

ドローンを用いた岩盤斜面観測システムの  
測定精度とその適用\*尾原 祐三<sup>1</sup> 吉 永 徹<sup>2</sup> 濱 地 亮<sup>3</sup>Measurement Accuracy and Case Studies of Monitoring System  
for Rock Slope Using Droneby Yuzo OBARA<sup>a\*</sup>, Toru YOSHINAGA<sup>b</sup> and Makoto HAMACHI<sup>c</sup>

- a. Faculty of Advanced Science and Technology, Kumamoto University  
(Corresponding author, E-mail: obara@kumamoto-u.ac.jp)  
b. Faculty of Engineering, Kumamoto University  
c. IDEA Consultants, Inc.

This paper described the use of a drone in collecting data and analyzing images for monitoring of rock slope. The drone consists of four electric rotors and equips with 4K camera. Firstly, the fundamental experiments were performed by the developed monitoring system with the drone. A measurement accuracy was discussed for method of collecting and using image data. As the results, it is made clear for obtaining a high measurement accuracy that the distance between slope surface and drone is less than 20m for collecting data, and that the overlap of images is 80%, and that GPS data and coordinates of GCP (Ground Control Point) are used in analyzing images. After that, the system was applied to rock slope of an open pit mine and a quarry. The three dimensional model can be constructed with a high accuracy. Furthermore, the change of shape of rock slope can be estimated with the lapse of time. Basing on these results, it is concluded that the developed system is very effective for monitoring rock slope.

**KEY WORDS:** Drone, Rock Slope, Monitoring, Measurement Accuracy

## 1. 諸 言

日本各地に存在する石灰石鉱山では、生産性向上のために採掘の大規模化が進み、高さ 500m、幅 1000m を越えるような長大斜面が形成されつつある。このような斜面が崩壊した場合、環境に与える影響の重大性を考慮すると、岩盤斜面の変位計測、監視技術、斜面の安定性評価法の確立が重大な課題となっている。

現在、日本で多く稼働している露天掘りの石灰石鉱山で実施されている計測において、目的、項目、要求などについてまとめると Table 1<sup>1, 2)</sup> のようである。計測目的を安全確保、鉱山管理、環境対策に大区分し、それぞれの項目についての概要をまとめている。

まず、安全確保における項目としては、落石の有無や落石箇所の分布、斜面変形、不連続面の幾何形状などが挙げられる。落石の有無や落石箇所の分布の観察においては、現地踏査や写真撮影による確認が行われている。斜面の変位測定は、点の変位情報として GPS (Global Positioning System)<sup>3)</sup>、APS (Automated Polar System)<sup>4)</sup>、線の変位情報として岩盤変位計<sup>5)</sup>、面の情報として 3 次元レーザスキャナ<sup>6)</sup> などによって行われている。不連続面の幾何形状の確認は、現地踏査や写真測量に頼っている。

つぎに、鉱山管理の項目としては、ピットや斜面の形状把握、

採掘量の算出などがある。ピットや斜面の形状把握においては地形測量、航空測量が行われ、これらの座標データを CAD を用いて管理している。採掘量の評価としては、トラック台数やベルトコンベアを用いた計量が行われるとともに、定期的な測量データに基づいて CAD によってその期間の総量として評価されている。

最後に、環境対策の項目としては、緑化の確認があげられ、目視点検や写真撮影によって確認されている。

現在、Table 1 の全ての項目を測定するために、それぞれの項目で異なる計測方法が用いられ、多くの種類の計測機材が用意されている。また、測定の際には担当者が現地で計測を行っている。さらに、長期間にわたって計測する機材では、機材に蓄えられた計測データの回収を担当者が行っており、多くの労力が払われている。このように、日々長大化する斜面を観測しながら安全性を確保するには限界があるため、遠隔からの計測が可能で、鉱山全体を面として測定できる観測システムの構築が望まれている。

このため、UAV (Unmanned Aerial Vehicle, 無人航空機) の 1 つであるドローンを導入した露天掘りによる岩盤斜面の観測システムの構築を試みた。ドローンは人の移動なく遠隔より操作ができ、搭載カメラによる撮影画像を用いて面としての写真測量ができるので、上記の課題解決が可能と考えられる。

そこで本研究では、まず、構築した観測システムに用いたドローンの仕様、撮影方法、撮影画像のからの 3 次元再構成、データの作成方法などについて述べる。つぎに、システムを用いた基礎実験を実施し、測定精度を検討する。最後に、石灰石鉱山と阿蘇地方の採石場の斜面に本システムを適用した計測例を示し、構築した観測システムの有効性を示す。

\*2018 年 7 月 23 日受付 2018 年 10 月 28 日受理

1. 正会員 熊本大学 大学院先端科学研究部

2. 正会員 熊本大学 工学部

3. いであ株式会社 東北支店 水圏部

【著者連絡先】FAX: 096-342-3686

E-mail: obara@kumamoto-u.ac.jp

キーワード: ドローン, 岩盤斜面, 観測システム, 測定精度

Table 1 Field measurement method in open-pit mine of limestone and relation in this study.

No.	Aim	Item	State	Required accuracy and scale	Measurement method	This study
①	Securing safety	Fallen rock	Point, Surface	Several cm to several m	Field survey	• Red relief image map <sup>7)</sup>
②		Distribution of fallen rock	Surface			• Difference of orthophotos
③		Deformation of slope surface	Point, Surface	More than / month: 5~50mm / 5day in caution: devise a countermeasure  Accuracy: 0.01mm	GPS <sup>3)</sup> APS <sup>4)</sup> Multiple-point borehole expensometer <sup>5)</sup>	• Difference of orthophotos
④		Geometry of discontinuity	Line	10~20m: high persistence 3~10m: medium persistence 1~3m: low persistence	Photo Field survey	• Red relief image map
⑤	Management	Geometry of open-pit	2D	Ex) Slope of T Mine Height: 500m, Width: 1km, Length: 2km Height of bench: less than 15m Width of bench: 5m Area of working face: 1,400,000m <sup>2</sup>	Topographical survey Aerial survey Laser survey <sup>6)</sup>	• Image overlap of orthophoto and CAD data
⑥			3D			• Red relief image map
⑦		Production quantity	Volume	1.297million tones / year: 1.316m <sup>3</sup> /day	Estimation by conveyor belt or dump truck	• CAD from DEM data
⑧	Environment	Planting	Area	-	Photo Field survey	• Orthophotos

## 2. 岩盤斜面観測システム

### 2・1 概要

カナダや中国のメーカーが世界に向けて多くのドローンの販売を行っている。一方、日本においても、市場規模の大きな農業散布、インフラ点検、降雨時現場点検などの目的でドローンの導入が急速に始まっている。最近では、地方創生特区においてドローン実証試験などが行われており、ますますドローンの利用が加速されると考えられる<sup>8)</sup>。しかし、露天掘り斜面においては、観測する斜面の範囲が広大で、ドローンが撮影する画像からの抽出項目が明確でなく、また抽出したとしてもその安全監視への利用方法は確立されていないが、最近徐々に検討されてきている。例えば、Xiao らは、採掘中の斜面の画像をドローンで撮影し、動画から切り出した画像を用いて3次元画像を構成し、採掘時の異なった段階での斜面の安定性を検討している<sup>9)</sup>。Rossi らは、地すべり地帯をドローンによって約1年間で3回の計測を行い、2cm/pixel のDEMデータを用いて、大きく変形している領域やその断面形状の変化を報告している<sup>10)</sup>。Esposito らは、鉱山において2種類の無人航空機を使って約2年間の採掘体積を間隔50cmのDEMデータを用いて評価している<sup>11)</sup>。また、Salvini らは、イタリアのカッカーラの大石切り場のドローンによる撮影により、斜面表面で観測された不連続面のマッピングを行っている<sup>12)</sup>。落石に関しては、座標が既知の地上の点であるGCP (Ground Control Point) の影響を考慮して、落石した断面の測定精度について検討したり<sup>13)</sup>、斜面上の浮石の安定性などを検討した報告がある<sup>14)</sup>。

