

衛星リモートセンシングを用いた蒸発散量調査

(株)エイト日本技術開発 トシ リミン

1. はじめに

近年では世界的な気候変動により日本の渇水年の水資源賦存量は減少傾向にあり、水収支の把握、水源確保が重要になっている。

蒸発散量が水収支の把握や農業における水管理にとって重要であるが、実際の量の推定が難しい水文要素であるため、以前から世界的にいろんな手法で研究が行われてきた。モデル計算と渦相関法に基づいたフラックスタワーでの計測以外に、衛星技術の発展や衛星データのクラウド保存・処理技術の進歩により、リモートセンシング技術を使った蒸発散量の推定が可能になった。

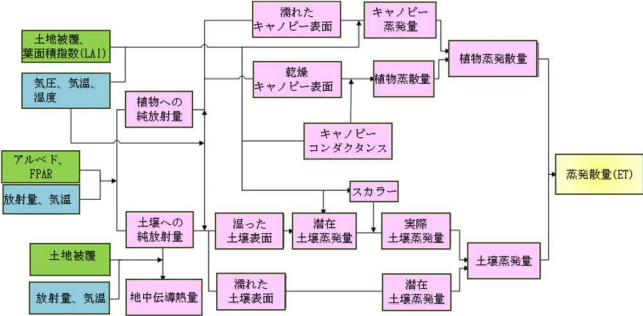
本稿は宮古島市白川田地下水流域界について、蒸発散量を面的かつ連続的に把握するために衛星リモートセンシング技術を用いて行った蒸発散量調査の結果を報告するものである。

2. 調査方法

蒸発散量は、MODIS 及び LANDSAT8 の観測データを用いて、白川田地下水流域界について、2013 年 1 月～2022 年 12 月における蒸発散量の推定を行った。MODIS はアメリカの地球観測衛星である Terra と Aqua に搭載されている可視・赤外域の放射計である。LANDSAT はアメリカの地球観測衛星であり、1972 年の 1 号機運用開始以降継続して打ち上げられて、2025 年現在で 9 号機まで打ちあがっている。本稿では、MODIS により収集された MOD16A2.061 データセットを Google Earth Engine プラットフォームで推定した。また、LANDSAT8 の観測データを用いて、地表面エネルギー収支モデル (SEBALI) 手法で蒸発散量を求め、MODIS で求めた蒸発散量との比較を行った。

(1) MOD16 アルゴリズム

MOD16 データプロダクトのアルゴリズムフローチャートを図-1 に示す。実蒸発散量の推定は熱収支に基づいたペンマン-モンテース法が使われている。MOD16A2.061 データセット (NASA 提供) の解像度が 500m である。



(2) 地表面エネルギー収支モデル (SEBALI)

SEBALI は対象地区の可視、近赤外、中間赤外、熱赤外の各波長域に対するマルチスペクトル画像と気象観測データに基づいて、以下の計算を順次行う：①地表パラメータ (アルベド、植生指標、地表面温度) の計算 ②熱収支項目 (純放射量、地中熱フラックス、顕熱フラックス、潜熱フラックス) の計算 ③蒸発比に基づく日蒸発散量の計算。SEBALI は以下のエネルギー収支式を使う¹⁾。

$$\lambda E = R_n - G - H \tag{1}$$

上の式の λE は蒸発散の潜熱フラックスであり、 R_n は純放射量、 G は地中熱フラックス、そして H は顕熱フラックスである。

アルベド (反射率) の計算には以下の式を使う。

$$\alpha = 0.130b_1 + 0.115b_2 + 0.143b_3 + 0.180b_4 + 0.281b_5 + 0.108b_6 + 0.042b_7 \tag{2}$$

上の式の b_1 - b_7 は Blue バンド、Green バンド、短波長赤外バンドなどである。

3. 調査結果

(1) MOD16より推定された蒸発散量

MOD16A2.061 より、白川田地下水流域界について、2013 年 1 月～2022 年 12 月における 10 年間の蒸発散量の推定を行った結果を図-2、表-1 に示す。年間蒸発散量の 10 年平均値が 1041.57mm であり、気象庁データの年間降雨量の 2317mm に対し、蒸発散量が 48% を占めた。同期間の蒸発散量の年間日平均値は 2.84mm であった。

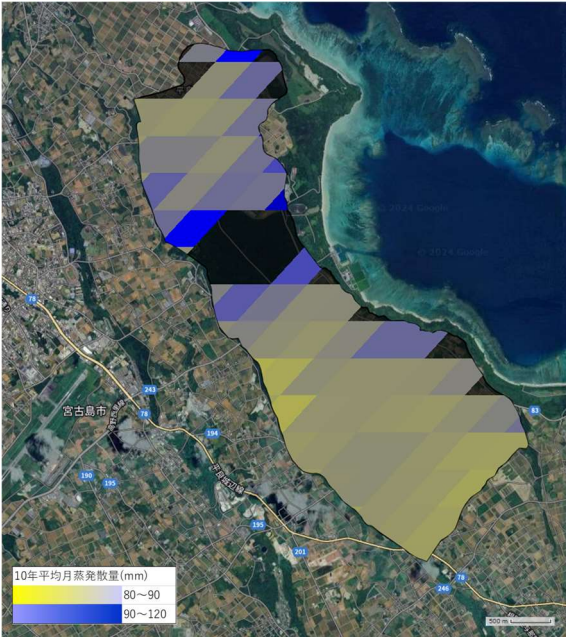


図-2 白川田地下水流域における 10 年間 (2013-2022 年) 平均月蒸発散量分布図

表-1 白川田地下水流域における蒸発散量 (MOD16)

	年間降水量 (気象庁_平良) (mm)	年間蒸発 散量 (mm)	年間日平均 蒸発散量 (mm/day)	7-9月の平均 日蒸発散量 (mm/day)	8日平均日蒸 発散量最大値 (mm/day)	蒸発散/降 雨比率
2013年	1593.5	1032.99	2.81	3.66	4.59	65%
2014年	1722	989.03	2.70	3.64	4.45	57%
2015年	2057	1084.62	2.95	3.64	4.69	53%
2016年	2675	1098.10	2.99	3.86	4.92	41%
2017年	1847	992.06	2.70	3.52	4.45	54%
2018年	2635.5	1090.95	2.97	4.00	5.35	41%
2019年	2699	1046.01	2.85	3.54	4.51	39%
2020年	2504.5	1021.94	2.78	3.30	4.49	41%
2021年	1669.5	1065.24	2.90	3.73	5.00	64%
2022年	3768	994.71	2.70	3.52	4.07	26%
10年平均	2317.1	1041.57	2.84	3.64	4.65	48%

