衛星リモートセンシングを適用した広島豪雨災害の予測と評価

Prediction and Evaluation of Earth Flow Disaster in Hiroshima Using Satellite Remote Sensing

島 重章^{a)}*・後藤恵之輔^{b)}

Shigenori SHIMA and Keinosuke GOTOH

Abstract

In Hiroshima there are many steep slopes. Recently, the development of the mountain slope has brought up the possibility of earth flow disaster. Therefore, the risk prediction technique has become a necessity. In this paper, the earth flow disaster, which occurred in Hiroshima on June 29, 1999, was examined using artificial satellite data of wide area. The satellite information data showed the usefulness of the risk prediction technique in forecast the slope torrent of mountains. Furthermore, the accuracy confirmation of the earth flow disaster prediction technique by using the satellite data showed the effectiveness of the future application.

Key words : weathering granite, natural slope, earth flow disaster, remote sensing, risk prediction.

和文要旨

全国的にも急傾斜地の多い広島市において、近年の山麓部開発は、土砂災害の危険性をもたらしているといえる。しかしながら、その危険性を予測するための対応策は、困難を要している。ここでは、1999年6月29日の広島豪雨災害発生箇所を広域情報として捉えた人工衛星データを用いて、災害発生以前のデータが示す情報の適用により、渓流斜面における風化土の堆積情報をもとに危険度予測手法の有用性を示した。さらに、衛星データによる土砂災害の規模および位置の確認が今後の評価へ有効であることを示した。

キーワード：風化花崗岩、自然斜面、土砂災害、リモートセンシング、危険度予測

1. はじめに

日本列島は、地殻変動帯に位置している。地形、地質は複雑であり、急峻な山地に加えてモンスーン常襲地帯に位置するため、豪雨豪雪型の厳しい気象条件下にあるといえよう。したがって、降雨災害の発生しやすい国土構造を有していると考えられる。また、環太平洋地震地帯に位置しているので地震災害の発生も多い。近年、わが国に発生した自然災害を表-1に示す¹⁾。

このような災害は、自然現象としての土砂移動現象と、我々の生活の場が交わる時にはじめて災害の対象となる。我々の生活をとりまく社会環境は、生産活動の拡大に伴い、生活の場が平地から山地へと拡大した。そのことが、近年の気象条件を誘因として発生する土砂災害との関わりを多くし、市街地への土砂災害によって甚大な被害を発生させているといえよう。

近年の土砂災害は、国内において毎年各地で発生している。土砂移動現象のうち斜面崩壊は、地すべりに比べて一般に小規模であるが、顕著な前兆を伴うことなく突発的に発生する場合が多い。ここ20年間の平均発生件数は500件/年であるが、斜面崩壊の件数はその半数以上を占め、それに伴い人的被害も毎年多発している²⁾。斜

表-1 最近の我が国の自然災害

Table 1 Natural disaster of the latest our country

年月日	災害名	主な被災地
H2. 11. 17~	普賢岳噴火	島原市
3. 9. 12~	台風 17, 18, 19 号	全国
5. 1. 15	釧路沖地震	釧路市
7. 12	北海道南西沖地震	北海道
7. 28~	平成 5 年 8 月豪雨	全国
6. 12. 28	三陸はるか沖地震	青森県
7. 1. 17	阪神・淡路大地震	兵庫県
8. 12. 6	土石流	長野, 新潟
9. 7. 10	土石流	鹿児島出水市
10. 8. 26~	平成 10 年 8 月末豪雨	福島, 栃木, 茨城
9. 21~	台風 18 号	九州
11. 6. 23~	梅雨前線豪雨	西日本
12. 3. 31	有珠山噴火	北海道
12. 10. 6	鳥取西部地震	鳥取, 島根
13. 3. 24	芸予地震	広島, 愛媛

面崩壊は、地質、地形、地盤、地理などの多岐に渡る要因が発生要因になると考えられる。このような要因のもとで発生する斜面災害に対して、「時刻」・「規模」・「場所」に関する要素を明らかにすることは、地域災害の原因を究明し、予知・予測により避難・回避できる社会環境を構築するために必要不可欠である。

災害の発生後に行われる緊急を要する被害状況調査としては、従来から航空写真測量が効果を発揮している。航空写真は太陽光のうちの可視光線を捉えて可視化したものである。さらに地盤調査を行うには、太陽光が示す可視光線データに加えて、それより波長の長い赤外線データが有効であると考えられる。それは地表面の熱量、

* 連絡著者 / corresponding author

a) 広島工業大学工学部建設工学科
Faculty of Engineering Hiroshima Institute of Technology
〒731-5193 広島市佐伯区三宅2-1-1
2-1-1, Miyake, Saeki-ku, Hiroshima, 731-5193, Japan

b) 長崎大学大学院生産科学研究科
Graduation School of Science and Eng. Nagasaki University

蒸発散量および水分量を検知するためである。斜面崩壊のような土砂災害を事前に予測するためには、地盤調査データが必要不可欠になると考えられる。リモートセンシング技術は、可視域から赤外域までのデータを用いた特徴抽出が可能であり、地表面を構成する物質を分類することが可能である。

危険箇所の予測のための調査を検討していくために、表層地盤に対する地域性、経年性、周期性を対象とするデータを用いて、筆者らはこれまでに衛星リモートセンシングによる地盤工学への適用性を検討してきた³⁾⁴⁾⁵⁾。

