

# 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

## APPLYING SATELLITE MULTI-SPECTRAL SCANNER DATA FOR LANDSLIDES PREDICTION

大林成行\*・小島尚人\*\*・笠 博義\*\*\*

By Shigeyuki OBAYASHI, Hirohito KOJIMA and Hiroyoshi KASA

A model for landslide prediction is presented using land cover information obtained from a satellite multi-spectral scanner data and geographical information such as the lay of the land, the nature of the soil and so on. This prediction model is based on the analysis of landslide data using Quantification Method Type I, II and III. The method of prediction is as follows: 1) Quantification Method Type I and III are used to analyze the causality between the satellite multi-spectral scanner data and landslide phenomena. 2) Using the result from Quantification Method Type I and III, a prediction map of a landslide area is made by using Quantification Method Type II and a min-max method applied to distinguish broken from unbroken areas. Comparison of the prediction map with on-site inspection of the areas under investigation, gave good agreement on the prospective landslide areas, measures for the prevention of landslides could then be undertaken. This prediction method is not only useful for selecting areas in danger of landslide but also for prevention of landslide disasters such as in areas where mechanized construction on steep slopes are being made.

*Keywords: landslides prediction, remote sensing, disaster prevention, quantification method*

### 1. はじめに

わが国は、島国の特徴として地形起伏に富み、かつ気候は、典型的な温暖性気候を有している。このため、台風、津波、洪水といった災害は後を絶たない。この中でも地形、地質等の地域のもつ素因や、地震、集中豪雨、さらには最近の建設工事の高度化に伴う急傾斜地での近接施工といった誘因によって2次的に発生する斜面災害は、災害対策の中でも最重要項目として位置付けられる。

斜面災害の問題は、一般に「地すべり」と「斜面崩壊」といった定義によって大きく2つに分けて取り扱われている。地すべりは、その規模が数100 m<sup>2</sup>以上におよぶものもあるほど大きく、土塊の移動速度は緩やかで、断続的または継続的である。これに比較して斜面崩壊は、その規模が数10 m<sup>2</sup>~数100 m<sup>2</sup>程度と比較的小さく、突発的かつ局所的に発生する。従来から、斜面崩壊に関する種々の対策が計画され実行に移されているが、

- ① 斜面崩壊箇所の事前予測が困難なこと。
- ② 斜面崩壊の危険性のある箇所が非常に多く、斜面

防護工等の防災工事に要する予算配分が防災効果をあげるうえで、的確かつ効果的に行えないこと。

- ③ 局地的かつ広域的に発生する斜面崩壊に対して、斜面崩壊危険箇所の事前パトロール体制の強化や住民の避難措置等を含む一貫した防災体制を網羅的に整備し、システム化することが困難なこと。
- ④ 過去の斜面崩壊地は、再発の可能性を十分にもった箇所であり、このような崩壊履歴とそれに付随する斜面崩壊にかかわる種々のデータを蓄積し、将来の防災活動に反映するための十分な検討、分析が継続的に行われていないこと。また、そのような体制が敷かれていないこと。

等のために、いまだ斜面崩壊による突発的災害を未然に防止するには至っていない。このような状況の中、さまざまな研究機関で、斜面崩壊を事前に予測し、防災活動に活用しようとする試みがなされている。その一手段として衛星マルチスペクトルデータを利用した斜面崩壊予測に関する研究の成果が期待されている。

衛星マルチスペクトルデータは、広域性、同時性、周期性といった特徴を有し、斜面崩壊箇所の広域かつ面的同時把握の可能性を秘めたデータとして注目されてきた。しかし、多くの研究者が統計的手法、数学的手法<sup>1),2)</sup>、最近ではエキスパートシステムの概念を駆使した非常に

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

\*\* 正会員 東京理科大学助手 理工学部土木工学科 (同上)

\*\*\* 正会員 (株)間組技術研究所研究第4部 (〒338 埼玉県与野市本町西 4-17-23)

興味ある予測手法の提案を試みてはいるものの<sup>3)</sup>、地形、地質、土壌等の要因が斜面崩壊にどのようにかかわってくるのかといった点があまりにも不明確なゆえに、その手法によって得られる結果に対して十分な精度の検証、さらには、提案された手法の一般性にまで言及したものがみられず、それらの手法が説得力のあるものとして、広く実用化されるまでには及んでいないのが現状である。本研究では、突発的、局所的に発生する「斜面崩壊」を対象に、「斜面崩壊予測」といった命題について、いま一度原点に立ち帰り、予測のモデル化の可能性とともに、衛星マルチスペクトルデータを組み込むことができるか否かの検討を多角的な観点から行い、本研究の試行錯誤の過程において得られた結果をもとに、防災上の予測だけでなく、建設工事における斜面崩壊危険地域の事前予測等、建設工事の高度化に対応できる実用化システムへ向けた予測手法の提案を試みるものである。

## 2. 研究の目的

本研究では、以下に示す3つの大きな目的を設定した。

- ① 斜面崩壊による災害や斜面崩壊対策、さらに、斜面崩壊予測手法に至るまで、多角的な観点から問題点を整理し、現時点において考えられる対応策を検討する。
- ② 斜面崩壊にかかわると考えられているさまざまな要因の因果関係を分析し、斜面崩壊予測に衛星マルチスペクトルデータを適用できるか否かの検討を行う。
- ③ ①、②の検討を踏まえて、現時点における衛星マルチスペクトルデータをベースとした斜面崩壊予測手法の概念を構築し、具体的な予測モデルを組み上げる。さらに、予測モデルによって実際に斜面崩壊危険性予測画像を作成し、現地へのフィードバックとともに構築したモデルの妥当性を検証する。

## 3. 研究の構成

本研究は、図-1に示す8つのステップから構成される。

- STEP 1:** 衛星マルチスペクトルデータによる斜面崩壊の予測を対象にした文献、資料等を可能な限り収集し、収集した文献、資料から素因別、誘因別、予測手法別にそれぞれ整理し、斜面崩壊予測のアプローチにおける問題点をとりまとめる。この結果をもとに、斜面崩壊にかかわると考えられている素因、誘因を抽出、整理する。
- STEP 2:** 研究対象地域の選定を行い、現地調査によってその研究対象地域内に存在する斜面崩壊地を選定し、トレーニングデータとする。さらに、斜面崩壊の事前予測という問題を取り扱うことから、使用する衛星マルチスペクトルデータは、崩壊以前のものを選定する。
- STEP 3:** 数量化理論を適用するうえで、必要となるア

