

航空レーザ計測結果の可視化 —赤色立体地図作成法とその発展—



千葉 達朗¹ 鈴木 雄介¹

1. はじめに

有珠山は北海道南西部に位置する活火山である（図1）。明治以降だけでも1910年、1943～45年、1977～78年、2000年とたびたび噴火を繰り返している。この火山のマグマはデイサイト質～流紋岩質で粘性が高く、溶岩ドームを形成する性質がある。有珠山の山頂にある大有珠や小有珠をはじめ、山麓の四十三山や昭和新山のほか東丸山や金毘羅山など多数の溶岩ドーム地形が認められる。

2000年の噴火は、有珠山北西山麓でのマグマ水蒸気爆発ではじまった（写真1）。数ヶ月の間に多数の火口や断層を形成しながら、最終的に比高70mの潜在ドームが形成された。この間の地殻変動量については、非常に早い段階で航空レーザ計測が行なわれ、3月31日の噴火寸前と4月26日の比較から、約 $4 \times 10^7 \text{ m}^3$ と測定されている¹⁾。

航空レーザ計測技術は、ほぼ真上方向から高密度の計測を行なうので、地表を覆う樹木を識別除去し地表の微地形を明らかにすることができる²⁾。有珠山とその周辺にある、溶岩ドーム群は深い樹林に覆われているものが多い。航空レーザ計測で微地形を明らかにできれば、活動履歴調査にとって非常に重要な情報となる。そこで、北海道立地質研究所とアジア航測、では、噴火が完全に終息した2005年5月に、有珠山全域の詳細な地形判読を目的として、航空レーザ計測と赤色立体地図を作成した³⁾。その後、道立地質研究所は

赤色立体地図の判読をもとに、形成年代の不明な溶岩ドームの現地調査や活断層のトレンチ発掘調査を実施した⁴⁾。

航空レーザ計測データを用いた地形判読には、地形の可視化技術が重要な役割を果たしている。本論文では、有珠山の地形可視化を行う過程で明らかになった、赤色立体地図法

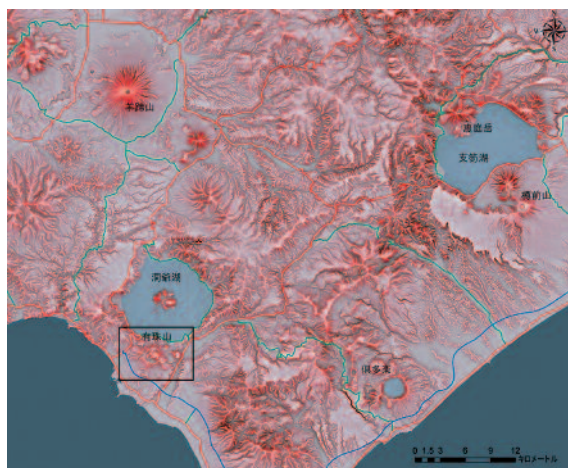


図1 有珠山レーザ計測範囲位置図（黒枠部分）
国土地理院発行の数値地図50m（標高）より作成



写真1 2000年3月31日のマグマ水蒸気噴火の状況
西南西方向よりアジア航測撮影

¹ アジア航測株式会社

の問題とその改良について述べる。また、従来の地形可視化の手法とも比較し、問題を整理して示したい。

なお、赤色立体地図の作成手法は2002年に千葉が考案し、2003年に特許を出願、2005年に国内で特許公開となった技術である⁵⁾。作成原理の基本的な部分は応用測量の2004年の論文⁶⁾で公表したが、2007年の地図の論文⁷⁾でより詳しい作成手順を示し事例も加えている。

2. 有珠山2000年噴火による地形の航空レーザ計測と可視化

測定範囲は、壮瞥町役場と有珠インターを対角線とする約9km×6kmの矩形で、測定面積は約50km²である（図2）。

航空レーザ計測は2005年5月の雪解け直後の条件のよい時期を選んで行なった。測定条

件を表1に示す。土木研究所による2000年4月の航空レーザ計測の測定条件を比較のために示す¹⁾。

3. 地形表現手法

地形表現には様々な手法があるが、航空レーザ計測などのように、DEMデータから作成する場合は、等高線図・陰影図・斜度図・高度段彩図などが使用されることが多い。

ここでは、図2の有珠山全体赤色立体地図

表1 航空レーザ計測条件

	土木研究所 ¹⁾	本測定 ³⁾
測定時期	2000年4月	2005年5月
対地高度	ヘリコプター 600-900m	固定翼 800-1500m
計測速度	60-90km/h	216km/h
スキャン角度	最大±11.3°	最大±18°
パルス頻度	2万5千回/s	7万回/s
ミラー周波数	25Hz	20Hz

