

# ドローンレーザー計測による斜面崩壊地形の迅速可視化 ～2018年4月耶馬溪土砂災害を例として～

原口 強<sup>1)</sup>・杉本一起<sup>2)</sup>・富井隆春<sup>2)</sup>

1) 大阪市立大学大学院 理学研究科 e-mail : haraguti@sci.osaka-cu.ac.jp

2) 株式会社アミューズワンセルフ

## 1. はじめに

航空レーザー測量技術により、植生で被覆された地域でも詳細な地形や地物を可視化することが可能となった。筆者らも、カンボジアのアンコール遺跡群<sup>1)</sup>やグアテマラのマヤ遺跡群<sup>2)</sup>で密林下の地形・遺跡の可視化（図1，図2）に成功している。図1，2の左右の画像は同じ場所の画像で、左側が熱帯の密林地帯を示す衛星画像、右側が航空レーザーで取得したデータから赤色立体図で可視化した画像である。森林下の遺跡の分布が可視化されている様子がみとれる。

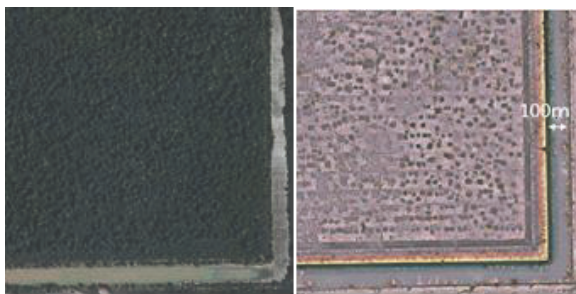


図1 アンコール遺跡群での可視化例<sup>1)</sup>



図2 マヤ文明セイバル遺跡での可視化例<sup>2)</sup>

このように広域を迅速かつ高精度に計測出来る航空レーザー測量の優位性は揺らがないものの、実際には1回の費用が高額である。さらに秒間10万点を超す稠密なデータシステムであるが、高度数百mを時速200kmで移動する機体からのデータ取得となるため、実際のデータ密度は1平方メートルあたり10から20点程度で、遺跡の詳細形状把握には限界がある。

こうした中、近年開発されたドローン搭載型レ

ーザースキャナシステムは、研究者自らが操作可能で、高度数10mを低速移動しながらデータ取得するため、センチオーダー精度が担保出来るまでに発展している。航空レーザーに比べ限定地域ではあるが、高精度・低コストで計測することが可能となる。

このような背景から、ここでは、国内で開発されたドローン搭載型レーザーシステムを用いた、2018年4月11日、大分県中津市耶馬溪町大字金吉の梶ヶ原地区において発生した斜面崩壊への適用事例を報告する。

## 2. ドローンレーザー計測システム

計測に使用した機器は以下の通りである。

【レーザー測量システム】総重量1.8kg，レーザーシステムと高性能INS搭載



図3 ドローン搭載型レーザーシステム

表1 スキャナーシステムの仕様

重量	1.8 kg
■ レーザースキャナー	
パルスレート	6万点/秒
スキャンレート	30Hz
距離	受光強度 $\geq 30\%$ ～200m over
FOV（視野角）	90°（ $\pm 45^\circ$ ）
測距精度	4mm@50m、20mm@150m（1 $\sigma$ ）
■ INS	
水平精度	$\pm 10$ mm
高さ精度	$\pm 20$ mm
姿勢精度	Yaw $\pm 0.02^\circ$ Pitch/Roll $\pm 0.01^\circ$

【ドローン】DJI Matrice600Pro：本体重量9.5kg，最大積載量5.5kgの折畳み可能な空撮用ドローン。



図4 システムを搭載した計測状態

### 3. 耶馬溪斜面崩壊の概要

崩壊地付近は標高 350m~400m の平坦な火砕流台地が広がり, その中を山国川の支川の金吉川が貫流している. 崩壊は金吉川の左岸側斜面(図 5, 図 6)で発生した. 崩壊地付近で金吉川は大きく蛇行し, 被災集落の梶ヶ原地区は河川の攻撃斜面にあたる.



