

地上リモートセンシングによる岩斜面の
安定性評価マニュアル(案)

～ 産学官共同研究報告書 ～

平成17年3月

(財)福井県建設技術公社

序 文

(財)福井県建設技術公社は、県および市町村の建設技術の向上と建設事業の効率的な推進を図るため、建設に関する受託・研修等の諸事業を行い、良質な社会資本の整備に寄与することを目的とし、県の出捐により平成6年4月に設立されました。

設立以来、今年で11年目を迎えることとなりました。この間、研修業務、調査・設計マニュアルの作成、建設事業に関する受託業務などを行い、建設事業の円滑かつ効率的な推進を図るための発注者支援を行って参りました。

このうち産学官共同研究支援事業は平成12年度より、大学と民間企業および県の機関（雪対策・建設技術研究所）が対等の立場で共通の課題に取り組み、技術研究開発を推進し、建設技術の高度化を図ることを目的として始まり、当公社はこの共同研究のコーディネートを行っております。

さて、平成元年7月には、本県における越前町玉川地係（一般国道305号）で大変悲惨な岩石崩落災害を経験しておりますが、急峻で脆弱な岩斜面の安全性確保が喫緊の課題となっております。この「地上リモートセンシングによる岩斜面の安定性評価」の研究は、地形や交通条件などにより十分な調査が困難な場所での自然岩斜面や施工中の岩斜面について、リモートセンシング技術を用いて客観的かつ定量的に評価できる手法の確立を目指して取り組んできたものであります。現在、特許第3536046号 登録済み、特願2004-163691 改良特許出願中であります。平成12年度から平成15年度までの4ヶ年にわたる研究を踏まえて、本年度、マニュアル（報告書）作成の運びとなりました。

本書はその研究成果をまとめ、実務者向けにマニュアル化したものであり既存岩斜面の点検、施工中の岩斜面の性状や安定性評価などに活用頂ければ幸いです。

最後に、この共同研究にご協力頂いた方々に対し、深く感謝申し上げます。

平成17年 3月

財団法人 福井県建設技術公社
理事長 笠 松 泰 夫

まえがき

福井県の山岳地域や海岸線は急峻な地形が多く、斜面崩壊や落石などの自然災害が少なくない。このため、道路斜面や住宅地近くの斜面の、精度の高い点検や管理が重要な課題となる。このような状況に対処するための一助として、(財)福井県建設技術公社がコーディネーターとなり、(株)サンワコン、福井大学、福井県雪対策・建設技術研究所、福井県土木部道路保全課が参加した産学官の共同研究により、新たな斜面管理方法の開発と実用化を目指すこととした。

開発および実用化の目標としたのは、地形的に近づくことすら困難な岩盤斜面の安定性を地上リモートセンシングで評価する手法である。利用できるピクセル(画素)の大きさから、衛星リモートセンシングを斜面安定管理に用いることは現時点では限界がある。そこで、地上に設置した簡便な機器を用いる地上リモートセンシングを対象とした。

具体的な手法の概要は、以下の通りである。

- 1) 対象とする岩盤斜面表面における太陽光線の反射スペクトル(周波数ごとの反射率)と、温度変化率(斜面表面温度の上がりやすさ)を計測する。
- 2) 1)の反射スペクトルから、斜面表面の黄色の程度(化学的風化の度合)を表す b^* 値を求める。
- 3) 2)の b^* 値と1)の温度変化率を用いて、統計的な相関関係に基づいて、対象斜面表面の弾性波速度(弾性波縦波伝播速度)と超音波速度(超音波縦波伝播速度)を推定する。
- 4) 日本道路公団の工事実績から求められている弾性波速度、超音波速度と斜面安定性の関係を用いて、斜面の安定性を評価する。

本手法は、対象斜面から離れた位置で簡単な計測を行うだけなので、短時間の簡便な作業と低コストで斜面安定性の評価が可能である。従来、日常的な斜面点検は目視による経験的な方法が中心であった。本手法の適用により、客観的な数値に基づく精度の高い斜面点検が可能となる。本手法の信頼性や適用性については、多数の岩盤斜面に対する試験的な適用や基礎研究により十分な検討を行ってきた。また、本手法による安定性評価結果をビジュアル化して分かりやすい評価を可能にしている。

以上の結果、福井県における産学官の共同研究の成果として、先進的かつユニークな斜面安定性の評価手法が開発された。本マニュアルは、この手法の利用方法と開発結果をまとめたものである。

第1編では、本手法で用いる用語や基本的概念について説明する。

第2編では、具体的な観測方法や評価方法を詳述する。

第3編では、本手法の適用斜面や適用の考え方を示す。

第4編では、本手法の基本となった基礎研究の成果を示す。

共同研究においては、産学官のそれぞれの能力が自由に発揮されるとともに有機的に結合され、貴重な研究成果が得られた。産学官による共同研究の顕著な成功例の一つと考えられる。今後、多数の実際斜面への適用を通じて、信頼性を一層高め、より広範な普及を図る必要がある。本マニュアルが斜面崩壊による災害の防止に大きく貢献することを期待したい。

平成17年3月

福井大学工学部

教授 荒井克彦

産学官共同研究支援事業

研究開発グループ

(平成12年度)

| | |
|---------|--|
| 本 多 秀 夫 | (株) サンワコン 地質部長 |
| 岡 島 尚 司 | (株) サンワコン 情報技術部 研究開発チームリーダー |
| 堂 前 裕 子 | (株) サンワコン 情報技術部 研究開発チーム |
| 荒 井 克 彦 | 福井大学工学部 建築建設工学科 教授 |
| 辻 正 寛 | (財) 福井県建設技術公社 業務課主任 (現 福井県総務部工事検査課参事) |

(平成13年度)

| | |
|---------|---------------------------------------|
| 本 多 秀 夫 | (株) サンワコン 地質部長 |
| 岡 島 尚 司 | (株) サンワコン 情報技術部 研究開発チームリーダー |
| 堂 前 裕 子 | (株) サンワコン 情報技術部 研究開発チーム |
| 荒 井 克 彦 | 福井大学工学部 建築建設工学科 教授 |
| 和 田 秀 一 | (財) 福井県建設技術公社 業務課主任 (現 福井県土木管理課主任) |
| 福 岡 誠 | (財) 福井県建設技術公社 業務課主任 (現 福井県都市整備課主任) |
| 山 木 忠 嘉 | (財) 福井県建設技術公社 業務課主査 |

(平成14年度)

| | |
|---------|--|
| 本 多 秀 夫 | (株) サンワコン 地質部長 |
| 岡 島 尚 司 | (株) サンワコン 情報技術部 研究開発チームリーダー |
| 堂 前 裕 子 | (株) サンワコン 情報技術部 研究開発チーム |
| 荒 井 克 彦 | 福井大学工学部 建築建設工学科 教授 |
| 谷 口 利 重 | 福井県雪対策・建設技術研究所 総括研究員 (現 福井県土木管理課 技術管理室長) |
| 篠 原 久 雄 | 福井県雪対策・建設技術研究所 主任研究員 (現 福井県武生土木事務所 地域整備課主任) |
| 和 田 秀 一 | (財) 福井県建設技術公社 業務課主任 (現 福井県土木管理課主任) |

| | |
|-------|---------------------------------------|
| 福岡 誠 | (財) 福井県建設技術公社 業務課主任 (現 福井県都市整備課主任) |
| 山木 忠嘉 | (財) 福井県建設技術公社 業務課主査 |
| 藤田 博行 | (財) 福井県建設技術公社 業務課技師 |

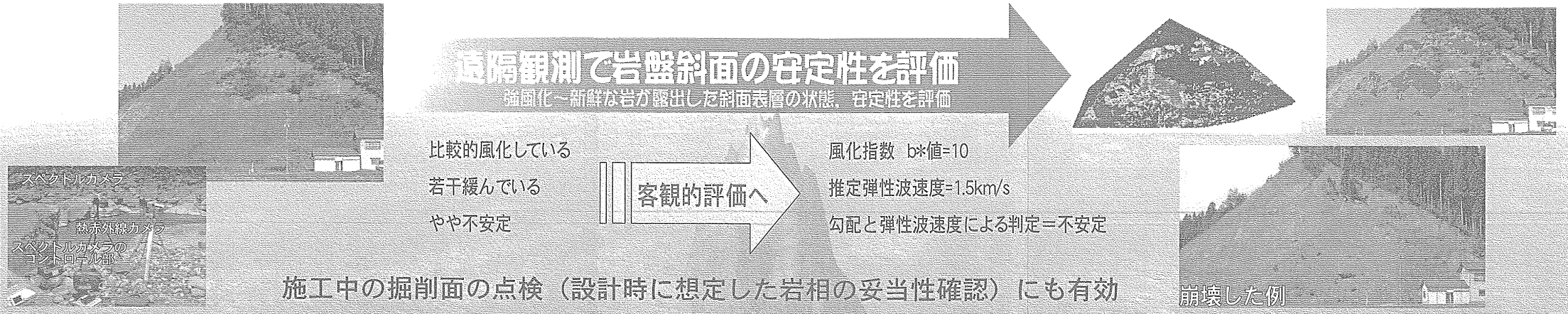
(平成15年度)

| | |
|--------|--|
| 本多 秀夫 | (株) サンワコン 取締役兼地質部長 |
| 岡島 尚司 | (株) サンワコン 情報技術部 研究開発チームリーダー |
| 廣瀬 剛 | (株) サンワコン 情報技術部 研究開発チーム |
| 大澤 美鈴 | (株) サンワコン 情報技術部 研究開発チーム |
| 荒井 克彦 | 福井大学工学部 建築建設工学科 教授 |
| 三田村 文寛 | 福井県雪対策・建設技術研究所 主任研究員 |
| 植村 明 | (財) 福井県建設技術公社 業務課長 (現 福井県敦賀土木事務所次長) |
| 伊藤 桂一 | (財) 福井県建設技術公社 業務課主任 |
| 榎田 強 | (財) 福井県建設技術公社 業務課企画主査 |
| 山木 忠嘉 | (財) 福井県建設技術公社 業務課主査 |
| 藤田 博行 | (財) 福井県建設技術公社 業務課主査 |

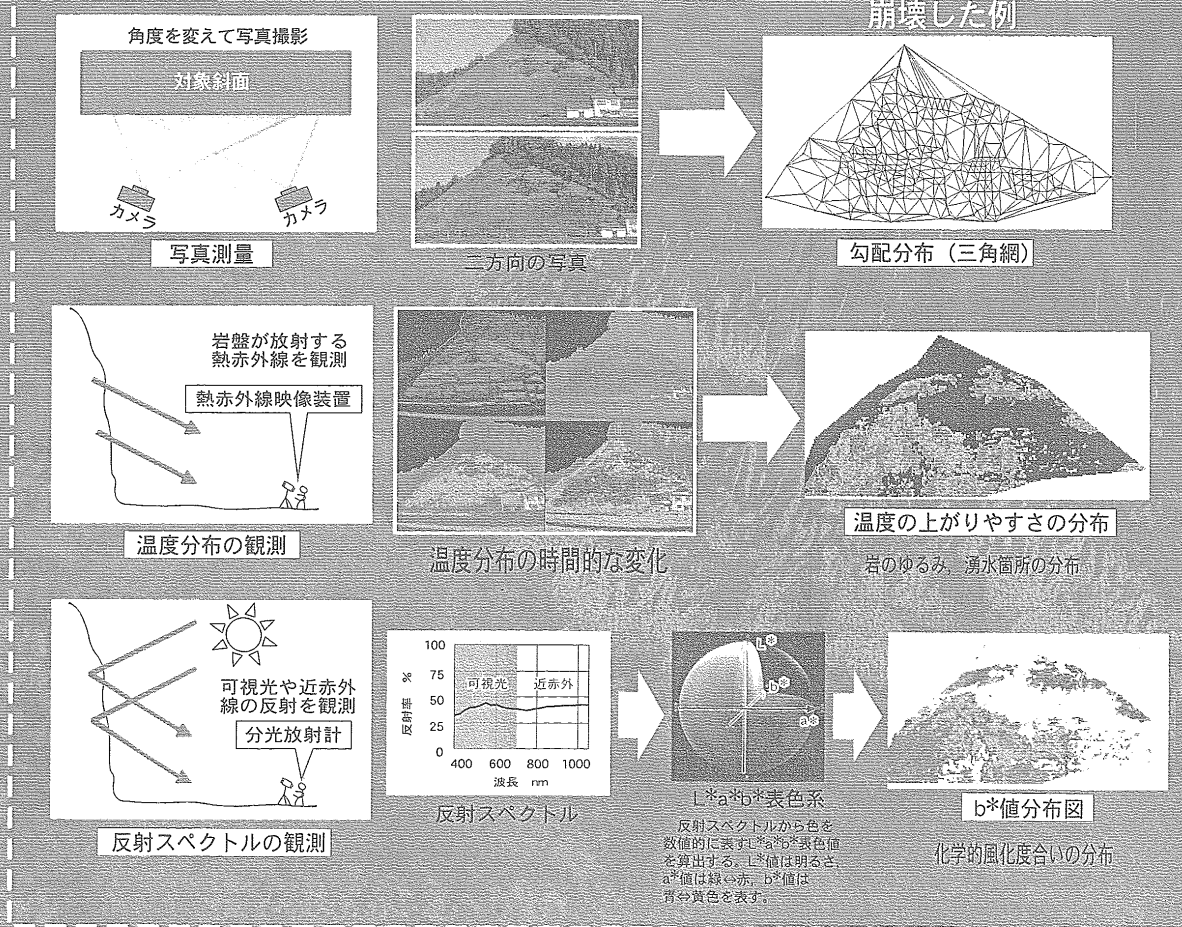
(平成16年度)

| | |
|--------|-----------------------------|
| 中島 敏浩 | (株) サンワコン 情報技術部長 |
| 岡島 尚司 | (株) サンワコン 情報技術部 研究開発チームリーダー |
| 廣瀬 剛 | (株) サンワコン 情報技術部 研究開発チーム |
| 堂前 裕子 | (株) サンワコン 情報技術部 研究開発チーム |
| 荒井 克彦 | 福井大学工学部 建築建設工学科 教授 |
| 三田村 文寛 | 福井県雪対策・建設技術研究所 主任研究員 |
| 平林 透 | 福井県土木部 道路保全課 企画主査 |
| 免 博彦 | (財) 福井県建設技術公社 業務課長 |
| 伊藤 桂一 | (財) 福井県建設技術公社 業務課主任 |
| 榎田 強 | (財) 福井県建設技術公社 業務課企画主査 |
| 山木 忠嘉 | (財) 福井県建設技術公社 業務課企画主査 |
| 藤田 博行 | (財) 福井県建設技術公社 業務課主査 |

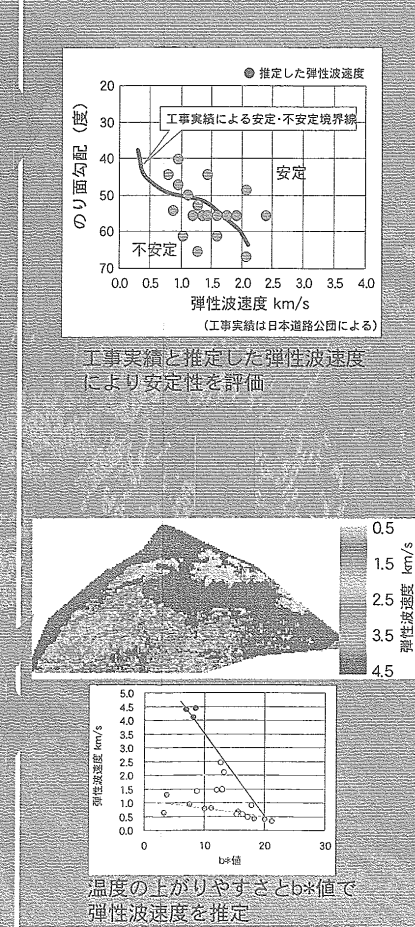
システムの概要



観測



解析・評価



システムの特徴

- 安全に評価できる。
- 客観的に評価できる。
- 斜面全体を均一な精度で評価できる。
- 不安定箇所の見落としを少なくする。
- 結果をビジュアルに表示できる。
- モニタリングに利用しやすい。
- 記録性がよいので、カルテを作成しやすい。

◇ 共同開発 ◇

福井大学
 福井県雪対策・建設技術研究所
 (財)福井県建設技術公社
 (株)サンワコン

* 特許第3536046号 登録済み
 * 特願2004-163691 改良特許出願中

【目 次】

序 文

まえがき

産学官共同研究支援事業 研究開発グループ

システムの概要

< 第1編 基礎資料 >

| | |
|----------------------------|---|
| 1.1 基本事項の解釈 | 1 |
| 1.1.1 地上リモートセンシング | 1 |
| 1.1.2 観測する電磁波 | 2 |
| 1.1.3 反射スペクトル | 4 |
| 1.1.4 L*a*b*表色系 | 5 |
| 1.1.5 表面温度分布 | 6 |
| 1.1.6 温度変化率とRIT比 | 7 |
| 1.1.7 NDVI (正規化植生指数) | 8 |
| 1.2 斜面の安定性評価 | 9 |

< 第2編 観測・評価の方法 >

| | |
|----------------------------|----|
| 2.1 適用条件 | 11 |
| 2.1.1 気象および日射 | 11 |
| 2.1.2 斜面表面の被覆 | 11 |
| 2.1.3 斜面の立地 (観測スペース) | 11 |
| 2.1.4 評価対象とする斜面 | 11 |
| 2.1.5 評価の対象とする崩壊形態 | 12 |
| 2.1.6 使用する観測機器 | 12 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 2.2 観測と評価の手順 | 13 |
| 2.2.1 観測 | 13 |
| 2.2.1.1 地形観測 | 13 |
| 2.2.1.2 温度分布観測 | 14 |
| 2.2.1.3 反射スペクトルの観測 | 15 |
| 2.2.2 データ整測 | 16 |
| 2.2.2.1 データ位置あわせ | 16 |
| 2.2.2.2 反射スペクトルおよびL*a*b*表色値の算出 | 17 |
| 2.2.2.3 植生部分の排除 | 18 |
| 2.2.2.4 RIT比の算出 | 19 |
| 2.2.3 安定性の評価 | 20 |
| 2.2.3.1 弾性波速度の推定 | 20 |
| 2.2.3.2 超音波速度の推定 | 21 |
| 2.2.3.3 き裂係数算出 | 22 |
| 2.2.3.4 弾性波速度と斜面の勾配による安定性の評価 | 23 |
| 2.2.3.5 き裂係数と斜面の勾配による安定性の評価 | 24 |
| 2.2.3.6 安定性の総合的な判断 | 25 |

< 第3編 適用 >

| | |
|------------------------|----|
| 3.1 利用方法 | 27 |
| 3.1.1 既存の斜面の点検 | 27 |
| 3.1.2 施工中の斜面の性状と安定性の評価 | 28 |
| 3.1.3 その他の利用 | 30 |
| 3.2 安定性評価事例 | 31 |

< 第4編 研究成果 >

| | |
|------------------------------------|----|
| 4.1 観測方法について | 37 |
| 4.1.1 反射スペクトル (L*a*b*表色系) 観測 | 37 |
| 4.1.2 温度の上がりやすさの観測 | 40 |
| 4.2 反射スペクトルや温度変化率と岩の性測 | 43 |
| 4.2.1 供試体を用いた基礎実験 | 43 |
| 4.2.2 実斜面への適用結果 | 46 |
| 4.2.3 多数の実斜面への適用結果 | 50 |
| 4.3 研究の経緯 | 57 |
| 4.3.1 平成12年度 | 57 |
| 4.3.2 平成13年度 | 58 |
| 4.3.3 平成14年度 | 59 |
| 4.3.4 平成15年度 | 60 |
| 4.3.5 平成16年度 | 61 |
| 参考文献 | 63 |
| あとがき | 66 |

<第1編 基礎資料>

1.1 基本事項の解釈

1.1.1 地上リモートセンシング

地上に設置した観測機器で、対象物に触れることなく、離れたところから、対象物の種類や状態を評価する技術である。

「リモートセンシング」とは、離れた所から、直接触れることなく対象物を同定あるいは計測し、その性質を分析する技術である（参考文献1）。広義の「リモートセンシング」には地震波や音波などを利用した物理探査も含むが、狭義には「電磁波」を用いた技術を指す場合が多い。マニュアル（案）でも「リモートセンシング」は電磁波を利用した探査技術を指すものとする。

一般に、リモートセンシングは人工衛星に搭載した観測機器によるもの（図1.1.1）を指す場合が多いが、本システムでは地上に設置した観測機器で観測を行う（図1.1.2）。衛星リモートセンシングと区別するために、地上に設置した観測で行うリモートセンシングを「地上リモートセンシング」と定義する。

