

◆ 特集：新しい時代に向けたダム技術 ◆

空中写真による第四紀断層の客観的判読の試み

倉橋稔幸* 品川俊介** 阿南修司*** 脇坂安彦****

1. 認識しにくい山岳地域の第四紀断層

日本列島のようなプレート境界に位置する地域では、地震災害は避けられない問題で、そのうち内陸部での地震災害の一部は、第四紀断層¹⁾に起因する。第四紀断層は、第四紀(約164万年～現在)に活動した断層であるが、そのうち、極めて近き時代(概ね第四紀後期;約30万年前以降)に地殻変動を繰り返し、今後も活動する可能性のある断層が活断層と呼ばれる。しかし、断層の今後の活動性については、よく分からないのが実状であるので、最近まで繰り返し活動した断層を、今後も活動する可能性が高いと評価するものである。活断層がダム及ぼす影響は地震動と地盤変位の二つに分けられる。地震動については耐震設計で対処されているが、地盤変位は基本的に設計による対処が難しい。したがって、現状ではダム建設にとって問題となる活断層の分布地はダムサイトとして避けられている。そのため、ダムサイト選定の際には、ダムとの位置関係を明確にするべく、調査の初期段階に空中写真による地形判読が実施され、活断層の有無が確認される²⁾。しかし、実際には地形判読のみから第四紀断層と活断層とを区別することは難しく、活断層であることの確認は地形判読後の詳細な現地調査により行われる。このため、本論では活断層と区別せず、第四紀断層として一括した。

断層の活動が度重なると、地形にずれを累積し、空中写真や衛星写真から線状模様、または通常の堆積や浸食作用で説明できない異常地形として認識できる。しかし、ダムが建設されることの多い山岳地域では、一般に第四紀断層を見出しにくい傾向がある。それは、①山地内には変位を認定すべき基準となるような、同一の時間に形成された地形面がそもそもないことが多いこと、②浸食・

堆積速度に比較して相対的に断層の平均変位速度が小さいか、一回のずれ量が小さいため、断層変位の証拠自体が失われるような環境にあることによっている。

一方、空中写真による地形判読は、第四紀断層を広範囲かつ効率的に調査できる手法である反面、定性的であり、個人の技術的熟練度に負うところが多い。それは、「第四紀断層の確からしさ」である地形的要因と、「判読の技術的熟練度」である人的要因とが複雑に絡み合っているからである。さらに、第四紀断層を構成する地形要素が不明瞭な場合は、その判読はさらに困難なものとなる。しかも、判読される線状模様のすべてが第四紀断層という訳ではなく、地質構造に由来するものも含まれている。その結果として、個人間で判読される第四紀断層の存在有無や断層位置を異ならせ、断層の詳細位置を推定する際の大きな課題となっている。

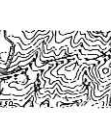
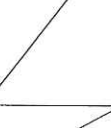
そこで、本論では、判読結果に個人差が生じやすい山岳地域における第四紀断層地形判読の基本的考え方と記載方法を取りまとめた。

本論で示す地形要素判読図(グラビア参照)は、第四紀断層を構成する地形要素の連続性、明瞭度、変位基準との関係などに注目し、客観的に判読した結果を示すものである。「客観的」とは、不明瞭な第四紀断層の位置を特定する際に、その判読過程が第三者に理解できるよう、合理的な判読根拠として第四紀断層の構成地形要素一つ一つを明示することを意味する。なお、本研究成果は、土木研究所と民間13社との共同研究「活断層の位置および規模の定量的認定法に関する研究」による成果の一部を取りまとめたものである^{3) 4)}。

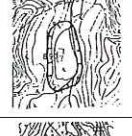
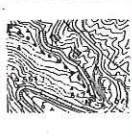
2. 第四紀断層の地形要素

