

39. 空間数値情報を利用した斜面の不安定性評価法

Evaluation of Natural Slope Stability by Digital Elevation Models and Satellite Imagery

○太田岳洋（鉄道総合技術研究所），長谷川淳（東日本旅客鉄道）

Takehiro OHTA and Atsushi HASEGAWA

1. はじめに

自然斜面の崩壊、落石、土石流などの斜面災害の発生には、地形・地質条件のほかに地下水条件や植生、人工改変などの環境条件が関与すると考えられており、斜面災害と地形との関係についてはこれまでも多くの研究者によって議論されている¹⁾。近年、数値標高モデル (DEM) を用いた地形計測により、斜面災害の発生に関わる地形条件を定量的に評価し、それを基に災害発生危険箇所を予測する手法が試みられている²⁾。しかし、現状では地形条件のみで定量的に精度よく災害発生に関して評価することは困難であり、植生などの環境条件や地質条件もあわせた定量的な評価手法の確立が望まれている。

地形と植生の関係については、環境保全を目的とした地生態学的観点からこれまで議論されてきた。特に、菊池は斜面崩壊地や土石流堆積地などの植物群の特徴と成立過程をまとめている³⁾。ただし、このような地生態学的な研究では、現地地形での植物群の成立過程を述べるにとどまっている。また、砂防分野では空中写真判読による斜面崩壊後の植生回復状況の経年的変遷に関する研究例があるにとどまっている⁴⁾。このようにいずれの分野でも、伐採などの植生環境の変化と、地形変化や土砂災害との関係を論じた研究例はほとんどみられない。一方、樹種や繁茂状況などの植生に関する定量的な評価については、1970年代よりLANDSATに代表される衛星画像の解析が利用されてきた。また近年は、高解像度の衛星画像を入手することが容易になり、より詳細な植生判読が可能となってきた⁵⁾。

以上のことを背景として、過去に自然災害や地形変化が顕著であった地域を対象に、現地踏査、空中写真判読、地形計測、浸透流解析と安定解析などを行い、自然災害の発生に関与する地形・地質条件、地下水条件、植生条件を明らかにした。そして、これらの災害発生に関与する諸条件をDEMや衛星画像を用いて定量的に評価することによって、鉄道沿線に影響をおよぼす災害の発生源となる不安定斜面を定量的に抽出する手法について検討した。本報告では、これらの検討結果について述べる。

2. 不安定斜面の地形条件とその数値化

数値標高モデル (DEM) を用いた地形計測手法や、斜面崩壊・落石など災害種別ごとの発生箇所における地形条件の特徴については、すでに報告している⁶⁾。ここでは、地質と地形との関係および地下水条件と地形との関係を考慮し、DEMから求められる地形特性値と斜面の不安定性との関係に

ついて検討する。

一般に、地質が異なると地形的な特徴も異なるので、均質な地質条件の領域においてDEMを用いた地形計測と空中写真を用いた不安定斜面の判読結果を比較し、斜面の不安定性に影響する地形条件について検討した。また、50m-DEMによる地形計測結果では斜面の不安定性を表せないことから、ここでは2000年11月に実施した航空レーザ測量⁷⁾により得られた格子点間隔が5mのDEM（以降5m-DEMと称する）を用いて、地形計測を行った。

検討対象地域は三陸海岸より約20km内陸に位置する北部北上山地の閉伊川と刈屋川の合流点付近にあたる（図-1）。対象地域内では過去に落石、斜面崩壊などの災害が繰り返し発生し、近年では地域内の複数流域において土石流の発生が確認されている。

対象地域周辺は標高100～600mの低山地地形を呈する。地質はおもに頁岩、砂岩、チャートおよびこれらの互層からなり、ほぼ均質な地質条件とみなすことができる。

対象地域のうち図-1に示す16流域について、流域地形量⁸⁾と流域ごとの局所地形量⁹⁾および区域地形量¹⁰⁾の平均値を5m-DEMから求めた（表-1）。区域地形量は対象格子点を中心とする5×5メッシュの標高値から求めた。また、斜面の崩壊や浸食を表す崩壊跡地数、ガリー長、土砂生産量

