

衛星リモートセンシングによる堆積土砂量の推測

島 重章*・橋口 翔**

(平成21年10月31日受理)

The Prediction of Collapse Soil by Satellite Remote Sensing

Shigenori SHIMA and Sho HASHIGUCHI

(Received Oct. 31, 2009)

Abstract

Recently, some sediment disasters have been occurring every year in various places. The average occurrence for the past 20 years is 500 times a year. It is thought that the sediment disaster caused by a localized torrential rain especially occurs at a weak part on the ground surface, by which an earth and sand movement phenomenon takes place.

In this research, artificial satellite data were used to explain the earth flow disaster, which occurred in Miyajima on September 6, 2005. The satellite information data which made use of pre-disaster data showed the usefulness as the risk prediction for weathering slopes of the mountain torrent.

Key Words: remote sensing, collapse soil, earth flow disaster, risk prediction

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る。一般的に発生する自然災害としては、第三紀層における地すべり災害、風化した花崗岩地帯に多発する斜面崩壊、および地下水の変動に伴う地盤沈下等がある。そのために多くの人的・物的損失を被っている。平成9年までに急傾斜崩壊危険箇所指定されたのは、全国で約8万7千箇所におよび、その対策工事箇所は24%程度にすぎない。これら自然災害を未然に防ぐためには、災害発生場所や規模の予知・予測が必要不可欠である。広域地盤を対象とする災害は、斜面崩壊の要因となると考えられる地質・地形・植生など、広範囲の地盤情報が必要である。しかしながら、ごく一般的な地盤調査では広範囲の地盤情報を得るには多くの時間や経費を費やしてしまう。

そこで、地盤情報を広域に捉えるため、衛星リモートセンシングデータを用いることが有効であると考えられる。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る。また、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、地表面を構成する地質を分類することが可能である。

ここでは、広島県西部に位置する宮島の山溪部を対象に、衛星リモートセンシングデータより得られた地盤情報のデータベース化を行い、そのデータに数値化分析第Ⅱ類を適用することで、崩壊要因を明らかにし、斜面崩壊の発生する危険箇所の位置予測を試みた。さらに、降雨により崩壊し土石流が発生した白糸川流域の堆積土砂量について崩壊規模の予測を試みた。

2. 宮島の地域特性

調査地域は、Fig.2.1に示す宮島(北緯34度15分~34度18分, 東経132度16分~132度20分)を範囲とした。

* 広島工業大学工学部都市建設工学科

** 広島工業大学大学院工学研究科建設工学専攻



Fig2.1 調査対象地域概要図

1) 地形

島の大部分が険しい起伏山地で占められている。山地部の谷や尾根は、山地北部では弥山（標高：535m）がドーム状にそびえ立つ。その周辺には、標高が300～400m付近に狭い山頂平坦面を形成し、標高が100～200m付近にかけては、かなり広い山腹緩斜面が見られる。

島の各地に谷底ないしは扇状地が見られる。起伏山地を背後にもつため、谷の勾配は急であり谷底平野の幅は狭くなっている。

2) 地質

広島県の花崗岩は、白亜紀型花崗岩類の風化したもので、正長石を主として石英が多く、粘着力が少なく透水性は大きい。表面侵食を受けやすい土質材料である。花崗岩を構成する結晶は、主として石英、長石および雲母である。このような結晶は、結晶構造の上から言うと、石英は緻密な組織を持ち、化学的風化を受け難い。逆に雲母は化学的風化に弱く、粘土化しやすい。長石は両者の中間に位置する。宮島には、黒雲母花崗岩が広く分布している。黒雲母花崗岩でも細粒部は侵食に抗して高い尾根を作り、粗粒部は深層風化を受けて軟らかくなり、急斜面と緩やかな山麓地の組み合わせを構成している場合が多い。

3. 土砂災害による被害状況

2005年8月29日マリアナ諸島近海で台風14号が発生した。台風は非常にゆっくりとした速度で北東に進み、大型で非常に強い勢力に発達した。9月4日に沖縄の南西諸島に上陸し、5日には九州全体を巻き込んだ。さらに広島にも被害が及び、9月の月間平均降雨量の2倍を超える量の雨が降り、各地で土砂災害が多発的に発生した。台風14号の経路をFig3.1に、降雨量データをFig3.2に示す。

宮島では6日の午後10時頃白糸川で土砂災害が発生し、多くの人的・物的被害をもたらした。土石流発生の要因として、連続雨量234mm・最大24時間雨量200mm/24h・最大時間雨量33mm/hと多量の雨が集中的に降ったことが考えられる。気象庁では1時間雨量が30mm以上

