

熱赤外線サーモグラフィによる斜面調査

山内 政也

熱赤外線サーモグラフィとは、赤外線を利用して対象物の温度を計測する手法である。非接触かつリアルタイムで計測を行えるため、様々な分野でモニタリングなどに利用されている。本稿では、計測原理や測定法などの概要と、斜面調査などへの適用事例を紹介する。岩盤斜面では、落石の危険につながる浮きを検出し、吹付のり面では背面空洞を検出した。また、併せて、文化財への適用事例も紹介する。

キーワード：熱赤外線、岩盤斜面、き裂、吹付のり面、空洞

1. はじめに

熱赤外線サーモグラフィとは、対象物から出ている赤外線放射エネルギーを検出し、それを温度（見かけ温度）に変換して表示する手法である。この特徴は、大きくは以下のようなものである。

- ①面的な温度分布状況を可視画像として表現できること
- ②非接触での測定が可能で、対象物から離れたところからも温度を把握できること
- ③リアルタイムでの温度計測や、可視画像との比較（重ねあわせ）が可能であること

非接触で測定できることから、人が近付くことができない場所や危険があつて触れることができないもの、動いている対象物なども計測が可能である。また、リアルタイムでの計測が行えるため、短時間の時間変化を計測したり、瞬間的な温度を捉えたりできるメリットがある。

このような特徴やメリットを活かし、電子部品やエンジンなどの放熱分布調査や、高圧設備や断熱材の診断、体温検査による入出国検査（SARS 検査）、火山活動の調査や災害調査など、多くの分野で利用されている。

斜面調査に関しては、岩盤斜面や吹付のり面などにおいて、その内部状況などが表面の温度に反映されるケースがあり、そのような場合に、熱赤外線サーモグラフィによる調査が行われている。本稿では、熱赤外線サーモグラフィの原理や測定方法に関して改めて概説するとともに、斜面などへの適用事例を紹介する。

2. 熱赤外線サーモグラフィ

(1) 概要

赤外線は、可視光やラジオ・携帯電話の電波と同じ電磁波の一種である。電磁波は、波長によって名前が付けられており、波長がおよそ $0.7\mu\text{m}$ から 1mm のものを赤外線と呼ぶ。可視光線の赤色に次いで波長が長いことから赤外線と呼ばれている。

物質は、その固有の温度に応じた量の赤外線を放射している。そのため、赤外線を計測することでその物質の温度を知ることができる。熱赤外線サーモグラフィとは、専用の装置により赤外線を検出し、画像化する装置やその手法のことを指す。

(2) 温度と赤外線の関係

地球上のあらゆる物体は、熱エネルギーを持っている。熱エネルギーとは、原子や分子の運動エネルギーの総称であり、熱エネルギーの異なった物質間を高い方から低い方へ移動する。温度の低い物体は原子などの動きが不活発になるため熱エネルギーが低下し、逆に、温度の高い物体はその動きが活発になり熱エネルギーも増大する。つまり、物体の熱エネルギーの変化を測定することで、温度変化を把握することができる。

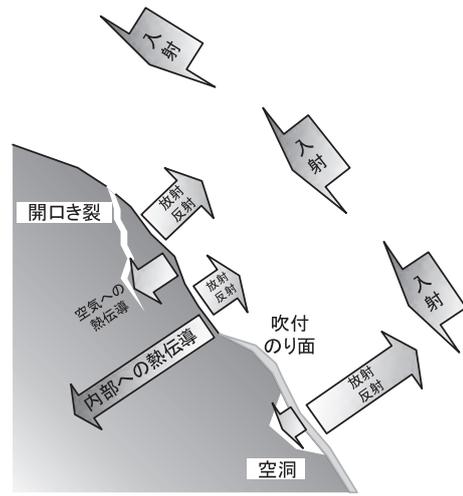
あらゆる光を吸収し放射する物体を“完全黒体”とよび、放出する赤外線の量は、光線の波長と温度の関係によって決まる（プランクの法則）。温度が高いほど、波長が短く放射量は大きくなる。つまり、赤外線の放射量を測定すると、完全黒体の温度がわかる。実際の物体は完全黒体に比べて赤外線の放射量は小さくなる傾向にある。完全黒体と実際の物体の放射量の比

