

土 木 研 究 所 資 料

リモートセンシングデータの 有効利用に関する調査

平成8年10月

建 設 省 土 木 研 究 所
積算技術研究センター システム課

Copyright © (1996) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

リモートセンシングデータの 有効利用に関する調査

企画課 建設専門官 平 城 正 隆

システム課 小 野 祐 明

交流研究員 二階堂 尚 宏*

要 旨

本論文は、社会資本の整備及び維持管理において高度化、省力化が期待できるリモートセンシングについて、基礎知識をとりまとめるとともに、建設行政における利用手法について調査し、紹介するものである。

キーワード：衛星リモートセンシング，衛星データ，光学センサ，マイクロ波センサ，LANDSAT，NOAA，GMS，SPOT，MOS-1，E・ERS-1，J・ERS-1，画像処理，建設行政，大規模災害，被災状況把握手法，地理情報システム，超高解像度衛星，EarlyBird，QuickBird，CRSS，OrbView，EROS，ALOS，地球観測プラットフォーム技術衛星，ADEOS，EOS，POP，合成開口レーダ，地球観測情報システム

* 交流研究員在職期間（平成7年4月～平成9年3月まで）

はじめに

人工衛星によるリモートセンシングは、搭載される観測装置を用いて、地表の対象物から反射または放射される光、電波などを測定し、それらのデータによって対象物の形状や現象を観測する技術であり、広範な地域の様々な情報を、短期間でしかも継続的に収集できるという特徴を有する。このため、我が国の宇宙開発計画においても従来から重要な分野として認識されており、農林水産業、地質・資源探査、海洋、気象、土地利用調査、地図作成など広い分野で利用されている。

河川・道路管理における雨量等の観測を例とし、建設行政における衛星データ利用のニーズは長年に渡り非常に高いにも関わらず、その精度、観測周期、コスト等の問題から、実際に利用された例は多くはない。しかしながら近年、急速に衛星データの多様化と高精度化が進み、一部では地上分解能が1 mとか2 mといった超高解像度の衛星データの取得が、現実のものとして議論されるようになってきており、建設行政においても社会資本の整備や維持管理のためのデータ収集において利用できる可能性が広がってきている。

本論文では、現状のリモートセンシング技術を利用するという視点で、リモートセンシングの基礎から防災をはじめとする建設行政における利用に関する手法を調査し、とりまとめたものである。

目 次

1. 概要	1
2. リモートセンシングの基礎知識	3
2.1 リモートセンシングの定義	5
2.2 リモートセンシングの原理	6
2.3 リモートセンシングの発展経緯	9
2.4 リモートセンシングのセンサ	12
2.4.1 光学センサ	13
2.4.2 マイクロ波センサ	19
2.4.3 その他のセンサ	25
2.5 主な衛星データ	29
2.5.1 LANDSATデータ	31
2.5.2 NOAAデータ	33
2.5.3 GMSデータ	35
2.5.4 SPOTデータ	37
2.5.5 MOS-1データ	39
2.5.6 E・ERS-1データ	41
2.5.7 J・ERS-1データ	43
2.6 画像処理・解析システム	46
2.6.1 ハードウェアシステム	46
2.6.2 ソフトウェアシステム	48
2.7 リモートセンシングの問題点	51
3. 建設行政における衛星データの利用	56
3.1 衛星データ利用の現状	57
3.2 衛星データの利用分野	58
3.2.1 道路	61
3.2.2 河川・湖沼	61
3.2.3 海洋・沿岸	62
3.2.4 都市計画・地域計画	62
3.2.5 地盤環境	63

3.2.6 災害	63
3.3 衛星データ利用上の課題	64
4. 大規模災害における衛星データの利用	66
4.1 衛星データの利用状況	66
4.1.1 火山災害	66
4.1.2 地震災害	67
4.1.3 風水害及び気象災害	69
4.2 衛星データの適用事例検証	70
4.2.1 構造物被害	70
4.2.2 液状化現象	72
4.3 衛星データの利用体制の確立	73
4.3.1 災害監視システム	73
4.3.2 地理情報システム (GIS) を利用した防災情報システム	74
5. 衛星リモートセンシングに関する技術動向	79
5.1 超高解像度衛星	79
5.1.1 「EarlyBird」及び「QuickBird」	79
5.1.2 CRSS	81
5.1.3 OrbView	83
5.1.4 EROS	84
5.1.5 ALOS	84
5.2 地球観測プラットフォーム技術衛星	86
5.2.1 ADEOS	86
5.2.2 EOS計画	90
5.2.3 POP計画	92
5.3 その他の衛星	93
5.3.1 アメリカ	94
5.3.2 ヨーロッパ	95
5.3.3 日本	97
5.4 合成開口レーダ	99
5.5 地球観測情報システム	100
6. 今後の課題	106

1. 概 要

河川・道路等の維持管理においては、社会資本の整備や維持に要するコスト等から、管理上必要とする場所に実際に観測機器を設置できる地点は限られている。リモートセンシングには、広域観測性という大きなメリットがあり、従来、山間部や危険区域等の理由で観測機器の設置に多大な費用を要し、経済的理由から観測できなかった場所を含め、広域的な状況を把握でき、また、多種にわたる基礎的データの収集に利用できる可能性が大きい。本研究では、リモートセンシングデータの有効利用により、社会資本管理に必要なデータを効率良く収集するシステムの構築について検討を行った。例えば、リモートセンサと地上系センサの相互補完により、データの精度やデータ収集費用の面で優れたシステムの構築が可能と考えられる。リモートセンシングには衛星を利用したもの（以下、「衛星リモートセンシング」という）と、航空機等を利用したものがある。衛星リモートセンシングでは、地球を周回する人工衛星を利用して定期的にデータを収集し、航空機等を利用したリモートセンシングでは、データが必要な時にセンサーを搭載させた航空機等を出動させてデータを収集している。河川行政、道路行政、環境等の各分野では広域管理が必要であるという観点から、本研究では広域観測に適した衛星リモートセンシングの利用を研究対象として検討を行なった。

本年度は、リモートセンシングの基礎情報について取りまとめを行い、衛星リモートセンシングの有効利用の可能性を探るために、建設行政ならびに大規模災害における衛星データの利用について調査・整理等を行った。また、衛星リモートセンシングに関する国際的な技術動向についても調査を行なった。以下にこれらの概要について記述する。

(1) リモートセンシングの基礎知識

リモートセンシングの研究分野は多岐にわたり、地上調査では把握することのできない広域を周期的、同時に観測することができ、得られた情報は様々な科学の分野において従来の枠を越えた効力を発揮することが多くの基礎研究によって判明している。

環境保全、災害防止、資源の把握や効果的管理及び探査、国土の調査や合理的な計画といった様々な分野で衛星リモートセンシングの利用が求められている。国の内外を問わず、このようなリモートセンシングを取り巻く諸情勢を見た場合、リモートセンシングの多様化と様々なニーズに対応すべき新たな時代に差しかかっているといえる。

ここでは、リモートセンシングの原理からデータの利用分野にいたるまで、リモートセンシングの基礎について理解することを念頭におき、基礎知識に関する次の項目について、調査内容を記述する。

- ① リモートセンシングの定義
- ② リモートセンシングの原理
- ③ リモートセンシングの発展経緯
- ④ リモートセンシングのセンサ
- ⑤ 主な衛星データ

⑥ 画像処理・解析システム

⑦ リモートセンシングの問題点

(2) 建設行政における衛星データの利用

建設行政にはきめ細かさと広域的な視点との双方が要求されるが、これは衛星リモートセンシングの最大の特長と合致するものであり、まずは他のデータ収集手段では労力や経済性の問題などで実現できない部分で衛星データを活用できると考える。

ここでは、建設行政に関連した分野における衛星データの利用実態を把握し、衛星データの利用に関する次の項目について、調査内容を記述する。

- ① 衛星データ利用の現状
- ② 衛星データの利用分野
- ③ 衛星データ利用上の課題

(3) 大規模災害における衛星データの利用

昨年（平成7年）1月17日に発生した阪神・淡路大震災では、被害状況を把握するうえで、衛星データは大きな威力を発揮した。この災害現況図は数値標高モデル等と組み合わせられ、鳥瞰図としても示されたので、被害の甚大さを視覚的に訴えると共に災害を被りやすい地形条件等もずいぶんと把握しやすくなった。

ここでは、大規模災害における被災状況の把握などを目的とした場合の、衛星データの利用に関する次の項目について、調査内容を記述する。

- ① 衛星データの利用状況
- ② 衛星データの適用事例検証
- ③ 衛星データの利用体制の確立

(4) 衛星リモートセンシングに関する技術動向

現在、米国等の民間企業が超高分解能型センサを搭載した人工衛星の適用化運用を計画しており、これらの計画が実現された場合には、地上分解能が1mとか2mといった超高精度の衛星データの取得が可能になるといわれている。そうすると、建設行政における社会資本の整備や維持、管理のための基礎的データの収集に衛星リモートセンシングを利用できる可能性がますます広がる。

ここでは、超高解像度衛星を中心に、衛星リモートセンシングの技術動向に関する次の項目について、調査内容を記述する。

- ① 超高解像度衛星
- ② 地球観測プラットフォーム技術衛星
- ③ その他の衛星
- ④ 合成開口レーダ
- ⑤ 地球観測情報システム

2. リモートセンシングの基礎知識

リモートセンシングにおける研究分野は多岐にわたり、地上調査では把握することのできない広域を周期的、同時に観測することができ、得られた情報は様々な科学の分野において従来の枠を越えた効力を発揮することが多くの基礎研究によって判明している。環境保全、災害防止、農林水産資源の把握や効果的管理、鉱物資源の探査、国土の調査や合理的な計画といった様々な分野でリモートセンシングの利用が求められている。

国の内外を問わず、このようなリモートセンシングを取り巻く諸情勢を見た場合、リモートセンシングの多様化と様々なニーズに対応すべき新たな時代に差しかかっているといえる。

特に、最近では、リモートセンシングによって得られた情報を単独で利用するだけでなく、種々の既存情報（または属性情報）と融合利用し、より付加価値のある情報を抽出・創造しようとするアプローチが多くなってきた。GIS (Geographical Information System: 地理情報システム) と衛星リモートセンシングデータ（以下、「衛星 データ」という）の融合利用技術に関する研究もその中の1つに位置付けられるが、現状では、蓄積されている種々の情報をどのように加工し、利用してよいのかといった点を模索している状況にあり、衛星データそのものの有効性評価にまで言及するには至っていない。ただし、既存の各種地理情報の蓄積形態と蓄積された情報の精度に問題がある場合も多い。

私たちが利用できる衛星データの種類（「2. 5 主な衛星データ」を参照のこと）は、第1世代の1972年にスタートしたLANDSAT/MSSに比べて、現在では、ユーザが選択して利用できる程に増えてきたことは大変な進歩である。しかし、一方で、データの選択性と有効バンドの検証が実際の解析に当たって求められるようになってきた。これは、一般のユーザにとっては、たいへん大きな問題である。衛星データの精度は、LANDSAT/TM、SPOT/HRVに代表される第2世代から大きく飛躍して第3世代に入ろうとしている現在、国土の計画/評価といった分野はもとより、地理情報と衛星データの融合利用等、衛星データを利活用するうえで新たな技術の展開が必要となってきた。

