

数値標高モデルを用いた変動地形調査

Survey on Tectonic Landform Using Digital Elevation Model

地理調査部 宇根 寛・小室勝也

Geographic Department Hiroshi UNE, Katsuya KOMURO

要 旨

活断層や活褶曲等の変動地形を抽出する手法として、詳細な数値地形データを用いて、コンピュータ処理により視覚化した画像を用いて地形を判読するとともに、地形データの統計的処理による定量的解析を行うことを試みた。この結果、コンピュータグラフィックスが地形判読に有効であることが明らかとなった。これまで、詳細な変動地形の把握は、知識と経験を必要とする空中写真判読に頼ってきた。これに、異なる観点からの新たな調査手法をもたらすものと期待される。

1. はじめに

地形を数値モデル（数値標高モデル（DEM：Digital Elevation Model））化して定量的な解析を行う研究は、コンピュータの普及以前から行われていた（例えば平野・横田 1976, Ohmori 1978 など）が、データの作成に非常な手間がかかること、コンピュータの処理能力の限界等の問題があった。近年、国土地理院により、約50m間隔のDEMの全国整備が完了し、一般に刊行された。これにより、だれでも容易にDEMが入手できるようになり、また、これを利用したソフトウェアも豊富に出回るようになった。

一方、ハードウェアの能力向上も相まって、CADやCGによる視覚化技術が急速に発達している。地形に関しても、DEMの解像度の向上と、高度な表現技術により、あたかも現実の地形を見ているような表現が可能になってきている。

DEMは、通常、等高線等のデータをもとに標高値を算出することで作成される。この場合、もともとは空中写真に撮し込まれている画像情報から一定の情報を抽出して二次的に作成されるのであるから、情報量は決して空中写真を超えることはない。従って、DEMを視覚化した地形画像は、もとの空中写真画像よりも解像度などの面においては劣っている。しかしながら、太陽光の地表における反射の強度をそのまま記録した空中写真は、植生、太陽の角度や天候による反射の違いなどの、撮影時のさまざまな地形以外の要因による情報も含んでおり、空中写真を用いて地形のみを目的とする調査を行う場合には、これらの「よけい」な情報を排除しながら判

読を行う必要がある。この技術は、職人芸ともいえる知識と経験を必要としている。空中写真を単にラスターデータとしてデジタル画像としても、このことは変わらない。一方、DEMは、地形を標高値という具体的な物理量としてモデル化し数値化されたものであることから、さまざまな画像処理や定量的解析を行うことにより、空中写真の「よけい」な情報をコンピュータの内部で取り除くことができ、次に示すような空中写真にない特徴を持たせることができる。

- 1) 植生による高度の増加分が排除され、純粋に地表の形態が表現される。
- 2) 天候や斜面の向きなどの空中写真撮影時の条件による画像の差が排除される。
- 3) 作成される画像が広域にわたって均質である。
- 4) コンピュータ処理により視点や陰影の付け方、高低差の強調などを自由に設定でき、地形の視認に最適な画像が得られる。

以上のことから、DEMからの画像の解析により、これまでの写真判読とは異なる観点で、地形を調査することが可能であると思われる。

本研究では、1) 東北地方日本海側の地域を対象に、広範囲のDEMを用いて広域にわたるシームレスの地形画像を作成し、広域的な地形の特徴を把握すること、2) 新潟県小千谷市北西部及び十日町市西部を対象に、昭和30年代の空中写真から高精度の地形データを作成して地形を再現し、変動地形を把握すること、の2つの手法を試みた。

当調査は、科学技術振興調整費による「日本海東縁部における地震発生ポテンシャル評価に関する総合研究」の一課題である地形・地質調査による「古地震調査（過去の運動の解明）」の中で行ったものである。

