

**投稿論文 (和文)**

**PAPERS**

# 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

笠 博義\*・小島尚人\*\*・大林成行\*\*\*・  
黒台昌弘\*

人工衛星マルチスペクトルデータおよび数値地盤情報を、数量化理論とミニマックス判別法を用いて解析することにより斜面崩壊危険箇所を予測するモデルが提案された。本研究ではこのモデルを「斜面崩壊」と「地すべり」の2つのタイプの崩壊現象に適用し、その有効性の検討がなされた。検討結果は次に示す通りである。

①本モデルによって「斜面崩壊」、「地すべり」両タイプの崩壊の予測が可能である。

②数量化理論第Ⅱ類および第Ⅲ類による検討から、「斜面崩壊」と「地すべり」には素因の影響程度に明らかな違いがあることがわかった。

**Keywords** : slope failure prediction, remote sensing, endogenous factors

## 1. はじめに

斜面崩壊の発生位置、時期、規模を的確に予測することは年々繰り返される土砂災害を防止するためにも、建設工事を安全に遂行するためにも重要である。しかし、斜面災害がその場所の持つ地形、地質などの素因と降雨や地震といった誘因とが複雑に関連して発生するため、そのメカニズムの解明が困難であり、事前に危険な斜面を予測・評価することは難しい問題となっている。

一般に斜面崩壊現象は大きく「地すべり：landslide」と「斜面崩壊：slope failure」に分類され<sup>1)</sup>、本研究でもこの分類に従って議論を進めるものとする。このうち「地すべり」の発生時期の予測に関しては、すべり粘土のクリープ特性を検討する方法が提案され、実際の地すべりの発生時刻を正確に予測できた実績がある<sup>2)</sup>。また、対象となる斜面が特定された後に空中写真判読、現地踏査や各種計測によって、地すべりブロックの分割を行うなどして、地すべりの規模に関する予測を行なうことが多い。

一方、規模の比較的小さい「斜面崩壊」の位置に関する予測は、やはり空中写真判読や現地踏査によってなされることが多いが、最近では衛星マルチスペクトルデータを利用した予測方法<sup>3), 4)</sup>が提案され、各方面から注目されている。しかし、「地すべり」および「斜面崩壊」の両タイプの崩壊危険箇所を同一手法で同時に予測することは困難であり、それを試みた研究もほとんど見当たらない。

以上のような背景において、筆者らは衛星マルチスペクトルデータを因子の一つとして組み込んだ斜面崩壊予

測モデルを提案し、実際の斜面崩壊予測に適用してその有効性を検討してきた<sup>5)</sup>。このモデルは、上に述べた斜面崩壊予測の三つの予測事項（位置、時期、規模）のうち斜面崩壊発生の危険性のある位置の予測を目的としたもので、衛星マルチスペクトルデータおよび地形地質等に関係した様々な数値データを統計的に解析し、トレーニングデータをもとに危険箇所を予測するものである。

このモデルに関しては、地震を誘因とした「斜面崩壊」を対象とした研究において、このモデルが有効であり、空中写真判読および現地踏査による調査結果と比較しても予測結果が適合していることが確認された<sup>5), 6)</sup>。

本研究ではこれまでの研究の成果を踏まえて、降雨を誘因とした「斜面崩壊」および「地すべり」を対象としたケースについて新たに検討を行い、斜面の崩壊現象のタイプの違いによる予測結果の違いについて検討を行い、本モデルのトレーニングデータと予測結果の関連性に関する考察を行うものである。さらに、以上のような検討結果をもとに、斜面崩壊予測システムの実用方法に関する提案も行っている。

## 2. 研究の目的

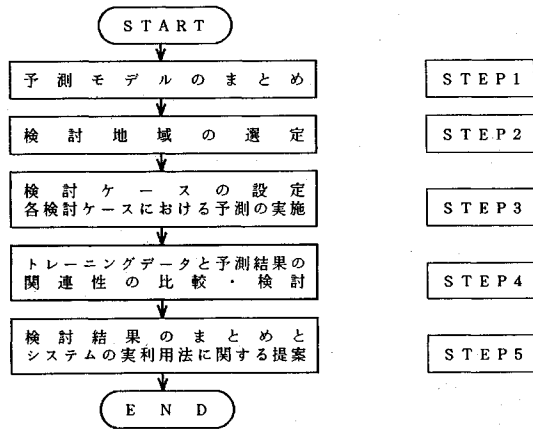
本研究の目的は、これまでに研究開発を行ってきた斜面崩壊予測システムの実用性に関して以下のような検討を加えることである。

- ① 同一地域における崩壊のタイプの違いに着目し、素因データおよびトレーニングデータと予測結果の関連性について検討し、「地すべり」および「斜面崩壊」に対する本モデルの予測適性について評価する。
- ② ①の結果をもとに斜面崩壊予測システムの実利用に際しての素因データおよびトレーニングデータの選定方法に関する検討を行い、現場適用型の斜面災害予測システム構築に関する提案を行う。

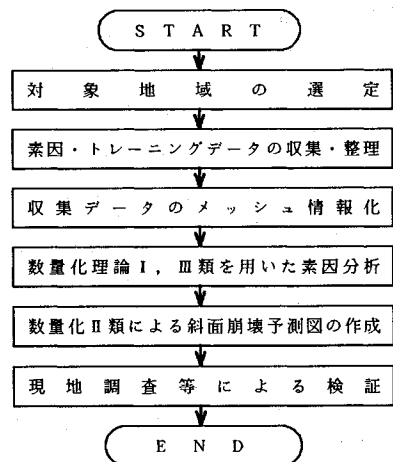
\* 正会員 (株)間組技術研究所研究第四部  
(〒305 茨城県つくば市間組字西向 515-1)

