

**CSIS Discussion**

**Paper 137**

東京大学空間情報科学研究センター

&

防災科学技術研究所

# **高解像度地形情報 シンポジウム 論文集**

## **～地形情報のすべて～**

高解像度地形情報に関する技術の概観とその活用

2014年8月8日（金）シンポジウム

8月9日（土）総合ハンズオン&レクチャー

2015年3月31日発行

編集・発行 東京大学空間情報科学研究センター  
〒277-8568 千葉県柏市柏の葉 5-1-5  
TEL 04-7136-4291 / FAX 04-7136-4292

独立行政法人防災科学技術研究所  
〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1  
TEL 029-851-1611

## 目次

はじめに.....	1
佐藤 浩・宮原伐折羅：SAR 干渉画像で検出した 2008 年岩手・宮城内陸地震によるすべり性表変動.....	3
横尾泰広：航空 LiDAR による地形データ取得の実際とその工夫点.....	5
新井場公德：地上型レーザースキャナの災害対応への活用～大規模な土砂災害後の地形の把握及び小規模な斜面崩壊における変形の監視～.....	7
早川裕弐：現地調査における地形情報取得のための GNSS と TLS.....	11
内山庄一郎：自然災害研究における三次元形状取得のための SfM-MVS 技術の活用.....	20
小花和宏之・早川裕弐・加藤 顕：ほぼ誰でもできる航空測量.....	24
山村 充：UAV 空撮画像と SfM で構築した地形モデルの精度評価と適応事例.....	28
小口 高：地形数値情報の歴史.....	31
シンポジウム・ワークショップ告知ポスター.....	35

## はじめに

本論文集は、2014年8月8日に開催された東京大学空間情報科学研究センター（CSIS）および防災科学技術研究所（NIED）主催「高解像度地形情報シンポジウム」で発表された研究の短編論文集である。本シンポジウムでは、キャッチフレーズとして「地形情報のすべて」が採用された。これは、いささか大風呂敷のようではあるが、高解像度地形情報に関する科学技術に焦点を置き、さまざまな地形情報取得手法の基礎から応用まで、幅広い話題を一挙に集めて議論することを目的としたためである。少なくとも日本の地球科学の関連分野においては、このような包括的なテーマの会合はおそらくこれまでになく、国内初の試みであったであろう。具体的なキーワードとしては、近年急速に発展・普及が進む航空レーザ測量（ALS; airborne laser scanning）、地上レーザ測量（TLS; terrestrial laser scanning）、SfM 多視点ステレオ写真測量（structure-from-motion multi-view stereo photogrammetry）、UAV/UAS（unmanned aerial vehicle/system）、SAR（synthetic aperture radar）、GNSS（global navigation satellite system）などが挙げられ、その原理から、現場における難易度や利点・欠点、ソフトウェア、データ処理方法、精度検証、適用事例などのトピックを網羅的に取り上げた。また、シンポジウムに併せて、TLSやUAV、SfM多視点写真測量に関するワークショップも実施し、その技術的なノウハウを参加者間で共有した。

本論文集に収録される研究論文は以下の8編である。佐藤・宮原は、衛星SARの干渉画像による地表変動の検出を行い、それが地すべり性のものであることを示した。横尾は、ALSによる地形データ取得の品質に関する検証を行った。新井場は、2つの事例研究からTLSの斜面災害における適用可能性を示した。早川は、GNSSとTLSの概要と適用事例の解説と、それぞれの手法の比較を行った。内山は、SfM多視点写真測量と小型UAVを活用した地形計測の基礎と応用を様々な事例で示し、多くのノウハウを共有した。小花和ほかは、小型UAVとSfM多視点写真測量による地形計測の精度検証と、その地形学的応用可能性を議論した。山村は、UAVとSfM多視点写真測量を用いた地形計測の精度検証と、多時期の比較による地形変化の検出について実例を示した。小口は、上記の先端技術に至るまでの地形数値情報に関する背景を歴史的に追跡し、今後の

発展について期待を込めた議論を行った。

地理学、地質学など地球科学や自然災害科学の諸分野においては、こうした先端技術の適用は、とくに海外では積極的に進められており、様々な成果が発表されてきている。しかしながら、日本国内における普及はまだ充分とは言えないのが実情であろう。そこで、このようなシンポジウムを通して、その適用事例を持ち寄り、地形情報の活用と可能性について包括的な議論することは大きな意義をもち、今後の普及と発展にも寄与することであったと考えられる。今後も同様なシンポジウムの開催や論文集の発行を通して、関連する各分野の研究者・技術者が共同し、高解像度・高精細な地形情報の利活用を促進してゆくことが期待される。

2015年3月

早川裕弐・内山庄一郎

## SAR 干渉画像で検出した 2008 年岩手・宮城内陸地震による地すべり性地表変動

佐藤 浩（日本大学）・宮原伐折羅（国土地理院）

## 1 はじめに

合成開口レーダー（SAR: synthetic aperture radar）は、人工衛星や航空機に搭載されたアンテナから地表へ斜め下向きにマイクロ波を射出し、後方散乱波を受信して地表変動を把握する技術である。

本稿では、人工衛星 ALOS（Advanced Land Observation Satellite）に搭載された、PALSAR（Phased Array type L-band SAR）センサ（波長約 24cm のマイクロ波センサ）による 2 時期の観測データを用い、SAR 干渉画像を生成して、平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震（M7.2, 気象庁暫定値）による地すべり性地表変動を検出した。この地震は、岩手県内陸南部の深さ 8km を震源とし、2008 年 6 月 14 日に発生した（気象庁 2009）。震源断層は、北北東－南南西走向の西上りの逆断層である。

## 2 SAR 干渉画像

基準となる（本稿の場合、本地震の前に観測された）SAR 画像と、共役を採る（後に観測された）SAR 画像を干渉させて、対象地区の地震前後の地表変動を面的に捉えた。前者の画像をマスター画像、後者の画像をスレーブ画像という。表 1 に、本稿で用いたマスター画像とスレーブ画像、そのパス（同一軌道上の観測帯）、観測日などを示した。表 1 に示した  $B_{PERP}$  とは、マスター画像の LoS（line of sight: 衛星から地表への視線方向）に対するスレーブ画像の LoS の垂直成分の長さである。 $B_{PERP}$  が小さいほど、位相の分散が小さく明瞭な SAR 干渉画像が得られる。また、ALOS の軌道上の進行の向きには北行（ascending）と南行（descending）がある。PALSAR は、北行軌道ではほぼ東向き、南行軌道ではほぼ西向きの LoS を有する。

2007 年 8 月 6 日観測の SAR 干渉画像のみ、地上解像度は約 20m（高分解能 2 偏波モード）、それ以外の 3 つの SAR 干渉画像の地上解像度は約 10m（高分解能

1 偏波モード）だった。いずれの画像も、オフナディア角（衛星直下と LoS の間の角度）は、 $34.3^\circ$  だった。パス 57 について 4 ルック処理（視線方向に 4 ルック、進行方向に 8 ルック）、パス 402 について 2 ルック処理をして、SAR 干渉画像を生成した。気象データに基づく補正は特に行っていない。図 1(a)に、パス 402 の SAR 干渉画像を示す。

## 3 地殻変動成分の除去

得られた SAR 干渉画像には地震による地表変動（地殻変動）と地すべり性の地表変動が混在しているが、前者による変動量のほうが後者よりも広域的に連続し、かつ単位長さあたりの変動量もより小さい、すなわち長波長の緩やかな変動であると考えられる。

そこで、パス 57 について、80 ルック処理（視線方向に 80 ルック、進行方向に 160 ルック）、パス 402 について 40 ルック処理し、長波長成分を示す SAR 干渉画像を生成した。図 1(b)に、パス 402 の結果を示す。

## 4 位相のアンラップと 2.5 次元解析

SAR 干渉画像では、LoS 方向についてのみ、伸び（地表が衛星から遠ざかる向きの変動）または縮み（地表が衛星に近づく向きの変動）の量が判る。そこで、パス 57 及びパス 402 の SAR 干渉画像の位相をアンラップした。アンラップとは、図 1 で、青→赤→黄→青色（約 12cm の伸び）または青→黄→赤→青色（約 12cm の縮み）の 1 周期の色変化が繰り返して連続している場合、繰り返しの（周期の）回数に応じて伸び・縮みの量を乗じて位相をつなぐ処理である。これにより、LoS の変動量が見積もれる。

その後、パス 57、402 それぞれについて、長波長成分の SAR 干渉画像のアンラップで得られた LoS 変動量から、元の SAR 干渉画像のアンラップから得られた LoS 変動量を引いて（以下、差分画像という）、地すべり性地表変動を見出そうとした。図 2(a)にパス 57 の差分画像を示す。背景は 20 万分の 1 地質図（大澤ほか 1988）である。

南北方向の変動が極めて小さいと仮定し、パス 57、パス 402 の差分画像を使って、東と西からみた LoS の変動量（パス 57 とパス 402）を組み合わせ、LoS の変

表 1 本稿で用いた SAR 画像

パス	マスター	スレーブ	軌道*	$B_{PERP}$
57	Aug 29, 2007	July 16, 2008	Des	+458 m
402	Aug 6, 2007	Jun 23, 2008	Asc	+613 m

\* Des, 南行軌道; Asc, 北行軌道

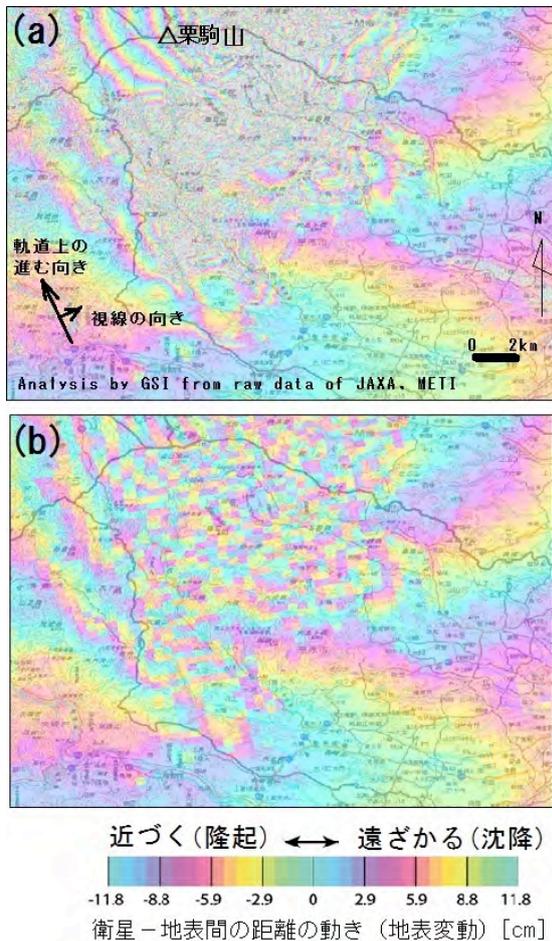


図1 SAR干渉画像  
(a) 元の画像, (b) 長波長成分の画像

動量を、東西方向と上下（鉛直）方向の成分に分離した（2.5次元解析；Fujiwara et.al. 2000）. そして、図2(a)に示す9本の測線上の各地点における東西方向・上下（鉛直）方向から得られる変動ベクトルを計算した. 結果を図2(b)に示す.

### 5 おわりに

図2(a)に示す青色の変動域が地質図で示される花山カルデラの位置に相当しているが、この場所は、2011年東北地方太平洋沖地震でも村上ほか(2011)が地すべり性地表変動を指摘した部分と一致している.

図2(b)では、A0, A1 測線の東側に隆起が表現されつつも、概ね、東側かつ下方の地すべり性の地表変動が示唆される.

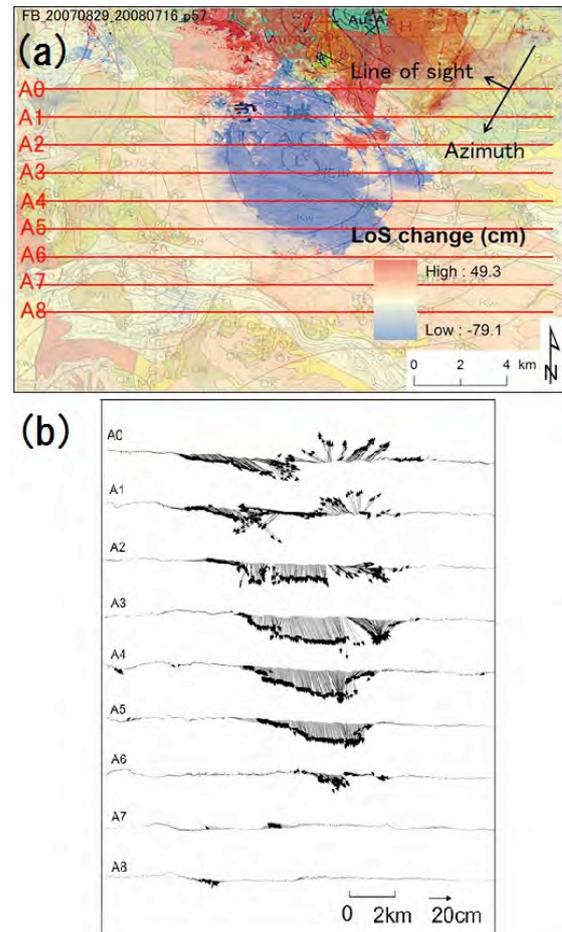


図2 アンラップと2.5次元解析の結果  
(a) パス57の差分画像, (b) 変動ベクトル

### 文献

大沢 穠・広島俊男・駒澤正夫・須田芳朗 (1988) 20万分の1地質図「新庄及び酒田」  
 気象庁 2009. 平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震について. 地震予知連絡会会報, 81: 101-131.  
 村上 亮・奥山 哲・古屋正人・阿部隆博 2011. ALOS (だいち) PALSAR による東北地方太平洋沖地震の地盤変動解析—山体崩壊の前兆把握への応用の検討—. 日本火山学会 2011年秋季大会講演予稿集 55.  
 Fujiwara S, Nishimura T, Murakami M, Nakagawa H, Tobita M, Rosen P.A 2000. 2.5D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry. Geophysical Research Letters, 27: 2049-2052.