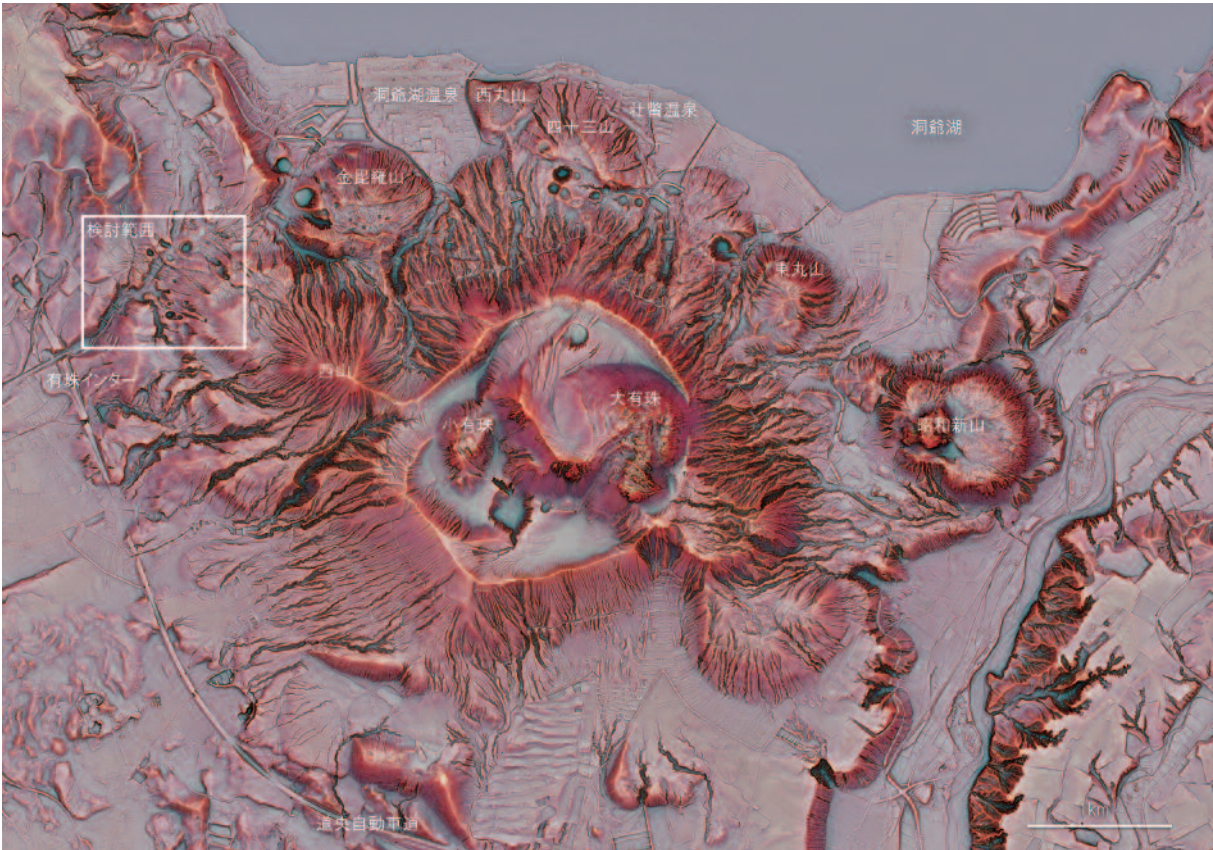


図2 有珠山周辺レーザ計測範囲全体赤色立体地図
詳細地形表現検討範囲を白四角で示した

の左側にある白枠の範囲（約 1km^2 ）のデータを用いて地形表現手法の比較を行なう。この地域は、2000年の有珠山噴火が開始した際に形成されたN1-N3火口をはじめとする多数の火口群と、潜在ドームの隆起に伴って形成された小断層地形が重なって発達する、世界的にも稀な、非常に複雑な地形の地域である（写真2、写真3）。

3.1 等高線図による表現

当該地区のDEMデータから2m間隔の等高線を発生させて表現したのが図3である。

図上での等高線同士の距離は（1）式で求められる⁵⁾。図面縮尺を $1/2,500$ としたときの傾斜 45° の斜面を示す等高線同士の距離は、 0.8mm となる。この場合は、断層崖を追跡するのはそう難しいことではない。ある程度の微地形も把握できる。ところが傾斜 5° の場合は 8mm と隙間が広くなるため、崖の追跡はより難しくなる。等高線による地形表現の場合、緩斜面では等高線の隙間の部分の微地形を可視化できないという問題がある。



写真2 傾動変形した国道230号（2000年11月2日千葉撮影、位置は図3に示す）写真左側が北方向で、潜在ドームの隆起中心のある方向



写真3 潜在ドームの隆起により階段状に変形した国道230号線（2000年11月2日千葉撮影、位置は図3に示す。立体視可能）

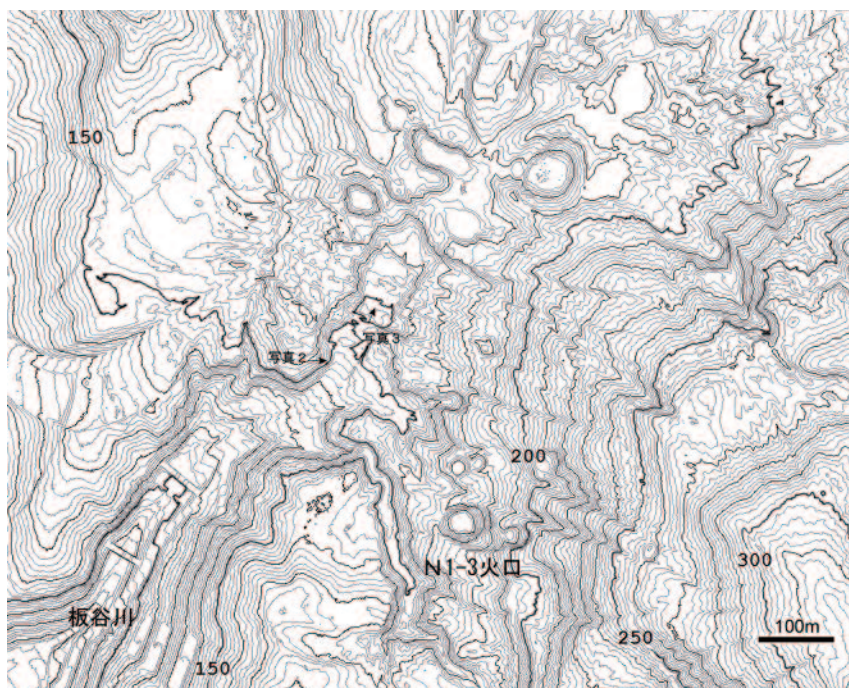


図3 航空レーザ計測1mDEMから発生させた等高線図 等高線間隔2m

$$d = \frac{1000 \cdot h}{a \cdot \tan \theta} \quad \dots\dots\dots (1)$$

d : 図上での等高線間の距離 (mm)