\*\* 正会員 東京理科大学助手 理工学部土木工学科

\*\*\* 正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科



図一 研究の流れ



図二 斜面崩壊予測の流れ

### 3. 研究の構成

本研究は図一に示すように6つのSTEPから構成される。

STEP 1: これまでの研究開発成果をもとに、予測モデルの理論的構成を明示し、本モデルの特徴をまとめる。これは今後の斜面崩壊予測システムの現場適応の際の基本設計資料となる。

STEP 2: 本予測システムの降雨性崩壊に対する有効性を評価するために、適切な検討地域を選定し、必要な素因データを収集整理する。

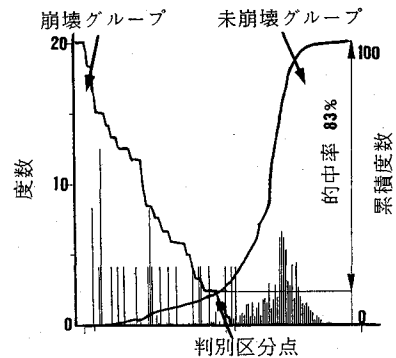
STEP 3: 対象地域における斜面崩壊危険性予測を行う。すなわち、収集データの数値情報化、統計的解析、予測画像の作成、現地調査等による検証の一連の作業を行い、予測結果を整理する。

STEP 4: 対象地域において「地すべり」および「斜面崩壊」の2つの斜面崩壊のタイプに着目し、この崩壊のタイプの相違が予測結果に与える影響を考察し、それぞれのタイプに対する本システムの適用性について評価する。

STEP 5: 以上の過程を経て、本モデルの総合的な検討を加えた結果をもとに、本システムの現場適用に関する提案を行う。すなわち、防災もしくは建設に関わる技術者を支援するためのシステムとして、実利用に際しての素因データやトレーニングデータの選定方法および予測結果の表示方法、または予測データの活用方法等について検討を行い、「斜面崩壊予測システム」の実利用化の方針を明確にする。

### 4. 衛星マルチスペクトルデータを用いた斜面崩壊予測システムの概要

これまで研究を進めてきた斜面崩壊予測モデルは図二に示すような流れで斜面崩壊の予測を行うもので、衛



図三 ミニマックス判別的中率

星マルチスペクトルデータや地形図、地質図などをもとに斜面崩壊の素因について統計的手法を用いて分析を行い、予測図を作成するものである。

このモデルの特徴は通常行われている斜面崩壊危険度のランク付けを行うことなしに、崩壊危険性の有無のみを判別することにある。従来の危険度の判定には予測に用いたアイテムやカテゴリーに重み付けを人為的に行うなど、研究者の経験や主観に大きく左右されるなどの問題が指摘されている<sup>9)7)</sup>。

これに対して、本予測モデルは数量化理論第Ⅱ類によって、対象域内の各ピクセルに対するスコア値を計算した後、ミニマックス判別によって判別区分点を設定し、崩壊側か未崩壊側かのどちらに属するかを判別するものである(図三)。ここで、予測精度の評価指標として、図中に示した的中率という指標を用いている。

このように客観的な評価手法を用いると同時に、本システムでは専門家の経験や直感といった有効ではあるが、極めて定量表現が困難な要素についてはトレーニングデータに反映することを可能としている。

すなわち、地すべりや斜面崩壊の危険地域は単純に傾

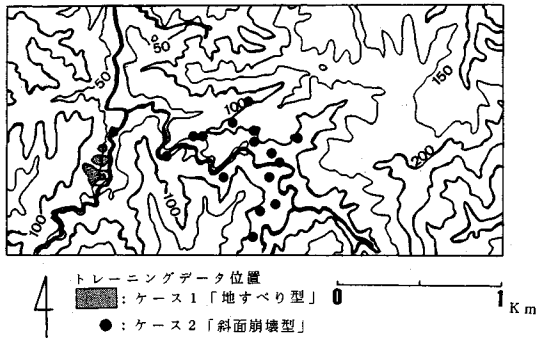


図-4 検討対象地域

表-1 斜面崩壊予測に用いた素因情報

収集した素因データ	素因
ランドサットTM	1988年3月4日 反射特性
地形図	1/10000 傾斜, 方位
表層地質図	1/50000 表層地質
土壌図	1/50000 土壌
植生図	1/50000 植生

斜角度, 地質等の個々の要因からは予測が困難であり, 専門家はこれらの要因に加えて, 周辺部を含めた等高線のパターンなどを総合的に判断して危険地域を抽出している。トレーニングデータはこうした総合的な解釈を単純化した形で表すものであり, 併せて「地すべり」, 「斜面崩壊」の現象的な相違を考慮した予測も容易に行うことができる。

このようなことから, 本予測モデルでは崩壊パターンの異なる複数の検討ケースを設定することによって, ある地域の斜面崩壊予測を多角的に行うことができる。

### 5. 検討地域の選定

本研究にて検討対象とする地域は, 1989年7月31日~8月1日にかけての集中豪雨によって「地すべり」および多数の「斜面崩壊」が発生した千葉県内の1.5×3 kmの範囲の地域(図-4)である。この地域は房総半島中部の丘陵地帯であり, 対象地域内にも複数の明瞭な地すべり地形が存在し, 本研究にて対象としている豪雨時に活動した場所もこれらの地すべり地の一部である。また, 地すべり以外にも小規模な斜面崩壊が多数発生している。