(2) SEBALI より推定された蒸発散量

SEBALI アルゴリズムを用いて、白川田地下水流域界について、2013 年 1 月～2022 年 12 月における 10 年間の蒸発散量の推定を行った結果を表-2 に示す。年間蒸発散量の 10 年平均値が 1100.71mm であり、気象庁データの年間降雨量の 2317mm に対し、蒸発散量が 51 %を占めた。

表-2 白川田地下水流域における蒸発散量 (SEBALI)

	年間降水量 (気象 庁_平良) (mm)	年間蒸発散量 (mm)	蒸発散/降雨比率
2013年	1593.5	1044.93	66%
2014年	1722	1036.18	60%
2015年	2057	1116.41	54%
2016年	2675	1119.31	42%
2017年	1847	1072.74	58%
2018年	2635.5	1153.10	44%
2019年	2699	1132.36	42%
2020年	2504.5	1159.99	46%
2021年	1669.5	1062.82	64%
2022年	3768	1109.30	29%
10年平均	2317.1	1100.71	51%

4. 考察

衛星リモートセンシングを用いて蒸発散量の推定を行った結果、MOD16A2データセットより収集した蒸発散量の10年平均値が1042mm に対し、地表面エネルギー収支モデル (SEBALI) より求めた値が1101mm であり、二つの手法で近い結果が得られた。

表-3 は沖縄県における地域別、時期別の年蒸発散量、平均値及びピーク時値等の文献値である。比屋根ら (2004)²⁾ が宮古島における夏植えサトウキビ畑の微気象観測の結果から熱収支をもとにボーエン比法で蒸発散量を測定した結果、日蒸発散量の年間平均値は 2.86mm/day であり、7-9 月の平均値は 3.27 mm/day であると報告している。田中 (1981)³⁾、比屋根 (2008)⁴⁾ が示した蒸発散量の日平均値は 2.9mm/day であった。これに対し、本稿で推定された白川田地下水流域界における 2013 年から

2022 年の日蒸発散量の年間平均値は 2.84mm/day であり、7-9 月の日蒸発散量が 3.30～4 mm/day、その 10 年平均は 3.64 mm/day であり、文献値とほぼ同じ結果であった。蒸発散量の年間合計値が文献では 1030～1180mm である^{5) 6)} のに対し、本業務では 10 年間平均値が 1042～1101mm であり、近い結果であった。

表-3 沖縄県における地域別、時期別の年蒸発散量、平均値及びピーク時値等の文献値

出典	観測地	観測期間	手法	年合計 (mm/年)	平均値 (mm/day)	7-9月平 均値 (mm/day)
山城 (1968、 1990)	那覇市	1967～1971年、 1983～1984年	ライシメータ	1180	3.3	6.4
田中 (1981)	宮古島	-	- (一般に使 われている 値)	1060	2.9	4.7
比屋根 (2004)	平良市	2000年1月～12月	熱収支ボー エン比法	1030	2.86	3.27
比屋根 (2008)	南風原 町新川	2002年8月～2002 年11月	熱収支ボー エン比法	-	2.91	-

《引用・参考文献》

- 1) Y.G. Mekonnen et al., (2024) Tailoring the surface energy balance algorithm for land-improved (SEBALI) model using high-resolution land/use landcover for monitoring actual evapotranspiration, Agricultural Water Management 303(2024) 109058
- 2) 比屋根真一・大場和彦・丸山篤志・黒瀬義孝・河野伸二・伊志嶺正人 (2004) 宮古島における夏植サトウキビ畑の蒸発散特性、熱帯農業 48(2): 94-100
- 3) 田中宏平・四ヶ所四男美 (1981) 宮古島の地下水予測に関するシステム理論的研究、九州大学農学部学藝雑誌、35 巻 3/4 号:97-103
- 4) 比屋根真一 (2008) 沖縄本島南部地域の夏季における春植えサトウキビの蒸発散、沖縄県農業研究センター研究報告 1:68-73
- 5) 山城三郎 (1968) 沖縄における甘蔗の蒸発散量 第 1 報、琉大農学報 15:193-198.
- 6) 山城三郎 (1990) 沖縄におけるサトウキビの蒸発散量 第 6 報 サトウキビの作物係数について、琉大農学報 37:171-1

既存盛土抽出手法の特徴と留意点

株式会社復建技術コンサルタント ○山口 秀平, 村上 智昭, 山下 桂一, 浅井 功

1. はじめに

令和3年7月に静岡県熱海市において発生した土石流災害等を踏まえ、盛土等に伴う災害の防止を目的として、危険な盛土等を規制する「宅地造成及び特定盛土等規制法」(通称「盛土規制法」)が令和5年5月に施行された。同法では、都道府県等が定期的に基礎調査(以下、「既存盛土等調査」という.)を実施することが規定されている。図-1には既存盛土等調査の手順を示した。

本稿では、既存盛土等調査の第一段階として行われる「既存盛土等分布調査」における既存盛土抽出手法について、複数地域で実施した結果を踏まえ、特徴や留意点を報告する。

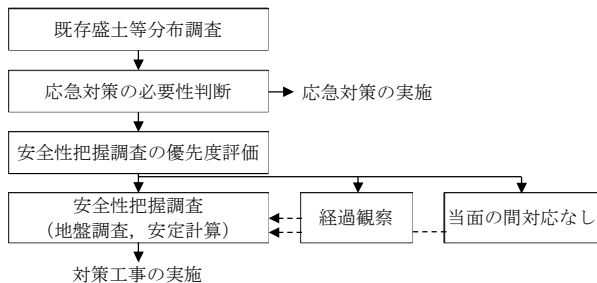


図-1 既存盛土等調査の手順¹⁾

2. 既存盛土抽出手法の概要

広範な範囲を対象として、既存盛土を抽出する手法には、(1)DEM(数値標高モデル)の変化で抽出する手法(以下、「DEM 差分解析」という.), (2)光学衛星画像から得られるNDVI(正規化植生指数)の変化で抽出する手法(以下、「NDVI 差分解析」という.), (3)SAR 衛星画像から得られる散乱強度の変化で抽出する方法(以下、「散乱強度差分解析」という.)がある。以下に各手法の概要を示す。

