そこで、 2000m^2 以上の崩壊地として抽出されたものに限って同様の検討を行ってみると、崩壊地数の正答率 (P) は丹沢で 100%，房総で 73%，面積比 (Ea) は丹沢で 94.9%，房総で 93.4% となった。よって次節の統計処理では、崩壊地面積の下限を $2 \times 10^3\text{m}^2$ とする。

5. 発生様式に関する定量的検討

ー規模と頻度の関係についてー

丹沢および房総の SPOT 画像から自動抽出された崩壊地について、横軸にピクセルのサイズから求めた崩壊地の規模、縦軸に累積崩壊地数の対数をプロットした (図 9)。

両対数で表した図 9 から、本稿で対象とした両地域とも右下がりの傾向を示し、規模と頻度の関係はべき乗則に従っている。対象とする崩壊のスケールは異なっているものの、六甲山地において平野・大森 (1989) により、また赤石山地において Sugai *et al.* (1994) により同様の関係が成立することが示されている。最近、このようなべき乗則を持つ破壊現象 (地震や雪崩) に自己組織臨界現象モデルを適用させて説明しようとする試みが行われている (例えば 島崎・長浜, 1995; 伊東, 1995; Rundle and Klein, 1993)。このモデルによれば、破壊の発生には多くの要素が複雑に相互作用していて自己組織的であり、静的なパラメータ (例えば、崩壊の場合は勾配

やラプラシアン) を少数取り扱うだけでは個々の破壊の発生やその規模を予測することは難しいとされる。代わりに、破壊の発生を集団として統計的に扱い、その性質を探ることが行われる。

このような観点から、得られた崩壊の規模ー頻度分布を直線で回帰することを考える。しかし、図 9 を詳細に検討すると、丹沢では $8 \times 10^3\text{m}^2$ 、房総では $5 \times 10^3\text{m}^2$ を境としてその前後で傾きが異なっているように見える。そこで、丹沢、房総それぞれの地域の規模ー頻度分布の回帰に関して、一本の直線を当てはめた場合と二本の直線で回帰した場合の当てはまり具合を赤池情報量基準 (AIC) (Akaike, 1974) を用いて検討した (図 10)。AIC を用いることで、これらのようなパラメータの数を考慮したモデルの当てはまり具合を定量的に検討することができる。AIC の値が小さいほどモデルへの当てはまりが有意に良いといわれる。

丹沢地域でみると、一本の直線で回帰した場合の AIC は -17.6 である。一方二本の直線で回帰を行うと、 $7.5 \times 10^3\text{m}^2$ を境としたときに最小の AIC -194.3 を得た。同様に、房総地域では、一本の直線回帰では AIC が -46.1 に対し、二直線の回帰では $5.1 \times 10^3\text{m}^2$ を境にして最小 AIC -119.9 であった。この結果より、両地域とも一本の直線によって回帰するよりも二本の直線で回帰する方がモデルへの当てはまりの程度が統計的に見て有意に良いことが分か

図 9 崩壊面積と累積頻度の関係および一本の回帰直線のあてはめ

図 10 崩壊面積と累積頻度の関係および二本の回帰直線のあてはめ

る。崩壊発生に尺度不変性（フラクタル）が完全に成り立つ時にはこのような傾きの変化はないので、両地域に共通に見られる傾きの変化は、規模の大きな崩壊と小さな崩壊の間に異なるメカニズムあるいはそれらの相互作用が存在しているために生じていると考えられる。

また、図 10 において同じ規模を持つ崩壊の頻度を見ると、房総半島に比べて丹沢山地の方が大きく、また崩壊の最大規模も大きい事が分かる。ここで、地形条件の違いを比較するため、50m-DEM を用いて両解析対象地域の平均起伏量と谷密度を求めた（表 3）。平均起伏量とは注目点とその周囲 8 点での最高標高と最低標高の差の平均値、谷密度は、落水線図を作成し、このうち 4 ピクセル以上の集水域面積を有する落水線と認定されたピクセル数を、非落水線であるピクセル数で除した値である。この値から、丹沢山地の地形の方が起伏に富み、地形の「きめ」が粗いということが分かる。崩壊は大きな谷を超えて起こる現象ではないので、このような地形条件の違いが規模－頻度分布に影響を与えていると説明できる。

表 3 地形条件の比較

	平均起伏量(m)	谷密度(%)
丹沢	75.3	49.7
房総	33.3	56.4

6. まとめ

軌道情報が与えられない代わりに安価で提供されている SPOT 画像データに正射補正を施し、地図画像データ、50m-DEM と統合して、崩壊地の自動抽出を試みた。その結果、 $2 \times 10^3 \text{m}^2$ 以上の崩壊地については十分な抽出率を得た。さらに、得られた崩壊地分布データを用いて崩壊の規模と頻度の関係について考察した。この結果、対象とした丹沢山地と房総半島の両地域ともその傾向はべき乗則に従っており、地震や雪崩等と同様に自己組織臨界現象のモデルが適用出来ると考えられた。しかし、さらに詳細に検討すると、崩壊面積が丹沢では $8 \times 10^3 \text{m}^2$ あたりで、房総では $5 \times 10^3 \text{m}^2$ あたりで累積頻度曲線に屈曲点が見られた。これを AIC を用いて考察し

