

2. 結晶片岩地域地すべりに特徴的な崩壊形態のフラクタル性について

The fractal structures of landslide shape in crystalline schist area

○藤本耕次 木下博久 池田雄輝 (復建調査設計株式会社)

1. はじめに

地すべり機構には地域特性が存在し、誘因が同程度規模であっても、地形・地質的素因の違いが崩壊規模や発生頻度、活動特性、水理地質構造特性等に影響する。地質的素因から崩壊タイプを大別すると、崩積土すべりと岩盤すべりに分けられ、後者の挙動は特に地質構造に規制される。四国中央を横断して分布する三波川帯は、結晶片岩類からなる地すべり多発地域で、その多くは、結晶片岩特有の構造的弱面に沿って発生している(図1、写真1)。偏在性、強度的異方性が強いこれら弱面の分布を各スケールで把握できれば、より合理的な地すべり機構解析が可能となり、効果的・経済的な対策工設計へとつながる。本研究では、結晶片岩類に発達する構造的弱面が持つ、様々なスケール下での自己相似性に着目し、斜面崩壊や地すべり機構との関係を検討した。

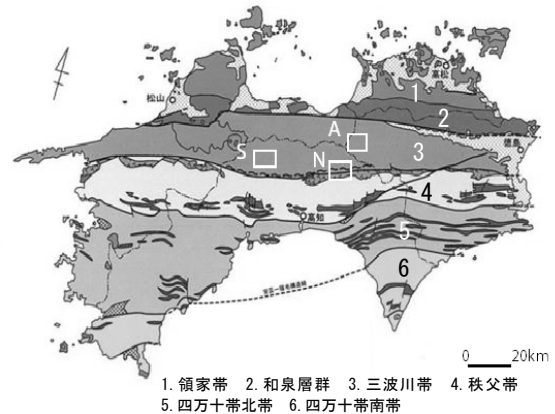


図1 四国の地質帯区分
(A, N, S: 研究対象地域)

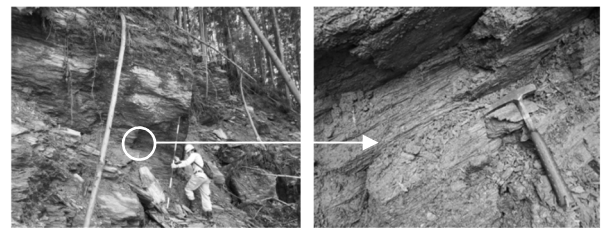


写真1 崩壊形態の自己相似性の例
(左: 露頭スケール, 右: 岩塊スケール)

2. 検討概要・方法

2.1 弱面構造のフラクタル次元について

樹木や山地斜面の沢筋など、自然形態の多くは、フラクタル性を持つとされる(Mandelbrot,1982など) 1)。フラクタルとは、部分が全体を表現できる図形、構造、現象、分布を指す概念で、「自己相似性(スケールの不変性)」を主な特徴とする。例えば海岸線や水系網は、地図の縮尺を変えても屈曲線や分岐形態は同じような形に見える。形態が、ある単位をパラメーターとしたべき乗の関係にあるとき、フラクタル性を持つとされ、次式で表される。フラクタル次元Dが形態を特徴付ける係数で、例えば海岸線の出入りが多いほどDは増加する。

$$N=c \cdot a^{-D} \quad \therefore D = -\log N(a) / \log(a) \quad \dots \text{式(1)}$$

(D: フラクタル次元, a: パラメーター, N: aに関連した総数, c: 定数)

一般に、自然形態が持つフラクタル次元 (D) は概ね 1.1~1.5 とされる。地質的現象も、その多くが、確率分布よりもフラクタル分布の方が現象をよく表現し得るとされ、断層や岩盤亀裂の発達形態、地下水流動形態等の評価手法として適用されている (大野,1997, 宇田川, 2007 など) 23)。佐々木ほか (1991) 4)は、豪雨による斜面崩壊の崩壊最大幅と崩壊数の関係にフラクタル性を導入し、地形・地質・植生・降雨量等の地域的な要因と崩壊規模や発生数の関係について定量的評価を行った (図 2)。D 値は、ランダムな幅 (長さ) に関する事象の分布頻度との関係を示し、両対数グラフの直線部の傾きで求められる。

