

(6) 赤外線放射温度計を用いた岩盤斜面調査技術に関する基礎研究

株式会社フジタ 技術研究所 正 員 ○村山秀幸

“ “ “ 門田俊一

金沢工業大学 “ 川村國夫

BASIC STUDY ON SURVEY TECHNOLOGY OF ROCK SLOPE BY USING THERMAL INFRARED SCANNING SYSTEM

Hideyuki MURAYAMA, Shunichi KADOTA ; Technical research Institute of Fujita Corp.
Kunio KAWAMURA ; Kanazawa Institute of Technology

Abstract

In general, there are many methods to survey rock mass. (i.e. geological survey, boring, geophysical exploration) Recently, a new rock survey technology using electromagnetic wave is focused on. Satellite remote sensing is the most popular way to use electromagnetic wave. Remote sensing is very useful for large scale survey, but not good at small scale. Thermal infrared scanning system can measure surface temperature of material from a distance on land.

This paper is to examine the applicability of thermal infrared scanning system for rock slope survey. At first, authors measure the surface emissivity of three kinds of rock specimens and measure the water flow in cracks of sandstone block in a laboratory by using thermal infrared scanning system. Secondly, we apply to survey rock slope within an unsteady rock block in field.

1. はじめに

岩盤の調査は、従来から調査目的により現地地質踏査を始めとしてボーリング調査、物理探査など種々の手法により行われている。これら調査法は、岩盤の性状を何らかの物理量に置き換え岩盤を定性的・定量的に把握し工学的に重要な指針を与えようとするものである。最近の材料開発技術やコンピュータ技術の発展はめざましく、地盤調査技術にもこれらの技術を応用した手法が用いられるようになってきている。特にこの中で電磁波を用いる探査法が注目されつつある。電磁波を用いた探査法としては、衛星などを利用したリモートセンシング手法が最も広く行われている。しかし、リモートセンシング手法は、探査範囲が広大で土地利用などの広範囲にわたる調査には有効であるが、狭い範囲の探査には向かない。岩盤斜面の崩落・剥離などの破壊現象は、突発的に起こるケースが多く、破壊現象の予知や危険度を把握することは困難な場合が多い。赤外線放射温度計（サーモグラフィー）は、赤外線波長領域を利用したセンサであり、建物の検査診断（非破壊検査）などに利用されつつある。本報告は、岩盤斜面の危険度調査に赤外線放射温度計を用いる手法についてその適用性を検討した結果を述べる。まず、赤外線放射温度計の特徴について述べ、次に、室内で行った基礎実験および、野外での測定例について報告する。

2. 赤外線を利用した温度測定技術

2-1 測定理論¹⁾ および測定事例

絶対零度以上の物質は、ある波長のエネルギーを放射している。ステファン・ボルツマンの法則によれば、与えられた放射エネルギーを完全に吸収する理想物体（黒体）において単位面積当たりに毎秒放射するエネルギー E は、その黒体の絶対温度の 4 乗に比例する。 $E = \sigma T^4$ ($\sigma: 5.67 \times 10^{-8} \text{ Jm}^{-2} \text{ sdeg}^{-4}$)。赤外線放射温度計は、常温における物体の放射エネルギーが赤外線波長領域にあることを利用して、この放射エネルギーを検知し物質の温度分布を測定する。最近、赤外線センサを建物の検査診断やモルタル吹き付け法面背後の空洞調査²⁾ などに適用した事例が多く見られるようになってた。これらは、物質の欠陥部や劣化部を表面の温度分布異常により判定しようとする試みであり、岩盤の劣化部の評価や、岩種・岩質区分などに適用できる可能性がある。しかし、地盤調査に赤外線放射温度計を適用した報告は少く、トンネル切羽の温度分布と内空変位の関係³⁾、高温坑道での調査⁴⁾、斜面斜面の湧水調査⁵⁾ などである。

