

## 衛星データを用いた広域崩壊地の危険度評価

Study on the Classification of Hazard  
of Slope Failures by Satellite Data

島 重章\* (Shigenori Shima)

平本和則\*\* (Kazunori Hiramoto)

1988年7月21日に発生した集中豪雨による土石流災害は、広島県加計町を中心に十数溪流におよぶ甚大な被害を与えた。本研究は、このような斜面崩壊の発生要因に着目し、統計的な手法による予測システムを開発した。まず災害発生後の人工衛星データ(LANDSAT/TMデータ)を入手し、衛星データを示す地表面の反射波長データと地域の土地基本調査データとの相関性から、広域の地盤の判別分類図としての風化区分図および土地被覆の現況を示す土地利用現況図を作成すると共に、数量化理論を用いて解析するもので、地図データとして得られる傾斜区分図、表層地質図および水系区分図と共に、崩壊危険斜面と同等の性質を有する斜面を定量的に判別するものである。結果として得られた知見は、人工衛星データによる広域土質地盤の画像処理から、風化進行の大きい地域が特定できること、数量化理論の適用により、危険度の高い地域がある程度予測評価できること、その要因としては、風化度がγ、傾斜が30°以上、植生が人工針葉樹林、表層地質が花崗岩、および水系がランクBについて斜面崩壊の危険性の高いことが判明した。

キーワード：斜面崩壊/マサ土/風化/表土/リモートセンシング/ (IGO:C-1, C-7)

## 1. まえがき

わが国は国土が狭いうえに地形・地質が急峻かつ複雑であり、加えて多雨多雪、地震多発地帯という厳しい自然条件下におかれており、自然開発の著しい進展という要因も加わり、常に自然災害の危険にさらされているといえよう。

最近の経済社会活動のなかで、土地利用の高度化および多様化を余儀なくされており、各地で大規模開発が行われる等、斜面との関わりがますます多くなる中で、斜面崩壊等の土砂災害が増加する傾向にある。

このような斜面崩壊の要因は、地形・地質構造および風化進行状況などの素因や、降雨・地震および融雪などの気象条件、切土や盛土による応力変化などの誘因が考えられる。しかしながら、このような要因を現場管理上のシステムに組み入れられるには多くの困難が伴い、実用に至っていないのが現状である。この土砂災害の増加傾向は今後も続くものと考えられ、これに対する対策は急

務とされているものの、目を見張るような特効薬は有り得ず、地道な観測・調査および研究の積み重ねから、初めて有効な対策が見いだされてくるものと考えられる。

ここでは、リモートセンシング技術を利用し、地上の広範囲の情報を定期的に提供する人工衛星データをもとに、地表面の反射波長特性を利用するものである。さらに、地図データをもとに数量化された地形地質情報を解析処理することにより、斜面崩壊の発生予測を広範囲に行おうとするものである。すなわち、人工衛星データから作成した風化区分図・土地利用現況図、および地図データとして得られる傾斜区分図・表層地質図・水系区分図をもとに、数量化理論(第Ⅰ類・第Ⅱ類・第Ⅲ類)を用いて広域崩壊地の危険度マップを作成し、斜面崩壊に対する危険度評価を行うものである。<sup>1), 2)</sup>

