

リモートセンシング利用の現状とその将来：
主に地質学的視点から

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2008-01-25 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 岩橋, 徹 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00000288

リモートセンシング利用の現状とその将来

—主に地質学的視点から—

岩 橋 徹*

Present State and Future Prospect for Application of Remote Sensing from Geologic Point of View

Toru IWAHASHI*

The application of remote sensing is very effective for identifying types of soil and rocks, mapping geologic structures, such as faults, foldings, fractures and other linear features, using visible and near-infrared bands of Landsat and other satellites MSS, TM, and SAR data. This application also includes prevention and management for natural disasters.

Therefore, many valuable studies have been carried out in various aspects such as investigation for developing natural resources, prospecting landslides, earthquakes, volcanic eruptions, and management for the change of environment as well.

This paper summarizes the present status and future prospect of remote sensing mainly in geology and related sciences.

Key Words : remote sensing, MSS, TM, Landsat data, geologic aspect

1. はじめに

最近、中東の産油国を中心に激しい戦争が勃発するなど、将来の石油需給の逼迫予測に起因する石油資源の利権をめぐる、世界の政治・経済はめまぐるしく動いている。

世界の人口は現状のままで推移するとすれば、西暦2000年には70億弱、さらに20年、30年後には100億を超えることが予測されている。このうち発展途上国の人口は、現在世界の人口のおよそ80%を占め、その増加率も高い。今後この人達の生活水準の向上に必要なエネルギーおよび食料等の生活物資の消費量は、恐らく加速度的に増

大されることになろう。このために、その資源確保が困難になり、生活物資について一層深刻な供給不足が起こり、混乱が予想される。

このようなグローバルな生活物資の供給危機を解消するには、一方では途上国を含めた世界の爆発的人口増の適正な抑制と資源の再利用を速やかに実施に移さなければならない。また、他方では地球上の各種の資源の所在と量をよく把握するばかりでなく、未発見の資源を積極的に探査し、地球環境を破壊しないよう配慮しながら計画的に増産・開発につとめ、適所に供給する必要がある。

今述べた多岐にわたる地球上の資源について、その地球上の所在と量の把握、未発見の資源の探

査、計画的増産・開発、開発に伴う地球環境破壊の監視等のためには、人工衛星によるリモートセンシングシステムの利用が効率的である。なぜならば、リモートセンシングシステムによって、関係の多くの情報を世界くまなく、比較的短時間に効率的に収集することができるからである。勿論この種のシステムは航空機に搭載が可能であるので、局部的な地域の詳細な調査研究にも利用することができる。このような観点から、先進国ばかりでなく世界の多くの国々でリモートセンシングの重要性が認められ盛んに利用されている。

2. リモートセンシングの歴史

1) 空中写真の時代

リモートセンシングという言葉が盛んに使用されるようになったのは今世紀の後半である。1913年、リビヤの油田地域の地図作成に空中写真が利用されたのがリモートセンシングの始まりである。空中写真撮影に用いるカメラ、フィルム等の乳剤、地図作成の研究と技術の進歩に伴って、地表の各種の地物や現象を判読する研究が推められ、この技術は世界第一次大戦時に軍事面で大きな力を発揮したことは有名である。

同大戦後、地質分野では、空中写真立体視の技術が石油、石炭、金属・非金属鉱物等の有用な工業用資源の探査、および水力発電などのエネルギー資源の開発に重要な役割を果たしている。

空中写真技術は、1940年頃から赤外線フィルムおよびナチュラルカラーフィルム等の実用化により飛躍的に発展を遂げることになる。農業・林業方面では植物の種類、分布、生育状況、材積、農地・森林の評価、山地災害、病虫害の発生状況等の調査に利用され、今日の人工衛星からのリモートセンシング研究と関連の技術の進歩の基礎となっている。

なお、日本では従来、国土地理院による5万分の1および2万5千分の1縮尺の地形図の等高線や地物間の境界等は、長期にわたる現地調査（地形測量・地物調査等）の資料をもとに描かれていた。20世紀の後半頃からは、地形図の作成は現

地調査に換わり空中写真図化機が利用され、等高線等が描画されるようになり、大幅に効率化・省力化が進められている。

2) 衛星等によるリモートセンシングの時代

リモートセンシングは、地球資源の探査のほか、環境科学分野では水質汚濁、海洋汚染、大気汚染、都市開発による自然環境改変、砂漠の拡大、その他の多くの分野の調査に応用範囲を広げてきている。

1957年10月4日、スプートニク-1が地球周回軌道に乗せられてから早くも33年余が経過しているが、この間、米ソを始め世界の主要国は競って資源探査・通信・気象・軍事（偵察、早期警戒）・航行等を目的とする実用衛星および宇宙物理・宇宙工学・宇宙生物学・測地学等を目的とする技術・研究衛星を多く打ち上げている。

1958年10月から1963年5月の間に行われたMERCURY計画、1965年3月から翌年の11月まで、2人乗り衛星でなされたジェミニ計画は地球探査も意図したものである。衛星内の手持ちカメラで地球周回軌道から地球表面のカラー写真が数多く撮影され、学術的に高く評価されたものも少なくない。

1966年9月、次に実施されたのはEROS計画（Earth Resources Observation Systems Program）である。この衛星の設計、組立管理、打ち上げ、軌道修正、姿勢制御、情報収集、情報伝達等は主にNASA（アメリカ航空宇宙局）が担当している。計画実施に先立ち、観測装置および一連のデータ処理システムの開発が行われ、航空機に搭載してテストが繰り返され、衛星搭載の同装置の開発に役立ったわけである。

EROS計画で最初に地球周回円軌道に乗せられたのは、ERTS-1（Earth Resources Technical Satellite-1、アーツ1号）で、1972年7月23日に打ち上げられている。この衛星は地球観測を目的にしているので、後にLANDSAT-1（ランドサット1号）と改称されている（図1）。当初の計画では衛星の軌道上の寿命は1年と見積られていたが、打ち上げ後、まもなく故障を起こした

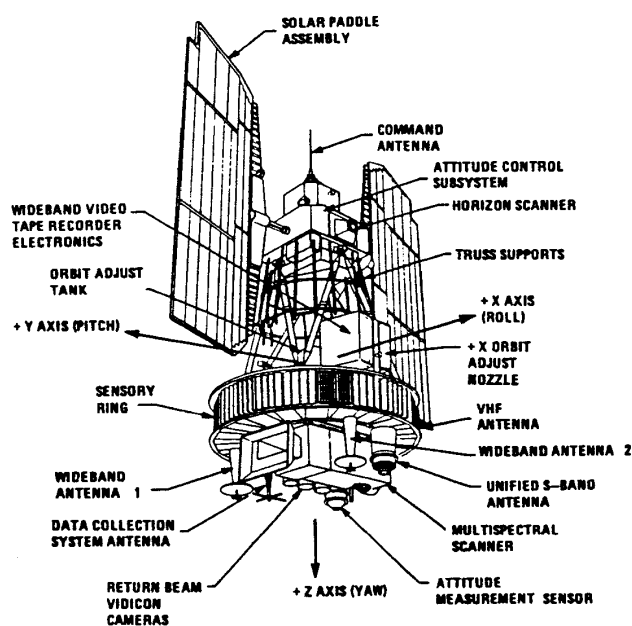


図1 LANDSAT-1~3の外観と観測装置等。
Fig. 1. Observatory configuration of LANDSAT-1, 2 and 3. (NASA, 1972)

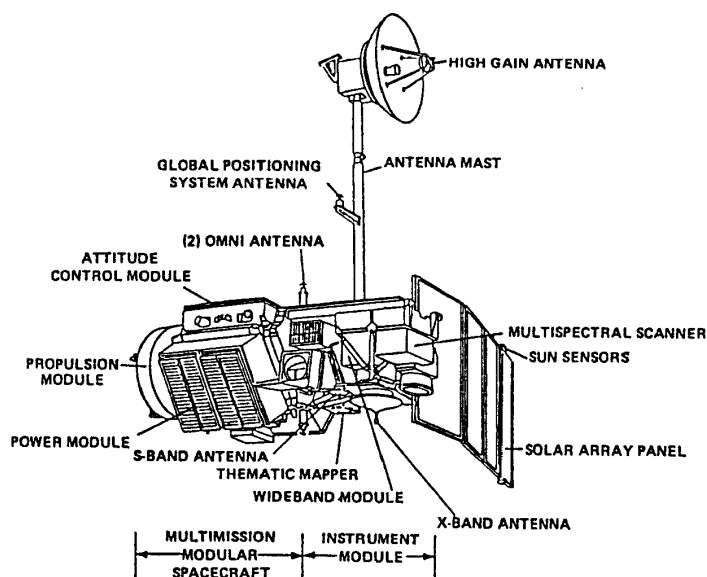


図2 LANDSAT-4, 5の外観と観測装置等。
Fig. 2. Observatory configuration of LANDSAT-4 and 5 flight segment. (COLWEL, 1983)

RBV (後述)を除けば、予想を上回り、5年間よくその機能を果たし、30万枚におよぶ地球上の画像と、その膨大な観測データを宇宙空間から地上局に送り届けてきた。しかし、1978年1月6日、命令系統を司るSバンド通信回線の故障等により、1号衛星は正式に引退している。

LANDSAT-1と同型のLANDSAT-2の打ち上げは計画より多少遅れ、1975年1月22日に軌道に乗せられている。続いて1978年3月5日、1, 2号と同型であるが、改造されたRBVを搭載したLANDSAT-3がThor Delta (トール・デルタ・ロケット)で打ち上げられ、観測を開始している。1982年7月16日には外形の異なる全く新型の4号、1984年3月1日に同型の5号が打ち上げられて供用されている(図2)。現在は、主に5号がデータの収集に活躍し、1号に続いて2号、3号などは計測機能が停止され引退している。

EROS計画に平行して、1973年5月から同年11月にかけて、SKYLAB計画が実施に移されている。SKYLAB衛星1~4号が次々に地球周

回軌道に乗せられ、宇宙空間において各種の実験がなされている。この計画の中で、衛星から手持ちの写真機で撮影された地球上のカラーおよび赤外写真は、一般の研究者等の希望により頒布されている。

1978年6月27日にアメリカの海洋調査衛星SEASAT-1が打ち上げられた。また、1986年2月22日にフランスのSPOT-1(図3)、1987年2月19日に日本の海洋調査衛星MOS-1(図4)、1990年1月23日にフランスのSPOT-2、1990年2月7日に日本のMOS-1bの各衛星が打ち上げられ、それぞれ地球周回円軌道に乗せられ、現在、多くの貴重なデータを収集している。

これらの衛星が収集するデータは世界的にその有用性が認められるようになり、アメリカを始め、ブラジル、カナダ、イラン、イタリア、スウェーデン、日本、オーストラリア、アルゼンチン、中国、インド、タイ、インドネシア等13ヶ国が、一つまたは複数の衛星からのリモートセンシングデータを直接受信できる設備を持つ地上局を設置している。

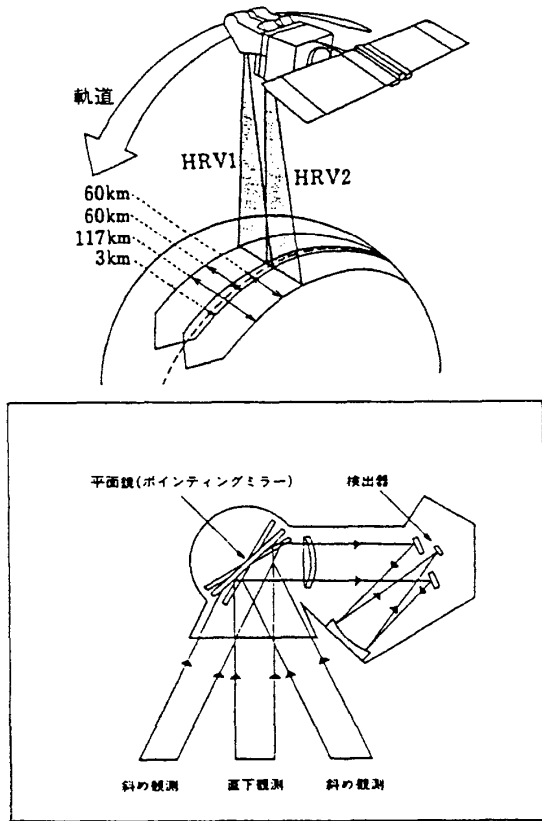


図3 SPOT-1 衛星の外観と観測視野。
 上図：SPOTの概観と2台のHRVの走査範囲を示す。
 下図：HRVの斜め観測の原理を示す。この方法で1つの衛星で従来の8日周期 (LANDSAT) の反復観測を4~5日周期に短縮できる。また、同一地域を別の方向から観測できるので、得た画像を立体視できる。(SPOT IMAGE社資料,1989)
 Fig. 3. Outline of SPOT satellite and field of observation.

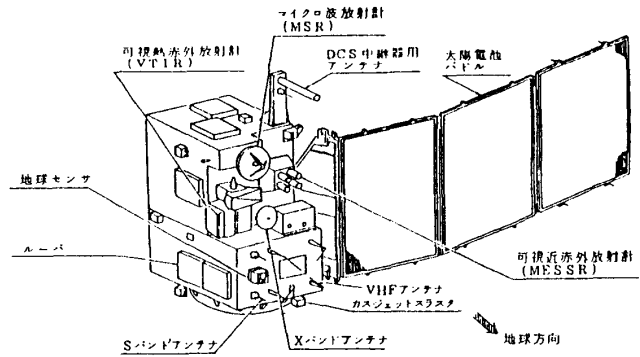


図4 MOS-1 下から見た外観。
 衛星の進行方向は図の上方になる。(土屋, 1990)
 Fig. 4. Observatory configuration of MOS-1, a view from below.

3. リモートセンシングの原理

1) リモートセンシングの定義

「リモートセンシング (Remote Sensing)」は遠隔探査と訳されている。これは地球上の対象物に直接接触したり、現象を直接観察したりしないで、センサーと呼ばれる測定装置やカメラなどを用いて遠隔 (人工衛星や航空機など) から、対象物より反射・放射される電磁波を捉え、それらの特性を求めたり、判読・識別したり、分類・積算・評価したりすることである (図5)。

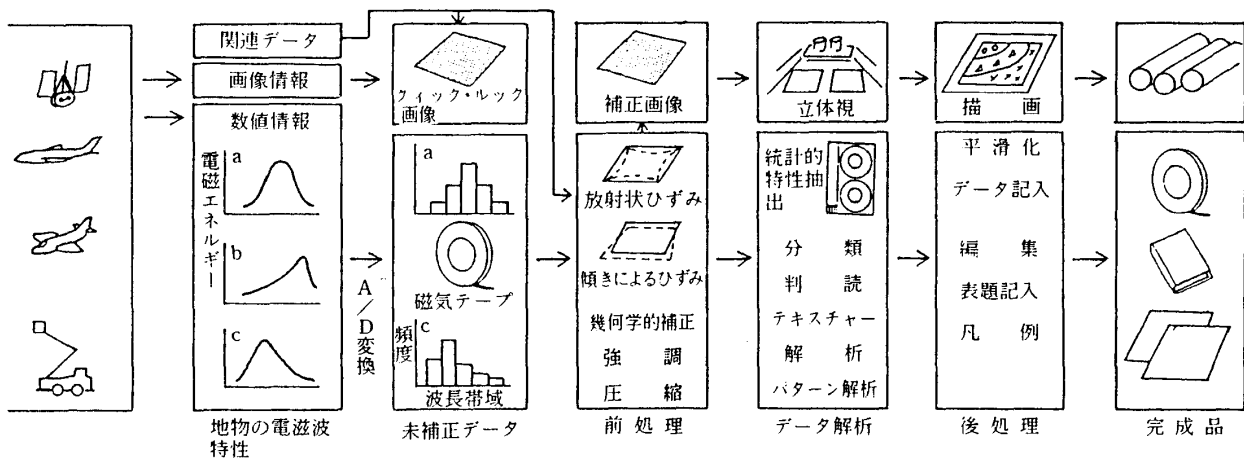


図5 リモートセンシングデータ処理の流れ。
 Fig. 5. Data acquisition and data analysis of electromagnetic remote sensing data.

2) 太陽の電磁波

太陽から放射される電磁波を100%とすると、地球大気中のガス、微細な浮遊粒子、雲等により、その約21%は反射され、約5%は散乱され、大気圏外に去り、その約18%は雲や微粒子等に吸収される。太陽からの電磁波のうち残りの約56%は大気を透過し、地表の物体に到達し、約50%は地物に吸収され、約6%は地物の表面で反射し大気圏外に向かう。地物に吸収された電磁波は熱交換および物理変換等により地表から放射され、大気に吸収され、一部は直接大気圏外に去る。

一方、大気に吸収された電磁波の一部は大気圏外に去るが、残りは地表へ放射され、大気を透過した太陽からの電磁波と同じように地物の表面で

反射・吸収・散乱・放射される(図6)。

3) 電磁波の波長帯の種類と検知装置

(1) 電磁波の波長帯の種類

図7の上半部に電磁波スペクトルの名称とその波長・周波数を示す。なお、可視光域では、短波長の方から0.40~0.45 μmは紫・青紫、0.45~0.50 μmは青・青緑、0.50~0.55 μmは緑、0.55~0.60 μmは黄緑・黄橙、0.60~0.70 μmは赤の波長帯域になっている。

現在、リモートセンシングに比較的良好に利用される電磁波の波長帯は、①可視光線、②近赤外線、③中赤外線、および④マイクロウェーブである。

(2) 検知装置

図7の下半部の密な斜め線の範囲に、電磁波を計測するシステム(検知装置)の名称とその計測波長帯を示している。上記の①、②など、大気中のガス・微粒子、および地物から反射・放射される電磁波などのうち、比較的短波長のものは光学系(カメラ)を用い、パナクロマティック(白黒)、カラー、赤外白黒、赤外カラー等のフィルムにアナログデータとして捉えることができる。

このほか、①~③を捉える装置に、スキャナー、TVカメラ、ラジオメータ等があり、スキャナーはリモートセンサー、またはセンサーと呼ばれている。

センサーに入射した電磁波はいくつかの波長帯にわたるため、回折格子(プリズム)を用いたり、

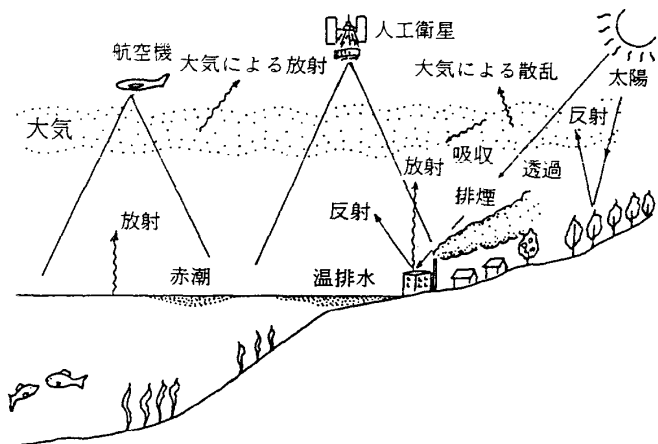


図6 太陽電磁波とリモートセンサに入射する電磁波。
Fig. 6. Electromagnetic spectrum from the sun, and incident radiations on sensor.

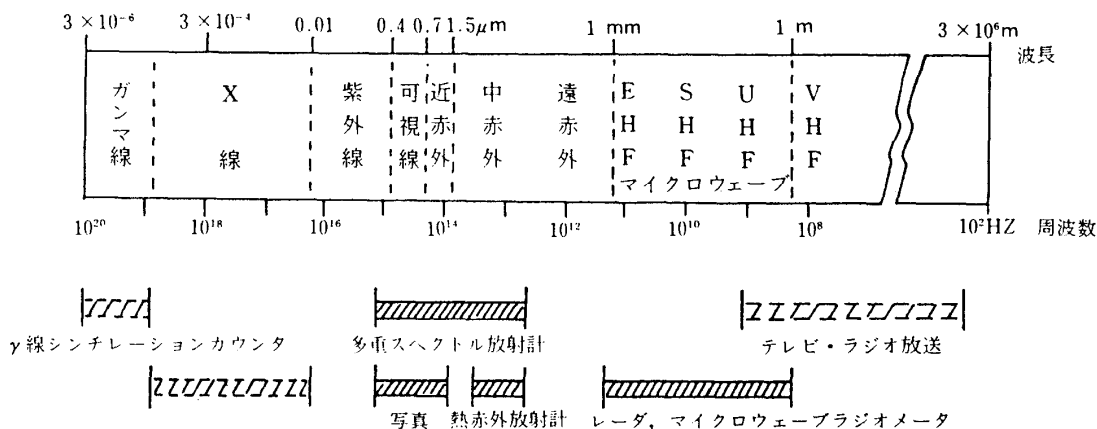


図7 電磁波スペクトルの名称、波長、周波数、計測システム。
Fig. 7. Electromagnetic spectrum, wavelength, bands, and frequencies employed in remote sensing.