「航空 LiDAR による地形データ取得の実際とその工夫点」

国際航業株式会社  
横尾 泰広

1. はじめに

航空レーザ測量 (LiDAR) による DEM データは、平成 16 年頃から整備が始まり、今日では国土の 50%以上が整備された。広範囲の地形データを高密度に取得している特徴や、標準化された手法によって、ある基準以上の精度を有することから、航空レーザ測量は多岐にわたる利活用事例が報告されている。一方で、人工林など密生した植生では地形表現精度が劣化する傾向にあり、改善のため独自の工夫で品質担保している。そこで本論文は、航空レーザ測量を概説するとともに、品質担保の工夫点を解説する。

2. 航空レーザ測量とは

航空レーザ測量は、航空機から地上に向けてレーザを照射し、地表面や地物で反射した地点の三次元データを取得する測量技術である。航空レーザシステムは、GNSS/IMU 装置、レーザ測距装置、この3つのセンサで構成される。また、日本国内で稼働する航空レーザシステムのほとんどは、2,000 万画素以上のデジタルカメラを搭載し、航空レーザ計測と同時にカラーデジタル空中写真を撮影する。

航空レーザ測量は高精度かつ高密度なデータが面的に取得できるメリットがある。一方で、表 1 に示すデメリットがあり、地域や季節に応じた計測手法を適応する必要がある。

表 1 航空レーザ測量のデメリット

デメリット項目	具体的内容	対応策
天候による影響	・悪天時のフライト不可 ・飛行困難な強風	・詳細な天候調査
制限空域	・自衛隊等の訓練空域 ・原発、空港周辺	・関係機関と調整
植生の繁茂が地形精度に影響	・田(水稻)、人工林、笹、ヨシ、竹林	・計測時期の選定
黒色や水域でのデータ欠損	・湛水地や降雨後 ・新設のアスファルト	・低高度計測
環境	・笹、ヨシ ・猛禽類に対する騒音	・補備計測、 ・高高度計測
不得意な地形	・直壁 ・オーバーハング	・斜め計測 ・地上 LiDAR 等の補測

3. DEM データの高精度化を目的とした作業上の工夫

3.1. 植生による地形表現精度の影響

表 1 に示す通り、植生が密生する竹林や間伐が行き届いていない人工林など箇所では、レーザ光が地盤面まで届きにくく、地形表現精度を変化させる。図 1 は同一箇所でも落葉期と繁茂期における地盤計測点の差による地形表現の影響例である。地盤計測点が疎の場合、沢等の地形が表現されていないことがわかる。そこで地盤計測点を増やすた

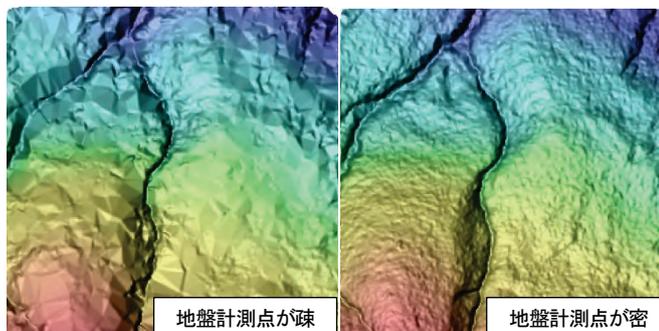


図 1 地盤計測点の疎密による地形表現の変化

め、落葉期の計測や回転翼を用いた高密度計測を実施するなどの計測での工夫をしている。また、取得したデータを以下の項目を検証し、品質を評価する。

- ①地盤到達率の考え方にに基づく計測密度の検証
- ②フィルタリング（地形計測点の抽出）作業の品質確認

### 3.2. 地盤到達率による計測密度の検証

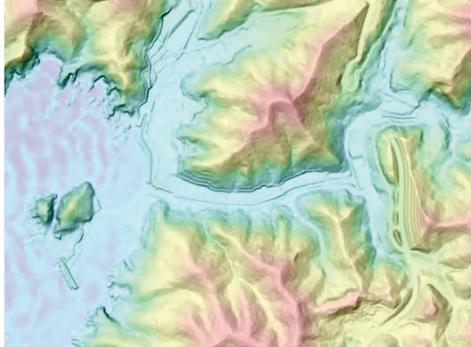
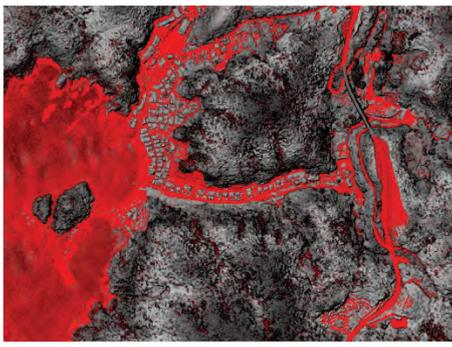
地盤到達率とは、計測対象範囲をDEMの格子間隔と同じメッシュに分割し、全メッシュに対する計測メッシュ数の割合である。要するに計測対象範囲に対して、地盤計測したメッシュが満遍なく分布しているかを評価する指標である。地盤計測点数では、裸地など地盤計測点数が増加する箇所を含むと評価が偏るため、点数では評価しない。

地盤到達率は、約50%以上であると微地形を確認できる。一方で、地盤到達率の分布にも注意が必要である。例えば、計測対象エリアの南半分が100%、北半分が0%の場合、エリア全体では50%の地盤到達率となるため、図2に示すような計測したメッシュ分布を評価する必要がある。

### 3.3. 微地形表現図を用いたフィルタリング検証

航空レーザ測量上空から計測するため、その計測データは樹木などの三次元点群データを含む。地形データ作成には、フィルタリング作業と呼ばれる地盤計測点を抽出する作業を行う。フィルタリング作業は、一般的に自動処理を行った後に自動処理でのエラーを手動処理で修正する。自動処理は様々な手法がある。地形や植生状況に応じたパラメータを設定するのだが、フィルタリングが甘く樹木などのデータが残存する場合と強すぎて地形を除去する場合がある。そのため、フィルタの品質を検査するため、以下の二種類の検査図面を用いて検査を行う。

表2 微地形表現図でのフィルタリング検査

名称	ELSAMAP	モノクロ陰影点群図
図		
特徴	微地形表現が優れているため、微細なノイズの検査が可能。 ・地物データの残存検査に最適 ・等高線間隔以下の植生検査に最適	堤防の法肩など傾斜が急激に変化する箇所の点群の欠落を検査 ・裸地や堤防など欠落してはいけない箇所の点群を探す検査に最適 ・裸地上の点群を検査するのに最適

### 4. おわりに

航空レーザ測量は、メリットとデメリットがあり、独自の工夫によって作業規程以上の品質を確保している。航空レーザ測量の特徴を理解していただき、今後、航空レーザデータの利活用が少しでも増えれば幸いである。

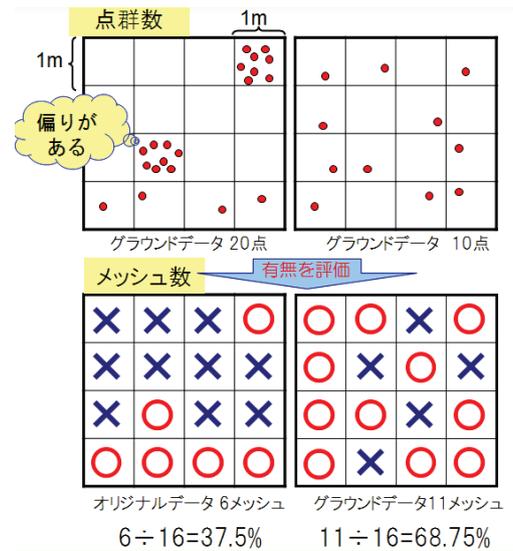


図2 地盤到達率の概念

地上型レーザースキャナの災害対応への活用  
 ～大規模な土砂災害後の地形の把握及び小規模な斜面崩壊における変形の監視～  
 Application of ground-based lazer scanner for disaster respons  
 -grasping topograph after a large landslide and monitoring secondary sliding-

新井場公德（消防庁消防研究センター）

Kiminori ARAIBA (National Research Institute of Fire and Disaster)

概要

土砂災害現場における応急対応に活用することを目的として、地上設置型レーザースキャナを用いて地形情報を収集し分析する方法について検討した2つの研究について紹介する。

一つは、大規模な土砂災害地において災害後の地形を把握するもので、2006年フィリピン南レイテ州における現場での調査検討である。この調査では、地形状況や崩壊深さ、堆積深さなどを明らかにした。一方、計測及び解析において、人手、時間及び工夫を要するなどの課題も明らかになった。

もう一つは、小規模な斜面崩壊（おおよそ幅100m程度以下）を対象として崩壊直前（おおよそ1時間程度）の変形を検知するための研究である。人工的な斜面崩壊実験において、遠隔から変形を検出する手法を開発した。一方、精度向上のため、時間分解能、空間解像度の決め方及び視野の確保が課題となることが明らかになった。

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震時の神戸市消防局の記録によれば、発災後3日めから生存救出の割合が低くなる<sup>1)</sup>。災害後の搜索救助は時間との闘いである一方、災害直後には二次災害の危険性が有り、危険な現象、発生条件、場所、蓋然性を把握することが必要となる。また、安全かつ効率的に搜索救助を行うために、行方不明者のいそうな場所及び進入ルートを把握し活動に要する人的・物的資源を選定することも必要となる。これらの事項を判断するにあたり、必要とされる情報の入手に要する時間の早さとと得られた情報の精度や全体性は一般的には両立しない。人命救助の時間短縮のため、災害初期から不完全な情報に基づき誤差を見込みながら活動を組み立てていく実態がある。本研究ではそのような背景

から、これらの判断に資する情報を搜索救助活動に即した時間尺度で得る方法について検討した。

2. 大規模な土砂災害地における地形把握

2.1.手法<sup>2)</sup>

2006年2月17日（金）10時36分頃、フィリピン南レイテ州サンベルナルド町ギンサウゴン・バランガイ（村）において山体崩壊が発生した。誘因については、678mm（2月8～17日）に達した降雨と考えられる（災害発生の前後に地震が観測されているが、災害の誘因であるか、結果であるかは不明）。土砂は、310世帯1857人の住民がいた村をほぼ完全に埋没し、死者154人（うち身元不明98人）、行方不明者990人の被害を生じた<sup>3)</sup>。

地形把握は、発生した現象の理解のほか、応急対応の搜索場所、進入路、危険な現象及び箇所を知るために必要であり、大規模な土砂災害においては、地形や町並みが破壊されていることから、早期に現状を把握することが重要である。この調査では、表1に記した地上設置型のスキャナ及び手持ちの測定装置を用いた。人員は7名で、2006年3月22～24



図1 レイテ島山体崩壊の状況及び計測点配置

表1 実験と計測の条件

NAME	accuracy in distance	accuracy in angle	divergence of laser	scan speed
RIEGL LPM-2K	50 mm	0.009 degree	1.2 mrad	2 points / sec.
FG21PG	50 cm	0.15 degree	2 mrad	manual

日及び2007年1月31日～2月1日に実施した。参照点測定のためのポール及びマーカー並びに携帯型GPSを用いた。

図1に計測器を設置した地点を示す。崩壊の源頭部から堆積土砂の末端部までの長さは3km以上あり、また、地表の凹凸や変化度合いに応じて、計測点は次の考え方で、現地で設定した。

- ・現象の理解のために源頭部を詳しく測定する
- ・死角になりがちながりのデータを取る
- ・堆積域に点在する流れ山を作る死角に注意する
- ・堆積域のデータ密度が薄くならないようにする

測定地点間の関係は、各地点に設置したマーカーの計測によって求め、GPSデータを元にグローバル座標に直した。

## 2.2.結果<sup>3)</sup>

図2(a)にフットプリントの分布を示す。中央部の深いガリー内のデータが得られていないが、源頭部、直下の谷、堆積域については概ねデータを得ることが出来た。この結果を基に、崩壊前の地形としてSRTMを用いて崩壊前後の標高差を求めたものを(b)に示す。山頂を含む200mを超える深さの崩壊であったことが分かる。堆積部分では深いところでは30mを超えている。(a)の赤い四角は、最重点搜索対象とされた小学校で、発災時には児童約250名と当日あった式典に集まった多くの住民がいたはずの場所である。救助活動に参加した方から「地形が変わりすぎていてどこを探したら良いか分からなかった」という話を伺っているが、深さ10m程度の土砂が堆積しており、場所が分かっても元の地表まで掘削することはきわめて難しい状況である。(c)には崩壊面の構造を示した。崩壊面は傾斜の異なる4つの面から構成され、比較的平滑な面で岩盤が崩落したことが窺われる。

## 2.3.考察

今回得られた地形モデルは一様な精度ではないが、どのような現象が起きたのか、重機などをどこへどのような経路で投入するか、万一源頭部に隣接する斜面が崩壊が発生した場合に、どの範囲に土砂が流下するかがある程度の精度でシミュレートでき、搜索救助活動の計画の策定に役立つと考えられる。

このデータを得る手法について検討すると、大規模な土砂災害地では、源頭部周辺は急傾斜で狭い、流走部は深く切れ込んでいる、堆積域は緩傾斜だが流れ山が散在する、という特徴が異なる部分から構成されているため、特徴に応じた測定地点の選定及び測定パラメタの設定が必要であった。それでもデ

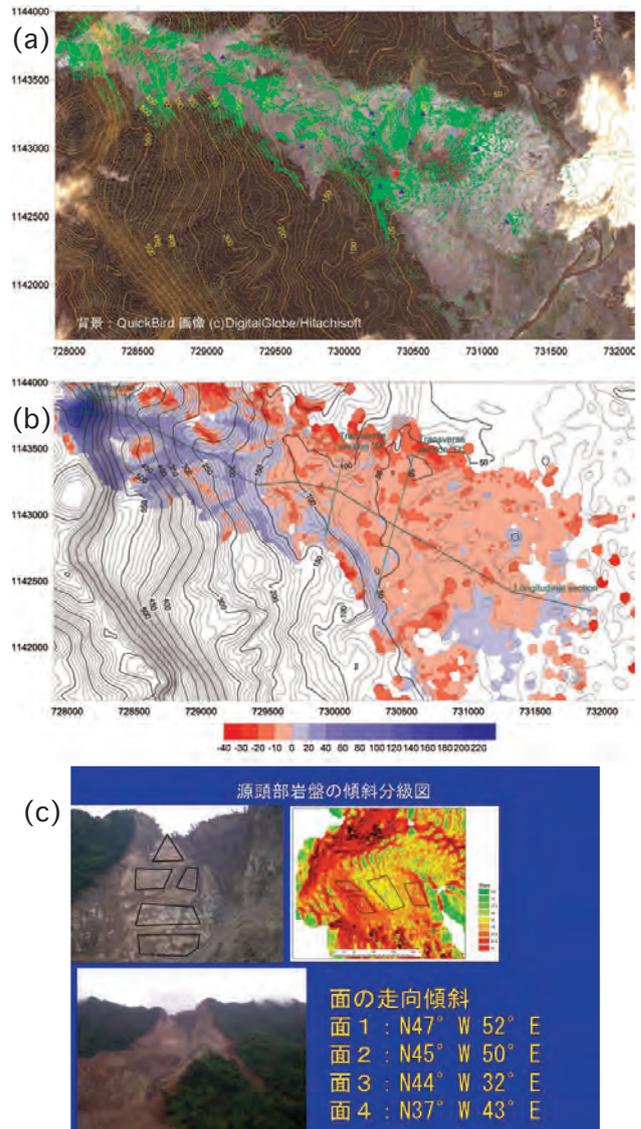


図1 地形計測結果 (a)フットプリント分布 (b)標高の変化(青:標高減、赤:標高増) (c)崩壊面の走向傾斜 長さの単位は全てm。崩壊前の標高はSRTMを内挿して用いた。

ータの空白域が生じたり、密度に濃淡が生じることは不可避であるが、地形の単調さ度合いなどに注目して濃度管理を行うことで、計測時間を短縮出来ると考えられた。また、現場技術について検討すると、異なる設置点での測定結果のマッチングは帰国後行ったが、これに大変時間を要した。また、結果としてデータの空白域がデータ密度の低い場所の把握が現地でできず、追加測定が出来なかった場所を生じた。

これらの課題は、近年発達 of 著しい空中型の地形計測手法により一定の改善が図られるが、地形の特徴に応じた地点選定(飛行経路)などのノウハウの蓄積が望まれる。

### 3. 崩壊面の変形監視<sup>4)</sup>

#### 3.1. 手法

斜面崩壊の前兆の計測は一般的に伸縮計で行われる<sup>5)~7)</sup>が、伸縮計は崖上に立ち入り設置場所を選定する必要があり、応急対応時にはそのような余裕がないことが多い。そこで消防研では、遠隔から斜面の変形を面的に監視する装置を研究している。図2に概要を示す。これまで、斜面を人工散水により崩壊させる実験で、レーザースキャナにより斜面を繰り返し測量し、その時間変化を求める手法を開発した。その結果、斜面上部ではすべり面上部に上部ほど大きな沈下が生じること、斜面下部で最終的なすべり面が地表に現れるのは、隆起域よりも下方であることが分かった。現在、計測条件を最適とするための研究開発を行っているところである。

表3に実験条件を示す。実験1~7は(独)防災科学技術研究所大型降雨実験設備で行った。土槽は、高さ5m、幅4m、厚さ1mである。「加波山実験」は、地震豪雨時の高速長距離土砂流動現象の解明プロジェクトが2003年11月14日に自然斜面で実施したもの<sup>8)</sup>で、幅5m、長さ約30mの斜面に地上約2mに設置したノズル群から散水し崩壊させた(長さ13m、高さ8m、最大深1.2m)。

レーザースキャナの仕様を表2に示す。機材は地上に三脚で設置した。倒木などの影響を簡易に除去するため、測定時に1ライン上のオーバーハングデータは削除した。測定結果をXY又はXZ面に投影し、格子間隔0.2m(実験1のみ0.1m)で平均して格子代表値を求めた。各測定ごとに各格子について初期値からの差分を求めて変形量とした。

#### 3.2. 結果

図3にY方向の変形について例を示す。崩壊発生の880秒前から、斜面上部で後退、下部で前進が見られる。図4に、代表的な点のZ変位を3つの実験について示す。変位が加速する様子が観察される。沈下領域の方が比較的早く加速が検出されている。また、加速の度合いは実験ごとに異なっている。

#### 3.3. 考察

道路の通行止めの判断では、1時間に10mmという変形が参照される。これを捉えるためにはmm単位の精度が必要で、この手法では平均化により確保している。一方、崩壊直前の変形は局所的で、平均化は変位量を鈍らせる。実験1に比べ4で加速が明瞭ではないのは、このことが影響しているとみられる。鋭敏に変形を知るためには、測定密度を向上させて格子サイズを小さくする必要がある。

