

シラス地帯における計画路線の事前評価を目的とした崩壊影響評価アルゴリズムの開発

熊谷 樹一郎¹・大林 成行²・川井田 実³・齋藤 元也⁴

¹正会員 工博 摂南大学講師 工学部 土木工学科 (〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8)
(前 農業環境技術研究所 リモートセンシング研究ユニット)

²正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278-8501 千葉県野田市山崎2641)

³正会員 日本道路公団 試験研究所 土工試験研究室 主任 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

⁴農博 農業環境技術研究所 環境管理部計測情報科 上席研究官 (〒305-8604 茨城県つくば市観音台3-1-1)

本研究では、衛星データや地理データ、さらにはそれらの処理/解析結果等の二次生成情報を対象に、シラス地帯に計画された路線に対する広域的な事前土地評価(崩壊影響評価)のためのアルゴリズムを開発した。シラス地帯に広く分布する侵食斜面では斜面崩壊の発生とともに多量の土砂が流下するケースの多いことに着目し、衛星データと地理データより作成された斜面安定性評価図から崩壊影響評価に関わる情報を抽出・整理した上で二次生成情報として採用した。提案したアルゴリズムを実際の計画路線に適用した結果、崩壊が発生した場合の影響を路線周囲に位置する集水域ごとに比較・評価できるとともに、広い範囲から砂防施設の設置必要箇所を効率よく抽出できることが示された。

Key Words : geographical data, satellite multi-spectral data, Shirasu area, cluster analysis

1. はじめに

シラス地帯で発生する斜面崩壊、土石流といった自然災害は尊い人命を奪うことが多く、旧来よりその対策を目的とした様々な研究が進められている。特に、大規模な土工事を伴う高速道路の施工については、シラス自然斜面だけに限定しても、25年以上も前から多くの土質力学的な実験が繰り返され、盛土工、排水工といった施工技術が開発されてきた¹⁾。最近ではシラスの土性そのものについてもサクシオンを考慮した土粒子間の粘着成分に着目した新たな研究も進められており²⁾、今後も多くの成果の得られていくことが期待できる。

一方、シラス地帯において高速道路等の大規模土工事を実施するには、計画路線に影響する集水域全域に対して排水工等の対策を効果的に設置するにはどうしたらよいか、といった事前評価を効率よく実施することが重要となる。あらかじめ影響範囲全域にわたって災害発生の可能性の高い箇所が特定できれば、詳細な調査や施工技術の選定に貴重な支援情報を提供することになる。

昨今では、計算機器の発達と GIS(Geographical

Information System)の普及等から、広い範囲を瞬時に評価する方法として衛星マルチスペクトルデータ(以下、衛星データ)と地理データを利用する例が多く見られるようになってきた。これらのデータを収集・整備するために多額の経費と多大の労力を必要とすることは、一般によく知られている。しかし、こうした労力と時間をかけて整備された衛星データや地理データ、およびそれらの処理/解析結果等の貴重な二次生成情報が再び使用されるケースは少なく、有効に利用できるアルゴリズムの開発が重要な課題として提起されてきた。

以上のような背景の下で、本研究はシラス地帯に計画された路線を中心に、その両側に広がる自然斜面で発生する崩壊現象の影響を広域的な視野に立った上で比較・分析する手順を提案するものである。具体的には、東京理科大学リモートセンシング研究所で開発された斜面安定性評価モデルから得られた斜面安定性評価図³⁾を用いた上で新しい応用アルゴリズムの開発を行った。斜面安定性評価図は衛星データと地理データを融合利用した結果であることから、二次生成情報の有効利用の課題に対しても一つのアプローチを示すことになる。

2. 従来の研究と本研究の意義

(1) シラス地帯における崩壊影響評価

シラス地帯で発生する自然斜面の崩壊，特に表層すべり崩壊の発生については周期性が伴っているとされている⁴⁾。すなわち，一度崩壊した斜面はシラス土壌がむき出しとなる。その後は，裸地のような箇所に草類が発生し，陽樹・陰樹が徐々に入り込んでくる。同時にシラス土壌も風化され，表層土が蓄積されてくる。表層土層厚が臨界点に達すると，再度崩壊が発生することになる^{4), 5)}。

一方で，鹿児島県を想定すると，シラス地帯は県本土の約6割を占めるほどの範囲に広がっており，斜面に至っては急崖，急斜面がその多くを占める。したがって，崩壊の発生そのものの現象解明と併せて，それぞれの斜面で崩壊が発生した場合，下部においてどの程度の影響を生じるかといった問題を広域にわたって比較していく姿勢が重要となる。

既往の研究では，専門の技術者が地形図や地質図等の資料を判読した上で詳細な現地調査を実施し，得られた表層土の厚さから潜在危険斜面を抽出したものが⁶⁾。崩壊発生による表層土の流下を比較・検証するには非常に有効な調査手段であるが，このような調査を数 km ～数十 km といった計画路線に沿った広い領域にわたって実施することは労力と時間の問題から現実的ではない。

本研究では，これらの問題に対して衛星データと地理データを採用した上で，広い面積を対象とした事前評価の視点から検討を進めていく。

(2) 計画路線における事前評価

鹿児島県内の既存高速道路周辺で発生した土砂災害についてはまだ記憶に新しいものがある^{6), 7)}。これらの災害を未然に防ぐには，路線の計画段階での砂防計画の立案が大切となる。また，高速道路の供用が開始された後にはどの程度の降雨で，路線上のどの位置に崩壊が発生する可能性があるのか，といった情報をリアルタイムで提供できるシステムが必要となってくる。

現在，これらの問題に対してはサクシオン等に代表される現地計測器を設置した研究が進められている⁸⁾。しかしながら，これらの定点観測機器を設置する際には，あらかじめ，計画された路線周辺全域にわたって，それぞれの地形・地質的な条件を考慮した上で候補地を選定していかなければならない作業が要求される。