θ : 斜面傾斜 (度)

a : 等高線図の縮尺の分母

h : 等高線間隔 (m)

また、火口などの凹地と山頂などの凸部は、孤立した環状の等高線が描かれ、そのみでは周囲より高いのか低いのかを判断することはできない。ハッチなどを補記すれば可能である。仮に、等高線の緩斜面での表現力を向上させるために、等高線間隔を0.2mに変更した場合、急斜面での等高線同士が接合してしまう。それを避けるには、線を細くするか、あるいは1/500程度の大縮尺にするしかない。航空レーザ計測によるDEMデータの可視化に等高線を使用すると、せっかく得られた多くのデータのごく一部しか表現できない、ということが起こりうる。

3.2 陰影図

等高線以外の地形可視化手法の中で、もっとも多く使用されるのが陰影図である。陰影は、直射日光に照らし出されたようなイメー

ジを作り出す。光源方向のベクトルと地形面の法線ベクトルの余弦の大きさで明るさを決め、立体感を得る表現法である。光源方向に正対する面が最も明るく、角度が大きいほど暗く表現される。光源の方位と高度を設定することにより、さまざまな陰影図ができ、強調される地形はそれぞれ全く異なる。

図4は北東方向からの光源による陰影図で、北西-南東走向に延びる断層地形がよくわかる。一方、図5は南東方向からの光源によるもので、断層の発達傾向や分布が異なるように見える。陰影から微地形を把握するには、複数の画像を総合検討することが必要であることがわかる。

このように、陰影図は強い立体感があるものの、方向依存性が大きい。また、光源方向と見る方向の関係によっては凹凸が反転して見えることもあるので、利用には注意が必要である。

3.3 斜度図

地形面の傾斜の大きさを示したものが斜度図である。地形面の法線ベクトルの垂直成分と定義できる。着目点の周囲8点あるいは4点の高度との差を用いて計算する方法と着目点の右下側4点を用いる方法がある。

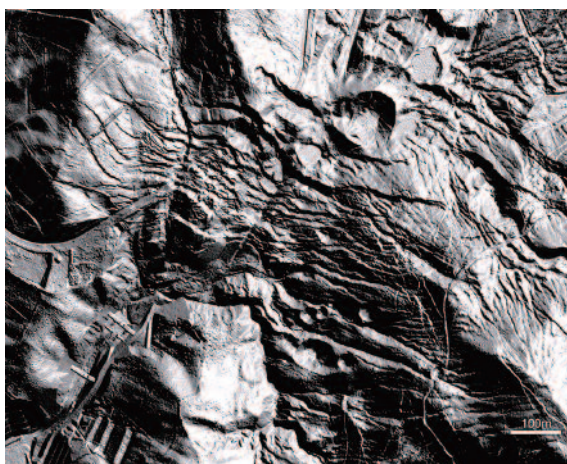


図4 陰影図 (北東光源)

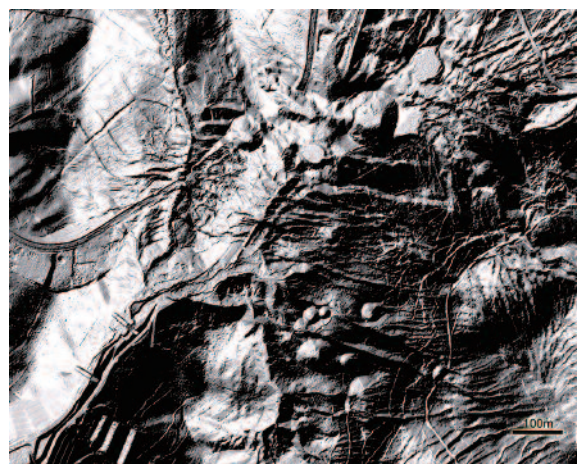


図5 陰影図 (南東光源)