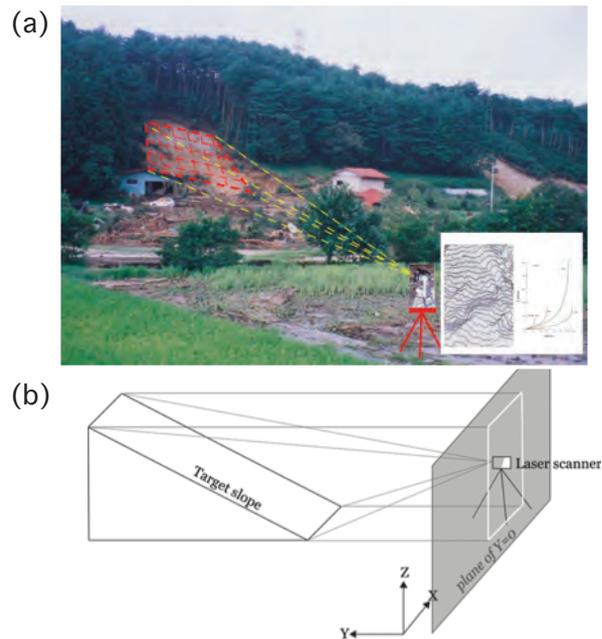


図2 崩壊面のリアルタイム遠隔監視装置の概要  
(a)計測のイメージ (b)座標の定義

表2 計測器の仕様

名称	測距精度	距離分解能	測角精度	測角分解能	光線拡散
LPN25HA	8 mm	1 mm	-	0.009°	1.2mrad

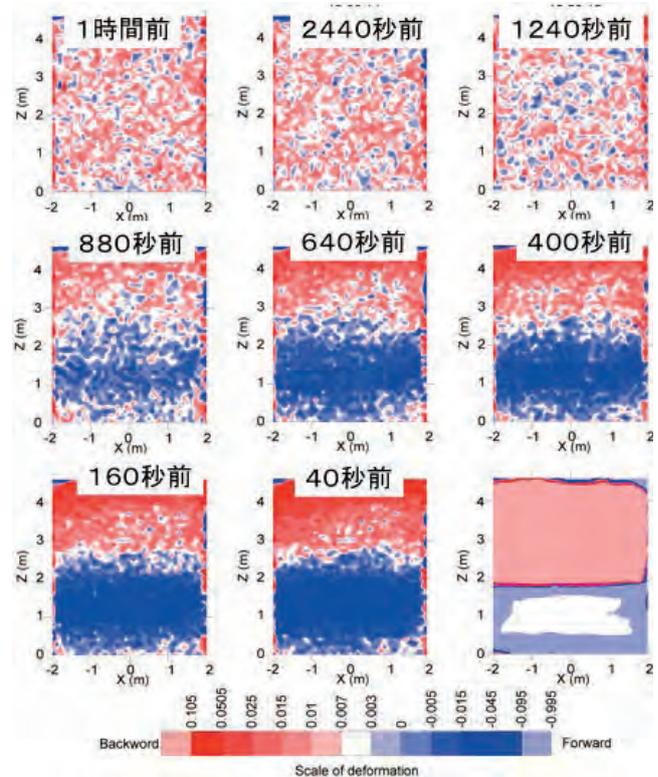


図3 実験3における斜面の前後方向の変形状況の経時変化。各結果の時間は崩壊発生までの時間を表し、右下のものは崩壊後を表す。変形量の単位はm。

実験7の方が実験4より変形が大きい。材料の違いもあるが、傾斜が大きいと地表から計測した場合に測定密度が上がることで及び照射光が円に近づくことの影響もあると見られる。計測機をなるべく斜面表面に正対させることが有効である。

4. まとめ

地上型レーザースキャナを災害応急対応へ活用するための研究例について紹介した。いずれも計測密度や視野角を対象となる地形や変形の特徴に対してどのように最適化するかが課題である。空中からの計測など新しい計測手段の導入を行いつつ、どのような計測手段をとるにせよ、対象の特徴に応じた測定・解析条件の最適化について、引き続き検討する必要があると考える。

参考文献

- 1) 消防庁 (1996) :阪神淡路大震災の記録, P. 372.
- 2) 消防研究センター、国土政策技術総合研究所、国土地理院 (2007) :フィリピン・レイテ島地すべり災害における救援活動の実態と応援技術の性能調査報告書, 消防研究センター (<http://www.fri.go.jp>) , P. 43.
- 3) Kiminori Araiba, Hiroshi Nagura, Byeong-pyo Jeong, Mamoru Koarai, Hiroshi P. Sato, Nobuyuki Osanai, Hideyuki Itoh and Kyoji Sassa (2008): Topography of failed and deposited areas of the large collapse in Southern Leyte, Philippines occurred on 17 February 2006, Proc. International Conference on Management of Landslide Hazard in the Asia-Pacific Region, pp. 434-443.
- 4) 消防研究所 (2006) :斜面崩壊現場の二次崩壊危険度予測手法に関する研究報告書,消防研究所研究資料第70号 (<http://www.fri.go.jp>) , P. 59.
- 5) 齊藤迪孝・上沢弘 (1960) :土のクリープ破壊に関する実験研究, 鉄道技術研究報告, No.128.
- 6) 福囿輝旗 (1985) :表面移動速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時刻の予測法, 地すべり, Vol.22, No. 2, pp. 8-13.
- 7) Hayashi, S. and Yamamori, T. (1991) Basic equation of slide

in tertiary creep and features of its parameters, Jour. of Japan Landslide Society, Vol. 28, No.1, pp.17-22.

- 8) 地震豪雨時の高速長距離土砂流動現象の解明プロジェクトチーム (2004) :人工降雨による現地崩壊実験成功、日本地すべり学会誌、第40巻5号、pp.88-89.

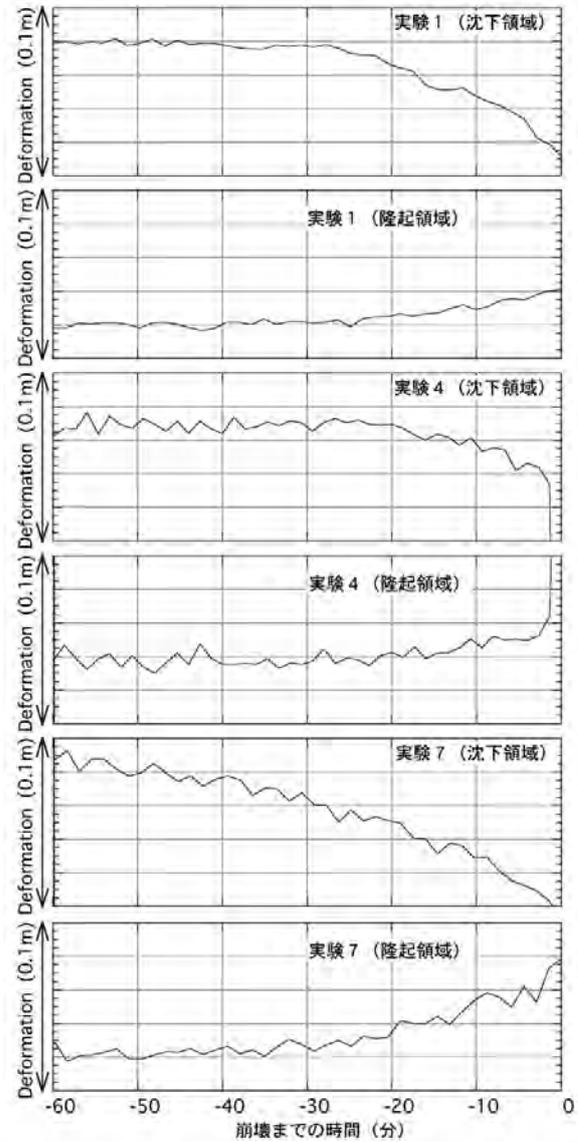


図4 各実験で代表的な点のZ変位

表3 実験条件

実験番号	材料	降雨強度	斜面傾斜	最小距離	水平角度 度範囲	水平角度 ステップ	鉛直角 度範囲	鉛直角 ステップ	1回の測定 時間	有効データ数
実験1	川砂	100mm	30°	12.0 m	21.6°	0.108°	18.0°	0.054°	約4分	約35000
実験2	川砂	50mm	30°	10.5 m	20.6°	0.200°	17.0°	0.100°	約1.5分	約13500
実験3	川砂	50mm	30°	16.5 m	26.2°	0.153°	17.0°	0.099°	約2.4分	約14000
実験4	川砂	50mm	30°	10.5 m	23.0°	0.297°	20.2°	0.126°	約1.4分	約6400
実験5	川砂	50mm	30°	10.5 m	19.4°	0.243°	16.2°	0.081°	約1.2分	約12000
実験6	まさ土	50mm	30°	8.8 m	24.4°	0.216°	21.2°	0.054°	約1.8分	約21000
実験7	まさ土	30mm	40°	13.3 m	22.4°	0.216°	15.9°	0.054°	約1.5分	約12400
加波山実験	自然斜面	78mm	平均33°	40 m	7.0°	0.054°	27.0°	0.054°	約1.5分	約20000

## 現地調査における地形情報取得のための GNSS と TLS

### GNSS and TLS for acquisition of topographic information in field surveys

早川裕弐 (東京大学)

Yuichi S. Hayakawa (Center for Spatial Information Science, The University of Tokyo)

#### 要旨

機材の高性能化にともない, GNSS (全地球航法衛星システム) や LRF (レーザ距離計), TLS (地上レーザスキャナ) による地形情報の取得は高精度化・高解像度化に向けて近年めざましい発展を遂げている. 一方, 機材の高価格化やデータ処理の複雑化は, それらの手法自体を専門としない各分野の研究者にとって, 敷居の高いものと認識される原因の一つにもなっていると考えられる. ここでは, まずGNSS測位やレーザ測量の原理について概説し, 次に地形学や地考古学の現場におけるそれらの活用事例をいくつか紹介する. また, 対象物の規模や形状, 現象解明に必要な解像度, 求める精度等, 各種条件によってどのような測量手法が適当であるのか, あるいはどのような組み合わせが最適であるのか, 事例を通して考察する.

#### 1. はじめに

地形情報のさまざまな取得方法のうち, ここではGNSS (全地球航法衛星システム), LRF (レーザ距離計), TLS (地上レーザ測量) の原理と適用事例について紹介する. 測量機材やシステムの技術的進展にともない, これらの手法は近年の地形情報取得の高精度化・高解像度化に大きく寄与している (図1). その一方で, 機材の高価格化やデータ処理の複雑化も進み, それらを専門に使用しない各分野の研究者にとって, こうした手法は敷居の高いものと認識される原因の一つにもなっている. そこで本稿では, これらの基礎的な知識の整理を行うことをまず一つの目的とする. さらに, 実際の現場における地形測量の適用事例を通して, 今後の発展に向けた議論を進めたい.

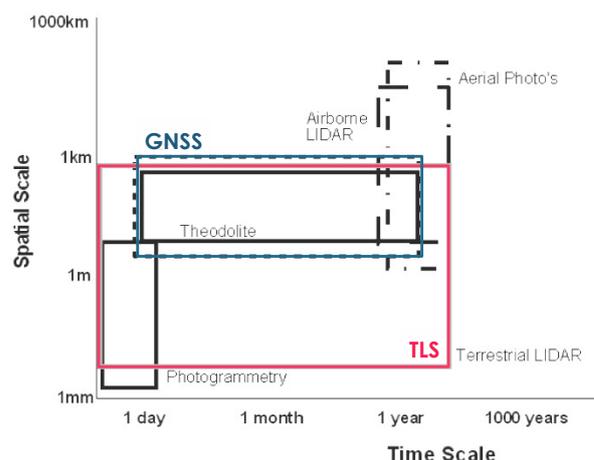


図1. 各種の地形測量手法がカバーする時間・空間スケールの範囲. Heritage and Hetherington (2007) を改変.

#### 2. GNSSのしくみ

GNSSとは, 衛星からの電波を受信することにより, 緯度・経度・高度の連続観測ができる測位システムのことである (長谷川ほか, 2002). そのシステム構成は, 地上高度約20,000 km (種類によっては30,000~40,000 km) の軌道を周回し電波を発する人工衛星 (宇宙部分), 地上で人工衛星から発された電波を受ける受信機 (ユーザ部分), および人工衛星の軌道計算とその発信電波のためのデータを送信する地上制御局 (制御部分) とからなる。「GNSS」は衛星測位システムの総称であり, 各国で異なる名称のシステムが運用されている. 代表的なものはアメリカ合衆国が運用するGPS (Global Positioning System) であり, 他にロシア連邦によるGLONASS, ヨーロッパ連合によるGalileo, 中国によるBeiDou (北斗) などがある.

代表的なGNSSであるGPSは, 1978年

に最初の測位衛星が打ち上げられ、1993年からシステムの正式運用が行われている。当初は軍事目的に限定された運用であったが、1996年の平和的民生利用への政策指針に基づき、2000年5月に精度劣化操作（SA: selective availability）の解除が実施された。これにより、SA解除以前は100 m の測位誤差があったものが、10 m 程度の誤差という実用的な範囲に収まるようになり、GPSの民生利用を大きく促進させることとなった。測量用途の他に、一般に広く実用化されているGNSS受信機の例を挙げると、カーナビゲーション、携帯電話、一部のデジタルカメラやビデオカメラ、サイクルコンピュータ、アウトドア用ハンディ受信機など、様々なものがある。

GNSS衛星からの電波信号には数種類の搬送波があり、多くの一般的な受信機で受信可能なものはL1帯（1,575.42 MHz, C/Aコード・Pコード）のみとなるが、測量用機材ではL2帯（1,227.6 MHz, Pコード）も含めて2周波を受信可能なものもある。搬送波により送られる測距信号は、混線防止と衛星識別のため、疑似ランダム雑音符号（PRN）により暗号化されており、このうちC/Aコード（L1帯）は民生用に開放されている。加えて、一部の人工衛星（高高度の静止衛星）からは後に述べる補正信号（SBAS: Satellite-Based Augmentation System）信号が発せられている。

GNSS測量を分類すると、大きくは単独測位と相対測位とに二分できる（表1）。このうち単独測位は、1台の受信機を用いて観測点の座標を求める方法である。相対測位でも同様であるが、測位の原理は、同時に4個以上のGNSS衛星からの電波を受信し、測点から制御局により

位置の判明している各衛星までの距離を用いて、後方交会法によって観測点の位置を求めるというものである。一方、相対測位はさらにディファレンシャル測位（DGNSS: differential GNSS）と干渉測位とに分けられる。ディファレンシャル測位は、複数の観測点（基準局と移動局）で同時に単独測位を行い、固定された基準局からの相対位置で移動局の誤差補正（ディファレンシャル補正）を行うものであり、最高で数10 cm 程度の精度での測位も可能である。これは後処理で行われることも多いが、先に述べたSBASの人工衛星から発せられる補正信号は、リアルタイムなディファレンシャル測位を可能とするものであり、その場合の精度は一般に数 m 程度である。SBASは地球上の地域別に運用され、アメリカ合衆国のWAAS（Wide Area Augmentation System）、ヨーロッパ連合のEGNOS（European Geostationary Navigation Overlay Service）、インドのGAGAN（GPS-Aided Geo Augmented Navigation）、日本のMSAS（MTSAT-based Satellite Augmentation System）などがある。なお日本のMSASはMTSAT（運輸多目的衛星、通称ひまわり）の機能の一つであるが、最新のひまわり8号にはこのSBAS機能は備わっていない。干渉測位は搬送波の位相差を利用する高精度な測位法である。2台の受信機をそれぞれ基地局・移動局として同時に受信した搬送波の位相差を測定し、基線解析により基線ベクトル（受信機間の距離と方向）の算定を行う。ただし位相差測定で読み取り可能なのは1波長未満だけであり、整数部分は不確定なため（整数値バイアス）、観測開始時にはこの確定（初期化）が必要である。干渉測位には動的干渉測

表 1. GNSS 測位の種類と特徴（長谷川ほか，2002 を元に作成）。

GNSS測位の種類		解析方法	必要観測時間	水平精度	適用事例	
単独測位		リアルタイム	数秒～数分	>10 m	自動車等のナビゲーション、携帯電話	
相対測位	ディファレンシャル法（コード補正） DGNSS	後処理/リアルタイム（SBAS）	数秒～数分	<数 m	航空機等の測位、工事用車両の運行管理	
	干渉測位（搬送波補正）	後処理キネマティック法 PPK	後処理	>1分	10 mm - 数cm	3-4級基準点測量
		リアルタイムキネマティック法 RTK	リアルタイム	数秒 - 1分	10 mm - 数cm	3-4級基準点測量、路線管理、公共測量
		短縮スタティック法	後処理	10 - 20 分	5 mm - 数cm	3-4級基準点測量
		スタティック法	後処理	>60 分	5 mm - 数cm	1-4級基準点測量、地殻変動観測