本論文では、1999年6月29日に発生した広島豪雨災害の発生原因を明らかにするために、国産地球観測衛星によって得られた災害発生以前のリモートセンシングデータをもとに、これまでの既報をとりまとめて斜面崩壊発生の予測と評価を行うものである。

2. 風化花崗岩地域の地域特性と災害履歴

2.1 地域特性

集中豪雨を誘因とする土砂災害は、地盤表層の脆弱箇所に見られ、土砂移動現象になると考えられる。西日本を広く覆う花崗岩地帯では、風化層の中に脆弱箇所を見出すことができる。従って、このような地域では、集中豪雨による斜面崩壊やがけ崩れなどの土砂災害の多いことも古くからよく知られている。

ここでは、広島豪雨災害が発生した広島型風化花崗岩地域の特性を述べる。対象とする範囲は、広島県の西部に位置して、図-1に示す5万分の1地形図N5-53-33-10「広島」である。地勢は、広島湾に面する広島平野、その背後の丘陵地や中国山地などが主な地形である。広島平野は、中国山地に源を発する太田川の流下によって三角州を形成し、市街地を發展させた。その周辺は、標高300~500mの山地で取り囲まれ、比較的ゆるやかな傾斜の山地部が広がっている。特に対象とする西部域は、佐伯区から隣接の廿日市市にかけて700m前後の山地に囲まれ、その山地部が前面の広島湾に急傾斜で臨んでい

る。広島市およびその周辺は、平坦地が少ないという地形上の制約があり、古くから海面の埋め立てが進められてきたものの、近年では、市街地が周辺の山地および丘陵地に拡大している⁶⁾。

(1) 地形

対象地域の広島市佐伯区周辺は、瀬戸内海からわずかな平地の広がりや谷地形を示し、全体的に標高500~600m程度の山地部から構成される。この地域は、中生代白亜紀の造山運動により形成された地形を成し、隆起準平化した山体が、侵食堆積を繰り返して現在の地形を形成した。

(2) 地質

この地域の地質は、白亜紀後期の広島花崗岩類を母体とする山体および第四紀層の堆積物から構成される。広島花崗岩類は、黒雲母花崗岩および角閃石花崗岩を主とする。第四紀層は、主に平地部に分布している沖積層のほか、山間部の極楽寺礫層、段丘堆積物、崩壊堆積物からなる。この地域の山地は、地盤特性として深層風化層を伴い、表層は風化残積土および風化崩積土であるまき土によって覆われているのが特徴的である。

(3) 土地利用

広島市の周辺では、太田川をはじめ、安川、吉山川、伏谷川、可愛川、御手洗川、八幡川、三筋川およびその支流流域の低平地において水田を主とする農業が行われてきた。また、山林は、大きく分けて南東部の大半を占める人工針葉樹林地帯、北西部の一隅を占める広葉樹林地帯、および中間にあるアカマツ林を含む混交林移行帯の3地域に分けることができる。

(4) 傾斜

広島市は、陸地部分のうち山地が約7割を占め、国内で最も急傾斜地の多い地域としてあげられる。したがって低地部の少ないこの地域は、山地部の開発が近年急速に拡大した。

山地部は、西に行くに従い高度と起伏を増し、それに応じて急傾斜の地域が広がっている。山地のうち傾斜30°未満の傾斜分布を見ると、北東-南西方向の地形配列に沿って伸びる傾向がある。調査対象地域は、土砂災害の発生した屋代川地区の極楽寺山山麓が15°以上20°未満、上小深川地区の窓ヶ山山麓が8°以上15°未満の傾斜を示している⁷⁾。

2.2 広島豪雨災害の被災状況

対象とした調査地域は、北緯34°22′、東経132°25′を中心位置とする広島市佐伯区の山地部の土砂崩壊現場である。1999年6月29日未明から降り続いた雨は、午後3時以降に集中豪雨となり、広島市西部から北部にかけて60mm/hr前後の降雨をもたらした。広島市西部域における観測資料を図-2に示す⁸⁾。この降雨は局所性が強く、広島市内ではあまり降雨が無いにもかかわらず、当該地では最大2時間降雨量が60~80mmを記録している⁹⁾。この集中豪雨により同地域において山腹の崩壊が

図-1 対象地域の位置概略図
Fig. 1 Outline map of the object area

図-2(a) 降雨量の日変化 (広島市消防局提供)
Fig. 2(a) Change of precipitation of rainfall (Offer of Hiroshima fire-fighting office)

図-2(b) 時間降雨量変化 (広島市消防局提供)
Fig. 2(b) Time precipitation change of rainfall (Offer of Hiroshima fire-fighting office)

表-2 広島豪雨災害による被害状況
Table 2 Damage situation by the Hiroshima heavy rain calamity

	広島全体					広島市域					呉市域				
	人的被害		家屋の被害			人的被害		家屋の被害			人的被害		家屋の被害		
	件数	死者	負傷	全壊	半壊	件数	死者	負傷	全壊	半壊	件数	死者	負傷	全壊	半壊
土石流等	139	13	5	49	62	107	13	5	47	62	10	-	-	-	-
地すべり	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
がけ崩れ	186	11	9	15	12	46	4	3	7	3	115	6	3	7	9
合計	325	24	14	64	74	153	17	8	54	65	125	6	3	7	9

