

リモートセンシングによる土砂崩壊の予測

石原慎一郎*・島 重章**・吉國 洋**

(平成13年10月24日受理)

The Prediction of Slope Failure Occurrence by Remote Sensing

Shinichiro ISHIHARA, Shigenori SHIMA and Hiroshi YOSHIKUNI

(Received Oct. 24, 2001)

Abstract

The slope failure induced by Hiroshima heavy rainfall on June 29, 1999 took many human lives, ravaged houses, and brought great damage. Then, the disaster reminded us of the fact that slope failure may happen at any time. One of the important factors seems to be the amount of deposit soil of weathering granite soil.

First, geotechnical engineering maps of the area were made based on the results of the multiple regression analysis, and the ground database was made on the satellite "ADEOS" data.

Furthermore, the weathering classification data was used as the disaster information data found in subsurface geology map. We also tried to predict the amount of collapse soil on a natural slope and the amount of product soil at the time of the disaster by applying End area formula using longitudinal and cross section of the watercourse of the area.

Key Words: slope failure, deposit soil, weathering granite soil, remote sensing data, end area formula,

1. はじめに

我々の生活をとりまく社会環境において、生活活動の場が平地から山地へと拡大した。そのことが近年、多発する土砂災害との関わりを拡大させたといえよう。

我が国は国土が急峻かつ複雑な地形・地質を成し、加えて多雨多雪・地震多発地帯という厳しい条件下に置かれている。このような環境条件の中に発生する地盤災害は、地すべり・斜面崩壊・地盤沈下・土石流および液状化などが挙げられるが、これらはいずれも広域に発生して、破壊要因も複雑である¹⁾。

このような地盤災害を予知・予測して避難・回避できる有効な手段は、未だ集成されたものはほとんどないのが現状である。近年地域ごとに事前対策としての地盤データを集積するためのデータベース作成が重要視されている。

なかでも、衛星リモートセンシングデータは地球表面の

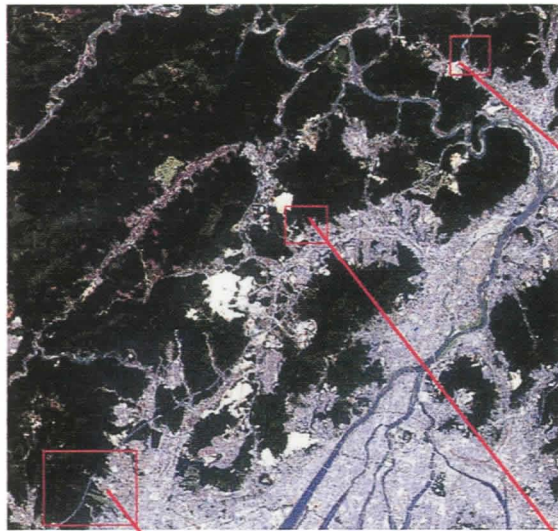
形状認識に関して十分な精度が得られている。また人工衛星を用いた地球観測技術は、いわゆるリモートセンシング技術は広域にわたる地球環境の変動を捉える上で不可欠な観測手段となっており、今後の研究は高分解能の分類や分析に目が向けられていると言われている。高度な画像処理／解析ソフトウェアが要求される所以である。いずれにしても、私達は宇宙から高精度で地球を観測することのできる技術を手にしたことになる。もはや手放すことのできない手段であるとともに、衛星リモートセンシングデータをどのように利用していくかは、私達の手委ねられていると言っても過言ではない。

平成11年6月29日の広島豪雨災害は、未曾有の災害を引き起こして多くの人命を奪い、家屋を破壊して多大な被害をもたらした。改めて、土砂災害が身近で起きるという事実を身に持って知ることとなったのは記憶に新しい。

この土砂流発生の要因は、風化花崗岩土による山間部の

* 広島工業大学大学院工学研究科土木工学専攻

** 広島工業大学工学部建設工学科



(a) 安佐北地域 (亀山地区)



(c) 佐伯地域 (屋代川地区, 下ヶ迫川地区)



(b) 安佐北地域 (長楽寺地区)

