

投稿論文  
*Paper*  
*(In Japanese)*

# 数量化理論による地すべりの危険度評価法の一試案

## A RISK EVALUATION METHOD FOR LANDSLIDE OCCURRENCE WITH QUANTIFICATION ANALYSIS

杉山和一\*・後藤恵之輔\*\*・吉住龍也\*\*\*・棚橋由彦\*\*\*\*

By Kazuichi SUGIYAMA, Keinosuke GOTOH, Tatsuya YOSHIZUMI and Yoshihiko TANABASHI

Today's increasing demand for land development can no longer leave vulnerable landslide areas untouched. Therefore, a rigorous method for this risk evaluation, if available, would be a valuable instrument for preventing landslide disasters in such development areas. Currently used conventional evaluation methods are empirical and qualitative in nature, largely depending on professional/pertinent expertise and judgement. In order to introduce some scientific rigor instead, this paper proposes a quantitative evaluation method, which (a) items from Hayashi's quantification theory with regard to relevant aspects (data items) connecting landslide risks, (b) classifies these items into a few categorical groups, (c) assesses the vulnerability of landslide in these items, (d) expresses the vulnerability in terms of the distribution of these data items in the multi-dimensional Euclidian space, and (e) evaluates the vulnerability as expressed by the distance measure between the eigenvalues which are respectively and uniquely determined for each category group in this space. This quantitative method, as well as the conventional method for comparison purposes, are applied to the vulnerability evaluation for Yuya district in Yamaguchi prefecture, well-known for frequent past occurrence and high risk of landslide. A significant consistency between the two evaluation results is found, including the applicability and practicality of the proposed quantitative method.

*Keywords : landslide, risk evaluation, quantification theory*

### 1. はじめに

近年、宅地造成や道路の築造等の大規模開発が各地で進行し、これに伴い、地すべりや斜面崩壊等の土砂災害も増加する傾向にある。この傾向は今後も続くと予想され、大きな社会問題となっている。そこで、最近は土木構造物の計画に際し、地すべりや斜面崩壊の発生予知を目的とする予備調査が多く実施され、それに基づく事前防止工が施工されるケースも珍しくない。

地すべりの発生予知を行う場合、その前段階で、現状における危険度評価が必要となる。地すべりの危険度評価の従来手法は、まず地形図、地質図、航空写真、文献等の既存資料を収集し、さらに現地踏査を行うことにより得られたデータを詳細に分析した後、経験的な判断により各地区の危険度を定性的に決定するものである。しかしながら、この方法は豊富な経験と高度な判断力を必

要とするため、誰にでも行えるものではなく、また、個人的な見解の相違を生じやすいなどの欠点を有し、ややもすれば普遍性に欠けるきらいがある。

これに対し、本研究は数量化理論を適用することにより、地すべりの危険度評価を定量的かつ高精度で行うことを目指すものである。数量化理論は、予測や分類問題において、解析に供する情報が数量でなく、アイテム中のカテゴリーへの反応として与えられる場合に、これらのデータを多次元的に解析する手法として、林<sup>1)</sup>により体系化された。この理論には4つのパターンがあり、第Ⅰ類は重回帰分析と同じ目的、第Ⅱ類は判別分析と同じ目的、第Ⅲ類と第Ⅳ類は主成分分析や因子分析と同じような目的に使用される<sup>2)</sup>。

本研究では、これらのうち第Ⅲ類<sup>3)</sup>を適用する。数量化理論第Ⅲ類による危険度評価において、各カテゴリーは、互いに性状が似たものは近い位置に、似てないものは遠い位置に配置される。そこで、互いに近くに位置するカテゴリーを数個ずつまとめ（群別分類）、各群に危険度評価点を設定する。よって、この手法を適用して危険度評価を行う場合、その結果の良否は、抽出する地すべりに関するデータの内容およびアイテム・カテゴリーの群別分類により大きく左右される。ここでは特に、カテゴリーの群別分類の方法に着目し、多次元ユーク

\* 正会員 (株)防災技術コンサルタント九州支店  
(〒850 長崎市新中川町2-3)

\*\* 正会員 工博 長崎大学教授 工学部土木工学科  
(〒852 長崎市文教町1-14)