各所に発生した。特に花崗岩の風化土により構成された地盤表層は、風化の進行した急傾斜地の山腹崩壊を促進させ、土石流となって数キロの溪流を流下して下流の田畑や家屋を直撃し、都市化の進行した団地への土砂流入を各地区で発生させた。主な災害状況を表-2に示す¹⁰⁾。

3. 衛星リモートセンシングデータの適用

3.1 人工衛星データの概要

自然現象を調査・解析する際に重要なことは、広域を見渡すこと、多くの側面から現象を見ることである。まず最初の視点は、人工衛星リモートセンシングによって、人間は宇宙から広域を観察することを可能とした。技術の進歩によって、この宇宙からの観測精度は年々高まる傾向にある。次の視点は、地理情報システムの登場によって数多くの情報を扱うことのできる、優れた電子頭脳を入手することを可能にした。人間の判断を加えることにより多現象の解析が可能となったのである。

リモートセンシング衛星データは、光学センサーとマ

イクロ波センサーに大別される。ここでは、地球表面の物質の分光反射率が異なることを利用した光学センサーデータについて説明する。人工衛星が地球へ送信してくる観測情報は、反射光に対応したデジタルデータを反射波長データとして提供する。このような反射波とは太陽光の電磁波であり、その波長の範囲はおおよそ0.4~数 μm 程度である。光学センサーは、これらの光を波長として捉え、地表物質の違いを色の違いとしてデータ処理することで画像表示が可能となる¹¹⁾。

物体の分光反射率は、物体の種類によって異なる。物体からの分光放射輝度は、分光反射率の影響を受けているため、数100kmの遠方からでも物体を識別できるのである。その例を紹介すると、まず土地被覆の代表的データとして植物、土、水の分光反射率を図-3に示す。植物は近赤外の領域で強い反射率を示し、土は可視領域と中間赤外で反射率が強く、水は全体的に反射率が小さい。植物が示す緑色は、針葉樹と広葉樹が同じ緑色をしてい

図-3 植物、土、水の分光反射特性
Fig. 3 Spectrum reflectance of a plant, ground, and water

図-4 植物の分光反射率
Fig. 4 Reflectance of vegetation spectrum

図-5 地盤表面の分光反射率
Fig. 5 Reflectance of spectrum on the ground surface

でも実際には違う緑色である。さらに近赤外域における大きな違いは、葉の細胞構造の違いにあるといわれている。その一例を図-4に示す。また、岩石や土も種類によって反射の特性が異なっている。図-5は、地盤表面の反射特性を示している。可視域から赤外域になるに従い反射率の変化は大きくなる。これらは土の種類と共に密度および含水量の多少が大きく影響している¹²⁾。

したがって、センサーによって捉えられる $0.75\mu\text{m}$ 以上の赤外域のデータは、水分の蒸発散量や、放熱量に依存した対象物からの放射データを示すことになる。その代表例が正規化差分植生指標 (NDVI) であるが、同様に地形、地質、水分などの情報の抽出が可能になると考えられる。

ここに使用した人工衛星データは、地球観測プラットフォーム技術衛星みどり (ADEOS) である。この衛星は、地球温暖化、熱帯雨林の減少、異常気象の発生等の環境変化に対応した全地球規模の観測データを取得し、

表-3 搭載センサ
Table 3 Satellite sensor

センサ名	バンド	波長範囲 (μm)	区分	分解能
高性能可視	BAND 1	0.42 ~ 0.50	B (青系)	16m
近赤外放射	BAND 2	0.52 ~ 0.60	G (緑系)	16 m
計	BAND 3	0.61 ~ 0.69	R (赤系)	16 m
(AVNIR)	BAND 4	0.76 ~ 0.89	近赤外	16 m

図-6 人工衛星データ ADEOS/AVNIRデータによる調査対象地域
Fig. 6 Investigation region by ADEOS/AVNIR satellite data

国際協力による地球環境監視に役立てると共に、次世代地球観測プラットフォーム技術の開発を目的とした衛星である。この衛星には陸域、海域、大気を総合的かつ継続的に観測するために、宇宙開発事業団 (NASDA) が開発した高性能可視近赤外放射計 (AVNIR) ほかに6種類のセンサーが搭載され、H-II 4号ロケットにより1996年8月に種子島から打ち上げられた。使用したADEOS/AVNIRデータの中からセンサー特性を表-3に、対象地域の崩壊発生以前の画像を図-6に示した。

3.2 使用したデータの解析方法

災害の発生には誘因と素因があり、それらが二つ以上作用したときに発生するといわれている。なかでも素因を発生以前に予測することができれば、災害の軽減に対処できると考えられる。そのような素因には、私たちの目に直接感知できるものとそうでないものがある。感知できないものとは、各種物質が有する放熱量や水分量の違いである。このような量を計測し表現するには、リモートセンシング技術の中で得られる波長別データを用いた特徴抽出法が有効であろう。

