

リモート・センシングによる水域調査

森 忠 次

まえがき

リモートセンシングという語は、遠隔探測（査）、遠隔調査、隔測などと訳されているが、定着していないので、ここでは英語そのままを用いることにする。遠方からの観測値が現地調査データより正確さにおいて劣るのは当然であり、リモートセンシング（以下RSと略記する）が有効であるかどうかは使い方によって決まることが多い。すなわち、現地調査とRSとの長所をたがいに生かし、現象の分析・総合、解析モデルの構成と検証などが行われて、はじめて観測の成果があったというべきであろう。

人工衛星からのRSによって、水理・水文関係の研究、水資源の管理などに有効な情報が得られたという報告は非常に多い。本文では、RSの特徴、水域調査に適用するに当たって参考となる原則的事項などの概要を記し、最後に幾つかの事例を示す。事例については筆者の不案内な事柄が多いので、原文によって内容を御検討願いたい。

1. リモートセンシングの概要

(1) 発展経過

もともと、写真測量によって地形図を作るためには、地上における測定、調査などをできる限り省略するために、位置の測定とともに写真の判読が行われてきた。写真判読と地上調査とは、いずれも長短があり、写真判読によってはじめて明らかになる事実も多く、写真判読の有効性が認識されていた。一方では油田探査、地質調査、森林調査などに関連して、写真判読技術が発達してきた。

第2次世界大戦後は、赤外カラー写真（偽色写真、IR color photograph, false color photograph）、マルチスペクトル写真などが利用できるようになり、データの種類が豊富になるとともに、判読効果も向上した。これらは可視光よりはみ出した波長帯の電磁波の記録を得るものであって、必然的に、より波長の異った資料を利用して、判読の質を向上させようという考え方につながる。こうなると、もはや写真記録の範囲を超えてしまうので、特定波長の電磁波を測定できる計測器によって、データを集めなければならない。

アメリカで1961年にアポロ計画が発足し、それから数年後には、宇宙探測に開発される技術を応用して、地球の状況をも調べようという提案がなされた。これがERTS（地球資源技術衛星、後にLANDSATと改名）計画やSKYLAB計画である。得られるデータは多量であること、原データは、写真のみならず磁気テープ記録でもあることから、デジタル量にして電子計算機によって処理する方向、画像とデジタル量との変換機器の開発、可視光以外の波長帯域の積極利用などの方向に進むことになった。

(2) 特 徴

RSが成立する根拠は、「物体の種類が異ったり、同一物体でも状態が異なれば、それに応じて異った電磁波の反射、または放射特性を呈する」という事実を基礎にしている。したがって、被測定対象物に直接触れることなく、その物体の反射または放射する電磁波の情報を収集することにより、対象物の識別・分類を行ったり、あるいはその物体の状態や環境条件の判断をしようとする技術がRSである。電磁波の

測定機器を総称してセンサ (sensor) と呼び、これを搭載する航空機や人工衛星などはプラットフォーム (platform) と総称されている。

上空において地表から到達する電磁波を測定すれば、測定計器に到達する電磁波は図-1.1 に示されるようになることがわかるだろう。すなわち、センサにとらえられる電磁波は、純粋な地表からの電磁波でなくて、大気の影響を受けて増減し、また太陽光によって大きな影響をうけるものである。したがって、前述のことを換言すれば、「同一物体でもその物体の状態や時刻、天候などの変化に応じて、電磁波の反射または放射特性は異なって記録されるものである」と表現することができる。

このことから、センサの記録は多くのパラメータを含んだものであるから、極めて多数の情報からパラメータを分離するか、いくつかのパラメータのほぼ正しい値がわかっているければ、必要とする情報を抽出することはできないことがわかるであろう。

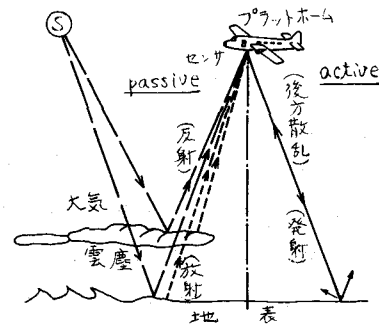


図-1.1 測定される電磁波

2. 電磁波の伝達

(1) 用語、電磁波の種類、センサ

分光特性を論ずるので、以下の量は単位波長帯域当りの値となる。

放射束 (radiant flux) $\phi = dQ/dt$ [エネルギー/時間/波長幅] $= W \cdot \mu m^{-1}$

放射照度 (irradiance) $E = d\phi/dA$ [エネルギー/時間/面積/波長幅] $= W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$

放射強度 (radiant intensity) $I = d\phi/d\Omega$ [エネルギー/時間/立体角/波長幅] $= W \cdot m^{-2} \cdot str^{-1} \cdot \mu m^{-1}$

放射輝度 (radiance) $L = \text{ある方向からみた物体の単位表面積当りの放射強度} = dI / (dA \cos \theta) = d^2\phi / (dA d\Omega \cos \theta)$ [エネルギー/時間/面積/立体角/波長幅] $= W \cdot m^{-2} \cdot str^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ (θ は面の法線と観測方向とのなす角)

電磁波の種類とセンサについては図-2.1 を参照

されたい。

(2) 放射と反射との関係

すべての物体はそれ自身の温度に応じて電磁波を放射している。黒体の放射エネルギーは有名なプランクの法則で与えられ、物体の温度が低くなるほど放射エネルギー量が減ずるとともに、最大エネルギーを示す波長は長くなる。太陽は 5700°K の黒体に近い強力なエネルギーを放射するが、地表に達するまでに減衰し、おおよそ図-2.2 のようなエネルギーが地表にふりそそいでいる。地球表面の温度を 300°K とすれば黒体放射量は図-2.2 のようになり、地物はいわゆる灰色であって放射エネルギーは幾分小さい (0.95 倍程度である。20°C において、土は 0.92~0.96、水は 0.96 程度の放射率である。) としても、波長約 10 μm の電磁波放射エネルギーをとらえれば、それほど太陽光の影響をうけることなく地表の値をとらえることができる (これが熱線による観測である)。