\* 広島工業大学工学部土木工学科助教授, \*\* 株式会社東建ジオテック 広島支店技術課

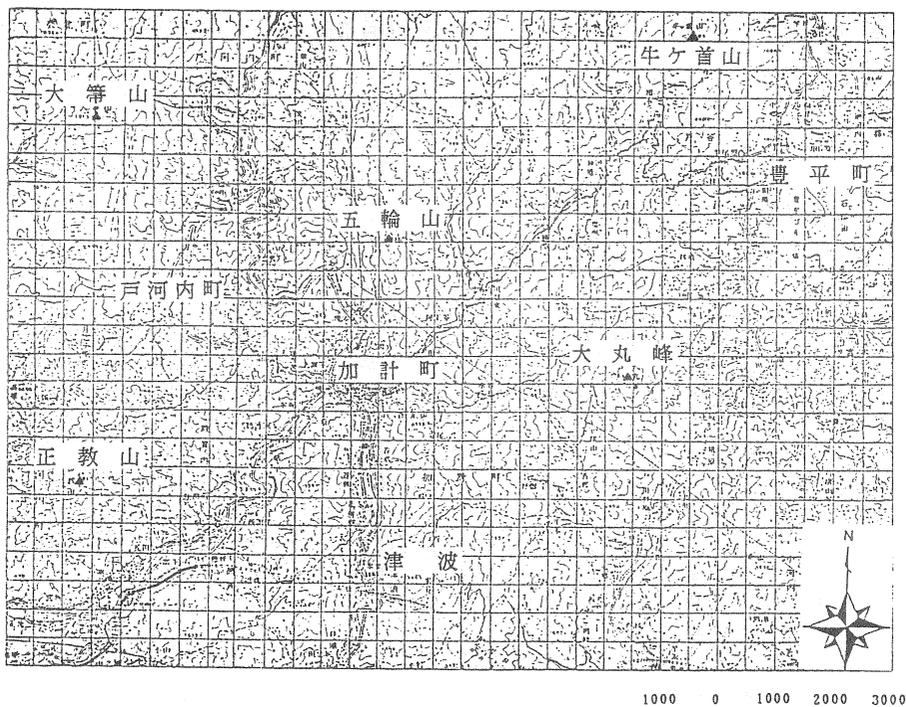


図. 1 調査地域の位置図

## 2. 現地の概要

調査地域は、図-1に示すように、広島県北西部に位置する山県郡加計町である。一級河川太田川水系の中上流域にあつて、標高 500~700mの山地が急傾斜面を成すなど、起伏山地を形成している。流域内の平坦地の地形は極めて悪く、中流部においては蛇行地形の形成がみられる。山頂部および山腹には浸食小起伏面が分布し、調査地の大部分は急傾斜地で占められている。

この付近の地質は、流紋岩類、花崗岩類および古生層群によって形成されている。なかでも花崗岩類の分布は広く、石英斑岩花崗岩および広島型花崗岩類質岩石に分類され、その表層部は風化土（以下マサ土と称す）に覆われている。この地域における風化の特徴は深層風化が挙げられ、過去における土石流の発生に伴う風化崩積土の堆積が渓流部にみられ、斜面を形成している。<sup>3)</sup>

最近発生した災害は、写真-1にその1部を示すが、1988年 7月21日に起こった集中豪雨による土石流で、その範囲は江河内谷川、中尾谷川ほか7溪流を主とする、大小十数溪流に達して多大の人的、物的被害を与えた。<sup>4)</sup>

この地域における風化の区分は、山地部における風化度として、土地基本分類に示された風化指標を参考とした。ここでは風化進行の小さいものから順に $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ とする。<sup>3)</sup>発生した土砂災害の主因は集中豪雨によるものであるが、地盤条件においてはこの風化が大きく関係しているものと考えられる。従つて、風化の最も進行していると思われる $\gamma$ 地区の分布を広域に把握することが重要になると考えられる。<sup>6)</sup>



写真. 1 災害後の状況<sup>5)</sup>

### 3. 人工衛星データの解析

人工衛星データは、地表面から反射または放射される光のうち人間の目に感じられる可視域と、それより波長の長い赤外域をいくつかの波長帯域に分けて観測することにより、地表面の種々の情報を収集するものである。一般に地表の物体は、その表面状態により太陽反射に対して固有の反射特性を示す。これらの物質から反射される電磁波の強さを測定し、特性を比較すれば、その物質の種類を識別することができる。図-2は、植物、土、水の可視・赤外域の反射特性である。<sup>7)</sup>

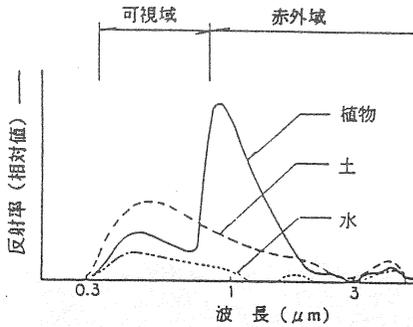


図-2 植物、土、水の反射特性<sup>7)</sup>

ここに使用した人工衛星は、米国(NASA)が打ち上げた、地上分解能が30m×30mを示す LANDSAT 5号である。このデータは、前述の災害発生後の1988年11月2日に観測したLANDSAT/TMデータである。ここではデジタルデータとして計算機適合テープ(以下CCTと称す)を入手し、アフィン変換による幾何補正を行った後1/5万地形図を目標とする画像表示を行った。TMデータの単バンド画像(7種類)の主な特徴を以下に示す。<sup>8)</sup>

① バンド1 (0.45~0.52 μm)

青から緑に見える可視域の波長帯であり、沿岸水域の区分や広葉樹と針葉樹の判別、土と植生の区別等の応用を目標におかれている。波長が短いために大気の影響を最も受けやすいが逆に大気情報を得るには非常に優れたバンドである。

② バンド2 (0.52~0.60 μm)

可視域の波長帯であり、健康な植物からの反射特性が観測される。水についてはバンド1とバンド2の比をとることにより、溶解有機物やプランクトンの存在を知ることができる。

③ バンド3 (0.63~0.69 μm)

赤色に見える可視域の波長帯で、葉緑素の吸収

度を評価し、植物の種類の違いを判読できる。また、土質境界や地質境界の決定に最も適したバンドである。

④ バンド4 (0.76~0.90 μm)

近赤外域のバンドであり、陸と海の高差がはっきりしている。また、植物からの反射が大きいため、植物量の調査等に適している。

⑤ バンド5 (1.55~1.75 μm)

植物や地盤の水分含水量の推定及び雲と雪の判別を目的とした中間赤外域の波長帯である。

⑥ バンド6 (10.4~12.5 μm)