図－7 重回帰モデル作成の流れ

Fig. 7 Flow of creation for multi regression analysis model

まず、人工衛星データが有する波長別データの利用は、地表面に存在する事象の空間分布を表現するために、多数の事象との相関関係を分析することが必須事項となる。ここでは、このような空間情報の解析に重回帰分析を取り上げた。図－7に示すように、既存抽出データとしての地盤主題図および特徴抽出データとしての比演算処理画像を用い、目的変量と説明変量との設定による重回帰分析を適用した。段階的手法をもとに得られた最良回帰式から、重回帰モデルによる新たな地盤主題図を作成するものである。このようにして作成された地盤主題図は、経年変化に伴い発生する既存データの問題点を解消し、人工衛星データが捉える広域情報をもとに更新することが可能である。ここに特徴抽出データとして用いた説明変量は、表－4に示す比演算の組み合わせによる。その組み合わせは、

$$X_n = \text{Ratio} - mn \quad \dots\dots\dots(1)$$

であり、その演算式は、

$$\text{Ratio} - mn = (\text{BAND}m - \text{BAND}n) / (\text{BAND}m + \text{BAND}n) \quad \dots\dots\dots(2)$$

表－4 変数の比演算組み合わせ表

Table 4 Operation combination table of the ratio of a variable

n \ m	BAND 1	BAND 2	BAND 3	BAND 4
BAND 1		X1	X2	X3
BAND 2	X4		X5	X6
BAND 3	X7	X8		X9
BAND 4	X10	X11	X12	

$$X_n = \text{Ratio} - mn$$

$$\text{Ratio} - mn = (\text{BAND}m - \text{BAND}n) / (\text{BAND}m + \text{BAND}n)$$

表－5 重回帰モデル式
Table 5 Multi regression model formula

作成項目	重回帰モデルによる最良回帰式	寄与率
土地利用区分	$Y = -0.616X_2 + 0.272X_5 - 0.178X_{10} + 65.848$	0.781
表層地質区分	$Y = -3.161X_1 - 2.925X_2 - 2.075X_7 - 3.368X_{10} + 4.071X_{11} + 564.429$	0.894
地形区分	$Y = 0.234X_2 + 0.054X_6 - 78.585$	0.711
風化度区分	$Y = 3.676X_2 - 0.834X_3 + 0.966X_6 + 3.423X_7 - 911.403$	0.894
傾斜区分	$Y = 2.685X_3 + 2.964X_6 + 2.793X_7 - 3.011X_{10} - 0.055X_{11} + 72.234$	0.921
飽和度区分	$Y = -0.721X_2 - 0.407X_{10} + 0.535X_{12} + 136.672$	0.964
土壌区分	$Y = 0.792X_6 + 0.342X_8 + 0.632X_{11} - 132.067$	0.842

である。

3.3 地盤災害関連情報データの適用

対象とする地域の斜面崩壊は、極楽寺山（標高661m）を発端とする屋代川の急斜面を流下し、土石流災害を発生させて人的、物的に多大なる被害をもたらした。この五日市地域は、人口12万人の地区を構成し、近年、広島市の衛星都市として山麓の開発と共に都市化が発達してきた地域である。図－6に示した画像は、1997年5月17日観測の空間情報データである。このようなデータを用いて地表面の状況を解明するには、多数の事象との相関関係を検討することが必要である。ここでは、多変量解析の中から空間相関分析として用いられる重回帰分析を取上げ、重回帰モデルの作成を行った¹³⁾。その適用例を以下に示す。

同地域の重回帰モデルを作成するにあたり、ここでは土地分類基本調査図として作成された5種類の主題図（土地利用区分、表層地質区分、地形区分、傾斜区分、土壌区分）⁶⁾、および衛星データの特徴抽出法により作成した2種類の主題図（風化区分、飽和度区分）をもとに、重回帰モデル画像を作成した。結果としての重回帰モデル式を表－5に示す。その中から、ここでは斜面災害の関連データとして風化区分を取上げた。この風化が、当該地域の地盤災害に大きく関わってきた要因データとして、その特性を以下に述べる。

(1) 風化度指標

風化区分のための指標は、表層地質区分図の中に記載の一般的な風化度指標として、地質学的に用いられている風化殻の深度（ $\alpha \leq 3m$, $\beta \leq 10m$, $\gamma > 10m$ ）を基準とした。

(2) 風化区分の作成精度について

人工衛星データが取得した観測マルチバンドデータが示す単バンドデータから作成した比演算処理データを説明変量とし、既存データの中から目的変量を風化殻の深度とする重回帰分析を行った。その結果、表－6に示すF検定、t検定の結果のように、有意性の高い最良回帰式を得た。この式をもとに、新たな地盤主題図を作成し図－8に示した。

以上の手法により作成した画像は、広域の平面情報データを示す風化区分データである。風化度を示す指標は、図示のように弱風化 α を青系（DN=0～100）、中風化 β を緑系（DN=100～160）、強風化 γ を赤系（DN=160～255）に区分し画像化した。

表-6 重回帰分析の結果
Table 6 Result of multi regression analysis

説明変量 (X)	比演算処理によって得られた衛星 DN データ				
目的変量 (Y)	表層地質図から得た風化度指標 (α , β , γ)				
圧縮変換 Atan	説明変量				重相関係数 (R) 0.944
	(X2) R-13	(X3) R-14	(X6) R-24	(X7) R-31	
F値	F検定	説明変量(X)	偏回帰係数	t 検定	
F(5,7.1%) =4.336 <(17.927)	1%有意	R-13	+ 3.676	1%有意	
		R-14	- 0.834	1%有意	
		R-24	+ 0.966	1%有意	
		R-31	+ 3.423	2%有意	
		定 数	- 911.403	1%有意	
最良回帰式					
$Y = 3.676X_2 - 0.834X_3 + 0.966X_6 + 3.423X_7 - 911.403$