本論の第四紀断層の地形要素判読がこれまでの地形判読と異なるのは、第四紀断層は個々の地形要素から構成されていると考えていることにある。

表-1 地形要素と地形面の凡例

①崖地形などの地形要素				
地形要素	記号	表記例	解 説	異判読しやすい地形
崖または低崖(s)	 (崖斜面が図示できる場合)  (崖斜面が図示できない場合)	 	崖は、普遍的に見られる地形で、 (1) 浸食によってできるもの(段丘崖など) (2) 地すべりや崩壊に伴ってできるもの(崩壊、地すべり頭部の滑落崖など) (3) 地殻変動によってできるもの(断層崖、拗曲崖) (4) 人工的なものなどがある。 ここで抽出の対象となるのは(3)である。断層崖は一般に比較的直線的である。河川などによる浸食では、弧状にえぐったような形態を示すので区別が可能である。ただし、浸食を受けた形態をしていても、浸食前は、付近に断層崖があったと推定できる場合は、抽出しておくべきである。また同様に、元々断層崖であったところが人工改変されている場合も抽出すべきであり、注意を要する。 年代の異なる地形面などの変位基準を切断する場合、古いものほど大きな変位(特に累積性)が確認できれば、断層崖である可能性が大きい。 比高数 10m以下の断層崖を低断層崖と呼ぶことがある。大きな断層崖の基部に、新しい断層変位の結果生じた比高数mの低断層崖が確認される場合がある。	注目する範囲の違いによって、次のような地形と異判読しやすいので注意する。 逆向き崖(崖の部分のみに注目した場合) 三角末端面、遷緩線、直線谷(崖の基部に注目した場合)
逆向き崖(rs)	 (斜面の下方を白抜き矢印で示す)		周辺斜面の傾斜方向に逆行する方向の崖を、特に逆向き崖として区別し、上記の崖と同様に断層変位によってできたものを抽出する。断層変位によるもののほか、クスタ等の組織地形、地すべり移動体の中に形成されるもの、山稜線付近で稜線ののびる方向に発達するもの(二重山稜)などがある。 逆向き崖は、新しい断層変位を示す有力な証拠となることが多いので、重要である。	崖、低崖(崖の部分に着目した場合)
拗曲崖(fs)	 (矢印の長さは拗曲帯の幅を示す)		地形面が拗曲変形した地形であり、幅の広い上に凸の急斜面である。新第三系、第四系の軟らかい地質で多くみられる。 ここでは、変形領域の幅が図上で3mm以上のものとし、3mm未満は崖として区分した。一般に地形面の保存がよい所でしか判断が困難である。 縦断面型が上に凸型の類似地形として周水河性斜面が挙げられるが、拗曲崖は変形領域と下部の遷緩線がいずれもシャープで区別できる。	注目する範囲の違いによって、次のような地形と異判読しやすいので注意する。 崖、低崖、ふくらみ地形(拗曲の部分に注目した場合) 遷緩線(拗曲の基部に注目した場合)
地形面の勾配異常(tl)	 (傾動方向を黒矢印で示す)		地形面は、その成因によって、形成時の勾配がある程度決まっている。ところが、地形から推定されるその成因と勾配が食い違う場合がある。この場合、断層活動に伴う地盤の傾動などが考えられる。周辺の地形配列と併せて考察することにより、近傍に断層位置が推定できる場合がある。	拗曲、ふくらみ地形(勾配異常部周辺も広く抽出した場合)
三角末端面(t)	 (傾動方向を黒矢印で示す)		稜線を、稜線の延伸方向に直交する方向で切断したような形状の崖。崖面の形状が三角形になる。山地平野境界に位置することが多く、山側隆起、横ずれ変位により形成された可能性がある。このような形態の崖は、河食崖としても形成される。また、最大傾斜方向をなす斜面であることが多く、抽出すべき地形要素であるか否かの吟味が必要である。	崖・低崖、異種地形境界(基部に着目した場合)
高度不連続(d)	 u u/d d up/down		ある部分を境にして地形面等の高度分布に差がある場合、高度不連続として抽出する。たとえば大きな谷の兩岸で山地高度に差がある場合など、高度差が生じている場合を明確に特定できない場合などに用いる。	ふくらみ地形(不連続となる部分に着目した場合)
②屈曲などの地形要素				
地形要素	記号	表記例	解 説	異判読しやすい地形要素
谷の屈曲(ov)	 谷幅が広い場合		谷がクランク状に屈曲したもの。単独では認定せず、リニアメント沿いに同方向の変位を示唆するその他の屈曲等の要素が1つ以上存在する場合に抽出する。いくつもの要素が同一方向の横ずれを示唆する場合、「系統的な横ずれ」という。系統的な横ずれが見られる場合、活断層である可能性が高いと言える。	注目する範囲の違いによって、次のような地形と異判読しやすいので注意する。 直線谷(屈曲の程度が小さい場合) 穀頭谷(屈曲した箇所の下流のみに着目した場合)
尾根の屈曲(or)	 谷幅が広い場合		尾根がクランク状に屈曲したもの。	風陰(屈曲部のみに着目した場合)
異種地形境界・崖線の屈曲(ob,os)	 異種地形境界の屈曲(ob) 崖線の屈曲(os)		山麓線などの異種地形境界、段丘崖などの崖線がクランク状に屈曲したもの。	崖・低崖、異種地形境界(屈曲の程度が小さい場合)
その他変位基準の横ずれ(of)	 (線種適宜)		変位基準となりうるものの横ずれ。たとえば地すべり堆積物の横ずれ。	(他の横ずれ地形要素)
分離丘陵(h)	 II		横ずれ変位などによって稜線から切断されて孤立した小地塊。上流側の河川の出口を塞ぐ位置にあることがある(この場合閉塞丘と呼ぶ)。開析の進んだ地域では、孤立した丘陵が点在し、分離丘陵の抽出が困難な場合がある。	ふくらみ地形(横ずれ変位が不明瞭な場合の異判読)

