

ステレオ等高線地形解析図による高解像度 DEM の可視化

Visualization of high-resolution DEMs using stereo contour and relief maps

粟田泰夫¹

Yasuo Awata¹

¹ 活断層・火山研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Institute of Earthquake and Volcano Geology, awata-y@aist.go.jp)

Abstract: The stereo contour and relief map, a new graphical technique in manipulating digital elevation model (DEM) is developed in order to visualize topography in detail. The feature of the map is the application of traditional and mature contour drawing to the digital mapping based on high-resolution DEMs. The 2-D contour and relief map consists of the fine contour image and the background relief map composed of commonly used DEM analysis images: elevation tints, hillshade and slope images. This 2-D image is texture-mapped to the surface of DEM and processed into a 3-D anaglyph. It is recommended to create a series of stereo contour and relief map with different resolutions of contour lines and vertical exaggerations in order to depict the regional topography of various terrain types and scales. The virtual stereoscopic 3-D images of the maps enable us to efficiently interpret the geomorphological processes, especially the sedimentation, erosion and tectonic processes after middle Pleistocene, on various areas from alluvial plains to high-mountains.

キーワード: DEM, ステレオ地形図, 等高線図, レリーフマップ, アナグリフ, 地形判読

Keywords: DEM, stereo map, contour map, relief map, anaglyph, geomorphological interpretation

1. はじめに

航空レーザ計測や衛星観測によって取得される高解像度の数値標高モデル (DEM) の拡充が急速に進んでおり, 精密地形図の作成や, 地すべり・砂防・河川・海岸・火山・変動地形および森林環境などの調査・研究に広く利用されている (例えば, 空中計測・マッピング部会レーザワーキング監修, 2015)。

高解像度 DEM を利用した地形判読においては, GIS ソフトウェアの地形解析機能と可視化機能によって作成した等高線図・標高段彩図・陰影起伏図・傾斜量図および傾斜方位図などの汎用的な地形解析図, あるいは標高段彩図と陰影起伏図の合成画像を使用することが一般的である (例えば, 日本地図センター編, 1998; Arrowsmith, 2006; Seijmonsbergen, 2013)。これらに加えて, 我が国においては, DEM から様々な微地形表現図を生成して地形判読に用いる手法が開発されてきた (空中計測・マッピング部会レーザワーキング監修, 2015)。これらの微地形表現図の多くは, 地形・地質の表現に優れた傾斜量図 (神谷ほか, 2000; 井上・伊計, 2001) を基本として, 地形の凹凸を表現する陰影起伏図, 地上開度図, 地下開度図および曲率図や, 標高分布を表現する標高段彩図などをカラー合成して擬似的立体感を与えた地形図画像である (千葉・沼田, 2003; 千葉ほか, 2007; 秋山, 2006; 向山・佐々木, 2007; 鈴木ほか, 2012; 戸田, 2012; 千田, 2014 など, 第1表)。また,

微地形表現図をステレオ画像に加工して立体視判読することも行われており (後藤・中田, 2011; 岩崎ほか, 2011; 泉ほか, 2011; 後藤・杉戸, 2012, 横山, 2013 など), イタリアでは2011年に (Tarqini *et al.*, 2012), また地理院地図では2017年3月にそれぞれ DEM から作成した全国土の陰影起伏図のアナグリフ画像が web 上で公開されている。しかし, これらの微地形表現図のほとんどは, 精密な標高値を示す地形量を持っていないことから, 地形の立体形状を詳細かつ定量的に表示することができず, とりわけ高低差の小さい段丘面や低地の地形表現には適していない。

高解像度の航空レーザ測量が普及し始めた当初には, DEM から作成した精密等高線図が微地形の判読に有効性であることが確認された (小野田ほか, 2002; 八木ほか, 2003 など)。しかし, その後に開発されてきた微地形表現図では, 従来の印刷地形図の読図において不可欠であった等高線 (鈴木, 1997) は一部で補助的に用いられているに過ぎない。微地形表現図において精密等高線が利用されない主な理由は, 一定間隔の等高線によって急傾斜の山地から緩傾斜の低地までを連続して詳細に表現することが困難であること (佐々木・向山, 2007), および精密等高線を描画するためには大縮尺図を作成する必要があり, その判読には熟練とともに多大な労力を要すること (千葉, 2014) とされている。

高解像度 DEM から作成する微地形表現図に関するこれらの課題を解決するために、筆者は、複数の汎用的な地形解析図を合成した背景に精密等高線図を上書きし、これを立体視画像に加工したステレオ等高線地形解析図(粟田, 2015)を開発した。等高線間隔と画素サイズおよび過高感が異なる複数のステレオ等高線地形解析図を表示して立体視することにより、緩傾斜の低地から急傾斜の山地までの詳細地形を効率的に判読することができる。本報告では、ステレオ等高線地形解析図の具体的な作成手法とその適用事例について述べる。

2. ステレオ等高線地形解析図の作成方法

ステレオ等高線地形解析図の作成手法は、1) 2次元の微地形表現図としても使用できる高品質の等高線地形解析図を作成し、2) それを DEM 上にテクスチャマッピングしてステレオ画像に加工する2段階からなる(第1図)。作成する2次元画像およびステレオ画像は、いずれも汎用のディスプレイ上に表示して使用することを主な出力方法とするラスタ画像である。

ここでは、岐阜県中津川市の坂下付近を例として図の作成手法を述べる(第2~6図)。坂下付近では、木曾川の西岸に数段の河岸段丘が発達し、それらは活断層である阿寺断層によって上下方向と横ずれ方向に累積的に変位させられている(第3図A;佃ほか, 1993など)。また東岸は急峻な山地斜面となっている。このため、緩傾斜地の複雑な地形面群と山地斜面の尾根・谷という、異なる地形種の詳細表現手法の検討に適している。使用したDEMは、国土地理院による格子間隔約5m(0.2秒)の基盤地図情報数値標高モデル(5mメッシュ、以下ではFG-DEM5と略称する)である。

2.1 等高線地形解析図の作成

2次元画像としての等高線地形解析図は、不連続データからなる精密等高線図を、連続データからなる標高段彩図、傾斜量図および陰影起伏図をカラー合成した図を背景に上書きしたものである(第1図)。

2.1.1 個別の地形解析図の作成

a) 等高線図

等高線図は、同じ標高地点を連ねた等値線を一定の標高間隔で表示した図であり、その読図によって地形の傾斜量、傾斜方位および曲率とそれらの変化をも同時に知ることができる、伝統的かつ優れた地形表現手法である。

等高線図の作成にあたっては、DEMの空間解像度と対象とする地形の地形種および規模に応じて最適な等高線間隔を選択するとともに、ラスタ画像とし

て等高線が表示できるように地形の傾斜に応じて画素サイズ(地上解像度)を調整する必要がある(第2図)。例えば、画素サイズがDEMの格子間隔と同じ画像では、格子間隔と同じ標高間隔の等高線は傾斜約27度以上の斜面においては重なり合って描き分けできなくなる。したがって、急斜面を精密等高線で表示するには画素サイズを小さくして空間解像度を大きくする必要がある。一方、急傾斜地の表示に適した画素サイズが小さな図では、緩傾斜地では等高線がまばらになりすぎて読図に適さないこともある。

本報告では、等高線の表示間隔の混み具合を以下の式で求められる等高線表示指数(Cd)と定義して、等高線図の適切な仕様を検討する際の目安として用いる。ここで、Ciは等高線間隔、Psは画素サイズである。

$$Cd = Ci / Ps$$

第2図では、斜面の傾斜および等高線の表示間隔(ピクセル)とCd値の関係を表している。ラスタ画像として等高線を描画するには、等高線間の隙間を含めて最小で2ピクセルの図上間隔が必要であり、ラスタ画像の行列方向に斜交する方向においては最小で3ピクセル程度が必要となる。等高線の屈曲やディスプレイ上での視認性を考慮すると、3~4ピクセル以上の間隔が必要と言える。一方、等高線間隔が数10ピクセルも開いてしまうと、等高線がまばらすぎて地形判読には適さない。一般的な印刷地形図の例では、地図情報レベル1000~5000の数値地形図でCd=8または10、国土地理院の2万5千分の1地形図ではCd=5、1万分1地形図では山地を除いてCd=2である(第2表)。傾斜45°程度までの斜面を等高線で表示するためには、Cd=2から4程度以上が必要となるが、この表示では、扇状地より下流の沖積低地においては等高線の表示間隔が数10ピクセル以上にひろがってしまい判読が困難となる。一方、Cd=0.4程度の等高線図では、傾斜10度前後以上の斜面では等高線が重なってしまうものの、扇状地の全域を適切な等高線密度で表示できることになる(第2図)。

従来の印刷地形図では、緩傾斜地を等高線で描画するために、主曲線よりも等高線間隔が小さい補助曲線が用いられてきた。DEMから作成するデジタル地形図においても補助曲線が用いられることはある。しかし、デジタル地形図では等高線間隔が異なる複数の地形図をセットとして作成することも容易にできることから、山地を含む対象地域全体を俯瞰するための等高線間隔が大きい図と、平地の微地形を詳細に描画するための等高線間隔が小さい図を併せて作成することが、地形判読のためには効率的と考えられる。

第3図A, B, Cは、いずれも画素サイズ2.5m,

すなわちと DEM の格子間隔の 2 倍のスケールで等高線を描いた坂下付近の画像であり、等高線間隔と画素サイズの違いによる等高線図の描画特性を示している。等高線間隔 1 m で $Cd=0.8$ の第 3 図 A では、木曾川西岸の段丘面群は詳細に描画できているが、傾斜 45° 程度になる東岸の山地斜面は主要な尾根・谷線を残して等高線で塗りつぶされている。一方、等高線間隔 5 m で $Cd=4$ の第 3 図 C では、東岸の山地斜面は詳細に表現されているが、西岸の段丘面群は大まかな段丘面の区分と分布域が読み取れるだけである。第 3 図 B では、2 m 間隔 $Cd=1.6$ の等高線によって西岸の段丘面が区分できる。東岸の急斜面では一部で等高線の主曲線が重なっているが、そのような場合でも 10 m 間隔で色を変えて表示した計曲線によって地形の概略を読み取ることができる。なお、2 m 間隔の等高線で東岸の急斜面を詳細に表現するためには、第 3 図 C と同じく $Cd=4$ となるように画素サイズを小さくして、すなわち画像のスケールを大きくして表示する必要がある (第 3 図 D)。

GIS ソフトウェアで作成される一般的な地形図では、等高線はベクトルデータとして扱われることが多い。しかし、等高線をラスターデータとすることで、適切な Cd 値の選択が直感的にできるとともに、ディスプレイ上で画像を拡大・縮小しても画質の変化が小さいとの利点がある。

b) 標高段彩図

標高段彩図は、色相の連続的な変化を標高値に割り当てて表示した図であり、大地形の標高分布を表現することに適している。しかし、一般的に使用される青～緑～赤に連続的に変化する色相環だけでは標高に対する色の変化が小さく、細かい標高差や地形を表現することができない。微地形を描画するには標高に対する色の変化を大きくする必要があり、色相環を繰り返し使用すること、あるいは連続的な色相環に明暗の縞模様からなるモアレ模様を組み込むこと (第 4 図 A) などの手法がある。また、等高線がまばらにしか表示されない極緩傾斜地においては、色彩の変化を大きくすることで等高線間隔よりも小さい高度変化を可視化することもできる。第 4 図 A では、このような微地形強調パターンによる標高段彩によって、木曾川西岸に 7 段の河岸段丘と阿寺断層の上下変位による変動地形が詳細に表示されている。