図5 崩壊斜面 (2018. 4. 16)

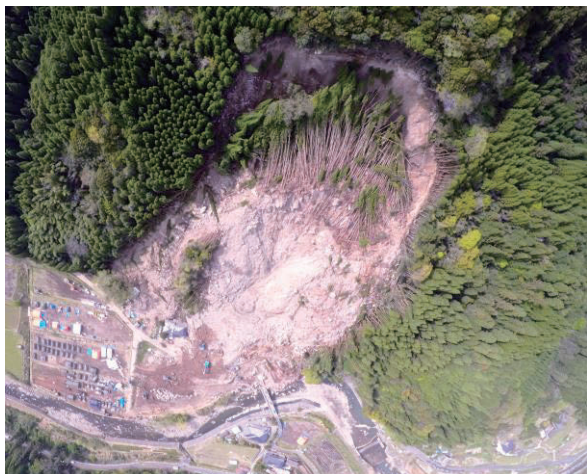


図6 崩壊斜面空撮画像 (2018. 4. 16)

周辺の地質は新第三紀中新世~鮮新世の豊肥火山岩類(安山岩, 玄武岩質安山岩および火砕岩)の分布地域で, この中に耶馬溪層(凝灰質砂, シルト, 軽石)が挟まれている. 平坦な火砕流台地を形成する地層は, 約 100 万年前の耶馬溪火砕流堆積物で柱状節理の発達した溶結凝灰岩でその下位には非溶結部を伴っている. 山国川沿いには約 9 万年前の阿蘇4火砕流堆積物の溶結凝灰岩の分布はあるが, 崩壊地周辺には分布しない.

### 4. 計測結果

崩壊地のドローンレーザー計測は, 対策現地本部の許可を得て, 捜索活動が続いていた 4 月 16 日に実施した. 事前に現地の地形を地理院地図で確認し, 樹木の高さを考慮し, 対地高度 70m に設定したフライトプランを作成した. 離着陸地点は, 大分大学の UAV チームが利用していた河川右岸の田植え前の水田を利用し, 筆者ら(図 7)が自ら操縦した. ドローンレーザー計測ルート of 安全確認のため, 同じフライトプランにより小型ドローン(Mavic Pro)を実際に飛行させて障害物等の確認を行った.

結果として最初に, ドローン搭載カメラで撮影した 4K 動画からキャプチャーした画像(図 7), 動画の静止画像から作成した 3D モデル図(図 8)を示す. 崩壊地の現況が明瞭に観察でき, 崩壊の概要を把握することが出来る. しかしこれらの情報は従来の航空写真測量技術と同等で, 樹木下の地形状況は分からない.