\*\*\* 正会員 復建調査設計(株) (元長崎大学工学部学部生)  
(〒730 広島市東区光町2-10-11)

\*\*\*\* 正会員 工博 長崎大学助教授 工学部土木工学科  
(〒852 長崎市文教町1-14)

リッド空間におけるカテゴリーの配置を数量的に把握する方法を試みた。

以下、2. で地形・地質概要を述べ、地すべり発生の素因について考察する。次に、3. で解析方法、4. で解析結果について、カテゴリーの群別分類手法を中心に詳述し、5. で本手法の特色と問題点をまとめる。なお、解析の対象として、古くから地すべり多発地として有名な山口県油谷湾地域を選んだ。

## 2. 油谷湾地域の地形・地質概要

### (1) 地形概要

解析対象地を図-1に示す。油谷湾地域は地形・地質的観点から、向津具半島域とその対岸域とに分けられ、このうち地すべりの発生は半島域に限られる。

向津具半島の地形は、その地質および日本海の風波による影響を強く受けている。すなわち、北岸は海食によって高い断崖となっているのに対し、南側の海岸線は屈曲に富む複雑な地形状況を呈する。地すべりは第三紀層が分布する場所に集中し、これらの位置は平均勾配10~20°程度の緩斜面および平坦地となっている。また、このような場所には池が多数存在し、地下水の供給が多いことを物語っている。一方、玄武岩の分布する半島中央部では、標高100~200 mの緩い溶岩台地が形成されており、地すべりはほとんどみられない<sup>4)</sup>。

### (2) 地質概要

向津具半島域の基盤は、古第三紀に噴出した津安安山岩類、今岬安山岩類ならびに新第三紀層の砂岩、頁岩の互層等から構成されている。また、これらの基盤に貫入し、または覆う形で玄武岩が広く露出する<sup>5)</sup>。

一方、半島対岸域においては、白亜系の流紋岩類が基盤をなし、その上位標高100 m付近まで段丘状に第三紀層が分布する。したがって、第三紀層を覆う玄武岩

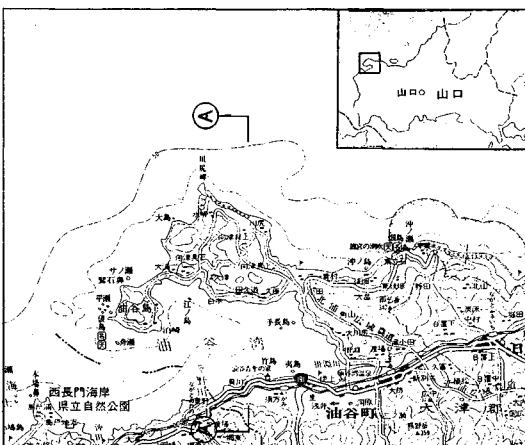


図-1 解析対象地

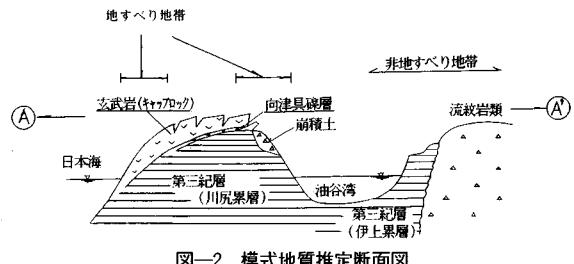


図-2 模式地質推定断面図

(キャップロック) の存在が、地すべり発生の地質的素因となっていると考えられる。図-2に解析地付近の地質状況を模式的に示す。

## 3. 解析方法

### (1) 解析の流れ

解析の流れを図-3に示す。まず、地すべり地のサンプルをモンテカルロ法により無作為に抽出する。次に、地形図、地質図、文献等の資料ならびに現地踏査の結果得られたデータの中から、地すべり発生に関与すると考えられる地形・地質的なアイテムを設定する。これらの

