

7 熱赤外リモートセンシングによる斜面調査手法に関する検討

建設省土木研究所 ○新 田 邦 弘†
 笹 原 克 夫
 工 藤 賢 二
 中 村 良 光

1 斜面調査における熱赤外リモートセンシングの利用

斜面の表面温度状態を考えた場合、日射等の熱エネルギーにより表面温度は上昇するが、岩盤では塊状状態であれば深部の低温（定温）部分へ熱エネルギーが伝播されることによって表面温度の上昇はある程度抑制される。しかし、亀裂等の不連続面が密に分布しているような場合は、深部への熱の伝播が阻害され、表面付近に熱が貯留され易い形となるため表面温が相対的に高くなると考えられる。こうした現象の違いを熱映像（熱赤外温度センサー）によって捉え、不連続面の分布状況等を推定しようとするのが熱赤外リモートセンシングによる斜面調査のねらいであり、そのために亀裂分布や表土層厚と表面温度変化との関係を明らかにする必要がある。

本研究は簡単な一次元方向のモデルに亀裂や表土層の条件を組込んでその影響を調べ、こうした表面温との関連等の基本特性を示すことを目的として数値解析と単純モデル実験を実施したものである。

2 数値計算による検討

2. 1 計算条件の設定

まず有限要素法による熱伝導解析プログラムを用いて、岩盤表面において一定の熱エネルギーの出入りがある状態などの一次元のモデルを想定し、その伝播状態が亀裂の存在位置やその厚さによってどのように変化するかを試算した。また表層土厚の違いによる表面温度の差についても計算を行なった。今回行った計算ケースおよび物性値等の諸元について表-1に示すが、大きく分けて次の3つの状態のモデルを設定し、種々の条件を変えて計算した。

- A 表面から一定の熱エネルギーの供給があり、暖められる場合
- B 深部に定常温度部があり、外気温が低温で、表面から冷却される場合
- C 表層に一定厚の土砂があり、内部が岩の状態暖められる場合

表-1 計算諸元

	熱伝導率 W/cm·K	比熱 J/g·K	密度 g/cm ³	亀裂深度 6, 12, 20, 30cm	入射エネルギー 0.85×0.7(kW/m ²)	初期温度 加熱時 20° 冷却時 15°
花崗岩	3.45×10 ⁻²	0.804	2.65	亀裂厚さ 1.5, 10, 20mm	計算時間 20秒ステップ6時間	外気温 加熱時 20° 固定 冷却時 0° 固定
安山岩	1.64×10 ⁻²	0.820	2.80	表土(砂)厚 6, 15, 25cm		
凝灰岩	1.39×10 ⁻²	0.812	2.11			
空	2.44×10 ⁻⁴	0.994	1.29×10 ⁻³			
砂	3.26×10 ⁻⁴	0.800	1.70			

2. 2 計算結果

まず、縦軸に温度、横軸に深度をとったグラフに経過時間ごとの温度分布図として表わし、温度変化の状態に関して代表的なグラフを示す。

†現 地質基礎工業株式会社

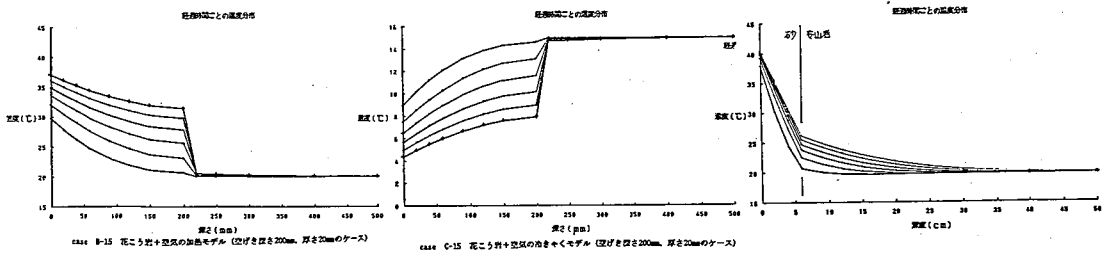


図-1 花崗岩（亀裂内空気）の加熱 図-2 同左条件の冷却 図-3 表土層（砂）の加熱

2. 3 解析結果の検討

① 亀裂深さと表面温度 一定時間に表面から伝わる熱は深度的に限界を持っており、6時間程度では、約40～50cmの深さが熱伝達範囲であり、亀裂が表面温度に影響を与え得る最大限界深度も必然的にこの深度以浅である。ただし、これはパラメータの不確実性があり大局的なオーダーと判断できる。定性的な傾向として、岩の熱伝導率が高いほど深度的に深くまで影響している。亀裂位置については浅いほど表面温度への影響が大きく、表面温度が高くなる傾向を示す。亀裂の厚さが厚い場合その傾向が大きい。冷却の場合は逆に表層部の熱が奪われ亀裂が浅いほど表面温度が下がっている。

② 亀裂厚さと表面温度 亀裂の厚さによる6時間後の表面温度の違いを見ると加熱ではいずれも厚いほど表面温が高い傾向を示すが、位置が浅いほど薄い亀裂でも温度差が大きくなっている。亀裂が深い場合差が小さい。冷却でも亀裂が厚いほど温度低下が大きい。

