

落石対策調査のための地上リモートセンシング 手法の基礎的研究

瀬戸島政博*・土井鐵徳**

最近、落石や岩石崩壊に伴う大規模な災害がしばしば発生し、そのために安全で効率的な落石対策調査が求められている。本研究は、このような背景から地上での熱映像と写真測量を併用した「地上リモートセンシング」による調査手法の確立を目的とするものである。多時期に観測された熱映像の画像処理や写真測量手法により抽出した地形情報を用いた画像の重ね合わせ解析を通じ、落石対策調査への本手法の適用性を把握した。

Keywords : rock fall disasters, remote sensing, thermal images

1. ま え が き

最近、落石や岩石崩壊に伴う大規模な災害がしばしば発生している。1987年6月の北海道上川町層雲峡峡谷（国道39号線）での熔結凝灰岩の岩石崩壊¹⁾や、1989年7月の福井県越前海岸（国道305号線）での岩石崩壊事故などはとくに顕著なものである。落石対策に関する調査は、これまで斜め写真の判読や現地踏査を主体になされてきている^{2),3)}。しかし、このような手法は、定性的で主観的な場合が多く、かつ急峻で危険な斜面を広域に、しかも面的に一律な精度のもとに調査を実施していくには難しい面がある。そのための調査手段として、地上リモートセンシング手法が注目されている。

リモートセンシングは、広域を面的に、しかも安全な間接的方法によって均一な精度で調査していく場合に有効な手段である。リモートセンシングは、1970年代初頭に打ち上げられた地球観測衛星データの解析を契機に、飛躍的に発達した技術である。したがって、リモートセンシングというと、人工衛星や航空機から観測されたデータをデジタル画像処理を経て、各種調査に利用していくまでを指すことが多く、写真測量などの技術分野はその範疇に含まれないとされている。しかし、本研究で対象としている落石対策の調査では、このような狭義の意味でリモートセンシングを解釈すると、適用上の問題（例えば、リモートセンシングでは反射・放射特性をすべてのよりどころとしているが、落石対策のための調査では、反射・放射特性だけで解決されない問題）も多く介在し、写真測量手法などを取り込んだ複合的な意味でリモートセンシングを解釈しておくことが肝要となる。

そこで、本研究では効率的で、しかも安全な落石対策調査を実施していくことを前提とし、地上での熱映像手法と写真測量手法を併用した、地上リモートセンシングによる調査手法の確立を目的とする基礎的研究である。

2. 本研究の特色と内容

従来から落石対策のための調査は、維持管理や対策工の計画設計を目的にしてなされてきた。そのため、空中写真判読や現地踏査を主体にし、必要な場合に依りて、弾性波探査、ボーリング、サウンディングなどによる精査がなされてきた。落石対策のための調査に空中写真を利用した研究は比較的早い時期からなされてきており、ヘリコプターによる写真撮影と写真の実体視部を用いた写真判読手法を駆使して行われてきている。しかしながら、定性的で主観的な手法であることは否めず、判読者の経験と知識によって結果が大きく左右されることが多い。一方、リモートセンシング技術の発達と普及により、熱映像の防災分野への利用がさかんになってきた。しかし、熱映像は地表面からの物体の放射量のみをよりどころとするもので、落石発生に関与する斜面の凹凸などの形状を知るうえでは十分な情報とはなりえない。

そこで、本研究では、(1) 空中写真判読による欠点を補い、より詳細な定量的情報を得るために地上写真測量手法を適用するとともに、(2) 熱映像手法と地上写真測量手法を併用することで、放射量特性だけでは解決されない斜面形状を加味した地上リモートセンシングによる落石対策の調査手法を検討する。(3) これらの研究を進めていくうえで、異なる情報をすべて画像データに統一し、画像のオーバーレイ手法を駆使して、見やすく、分かりやすい解析結果を得ることに努める。以上のように、従来とは異なった複合情報を用いたデジタル画像解析手法を主体として研究を進めている点が本研究の特色である。

* 正会員 国際航業（株）日野技術所
〒191 東京都日野市旭ヶ丘 3-6-1

** 建設省東北建設局東北技術事務所

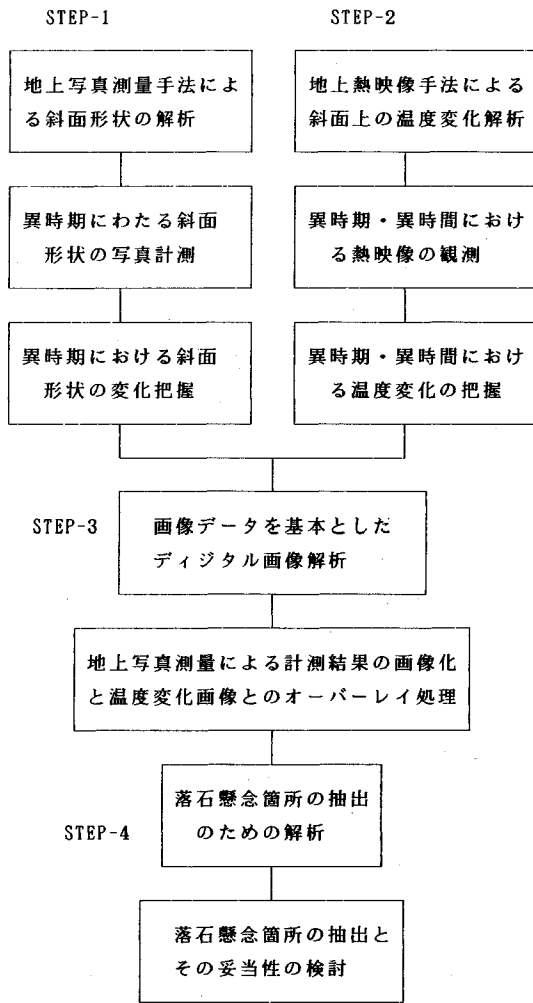


図-1 本研究の構成

本研究は、図-1に示す内容から構成されている。

(1) STEP-1：地上写真測量手法による斜面形状の解析

ここでは、時期別に対象斜面を地上からステレオ写真撮影し、解析図化機を用いて節理、転石、浮石、崖錐等写真上で識別可能なものを抽出する。さらに、25 cm 間隔でメッシュ測定を行い、対象斜面の奥行きを標高として算定する。

