

赤外線写真・赤外線映像の土質調査への応用

あら き はる み
荒 木 春 視*

1. リモートセンシング

人間はかんだり、なめたり、聴き耳を立てたりしなくても、目で色つやや形を、また手ざわりで表面の細やかな状況を凹凸や温みとして捉えることによって、かなりの物体を識別できる。リモートセンシングとは人間のこのような機能を物理量として捕捉しようとする技術である。しかしながら現状では、情報は得られるようになったものの、識別システムは模索中であり、未確立の状況にあるといつてよい。ここでは、この模索中のなかで、ある程度、実証されたものおよびシステムとして理論的に正しいと考えられるものについて述べることにする。

1.1 原 理

人間の視力は可視域を越える赤外域に関しては全盲に等しいが、この波長域は植生、土壌、水分が環境変化に即応して微妙な変動を示す領域でもあり、これらから反射または放射される電磁波に関する情報を収集するのがリモートセンシングである。

1.2 センサー

土木工事に関連するリモートセンシングの対象波長域は可視域から近赤外域にかけてと、遠赤外域であり、この電磁波情報を収集する装置がセンサーである。

1.2.1 赤外写真フィルム

写真によるカメラ方式は情報容量、解像力、三次元判読が可能という点で、線走査方式および非画像センサーより優れてはいるものの、 $0.9\mu\text{m}$ よりも長波長域での情報が得られないという欠点をもっている。赤外写真フィルムは赤外線フィルム（白黒フィルム）と赤外カラーフィルムとに分けられ、カメラシステムを通して地表面の情報が収録される。通常、赤外線写真と呼んでいるものは赤外線フィルムの 700nm 以下をフィルターカットしたものであり、赤外カラー写真では 500nm 以下をカットしている。赤外カラー写真に表現される色調は天然色ではなく、擬似カラーと呼ばれ、人間の目で緑に見えるものが青、赤色が緑、近赤外が赤として発色されている。

なお通常、航空写真測量に使われているパンクロ写真、土地利用および植生判読に使われている標準カラー写真もカメラ方式のセンサーの一種である。

1.2.2 スキャナー

走査機能を持つ望遠型の放射計がスキャナーであり、回転ミラーで地上を走査し、入力された電磁波を分光器で所定の波長に分割し、検知器に導いて電気信号に変換し、記録する。スキャナーには11チャンネルのマルチスペクトルスキャナーと単チャンネルのサーマルスキャナーとがある。

1.2.3 放射計

入力エネルギーの検出器には量子型と熱型があるが、スキャナーでは入力エネルギーの変化に対して速い応答が要求されるために量子型が使用されている。この量子型は1種類でカバーできるスペクトル帯が狭く、ノイズ除去のため低温で作動させる必要もあり、特に遠赤外域では検出器を液体窒素 (77°K) で冷却しなければならないという難点をもっている。しかし熱型は感度が入力スペクトルによって変わらないし、冷却の必要もないのであるが、応答速度が遅いという欠点がある。

放射温度計は非画像センサーの一種であり、熱型検出器が使用されている。

1.3 電磁波の反射と放射

太陽から地球へと放射されるエネルギーは大気層で18%が吸収され、26%が散乱されてしまうので、地表面にまで到達するのは残りの56%である。地表面に到達した太陽エネルギーは被覆物によって6%が反射され、50%が吸収される。したがって太陽から放射されるエネルギーのうち32%は元のままで大気圏に戻されているわけで、残りの68%が熱線に変えられて地表面から放出されていることになる。

太陽および大気からの放射エネルギーを受けて地表面は暖められ、大気中に熱線を放射して冷え、そこに熱平衡が成立する。この放射エネルギーは時間、季節、天候により、さらに土地利用形態、社会情勢によっても変化する。都市化によって晴天日の日射量が15~20%減少したり、工業都市では晴天日が9%も減少しているといわれている。特に波長の短い電磁波ほど散乱されやすく、排気ガス、浮遊ばいじん、ミストなど大気汚染物質、あるいは雲によって太陽から直接到達する紫外線および青色光が顕著に減衰し、熱収支にも影響を与えている。また反射日射量においても植生によって反射率が異なり、さらに建物の複合反射による減衰、樹木などの撤去による増大、明彩色の多用からくる増大、降雪地域での除雪による減少などがおこり、ここ