さらにマイクロ波領域の電磁波を利用することによって、地表面の各種の物理的なパラメータに関する

センサ	波長 (μm)									
	可視	近赤外	赤外	遠赤	マイクロ波					
単一カメラ	0.4	0.7	1.3	2.0	70	12	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵
マルチバンドカメラ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
熱線走査計	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
マルチスペクトルカメラ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
マイクロ波放射計	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
マイクロ波放射計	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
LANDSAT MSS	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SKYLAB MSS	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

図-2.1 電磁波とセンサ

情報を得ることが可能である。これは、電磁波が反射または散乱されると、強度（振幅）のみならず偏光特性も変化することを利用しようとするものである（後述）。

地表に到達した太陽からの光は、一部が吸収され残りが反射される。可視域～近赤外域のセンサによって測定されるのは太陽光が反射したものである。

3. 電磁波の反射

(1) 鏡面反射

電磁波は、反射または散乱されると電磁界の振幅が変化するのみならず、偏波の状態が変わる。一般に、入射する電磁波の波長に比べて地表が充分滑らかであれば、電磁波は鏡面反射する。

滑らかな媒質に入射する電磁波の反射率は垂直偏波、水平偏波に対してそれぞれ異なる。その大きさは電磁波の入射角、偏波の状態、物質の誘電率および導電率の関数である。したがって、電磁波の波長と物質の特性によって、反射特性は著しく異なることになる。

誘電率および導電率は、波長、地表の含水量、温度、密度などによって変化する。たとえば水の誘電率は可視域で1.77、マイクロ波域で81になる。マイクロ波では土壌の水分の増加につれて、地表の誘電率が小さくなって、しだいに導体の振舞いをし、可視域の場合と異なり反射量が大きくなる。

(2) 散 乱

地表が入射電界の波長に比べて粗面であるなら、電磁波は散乱し、あらゆる方向に反射する。散乱すると、平面偏波の電界は減極（depolarization）して、入射偏波面と同方向および直角方向の電界成分を持ち、位相もまちまちになる。これは媒質表面、および一度屈折した電磁波の媒質内部での多重反射にもとづくものと考えられていて、偏波の状態を観測できるマイクロ波リモートセンシングでは、地表面の幾何学的状態や内部の物性に関する情報を集めることができる（後述）。

4. 大気の影響

一般的なRS探査システムにおいて、大気の影響は次の2種類を考えることができる。

- ① 位置測定におよぼす影響として、大気の屈折現象により、正しい位置よりずれた方向から電磁波がセンサに入る。また大気の攪乱、光の散乱によって画像にぼけが生ずる。
- ② 電磁波の吸収・散乱により、太陽からの放射が地上に到るまで、また地上からの反射あるいは放射エネルギーがセンサに至るまでにエネルギーの量が減じ、一方では好ましくない散乱光が入射する。画像上ではコントラストが低下する。

ここでは②について述べる。

(1) 吸 収

大気を通過する電磁波は、大気分子や他の気体により、吸収を受ける。主要な大気成分である N_2 、 O_2 以外にも CO_2 、 H_2O 、 O_3 、 O 、 N 、 CO 、 CH_4 、 H 、 He 、 NO_x などが、放射伝達には重要な役割を演ずる。最

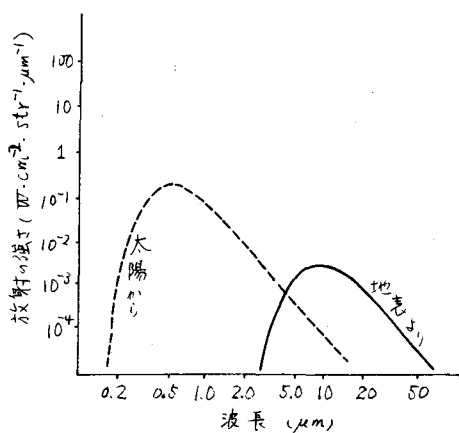


図-2.2 太陽からのエネルギーと地表からの放射エネルギー

大の吸収は、O、Hの原子、分子、O₃の電子の遷移によって紫外域でおこる。また赤外域においても、H₂O、CO₂、O₃の分子の振動、回転で多くの吸収帯が生ずる。赤外域におけるRSは、この吸収帯を避けて、いわゆる大気の窓で観測をおこなっている（図-4.1¹⁾）。

(2) 散 乱

可視域（0.4 μm～0.7 μm）では気体による吸収はほとんどない。しかしこの波長帯域では、大気中の分子や諸粒子による多重散乱がおこり、地上からの反射光は散乱減衰し、逆に他からの散乱光がセンサに入る。散乱は、散乱粒子の大きさと、物理的原因の違いから、レイリー散乱、ミー散乱、無差別散乱の3つに大別されている。

放射束φ₀の電磁波が均質な媒質を通過した場合、通過距離xにおける放射束φは、一般に

$$\phi = \phi_0 e^{-kx}$$

で与えられる。このkを消散（減衰）係数といって、吸収、散乱の程度を示すパラメータである。

レイリー散乱：大気分子の双極子放射により起こり、電磁波の波長の10⁻¹以下の粒子による散乱。正確な計算が可能であり、快晴時の空の青く見えるのは、この散乱による散乱光のためである。消散係数は、電磁波の波長λに対してλ⁻⁴に比例した値である。

ミー散乱：粒子の作る多重極による散乱。ヘイズ等の波長に等しい程度の大きさの粒子（エアロゾル）によるもので、大気組成に大きく依存し、計算は複雑。λ⁻¹～λ⁻²に比例した消散係数を持つ。

無差別散乱：波長よりかなり大きい粒子によるもので、20 μm以下の波長に対しては、どの波長についても等しく散乱させる。したがって悪天候時にはマイクロ波によるRSが有効となる（表-4.1、図-4.2²⁾参照）。

表-4.1 大気の散乱に関する諸量

散 乱 の 種 類	波長依存性	粒子直径	粒子の種類
Rayleigh	λ ⁻⁴	≪λ	空気分子
Mie	λ ⁻⁴ ～λ ⁰	0.1～10λ	煙、ガス、ヘイズ
Nonselective	λ ⁰	>10λ	塵、霧、雲

