

光学衛星画像による大規模崩壊の土砂移動状況の経年把握

水野正樹・江川真史・清水孝一・筒井 健

1. はじめに

衛星リモートセンシング技術は、一定品質で広域同時観測が可能であり、かつ長期的な継続観測により、地表で生じている事象を時系列的に解析することが可能である。さらに、近年では観測画像の高解像度化が進み、地上分解能が1mより高い画像の入手も容易となった。衛星リモートセンシング技術による大規模災害時の早期被災状況把握や継続的な流域監視等、土砂災害分野でも十分適用可能な条件が整ってきたといえる。

本報では、2004年3月26日にインドネシア国バワカラエン山カルデラ壁で発生した大崩壊（推定崩壊土砂量：約2億 m^3 ）を対象として、複数時期の高解像度光学衛星画像をもとにステレオ画像解析により時系列的にDEMを作成し、崩壊前後及びその後の土砂流出による地形変化を把握した事例について報告する。

2. DEMの作成方法

2.1 光学衛星画像によるDEMの作成方法

本研究では、光学衛星画像を用いたステレオ画像解析により、DEM（Digital Elevation Model：数値標高モデル）を作成した³⁾。ステレオ画像解析とは、2枚以上の異なる方向から撮影された衛星画像の視線方向差（視差）を解析し、各画素の3次元座標を計測する方法である。DEM作成の流れは以下のとおりである（図-1）。



図-1 本研究におけるDEM作成フロー

① ステレオペア衛星画像を選定・収集する。

- ② 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。
- ③ 幾何学モデルに基づいて画像の各画素に対応する、ステレオ対象画像の各画素位置を画像マッチング処理により照合する。
- ④ 対応付けた2つの画素位置から視線方向の交点を推定して、3次元座標計測を行う。
- ⑤ 画像全体の計測結果を一定のグリッド間隔に再構成したDSM（Digital Surface Model：数値地表高モデル）を作成する。なお、DSMは樹木や地物の高さを含む地表面の標高を表す。
- ⑥ 基準点補正は、地上基準点を用いて、主に衛星の位置、姿勢データ等に起因するDSMの水平・垂直座標誤差を補正する。誤差が大きく、傾き補正等が必要な場合は、3点以上の地上基準点を基に補正する。しかし今回は、対象箇所が海外で正確な地上基準点を設定しておらず、そして今回使用の衛星の位置・姿勢センサが高精度であることから、画像上の1地点を基準点として定め、水平移動により各画像の相対的な位置を合わせる補正を行った。
- ⑦ 樹林地域で地盤標高を求める場合は樹高補正を行うが、本研究では比較対象地域が崩壊地の裸地であるため樹高補正は不要である（以下、DSMをDEMとして使う）。

2.2 高解像度光学衛星画像によるDEMの精度

衛星画像のステレオ幾何学モデルに基づく、理論上の高さ精度は、①幾何学モデルの精度、②画像間位置あわせの精度、③解像度と視差角度に基づく幾何学条件の精度、の3要素に依存する。誤差のない理想的な幾何学モデルを仮定すると、高さ精度は式(1)により表わされ、画像解像度と視差角度に依存する。

$$H_{\text{error}} = R_{\text{reso}} \times P / (B / H) \quad \dots \text{式(1)}$$

ここで、 H_{error} ：高さ誤差、 R_{reso} ：画像解像度、 P ：位置あわせ精度、 B/H ：基線長さ/高度である。ただし、実際の複雑な自然地形においては、画像に複雑な歪みが生じるために、画像マッチング

The yearly monitoring of sediment movement by optical satellite images after a large-scale collapse.

処理で「画像間位置合わせの精度」が低下する。特に、斜面の傾斜角度により誤差が大きくなり、30度程度以上の急傾斜地における高さ精度には留意を要す。例えば、SPOT-5衛星を用いた場合、式(1)で理想的な条件下では約2mの高さ精度が想定されるが、実際は精度が低下する。