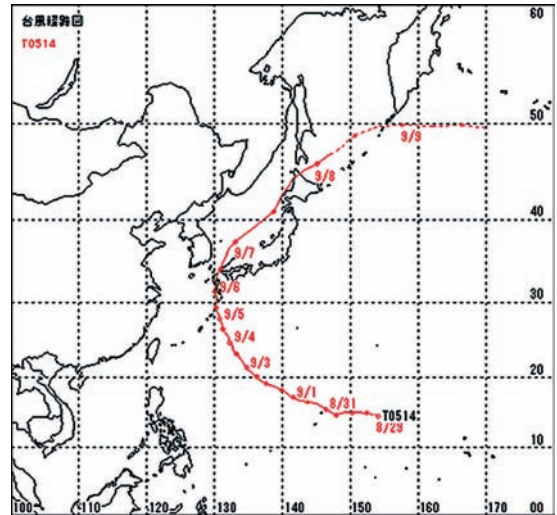


Fig3.1 台風14号の経路

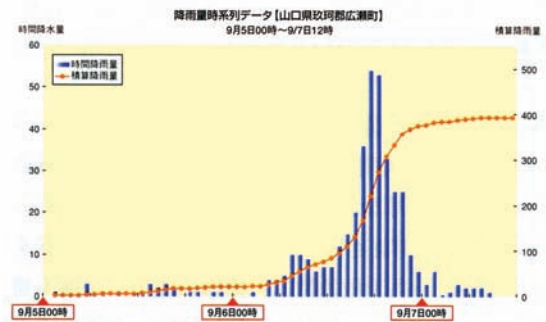


Fig3.2 アメダス降雨量時系列データ

50mm未満の場合、山崩れ・崖崩れが起きやすいと定めている。宮島の被害状況として、白糸川の流路をFig3.3に示す。



Fig3.3 被害状況（被災直後の様子）

4. 人工衛星データの適用

4.1 衛星リモートセンシングの概要

衛星リモートセンシングの特徴は、広範囲を瞬時に観測することができること（観測の広域性と瞬時性）、繰り返し同じ場所を観測することができること（反復性）、直接

現地に行かなくても現地の状態を知ることができること（非接触性）があげられる。技術の進歩によって観測精度は年々高まる傾向にある。

地上のすべての物体は、太陽光を受け多様な電磁波を放射し、その反射率は物体の種類・状態などにより異なる。その物体の反射特性を地球観測衛星に搭載したセンサで収集し、それらの強弱を対象ごとに比較することにより、対象物の識別または状態の認識を行うことができる。

衛星データは、光学センサとマイクロ波センサに大別されるが、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。光学センサは光を波長として捉え、Fig.4.1に示す地表物質の違いをデータ処理することで画像表示が可能となる。³⁾⁴⁾

なお、ここに使用した衛星データは、地球観測衛星 Quick Bird である。

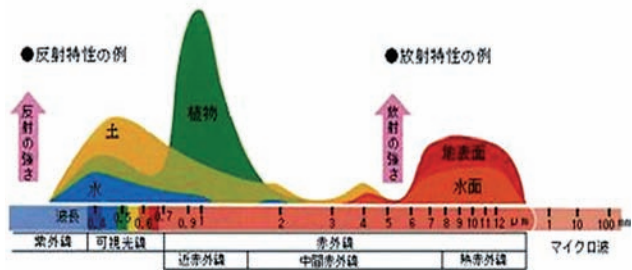


Fig.4.1 物質の反射・放射特性

4.2 使用した衛星データ

衛星データ（観測日：2005年6月6日）は、2001年10月19日に米国の商用衛星事業として Digital Globe 社が打ち上げた高分解能地球観測衛星 Quick Bird である。

搭載されているセンサ（パナクロマチック・マルチスペクトル）は、可視域から赤外域まで観測することができる。

Quick Bird の搭載センサの諸元を Table4.1 に示す。

Table4.1 Quick Bird 搭載センサの諸元

センサ名	バンド	波長	種類	分解能
Panchromatic	PAN	0.45~0.90 μm	パナクロマチック	0.61m
パナクロマチック				
	Band1	0.45~0.52 μm	青	2.44m
Multispectral	Band2	0.52~0.60 μm	緑	2.44m
マルチスペクトル	Band3	0.60~0.69 μm	赤	2.44m
	Band4	0.76~0.90 μm	近赤外	2.44m