一方、衛星データの処理・解析は画像処理工学や画像認識理論といった基礎理論のうえに立っており、独自の処理・解析技術の研究に立脚した専門分野（いわゆる、リモートセンシング）を形成してきた。そして、衛星データの処理・解析を行うことのできる研究機関が増加するにつれて、これらの研究分野も多種多様化し、さらに取り扱う内容もより一層高度化してきている。

現在、衛星データの利用にあたっては、目的別に様々な画像処理・解析手法が考案されており基礎技術はほぼ完成の域に到達しているといわれている。衛星データの画像処理・解析のためのソフトウェア・パッケージも30種類以上のものが市販されるようになってきた。しかし、このような要素技術の開発は着実に進められているものの、各手法の前提条件や、用いるパラメータに要求される精度の問題等、多くの研究課題が残されていることも事実である。加えて、専門分野別に衛星データの利用に際して指摘される問題は様々である。多くの試行の結果、現在、衛星データの利用分野別に要求仕様が取りまとめられるまでになってきた。

MSS、TM、HRVに代表される高分解能の衛星データが利用されている一方で、より性能の高いセンサの設計／開発が着々と進められている。さらに、衛星データの利用面に目を向けた時、「データ利用者側」と「データ提供側」（広義には、センサ開発側）との間でお互いの持つ技術の伝達が十分に行われていないことが指摘されている。そのため、衛星データを用いた貴重な研究成果がセンサ開発の面で有効に利用されていないといった問題が生じており、このことは「画像処理・解析」と「センサ開発」という2つの専門領域の橋渡しとなる情報が整理されていないだけでなく、そのような研究アプローチがほとんど見当たらないことに起因している。つまり、センサ開発の分野ではセンサが捉える連続的な電気信号から離散的な画像データを収集する過程、いわゆるデジタル信号処理に関わる研究が主体になり、画像処理・解析の分野では、観測収集された離散的な画像データのみに着目して統計理論に立脚した種々の画像処理・解析手法を開発、適用することに力が注がれているために、2つの研究分野は独立してその成果を蓄積してきたといえる。この2つの研究分野の間には「図2. 1」に示すような「衛星データの実利用」といった共通の目標がある。したがって、衛星データをより一層有効に活用するための技術展開を考えていくためには、利用者側の要求を満たすべく、将来指向型の高分解能センサの開発と観測収集されるデータの処理・解析技術の開発といった両面からの歩み寄りが必要となる。しかし、現実はこの種の問題に取り組もうとする場合、使用する衛星データの種類や適用する手法の問題等、膨大な量の画像処理・解析を伴うケーススタディが要求され、研究に要する時間と労力、データ処理・解析コスト、さらには処理・解析設備等の制約から、研究プロジェクトを完遂できる研究機関は極く限られてくる。衛星データの実利用化を目指すうえでデータの精度評価とともに具体的なデータの利用方法を考えていくことは避けて通ることのできない道であるといえる。今後のリモートセンシングの発展にとって大きな問題点である。

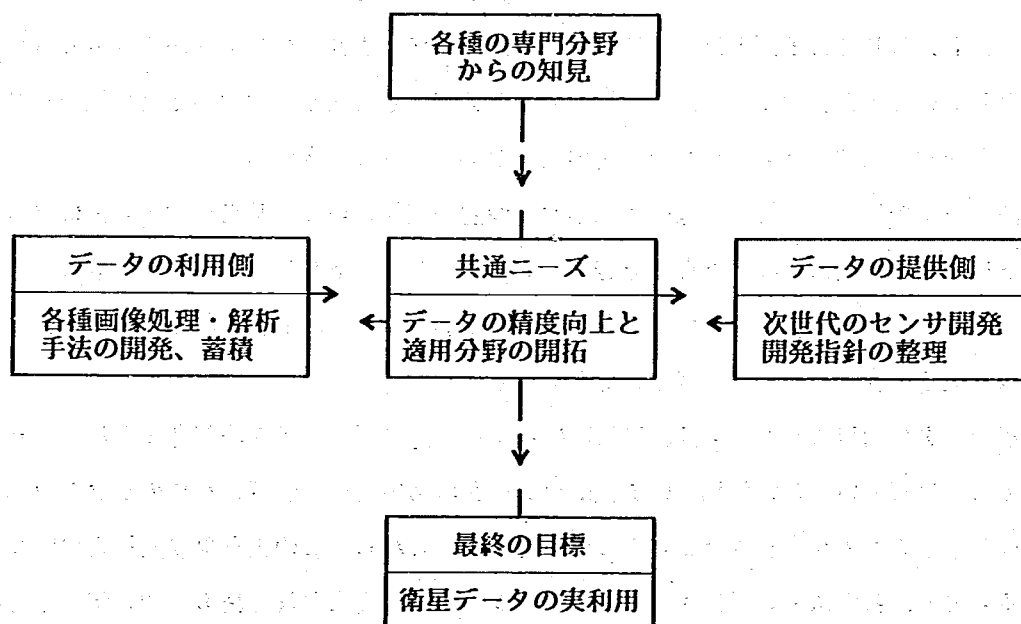


図2. 1 衛星データに関わるニーズと目標

しかし、人工衛星を用いたリモートセンシング（地球観測）は、数々の問題点を包含しながらも、1972年以来25年弱の間に、地球規模での環境モニタリングの手段としてその地位を着実に築いてきたといっても過言ではなく、現在（1996年）では、米国等の民間企業が超高分解能型センサを搭載した人工衛星の適用化運用を計画しており、これらの計画が実現された場合には、地上分解能が1mとか2mといった超高精度の衛星データの取得が可能になるといわれている。そうすると、建設行政における社会資本の整備や維持、管理のための基礎的データの収集に衛星リモートセンシングを利用できる可能性がますます広がる。

ここでは、以上のことを踏まえて、リモートセンシングの原理からリモートセンシングデータの利用にいたるまでリモートセンシングを理解するための基礎知識について解説する。

2. 1 リモートセンシングの定義

リモートセンシングは、手法論から見れば、画像の性質、画像の線型処理、画像の変換処理、特徴の抽出、位置の認識、3次元計測、テクスチャ解析といった基礎技術を集大成して用いる認識技術の応用として位置づけられる。一方、技術の面から見ると、物体の性状を抽出・分類して認識するための基礎技術として位置づけられる。いずれにしても、コンピュータとその周辺機器の発展に支えられて多くの可能性を提供してくれる先端技術の1つである。

大空から、あるいは宇宙から私たちは科学の眼を通して大気と水に覆われて青く輝く地球の姿を観測することができるようになった。このような新しい科学の眼を有効に利用するか否かは私たち人間の手に委ねられている。今後、多くの基礎技術の発達とともに、現在では考えられないような利用価値が見出されるかもしれない。

リモートセンシングという言葉の語源はE. L. Pruitt（米国）が1961年環境に関するシンポジウムで提唱したのが最初だとされている。その後、軍用の観測手段の1つとして研究・開発されてきた。

現在では、リモートセンシングという言葉が多くの分野で日常的に聞かれるようになっている。リモートセンシングという言葉の定義は学問の世界にあっては必ずしも定かではない。しかし、一般的には「対象物に直接手を触れることなく、その物体の性状を感じ取る」あるいは「遠距離から電磁波を用いて対象物を調べる探査法の1つ」といった説明がされている。漢字では「遠隔探査」、「隔測」、「遥感」といった言葉が用いられることがあるが、一般には、「リモートセンシング」が使われている。

私たち人間は眼というセンサを通して物を見て、その内容を脳という極めて性能の良いコンピュータを使って無意識の内に多くの情報を分析・評価し、場合によっては予測までしている。このように人間は極めて優れたリモートセンシング機能を備えていることになる。しかし、人間が直接見たり、感じたりする能力には限界があることが知られている。人間の眼は、いわゆる可視領域(400~750nm)という非常に限られた範囲の光しか見ることができない。このような機能を補うために、私たちは、人間が感知することのできない自然界の広範囲な光を観測することのできる器械（センサ）を開発し、それによって観測したデータをコンピュータの助けを借りて素早く処理することのできるソフトウェアを開発してきた。現在では、これらのセン

サを航空機や人工衛星に搭載して観測・収集したデータ（一般には数値データ）のことを狭い意味でのリモートセンシングデータ（「2.5 主な衛星データ」を参照のこと）といっている場合が多い。前者を航空機リモートセンシング、後者を衛星リモートセンシングといて区別する場合もある。

本研究では、これらのリモートセンシングデータを収集・処理・解析・評価する技術を総称してリモートセンシングと呼ぶことにする。また、河川行政、道路行政、環境等の各分野では広域管理が必要であるという観点から、広域観測に適した衛星リモートセンシングの利用を研究対象として検討を行なうものとする。

2.2 リモートセンシングの原理

リモートセンシング (Remote Sensing) とは、直接手に触れないで、対象物や現象に関する情報を収集し、対象物や現象の識別、分類、判読及び分析などを行なう技術である。

「図2.2.1」は、リモートセンシングによるデータ収集の概念を示したものであり、収集される情報は、対象物から反射または放射される電磁波に関する情報である。電磁波に関する情報を収集する装置をリモートセンサ（単にセンサ；sensorとも呼ぶ）といい、カメラやスキャナなどがある。センサが搭載される場所はプラットフォーム（platform）と呼ばれ、航空機や人工衛星などがこれにあたる。

これらのことから「リモートセンシングとは、航空機や人工衛星などのプラットフォームに搭載されたリモートセンサを用いて、地表の対象物から反射または放射される電磁波を収集し、それらのデータを用いて対象物や現象に関する情報を得る技術である。」ともいえる。

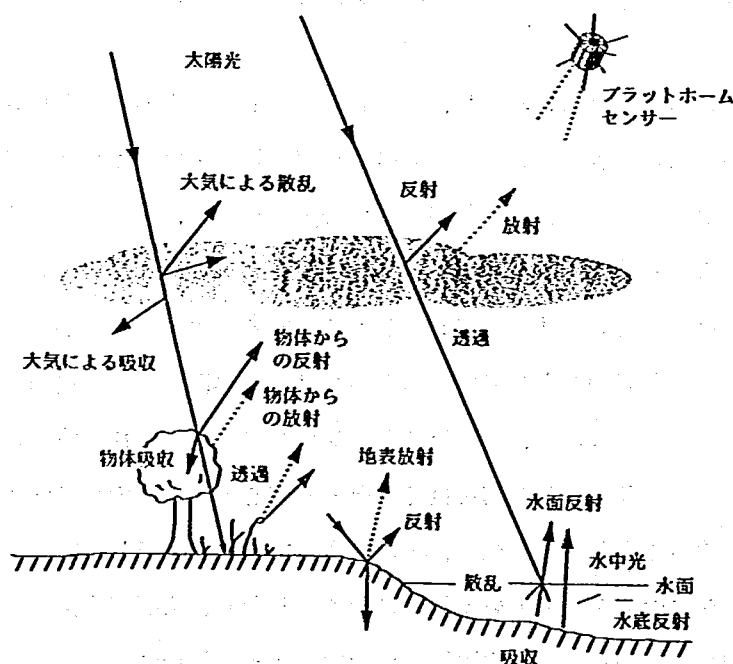


図2.2.1 リモートセンシングの原理

(地球表面からの反射/放射される電磁波)

