

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

大林成行¹・小島尚人²・Chang-Jo F.Chung³

¹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)

²正会員 工博 東京理科大学助教授 理工学部土木工学科 (同 上)

³Ph. D. カナダ地質調査所・空間情報分析研究室・室長 (601 Booth Street, Ottawa, Ont. Canada)

本研究は、広域にわたる斜面の崩壊危険箇所の評価支援を目的として、複数の斜面安定性評価モデルから得られる評価精度を比較し、モデルを活用する上での戦略を提案したものである。斜面安定性評価モデルとして、①SSEモデル(数量化Ⅱ類)、②ベイジアンモデル、③ファジーセットモデル、④確信度モデルといった4つの代表的な手法を取り上げた。これらのモデルでは、衛星データと各種地理情報を併用し、崩壊発生箇所をトレーニングデータとして広域にわたる危険箇所を推定する。斜面安定性評価図の対比較戦略を通して、ファジーセットモデルとSSEモデルが有用であることが判った。さらに、この2つのモデルから作成される斜面安定性評価図の違いを抽出した「差画像」を提示し、この差画像とその解釈の方法が斜面崩壊防止計画等への支援手段として有用となることを示した。

Key Words : slope stability evaluation, spatial data integration, geographical information, remote sensing data, erosive collapse

1. はじめに

斜面の崩壊の「発生時期・位置・規模」を事前に予知しようとする技術は古くから研究され、その成果の活用が強く求められている。これら3つの予測要件のうち、筆者らは斜面崩壊の発生「位置」と「規模」を事前に把握することを目的に、地形や表層地質、土壌といった各種地理情報と衛星マルチスペクトルデータ(以下、衛星データ)を融合利用できる斜面安定性評価モデル(SSE model: Slope Stability Evaluation model using satellite data and geographical information)を開発し¹⁾、数々の適用事例を通して広域にわたる崩壊危険箇所の事前評価に有効であることを示した^{2)~3)}。

SSEモデルでは、崩壊発生箇所を判別の基準(以下、トレーニングデータと呼ぶ)として、数量化Ⅱ類およびミニマックス2群判別手法を介して斜面安定性評価図を作成する。いわゆる地理情報を質的変量としてトレーニングデータとの因果関係を分析する多変量解析モデルである。これに対して、最近、確率理論をベースとして、空間情報を統合分析しようとする斜面安定性評価モデルが考案され、評価結果の信頼性について検討が進められている⁴⁾。

しかし、斜面安定性評価モデルから得られる斜面安定性評価図の精度比較の問題や、実際に崩壊防止計画等にこれら評価図を活用しようとする場合、どの斜面安定性評価モデルを信頼してよいのかといった根本的な問題については、十分な議論がなされていない。こ

の点は、斜面安定性評価モデルを活用していく上で不可欠な検討課題と言える。

そこで、本研究では、代表的な斜面安定性評価モデルから得られる評価結果を比較するとともに、モデルを活用する上での戦略を提案する。斜面安定性評価モデルとして、①SSEモデル(数量化Ⅱ類)、②ベイジアンモデル、③ファジーセットモデル、④確信度モデルといった4つの代表的な手法を取り上げた。これらの斜面安定性評価モデルから得られる斜面安定性評価図の対比較戦略を通して、ファジーセットモデルとSSEモデルが有用であることを導いている。さらに、この2つのモデルの斜面安定性評価図の違いを抽出した「差画像」を提示し、この差画像とその解釈の方法は、潜在危険斜面を見出し、斜面崩壊防止計画等への支援手段として有用となることを示す。

2. 本研究の範囲と特色

(1) 対象とする斜面崩壊地帯の土性

本研究では、継続して検討を進めているシラス地帯の崩壊危険箇所評価の問題を取り扱う^{5),6)}。自然シラス地帯では、風化層と地山との間で崩壊が発生しており、両者の間は物理的にも化学的にも不連続であり、いわば物性的に異質な層が斜面を覆っている。シラス斜面の崩壊問題を扱った研究は、古くから数多くあり、例えば道路沿線のシラス人工のり面を対象として崩壊要因を分析したものや⁷⁾、シラス自然斜面を対象とし

て、崩壊の周期性と発生場を予測しようとする研究等があげられる⁹⁾。現在に至ってもシラスそのものの土性を研究対象としたもの⁹⁾、特定のシラス斜面の安定解析手法に関わる提案等も見られる¹⁰⁾。いずれにしてもシラス自然斜面は侵食を伴う表層崩壊であり、「広域にわたって崩壊が発生する位置」を推定することは極めて難しく、地形学的観点から、まず第1に「潜在危険斜面⁹⁾・¹¹⁾」を区分し、図化していくことの重要性が指摘されている。

本研究では、複数の斜面安定性評価モデルの対比較を通して、この潜在危険斜面を見出すための「支援情報(差画像)」を提示することが目的の一つとなる。

(2) 本研究で取り扱う斜面安定性評価モデル

本研究で取り扱う「斜面安定性評価」は、崩壊の発生「位置」と「規模」を「広域かつ面的」に評価することを目的に、地形、表層地質、土壌といった各種地理情報と衛星データを併用し、トレーニングデータを判別基準として危険性のある箇所を判定するといった範囲に限られる。

斜面安定性評価モデルとして、現時点で最も一般的かつ広く認知されているものとして、本研究では、①SSEモデル(数量化Ⅱ類)、②ベイジアンモデル、③ファジーセットモデル、④確信度モデルの4種類を取り上げた。

SSEモデルは、数量化理論第Ⅱ類を中核とした斜面安定性評価モデルである¹²⁾・¹³⁾・¹⁴⁾。関連学会が実施した斜面安定性評価モデルに関する調査の結果を見ても、日本での適用実績が多く、実用性の高い斜面安定性評価モデルとして評価を受けている¹⁵⁾。また、ベイジアンモデル、ファジーセットモデル、確信度モデルは、確率理論に基づいて構成されており、鉱物資源探査支援を目的として構築されたものである¹⁶⁾。最近になって、斜面崩壊危険箇所評価にも適用効果があると報告され、諸外国において適用実績のある斜面安定性評価モデルである¹⁷⁾。

本研究で扱う斜面安定性評価の問題は、特定の斜面を対象として、力学モデル等に基づく崩壊発生時期を推定する「点」としての崩壊予知研究の分野とは検討の視点を異にする¹⁸⁾。本研究で得られる斜面安定性評価図によって潜在危険斜面を推定していくとともに、様々な斜面安定性評価に関わる研究分野への支援資料を提供していくといった利用形態を想定している。

(3) 斜面安定性評価モデルの適用方法の提案

上記の斜面安定性評価モデルを適用した研究については、それぞれが独自に進められ、個別に研究成果が報告されてきた⁹⁾。したがって、斜面安定性評価モデ

ルの利用者の立場から見た場合、

①複数の斜面安定性評価モデルから得られる解の違いをどのように取り扱えばよいのか。

②最終的にどの斜面安定性評価モデルを使用すればよいのか。

といった根本的な問題が残される。従来までに開発されてきた複数の斜面安定性評価モデルの活用方法を考えることは、不可欠の課題であり、斜面崩壊危険箇所評価の信頼性の向上につながるものと期待できる。

本研究で採用した斜面安定性評価モデルの詳細は、後述するが、いずれも既崩壊箇所(トレーニングデータ)を基準として、数量化理論および確率理論に基づいて斜面崩壊危険箇所評価図を作成するものである。ここで注意すべき点は、トレーニングデータが同じであれば、いかなるモデルを使用しても、理想的には評価結果は同一になることが、「必要条件」となることである。

そこで、本研究では、複数の斜面安定性評価モデルから得られる斜面安定性評価図の対比較・分析を通して、崩壊危険箇所評価に有効と判断できる斜面安定性評価モデルを絞り込む。さらに、これらの斜面安定性評価モデルから得られる斜面安定性評価図の違いを抽出した「差画像」を最終成果図として提示し、この差画像の情報が潜在危険斜面の調査・分析における支援情報として有用な情報を内包していることを示す。種類の異なる斜面安定性評価モデルの活用方法を提示するといった点において、本研究の意義がある。