いくつかのフィルタ（カットフィルタ、バンドパスフィルタ）が使用される。いくつかの波長帯（バンド）に分けられた電磁波は、光電子増倍管、

シリコンフォトダイオード等の検知素子によって電圧の強弱や電流の大小に換えられ、アナログデータとして磁気テープに記録される。

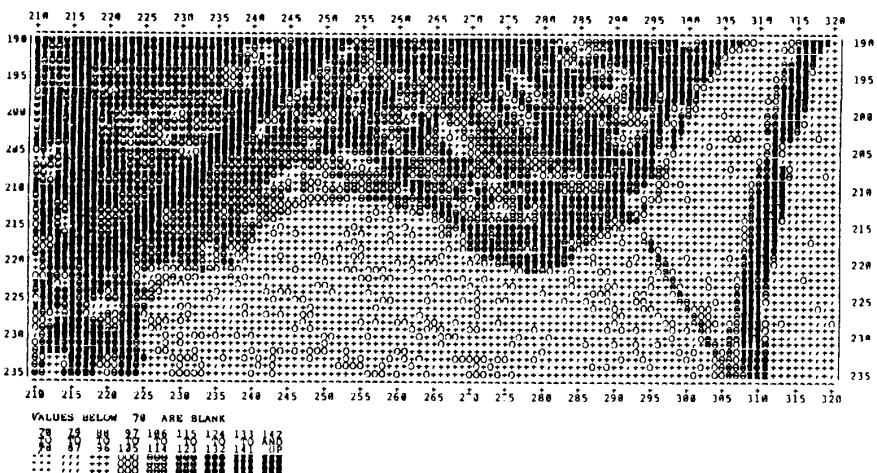
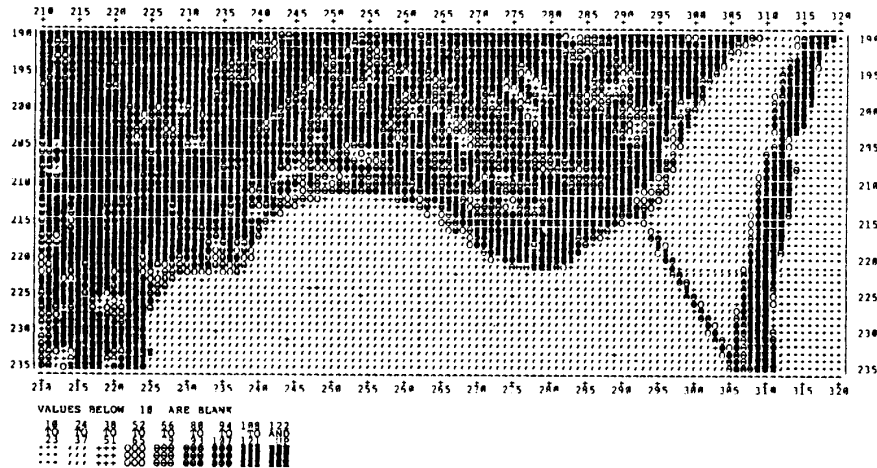
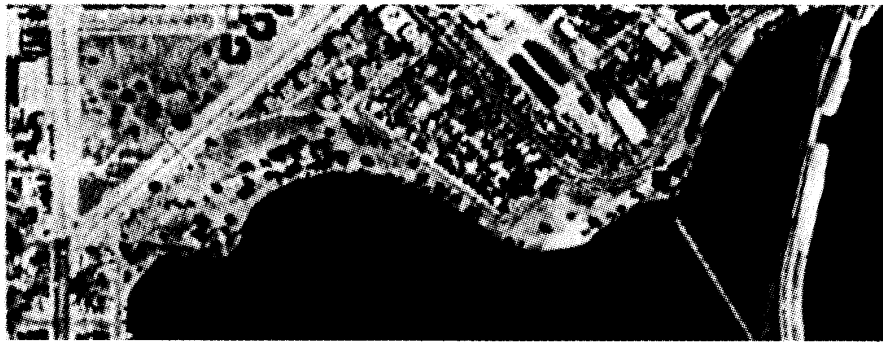


図8 カラー空中写真とその反射率の数値化。

上図：都市と湖の空中写真、中・下図：走査型 Microdensitometer による同空中写真面の緑・赤色の反射輝度の9段階区分。各区分に図の下の凡例に示す記号を割り当て、ラインプリンタで出力したもの。
 Fig. 8. Scanning microdensitometer data showing a portion of an urban area and lake. Upper: Aerial photograph. Middle: Level slice of green-sensitive film layer. Lower: Level slice of red-sensitive film layer. (LILLESAND, 1979)

上記④のマイクロウェーブはレーダ、マイクロウェーブラジオメータ等の計測機を使用し、指向性の送・受信装置（アンテナ）等を使用して能動的に地物の情報を捉える。

4) データの電送と処理

(1) データの電送

航空機搭載のセンサーが得た地上の情報は機内で磁気テープに入力され、飛行を終えた後、同テープはデータ処理センターに直送される。他方、衛星に搭載されたセンサーによって得られるデータは、指令に従って直接地上局へ、または一度、衛星搭載の磁気テープに収められ、指令より地上局に、マイクロ波の電波で搬送され、受信局のHDDT（High Density Digital Tape, 高密度磁気テープ）に収録される。

(2) データの処理

一旦HDDTに入力されたアナログデータは、直ちにクウィックルック画像にされ、さらに各種の補正が加えられて補正画像に改変される。

他方、HDDTに記録された上記のアナログデータは、電子計算機により数値情報（デジタルデータ）に変換・圧縮され、CCT（Computer Compatible Tapes, 電子計算機で演算が容易な磁気テープ）に変換される。次に各種の補正、影響因子の除去などのデータ処理が行われ、ユーザは必要に応じて画像などのアナログデータに変換したり、各種の数値計算、研究対象の地物の判読、画像中の地物別の電磁波特性を求める。これをもとに直接、画像上で地物別の分類、統計計算等の処理等を行うことができる。このようにして種類別に分けられたものは、その分布範囲を画面上に色別・記号別・数値別に表現することができる。このような処理はDensitometerを用いて、リモートセンシング画像からデータを読み取り、記号または数値別に出力することもできる（図8）。

また、光学的には、複数の異なったバンドのリモートセンシング白黒70mmフィルム画像に、それぞれ異なった色のカラーフィルターを備えた光源から光を当て、それぞれのレンズ系を通して一つの画面に画像を重ね合わせ、赤外または天然

色に似た画像（擬似カラー画像）を合成することができる。この装置はColor Additive Viewerと呼ばれている（図9）。

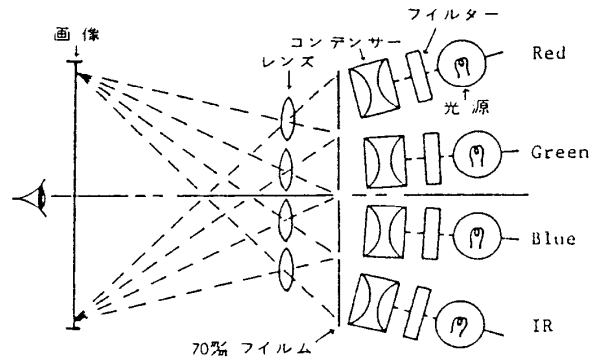


図9 Color Additive Viewerの原理。

右から白色光光源ランプ、カラーフィルター、コンデンサー、70mm白黒ポジフィルム、レンズ、画像面。上から順に赤、緑、青、赤外の各波長帯別に感光させた70mm白黒ポジフィルムをフィルムホルダーにセットする。このとき上から赤、緑、青（赤外の光源は消灯）のフィルターを選択して画像面に画像を正確（画像のずれ0.1mm以下）に重ね合わせると、天然色に近い画像が得られる。次にフィルターを上から緑、青、消灯、赤の順にすると赤外カラー写真に近い画像ができる。また、画像面にポジカラー印画紙を密着させ、適当な露光を行い、カラー現像するとカラープリントができる。

Fig. 9. Diagram of a color enhancement rear view projector. With control for hue, brightness, and saturation.

6) 電磁波特性と影響因子

地物から反射・放射される電磁波は、地物の種類（岩石・土・草・樹木・水等）、状態（乾湿・季節変化等）、条件（火山塵・風塵・排煙・霧・雲等の気象状況・太陽の高度と方位、センサーと対象物との相対的位置等）、センサーの性能・特性等の影響を受けて、同一の対象物でも計測時期により異なった電磁波特性を示す。

大気を例にとると、太陽からの電磁波は、大気中の二酸化炭素や水蒸気が存在するため、特定の複数の波長帯域で吸収される（図10）。この帯域を吸収スペクトルという。大気中のガスや微細粒子の状態は地理的位置と日時により異なるので、大気中のガスによる吸収スペクトルは一定であるが、散乱・吸収されないで地物に到達する電磁波

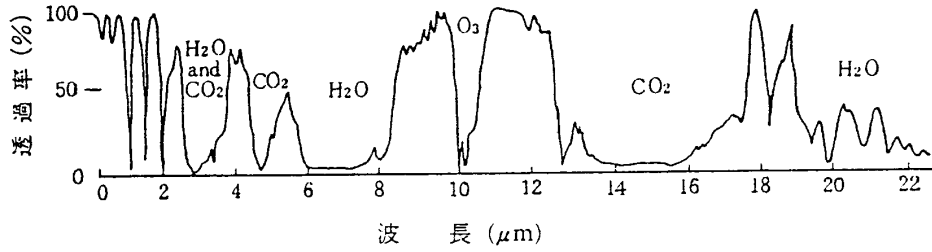


図10 大気分光透過率.

この図から赤外域における大気構成分子による太陽電磁波の吸収特性を読み取ることができる。(日本リモートセンシング研究会編, 1975)

Fig. 10. Atmospheric absorption bands. Transmission of energy through the atmosphere as a function of wavelength.

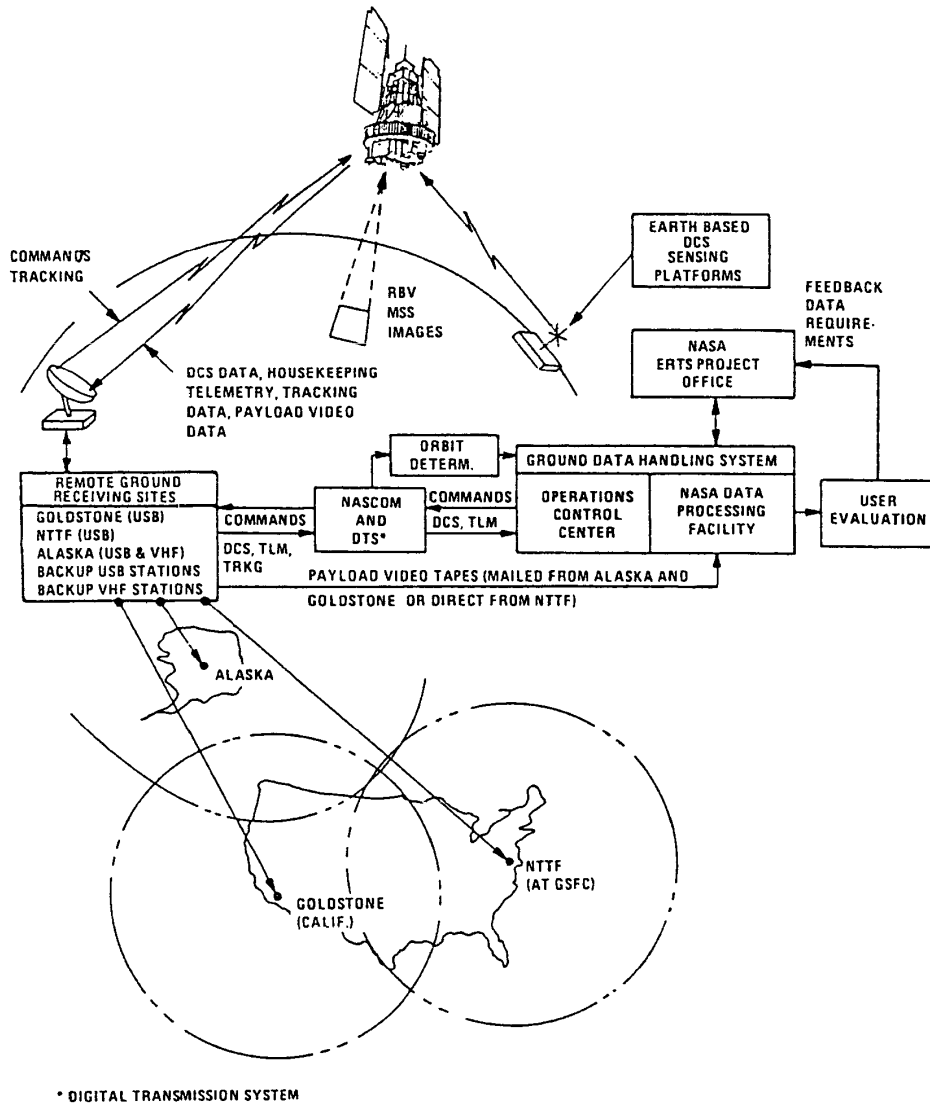


図11 LANDSAT の全システムとデータの流れ.

地球観測衛星 (LANDSAT), 通信衛星 (DOMSAT, TDRS) 地上受信局, 地上データ収集所 (DCP), 指令・デジタル転送施設, 地上データ処理施設, NASA地球観測技術衛星計画局等からなる. DOMSAT, TDRSは図11参照.

Fig. 11. Major elements of LANDSAT-1, 2, 3 systems, and data communication. (NASA, 1972)

の強度は、ガス・微粒子の濃度と厚さによって異なってくる。このために地物の表面で反射・放射される電磁波の強度が変化する。また、電磁波が再び大気を通してセンサーに達するとき、再び大気の影響を受けることになる。このようにセンサーが電磁波を検知するまでに複雑にさまざまな因子の影響を受ける。

4. LANDSAT の観測システム

NASA が計画し実行に移した ERTS 計画は、宇宙技術とリモートセンシング技術を併せて、地球資源の効率的開発・管理・実証を目的として始められている。これらの技術を確立するため、前述のように、LANDSAT-1～5 が打ち上げられている。

このシステムは地球観測衛星、通信衛星 (DOMSAT: Domestic Satellite)、地上送受信局、衛星飛行管制センター、データ処理システム等からなる。アメリカ国内の地上送受信局は、Maryland 州の GSFC (Goddard Space Flight Center, ゴダード宇宙飛行センター)、California 州の Goldstone および Alaska 州の Fairbanks の 3

ヶ所に置かれている。

アメリカ メリーランド州の GSFC には、NTTF (Network Test and Training Facility) が備えられ、また、LANDSAT 観測システムの心臓部にあたる衛星飛行管制センター (Operations Control Center, OCC) が置かれ、衛星が決められた太陽同期準回帰円軌道を正しく周回するよう、衛星搭載観測機の Z 軸が鉛直になるよう、衛星の軌道および姿勢の制御を行っている (図 11)。

1) LANDSAT の軌道

LANDSAT-1～3 は赤道面に対して軌道傾斜は約 99° (1号; 99.906° , 2号; 99.210° , 3号; 99.117°)、極軌道に近い太陽同期・準回帰円軌道を周回し、軌道高度は約 913km、周期は約 103分、1日に14回地球周回円軌道を飛行している。衛星が最初に赤道を通過する地点を基準にすると、地球の自転速度を計算にいれ、24時間後に通過する地点は経度で約 1.43° (約 158 km) 西にずれるように設定されている。つまり、18日毎 (この間に地球を 251回 周回する) に同一軌道にもどる (回帰日数 18日という) ように考えられている。いいかえれば、一つの衛星は

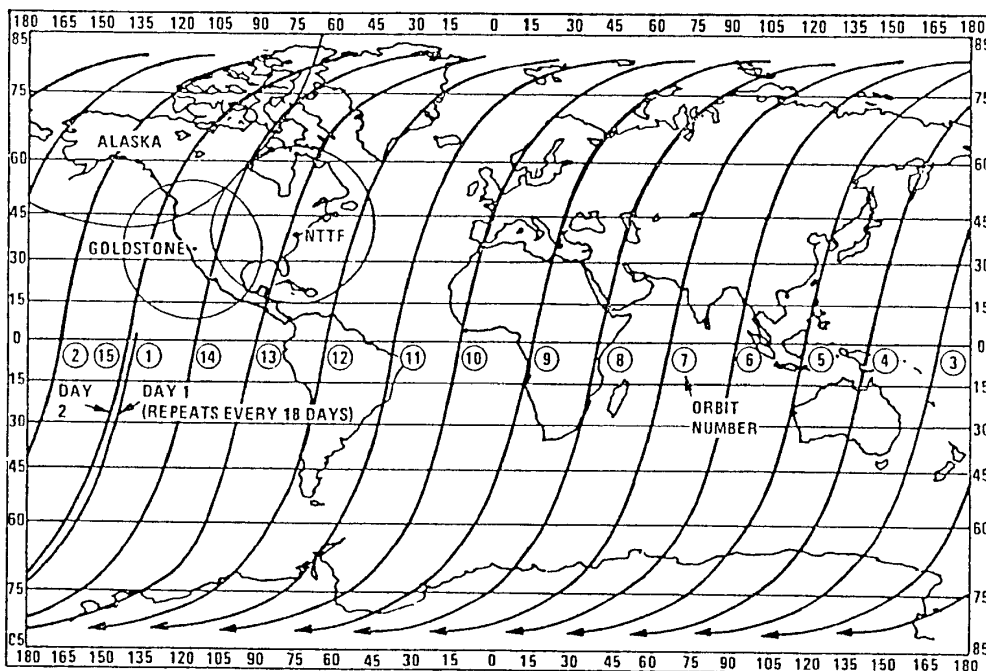


図12 LANDSAT-1の1日昼間の軌道。

Fig. 12. Typical LANDSAT-1 daily ground trace of daylight passes. (NASA, 1972)

18日に1回の割合で地球全面を計測することができる(図12). side-lapは赤道上で約27km(約14.6%)と計算される.

これに対して, LANDSAT-4の軌道高度は705.3km, 軌道傾斜は赤道面に対し 98.210° に設定され, 周期は98.5分, 回帰日数は16日, この間に太陽同期・準回帰円軌道を233周回転する. LANDSAT-5の周期は98.6分, 1日に地球を14.6周し, 16日目にもとの軌道に戻るようになる.

LANDSATの各衛星は日中, 軌道を北から南に向かい, 夜間はその反対方向に飛行している. また, その軌道面と太陽のなす角が一定に保たれているので, 日中, 赤道を通過する現地時刻(その国や地方の標準時刻ではない)は, 1号; 8:50, 2号; 9:08, 3号; 9:31となっている. 世界の各地点を通過する時刻は, このように衛星によって若干異なるものの, 一つの衛星に限れば, ほぼ一定の時刻になっているので, 地球上の研究対象地点の季節的, 経年的変化等を調べるとき太陽の高度や方位がほぼ一定になるので都合がよい.

衛星が地球軌道上を飛行する速さは, 軌道の高さにより異なるが, 1~3号は時速26,666km(秒速7.41km), 4号は時速26,958km(秒速7.49km)であり, これをジェット旅客機の速さに比較するとその約30倍, 音速に比較するとその約22倍の速さに相当する.

2) LANDSATに搭載の観測装置

LANDSAT-1~3の各衛星には, General Electric社グループの設計によるもので, 多重スペクトル走査放射計(MSS, 地上解像度78m)およびリターンビームビデオン(RBV)が搭載されている. また, 4・5両衛星はマーチン・マリエッタ社グループの設計により製作されたもので, 外形が1~3衛星と異なり, MSSのほか, 新たに地上解像度が30mのThematic Mapper(TM)が搭載されるようになった.

(1) MSS (Multispectral Scanner, 多重スペクトル走査放射計)

この装置はテレビカメラと同じように, 地球上

の約185kmの幅を, $\pm 2.88^\circ$ の角度で往復運動する反射鏡を用い, 衛星の進行方向に直角方向に走査し, 地球上の映像を連続に捉えることができる. 1, 2両衛星搭載のセンサーに到達した電磁波スペクトルのうち, 可視光線は分光器によって3波長帯域($0.50\sim 0.60\mu\text{m}$, $0.60\sim 0.70\mu\text{m}$, $0.70\sim 0.80\mu\text{m}$)に分割され, 近赤外線は1波長帯域($0.80\sim 1.10\mu\text{m}$)が検出される.

地上を1回走査する毎に, MSSに入射する可視光は, 3波長帯域別に各6個, 計18個の光電増倍管に, 近赤外は6個のシリコンフォトダイオード(検出素子)によって捉えられ(図13), それぞれの電磁エネルギーは電気信号に変換され, 増幅される. 3号衛星には波長帯域が $10.4\sim 12.5\mu\text{m}$ (Band No.8)の熱赤外線を検出するため, HgCdTe素子が追加されている.

1~3衛星搭載MSSのIFOV(Instantaneous Field of View, 地上瞬間視野)は79m, 4・5両衛星のものは82mとなっている.

