

シラス自然斜面の崩壊誘因推定支援を目的とした 衛星熱赤外域情報の活用方法の提案

小島尚人¹・大林成行²・北村良介³

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 (株) 国土情報技術研究所 代表取締役社長 (〒150-0002 東京都渋谷区渋谷 1-16-14)

³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)

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、崩壊誘因の広域逆推定問題への衛星熱赤外域情報の活用方法について提案したものである。地理情報と衛星熱赤外域情報を素因（説明変量）とし、降雨（誘因）に伴って発生した崩壊地データを目的変量とした。誘因を未観測情報（潜在変量）とし、共分散構造分析法を介して、これを逆推定する。1) ケース1：地理情報のみ使用、2) ケース2：地理情報+衛星熱赤外域情報、といった2つのケースを設定し、誘因影響図を比較した。検討の結果、ケース2に対応するパスモデルの適合度が向上し、衛星熱赤外域情報の有用性が裏付けられた。さらに、衛星熱赤外域情報の使用の有無に伴う誘因影響図上の違いを抽出した「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した。

Key Words : sirasu slope-stability evaluation, inverse estimation of trigger factor, satellite thermal infrared data, geographical information, analysis of covariance structures, quantification method

1. はじめに

亜熱帯地域に属する南九州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、梅雨と台風の来襲が重なる6月～9月の雨季には、広域に渡ってシラス斜面崩壊が頻発している^{1),2)}。斜面崩壊予知の目的は、「いつ、どこで、どのような規模」で発生するかを事前推定することであり、古くから多くの研究が進められているが、未だ検討すべき課題は多く残されている。このような状況の中、筆者らは、シラス斜面が「どこで、どのような規模」で発生するか、すなわち、「広域崩壊危険箇所評価支援」を目的とし、地形や地質、土壌等の各種地理情報と衛星リモートセンシングデータ（以下、衛星データ）を融合し、様々な崩壊危険箇所評価アルゴリズムを構築し、多くの適用実績を積み重ねてきた^{3),4)}。

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シラス地盤の強度低下をもたらす⁵⁾。筆者らはこの点に着目し、「衛星熱赤外域情報」が素因の一つとして、シラス自然斜面の広域崩壊危険箇所評価に有用であることを示してきた⁶⁾。衛星熱赤外域情報の新たな活用分野の拡張といった点においても意義ある成果と評価されている。

しかし、これまでの研究では、斜面崩壊の引き金となっている「降雨」や「地震」といった誘因と各種素因との相関関係があることを前提として、素因のみを入力情報として崩壊危険箇所評価モデルを構築してきた。これは、広域にわたって画素単位で誘因を計測し、評価モデルの入力情報とすることが困難なことに起因する。

この問題に対して誘因を未観測情報（潜在変量）として扱い、共分散構造分析法をベースとしてこれを逆推定するモデル、いわゆる ACOS モデル (Analysis of COvariance Structures model^{付録1)}) を構築し、誘因影響図 (TFI map : Trigger Factor Influence map) を作成するとともに、その活用方法を示した⁷⁾。

以上の研究では、シラス自然斜面の崩壊危険箇所評価支援を最終目標として、以下の2つの点を明らかにすることが主眼であり、それぞれ個別に検討を進めた。

- ① 素因としての衛星熱赤外域情報の有用性⁶⁾
- ② 誘因影響の広域逆推定の可能性⁷⁾

したがって、誘因影響を逆推定する場合に「衛星熱赤外域情報がどの程度寄与するのか」といった問題については、今後の課題として残されていた。誘因影響の逆推定精度の向上が期待できるだけでなく、衛星熱赤外域情報の適用分野の拡張面において意義ある検討課題となる。

以上の研究経緯のもとに、本研究では、誘因影響の

広域逆推定問題における衛星熱赤外域情報の適用可能性について検討した。さらに、衛星熱赤外域情報の使用の有無に伴う誘因影響図上に現れる違いを抽出した「差画像」を最終成果図として提示し、「崩壊危険側・安全側」といった技術者支援型の評価が展開できることを示している。

2. 本研究の前提条件と特色

(1) 研究の前提条件

a) 斜面崩壊の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、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、筆者らは、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。本研究の内容はこれらの検討にも寄与する。

b) 本研究で使用する誘因影響逆推定モデル

前述したとおり、本研究では筆者らが開発した崩壊誘因逆推定モデル、いわゆる ACOS モデルをベースとして検討を進める。ACOS モデルは、共分散構造分析法をベースとし、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観測変数である素因とし、潜在変数（誘因）の間で定義される「測定方程式」から誘因影響を画素単位で逆推定する。これを画像化したものが「誘因影響図」となる。モデルそのものの詳細については参考文献7)に詳述してあるので割愛する。

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⁹⁾。

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、「表層剝離、表層滑落、表層落下」の3つに分類したものや¹⁰⁾、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¹¹⁾。ACOS モデルを用いて、これら崩壊タイプ別に誘因影響の逆推定結果を比較するといったアプローチも想定できるが、分析結果の物理的意味解釈が複雑となり、比較結果の信頼性の問題が派生する。

そこで、本研究では、まず第1に「自然シラス斜面」を検討対象とした上で、誘因影響の逆推定問題における衛星熱赤外域情報の適用性について検討する。

(2) 研究の特色

これまで斜面崩壊危険箇所評価問題に衛星熱赤外域情報を適用することについて大きな期待が寄せられていたが、未開拓の分野となっていた。第1章でも述べたとおり、この課題に対して筆者らはシラス自然斜面の崩壊危険箇所評価における衛星熱赤外域情報の有用性を示してきた⁹⁾。

本研究の内容は、さらにステップを進めたものであり、今までの研究と比較して以下の2つの点において新規性がある。

a) 誘因影響逆推定における衛星熱赤外域情報の適用

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¹²⁾。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¹³⁾。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、これが崩壊誘因の一つになると言える。このことが、まさに誘因影響の広域逆推定問題に衛星熱赤外域情報を適用しようとする着想に至った経緯である。従来の研究には見られない衛星熱赤外域情報の活用方法として新規性があると考えている。

b) 衛星熱赤外域情報の活用方法の提示

本研究では、誘因の広域逆推定問題における衛星熱赤外域情報の有用性を示すだけでなく、衛星熱赤外域情報そのものの活用方法を提示している。具体的には、「衛星熱赤外域情報を使用した場合とそうでない場合の誘因影響図」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。

