

地球観測衛星画像と数値標高モデル（DEM）による 箱根火山の地形判読

Landform Analysis of the Hakone Volcano using Remote Sensing and DEM

新井田秀一¹⁾

Shuichi NIIDA¹⁾

Abstract. Landform analysis of Hakone volcano was carried out by slope gradation map, summit level map and anaglyph that were derived from remote sensing and DEM. As a result, the volcanic topography including the trace of dislocation, the corrosion geographic feature was reconfirmed. The immediate topographic deciphering of the larger area enables to clarify the concealed underground structure.

Key words: slope gradation map, summit level, anaglyph, DEM, remote sensing, geomorphology, landform analysis

1. はじめに

箱根火山は、神奈川県西部、静岡県との境に位置する更新世の火山である。南北約 20km、東西約 20km、約 410 平方 km の地域を占め、火山地形や浸食地形が発達する。さらに、伊豆衝突帯に位置することから、複雑な断層地形も見られる。

箱根火山の地形に関しては、Kaneko(1970) は航空写真の判読および野外調査の結果、断層を記載している。また、日本火山学会編(1971)「箱根火山」において鈴木(1971)が、起伏量や谷密度の分布図を用いて浸食を解析している。またこれらの地形解析を含めた箱根火山の発達史については平田(1999)にまとめられている。従来、航空写真や地形図によって行われてきた地形の研究は、1990 年代に入り、数値標高モデル (Digital Elevation Model : DEM) や地球観測衛星を使った手法が登場した (横山ほか, 1999、隈元ほか, 2002 など)。そこで箱根火山について、傾斜量図、接峰面図、余色立体図を作成し、地形の特徴を判読した。

2. 使用したデータと判読方法

地形を判読した範囲は、箱根火山を中心にした東経 138 度 54 分 30 秒から 139 度 10 分 50 秒、北緯 35 度 5 分から 35 度 22 分 30 秒である。この範囲の地形図を図 1 に示す。

2.1 数値標高モデル (DEM) による判読

数値標高モデルとは、標高値をある間隔でデジタル化したものである。国土地理院が発行している「数値地図 (標高)」のシリーズは、陸域のみのデータセットで、1 km、250 m、50 m メッシュの 3 種類ある。これらのデータは、同院発行の 2 万 5 千分の 1 地形図を、250 m メッシュは緯度経度方向にそれぞれ 40 等分 (7.5 秒 × 11.25 秒: 約 250 m)、50 m メッシュは 200 等分 (1.5 秒 × 2.25 秒: 約 50 m) に分割し、その中央の標高値を読み取って作成される (<http://www.gsi.go.jp/MAP/CD-ROM/cdrom.htm>)。

さらに詳細なメッシュとしては、北海道地図が発行している GISMAP Terrain がある。これは、2 万 5 千分の 1 地形図を 1000 等分 (0.3 秒 × 0.45 秒: 約 10 m) し、10 m の等高線を読み取ったものである (<http://www.hcc.co.jp/solutionhp/gismap/terrain.html>)。

地形を判読する際、地形の傾斜量や傾斜方向について

¹⁾ 神奈川県立生命の星・地球博物館
〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 499
Kanagawa Prefectural Museum of Natural History
499 Iryuda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan
新井田秀一; GFH01253@nifty.ne.jp

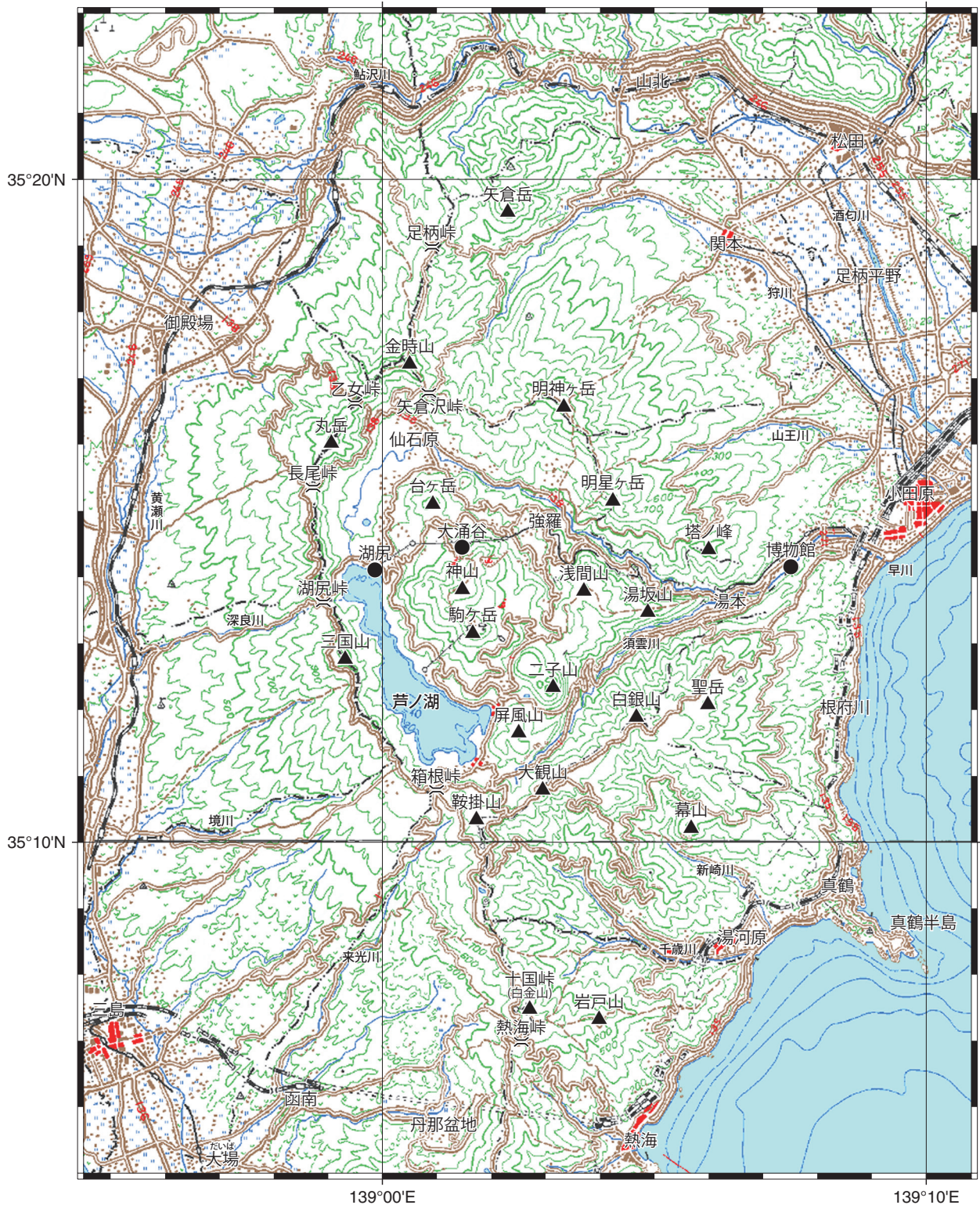


図1. 箱根火山地形図.