4.3 使用した画像とその解析処理

衛星データの画像解析処理手順を Fig.4.2 に示す。バンドを組み合わせることによりカラー合成画像を作成した。

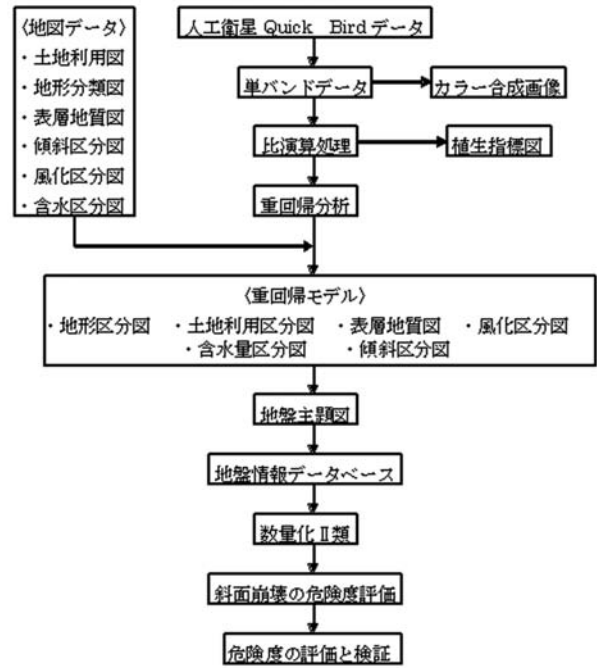
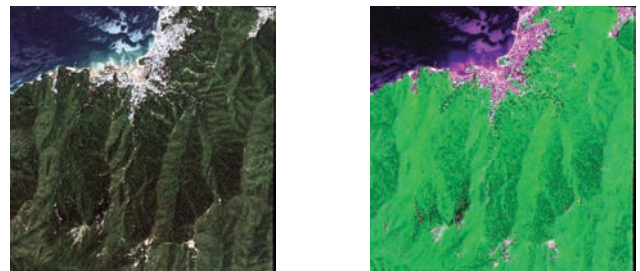


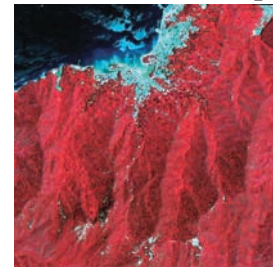
Fig.4.2 解析処理手順

画像は Fig.4.3 に示す。カラー合成画像には3つの種類があり、それぞれの画像に特徴がある。また、4つのバンドを用いて比演算処理を行い、各地盤分類図を目的変量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。



① True Color

② Natural Color



③ False Color

Fig.4.3 カラー合成画像

1) True Color 画像 (Fig.4.3 ①)

この画像は、Band3：赤色、Band2：緑色、Band1：青色を組み合わせで作成している。その特徴は、大気の影響を受けやすい反面、水域の現象を把握するのに適した画像であり、人の目で識別できる色と同じ様に表現される。

2) Natural Color 画像 (Fig4.3 ②)

この画像は、Band3：赤色、Band4：近赤外、Band2：緑色を組み合わせで作成している。その特徴は、植生のある森林部が緑となり、陸地と水海域の差がはっきりとわかる画像となっている。

3) False Color 画像

この画像は、Band4：近赤外、Band3：赤色、Band2：緑色を組み合わせで作成している。その特徴は、植生活力があるほど赤く見えるところにある。森林などは濃い赤色、裸地・浜辺などは白色、低地部分は青色がcaってくる。