2. 広域DEMによる地形画像

2.1 画像の作成

国土地理院では、1999年4月に、50mメッシュ標高データの全国整備を完了し、「数値地図50mメッシュ（標高）」としてCD-ROMにより刊行した。これは、25,000分の1地形図を縦横に200等分したメッシュ（地上約50

m×50m)の中心の標高を、地形図の等高線を数値化したデータから、コンピュータ処理により、作成したもので、全国がCD-ROM 3枚でカバーされている。

このデータのうち、東北地方日本海側の青森県から新潟県にかけての地域のデータをもとに、コンピュータにより陰影処理を行い、広域の地形画像を縮尺20万分の1で作成した。陰影をつけるための光線の方向は任意に設定できるが、経験的に、左上からの光線による陰影図が最も自然な立体感が得られる。光線の方向により、リニアメントの見え方が異なることから、北西方向、北東方向の2つの図をそれぞれ作成した。

2.2 画像の判読

本画像からは、次のような地形の特徴が読みとれる。

- 1) 山地と低地(平野・盆地・谷底平野)の差が明瞭に表れている。山地と低地の境界に着目すると、活断層等の構造的な成因を示唆する直線状を示すもの(青森平野、津軽平野、庄内平野、新潟平野、会津盆地等)が目につく(図-1)。一方で、横手盆地東縁など、顕著な活断層が知られている山地低地境界であっても、直線状を呈さない場合もある。
- 2) リニアメントを広域的視点から抽出することができる。もちろん、これによって見いだされたリニアメントをそのまま活断層と認定することはできないが、この中には、「新編日本の活断層」(活断層研究会1991)等に活断層として示されていないものもあり、活断層であるかどうか詳細な検討を行うための有効な情報となる(2, 3参照)。
- 3) 岩木山、岩手山、鳥海山などの火山斜面のなだらかな地形が特徴的である。

な地形が特徴的である。さらに、鳥海山、磐梯山などの山麓には、山体崩壊による流れ山地形が明瞭である(図-2)。

- 4) 山地の「きめ」の差は、地質や形成年代の違いを反映している(図-3)。
- 5) 山地におけるリニアメントの方向は、おおむね南北方向が卓越している。これは巨視的な地殻応力を反映していると考えられる。
- 6) 砂丘などの特徴的な地形も明瞭である。

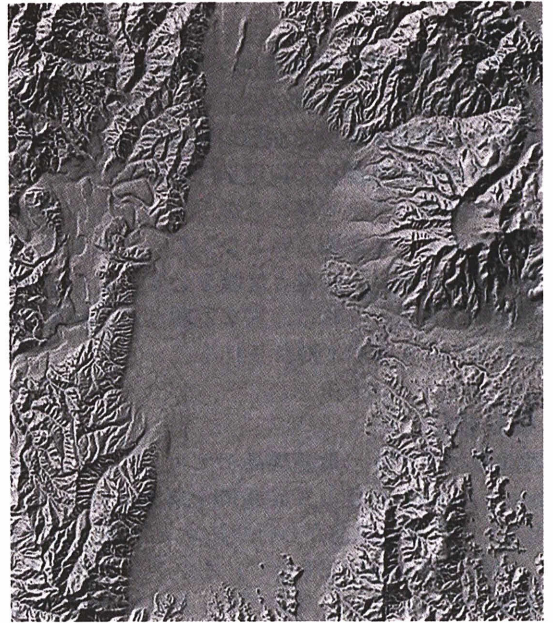


図-1 DEMより作成した会津盆地の地形画像



図-2 地形画像に表れた鳥海山



図-3 新潟県六日町付近

2.3 活断層の疑いのある地形の事例

上記の2)の一例として、図-4, 5に、津軽半島基部の地形画像と、当該部分の「新編日本の活断層」(活断層研究会1991)を示した。図-4に示した矢印は、陰影図に顕著なリニアメントとして表れているもので、「新編日本の活断層」には活断層として示されていないものを指摘したものである。

矢印aは、津軽山地西縁断層帯北部(図-5の7a)の平野側に並行するリニアメントである。ここには山地縁辺に開析の進んだ残丘状の地形が分布し、その平野との境がリニアメントを呈している。位置的にみて海食崖もしくは河食崖である可能性もあるが、巨視的にみると、津軽山地西縁断層帯が平野側にマイグレーションを起こした断層とも考えられる位置にある。