数値地図 200000 (地図画像) 東京, 横須賀, 甲府, 静岡を合成し, 地名注記を削除したうえ, 本文中に出てくる地名を補入.

の演算・図化を、Paul Wessel と Walter H. F. Smith が開発した The Generic Mapping Tools (GMT) を使用して行った。(<http://gmt.soest.hawaii.edu/>)。2007 年に出版された Windows 用のバージョン 4.2.0 を使用した。

傾斜量図の作成には、10 m メッシュ (GISMAP Terrain) について xyz2grd コマンドを用いて 2 次元グリッドデータファイルに変換し、方向微分および勾配を計算する grdgradient コマンドを用いて演算、図化した。

これを図2に示す。このような地表面の最大傾斜角度を白黒の濃淡で表したものを、「傾斜分布図」や「傾斜分級図」とも呼ぶ。しかし神谷ほか (2000) は、傾斜量を連続量として捉えているものに関しては「傾斜量図」と呼ぶとしているため、本稿でもこの表記に従う。

また、接峰面図は、数値地図 (標高) 50 m メッシュを用い、時実良典 (こびわ) 氏作成の接峰面図用データ変換プログラム mem2seppo (<http://www.kobiwa>).

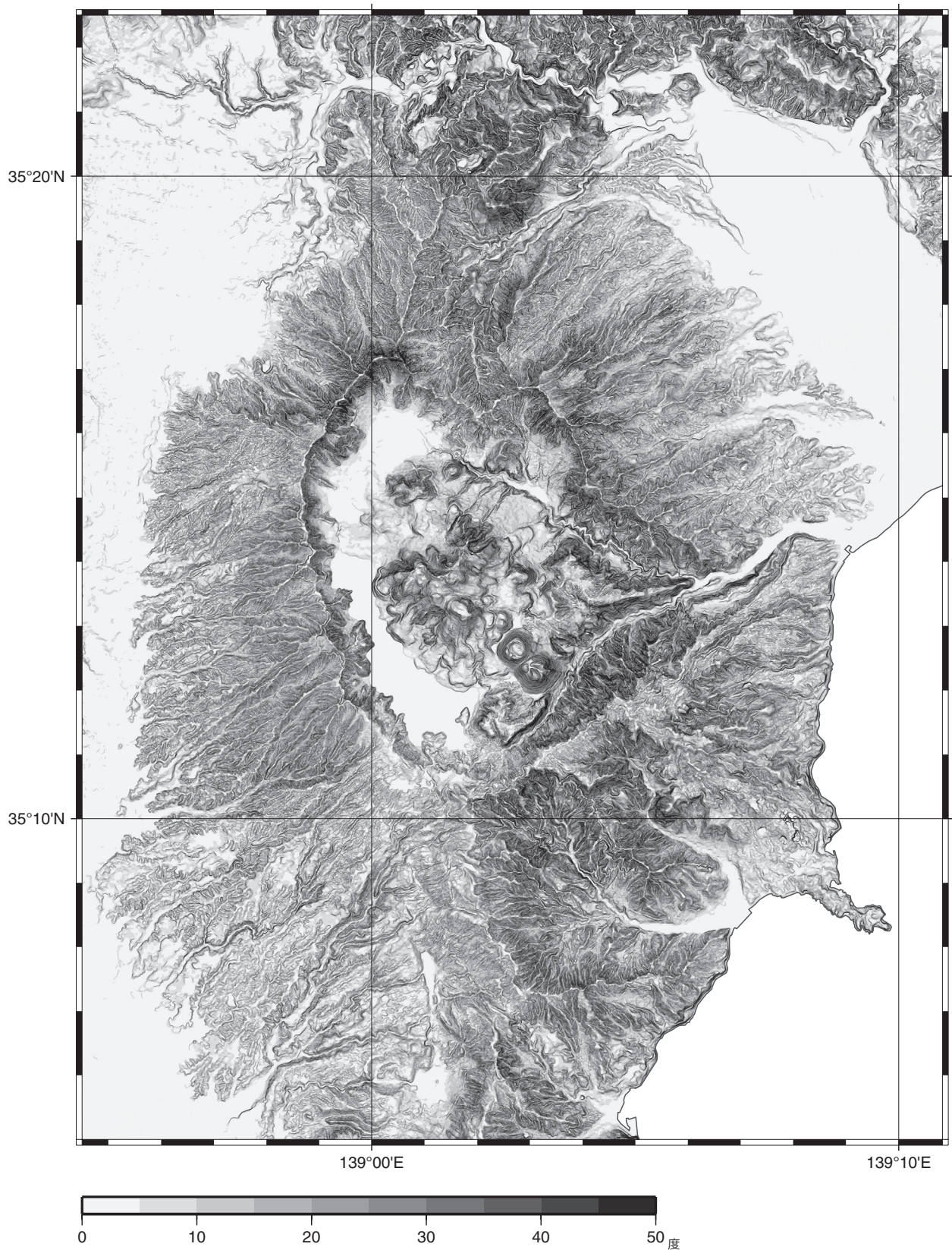


図2. 傾斜量図「箱根火山」.
GISMAP Terrain (北海道地図) 使用.

net/GmtTools/mem2seppo.shtml) を用いて 500 m メッシュ内の最高高度を抽出し、surface コマンドによって自然 3 次スプライン補間を行い、図化した。これを図 3 に示す。

2.2 地球観測衛星 Terra/ASTER 画像による判読

1999 年に打ち上げられた地球観測衛星「Terra」には、日本が開発した 3 種類の放射計から構成されるセンサ「ASTER」が搭載されている (藤定, 1995)。今回用いたのは、可視近赤外放射計 (VNIR) である。VNIR は地