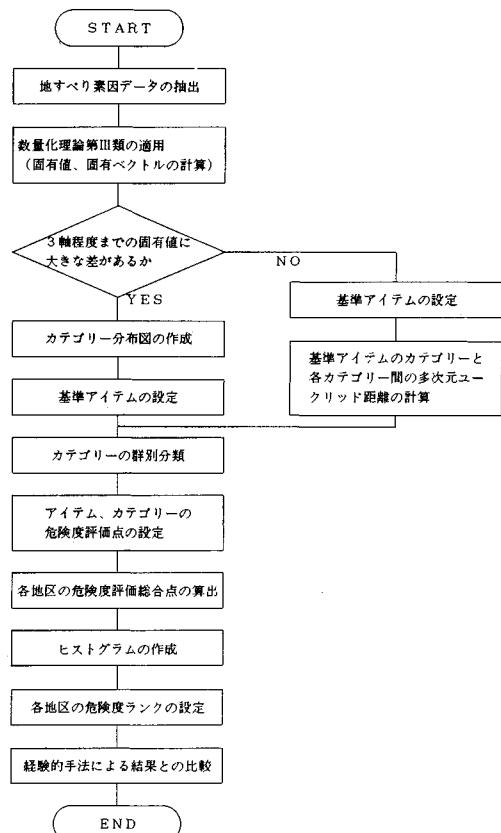


図-3 解析の流れ

アイテムを数個のカテゴリーに分別し、各サンプルがどのアイテム、カテゴリーに反応するかを調べる。

これらのデータに数量化理論第Ⅲ類を適用し、各カテゴリーの数量化値および固有値を算出する。ここで、得られた固有値の評価を行う。すなわち、1～3軸の固有値が4軸以下の固有値と比べ格段に大きいときには、4次元以降のカテゴリーの数量化値を無視することができる。この場合、3次元程度までのカテゴリーの数量化値の位置を表現することができるカテゴリー分布図を作成し、カテゴリーの群別分類を行うことが可能である。ところが、3軸以降の固有値が漸減するようなケースにおいては、4次元以降のカテゴリーの数量化値が無視できないため、カテゴリー分布図を利用した群別分類手法が適用できない。したがって、後者の場合多次元ユークリッド空間における各カテゴリーの配置を考慮し、群別分類を行わなければならない。

基準アイテムを設定した後、分類された各群のカテゴリーに、その群に属する基準アイテムのカテゴリーの危険度評価点を付与する。このアイテム、カテゴリーの危険度評価点をサンプルごとに累計し、各サンプルの危険度評価総合点を得る。次に、各サンプルの危険度評価総合点とその度数との関係をヒストグラムに描き、面積的に $n$ 等分することにより、おのおののサンプルの危険度ランク( $n$ 段階評価)を決定する。最後に、得られた結果を別途経験的手法により行われた危険度評価の結果と比較し、その妥当性を確認する。

## (2) クラスター分析による群別分類手法

データの構造を知る有効な手段として、そのデータを構成している個体をある基準によって分類することが考えられる。クラスター分析(cluster analysis)は、そのような目的に利用される手法である。この手法においては、組合せ的手法(combinatorial method)と非階層的手法(non-hierarchical method)が一般に知られている。前者の特徴はクラスターが形成されていく過程が階層的な(hierarchical)な構造をもつことと、その形成過程におけるクラスター間の類似度が1つ前の段階での類似度により計算されることである。これに対し、後者は分類される個体数が多い場合によく利用され、以下のような基本的な考え方を有する。

- ① 指定された個数のシード点(seed point)，すなわち、クラスターを形成する核を初期条件として与える。
- ② 逐次、個体とシード点との距離を計算し、それを基準に分類を行う。
- ③ ある収束条件を設定し、それが収束するまでシード点の変更を繰り返す<sup>6)</sup>。

次に、4軸以降の固有値が漸減するような場合におけ

る、カテゴリーの群別分類手法について述べる。この手法は上述した非階層的クラスター分析に属するものである。まず、アイテム中のカテゴリー数が適当に多く、かつ、危険度評価に対して大きく寄与すると想定されるアイテムを基準アイテムに選定する。この基準アイテム中の各カテゴリーの危険度評価点を、一般的な基準(カテゴリー間の危険度の常識的な順位)に照らし、あらかじめ設定する。次いで、基準アイテムの各カテゴリーとその他のカテゴリーとの多次元ユークリッド空間上における距離をそれぞれ算出する。ただし、本研究では固有値を重みとする2乗距離を採用し、次式による。

$$d_{rs}^2 = \sum W_i (X_{ri} - X_{si})^2$$

ここに、 $d_{rs}^2$ ：重み付き2乗距離

$W_i$ ：重み(固有値)

