

# 地質調査

2017

## 第1号

(通巻148号)

Japan Geotechnical  
Consultants Association

編集／一般社団法人全国地質調査業協会連合会

### 巻頭言

#### ドローン使用の今後の展望

国立研究開発法人土木研究所土砂管理  
研究グループ火山・土石流チーム 上席研究員  
(現 九州大学大学院農学研究院 准教授)

水野 秀明

### 小特集 ドローンの地質調査への活用

≫ ドローンの可能性について … 大前 創希

≫ ドローンの活用事例  
—ドローンによる熊本地震で生じた  
地表地震断層の計測—  
…………… 田中 圭・中田 高

≫ 神城断層調査におけるドローン活用事例  
…………… 石黒 聡士

≫ 地質調査と道路防災における  
ドローンの活用事例  
…………… 米川 康

≫ 地すべり調査におけるドローン  
(UAV)の活用事例  
…………… 山崎 新太郎

≫ ドローンを使用した不安定岩盤の抽出  
…………… 春口 孝之・松場 康二・渡部 芳彦

≫ UAVによる空撮画像のローカルな  
地形把握と防災利用の試み  
…………… 近藤 玲介・横田 彰宏

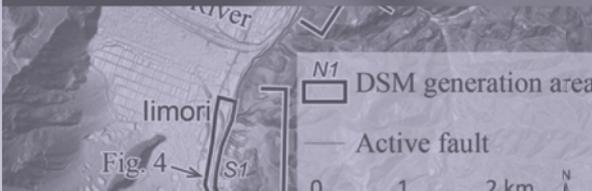
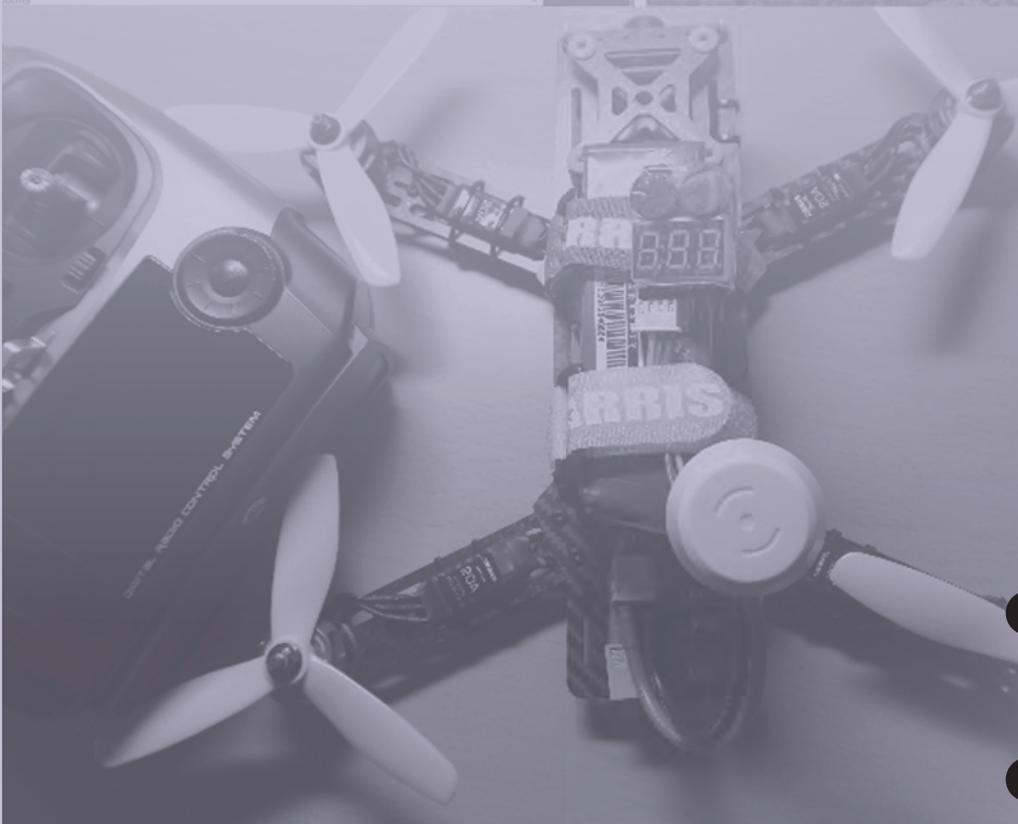
≫ 熊本城の再建に関するドローンの活用事例  
…………… 西村 正三・安井 伸顕

### やさしい知識

≫ ドローンの種類及び改正航空法について  
…………… 千田 泰弘

### 基礎技術講座

≫ 現場透水試験 …………… 小松 満

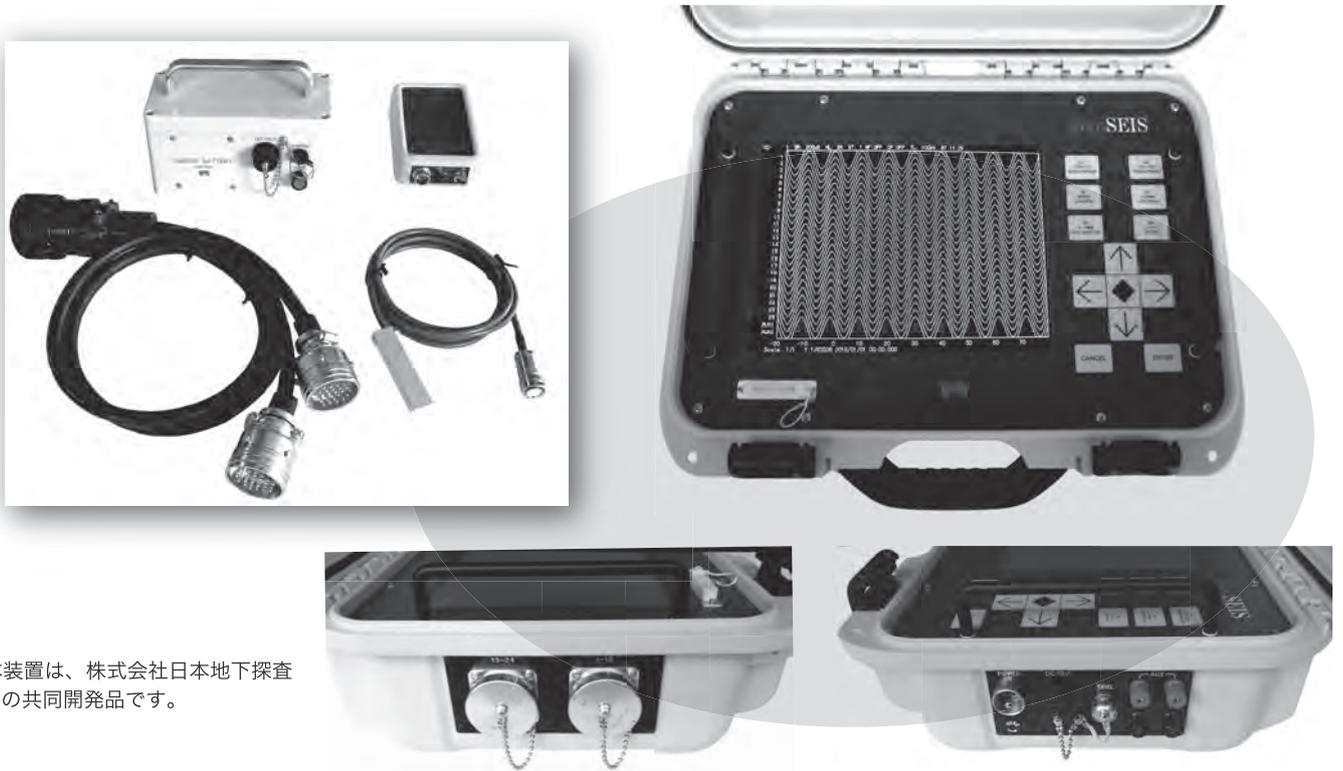


物探技術者待望の New Seismograph!

# GeoSEIS-24 & GeoSEIS-48 **geo5**

## 操作性と機動性を追求した all in one 構造の土木物探用サイсмоグラフ

- 24bit、20 $\mu$ sec の高速・高分解能サンプリング
- リアルタイム感覚の高速性を実現したノイズモニター
- 業界初、ショットマーク信号無線伝送機能
- 直射日光下でも見やすい高輝度カラー LCD 搭載
- 小型軽量・低消費電力（48 成分で 4.3Kg、待機時 0.6A）
- 24 成分 +2Aux を 48 成分 +2Aux に増設可能な柔軟設計
- データ収録は、取扱の容易な SD カード
- 各種ソフトウェアに対応可能な SEG-1、SEG-2 標準 format



\*本装置は、株式会社日本地下探査との共同開発品です。

**株式会社 ジオファイブ**

URL <http://www.geo5.co.jp/>

〒336-0931 埼玉県さいたま市緑区原山 1-12-1  
TEL 048-871-3511 FAX 048-871-3512  
Email sales@geo5.co.jp

■業務内容■

- 計測機器販売 : 地質調査機器・土木計測機器・工業計測機器
- 計測機器レンタル : 地質調査機器及びその他計測機器レンタル
- 計測業務 : 現場計測業務・測定機器設置・3D 計測業務
- 計測機器設計製作 : 各種地盤計測機器の設計製作

巻頭言	<ul style="list-style-type: none"> <li>≫ ドローン使用の今後の展望  <small>国立研究開発法人土木研究所土砂管理研究グループ                      火山・土石流チーム 上席研究員 (現 九州大学大学院農学研究院 准教授)</small> 水野 秀明 ……1</li> </ul>
小特集	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ ドローンの地質調査への活用</li> <li>≫ ドローンの可能性について 大前 創希 ……5</li> <li>≫ ドローンの活用事例                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- ドローンによる熊本地震で生じた地表地震断層の計測 -                                      田中 圭・中田 高 ……9</li> </ul> </li> <li>≫ 神城断層調査におけるドローン活用事例 石黒 聡士 ……15</li> <li>≫ 地質調査と道路防災におけるドローンの活用事例                                      米川 康 ……21</li> <li>≫ 地すべり調査におけるドローン (UAV) の活用事例                                      山崎 新太郎 ……27</li> <li>≫ ドローンを使用した不安定岩盤の抽出                                      春口 孝之・松場 康二・渡部 芳彦 ……32</li> <li>≫ UAVによる空撮画像のローカルな地形把握と                                      防災利用の試み 近藤 玲介・横田 彰宏 ……37</li> <li>≫ 熊本城の再建に関するドローンの活用事例                                      西村 正三・安井 伸顕 ……41</li> <li>≫ ドローンの種類及び改正航空法について 千田 泰弘 ……47</li> <li>≫ 現場透水試験 小松 満 ……51</li> <li>≫ 深層崩壊箇所における調査観測の経験                                      (和歌山県 熊野地区, 三越地区) 中野 英樹 ……57</li> <li>≫ 岡山県岡山市北区 岡山県立博物館 橋本 隆志 ……61</li> <li>≫ 大雪山系起源, 北十勝の深層地下水 渡邊 哲夫 ……63</li> <li>≫ 「袋田の滝」・「筑波山」: 茨城県のジオサイト 佐藤 尚弘 ……65</li> <li>≫ 電磁気学的手法による海底熱水鉱床探査の最前線                                      笠谷 貴史 ……67</li> <li>≫ 地形の辞典 ……71</li> <li>≫ 山形県地質図 (10万分の1) ……72</li> <li>≫ 報告書作成マニュアル (土質編) 第2版 ……73</li> <li>≫ 不動産取引と土壤汚染のリスク ……74</li> </ul>
やさしい知識	
基礎技術講座	
私の経験した現場	
各地の博物館巡り	
大地の恵み	
各地の残すべき地形・地質	
研究所からの報告	
書籍紹介	
書評	
地質だより	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 平成28年度 応用地形判読士資格検定試験                      二次試験合格者15名が決定 …… 75</li> <li>■ 全地連「技術フォーラム2017」の開催について (開催予告) …… 75</li> <li>■ 平成29年度 全地連資格検定試験の実施概要                      【地質調査技士・地質情報管理士・応用地形判読士】 …… 76</li> <li>■ 「報告書作成マニュアル (土質編) 第2版」の発行 (22年ぶりの大改訂) …… 76</li> <li>■ 平成29年度 道路防災点検技術講習会 開催案内 …… 76</li> <li>■ 全地連 e-Learning センター (Web 学習サイト) に                      新しいコンテンツを掲載しました …… 77</li> <li>■ ボーリング柱状図作成要領等の改訂および                      柱状図作成ソフトウェアの対応について …… 77</li> <li>■ 平成29年度研修「地質調査」開催案内 …… 78</li> <li>■ 地質調査技士資格登録更新 (平成29年度) 実施予定 …… 78</li> </ul>

# 地質調査 '17 第2号 (通巻149号) 内容 (予定) 平成29年8月発行

## 特定テーマ

## 離島

国土交通省による離島振興プロジェクトの創出  
北海道の離島の現状と民間主導の振興対策事例  
島嶼地域における再生可能エネルギー活用について  
隠岐の島の現状と振興対策について  
長崎県の離島の現状と振興対策について  
鹿児島県の離島の現状と振興対策について  
離島における水資源確保 (地下ダム) の現状  
西表島の成り立ちと自然について  
神の島・久高島と齋場御嶽<sup>せーふあうたき</sup>

\*上記のタイトルは仮称です。執筆者により変更することがあります。

# ドローン使用の今後の展望

みずの ひであき  
水野 秀明\*

**K**ey Word 土砂災害, 火山, 天然ダム, 調査, ドローン, iConstruction

## 1. はじめに

ドローン（無人航空機）は警備、自然環境や資源の調査、農薬の散布だけでなく、自然災害への危機管理や土木工事といった分野にも活用され始めた。

特に、火山噴火や地震、豪雨といった現象が引き起こす自然災害では、従来、防災に携わる方々が負傷するリスクを抱えながら自ら危険な区域に立ち入り、被災状況を把握したり、降灰の分布や洪水・土砂の氾濫範囲、石礫の大きさを計測したり、土砂を採取したりして、応急対策に必要な情報を取得した。一方で、ドローンは遠隔操作によって危険な区域に入ることができるため、カメラやレーザー距離計等のセンサや土砂を採取する装置を搭載できれば、限りなくゼロに近い被災リスクで必要な情報を取得できる。そのため、ドローンは自然災害への危機管理の分野で大きな革新を引き起こす可能性を有している。

また、自然災害への応急対策だけでなく、建設現場の作業員が危険な箇所において安全で高い生産性で作業すること等を目的として、iConstructionの技術が導入され始めた。この技術はICT（Information and Communication Technology）技術の全面的な活用、規格の標準化、施工時期の平準化といった3つの柱で構成される。特に、ICT技術の全面的な活用において、ドローンは3次元座標を生成するために必要となる写真やレーザースキャナーの計測値を安全にかつ短時間で取得できるため、測量と検査の段階の作業を省力化できる。

このように、ドローンは自然災害への危機管理や対策工事において、安全にかつ迅速にカメラや

計測機器を運搬できることから、大きな可能性を秘めている。ここでは、土砂災害の分野に着目して、ドローンが活躍する場面を考えてみたい。

## 2. ドローンが活躍する場面

### 2.1 火山が噴火した場合

写真-1は鹿児島県鹿児島市にある桜島の噴火状況である。写真のように火山が噴火すると、火山噴出物を空中に放出する。すると、火山灰が山腹斜面上に堆積する。山腹斜面が細粒分を多く含む火山灰で覆われると、表面流が発生しやすくなるとともに表面流量が増加することが報告されている<sup>1)</sup>。このことから、山腹斜面が火山灰で覆われると、雨水が地中に浸透する速度（浸透能）が遅くなるため<sup>2)</sup>、浸透できなかった雨水が山腹斜面上を流れ始め、溪流に流れ込む。その結果、溪流の水流が多くなり、溪流に堆積した土石を侵食し、



写真-1 桜島の噴火（平成27年5月26日撮影）

\*国立研究開発法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム 上席研究員（現九州大学大学院農学研究院 准教授）

土石流へと発達すると考えられる。そのため、火山噴火が発生し、火山灰が山腹斜面を覆った場合には、土石流による土砂災害の可能性を評価することが求められる。

土石流による土砂災害の可能性は土石流の発生する可能性と、土石流が流路から氾濫する可能性の両者より評価できる。山腹斜面や溪流の川底（溪床）にある土砂は重力と流水から受ける力によって移動し始め、場合によっては土石流へと発達する。そのため、土石流の発生の可能性を評価するためには、表面流の発生する可能性と山腹斜面や溪床にある土石の移動する可能性を知らなければならない。表面流の発生の可能性は浸透能の大小によって評価できる。浸透能の値は火山灰の粒度分布や空隙率、化学的組成等に影響をうけるため、実際に火山灰の堆積した場所で計測するか、あるいは採取した火山灰を用いて室内試験で計測することが求められる。また、溪床にある土石の移動や土石流の侵食・堆積は流れの水深、土石の粒径、溪床の勾配、土石の比重といった変数に影響を受ける<sup>3)</sup>。特に、土石がシルトや粘土といった細かい粒径を主体とする場合には、土石流に含まれる石礫が堆積しにくくなり、遠くまで流れる。そのため、土石流の発生の可能性を評価するうえで、火山灰の比重や粒度分布は重要な情報となる。また、土石流が流路から氾濫する可能性を評価するためには、流路の幅や高さといった形状を知らなければならない。以上を踏まえると、土石流による土砂災害の可能性を評価するためには、山腹斜面に堆積した火山灰と流路の形状といったデータが必要となる。

写真-2は鹿児島県熊毛郡屋久島町口永良部島の新岳の遠景である。鹿児島県熊毛郡屋久島町口永良部島の新岳はしばしば噴火しており、近年では平成26年8月3日、平成27年5月29日に噴火し



写真-2 口永良部島新岳（平成28年2月18日撮影）



写真-3 火山灰の採取に行く無人ヘリコプター（平成28年2月18日撮影）

た<sup>4)</sup>。また、新岳の麓や周辺では工場や道路が存在しており、土石流による土砂災害の可能性が高い。そこで、火口周辺に堆積した火山灰を採取するため、無人ヘリコプターを火口周辺まで飛行させた。写真-3は地上を離陸した無人ヘリコプターの様子である。

## 2.2 山腹が大規模に崩壊した場合

写真-4は鹿児島県垂水市深港地区で平成27年6月22日からの大雨で発生した崩壊<sup>5)</sup>を平成28年2月19日に撮影したものである。このような崩壊後の応急対策では、不安定な土砂が下流の住宅地等



写真-4 鹿児島県垂水市で発生した大規模な崩壊（平成28年2月19日撮影）

へ流出しないよう構造物による対策（ハードな対策）を講じたり，再度の崩壊への警戒避難体制の構築といった構造物によらない対策（ソフトな対策）を講じたりする。そのため，崩壊によって移動した土砂の堆積状況や崩壊地からの地下水の湧出状況等を早急に把握することを求められる。

応急対策としての構造物による対策を検討するためには，崩壊した斜面の直下から下流域にかけての土砂の堆積状況とその下流の流路内での土砂の堆積状況を知らなければならない。前者は土砂を捕捉するために，どの程度の空間を砂防堰堤等の構造物で作らなければならないか，という点を検討するために必要な情報である。後者は流路に堆積した土砂を取り除く必要性を検討するために必要な情報である。

応急対策としての構造物によらない対策を検討するためには，崩壊した斜面とその周辺の斜面の安定性を評価しなければならない。崩壊を引き起こす誘因は降雨や地震，火山噴火といった自然現象である。これらのうち降雨を誘因とする場合，山腹が水を含んで地下水水位が上昇し，土塊の重力が摩擦抵抗力を上回ると，土塊が移動し始める。そのため，斜面の安定性を評価するうえで，崩壊した斜面から湧出する地下水の有無やその量といった情報は非常に重要なものである。

ところが，崩壊はかなり急な斜面を形成したことに加え，山腹斜面が複数回崩壊したため，人間が安全に現地調査を行える状況ではなかった。このような背景から，崩壊地の周辺における崩壊土砂の堆積状況を把握するため，ドローンを飛ばし，鮮明な映像を撮影した。この映像は応急対策としてのハード対策やソフト対策を検討する上で十分に鮮明なもので，多くの情報をもたらした。このように，山腹が大規模に崩壊した場合でも，ドローンを用いた映像の撮影により，応急対策としてのハード対策とソフト対策を検討する上で，必要な情報を迅速に得られると期待できる。

### 2.3 河道閉塞（天然ダム）が形成された場合

写真-5は平成20年6月14日に発生した平成20年岩手・宮城内陸地震に伴って形成した河道閉塞（天然ダム）により引き起こされた土砂災害の事例で，宮城県栗原市湯の倉地区の人家の浸水被害である。この建物の下流側では，山腹斜面が崩れて，一迫川を土砂で埋めた。それにより河道閉塞（天然ダム）が形成し，河川の流水を溜め始めた。その結果，上流域では，河川の水位が上昇し，河川付近の人家や建物が浸水した。



(a) 平成20年6月17日 (b) 平成20年6月30日

写真-5 河道閉塞（天然ダム）の上流域における土砂災害の事例（宮城県栗原市湯の倉地区）



(a) 平成20年6月20日 (b) 平成20年6月21日

写真-6 河道閉塞（天然ダム）の下流域における土砂災害の事例（宮城県栗原市沼倉裏沢地区）

写真-6は前述の事例と同じ地震によって，栗原市沼倉裏沢地区に形成した河道閉塞（天然ダム）の時系列変化を示したものである。平成20年6月20日から21日の間に，河道閉塞（天然ダム）の上流側に溜まっていた水が越流し，河道閉塞（天然ダム）を急激に侵食した。この事例では下流域での河川を流れる水の流量が急激に増加しただけであった。しかし，上流側に溜まっていた水の量がより多かった場合，河道閉塞（天然ダム）はさらに侵食されたと想定され，その流れが下流で氾濫した可能性も考えられる。

但し，河道閉塞（天然ダム）は，その上流にたまった水が越流すると，必ず急激に侵食されるわけではない。写真-7は平成20年6月14日に発生した平成20年岩手・宮城内陸地震に伴って形成した河道閉塞（天然ダム）の事例で，湯浜地区の河道閉塞（天然ダム）の時系列変化を示したものである<sup>6)</sup>。この河道閉塞（天然ダム）は直径数mの岩で覆われていたため，その上流側に溜まっていた水が越流しても，大きく侵食されなかった。そのため，河道閉塞（天然ダム）の表面が砂のような細かい土砂で覆われているのか，あるいは直径数mのような石礫で覆われているのか，といった情報は，河道

閉塞（天然ダム）の急激な侵食の可能性を評価する上で重要なものである。

以上のように、河道閉塞（天然ダム）が形成されると、その上流域における湛水による被害と下流域における土砂と水の氾濫による被害の2種類の土砂災害の可能性が高まる。そのため、河道閉塞（天然ダム）が形成されると、土砂の堆積高さといった河道閉塞（天然ダム）の形状、その表面を覆う土砂の大きさ、その位置を迅速に調べて、前述の2種類の土砂災害の可能性を評価しなければならない。過去に河道閉塞（天然ダム）が形成した事例を見ると、平成16年新潟県中越地震、平成20年岩手・宮城内陸地震、平成23年台風12号による紀伊半島大水害といった地震や豪雨を誘因とする場合が多い。このような場合、河道閉塞（天然ダム）が形成した地区に到達する道路や橋梁は破損しているため、容易に現地調査ができない。さらに、河川の流水が溜まり続けるため、河道閉塞（天然ダム）の上流域での浸水や下流域での土砂と水の氾濫の可能性が高まり、調査を行う者にとって非常に危険な状況となる。そのため、ドローンを用いれば、迅速にかつ安全に情報を取得できると期待できる。

#### 2.4 二次的な土砂移動の想定される条件下での工事

2.3節までに例示した状況であると、地震や豪雨、火山噴火といった自然現象が再び起こると、崩壊や土石流が再び発生する可能性がある。従って、崩壊地周辺や流路などに堆積した土砂を除去した

り、土を詰めた土嚢袋やコンクリートブロックを用いて堤防や砂防堰堤等を仮設したりして、土石流の発生や氾濫の可能性を早急に引き下げなければならない。前述のように再び崩壊や土石流が発生する可能性があるため、作業員の安全性を考えると、遠隔で操縦できる建設機械を用いたほうがよい。このとき、建設機械が所定の形状に土砂を除去したり、あるいは所定の形状に堤防や砂防堰堤等を仮設したりしたか、という点を確認しなければならない。このような点でもドローンは活躍できると考えている。

### 3. まとめ

土砂災害は応急対策を講じるのに難しい条件を有している。一度崩壊や土石流は発生した後に、それらが全く発生しないということはない。豪雨や地震、火山噴火といった自然現象が再度生じると、再び崩壊や土石流が発生する。そのような条件の中で、応急対策としてのハードな対策やソフトな対策をより早く講じることが求められる。より効率的な対策にするためには、2章で紹介したような情報を取得しておくことが望ましい。そのような観点から、ドローンは土砂災害に対する現地調査を革新的に改善させられると考えている。今後、悪天候の中を長時間容易に操作できるドローンや、ドローンに搭載できる新たな計測機器の登場をとっても期待している。



(a) 平成20年6月21日 (b) 平成20年10月1日



(c) 平成21年3月10日 (d) 平成21年4月28日

写真-7 宮城県栗原市湯浜地区の河道閉塞（天然ダム）の時系列変化

#### 〈参考文献〉

- 1) 小川泰浩, 清水晃, 清水貴範, 宮緑育夫:「細粒火山灰被服を行った斜面の降雨流出に関する実験的研究」, [砂防学会誌], Vol.55, No.5, pp.22-30, 2003
- 2) 池谷浩, ヘンドロヤント, 小杉賢一朗, 水山高久:「火山噴出物の被覆による浸透能の減少—雲仙における比較試験—」, [砂防学会誌], Vol.48, No.2, pp.22-26, 1995
- 3) 高橋保:「土石流の停止・堆積機構に関する研究(3) —土石流扇状地の二次侵食—」, [京都大学防災研究所年報第25号B-2], pp.327-348, 1982
- 4) 気象庁:  
[http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/fukuoka/509\\_Kuchierabujima/509\\_history.html](http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/fukuoka/509_Kuchierabujima/509_history.html),  
(2017年2月11日現在)
- 5) 鹿児島県垂水市:  
<https://www.city.tarumizu.lg.jp/hisho/kurashi/bosai/bosai/taisaku/h270622.html>, (平成29年2月11日現在)
- 6) 水野秀明:「2008年岩手・宮城内陸地震により生じた天然ダム危険度評価の考え方」, [土木技術資料], Vol.52 No.2, pp.14~17, 2010



# ドローンの可能性について

おおまえ そうき  
大前 創希\*

Key Word 空撮, 低空域, 自由度が高い撮影, 立体的撮影

## ▼1 はじめに

2017年に入り、益々ドローンという単語を各所で聞くようになってきた。私の専門はウェブやITのコンサルティングやシステムの開発、マーケティングの支援といった所にあるが、2015年頃にIT系企業に勤める知人・友人の間でドローンが一気に注目された事もあり、私もその流れに乗って熱中していった一人である。ドローンは、今までに無い自由度で人が鳥の目を得ることが出来るという事を体験した人の多くは、その魅力にとりつかれた。百聞は一見にしかずとは正にこの体験の事をいうと、数年の経験を経た今もなお、よく感じる事がある。

そもそもドローンというテーマで、私が少しでも注目頂けたキッカケとなった出来事は、ドローンムービーコンテスト2016において、準グランプリを受賞した事にある。受賞作品は、広島県竹原市の風光明媚な様を短く編集した内容で、ドローンならではのカメラワークや、膝上30cm程度の高さから、上限150m未満というドローン特有の空間を空撮した。瀬戸内の「多島美」や、海岸線を走る呉線、夕日と重なるフェリーといった人工物は、今までに撮影する方法が無かったドローンの特性を活かした内容だ。

個人が、尚且つ極めて簡便に、高くても数十万円の機材さえあれば実行可能だという事は、ドローンの活躍を大いに期待すると共に、今日よく目にする様々なトラブルも多くなる結果を招いた。首相官邸を始め姫路城に墜落するなど、使い手側のルールの徹底や、操縦技術の慣熟など、社会的にドローンが認められるようになるためには、多くの課題があることも浮き彫りになってきた。

## ▼2 ドローンに関する法律

可能性の事を語る前に、ドローンに関する基礎知識として法整備の事に触れておきたい。現在最も重要な遵守すべき法律は、平成27年12月10日より施行された改正航空法である。この法律により、具体的に許可が必要な状況や環境が示された。例を挙げると、人口集中地区の上空、空港等の周辺及び上空、150m以上の高さの空域などは、安全性を確保した上で許可を受けた場合にのみ飛行可能となる。また、日の出から日没までの日中、目視可能な範囲での運用など更に細かい条件も設定されており、本法律を理解しないでドローン飛行を計画することは事実上不可能な内容となっている。本法律に係る機体は重量200g以上という事ではあるものの、2017年2月現在では、真っ当な空撮に耐える機体で200gを下回るものはほぼ存在しないため、全てのパイロットは熟知している必要がある。

また、全てのルールに従ったとしても、離発着する場所や空撮する対象の地権者に許可を得なければ、空撮した動画そのものを活用する事もままならない。改正航空法の遵守の他に、空撮を実施するまえに押さえておくべき事柄は多い。一例を挙げるとすれば、国立公園上空に侵入し空撮する場合は環境省に対して問合せをし、許可を得る必要がある。国交省の定めた飛行可能空域であったとしても、土地土地でトラブルを避けるために、また万が一墜落した場合の環境に対する被害を明確にするためにも、こういったルールを熟知し遵守する事が重要だ。安全あってのドローン活用であると共に、使用者ひとりひとりが厳格にルールを守るよう周知徹底していきたい。

\*株式会社クリエイティブホープ 代表取締役会長

### ▼3 なぜ今ドローンなのか？

ドローンが各方面で活躍する以前から、空撮や農業散布の領域でラジコンヘリが活躍してきたが、ではなぜドローンがこれほど注目されるようになったのだろうか？ 私が考えるにポイントが4つほどある。

1) 運用が簡便である。私は過去にヘリによる空撮を実施したことがあるが、人が搭乗して空撮する場合は小型ヘリとはいえ制限が多く、また実施に至るまでの準備やコストの面で、難易度が高いと実感した。現場で実際に撮影していると、欲しいシーンを撮影し切るまでの時間や、撮影のためのポジション取りが限定的で、現場における難しさを痛感した。その点ドローンによる空撮では機体が極めて小さく、1バッテリーあたりの飛行時間は20分超ながらも、複数バッテリーを備えることで飛躍的に飛行時間を伸ばすことができる。加えて空中でのポジション取りの簡便性が際立っている。対象に対して近接撮影が可能な事から画像のクオリティアップも容易であり、必要なカットを撮るためのコスト及び時間の制約がヘリ空撮と比較して格段に少なくなった。

2) コストが安価である。上記の事から結果的にこれらの要因はコストに反映され、今まで諦めていた企業や個人の空撮ニーズが顕在化した。いち空撮あたりの単価が下がった事もさることながら、機体そのものの費用も性能対比で見ると格段に下がっている。現在私がメインで活用している機体は2種類ある。いずれもDJIの機体で、Inspire2とPhantom4Proという種類だが、公式通販サイトではPhantom4Proは送信機付きで20万円前後で販売されている。更に廉価な機体も存在するため、個人レベルで十分購入可能な機材になったと言えるだろう。

3) 機体性能が高い。私がおもつDJIの機体が中心の話ではあるが、4Kクラスのクオリティで撮影が可能であり、動画も静止画も申し分ない美しい仕上がりを目指すことが可能だ。空撮におけるもっとも重要な要素の一つとして、映像が安定するために機体のブレや揺れを吸収するためのスタビライザーが必要になるが、この課題も専用3軸ジンバルにより解決している。3軸ジンバルがある事でフォーカスをしっかり決める事もできるため、鮮明で美しい映像に仕上がる。

カメラ性能もさることながら、直近の機体ではセンサー性能も格段に向上した事で、物体に近

寄った際に安全距離を確保することが容易になった事も重要なポイントとなる。特に対象に接近して撮影したい場合に前後左右にセンサーがある事により、オペレータから離れた距離にあるドローンでは認識しづらい対象物との距離を認識しながら操作出来ることは、歴史的な建造物や地形・崖など人の近寄りやすい場所を撮影する上では欠かす事のできない重要な要素だ。

機体性能についても一つ重要な点として、バッテリー性能の向上がある。気温などにより若干の長短はあるが、概ね20分前後の飛行が可能なバッテリー容量を確保した事で、対象を空撮する際にゆっくり考察しながら実施することができる。ほしいカットが得られるまで続ける事ができるため、映像創作上の利便性もさることながら、研究のための活用においても極めて有効に機能するのではないかと。私はどの機体でも常時5本のバッテリーを保有して運用しているが、単純計算で1時間40分の空撮が可能であり、これだけの時間を得られれば対象を撮影するに十分な時間があると考えている。

4) 法律が整備されつつある。前述したが、現在ドローンに係る法律としてもっとも重要なものは、平成27年12月10日より施行された改正航空法である。この法律が整備されたことで、どのような運用が望ましく、また望ましくないのかが明確になった。また、基準となる法律の整備は周辺環境整備にも大いに役に立っている。例えば、安全運行基準が明確に成ることで、これらの事柄を遵守するに足る知識と技能を資格として標準化する動きも出てきた。空撮したい地域が人口集中地区なのか、または航空管制地区にあたるのか？といった事を明確に知るための地図サービスも立ち上がった。これらの整備がされる前の状況では、個々のオペレータの判断に任されてきたため、人口集中地区で習熟度の足りない人物が危険な飛行をすることもあっただろうが、今ではそういった事は比較的直ぐに露見し、注意または悪質な場合は逮捕されるという状況になってきた。特に法律を知りながら許可を得ない飛行をした場合は厳しく罰せられる状況になり、無謀な飛行をする輩も減ってきたように感じる。

以上の4つの点から、今現在ドローンが注目され、また活躍の場が増えてきたと私は考えている。ではどういった所で実際にドローンが活躍しているのか？という活躍の現場を紹介しよう。



写真1 広島県三原市の龍泉寺を空撮。複雑な地形でも安定して撮影可能。  
<https://youtu.be/h8R88DpbCpQ>

#### 4 ドローン活躍の現場

私がドローンを用いている事は空撮がメインだが、他にも測量や調査の観点で土木建築の分野、農薬散布やセンシングの観点で農業、災害調査や警備といった領域でも活用が期待されている。また、まだ研究の域を出ない感があるものの、輸送手段などでも期待されている。いずれの分野でも重要な点として、先述したような性能の向上が重要な条件となっているが、2022年までに400億円を超える市場になると予想されており、必要不可欠な存在になりゆく未来が垣間見える。実は空撮というのは、ドローン市場の中ではごくごく僅かな領域でしか無く、私が見て感じてきたドローンのニーズにしても、顕在化している事として空撮の依頼をうける事は多いのだが、地方自治体等の仕事を通してドローン活用のニーズを聞くと、災害調査や獣害対策に対する期待感が大きいことがわかってきた。それぞれのシチュエーションで活用の方法を紹介しよう。

ドローンとセンサーを組み合わせた活用法は幅広く期待されている領域だが、今現在最も期待されている事としてICTを活用した土木建築の先進化を指す【スマートコンストラクション】<sup>1)</sup>の領域ではないだろうか。今までの測量は二人一組になり、多くの場所で計測を繰り返して測るという方法が中心だったのだが、この方法は時間がものすごくかかる

上に、実際に作業を進めていくと見積もった作業内容から大きくずれるという事もしばしば発生していた。この測量が人からドローンに置き換わる事により、極端な事例では人の手で1日かかる測量作業が15分まで短縮されるという。地形に左右されずゆっくりと空中を飛びながら高精度のセンサーで地形を計測し、必要があれば3次元の地形データも制作し全体を把握することもできる。また、これらの作業はGPS誘導により人が操作すること無く完成させることができるため、日次でデータを取得し変化の推移を調査することも出来る。例えば、どれくらいの土砂が移動したのか？といった差分を計測データから求めることも可能であるため、かなり精緻な分析も可能になった。土木建築の現場では、これらの事は革新的であると言える。

調査・点検の領域で期待されているのは、橋梁の経年劣化の領域だ。2030年には日本の道路橋梁の50%以上が60年を超えて使用されると言われている。こういった橋梁の点検にドローンを活用しようという動きも見られるようになった<sup>2)</sup>。理由は調査・点検が必要な現場の数に対して、今までどおり足場を組んで実施していると危険な水準になるまでに調査・点検が間に合わない可能性があり、またコストも課題になる。これらを安全かつ速やかに、人が高い足場に登って行う必要が無い方法で実施するのに

ドローンが最適だと考えられているからだ。

次に空撮の活用事例として、私の実体験を共有したい。この2年、ドローンによる空撮のニーズは官民幅広く依頼をうけてきている。その多くは春夏秋冬の景観であったり建造物であったり、地域の祭りなどのイベントなのだが、最近増えてきたニーズとして史跡や古城などの空撮がある。弊社は古城や山城の空撮経験が豊富にあるのだが、その中でも特にドローンによる空撮が映えた事例が、静岡県三島市にある山中城だ。20年かけて発掘復元された結果、障子堀や畝堀といった北条氏の築城方法を詳しく知ることができる本城は、人の目線で見て知ることも申し分ないのだが、ドローンによって俯瞰で見ると更に良く知ることができる。

こういった環境下では、小型で小回りの効く撮影方法は画期的だ。離発着場が現場に近く、どんな場所を撮影したいのか？ といった事を現場で調整しながら実施できるため、より特徴を浮き立たせるよう実施できる。他にも山城として有名な三重県熊野市の赤木城でも空撮を実施したが、いずれの史跡においても目線の高さから櫓を組んだ高さよりも高く、ヘリやセスナを用いた空撮よりも低空域かつ自

由度が高い状況で撮影出来るため、より立体的に現場を捉えることに成功している。この他に今現在発掘をしている史跡を立体的に捉えるための空撮の実施なども行っており、この領域におけるドローンの活用は有効であると考えられる。また市区町村の事例として、ドローン映像があることで宣材としてメディア取材に迅速に対応し、効果的なアピールに繋がった事も多数あり、質が高く活用しやすい形で情報を整理する事のメリットは大きい。

---

#### 〈参考文献〉

- 1) (一社) 日本建設機械施工協会：スマートコンストラクションのご紹介  
<http://www.mlit.go.jp/common/001113552.pdf>  
(2017年2月現在)
- 2) 土木学会第71回年次学術講演会：無人航空機（ドローン）の道路施設管理への展開（京都府：八雲橋・大津南郷宇治線）  
[http://www.krcnet.co.jp/papers/pdf/JSCE/JSCE2016\\_01.pdf](http://www.krcnet.co.jp/papers/pdf/JSCE/JSCE2016_01.pdf)  
(2017年2月現在)



写真2 静岡県三島市にある山中城を空撮。障子堀や畝堀も鮮明に確認できる。近景，遠景とも短時間で撮影が可能。  
<https://youtu.be/fceftHvDoFE>

# ドローンの活用事例

## — ドローンによる熊本地震で生じた地表地震断層の計測 —

たなか けい \* , なかた たかし \*\*

田中 圭 \* , 中田 高 \*\*

**K**  
ey Word

熊本地震, 地表地震断層, ドローン, UAV, SfM-MVS, オルソ画像, DSM

### 1 はじめに

「ドローン」または「UAV (Unmanned aerial vehicle)」の登場によって、誰でもが比較的簡単に目の高さからでは見えない様子を空撮することが可能となってきた。ドローンはGNSS, ジャイロ・加速度センサなど軽量かつ小型化したデバイスを搭載することで安定した飛行が可能となり、利用用途が広がった。また、それまで高価であった機体が2012年に登場した安価なPhantom (DJI社)によって、多くの利用者にも手が届くようになり、急速に裾野が広がった。

ドローンの空撮画像だけでもフィールドワークにとって技術革新ではあるが、さらに利用価値を大いに高めたのは、撮影画像から誰でも簡単に3Dモデルや地図を作成することができるSfM-MVS (Structure from Motion - Multi-View Stereo) 技術の普及である。SfM技術は、対象物をカメラの視点を変えながら撮影した複数枚の視差のある画像からカメラの撮影位置を推定する手法でまた、それらの位置から3D形状を復元するのがMVS技術で、既にコンピュータビジョン分野で確立された技術である。この技術によって作成される3Dデータは、地図の背景画像となるオルソ画像 (中心投影による歪みを取り除いた画像) と樹木や建物等の高さを含むDSM (Digital Surface Model) として出力することもできる。従来のデジタル図化機による写真測量は高度な専門知識を必要とするが、SfM-MVS技術は処理のほとんどが自動化されているため、容易かつ短時間で地図作成が可能となっている。内山ほか<sup>1)</sup>は、ドローンとSfMソフトを用いて根尾谷断層の高解像度3Dモデルを作成できることを示した。また、石黒ほか<sup>2)</sup>は2014年11月に発生した長野県神