たところ、べき乗則を表す回帰直線について統計的に有意な変曲点であることが示された。この原因として、規模の大きな崩壊と小さな崩壊の間には異なるメカニズムが存在することが考えられる。また両地域を比較すると、丹沢では房総よりも最大崩壊面積が大きく、また単位面積あたりの崩壊発生率も高いことが示された。

崩壊地自動判別の技術は、正確で迅速な崩壊地分布データを作成するためには必須の技術であり、防災や環境評価等の研究分野で強く望まれている。本研究では、地震性の崩壊と豪雨性の崩壊など崩壊の発生要因を区別していないこと、また、データの制約から崩壊発生の時間に関する頻度を求められなかったなど不十分な点も残る。しかし、衛星データの空間的・時間的解像度の向上、およびアルゴリズムの改良によってこれらの問題は今後解決されると予想される。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、野上道男教授をはじめとする東京都立大学地理情報学研究室の方々および建設省土木研究所の杉本宏之氏には終始御指導頂いた。また、データ取得にあたり財団法人リモート・センシング技術センターの田中聡太郎先生、千葉大学の古谷尊彦教授に便宜を図って頂いた。本論は 1999 年に東京都立大学に提出した修士論文に加筆・修正したものであり、内容の一部については 1998 年日本 Arc/Info・Erdas ユーザー会（株式会社パスコ主催）および 1999 年日本地理学会春季学術大会において発表した。

参考文献

- 伊東敬祐（1995）自己組織臨界現象としての地震、「科学」65, 257-265.
- 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」, 37B-1, 141-156.
- 神奈川県（1986）『土地分類基本調査・上野原・五日市』, 神奈川県企画部企画総務室.
- 神奈川県（1987）『土地分類基本調査・秦野・山中湖』, 神奈川県企画部企画総務室.
- 建設省国土地理院（1976）.『航空写真による崩壊調査法』, 建設省国土地理院.

- 建設省河川局砂防部 (1994) 地すべり防止区域指定規
準,『砂防関係法令例規集』, 全国治水砂防協会, 230-
231.
- 近藤純正 (1994)『水環境の気象学』, 朝倉書店.
- 島崎邦彦・長浜裕幸 (1995) 地震はでたらめに起こっ
ているのか?,『科学』, **65**, 241-256.
- 瀬戸島政博・白石一夫・森 大 (1991) SPOT データを
用いた地すべり箇所の抽出と地すべり分布図の情報
更新の試み,「写真測量とリモートセンシング」, **30**
(3), 4-15.
- 高木方隆・村井俊治 (1994) DTM 及び衛星データを用
いた地すべり危険地域の抽出,「地すべり」, **30** (4),
28-35.
- 千葉県 (1976a)『土地分類基本調査・富津』, 千葉県企
画部企画課.
- 千葉県 (1976b)『土地分類基本調査・大多喜』, 千葉県
企画部企画課.
- 野上道男 (1995) 細密 DEM の紹介と流域地形計測,
「地理学評論」, **68A**, 465-474.
- 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, 95-111.
- 平野勇二郎 (1998) GIS を用いた丹沢山塊, 桧洞丸山
頂付近のブナ林衰退と地形条件の解析,「地理学評
論」, **77A**, 505-514.
- 古谷尊彦・大倉 博 (1992) 房総半島鹿野山周辺地域
の斜面崩壊の地形・地質的特性,「地すべり」, **28**
(4), 29-36.
- 古谷尊彦 (1996)『ランドスライド』, 古今書院.
- 吉中龍之進・風間秀彦 (1973) 関東地区における最近
の豪雨型土砂災害の 2.3 の特質,「第 10 回災害科学
シンポジウム講演論文集」, **10**, 323-326.
- Akaike, H. (1974) A New Look at the Statistical Model
Identification, *IEEE Transactions on Automatic Control*,
19, 716-723.
- Colby, J. D. (1991) Topographic Normalization in Rugged
Terrain, *Photogrammetric Engineering & Remoto Sens-
ing*, **57**, 531-537.
- Rundle, J. B., Klein, W. (1993) Scaling and Critical Phe-
nomena in a Cellular Automaton Slider-Block Model
for Earthquakes, *Journal of Statistical Physics*, **72**, 405-
412.
- Sugai, T., Ohmori, H., Hirano, M. (1994) Rock Control on
Magnitude-Frequency Distribution of Landslide, *Trans.
Japan. Geomorph. Union*, **15**, 233-251.