本研究で構築しようとする岩盤斜面観測システムは、Fig. 1に示すようにカメラを搭載したドローンを図中の番号0~8~0へ移動するような所定の経路で飛ばし、所定の場所で所定方向の画像を撮影するというものである。撮影から画像処理までのフローをFig. 2に示す。飛行後に回収した撮影画像をもとに、市販のソフトウェアを用いて3次元モデルを作成し、その情報を分析に必要なデータ形式に出力する。つぎに、それを用いてTable 1に示したような項目を分析する。このようなシステムを用いると、ピット内での人の移動なく、必要なデータを簡単、安全、迅速に取得することが可能となる。

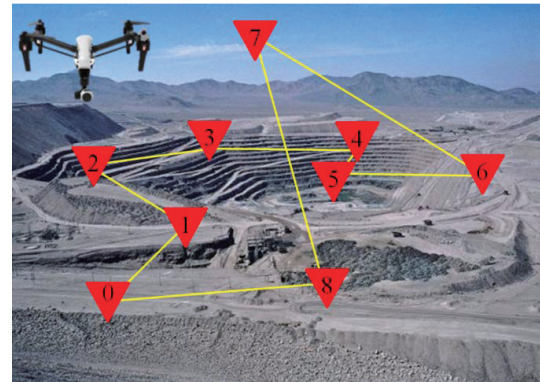


Fig.1 Outline of monitoring system for rock slope using drone.

### 2・2 ドローン

空中撮影には、Fig. 3示したDJI社製UAVのInspire1を使用した。なお、その諸元をTable 2に示す。本撮影に使用した機種のようなマルチローター方式のUAVは、自動車等で機体の運搬がしやすく、離発着に広い敷地は不要、低コストで高頻度に空中撮影が可能、4K動画の撮影可能な高解像度カメラを搭載しているなど運用性が高い。動力は電気モーター式であり、エンジン式のUAVと比べて相対的にメンテナンスが容易であり、導入コストも低いため、様々な空撮場面で活用が進んでいる。しかし、飛行速度や飛行距離に関するバッテリーの容量の点から範囲撮影には限界がある。

本研究におけるドローンによる空中撮影は自動航行ではなく、Fig. 3に示すコントローラーを用いてマニュアルで2名のオペレーターで行う。1名がマルチコプターを操縦し、1名がカメラの操作を行う。撮影中のカメラ映像は、コントローラーに装着されたタブレット端末で確認することができる。

用いた撮影画像は2種類ある。一つは4Kの静止画像であり、もう一つは4Kの動画から動画編集ソフトウェア、例えばAdobe Premiereを用いて切り出した画像である。なお、切り出し時には画像圧縮を行わないよう設定した。撮影条件は、最大可能解像度、ISOは100とし、撮影では現地の環境に適合するよう、絞り値は可能な限り高く、シャッタースピードは飛行速度を考慮し

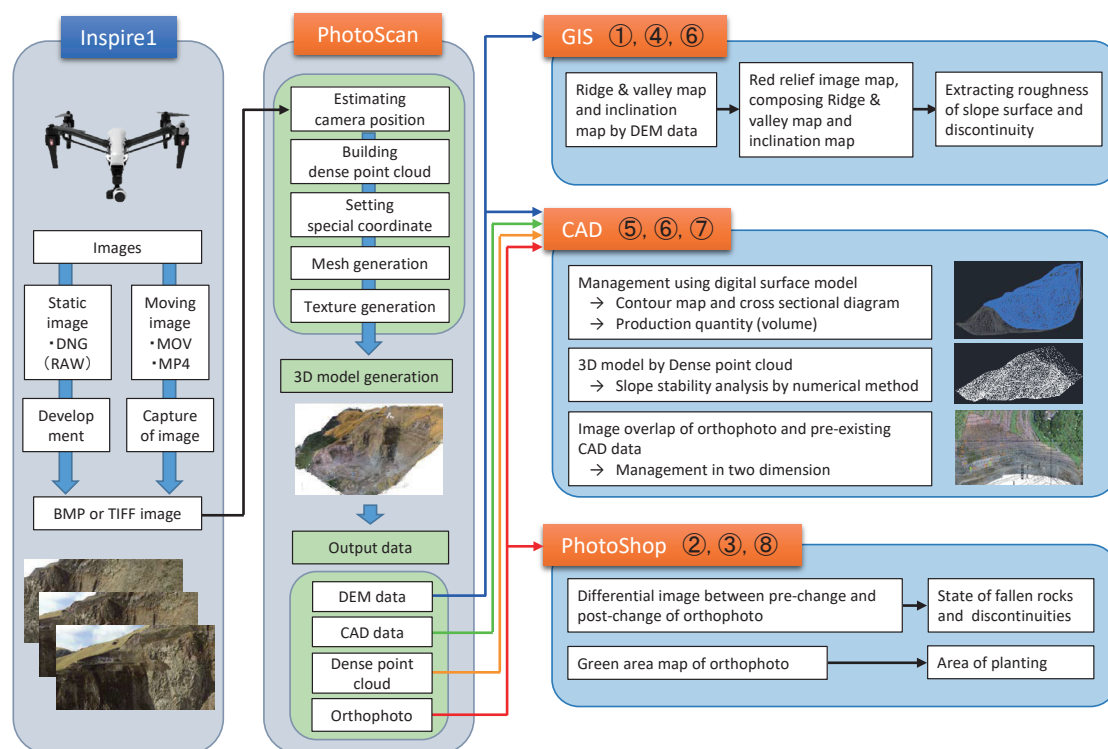


Fig.2 Image processing flow of the monitoring system for rock slope using drone.  
(Numbers correspond to those in Table 1)



Fig.3 Drone used in this study.  
(revise figure in <http://www.sekido-rc.com/>)

で設定した。この条件は静止画、動画のどちらの場合も同様である。

撮影後、これらの画像データをコンピュータに移動して次節に示す市販のソフトウェアを用いて解析することになる。画像データをコンピュータへ移動するときに、動画、静止画、不良データの判断を行う必要があるが、データ量が多いためこの操作が煩雑となる。このため、画像ファイルやフォルダーを整理しながらスムーズに移動が可能で、かつ、不良データを修復できるソフトウェアを製作し、システムに導入した。

### 2・3 次元モデルおよびデータの作成

一般的に、撮影画像の解析には多視点幾何による撮影位置の推定と三次元形状の復元 (SfM: Structure from Motion)<sup>15)</sup>の技術を利用したソフトウェアが使用され、撮影された複数画像を用いて3次元モデルが構築される<sup>16-18)</sup>。このモデルをもとに、DEMデータ (DEM: Digital Elevation Model)、オルソフォト (ひずみの無い正投影画像)、CADデータ、点群データなどを作成するこ

Table 2 Specifications of drone and camera.