城断層地震によって出現した地表地震断層を発生1週間後 (それ以降に積雪) にドローンによる空撮を実施し、地形が失われる前に記録することができ、災害調査時の優位性を報告している。

2016年4月14～16日にかけて発生した熊本地震は布田川-日奈久断層帯の北半部の既知の活断層と、活断層が認定されていなかった益城町下陳から益城町中心部にかけての沖積低地および阿蘇カルデラ内の南阿蘇村南西部黒川地区で顕著な横ずれの地表地震断層が新たに出現した。さらに、阿蘇カルデラ北西部の沖積低地では北東-南西走向の顕著な崖を伴う正断層性の地震断層が出現した。

近年、大規模な自然災害が発生した直後には、Google Earthの衛星画像の更新や国土地理院・民間航測会社による空中写真撮影・レーザー計測が実施されることが多く、発災後の情報が取得される中でドローンを使って独自の空中写真を取得する意義はどこにあるのかと、問われる。これに対する答えは、これらの手法に比べて、極めて詳細な画像を取得できることであろう。また、突発災害後の様子を出来るだけ早い時期に、詳細に記録することは災害の実相を解明するには不可欠であり、そのためにドローンによる空撮は必須のツールとなる。本稿では益城町堂園に現れた地表地震断層と阿蘇カルデラ内の地変を事例に、国土地理院のデータ (空中写真, 航空レーザー測量で取得した2m-DEM (Digital Elevation Model)) とドローン空撮によって得られたデータ (オルソ画像, DSM) について比較検討を行った。

\*一般財団法人 日本地図センター 研究開発部

\*\*広島大学名誉教授

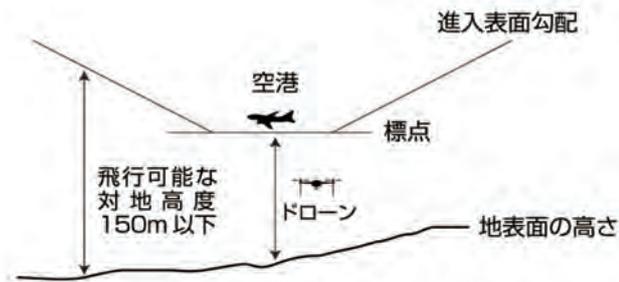


図1 空港周辺（鉛直方向）の概念



図3 200g未満機ドローン

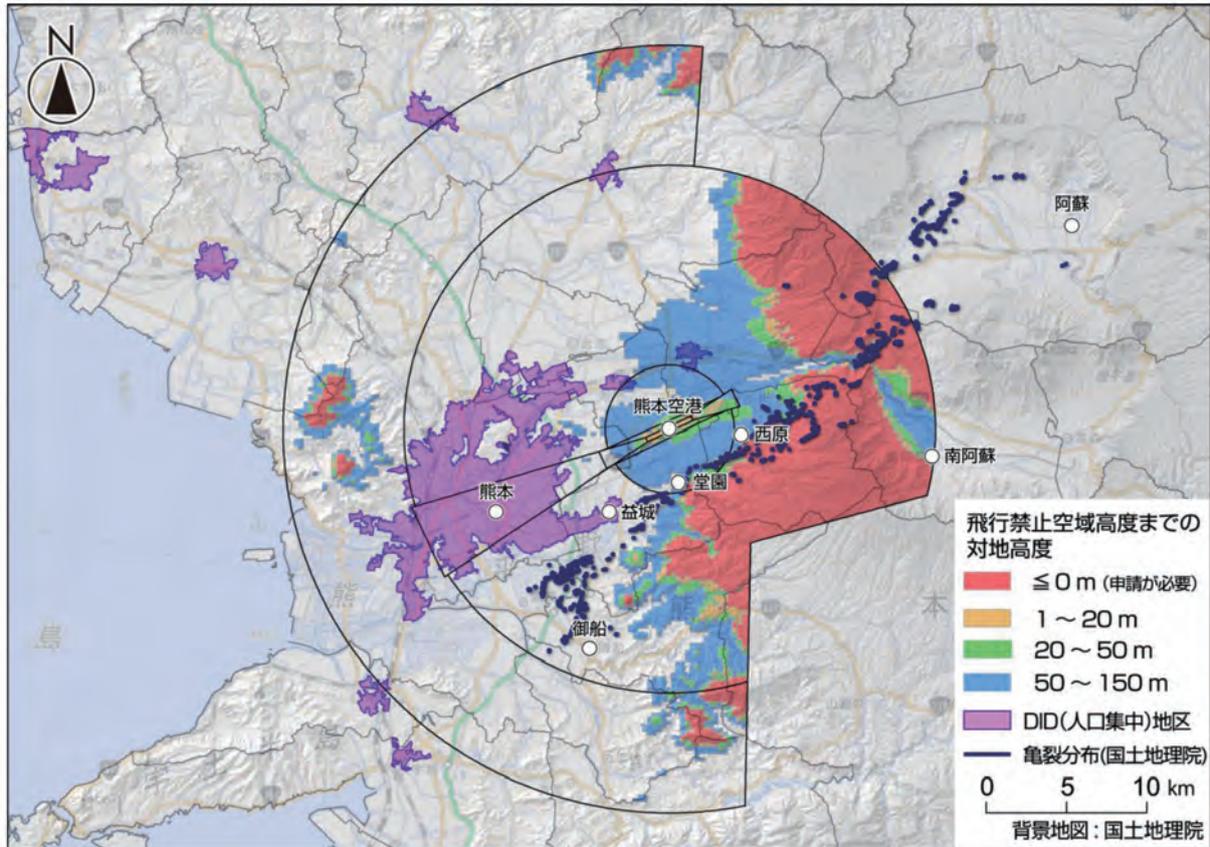


図2 熊本空港周辺におけるドローン飛行確認マップ

## 2 飛行禁止区域と撮影に使用した機体

### 2.1 熊本空港周辺の飛行禁止空域

2015年12月10日に施行された改正航空法では、ドローンの使用に関する運用が法整備され、多くの制限が課せられることになった。まず、空港周辺やDID（人口集中）地区および対地高度150m以上の飛行は禁止となっている。また、夜間飛行の禁止、目視外飛行の禁止、人や物件（建物や自動車など）から30m以上の距離を確保、イベントでの飛行禁止、危険物の輸送禁止、物の投下禁止などのルールが制定された。ただし、国土交通大臣の許可または承認を受ければ、法規制の対象から外れ、飛行すること

が許される。

熊本地震で大きな被害を受けた益城町には熊本空港が立地しているため、半径15～25kmの近隣市町村ではドローンの飛行が制限されている。これら飛行禁止空域は飛行場の標点（ARP：airport reference point）を基点として設定され、その標点の標高は滑走路中心部の192.7mである。

飛行禁止空域の制限高度は、飛行場標点と任意の2点間の距離から求めることができる。そこで、熊本空港周辺においてドローン空撮が可能かをDEMデータを使用して判定した。各地点の標高を安全側に求めるために、国土地理院刊行の

250m-DEMのメッシュ内最高値を使用した。両者の差分で求められた値が飛行禁止空域までの高度であり、その空間でドローンを飛行することが可能である(図1)。図2は熊本空港周辺におけるドローン飛行可能範囲及び飛行可能高度の確認マップである。DEMから計算した飛行禁止空域の制限高度までの対地高度とDID地区、さらに亀裂分布<sup>3)</sup>を重ね合わせた図である。熊本空港より東側に位置する阿蘇では、地表面の高さが空港の飛行禁止空域の高度を超えてしまい、ドローンの飛行には国土交通大臣の許可が必要な飛行禁止空域に該当する。また、阿蘇カルデラ内から流れる白川(南阿蘇村周辺)では、対地高度50mまでの範囲で飛行することが可能ではあるが、ドローンは容易に制限高度を超えてしまうため、操縦には注意が必要である。熊本空港より西側では、飛行禁止空域の高度まで150m以上となるため、ドローンは対地高度150mまで飛行することは可能である。ただし、DID地区となる熊本市街地等では事前に飛行許可の申請が必要となる。地表地震断層が多く生じた益城町は高遊原台地下の低地(標高10~70m)であるため、対地高度100m以下であれば、飛行禁止空域より低い高度の飛行となり、申請する必要はなくなる。

## 2.2 使用した機体

### 2.2.1 200g未満機

改正航空法では前述のように様々な制限が課せられているが、バッテリーやプロペラなど飛行に必要な部品の重量が200g未満の機体は規制対象の適用外になる。ちなみに、空撮用カメラを取り外し可能な状態で機体に取り付ければ付属品扱いとなり、機体重量から除外される。そのため、地震直後の4月に実施した空撮では益城町全域は飛行禁止空域であると判断し、重量200g未満のドローンで行った(後日、重量200g以上のドローンによる空撮は可能であることを知った)。

2016年4月時点では、一般的に200g未満機は室内用や玩具用が多く、地図作成に必要な自律飛行機能が搭載されている機体は市販されていなかった。そこで、海外から部品を取り寄せ、約8分間の飛行が可能な200g未満機(作成費用約3万円)を自作した(図3)。この機体は風に弱い欠点はあるが、災害時等では機動的に飛行することができる<sup>4)</sup>。ただし、搭載できるカメラはインターバル撮影が可能なGoProなどのアクションカメラなどの軽量の機種に限られ、現段階では写真測量用の画像としては必ずしも満足できるものではない。

### 2.2.2 折りたたみ式ドローン

4月の空撮は発災後の交通事情や配送事情も考慮した結果、福岡でレンタカーを用意してから現地入りした。そのため、地図作成に必要な最低限の機材と200g未満機の他に、折りたたみ式ドローン(作成費用約10万円)を準備し、空撮を実施した。フレーム(全長55cm)、スキッド部分が折りたたむことができ、運搬が容易という特徴がある。空撮用カメラにはRicoh GRを用いた。GRは重量が約245gと軽量でありながら、イメージセンサがAPS-Cサイズ(23.7mm×15.7mm)と大きく、高画質の撮影ができる。また、インターバル機能が標準装備されているため、ドローンに搭載する外付けのシャッター装置を用意しなくてもよい利点がある。

## 3 結果：地表地震断層

### 3.1 益城町堂園の地震断層

益城町堂園に出現した地震断層は麦畑やキャベツ畑の畦畔を2m以上明瞭に右横ずれさせており、熊本地震に伴う地震断層の代表的な例となっている。同地区を撮影した画像を比較するために、図4\_iは200g未満機(2016年4月23日撮影)、図4\_iiは折りたたみ式ドローン(2016年5月15日撮影)、図4\_iiiは国土地理院の航空機による撮影(2016年4月16日撮影)を並べた。次に、図4と同範囲のDSM・DEMの比較を行った(図5)。折りたたみ式ドローンによる空撮から作成したDSMは解像度が3cmであるため、地表地震断層を明確に判断できる。当然のことではあるが、国土地理院の航空レーザ測量の2mグリッドのDEM画像とすると両者の違いは明瞭である。

次に、オルソ画像・DSMデータを用いて地表地震断層の計測を行った。野外調査で変位量を計測する場合は、直線的な道路や人工物等のずれを目測で計測することが多いため、計測できる地点は限られてしまう。また、計測値がその場所を代表するものであるかどうか不安が残る。しかし、ドローンで詳細なオルソ画像・DSMを取得することで、現場では立ち入ることが難しい場所でも計測が可能となり、多くの変位基準のずれを容易に計測できる。図5-iiiは麦畑の条間を目印に10区間に分けて計測したもので、上下変位量はほとんど認められなかったが、右横ずれ量は2.21~2.43mであった。これらは、これまでに計測された2.0~2.2mよりも普遍的に大きく、ここでの横ずれ変位量が約2.30m(10区間の平均)となることがわかった。



i) 200g 未満機による空撮画像から作成したオルソ画像 (解像度 1 cm)

撮影 2016 年 4 月 23 日



ii) 折りたたみ式ドローンによる空撮画像から作成したオルソ画像 (解像度 2 cm)

撮影 2016 年 5 月 15 日



iii) 国土地理院撮影の空中写真から作成したオルソ画像 (解像度 20cm)

撮影 2016 年 4 月 16 日

図 4 熊本県益城町堂園周辺の地表地震断層のオルソ画像の比較

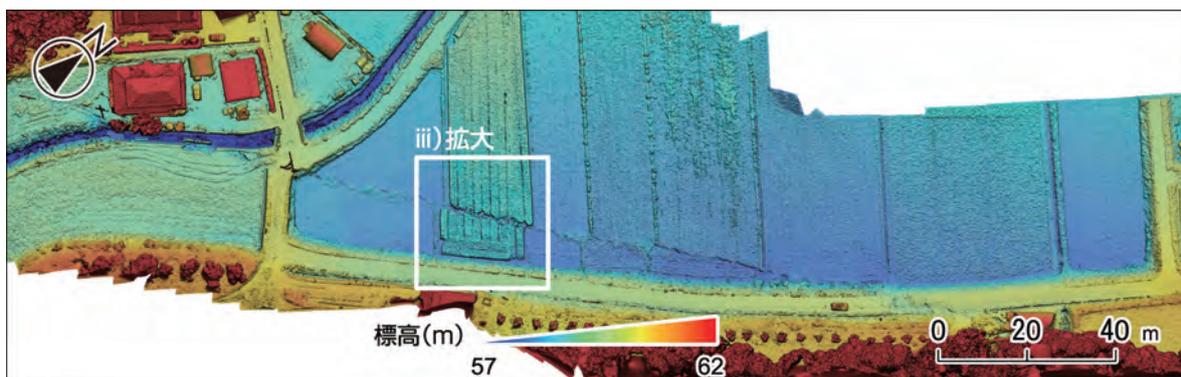
## 3.2. 阿蘇カルデラ北西部に出現した地震断層

### 3.2.1 阿蘇市的石および狩尾の地震断層

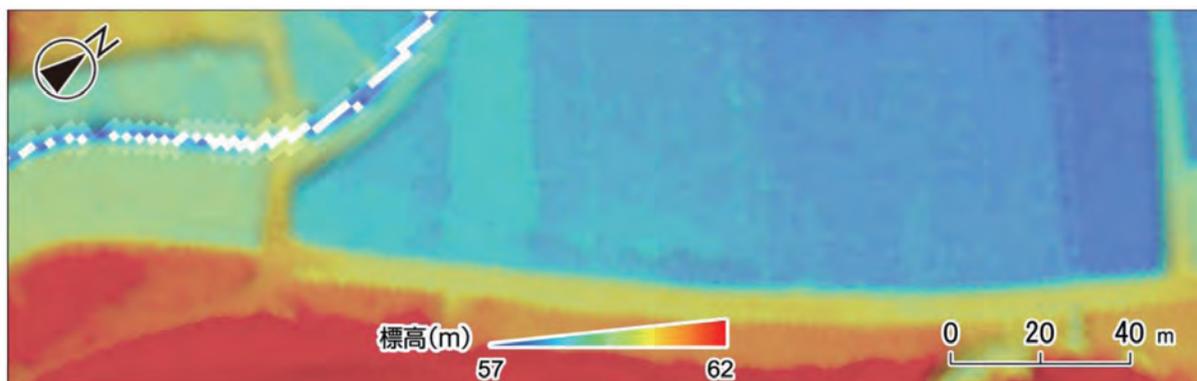
阿蘇市的石の阿蘇西小学校の北側では、幅約 50m・長さ 500m 以上にわたる連続性の良い (N60° E 走向) 地溝状の凹地が並走する正断層のずれによって地震断層が出現した。詳細な DSM によって任意の場所の地形断面を作成することが可能で、断層の見かけの上下変位量は 2m 以上に達する箇所もある。ここの地変が強い地震動による側方流動であるという考えがあるが、地形の変状は直線的に配列し、1987 年にニュージーランドで発生した

Edgecumbe 地震 (M6.7) の地震断層 (Beanland et al)<sup>5)</sup> と酷似しており、火山地域特有の正断層運動によるものと推定される。

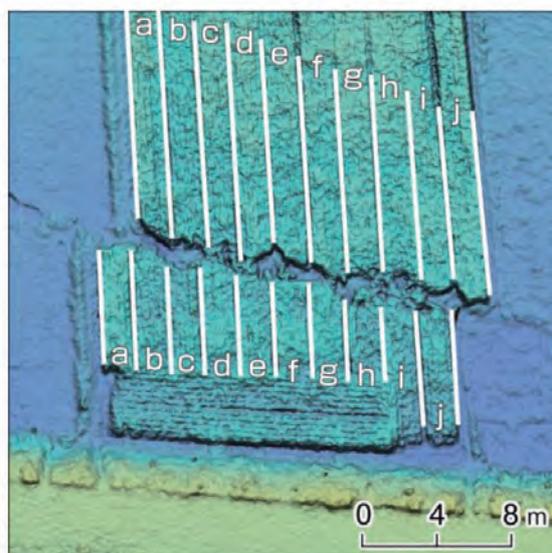
同様に阿蘇市狩尾の乙姫川東岸でも、N60 ~ 75° E の走向で数条の平行する亀裂に挟まれた幅約 80m・長さ約 300m の比較的大規模な地溝状の凹地が発達する。地溝の低地を挟む 2 条の亀裂に沿って右横ずれが確認できることから、これらの亀裂も地下の断層変位に由来するものと考えられる。空撮画像から作成した鳥瞰図はその特徴をよく表現している (図 6)。



i) 折りたたみ式ドローンによる空撮画像から作成した DSM (解像度 3cm)



ii) 国土地理院による航空レーザ測量の DEM (解像度 2m)  
 ※国土交通省国土地理院が管理する航空レーザ測量データを使用したものである。



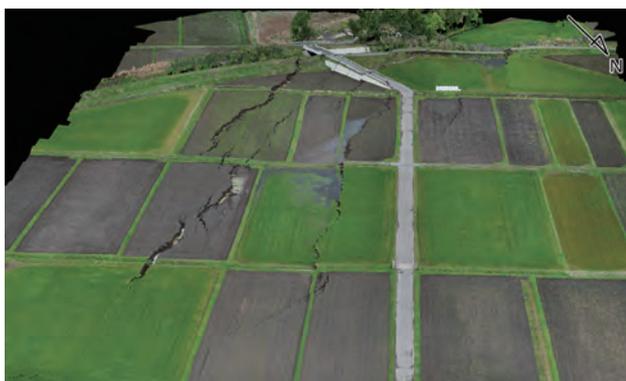
iii) i) で指定した麦畑周辺の拡大図 (左: オルソ画像, 右: DSM)

図5 熊本県益城町堂園周辺の地表地震断層の DSM・DEM の比較

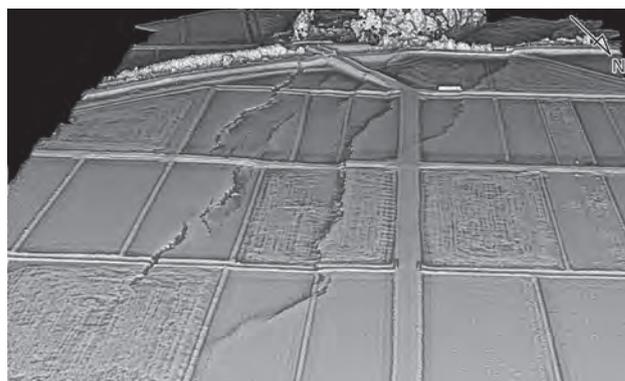
### 3.2.2 阿蘇市内牧の地震断層

阿蘇市内牧周辺では、N60～75°E 走向に平行する数条の正断層性の顕著な地震断層が出現した(図7)。このうち、駐車場から北東側の建物にかけては幅 100m・長さ 150～200m の範囲に、右ステップする 3 条の顕著な断層が認められた。この状況を折りたたみ式ドローンに Ricoh GR を搭載して飛行高

度 60m から撮影した。その結果、詳細なオルソ画像(解像度 2cm)や DSM(解像度 4cm)が得られ、断層の詳細な変位量計測が可能となった。西側の一条は、駐車場の北端から用水路を横切り北東の建物にまで達する。水田を 50cm 以上南落ちに変位させる顕著な断層である。中央の一条は、用水路を挟んで駐車場を大きく変位させて、水田と集合住宅を横

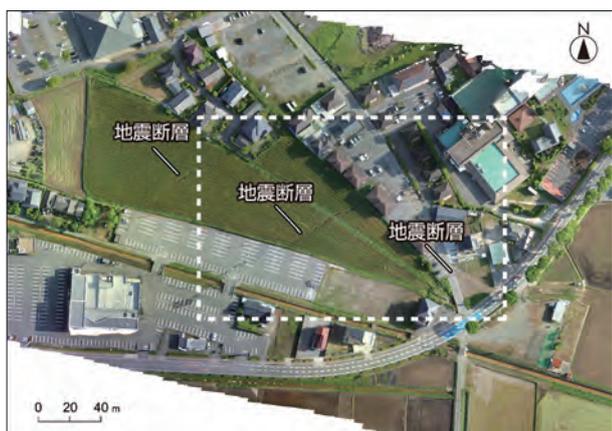


i) オルソ画像から作成した鳥瞰図

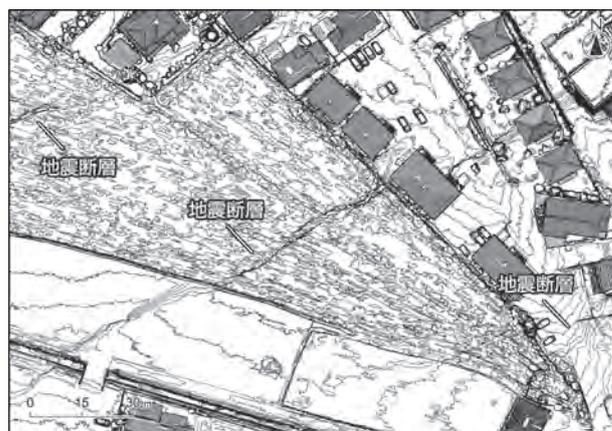


ii) DSM から作成した鳥瞰図

図6 阿蘇市狩尾（乙姫川東岸）の地震断層



i) オルソ画像



ii) 等高線 (0.1m 間隔)

図7 阿蘇市内牧の地震断層

切って宿泊施設の建物の近くまで達する。断層は水路や駐車場の白線、側溝などが最大数10cm、系統的に右横ずれしている。また、断層の縦ずれ量は南西側では北西落ちで最大1m弱程度、北東側では南東落ちで最大1m程度であり、横ずれ断層の変位に沿って観察されることの多い蝶番的なずれの形態を示していることがわかった。

#### 4 まとめ

大地震により突発災害が発生した場合、その様子をできるだけ早く詳細に記録することは災害の実相を解明するには不可欠であり、そのためにドローンは必須の手段となる。今回の空撮結果が示すように機動性に優れたドローン空撮による地表地震断層の把握は、非常に有効な手法であると考えられる。

#### 〈参考文献〉

- 1) 内山庄一郎, 中田 高, 井上 公, 熊原康博, 杉田 暁, 井筒 潤, 後藤秀昭, 福井弘道, 鈴木比奈子, 谷口 薫:「小型 UAV と SfM ソフトウェアを用いた断層変位地形把握の試みー根尾谷断層水鳥断層崖を例にー」, 「活断層研究」, Vol.40, pp.35-42, 2014.
- 2) 石黒聡士, 熊原康博, 後藤秀昭, 中田 高, 松多信尚, 杉戸信彦, 廣内大助, 渡辺満久, 澤 祥, 鈴木康弘:「UAV による空撮と SfM-MVS 解析による地表地震断層の地形モデル作成とその精度ー2014 年 11 月長野県北部の地震を例にー」, 「日本リモートセンシング学会誌」, Vol.36, No 2, pp.107-116, 2016.
- 3) 国土地理院:平成 28 年熊本地震に関する情報 <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html> (2016 年 2 月 20 日現在)
- 4) 古今書院:「地理 2016 年 7 月号:地理に使える低空撮ガイド 2 身近な事物を記録する (田中 圭)」, 2016.
- 5) Beanland, S., Berryman, K.R., Blick, G.H.:「Geological investigations of the 1987 Edgecumbe earthquake, New Zealand」, New Zealand Journal of Geology and Geophysics, vol.32, pp.73-91, 1989.

# 神城断層調査における ドローン活用事例

いしぐる さとし  
石黒 聡士\*

Key Word

2014年長野県北部の地震, 地表地震断層, 数値表層モデル, SfM-MVS

## 1 はじめに

2014年11月22日22時8分ごろ, 長野県北部の地震(Mj 6.7)が発生し, 長野県北安曇野郡白馬村北城, 塩島地区から神城盆地東縁までのおよそ9 kmの区間において, 地表地震断層の出現や地盤の変状が認められた。この地震は, 神城断層が活動したことによって引き起こされ, 神城断層が低断層崖や撓曲崖を形成していることが報告された<sup>1)</sup>。本研究では, 2機の無人航空機(Unmanned aerial vehicle, UAV)を用いて, 低空から地表地震断層とその近傍を空撮した。また, Structure from Motion - Multi-View Stereo (SfM-MVS) ソフトウェアにより空撮写真を解析し, 解像度数 cm の数値表層モデル(Digital Surface Model, DSM)とオルソ画像を作成した。作成されたDSMの精度を検証するために, 現地においてオートレベルとトータルステーションによる地形測量を別途実施した。現地測量結果との比較により, DSMは解像度, 精度のいずれにおいても地表地震断層の記録に十分であること, また, 従来の主たる地形計測手段であるオートレベルやトータルステーションによる地形測量に比べ, 広範囲の変位量計測を迅速かつ面的に計測できる点で優れていることを確認した。

2014年11月時点においては, UAVの普及が急速に進み, 地球科学, 考古学の分野で盛んに利用され始め, その有用性と可能性が広く認識されつつあった<sup>1)~6)</sup>。UAVに搭載した小型デジタルカメラによる空撮は, 従来の航空機による航空写真に比べて遥かに高解像度であり, スポット的に, 繰り返し撮影できる点で優れている。また, 上空から撮影された写真をSfM-MVSソフトウェアで解析して3D化することにより, 高解像度の地形の把握や計測

が可能である。UAVとSfM-MVSの普及によって, 研究者が任意の時期に, 必要な場所, 範囲において高解像度な地形計測が可能となった。このような状況の中, 地表地震断層の出現を伴う長野県北部の地震が発生した。筆者は, 地震発生2日後の11月24日に現地を確認し, UAVによる空撮と地表地震断層の地形モデルによるアーカイブが急務であることを認識し, 翌週に調査を実施することとした。

震源断層と表地震断層の関係を議論するためには, 地表地震断層の分布や平面形状を詳細にマッピングし, 変位量を計測して変位量の分布を把握する必要がある。そのためには, 地表地震断層の出現後に, 地形が失われる前のできるだけ早い時期に, 可能な限り高解像度で, 変位地形全体を短期間で撮影し, 地形を記録する必要がある。これらの条件を満たす計測手段として, まず機動性と解像度に優れたUAVにより空撮し, 次にSfM-MVSソフトウェアによりDSMを作成することが有効であると考えられる。一度DSMが完成すれば, 任意の場所において地形計測が可能となる。

## 2 UAVによる地震断層の撮影とGCP等の計測

空撮は, 地震発生1週間後の11月29日と30日の2日間に実施した。この直後に降雪があり, 地表面の姿は春まで観察不可能となった。撮影の対象は地盤の変状が認められた北端に近い塩島付近から南端付近の神城盆地東縁である(Fig. 1)。撮影に先立ち現地を踏査し, 撮影対象とする地表地震断層の位置を確認した。そのうえで, 2機のUAVで北端と南端から順次撮影を開始して, 合流するまで南下と

\*愛知工業大学地域防災研究センター ポストドクトラル研究員

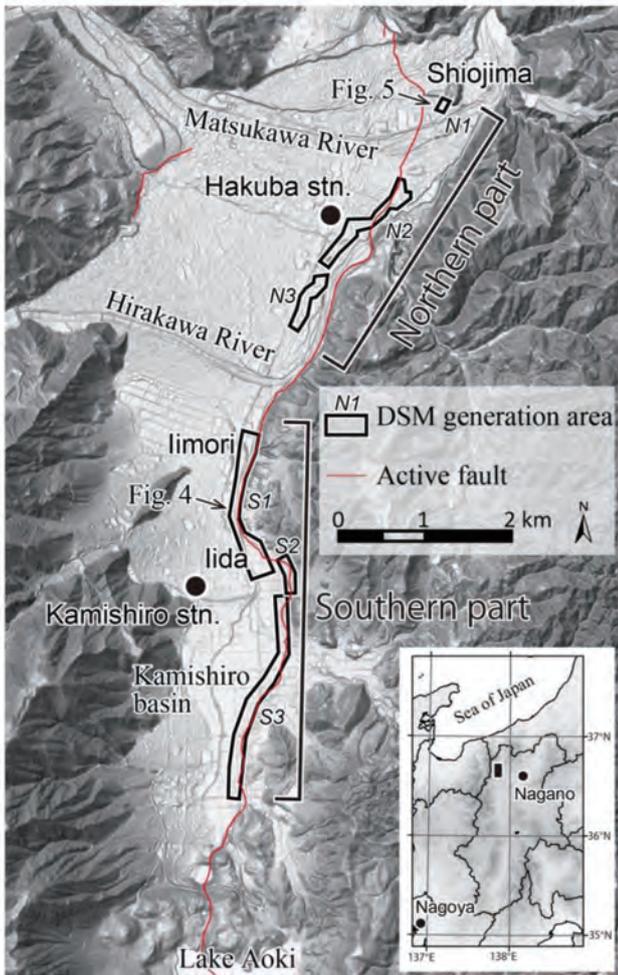


Figure 1 UAVによる撮影範囲とDSM作成範囲

北上をする撮影計画を立てた。使用したUAVは、DIJ社のPhantom2とF450 (Fig. 2およびTable 1)であり、搭載したカメラは2機ともRICOH社のGR (有効画素数1620万画素, 23.7 mm × 15.7 mm CMOS, 焦点距離18.3 mm 固定)である。2機のUAVで同じカメラを用いることにより、カメラの違いに起因する撮像の特性の違いや、DSMの作成精度のばらつきを抑制しようと試みた。また、空中を移動しながらの撮影であるため、オートの設定では撮像にブレが生じてしまう可能性がある。そこで、撮影時の天候にあわせて、撮像がブレないよう

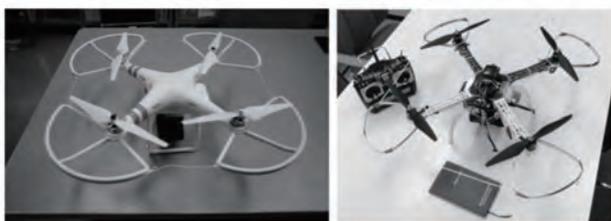


Figure 2 使用した2機のUAV。  
DJI Phantom2 (左)とF450 (右)

Table 1 使用したUAVの諸元

	Phantom2	F450
Type	quadcopter	quadcopter
Deadweight inc. battery	1000 g	1200 g
Battery	5200 mAh LiPO	3300 mAh LiPO
Dimensions (WxDxH)	29 x 29 x 18 cm	60 x 60 x 30 cm
Practical endurance	ca. 10 - 15 min	ca. 7 min

にシャッタースピードと絞りを調節した。ピントは無限遠に固定し、撮影にはインターバル機能を用い、離陸から着陸までの間、2秒間隔で撮影し続けた。

カメラを取り付けた状態のPhantom2は、一度の充電(バッテリー)につき約10~15分程度の飛行が可能である。Phantom2は目視による手動操縦によって地表地震断層周辺をくまなく撮影し、次の撮影ポイントへの移動を繰り返した。撮影高度が一定ではなく飛行ルートも決められないため、撮り漏らしのないように留意して撮影した。結果として、一カ所につきおよそ50~100 m四方程度の範囲が撮影可能であった。一方、F450は一度の充電で7分程度の飛行が可能であり、搭載されたGPSや加速度計、気圧計等のセンサーにより、予め決められたルートを自動航行できる。ルート設定にはMission Planner (ver. 1.3.9)を使用した (Fig. 3)。ルート設定の際は、GRの画角、地上解像度や安全性を考慮する必要がある。現場において状況を確認しつつ検討した結果、飛行高度は対地100 m~110 m、速さは10 m/sとした。この撮影によって得られる画像は、画像中央が機体直下の場合、長辺約130 m、短辺約85 mであり、地上解像度は約2.6~3.0 cm/pixelである。また、進行方向のオーバーラップ率は約75%、コース間のオーバーラップ率は45~50%となるようにコースを設定した。



Figure 3 自動航行のルートを設定するMission Plannerの画面

当初は地表地震断層の全域を撮影予定であったが、時間と天候の制約により、約7割程度のカバー率に留まった。撮影により DSM を作成した範囲を Fig. 1 に示す。Phantom2 により撮影された北地区 (Fig. 1 の N1 ~ N3) においては、23 回のフライトを行い、離着陸時の冗長な写真を除いて 3124 枚、1 回の平均撮影枚数 136 枚の写真を撮影した。F450 により撮影された南地区 (Fig. 1 の S1 ~ S3) においては、11 回のフライトを行い、同様に 1175 枚、1 回の平均撮影枚数 107 枚の写真を撮影した。解析に使用した写真は合計で 4299 枚に及んだ。なお、今回使用した 2 機の UAV はいずれもプロペラガードを装着した。また、自動航行する F450 については、ルートを操縦者の目視可能範囲とするなどの安全対策を実施した。

現地における地上基準点 (Ground Control Point, GCP) の 3 次元座標の測量と、精度検証のための地形断面測量にはトータルステーション (Leica TCR705) と GNSS 測量機 (Leica GPS900) を用いた。GNSS 測量は 2 台の GPS900 によるリアルタイムキネマティック (RTK) 測量を行った。GPS900 のカタログ上の位置決定精度は、水平 10 mm + 1 ppm、鉛直 20 mm + 1 ppm (キネマティック測量) である。

GCP の測量は 2014 年 12 月 3 日と 4 日に実施した。塩島においては、トータルステーションにより、10 点の 3 次元座標 (ローカル座標) を取得した。塩島地区以外の地区においては、GNSS 測量により 122 地点 (北地区 49 点、南地区 73 点) の緯度・経度・標高を得た。これらの GCP は、撮影された写真に写っている不動と思われる地物を現地で確認し、なおかつ、モデル作成時に全体にバランス良く配置されるように場所を選んだ。Fig. 4 に GCP の配置を例示する。

### 3 SfM-MVS 解析による細密地形モデル作成

SfM-MVS 技術は、複数の方向から対象物を撮影した多数の写真画像を解析することにより、撮影位置と姿勢、レンズ歪み等を自動で推定し、対象物の 3 次元点群を生成できる。SfM-MVS ソフトウェアはいくつか存在するが、本研究においては、設定の柔軟性や信頼性などの観点から、Agisoft 社製の Agisoft PhotoScan Professional Edition (1.1.2) (以下、PhotoScan) を用いた。PhotoScan は多くのパラメータを設定することができ、同ソフトウェアにおいて使用されているパターンマッチングアルゴリズムや 3D モデル作成の信頼性については、すでに多くの論文が発表されている<sup>7)~8)</sup>。PhotoScan の

基本的な処理の流れは、①写真のインポート (Add Photos)、②カメラ位置の推定と写真の整列 (Align Photos)、③点群生成 (Build Dense Cloud)、④メッシュ生成 (Build Mesh) と GCP のインポート、⑤ DSM およびオルソ画像の出力である。このうち、②において精度 (Accuracy) を、③にお

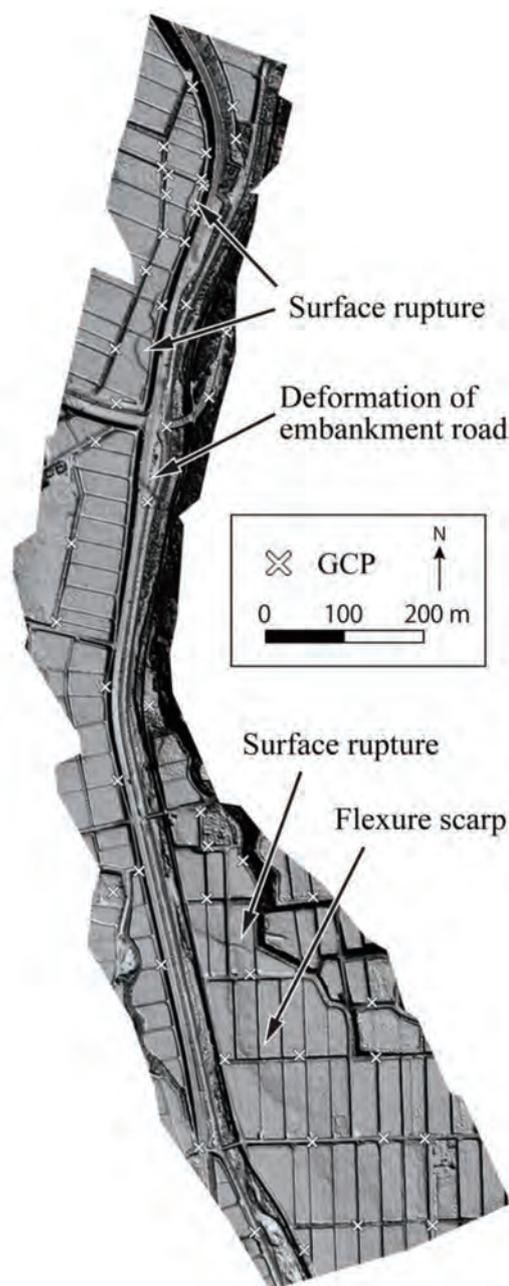


Figure 4 飯田・飯森地区の DSM の陰影図。位置は Fig. 1 の S1。(石黒ほか (2016)<sup>9)</sup> を一部改変)

いて品質 (Quality) を選択できる。本研究では, Accuracy, Quality とともに High を選択した。また,

出力は DSM, オルソ画像ともに Geotiff 型式とし, それぞれの空間解像度は入力画像の解像度に応じて

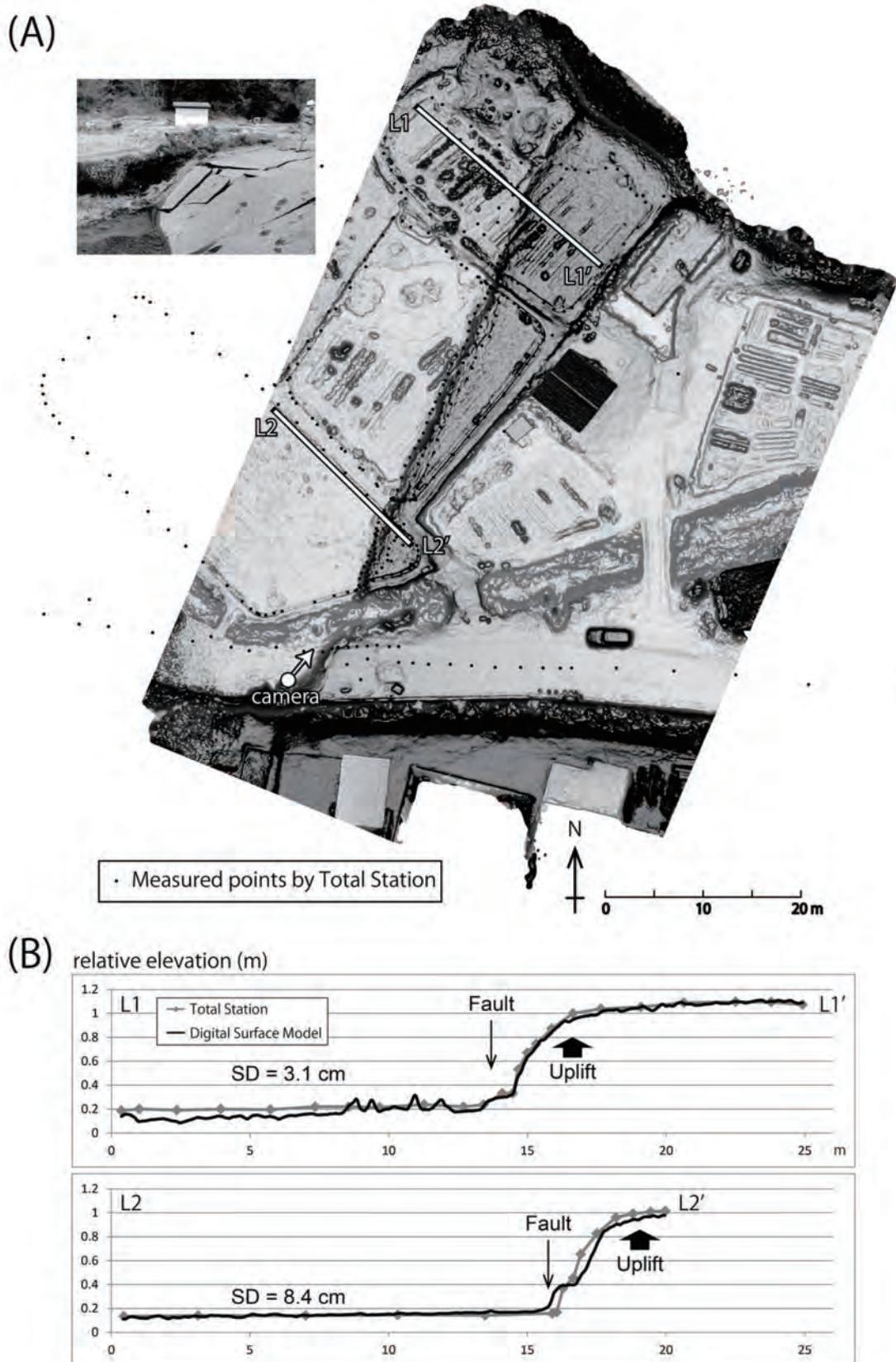


Figure 5 塩島地区における DSM 陰影図とトータルステーションによる測点 (A) および地形断面の比較 (B)。位置は Fig. 1 の N1。(石黒ほか (2016)<sup>9)</sup> を一部改変)