位（キネマティック法）と静的干渉測位（スタティック法）とがあり、動的干渉測位は初期化後、後処理（PPK: post-processed kinematic）またはリアルタイム（RTK: real-time kinematic）で基準局と移動局間の基線ベクトルを算出し、10～20 mm 程度の精度で座標を得る。そのため測点ごとの整数値バイアスの確定作業が不要であり、各測点における観測所要時間は数秒～1分程度である。既存の基準局情報から仮想基準局を設定し、そのデータを携帯電話網などで通信してRTK測位を行うVRS-RTK測位なども普及しており、国内の市街地等での実用性は高い。静的干渉測位は1時間以上の連続観測を要するが（ただし高速（短縮）スタティック法であれば必要時間は10～20分である）、得られる精度は数mm と高い。なお、GNSS受信機を価格帯で比較すると、概算であるが単独測位が可能な機材は数千～数万円、ディファレンシャル測位では数10万円、干渉測位は>100万円といった状況である。

日本国内には国土地理院が1994年から設置している約1,300箇所（2014年現在）の電子基準点があり、地殻変動等の連続観測に用いられるとともに、ユーザが各地でディファレンシャル測位や干渉測位を行う際の補正に使用できる基準局情報も配信されている。2014年6月にウェブ配信システムが一新され、GPSだけでなくGLONASSや、次に述べるQZSSのデータも利用可能となった。

日本が独自に構築しているGNSSの補完・補強システムとして、宇宙航空研究開発機構（JAXA）が運用する準天頂衛星システム（QZSS: Quasi-Zenith Satellite System）がある。これは、RNSS

（regional navigation satellite system）とも呼ばれるように、日本上空の領域を中心に衛星軌道が設置され、常に天頂付近にQZSS衛星が存在するような運用が目指されている。目標精度は高速移動体で1 m 以下、低速移動体で数cm であり、初号機みちびき（QZS-1）は2010年9月11日に打ち上げられ、現在試験運用が進められている。

### 3. 地上レーザ測量のしくみ

レーザ測量（lidar: light detection and ranging）は、レーザ（laser: light amplification by stimulated emission of radiation）を測定対象物に照射し、その反射光を受信することによりその物理的情報を得るアクティブセンシング技術である。レーザを発射後、対象物に反射して戻ってくるまでの往復時間やその強度を計測し、対象物までの距離や反射強度等のデータを得る。

レーザ測量のプラットフォームにはさまざまなものがあり、人工衛星、航空（ALS: airborne laser scanning）、地上（TLSやLRF: laser range finder）、移動体（MLS: mobile laser scanning）や卓上型などがそれぞれ活用されている。このうち、ハンドヘルドLRFは安価に手に入るレーザ測距装置であり（数万～数10万円）、手軽に地形測量にも活用できるため、フィールド調査においてよく利用されている。一方、多数の点を自動的に取得するTLSは、機体が高額であることも一因で、日本国内では現状としてそれほど普及しているとはいえない。

表2は、日本国内で販売されている主な地上レーザスキャナの一覧である。それぞれのスペックとともに、参考情報として大まかな価格帯について区分を示す。

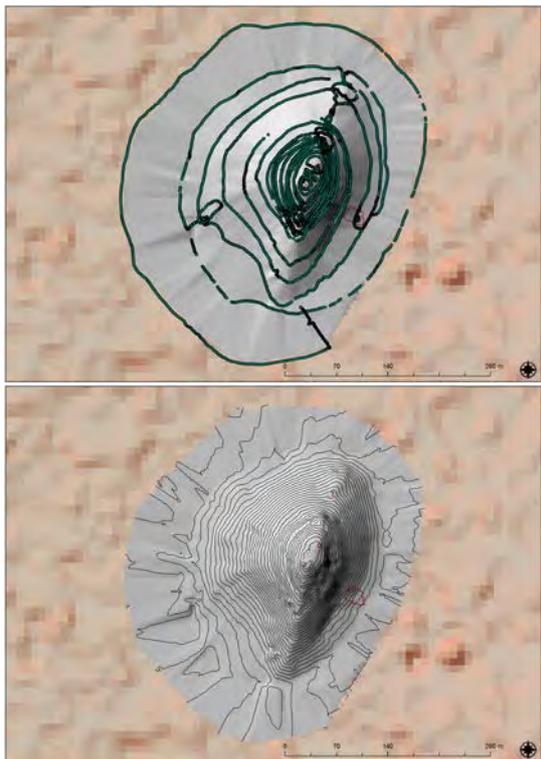


図 2. 遺丘とその周辺域において、DGNSSS 受信機を持って走行することによる地形計測の例.

#### 4.1. GNSSによる地形測量

図2は、DGNSSSのみを用いて計測した遺丘の例である（トルコ共和国カイセリ県）。約300 m ×400 mの範囲で、遺丘およびその周辺の地表面座標情報を、GNSS受信機を持ちながら約9 km、1.5時間で走破して取得した。GNSS受信機のログ間隔は1秒とした。なお地表面は起伏に加え多数の石や、乾燥地特有の棘のある下草などで走行条件は芳しくなかった。このログから、IGS（International GNSS Service）基準局のデータを用いた後処理ディファレンシャル補正により、精度約60 cmの点群を得た。またこの点群から、TIN補完によりDEMを作成し、陰影図、等高線を発生させた（図2）。後処理の手間も少なく、実質2時間程度で全工程が完了する簡便な地形計測手法である。また、RTK-GNSSなど、より高性能な機材を用いれば、対象範囲をアンテナとともに歩行することで、より高精度な地形測量が可能になる（たとえばOkumura, 2013）。

#### 4.2. ハンドヘルドLRFを用いた地形測量

GNSSを持ち込んだり使用できない地域などでは、LRFのみを用いて簡易的に地形測量を行うことが有効である。シリア北東部テル・セクル・アル・アヘイマルにおいて、筆者らはデジタルコンパス付LRFを活用して、先史時代の遺丘とその周辺域の地形測量を行った（Hayakawa et al., 2007）。ここでは、ハンドヘルドLRFの操作者が地表面を対象にLRFから測点までの距離と角度（水平、垂直）を読み上げ、補助者がノートに記録するという方式で、可能な限りで密な点群を生成した。測量開始地点を原点とする相対座標系であり、次の計測基点もLRFで順次計測するという方法であった。その結果、図3aに示す点群が得られ、ここからクリギング補間により解像度10 mのDEMを生成した（図3b）。また、1 m 間隔の等

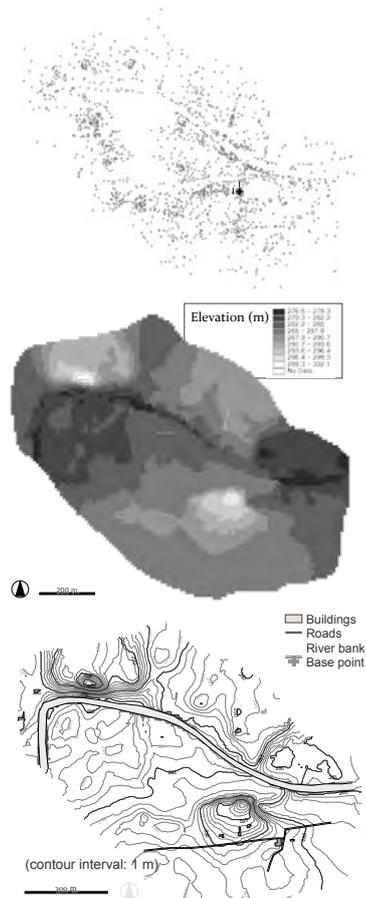


図 3. 遺丘とその周辺域を LRF のみで計測した事例（テル・セクル・アル・アヘイマル，シリア共和国）. Hayakawa et al. (2007) による.

表 2. 日本国内で販売されている主な地上レーザスキャナの一覧（2013年時点）。

PB: Phase-based 法, ToF: Time-of-Flight 法. 重量にバッテリーは含まない.

価格帯は概算である. A: <10M, B: 10-20M, C: 20-30M, D: >30M (JPY)

メーカー	機種名	測定方式	最大測定距離 (m)	@反射率 (%)	精度 @距離 (mm)	最高測定速度 (点/秒)	レーザ波長 (nm)	レーザ安全基準	波形解析	視野角 垂直×水平(°)	計測視野区分	重量 (kg)	外寸 W x H x D (mm)	カメラ	防水・防塵	ソフトウェア	価格帯
FARO	Focus3D S120	PB	120	( 90 )	±2 ( 25 )	976,000	905	Class 3R	不可	300 x 360	Panorama	5.0	240 x 200 x 100	内蔵型	-	SCENE	A
Trimble	TX5	PB	120	( 90 )	±2 ( 25 )	976,000	905	Class 3R	不可	300 x 360	Panorama	5.0	240 x 200 x 100	内蔵型	-	RealWorks	A
Leica Geosystems	ScanStation P20	ToF	120	( 18 )	±6 ( 100 )	1,000,000	808	Class 2	可	270 x 360	Panorama	11.9	358 x 395 x 238	内蔵型	IP54	Cyclone	A
Leica Geosystems	ScanStation C10	ToF	300	( 90 )	±4 ( - )	50,000	532	Class 3R	不可	270 x 360	Panorama	13.0	358 x 395 x 238	内蔵型	IP54	Cyclone	C
FARO	Focus3D X330	ToF	330	( - )	±2 ( - )	976,000	1,550	Class 1	不可	300 x 360	Panorama	5.2	240 x 200 x 100	内蔵型	-	SCENE	A
TOPCON	GLS-1500	ToF	500	( 90 )	±7 ( 150 )	30,000	1,535	Class 1	不可	70 x 360	Hybrid	16.0	240 x 566 x 240	外付型	IP52	ScanMaster	B
RIEGL	VZ-400	ToF	600	( 90 )	±5 ( - )	122,000	1,550	Class 1	可	100 x 360	Hybrid	9.6	180 x 308 x 180	外付型	IP64	RiScan Pro	C
MDL	Quarryman Pro	ToF	600	( 90 )	±50 ( - )	250	赤外線	Class 2M	不可	135 x 360	Hybrid	8.1	177 x 410 x 239	-	IP66	Model A	A
RIEGL	VZ-1000	ToF	1,000	( 90 )	±8 ( - )	122,000	近赤外線	Class 1	可	100 x 360	Hybrid	9.8	200 x 308 x 200	外付型	IP64	RiScan Pro	C
MDL	Quarryman Pro LR	ToF	1,200	( 90 )	±50 ( - )	250	赤外線	Class 3R	不可	135 x 360	Hybrid	8.1	177 x 410 x 239	-	IP66	Model A	A
Optec	ILRIS-3D	ToF	1,200	( 80 )	±7 ( 100 )	2,500	1,535	Class 1	不可	40 x 40	Camera	13.0	320 x 220 x 320	内蔵型	IP65	PolyWorks	B
Optec	ILRIS-HD-ER	ToF	1,700	( 80 )	±7 ( 100 )	10,000	1,535	Class 1M	不可	40 x 40	Camera	14.0	320 x 220 x 320	内蔵型	IP65	PolyWorks	B
RIEGL	VZ-4000	ToF	4,000	( 90 )	±15 ( - )	220,000	近赤外線	Class 1	可	60 x 360	Hybrid	14.5	226.5 x 450 x 236	外付型	IP64	RiScan Pro	D
RIEGL	VZ-6000	ToF	6,000	( 90 )	±15 ( - )	220,000	近赤外線	Class 3B	可	60 x 360	Hybrid	14.5	226.5 x 450 x 236	外付型	IP64	RiScan Pro	C
RIEGL	LPM-321	ToF	6,000	( 80 )	±25 ( - )	1,000	近赤外線	Class 1M	可	150 x 360	Hybrid	16.0	370 x 450 x 315	-	IP64	RiScan Pro	C

TLS機器に採用されるレーザ測距法には、断続的なレーザパルスの照射によるToF (Time of flight) 法と、連続的な照射によるPB (Phase-based) 法とがある。前者は長距離、後者は短距離高頻度の計測に適している。この測距法の違いにも依存し、TLS機器の計測可能距離は短距離型、中距離型、長距離型の3つに区分されることが多い。短距離型で計測できる距離は数10~150 m程度までであり、主に近距離の建築物や工場設計、あるいは遺跡における遺構の細密な計測などに利用される。中距離型は典型的には150~500 m程度の計測可能距離をもつものであり、計測速度(毎秒数~数10万点)や精度(数mm)、機材重量などの点でもバランスの取れた部類となる。長距離型はおよそ500 m以上の距離を計測できるものを主に指し、現状で最大6 kmの計測可能距離をもつものもある。一般に、計測可能距離と、計測速度・精度や機器の大きさは相反するものであり、距離が遠くなるほど単位時間に得られる点の数や精度は低下し、また機器も大型化する。

またTLS機器は、レーザの照射可能範囲に基づくと、上下左右にほぼ360°視野角の計測が可能なパノラマ型、水平方向には360°回転するものの上方向の視野角が限定されているハイブリッド型、視野角が水平方向および上下方向ともに限られているカメラ型とも区分できる。

同一の対象を複数の観測点から計測する

場合、TLSやLRFで取得された点群は、まずレジストレーションと呼ばれる位置合わせ処理が行われ一つの点群に合成される。これには特徴的な形状や反射パターンをもつターゲットを3個以上用いて実施するターゲット法が一般的であるが、TLSのような密な点群が得られる場合、壁や床面など人工的な平面・エッジなどの特徴形状を利用し、最近隣点間の距離を最小にするように調整し、ターゲットレスで点群同士を重ね合わせる方法もある(ICP: Iterative Closest Point法, Besl et al., 1992)。

次に、点群内の複数の特徴点(ターゲット等)に既知点あるいは他の測量手段(GNSS等)を用いて取得した地理座標を付与し、合成された点群全体を地理座標系に投影する作業が行われる。これはジオリファレンスと呼ばれる。

TLSによる点群は高精度でありながらも、たとえば地面を抽出したい場合には、それ以外の対象物(植生、人工物等)をノイズとして取り除く必要がある。そういったフィルタリング(あるいはセグメンテーション)を自動的に行う手法はいくつかあるが(たとえばBrodu and Lague, 2012)、実際には、高品質なデータを得るには手作業でノイズ除去を行う段階を欠かすことができない。

#### 4. 地考古学・地形学の現場におけるGNSS/LRF/TLSによる地形測量

地考古学・地形学の現場において、主に筆者が現場において実施している手法を軸に、いくつか事例を紹介する。

高線をDEMから抽出し、加えてLRFで計測した道路や河道ラインなどの地物も重ね合わせることで、数日で図3cのような地形図を得ることに成功した。

#### 4.3. LRFとGNSSを組み合わせた地形測量

GNSSが利用可能な場合は、LRFのみでの測量に加えて、計測基点の座標をGNSS受信機で取得することで、現地調査における効率を高めることができる。この場合、計測基点座標の誤差を抑えるため、少なくともディファレンシャル補正が可能なGNSS受信機が必要である。早川・津村(2008)およびHayakawa and Tsumura (2009)はこの手法を用いて、遺丘とその周辺域の迅速かつ高精度な地形計測を行った(図4)。この例では、約1 km<sup>2</sup>の範囲で、操作者2名、現地計測4日間のうちに、4 m DEMを生成し、こ

れに基づく地形図が完成した(図4b)。平板測量やトータルステーションなど従来の手法では数ヶ月かかるような作業を、たったの1週間で完了することができた。

また、LRFの操作はレーザ照射ボタンを指で押すのが通常であるが、GigaPanなどの自動パノラマ撮影装置(APS; automatic panorama shooting device)を利用して、上下左右に自動的に回転しつつトリガーを機械的に押下することで、レーザ計測を自動化し、より効率的なデータ取得が可能となる(早川ほか, 2012)。図5の例では、操作者1名、現場計測2.5時間で計測範囲約70,000 m<sup>2</sup>の4 m 解像度DEMが作成された。

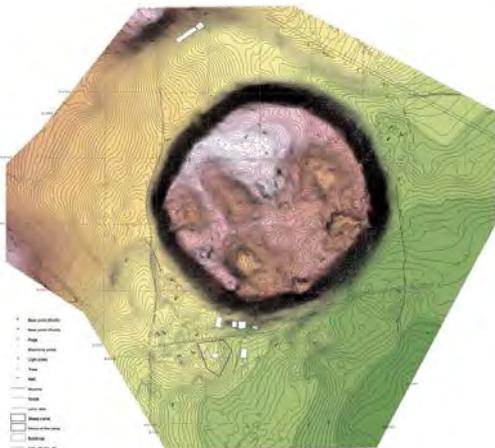


図4. 遺丘とその周辺域をLRFとGNSSを組み合わせて計測した事例(ハジトゥール・テペ, トルコ共和国). Hayakawa and Tsumura (2009)による.

