

衛星観測高精度DEMによるインドネシア国バワカラエン山の 大規模崩壊後の土砂流出の経年変化把握

Temporal change in the sediment discharge from the gigantic landslide occurred on
Mt. Bawakaraeng, Indonesia

清水孝一^{a)}*・小山内信智^{a)}・山越隆雄^{b)}・笹原克夫^{c)}・筒井 健^{d)}

Yoshikazu SHIMIZU, Nobutomo OSANAI, Takao YAMAKOSHI, Katsuo SASAHARA and Ken TSUTSUI

Abstract

On March 26, 2004, the gigantic landslide occurred on the caldera wall of Mt Bawakaraeng, Indonesia. This paper quantitatively shows the temporal change in the sediment discharge from the huge amount of the deposit of the landslide through the differentiation of the multi-temporal DEMs obtained by the stereo matching of two optical satellite images. Firstly, the landslide buried the original river channel completely. In the next year, gully erosion dominated on the entire landslide deposit and some part of the gully bed was found to degrade up to 60 m. The total amount of sediment which had discharged from the area of interest was estimated to be 36.3 million m³. In the second post-event year, such a severe and entire degradation was almost terminated and some part showed a tendency of the river bed aggradations. The total amount of the discharged sediment drastically decreased and was estimated to be 8.3 million m³.

Key words : Mt. Bawakaraeng, gigantic landslide, topographic change, gully erosion, satellite remote sensing, digital elevation model

和文要旨

2004年3月26日、インドネシア国のバワカラエン山において大規模な崩壊が発生した。本論文は、バワカラエン山の大規模崩壊による堆積土砂の崩壊発生から2年間の経年変化を衛星観測高精度DEMを用いて定量的に明らかにしたものである。崩壊の発生により、旧河道を崩壊土砂が埋塞し、その後1年目には全般的にガリー侵食が卓越し、侵食によって年間最大で60m程度の河床低下をもたらした部分が見られた。2年目には一部に侵食の卓越する部分が残ったものの全般的には侵食を示す範囲がせばまり、一部においては堆積を示した。変化量の経年変化は崩壊発生1年目の流出量36.3百万m³から2年目には8.3百万m³に減少した。

キーワード：バワカラエン山、大規模崩壊、地形変化、ガリー侵食、衛星リモートセンシング、DEM

1. はじめに

2004年3月26日、インドネシア国スラウェシ島南部の火山であるバワカラエン山（標高2,830m, a.s.l.）においてカルデラ壁の大規模な崩壊が発生した。この山体崩壊の規模は約2億m³という報告がある¹⁾。このような大規模な不安定土砂の生産後には崩壊堆積土砂の流出の増加により下流への土砂流出が頻発することが知られている。

このような大規模土砂生産後の土砂流出に関する研究の一例として、1980年に発生したアメリカ国のセントヘレンズ山の山体崩壊を伴う噴火後の土砂流出に関する研究事例²⁾、フィリピン国における、ピナツボ山の火山噴火後の土砂流出に関する研究事例³⁾、インドネシア国におけるメラピ火山の1998年に発生した火砕流の堆積物の侵食状況に関する研究事例⁴⁾、そして日本国内では、雲仙普賢岳において1991~1995年にかけて発生した火砕流の

堆積斜面の侵食状況に関する研究事例⁵⁾がある。

セントヘレンズ山の研究事例²⁾においては、噴火後20年間の浮遊砂観測により山体崩壊地と火山灰堆積地からの流出土砂量の変化が明らかにされている。その研究事例では、火山灰堆積地からの浮遊砂量は約5年で噴火前の状態に戻ったが、山体崩壊の崩積土の堆積地からは20年が経過してもなお噴火前のレベルを大きく上回る浮遊砂が流出していることが明らかになっている。

また、ピナツボ山の研究事例³⁾においては、流出土砂量が噴火後から指数関数的に減少することが経年変化の調査結果から判明している。

また、メラピ山⁴⁾と雲仙普賢岳⁵⁾における研究では、火砕流堆積斜面の測量結果（前者では地上測量、後者では空中写真測量）に基づいて、土砂生産量の経年変化が検討されるとともに、火砕流堆積斜面におけるガリーの発達特性が明らかにされた。

以上の研究より大規模土砂生産後の下流への土砂流出の特性が明らかになってきた。火山活動に伴う火砕流堆積物からの土砂流出に関する研究事例はある程度蓄積されており、流出土砂量は数年間で急激に減少することが判明してきた。しかし大規模山体崩壊後の土砂流出については、セントヘレンズの研究事例程度しかなく、未だその実態は十分に分かっているとはいえない。これにつ

* 連絡著者 / corresponding author

a) 国土交通省国土技術政策総合研究所
National Institute for Land and Infrastructure Management, Ministry of Land, Infrastructure and Transport
〒305-0804 茨城県つくば市旭1

1 Asahi, Tsukuba City, Ibaraki Prefecture 305-0804, Japan

b) 国土交通省国土技術政策総合研究所
Public Work Research Institute, Erosion and Sediment Control Research Group

c) 高知大学農学部
Kochi University, Faculty of Agriculture

d) 株式会社NTTデータ
NTT DATA Corporation

いては研究事例の蓄積が必要である。

本研究は山体崩壊の発生前後の衛星観測高精度DEM (Digital Elevation Model: 数値標高モデル) を用いて, 山体崩壊により発生した不安定土砂堆積地の地形変化の定量的評価を行い, 大规模崩壊跡地からの土砂流出量の経年変化過程を明らかにするものである。

2. バワカラエン山体崩壊の概要

2.1 バワカラエン山の概要

バワカラエン山 (標高2,830m) は, インドネシア共和国スラウェシ島南西部 (図-1) に位置し, スラウェシ島南部の主要都市であるマカッサルで海に注ぐジェネベラン川の源流域に位置する。

図-2 に本研究対象範囲を含む地質図を示す。バワカラエン山を構成する地質はLompobattang volcanicsに属す。Lompobattang volcanicsは更新世に火山活動によって形成された安山岩質の火山岩類で, 溶岩, 火砕岩, および二次鉱床から形成されている。



図-1 バワカラエン山の位置
Fig.1 Location of Mt. Bawakaraeng

図-3 に本研究対象域の傾斜角分布図を示す。明瞭なカルデラ壁が形成されており, カルデラ内は過去のカルデラ壁の崩壊によると思われる堆積物からなる比較的傾斜の緩やかな面が構成されている。この平坦面のほぼ中央を東西方向にジェネベラン川が流下している。

図-4 にバワカラエン山麓にあるレンケセ集落 (写真-1 B付近の左岸側) で計測されている降雨量について示す⁹⁾。2005年12月から2006年11月までの年間降雨量は3,531mm, 日最大雨量は238mm (2005年1月25日) を記録している。