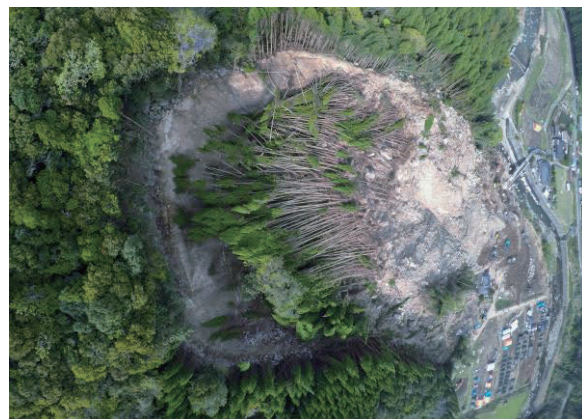


図7 崩壊斜面の動画からのキャプチャー画像

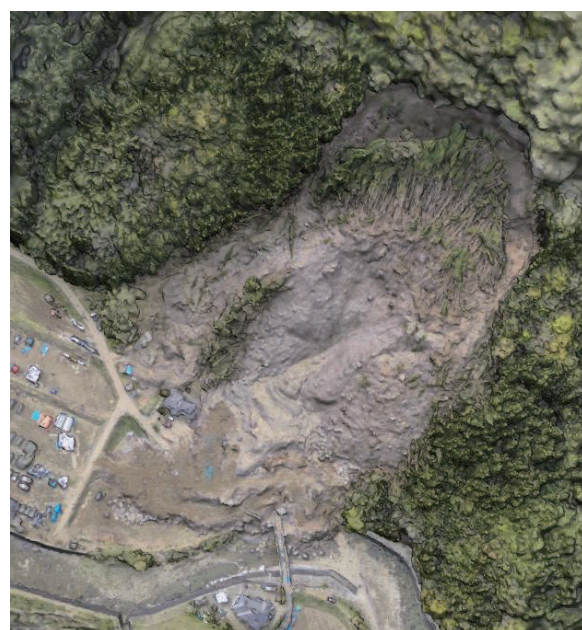


図8 空撮動画から作成した 3D モデル図

次にドローンレーザー計測データから作成した，樹木を含めた3Dモデル（図9），樹木を一部取り除いた3Dモデル（図10），地形のみの3Dモデル（図11）を示す。樹木をフィルタリング処理することで，樹木下の地形が可視化され，崩壊部分の3次元地形形状を明瞭に確認することができる。

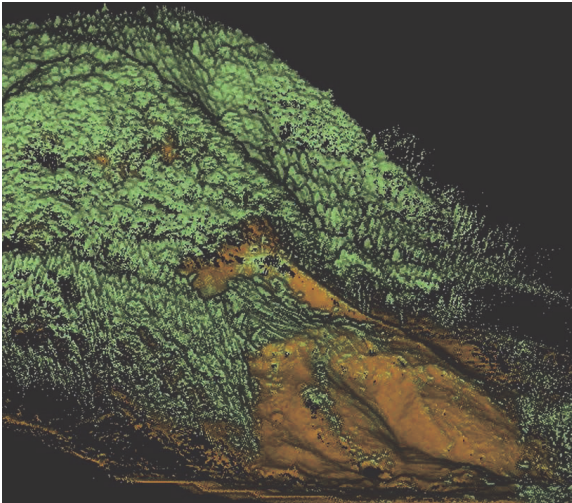


図9 レーザー計測データから作成した3Dモデル

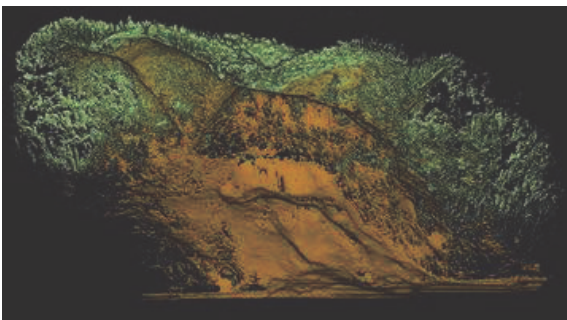


図10 一部樹木を除去した3Dモデル

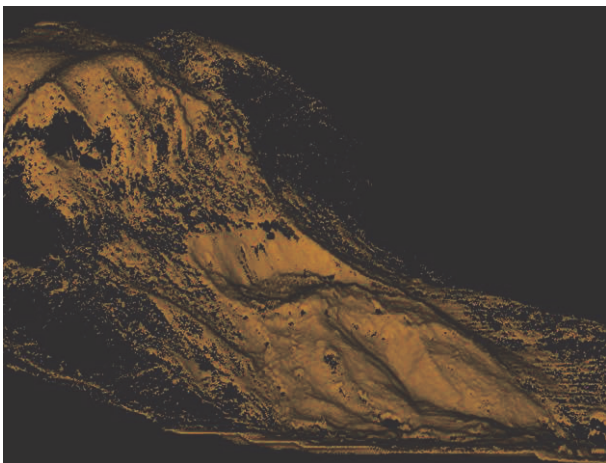


図11 地形のみ3Dモデル

さらに，3Dモデルから作成した崩壊地の地形断面（図12，13，14，15，16）を示す。これら情報から，樹木の倒壊状況と樹木下の地形が同時可視化され，樹木の動きから崩壊のメカニズムを推察することができる。