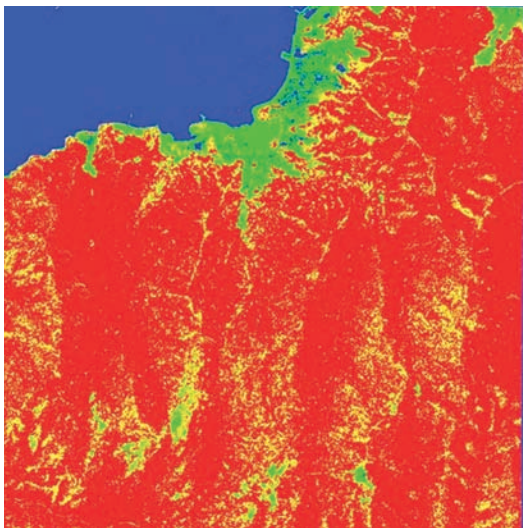


Fig4.4 植生指標図

Table4.2 植生指標図の DN 値および配色

植生指標	DN 値	配色
植生なし	0 ~ 65	青
活性度 小	66 ~ 160	緑
活性度 中	161 ~ 210	黄
活性度 大	211 ~ 255	赤

4) 植生指標図

比演算処理画像は、各 Band 間の濃度の比をとることによって、相互関係を強調し、Band の重ね合わせだけでは得られないわずかな反射強度差を知ることができる。また、植生活性度を調べるため国際的に認知された指標である、正規化差分植生指標 (NDVI) を適用することで、植生の分布調査が可能である。植生指標図を Fig4.4 に、Table4.2 に植生指標図の DN 値および配色を示す。

5. 重回帰分析の結果

衛星データを用いて地表面の状況を解明するには、多数個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り上げ、重回帰モデルの作成を行った。

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 の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。

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をもとに、土地利用区分、表層地質区分、地形区分、傾斜区分、風化区分、含水量区分の重回帰モデル画像を作成した。この中から、斜面災害の関連データとして傾斜区分と風化区分を取り上げた。なお DN 値とは、衛星が観測した電磁波エネルギーの強さを相対的に 256 (= 2⁸) 段階に置き換えたデジタル情報のことである。

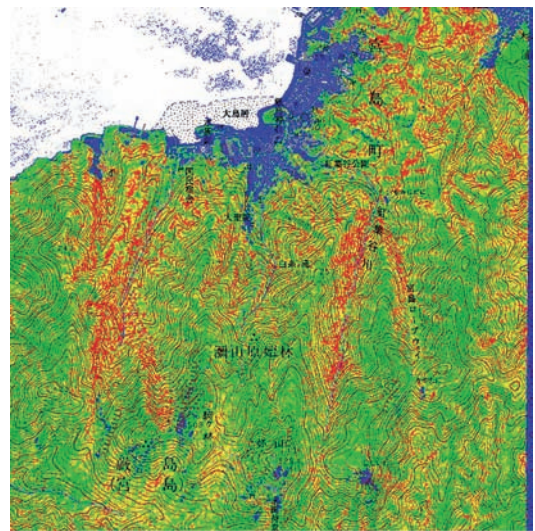


Fig5.1 傾斜区分図

Table5.1 傾斜区分図の DN 値および配色

	DN 値	配色
水域	0 ~ 45	白
8° 未満	46 ~ 140	青
8 ~ 20° 未満	141 ~ 230	黄緑
20 ~ 30° 未満	231 ~ 245	黄
30 ~ 40° 未満	246 ~ 250	橙
40° 以上	251 ~ 255	赤

傾斜区分図の DN 値および配色を Table5.1 に、傾斜区分図の分析結果を Table5.2 に、DN 値の相関性を示したものを Fig5.2 に示す。ついで風化区分についても示す。風化区分図の DN 値および配色を Table5.3 に、風化区分図の分析結果を Table5.4 に、DN 値の相関性を示したものを Fig5.4 に示した。

Table5.2 と Table5.4 より、傾斜区分と風化区分の両者の重相関係数が 0.96 以上であることから非常に精度が良いと考えられる。一般に、重回帰分析では重相関係数と寄与率が 0.8 以上で非常に精度が高いとされている。

Table5.2 重回帰分析結果（傾斜区分）

説明変量 (X)	比演算処理によって得られた DN 値	
目的変量 (Y)	傾斜区分図から得られた指標	
重相関係数 (R)	寄与率 (R ²)	調整済み寄与率
0.984	0.968	0.964
指 標	3：水域，6：8度未満，9：8～20度未満，12：20度～30度未満，15：30度～40度未満，18：40度以上	