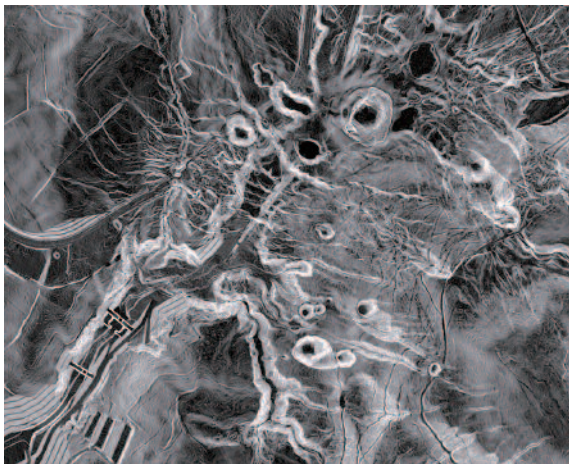


図6 斜度図（急斜面ほど明るい）

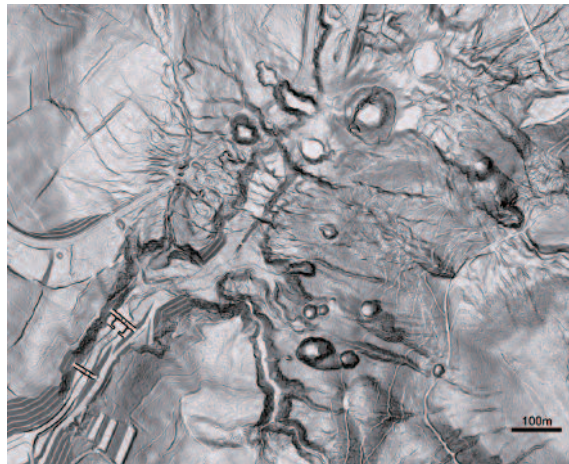


図7 斜度図（急斜面ほど暗い）

斜度図には、傾斜の大きい地点ほど明るく表現したもの（図6）と、傾斜の大きい地点ほど暗く表現したもの（図7）がある。断層地形の場合は図6の表現のほうが見やすく、火口地形は図7のほうが見やすい。斜度図には陰影図のような方向依存性はなく、あらゆる方向の微地形をよく表現できる。しかし、斜度図には斜面で囲まれた部分が周囲と比較して高いのか低いのか、いいかえれば、尾根なのか谷なのかの区別がつかないという問題がある。陰影の光源を垂直上方に設定した場合には、急斜面ほど暗く表現されるので、図7と類似した画像が生成される。

4. 大地形の可視化

航空レーザ計測によるDEMは解像度が高いため、DEMサイズが例えば1mと非常に小さくすることができる。これまでの、地形可視化手法をそのまま用いたのでは、着目点近傍の4点あるいは9点で計算を行なうことになり、どうしても近視眼的な表現となってしまう。そこで、大きなフィルタを用いて、相対的に大きな地形の表現を検討した。以下、横山他による地上開度・地下開度⁸⁾と、千葉他による尾根谷度⁶⁾の検討例を示す。

4.1 地上開度と地下開度

横山他は、ある地点からみた空の立体的な広がりを定量化することを試み、計算負荷を減らすために8方向に限定して地平線の角度を求めて平均するパラメータを提案した⁸⁾。これは、コンピュータグラフィックスでのラジオシティ法と類似した、ある着目点に届く環境光量を求めるものとみなすことができる。このパラメータは、地上開度と命名されたが、着目点を中心とする考慮距離までの地表面について、着目点における天頂から地平線までの角度を8方向測定し平均したものである。たとえば、1mDEMで考慮距離を100mとすれば、サイズ200×200mの大きいフィルタとみなすことができる。従来の地形パラメータと比較して、着目点付近の大地形と微地形の特徴の両方を同時に可視化することが可能なフィルタである。

一方、地下開度は、着目点における鉛直下方にある天底と地表面との角度の最低のものを8方向測定し、平均したものである。別の表現をすれば、地下開度は、あらかじめ地形を反転させて計算した地上開度ということもできる。

地上開度は、尾根部や山頂部などで高い値をとる。有珠山のデータから考慮して半径

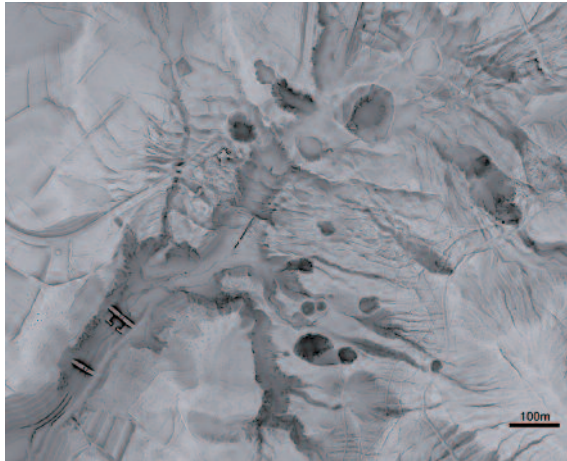


図8 地上開度図（高いほど明るい）
谷や火口の部分が暗くなりすぎて不鮮明

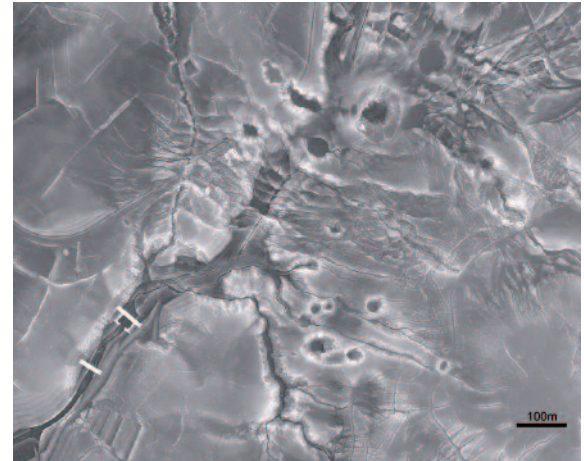


図9 地下開度図（高いほど暗い）
谷筋は明瞭だが尾根部が断片的表現

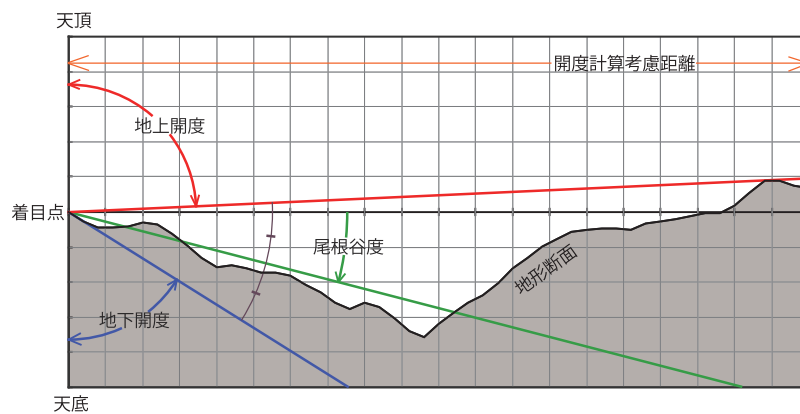


図10 地形断面上での地上開度・地下開度・尾根谷度の関係概念図*（計算考慮範囲：2000m）
*厳密には地上開度・地下開度はこの計算を8方向の断面について行い平均した値である