人工衛星
ADEOS/AVNIR
トゥルーカラー合成画像

観測日 1997/05/17
パス No.1325
ロウ No.345
観測地域：広島

図-1 人工衛星データを用いた調査地域図

堆積土砂量が大きく関係していたと考えられる。まず、災害が発生した調査地域の地盤分類図を作成することを試みた。ここでは、衛星データを用いて地盤工学的なデータとして利用可能な地形要因情報データを作成し、同地域の地盤データベース化を行うものである。更に、その中から災害関連情報データとしては、表層地質データのうちの風化区分データを用い、同地域の流路縦横断面図を用いた平均断面法を適用することによって、自然斜面における崩壊土砂量の把握および災害発生時の生産土砂量を予測することを試みたものである。

2. 土砂災害による被害状況

平成11年6月29日未明から前線の移動に伴って降りはじめた雨は、午後になってから急に強くなり、広島県全域に大雨をもたらした。特に、13時から16時にかけて広島市佐伯区から安佐北区へ向かう北東に延びる範囲と、15時から18時にかけて呉市から東広島市に至る帯上の狭い範囲に大雨をもたらした。豪雨が来襲したこれらの場所では、1時間雨量にして60mm~81mmの降雨が記録されている。今

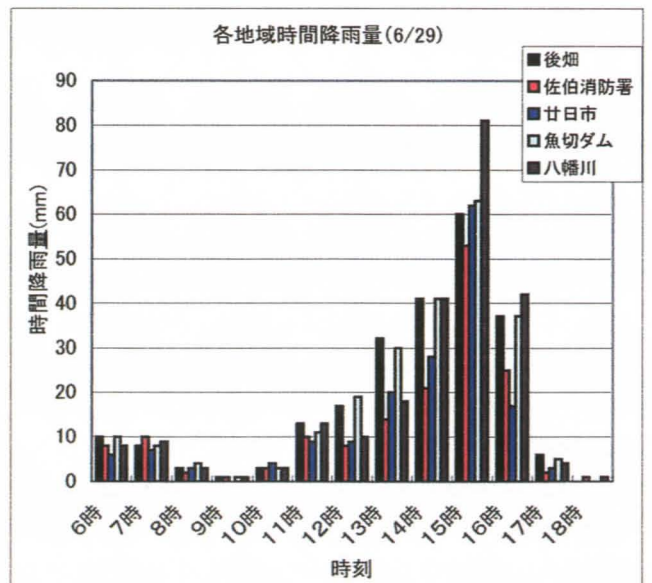


図-2 時間降雨量

回の災害の特徴は、23日からの先行降雨で緩んでいた地盤に急激に増大した降雨が極めて短い時間に集中し、降雨量



図-3 屋代川地区における被害状況

の急激な増加から2時間ないし3時間後のほぼ同時刻に災害が発生した。この集中豪雨に伴い、死者及び行方不明者が出ていない多くの場所でも土砂災害、河川氾濫、堤防・橋梁等の河川災害、家屋災害など多くの被害が発生した²⁾。図-1に災害が発生した地域を示し、調査地域とした。図-2に各地区の時間降雨量を示す³⁾。さらに広島市佐伯区屋代地区の被害状況として、図-3に航空写真データを示す⁴⁾。

3. 地球観測プラットフォーム衛星「みどり」について

地球観測衛星「みどり」は地球温暖化、オゾン層の破壊、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、国際協力による地球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。

高性能可視近赤外放射計 (AVNIR) は、陸域および沿岸地域から反射される可視から近赤外域の太陽光を観測する高分解能の光学センサであり、約16mの空間分解能を有する4バンドを持っている⁵⁾。

AVNIR は、基本的には衛星からその直下約80kmの範囲を細かく分割して観測しており、衛星が地球を周回する

ことにより地球上を広く観測する。表-1に使用した「みどり」の観測データを示す。

表-1 地球観測衛星「みどり」観測データ

AVNIR	マルチバンド (Mu)
観測バンド (μm)	Mu1: 0.42~0.50
	Mu2: 0.52~0.60
	Mu3: 0.61~0.69
	Mu4: 0.76~0.89
瞬時視野角	20 μrad (地表換算距離: 約16m)
観測日: 1997年5月17日	
パス No.1325, ロウ No.345 (広島地域)	

4. 解析方法

衛星データの画像解析処理は図-4に示す。4バンドを用いた比演算処理画像を用い、各地盤分類図を目的変数とする重回帰分析を行い、得られた最良回帰式から回帰処理画像を作成するものである。画像処理は、リモートセンシングデータ解析・可視化ソフトウェア「ENVI」、重回帰分析は統計処理ソフトウェア「SPSS」を使用した。