3. 研究の全体構成

本研究の構成を図-1に示す。以下、順を追って処理内容を述べる。

(1) STEP1: 対象領域と素因データの準備

a) 対象領域

対象領域は、鹿児島県吉田町に位置する佐多浦地区である(東西約3.6km×南北約1.8km)。この地区では、自然シラスの侵食谷と侵食崖が広く分布し、1993年8月の集中豪雨によって広域にわたって数多くの崩壊が発生している¹⁹⁾。この地域ではSSEモデルを用いた崩壊危険箇所評価の研究実績が蓄積されている⁹⁾・¹⁰⁾。種類の異なる斜面安定性評価モデルの評価結果を比較する上で、十分なグラントルースデータが整備されている。

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

表-1 素因データ

土地分類基本調査図面から作成			
表層地質	現存植生	土 壌	地形分類
砂、礫	スギ群落	粗粒風化火山	中起伏火山地
泥、砂、礫	ミズバネ群落	黒ボク土	丘陵地
泥岩	スギ、ヒノキ、ササ群落	乾性褐色森林土	シラス台地
シルト岩	ツツジ群落	褐色森林土	谷底平野
シラス	畑地雑草群落	細粒灰色低地土	崖
溶結凝灰岩	水田雑草群落	粗粒灰色低地土	火山麓地
安山岩質岩石	緑の多い住宅 常緑果樹園	灰色低地土	
		グライ土	
		市街地、その他	
DTMから作成			
標高	傾斜	起伏量	斜面方位
0~50	0~5	0~5	北
50~100	5~10	5~10	北北東
100~150	10~15	10~15	北東
150~200	15~20	15~20	東北東
200~250	20~25	20~25	東
250~	25~30	25~30	東南東
以上~未満	30~35	30~35	南東
単位：m	35~40	35~40	南南東
	40~	40~	南
	以上~未満	以上~未満	南南西
	単位：度	単位：m	南西
			西南西
			西
			西北西
			北西
			北北西
			平坦
衛星データから作成			
谷密度	植生指標	土地被覆	
0個	レベ'#1	樹林	
1	レベ'#2	市街地	
2	レベ'#3	水田	
3	レベ'#4	裸地	
4	レベ'#5		
5	レベ'#6		
	レベ'#7		
	レベ'#8		
	レベ'#9		
	レベ'#10		
	レベ'#11		
	レベ'#12		
	レベ'#13		
	レベ'#14		

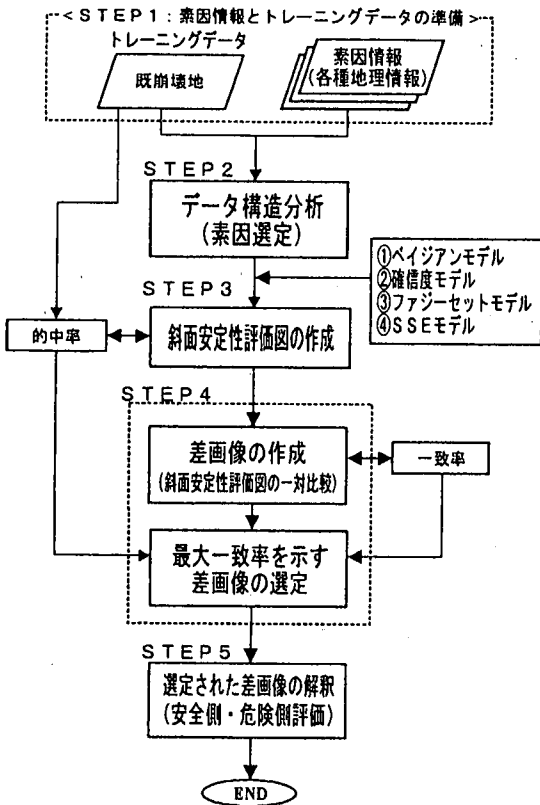


図-1 研究の全体構成

層地質、現存植生、土壌、地形分類)と数値地形モデル(DTM:Digital Terrain Model)からコンピュータ処理によって作成される数値地理データ(標高、傾斜区分、起伏量、斜面方位、谷密度)である。これらは土地に内在する潜在的な因子であり、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20m/画素という高分解能を有し、広く利用されているSPOT・HRVデータを用いた。データの観測時期は、1993年3月4日、観測エリアはPATH315-ROW286であり、画像ノイズのないデータを選定した。この衛星データから教師付き最尤法を用いて土地被覆分類図を作成し、素因データの一つとする。

さらに、シラス台地では地形の遷緩線や遷急線の近辺における植物の生育状態が崩壊発生との周期性と因果関係があると言われていることから¹⁰⁾、衛星データから計算される植生指標(NVI:Normalized Vegetation Index)も素因の一つに加えた。

(2) STEP2: データ構造分析(素因データの選定)

SSEモデルを使用する場合には、数値化Ⅲ類を用いて相関の高い素因の組合わせを見出し、さらに数量

化Ⅱ類を介して、偏相関係数の低い方の素因を除去する。これは、数量化理論に基づくSSEモデルの信頼性を保証する上で不可欠な前処理に位置付けられている⁵⁾。本研究では、確率理論に基づく斜面安定性評価モデルと数量化理論(Ⅱ類)に基づくSSEモデルとの解を比較することから、確率理論に基づく斜面安定性評価モデルにおいても、この前処理によって選定された素因データを共通に使用して、データ構造を分析し、斜面安定性評価図を作成することとする。

なお、本研究では、種類の異なる斜面安定性評価モデルの精度比較と適用戦略を提示することを第1の目的とすることから、確率理論に基づく斜面安定性評価モデルにおける素因データの影響分析等に関する詳細な検討については¹⁰⁾、本研究の範囲には含めず今後の課題とする。

(3) STEP3: 斜面安定性評価図の作成

4種類の斜面安定性評価モデルを用いて、それぞれ斜面安定性評価図を作成する。判別精度の評価には、トレーニングデータに対する「的中率」を用いる。さらに、数量化Ⅱ類および確率モデルに基づく分析を通して、アイテム・カテゴリ分析を行うとともに、斜面安定性評価図上にどのような違いが現れるのかについて検討を進める。

(4) STEP4: 斜面安定性評価図の対比較

4種類の斜面安定性評価モデルから作成されたそれぞれの斜面安定性評価図の違いを抽出した「差画像」

を作成する。全ての対比較の組合せ事象を考えると6種類(=, C₂)の差画像が作成される。この差画像の違いを定量的に評価する「一致率」を用いて、最大一致率を示す2つの斜面安定性評価モデルを選定する。換言すれば、斜面安定性評価モデルの解が最も類似している上位2つのモデルを選定することになる。

(5) STEP5: 選定された差画像の解釈

差画像上には、評価モデルの解が一致した箇所とそうでない箇所が表示される。この差画像上の情報を利用して、「安全側・危険側」の評価が展開できることを示す。選定された差画像が「潜在危険斜面」を見出し、斜面崩壊防止計画等への支援手段として有用となることを示す。

4. 本研究で扱う斜面安定性評価モデル

(1) 斜面安定性評価モデルの基本構成

本研究で扱う斜面安定性評価モデルは、図-2に示すように、素因情報とトレーニングデータの関係を確率モデルおよび数量化理論で分析し、斜面安定性評価図を作成するといった共通のプロセスを有している。

以下、検討対象として取り上げた4つの斜面安定性評価モデルの内容について概説する。

(2) 斜面安定性評価モデル

a) ベイジアンモデル (Bayesian model)

画素qにおいて斜面崩壊が発生すると想定される事象を「Tq」と表記し、画素qに該当する「i番目の素因におけるj番目のカテゴリ」をc_{ij} (i=1, ..., m, j=1, ..., n)と記述する。画素qの「崩壊発生確率: Sq」は、画素qが有する事象c_{ij}の下で、以下の条件付き確率Pを求めることに帰着する。

$$Sq = P\{Tq | c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{mj}\} \quad (1)$$