風化度指標	デジタル値	色
弱風化 α	0~100	青, 紫 (青系)
中風化 β	100~160	緑, 黄 (緑系)
強風化 γ	160~255	橙, 赤 (赤系)

図-8 衛星データを基に作成した風化区分図

Fig. 8 Weathering classification image created based on satellite data

(3) 重回帰モデルとしての地盤主題図

地形情報を表現する場合、地図情報では以前から等高線が利用されてきたが、近年のデジタルマッピングとしてリモートセンシングデータの利用は更なる適用範囲を広げた。重回帰モデルとして作成した地盤主題図は、既存の主題図を更新した地理情報システムとしての利用が可能である。例えば縮尺1万分の1画像として作成した地盤主題図は、地盤データベース化を行うことにより平面情報を提供する各種分野への利用が可能になる。

図-8は、対象地域における風化区分を示した画像である。当該地域は風化花崗岩を母岩とするまさ土に覆われ、山地部は急傾斜を成している。なお、ここに述べる風化土とは、花崗岩の風化土のうち残積土および崩積土

表-7 風化度指標区分
Table 7 Degree index classification of weathering granite

風化度指標	風化殻深度	DN値	画像の色
弱風化 α	3 m未満	0~100	青色系 (紫, 青)
中風化 β	3~10 m	100~160	緑色系 (緑, 黄)
強風化 γ	10 m以上	160~255	赤色系 (橙, 赤)

の両方を指している。その谷部から平地部は、深層まで風化の影響を受けたまさ土によって構成されている。この地域の地盤風化特性は、表-7に示す風化度指標に3区分される。弱風化の地域は露出岩の多く見られる山体に多く、風化残積土砂量も少ない。中風化の地域は一般に地域全域に見られる風化残積土である。強風化の地域は広島型風化花崗岩地域において風化残積土および崩積土として存在し、低地部や谷部に多く見られる。特に広島市周辺の標高100~300m程度の丘陵山地は、そのかなりの部分がまさ土であり、厚さ10m以上の土砂化した層によって構成された深層風化層を形成している。

衛星データが示す風化度の判読精度は、搭載センサーによって瞬間視野角が示す画素単位で示される。ここでは人工衛星のセンサーが示す地表距離換算値として1画素が16m×16mを示すことから、ここでは地表平面距離16mごとのデータ判読を可能とした。

4. 広島豪雨災害予測の結果と考察

4.1 土砂災害危険度予測への適用

土砂災害を予測する方法としては、各機関で多くの案が出されている。その予測項目としては、「時刻」、「規模」、「場所」の3項目の情報を得ることができれば、今後の対策に有効であると考えられている¹⁴⁾。まず、「時刻」については、基準雨量設定法等に見られるように、降雨を誘因とする発生予測の検討が多くなされていることから、別の分野で検討することにする¹⁵⁾。ここでは図-9に示すように、①崩壊の規模および②崩壊の位置の2項目について、衛星リモートセンシングを適用した検討を試みた。前項で述べた地盤主題図をもとに、災害の予測のための要因を設定し、それぞれの適用について述べる。

(1) 崩壊規模の予測

土砂災害は、地山を構成する地質の影響を受け、土砂移動現象を発生させ、崩壊に至る。広島周辺に発生した土砂災害は、山体の風化が大きく影響し、各所に崩壊の痕跡を残した。したがって、風化に伴う崩壊の予測を検討することが必要になる¹⁶⁾。

まず「規模」についての予測手法を検討する。降雨量と移動可能土砂量から土石流の規模を推定する方法があるが、ここでは渓流斜面における堆積土砂量をリモートセンシング衛星データから計測推定し、災害の規模を予測するものである¹⁷⁾。そのための適用箇所として、広島市佐伯区において1999年6月29日に発生した土石流災害を取上げた。屋代川流路に堆積したまさ土の風化崩積土

図-9 土砂崩壊発生の予測の流れ

Fig. 9 Flow of generating factor prediction of earth flow disaster

砂量を推測するために、災害発生以前に観測したリモートセンシングデータを用いて計測し、実際に発生した崩壊土砂量と比較検討した。

災害の規模を推測するためのデータとして、図-10に土砂災害の発生した地域を拡大図示し、図-11に屋代川流路の縦断面図を示し、堆積土砂標準断面図を図-12に示す。屋代川は三筋川の支川で、約2,500mの延長を有する急傾斜の山地河川である。この流域の表土はまさ土から成り、山地斜面の植生は上流部が混交林、中流が人工針葉樹林によって覆われ、中下流部が自動車道路および団地などの生活基盤によって構成されている。この流路において広島豪雨災害のうち最も延長の長い土石流が発生し、流下した土砂が都市化の進行した中下流域において生命および財産に多大な損害を与えた。このことから、渓流斜面に堆積している土砂量を事前に流域ごとに測定できれば、被害を最小限に抑制することができると思われる。

ここでは、リモートセンシングデータの中から、風化区分画像を用いて流水路のデジタル値（以下DN値と称す）を判読し、風化の深さを示す風化度指標をもとに堆積土砂量へ換算するものである。このリモートセンシングデータが示す放射量とは、地盤材料固有の水分量や放射量のことであり、人間の眼に感知できない特性を示す。したがって、空間情報量として画素単位で捉えた特徴抽出データは、地盤情報データとしての画像表示が可

