論 説

特徴的地形抽出のための斜面ベクトルのカラー表示とその立体視

中村 貴子*・正路 徹也*

Colored Surface Vector Maps and Their Stereoscopy to Extract Geomorphological Features

Takako NAKAMURA* and Tetsuya SHOJI*

Abstract : When a normal vector of slope surface ("surface vector" here) is shown as a point on a Wulff's net overlaying the basal plane of the HSI color cone, the vector is displayed by a color on a map. Accordingly, this map shows spatial distribution of surface vectors, each of which represents a slope direction and a slope degree at a point. The surface vector map is very useful to extract geomorphological features such as faults, linear structures, ring structures and others. If a stereo-pair of a surface vector map showing topography is provided, characteristic geomorphologies are extracted easier.

Key word : Surface vector, Wulff's net, HSI color cone, Stereo-pair

1. はじめに

地形から断裂帯や環状構造などを抽出するとき、地表面の傾斜は重要な情報を提供する。線形構造をはじめとする特徴的地形を把握するために標高図を眺めることや空中写真を立体視することは、以前から知られている有効な手段である。最近では、コンピュータの発達に伴ってデジタル標高モデル (DEM : Digital Elevation Model) の整備が進み、それらを用いた地形解析も活発に行われている。それは、地形情報がアナログからデジタルに変化したことにより、地形の変化量の数値解析や、空間情報の表示システムである GIS を利用した解析結果の管理・表示が容易に行えるようになったからである。

デジタル標高モデルを用いた地形解析は、それらを白黒の濃淡画像とし、それらの画像のフィルタリングを行うことによって地形の特徴を抽出する手法 (例えば、岩橋, 1992) や複数の光源を想定した陰影図を作成して、エッジ強調処理法により谷を抽出する手法 (例えば、羽坂ほか, 1991)、傾斜量図などの、特定の地形情報を強調表示した画像を作成し、地質構造解析、すなわち、リニアメントの抽出を行う (例えば、田中ほか, 1985 ; 神谷ほか, 2000) などの方法が主流である。また、人工衛星や空中写真などの画像を利用した、断裂系評価のためのリニアメント抽出も数多く行われている (例えば、大地ほか, 1987 ; 井上ほか, 1992)。このような、デジタル画像処理によるリニアメントの抽出は、地形の不連続点が線状に配列する地形形

状 (Hobbs, W.H., 1904) を、画像の濃淡の急激な変換点の連続として抽出するものである。

以上述べた各種手法のうち、傾斜量図を考えると、これは3次元の単位ベクトルである斜面の法線ベクトル (以下「斜面ベクトル」) のうち、鉛直方向からの角度のみを表現していて、方位が表現されていない。このため、傾斜量図で環状構造が抽出されても、その内部が盛り上がっているのか、落ち窪んでいるのか分からない。この盛り上がりか落ち窪みかを知るためには、別に陰影図などが必要となる。このとき傾斜方位図であっても、この判断は可能である (ただし、傾斜方位図はあまり一般的ではない)。本研究では、この傾斜量図と傾斜方位図を1枚の図面として表現する方法を開発した。

ところで、一般的な色は、光の3原色である赤 (R)、緑 (G)、青 (B) と、それらの補色であるシアン (C)、マゼンダ (M)、黄 (Y)、および、黒 (K)、白 (W) の6点を頂点とする RGB 立方体内の一点として表される。今、KとWを結ぶ直線をI軸として、この立方体のR、Y、G、C、B、Mを、Wを含みI軸に直交する平面に投影すると、正六角形ができる。この正六角形を円に変換し、その円を底面とし、Kを頂点とした円錐をHSI円錐カラーモデルという。この円錐の底面をウルフ網と一致させることで、ウルフ網上の1点として与えられる斜面ベクトルを色で表わすことができる。この色を地図上に表示することにより、傾斜方向と傾斜量の空間分布を同時に表現することができる。

2003年4月22日受付, 2003年8月18日受理

* 東京大学大学院新領域創成科学研究科 Department of Environment Systems, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo
Address: 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, JAPAN E-mail: nakamura@k.u-tokyo.ac.jp

このようにして作成した斜面ベクトル図を、地形が立体視できる立体視対として表現すると、特徴的地形がより容易に抽出できる。ここでは、デジタル標高モデルから陰影図、傾斜量図、傾斜方位図を作成し、斜面ベクトル図と比較・評価することによって、斜面ベクトル図の有効性を検証する。