本研究は，これらの計測器の設置位置を決定するための情報を提供することができる。すなわち，衛

星データ・地理データから得られた膨大な量の広域情報から，注目すべき箇所を絞り込むプロセスを提案するところに本研究の一つの特徴がある。

(3) 二次生成情報の有効利用

前述したように，広い範囲にわたった土地評価の手段として，衛星データと地理データは最近頻繁に利用されるようになってきた。これまでも，幾何学的歪の補正処理や位置合わせ等の処理が実施された衛星データや地理データについては，処理/解析結果とともにデータセットといった形で蓄積・管理され，いつでも利用できるといった体制が検討されている⁹⁾。

一方，衛星データや地理データの実務での利用・普及を進めていくには，オリジナルデータの有効利用はもとより，処理/解析結果等の二次生成情報を積極的に活用するアプローチが大切なものとなる。

本研究では，この問題についても計画路線における事前評価といった具体的な例を取り上げ，上記のデータセットの概念を応用することによって一つのアプローチを提示している。

3. 崩壊影響評価の考え方

(1) 広い地域を対象とした崩壊影響評価

これまでの研究においても，斜面のモデル化や崩壊現象のシミュレート等の特定の斜面に関する崩壊土砂の挙動検討は数多く行われている。

その一方で，高速道路等の大規模構造物を施工する場合には，路線の選定，計画路線周囲の評価，等の大切なプロセスがあり，広い視野に立った評価が望まれている。特に，斜面崩壊の影響等を考えていく場合には，少なくとも周辺山地の分水嶺までを考慮した上で検証していく姿勢が大切となる。本研究はこのような考えの下にアルゴリズムの開発を進めている。

(2) 崩壊影響評価の範囲

計画された路線での評価を前提とした場合，現実問題として工区等の区分された範囲で，最も崩壊の影響が大きいと推定される箇所を比較・選定し，計測器の設置や対策工の実施を計画していくといったアプローチが取られてきた。対象領域の大小は別にして，本研究でも，従来の工区といった領域の一つの対象領域とした上で，注目箇所の比較・抽出アルゴリズムの開発を最終目標とした。研究成果の照合に際して現地の協力が得やすいこと，既存調査資料の収集・利用が容易であることが主な理由である。

(3) 比較・評価の単位

実際の路線の調査・計画段階について一例を挙げる。と、土石流に関する流域特性調査では溪流の溪床勾配が 10° 以上の地点を抽出していく¹⁰⁾。抽出された地点が多い箇所を対象に空中写真の判読等を交えながら砂防調査の実施箇所を詳細に検討していくことになる。一方で、シラス地帯では急崖が多いこともあり、溪床勾配の大きい箇所が広い範囲にわたって頻度高く分布する傾向にある。そのため、斜面崩壊の影響の一つとして崩壊に伴う土石流の発生を調査するには、多くの溪流や周囲の斜面を一つ一つ検討していくといった労力の大きい作業を伴う。そこで、本研究では複数の溪流を含んだ集水域の一つの評価単位として取り扱うこととし、集水域内での斜面安定性評価結果を相互に比較するといったアプローチをとることとした。連鎖的に斜面崩壊が発生した場合の下流部への影響を比較しやすいことや、分析・評価結果を砂防調査・計画への支援情報として提供しやすいことがその理由として挙げられる。

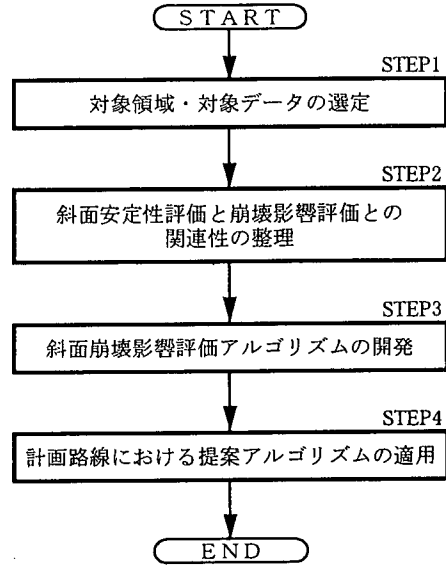


図-1 本研究の流れ

表-1 本研究で使用するデータ

情報区分	使用データ	資料および元データ
地形情報	水系図 (施工前)	5千分の1概略設計図 5千分の1地形図 土地分類基本調査成果図 現存植生図
	水系図 (施工後) 集水域図	
斜面情報	斜面安定性評価図	SPOT/HRV データ

4. 研究の構成

本研究の流れは図-1に示すとおりである。以下に内容を詳述する。

(1) 対象領域・対象データの選定 (STEP1)

本研究では、対象領域として鹿児島県のシラス地帯に計画されている自動車専用道路の周辺、 $2.2\text{ km} \times 2.6\text{ km}$ の領域を選定した。計画路線を中心に周辺山地の分水嶺までが範囲となっている。使用したデータは表-1に示すとおりである。地理データとして土地分類基本調査成果図¹¹⁾、現存植生図¹²⁾、5千分の1地形図、高速道路の概略設計図を数値化したものを採用している。衛星データとしてはSPOT/HRV データを用いて植生指標 (NDVI) を作成した。これらのデータから斜面安定性評価図、土工事前後での水系図、集水域図といった各種の処理／解析結果を作成し、解析に直接用いる情報を整備している^{3), 13)}。

(2) 斜面安定性評価と崩壊影響評価との関連性の整理 (STEP2)

衛星データと地理データの融合利用結果として採用した斜面安定性評価図から、崩壊の影響評価に関わる情報を抽出・整理する。処理／解析結果等の二次生成情報を有効利用していく上で重要な意味をもつステップである。斜面安定性評価図は衛星データや地理データを斜面安定性評価モデルに適用するこ

とによって作成されるものである。具体的には、衛星データや地理データを因子として適用し、既崩壊地を基準データ (トレーニングデータ) として、土地の性状と似かよった箇所を数量化Ⅱ類およびミニマックス2群判別から自動抽出した結果である^{3), 14)}。

(3) 斜面崩壊影響評価アルゴリズムの開発 (STEP3)

急斜面の多いシラス地帯に高速道路のような長大な構造物を計画する際、計画路線に対してどのような危険性があるかを事前評価することは大きな関心事である。このステップでは計画路線の両側に広がる集水域に着目し、衛星データと地理データの処理／解析結果から危険箇所を特定していくアルゴリズムを開発する。