Drone (Inspire1)	
Item	
Size	438mm×451mm×301mm
Wight	3400g
Hovering Accuracy (GPS mode)	Vertical : ±0.5m Horizontal : ±2.5m
Max flight time	25minutes
Operation range	2.0km
Max service ceiling	4500m
Max wind speed resistance	10m/s
Operating temperature range	-10~40°C

Camera	
Item	
Image maximum size	4000×3000 pixels
Field of view	Vertical : 94 degrees Horizontal : 62 degrees
Video recording mode	4K : 4096×2160 pixels

とができる。

本研究での SfM ソフトウェアには Agisoft 社の PhotoScan Professional Edition を用いた。また、Inspire1 に搭載されているカメラは絞り F/2.8 の広角レンズを採用しており、撮影画像にレンズによるひずみが確認されたため、PhotoScan 付属のソフトウェア AgisoftLens を用いてひずみ校正用パラメータを求め、得られたパラメータを用いて全ての画像にひずみ校正を行った。他のカメラを用いたときにもこの操作でレンズのひずみ校正が可能である。

PhotoScan を用いた SfM での処理において、3次元モデルの地理空間座標の設定に用いる位置情報は2種類ある。1つは、画像のメタデータを含む Exif (Exchangeable image file format) ファイルに記録されている GPS 情報であり、もう1つは、座標が既知の地上の点である GCP の位置情報である。これらによって3次元



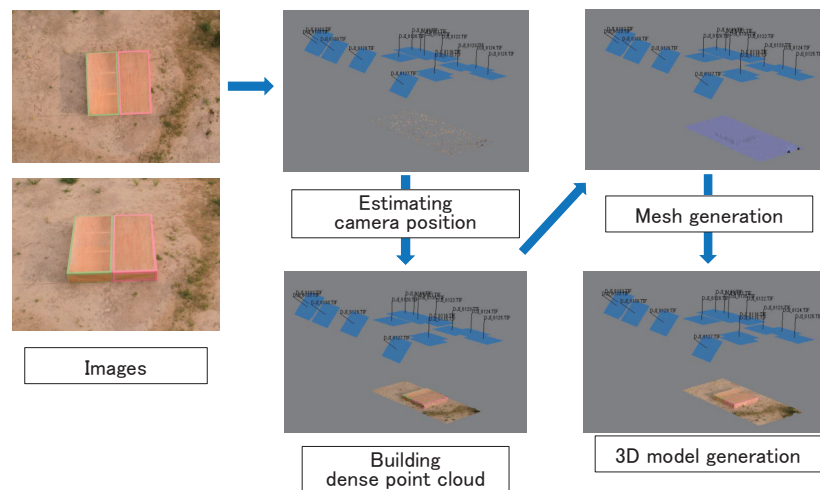


Fig.4 Flow up to 3D model generation.

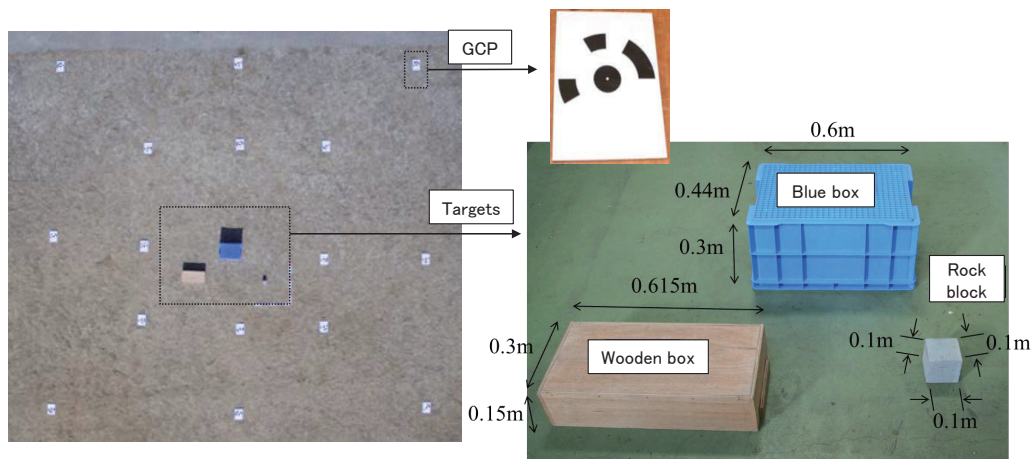


Fig.5 Targets and ground control point (GCP) around them.

モデルに地理空間座標が設定され、Fig. 4 の青色の四角で示されるように、画像の撮影位置を推定し、高密度点群データを作成し、つぎにメッシュを作成して、最後に3次元モデルが作成される。モデルが完成すると以下に示すような様々なデータ形式に出力することができる。

a) DEM データの出力 (Geo TIFF, Arc/Info ASCII Grid (ASC), Band Interleaved by Line (BIL), XYZ file format, Sputnik KMZ 他)

地表面を等間隔の正方形に区切り、それぞれの正方形のほぼ中心点に標高値を持たせた DEM データとして tif 形式などで出力する。

b) オルソフォトの出力 (JPEG, PNG, TIFF, Geo TIFF, Google Earth KMLmosaic 他)

レンズの中心から対象物までの距離の違いにより、作成した3次元画像にひずみが生じる。画像の周縁部ほど、このひずみは大きくなる。このひずみをなくし、真上から見たような傾きのない画像、オルソフォトに変換して出力する。なお、画像には位置情報が付与されている。

c) CAD データの出力 (STL models, Autodesk FBX, Autodesk DXF, 3DS, Google Earth KMZ 他)

設計や製図を行うために CAD で使用可能な AutoDesk によって開発された交換用の dxf ファイル形式などで出力する。なお、大容量のデータを扱う場合は、txt ファイルで出力し、それを CAD ソフトウェアで読み込むと効率的である。

d) 点群データの出力 (XYZ text file format 他)

3次元モデル作成時に高密度点群データ各点の3次元座標を txt ファイル形式で出力する。これによって様々なソフトウェア上で3次元モデルの再構成が可能となる。

### 3. 基礎実験<sup>19)</sup>

#### 3・1 概要

撮影条件や用いるデータが測定精度に及ぼす影響を検証するために基礎実験を行った。Fig. 5 に示すように、対象物の周囲に10m 四方内に8点、5m 四方に8点となるように計16点のGCPを設置し、カメラ角度は鉛直に地面を向くように設定して撮影を行った。対象物は木箱、プラスチック製の青箱、岩石であり、それらの寸法を Fig. 5 に示す。撮影した画像の選択により、横方向の重複率が60%,70%,80%と変更可能になるように約115枚の撮影画像を用いて解析を行った。なお、GCPは外径9cmの変則的な形とした。

実施した基礎実験は以下のようなものである。

① GCP 数と重複率：撮影高度を10mとし、3次元モデル作成時に画像の位置情報として地上の点のGCPの位置データを使用し、画像の重複率を変更した。なお、重複率とは、ドローンの進行方向に対して隣り合う画像の重複の割合である。ここで、GCPの位置情報を用いて作成したモデルを「BMPモデル」と呼ぶ。

② GPS データを持つ画像による重複率：撮影高度を 10m とし、3 次元モデル作成時に画像の位置情報として Exif ファイル内の GPS データを使用し、画像の重複率を変化させるように切り取る画像を変更した。なお、Exif ファイルの GPS 情報を用いて作成したモデルを「TIF モデル」と呼び、GCP のデータは用いていない。