ベイズの定理に従えば、式(1)の右辺は、次のように記述できる。

$$Sq = \frac{P\{Tq\} \cdot P\{c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{mj} | Tq\}}{P\{c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{mj}\}} \quad (2)$$

ここで、各素因が独立事象であると仮定すれば、

$$P\{c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{mj} | Tq\} = P\{c_{1j} | Tq\} \dots P\{c_{mj} | Tq\} \quad (3)$$

となる。したがって、式(3)を式(2)に代入して整理すると以下ようになる。

$$Sq = \frac{P\{c_{1j}\} \dots P\{c_{mj}\}}{P\{c_{1j}, \dots, c_{mj}\}} \cdot P\{Tq\} \cdot \frac{P\{Tq | c_{1j}\}}{P\{Tq\}} \dots \frac{P\{Tq | c_{mj}\}}{P\{Tq\}} \quad (4)$$

この式(4)に基づいてSqを計算するためには、

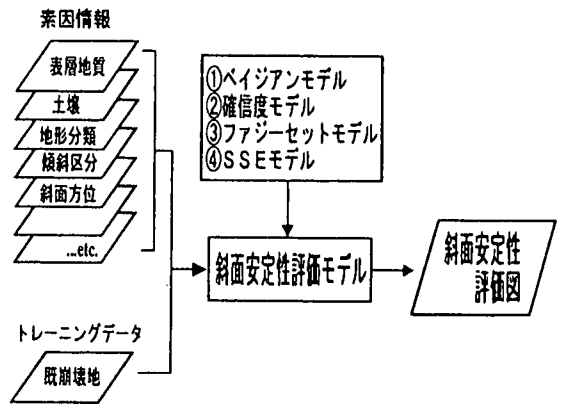


図-2 斜面安定性評価モデルの基本構成

$$P\{c_{ij}\} = N_{ij} / A \quad (5)$$

$$P\{c_{1j}, \dots, c_{mj}\} = N_r / A \quad (6)$$

$$P\{Tq\} = N_b / A \quad (7)$$

$$P\{Tq | c_{ij}\} = N_c / N_{ij} \quad (8)$$

となる。ここに、

N_{ij}: i番目の素因におけるカテゴリjの画素数

A: 評価領域全体の画素数

N_r: 画素qにおける「1番目~m番目までの素因に対するカテゴリの組合せ事象X」の画素数

N_b: 既崩壊地(トレーニングデータ)の画素数

N_c: i番目の素因におけるカテゴリjの領域に属する既崩壊地(トレーニングデータ)の画素数

すべての画素qに対して、Sq (0 ≤ Sq ≤ 1)が計算され、この値が大きいく程、崩壊危険性が高いことを意味する。なお、筆者らは式(1)の右辺のP{Tq | c_{ij}, ..., c_{mj}}を「Favorability Function」と定義している¹²⁾。

b) 確信度モデル

「確信度 (Certainty Factor: CF)」の基本概念は、医療分野におけるエキスパートシステムとして知られているMYCINの開発時に、Shortliffeらによって提案された¹³⁾。その後、評価結果の信頼性を高めるために、Heckermanによって修正された確信度が提案され¹⁴⁾、一般に利用されるようになった。本研究においてもこの修正された確信度を採用する。

k番目の素因に対応する画素pの確信度CF_k(p)は、P{Tq | c_{ij}}とP{Tq}の大小関係にしたがって、式(9)および式(10)のように記述される。

①条件1: P{Tq | c_{ij}} ≥ P{Tq}の時

$$CF_k(p) = \frac{P\{Tq | c_{ij}\} - P\{Tq\}}{P\{Tq | c_{ij}\} (1 - P\{Tq\})} \quad (9)$$

②条件2: P{Tq | c_{ij}} < P{Tq}の時

$$CF_k(p) = \frac{P\{Tq | c_{ij}\} - P\{Tq\}}{P\{Tq\} (1 - P\{Tq | c_{ij}\})} \quad (10)$$

確信度の値は-1~1の範囲にあり、値が大きい程、崩壊の危険性が高いことを意味する。また、式(9)からも判るように、条件付き確率 $P(Tq|c_{ij})$ が事前確率 $P(Tq)$ と等しい時、確信度は0となり、条件付き確率 $P(Tq|c_{ij})$ と事前確率 $P(Tq)$ との差が大きい程、確信度の絶対値が大きくなる。全ての画素に対して、素因毎の確信度の値を計算し、0~1に規格化する。このうち、最も高い確信度を示すものを当該画素に付与する最終評価値とする。

c) ファジーセットモデル

ファジー理論は、1965年にザデーによって提案され、その後、多くの研究者が制御・意思決定問題等に適用してきた¹⁰⁾。本研究では、斜面崩壊危険箇所評価の問題をファジー理論を用いてモデル化することを考える。

Xを評価領域全体の画素の集合とし、画素qに対する「斜面崩壊が発生する可能性」といったファジー集合をSとする。画素qの「斜面崩壊が発生する確率」は、ファジーメンバーシップ関数 μ_s として以下のよう記述される。

$$\mu_s: X \rightarrow [0, 1] \quad (11)$$

これはX上のファジー集合Sが、区間[0, 1]上の値をとるクリスプ集合であることを意味する。したがって、式(1)の崩壊発生確率 $P(Tq|c_{1j}, \dots, c_{nj})$ は、式(12)のように記述できる。

$$P(Tq|c_{1j}, \dots, c_{nj}) = \mu_s(q|c_{1j}, \dots, c_{nj}) \quad (12)$$

また、素因毎にはメンバーシップ関数の値 μ_{si} が定義でき、式(13)のようになる。

$$\mu_{si}(q|c_{ij}) = P(Tq|c_{ij}) = N_{ij} / N_{ij} \quad (13)$$

各画素の崩壊発生確率 $\mu_s(q|c_{1j}, \dots, c_{nj})$ は、 μ_{si} に対するファジー演算を介して計算する。ファジー演算には、ファジー論理積、ファジー論理和、ファジー積和、ファジー代数和演算等がある¹⁰⁾。

本研究では、鉱物資源探査等において信頼性のある評価値が得られると報告されており¹⁰⁾、ファジー演算の中でも多用されている「ファジー代数和演算」を採用した。この演算は式(14)で表される。

$$\mu_s(q|c_{1j}, \dots, c_{nj}) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - \mu_{si}(q|c_{ij})) \quad (14)$$

全ての画素について、この $\mu_s(q|c_{1j}, \dots, c_{nj})$ を計算し、評価値とする。 $\mu_s(q|c_{1j}, \dots, c_{nj})$ は、0~1の範囲をとり、値が大きい程、崩壊の危険性が高いことを意味する。

d) SSEモデル

SSEモデルの特徴は、従来までのような崩壊危険度といったようなランク付けを行うことなく、崩壊危険性の「有・無」のみを判定することにある。従来までの崩壊危険度の判定は、アイテムやカテゴリーに対

して人為的に重み付けを行う等、研究者の経験や主観に大きく左右されるといった問題が指摘されていた。

これに対してSSEモデルは、数量化II類によって各画素に付与されるスコア値を計算した後にトレーニングデータを基準としたミニマックス2群判別によって判別区分点を設定し、崩壊側・未崩壊側のいずれに属するのかを判別する¹¹⁾。

トレーニングデータは、実際に崩壊が発生した箇所を現地調査や既存資料をもとに設定する。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⁹⁾」と呼んでいる。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、崩壊発生前後それぞれにおいてステレオ空中写真を購入し、立体視鏡を通してトレーニング領域を選定する。

なお、筆者らは現状型トレーニングデータだけでなく、滑落崖や崩壊斜面冠頂部近辺をトレーニングデータとして設定する方法も提案している⁹⁾。これを「規範型トレーニングデータ」と呼ぶが、本研究では、数理化理論に基づく斜面安定性評価モデル(SSEモデル)と、ベイジアンモデル、確信度モデル、ファジーセットモデルに共通した確率理論に基づいて構築されるそれぞれの斜面安定性評価モデルの評価精度を比較することが、まず第1の目的であることから、規範型トレーニングデータの設定に伴う斜面安定性評価図への影響に関する問題は今後の課題とする。

