

4. センサ

本章ではセンサの種類、特徴、原理、及び観測バンドについて記載する。

4.1 センサの種類

地球観測衛星に搭載されたセンサは、人間の目でとらえられる可視光線以外に赤外や紫外線、マイクロ波等の数多くの電磁波を感知することができる。図 4.1-1 に示すようにセンサには大きくわけて、可視光線と赤外線（近赤外線、中間赤外線、熱赤外線）を観測する光学センサとマイクロ波で観測する電波センサの 2 種類のセンサがある。また、対象物から反射・放射される光や電磁波を観測する受動型（受動センサ）と、衛星搭載のアンテナから地上にマイクロ波を照射しその反射波をキャッチして地表面のようすを探る能動型（能動センサ）の 2 種類がある。

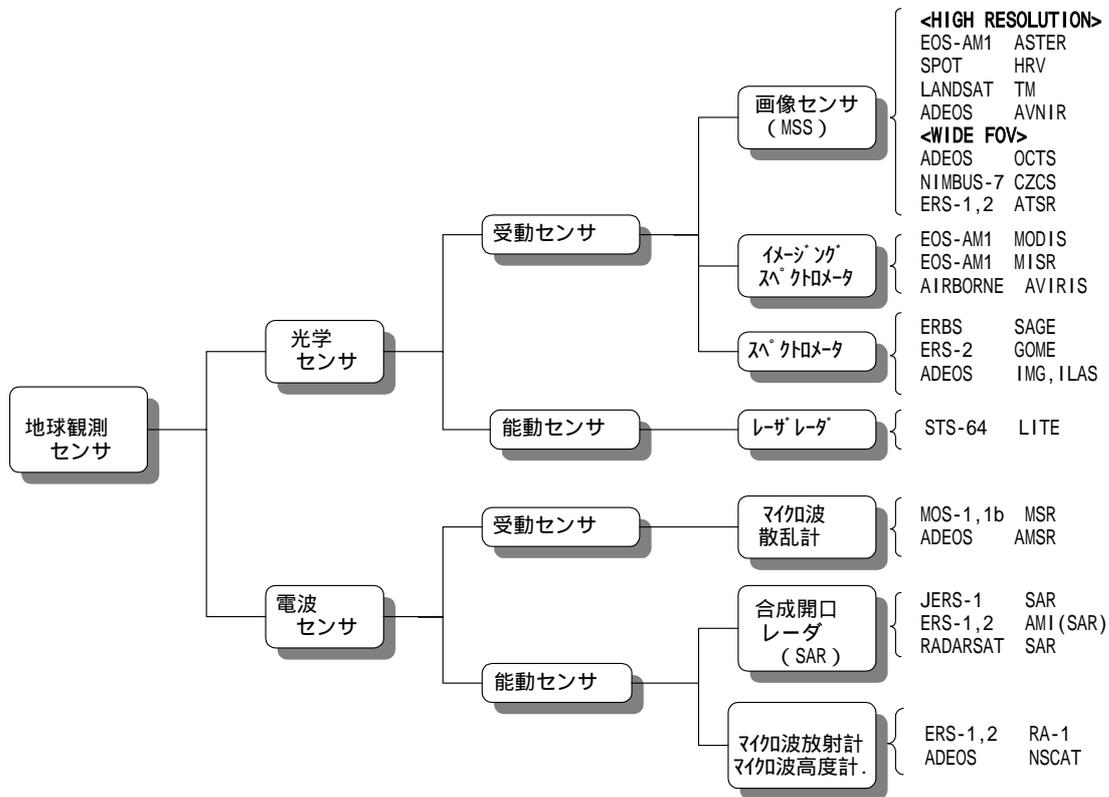


図 4.1-1 センサの分類

4.2 光学センサ

光学センサはリモートセンシングで最もよく利用されているセンサである。特にその解像力の高さを利用した画像センサはリモートセンシングの代表的なセンサとされている。しかし、最近地球環境研究が進むにつれ、単なる画像ではなく物理量（海面温度、気温、水蒸気等、定量的な量を指す）を測定する必要性が増している。これら物理量を測定するセンサの中には、画像、言い換えれば水平的な分布よりも、気温、水蒸気などのように鉛直分布を測定することを主目的とするセンサが増加している。これら、鉛直分布の測定を主目的とするセンサをサウンダと呼ぶ。