PhotoScan が自動計算する初期値とした。これらの設定は解析に用いるコンピュータの性能、出力される DSM の解像度などを考慮した結果であり、その判断はこれまでの経験に基づくところが大きい。

2機の UAV を用いて2日間に撮影された合計4299枚の写真全てを一気に処理することはコンピュータの性能上、非現実的であるので、いくつかの地域に区切って DSM を作成した。本研究では北地区、南地区をそれぞれ3つのパートに分割して処理を行った (Fig. 1)。1カ所の処理に数時間を要するため、PhotoScan のバッチ処理が大いに役立った。北地区と南地区の DSM 作成面積はそれぞれ約 0.20 km<sup>2</sup> と約 1.04 km<sup>2</sup> であった。写真撮影枚数と DSM 作成面積について、南地区と北地区で比較すると、撮影枚数が南地区は北地区のおよそ4割と少数であるにもかかわらず、DSM 作成面積は約5倍となった。これは、南地区で使用した F450 が飛行ルートを設定した自動航行であったため、北地区で使用した Phantom2 に比べて無駄のない撮影が可能であったことを示している。

#### 4 DSM の精度検証

PhotoScan での解析の結果、解像度 2.5 ~ 5.1 cm の DSM と解像度 0.9 ~ 2.5 cm のオルソ画像が作成された。作成された DSM の例として、飯森地区と飯田地区を含む S1 の領域の陰影図を Fig. 4 に示す。DSM の陰影図を見ると、断層運動によって変状した地盤の状況を鮮明に捉えられている。とくに、地震前には水平な平坦面だったと推測される水田において、連続的な地盤変状が観察される。このように、DSM の観察により、地表地震断層の詳細なトレースおよびマッピングが可能である。

現地における地形断面測量の結果と DSM による地形断面図との比較により、DSM による地形断面の形状がほぼ正確であることが分かる。L1, L2 (Fig. 5) の測線において、トータルステーションによる計測値と DSM による標高値との差を、比高計測誤差として算出すると、比高計測誤差の標準偏差の平均は 4.0 cm (最大は L2 の 8.4 cm) であった。通常、変動地形学的な研究において計測される地形の変位量は 10<sup>1</sup> ~ 10<sup>1</sup> m 程度であるが、地表地震断層の場合は 10<sup>2</sup> m 以下の微小な地形が出現するため、それ以下の計測精度が要求される。今回の検証結果は、本研究の地形計測が地表地震断層の変位量計測のために十分な精度を有していることを示している。

#### 5 まとめと今後の展望

本研究は UAV に搭載したデジタルカメラにより、2014年11月22日の長野県北部の地震に伴い地表に出現した地表地震断層を空撮した。これらの写真を用いて SfM-MVS ソフトウェアで解析することにより、解像度約 5 cm の高細密な DSM と解像度 2.5 cm のオルソ画像を作成した。これにより、変位地形が外的営力や人工改変によって消失する前に、面的な地形データとして保存することができ、DSM とオルソ画像の観察により、地表地震断層の詳細なトレースが可能である。また、本研究で作成された DSM による比高計測の誤差は、現地におけるトータルステーションによる測量結果との比較から、最大でも 10 cm 以内に収まる事が確認された。

2014年当時から執筆現在までに、UAV の技術は着実に進歩し、今日では自動航行は当然となっている。また、飛行時間も長時間化し、30分前後の飛行が可能なるマルチコプターが主流となりつつある。さらに、障害物の検知や衝突回避等の安全性も向上している。本研究で対象とした規模の地表地震断層の調査も含め、さらに広範囲の空撮が必要とされる場合においては、より長時間のフライトを安定して行える固定翼型の UAV の導入が必要であろう。

UAV による空撮と SfM-MVS ソフトウェアによる DSM 作成の手法は、航空写真測量や航空 LiDAR、現地測量などの他の手法と比べ、簡易な現地調査で、迅速に、より高解像度のデータを機動的に取得できる点で優位であり、出現後、急速に形態を変化させる地表地震断層の調査においては、広く用いられるべきものと考えられる。一方で、本手法により作成される DSM やオルソ画像などの空間データは、高解像度であるがゆえにデータ容量が膨大になる傾向にある。これらの大容量の空間データを効率よく扱う仕組みの開発も望まれる。

#### 〈謝辞〉

本研究は、災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画「地表地震断層および活断層の地表形状・変位量データにもとづく直下型大地震の規模・頻度予測手法の高度化 - LiDAR 等の高解像度 DEM を用いた検討 - (平成 26 年度, 代表: 鈴木康弘) の一部を使用した。上記を記し、感謝いたします。

本稿は、投稿論文「UAV による空撮と SfM-MVS 解析による地表地震断層の地形モデル作成とその精度—2014年11月長野県北部の地震を例に—」(日本リモートセンシング学会誌 Vol. 36 No. 2 pp. 107-116)の内容をもとに一部を加筆修正したものである。

〈参考文献〉

- 1) 廣内大助, 杉戸信彦, 清水龍来 : 2014 年 11 月 22 日長野県北部の地震 (長野県神城断層地震) に伴う地表変位と活断層, 活断層研究, 41, pp. i-ii, 2014.
- 2) F. Clapuyt, V. Vanacker, K. V. Oost : 2015. Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms, *Geomorphology*, 260, pp. 4-15. 2016
- 3) M. A. Fonstad, J. T. Dietrich, B. C. Courville, J. L. Jensen, and P. E. Carbonneau : Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement, *Earth Surface Processes and Landforms*, 38 (4) , pp. 421-430, 2013
- 4) 小花和宏之, 早川裕式, 齋藤仁, ゴメスクリストファー : UAV-SfM 手法と地上レーザ測量により得られた DSM の比較, 写真測量とリモートセンシング, 53 (2), pp. 67-74, 2014.
- 5) T. Rosnell, and E. Honkavaara : Point cloud generation from aerial image data acquired by a quadcopter type micro unmanned aerial vehicle and a digital still camera, *Sensors (Basel)* , 12 (1) , pp. 453-480, 2012.
- 6) 内山庄一郎, 中田 高, 井上 公, 熊原康博, 杉田 暁, 井筒潤, 後藤秀昭, 福井弘道, 鈴木比奈子, 谷口 薫 : 小型 UAV と SfM ソフトウェアを用いた断層変位地形の試みー根尾谷断層水鳥断層崖を例にー, 活断層研究, 40, pp. 35-42, 2014.
- 7) L. Javernick, J. Brasington, and B. Caruso, : Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry, *Geomorphology*, 213, pp. 166-182, 2014.
- 8) G. Verhoeven, M. Doneus, C. Briese, and F. Vermeulen : Mapping by matching: a computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs, *Journal of Archaeological Science*, 39 (7) , pp. 2060-2070, 2012.
- 9) 石黒聡士, 熊原康博, 後藤秀昭, 中田 高, 松多信尚, 杉戸信彦, 廣内大助, 渡辺満久, 澤 祥, 鈴木康弘 : UAV による空撮と SfM-MVS 解析による地表地震断層の地形モデル作成とその精度ー 2014 年 11 月長野県北部の地震を例にー, 日本リモートセンシング学会誌, 36, pp. 107-116. 2016.

# 地質調査と道路防災における ドローンの活用事例

よねかわ こう\*  
米川 康\*

Key Word

ドローン, Phantom3, 地質調査, 道路防災, 北海道, 空撮

## 1 はじめに

多くの企業や個人が所有しているドローンについては、撮影画像の活用についての多くの研究論文や報告がされているが、機体の操縦に関する具体的な事例についての報告は少ない。

本報告では、北海道における建設コンサルタント企業のドローン活用の実態について紹介し、道路防災や災害対応についての具体的な活用方法・操縦に関する事例について紹介したものである。

## 2 北海道の建設コンサルタントでの活用状況

北海道におけるドローンを保有している建設コンサルタント会社の数社にインタビューしたところ、そのほとんどが、各部署で数名の操縦者によって運営している。

保有ドローンのほとんどが測量用の大型ドローンを除いて Phantom3 であり、各社 1 台～2 台保有し、機材保有台数がそれほど多くなく、限られた操縦者が活用している。各社はバッテリーを 7～10 個ほど購入している。メンテナンスは外部に委託する予定であるが、まだ購入 1 年以内が多く、これからモーターや ESC (=「Electronic Speed Controller」は、受信機の信号を受けてモーターの回転速度を制御するもの) 等の老朽化による問題が発生する可能性がある。

多くの会社は、Phantom3 を修理して使っていくよりも、次世代の新機種を購入し直す計画である。その方が経済面・安全面で有利という判断である。

## 3 操縦者の操縦訓練

ほとんどの会社では、トイドローンでの室内訓練

を行っている。実際に Phantom3 での撮影を行うには、トイドローンによる室内訓練数時間を経て、指導者の下で屋外訓練を 2～3 時間行い、パイロットとして認めているようである。

トイドローンであっても、ジャイロセンサーによって機体の水平を自動的に保つ機能がある。

レース用ドローンでは、アクロモードを選択することで、よりシビアな操作を体験することが出来る。このアクロモード(より俊敏な動きが出来る操作モードで、ドローンレーサーが使用するモード。自律的に水平飛行を保たないため、より訓練が必要となる)の訓練によって、さらにもう一歩、操縦技術を磨くことができる。

なお、レース用ドローンには FPV (=「First Person View」の略で一人称視点という意味である。ドローン機体の前方カメラの映像がモニターやゴーグルに映し出され、ドローンに乗っている感覚で操縦できる)によるレースを想定し、より遅延の少ない画像転送周波数の 5.8GHz が使われる。ただし、この周波数を使用するには、日本国内では無線の免許証と送信機の免許状が必要となる。アマチュア無線技士等の国家資格を取得し、さらに 5.8GHz の送



写真 3.1 レースドローン ARRIS FPV250 250mm

\*明治コンサルタント株式会社

信機の免許状の申請を行うことになる。

### 3.1 室内トイドローン訓練

トイドローンでの訓練は思い通りに操縦できるようになるための非常に重要な訓練であり、1回1時間の訓練を10回程度は行うべきと考える。

練習方法は、1名だけではなく、2名以上で行って競い合うのが良い。ただし、室内での衝突の際にプロペラがはずれて高速回転して飛散する場合がありますので、トイドローンにおいても、安全のためのプロペラガードは必須である。室内訓練は3時間と設定している企業が多い。

### 3.2 屋外操縦訓練

屋外訓練は Phantom3 を用いるのが主流である。トイドローンによる練習をする場合は、風がほとんどない日を選ぶ必要がある。まだ航空法による規制が始まる前だったが、私は近くの森林公園付近でトイドローンの練習をした際に、風で流されて紛失した経験がある。

初めての屋外でのトイドローン訓練だったが、30 m位上昇させると機体が流され始め、それに抵抗するので精一杯となった。風速は3~4 mほどあったと思われる。そのうち、機体の向きがずれて方向を見失い、森の中に飛んで行ってしまった。その時墜落したであろう方向は目を凝らして確認していたものの、あわててプロポ（送信機）の電源を切ってしまったので、バインドも切れてしまった。そのため、搜索時にプロペラを回すなどの反応を試すことが出来なくなってしまい、結局1時間ほど探したが見つからなかった。トイドローンは、電源を入れるたびにプロポと機体のバインド作業（送信機と受信機が最適な通信ができるように行う作業）が必要で、それによって操縦が可能になるが、一度電源を切ってしまうと機体側の電源も入れなおさなければバインドされないため、搜索する場合はプロポの電源は切つてはいけない。

動画ならモード2・・・移動しつつターゲットキャッチできる。  
(直線的移動で、回転しながら撮影が容易)  
レースならモード1・・・車のハンドルのよう。螺旋しやすい。  
(前進行と転回が左1スティックで出来る)

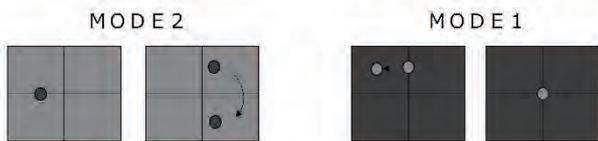


図 3.1 操縦 MODE の比較図

### 3.3 操縦モード

動画等の映像撮影では MODE 2 が有利であると思う。ただしレースドローンでは、車のハンドルのような操作が可能な MODE 1 が有利だと思っているが、それが正しいかは今のところ試行錯誤しているところである。

### 3.4 操縦訓練場所・施設

屋外での操縦訓練は、自社の敷地など訓練できる広場を用意する必要がある。北海道においても、練習場の確保は苦勞する現状がある。この春には、会員制ではあるが、北海道で初の対空標識を設置した70×200 m程度の練習場が出来るとの予定であり、写真測量の訓練にはとても期待できる。

## 4 ドローンの活用状況の事例

ドローンの活用は、防災点検、災害時、測量、河川状況の把握を含む環境調査、その他（農業、メディア、観光、趣味、イベント撮影、訓練）がある。ここではいくつかの実際の撮影事例を紹介する。なお、筆者の活用実績については、図 4.1 にプロットした。おおむね50箇所程度である。

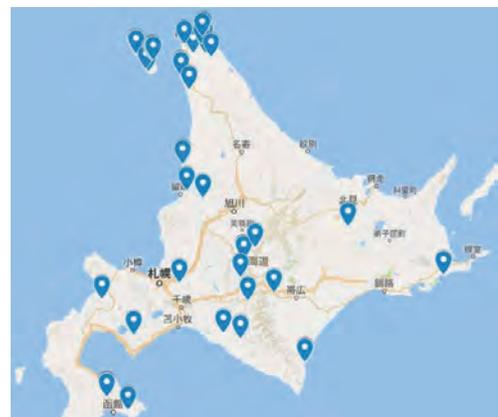


図 4.1 撮影箇所位置図 (google マイマップ使用)

### 4.1 防災点検での活用

道路防災点検の二次点検において、全体を俯瞰する写真を撮影するために活用した。

現地は、落石・崩壊の恐れのある箇所ので、1フライトの撮影が指示された。項目は以下の通り。

種別・細別：ラジコンヘリコプターによる写真撮影  
単位：フライト

数量：1

実施内容：二次点検箇所について、現地踏査やラジヘリ写真により安定度調査を行う

成果：写真帳



写真 4.1 防災点検撮影写真

実際は、操縦者2名で Phantom3 を2機同時に飛行させ、4時間程度で  $412+972 = 1348$  枚の写真撮影を行った。全景や遠景のほか斜め写真や近接写真で連続的な撮影を行った。また太陽光による影を考慮して早朝と昼過ぎの2回の撮影を行った。バッテリーは2台分で8本使用し、飛行と並行して車のシガーソケット 12V から充電も行いながら使用した。撮影データは、全景や近接写真以外に、点群データによる三次元化も試験的に行った。

## 4.2 災害時の活用

災害時の活用事例について、いくつかの事例があるので、代表的なものを紹介する。

### 4.2.1 周縁への影響把握が可能となった例

砂防ダムの袖部上流斜面の地すべり箇所では、豪雨によってその地すべりの一部が活動した際に現地調査を行った。活動範囲とその周辺までを撮影していたが、最後に遠景を撮影したところ、さらに上流側の斜面でも滑落崖を形成した小崩壊が写りこんでいた。遠景を撮影しなければ分からなかったのが、あらためてドローンによる空撮の効果を認識した。

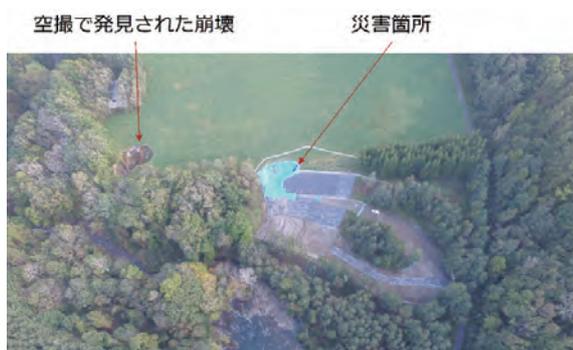


写真 4.2 空撮で発見された崩壊

### 4.2.2 強風と日没直前の短時間での撮影

現場は、2016年の豪雨災害で通行止めになった路線である。時間の都合で、夕方の15時から日没までに2つの現場の初動調査を行う必要があった。この現場はその2つ目の現場であり、1つ目の現場が16時までかかったことから、現場到着が17:30とかなり遅くなってしまった。



写真 4.3 日没直前の短時間空撮の例

当日の現場の日没時間は17:58であり、あまり時間はない。そのうえ、次の日は降雨が予想されたためブルーシートなどで崩壊箇所を覆う作業を早朝から行う予定であった。ドローンによる空撮は日没までの28分という時間制約の中で行う必要があった。しかも、風速は6m以上で激しく変化している。日没が近く光量も少ないうえに風も強い環境ではブレのない空撮は困難であった。風速が強いので、離陸および着陸時は機体の転倒が考えられる。よってハンドリリース、ハンドキャッチとし、空撮を実施した。飛行高度は、上空50~70m程度が限界で、それ以上では風に相当流されてしまう。撮影ポイントまでは出来るだけ低空で移動し、そこから上昇して風に流されながら撮影、流された箇所から再度低空に機体を下げ、再び撮影ポイントまで移動するという繰り返しを行った。強風の中での、しかも時間制約のある中での空撮だったため、墜落やフライアウェイの危険を感じながらの操縦だった。

### 4.2.3 融雪期の落石発生斜面の通行止め箇所

融雪後に雪崩柵を設置した法面に落石が発生し道路が通行止めとなった。落石再発の危険性を確認するために発生源を特定し安全を確認するための調査を実施した。

その際に、ドローンにより落石発生源を絞り込むために全景写真を空撮した。

また、落石メカニズムを説明するための斜め写真撮影も行った。



写真 4.4 落石発生法面の全景空撮

#### 4.2.5 スケールを設置しての災害箇所全景

災害写真を撮影する際には、撮影者が適切なポイントに移動して写真撮影する必要がある。その点ドローンによる撮影では、空中を自在に移動して撮影できるので、全景写真の撮影時間の短縮につながった。



写真 4.6 災害箇所にてポール設置での全景写真の空撮

#### 4.2.4 霧雨の中での空撮

土砂崩れにより通行止め区間で、災害箇所の全景写真を撮影した。あいにくの霧雨であったが、札幌から5時間かけて北見の山奥まで来たうえ、どうしても日帰りで札幌に戻る必要があったため、霧雨という天候の中で空撮を実行することにした。

機体は Phantom3A で、防水対策を施した。

まず、通気口は全てビニールテープで密閉した(20箇所以上あった)。そのうえ、モーター上部にもクリアファイルを丸く切り取って加工したフタを装着した。

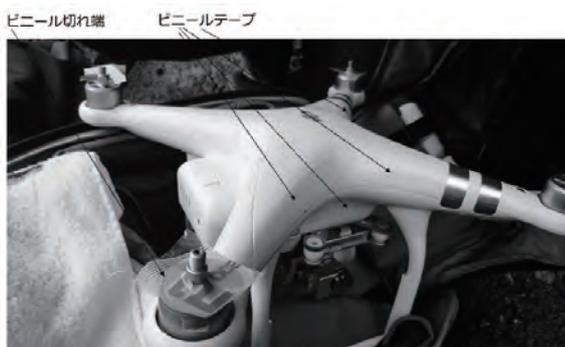


写真 4.5 霧雨の防水対策の例

霧雨は、ちょうど傘をさすかどうか迷う程度の強度で、じっとしているとすぐに衣服に水滴が付着するような状態であった。傘の下でキャリブレーションを行い、ハンドリリースで木々の間から湖上に向けて離陸させ、1分で撮影を完了。その後すぐにハンドキャッチによって着陸させた。機体は全体に湿ってしまったが、カメラレンズには水滴は付着しなかった。この飛行後も機体に問題はなく、各地で撮影が出来ている。

#### 4.3 寒冷時の飛行失敗例

##### 4.3.1 寒冷な時期での撮影 (林間に墜落)

10月末で、気温は約3℃。ボーリング調査地の全景を空撮した。機体がホームポイントより風下まで風に流されたので、上空よりも低空の方が風速は遅いと考え、林のぎりぎりの高さまで機体を降下させてホームポイントまで戻そうとしたところ、木の陰に機体が隠れたときに枝に触れたため、墜落した。墜落した箇所は、モニターによるとホームポイントから200mほどの距離にあることが分かっていたので、筐やぶを漕いで直線的に機体回収に向かうことが出来た。

機体方向に自分が移動すると、モニターで着実に機体に近づいていることが確認できたので捜索が容易だった。機体を発見したとこと、墜落の衝撃でバッテリーが外れていたが、墜落箇所の位置が記録されていたので捜索が可能だった。



図 4.2 林間部での墜落事例

##### 4.3.2 寒冷な時期での撮影 (寒冷地かつ強風下)

風力発電ヤードにおいて、調査地の全景を空撮した。地上風速は8~10m、風車の回転が速いので

上空はかなりの風速が予想される。そのため出来るだけ風下に流されないように配慮し、流されたら下降させて体制を整え直し、低空で風上に移動して再度目標高度に上昇する計画とした。

機体の最大飛行速度が無風時に 16m/s なので、風速 15 m 程度まではぎりぎりコントロール出来るだろうと考えていた。ハンドリリースで撮影を開始した。風上に向かって斜め上方に徐々に高度を上昇させていった。ホバリングも問題なく安定しているので、さらに風上かつ上空に進めていった。気温が低いと、モニター映像は実際の機体の動きよりもどんどん遅延することがわかっていたが、今回も気温が低いので、モニターに映る画像は機体の挙動よりも数秒遅延していた。

しばらくして、モニターに「低温のためバッテリーの出力を制限します」というような警告が表示され、実感としては出力が半分程度に制限された感覚であった。機体は直ちにホバリングが出来なくなり風下に 2~4m/s で流されていった。あっという間にホームポイントよりも風下に流されてしまった。気は焦るばかりだが、低空は風が弱いので降下させることで徐々に位置を風上に戻していったが、ずっとプロポのスティックは振り切っていた。しばらくして、プロポのスティック操作に力を入れすぎたのと、モニターの映像が遅延していることから、スティック操作がずれ、目を離れた瞬間に機体が回転してしまった。その一瞬で、再度風下に流されて行って遙か彼方に小さくなってしまった。バッテリー電圧は低下し、残量も 30% となった。さらに、電波が途切れ途切れになり、リターントゥホーム（あらかじめ登録した「ホームポイント」に機体を自動的に帰還される機能）が発動したのち電波が完全に途切れてしまった。

私は、ホームポイントに戻すことをあきらめ、風上に戻るのではなく、横に移動させて着陸させることを考えた。幸い、道路は風下に流されてしまった機体の横方向にも通っていたので、自分も車で急いでそちらに移動し、電波の回復とともに機体を誘導し、バッテリー残量ぎりぎり機体を回収することが出来た。電波が届かなくなっても自立飛行が出来たので、自分が動くことで電波を回復することが出来た。

### 4.3.3 冬 (-8℃) の標高 1200 m での撮影

全景撮影をしたが、気温はマイナス 8℃ だったため、シャツの中でバッテリーを温めて準備をした。約 5 分間の飛行に問題はなかった。

但し、モニターには 1 秒程度の遅延が発生したの

で、目視飛行は必須である。



図 4.3 寒冷かつ強風下での機体回収例



写真 4.7 冬の標高 1200 m での撮影例

## 4.4 その他の全景撮影事例

防災点検や災害などの他にも、いくつかの撮影事例があるので、紹介する。



写真 4.8 集中豪雨の後のダム全景撮影



写真 4.9 業務提案のための橋梁全景撮影



写真 4.10 海からの砂防施設等の全景撮影



写真 4.11 ボーリングマシン搬入のためのルート探索撮影

## 5 課題と問題点

北海道では11月に最高気温が10℃を下回り、さらに12月に入ると平均気温が0℃を下回る（札幌）ようになる。なお、道北では10月後半でも平均気温が10℃を下回るため、安全に飛行できるシーズンは5月～10月の6ヶ月となる。半年間の低温となる期間が問題であり、低温下での安全な飛行が今後の課題である。私の撮影現場は、関係者以外は近寄らない場所であったが、民家や通行人がある地域での空撮には厳重な安全管理が必要である。

乗用車の事故が降雪期間に多いのと同様に、ドローンの事故も低温期に多いのではないだろうか。ドローン機体への影響は、とくにバッテリーの低温による不具合がほとんどである。マニュアル上では機体の動作環境温度が-10℃～40℃となっている。機体の予期せぬ不具合を想定して、予備機を準備したうえ、ホバリングによりバッテリーの温度を20℃以上にする（DJI GO アプリ上で現在のバッテリーの温度を確認）ことが必要である。また機体には愛着を持つことが必要であり、モーターやプロペラについてのこだわり、ジェロ現象<sup>1)</sup>によるブレや振動によるジェロ現象対策（バランス調整）を行うべきである。

## 6 法令順守・申請

### 6.1 航空法

2016年9月から、包括申請などがスムーズになった<sup>2)</sup>。国土交通省への申請数がかなり増加したため、航空局標準マニュアルが整備され、それを遵守することでマニュアルの作成が不要となった。

さらに、操縦士の技量や過去の飛行実績または訓練実績等についての証明も簡略化された。ただし、申請から認可までの時間はかかる。

2017年に入ってからの包括申請の際には3週間以上かかると通知があった（実際には3週間ちょうどで日本全国での飛行許可が下りた）。今後、さらに申請数が増加すると思われるが、申請者の実績も増えるため、申請から認可までの手続きの簡略化は進むものと予想できる。現在は都度申請している会社が多いようだ。

### 6.2 電波法

海外仕様の5.8GHzの周波数の発信機（映像等）の使用には許可が必要である。通常のプロポは2.4GHz帯なので問題は無いのだが、私は5.8GHzの送信機が使いたかったのでアマチュア無線技士3級を取得し無線局を開局、加えて将来に備えて第二級陸上特殊無線技士も受験した。

## 7 おわりに

今のところ機体のメンテナンスはあまり必要ないと思われる。現在、毎年新しい安全に配慮のある機種バージョンアップが盛んで、しかも旧バージョンのモデルも続々と安価に発売されている。そのため、1つの機体で数年間メンテナンスして運用するよりも、古い機体は練習用として残し、毎年新しい機体に更新していくことが安全面や品質面からも良いと考える。

最後に北海道の建設コンサルタントにおける活用状況について多くの情報を頂いた関係各位には、この場をお借りして深く御礼申し上げる次第である。

### 〈参考文献〉

- 1) 井上公, 内山庄一郎, 鈴木比奈子: 「自然災害調査研究のためのマルチコプター空撮技術」, 「防災科学技術研究所研究報告」, 第81号, 2014年3月  
[http://dil-opac.bosai.go.jp/publication/nied\\_report/PDF/81/81-5inoue.pdf](http://dil-opac.bosai.go.jp/publication/nied_report/PDF/81/81-5inoue.pdf)
- 2) 行政書士 前場亮事務所: ドローン飛行の許可申請を自分でやる! ⑦マニュアル作成 <http://drone-kyoka.com/drone-zibunde7> (2017年2月19日現在)

※掲載写真は、すべて弊社撮影

# 地すべり調査における ドローン (UAV) の活用事例

やまさき しんたろう\*  
山崎 新太郎\*

Key Word

ドローン (UAV), SfM, 地質調査, 地すべり, 表層崩壊, 斜面災害

## 1 はじめに

ドローンまたは UAV (Unmanned Aerial Vehicle) と呼ばれるラジコン操縦による写真撮影機能を持った無人航空機 (以下 UAV と呼ぶ) は低価格で高性能の機体が普及してきており、さらに運用面における安全性も格段に向上してきている。地すべりにおける調査でも、既に多くの研究者・技術者が UAV を利用した地質調査を行ってきており、筆者は、決して第一人者といえる立場ではないが、約 2 年間低価格の普及型 UAV (図 1) を導入しての地すべりの調査を行ってきたことから、どのような調査において UAV による観察が有効であったかについて述べていきたい。なお、筆者は地すべりの調査における UAV の活用事例についてということで、担当編集者から原稿を引き受けた。しかし、「地すべり」という用語は岩盤すべりなどの塊状移動体の移動現象を対象を絞る場合もあれば、広く重力移動現象を包括した多義語である場合もある。ここでは後者の意味とし、後述する表層崩壊の観察事例も挙げておきたい。また、ある程度、網羅的に解説するために詳しい地すべりの構造やメカニズムの解説は省略しているので、参考文献等を参考にしていきたい。

本報で紹介するこれまでの UAV を用いた調査・研究の内容には北見工業大学・平松雅宏技術員、渡邊達也助教、吉川泰弘助教との共同での成果が多く含まれている。さらに、UAV における調査法については、防災科学技術研究所・内山庄一郎氏、地すべりの構造やメカニズムについては株式会社ドーコン・田近淳氏、京都大学防災研究所・松浦純生教授にご教示頂いた内容も含まれているので、ここに記して感謝申し上げる。



図 1 筆者の調査で用いている UAV (DJI 社, Phantom 4) と対地目標 (地上基準点となる標識) および DGPS 受信機

## 2 地すべりの調査における UAV の活用

地すべりの影響範囲や被災範囲を緊急に調査しなければならない場合において、言うまでもないが空撮は極めて有効である。巨大な地すべりの場合、その正確な形状を直ちに把握することが難しく、森林が視野を遮ることも多い。しかし、UAV を用いれば地すべりの全体や周辺を広く安全に観察できる。さらに、衛星写真や航空写真と異なり画像取得まで調査者が待つ必要も無い。

筆者が経験したものの中で UAV を活用して地すべりの全容が迅速につかめた例として、2015 年 4 月に発生した北海道羅臼町・幌萌海岸の地すべりを紹介する。当初、筆者がこの地すべりを UAV により調査したきっかけは、地震研究者からの依頼によるものであった。それは地すべりの前面の沿岸から

\*北見工業大学工学部社会環境工学科 助教



図2 UAVにより3つの角度・位置から撮影した北海道羅臼町・幌萌海岸の地すべり

海底部においてわずか数時間のうちに顕著な隆起が生じ、海面上に帯状の巨大な台地が形成されたものであった。当初、この隆起帯の形成が、地すべりと関連すると疑われることなく、なんらかの別の地殻変動の関連が疑われ、大きく報道された。しかし、UAVによる上空からの観察で陸地側に巨大な三角形の滑落崖が生じていたことが判明した。滑落崖は民家や除雪された道路から離れた緩い段丘上の森林の中にあり、民家や道路からは観察不可能であった。隆起と地すべりが関連していることは、上空からの観察によりはじめて明確になった。その後、筆者らのUAVを用いた調査により得た画像や動画は、多くのメディアで報道された。

一方で、この地すべりのメカニズムや、なぜ地すべりが巨大な隆起帯を形成したかについては、その後議論を呼ぶこととなった。ここでもUAVにより得た画像はその考察に大きく役立った。図2に示したのは発生直後の幌萌海岸地すべりを3つの角度から捉えた画像である。鉛直方向の画像には、雪捨場として利用されていた道路を認めることができるが、地すべり移動体の分離と移動により道路が10度程度時計回りに回転している。これから、分離した地すべり移動体が主に南東方向に運動したと分析できる。次に、側方からの画像において、隆起帯は海蝕崖より前方に台地上に形成されていることが観察できる。また、地すべり移動体上の木々には大きな前後への傾きが生じておらず、これからは平面的

なすべり面を有する並進すべりに近いことが推定できる。そして、斜め方向からの画像からは、海岸線に平行に形成された隆起帯は、複数の紡錘状の高まりが繋がった集合体であることが観察できる。後に、筆者も参加した踏査<sup>1)</sup>では、地すべりは南東から南南東に傾斜する新第三系泥岩・凝灰岩互層の流れ盤上に形成されていることが判明した。後述するが、隆起帯の断面には水平方向からの圧縮により形成された褶曲が認められ、隆起帯はこの褶曲の集合体であった。地すべりの内部構造やメカニズムを分析するのに有効な情報をUAVによる多角的な観察により踏査以前に得ることができたのである。

### 3 急崖や接近困難地の調査

地すべりの調査をはじめとする地質調査においては急崖の調査も頻繁に求められる。UAVによる観察が微細に亘る専門家の地質観察を代替するものではないが、調査者にとってロッククライミングなどの特殊な登攀技術の必要なく、急崖の接近観察・撮影ができることには大きな利点がある。また、調査対象が急崖に位置する場合、地形図に正確にその形状を図示できず、鉛直方向の航空写真や衛星写真から、その状況を観察することも難しい。

筆者らは、2014年8月の北海道礼文島豪雨災害によって発生した複数の地すべりにおいて、翌年6月にUAVを用いた調査を行っている。その中で特

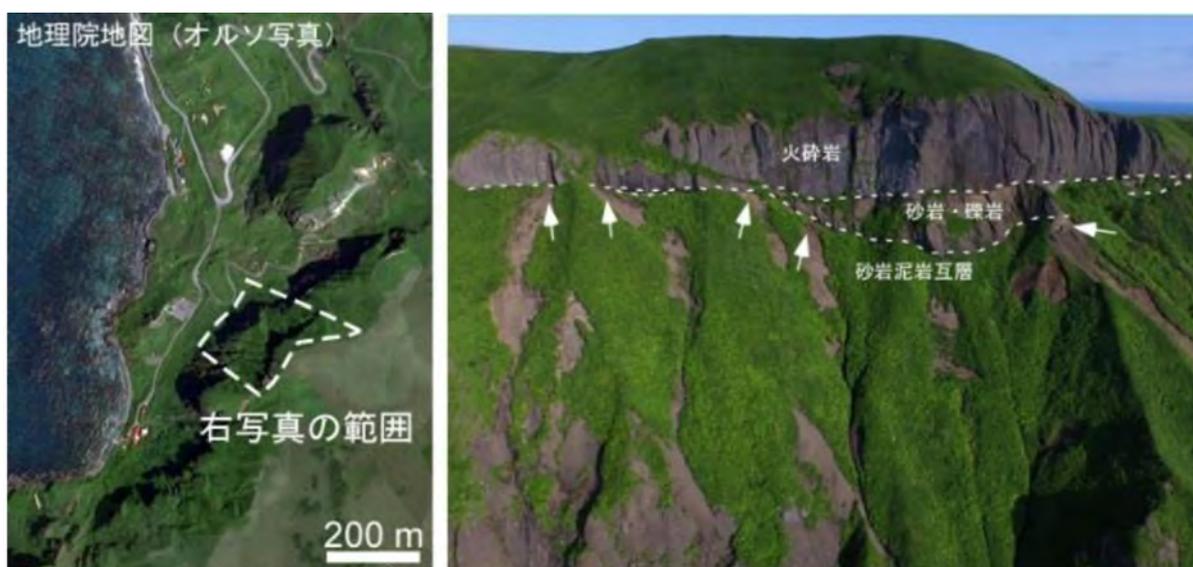


図3 2014年8月北海道礼文島豪雨による桃岩南方の表層崩壊発生箇所  
(右は UAV 撮影画像であり、図中の矢印は岩相境界を起源とする表層崩壊を示す)

にその効果が発揮されたのは、島南部の急崖地における表層崩壊の調査においてであった(図3)。この場所は、ほぼ鉛直から約45度の傾斜で鉛直比高差が約150mに達する斜面であり、なおかつ海が後方に迫るような場所であった。そのため、崩壊の発生箇所、形状、そして、斜面上方に存在する地質境界や岩相を正確に把握することは困難であった。筆者らはUAVを崖直下から上昇させ、水平方向に斜面にレンズを向けて観察することで、それらが初めて正確に観察できた。特にこの調査の結果、崖の最も上に位置する火砕岩とその直下に不連続に分布する砂岩・礫岩層(正級化構造を呈する)が鉛直に近い露岩壁を形成しており、そして、その下方のそれよりやや緩い斜面を形成する砂岩泥岩互層において表層崩壊の多くが発生していた。また、火砕岩と砂岩泥岩互層の地質境界や、砂岩・礫岩層と砂岩泥岩互層の地質境界の直下で複数の表層崩壊が発生していることが観察できた。おそらく、傾斜変換点付近に上方から流下した表層水が集中し、それにより飽和した場所において崩壊が発生していると考えられるが、このような観察事実は表層崩壊の発生場を考える上で科学的に意味がある。

急崖のみならず、海食崖などの船舶でしか接近できない場所や、落石が頻発するような直下に接近できない場所においてもUAVによる観察は有効である。図4は北海道地質百選にも取り上げられている入境学(にこまない)の地すべりである。この地すべりの末端には地すべりの内部構造を示す重要な露頭が海食崖にあり、田近<sup>2)</sup>により精密な観察結果が記載されている。一方で、この海食崖は船舶を用い

てある程度離れなければ全体が見渡せず、容易に近づくことは困難であった。UAVを用いてこの露頭の全体状況を観察すると大構造を明確に観察することが可能である。この露頭は節理が生じて分離した個々の岩石が前方、後方へと転動している様子を見事に示している。さらに、前方回転が主な領域と後方回転が主な領域からなる大構造が存在し、それに応じた陥没地形も観察できる。地すべりに限らず地質構造には大小双方においてこのように複雑な構造を呈するものがあり、特に大きな構造は丹念な踏査の無しには識別ができない場合も多い。一方で、微小構造の観察には踏査がやはり不可欠である。

#### 4 連続的な地形変化の観察

地すべりの調査におけるUAVの利用方法として、今後最も重要な役割が期待されるのが、地形変化を記録・観察する手段としての利用である。UAVを用いて繰り返し対象地を空撮することで、広い領域の一連の地形変化を正確に分析することが可能になる。簡便な方法としては、鉛直方向から撮影した多時期の画像をオルソ化して比較する方法である。図5は前述の幌萌海岸の地すべりの「海底」隆起帯における2時期の地形変化を示している。地すべりにより出現した隆起は5ヶ月後の台風により大きく消失した。UAVを用いれば、衛星写真を用いずとも、任意の時に広い領域の地形変化を捉えることが可能であり、衛星写真よりも解像度の高い分析が可能になる。さらに、鉛直方向以外にも多角度から撮影することで変化してゆく露頭を迅速に記録することが



図4 北海道厚岸町・入境学（にこまない）における地すべり末端の海食崖に露出した内部構造をUAVで撮影

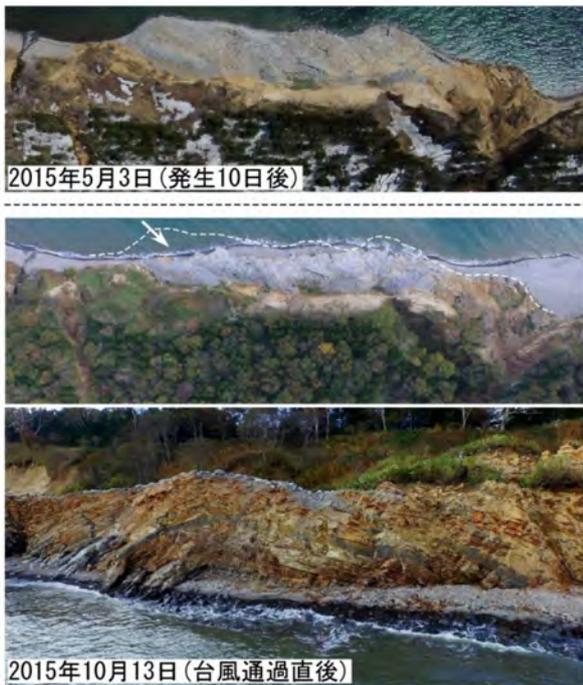


図5 北海道羅臼町・幌萌海岸地すべりの末端に形成された「海底」隆起帯における地形変化（UAVを用いて撮影した鉛直オルソ写真）と、侵食で露出した隆起帯の内部（海上の離れた場所よりUAVにて撮影、鉛直オルソ写真に矢印で位置が示されている）