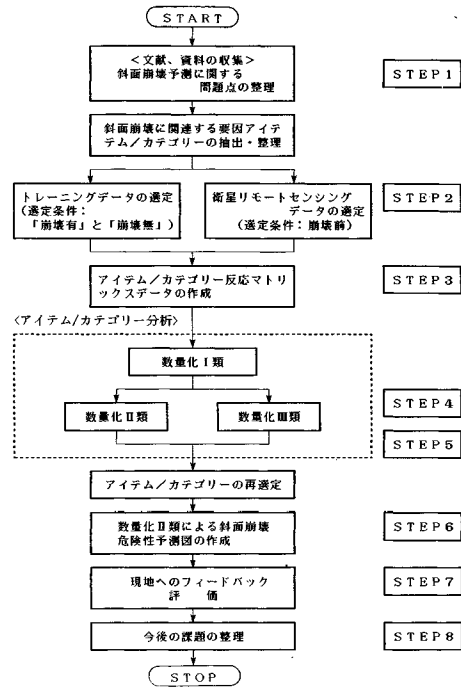


図-1 研究の構成

アイテム/カテゴリの反応マトリックスを作成する。このマトリックスに基づいて、数量化Ⅰ類により衛星マルチスペクトルデータと斜面崩壊現象の因果関係を見出すことができるか否かの検討を行う。

**STEP 4:** 数量化Ⅱ類によるアイテム/カテゴリ分析を行う。外的基準を「崩壊、未崩壊」という質的現象とし、STEP 1で選定した要因アイテムを説明変数として数量化Ⅱ類を適用するとともに、「崩壊、未崩壊」という現象を説明するうえでのアイテム/カテゴリの選定方法について検討する。

**STEP 5:** STEP 1で選定した要因アイテムに対して、「崩壊、未崩壊」という外的基準を設定しない状態、すなわち数量化Ⅲ類を適用し、斜面崩壊にかかわると考えられる要因アイテムのデータ構造を分析し、崩壊グループと未崩壊グループの要因アイテムのデータ構造の違いを見出すことができるか否かの検討を行う。

**STEP 6:** 数量化Ⅱ類によって、最終的な予測情報として崩壊危険可能性「有、無」という2つの現象に判別し、斜面崩壊危険可能性予測画像を作成する。2群判別する際のいき値は、数量化Ⅱ類によって得られるカテゴリースコア値に対してミニマックス解として得られる判別区分点の概念を導入する。

**STEP 7:** 作成した崩壊予測画像をもとに、現地へフィードバックし、本研究で構築した予測手法の妥当性を検証するとともに、衛星マルチスペクトルデータを

ベースとした斜面崩壊予測への適用の可能性を論ずる。  
STEP 8: 本研究の試行検討の結果を整理し、得られた成果や研究の過程で新たに派生した問題点、課題をとりまとめ、今後の研究の資料とする。

#### 4. 衛星マルチスペクトルデータをベースとした斜面崩壊予測の問題点<sup>4)</sup>

斜面崩壊が発生する要因には、地形、地質、植生等、各地域がもつ特有の「素因」と地震や集中豪雨等、斜面崩壊を起こそうとする「誘因」に分けられる。斜面崩壊は素因、誘因が複雑に関係し合っして発生し、現在では、その因果関係を明確にすることは困難な状況にある。これらの素因、誘因の整理結果をもとに、衛星マルチスペクトルデータを適用した斜面崩壊予測手法の適用上の問題点を整理すると以下の4点に集約整理される。

##### (1) 予測情報の提供形態とその精度の問題

斜面崩壊危険度評価を行う場合、「危険度大→中→小」のように数段階に危険度評価した解析画像を最終情報形態として出力することが多い。しかし、斜面崩壊予測と防災という観点から考えると、複雑な要因が絡んで発生する斜面崩壊の事前予測にこのようなランク付けが適当であるのか、さらには、防災指標として画素単位の画像表示が使用に耐え得るのかといった問題が挙げられる。この問題は、医者が健康体の人の病気発生を予知する場合と類似している。現在健康体の人が必要とする情報は、将来、病気に「なるか」「ならないか」といったいずれかの回答であるであろう。将来起こり得る病状の程度（軽症～重症）については、予防という観点に立てばそれほど大きな問題とはならない。同様の考えに基づけば斜面崩壊という「地球の病気」の予測結果としては、崩壊危険性の「有・無」といった2つの予測情報を提供することで十分である。崩壊危険性のランク付けは、「崩壊危険性有」と判定された箇所に対して、個々の現地調査などによってより詳細に検討するといったアプローチが妥当であろう。従来の研究では、崩壊危険度のランク付けを行うがゆえに、不明確な要因をもつ斜面崩壊現象をより複雑化し、研究を展開するうえで大きな支障となっている。本研究では、以上のような考えに基づき、崩壊危険性の「有・無」といった2つの予測情報によって斜面崩壊予測モデルの検討を進めることとした。

##### (2) 斜面崩壊現象と反射分光特性の因果関係の問題

従来の研究では、数量化理論等の多変量解析手法を適用する場合、植生指標、比演算値、反射分光特性の反応パターン等のパラメーターを質的変数とし<sup>1),2)</sup>、衛星マルチスペクトルデータを間接的に導入している。この考え方は、画像濃度値と斜面崩壊現象との因果関係を十分に説明できるものとはいいがたく、衛星マルチスペク

ルデータ適用上の問題点として議論的となっている。したがって、斜面崩壊前の画像濃度値と崩壊現象の因果関係があるのか否かの検討と並行して、画像濃度値をどのように崩壊予測手法に組み込んでいくのかといった問題を念頭に置き、具体的な崩壊予測モデルのアルゴリズムを考えなければならない。

##### (3) トレーニングデータの選定方法とその信頼性の検証方法の問題

斜面崩壊の問題ではなぜその箇所だけが崩壊し、その周辺が崩壊しなかったのかといった現象を、地形、地質、気象等、地域の特性を含めて説明できなければならない。そのため、トレーニングデータの選定方法について適切な考え方を導く必要がある。トレーニングデータの選定に要求される条件は以下のものが考えられる。

- ① 素因、誘因（静的、動的）データについて、地域の特性がトレーニングデータに内包できること。
- ② 崩壊の「有・無」といった2つの現実の事象それぞれについてトレーニングデータが収集できること。

特に②の条件を満たすデータが収集でき、かつそれらのトレーニングデータの信頼性を検証できる考え方を導くことは本研究を展開するうえで必須条件となる。

##### (4) 素因・誘因間のデータ構造分析に関する問題

斜面崩壊予測においては、斜面崩壊に関係する地質や地形、土壌等、質的データが複雑に関係し、かつこれら要因の性質が不明確なゆえに定量的に評価できないといった問題が指摘されている。そのため、質的データを数量的に取り扱う数量化理論等の各種統計手法が適用されている。「崩壊予測」という観点からみれば、崩壊現象を説明するうえで不明確で数多いアイテム/カテゴリーの中から、最適なアイテム/カテゴリーを抽出することが必要となるが、仮になんらかの指標により崩壊予測に有効なアイテム/カテゴリーが抽出できたとしても、それらに対して適切な評価指標がなければ、予測結果の信頼性に問題が生じる。さらに、(3)でも述べたように地域の特性によって素因、誘因項目が異なり、これらを斜面崩壊予測に用いる場合、標準化して設定することが困難である。したがって、地域の特性を考慮した素因、誘因の設定ができるだけでなく、素因・誘因間のデータ構造分析をも行える説得性のある考え方が必要となる。