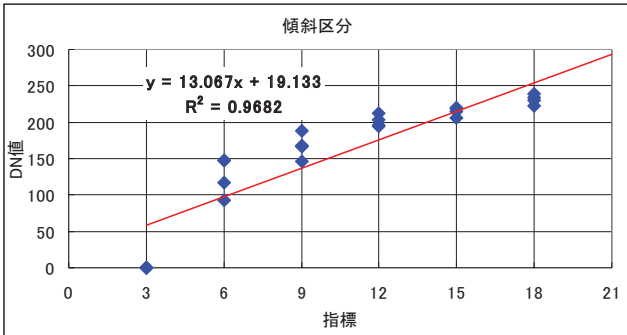


Fig5.2 傾斜区分と DN 値の相関性

Fig5.1 は、宮島における傾斜区分を示した画像である。解析地域のほとんどが傾斜 20 度以上の急勾配になっており、災害時の危険度が非常に高いと考えられる。

Fig5.3 は、宮島における風化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、

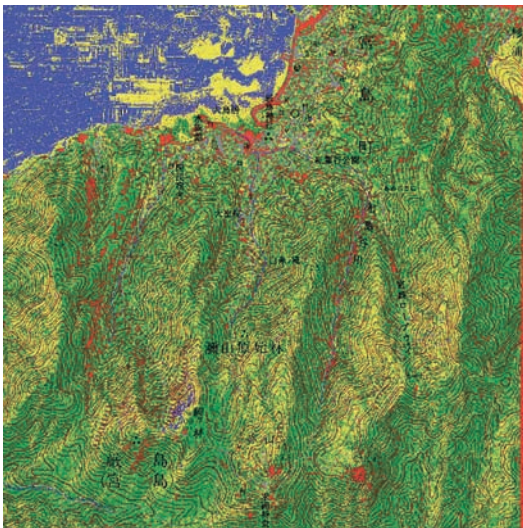


Fig5.3 風化区分図

Table5.3 風化区分図の DN 値および配色

	DN 値	配色
水域	0～45	青
弱風化 α	46～150	黄
中風化 β	151～250	緑
強風化 γ	251～255	赤

Table5.4 重回帰分析結果（風化区分）

説明変量 (X)	比演算処理によって得られた DN 値	
目的変量 (Y)	風化区分図から得られた指標	
重相関係数 (R)	寄与率 (R ²)	調整済み寄与率
0.968	0.937	0.929
指 標	3：水域，6：弱風化 α ，9：中風化 β ，12：強風化 γ	

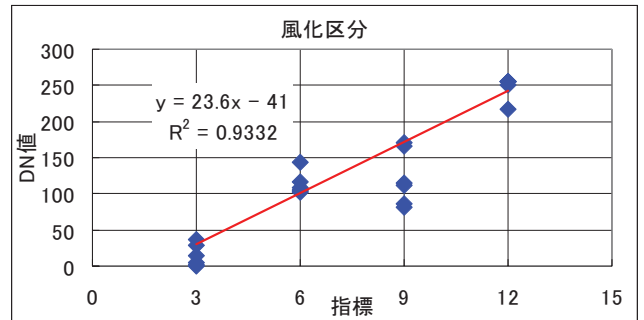


Fig5.4 風化区分と DN 値の相関性

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象として、一般にまさ土と称されている。その谷部から平地部は、深層までの風化の影響を受けたまさ土によって覆われている。

風化区分を示した、まさ土の風化度指標は、 $\alpha < 3m$ が表層風化を表して岩盤の露出を示し、 $\beta < 10m$ が中風化を表して風化した表土を示し、 $\gamma > 10m$ が強風化を表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壊土として厚い層を成して存在する。

6. 宮島山溪の危険度予測

6.1 斜面崩壊の危険度の予測

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。⁶⁾⁷⁾

ここでは、①崩壊の位置および②崩壊の規模の2項目について、衛星データを用いて検討を試みた。前項で述べた重回帰モデル図をもとに、災害の予測のための要因を設定し、それぞれについて述べていく。

1) 崩壊場所の予測

重回帰モデルによる地盤主題図から得られた地図情報をデータベース化し、そのデータを用いて崩壊場所の予測を試み、危険度評価図の作成を検討した。なお、Fig6.1 に危険度評価図作成の流れを示す。

ここに用いた地盤主題図は、観測日（2005年6月6日）

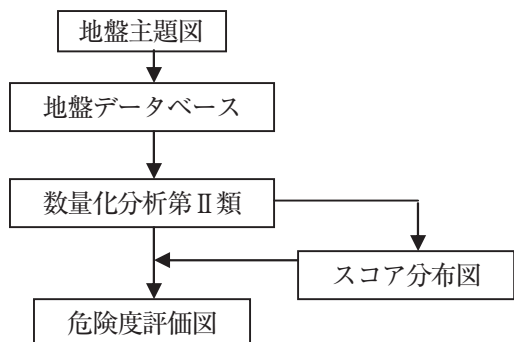


Fig6.1 危険度評価図作成の流れ⁸⁾

の地形要因データであり、地盤データベースとして利用した。これらのデータを用いて、2005年9月6日に宮島で発生した土砂災害の危険箇所の予測を行った。斜面崩壊の発生度の高い危険箇所の予測にあたっては、データベース化した地盤情報に、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分析第Ⅱ類を適用した。