5. データ構造の分析

本章では、斜面安定性評価図を作成するために使用する「素因」の選定問題と、選定された素因とトレーニングデータの関係分析、いわゆるカテゴリ分析について述べる。

(1) 素因の選定

本研究では、数量化III類を用いて素因間の相関係数を計算し、相関の高いいずれか一方の素因を除去する。SSEモデルに対しては、数量化II類の信頼性を保証するために、また、確率モデルでは素因の独立性を確保する上で、この処理は重要となる。表-1で示した素因データを用いて、数量化III類を介して計算した素因間の相関係数を計算した結果を表-2に示す。ここで、相関の高い因子の組を判断する閾値が問題となるが、筆者らの今までの検討と統計処理上の一般的な判断として⁹⁾、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。表中、枠で囲った箇所が該当する。

表-2 素因間の相関係数と素因選定結果

素因	傾斜	標高	地質	植生	起伏	斜面	現存	地形	土壌	被覆
傾斜区分	○	-								
標高	○	0.650	-							
森林地質	×	0.651	0.791	-						
植生指標	○	0.251	0.360	0.301	-					
起伏量	×	0.952	0.634	0.602	0.254	-				
斜面方位	○	0.377	0.244	0.402	0.258	0.276	-			
現存植生	○	0.605	0.633	0.677	0.281	0.588	0.276	-		
地形分類	×	0.616	0.661	0.716	0.275	0.594	0.265	0.737	-	
土壌	×	0.573	0.578	0.640	0.294	0.562	0.299	0.728	0.713	-
土地被覆	○	0.598	0.596	0.586	0.536	0.569	0.294	0.591	0.567	0.571
谷密度	○	0.196	0.120	0.075	0.111	0.147	0.112	0.044	0.036	0.058

注) ○: 当該素因データを使用する。 ×: 当該素因データを使用しない。

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-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。

この結果から、使用する素因は「傾斜区分、標高、植生指標、斜面方位、現存植生、土地被覆、谷密度」の7種類となる。選定されたこれら7種類の素因を構成するカテゴリの分析へと検討を進める。

(2) カテゴリ分析

確率理論に基づいて構成されるベイジアンモデル、確信度モデル、ファジーセットモデルにおいては、条件付き確率 $P(T_j|C_{ij})$ を用いてカテゴリ分析を行う。また、SSEモデルでは数量化Ⅱ類を介して外的基準であるトレーニングデータとカテゴリの因果関係を分析する。表-3に条件付き確率の値を、また、表-4には数量化Ⅱ類の処理結果を示す。なお、表-4の外的基準欄の「評価対象領域」とは、トレーニングデータ以外のすべての個体を意味する。

外的基準の欄を見ると、トレーニングデータに対して負の値、評価対象データには正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との関連性を分析できる¹⁾。

表-3および表-4から次の3つの点が読みとれる。

①表-3において条件付き確率が高い値を示すカテゴリは、表-4のカテゴリ数量を見ると、小さい値を示す傾向にあり、条件付き確率とカテゴリ数量の値の相関性が認められる。このことから、確率理論に基づく斜面安定性評価モデル(ベイジアン、確信度、ファジーセットモデル)とSSEモデルの評価図に現れる違いは(後述)、条件付き確率から画素単位に評価値を計算する際の斜面安定性評価モデルそのものの構成の違いに起因することになる。

②表-4において、偏相関係数の高い順に素因を列挙すると「傾斜区分、標高、植生指標、斜面方位、現存植生、土地被覆、谷密度」となる。傾斜区分や標高

表-3 条件付き確率

素因データ	傾度	条件付き確率 ($\times 10^{-3}$)	素因データ	傾度	条件付き確率 ($\times 10^{-3}$)
(以上~未満: m)			0 (樹)	11424	1.59
0~50	4623	0.00	1	1494	2.41
50~100	6296	1.51	2	2445	1.55
100~150	3608	4.13	3	615	1.30
150~200	1287	1.55	4	89	1.12
200~250	215	0.47	5	7	0.02
250~	45	0.00	6		
北	1801	1.72	レベル1	13	0.00
北北東	1156	1.38	レベル2	53	0.00
北東	1307	1.38	レベル3	122	0.02
東北東	1047	1.53	レベル4	265	1.31
東	1198	2.00	レベル5	397	2.00
東南東	913	1.10	レベル6	751	5.00
南東	1214	1.40	レベル7	1320	2.42
南	956	0.70	レベル8	2212	1.63
南南東	995	0.70	レベル9	2776	1.73
南南西	882	2.27	レベル10	3176	1.29
南西	637	2.67	レベル11	2037	1.03
西南西	674	1.92	レベル12	1603	1.33
西	656	3.05	レベル13	504	0.50
西北西	933	2.68	レベル14	45	0.00
北西	816	2.08	森林	11352	2.76
北北西	556	1.62	都市地	822	0.37
北西	383	0.00	水田	2609	0.00
			雑地	1291	0.31
			農耕地	2475	4.73
			11'1'~11'5' (樹)	1254	3.59
			11'5'~12' (樹)	7793	1.30
			12'~12'15' (樹)	101	0.00
			12'15'~12'30' (樹)	53	0.00
			12'30'~12'45' (樹)	3297	0.05
			12'45'~13' (樹)	1077	0.00
			13'~13'15' (樹)	14	0.00
			13'15'~13'30' (樹)	265	0.00
			13'30'~13'45' (樹)	15009	0.00

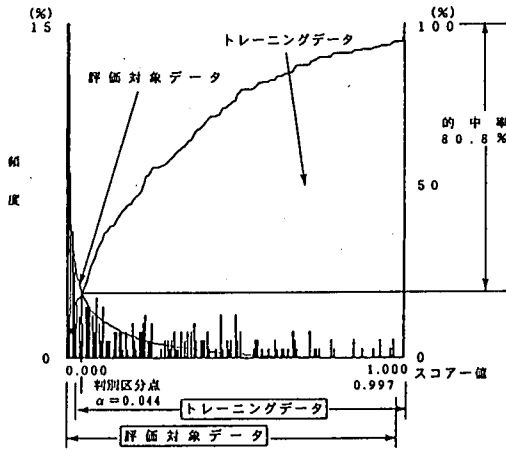
表-4 カテゴリ数量 (数量化Ⅱ類)

素因データ	傾度	数量 (レンジ)	素因データ	傾度	数量 (レンジ)
(以上~未満: m)			0 (樹)	11424	0.039
0~50	4623	0.081	1	1494	-0.112
50~100	6296	0.010	2	2445	-0.066
100~150	3608	-0.290	3	615	-0.183
150~200	1287	0.554	4	89	-0.131
200~250	215	0.801	5	7	0.607
250~	45	1.827	6		
北	1801	0.014	レベル1	13	0.772
北北東	1156	0.111	レベル2	53	0.665
北東	1307	0.043	レベル3	122	-0.087
東北東	1047	-0.030	レベル4	265	-0.257
東	1198	-0.202	レベル5	397	0.028
東南東	913	0.189	レベル6	751	-0.341
南東	1214	0.081	レベル7	1320	-0.427
南	956	0.194	レベル8	2212	-0.100
南南東	995	0.337	レベル9	2776	-0.031
南南西	882	-0.144	レベル10	3176	0.167
南西	637	-0.144	レベル11	2037	0.049
西南西	674	0.053	レベル12	1603	0.108
西	656	-0.293	レベル13	504	0.552
西北西	933	-0.185	レベル14	45	0.00
北西	816	-0.057	森林	11352	0.063
北北西	556	0.101	都市地	822	0.228
北西	383	-0.116	水田	2609	0.073
			雑地	1291	0.292
			農耕地	2475	-0.610
			11'1'~11'5' (樹)	1254	-0.226
			11'5'~12' (樹)	7793	0.167
			12'~12'15' (樹)	101	0.373
			12'15'~12'30' (樹)	53	0.100
			12'30'~12'45' (樹)	3297	0.104
			12'45'~13' (樹)	1077	0.001
			13'~13'15' (樹)	14	0.554
			13'15'~13'30' (樹)	265	-1.815
			13'30'~13'45' (樹)	15009	0.030