矢印bは浪岡撓曲(図-5の5)の北方延長にあたるリニアメントである。山地の稜線の東側を南北に縦断し、見かけ上東落ちを呈する。組織地形である可能性もあるが、南方延長の浪岡撓曲は明瞭な変位地形を伴う活断層であり、また、最近活動的な活断層であることが明らかにされた(青森県 1999)入内断層(図-5の4)とほぼ並行する位置に当たるこのリニアメントは注目に値すると考えられる。

矢印cは、同様に活断層の疑いがある黒石市街東部のリニアメントを北方に延長する部分である。ここに示したもののなかでは地形的に最も明瞭なリニアメントであり、これを形成し得る河川が存在しないこと、bと同様

に入内断層とほぼ平行することから、変位地形の可能性を検討する必要があると考えられる。

2.4 マクロ地形学の可能性

このように、DEMにより作成された広域の陰影図を判読することにより、これまでの調査で見落とされていた地形のマクロな特徴をとらえる可能性がある。従来、地形分類は、国土地理院の2万5千分の1土地条件図に代表されるような、微地形に着目して即地的な災害特性や地盤条件を明らかにすることを目的とした分類か、もしくは国土庁の土地分類調査で行われているような「大起伏山地」「低地」といった、大まかな地域の地形的特徴を示す分類のどちらかが行われてきた。今回作成したDEMによる広域の地形画像は、微地形の総体としての、いわばマクロな地形を表現する、初めての画像であるといえる。これを用いて、マクロな地形分類を行い、総体としての地形発達や地殻変動の考察を行う「マクロ地形学」の展開の可能性を秘めていると考える。実は、このような研究は、すでに戦前の地形学者が試みている(下村ほか 1934など)のものであるが、当時正確な地形図や空中写真などの適切な情報がなかったために、その後あまり省みられることがなかった。自然条件を踏まえた面的・定常的な国土の監視によるソフトな国土の管理が求められる今、あらためてその意義を問い直す必要があるのではないだろうか。