2-2 赤外線放射温度計の特徴

赤外線放射温度計は、非接触に表面の温度分布を把握できることを特徴とする。今回使用した赤外線放射温度計の仕様を表-1に、測定距離と測定範囲・分解能の関係を表-2に示す。ランドサットに搭載されている MSS センサの熱赤外線波長領域（バンド 6；10.4～12.5 μm ）の地上分解能が 120m であることと比較すると、地上で赤外線放射温度計を用いる方が精度的にも取扱いの面でも有利である。しかし、リモートセンシングで大気補正を行うのと同様に、得られる熱画像データには、種々のノイズ例えば、伝搬経路での吸収散乱、背景雑音などが含まれている。また、赤外線センサで物質の真の温度を測定する場合、物質固有の放射率 ϵ だけ補正する必要がある。放射率とは、黒体を 1 とした放射効率であり、一般の物質は 1 より低い値となる。この放射率は、表面の凹凸や、形状、温度、含水状態などによって変化するので厳密に放射率を測定し、真の温度を求めることは困難である。

表-1 赤外線放射温度計の仕様

温度測定範囲	-50～+2000℃
最小検知温度差	0.1℃
走査時間	0.5、1、2秒
測定視野	水平30°×垂直25°
焦点距離(λ - L)	15cm～無限遠(1～5倍)
水平解像度	30.0本以上
走査線数	232本
検出器	Cd-Hg-Te液体窒素冷却型
使用赤外線波長	8～13 μm
測定精度	±0.5%

表-2 測定距離と測定範囲・分解能(λ - L 1倍)

測定距離m	1.0	5.0	10.0	20.0
測定範囲(水平)cm	59	273	541	1076
〃(垂直)cm	47	224	446	889
分解能mm	1.8	7.8	15.5	30.7

3. 室内実験

3-1 実験目的・方法

赤外線放射温度計により、岩石の相対的な放射率と岩石の節理内の水の状態を把握する目的で岩石ブロックを用いて実験を行った。図-1に実験状況を、図-2に実験装置図を示す。実験は、赤外線カメラを岩石ブロック正面から1.0mに水平に設置し、カメラ背後の1.5mに写真撮影用フラットライト2個を供試体中心から10°の角度に設置した。また、供試体表面付近に湿温度計を設置し温度変化を測定した。図-2の実験装置は、縦横300mm 幅75mmの岩石を積み上げることができ、上部に定量ポンプからチューブにて送水を行い、下部に排水機構を有している。また、実験室はエアコンによりほぼ一定温度に保った。測定した熱画像は、コントローラを介してマイコンに保存し、減算処理を行い差画像として評価した。これは、ノイズや放射率の影響を除去するためである。

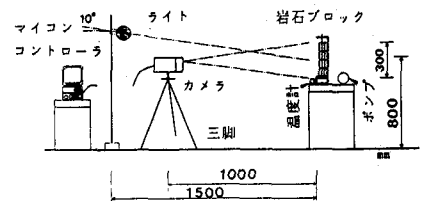


図-1 実験状況

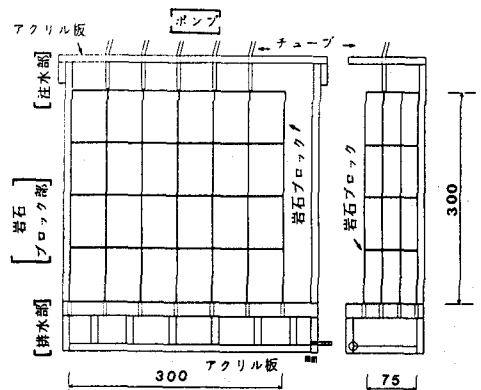


図-2 実験装置

3-2 相対的放射率の測定

供試体として、稲田花崗岩、来待砂岩、荻野凝灰岩を用いた。供試体は、平面研削盤で $200 \times 80 \times 60$ mmに整形した。また、表面が風化し暗褐色を呈する荻野凝灰岩も同様に整形した。図-3に示す様に供試体表面上部に黒色ペイント $\epsilon = 0.98$ を塗り、実験装置内に花崗岩、砂岩、凝灰岩、風化凝灰岩の順に列べ、1日以上放置し熱平衡状態に至らせた。熱平衡に達した供試体で、温度差が生じた場合 $\epsilon = 0.98$ の黒色ペイント部分の温度を測定し、その温度と一致するように放射率補正を行えばその岩石の相対的な放射率を知ることができる。室温で熱平衡状態に達した岩石では、温度差をほとんど確認できなかった。ライトによって強制的に熱エネルギーを与えた。熱画像の測定は、放射率を1とし、給熱開始直前から行いほぼ定常状態に達した時点で放射率の測定を行った。図-3のA～D点($\epsilon = 0.98$)とa～d点の経過時間に対する温度上昇を図-4に示す。経過時間50分の熱画像と給熱前の熱画像にて減算処理を行なった差画像を図-5に示す。図によれば温度上昇率は、凝灰岩、砂岩、花崗岩の順に高く、風化凝灰岩と新鮮な凝灰岩ではほとんど差がない。放射率の測定は、各岩石毎に図-3の花崗岩に示した3点と同様の点にて行い、その平均値を算出した。表-3放射率測定結果を示した。測定結果はややばらつきが花崗岩、砂岩、凝灰岩、風化凝灰岩の順で高い。つまり、花崗岩は放射率が高いので温度変化が少なく、逆に凝灰岩は放射率が低いので温度上昇が高いと考えられる。また、図-4にピーク時の接触温度(K(ca)熱電対温度計使用)を測定した結果を示した。この様に