2. 使用データ

斜面ベクトル図がさまざまな特徴的地形の抽出に有効であることを示すために、1997年に国土地理院から刊行された茨城県筑波山周辺の50m DEMを用いて、標高図、陰影図、傾斜方位図、傾斜量図、斜面ベクトル図、斜面ベクトル図の立体視対を作成した。また、特に断裂系と環状構造に対する斜面ベクトル図と斜面ベクトル図の立体視対の効果を検証するために、大分県万年山周辺と、青森県と秋田県の県境に位置する十和田湖周辺の傾斜量図と斜面ベクトル図の立体視対も作成した。筑波山周辺は、平野と山地が比較的明瞭に分かれた地形を示す。豊肥地域は日本最大の活火山地帯であり、火山地形と東西に走る大小規模の正断層が発達している。十和田湖はカルデラであり、環状構造の例として選んだ。

3. 斜面ベクトル図の作成方法

DEMの画像処理演算にはCompaq VF(Visual Fortran) Ver.6.6を、計算結果の画像表示にはAdobe Photoshop Ver.6.0を用いた。

3.1. 斜面ベクトル

50m DEMから斜面ベクトルを算出した。筑波山周辺のDEMの格子点間隔は、東西（緯線）方向が約56.0m、南北（経線）方向が約46.3mである。斜面ベクトルの傾斜方向と傾斜角は、対象とする格子点を中心とする9個の格子点に近似平面を当てはめ、その法線から求めた。

直交座標系で求めた法線ベクトルの傾斜方向（ θ ）と傾斜角（ ϕ ）は次式で与えられる。

$$\theta' = \cos^{-1} \left[\frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right]$$

$b \geq 0$ のとき

$$\theta = \theta'$$

$b < 0$ のとき

$$\theta = 2\pi - \theta'$$

$$\phi = 90 - \tan^{-1} \left[\frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right]$$

ここで、 a と b は近似平面 $z = ax + by + c$ の係数である。

3.2. 斜面ベクトルのステレオ投影とHSI色空間

斜面ベクトルの空間分布を地形図上に表現するために、色相（H：Hue）、彩度（S：Saturation）、明度（I：Intensity）の3成分で構成されるHSI円錐カラーモデルを利用した。ウルフ網とHSI円錐カラーモデルの底面を対応させたとき、斜面ベクトル（ θ , ϕ ）のステレオ投影点とHS面の座標（H, S）は次のように対応する。

$$H = \theta \quad (1)$$

$$S = \tan \frac{\phi}{2} \quad (2)$$

この場合、HSI空間では $I = 1.0$ である。この明度 I を、

$$I = I_0 + (1 - I_0) \times S \quad (0 \leq I_0 \leq 1.0) \quad (3)$$

とすることもできる。ここで、 I_0 は円錐の頂点の明度である。適当な I_0 を与えると、傾斜角度が明度でも表現される。 I_0 は図が見やすくなるように任意に決めればよい。 I_0 が1.0, 0.5, 0.0のときのウルフ網を第1図に示す。

ところで、実際に斜面ベクトルの傾き角が 0° に近くなることはほとんどないので、②式だとHSI円錐カラーモデルの底面を有効に使えない。そこで、 ϕ に最大傾斜を与える $\phi_{\max}$ を代入し、 S の最大輝度 S_{steepest} を、

$$S_{\text{steepest}} = \tan \frac{\phi_{\max}}{2} \quad (4)$$

とすると、HSI円錐カラーモデルの底面で高輝度の部分を有効に使うことができる。

3.3. 立体視対の作成

斜面ベクトルを表現する図で、同時に地形の起伏を表現したい場合、斜面ベクトル図と地形の起伏情報との重ね合わせが必要である。地形の起伏は、しばしば陰影図として表示される。そこで、斜面ベクトルはHS面で表し、Iを陰影図に利用することが可能である。しかし、この場合、当然のことながら、明度の変化として斜面ベクトル図を表現することはできない。この欠点を除くために、斜面ベクトルを示す色で地表面を着色し、この地形の立体視対を作成した。これを斜面ベクトル図の立体視対と呼ぶ。立体視対は、左目で見た像と、右目で見た像の2枚の画像からなる。この対画像をそれぞれの目で見ることにより、脳内で3次元像が認識される。

4. 結果と考察

筑波山周辺の標高図、陰影図、傾斜方位図、傾斜量図、斜面ベクトル図を第2図に、斜面ベクトルの立体視対を第3図に示す。傾斜方位図は、傾斜方向（ θ ）に円形カラーチャートの $S = 1.0$ のときの色を割り当てて表示してある。傾斜量図は、傾斜角（ ϕ ）が 0° を白、 90° を黒とする255～0の濃淡値に変換して表示してある。第2図と第3図の

第1図 HSI円錐カラーモデルで着色されたウルフ網. 左から, 円錐カラーモデルの明度が $I_0=1.0, 0.5, 0.0$. ウルフ網の経線と緯線の間隔はそれぞれ 30° .