* 東洋航空事業(株) 取締役



写真一 崩積土植生



写真二 土地利用・落差



写真三 地下水脈

での変化も熱収支と関連することとなる。

2. 赤外線写真

2.1 赤外線フィルム

スモッグ時の垂直写真, 斜め写真, 遠景写真, 汀線調査用写真, マルチスペクトル写真に赤外線フィルムが使用されている。コダック社製のコダックインフラレッドエアログラフィック2424はネガタイプで, 撮影時には 700 nm 以下をフィルターでカットして使用されている。

2.2 土地利用形態の判別

オーバーラップさえとれていれば実体視もでき, パンクロマチック写真と同様に土地利用形態の判別ができる。ここでは赤外線写真で特に判読しやすくなる事象について写真上で述べることにする。

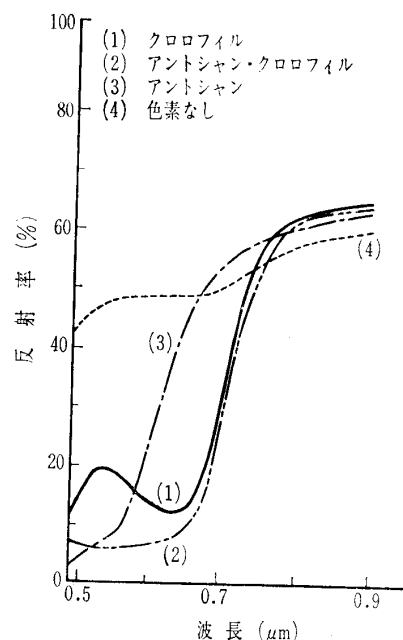
写真一 集落が狭長に谷の奥部へと伸びており, それを囲むようにして, 大小の樹冠を持つ林地が発達する。この灰白調の林地の外周には灰色調の, 均一の樹冠をもつ林地が広がっている。集落が崩積土上に発達していることを暗示する。裸地部の灰黒調は湿潤土である。

写真二 灰白調の広葉樹と灰色調の針葉樹, 灰色調の, やや湿潤な泥質土の小径, 細い平行しま模様は山腹での植林, その平行しまを切るようにして, “く” 型の条こん, これは尾根部の近くに発生したき裂で, 落差をもつ。

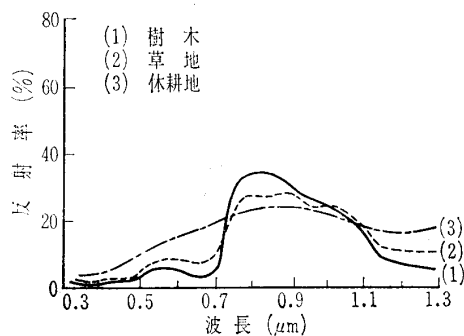
写真三 泥炭地の改良区が灰色調, そのなかをだ行しながら走る数条の濃灰調の模様, 天然の排水路である。

2.3 植物の反射スペクトル

植物の新陳代謝機能は四季による強弱があり, 冬季に休息し, 春になって活動を再開するものが多い。図一は葉部での色素形成と分光特性の関係を示したものであり, 春に新芽がでて盛夏にクロロフィルの形成が顕著に進むと, (1)のようなスペクトル分布となり 0.5 μm の緑領域にピークができ, 秋に近づくにつれてアントシアンが生成されは

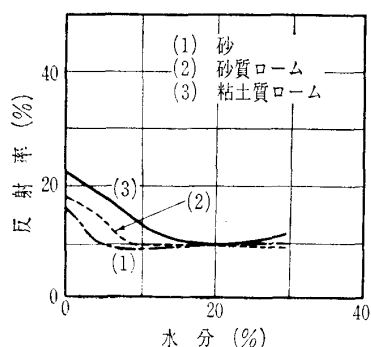


図一 葉の色素形成と分光反射特性
(Hotter & Johannsen 1969)



