

衛星画像と統計解析手法を利用した 斜面崩壊危険性評価に関する研究

森本 裕^{1*}・渡辺 宏²・楠見 晴重³

¹関西大学大学院 工学研究科 ソーシャルデザイン専攻 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

²国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

³関西大学環境都市工学部 都市システム工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

*E-mail: kusumi@ipcku.kansai-u.ac.jp

数量化理論Ⅱ類と相乗平均を用いて崩壊地点を評価した。評価するための説明変数として、斜面崩壊に関わりが深い傾斜・植生指標(NDVI)・表層地質・斜面方位を用いた。そして、数量化理論Ⅱ類と相乗平均の比較をした。結果を比較するために、2つの指標を計算した。1つは見逃し率、すなわち、実際に斜面崩壊が起こった箇所での危険度が低いと評価された地点の割合、もう1つは過抽出率、すなわち、実際は斜面崩壊が起こらなかった箇所での危険度が高いと評価された地点の割合である。

本研究の結果、見逃し率においてはほぼ同等、過抽出率においては相乗平均の精度が高かった。この結果は、崩壊地点の評価には、数量化理論Ⅱ類よりも相乗平均の方が適切であると考えられる。

Key Words : ASTER, Satellite multispectral data, Failure of slope danger evaluation, Qualification theory II, Geometric mean

1. 緒言

わが国は、島国の特徴として地形起伏に富んでおり、なおかつ湿潤変動帯に位置している。そのため、台風、津波、洪水といった災害は後を絶たない。さらに、地球温暖化が進むにつれて、21世紀末には発生する台風の数が減る一方、勢力は強大になる傾向があるとの試算が発表されている。実際に平成16年には、度重なる台風により集中豪雨が頻発しており、本研究対象地である淡路島においても、数多くの地すべりや、斜面崩壊・落石・土石流などの土砂災害によって、地域生活に深刻な被害が出た。このような土砂災害について、被災状況を迅速に把握することや、どこでどのような災害が起こるのかを事前に評価することが大きな課題となっている。しかしながら、斜面崩壊の危険度評価に関する研究^{1), 2)}がなされているものの、斜面崩壊箇所の事前予測が困難であることや、斜面崩壊の危険性のある箇所が非常に多いことなどの理由により、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。

そこで本研究では、広域性・同時性・周期性といった特徴を有する衛星マルチスペクトルデータを利用し、斜面崩壊に関わると考えられているさまざまな要因の因果関係を数量化理論Ⅱ類^{3), 4), 5)}ならびに相乗平均より解析、

比較し、斜面崩壊危険性評価への衛星マルチスペクトルデータの適用性について検討を試みた。そして、その結果を基に斜面崩壊危険性評価図を作成し、斜面崩壊危険性評価システムを構築することにより、未然に危険斜面を特定し対策を講じることを目的としている。

2. 研究対象地⁶⁾

本研究の対象地区である淡路島は、南北 55km(淡路町松帆～南淡町沼島)・東西 28km(洲本市由良～西淡町阿那賀)、周囲 203km の北東―南西に細長い形状をした島である。総面積は、592.17 km²で兵庫県の県土面積の約 7% を占めている。

対象地区の地形は、北部に北東―南西に延びる津名山地が広く発達しており、山地北部域では津名町、東浦町境の妙見山(標高 522m)を最高点とし、南側にやや起伏の大きい山地が、北側には起伏の小さな山地が分布し、一方、山地南部域では先山(標高 448m)を最高点とし、全体としては起伏の小さな山地が大半を占めている。島の中部から南部にかけては、島内最大の平坦地である三原山地が広がり、洲本川や三原川が流れている。さらに、南部には島内最高峰の諭鶴羽山(608m)を有する起伏の

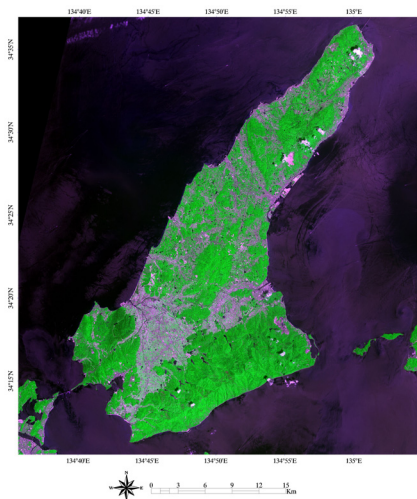


図-1 研究対象地区のASTER 画像
(ナチュラルカラー/2002年5月27日)