#### 5. 斜面崩壊予測モデルに適用する要因データの収集

##### (1) 要因アイテム/カテゴリーデータの収集

本研究では、斜面崩壊予測モデルの構築の過程において、斜面崩壊という自然界の不明確な現象を数量化理論



注)解析対象領域 約1.5 km×3.3 km

●印：実際の崩壊地(トレーニングエリア)

図-2 研究対象地域

を適用することによって斜面崩壊にかかわるデータ構造の因果関係分析を行うことを試みる。研究対象地域として、1987年12月17日に発生した千葉県東方沖地震を誘因として斜面崩壊が頻発した地域(図-2)を選定した。斜面崩壊問題を取り扱う場合には、「素因」と「誘因」両面からの研究アプローチが必要であるが、本研究では、衛星マルチスペクトルデータをベースとした斜面崩壊予測の適用可能性といった命題に対する解を得るための第1ステップとして対象地域に内在する「素因」からのアプローチによる研究を展開することとした。

斜面崩壊にかかわる要因アイテム/カテゴリーは、図-1に示したSTEP1で抽出整理したが、そのうち、本研究での試行において最も斜面崩壊に関連が深いと考えられている「素因」として、表-1に示す6種類のアイテムを検証アイテムとして絞りこんだ。ランドサットTMデータの公称地上分解能が1ピクセル30m×30mであることから残り5種類のアイテムにおいてもこの分解能に合わせたメッシュデータを作成した。さらに、作成されたメッシュデータの位置的ずれを補正するために1/10,000地形図を基準座標系として、幾何学的ひずみの補正(アフィン変換による座標変換の後、最近隣内挿)を行い、閉合差0.5ピクセル以内に収める処理を行った。斜面崩壊にかかわる研究に限られるわけではないが、数量化理論を適用する場合に最も問題となる点の1つに、「現象を説明するうえでどのようなアイテムを設定するのか」といったことが挙げられる。本研究では、このような限定的な考え方ではなく、崩壊現象を説明できる可能性のあるアイテムをまずランダムに設定し、その中から崩壊現象をより説明できるアイテムを取捨、選択していくといった消去法的考え方を採用した。このような考え方に基づいて設定した表-1のアイテムに対応するカテゴリー一覧を表-2に示す。表-2で示す土地被覆のカテゴリーが衛星マルチスペクトルデータから得られる分類項目であり、画像濃度値の変動を代表させる特徴抽出結果として位置付けられる。

表-1 設定したアイテム

衛星マルチスペクトルデータ	1987年5月21日ランドサットTMデータ PATH-155, ROW-354乗シーン
現況植生図	1/50,000 1985年
表層地質図	1/50,000 1977年
土壌図	1/50,000 1977年
傾斜	1/10,000地形図から30mメッシュで構築したDTM(Digital Terrain Model)より算出しメッシュ情報化
斜面方位	

表-2 設定したカテゴリー

アイテム	番号	カテゴリー	
植生	1	コナラ群落	
	2	シイ・カツラ群落	
	3	ススキ・アズマネザサ群落	
	4	落葉雑草群落	
	5	マツ雑林(アカマツ、クロマツ雑林)	
	6	スギ、ヒノキ、サウマ雑林	
	7	竹林(ハチク、マダケなど)	
	8	落葉樹林(ナシなど)	
	9	雑草群落	
	10	水田雑草群落	
	11	市街地	
	12	緑の多い住宅地(公園、墓地等含む)	
表層地質	13	1 非固結堆積物 2 泥がれ堆積物 3 砂がれ堆積物 4 砂1(成層基層) 5 砂2(地蔵笠層) 6 砂3(金剛地質) 7 火山性岩石 8 立川・武蔵野ローム層 9 立川・武蔵野・下米古ローム層	
	14	2	
	15	3	
	16	4	
	17	5	
	18	6	
	19	7	
	20	8	
土壌	21	1 黒ボク土壌 2 八衝土壌 3 グライ土壌 4 棕色黒ボク土壌 5 礫砂土壌 6 上砂土壌 7 グライ土壌 8 黒泥土壌 9 未区分地 10 泥炭土壌 11 吉田P土壌	(千葉県土壌誌名)
	22	2	
	23	3	
	24	4	
	25	5	
	26	6	
	27	7	
	28	8	
	29	9	
	30	10	
	31	11	
斜面方位	32	1 北	
	33	2 北北東	
	34	3 北東	
	35	4 東北東	
	36	5 東	
	37	6 東南東	
	38	7 南東	
	39	8 南南東	
	40	9 南	
	41	10 南南西	
	42	11 南西	
	43	12 西南西	
	44	13 西	
	45	14 西北西	
	46	15 北西	
	47	16 北北西	
	48	17 平坦	
傾斜	49	1 0°以上 ~ 5°未満	
	50	2 5° ~ 10°	
	51	3 10° ~ 15°	
	52	4 15° ~ 20°	
	53	5 20° ~ 25°	
	54	6 25° ~ 30°	
	55	7 30°	
土地被覆	56	1 畑	
	57	2 針葉樹市街地	
	58	3 市街地	
	59	4 芝	
	60	5 水田	
	61	6 雑草	
	62	7 裸地	

(2) 斜面崩壊地としてのトレーニングデータの収集  
衛星マルチスペクトルデータを用いた斜面崩壊地の抽出問題については、多くの研究事例があり、抽出した崩壊地のデータをもとにして斜面崩壊予測にまで展開する研究も行われている。しかし、土地被覆状況の変化から斜面崩壊地の抽出を試みるアプローチには、技術的に多くの課題が残されていることは、誰もが認めることである。そこで、本研究では、現地調査によって実際に斜面崩壊が起こった位置と規模を把握し、構築する予測

モデルのトレーニングデータとした。この考え方は、ごく自然なアプローチであり、斜面崩壊が実際に起こったという事象を教師データとして、現在斜面崩壊が起っていない箇所の崩壊危険性を判定する判別分類の概念に帰着される。なお、本研究の現地調査により選定したトレーニングデータは、図-2に示したとおりである。