本節では地球観測でよく利用されている画像センサについてのみ述べる。

(1)画像センサの種類

光の領域でのリモートセンシングは、主として対象物から入射する光を分光することによって対象物の情報を得る。地表の画像と分光情報を得るためのセンサを一般にマルチスペクトルスキャナ（MSS：Multi Spectral Scanner）と呼ぶ。MSSは通常、走査系、結像系、分光系、及び光電変換部から構成されている。走査系は地表の各点を走査する系を指すが、これは各瞬間には地表の1点を観測し、観測する点を地表上で走査する方法と（対象物面走査方式あるいは whisk broom と呼ばれる）、地表の像を多素子の光電変換素子上に投影し、その像を電子的に走査する方法（像面走査方式と呼ばれる）の2種類に分かれる。後者は更に、1次元の素子を用いる場合（push broom と呼ばれる）と、TVカメラのように2次元の素子を用いる場合に分かれる。以下ではOMSおよびPBSについて述べた後、それぞれのセンサの利点および欠点について述べる。

a. オプティカルメカニカルスキャナ（OMS）

対象物面走査方式の代表的なMSSは、従来LANDSATを中心に良く使われてきたOMS（Optical Mechanical Scanner）である。OMSは静止軌道上の衛星に搭載される場合と、極軌道衛星等の非静止軌道衛星に搭載される場合では、方式に大きな差がある。静止軌道ではプラットフォーム（衛星）はほとんど動かないため、地表の画像を得るためには2次元の走査を行う必要がある。これに対して、非静止軌道では、衛星が地表に対して相対的に動いていくため、走査の1方向はこの衛星の運動を利用することが出来る。ここでは極軌道など、非静止軌道衛星に用いられるOMSについて述べる。

OMSの原理図を図4.2-1に示す。この図から解るようにOMSの光学系は、走査光学系と結像光学系から構成される。走査光学系には通常回転鏡あるいは振動鏡が用いられる。衛星進行方向に対して直角方向の観測幅を通常観測幅あるいは走査幅（swath width）と呼ぶ。回転鏡は主として走査幅が広い場合（500km以上）に用いられ、振動鏡は主として比較的狭い走査幅（200km以下）の時用いられる。

走査幅は観測頻度に対する要求と、解像力に対する要求のどちらを優先させるかで決まる。通常地球観測に用いられる低軌道（高度 500～1,000km）の衛星の場合、1日に地球を14周程度回る。地球の周囲長は約 40,000km（赤道上）なので、1日に全球を観測しようとした場合、 $40,000 / 14 \approx 2,800$ km 程度の走査幅が必要となる。しかし、この走査幅で解像力を上げようとするると膨大なデータ量となってしまい、地上に伝送する能力を超える。このため高解像力センサは高々200km 程度の走査幅しか持たない。