できる。図5に示した、隆起帯の内部構造を示す貴重な露頭は、撮影日から数ヶ月のみ露出した後、2016年春には失われた。

現在、UAVを用いた地形変化の観測においては、多くの技術者・研究者が単純に空撮から進んで、地形の三次元モデルを作成し、細かな地形変化を捉える試みを行っている。地すべりにおいてはNiethammer et al.<sup>3)</sup>が裸岩した地すべり地の地形変化の観測においてこの方法を用いており、また国内の地すべりの研究においては、防災科学技術研究所の内山氏らが2013年伊豆大島災害の被災地<sup>4)</sup>や前述の幌萌海岸地すべり<sup>5)</sup>で実施している。これ

はSfM (Structure from Motion) と呼ばれる対象を多角度から撮影した複数の写真画像を合成して三次元復元する技術の応用であり、作成された三次元地形モデルは数値表面モデル (DSM: Digital Surface Model) と呼ばれている。数値標高モデル (DEM: Digital Elevation Model) と呼称が異なる理由は、航空レーザー計測とは異なり写真画像を元にしたモデル化では植生の影響を取り除くことが不可能であるためである。そのため、植生が密な我が国ではこの技術の地すべり観測への応用は限定的であると思われる。しかし、適切な調査対象を選べば、複数時期に取得した調査対象のDSMに対して差分計算を行うことによって三次元的な地形変化の追跡が可能である。また作成したDSMそのものも地すべりや土石流の到達範囲や動きを予測するための数値計算シミュレーションに用いることも可能であると思われる。図6は北海道東部浜中町・奔幌戸（ほんぼると）の幅約100mの地すべりにおけるDSMの作成例である。これは、普及型のUAV (Phantom 4) により撮影した158枚の写真画像と5点の地上基準点を用いて作成した。地上基準点は図示するように5点配置し、50cm以下の精度を持つビーコン内蔵DGPS受信機（図1）を用いて測位を行った。撮影画像の合成と点群データの抽出は、Agisoft社製PhotoScan Professionalで行い、そのデータを用いて、水平方向0.25mメッシュのDSMをGolden Software社製Surfer 12により作成した。野外での作業時間、すなわちUAVの運用および5点の地上基準点の測位に要した時間は約1時間半である。植生の影響なども考慮すると、現在、我々の持つ装置では0.5m程度以上の変化が発生した場合に有効な地形変化の検出が可能と考えられる。さらに精度の高いGNSS受信機を導入すれば、精密な観測が可能であろう。既に山村<sup>6)</sup>が砂防えん堤の堆砂状況の観測にUAVと高精度GNSS受信機を導入してDSM

を作成し、三次元において4cm以下の精度を実現している。この技術により、今後地すべりの運動に関する精密な観測が各所で実現すれば、複雑な挙動を示すこともある地すべりについて新たな科学的知見が得られる可能性がある。

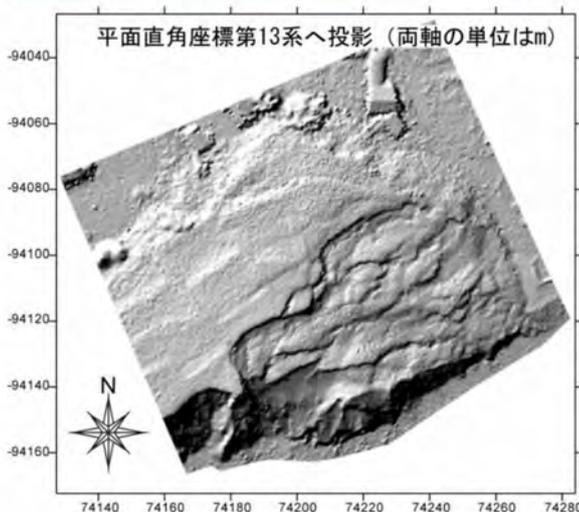


図6 北海道浜中町・奔幌戸(ぼんぼろと)における地すべりのUAVによる空撮画像と作成したDSMの陰影表示

## 5 おわりに

筆者は安価な普及型UAVを用いた地すべりの調査に関して述べてきた。UAVを用いた観察を地質踏査と併用して用いることで、地すべりの調査の効率は格段に向上するものと思われる。そして、UAVとSfM技術がもたらす広範囲の地形変化の観測は複雑な地すべりの動きの解明につながると思われる。

既にハイエンドのUAVには、分光器等の各種センサー、望遠拡大自在のレンズ、そしてレーザースキャナなどを搭載したものが登場しており、これらは地すべりの分析と観測においてさらに重要な役割を果たすだろう。

## 〈参考文献〉

- 1) 川上源太郎, 山崎新太郎, 伊藤陽司, 高橋 良, 渡邊達也, 興水健一, 田近 淳: 北海道, 羅臼町幌萌地すべり: 海岸を隆起させた地すべり, 第54回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.13-14, 2015.8
- 2) 田近 淳: 堆積岩を起源とする地すべり堆積物の内部構造と堆積相, 地下資源調査所報告, 第67号, pp.59-145, 1995
- 3) Niethammer, U., James, M.R., Rothmund, S., Tranelletti, J., Joswig, M.: UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results, Engineering Geology, Vol. 128, pp.2-11, 2012.3
- 4) 内山庄一郎, 井上 公, 鈴木比奈子: 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, No.81, pp.37-60, 2014.2
- 5) 内山庄一郎: SfM多視点ステレオ写真測量を用いた2015年羅臼町幌萌地すべりにおける地すべり発生前後の地形計測, 第54回日本地すべり学会研究発表会講演集, 96-97, 2015.8
- 6) 山村 充, 内山庄一郎, 熊井直也: UAV-SfMを用いた砂防えん堤の堆砂状況のモニタリングと堆砂量推計, 日本地すべり学会誌, Vol. 53(6), pp.9-13, 2016.11

# ドローンを使用した 不安定岩盤の抽出

はるぐち たかゆき\*、まつば こうじ、わたべ よしひこ\*\*  
春口 孝之\*、松場 康二、渡部 芳彦\*\*

**K**  
ey Word

ドローン、急崖斜面、雁行亀裂、花崗岩、崩壊、オーバーハング

## 1 はじめに

民家や道路に隣接する急傾斜地では、不安定岩盤を崩壊前に抽出することは重要な課題である。

急崖斜面では、地表踏査のみでは、岩盤状況を全て把握し評価することには限界がある。このため、直接観察することが困難な急崖壁面、急崖頭部などを安全にかつ効率よくデータを取得できるドローンが注目されている。

今回、地表踏査の結果にもとづきドローンを用いた斜面調査を行い、不安定岩盤の抽出を行った。

さらに抽出した不安定岩盤が、崩落したことを受けて、再度ドローンにより崩壊後のデータを取得した。

本報告では、崩壊前後のドローンで取得した画像をもとに、不安定岩盤の抽出にドローンデータをどのように活用したかについて紹介する。

## 2 崩壊の経緯

急崖斜面の評価を行うため、地表踏査を行った。その結果、急崖側面に変形を示唆する雁行配列する開口亀裂を確認した。急崖下方からの観察には限界があり、斜面がほぼ直立していたため、人力で急崖直上へ到達することも出来なかった。

このため、ドローンによる斜面状況の観察を行い、雁行亀裂の状況や地表踏査では確認できない急崖天端の状況を確認した。

この結果、急崖天端に急崖側面で確認した雁行亀裂とペアをなす明瞭な雁行亀裂を確認した。亀裂確認から約3ヶ月後、雁行亀裂および鉛直の開口亀裂に囲まれた部分（幅5m×長さ10m×高さ20m）が崩落した。このため、岩盤崩落後に再度ドローン

を用いて崩壊箇所のデータを取得し、崩壊前後の画像データを比較することにより、崩壊メカニズムについて解析を行った。

## 3 崩壊箇所の概要

崩壊箇所は、かつての花崗岩の採石場跡である。現地踏査の結果を図-1に示す。

急崖斜面には、走向がNS方向で70～80度東側に傾斜する亀裂と、これに直交し走向がEW方向の鉛直亀裂との2方向が卓越しており、これらの亀裂が斜面の基本的な形状を形成していた。

この他にEWに近い走向を持ち10度前後で北に緩く傾斜する亀裂が発達していた。

亀裂と斜面変形との関係は図-2に示すとおりである。以下に各斜面の変形状況について示す。

- ①斜面：東側に高角度で傾斜する亀裂を分離面とし、岩盤が西側へ傾倒していた。
  - ②斜面：EW方向とNS方向の走向を持つ鉛直亀裂と水平に近い亀裂面を分離面とし、岩盤が急崖から抜け落ちていた。
  - ③斜面：高角度で東側に傾斜している亀裂面を分離面として、岩盤が開放面方向に押し出していた。
- 崩壊は①斜面で発生した。①斜面では、急崖の中腹～下端にかけて、見かけ上緩やかに東側に傾斜するヒン岩岩脈が貫入していた。

ヒン岩には亀裂が多数認められ、この上に塊状花崗岩が載っている状態となっていた。

以下に現場での地表踏査結果とドローンで取得した画像をもとに不安定岩盤の抽出および崩壊後の検証を行った結果について詳述する。

\*株式会社ダイヤコンサルタント西日本事業本部 \*\*株式会社ダイヤコンサルタント関西支社四国支店

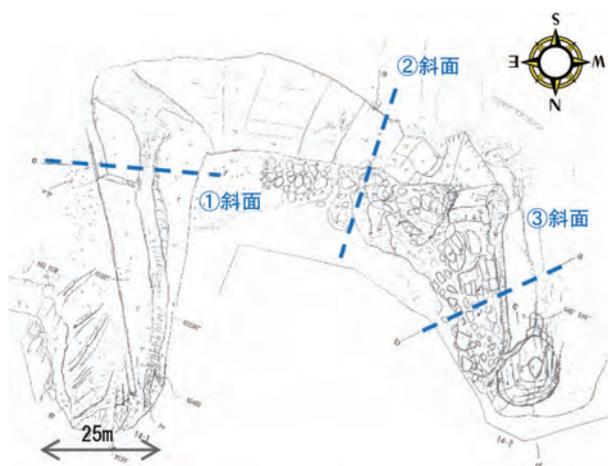


図-1 現地踏査結果平面図

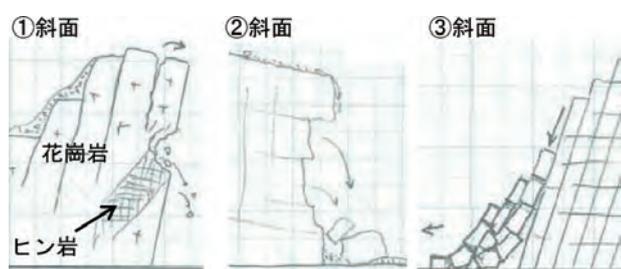


図-2 変形形態模式断面図

#### 4 崩壊前の観察結果 (①斜面)

現地観察の結果、ヒン岩岩脈の上にある花崗岩の急崖面に山側に傾斜し雁行配列 (右ズレ) する開口亀裂があることを確認した。

さらに背後にある鉛直亀裂は、高角度で山側に傾斜しており、亀裂面は上端がより開口していることを確認した。

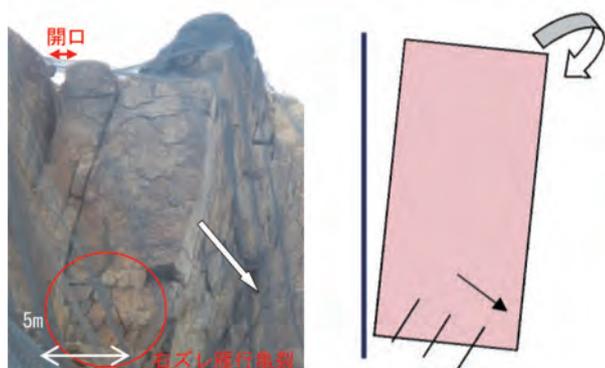


図-3 花崗岩の急崖面状況と変形の模式図

この結果を受けて、急崖天端の状況を確認するため、ドローンにより地形データおよび画像を取得した。ドローンにより取得した急崖天端状況を写真-1に示す。

写真-1に示すように、山体と急崖との接触部に雁行する左ズレの亀裂を確認した。



写真-1 ドローンによる急崖天端の状況

これは、側面で確認した右ズレの雁行亀裂とペアをなすものである。さらに急崖東側 (写真上側) にある鉛直亀裂は完全に開口しその延長部が雁行亀裂に連続していることを確認した。このことから、これらの亀裂に囲まれた部分が、一体として傾倒し不安定な状態にあると判断した。

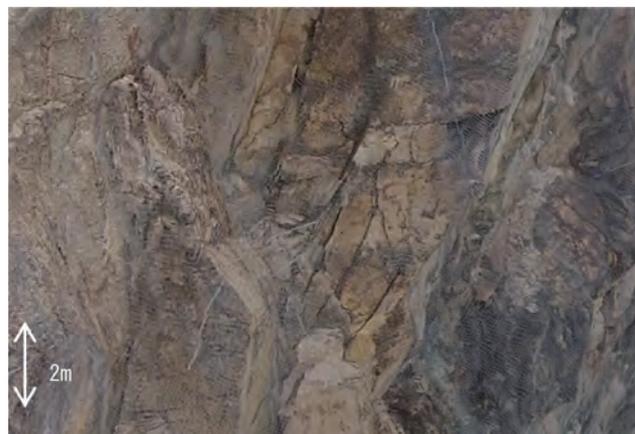


写真-2 急崖面の雁行亀裂 (ドローンで撮影)

写真-2には、ドローンで撮影した雁行亀裂を示す。亀裂の雁行状態、開口状態など、地上からの写真では判読できない詳細な亀裂の変形状態を確認できる。

#### 5 ドローン画像による崩壊前後の比較・解析

崩落直後に現地で崩壊状況を観察するとともに再

度ドローンにより、崩壊斜面の画像取得を行った。崩壊前後のドローン画像を写真-3に示す。

崩壊前後のドローンの画像を比較解析することにより、崩壊は、90に近い高角度で東傾斜する亀裂を分離面（写真-1および3参照）として生じていたことがわかった。

さらに崩壊の南側端部は、崩壊前にドローン画像で確認していた開口部から連続していた雁行亀裂を分離面としていることも確認できた。

ドローン撮影に当たっては、事前に地表面にターゲットを設置することにより、既存の地表面の地形データとの整合が可能である。

これによりドローンで記録されたデータは、既存の平面データと連続する位置と高さを持った三次元データとなることから、任意の断面作成が可能となった。

ドローンの取得データをもとに作成した崩壊前後の断面から急崖面の角度を読み取った結果を図-4に示す。崩壊前後の断面を比較すると、崩壊はヒン岩と花崗岩との境界近のオーバーハング部分を下端として発生しており、崩壊はヒン岩より下部の花崗岩を巻き込んでいないことがわかった。

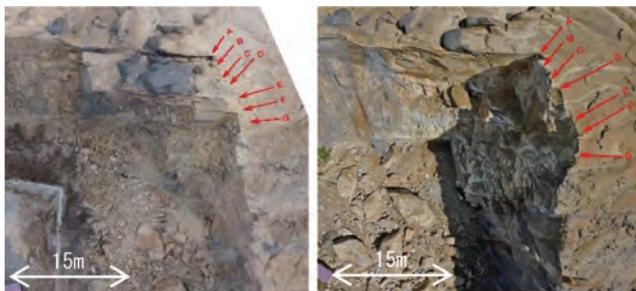


写真-3 崩壊前後の急崖天端状況

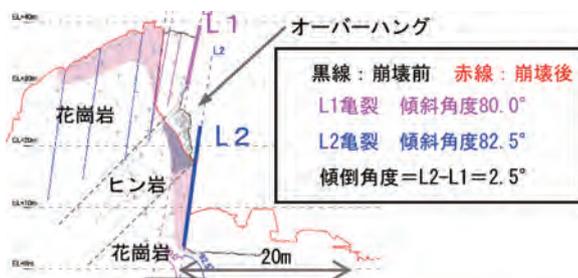


図-4 崩壊前後の断面図

また、崩壊した部分の傾斜L1が、崩壊しなかった下方の急崖部の傾斜L2と比べ2.5度程度傾倒していたことを確認できた。さらに、崩壊後に残った急崖面の傾斜は、崩壊しなかった岩盤下部の傾斜角

度とほぼ同じであることも確認できた。

崩壊前後の断面形状の比較から、崩壊前に岩盤の傾倒（重力変形）が始まっていたこと、今回の崩壊で新たに形成された分離面はまだ変形が起きていないことを確認できた。このように、ドローン画像により崩壊前後の急崖の微妙な傾倒角度の違いを把握し、残斜面の安定性評価を行うことが可能となる。



写真-4 崩壊面の状況（遠望写真）



写真-5 崩壊面のドローン画像（拡大）

崩壊面の状況遠望写真を写真-4に示す。崩壊面に向かって左上から右下にかけて、鉛直の開口亀裂があり完全に分離し褐色を示す部分、白色がかった褐色部分、一様に褐色を示す部分、そして一部灰白色を示す新たな分離面を含む部分を識別できる。亀裂表面の状態の差異は、亀裂面の開口度の違いを示しており、崩壊面に向かって右下の方が、密着度が高かったことを示している。

写真-5には、この遠望目視部分の一部を拡大した画像を示す。破線より右側は、密着度の高い部分であり、右下端部には新鮮な岩盤の亀裂面を確認できる。左側上方には、平滑な面があり、崩壊前に分離開口していた面である。写真中央部に凹凸のある粗い面が認められ、崩壊時に分断された部分と判断できる。このように詳細な分離面観察は、変形解析する上での有益な根拠となる。

現地観察による変形状況の観察と、ドローンで取得した崩壊前後の画像解析とをもとに推定した崩壊機構を図-5に示す。

花崗岩の下に貫入しているクラッキーなヒン岩部分が剥落し、この上にある花崗岩の急崖はオーバーハング状態となっていた。これに伴って、崩壊面に向かって左側上部が傾倒し、崩壊面に向かって右側下部へと亀裂面の拡大が進行していた。

この花崗岩の急崖部がヒン岩との境界部分を支点として回転しながら前方に崩壊した。

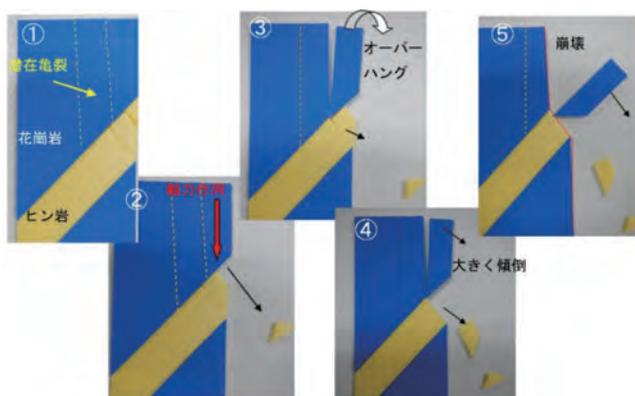


図-5 変形模式図

### 7-6 ドローンによる残斜面の評価

写真-6には、崩壊後のドローン画像を解析し、残斜面の中で不安定と評価した部分を示す。

画像から、岩盤の天端に開口亀裂が連続している状況を判読できる。また表面に刻まれた、ガリーの形状から、亀裂の開口部に向かって流入するみずみちがあることがわかる。このみずみちは、南北に伸びており斜面に存在する亀裂に規制される形となっている。

斜め上方からの視点で観察すると、亀裂が開口し傾倒が始まっていること、傾倒した岩盤に水平亀裂があり、わずかであるが後方変位している状況が確認できる。ドローンデータは、動画であることから、変形の状態を最も的確に確認できる方向を抽出することが可能で、必要部分を静止画像として観察することもドローンの強みである。

現地踏査では位置的な制約があるため限定的な視点からの情報となってしまうが、ドローンでは、急崖斜面を任意の角度から、観察することができることから、精度の高い斜面評価が可能となる。

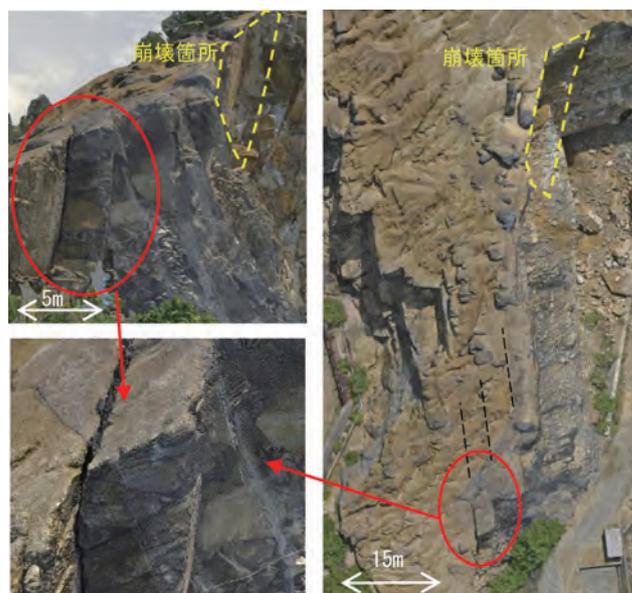


写真-6 今後崩壊が予測される斜面

### 7-7 ドローンデータによる地形図の作成

ドローンにより取得したデータは、座標を持った三次元データであるため、地表面からのレーザー測量データを組み合わせると、オーバーハングした岩盤の下面の状態も連続データとして取得できる。この結果、特に安定度評価のために必要なオーバーハング部分の下面を、動画として観察できる。

不安定岩盤などの問題のある部分については、関係する技術者が、同じ画面を同時に観る事が可能であることから、問題意識を共有しながら考察できるという利点もある。

ドローンにより取得したデータを基本に作成した三次元地形コンタを図-6に示す。コンタは高さごとに着色し、立体画像として認識しやすくしている。

コンタ図は、回転させて任意の方向から、確認することが可能である。

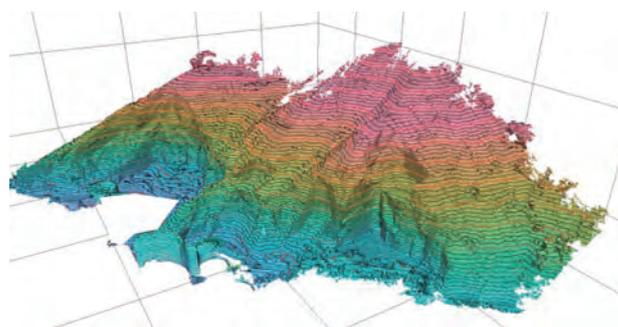


図-6 ドローンのデータで作成した地形コンタ図

## 8 まとめ

急崖斜面での地表踏査には限界がある。ドローンによりデータを取得することで、人が行けないような高所、急崖斜面を安全かつ詳細に観察ができる。調査の基本的な流れとしては、まず現地踏査で問題点を抽出し、問題点を意識した上でドローンにより詳細に観察することが効果的と考える。これにより、問題点を絞りこんだ精度の高い斜面評価を行うことが可能となる。

ドローンを用いることで、斜面全域のデジタルデータを面的に取得することが出来るため、任意の断面が作成可能であり、設計、施工に際して最も効果的な任意の断面を作成が可能である。何よりも安全に急崖の地形状況を把握できる。

ドローンのデータを読み解くにあたっては、現地踏査による詳細な現地観察が不可欠であると考えられる。両者を同時に行うことで、ドローンで獲得したデータを詳細に読みとくことが可能となる。

このように、急崖頭部や側面の安定性を、安全にかつ詳細に評価するためには、ドローンの活用が非常に有効である。

---

### 〈参考文献〉

- 1) 春口孝之, 松場康二:「岩盤斜面の崩壊予測事例」, 全地連「技術フォーラム 2016」熊本, 2016
- 2) 春口孝之, 松場康二, 渡部芳彦:「UAVによる不安定岩盤の抽出と崩壊後の検証事例」, 「応用地質学会 平成28年度研究発表会講演論文集」, pp.111, 2018

# UAVによる空撮画像のローカルな地形把握と防災利用の試み

こんどう れいすけ 近藤 玲介\*  
よこた あきひろ 横田 彰宏\*\*

**K**ey Word UAV, 空撮画像, 地形分類, 防災利用, 地域

## 1 はじめに

日本における無人航空機 (unmanned aerial vehicle; 以下, UAV) を利用した地質学および関連分野への適用の事例は, 安価で安定した飛行が容易に行える機体 (例えば, DJI 社の Phantom シリーズなど) の普及により, 2010 年頃より急速に進んでいる。地質関連分野では, 火山学的な利用や自然災害分野での一次データ収集での強力なツールとして認知されつつある<sup>1), 2)</sup>。地形学分野においても, 特に断層変異地形の把握や地震などに伴う重力地形の記載のために適用が進む<sup>3)</sup>。筆者らは, 北海道や三重県南部においてローカルな範囲での地形地質研究や, 地域防災に資するデータ収集を行うにあたり UAV を利用している。また, UAV からの空撮による静止画および動画は, 単に研究・分析のための専門的な利用だけではなく, 地域の一般住民や行政職員などを対象とした, 自然景観の提示と理解促進にとっても有効な手段である。そこで本稿では, 北海道北部オホーツク海側の頓別平野において微地形を含む地形分類図の作成にあたって UAV 画像を利用した事例と, 志摩半島南部に位置する三重県度会郡南伊勢町における地域防災の地域住民への周知にあたり地形的障害をわかりやすく伝えるための取組みについて紹介する (図 1)。

## 2 UAV 器材および解析の方法

本稿で用いた UAV は, 現在最も一般的に普及が進む民生 UAV の一つである DJI 社 Phantom4 である。本機体に内蔵されているデジタルカメラにより空撮時に静止画および動画を取得した。取得画像データの内, 静止画については, 写真測量 (Structure

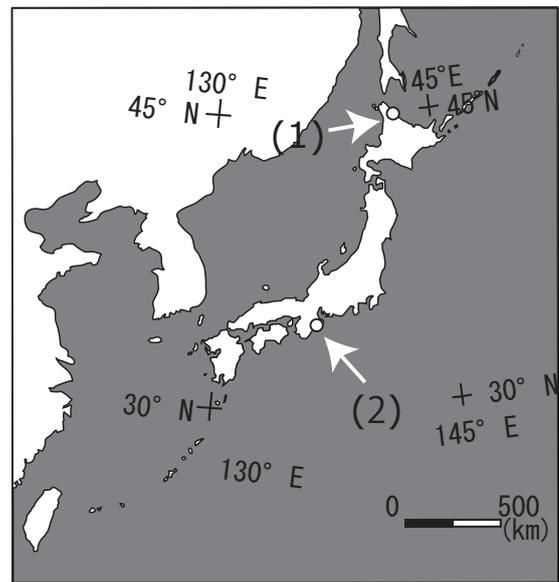


図 1 対象地の位置  
(1)北海道北部頓別平野, (2)志摩半島(南伊勢町)

from Motion; 以下, SfM) ソフトウェアである Agisoft 社の PhotoScan Pro を用いて, DSM (Digital Surface Model) およびオルソ画像を取得した。静止画撮影時には, 機体が対地高度約 100 m となるように手動で操縦し, 3 秒に 1 枚程度の間隔で自動撮影をおこなった。

北海道頓別平野での地形分類図作成にあたっては, 空中写真判読と UAV 画像に基づく DSM データを併用し, 微地形も含む地形分類を行い図化した。なお, 地形分類の範囲は広域に及ぶが, すべての範囲を UAV によって空撮したのではなく, 小規模・微地形分布の把握が困難と考えられ, UAV による DSM データが地形分類に特に有効であると判断されるいくつかの範囲において空撮をおこなった。

\*皇學館大学 教育開発センター 准教授

\*\*明治コンサルタント株式会社 技術部 技士

三重県南伊勢町においては、一次避難所の位置を地域住民（特に災害弱者である高齢者および児童）に、避難経路の地形傾斜を含めて既存のハザードマップよりも容易に把握してもらうため、各避難所を中心とした狭域において UAV により空撮を行い、取得画像から SfM ソフトウェアによりオルソ画像を作成し、簡易ハザードマップとしての利用を試みた。

### 3 北海道北部頓別平野における地形分類図作成での UAV 利用

北海道北部オホーツク海側に位置する頓別平野には、中期更新世～完新世に形成されたと考えられる海成／河成段丘や、完新世の低地、砂堤列などが分布している。また、頓別平野南東部には、縄文時代以降の遺跡が分布しており<sup>4)</sup>、地形発達史と古環境や過去の人間活動との関係についての解明が求められている。しかし、頓別平野南東部のブタウス遺跡<sup>5)</sup> 周辺においては段丘や完新世の微地形群の詳細が明らかになっておらず、著者らに加え考古学分野を

含めた学際的な研究が現在進められている<sup>5)</sup>。頓別平野南東部の発達史地形学的な研究をおこなうにあたっては、地形分類図の作成が重要な実施項目の一つとなるが、低地や海岸微地形、小規模な段丘を中心とした地形分類図の作成は、従来の空中写真判読のみによる地形分類は困難な場合がある。そこで、本稿では空中写真判読による地形分類を行う際に UAV による撮影画像に基づく DSM データ（図 2）も併せて使用して、地形のマッピングをおこなった（図 3）。

空撮画像からの DSM データの一例を図 2 に示した。従来の 1 万分の 1 程度の空中写真では判読が困難な小規模な段丘（図中 A 付近）や、微小な砂堤列（図中 B 付近など）が把握可能である。このような DSM データに併せ、空中写真判読も併用して作成された地形分類図が図 2 である。微地形の分類が容易となるため、段丘面上の旧河道や小規模な砂堤の連続性、泥炭地の分類が可能であった。

### 4 志摩半島周辺における地域向け防災資料としての UAV 画像の利用

前章で述べたように、空撮画像に基づく DSM データは地形の把握を容易にする。そこで本章では、三重県南部の南伊勢町における一般住民を対象としたハザードマップ（避難所マップ）作成の試みについて述べる。志摩半島周辺や伊勢平野南部では、南海トラフ地震による津波を中心とした災害に備え、詳細なハザードマップが作成され、GIS を用いて web で情報が発信されたり、紙媒体のマップが住民に配布されている。しかし、これらの既存の各種マップでは高度で緻密な各種情報が表現されているが、地図の判読が可能、あるいはパソコンを利用して情報収集が可能であることを初期前提としている場合も多い。加えて、特に志摩半島周辺はリアス海岸であり急峻な斜面の上に一次避難所が立地し、集落からは斜面上方の避難所が視認できない場合や、地域での避難訓練に参加することが困難な高齢者が多い地区も存在する。そのため、避難所までの経路の斜面傾斜の程度や地理的距離が正確に把握されていない場合もある。そこで、著者らは UAV による空撮画像から作成したオルソ画像を用いて、南伊勢町において狭域での災害弱者向けの避難経路把握のためのマップの作成を試みた。

南伊勢町の神津佐地区は、志摩半島南部のリアス海岸の低地に位置する人口 300 人に満たない集落であり、集落内の台地上や斜面上に計 7 か所の一次避難所が設置されている。これらの各避難所を中心に

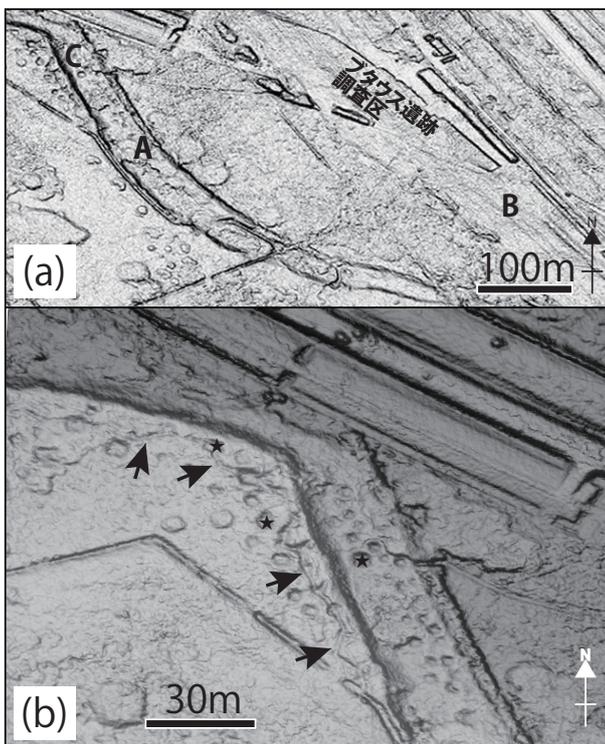


図 2 UAV 画像に基づく DSM  
 (a) ブタウス遺跡周辺の DSM。小さな段丘面や砂堤列の地形の詳細が把握可能。  
 (b) (a) 中の C 付近の拡大図。2 段の段丘面上の星印をはじめとした円形～方形の凹地はアイヌの住居址遺跡。住居址をつなぐ細い溝状の凹地は太平洋戦争時の塹壕跡（矢印）。

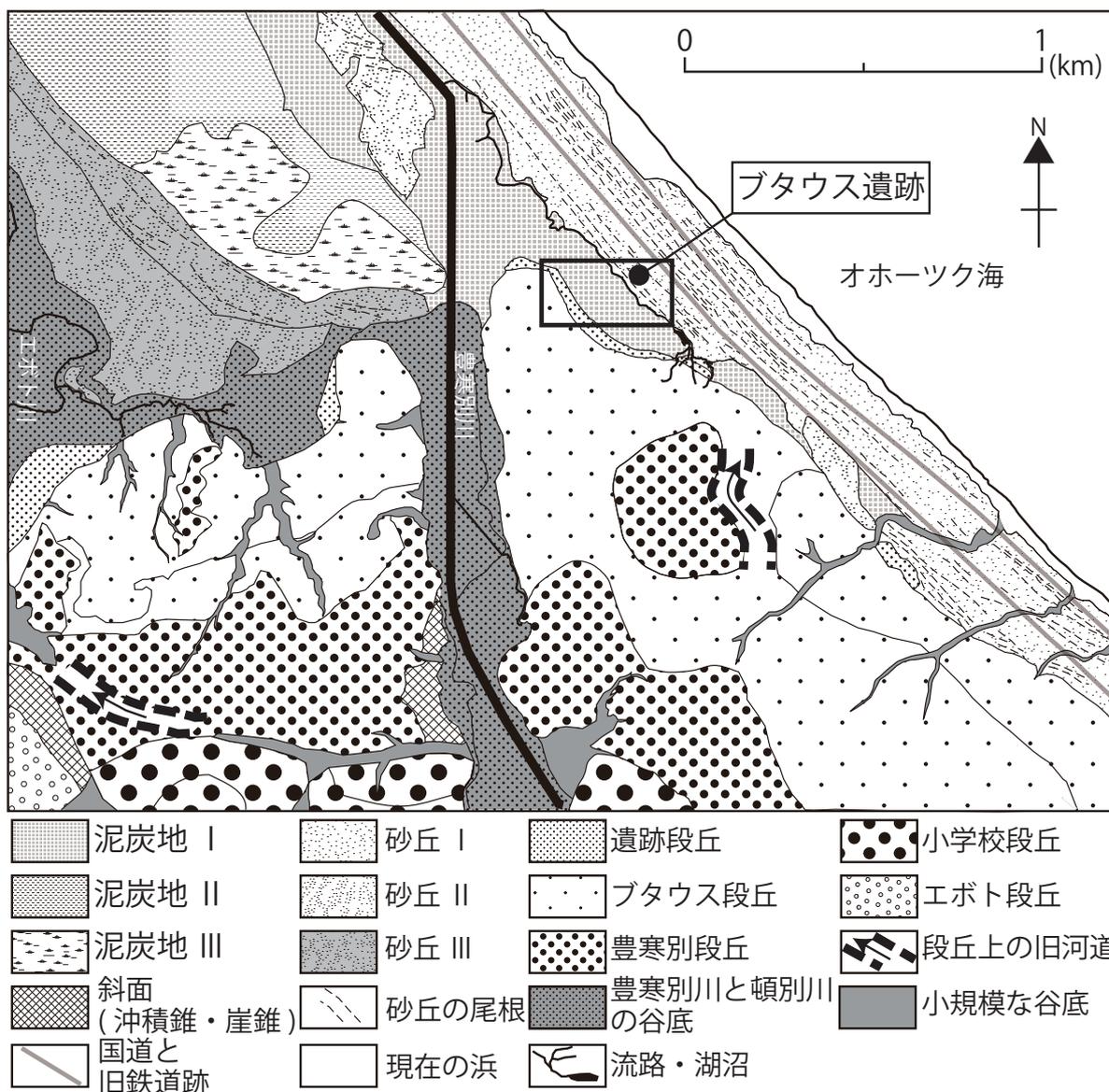


図3 頓別平野南東部、ブタウス遺跡周辺の地形分類図  
 図中の黒枠は図2 (a) の範囲を示す。

UAVにより静止画を撮影し、SfMソフトウェアによってオルソ画像を作成した(図4)。避難所のオルソ画像は、避難所マップの試作版として地域住民の中でも特に、1) 地図判読に苦手意識がある、2) webを利用したGIS版ハザードマップに苦手意識を持つ、複数名の南伊勢町在住者に閲覧してもらった。閲覧時には、オルソ画像そのものや、SfMソフトウェア上でアナグリフ加工<sup>\*</sup>した画像データ、空撮動画も提示した。その結果、従来のマップを見ても避難経路がどこの方向にあるかわからなかったが一目瞭然で理解可能、避難所までの地形や急傾斜の程度が分かりやすい、避難経路の中の狭隘路や崩落の危険がありそうな場所(人工構造物含む)が直感的にわかりやすい、などの感想・評価が得られた。したがって、オルソ画像を用いた避難所マップは、

地図判読に苦手意識を持つ一般住民の地理的空間把握を大幅に補備するマップとしての効果が期待できることが明らかとなった。

<sup>\*</sup>ステレオ画像加工。赤青のメガネを使用することで容易に立体視が可能。

### 5 まとめと今後の展開の可能性・課題

従来、地形・地質分野でのUAV利用は、火山噴火や地震などをはじめとする何らかの地学現象が生じた後に、緊急的・速報的に利用される場合が多かったが、地域の狭域の地形概況把握のツールとしても非常に有効であると言える。微地形を含む地形分類図の様な専門的・学術的な基礎データとしてだけではなく、自治体レベルの範囲内での従来よりも詳細・簡易なハザードマップの作成データとしても、地形



図4 南伊勢町神津佐地区の一次避難所(滝ヶ谷避難所)のオルソ画像  
地域住民に提示する際はアナグリフ加工を行なう場合がある。

把握の容易さから有効であると言えよう。南伊勢町では、皇學館大学生の地域活動・教育の一環として、UAV撮影地点のフィールドワークによる危険箇所マッピングも同時に行っており、現在はオルソ画像と危険箇所データを重ね合わせ作業を行っている。今後、UAV空撮に基づくオルソ画像による避難所マップに避難経路上の危険箇所を災害弱者向けに表現したものを作成し、集落への全戸配布やワークショップなどでの提示を行う予定である。

これらのような地形・地質調査目的、あるいは防災資料としての「平時の(発災前の)」画像データの収集は、地域の自然環境資源や歴史文化資源などの地域住民との共有を容易なものとする。例えば、北海道頓別平野での地形分類作成のためのDSMデータからは、アイヌの住居址と考えられる円形の凹地(図2(b);一部は星印で示した)が複数認められるとともに、図2(b)の矢印で示した付近では太平洋戦争時の塹壕跡と考えられる小規模な溝状の凹地が、住居址をつなぎ分布している形態が初めて明らかとなった。これらのような付加的に取得された戦争遺産を含む遺跡の可視化されたデータは、行政主体での地域教育資源や観光・文化資源としての活用も期待できる。

以上のような「地域でのUAV画像の活用」は、民生品の安価なUAVの普及により地質学・地形学的な専門知識がなくとも、地方自治体や住民自身の手によっても可能であり、実際に運用されている場合もある。将来的には、一般住民でも利用しやすい形式の地域による地域のための「UAV地域画像データベース」などが今後構築されることで、専門家の

学術目的利用のみならず、地域防災利用・発災時の速報データとの比較・地域環境教育・観光利用などが同時に低コストで運用されることが期待できる。

#### 〈謝辞〉

本稿は、日本学術振興会科研費(H26～28年度若手B;代表 近藤玲介・H28年度 基盤C;代表 板井正斉)を使用した成果の一部である。本稿を作成するにあたり、ご協力いただいた明治コンサルタント株式会社、浜頓別町役場、南伊勢町役場、南伊勢町各自治会、皇學館大H28年度CLL活動「南伊勢町ドローン防災プロジェクト」参加学生の皆様には、深く感謝申し上げます。