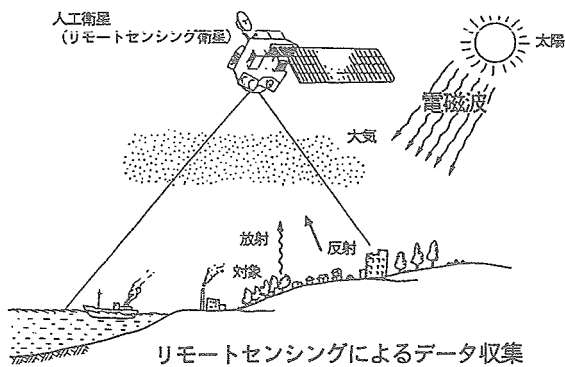


図1.1.1 衛星リモートセンシング（参考文献1）

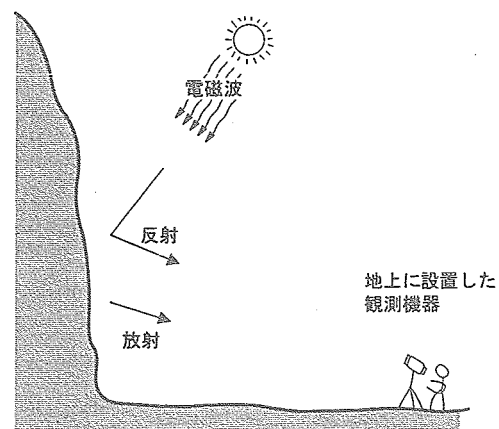


図1.1.2 地上リモートセンシング

1.1.2 観測する電磁波

可視光線と近赤外線、熱赤外線を観測する。可視光線と近赤外線の放射源は太陽である。熱赤外線の放射源は対象物そのものである。

電磁波には波長ごとに異なる名称がある（表 1.1.1）。図 1.1.3 に示すように、可視光線～短波長赤外線を利用するリモートセンシングを「可視・反射赤外リモートセンシング」、熱赤外線を利用するものを「熱赤外リモートセンシング」、マイクロ波を利用するものを「マイクロ波リモートセンシング」と呼ぶ（参考文献 1）。本システムは可視・反射赤外リモートセンシングと熱赤外リモートセンシングを利用する。前者では「反射スペクトル」、後者では「表面温度分布」を観測する。

表 1.1.1 電磁波の種類（参考文献 1）

| 名 称 | | 波長範囲 | 周波数範囲 | |
|---------|-------------|-------------------|--------------|------------|
| 紫 外 線 | | 10nm ~0.4 μ m | 750~3,000THz | |
| 可 視 光 線 | | 0.4 ~0.7 μ m | 430~ 750THz | |
| 赤外線 | 近 赤 外 | 0.7 ~1.3 μ m | 230~ 430THz | |
| | 短 波 長 赤 外 | 1.3 ~ 3 μ m | 100~ 230THz | |
| | 中 間 赤 外 | 3 ~ 8 μ m | 38~ 100THz | |
| | 熱 赤 外 | 8 ~ 14 μ m | 22~ 38THz | |
| | 遠 赤 外 | 14 μ m~ 1 mm | 0.3~ 22THz | |
| 電 波 | サブミリ波 | | 0.1 ~ 1 mm | 0.3~ 3 THz |
| | マイクロ波 | ミリメートル波 (EHF) | 1 ~ 10mm | 30~ 300GHz |
| | | センチメートル波 (SHF) | 1 ~ 10 cm | 3 ~ 30GHz |
| | | デシメートル波 (UHF) | 0.1 ~ 1 m | 0.3~ 3 GHz |
| | | 超 短 波 (VHF) | 1 ~ 10m | 30~ 300MHz |
| | | 短 波 (HF) | 10 ~ 100m | 3 ~ 30MHz |
| | | 中 波 (MF) | 0.1 ~ 1 km | 0.3~ 3 MHz |
| | 長 波 (LF) | 1 ~ 10km | 30~ 300kHz | |
| | 超 長 波 (VLF) | 10 ~ 100km | 3 ~ 30 kHz | |

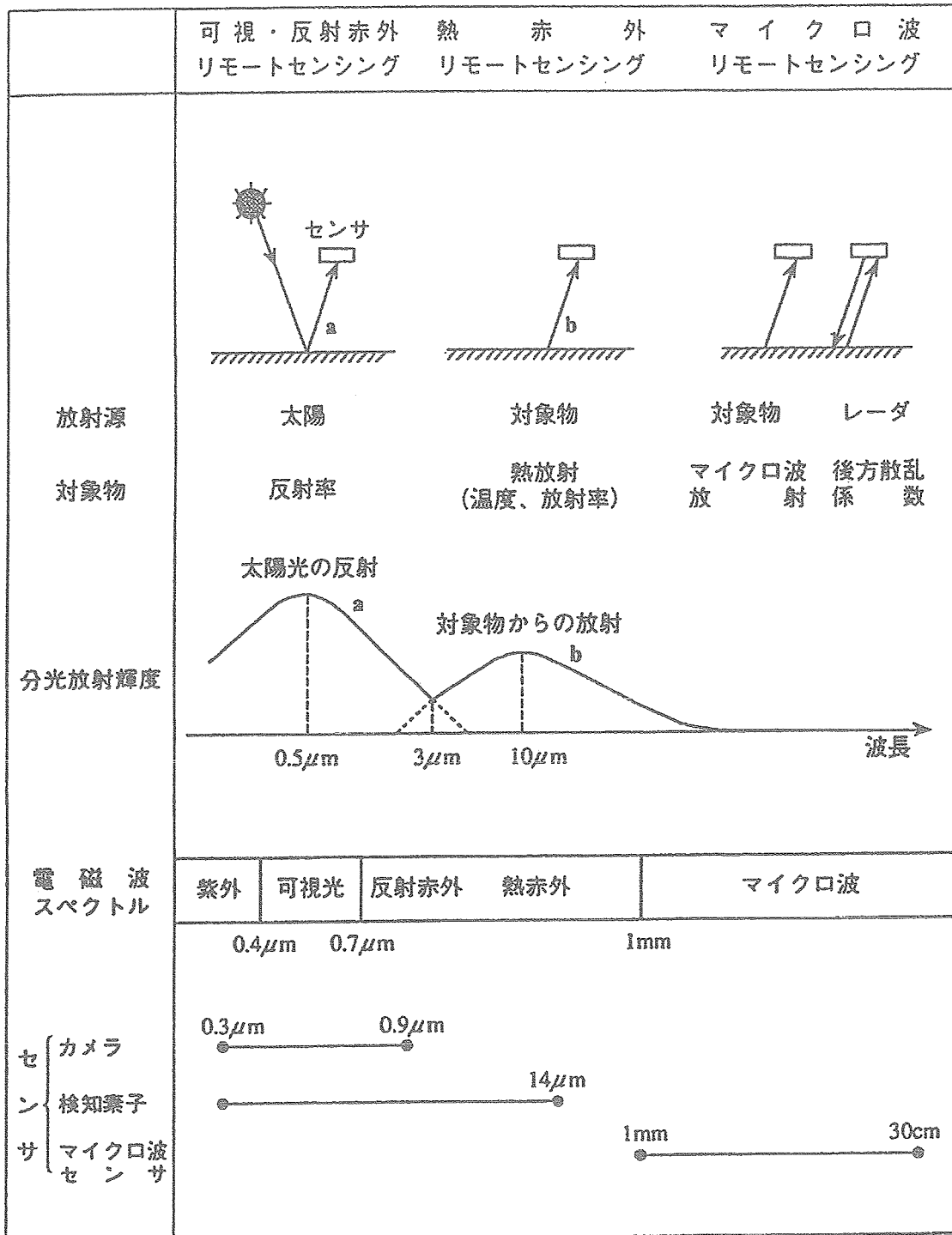


図 1.1.3 電磁波の種類とリモートセンシングの種類 (参考文献 1)

1.1.3 反射スペクトル

太陽からの可視光線や近赤外線が、対象の表面でどれくらい反射するかを、波長ごとに観測したものである。本システムは、反射スペクトルからL*a*b*表色値を算出して利用する。

対象面へ「入射する電磁波の量」に対する「反射する電磁波の量」の割合を反射率と呼ぶ。波長ごとの反射率を反射スペクトルと呼ぶ。本システムでは可視光線～近赤外線（400nm～1000nm）の電磁波を10nm間隔で観測する。斜面と同時に、電磁波をほぼ100%反射する標準白板も観測して、標準白板の観測値に対する対象物の観測値の比を反射率とする（図1.1.4）。L*a*b*表色値については1.1.4で説明する。

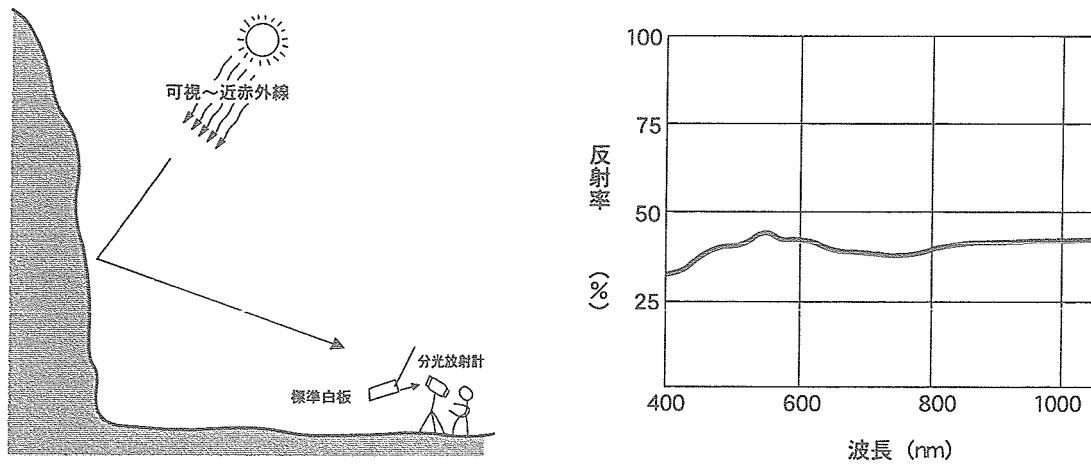


図1.1.4 反射スペクトルの観測

1.1.4 L*a*b*表色系

L*a*b*表色系は、色の違いを数値的に表すものである。L*値は暗いか明るいかを表す。a*値は緑か赤かを表す。b*値は青か黄かを表す。本システムはb*値を利用する。

1976年に国際照明委員会（CIE）で規格化され、日本でもJIS（JIS Z 8729）で採用されている表色系である（参考文献2）。本表色系は、色の違いをL*（エルスター）値、a*（エースター）値、b*（ピースター）値、の三つの値で表現する（図1.1.5）。L*値は暗いか明るいか（黒→白）を示す。a*値はマイナスの値が大きいほど緑に近く、プラスの値が大きいほど赤に近いことを示す。b*値はマイナスの値が大きいほど青に近く、プラスの値が大きいほど黄に近いことを示す。本システムでは主にb*値を利用する。

岩石の化学的風化により、水酸化鉄鉱物が増加して、これに伴いb*値が系統的に大きくなる。岩石のb*値は化学的風化の度合いを表す。

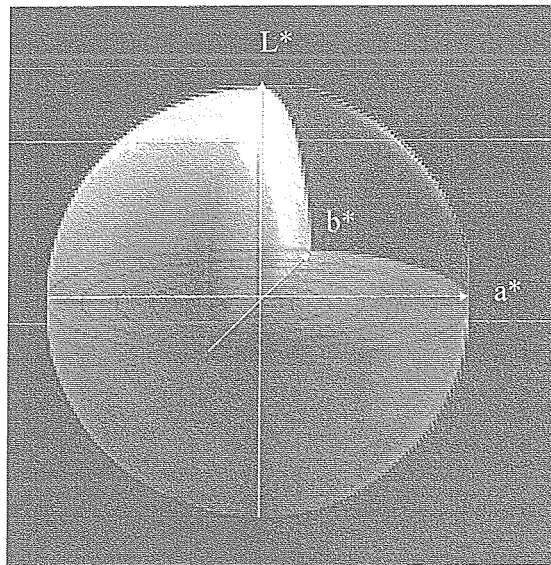


図1.1.5 L*a*b*表色系（参考文献2）

1.1.5 表面温度分布

対象面から放射する熱赤外線を測定し、表面温度を推定する。対象面をスキャンして温度分布データとする。

物体は温度に応じて決まった量の電磁波を放射する。図1.1.6は黒体（入射する全ての電磁波を吸収する仮想的な物体）の温度と放射する電磁波の量の関係である。通常の温度（270K～320K程度）では主に熱赤外線（8～14 μm ）を放射する。対象物体から放射する熱赤外線の量から、その表面温度を推定することができる。本システムでは熱赤外線カメラで多点の熱赤外線放射量を観測して、温度分布画像を得る。

実際の物体は黒体ではないので、図1.1.6より放射する電磁波の量が少ない。黒体の放射に対するそれぞれの物体の放射量の比を放射率と呼ぶ。対象面の放射率を知ることは困難であるため、本システムでは放射率を1として観測する。よって、観測した表面温度は実際の温度とは異なる。しかし、利用するのは対象の温度の上がりやすさであるので、絶対温度でないことは大きな問題ではないと判断する。

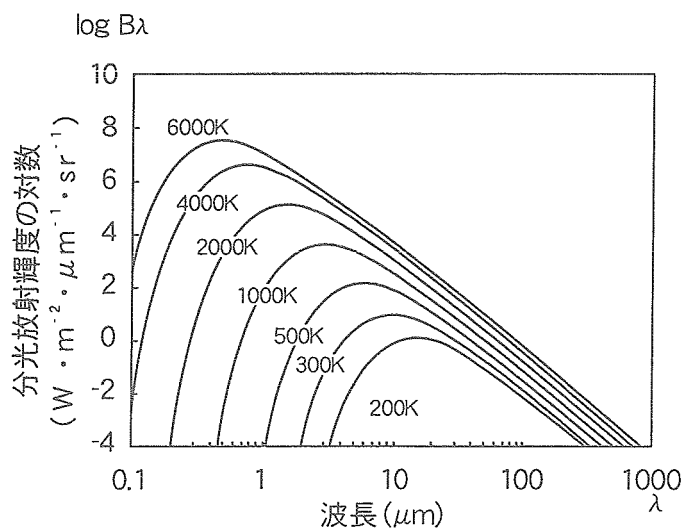


図1.1.6 黒体の温度と電磁波の放射（参考文献1）

1.1.6 温度変化率とRIT比

対象の表面温度が、単調に増加する時間帯の温度変化量を、時間で除した値 (°C/h) を温度変化率と呼び、次式で算出する。

$$\text{温度変化率} = \frac{\text{temp2} - \text{temp1}}{\Delta t}$$

ここで、temp1：単調に温度が上昇し始めた時の温度 (°C)、temp2：単調な温度上昇が終了した時の表面温度 (°C)、 Δt ：temp1とtemp2の間の時間 (h)、である。

対象の温度変化率を、対象と向きを合わせて設置した基準物体 (油土) の温度変化率で除した値をRIT比と呼び、次式で算出する。

$$\text{RIT比} = \frac{S_{RT} \cdot \cos(\theta_v)}{Y_{RT} \cdot \cos(\theta_s)}$$

ここで、 S_{RT} ：斜面の温度変化率、 Y_{RT} ：油土の温度変化率、 θ_s ：斜面への入射角、 θ_v ：油土への入射角、である。

表面温度の上がりやすさとして、温度変化率がある。しかし、温度変化率は日射条件の影響も強く受けるため、岩石の種類や風化度合いなどが同じ斜面でも、斜面の向きや季節の違いによって同じ値とはならない。温度変化率は、一般的なパラメータとしての利用が困難である。この問題を解決するために、RIT比を定義した。

RIT比は基準物体 (油土) に対して、どれくらい温度が上がりやすいかを表す。対象と基準物体の温度変化率が気象条件の影響を同じように受けており、比とすることで気象条件が打ち消される。なお、基準物体 (油土) の向きを斜面と完全に一致させるのは難しい。RIT比算出の際に、向きの違いにより生ずる太陽光の入射角の違いを利用した補正を行う。入射角による補正の方法や、RIT比の再現性などについては、4.1.2に示す。

⌘ RIT比：RITは「Rate of Increment of surface Temperature」の略。本研究で定義した用語である。

⌘ 油土：美術、工芸、彫刻などの分野で利用されている。天然の粘土と油を混ぜ合わせたものである。含水比や含油比が変化しにくく、直射日光を長時間受けてもき裂が発生しないなど、性質が変化しにくいことから、基準物体として適していると判断した。

1.1.7 NDVI^① (正規化植生指数)

植物は可視光線を吸収し、近赤外線を強く反射する。可視光線と近赤外線の反射の差で、植物の活性度を評価する指標である。

$$NDVI = \frac{\text{近赤外バンドの反射率} - \text{赤バンドの反射率}}{\text{近赤外バンドの反射率} + \text{赤バンドの反射率}}$$

ここで、バンドは波長域を表す。

植物は光合成のために可視光線を強く吸収する。一方、葉の温度が高くなりすぎないようにするために、近赤外線を強く反射する細胞構造になっている。これにより、植物の反射スペクトルでは可視光線の反射率と近赤外線の反射率が大きく異なる（図1.1.7）。この差を利用して植物の活性度（葉緑素の量）を表すのがNDVIである。本システムでは植物に覆われている部分は対象外なので、NDVI値で植生部分を識別して対象外としている。

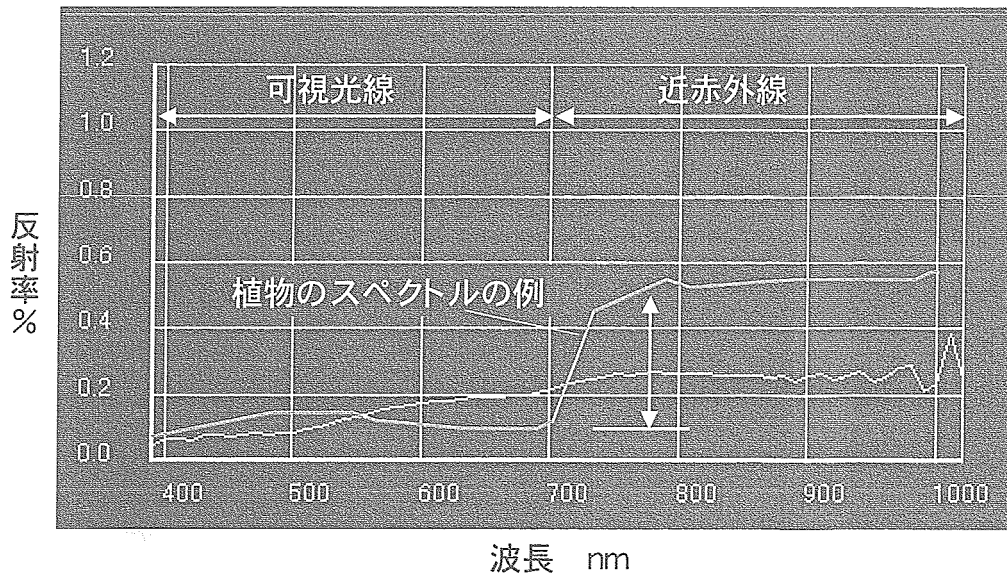


図1.1.7 植物の反射スペクトル

^①NDVI: Normalized Difference Vegetation Indexの略である。リモートセンシングで、一般的に利用される値である。

1.2 斜面の安定性評価

本システムでは、「弾性波速度と斜面勾配の関係」および「き裂係数と斜面勾配の関係」で、斜面の安定性を評価する。判定の基準は日本道路公団の工事実績に基づく図による。

日本道路公団の工事実績に基づいて、弾性波速度と斜面勾配の関係で斜面の安定性を評価する指標がある（図1.2.1）。例えば、弾性波速度が1 km/sであれば、勾配1:0.8程度が安定と不安定の境界となる。き裂係数と斜面勾配の関係で斜面の安定性を評価する指標もある（図1.2.2）。本システムでは、斜面各部分の弾性波速度とき裂係数を推定して、この二つの図に当てはめて斜面の安定性を評価する。

