4. 阿蘇大橋崩壊斜面対策工事における航空レーザ測量 及び UAV 計測による 3 次元地形測量データの活用事例

- 阿蘇大橋地区 砂防災害関連緊急事業(直轄)-

国際航業株式会社事業推進部	○ 堀川	毅信
国土交通省九州地方整備局	野村	真一
株式会社熊谷組土木設計部	中出	岡川
岡山大学大学院環境生命科学研究	1 西山	哲

1. はじめに

フィリピン海プレートなど4枚のプレートの際 にある日本は幾度無く地震の外力を受けた結果, 現在の地形を形成していることから,ある程度の 揺れでは自然斜面が崩壊する現象は発生しないが, 履歴の少ない一定以上のエネルギーをもつ地震が 発生した場合,地すべりや斜面崩壊にともなう大 規模な土砂移動が過去発生している。

平成28年4月熊本を襲った「熊本地震」は,最 大震度7が二回観測され阿蘇周辺において多くの 斜面崩壊を発生させた。特に南阿蘇立野地区にお いて発生した大規模な斜面崩壊は,崩壊斜面延長 最大700m,崩壊幅約200m,崩壊土砂量50万m³と推 定¹⁾された土砂が,国道57号,JR 豊肥本線,阿蘇大 橋を押し流した。さらに,崩壊斜面上部には,発災 直後に撮影された航空レーザ測量等による3次元 地形データや空中写真から多くの亀裂が確認され, 向山等が地震変位²⁾の状況を詳細に報告している。

崩壊斜面は、阿蘇カルデラ壁西縁で黒川が白川 に合流する1km上流の右岸東側斜面に位置し、安山 岩溶岩(一部凝灰角礫岩)が分布する。崩壊斜面上 部には地震後基岩となる溶岩と凝灰角礫岩が露出 し、斜面下部は崖錐堆積物と想定され、崩壊斜面周 辺表層は平均で1~2m程度黒ボク(N値5未満の軟 弱な地層)で覆われていたと推定され、余震や降雨 による崩壊拡大の危険性が高いと判断されたこと から早急な斜面安定化対策が望まれたが、斜面の 安全性が確保されないことから、有人による現況 調査や工事は実施できない状況であった。

このため,崩壊斜面拡大防止や斜面安定化を図る目的とした直轄砂防災害緊急砂防事業により, 安全な場所からの遠隔操作による無人化施工機械 を用いた応急対策工³⁾が検討・実施された。

無人化施工機械は,搭載された GNSS や傾斜セン サーなどにより得られる位置や高さ情報と設計デ ータの差分をモニターで確認しながら工事を実施 するマシンガイダンス技術により実施され,これ ら位置・高さ精度は,±50mm⁴以下が目安となって いる。また,航空レーザ計測及びUAV(無人航空: Unmanned aerial vehicle)計測においては,公共測量 作業規定に基づき実施するうえで要求される精度 が設定されており一般的には地図情報レベル250 ~1000で実施されている。

本報は, 熊本地震で発生した大規模な崩壊斜面 において, 測量・設計・施工の作業を航空レーザ計 測及び UAV 計測⁵⁾で取得した 3 次元地データを用 いて得られた知見や課題について整理し取りまと め, 今後推進される「i-construction」の実施に向け て参考となる 3 次元計測技術の基礎資料が提供で きたと考える。

1. 航空レーザ計測及び UAV 計測データ特性 2.1 航空レーザ計測の概要

航空レーザ計測に用いた仕様の基本的特性を表 -1 に示す。航空レーザ測量は、航空機に搭載した レーザスキャナ, GNSS 測量機, IMU(慣性計測装置) により点群として位置と高さ(x,y,z)を取得し, 高 さの精度は概ね±15cm 程度であるが, 樹木等の影 響を受けることから今回の計測では, 図-1 に示す 波形記録方式を用いたことで植生の影響を受けず に地表面のデータを取得するようにした。

表-1 航空レーザの仕様上の基本性能

GNSS/IMU性能				
位置精度	水	平0.02m,高度0.05m		
	(GNSS信号連続受信時)			
姿勢精度	姿勢精度 Roll&Pitch:0.005deg,Heading:0.008deg			
レーザスキャナ・写真解像度(計画/最大)				
スキャンレート 70.0kHz / 200Hz				
パルスレート		150, 000Hz / 400, 000Hz		
写真解像度		10cm / 対地高度による		