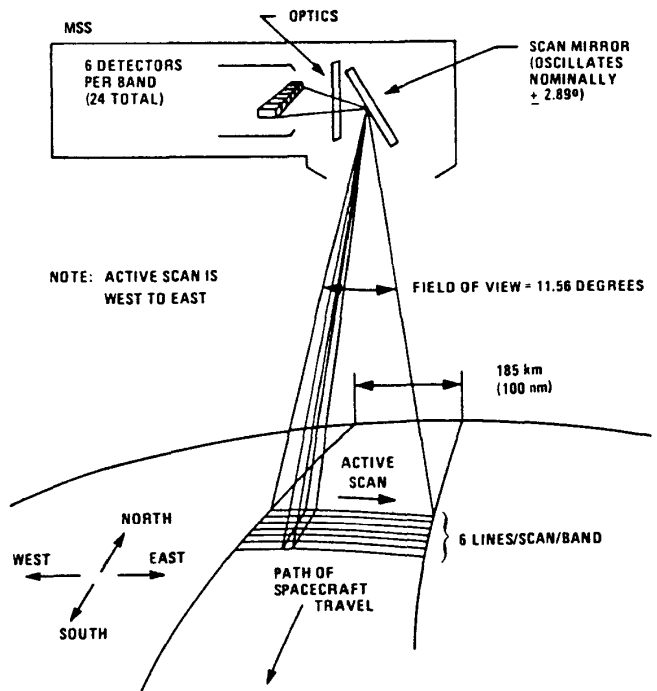


図13 LANDSAT-1, 2, 3のMSS(多重分光走査放射計)の構造と地上走査方法.
Fig. 13. MSS and ground scanning pattern.
(NASA, 1972)

(2) RETURN-BEAM VIDICON (RBV)

1・2両衛星には飛行方向に直角に、一列に配列された3個の独立したRBVカメラが搭載され、地上185×185kmの範囲が一時に撮影される(図14)。一方、3号衛星搭載のRBVカメラは2個で、軌道に対し直角方向に隣合った、地上90×88kmおよび90×98kmの視野が同時に露光される。同時に撮影される両画像は互いに約3km重複するようになっている(図15)。なお、このカメラの公称解像度は40m、IFOVは24mである。

各カメラに光学的フィルターが備えられ、1号衛星のNo.1, 2, 3のカメラは、それぞれ0.475~0.575μm, 0.580~0.680μm, 0.690~0.830μmの3波長帯域、3号衛星は、両カメラともパンクロマチック波長帯域(0.505~0.750μm)が選択受光される。映像はカメラ内部の光電面に一時蓄積され、シャッターが閉じられた後、光電面は電子ビームで走査され、ビデオ信号として磁気テープに記録される。

(3) THEMATIC MAPPER (TM)

RBVは故障等が生じたため、LANDSAT-4から後の衛星には、かわりに新しくTMが設計され搭載されている。スペクトルは7個のバンド(No.1: 0.45~0.52μm, No.2: 0.52~0.60μm, No.3: 0.63~0.69μm, No.4: 0.76~0.90μm, No.5: 1.55~1.75μm, No.6: 10.40~12.50μm, No.7: 2.08~2.35μm)に分割、地上瞬間視野はBand No.1~6: 30m, Band No.7: 120mであり、著しく改善された(図16)。

観測幅は従来の衛星と同様、185×185kmに揃えている。なお、従来の可視光検出用の光電増倍管に換わり、シリコンフォトダイオード、中赤外(バンドNo.5)にはInSb、遠赤外(バンドNo.6)にはHgCdTe、熱赤外(バンドNo.7)にはInSbの検出素子が使用されている。

3) 地上局・通信システム

(1) 地上局

地上送受信局は、LANDSAT-1がデータを収集し始めた1972年頃、ゴダード宇宙飛行センター

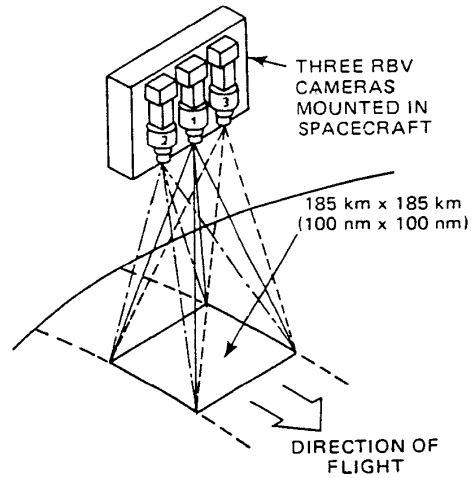


図14 LANDSAT-1, 2 の RETURN BEAM VIDICON CAMERAS.

LANDSAT-1, 2には3台のRBVカメラが搭載され、同時に同一の185×185kmの範囲の地上を撮影する。

Fig. 14. RBV camera heads of LANDSAT 1 and 2. Showing an area coverage on the ground. (COLWEL, 1983)

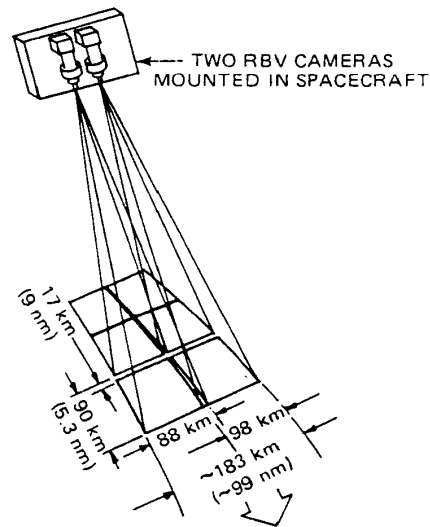


図15 LANDSAT-3のRBVカメラと撮影範囲.

LANDSAT-3搭載のRBVカメラが撮影する1画面(サブシーン)は、およそLANDSAT-1, 2のフルシーンを4分割した範囲になる。

Fig. 15. RBV cameras mounted on LANDSAT 3. Showing camera coverage. (COLWEL, 1983)

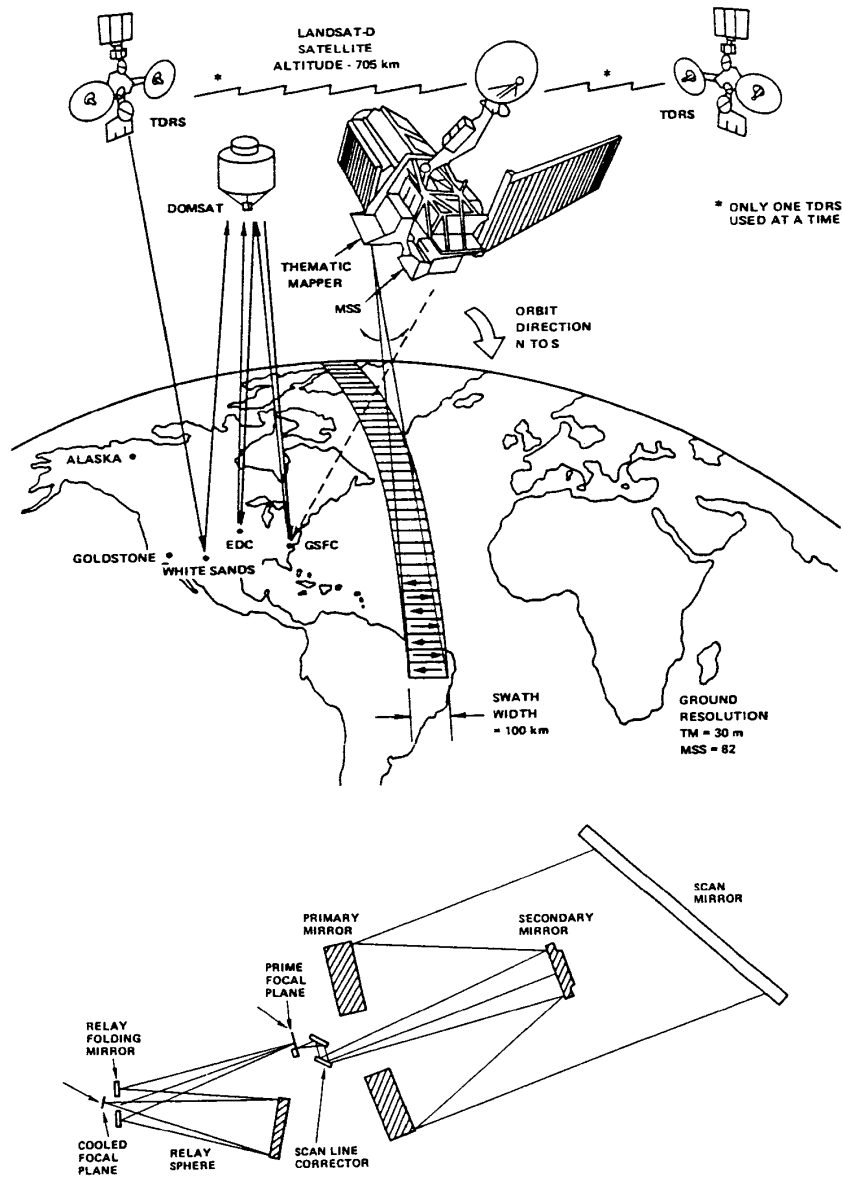


図16 LANDSAT-4, 5搭載のTMと同衛星の通信システム。

上図：TMによる地上走査状況，および衛星通信TDRS，DOMSAT間の通信システム．下図はTMの光学系統

Fig. 16. General data communication pattern, and optical system elements of THEMATIC MAPPER. (COLWEL, 1983)

(位置は図 17 中の (1)，以下同様)，California 州 Goldstone (2)，および Alaska 州 Fair-banks (3) の 3ヶ所および カナダの Prince Albert (4) に置かれている。当初は受信局のない地域の画像データは、一時、衛星内の WBVTRs (Wide Band Video Tape Recorders) に記録し、地上受信局の指令に従って、TDRS (Tracking and Data

Relay Satellite, 追跡・データ中継衛星) を介して地上局へ送信させている。しかし、衛星搭載のデータレコーダの容量が不十分なため、観測量に制限が生じた。そこで、衛星が得たデータを直接地上局へ送信する方法がとられ、世界の各所に地上受信局が計画され、建設されることになった。

現在までに建設・運用されている受信局は、ブ

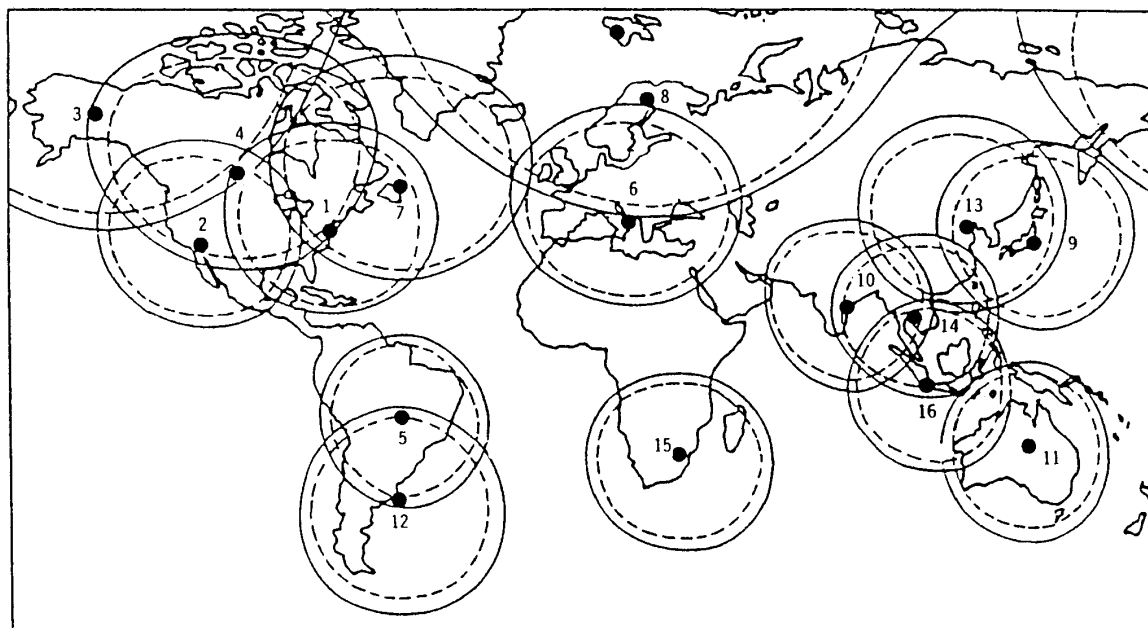


図17 LANDSAT データ受信局と受信可能範囲。

受信局の所在する地名は本文参照。外円はLANDSAT-3。内円は同4、5の受信範囲を示す。

Fig. 17. Current LANDSAT ground stations. Coverage circles of solid and dash lines based on LANDSAT-1 through 3, and 4, 5 respectively.

ラジルの Cuiaba (5) (1973年 受信開始, 以下同様), イタリアの Fucino (6) (1975), カナダの Shoe Cove (7) (1977), スウェーデンの Kiruna (8) (1978), 日本の埼玉県鳩山町 (9) (1978), インドの Hyderabad (10) (1979), オーストラリアの Alice Spring (11) (1980), アルゼンチンの Mar Chiquita (12) (1980), 中国の Peking (13) (1987), タイの Bangkok (14), 南アフリカの Johannesburg (15), インドネシアの Djakarta (16) 等に所在している (図 17)。

建設計画中の地上局は チリの Santiago, ケニアの Nairobi, サウジアラビア, パキスタン等である。日本の地上局 (宇宙開発事業団地球観測センター) は 1978年, 埼玉県比企郡鳩山町大字大橋字沼上 1401 に建設されている。ここでは LANDSAT, SPOT, MOS の各衛星からの情報が受信されている (図 18)。ここで得られたリモートセンシング・データは (財) リモート・センシング技術センターを通じて研究者, および一般の希望者に供給されている。

宇宙開発事業団 (NASDA, National Space Development Agency of Japan) の本社は東京

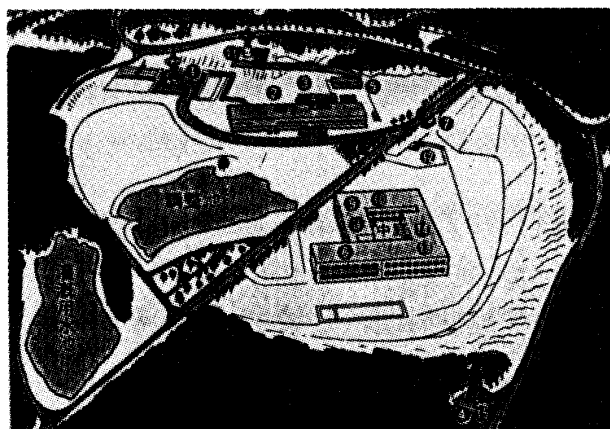


図18 宇宙開発事業団地球観測センターの整備計画。

- ①ランドサット受信用アンテナ
- ②ランドサット情報受信処理棟
- ③廃液処理設備
- ④ランドサット受信用アンテナコリメーション施設
- ⑤自家発電棟
- ⑥情報棟
- ⑦守衛所
- ⑧管理棟
- ⑨ミッション運用管制センター
- ⑩海洋観測衛星(MOS)運用棟
- ⑪海洋観測衛星受信アンテナ
- ⑫駐車場
- ⑬情報管理棟
- ⑭将来の日本の地球観測衛星受信処理棟増築可能スペース
- ⑮MOS等受信用アンテナコリメーション施設(宇宙開発事業団資料, 1985)

Fig. 18. A view of Earth Observation Center, National Space Development Agency of Japan.

都港区浜松町 2-4-1 の世界貿易センタービル内に所在し、平和目的の宇宙開発および利用の促進に寄与することを目的として、昭和 44 年 10 月 1 日に設立されている。同事業団は日本の宇宙開発の中核的实施機関であり、これまで多くの技術試験、静止通信・気象、地球資源、電離層観測、海洋観測、放送等の人工衛星と衛星打上げ用ロケットの開発・打上げおよび追跡の業務を行ってきている。

熊本県（1986）には東海大学の受信局が建設され、後述の MOS の受信を開始しており、LANDSAT 情報の受信が可能ないように準備されている。

(2) 通信システム

上記のように、当初は、地上受信局は僅か 4 局（アメリカに 3、カナダに 1）であったので、衛星が地上を Real Time（即時）に観測できる範囲は、概ね北アメリカ大陸に限られていた。その他の地域を観測するときは、衛星が獲得した情報を一旦衛星搭載の WBVTRs（上述）に記録した後、衛星が受信局の視野に入ったときに、受信局の指令に従って再生され、2.2875GHz の電波により搬送され、地上局がそのデータを受け取る方式をとっていた。

衛星が受信局の視野（天頂角 $\pm 85^\circ$ の範囲）の外にあるときは、地上に配置してある DCP（Data Collection Platform、地上データ収集局）と衛星搭載の DCS（Data Collection System）によるデータのやり取りでカバーすることができる。DCP はマサチューセッツ州 Waltham、チリの Santiago に置かれている。ただし、衛星搭載の DCS は中継機能しかもっていないので、DCP から衛星を介して地上局宛、データの送信が可能なのは、衛星が DCP および地上受信局の両者の視野内にあるときだけに制限される。

最近では受信局の数が増加したので、また、中継衛星を介して、受信が可能になったので、上記の国、あるいはその周辺地域の画像データの入手が容易になり、観測の範囲を広げることができるようになった。

衛星に対する受信局からの指令や衛星が得た MSS・RBV・TM 等の観測データは、S バンド

（2～4 GHz）および X バンド（8～12.5 GHz）のマイクロ波の電波を利用して搬送される。また、衛星からの微弱な電波でも正確にデータを受信することができるように、衛星からのデータは FM（Frequency Modulation、周波数変換）方式で搬送されている。

地上局のアンテナは衛星からの、このような微弱な電波も捉えられるように、大型のパラボラアンテナが装備され、自動、手動およびプログラム方式で、衛星を追跡できるようになっている。

アンテナで捉えた微弱な電波は低雑音増幅器により増幅され、MHz 単位の間周波に変換され、同軸ケーブルまたは光ファイバケーブルで NDPF（NASA Data Processing Facility、アメリカ航空宇宙局 データ処理施設）が設置されている建物に送られる。この際の信号は PCM-PSM（Pulse Cord Modulation-Phase Shift Modulation）の方式で送られ、ここで、もとの周波数に復原され、HDDT（高密度磁気テープ）に収録される。

現在の LANDSAT-4 の通信システムは、データを同衛星から、TDRS、TDRS 地上局、通信衛星 DOMSAT を介して GSFC および EDC へ送信するようになっている（図 16）。

4) LANDSAT のデータ処理

(1) LANDSAT データの Data Handling

ワシントン DC の北東郊外に所在する NASA の GSFC の一つの建物に LANDSAT から受信したりリモートセンシング・データを、HDDT、アナログの FM 磁気テープ、および Quick-Look Imagery（未補正の画像）等に変換する GDHS（上述）がある。このようにオリジナル・データを処理することを Data handling と呼んでいる。

前処理された HDDT、アナログの FM 磁気テープは EDC（前出）に電送され、ここで再びそれぞれの磁気テープに収録される。HDDT は D/D 変換され、計算機用磁気テープ（CCT）に変換される。アナログ磁気テープ（FM 磁気テープ）は A/D 変換され、CCT に変換される（図 19）。

世界標準座標：衛星直下の地球上の位置を表示

するため、便宜上、画像データは縦・横 185km × 185km の範囲に区切られ、衛星軌跡 (Path) と軌跡上の画像 (Row) 毎に番号が付けられる。

このシステムをWRS (World Reference System, 世界標準座標) と呼ぶ。カナダの東端を通る衛星軌跡を Path 1 とし、順に西隣りの同軌跡を Path 2, Path 3, ………, Path n と名付けている。各パスの北端を Row 1 とし、画像の中

心間隔 160km で、順に Row 2, Row 3, ………, Row n としている。LANDSAT-1~3 (図 20) と同 4, 5 号とでは衛星軌道周期が異なるので、別の WRS (世界標準座標) が用いられる。

注釈データ：電算機に入力される MSS, RBV, TM 等の各種データは、画像毎に注釈データが付けられる。画像の下に左から、計測日・月・年、画像の中心の緯度・経度、Path・Row の番号、衛星の鉛直線と地表の交点の緯度・経度、波長帯番号、太陽方位・俯仰角、受信局、衛星名・番号、衛星打ち上げ後の経過日数、観測時刻 (時、分、10 秒単位の数値) 等の注釈事項、2 行目に Grey Scale, 画像の周囲に 緯度・経度と指標が入力される。

注釈データは未補正画像 (Quick Look Copy), 補正画像に出力され (図 21), マイクロフィルムに収録され、これをもとにカタログ、閲覧用のファイルなどが作成される (図 5)。

(2) データの補正

衛星画像のオリジナル画像には次のような補正

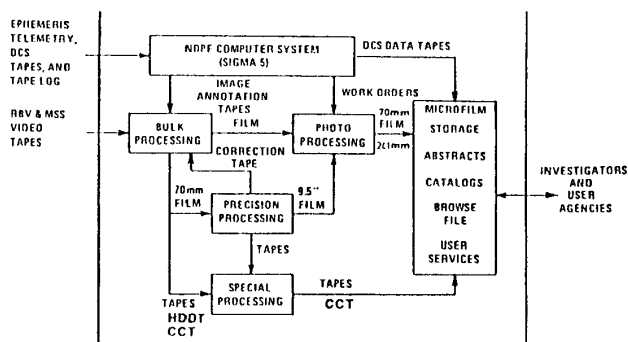


図19 NASAデータ処理システムにおける情報の流れ。
Fig. 19. Functional block diagram of NASA data processing facility. (NASA, 1972)

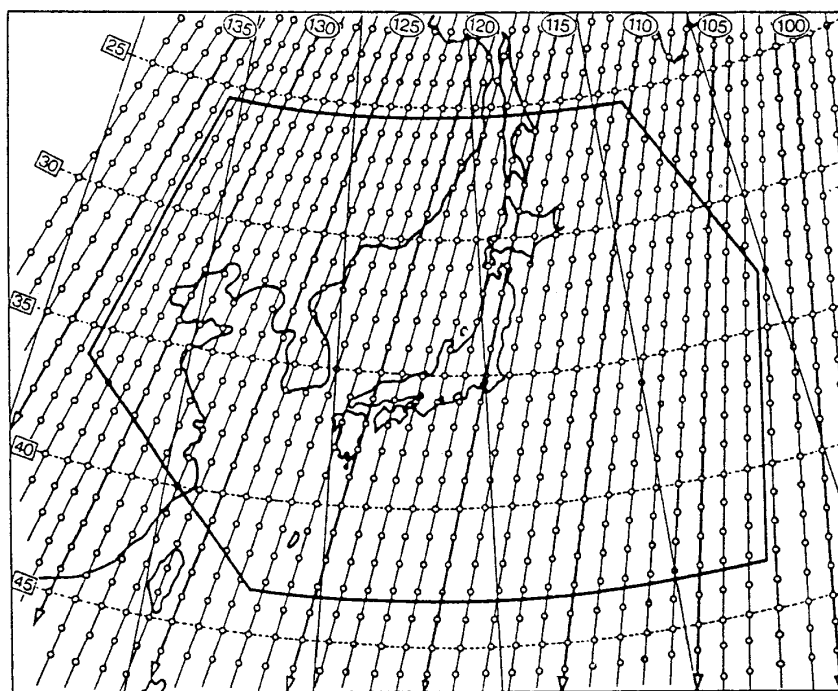


図20 LANDSAT-1~3の WRS (世界標準座標) と鳩山地上局の受信・観測範囲。
北北東-南南西方向の線がPath, 東西方向の並びをRowという。(宇宙開発事業団資料, 1981)

Fig. 20. Whorldwide Reference System(WRS) index map of Japan.