500mの地上開度図を作成した（図8）。その結果尾根が強調された画像が生成され、断層による変位地形の連続性はわかりやすいが、谷や窪地が一様に暗くなり、その部分の地形を判読しづらいという問題があった。地下開度は谷部や窪地などで高い値をとる。有珠山のデータから考慮半径500mの地下開度図（明度反転）を作成した（図9）。これを見ると、谷が強調されガリーなどは明瞭であるが、尾根は断片的に明るくなりすぎ、連続性がわかりにくい結果となった。

4.2 尾根谷度

千葉他は、地上開度と地下開度の関係を検討し、強い逆相関関係に着目し、尾根谷度と

してまとめることを提案した⁶⁾（2式）。

$$\text{尾根谷度} = \frac{\text{地上開度} - \text{地下開度}}{2} \quad \dots\dots (2)$$

尾根谷度は、尾根部でプラス、谷部でマイナス、平野や広い平面状斜面では0の値を取ることになる。尾根谷度の値は、着目点から考慮距離までの地形断面線に引ける上下2つの接線の角の2等分線と水平線とのなす角度に相当する（図10）。

模式的な地形断面における尾根谷度の値を概念的に示したものを図11に示す。このように、尾根と谷を際立たせるが、平坦面と平滑な斜面は同じ灰色で表現される。尾根谷度の

値と明度を比例させた尾根谷度画像を作成した（図12）。尾根は明るく、谷は暗く表現される。平滑な斜面は平坦面も斜面も同じ灰色で表現される。

5. 複数の画像の合成による地形可視化

斜度図（図7）は方向依存性もなく、微地形もよく表現できているが、尾根と谷の区別がつかない点が問題であった。この問題を解決するためには、尾根と谷を指標化した画像と合成すれば、わかりやすい地形表現手法に発展させることができると考えられる。

この問題については、これまでに3つの解決手法が提案されている。（1）斜度図を赤の彩度に割り当て、図12の尾根谷度画像と合成する「赤色立体地図」⁶⁾。（2）斜度図を明度に割り当て、地形断面の長波長成分とオリジナルとの差を陰陽成分として求め、谷を青く尾根を赤くなるように着色する「陰陽図」⁹⁾。（3）斜度図を明度に割り当て、高度段彩図と合成する「ELSAMAP」¹⁰⁾である。

5.1 赤色立体地図

赤色立体地図は、大地形も表現可能な地上開度と地下開度から「尾根谷度」を求め、これを明度に比例させた画像に、微地形である斜面の傾斜を赤の彩度に割り当てて合成する方法である⁶⁾。図7の斜度図と図12の尾根谷度図を合成し赤色立体地図を作成した（図13）。

赤色立体地図には、北西南東方向に併走する断層崖や水蒸気爆発の火口がわかりやすく立体的に表現されている。特に破壊された国道230号線を横断する地溝もわかりやすい。A点付近にあるクレーターも明瞭である。一方で、火口の底が深いほど暗く表現されているために、場所によっては火口底の地形がほとんど判読できない結果となった。

この画像を作成するために使用した、赤色

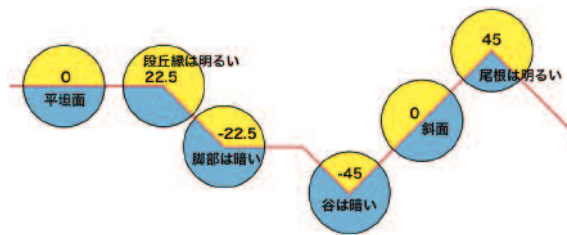


図11 地形断面と尾根谷度の関係概念図

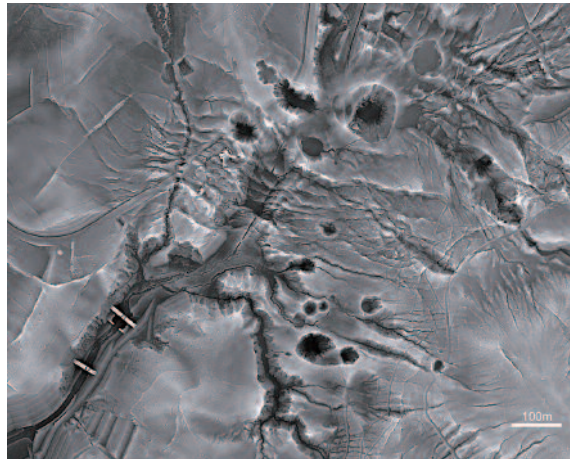


図12 尾根谷度図 計算考慮範囲500m
点状する火口と小クレーターや発達する断層崖やガリーがバランスよく可視化できている。

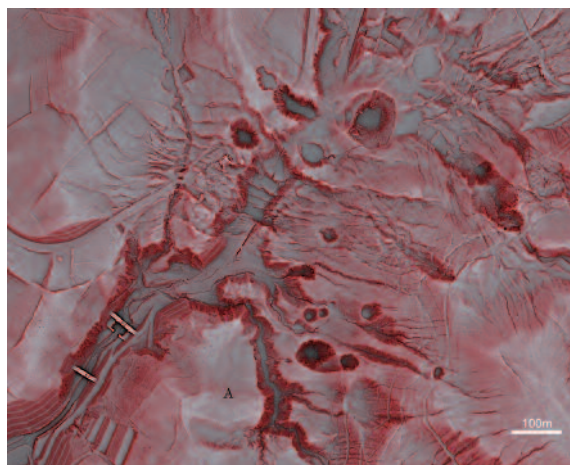


図13 赤色立体地図
計算考慮距離500m複雑な地形が立体的に表現されている⁷⁾

立体地図の色を決定するためのダイヤグラムを図14に示す。傾斜の最大値と尾根谷度の最大値と最小値は、作成する地域の特性に合わせて変化させるのだが、尾根地形が多ければ明るく、谷地形が多い場合は暗くなるという点は避けられない。また、有珠山全体に適用してみると急斜面が多いために赤黒くなりす