なお、ステレオ画像としてアナグリフ方式を用いる場合は、赤およびシアンなどのアナグリフ処理に適さない色の使用を避けるとともに、淡い色彩を使用する必要がある。

c) 傾斜量図

傾斜量図は、DEM のセル毎に隣接するセルの標高を最も良く説明する平面の傾斜量を計算し、その量

の大きい画素に低い明度、小さい画素に高い明度の色を与えて表示した図である。尾根・谷線や傾斜の変換点、低崖などの地形や、地質による地表の肌理の表現に適している (神谷, 2000; 井上・伊計, 2001)。また、等高線では表示しきれない局所的な地形の凹凸も表現できる。表示にグレースケールを用いることで、直感的に傾斜量の大小が把握しやすく、標高段彩図とのカラー合成に適した図になる。一般に、緩傾斜側の色の変化を大きくすることで緩斜面の表現に、急傾斜側の色の変化を大きくすることで尾根・谷線の表現に適した図となる。しかし、傾斜量図は標高や凹凸に関するデータをもたないことから、2 次元地形図での判読においては、地形の凹凸を読むことが困難となる場合がある。

第 4 図 B は、緩傾斜地の肌理を強調する設定の傾斜量図であり、段丘面上の圃場の法面が詳細に描画されている。また、段丘崖や低断層崖、山地の尾根・谷線も容易に判読することができる。

なお、本地形解析図において傾斜量図を用いる目的は、単に地形面の傾斜量分布を知るだけではなく、局所的な傾斜量の変化によって地表の肌理を詳細に描き出し、等高線図の背景として用いることにある。したがって、地表の肌理を表現することができる他の地形解析図、例えば陰影起伏図、曲率図、地上開度図、地下開度図、ラプラシアン図およびそれらの複数の図を合成して用いることもできる。

d) 陰影起伏図

陰影起伏図は、仮想の光源の方向と地表面の法線がなす角度に基づいて、光源の方向に向いた地表を明るい色、反対側に向いた地表を暗い色で表示した図であり、2 次元画像において地形図に強い凹凸感を与えることができる。その効果は光源の方向に依存する強い指向性を持ち、光源方位を北西にすることで自然な立体感が得られる。この図も、グレースケールを用いることで標高段彩図とのカラー合成に適したものとなる。

第 4 図 C は、光源方位を北西にするとともに地表の起伏を誇張して描いた陰影起伏図であり、段丘面上の圃場の法面や段丘崖が強い陰影で浮かび上がっている。一方、光源の方向に向かって延びる低断層崖の陰影は明瞭でない。東岸の山地では、光源の方向に向いた斜面を除いて陰影による尾根と谷の強い立体感が得られている。とくに、図の北東部に分布する尾根の南南西側の斜面は斜め横から照らされる配置となり、斜面に刻まれた小規模な尾根と谷の細かい陰影が浮き出されている。

第 4 図 D は、北西および東の 2 方位からの光源による多重光源陰影起伏図である。このような多重光源陰影起伏図や垂直光源による陰影起伏図は、傾斜量図に似た方向依存性の少ない傾斜分布を表現できることから、地形の肌理を表現する手段としても用

いることができる。また、山地斜面に刻まれた小規模な尾根・谷の描画は、第4図Bの傾斜量図よりも優れていると言える。ただし、方向依存性をなくしてしまうと、陰影起伏図の最大の特徴である擬似的立体感も失われてしまうことになる。

2.1.2 カラー合成による等高線地形解析図の作成

以上で作成した4つの地形解析図のうち、カラーの標高段彩図とグレースケールの傾斜量図および陰影起伏図をカラー合成し、これを背景に等高線図を上書きして等高線地形解析図を作成する(第1図)。標高段彩図と傾斜量図、陰影起伏図のカラー合成方法は、乗算合成、透過合成、半透明合成のいずれでも構わないが、合成した図が上書きする等高線図の色を妨げないこと、および、アナグリフに適する淡い色調であることが必要である。

第5図は、第3、4図の各地形解析図を作成した範囲とその周辺を含む等高線地形解析図である。この画像は、標高段彩と陰影起伏による擬似的立体感を持った精密地形図であり、詳細な地形判読に用いることもできる。しかし、2次元地形図の判読では、等高線の読図によって詳細な立体感を得るための習熟が必要であり、広い視野の詳細地形を正確に把握することは困難である。

2.2 ステレオ画像の作成

2次元地形図が持つ立体感表現の問題点を根本的に解決する手法として、ここでは、ステレオ画像に処理して立体視による仮想的立体感を得る手法を用いる(後藤・中田, 2011; 後藤・杉戸, 2012 など; 第1図)。汎用のディスプレイ上で画像を立体視する方法として、ステレオペア画像を用いた裸眼による平行法・交差法と、アナグリフ眼鏡を介したアナグリフ法がある。このうち、アナグリフ法は、広い表示範囲を立体視できること、画像の表示範囲の移動や拡大・縮小が容易であること、複数人数が同時に立体視できることなどの利点を持つ。さらに、片眼用画像を正射投影することによりステレオ画像をGISに取り込んで利用することができる。

第6図は、第5図をアナグリフ処理したステレオ等高線地形解析図である。この画像を立体視することで、DEMの持つ空間分解能と精度を十分に活用した地形判読が容易かつ効率的に行える。この画像を等高線幅0.1mm相当で印刷図とした場合、あるいはディスプレイ上にフル解像度(1ピクセル=1素子)で表示した場合には全域の地形を正確に俯瞰することができる。また、画像を拡大した場合には、精密等高線を1本ずつ、立体感を伴って読図することができる。

立体視による地形判読では、地形の特性に応じて適切な過高感を設定することが重要である。低地から山地までを同時に俯瞰するには、小さい垂直倍率

の画像が適当である。しかし、過高感の小さい画像では高低差の小さい低地の微地形を立体視することは困難である。また、ステレオ画像の作成においては、基準標高からの高度差に比例して片眼用の画像データをピクセル単位でオフセットさせて表示することから、垂直倍率の小さい画像では緩斜面が不自然な階段状に立体視される場合がある。ただし、その場合においても等高線の読図によれば自然な立体感が得られる。一方、過高感が大きい場合には、特定方向の急傾斜面やその近傍がオフセットさせた画素の陰になってしまうこと、あるいは標高差が大きくなり両眼用画像のオフセットが瞳孔間距離を越える場合には立体視することが困難になるなどの限界がある。このため、ステレオ画像への処理においても、急傾斜面を含む全域を立体視できる過高感の小さな図と、緩傾斜面の微地形を判読するための過高感の大きな図を併せて使用することが必要になる。

3. ステレオ等高線地形解析図の使用形態

ステレオ等高線地形解析図は、等高線間隔と画素サイズ、およびアナグリフの過高感によって、その表現特性が大きく変化する。このため、汎用的な画像としては、山地を含む全域を描画するCd=2~4程度の等高線図と、低地を等高線で描画するCd=0.4程度の図のいずれか、もしくはその2種類の図を作成することが基本と言える。

第7図は、甲府盆地西縁から市ノ瀬台地を経て身延山地に至る地域について、仕様の異なる等高線地形解析図をFG-DEM5から作成した例であり(第3表)、描画の比較がしやすいようにアナグリフ処理前の2次元地形図を示している。画素サイズは第7図A、B、Eが2.5m、Cが1m、Dが5mであり、等高線幅が同じ表示となるように調整してある。

等高線間隔1mの第7図Aでは、甲府盆地の扇状地と市ノ瀬台地の段丘面群が詳細に描画されており、F1、F2、F3およびF4断層に伴う断層崖や撓曲崖(第7図F; 今泉ほか, 1998)も明瞭に判読できる。しかし、傾斜が急な身延山地では、等高線が重なって地形の判読がほとんどできない。一方、等高線間隔5mの第7図Bでは全域の地形が描画できており、規模の小さなF2断層を除いて変動地形の判読も可能である。この図において、山地の地形をさらに詳細に判読するためには、第7図Cに示すようにCd=2を維持したまま等高線間隔と画素サイズをともに小さくする必要がある。この図では、等高線が詳細に識別できない縮尺であっても斜面の濃淡の変化として地形が判読できる。また、第7図Dは、より広範囲の地形を俯瞰するためにCd=2を維持したまま等高線間隔と画素サイズをともに大きくしたものである。

上述したように、ステレオ画像としては、山地を含む画像は過高感を小さく、平地を強調する画像は過高感が大きくなるように加工する。ただし、急峻な山地と平地が隣接する地域の画像をステレオ画像に加工する場合には、オフセットさせた山地の画素が平地の画素に重ならないようにオフセットさせる側の画像を選択する必要がある。

第7図 A, B に示す FG-DEM5 による画素サイズ 2.5 m の画像を、素子サイズが 0.25 mm のディスプレイにフル解像度で表示すると、縮尺 1 万分の 1 相当の地形図となる。また、等高線幅 0.1 mm の印刷図として出力すると縮尺 2 万 5 千分の 1 相当の地形図となる。ただし、等高線を詳細に読図する場合には、ステレオ地形図においても 2 次元地形図においても縮尺をそれらよりも拡大して用いる必要がある。

第7図 E の傾斜量図は、地形・地質の判読に適する優れた地形表現手段であるとともに、等高線や標高段彩で表現しきれない極微地形の表示に不可欠である。このため微地形の判読においては、ステレオ等高線地形解析図とともにステレオ傾斜量図（後藤・杉戸, 2012）を併せて使用することが効果的と言える。

4. ステレオ等高線地形解析図の作成事例

本章では、変動地形、地すべり地形および火山地形を対象としたステレオ等高線地形解析図の事例を示し、既存の地形・地質情報と比較しながら立体視判読における画像の特性を検証する。このうち、第 8, 10 および 11 図は、主に航空レーザ測量によって生成された FG-DEM5 から、第 9 図は国土交通省越美砂防事務所による 1 m 解像度の DEM、第 12 図は宇宙航空研究開発機構による ALOS 全球数値地表モデルの 30 m 相当解像度版 (AW3D30) の DEM から作成した（第 3 表）。

4.1 航空レーザ測量による DEM から作成した画像

a) 金沢市街地付近の段丘面群の撓曲変形

第 8 図は、森本-富樫断層帯により累積的な撓曲変形をうけた金沢市街地付近の後期更新世以降の段丘面群（中村ほか, 2003）の変動地形を表している。中村ほか（2003）によれば、この地域の段丘面は、高位から順に、野田 I・同 II・小立野・笠舞 I・同 II・同 III および同 IV 面の 7 面に区分され、これらの段丘面群は野町・長坂および野田山撓曲による東ないし南東側隆起の変形を受けている。