が行われている。

ラチオメトリックひずみ補正：MSS によって得られた画像の明暗や色彩などのデータを、衛星の探査装置に内蔵されている参照体（較正用光源）の測定値のデータ（画像データと共に地上局に送られてくる）を用い、定められた計算式に代入して補正を行う。この場合、センサ感度と各バンド当たり 6 個の検知素子間との感度偏差調整により歪みが補正される。

RBV の場合は、衛星搭載のカメラで装置内の画面に、瞬間的に 2 次元の画像が撮影されるが、画

面上の位置により感光の応答特性が異なるので、一定の日数毎に、3 段階の較正用光源を用いて、画面上の定められた格子上の点の感度を求めたデータが地上局に送られてくるので、これをもとに画像上の各点の利得の補正がなされる。TM の補正は基本的には MSS のそれと同じである。計算式は別のものが用いられる。

幾何学的補正：衛星の探査装置によって捉えられる地球表面の 1 シーン (Scene) は、地球回転楕円体の一部 (曲面) であり、また、地形の高低差、衛星の傾きがあるので、これを平面投影する

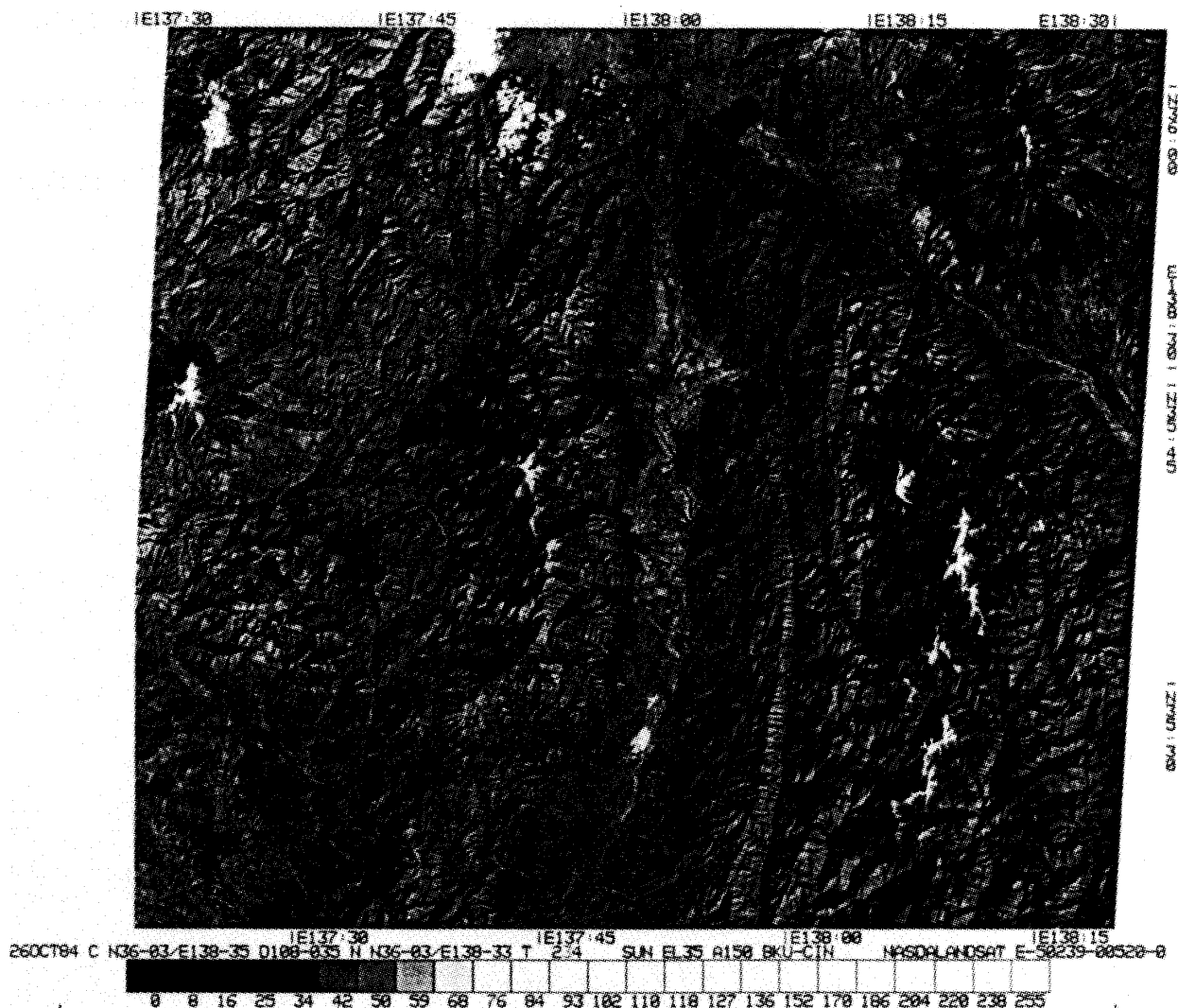


図21 LANDSAT 画像とその注釈データ。

LANDSAT画像とその Registration mark, tick mark, gray scale, alphanumeric annotationを示す。この原画像は LANDSAT-5 TM 2, 3, 4 band合成赤外カラー。PATH:108, ROW:035 のサブシーン 3 (諏訪湖・飯田)。(宇宙開発事業団地球観測センター受信画像)

Fig. 21. LANDSAT image format and annotation.

とき、一定の投影法を用い、画像の変換（補正）の作業がなされる。

データの圧縮：不必要なデータを削除し、必要なデータを残して保存する。情報量が減少するので、演算速度を速めることができる。

5) LANDSAT データの種類・頒布

(1) データの種類

利用者の目的に応じて、データを選ぶことができる（表1）。

(2) データ頒布

日本では、(財)リモートセンシング技術センター（東京都港区六本木7-15-17）により、内外の研究機関・研究者および一般の利用者に磁気テープ（CCT）・画像データ等が供給されている。

アメリカ合衆国では、従来、国務省（United States Department of Interior, USDI）所管の South Dakota 州 Sioux Falls の EROS DATA CENTER で受信・処理および頒布がなされていた。最近になって頒布は NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration) に移され、1987年頃からデータの頒布は民間会社の EOSAT 社が担当するようになっている。

5. SPOT-1 衛星とそのデータ

1986年2月22日、フランスのスポットと名付けられた地球観測衛星が、赤道に近い南米ガイアナの基地から、アリアンヌ・ロケットによって打ち上げられ、太陽同期・準回帰円軌道（高度832km, 軌道傾斜角98.7°, 回帰日数26日）に乗せることに成功した（図3）。

SPOT 衛星には2台の高分解能センサ HRV (High Resolution Visible Sensor) が搭載され、同衛星から得られる画像の地上解像度は、パンクロモードで10m, マルチスペクトルモードで20mに向上され、より細かい地上の情報を得ることができるようになった。

HRV-XS (マルチスペクトルモード) の波長帯域は0.49~0.59, 0.61~0.68 (以上は可視域), 0.79~0.89 μm (近赤外) の3バンド, HRV-P (パンクロモード) の波長帯域は0.51~0.73 μm (可視域) に設定されている。

HRV の受光軸は衛星の鉛直下方の点から±26°まで、衛星の軌道方向に対して直角方向に変化させることができるので、ステレオ画像が得られ、地形測量が可能になっている。

SPOT 計画は1978年、フランス政府は CNES (Centre National d'Etudes Spatiales: フラン

表1 LANDSATデータの種類・規格

Table 1. LANDSAT standard products; image size/tracks, scale/b.p.i., and formats.

(データコード)	(品名)	(規格)	(データコード)	(品名)	(規格)
□ MSS データ			□ TM データ		
M1100	70mm 白黒ポジフィルム	1:3,369,000	T1500	18.5cm 白黒ポジフィルム	1:1,000,000
M1200	70mm 白黒ネガフィルム	1:3,369,000	T1600	18.5cm 白黒ネガフィルム	1:1,000,000
M1500	18.5cm 白黒ポジフィルム	1:1,000,000	T1700	18.5cm 白黒プリント	1:1,000,000
M1600	18.5cm 白黒ネガフィルム	1:1,000,000	T1701	37.1cm 白黒プリント	1:500,000
M1700	18.5cm 白黒プリント	1:1,000,000	T1702	74.2cm 白黒プリント	1:250,000
M1701	37.1cm 白黒プリント	1:500,000			
M1702	74.2cm 白黒プリント	1:250,000	T3500	18.5cm カラーポジフィルム	1:1,000,000
			T3700	18.5cm カラープリント	1:1,000,000
M3500	18.5cm カラーポジフィルム	1:1,000,000	T3701	37.1cm カラープリント	1:500,000
M3700	18.5cm カラープリント	1:1,000,000	T3702	74.2cm カラープリント	1:250,000
M3701	37.1cm カラープリント	1:500,000			
M3702	74.2cm カラープリント	1:250,000	TM	CCT (フルシーン)	1600BPI
			TM	CCT (サブシーン)	1600BPI
MSS CCT		1600BPI			
MSS CCT		6250BPI	TM	CCT (フルシーン)	6250BPI
			TM	CCT (サブシーン)	6250BPI

ス宇宙国立研究所)が中心になり、ベルギー、スウェーデンの両国がこれに加わり、システムの技術開発・衛星の運用・管理がなされ、引き続き2号が打ち上げられ、3、4号の製作・打ち上げが計画されている。データの頒布は民間会社のSPOT IMAGE社が担当している。

6. MOS-1 衛星とそのデータ

日本では、1987年2月19日に、海洋観測衛星MOS-1 (Marine Observation Satellite) が宇宙開発事業団種子島宇宙センターからN-II型ロケットで打ち上げられ、高度909kmの太陽同期・準回帰円軌道に乗せられ、一日に地球を14周し、回帰日数17日(17日周期でもとの軌道に戻る)で、地球表面全体を観測することができる。

この衛星は日本最初の地球観測衛星であり、海面の温度および色などの海洋現象を観測するほか、地球観測のための基本技術の確立を目的として計画され、実施に移されものである(図4)。

この衛星には、LANDSATのMSSに相当するMESSR(可視近赤外電子走査放射計)のほか、VTIR(可視熱赤外放射計)、MSR(マイクロ波走査放射計)の3観測システムが搭載されている。

MESSR(Multispectral Electronic Self Scanning Radiometer)の波長帯域は $0.51\sim 0.59\mu\text{m}$ 、 $0.61\sim 0.69\mu\text{m}$ 、 $0.72\sim 0.80\mu\text{m}$ 、 $0.80\sim 1.1\mu\text{m}$ の4bandで、LANDSATのそれとほとんど同じである。瞬間視野(IFOV)は50mで、LANDSATの79m(1~3号)、81m(4、5号)より改善されている。

LANDSATの走査方式は反射鏡を往復回転させる機械的方式を採用しているが、MESSRは電子走査方式を採用している。2系統の観測システムがあり、両者を作動すれば200km幅を観測することができるが、切り換えを行い、通常は1系統だけを作動させ、100kmの幅で観測されている。

VTIR(Visible and Thermal Infrared Radiometer)は可視光の $0.5\sim 0.7\mu\text{m}$ 、 H_2O による太陽光の吸収帯の $6\sim 7\mu\text{m}$ 、 H_2O による太陽光

の吸収が少ない $10.5\sim 11.5\mu\text{m}$ 、および $11.5\sim 12.5\mu\text{m}$ 、合計4波長帯域をもち、1500km幅の海面および地表面の温度を測定することができる。

MSR(Microwave Scanning Radiometer)はカセグレン型といわれている円盤状のアンテナが、衛星の上下軸に対して 10° の角度でコニカルに走査することによって軌道沿いに幅320kmの帯状の地域を観測することができる(図22)。この装置は地表および大気から放射されるマイクロ波を23GHzと31GHzの2つのバンドで観測している。それぞれの分解能は32および23kmであるので鮮明な画像を得ることはできない。主に大気中の水蒸気量、水量および海水や積雪の観測を目的としている。

MOS-1 b衛星は1990年2月7日に打ち上げられ、MOS-1と同じ観測装置が搭載され、同じ軌道上のMOS-1と対称(軌道円の中心角 180°)の位置に乗せられ、現在順調に運用を続けている。観測データは国内ばかりでなく、海外でも広く利用されている。データ頒布は(財)リモートセンシング技術センター(上述)により供給されている。

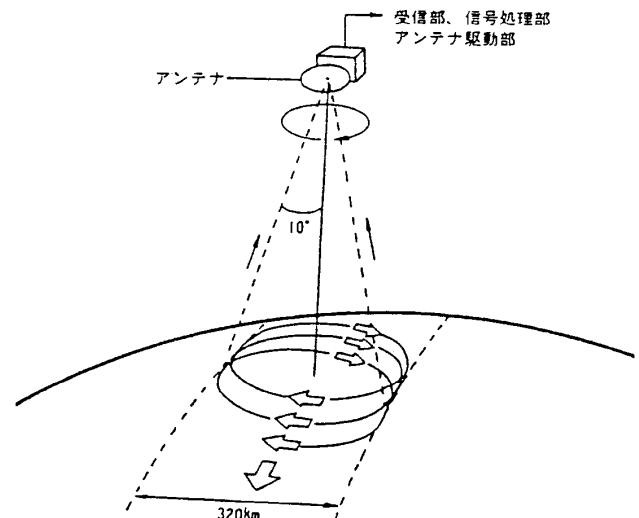


図22 MOS-1 MSRの観測概念図。
(RESTEC 1985年12月)

Fig. 22. Scanning pattern of Microwave Scanning Radiometer (MSR) mounted in MOS-1.

7. リモートセンシングデータの応用

1) 地質学

リモートセンシングによって得られる衛星画像中の線状模様は、地表の植生に惑わされることなく明瞭に識別されることが多い。従って、衛星画像は地質構造線、断層線、破碎された線、亀裂に富む線等の線状模様、および平行な曲線状の線状模様の集合として認識される褶曲構造などの地質構造の判読に、最も有効なものとして利用されている。

このほか、衛星画像はある種の岩石、あるいはそれらの風化物（土壌）の識別、有用な金属・非金属鉱物の鉱床、エネルギー資源（石炭・石油・放射性元素等の鉱床）の探査、および水資源の探査に役立つことが多い。また、最近では火山活動の研究、火山災害、斜面災害等の自然災害、土木地質の分野にも利用され始めている。

リモートセンシングデータを地質学に応用する場合、例えば、画像のある既知の地物 A の放射輝度特性を求め、これをもとに、画像全体から地物 A を抽出してその占める面積の総和を求めたいときは、MSS データが収録されている CCT を入手すればよい。

画像中の地質構造（断層、褶曲構造）、リニアメント等を抽出するときは、RBV または MSS 70mm ネガフィルムから得られた 14.6 インチ（37 cm）角の赤外域の白黒ペーパー・プリントまたは、赤外合成カラー・プリントを利用すればよい。

(1) Lineament（リニアメント、線状模様）と地質構造

地殻が構造運動を受けるとき、地殻を構成する地層・岩体の種類、水の存否、深度（地圧）、地温、最大圧縮応力の速度の違いによりその応答が異なると考えられる。同圧縮応力の速度が比較的小さいとき、地層・岩体は、深度に応じて曲げ褶

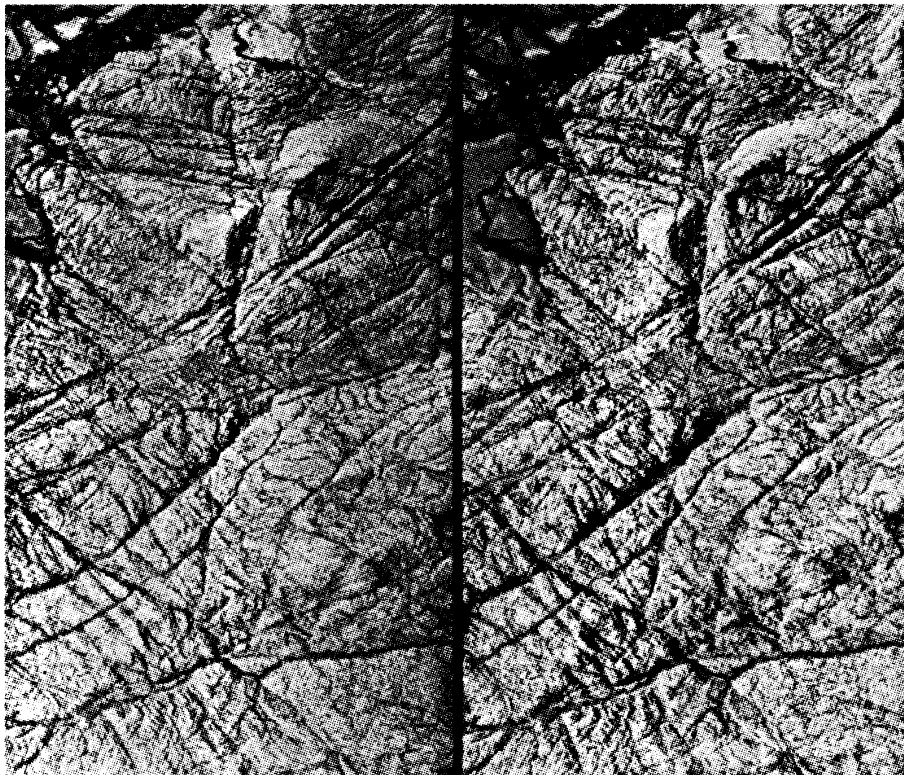


図23 Linear featureと地形の関係を示す立体空中写真。

花こう岩が広く分布するWyoming州の乾燥地域で断層や亀裂系が地形に明瞭に反映されている。

Fig. 23. Stereo pair of aerial photographs showing some distinct linear depressions. Granitic rocks are widely distributed in the arid area of Wyoming. (USGS aerophotos.)

曲, せん断褶曲, 流れ褶曲を生じる. ところが同圧縮応力の速度が比較的大きいときは, せん断破壊が起こると考えられる. 後者の場合, 地層や岩体にせん断応力が働き, ある線に沿って両側または片側に破壊が生じ, 大規模なものは地質構造線から, 小規模のものは亀裂に到るまで, 様々な規模の断層線, 破碎帯, 亀裂帯を生じる.

このため, これらの破壊された岩体や地層は地表付近で物理的・化学的風化作用を受け, 粘土化が進み, 脆弱ないし軟弱になり易い. そこでこれ

らの線に沿ったところでは, その周囲と比較して侵食が促進され, 直線状, または緩やかな曲線状の谷地形が形成され易い (図 23). LANDSAT や MOS-1 衛星から得られる画像上には, アラスカやカナダ (図 24), 乾燥露岩地域の例にみられるように, 多くの線状模様が認められる. このような線状模様を リニアメント (Lineament) と呼んでいる.

ただし, リニアメントがすべて断層や弱線とは限らない. 例えば厚い軟質の泥岩に厚い硬質の砂



図24 LANDSAT画像にみられる断層とLinear feature.

カナダ北西地方のGreat Slave Lake (図の左上) の東南に広がる原生代の結晶片岩に顕著な多くの南北～北西-南東方向 及び北東-南西のLinear featureが見られる. 湖の南東岸に沿い長さ560kmに及ぶMcDonald断層 (矢印) の一部がみられる.

原生代～デボン紀の堆積岩を切る北北西-南南東方向 (矢印) の構造線が明瞭. 同断層の西側に第四紀の河川堆積物が分布する.

Fig. 24. Faults and lineaments on the east arm of Great Slave Lake in the Northwest Territories of Canada. (SHORT *et al.*, 1976)

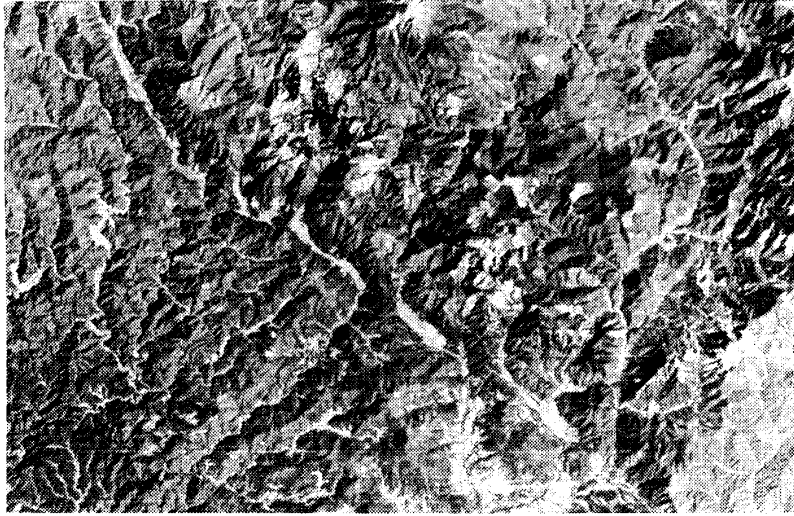


図25 リニアメントとして認められる阿寺断層.