③変位不明瞭な地形要素

地形要素	記号	表記例	解 説	異判読しやすい 地形要素
傾斜 変換線 (ks,kg)	 逕急線(ks)  逕緩線(kg)		傾斜の急変点を空間的に連ねた線で、斜面上部から下方に向かって傾斜が急になる線を逕急線、緩くなるものを逕緩線という。崖や撓曲崖は傾斜変換線の組み合わせで表現することが可能であるが、ここでは崖や撓曲崖としては不明瞭なものや、傾斜した斜面中に認められるものを指す。一般に変位基準が不明瞭で、断層変位の証拠となることは少なく、リニアメント位置の把握に利用される。	注目する範囲の違いによって、次のような地形と異判読しやすいので注意する。 崖・低崖、逆向き崖、撓曲崖（傾斜が変化する部分に着目した場合）
截頭谷と 風隙 (wg)	 風 隙  截頭谷		上流部を争奪された河谷を截頭谷という。また、截頭谷の最上流部には、谷の横断面が鞍部として存在する。これを風隙という。河川争奪は、通常の浸食によってもできるが、断層の横ずれあるいは縦ずれによっても形成される。截頭谷や風隙の抽出においては、その成因を考察することによって、断層活動様式を推定することができる。	鞍部、三角末端面（風隙の部分 を異判読） 谷の屈曲（谷全体として判読した 場合）
凹地 (dp)	 または 		凹地は、カルスト地形を除くと、通常の浸食作用では形成されない。崩壊や地すべりに伴うもののほか、断層活動に伴って形成される。断層の縦ずれまたは横ずれ変位に伴って物質が粗になって凹地ができることがある。凹地はしばしば水が溜まり池となる。	崖・低崖（凹地の一方の面につ いて抽出した場合）
ふくらみ 地形 (bl)			ほぼ平坦であったと思われる場所がふくらんだ地形で、バルジともいう。横ずれ断層に伴って生じるとされている。断層の横ずれによって両側から圧縮を受けてできた細長い凸地形を圧縮尾根（プレッシャーリッジ）と呼ぶ。	撓曲、地形面の勾配異常、高度 不連続（ふくらみ部のとらえ方 の違いによる異判読）
直線谷、 直線的な 谷底平野 (lv)	 または 		直線谷は様々な要因で形成されるが、断層線に沿って形成されることは多い。それは断層沿いが破碎され、浸食されやすくなるためと考えられる。直線谷はリニアメントの位置や連続性を知る上で重要である。 山地内で局所的に谷底平野の発達がよく場合は、断層変位によって河谷がせき止められて堆積が起こった可能性があるので注意が必要である。	崖・低崖、三角末端面、異種地 形境界 （基部ではなく、全体を判読した 場合） 谷の屈曲（屈曲の程度が小さい 場合）
異種地形 境界 (b)	 （やや太い破 線）		山地—平野境界、丘陵—平野境界などのように、異なる地形の境界となる部分。 これらの地形境界付近には、断層が存在する場合が多い。周辺に変位地形が見あたらない場合、断層が地下に伏在する場合もあるので、その場合には有用である。	三角末端面（基部ではなく、全 体を判読した場合） 崖線の屈曲（屈曲の程度が小さい 場合）
鞍部 (c)			稜線上の2つの峰の間に挟まれる低まり。 浸食地形として普通に形成されるが、破碎の影響で浸食を受けやすい断層沿いは、鞍部が形成されやすい。そのため、リニアメントの抽出において重要となる。	風隙（低まり箇所がやや長い場 合）
谷中分水 界 (dv)			谷底平野の中に分水界が存在する、特異な地形。水流の出発点である河谷の最上流部に平野が形成されることは通常あり得ず、谷中分水界の存在は、河川争奪が起こったか、または局所的な隆起、傾動などにより、途中から流下方向が変わったことを示す。その原因の一つとして、断層活動による場合がある。	鞍部（規模が小さい場合）

