

衛星リモートセンシングデータを導入した シラス自然斜面の崩壊危険箇所評価精度の向上

小島尚人¹・北村良介²・大林成行³・伊代田尚志⁴

¹正会員 工博 東京理科大学助教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

²正会員 工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40)

³正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

⁴学生員 東京理科大学大学院・理工学部土木工学科 (同上)

本研究は、シラス自然斜面の崩壊危険箇所評価支援を目的とし、衛星から観測される熱赤外域情報の適用性について検討したものである。筆者らが開発した斜面崩壊危険箇所評価モデルをベースとして、1) ケース1: 地理情報+衛星熱赤外域情報+植生指標, 2) ケース2: 地理情報+衛星熱赤外域情報, 3) ケース3: 地理情報+植生指標, といった3ケースを設定した。数量化Ⅱ類とⅢ類による分析の結果、衛星熱赤外域情報を使用した場合(ケース1, ケース2)には、潜在危険斜面の推定精度が向上することが判った。さらに、衛星熱赤外域情報の使用の有無に伴う評価結果の違いを抽出した「差画像」を最終成果図として提示し、「崩壊危険側・安全側」といった評価が展開できることを示すとともに、現地調査や斜面安定化計画等への支援情報として有用性の高いことを示した。

Key Words : slope stability evaluation, satellite thermal infrared data, geographical information, quantification method

1. はじめに

南九州地方は亜熱帯地域に属し、梅雨や台風来襲期には他の地域では見られない多量の降雨に見舞われる。この地域一帯は火砕流堆積物の非溶結部である「シラス」が広く分布しており、6月～9月といった雨季には、広域に渡ってシラス斜面崩壊が頻発し、多くの災害を被っている¹⁾²⁾。このような状況の中、筆者らは、地形や地質、土壤等の各種地理情報と衛星データを融合し、シラス等の火山噴出物で構成される斜面の崩壊危険箇所を広域にわたって推定していく研究に取り組んでいる³⁾⁴⁾。

崩壊危険箇所を広域にわたって推定していく場合、一般には衛星データから作成される「植生指標」が素因情報として有用であるとの報告が多い。これは植生活性度と降雨状況あるいは地下水脈との因果関係があるといった根拠に基づいており、各種統計手法による分析結果からも裏付けられている。しかし、これらの研究は、第三紀層や破砕帯を対象としたものであり、本研究で対象とするシラス斜面の法肩部や法尻部では植生が繁茂している箇所もあれば、そうでない箇所もある。また、起伏が大きい斜面の中腹部はシラスが剥きだしになっている場合もあることから、崩壊危険箇所を同定する上で植生指標の有用性には疑問の余地が

ある。

シラス地帯では、降雨、日射等による間隙水の浸透、蒸発が繰り返されており、熱伝達の違いによる温度分布の変化、地下水位の変動に伴う間隙水圧の変動が生じており、シラス地盤の強度低下をもたらすことが報告されている⁵⁾。このようなことから、前述した植生指標よりも人工衛星から観測される熱赤外域情報(以降、衛星熱赤外域情報と言う)の活用期待できるが、シラス地帯における潜在危険斜面の推定を目的として、衛星データから得られる画像特徴の適用可能性について検討された事例は筆者らの知る限り見当たらない。

本研究では、シラス地帯の広域崩壊危険箇所評価における衛星熱赤外域情報と植生指標の適用可能性について検討するとともに、衛星熱赤外域情報の有用性とその活用方法を示したものである。

2. 本研究の位置付けと特徴

(1) 本研究の位置付け

a) 崩壊予知要件と広域危険箇所評価

崩壊危険箇所評価の最終目標は、「崩壊発生時期・位置・規模」といった3つの要件を満たすことである。本研究で扱う問題は、このうち崩壊が「どこで発生し、

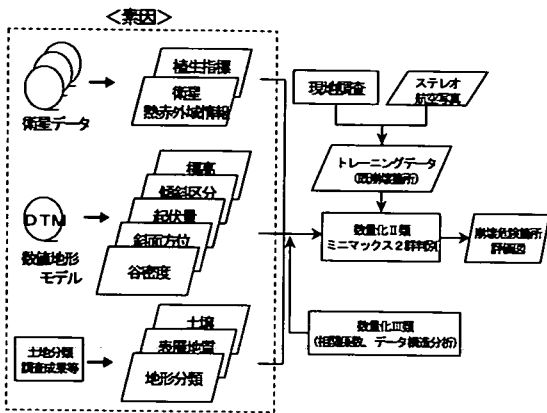


図-1 斜面崩壊危険箇所評価モデルの基本構成

どの程度の規模か」といった「広域崩壊危険箇所」の推定問題に位置付けられる。

「崩壊がいつ発生するか」といった問題については、特定の切土斜面や自然斜面を対象として、あらかじめ現地計測機器を設置して崩壊発生時刻を予知しようとする研究も並行して進めているが⁹⁾、このような「点としての観測情報」を「面としての危険箇所評価」へつなげるといったトータルシステムの構築も今後の課題として予定している。

b) 本研究で使用する崩壊危険箇所評価モデル

本研究は、筆者らが開発した崩壊危険箇所評価モデル、いわゆる SSE model (Slope Stability Evaluation model using satellite data and geographical information) をベースとして進める。SSE モデルは、図-1 に示すように地形や表層地質、土壌といった各種地理情報と衛星データを融合利用し、崩壊発生箇所を判別の基準（これをトレーニングデータと呼ぶ）として数量化II類とIII類、およびミニマクス2群判別手法を介して斜面の崩壊危険箇所評価図を作成・分析する多変量解析モデルである^{7),8)}。実際の国土調査事業においても SSE モデルは採用され⁹⁾、多くの適用実績を積み重ねてきているモデルである^{10),11)}。

c) 対象とするシラス斜面

シラス地帯の広域にわたる斜面崩壊は、風化シラスが問題となる。風化シラスは普通のシラスが物理的、化学的に風化を受けたもので、通常、この風化シラスを含めて「自然シラス」とされている¹²⁾。

シラス斜面の崩壊形態は、研究者によって様々な定義がある。代表的な例として、自然シラス斜面では、「表層剥離、表層滑落、表層落下」の3つに分類したものや¹³⁾、シラス人工斜面では、「斜面内崩壊、全面侵食、地すべり崩壊、のり肩崩壊、雨裂」といった分類も見られる¹⁴⁾。SSE モデルを用いて、全ての崩壊タ

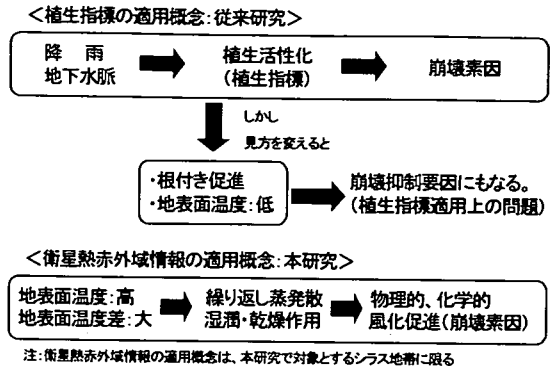


図-2 広域崩壊危険箇所評価における植生指標適用上の問題と衛星熱赤外域情報の適用概念

イプ別に評価精度を検討するといったアプローチも想定できるが、分析結果の比較と解釈が難しく、信頼性の問題が派生する。そこで、本研究では、「自然シラス斜面」を検討対象とし、広域崩壊危険箇所評価における衛星データの適用可能性について検討する。

(2) 本研究の特徴

衛星データと地理情報を融合利用して崩壊危険箇所評価を試みる手法はこれまでの研究と同様であるが、本研究は従来までの研究と比較して以下の3つの点において特徴がある。

a) 衛星熱赤外域情報の導入

広域崩壊危険箇所評価に衛星データを利用する場合、一般には、植生指標を利用した研究が多い。その適用概念を図-2の上段に示す。衛星データから計算される植生指標によって、間接的に地下水脈の影響を推定するといったアプローチであり、地下水脈と植生の活性度を反映した植生指標の値に相関関係があるといった考えに基づいている^{15),16)}。

これらの研究は、第3紀層や破砕帯等の種々の植生に覆われている崩壊地帯を対象としており、梅雨季節の植生活性が顕著な箇所である。しかし、シラス斜面の法肩部には、植生が繁茂しているところもあれば、そうでない箇所もあり、特に起伏の大きい斜面の中腹部や崖錐部等では、広域にわたってシラスそのものが剥きだしになっている箇所が多い。このような箇所は、植生の活性度を指標として地下水脈等との関係を議論することは難しい。また、見方を変えると、植生活性の高い箇所は植物の根付きがよくなり、逆に斜面の安定に寄与することも想定される。以上のことからシラスの風化促進を間接的に説明できる衛星熱赤外域情報の適用可能性に期待できる。このことが本研究を着手するに至った経緯でもある。