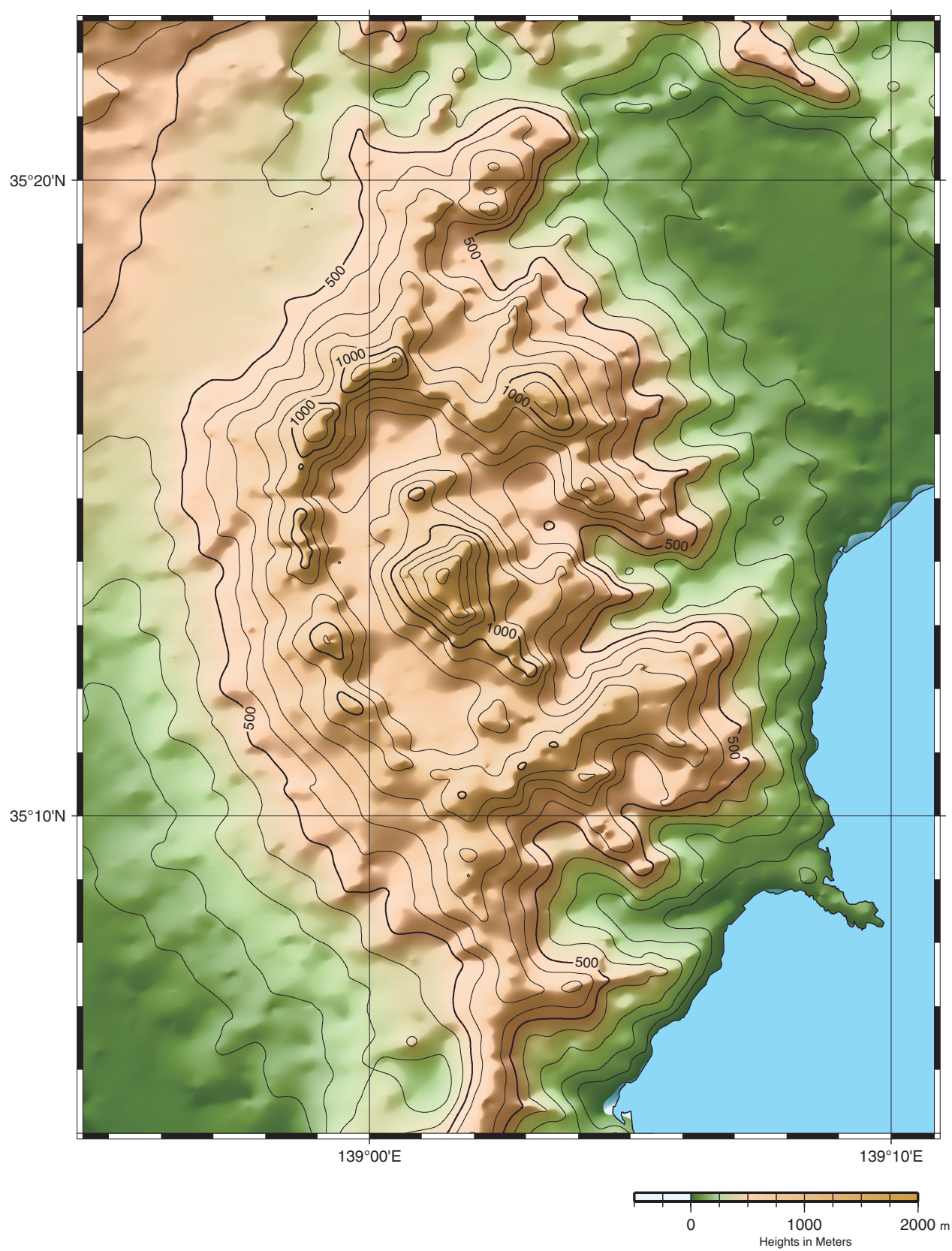


図3. 接峰面図「箱根火山」.
数値地図(標高)50 mメッシュから500 m四方の最高点を抽出して作成.