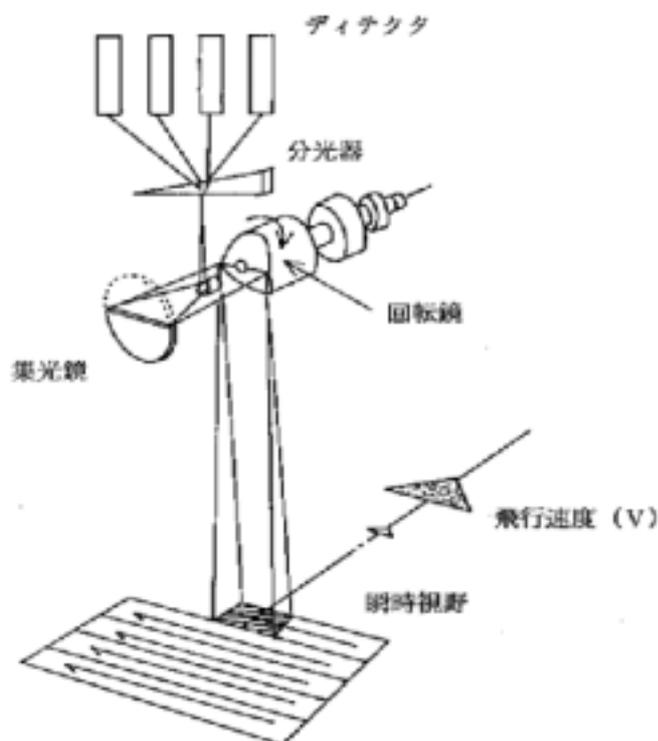


図 4.2-1 OMS の原理図

b. プッシュブルームスキャナ (PBS)

像面走査方式の代表的な MSS が PBS である。PBS (Push Broom Scanner) は、その名の通り 1 ライン分の光検知素子を並べて、1 方向（進行方向）にのみ走査を行うセンサである。PBS の原理図を図 4.2-2 に示す。OMS と異なり、走査は像面上で行われるため、走査光学系は不要である。結像光学系は、走査幅全体を結像するため、OMS に比べると比較的広角になる。例えば、高度 800km から 100km の走査幅を確保するためには、約 7.2 度の画角が必要となる。

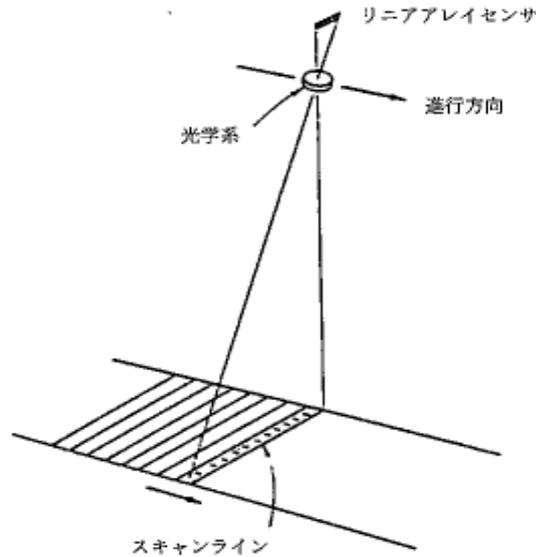


図 4.2-2 PBS の原理図

(2) OMS と PBS の利点及び欠点

OMS の利点は IFOV が見込む視野から入射する光を分光して測定するため、原理的にバンド (スペクトル帯域) 間の位置ずれがないという点にある。もっとも実際には後に述べる LANDSAT の場合のように、走査速度を上げるために各バンドに複数の素子を用いる場合もある。図 4.2-3 に LANDSAT TM の焦点面の構成を示す。このような場合、各検知器が同一時刻に観測する地上の位置は異なり、位置ずれが生じる。一方、欠点としては、走査光学系に振動鏡ないしは回転鏡を用いるため、衛星に振動が伝わり走査速度の不均一が生じる。また、システム構成が複雑になり、故障が生じ易くなる。これらの欠点を改善するために考え出されたのが PBS である。

PBS は OMS に比べて、機械的可動部分がないため、信頼性に優れている。しかしながら、OMS には無かった新たな光学的課題を抱えることになった。

まず問題になるのは、撮像方式が対象物面走査方式から像面走査方式に変わったため、センサの地上解像力が光学系の解像力に大きく依存するようになった点である。現在最も良く用いられている CCD の 1 素子の大きさは $7 \sim 14 \mu\text{m}$ である。従ってこの素子に必要な光学系の解像力は、 $143 \sim 286$ [line pairs/m] 程度となり、これだけでもかなり高解像力の光学系が必要になることが解る。将来のリモートセンシングセンサに用いられる CCD はより多素子のものになろうとしているが、その場合 1 素子の大きさが小さくなる傾向にある。従って光学系に求められる性能はますます高くなっていく。光学系の解像力を高める為には、開口を大きくする必要はあるが、衛星搭載センサという面からは、重量が小さい方がよい。