第 8 図の立体視によれば、7 面の段丘面群が明瞭に判読できる。また、立体視と等高線の読図に基づいて、野町・長坂および野田山撓曲による段丘面の変形は、それぞれ幅約 1, 0.5 および 1 km に及ぶことが判読できる。この結果は、縮尺約 2~4 万分の 1 空中写真の判読に基づいた中村ほか（2003）の結果と比較して、段丘面区分についてはほぼ同じである。

また、撓曲変形については、中村ほか（2003）が 3 条の撓曲帯の幅を、野町撓曲で 0.2~0.7 km、長坂撓曲で 0.2 km および野田山撓曲で 0.3 km 程度としていることに比べて、緩やかな変形がより広範囲に及んでいることが判読できる。また、野町撓曲の東側では小立野付近の小立野面の傾斜がほぼ水平となっており、同面が扇状地性の段丘面であることから西上がりの傾動を被ったことが推定される。同様の傾動は泉野付近の笠舞 II 面にも及んでいると推定される。さらに、金沢城公園の西側では、最も新しい段丘面である笠舞 IV 面も撓曲変形していることが、立体視と等高線の読図から判読できる。

このように、航空レーザ測量による DEM は標高解像度が高いことから、細密等高線図および過高感の大きなステレオ画像を用いることで、空中写真判読では困難な幅広い撓曲帯の正確な判読が可能になる。

b) 岐阜県能郷白山付近の地すべり地形

第 9 図 A, B は、岐阜県能郷白山の南東方に認められる地すべり地形の、ステレオ等高線地形解析図およびステレオ傾斜量図である。清水ほか（1998）は、空中写真判読に基づいて、この地点に滑落崖および初期状態の移動体からなる地すべり地形を判読している。

等高線地形解析図と傾斜量図の立体視によれば、稜線付近に規模の大きな滑落崖、その北東側の斜面中部に発達する多数の尾根向小崖、およびそれらの崖に囲まれた移動体が明瞭に判読できる。また、滑落崖の直下には、変形した斜面体とその表面の小崖も判読できる。さらに、等高線地形解析図からは、滑落崖の北方延長上に複数の小規模な側方崖が生じていることが等高線の系統的な屈曲と陰影から推定できる。

等高線地形解析図では、斜面の傾斜方向に延びる小規模な尾根や谷、小崖については、それらが等高線間隔程度の比高の凹凸であっても、水平に連なる等高線が系統的に屈曲することから判読することができる。一方、傾斜量図では、斜面の傾斜と直交方向に延びる小崖、とくに尾根向小崖の肩と脚に沿って伸びる輝度の高い尾根・谷線が際立っている。また、傾斜量図では、基盤岩から構成される急斜面と、堆積物に埋積された谷底との区別を明暗の強いコントラストから読み取ることが出来る。これに対して、等高線図の判読では、谷底埋積物と山地斜面の境界はやや不明瞭となっている。

DEM による精密等高線図および傾斜量図などの 2 次元地形図は、地すべり調査に多く用いられている（空中計測・マッピング部会レーザワーキング監修, 2015；石井ほか, 2016）。これらの 2 次元地形図と比較して、ステレオ図による判読では、細密等高線図の正確な判読が容易であり、また高度差が大きな地

域や広範囲の判読が効率的に行える利点がある。

c) 北海道千歳市付近の火砕流堆積面の撓曲変形

第10図は、北海道千歳市付近に認められる支笏火砕流堆積面の変動地形（後藤・杉戸，2012）のステレオ等高線地形解析図である。後藤・杉戸（2012）は、10 m メッシュ DEM によるステレオ傾斜量図の判読に基づいて支笏火砕流堆積面に長さ 10 km・幅 5 km の背斜変形を認め、これを千歳背斜と呼んだ。また、千歳背斜が北方の野幌丘陵の活背斜（池田ほか編，2002 など）と連続するのかどうかは不明とした。

第10図の立体視判読および地形断面図によれば、千歳背斜は非対称な背斜であり、その東翼は幅 4~5 km の緩やかな撓曲帯を形成していると判断される。また、背斜の北部では撓曲帯は北北西に走向を転じて、野幌丘陵の東縁を限る野幌断層帯のやや急な撓曲地形に連続する可能性が大きい。さらに、千歳背斜の背斜軸の東方 10~13 km 程度、すなわち新千歳空港の東方 2~5 km 程度においても東に凸に湾曲しながら南北に延びる背斜が認められ、その東翼は西翼よりもやや急傾斜していることが判読できる。

第10図は、本報告で示す他の図と異なり、大規模な変動地形を可視化するために画素サイズを大きく、すなわち画像のスケールを小さくしたものである（第3表）。ステレオ等高線地形解析図では、先にも述べたように、画素サイズと等高線間隔、およびアナグリフによる過高感を調整することで、様々な地形種や規模の地形判読に最適の地形図を作成することができる。

d) 蔵王火山の地形

第11図は、蔵王火山のステレオ等高線地形解析図である。蔵王火山には、約 25 万年前以降に流下した溶岩からなる起伏の少ない地形が多く認められる一方、御釜火口周辺から東にかけて崩壊地形が発達している（伴ほか，2015）。

第11図の立体視からは、各溶岩流の分布範囲の輪郭に加えて、溶岩流表面の分布高度のわずかな違いや極微地形を反映したテクスチャーの違いも判読することができる。このため、重なり合う溶岩の分布が正確に読み取れる。たとえば、熊野岳北側の熊野岳主山体溶岩・火砕岩類（Kmp）と熊野岳山頂溶岩（Kml）の分布、聖山平付近の聖山平溶岩（Szl）と駒草平火砕岩類（Kkp）の分布境界が識別できる。また、起伏の緩やかな尾根上の溶岩・火砕岩と同時に、崩壊地形に伴う急崖の詳細や谷底に分布する濁川岩屑なだれ堆積物（Ngd）などの崩壊堆積物による地形も判読できる。

従来の精密等高線をもたない微地形表現図では、起伏の小さい溶岩地形の分布形状や詳細なテクスチャーの違いを判読しづらい。また、2次元地形図において立体感を付与するためには急斜面や谷底が

濃い色で表現されがちであり（千葉ほか，2007）、詳細な地形判読が妨げられることが多い。これに対して、ステレオ等高線地形解析図では、分布高度の違いが容易に識別でき、等高線分布パターンの違いから溶岩地形のテクスチャーを識別できることがある。また、急斜面や谷底であっても地形判読が妨げられることは少ない。

4.2 衛星画像による AW3D30 から作成した画像

第12図は、AW3D30 から作成した中国新疆ウイグル自治区の天山山脈南東部、Yanqi 盆地の北縁に発達する変動地形（Huang *et al.*, 2015）のステレオ等高線地形解析図である。Huang *et al.* (2015) は、縮尺約 1 万 2 千分の 1 空中写真および Google Earth イメージの判読と縮尺 5 万分の 1 地形図の読図および現地調査によって、中期更新世以降に形成された 5 段の段丘面を区分している。また、それらの段丘面が、Haermodun 背斜によって累積的に変形していることを見出し、第12図の a-a' 測線付近において Heiji 前縁衝上断層による段丘面の上下変位を 3.3~3.6 m と計測している。

本図の作成に使用した AW3D30 の高さの精度は 5 m 程度とされているが、第12図では扇状地を描画する 3 m 間隔の等高線が大きく乱れることなく描かれており、地形の描画における実用的な高さの相対的精度は 1~2 m と推定される。このような精密等高線図を立体視することで、10 段の段丘面（第12図の 1~10 面）が区分できる。また、Hejing 前縁衝上断層による 10 面の上下変位量を a-a' 断面において AW3D30 の DEM データから約 4 m と計測できた。断面測線周辺の等高線の読図からも、断層による 10 面の上下変位が 3~6 m 程度であることは容易に推定できる。

ステレオ等高線地形解析図では、このように DEM の精度の限界に近い微地形の高度差についても、正確かつ定量的に判読することが可能である。

5. まとめ

詳細な地形判読を目的とした高解像度 DEM の可視化手法として、等高線間隔と画素サイズの間関係を適切に調整した等高線図を生成し、これをカラー標高段彩図と傾斜量図および陰影起伏図を合成した画像に上書きした等高線地形解析図を作成し、さらにアナグリフ処理によりステレオ画像に加工する手法を開発した。

このステレオ等高線地形解析図によれば、山地を表示できる等高線間隔の大きな画像と、段丘面や低地を表示できる等高線間隔の小さな画像をセットとして作成することで、汎用的な地形表現が可能となる。この図の立体視判読では、精密等高線による正確かつ定量的な地形の仮想的立体感と読図により、

従来の空中写真判読や等高線をもたない微地形表現図と比較して、詳細かつ定量的な地形判読を効率的に行える。とくに、等高線間隔と標高段彩色の変化を細かくすることで、中・後期更新世～完新世の地形・地質や変動地形の詳細な判読を促進することが期待される。また、全球の高解像度 DEM の整備が進む今日、これまで正確な地形情報が入手できなかった地域について、高精度の地形調査を効率的に進めることが期待される。

謝辞 本報告における地形図画像の作成には、片柳由明氏が開発した DEM 可視化ソフトウェアである「ジオ地蔵 ver.2.9.11」(<http://www.jizoh.jp/index.html>)を使用した。また、能郷白山付近の地すべり地形の可視化画像の作成には、国土交通省国土地理院が管理する「平成 20 年度越美砂防管内航空レーザ測量」による数値地形モデル (1 mDTM) を使用させていただいた。ここに記して感謝申し上げる。