(4) 計画路線における提案アルゴリズムの適用 (STEP4)

ここでは、本研究で提案したアルゴリズムの適用効果を検証する。すなわち、シラス地帯に計画されている路線を対象に、アルゴリズムを適用した結果と、詳細な現地調査に基づいた砂防ダムの設置計画

とを比較し、提案アルゴリズムの有効性を検証する。さらに、シラス地帯における提案アルゴリズムの新たな適用方法について述べる。

5. 斜面安定性評価と崩壊影響評価との関連性の整理

(1) 斜面安定性評価の前提条件と崩壊の影響

斜面安定性評価結果を崩壊の影響評価に利用していくには、前提条件を整理する必要がある。図-2は、侵食進行地域においてシラス自然斜面を対象にした際の「現状型」および「規範型」の考え方を整理したものである³¹⁾。「現状型」として選定された場所は侵食崩壊が発生した箇所であり、「規範型」として選定された場所は今後も崩壊の危険性が高いと判断された侵食斜面や滑落崖の冠頂部周辺である。斜面安定性評価ではトレーニングデータとして選ばれた箇所の土地の性状と似通った箇所を統計的に抽出し、崩壊の危険性「有」と判別する。シラス自然斜面を対象とした場合には、図-2のように「現状型」および「規範型」として定義された箇所それぞれから別々にトレーニングデータを選定することになる。ここで、崩壊が発生した場合に下流に押し流される土砂の量を考えると、図-2のように規範型として設定した箇所では表層土が多く流出されることが推測できる。一方、現状型のトレーニングデータで崩壊が発生した場合、それほど多くの土砂は発生しないことも推定できる。つまり、このトレーニングデータの選定方法は侵食の進行する可能性のある箇所を推定するための選定方法であるとともに、得られた解からは崩壊土砂の流出に関する有用な情報を抽出することも期待できる。

(2) 判別結果との関連づけ

斜面安定性評価からは、崩壊の可能性についてレベル分けをせず、トレーニングデータとして選定された領域(トレーニング領域)とそれ以外の領域(評価対象領域)ごとに、危険性の「有・無」といった曖昧性を排除した判別結果が得られる^{31), 14)}。本研究のケースにおける判別の前提条件とその結果を表-2に示す。表-2は現状型および規範型評価それぞれにおける判別前のトレーニングデータと評価対象データの個数と、数量化Ⅱ類およびミニマックス2群判別後の結果がまとめられている。トレーニングデータに対する判別精度を表す指標としての中率が用いられるが³¹⁾、本研究のケースでは現状型評価で88.2%、規範型評価で84.4%といった十分に高い精度を得ている。

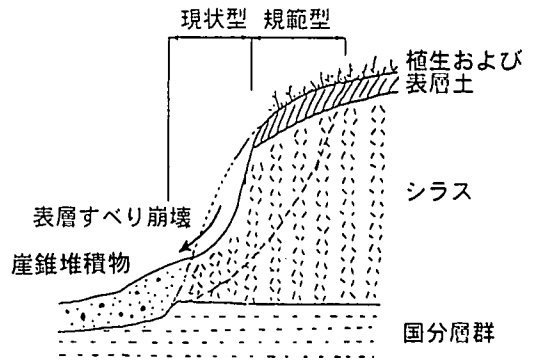


図-2 斜面安定性評価の前提条件³¹⁾

表-2 ミニマックス2群判別結果

判別事象		現状型	規範型
判別前	トレーニングデータ	34	32
	評価対象データ	12,934	12,936
判別後	トレーニングデータ	危険性有	30
		危険性無	4
	評価対象データ	危険性有	1,471
		危険性無	11,463
合計	危険性有	1,501	
	危険性無	11,467	
的中率		88.2%	84.4%

写真-1は「現状型」および「規範型」のトレーニングデータから作成された2種類の判別結果を取りまとめた斜面安定性評価図の差画像(以降、差画像と呼ぶ)である³¹⁾。表-3には表-2の判別結果に基づいた差画像の解釈表を示した。なお、領域の北西から南東にかけて描かれている太線が計画された路線になる。

差画像は、侵食崩壊の発生の引き金となる箇所(潜在危険斜面⁵¹⁾)の抽出を目的に提案・作成された³¹⁾。「現状型」と「規範型」の判別結果を組み合わせることによって、崩壊歴のある箇所を含めた急斜面全体から写真-1の黄色で示されたような「潜在危険斜面」を抽出できる。この際、トレーニングデータを「現状型」、「規範型」それぞれのケースで独立に設定していることから、差画像上で表現される事象は表-3の「評価図の組み合わせ」のような12ケースになる。

本研究では、表-3の「現地調査時の着眼点」の欄に注目し、「侵食崩壊の危険性大」、「反復崩壊」および「潜在危険」といったキーワードを基にして、差画像から表-4に示すような崩壊影響評価に関する一般解釈を整理した。表-4では、ある小領域を設定した上で、その中で集中的に現れた判別結果のケースごとに解釈を整理している。つまり、注目した集水域で崩壊が発生した場合に、その下流部にど