(1) DEM 差分解析

盛土の造成前後における地表面の高さの変化に着目し、盛土により地表面の標高が高く変化することを踏まえ、2時期(造成前後)のDEMの差分計算を行い、標高が高く変化した箇所を盛土の可能性のある箇所として抽出するものである。

(2) NDVI 差分解析

盛土の造成前後におけるNDVIの変化に着目し、植生域では盛土により植生が除去され、NDVIが小さく変化することを踏まえ、2時期(造成前後)のNDVIの差分計算を行い、NDVIが減少した箇所、すなわち、植生が除去された可能性のある箇所を盛土可能性箇所として抽出するものである。

(3) 散乱強度差分解析

盛土の造成前後における散乱強度の変化に着目し、盛

土により地形や地物の状態が変化することを踏まえ、2時期(造成前後)の散乱強度の差分計算を行い、散乱強度が変化した箇所を地形や地物が変化した箇所、すなわち、盛土の可能性のある箇所として抽出するものである。

3. 既存盛土抽出手法の特徴と留意点

(1) DEM 差分解析

○特徴

- ・航空レーザ測量データ等の精度の良いDEMを用いることができれば、精度よく盛土箇所を抽出可能である。
 - ・盛土造成前後のDEMから、概ねの盛土の面積や断面形状を把握することが可能である。
 - ・古い年代のDEMが整備されているケースは少ない。
- また、整備されていても精度が低い場合が多いため、古い年代に造成された盛土は精度よく抽出できないことが多い。

○留意点

- ・精度や解像度が低いDEM(例えば、国土地理院数値標高モデル10mメッシュ等)を用いる場合は特に傾斜地において誤検出(盛土ではない箇所の検出)が生じやすい。
- ・自治体が整備する都市計画基本図(DM)データは、地物のみ更新がなされ、地形は更新されていない場合があるため、適用する際には、地形データの年代に留意する必要がある。また、地形データの数値に誤りがあり、それ起因する誤検出が生じることもある。

(2) NDVI 差分解析

○特徴

- ・有償の光学衛星画像(spot6/7)を用いた場合は、分解能1.5m程度であり、盛土規制法の規制対象規模(面積500㎡以上)の植生変化領域を抽出可能である。
- ・植生除去箇所が検出されるため、盛土ではない箇所も検出される。
- ・標高の情報ではないため、盛土の規模や形状は把握できない。

○留意点

- ・被雲箇所は観測不可領域となるため、解析することができない。また、NDVIの変化を検出することから、植生活性度がより高い時期(6~8月頃)の画像を適用することが望ましいが、同時期は雲が多いため、被雲や植生の活性度の状況を勘案して、適切な画像を選定する必要がある。
- ・比較する2時期の期間が長期間の場合は、植生が再度活性化することにより、検出されないことがある。

(3) 散乱強度差分解析

○特徴

- ・有償の SAR 衛星画像（ALOS-2）を用いた場合は、分解能 2.5m 程度であり、盛土規制法の規制対象規模（面積 500 m²以上）の地形・地物変化領域を抽出可能である。
- ・散乱強度は地形・地物の変化等複数の要因で変化するため、盛土ではない箇所も多数検出される。
- ・標高の情報ではないため、盛土の規模や形状は把握できない。

○留意点

- ・起伏のある地形で SAR 衛星から照射されるマイクロ波が斜面の陰になる箇所は、散乱強度が得られないため、解析不可領域となる。なお、南北両軌道の画像を用いて解析することにより、解析不可領域を低減可能である。
- ・都市部の市街地やその周辺については、地物の変化が多いことから、盛土ではない変化（建物の変化や伐採のみの変化等）が膨大に抽出される傾向にある。

4. 盛土抽出の課題と対応策

(1) 盛土の可能性がより高い箇所の抽出

前述した各手法の特徴や留意点のとおり、机上での既存盛土抽出では、誤検出が多く生じることがある。机上で抽出された盛土の可能性のある箇所については、現地確認を行い、盛土か否かの判断を行うが、誤検出が膨大になると調査対象数も増大し、多大な費用や時間を要する。このため、より精度良く盛土箇所を抽出し、現地確認の効率化・省力化を図る必要がある。

より精度良く抽出する手法としては、複数の差分解析結果を総合的に判断して盛土の可能性がより高い箇所を抽出することが考えられる。例えば、山地部等の植生域の盛土を抽出する場合は、植生除去箇所を精度良く抽出可能である NDVI 差分解析を主体とし、DEM 差分解析、散乱強度差分解析を適宜組合せることにより、盛土の可能性がより高い箇所を抽出することが可能と考えられる。

(2) 抽出漏れの低減

山地部における大規模な盛土は、市街地部の盛土に比べ、現地で確認されにくいことから、山地部の大規模な盛土は、可能な限り机上調査で抽出する必要がある。

山地部における大規模な盛土の抽出漏れを低減する方法としては、最新の DEM を活用した人工地形の抽出が考えられる。具体的には、山地部において、最新の DEM をもとに傾斜区分図を作成し、傾斜区分図から山地部における平坦地箇所を人工改変地の可能性がある箇所として抽出するものである。

当該手法により、山地部の谷埋め盛土を抽出した事例を図-2および図-3に示す。図-2は傾斜区分図を用いて山地部における平坦地箇所を抽出した事例である。図-3は抽出箇所の拡大図（起伏陰影図）である。山地の谷部に法面が形成されており、人工地形であることが確認できる。

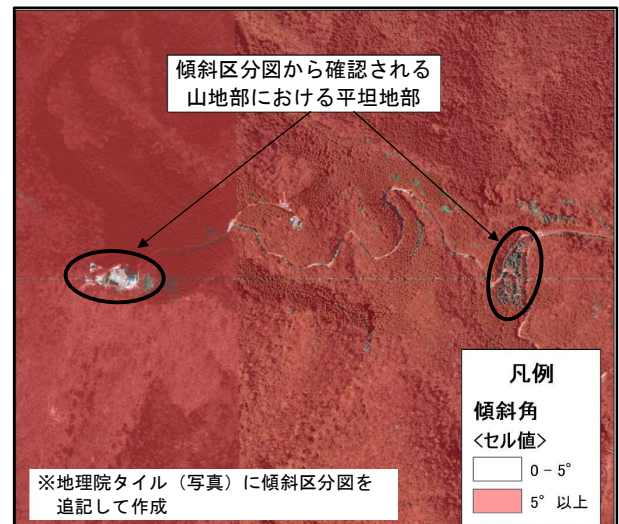


図-2 山地部における人工地形箇所の抽出の例
(0.5mDEM から作成した傾斜区分図)