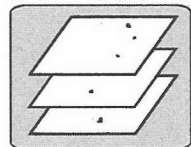
以上の分析手順（図-1）は、標準化されており、衛星熱赤外域情報を活用した技術者支援型の誘因影響分析アルゴリズムとして役立つ。

シラス自然斜面の崩壊誘因影響の推定支援は言うまでもなく、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点から見て本研究のアプローチは意義あるものと考えている。

STEP 1: 素因情報と
トレーニングデータの準備



既崩壊地 (観測情報)
(トレーニングデータ)



誘因: 未観測情報

潜在変数

逆推定

STEP 2: 素因選定

相関分析
(数量化Ⅱ類, Ⅲ類)

共分散構造分析法

STEP 3: 誘因影響図の比較・分析

ケース 1: 地理情報のみ使用

斜面崩壊危険
箇所評価図

誘因影響図
(逆推定)

ケース 2: 地理情報 +
衛星熱赤外域情報

斜面崩壊危険
箇所評価図

誘因影響図
(逆推定)

STEP 4: 差画像の作成と解釈

解釈表

解釈

差 画 像
(最終成果図)

試行検討 (感度分析): 素因分析、トレーニングデータの再選定等

図-1 誘因逆推定アルゴリズム (衛星熱赤外域情報の活用戦略)

表-1 本研究で使った素因

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 壤	地形分類	植生指標	熱赤外域情報	
砂、礫	粗粒風化火山	中起伏火山地	レベル 1	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	レベル 2
泥岩	乾性褐色森林土	シラス台地	レベル 3	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	レベル 4
シラス	細粒灰色低地土	崖	レベル 5	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	レベル 6
安山岩質岩石	灰色低地土		レベル 7	レベル 7	レベル 7
	グライ土		レベル 8	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 9
			レベル 10	レベル 10	レベル 10
			レベル 11	レベル 11	レベル 11
			レベル 12	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	現存植生
以上~未満 (m)	北	以上~未満	以上~未満 (m)	(個)	スタジア群落
0~50	北北東	0~5°	0~5	0	ミズバネスギ群落
50~100	北東	5~10°	5~10	1	ササ、ヒメ、ササ群落
100~150	東北東	10~15°	10~15	2	モウソウチク林
150~200	東	15~20°	15~20	3	畑地雑草群落
200~250	東南東	20~25°	20~25	4	水田雑草群落
250~	東南	25~30°	25~30	5	緑の多い住宅
	南南東	30~35°	30~35		常緑果樹園
	南	35~40°	35~40		
	南南西				
	南西				
	西南西				
	西				
	西北西				
	北西				
	北北西				
	平坦				

3. 研究の構成

本研究の構成を図-1に示す。衛星熱赤外域情報を活用した誘因影響の分析アルゴリズムとなっている。

(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

本研究で使った素因データを表-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、斜面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である人工衛星 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-ROW: 38であり、ノイズのない良好なデータを選定した。この衛星データから「衛星熱赤外域情報」と「植生指標^{付録2)}」を作成し、これらを素因として使用した。

d) トレーニングデータ (判別基準地: 既崩壊地)

本研究では、1993年8月の集中豪雨によって崩壊が

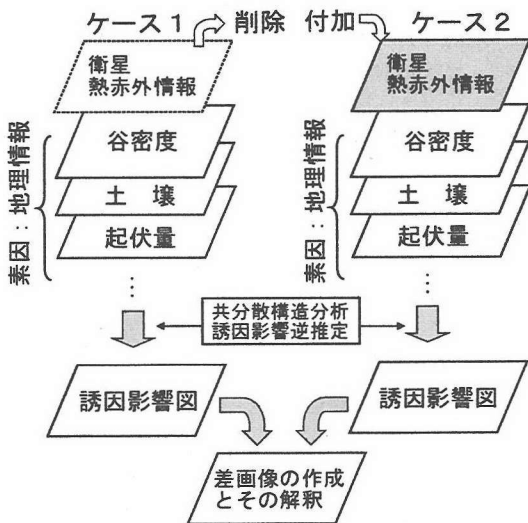


図-2 検討ケースの設定

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ACOS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。

なお、図-1に試行検討過程として記載したとおり、専門家の知見等を加味して、未崩壊地をトレーニング領域として設定するといった、いわゆる「規範型トレーニングデータ」の設定方法についても検討できるが、ACOSモデルの感度分析精度と分析範囲の拡張問題として、本研究の範囲には含めず、今後の課題とする。

(2) STEP2: 素因分析 (4章)

図-1で示したACOSモデルでは、あらかじめ設定した素因(表-1)のうち、「分析に使用する素因の決定問題」と「素因を構成するカテゴリ分析」に数量化Ⅱ類と数量化Ⅲ類を導入している。

数量化Ⅲ類を通して素因間の相関を計算し、数量化Ⅱ類の偏相関係数を併用して、独立性の高い素因の高い組を見い出すとともに、以降の分析に使用する素因を選定する。詳細は4章において述べる。

(3) STEP3: 誘因影響の逆推定 (5章)

自然シラス斜面の崩壊危険箇所評価における誘因影響の逆推定支援を目的として、衛星熱赤外域情報の適用可能性を検討する上で、図-2に示すように2つの検討ケースを設定した。

ケース1: 地理情報のみ使用

ケース2: 地理情報+衛星熱赤外域情報

それぞれの検討ケース毎に「斜面崩壊危険箇所評価

表-2 素因間の相関係数

	熱赤外	現存植生	起伏量	傾斜区分	植生指標	標高	斜面方位	土壌	表層地質	地形分類
熱赤外	○									
現存植生	○ 0.554	○								
起伏量	○ 0.545	○ 0.664	○							
傾斜区分	× 0.526	○ 0.616	○ 0.962	○						
植生指標	○ 0.416	○ 0.452	○ 0.393	○ 0.371	○					
標高	○ 0.579	○ 0.630	○ 0.678	○ 0.653	○ 0.570	○				
斜面方位	○ 0.501	○ 0.285	○ 0.267	○ 0.294	○ 0.220	○ 0.195	○			
土壌	○ 0.559	○ 0.073	○ 0.611	○ 0.583	○ 0.390	○ 0.590	○ 0.290	○		
表層地質	× 0.586	○ 0.685	○ 0.680	○ 0.664	○ 0.480	○ 0.797	○ 0.355	○ 0.653	○	
地形分類	○ 0.524	○ 0.533	○ 0.656	○ 0.632	○ 0.421	○ 0.649	○ 0.228	○ 0.613	○ 0.613	○
谷密度	○ 0.552	○ 0.109	○ 0.208	○ 0.222	○ 0.113	○ 0.165	○ 0.088	○ 0.126	○ 0.101	○ 0.086