応急対策事業で実施したレーザ計測の範囲位置

図及び崩壊地周辺のオルソ図を図-2,3に示した。



図-1 レーザデータ記録の概念図



図-2 レーザ計測範囲及び崩壊位置図



図-3 斜面崩壊箇所周辺オルソ及び植生状況

2.2 航空レーザ計測及び UAV 精度特性について

航空レーザ計測及び UAV 計測における精度は作成する数値地図の地図情報レベルで通常表現され, 詳細設計に使用される地図情報として平面縮尺が 1:200~1:500を標準として用いられている。また, 公共測量作業規定等で要求される地図情報レベル の位置精度は,以下のように整理される。

実施された航空レーザ計測は,立入禁止区域内 での設計及び施工に使用することから,地図情報 レベル500で実施し,UAV計測においても同等かそ れ以上の精度となるようにUAVを用いた公共測量 マニュアル(案)⁶⁾(以下UAVマニュアル)に準じた GCPの設置を行ったが,崩壊斜面周辺の地形及び時 間の制約があったことから崩壊斜面中腹部のGCP 間距離が200m以上となった。

表-2 精度に関しての数値レベル

地図情報レベル	250	500	
水平位置の標準偏差	12cm 以内	25cm 以内	
標高点の標準偏差	25cm 以内	25cm 以内	
等高線の標準偏差	50cm 以内	50cm 以内	

2.33次元地形モデルを応用した画像地形

航空レーザ計測の **DEM**(Digital Elevation Model)に より作成した崩壊斜面周辺のエルザマップ⁷⁾ (ELSAMAP)を図-4 に示した。



図-4 崩壊斜面周辺状況(ELSAMAP で作成)

図-4の ELSAMAP は斜面崩壊直後の地表面の状況 が良く反映されており頂部や尾根に伸びる亀裂の 発生状況,既存道路や水路施設,6月の豪雨で拡大 したガリーや崩壊斜面の凸凹な表層状況が視覚的 に確認できる。図-5はUAV 計測から作成された時 系列のELSAMAPで頭部ラウンディング(斜面安定化 施工)による崖状地形の整形,土留盛土工の施工進 捗状況が把握できる。またUAV 斜め撮影(図-16参 照)からは垂直写真では見えない崖地形の 3D 画像 による再現など活用を行った。



図-5 UAV計測から作成した4時期のELSAMAP

2.4 UAV 計測の概要

UAV空中写真計測は、初回計測(2016年6月26日) ~ 最終計測(2017年1月6日)計6回(図-6参照) 実施し、2017年6月2日に補足のUAV計測を実施し ている。今回のUAV計測では、一般的な垂直写真で の撮影以外に、第2回計測以降、斜面頭部のオーバ ーハングや浮石の状況把握を目的とした、斜め写 真撮影(カメラ設置角度を45度程度に設定)も実施 した。これらの計測に用いた計測機器を写真1に、 計測したセンサー諸元仕様を表-3に整理した。

ハードウェア性能	
UAV:エンルート社製	最大飛行時間30~40分
Zion QC730	最大積載量2.5kg
カメラ : ソニー社製α	撮像素子 APS-C : 23.5cm ×
6000	15.6cm 撮 影 画 質 6000 ×
	4000pixel
カメラ(飛行モニタリ	GoPro社製 Hero3:撮影画質4K
ング・動画)	(3840×2160pixel)
ソフトウェア	
画像解析Pix4D社製	Pix4D Mapper Pro
地形解析Esri社製	Arc GIS 10.3

表-3 UAV計測の仕様上の基本性能



図-6 UAV計測時期と斜面安定化施工対象施設

図-6は、UAV 計測時と GCP 配置の概要、対策工事 の実施状況やガリー拡大の因子を時系列で示した。 写真-1は、UAV 計測に使用した機器で、安全運航 に必要な撮影時のモニター画面(画像・電圧確認) で、撮影時の機材モニタリン等に使用した。