5. 地形要因データ解析

地形要因データとしては、土地分類基本調査図に基づいた地盤表層図を用いた。その中から重回帰分析により得られた風化度区分画像の精度を考察する⁶⁾。重回帰処理の精度は表-2に示す。重相関係数、F検定およびt検定の結果が精度良く示されている。また得られた回帰処理画像の質を検証するため、解析画像の中から指標ごとにデータを

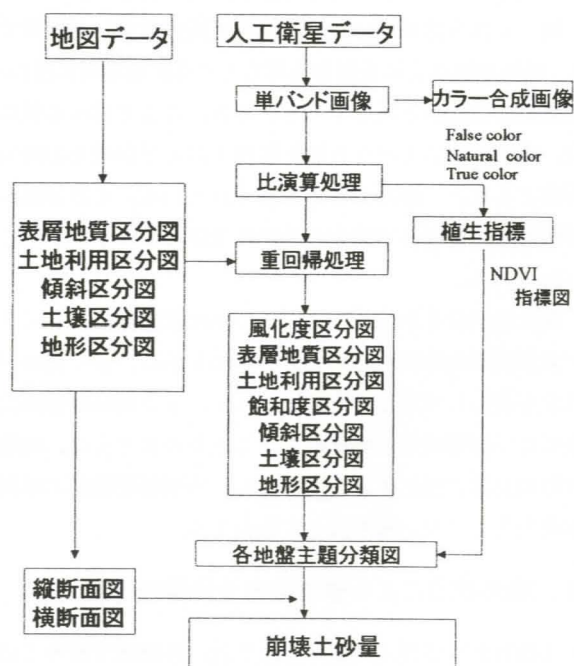


図-4 画像解析方法

無作為に抽出し、各デジタル値 (DN) に対応する数値データの確認を行った。結果を図-5 に示す。

表-2 重回帰分析結果

区分	重相関係数	寄与率	調整済み寄与率
風化	0.999	0.997	0.996
F検定 (危険率)	t検定 (危険率)	説明変量 (X_N)	偏回帰係数
0.1%	定数: 0.1%	X_1 : R-23	-0.115
	R-23: 0.1%	X_2 : R-42	-0.264
	R-42: 0.1%	X_3 : R-43	0.220
	R-43: 0.2%	定数	36.482
最良回帰式(Y)	$-0.115 X_1 - 0.264 X_2 + 0.220 X_3 + 36.482$		

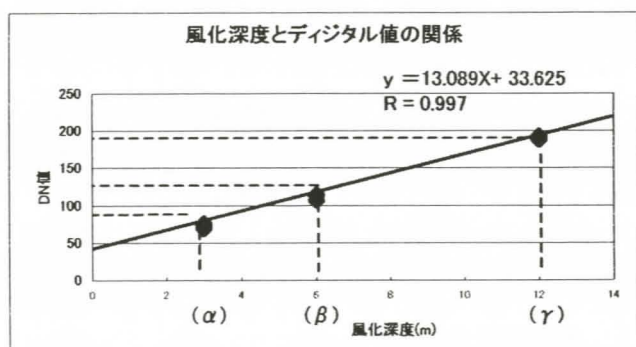


図-5 風化区分の相関

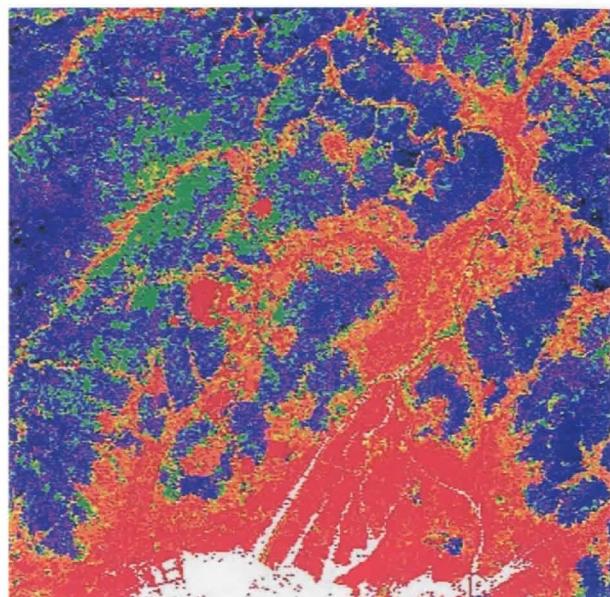
表-2より、風化度区分図の重相関係数は0.99以上で、F検定およびt検定についても0.1%の危険率を有し、信頼性が良いと考えられる。最良回帰式から得られた目的変量は、図-5において風化度指標である α 、 β 、 γ の区別が明確で、高精度を示した⁷⁾。重回帰分析によって、得られた結果から、作成された画像を図-6に示す。