図と誘因影響図」を作成する。共分散構造分析法に言うパス図上のパスウェイト(重み)を用いて、測定方程式から誘因の影響を画素単位で逆算し、これを画像化したものが誘因影響図となる。

さらに、ケース1とケース2の違い、すなわち、衛星熱赤外域情報の使用の有無に伴って、誘因影響図と斜面崩壊危険箇所評価図上にどのような違いが現れるのかについて比較・分析する。詳細は5章において述べる。

(4) STEP4: 衛星熱赤外域情報の活用戦略 (6章)

衛星熱赤外域情報の使用の有無によって現れる誘因影響の違いを抽出した「差画像」を作成する。この差画像とそれに対する解釈表を提示する点も本研究の特色となる。

4. 素因分析

本章では、誘因影響図の作成に使用する素因データの選定問題について説明するとともに、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

ACOSモデルでは、斜面崩壊危険箇所評価図と誘因影響図を作成する際に使用する素因を決定する上で、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⁷⁾。素因間の独立性を確保しておくことは、以降の分析を進める上で重要な前処理に位置付けられる。

表-1に示した素因データを用いて、数量化Ⅲ類を介して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合せ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

表-3 条件付き確率

素因データ	頻度	条件付き確率 ($\times 10^{-2}$)	素因データ	頻度	条件付き確率 ($\times 10^{-2}$)
衛星熱赤外域情報			北	836	0.12
レベル1	382	0.00	北北東	516	0.19
レベル2	603	0.00	北東	359	0.18
レベル3	957	0.00	東	507	0.39
レベル4	1216	0.16	東南東	524	0.57
レベル5	990	0.32	南	450	1.11
レベル6	735	0.41	南南東	553	2.17
レベル7	499	0.40	南東	437	0.00
レベル8	162	0.00	南南西	447	1.34
レベル9	403	1.49	南西	410	0.24
レベル10	355	1.41	西南西	241	0.41
レベル11	337	1.48	西	240	0.00
レベル12	331	1.51	西北西	288	0.35
スタジア群落	1053	0.93	西	396	0.25
ミナベイ・スライ群落	553	3.62	北西	408	0.25
ミナベイ・スライ群落	3546	0.20	北北西	229	0.44
モウソウテタ林	42	0.00	北西	97	0.00
湿地草群落	34	0.00			
水田草群落	1439	0.00			
緑の多い住宅	459	0.00			
高緑率地域	10	0.00			
起伏量			地形要因		
(以上～未満: m)			植生要因		
0～5	1266	0.00	被覆要因		
5～10	1757	0.00			
10～15	1753	0.40			
15～20	1203	0.83			
20～25	657	1.22			
25～30	324	3.09			
30～35	143	1.38			
35～40	31	0.00			
植生指標					
レベル1	40	2.12			
レベル2	87	0.23			
レベル3	216	1.18			
レベル4	378	0.49			
レベル5	513	0.31			
レベル6	962	0.09			
レベル7	1230	0.34			
レベル8	1309	0.31			
レベル9	1068	0.61			
レベル10	497	0.76			
レベル11	67	2.19			
レベル12					
標高					
(以上～未満: m)					
0～50	2060	0.10			
50～100	2765	0.29			
100～150	1623	1.29			
150～200	556	1.08			
200～250	105	0.00			
250～	29	0.00			
			谷密度		
			0 (無)	5077	0.63
			1	684	0.58
			2	1047	0.10
			3	289	0.00
			4	36	0.00
			5	5	0.00
			トレーニングデータ	37	
			評価対象領域	7101	

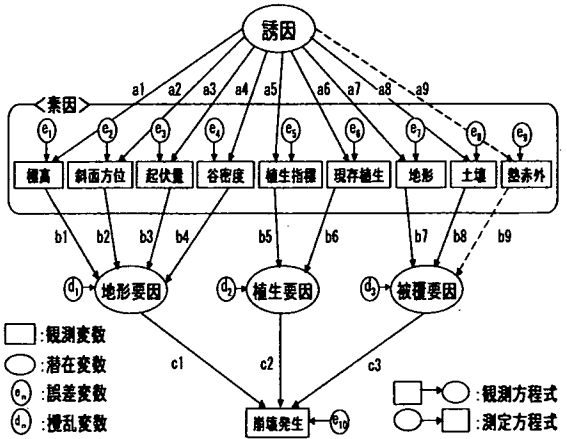


図-3 衛星熱赤外域情報の使用の有無を考慮したパス図

$$S_q = P \{ T_q | C_{1j}, C_{2j}, \dots, C_{nj} \} \quad (1)$$

また、素因毎の条件付き確率は次式で表される。

$$P(T_q | C_{ij}) = Nd / N_j \quad (2)$$

ここに、

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

N_j : i 番目の素因におけるカテゴリ j の画素数

ACOS モデルにおけるカテゴリ分析は、この条件付き確率を用いる。

各素因を構成するカテゴリに属する画素に付与される条件付き確率を統合して、画素単位で評価値 S_q が計算される。 $P(T_q | C_{ij})$ を統合する際のフレームワークとして、ベイジアンモデル、ファジーセットモデル、確信度モデル等といった様々なモデルが構築され、理論背景とともに、十分な適用実績を有している^{15), 16)}。なお、Favorability 理論そのものの詳細については、参考文献 14) に記載されているので本文では割愛する。