### 6. 衛星マルチスペクトルデータをベースとした斜面崩壊予測モデルの構築に関する検討

本研究では、斜面崩壊予測モデル構築のための一連の検討過程において、数量化Ⅰ類からⅢ類までを組み込む多角的な考え方を提案する。

#### (1) 数量化Ⅰ類の適用と分析結果

a) 適用概念 衛星マルチスペクトルデータから得られる土地被覆分類図は、画像濃度値の変化をとらえるための特徴抽出データとして位置付けられる。そのデータのもつ情報は、植生、表層地質、土壌等、面的な土地被覆状況の変化に影響を与える情報と密接な関係を持ち、この関係を解明するために個々の分野においてもさまざまな研究が行われている。ここでは、以下のような考えに基づいて数量化Ⅰ類を適用した。

① 植生、表層地質、土壌等のアイテムが衛星マルチスペクトルデータと因果関係があるのか否かを検討し、斜面崩壊現象を説明するための土地被覆分類図を作成する際のバンド選定の指標を得る。

② ①の検討結果をもとに、植生、表層地質、土壌等、斜面崩壊に関係するといわれている地理情報が、数量化理論を適用するうえで、衛星マルチスペクトルデータによって代替可能であるか否かの検討を行う。

具体的には、図-3に示すように目的変量をランドサット TM データ 1~7バンドの画像濃度値に、説明変量を植生図、表層地質図、土壌図からメッシュ化した数値データとし、合計 21 通りの検討ケースを設定し、各バンド帯の画像濃度値が設定したアイテムによってどの程度説明されるのかといった割合を重相関係数を指標として定量評価した。ここで設定した単バンドごとの目的変量以外にもバンド間比演算画像や差画像等も考えられるが、ここでは、あくまでも画像濃度値そのものと崩壊現象の関連性を見出すといった観点からこのような目的変量は設定していない。

b) 数量化Ⅰ類による分析結果 数量化Ⅰ類によって得られたアイテムと各バンド帯のデータとの重相関係数を整理したものを表-3に示す。

① 植生：3つの要因アイテムの中で、各バンドとも最も高い相関係数にあり、相関係数は0.4前後である。バンド別では、可視域のバンド1, 2, 3と熱赤外域のバンド6が0.4以上の値を示しており、逆に近赤外域のバ

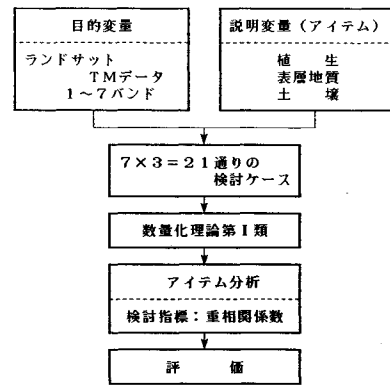


図-3 数量化Ⅰ類による分析方法

表-3 アイテムと各バンドの重相関係数

TM データ	BAND1	BAND2	BAND3	BAND4	BAND5	BAND6	BAND7
植生	0.481	0.426	0.419	0.288	0.344	0.475	0.394
表層地質	0.328	0.210	0.167	0.152	0.025	0.262	0.041
土壌	0.410	0.319	0.305	0.352	0.315	0.481	0.325

ンド4およびバンド5の相関は低い。

② 表層地質：3つのアイテムの中で、各バンドとも最も低い相関係数にある。近赤外域での相関係数はほとんどみられない。

③ 土壌：3つのアイテムの中で各バンドともに相関係数の値の変動は最も小さい。バンド別では、可視域のバンド1と熱赤外域のバンド6の相関が比較的高く0.4以上である。

以上の結果、設定したアイテムと TM データのバンド間において特徴的な関係を見出すことはできなかった。一般に衛星データから土地被覆を分類する場合、発散度等の統計指標を用いて分類項目が最適に分離できるように有効バンドの選定を行う。しかし、本研究で取り扱う土地被覆分類とは、目的別の土地被覆分類を行うことではなく、あくまでも画像濃度値によって斜面崩壊現象を説明できるか否かの関係を導き出すための特徴抽出を行うことである。したがって、表-3の結果からもわかるように設定したアイテムと TM データのバンド間において特徴的な関係を見出せなかったことから、画像濃度値の特徴を集約化して表現するといった意味で、バンド1~バンド7すべてを用いて土地被覆の状態を分類し、斜面崩壊現象を説明できるか否かの検証アイテムの1つとして組み込むこととした。

#### (2) 数量化Ⅱ類の適用と分析結果

a) 適用概念 本研究における数量化Ⅱ類での分析方法を図-4に示す。目的変量として現地調査から得られる崩壊の「有・無」といった2つの質的事象を取り上げ、崩壊「有」のピクセルとみなす領域として図-5に示す3つの検討ケースを設定した。ケースAは、崩壊規

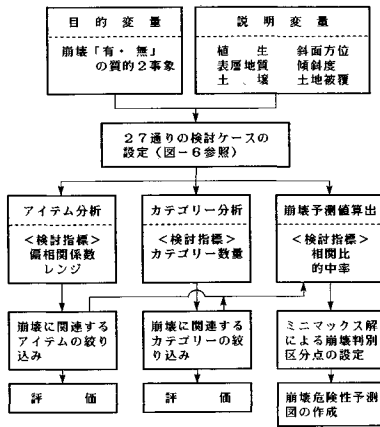


図-4 数量化Ⅱ類による分析方法

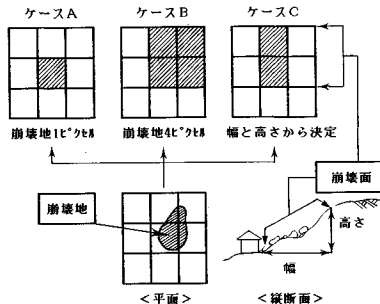


図-5 斜面崩壊ピクセルの設定方法

幅を1メッシュとする一般的な場合、ケースBは、各アイテムのメッシュデータを重ね合わせる際の幾何学的ひずみの補正処理の誤差（位置ずれ）を考慮して、崩壊規模を4メッシュとする場合、ケースCは、崩壊の幅と高さを考慮に入れて崩壊のり面の占有領域を水平面へ投影することによって崩壊規模を画素単位に換算する方法である。衛星マルチスペクトルデータを適用する場合に必ず問題とされる斜面崩壊規模と画素単位の崩壊予測の精度がどのように変動するのかを検証する意味で、これらの検討ケースを設定した。この3つの目的変量の検討ケースそれぞれに対して説明変量として9通りのアイテムの組合せを考え、図-6に示す合計27通りの検討ケースを設定した。分析評価は、以下の3つの観点から行った。

① アイテム分析：アイテムに付与されるスコア値から算出されるレンジ、偏相関係数、相関比といった統計指標から設定したアイテムが斜面崩壊に影響を及ぼすか否かについて検証、分析する。