斜面崩壊の素因はこれまでの研究結果をもとに表-1に示した6項目を選定し, アイテム・カテゴリは表-2に示したように6アイテム50カテゴリとした。

### 6. トレーニングデータと予測結果との関係

本地域では「斜面崩壊」と「地すべり」が同時に発生

表-2 設定したアイテム・カテゴリ

アイテム	番号	カテゴリ名
斜面傾斜	1	0° 以上 ~ 5° 未満
	2	5° ~ 10°
	3	10° ~ 15°
	4	15° ~ 20°
	5	20° ~ 25°
	6	25° ~ 30°
	7	30° ~ 35°
	8	35° ~ 40°
	9	40° ~ 45°
	10	45° ~
斜面方位	11	北 東
	12	北 東
	13	北 東
	14	北 東
	15	東 東
	16	南 東
	17	南 東
	18	南 東
	19	南 西
	20	南 西
	21	南 西
	22	西 西
	23	西 西
	24	北 西
25	北 西	
26	北 西	
27	北 西	
表層地質	28	泥岩 3 稲子沢泥岩層
	29	泥岩 6 千畑れき岩層
	30	れきが 堆積物
	31	泥岩 1 天津泥岩層
	32	泥岩 1 天津泥岩層
	32	泥岩 1 天津泥岩層
土 壤	33	褐色森林土壌
	34	グライ土壌
	35	乾性褐色森林土壌
植 生	36	水田
	37	スギ・ヒノキ・(サワラ) 植林
	38	常緑樹園(ビワ・ナツミカン)
	39	市街地
	40	緑の多い住宅地
	41	細地雑草群落
	42	竹林
43	コナラ群落	
地表面 反射特性 (代表土被覆)	44	畑地
	45	針葉樹
	46	広葉樹
	47	市街地(コンクリート)
	48	芝地
	49	裸地、荒地
	50	水田

しており, このようにタイプの異なる崩壊が混在する場所での崩壊予測では, トレーニングデータの選定方法が予測結果に影響を与えるものと思われる。以下, 上記の問題に関して表-3に示した3ケースを設定した。数量化Ⅱ類による処理結果を表-4に示す。なお, ここで用いているトレーニングデータは1989年8月の災害発生後直ちに実施された調査結果をもとに選定している。また, 図-4に示したように, 選定したトレーニングデータは「地すべり型」で24ピクセル, 「斜面崩壊型」で22ピクセルである。

#### (1) アイテム分析結果

a) ケース-1: レンジ, 偏相関係数ともに斜面方位の値が他に比較してかなり大きくなっている。このことはトレーニングデータ自体の方位が東を中心とした, かなり偏った値を有していたことによる結果と考えられる。これは, 今回の対象地域における「地すべり」地がほとんど東向き斜面であることから, むしろ地域の特性を反映したものであると考えられる。斜面の方位以外で

表-3 トレーニングデータの検討ケース

ケース	トレーニングデータ
1	地すべり型
2	斜面崩壊型
3	地すべり型+斜面崩壊型

表-5 カテゴリー分析結果

	ケース-1	ケース-2	ケース-3
崩壊有	-2.797	-1.875	-1.715
崩壊無	0.013	0.008	0.016

表-4 アイテム分析の結果

検討ケース			ケース-1	ケース-2	ケース-3
レ ン ジ アイ テム	傾 方 表 土 植 反 射 特 性	斜 位 地 質	1.313	5.417	3.406
		層 地 質	3.497	2.595	2.741
		境 地 質	0.647	0.901	0.644
		性 境 地 質	0.675	1.058	1.127
偏 相 関 係 数 アイ テム	傾 方 表 土 植 反 射 特 性	斜 位 地 質	0.035	0.067	0.047
		層 地 質	0.165	0.076	0.112
		境 地 質	0.038	0.025	0.034
		性 境 地 質	0.037	0.046	0.059
相 関 比		植 性	0.040	0.019	0.028
		反 射 特 性	0.066	0.042	0.066
		相 関 比	0.038	0.016	0.016
		相 関 比	0.038	0.016	0.016
ス コ ア	崩 壊 域	最 大 値	-0.797	0.041	0.505
		最 小 値	-4.252	-4.547	-3.862
		平 均 値	-2.797	-1.875	-1.716
		標 準 偏 差	1.125	1.255	1.251
コ ア	未 崩 壊 域	最 大 値	2.277	2.651	2.604
		最 小 値	-4.491	-6.498	-4.084
		平 均 値	0.013	0.008	0.016
		標 準 偏 差	0.980	0.991	0.983
観 測 値	崩 壊 個 数	24	22	46	
	未 崩 壊 個 数	4976	4978	4954	
予 測 値	崩 壊 個 数	589	1038	1286	
	未 崩 壊 個 数	4411	3962	3714	
判 別 区 分 点			-1.017	-0.608	-0.427
予 測 値 → 観 測 値	崩 壊 → 崩 壊	22	18	34	
	崩 壊 → 未 崩 壊	567	1020	1252	
	未 崩 壊 → 崩 壊	2	4	12	
	未 崩 壊 → 未 崩 壊	4409	3958	3702	
的 中 率			0.882	0.788	0.739

面方位、反射特性が大きな値を示している。このことは、ケース-2で対象としている「斜面崩壊型」が一般に、傾斜の急な斜面では、地質や方位によらず発生することも関連しているものと考えられる。

偏相関係数はいずれも、0.01以下であり、相関比の低さと合せて、ケース-1の場合と同様な理由が考えられる。崩壊域のスコア値はほとんどが負の領域であるが、最大値は正の値となっている。的中率はケース-1より10%程低い78%である。

c) ケース-3：ケース-3はレンジ、偏相関係数ともにケース-1と2の中間的な値を示している。レンジでは傾斜、方位、植性の順で斜面崩壊に関係が深いと考えられ、他の2ケースに比較して土壌のレンジが大きいたことが特徴である。相関比はケース-2とほぼ同じであるが、スコア値はケース-1と2の中間的な値を示す。