シラスの風化は降雨、日射等による雨水の浸透、間隙水の蒸発が繰り返されることに起因する。この風化作用は一般に物理的風化と化学的風化に分けて扱われる。

物理的風化は、地表に露出しているシラスが、日射による加熱、冷却に伴って、乾燥と湿潤を繰り返しながら進行する。固体材料の熱疲労による劣化過程に相当する¹⁷⁾。また、化学的風化では、シラス斜面の表層中腹部（非溶結部）において粘土鉱物が含まれる部分がスメクタイトに変質することが問題となる。このスメクタイトが水分を吸って膨張して乾湿を繰り返すことによって「すべり面」が形成され、崩壊に至る¹⁸⁾。

いずれにしてもシラス地帯においては地表面温度が高い箇所は風化が促進され、これが崩壊要因の一つになると言える。

以上のことから、地表面の温度情報が崩壊危険箇所を同定する上での新たな素因情報の一つとして適用効果が期待できるが、衛星熱赤外域情報を適用する際には次の2つの点に着目する必要がある。

- ①地表面温度が高い箇所
- ②地表面温度差が大きい箇所

地表面温度が高い箇所を衛星データから画素単位で特定することは容易であるが、地表面温度差については、昼間データと夜間データとの比較、さらには季節変化を分析するために時系列データが必要になる。季節変化を分析するための衛星データとしては、季節間の変化が大きい「春季・夏季・秋季・冬季」といった代表的な4つの季節が考えられる。特に、夏季と冬季のように温度差が大きい季節間を比較することは興味深い。観測時期の違いに伴って評価結果が異なる箇所は、地表面温度差が大きい箇所であると解釈でき、このような箇所は積極的に現地調査を行う必要があると言える。地表面温度差の情報を活用し、崩壊危険箇所の推定精度を向上できる可能性があるが、本研究では、まず第一に、シラス地帯の広域崩壊危険箇所評価における衛星熱赤外域情報そのものの適用可能性を見出すことを目的とすることから、時系列情報の適用性については、崩壊危険箇所のさらなる評価精度の向上を目指した今後の課題として、本研究の範囲には含めないこととする。

b) 衛星熱赤外域情報と植生指標の適用性の比較

図-2に示したとおり、シラス自然斜面の崩壊危険箇所評価における植生指標と衛星熱赤外域情報の適用性を比較している点も本研究の特色となる。数量化Ⅱ類とⅢ類による素因分析を通して、シラス斜面の崩壊危険箇所評価においては、植生指標に比べて、衛星熱赤外域情報の方が有用であることが示されている点も新たな知見である。

崩壊危険箇所評価における植生指標適用上の問題を

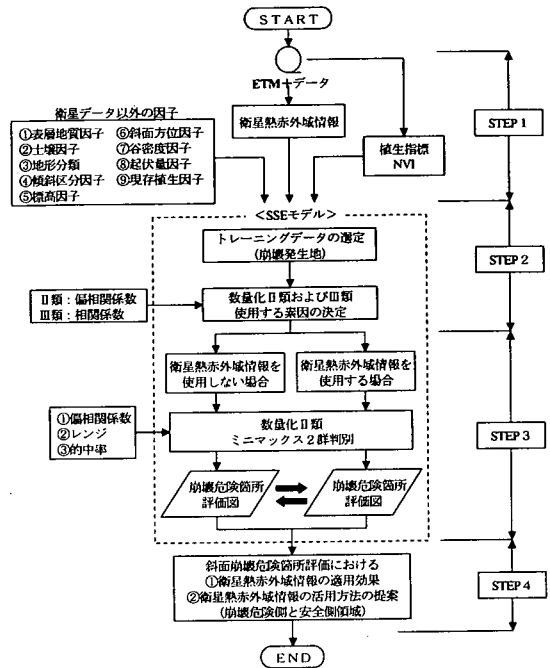


図-3 SSEモデルにおける衛星熱赤外域情報を活用した評価手順

指摘した上で、衛星熱赤外域情報の新たな適用分野を開拓するといった側面から見ても本研究のアプローチは意義あるものとなる。

c) 衛星熱赤外域情報の活用方法の提示

本研究では、衛星熱赤外域情報の有用性を示すだけでなく、衛星熱赤外域情報の活用方法を提示している。衛星熱赤外域情報を使用した場合とそうでない場合の崩壊危険箇所評価図の違いを抽出・表示した差画像を最終成果図とし、この違いを一般解釈表と照合し、「崩壊危険側・安全側」といった評価を展開する方策を示している。SSEモデルにおける衛星熱赤外域情報を活用した評価手順(図-3)は標準化されており、技術者支援型の評価アルゴリズムとして寄与するものと考えている。

3. 研究の構成

本研究の構成を図-3に示す。

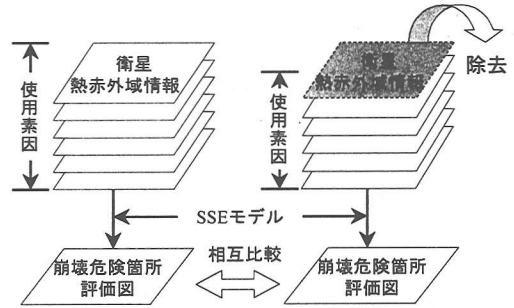
(1) STEP1: 対象領域の選定と素因データの準備

a) 対象領域

対象領域は、鹿児島県吉田町佐多浦地区である。この地区では、自然シラスの浸食谷・浸食崖が広く分布し、1993年8月の集中豪雨では広域にわたって数多く

表-1 素因データ

| 土地分類基本調査図から作成 | | | 衛星データから作成 | |
|---------------|---------|--------|-----------|------------|
| 表層地質 | 土壌 | 地形分類 | 植生指標 | 熱赤外域情報 |
| 砂、礫 | 粗粒原化火山 | 中起伏火山地 | レベル1 | レベル1 |
| 泥、砂、礫 | 黒ボク土 | 丘陵地 | レベル2 | レベル2 |
| 泥岩 | 乾性褐色森林土 | シラス野地 | レベル3 | レベル3 |
| シルト岩 | 褐色森林土 | 谷底平野 | レベル4 | レベル4 |
| シラス | 細粒灰色低地土 | 崖 | レベル5 | レベル5 |
| 溶結凝灰岩 | 粗粒灰色低地土 | 火山麓地 | レベル6 | レベル6 |
| 安山岩質岩石 | 灰色低地土 | | レベル7 | レベル7 |
| | グライ土 | | レベル8 | レベル8 |
| | 市街地、その他 | | レベル9 | レベル9 |
| | | | レベル10 | レベル10 |
| | | | レベル11 | レベル11 |
| | | | レベル12 | レベル12 |
| DTMから作成 | | | 現存植生図から作成 | |
| 標高 | 斜面方位 | 傾斜区分 | 起伏量 | 谷密度 |
| 以上~未満(m) | 北 | 以上~未満 | 以上~未満(m) | (個) |
| 0~50 | 北北東 | 0~5° | 0~5 | 0 |
| 50~100 | 北東 | 5~10° | 5~10 | 1 |
| 100~150 | 東北東 | 10~15° | 10~15 | 2 |
| 150~200 | 東 | 15~20° | 15~20 | 3 |
| 200~250 | 東南東 | 20~25° | 20~25 | 4 |
| 250~ | 南東 | 25~30° | 25~30 | 5 |
| | 南南東 | 30~35° | 30~35 | |
| | 南 | 35~40° | 35~40 | |
| | 南南西 | | | |
| | 南西 | | | |
| | 西南西 | | | |
| | 西 | | | |
| | 西北西 | | | |
| | 北西 | | | |
| | 北北西 | | | |
| | 平坦 | | | |
| | | | | 現存植生 |
| | | | | スタジアム群落 |
| | | | | ミズハイネクサ群落 |
| | | | | 柿、もみ、杉、雑木林 |
| | | | | モウソウチク林 |
| | | | | 畑地雑草群落 |
| | | | | 水田雑草群落 |
| | | | | 緑の多い住宅 |
| | | | | 常緑果樹園 |



【衛星熱赤外域情報を使用する場合】【衛星熱赤外域情報を使用しない場合】
(ケース1、ケース2) (ケース3)

図-4 検討ケース

量化Ⅲ類を導入している。本研究では、衛星熱赤外域情報の使用の有無による崩壊危険箇所評価への影響について検討する上で、数量化Ⅲ類を通してデータ構造を分析し、衛星熱赤外域情報の有効性を示す。