写真-1 使用機器(現地 UAV 計測機材配置状況) なお,GCP 第2次設置以降レーザ計測と UAV 計測 データの接合性については,詳細設計に対応可能

な数値レベル 500~1000 程度を目安とした。



図−7 UAV計測および画像解析フロー

3.3次元地形データ活用事例と計測精度

3.1 航空レーザ計測の活用と精度検証

図-1 に示した調整用基準点において実施された 平坦な道路上での点検は,標高値の平均値 1.2cm, 最大値 1.0cm,最小値-3.0cm,標準偏差 1.1cm と標 高精度は前述した±15cm と比較して高い精度で取 得されているが,図-2 に示した崩壊斜面頂部に接 続する工事用道路設計地点では,図-3 で確認でき るように樹高 20m 程度の杉林(下草が繁茂)か熊笹 の密集している状況であったことから,波形記録 式を用いることでパルス法より的確に地盤面を捉 える解析手法を採用した。



写真-2 頭部工事用道路中心線計画オルソ

航空レーザ計測(波形記録式)により作成され た各種3次元地形モデル(グランドデータから作成 された 1m コンター図, DEM, TIN)による縦横断図が 設計・施工で使用可能か実測を行った約 1km 区間 (85 地点)で縦断標高との比較検証を行いその結果 を表-4 に整理し,標高較差の分布状況を図-8 に示 した。なお, 1m コンターは 30 cm DEM をもとに作成 されている。

表-4	3次元地形デー	-タの精度検証表
14 7		/ ///////////////////////////////////

標高較差 比較(m)	実測値- 1mコンター	実測値一 50cmDEM	実測値- 50cmTINDEM	実測値- Ground_TIN	実測値- 1mDEM
最大較差	0.620	0.697	0.288	0.204	0.279
最小較差	-0.640	-0.564	-0.569	-0.636	-1.071
平均值	0.002	-0.014	-0.015	-0.008	-0.343
標準偏差	0.174	0.197	0.138	0.108	0.258

図-8から実測値と3次元地形データの標高較差 は,60cm 程度の最大較差が発生しているが,全体的 に±10cm 程度に収まっている。検証地の斜面勾配 が約30°~40°で図-3や写真-2に示した植生状 況下であったにも関わらず航空レーザ計測の Ground TIN で作成された縦断標高は,実測に近い 標高値が取得された。なお1mDEM については,平均 値や最大較差,標準偏差で差分が拡大し,施工図と して使用する場合誤差が大きすぎる。



3.2 UAV 写真測量の精度に関する検証事例

UAV 精度は、GCP (Ground Control Point)の配置お よびGPS 精度、機体特性による強風などの影響を受 けやすい。当該箇所においては地形上の制約から 斜面中腹に GCP が不足する対策として上段土留盛 土工の完成後、UAV マニュアルに準じた内部検証点 および内部標定点(以下内部 GCP)を図-9 中央部に 無人化施工機で運搬・設置し、外部の2級基準点か ら TS 測量により座標値を取得し、UAV 計測の精度 向上と検証を実施した。



図-9 UAV計測期間とGCP2次~3次の配置図状況

UAV 計測における標高データの精度検証は, 土留 盛土工に設置した内部 GCP を SfM(Structure from Motion)解析に使用・未使用の 2 ケースで実施し, その結果を図-10, 11 の点群標高分布図で示した。 内部 GCP を使用しない場合(図-10) 標定点付近 での点群標高分布は、ターゲット・台座部・地表面 で30~11cmの範囲で実測標高と点群の平均標高と の較差が生じた。また、ターゲット上部で実測標高 と点群の標高較差が拡大したのは、ターゲットが 板状で地表約40cmの高さに設置した影響と想定さ れたことから、今期のUAV 計測では、台座上に直接 ターゲットを設置する計画とした。



図-10 標定点付近の点群分布状況(内部GCPなし) 内部 GCP を用いた点群分布は,前述のターゲット 形状の影響はあるが,台座や地表面で平均較差が 2cm 以内となり十分な効果が得られた。



図-11 標定点付近の点群分布状況(内部GCP有り)

表-5には、図-10、11で示された点群データの平 均値と実測値の較差をGCP使用・未使用2ケースの 各部で算出した結果を示した。なお、2017年6月2日 に実施した補足のUAV計測では、課題で有ったGCP ターゲットの位置を下げて実施したことから全方 向(x, y, z)で実測値との較差5cm以内となる結果が 得られた。