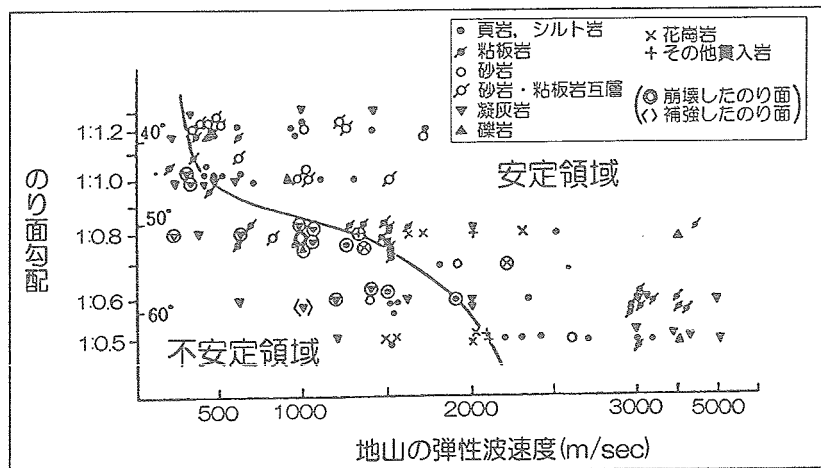


図1.2.1 弾性波速度とのり面勾配による安定性の評価（参考文献3）

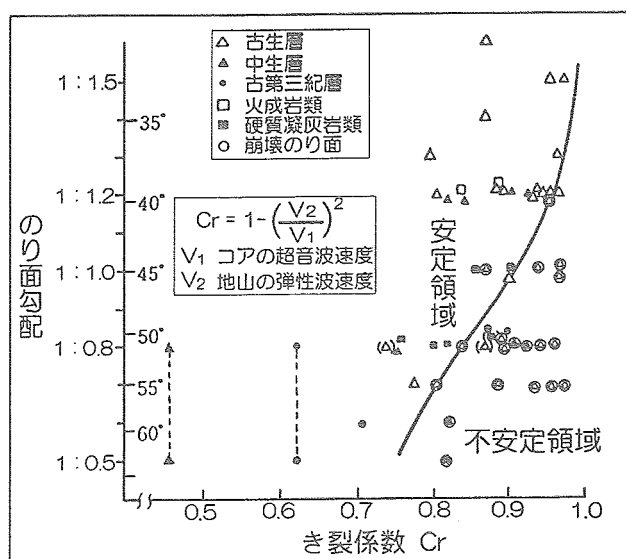


図1.2.2 き裂係数とのり面勾配による安定性の評価（参考文献3）

<第2編 観測・評価の方法>

2.1 適用条件

2.1.1 気象および日射

- ・ 白板と斜面に同時に直射日光が当たる時に反射スペクトルを観測する。
- ・ 反射スペクトルは数分で観測を終了するので、観測している間に、直射日光が斜面と標準白板に当たっていればよい。
- ・ 表面温度の時間的な変化は、直射日光による斜面表面の温度上昇を観測する。
- ・ 曇りの日でも、表面温度が増加しない状態が続いた後に、斜面と油土が同じタイミングで直射日光を受けて、数10分ほど直射日光を受け続け、それぞれの表面温度が単調に増加する場合は、観測可能とする。
- ・ 表面温度の時間的な変化は、周囲の気温も上昇過程にある時間帯（14時くらいまで）に観測する。
- ・ 反射スペクトルと温度分布は、霧などがなく、目視で対象斜面が明瞭に見える時に観測する。

2.1.2 斜面表面の被覆

- ・ 岩が露出している斜面を対象とする。

2.1.3 斜面の立地（観測スペース）

- ・ 斜面を見通せる場所に観測機器を設置できる場所が必要である。
- ・ 周囲の気温が上昇過程のときに、直射日光を受ける斜面を対象とする。

2.1.4 評価対象とする斜面

- ・ 安山岩、花崗岩、凝灰岩の斜面を対象とする（その他の岩種は、データを集めて、随時、評価対象斜面を増やしていく）。
- ・ 強風化～新鮮な岩で構成される斜面を対象とする。

2.1.5 評価の対象とする崩壊形態

- ・安定性の評価は、岩の風化や緩みによる表層崩壊を対象とする。

2.1.6 使用する観測機器

『分光放射計・・・反射スペクトルを観測する機器』

- ・走査型^ノ（スキャンできる型式）であること
- ・可視光線～近赤外線（400～1000nm程度）を観測できること
- ・10nm間隔程度で観測できること

『熱赤外線映像装置・・・表面温度分布を観測する機器』

- ・走査型（スキャンできる型式）であること
- ・観測する波長帯が8～13 μ mまたは8～14 μ mであること

『放射温度計・・・油土の温度を観測する機器』

- ・観測する波長帯が8～13 μ mまたは8～14 μ mであること
- ・1分間隔で自動的にデータを取得できること

『油土・・・基準物体として使うもの』

- ・標準硬度のレオン油土^ノであること

^ノ走査型　：対象面上で点（小領域）を順次移動させることにより、対象面全体をカバーする方式。

^ノレオン油土：硫黄分を含まない油と天然土を原料に作られた最も一般的な油土である。安定した品質で、大量に入手することが可能であることから、採用している。

2.2 観測と評価の手順

2.2.1 観測

2.2.1.1 地形観測

三次元写真測量で対象斜面の形状を捉える。各ポイントの勾配、走向傾斜をとらえる。

『三次元データの取得方法』

対象斜面の写真を2方向以上から撮影し（図2.1）、三次元写真測量ソフトで斜面の形状を三次元データにする。三次元写真測量は本開発によるものではないので、簡単に説明するに留める。

『観測の手順』

- ① 2方向からの写真に写りこむ位置に、座標決定用のスタッフ（水平垂直方向）を設置する（図2.2）。
- ② 垂直スタッフの間隔と水平スタッフの方向および座標の奥行き方向を記録する。
- ③ 写真を撮影し、三次元写真測量ソフトにて三次元データにする（図2.2）。

『参考（補足測量）』

ノンプリズム光波測距儀などで、できるだけ多くの点の座標を測量して、写真測量の精度を上げることができる。必要に応じて利用する。

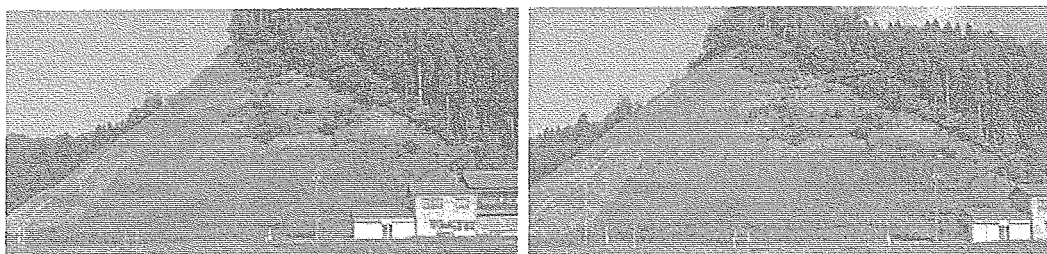


図2.1 三次元写真測量のために撮影した2枚の写真の例

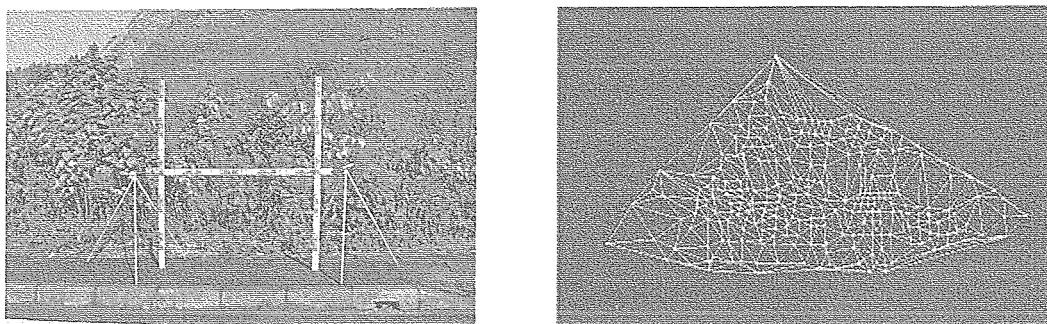


図2.2 （左）三次元写真測量のためのスケールと（右）解析した三角網

2.2.1.2 温度分布観測

日射による昇温過程の、斜面の表面温度分布を観測する。斜面と同じ向きに設置した基準物体（油土）の表面温度も観測する。観測は1分間隔を原則とする。

『油土の設置角度の決定（事前準備）』

三次元写真測量による等高線図から斜面の走向傾斜^ノの範囲を決める。走向傾斜の範囲をカバーし、鉛直線の向きを20°程度ずらした方向を油土の設置方法として設定する。

『観測開始時間の決定（事前準備）』

斜面に日射が当たる10分前には観測をスタートできるように準備する。

『油土の設置（事前準備）』

観測のスタート時に、油土の表面温度が周辺的环境条件に対して平衡状態になるように、前日の夜から油土を設置する。前日に設置できない場合は、運搬時の車内温度の影響を受けないように工夫する。

『油土の表面温度測定』

油土の表面温度は放射温度計で、1分毎に測定する（図2.3）。測定中に油土表面に放射温度計の影が映りこまないよう注意する。

『斜面の表面温度観測』

熱赤外線映像装置で斜面表面の温度分布を1分間隔で取得する（図2.4、図2.5）。原則として、日射が当たる前から表面温度が下がり始めるまで観測する。観測中は、以下のことに注意し、記録を残す。

○斜面に日射が当たり始めた時刻と油土に日射が当たり始めた時刻（可視画像も同時に取得できる熱赤外線映像装置であれば、斜面に日射が当たり始める様子を画像として記録できる）。

○日射の状態（雲などの影響で日射が遮られた時刻など）。

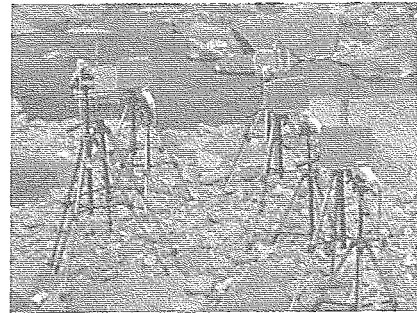


図 2.3 油土の設置状況



図 2.4 観測機器の設置状況

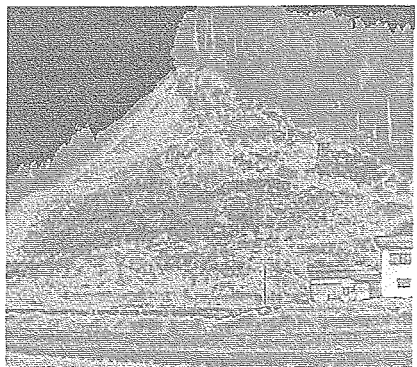


図 2.5 温度分布画像の例

ノ 走向傾斜：ある平面が、水平面と交わる直線を走向という。平面の上で、走向と直角方向の直線と水平面のなす角を傾斜という（ある平面の最大傾斜角）。

2.2.1.3 反射スペクトルの観測

走査型の分光放射計で斜面表面の反射スペクトルを観測する。

『入射条件』

- ・入射角ができる限り小さくなる時間帯に観測する。

『反射スペクトル観測』

- ・熱赤外線映像装置の設置場所の近傍に反射スペクトルカメラを設置する（図2.4）。

『標準白板の設置』

- ・斜面の反射スペクトル画像の下端または上端に写りこむように標準白板を設置する。
- ・標準白板はできる限り斜面の向きと同じになるように設置する（図2.6、図2.7）。
- ・斜面の向きが大きく変化する斜面の場合は、斜面の向きに応じて、標準白板の向きを変えて、複数枚のデータを観測する。
- ・設置した標準白板の走向傾斜を記録する。

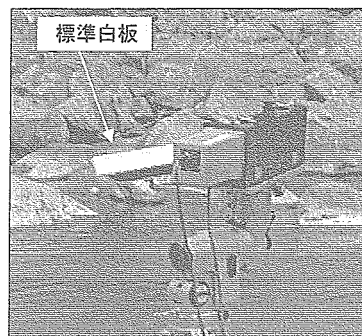


図2.6 スペクトルカメラと標準白板

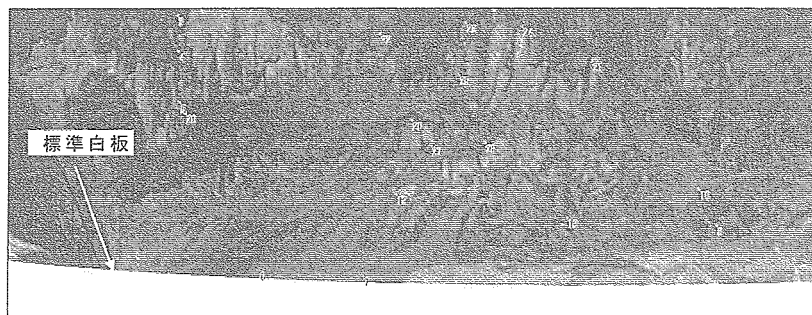


図2.7 スペクトル画像と写りこませた標準白板

2.2.2 データ整理

2.2.2.1 データ位置あわせ

地形データ、反射スペクトルデータ (L*a*b*表色系)、温度分布 (RIT比) データの幾何補正を行う。

光学写真を基本にして、地形データ (三角網) と表面温度分布画像、反射スペクトルデータの位置を合わせる (図 2.8)。

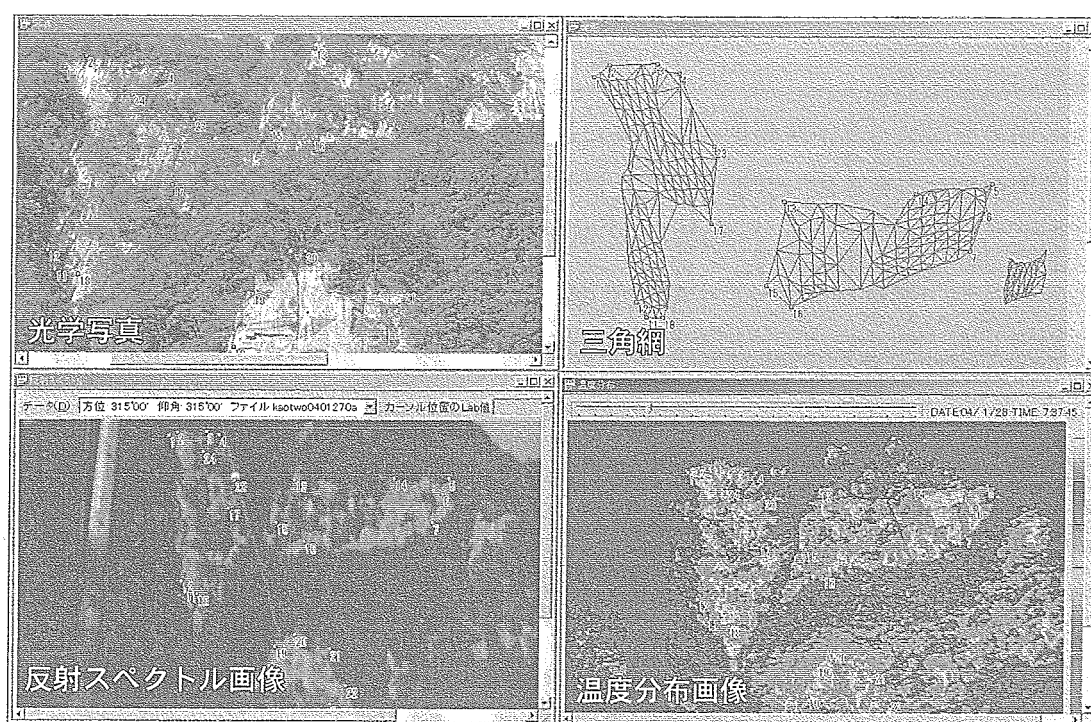


図 2.8 位置あわせ (幾何補正) を行う 4 種類の画像データ

2.2.2.2 反射スペクトルおよびL*a*b*表色値の算出

CIE（国際照明委員会）で定められている方法で、反射スペクトルからL*a*b*表色値を算出する。L*a*b*表色値を算出する前に、反射スペクトルの入射角補正を行う。

『反射率の算出』

- ①観測時刻と現場の緯度・経度から、観測時の太陽高度と太陽方位を求める。
- ②対象面の向きと太陽の位置から、斜面の各部分への太陽光の入射角度（図2.9）を算出する。
- ③標準白板の向きと太陽の向きから、標準白板への太陽光の入射角度を算出する。
- ④斜面の輝度を標準白板の輝度で割った値を、それぞれの入射角度で補正した値を反射率として算出する（図2.10）。4.1.1参照に補正方法を示す。

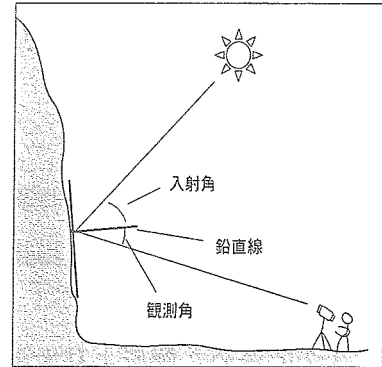


図2.9 入射角と観測角

『L*a*b*表色値の算出』

上述の方法で算出した反射スペクトルから、各ピクセル^ノのL*a*b*表色値を算出する（図2.11）。

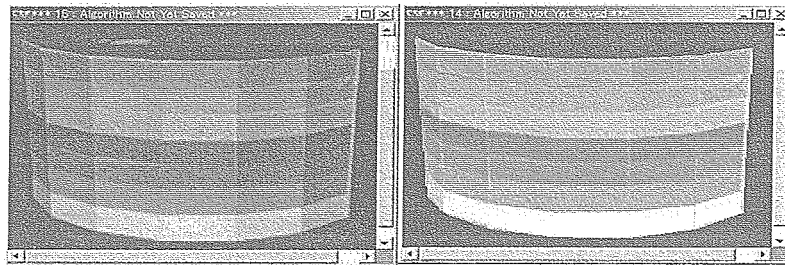


図2.10 入射角補正で、明るさが均等になった例

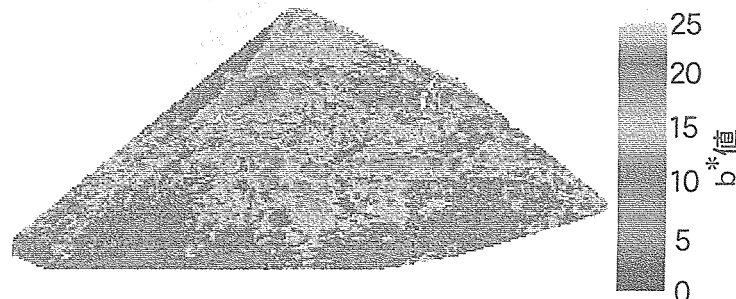


図2.11 b*値の分布

^ノピクセル：画素。走査型の観測機器でスキャンした、画像上の点（小領域）。

2.2.2.3 植生部分の排除

反射スペクトルからNDVI(正規化植生指数)を算出する。NDVIが^{いき}閾値以上の部分を植生部分として、その部分を評価対象から除外する。

『NDVIの算出』

1.1.7で説明した方法で、各ポイントのNDVIを算出する。

『植生部分の排除』

- ①斜面の写真とNDVIデータを重ねて、NDVIが閾値^ノより大きいピクセルは緑で塗りつぶし、それ以外は写真を表示する(図2.12、図2.13)。
- ②閾値を変えながら、目視で画像を確認して、植物の部分がうまく塗りつぶされる閾値を決める。
- ③②で決めた閾値より大きい部分は植生部分として、解析対象から除外する。

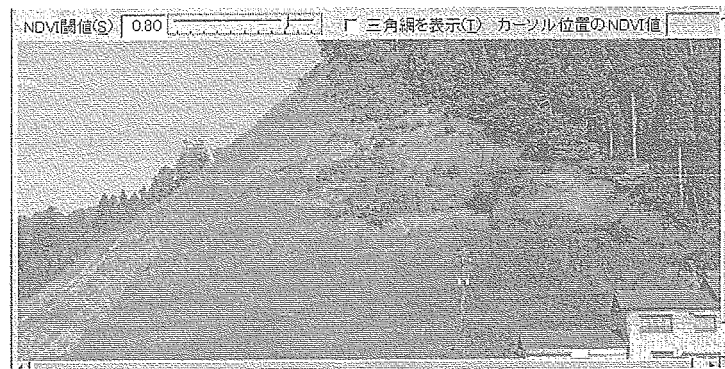


図 2.12 NDVIによる植生部分の判定で閾値が不適切な場合

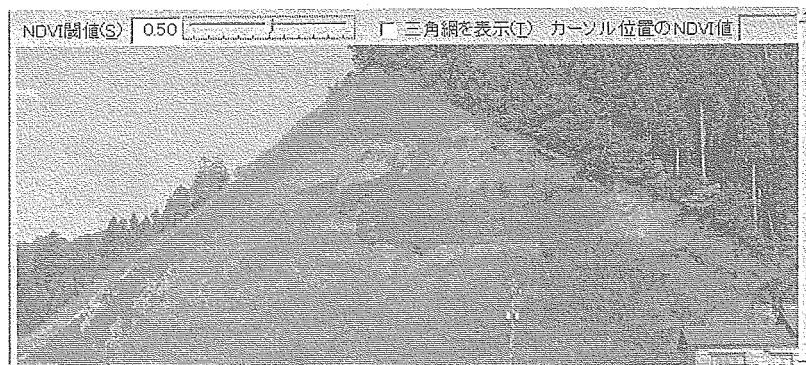


図 2.13 NDVIの閾値が概ね妥当となった例(目視で確認しながら閾値を決める)

^ノ閾値(しきいち、いきち) : 変量のある値を境として、何らかの現象が起きたり、何らかの操作をするとき、その値を閾値という。

2.2.2.4 RIT比の算出

温度分布と油土の表面温度データから、斜面各ポイントのRIT比を算出する。

- ①直射日光により、油土の表面温度が一様に増加する時間帯を温度変化率の算出時間帯とする。この時、油土と斜面の温度上昇がほぼ同時に始まっているか注意する。
- ②斜面各部の向きと油土の向きを比較して、斜面の部分ごとにそれぞれ一番向きが近い油土をその部分の基準油土とする（プログラムで処理）。
- ③各点ごとに比較する油土の温度変化率算出時間帯で、斜面各部分の温度変化率を算出する。
- ④温度変化率算出時間帯の中間の時刻における油土への太陽光の入射角を算出する。同じように斜面各部への入射角も算出する。
- ⑤1.1.6で示した方法でRIT比を算出する。