の崩壊が発生している²⁾。

b) 素因データの準備

本研究で使用した素因データを表-1に示す。土地分類基本調査の成果図面を数値化した土地分類図(表層地質, 土壌, 地形分類, 現存植生)と数値地形モデル(DTM: Digital Terrain Model)からコンピューター処理によって作成される数値地理データ(標高, 斜面方位, 傾斜区分, 起伏量, 谷密度)である。これらは土地に内在する潜在的な素因であり, 崩壊危険箇所の評価を進める上で基本となるものである。

c) 衛星データの選定

本研究では、衛星熱赤外域情報の地上分解能が60mであるLandsat-7/ETM+データを用いた。データの観測時期は2000年2月13日、観測エリアはPATH: 112-RW: 38であり、データの質が良好なものを選定した。この衛星データから「衛星熱赤外域情報」と「植生指標」を作成し、素因として使用した。

(2) STEP2: 数量化Ⅲ類による分析

本研究では、1993年8月の集中豪雨によって崩壊が発生した箇所をトレーニングデータとして設定した。これをSSEモデルでは「現状型トレーニングデータ」と呼ぶ。広域にわたってトレーニングデータを選定することから、斜面崩壊発生前後のステレオ空中写真を立体視し、「崩壊履歴」のある箇所をトレーニング領域として選定した。

図-1で示したSSEモデルでは、あらかじめ設定した素因(表-1)のうち、実際に崩壊危険箇所評価に使用する素因の決定問題と素因データの構造分析に数

(3) STEP3: 崩壊危険箇所評価図の作成

衛星熱赤外域情報の適用性を検討する上で、図-4に示すように衛星熱赤外域情報を「使用する場合(ケース1, ケース2)」と「使用しない場合(ケース3)」といった3つのケースを設定し、検討ケースごとに崩壊危険箇所評価図を作成する。衛星熱赤外域情報の使用の有無が崩壊危険箇所評価図上にどのような違いとなって現れるのかについて検討する。

(4) STEP4: 衛星熱赤外域情報の活用戦略の検討

衛星熱赤外域情報の使用の有無によって現れる崩壊危険箇所評価図の違いを表現した「差画像」を作成し、技術者支援型の表示形態として有用性のあることを示す。さらに、差画像に対する解釈支援情報を作成し、その有用性について検討する。

4. 衛星データから作成される素因データ

(1) 衛星熱赤外域情報

シラス斜面の崩壊要因は様々考えられるが、本研究では、特に地表面温度と崩壊現象との関係に注目し、Landsat-7/ETM+のバンド6データ(地上分解能: 60m/pixel)から衛星熱赤外域情報を作成した。地表面温度を求める際には、通常、衛星データのデジタル値を分光放射輝度に変換し、分光放射輝度から地表面温度を求める。しかし、「地表面温度という物理量」と「崩壊現象」を直接結び付けて解釈することは困難であることは言うまでもない。そこで、本研究では、SSEモデルの中核をなす数量化Ⅱ類に基づく分析を進める上

表一 2 素因間の相関係数

| | 熱赤外 | 起伏量 | 現存植生 | 標高 | 傾斜区分 | 斜面方位 | 植生指標 | 表層地質 | 土壌 | 地形分類 |
|------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 熱赤外 | ○ | | | | | | | | | |
| 起伏量 | ○ | 0.545 | | | | | | | | |
| 現存植生 | ○ | 0.554 | 0.664 | | | | | | | |
| 標高 | ○ | 0.579 | 0.678 | 0.630 | | | | | | |
| 傾斜区分 | × | 0.526 | 0.912 | 0.616 | 0.653 | | | | | |
| 斜面方位 | ○ | 0.501 | 0.267 | 0.285 | 0.195 | 0.294 | | | | |
| 植生指標 | ○ | 0.416 | 0.393 | 0.452 | 0.570 | 0.371 | 0.220 | | | |
| 表層地質 | × | 0.586 | 0.680 | 0.685 | 0.717 | 0.664 | 0.355 | 0.480 | | |
| 土壌 | ○ | 0.559 | 0.611 | 0.073 | 0.590 | 0.583 | 0.290 | 0.390 | 0.653 | |
| 地形分類 | ○ | 0.524 | 0.656 | 0.533 | 0.649 | 0.632 | 0.228 | 0.421 | 0.613 | 0.613 |
| 谷密度 | ○ | 0.552 | 0.208 | 0.109 | 0.165 | 0.222 | 0.088 | 0.113 | 0.101 | 0.126 |

で、衛星データの画像濃度値 (CCT カウント値) の分布をレベルスライスし、温度情報を名義尺度 (無次元化) として扱うこととした。

名義尺度に基づいても十分に傾向分析が可能であることは後述するが、衛星データのこのような取り扱い方は、衛星観測により得られる物理量を積極的に活用し、各種の分析モデルを構築していく上で、エンドユーザ層にとっても朗報になると言える。衛星データの利用普及を図っていく上で見逃されている点として指摘できる。

以上の考え方に基づいてレベルスライス処理した衛星熱赤外画像を写真一 1 に示す。温度が低いレベル 1 から温度が高いレベル 1 2 まで 1 2 段階にレベル分けした。写真一 1 で緑色の箇所が最も温度が低く、赤色に近づくにつれて温度が高い傾向にあることを示している。この衛星熱赤外画像特徴と、従来から素因として使用されている「植生指標」を適用した場合の崩壊危険箇所評価結果を比較・分析する。

(2) 植生指標

衛星データから作成される植生指標には、種々のものが提案されているが、本研究では、植生の活性度を定量的に評価した指標として一般的に広く使用されている正規化植生指標 (NVI: Normalized Vegetation Index) を採用した。

$$NVI = \frac{BAND4 - BAND3}{BAND4 + BAND3} \quad (1)$$

この他にも様々な植生指標が提案されているが、指標としての信頼性の問題も指摘されていることから、崩壊危険箇所評価におけるそれらの植生指標の適用可能性については今後の課題としたい。しかし、この種の基礎研究がさらに進展すれば、本研究のアプローチは、まさに衛星データの利用普及に寄与できるものとなり、個別の研究分野の境界を越えた萌芽的研究として意義あるものになると考えている。

表一 3 検討ケース

| 選定された素因 | | ケース 1 | ケース 2 | ケース 3 |
|---------|-------|-------|-------|-------|
| 地理情報 | 起伏量 | ○ | ○ | ○ |
| | 現存植生 | ○ | ○ | ○ |
| | 標高 | ○ | ○ | ○ |
| | 斜面方位 | ○ | ○ | ○ |
| | 土壌 | ○ | ○ | ○ |
| | 地形分類 | ○ | ○ | ○ |
| | 谷密度 | ○ | ○ | ○ |
| 衛星 | 熱赤外情報 | ○ | ○ | × |
| | 植生指標 | ○ | × | ○ |

5. 数量化Ⅲ類による分析

(1) 素因データの選定

SSE モデルでは、あらかじめ設定した素因間 (表一 1) の相関係数を計算するとともに、互いに相関の高い素因のいずれか一方を除去した上で、崩壊危険箇所評価図を作成する。これは数量化Ⅱ類の信頼性を高める上で重要なプロセスである。ここで、相関の高い素因の組を判断する「いき値」が問題となるが、今までの検討と統計処理上の一般的な判断として、本研究では、0.7 以上のものを削除の対象となる組とした。数量化Ⅲ類によって計算した素因間の相関係数を表一 2 に示す。表中、相関係数が高いものを白抜きにしてある。さらに、これらの組のうち、いずれか一方を除去する際の指標として数量化Ⅱ類の偏相関係数を用いる。表一 2 では、判りやすくするために偏相関係数の高い素因を上から順に記載してあるので、「傾斜区分」と「表層地質」が削除される。

以降の検討では 9 種類の素因を用いて検討を進めるが、ここでの分析の結果から、衛星熱赤外域情報に関して次の知見が得られる。

①表一 2 から衛星データから作成された衛星熱赤外域情報は有用な素因として選定されていることが判る。衛星熱赤外域情報は斜面崩壊危険箇所評価に寄与するものと期待できる。

②偏相関係数の順位で見ると、植生指標は 7 番目に寄与する素因であるのに対し、衛星熱赤外域情報は最も寄与する素因として位置付けることができる。衛星熱赤外域情報はシラス斜面における地表面温度の情報を反映した素因として、崩壊危険箇所評価への適用に期待できる。