文 献

- 秋山幸秀 (2006) Air-bone LiDAR による火山調査の応用事例. 先端測量技術, No. 89.90, 92-103.
- Arrowsmith, J.R. (2006) Active tectonics, tectonic geomorphology, and fault system dynamics: How geoinformatics can help. Geol. Soc. Am. Special Paper, 397, 131-139.
- 栗田泰夫 (2015) DEM へのテクスチャマッピングによるステレオ地形図・ラスタ画像の作成. 情報地質, 26, 96-97.
- 伴 雅雄・及川輝樹・山崎誠子 (2015) 蔵王火山地質図. 火山地質図, No. 18.
- 千葉達郎・沼田洋一 (2003) 赤色立体地図. 写真測量とリモートセンシング, 42.4, 2.
- 千葉達郎・鈴木雄介・平松孝晋 (2007) 地形表現手法の諸問題と赤色立体地図. 地図, 45, 27-36.
- 千葉達郎 (2014) 赤色立体地図とその応用. 測量, 2014.4, 32-33.
- 千田良道 (2014) 地形起伏図とその適応事例. 測量, 2014.7, 20-21.
- 藤原 治・柳田 誠・清水長正・三箇智二・佐々木俊法 (2004) 日本本列島における地すべり地形の分布・特徴. 日本地すべり学会誌, 41, 335-344.
- 後藤秀昭・中田 高 (2011) デジタル化ステレオペア画像を用いたディスプレイでの地形判読. 活断層研究, No. 34, 31-36.
- 後藤秀昭・杉戸信彦 (2012) 数値標高モデルのステレオ画像を用いた活断層地形判読. E-journal GEO, 7, 197-213.
- Huang, W., Yang, X., Li, A., Pierce, I. K. D., Thompson, J. A., Anguster, S. J. and Zhang, L. (2015) Late Pleistocene shortening rate on the northern margin of the Yanqi Basin, southeastern Tian Shan, NW China. Jour. Asian Earth Sci., 112, 11-124.
- 池田安隆・今泉俊文・東郷正美・平川一臣・宮内崇裕・佐藤比呂志 (編) (2002) 第四紀逆断層アトラス. 東京大学出版会, 254p.
- 今泉俊文・澤 祥・東郷正美・池田安隆 (1998) 1:25,000 都市圏活断層図「甲府」. 国土地理院技術資料, D-1, No.355.
- 井上 誠・伊計秀明 (2001) 傾斜量図の利用法について. 情報地質, 12, 72-73.
- 石井靖雄・西井稜子・武田大典 (2016) 航空レーザ測量データを用いた地すべり地形判読用地図の作成と判読に関する手引き (案). 土木研究所資料, No.4344, 1-38.
- 岩橋純子・佐藤 忠・内川講二・小野 康・下地恒明・星野 実 (2011) 航空レーザ測量の DEM から作成した余色立体地図等を用いた変動地形の観察. 国土地理院時報, No.121, 143-155.
- 泉 紀明・加藤幸弘・西澤あずさ・伊藤弘志・渡邊奈保子・中田 高・後藤秀昭・植木俊明・梶 琢 (2011) 3 秒グリッド DEM から作成したフィリピン海プレート北端部の 3D 画像. 海洋情報部研究報告, 47, 83-89.
- 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, 11-24.
- 空中計測・マッピング部会レーザワーキング (監修) (2015) 航空レーザ測量による災害対策事例集. 日本測量調査技術協会, 195p.
- 松野久也・石田正夫 (1960) 5 万分の 1 地質図幅「早来」および説明書. 北海道開発庁, 35p.
- 向山 栄・佐々木 寿 (2007) 新しい地形情報図 ELSAMAP. 地図, 45-1, 47-56.
- 中村洋介・金 幸隆・岡田篤正・竹村恵二 (2003) 金沢市街地における河成段丘の形成時期と森本-富樫断層帯野町撓曲の第四紀後期における上下変位速度. 活断層研究, No.23, 69-76.
- 日本地図センター (編) (1998) 数値地図ユーザーガイド (第 2 版補訂版). 日本地図センター, 471p.
- 野上道男 (2001), 日本列島の大地形と地形区分, 米倉伸之・貝塚爽平・野上道男・鎮西清高 (編), 日本の地形 1 総説. 東京大学出版会, 1-29.
- 小野田 敏・高山陶子・沼田洋一・豊山孝子・佐々木靖人 (2002) 航空レーザ計測および GIS による斜面防災への応用. 先端測量技術, No.82-15, 98-105.
- 斉藤享治 (1985) 扇状地の特性を形成する因子. 東北地理, 37, 43-60.
- Seijmonsbergen, A. C. (2013) The modern geomorphological map. Treatise on Geomorphology, 14, 35-51.

- 清水文健・井口 隆・大八木規夫（1998）地すべり地形分布図能郷白山．5万分の1地すべり地形分布図第9集「岐阜」，防災科学技術研究所研究資料，No.184.
- 曾谷龍典・佐藤博之（1980）千歳地域の地質．地域地質研究報告（5万分の1地質図幅）．地質調査所，92p.
- 鈴木清敬・鶴殿俊昭・近 政英・江坂文寿（2012）航空レーザ計測データを用いた荒廃地形判読手法．先端技術測量，No.103，54-63.
- 鈴木隆介（1997）読図の基礎．建設技術者のための地形図読図入門，第1巻，古今書院，200p.
- Tarquini, S., Vinci, S., Favalli, M., Doumaz, F., Fornaciai, A. and Nannipieri, L. (2012) Release of a 10-m-resolution DEM for the Italian territory: Comparison with global-coverage DEMs and anaglyph-mode exploration via the web. *Computers & Geosciences*, 38, 168-170.
- 戸田堅一郎（2012）航空レーザ測量データを用いた微地形図の作成．砂防学会誌，65-2，51-55.
- 佃 栄吉・粟田泰夫・山崎晴雄・杉山雄一・下川浩一・水野清秀（1993）阿寺断層系ストリップマップ説明書．構造図，No.7，地質調査所，39p.
- 八木浩司・檜垣大助・吉松弘行・相楽 渉・高木洋一・内山庄一郎（2003）空中レーザー高精度地形図の地すべり・微地形判読への応用．地すべり学会誌，39-4，35-41.
- 山本晃一（2010）沖積河川－構造と動態－．技報堂出版，587p.
- 横山隆三（2013）DEMをベースとした立体地図の作成と防災への応用．日本地すべり学会東北支部平成25年シンポジウム「空間把握・解析技術の進展と斜面防災への活用」．10-13.

(受付：2017年8月25日，受理：2017年11月20日)

第 1 表. 高解像度 DEM から作成する主な微地形表現図の仕様一覧. 擬似的立体感は, 陰影起伏のみによるものを除く. 使用する地形解析図のうち, カッコ付きは副次的に使用される要素.

Table 1. Characteristics of DEM-derived maps for interpretation of detailed topography. Spurious three-dimensional effects are except hillshade method. DEM analysis images in parentheses are supplementally used.

文 献	ステレオ 画像	擬似的 立体感	使用する地形解析図					備 考 (地図画像の名称等)
			等高 線	標高 段彩	陰影 起伏	傾斜 量	地上・ 地下 開度	
千葉・沼田(2003), 千葉ほか(2007)		○	(○)	(○)		○	○	「赤色立体地図」
秋山(2006)		○			○		高低差	
向山・佐々木(2007)		○	(○)	○	(○)	○	(○)	「陰陽図」 「カラー標高傾斜図 (ELSAMAP)」
岩橋ほか(2011)	○				○	○		複数方向からの光源を重ね合わせ
泉ほか(2011)	○				○	○		
後藤・杉戸(2012)	○				○	○		
鈴木ほか(2012)		○				○	○	「微地形強調図」
戸田(2012)		○	○	○		○	○	「長野県型立体地形図 (CS立体図)」
横山(2013)	○					○	○	「立体地形解析図」
千田(2014)	○	○		○		○	○	「地形起伏画像」
本報告	○		○	○	○	○		仕様の異なる地図画像を併用

第 2 表. 公共測量および基本測量で作成される地形図における等高線の仕様.

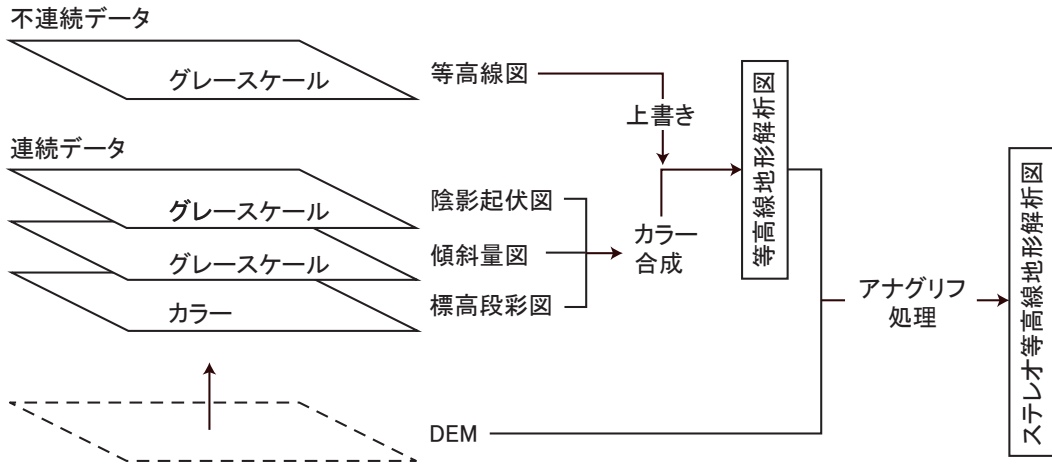
Table 2. Specifications of contour drawing on the national large-scale maps and the base topographic maps of Japan.

地形図の種類		相当縮尺	使用するDEMの 格子間隔 (m)	主曲線幅 (mm)	等高線間隔 (m)	Cd
数値 地形 図	地図情報レベル500	1/500	—	0.1	1	20
	地図情報レベル1000	1/1000	≤1	0.1	1	10
	地図情報レベル2500	1/2500	≤2	0.1	2	8
	地図情報レベル5000	1/5000	≤5	0.1	5	10
1万分1地形図		1/10000	—	0.1	2, 4(山地)	2, 4(山地)
2万5千分1地形図		1/25000	—	0.08	10	5

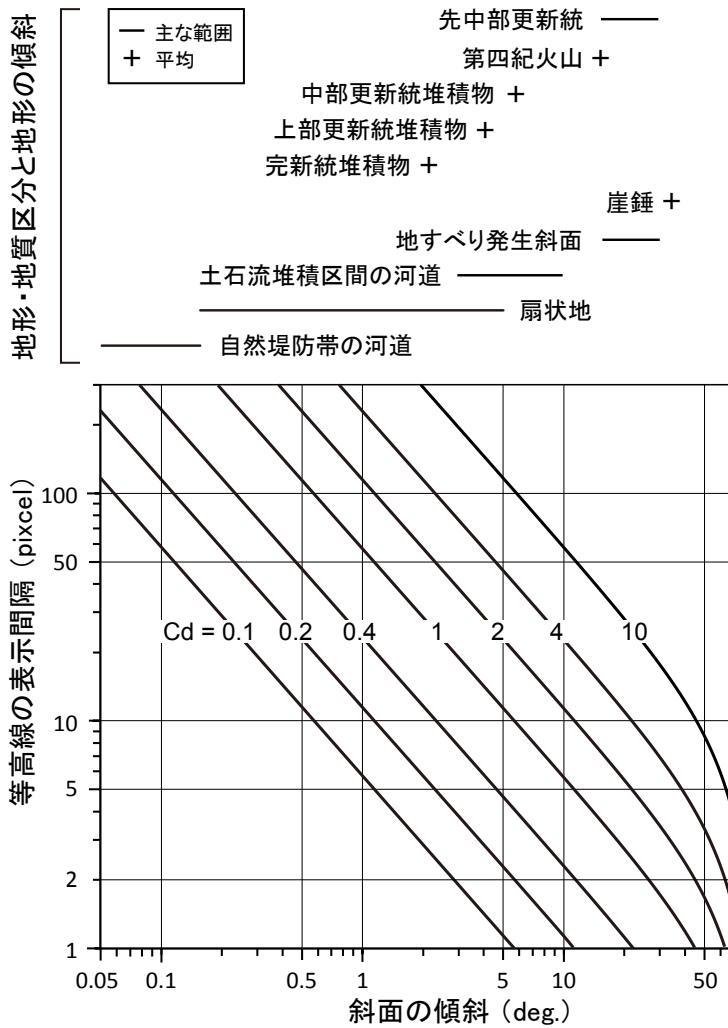
第 3 表. 本報告で作成したステレオおよび 2 次元の等高線地形解析図の仕様. *: DEM の格子間隔, 画素サイズおよび Cd は南北方向の値による.