第2図 筑波山周辺の地形解析図 (東西約22.4km, 南北約18.5km)

第3図 筑波山周辺の立体視図（東西約22.4km，南北約18.5km）

第5図 大分県万年山周辺の斜面ベクトルの地形立体視図（東西約23.3km，南北約18.5km）

第6図 傾斜方位図・傾斜量図・斜面ベクトル図における地形断面と表示色の関係。

斜面ベクトル図は、第1図に示す $I_0 = 1.0$ のときの円形カラーチャートで表現してある。斜面ベクトルの立体視対(第3図)を立体視すると、傾斜方向、傾斜量、標高の空間的变化を1枚の地図で容易に認識することができる。

まず、筑波山周辺の傾斜方位図および傾斜量図と斜面ベクトル図とを比較する。傾斜方位図には、傾斜方向のみが表示されている。傾斜量図には、地形の傾斜量のみが表示されている。標高図や陰影図を参考に傾斜方位図を見ると、斜面の連続性の抽出に有効であり、谷線・尾根線を含む線形構造がよく分かる。しかし、平野と山地の区分が不明瞭で、また斜面の凹凸も不明瞭である。傾斜量図は平野と山地が明瞭に区分されている。また、谷線・尾根線を含む線形構造や段丘崖も明瞭に認識できる。ただ、山地では、地形の起伏が不明瞭である。対して、斜面ベクトル図を見ると、谷線・尾根線を含む線形構造が明瞭で、山地、平野、段丘崖の区分も可能であり、地形の違いが明瞭に識別できる。これらのことから、斜面ベクトル図は、傾斜方位図と傾斜量図の長所を合わせもつ上に、地形の起伏も表現していることがわかる。

次に、標高図および陰影図を斜面ベクトル図と比較する。標高図は、地形の外観を見るためには一般的なものであるが、標高図から特徴的な地形を判読するためにはある程度の熟練を要する。また、標高図から特徴的な地形を定量的に抽出することはさらに難しい。陰影図は、影を付けることで地形の凹凸が立体的に見えるという点で、線形構造の抽出や地形の外観把握に優れている。しかし、光の照射方向に平行する線形構造が捉えられないことや、陰になる部分の地形が不明瞭であるという欠点がある。このため線形構造や地形の変化を方向に関係なく抽出するためには、複数の方向からの光源を想定した多くの画像を見なければならない。その点、斜面ベクトル図は1枚の図で線形構造などの特徴的地形や地形の変化を表現している上に、定量的に扱うことも可能である。また、斜面ベクトル図はカラー図であるため、人間の直感的な認識を助け、見落としが少なくなることが期待できる。

斜面ベクトル図は、単独で傾斜方向、傾斜量、地形の変化などを表現することが可能で、線形構造などの特徴的地形の抽出に適していることがわかった。しかし、正確に地形の変化を認識するためには、円形カラーチャートの色相と傾斜方向の対応付けを参照する必要がある。この煩雑さを防ぐために、斜面ベクトルに対応する色がつけられた地形を想定して、これを立体視することにした。これにより、地形の変化がより容易に認識できる(第3図)。

斜面ベクトル図が線形構造の抽出に適していることを確かめるために、大分県万年山周辺の陰影図、傾斜方位図、傾斜量図、斜面ベクトル図(第4図)および立体視対(第5図)を作成した。まず、第4図の斜面ベクトル図を見ると、万年山の西～南西部④と北東部⑤において、ほぼ東西に走る線構造(青)が見られる。これら東西に走る線構造は、南～南西向き幅の狭い急峻な斜面の連続であり、

本地域に多数発達している東西に走る正断層(町田ほか、2001)に対比される。また、南北に走る線構造(赤)が青で示す線構造と交差している。これらの赤で示された線構造は東向きの幅の狭い急峻な斜面の連続である。このことは、第5図の立体視対を用いて立体視して見るとさらに明瞭に認識できる。これらの線構造は、立体視からわかる地形の特徴からも、断裂構造を捉えている可能性が高い。また、④では、東西方向の線構造である青い線が南北方向の赤い線構造を連続的に分断しているようにも見える。