③ 撮影高度：両モデルの重複率を 80% とし、BMP モデルでは GCP を 16 個用いて、飛行高度を 10m, 15m, 20m と変更した。

### 3・2 実験結果と考察

対象物は、木箱、岩石とし、それぞれを木箱、岩石と呼ぶ。なお、青箱も対象としたが画像から構成した 3 次元モデルではこの形状が再現されていないことが判明した。これは、青箱上面の格子状の立体的模様が影響したためと考えられ、ここでは木箱と岩石についてのみ評価を行った。

対象物の高さ、水平方向の精度は、GIS ソフトを使用し、DEM データにより断面図を Fig. 6 のように描いた。対象物上面の高さ平均と周辺地面の高さ平均の差を対象物の高さとした。また、側面の傾きを傾斜とし、傾斜の逆数より側面の精度とした。すなわち、この値が小さく側面は精度よくモデル化されていると言える。

#### (1) BMP モデルにおける重複率と GCP 数が精度に及ぼす影響

BMP モデルにおける重複率と岩石と木箱の傾斜の逆数の関係を Fig. 7 に示す。Fig. 7 (a) の岩石では、重複率によらず GCP 数が 6 点以上でその値がばらつきはあるもののほぼ一定の値をとる傾向が見られた。一方、Fig. 7 (b) の木箱モデルを見ると、GCP 数の増加による傾き逆数の変化量が少なく、GCP 数が 6 点以上でその値がほぼ一定となる傾向が見られた。また、岩石では見ら

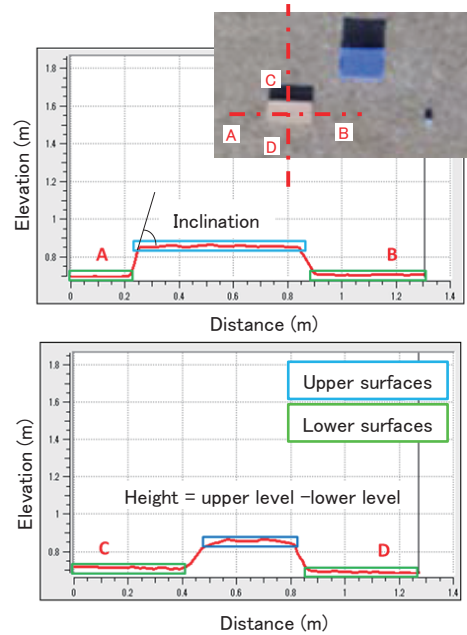


Fig.6 Definition of height and inclination of targets.

れなかった重複率の増加に伴い傾き逆数の値が小さくなるという傾向も見られた。

つぎに、BMP モデルにおける重複率と岩石と木箱の高さの関係を Fig. 8 に示す。Fig. 8 (a) に示した岩石では、GCP 数によっ

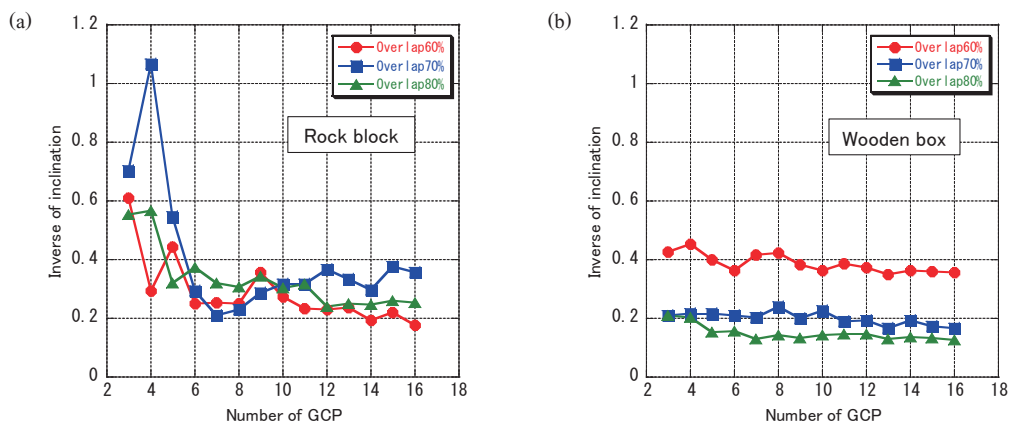


Fig.7 Relations between number of GCP and inverse of inclination in BMP model.

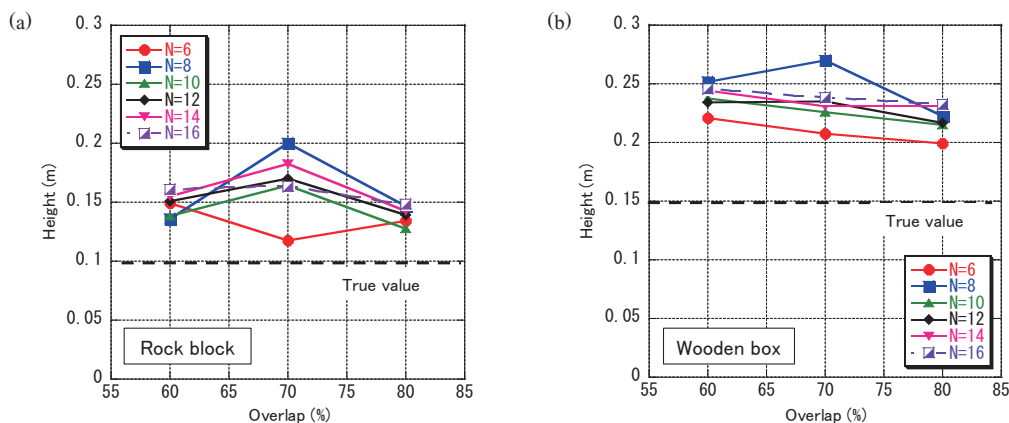


Fig.8 Relations between overlap and height in BMP model.

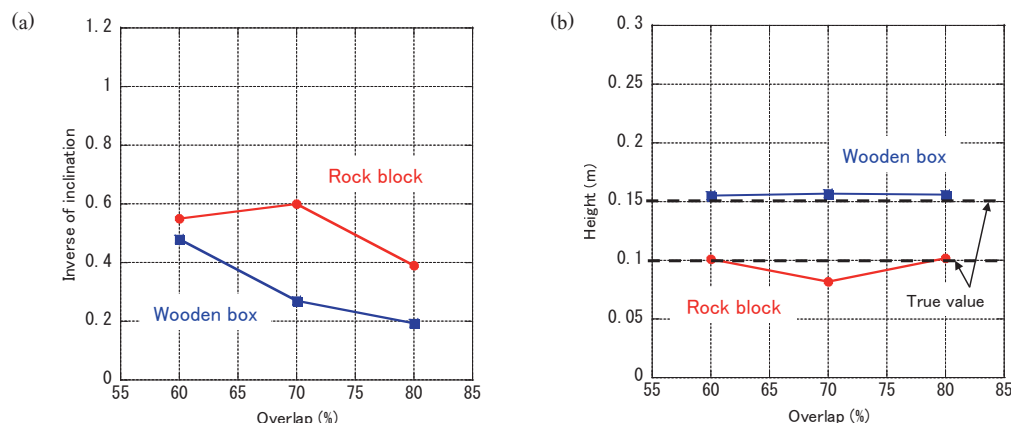


Fig.9 Relations between overlap and inverse of inclination, height in TIF model.