$X_{ri}$ ：カテゴリーの数量化値

$X_{si}$ ：基準アイテムのカテゴリーの数量化値

ここに、基準アイテムの各カテゴリーを中心とした群を想定し、その他のカテゴリーを最も距離の近い基準アイテム、カテゴリーが属する群に帰属させる。こうして、すべてのカテゴリーに、帰属する基準アイテムの各カテゴリーの危険度評価点を与える。最後に、得られた危険度評価点に常識的に矛盾がないかを確認する。

## 4. 解析結果

### (1) 地すべりに関与する要因の抽出

今回の解析では、まず地形状況から判断して地すべり地と想定されるサンプルを93か所無作為に抽出した。次に、地形図、表層地質図、土壤図等を参照し、また、現地踏査の結果を考え合わせ、地すべりに関与するアイテムとして、地形的要因3項目(平面形状、縦断形状、傾斜)、地質的要因3項目(表層地質、土壤、断層)、その他2項目(池からの距離、土地利用)を抽出した。さらに、これらのアイテムを2～6のカテゴリーに分類し、合計31個のカテゴリーを設定した。アイテム、カテゴリーを一括して表-1に示す。なお、表中の( )は各カテゴリーに反応したサンプル数を表わす。

### (2) 固有値の評価

前項で抽出したデータに数量化理論第Ⅲ類を適用して、各カテゴリーの数量化値および固有値を算出した。その結果、1軸から23軸までは固有値が漸次減少し、それ以降の固有値と大きな差が生じた(表-2参照)。したがって、カテゴリーの群別分類に際し、4次元以降、最低23次元までのカテゴリーの数量化値も考慮することが必要となり、カテゴリー分布図を使用した一般的な群別分類手法が適用できないという結果になった。なお、24軸から31軸の固有値が23軸までのものと比べ格段に小さいことから、ここでは24次元以降のカテゴリー

表一 アイテム・カテゴリー観表

アイテム	カ テ ゴ リ ー
平面形状	1) 沢型(54) 2) 尾根型(15) 3) 混合型(24)
縦断形状	4) 凸型(17) 5) 凹型(3) 6) 混合型(37) 7) 直線型(36)
傾 斜	8) 0°~5°(12) 9) 5°~10°(33) 10) 10°~15°(35) 11) 15°~20°(10) 12) 20°~25°(3)
表層地質	13) 玄武岩(20) 14) 砂岩(73)
土 壤	15) 黄色土壌(5) 16) 乾性褐色森林土壌(赤)(41) 17) 乾性褐色森林土壌(黄)(31) 18) 褐色低地土壌(16)
断 層	19) 有(31) 20) 無(62)
池からの距離(m)	21) 0(44) 22) 0~50(23) 23) 50~100(11) 24) 100~150(5) 25) 150~200(7) 26) 200以上(3)
土地利用	27) 田(45) 28) 針葉樹林(10) 29) 混交林(14) 30) 集落(20) 31) 未利用地(4)

の数量化値は無視した。

### (3) カテゴリーの群別分類

地すべりは、一般に15~20°程度の傾斜で多発することが知られており<sup>7)~9)</sup>、それ以下ではすべりのポテンシャルが低下する傾向にある。また、当該地すべりは第三紀層の地すべりに分類され、このタイプの地すべりは地表面勾配5~15°で多発するといわれている<sup>10)</sup>。このことは、表一の「傾斜」のアイテム・カテゴリーにおける各サンプルの反応状況とも一致する。そこで、基準アイテムに「傾斜」を選定した。この基準アイテムの各カテゴリーとその他のカテゴリーの23次元空間における重み付きユークリッド距離(2乗距離)を算出した。その結果、表三のようにすべてのカテゴリーを、距離が最も近い各基準アイテムのカテゴリーを中心とする群に帰属させることができる。

こうして、各カテゴリーに、距離が最も近い基準アイテムのカテゴリーの危険度評価点を付与した(表四参照)。なお、各軸の固有値をユークリッド距離の重みとした。ちなみに、表二の「土地利用」のアイテムを参