表-3 放射率測定結果

	放射率(ϵ)
花崗岩	0.962~0.965
砂岩	0.966~0.968
凝灰岩	0.953~0.959
風化凝灰岩	0.947~0.958

放射率1で測定した温度と接触温度とは一致しない。接触温度と赤外線放射温度計の値を一致させるには、放射率が1以上必要であり矛盾が生じる。以上の結果より、相対的な岩石の放射率は、岩種により多少異なるので地質区分などに適用できる可能性はある。しかし、その相違は非常に微小であり熱エネルギーを与えて強調しないとその差異を確認することは難しいと考えられる。また、今回測定した岩石の放射率はいずれも0.9以上であり地盤の放射率は、一般に高いことが予想される。

3-3 節理内の水の状態の測定

供試体は、来待砂岩であり、平面研削盤で $75 \times 50 \times 25$ mmに整形した直方体ブロックを図-6に示すように縦横300mm 幅75mmに実験装置内で積み上げた。供試体は、自然含水状態でブロック積み上げ後1日以上放置し熱平衡状態に至らせた。送水には、定量ポンプを用い図-6に示

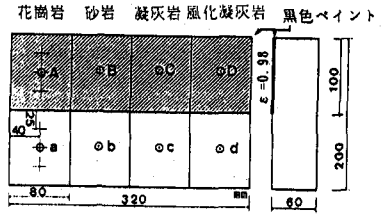


図-3 放射率測定状況

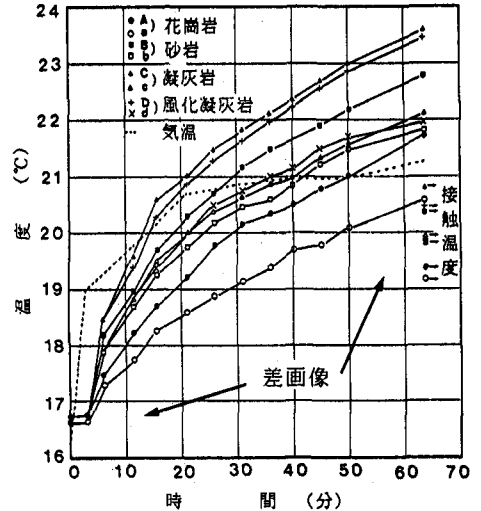


図-4 経過時間-温度図

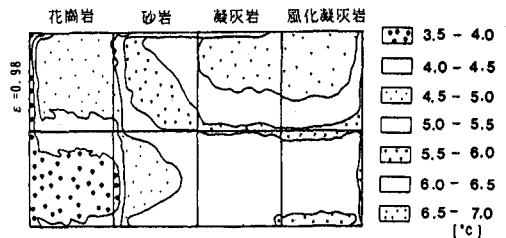


図-5 差画像

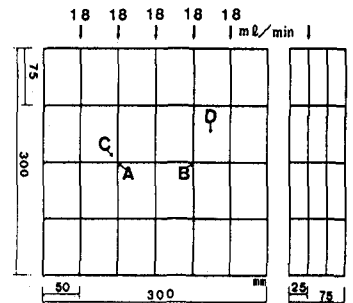


図-6 ブロック積み上げ状況

した5箇所から各々18ml/minを送水した。温度状態は、送水後約1時間ではほぼ定常状態に達するので、約1時間後にライトで熱エネルギーを与えさらに、定常状態時達した時点でライトを消し温度を下降させた。熱画像の測定は放射率を1とし、送水直前より開始した。水は井戸水を使用し、水温変化を1℃以下に抑えた。実験時の水温は17～18℃である。