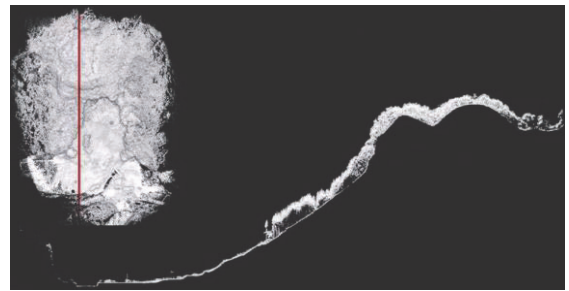


図12 地形断面1：左図の赤線は断面位置

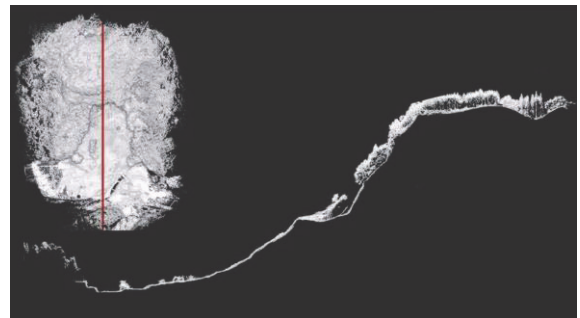


図13 地形断面2：左図の赤線は断面位置

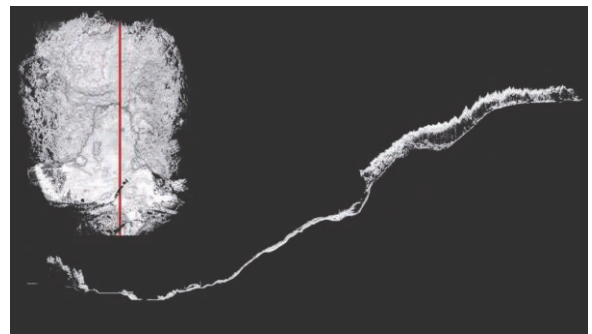


図14 地形断面3：左図の赤線は断面位置

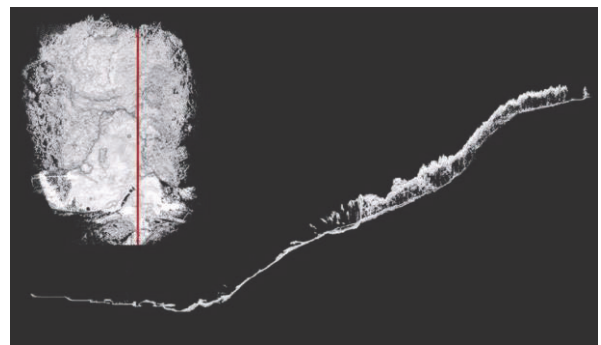


図15 地形断面4：左図の赤線は断面位置

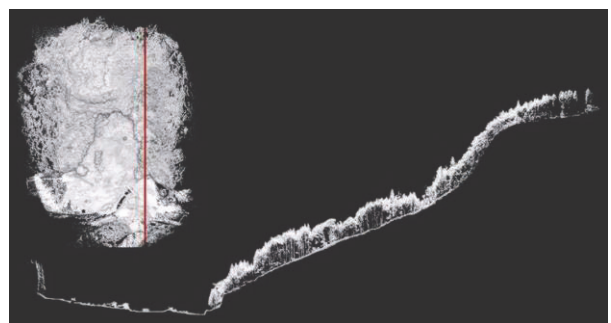


図16 地形断面5：左図の赤線は断面位置

## 5. 崩壊メカニズム

### (1) 崩壊形態の推定

計測データから、崩壊部分の3Dモデル(図17)と主断面(図18)を作成した。対象斜面は標高170m~360m, 比高約200mの急斜面で、崩壊は斜面中部の標高240m~270mで発生している。