図二 地上被覆物の分光反射特性
(Root & Miller 1971)

じめ, 緑のピークが消え, (2)のようになり, さらに秋も更けるにつれてクロロフィルが失われ, アントシアンが葉部



図—3 土壌水分と土質別の反射率
(0.4~0.7 μm)
(Sabatini & Rabchevsky
1970)

したがって崩壊・地スベリの原因となる土壌水分に変化が生じるならば、植物の生理機能にも何らかの影響を与え、植物の反射スペクトルに異常の現われる可能性もあるわけで、その点からリモートセンシングと地スベリ、崩壊の関連性がでてくるわけである。

2.4 土壌の反射スペクトル

砂浜がパンクロマチック写真で白く、水田の泥質土が濃灰色調に映ることは経験的に熟知するところである。砂浜では含水率が小さく反射率が大きくなるからであり、水田では含水率が大きく反射率が小さくなるからである。図—3は砂、砂質ローム、粘土質ロームについて土壌水分と反射率の関係を示したものであるが、乾燥土で高い反射率をもつ各土壌とも、水分を吸収するにつれて減少し、砂では5%、砂質ロームでは10%、粘土質ロームでは15%に達すると一定値になる。

3. 赤外線映像

3.1 サーマルスキャナー

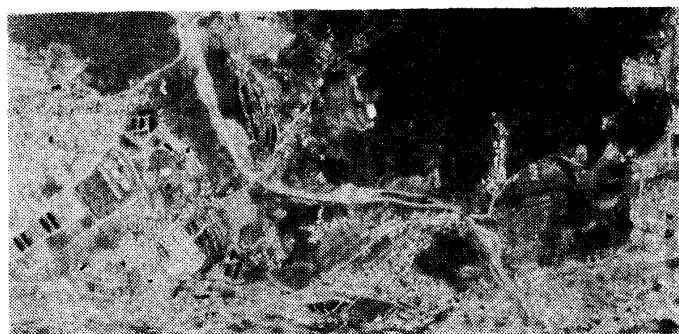
冷水塊・浮氷群の分布、工場排水の拡散状況、地下埋設物の破損箇所、鉱化帯の分布、航跡、火口マグマの活動状況などの調査にサーマルスキャナーが従来から使われている。しかしサーマルスキャナーの利用面はこれらの調査項目に限定されるものでなく、従来の手法が直接、温度差を測定するものであったが、それに加え、同一物体の温度上昇率を測定することによって、その利用面は拡大される。写真—4は朝と日中の2回撮像した赤外線映像であるが、この2枚はかなり異なった印象を与え、それぞれが特徴ある情報を提供している。朝の映像で線状に伸びるのは河川であり、日中のは道路である。また多くの沼地は河川水の補給を受け、その水源が湧水であること、中央下部にみえる四角のグラウンドは泥質混じりであることが判読される。

3.1.1 構造と性能

サーマルスキャナーは走査部と記録部からなる。

走査部 物体から放射される赤外線をスキャンミラーで走査捕捉し、フィルターによって波長域を選別し、入力する。

に残るようになると、(3)のように0.7 μm の赤領域の反射が強まる。そして晩秋から冬にかけて落葉するころには(4)のようになる。また樹林、草地、休耕地について分光反射特性をみると図—2のようになり、赤外反射の休耕地でおちることがわかる。



写真—4 赤外線映像
上：8時22分 撮像
下：12時04分 撮像
撮像対地高度：500m

入力された放射赤外線は検知器で電気信号に変換する。

記録部 走査部から送られてきた電気信号をグローモジュレーターチューブ、集光レンズ、反射鏡を通して輝度変調に変換する。これを対地速度とフィルム送り速度に同調させ、70 mm ロールフィルム上に輝度変調スポットとして露光させれば、そこにスキャンラインが記録されることとなる。Bendix 社製のサーマルスキャナー（サーマルマッパー）の性能はつぎのとおりである。