を放射率と呼び、通常の物体の放射率は1未満となる。

(3) 測定原理

赤外線カメラは、可視光よりも波長の長い赤外線に感度を持ったデジタルカメラ（ビデオカメラ）のようなもので、赤外線の放射強度を可視化する。多くの赤外線カメラでは、コスト面でメリットの大きいマイクロボロメータ型検出器が使用されている。マイクロボロメータ型検出器は、放射エネルギーによるバルク材の状態変化に応答するもので、冷却の必要が無いため比較的lowコストでカメラの小型化などが可能である。一方、より高い感度が求められる場合には、赤外光による光電効果を用いる量子型検出器が用いられる。量子型検出器は、極低温に冷却すれば熱雑音がなくなり、赤外線に対し極めて高感度かつ温度変化に迅速に反応する。

なお、通常の対象物は完全黒体ではないため、得られた赤外線強度からその物体の温度を求めるためには、放射率によって補正する必要がある。また、測定される値には大気による吸収などの影響も含まれている。そのため、測定方法や対象物などに応じて、校正を行う（適切な放射エネルギーから温度への変換式を使用する）ことが重要となる。



図一 斜面における熱伝導率の違い

- ①岩盤斜面におけるき裂の発達
- ②斜面の緩みや浮石
- ③風化
- ④崩壊の誘因となる地下水の存在
- ⑤地質境界部付近の脆弱性
- ⑥吹付けコンクリートの劣化やき裂
- ⑦吹付けコンクリート背面の空洞（浮き）

これらの事象と表面温度の関係を考えて、表一に示すような温度変化との対応が想定される。

3. 斜面調査などへの適用

(1) 適用の考え方

これまで述べてきたように、熱赤外線サーモグラフィは、あくまでも物体の表面温度を計測するものである。一方、斜面問題を考えた場合には、以下のような事項が斜面崩壊などのリスクに関連した事象となる（図一1）。

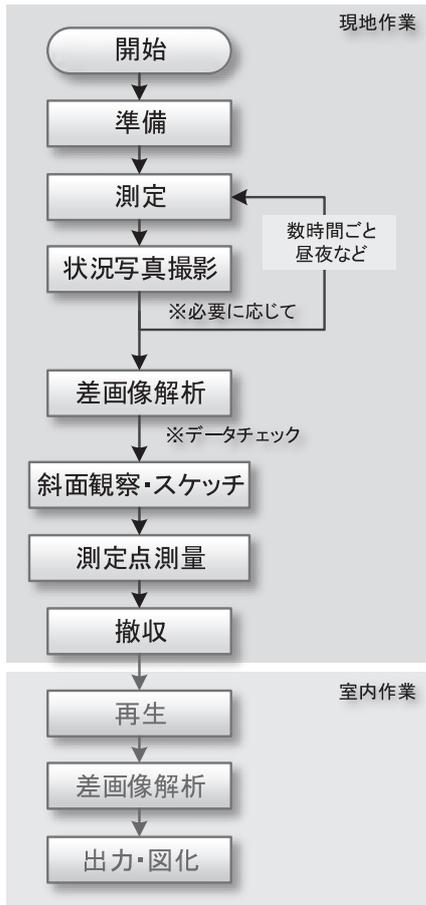
(2) 調査方法

図二には、熱赤外線サーモグラフィによる調査手順の一例を示す。多くの調査では、表一に示したような事象を温度変化の量として捉えるため、日中と夜間の温度変化を測定し、その差分（差画像）を用いて検討を行う。