② カテゴリ分析：各カテゴリに付与されるスコア値から設定したカテゴリが斜面崩壊に影響を及ぼすか否かについて検証、分析する。さらに、分析結果を

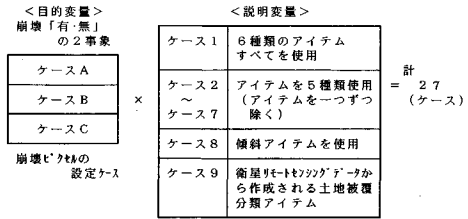


図-6 数量化Ⅱ類による検討ケース

表-4 数量化Ⅱ類によるアイテム分析結果

説明変量の組合せ	目的変量の検討ケース								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
植生	○	○	○	○	○	○	○	○	○
表層地質	○	○	○	○	○	○	○	○	○
土壌	○	○	○	○	○	○	○	○	○
斜面方位	○	○	○	○	○	○	○	○	○
傾斜	○	○	○	○	○	○	○	○	○
土地被覆	○	○	○	○	○	○	○	○	○
相関比	0.040	1.979	0.812	0.806	0.805	0.860	0.851	0.808	0.808
相関比	0.650	0.645	0.478	0.735	0.514	1.417	0.055	0.086	0.055
相関比	0.085	0.077	0.035	0.080	0.089	0.112	0.084	0.084	0.084
相関比	0.045	0.061	0.035	0.044	0.044	0.078	0.043	0.043	0.043
相関比	0.057	0.058	0.061	0.058	0.057	0.055	0.055	0.055	0.055
相関比	0.230	0.235	0.222	0.237	0.228	0.233	0.245	0.245	0.245
相関比	0.039	0.042	0.038	0.036	0.036	0.054	0.054	0.054	0.054
相関比	0.072	0.070	0.066	0.070	0.069	0.029	0.070	0.060	0.060
予測精度: P1 (%)	89.7	89.7	89.7	89.7	89.7	86.2	89.7	93.1	62.1
検出ケースNO.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
植生	○	○	○	○	○	○	○	○	○
表層地質	○	○	○	○	○	○	○	○	○
土壌	○	○	○	○	○	○	○	○	○
斜面方位	○	○	○	○	○	○	○	○	○
傾斜	○	○	○	○	○	○	○	○	○
土地被覆	○	○	○	○	○	○	○	○	○
相関比	1.137	1.935	0.803	0.803	0.803	0.803	0.803	0.803	0.803
相関比	0.880	0.956	0.803	0.834	0.839	0.759	1.000	0.798	0.798
相関比	0.488	10.991	11.156	11.034	10.756	11.034	10.483	13.030	13.030
相関比	0.227	0.151	0.278	0.329	0.231	0.578	0.297	0.578	0.297
相関比	0.086	0.130	0.114	0.118	0.134	0.201	0.132	0.132	0.132
相関比	0.100	0.100	0.134	0.092	0.096	0.150	0.100	0.100	0.100
相関比	0.094	0.095	0.099	0.094	0.095	0.094	0.094	0.094	0.094
相関比	0.295	0.306	0.312	0.315	0.291	0.294	0.360	0.360	0.360
相関比	0.016	0.019	0.036	0.021	0.026	0.032	0.032	0.032	0.032
相関比	0.160	0.185	0.148	0.154	0.153	0.093	0.160	0.129	0.067
予測精度: P1 (%)	87.6	87.6	85.0	86.7	87.6	87.6	87.6	82.3	67.3
検出ケースNO.	19	20	21	22	23	24	25	26	27
植生	○	○	○	○	○	○	○	○	○
表層地質	○	○	○	○	○	○	○	○	○
土壌	○	○	○	○	○	○	○	○	○
斜面方位	○	○	○	○	○	○	○	○	○
傾斜	○	○	○	○	○	○	○	○	○
土地被覆	○	○	○	○	○	○	○	○	○
相関比	0.891	0.959	0.654	0.723	0.723	0.295	0.844	0.844	0.844
相関比	1.633	1.564	1.599	1.605	1.605	2.538	1.613	1.613	1.613
相関比	0.637	0.723	0.597	0.597	0.544	1.688	0.599	0.599	0.599
相関比	0.827	0.808	0.859	0.873	0.873	1.457	0.757	0.757	0.757
相関比	13.195	13.243	13.593	13.424	13.443	13.293	14.261	14.261	14.261
相関比	0.491	0.537	0.378	0.517	0.369	1.198	0.369	0.369	0.369
相関比	0.043	0.033	0.049	0.042	0.042	0.082	0.050	0.050	0.050
相関比	0.077	0.071	0.069	0.080	0.080	0.117	0.072	0.072	0.072
相関比	0.059	0.051	0.048	0.055	0.055	0.093	0.053	0.053	0.053
相関比	0.068	0.068	0.071	0.068	0.064	0.064	0.065	0.065	0.065
相関比	0.286	0.286	0.284	0.283	0.283	0.290	0.298	0.298	0.298
相関比	0.100	0.098	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095
相関比	88.2	88.2	85.3	88.2	88.2	88.2	91.1	91.1	61.8

注) 表中の予測精度P1については、7案(3)で定義。

後述する数量化Ⅲ類によって得られるカテゴリ-数量散布図と比較検討し、斜面崩壊現象に関連すると考えられるカテゴリを絞り込む。

③ 崩壊危険性「有・無」の2群判別：数量化Ⅱ類によって算出される各個体のカテゴリスコア値についてミニマックス解から得られる判別区分点によって崩壊危険性「有・無」の2群判別を行い、斜面崩壊危険性予測図を作成する。

b) 数量化Ⅱ類による分析結果

① アイテム分析：図-6に示した27通りの検討ケースについてレンジ、偏相関係数、相関比を整理したものを表-4に示す。レンジ、偏相関係数、相関比いずれも非常に小さい値を示しており、斜面崩壊現象を数量化して説明する際には、数値の微妙な違いをとらえ、入

念に分析することが必要となる。たとえば、レンジや偏相関係数に着目すると経験的、常識的に斜面崩壊に関連すると考えられる傾斜、表層地質アイテムが他のアイテムと比較して相対的に高い数値を示す傾向が把握できる。また、崩壊ピクセルの設定ケースA~Cに着目するとそれほど大きな差はみられない。このような統計指標による一般的な解釈の結果として斜面崩壊現象と関連性があると考えられるアイテムは、影響度の大きい順に傾斜、表層地質となる。その他のアイテムについては、特に際立った傾向は示していないことから序列化することは難しい。

② カテゴリー分析：アイテム分析と同様に27通りの検討ケースについて、崩壊の「有・無」という2つの質的事象（目的変量）に付与されるカテゴリースコア値を算出した結果を表-5に示す。これによれば、崩壊の「有・無」という2つの質的事象が、スコア値の正、負によって区別できることがわかる。このことから、表-2で示した各カテゴリーに付与されるスコア値の正、負によって崩壊に関連するカテゴリーか否かを判定した。その結果、特に崩壊に関係があると判定されたカテゴリーは、傾斜アイテムの「20°~25°」、「25°~30°」、「30°~」、表層地質アイテムの「火山性岩石（立川ローム層のみ）」となった。なお、検討ケースごとのカテゴリーに付与される数量は、膨大な数にのぼるため、紙面の都合上ここでは掲載しない。