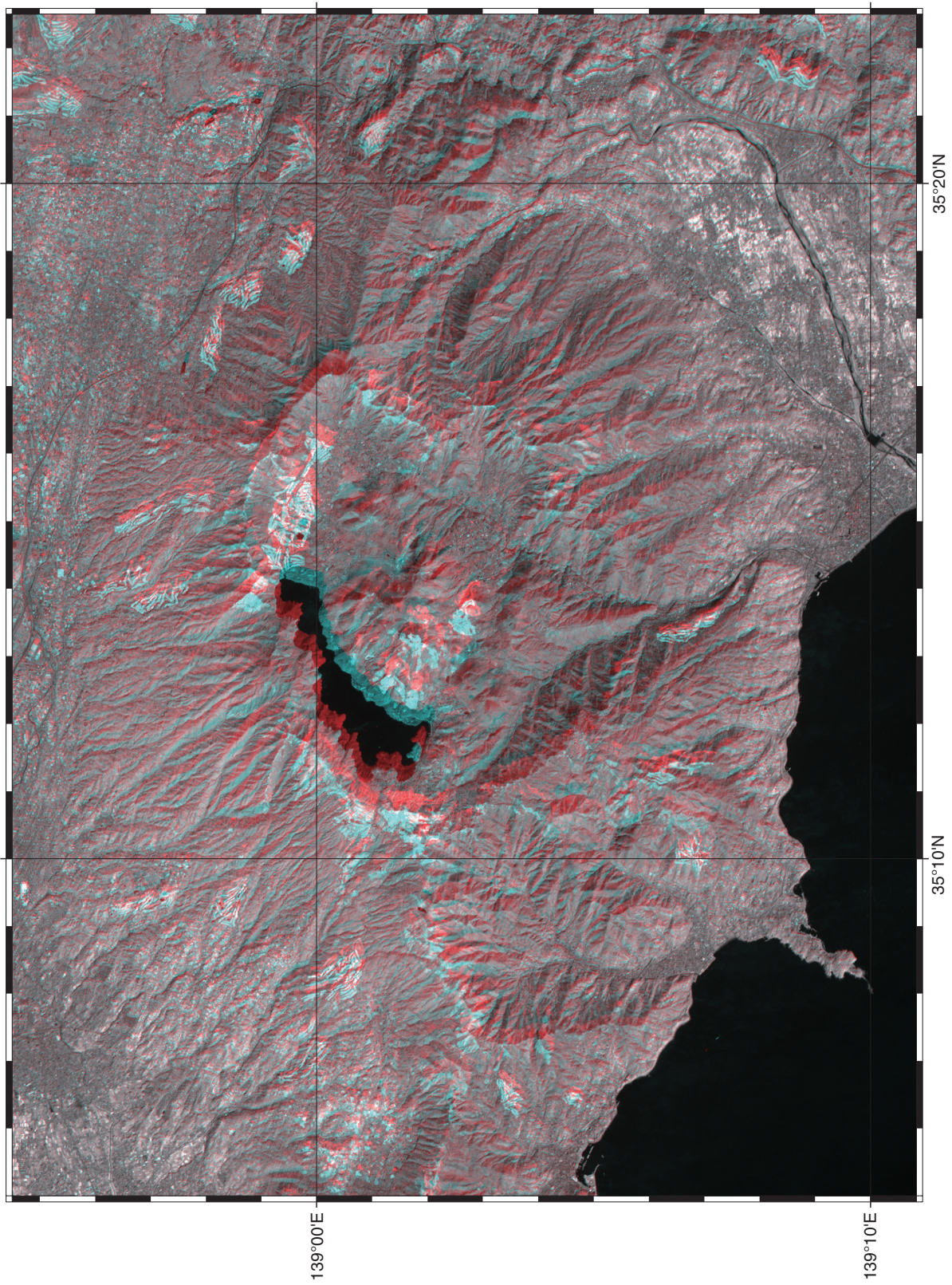


図4. 余色立体図「箱根火山」。
地球観測衛星 Terra/ASTER VNIR バンド 3 N, 3 B 使用。立体視をするために、西を上としている。

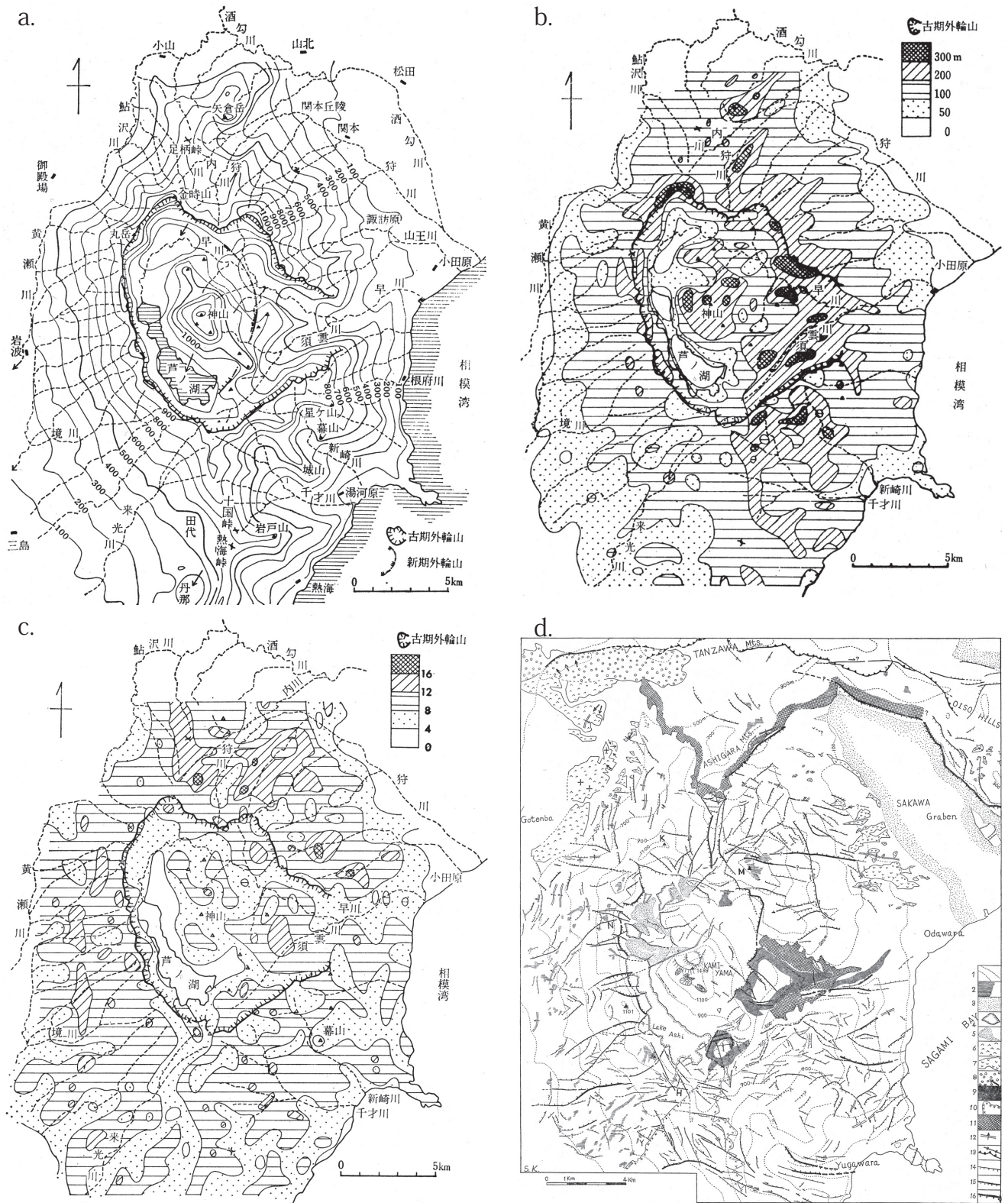


図5. 先行研究の成果。

a. 箱根火山の埋積接峰面図 (鈴木, 1971), b. 箱根火山近傍の起伏量分布 (鈴木, 1971), c. 箱根火山近傍の谷密度分布 (鈴木, 1971), d. 箱根火山近傍の変動地形の分布 (Kaneko, 1970).

