

リモート・センシング手法による斜面崩壊の予測に関する研究

——土の含水比の測定実験——

木村 薫 上野 裕治
平間 邦興

Application of Remote Sensing Techniques to Monitoring of Slope Failure

——Study on Measurement of Soil Moisture——

Kaoru Kimura Yuji Ueno
Kunioki Hiram

Abstract

The purpose of studies reported in this paper is to investigate sensors, spectral bands, and analysis methods for measurement of soil moisture by remote sensing techniques. These studies comprise a first step for application of the techniques to monitoring of slope failures at earthwork sites. Three kinds of soil were tested in this study; clay, loam, and fine sand. And three kinds of sensor were used; multispectral camera, spectral reflection meter, and infrared thermometer. As a result, it was clarified that it would be effective to use data of IR and R bands, UV/IR and B/IR bybands of the multi-spectral camera, and data of infrared thermometers. Further, it was possible for other factors which must be considered in case of putting to practical use also to be arranged in order.

概要

この論文は、土地造成工事、道路工事、などの切、盛土工事現場における造成斜面の含水比の面的な分布をリモート・センシング手法を用いては握し、斜面安定性予測のための一調査手法とする目的で、センサーの選定、波長バンドの選定、解析方法の検討を行なった基礎実験の結果をまとめたものである。実験用土は粘土、ローム、山砂の3種で、それぞれ8段階に含水比調整したものを使用し、センサーはマルチスペクトルカメラ、分光反射率計、赤外線放射温度計の3種を使用した。実験の結果、マルチスペクトル写真のIR、Rバンド、UV/IR、B/IR バイバンド、および赤外線放射温度計による測定、などに有効な結果が得られた。さらに、実用化にあたり考慮すべき他の要因についても整理することができた。

1. まえがき

リモート・センシングとは「直接手に触れないで、対象物や現象に関する情報を収集し、対象物や現象の識別、分類、判読および分析などを行なう技術¹⁾」と定義づけられている。その中でも、ERTS 衛星あるいは航空機によるマルチスペクトル写真を応用して、広域での環境調査、自然資源探査、気象調査などに実用化され、広く一般にも認識されるようになってきた。

一方、一連の建設工事の中でも、土地造成工事、道路工事などにおいて、斜面崩壊危険地帯の早期発見と安定性の予測は重要な課題であり、現在実施している現地踏査、ボーリング調査、諸土質試験などに加え、ハンディ

で操作も容易なりリモート・センシング手法を開発し、これを用いて地表含水比の分布を広く把握することができれば、非常に有効な調査手法となるはずである。

この報告は以上のような調査方法を確立するための第一段階として、センサーの選定、波長バンドの選定、解析方法の検討を行なうことを目的とした基礎実験の結果報告である。

2. 実験概要

2.1. 実験条件

実験に用いた土試験料は次の3種である。

- A. 粘土 (千葉県佐倉市, ちゅう積粘土)
- B. ローム (東京都清瀬市, 関東ローム)

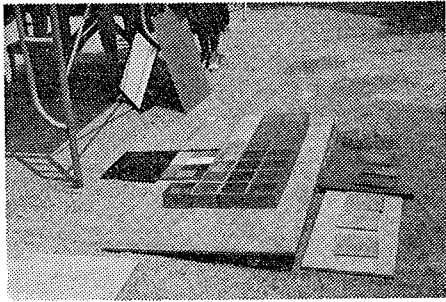


写真-1 実験セット状況



写真-2 撮影状況

(左からカメラ, 分光反射率計, 赤外線放射温度計)

C. 山砂 (千葉県佐原市, 2 mm フルイ通過分)

A, B 試料は気乾状態から液性限界まで, C 試料は表面に水が浮き出るまでの 8 段階に含水比調整し, これはそれぞれベニア板製のマス型箱 (内側寸法130×130×70 mm, 防水ペイント塗装) に入れて, 2.5 kg ランマー, 3 層, 29回で締固めたものを供試体とした。

