

# 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

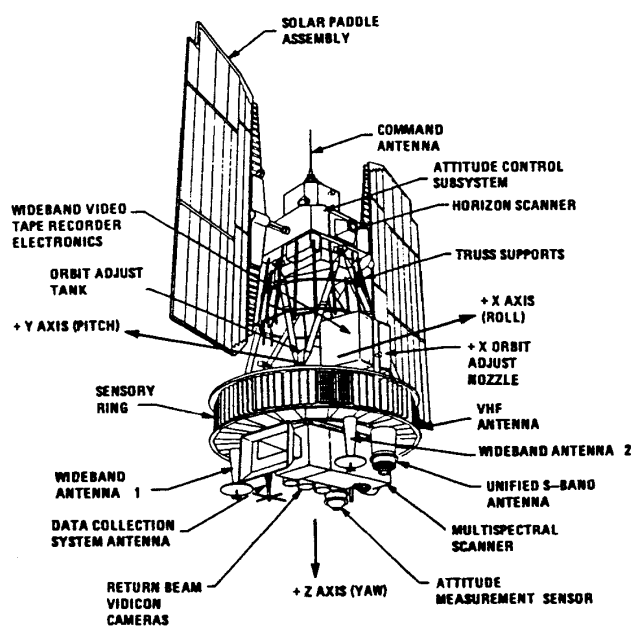


図1 LANDSAT-1~3の外観と観測装置等。  
Fig. 1. Observatory configuration of LANDSAT-1, 2 and 3. (NASA, 1972)

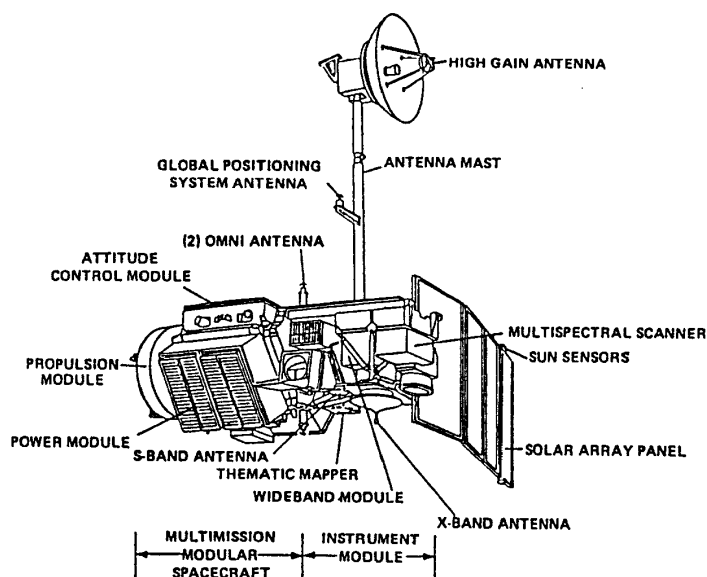


図2 LANDSAT-4, 5の外観と観測装置等。  
Fig. 2. Observatory configuration of LANDSAT-4 and 5 flight segment. (COLWEL, 1983)