(2) STEP-2：地上熱映像手法による斜面上の温度変化解析

斜面上の温度変化解析にあたっては、地上に熱赤外センサを設置し、異時期・異時間にわたる多数の熱映像の観測を実施する。さらに、熱映像のデジタル画像解析を通じ、斜面上の微細な温度変化パターンを抽出する。

(3) STEP-3：画像データを基本とするデジタル画像解析

ここでは、STEP-1による斜面形状の計測結果をカ

ラー画像化するとともに、STEP-2による温度変化パターン画像を用いて、画像同士の重ね合わせ解析等のデジタル画像解析を実行する。これによって、温度変化パターンと斜面形状との対応を明らかにする。

(4) STEP-4：落石懸念箇所抽出のための解析

落石懸念箇所抽出にあたっては、既往落石箇所を主眼に置き、温度変化パターン画像と各種斜面形状画像を併用して、画像同士のオーバーレイ解析を実行し、今後の落石懸念箇所として想定されるものを明らかにする。

3. 適用手法

(1) 地上熱映像手法

熱映像の原理は、絶対温度0°K以上のすべての物体はその温度に対応する赤外線を放射していることに基づく。温度と赤外線の放射との関係は、1) Plankの法則(ある温度における波長と放射エネルギー量との関係が求められる)、2) Wienの変位則(放射エネルギーが最大となる波長と温度との関係が求められる)、3) Stefan-Boltzmannの法則(放射エネルギーと温度との関係が求められる)の3法則によって関係づけられる。電磁波は大気中を透過する際に吸収や散乱が行われるため波長によってその透過の程度に差がある。大気中では炭酸ガス、水蒸気による減衰が大きい、とくに3.5-4.2 μm、8-14 μmの間では大気の窓といわれる透過率がよい範囲があり、この大気の窓を利用して遠(熱)赤外線を感知する。

熱映像は、大気の窓を通じて物体から放射される遠(熱)赤外線をセンサでとらえ、温度分布画像にしたものである。したがって、対象物の表面温度分布を面的に、しかも温度の絶対値に変換してとらえることができる。

本研究で採用した地上熱映像手法では対象斜面の岩盤表面の温度分布を異時期、異時間にわたり多数の観測を実施した。各時期の熱映像は、それぞれ異なった観測条件下でなされ、これを統一性をもつデータとするには、各画像の幾何学的補正を十分に施し、後述の画像のオーバーレイ手法を適用することにより、微細な温度変化や温度変化と斜面形状との対応を把握するようにした。

なお、幾何学的補正にあたっては、地上写真測量手法によって計測された斜面の平面図画像(写真-1)と各時期の熱映像とを用いて、両画像で明瞭にその位置が識別できる地点(地上基準点)を選定し、それらの地上基準点を用いて、アフィン変換により両画像の位置合わせを行った。

(2) 地上写真測量手法

本手法は、地上写真を用い解析図化機による対象斜面の精密図化および計測を行うことによって、落石の実態をとらえようとするものである。これによって、対象斜面全体の形状、規模、節理の発達状況、転石・浮石の位

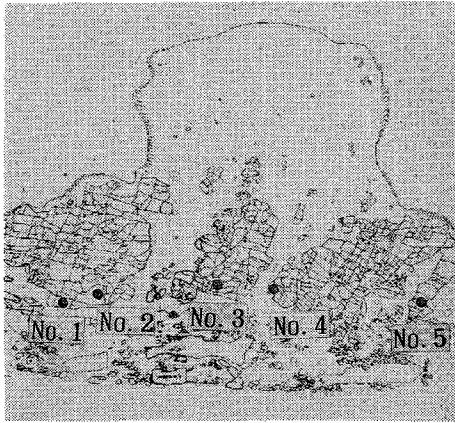


写真-1 対象斜面の平面図
(No. はひずみ量及び温度測定地点)

置や大きさ、節理系によってブロック化した岩塊の大きさ、位置、これらの経時変化を知ることができる。

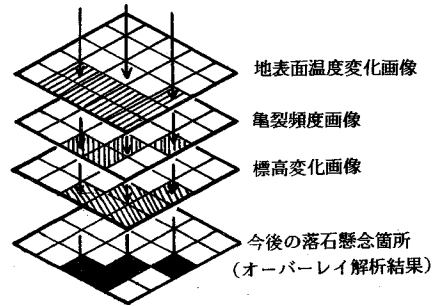
地上写真測量手法を適用していくには、地上ステレオ写真撮影に先立ち、モデル標定用の基準点を設置し、前方交会法によって任意座標系で各基準点の座標を求める。次に、撮影した写真をもとに、解析図化機によって対象斜面の標高(奥行き)をメッシュデータとして測定すると同時に、節理、転石、浮石、崖錐等、写真上で判読可能なものを全てを表現する。また、計測は格子点の他に、あらかじめ対象斜面上にマーキングした点についても3次元座標値を計測する。メッシュデータからは断面図や等高線図を自動描画する。

(3) 画像のオーバーレイ手法

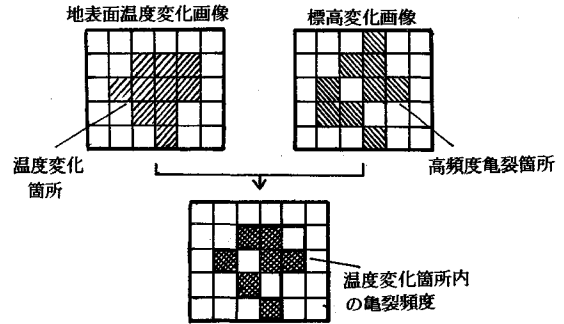
本研究では、異時期・異時間の熱映像と地上写真測量手法による対象斜面の形状との関係を明らかにするために地上写真測量手法に基づく解析結果をすべて画像化し、そのうえで本手法を適用して、オーバーレイ解析を実施した⁴⁾。

画素を単位とする画像同士のオーバーレイ手法にはさまざまなものが考えられるが、図-2にはその代表的なものを示す。すなわち、インデックス型のオーバーレイ手法やマトリックス型のオーバーレイ手法である⁵⁾。これ以外にもスクリーン表示型のオーバーレイ手法がある。インデックス型のオーバーレイ手法は、多層情報(例えば、リモートセンシングデータと各種の地理情報など)の重ね合わせ解析に最適であり、個々の画像情報に重みや点数を付けて用いる。主として、落石発生の危険度などの分級評価に用いられる。