他のバンドとは異なり、瞬時視野(IFOV)が他のバンドの4倍の120mである遠赤外域の波長帯である。常温の地表面温度分布データを得るためのもので、低温部は黒く、温度が高くなるにつれて白くなるように濃淡をつける。

⑦ バンド7 (2.08~2.35 μm)

地質における熱水変質地域の識別を目的とした中間赤外域の波長帯である。

このデータを用いて風化区分図および土地利用現況図を作成するもので、その解析手順は図-3に示す。ここで地図データとは、1/5万地形図および土地分類基本調査図である。

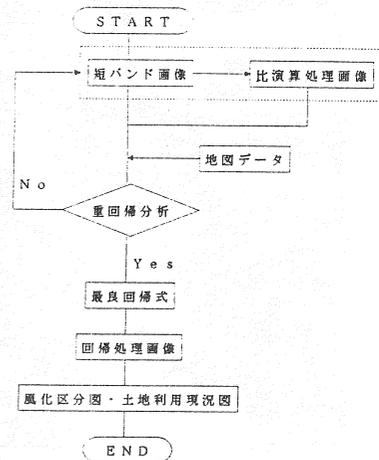


図-3 人工衛星データの解析手順

ここに比演算画像(以下RATIOと称す)とは、

$$RATIO-A, B = \frac{BAND A - BAND B}{BAND A + BAND B} \dots\dots(1)$$

以上の式により各画素間の演算処理を行い、画像

表示を行うために0～255の正規化数値処理を行うものである。次に回帰処理画像とは、地図データと画像データ間の高い相関を示す関係を得るために、重回帰分析の結果から得られる最良回帰式をもとに、新たに得られる画像である。ここでは、TMデータを解析手順に従って処理し、風化・土地利用表示画像に最適と考えられる単バンド画像および比演算処理画像を抽出し、風化度・植生との高い相関性を示す回帰処理画像を作成する。ここに得られる風化度とは表層地質に示される風化殻の深度 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ の波長特性を示し、植生とは土地利用に示される針葉樹林、広葉樹林、混交林などの波長特性を示す。