写真-1は、送水後定常状態に達した状況であり節理面が水みちとなっていることが明瞭に分かる。図-6に示した節理交点A、B点、節理交点近傍点C点、岩石ブロックで水の浸透がないD点の経過時間に対する温度変化を図-7に示す。図-8に送水開始直前の熱画像と給熱直前の熱画像において減算処理した差画像を示し、図-9に温度降下直前の熱画像と給熱直前の熱画像において減算処理した差画像示した。図-7によれば全

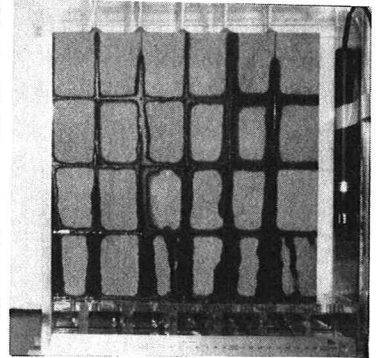


写真-1 定常状態における状態

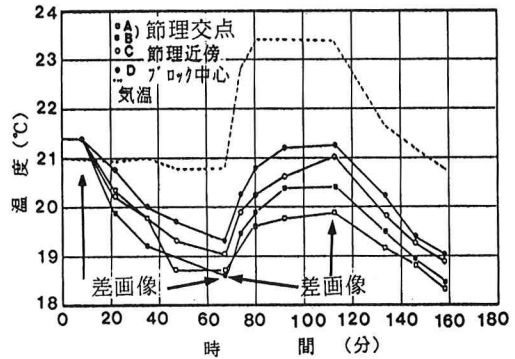


図-7 経過時間-温度図

ての点が送水後温度低下しているが、節理面が水みちとなる節理交点の温度低下が顕著であることが分かる。C点は水が浸透しているが、水の浸透がないD点の温度変化とよく一致している。C点と節理交点のA、B点の温度上昇勾配の違いにより水の浸透部分と流れている部分を区分できる可能性があると言える。また、A点とB点を比較すると給熱時の温度上昇勾配およびピーク温度がB点の方が高い。これは岩石ブロック内の節理の水の流れはすべての節理で一定ではなく、A点側の節理の方が流れる水量が多くあるいは早いことが予想される。図-8と写真-1では、このような岩石ブロック内での卓越的な水の流れを把握することはできない。しかし、図-9によれば低温部が左側の節理に片寄る傾向を示すので、卓越した水の流れがやや左下方向にあると言える。しかし、今回の実験では、正確な排水量を把握していないので確定的ではない。以上の結

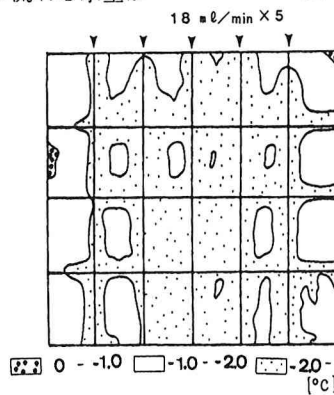


図-8 差画像

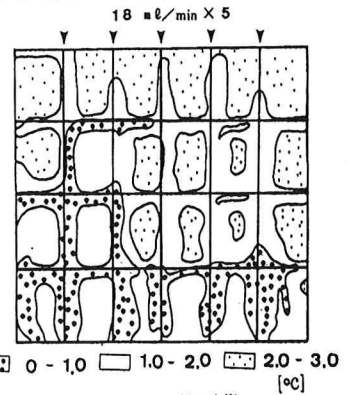


図-9 差画像

果から、赤外線放射温度計によって節理内の水の状態を把握する事は比較的容易であり、水の浸透部分と流れている部分を区分できる可能性がある。また、水の卓越的な流れの状態を把握できる可能性もある。

4. 野外測定例

測定地点はある林道の自然斜面である。当地点に分布する流紋岩は岩相変化が著しく、断層・節理などの不連続面が多く発達したクラッキーな岩盤である。測定は、太陽光による熱エネルギー勾配の大きい時間帯である早朝と日没に実施した。図-10に測定状況図を示す。写真-2に測定を実施した危険箇所を示す。測定箇所は、ほぼ垂直な斜