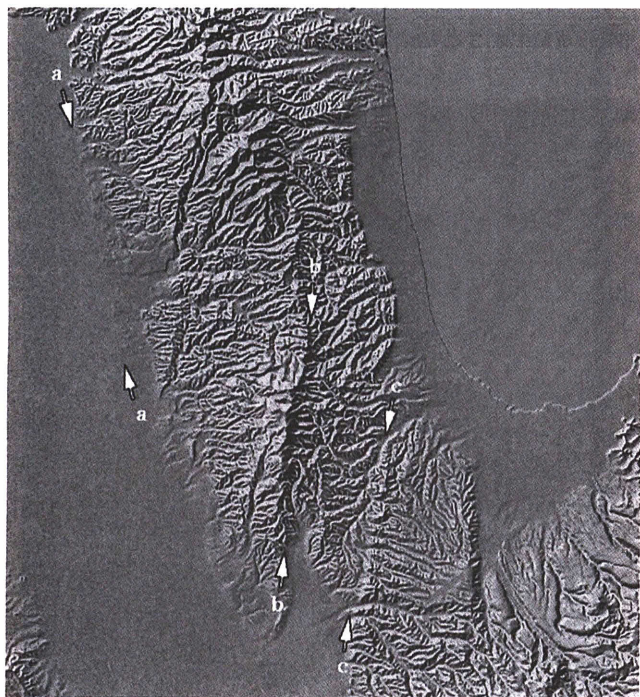


図-4 津軽半島基部の地形画像

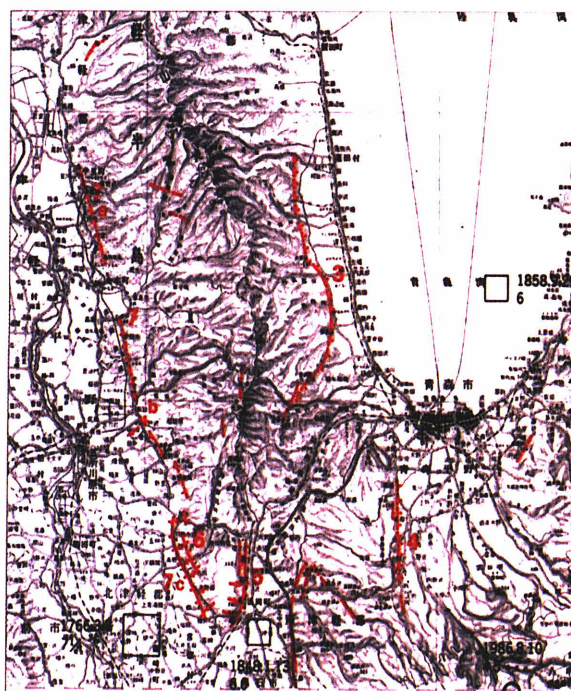


図-5 「新編日本の活断層」より

3. 詳細なDEMによる地形画像

一般に、詳細な変動地形の判読には、1万～2万分の1の大縮尺の空中写真が用いられる。本研究では、このような大縮尺の空中写真から、詳細なDEMを作成し、これを視覚化することによって、詳細な変動地形を判読するとともに、統計的手法による定量的分析の可能性を試みた。

3.1 調査の概要

調査の対象地域は、新潟県小千谷市北西部及び十日町市西部の2地区である。この両地区を含む信濃川中・下流地域では、河成段丘面に第四紀後期の地殻変動による変動地形が随所で観察できる(町田・池田 1969, 太田・鈴木 1979他)。また、近年の測地観測の結果から、歪みの集中帯に属するとされており(鷲谷・多田 1998)、現在においても活発な地殻変動が続いていると考えられている。

本調査では、地形等にかかわる情報をデジタル形式で取得するレベル2,500(1:2,500地形図相当の精度)デジタルマッピングを行って等高線データを取得した後、5mメッシュのDEMを作成し、そのデータを用いて地形を視覚化するとともに定量的な解析を試みた。

使用する空中写真としては、人間活動による改変が少ない昭和20年代及び昭和30年代に撮影されたものとした。使用した空中写真の撮影時期、縮尺等を表-1に示す。

表-1 調査地域と空中写真の諸元

地区名	調査面積	空中写真の諸元等			
		撮影年	写真縮尺	撮影高度	使用枚数
小千谷	15.0km ²	1962年	1:20,000	約3,000m	4
十日町	12.5km ²	1947年	1:17,000	約2,600m	5

3.2 地形データ

地形データは、1) 数値図化機を用いて取得した2m間隔の等高線データ(緩斜面については1m間隔)、2) 活断層等の変位地形を横切るように測線を定め、その測線に沿って標高を計測(数値図化機を使用)することによって作成した断面標高データ、3) 等高線データから計算処理により求めた5mメッシュDEMの3つである。

これらのデータの精度は、数値図化を行う場合に使用する写真上の座標と地上の座標(経・緯度)に関連を持たせるために行った観測の結果に基づく。GPS測量による現地観測を実施して座標を求めた地点(標定点)について、数値図化機で空中写真を標定したときの同地点の測定による残差を表-2に示す。水平方向の残差で大きい値があるが、この主な原因としては、空中写真撮影

後の経年変化、フィルムに撮し込まれている画像のボケやブレ等により、現地で設置した標定点の位置を空中写真上で定め測定したときの位置のズレ、また、撮影当時から変化していないと思われる地点(目標物)に標定点を設置したが、実際には若干の変化を受けていたことなどが考えられる。しかしながら、約50年前の空中写真を使用しての観測結果であること等を考慮すれば、現行の測量作業規程で定められた値を適用することは困難であり、さらに、垂直方向の残差は小さいことから、調査の目的である撮影当時の地形を把握するための地形モデルの信頼度は、十分であると判断できる。