(2) 検討ケースの設定

SSE モデルにおける衛星熱赤外域情報の有効性を評価する上で、衛星熱赤外域情報を「使用する場合」と「使用しない場合」の評価精度を検討する。ここで、

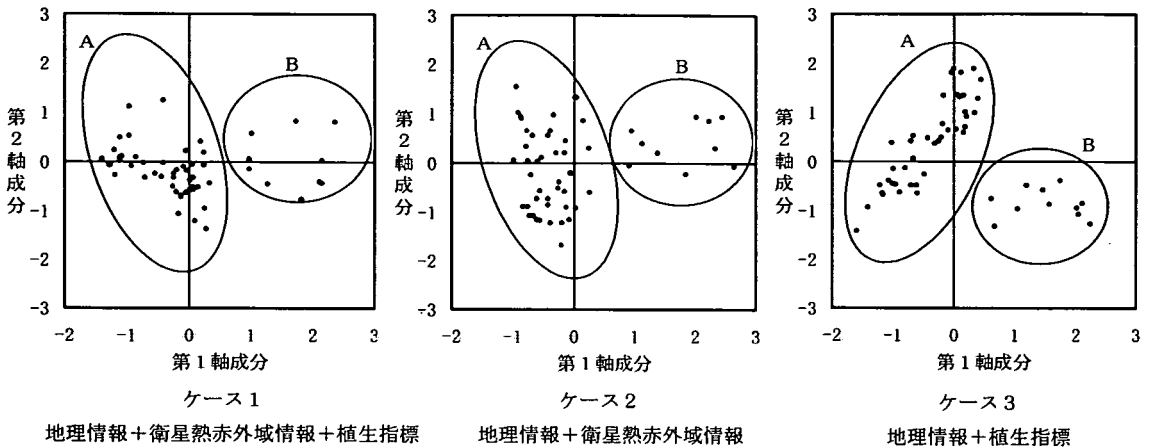


図-5 トレーニングデータの個体数量散布図

注意しなければならない点は、前述の分析において使用するべき素因として残された植生指標の取り扱い方である。

つまり、衛星熱赤外域情報そのものの有効性を立証するためには、衛星データから計算されるもう一つの画像特徴量である植生指標の適用効果との比較が不可欠となることである。この点を考慮して本研究では、表-3に示す3ケースを設定した。各ケースの内容は次のようになる。

ケース1：地理情報+衛星熱赤外域情報+植生指標
(選定された9種類の素因を用いる)

ケース2：地理情報+衛星熱赤外域情報

ケース3：地理情報+植生指標

ケース1とケース2は、植生指標の影響について検証するものであり、ケース3は、衛星熱赤外域情報が植生指標に比べて有効であるか否かを検討するためのケースとなる。

(3) データ構造分析

ケース1~ケース3に対し、数量化Ⅲ類によるデータ構造の分析を行い、衛星熱赤外域情報の使用の有無に伴う影響について分析する。

数量化Ⅲ類は、目的変数を設定せずにスコア値が付与された個体の分布状態からデータ構造の分析を行うものである。SSEモデルにおける数量化Ⅲ類の適用概念は文献7)に詳述してあるのでここでは割愛するが、トレーニングデータと評価対象データに対する個体数量散布図上での分布状態の違いによって、土地の性状の違いの有無を裏付けることができる。

図-5にトレーニングデータのみに着目した個体数量散布図を示す。なお、第1軸から第3軸までの固有値 (λ_n) は、

ケース1： $\lambda_1=0.417, \lambda_2=0.323, \lambda_3=0.208$

ケース2： $\lambda_1=0.417, \lambda_2=0.310, \lambda_3=0.214$

ケース3： $\lambda_1=0.434, \lambda_2=0.333, \lambda_3=0.227$

である。いずれも第3固有値は、第1および第2固有値に比べて小さく、第2固有値までの累積寄与率は70%以上を示した。なお、ここではトレーニングデータに対する個体数量散布図を検討ケースごとに分析することを目的としており、第1軸と第2軸を利用することによって十分に分析できることから、第3軸以下を利用した場合の分析については割愛し、第1軸と第2軸で構成される特性空間内で分析した結果を示すこととする。

図-5を見ると、トレーニングデータが2つのグループに分類されることが判る。既崩壊箇所をトレーニングデータとして設定したが、トレーニングデータの中に2種類の崩壊タイプが存在すると考えられる。

左側のグループを「グループA」とし、右側のグループを「グループB」とする。ケース1とケース2(衛星熱赤外域情報使用)では、グループA、グループBともに同様な空間位置に分布しているが、ケース3(衛星熱赤外域情報未使用)では、まったく異なる空間位置に分布しているのが判る。グループAに着目すると、ケース1、ケース2では第2象限から第3象限にかけて分布しているのに対し、ケース3では、第1象限から第3象限にかけて分布している。また、グループBに関しても、ケース1、ケース2では第1象限と第4象限に分布しているのに対し、ケース3では第4象限だけに分布している。

以上の数量化Ⅲ類の分析結果は以下の2点にまとめられる。

①衛星熱赤外域情報の使用の有無によってデータ構造の違いが見れるが、植生指標の寄与については有意

表-4 (a) 数量化Ⅱ類の結果：ケース1

| 要因データ | 傾度 | 対数 数量 | 偏相関係数 (レンジ) | 要因データ | 傾度 | 対数 数量 | 偏相関係数 (レンジ) | | |
|-----------------|------|----------|------------------|------------------|-----------|----------|------------------|------------------|------------------|
| 衛星熱赤外域情報 | | | | | | | | | |
| レベル1 | 382 | -1.270 | 0.198 (2.877) | レベル1 | 40 | -0.117 | 0.070 (1.452) | | |
| レベル2 | 603 | -1.097 | | レベル2 | 87 | 0.538 | | | |
| レベル3 | 957 | -0.765 | | レベル3 | 216 | 0.014 | | | |
| レベル4 | 1216 | -0.477 | | レベル4 | 378 | 0.463 | | | |
| レベル5 | 950 | -0.190 | | レベル5 | 513 | 0.845 | | | |
| レベル6 | 735 | 0.164 | | レベル6 | 771 | 0.034 | | | |
| レベル7 | 499 | 0.338 | | レベル7 | 962 | 0.189 | | | |
| レベル8 | 370 | 1.034 | | レベル8 | 1230 | -0.076 | | | |
| レベル9 | 403 | 1.429 | | レベル9 | 1309 | -0.175 | | | |
| レベル10 | 355 | 1.400 | | レベル10 | 1068 | -0.291 | | | |
| レベル11 | 337 | 0.853 | | レベル11 | 497 | -0.026 | | | |
| レベル12 | 331 | 0.512 | | レベル12 | 67 | -0.907 | | | |
| 現存植生 | | | | | | | | | |
| スダジイ群落 | 1055 | 0.365 | 0.116 (2.642) | 粗粒風化火山 崩平ク土 | 313 | -0.513 | 0.103 (1.198) | | |
| ミズバネ・イヌフサ群落 | 553 | 1.377 | | 乾性褐色森林土 | 4351 | 0.061 | | | |
| シバ・ヒメノ、イヌフサ群落 | 3546 | -0.116 | | 粗粒灰色低地土 | 84 | 0.435 | | | |
| モウソウチク林 | 42 | -1.265 | | 細粒灰色低地土 | 143 | -0.011 | | | |
| 畑地雑草群落 | 34 | -0.170 | | 灰色低地土 | 1562 | 0.061 | | | |
| 水田雑草群落 | 1439 | -0.383 | | グライ土 | 82 | 0.111 | | | |
| 緑の多い住宅 常緑果樹園 | 459 | -0.282 | | 市街地、その他 | 119 | -0.206 | | | |
| | 10 | 0.429 | | | | | | | |
| (以上～未満：m) | | | | | | | | | |
| 0～5 | 2060 | -0.529 | | 0.096 (1.658) | 中起伏火山地 | 300 | | -0.508 | 0.048 (0.912) |
| 5～10 | 2765 | 0.069 | | | 丘陵地 | 4653 | | 0.112 | |
| 10～15 | 1623 | 0.669 | | | シラス台地 | 14 | | -0.365 | |
| 15～20 | 56 | -0.386 | 谷底平野 | | 2015 | -0.171 | | | |
| 20～25 | 105 | 0.123 | 崖 | | 58 | -0.697 | | | |
| 25～30 | 324 | 1.193 | 火山麓地 | | 98 | 0.215 | | | |
| 30～35 | 145 | 0.631 | | | | | | | |
| 35～40 | 31 | 0.514 | | | | | | | |
| 起伏量 | | | | | | | | | |
| 0～5 | 1266 | -0.463 | 0.086 (1.109) | | 0 (樹) | 5077 | 0.016 | 0.010 (0.544) | |
| 5～10 | 1757 | -0.209 | | | 1 | 684 | -0.047 | | |
| 10～15 | 1755 | -0.110 | | | 2 | 1047 | -0.059 | | |
| 15～20 | 1203 | 0.208 | | 3 | 289 | 0.041 | | | |
| 20～25 | 657 | 0.614 | | 4 | 36 | 0.090 | | | |
| 25～30 | 324 | 1.193 | | 5 | 5 | -0.454 | | | |
| 30～35 | 145 | 0.631 | | | | | | | |
| 35～40 | 31 | 0.514 | | | | | | | |
| 北 | 836 | 0.227 | | 0.093 (1.538) | 谷密度 | | | | 0.020 (0.515) |
| 北北東 | 516 | 0.211 | | | トレーニングデータ | 59 | 3.014 | | |
| 北東 | 559 | -0.220 | | | 外的基準 | 7079 | -0.025 | | |
| 東北東 | 507 | 0.276 | | | | | | | |
| 東 | 524 | 0.085 | | | | | | | |
| 東南東 | 450 | -0.147 | | | | | | | |
| 南東 | 553 | 0.377 | | | | | | | |
| 南南東 | 437 | -0.353 | | | | | | | |
| 南 | 447 | -0.214 | | | | | | | |
| 南南西 | 410 | -0.417 | | | | | | | |
| 南西 | 241 | -0.451 | | | | | | | |
| 西南西 | 240 | -0.104 | | | | | | | |
| 西 | 288 | 0.291 | | | | | | | |
| 西北西 | 396 | 0.187 | | | | | | | |
| 北西 | 408 | 0.232 | | | | | | | |
| 北北西 | 229 | 0.020 | | | | | | | |
| 平坦 | 97 | -0.406 | | | | | | | |