表-3 に式 (1) によって計算した条件付き確率 $P(T_q | C_{ij})$ の値を示す。表-3 から次の 2 つの点が読みとれる。

- ① 熱赤外域情報のカテゴリを見ると「レベル 8 以上」の条件付き確率の値が高い。
- ② 斜面方位のカテゴリでは「南、東南東、南東」の条件付き確率の値が高い。

これらの結果は、地表面温度が高くなるシラス自然斜面において風化作用が促進され、崩壊発生確率が高くなることを示唆している。

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合せとした。表中、灰色で反転指示した箇所が該当する。

さらに、これらの組合せのうち、いずれか一方を除去する際の基準として数量化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並べて記載してある。

この結果から、これ以降の検討で使用する素因は、「衛星熱赤外域情報、斜面方位、標高、起伏量、谷密度、地形分類、現存植生、土壌、植生指標」の 9 種類となる。衛星熱赤外域情報が偏相関係数で上位に位置することは、衛星熱赤外域情報が斜面崩壊危険箇所評価図および誘因影響の逆推定において優位な因子であることを裏付けていると言える。

(2) 素因を構成するカテゴリの分析

ACOS モデルでは、Favorability 理論^{14), 付録 3)}に基づいて各素因を構成するカテゴリに付与される事前確率の値が入力情報となる。

具体的には、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「 T_q 」とし、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} ($i = 1, \dots, m$, $j = 1, \dots, n$) とすると画素 q の「崩壊発生確率: S_q 」は次式で表される。

この結果のもとに、次章において ACOS モデルに基づく誘因影響の広域逆推定問題へと検討を進める。

5. 誘因影響の逆推定

(1) パス図

図-2に示した2つのケース、すなわち衛星熱赤外域情報の使用の有無の違いを考慮して2種類のパス図を考える。図-3に本研究で使用したパス図を示す。このパス図は、誘因(潜在変数:未観測情報)が素因(観測情報)に影響を及ぼして斜面崩壊が発生するといった自然な考え方に基づいている^{7),付録4)}。本研究では、降雨に伴って崩壊が発生した箇所をトレーニングデータとしていることから、誘因は「降雨」となる。

これ以外の潜在変数として、「風化作用」等の潜在変数をパス図に加えることも興味深い検討となるが、本研究では、誘因逆推定問題における「衛星熱赤外域情報」そのものの適用性に関する検討が第1の目的であることから、この点に関する検討は本研究の範囲には含めず、今後の課題としたい。

(2) パラメータ推定

共分散構造分析法におけるパラメータ推定問題は、「観測データの分散共分散行列」と「モデルから再現される分散共分散行列」ができるだけ近似するようにパス係数と分散を求めることに帰着する。2つの代表的な方法があり、1つは最小2乗法、もう1つは最尤法である。本研究では基準関数(Discrepancy function)として、頻繁に利用されている最尤法に基づく以下の対数尤度関数Fを用いる^{17),18)}。

$$F = \log_e |C| - \log_e |S| + \text{trace}(SC^{-1}) - p + (X - \mu)' C^{-1} (X - \mu) \quad (3)$$

- ここに、
- S: 観測データの分散共分散行列
- C: モデルから再現された分散共分散行列
- p: 「観測変数」の数
- X: 観測データから得られる平均値ベクトル
- μ: モデルから得られる平均値ベクトル

最尤法では、得られた標本データを固定した上で、そのデータが得られる確率が最も高い母集団を求め、パラメータを決定する。すなわち、式(3)で示した対数尤度関数Fの最大化に帰着する。なお、対数尤度関数Fの定式化に関する詳細は、多くの参考図書に記載されていることから本論では割愛する^{17),18)}。

表-4 適合度指標

	パスモデル	カイ2乗検定				GFI	AGFI	AIC	RMSEA
	観測変数(観測)の有数	カイ2乗値	自由度	確率					
<ケース1> 地理情報のみ使用	モデルA	42.9	30	0.344	0.965	0.936	44.9	0.077	
	モデルB	170.6	38	0.000	0.806	0.711	171.7	0.152	
<ケース2> 地理情報+衛星熱赤外域情報	モデルC	30.3	28	0.369	0.976	0.952	32.5	0.064	
	モデルD	168.4	37	0.000	0.807	0.713	169.5	0.150	

注)モデルA:地理情報(素因)+潜在変数(誘因)
モデルB:地理情報(素因)のみ
モデルC:地理情報(素因)+衛星熱赤外域情報(素因)+潜在変数(誘因)
モデルD:地理情報(素因)+衛星熱赤外域情報(素因)

(3) 誘因(潜在変数)の有無を考慮したパスモデル

図-2で示したように、本研究では「衛星熱赤外域情報を使用する場合と使用しない場合」の2ケースを設定して、パスモデルの適合度を検定する。

ここで注意すべき点は、さらに、それぞれのケースについて「潜在変数を考慮する場合と考慮しない場合」のパスモデルを考え、「潜在変数(誘因)」の導入意義を示すことが不可欠となることである。すなわち、以下の4つのモデルの適合度を比較検定することに帰着する。

- a) ケース1: 地理情報のみ使用
 - ①モデルA: 地理情報(素因)+潜在変数(誘因)
 - ②モデルB: 地理情報(素因)のみ
- b) ケース2: 地理情報+衛星熱赤外域情報
 - ①モデルC: 地理情報(素因)+衛星熱赤外域情報(素因)+潜在変数(誘因)
 - ②モデルD: 地理情報+衛星熱赤外域情報

(4) 適合度検定

前述したとおり、「観測データの分散共分散行列」と「モデルから再現される分散共分散行列」が近似している程、モデルの適合性が高いことになる。そこで、上記4種類のパスモデルについて「適合度検定」を実施する。

本研究では、共分散構造分析法で一般に利用されている「カイ2乗値、GFI(Goodness of Fit Index), AGFI (Adjusted Goodness of Fit Index), AIC (Akaike information criterion), RMSEA (Root Mean Square Error of Approximation)」といった5つの評価指標を用いる。なお、これらの指標そのものの説明については、多くの参考書に記載されているので割愛する^{17),18)}。