④地形面など

地形要素	記号	表記例	解 説	異判読しやすい 地形要素
段丘面・ その他の 変位基準			断層の活動性を判定するためには、段丘面、火山灰堆積面、火砕流堆積面、溶岩流の面などの変位基準面（ずれが生じている場合その変位量が推定できるもの）に着目し、これらが変位しているか調べる。	断層をはさむ地形面が同じか どうか、また人工改変面（盛土・切土）でないかどうか に注意する。
崖・急 傾斜・ 扇状地			急崖の基部に、崩落物によって構成される急傾斜の堆積地形を崖・急傾斜、谷口を中心に形成される、半円錐形の砂礫堆積地形を扇状地、扇状地のうち急傾斜で小規模なものを沖積扇という。断層崖付近に現れることがあり、しばしばこれらが変位基準となる。	
開析度の 違い			ある部分を境にして、それぞれの開析度が異なる場合、境界を挟んで地形の年代や地質が異なる場合がある。	—
写真の陰 影、キメ			空中写真の撮影条件（季節、天候、光の方向など）や植生、土壌水分量などによって、写真の陰影やキメが線状の模様を呈することがある。これは微地形や地質と関係する場合があり、リニアメントの位置や連続性の把握に役立つ場合がある。	—

これまでの第四紀断層の認定は、第四紀断層を挟み両側の変位基準となる地盤に系統的なずれが生じており、ずれが繰り返された形跡を見出すことにより行われた⁵⁾。変位基準として挙げられるのは、地形面、線状の地形・水系、地層・岩脈、特有の地質構造、人工構造物などである。その変位基準が明瞭であればあるほど、線状模様の判読は確実なものとなり、第四紀断層の位置や活動度の推定精度を向上させることができる。

しかし、山岳地域では、変位基準そのものが不

表-2 断層変位構成要素の対比

松田ほか(1977)6)		岡田(1990)7)		本論
崖地形	変動崖 断層崖 低断層崖 拗曲崖 三角 末端面* 逆向き 断層崖	断層崖地形	断層崖 低断層崖 拗曲崖 三角 末端面* 逆向き 断層崖	① 崖地形などの地形要素 崖または低崖* 拗曲崖 三角 末端面* 逆向き崖* 地形面の勾配異常* 高度不連続*
凹地形	変動凹地 地溝 小地溝 断層凹地 断層陥没地 断層池* 断層鞍部 断層角盆地	断層凹地	地溝 小地溝 断層凹地 断層陥没地 断層池* 断層鞍部 断層角盆地 断層谷	② 凹地* 鞍部* 直線谷*
凸地形	変動凸地 地壘 ふくらみ* 断層地塊山地 傾動山地	断層凸地	地壘 半地壘 小地壘 ふくらみ* 断層地塊山地 傾動地塊山地 圧縮尾根 断層分離丘	③ 変位不明瞭な地形要素 ふくらみ地形* 傾斜 変換線* 異種地形境界* 谷中分水界* 数頭谷と風陵*
横ずれ地形	横ずれ地形 横ずれ谷 横ずれ尾根 閉塞丘	横ずれ地形	截頭谷* 風陵* 横ずれ地形 横ずれ谷 横ずれ尾根 閉塞丘 段丘崖の食違い 山麓線の食違い	④ 横ずれ地形谷の屈曲* 尾根の屈曲* 閉塞丘 その他変位基準の横ずれ異種地形境界・崖線の屈曲*

*印の地形は他の原因でも形成されるので、必ずしも断層変位地形とは限らないとされているもの。

明瞭であることが多い。第四紀断層起源の線状模様は表-1の凡例に示すように様々な地形要素から構成される。本論の地形要素区分では、断層が活動した可能性を示すものとして、地形要素判読において記載すべき地形要素を、地形面勾配の異常、地形面、地形線あるいは人工構造物などの切断、変形の系統性(複数の変位基準が同一方向に変形)、変位の累積性(古いものほど大きな変位)などの四点に着目し、以下の三つに分類した。すなわち①崖地形などの地形要素、②屈曲などの地形要素、③変位不明瞭な地形要素である。このうち、変位基準の明瞭な変位を示す地形要素は、①と②の地形要素である。また、③変位不明瞭な地形要素とは、断層変位を過去に受けた可能性があるが、断層による変位との関連が不明な地形要素のことである。