そこで本事例のインドネシア・バワカラエン山の場合について、作成した5mメッシュのSPOT-5衛星画像（2.5m分解能）から作成したDEMの精度検証のために、地形変化がないエリアにおける2時期のSPOT-5のDEMを用いて、相対高さ誤差、及び相対水平誤差を検証した¹⁾。相対誤差は、DEMをもとに作成した2時期のオルソ画像の差分を用いて、位置座標のずれを検証したものである。その結果、相対高さ誤差は約3mであり、相対水平誤差もDEMの1メッシュ以内が十分確保されている。また同様に、QuickBird衛星画像（0.6m分解能）およびIKONOS衛星画像（1m分解能）から作成した2mメッシュのDEMは、2m間隔の等高線を作図して評価し、その結果、概ね2mの高さ精度は確保されていると判断した。

3. 土砂移動量解析

3.1 インドネシア・バワカラエン山大崩壊の概要

2004年3月26日、インドネシア国スラウェシ島のバワカラエン山のカルデラ壁において、インドネシア最大級の大規模な崩壊が発生した（写真-1）。崩壊土量は約2億m³以上と推定され、崩壊土砂は約7km下流まで到達した。一方、大量に供給された不安定な崩積土は、その後の急速な侵食作用を受けており、下流域の多目的ダムや集落にとって脅威となっている。



写真-1 バワカラエン山の大崩壊

3.2 光学衛星画像を用いた時系列DEMの作成

特に侵食作用が顕著なカルデラ部付近を対象エリア（図-2）として、崩壊前（2003年）、崩壊直後（2004年）及び崩壊から6年半経過後（2010年）の3時期の高解像度光学衛星画像を収集し、DEMを作成した（表-1及び図-4(A),(B),(D)参照）。



図-2 DEM作成エリア（黒枠）

表-1 時系列DEM作成仕様

データ名	時期	衛星種類	DEM分解能	画像撮影日	地上分解能
DEM ₂₀₀₃	崩壊前	IKONOS ※	2m	2003年6月2日、6月13日	1.0m
DEM ₂₀₀₄	崩壊直後	SPOT-5	5m	2004年10月13日、11月2日	2.5m
DEM ₂₀₁₀	崩壊	WorldView-1,2	2m	2010年9月2日、10月13日	0.5m/
	6年半後	QuickBird		2010年10月16日	0.6m

※雲補間用に一部ASTER-DEMを使用（2001年7月7日撮影）

3.3 崩壊前後の地形変化量の推定

崩壊前後の地形変化量を把握するために、作成したDEM₂₀₀₃とDEM₂₀₀₄を用いて差分解析を行った（表-2、図-4(F)）。崩壊による侵食量は2.1億m³、崩壊深は最大483mであり、堆積量は1.4億m³、堆積深は最大145mと推定された。崩壊土砂は崩壊前の谷部を埋めるように堆積し、差分の0.7億m³は解析エリアより下流へ流下したと考えられる。

表-2 崩壊前後の地形変化※：分布図（DEM₂₀₀₄-DEM₂₀₀₃）

侵食(-)			堆積(+)			差分 (m ³)
侵食量 (m ³)	最大深 (m)	平均深 (m)	堆積量 (m ³)	最大深 (m)	平均深 (m)	
-2.1億	-483	-66	1.4億	145	40	-7,000万

※参考文献3）（SPOT-5で10万m³程度の精度を確保）より、体積の有効数字程度の精度は確保されていると考えられる

3.4 崩壊直後の想定地山DEMの作成

大規模な崩壊発生以降、崩壊地付近ではガリー侵食や拡大崩壊、堆積域では崩積土の再移動等、経年的な土砂移動状況を把握した。ここで、崩壊後の土砂移動の経年変化を把握するために、崩積土を取り除いた崩壊直後の地山の表面標高を基準に地形変化量をモニタリングした。ただし、崩壊時に崩壊してすぐ崩積土に埋もれたエリアでは、現地ボーリング調査結果等が無い限り、正確に崩壊後地山の表面を推定することは困難である。よって、崩壊前後のDEM₂₀₀₃とDEM₂₀₀₄を比較し、各メッシュでより低い標高値を便宜上の崩壊直後想定地山と定義しDEMを作成した（以下、「想定地山」という。図-3及び図-4(C)）。