地球上にある全ての物体は太陽からの光線を受けてそれぞれの物体に特有の電磁波を反射していることはよく知られている。「表2.2.1」や「図2.2.2」に示すように、この電磁波は広い波長域にわたるもので、電磁波は、波長の短い方から、γ線、X線、紫外線、可視光線、赤外線、電波からなる。この中で電波は、一般に、サブミリ波、ミリ波、マイクロ波、ラジオ波に分けられる。また、リモートセンシングでは可視・近赤外波長域はVNI R (Visible and Near InfraRed)、短波長赤外はSWIR (Short wave InfraRed)、熱赤外はTIRまたはTHIR (Thermal InfraRed)と規定する習慣になっているが、波長域の定義については専門分野によって少しずつ異なる場合があるので注意が必要である。

表2.2.1 電磁波の分類と名称

名 称		波 長 範 囲	周 波 数 範 囲	
γ 線		0.1nm以下	30PHz以上	
x 線		0.1~10nm	3~30PHz	
紫 外 線		10nm~0.4μm	750~3,000THz	
可 視 光 線		0.4~0.7μm	430~750THz	
赤外線	近赤外		0.7~1.3μm	230~430THz
	短波長赤外		1.3~3μm	100~230THz
	中間赤外		3~8μm	38~100THz
	熱赤外		8~14μm	22~38THz
	遠赤外		14μm~1mm	3~22THz
電 波	サブミリ波		0.1~1mm	0.3~3THz
	マイクロ波	ミリメートル波 (EHF)	1~10mm	30~300GHz
		センチメートル波 (SHF)	1~10cm	3~30GHz
		デシメートル波 (UHF)	0.1~1m	0.3~3GHz
	超短波	(VHF)	1~10m	30~300MHz
	短波	(HF)	10~100m	3~30MHz
	中波	(MF)	0.1~1km	0.3~3MHz
	長波	(LF)	1~10km	30~300kHz
	超長波	(VLF)	10~100km	3~30kHz

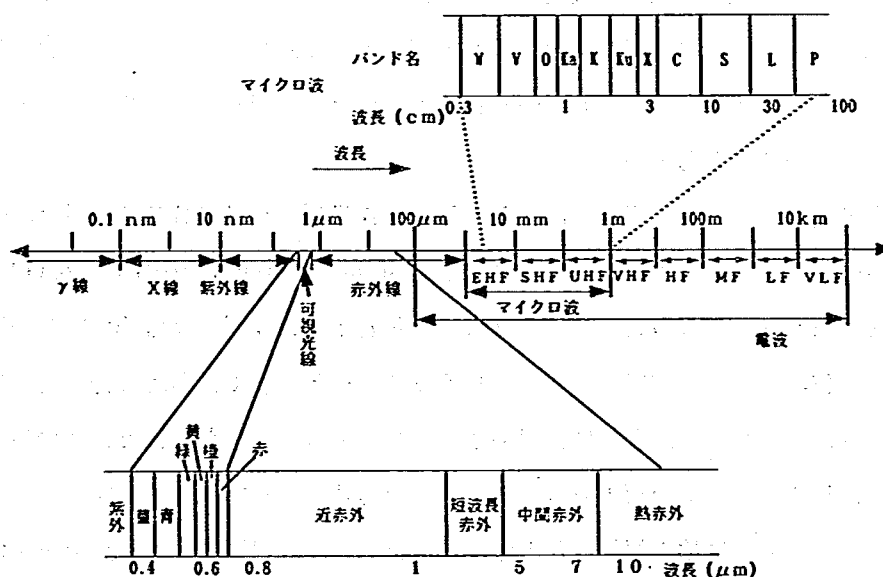


図2.2.2 電磁波の区分

それぞれの物体がどんな波長の光を吸収し反射するかは物体個々の物理的または科学的な性状によって異なっている。これを物体個々のスペクトル反射特性と呼んでいる。

「図2. 2. 3」に示すように、砂漠の場合は450~700nm (0.45~0.7 μ m) の波長帯で見るとその様子を一番よく捉えることができる。小麦畑では700~900nm (0.7~0.9 μ m) 位の波長帯（人間の目には見えない）で見ると良くわかる。水の場合も水質によって反射率が異なることがわかっている。

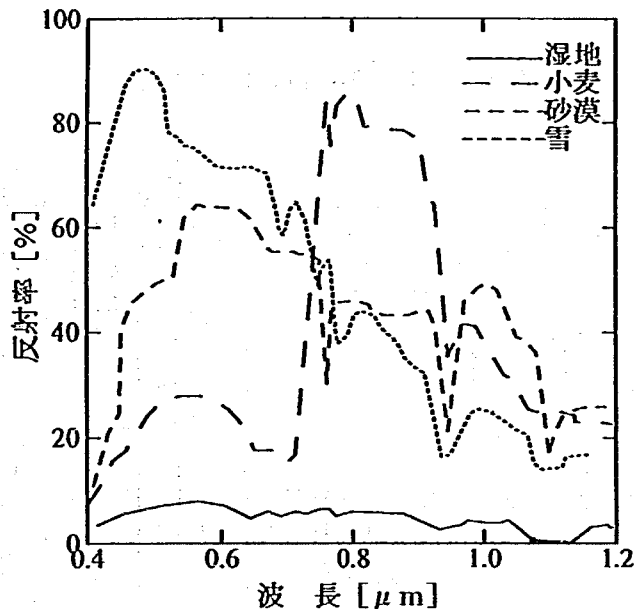


図2. 2. 3 物質が反射する波長別スペクトル反射特性

リモートセンシングは、土地利用状況や穀物の成育状況の把握、火山活動・山火事・赤潮の監視、砂漠や草原の状況把握、水質の分析、森林資源や気象・積雪・海流・海面温度等の調査、地下資源や埋蔵遺跡の探査等、私たちの生活環境を解析する手段として使われ、地球の自然を守り、限られた地球上の資源を有効に利用するために役立っていている。

私たちが利用できる衛星データも、現在では、LANDSATデータ (MSS: Multi-Spectral Scanner, TM: Thematic Mapper)、SPOTデータ (HRV: High Resolution Visible)、MOS-1データ (MESSR, VTIR, MSR)、NOAAデータ (AVHRR: Advanced very High Resolution Radiometer)、GMSデータ (ひまわりによる気象データ) 等々その種類も多く、利用分野や目的に応じて使い分けることができるようになってきた。さらに、将来型のセンサとしてマイクロ波センサの利用についても資源探査の分野を中心にして、少しずつ利用分野が広がってきている。そして、最近では急速に衛星データの多様化と高精度化が進み、一部では地上解像度が1mとか2mといった超高精度の衛星データの取得が現実のものとして議論されるとともに、新しい利用の時代を迎えようとしている。

2. 3 リモートセンシングの発展経緯

ここではリモートセンシングの生い立ちについて振り返ることとする。従来、技術としてのリモートセンシングは主として空中写真を扱ってきた人達によって始められてきたといっても過言ではない。すなわち、写真測量の技術者によって昔から写真判読技術の1つとして育てられてきたもので、特に、リモートセンシングという名を冠せずに存在してきた。いい換えれば、人々は地球表面の各種の写真を多くの目的に利用してきたわけであるが、これらの情報は全て航空機から得られたものである。全国規模で得られている重視度60%の空中写真などは、今更リモートセンシングデータという必要のないまでに一般化している。

表2. 3. 1 世界の主な地球観測衛星打ち上げ年表(その1)

●: 打ち上げ済み ◎: 開発中 ○: 計画中または検討中 (1995年現在)

	日本	米国	フランス	ESA	ドイツ	インド	ロシア
~ 1985	●GMS ●GMS-2 ●GMS-3 ●ETS-II ●EXOS-C	●TIROS ●LANDSAT-1 ●HCMM ●LANDSAT-2 ●SEASAT-1 ●LANDSAT-3 ●NIMBUS-7 ●LANDSAT-4 ●MAGSAT ●LANDSAT-5 ●TIROS-N ●SMS-1 ●NOAA-6 ●SMS-2 ●NOAA-7 ●GOES-1 ●NOAA-8 ●GOES-2 ●NOAA-9 ●GOES-3 ●OSTA-1 ●GOES-4 ●OSTA-3 ●GOES-5 ●GOES-6 ●GEOSAT-1 ●ERBS		●METEOSAT-1 ●METEOSAT-2 ●FSLP(STS-9)	●TOMS-01 (STS-7) ●MOMS-01 (STS-11)	●BHASKARA-1 ●INSAT-1A ●BHASKARA-2 ●INSAT-1B	●METEOR-1 ●METEOR-2 ●METEOR-3 ●ALMAZ ●RESURS-F
1986		●NOAA-10	●SPOT-1				●METEOR-2 ●RESURS-F1 (5)
1987	●MOS-1						●RESURS-F1 (3) ●METEOR-2
1988		●NOAA-11		●METEOSAT-3		●IRS-1A ●INSAT-1C	●RESURS-F1 (2) ●METEOR-2
1989	●GMS-4			●METEOSAT-4			●RESURS-F2, 3 (6) ●METEOR-2
1990	●MOS-1b		●SPOT-2	●METEOSAT-5		●INSAT-1D	●RESURS-F2 (4) ●METEOR-2
1991		●GOES-7 ●NOAA-12 ●UARS		●ERS-1		●IRS-1B	●ALMAZ-1
1992	●JERS-1	●TOPEX	●Poseidon			●INSAT-2A	●RESURS-F1 (4)
1993			●SPOT-3	●METEOSAT-6	●MOMS-02		●METEOR-2-21 ●RESURS-F1 (3)-F2
1994		●GOES-8 ●SIR-C/XSAR ●NOAA-14			●SIR-C/XSAR	●INSAT-2B ●IRS-P2	●Eletro-1

表2. 3. 1 世界の主な地球観測衛星打ち上げ年表 (その2)

●: 打ち上げ済み ◎: 開発中 ○: 計画中または検討中 (1995年現在)

	日本	米 国	フランス	ESA	ドイツ	インド	ロシア
1995	●GMS-5	◎SeaStar ◎GOES-J ◎NOAA-K ◎TOMS-EP		●ERS-2		○IRS-P3 ○INSAT-2C	○METEOR3 ○RESURS-F ○RESUR-0
1996	○ADEOS	◎GEOSAT-F0		○METEOSAT-7			○ALMAZ-2 ○Kuban
1997	○TRMM	○TRMM ◎NOAA-L	○SPOT-4			○IRS-1C ○INSAT-2D	○METEOR3
1998		◎EOS-AM1 ○LANDSAT-7		○ENVISAT-1			
1999	○ADEOS-II	◎NOAA-M ◎GOES-K				○IRS-1D	
2000		◎GOES-L ◎EOS-PM1 ◎NOAA-N		○MSG ○METOP		○INSAT-3A	
2001							
2002	○ALOS	◎EOS-CHEM ◎NOAA-O					
2003		◎EOS-LASERALT	○SPOT-5	○ENVISAT-2			
2004		◎EOS-AM2					

リモートセンシングという言葉が今日のように一般化するきっかけは、人工衛星とコンピュータの実用化にある。米国航空宇宙局(NASA: National Aeronautic and Space Administration) が打ち上げた地球観測用衛星による極めて広域の地球表面の情報は人類がかつて経験したことのない感動を与えたことが多くの文献に記録されている。地球規模での海流や雲の状況に加えて島や大陸の形状が現実のものとして一般の人々にも実感として見られるようになった。