Table 3. Specifications of contour drawing on the stereo and 2-D contour and relief maps shown in this article. *: DEM size, pixel size and Cd are the values in N-S direction.

図番号	主な地形種	DEMの 格子間隔* (m)	画素 サイズ* (m)	等高線間隔 (m)	Cd*
第5図	段丘, 山地	5	1.25	2	1.6
第6図	段丘, 山地	5	1.25	2	1.6
第7図A	扇状地, 段丘, 山地	5	2.5	1	0.4
第7図B	扇状地, 段丘, 山地	5	2.5	5	2
第7図C	山地	5	1	2	0.8
第7図D	扇状地, 段丘, 山地	5	5	10	2
第8図	扇状地, 段丘	5	3.3	1, 2	0.3, 0.6
第9図	山地	1	0.5	2	4
第10図	火砕流堆積面	5	12.5	5	0.4
第11図	火山	5	2.5	5	2
第12図	扇状地, 段丘	30	7.5	3	0.4

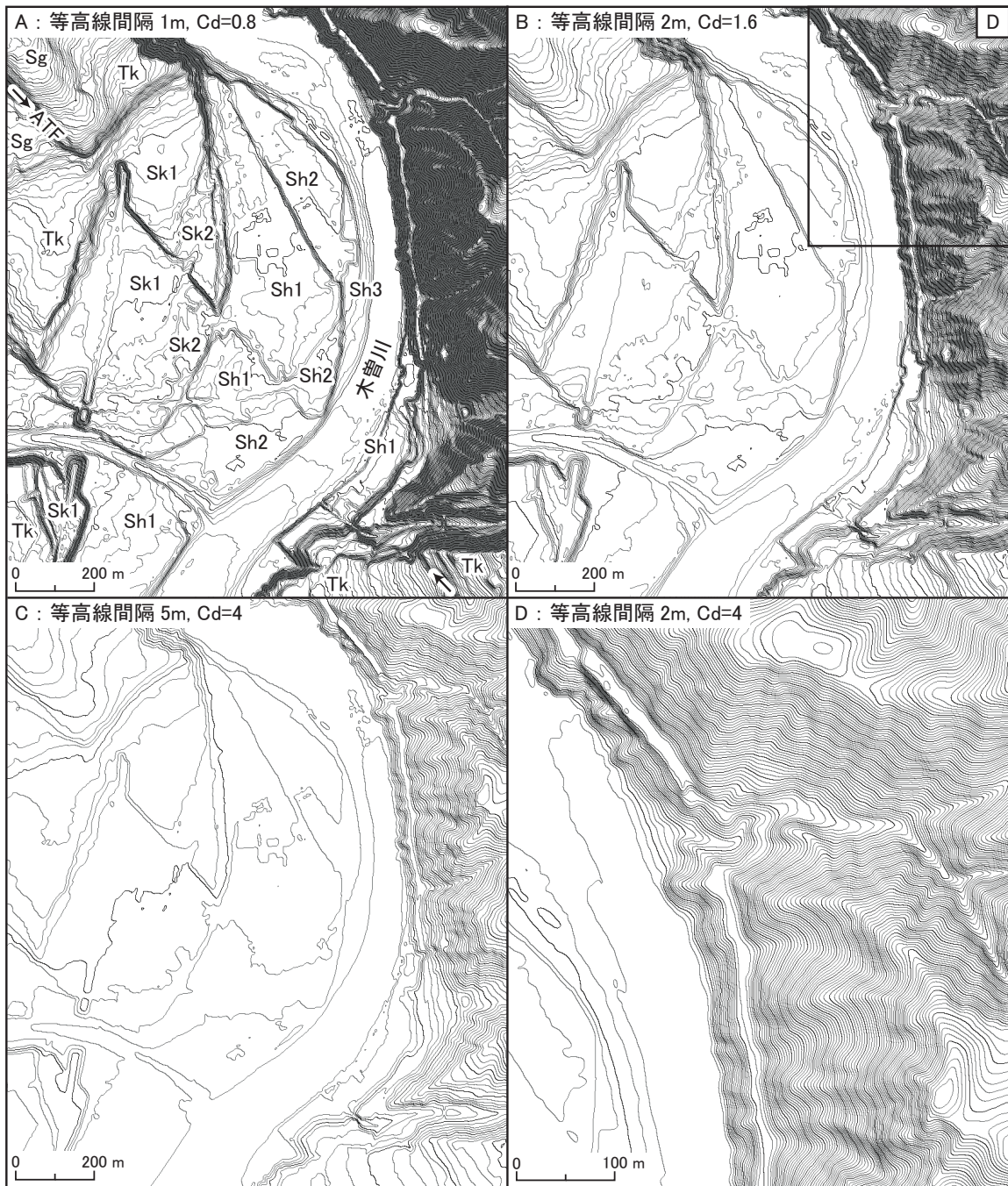


第1図. ステレオ等高線地形解析図のレイヤー構成と作成方法.
 Fig. 1. Workflow for the creation of a stereo contour and relief map.



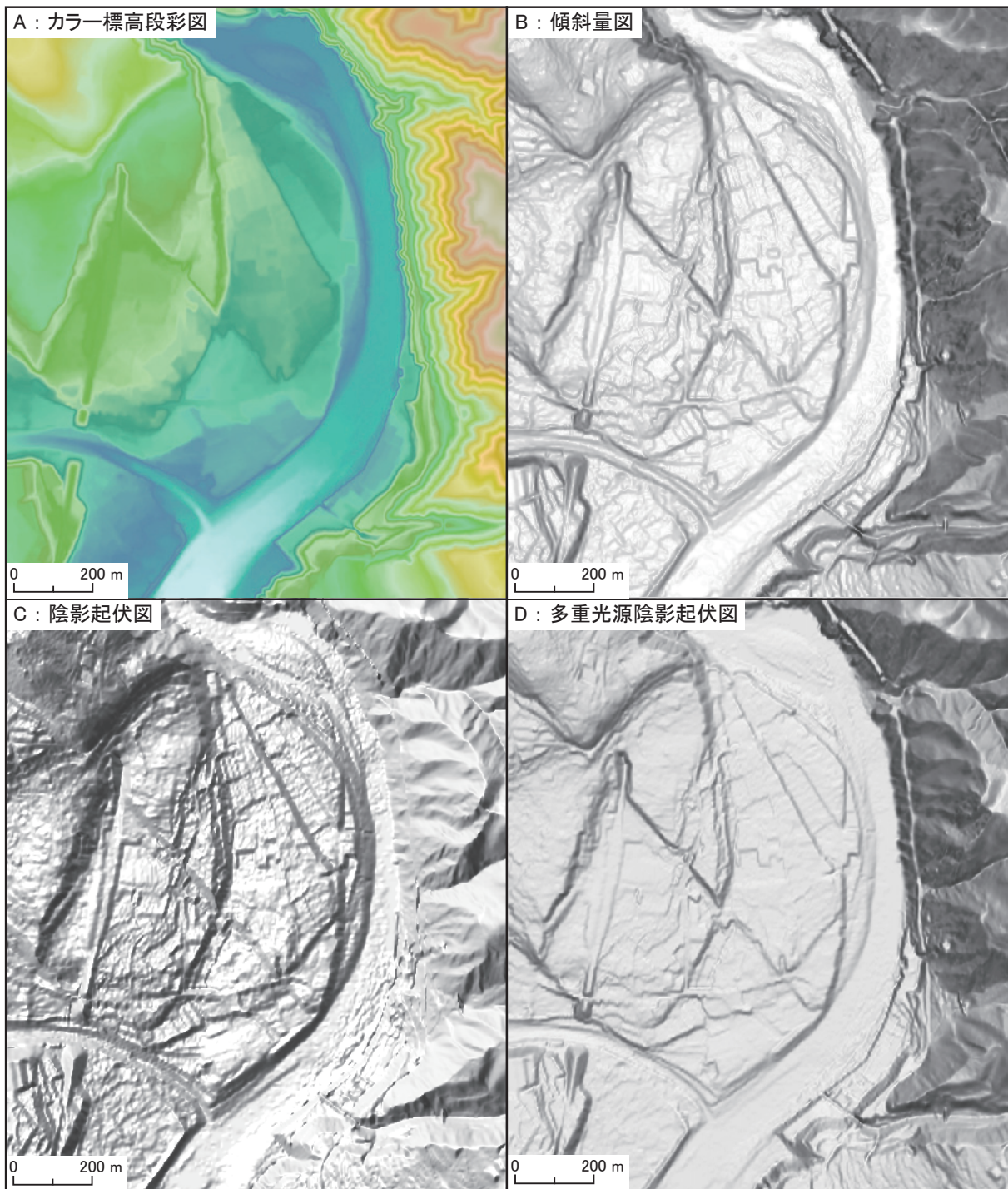
第2図. 等高線描画指数と等高線の描画間隔および地形面の傾斜の関係. Cd: 等高線描画指数 (= 等高線間隔 (Ci) / 画素サイズ (Ps)). 地形・地質と傾斜の関係は, 野上 (2001), 藤原ほか (2004), 斉藤 (1985), 山本 (2010) に基づく.

Fig. 2. Relationship among slope angle, distance between successive contour lines, contour interval and pixel size. Contour drawing index (Cd) is the number of the contour interval (Ci) divided by the pixel size (Ps): $Cd=Ci/Ps$.



第3図. 地形解析図の比較 -1. 等高線間隔と画素サイズの違いによる表示. A : 等高線間隔 1 m, Cd=0.8 ; B : 等高線間隔 2 m, Cd=1.6 ; C : 等高線間隔 5 m, Cd=4 ; D : 等高線間隔 2 m, Cd=4. ATF : 阿寺断層, Sg : 松源地面, Tk : 高部面, Sk1 : 坂下 1 面, Sk2 : 坂下 2 面, Sh1 : 西方寺 1 面, Sh2 : 西方寺 2 面, Sh3 : 西方寺 3 面 (段丘面の区分は佃ほか, 1993 による).

Fig. 3. Comparison between contour images with different specification in contour interval and pixel size. A: contour interval 1 m, Cd=0.8, B: contour interval 2 m, Cd=1.6, C: contour interval 5 m, Cd=4, D: contour interval 2 m, Cd=4. ATF: Atera fault; Sg: Shogenji, Tk: Takabe, Sk1: Sakashita 1, Sk2: Sakashita 2, Sh1: Saihoji 1, Sh2: Saihoji 2, Sh3: Saihoji 3 terrace surfaces (after Tsukuda *et al.*, 1993).