的中率は74%と、3つのケースの中で最も低く、性質の異なる2種類のトレーニングデータを1つのものとして用いた検討による影響であると考えられる。

d) アイテム分析のまとめ：アイテム分析において、各ケースともに言えることは、レンジから斜面の傾斜と方位が崩壊に関する割合がかなり高く、しかも、ケース-1の「地すべり型」では斜面方位が、ケース-2の「斜面崩壊型」では傾斜が最も大きな値を示していることが確認された。このことは、両崩壊のタイプの違いを示しているように考えられるが、カテゴリー分析を通じてより詳細に検討する必要がある。

この2つに次いで大きなレンジの値を示すのが、反射特性及び植性である。表層地質のレンジは予想以上に小さいが、地質に対しては本研究の対象地域の大半が同一の表層地質（泥岩）からなることの影響が大きいものと考えられる。

(2) 数値化Ⅱ類によるカテゴリー分析

これまでの研究<sup>5)</sup>から、数値化Ⅱ類によって求められたカテゴリー数量のうち崩壊に関係するカテゴリーは負の値を示し、その絶対値に比例して寄与する割合が大きくなることが確認されている。

本研究における数値化Ⅱ類分析による、崩壊「有・無」という2つの目的変量に付与されるカテゴリー数量は、表-5に示したように、やはり崩壊グループで各ケースとも負の値を示している。以上のことを背景において次のようにケース毎のカテゴリー分析を行った。

a) ケース-1：このケースにおいて最も特徴的な

は、植性、斜面傾斜、反射特性がレンジにおいて比較的大きな値を示している。

相関比は0.038ときわめて小さい値であるが、これはこれまでの研究においても同様な結果が得られており、データ自身が正規分布をしていないことによるものであると考えられる。

スコア値に関しても、これまでの研究<sup>5)</sup>と同様に崩壊域はすべて負の値となっている。また、的中率は88%とかなり高い値となった。

b) ケース-2：レンジでは斜面の傾斜が他のアイテムのおよそ2倍以上の大きな値となっている。次いで斜

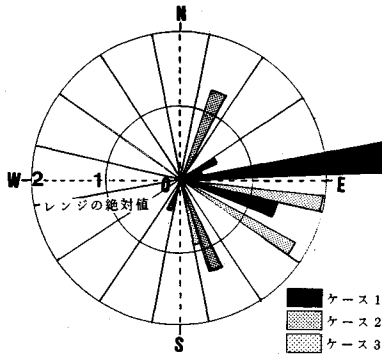


図-5 崩壊危険斜面の方位特性

は、斜面の方位のカテゴリーである。図-5に示したように方位のカテゴリーにおいて負の値となっているものは東、東南東、南東の3個だけであり、極端な集中状況を示している。これはアイテム分析でも述べたが、トレーニングデータの影響を強く反映したものであると考えられる。

斜面傾斜(図-6)では負のカテゴリーは10°~15°、15°~20°および30°~35°であり、絶対値から最も崩壊に関係が深いのは傾斜10°~20°の緩斜面であると分析される。これは通常の「地すべり」が傾斜20°未満の斜面で多発することとよく一致している。

その他のカテゴリーでは、絶対値の大きい順に、地表面反射特性の広葉樹タイプ、土壌のうちグライ土壌、植性の竹林、地表面反射特性の水田タイプ、植性のコナラ群落、泥岩1が負の値をとり、崩壊に関係していると判断される。

これらのことを総合して検討すると、ケース-1では東向きの傾斜20°以下の緩斜面で崩壊が発生する傾向が強く、地表面は広葉樹や水田等が示す反射特性となっている。これは現地調査結果による地すべり地の現状ともよく適合した結果である。

b) ケース-2: ケース-2では図-6より崩壊の発生する傾斜が20°~25°および35°~45°の斜面に集中していることが表から読み取れる。これはケース-1と同様に通常の「斜面崩壊」が20°以上の急斜面で発生することとよく一致する。一方、斜面の方位は比較的広範囲に負のカテゴリーが存在するが、それでも北北東から南南西の東半分には分布している(図-5)。

その他のカテゴリーでは、地表面反射特性の裸地・荒地タイプが比較的高い値を示し、ケース-1では正の値だった植性の水田雑草群落、スギ、ヒノキ、(サワラ)群落、泥がち堆積物が新たに負の値となっている。このことは、「地すべり」と異なり「斜面崩壊」は規模が小さく、様々な地表面の状況で発生することを示唆しているものと考えられる。また、裸地、荒地のカテゴリーの

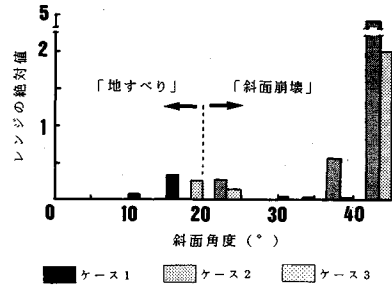


図-6 崩壊危険斜面の傾斜特性

値が大ききことは、これまでにすでに崩壊を起こした場所に対応している可能性もある。

c) ケース-3: このケースは、アイテム分析と同様にケース-2とケース-3の中間的な位置付になるものと考えられる。斜面の傾斜はおよそ15°~45°の範囲に負の値となっており、40°~45°の範囲と20°~30°の範囲にピークが分かれている(図-6)。また、斜面の方位は北北東から南南東に負の記号が見られ(図-5)、やはり前述の2ケースの中間的な性格を示している。その他のカテゴリーでもこの傾向は同様である。

d) 数量化Ⅱ類によるカテゴリー分析のまとめ: 数量化Ⅱ類によるカテゴリー分析の結果、ケース-1とケース-2の違いが定量的に評価された。特に斜面の方位と傾斜に関しては、それぞれ図-5、図-6に示すように明瞭な違いが現れている。同時に両者のデータを統合して新たに解析したケース-3では両者の中間的な性格が顕著に示された。