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。

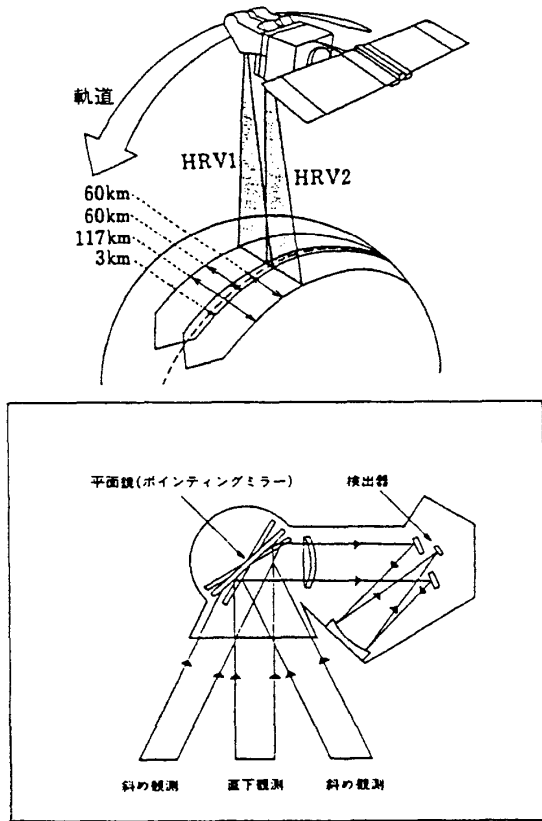


図3 SPOT-1 衛星の外観と観測視野。  
 上図：SPOTの概観と2台のHRVの走査範囲を示す。  
 下図：HRVの斜め観測の原理を示す。この方法で1つの衛星で従来の8日周期 (LANDSAT) の反復観測を4~5日周期に短縮できる。また、同一地域を別の方向から観測できるので、得た画像を立体視できる。(SPOT IMAGE社資料,1989)  
 Fig. 3. Outline of SPOT satellite and field of observation.

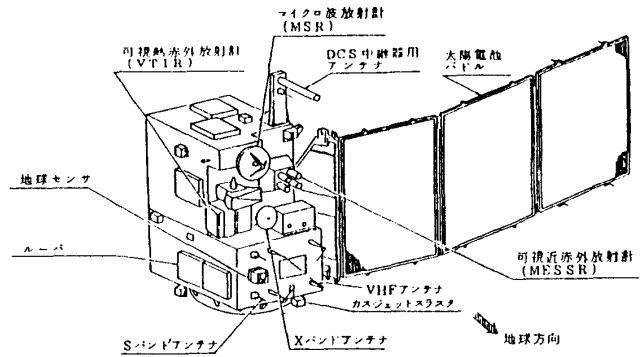


図4 MOS-1 下から見た外観。  
 衛星の進行方向は図の上方になる。(土屋, 1990)  
 Fig. 4. Observatory configuration of MOS-1, a view from below.

### 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)。

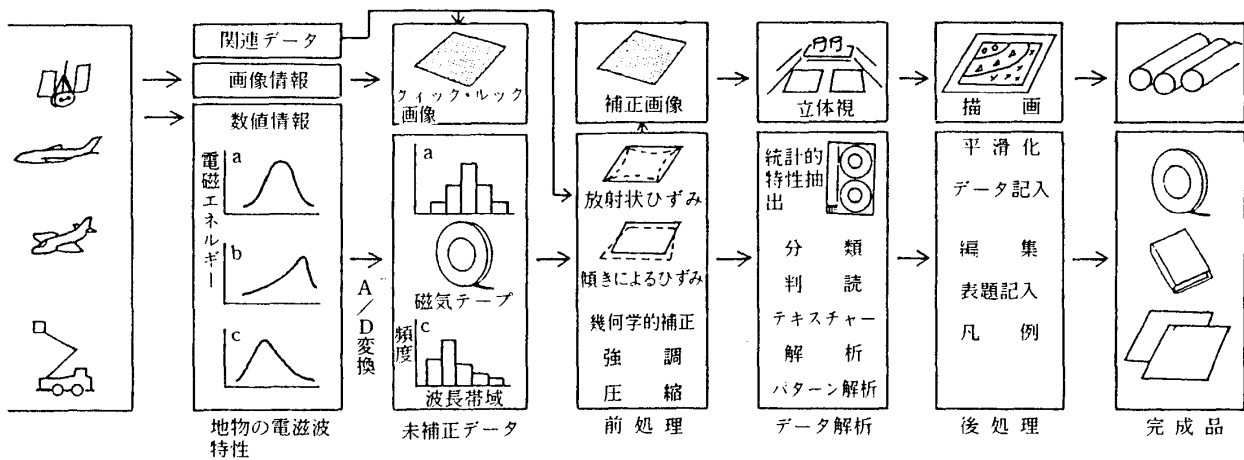


図5 リモートセンシングデータ処理の流れ。  
 Fig. 5. Data acquisition and data analysis of electromagnetic remote sensing data.