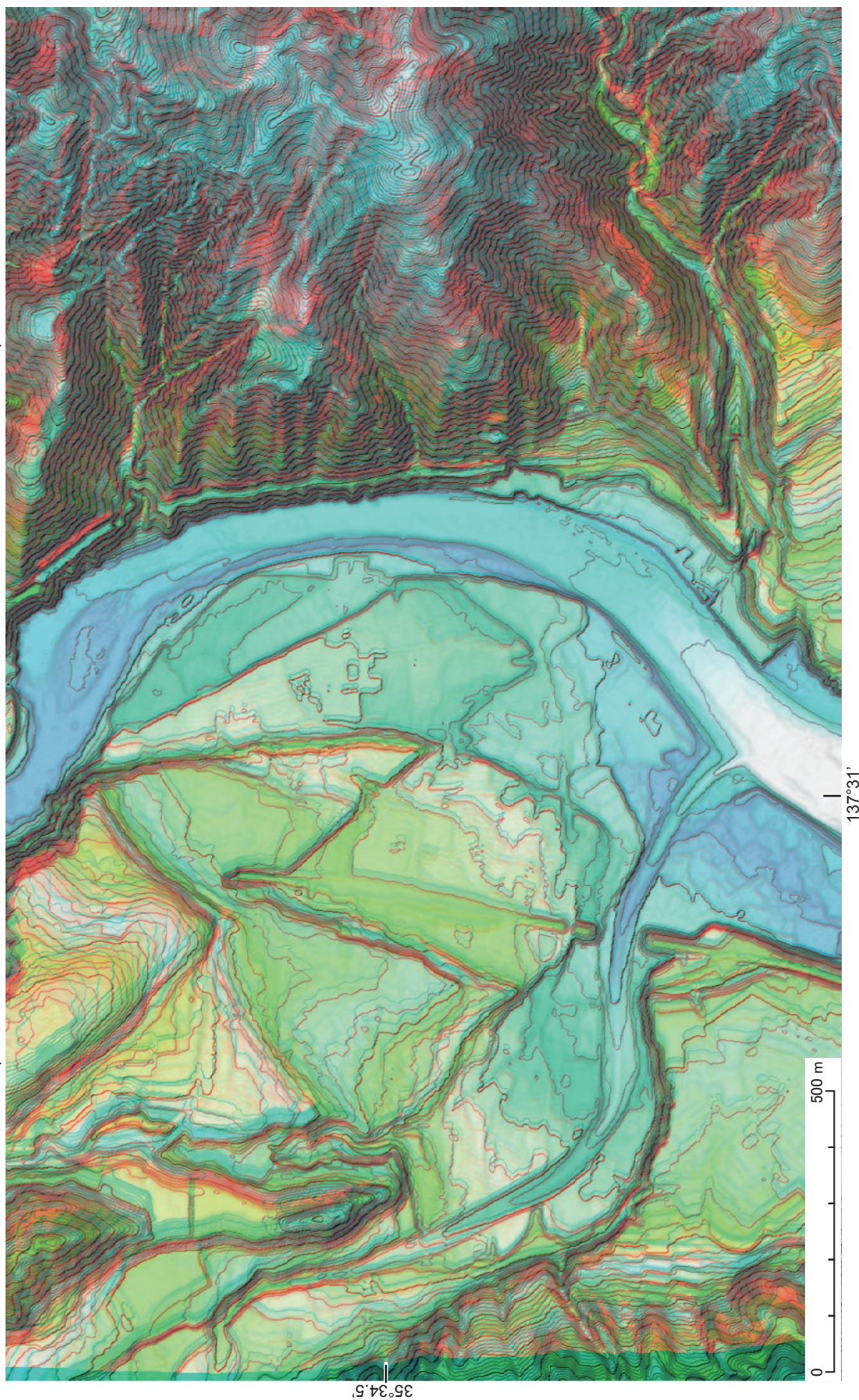
第4図. 地形解析図の比較-2. 連続データによる表示. A: カラー標高段彩図, B: 傾斜量図, C: 陰影起伏図 (光源方位は北西), D: 多重光源陰影起伏図 (光源方位は北西および東). 図の範囲は第3図と同じ.
 Fig. 4. Comparison among commonly used DEM analysis images. A: color elevation tints with moire pattern, B: slope, C: hillshade (illumination azimuth is 315 degrees), and D: hillshade by multiplexed incident illumination sources (azimuths are 90 and 315 degrees). The areas are same in fig. 3.

第3図 A, B, C および第4図の範囲

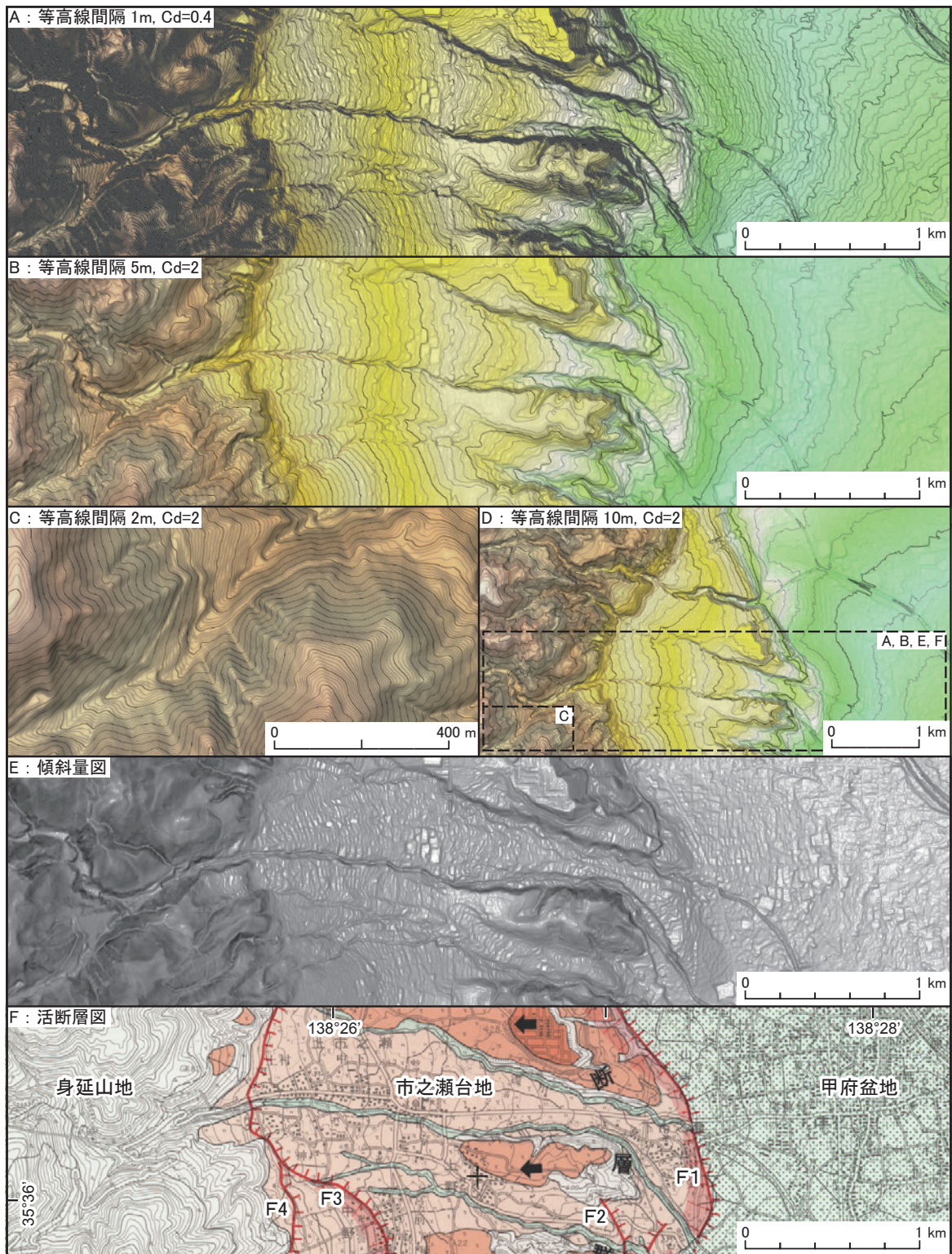


第5図. 等高線地形解析図. 2 m 等高線図, カラー標高段彩図, 傾斜量図および陰影起伏図の合成による.
Fig. 5. Contour and relief map composed of contour map of 2 m interval, elevation, slope and hillshade images.

図 3A, B, C および図 4 の範囲

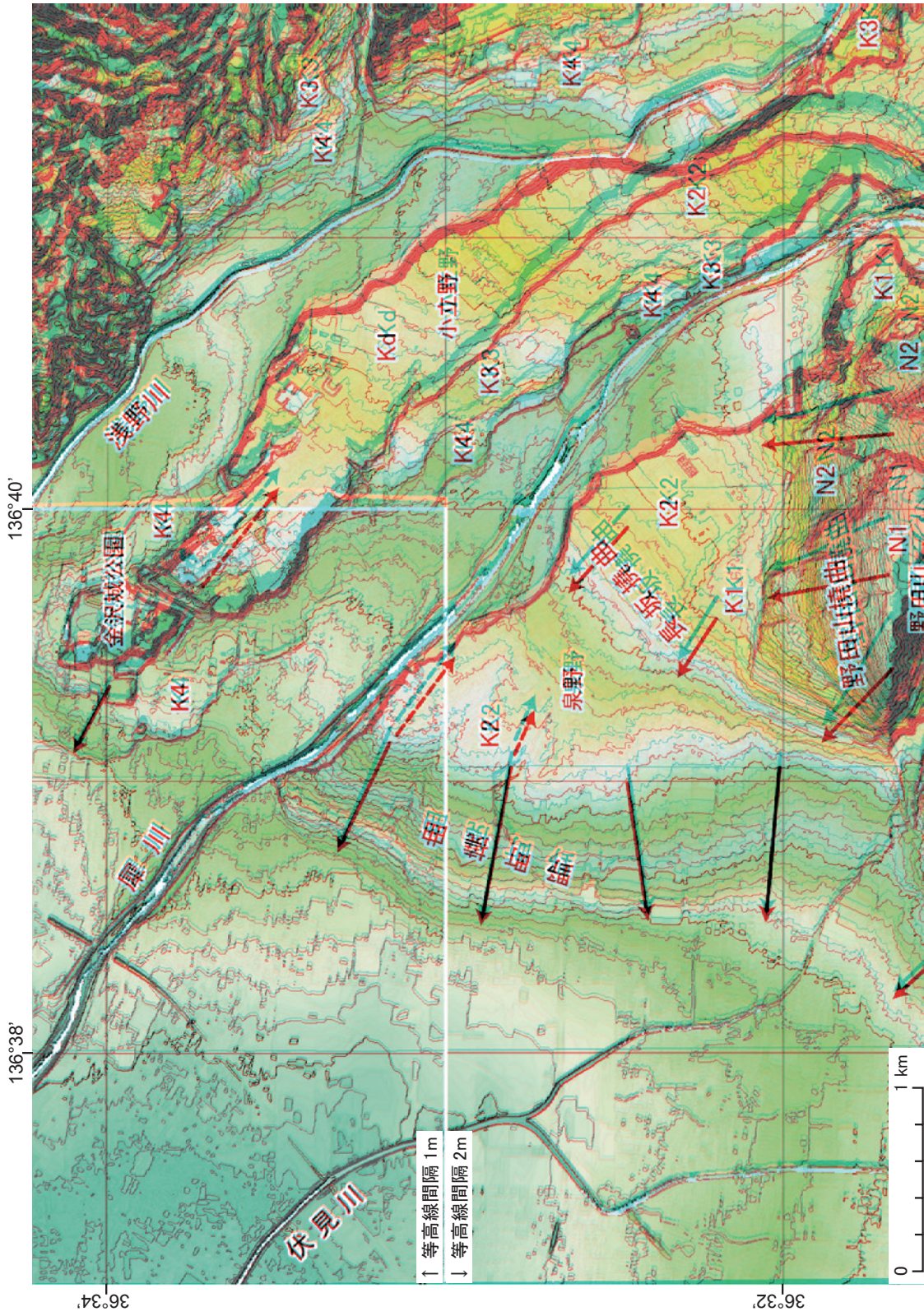


第 6 図. ステレオ等高線地形解析図, 右目画像を正射投影としてアナグリフ処理した画像, 図の範囲は第 5 図と同じ.
Fig. 6. 3-D anaglyph image of the contour and relief map. The image for right eye is orthographically projected. The area is same in fig. 5.