また、表層地質では泥岩1が、土壌ではグライ土壌が各ケース共通の負の値を持つカテゴリーである。表層地質については先にも述べた通り、対象地域内の大半が泥岩層であり、トレーニングデータもすべてこの地質の部分で選定されたためであると考えられる。また、土壌は水田に発達するグライ土壌が3ケースに共通するカテゴリーであるが、これは現地調査の結果、対象地域のかなりの崩壊が水田と隣接した斜面にて発生していることが影響しているものと推測される。

植性においては竹林がすべてのケースにおいて崩壊と関係があると判定されたが、植性図における竹林のカテゴリーは、わずか8ピクセルであることから、解析結果の取扱いには注意を要する。しかし、一般にも竹類と斜面崩壊の関係が密接であることは経験的に知られており、事実、現地調査においても崩壊地周辺に竹や笹類が見られるケースが非常に多いことが確認されている。

地表面反射特性については広葉樹はすべてのケースにおいて崩壊に関係があるカテゴリーであると分析され、裸地・荒地、水田が検討ケースによって反応している。このことは、地すべり地は山間部において比較的平坦な

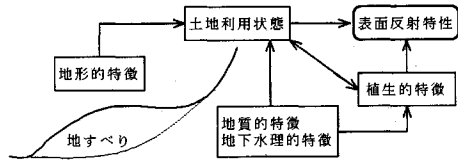


図-7 地すべりと反射特性の関連性

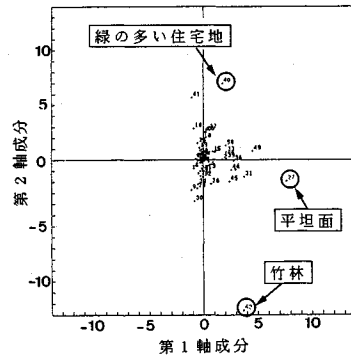


図-9 カテゴリー散布図 (未崩壊地)

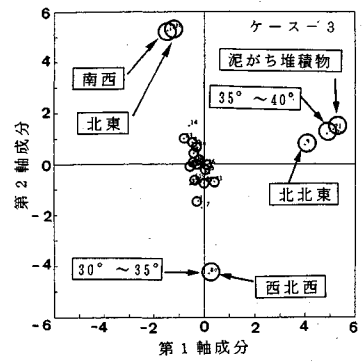
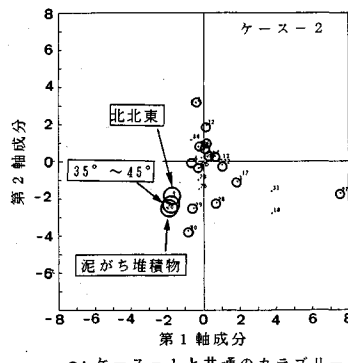
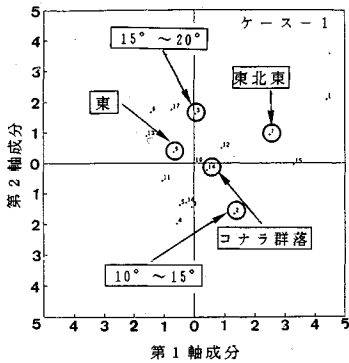


図-8 カテゴリー数量散布図 (崩壊域)

地形を呈するため、古くから耕作地として利用されており、その地域に特有な土地利用状態を表わすことが多いことに関連しているものと考えられる。つまり、この土地利用状態が地表面の反射特性に反映することによって、今回のような「地すべり」予測に衛星マルチスペクトルデータが大きく寄与するものと分析されたと考えられる。図-7に反射特性と地すべりとの関連性を模式的に示した。

### (3) 数量化Ⅲ類によるカテゴリー分析

斜面崩壊はアイテム・カテゴリーが密接に影響しあって発生するものと考えられるが、ここでさらに注意しなければならないことは、カテゴリー間の関係も崩壊現象に関係があると考えられることである。このカテゴリー間の分析を行うために本研究では数量化Ⅲ類を用いた。各ケースの崩壊データに対するカテゴリー数量散布図を図-8に示した。なお、未崩壊データはいずれのケースにおいても同様な結果となったため代表的なものとして図-9にケース-3について示した。

a) 未崩壊グループ：散布図の構造は、原点付近を頂点とした第一象限に開いたV字形を示している。この中で、特徴的なのは崩壊との関連性が強いカテゴリーNo.42の竹林が第2軸成分においてきわめて大きな負

の値をとることである。また、崩壊との関連性が小さいと推定されるカテゴリーであるNo.27(平坦面)やNo.40(緑の多い平坦面)がV字の頂点に位置している。

b) ケース-1：特に明瞭な特徴は見出せず、各カテゴリーは原点周辺に散在している。数量化Ⅱ類にて、特に崩壊との関連性があると考えられたカテゴリーのうち、竹林以外のものは全て含まれているが、この分布状態にも特徴は見られないが、詳しくカテゴリーの分布状況を検討してみると、崩壊と深い関連があると推定された傾斜10°~20°、方位東北東、東、コナラ群落などはすべて、原点周辺に集中している。

c) ケース-2：全体的にみて逆向きのV字形の構造を示している。ケース-1と比較して崩壊に関連のあるカテゴリーの数も約2倍弱に増加している。数量化Ⅱ類にて崩壊との関連が大きいとされたカテゴリーはケース-1と同様に、竹林を除く全てがこの中に含まれているが、その分布は、やはり逆V字形をしており、一部への集中は見られない。ケース-2において崩壊と関連が深いと考えられた傾斜35°~45°、方位北北東、泥がち堆積物などは原点から離れた位置に分布している。また、ケース-1に共通しているカテゴリーはほぼ原点付近に分布している。

d) ケースー3: カテゴリー数量の散布状態は、どちらかという崩壊なしの状態に近く、上向きのV字形である。ただし、このグラフ中の75%のカテゴリーが原点付近に集中している。また、ケースー1,2と同様に、数量化Ⅱ類にて負の値を持ったカテゴリーのうち、竹林以外のすべてが含まれている。