マトリックス型のオーバーレイ手法は、2種類のリモートセンシングデータあるいは地理情報の組み合わせによるオーバーレイであり、本研究では斜面上の岩盤の地表温度変化と斜面形状との関係を分析するためにこの手法を適用する。



(A) インデックス型オーバーレイ



(B) マトリックス型オーバーレイ

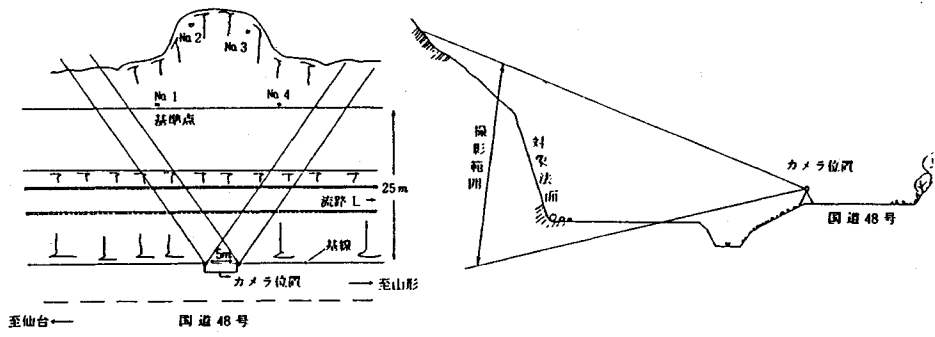
図-2 代表的な画像のオーバーレイ処理手法

スクリーン表示型のオーバーレイ手法は2種類のリモートセンシングデータあるいは地理情報を用いて、単純な画像の重ね合わせ表示を行うものであり、本研究では、現況写真画像上に温度変化領域を重ね合わせて表示する場合などに用いた手法である。

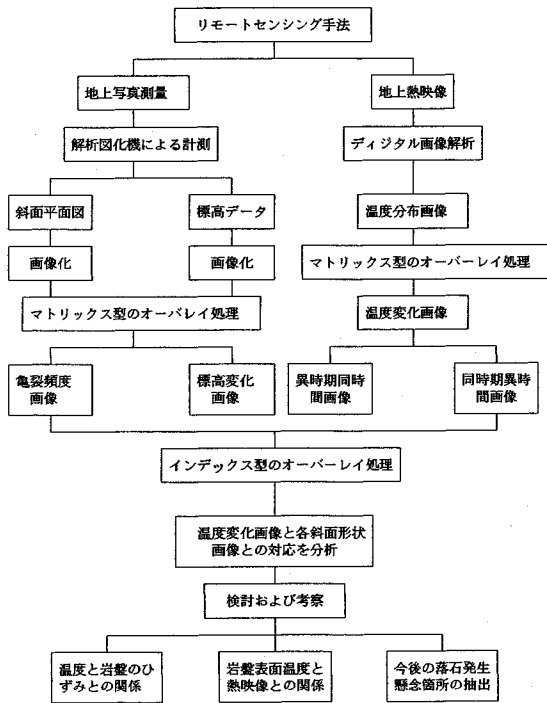
4. 解析地域

解析地域は、山形県東根市大字関山字滝山地区に位置し、国道48号関山トンネル山形側坑口から山形側へ約70mの位置にある(図-3)。対象斜面は乱川支流の萱倉沢左岸斜面であり、周囲には標高900m内外の山地部が位置し、全体に壮年期の急峻な山体を呈する。対象斜面は、自然斜面下部に位置し、比高最大20m、幅約30mの規模で、全体的にオーバーハングしている。

解析地域は、グリーンタフ地域に属し、変質した粗粒凝灰岩からなる。この岩石は石英粒子(1~2mm)を多く含む粗粒である。対象斜面は節理が発達し、節理系に規制された凹凸が著しい。岩盤の割れ目沿いに風化が進み、岩盤が緩んで節理は開口気味である。対象斜面上部は風化が著しく、土壌化している。中部は岩盤が露出し、節理の発達が顕著で、5系統の卓越方向が識別される。下部は20~60cm大の岩塊と土砂からなる崖錐が形成されている。



図—3 解析地域の位置図



図—4 解析方法

5. 解析方法

解析方法は図—4のフローチャートに示すとおりである。

(1) 地上ステレオ写真撮影と解析図化機による計測
対象斜面上の変動・落石を把握するためにステレオ写真撮影・図化・計測を実施する。撮影および計測のための使用機器と観測結果を表—1, 2に示す。撮影したステレオ写真に基づき、解析図化機を用いて節理・転石・浮石・崖錐等、写真上で判読可能なものを全て表現した精密な対象斜面の平面図(1/50)を作成する。さらに、25 cm 間隔(図上で 0.5 cm)でメッシュ計測を行い、メッシュ交点における標高値を計測する。この標高値を基に、

表—1 使用機器と仕様

手法別	観測用	解析用
地上写真測量手法	・地上カメラ(LMK f=99mm) ・フォーカスデレション(SFT: 1秒読み) ・経緯儀(T-3) ・水準儀(オートレベルB2)	・解析図化機(ソフトアップC-120) ・図面出力装置(サイネティック1100)
地上熱映像手法	・熱赤外線測定システム(サーモビジョン880: 8~12μm)	・入力用スキャナ(カフドラムスキャナ2607) ・デジタル画像解析システム ・画像出力装置(カラーフォトリンタ3302A)
岩盤計測手法	・ひずみゲージ(KF-5-1-11500(防水型)(埋設)編り付、5mm) ・温度ゲージ(KT-7-50-A7(自己接着型)温度デクアタ) ・T-501A(常温用、-45~100℃測定器) ・UCAM-11(ビデオカメラ) ・UCAM-5T(ビデオカメラ測定器) ・USB20A-20(UCAM 制御)	—