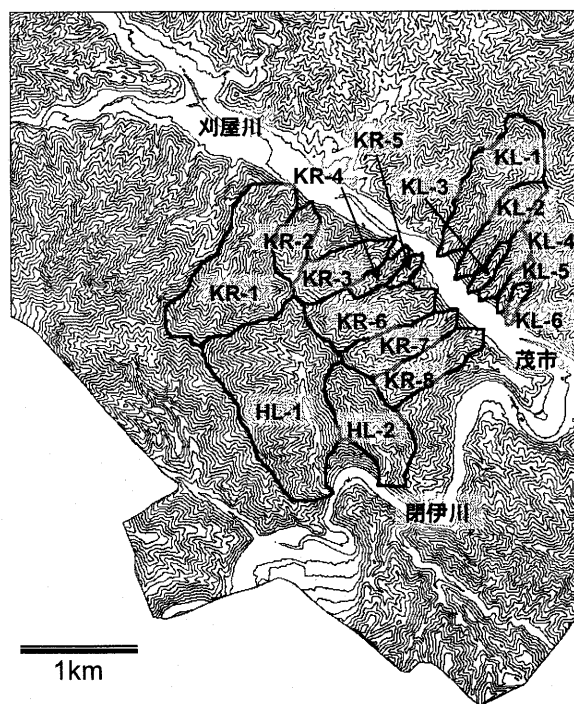


図-1 北上山地における検討対象流域

表-1 対象流域の地形特性値と災害地形の分布状況

流域 番号	局所地形量の平均		区域地形量の平均			流域地形量					災害地形分布状況		
	平均標高 (m)	最大傾斜 の平均 (°)	表面積比 の平均	起伏量の 平均(m)	高度分散 量の平均 (m)	流域面積 (km ²)	流域 表面積比	流域 起伏量 (m)	流域高度 分散量 (m)	流域 平均比高 (m)	ガリー長 (km)	崩壊跡地 数	渓床堆積物 分布面積 (km ²)
HL-1	335.3	39.16	2.70	19.07	5.43	1.82	2.70	578.0	109.8	268.1	1.4	18	0.128
HL-2	268.3	40.57	2.92	19.80	5.63	0.64	2.93	387.2	82.2	204.3	3.3	3	0.017
KL-1	329.2	38.76	2.78	18.76	5.31	0.74	2.78	492.6	108.5	267.3	0.7	4	0.033
KL-2	279.5	40.09	3.04	19.91	5.61	0.35	3.04	457.1	99.5	221.2	0.5	6	0.023
KL-3	179.4	37.60	2.48	17.70	5.05	0.08	2.48	246.0	58.3	122.7	0.1	0	0.000
KL-4	211.8	38.03	2.72	18.38	5.21	0.15	2.71	320.4	76.8	156.7	0.7	2	0.000
KL-5	167.5	34.17	2.56	15.97	4.60	0.10	2.55	256.7	69.2	113.6	0.5	0	0.000
KL-6	138.2	29.06	1.84	12.64	3.53	0.06	1.76	205.7	59.3	86.2	0.6	0	0.000
KR-1	358.7	40.40	2.93	19.60	5.57	1.27	2.93	606.1	130.3	279.0	1.7	16	0.036
KR-2	307.8	38.31	2.57	18.25	5.20	0.24	2.56	382.9	84.0	230.6	0.4	0	0.003
KR-3	291.2	37.70	2.16	18.25	5.07	0.38	2.16	417.4	97.0	226.1	0.5	5	0.016
KR-4	216.4	37.12	2.39	17.57	4.90	0.12	2.38	284.4	62.3	151.5	0.2	5	0.003
KR-5	142.3	31.48	2.20	14.05	4.00	0.07	2.20	162.7	43.5	79.8	0.0	0	0.000
KR-6	275.3	38.28	2.26	18.24	5.16	0.62	2.25	407.0	97.3	207.6	1.7	13	0.023
KR-7	284.1	36.58	2.04	17.08	4.90	0.42	2.04	406.2	92.3	227.2	1.3	2	0.003
KR-8	258.9	37.08	2.24	17.58	4.96	0.41	2.22	386.8	87.9	204.8	0.6	5	0.000