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けられるため、回折格子(プリズム)を用いたり、

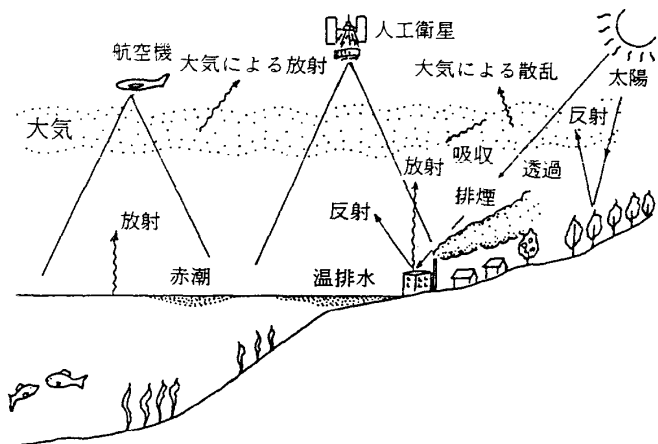


図6 太陽電磁波とリモートセンサに入射する電磁波。  
Fig. 6. Electromagnetic spectrum from the sun, and incident radiations on sensor.

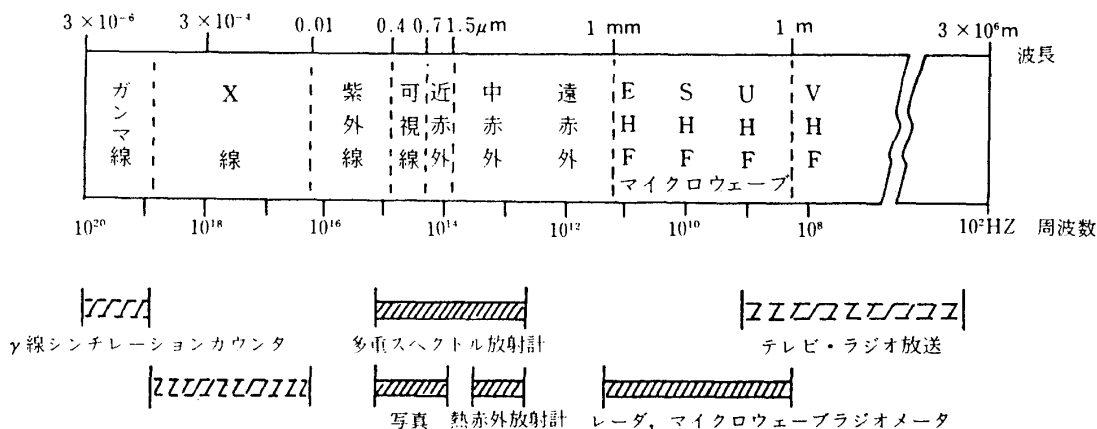


図7 電磁波スペクトルの名称、波長、周波数、計測システム。  
Fig. 7. Electromagnetic spectrum, wavelength, bands, and frequencies employed in remote sensing.