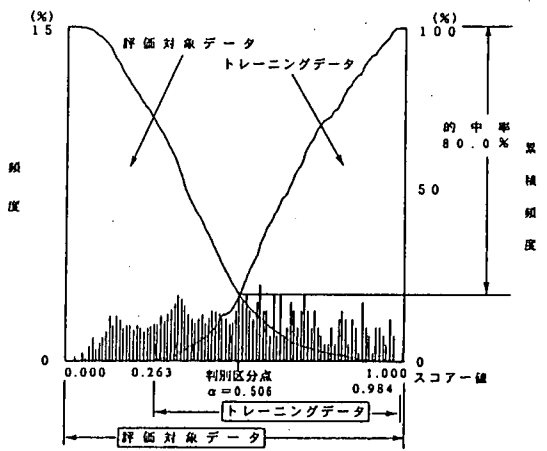
区分がトレーニングデータの土地の性状と関係があるものと考えられる。

③衛星データから作成される因子については、土地被覆よりも植生指標がトレーニングデータを説明付ける上で寄与する結果となっている。シラス地帯の植生の活性度等が斜面崩壊の発生と何らかの因果関係があるものと考えられる。

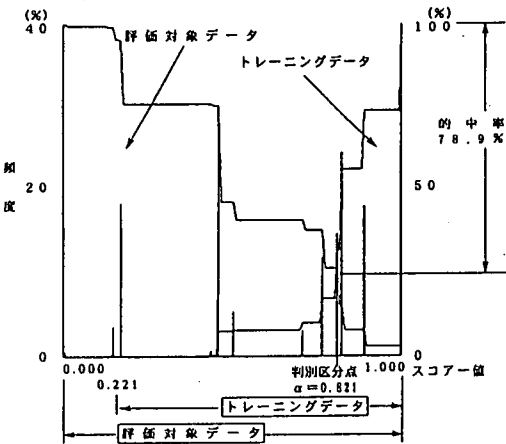
以上のカテゴリ分析の結果をもとに、斜面安定性評価図上に現れる違いについて、さらに検討を進める。



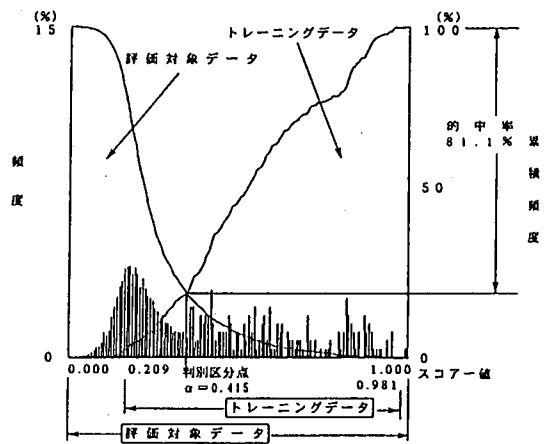
(a) ベイジアンモデル



(b) ファジーセットモデル



(c) 確信度モデル



(d) SSEモデル

図-3 ミニマックス2群判別結果

6. 斜面安定性評価図の作成

(1) ミニマックス2群判別

斜面安定性評価図を作成するには、0～1に規格化した評価値（スコア値）が付与された全画素に対して、トレーニングデータを基準としたミニマックス2群判別手法を用いて斜面安定性評価図を作成する。判別結果を図-3に示す。

横軸には各画素に付与された評価値を、左側縦軸には頻度を取り、トレーニングデータおよび評価対象データのヒストグラムを表示した。また、ミニマックス2群判別結果を判りやすくするために、右側縦軸には累積頻度をとって、図-3に示すように負極側と正極側からそれぞれトレーニングデータと評価対象データに対する累積頻度曲線を描いた結果を表示してある。つまり、トレーニングデータをAグループ、評価対象

データをBグループとすると、

$$F_A(x) = 1 - \int_{-\infty}^x f_A(x) dx \quad \left(\int_{-\infty}^{+\infty} f_A(x) dx = 1 \right) \quad (15)$$

$$F_B(x) = \int_{-\infty}^x f_B(x) dx \quad \left(\int_{-\infty}^{+\infty} f_B(x) dx = 1 \right) \quad (16)$$

ここに、 $f_i(x)$: $i=A, B$ グループのスコア値 x の度数と表現でき、2つの累積頻度分布 $F_A(x)$ 、 $F_B(x)$ の交点が求める判別区分点 α となる。すなわち、

Aグループとして判定される領域： $x \geq \alpha$

Bグループとして判定される領域： $x < \alpha$

であり、このときの判別の精度を表す的中率 P は、

$$P = 1 - F_i(\alpha) \quad (i=A, B) \quad (17)$$

として求められる。この2群判別に基づくトレーニングデータと評価対象データに対する判別前後の画素数

表-5 ミニマックス2群判別結果

判別事象	ベイジアンモデル	ファジーセットモデル	確信度モデル	SSEモデル	評価図上の色付け		
判別前							
トレーニングデータ	265	265	265	265	—		
評価対象データ	15809	15809	15809	15809	—		
判別後	トレーニングデータ	危険性有	214	212	209	215	赤色
		危険性無	51	53	56	50	青色
	評価対象データ	危険性有	2930	3055	4182	3004	緑色
		危険性無	12879	12754	11627	12805	白色
	合計	危険性有	3144	3267	4391	3219	—
		危険性無	12930	12807	11683	12855	—
的中率 (%)	80.8	80.0	78.9	81.1	—		

を整理したものが表-5である。なお、表中の評価対象データとは、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。

図-3および表-5から次のことが読み取れる。

① トレーニングデータに対する的中率は、SSEモデルが81.1%であり、最も高い値を示している。ベイジアンモデルとファジーセットモデルでは、それぞれ80.8%、80.0%、確信度モデルは78.9%であり、トレーニングデータに対する的中率は、4つのモデルとも優位な差は見られない。

② 図-3(a)のベイジアンモデルを見ると、評価値の低い側、すなわち、崩壊の危険性が低い側に、個体が偏って分布している。このことは、条件付き確率 $P(Tq/c_{ij})$ が全体として小さく見積られ、評価領域の崩壊発生確率が低いことを意味する。

③ ファジーセットモデル(図-3(b))では、個体の分布状態は連続性を持つが、トレーニングデータと評価対象データのグループ間の分離性は見られない。

④ 確信度モデル(図-3(c))では、離散的な分布を示している。個体に付与される確信度の値が、一定の値に集中する傾向にあることが判る。

⑤ SSEモデル(図-3(d))では、個体の分布状態は連続性を持ち、評価対象データの分布は正規性を示している。ファジーセットモデルに比べて、評価対象データとトレーニングデータのグループ間の分離性が認められる。

以上のような個体の分布状態の違いが、斜面安定性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、さらに検討を進める。

(2) 斜面安定性評価図の作成

4種類の評価モデルを用いて作成した斜面安定性評価図をそれぞれ写真-1(a)~写真-1(d)に示した。評価図上の色の意味は表-6に記載した。いずれも等高線が密になっている急崖地が一様に危険地帯として

表-6 斜面安定性評価図の凡例

(写真-1参照)

評価図上の色	説明
赤色	トレーニングデータのうち、「危険性・有」として判別されたもの
青色	トレーニングデータのうち、「危険性・無」として判別されたもの
緑色	評価対象データのうち、「危険性・有」として判別されたもの
白色	評価対象データのうち、「危険性・無」として判別されたもの