ぎ問題となった。

5.2 赤色立体地図の問題点

2002年に発案した赤色立体地図は、数年間の試作の過程でいくつかの問題点が明らかになってきた。以下に、問題点を挙げる。

- (1) 谷が暗くなりすぎる。尾根谷度を明度に直接割り当てているので、深い谷は非常に暗く表現されてしまう。
- (2) 高度が読み取れない。これは、他の手法にも共通する問題である。
- (3) 水系が追跡しにくい。谷筋が暗いためか、たどりにくいことがある。

6. 赤色立体地図の改良

有珠山の航空レーザ計測結果を赤色立体地図で表現するために、地形特性を考慮していくつかの新たな改良を加えた。以下に挙げる。

6.1 地上開度と地下開度の色相対応

深いガリーや火口などの場合、尾根谷開度の値が非常に小さくなることもある。その場合、赤色立体地図は、明度と尾根谷開度が比例しているので、極端に暗くなり、谷が認識できなくなるという問題があった。

そこで、地上開度と地下開度から尾根谷度

を求めて明度として利用するだけでなく、地上開度と地下開度の値を相殺しないで生かした形で、色相と対応させる画像を作成した。図15の画像は、地下開度が高い谷や窪地をシアン色に、地上開度の大きい尾根や頂上を赤色に調整した画像である。地上開度も小さい谷斜面等は緑色を呈している。

この地上開度－地下開度調整画像を、従来の赤色立体地図（図13）に重ねあわせ合成することによって、暗くなりすぎた谷の表現をシアンがかった色に調整改善し、谷が暗くて見にくいという問題点を改善した（図16）。暗いシアン色は、深いという錯覚をもたらす

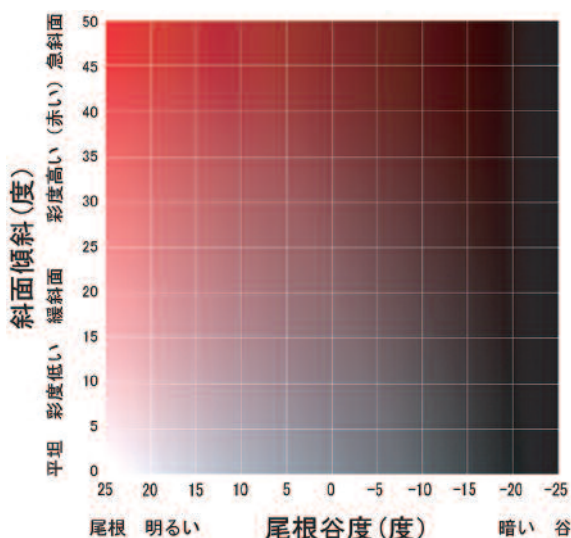


図14 赤色立体地図作成用ダイアグラムの一例⁶⁾

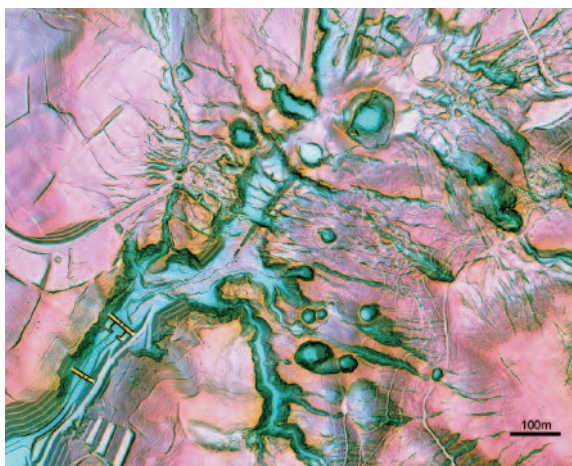


図15 地上開度－地下開度調整画像

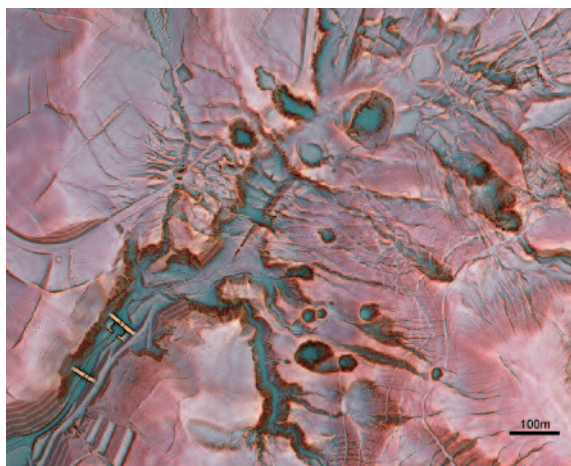


図16 調整後の赤色立体地図

ようである。

6.2 等高線との合成

赤色立体地図は、地形の微分値である斜度と凹凸情報である尾根谷度の合成のみで作成されており、高度に関する情報や、斜面方位に関する情報を保持していない。そのため、斜面傾斜の急な部分が高く見えたり、広く明るい尾根を持つ場所が高く見えたり、という指摘がたびたびあった。対応策としては、高度段彩や等高線画像を重ねる方法が考えられる。