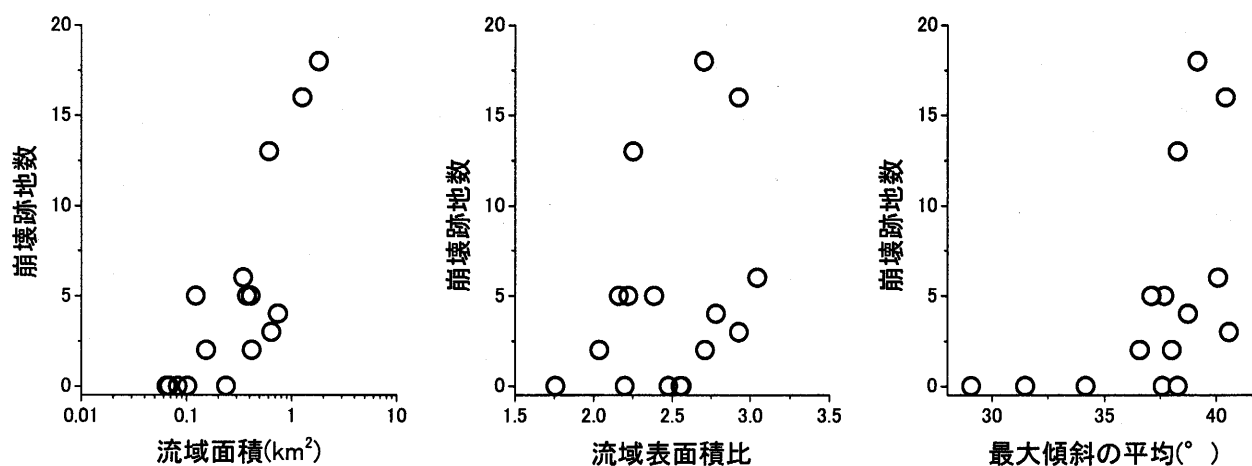


図-2 地形特性値と崩壊跡地数の関係

を表す渓床堆積物の分布面積を2001年撮影の空中写真から判読した(表-1)。崩壊やガリーの発生、渓床堆積物の生成といった現象が鉄道沿線で生じると、鉄道が被災することになる。そこで、崩壊跡、ガリー、渓床堆積物の分布を以降は「災害地形」と称する。

流域表面積比^⑧や最大傾斜の平均値では流域面積との相関は明瞭でないが、これら以外の多くの地形特性値では流域面積との相関が認められる(表-1)。このため、流域面積、流域表面積比および最大傾斜の平均値に対する崩壊跡地数の関係のみを図-2に示す。崩壊跡地数は流域面積が大きくなると増加する傾向が見られるが、0.1~1.0km²の流域面積の場合には類似の面積でも崩壊跡地数が異なることがある。また、流域表面積比と崩壊跡地数との間には不明瞭であるが正の相関がみられ、最大傾斜の平均値では37°を超えると崩壊跡地数が急増する傾向がみられる。

次に、流域ごとの地形特性値と災害地形の分布を比較すると、流域面積が大きく最大傾斜の平均も大きい流域KR-1、HL-1でガリー、崩壊跡地、渓床堆積物が多く認められる(表-1)。このことから、流域内の災害地形の分布量、つまり流域内の斜面の不安定さは地形条件に関係があると考えられる。一方、流域KR-6、KR-7、KR-8は流域面積が

ほぼ同じで、流域表面積比や最大傾斜の平均値も類似した値を示し、同様の地形条件を呈すると判断できるが、流域KR-6では他の2流域よりもガリー、崩壊跡地、渓床堆積物が発達する(表-1)。このことは、地質条件と地形条件がほぼ同様でも、災害地形の分布状況つまり斜面の不安定さが異なることを示唆する。