(3) 放射伝達

センサは通常放射輝度が測定されるものであって、センサに入る電磁波のエネルギーには放射によるものに途中の大気からの散乱が加えられる。このような余分なエネルギーを放射輝度として測ったときの値をパスラジアンズ（path radiance, 光路輝度）と呼んでいる。したがって、地表で物体が反射、放射した放射輝度L₀の電磁波がセンサに入るときの輝度をLとし、大気の透過率をT、パスラジアンズをL_pとすると、

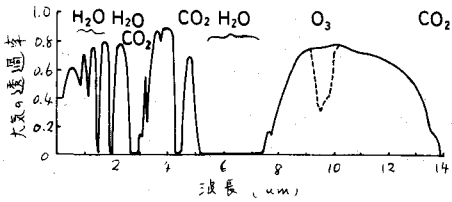


図-4.1 大気の透過率（高度2,000ヤードにおける値、主な吸収分子も示す）

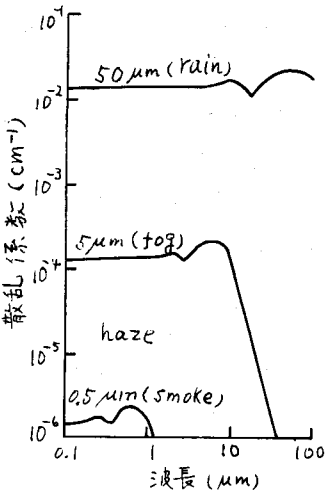


図-4.2 無差別散乱の散乱係数

$$L = L_0 \cdot T + L_p \quad (4-1)$$

というように書ける。 T および L_p を知るには、吸収・散乱・反射に関する各種のパラメータを知ったうえで、放射伝達の微分方程式を解かねばならない。したがって、 L から L_0 を推定するのはかなり困難であるが、モデルを組立てて計算が行われている³⁾。LANDSATに対しては、 L_p の値は表-4.2に示す程度である。

表-4.2 LANDSAT MSSにおける
パスラジアンズの太陽直達
光に対する比

波長帯番号	1	2	3	4
%	7.1	4.0	3.2	2.6

5. センサとプラットフォーム

(1) センサの分類

・能動的方式と受動的方式：前者は、被測定物体に人為的に電磁波を送り、それが反射または散乱して戻って来たものを記録する。これに対して後者は、人為的に電磁波を送ることなく、それ自体の放射あるいは太陽光の反射などによって発する電磁波の記録を得るものである。

・走査方式と非走査方式

・画像方式と非画像方式

・対象物面計測方式と映像面計測方式：前者は対象物を直接測定の対象としているもので、後述の写真やMSSなどがある。後者はレンズを通して得た映像面を測定するものであって、テレビはこれに属する。

(2) 写真機とフィルム

各種写真フィルムの分光感度を図-5.1に示す。図における点線はフィルタでカットする部分である。赤外カラー写真では、近赤外部が赤色に発色し、青色部分はほとんど感光しないので、肉眼で得られた色とは異った表現となる。

カラー写真から個別の波長帯域の情報を得ようとするれば、機器を用いて色分解をしなければならない。これに対して、マルチスペクトル写真機(図-5.2)は図-5.1(c)、(d)における4種の波長帯域の情報を個別にフィルム記録としたものであって、必要に応じて合成画像を作ればよい。

(3) マルチスペクトルスキャナ(MSS)

MSSは対象物走査方式の代表的なものである。図-5.3において、航空機の下から入ってきた光は、プリズムによって分光され、波長帯域ごとに放射計で測定され、磁気テープに記録される。計器の瞬間視野角 θ は非常に小さくて、地上の微小面積ごとの記録が得られるようになっている。航空機を前進させながら回転鏡を廻して進行方向に直角な線上を高速に走査すると、図-5.3

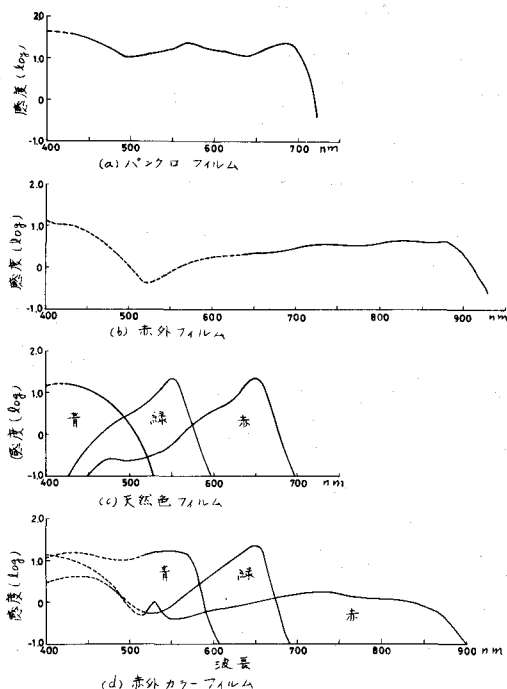
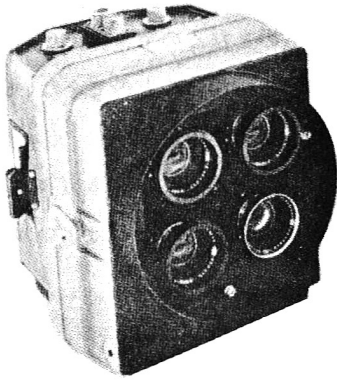
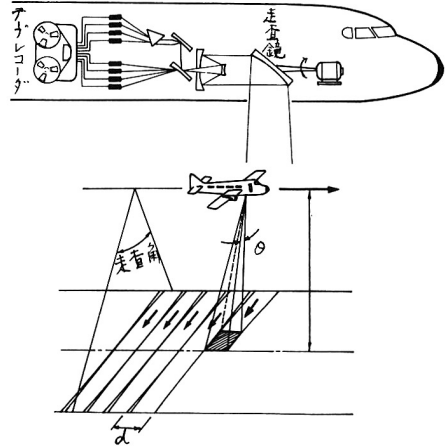


図-5.1 各種写真フィルムの分光感度の例



図ー5.2 マルティスペクトルカメラ



図ー5.3 MSSの記録方式

のように、帯状の長大な地域の波長帯別電磁波記録が得られる。

瞬間視野角は、航空機搭載用で $2.5 \text{ m} \cdot \text{rad}$ 程度、人工衛星用では $0.1 \sim 0.2 \text{ m} \cdot \text{rad}$ くらいである。この角に対応する地上面積（図ー5.3における斜線部）が最小計測面積すなわち地上解像力であり、これを画素（pixel）と呼んでいる。この値は撮影計画に重要であり、表ー5.1 に概要を記す。