人類が現実には地球の観測、探査手段として人工衛星に関心を持つようになったのはNASAによって打ち上げられた実験用気象衛星TIROS (Television and Infrared Observation Satellite、1960年4月始めて打ち上げる) に始まるLANDSATシリーズ(地球観測衛星、その最初のものが1972年7月23日に第1号として打ち上げられた。当初は地球資源探査衛星[ERTS: Earth Resources Technology Satellite] という) やNOAAシリーズなどの衛星利用が民間に開放されてからである(表2.3.1を参照のこと)。中でもLANDSAT-1号の運用が私たちに与えた影響は大きいものがある。

勿論、毎日のテレビ受像器を通じて通報される気象衛星(GMS 1号~5号。通称“ひまわり”として知られている) からの映像も実用衛星の利用価値を大いに高めることに役立ってきたことはいうまでもない。

このように、1972年、NASAはLANDSAT-1号を打ち上げたが、これは従来の科学衛星と異なり非常に高い地表分解能を持っていた。80mの地表面分解能を持つMSS(Multi-Spectral Scanner)により、可視、近赤外光(400~1100 nmの波長域)を4つのバンド帯域に分割して観測され、一般に公表されるようになった。さらに、地球表面の映像としてのフィルム写真に加えてコンピュータでデータ処理が可能なCCT(Computer Compatible Tape) データが一般の不特定多数の人々に頒布されるシステムができた。これがリモートセンシングあるいはリモートセンシングデータの一般化のきっかけといって良い。その意味でリモートセンシングの原点はLANDSATにあるといっても過言ではない。

人工衛星を用いる地球観測データの広域性、同時性、周期性は航空機からの写真情報では全く得られないものである。しかも、スペクトル帯域、つまり波長帯を複数の帯域に分割する観測技術は単なるフィルム写真では得られない技術的展開を与えることになった。しかも、LANDSATのCCTデータがデジタルデータであるという特徴が、産業界で急速に展開したエレクトロニクス技術や情報処理技術と相まって現在のような普及を見るまでになった。

リモートセンシング発展の当初は、人工衛星つまり宇宙技術開発やコンピュータを中心にした情報処理技術開発主導型で推移してきた傾向がある。このことは、リモートセンシングの発生経緯からして自然の成り行きであったかもしれない。しかし、現在では、人工衛星を介して得られるどのような情報も私たちはコンピュータの力を借りて処理・解析することが可能になった。一方、調査や探査には明確な目的意識が無ければならないことはいうまでもない。これからのリモートセンシングは具体的な目的に沿った利用技術の開発と平行して進歩して行くことになるかと予想される。

2. 4 リモートセンシングのセンサ

リモートセンシングは「非接触調査手法」であることから、調査しようとする対象物の情報を情報伝達媒体を通して受け取るセンサが必要になる。一般には、「図2. 4. 1」に示すような電磁波を捕えるセンサが用いられる。センサとしては、「電磁波を捕えるセンサ」の他にも、音波や超音波に代表される「圧力波を捕えるセンサ」や重力や磁力で知られる「力の場を捕えるセンサ」が考えられるが、主に以下の3つの理由から「電磁波を捕えるセンサ」が用いられている。

- ① 真空中や大気中を少ない減衰で捕えることができる。
- ② 振幅や位相、多様な波長、偏光・偏波など情報伝達に利用できる変数が多い。
- ③ 受動、能動両用の柔軟な使用が可能である。

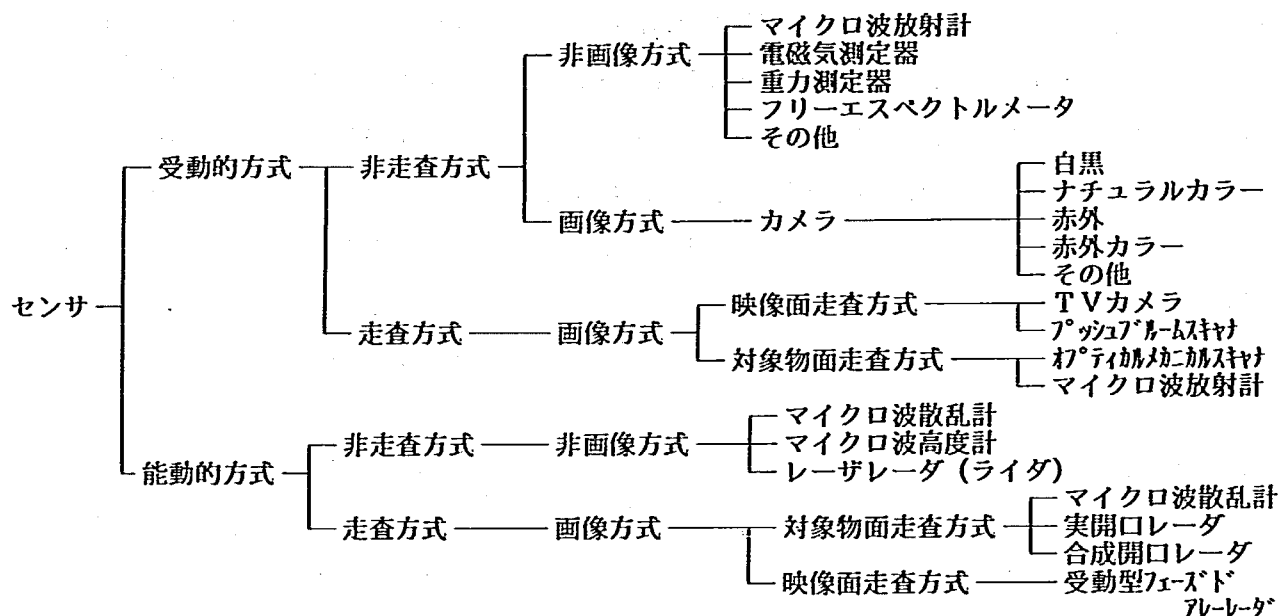


図2. 4. 1 センサの分類

受動的_方式 (Passive sensor) とは、太陽光の反射及び対象物から放射される電磁波を収集する方式であり、能動的_方式 (active sensor) とは、対象物に向けて電磁波を照射し、対象物で反射されて来た電磁波を収集する方式である。それぞれの方式は、さらに走査方式と非走査方式に分けられる。

受動的、非走査、非画像方式 (non image sensor) に分類されるものは、2次元画像を作らないもので、プラットフォームに載せたセンサにより、プラットフォームの移動とともに、その航跡下のデータを測定する方式である。画像方式 (image sensor) のものは、いわゆるカメラを使用するもので、衛星用ではソ連のコスモス衛星がカメラ方式をとっている。航空機搭載用では、航空カメラが多く用いられている。走査方式には、映像面走査方式 (image plane scanning method) と対象物面走査方式 (object plane scanning method) とがある。映像面走査方式の代表例としてはTVカメラがあり、対象物面走査方式の代表例としてはオ

プティカルメカニカルスキャナがある。プッシュブルームスキャナ（固体スキャナ [CCDカメラともいう]）は両方式の混合で、進行直角方向は映像面走査だが、進行方向は対象物面走査である。

能動的方式のうち非走査、非画像方式は、受動的方式のそれと同じで、走査をすることなく、プラットフォーム下の対象物の情報を点的あるいは線的に取得する方式である。レーダ高度計がこれに該当する。走査方式は、プラットフォームの進行方向に対し直角方向に走査を行い、地表面の2次元画像を得る方式で、合成開口レーダはその代表例である。

またここ数年来、新たな技術開発が行われてきたものの一つにレーザセンサがある。この種のセンサとして、大気の測定に威力を発揮するレーザレーダがあげられる。

2. 4. 1 光学センサ

光学センサを電磁波の波長別に分類すると「表2. 4. 1. 1」のようになり、可視から赤外に至る光の領域のセンサを総称して光学センサと呼ぶ。従来の衛星リモートセンシングは光学センサを主体に発展してきたものであり、地球観測のための重要なセンサの1つとして今後も利用されるはずである。

表2. 4. 1. 1 主なセンサの波長帯域

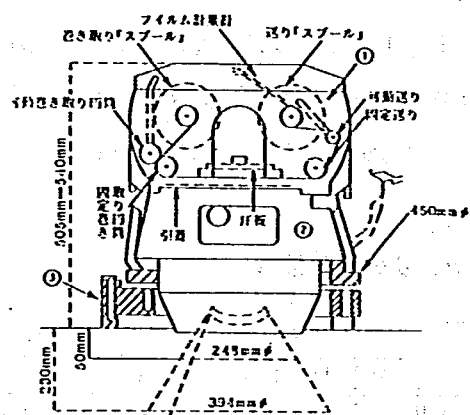
波長 (μm)			赤外						電波			
	紫外	可視光				近 短波長		中間	熱 遠	ミリ波	マイクロ波	
センサ	0.4	0.5	0.6	0.7	0.9	1.5	5.5	8.0	14.0	1000	10000	100000
カメラ(白黒フィルム)	_____											
(カラーフィルム)	_____											
(赤外フィルム)	_____											
(赤外カラーフィルム)	_____											
TVカメラ	_____											
航空機カメラ	_____											
(航空機MSS)	_____											
(Landsat MSS)	_____											
(Landsat TM)	_____											
衛星カメラ(SPOT HRV)	_____											
(サーマルビデオ)	_____											

(1) カメラ

衛星リモートセンシング用カメラとして使われているものには、測量用の航空カメラ (aerial camera)、マルチスペクトルカメラ (multi spectral camera) 等がある。

測量用の航空カメラは地表を垂直方向に連続して撮影することにより、地形測量や地図作成などに用いられており、厳密な測定が要求されるので、以下のような光学幾何学的な諸条件が厳密に規定され、設計されている。「図2. 4. 1. 1」に、ツァイス社のRMK測量用カメラの構造を示す。

- ① レンズディストーションが少ないこと
- ② 解像力が極めて高く、画面の周辺部まで尖鋭な像が得られること
- ③ 光軸との位置関係が精密に測定されていること。測量用写真には、この位置関係を求めるために画面の4隅または4辺の中心に指標か、または画面の内部にレゾーと呼ぶ十字マークの方眼が写されている。
- ④ 光軸とフィルム面が直交していること
- ⑤ 厳密にフィルムの平面性を保つために、真空装置により圧定されていること
- ⑥ 焦点距離が精度よく測定されていること
- ⑦ 連続した撮影が可能であること
- ⑧ 高速飛行体と地面との対地速度に合わせてフィルム面を移動させるブレ防止機構（FMC：forward motion compensator）があること（特に宇宙カメラの場合）



- ① フィルム庫
 - ② 写真機本体
 - ③ 架台
- 写真機の回転に要する外径 510φ
「フィルム」庫を装着した際の外径 550φ

図 2. 4. 1. 1 ツアイス社RMK測量用カメラの構造

マルチスペクトルカメラは主として判読用に使われ、可視光及び近赤外域をいくつかの帯域ごとに記録し、対象物の判別に用いられる。「図 2. 4. 1. 2」に、マルチスペクトルカメラの3つの方式について示す。