表二 固有値

軸	固有値	軸	固有値
1	0.54283	1 7	0.27349
2	0.49311	1 8	0.25941
3	0.44893	1 9	0.25151
4	0.44755	2 0	0.23317
5	0.43474	2 1	0.21558
6	0.41742	2 2	0.20439
7	0.40054	2 3	0.15819
8	0.38946	2 4	0.00015
9	0.36823	2 5	0.00014
10	0.36011	2 6	0.00014
11	0.34899	2 7	0.00013
12	0.34290	2 8	0.00011
13	0.32404	2 9	0.00009
14	0.31751	3 0	0.00003
15	0.29898	3 1	0.00000
16	0.29527		

表三 群別分類結果

カ テ ゴ リ ー 番 号	基 準 アイ テ ム の カ テ ゴ リ ー 番 号	カ テ ゴ リ ー 番 号	基 準 アイ テ ム の カ テ ゴ リ ー 番 号
1	1 0	1 7	1 0
2	1 0	1 8	1 0
3	9	1 9	1 0
4	1 0	2 0	1 0
5	1 0	2 1	1 0
6	9	2 2	1 0
7	1 0	2 3	1 1
8	-	2 4	1 0
9	-	2 5	1 0
1 0	-	2 6	9
1 1	-	2 7	1 0
1 2	-	2 8	9
1 3	1 0	2 9	1 0
1 4	1 0	3 0	9
1 5	9	3 1	8
1 6	1 0		

照すれば、「田」、「混交林」のカテゴリーの危険度が高く、「未利用地」の危険度が低くなっている。現地における状況とよく符合する。これらの結果から、この群別分類の妥当性が示唆される。

### (4) 危険度評価

前項で設定した危険度評価点のサンプルごとの総和を算出し、危険度評価総合点を得た。さらに、危険度評価総合点とその度数との関係をヒストグラム(図一四参照)に描き、面積的に5等分することにより、図一五に示すように、危険度の高いものからA、B、C、D、Eの順に5段階の危険度ランクを設定した。

### (5) 従来手法との比較

数量化理論第III類を適用した危険度評価手法では、結果の定量的な検証が、今のところ困難である。したがって、ここでは従来の経験的な手法による結果と比較して、結果の妥当性について検討する。図一六に藤原(理学博士、技術士、昭和36年東京教育大卒)が1972年に行った経験的な手法による危険度評価の結果<sup>11)</sup>を示す。図一

表四 危険度評価点

アイテム	危 険 度 評 價 点				
	0	1	2	3	4
平面形状	3)混合型	1)沢型 2)尾根型			
縦断形状	6)複合型	4)凸型 5)凹型 7)直線型			
傾斜(°)	8)0~5 9)5~10	10)10~15 11)15~20 12)20~25			
表層地質		13)玄武岩 14)砂岩			
土 壤		15)黄色土壌 16)乾性褐色森林土壌(赤系) 17)乾性褐色森林土壌(黄系) 18)褐色低地土壌			
断 層		19)有 20)無			
池からの距離(m)		26)200以上 21)0 22)0~50 24)100~150 25)150~200	23)50~100		
土地利用	31)未利用地 30)集落	28)針葉樹林 29)混交林	27)田		