2.2.3 安定性の評価

2.2.3.1 弾性波速度の推定

観測、整理した b^* 値から、経験式を利用して、弾性波速度を算出する。

本マニュアルでは、安山岩、花崗岩、凝灰岩斜面の弾性波速度を、式(2.2)、(2.3)、(2.4)でそれぞれ推定する。

・安山岩の場合

$$\left. \begin{array}{ll} V_r = (b^* - 20) \cdot D + 0.5 & : b^* \leq 20 \\ V_r = 0.5 & : b^* > 20 \\ D = -0.9 \cdot \text{RIT比} + 0.6 & : \text{RIT比} \geq 0.7 \\ D = -0.03 & : \text{RIT比} < 0.7 \end{array} \right\} (2.2)$$

ここで、 D ：推定式の勾配、である。

・花崗岩の場合

$$\left. \begin{array}{ll} V_r = (b^* - 18) \cdot D + 0.5 & : b^* \leq 18 \\ V_r = 0.5 & : b^* > 18 \\ D = -0.3 & : 0.4 \leq \text{RIT比} \leq 0.75 \end{array} \right\} (2.3)$$

・凝灰岩の場合

$$\left. \begin{array}{ll} V_r = (b^* - 25) \cdot D + 0.5 & : b^* \leq 25 \\ V_r = 0.5 & : b^* > 25 \\ D = -2.0 \cdot \text{RIT比} + 1.0 & : \text{RIT比} < 0.5125 \\ D = -0.025 & : \text{RIT比} < 0.5125 \end{array} \right\} (2.4)$$

上記以外の岩種は、推定式を未作成である。本システムによる観測を行い、 b^* 値やRIT比が大きい部分と小さい部分で、弾性波速度を実測する。 b^* 値を説明変数とし、RIT比に応じて勾配が異なる弾性波速度推定式を作成する。推定式の作成は、4.2.3の研究成果を参考とする。

2.2.3.2 超音波速度の推定

観測、整理したb*値から、経験式を利用して、超音波速度を算出する。

本マニュアルを作成する段階では、安山岩、花崗岩、凝灰岩斜面での弾性波速度推定式が導かれている。

安山岩の超音波速度 = $-0.23 \cdot b^* + 6.54$

花崗岩の超音波速度 = $-0.30 \cdot b^* + 8.00$

凝灰岩の超音波速度 = $-0.20 \cdot b^* + 5.00$

上記以外の岩種は、推定式を未作成である。本システムによる観測を行い、b*値が大きい部分と小さい部分で、岩石片を採取し、超音波速度を実測する。b*値を説明変数とした超音波速度推定式を作成する。推定式の作成は、4.2.3の研究成果を参考とする。

2.2.3.3 き裂係数算出

き裂係数は弾性波速度と超音波速度から次式で求める。

$$Cr = 1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2$$

ここで、 Cr : き裂係数、 V_1 : 弾性波速度(km/s)、 V_2 : 超音波速度(km/s)、である。

き裂係数は弾性波速度と超音波速度を利用して算出する値である。弾性波速度は主に、岩片の硬さとき裂の量や状態に影響を受ける値である。超音波速度は、き裂を含まない岩片で測定するので、岩片の硬さの影響を強く受け、き裂の情報は含まない。両者の比をとることで、岩片の硬さの情報がキャンセルされて、き裂の情報が抽出される。これを利用したのが、き裂係数であり、一般に利用されている。

2.2.3.4 弾性波速度と斜面の勾配による安定性の評価

日本道路公団の工事実績による、安定性評価指標に、推定した弾性波速度と写真測量で得た斜面勾配をプロットして、各ポイントの安定性を評価する。

日本道路公団の工事実績による安定性評価図（図 2.14）に、各部分ごとに観測した斜面勾配と推定した弾性波速度をプロットし、安定性を評価する（図 2.15）。

切土斜面など、斜面の勾配が均一な場合、概略の斜面勾配と弾性波速度の関係で評価することも可とする。植生や小段の影響で、写真測量の精度が悪いときに有効である。

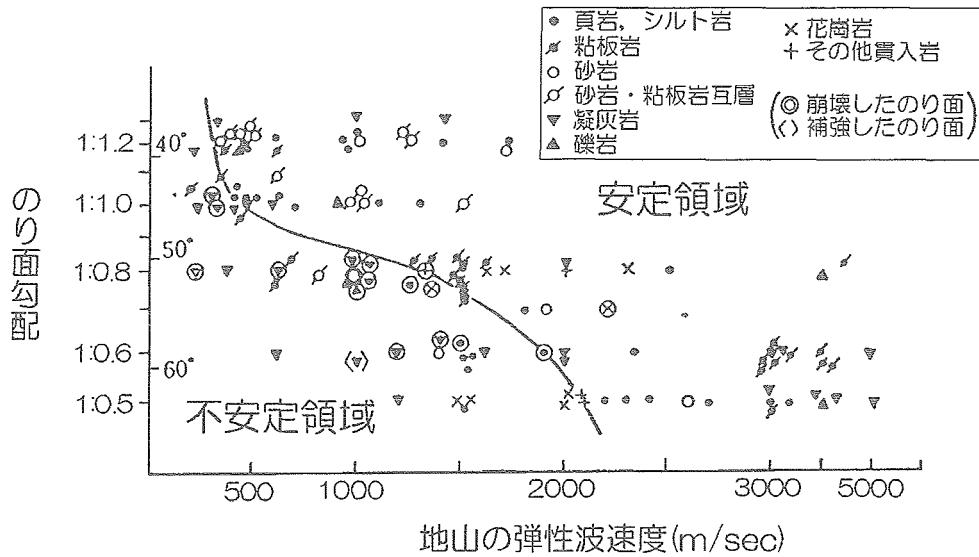


図 2.14 道路公団の工事実績による安定性の評価指標（参考資料 3）

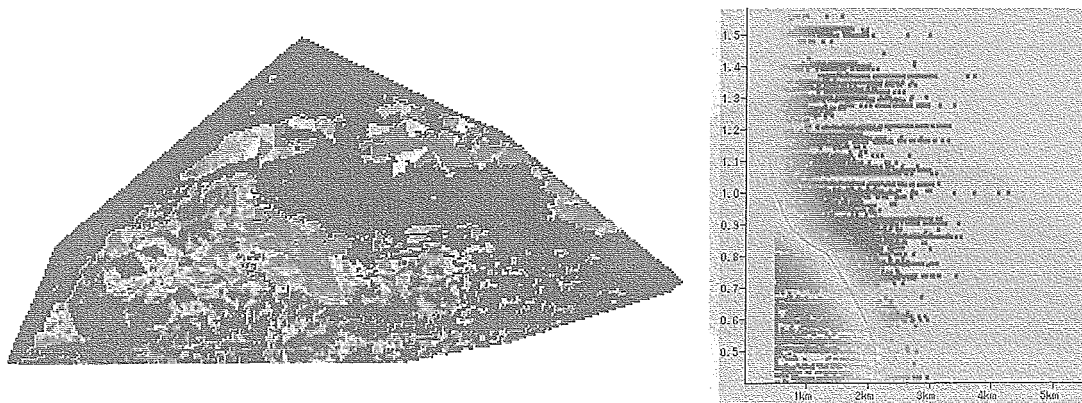


図 2.15 観測・解析したデータを図 2.14 に適用して安定性を評価した例

2.2.3.5 き裂係数と斜面の勾配による安定性の評価

日本道路公団の工事実績による、安定性評価指標に、推定したき裂係数と写真測量で得た斜面勾配をプロットして、各ポイントの安定性を評価する。

日本道路公団の工事実績による安定性評価図（図 2.16）に、各部分ごとに観測した斜面勾配と推定したき裂係数をプロットし、安定性を評価する（図 2.17）。

切土斜面など、斜面の勾配が均一な場合、概略の斜面勾配と弾性波速度の関係で評価することも可とする。植生や小段の影響で、写真測量の精度が悪いときに有効である。

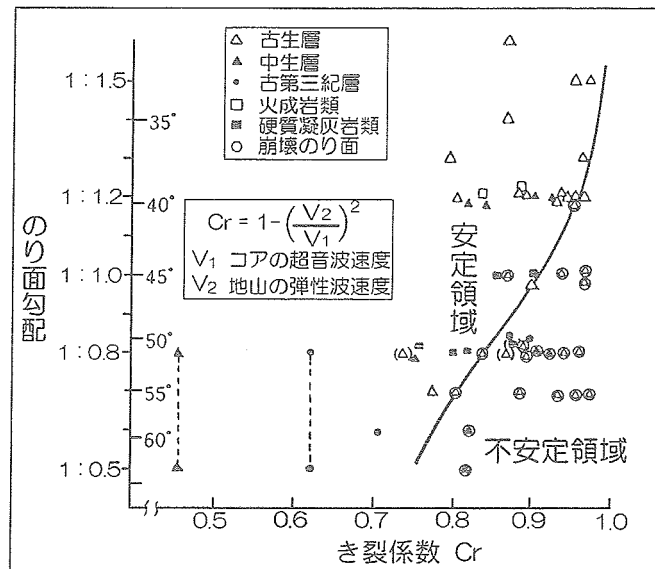


図 2.16 日本道路公団の工事実績による安定性の評価指標（参考文献 3）

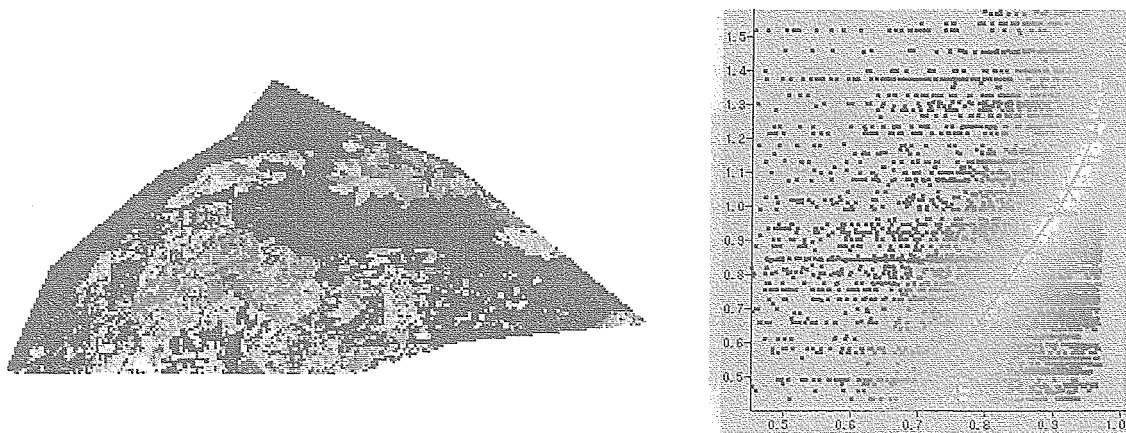


図 2.17 観測・解析したデータを図 2.16 に適用して安定性を評価した例

2.2.3.6 安定性の総合的な判断

弾性波速度による評価またはき裂係数による評価で不安定と評価されたポイントは不安定と判断するが、目視観察などを併用して、総合的な解釈を行う。

本システムでは、目視観察では定量的に評価するのが難しい化学的風化や物理的風化に伴う岩斜面の劣化を、弾性波速度やき裂係数として評価する。一方、目視観察の方が捉えやすい性状や、目視観察と本システムのデータと合わせて判断すべき性状がある。弾性波速度による評価またはき裂係数による評価で不安定と評価されたポイントは不安定と判断するが、以下のような項目に注意して、総合的な解釈も行う。

- ・ オーバーハング
- ・ 集水地形
- ・ 浮石の状況
- ・ 流れ盤、受け盤などの地質構造
- ・ 湧水や苔（降雨時のみの湧水など）などの分布
- ・ 風化の不連続面
- ・ 変状

< 第 3 編 適 用 >

3.1 利用方法

3.1.1 既存の斜面の点検

①道路に面する切土斜面、②急傾斜地の斜面、③原石山などで、岩が露出する斜面の安定性を評価する。

①道路に面する切土斜面で、安定性の評価を客観的かつ定量的に行う。定期的な点検により、風化・緩み領域の拡大状況を客観的に評価する。

②急傾斜地の斜面で、斜面の安定性を客観的かつ定量的に行う。

③原石山の掘削斜面で、工事中の災害防止や工事後の管理において、斜面の安定性を客観的かつ定量的に行う。

以上のように、岩が露出している斜面の安定性を評価する。目視点検も同時に行い、明瞭な変状やオーバーハング、湧水などを把握する。通常の目視だけの点検結果に加えて、以下のことを客観的・定量的に評価できる。

- ・写真測量による平面形状・断面形状
- ・風化度合いの分布
- ・緩み（弾性波速度）の分布
- ・弾性波速度と勾配、き裂係数と勾配による安定性

総合的な評価として、以下に示すような、不安定さを助長する素因についても検討し、変位観測や詳細調査の必要性について検討する。

- ・明瞭な風化の不連続面がないか。
- ・風化の不連続面からの湧水がないか。

なお、岩が露出している斜面を対象とするものの、条件によっては、落石防止網程度の被覆は障害にならない場合もある。現段階では、個々の現場で適用の可否を判断する必要があるため、そのような場合には、相談窓口（巻末の奥付に記載）に相談されたい。

3.1.2 施工中の斜面の性状と安定性の評価

施工中に岩が露出した掘削面（下表参照）を観測し、以下を評価・記録する。

- ①設計段階で想定した地山の性状との違い（設計の見直しの必要性）。
- ②管理段階で注意すべきポイント。
- ③対象斜面のカルテ。

| 適用する現場 | 適用する岩相と効果 | |
|---|----------------------|----|
| | 岩相 | 効果 |
| 道路建設中の切土斜面 | 土砂（強風化した岩）～硬岩が分布する斜面 | ◎ |
| 宅地造成中の切土斜面 | 土砂（強風化した岩）～軟岩が分布する斜面 | ◎ |
| ダム工事用道路の掘削面 | 軟岩～硬岩が分布する斜面 | ◎ |
| ダムのアバット掘削面 | 土砂のみが分布する斜面 | ○ |
| 急傾斜対策工事中の斜面 | 軟岩のみが分布する斜面 | ○ |
| | 硬岩のみが分布する斜面 | ○ |
| 備考 | | |
| ◎：本システムによるチェックで効果的に、想定した岩相の妥当性を評価できる。 | | |
| ○：岩相が均一で、想定した岩相との違いがほとんどない場合が多いが、均一であることを確認する意味で、重要である。 | | |

①設計時に想定する地質断面は、代表的なポイントやライン上での調査結果によるものであり、地山全体を把握できていない。図3.1に示すように、横断方向の想定断面に対して、実際の掘削面ではさまざまなパターンの岩相分布を取りうる。

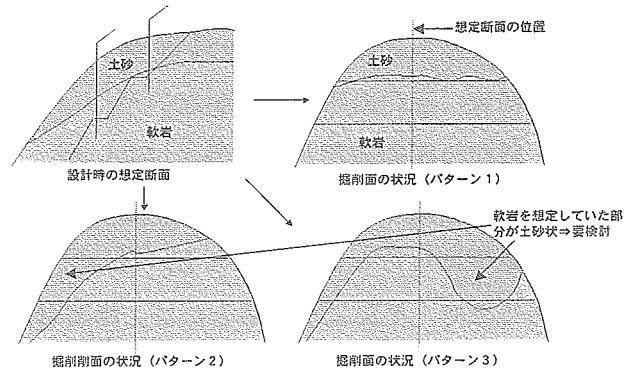


図3.1 地質想定断面と実際の掘削面の岩相のパターン

一方、通常は代表断面を縦断方向に展開して設計を行う。図3.1のパターン1であれば、想定どおりの岩相分布であるが、パターン2やパターン3の場合は、想定外の分布となり、設計の見直しを検討すべきである。図3.1のパターン2やパターン3を設計段階で精度よく想定することが難しい。切土の施工にあたって、地質状態をよく観察し、当初予想した地質状況との違いに注意することが重要である。本システムで、設計時に想定した地山

の性状との違いを評価し、設計の見直しの必要性を検討する。例えば、過大な設計をしていた場合には、適切な工法（範囲）に変更して工費を削減できる。過小な設計をしていた場合には、必要な対策を追加して、完成後の崩壊を回避できる。具体的には、以下のようなチェックを行う。

- ・設計段階に行った調査ボーリングのコアの b^* 値と掘削面の b^* 値の比較。
- ・設計時に想定した岩級区分に対応する弾性波速度と、本システムで推定した弾性波速度の比較。
- ・設計時に想定した岩相境界と b^* 値、推定弾性波速度の境界の比較。

②風化が進んでいる部分や緩み域（推定弾性波速度が小さい部分、推定き裂係数が大きい部分）、風化の不連続面、緩み域の不連続面などを明確に記録する。これらをもとに、管理段階で着目すべきポイントを評価する。

③本システムによる観測データと勾配・保護工の種類・施工時の問題点、施工後の安定性などを、対象斜面のカルテとして残す。カルテは以下のように利用する。

- ・管理段階で、変状が発生した場合
 - 変状の原因
 - 変状が拡大する可能性がある範囲
 - 調査・観測・対策が必要な範囲を検討する材料とする。
- ・客観的、定量的に評価した地山の性状と、施工上の問題点や施工後の安定性との関係を、以降の斜面設計の基礎資料とする。

3.1.3 その他の利用

例えば、次のような利用が考えられる。

1) 崩壊した後の斜面で、崩壊の規模や形状を迅速に捉える。二次災害の危険のため近づけない部分の、風化や緩みの程度・分布の概略を捉える。観測データは

①災害対策事業申請の資料

②対策のための調査計画や観測計画

の検討資料として利用する。

2) 従来の詳細調査と併用した利用が考えられる。例えば、調査ボーリングデータと本システムによる観測データを比較して、岩相の連続性を検討する。斜面上部での屈折法弾性波探査試験データと本システムのデータを比較して、岩相の連続性を検討する。このように、従来の調査方法によるデータを面的、立体的に広げるために利用する。

3.2 安定性評価事例

・事例1 (図版1、図版2)

中新世安山岩の切土斜面である。強風化して土砂状の岩から比較的新鮮な岩が分布する。弾性波速度による判定とき裂係数による判定で、斜面中央から上部にかけて不安定と評価される。b*分布で見ると、不安定部分はb*値が大きく、風化が進んでいる。下部の新鮮な部分との間に風化の不連続面がある。顕著な湧水はないが、風化の不連続面付近に苔の分布が確認でき (NDVI値が参考になった)、降雨時などの湧水が考えられる。不安定と判定されることと、風化の不連続面、不連続面付近の水を勘案すると、早急に対策が必要な斜面と判断できる。

この斜面を観測した後に、ほぼ想定どおりの崩壊が発生した (図3.2)。地元の聞き込みで、本システムの判定で不安定とされた斜面中央付近が最初に崩落し、上部斜面に崩壊が進行したことが分かった。本システムによる評価は妥当であったといえる。滑落崖を見ると、苔が分布していた高さ付近から湧水の痕跡が認められ (図3.3)、崩壊素因の一つであったと考えられる。

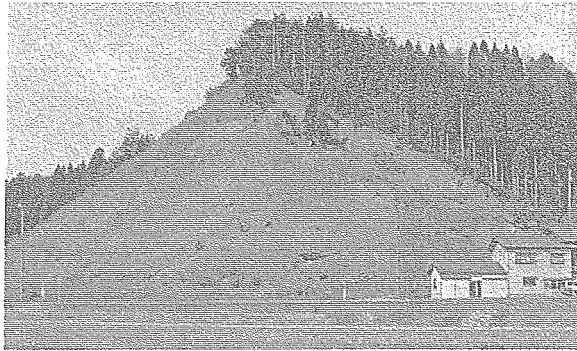


図3.2 観測から数ヶ月後に発生した崩壊の状況

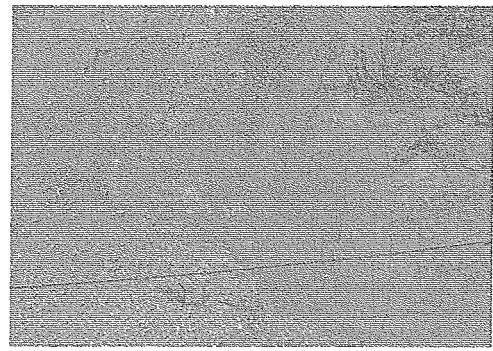
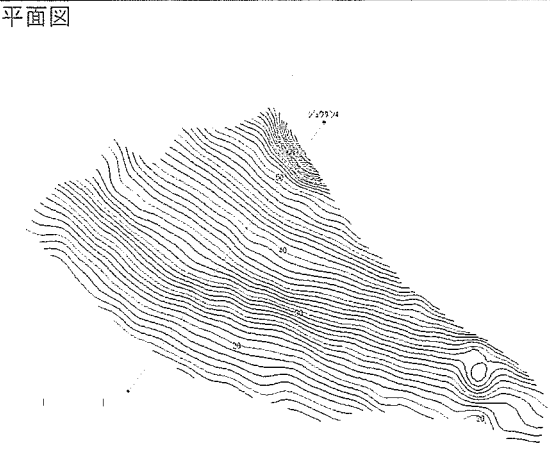
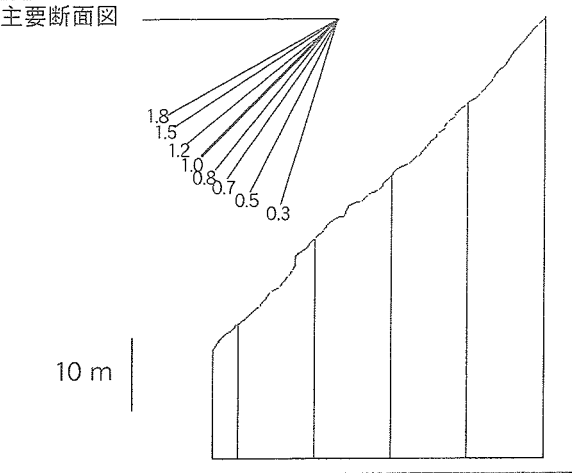