LANDSAT-2, MSS画像に同断層の左横ずれによる河川の屈曲が認められ, 明瞭なリニアメントを形成する. 画像の横幅は66km. (11SEP75 C N35-56/E137-22 MSS NASA ERTS E-2232-00470の一部)

Fig. 25. Distinct linear alignment runs along the Atera fault.



図26 立体空中写真に見られる背斜構造.

Wyoming州 Fermont 郡における砂岩・頁岩の互層からなる背斜構造が認められる.

Fig. 26. Tilted interbedded sandstone and shale shows an anticline in an arid climate. Fremont County, Wyoming. (USGS photos. Stereogram)



図27 LANDSAT-2 画像にみられるドーム構造。

San Rafael SwellといわれているアメリカUtah州の大規模なドーム構造。ドームの中央は上部石炭系～二畳系の砂岩と炭酸塩岩，その周囲は内側から順に三畳系，ジュラ系砂岩，白亜系の砂岩等からなる。画像の左右の幅は76.5km。(29OCT75 C N38-52/W111-16 MSS 5 NASA ERTS E-2280-17240の一部)

Fig. 27. San Rafael Swell, Utah. LANDSAT imagery shows a broad structural dome or uplift.

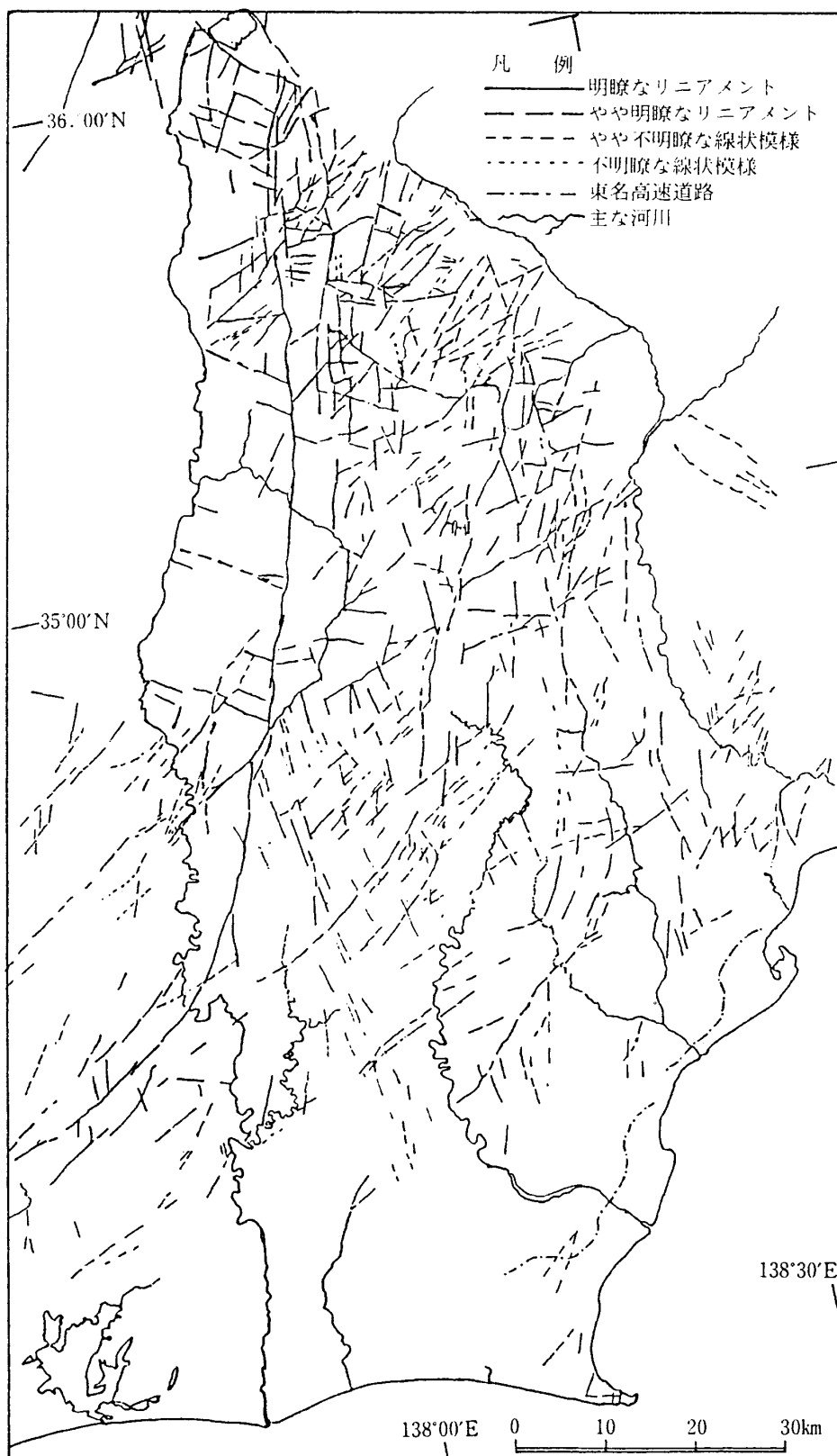


図28 LANDSAT-1 画像からのリニアメント抽出。

赤石山地およびその周辺のリニアメントとLinear featureの抽出 (1972年12月15日, 1973年2月25日の画像を利用)

Fig. 28. Map of geological linear features in Akaishi Terrain, central Japan, using LANDSAT images. Solid lines: Most obvious lineaments. Dashed lines: Less obvious lineaments. Short dashed lines: Indistinct linear features. Dotted lines: more indistict linear features. Chains: Tomei express highway. (identified by the author)

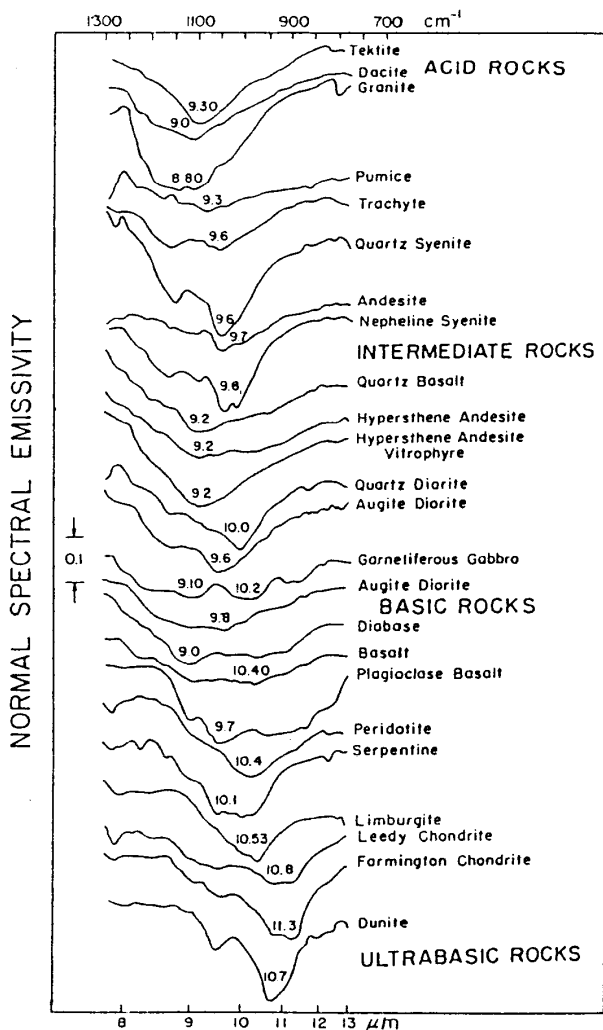
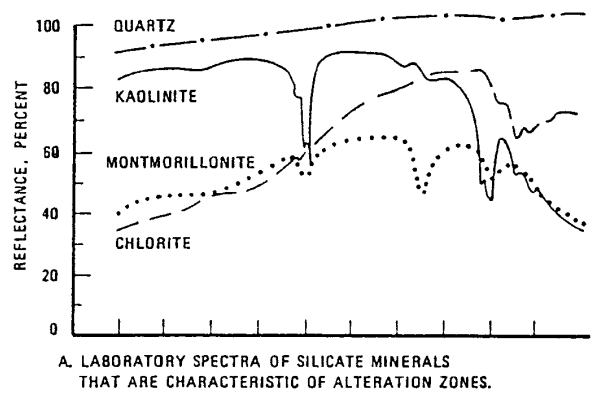


図29 近赤外域における各種岩石のスペクトル放射率。曲線上の数値は吸収スペクトルの最小値の波長を示す。

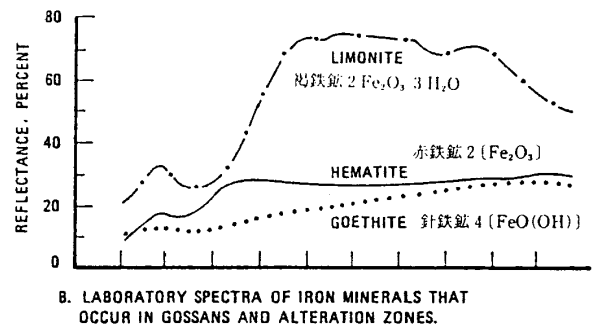
Fig. 29. Normal spectral Emissivity of rocks. (VIKER *et al.*, 1967)

岩が重なり、ある程度傾斜しているところでは、泥岩が選択的に侵食され、直線状の平行状水系を形成することが多い。このようなリニアメントはケスタ地形の存否で区別することができる。

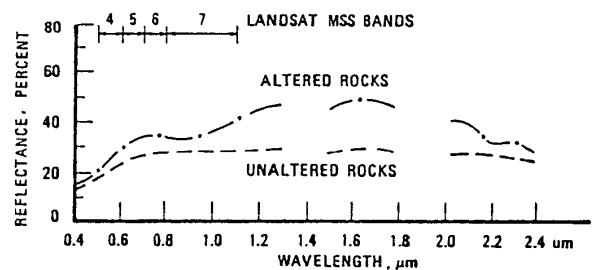
リニアメントを挟んで両側の山稜の横ずれ、水系の屈曲(図25)等、断層特有の地形によって断層等か否かを区別することができる。線状模様は現地踏査・空中写真からも抽出することができる。しかし、この場合は余りにも微視的になるため、比較的大規模な断層線(リニアメント)を見逃すことが多い。これに対し、衛星からの合成赤



A. LABORATORY SPECTRA OF SILICATE MINERALS THAT ARE CHARACTERISTIC OF ALTERATION ZONES.



B. LABORATORY SPECTRA OF IRON MINERALS THAT OCCUR IN GOSSANS AND ALTERATION ZONES.



C. FIELD SPECTRA OF ALTERED ROCKS (AVERAGE OF 284 MEASUREMENTS) AND UNALTERED ROCKS (342 MEASUREMENTS) AT GOLDFIELD, NEVADA.

図30 鉱物・岩石の変質帯で特徴的な可視～近赤外域分光反射率。

Fig. 30. Reflectance spectra of minerals and rocks that are characteristic of alteration zones. (A: HUNT *et al.*, 1970, B: HUNT *et al.*, 1971, C: ROWAN *et al.*, 1977)

外画像を観察する場合、地形を巨視的にみることができるので、リニアメントが浮き彫りにされる。比較的容易にその長短、および強弱を区別することができるので、リニアメント解析の手法は、広域の地質構造解明に威力を発揮できる。また、リニアメントを抽出することにより、沖積層で被覆

された断層線等の発見の手がかりを掴むことができる。

図26はWyoming州Fremont郡における砂岩・頁岩互層の背斜構造を示す立体視用空中写真である。

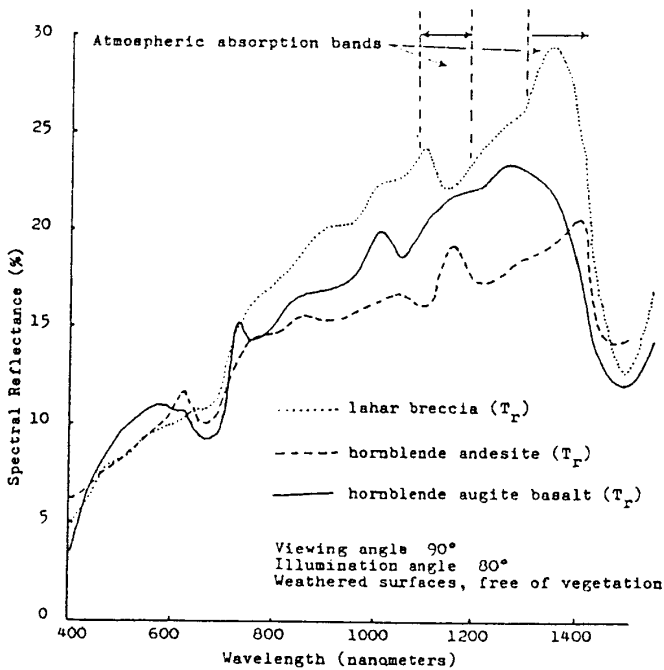
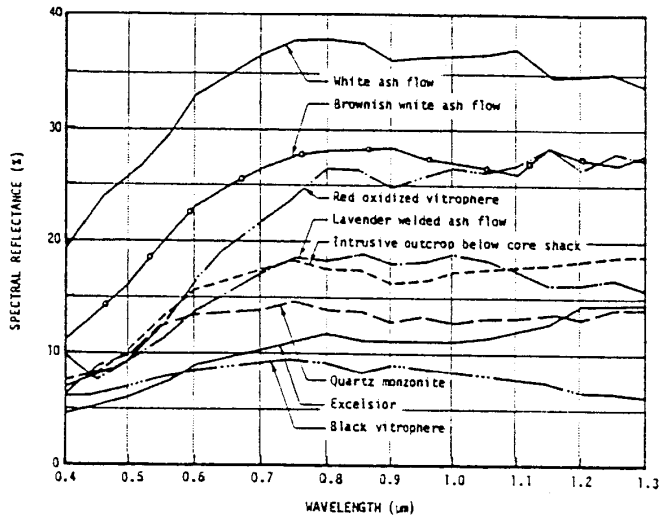


図31 火山灰と岩石の可視～赤外域分光反射率。

上図：Nevada州 Crow Springs における火山灰流、石英モンゾニ岩、黒色はり斑岩等の分光反射率。
下図：Colorado州 Bonanza地域のRawley層群にみられる3種の岩石の可視～赤外域の分光反射率。

Fig. 31. Reflectance spectra of ash flows and igneous rocks in Crow Springs, Nevada, (REEVES *et al.*, Vol. I, 1975) and reflectance spectra of rocks in Bonanza, Colorado. (MARRS, 1973)

る。衛星画像でも同じような褶曲構造を読み取ることができる。

図27はUtah州中部のSan Rafael SwellのLANDSAT画像である。大規模なドーム構造を認めることができる。

以上のように、リニアメントは断層や地質構造線、亀裂帯等を示す可能性が高いので、しばしば、この手法は石油を胚胎する貯油層の地質構造解析、各種の鉱床の探査、地震予知、トンネル掘削時の湧水予知等に役立てられている。

図28はLANDSAT-1バンド7(近赤外)による中部山岳地域の画像を基にリニアメントを抽出したものである。この図中のリニアメントには断層と推定されるものがある。

(2) 岩石、風化した岩石等の電磁波特性

地上の岩石・その風化物および熱変質物・鉱物・土壌等の表面で反射・放射・吸収される太陽光のスペクトルは、その種類によって異なる。このことについては、Vickers *et al.*(1967), Hunt *et al.*(1970, '71, '74), Lyon (1970), Goetz (1975, '76), Salisbury(1988)らによって測定されているが、現在、資料は必ずしも充分といえない。

将来、関係の資料が豊富になれば岩石等の反射・

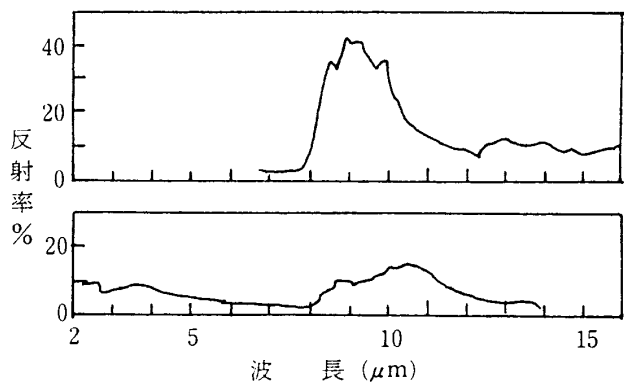


図32 花こう岩、はんれい岩の赤外分光反射率。

上図：SiO₂の含有率が72.9%の花こう岩。
下図：SiO₂の含有率が44.2%の斑れい岩。

Fig. 32. Reflectance spectra of granite and gabbro. Upper: Granite with SiO₂ content of 72.9% (HUNT, 1974). Lower: Gabbro with SiO₂ content of 44.2% (SALISBURY, 1988).

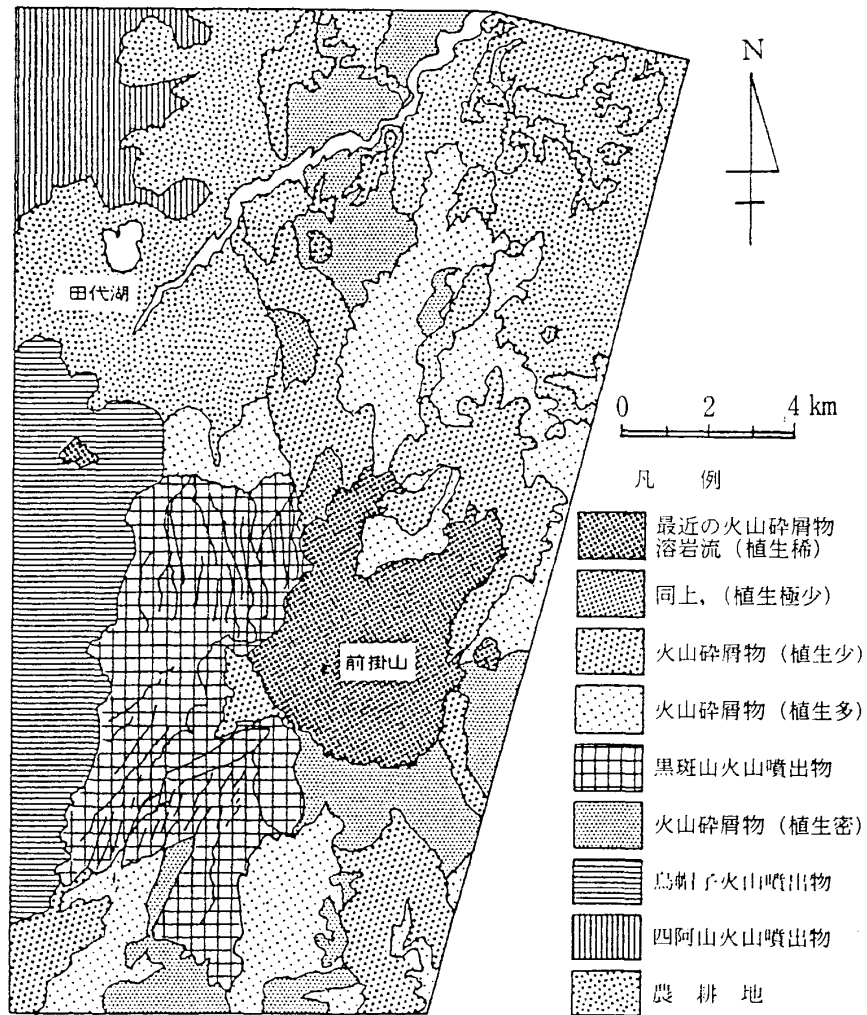


図33 LANDSAT-2 MSS 画像による浅間火山の地質等分類.

11SEP75 C N35-56/E137-22 MSS Bd 7 NASA ERTS E-2232-00470 使用.

Fig. 33. Geologic interpretation of LANDSAT image.

