

UAV 撮影による赤外線熱画像を利用した空中地温探査の試み

(株)みすず総合コンサルタント ○阿部 健, 石関 剛史
長野県長野建設事務所 高橋 甚一

1. はじめに

地温探査は、地下水の流動経路（水みち）の把握を目的とするもので、例えば、地すべり対策において地下水排除工を水みちに沿って配置することにより経済的かつ効果的な計画とするなど、利用価値の高い調査である。

既往の手法として「1m 深地温探査¹⁾」があるが、測定が簡便で大掛かりな機材も必要としないため汎用性が高い手法である。一方で、作業時間や人的労力、土地への立入り許可、安全管理などの課題が考えられる。

本論では、1m 深地温探査の課題を解消するため UAV に搭載した赤外線カメラにより上空から熱画像を撮影し、地表面温度分布から同様の原理で地下水流動経路の検出を試みた。地すべり斜面を対象とした計測結果を示し、空中地温探査の実用性と課題を考察する。なお、結果の妥当性は、上空からの熱画像撮影（以降“空中探査”と呼ぶ）と同時期に 1m 深地温探査（以降“地上探査”と呼ぶ）を実施し、両者を比較することにより検証する。

2. 対象地の概要

探査実験の対象地は、長野県長野建設事務所所管の地すべり防止区域「三ツ出地区」で、長野市中心部の北方約 6km に位置する。

地すべりブロックは幅約 90m、長さ約 160m の南西向き凹状緩斜面を呈する。下部は緩斜面で安定しているのに対して、上部は急斜面が残り、2021 年 7 月の降雨（14mm/時間）により局所的な表層崩壊が発生している。（図-1）崩壊土砂は泥土化して地すべり下部まで流出しており、多量の地下水が崩壊箇所に入射したことがうかがえる。

崩壊発生はブロック全体の不安定化を助長するもので、対策上、地下水流入経路の把握が重要と考えた。

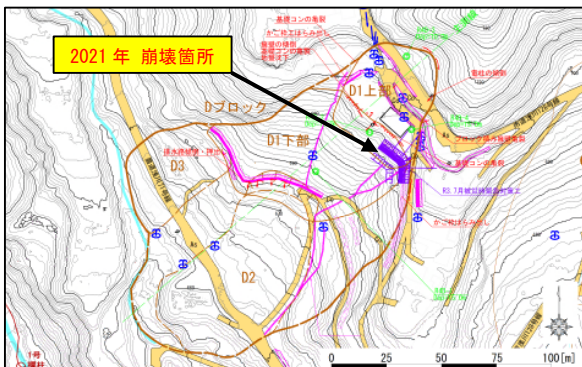


図-1 探査対象(三ツ出地すべり D ブロック)

3. 探査方法

(1) 地温探査の原理

地温探査は、地下水温と地上温度との差に着目し、地

下水分布箇所直上の地温が周囲と比べて高温または低温を示すものとして温度分布から地下水流動経路を推定するものである。地下水温と地上温度との差が大きくなる夏季あるいは冬季の探査が有効となる。

なお、結果検証の基準となる地上探査は、地盤に挿入した深さ 1m の孔に温度計を挿入し地中温度を計測するもので、測点は 5~20m 間隔で格子状配置するのが一般的であり、今回は地すべり横断方向に 10m 間隔、縦断方向に 20m 間隔にて配置した。

(2) 空中探査の使用機材

赤外線カメラは 0.1 度以上の温度分解能の確保を目指し、日本アビオニクス(株)製 Infrec R500EX-Pro (温度分解能 0.05 度:測定温度範囲 摂氏 -20~+60 度設定時)を採用した。これを UAV 下部に取り付けるが、機体の揺れに伴う撮影ブレ防止のためジンバルを使用した(図-2)。なお、UAV は搭載重量、飛行速度、安定性、耐風速性、連続飛行時間、耐水性(雨天飛行)等の諸性能を満足することを条件とし、(株)プロドローン製 X-F1 を選定した。



図-2 空中探査システム概要

(3) 撮影条件と飛行計画

熱画像は、デジタル写真と同様にドットの集合で表現されるため、公共測量における「作業規定の準則 第 3 章 UAV 写真測量²⁾」を参考とした。

① 撮影条件

解像度の設定は地上探査の測点間隔 10~20m 相当以上の点密度が条件となる。カメラの性能上、この条件は十分にクリアできるが、過度に高解像度で撮影した場合、データ量が膨大となり解析作業の負担となるため、一定の解像度を確保しつつ解析に無理のない設定が望ましい。適正値については今後の課題であるが、今回は点間隔 130mm の地上画素数を目指し、カメラ画素数 640×480、撮影距離(飛行高度) 149m とした。(図-3)