2.2 2004.3.26に発生した山体崩壊について

山体崩壊により, 死者・行方不明者32名, 住居12棟を含む1,500haの農地等が埋没する直接被害が生じた。崩壊した山稜の標高は約2,500mから2,600mで, 平均崩壊比高は750m, 平均崩壊幅が1,600m。推定崩壊土砂量は地山土砂量で約2億m³とされている¹⁾。

山体崩壊の発生したジェネベラン川の中流域には, ジェネベラン川の洪水調節, 下流都市の灌漑, 電力供給

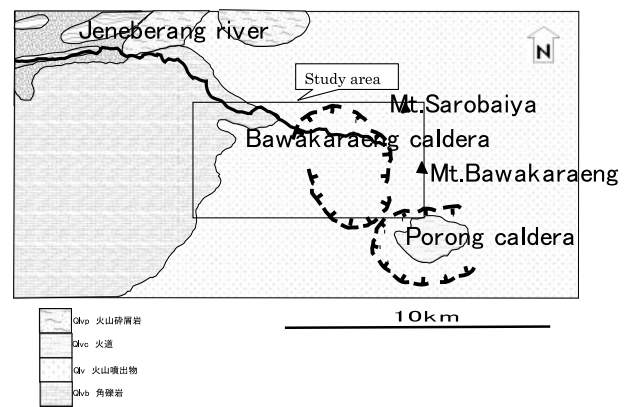


図-2 バワカラエン山周辺の地質図
Fig.2 Geologic map in the vicinity of Mt. Bawakaraeng

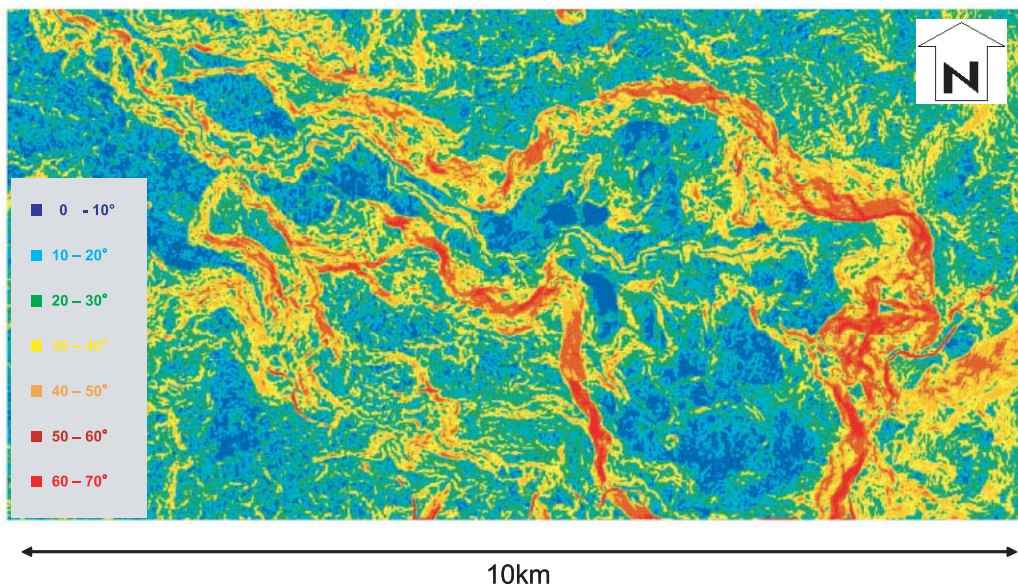


図-3 傾斜角分布図 (2005)
Fig.3 Distribution map of slope angle of the ground created from the DEM obtained in 2005

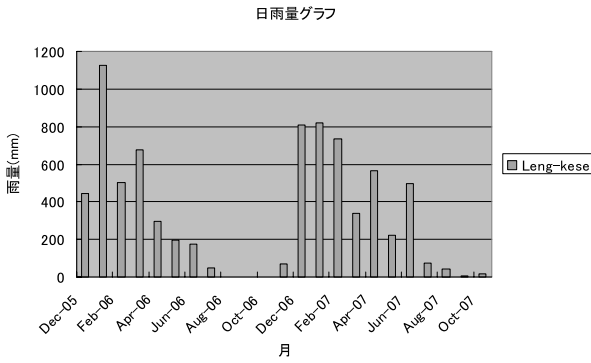


図-4 月雨量グラフ (2005.12~)

Fig. 4 Monthly rainfall from December 2005 to October 2007.

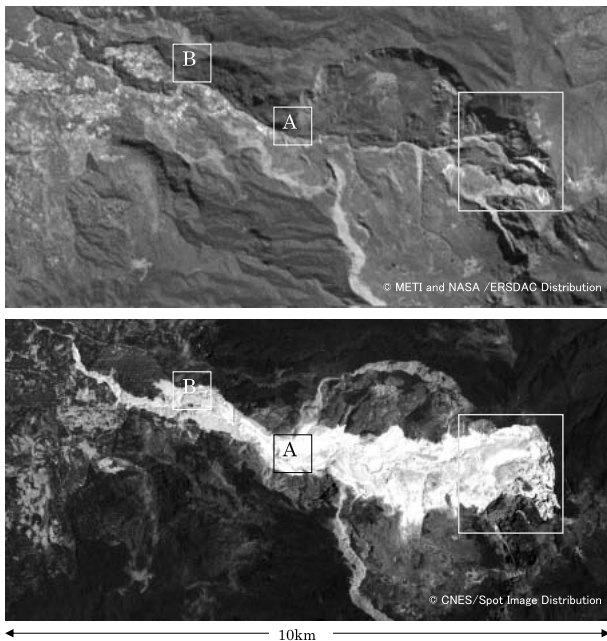


写真-1 解析に用いたバワカラエン山周辺の衛星画像 (上: 2001年7月7日 (発生前), 下: 2004年11月2日 (発生後))

Photo.1 An example of satellite images of Mt. Bawakaraeng and its vicinity (Upper: July 7, 2001 before the landslide, Lower: Nov. 2, 2004 after the landslide)

を目的としたビリビリダム (総貯水量約3.8億 m^3 , 1999年完成) が建設されている。崩壊土砂のダム貯水池への堆積による貯水容量の減少 (埋没), 水道・灌漑用水の汚濁など, 二次被害が問題となっているところである。

3. 使用する衛星観測高精度DEMについて

3.1 衛星データについて

表-1 に示す衛星画像よりDEMを作成した。

崩壊発生前のDEMはTerra衛星搭載のASTERセンサー (以下, ASTERと記載) による画像から作成した (以下, ASTER-DEMと記載)。ASTER画像の地表分解能は15mで撮影幅は60kmである。この画像から作成したDEM

表-1 解析に用いた衛星画像
Table 1 Satellite images utilized in this study

撮影日時	事項	衛星画像	BH比
2001年7月7日	崩壊前	ASTER	0.60
2004年10月13日	崩壊発生年	SPOT-5	0.58
2004年11月2日			
2005年9月20日	崩壊後1年	SPOT-5	0.61
2005年9月26日			
2006年8月4日	崩壊後2年	SPOT-5	0.56
2006年8月29日			