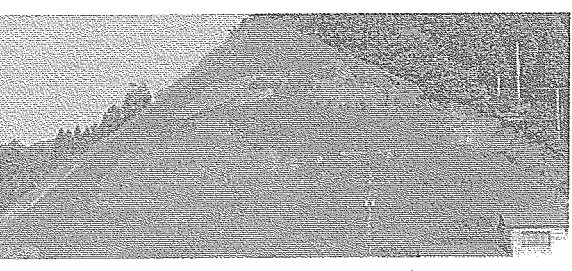
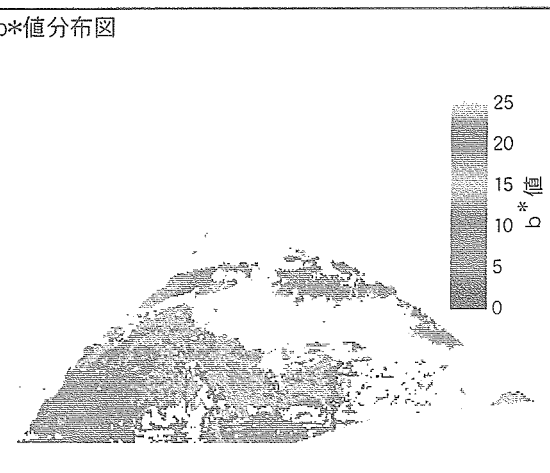
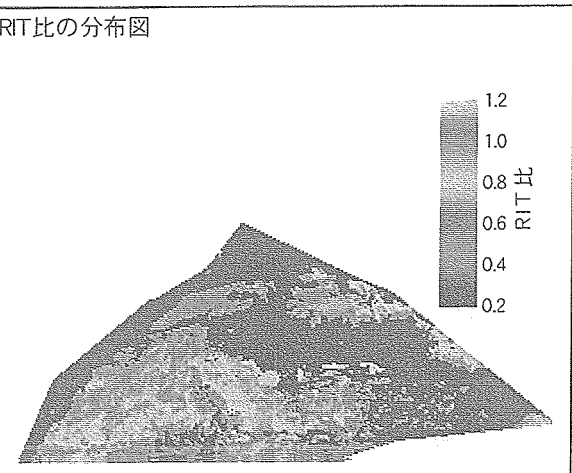


図3.3 観測で苔が確認されていた付近の滑落崖の拡大写真 (水が湧出した跡が認められる)

様式-1

| | | | | | |
|---|--|------------|-----------------------|------|--------|
| 施設管理番号 | S0417***** | 工事名 | 〇〇工事に伴う地質確認業務 上・下・他 | | |
| 路線名 | R-777号線 | 所在地 | 〇〇県〇〇市〇〇町 | | |
| スペクトル観測日 | *年*月*日 | 温度分布観測日 | *年*月*日 | | |
| 観測機器の仕様 | | | | | |
| 分光放射計 | 測定波長 | 400~1050nm | 測定波長間隔 | 10nm | |
| 熱赤外線映像装置 | 測定波長 | 8~13nm | 放射温度計 | 測定波長 | 8~13nm |
| 平面図 | 主要断面図 | | | | |
|  |  | | | | |
| 斜面の写真 | 植生判定図 | | | | |
|  |  | | | | |
| b*値分布図 | RIT比の分布図 | | | | |
|  |  | | | | |

図版1 事例1

様式-2

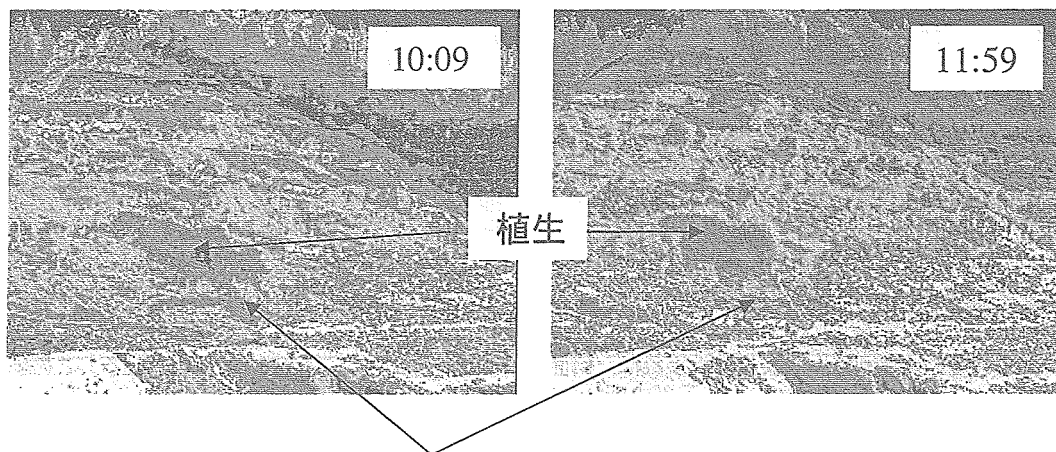
| | | | |
|--|---|-----------|--------------|
| 施設管理番号 | S0417***** | 工事名 | 〇〇〇〇〇〇 上・下・他 |
| 路線名 | R-777号線 | 所在地 | 〇〇県〇〇市〇〇町 |
| 推定弾性波速度分布図 | 推定超音波速度分布図 | 推定き裂係数分布図 | |
| | | | |
| 弾性波速度による安定性評価 | | | |
| | | | |
| き裂係数による安定性評価 | | | |
| | | | |
| 安定性評価結果の解釈と今後の対応方針 | | | |
| <p>中新世安山岩の切土斜面である。強風化して土砂状の岩から比較的新鮮な岩が分布する。本手法による評価は以下になる。</p> <p>弾性波速度による判定とき裂係数によれば、斜面中央から上部にかけて不安定と評価される。この部分はb*値も大きく風化が進んでおり、下部の新鮮な部分との間に風化の不連続面が認められる。RIT比が極端に低い傾向はないので顕著な湧水はないが、苔の分布が確認でき、その周辺に水の存在が懸念される。風化の不連続面に地下水があれば斜面はより不安定といえる。弾性波速度やき裂係数による評価に加えて、不安定と判断できる要素があるので、特に要注意の斜面と判断できる。対策が必要と判断できる。</p> | | | |
| 対策の必要性 | 1. 特に対策を必要としない 2. 専門技術者による対策検討を要する | | |

図版2 事例1

・事例2 (図版3、図版4)

中新世安山岩の採石場斜面である。強風化して土砂状の岩から比較的新鮮な岩が分布する。中新世の安山岩で構成される切土斜面である。弾性波速度による判定では、全体的に概ね安定した斜面である。き裂係数による判定では、広範囲で不安定と判定される。弾性波速度よりき裂係数で不安定となるのは、岩片の風化より節理の緩みが顕在化しているためと考えられる。小規模な落石が予想される。斜面の下部には拳大の落石が認められる。被災したときの被害の大きさを勘案し、落石防護フェンスなどの対策が必要と判断される。

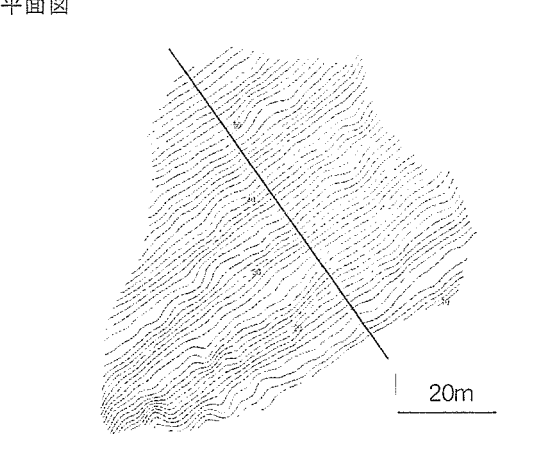
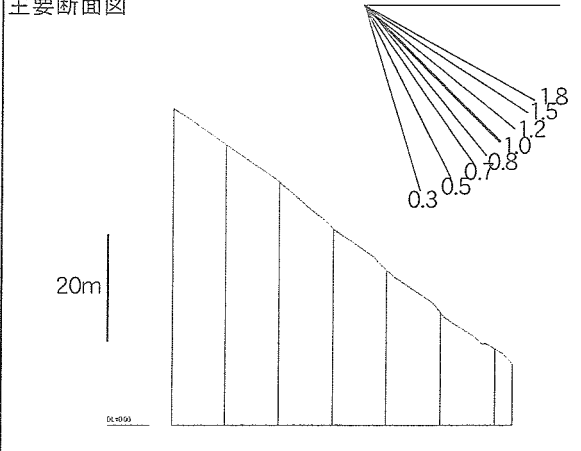
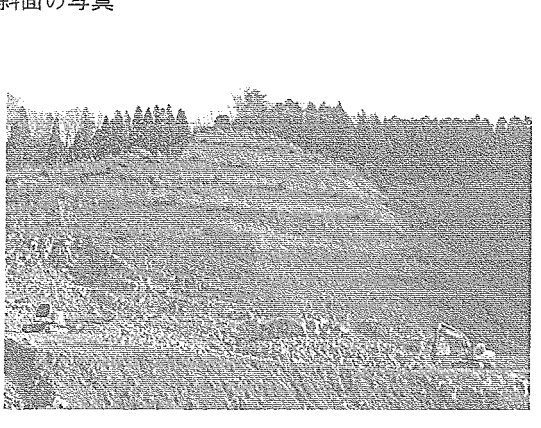
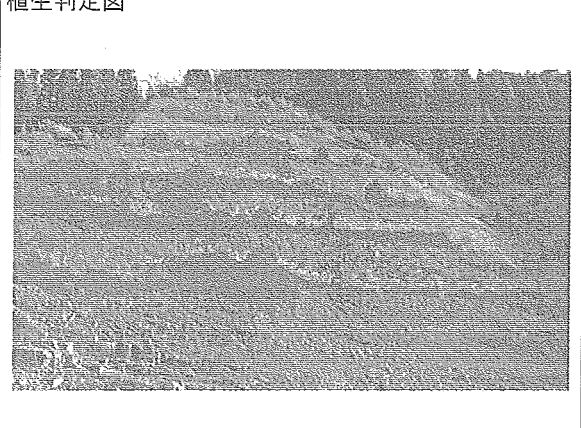
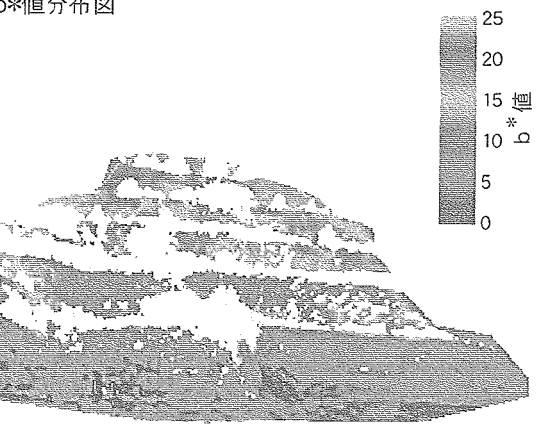
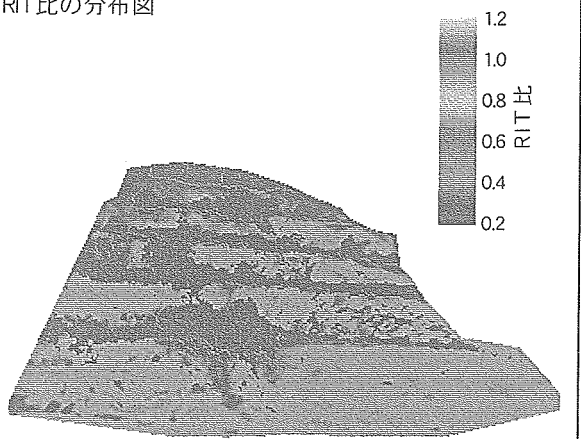
斜面下部の中央付近に局所的に表面温度が低い部分がある。この部分は湧水の可能性がある(図3.4)。この部分の上部は局所的に植生が繁茂していることから、この周辺に湧水や水道が分布するか、地表水が集まりやすくなっている可能性がある。ガリーの発生や豪雨時の崩壊に注意が必要である。継続的な監視を行い、状況に応じて地下水排水工または地表水排水工などが必要である。



周囲に対して相対的に温度が低い

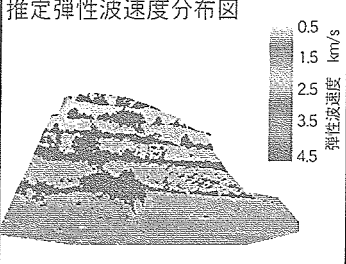
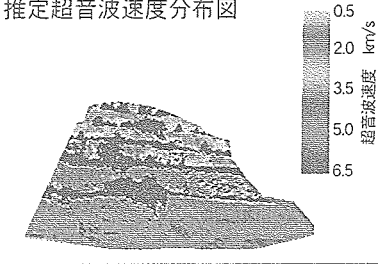
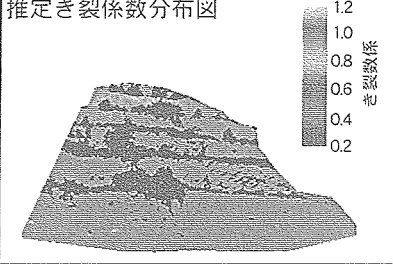
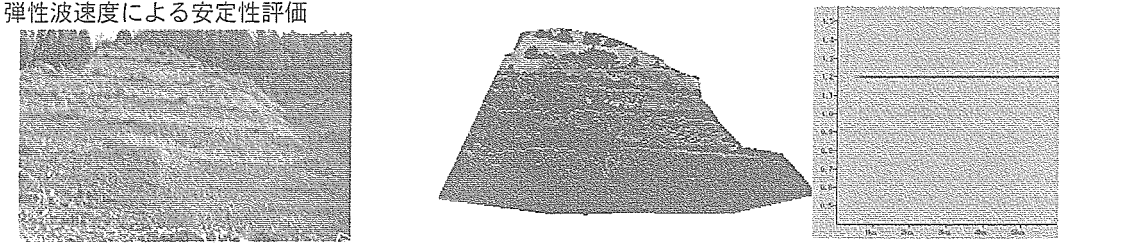
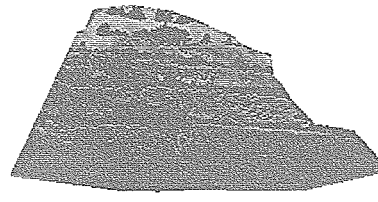
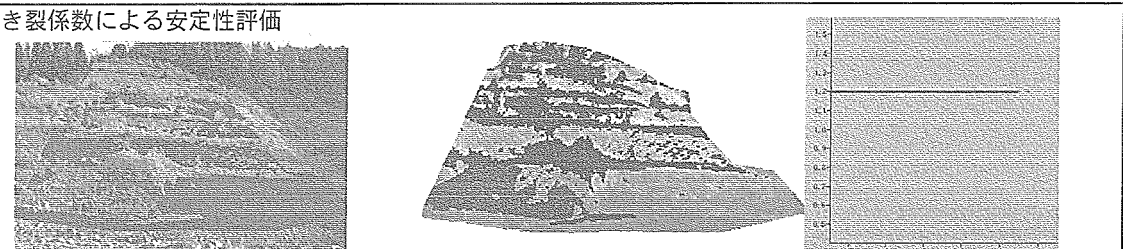
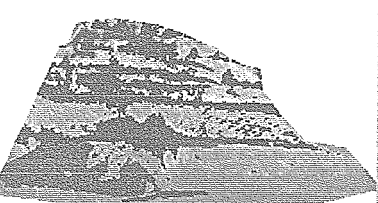
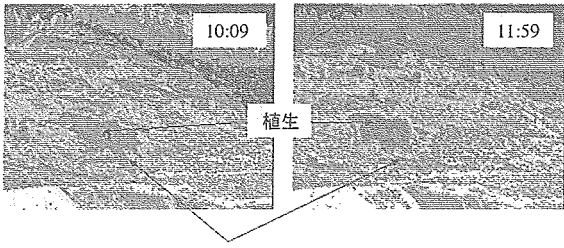
図3.4 温度分布画像の一例。左上の数字は観測した時刻を表す。矢印で示した温度が低い部分は、他の時間の温度分布でも温度が低い傾向がある。

様式-1

| | | | |
|---|--|---------|-------|
| 施設管理番号 | | 工事名 | 上・下・他 |
| 路線名 | | 所在地 | |
| スペクトル観測日 | | 温度分布観測日 | 地形観測日 |
| 観測機器の仕様 | | | |
| 分光放射計 | 測定波長 | 測定波長間隔 | |
| 熱赤外線映像装置 | 測定波長 | 放射温度計 | 測定波長 |
| 平面図 | 主要断面図 | | |
|  |  | | |
| 斜面の写真 | 植生判定図 | | |
|  |  | | |
| b*値分布図 | RIT比の分布図 | | |
|  |  | | |

図版3 事例2

様式-2

| | | | | |
|--|---|--|---|-------|
| 施設管理番号 | | | 工事名 | 上・下・他 |
| 路線名 | | | 所在地 | |
| 推定弾性波速度分布図 | 推定超音波速度分布図 | 推定き裂係数分布図 | | |
|  |  |  | | |
| 弾性波速度による安定性評価 |  | |  | |
| き裂係数による安定性評価 |  | |  | |
| 安定性評価結果の解釈 | | | | |
| <p>中新世の安山岩で構成される切土斜面である。弾性波速度による判定では、全体的に概ね安定した斜面である。き裂係数による判定では、広範囲で不安定と判定される。弾性波速度よりき裂係数で不安定となるのは、岩片の風化より節理の緩みが顕在化しているためと考えられる。小規模な落石が予想される。斜面の下部には拳大の落石が認められる。被災したときの被害の大きさを勘案し、落石防護フェンスなどの対策が必要と判断される。</p> <p>斜面下部の中央付近に局部的に表面温度が低い部分がある。この部分は湧水の可能性がある（右図）。この部分の上部は局部的に植生が繁茂していることから、この周辺に湧水や水道が分布するか、地表水が集まりやすくなっている可能性がある。ガリーの発生や豪雨時に崩壊に注意が必要である。継続的な監視を行い、必要に応じて地下水排水工または地表水排水工が必要である。</p> | | |  <p>温度分布画像の一例。左上の数字は観測した時刻を表す。矢印で示した温度が低い部分は、他の時間の温度分布でも温度が低い傾向がある。</p> | |
| 今後の対応方針 | | | | |
| 対策の必要性 | 1.特に対策を必要としない 2.専門技術者による対策検討を要する | | | |

図版4 事例2

< 第 4 編 研究成果 >

4.1 観測方法について

4.1.1 反射スペクトル (L*a*b*表色系) 観測

- 対象面への入射角と観測角の影響は、無視できる。
- 標準白板と対象面の向きの違いの影響、太陽光の入射角による補正で、ほぼ無視できる。

○対象面への入射角と観測角の影響

対象面の鉛直線と太陽光の入射方向が成す角を「入射角」、対象面の鉛直線と観測視線の成す角を「観測角」とする (図 4.1.1)。現場計測では入射角と観測角を自由には選べない。3種類の岩石供試体を準備し、その切断面に対して、入射角と観測角を変えて反射スペクトルを観測し、算出したa*値やb*値への影響を検討した。図 4.1.2 に各入射角および観測角でのa*値、b*値を示す。入射角 0°、観測角を 5° 以内とした時の値を基準値線として同図に示す。図 4.1.2 から① a*値、b*値にばらつきはあるがそれほど大きなものではない、② 入射角が大きいほどばらつきが大きくなる傾向があることが分かる。できる限り入射角が小さい時間帯に観測することで、入射角や観測角の影響は無視できると判断した。