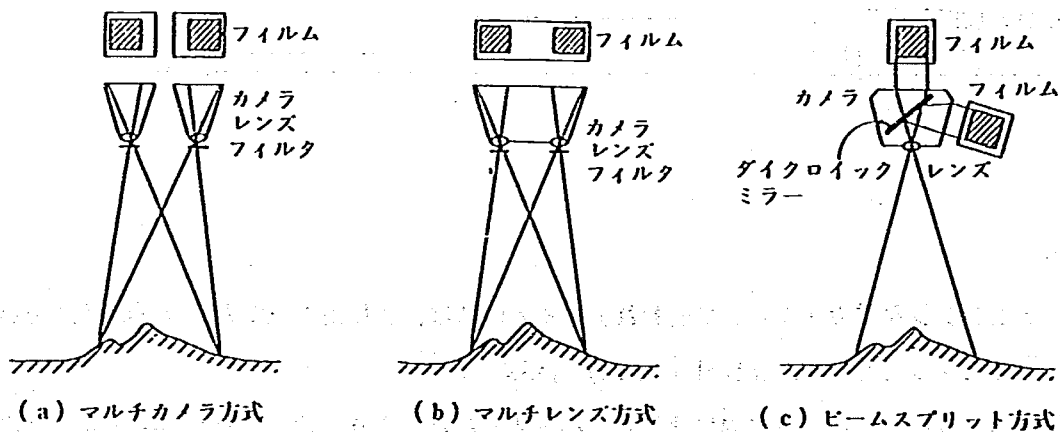


図 2. 4. 1. 2 マルチスペクトルカメラの方式

(2) TVカメラ

LANDSATには、リターンビームビジコン（略して RBV）と呼ばれるTVカメラ方式のセンサが積まれている。TVカメラは視野全体を同時に、ごく短時間内に撮影するので、リモートセンシング用のセンサとしては、画像の処理的な較正がきわめて容易になること、及び衛星などのプラットフォームの姿勢制御に対する厳しさがゆるめられること等の利点がある。

RBVは、光電面に蓄積された像を読み出すにあたって、読み出し用の電子ビームを折り返して、2次電子増倍器で高感度の信号検出を行なう方式のビジコンである。光電面には、ASOS (antimony trisulfide oxysulfide) と呼ばれる光導電物質が使われる。「図2.4.1.3」にRBVの構造の例を示す。LANDSATに積まれているRBVは、光電面の大きさが $25 \times 25 \text{ mm}$ で、分解能は、レスポンスが50%に落ちる空間周波数で表わして、 45 Hz/mm である。

ASOSという光電面は、おおよそ $0.8 \mu\text{m}$ 付近までしか波長感度がないので、それより長波長についても働くものとして、シリコンを光電面に用いたRBVも開発されている。これはシリコンフォトダイオードを多数並べたものと考えてよく、分解能 70 Hz/mm ぐらいまでは可能といわれている。波長範囲は $1.1 \mu\text{m}$ まで広げることができる。

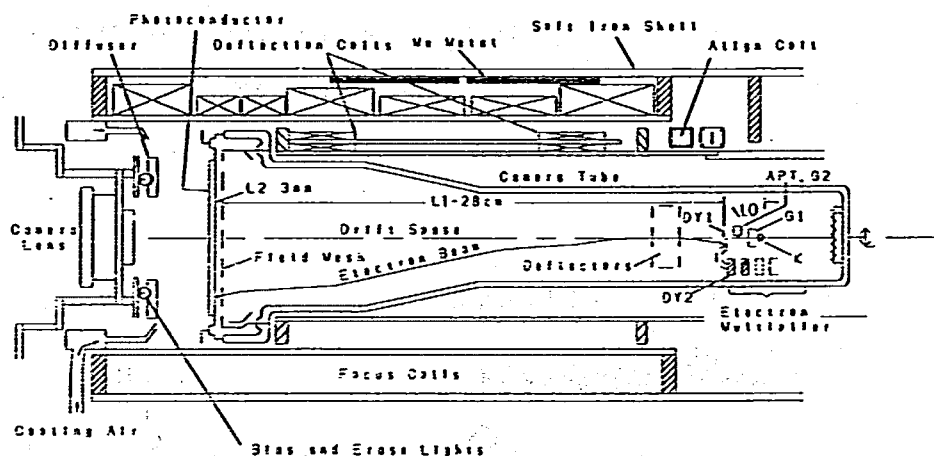


図2.4.1.3 リターンビームビジコンの構造

(3) オプティカルメカニカルスキャナ

オプティカルメカニカルスキャナ (optical mechanical scanner) とは、地表からの放射を分光して観測を行う機械走査型放射計で、スキャナを搭載するプラットフォームの移動と、回転鏡あるいは振動鏡による、プラットフォームの移動に対し直角な方向の走査とを組み合わせることで2次元の情報を得るセンサで、集光部、分光部、走査部、検出部、参照信号から構成されている。

プッシュブルーム・スキャナに比べ、比較的観測幅を広く取ることができ、集光部の画角が小さくて済む。また、バンド間の位置ずれが少なく、映像力が高い等の特徴を有している。しかし、光電変換部における検知素子の積分時間が長く取れないため、SN比の点で映像面走査方式のプッシュブルームスキャナに劣る。

このオプティカルメカニカルスキャナは極軌道衛星をプラットフォームとして搭載されており、代表的なものとして、地球観測衛星であるLANDSATのMSS (multi spectral scanner system)、TM (the matic mapper) や、気象衛星であるNOAAのAVHRR (advanced very high resolution radiometer) 等がある。

オプティカルメカニカルスキャナの構造について、以下に簡単に述べるとともに、「図2.4.1.4」にオプティカルメカニカルスキャナの構造を示し、また「図2.4.1.5」にオプティカルメカニカルスキャナによるデータ収集の原理を示す。

- ① [集光部] 色収差を避けるために、ニュートン式、カセグレン式、リッチークレアン式などの反射望遠鏡方式で構成される。
- ② [分光部] ダイクロイックミラー (可視域と熱赤外域との分離)、回折格子、プリズム、フィルタなどの組み合わせで構成される。
- ③ [走査部] 人工衛星や航空機の進行方向と直角方向の走査に、反射鏡の回転や振動を用いて行う。
- ④ [検出部] 分光部を通過した放射は光電変換素子で電気信号に変換される。光電変換素子は検知素子ともいわれ、近紫外域、可視域では光電子増倍管が、可視域、近赤外域ではシリコンフォトダイオードが、中間赤外域では冷却したインジウムアンチモン (InSb)、インジウム砒素 (InAs) が、熱赤外域では焦電素子や冷却した水銀カドミウムテルル (HgCdTe) がそれぞれ用いられている。
- ⑤ [参照信号部] 得られた電気信号は、検知素子の感度変化等の影響を受ける。そこで、放射強度や温度が一定の放射源や熱源をスキャナ本体に組み込み、走査信号の一部として同時に取得する。これにより、得られた電気信号を常に校正できるので、測定の精度が維持される。

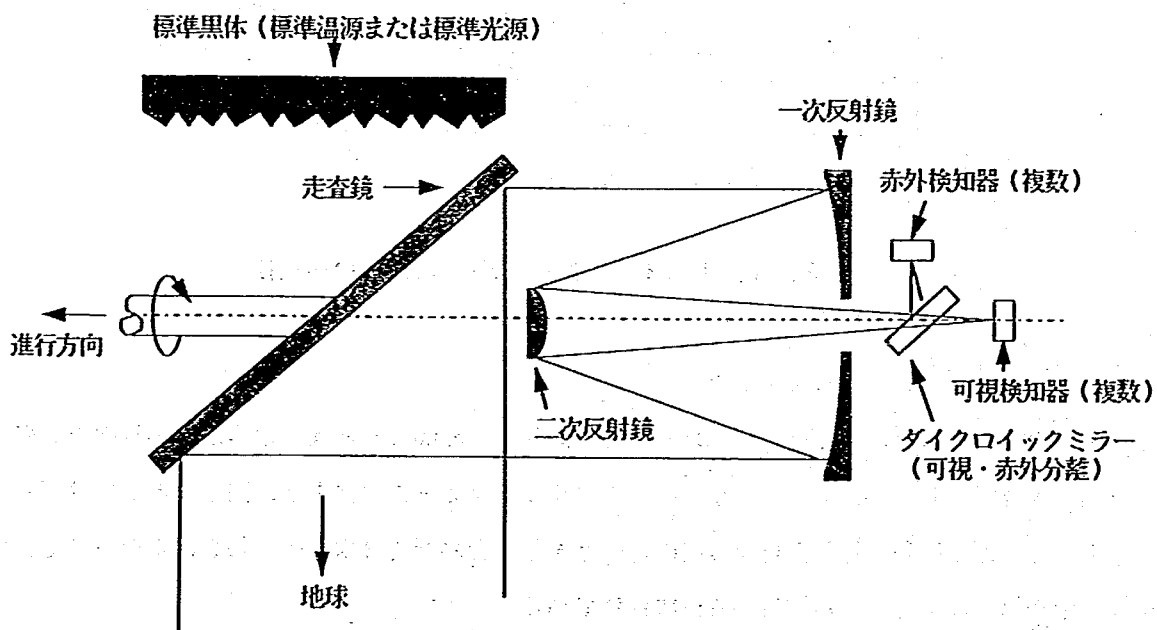


図2.4.1.4 オプティカルメカニカルスキャナの構造

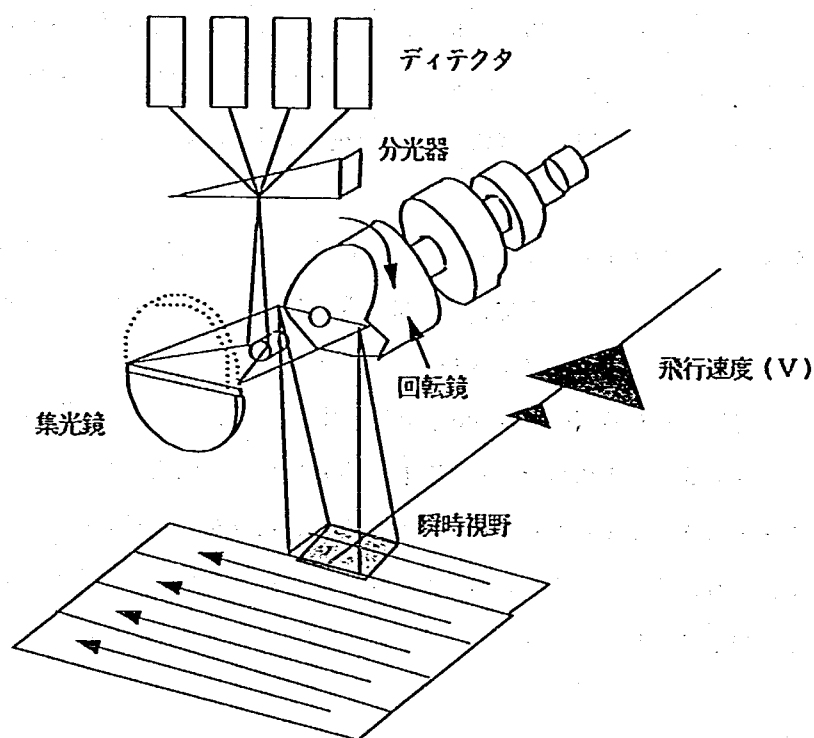


図2. 4. 1. 5 オプティカルメカニカルスキャナによるデータ収集の原理

(4) プッシュブルームスキャナ

「図2. 4. 1. 6」は、プッシュブルームスキャナ (pushbroom scanner) の原理を示したものである。このように固体光電変換素子が1列に並んだ構造の検知器をリニアアレイセンサ (linear array sensor) といい、リニアアレイセンサを用いたスキャナをプッシュブルームスキャナという。