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。

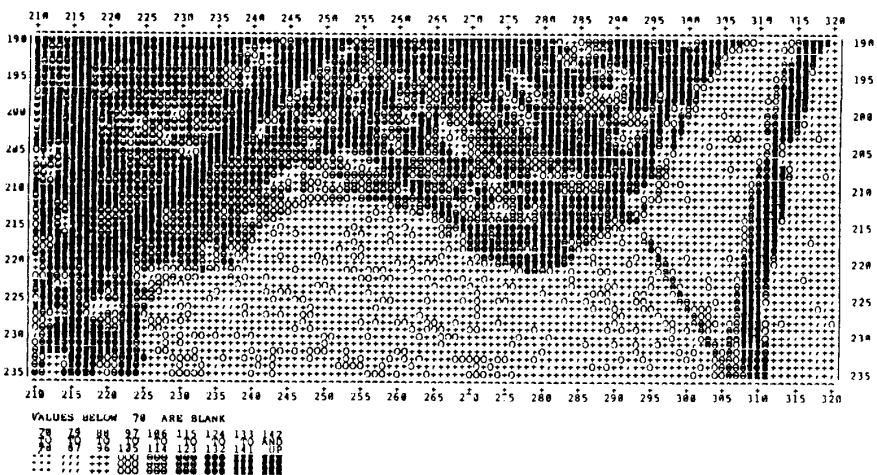
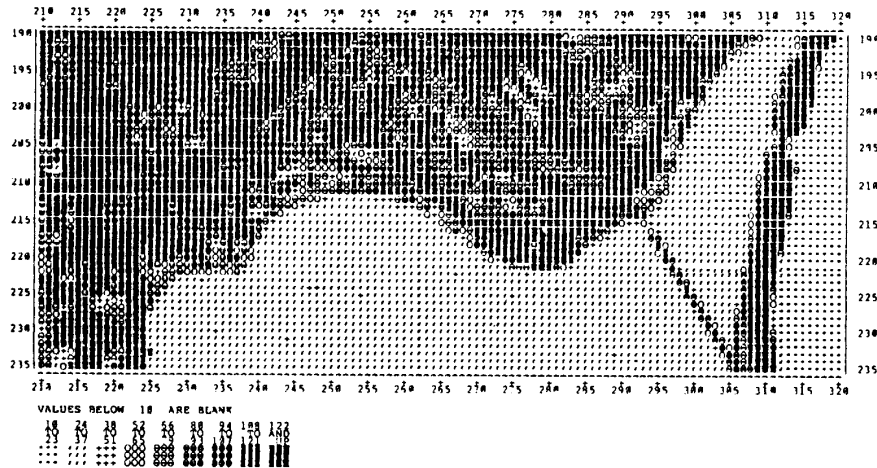


図8 カラー空中写真とその反射率の数値化。

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）。

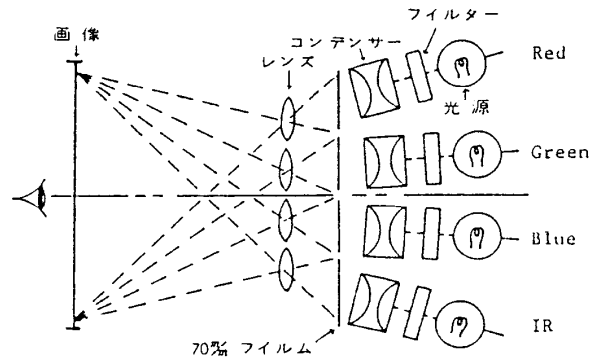


図9 Color Additive Viewerの原理。

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

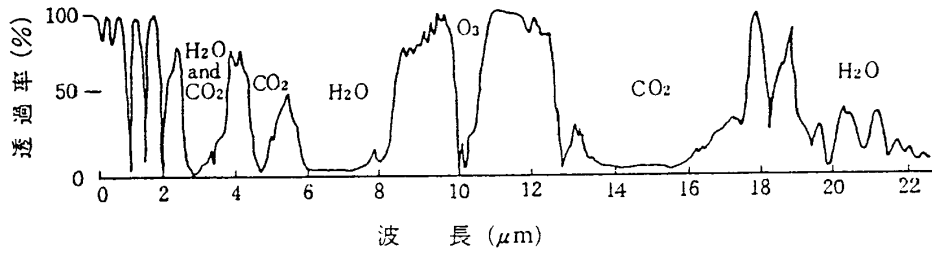


図10 大気分光透過率.