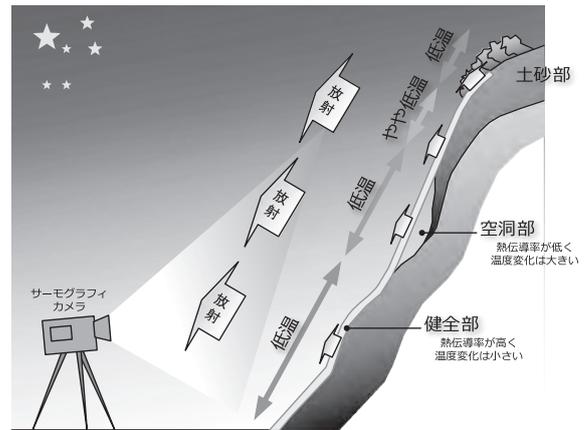
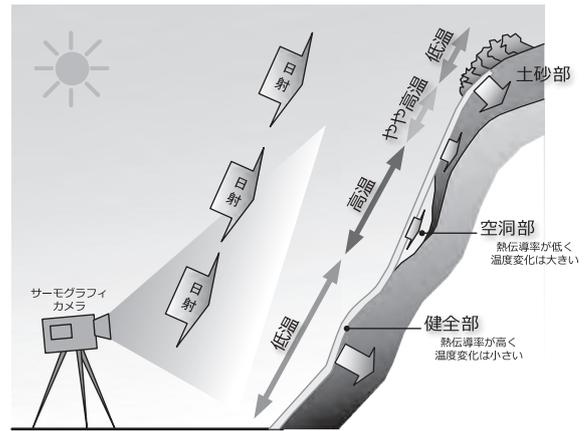
また、図二にあるように、可視画像による写真撮影や、観察・スケッチなどを併せて実施し、検討の

表一 赤外線サーモグラフィで検出可能性のある斜面上の事象

斜面上の事象	温度に着目した場合のポイント
き裂（開口き裂）	空気は断熱材としての効果があるため、開口き裂付近では温度変化が大きくなりやすい。例えば、開口部の周辺で線状の温度変化大の領域として検出される場合が多い。また、表面近くの浅いところで、表面に平行に近い走向でき裂が走っている場合には、温度変化が大きい領域が、広がりをもって検出される。
緩みや浮石	岩の緩んでいる部分は空隙率が大きいため、温度変化が大きい領域として検出される可能性がある。浮石についても開口き裂が背後に存在すれば熱の伝導が遮断されるため、温度変化が大きくなる可能性がある。
風化	空隙率が大きいため、温度変化大の領域として検出される可能性がある。
湿潤部	含水比が大きいため熱容量も大きく、温度変化が小さい領域として検出されやすい。また、地下水の湧水がある場合には、季節を問わず一定の温度（地下水の温度）が計測されるケースもある。
地質境界	岩種による熱容量の違いが大きければ検出される。
吹付の浮きや背面空洞	開口き裂の場合と同様、空洞の断熱効果により、浮きや背面空洞がある箇所では、温度変化が大きくなりやすい。