なお、①～③の地形要素は、断層変位を前提とした区分や表現としていないものの、断層変位地形と形態的に似ていることから、既存の松田ほか⁶⁾、岡田⁷⁾などの地形区分と表-2に示すように概ね対比される。

3. 第四紀断層の地形要素判読図作成

3.1 地形要素判読図の位置づけ

これまでのダムサイト選定の際に行われる第四紀断層の調査では、まず、ダムサイトから半径50km以内の既存文献調査、次いで半径10km以内の空中写真による地形判読が実施され、文献調査から抽出された第四紀断層と、空中写真による地形判読から抽出された線状模様とが記載される。その後、特定の第四紀断層と線状模様についての現地地質調査が行われている²⁾。本論の地形要素判読は、半径10km以内の空中写真による地形判読後に位置づけられる。判読対象となるのは、文献調査や10km範囲内の地形判読等の結果から、桑原¹⁾のL1未満となった線状模様(L3未満の判断が多少困難であるものまで含める)や、活断層研究会⁵⁾の確実度「および」に相当する第四紀断層である。これらを縮尺2万分の1程度の空中写真を用いて地形要素および変位基準面を詳細に判読する。第四紀断層の地形要素判読図作成の流れを図-1に示す。

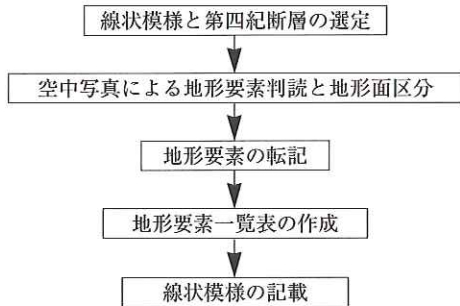


図-1 第四紀断層の地形要素判読図作成の流れ

3.2 地形要素判読と地形面区分

3.2.1 判読範囲

まず、選定された線状模様・第四紀断層ごとに空中写真判読を行い、断層変位地形である可能性のある地形要素やその他の関連地形要素を判読する。変位基準や地形要素が判読できる範囲を基本とし、線状模様や断層から両側3kmの範囲を目安とする。

3.2.2 地形要素判読

地形要素判読では、地形要素を抽出する。地形要素については、表-1に示した①崖地形などの地形要素、②屈曲などの地形要素、③変位不明瞭な地形要素を抽出する。新しい変位地形の疑いがある地形的証拠と、それに付随する線状模様構成要素をすべて記載する。記載にあたっては、空中写真に直接記載する。ただし、複数の要素に該当する場合、空中写真が煩雑になりすぎるので全てを記載することはできないので、断層の変位が明瞭な①崖地形などの地形要素や②屈曲などの地形要素を優先的に記載する。

第四紀断層地形要素を判読するには、縦ずれまたは横ずれの第四紀断層の特性と、各地形要素の空間分布の特徴、および地形要素の組み合わせの特徴に注目する。これまでの本研究の成果³⁾から、活断層では、日本の山地の地形条件において、線状模様の延長1kmあたり最大10箇所程度、平均的には1kmあたり数箇所程度の断層変位を示唆する地形要素が見出されることが多い。この出現状況は地形の起伏の程度(谷密度)や浸食・堆積場の違いによって異なるものであり、必ずしも活動性の高い断層において地形要素の出現頻度が高くなるわけではない。むしろ数は少なくとも、あるいは出現頻度は小さくとも、第四紀断層の変位を確実に示す地形要素を見出すことが重要である。

しかし、活動性が高い断層は、ある一定の延長以上の規模であることが多いので、抽出される地形要素の総数も多くなり、そのなかに特徴が明瞭な地形要素が含まれる可能性が高い。また延長が2kmより長い線状模様では、第四紀断層地形要素の連続性を確認するのが比較的容易であり、判読者による個人差も小さい傾向にある。表-3に示すように各々の断層変位地形の特徴にしたがって、判断するとよい。