表-1 各バンドの対応表

放射計	バンド	波長域(μm)	空中分解能
VNIR	1	0.52~0.60	15m
	2	0.63~0.69	
	3N	0.76~0.86	
	3B	0.76~0.86	
SWIR	4	1.600~1.700	30m
	5	2.145~2.185	
	6	2.185~2.225	
	7	2.235~2.285	
	8	2.295~2.365	
	9	2.360~2.430	
TIR	10	8.125~8.475	90m
	11	8.475~8.825	
	12	8.925~9.275	
	13	10.25~10.95	
	14	10.95~11.65	

大きい諭鶴羽山地が東西方向に走っており、断崖絶壁の海岸線を形成している。

そして、対象地区の地質としては、北部の津名山地は主に花崗岩から構成されており、その北半分の地域では、神戸層群が花崗岩を覆っている箇所が点在している。津名山地の南部では、大阪層群が全地域にわたって広く分布している。また、山地の山麓部・海岸沿いには後期更新世の段丘堆積物が各地に分布している。これらは、ほとんどが礫岩・砂岩層を主体とする河成堆積物で、全体的には、高位段丘・中位段丘・低位段丘・最低位段丘の4つに区分できる。南部の諭鶴羽山地は、その大部分が白亜紀の和泉層群と呼ばれる礫岩・砂岩・泥質岩の層からなり、この和泉層群は東方の和泉山脈から、淡路島南部、鳴門海峡を経て西方の讃岐山脈へと続き、中央構造線北縁の山地の一部と位置づけられている。本研究の対象地区である淡路島のASTER画像を図-1に示す。

3. 研究方法^{7), 8), 9)}

研究対象地区について、兵庫県提供の資料より、実際に斜面崩壊が発生した箇所のデータを用いて、数量化理論Ⅱ類・相乗平均により崩壊・未崩壊という目的変数を評価した場合、実際の崩壊の分布と一致するのか検証した。今回説明変数は斜面崩壊に関わりが深い傾斜・植生指標(NDVI)・表層地質・斜面方位を使用することとした。

以下、衛星画像データ、サンプルの抽出方法、説明変数、数量化理論Ⅱ類ならびに相乗平均について示していくこととする。

(1) 衛星画像データ¹⁰⁾

本研究で使用したデータは、可視域から熱赤外領域にバンドを有する高性能光学センサASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)のものである。以下にASTERの特徴を示す。

(1) 表-1にASTERバンドの詳細を示している。

この表のように、幅広い波長域帯(可視・近赤外[VNIR]域に3バンド、短波長赤外[SWIR]域に6バンド、熱赤外[TIR]域に5バンド:全14バンド)を持つ。

(2) 同一軌道からの立体視観測が可能。

(3) 位置・高度などに関して、高精度を実現。

(4) 全世界をカバーしている。

(5) 安価である。

なお、本研究で使用したデータは斜面崩壊が発生する以前に取得された2002年5月27日のものである。

(2) サンプルの抽出方法

斜面崩壊発生箇所グループは、兵庫県淡路県民局洲本農林水産振興事務所に提供を受けた淡路島の崩壊に関する資料を基に作成した。実際に斜面崩壊が発生した箇所のデータ(111箇所)のうち、雲がかかっていることにより使用できないデータを省いた109点を選定した。また、斜面崩壊未発生箇所グループの選定については、走向・傾斜・表層地質などにより分類し、発生箇所グループの選定数に近づくように任意に抽出し、105点を選定した。

(3) 説明変数

傾斜・植生指標(NDVI)・表層地質・斜面方位という4つの説明変数のうち、傾斜・斜面方位はVNIRのDEMデータを用いた。植生指標(NDVI)は、植物の緑葉は青領域と赤領域の波長を吸収し、近赤外線領域の波長を強く反射するこの植生の持つ特性を生かし、赤波長(R)と近赤外波長(IR)の値を用いて植生指数を算出する。表層地質は、SWIRのデータを15mグリッドにリサイズしたのちバンド演算することにより算出する。