表-2 データ計測に関する残差

地区名	水平方向の残差		垂直方向(標高)の残差	
	標準偏差	最大値	標準偏差	最大値
小千谷	0.76m	2.63m	0.15m	0.31m
十日町	1.93m	7.03m	0.93m	1.51m

3.3 地形の画像化

地殻変動による地形の変位を認定するために、詳細な地形データを用いて陰影図、傾斜分類図、等高線図、断面図、広域の傾斜成分を取り除いた時の標高段彩図等の画像を作成した。

3.4 計算機による地形分類

地形をいくつかの指標により定量化し、統計的手法で地形の特徴を把握することを試みた。ここでは、傾斜分類図から抽出した緩斜面を一辺が100mの方形に細分化し、各エリアについて、平均標高、傾斜度及び傾斜方位等の定量的な情報を求め、その値から地形の特徴の分類を試みた。各エリアを代表する傾斜度及び傾斜方位の算出方法は次のとおりとした。

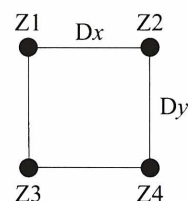
1) 第一に近隣の4点の標高データから作成される矩形面(1メッシュ)毎の傾斜度(S)及び傾斜の方位(θ)を次に示す式を用いて求めた。

$$S = \tan^{-1} \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{b}{a}$$

$$a = \frac{(Z1+Z3)-(Z2+Z4)}{2 \times Dx}$$

$$b = \frac{(Z1+Z2)-(Z3+Z4)}{2 \times Dy}$$



Z1, Z2, Z3, Z4は標高値
Dx, Dyはメッシュ間隔

2) 任意の範囲に完全に含まれるメッシュを抽出し、平均の傾斜度 (S) 及び傾斜方位 (D) を求め、その地形面を代表する値とした。

$$S = \frac{\sum S}{n} \quad \begin{array}{l} \sum S \text{は傾斜度の計} \\ n \text{はメッシュ数} \end{array}$$

$$D = \sin^{-1} \left[\frac{v}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right]$$

$$x = (\sin S_1 \cos \theta_1 + \sin S_2 \cos \theta_2 + \dots + \sin S_n \cos \theta_n)$$

$$y = (\sin S_1 \sin \theta_1 + \sin S_2 \sin \theta_2 + \dots + \sin S_n \sin \theta_n)$$