図17に等高線画像との重ね合わせの例を示す。等高線間隔と赤色立体地図の濃度のバランスを調整することで、等高線の長所と赤色立体地図の長所を併せ持った地形表現も可能である。等高線が見えるように赤色立体地図は淡い色に調整した場合、1mDEMでようやく表現できるような微地形は表現できなくなる。例えば、図17のA地点付近のクレター

は不明瞭である。

6.3 地形を裏から見る

赤色立体地図では、彩度と斜度を比例させて色を決めている。係数やガンマ値をうまく調整すると、遠方から見たときの混色によって生じる彩度の変化を、傾斜とその平均の関係に調和させることができる。この強調の度合いによっては谷部分の連続性がわかりにくく、追跡しにくいことがあるという問題があった。

そこで、はじめに一定の値から標高値を減ずることによって、地形を反転させておき、その後地上開度と地下開度を計算し、赤色立体地図作成処理を行なうという解決策を提案する。この処理で谷を明るく強調した赤色立体地図を作成することができる。立体感は空中写真を逆実体視した場合と類似しているが、明度も反転しているので逆実体視よりも見やすい。たとえば、地球の内側から

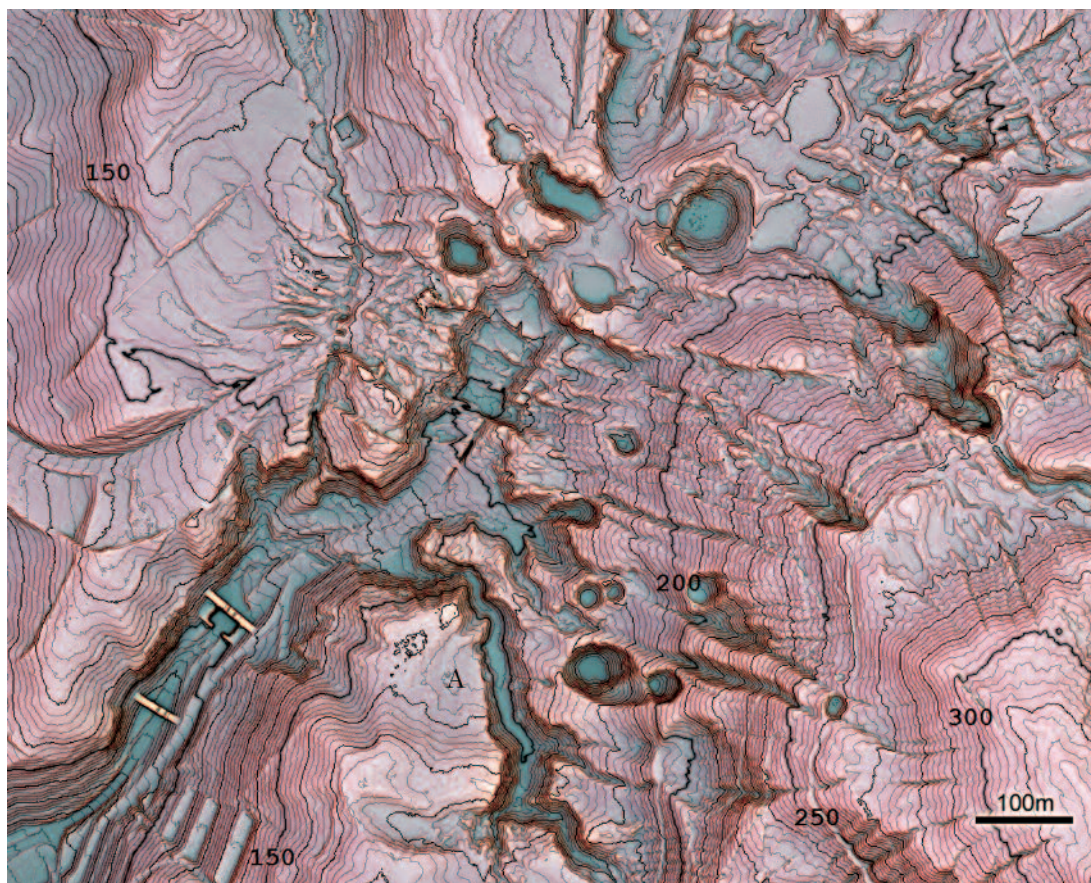


図17 微調整後の赤色立体地図と等高線画像の重ね合わせ

地表を見上げているようなイメージである。谷の部分が、明るく表現されるので、水系の判読や追跡、砂防施設の管理等には有効な手法と考えられる（図18）。

7. まとめと今後の課題

有珠山の航空レーザ計測による1mDEMを判読するために作成した赤色立体地図を事例として、航空レーザ計測データの可視化の手法について比較検討を行なった。等高線図や陰影図・斜度図をはじめとする従来の地形可視化手法と、サイズの大きいフィルタである地上開度・地下開度・尾根谷度の手法を整理した。その後、これらの画像を重ね合わせたものとして赤色立体地図を作成し、その画像の問題点を整理した。さらに、その問題点を解決するために行なった改良や重ねあわせ表現の考え方を示し、問題点を解決させた画像

を紹介した。

赤色以外の色、たとえば緑色について安定した立体感を出すことについては、既往の地図の色空間との関係からも急務と考えている。しかし、地形の特徴や重ね合わせの色によって様々な問題があり、まだ検討が必要と考えている。