表-4にモデル別の適合度指標の計算結果を示す。これより以下の点を読みとれる。

- a) カイ2乗値について
- 式(3)の基準関数は簡単な変形で漸近的にカイ2乗分布に従う。つまり、観測された分散共分散行列と

モデルから再現される分散共分散行列が乖離していれば、カイ2乗値は大きな値をとり、モデルが観測データに適合していないと判断される。

表-4からケース1では、モデルAのカイ2乗値が小さく、ケース2では、モデルCのカイ2乗値が小さいことが判る。このことは、誘因を考慮したパスモデルが有意であることを意味する。さらに、モデルAとモデルCともに、有意水準の確率は0.05以上である。このことは5%水準の有意差でモデルと観測データが等しいという仮説が棄却できないことを意味する。つまり、「モデルAとモデルC」は採択できる。

一方、モデルBとモデルDのカイ2乗値は大きく、有意水準の確率もほとんど0に近い。したがって、モデルと観測データとの適合性がないものと見なされ、「モデルBとモデルD」は棄却される。

b) GFI と AGFI について

GFI と AGFI は、豊田 (1992) らにより簡単かつ確実なモデル選択の指標として提示された指標である¹⁷⁾。後述する AIC と併用してモデルを採択する。

GFI は「0～1」の値をとる。GFI が 0.9 以下のモデルは棄却し、残ったモデルについて比較し、AIC の値が最小のものを最終モデルとして採択する。

AGFI は、パラメータに対する拘束の数に影響を受ける GFI の欠点を修正した指標である。パラメータが多く、複雑なモデルに対してペナルティを加える。GFI と同様に「0～1」の値をとる。1 の場合にはモデルが完全に適合していることを意味する。回帰分析の用語で表現すれば、GFI は重相関係数に、AGFI は自由度調整済の重相関係数に相当する。AGF ≤ GFI の関係が成立立つ。

GFI と AGFI の値がともに 0.9 以上であれば、モデルと観測データの適合性があるものと見なされる。

表-4からモデルAとモデルCの GFI と AGFI はいずれも 0.9 以上、モデルBとモデルDは 0.9 以下であることが判る。このことから、「モデルAとモデルC」は採択され、「モデルBとモデルD」は棄却される。

c) AIC について

AIC は相対的なモデルの良さを表す指標であり、モデル間の比較に適している。一般には AIC の値が小さいモデルが採択される。表-4からケース1では、モデルAの AIC が小さく、ケース2ではモデルCの AIC が小さいことが判る。したがって、「モデルAとモデルC」が採択され、「モデルBとモデルD」は棄却される。

d) RMSEA について

RMSEA は、モデルの複雑さに伴う見かけ上の適合度の上昇を調整するための適合度指標の1つである。この値が 0.08 以下であれば適合度が高く、0.10 以上であれば、そのモデルを採択すべきでないと判断さ

表-5 パス係数

パス関係		パス係数	モデルA	モデルC
誘因	→ 標高区分	a1	0.692	0.672
	→ 斜面方位	a2	-0.001	-0.053
	→ 起伏量	a3	0.545	0.506
	→ 谷密度	a4	0.155	0.122
	→ 植生指標	a5	-0.014	-0.047
	→ 現存植生	a6	0.484	0.442
	→ 地形分類	a7	0.600	0.636
	→ 土壌	a8	0.644	0.682
	→ 熱赤外	a9	未使用	-0.612
標高	→	地形要因	b1	-0.023
斜面方位	→		b2	0.815
起伏量	→		b3	0.560
谷密度	→		b4	0.139
植生指標	→	植生要因	b5	0.445
現存植生	→		b6	0.899
地形分類	→	被覆要因	b7	0.962
土壌	→		b8	0.090
熱赤外	→		b9	未使用
地形要因	→	崩壊発生	c1	0.098
植生要因	→		c2	0.113
被覆要因	→		c3	0.017

注) モデルA: 地理情報(要因) + 潜在変数(誘因)

モデルC: 地理情報(要因) + 衛星熱赤外域情報(要因) + 潜在変数(誘因)

れる。比較するモデル数が多いときにカイ2乗検定の代わりに利用されることが多い。

表-4からモデルAとモデルCの RMSEA が 0.08 以下であることが判る。これより、「モデルAとモデルC」が採択され、「モデルBとモデルD」は棄却される。

以上の適合度検定結果は、以下の2点にまとめることができる、

- ① 「モデルAとモデルC」が採択でき、「モデルBとモデルD」は棄却される。このことから潜在変数(誘因)を考慮するパスモデルの優位性を裏付けることができる。
- ② さらに、潜在変数(誘因)と衛星熱赤外域情報(要因)を考慮したモデルCの適合度が最も高く、衛星熱赤外域情報の有用性が認められる。

以降の検討では、採択された「モデルAとモデルC」について比較分析を進める。

なお、本研究における適合度検定では、「モデルが正しい」という仮説を設定している。つまり「モデルが棄却されない」ことによって、当該モデルを受容する(正しいであろうと判断する)ことを期待して検定が行われる。このことから「モデルが正しい」という仮説が棄却されない場合でも「正しいモデルである」とは断定できない。仮説が棄却されないことはモデルを採択する上での「必要条件」であり、「十分条件」ではないことに注意を要する。

本研究では、このようなモデル構築上の限界を認識し「十分条件」を補う上で、衛星熱赤外域情報の使用

の有無に伴って現れる誘因影響図の違いを抽出した差画像を作成し、誘因影響評価における「危険側と安全側」といった具体的な技術者支援情報を提示する。

(5) パス係数分析

採択された「モデルAとモデルC」のパス係数の計算結果を表-5に示す。この結果から、以下の3つのことが読みとれる。

- ①「地形要因→崩壊発生」、「植生要因→崩壊発生」、「被覆要因→崩壊発生」に付与されるパス係数が正である。正值で大きい値が付与される場合には、崩壊発生率が高いことを意味する。
- ②「誘因→熱赤外域情報」のパス係数が、マイナスの値を示す。このことは、衛星熱赤外域情報を加味することによって、潜在変数である誘因の値が大きくなる方向にパス係数が働くことを意味する。誘因影響図にこの結果が反映されることが推察される（6章において詳述）。
- ③同様に「誘因→植生指標」と「誘因→斜面方位」のパス係数が、マイナスの値を示している。衛星熱赤外域情報と同様に、「植生指標」と「斜面方位」は誘因の値が大きくなる方向に寄与することを意味する。以上の分析結果のもとに、衛星熱赤外域情報の使用の有無にともなう誘因影響の逆推定結果の違い（モデルA vs. モデルC）について比較する。