③ 崩壊危険性の「有・無」の2群判別：数量化Ⅱ類

表-5 目的変量に付与されるスコア値

目的変量	崩壊有		崩壊無		崩壊有		崩壊無		崩壊有		崩壊無	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
傾斜ケースNO.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ケースA 崩壊有	-3.876	-3.629	-3.529	-3.644	-3.604	-2.349	-3.644	-3.359	-0.907			
崩壊無	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.012	0.019	0.018	0.024			
傾斜ケースNO.	10	11	12	13	14	15	16	17	18			
ケースB 崩壊有	-2.758	-2.718	-2.657	-2.707	-2.703	-2.101	-2.757	-2.488	-0.598			
崩壊無	0.058	0.057	0.056	0.057	0.057	0.044	0.058	0.052	0.012			
傾斜ケースNO.	19	20	21	22	23	24	25	26	27			
ケースC 崩壊有	-4.001	-3.977	-3.917	-3.965	-3.920	-2.285	-3.978	-3.781	-0.674			
崩壊無	0.025	0.025	0.024	0.025	0.024	0.014	0.025	0.024	0.004			

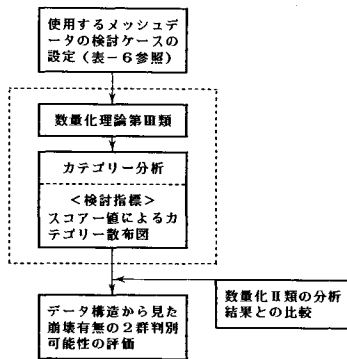


図-7 数量化Ⅲ類による分析方法

による崩壊危険性の2群判別問題については次章で述べる。

(3) 数量化Ⅲ類の適用と分析結果

a) 適用概念 数量化Ⅰ類とⅡ類では、現地調査から得られた崩壊の「有・無」という2つの事象を目的変量としてアイテム、カテゴリーの分析を行った。斜面崩壊は、アイテム、カテゴリーに内在する複雑な因果関係によって発生するといわれており、崩壊発生メカニズムを解明するためには、これらの因果関係を何らかの指標で分析できる考え方が必要となる。そこで、崩壊の「有・無」という目的変量を設定せず、カテゴリーがお互いにどのような関連性をもつのかといったデータ構造の分析に数量化Ⅲ類を適用した。図-7にその分析方法を、また、分析に使用するメッシュデータの検討ケースを表-6に示す。

b) 数量化Ⅲ類による分析結果 表-6で示した7通りの検討ケースのうち、比較のためにケースⅢ-1、ケースⅢ-6、ケースⅢ-7について、スコア値によるカテゴリーの散布状態を図-8に示す。ケースⅢ-1は、解析対象地域内の全メッシュデータに対するカテゴリー散布図であり、ケースⅢ-6は、現地調査で得られた崩壊地のみを対象に図-5で示したケースCの崩壊ピクセルの設定方法に従って作成したメッシュデータに対するカテゴリー散布図である。また、ケースⅢ-7は、ケースⅢ-6で作成した崩壊メッシュデータ以外、すなわち未崩壊地とみなすデータを対象として作成したメッシュデータに対するカテゴリー散布図である。ケースⅢ-1とケースⅢ-7のカテゴリーの散布状態は全く同じ様相を呈しており、一部団子状に固まっている箇所以外には、特に際立った特徴は見出せない。ところが、ケースⅢ-6では、カテゴリーの散布状態はV字形を呈しており、数量化Ⅱ類のカテゴリー分析によって崩壊に関係があると判定された傾斜「25°~30°」、「30°~」、および表層地質「火山性岩石（立川ローム層のみ）」のカテゴリーはV字状分布の頂点付近に集まってきている。ケースⅢ-1、ケースⅢ-7ではこのような傾向はみられず、このことは、数量化によって見出される特性空間内のカテゴリー分布

表-6 数量化Ⅲ類による検討ケース

ケース名	使用するメッシュデータ
Ⅲ-1	対象地域内の全メッシュデータ
Ⅲ-2	ケースA・崩壊地データのみ
Ⅲ-3	ケースA・未崩壊地データのみ
Ⅲ-4	ケースB・崩壊地データのみ
Ⅲ-5	ケースB・未崩壊地データのみ
Ⅲ-6	ケースC・崩壊地データのみ
Ⅲ-7	ケースC・未崩壊地データのみ

注) ケースA~Cは図-5参照

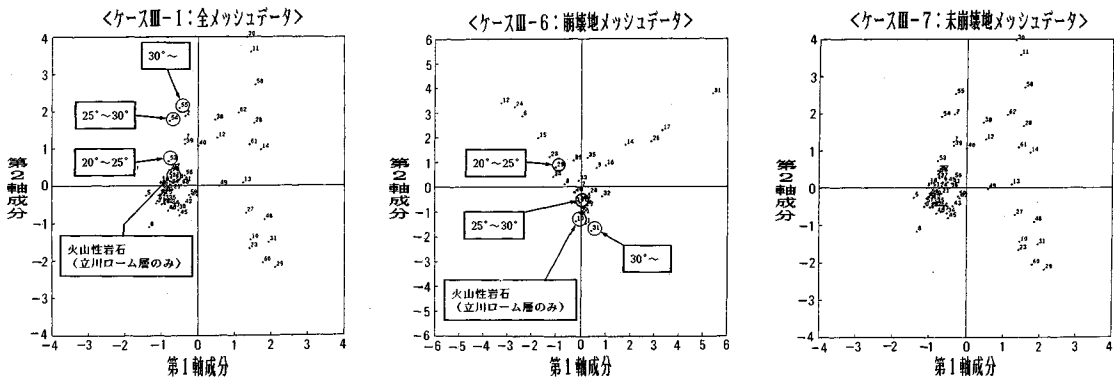


図-8 スコア値によるカテゴリー散佈図

の違いから崩壊の有無が判定できる可能性を示唆しているものといえる。

### 7. 数量化Ⅱ類による斜面崩壊危険性の予測

#### (1) 崩壊・未崩壊グループの分離性の問題

崩壊の有無という2つの目的変数の分離性がどの程度説明されるのかといった統計指標の1つに表-4で示した相関比 (= 外分散 / 全分散) が挙げられる。数量化Ⅱ類の検討結果では、相関比は非常に小さい値を示したが、これは、図-9に示すように崩壊・未崩壊グループが正規分布とならず、全分散が大きくなったためである。このように分析対象データが正規分布に従わない場合には、相関比による評価の信頼性には問題がある。したがって、本研究では崩壊の2群判別問題の評価において相関比は取り上げず、次に述べるミニマックス判別の考え方を適用した。