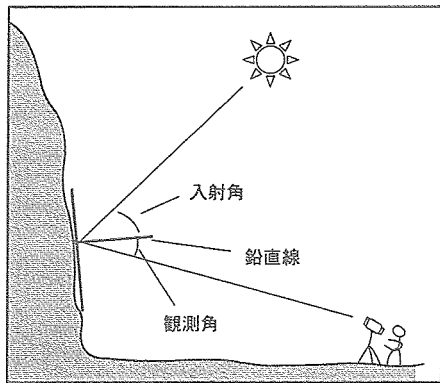


図 4.1.1 入射角と観測角

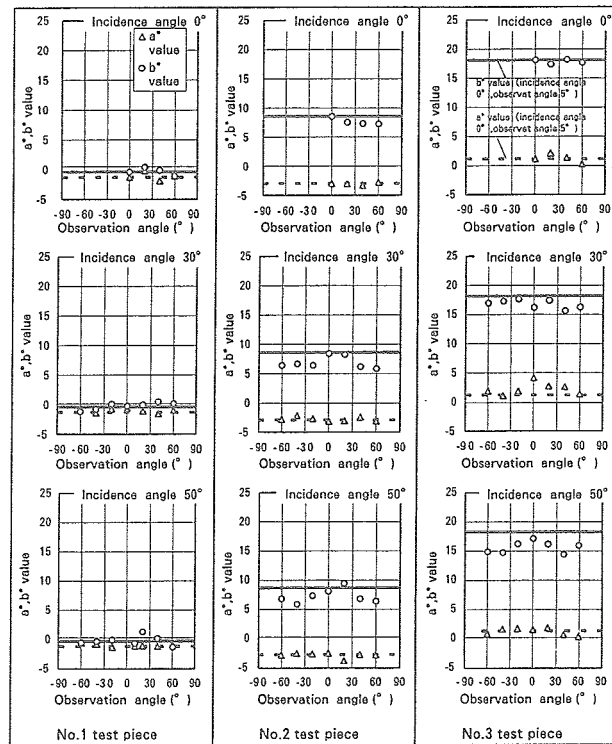


図 4.1.2 入射角と観測角のa*値、b*値への影響

○標準白板と対象面の向きの違いの影響と補正

標準白板と岩の表面の向きが異なる場合の影響を検討した。20° ずつ角度をずらしたボードに色紙を貼付けて反射スペクトル観測した（図4.1.3）。標準白板は右から3つめの面の向きに合わせた。図4.1.3は反射スペクトルからRGB画像を作成したものである。図4.1.4には「白板への入射角と対象面への入射角の差」とL*値の関係を示す。図4.1.5は入射角の差とa*値、図4.1.6は入射角の差とb*値の関係を示す。L*値は入射角の違いが大きく影響する。a*値は絶対値が小さい場合は入射角の影響を受けないが、絶対値が大きいと入射角の影響を受ける。入射角の差が大きいほど影響が大きい。b*値もa*値と同じような影響を受けている。

反射強度は入射角の余弦に比例する（余弦の法則）と仮定して、式（4.1）を作成した。

$$R = R_0 \frac{\cos \theta_w}{\cos \theta_s} \quad (4.1)$$

ここで、 R ：余弦の法則で補正した反射率（%）、 R_0 ：補正前の反射率（%）、 θ_s ：斜面への入射角（°）、 θ_w ：標準白板への入射角（°）、である。

図4.1.7は式（4.1）で補正した反射スペクトルでRGB画像を作成したものである。向きにかかわらず、同じ明るさになっており、うまく補正できている。図4.1.8～図4.1.10には入射角の差とL*、a*、b*値の関係を示した。入射角の差が15°以上になると若干の影響が残るが、入射角の影響はほぼ取り除くことができている。できる限り斜面と同じ向きに標準白板を設置し、入射角による補正を行えば、標準白板と斜面の向きずれの影響は無視できると考えられる。

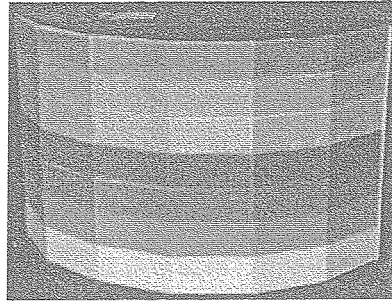


図 4.1.3 補正していないテストボードのRGB画像

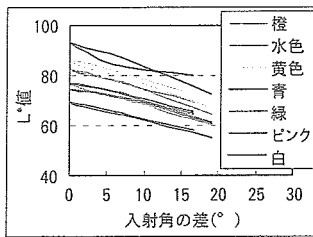


図 4.1.4
対象と標準白板の向き
の違いの影響 (L*値)

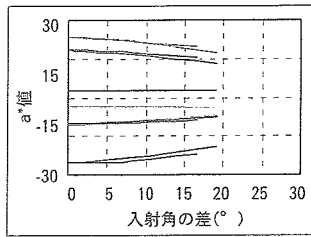


図 4.1.5
対象と標準白板の向き
の違いの影響 (a*値)

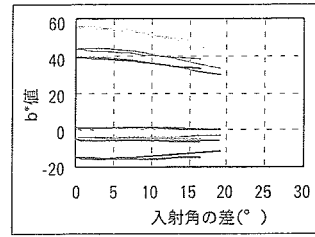


図 4.1.6
対象と標準白板の向き
の違いの影響 (b*値)

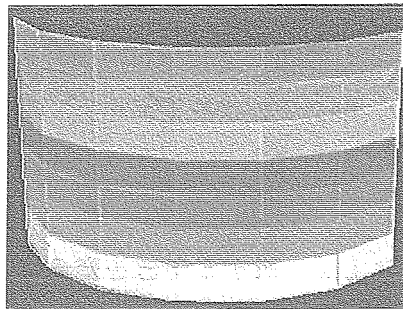


図 4.1.7 補正したテストボードのRGB画像

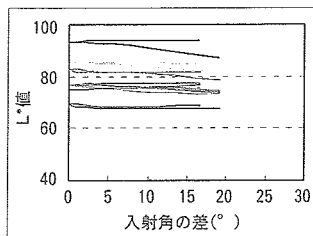


図 4.1.8
入射角による
補正の効果 (L*値)

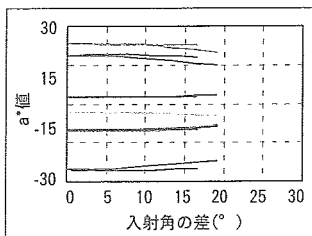


図 4.1.9
入射角による
補正の効果 (a*値)

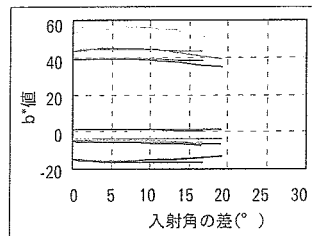


図 4.1.10
入射角による
補正の効果 (b*値)

4.1.2 温度の上がりやすさの観測

- 温度変化率は、対象面の性状だけでなく、日射条件に強く左右される。
- 斜面と同時に観測した基準物体（油土）に対して、どれくらい温度が上がりやすいかを表す『RIT比』を定義した。
- 『RIT比』で、日射条件をキャンセルして、斜面そのものの温度の上がりやすさを捉えることができる。
- 油土と斜面の向きの違いは、日射の入射角による補正をすれば、無視できる。

$$\text{RIT比} = \frac{S_{\text{RT}} \cdot \cos(\theta_v)}{Y_{\text{RT}} \cdot \cos(\theta_s)}$$

ここで、 S_{RT} ：斜面の温度変化率、 Y_{RT} ：油土の温度変化率、 θ_s ：斜面への入射角、 θ_v ：油土への入射角、である。

○温度変化率の問題点

4.2 および 4.3 で述べるが、岩石の温度変化率は乾燥比重と相関があり、岩の温度変化率は弾性波速度と相関がある。斜面の性状を捉える上で有効な情報である。しかし、温度変化率は日射条件の影響も強く受ける。岩石の種類や風化度合いなどが同じ斜面でも、斜面の向きや季節の違いによって同じ値とはならない。例えば、表 4.1.1 に示したコンクリート供試体を観測日や太陽に対する向きを変えて（表 4.1.2）温度変化率を観測すると、温度変化率はばらばらの値となる（図 4.1.11）。一般的なパラメータとしての利用が困難である。この問題を解決するために、以下のRIT比を定義した。

○RIT比の定義

対象の温度変化率を観測する時に、対象と同じ向きに設置した参照対象物（油土）の温度変化率も観測し、参照対象物の温度変化率に対する対象の温度変化率の比をRIT比と定義する。対象と参照対象物の温度変化率には同じ気象条件が影響しており、比とすることで気象条件を打ち消すのが目的である。

○RIT比の再現性

1.3.2.1で述べたコンクリート供試体の観測実験で、それぞれのコンクリート供試体と向きを同じに設置した油土の表面温度も観測した。図4.1.12に各対象のRIT比を示す。観測日や供試体の向きにより温度変化率は異なる(図4.1.11)が、RIT比は±0.1程度のばらつきの範囲にあり、観測日や供試体の向きの影響を消去できている。

表 4.1.1 コンクリート供試体の大きさ

| 供試体 | 供試体のサイズ(cm) | | |
|-------|-------------|----|--------|
| | 縦 | 横 | 高さ(厚み) |
| No.1A | 30 | 30 | 10 |
| No.1B | | | |
| No.2A | 30 | 30 | 20 |
| No.2B | | | |
| No.3A | 30 | 30 | 30 |
| No.3B | | | |

表 4.1.2 コンクリート供試体の設置条件

| 観測日 | 時刻 | 供試体 | 表面の走向・傾斜 |
|------|-----------------|-------------------------|-------------|
| 8/29 | 9:00 ~13:50 | all | level |
| 9/2 | 10:20 ~14:10 | No.1A No.2A No.3A | level |
| | | No.1B No.2B No.3B | N65° W35° S |
| 9/8 | 9:10 ~13:00 | No.1A No.2A No.3A | N10° W 90° |
| | | No.1B No.2B No.3B | N40° W 90° |

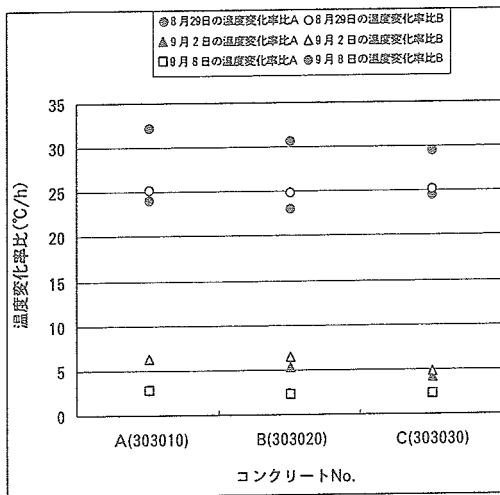


図 4.1.11 設置条件の異なるコンクリート供試体の温度変化率

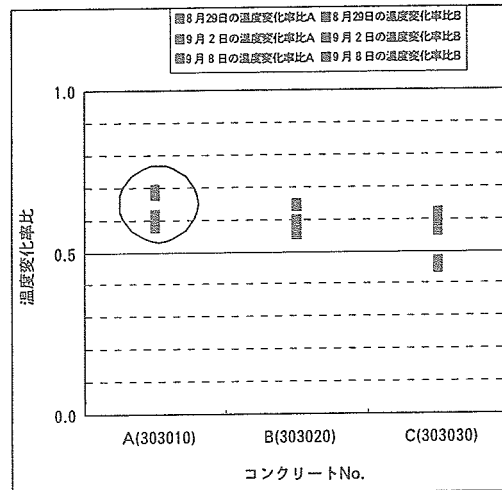


図 4.1.12 設置条件の異なるコンクリート供試体のRIT比

○油土と斜面の向きの違いの補正

実際の斜面では油土の向きを斜面の向きと完全に一致させるのは難しい。向きの誤差の影響を検討する。表 4.1.1 のNo.1 A、Bのコンクリート供試体を北から時計回りに180°（真南向き）と北から時計回りに185°（真南よりやや西向き）に、表面の傾斜角を90°で設置した。供試体に対し、20°ずつ向きをずらして油土を設置し（図 4.1.13）、それぞれの油土に対するRIT比を算出した。図 4.1.14にRIT比の算出時間帯の中間時刻での「供試体への入射角と油土への入射角の差」とRIT比の関係を示す。同図には、図 4.1.12のNo.1 A、Bのばらつきの範囲も誤差範囲として示す。油土表面の向きとコンクリート供試体表面の向きの差（入射角の差）が大きくなるとRIT比が誤差範囲から外れる。油土と供試体の入射角が異なるとRIT比も異なる原因は入射光の照度の違いであり、入射光の照度は余弦の法則⁴⁾に従うと仮定し、入射角による補正式(4.2)を作成した。

式(4.2)の補正を行った結果を図 4.1.15に示すが、向きの違いの影響を軽減できた。できる限り斜面と同じ向きに油土を設置して、式(4.2)で入射角の違いを補正すれば、油土の設置誤差は問題ないと考えられる。後述するように、RIT比とb*値を用いて弾性波速度を推定できるので、RIT比における±0.1程度の誤差は許容範囲と考える。

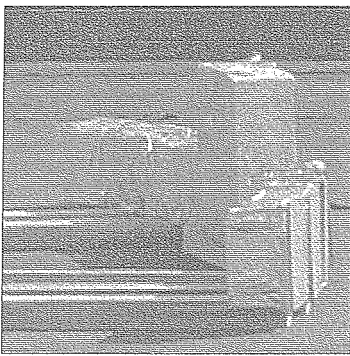


図 4.1.13
向きをずらしたコンクリート
供試体と油土の設置状況

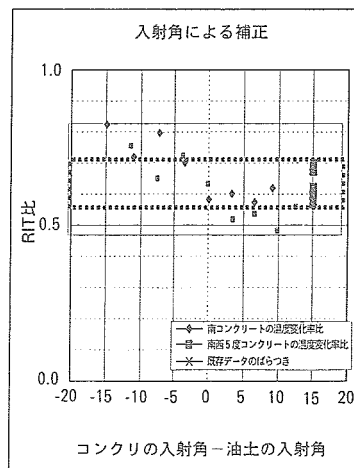


図 4.1.14
油土と対象の向きが違う
場合のRIT比

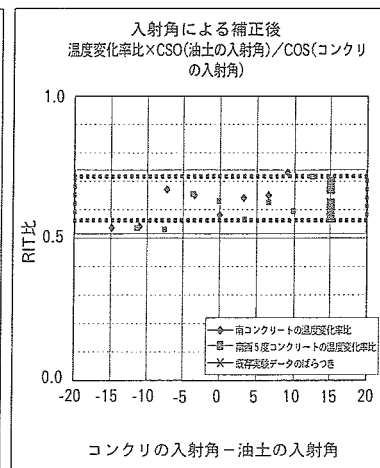


図 4.1.15
入射角による補正を行った
場合のRIT比

4.2 反射スペクトルや温度変化率と岩の性質

4.2.1 供試体を用いた基礎実験

供試体による基礎実験で、以下のことが分かった。

- ・風化が強いほど、反射スペクトルの短波長側が左下がりになる。
- ・風化が強いほど、 b^* 値が系統的に大きくなる。
- ・ b^* 値と乾燥比重に負の相関がある。
- ・岩石の温度変化率 ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$) と乾燥比重に正の相関がある。

○実験内容

風化程度の異なる安山岩供試体を36個作成し、表面温度の時間的な変化と反射スペクトルを測定した。図4.2.1に実験に用いた供試体の写真を示す。目視観察およびハンマー打診による風化程度が強いものほど乾燥比重が小さい傾向がある。観測は曇り時々晴れの日1回目(12月4日)、快晴の日2回目(12月5日)を行った。気象条件が悪く、含水比を制御しきれなかったため、3階建物屋上に供試体を1週間放置し、供試体を自然含水比に近い状態として実験を行った。実際には観測前日や当日の朝に降雨があり、やや湿った状態であった。

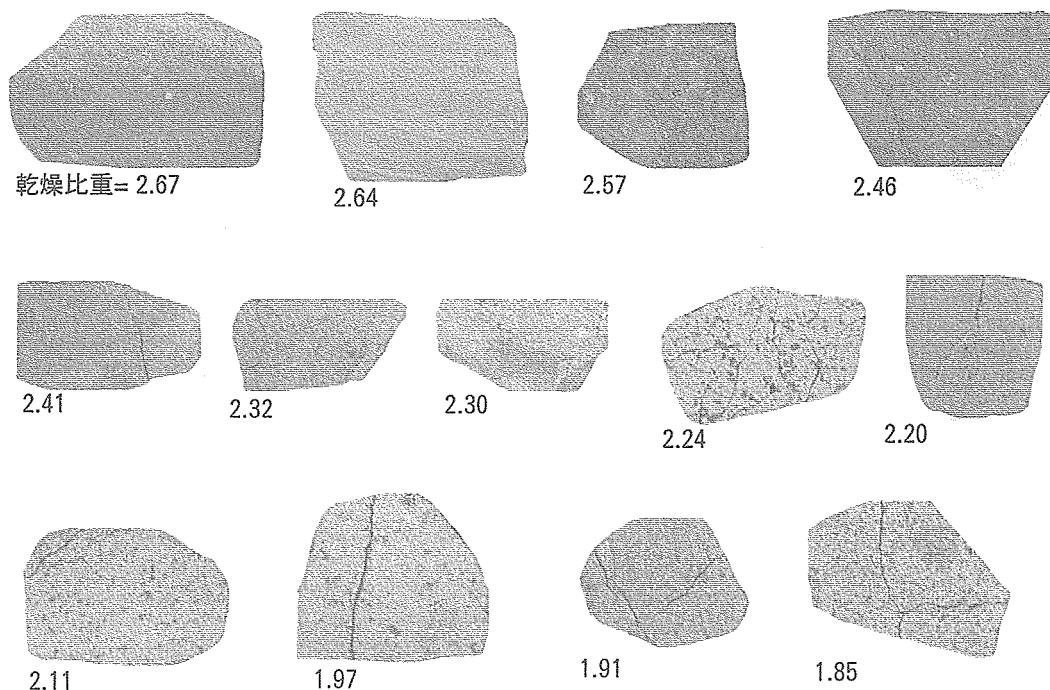


図4.2.1 基礎実験で観測した供試体と油土の設置状況

○反射スペクトル、b*値と風化の関係

目視による風化程度とスペクトル形状、b*値に相関が認められた。風化程度に伴うb*値の増加は、Nagano and Nakashima⁵⁾ やNakashima et al⁶⁾ 接触型の分光測色計を用いた実験で示した風化程度とb*値の関係と整合する。Nakashima et al⁶⁾ 風化による水酸化鉄鉱物の結晶化や増加がb*値の増加に関与することを示している。本研究で得られた関係も同様の現象と考えられる。リモートセンシングにより、この関係を確認できたことに重要な意義がある。

○反射スペクトル、b*値と乾燥比重

図4.2.2に各供試体を乾燥比重の範囲ごとに分けて、2回目(12月5日)の実験で正午ごろに観測した反射スペクトルを示した。例えば、乾燥比重が2.0以下の供試体は7個あるので、一番左側のグラフに7つの反射スペクトルを示している。同図では、乾燥比重の小さい範囲のものから順に左側から並べている。乾燥比重が小さいほど短波長側のスペクトルが左下がりになることが分かった。

図4.2.3に示すように、b*値と乾燥比重に明瞭な負の相関が認められる。図4.2.4に示すように、各供試体のa*-b*関係は風化(乾燥比重の減少)に伴い系統的に変化し、特にb*値が風化に伴って顕著に変化する。

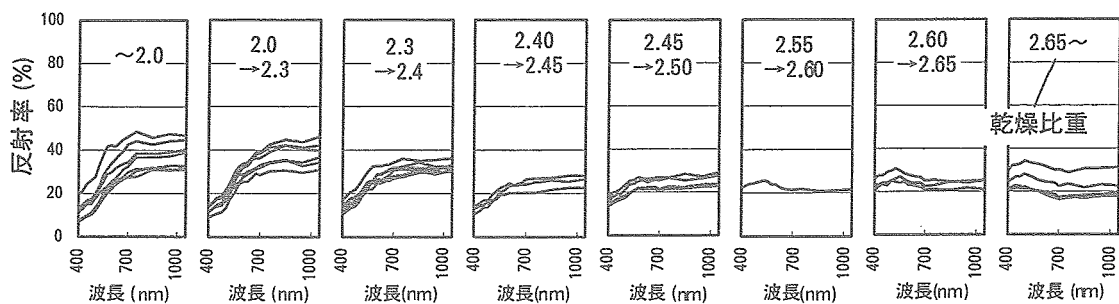


図4.2.2 安山岩の供試体の乾燥比重と反射スペクトルの形

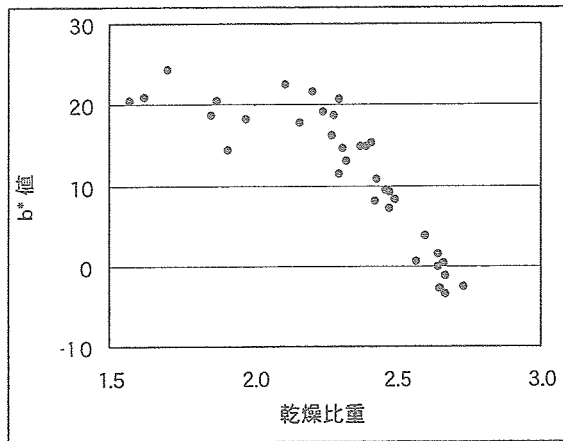


図 4.2.3 供試体の乾燥比重とb*値

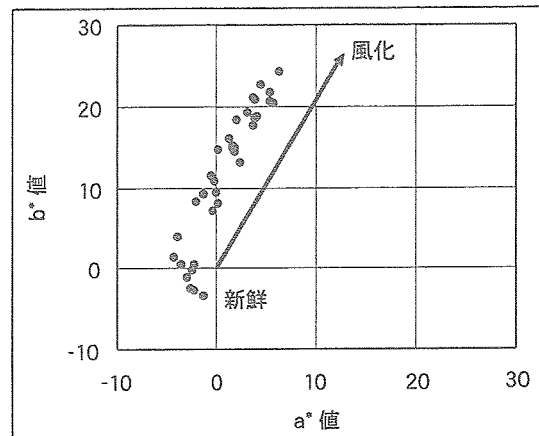


図 4.2.4 風化程度の異なる安山岩の供試体のa*-b*関係

○表面温度の変化率と乾燥比重

直射日光により表面温度が上昇した観測 1 回目の13:40~13:52、観測 2 回目の 8:30~11:15から温度変化率を算出し、図 4.2.5、図 4.2.6 に温度変化率と乾燥比重の関係を示した。温度変化率と乾燥比重にかなり強い正の相関が認められる（この時点ではR/T比は定義していなかった）。