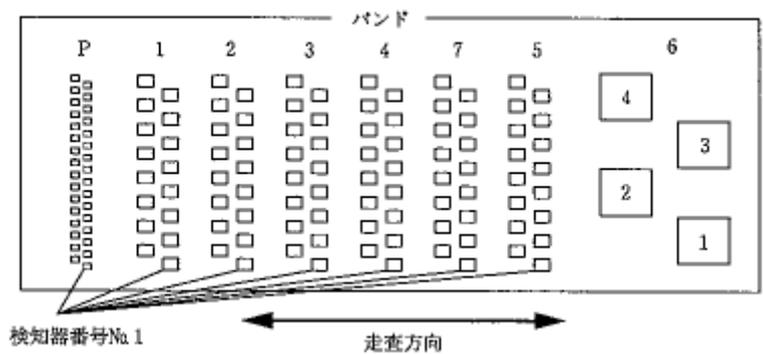


図 4.2-3 LANDSAT-TM の焦点面における検知器の配置図

4.3 電波センサ

(1) SAR の直感的な説明

合成開口レーダはサイドルッキングレーダの一種と考えることができる。ここで簡単にサイドルッキングレーダ (Side Looking Radar = SLR) の原理から説明しておく。図 4.3-1 にサイドルッキングレーダ (SLR) の原理図を示す。図から解るように SLR ではプラットフォームの進行方向に直角方向に幅の狭いファンビームを照射し、地表からの後方散乱成分を収集する。この時の進行方向をアジマス方向、電波の照射方向をレンジ方向と呼ぶ。SLR では巾の狭い扇形ビームパルスをプラットフォームの進行方向に垂直な方向に照射する。このパルスの地上での後方散乱成分は、プラットフォームと散乱地点の距離に比例した時間でセンサに到達する。言い換えれば進行方向に垂直方向の距離 (レンジ方向と呼ばれる) は、時間軸に射影される。従って SLR のレンジ方向分解能は、センサの時間分解能によって決定される。

SLR では、アジマス方向の解像力はファンビームの幅で、レンジ方向の解像力は時間分解能で決まる。ファンビームの地上での幅は次式で決定されるが、

$$r = R / D$$

衛星高度から十分な地上解像力を得るためには長大なアンテナが必要になる。ここで r は地上解像力、 λ は波長、 R はアンテナと地上との距離、 D はアンテナ開口である。この欠点を回避し衛星高度から十分な地上解像力を得るために考え出されたのが SAR (Synthetic Aperture Radar) である。

SAR では図 4.3-1 に示すように SLR とは逆に小さいアンテナを用いて一度に広い範囲を照射する。逆に言えば地上の各地点はかなり長い間照射され続けることになる。地上の一点に注目した場合、SAR センサはその点からの信号を位相整合することにより、仮想的に長大なアンテナを合成することができる。この場合、理論的な地上解像力は、地上からの距離に無関係に、アンテナ開口の $1/2$ になる。通常 SAR ではレンジ方向の解像力もアジマス方向に合わせて向上させるため、照射パルスはチャープ変調される。チャープ (chirp) 変調とは図 4.3-2 に示すように、周波数を時間に対して直線的に変化させる変調方式である。開口合成とチャープ変調により、SAR では衛星高度から 20m 前後の地上解像力を得ることができる。

SAR 画像の再生処理はまず、チャープ信号の処理から始まる。最初に戻ってきたチャープ信号から始めて、最後に戻ってきた信号までを、出した時間に応じて遅らせて合成する事により、仮想的に 1 つの大きな短いパルスを作る事ができる。つまり受信信号に図 4.3-3 に示すような遅れを加えて合成することにより図 4.3-4 に示すような大パルスが仮想的に得られる。この処理をレンジ圧縮 (range compression) と呼ぶ。