ケースー3では「地すべり」と「斜面崩壊」という性質の異なるトレーニングデータを一つのトレーニングデータとして解析をおこなったため、各崩壊に対応するカテゴリーが散布図上で遍在する結果となったものと考えられる。

e) 数量化Ⅲ類によるカテゴリー分析のまとめ: 上に述べた一連の検討から、トレーニングデータの性質が同一であれば、崩壊に関連したカテゴリーの散布図上での分布状態は比較的均一で、原点付近に集中するが、異なった性質のトレーニングデータが混在する場合は、散布図上でもカテゴリー間に遍在が生じることが判った。

### 7. 予測画像と現地調査結果の比較検討

以上のような統計的な検討結果を踏まえて、予測画像の検討と現地調査結果との比較検討を実施した。図-10は空中写真判読によって作成した対象地域の斜面崩壊の発生状況を示したものに、現地踏査で確認された新しい斜面崩壊の発生位置を加えたものである。この図からわかるように、対象地域内には数カ所の地すべり地が見られ、今回対象とした降雨によって大規模な被害が生じたのもこれら地域内が多い。また、規模の小さな「斜面崩壊」地形は各所で散見され、継続的にこの地域において斜面の崩壊が発生していたことが判読される。

以下、各ケース毎の予測画像とこの現地調査結果との対比を中心として検討を加える。

a) ケースー1: 「地すべり」型トレーニングデータを用いて予測した画像を図-11(1)に示す。このケースの的中率は88%であり、3ケースの中でも最も高い値を示す。これは「地すべり」型は「斜面崩壊」型と比較して、地形、地質的に発生条件がより限定されていることの影響があるものと考えられる。

現地調査および空中写真判読から「地すべり」地であると判断された部分のうち東向きものは予測図とよく一致しているが、ほぼ西向きの斜面は危険地域には判定されていない。これは本研究において対象とした災害では、実際に西向き斜面が崩壊しておらず、トレーニングデータに反映されていないためであると考えられる。

b) ケースー2: 本ケースは規模が小さく、かつ傾斜が急な「斜面崩壊」を対象としたもので、的中率はおよそ79%で、崩壊の危険性ありと予測されるピクセル数は1038にのぼる。この値は「地すべり」型での予測個数589ピクセルの2倍弱であり全ピクセル数のおよそ

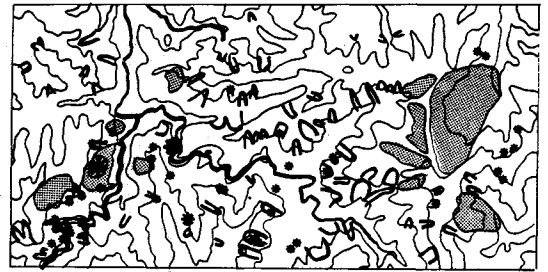


図-10 対象地域の写真判読・現地調査結果

20%に相当するものである。このケースにおけるトレーニングデータをもとに予測を行った場合、対象地域の崩壊危険地域はケースー1とはかなり異なった予測結果となっている(図-11(2))。

また、予測されたピクセルを詳細に検討しても、予測された範囲がかなり異なっており、トレーニングデータ周辺部にまとまった予測範囲が見られる他、ほぼ対象域全域に予測地域が分布しているのがわかる。このケースにおいては現地調査の結果、「地すべり」型の崩壊は予測されていない場合が多い反面、多数の場所で小規模な「斜面崩壊」が的確に予測されている。

c) ケースー3: 本対象地域において、特に斜面崩壊のタイプを考慮せずに予測を行った場合の結果を検討するために、両タイプのトレーニングデータを用いて斜面崩壊予測を実施したものである(図-11(3))。

ケースー3の的中率は、およそ74%と他のケースと比較して低くなっているが、この原因は両タイプの間で崩壊の特性、素因特性が大きく異なっているためであると類推される。