実験は昭和53年 8 月 5 日, 11:00~12:30 に行ない, 当日の気象条件は次のとおりである。

天候: 晴れ時々曇, 気温: 34.5℃

太陽高度: 53°, 湿度: 57%

実験のセットは写真-1 に示すように, 屋外の路上にベニア板を敷いた上に試料箱, キャリブレーションのための標準白色板, カラーチャート, および土試料と同じ箱に入れた水を配置した。しかる後, 高さ 3m の位置からマルチスペクトルカメラ, 分光反射率計, 赤外線放射温度計の 3 種類のセンサーによる撮影を行なった。

撮影状況を示したのが写真-2 である。

2.2. マルチスペクトル写真による方法

マルチスペクトル写真撮影は通常, マルチカメラ方式, またはマルチレンズ方式で行なわれるが, 本実験の場合カメラと対象物との距離が 3 m と短いため, 1 台のカメラ (ハッセルブラッド 500EL) でフィルムとフィルターとの組み合わせを変えて 5 種の写真撮影を行なった。使用したフィルム, フィルター, および撮影バンドを表-1 に示す。

フィルム	フィルター	撮影バンド
Tri-X 2403 (モノクロ)	UV (コーニング 7-59)	紫外線領域
	なし	可視光領域(モノクロ)
IR-2424 (モノクロ)	IR (ラッテン 89-B)	赤外線領域
	UV (コーニング 7-59)	紫外+赤外線領域
Ektachrome 5256 (カラー)	なし	可視光領域(カラー)

表-1 使用フィルム, フィルター, および撮影バンド

この中でカラーフィルムは, 青, 緑, 赤の可視光に感光する三つの乳剤層を持った 3 バンドのマルチスペクトルセンサーと解釈することができる。したがってここで

は紫外, 青, 緑, 赤, 赤外, 紫外+赤外, およびモノクロ可視光, カラー可視光領域の合計 8 波長バンドの撮影を行なったことになる。

解析方法は, 撮影の完了したカラーフィルムのポジについては光電濃度計 (マクベス TD-504) により, 3 色分光した濃度を測定し, モノクロフィルムのネガについては透過濃度計 (サクラ PDA-11) を使用して測定した。測定値はそれぞれ濃度計特性による補正と, グレースケールによる濃度補正を行ない, 土試料の含水比との対応を試みた。ここに濃度 D は次式で表わされる。

$$D = \log \frac{1}{\tau} \quad (\tau = \text{透過率})$$

2.3. 分光反射率計による方法

分光反射率とは, 認意に定めた特定の光を全方向から与えたときに反射するその光の割合をいう。今回使用した分光反射率計 (きもと PM-13) は, 試料に照射された特定の波長の光 (実験上では太陽光の一成分) の反射光を積分球で集光できるようになっており, このとき標準白色板からの反射を 1 として試料からの反射の比が百分率で求められる。今回の実験では 400 nm から 850 nm までを測定し, 各試料ごとに分光反射率曲線を求めた。

2.4. 赤外線放射温度計による方法

赤外線放射温度計は, 離れた位置から対象物の表面温度を測定するための計器で, Stefan-Boltzman の法則に基づいて, ある一定領域の電磁波の放射エネルギー量を検出することにより, 物体の表面温度を求めることができる。

今回使用した赤外線放射温度計 (ナショナル ER-2002) は視野角 2° のスポットで測定する機構となっているため, 手で計器を振って試料上を走査しながら電圧信号を自記録し, 温度へ変換した。

3. 実験結果とその検討

3.1. マルチスペクトル写真による方法

各試料ごとに含水比と 8 波長バンドの濃度曲線を記入

したものが図-1~3である。ここに図中の各記号は次のバンドを示す。

- UV: (Ultraviolet) 紫外線
- B: (Blue) 青色光
- G: (Green) 緑色光
- R: (Red) 赤色光
- IR: (Infrared) 赤外線
- IR+UV: (Infrared+Ultraviolet) 赤外線+紫外線

- Vis. Mono: (Visual Monochromatic) 可視光 (白黒)
- Vis. Color: (Visual Color) 可視光 (カラー)

図から明らかなように、各試料、各波長バンド共、全体的に含水比が高くなると濃度が高くなるという傾向は明確に見られる。しかし波長バンド別による曲線の傾斜の差にはあまり変化が認められないが、IR, Rバンドが一定、の範囲の中で比較的良好な直線性を示しており、UV, Bバンドが特徴ある曲線を示していることが分かる。ま