最近、地図は印刷して使うものから、ディスプレイ上でスクロールしたりズームアップしたりしてみるものに急速に変わりつつある。背景に赤色立体地図を適用すれば、回転させても立体感は損なわないので応用範囲がさらに広がるのではないかと、ユーザーが自由に地形可視化手法を組み合わせ、自在に地形を判読できるように、今後も地形可視化手法の検討をすすめてゆきたい。

■参考文献

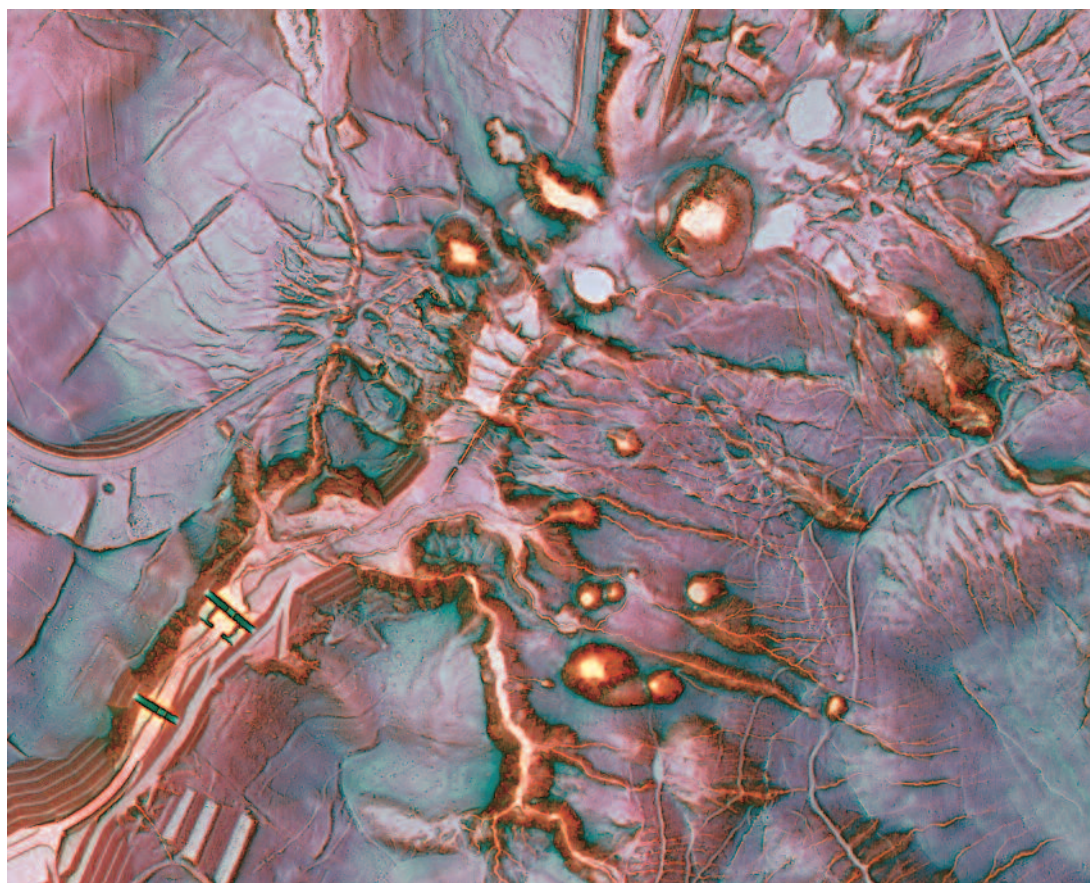


図18 反転赤色立体地図

- 1) 仲野公章・清水孝一・山越隆雄・葛西勝栄・中村剛・秋山幸秀・高貫潤一. 2000年有珠山噴火時におけるヘリコプター搭載レーザースキャナーによる地形変化測定. 砂防学会誌：3,8-94. 2001
- 2) 航空レーザ測量WG.『航空レーザ測量ハンドブック』. 日本測量調査技術協会、2004.
- 3) 石丸聡・千葉達朗・大津直・廣瀬亘・田近淳・岡崎紀俊. 有珠火山周辺の火口・断層地形－赤色立体地図による詳細地形判読－. 日本地球惑星科学連合2006年大会要旨：V101-P003. 2006.
- 4) 北海道立地質研究所. 有珠山の地殻変動予測に関する研究. 北海道立地質研究所調査研究報告35：2007
- 5) 「視覚化処理システム、視覚化処理方法、視覚化処理プログラム」特許公開2005-174354
- 6) 千葉達朗・鈴木雄介. 赤色立体地図－新しい地形表現手法－. 応用測量論文集 15：81-89. 2004.
- 7) 千葉達朗・鈴木雄介・平松孝晋. 地形表現手法の諸問題と赤色立体地図. 地図 45：27-36. 2007.
- 8) 横山隆三・白沢道生・菊池祐. 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. 1999
- 9) 秋山幸秀. Air-borne LiDARによる火山調査の応用事例. 先端測量技術：92-102. 2006
- 10) 佐々木寿・向山栄. 地形判読を支援するELSAMAPの開発. 先端測量技術：93,8-16. 2007

発表日：2007年6月22日

(発表者)

千葉 達朗 (ちば たつろう)

所属：アジア航測株式会社 事業推進本部
プロジェクト推進室

日本大学文理学部地球システム科学科非常
勤講師

おもに火山地質調査、火山防災検討業務、
活断層調査に従事

2002年に赤色立体地図作成法を発明、その
後は地形可視化の研究も進めている

E-mail:ta.chiba@ajiko.co.jp

(共著)

鈴木雄介：アジア航測株式会社 事業推進
本部防災地質部