(4) 数量化理論Ⅱ類

数量化理論Ⅱ類とは、質的データの判別・予測分析のための方法論である。説明変数 $X_i (i=1, 2, \dots, p)$ がそれぞれ m_i 個の選択枝を持ち、各選択枝が選択されれば1、選択されなければ0を取るような $\sum m_i$ 個の変数 $C_{ij} (i=1, 2, \dots, p; j=1, 2, \dots, m_i)$ を定義する。ここで、各カテゴリーに特定の数値 $a_{ij} (i=1, 2, \dots, p; j=1, 2, \dots, m_i)$ を割り当てて、式(1)を計算することにより、合性値 Z を求め、各ケースがどの群に属するのか判別する。

$$Z = \sum \sum a_{ij} c_{ij} \quad (1)$$

数量化理論Ⅱ類を適用するために、各説明変数に閾値の設定をする必要がある。閾値とは、一般にはなんらかの反応を惹き起こすために必要な最小のエネルギー値のことを言う。価値判断の問題で「～である」と評価する最低線のことである。本解析では、これまで行ってきた解析結果から、最も妥当性があると思われる閾値を利用している。これら設定した閾値を基に、全てのサンプルを分類し、数量化理論Ⅱ類を適用することにより連立方程式を得る。以下に各カテゴリーの分類について記す。

a) 傾斜

一説には、最も斜面崩壊が発生しやすい²⁾という傾斜角『15～25°』を基準として、「～15°」、「15～25°」、「25°～」に設定した。

b) 植生指標 (NDVI)¹⁰⁾

広葉樹に当たると考えられる「0.47～」，針葉樹に当たると考えられる「0.26～0.47」，その他と思われる「～0.26」に設定した。

c) 斜面方位

斜面方位は日照量と密接に関係するため植被生育量や表層風化を表す指標として用いられる¹¹⁾こともある。今回は、「北」、「南」、「その他」を設定した。

d) 表層地質

地質と密接に関係すると言われている¹⁰⁾短波長赤外 [SWIR] のバンド演算を行い独自の分類を行っている。今回は、「花崗岩」、「礫・泥・砂岩」、「その他」を設定した。

(5) 相乗平均

相乗平均は乗法に基づいている。したがって、相加平均に基づいているWLC (Weighted linear combination) と基本的に異なる。すなわち、無関係であると考えられた要素により特徴付けられた領域を排除するという意味でWLCよりはるかに効果的である。式(2)を計算することで相乗平均値GMを求め、各ケースがどの群に属するのか判断するのである。

$$GM = \left[\prod_{i=1}^n p_i \right]^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

表-2 カテゴリースコアの設定

点数	1	1.5	2	3
傾斜	～5° or 25°～		5～15°	15～25°
NDVI	0.47～	0.26～0.47	～0.26	
表層地質	その他		礫・泥・砂岩	
斜面方位	南			その他

表-3 各カテゴリーに与える値 a_{ij}

a		j		
i	1(傾斜)	0.32108 (0～15°)	0.13554 (15～25°)	0 (25°～)
	2(NDVI)	-0.13159 (その他)	0.05294 (針葉樹)	0 (広葉樹)
	3(斜面方位)	-0.12684 (北)	-0.33222 (南)	0 (その他)
	4(表層地質)	0.00537 (礫・泥・砂岩)	0.13256 (花崗岩)	0 (その他)