6. 誘因影響の広域逆推定支援を目的とした衛星熱赤外域情報の活用戦略

(1) 斜面崩壊危険箇所評価図の作成

トレーニングデータ（既崩壊地）を判別の基準として、ミニマックス2群判別を通して斜面崩壊危険箇所評価図を作成する。斜面崩壊危険箇所評価図の作成方法に関しては既発表文献に記述しているので本文では割愛する^{3), 4), 6), 7)}。

ミニマックス2群判別結果を表-6に示す。トレーニングデータに対する判別精度を表す的中率を見ると、モデルCが89.2%、モデルAが78.4%となっており、モデルCが優位であることが判る。衛星熱赤外域情報を導入する効果が確認できる。

さらに、この違いを分析するために、モデルAとモデルCそれぞれについて斜面崩壊危険箇所評価図を作成した。その結果が写真-1(a)（モデルA）と写真-1(b)（モデルC）である。これら評価図の凡例は表-7に示した。

写真-1(b)を見て明らかなようにモデルCでは、崩壊危険箇所として判定される箇所が少ないことが判

表-6 ミニマックス2群判別結果

			モデルA	モデルC
判別前	トレーニングデータ		37	37
	評価対象データ		7,101	7,101
判別後	トレーニングデータ	危険性有	29	33
		危険性無	8	4
	評価対象データ	危険性有	1,234	830
		危険性無	5,929	6,333
	合計	危険性有	1,263	863
		危険性無	5,937	6,337
的中率 (%)			78.4	89.2

注) モデルA: 地理情報(素因)+潜在変数(誘因)

モデルC: 地理情報(素因)+衛星熱赤外域情報(素因)+潜在変数(誘因)

る。衛星熱赤外域情報を使用すると、潜在危険斜面を絞り込んでいく上で有用となることが判る。しかし、評価者にとって危険箇所を見落とす危険性があり、「危険側」の評価図となる点には注意を要する⁹⁾。

(2) 誘因影響図の作成

モデルAとモデルCについて、それぞれ誘因影響を画素単位で逆推定し、誘因影響図として出力した結果が写真-1(c)（モデルA）と写真-1(d)（モデルC）である。なお、逆推定の考え方は文献7)に掲載しているが、本文末尾の付録5)にその一部を掲載する。

写真-1(c)（モデルA）と写真-1(d)（モデルC）から以下の2つの点が判る。

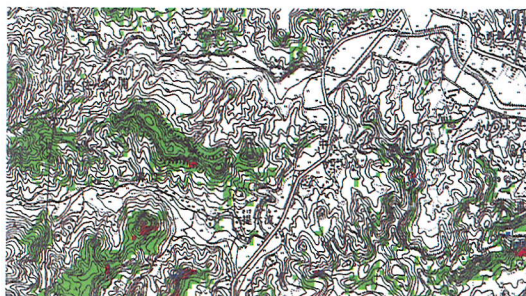
- ①モデルAに比べて、モデルCの誘因影響の値は、全体として強くなっていることが判る。
- ②特に、斜面中腹部（○印を付与した箇所等）の誘因影響の値が強く現れている。

これらの結果は、シラスが剥き出しになっている斜面中腹部の誘因影響の値が強くなることを裏付けており、衛星熱赤外域情報を使用したモデルCから得られる誘因影響図は、有用な結果を導いていると言える。

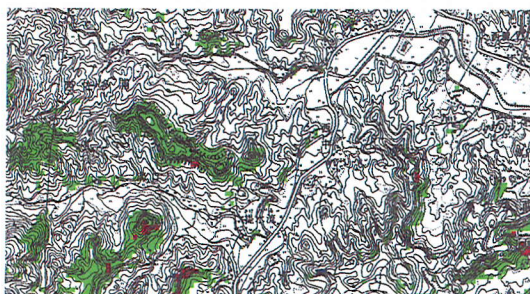
(3) 差画像の作成と解釈

写真-1(c)（モデルA）と写真-1(d)（モデルC）の誘因影響図の違いは、まさに衛星熱赤外域情報の使用の有無に伴って現れた違いである。そこで、これらの違いを明確にするために、画素単位で誘因影響の値の差を計算し、新たな支援情報として「差画像」を作成した。その結果が写真-1(e)である。この差画像の解釈を表-8に示す。差画像は3つのグループに分けて解釈できる点に特徴がある。

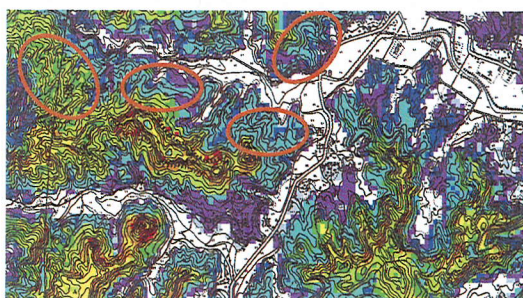
- ①グループA（赤色系）：衛星熱赤外域情報を使用した場合に誘因影響が強く現れた画素。評価者にとって誘因影響の強い箇所を見落とす危険性が少なく



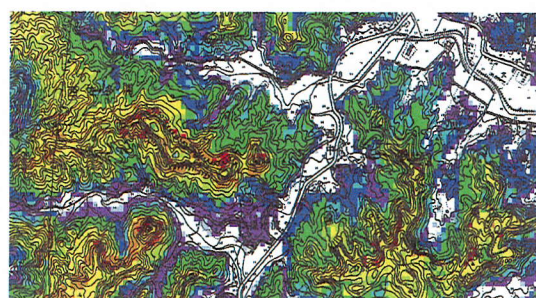
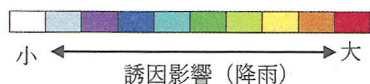
(a) 斜面崩壊危険箇所評価図
モデルA：地理情報のみ使用