図-10 災害発生地の拡大図

Fig. 10 Enlargement of earth flow disaster area

図-11 対象地の縦断面図

Fig. 11 Longitudinal section of the object ground

図-12 標準横断面図

Fig. 12 Standard transverse cross section

能であると考えた。対象地域の風化度は、地形要因データとして得られた風化区分画像をもとに風化深度の違いを定量化して示した。

その手法は、風化区分画像が示す風化深度とDN値の関係を図-13に示し、図-11に示した屋代川縦断面図中のDN値のデータをもとに風化深度への換算を可能とした。その換算値は、風化殻の深度から経験的に求めた

図-13 風化区分とDN値の相関性

Fig. 13 Correlation of weathering classification and DN value

$\alpha = 3\text{m}$, $\beta = 6\text{m}$, $\gamma = 12\text{m}$ を基準値とし、衛星データが示すDN値に対応させたものである。

風化区分画像が示す1画素は、地上換算距離16mを示し、流路縦断面図に沿ったDN値の判読を単距離100mごとに計測し、下流端 (No.1) から最上流端 (No.26) までの集計を求めた。ここに示す崩壊土砂量は、平均断面法による体積土砂量 (V) である。いま区間nにおける全体積土砂量Vは、式(3)により求められる。

$$V = \int_1^n dV = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (A_i + A_{i+1}) \cdot d \cdots \cdots (3)$$

ここに、 A_i , A_{i+1} ; 区間iおよびi+1番目の断面積
d; 区間距離

その集計量は、崩壊土砂量計算値として表-8に示した。

(2) 崩壊場所の予測

重回帰モデルとして作成した地盤主題図は、対象地域である広島市佐伯区において1万分の1地形図との重ね合わせによる地理情報データを作成し、データベース化した。そのデータを用いて、崩壊場所の予測を検討した¹⁸⁾。

ここに用いた地盤主題図は、観測年 (1997年) の地形要因データであり、地盤データベースとしての利用が可能である。これらのデータを用いて、1999年6月29日に発生した土砂災害の危険箇所を予測するにあたり、ここでは多変量解析の中から判別分類を行うことを目的とする数量化第Ⅱ類を適用する。その解析範囲は、図-10に示した風化区分図の中から拡大範囲の領域 (100画素×100画素) を対象とした。

まず外的基準を設定するにあたり、作成した地盤主題図の中から土砂崩壊現象の発生に寄与すると考えられるデータを選定する。数量化第Ⅱ類の処理結果から判別区分されるデータは、外的基準として選定したカテゴリーを母集団とする分離度の良否によって示される。それは

表-8 崩壊土砂量計算表
Table 8 Amount of collapse of disaster

測点 No.	追加距離(m)	DN 値	風化層 (m)	横距離 (m)	断面積 (m ²)	平均断面 積(m ²)	体積 (m ³)
No.1	0	135	7.8	30.0	140.4	140.4	0
No.2	100	70	2.8	30.0	49.7	95.0	9500
No.3	200	62	2.2	20.0	26.7	38.2	3820
No.4	300	43	0.7	12.5	5.2	16.0	1600
No.5	400	56	1.8	10.0	10.6	7.9	790
No.6	500	57	1.8	12.5	13.8	12.2	1220
No.7	600	35	0.1	15.0	0.9	7.4	740
No.8	700	35	0.1	10.0	0.6	0.8	80
No.9	800	66	2.5	7.5	11.0	5.8	580
No.10	900	52	1.4	7.5	6.2	8.6	860
No.11	1000	35	0.1	10.0	0.6	3.4	340
No.12	1100	35	0.1	10.0	0.6	0.6	60
No.13	1200	35	0.1	7.5	0.5	0.5	50
No.14	1300	49	1.2	15.0	10.8	5.6	560
No.15	1400	49	1.2	15.0	10.8	10.8	1080
No.16	1500	49	1.2	10.0	7.2	9.0	900
No.17	1600	57	1.8	12.5	13.2	10.2	1020
No.18	1700	40	0.5	10.0	3.3	8.2	830
No.19	1800	35	0.1	10.0	0.6	1.9	190
No.20	1900	47	1.0	12.5	7.5	4.1	410
No.21	2000	53	1.5	10.0	8.8	8.1	810
No.22	2100	67	2.6	7.5	11.7	10.2	1020
No.23	2200	66	2.5	10.0	14.7	13.2	1320
No.24	2300	55	1.6	12.5	12.1	13.4	1340
No.25	2400	49	1.2	10.0	6.9	9.5	950
No.26	2500	104	1.4	10.0	32.1	19.5	1950
合計	崩壊土砂量計算値 = 32020 m ³						

表-9 数量化分析Ⅱ類アイテム・カテゴリー表
Table 9 Item category table of quantification analysis Ⅱ

アイテム	カテゴリー	カテゴリー数量	偏相関係数
風化	α β γ	(外的基準)	
表層地質	深成岩 固結堆積物 未固結堆積物	-0.1448 0.0226 0.0304	0.0717
土地利用	人工針葉樹林 天然広葉樹林 市街地	-0.2341 0.0123 3.5132	0.5617
傾斜	0~15° 15° ~40° 40° 以上	-0.2001 0.0855 0.9181	0.3159
飽和度	低含水域 中含水域 高含水域	0.3904 0.0342 0.5652	0.1739
土壌	乾燥褐色森林土 残積性未熟土 粗粒残積未熟土	-0.1711 0.0251 0.0375	0.0688
地形	山地 台地・丘陵地 低地	0.0509 0.0753 1.1281	0.2497