③ 亀裂内物質の熱伝導率と表面温度（充填物による違い） 今回の計算では砂と空気との2種類の熱伝導率の違う物質を同一条件で計算したがこれを比較すると熱伝導率の低い物質で充填された亀裂の方が、表面温度の上昇が大きくなっている。

④ 岩盤の熱伝導率と表面温度 岩の熱伝導率の条件のみの違う花崗岩と安山岩の計算ケースのデータを比較すると、熱伝導率の低い安山岩の場合の方が表面温度が低くなっている。熱伝導率が相対的に小さい安山岩では、花崗岩に比べて、亀裂情報が表面温度差として現れる限界深度が相対的に小さいと考えられる。

⑤ 表層土（砂層）厚と表面温度 表層土厚60mmの場合には熱伝導によって他のケースに比べて表面の温度上昇が低くなることが判る。しかし、表層土厚が150mmを超えると表面温度の変化はほぼ等しくなり、薄い場合に比べて高い側で、厚さによらない一定の温度上昇を示すと考えられる。このように、表層土厚の検出においても限界があり、せいぜい10～15cm程度の厚さまでしか識別できないと考えられる。ただし、物性の違いにより多少検出厚さの限界も変化するであろう。

2. 4 留意点

ここでの計算条件は、理想状態を想定した形のものであり、日射量や天候の日変化、外気の接触部からの直接の熱伝播、表面からの輻射熱等は考慮されていない。また初期状態の温度分布も簡略化し、亀裂の方向形状も、表面と平行した形のみを想定である。また実際には水分の気化熱など他の要因の影響もあると考えられる等の点にも留意する必要がある。

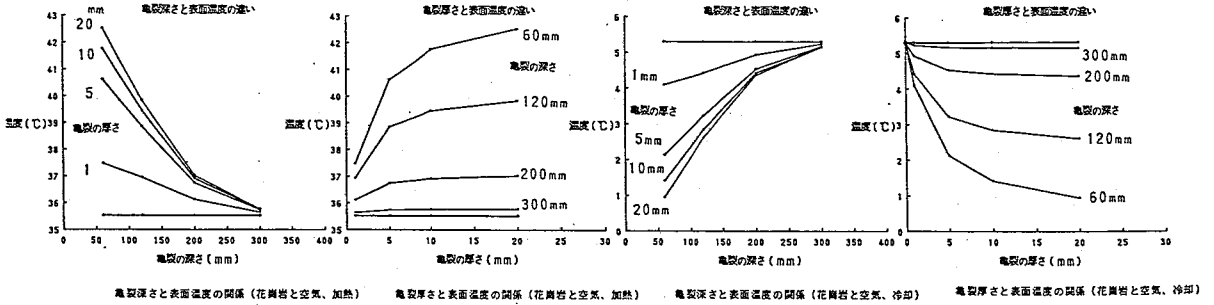


図-4 6時間後の表面温度と亀裂条件等との関係図

3 岩片模型を用いたモデルによる表面温度変化特性の測定実験

3.1 実験モデル

下図のような試験片によるクラックモデルを作製し、断熱材により熱入射方向以外の面を覆い、深さ方向に各10点ほどの温度測定を行なって、経時的温度分布の変化を測定した。

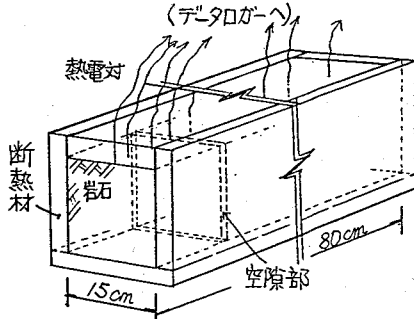


図-5 モデルの作成

表-2 モデル試料の物性

	熱伝導率 W/m·K	密度 g/cm ³	比熱 cal/g·K
凝灰岩	0.798	1.798	0.248
花崗岩	2.801	2.629	0.271
	熱伝導率 W/m·K	単位体積重量 g/cm ³	含水比 %
ローム乾燥	0.204	0.933	14.00
湿潤	0.436	1.111	55.93
マサ土乾燥	0.199	1.000	8.10
湿潤	0.365	1.289	30.71
川砂乾燥	0.269	1.578	0.52
湿潤	0.480	1.627	19.89

3.2 実験ケース

表-3 実験ケースの内容

<p>○岩石試料 材料 花崗岩、凝灰岩 亀裂厚さ 1.5, 10, 20mm 亀裂深さ 5, 10, 25, 50cm 温度計測点 0, 1, 3, 5, 10, (10点) 20, 30, 50, 70cm等 加熱 花崗岩, 凝灰岩 冷却 花崗岩</p>	<p>○土質試料 材料 ローム, マサ土, 川砂 各 風乾, 湿潤状態 表土層厚 5, 10, 25, 50cm 基岩は いずれも凝灰岩</p>	<p>温度計測時間 いずれも 1分ごと6時間 4ケースずつ 42chの温度スキャン</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------