図一 2 赤外線サーモグラフィ調査の調査手順



図一 3 赤外線サーモグラフィの測定イメージ

ための資料とする。最近では、可視画像と赤外面像を同時に撮影できる機器も多く販売されている。

図一 3 には、測定イメージを示す。

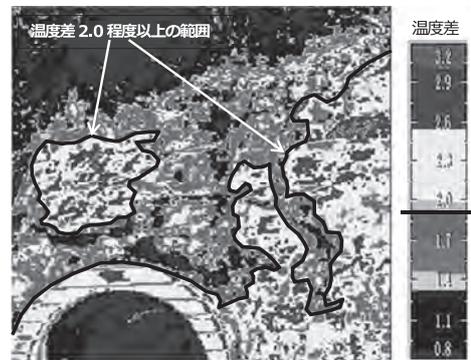
(3) 調査事例

以下に、調査事例を示す。

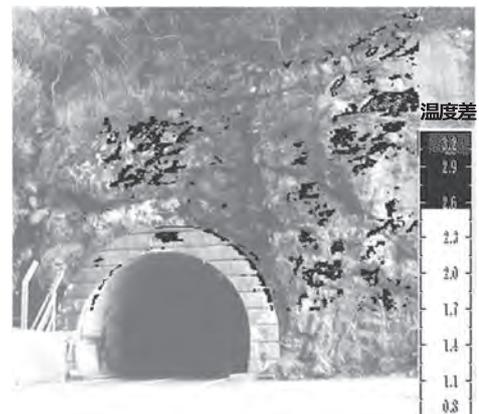
いずれも、地形状況などから、近接での調査には困難が伴う斜面の調査であり、離れたところから、非接触で面的な調査ができるという、熱赤外線サーモグラフィのメリットを活かした事例である。なお、3つ目の事例は、対象が文化財であり、保存の観点からも非接触の調査が求められ、熱赤外線サーモグラフィを適用した事例である。

(a) 岩盤斜面における事例

図一 4 は、トンネル坑口周辺の岩盤斜面に対して状況を調査した事例である。この結果(差画像)から、温度差の大きい部分を、表層に浮きが存在する箇所として抽出した。可視画像とあわせると、図一 5 のような結果となった。図に示した領域が昼夜の温度差の大きな箇所であり、浮きに相当するものと判定された。浮きは、落石の危険の結びつく状況であり、道路のり面やトンネル坑口部などの調査に有効である。



図一 4 岩盤斜面における調査事例 (差画像)



図一 5 岩盤斜面における調査事例 (温度差の大きな範囲と可視画像の重ね合わせ)

(b) 吹付のり面における調査事例

図一6は、吹付のり面における事例である。写真一1に示すような箇所において調査を実施したところ、温度差の大きな範囲を抽出することができた。この結果から、温度差の大きな箇所には、吹付コンクリート背面に空洞があると推定した。抽出した箇所においてコア削孔による調査を実施した結果、実際に空洞が確認された。このようなのり面では、対象範囲全体について近接での調査をするには、大きな仮設が必要であるなど課題が多い。そのため、熱赤外線サーモグラフィを使用してのり面全体の状況を把握することで、詳細調査箇所や対策範囲を絞り込むことができ、効率の良い対応が可能となる。



図一6 吹付のり面における事例



写真一1 吹付のり面における事例の現地状況

(c) 文化財調査での事例

熱赤外線サーモグラフィは、文化財調査にも使用されている。図一7は、磨崖仏（岩盤に直接彫られた仏像）の表面の風化度を、熱赤外線サーモグラフィによって調査した事例である。調査の結果、磨崖仏の胸の付近に温度変化の大きい箇所が見られ、風化や劣化が進んでいることが推定された。この結果に基づいて石仏の表面を調査したところ、表層剥離が進んでいることが確認され、その後、保存修復工事が行われた。文化財の場合、対象物に損傷を与えずに保存するため、非接触での調査が求められることが多い。そのため、岩盤や斜面に直接構築された遺跡などについては、熱赤外線サーモグラフィが有効な調査手法の一つとなる。

4. おわりに

本稿では、熱赤外線サーモグラフィによる調査について概説した。インフラの老朽化などが叫ばれる中、斜面においては、構造物の劣化や異常気象などによる災害の多発などが懸念される。近接での調査が難しい斜面では、このような非接触の調査はたいへん有効である。最近では、ドローンに搭載できるような小型の赤外線カメラも開発されており、今後、活用の範囲は広がるものと予想される。

JICMA

[筆者紹介]
山内 政也 (やまうち まさや)
応用地質株式会社
東京支社 技術部
グループマネージャー



図一7 文化財（石仏）における事例