A map of geological interpretation around Mt. Asama, on the boundary between Nagano and Gunma Prefectures, Central Japan. (Mapping by the author, 1979b)

吸収スペクトルを測定すればある程度未知の岩石等の種類を推定・分類することが可能になると考えられる。しかし、この場合でも、ground truth dataを充分計測し、これを参照データとして判別・分類する必要があることはいうまでもない。

Vickers *et al.*(1967)によれば、酸性岩では9.0~9.7 μm 、中性岩では9.2~9.8 μm 、塩基性岩では9.0~11.3 μm に吸収がみられる。それぞれのグループを比較すれば差異が認められるが、岩種の間では識別できるとは限らない(図29)。針鉄

鉱、赤鉄鉱、褐鉄鉱のような鉄の酸化物は、鉄イオンによる青・緑の波長帯(0.4~1.0 μm)に顕著な吸収があり、識別することができる。また、熱水変質鉱物、炭酸塩鉱物、硫酸塩鉱物、風化した岩石など、水酸基、炭酸基をもつ鉱物は、近赤外の1.3~2.5 μm の間に顕著なスペクトル吸収がみられる(図30)。

図31は安山岩、玄武岩、石英モンゾニ岩、黒色はりはん岩、火山灰流、溶結火山灰流等の可視~近赤外域のスペクトル特性を示す。

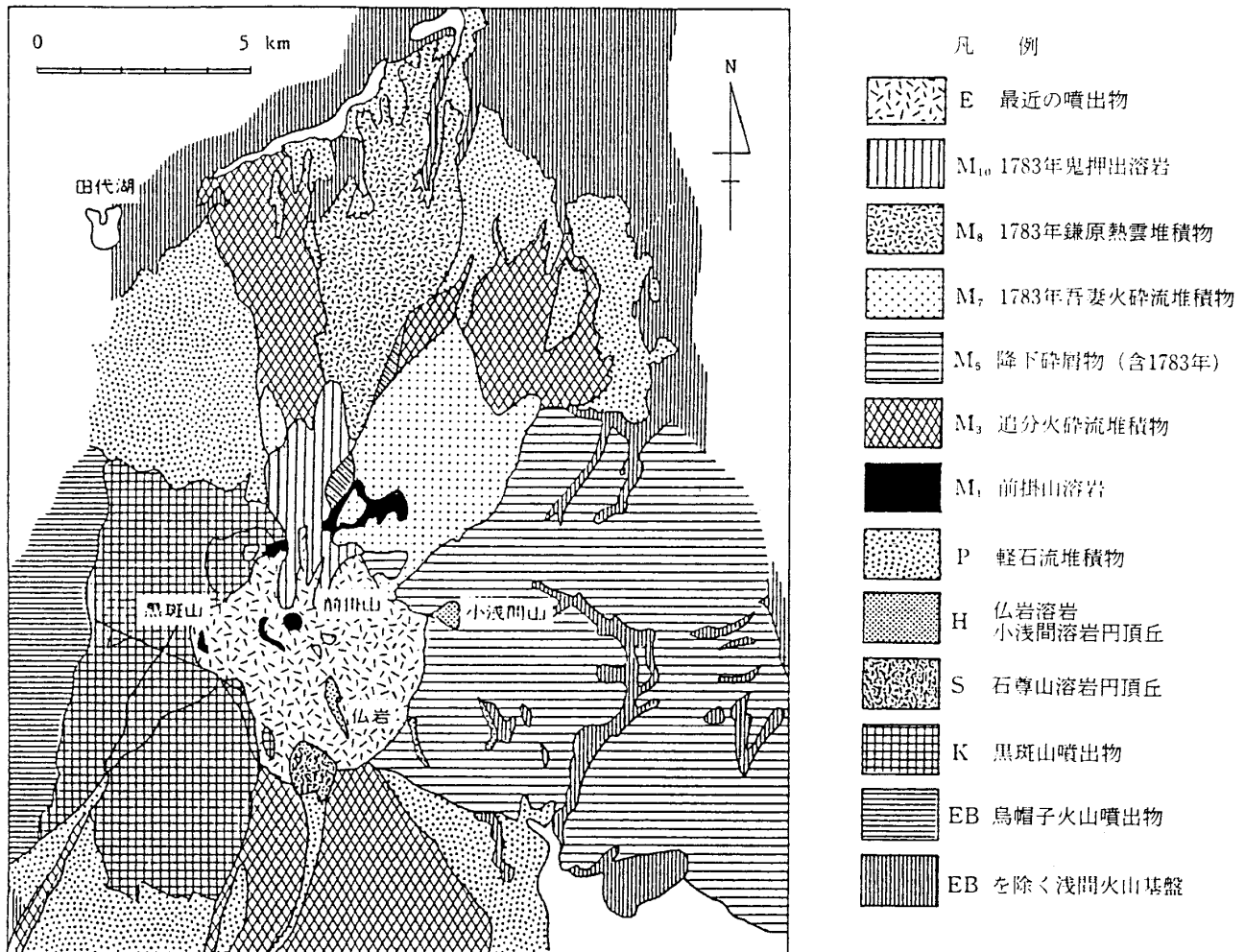


図34 浅間山の地質図.
 (ARAMAKI, 1963 の地質図を一部簡略化した)
 Fig. 34. Geologic map of Mt. Asama.

また, Vincent *et al.*(1975) は, 火成岩の熱赤外領域のスペクトルがシリカ含有量と相関が高いことを定量的に明らかにしている. Hunt(1974)によれば SiO₂の含有量が 72.9%の花こう岩は 8~12 μm 間の反射率が約 45%であり, ピークを示す. また, Salisbury(1988)によれば, SiO₂の含有量が 44.2%のはんれい岩の反射率は約 15%のピークをつける (図 32).

二宮・佐藤(1990)はこの両スペクトル・データを用いて火成岩の SiO₂含有量を計算で予測す

る方法を考え出している.

日本列島や熱帯雨林地方のように密集した植生に覆われている地域では, 一般にリモートセンシングによる岩石等の識別・マッピングの適用は困難である. しかし長野・群馬両県境に跨る浅間山の鬼押出し溶岩のように, 比較的最近活動した火山の放出物の解析にはある程度利用できる.

1975年9月11日の LANDSAT-2, MSSで得られた 4, 5, 6, 7各 Bandの 70mm ポジフィルムを Stanford Technology Corp. 製の I²S



図35 Washington D. C. 周辺の LANDSAT-1 画像。
(22FEB75 C N38-58/W077-03 MSS NASA ERTS E-1944-15030の一部)
Fig. 35. LANDSAT imagery in the area around Washington D.C.

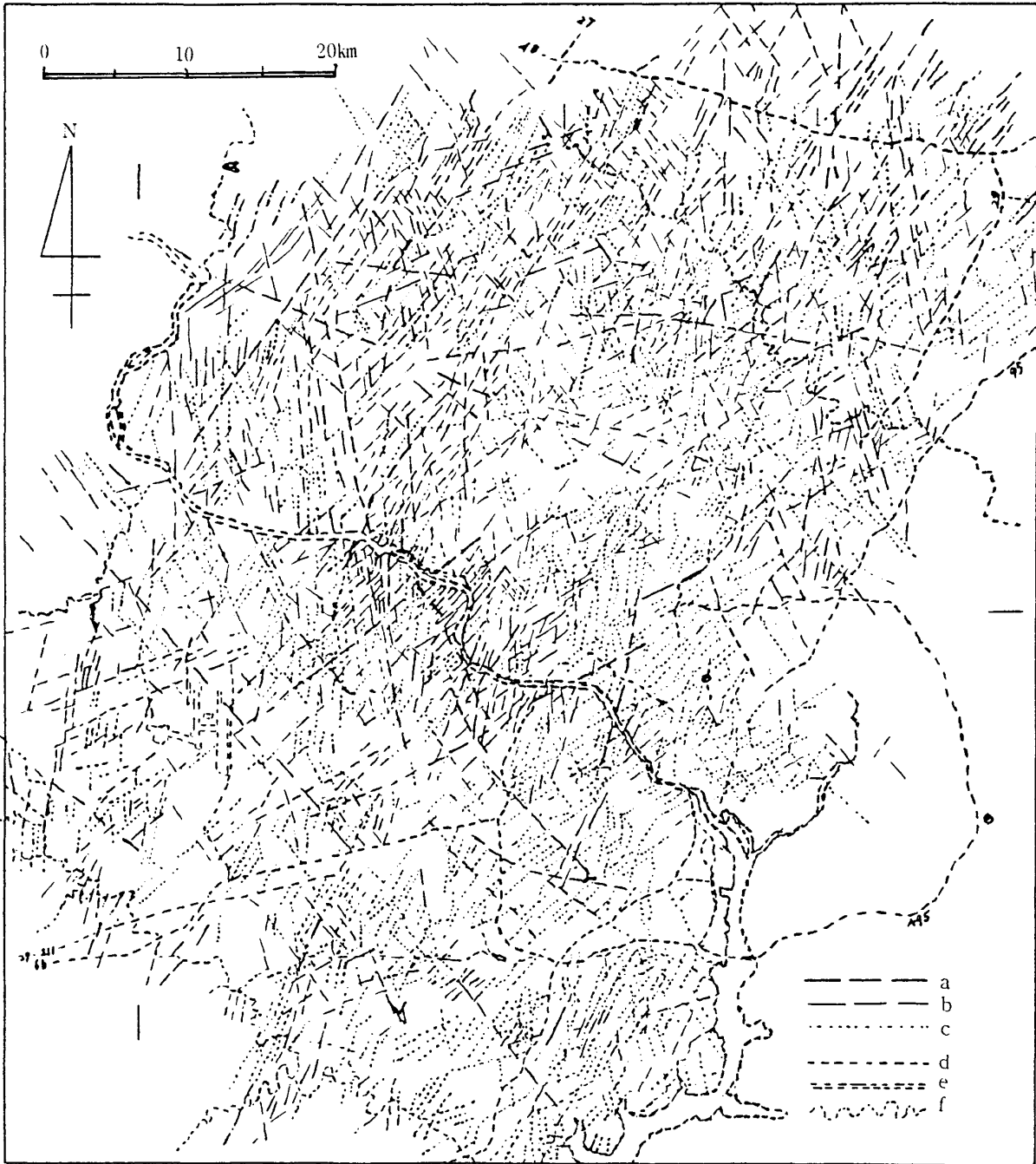


図36 図35の LANDSAT-1 画像からのリニアメント抽出

Fig. 36. Linear alignments of LANDSAT imagery around Washington D.C.

a: Most obvious lineaments. b: Less obvious lineaments. c: Indistinct linear features.
 d: Interstate highways. e: Potomac river. f: other rivers. (identified by the author, IWAHASHI *et al.*, 1978)

Color Additive Viewer に装着し、溶岩・火山碎屑物を強調した画像を得ることができた。そこで Cibachrome ポジ印画紙 (50.6×40.4cm) に密着露光し、現像・漂白・定着・水洗等の処理を行い、縮尺 50 万分の 1 のカラー画像を作成した。図 33 はこの画像をもとに、類似の色調を呈する範囲を描画したものである。この結果を図 34 の地質図 (Aramaki, 1963) と比較すると、最近の噴出物、黒斑山噴出物、烏帽子火山噴出物等に比較的良好な相関がみられた。

その他、冠雪の少ない高山地帯や植生がほとんど見られない乾燥した砂漠周辺の山岳地方での地質の判読に効率よく利用することができる。

(3) 鉱物、エネルギー資源探査

金、銀、銅、錫、鉛、亜鉛等の金属資源、石炭、石油、ウランウム等のエネルギー資源、その他の金属・非金属の有用資源の探査は、古くは、鉱床・鉱脈が地上に露出する露頭から試掘が始められ、鉱脈等に沿って採掘が進められていた。しかし、近年は、残された資源については頭脳的探査が要求されている。すなわち、地質踏査、弾性波探査、電気探査、重力探査、放射能探査等の物理探査により地下深部の鉱床の分布を推定し、さらにボーリング等により鉱床の存在、鉱石の品位や鉱量を確かめた上で開発が行われる。

リモートセンシングの技術は、最近、鉱床の初期段階の調査に利用されている。先ず対象の鉱脈の露頭でそのスペクトルの反射・吸収特性を調べ、次に衛星または航空機に搭載したリモートセンサで広域を調査する。また、上述のようにリニアメント解析により、顕在・伏在している構造線や断層線、褶曲構造等を明らかにする。リモートセンシングは、とくに広大な探査地域から鉱床の位置を搾り込むときに威力を発揮できるようである。

(4) 水資源の探査

山岳地帯、森林地帯における積雪量・融雪量の時系列的変化、山地の荒廃状況等の調査により、森林の保有する水資源のかん養機能の評価を行う。

(5) 土木地質への応用

図 35 の原図はアメリカ合衆国東岸、Washington D.C. を中心とした地域の LANDSAT-1 の

4, 5, 7 の 3 つの Band で合成した、縮尺 50 万分の 1 赤外カラー画像である。筆者がこのカラーコピーからリニアメントを抽出したものを図 36 に示す。

USGS の Soil Lab. 所属の Ranger *et al.* (1978) によれば、この図の中のリニアメントは、図の中央を北西から南東に流れるポートマック川の地下を横断するトンネルの工事の際に見られた亀裂系と一致している。

2) 自然災害科学

(1) 農林災害：リモートセンシングは、火山噴火による溶岩・粗粒火山碎屑物・細粒火山碎屑物(降灰)等の分布調査、降灰等による森林・農作物の被害調査、森林・農作物の病虫害の被害状況調査、森林火災の進行状況(図 37)・同被害調査、同復旧状況調査、干ばつによる農作物の被害状況調査、半乾燥地における砂漠化の調査、遅霜等の冷害・冷夏による農作物の被害状況調査等。

(2) 気象災害：台風・集中豪雨・融雪による河川堤防の決壊・氾濫・冠水の状況調査。

(3) 地盤災害：地すべり・山崩れ・山津波等の調査、その復旧状況の推移の監視と評価、地盤沈下等。大八木(1990)により SPOT 画像を利用して地すべり地形の判読がなされている。

(4) 地震災害：活断層・地震断層調査等。

以上のように、その利用は多くの分野で可能であり、多くの研究が公表されている。

石黒ほか(1990)による「LANDSAT, MOS-1 データによる桜島の噴煙と降灰地域の検出」の研究がある。

3) 環境科学

環境保全、乾燥・半乾燥地域の環境調査(岩橋, 1986a, b), 砂漠の拡大化, 乾燥地域の緑地化(図 38), 大気汚染, 水質汚濁, 温排水, 海洋汚染(図 39), 都市開発等による自然改変, 山地災害, 火山活動の監視, 洪水による冠水状況把握等にリモートセンシングが利用され、多くの報告がなされている。

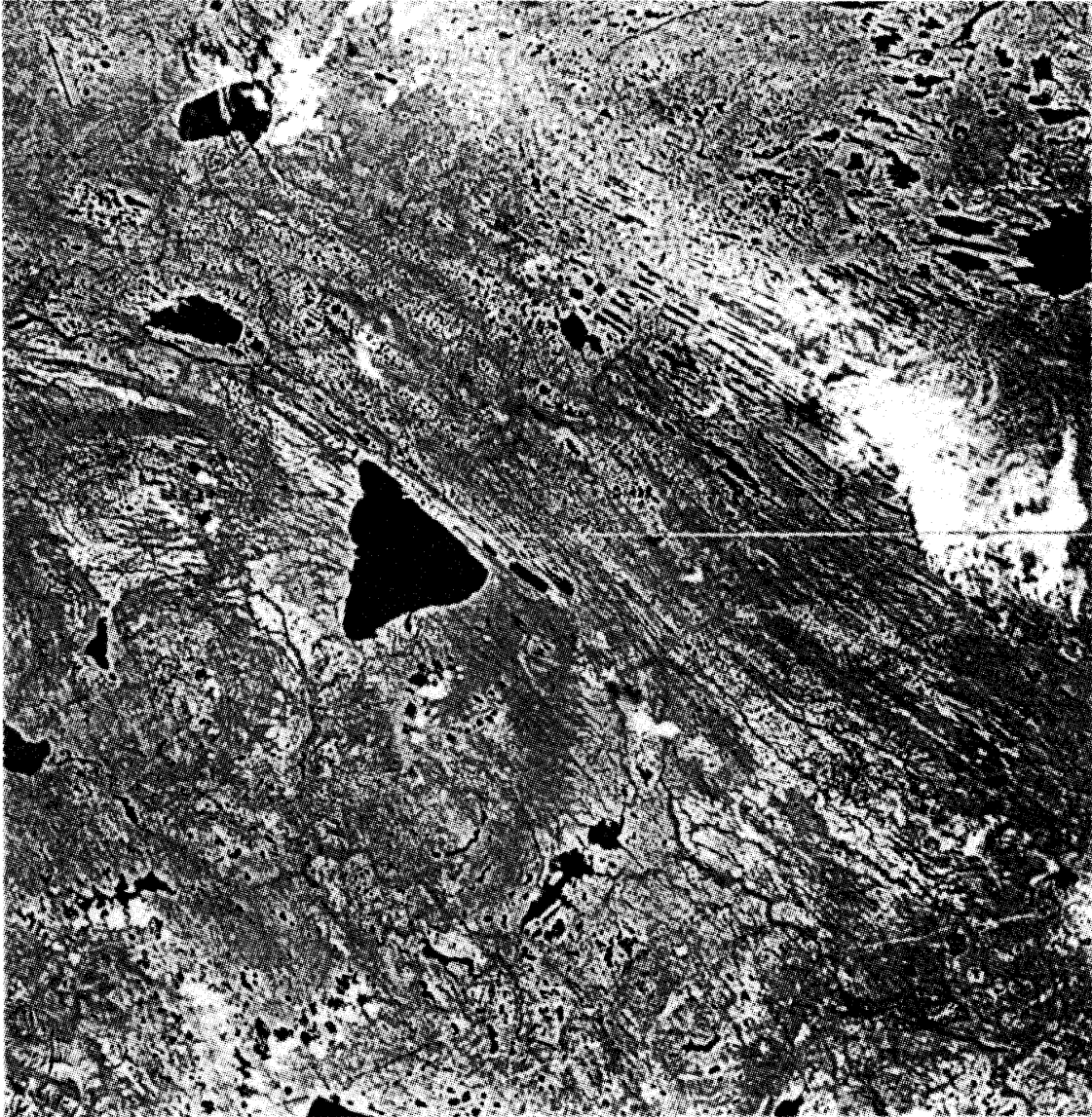


図37 カナダ Northwest Territories Great Bear Lake 南方における森林火災。

LANDSAT画像の横幅が約180kmであるので、火災の規模を推察できる。また、この画像から氷食地形が読み取れる。30JUL73 LANDSAT-1 MSS 合成赤外カラー画像。

Fig. 37. Forest fire on the south of Great Bear Lake, a heavily glaciated part of the Northwest Territories. (SHORT *et al.*, 1976)



図38 San Rafael Swell 西部の乾燥地帯の緑化。

Utah州中部のドーム状構造(図27) 一帯の広大な乾燥地域は最近になり西側の山地からの用水路により農耕地が拡大しつつある。画像の横幅は約59km。(29OCT75 LANDSAT-2 MSS 画像の一部)

Fig. 38. Irrigated area of arid climate on the western part of San Rafael Swell.



図39 1979年10月19日台風20号による河川放出物による海洋汚濁。

天竜, 大井, 安倍, 富士等の諸河川から放出された濁水の流路がよく識別できる。原図は1985年10月22日, LANDSAT-3 MSS 画像(宇宙開発事業団地球観測センター, 1985年5月資料)

Fig. 39. Rivers pour sediment in the sea, off the coast of Shizuoka Prefecture. The cloud of mud and silt coloring the water far from the river mouth, after a heavy rainfall accompanied with a typhoon.

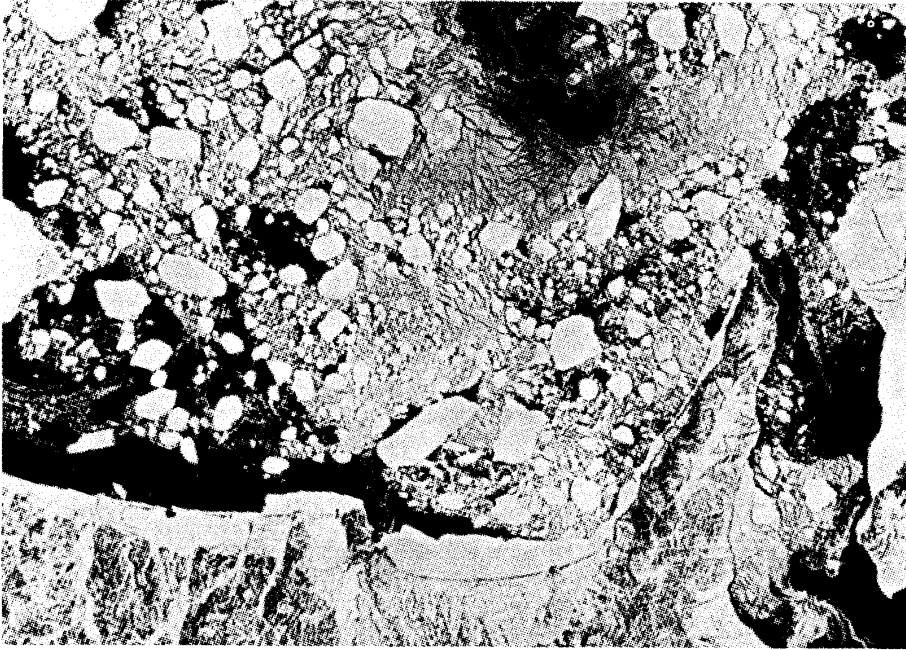


図40 北海道網走沖の流水の分布状況.

原図は1979年4月5日, LANDSAT-3 が観測し, 宇宙開発事業団地球観測センターで受信・処理したMSS合成カラー画像.(宇宙開発事業団地球観測センター, 1985年5月資料)

Fig. 40. A pattern indicates divergence of ice floes and thin grey ice near the coast of Shiretoko Peninsula in early spring.