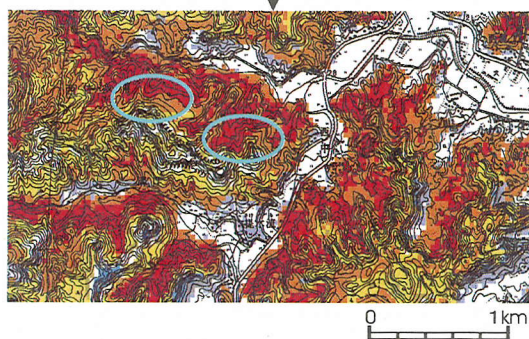
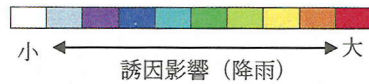
(b) 斜面崩壊危険箇所評価図
モデルC：地理情報＋衛星熱赤外域情報



(c) 誘因影響図
モデルA：地理情報のみ使用



(d) 誘因影響図
モデルC：地理情報＋衛星熱赤外域情報



(e) 誘因影響図の差画像 (モデルA vs. モデルC)

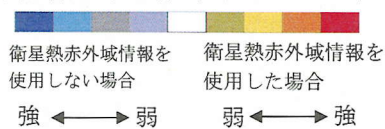


表-7 斜面崩壊危険箇所評価図 (写真-1 (a)と(b)) の凡例

トレーニングデータ (判別基準：既崩壊地)	評価対象データ
■ 崩壊危険性有	■ 崩壊危険性有
■ 崩壊危険性無	□ 崩壊危険性無

表-8 誘因影響図の差画像の解釈

赤色系 (グループA)	衛星熱赤外域情報を使用した場合に誘因影響が強く現れた画素 (安全側評価領域)
白色 (グループB)	衛星熱赤外域情報の使用の有無に関わらず誘因影響に変化がない画素
青色系 (グループC)	衛星熱赤外域情報を使用しない場合に誘因影響が強く現れた画素 (危険側評価領域)

写真-1 誘因影響図とその差画像

なることから「安全側の評価領域」とみなされる。

②グループB（白色）：衛星熱赤外域情報の使用の有無に関わらず誘因影響に変化がない画素。

③グループC（青色系）：衛星熱赤外域情報を使用しない場合（地理情報のみ使用）に誘因影響が強く現れた画素。評価者にとって誘因影響の弱い箇所となることから「危険側の評価領域」とみなされる。

なお、以上の解釈は、衛星熱赤外域情報の使用の有無に伴う誘因影響図の違いを表現した差画像に対する一般解釈であり、差画像の適用意義（工学的意義）については、次項のとおりとなる。

（4）差画像の適用意義

2章において述べたとおり、シラスの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。つまり、地表面温度が高いシラス斜面の風化が促進され、これが崩壊誘因の一つになる。写真-1 (e) の差画像は、まさにこのような潜在危険斜面を推定する上で役立つと言える。

例えば、赤色系の箇所は、衛星熱赤外域情報を適用した場合に誘因影響が強く現れた箇所であり、降雨、日射等による間隙水の浸透、蒸発が繰り返され、風化が促進される斜面として注意すべき箇所となる¹⁹⁾。また、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シラス地盤の強度低下をもたらすことから、赤色系の箇所は、計測機器（土壌水分計、テンシオメータ、傾斜計、温度計等）の設置候補地点にもなる。現地調査結果からシラス斜面が剥き出しになっている箇所の危険性が見いだされており、支援情報としての差画像の有用性が確認されている。

一方、青色系の画素は、衛星熱赤外域情報を使用しない場合に誘因影響が強くなった箇所であることから、赤色系の領域との比較候補として現地調査時の留意箇所となる。このような留意すべき地点を事前に把握しておくことは、現地調査時のルート設定や誘導情報として寄与する。

筆者らの従来までの研究や他の研究事例を見ても、以上のような誘因影響と潜在危険斜面との関係を同時に分析できる支援情報は提示されていない⁶⁾。誘因影響図の「差画像」は、誘因影響の逆推定における衛星熱赤外域情報の活用戦略としてだけでなく、問題発見を促す支援情報として役立つものと考えている。

7. まとめ

本研究の内容は、以下の3点にまとめられる。

①筆者らの研究を含めて、従来までの素因と誘因を扱った斜面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誘因影響逆推定における衛星熱赤外域情報導入の意義を示し、その適用方法を提示した（図-1）。

②数量化Ⅱ類とⅢ類による素因分析を通して、衛星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、パス係数の分析を通して、衛星熱赤外域情報は誘因影響を強める方向に作用することを示した。

③衛星熱赤外域情報を使用した場合と使用しない場合の誘因影響図を比較した結果（ケースAとケースC）、衛星熱赤外域情報を適用した場合には、ACOSモデルの成立要件である適合度が高まり、誘因逆推定精度が向上することが確認された。さらに、衛星熱赤外域情報の使用の有無に伴う誘因影響図上の違いを抽出した「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した。

今後の課題として、

① 潜在変数（誘因）の複数設定問題

② 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誘因影響逆推定問題

等があげられる。誘因影響をより多角的に分析するとともに、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分析アルゴリズム（図-1）が寄与できる。

また、本研究の成果を用いて、特定の観測地点の情報（サクションと温度情報等²⁰⁾）を誘因影響の逆推定を含めた広域崩壊危険箇所評価へ反映するといった、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いる。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、「崩壊危険箇所の評価」問題ではあるが、衛星熱赤外域情報と地理情報を併用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衛星データと地理情報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。本研究の内容は、「斜面崩壊誘因の広域逆推定問題」と「衛星熱赤外域情報の活用戦略」といった2つの課題に取り組んだものであり、空間情報の統合・分析モデルの構築を目的とした研究分野における新たな視点としても何らかの形で寄与できれば幸いである。

謝辞：本研究は、平成12年度～14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・理学部地球環境科学科）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。

付録

1) ACOS モデル¹⁾

素因と誘因を説明変量とし、共分散構造分析法をベースとして斜面崩壊危険箇所を評価するモデル。誘因情報（降雨、地震等）を画素単位では観測困難な「潜在変数」とみなし、衛星データと地理情報（素因）を「観測変数」とする。測定方程式に基づいて誘因影響を逆推定するとともに「誘因影響図」を作成できる点が特色となっている。