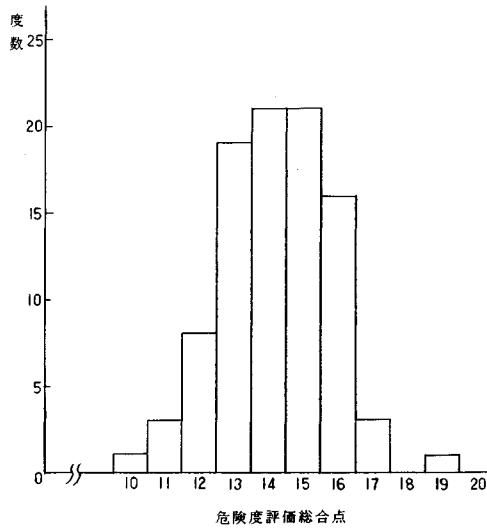


図-4 ヒストグラム

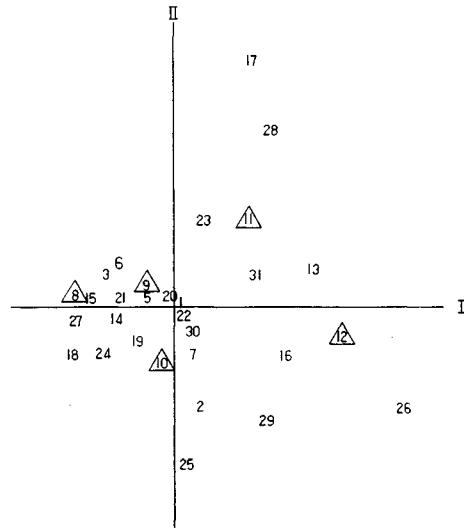


図-7 カテゴリー分布図

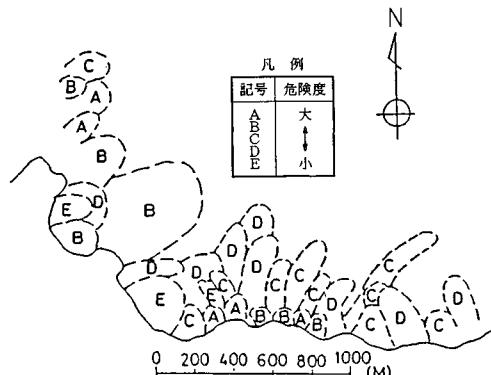


図-5 危険度ランク（本手法）

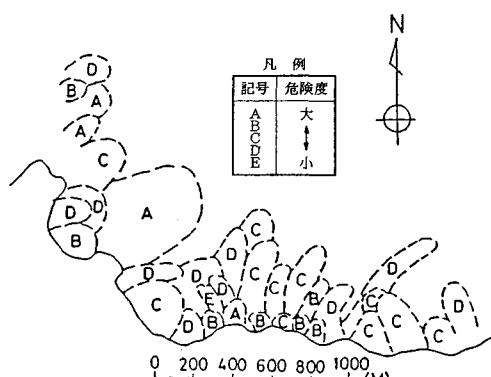


図-6 危険度ランク（経験による手法）

5, 6を比較すれば、多くの地すべりブロックにおいて、危険度が一致していることが明らかである。よって、地すべりの危険度評価に対し、本手法の適用が有効であるという結論に至る。

## 5. 本手法の特色と問題点

本事例のように、1~3軸までの固有値とそれ以降の固有値との間に大きな差がない場合、カテゴリー分布図を利用した群別分類手法が利用できないことは前述したとおりである。そのカテゴリー分布図（I-II軸平面）を仮に描けば、図-7のようになる。ここに、図中の数値はカテゴリー番号、△印は基準アイテムのカテゴリーを表す。この図からも、各カテゴリーがランダムに分散し、カテゴリーの群別分類が困難であることが明らかである。

このように、固有値が漸減する原因として、一般にサンプル数、アイテム数の不足ならびにその抽出方法の不手際等が挙げられる。ところが、「油谷湾地域保全開発調査報告書」<sup>5)</sup>によれば、半島全域の地すべりブロックの数は638か所で、うち沢型すべり404か所、山型すべり102か所、混合型すべり132か所となっている。これを表-1の「平面形状」の各カテゴリーの反応数と比較すれば、おおむね同様な割合になっており、うまくサンプリングされていると判断される。また、アイテム数についても収集可能な要因をできるだけ多く集めた。こうした理由から、解析対象地である油谷湾地域の特殊性が解析に影響を与えたと判断するほうが妥当であろう。すなわち、向津具半島の南側沿岸の地すべり地は全般的に危険度が高く、抽出したサンプルの危険度に大きな差がなかったことに起因すると考えられる。

前項まで詳述した非階層的クラスター分析による群別分類手法は、以下に記す特色を有する。

- ① 3軸以降の固有値が漸減するような場合にも適用できること。

② 基準アイテムの設定を除き、定量的に群別分類を行うことができるため、より客観的であること。

したがって、普遍的な危険度評価を目指す立場からすれば、本手法は非常に有用であると考えられる。

一方、問題点としては、基準アイテムの設定段階で主観が入るため、結果に大きな差異を生ずる危険性があることが推定される。この欠点を補うため、異なる基準アイテムを設定することにより、本手法を何度か繰り返し、最も妥当な結果を選択することが望ましい。