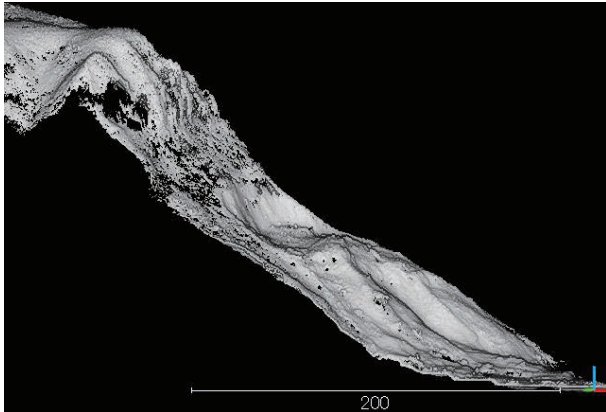


図17 崩壊部分の3Dモデル

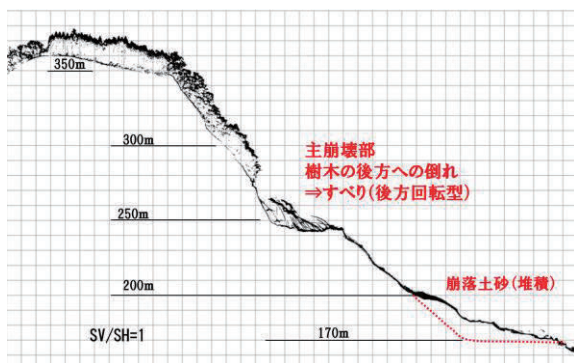


図18 崩壊斜面の主断面

樹木の倒壊方向から地盤が後方回転していることが明瞭で、崩壊後の地形からも斜面中部がスプーンで抉ったように抜け出していること(図19)が確認できる。滑り出した土塊はその後、斜面下部の表層部を巻き込んで崩落し、直下の民家を覆ったと推察される。

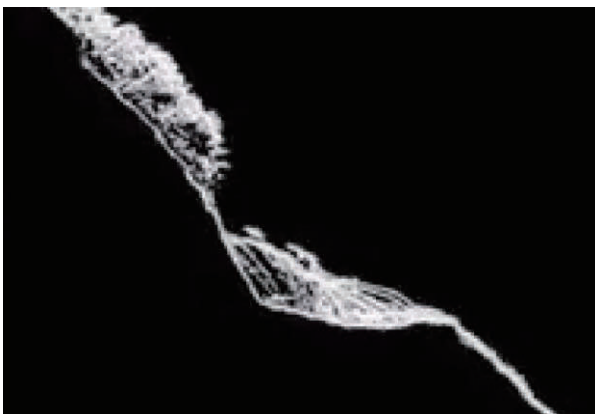


図19 崩壊斜面の主断面の拡大部

民家側からみれば、比高約70mは高層ビル23階フロア的位置に相当する。これより上の部分が、厚さ30m(ビル10階分に相当)の土塊が落ちてきたことになる。

### (2) 斜面中腹からの湧水

崩壊は2018年4月11日(水)未明に発生している。当日の報告<sup>3)</sup>によれば、「現場は(中略)・・・中腹には湧水個所が確認され、11日の午前中まで大量の濁水が湧出していましたが、午後にはその湧出量も少なくなりました。トレンチ状のV字となった地盤は、崩壊後の湧水の浸食によって形成されたものと思われます。」とある。