図-3 山地部における人工地形箇所の抽出の例
(0.5mDEM から作成した起伏陰影図)

5. まとめ

既存盛土抽出にあたっては、各抽出手法の特徴や留意点を踏まえ、調査対象地の地形や土地利用、基礎資料の整備状況等を勘案して適切な抽出手法を選定することで、より効果的に既存盛土を抽出可能であると考えられる。また、単独の差分解析では誤検出が膨大に生じる懸念がある場合は、複数の差分解析結果を総合的に判断することにより、盛土の可能性がより高い箇所を抽出可能と考える。なお、本稿で示した抽出手法を適用した場合においても、全ての盛土を抽出できるとは限らないため、抽出漏れに対応する方法として、地元住民や民間事業者（例：宅配業者等）と連携したパトロール等も活用して、危険な盛土の事前把握に努めることが重要である。

《引用・参考文献》

- 1) 国土交通省・農林水産省・林野庁(令和5年5月):盛土等の安全対策推進ガイドライン及び同解説, p. 1-23

UAV 測量を活用した河岸露頭の岩盤割れ目抽出方法

中央開発株式会社 ○後藤 慧, 細矢 卓志, 石原 隆仙, 彦坂 千遥

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 島田 耕史

1. はじめに

岩盤中の割れ目の発達状況は、対象とする岩盤の強度と透水性を評価する上で極めて重要な要素である。特に地表と地下深部を繋ぐ大きな割れ目は水や物質の移行経路となり、割れ目沿いに酸化・風化を進行させて岩盤の安定性を低下させる要因にもなる。現在、ダムや地下施設の建設においては地質技術者が手作業で岩盤割れ目の分布を計測しているが、広範囲の計測に時間がかかることや、人間が到達できない地点は調査ができない等の課題がある。そこで筆者らは、河岸に露出する岩盤露頭を対象として、空中から対象物を撮影できる UAV（ドローン）を使用した割れ目の抽出を試みた。本論では、現地での UAV 測量の実施段階・取得データの三次元モデル解析段階において展開した手法を紹介し、遠隔による岩盤割れ目抽出の有効性を考察する。

2. 調査概要

(1) 調査対象

UAV 計測は、河岸の岩盤の露出が良い2ヶ所の地点（調査地 A、調査地 B）において実施した。2地点はいずれも三波川変成帯の分布域にあたり、泥質の結晶片岩が露出している。結晶片岩は、変成作用によって発達した片理面が弱線となって剥がれやすいという特性があり、露頭では節理の他に片理面に沿った割れ目や岩盤表面の剥落が認められる。

調査地 A は岩盤露頭が概ね平面的に分布しており、UAV から真下方向を撮影する従来手法での自動マッピングが実施可能であった。一方、調査地 B の露頭は水面から高角度で切り立つ岩壁として発達しており、岩の凹凸、崖からの枝の張り出しなどを考慮して航路を選定し、カメラを横向きにして撮影飛行を行った（図-1）。

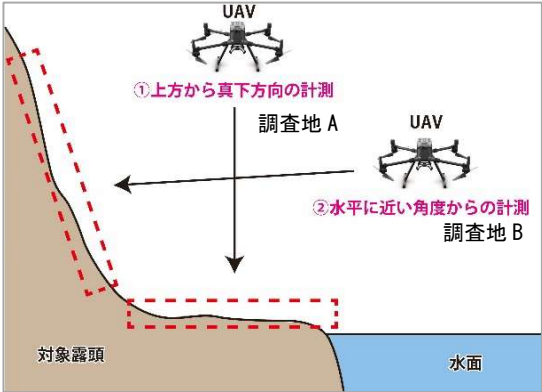


図-1 各露頭と UAV 飛行計測のイメージ

(2) 調査方法

2地点において実施した飛行計測方法を表-1に示す。本調査では、露頭状況に応じて対象を捉えるカメラの角度を適切に設定し、測量の手法としてレーザ測量（LiDAR）と写真測量を使用した。また飛行の手法として、あらかじめ設定した航路上を自動で飛行し撮影する自動撮影と、操縦者が直接機体の進行とカメラのシャッターを操作する手動撮影を実施した。自動操縦ではデータをくまなく取得できるという点、手動操縦では対象物へ接近し小回りを利かせたデータ取得が出来る点でそれぞれメリットがある。UAV は、LiDAR モジュール「Zemuse L1」を搭載した DJI Matrice 300 RTK（以後、大型機と呼称する）を使用して主に自動撮影飛行を行い、小回りが利く DJI Mavic 2 Pro（以後、小型機と呼称する）を使用して手動撮影飛行を実施した。

表-1 各地点における計測実施手法及び作成データ

調査地	No.	手法	飛行方法	対地高度	カメラ角度*	作成データ
A	1	レーザ	自動	50m	-90°	点群データ
	2	連続写真	自動	50m	-90°	オルソ画像・点群データ
	3	連続写真	手動	10m程度	-90°	オルソ画像・点群データ
B	1	レーザ	自動	50m	-40°	点群データ
	2	レーザ	自動	10~20m	0°	点群データ
	3	連続写真	自動	10~20m	0°	点群データ
	4	連続写真	手動	10~20m	0°	点群データ

*カメラ角度は水平を 0°、真下方向を-90° とする

UAV レーザ測量で取得したデータ、連続写真の SfM（フォトグラメトリ）解析から作成した三次元モデルは、UAV の GPS 座標やコンパス、傾きの情報などをもとに本来の露頭の向きや姿勢で復元される。大型機と小型機の座標復元精度はやや異なるが、各地点の各測量結果からそれぞれ点群データを構築し、露頭の形状を復元した。平面的モデルが作成可能な調査地 A では、さらに連続写真から GIS データとして使用できるオルソ画像を作成した。

LiDAR 点群データの構築には DJI 社製の DJI Terra を使用し、LiDAR 点群の植生フィルタリングや連続写真の SfM 解析には、Agisoft 社製の Metashape Professional を使用した。データの閲覧と割れ目の抽出では、オートデスク社の Auto CAD 及びオープンソース点群処理ソフトウェアの CloudCompare を使用し、面構造の解析を実施した。