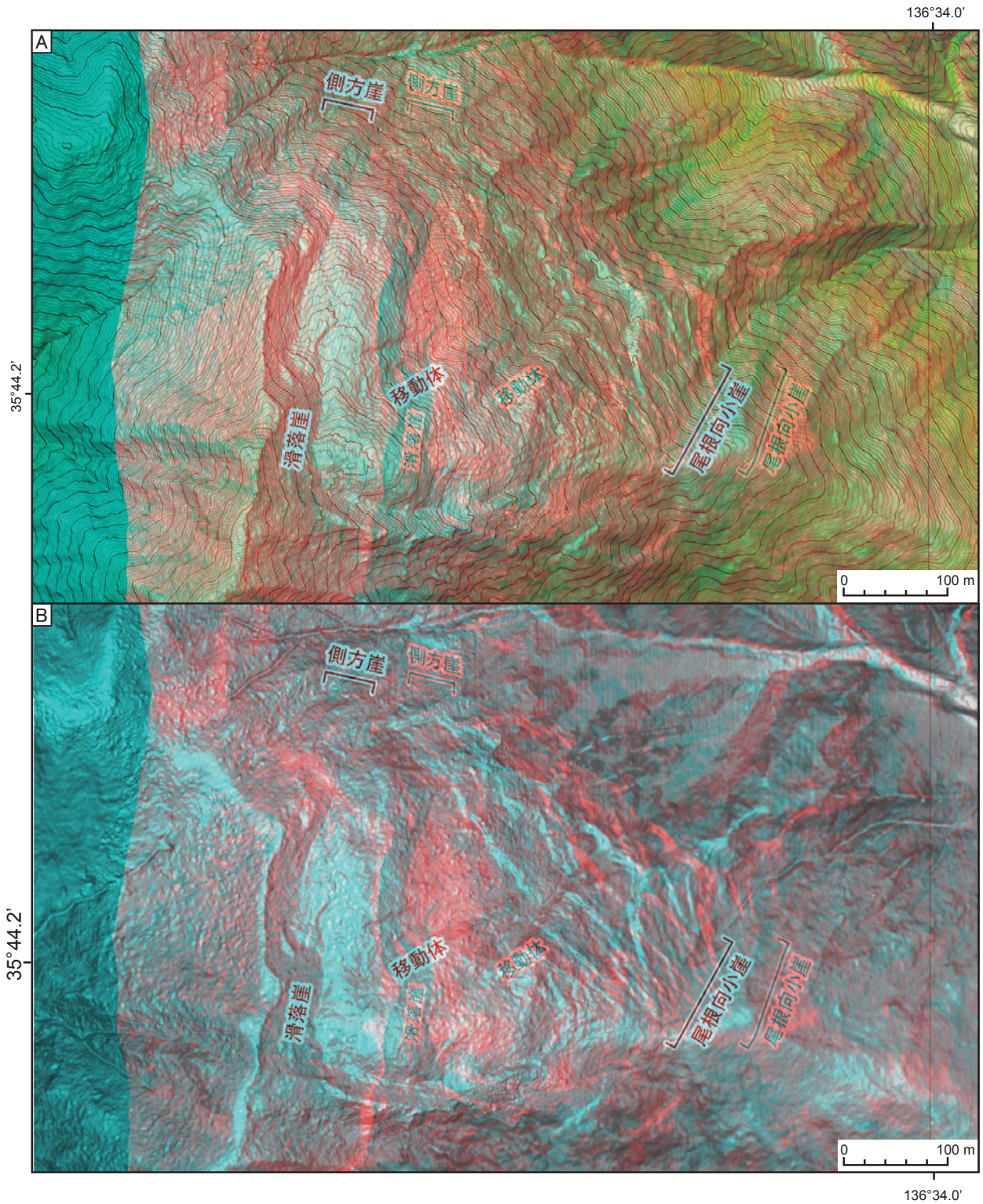
第 7 図. 地形判読に用いる等高線地形解析図および傾斜量図のセットの例. A~D: 等高線地形解析図, E: 傾斜量図, F: 都市圏活断層図「甲府」の一部 (今泉ほか, 1998). F1~F4 は市之瀬断層群.

Fig. 7. A series of contour and relief maps with different contour intervals and scales, and a slope map used for visual interpretation of regional geomorphology. A-D: contour and relief maps, E: slope map, F: active fault map (Imaizumi *et al.*, 1998). F1-4 are the Ichinose active faults.



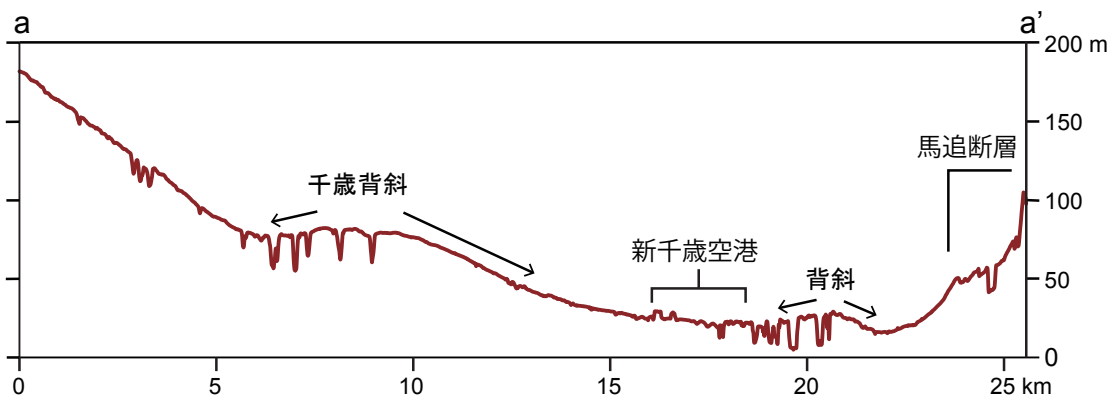
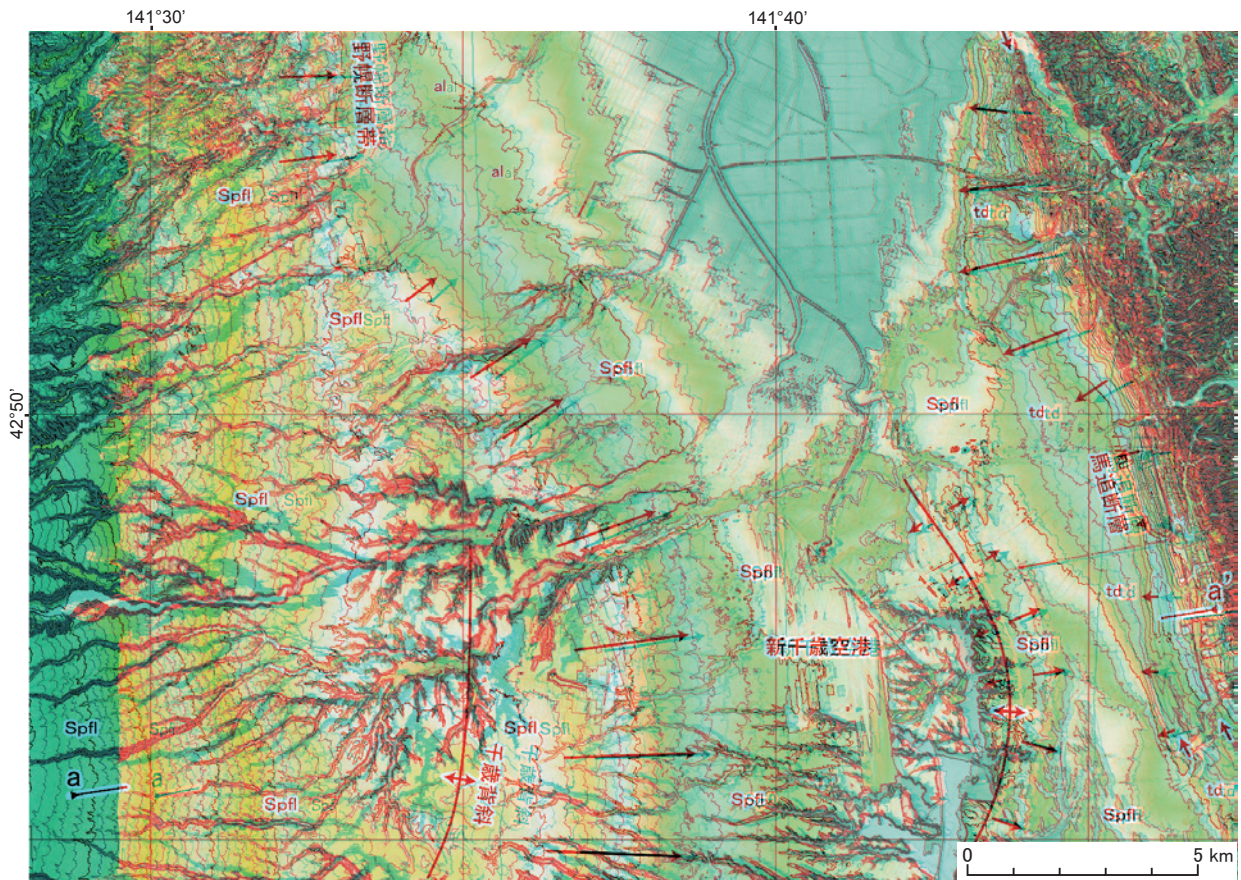
第 8 図. スプレオ等高線地形解析図の例-1: 金沢市街地付近における段丘面群の撓曲地形。北西部は等高線間隔 1 m, Cd=0.4。それ以外は等高線間隔 2 m, Cd=0.8。N1: 野田 I 面, N2: 野田 II 面, Kd: 小立野野, K1: 笠舞 I 面, K2: 笠舞 II 面, K3: 笠舞 III 面, K4: 笠舞 IV 面 (地形面区分は中村ほか, 2003 による)。矢印は撓曲屋, 破線の矢印は段丘面の逆傾動を示す。

Fig. 8. Anaglyph of contour and relief image-1 showing the tectonic geomorphology of active flexures around the downtown of Kanazawa, Ishikawa Prefecture. Northwest quadrant is drawn with 1 m contour interval and $Cd=0.4$. Other three quadrants are 2 m contour interval and $Cd=0.8$. N1: Noda I, N2: Noda 2, Kd: Kodachi, K1: Kasamai 1, K2: Kasamai 2, K3: Kasamai 3, K4: Kasamai 4 terrace surfaces (after Nakamura *et al.*, 2003). Arrows indicate flexure scarp, and arrows with broken line indicate upstream-facing tilt of the terrace surface.