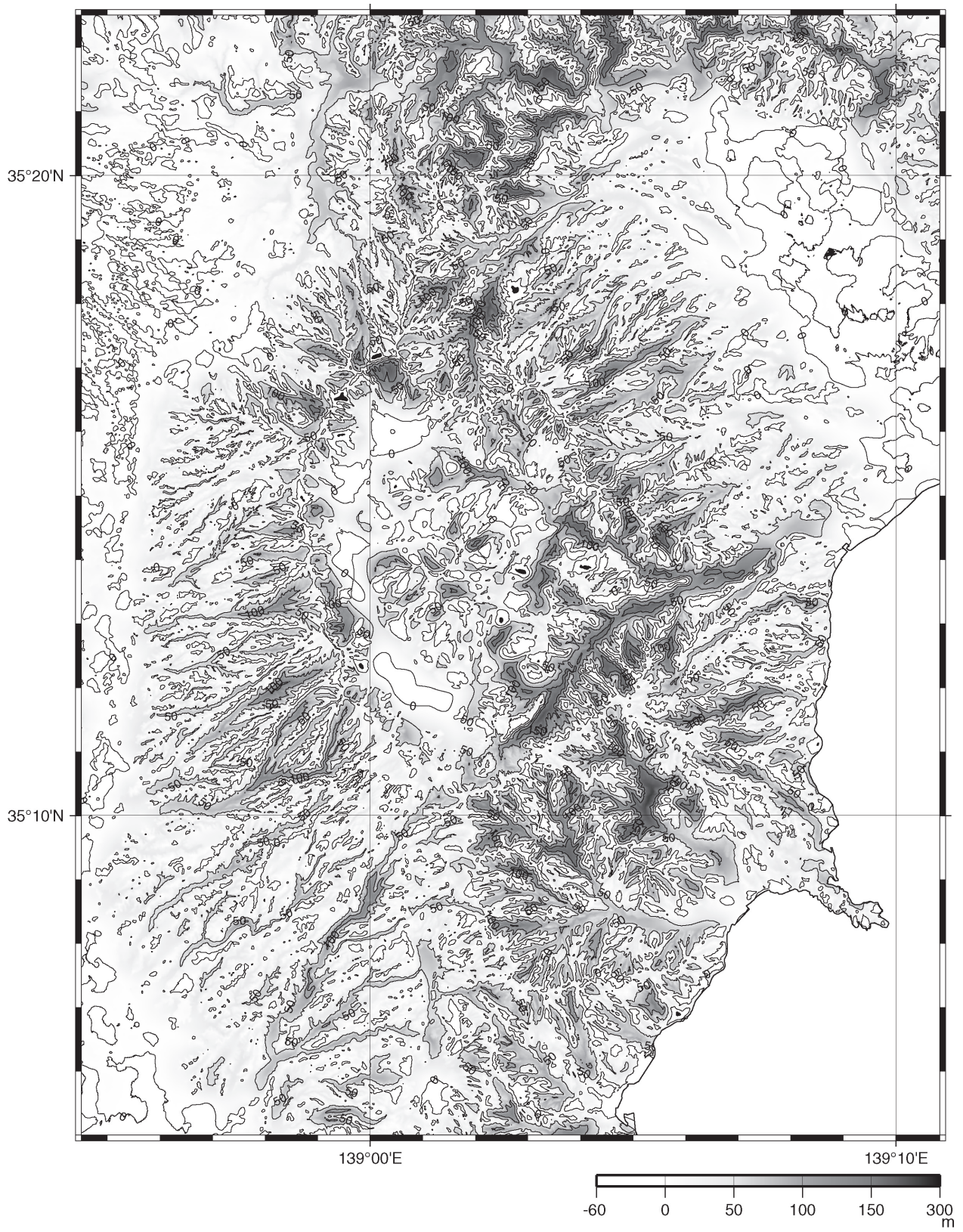


図6. 箱根火山の浸食量図.
接峰面から現地形面を引き算したもの.

上解像度 15 m で地表面を 60 km 幅で観測する。観測波長帯は、バンド 1: 0.52 ~ 0.60 μm (緑)、バンド 2: 0.63 ~ 0.69 μm (赤)、バンド 3 N: 0.76 ~ 0.86 μm (近赤外)、バンド 3 B: 0.76 ~ 0.86 μm (近赤外) である。このうちバンド 3 B は、同じ観測軌道において 27.6 度の後方視となっているため、バンド 3 N と組み合わせることで立体視を可能としている。

ここでは、新井田・蛭子 (2008) において行った余色立体図による地形判読の方法を、箱根火山について適用した。Terra/ASTER VNIR 画像のバンド 3 N、3 B を用いて余色立体図を作成し、赤青フィルターの付いている色メガネを装着して眺めると、地形を立体的に見ることができる。リニアメント (線形構造) とテクスチャー (きめ) を判断基準として、地形的特徴を読み取っていった。なお、余色立体図の作成には、Purdue 大学が公開している解析ソフト MultiSpec32 (<http://cobweb.ecn.purdue.edu/%7EBiehl/MultiSpec/>) を用いた。2002 年 3 月 10 日観測のデータから作成した余色立体図を図 4 に示す。この図は、立体視をする都合から、北を右側に示すよう回転してある。

3. 地形概観

図 1 として示した地形図の中で箱根火山は、中央に位置する。外輪山として南から時計回りに聖岳 (839 m)、白銀山 (993 m)、大観山 (1007 m)、鞍掛山 (1004 m)、箱根峠 (850 m)、三国山 (1102 m)、湖尻峠 (850 m)、長尾峠 (911 m)、丸山 (1156 m)、乙女峠 (1005 m)、金時山 (1213 m)、矢倉沢峠 (867 m)、明神ヶ岳 (1169 m)、明星ヶ岳 (924 m)、塔ノ峰 (566 m) に囲まれている。カルデラの内部には、西側に芦ノ湖 (725 m)、中央に屏風山 (948 m)、二子山 (上二子山: 1091 m、下二子山: 1065 m)、駒ヶ岳 (1327 m)、神山 (1438 m)、台ヶ岳 (1046 m) があり、東側に浅間山 (802 m) や湯坂山 (547 m) がある。

芦ノ湖の北岸からは早川が仙石原を通り、カルデラの東側を刻みながら流れている。また、カルデラの南側には須雲川が流れている。

4. 先行研究との比較

4.1 鈴木 (1971) との比較

鈴木 (1971) は、箱根火山の生成当時の地形を復元するため、谷幅 1 km 以下の谷を埋めつぶした「埋積接峰面図」(図 5 a) を作成した。DEM から作成した接峰面図 (図 3) と比較すると、ほぼ同じであることが確かめられた。このように、異なる手法で作成された図が重なることは、この手法の有用性を示すものである。接峰面図は浸食前の地形面を表しているとされ、ここから現地地形面をマイナスすれば浸食量を求めることができる (中山, 1998)。浸食量を深さ (m) として表したものが図 6 である。外輪山の外側斜面では、箱根峠南西側斜面において浸食量が少ない。鈴木 (1971) によれば、ここは箱根火山の生成当時の地形に近いと考えられ、火山原面と呼んでいる。他にも、大観山東方や白銀山東方にも浸食量の少ない場所が図 6 から読み取ることができ

るが、これらも箱根火山の復元の参考にされていた。

外輪山の東西斜面に比べ、南側湯河原と北側狩川上流域は浸食量が多いことが読み取れる。この浸食について調べたものに「起伏量図」(図 5 b) がある。この図は 500 m メッシュの中での標高の最高点と最低点の差を示したものである。傾斜量図 (図 2) と比較すると、200 m を越える起伏 (図 5 a において斜線で囲まれた範囲) は、30 度以上の傾斜を示す場所とかなり重複する。300 m 以上の起伏は、金時山頂上付近などにあたる。傾斜が急な場所は隆起や浸食が原因と考えられるため、両図において分布が重なるものと考えられる。

鈴木 (1971) の「谷密度図」(図 5 c) とは、傾斜量図、接峰面図、余色立体図との間に関係を見出せなかった。

4.2 Kaneko (1970) との比較

Kaneko (1970) は箱根火山の変動地形を詳細に調べた (図 5 d)。図 5 d 中の凡例 1 で示される点線は接峰面であり、これも DEM から作成した接峰面図 (図 3) とかなりの一致を示す。

傾斜量図 (図 2) において色が急激に変化する場所は、傾斜角度が折れ曲がるように変化している。これが直線的に連続する場所は、地形が段のようになっている。このような場所および尾根や谷筋が食い違いを見せている場所は、断層が存在する可能性がある。Kaneko (1970) の変動地形図 (図 5 d) における凡例 14 ~ 16 は、2 万分の 1 航空写真と現地調査から判断した断層を記したものである。傾斜量図 (図 2) にこれらの断層位置を重ね合わせたものを図 7 に示す。比高 20 m 以上の断層 (凡例 15、16) は、傾斜量図に上記の特徴がよく表れていることが分かる。比高 20 m 以下 (凡例 14) であっても、和留沢断層のように延長が長く、いくつもの尾根を横断している場合には、傾斜量図にも表れている。