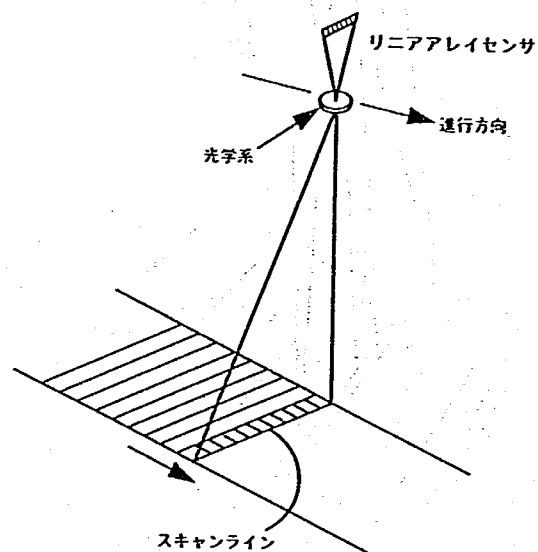
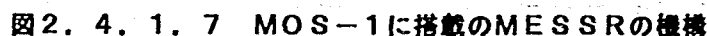


図2. 4. 1. 6 プッシュブルームスキャナの原理

リニアアレイセンサとしては、CCD (charge coupled device) を用いることが多く、SPOTのHRV、MOS-1のMESSR、JERS-1のOPSなどに採用されている。例えばMOS-1に搭載されているスキャナの場合、1素子の大きさが $14\mu\text{m} \times 14\mu\text{m}$ であり、これを1ラインに2,048個並べている。最近では、1ラインに約5,000~10,000の素子を並べたものが開発されている。「図2.4.1.7」は、MOS-1 MESSRの機構を示している。



2. 4. 2 マイクロ波センサ

マイクロ波センサは、「表2. 4. 2. 1」のようにおおまかに分類される。

全天候性という特徴から、1991年以降に打ち上げられた衛星のほとんどがいずれかのマイクロ波センサを搭載している。能動式センサは観測波長のみならずその水平・高度方向の分解能によって観測項目が細分される。

「表2. 4. 2. 1」 マイクロ波センサの分類

	センサの種類	観測対象
受動センサ (passive sensor)	マイクロ波放射系 (microwave radiometer) 固定視野・走査式	海面の状態、海面温度、海上風 海洋の塩分濃度、海水 水蒸気量、雲水量、降水強度 大気温度、風 オゾン、エアロゾル、NO _x その他の大気微量成分
能動センサ (active sensor)	マイクロ波散乱計 (microwave scatterometer) 降雨レーダ	土壌水分、地表面の粗さ 湖氷・海水分布、積雪分布 植生密度 海洋波浪、海上風、風向・風速 降水強度
	マイクロ波高度計 (microwave altimeter)	海面の形状、ジオイド 波高、海流変動中規模渦、潮汐 風速
	画像レーダ (imaging radar) 合成開口	地表面の映像 海洋波浪、海上風 地形、地質 海水、雪氷のモニタリング

(1) マイクロ波放射計

地球の表面を構成する物質は熱放射によって電波も放射している。電波帯における地球の熱放射の絶対量を測定し、地表面あるいは大気の状態を観測するセンサが放射計（ラジオメータ）である。マイクロ波放射計は他のセンサの大気補正にも利用される。

放射計で観測される輝度温度はレーリー・ジーンズの放射法則によって表され、一般に地表面の各種性質及び途中の伝搬媒質の影響が複合したものである。このため観測量から特定の物理量を推定するためには、それぞれの影響を除法できるような周波数や偏波を組み合わせた多チャンネル放射計が利用される。「図2. 4. 2. 1」は、海洋におけるそれぞれの物理量に対する輝度温度の感度と、観測に向けた周波数帯（矢印）を示す。

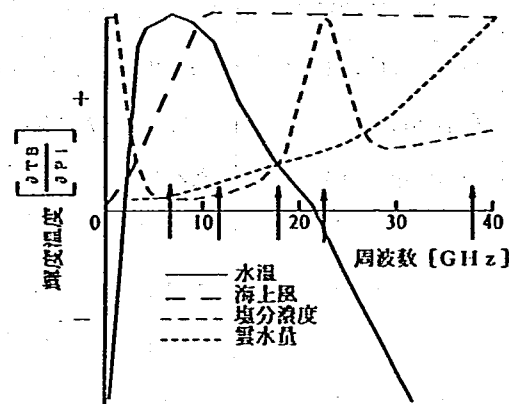


図2. 4. 2. 1 海洋における各種物理量に対する輝度温度の感度及び好ましい観測周波数帯

2次元的な映像データを取得する際には、地表面の影響が大きい周波数帯では入射角一定のコニカル走査方式が、また地表面の影響を無視できる周波数帯ではクロストラック走査方式が向いている。「図2. 4. 2. 2」にコニカル走査方式とクロストラック走査方式の概要を示す。

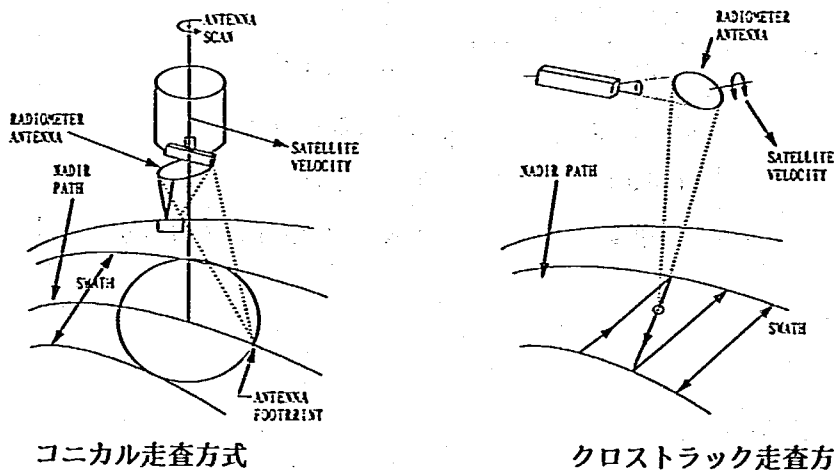


図2. 4. 2. 2 コニカル走査方式とクロストラック走査方式の概要

マイクロ波放射計では、信号にくらべて雑音が大きいため、色々な工夫が必要である。さまざまな方式のうち最も単純な方式は全電力放射計である。このシステムでは、高い周波数帯の信号を自ら持っているローカル発振器の信号と混合し、ミキサによってそれらの差分の低い周波数に変換して高い信号増幅を容易に行えるようにしている。システム利得変動の影響が無視できれば、放射計の感度は観測帯域幅が広いほどまた積分時間が長いほど良い。ただし100GHz程度以上の高周波数帯では安定に増幅を行うことが困難で、現在もミキサで直接検波する方法を取っている。「図2.4.2.3」に全電力放射計のシステム図を示す。

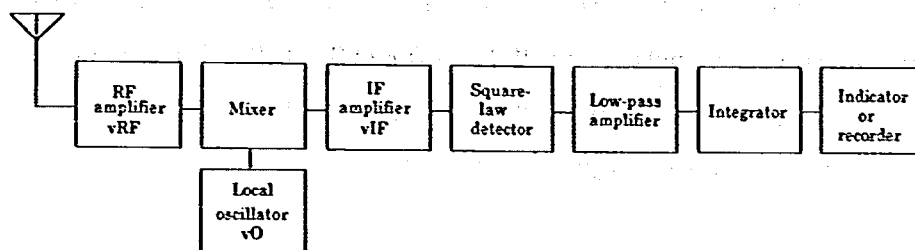


図2.4.2.3 全電力放射計のシステム概要

(2) マイクロ波散乱計

マイクロ波散乱計は、起伏のある物体の表面に電波を発射し、その表面により散乱されて戻ってくる受信電力を計測するものである。海上風の風速ベクトルを2次元的に測定する衛星搭載センサとして使用されている。

マイクロ波散乱計には、電波を断続的に出すパルス方式と、連続的に出すCW (continuous wave) 方式とがある。これまで、ハードウェアの製作上簡単なため、パルス方式が用いられてきたが、電波の帯域幅が広くなり、電波法における許可、電波干渉等が問題となってきた。一方、CW方式をとると、帯域幅がパルス方式の1/100程度に狭くなり、前述の問題が大幅に軽減されるとともに、受信機も安価に製作できるようになったため、この方式が増えている。

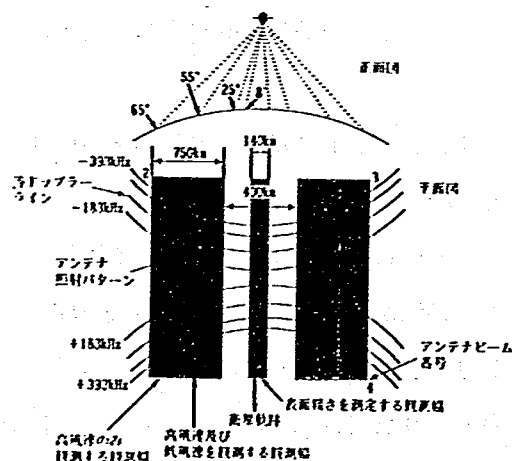


図2.4.2.4 SEASAT-SASSの測定パターン

人工衛星搭載のマイクロ波散乱計で代表的なものはSESAT-SASS (SASS: Seasat-A satellite Scatterometer) である。これは、4本の固定アンテナから、14.5GHzの扇型ビームのバルスを4方向に発振し、後方散乱信号をドップラフィルタを通して小さな照射セルに分割して受信する構造になっている。

「図2.4.2.4」は4本のアンテナビームが地球表面を照射するパターン、及びその区画内の入射角の分布を示す。衛星の運動に伴って、海面上の同一セルを前方のビームと後方のビームが90°ずれた方向から見る事ができる。海面の表面張力波が風向に従った方向特性を持つことに着目して、2方向から後方散乱強度を測定することによって、風向と風速を定めるように工夫されている。

今後、利用可能な人工衛星搭載のマイクロ波散乱計には、「表2.4.2.2」に示すERS-1-AMI-風モード (Active Microwave Instrument) 及び、ADEOS-NSCAT (NASA SCATterometer) があり、共にSESAT-SASSの経験を生かし、3本のアンテナで後方、側方、前方から海面の表面散乱を測定し、海上風の風速ベクトルを観測することとなっている。

表2.4.2.2 ERS-1搭載AMI-風モード及びADEOS搭載NSCATの諸元

マイクロ波散乱計	AMI (ERS-1) 風モード	NSCAT (ADEOS)
周波数	5.3GHz	14GHz
偏波	VV	HH/VV
空間分解能	50km (25km Grid)	50km
観測幅	400km	1200km
ビーム方向	45°、90°、135°	±45°、±135°、65°、-115°
風速レンジ	4-24m/s	3-30m/s
風速観測精度	2m/sまたは10%	2m/sまたは10%
風向レンジ	0-360°	0-360°
風向観測精度	20°	20°以下

(3) マイクロ波高度計

マイクロ波高度計は、飛翔体の軌道を基準に、その直下の地球表面との距離を測定するものであり、海流等の海洋の中規模な現象などを含む研究、散乱強度の測定による海上風速や波高の観測、また、氷床の形状観測等に利用されている。このためには、マイクロ波高度計自身の精度のみならず、基準となる飛翔体の軌道等の正確な測定が必要となる。

マイクロ波高度計の原理を「図2.4.2.5」に示す。地表面あるいは、海面の凹凸は準楕円体面 (reference ellipsoid または spheroid) からの高さとして求められ、この高さを海面高度 (sea surface height: H_{SSH}) という。衛星の高度 (satellite height: H_s) は準楕円体面よりあたえられるから、この値から飛翔体より測定された海面までの距離 (H_a) を引くことにより海面高度が求められる。