次に、第4図の陰影図と斜面ベクトル図を比較する。陰影図(第4図のaとb)を見ると、光源が北側にある場合は④、⑤の区域に見られる東西方向の線形構造が鮮明に認識できるが、光源が南東側にある場合はかなり不鮮明である。対して、斜面ベクトル図ではさまざまな方向の線形構造が色相の違う線で全て同時に表現されている。さらに、斜面ベクトル図を、傾斜方位図および傾斜量図と比較すると、傾斜方位図は、傾斜方向の連続性の抽出には適しているが、傾斜角が急峻な部分のみを抽出することは不可能であり、抽出される断層の幅が実際より広くなる。一方、傾斜量図では、さまざまな方向性を持つ斜面が混在している場合、傾斜方向の識別ができず線形構造の連続性を追いつく。断層の抽出で斜面ベクトル図が傾斜方位図や傾斜量図より優れているのは、第6図を見れば明らかである。例えば、両側が同程度の傾きをもつ谷の断面の場合、傾斜方位図(a)では、傾斜方向のみによって色分けされ、同じ傾斜方向を持つ斜面は同じ色相と彩度で表現されるため、抽出された線構造の幅が広くなる。傾斜量図(b)でも谷線の両側の斜面が同じ色相と彩度で表現されるため、抽出された線構造の幅が広くなる。これに対し、斜面ベクトル図(c)では、傾斜角が大きい部分は彩度が高く、傾斜方向が色相で区別されるため、推定される断層の幅がシャープになる。

環状構造の抽出にも斜面ベクトル図は有効である。第7図に十和田湖周辺の傾斜量図と斜面ベクトル図が、第8図にその立体視対が示してある。第7図の傾斜量図と斜面ベクトル図を比較すると、傾斜量図は環状構造を形成している急峻な傾斜面の連続をよく表現している。しかし、環状構造の内側が陥没しているか隆起しているかの判断は難しい。斜面ベクトル図でも、傾斜の急峻な部分は彩度が大きいため環状構造は抽出される。さらに、斜面ベクトル図では、傾斜の方向がわかるので、陥没構造と隆起構造の識別が可能となる。また、斜面ベクトル図を立体視することで陥没構造と隆起構造をより容易に認識できる。

5. まとめ

斜面ベクトル図とその立体視対を作成した結果、以下のことがわかった。

- (1) ウルフ網とHSI円錐カラーモデルの底面を対応させて斜面ベクトルを色で表し、これを地図として表現すると、傾斜方向、傾斜量、地形の変化を同時に表

a 陰影図（光源：北）

b 陰影図（光源：南東）

c 傾斜方位図

d 傾斜量図

e 傾斜ベクトル図

第4図 万年山周辺の地形解析図（東西：約23.3km，南北：約18.5km）

第7図 十和田湖周辺の傾斜量図（左）と傾斜ベクトル図（右）（東西約21.2km，南北約27.8km）

第8図 十和田湖周辺の立体視対（東西約21.2km，南北約27.8km）

現できる。この図を斜面ベクトル図と名づけた。

- (2) 斜面ベクトル図を，地形が立体視できるように立体視対として表現すると，断層帯などの特徴的地形がより容易に抽出できる。

文 献

- 羽坂俊一・渡辺 寧・池田国昭 (1991) 地形数値データを基にしたリニアメントの抽出—2万5千分の1地形図「余市岳」での応用例—。地質調査所月報，vol. 42，no. 1，pp. 11-17.
- Hobbs, W. H. (1904) Lineaments of Atlantic Border Region. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, vol. 15, pp. 483-506.
- 井上大榮・水落幸広・桜田裕之 (1992) リニアメントの断裂系としての特性とその評価。応用地質，vol. 33，no. 3，pp. 25-34.
- 岩橋純子 (1992) デジタルフィルタを用いた数値地形モデルの地形解析。情報地質，vol. 3，no. 1，pp. 31-37.
- 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，vol. 11，no. 1，pp. 11-24.
- 町田 洋・太田陽子・河名俊男・森脇 広・長岡信治 (2001) 日本の地形7九州・南西諸島。東京大学出版会，355p.
- 大地正高・駒井二郎・新井勝男・藤岡洋介・徳尾貴昭・大谷健二 (1987) 衛星MSSデータからのリニアメント自動抽出とその地質学的評価。鉱山地質，vol. 37，no. 2，pp. 99-108.
- 田中耕平・幾志新吉・熊谷貞治 (1985) 三宅島の傾斜分布図。国立防災科学技術センター研究速報，no. 69，pp. 7-27.

要 旨

特徴的地形抽出のための斜面ベクトルのカラー表示とその立体視

：中村 貴子・正路 徹也

傾斜面の法線ベクトル（すなわち，斜面ベクトル）をHSI円錐カラーモデルの底面に描いたウルフ網上の点に対応させることにより，斜面ベクトルは地図上の一点に色で表示される。したがって，傾斜方向と傾斜量の空間的分布が同時に表現される。この図は，単独で傾斜方向，傾斜量，地形の変化を表現することが可能で，断層やその他の線形構造，環状構造などの特徴的地形の抽出に適している。また，斜面ベクトル図で着色した地形表面の立体視対を作成すると，特徴的地形の抽出がさらに容易になる。

キーワード：斜面ベクトル，ウルフ網，HSI円錐カラーモデル，立体視対