以下に、回帰処理画像の最良回帰式・相関係数を示す。<sup>9)</sup>

<風化区分図>

・重相関係数  $R = 0.912496$

・最良回帰式

$$Y = -0.603364X_1 - 1.89716X_2 - 7.12639X_3 + 2316.29 \dots\dots(2)$$

ここに、Y : 風化度

$X_1$  : RATIO-3, 6のCCT値

$X_2$  : RATIO-6, 1のCCT値

$X_3$  : RATIO-6, 2のCCT値

<土地利用現況図>

・重相関係数  $R = 0.926826$

・最良回帰式

$$Y = 0.277818X_1 + 0.0271856X_2 + 0.0835757X_3 - 12.7755 \dots\dots(3)$$

ここに、Y : 植生

$X_1$  : バンド3のCCT値

$X_2$  : バンド4のCCT値

$X_3$  : バンド6のCCT値

以上より、代表として風化区分図を図-4に示す。

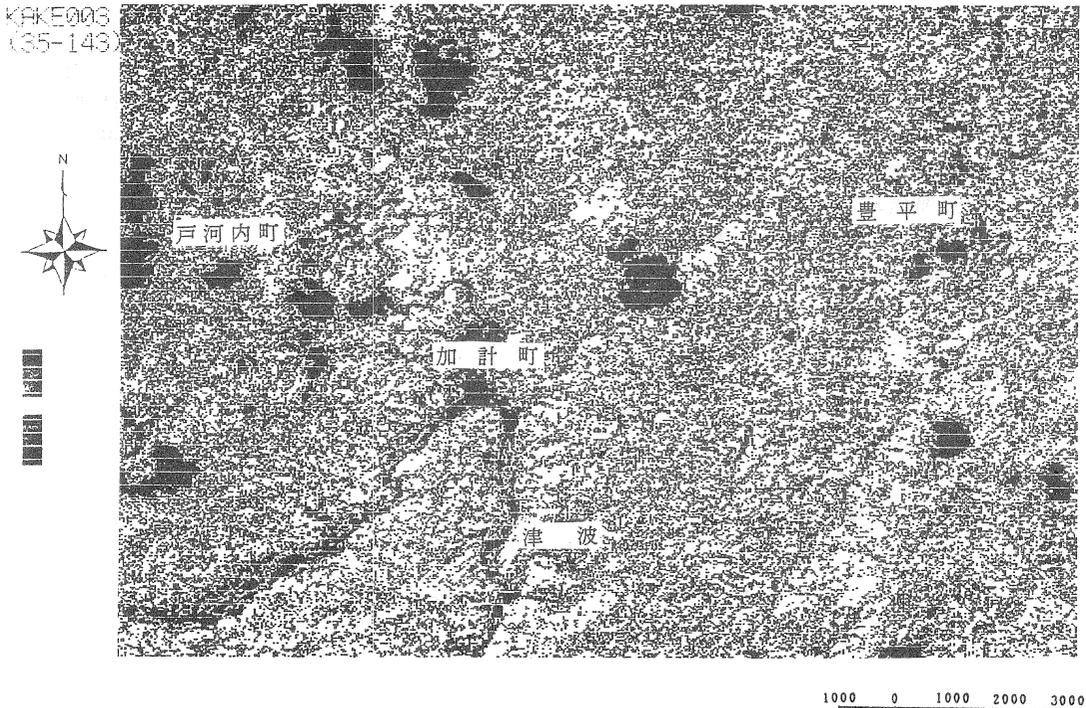


図-4 風化区分図

#### 4. 数量化理論による危険度評価

各種計測データを用いて現象を予測したり分類したりすることは、各分野においていろいろな現象を解明するのに重要である。ある現象を解明す

るには、現象に対する多くの特性要因に反応する質的パターンの項目や、測定した特性量を総合的にまとめて分析していく方法として、多変量解析が効果を示すと考えられている。

データが質的なものや、量的なものをカテゴリー化したもので得られているとき、それらを予測や分類の問題として解析する場合に用いられる情報量を、数量ではなくアイテム中のカテゴリーへの反応として得られたデータが、数量化理論データである。<sup>10)</sup>

- このデータを用いる数量化理論の目的は、
- (イ) 要因(アイテム)、範疇(カテゴリー)およびサンプルを数量化することによって、分類を数量的に行うこと。
  - (ロ) 分類に対する各要因の寄与の程度を数量的に表現すること。
  - (ハ) データとして得られていなかった新しいタイプのデータがどのグループに最も近いかを数量的に表すこと。

数量化理論(第Ⅰ類・第Ⅱ類・第Ⅲ類)を適用するにあたり、各要因に対して使用するデータは、人工衛星データとして回帰処理画像から風化度および植生であり、地形情報データとして土地分類基本調査図から傾斜、表層地質および水系を用いた。ここに、数量化分析作業を行うにあたり、多変量解析プログラムの数量化理論(第Ⅰ類・第Ⅱ類・第Ⅲ類)を使用した。対象とする解析範囲は縦11.5km、横15.5kmであり、500m四方の区画(713区画)に分割し、その範囲について解析検討したものである。

今回、水系区分図のランク分けは、水系の度合いが高いものから順にランクA・B・C・D・Eおよびなしと設定した。

以上のデータを用いて数量化理論(第Ⅰ類・第Ⅱ類・第Ⅲ類)を行う。

表-1 各区画におけるカテゴリー表

要因	番号	カテゴリー	要因	番号	カテゴリー
風化度	1	α	表層	1	砂
	2	β		2	泥質岩
	3	γ		3	流紋岩
傾斜	1	0° ~ 3°		4	安山岩
	2	3° ~ 8°		5	花崗岩
	3	8° ~ 15°	水系	1	なし
	4	15° ~ 20°		2	ランク E
5	20° ~ 30°	3		ランク D	
6	30° ~	4		ランク C	
植生	1	水田		5	ランク B
	2	人工針葉樹林		6	ランク A
	3	天然針葉樹林	外的基準	番号	カテゴリー
	4	天然広葉樹林		崩壊履歴	1 未崩壊(100)
	5	混交林		2 崩壊(200)	
	6	市街地			

① 数量化理論第Ⅰ類

数量化理論第Ⅰ類とは、分析しようとしている外的基準が数量Yで表現されるそのYの起こり方を予測するために、その外的基準に関連する要因中(アイテム)の区分(カテゴリー)の反応として説明特性が予測されているとき、それらの質的説明特性にもとづいて目的の特性数量Yを予測したり、アイテム・カテゴリーの要因分析などをする質的データ解析の方法である。

ここで、外的基準を崩壊履歴の未崩壊(100)・崩壊(200)とし、要因を風化度・傾斜・植生・表層地質・水系とし、表-1に示す。

解析手順は、まず解析対象地域を風化区分図・傾斜区分図・土地利用現況図・表層地質図・水系区分図上に設定して、500m四方の区画に分割する。その画像範囲(713区画)をサンプルとして、各区画についての外的基準・要因におけるカテゴリーを調べて数量化理論第Ⅰ類を行い、予測値により斜面崩壊に対する危険度を予測するものである。<sup>11)</sup>

解析の結果求まる予測値により危険度の高いものから順に危険度ランクA・B・C・安全として図-5に示し、斜面崩壊の危険度マップ(図-6)を作成する。この図より、既存の崩壊地は崩壊側に区分され、それと同等のランクを示す各区画についてA、BおよびC区分したものである。