5. 判読と検討

読み取り結果を図 8 にまとめる。傾斜量図や余色立体図から読み取った結果を、傾斜量図の上に重ねて示す。

5.1 外輪山の判読

外輪山の裾野は、余色立体図 (図 4) から、東側 (図 8: 凡例 a) および西側の斜面 (図 8: 凡例 b) に深い谷が数多く刻まれていることがわかる。この裾野の傾斜角度は、東側より西側のほうが緩やかである。特に三島へと向かう南西側はさらに緩やかであり (図 8: 凡例 b)、裾野の他の部分に比較すると刻まれる谷も浅めである。傾斜量図 (図 2) を見ると、白黒の筋として表される直線的な谷として東西方向に刻まれていることが読める。浸食量図 (図 6) から、このことは読み取れる。稜線の高さは、余色立体図 (図 4) から読み取ると、一様ではないことがわかる。金時山のように尖っている部分 (図 8: 凡例 c) や、湖尻峠周辺 (図 8: 凡例 d)、矢倉沢峠周辺 (図 8: 凡例 e)、明神ヶ岳から明星ヶ岳間 (図 8: 凡例 f) のようにえぐれるように低い部分もある。

金時山の北北西側斜面は、余色立体図 (図 4) で見ると足柄峠の西側に掛けて他よりも細かいしわが一定の幅で続いている。金時山から矢倉沢峠、明神ヶ岳にかけて

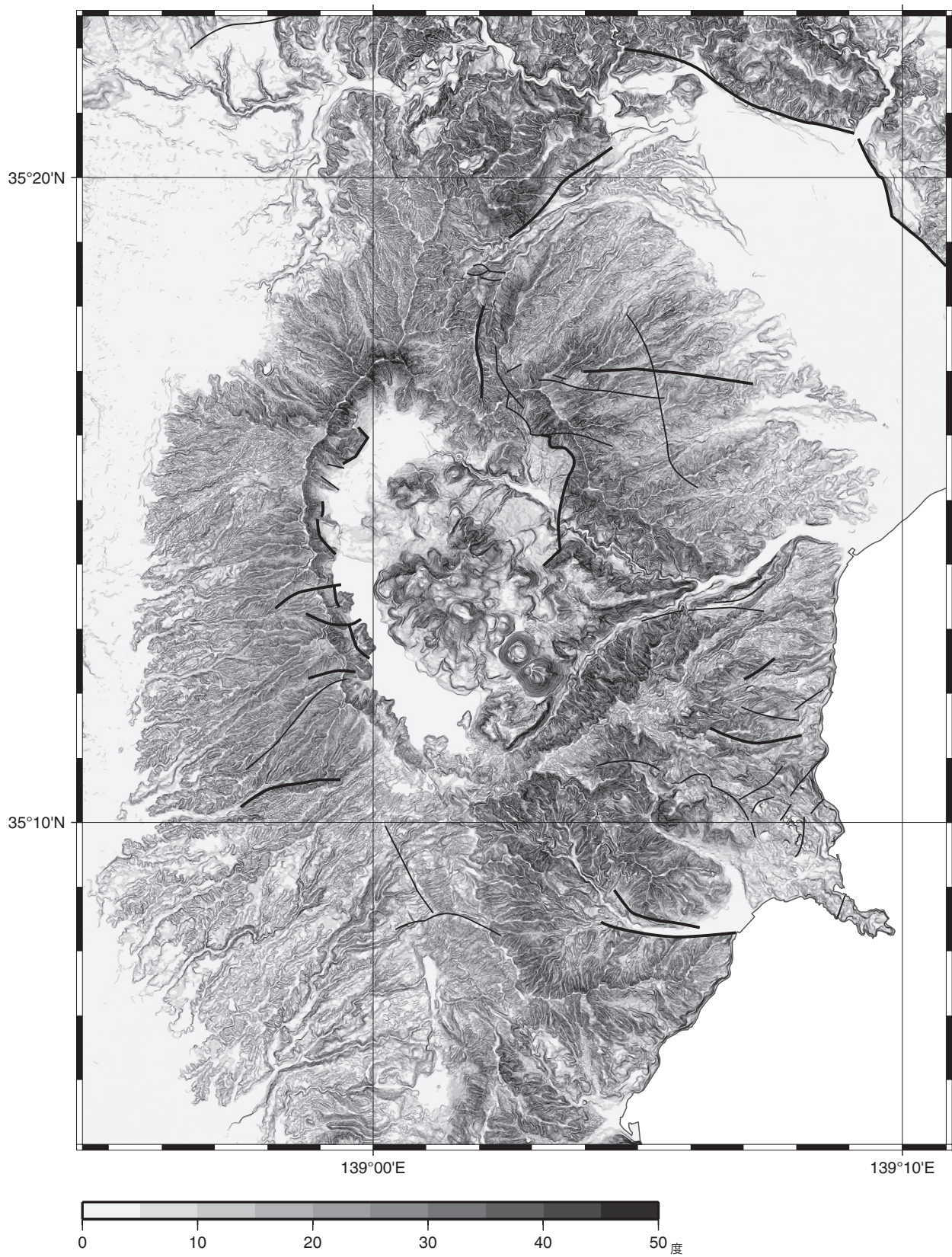


図7. 箱根火山の断層地形.

図5d (Kaneko, 1970) から凡例 15・16 および, 14 の一部について, 傾斜量図に重ねて示した.

の北東側斜面は大きくえぐれており、関本に向けて狩川として深い谷が刻まれている。浸食量図(図6)からも、100 mを超える量が浸食されていることがわかる。ここから矢倉岳に向けて、北東方向に平山断層が走っている(図8：凡例h)。

金時山から北へ向かう稜線は、同じような高さで足柄峠を越え、矢倉岳のところで急激に盛り上がっているのが、余色立体図(図4)から読み取ることができる(図8：凡例e)。これは足柄山地が隆起していることを示している。その東側の境界に前述の平山断層がある。

明神ヶ岳から明星ヶ岳にかけての東側斜面の中腹には、傾斜量図(図2)において尾根に食い違いが見られる(図8：凡例i)。このリニアメントは和留沢断層と重なり、Kaneko(1970)の変動地形図(図5d)と矛盾しない。

外輪山の内側斜面は、急角度で落ち込んでいる。傾斜量図(図2)でみると、芦ノ湖に沿った西側は30度以上の部分が多い。芦ノ湖湖畔には、水鳥の脚のような半島が2ヶ所ある。三国山下のもの(図8：凡例j)は、途中にくびれを持つため崩壊地形であり、湖尻峠に近いもの(図8：凡例k)は山伏峠火山体である。また、長尾峠付近には半島型に突き出したような高まりがみえる(図8：凡例l)。これは、大唐沢溶岩が削り残されたものである。