表-4 (b) 数量化Ⅱ類の結果：ケース2

| 要因データ | 傾度 | 対数 数量 | 偏相関係数 (レンジ) | 要因データ | 傾度 | 対数 数量 | 偏相関係数 (レンジ) | | |
|-----------------|------|----------|------------------|------------------|-----------|----------|------------------|------------------|------------------|
| 衛星熱赤外域情報 | | | | | | | | | |
| レベル1 | 382 | -1.270 | 0.209 (3.045) | 北 | 836 | 0.248 | 0.089 (1.117) | | |
| レベル2 | 603 | -1.097 | | 北北東 | 516 | 0.272 | | | |
| レベル3 | 957 | -0.765 | | 北東 | 559 | -0.185 | | | |
| レベル4 | 1216 | -0.477 | | 東北東 | 507 | 0.289 | | | |
| レベル5 | 950 | -0.190 | | 東 | 524 | 0.113 | | | |
| レベル6 | 735 | 0.164 | | 東南東 | 450 | -0.121 | | | |
| レベル7 | 499 | 0.338 | | 南東 | 553 | 0.350 | | | |
| レベル8 | 370 | 1.034 | | 南南東 | 437 | -0.677 | | | |
| レベル9 | 403 | 1.429 | | 南 | 447 | -0.261 | | | |
| レベル10 | 355 | 1.400 | | 南南西 | 410 | -0.488 | | | |
| レベル11 | 337 | 0.853 | | 南西 | 241 | -0.534 | | | |
| レベル12 | 331 | 0.512 | | 西南西 | 240 | -0.182 | | | |
| 現存植生 | | | | | | | | | |
| スダジイ群落 | 1055 | 0.441 | 0.116 (2.642) | 西 | 288 | 0.279 | 0.056 (1.337) | | |
| ミズバネ・イヌフサ群落 | 553 | 1.375 | | 西北西 | 396 | 0.185 | | | |
| シバ・ヒメノ、イヌフサ群落 | 3546 | -0.141 | | 北西 | 408 | 0.284 | | | |
| モウソウチク林 | 42 | -1.190 | | 北北西 | 229 | 0.027 | | | |
| 畑地雑草群落 | 34 | -0.271 | | 平坦 | 97 | -0.414 | | | |
| 水田雑草群落 | 1439 | -0.376 | | 粗粒風化火山 | 313 | -0.518 | | | |
| 緑の多い住宅 常緑果樹園 | 459 | -0.279 | | 崩平ク土 | 251 | -0.086 | | | |
| | 10 | 0.360 | | 乾性褐色森林土 | 233 | -0.875 | | | |
| (以上～未満：m) | | | | | | | | | |
| 0～5 | 2060 | -0.454 | | 0.099 (1.709) | 褐色森林土 | 4351 | | 0.058 | 0.046 (1.001) |
| 5～10 | 1757 | -0.224 | | | 粗粒灰色低地土 | 84 | | 0.642 | |
| 10～15 | 1755 | -0.138 | | | 細粒灰色低地土 | 143 | | -0.037 | |
| 15～20 | 1203 | 0.216 | 灰色低地土 | | 1562 | 0.067 | | | |
| 20～25 | 657 | 0.615 | グライ土 | | 82 | 0.190 | | | |
| 25～30 | 324 | 1.254 | 市街地、その他 | | 119 | -0.527 | | | |
| 30～35 | 145 | 0.702 | | | | | | | |
| 35～40 | 31 | 0.614 | | | | | | | |
| 起伏量 | | | | | | | | | |
| 0～5 | 1266 | -0.487 | 0.099 (1.143) | | 0 (樹) | 5077 | 0.014 | 0.010 (0.657) | |
| 5～10 | 1757 | -0.310 | | | 1 | 684 | -0.051 | | |
| 10～15 | 1755 | -0.228 | | | 2 | 1047 | -0.147 | | |
| 15～20 | 1203 | 0.229 | | 3 | 289 | 0.053 | | | |
| 20～25 | 657 | 0.755 | | 4 | 36 | -0.137 | | | |
| 25～30 | 324 | 1.550 | | 5 | 5 | -0.523 | | | |
| 30～35 | 145 | 1.013 | | | | | | | |
| 35～40 | 31 | 0.932 | | | | | | | |
| 北 | 836 | -0.037 | | 0.093 (1.538) | 谷密度 | | | | 0.020 (0.515) |
| 北北東 | 516 | -0.080 | | | トレーニングデータ | 59 | 2.491 | | |
| 北東 | 559 | -0.401 | | | 外的基準 | 7079 | -0.021 | | |
| 東北東 | 507 | 0.413 | | | | | | | |
| 東 | 524 | 0.357 | | | | | | | |
| 東南東 | 450 | 0.251 | | | | | | | |
| 南東 | 553 | 1.019 | | | | | | | |
| 南南東 | 437 | -0.353 | | | | | | | |
| 南 | 447 | -0.153 | | | | | | | |
| 南南西 | 410 | -0.227 | | | | | | | |
| 南西 | 241 | -0.520 | | | | | | | |
| 西南西 | 240 | -0.443 | | | | | | | |
| 西 | 288 | -0.158 | | | | | | | |
| 西北西 | 396 | -0.294 | | | | | | | |
| 北西 | 408 | -0.230 | | | | | | | |
| 北北西 | 229 | -0.407 | | | | | | | |
| 平坦 | 97 | -0.177 | | | | | | | |