(4) 固体スキャナ（CCD）

シリコンなどの固体感光素子の微小片を多数並べて、これに検知されるエネルギーを記録するもの。

(5) 熱線走査計（thermal scanner）

常温（約 300 K ）の物体が最大放射を呈する波長が $10 \mu\text{m}$ 付近にあることから、 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ （またはその一部）のスペクトル帯域に属する遠赤外線（熱線）部分のみを検知する機器である。MSS と同様な走査方式を採用しており、温度分解能は $0.2 \sim 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ に達する。

熱線は大気中で幾分散乱・吸収されてセンサに達するので、測定値が直ちに地表温度とは言い難いが、地上調査データおよび大気の状態のデータを用いて温度の定量化を行うことが比較的容易である。この計測は夜間に行える特徴がある。

(6) マイクロ波利用センサ

この波長帯域は雲を透過することと、他の波長帯域で得られない情報をとらえられるので、今後の利用が期待される。

(a) マイクロ波放射計：地表からのマイクロ波を受動的にとらえる。解像力は悪いが、水域、大気の調査（温度、塩分、水、大気組成など）に用いられる。

(b) マイクロ波散乱計：能動的方式のもので、送信電力と地表から散乱されて戻った受信電力の大きさから、気象、海洋関係の情報（風、波、雲、起伏など）を得るのに用いられる。

(c) マイクロ波高度計：能動的方式であって、マイクロ波パルスが戻って来るまでの時間から、地表面

表ー5.1 撮影高度と MSS の画素寸法

プラットフォーム	航空機		LANDSAT	SKYLAB
高度 (km)	1	3	900	435
瞬間視野 ($\text{m} \cdot \text{rad}$)	2.5	2.5	0.086	0.182
画素辺長 (m)	2.5	7.5	76	78

の高低を測る。波、海流、ジオイドなどの観測に用いられる。

(d) レーダ：Side-looking airborne Rader (SLAR)や合成開口レーダ(SAR)と称するものがある。前者は航空機から陸域の観測に、後者は水域の観測に主として用いられる。

(e) レーザレーダ：主として気象および大気関係の調査に用いられる。

(7) プラットホーム

航空機については省略し、水域調査に用いられることの多い人工衛星と搭載センサの概要を表-5.2に示す。

わが国のRS用人工衛星としては1978年7月に打上げられた静止気象衛星「ひまわり」が親しいが、今後には海洋観測衛星MOS (Marine Observation Satellite, 1984)や高解像力の陸域観測衛星LOS (Land Observation Satellite, 1987)などの打上げ計画が進められている。これらには赤外線放射計、マイクロ波放射計などが搭載される予定である。

表-5.2 水域観測に利用し易い人工衛星とセンサ

プラットホーム	セ ン サ			主要用途
	種 類	波 長, 周波数	解 像 力	
LANDSAT-1 } " -3	MSS	0.5 ~ 0.6 μm 0.6 ~ 0.7 0.7 ~ 0.8 0.8 ~ 1.1	80 m	地表面の各種 観測
		10.4 ~ 12.6 (3号のみ)	240 m	温度観測
NIMBUS-4 } " -6 SEASAT-A	可視・赤外 放射計	0.49 ~ 0.94 μm	3 km	沿岸形状
		10.5 ~ 12.5	5 km	雲 海面温度
NIMBUS-5 } " -7 SEASAT-A	マイクロ波 放射計	6.4 GHz	87 × 144 km	海面風速
		10.7	58 × 89	海面温度
		18.0	31 × 53	水蒸気
		21.0	27 × 42	塩分, 海流
		37.0	16 × 25	
GEOS-C SEASAT-A	マイクロ波 高度計	13.5 GHz	1.6 km	波高, 波 ジオイド
SEASAT-A	マイクロ波 散乱計	14.6 GHz	50 km	海面風速 風向
SEASAT-A	合成開口 レーダ	1.34 GHz	25 m	波長, 波向 海面一般

6. データ処理

画像として得られる記録は、目視によって判断できること、位置測定が容易なこと、経済的に処理が可能なことなどに最大の長所を持つが、電磁波強度の測定、数値処理、保存などに難点がある。磁気テープにデジタル記録されているものは、画像記録と逆の特徴を有することになる。それぞれ長短があるので、A-D、D-Aの変換の行える各種の機器が利用される。

ここではMSS記録を例にとりて、磁気テープ記録の処理過程の概要を示そう^{A7)}

(1) 利用者に渡るまでの処理

一般には電子計算機用磁気テープ(CCT)または画像が渡されるが、これまでは幾種類かの処理と補正が行われている。それらの要点はつぎのようである。

(a) 検査、変換：画像表示してみ、記録が正常か、雲がないかなどを調べる。デジタルテープに変換する。

(b) 電磁的ひずみ補正：雑音除去、較正信号による補正、太陽高度や走査角による補正など。

(c) 幾何学的ひずみ補正：プラットホームのゆれや走査角の大きさによる位置ずれの補正、地球曲率による補正など。

CCTは、各チャンネルごとに波長帯域別の放射輝度が各画素ごとに7ビットまたは8ビットで記録されており、各画素は走査線番号と各線中の画素番号による2次元配列となっている。これらの画素番号が地上座標と関連づけられており、しかも各画素の放射輝度が正しい値であることが理想である。なるべくこの状態に近づくようしたものを補正された電子計算機用磁気テープ(CCCT)と呼んでいる。利用者は、使用目的に応じて重点項目を選んで補正しなければならないことが多い。

(2) 利用者の行う処理

磁気テープであれば、内容をなんらかの方法で画像とすれば、目的に適するものかどうかの見当がつく。利用可能な記録であれば、位置誤差の大きさと放射輝度の内容分析を行って解析方針を立てることになる。

位置の補正を十分に行えば、人工衛星の記録では誤差を±1画素程度にすることができるとされている。航空機の記録では、高低差の大きい地形のときには、高低差が既知でないと十分な補正ができない。