表—2 観測結果一覧

年	月	日	落石履歴	地上写真撮影	地上熱赤外線観測
1987	11	26	—	◎	—
		15	—	—	◎ 14:30
	12	24 25	左側下部 左で発生	◎	—
1988	4	上旬	右側上部 (崖錐)	—	—
		20	—	◎	—
	6	14	—	◎	—
	8	9 10	—	◎	◎ [14:10, 19:30 20:00, 5:00, 10:00
		11	22	—	◎
	12	14 15	—	—	◎
1 15			全体的に多 量発生(崖錐)	—	—
1989	4	18 19	—	◎	◎ [13:00, 18:00 19:30, 22:00 4:25, 10:10 12:25
		2 7	中央やや 左側下部	—	—
	6	18	右側上部	—	—
	10	10 11	—	—	◎ [13:30, 15:10 19:30, 22:00 4:25, 10:10 12:25
			22	—	◎
	12	15	—	◎	—
1990	4	?	右側上部 (崖錐)	—	—
		26	—	◎	—
	8	15 16	—	◎	◎ [22:00, 4:00 13:30, 12:00 15:00, 19:00
		10	27	左側凸部 (崖錐)	—
12	4 5	—	—	—	

(◎ : 撮影および観測、表中の温度は気温を示す)

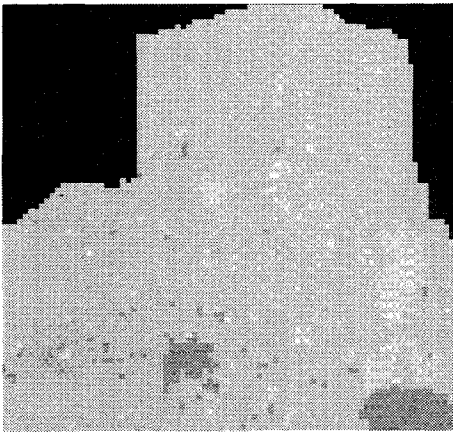


写真-2 標高変化 (1987.11~88.11)



写真-3 亀裂頻度

断面図・等高線図を出力する。

(2) 計測結果の画像化

(1) で計測された対象斜面の平面図はスキャナー入力により画像化するとともに、標高データ(磁気テープ)についてもカラー画像化を図る(写真-1)。

(3) 標高変化画像の作成

多時期の標高区分画像のうち、落石発生の前後に計測された画像(1987.11, 87.12, 88.11, 89.8)を用いて、マトリックス型のオーバーレイ処理手法を適用し、標高変化画像を作成する。落石発生前後にあたる1987.11と88.11の場合の標高変化画像を写真-2に示す。

(4) 亀裂頻度画像の作成

亀裂頻度画像の作成にあたっては、対象斜面の平面図(1989.8)に基づき、岩盤箇所だけをマスク画像処理によって抽出し、そのうえで、5×5画素を単位とする領域内での亀裂分布頻度を計算して画像化する(写真-3)。すなわち、亀裂頻度の算定にあたっては25画素を1つの単位として、25画素中に亀裂の分布する画素が何画素あるかを識別し、その値を5×5画素を1画素とする画素中に記録する。

(5) 亀裂方向区分画像の作成

亀裂頻度画像の場合と同様に、岩盤箇所だけをマスク画像処理によって抽出する。この画像について垂直方向、水平方向、斜め方向の3成分の亀裂に区分し、表示した亀裂方向区分画像を作成する(写真-4)。

亀裂方向区分の算定にあたっては、横方向の5画素を対象として、5画素中で4画素以上が亀裂を示す画素である場合は水平方向の亀裂とする。同様に縦方向の5画素を対象に、4画素以上が亀裂を示す画素である場合は垂直方向の亀裂とする。これ以外を斜め方向の亀裂とする。

(6) 地上熱ビデオシステムによる観測と解析

熱ビデオは、対象物の表面温度を画像化し、ビデオテー

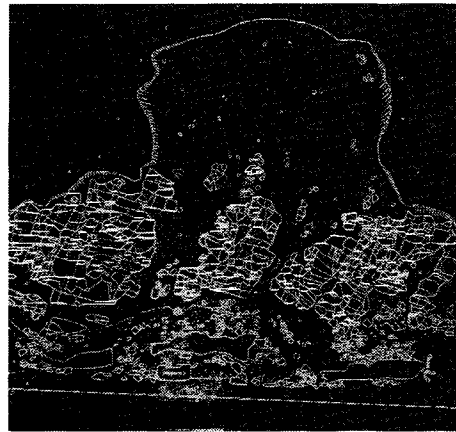


写真-4 亀裂方向

プあるいはフロッピーディスクに一連の画像として収録したものである。得られた温度分布画像は、VTRを用いてモニター上に再生でき、さらにデジタル画像データに変換することで、定量的な解析が可能となる。熱ビデオシステムは観測システムと画像解析システム(表-1)から構成される。表-2には観測結果を示す。

温度分布画像は、熱ビデオによる観測データをアナログ/デジタル変換を施したうえで画像化し、レベルスライス(濃度分割)処理によって作成したものである。

(7) 各時期の温度分布画像のオーバーレイ処理

本研究では、観測時期の異なる熱映像データの温度変化解析による微小な温度変化領域をとらえることにより、落石発生に関連深い岩盤の風化箇所を把握できるのではないかと考える。その際、温度変化を把握するには、日変化(例えば日中と夜間との比較)と季節変化(例えば夏季と冬季のある一定時間での比較)が考えられる。そのため、本研究では日変化に主眼を置いて温度変化領域を抽出するために同時期異時間に観測された熱映像データに基づく温度解析を実施する。一方、季節変化を

主眼に置いて温度変化領域を抽出するために、異時期同時間に観測された熱映像データに基づいて温度解析を実施する。

各時期の温度分布画像を用いて、1) 同一観測時間帯別の画像のマトリックス型オーバーレイ処理と温度変化領域の抽出、2) 異時期に観測された画像間のマトリックス型オーバーレイ処理と温度変化領域の抽出を行う。この結果、同時期異時間の温度変化画像と異時期同時間の温度変化画像を作成する。

(8) 温度変化領域と斜面形状との対応

ここでは、(7)で把握された同時期異時間および異時期同時間における温度変化画像と、標高変化画像、亀裂頻度画像、亀裂方向区分画像とを、画素を単位に画像同士のマトリックス型オーバーレイ処理を実行し、温度変化領域と斜面形状との対応を明らかにする。