判定されている。さらに細部を見るとそれぞれの評価図上には危険箇所の違いが見られる。評価モデルの構成の違いに伴って現れたものである。

次章において、この違いを比較・分析するとともに、複数の斜面安定性評価モデルの活用方法について検討する。

7. 斜面安定性評価モデルの活用方法

(1) 斜面安定性評価図の対比較

写真-1(a)~写真-1(d)で示した斜面安定性評価図の違いを定量的に評価する指標として、式(17)の一致率を定義する。

$$\text{一致率} = \frac{Q(A \cap B)}{R(A \cup B)} \quad (\%) \quad (17)$$

ここに、

$Q(A \cap B)$: 評価モデルAと評価モデルBともに崩壊危険性・有と判定された画素数(積集合)

$R(A \cup B)$: 評価モデルAと評価モデルBそれぞれにおいて崩壊危険性・有と判定された画素数(和集合)

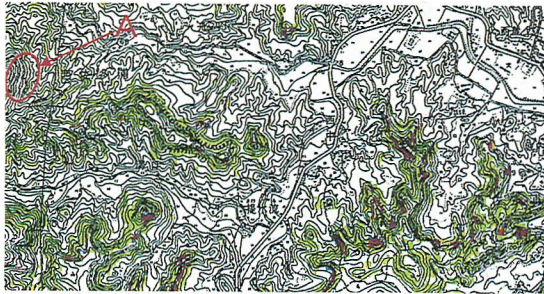
写真-1(a)~写真-1(d)に示した斜面安定性評価図をそれぞれ対比較し、全ての組合せ事象について一致率を計算した結果を図-4に示す。図-4と写真-1(a)~写真-1(d)から次のことが読みとれる。

a) ファジーセットモデルとSSEモデルについて

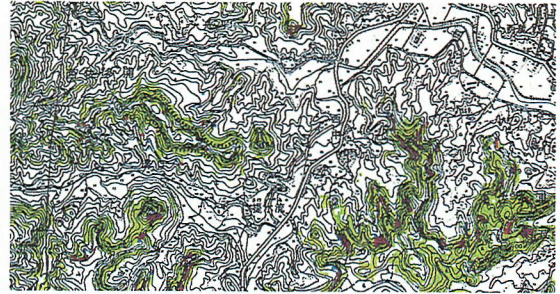
この2つのモデルを用いた斜面安定性評価図の一致率が最も高く、78%を示す。写真-1(b)と写真-1(d)を見ると、ファジーセットモデルとSSEモデルから作成されるそれぞれの斜面安定性評価図の類似性が認められる。

b) ベイジアンモデルについて

このモデルの斜面安定性評価図と、ファジーセットモデルおよびSSEモデルの斜面安定性評価図との一



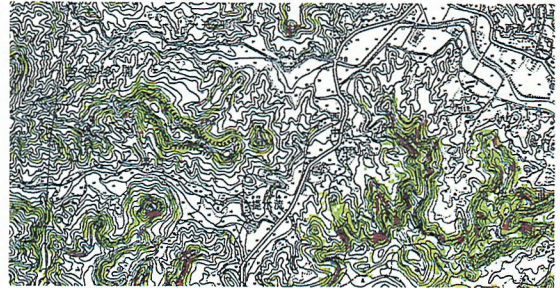
(a)ベイジアンモデル



(b)ファジーセットモデル



(c)確信度モデル



(d)SSEモデル

写真-1 斜面安定性評価図の比較

致率は、それぞれ74%および67%を示す。しかし、ファジーセットモデルおよびSSEモデルの解の一致率(78%)には及ばない。写真-1(a)の斜面安定性評価図上に指示した「A」の箇所は、ファジーセットモデル、確信度モデル、SSEモデルいずれも危険性・有として判定されているが、ベイジアンモデルでは、危険性・無と評価されている。この箇所は急崖を成しており、植生は繁茂しているものの崩壊の危険性の高い箇所であることが現地調査およびステレオ空中写真からも判読されている。したがって、ベイジアンモデルの斜面安定性評価図においては、崩壊危険箇所を見落すことになる。

c) 確信度モデルについて

このモデルの斜面安定性評価図と、他の3種類の評価モデルから作成される斜面安定性評価図とを比較すると、いずれも65%以下という低い一致率を示す。これは、写真-4(c)からも判るように、他の評価モデルに比べて、評価領域内の中央より東側の領域が崩壊危険性・有として判定される画素が、かなり多いことに起因する。一方、評価領域内の中央より西側の領域では、確信度モデルの斜面安定性評価図は、他の評価モデルの斜面安定性評価図と比較して顕著な違いはない。確信度モデルを適用する際には、他の評価モデルに比べて、局所的に解の違いが大きく現れることに注意を要すると言える。

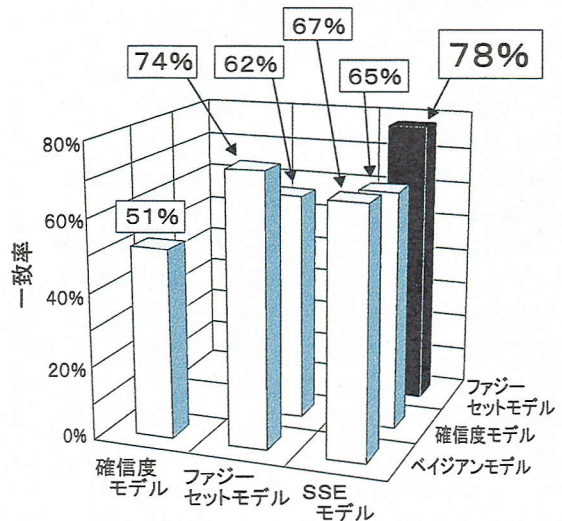


図-4 一致率の比較

なお、本研究における確信度モデルでは、素因毎の確信度のうち、最大確信度を最終評価値として採用したが、加重平均確信度を用いることも考えられる。しかし、この場合、極端に小さい確信度に影響を受け、崩壊危険箇所を見逃す可能性もある。最大確信度あるいは加重平均確信度といった「確信度の違い」に関する評価結果に及ぼす影響については、確信度モデルの

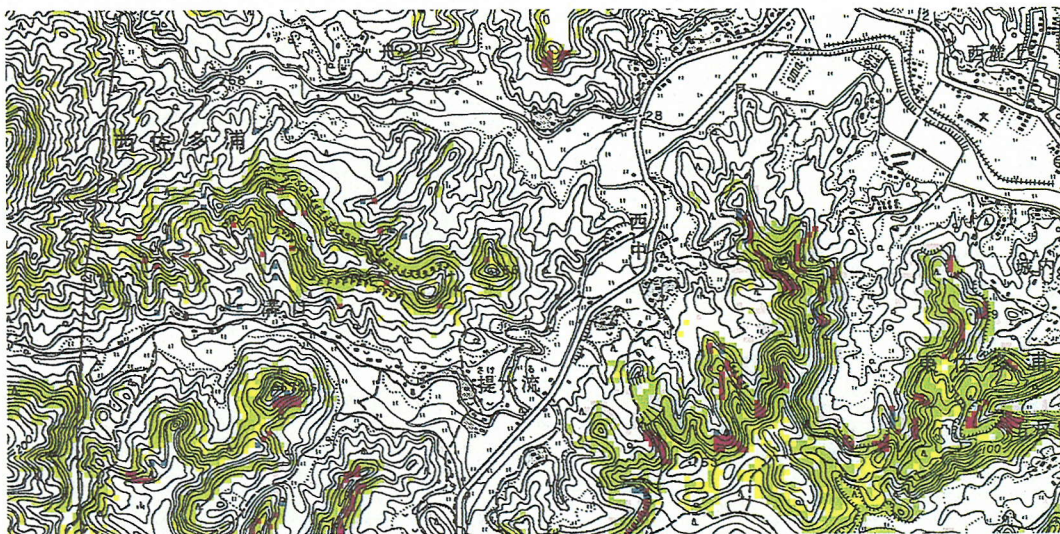


写真-2 写真-1(b)と写真-1(d)の差画像

- 注1) 写真-1(b)：ファジーセットモデルを用いて作成した斜面安定性評価図
 写真-1(d)：SSEモデルを用いて作成した斜面安定性評価図
 2) 差画像の解釈表：表-6参照