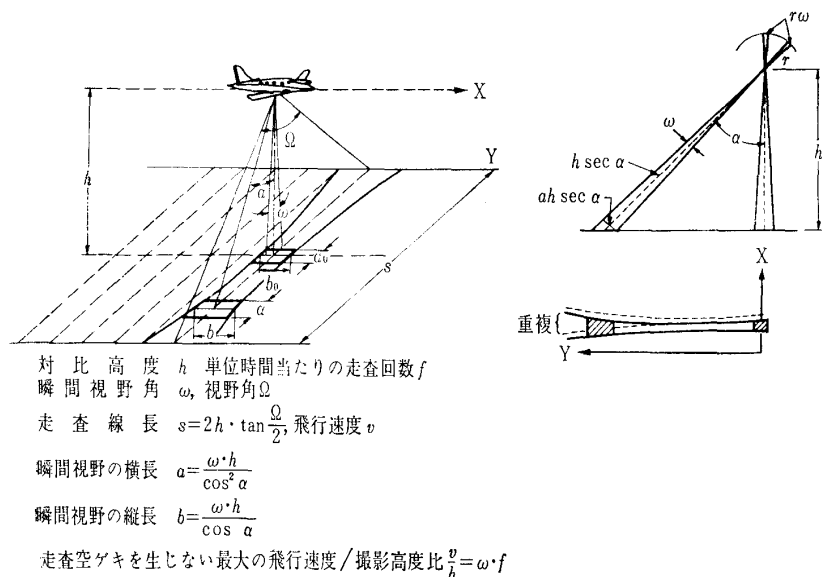
走査回数：100本/秒、視野角：120度、瞬間視野角：2.5 ミリラジアン、感度 0.1℃、検知器：Hg・Cd・Te および InSb、使用波長域：8~12.5 μm および 4~5.5 μm 、フィルム：コダック RAR 2498, ASA 250 (70 mm ロール)、連続撮像時間：3.5時間。

3.1.2 撮像

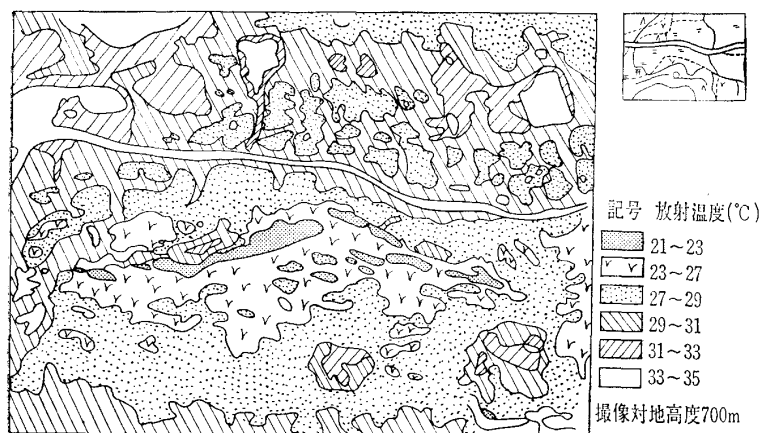
サーマルスキャナーを航空機に搭載し、対地速度 V と高度 H からフィルム送り速度を、また調査目的に合わせて温度レベル (D.C. Level) と温度レンジ (Signal Gain) を設定し、赤外線映像を撮像する。その際、放射温度計も同期させてスキャンニングセンター上の放射温度記録をとり、映像の温度標定の参考とする。図—4はサーマルスキャナーの撮像諸元をまとめたものであるが、この図から明らかにセンター上の映像は左右のものより縮尺が大きくなっており、左右の走査方向でヒズミを生じている。

3.1.3 デジカラー写真

赤外線映像における白黒の濃淡をカラー表示するためには、カラーデータシステムを使用する。このシステムは白



図—4 撮像条件の諸元



図—5 サーマルスキャナーによる地表面温度分布

黒濃淡の極大を白、極小を黒とし、その中間が段階的にシアン、濃青、緑、オレンジ、黄、茶、オリーブ、赤、紫、マゼンタに区分されるようになっており、TVカメラを通じてフィルムの濃淡を光の強度変化としてとらえ、これをカラーフィルムを装てんしたカメラで撮影するといった仕組みになっている。したがってデジカラー化されたものの解像力は元来のフィルムよりかなり低いものとなっており、情報がある大きさに集約され、平均化されたものが表示されることとなる。図—5はデジカラー写真から地表面の温度分布を図化したものである。