まず、数量化分析第Ⅱ類で解析を進めていくにあたり、Table6.1に示すアイテム／カテゴリーの中から外的基準を設定する。危険度を評価する基準として、土地利用区分・傾斜区分・風化区分などが考えられるが、宮島の白糸川の土石流災害の場合は、堆積土砂量が深く関係すると考え、危険度評価図の基準となる外的基準を風化区分とすることで、現地との相関性が得られると考えた。

Table6.1 アイテム／カテゴリー

アイテム	番号	カテゴリー	アイテム	番号	カテゴリー
傾斜	1	水域	土地利用	1	水域
	2	8°未満		2	市街地
	3	8°以上20°未満		3	裸地
	4	20°以上30°未満		4	天然針葉樹
	5	30°以上40°未満		5	混交林
風化	6	40°以上	地形区分	1	水域
	1	水域		2	低地
	2	弱風化 (α)		3	山麓地
	3	中風化 (β)		4	大起伏山地
含水量	4	強風化 (γ)	表層地質	1	水域
	1	水域		2	市街地
	2	含水量 高		3	未固結堆積物
	3	含水量 中		4	深成岩
	4	含水量 低			

その結果、Fig6.2に示すスコア分布図を得た。そして、Fig6.2に示すように危険度を大・中・小と3区分した判別区分の設定をした。まず、スコア範囲 - 3.02 ~ - 1.09 の範囲では、弱風化 (α) と水域が共に分布していることから、この範囲を危険度小とした。次に、スコア範囲 - 1.09 ~ 0.72 の範囲では、弱風化 (α) と中風化 (β)、さらには強風化 (γ) が混在しているが、中でも中風化 (β) がより多く分布していることから、この範囲を危険度中とし

た。またスコア範囲 0.72 ~ 2.53 の範囲では、強風化 (γ) のみしか分布していないことから、危険度大とみなした。

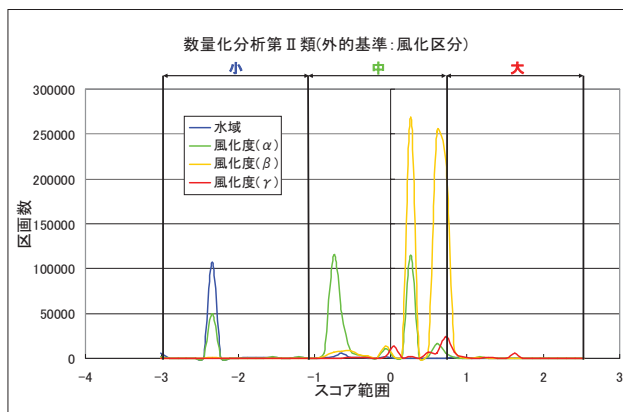


Fig6.2 スコア分布図

なお、Fig6.3に示した画像は、判別画像に地形図を重ね合わせたものであり、これを危険度評価図と称する。

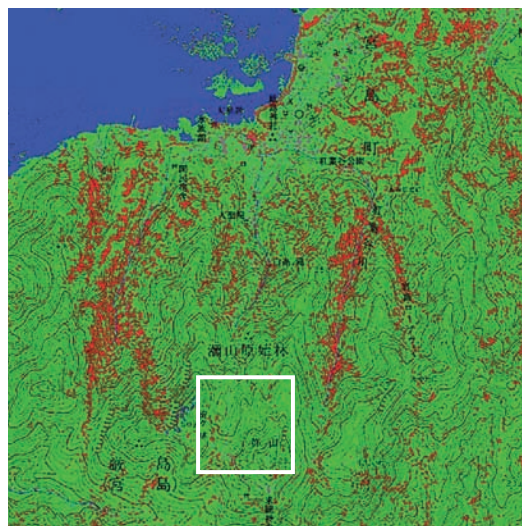


Fig6.3 危険度評価図

Table6.2 スコア範囲と配色

危険度	スコア値	配色
小	- 3.02 ~ - 1.09	青
中	- 1.09 ~ 0.72	黄緑
大	0.72 ~ 2.53	赤

Fig6.3およびTable6.2より危険度小は主に水域が関係しているため、海に多く存在している。危険度中に至っては弱風化 (α) と中風化 (β) で構成され、そのほとんどが中風化 (β) であることから、島全体が風化の進行した状態にあると言える。危険度大は、各溪流に沿うようにして表れている点と各溪流の最上流部付近に存在している点の2項目から、特に対策が行き届いていない溪流付近では非常に危険度が高いと言える。