以上のことから、均一な地質条件の範囲内においては、表面積比や最大傾斜が大きくなると災害地形が顕著になるなど、地形条件と斜面の不安定性との間にある程度の関係は認められるが、対応しない場合もある。このため、地形条件のみで斜面の不安定性を評価することが困難な場合があると考えられる。

3. 衛星画像による植生の不活性度の評価

一般に、植生の状況は斜面の保水性や耐浸食性に関係するため、間接的に斜面の安定性に影響すると考えられている。また、太田ほかは図-1に示した北上山地のいくつかの流域において、伐採などにより植生の活性度が低下すると、斜面の崩壊やガリー浸食が顕著となり、渓床堆積物の量が増加するなど、災害地形の消長が植生の分布率の変化に明瞭に対応していることを報告している^⑨。つまり、植生

の活性度の低下にともない斜面の不安定化が進むといえる。植生の活性度については、衛星画像から算出される正規化植生指数 (Normalized Differential Vegetation Index : NDVI)⁹ を用いて定量的に評価できる¹⁰。

一方2章で述べたように、高度分散量や表面積比の値が大きい、すなわち地形の起伏や凹凸の大きな箇所では災害の発生や災害地形の分布が認められることが多い。以上のことから、災害発生源となる不安定斜面の抽出には、地形条件と植生条件を組合せて評価することが有効と考えられる。

地形と植生の条件を組み合わせる不安定斜面を抽出するためには、災害発生に関係すると考えられる地形の起伏や凹凸の増大にしたがって大きくなる地形特性値を地形条件の指標とし、植生条件を表す指標としては植生の活性度が低くなるほど値が増加するような指標を用いることが有効であると考えられる。前述したように、地形特性値は一般に地形の起伏や凹凸など地形的な不安定さが増大すると大きくなる特徴を有する⁹。

一方、NDVI値は植生の活性度が増大するにしたがい大きくなる指標である。そこで、植生の活性度が低くなると大きな値となるような次式の指標を用いることとした。

$$rNDVI = \{1 + (\text{red} - \text{nir}) / (\text{nir} + \text{red})\} \times C \quad \dots (1)$$

nir : 近赤外の波長帯の反射強度

red : 赤の波長帯の反射強度

C : 定数

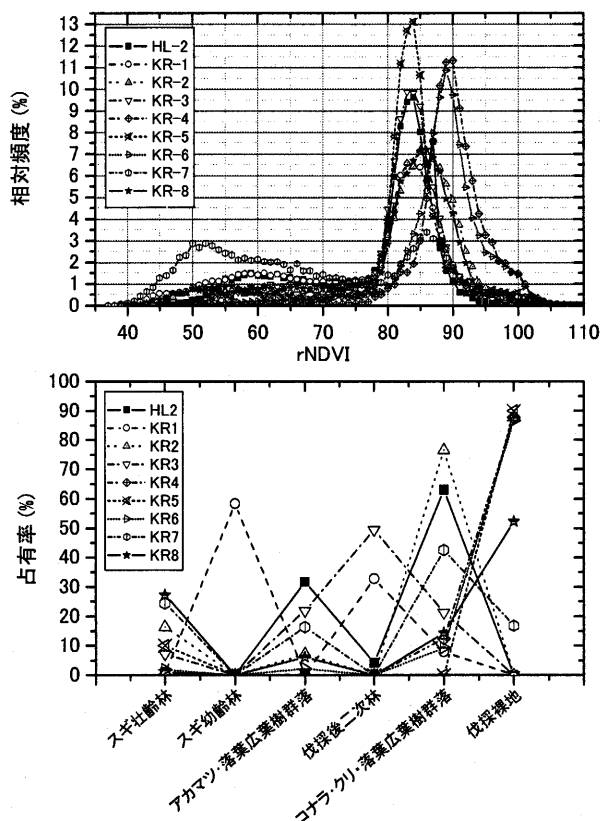


図-3 流域ごとのrNDVI値の相対頻度分布 (上) と各植生の占有率 (下)