#### (2) ミニマックス判別の考え方

2群判別問題におけるミニマックス解としての判別区分点、的中率の算出問題について考える。図-10のように累積頻度分布をつくり、

$$\begin{cases} F_A(Y) = 1 - \int_{-\infty}^Y f_A(y) dy, & \left( \int_{-\infty}^{+\infty} f_A(y) dy = 1 \right) \\ F_B(Y) = \int_{-\infty}^Y f_B(y) dy, & \left( \int_{-\infty}^{+\infty} f_B(y) dy = 1 \right) \end{cases} \dots (1)$$

ただし、 $f_i(y)$ :  $i=A, B$  グループのスコア値  $y$  の度数となったとき、2つの累積頻度分布  $F_i(Y)$ ,  $i=A, B$  の交点が求める判別区分点  $\alpha$  となる。すなわち、

$$\begin{cases} A \text{ グループの領域: } Y \leq \alpha \\ B \text{ グループの領域: } Y > \alpha \end{cases}$$

であり、このとき、判別の割合を表わす的中率  $P$  は、

$$P = 1 - F_A(\alpha) \quad (i=A, B) \dots (2)$$

として求められる。この  $\alpha, P$  は一般解 (厳密解) である。ここで分析対象データが正規分布に従うとみなされる場合の判別区分点を  $\alpha'$ 、的中率を  $P'$  とすると、

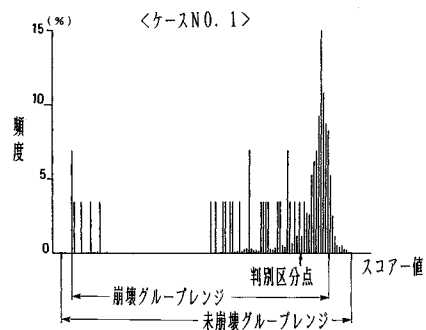


図-9 崩壊・未崩壊グループの分布状態

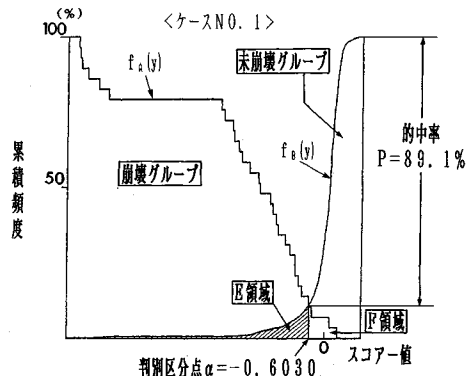


図-10 判別区分点および的中率の算出結果

$$\begin{cases} \alpha' = (\mu_A \sigma_B + \sigma_B \mu_A) / (\sigma_A + \sigma_B) \\ P' = (1/\sqrt{2\pi}) \cdot \int_{\beta}^{+\infty} \exp(-t^2/2) dt \end{cases} \dots (3)$$

ただし、 $\mu_i$ : 平均値,  $\sigma_i$ : 標準偏差, ( $i=A, B$ )

$$\beta = (\mu_A - \sigma_B) / (\sigma_A + \sigma_B)$$

として平均値と標準偏差によって一意的に決定できる。しかし、本研究ではデータが正規分布に従わないことから  $\alpha', P'$  は用いず、式 (1), (2) から得られる一般解としての判別区分点  $\alpha$  と的中率  $P$  を採用し、次に述べ



る予測精度の問題について検討を行う。

(3) 的中率と予測精度について

本研究で取り扱う斜面崩壊予測問題は、たとえば図-10 (検討ケース No.1) に示されるように崩壊データと未崩壊データのラップ部分の問題に帰着される。図-10 で定義される E 領域、F 領域の説明は、図-11 の凡例に示すとおりである。ここで E 領域に入る個体、すなわち「崩壊危険性・有」として判定された個体に対する予測精度は、あくまでも教師データとして設定した実際の崩壊グループとの類似性という観点から間接的、客観的に評価するほかはない。したがって、次式(4)で示すように崩壊グループのデータが判別区分点によって未崩壊グループに誤判別される割合をもって、予測の精度指標  $P_1$  とみなすことができる。

$$P_1 = K(F) / K_a \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $K(F)$  : 図-10 の F 領域に判別される個体数

$K_a$  : 崩壊グループの全個体数

定義のうえで  $P_1$  の値は的中率  $P$  と一致するはずであるが、ピクセル単位の離散的な解  $P_1$  と一般解 (厳密解)  $P$  との誤差は生じる。本研究では、次で述べる予測画像の表示形態も考慮して、予測精度は厳密解  $P$  よりもピクセル単位でとらえられる離散解  $P_1$  で表現することとした。

(4) 斜面崩壊危険性予測図の作成

予測図は設定した検討ケースごとに機械的に作成することができるが、極端な場合、アイテム1つから作成される予測画像は意味あるものではない。本研究の過程では、数量化Ⅱ類、Ⅲ類によるアイテム/カテゴリー分析で特に際だった特徴を示す要因を絞り込むことができなかったことから、すべてのアイテムを使用した場合で最も予測精度  $P_1$  が高かった検討ケース No.1 に対応する



凡 例	
緑 色	現地では未崩壊ピクセルと見なされるもののうち崩壊の危険性があると判別されたピクセル。(図-10のE領域にはいるピクセル)
赤 色	現地調査から得られた実際の崩壊ピクセルのうち構築した予測モデルによって、崩壊の危険性があると判別されたピクセル。
青 色	現地調査から得られた実際の崩壊ピクセルのうち構築した予測モデルによって、崩壊の危険性がないと判別されたピクセル。(図-10のF領域にはいるピクセルで、本来ならば赤色として反応すべきピクセル)

図-11 崩壊危険性予測図 (検討ケース No.1)

予測画像を図-11に示す。予測画像の精度  $P_1$  は、式(4)から  $P_1 = K(F) / K_a = 3 / 29 = 0.103$  で約 10.3% の誤判別率、的中率では  $P = 89.1(\%)$  であった。この値はあくまでも手法の処理性能を数値で示したにすぎず、この値によって予測画像の優劣を絶対評価することは危険である。あくまでも現地との照合によって総合評価することが大切である。なお、予測画像の表示色は図-11に示す意味をもち、背景には地形図をスキャナーで読み取ってデジタル化した画像データを用い、予測画素の位置と等高線や周囲の地形の関連性を判断できるような支援型の情報形態となるよう配慮した。