図-6は広島地域における風化度区分を示した画像である。解析地域は広島花崗岩を母岩とする表層地質に覆われ、山地部は急傾斜を成している。なお、ここで述べる風化土は、風化花崗岩土のうち風化残積土および崩壊土の両方を対称として、一般にまさ土と称されている。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覆われている。

風化度区分を示した、まさ土の風化度指標は、 $\alpha < 3$ mが表層弱風化を表わして岩盤の露出を示し、 $\beta < 10$ mが中風化を表わして風化した表土を示し、 $\gamma > 10$ mが強風化を表わして深層風化と呼ばれる。これらのまさ土は、山頂付近の環急線に残積土として存在し、未固結堆積部には風化崩積土として厚い層を成して存在する。

6. 地形要因による崩壊発生土砂量の子測

土砂災害を予測する方法としては、各機関で数多くの案が出されている。予測項目としては、「いつ」、「どこに」、



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	160~264	橙, 赤 (赤系)

図-6 風化度区分図

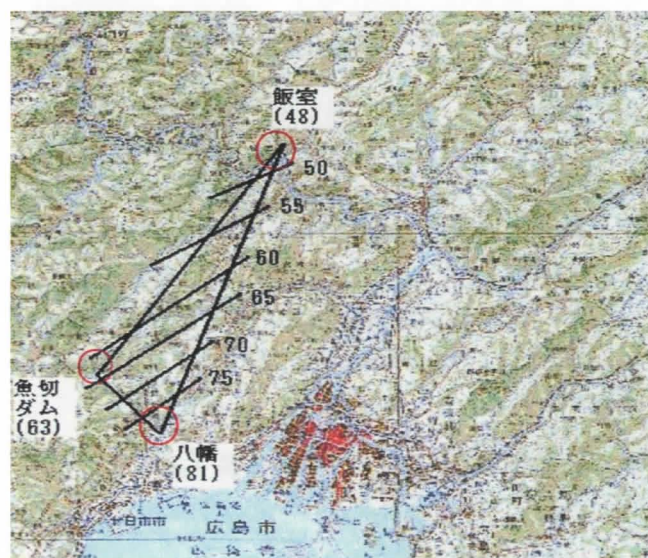


図-7 等雨量線予測図 (1/200,000地図)

「どのくらい」の3つの予測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る。

まず、第一に時間の項である「いつ」についての予測手法は、降雨量に関与していると考えられる。図-7は広島地域の各地域降雨量の予測法を示したものである。図中3箇所の観測所による降雨量データをもとに、地域の雨量を等降雨量補間法によって予測した⁸⁾。これから得られた降雨量をもとに各流域における降雨量を設定した。図-8に降雨量と流域面積の関係を示す。この図からは、広島北西

部において比較的累加降雨量が少ない時に崩壊している。

この地域は崩壊した流域内に急傾斜が多いため、降雨量が少なくても崩壊したものと考えられる。佐伯地区では累加雨量の多い時に崩壊が発生している。従って、累加雨量と流域面積の関係から、発生雨量から「いつ」崩壊に至るかが予測できる。

第二に場所の項である「どこに」についての予測手法は、前報に示した「土砂崩壊発生の予測と評価」を参照されたい⁹⁾。地形要因データを用いた危険度予測図のGISデータから危険度の高い箇所を設定できる。

最後に範囲の項である「どのくらい」についての予測手法は、斜面における堆積状況を推定し、災害の規模を推測するための資料として図-9に土砂災害の発生した地域を示し、図-10および図-11に各流路の縦断面図を示す。ま