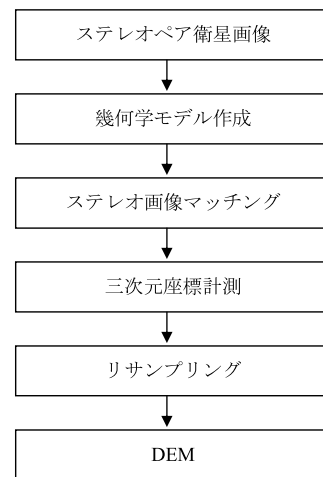


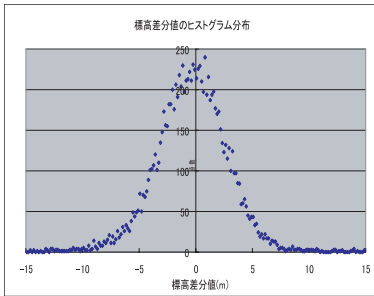
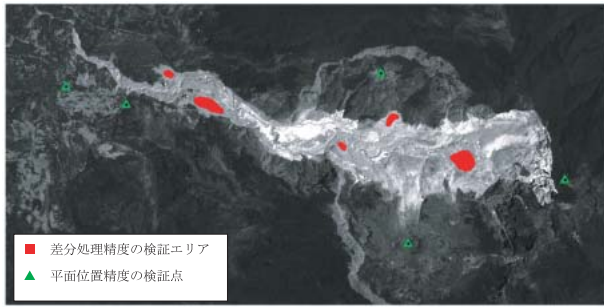
図-5 衛星画像からDEM作成のフロー
Fig. 5 Flow chart of the DEM generation processes from stereoscopic satellite imagery

の地表分解能は15mであり, その標高精度は約10~30m (1 σ) である⁷⁾。なお, ASTERは直下視と後方視の2つのセンサーを搭載していることから, 1回の撮影でステレオペア画像を取得可能である。ステレオペア画像の三次元座標計測性能を表すBH比 (Base to Height Ratio: 基線/高度比) は0.60である。

崩壊発生後のDEMはSPOT-5衛星搭載のHRGセンサー (以下, SPOT-5と記載) による画像から作成したもの (以下, SPOT-DEMと記載) である。SPOT-5画像の分解能は2.5mで撮影幅は60kmである。この画像から作成したDEMの地表分解能は5mであり, その標高精度は約5m (1 σ) である⁸⁾。なお, SPOT-5は, 東西方向に撮影角度を変更して画像取得が可能であることから, 異方向からの2回の画像撮影を行い, ステレオペア画像を取得した。ステレオペア画像のBH比は2004年画像が0.58, 2005年画像が0.61, 2006年画像が0.56である。

3.2 DEMの抽出方法

図-5にDEMの抽出方法を示す。まず, 衛星位置・姿勢情報, センサモデルを利用して画像の各画素の視線方向を表した幾何学モデルを作成する。次に, 相互相関に基づくステレオ画像マッチングによりステレオ画像間



誤差 (m)	平均	標準偏差
	-0.30	3.24

図-6 SPOT-DEMの精度評価結果

Fig. 6 The result of accuracy evaluation of the SPOT-DEM

の画素位置を対応付ける。続いて、幾何学モデルと画素位置の対応付け結果を用いて、視線方向の交点を算出することにより地表の三次元座標を計測する。そして、計測結果をメッシュ単位に再構成してDEMを作成する。

山体崩壊発生後の地形変化を追跡するためのSPOT-DEMについて、その性能を検証するため、①差分処理の精度（相対標高誤差）および②平面位置精度（相対平面誤差）の検証を行った。①差分処理の精度については、2004年と2005年のSPOT-DEMを用いて、地形変化が発生しなかったと考えられる領域において、差分誤差を検証した。差分誤差のヒストグラムを図-6に示す。差分処理の精度は約3m（1σ）であった。②平面位置精度については、DEMに基づく2時期の2.5m解像度オルソ画像を用いて、画像上で位置を特定できる5点の参照点を選定して、平面位置を比較した（図-6参照）。その結果、2004年と2005年データ間、2005年と2006年データ間で共に、8近傍の1画素（3.5m）以内に収まっていた。本研究で使用したSPOT-DEMの空間分解能は5mであるため、平面位置精度はその分解能以内である。なお、画像マッチングの誤差領域では、上記の平面誤差は大きくなることが想定されるが、①差分処理の精度評価の結果から、大部分の領域では本数値が適用可能であると考えられる。

4. 衛星観測高精度DEMによる地形変動状況について

4.1 山体崩壊の発生について

図-7に崩壊発生前の2001年のDEMと崩壊発生後の2004年のDEMにより算出された標高の差を計算した結

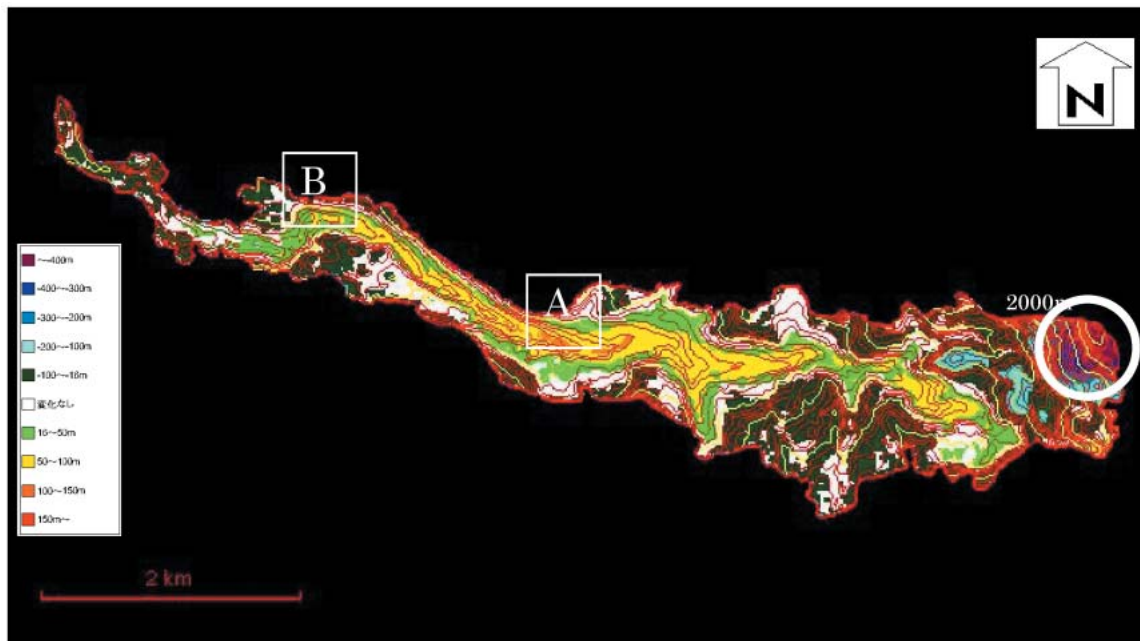


図-7 DEMの差分処理結果 (2001-04)

※一方向の変化: 187,555,000m³ 十方向の変化108,949,000m³

Fig. 7 The result of the differentiation of the multi-temporal DEMs in 2004 and 2001.