S_n は各メッシュの傾斜度

θ_n は各メッシュの傾斜の方位

3.5 画像に現れた地形の変位

3.5.1 小千谷地区

本地域では、信濃川の河成段丘面が異常な傾斜が示すことから、古くより段丘面の変形が指摘されており、また、現地調査や水準測量の結果から、段丘面の変形が活

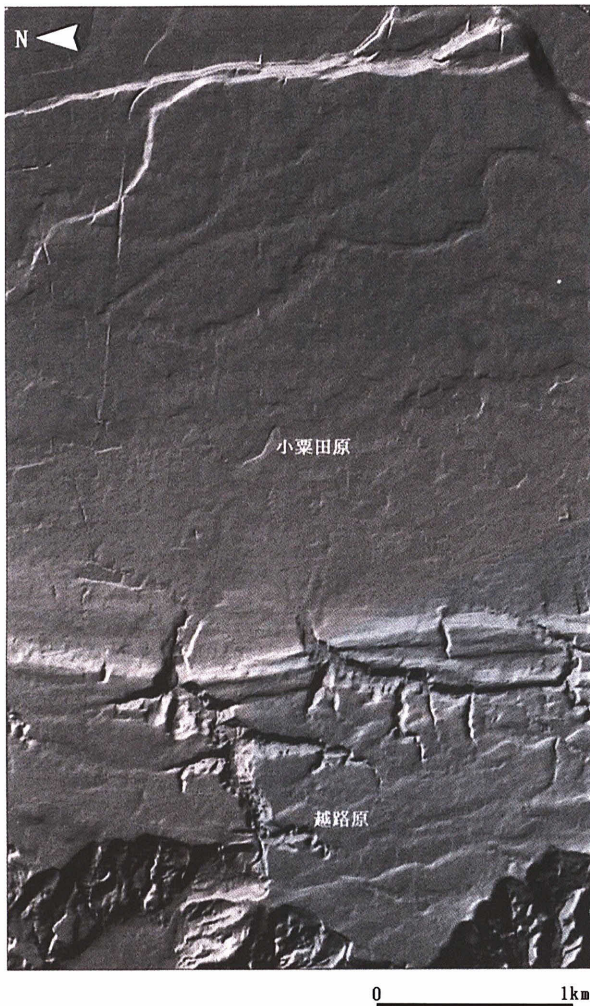


図-6 小千谷地区の陰影図 (光は北東方向から照射)

褶曲等によるものであることが明らかにされ、その変形速度等が求められている (中村・太田 1969他)。

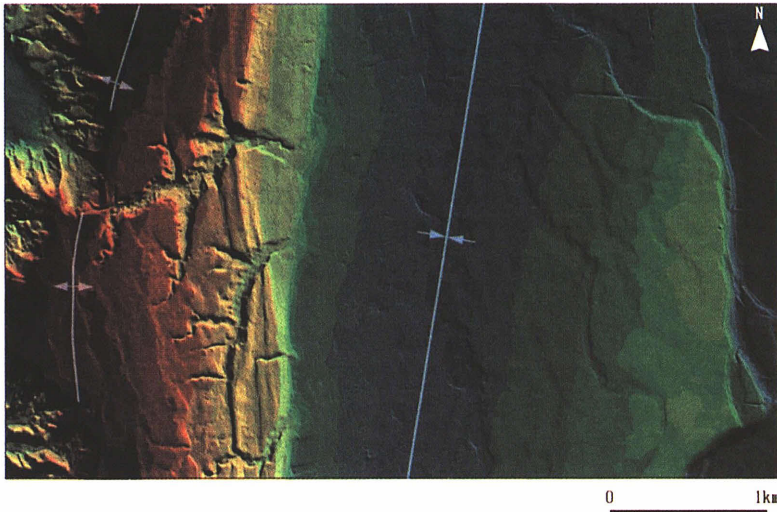
陰影図 (図-6) からは、調査地区西方で上位の越路原と、その東に広がる下位の小栗田原、それにそれぞれの面が変位を受けて形成された地形が明瞭に判読できる。越路原にはこれを浸食する谷が刻まれ、これらにより形成された複合扇状地が小栗田原の西部を覆っている。越路原の、小栗田原との段丘崖近くには、段丘崖と並行するいくつかのリニアメントがみられ、その背後に向斜状の低まりが並行している。小栗田原の中央にも、これらに並行する向斜状の低まりが南北に延びている。

早津・新井 (1982) は、両段丘面が、活褶曲とともに北-北北東方向への傾動運動を受けて累積的に変位していることを指摘している。すなわち、両段丘面の現在の地形から、活褶曲による変位と、傾動による変位を取り除くことができれば、(浸食・堆積の影響は別として)ほぼ段丘面形成時の河床勾配を示す面となることが予想される。このような想定に基づき、DEMを用いて地形変位のシミュレーションを行うことにより、変位量の定量化を試みた (図-7)。形成時の河床の傾きについては適当な指標がないことから、信濃川のこの付近の現河床勾配と同じと仮定してこれを段丘面の傾斜から取り除くと、活褶曲の影響と考えられる北-北北東に軸を持つ波状の変形と、面全体の北-北北東方向への傾きに分離できる。波状の変形は、向斜軸、背斜軸を中心としてほぼ対称となっており、最大の垂直変位は、越路原で約90m、小栗田原で約30mであった。また、傾きの大きさは、越路原と小栗田原では異なり、傾動が累積的に進行していることを示している。早津・新井 (1982) に従って、越路原の形成年代を13~15万年前、小栗田原を5~6万年前とすると、両段丘面の傾動速度はほぼ一致し、これを0.13~0.19mm/km・yとした早津・新井(1982)の推定結果を裏付ける値が得られた。