放射輝度の大きさは、地上で同時観測を行った値によって補正するのがよい。放射輝度に関する内容分析は、各種の処理機器および電子計算機のパッケージプログラムを用いて実行される。それに続く補正・加工についても同様である。解析は統計的な推定・分類手法によることが多く、そのためには記録内容の統計的特性を詳しく調べておく必要がある^{4)A9)}

7 波長帯域ごとの特性

物体から反射、放射される光は、その物体の物理的特性を表わすパラメータと密接な関係を有するから、目的に応じて適切な波長帯域の記録を利用すべきである。そのための指針となる事項を示しておく。

(1) 可視光域

水から射出される光は、図-7.1のように水面反射、水中からの散乱、水底からの反射の3種が混合されており、これらの強弱は、太陽高度と方向、センサの受光角度、水の質、光の波長によって変化する。

清浄な水や海水は、 $0.40 \sim 0.55 \mu\text{m}$ の波長の光をかなりよく通すので、この波長帯域の光は水中観測によい。水が汚れると当然光の透過度は悪くなり、特に短波長において著しい(図-7.2)。したがって、

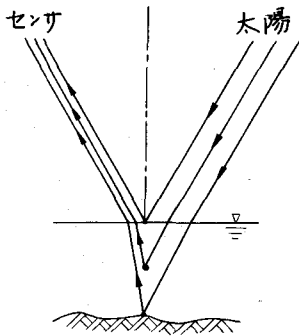


図-7.1 水から射出される光

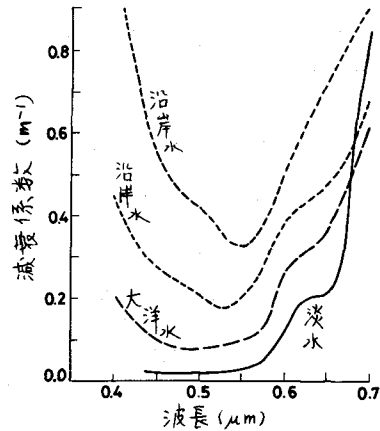


図-7.2 水の分光減衰特性

少し濁った水中の観測には $0.52 \sim 0.56 \mu\text{m}$ くらいの光がよく用いられる。一方では、約 $0.65 \mu\text{m}$ 以上の波長のものは、清浄水からはほとんど反射せず、水以外のものは比較的反射率が高い。したがって、水面における浮遊物調査に適する。

太陽からの入射光の強さに対する反射光の比（全波長にわたる平均）をアルベド（albedo）というが、この値の概要は表-7.1のとおりである。清浄水の反射率は $0.4 \sim 0.6 \mu\text{m}$ の波長帯において 0.1 に近く、 $0.6 \sim 0.7 \mu\text{m}$ においては 0.05 以下である。

表-7.1 地表面のアルベド

種 類	アルベド
水	$0.03 \sim 0.10$
雲	$0.50 \sim 0.75$
雪	$0.65 \sim 0.90$
草地、裸地	$0.05 \sim 0.25$
森 林	$0.04 \sim 0.08$

植物および植物性プランクトンは $0.55 \sim 0.56 \mu\text{m}$ の光の反射が強い。一方では植物性プランクトンは 0.44 および $0.67 \mu\text{m}$ 付近の波長の吸収が強いという測定値がある。わが国の霞ヶ浦における例では、MSSの波長 $0.64 \sim 0.72 \mu\text{m}$ の記録と水中のクロロフィルaの量との相関が強いことを見出し、湖面一部分についてクロロフィル分布図を作っている⁵⁾

可視光に対して水面は鏡面に近い反射をするので、太陽位置と観測方向との関係によって、図-7.3のように、写真に明るく写ったり、暗く写ったりすることに注意を要する。

水中に土砂その他の物質が浮遊すれば当然射出光の状態が変わる。たとえば、カオリンまたはマサ土の微粒子を水中に懸濁させ、図-7.4の状態分光反射率を測定した場合についての結果を示そう。^{6~7)}

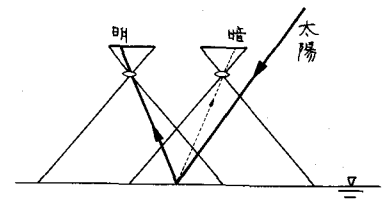


図-7.3 太陽位置と観測方向の関係

濁度と浮遊物量(SS)とは直線関係が成立したので、濁度を変数として観測例を示すと、図-7.5のようになる。①反射率と濁度の関係は線形に近いが、濁度変化の反射率に及ぼす影響は、太陽高度の影響よりも小さい。②同一濁度のときの反射率は、マサ土ではカオリンの $1/2 \sim 1/3$ になる（浮遊物の反射特性に影響される）。③以上より、地上調査データの助けがなければ、濁度またはSSの量的決定は困難である。

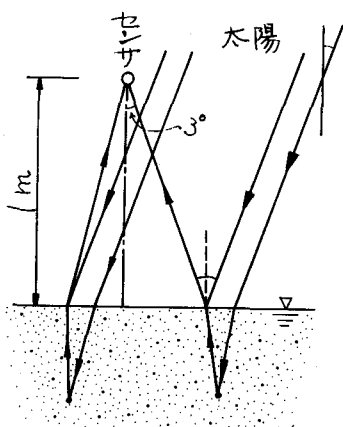


図-7.4 濁水の観測

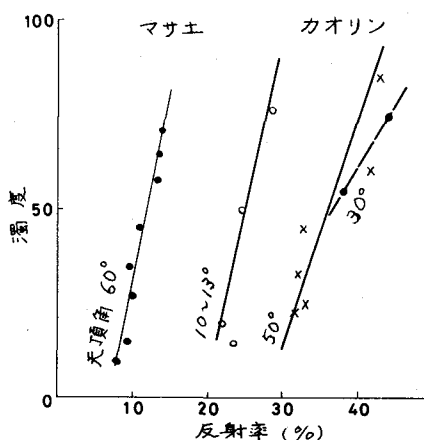


図-7.5 水の濁度と反射率との関係

類似の測定が、ミシシッピ川西方の6つの湖の水面上20～50cmにおいて行われている。その結果によれば、表面輝度および反射率とSSとの関係は、波長 $0.45 \sim 0.9 \mu\text{m}$ において直線回帰式を得ており、この中で $0.7 \sim 0.8 \mu\text{m}$ のものが最もよい。これらの回帰式は太陽高度に応じて変える必要があり、後方散乱による影響を補正すれば、相関係数は0.9くらいになり、SSの推定が可能であるとしている⁸⁾。