従って、これらは現在未崩壊であっても、危険性の高い区画であると考えられ、今後の危険箇所予測の対象となるものと思われる。

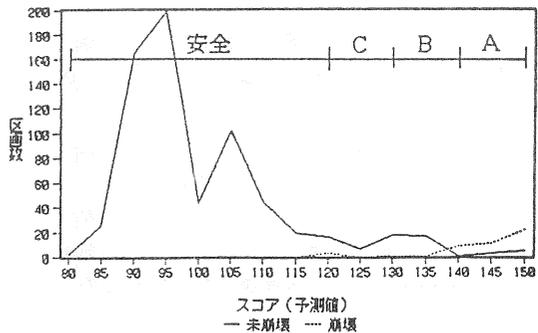


図-5 スコア分布図(数量化理論第Ⅰ類)

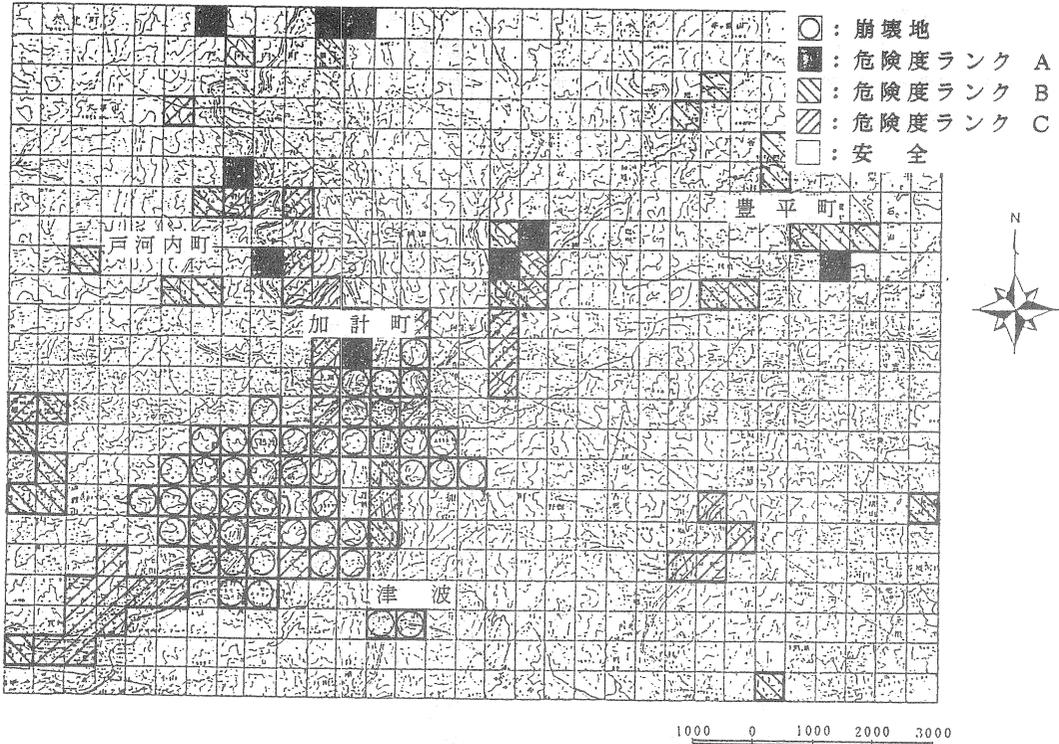


図-6 危険度マップ(数量化理論第Ⅰ類)

② 数量化理論第Ⅱ類

数量化理論第Ⅱ類とは、外的基準が分類で与えられている場合の、1と0の数値からなるデータの数量化分析である。

この分析の目的は、要因・カテゴリおよびサンプルを数量化することによって、分類を数量的に行い、分類に対する各要因の寄与の程度を数量的に表現し、データとして得られていなかった新しいタイプのデータがどのグループに最も近いのかを数量的に表すことであり、いわゆる質的データによる判別分析である。

ここで、外的基準を数量化理論第Ⅰ類と同様に崩壊履歴とし、各要因を風化度・傾斜・植生・表層地質・水系とし、表-2に示す。

解析手順は、数量化理論第Ⅰ類と同様に各図面上に500m四方の区画に分割し、画像範囲(713区画)をサンプルとして、各区画についてのカテゴリを調べて数量化理論第Ⅱ類を行い、判別得点より斜面崩壊に対する危険度を判別するものである。<sup>12)</sup>

解析の結果求まる判別得点により危険度の高い

ものから順に危険度ランクA・B・C・安全として図-7に示し、斜面崩壊の危険度マップ(図-8)を作成する。この図からも第Ⅰ類と同様に危険度のランクを各区画に示すと考えられ、危険箇所判別予測に使用できるものと思われる。

表-2 各区画におけるカテゴリ表

要因	番号	カテゴリ	要因	番号	カテゴリ
風化度	1	α	表層	1	砂
	2	β		2	泥質岩
	3	γ		3	流紋岩
傾斜	1	0° ~ 3°		4	安山岩
	2	3° ~ 8°		5	花崗岩
	3	8° ~ 15°	水系	1	なし
	4	15° ~ 20°		2	ランク E
5	20° ~ 30°	3		ランク D	
6	30° ~	4		ランク C	
植生	1	水田	5	ランク B	
	2	人工針葉樹林	6	ランク A	
	3	天然針葉樹林	外的基準 番号 カテゴリ		
	4	天然広葉樹林	崩壊履歴	1	未崩壊
	5	混交林	2	崩壊	
	6	市街地			