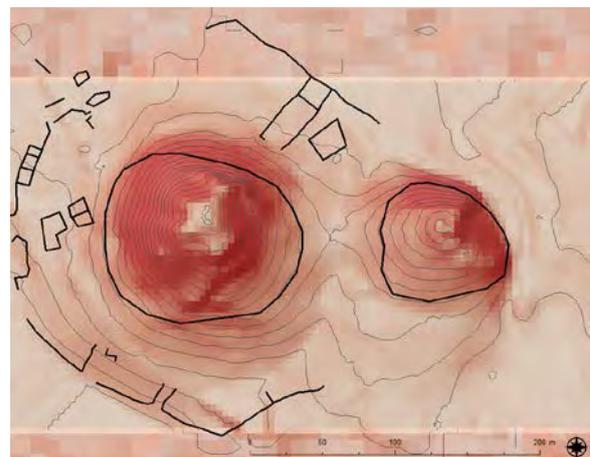


図5. 遺丘とその周辺域を自動化したLRFとGNSSを組み合わせて計測した事例(イキテペ, トルコ共和国). Hayakawa et al. (2012)による.

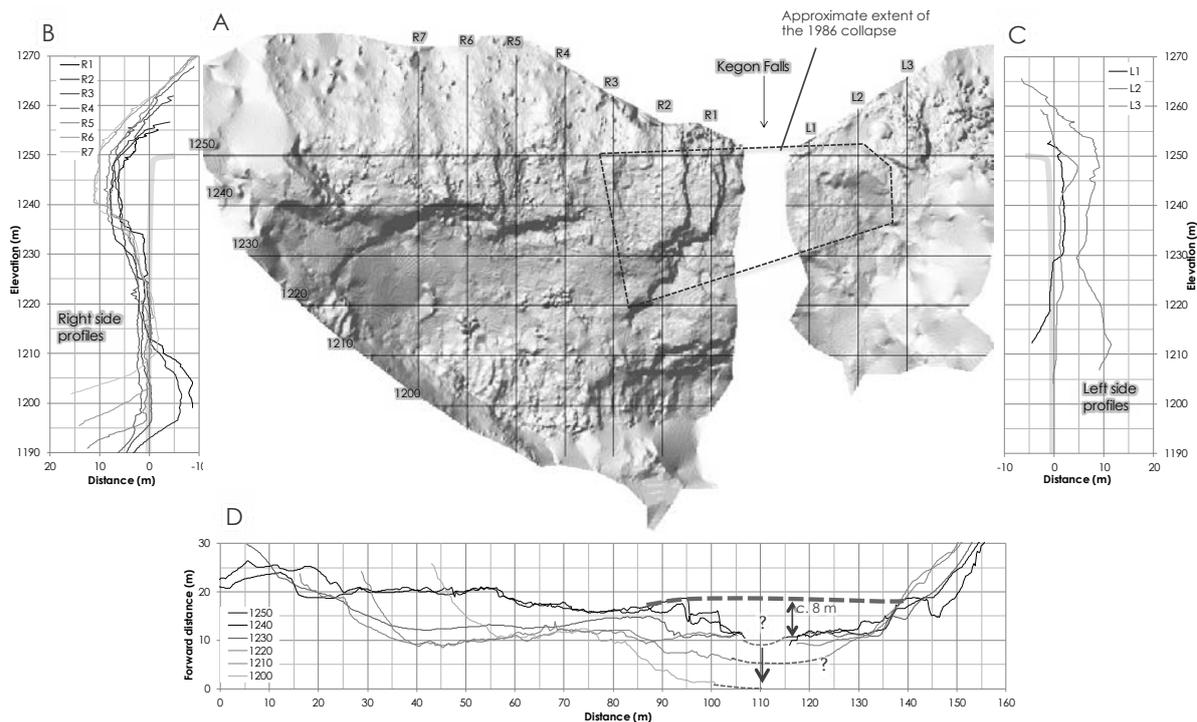


図 6. 日光・華厳滝の崖面の TLS 計測による形状分析 (Hayakawa, 2013) .

4.4. TLSによる地形計測とその解析

自動化LRFとGNSSによる簡易な地形計測に比べ、TLSによる地形計測はより精密、高精度に地形情報を取得することができる。以下はTLSによる地形計測・解析の事例である。

Hayakawa (2013) は、栃木県日光・華厳滝において、滝周辺の崖面をTLSで計測することにより、その詳細な形状分析を行った。その結果、岩盤の風化による凹部を発見するとともに、斜面安定解析から華厳滝崖面の崩壊メカニズムについて論じた (図6)。

静岡県静岡市葵区、安倍川上流に位置する大谷崩では、主に土石流により移動する溪床堆積物の季節変動について、TLSを用いた繰り返し計測からその量的評価を行っている。図7で示すように、土石流の発生による侵食や側壁斜面の凍結融解作用による土砂供給に起因し、数 m 単位で生じる溪床高度の変化とその堆積土砂量が定量化された。これにより、これまで計測困難であった流域最上部の急傾斜地での土砂移動様態が明らかにされつつある (Hayakawa et al., submitted)。

東北地方三陸海岸沿岸域においては、2011年東北地方太平洋沖地震にともなう津

波が入り組んだりアス海岸に侵入し、陸域側に数100 m にもおよぶ岩盤侵食を生じたケースが観察された。なかでも典型的な事例として、宮古市重茂・姉吉地区の海岸に面する谷において、TLS計測を実施し、岩盤に刻まれた津波による侵食痕を精密に計測した。その結果、岩盤に形成された小崖が津波浸水高付近に集中することが示され、谷全体の形状等とあわせて、完新世の高海面期以降に再来する津波が、長期的な地形発達において無視できない量の岩盤侵食を発生させていることが示された (早川ほか, 2015; Hayakawa et al., 2015)。

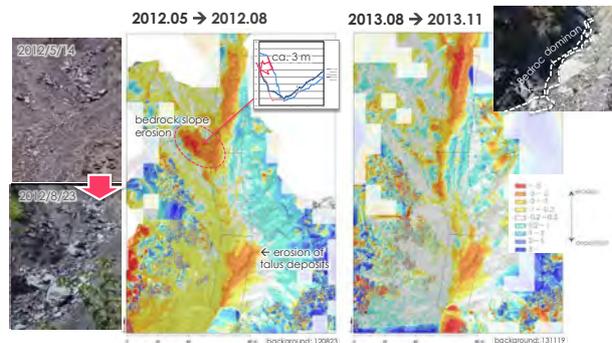


図 7. 静岡・大谷崩一ノ沢における溪床堆積物の季節変動 (Hayakawa et al., submitted) .

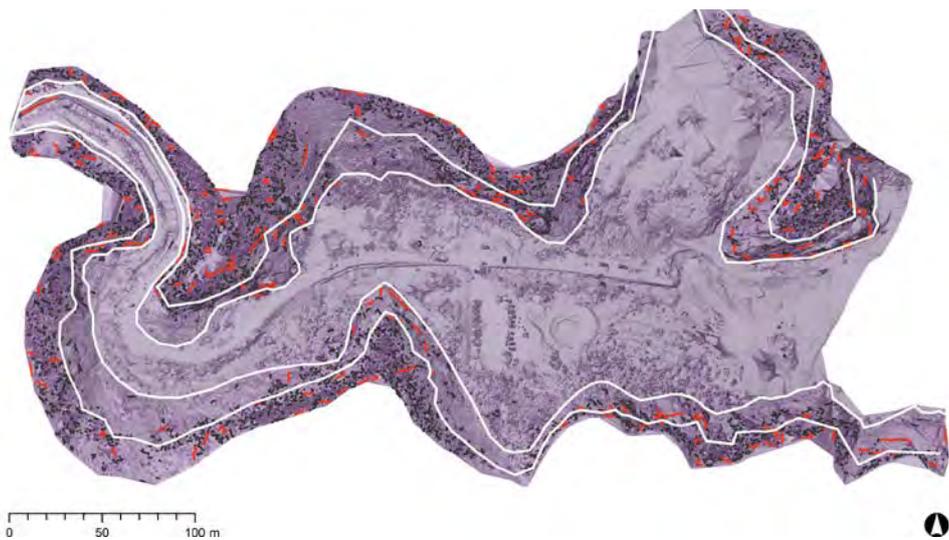


図8. 岩手県宮古市重茂姉吉における TLS 計測から生成した 10 cm DEM と抽出された崖線の分布.

### 5. まとめと展望

GNSSとTLS, それぞれの原理と適用事例について本稿では簡単に紹介した。位置情報や形状情報を得ることにに関して, それぞれにメリットとデメリットとがあり(表3), ここで紹介した適用事例からも, 目的に従って適切な手法を選択する重要性が示唆される。たとえば, 一次的な簡易地形図作成であれば, DGNSSのみでも, あるいはLRFのみでも可能であり, 機材の利用制限や現場での時間制限を鑑みて, こうした簡易な手法が有効であるケースも考えられる。一方, より詳細かつ正確な地

形情報が必要とされ, また使用機材が大きく制限されない場合は, 高精度GNSSやTLSを十分に活用し, 高精細な地形情報を取得することが望ましいケースもあろう。とくに, 地形変化の抽出といった目的に関しては, 複数時期の高精細データの位置合わせや, 計測誤差に依存する検出可能限界など, 綿密な検証が必要となってくる。やみくもに「高解像度」であることが最善なのではなく, 対象とする地形・地物の規模や形状, あるいは解析手段に最適な解像度と, それに見合った精度をもって, 地形情報の現場での取得方法を選択することが重要である。

表 3. GNSS, LRF, TLS 各手法の各条件に関するメリットとデメリット。

	GNSS	LRF (+ GNSS)	TLS (+ GNSS)
time on site	★ 1- hours	★★ 0.5-1 hour	★ several hours (multiple scan)
time for post processing	★★★★ 1 hour	★★ 2- hours	★ several hours
area	★ 10-100 m	★★ 1000 m	★★ 1000 m
cost	★★ JPY 100k-1M	★★★★ JPY 100k-200k	⊕ JPY 5M-30M
resolution & representation	★ 1-10 m	★★ 1-10 m	★★★★★ 1-10 mm
relative accuracy	★★ 1-10 cm	★ 10 cm - 1 m	★★★★ 2-3 mm
visibility (RGB)	⊕ N/A	⊕ N/A	★★ RGB point cloud

文献

- Besl, P. J., and N. D. McKay (1992), A method for registration of 3-D shapes, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 14(2), 239–256.
- Brodu, N., and D. Lague (2012), 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 68, 121–134, doi:10.1016/j.isprsjprs.2012.01.006.
- 長谷川昌弘, 今村遼平, 吉川眞 (2002), ジオインフォマティクス入門, 理工図書, 東京.
- Hayakawa, Y. S. (2013), Stability Analysis of Cliff Face around Kegon Falls in Nikko, Eastern Japan: An Implication to Its Erosional Mechanisms, *Int. J. Geosci.*, 04(06), 8–16, doi:10.4236/ijg.2013.46A2002.
- Hayakawa, Y. S., and H. Tsumura (2009), Utilization of laser range finder and differential GPS for high-resolution topographic measurement at Hacituğrul Tepe, Turkey, *Geoarchaeology*, 24(2), 176–190, doi:10.1002/gea.20261.
- Hayakawa, Y. S., T. Oguchi, J. Komatsubara, K. Ito, K. Hori, and Y. Nishiaki (2007), Rapid On-site Topographic Mapping with a Handheld Laser Range Finder for a Geoarchaeological Survey in Syria, *Geogr. Res.*, 45(1), 95–104, doi:10.1111/j.1745-5871.2007.00431.x.
- Hayakawa, Y. S., T. Oguchi, H. Saito, A. Kobayashi, V. R. Baker, J. D. Pelletier, L. A. McGuire, G. Komatsu, and K. Goto (2015), Geomorphic imprints of repeated tsunami waves in a coastal valley in northeastern Japan, *Geomorphology*, in press. doi:10.1016/j.geomorph.2015.02.034
- Hayakawa, Y. S., F. Imaizumi, N. Hotta, and H. Tsunetaka (submitted), Toward long-lasting disaster mitigation after huge landslide: high-definition topographic measurements of sediment production by debris flows in a steep headwater channel, in *Geomorphology and Society*.
- 早川裕一, 津村宏臣 (2008), LRF と DGPS を用いた野外調査における地形測量：トルコ, ハジトゥール・テペ遺跡における適用事例, *地形*, 29(4), 421–434.
- 早川裕一, 紺谷亮一, フィクリ=クラックオウル, サバハッティン=エゼル, ギュゼル=オズトゥルク (2012), レーザ距離計と自動パノラマ撮影装置を組み合わせた簡易レーザスキャンシステムの構築, *CSIS Discuss. Pap.*, 113, 1–9.
- 早川裕一, 小口高, 齋藤仁, 小林明才, 小松吾郎, 後藤和久 (2015), 三陸海岸における津波による侵食地形の特徴—地上レーザ測量による解析—, 地学雑誌, in press.
- Heritage, G., and D. Hetherington (2007), Towards a protocol for laser scanning in fluvial geomorphology, *Earth Surf. Process. Landforms*, 32(1), 66–74, doi:10.1002/esp.1375.
- Okumura, K. (2013), Tectonic geomorphology, structural geology, and paleoseismology of fault zones from high resolution topography, in *VISES SCEC Workshop on High Resolution Topography Applied to Earthquake Studies. September 18-20, 2013, Hongo, Tokyo*.

# 自然災害研究における三次元形状取得のための SfM-MVS 技術の活用

内山庄一郎 (独立行政法人 防災科学技術研究所)

uchiyama@bosai.go.jp

## 1 はじめに

空撮画像等と SfM-MVS (Structure from Motion and Multi-view Stereo) による画像解析とを組み合わせた地形情報取得技術が普及しつつある。この技術により高解像度の地形情報を得ることが容易になった。現段階では、本技術によって得られる地形情報の位置精度や三次元形状の正確さなど、検討すべき課題を指摘できるが、同時に、広汎な応用可能性を持つと考えている。ここでは、応用可能性の開拓に重点を置いて実施したいいくつかの事例を基にして、SfM-MVS 技術の活用を始めるに際し有用と思われる知見を紹介する。

なお、本稿は 2014 (平成 26) 年 8 月 8 日に開催された第一回高解像度地形情報シンポジウムで発表した。

## 2 SfM-MVS (Structure from Motion and Multi-view Stereo) について

コンピュータビジョンの分野で発達した技術である SfM-MVS は、Structure from Motion および Multi-view Stereo の頭文字をとった用語であり、現時点では適切な日本語訳語が見当たらない。SfM 技術により、動画 (Motion)、つまり刻々と撮影位置が変化する複数の画像から、被写体の三次元形状 (Structure) が得られる。さらに MVS 技術により三次元形状の高密度な点群データが生成される。本来、これらの技術はロボットの自己位置認識等に利用されているため、三次元モデルの生成処理がほぼ自動で行われることを特徴とする。このため、写真をベースとした三次元計測技術である伝統的な写真測量に比して、その作業コストと技術的難易度が低い。筆者は

この技術を応用し、例えば空中写真のような上空から地上を撮影した写真に対して適用することにより、地表面の三次元モデルを得る用途に用いている。SfM-MVS の原理については本稿では触れないので、文末に参考文献を挙げる (黄ほか, 1998 ; 林, 2011 ; 満上, 2011)。

ここで紹介する事例は、SfM-MVS ソフトウェアとして Agisoft PhotoScan Professional Edition を用いた。価格は 50 万円未満、Windows, Mac, Linux で動作する。なお、同ソフトウェアの Standard Edition では地上基準点 (位置座標) を設置できないため、地形情報作成の用途には使用できない。

### 2.1 SfM-MVS 技術による地形情報の取得

この技術が自然災害研究者等に知られる以前は、基盤地図情報数値標高モデル (国土地理院) の 10m メッシュ (一部地域は 5m メッシュ) が、入手が容易な地形情報の代表であった。しかし、地上解像度は 1 画素あたり 10m または 5m であり、微細な地形を議論するには十分とは言えない場合もある。また、自然災害等により大きな地形変化が生じた場合でも、高頻度に情報は更新されない。そのような中、SfM-MVS 技術を実装したソフトウェアでは、複数枚の写真を用意して所定のプロセスに沿って処理を行うだけで高解像度の地形情報を得ることができる。例えば、空中写真のデジタルアーカイブを活用し過去の地形情報を取得したり、低コストで運用可能な小型無人航空機による低空空撮を活用して、高頻度に地形情報を得たりすることができる。