5.2 中央火口丘の判読

神山には、湖尻方向に崩壊している地形があることが傾斜量図(図2)と余色立体図(図4)の両方から読み取れる(図8：凡例m)。この山体崩壊はカルデラ内部を塞ぎ止め、芦ノ湖を誕生させたものである。また強羅に向けて、大涌谷と早雲地獄と呼ばれる崩壊地形がある(図8：凡例n)。この部分は傾斜量図(図2)において、上部が丸く閉じた〇型をしており、縁が黒く中央部に向けて急激に白くなる。そして崩壊して流れた方向に向けて全体的に色が薄くなっているという特徴によって表されている。ただし、強羅の平坦面は余色立体図(図4)において湖尻周辺と比べるとテクスチャーに差がある(図8：凡例n)。ここは、後期中央火口丘からの火砕流堆積物で覆われているとされる。

視野を広げて余色立体図(図4)をみると、湖尻峠(図8：凡例d)－神山の崩壊(図8：凡例l)－明神ヶ岳から明星ヶ岳間(図8：凡例f)と3ヶ所の低い地形が、北東－南西方向に連続しているように見える。図8に斜線で示す。Kaneko(1970)や鈴木(1971)には記述がないが、外輪山外側の東側(図8：凡例a)および西側斜面(図8：凡例b)についても同じ方向に谷が刻まれていることも含め、南東－北西方向での圧縮が影響を与えている可能性がある。

芦ノ湖南東岸から上二子山北西側を通り浅間山北西側にかけて続くリニアメント(図8：凡例o)も、傾斜量図(図2)と余色立体図(図4)の両方から読み取ることができる。これは断層地形と考えられる。

箱根町宮城野地区は、明神ヶ岳から明星ヶ岳へと外輪山の稜線が屈曲する内側にあたる(図8：凡例p)。こ

こは崩壊地のようにも見える平坦な面であるが、よくわからない。宮城野地区の東側・明星ヶ岳の西側の裾は、先ほどのリニアメントにつながっている可能性がある(図8：凡例o)。また、南西方向に延長すると、箱根峠を越えて来光川として刻まれている三島市大場に続く谷(図8：凡例b')につながるように見える。

強羅地区から湯本地区にかけて早川(図8：凡例q)や須雲川(図8：凡例r)は、急峻な地形となっている。この部分は傾斜量図(図2)において、河床部は緩傾斜を表す淡色が線状に続き、河岸が切り立っているため黒く縁取られたように表されている。さらに早川(図8：凡例q)は蛇行していることも読み取れる。余色立体図(図4)では、谷がV字に刻まれている様子がわかる。湯本から下流は、平坦な河床部が多少拡大する(図8：凡例q')。また、湯本地区の南側には平坦面があり、傾斜量図(図2)では上部と下部に急傾斜を示す暗部がある(図8：凡例q'')。余色立体図(図4)によって、須雲川の谷を湯本地区から南西方向に見ていくと、前述の芦ノ湖南東岸から明星ヶ岳西側の裾までのリニアメントと同様に、鞍掛山を越え、前述の来光川の谷(図8：凡例b'')につながるように見える。

溶岩ドームは、傾斜量図(図2)において、急傾斜である裾野部分は暗色として、ドーム型の円形に表現される(図8：凡例s)。斜面はほとんど谷に刻まれていない。頂上部は、傾斜がゆるいため、淡色となる。上二子山、下二子山、台ヶ岳、小塚山では典型的な形が読み取れる。このうち台ヶ岳は谷が刻まれており、多少いびつである。

前期中央火口丘である屏風山、浅間山、湯坂山は、楕状火山とされる。傾斜量図(図2)ではドームの特徴に似ているように見えるが、頂上部が広い平坦部を持つ点が異なっている(図8：凡例t)。余色立体図(図4)においてもこの特徴は読み取れる。

神山や駒ヶ岳では、傾斜量図(図2)において幾重にも黒く縁取られた地形が見える(図8：凡例u)。これは溶岩の流れた地形で、縁取られた一区画が一枚の溶岩流であるとされる。この中には溶岩堤防も表されている。余色立体図(図4)ではひょうたんのような形に表され、流れ固まった様子がうかがえる。

5.3 湯河原・熱海周辺の判読

十国峠～鞍掛山～大観山に囲まれた神奈川県湯河原地区(図8：凡例v)は、傾斜量図(図2)において、外輪山の外側を刻む谷よりも色が濃く、テクスチャーは白銀山北側の斜面と似ている。しかし、こちらのほうがより濃く、急傾斜であることがわかる。余色立体図(図4)では、頂上部が急角度で始まり底部では緩やかになる地形が見える。湯河原町市街地では千歳川下流部両岸に直線的な構造が見える(図8：凡例v')。これは、Kaneko(1970)の変動地形図(図5d)における凡例16の断層線と一致する。

小田原市根府川地区から真鶴町にかけても、傾斜量図(図2)から溶岩流地形が読み取れる(図8：凡例w)。こちらは駒ヶ岳などに比べて古い溶岩流なので、浸食されてテクスチャーがあまりはっきりしていない個所もあ