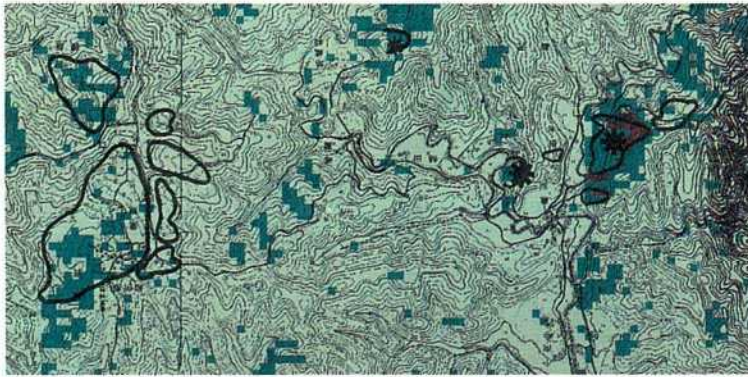
### 8. 結 論

#### (1) 検討結果のまとめ

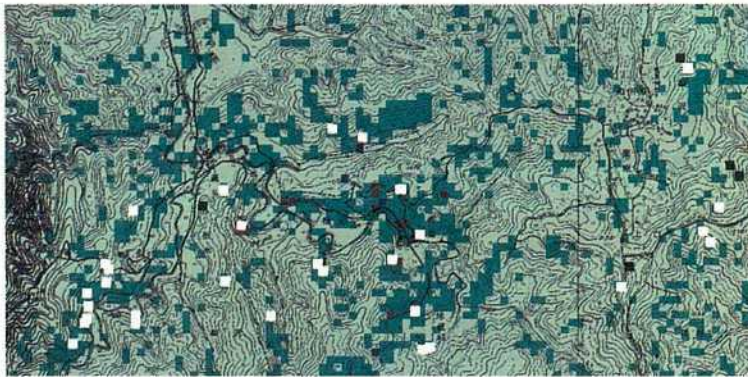
本研究においては斜面崩壊予測モデルの実利用に関する検討とトレーニングデータの質についての検討を行い、以下に示す結果を得た。

- ① 本研究を含むこれまでの研究過程において提案してきた「斜面崩壊予測モデル」が、降雨性崩壊に精度良く適用できることがわかった。予測精度の一つの指標となる的中率は73~88%であり、トレーニングデータを規準としたミニマックス判別によっても十分な判別性能が得られることが判った。
- ② 本対象地域では「地すべり」型崩壊が斜面の方向に、「斜面崩壊型」崩壊では斜面の傾斜との関連性が高いことが示された。また、衛星データより算出される反射特性は斜面崩壊予測において有効な素因

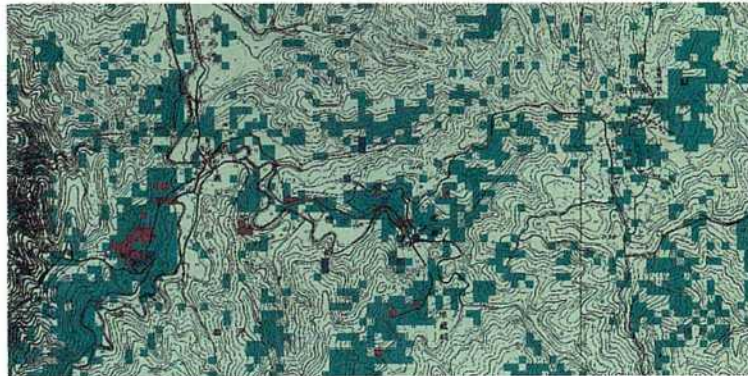




(1) ケース1 「地すべり」型崩壊予測結果



(2) ケース2 「斜面崩壊」型崩壊予測結果

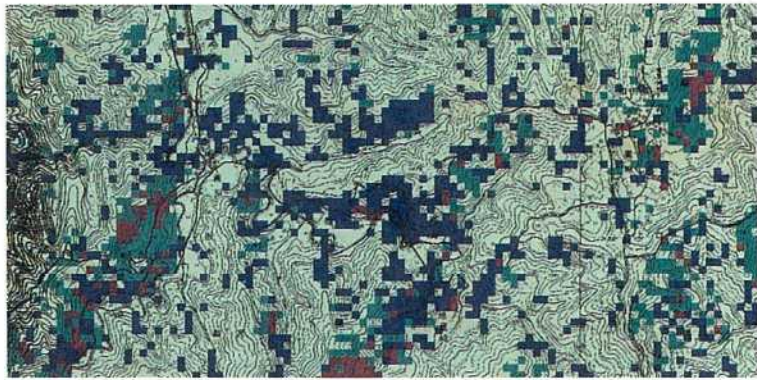


(3) ケース3 崩壊型を考慮しない場合の予測結果

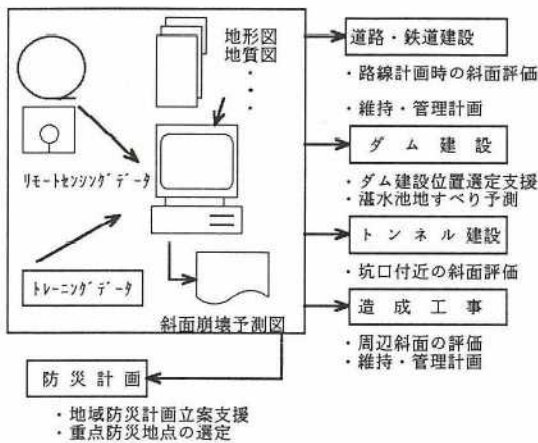
凡 例	
緑 色	崩壊の危険性があると判断されたピクセル
青 色	崩壊地のトレーニングデータとして選定されたにも関わらず崩壊危険性がないと誤分類されたピクセル
赤 色	崩壊地のトレーニングデータとして選定され、崩壊危険性があると正しく判断されたピクセル

- : 地すべり地
- ✱ : 地すべり活動地域
- : 実際の崩壊地で崩壊危険性ありと予測された地域
- : 実際の崩壊地で崩壊危険性なしと予測された地域

図-11 崩壊危険地域予測画像



図一12 「地すべり」「斜面崩壊」の同時表示例  
 緑色：「地すべり」危険地 青色：「斜面崩壊」危険地  
 赤色：「地すべり」「斜面崩壊」共通危険地域



図一13 斜面崩壊予測システムの建設分野での位置付

情報であることがアイテム分析等から示された。

- ③ 「地すべり型」のトレーニングデータを用いたケースと「斜面崩壊型」のトレーニングデータを用いた結果では、統計的な解析結果も予測画像も異なったものとなり、本モデルがトレーニングデータの質を予測結果に的確に反映できることが明らかとなった。
- ④ トレーニングデータを選定する際に、本研究にて分類した「地すべり」型、「斜面崩壊」型等の分類基準を設けるとともに、いくつかのトレーニングデータの選定基準を策定することが必要である。すなわち、これまでの研究において対象とした地域は検証を行う上でも実際に崩壊が発生した後に崩壊地をトレーニングデータとして選定しているが、実際に本システムにて予測を行なう際には、トレーニングデータとして、「最近の崩壊地」「明瞭な地すべり地形」「崩壊地の隣接斜面」などを地形地質の専門家の意見を取り込んで検討する必要がある。