Total degradations: 187,555,000m³, Total aggradations: 108,949,000m³

果について示す。ここで、DEMの標高誤差は2001年のASTER-DEMについて大まかに15m程度であり、2004年のSPOT-DEMについて大まかに5m程度であるため、2つのDEMの差分を求める際に誤差伝搬の法則により16mの誤差を考慮して、±16mは変化がないものとして考える。

図-7には2001年のDEMより生成した20m等高線を重ね合わせた。等高線は補助曲線を1,000mごとに緑色で、計曲線を100mごとに黄色で、主曲線を20mごとに赤色で示した。なお、差分処理は2004年の衛星画像(写真-1)で明白色を示す崩壊地および崩壊土砂の堆積地のみを処理した。

図-7を見るとカルデラの北西側に著しい低下域(円で示した範囲)があることがわかる。DEMの差分処理によると最大で約470mの低下を示している。写真-2にカルデラ壁の崩壊状況について示す。写真中の2002年の稜線が崩壊発生後の2004年に低下していることがわかる。この稜線を含む崩壊により図-7の北西の低下域(円

で示した範囲)が生じたことがわかる。

カルデラ壁の崩壊により発生した崩壊土砂は、旧ジェネベラン川河道に沿って堆積しジェネベラン川が下刻していた谷を最大で約140m上昇させていることが判読できる。写真-3に崩壊発生直後のカルデラ出口付近(写真-1のA付近)の状況を示す。崩壊土砂の堆積により谷地形がほぼ平坦な面となっている状況が確認される。これは、図-7で表現されている谷地形を埋めた上昇域と調和的な結果を示している。

崩壊発生前(2001)のDEMと崩壊発生後(2004)のDEMの差分処理で計算された、崩壊により標高が低下した範囲の体積(山体崩壊体積にほぼ等しい)は約185.8百万 m^3 でその面積は約1.8千万 m^2 あり、標高が上昇した範囲の体積(山体崩壊土砂の堆積した量)は約108.3百万 m^3 でその面積は約4.3千万 m^2 (表-2)、その差の約77.5百万 m^3 は下流に流下したものと考えられる。土砂量の算出にあたっては、誤差を見込んで変化なしの範囲±16mを除外して算出している。

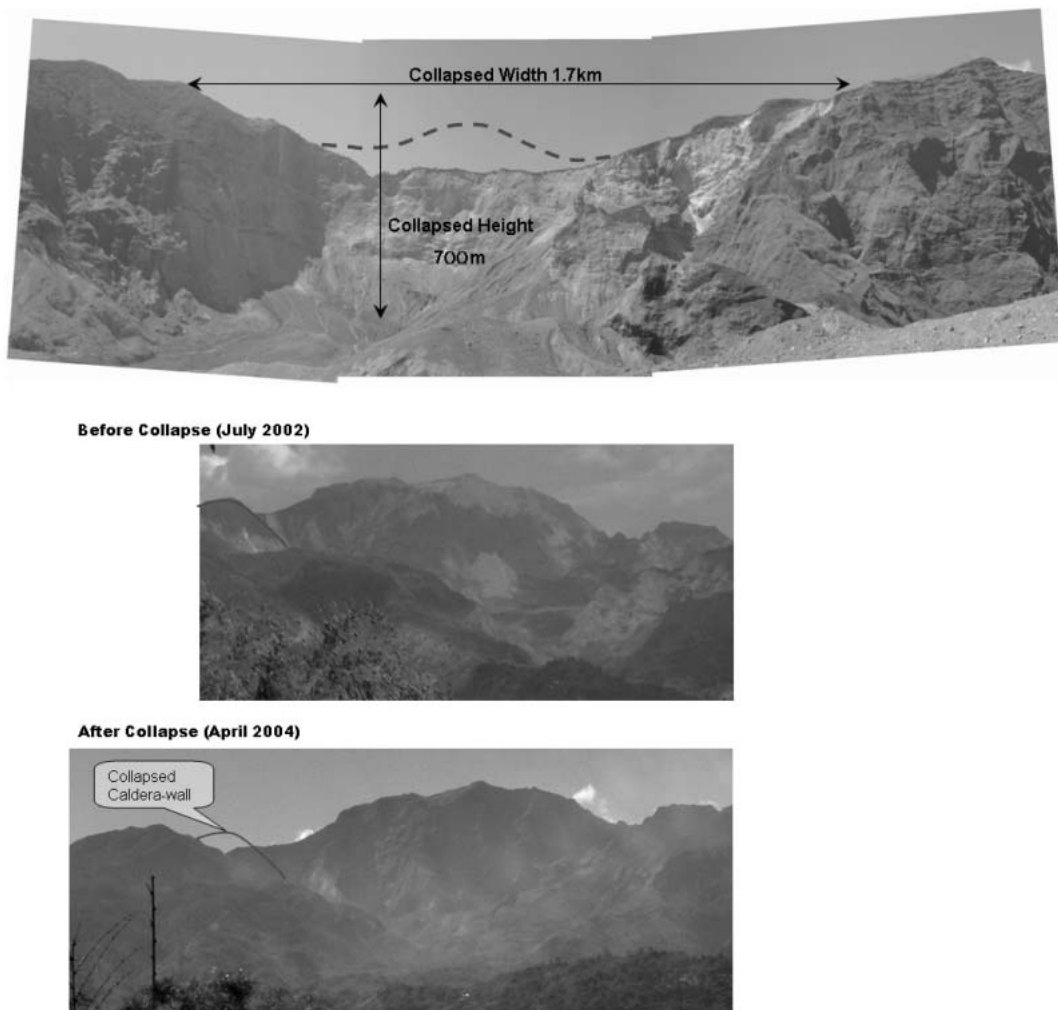


写真-2 カルデラ壁崩壊源の状況(6)より引用)

上段・下段: 崩壊後のカルデラ全景; 中段: 崩壊前のカルデラ全景

Photo 2 Photographs of Mt. Bawakaraeng caldera before and after the landslide⁶⁾

Upper & Lower: Photos of the caldera after the landslide, Middle: Photo before the landslide