3. データ解析および割れ目の抽出結果

(1) 調査地 A

取得した各データを比較した結果、調査地 A では、手動飛行撮影から作成したオルソ画像が最も割れ目の抽出に適していた。高さ方向からの正射俯瞰画像であるオルソ画像は、割れ目の面と水平面との交線（割れ目の走向）がそのまま線として映し出されるため、GIS ソフト等を使用して XY 座標上で線の方位角の計測が可能である。割れ目の平面的な分布傾向や走向を抽出し、割れ目のトレース線の走向（角度）を CAD 上で計測した。抽出する亀裂の長さは30cm 以上としている。露頭の一部における割れ目判読の様子と抽出結果を図-2及び表-2に示す。調査地 A の露頭では、EW 走向で発達する片理面と交差するように NW 走向の割れ目が発達しており、NE 走向の割れ目は相対的に少ないという傾向が得られた。

取得したデータのうち、レーザ測量の点群は写真測量で構築した点群と比較して粗く、起伏が均されて割れ目の抽出が困難であった。また、大型機の自動飛行で作成したオルソ画像は、小型機の手動飛行より高度を上げる必要があったことから、解像度で劣っていた。

(2) 調査地 B

岩壁状に発達する調査地 B の露頭は、上空から直下撮影で捉えることは困難であり、調査地 A のようなオルソ画像の作成や平面的な解析は実施できない。そこで、測量で取得したデータはそれぞれ点群データの状態点群処理ソフト「CloudCompare」に読み込み、三次元的な解析を実施した。判読に最も適していたデータは、小型機

の手動飛行で取得した SfM 点群データである。ソフト上の「Plane Tools」プラグインを使用することで面構造の向きや角度を自動計測することができ、割れ目の走向に加え傾斜も抽出することができた。露頭の一部における割れ目の判読の様子と抽出結果を図-3 及び表-3 に示す。調査地 B の露頭では、NS~N30° E 走向で発達する節理が EW 方向に発達する結晶片岩の片理を切断して割れ目として発達している。NS~N30° E 走向の節理の傾斜は 70° から直角で高角である。

B 地点でもレーザ点群は既述の特性から大きく開口した割れ目以外の抽出が困難であったが、写真測量の点群にない特徴として植生に遮られた壁面のデータを取得しており、走向傾斜の計測を実施できた。調査対象の植生被覆状況によっては一切岩盤が露出していないこともあり、レーザ測量による遠隔調査も効果的であると言える。大型機で撮影した SfM 点群データは、張り出した樹木に小型機以上に航路を制限されたため、小型機の SfM 点群データより点群密度が低くなった。

4. まとめ

UAV の撮影データから撮影対象の本来の形状と姿勢が復元でき、岩盤が露出した一定範囲において、効率的な割れ目の走向・傾斜の取得が可能であることが判明した。一方で、精度検証のためには実測値との対比が必要である。また、データの取得・解析に関しては、調査対象の特性に応じて、測量方法の使い分けや計測時のパラメータなどの設定方法を都度模索し、最適化していくことが求められる。

表-2 図-2において判読した割れ目の走向

No.	走向 真北	No.	走向 真北
1	N 61° E	7	N 52° W
2	N 38° W	8	N 18° W
3	N 39° W	9	N 87° W
4	N 36° W	10	N 77° W
5	N 57° W	11	N 89° E
6	N 38° W	12	N 46° W

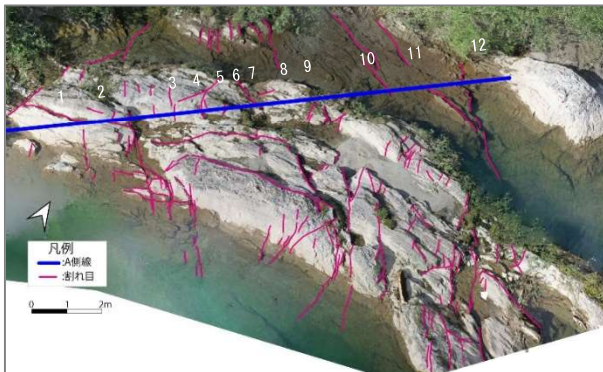


図-2 調査地 A における割れ目の判読

表-3 図-3において判読した割れ目の走向傾斜

No.	走向・傾斜
5	NS 78° W
6	N31° E 71° SE
7	N89° W 46° S
8	N83° W 22° N
9	N25° E 72° E
10	N2° E 68° W
11	N8° E 69° W
12	N72° E 62° S

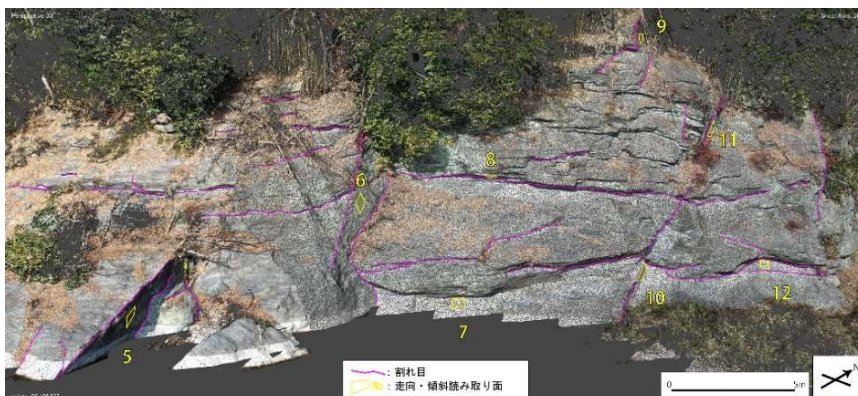


図-3 地点 B における割れ目の判読

空中電磁探査結果と調査ボーリング結果の対比・評価手法について

大日本ダイヤコンサルタント株式会社 ○野崎 勇佑, 山根 博, 濱本 拓志, 馬場 敬之, 金丸 諒太郎

1. はじめに

地質調査における岩盤、地下水等の性状の把握は構造物の設計・施工を行う上で重要な基礎データである。近年、予備調査段階で広域の地質情報の取得を目的とした空中電磁探査の実施される機会が増加傾向にある。