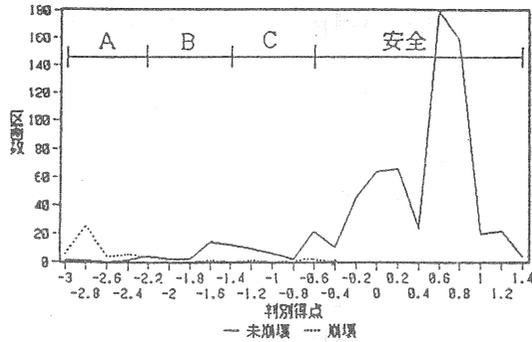


図-7 スコア分布図(数量化理論第Ⅱ類)

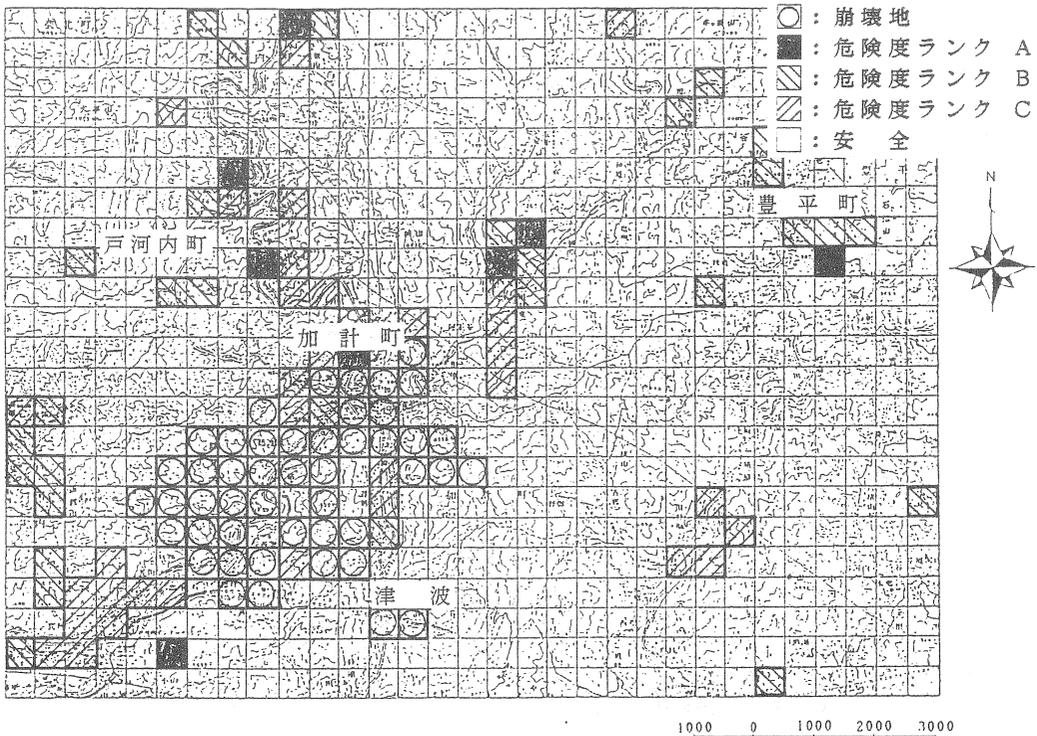


図-8 危険度マップ(数量化理論第Ⅱ類)

③ 数量化理論第Ⅲ類

数量化理論第Ⅲ類とは、第Ⅰ類や第Ⅱ類とは相違した外的基準を持たない手法である。この分析の対象となるデータは、いくつかの範疇に対して、各個体がどの範疇に反応したかを1または0で表したものである。

分析の目的は、範疇や個体を数量化することによって、それらを数量的に分類し、データのもつ構造を解明することである。

ここでは、風化度・傾斜・植生・表層地質・水系・崩壊履歴の6つの要因全てを範疇としそれぞ

れの範疇が崩壊の範疇にどれだけ数量的に近いかを判断して斜面崩壊に対する危険度を推定する。各要因とカテゴリーを表-3に示す。

解析手順は、数量化理論第Ⅰ類・第Ⅱ類と同様に各図面上に500m四方の区画に分割し、画像範囲(713区画)をサンプルとして、各区画についてのカテゴリーを調べて数量化理論第Ⅲ類を行い、カテゴリーの数量化値および固有値を算出し、斜面崩壊に対して大きく寄与すると想定される基準アイテムを設定し、得られた固有値をもとに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。ここでは、固有値を重みとする2乗距離を採用し、次式で求める。<sup>13)</sup>

$$d_{rs}^2 = \sum W_i (X_{ri} - X_{si})^2 \dots\dots(4)$$

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

ここで、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。全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矛盾がないかを確認する。