この時に撮影された写真(図20)には斜面からの湧水が幾筋も確認され、それらが合流して楔状の谷部に集中して流下している様子(図21)が読み取れる。

崩壊後にこれらの地形が形成されていることから、直後の湧水が集まり、流水となって谷地形を形成したことが読み取れる。



図20 崩壊斜面直下の湧水：大分大学撮影<sup>3)</sup>

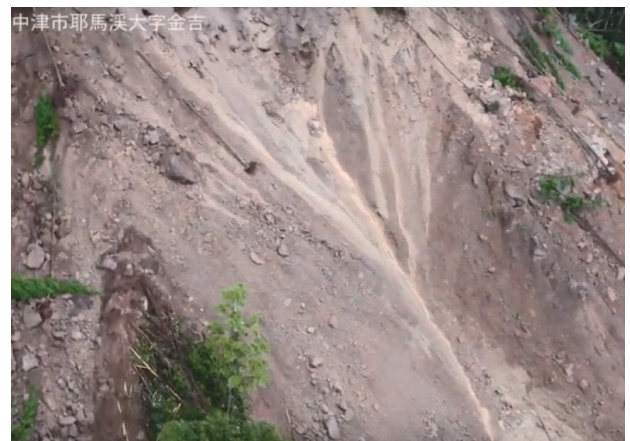


図21 崩壊斜面直下の湧水：大分大学撮影<sup>3)</sup>

さらに、湧水は河川に流れ出し、河川水を淡褐色に変色させて流下（図 22）している。これは崩壊土砂が河川を堰き止めたため、その影響によって、河川水が変色した可能性もある。しかし、河川水の色（図 23）に着目すれば、堰き止めによる河川水の色とは明らかに異なる。

河川の中腹からの湧水と目撃証言および空撮写真にみられる湧水の形態から判断して、かなりの水量が中腹から湧出し、その後河川に流れ込み、河川水を淡褐色に変色させたものと推察される。



図 22 河川へ流出した淡褐色の水の流れ  
：大分大学撮影<sup>3)</sup>より判読



図 23 淡褐色水，暗灰色水と河川水の混合  
：大分大学撮影<sup>3)</sup>より判読

### (3) 事前に崩壊が予測できたか

今回の崩壊を「崩壊前に予測可能できたか」について地形図（図 24）などの地形情報から検討する。

崩壊前の周辺地形図（図 24）では崩壊跡が多数読み取れる。一方、今回崩壊した部分の地形図を拡大（図 25）すると、斜面中腹に尾根状に張り出した部分が確認される。崩壊前の空中写真（図 26）をみると、崩壊した地点は広く植生に覆われている。

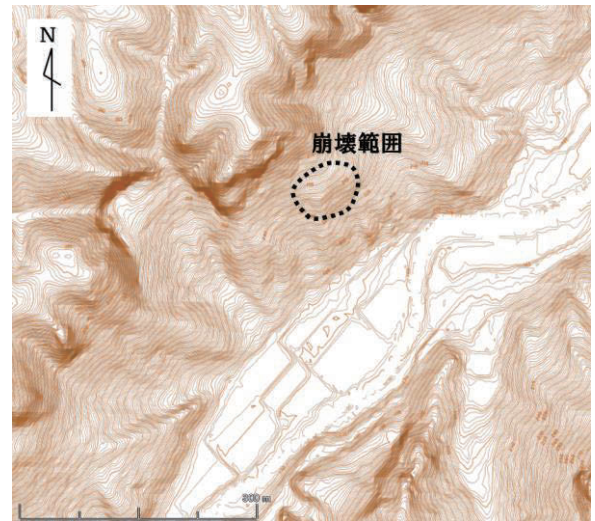


図 24 崩壊前の周辺の地形図

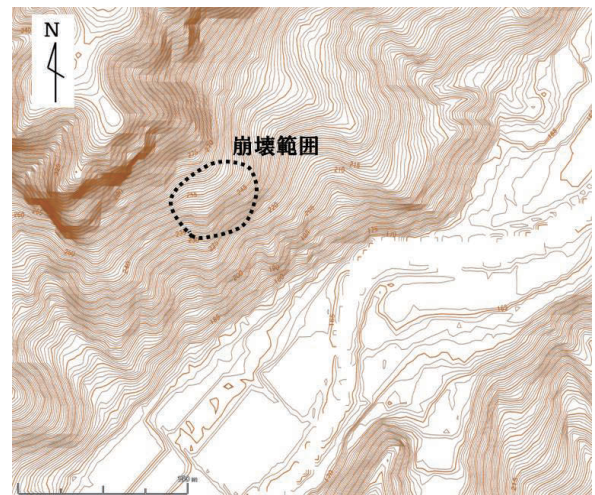


図 25 崩壊前の周辺の地形図（拡大 1）

このように地形図や空中写真の情報だけから、実際に今回崩壊場所（図 27）を事前に予測することは極めて困難だったのであろう。

一方、崩壊後に作成された赤色立体図（図 28）を観察すると、過去に崩壊が繰り返された跡が地形図判読より明瞭に判読出来る。その中で当該斜面の崩壊は、周囲より突き出た尾根部の先端で発生していることが読み取れる。すなわち、不安定土塊が斜面中部に取り残されていたことが想定される。