8. 予測図の現地へのフィードバック

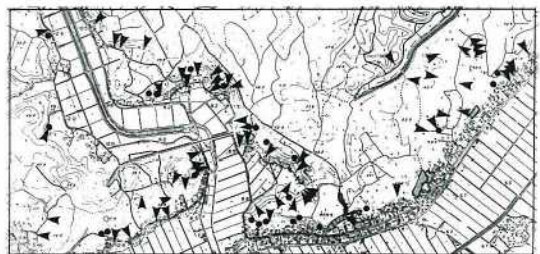
予測図の精度を確認するため、空中写真判読とともに崩壊地データを収集したときと同様、現地調査を行った。

(1) 空中写真判読結果

判読に用いた空中写真は、千葉県東方沖地震発生から10日後に撮影したカラー空中写真で縮尺は約 1/8700 である。写真判読によると幅数 m 程度の小規模な斜面崩壊も十分に判読できることから、この写真から得られる情報は予測図の精度を検証するうえで有効な資料として採用した。写真判読による崩壊地の確認結果を図-12に示す。崩壊地および崩壊跡地は、そのほとんどが沖積低地と下総台地との境界に形成される急傾斜の段丘崖に集中している。この判読結果と図-11に示した予測図を比較すると崩壊危険地域と判断された部分と崩壊地や崩壊跡地、さらに対策済み斜面の位置がよく一致していることが読み取れる。等高線が入り組んでいる予測図内の右上部では、写真判読では崩壊地として読み取れない箇所にもかかわらず、「崩壊危険性有」と判別される箇所もあることから、次に述べる現地調査によって予測図のより詳細な検証を行った。

(2) 現地調査結果

予測画像において危険地と判断されたところは、空中写真判読結果と同様に段丘崖であり、その最も急な部分は、傾斜 70° 以上のほとんど垂直な崖であった。それら



注) ●: 新崩壊地、▼: 崩壊跡地、▨: 対策済み斜面

図-12 崩壊地の写真判読結果

は大規模なものでも幅 30 m、高さ 30 m 程度で、斜面の表層が崩壊したものと考えられる。崩壊箇所の観察から、地質は砂層の上部に関東ロームが堆積しているところが多く、数量化理論から斜面崩壊との関連性があると判断された表層地質との整合性が認められた。また、予測図から危険地と判断された小河川沿いの斜面、および空中写真判読では崩壊地として読み取れなかった予測図右上部の崩壊危険箇所を調査した結果、ごく小規模な崩壊地形が確認されたほか、過去の崩壊現象を物語る根拠がりのある杉の木などもみられ、かなりの精度で崩壊危険地が絞り込めることが確認できた。

## 9. 研究の成果

本研究で得られた成果として以下の 4 点が整理できる。

(1) 本研究で構築したモデルによる予測結果と空中写真判読、現地調査結果の比較によって、本手法の妥当性が確認できた。本研究で取り扱う斜面崩壊の問題は、面的広域予測という観点からみて、現場での斜面安定計算等の局所予測とは性質を異にする。斜面崩壊危険地の絞り込みを行うとともに、斜面防護工事計画、崩壊危険地域指定図の作成といった防災活動のみならず、建設事業等の計画段階における基礎資料を作成する一連の処理アルゴリズムを構築することができた。

(2) 崩壊危険性の予測情報の提供形態として、崩壊危険性の「有・無」といった 2 つの情報、さらに、図 11 に示すように地形図上で視覚に訴えることができる支援的な情報の表示形態を提案し、その有効性を実証することができた。これにより、崩壊危険性をランク付けすることが、現象をより複雑化し、問題解決のプロセスを不明確にしまう点を指摘することができた。

(3) 本研究では、斜面崩壊にかかわると考えられるカテゴリーをまず設定し、その中からより斜面崩壊現象を説明するうえで有効と考えられるカテゴリーを絞り込むといった消去法的分析アプローチを提案した。具体的な手法として数量化Ⅲ類を適用するとともに、分析過程においてその有効性を確認できた。

(4) 崩壊、未崩壊グループのデータが正規性をもたないため、従来から適用されている相関比、的中率といった 2 群判別性の統計指標は、適切でないという結論に至った。つまり、斜面崩壊の問題は図 10 で示した E 領域および F 領域の決定問題のみに帰着される特殊な 2 群判別問題として扱う必要があること、さらに、この判別問題が斜面崩壊現象の複雑な因果関係を定量的に分析評価する上で非常に重要な意味をもち、本予測モデルが人間の判断を介在させつつさまざまな検討を加えられる実用的かつ発展性のあるモデルであることを確認できた。

## 10. 今後の展望

本研究における今後の展望を次の 3 点に整理する。

(1) 最終的に提供される予測画像を二次元表示から三次元表示することによって、地形の変化をも捉えられるような付加価値のある支援的な表示形態を工夫、提供する。現況地形に即した人間の評価、判断が加えられる。

(2) 本研究で構築した予測モデルは、素因側からみた静的な予測モデルとして位置付けることができる。予測図と現地調査結果の比較によって、かなりの精度で崩壊危険地が一致したことを考えると、今後は崩壊危険地をさらに絞り込むといった防災上の観点から、降雨や地震等の誘因データを組み込むことができるようなシミュレーション的概念を導入した予測モデルを検討する。

(3) 防災計画や建設工事等で本モデルを利用する際の適用法（パーソナルコンピュータでのシステム化等）を検討し、その効用と適用限界を明確にする。

## 11. むすび

斜面崩壊の予測問題を取り扱った研究は、枚挙にいとまがない。その中でも宇宙から観測収集される衛星マルチスペクトルデータを用いた斜面崩壊予測へのアプローチは、広域にわたる面的予測といった点で、防災分野のみならず建設分野においても、都市機能のスプロール化に伴って今後ますます必要性を増してくるであろう。本研究で得られた知見が、今後の斜面崩壊問題を取り扱っていくうえで、より新しい技術を融合した新たな展開の一助となれば幸いである。

最後に本研究を進めるにあたって貴重な資料を提供してくださった関係各位に厚くお礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 堺つよし・西川 肇・福山 茂：ランドサット MSS データを用いた山腹崩壊の要因に関する研究，土木学会第 40 回年次学術講演会講演概要集第 4 部門，pp. 217～218，1985. 9.
- 2) 後藤恵之輔・瀬戸島政博・岡崎修平：リモートセンシングによる斜面崩壊発生地点の予測手法，土質工学会論文報告集，Vol. 25，No. 2，pp. 185～194，1985. 6.
- 3) 正村芳久：地すべり・斜面崩壊の危険性判定エキスパートシステムの試作結果，土木学会第 43 回年次学術講演概要集，pp. 436～437，1988. 10.
- 4) 大林成行・小島尚人・笠 博義：衛星リモートセンシングデータを用いた斜面崩壊予知の適用上の問題点，第 16 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，pp. 238～239，1989. 3.
- 5) 丸安隆和・大林成行 監修：衛星リモートセンシングデータの画像処理／解析，pp. 1～674，東京理科大学出版会，1985.

(1989. 8. 1・受付)