3.3 実験結果

温度変化グラフを見ると、FEMの数値解析でも見られたような温度分布形状を示しており、シミュレーションとの整合性はよく、亀裂部分で温度勾配が急になり、表面近くでも温度勾配が急になっている点や、数十cmまでに大部分の温度上昇、熱貯留の範囲がとどまる点などよく整合していると言える。しかし、亀裂条件（深さ位置、厚さ）と表面温度の関係は数値解析で想定されたような整然とした関係は示しておらず、かなりばらつきが大きくなった。

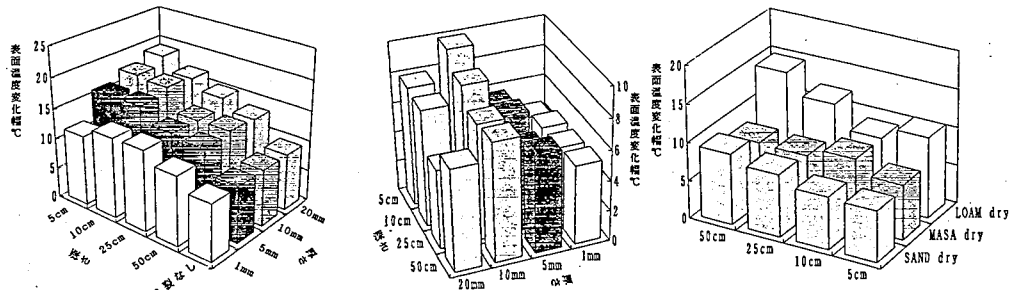
3.4 考察

モデル実験による表面温度計測結果のばらつきは、表面温度の変化に亀裂の状態の差、あるいは表土層厚による影響以外にも大きな度合いで作用する要素があることを示す。例えば表面の色調、反射率（熱吸収率）や熱伝導率、含水率等で多少のばらつきは考えられる（特に凝灰岩）。また、室内の空気の対流状態による冷却や初期の試料温度のばらつきも影響があったと考えられる。

しかしながら、温度上昇の安定化した1時間後から実験終了（6時間後）までの間の温度上昇幅に注目したところ、下のグラフの様に数値解析の傾向と整合する特性が得られた。

○岩石試料 この結果から定性的に「亀裂深さが浅いほど表面温度上昇が大きい」「亀裂厚さが厚いほど表面温度上昇が大きい」という傾向が確かめられた。また、いずれのケースも亀裂の深さに関しての方が、亀裂の厚さに対するよりも相対的に鋭敏（関係が明瞭）である点が、数値解析結果との比較での相違点として認められる。これは数値解析の時点で内部亀裂空間における熱伝播の条件に熱伝導しか見ておらず、放射および対流による熱輸送等が欠けていたため、実際の実験の方では亀裂厚さによる熱移動量の差異が比較的小さかったものと考えられる。

○土質試料 土質試料の実験では同様に1時間後からの温度上昇幅を見た場合、岩に比べてやや複雑な結果になった。これを見ると、乾燥状態の試料では、川砂とローム土で、ほぼ厚さが薄いほど温度上昇の幅が小さいという傾向が認められるが、マサの試料ではそうは言えない結果となった。また湿潤状態の試料では、表層土厚と、温度上昇幅との関係は明瞭ではなく、一定の傾向を示していないような結果となった。表面状態等の他の要素の影響が大きいためと考えられる。



亀裂条件と1時間後から6時間後までの温度上昇幅との関係 亀裂条件と1時間後から6時間後までの温度低下幅との関係 土質試料の表層土厚と1時間後から6時間後の温度上昇幅の関係

図-6 温度変化幅と亀裂条件等との関係図

4 まとめ

岩盤斜面の熱赤外映像に反映される情報は、最大限ほぼ 0.3～0.5 m 程度以浅のものに限られると考えられる。すなわち崩壊する岩石の厚さが 1 m を超えるような深部の不連続面などの情報を表面の熱映像のみで捉えるのは困難といわざるを得ない。逆に、数 10 cm 以内の落石の可能性のある浮石であれば、熱赤外リモートセンシングを適用することによって他の部分との温度変化の差異を読み取り、それを抽出することができる可能性があると推定される。

また亀裂等の岩石内部空間内での熱伝導以外の対流や熱放射等、実際の岩石の表面温度を左右する要因は実際には様々な要素が存在し、温度変化に亀裂分布性状よりも大きな影響を与える場合があることが実験の結果から予想され、条件をできるだけ詳しく検討した上での現地測定が必要とされる。

以上のような特徴から熱赤外リモートセンシングの適用法について考えた場合、最も適した対象としては約 30 cm 以内の厚さを有する岩盤斜面上の浮石（剥落型落石の危険岩片）を遠隔地からの測定によって抽出するといった運用に適することとなるであろう。ただし日射の不均質さ、湧水の多い場所等、亀裂以外の条件が大きく作用するような環境ではやはり温度情報だけでは浮石、亀裂の状態を推定するには困難が伴うと推定される。今後これらの条件への対処法や、日周期の温度の上昇下降の変化と亀裂賦存状態との関係等についても追究、検討する必要がある。