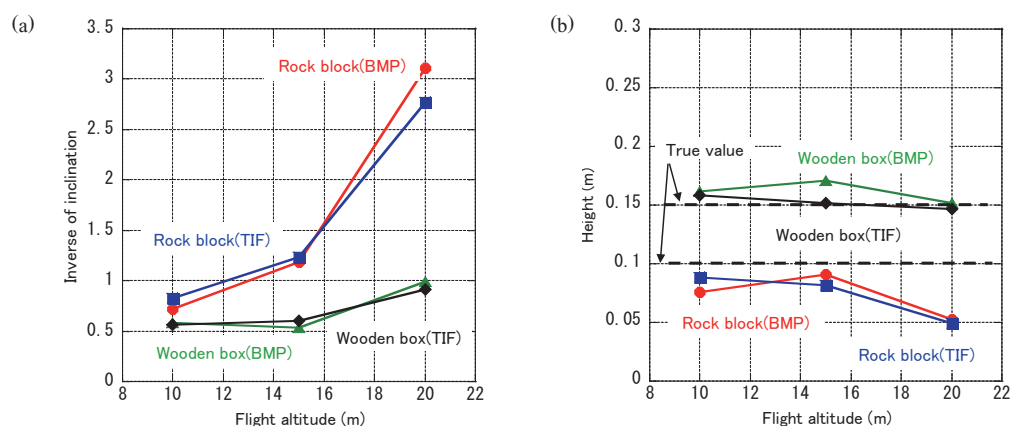


Fig.10 Relations between flight altitude and inverse of inclination, height in BMP and TIF model.

てばらつきはあるものの平均的にはほぼ一定値を示した。高さの真値は 10cm であるが、モデルでは約 15cm と評価された。一方、Fig. 8 (b) の木箱においても岩石と同様にばらつきが、重複率が大きくなると減少している。しかし、高さの真値は 15cm であるが、平均的には約 22cm の評価となった。

## (2) TIF モデルにおける GPS データと重複率が精度に及ぼす影響

TIF モデルにおける重複率と岩石と木箱の傾斜の逆数および高さとの関係を Fig. 9 に示す。Fig. 9 (a) の傾斜の逆数は、重複率が 60% から増大すると傾きは減少し、精度が上昇している。Fig. 9 (b) の高さにおいては、重複率に拘わらず、ほぼ一定の値を示し、それらの平均値は、岩石で約 9cm、木箱で約 16cm となり、真値に近い値を評価している。

## (3) 飛行高度が精度に及ぼす影響

両モデルにおける飛行高度（対象物までの距離）と岩石と木箱の傾斜の逆数および高さとの関係を Fig. 10 に示す。このとき、BMP モデルについては、重複率 80%、GCP16 個の条件での結果をプロットしている。Fig. 10 (a) の傾斜の逆数において、岩石と木箱ともに、飛行高度が高くなるとともに傾き逆数は大きくなり、実測値との誤差も大きくなるという傾向が見受けられる。Fig. 10 (b) の高さにおいては、実測値との誤差は両モデルにおいてほとんど見られなかった。このことから、対象物が木箱程度の大きさがあれば、高度が 20m 程度 (0.015m/1pixel) の画像を用いて精度よく 3 次元モデルの作成が可能であることがわかった。

上記の結果を総合すると、露天掘り斜面になるべく近づき、20m 以下の距離で撮影し、4K 動画による撮影と GPS 情報を含む

静止画を併用し、重複率は約 80% 程度の画像を用い、地上に置かれた GCP の情報を使うことで、最も効率よく、かつ、測定精度を著しく下げることなく、斜面形状の 3 次元モデルの構成が可能であることが明らかとなった。

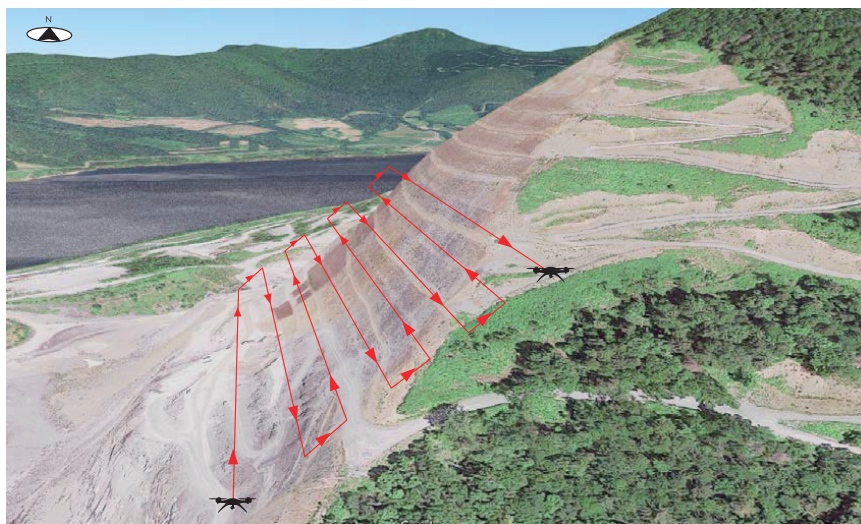
なお、今回の実験のように 10m 四方の範囲において対象物の高さを 5 cm 以内の測定誤差にしたい場合は、Fig. 9 や 10 に示したように上記の条件で十分と考えられる。しかし、さらに精度を上げたい場合には、数 m の高さで航行して画像を撮影することによって対応が可能である。この場合、使用する画像数も増加し、解析のための時間や PC の記憶容量も増大する。このため、本格測量の前に試験航行を行って必要な精度が得られるような撮影条件を把握しておくことが重要と考えられる。このように対象とする測定範囲と解析に必要な労力を考慮して測定精度が決定されることが考えられる。

## 4. 適用例

### 4・1 石灰石鉱山への適用

対象とした斜面は高さ約 200m、幅約 300m である。この斜面の撮影のために飛行経路のイメージを Fig. 11 に示す。斜面は撮影領域が広大であり、全域を静止画で撮影するには、多大な労力と時間を要するため、動画による撮影を行った。撮影は、2 名の技術者がマニュアルにより行った。撮影においては、動画に GPS による位置情報がないため、高度を保ったまま水平に飛行させドローンが撮影領域の一端にきたときに動画を止め、GPS 情報が含まれる静止画の撮影を行った。その後、高度を 10m 程





出典：Google Map

Fig.11 Flight paths of drone.

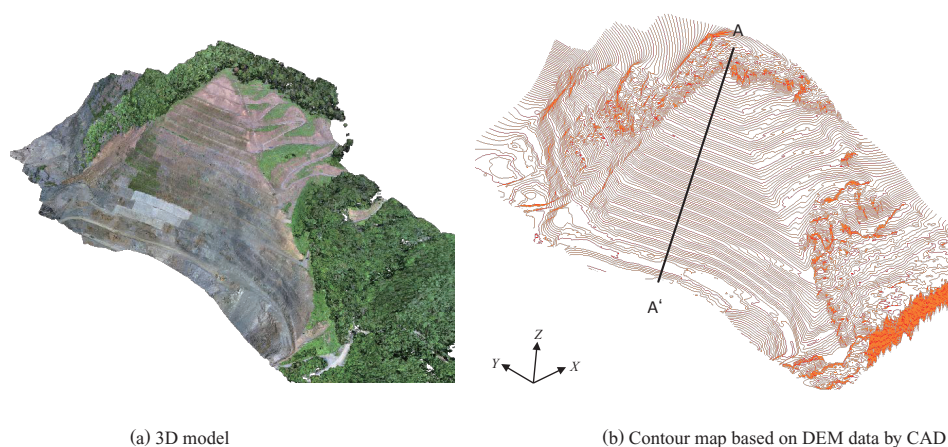


Fig.12 3D model and contour map.