表-3 第四紀断層における特徴的な地形要素

組み合わせ (断層タイプ、地形場別)		
断層タイプ 地形	縦ずれ断層 (逆断層)	横ずれ断層
山地	①「逆向き崖」「分離丘陵」「遷緩線」が線状配列地形	①「谷の屈曲」と「逆向き崖」または分離丘陵 ②「谷の屈曲」とこの間を補間する「崖」「逆向き崖」「三角末端面」「鞍部」「遷緩線」など ③「鞍部」列とこの間を補間する「直線谷」「遷緩線」「逆向き崖」など
山地—平地境界	①「崖、撓曲崖、三角末端面」とこれを補間する「異種地形境界」 ②「崖」や「三角末端面」からなる線状模様の平行配列	特になし
山間谷底平野	特になし	「三角末端面」「直線谷」+谷中に「谷中分水界」「風隙」
平地	「撓曲崖」ないし「低崖」が単独で出現	特になし

3.2.3 地形面区分

第四紀断層の地形要素を判読する地域においては、変位基準となり得る地形面(表-1 ④参照)も同様に判読する。地形面は、第四紀断層地形要素の形成時期、断層活動の累積性を推定する根拠となる。地形面の区分には、山地および丘陵地の斜面、台地、低地および段丘面、扇状地、改変地などがあるが、地域により抽出できる地形面は異なる。

3.3 地形要素と地形面区分の転記

次に空中写真に記載した地形要素と地形面を2万5千分の1地形図に転記する。地形要素の転記は、各地形要素を地形図に鉛筆もしくは製図用ペンなどの筆記用具で記入する。風隙や谷中分水界のように一点で示す地形要素については、その点

位置を記号の中心に合わせる。また判読した地形要素が使用する地形図上で改変されている場合も、その位置を推定して記入する。転記に際しては、空中写真とできるだけ同時期の旧版地形図を使用することが望ましい。また、転記内容が重複し図面が煩雑になる場合には、第四紀断層地形要素と地形面区分は別々の図面に記入してもよい。

3.4 地形要素一覧表の作成

次に地形図に記入した一連の線状模様属する地形要素にそれぞれ番号を付け、表-4に示す第四紀断層地形要素一覧表に整理する。

表-4 入山断層を例とした地形要素一覧表
(第四紀断層の地形要素図は、グラビアを参照)

断層名	判読結果								
	線状模様および 構成地形要素				地形の 明瞭度 ○△	延長 (km)	見かけの ずれ量 (m)	ずれの 向き	記事
	線状模 様番号	地形要素		名称					
		主	副		記号	名称			
入山断層	1								
	1	1	a	地形面の 勾配異常		0.50			
	1	2				2.10			
	1	2	a	崖	○	1.70			
	1	2	b	高度 不連続		0.40			
	2					1.70			
	2		a	崖	○	0.20			
	2		b	鞍部					
	2		c	谷の屈曲			200	右	
	2		d	逆向き崖		0.20			
	2		e	鞍部					
	2		f	遷緩線		0.25			
	3					0.60			
	3		a	逆向き崖	△	0.10			
	3		b	逆向き崖	△	0.20			

一覧表には、線状模様番号、地形要素、地形の明瞭度、延長、見かけのずれ量、ずれの向きなどを記入する。

線状模様番号は、原則として端が北に位置するものから順番にアラビア数字で表す。そのうち、線状模様が分岐しているものについては、主断層と思われるものを「○-1」とし、以下、枝分かれしたものには「○-2」、「○-3」として枝番号をつける。

また、各線状模様属する地形要素については、

小文字のアルファベットでa、b、c・・・の順に示す。

地形の明瞭度については、崖、低崖、逆向き崖、撓曲崖、三角末端面の明瞭度を、開析の程度から表-5に示す定性的な基準を用いて行う。

表-5 地形要素明瞭度の判断基準

地形要素	明瞭 (○)	不明瞭 (△)
崖地形	狭い幅で高度変化が明瞭である	広い幅で高度変化する
屈曲地形	3つ以上の地形要素で系統的に変位する	1~2の地形要素に変位が限られる
三角末端面	開析を受けていない谷地形が発達する	開析を受けて
その他	明らかに成因が推定できる	成因が必ずしも特定しがたい

記事欄には、判断に迷った場合や別な地形要素としても解釈可能な場合など、判読時に気がついた点を記入する。

3.6 線状模様の記載

判読対象とした線状模様に対して、①崖地形などの地形要素と②屈曲などの地形要素が、一連のまとまった連続性を示すと判断した場合には、第四紀断層起源の線状模様として、地形要素が転記された地形図に重ねて記入する。線状模様を第四紀断層地形要素判読図の上に表す際には、それぞれの地形要素をどのように結ぶかについての判断が必要である。したがって、記載にあたっては下記のような判断の基準と要領に基づき、できるだけ客観性を持たせることが必要である。