一方、アジマス方向に関しては、地上のある点を考えてみると、衛星が近づいてきていちばん近いところを通り、続いて去って行くことになる。この間地上の点は電波に照射され

続けるが、電波に関しても音と同様・ドップラー効果が生じる。従って、地上の 1 点から返ってくる電波は、直線的に周波数が変化する。言い換えれば、チャープ変調された様な電波になる。従って、レンジ圧縮と同様な処理を、この信号に対しても行えば、地上の 1 点からの信号が再生されることになる。この処理をアジマス圧縮 (azimuth compression) と呼ぶ。

SAR 画像の特徴としてもう一つ挙げられるのはスペックル (speckle) である。コヒーレンス光学系による撮像系の特徴として、SAR の場合も再生画像上にごま塩状のスペックルノイズが存在する。SAR の場合同一シーンは通常一回しか撮影されないため、スペックルの効果的な低減法はいくつかの画素の平均値をとるほか無い。この処理をマルチルック (multi look) 処理と呼び、解像力の低下をもたらすにもかかわらず良く用いられている。

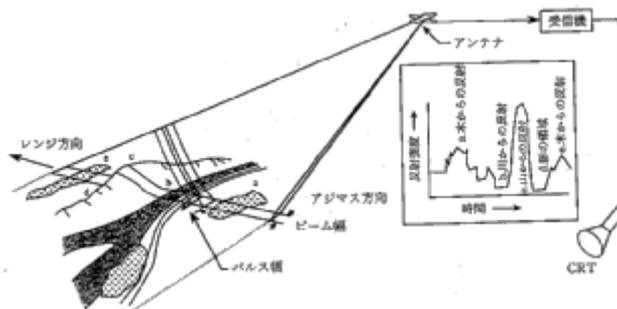


図 4.3-1 SLR の原理図

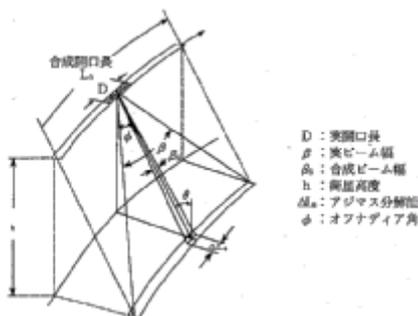


図 4.3-2 SAR の電波照射域

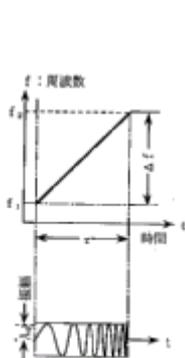


図 4.3-3 チャープ信号

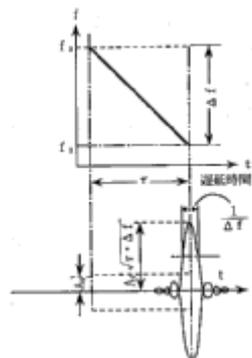


図 4.3-4 チャ-プ圧縮されたパルス

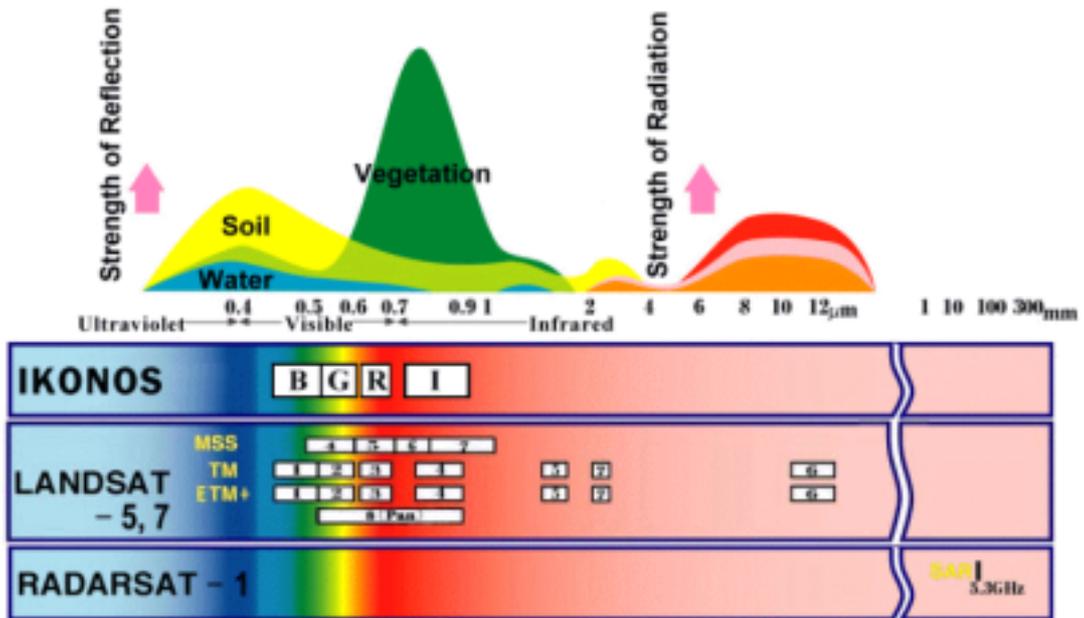
(4.2 項、4.3 項参考文献：リモートセンシングハンドブック、宇宙開発事業団発行)

4.4 センサの見る波長帯（観測バンド）