空中電磁探査はヘリコプターや UAV（ドローン）を使用し、地盤内部の電気的特性を観測することで、岩盤性状や地下水分布などを推定するための物理探査手法である。

本稿では、2つの地区を対象に UAV を利用した空中電磁探査により取得した比抵抗とボーリング調査結果を対比し、地質評価を行った事例を紹介する。

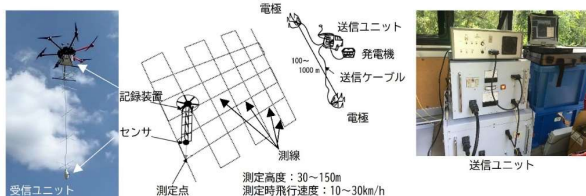


図-1 UAV を用いた空中電磁探査実施状況

2. 空中電磁探査で得られる比抵抗の概要

空中電磁探査を実施することで、比抵抗（含水量や粘土分含有量によって生じる電気的特性）を把握することが出来る。

比抵抗と地質・地下水の関係を図-2 に示す。岩盤性状が良好であれば高比抵抗を呈し、風化や破碎を受けると比抵抗は小さくなる。また表層付近の間隙の大きく地下水で飽和する箇所、粘土化している箇所（断層破碎帯、凝灰岩層等）は低比抵抗を呈する。

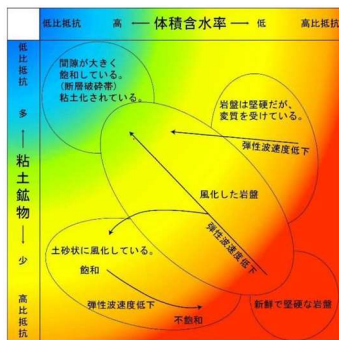


図-2 比抵抗と地質・地下水の関係¹⁾

3. 空中電磁探査結果及びボーリング位置

(1) 調査地 A(地質帯境界付近)

調査地 A は文献・既往調査より地質帯境界（断層）の分布が想定されており、断層周辺の地質性状及び地下水分布を把握するために空中電磁探査を実施した。比抵抗断面を図-3 に示す。地質帯境界は黒破線範囲内の分布が

想定されており、境界の前後で地下深部の比抵抗に差が認められた。ボーリング位置は比抵抗に差が見られる箇所、深部で低比抵抗を示す2箇所（No. 1 孔、No. 2 孔）を選定した。

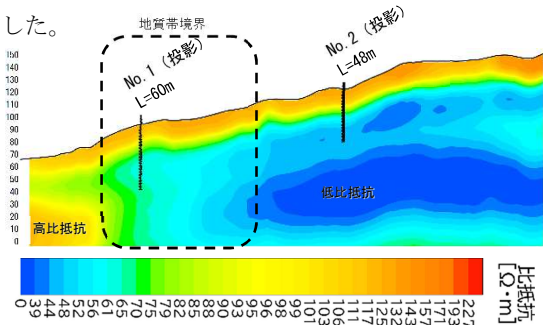


図-3 比抵抗断面図(調査地 A)

(2) 調査地 B(地すべり地形分布想定箇所)

調査地 B は既往調査より地すべり地形の分布が想定されており、地すべりの規模と地下水分布を把握することを目的に空中電磁探査を実施した。比抵抗断面を図-4 に示す。山頂付近に地すべり頭部の分布が想定されており、想定位置付近の比抵抗に差が見られた。ボーリング位置は地形の中心付近の1箇所を選定した。

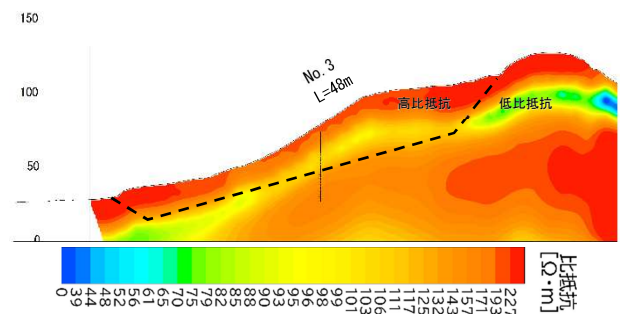


図-4 比抵抗断面図(調査地 B)

4. ボーリングコアと比抵抗の対比

(1) 調査地 A(地質帯境界付近)

ボーリング調査の結果 No. 1 孔は泥岩を主体とした岩盤、No. 2 では砂岩優勢で 30cm 泥岩を挟在する岩盤の分布を確認した。なお、No. 2 は地下深部に向かい砂岩と泥岩の境界が不明瞭となり、泥岩主体の岩盤への遷移が認められた。図-5 に岩級ごとの代表的なコアと対応する比抵抗の範囲を示す。

地質・岩級	コア写真		比抵抗 Ω・m
	No.1	No.2	
未固結堆積物			96 超
D			96 超
CL			75-96
CM			61-75
CH			61 未満

図-5 ボーリングコアと比抵抗の対比(調査地 A)

浅部に分布する未固結堆積物、開口部を多く含むD級岩盤は $96\Omega \cdot m$ 以上の高い比抵抗を示した。CL級岩盤は $75 \sim 96\Omega \cdot m$ 、CM級岩盤は $61 \sim 75\Omega \cdot m$ 、CH級岩盤は $61\Omega \cdot m$ 未満と岩盤性状が良好になるにつれて比抵抗値が小さくなることが確認された。

なお、調査地Aに分布する CH 級岩盤は割れ目が少なく風化も小さい新鮮な硬岩であるため図-2に倣えば高比抵抗を示すと考えられる。一般的な岩盤における低比抵抗の要因として、岩盤が間隙を多く含んだ上で体積含水率が高いこと・岩盤自体が粘土鉱物を多く含むことが挙げられるが、コア上に該当する要因は認められない。

調査地Aの地下深部に分布する新鮮な岩盤が低比抵抗を示した要因には、図-6に示す岩石（固有）の比抵抗値の影響が推定される。

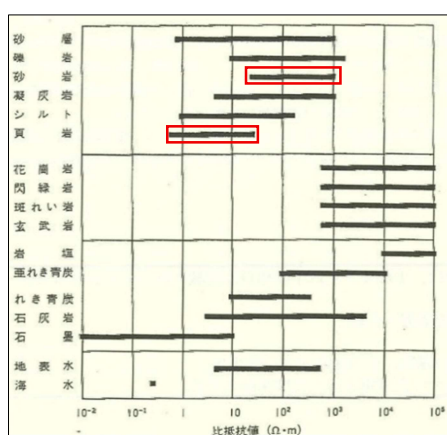


図-6 岩石等の比抵抗値²⁾

岩石と比抵抗値の関係から泥岩（頁岩）で低比抵抗、砂岩で高比抵抗を示すことが確認できる。

(2)調査地 B(地すべり地形分布想定箇所)

ボーリング調査から砂岩主体の岩盤の分布を確認した。図-7に岩級ごとの代表的なコアと対応する比抵抗の範囲を示す。

地質・岩級	コア写真	比抵抗 $\Omega \cdot m$
	No.3	
未固結堆積物		125超
D		125超
CL		75-125
CM		75未満
		75-157 (地下水位以深)