表-4 (c) 数量化Ⅱ類の結果：ケース3

| 要因データ | 傾度 | 対数 数量 | 偏相関係数 (レンジ) | 要因データ | 傾度 | 対数 数量 | 偏相関係数 (レンジ) | | |
|-----------------|------|----------|------------------|------------------|---------|----------|------------------|------------------|------------------|
| 衛星熱赤外域情報 | | | | | | | | | |
| レベル1 | 382 | -1.270 | 0.114 (2.580) | レベル1 | 40 | -0.155 | 0.092 (2.051) | | |
| レベル2 | 603 | -1.097 | | レベル2 | 87 | 0.944 | | | |
| レベル3 | 957 | -0.765 | | レベル3 | 216 | 0.403 | | | |
| レベル4 | 1216 | -0.477 | | レベル4 | 378 | 0.838 | | | |
| レベル5 | 950 | -0.190 | | レベル5 | 513 | 0.840 | | | |
| レベル6 | 735 | 0.164 | | レベル6 | 771 | 0.090 | | | |
| レベル7 | 499 | 0.338 | | レベル7 | 962 | 0.169 | | | |
| レベル8 | 370 | 1.034 | | レベル8 | 1230 | -0.174 | | | |
| レベル9 | 403 | 1.429 | | レベル9 | 1309 | -0.318 | | | |
| レベル10 | 355 | 1.400 | | レベル10 | 1068 | -0.388 | | | |
| レベル11 | 337 | 0.853 | | レベル11 | 497 | -0.051 | | | |
| レベル12 | 331 | 0.512 | | レベル12 | 67 | -1.107 | | | |
| 現存植生 | | | | | | | | | |
| スダジイ群落 | 1055 | 0.204 | 0.104 (1.947) | (以上～未満：m) | | | 0.072 (1.286) | | |
| ミズバネ・イヌフサ群落 | 553 | 1.831 | | 0～5 | 2060 | -0.068 | | | |
| シバ・ヒメノ、イヌフサ群落 | 3546 | -0.176 | | 5～10 | 2765 | -0.033 | | | |
| モウソウチク林 | 42 | -0.749 | | 10～15 | 1623 | 0.434 | | | |
| 畑地雑草群落 | 34 | -0.923 | | 15～20 | 556 | -0.852 | | | |
| 水田雑草群落 | 1439 | -0.366 | | 20～25 | 105 | -0.036 | | | |
| 緑の多い住宅 常緑果樹園 | 459 | -0.157 | | 25～30 | 324 | 1.550 | | | |
| | 10 | -0.193 | | 30～35 | 145 | 1.013 | | | |
| | | | | 35～40 | 31 | 0.932 | | | |
| 起伏量 | | | | | | | | | |
| 0～5 | 1266 | -0.398 | | 0.093 (1.538) | 粗粒風化火山 | 313 | | -0.184 | 0.057 (1.548) |
| 5～10 | 1757 | -0.310 | | | 崩平ク土 | 251 | | -0.241 | |
| 10～15 | 1755 | -0.228 | 乾性褐色森林土 | | 233 | -1.237 | | | |
| 15～20 | 1203 | 0.229 | 褐色森林土 | | 4351 | -0.026 | | | |
| 20～25 | 657 | 0.755 | 粗粒灰色低地土 | | 84 | 0.153 | | | |
| 25～30 | 324 | 1.550 | 細粒灰色低地土 | | 143 | 0.184 | | | |
| 30～35 | 145 | 1.013 | 灰色低地土 | | 1562 | 0.311 | | | |
| 35～40 | 31 | 0.932 | グライ土 | | 82 | 0.039 | | | |
| 北 | 836 | -0.037 | 0.093 (1.538) | | 市街地、その他 | 119 | -0.086 | 0.020 (0.515) | |
| 北北東 | 516 | -0.080 | | | 中起伏火山地 | 300 | -0.654 | | |
| 北東 | 559 | -0.401 | | | 丘陵地 | 4653 | 0.123 | | |
| 東北東 | 507 | 0.413 | | | シラス台地 | 14 | -0.729 | | |
| 東 | 524 | 0.357 | | 谷底平野 | 2015 | -0.167 | | | |
| 東南東 | 450 | 0.251 | | 崖 | 58 | -1.035 | | | |
| 南東 | 553 | 1.019 | | 火山麓地 | 98 | 0.299 | | | |
| 南南東 | 437 | -0.353 | | 0 (樹) | 5077 | 0.052 | | | |
| 南 | 447 | -0.153 | | 1 | 684 | -0.079 | | | |
| 南南西 | 410 | -0.227 | | 2 | 1047 | -0.147 | | | |
| 南西 | 241 | -0.520 | | 3 | 289 | -0.178 | | | |
| 西南西 | 240 | -0.443 | | 4 | 36 | -0.137 | | | |
| 西 | 288 | -0.158 | 5 | 5 | -0.462 | | | | |
| 西北西 | 396 | -0.294 | | | | | | | |
| 北西 | 408 | -0.230 | | | | | | | |
| 北北西 | 229 | -0.407 | | | | | | | |
| 平坦 | 97 | -0.177 | | | | | | | |

性が認められないと言える。

②衛星熱赤外域情報の使用の有無に伴って評価図上に違いが現れることが推察できる。

そこで、次節において数量化Ⅱ類とミニマックス2

群判別を通して作成される崩壊危険箇所評価上に現れる違いを分析することによって、衛星熱赤外域情報の有効性についてさらに検討を進める。

6. 斜面崩壊危険箇所評価図の作成

(1) 数量化Ⅱ類による分析

SSEモデルは実際に斜面崩壊が発生した箇所をトレーニングデータ(外的基準)として設定し、素因との因果関係を分析するために数量化Ⅱ類を適用している。ケース1からケース3について数量化Ⅱ類によって処理した結果をそれぞれ表-4(a)~(c)に示す。表中の素因は偏相関係数の高い方から順に並べてある。

表-4(a)の偏相関係数の値を見ると衛星熱赤外域情報は第1位に位置しており、レンジの値も最も大きいことが判る。衛星熱赤外域情報はトレーニングデータを説明付ける上で他の素因以上に寄与するものと判断できる。さらに、表-4(a)のカテゴリー数量に着目して分析を進める。

外的基準の欄を見ると、トレーニングデータに対して正の値、評価対象データには負の値が付与されており、数量化Ⅱ類では、この符号の違いから「外的基準と各カテゴリーとの関連性」を分析できる。数量化Ⅱ類の結果を判りやすくするためカテゴリー数量をグラフ化したものを図-6に示す。数量化Ⅱ類の処理結果

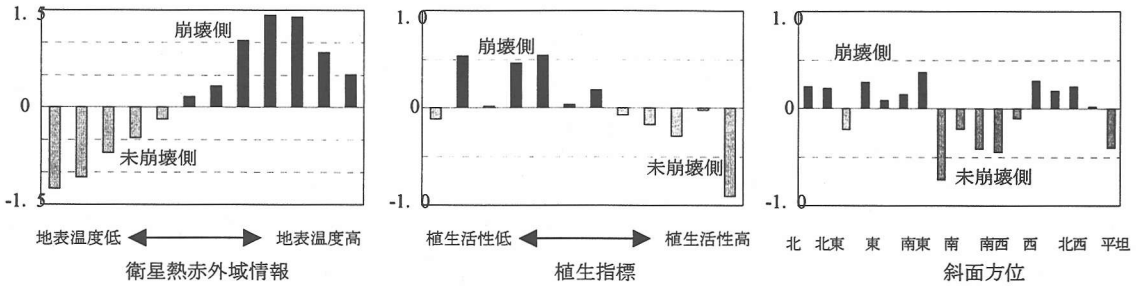


図-6 カテゴリー数量グラフ

は以下の2点にまとめられる。

a) 衛星熱赤外域情報と植生指標の比較

図-6から判るように、温度が高いレベル6からレベル12において「正の値」を示している。また、植生指標においては、植生の活性度が低いレベル2からレベル7でカテゴリー数量が「正の値」を示している。

これらのことは、植生の活性度が低く、日射により温度が上昇しやすい斜面が、トレーニングデータの土地の性状を説明付けるカテゴリーであることを意味している。衛星熱赤外域情報の適用性を裏付ける結果でもある。

b) 衛星熱赤外域情報と斜面方位の比較

衛星熱赤外域情報と関連性が高いと考えられる斜面方位については、「南」から「西」にかけて、カテゴリー数量が「負の値」を示している。すなわち、日当たりが良く、地表面温度が上昇しやすいはずの南向きの斜面で「負の値」を示している。

これは、衛星データの観測時間が10時前後であるため、南向きの斜面に十分日が当たっていないことに起因する。地表面に日が当たってから温度が上昇するまでには、時間的間隔が有ると考えられる。そのため、朝から日が当たっていた「東」や「南東」向きの斜面では、地表面温度が上昇し、カテゴリー数量が「正の値」を示している。

以上までの分析結果を総合すると（第5章の図-5、第6章の表-4と図-6）、衛星熱赤外域情報はトレーニングデータの土地の性状を説明付ける上で寄与する要因であると考えられる。

数量化Ⅱ類は、あくまでも外的基準として設定したトレーニングデータおよび評価対象データの土地の性状と各カテゴリーとの関連性を分析する手段であり、衛星熱赤外域情報のレベル値の大小と「広域にわたる崩壊発出現象のメカニズムそのもの」との因果関係を直接的に説明付けることは困難であることは言うまでもない。本研究では、視点を変えてケース1～ケース3に対する崩壊危険箇所評価図をそれぞれ作成し、評

表-5 ミニマックス2群判別結果

| 検討ケース | | ケース1 | ケース2 | ケース3 | |
|-------|-----------|-------------------|--------------|-----------|-------|
| | | 地理情報+衛星熱赤外情報+植生指標 | 地理情報+衛星熱赤外情報 | 地理情報+植生指標 | |
| 判別前 | トレーニングデータ | 59 | 59 | 59 | |
| | 評価対象データ | 7,079 | 7,079 | 7,079 | |
| 判別後 | トレーニングデータ | 危険性有 | 55 | 55 | 51 |
| | | 危険性無 | 4 | 4 | 8 |
| | 評価対象データ | 危険性有 | 485 | 522 | 1,051 |
| | | 危険性無 | 6,634 | 6,557 | 6,028 |
| | 合計 | 危険性有 | 540 | 577 | 1,102 |
| | | 危険性無 | 6,638 | 6,561 | 6,036 |
| 的中率 | | 93.2% | 93.2% | 86.4% | |