度上げて反対方向に水平に飛行させ動画撮影を行った。この操作を繰り返しながら下部から上部に移動し撮影を行った。ここで、撮影対象の残壁に対してドローンの空撮位置の決定には切羽のベンチを利用し、5ベンチ分が常に撮影画像に収まるよう対地高度を保持しながら水平飛行を行った。この結果、斜面表面に対しての空撮位置を、残壁上部で約 50m、残壁下部で約 75m の距離を保ちながら空撮を実施した。また、垂直方向への移動量は、取得する画像間の垂直方向への重複率 80% を満たすため、1 ベンチ分の垂直移動を移動量 20% の目安とした。上述した高度 10m 程の移動は、およそ 1 ベンチの高さに相当する。

撮影後、切り出した動画、任意の点での静止画および GCP を併用し、PhotoScan によって残壁上部、残壁下部の 3 次元モデルをそれぞれ構築し、最後に全てのモデルをマージし、本計測範囲の全域モデルを再構築した。このとき使用した画像は約 750 枚、GCP は 10 点、点群数は 4300 万点となった。また、3 次元モデルを GCP とともに示すと Fig. 12 (a) のようである。また、DEM データを用いて CAD 上で等高線を描くと Fig. 12 (b) のようであり、ベンチ成形などは設計通り実施されていることが判読できる。

Fig. 12 (b) 中に引かれた実線の断面図を Fig. 13 に示す。これは、鉱山で実施している測量による断面図に、DEM データによる断面図を標高 590m の値を一致させて重ねて描いたものである。

下部に行くほど両者の差は大きくなるが、その差は顕著ではない。得られた 3 次元モデルでの GCP における各座標成分の平均平方二乗誤差 (Root mean squared error: RMSE) の平均値を図中の表に示している。最も大きな誤差は Y 方向で 35cm であった。この程度の誤差を持つ測量は地形図や断面図を描く場合や掘削量を評価するには許容できる範囲と考えられる。また、この値は斜面周辺の植生の影響も含んでいるためこのような値になったと考えられるが、植物を含む画像を解析の中から取り除くことができれば、さらに精度が向上すると考えられる。

#### 4・2 採石場への適用

熊本県阿蘇市の採石場 (以下、採石場) に本システムを適用した。撮影は、2016 年 2 月、6 月、12 月に実施し、採石場の安全性確保の目的でモニタリングを行った。また、2016 年 4 月 16 日に発生した最大震度 7 の熊本地震の影響で、採石場でも大規模崩壊が発生した。そこで、本研究では、採石場のモニタリングを行うと同時に、熊本地震で採石場が被害を受けた箇所被害状況の把握も目的に岩盤斜面観測システムを適用した。

採石場での撮影領域は、斜面に対して幅約 300m、高さ約 200m である。撮影は、前例と同様 2 名の技術者がマニュアルにより、採石場が昼休憩の重機が作業していない 12 時から 13 時の時間帯に行った。採石場の対象エリアの下半分と上半分にわけて二日間かけて撮影し、実時間 2 時間で完了した。撮影では、高度

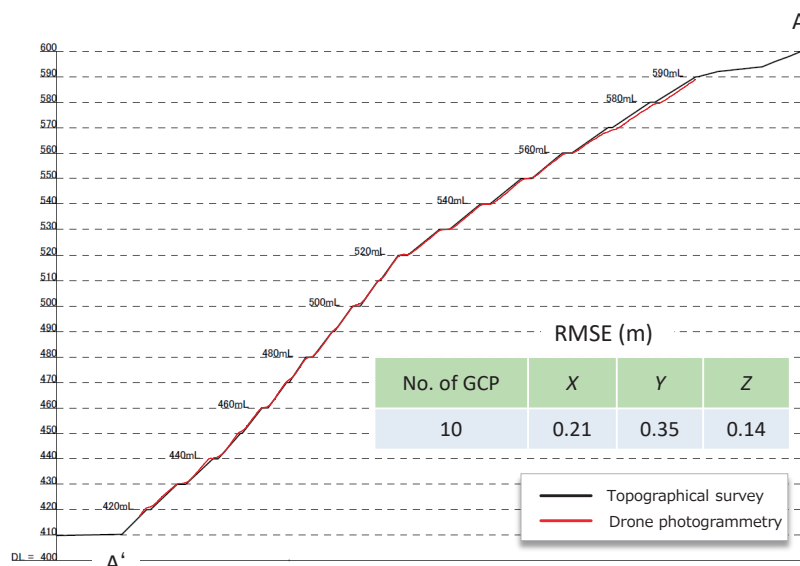


Fig.13 Comparison of shapes from drone photogrammetry and conventional topographical survey in cross section of slope A-A' in Fig.12, and root mean squared error (RMSE) in each direction.

を保ったまま水平に飛行させドローンが撮影領域の一端にきたときに動画を止め、GPS 情報が含まれている静止画の撮影を行った。その後、高度を 5m 下げて反対方向に水平に飛行させ動画撮影を行った。この操作を繰り返ししながら上部から下部に移動しながら撮影を行った。このように撮影をマニュアルで行っているため、撮影高度は 3 回の測定で異なっている。2 月の撮影では、斜面表面に最も近寄れた位置では 10 m、最も離れて撮影した場所でも 70 ~ 80m であった。一方、6 月、12 月のモデルは斜面表面から 20 ~ 30m で撮影し、それに加え 80m 程度離れた距離から全体をとらえた画像を撮影し、画像解析に使用した。得られた動画より非圧縮な静止画を切り出し、これらと撮影した静止画を併用して 3 次元モデルを作成した。

モデル作成には重複率が鉛直方向に 60%、水平方向 80% になるように動画を切り出した。この結果、Fig. 14 の右上の表に示すように、作成に用いた画像の枚数は約 650 ~ 690 枚となった。この場合、用いたワークステーション (CPU : Intel Xeon E5-1650 v3 (3. 50GHz), Memory : 64GB, GPU : NVIDIA GeForce GTX TITAN X) での photoscan の作業時間は点群データ作成までに 10 ~ 13 時間を要した。また、点群数は 100 万 ~ 120 万点となった。点群数は画像の枚数に依存せず、撮影位置と対象物との距離、撮影時の天候、時間帯による陰影などに影響され、photoscan 上で認識しやすい画像を使用すると、多くのタイポイント (photoscan で点群を作成する時、複数の画像から検出した同じポイント) を検出し、点群数が増大することがわかった。

2016 年 2 月、6 月、12 月における 3 次元モデルは Fig. 14 のようである。モデル領域は横 300m、縦 200m である。2 月のモデルをみると、斜面は南東向きであるため、斜面表面は明るく表示されているが、画像中央付近にあるオープンシュートで削られたくぼみや左側 (西側) には影が見られる。また、右側 (東側) の斜面に凹凸が見られ、斜面表面は張り出していることがわかる。つぎに 6 月のモデルとみると、斜面上部に雑草が分布しており、東側斜面表面は 2 月のそれに比較してなめらかで、斜面脚部に盛り上がりが見えてくる。これら 2 回の撮影の間で熊本地震が発生し、東側斜面が崩壊した。このため、東側斜面の様子に違いが表れている。つぎに 12 月のモデルとみると、東側斜面の盛り上がりは消滅している。6 月のモデルにおけるこの盛り上がりは崩壊