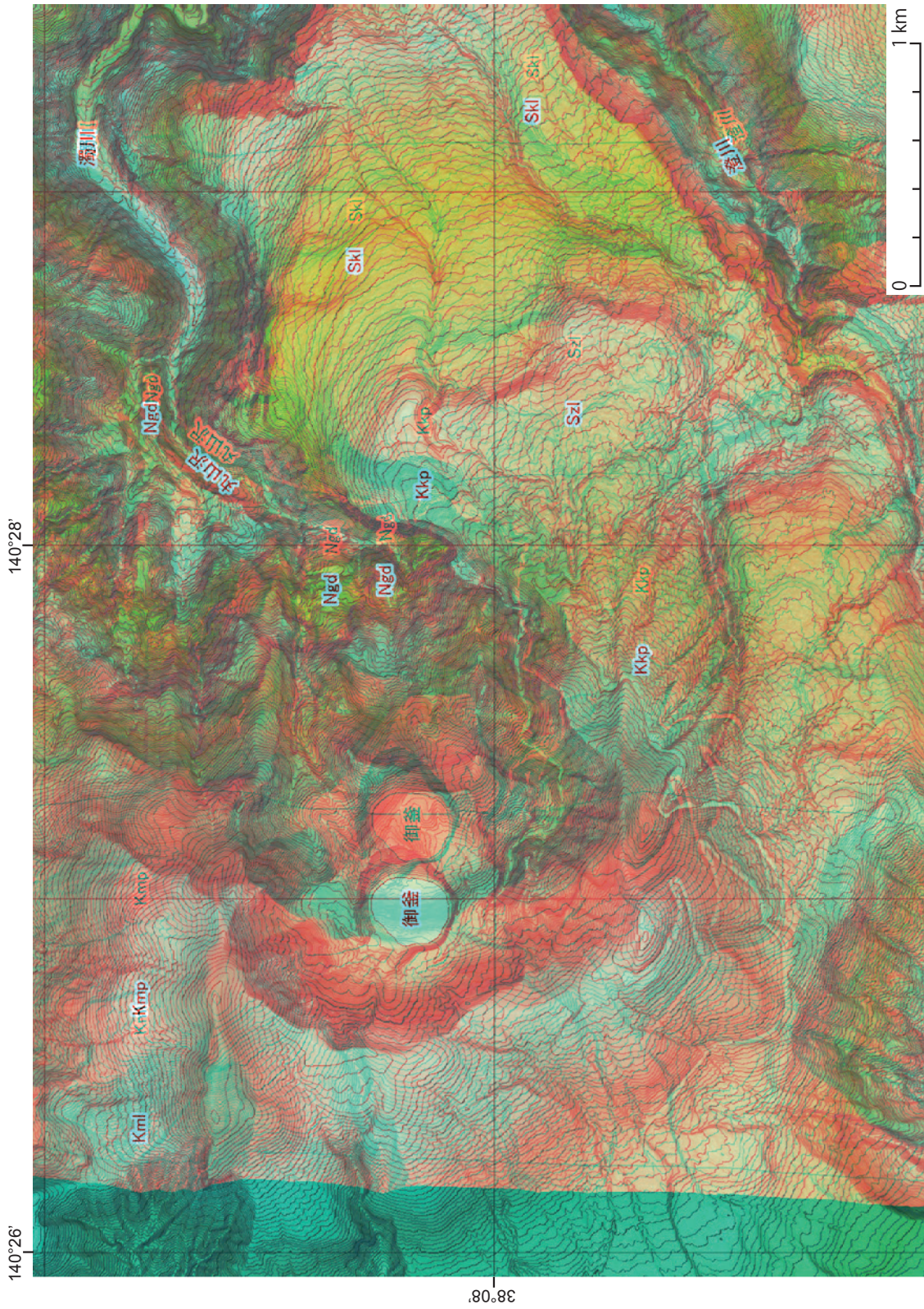
第9図. ステレオ等高線地形解析図の例-2: 岐阜県能郷白山付近の地すべり地形. A: ステレオ等高線地形解析図. 等高線間隔 2 m, Cd=4. B: ステレオ傾斜量図.

Fig. 9. Anaglyph of contour and relief image-2 showing the geomorphology of an embryonic landslide near Mt. Noghakusan, Gifu Prefecture. A: stereo contour and relief map with 2 m contour interval and Cd=4. B: stereo slope map.

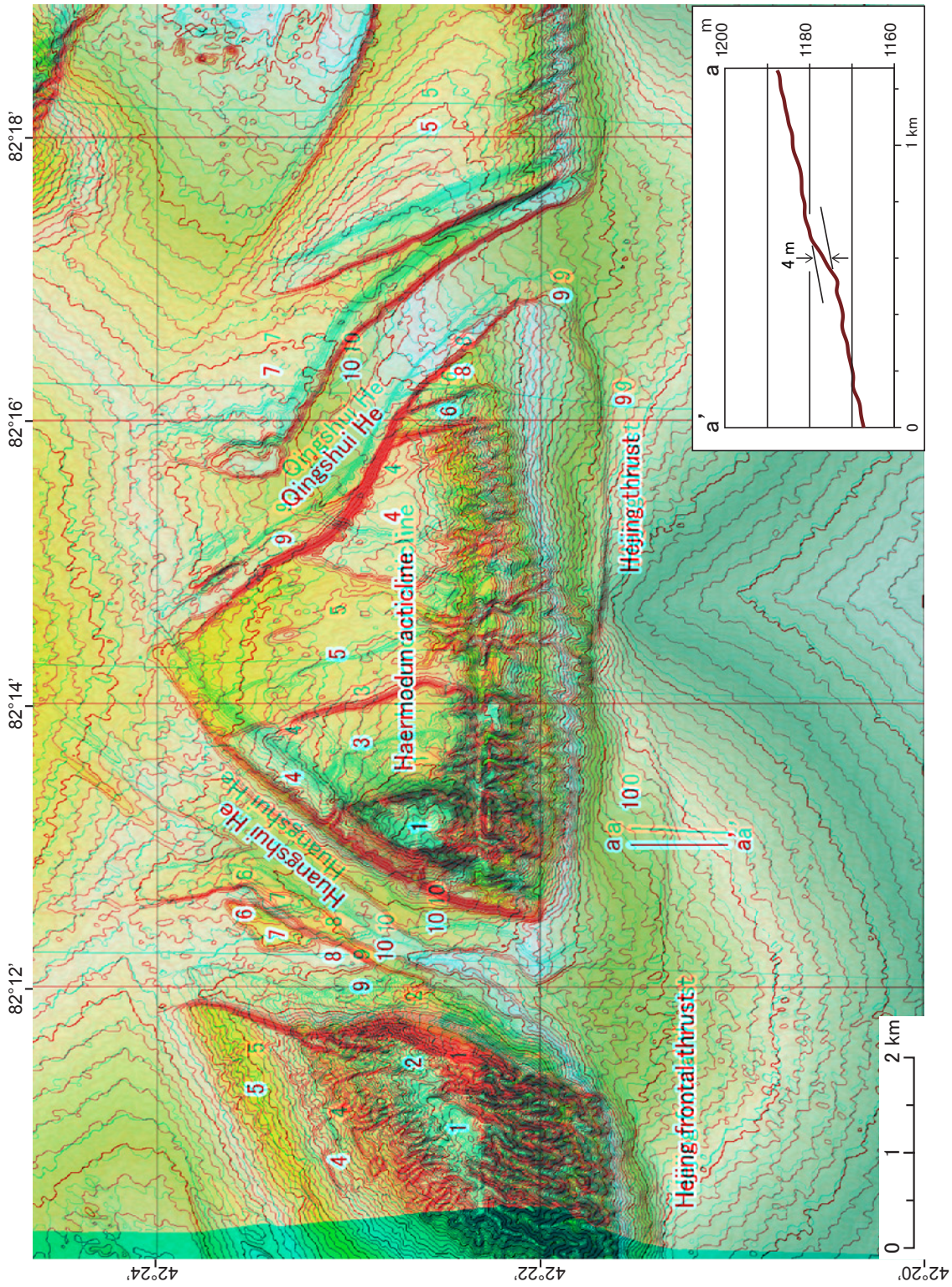


第 10 図. ステレオ等高線地形解析図の例 -3 : 北海道千歳市付近における火砕流堆積面の撓曲地形. 等高線間隔 5 m, Cd=0.4. 下の図は, a-a' 測線の地形断面図. Spfl : 支笏火砕流堆積面, td: 段丘面 (松野・石田, 1960 および曾谷・佐藤, 1980 に基づく). 矢印は撓曲崖および地形面の傾動.

Fig. 10. Anaglyph of contour and relief image-3 showing the regional deformation of pyroclastic flow deposits by active anticlines and flexures, Chitose, Hokkaido. Contour interval is 5 m, Cd=0.4. Bottom figure shows the topographical cross section along the line a-a'. Spfl: surface of Shikotsu Pyroclastic deposit. td: terrace surface (after Matsuno and Ishida, 1960; Soya and Sato, 1980). Arrows indicate flexure and tilting of the surfaces.



第 11 図. ステレオ等高線地形解析図の例-4: 蔵王火山の中・後期更新世の溶岩地形と浸食地形、等高線間隔 5 m, Cd=2. Skl: 賽ノ碩溶岩類, Szi: 聖山平溶岩類, Kkp: 熊野岳主山体溶岩・火砕岩, Kml: 熊野岳山頂溶岩, Kmp: 駒草平火砕岩類, Ngd: 濁川岩層なだれ堆積物 (伴ほか, 2015).
 Fig. 11. Anaglyph of contour and relief image-4 showing topography of lava flows in the middle to late Pleistocene and deeply eroded valleys, Zao volcano, Miyagi and Yamagata Prefecture border. Contour interval is 5 m, Cd=2. Skl: Sainokawara lavas, Szi: Seizandaira lavas, Kkp: Kumanodake lava and pyroclastic rock, Kml: Kumanodake lava, Kmp: Komakusadaira pyroclastic rock, Ngd: Nigorikawa debris avalanche deposits (Ban *et al.*, 2015).



第 12 図. ステレオ等高線地形解析図の例 -5 : 中国, 天山山脈南東部における段丘面群の変動地形, 1~10 : 段丘面群, 等高線間隔 3 m, Cd=0.4. 右下の図は, Hejing 前縁衝上断層 (Huang *et al.*, 2015) による段丘面 10 の上下変位を示す AW3D30 による地形断面図.

Fig. 12. Anaglyph of contour and relief image-5 showing the tectonic landform of river terraces, along a thrust and fold belt on the foot of Tian Shan Mountains, NW China. 1-10: terrace surfaces. Contour interval is 3 m, Cd=0.4. Figure at right-bottom shows the vertical offset of the terrace 10 by the Hejing frontal thrust (Huang *et al.*, 2015) along the line a-a'.