アイテムの中から相関比としての高い値を示す要因データを選択することが必要条件となる¹⁹⁾。ここではアイテム項目の中から風化区分の相関比 (0.8) を得た。従ってその他のアイテムを要因データとする数量化分析を行った。それらの数量化演算データおよび処理結果を表-9にまとめて示した。

設定した外的規準は、風化区分の指標に示した弱風化 α 、中風化 β および強風化 γ である。分析結果は、数量化されたデータをスコア値分布図として図-14に示した。

数量化Ⅱ類スコア分布(極楽寺地区)

図-14 スコア分布図 (風化度)
Fig. 14 Score distribution figure (degree of weathering)

図-15 危険度評価図 (外的基準: 風化度)

Fig. 15 Danger evaluation figure (external standard: degree of weathering)

この地域にこれまで発生した土石流災害のうち、1987年に発生した広島県北西部災害(加計町災害)の現地調査にも見られたように、風化の進行した山腹に残積した風化土および溪流に堆積した崩積土が移動現象を起こしている²⁰⁾。このような地域特性をもとに、風化の進行した強風化箇所を脆弱箇所を設定した。したがって、崩壊発生箇所(γ領域)を主として危険度Aとして表示し、更にスコア値の区分の分布からβ領域を危険度Bとし、α領域を危険度Cと設定した。この3区分を評価判定基準として適用し、解析範囲(100画素×100画素)を対象に、図-15に示す危険度評価図を作成した²¹⁾。

4.2 衛星データによる災害状況の予測結果

人工衛星データから得られた空間情報データのうち、作成した地盤主題図の利用により、ここでは災害発生の可能性を絞り込むための規模および場所の予測を検討した。

崩壊発生規模の検討のため、(社)地盤工学会調査部および中国支部による災害緊急調査委員会が2000年3月に提出した調査報告書の中から、佐伯区管内の主な溪流における発生土砂量を表-10に示す²²⁾。屋代川の場合、崩壊後に発生土砂量として報告された35,816m³と比較すると、風化度指標図をもとに得られた崩壊土砂量計算値32,020m³は、(発生量/計算量)=1.12である。広域性を考慮すると、かなり良いと思われる値を得た。

土砂災害は、多くの要因が複数個以上作用して発生すると考えられている。その中でも、溪流勾配、堆積土砂および多量の降雨が大きな要因を占めると考えられてい

表-10 佐伯区の流出土砂量

Table 10 Amount of earth and sand outflow of Saekiward

溪流名	流域面積(km ²)	発生土砂量(m ³)
古野川	0.873	46,600
堂ヶ原支川	0.021	3,335
荒谷川	3.705	111,308
下ヶ迫川支川	0.195	8,161
屋代川	0.806	35,816

る。ここでは、地域特性を考慮した風化区分データをもとに堆積土砂量に着目した。強風化したまき土の混在する広島型花崗岩土は、土層内に浸透した雨水により傾斜面を移動したと考えられる。その拡大現象が土石流となり、下流への被害を大きくした。ここに検討した堆積土砂は、時間経過の中で累積された土砂量である。従って、この地域では溪流に堆積する土砂量を地盤情報データとして捉え、追跡調査を行うことが必要であろう。そのためにも今後、衛星リモートセンシングによる堆積土砂量の計測を継続することにより、流域における広域崩壊発生規模の予測を可能にすると考えられる。

つぎに崩壊場所の予測は、崩壊発生より以前の人工衛星データを用いて検討した。ここでは広島豪雨災害時に数ヶ所の崩壊を発生させた極楽寺山山腹を対象地として取上げ、地盤主題図から崩壊危険度の高い箇所を検証推定するものである。危険度判定のためのアイテム・カテゴリーは、外的基準として設定した風化区分との関係が危険度評価に大きく関係していると考えられる。

危険度評価図は、相関比に基づく外的規準を風化度として数量化第Ⅱ類により作成したものである。土砂崩壊の発生した屋代川流路に沿って危険度ランクを確認すると、極楽寺山頂はランクAと評価され、その山頂を源頭部とする土砂災害の発生流路では、ランクBの評価が多くみられる。その流路に沿った崩壊の中率は、71.6%である。このような評価図は、潜在的な危険性を示すハザードマップになると考えられる。

1999年6月29日の集中豪雨と共に発生した斜面崩壊は、風化した山地部と荒廃した土地利用および急傾斜地形に関係すると考えられる。その山麓部に団地造成などの都市化現象が拡大したことが、土砂移動現象に伴う土石流の直撃や土砂流入などの被害を直接的に大きくしたと考えられる。

5. おわりに

土石流の発生を予測するために、地球観測プラットフォーム技術衛星「みどり」のADEOS/AVNIRデータを用い、地形要因データを重回帰モデル画像として作成した。そのデータをもとに、堆積土砂量の計測から堆積規模の予測を行った。更に、地盤主題図をもとに数量化