(2) 近赤外線

近赤外線は水に吸収されて反射しない。したがって、船、浮遊物、油膜、表面汚染、赤潮などの調査に、波長 $0.7 \sim 1.1 \mu\text{m}$ またはその一部分がよく用いられる。とくに赤外カラー写真を用いると、これらの存在が色の差として現われるので判断が容易となる。土壌中の水分、植物の活力調査に利用されるのもこの波長帯域である（葉緑素は近赤外線を強く反射させる）。

(3) 遠赤外線（熱線）

$8 \sim 14 \mu\text{m}$ またはこの一部の波長帯域が利用される。この波長帯域が常温における黒体放射の最高エネルギー部分に相当し、かつ大気を透過し易い。

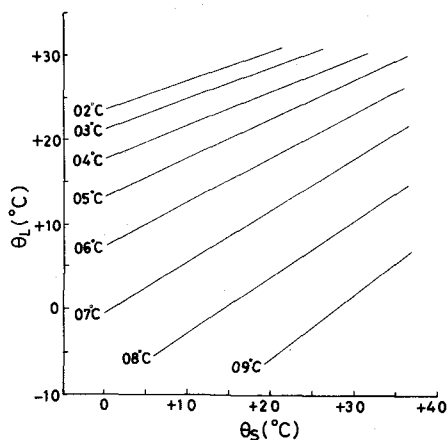
センサで観測される放射輝度は式(4-1)で与えられるが、この式中の L_0 は次式のように構成されていると考えなければならない。

$$L_0 = \epsilon L_K + rN$$

ここに、 L_K ：表面温度 K^0 における黒体の放射輝度、 N ：大気から表面に入射する放射照度、 ϵ ：放射率（清浄水で面に直角な方向では0.986）、 r ：反射率（同じ状態では0.014）。

しかしながら、 N および r が小さく、かつ式(4-1)における L_p が小さく、 T が1に近いので、比較的正しい温度を得ることができる（ 1°C 以下の補正でよいことが多い）。

たとえば、波長 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ を用いたとき、滑らかな水面における観測値に対する補正は図-7.6のとおりであり⁹⁾、センサの高度による影響も各種の計算ならびに観測が行われている。これらによれば、表面温度と気温との差が大きいときに補正量が増加する。また大気の湿度変動の影響はそれほど大きくないこともわかっている¹⁰⁾。水以外の物質の反射率はやや大きいから（表-7.2）、これらの温度を求めようとすると補正量が大きくなる。



図一 7.6 快晴時における温度の補正量
(θ_S :水温, θ_L :気温)

表一 7.2 波長帯 8 ~
14 μm に対
する反射率

種 類	反 射 率
岩 石	0.04 ~ 0.11
コンクリート	0.03 ~ 0.06
アスファルト	0.04 ~ 0.05
芝 生	0.03

水の観測であれば誤差 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 、低空からの観測値を厳密に補正すれば誤差 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ に収まるといわれている¹¹⁾。水面上の観測値を用いて補正するように計画するのもよい。RS で得られる温度は、表面の真の薄層部分のものであること、画素寸法が比較的大きいことなどを知っておく必要がある。

(4) マイクロ波

これはレーダ技術が基礎になっていて、既述のように能動的と受動的とに分けられる。解像力は悪いが、大気、天候、太陽などの影響をあまりうけないので、全天候型で昼夜の探測ができる。多くの応用可能性があり、目的に応じたセンサが開発されているので、これらを利用するときの測定量の性質の概要を記しておく。

(a) 能動方式：入射したマイクロ波を物体が反射する能力は、単位面積当りの平均断面積（散乱係数ともいう）で表わす。これは、物体と同位置に置いた球が、物体によって反射されるのと同じ量のエネルギーを反射するときの球の断面積に相当し、 $\sigma_{\alpha\beta}$ で表わす（反射によって偏波するので、添字 α, β は水平または垂直方向の偏波を示す）。この値は、誘電率、導電率、粗面の状態、入射角度などに依存するから、能動的センサを用いて後方散乱したマイクロ波のエネルギーと偏波状態を観測し、上記はじめの 3 者の量を測定することが行われている。添字 α, β をそれぞれ H, V で表わし、送信、受信の順に記すと、HH, HV, VH, VV の 4 通りのデータが得られる可能性がある。

風によって水面に特有の波が発生し、そのため後方散乱に大きい影響を与える。したがって、 $\sigma_{\alpha\beta}$ の測定値によって表面の風速とその方向が求められる¹²⁾。

陸地に対しては、表面が不規則形状で等方等質でないから、物理的なパラメータの計測には適しない。ただし、マイクロ波はある程度地中に浸透し、含水量によって土の誘電率、導電率が大きく変ずるので、土壌含水率の推定に使用することが試みられている。

雪、氷に対してもマイクロ波が浸透するので、これらの含水量や組織の変化に伴う散乱特性の変化との関係から、雪、氷等の調査に利用することも可能である（古いものが強い後方散乱を呈する）。

陸上の特性をとらえるためには画像レーダも用いられる。

(b) 受動方式：地表物体から放射される微細なマイクロ波は、温度その他の特性によって放射率が変わるのみならず、マイクロ波の放射方向、偏波状態、周波数、強度なども物理的な特性を表わすパラメータの

関数となる。ただし、放射計では、到達したエネルギーの強さを測っている。また観測値は物体の温度に換算して表示することが多い。

海面から放射するマイクロ波を測定すると、海面風速と塩分濃度が求められる。たとえば、風速が大きくなると海面が粗になると、風速 20 m/sec くらいまでは水平偏波のエネルギーは増し、垂直偏波のエネルギーは減ずる。風速がより大きくなれば、水面が泡立つので、マイクロ波による観測はより有効となる。塩分濃度の差による放射マイクロ波の変動程度は風による影響よりも小さいので、塩分濃度の観測は静穏な時に限るとされている。¹²⁾