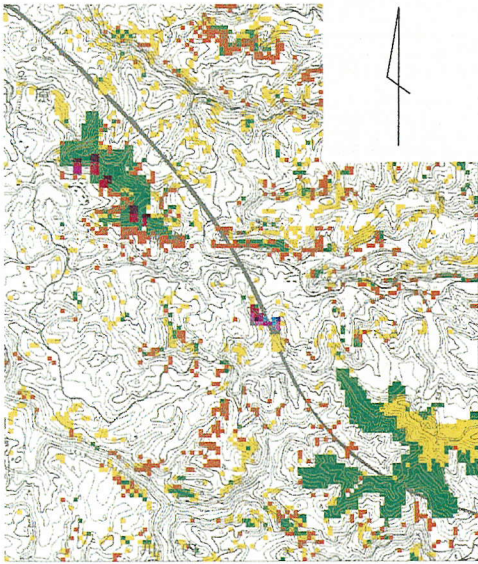


写真-1 斜面安定性評価図（差画像）（凡例：表-2）

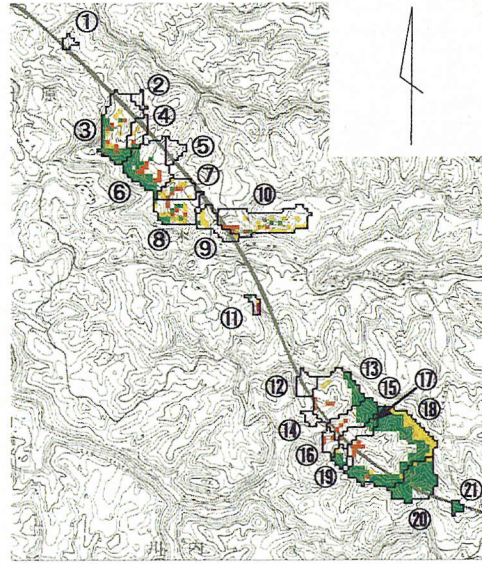


写真-2 集水域内での判別結果の分布状況

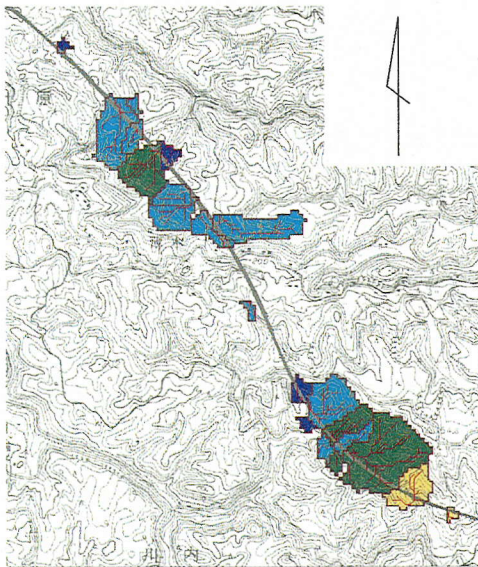


写真-3 集水域の類型化



写真-4 詳細比較・分析結果

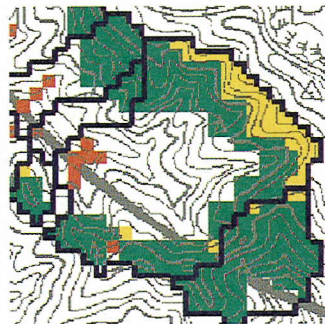


写真-5 No. 18地域の拡大図

表-3 斜面安定性評価図(差画像)から得られる情報³⁾

評価図の組合せ (危険性の有無)	差画像上の色付け		一般解釈 (ミニマックス2群判別結果に基づく)	現地調査時の 着視点	ケース	
	現状型	規範型				
トレーニング領域 評価対象データ	有	有	赤	現状型: 侵食による表層崩壊の可能性あり 規範型: 侵食の進行の可能性あり	危険性大	1
		無	薄赤	現状型: 侵食による表層崩壊の可能性あり 規範型: 侵食の進行の可能性なし	要注意箇所 反復崩壊	2
		有	青	現状型: 侵食による表層崩壊の可能性なし 規範型: 侵食の進行の可能性あり	要注意箇所 潜在危険斜面	3
		無	薄青	現状型: 侵食による表層崩壊の可能性なし 規範型: 侵食の進行の可能性なし	危険性小	4
	有	有	こげ茶	現状型: 侵食による表層崩壊の可能性あり 規範型: 侵食の進行の可能性あり	危険性大	5
		無	ピンク	現状型: 侵食による表層崩壊の可能性なし 規範型: 侵食の進行の可能性あり	要注意箇所 反復崩壊	6
		有	紫	現状型: 侵食による表層崩壊の可能性あり 規範型: 侵食の進行の可能性なし	要注意箇所 潜在危険斜面	7
		無	灰	現状型: 侵食による表層崩壊の可能性なし 規範型: 侵食の進行の可能性なし	危険性小	8
評価対象領域 評価対象データ	有	有	緑	現状型: 侵食による表層崩壊の可能性あり 規範型: 侵食の進行の可能性あり	危険性大	9
		無	橙	現状型: 侵食による表層崩壊の可能性あり 規範型: 侵食の進行の可能性なし	要注意箇所 反復崩壊	10
	有	有	黄色	現状型: 侵食による表層崩壊の可能性なし 規範型: 侵食の進行の可能性あり	要注意箇所 潜在危険斜面	11
		無	白	現状型: 侵食による表層崩壊の可能性なし 規範型: 侵食の進行の可能性なし	危険性小	12

注) ハンチ部分はトレーニングデータとして選定された画素を意味する。

表-4 崩壊影響評価についての一般解釈

	斜面安定性評価結果		崩壊影響についての一般解釈		
	現地調査での着視点	ケース	差画像上の色付け	留意点	危険度の分布タイプ
単独型分布	侵食崩壊の危険性大	1	赤	既崩壊地であるが、表層土の堆積状況や植生の分布状態に留意する必要がある。	タイプI
		5	こげ茶	未崩壊地であり、斜面上に表層土が厚く堆積し、植生が繁茂している可能性がある。	タイプII
		9	緑	斜面上に表層土が厚く堆積し、植生が繁茂している場合に注意を要する。	タイプIII
潜在危険	+ 潜在危険	3	青	既崩壊地であるが、表層土の堆積状況や植生の分布状態に留意する必要がある。	タイプIV
		6	ピンク	未崩壊地であり、斜面上部に表層土が厚く堆積し、植生が繁茂している可能性がある。	タイプV
		11	黄	斜面上部に表層土が厚く堆積し、植生が繁茂している可能性がある。	タイプVI
		1	赤	侵食崩壊斜面の背後に潜在危険斜面が控えている場合は、潜在危険斜面の崩壊が引き金となり、大規模な侵食崩壊の発生に発展する可能性がある。	タイプVII
反復崩壊 + 潜在危険	+ 潜在危険	2	薄赤	反復崩壊斜面の背後に潜在危険斜面が控えている場合は、潜在危険斜面の崩壊が引き金となり、大規模な侵食崩壊の発生に発展する可能性がある。	タイプVIII
		7	紫橙		

のような影響が生じるか、といった点を重点的に取りまとめていることになる。具体的には、判別結果の分布状態を「単独型分布」と「複合型分布」に区分し、解釈を8つのタイプに整理している。以下にそれぞれのタイプについて詳述する。