表-3 各要因とカテゴリー表

要 因	番号	カテゴリー	要 因	番号	カテゴリー
風化度	1	$\alpha$	表 層	1 6	砂
	2	$\beta$		1 7	泥質岩
	3	$\gamma$		1 8	流紋岩
傾 斜	4	0° ~ 3°	水 系	1 9	安山岩
	5	3° ~ 8°		2 0	花崗岩
	6	8° ~ 15°		2 1	なし
	7	15° ~ 20°		2 2	ランク E
	8	20° ~ 30°		2 3	ランク D
	9	30° ~		2 4	ランク C
植 生	1 0	水田	2 5	ランク B	
	1 1	人工針葉樹林	2 6	ランク A	
	1 2	天然針葉樹林	崩壊履歴	2 7	崩壊
	1 3	天然広葉樹林		2 8	未崩壊
	1 4	混交林			
1 5	市街地				

解析の結果、各カテゴリーの数量化値および固有値を算出し、表-4に示す。

表-4 各軸における固有値

軸	固有値	軸	固有値
1	0.664221	1 5	0.349545
2	0.567848	1 6	0.340696
3	0.500374	1 7	0.336642
4	0.497241	1 8	0.32487
5	0.453361	1 9	0.300131
6	0.442075	2 0	0.2701
7	0.433551	2 1	0.238892
8	0.420785	2 2	0.221902
9	0.411712	2 3	0.0230179
1 0	0.395903	2 4	0.0004021
1 1	0.389267	2 5	0.0003069
1 2	0.384497	2 6	0.0002279
1 3	0.378884	2 7	0.000142
1 4	0.374767	2 8	0.0000000

上記の固有値をもとに危険度評価点を算出し、表-5にまとめる。

表-5 危険度評価点一覧表

風化度	$\alpha$	2.0	砂	6.0
	$\beta$	4.0	表 泥質岩	4.0
	$\gamma$	10.0	流紋岩	2.0
傾	0° ~ 3°	2.0	層 安山岩	2.0
	3° ~ 8°	2.0	花崗岩	10.0
	8° ~ 15°	4.0	なし	6.0
	15° ~ 20°	6.0	水 ランク E	2.0
斜	20° ~ 30°	8.0	ランク D	4.0
	30° ~	10.0	ランク C	6.0
			系 ランク B	10.0
植	水田	6.0	ランク A	4.0
	人工針葉樹林	10.0		
	天然針葉樹林	2.0		
	天然広葉樹林	4.0		
生	混交林	4.0		
	市街地	6.0		

この結果より各要因において風化度では $\gamma$ ・傾斜では30°以上・植生では人工針葉樹林・表層地質では花崗岩・水系ではランクBで高い得点が得られた。

この危険度評価点を各区画ごとの総和を危険度評価総合点を算出し、更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-9)に示す。

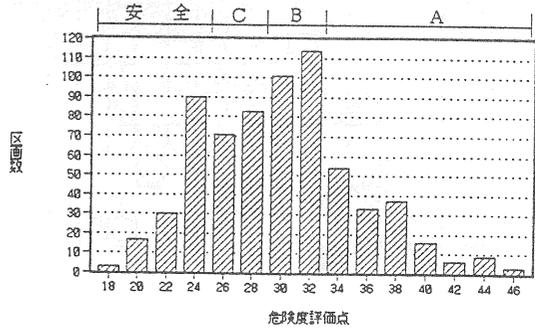


図-9 ヒストグラム

このヒストグラムを面積的に4等分することにより危険度の高いものから順に危険度ランクA・B・C・安全として表-6に示し、斜面崩壊の危険度マップ(図-10)を作成する。