2005年の9月6日の台風14号の影響により、宮島にある溪流のうち、市街地から南方向にのびる白糸川では上流部で土石流が発生した。Fig6.4に崩壊現場写真を示す。

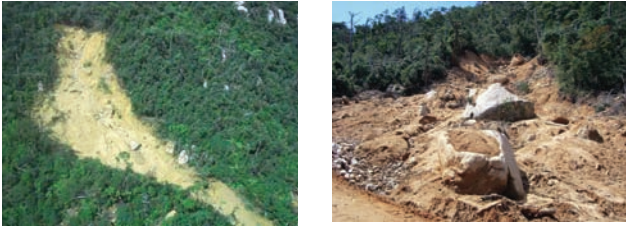


Fig6.4 崩壊現場写真

2) 崩壊規模の推測

崩壊規模の算出方法として、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、ここでは溪流斜面における堆積土砂量を衛星データ（風化区分図・危険度評価図）から計測・推定し、災害の規模を推測するものである。

本研究で用いた衛星データが災害発生2ヶ月前のものであることから、災害発生前の堆積土砂量と砂防堰堤施工時の不安定土砂量との値と比較検討することとした。

災害の規模を推測するためのデータとして、Fig6.5に土石災害の発生した地域を拡大図示し、Fig6.6に白糸川の縦断面図を示し、堆積土砂標準断面図をFig6.7に示す。白糸川の流路長は1090mだが、崩壊経路も含めると約1630mになる。ここでは、崩壊経路の延長も白糸川の一部として考えて流路長にする。

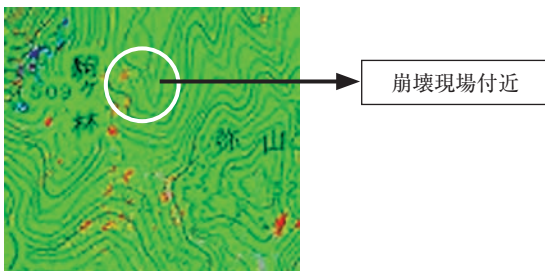


Fig6.5 崩壊現場付近（拡大図示）

この流路において土石流が発生し、流下した土砂が下流域の居住地区において多大な損害を与えた。このことから溪流斜面に堆積している土砂量を事前に測定できれば、被害を最小限に抑えることができると考えられる。

ここでは、衛星データの中から風化区分図を用いて流水路のDN値を判読し、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。その手法は、風化区分画像が示す風化深度とDN値との関係をFig6.8に示した。白糸川におけるDN値と風化深度の比較から堆積土砂量を算出した。