3.2 黒体放射と太陽光の分光特性

物体が加熱されるとプランク (Planck) の法則に従って赤外線が放出され、その際に放出される全エネルギーはステファン・ボルツマン (Stefan-Boltzmann) の法則によって表わすことができる。

$$\text{プランクの法則} \quad W_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} \left(\exp \frac{c_2}{\lambda T} - 1 \right)^{-1} \dots (1)$$

ステファン・ボルツマンの法則

$$W = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} W_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \dots (2)$$

ここで W_{λ} : 放射エネルギー

λ : スペクトル分布

T : 絶対温度

σ : ボルツマン定数

通常の物体は灰色体と呼ばれ、放射エネルギーは黒体より小さく、その比を放射率 ϵ で表わしている。したがって(2)式はつぎのようになる。

$$W = \epsilon \sigma T^4 \dots (3)$$

太陽を $5,900^{\circ}\text{K}$ の黒体とみなすとき、大気層の水分子によるスペクトルの吸収がみられ、欠損部が出現し、 $4\mu\text{m}$ 以上のスペクトルはほとんど分布しない。

3.3 地表面の放射率

自然の中では水の放射率が高く、泥炭、砂質ローム、細砂、露岩地の順に低くなっており、また乾湿でみると湿潤状態でやや高くなる。したがって赤外線映像では土地利用状況が浮彫りにされやすいわけである。表—1に地表面の放射率を示す。

3.4 放射温度と実測温度

航空機で計測される放射エネルギーには地表面からのものに大気中からのものも付加されており、大気層が安定していて付加量が一定ならば、赤外線映像は地表面温度と高い相関を示すが、逆に不安定な状態にあると温度相関が悪くなる。

これは気流の状態によるもので、飛行コース、地形によって大気からの放射エネルギーは変わる。

4. 土質調査への応用

4.1 土壌含水状態の調査

切盛土工およびトンネル工などによる水田の減水深の増減、畑地の乾性化の状況調査には表層土壌の含水状態を知

表—1 地表面の放射率

地 表 面	放 射 率	地 表 面	放 射 率
細砂(乾)	0.949	草地(密)	0.986
細砂(湿)	0.962	草地(疎)	0.975
砂質ローム(乾)	0.954	針葉樹(葉)	0.971
砂質ローム(湿)	0.968	石英粗砂	0.914
泥炭(乾)	0.970	風化花こう岩	0.898
泥炭(湿)	0.983	花こう岩	0.815
水	0.993	コンクリート	0.92

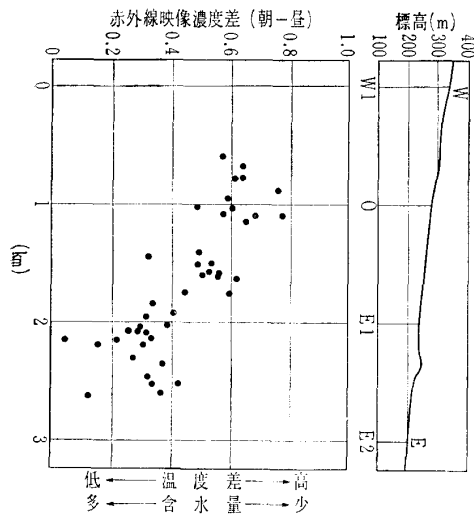


図-6 水田土壌の含水状態と地形との関係
(赤外線映像による)

る必要がある。しかし土壌含水量は気象変化を受けやすく、刻々、時間と共に変化するので調査地全域を同時に調査する必要があり、ばく大な人数のはりつけが要請され、実際上では点の情報で判断されることが多い。

リモートセンシングはこの点の情報を面的に広げるきわめて有用な手段である。土壌温度は水分の蒸発速度、風化の受けやすさ、微生物による有機物の分解速度、種子の発芽、作物の成長速度などと関係しており、ある地区での裸地、水田、畑の土壌温度が水分と密接に関連していることは十分に推測されるところである。