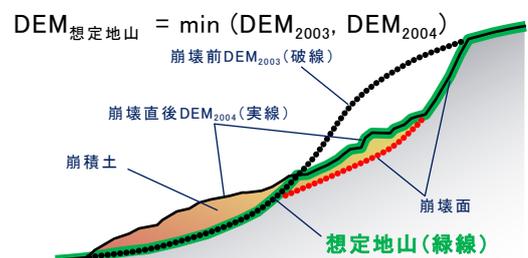


図-3 想定地山の模式図

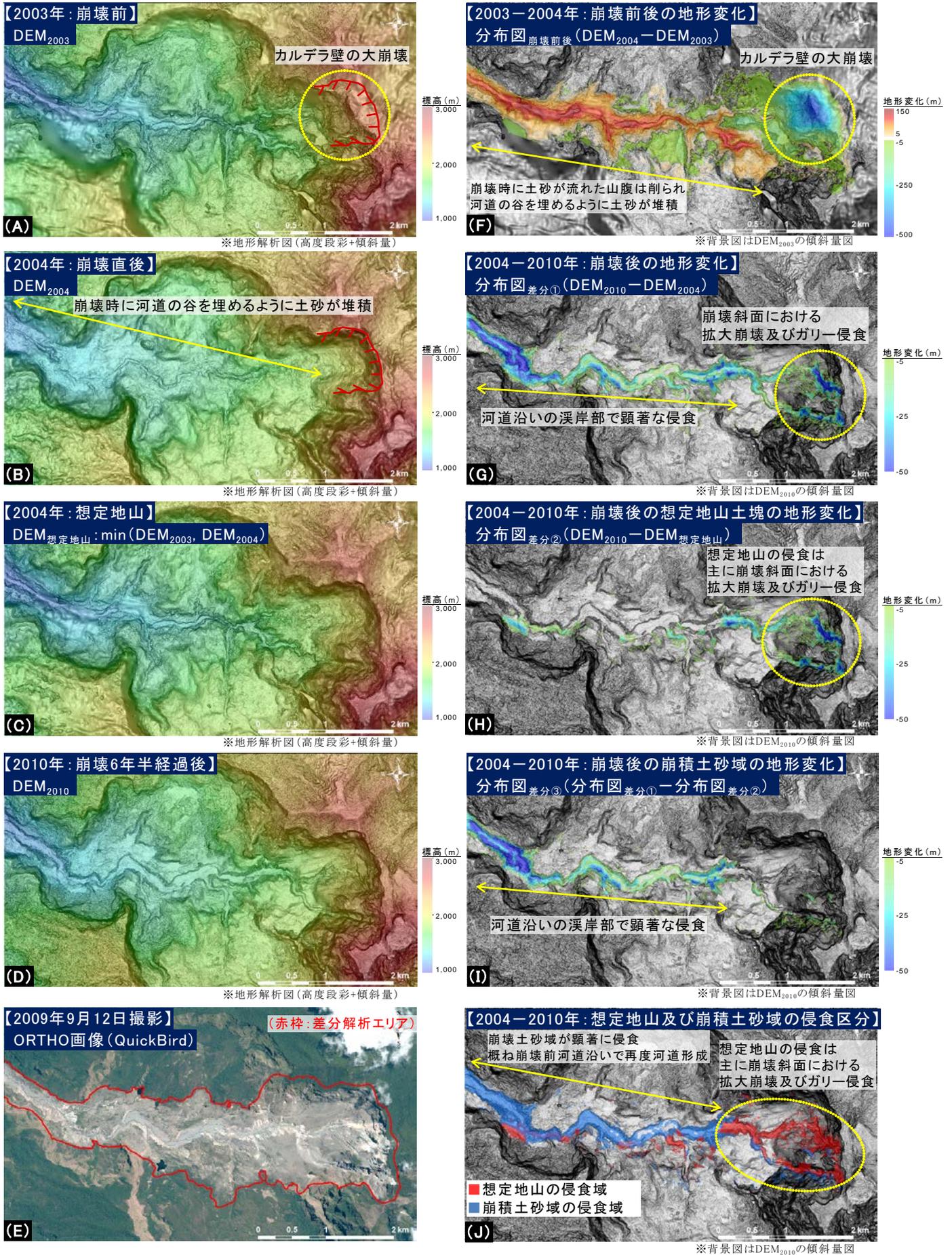


図-4 光学衛星画像による時系列DEM及び経年変化

3.5 崩壊後カルデラ部の経年変化

作成したDEMをもとに崩壊後の2004年～2010年のカルデラ部の経年変化を推定した(表-3)。

データ名	解析内容	差分解析(A-B)		侵食量(m ³)	割合
		A	B		
分布図差分① 図-4(G)	崩壊後の侵食量	DEM ₂₀₁₀ (2mメッシュ)	DEM ₂₀₀₄ (5mメッシュ)	-4,200万	-
分布図差分② 図-4(H)	想定地山からの侵食量	DEM ₂₀₁₀ (2mメッシュ)	DEM _{想定地山} (2mメッシュ)	-1,500万	36%
分布図差分③ 図-4(I)	崩積土砂域の侵食量	DEM _{差分①} (2mメッシュ)	DEM _{差分②} (2mメッシュ)	-2,700万	64%

※DEM₂₀₀₄は2mメッシュに補間

表-3 崩壊後の想定地山及び崩積土砂域の経年変化

(1) 崩壊後の侵食量 (分布図差分①=DEM₂₀₁₀-DEM₂₀₀₄)

2004年～2010年の侵食量は4,200万m³程度で、河道沿いの溪岸部に侵食が見られる(図-4(G))。年が経つにつれて毎年の侵食量は減少するとともに顕著な侵食位置は変化している^{1),2)}。

(2) 想定地山からの侵食量 (分布図差分②=DEM₂₀₁₀-DEM_{想定地山})

想定地山からの侵食量は、1,500万m³程度であり、2004年～2010年の侵食量4,200m³の約36%に相当する。主に崩壊斜面における拡大崩壊及びガリー侵食である(図-4(H))。

(3) 崩積土砂域の侵食量 (分布図差分③=分布図差分①-分布図差分②)

2004年～2010年の侵食量と想定地山からの侵食量の差を崩積土砂域の侵食量とし、2,700万m³程度であった。これは2004年～2010年の侵食量4,200m³の約64%に相当し、また、崩壊時の崩積土1.4億m³に対して約20%が解析エリアより下流へ流出したことになる。また、本地域では、概ね崩壊前の河道と類似した流れに沿った侵食作用が認められる(図-4(I))。

以上より、本地域における大規模崩壊後の経年変化の特性は、主に次のとおりであった。