#### 〈参考文献〉

- 1) 井上 公, 内山庄一郎, 鈴木比奈子「自然災害調査研究のためのマルチコプター空撮技術」, 「防災科学技術研究所研究報告」, Vol.81, p.61-98, 2014.3
- 2) 石黒聡士, 松多信尚, 井上 公, 中田 高, 田中 圭, 石山達也, 箕田友和, 竹竝大士, 森木ひかる, 廣内大助「UAVを用いた平成28年熊本地震の地表地震断層の撮影と地形モデル作成」, 「日本リモートセンシング学会誌」, Vol.36, No.3, p.214-217, 2016.7
- 3) 内山庄一郎, 中田 高, 井上 公, 熊原康博, 杉田 暁, 井筒 潤, 後藤秀昭, 福井弘道, 鈴木比奈子, 谷口 薫「小型UAVとSfMソフトウェアを用いた断層変位地形把握の試みー根尾谷断層水鳥断層崖を例にー」, 「活断層研究」, Vol. 40, p.35-42, 2014.
- 4) 浜頓別町教育委員会:「一般国道238号浜猿防災工事(浜頓別工区)用地内埋蔵文化財発掘調査報告書 グタウス遺跡1」
- 5) 近藤玲介, 重野聖之, 横田彰宏, 塚本すみ子, 乾 茂年, 宮入陽介, 横山祐典, 富士田 裕子, 竹村貴人, 竹下千栄子, 坂本竜彦, 右代啓視「北海道北部頓別平野周辺の沿岸部における完新世の砂丘および沖積層のルミネッセンス年代」, 「日本地球惑星科学連合2016年大会発予稿」, <http://www2.jpgu.org/meeting/2016/PDF2016/index.html> (2017年3月1日現在)

# 熊本城の再建に関するドローンの活用事例

にしむら しょうぞう やすい のぶあき  
西村 正三\* , 安井 伸顕\*\*

**Key Word** UAV・SFM 解析, UAV・レーザ, 地上型レーザ, 石垣修復支援システム

## はじめに

熊本城の石垣は、2016年4月に起きた熊本地震により大きく被災し、崩落・膨らみ・緩みなど517面に達したと報告されている<sup>1)</sup>。従来、これらの測量・計測には、トータルステーションによる測量や地上型レーザスキャナ(以下 TLS), 最近ではドローン(以下 UAV)による計測・撮影が行われてきた。そのうち UAV の解析手法としては特に写真測量の発展形である SFM<sup>注1)</sup> 解析が一般化し、著者らも UAV を用い計測を実施してきた。しかし、SFM 解析は、画像による3次元データ取得のため、DSM<sup>注2)</sup> となり、樹木が繁茂している環境下では DEM<sup>注3)</sup> の取得は難しく、最近では、航空機(LiDAR<sup>注4)</sup>)を軽量化し UAV 搭載可能なレーザ機器(以下 UAV(LiDAR))も使用されており、それらを一覧に整理した(表1, 図1)。以下では被災した熊本城石垣を事例に、UAV(SFM), UAV(LiDAR), TLS を活用した各事例の課題及び課題解決策について紹介する。

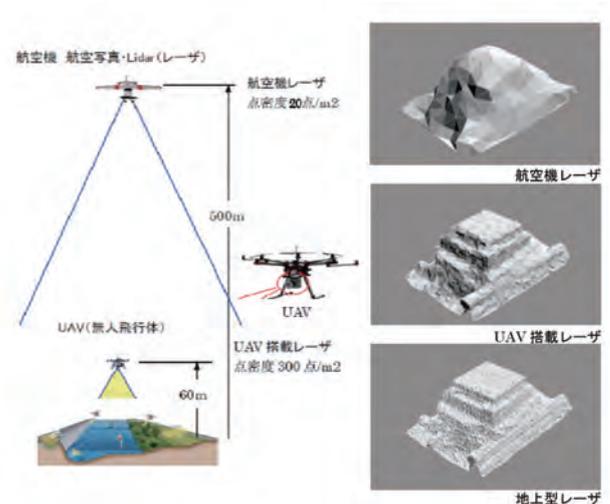


図1 UAV と航空機の高度の差と点密度

表1 地形形状取得技術の比較

	航空機 (LiDAR)	UAV (SFM)	UAV (LiDAR)
計測面積	1~50 km <sup>2</sup> (5,000 ha)	0.5 km <sup>2</sup> (50 ha)	0.5 km <sup>2</sup> (50 ha)
対地高度	500m~2km	10~100 m	10~150 m
飛行速度	40~200km/h	40km/h 以下	40 km/h 以下
航続時間	2~3 時間	短い (30分)	短い (30分)
点密度	10~30 点/m <sup>2</sup>	—	100~300 点/ m <sup>2</sup>
特徴	樹木下の形状が計測可能 広範囲で計測可能	低空から高精細に撮影 SFM で高精細な画像を取得	樹木下の形状が計測可能 極小範囲を超高密度計測可能

注1) SFM: (Structure from Motion) 各写真の特徴点抽出と写真間の特徴点の対応付けを行い 3D モデルを生成  
 注2) DSM: (Digital Surface model) 植生等を含んだ数値表層モデル  
 注3) DEM: (Digital Elevation Model) 数値標高モデルは植生等を除去した地表面の地形のデジタル表現  
 注4) LiDAR: (Light detection and ranging) パルス状のレーザを発光し、対象物からの反射光によって距離を測る

\*株式会社 計測リサーチコンサルタント 取締役 クリエイティブ事業部 部長 博士 (工学)  
 \*\*株式会社 計測リサーチコンサルタント クリエイティブ事業部 主任 博士 (工学)

## 2 熊本城の被災状況

先に紹介したように熊本城の石垣は、熊本地震により大きく被災した。石の崩落は50箇所、229面、被災面積は約23,600m<sup>2</sup>となり、これは石垣全体の約3割に達する。石垣の全面復旧には20年程度かかると試算されている<sup>1)</sup>。特に熊本城の石垣は特別史跡の文化財<sup>2)</sup>であり、元の位置に同じ構造で復元することが求められており、そのためにも石垣面の3次元計測が重要となる。また計測に当たっては、樹木に覆われた石垣面の計測手法の提案を含め如何に迅速にかつ精度良く計測するかが鍵となる。



図2 熊本城の被災の状況<sup>2)</sup> および計測対象



図3 樹木に覆われた熊本城の石垣  
樹木に覆われた石垣面の計測を如何に迅速にかつ精度良く計測するかが鍵

## 3 UAV (SFM) 解析, 地上型レーザスキャナ

### 3.1 概要と撮影・飛行計画

撮影にはデジタル一眼レフカメラを搭載することの可能なUAVを使用(図4参照)。UAVに軽量のミラーレスカメラ Sony a 7R を搭載し、石垣の組み立てを把握するために目標解像度を10mm/pixと設

定。解像度が一定となるよう、20m程度の距離を維持して撮影する飛行計画とした。

### 3.2 UAV 画像データの解析処理

撮影画像を用いSFM解析を行う。SFMとは、多視点から撮影した画像を元に、対象物の3Dモデルを構築する技術であり、生成した不整三角形網(以下TIN - triangulated irregular network)には、3次元座標とともに高精細な撮影画像がマッピングされた3Dモデルが構築される<sup>3)</sup>。現在SFM解析を行うソフトウェアは、数種類市販されている。一般的によく利用される2種類(P,C)のソフトについて纏めた(図5参照)。ソフトPは、解析の柔軟性が高いが、構造物のエッジが正確に表現されていない。一方、ソフトCは、稜線を加味しTINを形成するため、エッジの再現性が高い。石垣の修復検討では、石垣組み立ての再現性・認識度を重視するため、ソフトCを使用した。

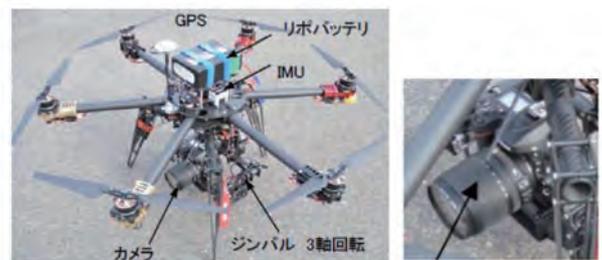


図4 UAVの姿図と機器類の配置

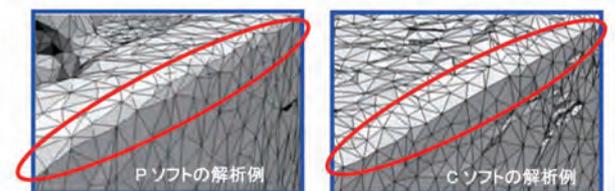


図5 構造物のエッジの再現性比較

## 4 宇土櫓石垣への活用

### 4.1 解析・検討に用いた情報

筆者らは以前から「石垣修復支援システム<sup>4)</sup>」の機能向上を図るため城郭石垣の3Dレーザデータの収集を行っており、震災10年前の宇土櫓の3D計測データを取得していた。以下では震災で被災した宇土櫓の石垣を、UAV(SFM)で構築した3Dモデル(以下UAVモデル)と10年前3Dレーザで構築した3Dモデル(以下レーザモデル)(表2参照)を用いて、地震前後における石垣の変形の進行について比較・検証を行った。

## 4.2 3Dモデル生成

### (1) UAV(SFM) モデル生成

従来の写真測量では、UAVで取得した膨大な枚数の標定作業を手動で行う必要があり、多大な時間を要していたが、特に石垣など特徴点の多い対象の場合SFM解析では容易に奥行きのある面モデル生成も可能である。今回はUAVで撮影した計100枚の画像を使用し、SFM解析で石垣面の精細な3Dモデルを生成した。また一方このデータを用いて石垣の孕みの進行について検討した。図6に解析の流れと図7に各成果のイメージを示す。算出した特徴点を元に、TINを構築し、画像をテクスチャとして、マッピングすることで、3Dモデルが生成される。このモデルは、PC上で自由に拡大縮小・移動回転でき任意の視点からモデルを閲覧が可能となる。生成したモデルを他CGソフト(Autodesk社3DSmaxを使用)へ移行し、オルソ画像を出力し、損傷調査のベース図を作成する。

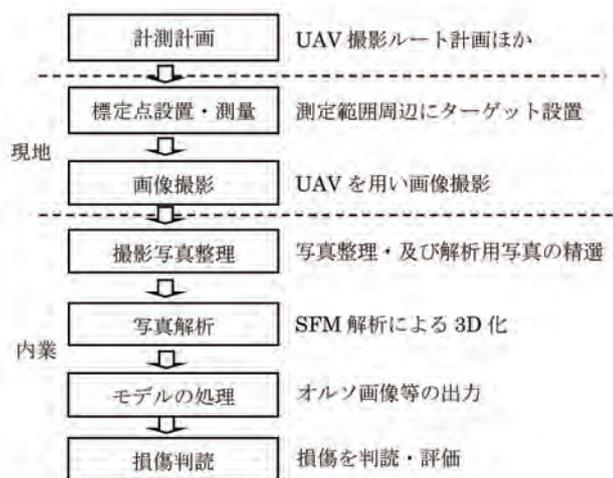


図6 UAV撮影～SFM解析処理作業の流れ

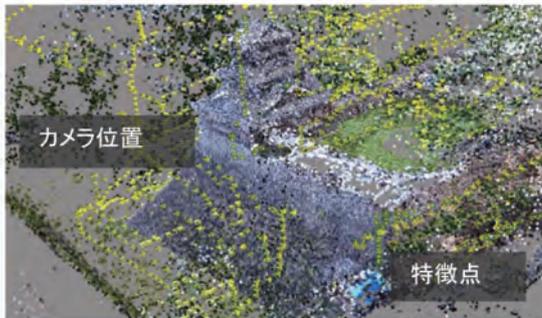


図7 解析処理作業の流れ

表2 解析に使用した情報

3Dモデル解析手法	UAV(SFM)	3Dレーザスキャナ	3Dレーザスキャナ
データ取得日	2016年10月8日(震災後)		2006年4月18日(震災前)
データ取得機器1	UAV	TOPCON GLS-2000	RIEGL LMS-Z420i
データ取得機器2	Sony α7R		
解析ソフト	SFM(ContextCapture)	I-Site	I-Site
写真、3Dデータ提供	清水建設株式会社		リーグルジャパン(株)

## (2) TLS レーザモデル生成

3D レーザ計測は、離れた位置から短時間に広範囲の三次元座標及び色情報を取得し、構造物の形状記録、変位計測を短時間で行うことができる。三階建ての「宇土櫓」は、外壁などが破損、平屋部分は倒壊した。その倒壊した平屋部分の漆喰が孕んだ石垣面に垂れ落ちその痕跡を確認できる。



図8 TLS, UAV (SFM) を用いた3Dモデル生成

## 4.3 比較検証

震災後の UAV モデルと震災 10 年前のレーザモデルを重畳し、その差分値から過去のデータとの変化範囲を黄～赤の暖色で表現し、孕みの進行している箇所を抽出した (図9の①②)。またこのデータを元に 3m 毎の石垣断面を抽出し 17 断面を比較し重畳表示した (図9の③)。図9の④は、石垣面をオルソ画像として書き出し、石垣の変形、孕みの進行具合を抽出した段彩図としている。これらの結果から、石垣面の中央部及び右側に大きな孕みが見られ、特に右側の孕みの大きい位置の詳細断面からは、今回の2度の震度7の地震により、約0.5m程度の孕みが進行したことが明らかとなった。(⑤, ⑥)

## 4.4 石垣修復検討

石垣修復には、石垣の線形、断面、石材配置検討が必要となる。石垣断面の設定は、石垣の解体調査を行い、裏込層の範囲等の石垣情報を把握したうえで計画を進める必要があるが、今回は石垣外面調査により得られる情報のみであるが、凡その修復範囲を設定することができた。

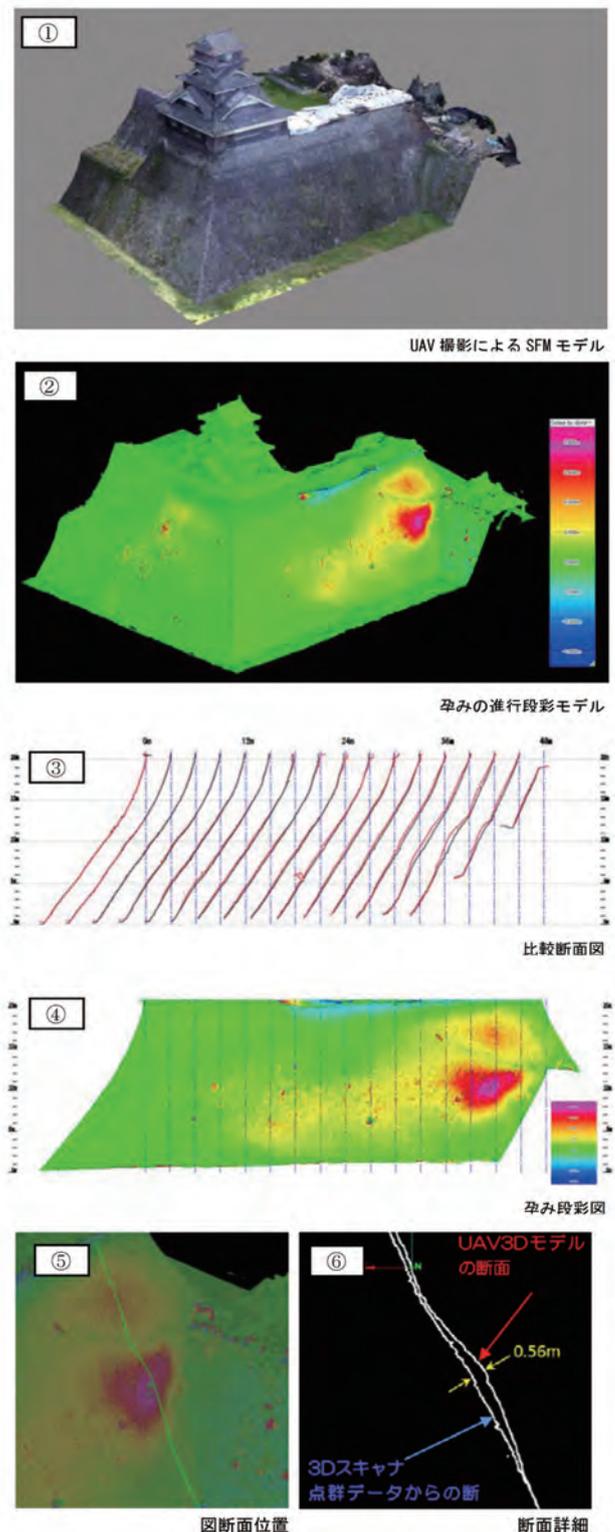


図9 2 時期の石垣面の断面比較 (2006/4/18 と 2016/10/8 の比較)

## 5 UAV (LiDAR) の活用 (樹木に覆われた石垣)

### 5.1 UAV (LiDAR) について

UAV にカメラを搭載し SFM 解析を用いた手法では、手前の樹木が障害となり地表面の形状まで得られない。一方上空からのレーザ計測は、樹木の枝葉の間をレーザが通過することで、樹木下の地形の形状取得が可能である。現在市販されている UAV (LiDAR) は表 3 に示すように Riegl を搭載した高価なものから Velodyne 搭載の廉価なものがある(図 11)。データ取得から解析までの流れは同様である。以下では Velodyne 搭載の YellowScan について紹介する(表 4, 図 12)。

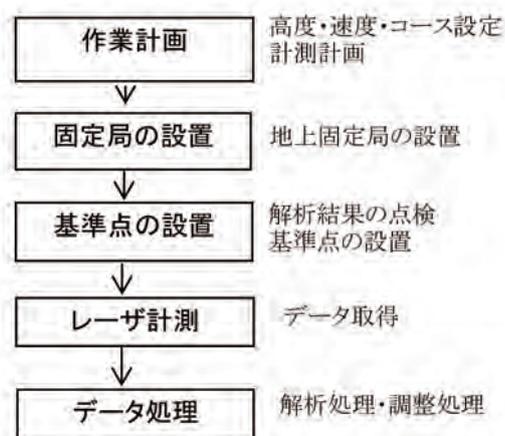


図 11 計測～処理のフロー

表 4 YellowScan の仕様

YellowScan Surveyor	
最大レンジ	100m
視野角	360°
測定数	30 万ショット/秒
GNSS	GPS, GLONASS, BeiDou
重量	1.5kg (バッテリー含む)



YellowScan (IMU レーザスキャナ)



図 12 UAV (LiDAR) YellowScan システム

UAV (LiDAR) は、GNSS/IMU と LiDAR センサ、データロガーで構成されている。実機による航空レーザ、移動計測車両に搭載する (MMS) などと同様

表 3 UAV (LiDAR) の比較

レーザセンサ			
UAV (LiDAR)			
メーカー	Velodyne Lidar	RIEGL mini VUX-1	RIEGL
形式	ALS-16	Mini VUX-1UAV	VUX-1UAV
重量 (g)	830	1,550	3,650
測定誤差 (mm)	30	15	10

## 5.2 UAV (LiDAR) を活用した石垣の計測

樹木に覆われた石垣面を迅速に計測する手法として UAV (LiDAR) を活用する例を紹介する。石垣面の前面が斜面で樹木に覆われた場合は、TLS が用いられることがあるが、樹木の幹の裏側での欠測発生により、複数回の機材移動が必要となり、効率のよい現地作業は難しい。UAV (LiDAR) 計測では、TLS の計測密度には及ばないが、上空を移動しながら多方向へレーザを照射することが可能なため、比較的死角の少ないデータが取得でき、石垣面の凹凸も取得データから確認できる。

図 13 は UAV (LiDAR) を活用し前面に樹木が覆っている状況での計測例を示したものである。植生を取り除くフィルタリング処理を行うことで、必要な斜面や石垣面のみを残すことが可能である。(①, ②) また UAV (LiDAR) では広範囲を一度に取得することができるため周辺地形を含めた地形データ作成することが可能である。

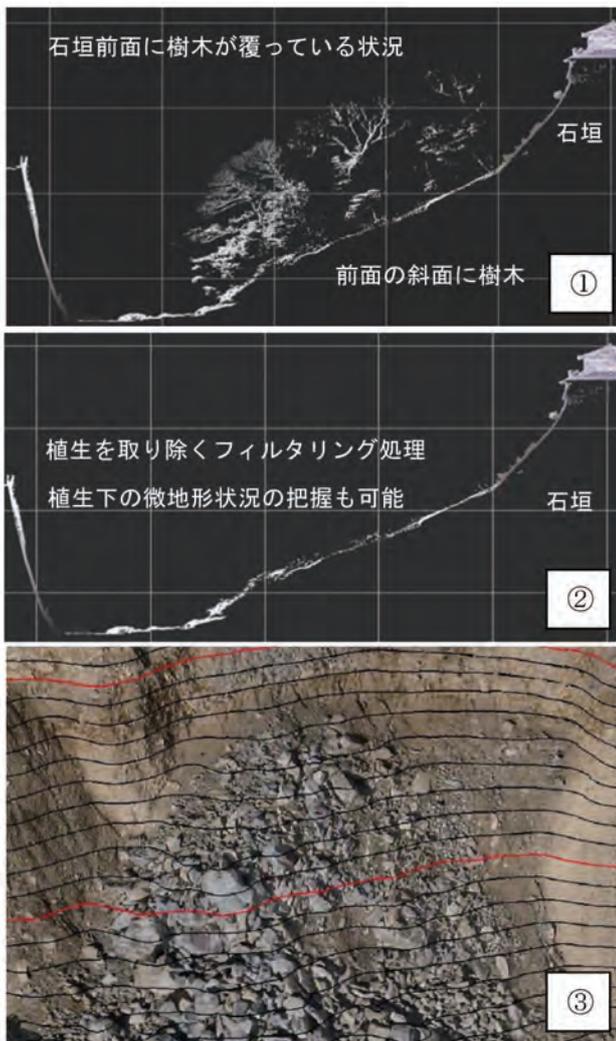


図 13 UAV (LiDAR) を活用した計測と表示例

図 13 の③は取得したデータから作成した地形コンターと取得点群を重畳表示したものである。このデータを活用することで、崩壊した石材や背面の裏込層の崩壊状況をより正確に把握でき、植生下の微地形状況の把握も可能であり、石垣を含めた周辺地盤の管理データとしての活用も期待される。

UAV (LiDAR) は、その機動性により平常時ばかりでなく緊急災害時を含めた様々な場面での利用が期待される。データの精度、運用の利便性の面から効率的で有益な測量手法の一つに発展することは容易に想像できるが、法律やガイドラインに従った機材運用での安全確保も発展に欠かせない重要な要素と考える。

## 6 まとめ

近年わが国では数年おきに大災害が発生し、その対策としての「防災・減災・救済」が国を挙げての喫緊の課題であり、特に UAV が、その中で重要な役割を担い始めている。熊本城の石垣で紹介した地震前後における 3 次元データを活用した解析は、常日ごろからインフラ構造物や文化財建造物の 3 次元データを取得しておくことの重要性について改めて検証できた好事例として紹介したものである。

UAV で撮影した画像をもとに SFM で解析することで、あるがままの 3D モデルとして形状を容易に再現できる。そのとき SFM 解析で 3D モデルを作成するには UAV 画像にこだわる必要は無く、地上から撮影したオーバーラップした画像があれば可能であり、例えば地域の NPO 等と連携を図ることで「地産地消によるインフラ点検」ができ、地方のインフラ長寿命化に大きく貢献する可能性がある。また、画像や 3 次元計測にて記録を残すことで、データを持ち帰ってからの状況把握がより理解しやすくなり、そのため目視点検のばらつきの解消にもつながり、より正確な判断、記録保存に貢献するものと考えられる。

### 〈参考文献〉

- 1) 熊本城の石垣に関するシンポジウム配布資料 2017/1/31 : 熊本大学百周年記念館
- 2) 熊本城復興を支援するみんなの会 : 「ブルーシートのかかっていない被災直後の熊本城 2106 年 4 月 16 日撮影」, 2016. 11
- 3) 鳥居秋彦ほか : 画像の認識・理解シンポジウム, MIRU2011, (2011)
- 4) 一般財団法人国土技術研究センター : <http://www.jice.or.jp/review/awards/manufacturing/02nd> (2017 年 2 月 2 日現在)

やさしい  
知識ドローンの種類及び  
改正航空法についてせんだ やすひろ\*  
千田 泰弘\*

Key Word ドローン, 無人航空機, 航空法, 飛行可能空域, 飛行方法

## 1. はじめに

無人航空機はライト兄弟の飛行機発明よりも古い歴史を持つが、専ら軍事やホビー用として発展してきた。DRONE という言葉は、世界で初めて英国海軍が開発した無線操縦の射撃訓練用標的機（愛称 QUEEN BEE）を参考に、1935年に同様な標的機を開発した米国海軍が、英国に敬意を表し、蜜蜂の世界で最も地位の低い雄蜂を意味する DRONE という愛称を用いたことに始まる。

DRONE という言葉は、発音が簡単であり、欧州の主要言語にも同じ意味の単語があることからなじみ易く無人航空機を一般的に表現する言葉として定着したものと考えられる。

ドローンを民生用に使った場合の経済効果、社会効果を世界で最初に発表したのは、米国 NASA であり、2004年12月に出された報告書には、現在活用が始まっている殆どすべての分野が可能性として網羅されており、産業用の利用について積極的な提案を行っている。「空の産業革命」の可能性を提唱したもので、欧米各国で、ドローンの産業利用に関する研究を加速する端緒を開いたと言える。

2004年以降ドローンの特許出願数は毎年20%程度の伸びを示しており、最近でもこの傾向は続いている（図1）。世界市場もこれに呼応した成長を続けていると見られている。

長期間にわたり研究開発されてきたが産業用として活用されなかった技術が、ある時期に市場に現れ急スピードで進展した事例の典型はインターネットと言われている。産業用ドローンの現況は軍事研究用が民間に開放されたインターネットの1990年代の様相に酷似しており、ドローン市場の場合は進展させる原動力がIT技術と法制度の整備

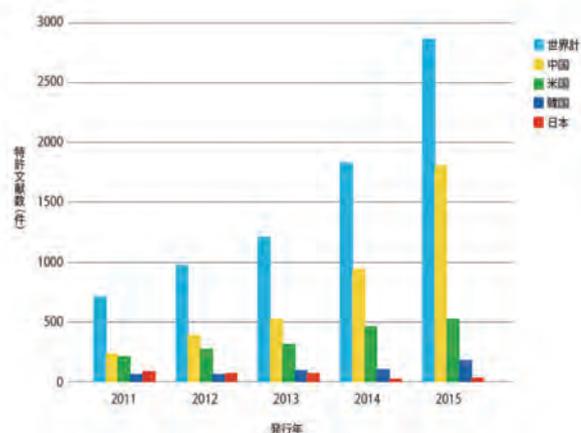


図1 ドローン特許  
(国立研究開発法人) 新エネルギー・産業技術総合開発機構技術戦略研究センター (2017・2)

である。法制度整備が市場の拡大に重要な効果を持つことは、我が国の事例にも現れており、航空法改正以前には開発業者は中小、ベンチャー10社程度であったが、法改正後には大企業を含め参入が相次ぎ、その数が約3倍にまで増加している。全世界では軍用も含めた統計ではあるが2016年6月時点で、59か国に661の開発業者が2020種類のドローンの開発を手掛けている。機種約50%は民生用と見られている。

本稿では技術開発が進むドローンと日本の法制度について述べることにする。

## 2. ドローンの種類

一般に最もなじみの深いドローンは4枚以上のプロペラを持つマルチコプターと総称される機体であるが、2011年にフランスの会社が世界で初めてこれを量産して以降、世界のホビー市場に急拡

\* (一社) 日本 UAS 産業振興協議会 副理事長

大し、ドローンの代名詞のように言われるまでになった。誰でも簡単に飛行させることができるため利用者を急速に拡大させ、フランスに続いた中国のベンチャー企業が大成をおさめ、世界のホビー用マルチコプター市場の70%以上を寡占するまでに成長した。

民生用ドローン市場は、このようにマルチコプターによるホビー市場が牽引し世界的なブームを起こした。

一方、空撮、測量、物流などのミッション達成を目的とする産業用ドローンは、産業分野毎に異なる要求性能を最適コストで実現させる必要があり、さらに信頼性や保守性などの工業製品としての品質が求められるなど、ホビー市場とは異なる市場として進展を見せ始めている。本稿では代表的な産業用ドローンの種類に関し、その特徴に着目して簡単に纏める。

### (1) 飛行船

ヘリウムガスなどを使う飛行船で、電力を地上からケーブルで供給するタイプのものは長時間の飛行が可能であるため国境警備やイベント会場などの定点警備用のものがすでに開発され使用されている。高高度に配置し、無線基地局に使用するなどの実験が行われたこともある。

運搬やヘリウムガスの取り扱いが面倒であるが消費エネルギーが少ないという利点を持つ。

### (2) ヘリコプター

プロペラ（回転翼と言う）により浮力と推進力を発生する構造で、回転翼が一枚のものを特にヘリコプターと呼ぶ。回転翼の回転の反作用で機体が回転するのを防ぐため、テールローターと呼ばれる垂直方向に回転するプロペラを尾部に設置する必要がある、また機体の傾きを補正するため、プロペラが一回転する間にその角度を変化させるピッチコントロールと言う機構も必要なため、構造が複雑で大型となるが、既存のガソリンエンジンなどが使えることもあって重量物搭載機や長時間飛行機が実用化されており、20年以上の実績のある日本の農薬散布ヘリや10数年の歴史を持つオーストリアのロータリーエンジン搭載の多目的ヘリなどが知られている。最近では日本においてテールローターやピッチコントロールを使わない機体の開発が進められている。

### (3) マルチコプター

プロペラが4枚以上の回転翼機を総称してマルチコプターと呼んでいる。各プロペラを逆回転してバランスさせるため6枚、8枚などと偶数枚が普通であり、最大では人が乗ることができる16枚の

大型機も実用化されている。プロペラはねじれが反対の2種類が搭載されている。モーターの電流を高速で頻繁に制御して機体の傾きをバランスさせる必要があり電池の使用が必須であるため、長時間飛行や重量物搭載機の実現が難しく、現在は数キログラムを搭載し数十分飛行できるものが市場に出されている。

他の機種に比べ操縦や扱いが非常に易しく、風にも強い機体が作れるため2011年に市場に出現して以降多くのメーカーが参入して多種の機体を製造している。操縦の自在性、ホバリング、垂直離着陸機能などの利点を生かして空撮、測量、点検、農薬散布などで多く使われており、産業用の用途開発が最も早く進んでいる機種である。

長時間飛行に関しては、地上から有線で給電するタイプ（テザードローンとも言う）が内外で実用化されており、点検や定点での警備などに使われている。この給電線は、信号伝送にも使えるため、無線操縦では安定的な制御が難しい無線雑音の多い環境での使用などにも使われる。長時間飛行には電池の性能の改善、燃料電池の開発、エンジンで発電するハイブリッドエンジンなどがあり、海外及び我が国で研究開発が進められている。

重量物搭載が可能な大型マルチコプターの開発が近年各国で進められており、物流サービスなどに使用され始めたがこれらに関しては(5)にまとめる。

### (4) 固定翼機

固定翼機は浮力を翼で発生させるためヘリコプターやマルチコプターなどの回転翼機に比べエネルギー効率は原理的に非常に良く、電池駆動の固定翼の場合はマルチコプターに比べ数倍以上と大幅な長時間飛行が可能である。この特性を生かし、遭難者の探索、鉱物資源探査、広域の植生観察、医薬品の緊急輸送など、広範囲な地域を短時間でカバーする用途向けに利用が始まっている。通常の飛行機型ばかりではなく、三角翼型のもの、垂直離発着を可能とするオスプレイ型（チルトローターと言う）や尾翼部分で直立し垂直に上昇する型（テールシッターと言う）、固定翼機に垂直上昇プロペラを付加したものなどがある。滑走路を不要とするための発射台、パラシュートによる着陸などの技術は実用機で使われている。

### (5) 大型機

ドローンによる物流サービスは、安倍首相が平成25年末に「3年以内実現させる」と宣言したが、海外ではすでに、フランス、英国、ニュージーランド、ルワンダ、ケニアなどでサービスが始まっている。

サービスの試験中の国は欧州諸国に多く、アメリカ、カナダは近くサービスを開始する。物流ドローン開発専門企業は2011年以降アメリカ、カナダ、ドイツに創業している。

物流にも使える大型機（例えば50kg以上積載し1時間以上飛行できる）の機体は、韓国、ドイツ、イスラエル、オーストリアなどで開発済みであり、また大型機用のエンジン開発はイギリス、オーストリア、ドイツ、アメリカで進んでいる。大型機の開発は日本でも進行中である。

大型機の種類は、ヘリコプター型、マルチコプター型、チルトローター型などである。現在開発されている最大の機体はイスラエル製で500kgを搭載できる。人が乗れることから、小型航空機としての認可を米国で本年中に取得する計画としている。大型機の開発は有人機開発と接点を持つこととなり、有人機技術への影響が大きい。欧州政府の無人航空機振興政策には、有人航空機の発展への貢献が謳われている。

### 3. 改正航空法等

#### (1) 世界のドローン法規制の流れ

歴史的にドローンのホビー利用は自主的な安全ルールを守って発展してきた。どちらかと言えば法規制を好まない状況の中で健全な発展をしてきたと言える。

2004年にNASAがドローンの民生利用を提案する以前に、世界で初めてドローンの法規制を作ったのは2002年オーストラリアとイギリスの両国であった。オーストラリアのドローン規制の目的の一つに、無人機による物流サービスの実現が、またイギリスでは利用を健全化するなど前向きな目的があったと言われているが、アメリカでは2009年にこれと逆にドローンの産業利用を法律で全面禁止するなど世界は必ずしも同一方向に向かっていなかった。

欧州では各国とも英国を先事例として法制度の整備を進め各国で法制度がスタートしたがこれらは本年中に統一されることが決まっている。2014年ごろから欧州以外の国でも法律が相次いで制定され、遅れていた米国でもドローン法が昨年8月に施行された。法制度面から眺めれば日本が航空法を改正した2015年末までに、30ヶ国近い国で法整備がなされており、世界の産業用ドローンの実質的な幕開けの年と言っても過言ではない。

世界の法制度の基本的考え方は次のように要約できる。

- 規制内容は進歩のスピードを妨げないため必要最小限に留める。

- 予想される危険の程度に応じた規制とする。

危険のない場所や飛行の仕方には規制を行わず、危険が予測される場所や使い方には必要最小限の規制を、有人機と共存するなど最も危険な使い方には厳格な規制を行う。これをリスクベースの規制と言い、国際的な考え方になっている。

2021年からは、世界の民間航空機の安全基準を定めるシカゴ条約に、操縦者の乗らない航空機（RPASと言う）に関する規定の追加が始まることになっており、国際間を遠隔操縦による航空機が運航できるようになる。これが無人航空機の法規制の行き着くところであり、ドローンと有人機が同一の空域を飛行する時代が始まると認識されている。

#### (2) 安全確保の仕組み

ドローンの安全確保の全体を理解するため仕組みは図2に示すとおりである。

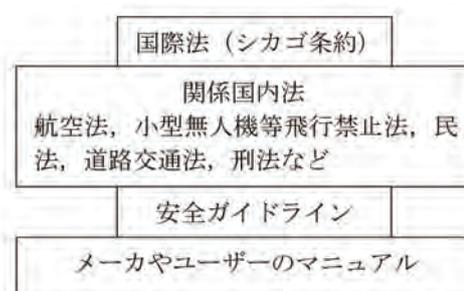


図2 安全確保の仕組み

ドローンの安全な利用を確保する仕組みは、国際条約、国内では航空法を中心に関連する国内法、メーカーや利用者が作る安全な操作方法等のマニュアルがある。急速な技術進歩などによりマニュアルの世界のスピードは極めて速いが法律の世界はスピードが遅い。このギャップを埋める工夫が「安全ガイドライン」の公示と言う考え方であり、我が国だけの仕組みである。関連する法律の要点、法律ではないが重要なアドバイスなどが国土交通省のホームページに掲載されている。

以下改正された航空法や国内で関連する法規について概要を述べる。

#### (3) 航空法

平成27年12月に無人航空機と言う概念が新たに航空法に定義され、飛行区域、飛行方法などの原則が定められた。同時に詳細内容を定める航空法施行規則も改正された。改正法及び同施行規則によれば無人航空機とは重量200g以上の人が乗れない構造のものであり、200g未満のものは模型飛行機と呼んで法の対象外とされた。

飛行区域及び飛行方法の原則は図3のとおりである。

### ★飛行禁止空域

次の場所では、無人航空機の飛行は禁止されていますので、ご注意ください！飛行させたい場合には、国土交通大臣による許可が必要です。所定の手続きを行ってください。



### ★飛行の方法

無人航空機を飛行させる際には、次の方法に従って飛行させましょう！これらの方法によらずに飛行させたい場合には、国土交通大臣による承認が必要です。所定の手続きを行ってください。



図3 飛行禁止空域，飛行方法

- 空港周辺：航空機の進入，離陸で使う空域が飛行禁止。空港ごとに異なる。
- 150 m：地表，水面からの距離であり，海拔ではない。
- 人家の密集地域：平方キロあたり約 4000 人以上の地域で，DID (Densely Inhabited District) と略称する。国土交通省の HP に掲載されている。5 年ごとの国勢調査により改定される。
- 日中での飛行：地域の気象台が発表する日の出から日没時間まで。
- 目視の範囲内：肉眼（メガネはよい）で見える範囲。双眼鏡やモニター画面の使用は不可。
- 距離の確保：第三者及び第三者の所有する物から 30 m 以上離して飛行すること。
- 催し場所での飛行禁止：祭礼，運動会，イベントなどの場所が該当する。自然に人などが集まっている場合は該当しない。
- 危険物の輸送禁止：薬品，可燃物など。農薬はこれに該当する。
- 物件投下の禁止：地上からの距離にかかわらず機体から物投下することを禁止。水や農薬も該当する。

以上述べた飛行禁止，飛行方法の原則に該当しない飛行形態に関しては（例：農薬散布）個別に国土交通省の許可・承認が必要である。申請に当たっては 10 時間以上の飛行経験を有する操縦者が必要であり，原則は自己申告であるが，操縦訓練校等からの証明書は第三者が証明する為有効である。

航空法改正以降約 1 年間で許可・承認件数は約 1 万件に上り今後の増加が見込まれている。

飛行可能空域や許可・承認の申請書作成を支援するドローン専用飛行支援地図サービス「SORAPASS」が（一社）日本 UAS 産業振興協会から提供されている。

#### ● 飛行区域や飛行方法に関する特例

事故や災害時において人の捜索・救助を行う場合には法で定める飛行禁止区域，飛行方法の原則は適用されない。ただし飛行を行う者はあらかじめ警察，国交省などに認定されていなければならない。

#### (4) その他の関連法規

主なものを挙げる。

#### ● 小型無人機等飛行禁止法

官邸に落下した事件を受け議員立法で作られた法律で，国会議事堂，首相官邸，外国公館，原子力設備の上空及び周辺への進入禁止を定める。航空機や無人航空機ではないハンググライダー，パラグライダー等も対象となる。

#### ● 民法

207 条において土地の所有権は上空にも及ぶとされており，他人の土地の上空を無断で飛行することはできない。航空機は無人機と異なり公共性が謳われており，民法第 1 条によりこれは適用されないと解釈されている。

#### ● 道路交通法

道路の上空飛行に関する規定は無いが，航空機とは異なり道路上の交通に支障を与える恐れもある為，道路上空の飛行に関しては警察の許可を得る必要がある。

#### ● 刑法

過失により電車及び船舶の往来に危険を生じさせたり，破壊した場合は過失往来危険罪に問われる恐れがある。海上や鉄道路線上のドローンの飛行は決して事故を起こさない配慮が必要である。

#### (参考文献)

- 1) 日刊工業新聞社「トコトンやさしいドローンの本（一社）日本 UAS 産業協会編」2016 年 10 月
- 2) RPAS The Global Perspective 14th Edition 2016/6 UVS International
- 3) 無人航空機 (UAV) システム分野の技術戦略策定に向けて 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構技術戦略研究センター 2017 年 2 月
- 4) 国土交通省：無人航空機 (ドローン・ラジコン機等) の飛行ルール [http://www.mlit.go.jp/koku/koku\\_tk10\\_000003.html](http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html)
- 5) 国土交通省：無人航空機 (ドローン，ラジコン等) の飛行に関する Q & A <http://www.mlit.go.jp/common/001110417.pdf>
- 6) (一社) 日本 UAS 産業振興協会 <https://uas-japan.org/>