土壌温度は夜間では同一地温であるものの、日中では含水状態によってつぎのような経過をたどる。

土壌水分	朝の地温	昼の地温	温度差
多	低	中	小
少	低	高	大

したがって赤外線映像を朝と昼とで比較するとき、含水量の少ない土壌では朝と昼とでポジフィルムの濃度差が大きくでてくることになる。図-6は水田の含水状態が地形によってどう変わるかを調べたもので、低地側で含水量の増大する傾向にあることがわかる。

4.2 土 壌 調 査

土地改良事業において排水計画をたてるには土壌調査が必要である。土壌の物理的性質は土壌型によって異なり、地中温度上昇率、最大地中温度、赤外線反射率、作物の生育度に変化をもたらす。図-7は土地利用状況（草地、裸地）と地中温度の日変化を示したものであるが、対象物間の温度差が7月で大きくなることがわかる。この時期に同一場所の赤外線写真および赤外線映像を比較してみると表-2のようになっており、地表面が裸地から草で被覆されていくに従って赤外線反射が強くなり、9時の地中温度が、カーペット状に被覆されている地点で最も低く、そこでは日中でも地中温度があまり上昇しないことがわかる。また

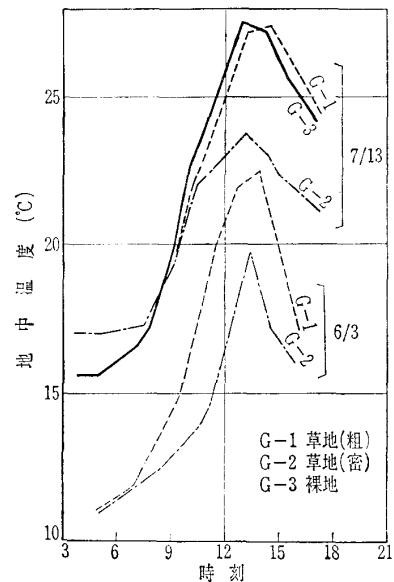


図-7 地中温度の日変化

表-2 土地利用と赤外線写真および赤外線映像

地 点	土 地 利 用	赤外線 写真濃 度階級*	赤外線映像濃度 9時 13時 A-B (A) (B)	地中温度 上昇 (9h~13h) (°C)
G-1	草地(粗)	7	0.66 0.66 0.00	7.6
G-2	草地(密)	5	0.79 0.79 0.00	4.6
G-3	裸地	8	0.65 0.66 -0.01	8.2

*1(白)←→(黒) 12

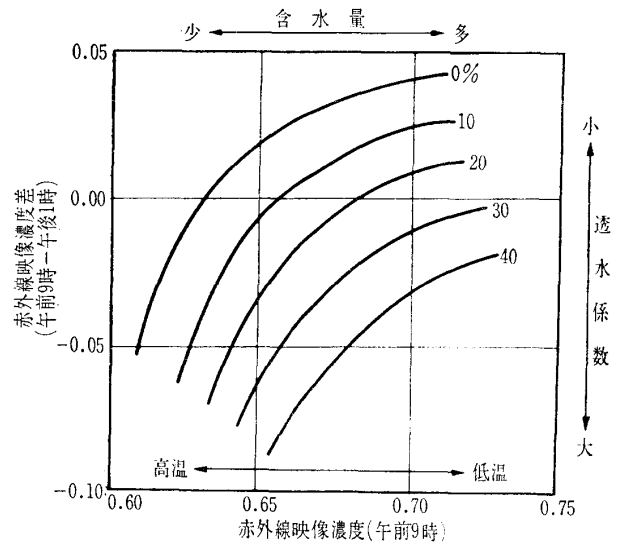


図-8 赤外線映像と表層土(0~15cm)のレキ含有率の関係

地中温度の日変化には土壌間ゲキ水の移動しやすさも関係しており、赤外線映像における朝と昼とで濃度差が同じでも、透水性が同じだとは限らない。図-8は赤外線映像と表層土(0~15cm)のレキ含有率の関係をまとめたものであるが、朝と昼の濃度差が同じでも、レキ含有率が高いと、