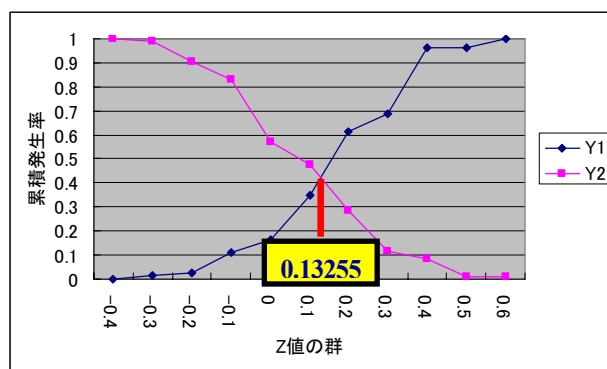


図-2 Z値群から得た境界値

相乗平均を適用するために、各説明変数にカテゴリースコアを設定する必要がある。カテゴリースコアは斜面崩壊の危険性が高いと思われるものほど値が大きくなり、各パラメータは4つ未満のレベル、重みは1-3で格付けしている。重みの幅は、数量化理論Ⅱ類の解析より得られたレンジの値により決定しており、表-2に示した通りである。

4. 解析結果

(1) 数量化理論Ⅱ類による評価

サンプルから得られた連立方程式を行列計算することによって、得られた各カテゴリーに与える値 a_{ij} を表-3に示す。ここで、 $j=3$ の部分が全て0となっているのは、行列式を解く際にrank落ちの処理を行っているためである。この値により、合性値 Z を計算し、斜面崩壊グループ (Y_1) と斜面未崩壊グループ (Y_2) の境界値を求めることとなる。今回は、図-2に示すように $Z=0.13255$ を斜面崩壊危険性評

価の境界値として設定した。

境界値を用いることにより斜面崩壊が発生するかしないかを検討することとなるが、本研究ではその指標を『見逃し率』、『過抽出率』としている。本研究で、見逃し率とは「(実際に斜面崩壊が発生した箇所)/(斜面崩壊が発生しないと判定された箇所)」のことを指し、過抽出率とは「(実際に斜面崩壊が未発生であった箇所)/(斜面崩壊が発生すると判定された箇所)」のことを指す。今回の解析では、実際の斜面崩壊発生箇所において、未発生箇所と判定されたのは、109箇所中37箇所であり見逃し率は $37/109=33.9\%$ 、斜面崩壊未発生箇所が発生箇所と判定されたのは、105箇所中28箇所であり過抽出率は $28/105=26.7\%$ であった。ただし、このような評価法だと、過去の崩壊・未崩壊地点の分布パターンを忠実に再現できないと、見逃し率・過抽出率はともに0%とならないことに注意する必要がある。しかしながら、今後の豪雨を伴う斜面崩壊の発生を待って、斜面崩壊危険性評価の信憑性を確かめることが困難であること。さらに、崩壊・未崩壊の評価結果の妥当性を検証するためには、他の客観的な評価法が見当たらないことから、以上のような方法で評価することとした。相乗平均においても同様の評価をする。

(2) 相乗平均による評価

サンプルのGM値を計算し、斜面崩壊グループ(Y₁)と斜面未崩壊グループ(Y₂)の境界値を求めることとなる。今回は、**図-3**に示すようにGM=1.65263を斜面崩壊危険性評価の境界値として設定した。

今回の解析では、実際の斜面崩壊発生箇所において、未発生箇所と判定されたのは、109箇所中39箇所であり見逃し率は $39/109=35.8\%$ 、斜面崩壊未発生箇所が発生箇所と判定されたのは、105箇所中15箇所であり過抽出率は $15/105=14.3\%$ であった。両解析結果を比較すると、見逃し率においては同等、過抽出率においては相乗平均の精度が高かった。したがって、崩壊箇所の地点評価には数量化理論Ⅱ類よりも相乗平均の方が適切であると考えられる。

(3) 斜面崩壊危険性評価図¹²⁾

a) 広域画像による比較

両解析の結果を用いることにより作成された斜面崩壊危険性評価図を**図-4**、**図-5**に示す。図中の赤い部分が危険度「高」、緑の部分が危険度「低」を表している。両図をみると数量化理論Ⅱ類は全体が赤色に覆われているが、相乗平均は緑色の方が強いように見受けられる。したがって、危険斜面対策箇所の絞込みといった観点からも相乗平均の方が優位ではないかと考えられる。＝