(9) 検討および考察

検討および考察にあたっては、本研究手法の妥当性を吟味するねらいから、1) 岩盤表面の温度変化と岩盤のひずみ量との関連性と、2) 岩盤表面温度と熱ビデオでとらえた表面温度分布との関係について検討する。3) さらに、本研究手法を今後、落石予測の面で役立てていくために、温度変化画像と各種斜面形状画像とのインデックス型オーバーレイ処理により、落石発生懸念箇所の抽出を試みる。

6. 解析結果

(1) 同時期異時間の温度変化解析結果

対象斜面での落石は岩盤の特定ブロックが遊離し、振動や流水、氷結・融解作用等が契機となって落下することにより起こると考えられる。したがって、今後落石が発生する岩盤ブロックは背後の斜面と分断され遊離していると推定される。背後の斜面より遊離した岩盤ブロックは熱容量が小さいため、周囲の岩盤より顕著な温度変化を示すと考えられる。これらに基づき、適切な2時期の温度分布画像をマトリックス型オーバーレイ処理をすることにより、温度変化の顕著な領域を抽出する。

同時期異時間画像による温度変化解析にあたっては、温度変化の大きいものを用い、次の4ケースについて実施する。

- ・ケース1：1988年8月9日14：10と8月10日5：00
- ・ケース2：1989年4月18日13：00と4月18日21：00
- ・ケース3：1989年8月10日19：30と8月11日4：25
- ・ケース4：1990年8月16日4：00と8月16日15：00

岩盤表面上の日温度変化は、図-5のように8月の場合、4~6°Cに及んでいる。そこで、ケース1、3、4の8月観測の場合は概ね4°C以上の温度差のあるところを温度変化領域として抽出する。また、4月観測の場合、日温度較差は8月時点よりも小さいと考え、概ね2°C

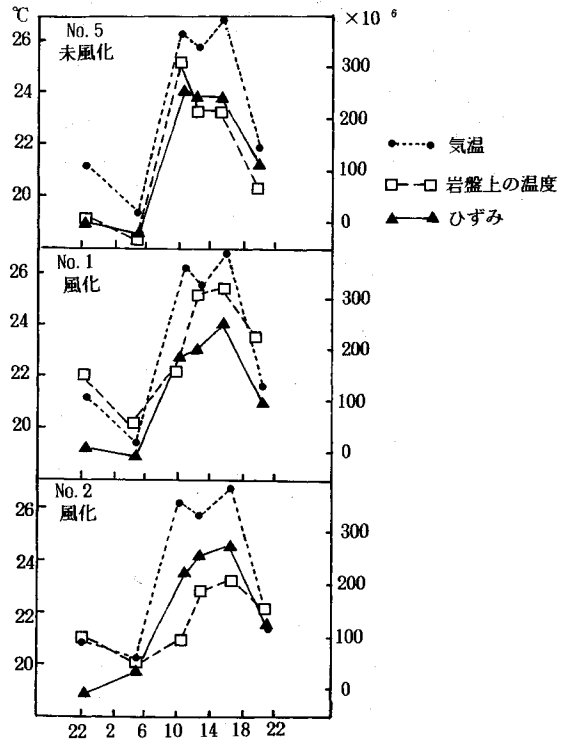


図-5 岩盤の表面温度とひずみ量の関係 (1990年8月15~16日までの観測)

以上の温度差のあるところを温度変化領域として抽出する。

これらの4ケースの温度変化箇所をインデックス型オーバーレイ処理したものが写真-5である。

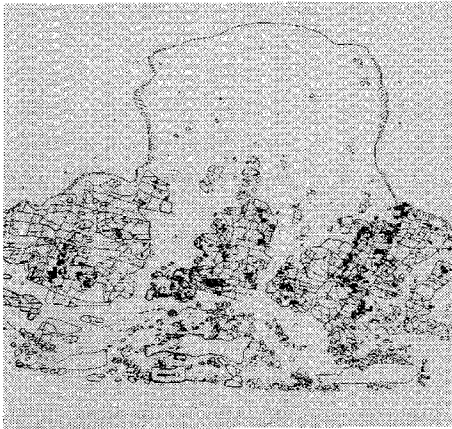
対象斜面に向かって左側の岩盤ブロック前面にわたって特徴的な温度変化領域が認められる。この岩盤ブロックは形態的にもかなり張り出した凸型を示している。この岩盤ブロックでは、破碎はあまり進んでおらず、比較的大きなブロックを保持している。ただ、水平方向の亀裂(節理)が多く分布しており、落石の危険性はそれほど高いものでないと推定される。

対象斜面の中央部でも特異な温度変化領域が認められる。個々の特徴的な温度変化領域の面積は狭く、岩盤全体に点在している。これは、岩盤表面の個々の小岩塊の温度変化をとらえていたものであり、斜面全体の傾向を表していないようである。落石が発生しても小岩塊の抜け落ちなどの小規模な崩落になると推定される。

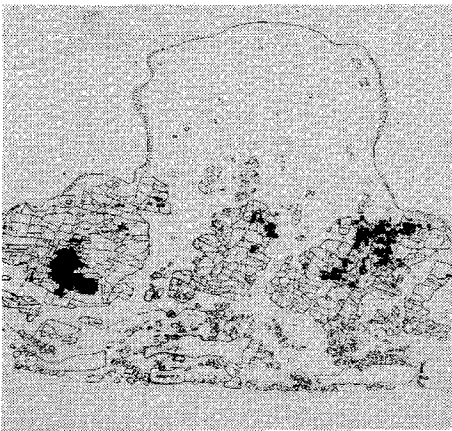
対象斜面に向かって右側の岩盤ブロック上でも特異な温度変化領域が認められる。この領域は、以前に落石が発生した箇所の直下にあることを勘案すると、今後の落石発生の懸念箇所として位置づけられよう。

(2) 異時期同時間の温度変化解析結果

同時期異時間の温度変化解析結果と同様の目的から異



写真—5 同時期異時間の温度変化



写真—6 異時期同時間の温度変化

時期同時間の温度変化解析を実施する。解析にあたっては次の3ケースを実施する。

- ケース1: 87年 12月 15日 14:30 と
89年 8月 10日 15:10
- ケース2: 88年 8月 9日 20:00 と
89年 8月 10日 19:30
- ケース3: 89年 4月 18日 21:00 と
89年 8月 10日 22:00