なお、マイクロ波によって海面上の油の量を定量的にとらえるための研究も行われている。

8. 適 用 例

統計的な分類あるいは決定手法を駆使したものを除いて、水域の観測に RS の利用された最近の例を幾つか示して参考に供する。

(1) 特殊な浮子による表面流速の測定

一般には、空中写真測量によって、水面にできる模様、浮遊物、浮子などの追跡によって表面流速が観測されるが、特殊な浮子を利用した例を示そう。¹³⁾

空中から落とすと、水中で幾つかの観測用浮子が飛び出す装置を作製した。図-8.1 のように、目標点上でヘリコプターからこの装置を落とすと、水面に達したとき直ちに浮子 (SM) が飛び出し、これがヘリコプター誘導の目印となる。装置の残部が水底に達すると直ちに浮子 (F1) を浮上させ、さらに一定時間後に第3の浮子 (F2) を浮上させるような機構となっている。F2 が水面に現われた後にヘリコプターから全浮子の写真を撮影し、F1 と F2 の位置の差から表面流速を求めればよい。沿岸の 36 点で実施し、0 ~ 1 m/sec 程度の流速・流向を決定している。

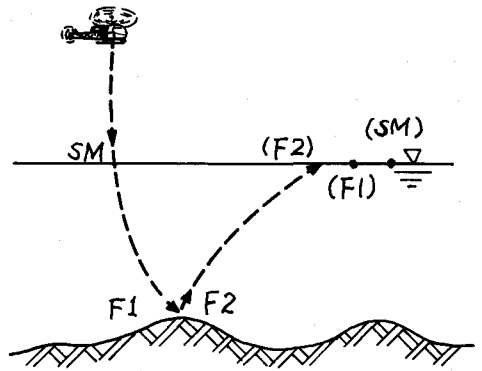


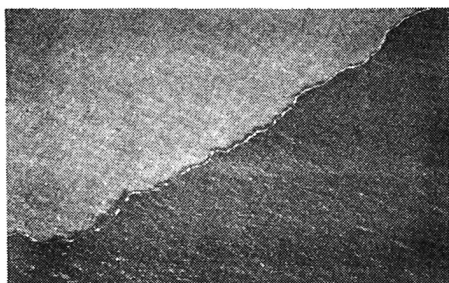
図-8.1 特殊な浮子による表面流速の測定

(2) 湾内のフロントの観測

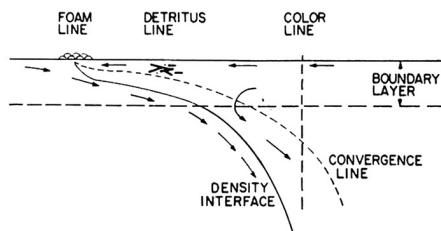
Delaware 湾 (幅 5 km × 奥行 10 km くらい) における水の流動は、潮汐、洪水などとの関連において、すでに多くの観測と解析が行われ、フロントの性質も論じられていた。たとえば、泡立ち、浮遊物の集まり、色の境目などが図-8.2 のように現われ、流れは図-8.3 のように考えられている場所がある。鉛直断面の塩分濃度・流速の観測、油膜の流動・拡散の観測と解析などもフロントの存在を念頭において実施されていた。

最近では LANDSAT の MSS 記録を、ヘリコプターおよび船による観測値と結びつけて SS の分布図を作成している。また、36 個の MSS 画像から、潮汐周期の 1/12 ごとの時刻におけるフロントを見出し、これを潮流図に重ねて図示した。ただし、泡のできる線、温度差・塩分差の線は現在のところ見出し難く、主として濁度差の境界であるとしている。¹⁴⁾

これらのフロントの検討より、新しい水理モデルの開発の必要性が一部において見出されており、フロントの存在を考慮した表面汚染物の流動追跡のための解析法を研究中である。



図一 8.2 湾内フロントの空中写真



図一 8.3 鉛直断面における流れの模式図

わが国では富山湾における観測と解析の例がある。^{15～16)}

(3) 熱線による水温測定

水域のみならず市街地，畑，森林，火山など非常に多くの実例があるので省略する。センサによって得られた値を補正するための基礎的事項は，かなり以前から研究されている。¹⁷⁾

(4) 下水汚泥の拡散観測

ニューヨーク下湾に 2886 m³ の下水汚泥をバージ船から投棄し，3 km の高さから航空機を用いて MSS 記録を取り，同時に天然色および赤外カラー写真を撮影して，判読と位置決定の助けとした。MSS 記録に対して太陽高度の変化に対する水面輝度変化の補正を行い，波長 0.7～0.74 μm の測定値と SS との間に図一 8.4 の回帰関係を求めている。この結果を用いて SS の拡散状況を図示している。¹⁸⁾

(5) マイクロ波による観測

マイクロ波を利用した観測のための基礎データが急速に集積されつつあり，この分野の発展はめざましい。わが国でも人工衛星 SEASAT-A の観測値を用いて，海洋風の測定を行う試みが始められている。¹⁹⁾ また塩分濃度の測定に関しては，十分な補正をすれば，濃度 5 ppt 以上のときに標準偏差 ± 1 ppt くらいまで測れると推定されている。²⁰⁾

(6) その他

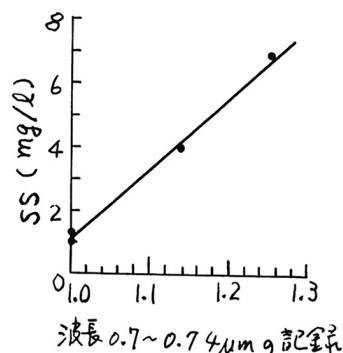
RS 適用の提案や計画，新しい観測手段などについて少し触れておく。

USA では，研究の必要性が認められており，かつ RS を適用すれば成果があげられるものとして，つぎの 4 つをあげている。²¹⁾ ①河口および大陸棚における物質の移動と沈澱。②海洋汚染物の流動追跡。③ marine phytoplankton dynamics ④ ocean front.