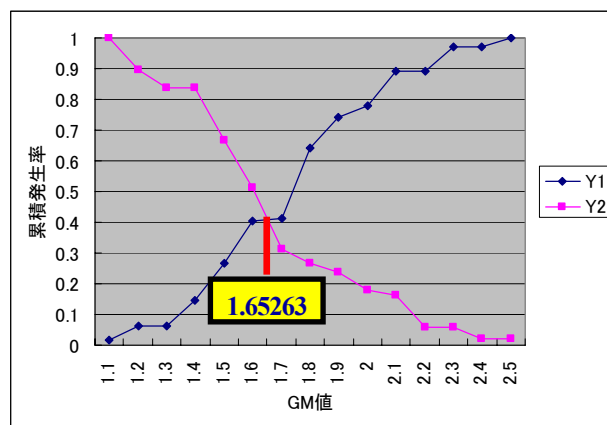


図-3 GM値群から得た境界値

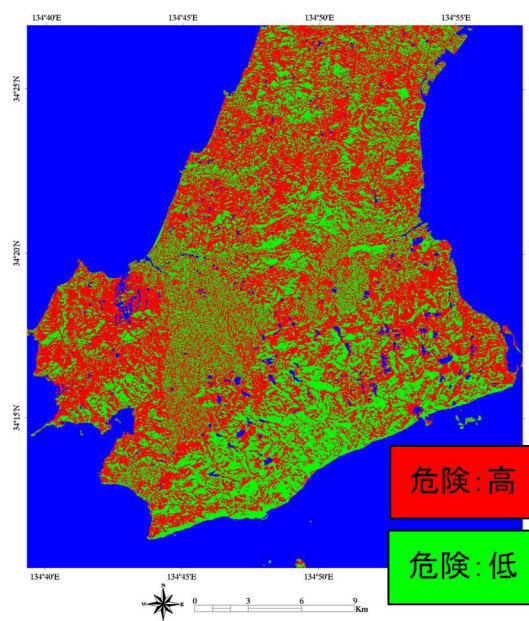


図-4 斜面崩壊危険性評価図(数量化理論Ⅱ類)

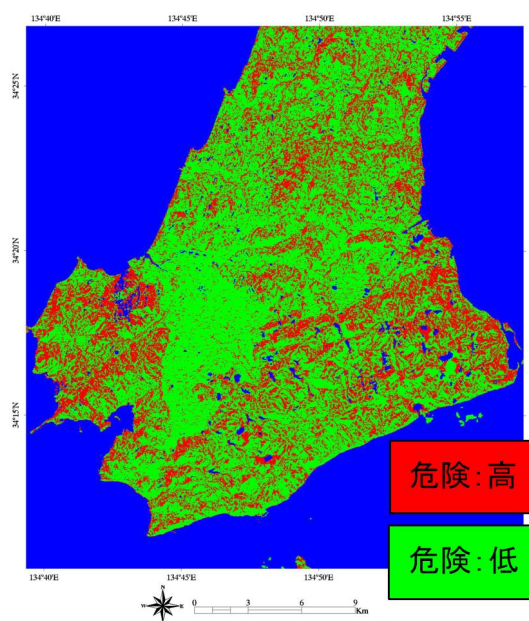


図-5 斜面崩壊危険性評価図(相乗平均)

b) 拡大画像による比較

図-4, 図-5では範囲が広域であり, 実際の斜面崩壊発生箇所との比較が難しいので, 図-6に示す実際の斜面崩壊発生箇所と四角に囲われた地域図-7～図-12に焦点を当て比較を行った. この地域を選択した理由としては, ASTER画像 $50 \times 50 = 2500\text{pixel}$ (750m四方) 内で, 実際に斜面崩壊が発生した箇所が3箇所以上あること. かつ, 4つの説明変数が偏らない離れた地域である. なお, 図-7, 8は山間部の集落であり, 図-9, 10は丘陵地, そして図-11, 12は山地である. これら6つの図を見てみると, 実際に斜面崩壊が起こった箇所(白丸部)と斜面崩壊が起こると評価された箇所(赤色部)で一致した割合は6～7割程となる. したがって淡路島全域で同程度の評価精度を実現できたと考えられ, 広域画像による比較と同様に相乗平均による解析の方が優位であると考えられる.