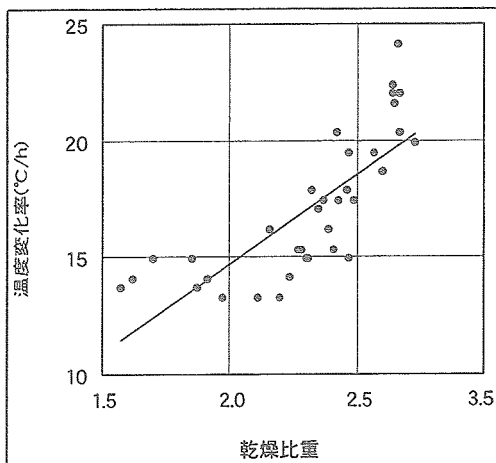


図 4.2.5 供試体の乾燥比重と温度変化率

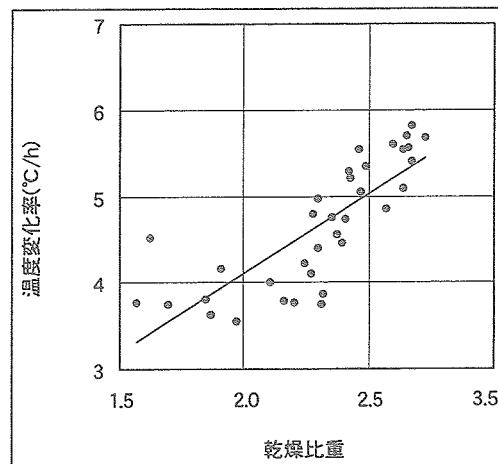


図 4.2.6 供試体の乾燥比重と温度変化率

4.2.2 実斜面への適用結果

モデル斜面（安山岩の採石場の斜面）での実験で、以下のようなことが分かった。

- b^* 値と弾性波速度に負の相関がある。
- b^* 値と超音波速度に負の相関がある。
- 温度変化率と弾性波速度に正の相関がある。

ただし、一つの安山岩斜面での実験結果であり、多数の斜面への適用性を確認していない。多数の斜面への適用性については、1.4.3で述べる。

○実験内容

表4.2.1に対象斜面の概要を示し、図4.2.7に対象斜面の状況を示す。表面温度分布の観測は9月18日の快晴の日に行った。温度変化率を効果的に把握するため、斜面に直射日光が当たる前の午前8時から5分ごとに約8時間半の表面温度分布を観測した。観測中に温度が最も高くなった時の表面温度分布画像を図4.2.8に示す。比較的新鮮な岩が露出する斜面左中下や中央から右下部分の温度が高く、風化した上部の岩ほど温度が低い。風化が進んだ上部でも比較的新鮮な部分では周囲より温度が高い。新鮮な部分ほど表面温度が高いことが分かる。

4.2.1で示したように、新鮮な岩石ほど温度変化率が大きいため、新鮮な部分ほど直射日光により表面温度が高くなりやすいためと考えられる。風化した部分は節理が増加したり、緩んだりするため、節理内に水を貯留しやすくなり表面温度が低い可能性もある。風化による熱容量の変化なども影響している可能性はあるが、現時点では判断できない。斜面中央から下部にかけての低温部分は湧水箇所（植生も分布する）と一致しており、湧水箇所は表面温度が顕著に低くなる。湧水箇所以外でも植生が分布する部分は表面温度が低い。

斜面の表面温度が上昇する12時、13時、14時の温度分布画像の目視判読により、温度が顕著に異なる境界を求めて、斜面表面を領域分けした（図4.2.9）。

表4. 2. 1 観測した安山岩斜面の概要

| | |
|---------|--|
| 岩石の種類 | 安山岩（新第三紀中新世） |
| 風化の程度 | 新鮮な岩盤から強風化し土砂状を呈する部分まで変化に富む。 |
| 不連続面・構造 | 新鮮な部分から風化した部分まで節理が発達している。 土砂状に風化して節理として認識できない部分もある。 節理面に卓越した方向性はない。 構造的な不安定要因は認められない。 |
| 岩盤の緩み | 風化が進み岩盤の緩みはあるが、勾配が緩いため比較的安定している。 |
| 熱水変質 | 顕著な赤色系や緑色系の部分はなく、熱水変質はあまり受けていないと思われる。 |
| 湧水 | 斜面下部中央付近に局所的に湧水が認められる。 |
| 植生 | 湧水箇所付近や土砂化した部分、小段上などに植生がある。 |
| 勾配 | 1:1.2 |
| 斜面の向き | 南西方向 |
| 日射条件 | 実験を行った時期(9月)には午前10時頃から夕方にかけて直射日光が当たった。 |
| 斜面の種類 | 採石場の掘削斜面 |
| 所在地 | 福井県足羽郡美山町 |

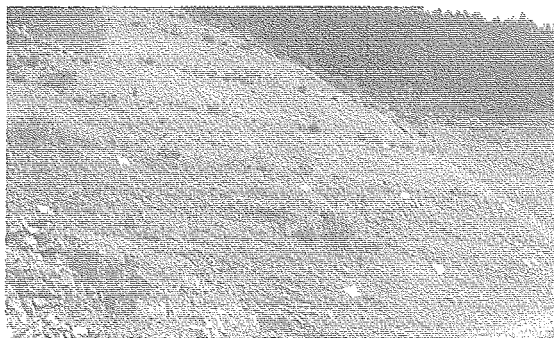


図4. 2. 7 観測した斜面

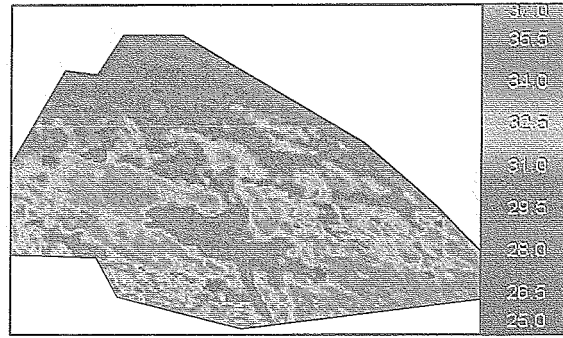


図4. 2. 8 観測した斜面の温度分布

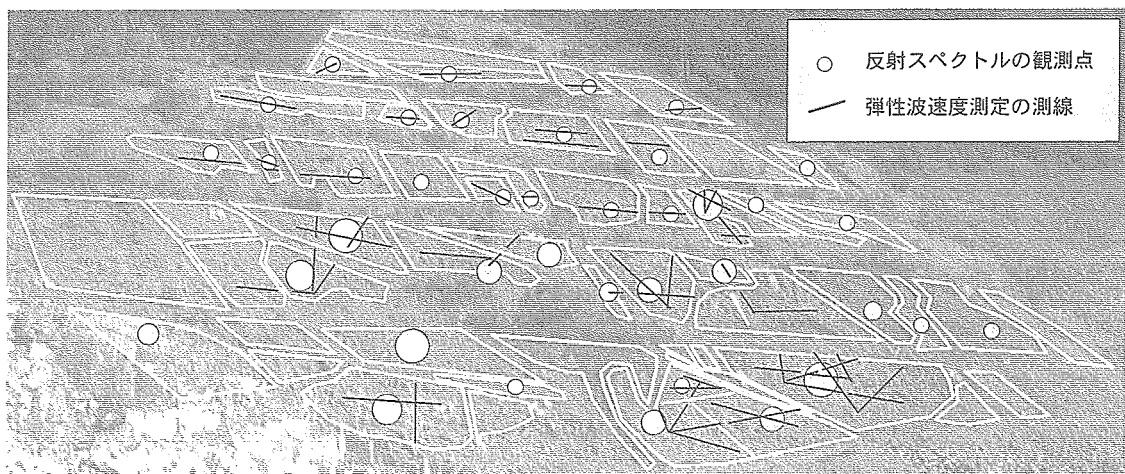


図4. 2. 9 温度分布を参考にして分けた領域

○温度変化率と弾性波速度の関係

各領域の温度変化率の計測結果と弾性波速度の実測（図4.2.9に測線を示す）結果の関係を図4.2.10に示す。この図から両者に強い正の相関（相関係数 $R=0.80$ ）が認められる。4.2.1で、岩石供試体の風化程度が強いほど温度変化率が小さくなることが分かっている。実際の岩では風化による節理の増加や緩みにより水分が貯留しやすくなり、風化程度が強いほど温度変化率が小さくなることを助長している可能性もある。風化による熱容量の変化も影響する可能性があるが、現時点では判断できない。一方、弾性波速度は一般的に風化程度が強いほど小さいことから、「温度変化率が小さい＝風化程度が強い＝弾性波速度が小さい」という関係になり、温度変化率と弾性波速度に正の相関があると考えられる。

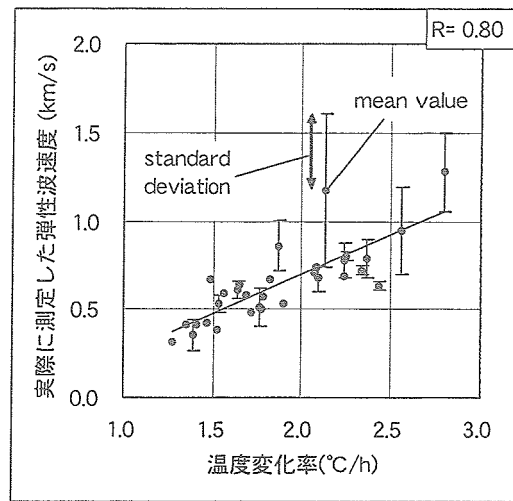


図4.2.10 温度変化率と実際に測定した弾性波速度

○ b^* 値と弾性波速度

領域ごとの反射スペクトルから求めた b^* 値（図4.2.9に反射スペクトルの測定位置を示す）と弾性波速度の実測結果の関係を図4.2.11に示す。図中に単回帰式を示したが、両者の間には良好な負の相関（相関係数 $R=0.73$ ）が認められる。4.2.1で、風化程度が大きい岩石ほど b^* 値が増加することが分かっている。一般的に、風化程度が大きいほど弾性波速度は小さいので、「 b^* 値が大きい＝風化程度が大きい＝弾性波速度が小さい」という関係が成り立ち、 b^* 値と弾性波速度に明瞭な負の相関があると考えられる。

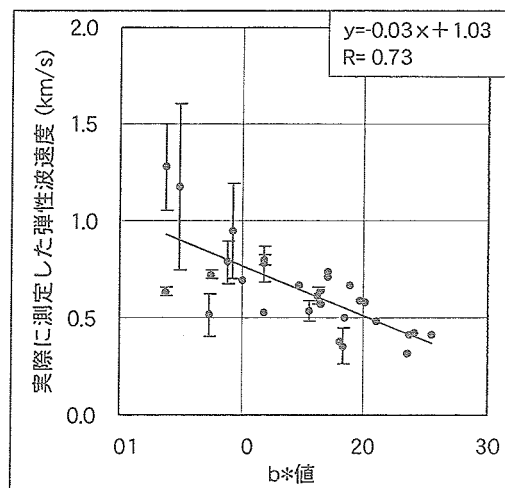


図4.2.11 b^* 値と実際に測定した弾性波速度

○b*値と超音波速度

領域ごとの反射スペクトルから求めたb*値と超音波速度の実測結果の関係を図4.2.12に示す。図中に示した単回帰式から、両者に良好な負の相関（ $R=0.90$ ）が認められる。4.2.1で、風化程度が大きい岩石ほどb*値が増加することが分かっている。一方、一般的に風化程度が大きいほど超音波速度は小さいことから、「b*値が大きい＝風化程度が大きい＝超音波速度が小さい」という関係が成り立ち、b*値と超音波速度に明瞭な負の相関があると考えられる。本実験では、数mの範囲で観測した反射スペクトルと岩石の超音波速度に顕著な負の相関があるという観測結果が得られた。これは、対象とした斜面が比較的均一な岩であるため、岩片の超音波速度が狭い領域の岩の速度をかなりの程度表現していた可能性が高いことによるものと考えられる。

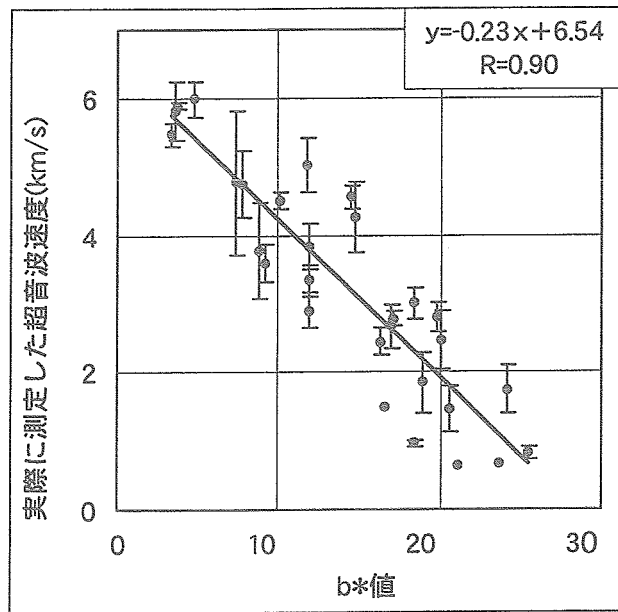


図4.2.12 b*値と実際に測定した超音波速度

4.2.3 多数の実斜面への適用結果

「4.2.2」で得られた結果が、多数の斜面でも適用できるか検討した結果、以下のことが分かった。

- ・超音波速度とb*値には負の相関がある。
- ・b*値と弾性波速度の相関は成り立たず、同じb*値でも弾性波速度がばらつく。
- ・RIT比で、同じb*値での弾性波速度のばらつきを説明できる。
- ・b*値とRIT比を利用して、弾性波速度を推定できる。
- ・弾性波速度の推定式は岩種により異なる。

○安山岩斜面のb*値と弾性波速度

4.2.2は、1つの安山岩斜面を対象にした実験である。成果がいろいろな斜面に適用できるかは明らかでない。そこで、5箇所の安山岩斜面を対象に適用実験を行った。5つの斜面で反射スペクトルから求めたb*値と実際に測定した弾性波速度の関係を図4.2.13に示す。小さいb*値では弾性波速度が1 km/sから4.5km/s程度とばらつき、b*値が大きくなると弾性波速度のばらつきは収束し、b*値が20程度では0.5km/s程度になる。図4.2.11で示したb*値と弾性波速度の近似直線を図4.2.13に示すが、b*値が小さく弾性波速度が大きい部分がうまく表現できていない。

○安山岩斜面のb*値と超音波速度

図4.2.14に、5箇所の安山岩斜面のb*値と実際に測定した超音波速度の関係を示す。図4.2.12に示したb*値と超音波速度の近似直線を図4.2.14に示すが、うまく表現できている。

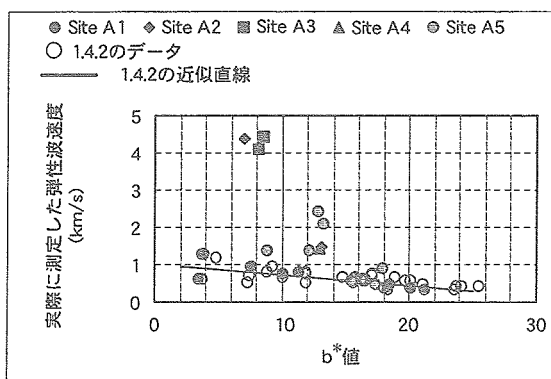


図4.2.13 複数の安山岩斜面のb*値と実際に測定した弾性波速度

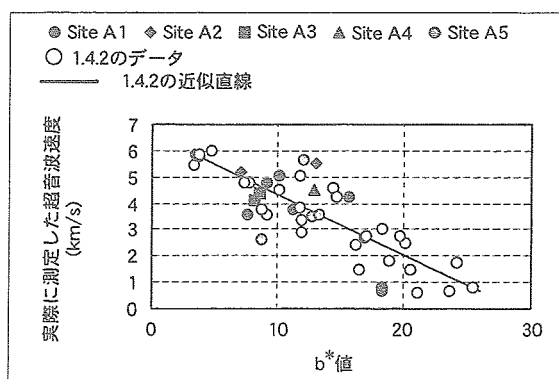


図4.2.14 複数の安山岩斜面のb*値と実際に測定した超音波速度

○ b^* 値と弾性波速度、超音波速度の関係の考察

先述したように、4.2.2で示した近似直線で超音波速度は推定できるが、弾性波速度は推定できない場合がある。 b^* 値は岩石の化学的風化による水酸化鉄鉱物の増加（造岩鉱物中の鉄の酸化）を捉えている^{5)・6)}。化学的風化では造岩鉱物の酸化還元反応と水和、溶解が並行して進む場合が多い。造岩鉱物の溶解により岩石は脆弱化していく。酸化(b^* 値の増加)に伴って溶解(脆弱化)も進んでいる可能性が高い。超音波速度は岩石の種類や含水比などの影響を受けるが、岩石片の密度や硬さとも関係して化学的風化作用の影響を大きく受けやすいので、 b^* 値による推定が可能と考えられる。弾性波速度は超音波速度と同じように化学的風化の影響を受けるが、それに加えてき裂の影響も大きく受ける。き裂の発生は化学的風化作用とも関係するが、物理的風化作用の影響も強く受ける。物理的風化作用には内部応力に起因するものや、日射によるもの、凍結融解によるものなど、様々な要因がある⁶⁾。物理的風化の進行と化学的風化の進行は必ずしも一致しないため、化学的風化を主に捉える b^* 値では物理的風化によるき裂の状態を捉えることが難しい。以上のことから、 b^* 値のみによる弾性波速度の推定式は一般的な斜面への適用性に問題があると考えられる。

○RIT比を利用した弾性波速度推定式の修正

既に述べたように、 b^* 値だけでは弾性波速度を推定できない場合がある。4.2.2では、温度変化率と弾性波速度に正の相関があることを示した。しかし、4.2.2の段階では、温度変化率を基準化していなかった(RIT比を定義していなかった)ため、温度変化率と弾性波速度の相関関係を積極的に利用することができなかった。4.1.2で温度変化率を同一基準で比較できるように、RIT比を定義した。これらに基づいて、弾性波速度推定式の適用性を改善する。図4.2.13の安山岩斜面の b^* 値と弾性波速度の関係をRIT比で分けたものを図4.2.15に示す。 b^* 値が同じでもRIT比が大きいものは弾性波速度が速い傾向がある。 b^* 値が20以上では土砂斜面となり、弾性波速度がほとんど変わらない。そこで、図4.2.16に示すように、 b^* 値20、弾性波速度0.5km/sの点を通り、RIT比に応じて直線の勾配 D が変化する弾性波速度 V の推定式を作成する。

$$\left. \begin{aligned} V_t &= (b^* - 20) \cdot D + 0.5 : b^* \leq 20 \\ V_t &= 0.5 : b^* > 20 \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

ここで、 D ：推定式の勾配、である。RIT比と勾配線の関係を図4.2.16に示し、次式で表す。

$$\left. \begin{aligned} D &= -0.9 \cdot \text{RIT比} + 0.6 : \text{RIT比} \geq 0.7 \\ D &= -0.03 : \text{RIT比} < 0.7 \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

図4.2.17に示すように、式(4.3)で推定した弾性波速度と実際に測定した弾性波速度はよく一致している。以上の結果、 b^* 値とRIT比を組み合わせることで、弾性波速度を一般的に推定できることを示した。