(1) 式で算出される指標は、植生の不活性度を表す指標と考えられるので、以降ではrNDVI (reverse NDVI) と称する。NDVI値とrNDVI値の定義式から、それぞれの頻度分布は線対象となるので、rNDVIによる植生区分を用いて、植生の分類精度を低下させることなく植生の不活性度を表すことが可能と判断できると考えられる。

図-1に示した対象地域について、2000年4月に撮影されたIKONOS衛星画像を取得し、雲などの影響のないHL-2, KR-1~8の9流域について画像解析を行った。各流域におけるrNDVI値の頻度分布と植生の占有率を図-3に示す。図-3の下図では、衛星画像の撮影時期に想定される植生活性度の順に植生区分を並べて示している。植生活性度の低い (rNDVI値の高い) 方から見ると、伐採後の裸地が流域の大部分を占めるKR-4, KR-6ではrNDVI=90付近に大きなピークがある。流域KR-2, KR-7ではコナラ・クリ・落葉広葉樹群落が広く分布するが、これらの流域はrNDVI=86のピークを有する。伐採後二次林が他の流域よりも顕著なKR-1, KR-3ではrNDVI値が83~84にピークが見られる。一方、針葉樹については、アカマツ・落葉広葉樹群落が広く分布する流域HL-2, KR-7でrNDVI=55~70にもブロードなピークがあり、スギ幼齢林が分布するKR-1でもrNDVI=50~65に同じくブロードなピークが見られる。また、KR-7にはスギの壮齢林も分布するが、50~52を中心とするrNDVI値のピークが認められる。

4. DEMと衛星画像による斜面の不安定性評価

検討対象地域について、上記のように衛星画像から算出されるrNDVI値とDEMから算出される地形特性値を用いて不安定斜面の抽出を試みた。今回、地形特性値としては高度分散量を使用した。図-4右上にrNDVI値と高度分散量を乗算した結果を示す。この値は、植生が少なく地形の起伏に富む箇所で大きくなり、植生が多く地形の起伏が少ない箇所では小さくなる。この解析結果と空中写真から判読され

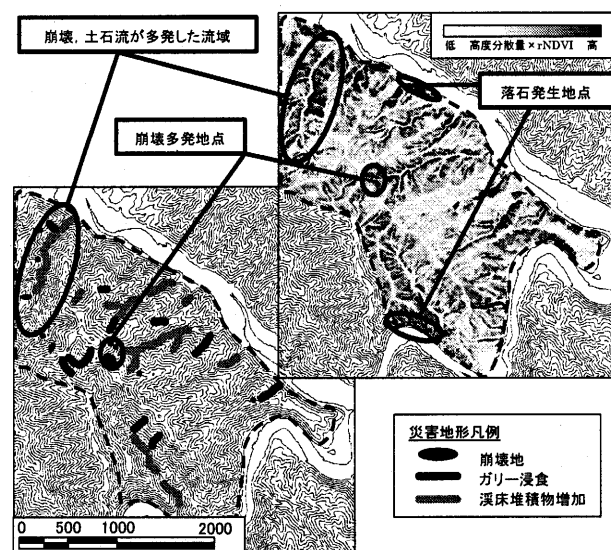


図-4 DEMと衛星画像の解析結果 (右上) と災害地形分布図 (左下) との比較

た災害地形の分布状況（図4－左下）を比較すると、高度分散量にrNDVI値を乗じた値が大きい箇所では斜面崩壊や落石が発生し、ガリーが形成されていることがわかる。

次に、図－1に示した流域ごとに高度分散量とrNDVI値の乗算値の平均を求め、その値と表－1に示した災害地形の分布状況との関係を検討する（図－5）。図の縦軸に示した崩壊箇所数、溪床堆積物の分布面積については、それぞれ流域面積で規格化した。図から、高度分散量とrNDVI値の乗算値が大きくなると、崩壊箇所数や溪床堆積物の分布率が增大することがわかる。

以上のことから、図－4右上に示す高度分散量とrNDVI値の乗算値は斜面の災害発生危険度を表していると考えられ、ここで述べたDEMから求められる地形特性値と衛星画像から得られる植生に関する指数を用いた評価手法が不安定斜面を抽出するうえで有効であることが明らかとなった。