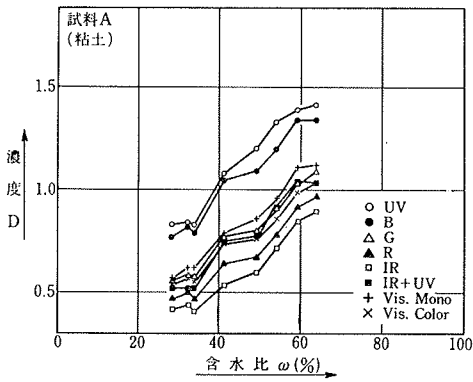


図-1 含水比—濃度曲線〈試料A〉

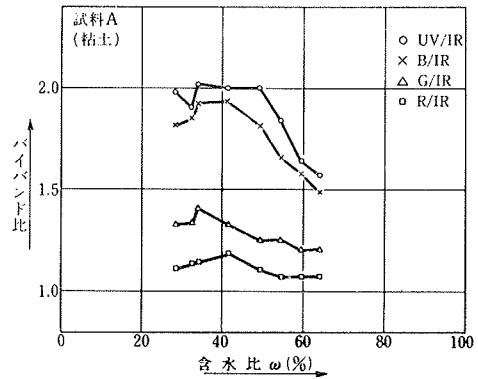


図-4 含水比—バイバンド比曲線〈試料A〉

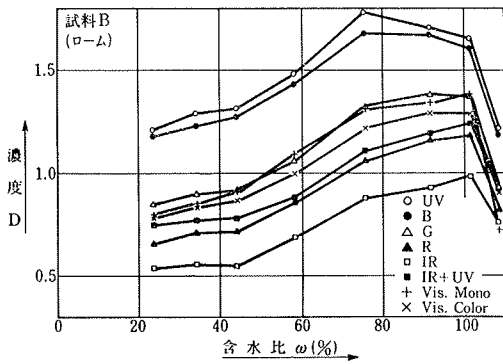


図-2 含水比—濃度曲線〈試料B〉

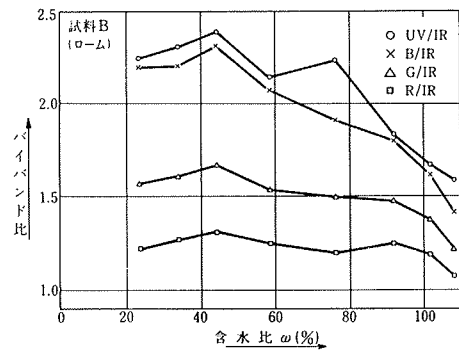


図-5 含水比—バイバンド比曲線〈試料B〉

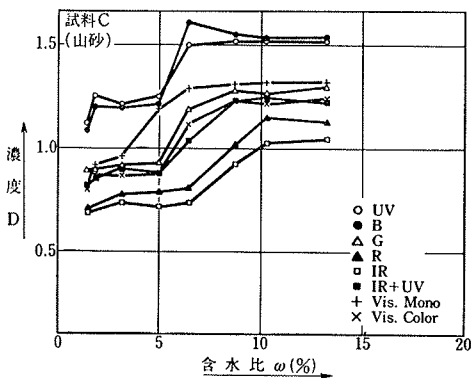


図-3 含水比—濃度曲線〈試料C〉

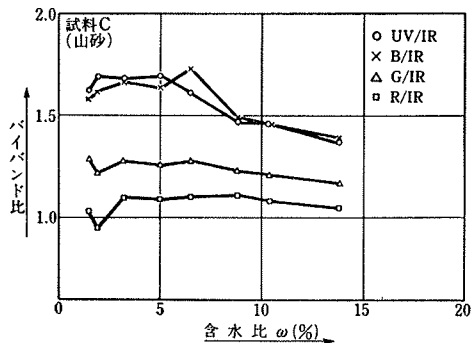


図-6 含水比—バイバンド比曲線〈試料C〉

た、この含水比—濃度曲線から含水比を測定するスケールとして有効なのは、一定の範囲の、傾斜をもった直線部分であることが理解できよう。ここで、その直線部分を取り出し、この実験で使用した試料ごとの含水比の測定が可能な有効範囲を、参考までに比較してみると次のようになる。