ケース1は1987年12月15日の観測データが大きな落石が発生する以前に観測された唯一の熱映像であり、落石発生時をはさむ両時期での温度変化を把握するねらいで行う。日中の観測データであるため日照による若干の影響はあるものと考えられる。ケース2は1年間におけるほぼ同時に観測された画像を用いて、その温度変化を把握するねらいで解析を行ったものである。とくに、日照による影響のない、夜間に観測された熱映像同士での温度変化を抽出する。ケース3は、春季と夏季における温度変化を把握するねらいで解析を行ったもので、ケース2と同様に日照の影響のない、夜間の観測データを用いる。写真—6は上記3ケースの温度変化解析をイ

表—3 温度変化領域と亀裂頻度との関係

対象領域 岩盤ブロックの位置	温度変化領域内				対象斜面内の岩盤ブロック全体領域	
	同時期異時間の解析による温度変化領域		異時期同時間の解析による温度変化領域		ブロック全体領域	
	25画素中で4画素が亀裂	25画素中で5画素以上が亀裂	25画素中で4画素が亀裂	25画素中で5画素以上が亀裂	25画素中で4画素が亀裂	25画素中で5画素以上が亀裂
左側	28.05%	71.95%	27.07%	72.93%	26.03%	73.97%
中側	19.77	80.23	8.47	91.53	27.11	72.89
右側	23.18	76.82	12.05	87.95	28.40	71.60

表—4 温度変化領域と亀裂方向との関係

対象領域 岩盤ブロックの位置	温度変化領域内				対象斜面内の岩盤ブロック全体領域	
	同時期異時間の解析による温度変化領域		異時期同時間の解析による温度変化領域		ブロック全体領域	
	垂直・斜	水平	垂直・斜	水平	垂直・斜	水平
左側	77.47%	22.53%	75.98%	24.02%	84.85%	15.15%
中側	78.89	21.11	95.28	4.72	80.28	19.72
右側	88.92	11.08	82.21	17.79	74.15	25.85

表—5 温度変化領域と標高変化との関係

対象領域 岩盤ブロックの位置	温度変化領域内						対象斜面内の岩盤ブロック全体領域		
	同時期異時間の解析による温度変化領域			異時期同時間の解析による温度変化領域			ブロック全体領域		
	変化	変化	堆積*	変化	変化	堆積*	変化	変化	堆積*
左側	1.67%	98.25	0.10%	1.38%	98.59%	0.03%	1.69%	97.84%	0.47%
中側	3.56	95.01	1.44	0.83	99.17	0.00	2.72	96.50	0.78
右側	11.67	87.84	0.69	15.06	84.94	0.00	19.33	80.18	0.49

(*堆積とは、斜面上部からの崩落で埋まったところを示す)

ンデックス型オーバーレイ処理をしたものである。

温度変化領域の抽出にあたっては、気温観測結果及び岩盤表面上での観測温度の日変化に基づく。すなわち、ケース1では気温差で20°C近くあり、概ね20°C以上の温度差をもつところを温度変化領域とする。ケース2の場合には、岩盤表面上の観測温度で4~6°Cの差があり、概ね4°C以上の温度差をもつところを温度変化領域とする。ケース3では気温差で8°C以上の隔たりがあり、これ以上の温度差をもつところを温度変化領域とする。

対象斜面に向かって左側の岩盤ブロックにおいては、常に明瞭な温度変化領域を認めることができる。対象斜面の中央部の岩盤ブロックでは小規模な温度変化領域が認められる。対象斜面に向かって右側の岩盤ブロックでは、上部~中央にかけて温度変化領域を認めることができる。

(3) 温度変化領域と斜面形状の関係

温度変化領域については、同時期異時間の場合と異時期同時間の場合の解析によって明らかにされている。両解析による温度変化領域と斜面形状との関係をみたものを表—3~表—5に示す。

亀裂頻度は、5×5画素を設定し、そのうち何画素が亀裂箇所であるかを頻度として表示したものである。1画素のサイズは実長で約10cm×10cm(5×5画素では50cm×50cm)である。表—3に基づき亀裂頻度をみると、中央ブロック、右側ブロックともブロック全体に占める亀裂頻度の比率よりも温度変化領域内の方が高い値

を示す。すなわち、この比率からみる限りにおいては、亀裂の頻度の高いところを温度変化領域として概ねとらえていることが分かる。

亀裂方向をみると、左側ブロックではブロック全体の傾向に比べ、温度変化領域では水平方向の亀裂の比率が高い。右側ブロックでは反対に、ブロック全体の傾向に比べ、垂直から斜め方向の亀裂の比率が高くなる。中央部ブロックでは、同時期異時間、異時期同時間とで傾向が異なる。

標高変化では、各ブロックともそれぞれのブロック全体の傾向とほぼ類似している。

この結果から、温度変化領域と亀裂頻度の間には比較的強い相関があると考えられる。すなわち、温度変化領域は亀裂の発達した風化岩塊の箇所をとらえていると推定される。

今後の落石発生の懸念箇所を抽出していくには、前述の温度変化領域やそれと比較的相関のある亀裂頻度だけでなく、温度変化領域と相関のあまりなかった亀裂方向や標高変化等の情報（一般的に落石発生に関与している情報と考えられる情報）も加味し、総合的な面から解析する必要がある。その場合、①亀裂頻度が高いところ、②垂直及び斜め方向の亀裂が卓越する箇所、③過去の落石等により標高変化の大きな箇所、が今後の落石発生の懸念箇所と考えられる。

7. 検討および考察

ここでは、本研究手法の妥当性を検討するねらいから、1) 岩盤表面の温度変化と岩盤のひずみ量、2) 岩盤表面温度と熱ビデオによる表面温度分布との対応について分析した。さらに、今後の落石発生予測の一手法として本研究手法を位置づけていくことを前提とした落石発生懸念箇所の抽出を試みる。