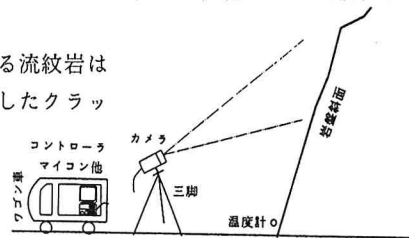


図-10 野外測定状況

面であり斜面上部に岩盤ブロックが凸に存在し、付近の岩盤は鏡肌を呈するので崩壊する危険性が高いと思われる。測定は、この岩盤ブロックと基盤とが密着した状態にあるか、さらに付近に水が存在するかを判定することを目的とした。測定例として早朝の測定結果を示す。図-11にブロック下部の影の部分A、B点、鏡肌を呈する岩盤部分C点、植生部分E点の時間経過に対する温度変化を示し、図-12に測定終了時の熱画像と測定開始直後の熱画像において減算処理した差画像を示す。

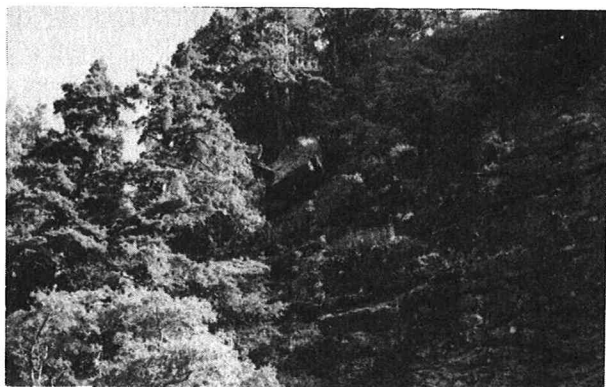


写真-2 危険斜面状況

直射日光は、測定開始70分後に斜面全面に当たり始めた。岩盤部分D点とブロック上部C点の温度上昇勾配は、ほとんど同様なのでこのブロックの基盤との密着性は良いと考えられる。さらに、クラック下部A、B点は、直射日光の影響を直接受けないので、全体的な温度勾配は岩盤と比較して低いが、直射日光の当たり始める以前の温度上昇率は、岩盤部分とほとんど変わらない、よってブロック下部に水が浸透している可能性も少ないと考えられる。以上の結果よりこの岩盤ブロックは、現在のところさほど危険な状態にはないと判断される。しかし、現場での詳細な検証測定を行っていないので確定的な判断を下すことはできない。

5. おわりに

本報告は、赤外線放射温度計による岩盤表面の温度分布状態から岩盤斜面の危険度を判定するために必要な事項に対して検討を行った結果について述べた。室内での実験結果より、付近の熱エネルギー勾配を変化させることにより赤外線放射温度計を用いて以下事項に対する適用性が明かとなった。

1. 岩種により放射率が微小ではあるが異なるので地質区分への適用。
2. 節理内での水の状況を把握することは比較的容易であり、水の浸透と流れを区分できる可能性がある。
3. さらに、節理内で卓越する水の流れを把握できる可能性がある。

今後、野外での検証測定を行うことにより、確度の高い情報を収集する必要がある。

【参考文献】

- 1) 日本写真測量学会編; 熱赤外線リモートセンシングの技術と実際, 鹿島出版会, 1986
- 2) 米村他; 赤外線を活用したモルタル吹き付け背面の空洞調査について, 日本道路会議論文, Vol. 15, NO. 1PPAN, 1983
- 3) 後藤他; 熱赤外線リモートセンシングを用いた法面空洞調査の基礎実験, 第25回土質工学研究発表会, 1990. 6
- 4) 荒木他; トンネル切羽の温度分布と内空変位, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 26, 特集Ⅱ
- 5) 湯原他; 赤外線放射温度計を用いた黒部上部軌道トンネル内壁温度分布の測定および放射率補正, 日本地熱学会誌, Vol. 4, NO. 2, 1982
- 6) 加藤他; リモートセンシングを活用した山地災害予知システムの開発, 森林航測, No. 149, 1986

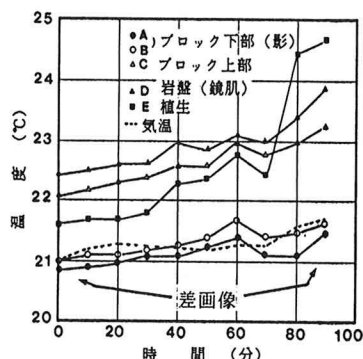


図-11 経過時間-温度図



図-12 差画像