② 飛行計画

写真 1 枚の画角に全域が納まらないため、分割撮影した画像を張り合わせてオルソ画像を作成した。オルソ画像の作成にあたっては、作業規定の準則²⁾に示される同一

路線のオーバーラップ率80%，路線どうしのサイドラップ率60%となるように路線間隔12.5m，飛行速度4m/秒，シャッターインターバル3秒にて自動航行させた。(図-3)



図-3 空中地温探査 飛行計画図

(4) 計測データの整理

撮影した熱画像は各ドットについて3成分 (X, Y, Z) の数値データ化した。各成分は X, Y が公共座標, Z は温度値とした。温度値の数値化は、カラー画像の RGB を 256階調に変換することで求めている。

なお、1m 深地温探査では計測温度値に以下の補正を加えることとしている。

① 測温体補正

使用する複数の温度計毎の固有誤差を補正。

② 深度補正

測定深度 1m と異なる深度で測定した場合の補正。

③ 経日変化補正

気温の日変化や時間変化に合わせた補正。

④ 地形・地質補正

調査範囲が広域にわたる場合の場所による補正。

⑤ 地況補正

各測点の植生や日照環境などの違いを補正。

上記のうち、空中探査では性質上①②は不要で、③も撮影時間が約15分と短時間であるため必要としない。④については、今回は計測範囲が広域でなく同一の地質帯内であることから行わず、⑤のみ実施した。

4. 探査結果

空中探査と地上探査についてそれぞれ作成した地温分布図(段彩図)を図-4に示す。探査は2022年12月に実施したもので、理論上、冬季のため地下水流動域は高温を示す赤色系の色彩で表現されることとなる。

まず、検証の基準とする地上探査結果について、現地状況と照らし合わせれば、2021年7月に発生した崩壊箇所を中心とした上部斜面に地下水の存在が想定される高温域が強く表れており、地下水と崩壊発生の関連を裏付けている。また、下部斜面の高温域に沿って湧水箇所が分布するなど、現地状況との整合が認められる。

次に、地上探査と空中探査の結果を比較すれば、検出された高温域のうち、桃色線で囲った箇所で両者に一致

が見られる。また、表層崩壊箇所は空中探査においても強い高温域が検出されているなど、地上探査と空中探査とで概ね整合する結果が得られた。

ただし、局所的(黄色線で囲った箇所)には、整合しない箇所もあり、原因の精査が必要となる。

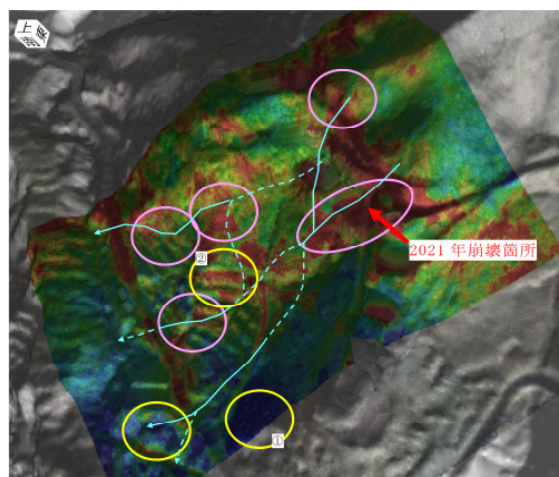
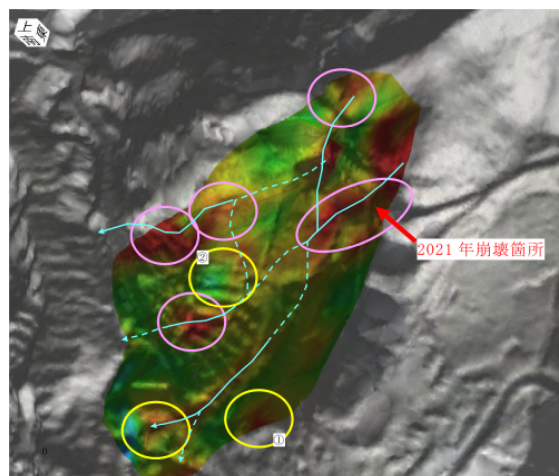


図-4 地温分布図(上:地上探査, 下:空中探査)

5. まとめ

地上探査と空中探査の結果は多くの部分で良い一致が見られ、空中探査の有効性として評価できる。ただし、一部に相反する結果も得られており、その原因が地表面と1m 深との環境の違いによるものか、測点密度の差によるものか、あるいはその両方または別の要素によるものかを究明し、最適な測定条件と解析方法を検討することが今後の課題となる。

空中探査は、測定時間が極めて短時間で労力も大幅に軽減できること、レーザー測量並みの測点密度が確保できること、いくつかのデータ補正が省略できることなど多くの利点があり、今後の実用化に期待が持たれる。

《引用・参考文献》

- 1) 竹内篤雄 (2013) : 地下水調査法 1m 深地温探査, 古今書院.
- 2) 国土交通省告示 (全部改正2008, 一部改正2023) : 作業規定の準則.