価図上に現れる違いについて分析する。

(2) ミニマックス2群判別

SSEモデルでは、数量化Ⅱ類によってスコア値が付与された個体に対して、トレーニングデータを基準としたミニマックス2群判別手法を通して崩壊危険箇所評価図を作成する。ケース1～ケース3に対するミニマックス2群判別結果を表-5に示した。なお、表中の評価対象データは、対象領域内にあるトレーニングデータ以外のすべての画素である。この表から次の2点を読み取れる。

①衛星熱赤外域情報を使用したケース1およびケース2の的中率は93.2%、衛星熱赤外域情報を使用しないケース3の的中率は86.4%を示し、衛星熱赤外域情報を使用した場合には2群判別精度が向上する。

②表-5の合計欄を見ると、崩壊の危険性が有るものとして判別された画素は、ケース1は540画素、ケース2、ケース3はそれぞれ577画素、1102画素となっており、衛星熱赤外域情報は植生指標に比べて崩壊危険箇所を絞り込む効果が高いと言える。

以上の効果が崩壊危険箇所評価図にどのように現れるのかについてさらに検討を進める。

(3) 崩壊危険箇所評価図の比較

ミニマックス2群判別を通して作成したケース1～

ケース3までの崩壊危険箇所評価図をそれぞれ写真-2(a)~(c)に示す。また、評価図の色の意味は、表-6に示す。

ケース3に比べてケース1とケース2は、明らかに崩壊危険箇所が絞り込まれていることが判る。橙色と青色の丸印で示した2カ所は特に変化が大きいことが判る。一方、ケース1とケース2では評価図上での有意な違いは認められない。これらのことから植生指標に比べて衛星熱赤外域情報は適用効果が高いと言える。

以上のように、衛星熱赤外域情報を適用した場合には、トレーニングデータを基準とした崩壊危険箇所の2群判別精度の向上が顕著であると言える。今までの研究では、得ることはできなかった結果であり、衛星熱赤外域情報は有用性の高い素因として提唱できる。

7. 衛星熱赤外域情報の活用戦略の提案

これまでの衛星熱赤外域情報の使用の有無に伴う崩壊危険箇所の評価結果の違いを利用し、衛星熱赤外域情報の活用戦略を提案する。

崩壊危険箇所評価図は、ミニマックス2群判別を通して4つの情報に区分されていることから、ケース1(写真-2(a))とケース3(写真-2(c))の違いを抽出する場合には、表-7のような組合せ事象となる。

この組合せに従って作成した差画像を写真-3(a)に示す。なお、差画像を作成する際には、ケース1とケース2の組合せ、すなわち植生指標の適用効果を検証するケースも考えられる。この差画像が写真-3(b)となるが、ケース1とケース2の評価結果の違いに有意性は認められない。したがって、衛星熱赤外域情報の活用方法について考える上で、写真-3(a)の差画像を用いて論述を進める。以下、表-7に示したケース名に従って、評価者が実際に下す解釈について考察する。

①ケースa(赤色:50画素):衛星熱赤外域情報の使用の有無にかかわらず「崩壊危険性・有」と判定された画素である。トレーニングデータとして設定した箇所でもあることから、崩壊再発生の可能性のある領域として継続して注意していくことが必要となる。

②ケースb(茶色:5画素):衛星熱赤外域情報を使用したことによって「崩壊危険性・有」と判定された画素である。トレーニングデータとして設定した箇所であり、衛星熱赤外域情報を使用したことによって、本来の危険性のある画素として正しく判別されたことになる。評価者にとっては、危険箇所の見落としがなくなり「安全側」の評価領域となる。

③ケースc(薄青色:1画素):衛星熱赤外域情報を

使用したことによって、「崩壊危険性・無」と判定された画素である。トレーニングデータとして設定した箇所であり、衛星熱赤外域情報を使用したことによって、トレーニング領域でありながら、危険性の無い箇所として誤って判別されたことになる。評価者にとっては「危険側」の評価領域と見なされる。

④ケースd(青色:3画素):衛星熱赤外域情報の使用の有無にかかわらず、「崩壊危険性・無」と判定された画素である。崩壊再発生の可能性の低い箇所として評価できるが、トレーニングデータとして設定した領域でもあることから、現地調査を通して入念な検証が必要となる。

⑤ケースe(緑色:409画素):衛星熱赤外域情報の使用の有無にかかわらず「崩壊危険性・有」と判定された画素である。トレーニングデータに類似する土地の性状となっており、崩壊の危険性が最も高い箇所として評価できる。

⑥ケースf(ピンク色:56画素):衛星熱赤外域情報を使用したことによって「崩壊危険性・有」と判定された画素である。衛星熱赤外域情報の適用効果が反映された箇所であり、評価者にとっては「安全側の評価領域」となる。

⑦ケースg(橙色:642画素):衛星熱赤外域情報を使用したことによって「崩壊危険性・無」と判定された画素である。衛星熱赤外域情報の適用効果が反映された箇所であるが、植生指標を使用した場合には、「崩壊危険性・有」と判定される画素でもある。評価者にとっては「危険側の評価領域」となる。

⑧ケースh(白色:6034画素):衛星熱赤外域情報の使用の有無にかかわらず、「崩壊危険性・無」と判定された画素である。崩壊の可能性の低い箇所として評価できる。

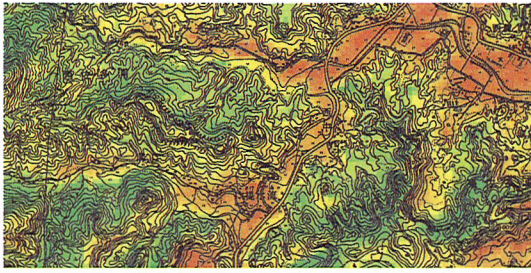
以上の評価は、SSEモデルから得られる評価図を組み合わせることによつてのみ可能であることは言うまでもないが、衛星熱赤外域情報を導入した斜面崩壊危険箇所評価図(差画像)を活用して「崩壊危険側・安全側」といった2つの視点から多角的に評価を展開できる点は、今までにない研究の特色である。

8. まとめ

本研究の内容は、以下の3点にまとめられる。

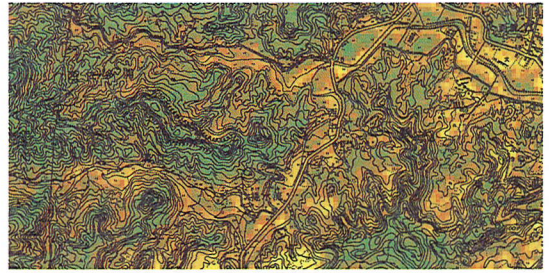
①従来までの植生指標を適用した崩壊危険箇所評価における問題を指摘した上で、シラス自然斜面における衛星熱赤外域情報導入の意義を明示し、適用概念について検討・整理した(図-2)。

②数量化Ⅱ類とⅢ類による素因分析を通して、衛星



低 ← 温度 → 高

(a) 衛星熱赤外域情報



低 ← 植生活性度 → 高

(b) 植生指標 (NVI)

写真-1 衛星データから作成した素因データ



写真-2 (a) ケース1の評価図

(地理情報+衛星熱赤外域情報+植生指標)

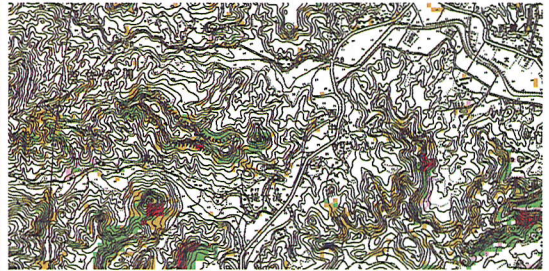


写真-3 (a) ケース1 vs. ケース3の差画像

(衛星熱赤外域情報の有無)



写真-2 (b) ケース2の評価図

(地理情報+衛星熱赤外域情報)