流路縦断面図に沿ったDN値の判読を単距離30mごとに

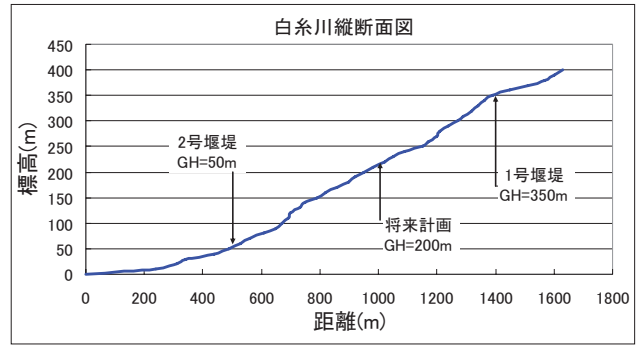


Fig6.6 白糸川縦断面図

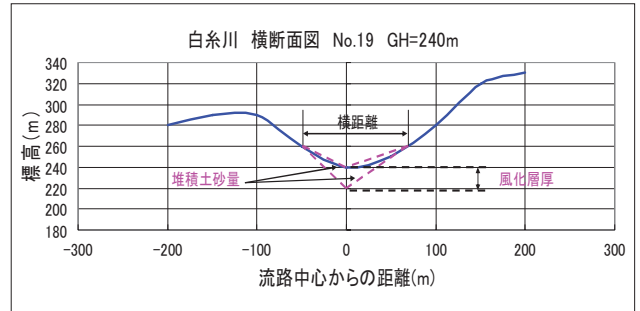


Fig6.7 堆積土砂標準断面図

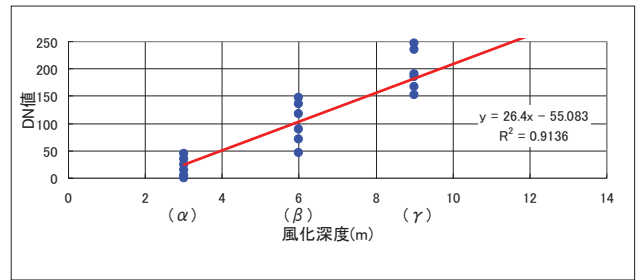


Fig6.8 風化区分とDN値の相関性

計測し、最上流端 (No.1) から中流端 (No.42) までの集計を求めた。ここに示す崩壊土砂量は、平均断面法による堆積土砂量である。その集計量は、堆積土砂量計算結果としてTable6.3に示した。

Table6.3 計算結果

堆積土砂量 (m ³)	254381.2
不安定土砂量 (m ³)	16210.0

7. 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データのうち、作成した風化区分図や危険度評価図などの地盤主題図から、災害発生の可能性を絞り込むための場所および規模の予測を検討した。

砂防堰堤を設計する際の土砂量と衛星データとの相関を図るため、広島県土木建築部河川砂防総室砂防室が提出した不安定土砂量 (= 16210.0 m³) と比較すると衛星データの方が約16倍も多く算出していることがわかる。⁹⁾したがって、今回の土砂災害で流れ出した土砂以外にも、風化を

伴う不安定土砂の貯留が大きいものと考えた。

このように、衛星データの解析によって危険箇所を絞り込み、更にその箇所についての堆積土砂量を算出することで、効率よく危険斜面を特定することが可能であると考えられる。¹⁰⁾

8. おわりに

宮島の土砂災害発生の危険箇所を予測するために、地球観測衛星 Quick Bird のデータを用い、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、数量化分析第Ⅱ類を適用し危険箇所の予測を行った。更に、実際に土石流が発生した白糸川の堆積土砂量を衛星データより推定し、比較検討することで危険度の比較を行った。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) 重回帰モデルは、説明変量として用いた比演算処理データとして、地被地覆データのうち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た。こ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) 作成した危険度評価図と既存の地形図を比較した結果、崩壊の危険度が大きいと示された箇所は、各溪流の最上流部付近と溪流に沿うように存在した。その反面、島全体が危険度中であり、全体的危険であるという結果となった。したがって、豪雨による斜面崩壊の可能性があると言える。
- 4) 衛星データより得られた地盤情報は、数量化分析第Ⅱ類を適用することで、斜面崩壊の可能性をランク付けした位置情報として、危険度ランクの表示が可能である。
- 5) 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。それにより、斜面崩壊予測箇所の絞込み

が可能である。

- 6) 重回帰モデルとして作成した風化区分図は、DN 値が示す数値の判読から、堆積土砂量の推定が可能である。

謝 辞

本研究に使用した Quick Bird データは、Digital Globe 社および日立ソフトウェアエンジニアリング(株)から使用許諾を受けたデータである。

参 考 文 献

- 1) 国土調査：「土地分類基本調査（巖島）」, 1979.
- 2) 島重章：「岩国・宮島の被災について（速報）」, 土木学会誌, 第 90 巻, 第 11 号, pp48～50, 2005.
- 3) 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」, 日本測量協会, pp 2～28, 2001.
- 4) 財団法人リモートセンシング技術センタ (RESTEC)：「宇宙から地球を守るリモートセンシング」, 朝倉書店, pp 4～5, 1998.
- 5) 石原慎一郎, 島重章, 吉國洋：「リモートセンシングによる土砂崩壊の予測」, 広島工業大学紀要, 研究編, 第 36 号, pp91～98, 2001.
- 6) 島重章, 後藤恵之輔：「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」, 日本地すべり学会誌, 第 40 巻, 第 5 号, pp55～57, 2004.
- 7) (社)地盤工学会編；ジオテクノート「土は襲う」, pp81～88, 1995.
- 8) 胡隆之, 島重章：「山地斜面の崩壊原因と安定解析に関する研究」, 広島工業大学紀要, 研究編, 第 42 巻, pp91～98, 2007.
- 9) 広島県土木建築部河川砂防総室砂防室：「砂防技術指針」, 2001.
- 10) 胡隆之, 島重章：「衛星データによる山地溪流の堆積土砂量の予測」, 地盤工学会誌, 第 55 巻, 第 11 号, pp20～22, 2007.