2) 植生指標²⁰⁾

植物は、一般に電磁波エネルギーの赤領域で吸収が強く、緑、近赤外域で反射が強い。このことを利用し、マルチスペクトルデータから計算される植生の生育状況や活性度を表す指標を植生指標と言う。本研究では、実用性を考慮し、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）を素因の一つとして採用した。

$$NVI = \frac{BAND\ 4 - BAND\ 3}{BAND\ 4 + BAND\ 3} \quad (4)$$

3) Favorability 理論¹⁰⁾

地形、土壌、表層地質、傾斜区分、起伏量、斜面方位等の数値化された図面情報を説明変量として分析する際に、カテゴリ（質的データ）を数量化して統合分析する理論の呼称。説明変量を構成するカテゴリに付与される事前確率の値が入力情報となり（計算方法：本文4(2)参照）、統合分析の際にベイズアンモデル、ファジーセット、確信度モデル等の統合方法を適用でき、拡張性を有している。鉱物資源ポテンシャルマップの作成等にも応用されている。筆者らもFavorability理論に基づく複数の斜面崩壊危険箇所評価モデルを構築し、複数のモデルの活用戦略を提示している¹⁰⁾。

4) 「素因（観測変数）と誘因（潜在変数）」の定義

素因とは、斜面崩壊要因のうちの「土地の性状」を指す。説明変数として観測可能であり、共分散構造分

析法では、これを「観測変数」と言う。具体的には、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¹⁾（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（表-1参照）。

誘因とは、「降雨」、「地震」といった直接的に斜面崩壊の引き金となる要因を言う。1章でも述べたとおり、誘因は画素単位で観測することは困難であることから、本研究では誘因を「未観測情報」とする。分散共分散分析法では、これを「潜在変数」と呼ぶ（図-3参照）。

5) 誘因影響の逆推定¹⁾

共分散構造分析法では、観測変数から潜在変数を説明する関係式を「観測方程式」と呼び、潜在変数から観測変数を説明する関係式を「測定方程式」と呼ぶ¹⁷⁾。

図-3に示したパスモデルでは、潜在変数である誘因と観測変数である素因の間で、以下のような測定方程式が成り立っている。

$$z_{ji} = a_j f_i + e_{ji} \quad (5)$$

ここに、

z_{ji} : i番目の画素に対応する素因jのデータ

a_j : 素因jに対するパス係数

f_i : i番目の画素に対応する誘因情報（潜在変数）

e_{ji} : i番目の画素の素因jに対する誤差

これをもとに、 z_{ji} の線形式に基づいて誘因 \hat{f}_i を逆推定する。線形逆推定式は次式で表される。

$$\hat{f}_i = \sum_{j=1}^p b_j z_{ji} \quad (6)$$

問題は、この推定値 \hat{f}_i が真値 f_i にできるだけ近くなるように係数 $\{b_j\}$ を求めることに帰着される。つまり、次式を最小にする $\{b_j\}$ を求めればよい。

$$Q = \sum_{i=1}^n (f_i - \hat{f}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (f_i - \sum_{j=1}^p b_j z_{ji})^2 \rightarrow \min \quad (7)$$

Q を b_j で偏微分して0とおき、

$$\frac{\partial Q}{\partial b_j} = -2 \sum_{i=1}^n z_{ji} (f_i - \sum_{j=1}^p b_j z_{ji}) = 0 \quad (8)$$

これを展開して整理する。

なお、 z_{ji} と f_i はそれぞれ平均 0、分散 1 に標準化されていることから、誤差項は無視される。最終的に求める $\{b_j\}$ は次式となる。

$$b_j = \sum_{i=1}^p a_j r^{ij} \quad (9)$$

ここに、

r^{ij} : 相関行列 R の逆行列 R^{-1} の (j, j') 要素

$\{b_j\}$ を式 (6) に代入して、誘因 \hat{f}_i を画素単位で計算し、これを画像化したものが「誘因影響図：写真－1 (c) と写真－1 (d)」となる。

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, 博士学位論文 (鹿児島大学), 全 153 頁, 2001 年 3 月.
- 6) 小島尚人, 北村良介, 大林成行, 伊代田尚志: 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, 土木学会論文集, No.707/VI-55, pp.165-176, 2002 年 6 月.
- 7) 小島尚人, 大林成行, 青木太: 共分散構造分析法を導入した斜面崩壊危険箇所評価アルゴリズムの構築, 土木学会論文集, No.714/VI-56, pp.79-93, 2002 年 9 月.
- 8) 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ヨ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.
- 9) 春山元寿: c と ϕ を考を考える, シラス, 土と基礎, 23-6, pp.67-74, 1975 年.
- 10) 下川悦郎, 地頭苗隆, 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) Chung, C.F. and Fabbri, A.G.: Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol.65, No.12, pp.1389-1399, 1999.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 豊田秀樹, 竹内啓 監修: SAS による共分散構造分析, 東京大学出版会, 1992 年.
- 18) Hoyle, R.H.(Ed.): Structural Equation Modeling, Concepts, Issues, and applications, *SAGE Publications*, 1999.
- 19) 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.
- 20) 大林成行, 小島尚人: 最新・実務者のためのリモートセンシング, (株) フジ・テクノシステム, 全 967 頁, 2002 年 7 月.

(2003. 1. 20 受付)

AN APPLICATION OF SATELLITE THERMAL INFRARED DATA IN TRIGGER-FACTOR INVERSE ESTIMATION FOR IDENTIFYING HAZARDOUS-SLOPE COMPOSED OF SHIRASU-DEPOSIT

Hirohito KOJIMA, Shigeyuki OBAYASHI and Ryosuke KITAMURA

This paper discusses the applicability of the satellite Thermal-Infrared data (TI data) for the inverse estimation of trigger factors with respect to the shirasu slope failures, based on the analysis of covariance structures model. In this model, a "Trigger Factor Influence map (TFI map)" could be produced through the measurement-equation defined by the trigger- and the causal-factors, such as the geographical information (GI) as well as the satellite data. In producing the TFI maps, the following examination cases were executed: Case-1) Only using GI, Case-2) Using the TI data and GI. In the Case 2 of applying the TI data, the better goodness fit of the model is confirmed through the hypothesis testing. Furthermore, as a practical utilization of the TI data, the "Risky- and Safe-side assessment" sub-area is delineated on the difference map between the TFI maps in each case.