筆者らは、これら地質的現象が持つフラクタル性について、岩石を破碎した際の岩片の形状と斜面崩壊の形態とが、岩塊・露頭・斜面の各スケール下で相似形をなすことがあり、特に結晶片岩類でその傾向が強いことに注目した。結晶片岩類の持つ弱面構造の自己相似性は、斜面崩壊形態を大局的に規制する要因と見られ、これらをモデル化・定量化することが、斜面崩壊・地すべり機構の解明や発生予測に有効な手法の1つとなることが期待される (図 3)。

2.2 弱面構造の抽出・計測方法

本論では、結晶片岩類の初生的な弱面 (片理面・節理面・劈開面) が、地すべりブロックの形態 (すべり面・滑落崖・側壁) を規制するとの仮説のもと、これら構造の自己相似性の特性を検討した (写真 2)。今回、四国三波川帯の結晶片岩類地域 (A、N、S 地区) の地すべり・斜面崩壊を対象に、岩塊～露頭スケール (数十 cm～十数 m)、斜面スケール (数十 m) において抽出した弱面構造の各单位延長と総数との関係を両対数グラフにプロットし D 値を求めた。また、岩種別の特性を検討するため、N 地域の非結晶片岩 (緑色岩) との比較を行った。弱面構造の抽出方法、計測方法は以下の通り (図 4, 表 1)。

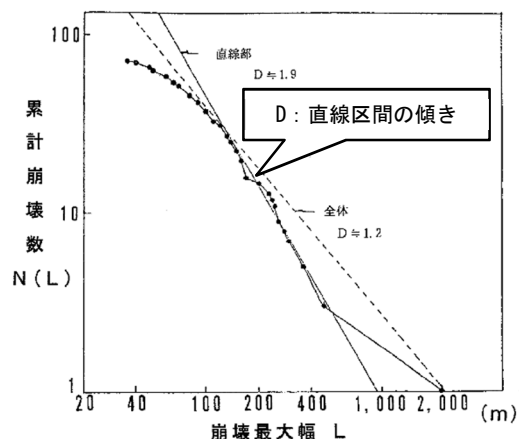


図 2 斜面崩壊の規模と発生数のフラクタル性 (佐々木ほか, 1991 に加筆)

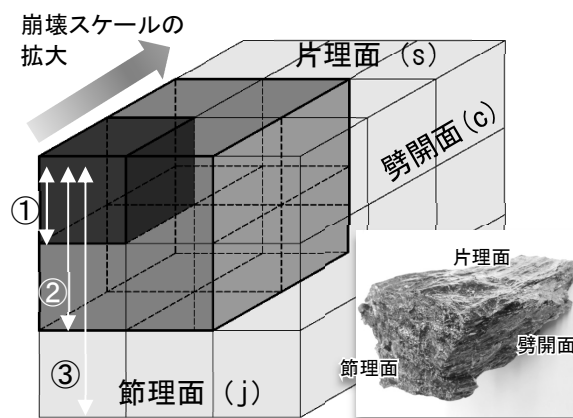


図 3 結晶片岩類の弱面構造が持つ自己相似性と崩壊特性の概念図 (①岩塊スケール ②露頭スケール ③斜面スケール)

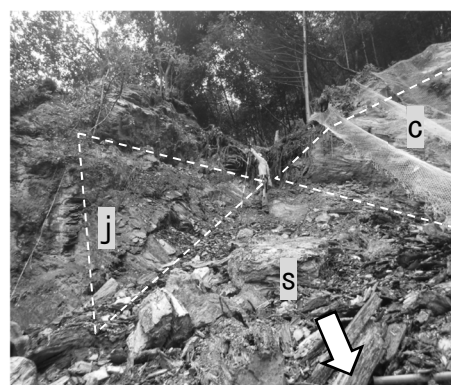


写真 2 崩壊形態を規制する弱面 (片理面 (s) がすべり面となり、節理面 (j) と劈開面 (c) が崩壊頭部あるいは側部となる例)