図-7 ボーリングコアと比抵抗の対比（調査地 B）

浅部に分布する未固結堆積物、D 級岩盤は $125 \Omega \cdot \text{m}$ 以上、CL 級岩盤は $75 \sim 125 \Omega \cdot \text{m}$ を示した。CM 級岩盤は地下水位より上で $75 \Omega \cdot \text{m}$ 未満、地下水位より下で $75 \sim 157 \Omega \cdot \text{m}$ を示した。調査地 B に分布する岩盤は深度と調和的な風化構造を持つことが比抵抗及びボーリングコアで確認できた。また、コア上にすべり面や地すべり性の破碎部が認められないことから地すべりは分布しないと判断した。

5. 空中電磁探査とボーリング調査の結果を踏まえた岩盤性状及び地下水分布の評価手法について

(1) 岩盤性状と比抵抗の関係について

地下水で飽和された岩盤では、比抵抗は風化構造に従い、低比抵抗から高比抵抗に変化する。一方で、地下水位以浅に分布する D~CL 級岩盤や未固結堆積物は高比抵抗を示す。比抵抗から表層付近の岩盤性状を推定する場合は、地表踏査で露頭分布や表流水の有無等も併せて確認することが望ましい。

(2) 岩種と比抵抗の関係について

地下水位以深に分布する新鮮な岩盤は高比抵抗を呈する可能性が高いが、泥岩及び泥質岩優勢層では低比抵抗を呈した。地下深部で低比抵抗を呈す箇所における評価にはボーリング調査結果と合わせた確認が必須である。

(3) 地下水位分布と比抵抗の関係について

掘削中に確認した水位に安定性が認められた深度の比抵抗は $100 \Omega \cdot \text{m}$ 付近を示した。本調査における地下水位の比抵抗は地質や岩盤性状から受ける影響が小さく、地下水位自体の分布に支配されるものと考えられる。

(4) 本調査結果から推定される岩盤性状・地下水分布

(1)～(3)を踏まえ地質、岩盤状況、地下水位を評価し作成した地質断面図を図-8、図-9に示す。

空中電磁探査で得られる比抵抗は様々な要因で変化する。必要に応じて適切な調査を合わせて実施し、総合的に検討することで、精度の高い広域の地質情報の取得が期待できる。

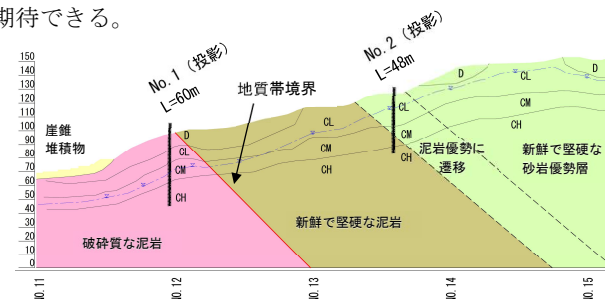


図-8 地質断面図(調査地 A)

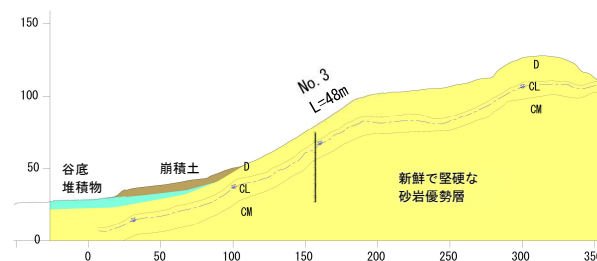


図-9 地質断面図(調査地B)

《引用·参考文献》

- 1) 比抵抗密度探査に基づく地盤評価に関する調査・研究委員会・講習・研究検討会テキスト。(公社)土木学会関西支部. 1997, p. 107
- 2) 新版 物理探査の適用の手引き-土木物理探査マニュアル2008-. (公社)物理探査学会. 2008-10-21, p. 261

「最新の計測技術」を活用した擁壁変状調査の試み

株式会社みすず総合コンサルタント
上田市丸子地域建設課

○中澤 潤一，阿部 健
田中 真道

1. はじめに

擁壁の変状調査は、擁壁に生じている損傷や劣化、変形などの異常を把握し、安全性や機能性を評価するための重要な作業である。従来、人の目視による調査を行いスケッチと現地状況写真を整理し、報告書としてとりまとめていた。その際の課題を以下に示す。

問題点 解決策

課題1：現地調査に時間がかかる。⇒「省力化」

課題2：精度が劣る。⇒「計測機器活用」

課題3：技術力のばらつき。⇒「マニュアル化」

上記問題点を解消するため、試みた事例を紹介する。

2. 従来の擁壁変状調査

以下に、従来の擁壁変状調査を示す。

(1) 外業(地表踏査)

現地を歩き、目視により変状の位置、規模の確認を行う。画板に図面を携帯し、スケッチと写真撮影方向を記載しながら調査を行う。

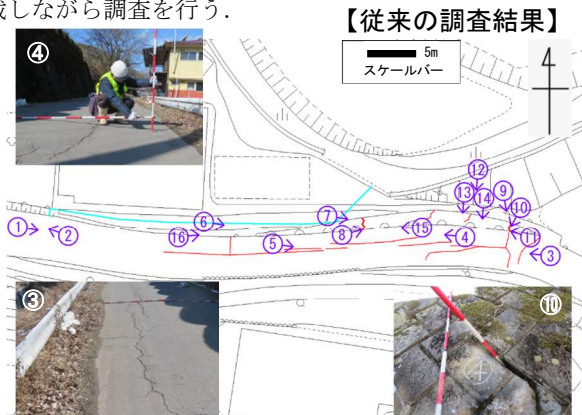


図-1 踏査結果平面図

(2) 内業(写真整理, 平面図, 断面図作成)