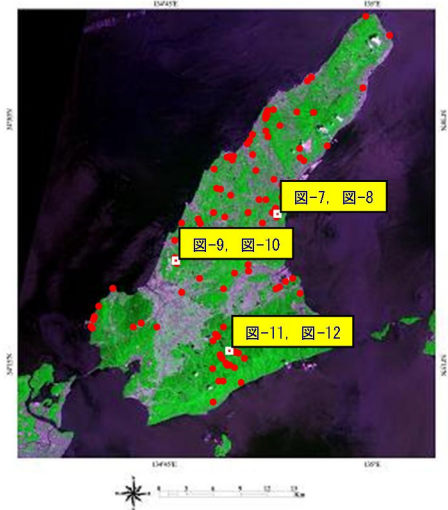


図-6 実際の斜面崩壊発生箇所

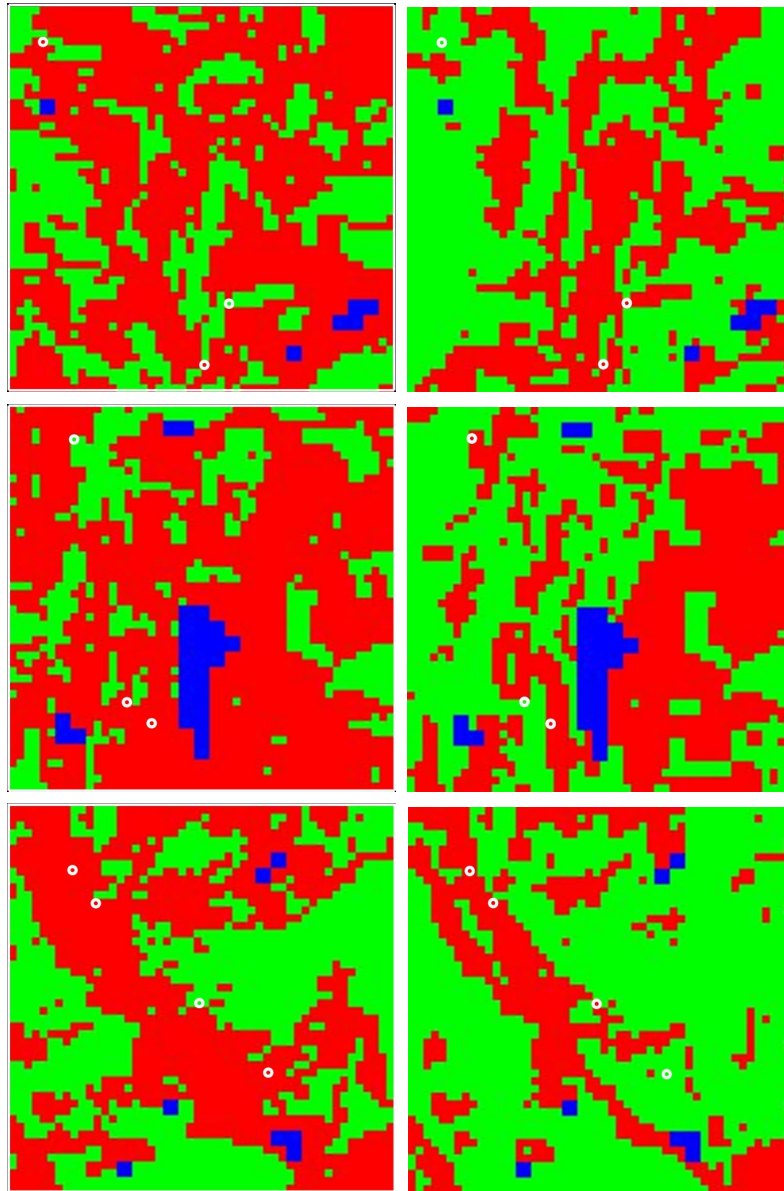


図-7(上段左), 図-8(上段右), 図-9(中段左), 図-10(中段右), 図-11(下段左), 図-12(下段右)
実際の斜面崩壊箇所との対応図(奇数: 数量化理論Ⅱ類, 偶数: 相乗平均)