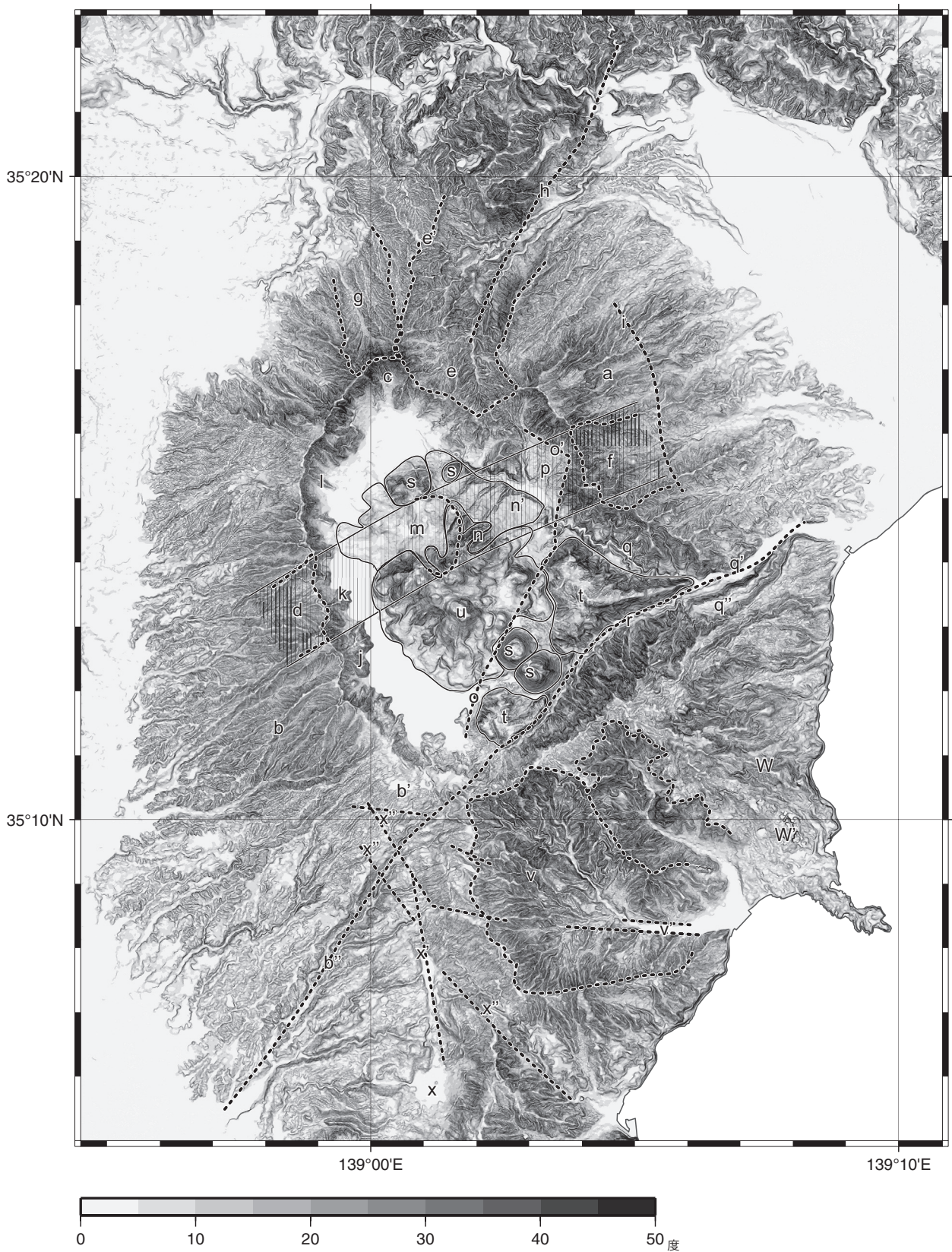


図8. 余色立体図および傾斜量図からの地形構造判読図。

a: 外輪山東側斜面, b: 外輪山西側斜面, b': 外輪山西側の緩斜面, b'': 箱根峠から三島市大場へ続くリニアメント, c: 金時山, d: 湖尻峠, e: 矢倉沢峠, f: 明神ヶ岳から明星ヶ岳, g: 金時山北北西斜面, h: 平山断層, i: 和留沢断層, j: 芦ノ湖小杉鼻から立岩, k: 芦ノ湖亀ヶ崎, l: 長尾峠下, m: 神山北西斜面, n: 大涌谷・早雲地獄, n': 強羅, o: 芦ノ湖南岸から浅間山北西側へのリニアメント, o': 宮城野と明星ヶ岳を隔てるリニアメント, p: 宮城野, q: 早川 (強羅～湯本), q': 早川 (湯本から河口), q'': 湯本の北側の平坦面, r: 須雲川, s: 溶岩ドーム, t: 楯状火山, u: 中央火口丘の溶岩流地形, v: 湯河原地区, v': 千歳川河口のリニアメント, w: 溶岩流地形, w': 採石場, x: 丹那盆地, x': 丹那断層, x'': 丹那 (北伊豆) 断層系のリニアメント

る。真鶴半島の付け根にある窪みは、採石場である（図8：凡例 w'）。本小松石などして知られる真鶴産の石材は、この溶岩流から切り出されている。

静岡県熱海市と函南町にはさまれたところに丹那盆地（図8：凡例 x）があり、丹那断層が南北方向に走っている（図8：凡例 x'）。傾斜量図（図2）では、丹那盆地の白色面の西側に傾斜の急な変化を示す黒いエッジが南北方向に直線的に続いているのが読める。余色立体図（図4）において、傾斜角が急激に変化する場所が直線的に続いているのがわかる。

丹那断層に対し、左に30度交差する方向に走るリニアメントがいくつか見られる（図8：凡例 x''）。傾斜量図（図2）では、来光川などの谷に横ずれを読み取ることができる。これらは丹那（北伊豆）断層系（活断層調査会, 1991）とされる。

6. まとめ

箱根火山に関する従来からの研究成果に対して、今回用いた DEM や衛星画像を用いた判読結果は相反しないことがわかった。

傾斜量図では、高さの相関関係は失われてしまうが、形やテクスチャーが強調される。そのため、溶岩ドームのような盛り上がりや、溶岩の流れた地形、U字型にえぐれた崩壊地形、V字型の浸食地形が読み取れることが確認できた。余色立体図からは、リニアメントやテクスチャーを読み取ることができるだけでなく、傾斜量図では失われている高さの情報も同時に読み取ることができる。問題点として、赤青メガネを装着するというステップが入り、立体視という感覚的な判断が生じてしまう。しかしこれらの方法は、広い範囲を読み取り、比較検討

できるため、今までに見えてこなかった地下の構造を明らかにする可能性がある。今後の現地調査とあわせて検討を続けたい。

謝辞

神奈川県立生命の星・地球博物館学芸員の平田大二氏、笠間友博氏、山下浩之氏には、地形学的な検討をはじめ、様々な情報を提供していただいた。ここに記してお礼申し上げる。

引用文献

- 平田由紀子, 1999. 箱根火山の発達史. 伊豆小笠原の研究—伊豆・小笠原弧のテクトニクスと火成活動—, 神奈川博調査研報（自然）, (9): 153-178.
- 藤定広幸, 1995. ASTER センサシステムの概要. 日本リモートセンシング学会誌, 15(2): 8-15.
- 神谷泉・黒木貴一・田中耕平, 2000. 傾斜量図を用いた地形・地質の判読. 情報地質, 11(1), 11-24.
- Kaneko, S., 1970. Deformation of Hakone volcano. Jour. Geol. Soc. Japan, 76(5): 247-257.
- 活断層調査会, 1991. 第Ⅱ部 A53 横須賀, 新編 日本の活断層, pp.178-183. 東京大学出版会, 東京.
- 隈元崇・中山大地・田中靖・鈴木康弘, 2002. 活断層研究への数値標高モデルの応用. 活断層研究, (21), 5-16.
- 中山大地, 1998. DEM を用いた地形計測による山地の流域分類の試み—阿武隈山地を例にして—. 地理学評論, 71A-3, 169-186.
- 新井田秀一・蛭子貞二, 2008. 地球観測衛星画像による余色立体図を使った地形判読の試み—三浦半島を例にして—. 神奈川博研報（自然）, (37): 1-12.
- 鈴木隆介, 1971. 箱根火山の地形—地形の成因—. 日本火山学会編, 箱根火山. 7-42pp. 箱根町, 神奈川.
- 横山隆三・白沢道生・菊池祐, 1999. 開度による地形特徴の表示. 写真測量とリモートセンシング, 4, 26-34.