マイクロ波高度計においては、距離分解能を得るために、短いバルスを用いる必要があり、このためにバルス圧縮技術を用いている。また、海面より反射されたバルス波形の立ち上がり特性から有義波高が推定されている。

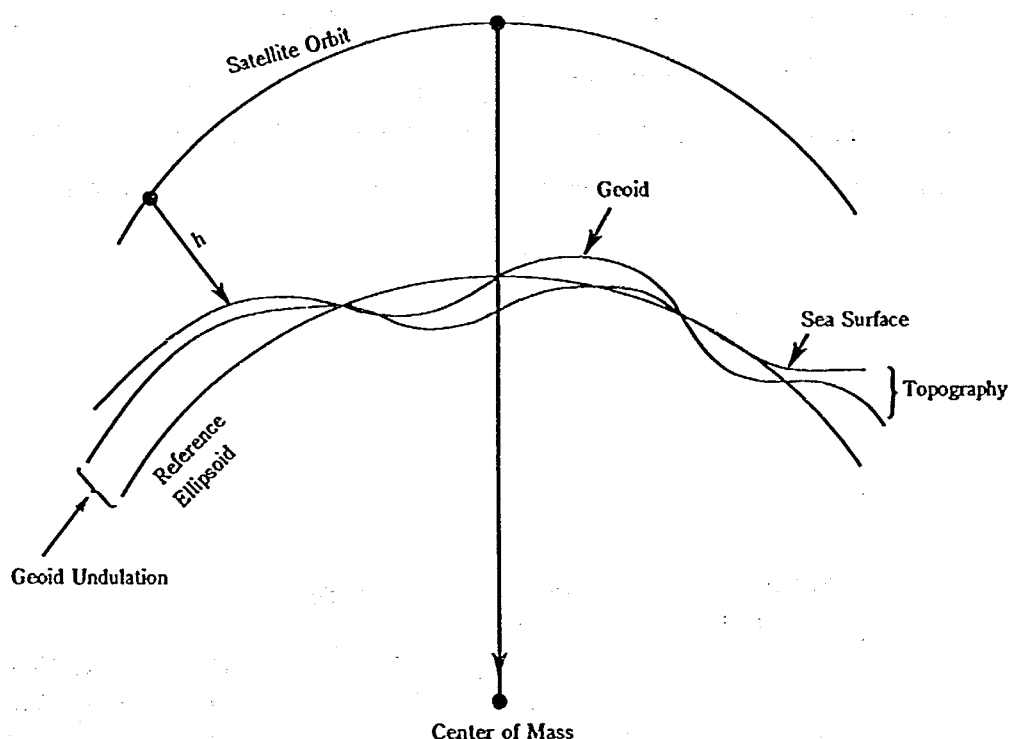


図 2. 4. 2. 5 マイクロ波高度計の原理

今後利用可能となるマイクロ波高度計は「表 2. 4. 2. 3」に示す。ERS-1-RA (radar altimeter) 及び、TOPEX/POSEIDON-ALTであり、特にPOSEIDON計画ではKuバンドとCバンドの2周波の高度計を用い電離層の影響を補正し、さらに水蒸気ラジオメータを用い、対流圏伝搬路の補正を行う。さらに、GPS受信機を搭載し、衛星軌道の決定精度をあげ、レーザー反射鏡の搭載により絶対高度の測定を行う等の測定精度向上のための工夫がなされている。

表 2. 4. 2. 3 人工衛星搭載用マイクロ波高度計の比較

マイクロ波高度計	GEOSAT-ALT/SALT	ERS-1-RA	TOPEX-ALT	POSEIDON-ALT
周波数	13.5GHz	13.8GHz	5.3GHz, 13.6GHz	13.65GHz
バンド幅	320MHz	330/82.5MHz (海/氷)	320MHz	330MHz
送信出力	20W	50W	20W	20W
パルス繰り返し	1020Hz	1020Hz	1000Hz, 4000Hz	1700Hz
パルス圧縮比	33000	6600	33000	33000
積分時間	1sec	0.05sec	1または0.1sec	1または0.1sec
パルス制限瞬間視野	1.7km	1.7km	2.2km	2.2km
対流圏伝搬路長測定精度	-	5cm	±1.2cm	±1.2cm
電子密度測定精度	-	-	±3×10 ¹⁶ e/m ²	-
衛星高度精度	-	-	±14cm	±14cm
高度測定精度	±3.5cm	10cm	±2cm	±4cm
波高測定レンジ	-	1-20cm	-	-
波高測定精度	0.5mまたは±10%	0.5mまたは±10%	0.5mまたは±10%	0.5mまたは±10%
風速測定レンジ	1-18m/s	-	-	-
風速測定精度	±1.8m/s	±2m/s	±2m/s	±2m/s

(4) 合成開口レーダ

合成開口レーダは、レンジ方向においては、パルス圧縮を用いて高い分解能を達成しているが、アジマス方向においては、合成開口処理により分解能を改善している点に特徴がある。位置を次々と変えながら受信した信号を、位相まで含めて記録し、処理することにより、実際のアンテナ長より長い仮想のアンテナ長（合成開口長）を用いて観測したのと同様の効果を得ることになる。「図2.4.2.6」に合成開口レーダの原理について示す。

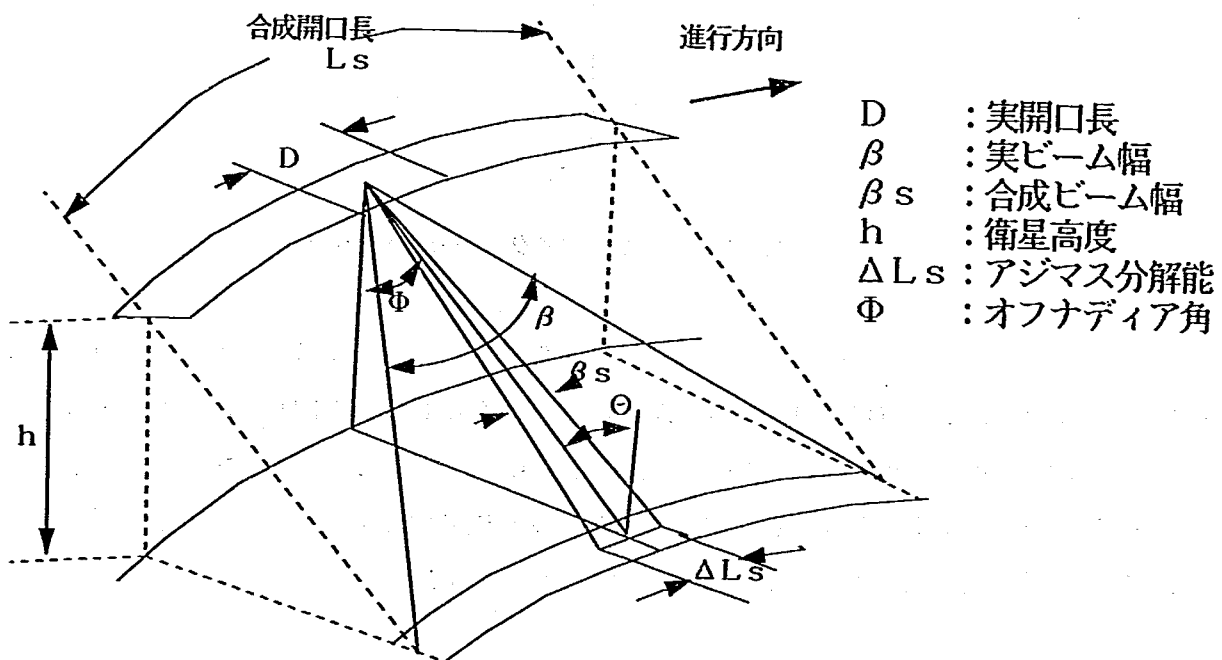


図2.4.2.6 合成開口レーダの原理

合成開口長は、一つのターゲットに対して実開口長のアンテナが照射できる範囲を意味し、次の関係式より、アジマス方向の分解能は実開口長の1/2となる。

$$\text{実ビーム幅} : \beta = \lambda / D$$

$$\text{実分解能} : \Delta L = \beta R = L_s \text{ (合成開口長)}$$

$$\text{合成ビーム幅} : \beta_s = \lambda / 2 L_s = D / 2 R$$

$$\text{合成分解能} : \Delta L_s = \beta_s R = D / 2$$

このように、アジマス方向の分解能はレンジに依らないため、衛星高度からでも高分解能の画像を得ることが可能となる。また、実開口レーダで分解能をあげるにはアンテナを大きくしてビーム幅を狭くすることが必要であるのに対し、合成開口レーダでは実開口長が小さい程分解能が良くなる。

合成開口レーダでは、地表面上のターゲットからの反射パルスはそのターゲットがビームを照射されている限り受信され続ける。その間、プラットフォームの進行に伴ってプラットフォームとターゲットの相対的な位置関係が変化するため、反射パルスにはドップラー効果による周波数偏移が生じる。周波数の偏移は時間に対して線形であるので、反射パルスが線形FM変調を受けたものと解釈できる。そこで、周波数偏移の逆特性に対応したフィルタを通すことでアジマス方向の分解能を改善することができる。この処理をアジマス圧縮ともいう。

合成開口レーダの場合、プラットフォームの速度や姿勢の変化はドップラー偏移の変化を引き起こし、合成開口処理の効果を減殺する。プラットフォームの速度や姿勢の変化を十分な精度で計測し、合成開口処理時に補正を行うことはきわめて困難であるため、プラットフォームの姿勢や速度の安定が強く求められる。

2. 4. 3 その他のセンサ

ここに分類するセンサは、多くの場合すでに説明したセンサを別の用途にも利用しているものである。

(1) 気体用センサ

気体用センサ (atmospheric sensor) は、気温、水蒸気、大気中の微量成分気体、エアロゾル等の3次元的な分布の測定のほか、風の測定、地球放射収支 (earth radiation budget) の測定等を目的としている。

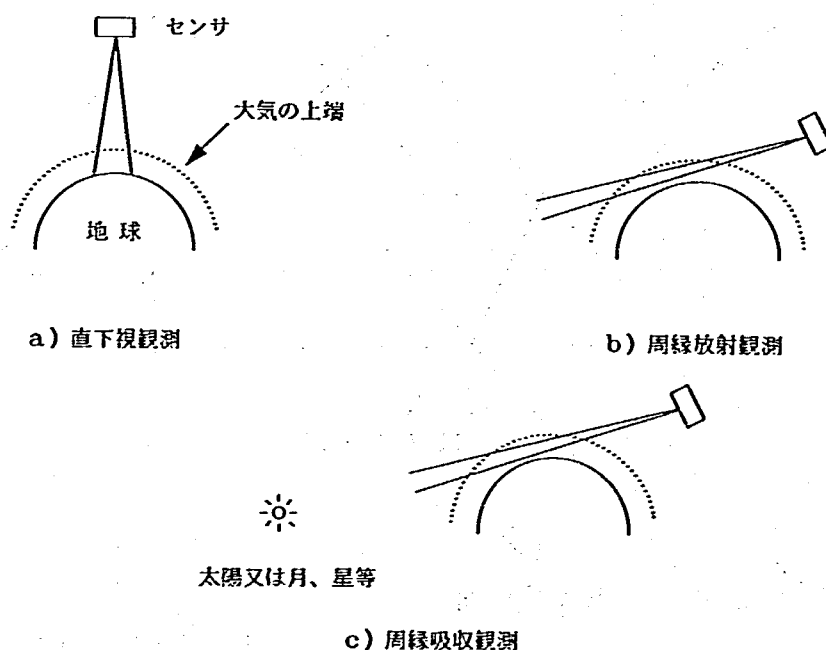


図2. 4. 3. 1 大気用センサの測定方法

これらの物理量は通常リモートセンシングでは直接計れないので、実際には大気の散乱、吸収または放射のスペクトルを測定し、その結果から物理量を推定することになる。測定に利用する電磁波のスペクトル帯域は広く、紫外、可視、赤外の光の領域から、マイクロ波、ミリ波等の電波領域まで広がっている。大気センサには能動方式のものと受動方式のものがあるが、能動方式の代表的なセンサはライダーであり「(2) レーザレーダ」で取りあげるので、ここでは受動方式のセンサについてのみ述べる。