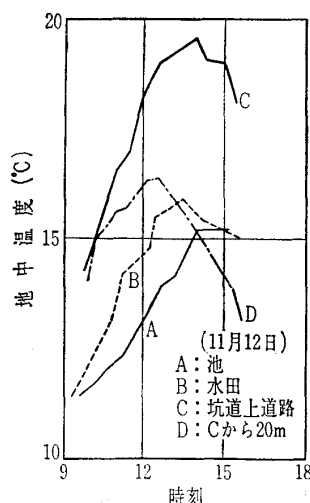


図-9 素掘坑道上の地中温度日変化

朝の映像濃度は大きくなる。

4.3 浅層地下水調査

ここでの浅層地下水とは土壌鉛直方向の熱収支に影響を及ぼし、地表面温度分布の一因となっているような、ごく浅い地下水を対象としている。土壌型のおおよその分布が赤外線写真および赤外線映像のパターン認識でとらえられていれば、現地における点の土壌調査を面に拡大することが可能である。この土壌区分のなかで一定の区画を切り、各区画について朝と昼の赤外線映像濃度差を求める。この濃度差分布を浅層地下水の流れのベクトルを表わすものと考え、地表面標高をも考慮しながら、濃度差に収れんするよう地下水脈を推定することになる。濃度差の小さいほど過湿状態にあるわけで、そこに水みちがあるとの前提にたって濃度差を解釈していくのである。図-6の場合、含水量が低地側で多くなることから低地側では地下水面が浅くなっていることを予測させ、事実、さらに低地側では自噴井、湧水もみられるようになる。

4.4 陥没地調査

石灰岩地帯では風化作用による陥没地形がしばしばみられる。そこには地下空洞と低温地下水の分布がつきまとい、空洞内の冷氣が大气と短絡して陥没地上での地中温度の低下となって現われる。しかし陥没地上ではつねに低温になるとは限らないわけで、トンネル掘削でみられるように地下水位の低下が地表面における土壌の乾性化を進め、地中温度がむしろ高温になる場合もある。図-9は旧坑道上の裸地部およびそこから20m離れた裸地部での地中温度日変化を示したものであるが、両地点において朝の地中温度が同じでも、日中での温度上昇は異なっており、旧坑道上の裸地部で乾性化の進んでいることがわかる。

したがって、陥没地調査では事前に既知の陥没部についての地中温度日変化を調べ、それを判読キーとして調査するのがよいわけである。旧坑道の分布を知るには裸地部についての赤外線映像における朝と昼の濃度差を求め、温度差の大きな地点について、既往文献ならびに既往掘削資料を参考として旧坑道の存否を検討することになる。

参考文献

- 1) 荒木春視・足立康夫：マルチスペクトル写真と土壌水分，第11回土質工学研究発表会講演集，1976
- 2) 荒木春視・松田徹・嫁兼敏和：マルチスペクトル写真の土質調査への応用，日本写真測量学会春季講演集，1976
- 3) 荒木春視・三浦千代子・亀井照人：埋蔵文化財調査に伴うマルチスペクトル写真撮影・解析，鳥取県教育委員会，因幡国府遺跡発掘調査報告書Ⅲ，1975
- 4) Frederick Betz, JR. (Edited): Environmental Geology, Dowden, Hutchinson & Ross, Inc, 1975
- 5) Manual of Remote Sensing, American Society of Photogrammetry, 1975
- 6) 丸安・土屋・中島・渡辺：日本の衛星写真，朝倉書店，1974
- 7) 日本リモートセンシング研究会(編)：リモートセンシングノート，技報堂，1975
- 8) 佐々・西尾(共訳)：写真測量ハンドブック，画像工学研究所，1976
- 9) 和達・土屋・安田・江森・飯坂・長尾：リモートセンシング，朝倉書店，1976

(原稿受理 1977. 2. 14)

学会発行図書案内

土質基礎工学ライブラリー 第13巻

『軟弱地盤における工事実施例(その2)』

A 5判 360ページ

定価 5,900円 会員特価 4,600円

発行：土質工学会

東京都港区西新橋1-35-5 東亜別館
〒105 電話 03-502-6256~9