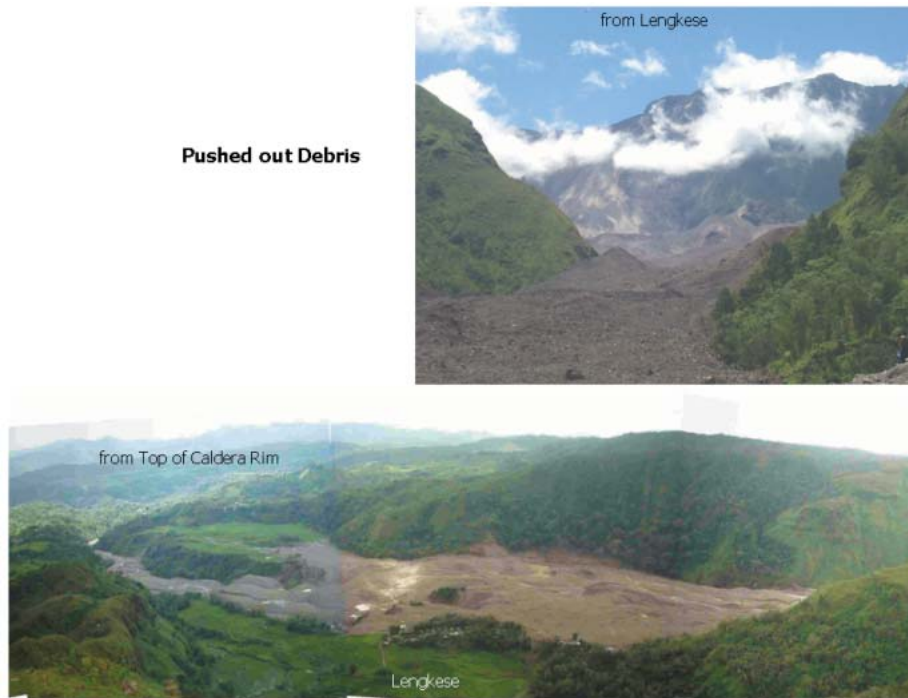


写真-3 崩壊土砂の堆積状況(6)より引用)

Photo 3 Photographs of the landslide deposit⁶⁾

Upper: Frontal view taken from Lengese village Lower: Oblique view taken from the top of the caldera rim.

表-2 DEM差分処理による変化量

Table 2 The temporal change in the total aggradations, the total degradations and the residuals obtained from the differentiations of the multi-temporal DEMs

	-方向			+方向			差
	面積(m ²)	体積(m ³)	平均深さ(m)	面積(m ²)	体積(m ³)	平均深さ(m)	
崩壊発生年	18,336,620	-187,555,000	-10.23	42,810,500	108,949,000	2.54	-78,606,000
崩壊発生後1年	2,171,730	-37,480,000	-17.26	166,050	1,217,000	7.33	-36,263,000
崩壊発生後2年	946,225	-11,360,000	-12.01	334,175	3,023,000	9.05	-8,337,000

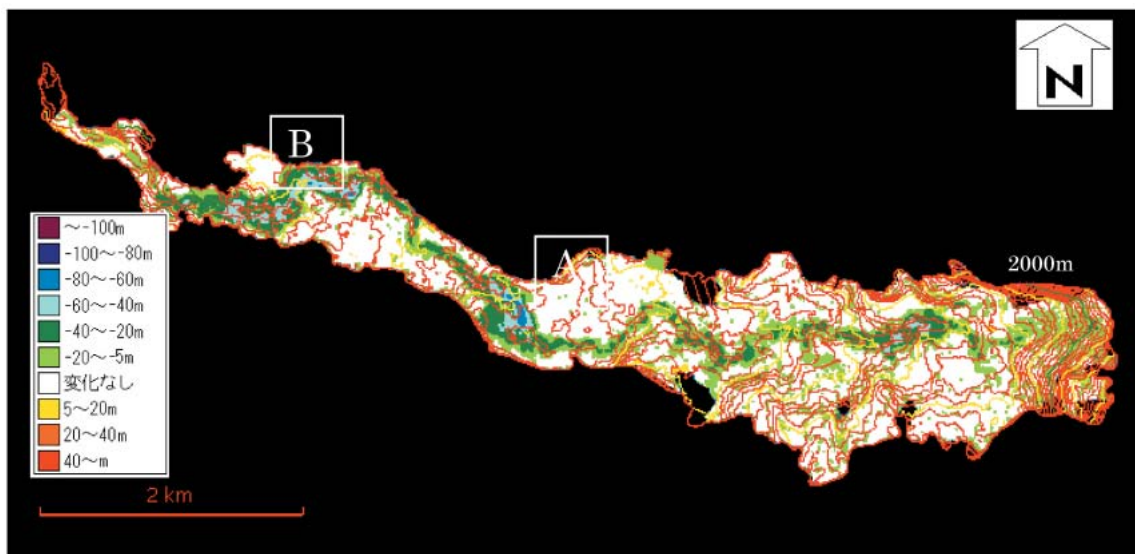


図-8 DEMの差分処理結果(2004-05)

※-方向の変化: 37,480,000m³ +方向の変化1,217,000m³

Fig. 8 The result of the differentiation of the multi-temporal DEMs in 2005 and 2004.

Total degradations: 37,480,000m³, Total aggradations: 1,217,000m³



写真-4 カルデラ出口付近(A)の状況 (2005)

Photo 4 Oblique view of the exit of the caldera of Mt. Bawakaraeng
This photo was taken in 2005.



写真-5 B付近のガリー侵食状況 (上: 2005, 下2006)
Photo 5 Gully erosion near the point "B"

4.2 山体崩壊の発生1年後について

図-8に崩壊発生年の2004年とその1年後の2005年のDEMにより算出された標高の差を計算した結果を示す。大まかに5mの標高誤差がある2時期のSPOT-DEMの差分処理なので誤差伝搬の法則により±5mは変化がないものとする。

図-8には2004年のDEMより生成した20m等高線を図-7同様に重ね合わせた。

変化のある領域では全般的に低下傾向が卓越しているが、堆積後の降雨によるガリー侵食によると思われる連続した低下域の帯がみられる一方、図-8AやB付近(写真-1のA, Bと同じ)ではガリーの側方侵食による幅広い低下域も確認された。この低下域での変化量は最大