(1) 岩盤の表面温度変化と岩盤のひずみ量との関係

図—5には対象斜面のうち、未風化と風化の進んだ岩盤上における表面温度変化と岩盤のひずみ量との関係を示す。未風化の岩盤では、気温変化とほぼ類似して岩盤上でも同様の温度変化を示す。地表温度計及び歪みゲージの測定位置は写真—1に示す。気温は対象斜面に隣接して測定する。なお、歪み測定は岩盤表面で行った。その温度変化は、常に気温変化よりは岩盤の表面温度変化の方が低い。未風化の岩盤では気温の上昇とともに岩盤上の温度は上昇し、気温が低下すれば岩盤上の温度も低下してくる。一方、風化の進んだ岩盤（図—5のNo.1, No.2）では、夕方から明け方にかけて岩盤上の温度が気温より高くなる。これは、日中に熱せられた空気が岩盤内の空洞に断熱された状態で存在し、その結果、夕方から明け方まで保温状態にあったためと推定される。すなわち、日中では気温の上昇とほぼ類似して岩盤上の気

温も上昇し、午前中では5～6°Cの差があるが、午後には3～4°Cの差となる。

ひずみ量のパターンとの関係でみると、未風化の岩盤上では温度上昇に伴い、熱膨張がはたらき、岩盤のひずみ量は増大する。この場合の最大ひずみ量は 213×10^{-6} になる。一方、風化の進んだ岩盤では、岩盤上の温度上昇に伴いひずみ量も増大するが、未風化の岩盤に比べて最大ひずみ量は大きい傾向にある（No.1での最大ひずみ量は 248×10^{-6} 、No.2では 250×10^{-6} となっている）。

以上の結果から、岩盤の表面温度変化と岩盤のひずみ量の関係は次のように要約される。

(1) 未風化の岩盤と風化の進行した岩盤では、岩盤上の日温度の変化パターンに差異を生じている。岩塊が小さい、すなわち亀裂の発達している岩盤や岩塊が浮いているような岩盤などでは、未風化の岩盤に比較して夜間から深夜にかけては、気温の低下に関係なく、岩盤内で保温された状態が続いていることが分かる。

(2) さらに、このような箇所では、熱膨張により未風化の岩盤に比べて、そのひずみ量が大きな傾向にある。したがって、岩盤表面の温度変化パターンを面的にとらえることは、同時にひずみ量の大きな岩盤の亀裂の発達している所や岩塊が浮いた状態の不安定な箇所を示していることが多いと考えられる。

(2) 岩盤表面温度と熱ビデオによる表面温度分布との対応

7.(1)で岩盤表面温度をとらえることで落石発生予測の際の有用な情報をとらえていることが分かったが、次に、間接的な観測手法である熱ビデオでとらえている岩盤表面の温度分布が実際の岩盤表面の観測温度とどんな関係にあるのかを明らかにしておく必要がある。

ここでは、対象斜面の岩盤表面に温度ゲージを接着して観測した実測温度と熱ビデオセンサによる観測温度との対応を調べてみる。両者の対応は図—6に示すとおりである。この図からつぎのことが言える。

(1) どの観測時間帯とも実測温度と熱ビデオセンサによる観測温度との対応はよい。概ね両温度による差は1°C以内であり、対象斜面から熱ビデオセンサの観測地点までの距離（約60m）を考慮すると、解析上では問題のない精度と言える。すなわち、同時期異時間画像を用いた温度変化解析で温度変化領域とした温度は概ね4°C（ただし4月観測のデータでは2°C）、異時期同時間画像を用いた温度変化解析では4～8°Cを温度変化領域としたためである。

(2) 日中の観測温度では、日向と日陰の差などを生じ、実測温度と観測温度との差を生じているが、夜間では両者の温度差は生じていないことが推定される。

(3) 風化の程度を比較してみると、未風化に近い岩盤では日中、夜間とも実測温度と観測温度との差が少な

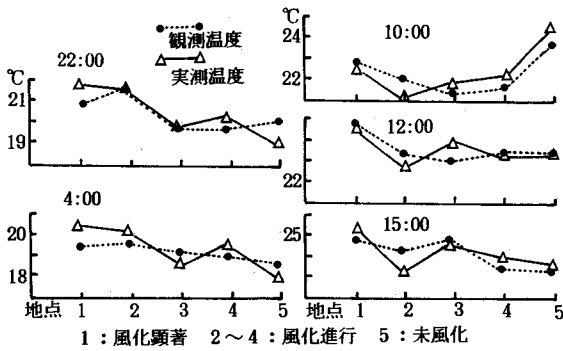


図-6 岩盤上の実測温度と熱ビデオによる観測温度
(1990年8月15~16日までの観測)

い。それに比べ、亀裂の発達した風化岩盤では実測温度と観測温度とに若干の差が認められる。

(3) インデックス型のオーバーレイ処理手法による落石発生懸念箇所抽出の試み

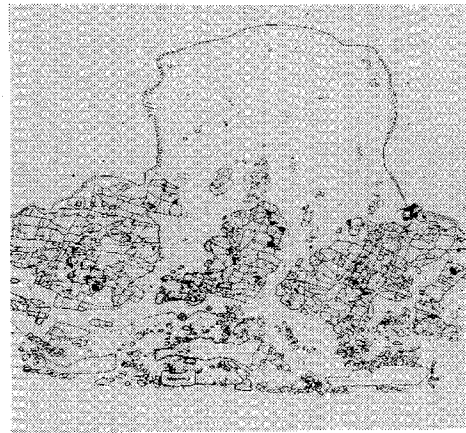
熱ビデオセンサによる岩盤表面の温度観測は岩盤の性状を知るうえで有用な方法であるが、あくまでも放射特性のみをよりどころとしている。落石発生を予測する場合、熱映像データに加えて地形データ(たとえば、標高変化、亀裂頻度、亀裂方向、斜面変状など)の併用が必要となろう。ここでは、3.(3)に記したインデックス型のオーバーレイ処理手法を主体に、今後の落石発生懸念箇所の抽出を試みる。

このオーバーレイ処理を実行するにあたっては次のような条件を設定した。①亀裂頻度が高く、②垂直および斜交の亀裂方向からなり、③標高変化が大きい、といった条件が重なり合う箇所を今後の落石発生懸念箇所とした。その結果、温度変化領域だけでなく関連する他の画像を併用した総合的な見地から落石発生の懸念箇所を検討でき、次に列挙するような傾向を把握することができた。写真一7, 8は各画像を用いたインデックス型オーバーレイ処理により落石発生懸念箇所を抽出したものである。