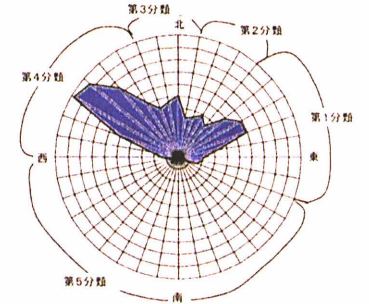
一方、計算機を用いて緩斜面における傾斜の方位を求めると、概ね5方向に分類できる (図-8)。さらに、斜度の情報を付加した結果 (図-9)、小栗田原では、西部で東北東向きの面、東部で北西向きの面、その中央部及び段丘面の東縁部で北向きの傾きを持った面に大別され、東部の北西向きの面においては、北北東-南南西を軸に比較的傾きが大きい面が偏ることが読み取れる。越路原では、北方で北西向きの面と東北東向きの面に分かれ、中央部では概ね東北東向きの面が多く観られるものの、南方においては、いくつかの小崖により囲まれた所で、特徴を掴みにくい結果となった。

3.5.2 十日町地区

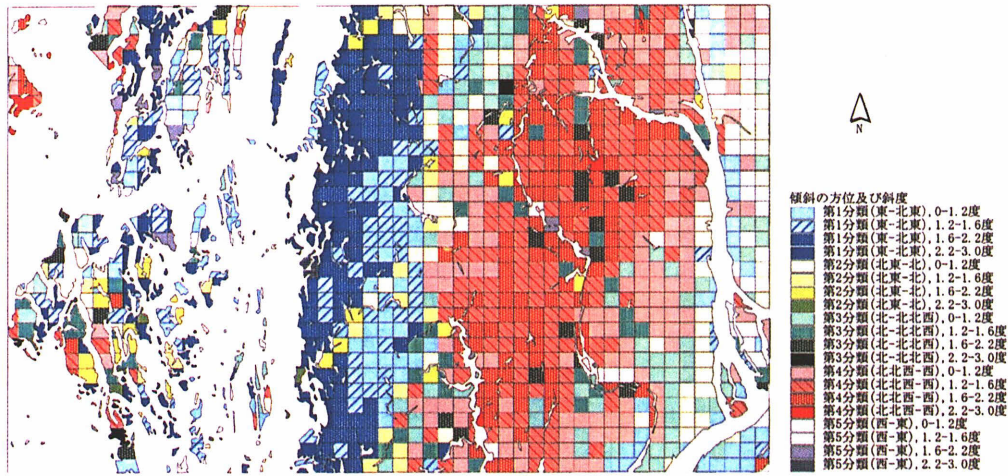
信濃川中流に位置する十日町付近では、河成段丘が発達しており、その段丘面が局部的に変位を受けていることで知られ (町田・池田 1969他)、当該地区においても、段丘面上に逆傾斜 (西上がり東下がり) を呈する地