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.

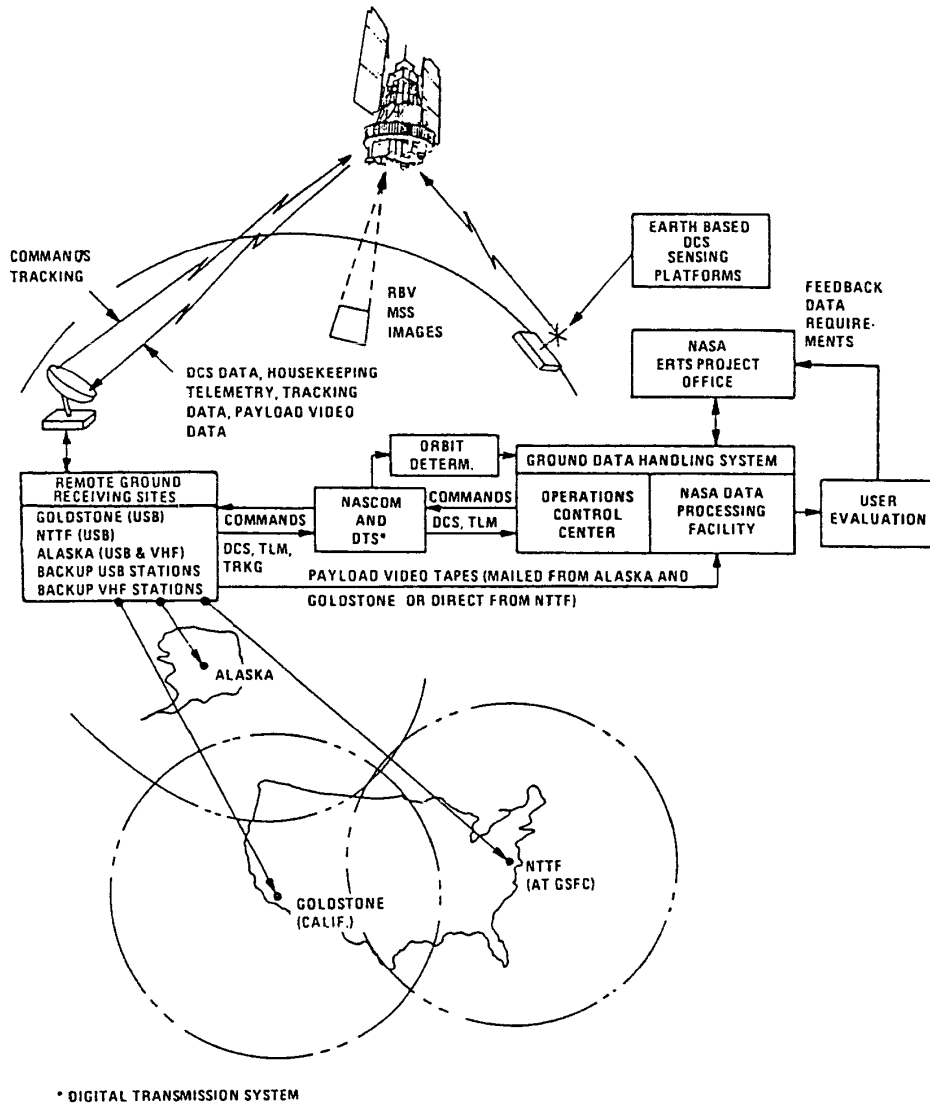


図11 LANDSAT の全システムとデータの流れ.