1) 露頭～斜面スケール（露頭計測）

- ・現地踏査により、対象とする斜面岩盤の弱面構造の卓越方向を計測する。
- ・これら卓越方向に規制されて発生した斜面崩壊箇所、地すべりブロックを抽出する。
- ・露頭で見られる弱面のうち、崩壊形状を強く規制する面を選択する（今回は劈開面を選択）。
- ・劈開面の中で、節理面に限られた区間を1単位とし、それぞれ面の延長を計測する。
- ・計測単位は、L=0.5、1、1.5、2、4、6、8、10mとする。
- ・これら弱面の走向を計測し、卓越方向を求める（ローズダイアグラムを作成）。

2) 斜面～サイトスケール（机上計測）

- ・地形判読を基に、(1)で求めた弱面の卓越方向と調和的な方向に発達する崖地形やリニアメント、崩壊ブロックを抽出し、それぞれ延長を計測する。
- ・判読基図はLP図面(2mコンター)とし、一部範囲について実測平面図(縮尺1/250)とする。
- ・線状地形の計測単位は、L=25、30、35m・・・の5mピッチとする。

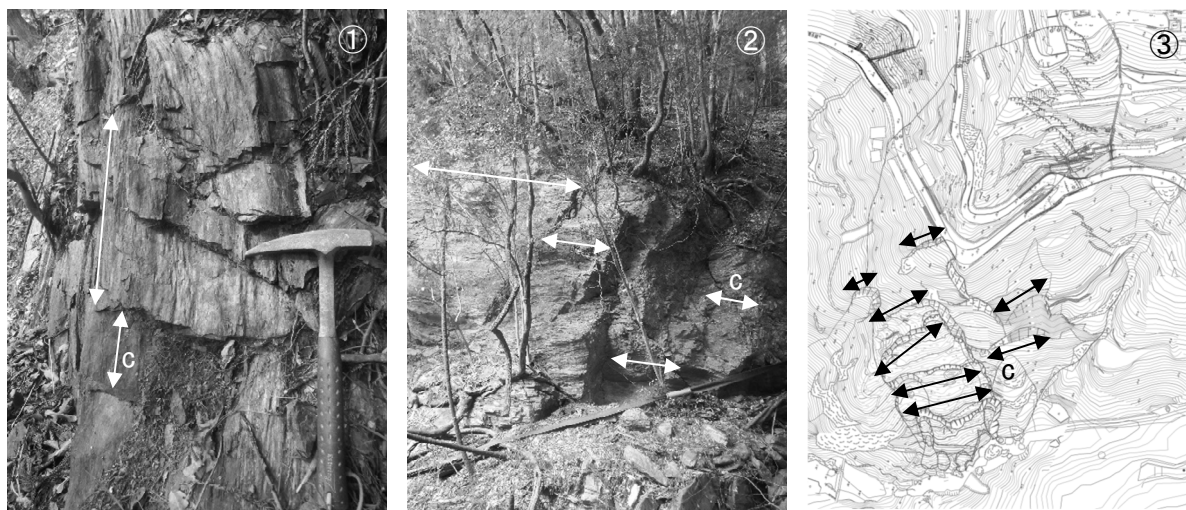


図4 弱面構造の延長と計測方法（劈開面cの例）
 (①岩塊スケール ②露頭スケール ③斜面スケール)

表1 各地域における弱面構造の計測条件と計測数

地区	地質	ブロック側部を規制する弱面	弱面の主な走向	現地計測数	机上計測数	計測総数
A	泥質片岩主体 砂質片岩 塩基性片岩	劈開面	N15° ~ 30° W	140	126	266
N	泥質片岩 塩基性片岩	劈開面	N60° ~ 80° E	165	56	221
S	泥質片岩	劈開面	N40° ~ 60° E	63	58	121
計				368	240	608

3. 計測結果

A、N、S 地域の計測結果を図 5 に示す。全地域すべてのデータから求めた D 値は 1.12~1.59 と、自然形態が有する一般的な値であり、弱面構造が有するフラクタル性が認められた。地域別にみると、A 地域が $D=1.20$ 、N 地域が $D=1.59$ 、S 地域が $D=1.25$ で、N 地域のフラクタル次元が最も高く、A 地域と S 地域は同程度の値であった。

全地域をプロットした場合、データのばらつきがやや大きくなり、直線区間の認定が難しい。傾きが最小となる、単位延長 5m 以上 100m 以下の区間で直線区間をとると $D=1.12$ で、A 地域の D 値よりも小さくなる。