- ①線状模様は、各地形要素から推定した断層面のずれの方向を考慮し、その形状に合わせて地形要素間を連続して結ぶ。
- ②崖地形などは、断層変位後に浸食によって後退していることもある。崖の直下に線状模様を引くかどうかは周囲の地形状況と合わせて判断する。
- ③河谷・沖積低地の内部において断層変位を示す地形が認められない場合でも、その両端部において線状模様が明瞭で、センスや方向性が同一と認められる場合は、伏在部として点線で内挿させ、連続した線状模様の一部として表現する。
- ④河谷・沖積低地などにおいて断層変位を示す地形が認められない場合、またその片端までのみ線状模様が明瞭である場合は、それを外挿せずに確認できる地形要素の位置で断層線を止める。

⑤線状模様から断層によって生じた変位の向きが読みとれる場合は、縦ずれ、横ずれを表す副記号を記入する。

そのほか、線状模様の末端は、その延長上で断層変位がまったく認められなくなる場合と、ある程度の間隔を置いてその近傍に隣接する他の線状模様に移り移る場合とがある。線状模様の末端部は、第四紀断層の地形要素の明瞭さが失われるか連続性が途切れ、断層変位が認定できなくなることによって認識されるが、そこが末端であることを確実に示す基準を見出すことは容易ではない。したがって、断層の末端部であるかどうかは、線状模様全体の形状と断層変位地形の明瞭さに注目し、先端がどこまで確認できるかについて慎重に判断する必要がある。一般に線状模様の末端部を特徴づける地形要素は限られ、必ずしも断層変位を明瞭に示さない崖地形（崖、線緩線、三角末端面など）や、直線谷、鞍部などが多く、横ずれが明瞭な尾根・谷の屈曲や分離丘陵などは少ない傾向がある。

その他、最近の研究では、線状模様の末端に特有の地形的特徴があり、それは断層の破壊過程と破壊の範囲を示すこと、およびそれを利用して断層が一度に活動する範囲を推定することができることが指摘されている。中田ほか⁸⁾は、断層の分岐形状を断層セグメント境界の推定指標とした。また、亀・山下⁹⁾は断層破壊の成長シミュレーションから、断層が進行方向に向かって屈曲あるいは分岐して停止することを明らかにした。これらのことから、線状模様に分岐や屈曲が生じ、その延長が明瞭でなくなっている場合には、その分岐や

屈曲部分が線状模様の末端である可能性が高いと考えられる。

4. 線状模様の確実度評価

地形要素判読や地形面区分の結果に基づき、第四紀断層の可能性のある線状模様を、表-7の桑原¹⁾の確実度区分に応じて区分する。詳細な判定基準については、各地域特性に応じて論理的な基準に基づいて行う。

地形要素の判読作業は重要な位置を占めるが、図上に描画される線状模様はあくまでも地形要素の分布から解釈した結果である。よって、第四紀断層の確実度評価にあたっては、それだけの情報で第四紀断層の確実度評価が完結するわけではないことに留意しなければならない。すなわち、現地踏査をはじめ他の調査（手法）により、地形判読結果を検証し、地形判読では得られない地質構造、地質層序、堆積物や地形面の年代情報を考慮する必要もある。したがって、地形判読作業段階では疑わしきものも含めて表現しておき、最終的には、その他の地質調査などの結果を考慮して総合的に評価する必要がある。

従来の第四紀断層における確実度の判定は、変位基準に基づいて行われている。しかし、これまでも説明してきたとおり、山岳地域では変位基準そのものが不明瞭であることから、変位基準に

表-7 線状模様の確実度分類 桑原 (1987) ¹⁾

分 類	記 事
L1	地質構造を反映していると思われる線状模様のうち、ごく最近（第四紀程度）の変位を示す地形である確からしさの最も高いもの。具体的には、変位の基準となる地形が明瞭なものの。すなわち、線状模様の両側の尾根、谷、地形面が極最近までひと続きであったことが明らかに判り、それが線状模様によって系統的に変位（変位の向き、変位量等がほぼ同じようになっていること）しているもの。したがって系統的でないもの、例えば、同時代に形成された地形がところによって変位したり、しなかったりするものはここには含めない。
L2	L1に準じ、変位を示す地形である確からしさのやや高いもの。すなわち、段丘などの明瞭な変位基準がないために、確実度は低い、尾根や谷が横ずれ様に配列していたり、直接的な低断層層と思われる地形があって、変位の向きは確定できるが、両側の地形面が異なるなど、ごく最近の変位地形であることが不明瞭な線状模様。
L3	L2に準じ、変位を示す地形である確からしさの最も低いもの。すなわち最も不明瞭なもので、変位地形もみられる地形をもつが、変位の向きが不明瞭であったり、他の原因も考えられるもの。