### 3 SfM-MVS 技術を地形情報の取得手段として用いる際の留意点

SfM-MVS 技術はコンピュータビジョンの分野において写真測量をベースに発展した技術である。したがって、解析に用いた写真に写っている被写体表面の三次元モデルが生成される。つまり、空中写真のように地形・植生・人工構造物が写り込んでいる場合、得られる三次元形状は、植生・人工構造物等を含む地表面の三次元モデルとなる。これは数値地表面モデル、あるいは数値表層モデル (DSM: Digital Surface Model) などと呼ばれる。植生や人工構造物を除去した地形モデル (Terrain Model) ではないことに留意する必要がある。

同様の理由により、得られる地形情報の精度および解像度は、解析に用いた写真の品質 (解像度・画質・レンズ歪み) に依存する。特に小型無人航空機や有人航空機から空撮を行う場合は、適切な品質の画像が得られるよう留意が必要である。以下に SfM-MVS 処理を成功させるために必要な主たる留意点を挙げる。

#### 3.1 デジタルカメラの設定に関する事項

- a) 画素数が多く ISO ノイズが少ないこと : サイズの大きい撮像センサーを使用する。1200 万画素以上、かつ APS-C サイズより大きいセンサーが良好。
- b) 解像度が高いこと : 大型撮像センサーおよび高性能レンズを使用する。解像度は ISO12233 テストチャート等で確認できる。
- c) 広角歪みが少ないこと : 適切な焦点距離のレンズを使用する。15 mm~50 mm 程度の焦点距離が良好。
- d) 有人・無人航空機による空撮の場合、写真全面が合焦していること : オートフォーカスを無限遠に設定する。一眼レフカメラの場合、ピントリングの適切な無限遠フォーカス位置は、撮影テストを繰り返して求める必要がある。
- e) カメラブレがないこと : シャッタースピードを高速に設定する。小型無人航空機

の場合 1/1000~1/4000 程度が良好。

- f) 絞り値が一定であること : f 値の設定を固定する。開放絞りに近い場合、被写界深度 (合焦範囲の奥行) が狭くなる。撮影対象の距離と合焦範囲を事前にテスト撮影により確認し、適切な絞り値を求める。
- g) 白飛び・黒つぶれがないこと : 撮影画像のヒストグラムを確認し、撮影環境の光量に合った適切な ISO 値および露出補正值を設定する。積雪環境のように、ヒストグラムの幅が狭くコントラストが低い環境の場合、高機能なデジタルカメラであれば JPEG 画像に加えて RAW 画像を保存し、撮影後に画像の明るさ等を調整することで白飛び・黒つぶれを回避することができる。
- h) 画像圧縮ノイズが少ないこと : JPEG 画像の画質設定を、最も圧縮率が低い設定で保存する。

#### 3.2 画像のオーバーラップおよび撮影位置に関する事項

- a) 画像のオーバーラップ (重なり) を十分に確保すること : 飛行コース進行方向の画像オーバーラップおよび飛行コース間オーバーラップ (サイドラップ) が最低でも 75%以上となるようにフライトコースを設定する。特にロール方向 (機体の水平方向) の傾きが大きい無人固定翼機で垂直写真を撮影する場合、80%程度のサイドラップが必要となる。高すぎるオーバーラップ率によって撮影枚数を過剰に増やすと、その後の処理時間が膨大になる。適切な枚数となるよう撮影計画を行う。
- b) 撮影位置情報を取得すること : 小型無人航空機の場合は、フライトコントローラーや小型 GPS ロガーにより取得したトラックログ、有人機の場合は GNSS 機器やデジタルカメラに装着した GPS 受信機等で取得した撮影位置情報を用意する。

SfM-MVS による解析処理の際に撮影位置情報を追加することで、画像のマッチング処理（画像の撮影位置・撮影姿勢の推定処理）に要する時間が短縮される。通常の画像マッチング処理では、解析に投入した全画像の順列組み合わせを試行し、各画像の撮影位置・姿勢を推定する。これに対し、撮影位置情報を与えることで近傍の画像を検索し、必要最小限の処理で撮影位置・姿勢の推定処理を行うことができる。画像の枚数・撮影範囲が大きくなるほど劇的に高速化する。また、副次的な効果として地上基準点を使用せずとも、位置情報を持った三次元モデルを出力することができる。ただし、その成果には数メートルの位置および標高の誤差が認められる。

### 3.3 地上基準点の設置・精度に関する事項

- a) 周囲が開けた平面に設置すること：SfM-MVS 技術の特性として、近傍に高さのある物体が存在すると、周囲の高さに引っ張られて、正確な三次元形状を示さないことがある。したがって、地上に対空標識を設置する場合は周囲に高い地物や地形がない開けた平面を選ぶ。
- b) 位置情報が正確であること：トータルステーションや RTK-GNSS 等を用いて、数ミリメートルから数センチメートルの測量精度で対空標識の位置情報を計測する。
- c) 地上基準点が撮影画像上で明瞭に判読できること：撮影画像に写っている対空標識等をマウスで指定することによって地上基準点を設置する。したがって、画像中で対空標識の中心の点が明瞭に写り込んでいる必要がある。一例として、対地高度 150m 上空から撮影した場合、A4 の白板・黒板を市松模様を組み合わせた A2 サイズの対空標識が判別しやすい。

## 4 解析に使用する画像データの取得

### 4.1 小型無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) による低空空撮

低空からの撮影手法として、複数の回転翼を持つマルチコプターや固定翼機など、デジタルカメラを搭載した小型無人航空機が利用されている。一回のフライト可能時間（10 分から数十分程度であることが多い）や、安全のため操縦者の視界内でフライトを実施する等の制約から、撮影対象範囲は数百メートル四方と局所的である。しかしながら、最高飛行高度が地表より上空 150 m（場所により 250 m）と低空であることから、一画素あたり数センチメートルの地上解像度（GSD: Ground Sample Distance）を持つ高解像度な画像を得ることができる。ただし、墜落による第三者への加害リスクがゼロではないこと、さらに関連法規の未整備による法的トラブルの可能性の存在など、研究での活用およびその発展的普及に向けた課題は多い。

### 4.2 有人航空機からの空撮

航空測量用のデジタルカメラによる撮影や、チャーター機からの手持ちカメラでの撮影など、有人航空機からの撮影は上空からのスタンダードな撮影手法として活用されている。飛行速度が速く飛行高度も高いため、広域を網羅的に撮影する手法として有効である。航空測量用のカメラであれば、飛行高度によるが、例えば地上解像度が一画素あたり十数センチメートル、一枚の画像で 1.5 km × 3.5 km 程度の範囲を撮影することができる。ただし高額であり、頻回を気軽に撮影できる手段ではない。チャーター機であれば、航空機の機種にもよるが一時あたり 10 万円～50 万円程度の費用で利用することができる。ただし、SfM-MVS 処理に適した写真を得るための飛行コースの指示やカメラ設定、撮影技術に関する難易度は高い。

### 4.3 空中写真

国土院が撮影し、デジタル化された空中写真は一般財団法人日本地図センターで販売されている。一枚あたり 3,909 円（平成 27 年

3月時点), デジタル航測カメラで撮影した写真はオリジナル解像度であり, ロールフィルムをデジタル化した空中写真は20~21マイクロメートル(1,200 dpi相当)の解像度となる。デジタル航測カメラ(例えば, インターグラフ社 DMC, ベクセル社 UCD 等)で撮影された画像は, 購入してそのまま SfM-MVS 処理を行うことができる。撮影時の諸元(焦点距離, 絞り値, 撮影位置情報等)があれば, なお良い。ロールフィルムをスキャニングしてデジタル化した画像は, ロールフィルムをスキャナーに設置する際の位置や角度が少しずつ異なるため, そのままでは SfM-MVS 処理時に適用されるべき自動レンズ歪み補正が正しく機能しない。レンズの放射状の歪みが補正されないため, お椀のように湾曲した三次元形状になる場合がある。これは Bowl effect などと呼ばれる。対策としては, スキャニングされた画像のレンズ主点位置, 画像の傾き, 縦・横の画素数が同じになるように画像を調整する方法が考えられる。

#### 4.4 デジタルカメラの手持ち撮影

石碑の文字刻印や地質露頭の立体構造, あるいは高さ数メートル程度の地形や構造物等であれば, 手持ち, またはポールの先端に取り付けたデジタルカメラで撮影する方法も選択肢となる。小型無人航空機と異なり, 墜落等の危険が無く安全であり, 航空法等による制限も受けない。ただし, 手ぶれ・カメラブレが起きやすいこと, および撮影枚数が過剰になりがちになることに注意を要する。

#### 5 まとめ

本稿では, 自然災害研究における三次元形状取得のための SfM-MVS 技術の活用を目的として実施した事例から, SfM-MVS 技術を利用する際に有用と思われる知見をとりまとめた。考察や経験が不十分な点も残るが, これから新たに利用を始める場合にはある程度の参考になるだろう。

#### 6. 無人航空機に関する注意喚起

紙面の都合上, 詳細に触れていないが, 無人航空機の活用には航空法, 電波法, 機体のメカニズム, 適切な整備, バッテリー等の危険物管理, 飛行予定地域の気象・地形情報, 保険を含めたリスク管理などを総合的に理解し運用する必要がある。機体の低価格化により参入は容易になったが, 安全な運用に必要な情報の流通はいまだ十分ではない。したがって, 利用者の増大とともに, 大きな事故が発生するリスクも増加していくことが懸念される。今後, 関連法規の整備, ノウハウの共有が急務となる分野である。

#### 文献

- 黄 英傑・坂本拓之・西田広文 (1998):多視点画像からの 3次元情報抽出. RICOH TECHNICAL REPORT, 24, 26-34.
- 林昌希 (2011): コンピュータビジョンのセカイ・今そこにあるミライ 動画編集技術「マッシュムーブ」(1).  
([http://news.mynavi.jp/series/computer\\_vision/002/](http://news.mynavi.jp/series/computer_vision/002/), 2015年3月3日閲覧)
- 満上育久 (2011): 私の研究開発ツール Bundler: Structure from Motion for Unordered Image Collections. 映像情報メディア学会誌, 53, 479-482.
- 内山庄一郎・井上 公・鈴木比奈子 (2014): SfM を用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究. 防災科学技術研究所研究報告, 81, 37-60.
- 内山庄一郎・宮城豊彦・大友萌子・中川理絵 (2014): Structure from Motion によって生成した DSM の応用可能性 西表島仲間川下流域のマングローブ林の事例, 日本地理学会発表要旨集 No.86, 189.
- 内山庄一郎・井上公・後藤秀昭・中田高・井田康之・梅田篤 (2014): 平成 26 年 8 月豪雨による広島土石流災害における空撮写真を用いた搜索支援地図の作成, CSIS DAYS 2014, 16.

## ほぼ誰でもできる航空測量

小花和 宏之 (千葉大学 環境リモートセンシング研究センター)・  
早川 裕弐 (東京大学 空間情報科学研究センター)・加藤 颯 (千葉大学 園芸学研究科)

### 1. はじめに

近年、小型 UAV を用いて空撮を行い、それらの空中写真から SfM-MVS 手法により対象地の標高データを取得する航空測量が注目されている。使用可能な機材やソフトウェアは多数存在するが、本研究ではそれらの中でも比較的安価な機材群を用いた UAV 航空測量システムの一例を紹介し、またそのフィールド適用例や特徴について報告する。

### 2. UAV 航空測量手法の適用例

#### 2.1 システム概要

小型 UAV (DJI Phantom 2) に単独測位 GNSS (NIKON GP-1A) を装着したデジタルカメラ (NIKON COOLPIX A) を搭載し、対象地の上空あるいは周囲を飛行して連続写真を撮影し、航空写真を写真測量ソフトウェア (Agisoft PhotoScan Professional edition) を用いて SfM-MVS 処理することで、DSM やオルソフォトを作成した。

#### 2.2 対象地および測量結果

以下の 4 地形において UAV 測量を実施し、3D モデル、オルソ画像、等高線図、3 次元点群、3 次元点群を元にした断面図を作成した。

##### 1) 礫浜

約 5~10 m 波長のビーチカスプが明瞭に発達した、岩手県九戸郡種市の礫浜を対象とした。撮影日は 2013/12/9、撮影枚数は 202 枚である。UAV 測量の結果、ビーチカスプの形状は明瞭に表現されており、本システムにより数 m 規模の微地形が表現可能であることが確認された。また、岸沖方向の断面図では海岸の僅かな傾斜変換点も認識可能であった。なお、波が強い場合は水面の測量は不可であることが分かった。

##### 2) 岩石海岸

本州最東端に位置し、海側が 20 m 程度のほぼ垂直な海食崖で囲まれた波食棚である、岩手県宮古市とどヶ崎の岩石海岸を対象とした。撮影日は 2014/3/18、撮影枚数は 2125 枚である。測量の結果、地上からの直接観測が不可能な海食崖の形状が明瞭に表現され、また波食棚上の狭くて深い窪みも計測可能であることが確認された。また、波食棚陸側の樹木で覆われた場所においては、林冠および地表 (あるいは下層植生) の 2 層を計測することが出来た。

##### 3) 森林

約 20~30 m の樹高の針葉樹で覆われた植林地である、千葉県山武市森の森林を対象とし

た。撮影日は2014/2/7、撮影枚数は1411枚である。測定の結果、地上からの直接観測が困難な林冠の状況を明瞭に観測することが出来た。また、断面図には林冠および地表（あるいは下層植生）の2層構造が明瞭に示され、さらに場所によっては樹幹らしき形状も計測された。

#### 4) 陸繋島

九十九里浜南部の太東崎に位置し、波により激しく侵食された陸繋島である、千葉県いすみ市の雀島を対象とした。撮影日は2014/6/24、撮影枚数は1212枚である。測定の結果（図1）、徒歩によるアクセスが困難な場所にあるオーバーハングを含む急斜面の形状を明瞭に計測することが出来た。また、海食洞の天井部を含む3次元構造も把握することが可能であることが確認された。

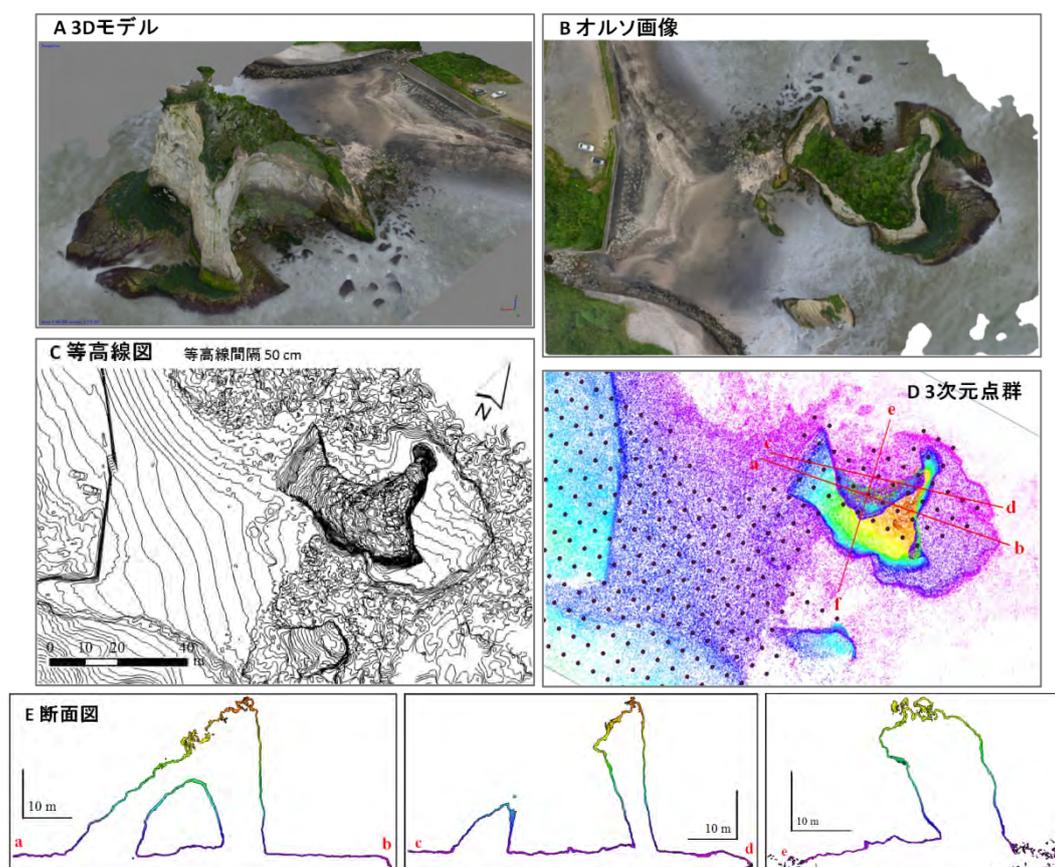


図1 測量結果の一例（千葉県いすみ市の陸繋島）

#### 2.3 システムの特徴

以上の様々な環境下におけるテストにより、以下の特徴が確認された。まず、①総重量2 kg程度と機材が軽量かつコンパクトであるため調査地への機材搬入が容易であり、②マルチコプターは垂直離着陸が可能、すなわち固定翼と違い滑走路が不要であり、③空中からの撮影・計測であるため林冠やアクセス困難地の計測も可能である。これら3つの特徴によりフィールドへの適用性の高さが確認された。