- ⑤ 本研究の対象地域のように複数の崩壊タイプが存在する場合は、各崩壊タイプ毎に予測を行い、その結果を図一12に示したように画像上で重ね合わせる方法が有効である。この方法によって、予測精度を落とすことなく複数のタイプの崩壊予測結果を同一画像上で判読でき、技術者支援型の表示形態として極めて有効である。

## (2) 実利用化へ向けての課題と提案

これまでの検討を通じて、より実用的なシステムの構築を目指す上で次のような課題があげられる。さらに実用性に重点をおいて、各々の課題に対する改善方法や今後の検討方針に関する提案を行った。

- ① システム構成：本モデルをより容易に利用できるように、パソコンを中心としたシステムの構築を目指し、斜面崩壊の危険性の予測が最も必用とされる現場での利用を可能とする。この場合、データの入力に関する部分は大型計算機による方法などを検討し、できるだけ特殊な装置を必要としないシステムが望ましい。
- ② 適用分野の明確化：実際の斜面崩壊予測が必要な現場での適用を行うために、適用分野を明確にする。例えば湛水前のダムでの湛水後の地すべりの危険性の予測、道路や構造物の建設に際してサイト選定に利用するなどが考えられる。図一13には建設分野において本システムを適用する際の利用例を示した。この図に示すように大規模な土木工事では、多くの場合に斜面との関わりが生じており、斜面崩壊予測技術の果たす役割は決して小さくないものと考えられる。

## 9. おわりに

今回の検討から本研究にて構築した予測モデルが降雨性崩壊に対しても有効であることが一つの実用例におい

て検証された。また、これまでの研究で行った地震が誘因となった斜面崩壊での検討と合わせて、実用的な斜面崩壊モデルの提案および実施例による検証ができたものと考えられる。

衛星マルチスペクトルデータはこれまでの地域情報と比較して、格段にリアルタイム性が高く、本研究のように地表面の反射特性そのものをデータとして利用する場合は、衛星リモートセンシングの実利用の側面から見た場合においても有意義なものであると思われる。しかし、地表面の反射特性が表わす意味を理論的に斜面崩壊現象と関連付けることなど今後の研究が必要である点もあり、リモートセンシング分野と防災工学や土質工学等の分野の研究者の間での活発な議論が必要であると考えられる。

また、本システムは、統計理論を用いた定量的な斜面崩壊の予測と、むしろ定性的な専門家の経験を活用できるトレーニングデータの選定過程とをリンクさせることによって、フレキシブルな予測が可能であり、衛星リモートセンシングデータを利用していることから、最新の情報を活用でき、かつ経時変化的な情報を得ることが可能である。

このような特徴を有効に利用することによって、地域の防災計画をはじめ継続的な災害監視にも有効に活用できるものと考えられる。特に今後さらに開発が進むと考えられる、首都圏をはじめとする都市近郊の丘陵部の防災計画や、その開発工事の際の安全性の確保または適切な観測体制の整備において本システムの適用が考えられ

る。また、筆者らは現在パーソナルコンピュータを用いたシステムの簡易化および実際の建設工事への適用を考えてさらに研究を続けている。

最後に本研究を進めるに当たって貴重な資料を提供して頂いた関係各位に厚くお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 渡正亮：地域開発と地すべり「地すべり・斜面崩壊の調査・解析・防止工法」総合資料集，pp. 39～49, 1977.
- 2) 斉藤迪孝：斜面崩壊発生時期の予知，土と基礎，Vol. 17, No. 2, pp. 29～37, 1969.
- 3) 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，土質学会論文報告集，Vol. 25, No. 2, pp. 185～194, 1985.
- 4) 大島太市・力丸厚・加藤洋一・中村正治：数値地形モデルおよびリモートセンシングデータの合成による山岳危険地区の推定について，法政大学工学部研究集報，第22号，pp. 179～186, 1986.
- 5) 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，第415号／VI-12, pp. 71～80, 1990.
- 6) 大林成行・小島尚人・笠博義・黒台昌弘：衛星リモートセンシングデータを用いた斜面崩壊予測システムによる降雨性崩壊危険地の抽出／適用事例，第17回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，pp. 259～260, 1990.
- 7) 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.

(1991. 4. 15 受付)

## STUDY ON APPLICABILITY OF SLOPE FAILURE PREDICTION FOR VARIOUS TYPES OF SLOPE FAILURE

Hiroyoshi KASA, Hirohito KOJIMA, Shigeyuki OBAYASHI and Masahiro KURODAI

The slope failure prediction model using satellite multi-spectral data and digital geographical information has been proposed. It can be used for the prediction of dangerous zone by Quantification method and mini-max method. In this paper, effectiveness for the prediction of "slope failure" and "landslide" is discussed. The summary of the results is as shown below.

- 1) This model is able to predict two types of slope failure phenomena, i.e. "slope failure" and "landslide".
- 2) From the results of analysis by Quantification method type II and type III, there is evidently difference of degree of effect for endogenous factors between "slope failure" and "landslide".