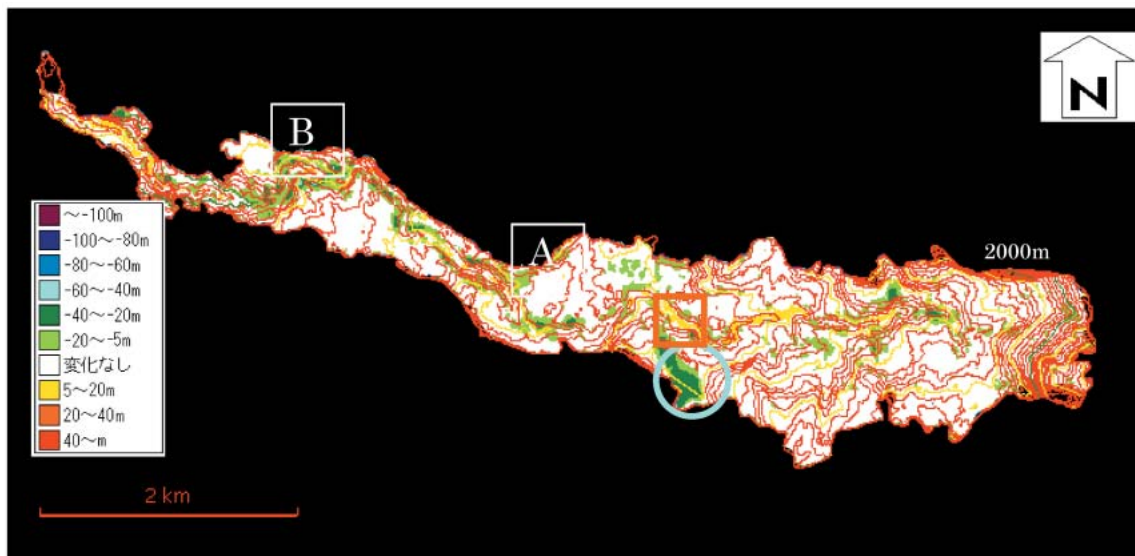


図-9 DEMの差分処理結果 (2005-06)

※一方向の変化: 11,360,000m³ 十方向の変化3,023,000m³

Fig. 9 The result of the differentiation of the multi-temporal DEMs in 2006 and 2005.
Total degradations: 11,360,000m³, Total aggradations: 3,023,000m³

で約60mに達する。

写真-4にカルデラ出口付近(写真-1のA付近)の崩壊発生から1年経過した状況を示す。写真-2と比較して分かる通り、崩壊発生時には堆積土砂により元の河床を埋塞した平坦面が形成されていた状況から新たにガリー侵食が進んでいることが確認できる。

また、写真-1のB付近のガリー侵食状況を写真-5に示す。崩壊発生年(2004)のDEMと崩壊発生1年後(2005)のDEMの差分処理で計算された、標高が低下した範囲の体積(侵食により流出した土砂量に相当する)は約37.5百万 m^3 その面積は約2.2百万 m^2 であり、標高が上昇した範囲の体積(侵食されて流下した土砂が流下途中で堆積した量)は約1.2百万 m^3 面積は約17万 m^2 で(表-2), その差の約36.3百万 m^3 が下流に流下したものと考えられる。(表-2)これは山体崩壊によって発生した崩壊土砂量約2億 m^3 の約20%に相当する。

土砂量の算出にあたっては、誤差を見込んで変化なしの範囲 $\pm 5m$ を除外して算出している。

4.3 山体崩壊の発生2年後について

図-9にさらに1年後の2005年とその1年後の2006年のDEMにより算出された標高の差を計算した結果を示す。

山体崩壊の発生1年後と同様の理由から $\pm 5m$ は変化がないものとする。図-9には差の計算結果に2005年のDEMより生成した20m等高線を図-7同様に重ね合わせた。DEMの差分処理より標高が低下した範囲の堆積(侵食により流出した土砂量に相当する)は約11.4百万 m^3 その面積は約95万 m^2 であり、標高が上昇した範囲の堆積(侵食されて流下した土砂が流下途中で堆積した量)は約3.0百万 m^3 面積は33万 m^2 で(表-2), その差の約8.3百万 m^3 が下流に流下したものと考えられる。

土砂量の算出にあたっては、誤差を見込んで変化なしの範囲 $\pm 5m$ を除外して算出している。

図-8のような急激な低下域が見られなくなるととも



写真-6 天然湖下流の侵食状況

Photo 6 Gully erosion in the lower reach of a natural lake

に、低下域の幅が狭くなったほか、一部の区間では堆積域が現れる(例えば図-9の四角の範囲)などガリーの発達状況に変化が見られた。また、左岸側に図-9の円で囲まれた範囲で顕著な低下域が見られる。この地点には2005年の衛星画像では天然湖の形成が確認されている。DEM作成においては、水面では画像がマッチングしないため近傍湖岸の標高を内挿している。この変化領域は天然湖の決壊に伴う水面の低下と天然湖岸の決壊・侵食による低下域を示していると考えられる。写真-6に天然湖壁面の侵食状況を示す。このガリー侵食により流出した土砂がジェネベラン川に堆積し、これより上流からのガリー侵食土砂がジェネベラン川に沿って堆積した結果、上記堆積域が現れたものと考えられる。

4.4 横断面の変化

期間内の堆積土砂の変化をより詳細に把握するために図-10に示す12断面をとり、作成した横断面図を図-11に示す。

全般的に2004年から2005年の約1年間で縦横方向にガリー侵食が進んだ後2005年から2006年の約1年間では大きな変化はなく、侵食についてはおおむね停止したものの、いくつかの断面では上記で述べたのと異なる変化を示した。それらの地点について以下詳細に述べる。

No.1では2005年から2006年の間にガリーを埋めるような変化が見られた。写真-7にNo.1付近のSPOTのオルソ画像を示す。ガリー側壁の押し出しのものととなる上部の斜面変状については確認ができなかったものの、ガリー底の形状が2005年に比べて2006年が滑らかになっており、横断面図に見られるガリーを埋める変化を裏付けるものとなっている。

No.5は2004年から2005年だけでなく、2006年になっても侵食が止まっていない。図-7~9のBにあたる場所である。写真-5に示したとおりガリー侵食が進んでいる。この地点においては2005年と2006年に行った現地調査により計測を実施しており、約12mの侵食による河床の低下を観測している。横断面図の示す変化はこの結果ときわめて整合した結果を示している。