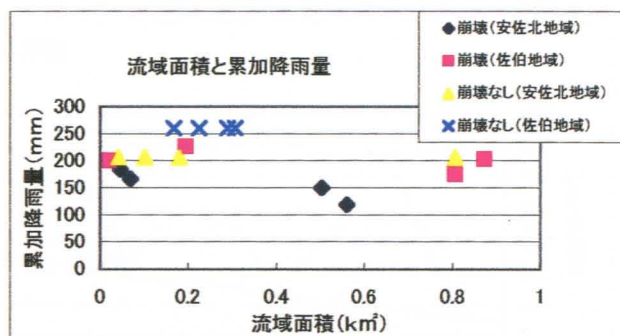


図-8 流域面積と降雨量の関係

た図-12に横断面図を示す。

図-10に示す屋代川流域では、約2,500mの長い流路で被害が大きくなり、図-11に示す亀山流域では2本の流路

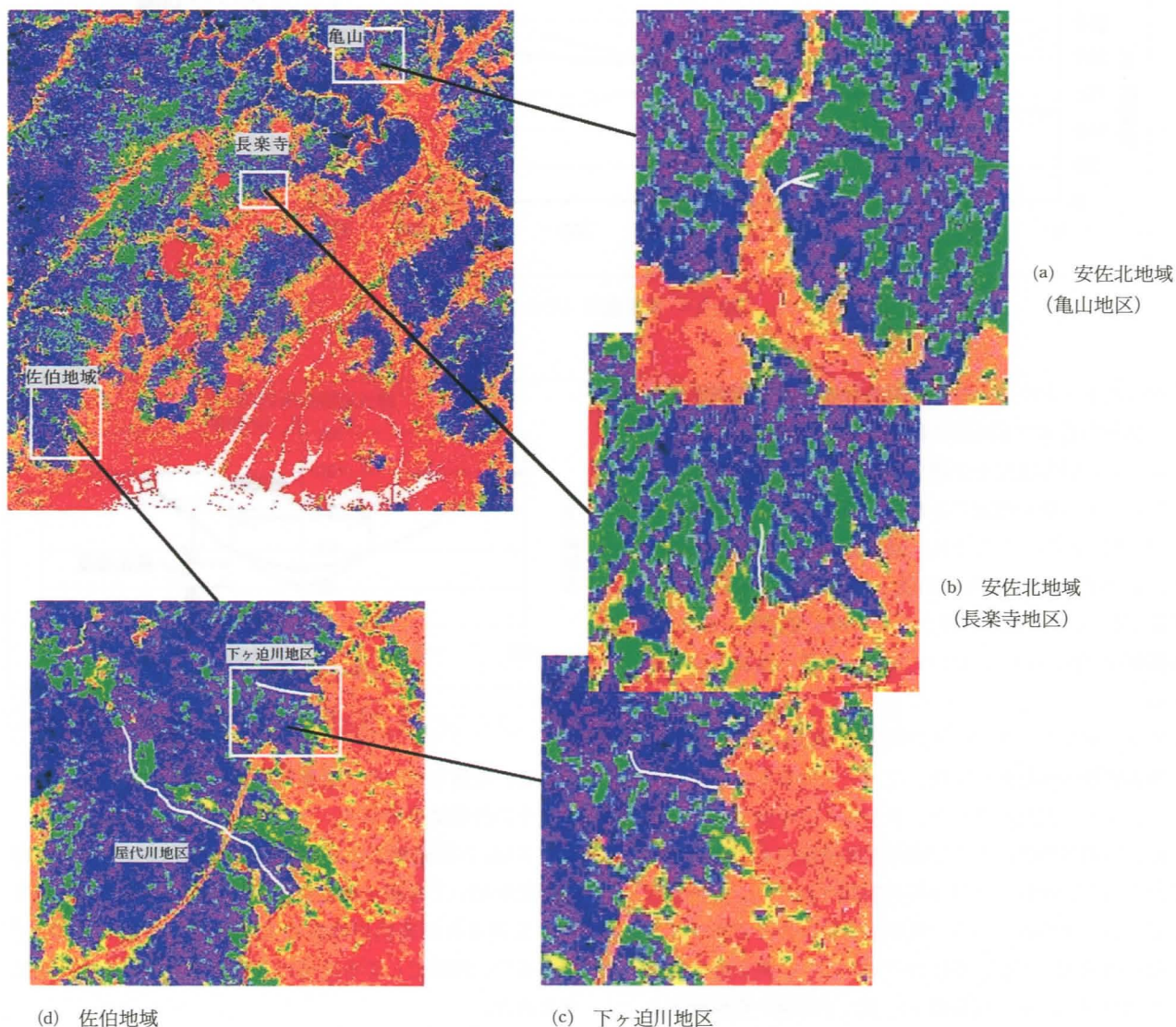


図-9 災害地域の風化および流路図

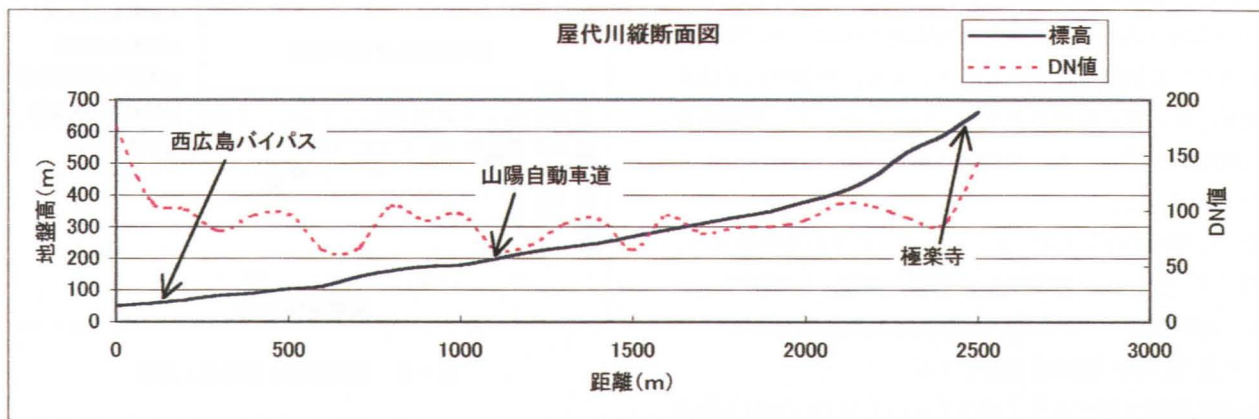


図-10 縦断面図 (その1)

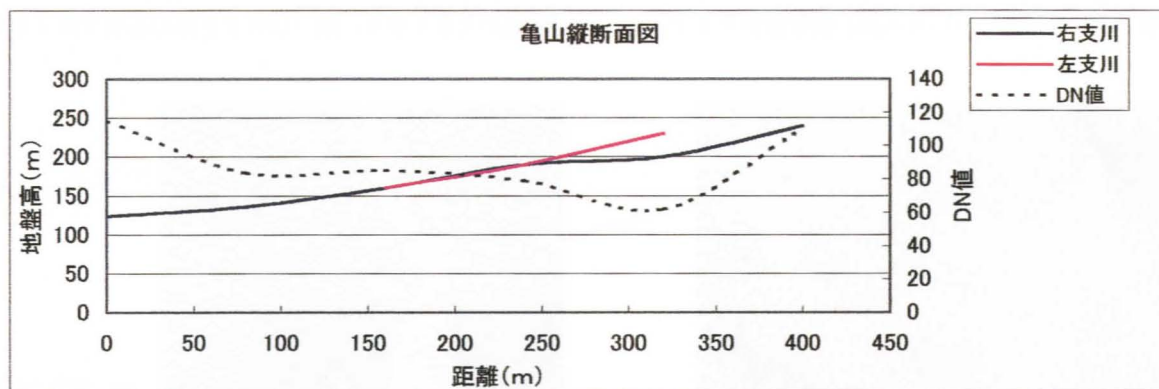


図-11 縦断面図 (その2)

で災害の発生をもたらした。佐伯地域における崩壊箇所のうち、荒谷川流域でも同様に数本の流路で被害を大きくした。従って、被害状況を予測するためには、溪流斜面に堆積している土砂量を測定できれば、被害を事前に抑制することが可能である。ここでは、風化区分図を用いて被害にあった流水路における風化崩積土の位置をDN値によって判読した。更に、風化の深さを示す風化度指標をもとに、流路横断面(図-12)において堆積土砂量へ換算するものである。

リモートセンシングデータの風化区分図が示す土砂量とは、地盤表層の放射量を反映したデータである。リモートセンシングデータは、光学センサが捉える特性としての分光特性、放射量特性、および幾何学的特性があり、光学センサはこれらの特性で計測条件を規制される¹⁰⁾。なかでも放射量とは、地盤固有の水分量や放熱量のことであり、人間の眼には感知できない特性を示す。ここに風化度の違いを示す放射量は、風化度指標 α 、 β 、 γ の違いを反映するもので、得られた風化区分図をもとに風化深度の違いを定量化した。風化度と風化深度の関係をもとに溪流に堆積した土砂量を推測する方法としては、地形要因データの風化度区分図を活用し、風化深度に対する相関図(図-5)を