(1) 対象斜面に向かって左側の岩盤ブロック最上部や中央部で温度変化領域が確認されていたが、他の情報による画像をインデックス型オーバーレイ手法で処理してみると、岩盤ブロック中央部に認められる温度変化領域では、水平方向の亀裂(節理)が多く、比較的岩塊としての「すわり」はよいが、岩塊の浮きやぬけなどが考えられる。この箇所は落石の履歴をもち、これまでの懸念箇所の抽出結果にある程度妥当性を見出すことができた。

一方、岩盤ブロック上部の温度変化領域では、標高変化量も大きく、垂直や斜交の亀裂も多く分布する。したがって、この箇所は今後の落石発生箇所として判断できる。

(2) 対象斜面の中央部の岩盤ブロックでは、温度変



写真一7 同時期異時間での落石懸念箇所



写真一8 異時期同時間での落石懸念箇所

化領域が岩盤ブロックの上部や中央部に点在して分布する。とくに、岩盤ブロックの上部では亀裂頻度が高く、垂直方向の節理が卓越し、これまでの標高変化もかなり認められる箇所である。したがって、今後の落石発生懸念箇所として十分に検討すべきところと判断できる。

(3) 対象斜面に向かって右側の岩盤ブロックでは、これまでに落石の履歴をもつところであり、温度変化領域がどの場合にも広範に認められている。さらに、標高変化も極めて大で、亀裂頻度もかなり高いところである。

以上のように、今後の落石発生懸念箇所をゾーニングしていく場合、使用する情報は、単に熱映像による温度変化画像だけでなく、量、質、形式とも多岐にわたる情報(例えば岩盤表面の形状に関する画像情報など)を統一の画素サイズで重ね合わせて解析できる画像のオーバーレイ処理手法の適用が有効となろう。

8. 今後の課題

本研究では、特定斜面を対象として熱映像および写真測量を主体とした広義の地上リモートセンシング手法を

適用し、落石対策調査への有効性を検討したものである。

現実の落石頻発斜面は、分布面積も延長も大であり、急崖から形成され、十分な条件での観測と解析は期待できない。さらに、その調査にあたっては精度面での要求だけでなく、迅速性も要求される。そこで、本手法を現実の落石頻発斜面に適用していく場合、次のような改善・改良策が考えられる。

(1) 熱映像データの位置同定の向上

熱映像による温度画像は落石対策調査を進めていく上で、有用な情報となり得るが、画像が粗く、温度変化領域が判明してもその位置の同定が難しいといった問題がある。そこで、熱映像の観測と併せてビデオやカラー写真による解像度の高い映像の撮影を行う等により、熱映像による温度画像の位置同定を容易にすることが肝要となる。

(2) リアルタイムな画像のオーバーレイ処理への改善

実際の落石発生を想定した場合、素因分析をした結果に基づき、その素因の有意性を判断する。そのためには、本研究で適用した画像のオーバーレイ処理を改善し、リアルタイムな処理が可能になるようにする必要がある。すなわち、そのための一手法としては、今後の懸念箇所を抽出するのに用いる各アイテム（例えば、亀裂頻度、亀裂方向等）の画像情報を各色（赤色・緑色・青色）のイメージメモリ上に展開し、それを合成することにより、色調値で懸念箇所を表現することが考えられる。

(3) 統計処理手法との併用による解析手法の改善

他の統計処理手法とのリンクにより、定量的で客観的な解析が可能となる。すなわち、落石発生直後で、緊急性を要する場合には難しい面があるが、各種素因情報を用いて、これを数量化理論などの統計処理手法と併用することにより、精度の高い解析を可能にする。

(4) 多重センサを用いた観測手法の改善

長大な落石頻発斜面を対象とする場合、多段的な観測・解析手法が必要となる。ここで言う多段的な手法とは、第一に長大な対象斜面から落石発生の重点調査箇所を洗

い出し、第二にその重点調査箇所について本研究手法である地上リモートセンシングによる観測・解析を実施することである。これにより、今後の落石発生の懸念箇所として継続したモニタリング調査を実施していくことが可能となる。

9. おわりに

落石対策調査は、従来から斜め写真の目視判読や地上踏査を主体としてなされてきた。客観性と定量性へ向けての一手法として本研究では地上リモートセンシングを提案した。本研究を通じ、単に熱映像だけを使うのではなく、また地上写真測量結果だけによるのでもなく、両手法の特徴を生かし、複合的なデジタル画像解析を行うことにより、結果の視認性の向上を図ることができた。リモートセンシング技術は今後ますます発展することが予想され、加えて、本研究で採用した画像のオーバーレイ処理手法に変わる新しい解析技術の提案もなされてこよう。さらには、簡易で操作性の高い現地レベルでの観測・解析システムの構築の必要性にせまられよう。その面で、本研究がその一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 層雲峡突発災害調査グループ：1987年6月9日の層雲峡熔結凝灰岩の崩災、北海道地区自然科学資料センター報告、No.3, pp.75~79, 1988.
- 2) (社)日本道路協会：落石対策便覧, pp.25~75, 1983.
- 3) 小橋澄治：土質工学基礎叢書No.9斜面安定, 鹿島出版会, pp.18~54, 1975.
- 4) 瀬戸島政博・森大・赤松幸生・土井鐵徳：多時期の熱映像データと地形計測データを併用した落石多発斜面における動態調査, 日本写真測量学会平成2年度学術講演発表論文集, pp.21~24, 1990.
- 5) 瀬戸島政博・大山容一：斜面災害地点における土地条件分析を目的としたカラー空中写真データの画像解析手法, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.11, No.2, pp.41~53, 1991.

(1991.7.4 受付)

BASIC STUDY OF REMOTE SENSING TECHNIQUE FOR INVESTIGATION OF ROCK FALLING AREAS

Masahiro SETOJIMA and Tetunori DOI

In recent years, the rock fall disasters are taking place in large scale. So far, the investigations for the countermeasure against the rock falling have been mainly carried out through the interpretation of oblique photographs and field exploration. In many cases, however, the results obtained by these methods are often stereotyped and subjective. At present, there is an urgent necessity to carry out the investigation over the wide area of acute and dangerous slope land grasping it as a plane and with uniform accuracy. In this study, therefore, we discussed how to establish the investigation method by ground remote sensing and its possibility of applications, using thermal images of ground and aerial survey specifying a frequent rocksliding slope land as a model area, in an aim to perform safe and efficient investigation for the implementation of countermeasures against the rock fall.