また、④UAV、カメラ、ソフトウェア一式の機材費は約 26 万円、計算用ワークステーションの価格は約 27 万円と従来の航空測量手法に比べて初期コストが安く、⑤UAV フライト・撮影・データ処理まで一人で運用可能であり、専門業者等への外注の必要もないため運用コストがほぼ 0 円であり、⑥撮影枚数や計算条件によって大きく異なるが、今回の適用例では全てデータ処理時間が 24 時間以内であり、迅速な計測が可能である。以上のコストおよび作業時間面の長所により、高頻度な計測および地図更新が可能である。

### 3. 手法簡略化の試み

一般に、UAV 測量を実施する際は空撮と同時に地上において GNSS 相対測位を行い、取得した座標値を GCP として最終的な測量結果を得る。GNSS 相対測位は精度の高い座標値が得られるため、高精度な UAV 測量を実現するためには必須である。本研究ではシステムの更なる作業簡便化およびコスト優位化を図るため、GNSS 相対測位の代わりにカメラに搭載した GNSS 単独測位のみを GCP として使用し、測量成果（以下、UAV-DSM と呼称）の精度を検証した。国土地理院が公開している航空レーザ測量結果である基盤地図情報 5 m メッシュ（以下、5m-DTM と呼称）を標高の真値と仮定して、UAV-DSM と比較したところ、以下の結果が得られた。

まず、林冠部では UAV-DSM の方が 5m-DTM よりも 10~30 m 程度大きい。これは、DSM（表層）と DTM（地表）の差、すなわち植生の高さを反映したものと考えられる。また、海食崖等の急斜面では UAV-DSM と 5m-DTM の差が±10~40 m と大きい。これは、5m-DTM の水平精度が 1.0 m であり、両値の比較点位置の僅かなずれが急傾斜地では標高値の大きな変化に繋がったためと、UAV-DSM と 5m-DTM の計測時期が異なっており、その期間中に発生した実際の地形変化によるものと考えられる。さらに、砂浜や波食棚等の裸地においては UAV-DSM と 5m-DTM の差は±10 m と相対的に小さい。これは、衛星位置の不正確さや電離層の影響に起因する GNSS 単独測位の誤差によるものと考えられる。以上より、単独測位 GNSS を GCP とした簡易 UAV 測量成果は、地形の起伏はきれいに表現される（すなわち局所的に大きく標高値がばらつくことは無い）ものの、全体的に 10 m 程度のずれが発生することが判明した。

### 4. 地形変化量計測への展望

2.2 の 4) で紹介した雀島（陸繋島）が位置する太東崎は、北部の九十九里浜への主要な土砂供給元の一つであり、九十九里浜の海岸侵食を考察する上で、その海食崖の侵食速度は重要なデータとなる。上記 2014/6/24 の UAV 測量成果と、1974/12/31 に国土地理院により撮影された空中写真を比較すると 10 m 以上の崖の後退（侵食）が認められた（図 2）。また、2013/10/28 に予察的に実施した UAV 測量の結果と 2014/6/24 の結果を比較すると、海食洞の天井部から崩落したと考えられる数 m 規模の落石群が明瞭に確認された（図 3）。本稿で提案する UAV 測量は従来の手法より空間分解能が高いため、今後継続的に雀島の計測

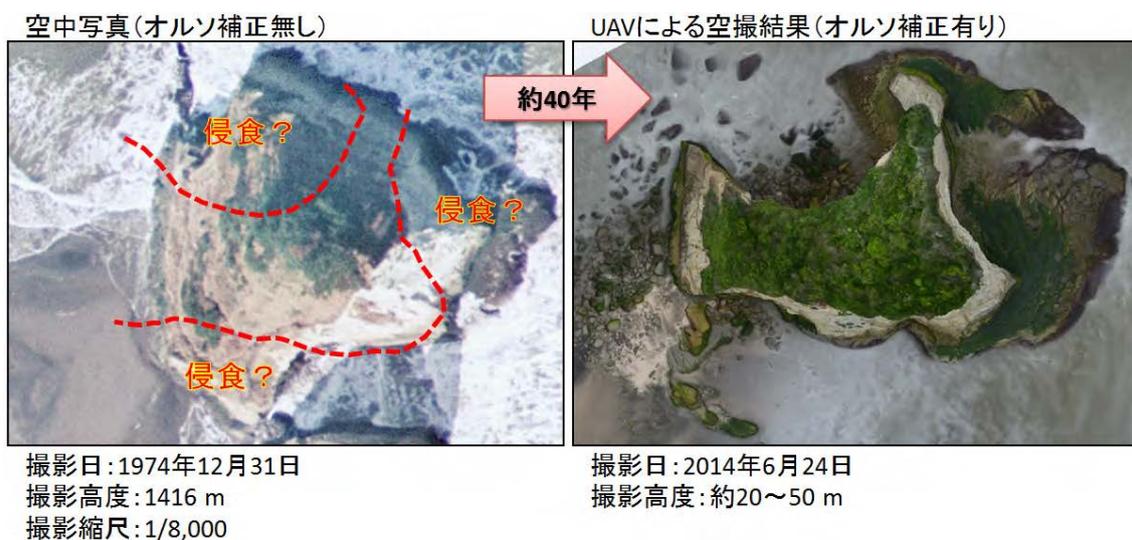


図2 空中写真の比較

を続けることで詳細な地形変化の定量化が可能となり、現在の崖の侵食速度および土砂供給速度が正確に判明する。また、UAV 測量は高頻度計測が可能すなわち時間分解能が高いため、地形変化とその要因（台風や地震等のイベント）との対応関係を細かく比較することが可能であり、地形変化メカニズムの解明に貢献すると期待される。

謝辞 本研究は、財団法人国土地理協会平成 24 年度学術研究助成金および JSPS 科研費 25750148 の一部を使用した。



図3 海食洞の崩壊

# UAV 空撮画像と SfM で構築した地形モデルの精度評価と適応事例

山村 充

(国土防災技術株式会社)

## 1. はじめに

一般に、空撮画像から構築した三次元地形モデル (DSM) に位置情報を付加させるため、空撮時に地表基準点 (GCP) を設置する。対象域に 3 点以上の基準点を設けることで三次元的な空間配置が復元されるが、GCP の設置数や基準点同士を結んだ面が空撮範囲に占める割合によって DSM の精度が変わるものと考えられる。しかし、実際の災害緊急対応等に鑑みると、立ち入り可能な範囲が限られること、多点測量するための時間が確保できないこと等が想定され、実務上、GCP を多数設置できないケースが多いと予想される。そこで、精度検証における最初のステップとして、三次元モデル構築に最低限必要な 3 点の GCP を用い、GCP 設置箇所と構築される DSM 精度について検討した。

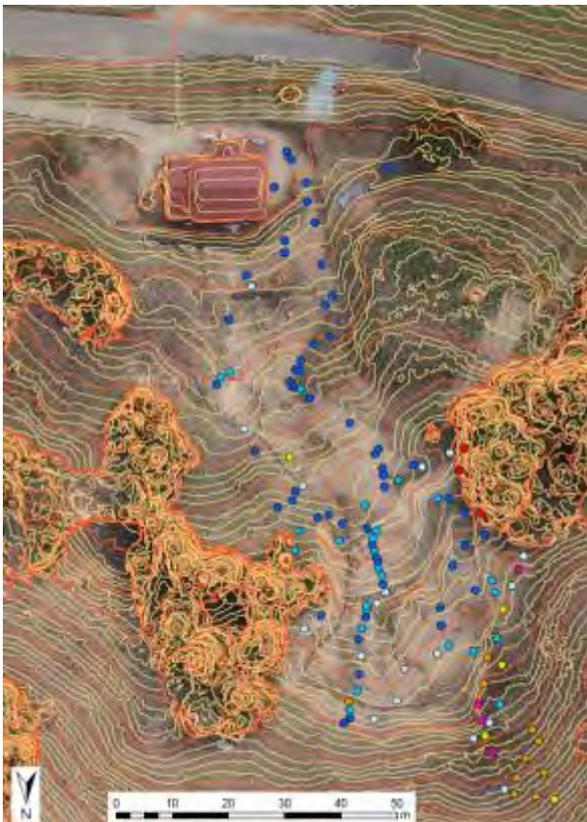


図 1 空撮対象全景と測量実施箇所

また、将来的な利活用方法の一つとして、多時期 DSM 間の差分をとり、時間あたりの移動土塊量や地すべり移動量を抽出することが挙げられる。現段階では標高値誤差が大きく微小変化を捉えることは難しいのが現状である。予察的な取り組みとなるが、現場への適応事例として、砂防えん堤堆砂量のモニタリング調査で行った差分解析結果について紹介する。

## 2. 地表基準点とモデル精度

調査地として、空撮対象斜面の多くが植生の少ない裸地で構成される、福島県内の地すべり地を選択した (図 1)。撮影は比高 50m, 100m の 2 高度から自動航行によって実施し、全 426 枚の画像を取得した。画像処理には PhotoScan Professional (agisoft) を用いた。また、トータルステーションを用い、GCP6 点及び三次元モデルの標高値検証点 121 点 (図 1 の丸印) の測量を実施した。

全 6 点の GCP から 3 点を選ぶ組み合わせの中から、図 2 に示す 4 ケースを選択し、地上解像度 8 cm の DSM を構築した。ケース 1 及びケース 3 は、空撮対象範囲内において GCP を比較的広範囲に設置できる状況を、ケース 2 とケース 4 は、狭い範囲での設置となる状況を想定している。

ケース 1 では、裸地でも地表面の傾斜度が  $50^\circ$  以上の点で実測値とモデル標高値の差が開いた (図 3)。この要因の一つとして、上空からの水平撮影では勾配が大きいと単位ピクセルあたりの z 方向解像度が低下することが挙げられる。傾斜度  $50^\circ$  未満の裸地に限ると、実測値との差は概ね 20cm 以内となった。また、モデルは撮影画像を基に構築されるため、広葉樹林及びスギ林等、樹木で覆われた範囲の地形情報取得は困難となる。

図 2 右のグラフは、横軸に実測値標高、縦軸に実

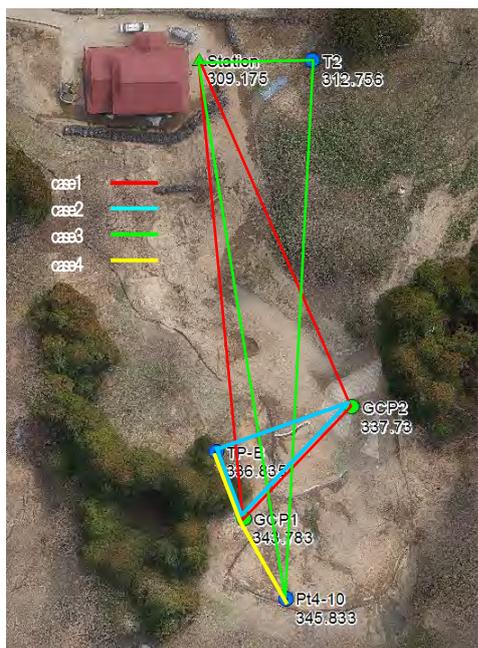
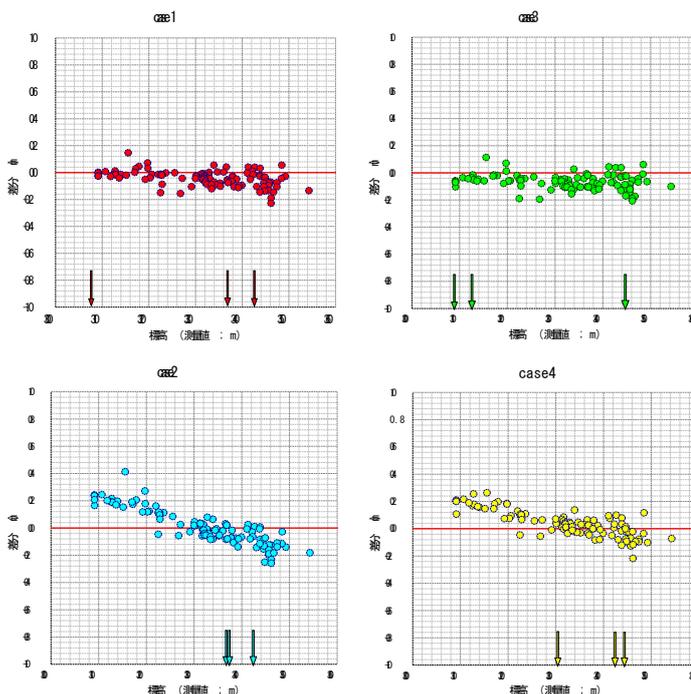


図2 GCPの組み合わせと標高差分



測値と各ケースのモデル標高値の差分を取りプロットしたものである。なお、広葉樹林及びスギ林内に位置した 28 点及び傾斜度  $50^\circ$  以上となる 4 点は除外した。矢印は各ケースの DSM 構築に用いた GCP の標高値を表す。GCP 設置標高内 (矢印に挟まれた範囲) では、裸地であれば概ね実測値との差分が  $\pm 20\text{cm}$  (平均 約  $4\text{cm}$ ) 以内となった。また、GCP 設置標高外では差が大きくなる傾向にあるものの、全てのケースで標高値の差分は概ね  $\pm 30\text{cm}$  以内に

収まった。斜面災害の現況把握や初動調査等で活用する上で、今回対象とした地すべり地規模であれば GCP の設置位置に依らず、十分実用的なレベルで三次元モデルが取得可能と判断される。

### 3. SfM の現場適応事例 ー堆砂量の推定ー

撮影対象は、福島県某所に敷設された大規模えん堤及びその上流部に位置するスリットダム堆砂物である。平成 26 年 5 月、7 月の二時期に空撮を実施し、地上解像度  $20\text{cm}$  の DSM を構築した。二時期の標高差 (図 4) から、スリットえん堤堆砂域では  $1\text{m}$  以上の増加が認められた。一方、大規模えん堤堆砂域では変動幅は誤差範囲内となるものの、5 月に比べて標高値が低くなる傾向が認められた。河川中央域を縦断測線に沿って標高を比較しても、この 2 ヶ月でスリットえん堤部で堆砂が活発だったことが伺える。

平成 23、25 年の 9 月に航空 LIDAR 測量 (地上解像度  $1\text{m}$  の DEM) が対象域で実施されている。この LIDAR データと今回取得した DSM を比較し、経時的な堆砂量変化を試算した。まず、平成 23 年 9 月時点を起点とし、スリットえん堤及び大規模えん堤堆砂域における標高差分を抽出した (図 5)。