①タイプI：既に斜面崩壊が発生しているが、規範型トレーニングデータの土地の性状とも似ている、と判別された箇所が、集水域内に多く分布しているタイプである。侵食崩壊発生危険性が大きいことから、崩壊の影響を評価していくには、表層土の堆積状況や植生の分布状態について詳細な現地調査を実施することが大切となる。

②タイプII：未崩壊地であると同時に現状型トレーニングデータの土地の性状と似ていると判別された箇所が、集水域内に多く分布しているタイプである。侵食崩壊発生危険性が大きく、表層土や樹木等が崩壊土砂に加わることが想定される。崩壊の影響を評価していく上で要注意の領域と解釈できる。

③タイプIII：評価対象領域において侵食崩壊の危険性大として判別された箇所が、集水域内に多く分布しているタイプである。現地において斜面上に表層土が厚く堆積し、植生が繁茂している場合には崩壊土砂の影響が大きくなることが推定されることが

ら、入念な現地調査が必要となる。

④タイプIV：既に斜面崩壊が発生しているが、潜在危険斜面として判別された箇所が、集水域内に多く分布しているタイプである。大規模な侵食崩壊に発展する可能性もあることから、表層土の堆積状況や植生の分布状態について入念な現地調査が必要となる。

⑤タイプV：現状が未崩壊地であり、潜在危険斜面として判別された箇所が、集水域内に多く分布しているタイプである。斜面上の表層土の堆積状況や植生の繁茂状態に注意が必要となる。大規模な侵食崩壊に発展する可能性もあることから、留意が必要な領域と解釈できる。

⑥タイプVI：評価対象領域において潜在危険斜面として判別された箇所が、集水域内に多く分布しているタイプである。斜面上部に表層土が厚く堆積し、植生が繁茂している可能性があることから、大規模な崩壊に発展した場合には注意が必要となる。

以上が一種類の判別結果が集水域内に特に多く分布しているタイプから得られる崩壊影響評価の一般解釈となる。次に2種類の判別結果が特に多く分布している場合について整理する。

⑦タイプVII：「侵食崩壊の危険性大」と「潜在危

険斜面」と判別された箇所が共に多く分布しているタイプである。分布の位置関係によっては大規模な侵食崩壊に発展する可能性が高い領域と判断できる。樹木や表層土が崩壊土砂として下流部に押し流されてくる可能性もあり、崩壊の影響評価を実施する上で要注意領域と判断できる。

⑧タイプⅧ：「反復崩壊危険斜面」と「潜在危険斜面」と判別された箇所が共に多く分布しているタイプである。分布の位置関係によっては大規模な侵食崩壊に発展する可能性がある領域と判断できる。樹木等の植生や表層土が崩壊土砂として大量に押し流されてくる可能性もあり、崩壊の影響評価を実施する上で要注意領域と判断できる。

以上のように整理された情報を用いて、計画路線を対象とした広域的な崩壊の影響評価アルゴリズムを作成していく。

6. 斜面崩壊影響評価アルゴリズムの開発

(1) 水系線を用いた集水域の抽出

a) 集水域の抽出条件

本研究では、土工事前・後のDTM (Digital Terrain Model) から水系線を計算し、集水域を自動的に求めることとした。

DTMを用いた研究は古くから進められてきており、既に路線計画・設計の分野では有効な利用方法が検討されてきている¹⁵⁾。本研究のアプローチでは、土工事前・後それぞれでの水系線を計算した後に、計画路線にインパクトを与える可能性のある箇所（ここでは、注目箇所と呼ぶ）を抽出し、その上流側の集水域を自動的に決定する。DTMから水系線を作成する方法については現在も多くの議論が見られるが^{16), 17)}、本研究では一次以上の水系線に着目した。

まずはじめに、土工事によって地形が改変され、一次以上の水系線が分断された箇所に着目する。一次以上の水系線が分断された箇所については、必ずその上流部分に集水域が存在することになる。その集水域をそれぞれ特定し、比較対照のための「注目する領域」として抽出した。

なお、水系線が発生しない路線近傍の斜面については、詳細な調査が頻繁に実施できると判断し、本研究では対象外としている。また、路線と交差する河川については、上流部の集水域が広大になるとともに、評価された斜面と路線との距離についても議論する必要が出てくる。ここでも、計画路線から分水嶺までの領域を対象に注目領域（集水域）を抽出することの重要性が指摘できる。

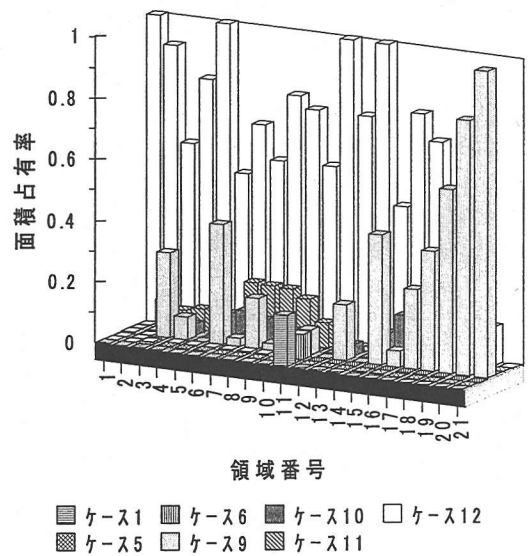


図-3 判別結果の分布状況

b) 集水域の抽出

写真-2は、集水域ごとに差画像上の判別結果を抽出したものである。ここでは便宜上、集水域について①から⑳の番号を振っている。

写真-2からは、計画路線の両側に様々な面積の集水域が控えていることがわかる。一方、この画像からおおよその集水傾向を把握できるが、集水域内の斜面の状態を吟味するには集水面積だけでなく、さらに詳細な検討が必要であることもわかる。