5. まとめ

本研究では、衛星画像と統計解析手法を利用した斜面崩壊危険性評価システムの構築として、斜面崩壊の評価に衛星マルチスペクトルデータの適用性についての検討を行い、評価モデルによって実際に斜面崩壊危険性評価図を作成するシステムの確立を試みた。以下に本研究で得られた成果について要約する。

(1) 今回の解析では、現地の地盤情報を利用せず、衛星画像データのみを使用により検討する統計解析手法を採用した。斜面崩壊発生箇所の見逃し率が両解析で 30% 付近とやや低い結果となったが、一方、過抽出率においては、相乗平均が 14.3% と数量化理論Ⅱ類の 26.7% よりはるかに優れた結果を示し、斜面崩壊危険性評価図においても顕著な差が見られた。過抽出率が低いということは、対策防止工などを行う時の順位付けをする際に有効な指標であることを意味すると考えられる。したがって、今後不的中箇所がなぜ不的中箇所と評価させたのか検討が必要となるが、斜面崩壊評価に衛星マルチスペクトルデータを適用することは可能であると認められた。

(2) 数量化理論Ⅱ類を用いることにより、説明変数 X_i と、従属変数 Y_i が共に定性的である問題を定量的な問題として取り扱うことができた。そして、相乗平均を用いることにより、これまで線形でしか考えられなかった問題において、さらに各カテゴリー 1 つ 1 つの負荷を高めることができた。

以上に記したように、衛星画像データと統計解析手法を用いて斜面崩壊危険性評価のモデル化を行うことが可能であるということが示された。

謝辞：最後に、本研究を行うにあたり、貴重なデータを提供していただいた兵庫県淡路県民局洲本農林水産振興事務所に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 大林成行・小島尚人・笠博義：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，p173-184，1996.
- 2) 佐藤浩ほか：斜面崩壊の危険度評価におけるニューラルネットワークと最尤法分類の比較，日本地すべり学会誌，Vol.42，No.4，p293-302，2005.
- 3) 駒澤勉：数量化理論とデータ処理，朝倉書店，pp49-88，1987.
- 4) 田浦秀春：土木技術者のための統計解析(モデル解析)，吉井書店，1985.
- 5) 小林龍一：数量化理論入門，日科技連出版社，pp47-62，1984.
- 6) 平成 16 年台風 23 号関西圏地盤災害緊急調査団：平成 16 年台風 23 号による関西圏地盤災害調査報告書，地盤工学会，pp49-54，2005.
- 7) 大林成行・小島尚人・笠博義：斜面崩壊予測を対象とした衛星マルチスペクトルデータの実用化について，土木学会論文集，No.415/IV-12，pp71-80，1990.
- 8) 荒川泰・立川哲史・荒木強：衛星データを用いた地滑り・斜面崩壊箇所の予測・抽出手法の研究開発，物理探査学会第 113 回学術講演会論文集，pp91-94，2005.
- 9) 兵庫県：県土整備部資料，2004.
- 10) 財団法人 資源・環境観測センター(ERSDAC)：資源・環境リモートセンシング実用シリーズ 1(宇宙からの地球観測)，チクマ秀版社，pp167-169，pp84-87，pp72-84，2001.
- 11) 土木学会岩盤力学委員会：岩盤斜面の安定解析と計測，土木学会，p3-7，1994.
- 12) 大林成行：実務者のためのリモートセンシング(データ処理/解析の基礎から見積書・仕様書の作成まで)，フジ・テクノシステム，pp216-236，1995.

ANALYTICAL EVALUATION OF SLOPE FAILURE LOCATION USING SATELLITE IMAGE AND STATISTICAL ANALYSIS

Yu MORIMOTO, Hiroshi WATANABE and Harushige KUSUMI

Landslide areas were evaluated using qualification theory II and geometric mean. To evaluate the areas, inclination, NDVI, geological features, and azimuth, which are considered closely related to the landslide, were used as explanatory variables. Comparing with these results, two indices were calculated, one is the overlooking ratio, which is estimated as non-landslide areas for actual landslide-occurred areas, the other is overextraction ratio, which is estimated as landslide areas for actual non-landslide areas. As a result, at the overlooking ratio, the geometric mean and the qualification theory II provide almost equal result. But the overextraction ratio, the former provides better results than the latter.