地域別に直線区間を比較すると、A 地域と S 地域は、単位延長 5m 以上 100m 以下の区間で、D 値はそれぞれ 1.20、1.25 である。N 地域は単位延長 10m 以上 150m 以下の区間において、D 値は 1.59 である。これらのことから、今回の計測結果では、数 m~数十 m と単位延長が小さい範囲に直線区間が位置する地域は相対的に D 値が低く、単位延長が 10m を超え、100m 以上まで直線区間が位置する地域は D 値が大きくなる傾向が認められる。

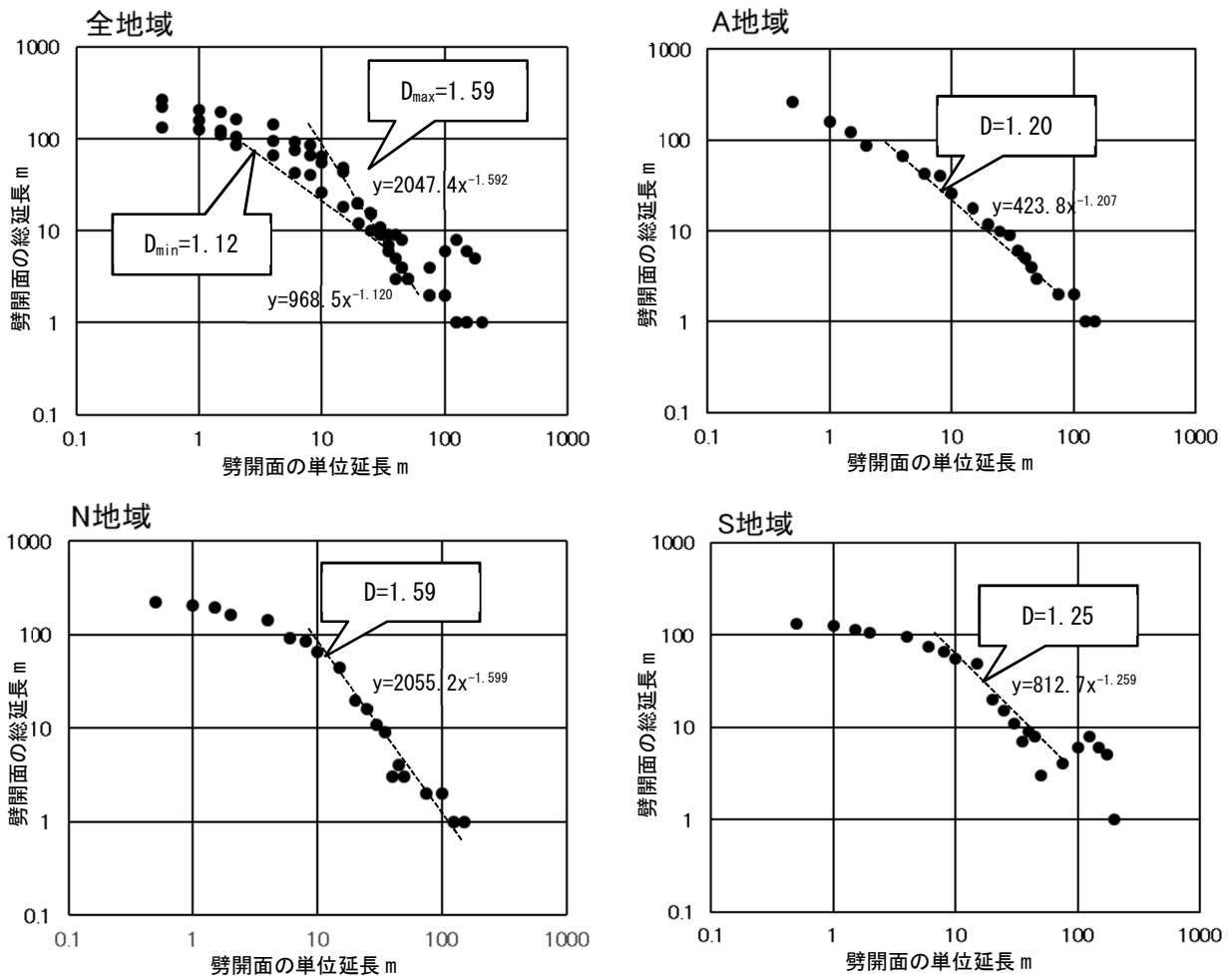


図 5 各地域の劈開面のフラクタル次元 (D)