集水域内での判別結果の分布を見ると、様々な分布パターンが見られる。狭い集水面積であっても崩壊発生の可能性のある箇所が多く分布していれば、より重点的な対策の実施が必要不可欠となる。また、広い集水面積であっても崩壊の可能性箇所が少なければ、領域内での砂防ダム等の設置箇所をより絞り込むことが可能となる。したがって、集水境界を明らかにすることと同時に集水面積に対する判別結果の割合を明らかにすることが必要となる。そこで、それぞれの領域における各判別結果の占有率を図-3のように取りまとめた。

図-3では、横軸に集水域の番号（写真-2の①～⑳に対応）、奥行き方向に判別結果（表-3の各ケースに対応）、縦方向に各々の集水域における各判別結果の面積占有率が示されている。なお、ケース2～ケース4、ケース7、ケース8については抽出した集水域内で発生しなかったため、省略している。

全体としては、集水域内でケース12の「危険性小」と判定された画素が多く占める傾向にあるものの、ケース9の「危険性大」と判定された画素の多

く分布している領域や、ケース11「潜在危険斜面」、ケース10「反復崩壊斜面」と判定された画素が混在している領域も見られる。

これらの情報は注目領域として取り上げた各集水域での斜面安定度を表した貴重な情報である。判別結果を比較・分析することによって、排水工対策や砂防計画等に有用な情報の提供が期待できる。その一方で、写真-2の集水域を分析するには20箇所以上の領域それぞれについてケース1からケース12までの判別結果の分布を比較・区分していく膨大な作業が必要になる。つまり、判別結果を用いた広域的な崩壊影響評価へと展開するには煩雑な作業を伴うことになり、実用を前提とした場合の一つの阻害要因となっている。そこで本研究では以下のような新たな工夫を試みることにした。

(2) 階層的クラスター分析の導入

a) ノンパラメトリック手法の導入

一般的に、路線の計画・設計段階においては、計画地域や工区といった範囲内で各地点の状況を相互に比較・分析し、砂防調査へと展開することが多い。したがって、複数の集水域の特性についてあらかじめグループ化・類型化を実施しておくことによって調査計画への貴重な資料が得られることになる。その一方で、一例として土石流を挙げると、発生基準となるデータの取得は現地調査からも得ることが困難な点も指摘されており¹⁰⁾、あらかじめグループ化・類型化のための基準のようなものを整備することは難しいことになる。そこで、本研究では外的基準を必要としない階層的クラスター分析を適用し、集水域内の判別結果の分布特性を相対的に区分することとした。

階層的クラスター分析には、クラスター間の距離(類似度)の定義の違いから最短距離法、最長距離法、群平均法、メジアン法、重心法およびウォード法といった方法が提案されている¹⁸⁾。本研究では、「崩壊の危険性があるか否か」といったユーザの判断に直結する情報を取り扱う。したがって、一般に広く使用されており、情報の損失量が最小となるようにクラスタリングするウォード法を採用することとした¹⁸⁾。

b) 分析結果の解釈

階層的クラスター分析を含めたノンパラメトリックの分類手法では、分類結果を解釈することが難しいといった指摘がある。一例を挙げると、衛星データの画像処理における土地被覆分類図作成では、CCTカウント値を使用したクラスター結果と現地の土地被覆との関連性が明らかにならないため、出力

結果を土地利用現況図等と代替利用するには実用上の問題があるとの見解がある¹⁹⁾。つまり、取り扱う数値の持つ意味があいまいなものを対象とすると分析結果が解釈困難なものとなる。

本研究では、基本的には崩壊の危険性の「有・無」といった判別結果を対象データとしており、クラスター分析結果をユーザが解釈することが比較的容易なものとなっている。さらに、表-4に示したような簡便な一般解釈表を利用することによって、より実用的な解釈が可能となる。

c) 分析結果

階層的クラスター分析において問題となるのがクラスターの個数の決定である。本研究で採用した斜面安定性評価図が表-3のように12の情報を持っていることから12個のクラスターで分析結果を比較することも想定できるが、このままであるとユーザが解釈する際の煩雑さ・複雑さを解消するには至らない。そこで、差画像における「現地調査時の着眼点」を大きく分けると「危険性大」、「潜在危険斜面」、「反復崩壊斜面」および「危険性小」といった4つの情報に区分できることに着目し、本研究では4個のクラスターから比較・分析を進めることとする。

図-4に、階層的クラスター分析から得られたデンドログラムを示す。図中の点線の位置での結果をまとめると図-5のIからIVのように類型化される。写真-3には、4つのクラスターに類型化された結果を画像表示している。図-5のI~IVと、写真-3で割り当てた色との対応は以下のとおりである。

I：青色，II：水色，III：緑色，IV：黄色

図-5を見ると、Iは「危険性小」として判別されたケース12が集水域のすべてを占めたクラスであることがわかる。順にII、IIIと見ていくと、ケース12が減少すると同時に、何らかの危険性を表す判別結果が徐々に集水域での割合を占めてきており、IVではケース9の「危険性大」が領域のほとんどを占めている。

一方で、図-5や写真-4からはおおよその傾向は把握できるものの、このままでは本研究の目標とする「注目箇所の絞り込み」に対しては十分な情報を得ることが難しい。そこで、本研究では階層的クラスター分析の結果と表-4の一般解釈表を利用した詳細分析プロセスを考案した。以下にその内容を詳述する。