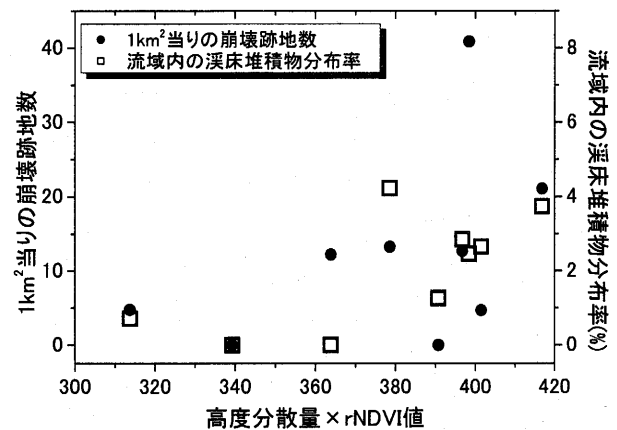
5. まとめ

自然災害の発生に関わる地形・地質条件、地下水条件、植生などの環境条件を明らかにするために、いくつかの地域を対象に現地踏査、空中写真による地形・植生状況とそれらの経時変化の判読、数値標高モデル（DEM）を用いた地形計測、浸透流解析結果に基づく斜面安定解析、衛星画像による植生判読を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 均一な地質条件の場合、地形の起伏や凹凸が増大すると災害地形が発達するなど、地形条件と斜面の不安定性との間にある程度関係は認められるが、対応しない場合もある。
- 2) 衛星画像から求められるrNDVI値により植生の不活性度を表すことができ、これを基にある程度の植生区分が可能である。
- 3) 高度分散量とrNDVI値を乗じた値が大きい斜面において、斜面崩壊やガリー浸食、落石災害が発生し、この値の平均値が大きい流域で溪床堆積物の分布量が多い。
- 4) 不安定斜面の抽出にはDEMから求められる地形特性値と衛星画像から得られる植生に関する指標を用いた評価手法が有効である。

文 献

- 1) 羽田野誠一：最近の地形学，8. 崩壊性地形（その1），土と基礎，Vol. 22，No. 9，pp. 42-49，1974。
- 2) 太田岳洋：DEMを用いた地形計測の自然災害評価への応



図－5 流域ごとの高度分散量×rNDVI値と災害地形分布量との関係

用，資源・素材学会2001年秋季大会企画発表・一般発表(A)(B)講演資料，pp. 353-356，2001。

- 3) 菊池多賀夫：地形植生誌，東大出版会，220p.，2001。
- 4) 鈴木雅一：航空写真による最近57年間の丹沢山地北部の崩壊地と森林の変遷，砂防学会誌（新砂防），Vol. 54，No. 5，pp. 12-19，2002。
- 5) 蔡斌・秋山侃・小阪尚子・永井論：高分解能マルチスペクトル衛星画像による林分タイプの分類，日本写真測量学会年次学術講演会予稿集，pp. 221-224，2004。
- 6) 太田岳洋・木谷日出男：数値標高モデルを利用した災害地形評価，鉄道総研報告，Vol. 17，No. 8，pp. 37-42，2003。
- 7) 太田岳洋・八戸昭一・木谷日出男：細密DEMによる地形計測の自然災害評価への応用－北部北上山地における検討例－，日本応用地質学会平成13年度研究発表会講演論文集，pp. 63-66，2001。
- 8) 太田岳洋・高見智之・川村晃寛：空中写真判読による地形・植生経時変化とその関係の検討－北部北上山地の例－，日本応用地質学会平成16年度研究発表会講演論文集，pp. 317-320，2004。
- 9) Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A. and Deering, D. W.: Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS, Proceedings of Third Earth Resources Technology Satellite - 1 Symposium, Greenbelt, NASA SP-351, pp. 301-317, 1974。
- 10) 長谷川淳・太田岳洋：自然災害要因抽出における高分解能衛星画像の利用に関する検討，日本応用地質学会平成16年度研究発表会講演論文集，pp. 145-148，2004。