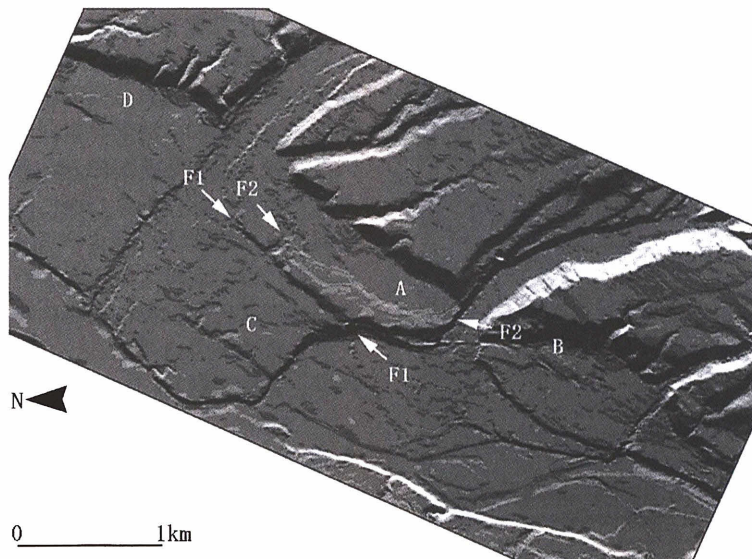
図一七 小栗田原のNNE-SSW方向の傾斜成分を取り除いた時の陰影段彩図



図一八 区分した地形面の傾斜方位毎の面積



図一九 傾斜方位及び傾度による分類 (小千谷)



図一〇 十日町地区の陰影図 (光は北東方向から照射)

形がみられる。ここには、東上がりの主断層とその背後に西上がりの副断層が存在していることが、専修大等のトレンチ調査によって確認された(太田 1998, 渡辺・鈴木 1999)。

これらを含む段丘面の変位は、地形データから作成した画像上に明瞭に現われた。陰影図(図-10)のA付近では、主断層(F1)の南東側で山地側低下の逆傾斜となり、西上がりの副断層(F2)と段丘崖の間に凹地を形成している状態、B付近では、東上がりの小崖とその背後の山地側低下の斜面が存在していることが判読できる。さらに、A付近の地形的特徴と類似した地形が、完新世に形成されたと考えられる段丘面にも並行して存在していること(C付近)、また、活断層の延長部に当たるD付近の段丘面上に、北東-南西方向の小崖等の変形

が認めらる。

5. おわりに

現段階において、数値地形データによる地形調査は、知識と経験を持つ技術者や研究者の行う空中写真判読には及ばないことは明らかである。従って、本研究の方法が空中写真判読に取って代わることはおそくないであろう。しかしながら、空中写真判読の補助的手段として用いたり、地形変位のシミュレーションなどの定量的分析と写真判読やトレンチ調査等の現地調査結果を併用するなど、変動地形研究における本研究の意義は大きく、さらに「マクロ地形学」などの全く新たな展開も考えられることから、今後とも積極的に本研究を進めていく必要があるだろう。

参考文献

- [1] 青森県(1999): 青森湾西岸断層帯に関する調査 第3回活断層調査成果報告会予稿集27-36
- [2] 早津賢二・新井房夫(1982): 信濃川下流地域(新潟県小千谷市付近)における河成段丘群の形成年代と段丘面の変異速度 地理学評論55-2, 130-138
- [3] 平野昌繁・横田修一郎(1976): 西南日本に例をとった電子計算機による地形数値解析 地理学評論49-7, 440-454
- [4] 町田 貞・池田 宏(1969): 信濃川中流地域における段丘面の変位 地理学評論42-10, 623-631
- [5] 中村一明・太田陽子(1969): 活褶曲 -研究史と問題点- 第四紀研究7-4, 200-211
- [6] Ohmori, H (1978): Relief structure of the Japanese mountains and their stages in geomorphic development: Bull. Dept. Geogr. Univ. Tokyo, 10, 31-83
- [7] 太田陽子・鈴木郁夫(1979): 信濃川下流地域における活褶曲の資料 地理学評論52-10, 592-601
- [8] 太田陽子(1998): 庄内平野および十日町盆地東縁における活断層の発見およびトレンチ調査による古地震の検討 月刊地球20-8, 454-459
- [9] 活断層研究会編(1991): 新編日本の活断層—分布図と資料—, 東京大学出版会, 437p
- [10] 鷺谷 威・多田 堯(1998): 日本海東縁部の地殻変動とテクトニクス 月刊地球20-8
- [11] 下村彦一・花井重次・渡辺 光・岡山俊雄・椋山正英(1934): 地形区, 岩波講座 地理学 [自然関係緒論]
- [12] 渡辺満久・鈴木康弘(1999): 活断層地形判読, 古今書院, 90-93