(3) 詳細比較・分析プロセス

a) 詳細比較・分析

図-6に本研究で提案する詳細比較・分析手順の流れを示し、以下に詳細を述べる。

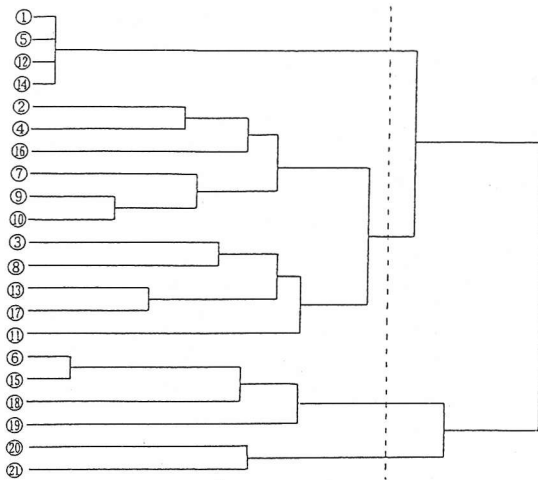


図-4 類型化の結果

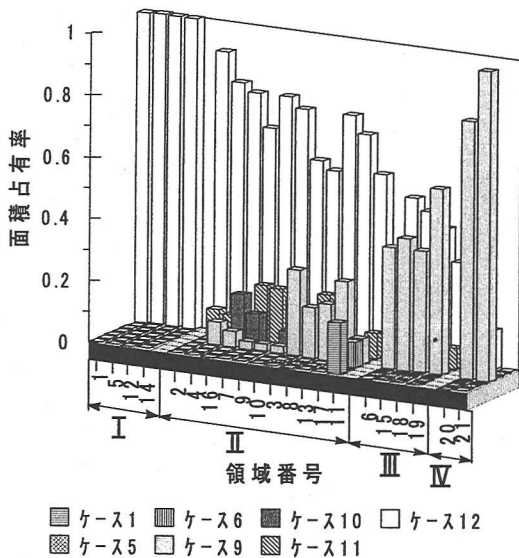


図-5 判別結果の類型化

STEP1: 対象領域全体で階層的クラスター分析を実施し、デンドログラムや写真-3のような類型化した結果を得る。

STEP2: 判別結果の分布から表-4の一般解釈表を基に注目すべきクラスターを選定する。クラスター分析から得られる解は統計的に区分された結果ではあるものの、ノンパラメトリック手法であるためにクラス分けの基準が明確ではない。したがって、クラス内での判別結果の分布特性を十分に把握しておくことが大切となる。

STEP3: 表-4の一般解釈表を基に対象クラスター内でのクラス分けをデンドログラムを用いて実施する。新たに区分された集水域を画像化し、崩壊の

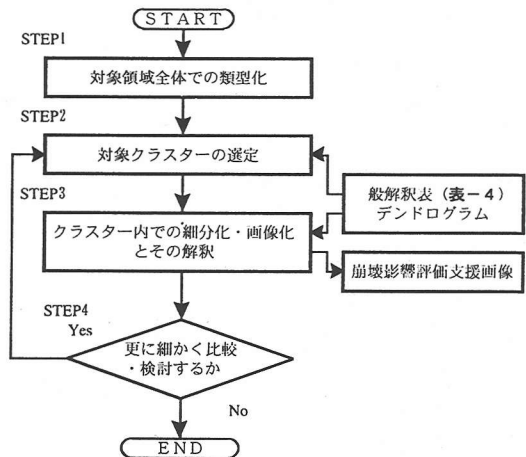


図-6 詳細比較・分析手順

影響を評価するための支援情報として提示する。

STEP4: クラスター内の集水域の数が多い場合、各々の分布を比較するには煩雑さが伴う。したがって、提案する手順では1回の比較・検討にデンドログラムでの一つの分岐点を取り上げることが望ましい。さらに詳細にわたって集水域を比較・区分したい場合には、STEP2に戻って比較対照とするクラスターを選定した上で分析を進めることになる。有用な情報が抽出できれば作業を終了する。

b) 類型化の結果

提案した手順に沿って出力した一例を写真-4に示す。写真-4は写真-3のⅢのクラス(緑色)を詳細に分析した結果である。図-5からも判るように、Ⅲのクラスは表-4の複合型(タイプⅦ:「侵食崩壊の危険性大」+「潜在危険斜面」)に該当するグループである。

写真-4では18番の集水域が単独で抽出されている。この領域の判別結果の分布を写真-5に拡大表示する。18番では領域内の斜面に緑色の画素が連なって分布し、さらに、北東斜面では斜面冠頂部付近に黄色の画素が連続していることがわかる。つまり、この集水域については、侵食の進行を促す可能性のある「潜在危険斜面(黄色の画素)」と、「危険性大(緑色の画素)」と判別された斜面が連続していることになり、侵食の進行をきっかけとして多量の土砂流出を伴った大規模な斜面崩壊の発生する可能性が高い領域であることが推測できる。

18番の領域は、詳細な現地調査の結果、本研究の対象領域では唯一、砂防ダムのような防災対策が必要と判断された地域であり、現在、高速道路そのものの施工とともに砂防に関する工事も実施されていることが判明している。

c) 提案アルゴリズムのシステムへの導入

本研究で提案したアルゴリズムでは、画像の表示・相互参照、解釈表との照合といった動作を繰り返すことで崩壊の影響評価に有効な情報が抽出される。したがって、実際にはユーザインターフェースに優れたシステムが必要不可欠となる。また、水系図や斜面安定性評価図といった衛星データと地理データの処理/解析結果を利用していることから、画像データベースと有機的にリンクしたシステムであることも必要である。このようなシステムについては、多くの検討からデータセットの概念を用いたシステムが既に構築され、実用化されている⁹⁾。

(4) 提案アルゴリズムの利用用途

a) 路線計画への利用

本研究で提案したアルゴリズムは、いくつかの比較路線の中から一つの路線を選定する際の支援情報としても利用できることが判っている。表示された画像上で選定の対象となる路線候補を指定することによって、交差(分断)される水系と集水域が自動決定され、それぞれの路線候補について注目箇所と集水域内の判別結果の分布状況が計算される。つまり、提案アルゴリズムを用いることで、崩壊が発生した場合に最も影響の少ない路線を選択できるとともに、斜面崩壊の危険性が想定される箇所に対して適切な対策を講じることが可能になる。

b) 観測機器の設置

最近では、サクション等の計測器や電気探査計測法等を利用し、斜面の挙動を観測する試みが進められてきている⁹⁾。その一方で、これらの計器は精度高く地盤状態を観測できるものの、対象とする範囲が限られている。高速道路等の広範囲にわたる構造物において、周辺のすべての斜面にこのような計器を設置することは維持・管理の面から見ても現実的ではない。したがって、設置箇所の絞り込みが重要になってくる。本研究で提案したアルゴリズムでは、これらの観測機器の設置候補地の選定に対して、集水面積といった情報のみならず、斜面の特性、安定度といったシラス斜面の挙動と密接に関わった情報を提供できる。

7. まとめ

本研究で得られた成果は次の4点である。

①シラス地帯において高速道路等の大型構造物を施工する場合には、少なくとも周辺山地の分水嶺までを含んだ事前の広域的な土地評価が重要となることを指摘し、その具体策を提案した。