水資源調査のためには，土の表面下 0～5 cm の層の含水量の測定，積雪中の水分量の推定などに必要なデータが集積されたので，実用の段階に達したと考えられている。²²⁾

温度の変動，換言すれば thermal inertia が物質ごとに異なることを利用して，昼夜にわたる表面温度の変動状況から，岩質，土壌含水量などの判断資料にすることも行われている。

波長 0.48～0.55 μm のレーザパルスを送り，後方散乱波の諸量を測定すると，これらが水中音



図一 8.4 MSS 記録と SS との関係

速、濁度、水温、塩分濃度の関数となる事実から、後者の4種の量を分離しようとする試みが提案されている。²³⁾

蛍光レーザのパルスを用いて、航空機から油、パルプなどによる水面汚染の観測を行うことも実験された。この方式によれば、雑音が小さく、画素も小さくて良い結果が得られるとされている。²⁴⁾

一般参考書

- A1) 和達清夫, 他5名: リモートセンシング, 朝倉 (1976).
- A2) Manual of Remote Sensing, Am. Soc. of Photogrammetry (1975).
- A3) Jensen, N.: Optical and Photographic Reconnaissance Systems, John Wiley & Sons (1968).
- A4) Committee on Remote Sensing for Agricultural Purposes: Remote Sensing with Special Reference to Agriculture and Forestry, National Academie of Sciences, USA (1970).
- A5) Barrett, E. C. and L. F. Curtis: Introduction to Environmental Remote Sensing, Chapman and Hall (1976).
- A6) Gjessing, D. T.: Remote Surveillance by Electromagnetic Waves for Air-Water-Land, Ann Arbor Science Publ. (1978).
- A7) リモートセンシングデータ解析研究会 (訳): リモートセンシングデータ利用ハンドブック, 日本技術経済センター (1976).
- A8) Veziroglu, T. N. (ed.): Remote Sensing, energy-related studies, Hemisphere (1975).
- A9) Swain, P. H. and S. M. Davis: Remote Sensing: the quantitative approach, McGraw-Hill (1978).
- A10) Sabins, Jr., F. F.: Remote Sensing: Principles and Interpretation, Edward Arnold (1978).
- A11) Richardson, Jr., B. F. (ed.): Introduction to Remote Sensing of the Environment, Kendall/Hunt (1978).

引用文献

- 1) 文献A 5, p. 34.
- 2) 文献A 3, p. 38.
- 3) Turner, R. E.: Radiative Transfer in Real Atmospheres, NASA CR-ERIM 190100-24-T (1973).
- 4) 森 忠次: リモートセンシングの手法と応用について, 昭和52年度第1回講習会テキスト, 土木学会中国四国支部, pp. 27-75 (1977).
- 5) 安岡善文, 宮崎忠国: 遠隔計測による湖水域の定量的水質計測, 第3回リモートセンシングシンポジウム資料, pp. 143-146, 計測自動制御学会 (1977).
- 6) 服部 進, 森 忠次, 奥山峰広: 水面の分光反射率の測定による濁度の推定, 土木学会第34回年次学術講演会講演概要集, 第4部, pp. 344-345 (1979).
- 7) 森 忠次, 他3名: 日本国土海洋総合学術診断, Tech. Report-I, 1980 日本造船振興財団, pp. 123-132.
- 8) Ritchie, J. C., F. R. Schiebe and J. R. McHenry: Remote Sensing of Suspended Sediments in Surface Waters, PE & RS, Vol. 42, pp. 1539-1545 (1976).

- 9) Lorenz, D.: Temperature measurements of Natural Surfaces Using Infrared Radiometers, Applied Optics, Vol. 7, pp. 1705–1710 (1968).
- 10) Shaw, R. W. and J. G. Irbe: Environmental Adjustments for the Airborne Radiation Thermometer Measuring Water Surface Temperature, Water Resources Research, Vol. 8, pp. 1214–1224 (1972).
- 11) Saunders, P. M.: Corrections for Airborne Radiation Thermometry, J. Geophysical Research, Vol. 75, pp. 7596–7601 (1970).
- 12) Krishen, K.: Remote Sensing of Ocean Using Microwave Sensors, 文献A8, pp. 66–99.
- 13) Lissauer, I. M. and L. D. Farmer: Determining Synoptic Surface Current Patterns Using Aerial Photography, PE & RS, Vol. 46, pp. 333–336 (1980).
- 14) Klemas, V. and D. F. Polis: A Study of Density Fronts and Their Effects on Coastal Pollutants, RSE, Vol. 6, pp. 95–126 (1977).
- 15) 大西外明, 西村 司: リモートセンシングを用いた河口部拡散調査と密度流論的検討, 土木学会論文報告集, No 289, pp. 75–87 (1979).
- 16) 大西外明, 田中総太郎: Landsat による急傾斜湾内密度流フロントの観測と安定性に関する考察, 同上, No 292, pp. 53–63 (1979).
- 17) Lee, S. S., T. N. Veziroglu, S. Sengupta and N. L. Weinberg: Remote Sensing Applied to Thermal Pollution, 文献A8, pp. 303–334.
- 18) Johnson, R. W., R. M. Glasgow, I. W. Duedall and J. R. Proni: Monitoring the Temporal Dispersion of a Sewage Sludge Plume, PE & RS, Vol. 45, pp. 763–768 (1979).
- 19) 斉藤誠一, 飯坂譲二: 人工衛星からの海上風測定, 日本写真測量学会, 昭和55年度年次学術講演会発表論文集, pp. 115–116 (1980).
- 20) Blume, H.-J. C., B. M. Kendall and J. C. Fedors: Sea-Surface Temperature and Salinity Mapping from Remote Microwave Radiometric Measurements and Brightness Temperature, NASA TP 1077 (1977).
- 21) Johnson, R. W. and R. C. Harriss: Remote Sensing for Water Quality and Biological Measurements in Coastal Waters, PE & RS, Vol. 46, pp. 77–85 (1980).
- 22) Schmugge, T. J.: Microwave Approach in Hydrology, PE & RS, Vol. 46, pp. 495–507 (1980).
- 23) Hirschberg, J. G., A. W. Wouters and J. D. Byrne: Laser Measure of Sea Salinity, Temperature and Turbidity in Depth, 文献A8, pp. 157–167.
- 24) Bristow, M. P. F.: Airborne Monitoring of Surface Water Pollutants by Fluorescence Spectroscopy, RSE, Vol. 7, pp. 105–127 (1978).

〔雑誌略号〕

RSE = Remote Sensing of Environment

PE & RS = Photogrammetric Engineering and Remote Sensing