後のずりであり、12 月までの期間中に骨材として搬出されたため消滅した。また、地震後も操作は行われており、西側斜面の形状が変化している様子が読み取れる。

3 つの 3 次元モデルから崩壊や操業による体積変化を評価した。体積の算出では、点群データを dxf 形式で出力し、そのデータを CAD に読み込み、CAD 上で評価を行った。このとき、座標系は平面直角座標系 JGD2000/Japan Plane RectangularCS2 を使用した。読み込んだ点群で作成した表面モデルを作成し、2 月の表面を基準表面として 6 月、12 月の表面をそれぞれ比較し差分量として算出した。

体積評価の対象領域は Fig. 15 に示すように、2 つの領域とした。なお、対象は斜面の矩先から水平距離約 250m、標高 510m 以上の領域を対象としている。西側の領域 A は採石計画に沿って行われた掘削エリアであり、東側の領域 B エリアは熊本地震や地震後の豪雨での崩落が確認された崩落エリアである。体積評価の結果を示すと Fig. 16 のようである。3 次元モデルからも確認できるが、領域 A は 4 月の地震の影響で 2 月から 6 月にかけて掘削はほとんど進んでいない。一方、6 月から 12 月の間に掘削工事が大幅に進んでいることがわかる。CAD 上での領域 A の体積は 2 月と 6 月の間に約 5 万  $m^3$ 、2 月と 12 月に約 23 万  $m^3$  と変化してきている。つぎに、領域 B は熊本地震や地震後の豪雨の影響を受けており、2 月と 6 月の体積変化は 21 万  $m^3$  となり、地震による崩壊土量が評価された。一方、6 月と 12 月の体積変化は 2 万  $m^3$  となった。地震後は大幅な崩落はないものの、小規模の落石、岩盤崩れ、崩壊ずりの搬出によってこの変化が起こったと考えられる。この採石場では、熊本地震や豪雨の影響による崩壊土量や土砂移動についての正確なデータは得られていない。しかし、地震後の調査では、地震と地震後の豪雨の影響で崩落した土量の推定量が 10 万 ~ 20 万  $m^3$  と報告されており、今回の評価で得られた値は妥当であると言える。

領域 A および B の代表的な断面図を Fig. 17 に示す。Fig. 15 に示された一点鎖線で示された位置の断面図である。これらの図は 3 次元モデルから作成した DEM データとソフトウェア QGIS を用いて作成した。断面 A-A' では、2 月から 6 月の期間ではわずかな変化であったものが、12 月には大きく変化しており、採掘作業が進んでいることが確認できる。また、断面 B-B' では、熊





(a) 2016/2



(b) 2016/6

Information in analysis			
Year/month	No. of images	Analyzed time (hours)	No. of dense point
2016/2	652	13	1,265,222
2016/6	685	10	1,093,763
2016/12	665	10	1,131,154

PC used in analyses:

CPU Intel Xeon E5-1650 v3 (3.50GHz), Memory 64GB  
GPU NVIDIA GeForce GTX TITAN X

(c) 2016/12

Fig.14 3D models and information in analysis.

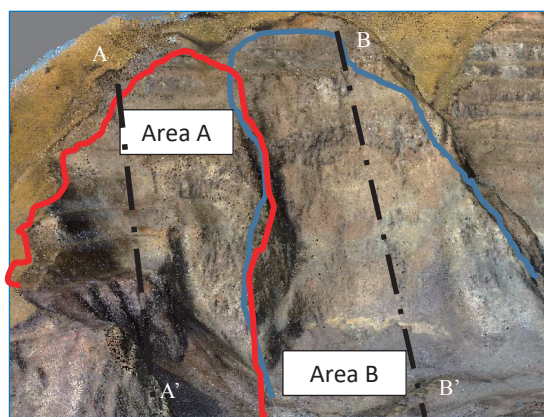


Fig.15 Areas for evaluating volume change and locations of cross section for monitoring shape of slope.

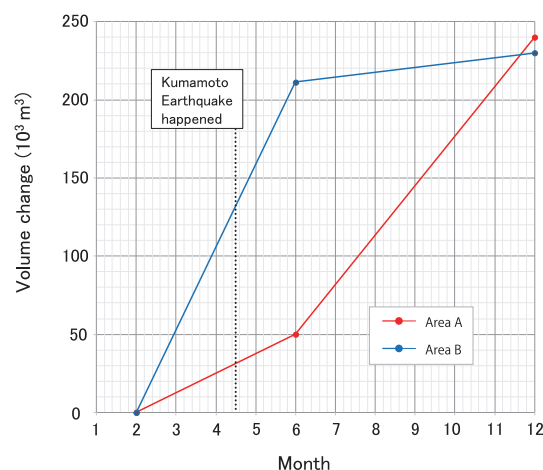


Fig.16 Volume change from February 2016.

本地震で崩落が起こったため2月と6月の間にその影響が顕著に表れている。また、12月の断面図を見ると、斜面脚部の変化が大きく、崩壊ずりの撤出が行われたことが確認できる。

### 5. 課題と展望

採石場の2月のモデルは高密度点群の数が6月、12月と比較しても多く処理にも2時間ほど多く時間がかかった。これは、それぞれのモデルに使用した画像数の違いによると考えられる。2月の撮影では、斜面表面に最も近寄れた位置では10m、最も離れて撮影した場所でも70～80mであった。一方、6月、12月のモデルは斜面表面から20～30mで撮影し、それに加え80m程度離れた距離から全体をとらえた画像を撮影し、画像解析に使用した。このように2月の撮影では斜面表面に近いものが多く同じ領域を撮影でカバーするために画像数が多くなっていた。したがって、モデル作成に使用した画像数が6月、12月に比べ多く、数点群10万～20万点ほど多く作成され、2月のモデルの方が岩盤の凹凸や、色合いをよく表現できていた。

基礎実験と適用実験から、画像解析の精度は使用した画像の枚

数に依存しないこと、対象との距離に近い画像を用いることで、斜面の細かい凹凸をとらえることができるなど解析精度に関する知見を得ることができた。しかし、ドローンを岩盤斜面に近づけることは危険が伴う。今回の研究ではドローンの飛行をマニュアル操縦しているが、ドローンにはすでに自動航行ができるシステムが導入されているので、これを利用すると同じ位置から撮影を行うことができ、常に同程度の精度の3次元モデルの作成ができ、高品質データとして保管が可能となる。しかし、鉱山の操業の進行とともに斜面形状が変化するので、分析項目に適合した自動航行の経路や位置の選定、修正を逐次行うことが必要である。

なお、測定精度に及ぼす天候については、雨天ではドローンを航行させることができない。一方、晴天では日当たりの領域と日陰の領域における明度の差が大きく解析には向いていない。撮影に良好な天候は曇りで、風のない時の航行撮影が最適である。また、植生が測定精度に大きく影響を与える。岩盤斜面は裸地であるので表面の状況を直接撮影できるが、周辺の植物が画像に入ると、植物の高さまでもが解析されることとなり、撮影時に風が吹いて、植物がそよぐような場合の測定精度は低下する。とく