試料A	粘土	35~65% (30%)
試料B	ローム	30~100% (70%)
試料C	山砂	3~10% (7%)

このように細粒分の多い土の方が有効範囲は広がる傾向にあり、これは土中での水の存在状態、すなわち粒度、土の比表面積、pF値などの要因に起因するものと考えられる。

特に、図—2の試料B（ローム）において、高含水比で急激に濃度の低下する現象が見られるが、これは試料の表面で水が分離し、この面で光が全反射を起こすためと考えられる。

次に図—1 3における各波長バンド間の傾斜の差を明確にするため、IRバンド濃度を分母にとり、UV、B、G、R、バンドとのバイバンド比を出したものが図—4~6である。A、B試料ではB/IRが、C試料ではUV/IRが良好な直線性を示しており、B試料の高含水比域における全反射の影響は消去されていることが分かる。

3.2. 分光反射率計による方法

各試料ごとに含水比8段階の内、低含水比側から1, 4, 7段階目の試料についてその分光反射率特性を描いたものが図—7~9である。

図から明らかのように、各試料とも長波長になるに従い含水比の増加に伴う反射率の低下が大きくなる。この傾向は、長波長域を対象とした方が含水比の判読のためには有利なことを意味し、UVまたはBとIRのバイバンド比が有効なことを示している。しかし、この分光反射率特性から考察されるほどには、前述したマルチスペクトル写真によるIRバンド濃度に特徴が見られない。その原因は、含水比の変化によって反射率の差が大きく現われるのが700nm以上の可視光域外の消長域であり、フィルム、レンズ、フィルターといった光学系のシステムで、これ以上の長波長域のみを抽出することが難かしいためであると考えられる。

3.3. 赤外線放射温度計による方法

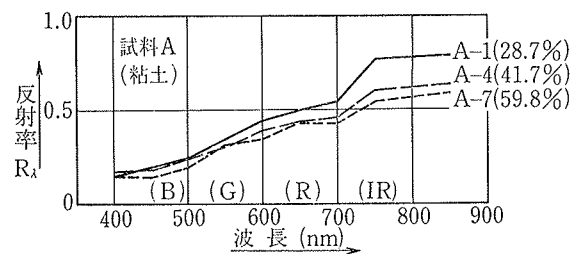
各試料ごとに、含水比と表面温度の相関を示したものが図—10~12である。測定は2回づつ行ない、測定値を全てプロットして一回帰分析を行なった結果、図中に示したように相関係数 $r=0.83\sim0.90$ の高い値を得た。

土の含水比の増加に伴い表面温度が低下する傾向は明らかであるが、これは水分の蒸発散時の気化熱による低

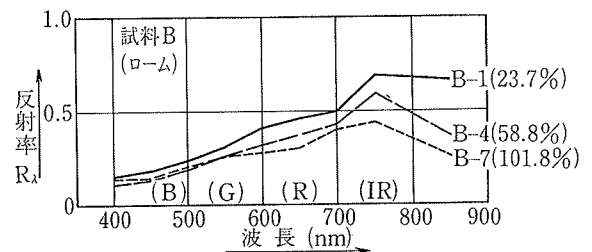
下と考えられる。したがって、土固有の水分蒸発散に関するポテンシャル、経時変化、などに影響を受けていると考えられ、これらの諸要因を考慮した基礎調査、実験が必要となる。

4. まとめ

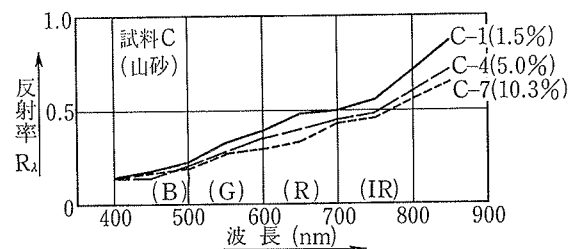
今回の実験では3種の測定方法を実施したが、マルチスペクトル写真による方法では有効であり、特に、UV、B、IRバンドが解析上、利用できることが分かった。分光反射率計は非常に精度の高いデータが得られるが、機材の操作上、大面積を対象とする現場での調査には不適當と考えられ、基礎実験のバックデータとして利用すべきであると解釈した。赤外線放射温度計は、土の含水比と温度に関する理論的な考察を今後も進める必要がある