リモートセンシング衛星データは、1画素あたりの情報量を0～255(8bit)、0～2047(11bit)などのレベルでとらえ、「バンドごとにとらえたデータ」を使用して解析を行うにあたり各バンド（波長）がどのような特徴を持っているかについて、LANDSAT(TM センサ¹、MSS センサ²)、IKONOSのとらえるバンドを基に説明する。

表 4.4-1 観測バンドの特性

波長帯	各波長帯の特徴	観測バンドの割当例		
		LANDSAT-TM	LANDSAT-MSS	IKONOS
青	浅海域の地形や沿岸の観測に適している。針葉樹と広葉樹の区別や土壌と植生の区別。	1 (0.45 ~ 0.52 μm)	-	B (0.45 ~ 0.52 μm)
緑	地表構造物の識別（コンクリート、金属や木材）、水質の調査。水・陸域の区別。水域と植物の区別は難しい。	2 (0.52 ~ 0.60 μm)	4 (0.5 ~ 0.6 μm)	G (0.52 ~ 0.60 μm)
赤	モノクロ画像上で明るく見えるのが市街地や砂浜、造成後の乾いた裸地、収穫後の畑地、枯れた草地や芝地などである。植生調査。陸域と水域の区別。	3 (0.63 ~ 0.69 μm)	5 (0.6 ~ 0.7 μm)	R (0.63 ~ 0.69 μm)
近赤外線	人間の目には感じられない波長。赤外線は水に吸収されるため、水面は暗く写る。陸域と水域の境界線の抽出や地質構造の判読に向いている。植生分布、熱水変質により褐鉄鉱などの検出。	4 (0.76 ~ 0.90 μm)	6 (0.7 ~ 0.8 μm) 7 (0.8 ~ 1.1 μm)	I (0.76 ~ 0.90 μm)
短波赤外線	雲と積雪域の区分。雲は白く、積雪域は黒ずんで見える。埋立地や空き地、草地やゴルフ場は白く見える。植物と土壌の水分含有量の推定。	5 (1.55 ~ 1.75 μm)	-	-
熱赤外線	地熱、水温分布。石灰岩や粘土分布。シュードカラー表示して分布をみることが可能。	6 (10.4 ~ 12.5 μm)	-	-
中波赤外線	露出している地表熱水鉱床や鉱石資源探査、水域と雲の識別。	7 (2.08 ~ 2.35 μm)	-	-



(宇宙開発事業団 提供)

図 4.4-1 観測バンドの特性例