No.8は近傍の断面でほとんど変化が無かったのに比較して河床が上昇した断面である。写真-7に断面No.8

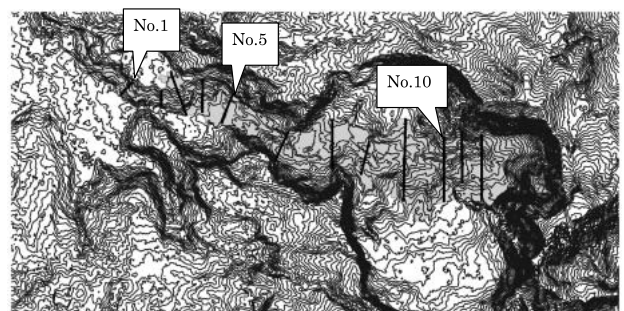


図-10 横断面位置図

(図左側下流から上流に向かってNo.1~12)
Fig. 10 Location of Cross-sections

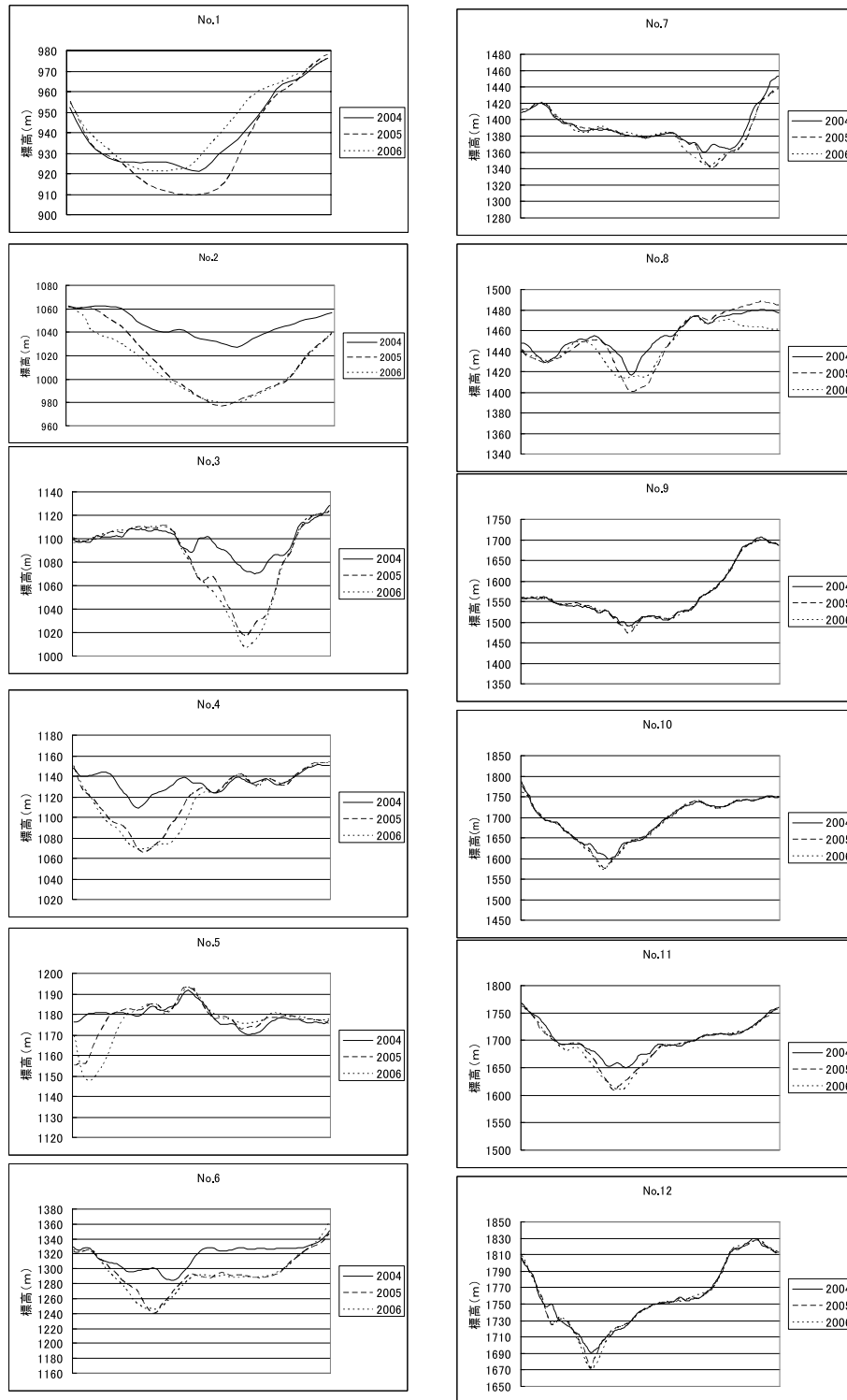


図-11 横断面図 (下流から上流の向きに見て作成)

Fig. 11 Cross sections (The left side of the figures corresponds to the right bank)

付近のSPOTオルソ画像を示す。

2005年と2006年の間に天然湖の堤体が決壊しその土砂がジェネベラン川に流出しガリーを埋塞するとともに上流からの土砂を堆積させ、その結果ガリーの谷底を上昇させたことが示されている。