表-6 線状模様記号の凡例

線状模様	記 号	備 考
明瞭な線状模様	————	第四紀断層地形要素が明瞭なもの（表-1中の①および②の地形要素）から構成される線状模様
不明瞭な線状模様	-----	地形要素が不明瞭なもの（表-1中の③の地形要素）から構成される線状模様
線状模様の伏在部		新しい地形面に覆われていて、地形要素が認められない部分
横ずれ	→ ←	横ずれが推定される線状模様につける。
縦ずれ	⊥	上下変位の縦ずれが推定される線状模様につける。ケバは、地形面が低下している側につける。

基づいた確実度分類は極めて難しい。したがって、今後は、地形要素の明瞭度・系統性を考慮した新しい確実度分類を作成することが必要と考える。表-8にその確実度分類の概念を示す。

表-8 地形要素を考慮した第四紀断層の確実度分類の概念

活断層の可能性		①崖地形などの要素 ②屈曲などの要素	③変位不明瞭な地形要素
高 ↑ ↓ 低	あり	明瞭かつ系統的	(あってもなくても評価は変わらない) (あるほうが上位)
		明瞭かつやや系統的	
		不明瞭かつやや系統的	(明瞭×複数)
		不明瞭かつ局所的	複数あり
なし		なし	あり

5. まとめと今後の課題

本論は、第四紀断層地形判読の基本的考え方と地形要素の記載方法を記述することで、第四紀断層起源の線状模様抽出までのプロセスを客観化した。

しかし、変位基準そのものが不明瞭である山岳地域の第四紀断層では、従来の確実度分類の実施は難しい。したがって、今後は、地形要素の明瞭度・系統性などを考慮した新しい確実度分類を作成することが必要である。

参考文献

- 1) 桑原啓三：第四紀断層の調査法, 土木技術資料, 第29巻, 第6号, pp.293-298, 1987.
- 2) 脇坂安彦：ダム建設における第四紀断層の調査, ダム工学会第4回講習会概要集, ダム工学会, pp.1-16, 1998.
- 3) 脇坂安彦, 阿南修司, 倉橋稔幸, 品川俊介ほか：活断層の位置および規模の定量的認定法に関する研究 (1) 活断層の地形要素, 土木研究所共同研究報告書, 第281号, p.460, 2002.
- 4) 脇坂安彦, 阿南修司, 倉橋稔幸, 品川俊介ほか：活断層の位置および規模の定量的認定法に関する研究 (2) 主に山岳地域における活断層地形判読の基本的考え方と記載方法, 土木研究所共同研究報告書, 第284号, p.54, 2003.
- 5) 活断層研究会：[新編] 日本の活断層—分布図と資料一, 東京大学出版会, p.412, 1991.
- 6) 松田時彦, 太田陽子, 岡田篤正, 清水文健, 東郷正美：空中写真による活断層の認定と実例, 震研彙報, 第52巻, pp.461-496, 1977.
- 7) 岡田篤正：断層地形, 佐藤 久, 町田 洋編, 地形学(総観地理学講座6), 朝倉書店, pp.216-229, 1990.
- 8) 中田 高, 島崎邦彦, 鈴木康弘, 佃 栄吉：活断層はどこから割れ始めるのか?—活断層の分岐形態と破壊伝播方向—, 地学雑誌, 第107巻, pp.512-528, 1998.
- 9) 亀 伸樹, 山下輝夫：大きな地震より小さな地震が多いのはなぜか 自ら止まる地震破壊の性質, 科学, 第68巻, pp.702-709, 1998.

倉橋稔幸*



独立行政法人土木研究所
材料地盤研究グループ地質
チーム主任研究員
Toshiyuki KURAHASHI

品川俊介**



国土交通省九州地方整備局
長崎工事事務所(前 地質チ
ーム研究員)
Shunsuke SHINAGAWA

阿南修司***



独立行政法人土木研究所
材料地盤研究グループ地質
チーム主任研究員
Shuji ANAN

脇坂安彦****



国土交通省近畿地方整備局
大戸川ダム工事事務所(前
地質チーム上席研究員, 理博)
Dr. Yasuhiko WAKIZAKA