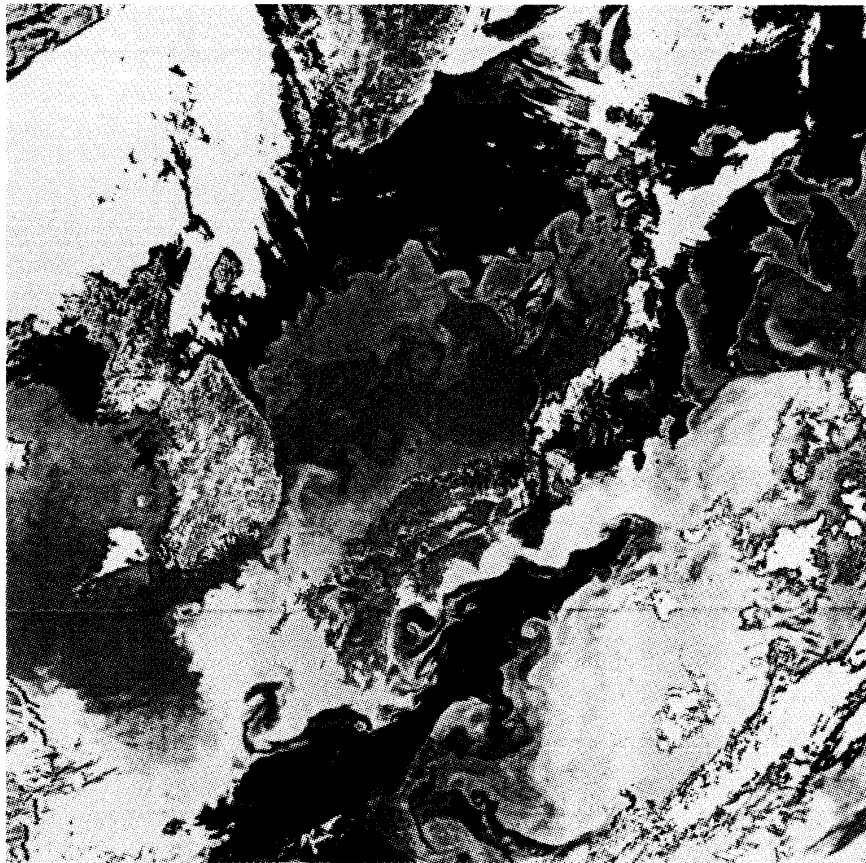


図41 日本列島周辺海域の海面温度分布図.

西南日本から東海沖へ北上する黒潮の流路が明瞭である. 1981年4月23日のNOAA AVHRR のチャンネル4 (10.5~11.5 μm) のデータから作成されている. ((財)リモートセンシング技術センター, 1985.12 資料)

Fig. 41. Thermal infrared image around the Japan islands.

4) 海 洋

現在, LANDSAT等による 流水分布 (図40), 同移動状況調査, 気象衛星 NOAAにより海流の分布と寒流および暖流の温度分布が観測され (図41), 印刷物として刊行されている (後述). 外洋における船舶の航海には位置の観測が重要である. 衛星は時間的・空間的に定められた軌道を周回しているのので, ある時刻にその方位角および仰角を測定すれば船舶の位置を割り出すことができる.

5) 気 象

気象観測には静止気象衛星と極軌道気象衛星とがあり, 台風の位置・移動方向, 強度等の観測, 集中豪雨, 風向, 風速, 天気予報, 長期予報, 大気汚染等の観測・データ収集に活躍している.

(1) 静止気象衛星: 赤道上には METEOSAT (西経 0°, ヨーロッパ宇宙機構), GOMS (東経 70°, ソ連), GMS (東経 140°, 日本), GOES (西経 70°, 同 140°, アメリカ) 等, 5 個の静止気象衛星が 70° 間隔で配備されている. これらの衛星は赤道上を地球自転と等しい角速度で回転しているのので, 地球から静止したように見える.

ひまわりの名で知られている日本の静止気象衛星 GMS (Geostationary Meteorological Satellite) は, 赤道上 35,750km の軌道にある. この衛星の製作から軌道に乗せ, 軌道上に維持する仕事 (管制) は宇宙開発事業団が担当し, 観測・データ処理・利用等は気象庁が行っている. 現在, 1989年9月6日に打ち上げられた4号が働いている.

(2) 極軌道気象衛星: 北緯 60° から南緯 60° までは静止気象衛星が観測できる. 極軌道衛星は静止衛星が観測できない両極周辺の観測も行っている. 極軌道気象衛星 NOAA は通常 2 個が運用され, 互いに地球の反対側に位置し, 共に高度 850 km の極軌道を周回している. NOAAには AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), TOVS (Tiros Operational Vertical Sounder), HIRS (High Resolution Infrared Sounder, 高分解能熱赤外放射計) 等の観測装置が搭載されている.

6) 農 業

(1) 植物種の抽出・分類, 作付面積の算出

地表を広く覆っている緑色の植物の葉は, 太陽光のエネルギーを吸収して, 光合成を行なっている. 光は主にクロロフィル, 一部は葉に含まれる水に吸収される. クロロフィルによる吸収は, 0.40~0.47 μm (青色) 付近と 0.63~0.68 μm (赤色) 付近, 水による吸収は 1.4 μm 付近および 1.9 μm 付近で著しい (図42).

植物の種類や生育状態の違いにより, その分光反射特性が異なる. そこで, 予め, 地上において分光反射率計を用いて, 計測の対象としたい既知の植物種の分光反射特性を捉え, そのデータをコンピュータに入力・記録する. このデータを,

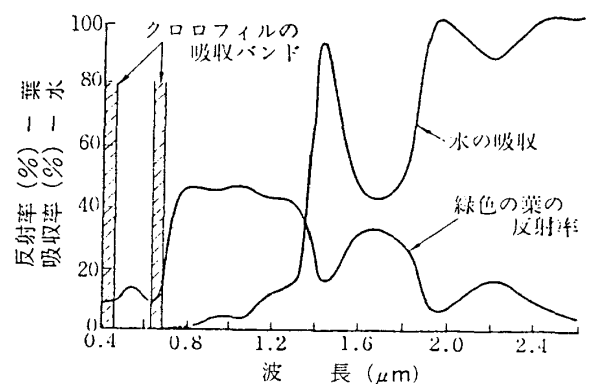
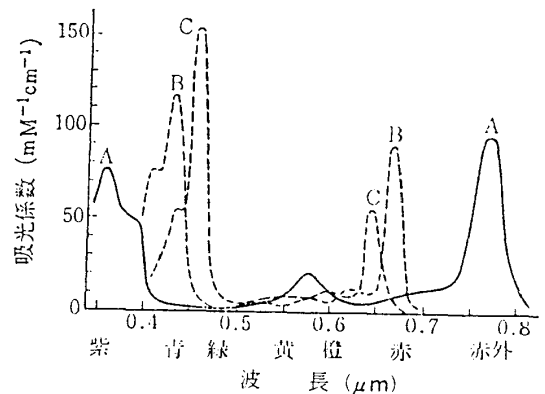


図42 クロロフィルの吸収スペクトル (上図) と植物の反射特性 (下図).

上図 A: バクテリオクロロフィル, B: クロロフィル a, C: クロロフィル b.

Fig. 42. Spectral absorption curve for chlorophyll (Upper graph). Typical spectral reflectance of plants (Lower graph). (FOGG, 1972)

Ground truth (グラントルス) と呼ぶ。

次に、航空機または衛星に搭載した MSS 等の計測システムを用いて、地上の植物の電磁波スペクトル強度を測定し、上述のようにコンピュータに入力・記録し、ground truth データをもとに、測定域内のそれぞれの対象植物種を抽出・分類することができる。また、必要な場合は、コンピュータの演算により、それぞれの植物種の占める範囲の総面積(作付面積)を積算することもできる。

(2) 生育状況, 作柄評価, 収穫予想

植物種(農産物)は生育に従って、土壌(水稲の場合は水面)の占める面積に対して植物種の占める面積が次第に増加し、また、植物種そのものの分光反射特性も可視光・近赤外領域で変化する。一例を挙げると、水稲は7月初旬から10月16日までの間、可視光から近赤外域で特に近赤外域で次第に反射率が上昇することが明らかにされている(図43)。従って、予めその季節毎の変化を地上で計測・記録しておけば、衛星高度等からそれぞれの農産物の季節毎の生育状況を把握できる。また、その収穫期における作柄の評価、収穫予想も可能となる。

1990年、ソビエト連邦における地域的な食料不足が報道され、ヨーロッパの各国から食料の援助の手が差しのべられた。しかし、アメリカ合衆国に、直ちにそのような動きがみられなかったの

は、恐らく、LANDSAT 等による情報で、ソ連の1990年の農産物は豊作であるが、流通機構に問題が生じていることを早くから掴んでいたためと考えられる。

農産物については、気候の長期予測をにらみながら、刻々と変化する世界の作付け状況や生育状況、収穫予想等の正確な情報を得て、速やかに、次期の作付け計画を立てる必要がある。不作の国に対して直ちにグローバルな見地から適切な方策を立て、供給を行わなければならない。

7) 林業

林産資源についてみると、汎世界的に林産資源となる植物の生育状況とのバランスを考慮して計画的に伐採と植栽を行う必要がある。

植林の生育状況の時系列的変化の調査・監視、病虫害の発生状況とその時系列的変化把握、山林火災の被害状況の把握、その人工的・自然的復旧状況把握、種類別森林資源の面積・材積調査、およびその時系列的変化の解析、広葉樹・植栽樹の伐採状況調査、伐採跡地の更新状況調査、森林地以外の転用(宅地化、農地化、工業用地化等)の調査等に利用される(図44)。

8) 水産業

三陸沖、ニューファウンドランド沖等のように、寒流と暖流が会合する潮境付近では、両系のプランクトンや藻類が豊富なため、良い漁場になっている。しかし、寒流と暖流は絶えずその流路を変えるため、潮境の位置が変動する。このため、寒流と暖流の動きを捉える必要がある。このような広域の海洋調査には静止衛星等による熱赤外域のリモートセンシングが最適であり、寒暖両海流の状況の情報を Real Time で得ることができ、極めて好都合である。現在、気象衛星 NOAA の赤外センサによる海面温度分布図(衛星利用水産海洋情報等)が発行されている。

なお、クロロフィルをもつ植物プランクトンは海洋生物の食物連鎖の根幹をなすもので、その濃度により海水の色が異なる。その濃度を測定するため衛星からのリモートセンシングが利用されて

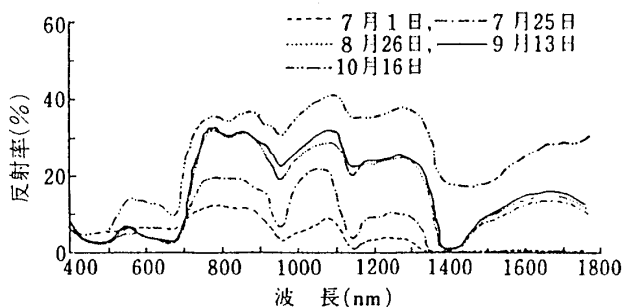


図43 水稲アケノホシの生育過程に伴う分光反射率の変化(秋山, 1985)。

Fig. 43. The change of spectral reflectance of rice "Akenohoshi" during their growing.

いる。

8. リモートセンシングの将来

LANDSAT-6, 7の管理運用がNASAから民間のEOSAT社に移され、新しい観点から設計が始められており、将来の新しい需要に答えることになる。

日本の1990年代の地球観測衛星には能動型のSAR (Synthetic Aperture Radar, 合成開口レーダ) (図45) やレーザー・レーダが搭載されることが多くなると予想される。これは衛星や航空機から能動的にマイクロ波を放射し、再び地物からの反射波をアンテナで受信し、電子機器により複雑なデータ処理を行い、地上の画像を得ることができるシステムである。長波長の電磁波を利用

するので、植物、雲、霧、スモッグ等による反射、散乱を受けにくく、それらを透過しやすいため、それらに覆われた地域での利用が可能である。また、太陽光に依存しないため、日照時間が短い高緯度地方や夜間の観測に利用できる。このシステムの航空機高度からの探査については、すでに実用化の時代に入っており (図46), APOLLO-17 (1972), PIONEER Venus radar mapper, SEASAT (1978) 等、衛星高度のプラットフォームにも搭載され始めている。このシステムにより土壌や岩石の区別が可能になるので、熱帯雨林などに覆われた未踏査地域の地質探査に重要な働きをすることが期待される。

リモートセンシングの技術は宇宙産業の育成、宇宙・地球科学研究の発展、および科学技術水準の向上に役立ち、引いては国家の活性化に大きく

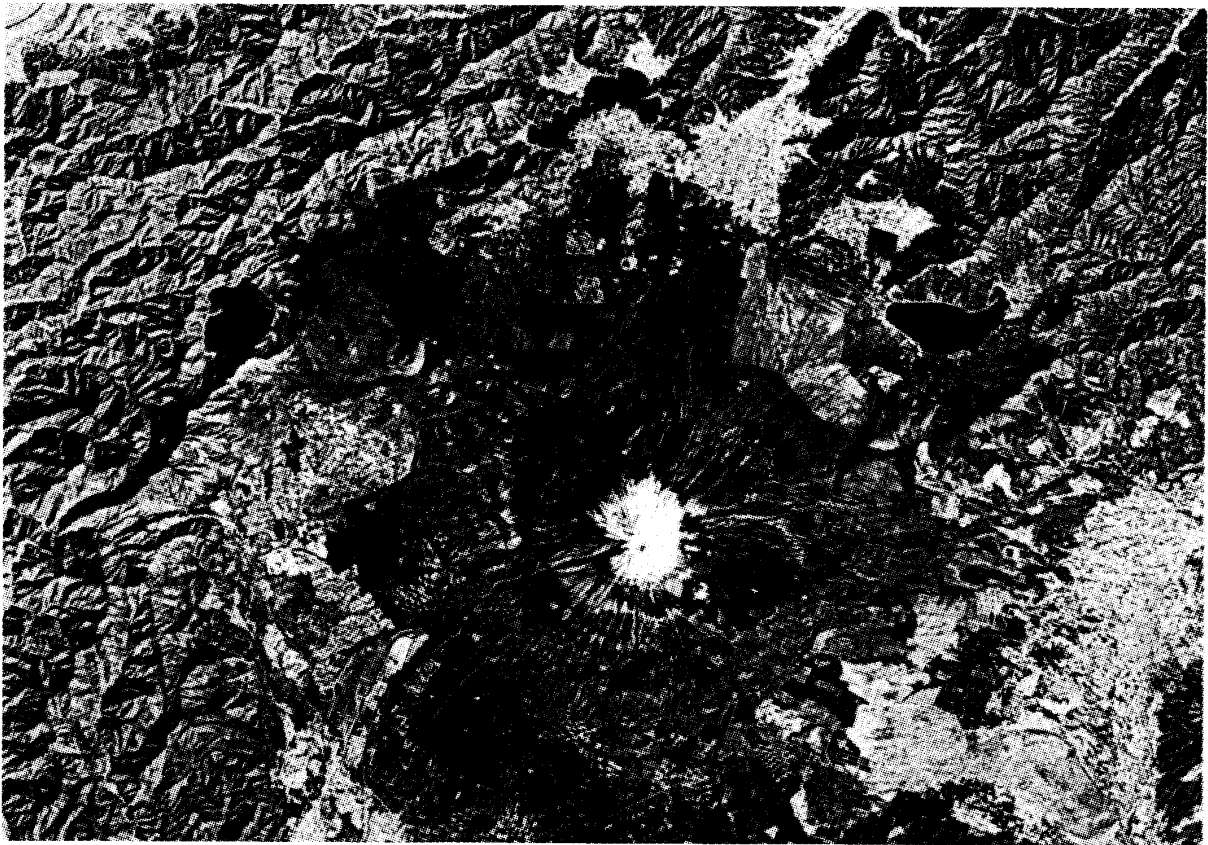


図44 富士山周辺の植生分布。

1984年10月26日 LANDSAT-5 TM 画像 (RESTEC, 1985. 12資料)。

Fig. 44. Enhanced MSS image in the area around Mt. Fuji for the classification of plants.

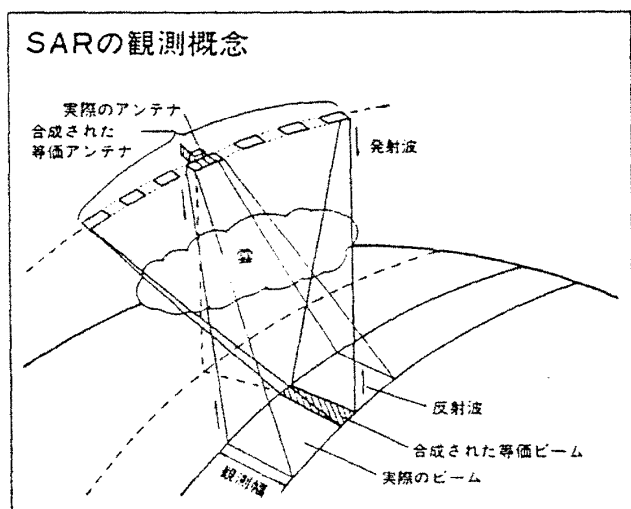
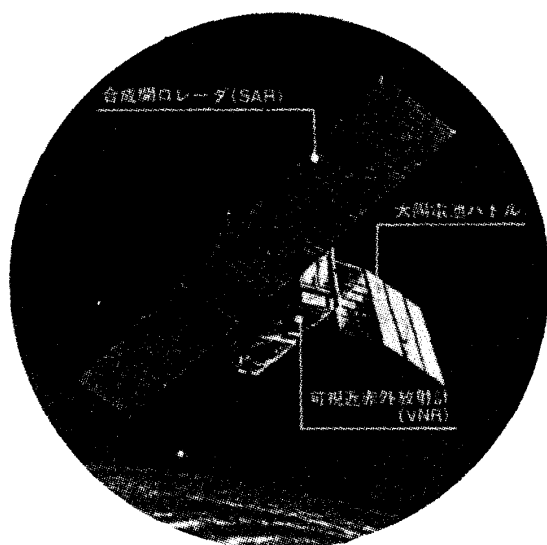


図45 地球資源衛星JERS-1 搭載予定のSARの観測概念図 (RESTEC, 1985. 12資料).

Fig. 45. Configuration of SAR for prospective Earth Resources Satellite JERS-1.

貢献することにもつながる。今世紀の後半は人口の爆発的増加と資源の乱開発，エネルギーの大量消費により，地球は大きく環境を悪くしてきた。そこで，次世紀の主要テーマになることは地球環境の問題であることが明らかである。このためにも，リモートセンシングにより，国際的な資源の確保，管理，監視などのもので，適正な開発と調和的資源の活用を行う必要がある。

LANDSAT 画像の地上解像力は一画素の関係で80m×80mであったので，より高い解像力が望まれていた。そこで スポット衛星が登場し，

画像の解像力が10m および20m までに高められた。これをさらに高めることにより，より精密な多くの情報が得られるに違いない。しかし，解像度を数メートルまで高めた場合，空中写真との違いが認められなくなる。ただし，将来とも衛星利用の場合は地上から遠隔操作で観測できるメリットは大きいと考えられる。

現在，より高度なJ-ERS-1 (地球資源衛星)，ADEOS (地球観測プラットフォーム技術衛星) 等の地球観測衛星計画が進められている。また，日本ではタイ国のバンコック (国家研究センター管轄のリモートセンシングセンターに委託運用されている)，文部省局地研究所南極基地 (南極観測昭和基地) にMOS，J-ERS の計測データを受信できる地上局をもち，また，山口県および熊本県 (東海大学宇宙情報センター) にはMOS の情報を受信できる設備があり，互いデータの交換ができる通信ネットワークの完成後の飛躍的活動が期待される。

これからは，リモートセンシングの技術が利用され，未開発地域に隠された有用資源の開発が推進されると考えられる。さらに，地球の表面に何が捉えられるかという研究から，地球環境の変化など，地球の表面がどのように変化しているかを捉える研究に焦点が移るのではないかと考えられる。

西尾ほか(1990) によれば南極白瀬氷河の流速と経年変化がLANDSAT およびMOS-1 データで研究されており，将来は南極大陸全体の氷床量の経年変化の観測から地球環境の変化を捉える研究が進められるであろうと述べている。

現在は海洋の気象は無線による気象通報をもとに天気図を作成し，気圧配置，等圧線，不連続線等から判断している。しかし，現在開発中のマイクロ波センサが完成すれば，衛星からの観測により海上の風力，波高，流水，冰山等の情報が即時に得られ，航海，漁船の操業等の安全が確保されると予想される。

上述したように，リモートセンシングの技術は新しい要求に応じて開発が進められ，さらに新しい需要を生み，永く研究と開発が推進され，人類の福祉と発展に大きく寄与し続けるものと考えて

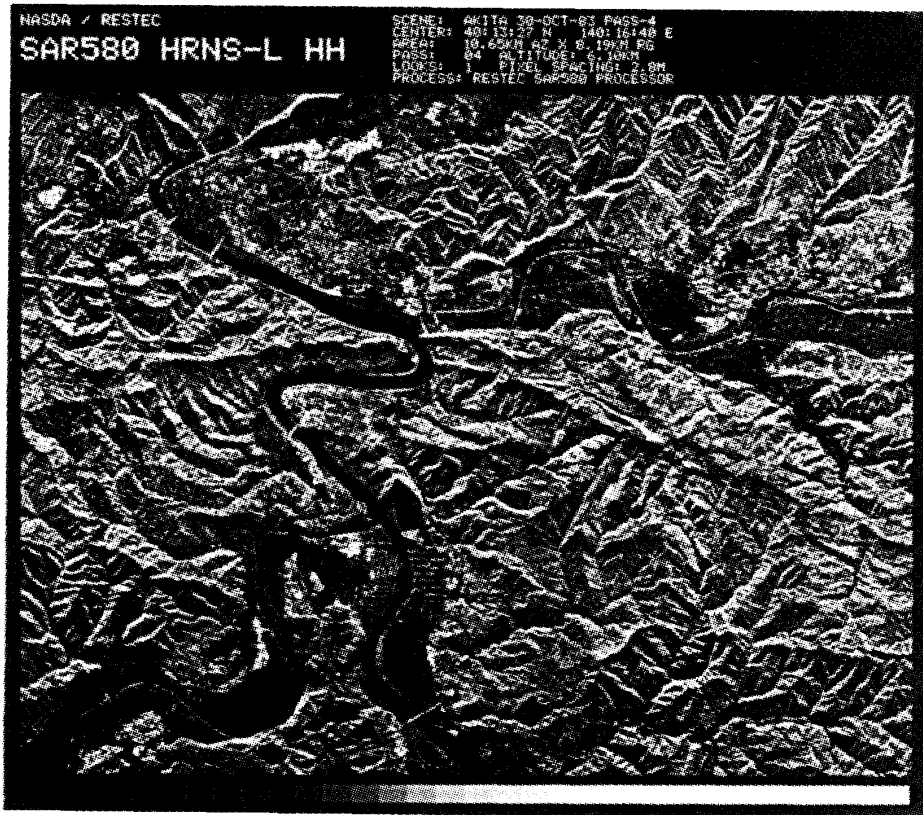


図46 航空機搭載の合成開口レーダ画像。
秋田県ニツ井地域。(RESTEC, 1985. 12資料)

Fig. 46. SAR imagery mounted on an aircraft.