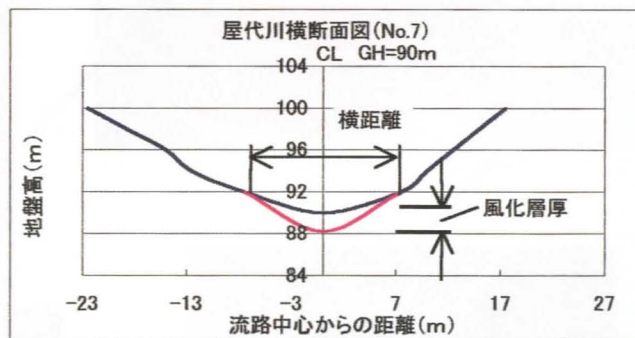


図-12 横断面図 (No.7)

もとに、堆積している土砂量に換算したものである。表-3にその計算結果を示す。

表-3は、区間距離100mの堆積土砂断面積をもとに、平均断面法を用いて堆積土砂量を求めたものである。災害発生後に公表された屋代川地区の土砂崩壊発生量は $34,500\text{m}^3$ である¹¹⁾。同様にして各地域における計算結果を表-4にまとめた。

佐伯地域(屋代川および下ヶ迫川)では土砂崩壊発生量/計算値の割合が1を超える値になった。この地域では、主に風化花崗岩土による地盤が崩壊要因に関与していると思われる。土砂災害で流出されるのは、前報に示した地盤

表-3 堆積土砂量(屋代川地区)

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	175	7.8	30.0	140.4	140.4	0
No.2	100	109	2.8	30.0	49.7	95.0	9,500
No.3	200	102	2.2	20.0	26.7	38.2	3,820
No.4	300	82	0.7	12.5	5.2	16.0	1,600
No.5	400	96	1.8	10.0	10.6	7.9	790
No.6	500	97	1.8	12.5	13.8	12.2	1,220
No.7	600	65	0.1	15.0	0.9	7.4	740
No.8	700	65	0.1	10.0	0.6	0.8	80
No.9	800	105	2.5	7.5	11.0	5.8	580
No.10	900	91	1.4	7.5	6.2	8.6	860
No.11	1,000	98	0.1	10.0	0.6	3.4	340
No.12	1,100	66	0.1	10.0	0.6	0.6	60
No.13	1,200	69	0.1	7.5	0.5	0.5	50
No.14	1,300	88	1.2	15.0	10.8	5.6	560
No.15	1,400	105	1.2	15.0	10.8	10.8	1,080
No.16	1,500	65	1.2	10.0	7.2	9.0	900
No.17	1,600	96	1.8	12.5	13.2	10.2	1,020
No.18	1,700	80	0.5	10.0	3.3	8.2	830
No.19	1,800	85	0.1	10.0	0.6	1.9	190
No.20	1,900	86	1.0	12.5	7.5	4.1	410
No.21	2,000	92	1.5	10.0	8.8	8.1	810
No.22	2,100	107	2.6	7.5	11.7	10.2	1,020
No.23	2,200	105	2.5	10.0	14.7	13.2	1,320
No.24	2,300	94	1.6	12.5	12.1	13.4	1,340
No.25	2,400	88	1.2	10.0	6.9	9.5	950
No.26	2,500	143	5.4	10.0	32.1	19.5	1,950
合計	崩壊土砂量計算値 = 32,020m ³						

主題図のうち表層地盤区分図が示す流路内の未固結堆積土砂量の存在が認められていること、および岩石や倒木も同時に流出し、それらの洗掘が予想以上に働いていたと考えられる。

安佐北地域(長楽寺および亀山)では割合が1以下であり、流路内には堆積土砂量の残留が予想される。この地域における地盤は風化があまり進行していないものの、急傾斜地盤が多い。そのことから、主に急傾斜地盤や植生の相乗が崩壊要因に関与していると思われる。図-13に災害後の状況写真を示す。この図より、流路斜面に残留した土砂の堆積している様子が見られる。今後は残留堆積土砂量(計算値-土砂崩壊発生量)に注目する必要がある。