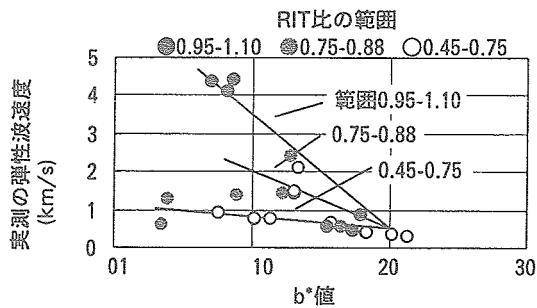


図4.2.15 RIT比の大きさを分けた b^* 値と弾性波速度

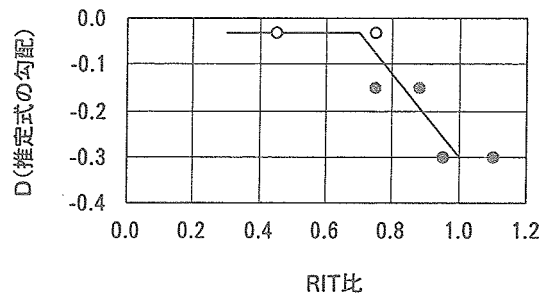


図4.2.16 RIT比と図1.4.15の近似直線の勾配の関係

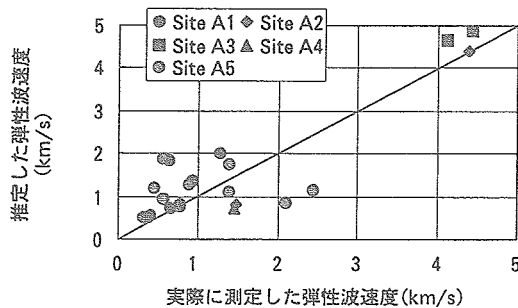


図4.2.17 実際に測定した弾性波速度と推定した弾性波速度

○安山岩以外の実斜面への適用

『花崗岩斜面への適用』

3つの花崗岩斜面で、本論文で改良した手法による観測を行った。b*値と弾性波速度の関係をRIT比で分類したものを図4.2.18に示す。b*値18で弾性波速度0.5km/sの点を通る次式を作成する。

$$\left. \begin{aligned} V_t &= (b^* - 18) \cdot D + 0.5 && : b^* \leq 18 \\ V_t &= 0.5 && : b^* > 18 \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

推定式の勾配Dは一定であり次式のようになる。

$$D = -0.3 \quad : 0.4 \leq \text{RIT比} \leq 0.75 \quad (4.6)$$

RIT比が式(4.6)で示した範囲外ではDを検討する必要がある。式(4.5)による弾性波速度と実際の弾性波速度の関係を図4.2.19に示すが、実測値と推定値がよく一致している。図4.2.20にb*値と実際に測定した超音波速度の関係を示す。b*値が20以下の部分で認められる負の相関関係を利用してb*値から超音波速度を推定すると図4.2.21のようになる。b*値が20以上の部分は実際に測定したデータから外れるが、その他の部分ではよく一致している。図4.2.22に、反射スペクトルから算出した斜面のb*値と、接触型の分光測色計で測定した供試体の切断面のb*値の関係を示す。全体のb*値が切断面のb*値より大きい。値が大きく異なるデータがあり、図4.2.20、図4.2.21で相関関係から外れるデータと一致する。岩石内部に対して表面の風化が著しく進んでいることによると考えられる。このような場合は本手法による超音波速度推定の適用外とし、弾性波速度による評価を行う。

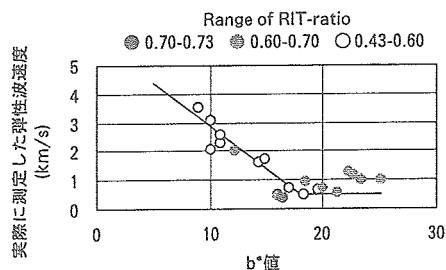


図4.2.18 花崗岩のb*値と実際に測定した弾性波速度

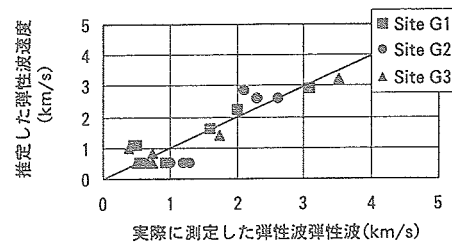


図4.2.19 花崗岩の実際に測定した弾性波速度とRIT法で推定した弾性波速度

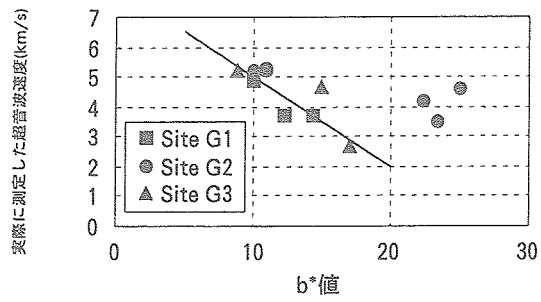


図 4.2.20 花崗岩のb*値と実際に測定した超音波速度

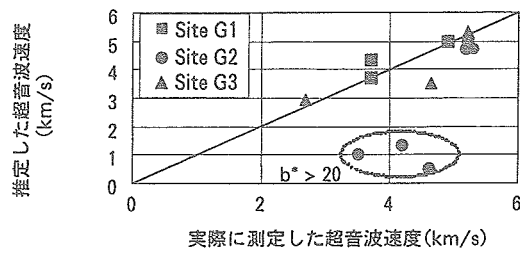


図 4.2.21 実際に測定した超音波速度と推定した超音波速度

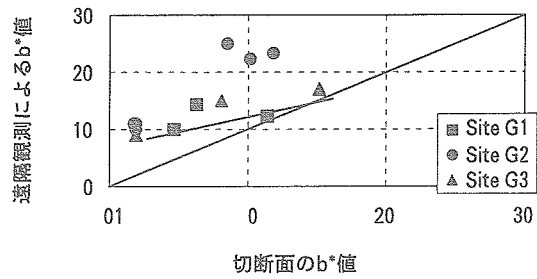


図 4.2.22 供試体の切断面のb*値と遠隔観測によるb*値

『凝灰岩斜面への適用』

3つの凝灰岩斜面で求めた b^* 値と弾性波速度の関係を、RIT比で分けた結果を図4.2.23に示す。 b^* 値25で弾性波速度0.5km/sの点を通る推定式を作成する。

$$\left. \begin{aligned} V_i &= (b^*-25) \cdot D + 0.5 && : b^* \leq 25 \\ V_i &= 0.5 && : b^* > 25 \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

RIT比と勾配Dの関係を図4.2.24と次式に示す。

$$\left. \begin{aligned} D &= -2.0 \cdot \text{RIT比} + 1.0 && : \text{RIT比} \geq 0.5125 \\ D &= -0.025 && : \text{RIT比} < 0.5125 \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

式(4.7)で算出した弾性波速度と実際に測定した弾性波速度の関係を図4.2.25に示すが、実測値と推定値はよく一致している。凝灰岩斜面での b^* 値と実際に測定した超音波速度に良好な負の相関関係があり、この関係を利用して b^* 値から推定した超音波速度が図4.2.26であり、 b^* 値で超音波速度を推定できる。

b^* とRIT比による弾性波速度と超音波速度の推定方法が、安山岩だけでなく花崗岩や凝灰岩の斜面へも適用できることを示した。風化に伴い針鉄鉱が増加して b^* 値が大きくなる岩石であれば、本手法を適用できる可能性は高いと考えられる。

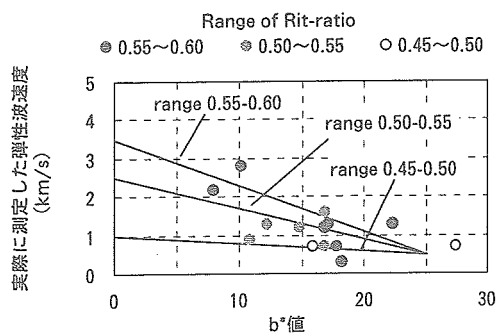


図4.2.23 RIT比で分けた凝灰岩の b^* 値と弾性波速度

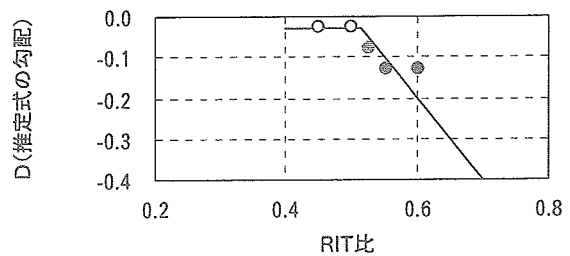


図4.2.24 RIT比と図1.4.23の近似直線の勾配

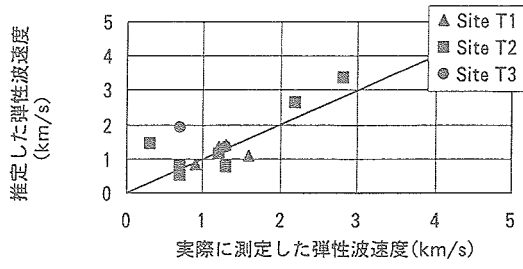


図 4.2.25 凝灰岩の実際に測定した弾性波速度と推定した弾性波速度

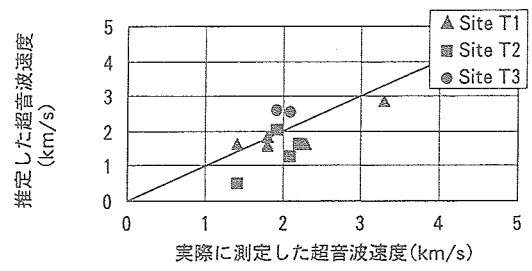


図 4.2.26 凝灰岩の実際に測定した超音波速度と推定した超音波速度

4.3 研究の経緯

4.3.1 平成12年度

「研究の内容」

対象斜面を遠隔から観測（リモートセンシング）しその性状を識別する。観測するデータは岩盤表面の「反射スペクトル」および「温度特性」である。反射スペクトルは太陽から入射した電磁波が斜面表面でどの程度反射するかを波長ごとに観測する。温度特性は斜面表面の温度分布と表面温度の経時変化を観測する。対象物の種類や特徴により「反射スペクトル」や「温度特性」が異なることを利用して対象斜面の性状を識別する方法を開発する。

「研究の成果」

反射スペクトルや温度変化特性により岩盤のどのような性状を評価できるかを検討するため、種類、色調、風化程度、乾燥比重などの異なる岩石テストピースを用いて基礎実験を行った。観測データにより「岩石の種類」「岩石の風化」「岩石の比重・密度」「岩石の湿潤状態」を識別できる可能性が分かった。一方で太陽光の入射角度や観測視線の方向などの観測条件がデータに影響するため、観測条件やデータ補正方法について検討する必要があることが分かった。

4.3.2 平成13年度

「研究の内容」

平成12年度の基礎的な研究で、遠隔観測により岩盤の風化程度や乾燥比重を評価できる可能性が分かった。しかし、これらは斜面安定性と密接に関係する性状ではあるが、その影響は複雑で、安定性評価の明確な指標としては利用しにくい。そこで、より直接的に斜面の安定性の評価指標となりうる岩盤の弾性波速度、超音波速度の識別可能性をモデル斜面実験により検討した。

「研究の成果」

本手法による観測データと岩盤斜面の弾性波速度、超音波速度に明瞭な相関関係が認められた。この相関を利用して弾性波速度、超音波速度を推定できる可能性が分かった。これを従来の安定性評価手法に適用することにより、遠隔観測による一連の斜面安定性評価手法ができた。今回の成果は一箇所のモデル斜面によるものであり、その精度や適用性については十分には検討していない。次年度以降は観測データを増やし精度や適用性について検討する。なお、このシステムを特許出願した。

4.3.3 平成14年度

「研究の内容」

開発する手法では観測データから弾性波速度や超音波速度を推定することが最も重要である。岩盤斜面の表面温度分布で斜面を領域分けし、領域ごとに可視・近赤外の反射スペクトルを観測した。反射スペクトルからL*a*b*表色値を算出した。さらに、領域ごとに弾性波速度と超音波速度を従来の方法で測定し、b*値との関係を検討した（本研究ではb*値と弾性波速度や超音波速度の関係を検討するためにこれらを実測したが、手法が完成すれば実測する必要はない）。この検討を安山岩、凝灰岩、花崗岩の斜面で行った。

「研究の成果」

b*値と弾性波速度に明瞭な相関があることが分かった。岩種によって回帰式が異なるものの、この相関関係を利用して弾性波速度を推定する可能性が分かった。推定した弾性波速度と超音波速度を日本道路公団の工事实績により作成された安定性評価図に適用して斜面の安定性を評価する可能性を示した。超音波速度についても同様の相関関係があり、安定性評価に利用する可能性が分かった。

4.3.4 平成 15 年度

「研究の内容」

既に基本的なシステムは確立しているが、①遠隔観測データを目視判読で分けた領域ごとに安定性を評価するが領域分けの客観性に問題がある、②表面温度の上がりやすさを観測するが日射条件の影響を強く受けるのでいろいろな斜面を同一基準で比較できない、③弾性波速度および超音波速度の推定式の精度と適用性の向上、④温度変化率と b^* 値によるデータの適用性評価の適用性向上、⑤得られた結果から安定性をどう評価するか、などの課題が残っていた。コンクリート供試体による基礎的な実験、実際の斜面での観測と実証データ取得、観測データと実証データ分析などを行い、上述の課題解決に取り組んだ。

「研究の成果」

①機器を代えてグルーピングせずに適切な結果を得られることを確認し、客観性を向上した、②温度変化率を油土に対する温度の上がりやすさとして基準化した（特許出願）、③基準化した温度変化率を利用して共同研究前の推定式より適用性が向上した（特許出願）、④超音波速度の推定の適用可否を判定する方法を基準化した、⑤安定性評価結果の表示を基準化しビジュアルで分かりやすい評価結果が可能になった。以上の成果を踏まえて、他の調査手法との位置づけを考察し、複合的な利用方法についても整理した。

4.3.5 平成16年度

普及のために、マニュアルの作成や、国土交通省のNETIS（新技術情報提供システム）への登録を進める。

13年度に出願していた特許について、特許登録を完了した。15年度に改良した部分（RIT比の利用）について、新たに特許出願した。

<参考文献>

参考文献

- 1) 日本リモートセンシング研究会：図解リモートセンシング、(審) 日本測量協会、1992
- 2) ミノルタ株式会社：色を読む話、
- 3) 岩の力学委員会(編)：岩の工学的性質と設計・施工への応用、(社)地盤工学会、東京都、2001
- 4) 宮尾亘、中川靖夫、白水俊次：可視光センシング、光センシング工学、(株)日本理工出版会、東京都、1995.
- 5) T.Nagano and S.Nakashima：Study of color measurement and degree of weathering of granitic rocks by visible diffuse reflectance spectroscopy, *Geochemical Journal*, 23, pp75-83, 1989
- 6) S.Nakashima, I.Miyagi, E.Nakata, H.Sasaki, S.Nitto, T.Hirano, T.Sato and H. Hayashi：Color measurement of some natural and synthetic minerals - 1, *Rep. Res.Inst.Natural Resources, Mining College, Akita Univ*, 57, pp.57-76, 1992
- 7) 岡島尚司, 荒井克彦, 本多秀夫, 堂前裕子, 辻正寛：地上リモートセンシングによる岩盤斜面調査方法開発のための基礎的研究, *日本リモートセンシング学会誌*, 23(3), pp.224-238, 2003.
- 8) 岡島尚司, 荒井克彦, 本多秀夫, 堂前裕子, 和田秀一：地上リモートセンシングによる岩盤斜面の安定性評価の可能性, *日本リモートセンシング学会誌*, 24(1), pp.39-52, 2004
- 9) 松平真, 本多秀夫, 岡島尚司, 杉本敬一, 荒井克彦：電磁波の反射スペクトルと熱画像に基づく地盤材料と状態の特定, 第35回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.409-410, 2000
- 10) 岡島尚司, 堂前裕子, 本多秀夫, 荒井克彦, 和田秀一, 山木忠嘉, 辻正寛：地上リモートセンシング手法による岩盤斜面調査のための基礎的実験, *日本応用地質学会中部支部研究発表会予稿集*, 日本応用地質学会中部支部, pp.47-50, 2001
- 11) 岡島尚司, 堂前裕子, 本多秀夫, 荒井克彦, 和田秀一, 山木忠嘉, 辻正寛：地上リモートセンシング手法を用いた岩盤斜面調査のための基礎的実験, *全地連全技術フォーラム2001講演集*, 全国地質調査業協会連合会, pp.299-300, 2001
- 12) 岡島尚司, 堂前裕子, 本多秀夫, 辻正寛, 荒井克彦：地上リモートセンシング手法を用いた岩盤斜面調査のための基礎的実験, 第36回地盤工学研究発表会発表講演

- 集, 地盤工学会, pp.67-68, 2001
- 13) 岡島尚司, 本多秀夫, 杉本敬一, 堂前裕子, 荒井克彦, 和田秀一, 山木忠嘉, 辻 正寛: 地上リモートセンシング手法による岩盤斜面点検方法, 平成14年度北陸技術フォーラム論文集, (社)北陸地質調査業協会, pp.26-29, 2002
 - 14) 岡島尚司, 荒井克彦, 本多秀夫, 廣瀬剛, 大澤美鈴, 福岡誠, 伊藤桂一, 三田村文寛: 地上リモートセンシングによる岩盤斜面安定性評価の多数の実斜面への適用, 日本リモートセンシング学会誌, 25 (1), pp.72-82, 2005
 - 15) 岡島尚司, 荒井克彦, 廣瀬剛, 大澤美鈴, 伊藤桂一, 三田村文寛: 地上リモートセンシングによる岩盤斜面の性状と安定性の評価, 日本リモートセンシング学会第37回(平成16年度秋季)学術講演会
 - 16) 一川宏也, 長谷川秀人: 熱赤外線リモートセンシングによる土の判別手法に関する基礎的実験, 土と基礎, 40 (8), pp.11-16, 1992
 - 17) 建設省土木研究所(編): 熱赤外線映像法による吹付けのり面老朽化診断マニュアル, (財)土木研究センター, 東京都, 1996.
 - 18) 地盤工学会 地盤工学への物理探査技術の適用と事例編集委員会編: 地盤工学・実務シリーズ14 地盤工学への物理探査技術の適用と事例, (社)地盤工学会、東京都, 2001.
 - 19) 穴戸皓一, 長谷川秀人, 小谷野多美枝: 岩盤の表面温度観測による風化度の判定手法に関する基礎的実験(その2), 平成5年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 2, pp.5-8, 1993
 - 20) 武内俊昭, 吉村正義, 藤井勢之: 岩石の色彩の数値化と地質工学への応用, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.527-532, 1994.
 - 21) 千木良雅弘編: 災害地質学入門, 近未来社、名古屋、1998
 - 22) (財)道路保全技術センター編: 平成8年度道路防災総点検要領[豪雨・豪雪等], (財)道路保全技術センター、東京都、1996.
 - 23) 土木学会岩盤力学委員会編: 岩盤斜面の調査と対策、第3章, pp.113-115, 丸善、東京都、1999
 - 24) 西山賢一, 松倉公憲: 風化による砂岩礫の物性・色彩の時間的变化, 平成10年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 27, pp.105-108, 1998.
 - 25) 長谷川秀人, 穴戸皓一, 斎藤賢己, 小谷野多美枝, 一川宏也, 池田秀夫: 岩盤の表面温度観測による風化度の判定手法に関する基礎的実験, 平成4年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 25, pp.97-100, 1992

- 26) 満下淳二, 石沢一吉, 遠藤司, 武内俊昭: 岩石の色彩測定と風化区分および物性値評価への応用に関する検討, 応用地質, 38 (6), pp.370-385, 1998
- 27) 山本浩也: 熱赤外線による岩盤斜面調査, 全地連「技術フォーラム'97」講演論文集, P13, pp.569-572, 1997

あ と が き

産学官共同研究支援事業により、十分な調査が困難な場所での岩斜面について、地上リモートセンシング技術を用いて客観的かつ定量的に斜面の安定性を評価できる手法を確立することができた。この手法が、落石や斜面崩落等の自然災害を未然に防ぐことに役立つことを期待する。

本研究は産学官共同研究支援事業のほか、(財)福井県産業支援センターの地域研究開発促進拠点支援事業および独立行政法人科学技術振興機構の研究成果最適移転事業のご支援をいただいた。また、福井大学 町原秀夫技術官、八十川和之氏、熊野克則氏、藤田貴準氏、福井県骨材工業組合 郡寄隆次氏、(株)岩佐土建、今中土木(株)、伊原建設(株)、寺川建設工業(株)、(株)登建、(有)花田組、福井県工業技術センター 黒川和男氏など多くの方々に多大なご助言とご協力をいただいたことに対し、深く感謝の意を表します。

平成17年3月

地上リモートセンシングによる岩斜面の安定性評価マニュアル(案)
～産学官共同研究報告書～
平成17年3月発行

編集 研究開発グループ
発行 〒910-0005 福井市大手 2-9-10 (電気ビル1F)
(財) 福井県建設技術公社
連絡先 〒918-8012 福井市花堂北 1-7-25
(株) サンワコン 情報技術部 研究開発チーム
電話 0776-36-2790
印刷 〒915-0802 武生市北府 3-12-31
(株) 国府印刷社