地表踏査結果のとりまとめを行う。写真を整理し、図-1 踏査結果平面図及び図-2 道路変状の機構断面図などを作成し報告書として仕上げる。

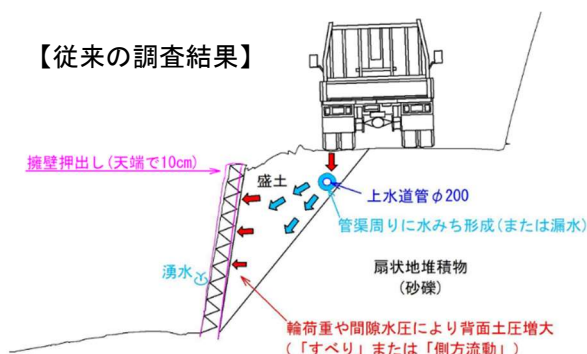


図-2 道路変状の機構断面図

3. 最新の計測技術を活用した擁壁変状調査

今回活用した計測機器とその特徴を表-1に示す。

表-1 各計測技術の特徴

計測技術	特 徴
スラムレーザー計測	高精度であるが、やや視覚的表現にとる(亀裂など不明瞭)。
LiDAR スキャナー計測	やや精度が劣るが、視覚的表現に優れる(亀裂など明瞭にわかる)。
赤外線カメラ撮影	路面、壁面の温度差から異常個所を抽出することができる。

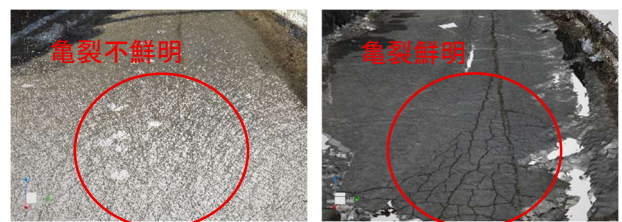


図-3 左 スラムレーザー 右 LiDAR スキャナー

(1) スラムレーザー計測

スラムレーザー計測状況を以下に示す。使用した機器は、BLK2G0 である。



写真-1 スラムレーザー計測状況

(2) LiDAR スキャナー計測

LiDAR スキャナー計測状況を以下に示す。使用した機器は、iPhone 14 Pro と iPad Pro (第4世代) である。



写真-2 LiDAR スキャナー計測状況

(3) 赤外線カメラ撮影

赤外線カメラ撮影状況を以下に示す. 使用した機器は,
PD8-AW / R500EX-PRO である.



写真-3 赤外線カメラ撮影状況

4. 調査結果の整理と解析

(1) 統合モデル作成

スラムレーザー計測結果と LiDAR 計測結果を統合した三次元モデルに、現地踏査結果で見られた変状を引き出すことで以下に示す踏査結果統合モデルを作成しマニュアル化した。計測する手順だけ覚えれば誰でも同精度で計測することができ、図-4に示す踏査結果統合モデルを作成することができる。（課題3対応「マニュアル化」）

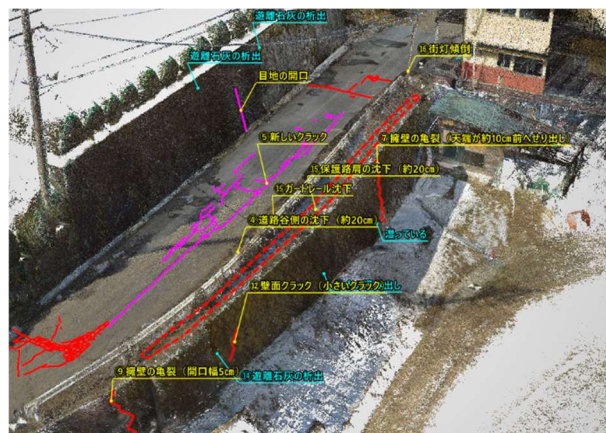


図-4 踏査結果統合モデル

(2) 路面排水経路の特定

スラムレーザー計測結果の標高データ（点群）から段
彩図を作成し、表流水が流入する箇所を特定した。

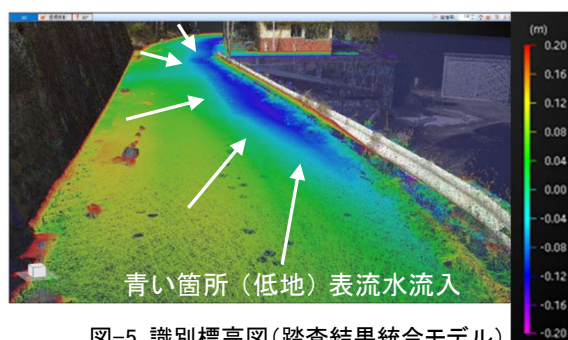


図-5 識別標高図(踏査結果統合モデル)

(3) 埋設管の経路の推定

赤外線カメラ撮影結果から、温泉管が埋設されていると推定した。

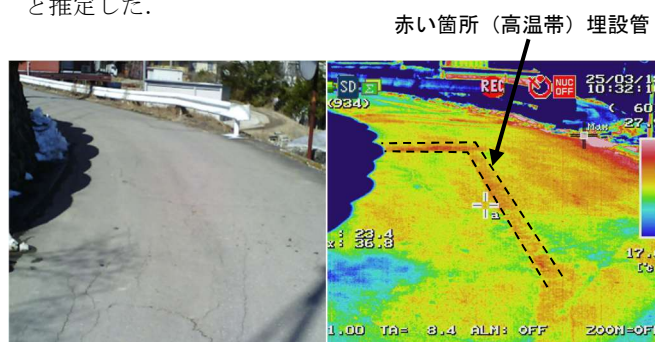


写真-4 赤外線カメラ撮影

(4) 変状発生箇所のトレース

LiDAR 計測結果から、クラック発生箇所をトレースし変状の分布状況を三次元的に把握した。通常現地で計測してスケッチを行うと、本現場では2時間程度時間を要してしまうが、今回は統合モデルからクラックを抽出しトレースしたことで、正確かつ短時間（所要時間30分）で変状図を作成することができた。

(課題1「省力化」、課題2「計測機器活用」対応)



図-6 クラックのトレース(踏査結果統合モデル)

5. まとめ

人手不足が叫ばれるなか、計測・測量・AI 技術の発達が目まぐるしい昨今、私たちが従事している建設コンサルタント業界で求めているものは、「省力化」、「計測機器活用」、「マニュアル化」であると考えた。そこで社内で保有する最新の計測機器及び解析ソフトを活用し統合モデルを作成し、課題1〜3で挙げた事項を解消することができたと考える。この「最新の計測技術」を活用した擁壁変状調査は、作業手順さえ覚えてしまえば、誰でも同じ精度の成果を作成することができ、さらに品質の高いサービスを発注者や関係者に提供できる。

地質調査業務で基本となる地表踏査。最新の計測技術を活用することで、「省力化」に繋がり、変状が発生している原因を解明するための一助となる。新しい計測技術を活用する際は、計測機器の欠点を理解し、それを補える様に他の計測機器を組み合わせしていく必要がある。