## 現場透水試験

こまつ みつる\*  
小松 満\*

**K**ey Word 透水係数, ダルシーの法則, 単孔式透水試験, 揚水試験, 透水量係数, 貯留係数, 地下水位, 不飽和地盤

### 1. はじめに

現場透水試験は原位置透水試験とも呼ばれ、地下水用語集<sup>1)</sup>によると、“現場における調査井戸（ボーリング孔）などを利用した揚水試験、注水試験、回復試験、干渉試験、トレーサー試験などを指す。コアによる室内試験に比べて、試験地点周囲の自然状態の平均透水特性やその広がりや推定できる”。また、地盤工学会用語辞典<sup>2)</sup>によると、“地盤が存在しているままの状態、原位置で行う透水試験である。試料を採取する過程がないので、室内透水試験に比較して、対象地盤の攪乱を最小限にとどめることができる。”と説明されています。いずれも室内試験よりも実際の挙動に即した試験であることが利点として挙げられていますが、その一方で現場では地質構造や自然条件等の影響を受けるため、結果の解釈とパラメータを求めるための理論解を適用する際には注意を要します。なお、現場透水試験を狭義の意味で1本のボーリング孔を用いる透水試験を指すこともありますが、本稿では揚水試験やトレーサー試験、地下水面より上での地盤を対象とした透水試験を含めて現場透水試験として取り扱い、試験の内容や方法ならびに結果の整理や解析について、地盤工学会基準<sup>3)</sup>に従って説明をします。

### 2. 現場透水試験の種類と特徴

現場透水試験の種類は「地盤調査の方法と解説」で表-1のように整理されています<sup>3)</sup>。単孔式透水試験は、単一の試験孔で実施する現場透水試験法の総称であり、多くがこのタイプと言えます。具体的には、1本のボーリング孔や井戸を用い、揚水あるいは注水した際の地下水位の回復や低下挙動から主に透水性を求めます。そのため、ボーリング孔先端部、スクリーン設置部などの局所的な評価が可能となります。また、揚水試験は、揚水に伴う複数の観測井の水位低下量から透水性や貯留性を求める試験方法です。そのため、広い範囲の平均的な帯水層の水理特性を評価することが可能となります。さらに、井戸の揚水能力も把握することができます。

このように地下水面より下の未固結地盤で実施する現場透水試験には表-2のような特徴があります。ここで地下水面とは、土中の間隙において水が自由に移動できる大気圧と等しい圧力をもつ地下水の表面のことを指し、通常、地下水面より下は水によって飽和されています。一方、地下水面より上は毛管作用による影響で浅は不飽和状態となっています。この不飽和状態で実施する試験法は現在、締め固めた地盤を対象として、オーガー孔を利用する方法のみが基準化されています。

表-1 透水特性を求めるための試験方法の比較表<sup>3)</sup>に一部修正

地盤工学会基準		適用範囲						方式		得られるパラメータ			
番号 (JGS-)	名称	対象			状態		方法		単孔	多孔	透水 特性	貯留 特性	その 他
		未固結	岩盤	締め固め	飽和	不飽和	定常	非定常					
1314	単孔を利用した透水試験方法	○	—	—	○	—	○	○	○	—	○	△	—
1315	揚水試験方法	○	△	—	○	—	○	○	—	○	○	○	△
1316	締め固めた地盤の透水試験方法	—	—	○	—	○	○	—	○	—	○	—	—
1321	孔内水位回復法による岩盤の透水試験方法	—	○	—	○	—	—	○	○	—	○	△	—
1322	注水による岩盤の透水試験方法	—	○	—	○	—	○	—	○	—	○	—	—
1323	ルジオン試験方法	—	○	—	○	—	○	—	○	—	—	—	○

\*岡山大学大学院 環境生命科学研究科 准教授 博士（工学）

表-2 未固結地盤で実施する現場透水試験の特徴

特徴	単孔を利用した透水試験	揚水試験
利点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 広く普及している</li> <li>・ 比較的安価</li> <li>・ 深さや位置を変えることで三次元的評価が可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 透水性と貯留性が得られる</li> <li>・ 信頼性が高い</li> <li>・ 広範囲の地盤情報を反映している</li> </ul>
欠点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 精度がやや低い</li> <li>・ 個人差が大きい</li> <li>・ 局所的な情報である</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 比較的高価（主に大規模なプロジェクトで実施）</li> <li>・ 適切な解析がなされていない場合が多い</li> </ul>

### 3. 現場透水試験の準備と注意点

#### 3.1 試験孔の掘削とフィルターの設定

各試験に対する標準的な孔径<sup>4)</sup>は、単孔を利用した透水試験が86mm、岩盤に対する透水試験が66mm、揚水試験での揚水井は100～300mmならびに観測井は66～86mmとなっています。また、正確な物性を把握するためには孔の仕上がりを良くすることが重要であり、特に、未固結地盤においては孔壁が崩壊しやすいことから、ケーシングによる保孔や泥水管理<sup>4)</sup>が必要です。具体的には、①掘削時の泥水圧力を極力低く抑える、②コアチューブ類の挿入、引き上げは孔内の急激な変化を引き起こさないようにゆっくりと行う、③孔内の泥水位が低下したときは直ちに孔口から泥水を補給して孔壁の崩壊を防止する、④孔曲りや孔壁崩壊の原因となりスライムの排除が不十分となるような急速な掘進を行わないことです。なお、対象とする帯水層を完全に貫入して掘られ、その全層に対してスクリーンを有する井戸は完全貫入井、これに対して一部のみスクリーンを有する井戸は部分貫入井と呼ばれています。

フィルターには粒径の揃った砂や砂利、金網、編み布などが用いられますが、良好な透水性を有し地下水の流入、流出が容易に行えるという性質と地盤中の土粒子が井戸内へ流入することを防止する性能が要求されます。これらの相反する性質を満足できる材料は帯水層の粒径分布から決定することができます<sup>5)</sup>。

#### 3.2 試験孔の洗浄及び揚水・注水の方法

揚水時における水頭損失は試験結果に影響を及ぼす可能性があります。この原因としては、洗浄不足による帯水層の孔壁表面、フィルター材やスクリーン、揚水管中での流動抵抗などが考えられます。このうち、井戸の洗浄は、ブラッシング、中空状のカップを井戸内で急激に引き上げることを繰り返して内部に急激な流れを作るスワビング、底に弁の付いた容器で吸い取るベイラー、空気を吹き込んで土砂などをまきあげ排出するエアリーフト、高圧水をスクリーンに吹き付けるジェット

ング等により行われます。

揚水の方法には、井戸内に設置した水中ポンプを用いる方法と地上に設置した真空ポンプを用いる方法があります。試験によって吐出容量と圧力が規定されているものがあり、真空ポンプを用いる場合の汲み上げ可能な水深の限界は実質的には6～7m程度であることに注意する必要があります。また、注水には所定の吐出流量と圧力を有するポンプが規定されています。

#### 3.3 測定項目

現場透水試験での測定項目は主に、地下水位と流量になります。流量は三角堰や流量計、既知容積の容器などが用いられ、試験によっては測定精度に加え、自記記録可能なものが求められています。一方、地下水位の測定については、地盤工学会基準<sup>3)</sup>では3基準が制定されており（JGS1311, 1312, 1313）、岩盤に対する現場透水試験の基準の中でも規定されています（JGS1321）。水位測定は巻尺型の手動式水位測定器、フロート式自記水位計や水圧式水位計により行われ、最近ではデータロガーを内蔵した圧力センサーなど、簡便で精度の高い機器が市販されています。なお、計測された間隙水圧は、水位変動の相対的な評価のほか、水の単位体積重量から圧力水頭に換算し、計測点での標高を示す位置水頭を考慮した全水頭で表すことで地下水面の標高値が求められます。この際、機器によっては大気圧補正を行う必要があります。

上部に低透水性の地層（難透水層、加圧層）が被覆している被圧帯水層では、浅部にある不圧帯水層の自由地下水が示す水位とは異なる場合があります。また、不圧帯水層中に部分的な粘土層などが凹形状で存在することで、その上部の砂礫層中に宙水として貯留される場合があるため、深さの異なる複数の点で計測するなど、調査対象とする帯水層の地下水位を適切に把握することが必要となります。さらに、人為的な影響だけでなく、降雨、気圧、潮汐、河川水位等の自然現象の影響も受けます。そのため、これらの影響を考慮した上で、試験前後での平衡状態での水位の確認が重要となります。この平衡水位は1時間あたりの水位変化量が1cm未満でかつ収束傾向にあることを確認した段階としています。

#### 3.4 試験条件と方法

地下水の流れは非常に緩慢であることから、試験条件は層流状態、つまり、ダルシーの法則を満足していることが前提となります。その判断には

レイノルズ数（地下水流動においては、一般的に平均粒径とダルシーの法則で定義される流速の積を水の動粘性係数で割った値）が用いられ、この値が1以上になると層流から乱流の遷移領域になると言われています。大規模な揚水井戸のごく近傍や高透水性の帯水層において大きなレイノルズ数をもつ流れが生じて水頭損失が非線形となったり、逆に極端に小さい値を示す流れは高粘性流体としての挙動を示したりするために、ダルシーの法則が適用できない場合があります。

試験方法は、揚水あるいは注水等により試験孔内の水位を一時的に低下または上昇させ、平衡状態に戻るときの水位変化を経時的に測定する非定常法と、試験孔内の水位が一定となったときの流量を測定する定常法に分類されます。このうち、非定常法には孔内の水を汲み上げて水位を低下させた後の水位上昇過程を測定する揚水法（回復法）と孔内に水を注水して水位を上昇させた後の水位低下過程を測定する注水法があります。また、錘（スラグ）を投入したり引き上げたりすることによって孔内水位を瞬間的に変化させるスラグ法があります。

### 3.5 結果の整理と解析

現場透水試験の結果の整理は、測定項目の地下水位の変化量や流量を試験開始後の経過時間に対してプロットします。結果の解析方法のうち、定常法は、一定の境界条件の下で地下水位の時間変化がなくなった状態、つまり、地下水流動の支配方程式の時間微分項をゼロとした場合の理論解より求めます。一方、非定常法は地下水位の時間変化を伴う状態での解析であり、地下水流動の支配方程式を時間微分項も含めて解いた場合の理論解により求めます。なお、これらの解析方法は、理論式を誘導する上での仮定が満足された場合に適用できるものですので、この条件から大きく逸脱した条件の下で実施された試験結果の解析には、別途、対応する解析解を適用する必要があります。

現場透水試験で求める帯水層での物理特性は主に透水性と貯留性であり、このうち貯留性は非定常試験により得られます。一方、地下水面より上での現場透水試験は透水性のみとなりますが、地盤の保水性の影響を受けます。

以下にこれらのパラメータを順に説明します<sup>6)</sup>。

①透水性係数 ( $k[L T^{-1}]$ ) 水が浸透する際の抵抗を表す指標を意味し、地下水の浸透に対する運動方程式であるダルシーの法則において流速が動水勾配に比例する際の定数で示されます。透水性係数が全

ての流れの方向において同じ場合を等方性、異なる場合は異方性、透水性係数が場所によらず一定の場合を均質、異なる場合を不均質と呼びます。通常、多くの地盤は均質であることは稀であり、不均質性かつ異方性を有します。また、不飽和状態での透水性係数は水分量（飽和度）の値によって変化します。現場では浸透に伴う残留空気のため完全な飽和状態とはならない場合が多く、この状態で得られた値を現場飽和透水性係数として室内透水試験や地下水面より下の現場透水試験での値と区別しています。なお、ボーリングデータ等により、事前に粒度分布から透水性係数の概略値を推測しておくことも大切です。

②透水量係数 ( $T[L^2 T^{-1}]$ ) 透水性係数と帯水層厚  $D$  の積として  $T=kD$  で定義され、主に揚水試験から求められます。なお、不圧帯水層では帯水層下端から地下水面までが  $D$  となります。

③比貯留係数 ( $S_s[L^{-1}]$ ) 被圧帯水層において水頭の単位変動により単位体積の帯水層から流出、または貯留される地下水の体積として示されます。有効応力の増減による帯水層の弾性変形により生じるため、固結度が低いほど大きな値となります。

④比産出率 ( $S_y[-]$ ) 不圧帯水層において単位の地下水位変化によって生じる単位体積当たりの貯留水の変化量であり、毛管作用の無視できる媒体では近似的に流体が動くことのできる間隙率を表す指標である有効間隙率の値に等しくなるため、比貯留係数よりも大きな値となります。

⑤貯留係数 ( $S[-]$ ) 比貯留係数と帯水層の厚さ  $D$  の積、これと比産出率の和として、 $S=S_s D+S_y$  で定義されます。被圧帯水層の特性が卓越している場合には  $S=S_s D$  となり、不圧帯水層では  $S=S_y$  となるため、不圧帯水層の貯留係数は被圧帯水層のそれよりも格段に大きな値となります。なお、貯留係数が大きいほど、水位変化量は小さくなります。

⑥ルジオン値 ( $Lu(\ell /(\min \cdot m))$ ) 0.98MPaの圧力で注水したときの試験区間1mあたりの注水量をリットル単位で表示した値で示されます。ルジオン試験の標準寸法 ( $L=5m, D=66mm$ ) では、 $1Lu = 1.3 \times 10^7 m/s$  となります。

その他、現場透水試験に関係するものとして、下記のパラメータがあります。

⑦水理拡散率 ( $\eta[L^2 T^{-1}]$ ) 貯留係数に対する透水量係数の比 ( $T/S$ ) の値であり、帯水層の地下水位変化の伝播速度を支配します。

⑧漏水因子 ( $B[L]$ ) 帯水層からの揚水により、その帯水層の上部または下部に位置する難透水層を

通って地下水が鉛直方向に浸透する現象を示す指標です。漏水因子が大きい場合は、難透水層からの漏水率が少ないことを意味します。

⑨影響圏 (R[L]) 揚水に伴い周辺地下水の水位または水圧が低下する範囲を示し、揚水流量や時間、帯水層定数、地下水涵養量、帯水層の境界および河川や湖沼など周辺の水理境界に影響されます。揚水に伴って地下水井や水頭の低下を生じる影響圏は被圧帯水層では数百mから数km、不圧帯水層では数十m～数百m程度とされています。

## 4. 単孔式透水試験

### 4.1 単孔を利用した透水試験 (JGS1314-2012)

試験方法による分類としては、前述のように定常法と非定常法がありますが、透水係数 $10^{-4}$ m/sを境にして選別されます。これは、一般的な試験の仕様や時間で実施可能な判別となりますので、あくまで目安と言えます。一方、試験孔の仕様による分類としては、計測区間の形状により、オーガー法、ピエゾメーター法、チューブ法、パッカー法がありますが、JGSで採用されている方法は、ピエゾメーター法であり、得られる透水係数は、試験区間周辺の水平方向の流れ成分の影響が大きくなります。試験時の留意点は、①孔壁と測定パイプ間の空隙の有無、②孔壁および孔底の十分な洗浄および遮水、③試験区間の長さLと試験区間の孔径Dの比 $L/D \geq 4$ とし、試験終了まで試験区間の形状を一定に保つ、④地下水面より上の不飽和地盤にはこの方法は適用できないこと等が挙げられますが、③に関しては理論解を適切に取り扱うことによって $L/D < 4$ の条件でも適用可能となります(理論解を数学的に簡素化するために単に $L/D \geq 4$ の条件が用いられています)<sup>7)</sup>。

### 4.2 岩盤に対する透水試験

土質地盤と同様に岩盤が均質等方な多孔質媒体として仮定しています。亀裂性岩盤では、別の水理試験や数値解析を用いた評価が必要となります。

#### (1) 孔内水位回復法による岩盤の透水試験

(JGS 1321-2012)

ボーリング孔内にパッカーを用いてトリップバルブ付水位測定管を立て、トリップバルブを開放した後の水位測定管内の水位回復と時間の関係から岩盤の透水係数を求めるもので、非定常法による透水試験に分類されます。

#### (2) 注水による岩盤の透水試験 (JGS1322-2012)

ボーリング孔内にパッカーを用いて試験区間を

設定し、ここに圧力を段階的に上昇させながら注水を行い、各段階での一定注水流量と注水圧力の関係から透水係数を求めるもので、定常法による透水試験に分類されます。

#### (3) ルジオン試験 (JGS1323-2012)

ボーリング孔内をパッカーで区切った試験区間に、一定圧力で注水を行い、注水圧力と注水流量からルジオン値を求める試験です。

## 4.3 結果の整理と解析方法

単孔式透水試験の理論式は三次元放射流から誘導されており、定常法は、試験区間の孔径あるいは測定用パイプのスクリーン外径D (m)、試験区間の長さL (m)の条件で、一定揚水流量または注水流量 $Q_0$  (m<sup>3</sup>/s)と平衡水位からの水位変動量 $s_0$  (m)から透水係数k(m/s)を求めることができます。

$$k = \frac{Q_0}{2\pi s_0 L} \ln\left(\frac{2L}{D}\right) \quad (\text{ただし, } L/D \geq 4)$$

一方、非定常法では、ある時間における揚水流量または注水流量 $Q_0$  (m<sup>3</sup>/s)と孔内水位の単位時間あたりの変動量から以下の理論式が誘導されます。

$$k = \frac{d_e^2}{8L} \ln\left(\frac{2L}{D}\right) \frac{\ln(s_1/s_2)}{t_2 - t_1} \quad (\text{ただし, } L/D \geq 4)$$

ここで、 $d_e$ : 手動式水位測定器の場合は $d_e = d$ 、水圧式測定器の場合は水位測定ケーブルの断面積を差し引いて求めた有効断面積と等価な面積を有する円の直径 (m)、 $d$ : 水位変動区間における測定用パイプの内径 (m)。

解析方法は、通常、Hvorslev (ボシュレフ)の方法である $\log_{10}(s)-t$ プロットの直線勾配法を用いますが、試験結果が地盤の貯留性の影響を受ける場合には、水位回復状況を標準曲線群と合致させるCooper (クーパー)らの方法である曲線一致法により求めます。なお、 $\log(s)-t$ プロットにおいて直線が得られない要因としては、①平衡水位を誤って評価した場合、②乱流が発生した場合、③孔壁の洗浄が不十分な場合、④地盤の貯留性が無視できない場合が挙げられます。また、得られる比貯留係数は、透水係数に比べると著しく感度が鈍いため、参考値とする必要があります。このように、単孔式透水試験で得られた透水係数の値は、その使い方を考慮して選定すべきで、異なる試験法で得られた結果は理論的背景が異なることから平均化して評価することは避けるべきです。

一方、ルジオン試験のみ、有効注水圧力(試験区間における注水時の水圧から平衡時の水圧及び

注水管内抵抗による損失水頭に相当する水圧を引いた差圧) と単位長さ当たりの注水流量の関係を示す  $p - q$  線の直線関係から有効注水圧力 0.98MPa に相当する  $q$  ( $\ell / (\text{min} \cdot \text{m})$ ) を求めてルジオン値  $Lu$  とします。

## 5. 揚水試験 (JGS1315-2012)

揚水試験は単孔式透水試験と対比する意味で多孔式透水試験とも呼ばれ、揚水流量を段階的に変化させて揚水井戸内の水位低下量を計測する「段階揚水試験」、揚水流量一定で揚水を継続して観測井での水位変化を測定する「定流量揚水試験」、その後、揚水を停止して水位の回復状況を測定する「回復試験」の順に実施するのが一般的です。なお、継続時間などの制約により、やむを得ず再度段階揚水試験の途中から行う場合は、中断前の揚水量から始めて同様の水位低下量になった状況から次段階の揚水に移行するなどの配慮が必要です。

結果の整理方法には定常法と非定常法があり、典型的な水位低下パターンの比較等から帯水層モデルの推定を行った後に適切な解析方法を選択する必要があります。

被圧帯水層の定常法の場合、ダルシーの法則に基づく運動方程式より下記の式が誘導されます。

$$s_1 - s_2 = \frac{2.30Q}{2\pi T} \log_{10} \left( \frac{r_2}{r_1} \right)$$

ここで、 $s_1, s_2$  は揚水井戸中心からの距離  $r_1$  (m)、 $r_2$  (m) だけ離れた点での水位低下量 (m)。

解析方法は Thiem (ティーム) の方法である直線勾配法が一般的であり、片対数紙上に上式左辺と右辺の変数の関係を示す  $s - \log_{10}(r)$  をプロットし、この直線部分の勾配と定常流量  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) から透水量係数  $T$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) を求めます。一方、非定常法はダルシーの法則に基づく運動方程式と連続方程式から誘導され、水位低下量や流量変化を無次元化して、時間や井戸からの距離に関する関数として表した井戸関数が用いられます。

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u), \quad u = \frac{Sr^2}{4Tt}$$

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \dots$$

ここで、 $s$  : 水位低下 (上昇) 量 (m)、 $Q$  : 一定揚水 (注水) 流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )、 $T$  : 透水量係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )、 $S$  : 貯留係数、 $r$  : 揚水 (注水) 井戸からの距離 (m)、 $t$  : 揚水開始後の経過時間 (s)。

非定常の解析法には、Theis (タイス) の方法である曲線一致法が用いられ、井戸関数  $W(u)$  と  $1/u$  の関係を表す標準曲線と試験結果として得られる  $s - (t/r^2)$  の関係 ( $s$  : 水位低下量、 $r$  : 揚水井戸中心からの距離、 $t$  : 揚水開始後の経過時間) を同じスケールの両対数紙上に整理して重ね合わせ、この合致点の座標から透水量係数  $T$  と貯留係数  $S$  を算出します。一方、Cooper (クーパー) と Jacob (ヤコブ) の方法である直線勾配法は、 $u < 0.01$  の条件で井戸関数  $W(u)$  がテイラー展開された式の右辺第 2 項までで近似できることを利用した次式により、片対数紙上に  $s - (t/r^2)$  をプロットし、直線部分の勾配と切片の座標の読みから  $T$  と  $S$  を算出します。

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ \ln \left( \frac{t}{r^2} \right) - \ln \left( \frac{S}{2.25T} \right) \right\}$$

基本的に上記の解析方法は、被圧帯水層を対象としています。不圧帯水層を考える場合、水位低下量が飽和帯水層厚さに対して小さく、鉛直方向の流れが無視できるという Dupuit (デュピュイ) の仮定を満足するときに適用可能となります。

また、最近では帯水層モデルの推定や曲線一致法の精度向上に、水位低下量を対数値の時間微分で表す Derivatives 曲線<sup>8)</sup> が用いられています。

## 6. 不飽和地盤を対象とした現場透水試験

地下水面より上の不飽和地盤で実施される透水試験は、基本的に注水による定常法により実施されます。不飽和地盤で得られる透水係数は、水分量 (飽和度) によって変化しますが、このうち、飽和に近い透水係数 (現場で得られる最大値) を求める方法としてロックフィルダムのコア材などの低透水性材料を対象とした 1 つの基準が制定されています。また、最近では、堤防などの土構造物や斜面などの自然地盤を対象とした新規基準の制定に関する作業が進められています<sup>9)</sup>。

### (1) 締め固めた地盤の透水試験方法 (JGS1316-2012)

標準として地盤表面を直径 0.3m 及び深さ 0.3m の円筒状に掘削した試験孔に対して、マリオットサイフォン等の注水装置を用いて孔内水位を一定に保った状態で流入流量と試験開始からの経過時間をプロットし、定常流量から透水量係数を求めます。理論式は、点源放射流を水深に対して積分することによって誘導されています。

### (2) 地下水面より上の地盤を対象とした透水試験方法 (新規基準案, 公示済)<sup>9)</sup>

5種類の既存の試験方法を対象に、試験方法や解析方法の共通点をまとめた包括的な試験方法としての基準案となっています。地表面で実施する場合は、数十cmまでの浅い地盤での透水性を対象としており、負荷する圧力を負圧か正圧を選択します。一方、試験孔で実施する場合は、試験孔全体を用いる方法、測定用パイプを用いる方法、パッカーを用いる方法が示されています。

## 7. 地下水流動状況の調査（トレーサー試験）

現在、ボーリング孔を利用して帯水層における深さ方向の地下水の情報を得る試験法として、2つの基準が制定されています。いずれも1本のボーリング孔を用いて鉛直方向の地下水の流動状況を測定する方法です。なお、物質の移動を追跡して分散長や有効間隙率等の物質移動特性を求める試験法は現状では基準にはなっていません。

### (1) トレーサーによる地下水流動層検層 (JGS1317-2012)

測定孔内にトレーサー液を投入置換し、地下水が孔内に流入することにより生じるトレーサー濃度や温度の変化を継続的に測定し、希釈する速さによって地下水が卓越して流動している層を確認する調査方法です。具体的には、孔内地下水の電気抵抗あるいは温度を変化させた後、孔内水のこれらの経時変化を測定します。

### (2) 単孔を利用した地下水流向流速測定方法 (JGS1318-2015)<sup>10)</sup>

測定孔内の流向及び流速を測定する原理のうち、溶液の移動や温度変化を検出する溶液濃度追跡法と、特定の浮遊粒子に着目しその軌跡を追う粒子追跡法に基づいた調査方法です。流速が極めて遅い場では、溶液濃度追跡法は拡散現象が避けられないため、粒子追跡法が用いられます。測定方法は、光学式、レーザー光、超音波式等が開発されています。

## 8. おわりに

本稿では現場透水試験の概要について、試験実施の際の留意点などを中心に網羅的にまとめました。そのため、個々の試験法の概略図や解析方法に用いるグラフ等の詳細な説明は誌面の都合上、割愛させていただきました。

現場透水試験は他の地盤調査とは異なり、物性値を得るための解析が必要となります。そのため、試験時の測定精度に加え、実施した試験が理論解

を誘導している仮定や条件に適合しているかを見極めることが必要となります。つまり、得られた結果に対する検証を行うことにより物性値が示す特性を正しく理解することが可能となります。また、基準以外の方法を用いた場合は、その旨を報告事項に必ず記載し、結果の評価の際に確認できるようにすることをお勧めします。

ところで、「地盤調査の方法と解説」<sup>3)</sup>では理論式の誘導条件などの記載が必ずしも十分ではないため、現在、地盤工学会地盤調査・規格委員会において、原著論文と利用する最終形の式の間を埋めることを目的として、「地下水調査に用いる井戸理論式の整理及び解説」の作成が行われております。近日中に地盤工学会HPから入手可能となる予定です。また、継続して地下水調査に関する現行基準の改正や新規基準の制定に向けた作業が進められておりますので、最新の情報を確認して頂きたいと考えます。

### 〈参考文献〉

- 1) 日本地下水学会編：地下水用語集，理工図書，p.32，2011.
- 2) 地盤工学会 地盤工学用語辞典改訂編集委員会編：地盤工学用語辞典，丸善出版，p.121，2006.
- 3) 地盤工学会 地盤調査規格・基準委員会編：地盤調査の方法と解説—第7編 地下水調査，丸善出版，pp.471-659，2013.
- 4) 全国地質調査業協会連合会編：ボーリングポケットブック（第4版），オーム社，pp.46-47，2003.
- 5) 地盤工学会編：現場技術者のための土と基礎シリーズ19，根切り工事と地下水—調査・設計から施工まで—，pp.197-198，1991.
- 6) 日本地下水学会 地下水流動解析基礎理論のとりまとめグループ編：地下水シミュレーション—これだけは知っておきたい基礎理論—，技法堂出版，pp.79-90，2010.
- 7) 進士喜英：地下水学の名著を読む（7）現場透水試験の源流 Hvorslev（1951），地下水学会誌，Vol.58，No.2，pp.241-246，2016.
- 8) Horne, R.N. : Modern Well Test Analysis : A Computer-Aided Approach, Petroway Inc., 257p., 1995.
- 9) 地盤工学会：学会基準—新規制定，改訂に伴う公示 [https://www.jiban.or.jp/file/organi/bu/kijyunbu/kouji/chikasuien\\_h28.pdf](https://www.jiban.or.jp/file/organi/bu/kijyunbu/kouji/chikasuien_h28.pdf)（2017年2月20日現在）
- 10) 地盤工学会：新規制定地盤工学会基準・同解説（2016年度版）単孔を利用した地下水流向流速測定方法（JGS1318-2015），2016.

# 深層崩壊箇所における調査観測の経験 (和歌山県 熊野地区, 三越地区)

なかの ひでき  
中野 英樹\*

K  
ey Word

紀伊半島, 平成 23 年台風 12 号, 深層崩壊, 臨時点検, ボーリングコア観察,  
水位変動速度, 亀裂の破壊, 崩壊発生メカニズム

## 1. はじめに

平成 23 年 9 月 2 日から 5 日にかけて西日本を縦断した台風 12 号は紀伊半島に大量の降雨をもたらす、一部地域で総雨量が 2,000 ミリを超えるなど記録的な豪雨に見舞われ、土砂災害は紀伊半島だけで 3,000 箇所を超え、甚大な被害をもたらした。特に和歌山県や奈良県では、深層崩壊により大規模な河道閉塞が 17 箇所形成された<sup>1)</sup>。

私は、これら深層崩壊のうち、和歌山県田辺市本宮町の三越地区、和歌山県田辺市熊野の熊野地区(図-1)にて、平成 26 年度から崩壊地の災害復旧事業や深層崩壊のメカニズム解明等の調査や観測、斜面監視する動態観測機器などの維持管理に携わっており、本編では私がこれまで経験した主なイベント、深層崩壊の特徴について紹介する。

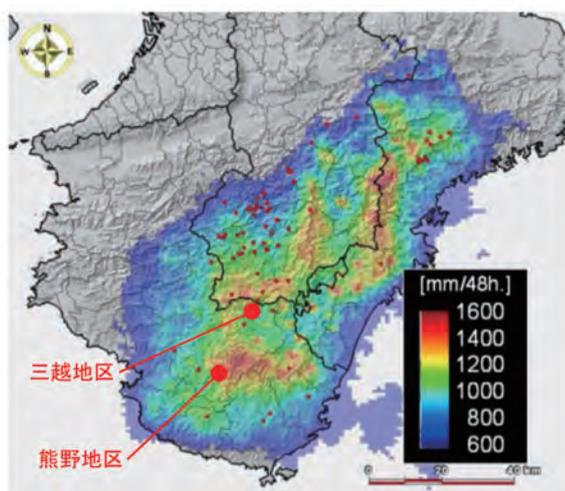


図-1 三越地区、熊野地区の位置(最大 48 時間雨量と崩壊土砂量 10 万  $m^3$  以上の崩壊地(赤丸)の分布状況<sup>2)</sup>に加筆。)

## 2. 三越地区、熊野地区の概要

### 2-1. 三越地区

三越地区は和歌山県田辺市本宮町三越に位置し、平成 23 年 9 月 4 日 8:30 頃<sup>3)</sup>に三越川右岸側の北向き斜面にて、崩壊規模幅約 300m、奥行き約 670m の崩壊<sup>4)</sup>が発生した。三越川は崩壊した土砂により一時的に河道閉塞が発生、その後侵食されて、閉塞は解消された。(写真-1)

崩壊地には白亜系の堆積岩である四万十帯の泥岩砂岩互層が分布しており、大局的には北落ち傾斜で、崩壊地が北向き斜面であることから流れ盤を呈している。また、崩壊地は、三越川の攻撃斜面に位置しており、崩壊発生以前の空中写真判読から地すべり地形が読みとれる。



写真-1 崩壊直後の三越地区<sup>2)</sup>

### 2-2. 熊野地区

熊野地区は和歌山県田辺市熊野に位置し、平成 23 年 9 月 4 日 6:54 頃<sup>3)</sup>に熊野川右岸側の南向き斜面にて、崩壊規模幅約 450m、奥行き約 650m、崩壊土砂量約 410 万  $m^3$  の崩壊<sup>4)</sup>が発生した。

崩壊土砂が河道を閉塞したことで湛水地が形成されたが、規模が小さかったため、ポンプ排水、仮排

\*株式会社エイト日本技術開発 防災保全事業部 関西支社 防災保全部 地盤技術グループ プロジェクトマネージャー

水路の整備および湛水池の埋め戻しにより、閉塞は解消された。(写真-2)

崩壊地には斜面下位より白亜系の堆積岩である四万十帯の泥岩、砂岩、礫岩の順に分布しており、大局的には南落ち傾斜であるため、流れ盤を呈している。また、崩壊地頭部には不安定斜面が残存する。



写真-2 崩壊直後の熊野地区<sup>2)</sup>

### 3. 私が経験した主なイベント

三越地区、熊野地区は紀伊山地の中心部に位置するため、年間降水量が多く、天候の急変による雷の発生も多い。

また、崩壊地は巨大岩塊や崩積土が残存し、植生もほとんどなく、荒々しい状態で、特に滑落崖周辺は急崖となっており、不安定な状態にある。

両地区とも不安定斜面の安定度の把握や崩壊地内で作業している工事関係者の安全確保を目的とした自動斜面監視システムを導入しているが、崩壊地が広大であるため、崩壊地全域をカバーできていないのが現状である。

そこで、月1回実施する定期点検時や定点観測を目的としたインターバルカメラ(写真-3)にて、斜面異常の有無をチェックしている。

また、台風等による豪雨後、動態観測機器の警戒基準値の超過、新たな崩壊の発生、通信機器の不調等があれば臨時点検を実施している。

以下に、これまでに私が経験した主なイベントの一部を紹介する。

### 3-1. 斜面変動による臨時点検

豪雨等による警戒基準値の超過や新たな崩壊の発生等の斜面変動により、これまで5回の臨時点検を実施している。

臨時点検は主に崩壊範囲の拡大や前兆が無いか、崩壊背後斜面や崩壊土砂の安定性、観測機器の異常有無等について点検を行っている。点検結果は、崩壊地内の対策工事の再開判断の基準の1つとなっていることから、豪雨後の早い段階で実施することが重要であり、また現地にて斜面安定度を判断する必要があることから、災害等の実務経験者を含めた点検班を構成して早急に対応している。

熊野地区の斜面変動は図-2のように、滑落崖、その背後斜面や崩壊地に残存する不安定斜面にて発生しており、震度3~4程度の地震でも一部の斜面で変動が発生している。写真-4、写真-5は台風による豪雨により滑落崖の背後斜面が崩壊時のもので、滑落崖には巨大な不安定岩塊が残存するものの、崩壊土砂の大半は崩壊面にて停止し、工事範囲内までは到達しなかった。このとき、臨時点検にて拡大崩壊の危険性は小さく、崩壊しても工事範囲まで到達しないと判断し、その後の定期点検時にはチェックするようにし、崩壊の前兆の把握に努めている。

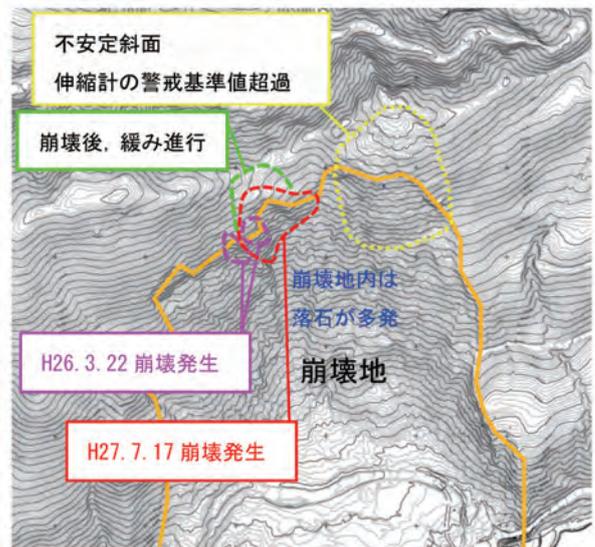


図-2 熊野地区の主な斜面変動の発生箇所



写真-3 インターバルカメラと撮影画像



写真-4  
新しい崩壊による  
臨時点検写真  
・崩壊状況全景  
(H27.7.18)



写真-5  
新しい崩壊による  
臨時点検写真  
・崩壊地滑落崖  
(H27.7.18)

### 3-2. 落雷による機器異常や破損による臨時点検

最近ではデータ通信網の整備が進んだことで、山深いこの地でも携帯電話回線を用いた自動斜面監視システムを導入しており、現地から遠く離れた社内にて常時監視することができるのだが、電子機器の大敵である落雷（誘導雷）と思われる機器の異常は度々発生した。落雷（誘導雷）対策として避雷器も設置したものの、完璧な対策とはならず、不十分だったようである。

落雷（誘導雷）により多数の機器が被災することがあり、2016年9月の落雷（誘導雷）ではデータ集録装置6基、通信機関係6基が全損した。

このような機器異常が発生した場合、対策が待たず無しの状況で実施されている工事の安全確保のために早期復旧が必要となる。

そこで、臨時点検の際は、最低限の代替器を持参し、機器メーカーに事前連絡を行った上で現地に向かうこととし、また、平常時から自動斜面監視システムをチェックする社内監視員を配置するなど、早急なシステムの復旧を心がけている。

## 4. 深層崩壊の特徴とメカニズムの解明に向けて

紀伊半島で発生した深層崩壊は流れ盤を呈する斜面に多く、基盤内に崩壊面が生じて短時間で崩れ落ち、崩壊最深部付近に湧水がみられる場合が多い。また、三越地区、熊野地区のこれまでの水位観測から水位上昇開始後に一時的に水位上昇が鈍くなる深度の存在、急激な水位上昇等の特徴が認められ、深層崩壊の発生メカニズムの一因として地下水が大きく影響しているものと考えられる。そこで三越地区、熊野地区においては、豪雨による間隙水圧の上昇により、特定の水みちを形成する亀裂が破壊強度を超え、進行性破壊を生じることにより「強度ゼロ」状態となって崩れ落ちたのではないかと仮説をたて、地下地盤構造や地下水の変動特性に着目した調査、観測を行っている。

### 4-1. 崩壊発生深度の特徴

三越地区、熊野地区ともに崩壊地の背後斜面には深度30～40m付近まで風化が認められる風化岩が分布し、それ以深は原岩色を呈する新鮮岩が分布している。この傾向はコア観察だけでなく、破碎度区分<sup>5)</sup>や色彩測定でも同様の傾向となり、pHや電気伝導度（EC）の測定結果でも風化岩と新鮮岩との境界付近に測定値の変化が認められた。（図-3参照）また、崩壊地内と崩壊地の背後斜面におけるボーリングコアを比較すると、崩壊地内は崩積土を除くと新鮮岩主体となることから、三越地区、熊野地区においては深度30～40m付近までの風化岩が崩壊したものと考えられる。

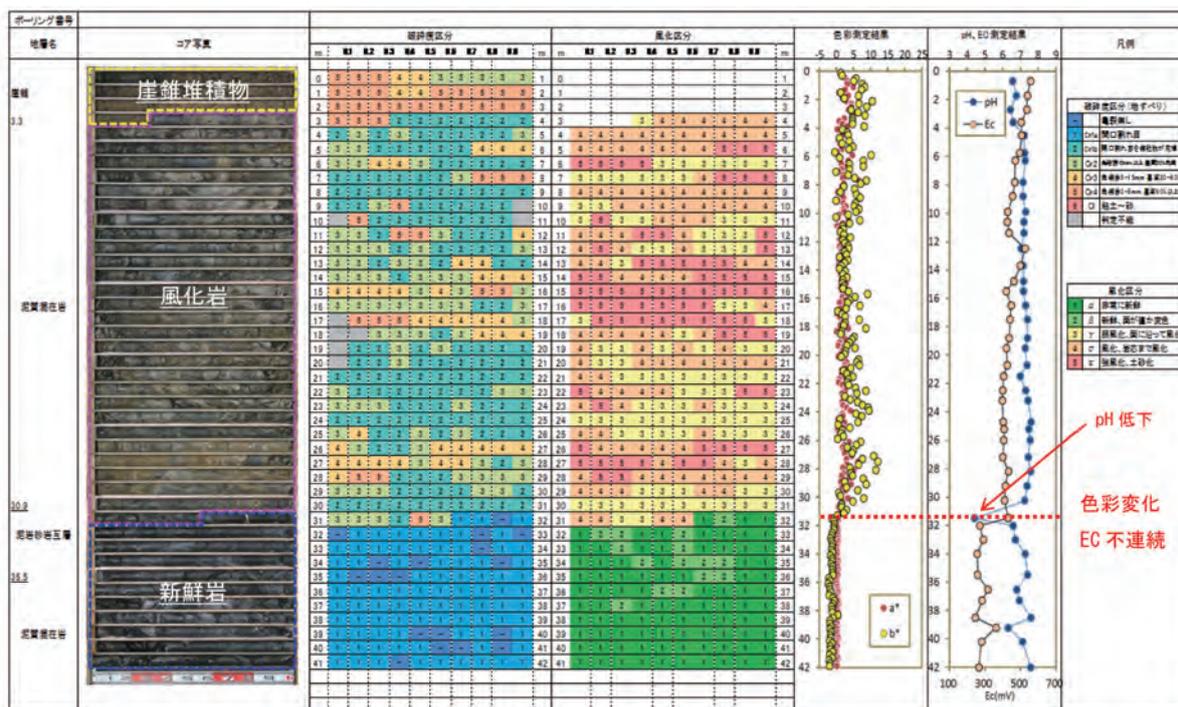


図-3 崩壊地背後斜面のボーリングコア観察結果と色彩, pH, EC測定結果の例 (三越地区)