表-5 標定点付近点群データの標高較差(大分側)

内部GCP_検証箇所		点群_標高較差			
		最大値	最小値	平均值	標準偏差
GCP	ターゲット	0.502	0.158	0.298	0.112
未 使 用	ターゲット台座	0.215	-0.082	0.106	0.061
	土留盛土天端	0.181	0.004	0.097	0.034
^{GCP} 使用	ターゲット	0.356	0.007	0.161	0.096
	ターゲット台座	0.114	-0.261	-0.016	0.075
	土留盛土天端	0.091	-0.121	-0.019	0.035
較差(UAV-VRS実測)		計測日	Х	Y	Z
下	段土留盛土工中央	2017/6/2	-0.003	0.028	-0.044

3.3 航空レーザ及び UAV 計測の活用と較差検証

立入不可能な斜面安定化施工(ラウンディング) の進捗状況把握は、計画時に策定した測線(図-12) に基づき工事前後の航空レーザおよび UAV 計測の 3次元地形モデルから作成した断面図(図-13)によ り,施工進捗状況把握と掘削土量算出を実施した。

断面作成に使用した4時期計測データは,施工前 の5月14日撮影航空レーザ計測,8月30日撮影 UAV 第4回計測(熊笹伐採後), 10月27日撮影UAV 第5回計測(施工途中データ),1月6日撮影 UAV 第6回計測(施工完了後)を使用し、比較検証は工事 中央部側線 R-08 で実施した。



図-12 断面作成位置図

UAV 計測の2時期比較から,熊笹伐採後で工事用 道路の影響を受けない横断標高(第4~5回 UAV 計 測)データを用いL2区間30地点で標高較差比較を 表-6(頭部:③)に示した。比較の結果,2断面の標 高較差は平均値-2.2cm,標準偏差6.9cmで地図情報 レベル 500 以上と判断され, 航空レーザと UAV 計測 データの断面比較は,精度上問題ないことが確認 できた。



崩壊斜面頂部は、当初熊笹(図-3 参照)が密生し た状況で,航空レーザ計測データが,熊笹密生区間 の地表面を的確に捉えているか懸念された。熊笹 伐採後の2時期 UAV 標高較差が小さかったことを 踏まえ,航空レーザ計測と第4回UAV計測により作 成した横断(1mDEM で作成)から, 熊笹密集部の影響 を検証する目的で設定した L2 区間,30 地点で標高 値の差分を検証した結果,標高較差の平均値 21.1cm,標準偏差18.3cmとなり,データ接合の目安 として考えられる標準偏差25cm以下であった。



図-14 2時期横断標高格差分布状況

航空レーザとUAV 計測の標高格差は,表-6頭部① ②の2ケースで平均値が20cm程度で、図-14の較差 分布のバラツキが少ない。これら熊笹密集部では 航空レーザの Ground データ標高値が約 20cm 高く 取得された可能性があると思われる。

	衣⁻0 ∠时别做到惊向权左 見衣					
	2時期橫斷標高較差	最大值	最小值	平均值	標準偏差	
頭部	1: LP514-UAV830	0.415	-0.764	0.186	0.186	
	2: LP514-UAV1027	0.461	-0.653	0.211	0.183	
	3: UAV830-UAV1027	0.111	-0.196	-0.022	0.069	
斜面	@:LP514-UAV830	0.560	-0.250	0,120	0.220	

4. ガリー対策工に活用した地形データ特性 4.1計測手法で特性の異なる3次元地形モデル

図-15 に示した熊本側斜面頭部のガリーは、8 月 下旬の豪雨で拡大し落石発生の危険性が増加した

ことからガリー部の安定化施工を実施した。施工 に必要な地形データは,航空レーザ及びUAV計測の DEM から横断図(図-16) を作成した。



図-15 ガリー変遷状況(3時期オルソ図)

UAV 地形モデルは、裸地部以外は植生影響を受け る数値表層モデル(DSM: Digital Surface Model)であ ることから図-16上段の横断に示したように裸地 である崩壊部以外のデータを重ね合わせても差分 解析は出来ない。

4.2 データ接合時の課題について

図-16上段に3時期のDEMデータから作成した NO.5地点での重ね断面を示した。UAV計測データ から作成された2時期断面は植生の影響が確認さ れるため,航空レーザ横断高さ以上となる矢印上 面部は樹木部として削除した。