また、非結晶片岩（緑色岩主体）地域の算出結果を、**図 6** に示す。プロットしたデータはばらつきが大きく、直線区間の認定が困難であった。参考値ではあるが、全データの近似直線をとると、 $D=0.51$ と 1 を大きく下回る。これは、結晶片岩類に比べて割れ目の異方性や偏在性が小さい緑色岩には、弱面構造のフラクタル性は認められないといえる。

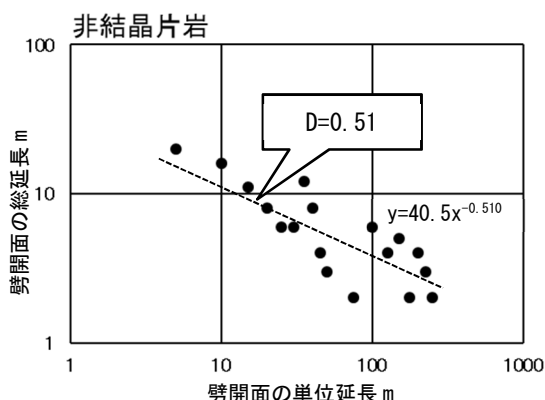


図 6 非結晶片岩地域の割れ目のフラクタル次元 (D)

4. 考察

地域間のフラクタル次元 (D) の差について、計算条件から検証した (表 2)。相対的に D 値が大きい N 地域は、計測対象とした露頭面積 (a) が、机上計測範囲の約 20% を占めている。対して、D 値が小さい A 地域、S 地域のそれは、0.1~0.6% と低い割合となっている。このような、マクロ/ミクロスケール下におけるサンプル数のギャップの大きさが、べき乗関係式に基づく D 値の計算に影響した可能性がある。また、本来であればスケールに依存しないとされる自己相似性が、サイトスケールの計測値が 100m 付近を境として、D 値が変化する (低下する) ことは、各スケール下におけるサンプル数のアンバランスさ、あるいは基図の精度に起因することが考えられる。

表 2 各地域の計算条件

地域	フラクタル次元 (D)	斜面スケール領域 (A) と露頭スケール領域 (a) の面積比 (a/A)	露頭計測数 (s) と机上計測数 (S) の比 (s/S)	机上計測に使用した基図の精度	大局的な斜面形状	主なすべり面深度 (GL-m)
A	1.20	0.6	1.11	実測図 (1mコンター) LP図 (2mコンター)	凸型	40~60
N	1.59	21.0	2.94		凸型~直線	10~30
S	1.25	0.1	1.08	LP図 (2mコンター)	凹型	60~80

対数グラフでの直線部分の傾きが D 値となるが、多くの場合、単純な直線にはならず、逆 S 字型になる (山田, 1997, **図 7**)⁵⁾。単位延長が小さい上の部分が左に曲がり (**図 7** の a 部分)、大きい部分の裾が右に折れ曲がったり (同 b 部分)、垂れ下がる形となる (同 c 部分)。これらの振れは、マクロ/ミクロスケールそれぞれの極限側の計測誤差、制約に起因するとされる。

表 2 に示すように、机上計測数 (マクロスケール) と露頭計測数 (ミクロスケール) の比率の大小が、a 部分の曲がりの程度を左右し、直線区間の傾きに影響していると考えられる。

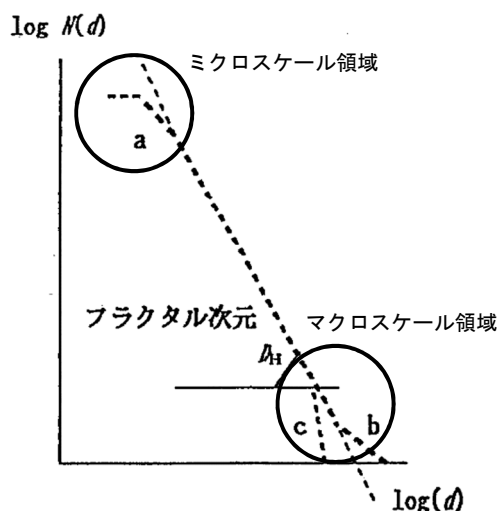


図 7 フラクタル次元の対数グラフ (山田, 1997 に加筆)