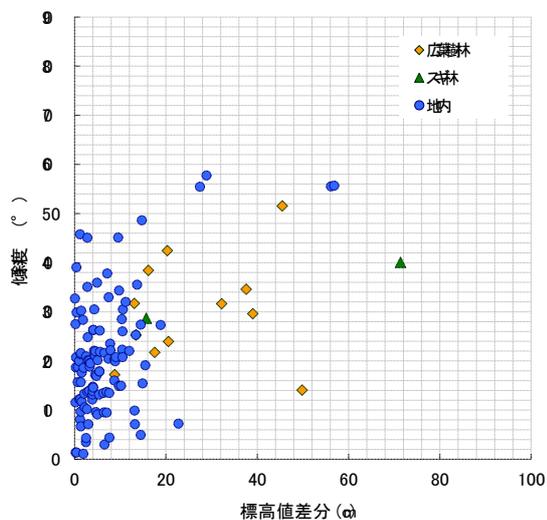


図3 標高差分と傾斜度

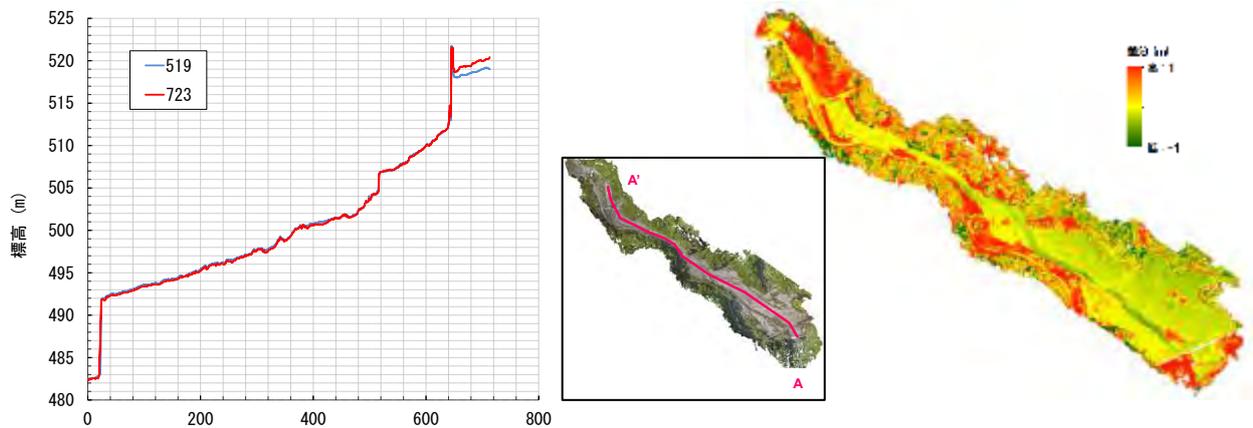


図4 DSM二時期の差分と標高値の比較

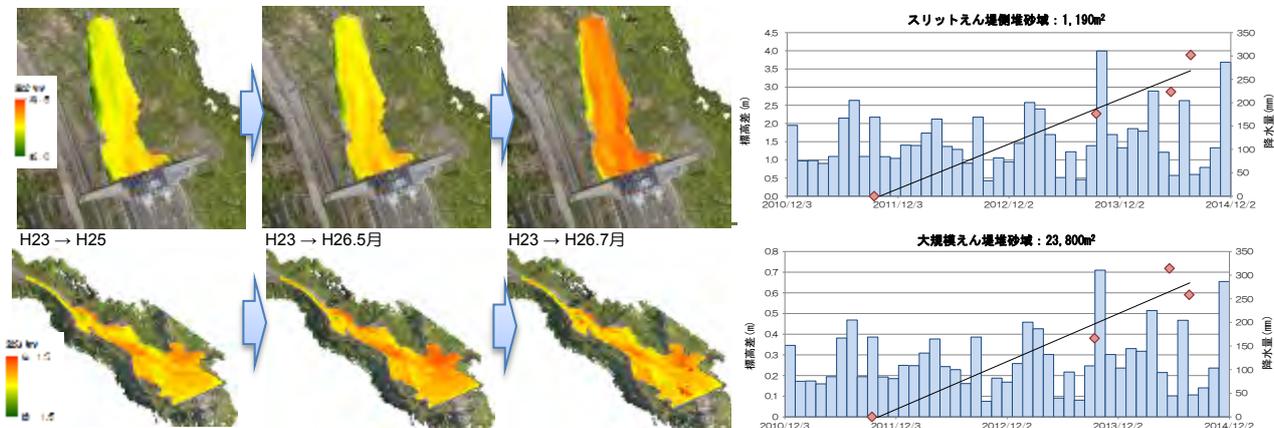


図5 差分解析結果

平成23年9月時点の堆砂状況を0とし、各DEM及びDSMとの差分から堆砂物量を平均比高差として算出した。平均比高差の経時変化を図5右に示す。2011年、2013年はLIDARデータ、2014年の2点はDSMを基に算出した。青棒グラフは、調査地近傍の気象観測所から得た月間累積雨量を示す。ここ3ヵ年の累積堆砂量は、スリットえん堤堆砂域で約4,700m<sup>3</sup>、大規模えん堤堆砂域では約14,000m<sup>3</sup>と試算された。月平均の堆砂変化量は、スリットえん堤では約120m<sup>3</sup>y<sup>-1</sup>、大規模えん堤では約500m<sup>3</sup>y<sup>-1</sup>と見積もられた。また、平成26年5月から7月にかけて堆砂量の変化が著しいが、この2ヶ月で約400mmの雨量が観測されていた。同期間、上流域において河川への土砂流出量が増大していたものと推察される。

#### 4. まとめ

現時点では斜面の微細な動きを捉えることは難しいが、比高50~100mでの空撮から地上解像度10cm程度のDSMが取得され、精度面においても災害時緊急対応に十分利用可能なレベルと考えられる。

本技術の現場適応事例として、えん堤の堆砂量モニタリングに関する取り組みについて紹介した。二時期の差分解析から、スリットえん堤で堆砂量の増加が確認された。降雨イベントによる土砂流出とその堆砂状況を捉えた可能性がある。今回は試験的な試みとしての位置づけではあるが、将来的には砂防えん堤の維持管理等に有用なツールになるものと期待される。

## 地形数値情報の歴史

小口 高

(東京大学・空間情報科学研究センター)

### 1. 地形数値情報の小史

地形は先史時代から人間の活動を規定してきた要素であり、地形を地図の上に表現する試みが古くから行われてきた。地形を表す客観的な情報として最も古典的で、現在も使われているものは等高線である。等高線は近世の地図でも使われた例があるが、地上測量で得られたデータから等高線を描く作業は多大な労力を要したため、当時は普及しなかった。しかし、20世紀初頭に航空写真測量が可能となり、間もなく地図作成に広く使われるようになると、等高線が入った地図が急速に普及した。

1930年代後半に電気信号のみを用いて計算を行うコンピュータが開発され、その後急速に発展した。これにともない、標高を含む地図の情報をコンピュータで処理する試みが始まった。この際には等高線ではなく、格子を用いて標高を一定間隔で面的にサンプリングしたラスタ型デジタル標高モデル (DEM) が採用された。その理由は、構造がコンピュータのスクリーンの表示や画像ファイルと同様であり、コンピュータで扱いやすいためである。1960年代末までに、DEMを用いて陰影図を作成する手法や、地形の傾斜と斜面方向を3×3のフィルター (移動窓) を用いて計算する手法が提案された (Yoeli, 1967; Sharpnack and Akin, 1969 など)。また、1980年代にはDEMから

自動的に水系や流域を抽出する方法も開発された (Jenson and Domingue, 1988 など)。

これらの手法もしくはその改良版が、現行のGISにも広く採用されている。

1980年代には、ESRI社のArc/Infoが商用GISソフトウェアとして初めて成功を収めたが、主な目的はベクター型のデータの処理であった。さらにArc/Infoは高価で、それを動かすために必要なコンピュータ (ワークステーション) も高価であったため、GISを地形の分析に用いることは少なかった。しかし、1990年代に入るとPCで動くGISが普及し、Microsoft WindowsやMac OSといったGUIのオペレーションシステムの導入によりGISの操作が容易になった。さらに、ベクター型とラスタ型のデータを共に扱えるGISソフトウェアが一般的になったため、DEMをGISで分析する傾向が明確になった。その後はDEMとGISを活用した地形の研究が年を追って増加した (Oguchi and Wasklewicz, 2011)。GIS関連のソフトウェアのオープンソース化が進み、多様なデータの処理や分析を無償でできるようになったことも、この動向を加速した。

近年はDEM自体の普及と質の向上も著しい。初期には地形図に格子をかけて標高を読み取り、DEMを自作する必要があった。たとえば阪口 (1965) は、地形図から緯度経度1分の解像度のDEMを作成し、日本列島全体の地形特性を定量化した。筆者も

1980～90年代に国土地理院の二万五千分の一地形図に5 mmのメッシュをかけて解像度125 mのDEMを作成し、流域の地形特性を分析していた（小口，1988；Oguchi，1996）。しかし20世紀末までには、先進国では国土地理院の「数値地図（標高）50mメッシュ」のような解像度数十mの官製DEMが普及し、解像度約1 kmで全球をカバーしたDEM（GTOPO30）も公開された。21世紀に入ると、SRTM DEM，ASTER GDEMといった全球をカバーするDEMの解像度が数十mまで向上し、個別の地域では解像度が数mもしくはそれよりも高いDEMが普及した。後者の動向には、デジタル写真測量や航空・地上レーザ測量の発展が大きく貢献している。また、DEMのオープンソース化も着実に進んでいる。たとえば以前は有償であった国土地理院作成のDEMは、現在は解像度が向上したにも関わらず、無償でウェブサイトからダウンロードできる。

DEMの作成に関係する最近の動向で最も重要なものは、無人航空機（UAV）と簡便な写真測量の技術であるSfM（Structure from Motion）を活用したDEMの取得である。従来、高解像度DEMを得る際に用いられていたデジタル写真測量とレーザ測量は、高価な装置、計測の手間、および専門的な作業を要した。しかし、小型で安価なUAVを用いて上空から撮影した写真を、無償もしくは安価なSfM用のソフトウェアで処理することにより、少ない投資で簡便に高解像度のDEMを取得できるようになった。このため、これらの手法を活用する研究者や実務者が最近急増し、一種のブームになっている。

## 2. 高解像度DEMの急速な普及と今後の課題

高解像度DEMを取り巻く現状で注意すべき点は、ブームを通じて多数の人が多量のデータを生成することが、研究の質の向上には必ずしもつながらないことである。一般にブームは物事の普及には望ましいが、何か大きな進歩があった後に生じることが多く、ブームがさらに大きな進歩をもたらすとはいえない。これはUAVやSfMによるDEMの取得についても当てはまるだろう。初期にこれらの手法を地形学に導入した人たちの貢献は大きいですが、今の段階でこれらの手法を用いたことをアピールしても、オリジナルな成果にはならないといえる。

一方、高解像度DEMを活用することにより、地形学の概念に根本的な変革が生じることを示すことができれば、それは非常にオリジナリティの高い成果になる。手法の簡便さや、「解像度が上がって地形の特徴がよく把握できるようになった」ことを強調するのではなく、「解像度が上がったために地形の構造や成因に関する新たな概念が構築された」ことを実証的に示すことが望ましい。これは「言うは易く行うは難し」でもある。解像度の点でDEMと同様の経緯を辿っているものに、衛星画像がある。1980～90年代には、LandsatのTMセンサなどで取得された解像度数十mの衛星画像が広く用いられており、それに基づいて土地利用分類などが行われた。しかし21世紀に入ると、解像度数mの高解像度の衛星画像が普及し、土地利用の分類の解像度も向上した。しかし、このような高解像度の土地利用図

が、以前のものよりも詳細であるが故に優れているかは判然としない。数十 m の解像度の衛星画像からは、地理学で広く使われている土地利用の範疇である「森林」「水田」「畑地」「市街地」といった要素に良く対応する土地利用分類図を作成できた。一方、高解像度のデータを用いると、市街地にある特定の宅地の中にみられる個々の木や建物を区別したような結果が得られる。これは進歩ではあるが、既存の土地利用の概念やスケールとは異なるため、そのままでは活用が難しい。一方、新たな解像度に対応した土地利用分類の新たな体系を提示することも容易ではない。

DEM についても同様の問題がある。一例を挙げよう。斜面の勾配を正確に把握することは、斜面の形成過程などを論じる際に重要である。日本では 1990 年代の中頃に、国土地理院が提供する DEM の解像度が 250 m から 50 m になった。これに関連して野上 (1995) は、「従来の 250m-DEM では、勾配を計算することはできても、意味のある精度には達していなかった。全国をカバーする 50m-DEM によって、地形計測あるいは地形の数量的な研究は新しい時代を迎えることになる」と述べている。これは、解像度の向上が研究の質的な向上につながることを意味する。一方、最近では 50 m よりもはるかに高解像度の DEM が得られている。そのデータには、斜面の上に分布する転石が持つ凹凸のような情報が反映されているとすれば、斜面地形の研究に応用する際にはノイズが増えたという意味しか持たない可能性がある。したがって、高解像度 DEM を分析して解釈するための新たな体系を提示し、高解像度 DEM には本質的な意味があ

ることを示す必要がある。

現状では、高解像度 DEM の取得に関する技術的な進歩と、結果の解像度の高さが強調される一方で、それを用いて地形学の新体系を構築しようという動きはあまりみられない。これは残念な状況であり、それを打破して地形学の真の進歩が実現することを望みたい。このように書くと、「筆者が責任を持ってやれ」という声が出そうである。個人的な話で恐縮だが、筆者はすでに 50 代であり、現在は研究組織の長や地形学の雑誌 *Geomorphology* の編集委員長などの業務で手一杯の状況にある。さらに、新体系の構築といった既存の概念を大きく変えるような研究は、頭が柔らかい若手の方が実現できる可能性が高い。

念のために記すが、「ブームなのでやった」という状況も決して悪くない。単純にブームについていけないことの方が問題であることは、実際に UAV や SfM を駆使することがない筆者は十分に承知している。しかし一方で、現状を大きく変えようとする意欲的な若手が日本に現れ、世界の地形学者を驚かすような成果を高解像度 DEM について上げることも望んでいる。

DEM を用いた研究の日本の先駆者の一人である阪口豊は、事例研究である阪口 (1965) を次の言葉で締めくくっている。「ここに展開された議論は、あたかも、物体を構成している個別的な粒子・原子や分子がどんな力学で記述されるかにはあまり関係せず、ただ莫大な数の粒子からなる巨視的物体のふるまいや性質を支配している特別な型の法則性を研究する統計物理学の考え方に通ずるものがある。地形学におけるこのような分野は統計地形学とでもよん

だらよいであろう」。この記述は、米国の Horton, Strahler といった地形学者が当時までに展開していた地形学の統計的な研究と関連しているが、行った研究を個別の事例で終わらせるのではなく、学問の大きな枠組みの変化と結びつけている点が重要である。約 50 年前の記述ではあるが、若い人たちの参考になればと思う。

Yoeli, P., 1967. The mechanisation of analytical hill shading. *Cartographic Journal* 4, 82-88.

## 引用文献

小口 高, 1988. 松本盆地周辺の流域における最終氷期末期以降の地形発達を規定した要因. *地理学評論* 61A, 872-893.

阪口 豊, 1965. 流域の発達と日本島流域の特性. *地理学評論* 38, 74-91.

野上道男, 1995. 細密 DEM の紹介と流域地形計測. *地理学評論* 68A, 465-474.

Oguchi, T., 1996. Factors affecting the magnitude of post-glacial hillslope incision in Japanese mountains. *Catena* 26, 171-186.

Oguchi, T., Wasklewicz, T., 2011. Geographical Information Systems in geomorphology. In: Gregory, K.J., Goudie, A. (Eds.) *The SAGE Handbook of Geomorphology*. Sage Publications, London, 227-245.

Jenson, S.K., Domingue, J.O., 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54, 1593-1600.

Sharpnack, D.A., Akin, G., 1969. An algorithm for computing slope and aspect from elevations. *Photogrammetric Survey* 35, 247-248.



# 高解像度地形情報 シンポジウム

高解像度地形情報に関する技術の概観とその活用

8/8 金

symposium

## シンポジウム 「地形情報のすべて」

【10:00-16:30】

会場／東京大学 柏の葉キャンパス駅前サテライト  
1F 多目的ホール

※TX柏の葉キャンパス駅より徒歩1分



## 講演者

speakers

- 佐藤 浩 (日本大学) / 衛星SAR
- 横尾泰広 (国際航業株式会社) / 航空LiDAR
- 新井場公徳 (消防研究所) / 地上LiDAR (TLS)
- 早川裕弐 (東京大学) / GNSS & TLS
- 神谷 泉 (国土地理院) / Photogrammetry (写真測量)
- 内山庄一郎 (防災科学技術研究所) / SfM: Structure from Motion
- 満上育久 (大阪大学産業科学研究所) / CV: Computer Vision
- 加藤 顕 (千葉大学) / TLS & 航空LiDAR
- 小花和宏之 (千葉大学) / UAV & SfM & TLS
- 山村 充 (国土防災技術株式会社) / UAV & SfM
- 井上 公 (防災科学技術研究所) / UAV: Unmanned Aerial Vehicle
- 小口 高 (東京大学) / DEMとその活用の歴史

## 対象

target

地形学、地質学、防災・減災、自然災害研究、地図製作等に関連する技術者、研究者、大学院生、学生等 ※最大100名程度

8/9 土

workshop

## TLS/UAV/SfM/GNSS 総合ハンズオン&レクチャー

【10:00-17:00】

会場／東京大学 柏キャンパス総合研究棟  
6F 大会議室

## 主催

sponsorship

東京大学空間情報科学研究センター、(独)防災科学技術研究所

【高解像度地形情報シンポジウム事務局】

内山庄一郎 (防災科研)、早川裕弐 (東京大学)

Email ▶ [gis-landslide@bosai.go.jp](mailto:gis-landslide@bosai.go.jp)