図-16 3時期ガリー代表横断図

図-17 は UAV で斜め撮影した写真を 3D モデル化 したガリー対策施工前後 2 時期を, PC の画面上で ガリー対策状況が解り易いアングルで切り取った 画像に, 図-16 の下段 NO.5 断面を重ねて表示した もので, 左図の中央及び端部において植生の影響 を受けている状況が確認される。



図-17 2 時期 UAV 斜め撮影写真 3D モデル

これらの斜め写真3D画像は,市販の画像解析ソフトを用いて作成した。

5. まとめ

本論文では、大規模な崩壊斜面において航空レ ーザ計測及びUAV計測を6回(補足1回)実施し、ラ ウンディングおよびガリー等の対策施設検討に必 要な地形データの精度検証を踏まえた活用など得 られた知見を以下に整理した。

(1)地図情報レベル500で撮影した航空レーザ計測 は植生部(杉,下草有り)の影響が小さく斜面安定 化施工や工事用道路の設計施工の使用精度が十分 確保された。3 次元地形モデルでは DEM 等メッシュ サイズ 50cm 以下であれば,実測縦断 1km 区間の標 高較差が平均値 2cm 以下,標準偏差は 10cm~20cm オーダーで有ったことから,設計施工上で使用で きる精度が確保されていた。同じ点群データを用 いた 1mDEM では,標高較差の平均値が 34.3cm,標準 偏差 25.8cm と設計に用いるには誤差が大きくなる。 (2) UAV 計測精度は,UAV マニュアルに準じて GCP を 配置したケースにおいて,GCP 設置高や形状に起因 した標高精度への影響が確認された。GCP 位置を地 表面付近に設置したケースでは,全方向(x,y,z)で 実測値との較差 5cm 以内で計測された。

(3) 斜面頭部の密集した熊笹部において, 地図情報 レベル 500 の航空レーザ計測と熊笹伐採後の UAV 計測 3 次元地形モデルによる標高較差は,約 20cm 程度あることが確認された。

(4) UAV 計測による 3D 地形モデルは,測量成果とし ての活用以外に,現地調査不可能な立入禁止区域 の状況確認や位置情報の把握などが可能で,斜め 撮影による 3D 地形モデルでは、オーバーハング部 やガリー内部の地形把握も確認できた。

謝辞

阿蘇大橋地区復旧技術検討会(委員長北園芳人, 熊本大学名誉教授)ならびに阿蘇大橋地区斜面防 災対策施工検討委員会(委員長笹原克夫,高知大学 大学院教授)の委員の皆様にはご指導・ご助言を頂 きました。また エンルート(株),アミューズワン セルフ(株)にはUAV計測にてご協力を頂きました。 この場を借りて厚く御礼を申し上げます。

参考文献

1)国土交通省九州地方整備局熊本地震情報,阿蘇大橋地区 復旧技術検討会資料(概要版),公開サイト

http://www.qsr.mlit.go.jp/n-topics/h28/160520/data/shiry ou3

2)向山栄・佐藤匠・高見智之・西村智博:日本応用地質学 会、熊本・大分地震災害調査団 調査報告速報版 その2、2 時期の航空レーザ測量地形データ解析による平成28年 3)小野寺・堀川・島田他:砂防学会、阿蘇大橋地区斜面防 災対策工事の取り組み(その3),pp306~307,2017

4)国土交通省中部地方整備局(建設ICT導入普及研究 会): ICTバックホウの情報化施工管理要領(案)

http://www.cbr.mlit.go.jp/kensetsu-ict/ict-proposal.html 5)政野敦・堀川毅信・鳥田英司他:応用測量論文集、航空 レーザ測量及びUAVを併用した斜面災害対応の活用事例 JAST Vol.28, pp149~158,2017

6)国土地理院(2016): UAV による公共測量, 公開サイト, http://psgsv2.gsi.go.jp/koukyou/public/uav/

7)国際航業ホームページ【速報】平成 28 年(2016 年)熊本 地震 2016 年 4 月 ELSAMAP 阿蘇大橋,公開サイト http://www.kkc.co.jp/service/bousai/csr/disaster/201604_ kumamoto/