しかし、これも今回崩壊した事前情報が無ければ、認識できることは難しかったのではなかろうか。

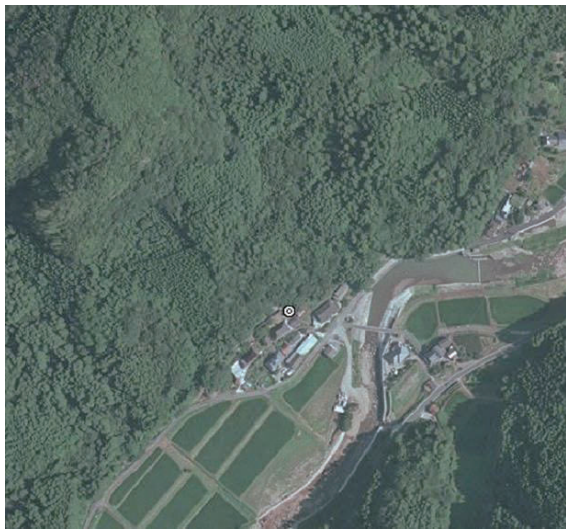


図 26 崩壊前の周辺の空中写真

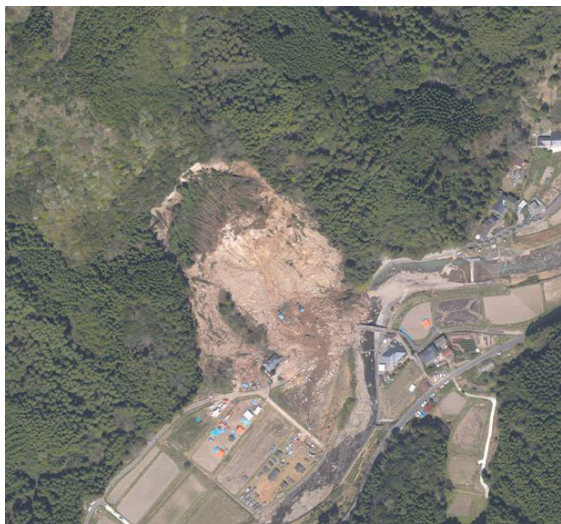


図 27 崩壊後の空中写真

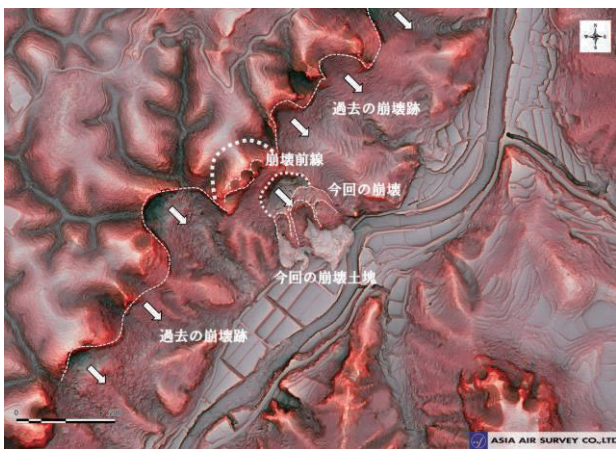


図 28 崩壊斜面付近の崩壊地形判読  
：アジア航測が公開した赤色立体図<sup>4)</sup>に加筆

#### (4) 崩壊プロセスの推定

本文で示した今回の計測内容や観察結果を，図

29 に示す。

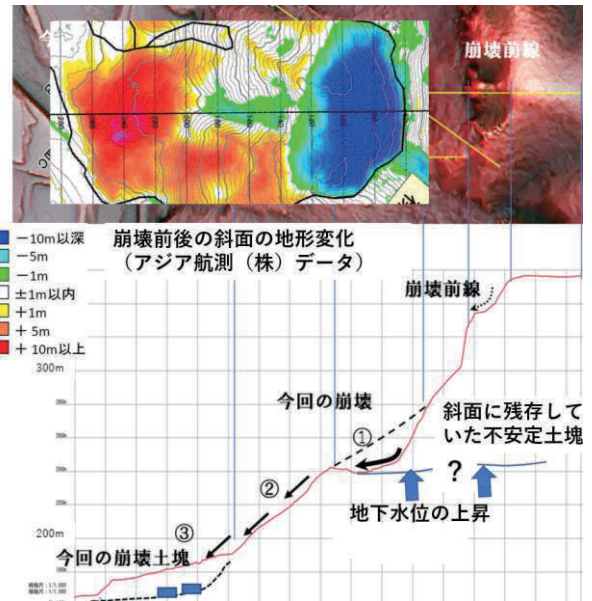


図 29 崩壊プロセス

地形図や赤色立体図の判読から多数の崩壊地形が確認され，その中で今回の崩壊地付近は僅かに尾根状に張り出した部分であった．このことから，斜面中腹に不安定土塊があったことが想定される．崩壊直後の斜面には多数の湧水が見られ，かなりの湧水量であったことから，不安定土塊内部の地下水位が上昇し，斜面の安全率が低下し臨界状態となったとみられる．

これらの条件が揃った結果，斜面中腹に張り付いていた不安定土塊が一気に抜け出して崩壊したと想定される．

通常，崩壊の引き金は地震動や降雨があるが，今回は直接の外的要因がない．崩壊の素因は地層構成と急崖斜面，地下水環境，遠因として地震動や先行降雨があると見られる．

本文は十分な地下地質や地下水に関する情報が少ない中でまとめたものであり，今後十分な調査によってそのメカニズムの解明が必要である．

#### 6. まとめ

大分県耶馬溪で発生した斜面崩壊を対象として，ドローンレーザー計測により実施した斜面崩壊地形の迅速可視化事例を報告した．

現地計測 1 時間，数時間後には 3D モデルを作成し，関係者に提供した．崩壊形態の可視化や 2 次災害防止の観点から，本手法は極めて有効であった．

崩壊後の調査でそのメカニズムを解明し，対策を検討することは重要である．しかし，崩壊後では人命は救えない．なぜ，あの場所が，あのような形態で滑ったのか，他の斜面ではなく，なぜあ