- ・大規模崩壊斜面は、ガリー侵食や拡大崩壊等により、継続的な土砂発生源となっている。

- ・不安定に堆積した崩積土は、概ね崩壊前の河道と類似した流れに沿った差別的な侵食により、継続的に土砂流出する。

4. まとめ

本稿では、航空機観測の困難な海外での大規模崩壊を対象に、光学衛星画像をもとに高解像度かつ時系列的なDEMを作成し比較した。その結果、大規模崩壊後斜面の継続的な侵食や、堆積崩積土の崩壊前河道に沿った侵食等の土砂移動の経年変化を詳細に把握することができた。

本解析結果は、衛星画像撮影と解析に時間を要することに課題は残るものの、長期的な流域監視におけるリモートセンシング技術の実運用に資する有益な結果が得られたと考えられる。

今後、衛星による流域監視手法を確立するための技術開発を進めるとともに、実用的な手法として、国内外を問わず普及を図っていきたい。

参考文献

- 1) 清水孝一、小山内信智、山越隆雄、笹原克夫、筒井健：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、日本地すべり学会誌、Vol.45、No.2、pp.95～105、2008
- 2) 水野正樹、林真一郎、清水孝一、小山内信智：衛星リモートセンシング技術の土砂災害への応用、土木技術資料、第53巻、第1号、pp.16～19、2011
- 3) Ken TSUTSUI, Shuichi ROKUGAWA, Hideaki NAKAGAWA, Sanae MIYAZAKI, Chin-Tung CHENG, Takashi Shiraishi, Shiun-Der YANG: 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, 2007.

水野正樹



国土交通省国土技術政策
総合研究所危機管理技術
研究センター砂防研究室
主任研究官
Masaki MIZUNO

江川真史



国土交通省国土技術政策
総合研究所危機管理技術
研究センター砂防研究室
部外研究員
Masafumi EKAWA

清水孝一



(独) 土木研究所水災害・
リスクマネジメント国際
センター水災害研究グル
ープ(防災) 総括主任
研究員
Yoshikazu SHIMIZU

筒井 健



(株)NTTデータ公共
システム事業本部
e-コミュニティ事業部
Ken TSUTSUI