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  $99^\circ$  (1号;  $99.906^\circ$ , 2号;  $99.210^\circ$ , 3号;  $99.117^\circ$ ), 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  $1.43^\circ$  (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

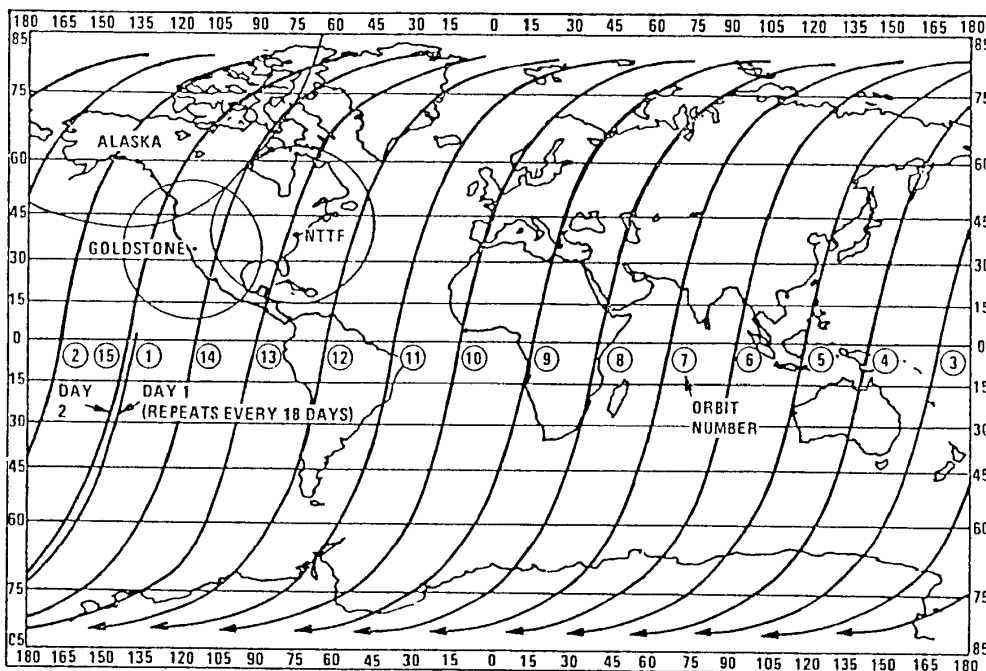


図12 LANDSAT-1の1日昼間の軌道。

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 $98.210^\circ$ 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(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。

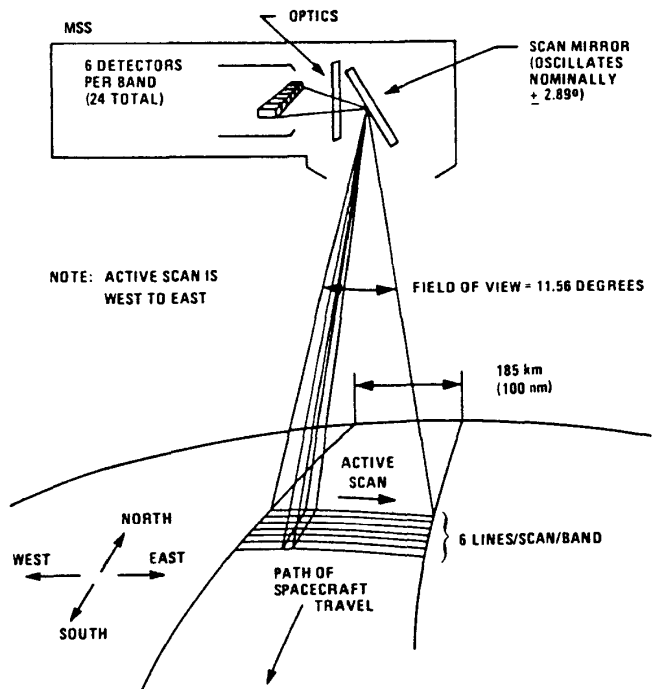


図13 LANDSAT-1, 2, 3のMSS(多重分光走査放射計)の構造と地上走査方法。

Fig. 13. MSS and ground scanning pattern. (NASA, 1972)