第Ⅱ類を適用し, 崩壊の可能性の高い場所の予測を行った。ここに得られた結果を以下に要約する。

- (1) 空間情報データとして得られた人工衛星データは, 広域性, 周期性, 継続性などの特性を有すると共に, 観測時の地被地覆情報との相関性を示すデジタルデータを提供する。
- (2) 重回帰モデルの説明変量として用いた比演算処理データは, 地被地覆データのうちの反射特性および放射特性を特徴抽出データとする相関性を示し, それらのデータから地盤表層データの抽出が可能である。
- (3) 重回帰分析により得られた風化度の地盤情報データは, 解析結果が示す重相関係数, F検定, t検定について高い精度を示すと共に, 有意性の高い最良回帰式から重回帰モデルを作成することができた。
- (4) 土石流が発生した溪流の流域内には, 風化残積土および崩積土が厚く堆積するが, この堆積土砂量は, まさ土の風化特性を示す重回帰モデルと相関を示す。
- (5) 重回帰モデルとして作成した風化区分画像は, そのデジタル値が示す数値の判読から, 流出可能土砂量としての堆積土砂量の推定が可能である。
- (6) 崩壊の予測は, 時刻, 場所および規模である。重回帰モデルから推定された堆積土砂量は, 実際の土砂崩壊発生量と同等の値を示したことから, 広域の風化土地域において多発する崩壊予測箇所の絞込みおよび崩壊予測規模の推定が可能である。
- (7) 地盤主題図として作成した重回帰モデルは, 地形図と共に地理情報データとしてのデータベース化が可能であり, 新規の広域情報として更新することが可能である。
- (8) 人工衛星データをもとに作成した地盤主題図の中から, 数量化第Ⅱ類のアイテムとして設定した外的規準は, 土砂災害の可能性をランク付けした位置情報として, 危険度ランクの画像表示が可能である。
- (9) 危険度ランクは, 対象地域の平面情報として広域情報を提供する。作成した評価図は, 潜在的な危険度を示すハザードマップになると考えられる。

謝辞

おわりに, 本研究に使用したADEOS/AVNIRデータは, 宇宙開発事業団から研究者用配布データとして提供を受けたものである。ここに記して謝意を申し上げます。

引用文献

- 1) 国土庁編 (2000); 平成12年度防災白書, pp. 1-52.
- 2) JOSシステム研究会編 (2003); 突然襲う土砂災害.
- 3) 日本道路公団広島管理局編 (1993); 中国自動車道のり面防災検討報告書, (財)高速道路技術センター, pp. 45-56.
- 4) 島 重章 (1994); 重回帰分析による地盤判別分類画像の作成, (社)日本リモートセンシング学会第17回学術講演会, pp. 69-70.
- 5) 島 重章, 田邊雅之, 吉國 洋 (1998); 人工衛星データを用いた地盤データベースの作成, (社)地盤工学会中国支部論文集「地盤と建設」Vol. 16, No. 1, pp. 7-14.
- 6) 広島県企画部地域振興課編 (1991); 土地分類基本調査「広島」解説書.
- 7) 広島県企画部地域振興課編 (1991); 土地分類基本調査「広島」傾斜区分図.
- 8) 広島市消防局 (1999); 平成11年6月降雨量データ, 広島市佐伯本部.
- 9) 地盤工学会中国支部研究委員会編 (2003); まさ土地帯の風化及び降雨浸透特性と斜面に関する研究報告書, 第1章, pp. 1-15.
- 10) 広島県土木建築部 (2003); 広島県土砂災害の状況, 河川砂防総室.
- 11) 日本リモートセンシング研究会編 (1998); 図解リモートセンシング, (社)日本測量協会, pp. 26-55.
- 12) 石井吉徳 (1981); リモートセンシング読本, pp. 13-35, オーム社.
- 13) 島 重章, 後藤恵之輔 (1997); 重回帰分析による地盤分類主題図の作成, (社)日本写真測量学会誌, Vol. 36, No. 3, pp. 29-33.
- 14) (社)地盤工学会編 (1995); ジオテクノート「土は襲う」, pp. 81-88.
- 15) 地盤工学会中国支部研究委員会編 (2003); まさ土地帯の風化及び降雨浸透特性と斜面に関する研究報告書, 第5章, pp. 181-189.
- 16) 石原慎一郎, 島 重章, 吉國 洋 (2002); リモートセンシングによる土砂崩壊の予測, 広島工業大学研究紀要, No. 36, pp. 91-98.
- 17) 島 重章, 石原慎一郎 (2003); 地形要因データを考慮した土砂崩壊発生量の予測と評価, (社)地盤工学会シンポジウムNo. 128発表論文集, pp. 59-68.
- 18) 島 重章, 吉國 洋, 神谷 誠, 小川洋一 (1997); 衛星リモートセンシングを利用した法面崩壊発生の予測について, (社)地盤工学会誌「土と基礎」Vol. 45, No. 6, pp. 23-25.
- 19) 林知巳夫, 駒沢 勉 (1990); 数値化理論とデータ処理, 朝倉出版, pp. 49-52.
- 20) 島 重章, 平本和則 (1995); 衛星データを用いた広域崩壊地の危険度評価, (社)土質工学会中国支部論文集「地盤と建設」Vol. 12, No. 1, pp. 25-34.
- 21) 島 重章, 石原慎一郎, 吉國 洋 (2001); 地形要因データを考慮した土砂崩壊発生の予測と評価, 広島工業大学研究紀要, No. 35, pp. 95-104.
- 22) (社)地盤工学会・調査部, 同・中国支部 (2000); 平成11年の広島豪雨災害調査報告書「災害の概要」, pp. 4-33.

(原稿受付2003年7月1日, 原稿受理2003年12月18日)