また、各地域に代表される、すべり面の深さを見ると、D 値の大きい N 地域のすべり面深度は、D 値の小さい A 地域、S 地域のすべり面よりも浅く、約半分の深度である。すべり面深度が浅い、地すべりブロックが小さいほど、岩盤の破碎度が高く、弱面の分離や小ブロックの崩壊が進み、より小さいスケールの計測数が優勢となった可能性もある。

5. 適用事例及び今後の展望

以上で述べた結晶片岩類のフラクタル特性を踏まえ、地すべり対策工の設計・施工に適用した事例を紹介する。N 地域で発生した地すべりは、斜面全体の地表踏査を通じて、斜面方向に対して直交し高角で傾斜する劈開面を崩壊頭部に、斜面方向に平行して発達する節理面が崩壊側部を形成している崩壊跡を多く観察した。また、ボーリング調査、孔内変動観測結果から、すべり面の傾斜が、露頭で見られる片理面の傾斜角（約 15° の緩傾斜）に調和的であることを確認した。これらの状況に基づき、地すべり機構解析では、地すべりブロック形状に一般的な円弧すべりではなく、直線的で緩い傾斜のすべり面、直線的で高角な滑落崖という、極めて極端な「椅子型（平進型）すべり」であり、かつ相似形をもって大小 2 つのブロックが重なるモデルとした（図 8）。このモデルを基に、横ボーリング工とアンカー工を設計し、施工後には変動停止を確認できた。

崩壊形態の自己相似性については、計測方法や計算方法、使用する基図などの検討課題は残るものの、岩石の破壊から崩壊・地すべりに至る各スケール下での斜面変動は、基盤岩の持つ構造特性を素因とする自己相似性を有すると考えられる。これら自己相似性を定量的・大局的に把握すれば、地表露頭状況から地下の弱面構造や地すべりブロック形状、水みちを規制する水理地質構造などを高い精度で推定できる。その結果、より実現象に即した地すべり機構解析や、効果的・経済的な対策工の選定と配置計画につながると期待される。

引用文献

- 1) Mandelbrot, B. B. (1982): The Fractal Geometry of Nature, W. H. Freeman & Co., San Francisco, 468p.
- 2) 大野博之 (1997) : 地球科学分野へのフラクタルの応用, 応用地質, 第 38 巻, 第 3 号, 159-173p.
- 3) 宇田川義夫 (2007) : トンネル切羽画像のフラクタル解析による地質評価手法の開発, 応用地質, 第 48 巻, 第 3 号, 116-125p.
- 4) 佐々木靖人・阿部昌彦・平野勇 (1991) : 斜面崩壊の規模と発生数に関するフラクタル, 応用地質, 第 32 巻, 第 3 号, 1-11p.
- 5) 山田俊雄 (1997) : フラクタル次元の算出方法とその事例, 情報地質, 第 8 巻, 第 3 号, 177-184p.

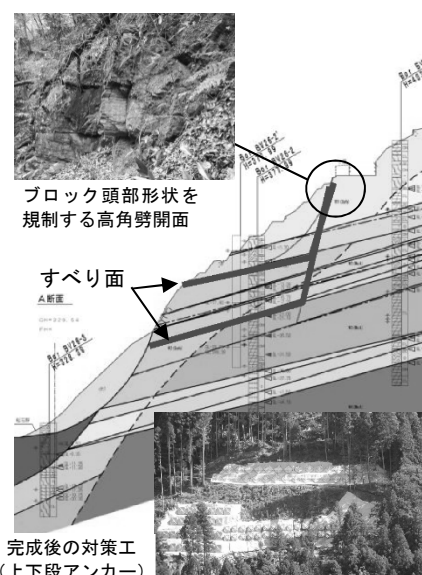


図 8 結晶片岩の自己相似性を考慮した地すべり機構解析の例