そこだったのか. 確かに事前予測は極めて困難な場所であるが, なんとかして事前予測する為の技術開発・研究が必要である.

### 謝辞

大分大学減災・復興デザイン教育研究センターの鶴成 悦久准教授には、現地計測において多大な協力を頂いた. ここに感謝します.

### 参考文献

- 1) I.Shimoda, T.Haraguchi, T.Chiba, M.Shimoda, 2016, The Advanced Hydraulic City Structure of the Royal City of Angkor Thom and Vicinity Revealed through a High-Resolution Read Relief Image Map, Archaeological Discovery, Volume 4, 22-36
- 2) T.Inomata, F.Pinzn, J. L. Ranchos, T. Haraguchi, H. Nasu , J.C. Fernandez-Diaz, K. Aoyama, H. Yonenobu, 2017, Archaeological Application of Airborne LiDAR with Object-Based Vegetation Classification and Visualization Techniques at the Lowland Maya Site of Ceibal, Guatemala, 9 (6) :563 Remote Sensing
- 3) 大分大学減災・復興デザイン教育研究センター, 2018, 中津市耶馬溪町で発生した土砂災害 (2018.4.11) について  
[http://www.cerd.oita-u.ac.jp/2018/04/12/yabakei\\_](http://www.cerd.oita-u.ac.jp/2018/04/12/yabakei_)
- 4) アジア航測 (株), 2018, 平成 30 年 4 月大分県中津市耶馬溪で発生した斜面崩壊, <http://www.ajiko.co.jp/article/detail/ID5EGJ98PO1/>