図—7 分光反射率特性〈試料A〉



図—8 分光反射率特性〈試料B〉



図—9 分光反射率特性〈試料C〉

り、さらに測定機自体についても高精度のものが必要となるが、温度分布を面的に把握することには、きわめて有効であり、調査手法としての可能性は大きいと言えよう。

今後は今回の基礎実験をもとに、含水比以外の要因をも考慮した実験、および現場での応用実験を行なうと

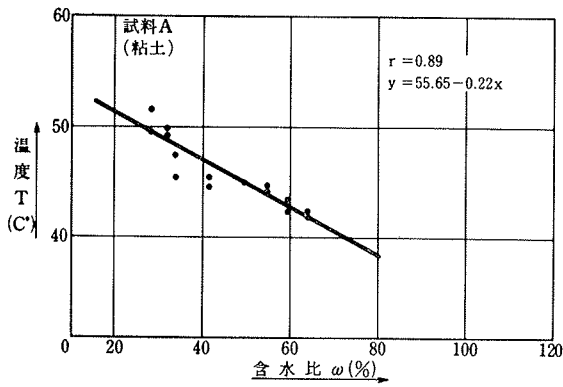


図-10 含水比—表面温度相関図〈試料A〉

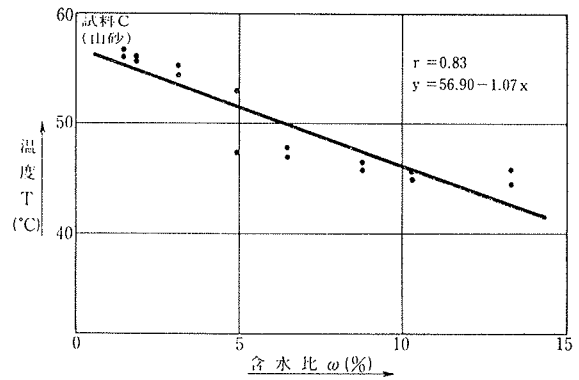


図-12 含水比—表面温度相関図〈試料C〉

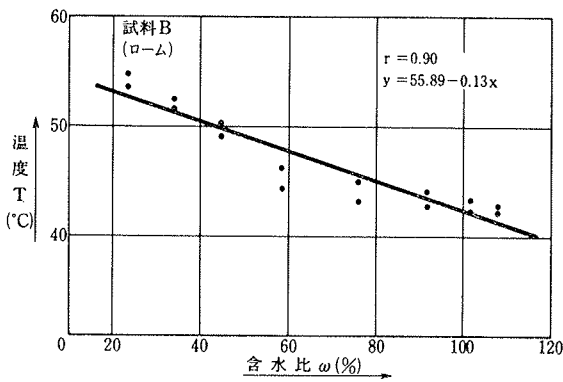


図-11 含水比—表面温度相関図〈試料B〉

もに、解析データの電算機処理に関する検討を進めたいと考えている。

この研究は国際航業(株)との共同研究で進めているものであり、同社日野技術所、地質部、今村遼平(課長)、柴田健一、長田俊明、各スタッフと共同で実施した実験

結果報告である。

参考文献

- 1) 村井, 他: リモートセンシングノート, 技報堂, (昭和50.11), p. 2
- 2) リモートセンシング, キャノン, (昭和49.10)
- 3) 今村: マルチスペクトル写真による地表含水状況の区分, 新砂防, (昭和51.2)
- 4) 安江, 岡本, 今村, 中林: マルチスペクトル写真による道路沿いの斜面調査, 施工技術, (1974.6)
- 5) 極檀, 渡辺, 君島: 赤外線カメラによる土の含水量の推定, 土木学会第32回年次学術講演会概要集, (昭和52.10)
- 6) 山内, 後藤, 巻内, 山口, 村田: リモートセンシングのための桜島火山灰の反射特性について, 第13回土質工学研究発表会講演集, (昭和53.6)