②シラス地帯に計画された路線での広域事前評価に対して、衛星データと地理データ、さらには、それらの処理/解析結果である二次生成情報を利用するアプローチを提案した。具体的には、既存の斜面安定性評価結果から得られる情報を整理し、崩壊の影響評価に展開するための一般解釈表を提示した。

③整理した一般解釈を基に、計画路線に沿った広域対象領域から注目箇所を自動抽出し、その上流部分に位置する複数の集水域を対象として、それぞれの崩壊の影響を比較・検証するアルゴリズムを提案した。ここで提案した方法を導入することによって衛星データや地理データの効果的な融合利用が実務ベースで可能になるものと考えている。

④提案したアルゴリズムを実際の計画路線に適用したところ、詳細な現地調査から砂防施設設置の必要性ありとして判断された箇所が抽出できていることがわかった。

謝辞：本研究を取りまとめるにあたって、持永龍一郎博士(道雄エンジ株)には、シラスの特性等の貴重な情報をご教示いただきました。北村良介博士(鹿児島大学工学部教授)には、シラスに関する最新の研究動向とその成果についてご教示いただくとともに、本研究に対するご意見をいただきました。また、現地の詳細な調査および計画路線に関わる情報提供等については、日本道路公団の関係者各位に多大なご協力をいただきました。東京理科大学大学院の松島康人君には、データの処理/解析面で支援いただきました。末筆ながら深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山内豊聡, 持永龍一郎, 川村忠孝: シラス地帯における九州縦貫自動車道の設計施工, 土木学会誌, No. 57-6, pp. 65-75, 1972.
- 2) 北村良介, 山田満秀: 粘着成分を考慮したしらす斜面の安定解析, 降雨と地震から危険斜面を守る地盤工学に関するシンポジウム発表論文集, pp. 77-80, 1997.
- 3) 大林成行, 小島尚人, 村上遼也: 侵食崩壊を伴う急傾斜地を対象とした場合の危険箇所評価方法の一提案, 土木学会論文集, No. 567/VI-35, pp. 225-236, 1997.
- 4) 露木利貞, 岩松暉: 1986年7月10日梅雨末期集中豪雨による鹿児島市内のシラス災害に関する調査研究, 自然災害科学総合シンポジウム要旨集, Vol. 24, pp. 33-46, 1987.
- 5) 下川悦郎, 地頭菌隆, 高野茂: しらす台地周辺斜面

- における崩壊の周期性と発生場の予測, 地形, Vol. 10, No. 4, pp. 267-284, 1989.
- 6) 1993年豪雨災害鹿児島大学調査研究会:「1993年鹿児島豪雨災害の総合調査研究」報告書, A4判, 229頁, 1994.
- 7) 1993年豪雨災害鹿児島大学調査研究会:「1993年鹿児島豪雨災害の総合調査研究」報告書 第2集, A4判, 218頁, 1995.
- 8) 北村良介, 井料達生, 城本一義, 下川悦朗, 地頭菌隆, 岩松暉, 横田修一郎:しらす地盤における降雨に伴う土砂災害の発生機構, 河川情報研究, No. 5, pp. 51-61, 1997.
- 9) 大林成行, 熊谷樹一郎, 大瀧克則, 野上浩典:衛星データと地理・社会データの融合利用を前提としたデータセットの構築について, 土木情報システム論文集, Vol. 6, pp. 47-54, 1997.
- 10) 吉岡良朗編著:新体系土木工学77, 砂防・地すべり・急傾斜地崩壊, 技報堂出版, 1980.
- 11) 鹿児島県:土地分類基本調査・国分, A5判, 34頁, 1973.
- 12) 環境庁:第3回自然環境保全基礎調査(植生調査)現存植生図・国分, 1985.
- 13) 熊谷樹一郎, 大林成行, 松島康人, 寺山充生:衛星リモートセンシングデータの実利用を念頭に置いた地形改変による影響評価システムの構築, 土木情報システム論文集, Vol. 6, pp. 55-62, 1997.
- 14) 笠博義, 小島尚人, 大林成行:異なった斜面崩壊のタイプに対する斜面崩壊予測システムの適用性の研究, 土木学会論文集, No. 444/VI-16, pp. 71-80, 1992.
- 15) 丸安隆和, 村井俊治, 大林成行:路線計画および設計を対象とした帯状デジタルトレインモデルの作成, 写真測量, Vol. 10, No. 2, pp. 22-29, 1971.
- 16) Kao, J.-J.:Determining Drainage Pattern Using DEM Data for Nonpoint-Source Water Quality Modeling, *Water Science and Technology*, Vol.26, No.5/6, pp.1431-1438, 1992.
- 17) 佐藤嘉則, 篠田成郎, 都築克紀:グリッド型DEMによる落水方向ベクトルと集水境界の推定法, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, 共通セッション, pp. 332-333, 1996.
- 18) 西田英郎, 佐藤嗣二共訳:実例クラスター分析, A5判, 424頁, 内田老鶴圃, 1992.
- 19) 小島尚人, 大林成行:画像分類におけるトレーニングサンプル再抽出方法の一提案, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 14, No13, pp. 50-65, 1994.

(1998.10.2 受付)

DEVELOPMENT OF THE EVALUATION METHOD OF THE SLOPE FAILURE FOR PRE-EVALUATION OF HIGHWAY ROUTE IN SHIRASU AREA

Kiichiro KUMAGAI, Shigeyuki OBAYASHI, Minoru KAWAIDA and Genya SAITO

The objective of this study is to develop the evaluation method of the slope failure using not only satellite multi-spectral data and geographical data but also secondary generated data for planning highway route in shirasu area. As for the feature of the erosive area, as a Shirasu plateau, mudflow occurring simultaneously with slope failure brings about disaster frequently. In this study, using the slope stability evaluation map which was made from satellite multi-spectral data and geographical data, the evaluation procedure making a comparison between the distributions of extracted pixels in the catchment areas calculated from digital terrain model (DTM) was proposed. It was shown that the proposed procedure was very useful for pre-evaluation of highway route in shirasu area.