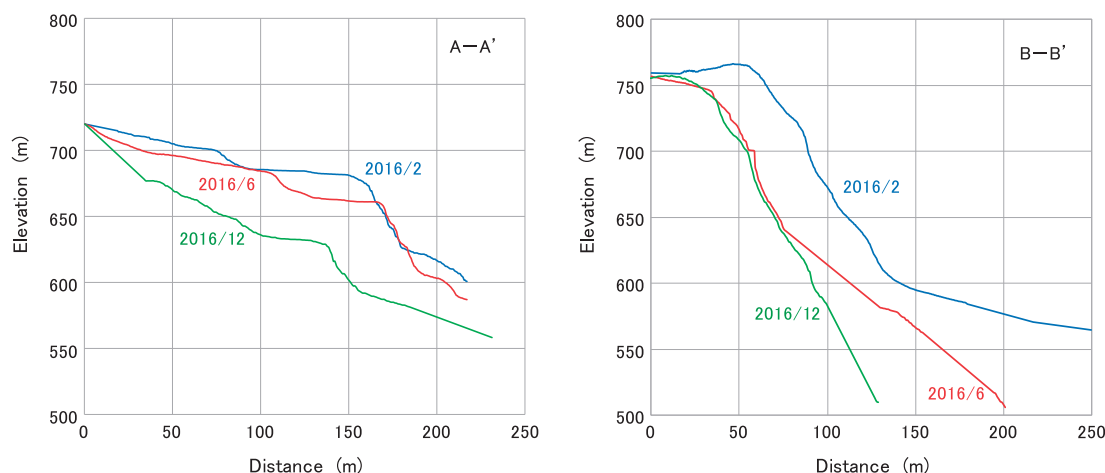


Fig.17 Shape change of rock slope in cross sections.

に、植生と裸地との境界付近などでは十分な精度は得られないが、植生領域から離れた裸地の測定精度は所定の精度は持っていると考えられる。最後に、カメラの画素数が上がると同じ距離からの撮影の場合、画素数が増大して1ピクセルの実サイズが小さくなり、測定精度は向上する。しかし、1画像の容量が大きくなり、解析に要する時間が増大する。したがって、適切な測定精度が得られるような条件を設定することが重要である。

## 7. 結 言

本研究では、広大な露天掘り斜面において、人の到達困難な場所を空中撮影し、その画像を用いて、斜面形状を把握するためのドローンを用いた岩盤斜面観測システムを構築し、システムの測定精度を検討するために基礎実験を行った。つぎに、システムを石灰石鉱山と採石場の岩盤斜面に適用し、その有効性を検討した。

この結果、構築したシステムでは、露天掘り斜面より20m以下の距離で撮影し、4K動画による撮影とGPS情報を含む静止画を併用し、重複率は約80%程度の画像を用い、地上に置かれたGCPの情報を使うことで、最も効率よく、かつ、構成精度を著しく下げることなく、斜面形状の3次元モデルの構成が可能であることを明らかにした。つぎに、石灰石鉱山への適用では、3次元モデルの等高線図を作成するとともに、ある断面形状に対し、従来の測量で作成された結果と本システムから得られた結果を比較して顕著な誤差は生じないことを示した。最後に、採石場のモニタリングへの適用では、1年10か月の期間の3回の撮影から3次元モデルを作成し、これらの情報から、変化した体積の評価、断面の評価を行った。これらの結果を総合すると、構築した岩盤斜面観測システムは現状の測定のみならず、モニタリングにおいても有効であると考えられる。

**謝辞** 本研究は2つの団体からの支援によって基礎的研究から応用研究へと進展させることができた。基礎的研究は、「平成27

年度石灰石鉱業協会研究奨励金」、応用研究は、「総務省平成28年度戦略的情報通信研究開発推進事業(SCOPE)」の事業費をもとに実施した。ここに記して厚く感謝の意を表します。

## References

- 1) 尾原祐三, 吉永徹: 石灰石, No. 411 (2018), 57-64. [Obara, Y., Yoshinaga, T.: Sekkaiseki, No. 411 (2018), 57-64.]
- 2) 資源・素材学会 編集: 残壁ハンドブック (丸善出版, 2005) [MMIJ: Zankeki Handbook (Maruzen, 2005).]
- 3) Shimizu, N., Nakashima, S., Masunari, T.: Rock Mechanics and Rock Engineering, **47** (1), (2014), 313-328.
- 4) Yamatomi, J., Sugiyama, T., Mikami, K., Wakisaka, T., Akiyama, F.: Proc. MMIJ Annual Meeting (2016), Vol. 3, No. 2, [1111].
- 5) Kaneko, K., Noguchi, Y., Soda, K., Hazuku, M.: Journal of MMIJ, **112** (1996), 915-920. DOI <https://doi.org/10.2473/shigentosozai.112.915>
- 6) 原田卓弘, 山田岳史, 磯貝晃一: 全地連「技術 e フォーラム 2004」福岡, <https://www.web-gis.jp/e-Forum/2004/123.PDF> [T. Harada et al.: Zenchiren, "Gijutsu e-forum2004"]
- 7) Chiba, T., Suzuki, Y., Hiramatsu, T.: Map, Journal of the Japan Cartographers Association, **45** (2007), 27-36. DOI <https://doi.org/10.11212/jjca1963.45.27>
- 8) シードプランニング: 業務用無人機(ドローン)の市場動向, 2017年9月22日, <https://www.seedplanning.co.jp/press/2017/2017092201.html> [Seed Planning: Press release, 2017.9.22]
- 9) Xiao, Y., Kamat, V.R., Lee, S.: Construction Research Congress 2018, pp.169-179, 2018.
- 10) Rossi, G., Tanteri, L., Tofani, V., Vannocci, P., Moretti, A., Casagi, N.: Landslides, **15** (2018), 1045-1052.
- 11) Esposito, G., Mastroiocco, G., Salvini, R., Olivetti, M., Starita, P.: Environ Earth Sci, **76** (2017), 103. DOI <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6409-z>
- 12) Salvini, R., Mastroiocco, G., Seddaiu, M., Rossi, D., Vanneschi, C.: Geomatics Natural Hazards and Risk, **8**, 1, pp.34-52, 2017.
- 13) Manousakis, J., Zekkos, D., Saroglou, H., Clark, M.: Proc. of Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W2, 2016.
- 14) Uehara, F.: Japanese Railway Engineering, 196 (2017), pp.2-5.
- 15) 内山庄一郎, 井上公, 鈴木比奈子: 防災科学技術研究所研究報告第81号, pp.37-60, 2014. [Uchiyama, S. et al.: Bousai kagaku jijutsu kenkyujo kenkyu houkoku, No.81, pp.37-60, 2014.]
- 16) Obanawa, H., Hayakawa, Y., Saito, H., Gomez, C.: Journal of the Japan society of photogrammetry and remote sensing, **53** (2014), 67-74. DOI <https://doi.org/10.4287/jsprs.53.67>
- 17) Hayakawa, Y., Obanawa, H.: BUTSURI-TANSA, **69** (2016), 297-309. DOI <https://doi.org/10.3124/segj.69.297>
- 18) 早坂寿人, 大野裕幸, 大塚力, 関谷洋史, 瀧繁幸: 国土地理院時報, **127** (2015), 107-116. [Hayasaka, H. et al.: Kokudo chirin jihou, **127** (2015), 107-116.]
- 19) Obara, Y., Yoshinaga, T., Matsue Y.: Proc. MMIJ Annual Meeting (2018), Vol. 5, No. 1, [3201-10-06].