## 6. む す び

従来、斜面崩壊および土石流の危険度評価には数量化理論（主に第Ⅱ類）を適用した研究事例<sup>12),13)</sup>が多くみられ、実用的な成果をあげている。これは、斜面崩壊、土石流とも運動速度が速く、発生箇所と非発生箇所との識別が容易であり（外的基準が与えられる）、したがって、数量化理論第Ⅱ類の適用が可能であるという、大きな理由がある<sup>14)</sup>。また、地すべりに対しても第Ⅱ類を適用した研究事例<sup>15)</sup>がある。その結果は地すべり地の抽出という面では効果的であるが、著者らが目指す地すべり地の危険度ランク付けという目的に照らすと、精度的に若干の疑問点が残る。

一方、地すべりの危険度評価の従来手法は、経験やカソニに頼るため、個人的な見解の差を生じやすく、客観性、普遍性に欠けることは否めない。数量化理論第Ⅲ類を適用した本手法は、これらの欠点を補うことを目指すものであり、以下のような特質を有する。

① 従来手法に比べ、より客観的な危険度評価を行うことができる。

② 広域にわたる危険度評価を、より経済的に行う可能性を秘めている。

③ 広範な地域を対象とする危険度評価において、同一の基準によることができる。

しかしながら、現時点において解決しなければならない問題点もいくつか残っている。それを次に列挙する。

① 結果を検証する方法が確立されなければならないこと。

② 危険度ランクが相対的にしか設定できること。

③ 地すべりに対する適用事例が少ないため、一般性が問われること。

このうち、①については、工学的な検証を行うことは今の時点では不可能であると考える。したがって、5年ほど後に再び現地を訪れ、各地すべりブロックの状況を

把握・検討する予定である。②の問題点については、広範な地域を対象として解析を行うことにより、解決できると判断される。また、③についても、解析事例が増えすることで超えることができる問題であると考える。今後、これらの問題点を解決し、高精度で行うことのできる地すべりの危険度評価法を確立するため、多方面からのアプローチを試みる予定である。

**謝 辞**：本論文の作成にあたり、現地踏査と資料収集について種々ご協力いただいた山口大学工学部 村田秀一教授、兵動正幸助教授ならびに安福規之助手に対し、深謝の意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) 林知己夫・駒澤 勉：数量化理論とデータ処理、朝倉書店、1982.
- 2) 川口至商：多変量解析入門Ⅰ、森北出版、pp. 95～107, 1978.
- 3) 川口至商：多変量解析入門Ⅱ、森北出版、pp. 89～98, 1978.
- 4) 大原資生・島 史・村田秀一・松田 博・安福規之：風化玄武岩に起因する油谷地域地すべり拳動について、山口大学工学部研究報告、第35巻、第1号、pp. 71～76, 1984.
- 5) 建設省中国地方建設局：油谷湾地域保全開発報告書（日本工営株式会社）、pp. 5～11, 1975.
- 6) 前出3), pp. 26～44.
- 7) 藤原明敏：地すべりの解析と防止対策、理工図書、pp. 19～43, 1979.
- 8) 土質工学会編：土砂災害の予知と対策、土質基礎工学ライブラリー27、pp. 31～48、土質工学会、1985.
- 9) 渡 正亮・小橋澄治：地すべり・斜面崩壊の予知と対策、山海堂、pp. 7～12, 1987.
- 10) 前出9), p. 11.
- 11) 前出5), pp. 15～16.
- 12) 井東澄雄・石川重雄・西木敏夫：斜面表層崩壊予知に関する推計学的研究、地すべり、Vol. 24, No. 1, pp. 10～19, 1987.
- 13) 棚橋由彦・後藤恵之輔・杉山和一：土石流の事例解析と発生予測法の一試案、新砂防、Vol. 41, No. 5, pp. 3～13, 1989.
- 14) 杉山和一・後藤恵之輔・棚橋由彦：地すべりの危険度評価における数量化理論適用の試み、地すべり、Vol. 23, No. 4, pp. 24～28, 1987.
- 15) 川上 浩・斎藤 豊：姫川および裾花川流域における地すべり危険度評価、自然災害科学、Vol. 2, No. 1, pp. 26～36, 1983.

(1989.7.18・受付)