評価精度の問題として、本研究の範囲には含めず、今後の課題としたい。

(2) 斜面安定性評価モデルの選定

前述までの分析を通して、4つの種類の異なる斜面安定性評価モデル別に作成される斜面安定性評価図の違いを明らかにすることができた。しかし、斜面安定性評価を実施する利用者側の立場に立つと、いったいどの斜面安定性評価モデルを採用したらよいのかといった問題が派生する。

この問題に対して、ここでは、以下に示す2つの制約条件を設定した上で、危険箇所評価に有効と判断できる斜面安定性評価モデルを絞り込むこととする。

条件1：的中率が高いこと（判別精度の高さ）

条件2：一致率が高いこと（解の類似性）

条件1はトレーニングデータに対する同定精度、いわゆる「斜面安定性評価モデルそのものの判別精度」が高いことを意味する。前掲の表-5からベイジアンモデル、確信度モデル、ファジーセットモデル、SSEモデルの的中率は、それぞれ80.8%、78.9%、80.0%および81.1%であった。この結果と、写真-1に対する前述までの分析結果を加味すると、確信度モデル以外は、いずれの斜面安定性評価モデルも採用候補になると判断できる。

条件2は、トレーニングデータが同一であれば、いかなるモデルを使用しても、理想的には評価結果は同一になることが「必要条件」とであるといった考えに基づく。一致率が高い組み合わせは、図-3からファジ

表-7 差画像の標準解釈表

	面状の組合せ (崩壊危険性の有無)		差画像の一般解釈	ケース名	差画像 上での 色付け
	評価モデル1	評価モデル2			
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。 解が同じであることから、評価者にとって「安全側評価領域」。	ケース1	赤
		無	評価モデル1において崩壊危険性・有と判定された領域。 解が異なることから、評価者にとって「危険側評価領域」。	ケース2	薄青
	無	有	評価モデル2において崩壊危険性・有と判定された領域。 解が異なることから、評価者にとって「危険側評価領域」。	ケース3	茶
		無	崩壊「再発生」の可能性の低い領域。	ケース4	青
評価対象データ	有	有	崩壊の危険性の高い領域。 解が同じであることから、評価者にとって「安全側評価領域」。	ケース5	緑
		無	評価モデル1において崩壊危険性・有と判定された領域。 解が異なることから、評価者にとって「危険側評価領域」。	ケース6	黄
	無	有	評価モデル2において崩壊危険性・有と判定された領域。 解が異なることから、評価者にとって「危険側評価領域」。	ケース7	ピンク
		無	崩壊の危険性のない領域。	ケース8	白

注1) 本研究では、評価モデル1：ファジーセットモデル、評価モデル2：SSEモデルとして上記解釈表の内容が適用される。

イセットモデルとSSEモデルであることが判る。

以上の分析結果から、条件1と条件2を同時に満たすものとして、ファジーセットモデルとSSEモデルが条件に合致する斜面安定性評価モデルと言える。次項では、さらに、これらの2つの斜面安定性評価モデ

ルの斜面安定性評価図の違いを抽出した「差画像」を「最終成果図」として提示し、その解釈の内容について検討する。

(3) 差画像の作成

写真-1の斜面安定性評価図は、ミニマックス2群判別を通して表-5に示した4つの情報に区分されている。したがって、上記の検討で選定されたファジーセットモデル(写真-1(b))とSSEモデル(写真-1(d))の斜面安定性評価図の違い抽出する場合、表-7のような8種類の組合せ事象となる。この組合せに従って作成した差画像を写真-2に示す。

(4) 差画像の解釈

表-7のケース名に従って差画像の解釈とその有用性について考察する。

a) トレーニングデータに対する解釈

ケース1~ケース4まではトレーニングデータに対する解釈となる。

①ケース1(赤色:207画素):いずれの斜面安定性評価モデルにおいても崩壊危険性・有と判定された画素である。この画素は既崩壊地であり、トレーニングデータとして設定したものである。シラス斜面の既崩壊箇所は、「崩壊再発生」の可能性のある領域として指摘されている⁹⁾。したがって、このケースに該当する画素は、特に、シラス侵食崩壊の周期性を念頭におき、継続的に注意していく候補領域となる。斜面安定性評価モデルの解が一致することから、評価者にとっては、「安全側の評価領域」として解釈される。

②ケース2(薄青色:8画素):ファジーセットモデルを使用した場合のみ崩壊危険性・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、ファジーセットモデルを使用したことによって、本来の危険性の有る画素として正しく判別されたことになる。しかし、SSEモデルでは、崩壊危険性・無として判定される画素であることから、斜面安定性評価モデルの解が異なる領域として、現地調査時の留意事項となる。モデル解が異なることから、評価者にとっては「危険側の評価領域」として解釈される。

③ケース3(茶色:8画素):SSEモデルを使用した場合のみ崩壊危険性・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、SSEモデルを使用したことによって、本来の危険性の有る画素として正しく判別されたことになる。しかし、ファジーセットモデルでは、崩壊危険性・無として判定される画素であることから、ケース2と同様に斜面安定性評価モデルの解が異なる領域として、現地調査時の留意事項となる。ケース2と同様にモデル解が異

なることから、評価者にとって「危険側の評価領域」として解釈される。

④ケース4(青色:42画素):いずれの斜面安定性評価モデルにおいても崩壊危険性・無と判定された画素である。

トレーニングデータの土地の性状と異なる領域であることを示唆するものであり、崩壊タイプが異なることも考えられる。また、斜面安定性評価モデルから得られる解としては、「崩壊再発生」の可能性の低い箇所として解釈できるが、トレーニング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。

以上までは、トレーニングデータに対する解釈である。さらに、評価対象データに対するケース5~ケース8について考察を進める。

b) 評価対象データに対する解釈

⑤ケース5(緑色:2,609画素):いずれの斜面安定性評価モデルにおいても崩壊危険性・有と判定された画素である。トレーニングデータの土地の性状と類似する箇所であり、崩壊の危険性が最も高い箇所として評価できる。斜面安定性評価モデルの解が一致することから、評価者にとっては「安全側の評価領域」として解釈される。

③ケース6(黄色:446画素):ファジーセットモデルを使用した場合のみ崩壊危険性・有と判定された画素である。しかし、SSEモデルでは、崩壊危険性・無として判定される画素であることから、評価者にとっては、「危険側の評価領域」となる。

④ケース7(ピンク色:395画素):SSEモデルを使用した場合のみ崩壊危険性・有と判定された画素である。しかし、ファジーセットモデルでは、崩壊危険性・無として判定される画素であることから、評価者にとっては、「危険側の評価領域」となる。

⑤ケース8(白色:12,359画素):いずれの斜面安定性評価モデルにおいても崩壊危険性・無と判定された画素である。斜面安定性評価モデルから得られる解としては、トレーニングデータの土地の性状と異なる領域であり、崩壊発生の可能性の低い箇所として解釈できる。

以上の評価は、図-1で示した分析プロセスを通して選定された2種類の斜面安定性評価モデルから得られる評価図を組み合わせることによってのみ可能であることは言うまでもない。差画像を活用して「崩壊危険側・安全側評価」といった2つの視点から多角的に評価を展開できる点が本研究の特色である。

しかし、表-7で示したケースに該当する差画像上の画素について、相対的な「崩壊危険度」を評価することはできない。あくまでもトレーニングデータと土地の性状が類似する箇所を判定し上で、支援情報を提

供し、解釈するといった適用範囲に限られる。評価図の違いを比較する際には、個体に付与されるスコア値の差についてより詳細に定量分析を進めることも考えられるが、この点については、それぞれの斜面安定性評価モデルの評価精度向上の研究に委ねることとし、本研究の範囲には含めず今後の課題とする。

8. まとめ

(1) 研究の成果

本研究は、代表的な複数の斜面安定性評価モデルから得られる評価結果を比較するとともに、斜面安定性評価モデルを活用する上での戦略を提案したものである。本研究の内容と成果は、次の3点にまとめられる。