5. 考察

本研究は大規模な崩壊による大量の不安定土砂が生産された後、短期間に变化する侵食過程を衛星画像より作成したDEMの差分解析により明らかにしたものである。

図-12に変化量のグラフを示す。-方向のグラフが崩壊もしくは侵食量を、+方向のグラフが堆積土砂量を、差が流域外への流出土砂量を示す。

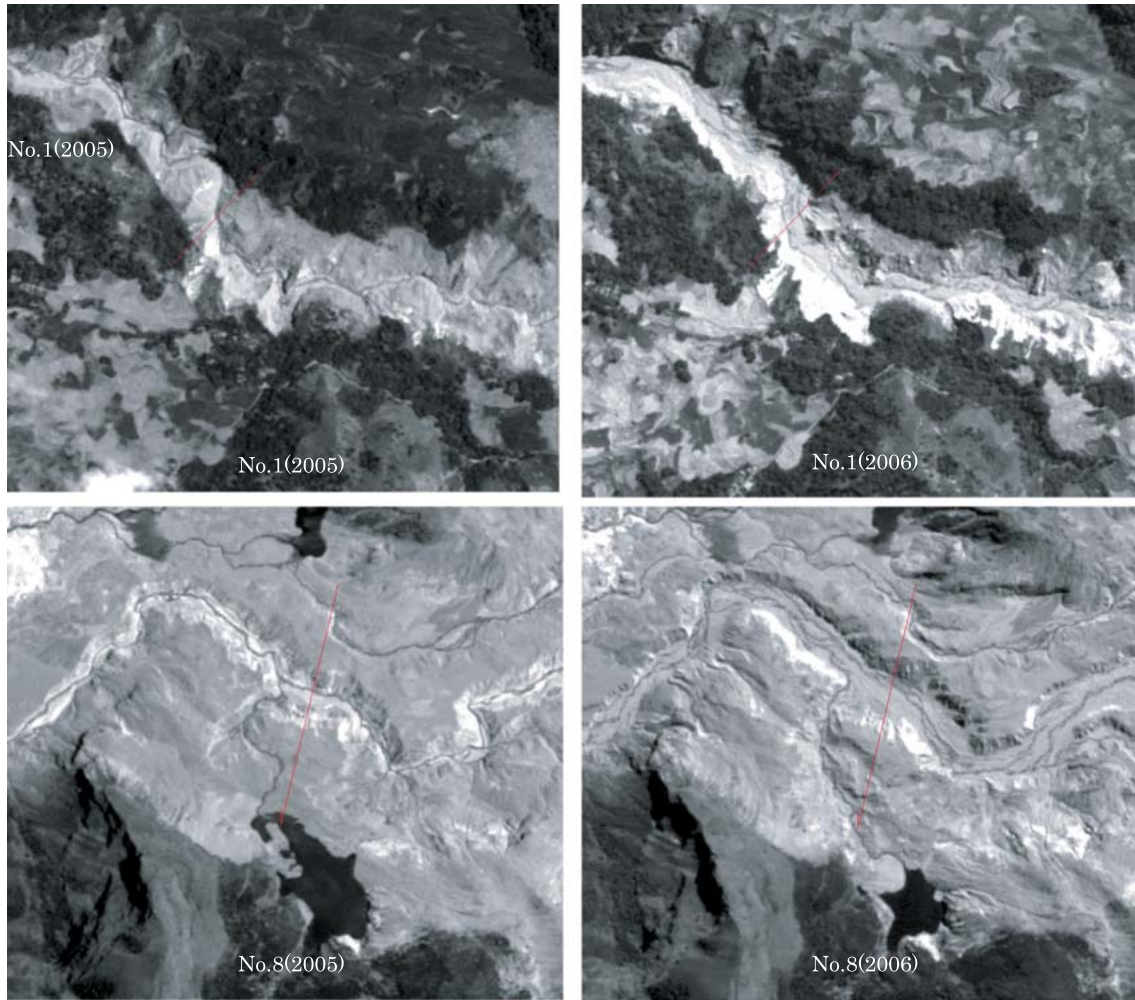


写真-7 No.1とNo8. 付近のSPOTオルソ画像 (2005と2006)
Photo 7 SPOT ortho photos around the cross section No. 1 and No. 8 in 2005 and 2006.

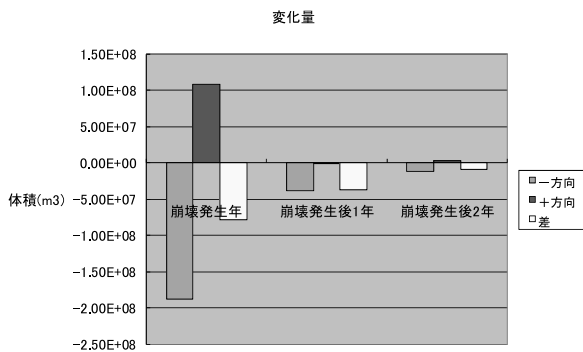


図-12 DEM差分処理による変化量

Fig. 12 The temporal change in the total aggradations, the total degradations and the residuals obtained from the differentiations of the multi-temporal DEMs

堆積土砂域の侵食量は調査した2年間で約3割弱に低下した。その一方で堆積量は約3倍となり、域外に流出した量は1年目の約36.3百万m³から約8.3百万m³に低下した。

本事例では、大規模な崩壊が発生した後1年においては、流水の影響を受けている部分では侵食による土砂の流出が卓越し、厚く堆積した不安定土砂は、一方的に低下する状態であったと考えられる。この傾向は、2年目においては一部区間において侵食と堆積がほぼ等しくなり、侵食の傾向が収まる一方、一部区間ではむしろ堆積の傾向を示す区間が現れこのため域外への流出土砂量が著しく低下する結果となったものと考えられる。

崩壊時から崩壊2年後までの衛星観測高精度DEMの解析と現地調査から大規模崩壊により生産された不安定土砂の侵食・堆積の時間変化について以下のことが分かった。

崩壊時に崩壊部分の標高が大きく下がり、下流の河谷が埋塞しほぼ平坦な面を形成した。

崩壊発生から1年後の間にガリーを形成し、そのガリーに沿って侵食傾向が著しかった。特にカルデラ出口(A)とレンケセ集落直下流(B)のガリー-屈曲部では侵食による谷壁の後退と、谷底面の下刻が著しかった。

崩壊発生から2年後の間に、レンケセ集落直下流(B)においては依然としてDEMの差分処理で46mと大きな侵

食傾向を示すものの、それ以外の部分ではガリー沿いの侵食傾向は弱まり、逆に天然湖上流など堆積傾向を示す部分が現れるようになった。

6. おわりに

大規模な崩壊により発生した不安定な土砂の移動状況は、発生後の経過期間によって変化することが既往の研究によっても知られている。しかしながら、具体的にどのような経過をたどるか明確にされた事例は少ない、今回の衛星画像を用いた解析により経年的かつ面的な変化過程を把握することができた。

今後も本研究を継続してバワカラエン山の山体崩壊とその後の地形変化を衛星画像から作成したDEMを使って追跡することにより、さらにその実態を明らかにしていきたいと考えている。また、現地調査の結果と合わせて堆積土砂の侵食過程について解析を進めていきたいと考えている。

謝辞

本研究に当たり、現地観測データの提供をしてくださるなど多大なご協力をくださった、(株)建設技術研究所インターナショナル清水比呂志氏、八千代エンジニアリング(株)渡辺岳志氏に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 土屋智・古賀省三・笹原克夫・松井宗廣・中広三男・渡部文人・嶋大尚・吉田和久 (2004): インドネシア南スラウェシ州で発生した巨大崩壊と崩壊土砂の流出堆積 (速報), 砂防学会誌, Vol. 57, No. 3, p. 40-46.
- 2) J. J. Major, T. C. Pierson, R. L. Dinehart, and J. E. Costa (2000): Sediment yield following severe volcanic disturbance-A two-decade perspective from Mount St. Helens, *Geology*, Vol. 28, No. 9, pp. 819-822
- 3) A. S. Daag, Ph. D thesis: Modelling the erosion of pyroclastic flow deposits and the occurrences of lahars at Mt. Pinatubo, Philippines, Univ. of Utrecht, Netherland, p. 238
- 4) 金子正則・笹原克夫・竹内正信・南 哲行・スバルカ (2001): 1998年7月にインドネシア・メラビ火山で発生した火砕流堆積物の侵食状況, 砂防学会誌, Vol. 54, No. 1, pp. 59-65
- 5) 小橋澄治・水山高久 (1996): 流出土砂量の予測, 雲仙火山砂防研究報告, 第2号, (社)砂防学会, pp. 19-26
- 6) Government of The Republic of the Indonesia, Ministry of Public Works The Directorate General of Water Resources (2006): Report on urgent survey for Consulting Engineering Services Bawakaraeng Urgent Sediment Control Project
- 7) H. Fujisada, G. B. Bailey, G. G. Kelly, S. Hara, and M. J. Abrams (2005): ASTER DEM Performance, *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, VOL. 43, NO. 12, pp. 2707-2714.
- 8) K. Tsutsui, S. Rokugawa, H. Nakagawa, S. Miyazaki, C. -T. Cheng, T. Shiraishi, and S. -D. Yang (2007): Detection and Volume Estimation of Large-Scale Landslides Based on Elevation-Change Analysis Using DEMs Extracted From High-Resolution Satellite Stereo Imagery, *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, VOL. 45, NO. 6, pp. 1681-1696.
- 9) 八千代エンジニアリング(株)渡辺岳志氏私信
(原稿受付2007年12月3日, 原稿受理2008年6月4日)