4-2. 地下水変動の特徴

図-4は崩壊発生地の背後斜面の水位観測孔における平成27年7月の台風11号時の水位上昇と水位変動速度の関係をグラフ化したものである。

台風11号では降り始めからの累積雨量が571.5mm(アメダス本宮)に達した。降雨開始から29時間後の累積雨量350mm付近を超えてから水位上昇を開始するが、時間雨量20~30mm降り続けている中、一時的に水位上昇速度が遅くなる深度が認められた。

この現象は三越地区、熊野地区の他の水位観測孔でも認められ、図-5のように、コア状況も含めて考察すると、亀裂の発達した風化岩の開口亀裂に地下水が流入し、その後、亀裂内に地下水を貯留できる限界を超えると再び地下水位が上昇したと考えられる。

また、この地下水位の再上昇により、地下水を貯留した開口亀裂には水頭高の上昇分の間隙水圧が作用すると推測される。

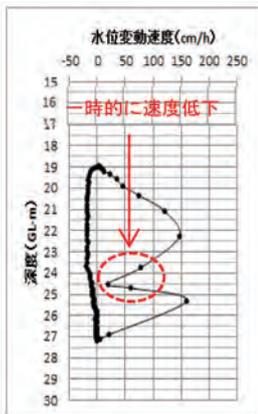


図-4 水位変動速度

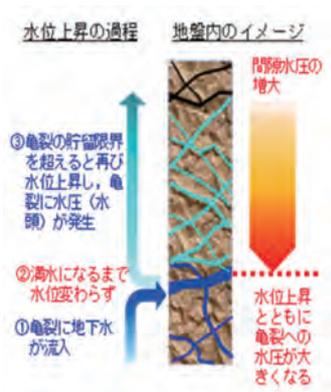


図-5 地盤内の水位上昇と間隙水圧のイメージ

4-3. 亀裂の破壊特性

図-5のように亀裂に間隙水圧がかかった場合、どの程度で亀裂が破壊するのかを岩盤透水試験(ルジオンテスト)を用いて測定を行った。

その結果、三越地区では50m相当、熊野地区では90m相当の水頭が発生すれば、亀裂が破壊することが確認された。

4-4. 崩壊発生メカニズムへのアプローチ

上記以外でも、崩壊地周辺の水理特性(比流量、水質、地下水供給方向等)について調査観測を行い、総合的に崩壊発生メカニズムについて検討しており、これまでの検討結果では、深層崩壊の発生時の降水量による間隙水圧の上昇にて、亀裂が破壊

強度を超える可能性があるという検討結果が得られた。

5. おわりに

崩壊から5年が過ぎたが、崩壊地内は巨大岩塊や崩積土が残存する荒々しい裸地が広がっている。しかし、崩壊地内には新しい松の幼木等が散見されるようになり、幹径は2cm程度まで成長しているものもある。(写真-6)

また、熊野地区の崩壊地の尾根を越えた裏側(北側)にはハイキングコースとして人気のある百間谷溪谷がある。奇岩や甌穴、大小の滝(写真-7)が連なる溪谷で崩壊発生以降は入山が制限されていたが、登山口付近の整備が進んだことで入山制限が解除され、昨年度から登山者が増加している。対策工事も急ピッチで進められているが、このような植生の回復や観光客の増加から、災害からの復興を肌で感じとれるようになったことは心からうれしい。

私はこの現場を通して、微力ながら斜面の安全管理という災害復旧の一翼に携わらせていただき、また、深層崩壊箇所における地下地盤構造や岩盤内の地下水変動等の水理特性、崩壊メカニズムの検討に携わるなど、技術者として大変貴重な経験をさせていただいている。

最後に、本稿をまとめるにあたり、国土交通省近畿地方整備局紀伊山地砂防事務所より、業務を通じて得られた成果の利用を承諾していただきました。ここに謹んで感謝いたします。



写真-6 崩壊地内の松の幼木



写真-7 百間谷溪谷の滝

〈参考文献〉

- 1) 国土交通省近畿地方整備局企画部企画課紀伊半島大水害記録誌事務局：2011年紀伊半島大水害 国土交通省近畿地方整備局災害対応の記録 (2013.2)
- 2) 内田太郎・佐藤匠・水野正・林真一郎・岡本敦：土木技術資料54-10「2011年台風12号における降雨量と斜面崩壊特性」(2012)
- 3) 千木良雅弘・松四雄騎・ツォウ チンイン・平石成美・松澤真・松浦純生：京都大学防災研究所年報 第55号A「2011年台風12号による深層崩壊」(2012.6)
- 4) 紀伊山地砂防事務所；事業概要パンフレット (2013.10)
- 5) 脇坂安彦・上妻睦男・綿谷博之・豊口佳之：地すべり移動体を特徴づける破碎岩 四万十帯の地すべりを例として、応用地質、第52巻、第6号、231-247頁 (2012)

# 各地の博物館巡り

岡山県岡山市北区

## 岡山県立博物館



博物館正面玄関

### はじめに

岡山県立博物館は、かつて、「吉備の国」として繁栄した岡山県の原始・古代から近世にいたるまでの豊富な文化遺産を収集保存して、長く後世に伝えるとともに、その代表的なものを展示・公開する歴史博物館です。日本三名園の一つとして有名な岡山後楽園の外苑に、昭和46（1971）年に開館し、岡山県の歴史文化の情報発信基地として、様々な展示や博物館講座などの教育普及事業が行われています。

### 展覧会

年2回の特別展及び年各1回の企画展及び交流展では、様々なテーマを設定し、県内外から国宝や重要文化財を含む貴重な資料を収集・展示しています。それ以外の時期は、平常展が「岡山の歴史と文化」をメインテーマに開催されます。

館内は、第1から第4の展示室で構成されており、全ての展示室で、実物資料を中心とした展示がなされています。

### 展示内容 ～平常展～

#### 古代（第1展示室）

旧石器時代のコーナーでは、瀬戸内海沿岸や中国山地で発見された石器、瀬戸内海の海底から引き上げられたナウマンゾウの化石などが展示されています。縄文時代のコーナーでは、県内の貝塚などから発掘された土器や石鏃など、当時の生活と文化を示す遺物が展示され、弥生時代のコーナーでは銅鐸・銅剣などをはじめ、古墳などから発見された三角縁神獣鏡や装飾須恵器など貴重な出土

品が展示されています。



三角縁神獣鏡（三国時代）

#### 文書（主に第2展示室）

生産力の発展により市場が出現し、港町が発達した中世の様子が、牛窓本蓮寺文書などによって紹介されています。また、足利尊氏御教書など、武士勢力の動きを示す文書も展示されています。戦国時代では戦国武将の書状、近世では、国絵図や藩主・家臣の書、蘭学資料や近世文人・学者などの書が展示されています。

#### 美術工芸（主に第2展示室）

平安から室町までの各時代を代表する多彩な仏像や仏画などには、国や県の重要文化財に指定されたものが数多く展示されています。また、岡山県出身で浄土宗の開祖である法然の生涯を描く絵巻の断簡などもあります。

近世の書画では、長谷川信治（等伯）筆の屏風絵や江戸後期の南画派の浦上玉堂・春琴親子や四条派の柴田義堇ら岡山県に生まれ全国に名をはせた画家たちの作品の展示がメインとなっています。



法然上人伝法絵 断簡「臨終」の段（鎌倉時代）

## 民俗（主に第3展示室）

民俗のコーナーでは、テーマを設定し、各種の民俗資料によって庶民生活の推移を展示しています。また、河川交通を担った高瀬舟を復元したものや昭和30年代の暮らしを再現したコーナーなどがあります。



錦莞蕙織機（明治時代：昭和時代復元）

## 刀剣と甲冑（第4展示室）

平安時代後期、鎬（しのぎ）とそりを持つ日本刀が誕生したころから、備前・備中は日本でも有数の刀剣の製作地であり、包平や正恒など多くの名匠が活躍しました。鎌倉時代になると、一文字派・長船派など、多くの流派に分かれ優れた刀剣が製作されました。これらの備前刀、備中刀が数多く収集、展示されています。

また、国内で唯一、平安時代末期の制作当時の姿をそのまま伝える国宝の赤韋威大鎧（あかがわおどしおおよろい）をはじめ、室町時代や南北朝時代の重要文化財に指定されている名品が随時展示されています。



赤韋威鎧 兜，大袖付（平安時代末期）

## 備前焼（第4展示室）

岡山県を代表する伝統工芸の備前焼は、鎌倉時代から室町時代までは、播鉢（すりばち）、甕（かめ）、

壺（つぼ）など雑器が主に作られ、次第に西日本の市場を制圧するまでになりました。室町時代末期から茶の湯の盛行とともに「侘び」の精神を表す茶器が併せて作られるようになりました。雑器では、当時の日常生活に使われたものや時代判定の基準資料となる年銘ものを主体に、茶器では桃山時代のものを中心に茶入や水指などが展示されています。



備前焼緋襷大徳利（安土桃山時代）

## おわりに

岡山県立博物館の周辺は、歴史、文化、芸術、音楽にわたる多彩な文化施設が集まっており、「岡山カルチャーゾーン」と呼ばれています。豊かな緑に囲まれた旭川の美しい水辺を歩きながら新しい出会いや発見、体験を楽しむ「かるチャーさんぽ」をぜひお楽しみください。

## ご案内

### ●開館時間

- 4月～9月 9:00～18:00
- 冬季（10月～3月）9:30～17:00

### ●休館日

- 月曜日（祝日の場合は開館、翌日に休館）年末年始（詳細は、年間スケジュールで確認してください。）

### ●入館料（平常展・企画展・交流展）

- 一般 250円（200円）
- 65歳以上 120円（100円）
- 高校生以下 無料 ※（ ）内は30名以上の団体料金  
特別展開催中は料金が変わります。

### ●住所・電話番号等

- 〒703-8257 岡山県岡山市北区後楽園1-5
- TEL (086) 272-1149 FAX (086) 272-1150

### ●ホームページ

- <http://www.pref.okayama.jp/kyoiku/kenhaku/hakubu.html>

※写真は全て岡山県立博物館蔵です。

[株]アサヒ地質研究所 代表取締役 はしもと たかし 橋本 隆志

# 大地の恵み

## 大雪山系起源，北十勝の深層地下水

### 十勝平野の地下水資源

十勝平野は北海道東部に存在し、新生代末500万年前頃以降の浅海～河川域堆積物が最大1,500～2,000mの厚さで積み重なった構造盆地を成している。平野を南北に縦断する断層帯により西半部（帯広～音更を中心とする地域）は東半部に対して相対的に沈降し、十勝川支流の音更川下流～札内川下流に沈降軸をもつ東急西緩の断面形態を有する盆状構造が形成され、水理地質的には被圧地下水盆が構成されている。そこでは、便宜的区分・名称であるが、層状の地下水資源として深度1,000～1,500m級では40℃前後～50℃前後の「深層熱水」、500～1,000m級では25℃～40℃前後の「深層温水」、500m級以下では「深層地下水」が賦存している（図1）。

### 大雪山系と然別火山群

十勝平野の北西側には北海道の屋根と呼ばれる2,000m級の大雪山系（大雪山国立公園）が存在する。その広さは神奈川県にも匹敵するが、その南東部は東大雪と呼ばれ、ニペソツ山（2,013m）、ウペペサンケ山（1,848m）、石狩岳（1,967m）、然別火山群、

十勝三股盆地・然別湖などの第四紀の新旧の火山・カルデラ地形・堰き止め湖が存在している。このうち、然別火山群は十勝平野に隣接し、1,200～1,400mの西ヌブカウシヌプリ、東ヌブカウシヌプリ、天望山、白雲山などの10個の溶岩ドームから構成され、約30万年前から2万年前過ぎまでの噴火活動が想定される（写真1）。この火山群の南～南東の山麓一帯あたると十勝平野北西部（士幌～音更・鹿追町管内）には次に述べるおいしい水の条件を満たした深層地下水が豊富に賦存する。



写真1 然別火山群（鹿追町市街付近から）

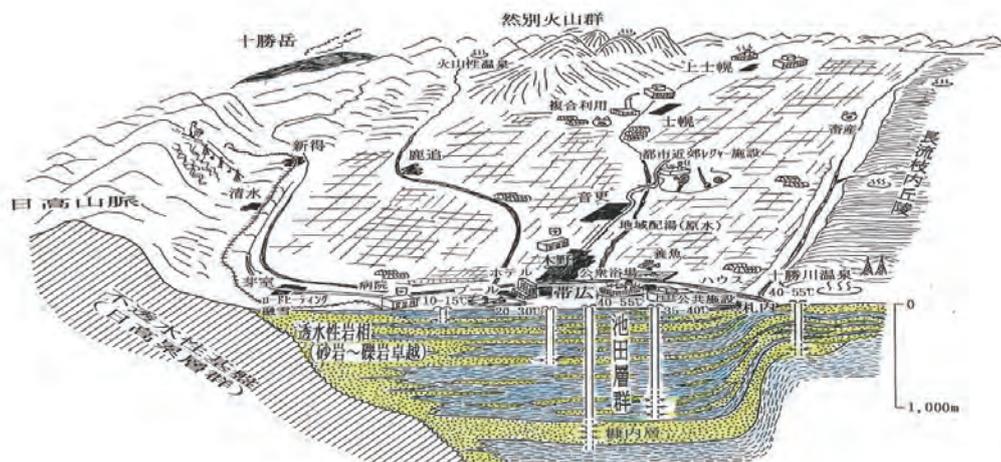


図1 十勝平野西半部の層状地下水資源の賦存概念図（参考文献1から引用・加筆）

## 然別火山群から音更西岸台地への地下水の流動

一般的に深層地下水は溶存成分量が比較的多く、鉄分・フミン質で着色しているなどの理由で、飲用には向かず、農業・工業用の雑用水として使用されることが多いが、十勝平野の場合、札内川・音更川などで、深部まで砂礫質堆積物が卓越する条件などが存在する場合に深層地下水であっても飲料適の水が得られる場合がある。その代表的なものとして、然別火山群南東に位置する音更川西岸台地の事例があげられる。深層地下水が得られる水井戸は深度250mに達し、深度200～250m付近の採水区間の地層は池田層群（十勝構造盆地堆積物）上部層で約100万年前に十勝三股カルデラを形成した十勝三股火砕流の下位に相当し、100数10万年前の年代が想定できる。ここでの深層地下水の賦存と流れのイメージを図2に示すが、十勝三股火砕流を鍵層として対比すると、西側山地では池田層群の上位に火山性の溶岩・火山礫などで構成される然別火山群の構成物が重なっていることが明らかである。火山群構成物は全体として亀裂に富みまたはポーラスで透水性は極めて良好であり、火山山麓（扇状地群）に多くの湧水をもたらすと同時に、より深部の盆地堆積物中にも浸透する。音更川西岸台地から見ると、然別火山群へ向かって盆地堆積物は砂礫が卓越しており、水質悪化の要因となる泥質岩・炭質岩（亜炭）などが少なくなり、図のような良質な地下水の供給ルートが形成されていると思われる。

## おいしい水の条件を満たした深層地下水

（旧）厚生省には「おいしい水研究会」があり、1985年に「おいしい水の条件」を発表し、7項目の指針値を示している（表1）。この中で蒸発残留物は温泉などでは成分の効能と成立要件に関わり

問題となるが、地下水の場合には微妙な量がまろやかさをもたらすとされている。硬度はCa・Mgの含有量を示し、低いものはくせのない水となる。音更川西岸台地の深層地下水はこれら7項目の条件を満たし、深層地下水ゆへの地表での産業活動（肥料・家畜堆肥散布など）による細菌・亜硝酸性窒素などの影響からは無縁の水となっている。なお、実際にこの水は株式会社深層地下水研究所（本社：音更町）よりミネラルウォーター「ルプチュプ」として生産・販売が行われている。

表1 おいしい水の指針値と音更深層地下水

項目	指針値	音更
蒸発残留物 *	20-200	91
硬度 *	10-100	19.6
遊離炭酸 *	3-30	—
過マンガン酸カリウム消費量 *	3以下	0.3
臭気度 *	3以下	0
残留塩素 *	0.4以下	0
水温 *	20℃以下	9
味	—	異常なし
色度	—	0
濁度	—	0
一般細菌	—	認めず
大腸菌群数	—	認めず
pH	—	7.6
塩素イオン	—	1.2
硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素	—	0.03

〔株）有賀さく泉工業 代表取締役 渡邊 哲夫〕

### 〈参考文献〉

- 岡孝雄「十勝平野北部地域地質図及び説明書」平成11年十勝支庁農業振興部発行
- 岡孝雄「十勝平野中央部地域地質図及び説明書」平成12年十勝支庁農業振興部発行

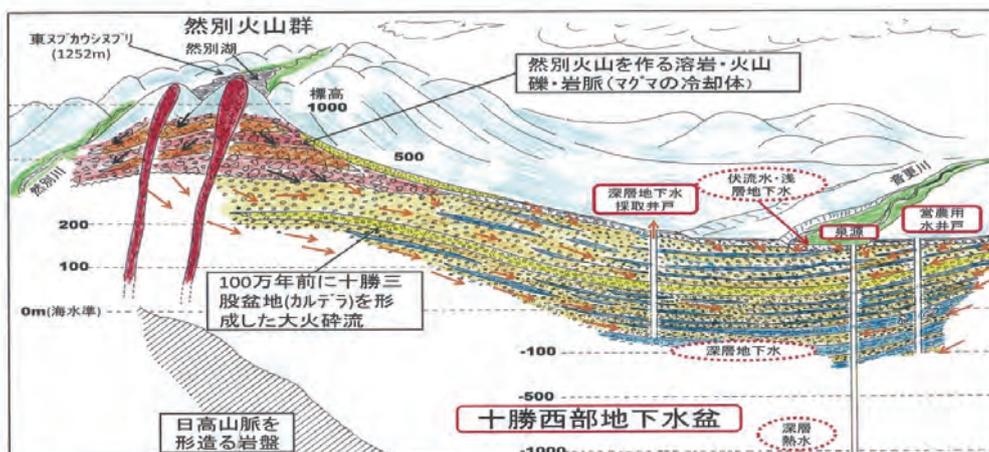


図2 大雪山系然別火山群に由来する十勝平野北西部の深層地下水のイメージ（原図提供：岡孝雄氏）

各地に残すべき

地形

地質

## 「袋田の滝」・「筑波山」：茨城県のジオサイト

### 1. はじめに

茨城県には、現在、日本ジオパーク委員会に認定されたつぎの2つのジオパークがあります(図-1)。

- ・茨城県北ジオパーク(袋田の滝他)
- ・筑波山地域ジオパーク(筑波山他)

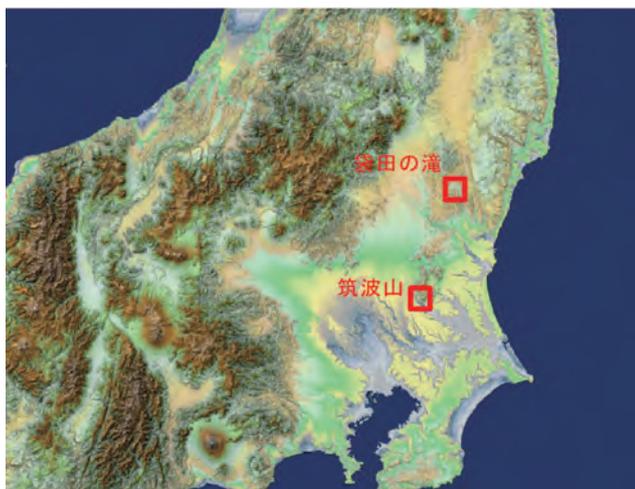


図-1 「袋田の滝」, 「筑波山」の位置  
(出典: カシミール3D スーパー地形)

### 2. 茨城県北ジオパーク

茨城県北ジオパークは多くのジオサイト(ジオパークの見どころ)からなり、5億年にわたる日本列島誕生の歴史を実際に足で歩き、手で触れることができます。主なジオサイトは、八溝山、五浦海岸、常陸炭田、花貫溪谷、日立、袋田の滝、竜神溪谷、大宮段丘、東海村、平磯海岸、大洗海岸、千波湖です。

今回は「袋田の滝ジオサイト」を紹介します。

袋田の滝は、久慈川支流の滝川上流に位置し、規模は、長さ120m、幅73mで、日本の滝百選に選定されています(写真-1, 写真-2)。また、華巖の滝、那智の滝とともに日本三名瀑のひとつに挙

げられる場合があります。

袋田の滝は、滝の流れが大岩壁を四段に落下することから、別名「四度(よど)の滝」とも呼ばれます。また、一説には、西行法師がここを訪れた際、「この滝は四季に一度ずつ来てみなければ真

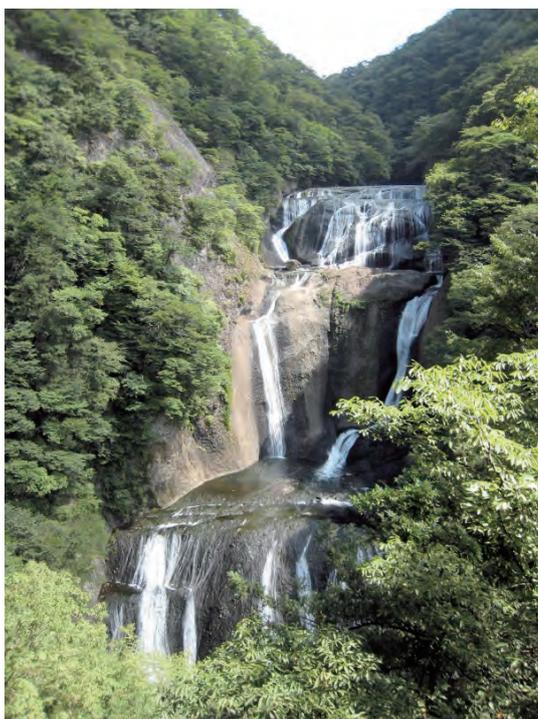


写真-1 袋田の滝 遠景



写真-2 袋田の滝 近景

の風趣は味わえない」と絶賛したことによっても伝えられています。

滝を形成している岩盤は、海底火山を構成していた水中火山岩です。周辺の岩盤より堅いため滝になったと言われています（写真-3、写真-4）。



写真-3 水中火山岩の遠景



写真-4 水中火山岩の近景

### 3. 筑波山地域ジオパーク

筑波山地域は、主に日本百名山のひとつである名峰筑波山を含む山塊、湖面積が日本第2位の霞ヶ浦、それらをつなぐ平野から構成されます。特に筑波山は、古くから人々の山岳信仰や伝統文化等の舞台となってきました。写真-5に筑波山の遠景、写真-6に筑波山から関東平野と富士山を眺めた写真を示します。



写真-5 筑波山 遠景

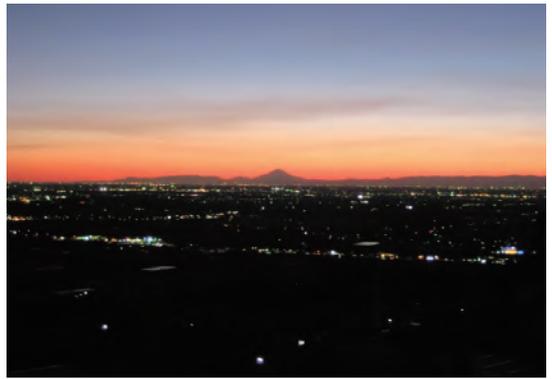


写真-6 筑波山から見た関東平野と富士山

筑波山の山頂部には斑れい岩（写真-7）、その周辺には花崗岩類が分布します。一般に斑れい岩類は風化に強く、花崗岩は風化しやすいため、山頂部が険しい傾斜、山麓部にすそ野が広がる美しい筑波山ができたと言われています。



写真-7 筑波山山頂付近に露出する斑れい岩

### 4. おわりに

茨城県には多くの興味深いジオサイトがあります。機会があれば是非、訪れてみてください。

#### 〈参考〉

- ・茨城県北ジオパーク公式ホームページ  
<https://www.ibaraki-geopark.com/>
- ・筑波山地域ジオパーク公式ホームページ  
<http://tsukuba-geopark.jp/>

〔関東地質調査業協会 技術委員  
佐藤 尚弘（明治コンサルタント株式会社）〕

# 電磁気学的手法による 海底熱水鉱床探査の最前線

かさや たかふみ  
笠谷 貴史\*

**K**ey Word 海底熱水鉱床, 物理探査, 電気探査, 電磁探査, 自然電位

## 1. はじめに

現在、陸上で操業している鉱山は資源の枯渇や採算性などの点から減少しており、ベースメタルや金・銀などの貴金属、レアメタルを産出する操業中の鉱山はわずかである。海に囲まれた日本は広大な排他的経済水域（EEZ）を有しており、沖縄・南西諸島や伊豆・小笠原海域に存在する熱水域の海底熱水鉱床の存在が注目されており、海域でどのように効率よく探すかが課題となっている。

多様な目的に応じて地下構造を可視化することは非常に重要であり、それを支える技術が物理探査である。調査対象地域の至る所でボーリングによるサンプル採取や検層によるデータ取得を行うことが出来れば良いが、一般的にはコスト高となるため困難である。そのため、物理探査による地下構造の可視化を実施して、必要に応じてボーリングなどのサンプル採取や検層を組み合わせることによって総合的に地下構造を診断していく必要がある。しかしながら、物理探査を実施する場合、その規模、探査対象、探査地域の状況、その可探深度などの必要要件、加えて探査コストなどを検討し、様々な探査技術の中から適切な手法を選ぶ事が極めて重要である。

資源探査としては、石油・天然ガスなどの化石燃料と金属資源が大きな探査対象となる。前者では、主として人工震源を用いた地震波探査が陸域、海域問わず用いられており、近年、海域においても曳航式の電源によるコントロールソース EM 法（CSEM 法）が用いられており、EMGS 社や PGS 社では、CSEM 法を実際の海域での探査に利用している。

金などの金属鉱床においては、地下の密度差を

可視化する重力探査なども有効であるが、主として電磁気学に基づいた物理探査法が用いられることが多い。これは、金属鉱床が低比抵抗（あるいは逆数の高電気伝導度）としてイメージングされることを利用している。陸上の金属鉱床探査において電気探査や CSMT 法、TEM 法による探査<sup>1)</sup>が鉱量推定に大きな役割を果たしてきている。近年では、ヘリなどの飛行体を用いた電磁探査も多く実施され、効率的な地下の可視化技術として用いられている。

一方、海域では、東太平洋海膨や大西洋中央海嶺において、送受信アレイを潜水艇で設置、あるいは海上の船舶からウィンチで海底を曳航するなどの方式で先駆的な電気探査や電磁探査が行われているが、効率的な資源探査手法として確立していない状況であった。国内でも海洋研究開発機構（当時は海洋科学技術センター、以下 JAMSTEC）で開発した曳航式電気探査装置を用い、水深約 1,000m のメタンハイドレート域において約 200m の電極アレイを曳航した探査を行った<sup>2)・3)</sup>。また、神戸大学を中心とし、Magneto Metric Resistivity (MMR) 法のマリアナ海域の熱水域での適応も試みられている<sup>4)</sup>。しかしながら、海底での金属鉱床に関する調査を実施するのに適切な手法が確立されているとは言えない状況であった。本稿では、熱水鉱床探査のための手法開発の流れや探査法について解説すると共に、最近の成果を織り交ぜて解説する。

## 2. 熱水鉱床探査で用いられる探査手法の概要

2009 年から始まった文科省による「海洋資源の利用促進に向けた基盤ツール開発プログラム」を

\*国立研究開発法人 海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター 主任技術研究員

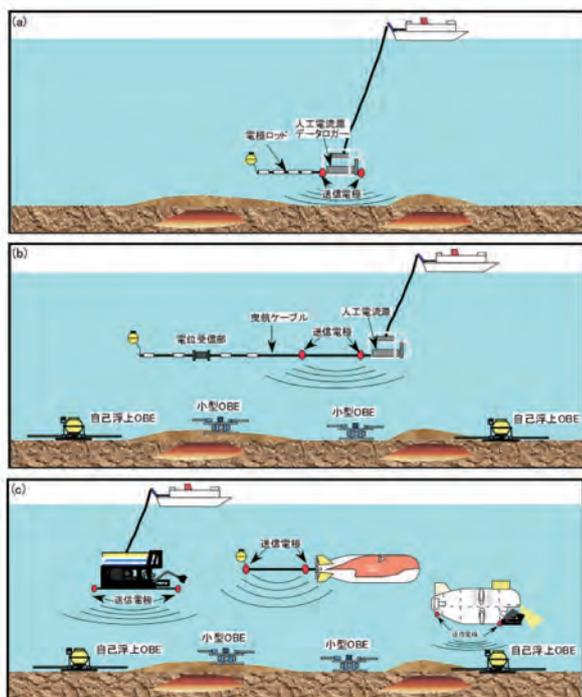


図1 開発した機器の運用の例。  
 (a) カメラ曳航体に 30m 程度の電極アレイを曳航  
 (b) 200m 程度の送受信電極アレイを曳航  
 (c) ビークルに送信電流源を搭載し、海底に設置した電位差計で信号を受信

契機として資源探査手法の開発がスタートした。同プログラムは、その後も「海洋鉱物資源広域探査システム開発」として継続的に開発が行われている（以下、資源基盤ツール）。現在、このプログラムでは、主たる物理探査法として、京都大学とJAMSTECでは水中に電流を流す電気・電磁探査法、早稲田大学ではTEM法をベースとした電磁探査法、(株)地球総合科学研究所ではハイドロフォンアレイを用いた音波探査、東京大学地震研究所ではAUVに搭載する重力計、東京大学生産研究所では種々の音響機器が継続的に開発をしており、実海域での観測試験が行われ、成果を上げつつある。

JAMSTECでは、2011年に海底資源研究プロジェクト（現海底資源研究開発センター）が立ち上がり、資源成因研究を中心とした研究開発が始まった。2014年より内閣府主導で始まった戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）に、次世代海洋資源調査技術「海のジパング計画」が採択され、JAMSTECがこのプログラムの管理法人となり研究開発を推進している。JAMSTECでは、成因研究の一環として、資源成因研究をも含んだ探査プロトコルの提唱を目指しており、それに必要な物理探査手法が必要であった。JAMSTECでは、京都大学と共同で開発してきた資源基盤ツールの機

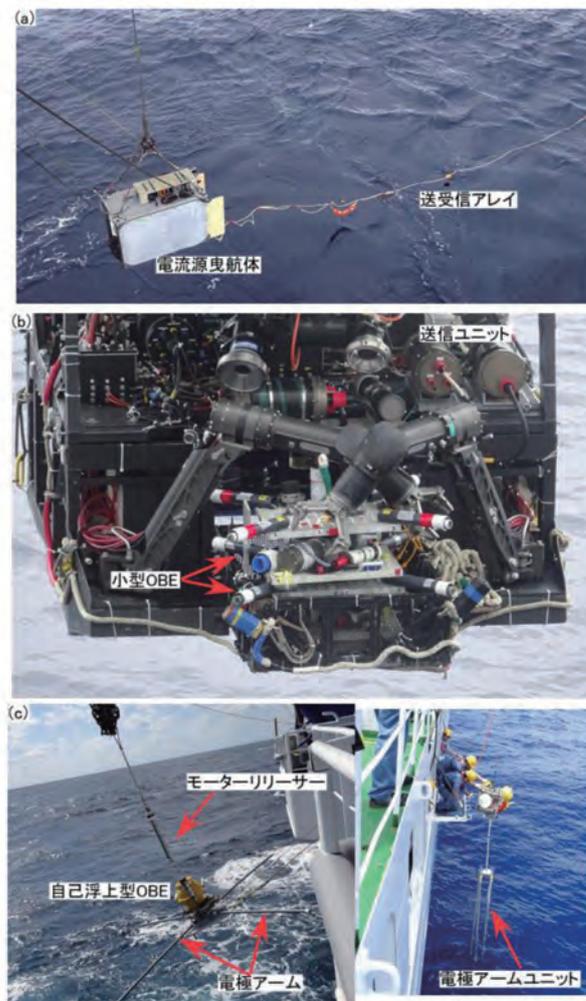


図2 (a) 電流送信に特化した曳航体  
 (b) ROVに搭載した送信ユニットと小型OBE。小型OBEはROVで海底に設置する。  
 (c) 自己浮上型海底電位計（OBE）。回収時は電極アームユニットと畳んで浮上する（特許第4346605号）。

材をベースに、電流を水中に流す手法を採用した。開発した機材は、探査対象、探査深度に応じて柔軟に対応できるように設計されている。図1はその運用法の一例を示したものである。観測システムは、送信部と受信部からなり、送信部は、汎用のカメラ曳航体や水中ロボット（ROV・AUV）、有人潜水船とJAMSTECの有する水中航走体の全てに搭載が可能である。受信部は記録装置と受信電極アレイで構成され、受信電極には銀・塩化銀電極を用いている。また、電流送信に特化した曳航体も製作し、大容量の電流送信が可能となり（図2-a）、図1-bの運用形態で主に用いられる。海底電位計（OBE）は図2-bと-cの観測形態のどちらでも同一の機材で運用できるように設計している。自己浮上型として運用する場合、熱水鉱床近傍では地形が複雑であるため、自由落下で設置

するのは難しい。そのため、ウィンチケーブルにモーターリリーサーを取り付け、その下に OBE をつり下げ、目標地点付近まで降下させてモーターリリーサーから切り離して設置を行う。小型 OBE の場合は、ROV 等を用いて設置し、ビークルからその位置を検出できる音響測位装置を取り付けて運用する。

### 3. 実海域での観測事例

開発してきた観測機器の試験観測の過程で、この受信信号を注意深く検討すると、DC レベルがその位置によって大きく変化することが明らかになってきた。その変化は、熱水域や鉱床域とされる領域と一致しているため、地下構造に起因する自然電位異常では無いかと考えた。鉱体に起因する自然電位異常は、地下の酸化還元状態によって引き起こされるとされる<sup>5)</sup>。海域では、熱水の循環により同様の酸化還元反応が起きていると推測され、その反応により電流ダイポールが形成されると考えられ、海中で連続的に電位を計測すると負の電位異常が観測される (図 3)。

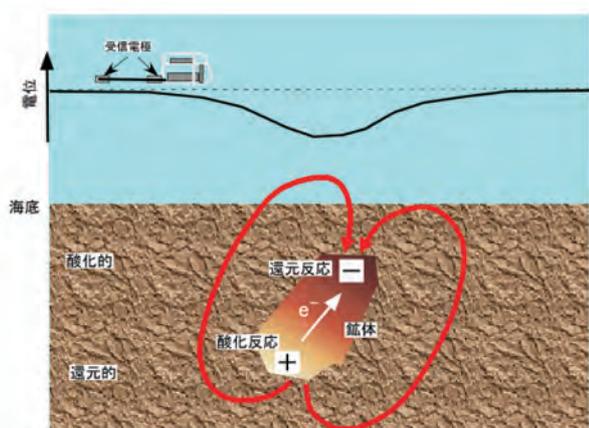


図 3 鉱体による自然電位異常の模式図。実際に観測されるのは電位差なので、観測値を積分すると電位が得られる。

陸上で連続的に電位を計測するためには、尺取り虫式に観測するか、固定した基準電極に対して計測電極を長い電線でつないで観測をする必要があり、効率的とは言えず、陸域の鉱山の探査法として用いられていない。しかしながら、海中では海水が伝導体のため、連続的に電位を計測することが極めて簡単である。よって、鉱体に伴う電位を観測することは鉱体把握のために極めて有効な手法と考えられる。

この自然電位異常は、機器開発の過程において、

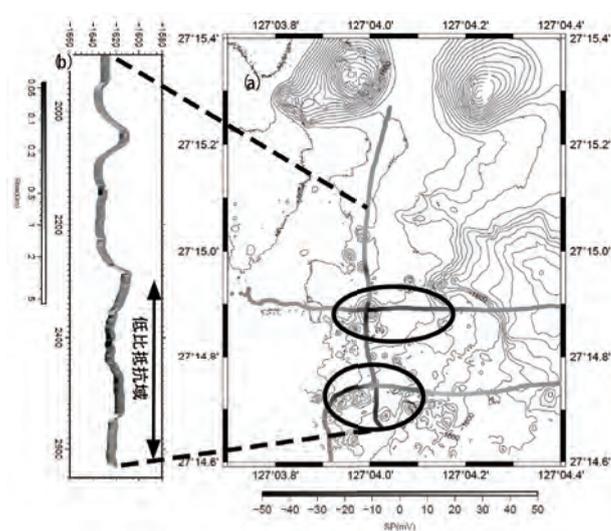


図 4 30m の電極アレイを伊是名海穴で曳航して得られたデータ例  
 (a) 自然電位データの例。赤丸のところで明瞭な負の異常が検出される。  
 (b) マウンド域を中心とする電気探査データから 2 次元構造解析を実施した例。自然電位の異常域に相当する位置に低比抵抗の存在が示唆される。

伊平屋北海丘域で行われた試験観測で観測されたが、自然電位を用いた探査の有効性を検証するには不十分なデータであった。そのため、石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) の調査により有望な熱水鉱床とされる中部沖縄トラフ伊是名海穴<sup>6)</sup>において観測を行い、鉱床域との関係を検証した。観測は図 1-a の形態で実施され、伊是名海穴の広い範囲を 30m の受信電極アレイ (5ch 計測) を、海底観測が出来る高度 (数 m から 5m 程度) で曳航して観測を行った。曳航体に取り付けた送信電極から電流送信も行うことにより同時に電気探査のデータも取得している。

図 4 は、取得した生データから算出した電位データのプロットであるが、図中の黒丸のところで明瞭な負の異常がみとめられる。この領域は熱水マウンドが存在し、有望な鉱床域とされている<sup>5)</sup>。一方で、それ以外の領域では顕著な異常が見られないことから、この負の異常が鉱床を伴う熱水域に関する情報を持っていることが示唆される。また、同時に取得された電気探査データを解析すると、自然電位異常が見られる領域で海水よりも明らかに低い比抵抗構造が見られ (図 4)、この結果も鉱床を伴う熱水域に関連すると考えられる。

この実験で得られる比抵抗構造は、送受信間距離が最大でも 30m 程度となるため、探査深度はせいぜい 10m 以下である。電気探査として、探査深

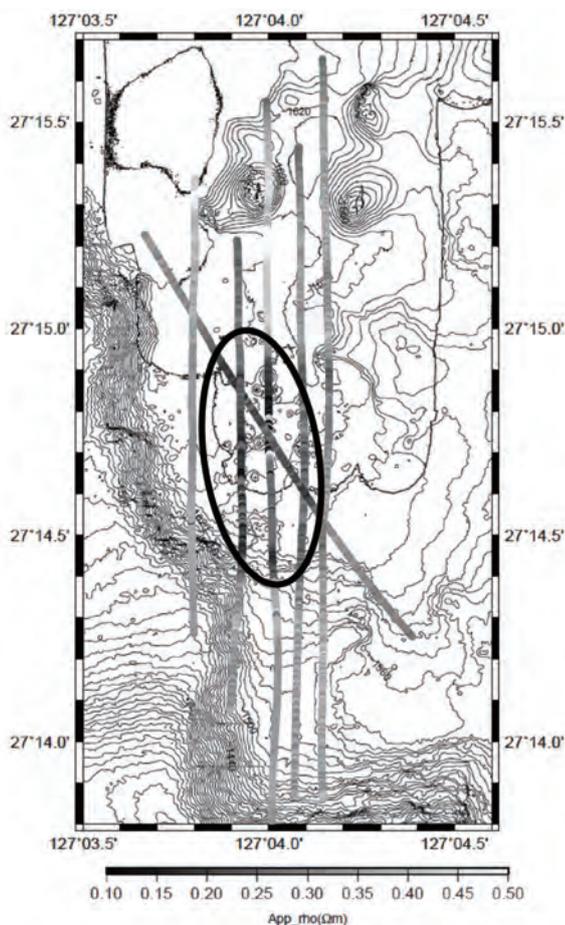


図5 最も送受信電極間隔が長い組み合わせで算出された見かけ比抵抗値をプロットしたもの。黒丸の領域で低比抵抗となっているのがわかる。

度を大きくするには送受信間隔を長くしてやる必要がある。そこで、図1-bのように長い曳航物に送受信電極を取り付け、やや高い高度を飛ぶことで、送受信間隔を広げ、より深い構造の情報を得る。しかしながら、高度が高いため、海中のデータしか取得できない電極組み合わせが出てきてしまう。そのため、最も送受信間隔が短い電極組み合わせが、平均的な曳航高度のおおよそ3倍程度になるようにしておく（その組み合わせが海底面近傍の情報を得る）ように、事前に検討をしておく必要がある。現在のシステムでは、200mの曳航長の場合で、最も近い送信と受信電極の距離を100m前後として観測を行っている。

このような電極配置の電極アレイを、図2-aの電流源曳航体から曳航する観測形態で、同じ伊是名海穴において観測を行った。図5は取得されたデータから算出された見かけ比抵抗の例で、最も送受信電極間隔の長い（もっとも深い）組み合わせを示している。図中の黒丸の位置で、海水より低い見かけ比抵抗値を示す点が集中していることがよ

く分かる。この位置は、図4で示した領域を含む鉱体の存在が示唆される領域であり、このような比抵抗の分布は鉱体との関係が示唆される。

#### 4. まとめ

これらの観測事例から、自然電位と電気探査のデータが、海底熱水鉱床探査に有効であることが示唆される。長尺物を曳航するため、曳航に関するノウハウは必要であるが、観測機材の構造が単純であるため、取得コストが安いことも特徴である。また、図1-bにあるように、海底にOBEを設置することで、より長い送受信間隔でのデータ（深部のデータ）を取得することが可能で、探査深度を上げやすい。また、このデータをCSEM法として解析することでも探査深度を上げることができる。このことは、鉱体の下面の情報を得やすいということを含意し、賦存量推定のための重要な情報を提供することができる。また、自然電位データは簡易的なデータ処理で地下構造に起因する情報を抽出することが容易であり、このデータは電気探査の観測をすれば必ず得られる。自然電位と電気探査とは、違うパラメータで地下構造の情報を得られるため、地下構造推定の精度を上げる点でも有利と考えられる。これらの一連の手法は、資源推定システム及び資源推定方法（出願番号2016-020642）、「効率的な探査法」（出願番号2016-176889）として特許出願を行っている。

#### 〈参考文献〉

- 1) 物理探査学会：「物理探査ハンドブック」, 1998.
- 2) 笠谷貴史, 後藤忠徳, 高木亮：「海洋における地殻構造探査のための電磁場観測技術とその動向」, 「物理探査」, Vol.59, No.6, pp.585-594, 2006.
- 3) Goto, T., Kasaya, T., Machiyama, H., Takagi, R., Matsumoto, R., Okuda, Y., Satoh, M., Watanabe, T., Seama, N., Mikada, H., Sanada, Y., and Kinoshita, M.: 「Marine deep-towed DC resistivity survey in a methane hydrate area, Japan Sea」, 「Exploration Geophysics」, pp.52-59; 「Butsuri-Tansa」, pp.52-59; 「Mullii-Tansa」, pp. 52-59., 2008.
- 4) 多田訓子, 島伸和：「Magnetometric Resistivity法を利用した海洋近くの比抵抗構造探査」, 「物理探査」, Vol.59, No.3, 171-180, 2006.
- 5) Sato, M. & Mooney, H.: 「The electrochemical mechanism of sulfide self-potentials」, 「Geophysics」, Vol. 25, pp.226-249, 1960.
- 6) 経済産業省資源エネルギー庁・石油天然ガス金属鉱物資源機構・海底熱水鉱床開発委員会：「海底熱水鉱床開発計画 第1期最終評価報告書」, 2013.