①複数の斜面安定性評価モデル（ベイジアンモデル、確信度モデル、ファジーセットモデル、SSEモデル（数量化Ⅱ類））の評価結果を比較した上で、種類の異なる斜面安定性評価モデルの活用戦略を提示することの必要性を指摘した。

②複数の斜面安定性評価モデルから得られる斜面安定性評価図の対比較・分析を通して、ファジーセットモデルとSSEモデルの2つの斜面安定性評価モデルが有効と判断された。

③さらに、これら2種類の斜面安定性評価モデルから得られる斜面安定性評価図の違いを抽出した「差画像（写真-2）」を「最終成果図」として提示し、「崩壊危険側・安全側」といった2つの視点から評価が展開できることを示した。この差画像と解釈の内容（表-7）は、崩壊地や急傾斜地の調査、崩壊防止計画等の事業計画策定時の支援情報として有用性の高いことを示した。

空間情報の融合利用に関する手法論的研究は数多くある。しかし、モデルから得られる解は、モデルが成立する上での前提・仮定条件に基づいており、非線形モデル等では内部構造がブラックボックスであることが問題点としてよく指摘される。つまり、実際の意思決定の場面に際して、一意的に得られるモデル解だけでは、利用者にとって実際に活用できる情報になっていないことが多い。GIS(Geographical Information Systems)やリモートセンシングといった空間情報を扱う技術の活用に関する研究では、この点に関する議論が不足していることを認識する必要がある。

本研究の内容は、このような問題に対する一つの対策を示したものでもあり、空間情報の融合利用技術における政策意思決定支援に関わる研究分野の展開にも寄与できるのではないかと考えている。

(2) 今後の展開

今後の研究の展開として次の3点を考えている。

a) 他地域における適用事例の蓄積

本研究では、ファジーセットモデルとSSEモデルが有効であることを示したが、崩壊形態が異なる他地域においてはこの限りではない。今後は本研究の分析アルゴリズム（図-1）を用いて、他地域における適用事例を積み重ねていくことが課題となる。

b) 新たな斜面安定性評価モデルの評価結果の比較

筆者らは、本研究で取り上げた斜面安定性評価モデル以外にも、確率理論に基づく種々の評価モデルの構築を進めている。今後、新たに構築されるこれらの斜面安定性評価モデルを加え、得られる評価精度について比較・分析することは興味深い課題となる。この分析においても本研究で提示した差画像の作成とその解釈に至る一連の分析アルゴリズム（図-1）が役立つ。

c) 崩壊危険箇所の評価精度の向上

本研究では、「トレーニングデータが同一であれば、理想的には評価結果が完全に一致することが必要条件である」といった考えの下に、一致率と的中率を指標として、崩壊危険箇所評価に有効と考えられる斜面安定性評価モデルを選定した。的中率は、斜面安定性評価モデルそのものの判別精度を評価する指標ではあるが、的中率が高くとも、それぞれの斜面安定性評価モデルから作成される斜面安定性評価図間の一致率は、必ずしも高いとは限らない。したがって、最終的に作成される差画像上で評価結果が一致する画素（表-7のケース1とケース5）の信頼性を高めるためには、「一致率」と「的中率」の両者を同時に高める必要がある。これを実現するためには、今後の課題として、トレーニングデータを構成する画素群から、性質の異なる画素を判定・除去し、トレーニングデータの一様性を高めるといった前処理等を適用することが考えられる²⁰⁾。

9. むすび

斜面崩壊の予知・予測に完全な解はありえない。シラス特殊土で構成される斜面の危険性評価に関わる研究の歴史は古く、多くの成果が蓄積されている^{7)~11)}。本研究の内容は、そのうちのほんの一部を研究対象としたものであるが、関連方面の研究に何らかの形で寄与できれば幸いである。

謝辞：本研究の内容は、（財）前田記念工学振興財団からの研究助成を受けて実施した成果の一部である。また、データの整理・画像処理等に際して、亀井慎一郎君（東京理科大学理工学部土木工科大学院）の協力を得た。関係各位に記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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用化について, 土木学会論文集, No. 415/VI-12, pp. 71-80, 1990年3月.
- 2) 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. 11-20, 1992年3月.
- 3) 大林成行, 小島尚人, 藤井克史: 衛星マルチスペクトルデータを適用した地すべり危険箇所の評価精度の向上, 土木学会論文集, No. 534/VI-30, pp. 173-184, 1996年3月.
- 4) Chung, C.F., Fabbri, A.G. and van Westen, C.J.: Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. In Carrara, A. and Guzzetti, F., eds., *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 107-133, 1995.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 北村良介, 高橋史哉, 古賀省三, 城本一義: しらす地盤における不飽和浸透挙動の現地計測について, 土木学会第50回年次学術講演会講演集, III-67, pp. 134-135, 1995年9月.
- 10) 山田満秀, 北村良介: しらす斜面の安定解析手法の開発, 土木学会第50回年次学術講演会講演集, III-402, pp. 804-805, 1995年9月.
- 11) 藤元隆彦, 笹原克夫, 網木亮介: しらす斜面における崩壊発生位置の地形学的検討, 地すべり学会研究発表講演集, Vol. 33, pp. 17-20, 1994年.
- 12) 科学技術庁防災科学技術研究所, (社)日本リモートセンシング学会: リモートセンシングの地すべり災害解析への応用に関する調査報告書, A4版, 53頁, 1995年3月.
- 13) Chung, C.F. and Fabbri, A.G.: The representation of geoscience information for data integration, *Nonrenewable Resources, Oxford University Press*, Vol.2, No.2, pp.122-139, 1993.
- 14) Zezere, L., Ferreira, A.B. and Reis, E.: Modeling landslide hazard north of lisbon, portugal, using favourability functions, *Proceedings of the International Association for Mathematical Geology(IAMG)*, poster session, No.4, pp.254, 1998.10.
- 15) 鹿児島大学: 1993年鹿児島豪雨災害の総合的調査研究報告書, 全229頁, 1994年3月.
- 16) Obayashi, S., Chung, C.F., Kojima, H. and Fabbri, A.G.: Sensitivity analysis of quantitative prediction model based on map overlays: An application to landslide hazard zonation, *Proceedings of the 25th Japanese Conference on Remote Sensing, The Remote Sensing Society of Japan*, pp. 287-288, 1998.11.
- 17) Shortliffe, E.H. and Buchanan, B.G.: A model of inexact reasoning in medicine, *Mathematical Biosciences*, Vol.23, pp.351-379, 1975.
- 18) Heckerman, D.: Probabilistic interpretations for MYCIN's certainty factors, in Kanal, L.N., and Lemmer, J.F., eds., *Uncertainty in artificial intelligence*, New York, Elsevier, pp.167-196, 1986.
- 19) Zadeh, L.A.: Fuzzy sets, *IEEE Information and Control*, Vol.8, p.338-353, 1965.
- 20) 小島尚人, 大林成行, 山森英俊: ニューラルネットワークを導入した土地分級評価精度の向上, 土木学会論文集, No. 534/VI-30, pp. 223-233, 1996年3月.

(1999. 1. 28 受付)

COMPARISON OF THE ACCURACY OF THE SLOPE STABILITY EVALUATION MODELS AND ITS PRACTICAL APPLICATION

Shigeyuki OBAYASHI, Hirohito KOJIMA and Chang-Jo F. Chung

The objective of this study is to propose a strategy for the application of the slope stability evaluation models for risk prevention plans. One of the difficulties is to interpret the prediction results derived from "different models". In this contribution, four prediction models were considered: (1) a Bayesian probability model, (2) a Certainty factor model, (3) a Fuzzy set theory mode, and (4) a SSE model based on the quantification method of Type-II. As the results, it is indicated that: (a) the "SSE model" and "Fuzzy set theory model" are particularly effective for evaluating the hazardous area in the study area; and (b) as a final product, "Risky-side" and "Safe-side" assessment sub-areas are delineated from the difference map (termed "DIF-map") made by those selected two models.