土砂崩壊の発生は、複数の要因で発生すると考えられる。従って、現地特性を考慮した降雨量、地理地形要因、および堆積土砂量を検討するために、衛星リモートセンシングによる土砂崩壊発生の予測は有効であると考えられる。

表-4 各流域土砂崩壊発生量

地域名	土砂崩壊発生量 (m ³)	計算値 (m ³)	割合
屋代川	34,500	32,020	1.08
下ヶ迫川	8,161	7,220	1.13
長楽寺	3,888	6,550	0.59
亀山	3,222	12,400	0.26



図-13 流出後の斜面状況 (H11.7.1撮影)

7. 結 論

人工衛星「みどり」のAVNIRデータを使用した降雨時の土砂災害予測について、「いつ」「どこに」「どのくらい」の土砂崩壊が発生するかを検討してみた。地球観測衛星を用いて土石流災害を解明し、評価することは今後の斜面崩壊の予測に重要であると考えられる。ここに得られた知見は以下の通りである。

- (1) 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検定について各々に信頼のおける精度を得たことにより、有意性の高い最良回帰式および回帰処理画像が得られた。
- (2) 各地域の降雨量を検討した結果、地域降雨量および流域面積の確認により「いつ」崩壊に達するかが予想できる。
- (3) 地形要因データを用いた危険度予測図のGISデータから危険箇所を予測した結果、「どこに」崩壊するかが判断できる。
- (4) 自然斜面の堆積土砂を回帰処理画像より、風化度指標をもとに堆積土砂量へ換算した結果、「どのくらい」の堆積土砂量が存在するか推定できる。佐伯地域では計算値よりも多くの土砂量が流出し、また安佐北地域では、計算値よりも少ない土砂量が流出した。被害地域においては、溪流斜面に流出した土砂が残積しているので、今後の多量降雨に注意を要すると思われる。
- (5) 土砂崩壊は複数の要因で発生するため、要因解明は難しい。そのために降雨量の予測、未災害地区の危険箇

所の抽出，流出土砂量の被害推定をすることが必要である。降雨量および地形などの地域差によって災害が発生したことを考慮し，広域情報としての衛星リモートセンシングによる土砂崩壊の予測を行うことは有効であると考えられる。

おわりに本研究に使用した ADEOS データは、宇宙開発事業団の提供による。またデータの購入は社団法人中国建設弘済会および財団法人住友財団の御協力による。ここに記して御礼申し上げます。

文 献

- 1) 国土庁編：平成12年度防災白書，pp.1～52，2000.
- 2) 平成11年6月末豪雨災害広島工業大学緊急調査研究会編：平成11年6月末豪雨災害調査研究報告書，同調査委員会，pp.I-1～I-15，2000.
- 3) 平成11年広島県豪雨災害緊急調査委員会編：平成11年の広島県豪雨災害調査報告書，(社)地盤工学会中国支部，pp.4～33，2000.
- 4) アジア航測(株)編：1999年6月29日広島の高雨災害1/50,000空中写真 ([//www.ajiko.co.jp/topic/ct/Hiroshima/itsukaichi-long.jpg](http://www.ajiko.co.jp/topic/ct/Hiroshima/itsukaichi-long.jpg)).
- 5) 宇宙開発事業団：ADEOS 衛星 ([//www.eoc.nasda.go.jp/guide/satellite/satdata/adeos-i.html](http://www.eoc.nasda.go.jp/guide/satellite/satdata/adeos-i.html)).
- 6) 藤原圭介，島 重章，吉国 洋：衛星リモートセンシングを用いた地盤データベース化の試み，第51回土木学会中国支部，pp.434～435，1999.
- 7) 広島県企画振興部地域振興課編：都道府県土地分類基本調査「広島」，広島県，1978.
- 8) 瀬尾克美：土石流の予測，土石流；メカニズム，災害と対策講習会，(社)地盤工学会，pp.43～50，2001.
- 9) 石原慎一郎，島 重章，吉国 洋：地形要因データを考慮した土砂崩壊発生の予測と評価について，広島工業大学研究紀要第35巻，pp.95～104，2001.
- 10) 日本リモートセンシング研究会：図解リモートセンシング，社団法人日本測量協会，pp.26～55，1998.
- 11) 前掲書3).