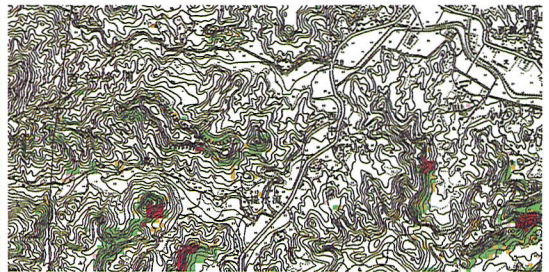


写真-3 (b) ケース1 vs. ケース2の差画像

(植生指標の有無)



写真-2 (c) ケース3の評価図

(地理情報+植生指標)

表-7 差画像一般解釈表

| | 画像の組合せ (危険性の有無) 衛星熱赤外域情報 使用 未使用 | | 差画像の一般解釈 | ケース名 | 差画像上での色づけ |
|-----------|--|---|--|------|-----------|
| | 有 | 無 | | | |
| トレーニングデータ | 有 | 有 | 崩壊「再発生」の可能性の高い領域 | ケースa | 赤 ■ |
| | | 無 | 衛星熱赤外域情報を使用したことによって崩壊危険性・有と判定された領域であり、評価者にとって「安全側評価領域」 | ケースb | 茶 ■ |
| | 無 | 有 | 衛星熱赤外域情報を使用したことによって崩壊危険性・無と判定された領域であり、評価者にとって「危険側評価領域」 | ケースc | 薄青 ■ |
| | | 無 | 崩壊「再発生」の可能性の低い領域 | ケースd | 青 ■ |
| 評価対象データ | 有 | 有 | 崩壊危険性の高い領域 | ケースe | 緑 ■ |
| | | 無 | 衛星熱赤外域情報を使用したことによって崩壊危険性・有と判定された領域であり、評価者にとって「安全側評価領域」 | ケースf | ピンク ■ |
| | 無 | 有 | 衛星熱赤外域情報を使用したことによって崩壊危険性・無と判定された領域であり、評価者にとって「危険側評価領域」 | ケースg | 橙 ■ |
| | | 無 | 崩壊危険性の低い領域 | ケースh | 白 ■ |

表-6 崩壊危険箇所評価図の凡例

| | | |
|---------------------|----|------------------------------|
| トレーニングデータ (既崩壊地) | 赤色 | トレーニングデータのうち、「危険性・有」と判別された箇所 |
| | 青色 | トレーニングデータのうち、「危険性・無」と判別された箇所 |
| 評価対象データ | 緑色 | 評価対象データのうち、「危険性・有」と判別された箇所 |
| | 白色 | 評価対象データのうち、「危険性・無」と判別された箇所 |

熱赤外域情報はトレーニングデータ（既崩壊地）を説明付ける上で有用な素因であることが裏付けられた。

さらに、衛星熱赤外域情報を使用した場合、トレーニングデータを判別基準とした2群判別精度が向上することが判った。この効果は植生指標に比べても高いことが判り、衛星熱赤外域情報の導入意義を示した。

③衛星熱赤外域情報の使用の有無に伴う評価結果の違いを抽出した「差画像」を作成し、「崩壊危険側・安全側」といった評価が展開できることを示すとともに、現地調査時における誘導情報、崩壊防止計画等への支援情報として役立つことを示した。

今後の課題として、第2章でも指摘したとおり観測時期の異なる時系列衛星熱赤外域情報を使用した場合の評価結果への影響について分析する必要がある。シラス地帯の地表面温度差の情報を活用し、崩壊危険箇所の推定精度をさらに向上できる可能性がある。この際にも本研究で提示した一連の評価アルゴリズム（差画像とその解釈）が寄与できる。さらに、本研究の成果を用いて、特定の観測地点の情報（サクシオンと温度情報等⁵⁾）を用いて広域崩壊危険箇所評価へ展開するといった、いわゆる「点」から「面」への予知を実施できるトータルシステムの構築を考えており、本研究のアプローチは発展性のあるものとして期待できる。

崩壊の予知は時間・空間スケール、いずれも満足する必要がある。しかし、このような予知を実現することは困難であることを認識しなければならない。本研究で扱った内容は「崩壊予知」ではなく、「崩壊危険箇所の推定」問題ではあるが、衛星データを媒体として技術者支援情報を提供する施策として活用できるのではないかと考えている。

国土保全と管理の名のもとに、地域防災支援を目的として地理情報と衛星データを統合利用しようとするアプローチは、今後重要な位置を占めるはずである。崩壊危険箇所評価のみならず、この方面の研究アプローチの一つとして本研究の内容が参考になれば幸いである。

謝辞：本研究は、平成12年度科研費・地域連携推進研究（研究代表者：北村良介、課題番号：12792009）のうちの一課題として進められたものである。

持永龍一郎博士には、シラス自然斜面の崩壊現象と要因分析について、また、富田克利博士（鹿児島大学教授・地球環境科学科）には、シラス地帯の物理的・化学的風化問題とともに衛星熱赤外域情報の適用可能性に関して貴重なご意見とご助言を賜りました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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年.
- 2) 1993年鹿児島豪雨災害調査委員会編: 1993年鹿児島豪雨災害一繰り返される災害一, 土質工学会(現:地盤工学会), 全209頁, 1995年3月.
- 3) 大林成行, 小島尚人, 村上達也: 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年6月.
- 4) 大林成行, 小島尚人: 自然シラス斜面の地盤特性を考慮した崩壊危険箇所評価方法の一提案, 土木学会論文集, No.609/VI-41, pp.123-136, 1998年12月.
- 5) 宮本裕二: 熱を考慮した不飽和土の浸透特性に関する基礎的研究, 鹿児島大学博士論文, 全153頁, 2001年3月.
- 6) 北村良介, 川井田実, 阿部廣史, 坂本一義, 寺地卓也: 砂質土地盤でのサクシオンの現地計測システムの開発, 土木学会論文集, No.632/III-51, pp.287-292, 2000年6月.
- 7) 大林成行, 小島尚人, 笠博義: 斜面崩壊予測を対象とした衛星マルチスペクトルデータの実利用化について, 土木学会論文集, No.415/VI-12, pp.71-80, 1990年3月.
- 8) 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年3月.
- 9) 平成6年度神津島地区土地分類細部調査報告書, 神津島村役場, 東京理科大学リモートセンシング研究所, A4版, 全105頁, 1995年3月.
- 10) Kojima, H., Chung, C.F. and van Westin, C.J.: Strategy on the landslide type analysis based on the expert knowledge and the quantitative prediction model, *International Archives of the International Society for Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol.33, Part-B7, pp.701-708, 2000.7.
- 11) 大林成行, 小島尚人, Chung, C.F.: 斜面安定性評価モデルの精度比較とその実用化への提案, 土木学会論文集, No.630/VI-44, pp.77-89, 1999年9月.
- 12) 春山元寿: cとφを考える, シラス, 土と基礎, 23-6, pp.67-74, 1975年.
- 13) 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年.
- 14) 持永龍一郎, 福山俊郎: シラスのり面崩壊に関する要因分析, 土木学会論文報告集, 第197号, pp.101-110, 1972年1月.
- 15) 島 旦: ランドサットデータから想定される地すべり発生地の分布, 第21回地すべり学会研究発表論文集, Vol.21, pp.2-3, 1982年.
- 16) 後藤恵之輔, 古本勝弘: リモートセンシングによる地下水探査法, 土木学会誌, Vol.71, pp.69-75, 1986年.
- 17) 土木学会岩盤力学委員会編: 岩盤斜面の調査と対策, 丸善(株), 全370頁, 1999年10月.
- 18) Kawano, M. and Tomita, K.: Microbial biomineralization in weathered volcanic ash deposit and formation of biogenic minerals by experimental incubation, *American Mineralogist*, Vol.86, pp.400-410, 2001.

(2001. 8. 13 受付)

IMPROVEMENT OF THE ACCURACY FOR IDENTIFYING THE HAZARDOUS-SLOPE COMPOSED OF THE SHIRASU-DEPOSIT APPLYING THE SATELLITE DATA

Hirohito KOJIMA , Ryosuke KITAMURA , Shigeyuki OBAYASHI and Hisashi IYODA

This paper discusses the applicability of satellite infrared (IR) data and normalized vegetation index (NVI) for evaluating the hazardous-slope composed of the shirasu-deposit, based on the SSE model (Slope Stability Evaluation model). In this model the geographical information (GIS) and the satellite data are integrated to produce the slope-stability evaluation map. The following case studies are executed: Case-1) using GIS, IR and NVI; Case-2) using GIS and IR; and Case-3) using GIS and NVI. In the case of using IR data, the high agreement with respect to the training samples of the slope failures are confirmed. As a final product, "Risky-side" and "Safe-side" assessment sub-areas are also delineated on the difference map (termed "DIF-map") of "Case1 vs. Case3" as supporting information for the slope-failure prevention plans.