表-6 危険度ランク

危険度ランク	危険度評価総合点	危険度
A	46 ~ 34	大
B	32 ~ 30	
C	28 ~ 26	
安全	24 ~ 18	小

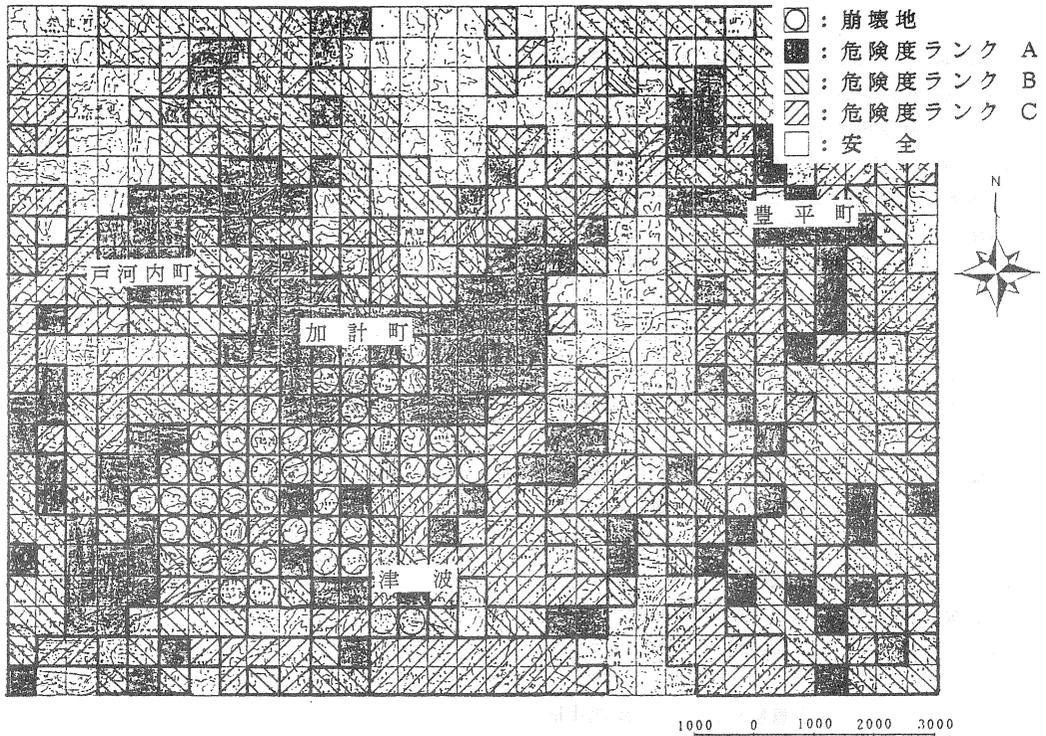


図-10 危険度マップ（数量化理論第Ⅲ類）

この結果は、危険性に対する主成分(各要因)のランク付けを行うもので、図示の危険度ランクの高いもの程、危険性の可能性を示すものであり、第Ⅰ類・第Ⅱ類以上に危険度の区画範囲を評価することができる。

### 5. 結論

人工衛星データを用いて斜面崩壊の危険度評価に対する検討を数量化理論で行い、風化度・傾斜・植生・表層地質・水系の5つの地理的条件をもとに分析を行った結果、以下に述べる結論を得ることができた。

- (1) 使用した人工衛星データは、LANDSAT/TMデータで災害発生後の1988年11月2日観測データである。この人工衛星データを用いて風化度・植生について画像処理を行い、共に信頼度の高いデータが得られた。このデータは広域地盤の表示として利用可能と思われる。
- (2) 数量化理論の適用により斜面崩壊に対して最も大きく影響を及ぼしているものとしては、風化度については $\gamma$ 、傾斜については30度以上、

植生については人工針葉樹林、表層地質については花崗岩、水系についてはランクBと判明した。

(3) 数量化理論による第Ⅰ類・第Ⅱ類および第Ⅲ類の3つの手法を用いて分析を行ったが、それぞれ手法は違うものの危険地帯と判定した区画はほぼ同じ位置を示した。

以上の結果、今後の災害発生地の予測や、それに対する対策を考える上で、数量化理論を用いて斜面崩壊地の調査を行うことは有意であるといえる。今後は、斜面崩壊の要因の1つに挙げられる降雨についても考慮に入れて分析を行い、斜面崩壊に対する要因を検討し、斜面崩壊の予知システムを確立して行きたい。

最後に、本研究を進めるにあたり、広島県加計土木建設事務所、広島県山県郡加計町役場建設部土木課、(株)きもと情報技術センターに、心から謝意を表す次第です。

参 考 文 献

- 1) 島 重章、上村直樹(1993):人工衛星データによる広域崩壊地の評価について、土木工学会中国四国支部講演概要集
- 2) 島 重章、平本和則(1994):数量化理論による広域崩壊地の危険度評価、土木工学会中国四国支部講演概要集, pp454-455
- 3) 広島県企画振興部編(1988):土地分類基本調査(加計)、広島県
- 4) 広島県土木建築部編(1988):県北西部豪雨災害(速報)版、広島県
- 5) 広島県土木建築部編(1988):資料(土石流災害)広島県
- 6) 土質工学会編集委員会編(1979):風化花崗岩とまさ土の工学的性質とその応用、土質工学会
- 7) R E S T E C 編(1989):宇宙から地球を見る、(財)リモートセンシング技術センター、pp. 47
- 8) 宇宙開発事業団編(1985):地球観測データ利用ハンドブック(ランドサット編)、(財)リモートセンシング技術センター
- 9) 川口至商(1978):多変量解析入門 I、森北出版 pp. 3-33
- 10) 林知己夫、駒澤勉(1990):数量化理論とデータ処理、朝倉書店、pp. 1-154
- 11) 川口至商(1978):多変量解析入門 I、森北出版 pp. 95-107
- 12) 川口至商(1978):多変量解析入門 II、森北出版 pp. 69-88
- 13) 川口至商(1978):多変量解析入門 II、森北出版 pp. 89-98