## 書籍紹介

## 地形の辞典

日本地形学連合 [編] 責任編集：鈴木隆介\*，砂村継夫\*\*，松倉公憲\*\*\*



- B5版 / 1,032頁
- 定価：本体 26,000円 + 税
- 発行所：株式会社 朝倉書店
- 発行日：平成 29年 2月 10日
- ISBN 978-4-254-16063-5 C3544

**ま** えがきの冒頭において本書の出版目的が述べられている。すなわち、地形は、地形学はもとより、地学、工学、農学など、広範な科学・技術分野で研究されてきたが、地形用語に関しては誤読を含む誤解や誤用があり、用語の整理・共有する必要があったとされる。このような背景から、本書が日本地形学連合 (JGU) の創立 35 周年記念事業の一環として企画され、執筆者は様々な分野に及ぶ 242 名、用語は 8626 項目について最新の知見を含めた内容で作成されている。

具体的な内容について災害関係の用語を見ると、「土石流」の説明では「泥流」や「ラハール」などの関連用語が示され、さらに「土石流段丘」など土石流の付く用語が 9 項目続くので調べようとした内容を多角的に理解することができる。「崩壊」については「マスマーブメント」や「表層崩壊」などの関連用語が示され、「崩壊地形」など 5 項目が続くので理解を深めることができる。紀伊半

島の豪雨災害の報道などで広く普及した「深層崩壊」についても「大規模崩壊」や「巨大崩壊」との違いが明確に示されている。「天然ダム」では「地すべりダム」をはじめ様々な呼び名が示され、そのうちの 1 つである「河道閉塞」の次のような内容も興味深い。新潟県中越地震 (2004 年) で発生した土砂移動により多数の天然ダムが形成されたが、災害であるのにいいイメージにつながるのと理由で「河道閉塞」に言い換えられるようになったとされる。これらのことから、マスコミや行政側から広まった用語が科学分野の学術用語として定着する背景の一端を垣間見ることできる。

地質関係の研究者や技術者などであれば当たり前のことであるが、国際的に地質時代の「第三紀」を使わずに第三紀を二分した「Paleogene」「Neogene」とすることになり、これらの訳語として「近成紀」や「新世紀」がある。訳語の馴染みがないためか、日本地質学会では「古第三紀」と「新第三紀」を使うようにしているといったことがわかる。一方で、地質分野で当たり前に使ってきた「ケルンコロン」や「ケルンバット」が国際的には使われていないことや、シュナイダーの火山地形用語としてお馴染みの「アスピーテ」や「ホマーテ」などが国際的に通用しないことも知ることができる。

項目の説明には図表が添えられたものや関連する文献も適宜示されており理解の助けになる。また、項目の英語訳が付けられており、巻末の英語索引は地形関係用語の英和辞典としても活用できるものになっている。

書名を「地形学辞典」ではなく「地形の辞典」とした所以は、専門家や研究者にとどまらず、マスメディアを含む一般の方々にも理解を深めてもらうことを念頭に編集されているとのことが「まえがき」に記されている。そのため平易な説明になっているので地形の専門家以外にも広く活用していただきたい書籍であり、応用地形判読士をはじめとする資格試験などでは知識を確認するための必見の書といえる。

膨大な項目と丁寧な内容説明のため、書籍は B5 版で厚さ約 5cm、2kg 以上の重さがあり、ハンドブックとしてではなく座右の書としての活用、研究所や事業所であれば各フロアへの配置をお勧めする次第です。

(応用地質(株) 上野 将司)

\*中央大学名誉教授 \*\*大阪大学名誉教授 \*\*\*筑波大学名誉教授

## 山形県地質図(10万分の1)

著者 山形応用地質研究会\*



地質図：B1判(103×73cm)4枚  
説明書：A4判61P／箱入りセット

これまで山形県全県の地質図は、山形県が1971年に発行した20万分の1がありましたが、40年以上も絶版のままでした。こうした事情に鑑み、山形応用地質研究会では新たな地質図を作成すべく検討を続けてきましたが、この度ようやく表記の地質図並びにその説明書を出版することができました。

以前の地質図は主に鉱工業用に編纂されておりましたが、新版は応用地質全般の利用を念頭に、使い易い縮尺を考慮し、10万分の1としました。また、図判は全県を4区域(庄内、最上、村山、置賜)に分け、地域の地質を俯瞰的に把握し易くしました。付属する説明書には山形県の地質史の解説、4地域別の地質(新第三系主体)及び、火山、深成岩・変成岩類の記載があります。

地方の地質概要を把握するには10万分の1のスケールは、最適のサイズです。その上でより詳細な地質図や、さらに既存資料へとスムーズな橋渡しとなるよう、説明書には各地質の記載とオリジナルな文献とを全てリンクさせてあります。こうした構成はとくに調査に携わる方々の文献探し等への利便性にも配慮されたものです。

基礎資料としての整備・活用が期待されます。

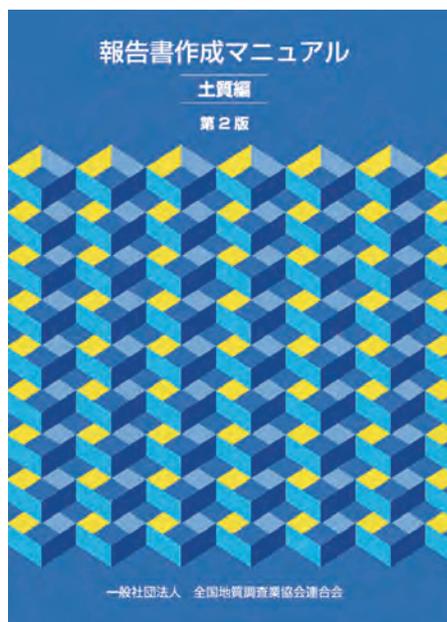
- 発行日：2016年11月30日発行
- 発行所：山形大学出版会
- 定価：20,000円(税別)，  
地域別売は各6,000円(税別)
- 購入方法：  
詳しくは下記URLへ  
<http://www.geocities.jp/yamagataoyo/mousikomi.html>
- 問い合わせ先：  
山形大学の友研究室  
Tel. 023-628-4424  
e-mail yukiko@e.yamagata-u.ac.jp

\*本会は山形の応用地質に関わる教育機関、公官庁、企業等の所属員の相互研鑽・研究団体(1980年に創立)

## 書籍紹介

## 報告書作成マニュアル(土質編)第2版

一般社団法人 全国地質調査業協会連合会



発行：全国地質調査業協会連合会  
A5版 168頁  
定価：本体 3,000円（税別）

**報**告書作成マニュアル(土質編)第2版」は、平成29年3月に発行いたしました。

本書は、地質調査報告書の作成方法に関する唯一の教科書といえるものであり、平成6年の初版発行以降、今日まで多くの地質調査技術者にご利用いただけてまいりました。しかし、初版発行から約22年が経過し、この間では地質調査業をとりまく環境や業務の進め方も大きく変化しました。

全地連では、地質調査の成果と言える報告書について、その技術的信頼を確保することはもちろんのこと、顧客のニーズや環境の変化にも対応することが重要であるとの観点に立ち、このたび、第2版を発行する運びとなりました。

この第2版では、初版発行当時にはなかったコンサルティング業務やSI単位、電子納品、地質情報の電子化、地質リスク概念などの情報を反映し、

また報告書執筆に役立つ関連情報も充実いたしました。本書の目次構成は下記のとおりであり、業務の流れや報告書の目次構成に沿って、実施調査計画書や報告書の作成手順のポイントを説明しております。また、本書の執筆者である6名のベテラン地質調査技術者には、後輩・若手へのメッセージとして、地質調査や報告書作成に対する熱い思いをコラムとしてまとめいただきました。

本書は、若手地質調査技術者の教科書として、またベテラン技術者の品質管理にも役立つものと確信しております。

最後に、本書の企画編集・執筆に当たられた技術委員、執筆者、事務局の方々に厚く御礼申し上げます。

## 【概略目次】

## 第1章 報告書の意義と作成上の心構え

- 報告書の役割と作成上の心構え
- 地盤調査業務の流れと報告書の作成手順
- 仕様内容の確認 ●計画書の作成 ●結果の報告
- 報告書の標準的な構成と成果品 ●成果品の検査
- 地盤調査における瑕疵による損害賠償

## 第2章 報告書の作成方法

- 報告書の作成手順 ●目次の構成 ●業務概要の作成
- 調査方法の作成 ●地形・地質概要の作成
- 調査結果の作成 ●考察の作成 ●まとめの書き方
- データシート類の種類と取り扱い方
- 図表類の取り扱い方 ●写真 ●スケッチの取り扱い
- 標本の整理の仕方 ●チェックリスト筆原稿の見直し

## 第3章 報告書執筆に必要な基礎知識

- 日本語の文章の書き方 ●執筆原稿の見直し、校閲
- 用語、単位 ●フローチャート(流れ図)の作り方
- 報告書の守秘義務 ●文献の引用方法
- 概要版報告書の必要性和まとめ方の要領 ●成果品

## 付録：執筆に役立つ関連情報

- 付録1 ICT技術の活用
- 付録2 既存資料の活用方法
- 付録3 地盤調査関係の主なスペック一覧
- 付録4 関連用語と記号

## 【購入申込方法(販売窓口)】

- 全地連会員の方は、地区協会にお問合せの上、お申込ください。(会員価格にて提供)
- 全地連会員以外の方は、全地連ホームページよりお申込みください。  
▶▶▶ <https://www.zenchiren.or.jp/book/>

## 『不動産取引と 土壌汚染のリスク』

木暮 敬二\*



- 第1章 土壌汚染とは
- 第2章 土壌汚染に関わる規制の現状
- 第3章 土壌汚染対策の実態と課題
- 第4章 土壌汚染対策の費用負担問題
- 第5章 市街地の大規模土壌汚染対策に学ぶ
- 第6章 土壌汚染対策法の改正
- 第7章 土壌汚染に関わる市場の動向
- 第8章 土壌汚染と瑕疵担保責任

本書の特徴は、土壌汚染に関する土地取引の実態を全体像として捉えることができ、また土地取引の利害関係者が抱える問題を解決するヒントを与えてくれるといえよう。

利害関係者とは、土地の売主、買主はもちろんのこと、調査会社や措置修復会社、周辺住民、不動産会社、金融機関、自治体も含めて様々である。

「土壌汚染問題をめぐって、紛争が起きる最大の原因は、どこまで汚染を修復（浄化）するのかという問いに行きつく」と著者は述べている。

これは、利害関係者双方の価値観と感情のぶつかりあいとも言えるものであり、それ故、教科書的な答えの導き方法もなく、リスクコミュニケーションが重要になってくることも頷ける。

本書では、土壌汚染の調査や措置がどのように実施されているのか、また対策の措置水準や費用分担の決定方法、豊洲の事業の進め方、裁判にみる瑕疵担保責任の問題など、これらの具体的な事例を紹介するとともに、それぞれの場面で考えられた判断方法やリスクコミュニケーションを、著者の見解として述べている。

これらの事例や見解は、明確なルールが存在しない土壌汚染に関わる土地取引の事業を円滑に進める上での羅針盤のような役割を果たすものであり、事業に関わる関係者や専門家には事業全体を踏まえた適切・妥当な判断を下す材料になるものと考えられる。

土地取引に関わる関係者には、ぜひご一読をお勧めしたい。

(全地連 高橋 暁)

**土** 壌汚染に関わる土地取引の問題は、どのようにして解決すればよいのか。

おそらく、この問いに即答できる人はいない。

本書によれば、わが国における土壌汚染対策は、土壌汚染による人の健康被害の防止を目的とした「土壌汚染対策法」が存在するが、しかし本法では土壌汚染した土地の取引方法は示されていない。また、不動産取引分野においては、土壌汚染に関する取引上のリスクにどう対応すべきかについて、統一的で明確な考え方やルールが確立されていないのが実情とのことである。

問題解決に向けたルールが存在しないが故に、メディアを賑わす豊洲のような問題も発生したと考えられるが、著者曰く、土壌汚染の問題解決にはリスクコミュニケーションが特に重要であると示している。

本書のねらいは、土壌汚染に関わる対策の実態を明らかにし、残された課題の解決方法を探るとしており、目次構成は次のとおりである。

\*防衛大学名誉教授、工学博士（京都大学）

## CHISHITSU-DAYORI

本号より、「会告」は「地質だより」へと名称を変更しました。  
一層お役に立つ情報を発信してまいりたいと思います。(全地連事務局)

### 平成 28 年度 応用地形判読士資格検定試験 二次試験合格者 15 名が決定

全地連理事会は平成 29 年 2 月、第 5 回目となる本検定試験(二次試験)の合格者 15 名を決定しました。合格者は、資格登録手続きを経て「応用地形判読士」の称号が付与されます。合格者全員の登録手続きが完了しますと、「応用地形判読士」の全登録者数は 84 名になります。

なお、応用地形判読士の資格活用につきましては、国土地理院が平成 27 年 12 月に、「請負測量業務の競争入札のための測量技術者の認定資格登録」制度における測量技術者の認定資格として応用地形判読士資格を登録しました。また、国土交通省は平成 28 年 2 月、民間資格の登録制度における新設分野(地質・土質)において、応用地形判読士資格および地質調査技士資格を登録しました。これらの資格登録は、業務発注時の評価に活かすなど、有資格者の活用が期待されます。

### 全地連「技術フォーラム 2017」の開催について (開催予告)

毎年、多くの方々にご参加を頂いています全地連技術フォーラムにつきまして、平成 29 年度は下記のとおり開催します。

#### 全地連「技術フォーラム 2017」旭川 開催概要

- 主 催：一般社団法人全国地質調査業協会連合会
- 協 力：一般社団法人北海道地質調査業協会
- 開催日程：平成 29 年 9 月 14 日(木)～9 月 15 日(金) 2 日間
- 開催場所：旭川グランドホテル(北海道旭川市)
- メインテーマ：「はじまりは地質調査から」

技術フォーラムの開催に関する詳細や一般参加者募集(技術発表会、技術者交流懇親会)につきましては、7 月にホームページ等を通じてご案内する予定です。なお、技術発表会の原稿募集受付は、4 月上旬で終了しました。多数のご応募をいただき、ありがとうございました。

## 平成 29 年度 全地連資格検定試験の実施概要 【地質調査技士・地質情報管理士・応用地形判読士】

全地連の資格検定試験（地質調査技士，地質情報管理士，応用地形判読士）は，平成 29 年 7 月に全国 10 会場で実施します。受験資格や申込方法などに関する詳細は，4 月 10 日（月）に全地連のホームページに掲載します受験の手引きをご覧ください。

○資格検定試験 実施概要（3つの資格検定試験は，同日程・同会場で実施いたします）

試験日：平成 29 年 7 月 8 日（土）

申込期間：平成 29 年 4 月 10 日（月）～ 5 月 12 日（金）

試験会場：全国 10 会場

（予定）札幌、仙台、新潟、東京、名古屋、大阪、広島、高松、福岡、沖縄

申込方法：受験手引きや受験願書は，全地連のホームページからダウンロードし入手してください。

## 「報告書作成マニュアル（土質編）第 2 版」の発行 （22 年ぶりの大改訂）

全地連では，「報告書作成マニュアル（土質編）第 2 版」を今年 3 月に発行し，販売を開始しました。本書は，地質調査報告書の作成方法に関する唯一の教科書といえるものですが，初版発行から約 22 年が経過し，改訂・再販を希望する多くの声が寄せられていた事もあり，今回の発行となった次第です。

本書の紹介や販売につきましては，「地質と調査」に掲載します書籍紹介コーナーをご覧ください。

## 平成 29 年度 道路防災点検技術講習会 開催案内

平成 29 年度「道路防災点検技術講習会」を下記のとおり開催します。

本講習会は，最近の災害事例を紹介するとともに，①『点検要領（平成 18 年 9 月 29 日付け事務連絡資料）』の改訂点，②点検箇所の抽出方法，③具体的な着目点，などをわかりやすく解説することを目的としております。

講習会の詳細や申込方法につきましては，全地連のホームページをご覧ください。

▶▶▶ <http://www.zenchiren.or.jp/>（全地連ホームページ）

### 道路防災点検技術講習会 開催概要

- 開催日／開催場所： 松 江 ■平成 29 年 6 月 23 日（金）会場未定
- 東京 1 ■平成 29 年 6 月 30 日（金）連合会館 大会議室
- 徳 島 ■平成 29 年 9 月 29 日（金）徳島県 JA 会館 別館大ホール
- 大 阪 ■平成 29 年 10 月 27 日（金）天満研修センター ホール
- 東京 2 ■平成 29 年 11 月 10 日（金）連合会館 大会議室

■主 催：一般社団法人 全国地質調査業協会連合会

■後 援：国立研究開発法人 土木研究所

■参加費（テキスト代，税込み）

会員 7,200 円 ※会員対象：全地連会員企業の職員，地質調査技士，地質情報管理士，  
応用地形判読士・判読士補・マスター，官公庁の職員

一般 8,200 円

\*本講習会は，ジオ・スクーリングネットを運営する“土質・地質技術者生涯学習協議会”が開催を確認しており，CPD の加対象となっております（加ポイント：6）。

## 全地連 e-Learning センター（Web 学習サイト）に新しいコンテンツを掲載しました

Web 学習サイト「全地連 e-Learning センター」では、この度、「ボーリング作業安全講座」のコンテンツを追加公開しました。

本コンテンツでは、ボーリング作業を安全に実施するための「安全マニュアル」と作業現場での要点（始業前点検、昇降作業、掘削作業など）を画像にまとめた資料を公開しています。新入社員教育や安全教育などにご活用ください。

全地連 e-Learning センター ▶▶▶ <https://www.zenchiren.or.jp/learning/>  
協力：一般社団法人日本産業機械工業会

## ボーリング柱状図作成要領等の改訂および柱状図作成ソフトウェアの対応について

### [要領の改訂]

次の2つの要領はここ約1年の間に改訂を行い、平成29年4月から施行されます。

- 「ボーリング柱状図及びボーリングコア取扱い・保管要領（案）・同解説（平成27年6月）」
- 「地質・土質調査成果電子納品要領」

ボーリング柱状図の作成要領の改訂では、ボーリング柱状図の品質確保のため、ボーリング削孔やボーリングコア鑑定など関係者の地質調査技士登録番号を明記するようになり、また、電子納品に当たっては地質情報管理士が関わることも記されました。本要領の改訂を受け、電子納品要領の改訂も行い、今回の施行となった次第です。なお、電子納品要領には、地質情報管理士の活用が以前より記されておりましたが、それを今回、ボーリング柱状図の作成要領にも反映したものといたします。

今回の改訂につきましては、JACIC 日本建設情報総合センターが専門委員会（事務局：全地連）を設置し、見直し検討を進めてまいりました。全地連では、関係機関と連携し、資格の活用に向けて今後も検討を進めてまいります。

各要領の詳細は、以下のホームページよりご確認ください。

- ボーリング柱状図作成要領 ▶▶▶ <https://www.zenchiren.or.jp/koukai/>
- 電子納品要領 ▶▶▶ [http://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08\\_hh\\_000369.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_hh_000369.html)

### [ボーリング柱状図作成ソフトウェアのリリース]

ボーリング柱状図の作成要領が改訂されることに伴い、ボーリング柱状図作成ソフトウェアを提供する下記のベンダーは、本年4月以降に対応版をリリースする予定です。（50音順、敬称略）

- 応用リソースマネジメント（株） お問い合わせ等は、以下のURLを参照下さい。  
▶▶▶ [http://www.oyorm.co.jp/products\\_service/index.html](http://www.oyorm.co.jp/products_service/index.html)
- 基礎地盤コンサルタンツ（株） 『柱状-BASE.NET』と名称を改めてリリースします。  
詳細については、以下のURLを参照下さい。  
▶▶▶ <http://www.kiso.co.jp/pdfs/syskai/TJ-BASE.pdf>
- サザンテック（株）
- （有）ジーテック
- 中央開発（株）

## 平成 29 年度研修「地質調査」開催案内

毎年、多くの発注機関の方や地質技術者にご参加を頂いております本研修につきまして、平成 29 年度は下記のとおり開催します。

本研修は、発注機関の方の参加が全体の 1 / 3 前後を占めており、参加者からは産官の相互交流、情報交換の貴重な機会としても大変好評をいただいております。講習会の詳細や参加申し込み方法は、全地連のホームページをご覧ください。

### 平成 29 年度研修「地質調査」 実施要領

1. 共 催 (一般) 全国建設研修センター, (一社) 全国地質調査業協会連合会
2. 後 援 国土交通省, 全国知事会・全国市長会・全国町村会
3. 対象職員 国, 地方公共団体及び民間企業等において建設事業に携わる者
4. 研修期間 平成 29 年 5 月 17 日 (水) ~ 平成 29 年 5 月 19 日 (金) 3 日間
5. 教 科 目
  - ・地盤特有の見方, 考え方と地盤工学的問題解決のポイント
  - ・地質調査の計画      ・地質調査発注のポイント
  - ・地質調査を活用した技術
  - ・道路防災と点検における留意点について など
6. 研修場所 一般財団法人 全国建設研修センター 研修会館 (東京都小平市)
7. 研修経費 74,800 円 (1 人当たり, 宿泊費込, 消費税含)
8. 申込締切日 平成 29 年 5 月 10 日 (水)
9. 申込先及び問い合わせ先
 

講習会の詳細や申し込み方法, お問合せ先は, 全地連のホームページ (イベント情報) をご覧ください。

〈全地連ホームページ〉

▶▶▶ <https://www.zenchiren.or.jp/event/downloadf/114>

## 地質調査技士資格登録更新 (平成 29 年度) 実施予定

平成 29 年度地質調査技士登録更新は、下記の日程で実施する予定です。詳細が決まり次第、全地連のホームページでご案内します。更新対象者の方は、更新手続きをお忘れのないようにご予定ください。

### 平成 29 年度 地質調査技士登録更新 実施概要 (予定)

- 更新対象者：
  - 平成 24 年度 (2012 年度) の「登録更新講習会」を受講した方
  - 平成 24 年度 (2012 年度) の「第 47 回地質調査技士資格検定試験」に合格し、登録した方
- 更新手続期間：平成 29 年 9 月中旬～10 月中旬 (約 1 か月間)
- 更新方法：講習会受講形式または CPD 記録報告形式 (任意選択)
- 講習会受講地および講習日：
  - 全国 12 会場 各会場で定める平成 29 年 11 月～翌年 1 月のうちの 1 日間
- その他：
 

更新対象者の方には、8 月下旬に更新案内はがきをご自宅宛に郵送する予定です。案内が万一届かない場合は、更新手続期間中に全地連のホームページを直接ご確認の上、手続きを進めてください。

## 編集後記

本号では、近年、注目されている「ドローン (UAV)」を取り上げました。

ドローンは宅配ビジネス、過疎地の医療品配達など産業界での幅広い活用が期待されており、地質業界でも活用され始めています。

本号では、「地すべり調査」、「不安定岩盤の抽出」、「道路防災点検」、「活断層調査」などのドローンを地質調査に応用されている事例を広く執筆して頂きました。ドローンを使用することにより手に入れたい情報を手軽に手に入れることができるようになりましたが、同時に、その活用の可能性も同時に感じることができました。

また、ドローンによる画像は直感的で分かりやすいという特徴があります。「地域防災」という観点では、画像データが避難所、避難路の把握に活用できることを知りました。

ドローンは大きな可能性を秘めています。本号を機会に、ドローンをさらに身近なものとして感じて頂き、今後更に活用するきっかけになれば幸いです。

最後になりましたが、ご多忙中にも関わらず快く執筆を受け入れて頂きました執筆者の方々には、心から感謝の意を表します。

(2017年4月 細矢記)

## 機関誌「地質と調査」編集委員会

一般社団法人全国地質調査業協会連合会

委員長 鹿野 浩司

委員 尾高 潤一郎、佐久間 春之、細野 高康、細矢 卓志、結城 則行、利藤 房男、土屋 彰義、山本 聡、池田 俊雄、高橋 暁、中川 直、各地区地質調査業協会

委員 北海道：鈴木 孝雄 東北：昆 孝広 北陸：津嶋 春秋 関東：丹下 良樹 中部：成瀬 文宏  
関西：東原 純 中国：向井 雅司 四国：大岡 和俊 九州：金田 良則 沖縄県：長堂 嘉光

一般社団法人全国地質調査業協会連合会

〒101-0047 東京都千代田区内神田 1-5-13 内神田 TK ビル 3 階 TEL. (03) 3518-8873 FAX. (03) 3518-8876

北海道地質調査業協会	〒060-0003	北海道札幌市中央区北 3 条西 2 丁目 1 (カミヤマビル)	TEL. (011) 251-5766
東北地質調査業協会	〒983-0852	宮城県仙台市宮城野区榴岡 4-1-8 (パルシティ仙台 1 階)	TEL. (022) 299-9470
北陸地質調査業協会	〒951-8051	新潟県新潟市中央区新潟町通 1 ノ町 1977 番地 2 (ロイヤル礎 406)	TEL. (025) 225-8360
関東地質調査業協会	〒101-0047	東京都千代田区内神田 2-6-8 (内神田クレストビル)	TEL. (03) 3252-2961
中部地質調査業協会	〒461-0004	愛知県名古屋市東区葵 3-25-20 (ニューコーポ千種橋 403)	TEL. (052) 937-4606
関西地質調査業協会	〒550-0004	大阪府大阪市西区靱本町 1-14-15 (本町クィーパービル)	TEL. (06) 6441-0056
中国地質調査業協会	〒730-0017	広島県広島市中区鉄砲町 1-18 (佐々木ビル)	TEL. (082) 221-2666
四国地質調査業協会	〒761-8056	香川県高松市上天神町 231-1 (マリッチ F1 101)	TEL. (087) 899-5410
九州地質調査業協会	〒812-0013	福岡県福岡市博多区博多駅東 2-4-30 (いわきビル)	TEL. (092) 471-0059
沖縄県地質調査業協会	〒903-0128	沖縄県中頭郡西原町森川 143-2 (森川 106)	TEL. (098) 988-8350

機関誌 「地質と調査」 '17 年 1 号 No.148

平成 29 年 4 月 15 日 印刷

平成 29 年 4 月 20 日 発行

編集 一般社団法人全国地質調査業協会連合会

〒101-0047 東京都千代田区内神田 1-5-13 内神田 TK ビル 3 階

発行所 株式会社ジェイスパーク

〒102-0082 東京都千代田区一番町 9-8 ノザワビル 7 階 TEL. (03) 3264-7781 FAX. (03) 3264-7782

株式会社ワコー

〒102-0072 東京都千代田区飯田橋 3-11-7 TEL. (03) 3295-8011 FAX. (03) 3230-2511

印刷所 株式会社 高山

**無断転載厳禁**

印刷物・Web 上等に本誌記事を掲載する場合は、一般社団法人全国地質調査業協会連合会に許可を受けてください。

# 使い勝手が一段とアップするスペーサー

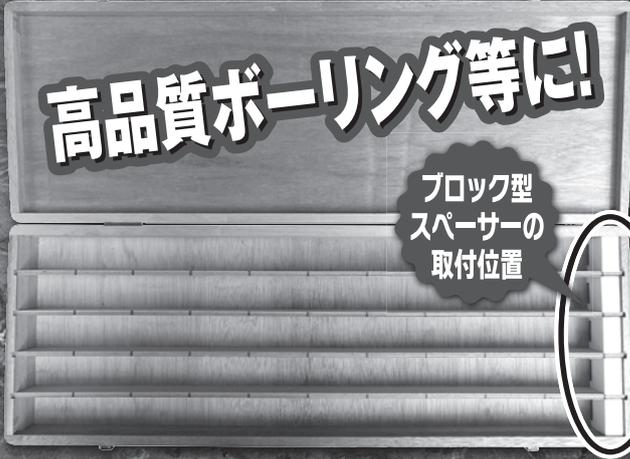
## コア箱用ブロック型スペーサーS-M

(当社オリジナル製品)

実用新案(登録第3207791)

### 高品質ボーリング等に!

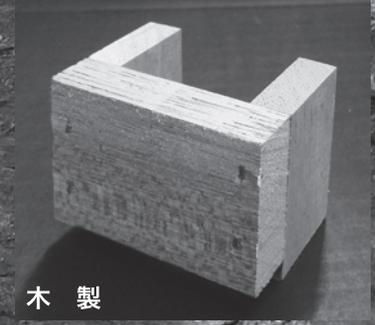
ブロック型  
スペーサーの  
取付位置



NEW



発泡スチロール製



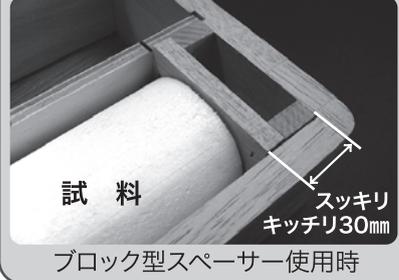
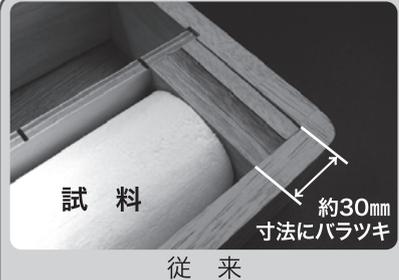
木製

### 特徴①

#### 寸法精度の向上

(国交省型コア箱・右端  
3cmのスペース確保)

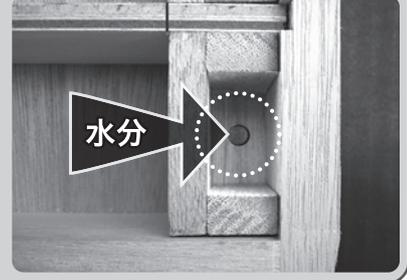
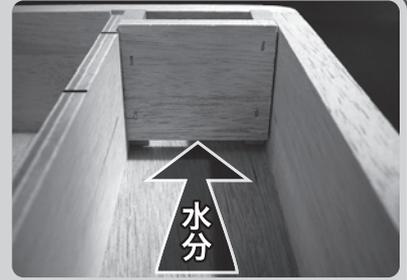
従来はコア箱附属の仕切板(コマ板)を詰めていたため寸法にバラツキがあり、外観も良好ではありません。ブロック型スペーサーを使用することにより30mm程度のスペースを確保することができ、スマートになります。



### 特徴②

#### 水抜き孔の 機能を生かす

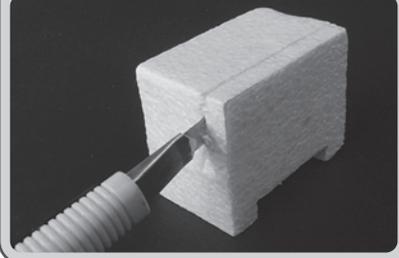
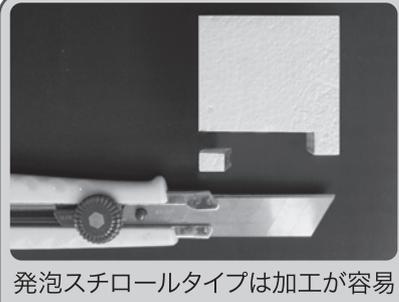
従来の仕切板の場合、コア箱右端に設けた水抜き孔をふさぐ形となり、水はけ性に難がりましたが、このブロックスペーサーは下部にスリットを設けることにより、水野抜け道を確保し、水抜き孔の機能を妨げません。



### 特徴③

#### 材質

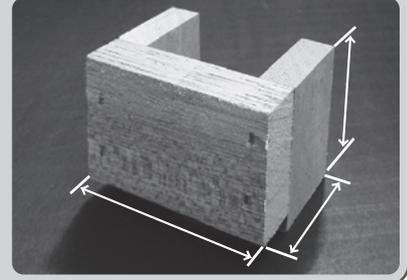
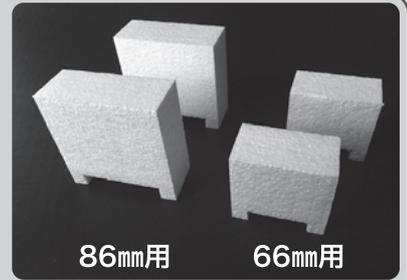
定評の木製タイプと、発泡スチロールタイプをご用意しております。  
発泡スチロールタイプは・軽量・安価のうえ必要に応じ、刃物などで容易に加工が可能です。  
(←左図)



### 特徴④

#### サイズ

66用、86用のラインナップを基本として、他のサイズへの対応も可能です。



コア箱・土質標本箱・土質試料瓶

全国地質調査業協会連合会賛助会員

## 株式会社マスダ商店

〒733-0032 広島市西区東観音町4-21

ホームページ: [www.masuda-s.jp](http://www.masuda-s.jp)

ご注文・お問い合わせは

TEL082-231-4842  
FAX082-292-9882

マスダ商店

検索

E-mail: [info@masuda-s.jp](mailto:info@masuda-s.jp)



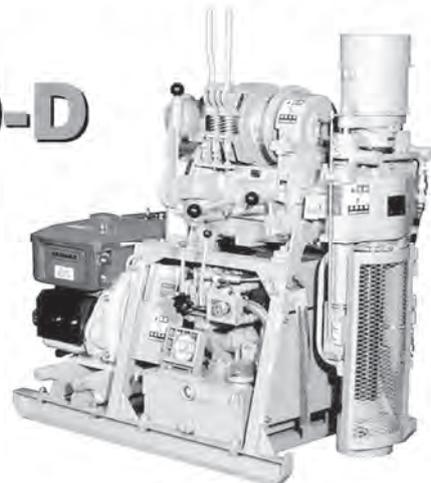
**TOHO**  
DRILLING EQUIPMENT

# 小型ボーリングマシン

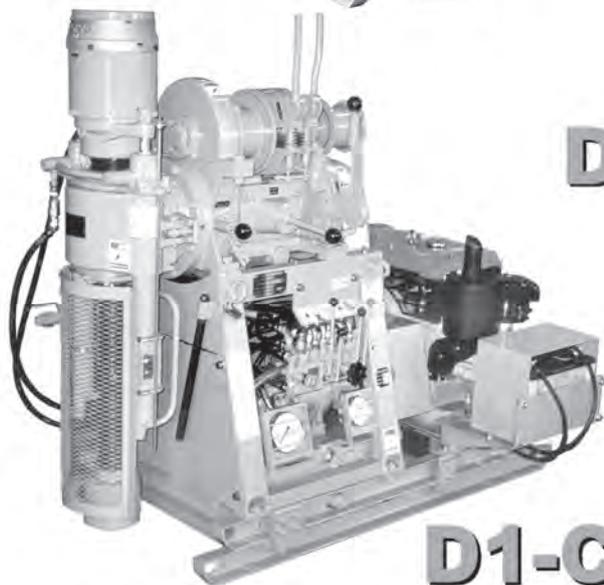
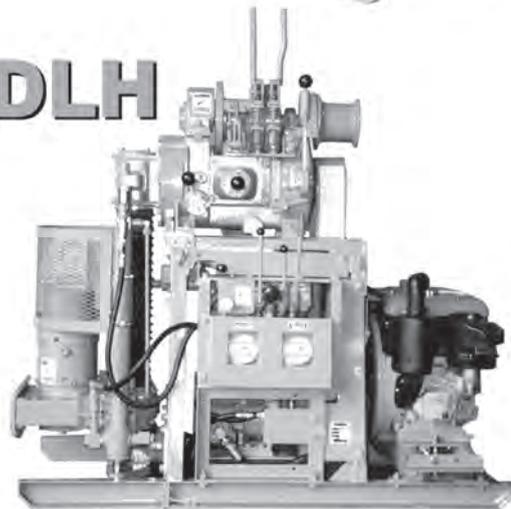
**DM-03**



**D0-D**



**D0-DLH**



**D1-C**

試錐機には小型ボーリングポンプが内蔵できます。(DM-03を除く)

機種名		DM-03	D0-D	D0-DLH	D1-C
穿孔能力	m	30	100	100	280
回転数	min <sup>-1</sup>	65,125,370	(A)60,170,330	(A)60,170,330	(A)65,130,170,370
			(B)110,320,625※	(B)110,320,625※	(B)90,170,320,490※
スピンドル内径	mm	47	43	43	48,58
ストローク	mm	300	400,500※	500	500
巻上げ力	kN(kgf)	3.9(400)	5.9(600)	5.9(600)	10.8(1100)
スライド	mm		油圧式300※	油圧式300※	油圧式300
動力	kW/HP	3.7/5	3.7/5	3.7/5	5.5/8
質量	kg	180	315	475	550
寸法	H×W×L mm	960×550×1115	1200×660×1180	1440×890×1415	1390×735×1580

右操作、左操作をご用意しております。

※はオプションです。



**東邦地下工機株式会社**

東京都品川区東品川 4-4-7 TEL 03 (3474) 4141  
 福岡市博多区西月隈 5-19-53 TEL 092 (581) 3031  
 URL: <http://www.tohochikakoki.co.jp>

福岡 ☎ 092(581)3031  
 東京 ☎ 03(3474)4141  
 札幌 ☎ 011(376)1156  
 仙台 ☎ 022(235)0821  
 新潟 ☎ 025(284)5164  
 金沢 ☎ 076(235)3235

名古屋 ☎ 052(798)6667  
 大阪 ☎ 072(924)5022  
 松山 ☎ 089(953)2301  
 広島 ☎ 082(533)7377  
 山口 ☎ 083(973)0161  
 熊本 ☎ 096(232)4763

# 地質調査

通巻148号

●発行所

株式会社ジェイスパーク／株式会社ワコー