いる。

9. おわりに

我々はリモートセンシングによって、地球を太陽系構成の一つの惑星という視点で観察することができる。地球を惑星として遠くからみることにより、地質構造を従来と異なった観点から読み取ることができ、地球をダイナミックなものとして捉え、造構運動等を考察することができる。

また、地球を遠くから観察し、計測し、地球環境の変化、あるいは地球上のいろいろな現象等の研究対象をグローバルに把握することができる。このような研究結果をもとに、我々は地球の環境を、少なくとも現在よりも悪くしないよう、むしろよい方向にコントロールする必要がある。これにはリモートセンシングによる方法が最も適切、

かつ効率のよい方法の一つと考える。

地球上で化石燃料を、このままの傾向で燃焼させると仮定すると、地球大気に含まれる二酸化炭素の含有量が、近い将来、現在の2倍になり、このために、地球大気の温室効果のため、地球の平均気温が現在よりも平均3℃以上上昇すると計算されている。その結果、南極やグリーンランド等の大陸に見られる厚い氷床(Ice sheet)、北極海域の氷床、他の大陸の高山地域および高緯度地域に見られる氷帽 (Ice cap)、谷氷河 (Valley glacier)、山麓氷河が海に融け出し、海水面が数メートル上昇する。このために、世界の多くの臨海都市、工業地帯等が水没の危機に見舞われるといわれている。

リモートセンシングは、すでに大規模開発の実態把握の研究に利用されているが、将来もこの手法を用いて、大規模開発を含めた自然環境の変化

の監視に利用されることは疑いない。

最後に、リモートセンシング画像で地質判読を行う場合、写真地質学の場合と同じように、事前に、地質現象を含む地質学および関連の学問の基本をよく理解しておく必要があり、また、リモートセンシングの基礎となる豊富な地表調査データ (Ground truth) を併用して判断すべきであるということを付記したい。

謝 辞

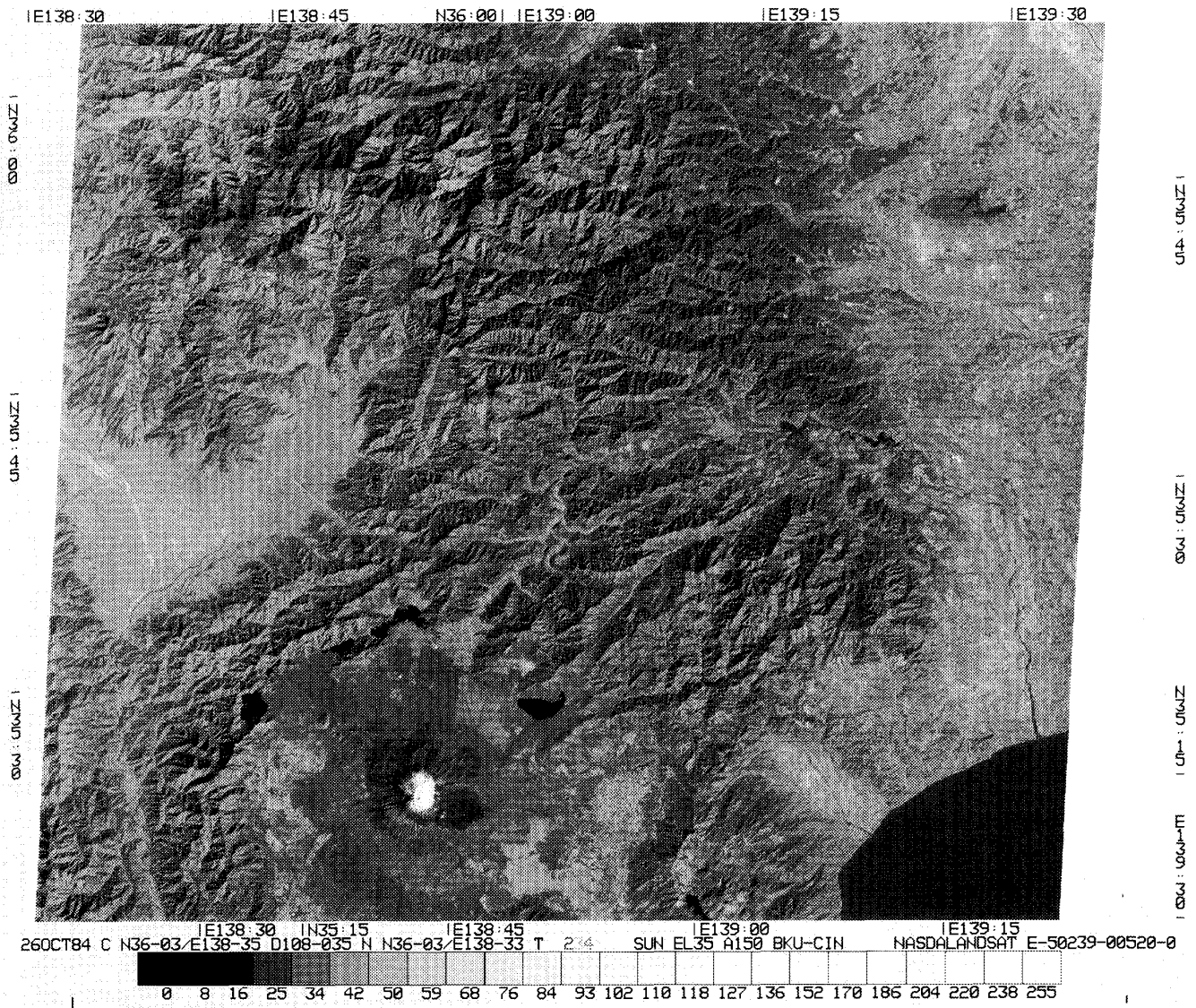
本論の作成に当たり、静岡大学教育学部の木宮一邦教授からは温かい励ましを頂いた。1976～'77年、文部省在外研究員として Virginia 州 Reston の USGS で研究中、当時 EROS Program にご在職中の William Douglas Carter 博士を始め、多くの研究者からリモートセンシング等について貴重なご助言とご教示を頂いた。(財)リモートセンシング技術センターからは、ご厚意で同センター受信の画像や資料の印刷のお許しを得ることができた。また、本学部の藤吉 瞭助教授、大塚謙一助教授からなにかとお世話を頂いた。半田孝司技官には挿入図の浄書の労をお取り頂いた。茲に記して、これらの方々から心から厚く感謝の意を表します。

文 献

- 秋山 侃・斎藤元也 (1986), リモートセンシング技術の利用 (その2) - 農作物調査への適用 -。農業土木学会誌, 54, 10.
- ARAMAKI, S.(1963), Geology of Asama Volcano. *Jour. Fac. Sci. Univ. Tokyo, Sec. II*, 16, Part 2, 229-443, with 3 text-figures.
- COLWEL, R. N(ed.).(1983), *Manual of Remote Sensing, Second Edition*, 2440p.
- FOGG, G. E. (1972), *Photosynthesis*. 柴田和雄訳「光合成」, 共立出版.
- GOETZ, A. F. H., BILLINGSLEY, F. C., GILLSPIE, A. R., ABRAMS, M. J., SQUIRES, R. L., SHOEMAKER, E. N., LUCCHITTA, I. and ELSTON, D. P.(1975), Applications of ERTS images and image processing to regional geologic problems and geologic mapping in northern Arizona, Calif. Inst. Techn. Jet Propulsion Lab., Techn. Report, 32-1597, 188p.
- GOETZ, A. F. H.(1976), Remote Sensing Geology - Landsat and beyond: Proceeding of Caltech/JPL Conference on Image Processing Technology, Data Source and Software for Commercial and Scientific Applications. Jet Propulsion Lab. SP 43-30, 8/1-8/8.
- HUNT, G. R. and SALISBURY, J. W.(1970), Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks, I. Silicate minerals. *Modern Geology*, 1(4), 283-300.
- HUNT, G. R., SALISBURY, J. W. and LENHOFF, C. J.(1971), Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks, III. Oxides and hydroxides. *Modern Geology*, 2(3), 195-205.
- HUNT, G. R. and SALISBURY, J. W.(1974), Mid-infrared spectral Behavior of Igneous Rocks. Air Force Cambridge Research Lab. Technical Report, TR-74-0625, 142p.
- 石黒悦爾・Mishra, K. K.・日高靖之・宮里 満・堤 毅一・増水紀勝(1990), LANDSATとMOS-1データによる桜島噴煙とその降灰地域の検出。日本リモートセンシング学会 第10回学術講演会論文集, 197-198.
- LANGER, W. H., OBERMEIER, S. F. and IWAHASHI, T.(1978), Relationship of regional joint, fracture and shear patterns to landslids in the Coastal Plain of Fairfax County, Virginia. Southeastern Section of the Geological Society of America, 27th Annual Meeting, 10(4), 173.
- IWAHASHI, T. and HEIRONIMUS, T. L.(1978), Map showing Landsat imagery alignment in Fairfax County Virginia. 1 pl., scale 1: 48,000. USGS, Openfile Report No. 78-525.
- 岩橋 徹 (1979a), 人工衛星からみた中部地方, - 自然と人間のいとなみを探る -, '79フィールドワー

- クテキスト. 地質コース, 1-61. 静岡教育出版社.
- (1979b), ランドサット画像による浅間火山の地質解析. 日本写真測量学会 昭和 54 年秋学期学術講演会発表論文集, 39-42.
- 中部地方西部の地震断層と活断層, —その地質と地形変形を現地で探る—, '80フィールドワークテキスト. 地質コース, 49-84, 続, 1-9, 静岡教育出版社.
- (1980), リモートセンシングによる地質および地質構造解析. 昭和 54 度 ランドサットデータ研究解析成果概要報告集, 69-70, 科学技術庁研究調整局, 宇宙開発事業団.
- (1981), リモートセンシングによる東海地域の活断層の地質解析. 昭和 55 年度ランドサットデータ研究解析成果概要報告集, 65-66, 科学技術庁研究調整局, 宇宙開発事業団.
- (1982), RBV による中部地方の地質構造解析. 昭和 56 年ランドサットデータ研究解析成果概要報告集, 65-66, 科学技術庁研究調整局, 宇宙開発事業団.
- (1983), 中国大陸乾燥地域・周辺部の地質解析. 昭和 57 年度ランドサットデータ研究解析成果概要報告集, 61-62, 宇宙開発事業団.
- (1985), 中国大陸砂漠地域とその周辺域の地質解析 (継続). 昭和 58 年度ランドサットデータ研究解析成果概要報告集, 46-47, 宇宙開発事業団.
- (1986a), 中国大陸乾燥地域とその周縁部の地質解析—ランドサットデータ MSS 画像を利用して—. ランドサットデータ研究解析成果論文集 (その 1), 171-186, 宇宙開発事業団 地球観測センター.
- (1986b), 中国大陸砂漠地域とその周辺域の環境解析—ランドサット MS 画像を利用して—. ランドサットデータ研究解析成果論文集 (その 2), 141-143, 宇宙開発事業団 地球観測センター.
- 科学技術庁資源調査会編 (1985), リモートセンシングの現状と動向. リモートセンシングデータの有効利用に関する調査, 1-173.
- LILLISAND, T. M. and KIEFER, R. W. (1979), Remote Sensing and Image Interpretation. 1-612, John Wiley & Sons.
- MARRS, R. W. (1973), Application of remote-sensing techniques to the geology of the Bonanza volcanic center, Colorado School of Mines Bonanza Remote Sensing Project Report 73-1, 281p.
- 松野久也・丸安隆和・ほか17名(1974), リモートセンシング, 1-481, キャノン株.
- MILLER, V. C. (1961), Photogeology, 1-248, McGraw-Hill.
- NASA (1972), NASA Earth Resources Technology Satellite Data Users Handbook, NASA.
- 日本リモートセンシング研究会編(1975), リモートセンシング・ノート 原理と応用, 1-146, 技報堂.
- 日本リモートセンシング研究会編(1981), 画像の処理と解析, 1-267, 共立出版.
- 二宮芳樹・佐藤 功(1990), 熱赤外反射スペクトルを用いた火成岩のSiO₂含有量の予測. 日本リモートセンシング学会 第10回学術講演会論文集, 61-62.
- 西尾文彦・長幸 平・石川貴之(1990), 衛星時系列データによる南極白瀬氷河および海水変動の研究. 日本リモートセンシング学会 第10回学術講演会論文集, 213-214.
- 大八木規夫(1990), Spot画像による地すべり地形の判読. SPOT Conference in TOKYO, 4p.
- RAY, R. G. (1960), Areal Photographs in Geologic Interpretation and Mapping. *U.S. Geological Survey, Prof. Pap.*, 373, 1-230.
- REEVES, R. G. (Chief ed.) (1975), Manual of Remote Sensing, First Edition, Vol, I, 1-867, Vol. II, 869-2144,
- ROWAN, L. C., GOETZ, A. F. H. and ASHLEY, R. P. (1977), Discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks in visible and near-infrared multispectral images. *Geophysics*, 42, 3, 522-535.
- SABINS Jr. F. F. (1978), Remote Sensing Principle and Interpretation, 1-426, W. H. Freeman.
- 坂田俊文(1988), 地球を観測する. 1-174, 日本放送協会.
- SALISBURY, J. W., WALTER, L. S., and D'

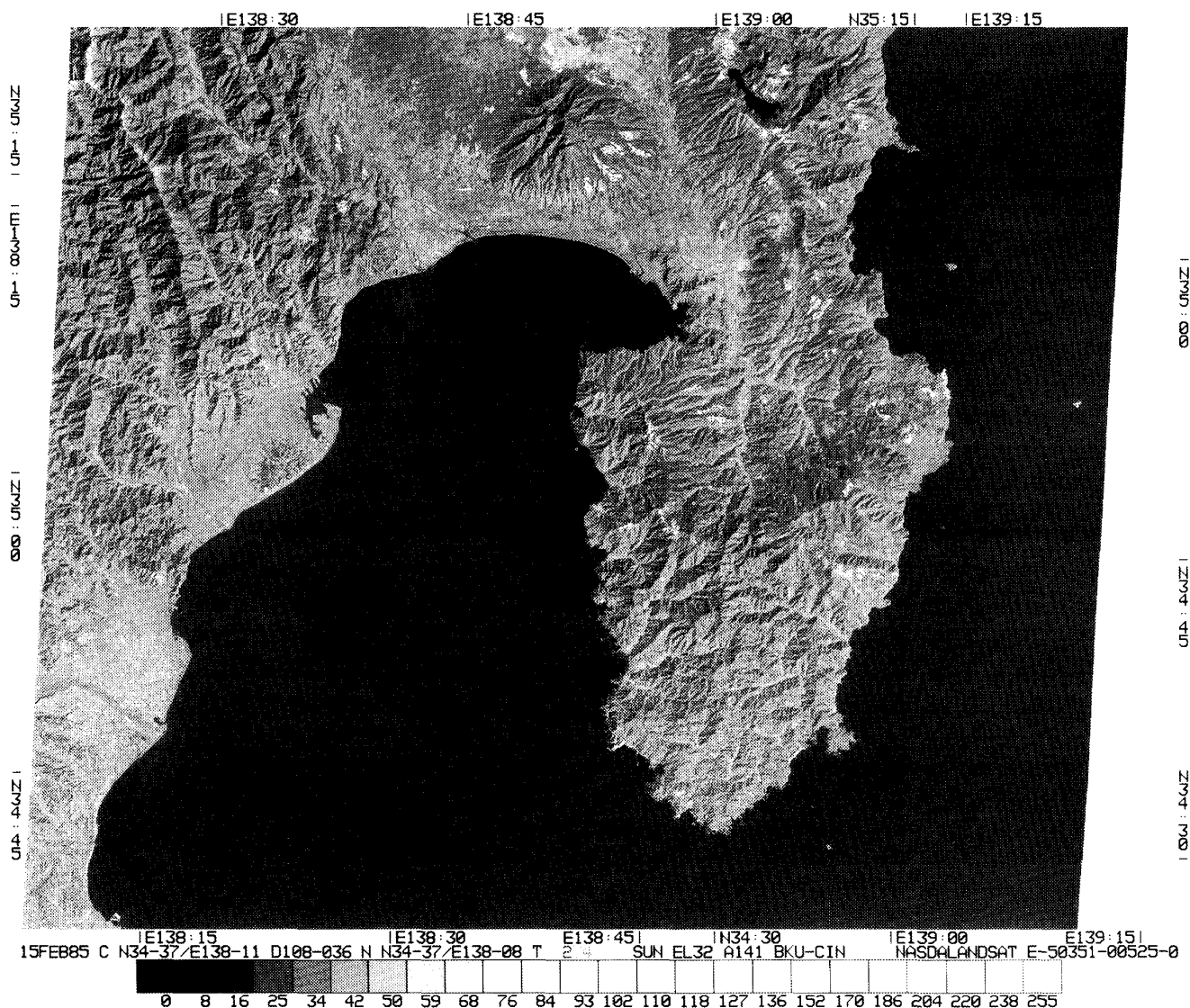
- ARIA, D.(1988), Mid-infrared (2.5 to 13 μ m) Spectra of Igneous Rocks. USGS Open File Report 88-686, 17p.
- SHORT, N. M., LOWMAN Jr. P. D. and FREDEN, S. C.(1976), Mission to Earth: Landsat Views the World, 1-459, National Aeronautics and Space Administration.
- 土屋 清(1990), リモートセンシング概論. 1-327, 朝倉書店.
- VICKER R. S. and LYON, R. J. P.(1967), Infra-red sensing from spacecraft—a geological interpretation. Am. Inst. Aeronautics and Astronautics, Thermophysics Specialist Conf. Proc. Paper no. 67-284, 10p.
- VINCENT, R. K., ROWAN, L. C., GILLESPIE, R. E. and KNAPP, C.(1975), Thermal infrared spectra and chemical analysis of twenty-six igneous rock samples. Remote Sensing of Environment, 4, 199-209.
- WILLIAMS, R. S. and WILLIAM D. CARTER,(eds.) (1976), ERTS-1 A Window on our Planet. U.S. Geol. Survey, Prof. Pap., 929, 1-362.



図版1 LANDSAT-5 TM, 1984年10月26日の画像。

PATH:108, ROW:035のサブシーン4(富士山), Band 2, 3, 4. 合成カラー画像. 画像の幅は97km(MSSフルシーンの幅の約2分の1). 画像の下方に新雪をいただく富士山の中央火口, その西側に大沢崩れと同扇状地. 東側の宝永山一帯に暗色の火山砕屑物が広く露出する. 火口の北北西に青木ヶ原熔岩流および大室山, 片蓋山, 南南東に鐘子山等, 多くの側火山(砕屑丘)が認められる. 本栖・精進・西・河口・山中の5湖. 東方に相模湖, 北東に村山貯水地(狭山・多摩両湖), 付近に立川飛行場の滑走路も認められる. 画像の中央西側には甲府盆地が広がり, 釜無川と笛吹川が合流して富士川となり富士川谷の新第三系を開析して南流する. 南東に箱根火山外輪山, 中央火口丘群, 芦ノ湖がみられる. 丹沢山地, 関東山地には多くのNNE-SSW, 共役のNNW-SEE方向の線状模様が認められる. (260CT84 C 36-03/E138-35 T NASDA LANDSAT E-50239-00520, 宇宙開発事業団地球観測センター受信画像)

Plate 1 LANDSAT-5 TM imagery of the Kanto Terrain, Mt. Fuji and Hakone caldera. (Courtesy NASDA and RESTEC)



図版2 LANDSAT-5 TM, 1985年2月15日の画像.

PATH:108, ROW:036サブシーン2(静岡), Band 2, 3, 4による合成カラー画像. 安倍川の両側に分布する瀬戸川層群, 富士川沿いの新第三系には南北性の線状模様が発達するが, 糸魚川静岡構造線は一部を除き不明瞭. 伊豆半島北部には丹那盆地および, 南北性の丹那活断層・大野断層, その他の派生する断層, 伊東市一碧湖の南には大室山, 矢筈山等の第四紀の若い火山が認められる. 駿河湾沿いに, 島田・藤枝・焼津・静岡・富士宮・富士・沼津・三島等の都市, これらを結ぶ東名高速道路, 東海道新幹線の一部が平野部で認められる. 画像南西端には牧ノ原台地の平坦面と淡赤褐色の茶畑がみられる. (15FEB85 C 34-37/E138-11 T NASDA LANDSAT E-50351-00525, 宇宙開発事業団地球観測センター受信画像)

Plate 2 LANDSAT-5 TM imagery of the Izu Peninsula.