測定の方法は大きく分けて3種類ある。「図2.4.3.1」に示すように1番目の方法は地上測定用のセンサと同様、プラットフォームから鉛直下方を観測する(直下視観測またはnadir観測と呼ばれる)ものである。この方式のセンサは、水平方向の分解能には優れるが、垂直方向の分解能は低くなる。また、測定領域が主として対流圏となり、気体の濃度が低い成層圏の測定は難しい。2番目の方法としては、「図2.4.3.1」に示したように地球の周縁方向を観測(limb observation)するものである。nadir観測のセンサに対し、水平方向の分解能は低い、垂直方向の分解能は高くなる。また、成層圏の観測にも向いている。3番目の方法は、大気の放射を測定するほか、太陽、月、星等の光源からの光の吸収を測定する方法(occultation測定と呼ばれる)である。吸収観測型のセンサでは、SN比は高くなるが、光源が星以外の場合、観測領域が制限される。

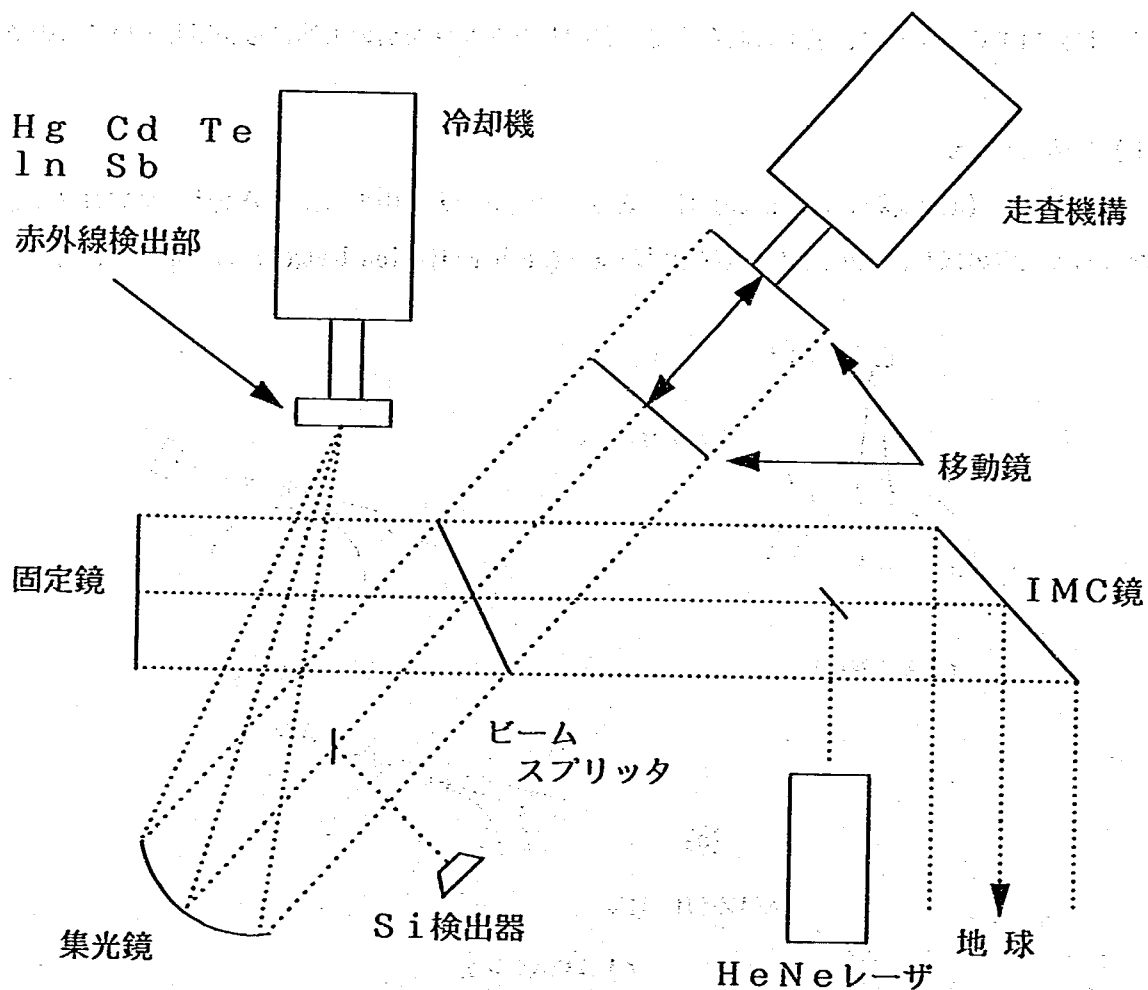


図2.4.3.2 ADEOS搭載マイケルソン分光放射計(IMG)の構造

気体用センサには、プラットフォームから見て、一定の方向のみを観測するものと、走査を行うものがある。前者は通常サウンダ (sounder) と呼ばれる。光の領域のセンサは、スペクトル測定を行うことから、センサの主要部は分光器である。しかし、地上測定用のセンサに対してはるかに高い波長分解能が要求される。通常分光器としては、プリズム、回析格子等の分散型分光器の他、マイケルソン (Michelson) 型、ファブリーペロー (Fabry-perot) 型等の干渉計が用いられ、それぞれマイケルソン分光放射計 (Michelson spectro radiometer)、ファブリーペロー分光放射計 (Fabry-Perot spectro radiometer) と呼ばれている。

「図2.4.3.2」は日本のADEOS衛星に搭載されるマイケルソン分光放射計の構造を示す。3.3-14 μm の波長を直下観測するもので、スペクトル解像力は 0.1 cm^{-1} である。

(2) レーザレーダ

光を発射して、その散乱、反射光の戻り時間や強度、周波数偏移、偏光状態の変化などから、測定対象の距離や濃度、速度、形状などの物理的性質を測定する手法及び装置のことを光レーダ (optical radar) という。しかし、実際に使われる光は、ほとんどがレーザ光であることから、レーザレーダ (laser radar)、あるいは「light detection and ranging」を略してライダ (lidar) と呼ばれている。

レーザレーダは能動型センサの1種で、マイクロ波レーダの「光」版である。利用は、主として大気の状態や、大気汚染、成層圏物質など大気中の物理的性質、及びその空間分布を測定するのに用いられる。また、距離を測定するのにも用いられ、この場合は、レーザ測距儀 (laser distance meter)、レーザ高度計 (laser altimeter) などと呼ばれることが多い。大気が測定の主な対象であるが、水深や油膜などの海面物質、あるいは植物のクロロフィルなどの測定にも用いられ、リモートセンシングにおける大気補正に有効な情報を提供する。

レーザレーダ測定装置の概要は「図2.4.3.3」に示す通りであり、送光光と受光光の波長が変わらないとき、距離 R から戻ってくる受光信号のパワー $P_r(R)$ は次のライダ方程式で表される。

$$P_r(R) = P_o K A_r q \sigma(R) T^2(R) Y(R) / R^2 + P_b$$

ここで、 P_o は送光レーザ光強度、 K は受光光学系効率、 A_r は開口面積、 q はパルス空間長の $1/2$ 、 $\sigma(R)$ は後方散乱係数、 $T(R)$ は大気の透過率、 $Y(R)$ は幾何学的効率、 P_b は背景光雑音である。受光された信号光は検出器で電気信号に変えられ、AD変換されてデジタル量としてコンピュータで処理され、解析・表示される。レーザレーダの到達距離は受光信号強度と雑音強度との関係から決まる。

また、レーザレーダは測定の種類や対象に応じて、「表2.4.3.1」のように分類できる。この表で、エアロゾルからのミー散乱を測定するミーライダは信号強度も強く、技術的にも確立された手法である。また、各気体濃度の測定には、蛍光散乱 (蛍光ライダ)、ラマン散乱 (ラマンライダ)、差分吸収 (差分吸収ライダ/DIAL) などが、速度の測定にはドップラライダが使用される。形状・種類の測定には偏光解消度や多波長での測定が併用される。

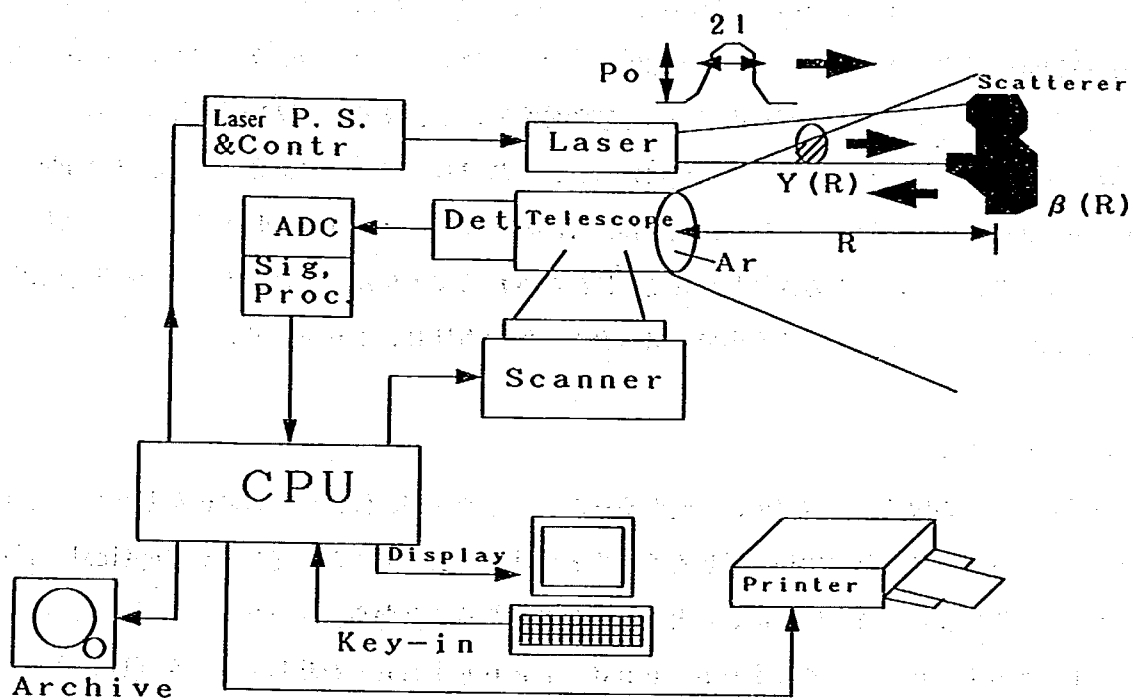


図 2. 4. 3. 3 レーザレーダ測定装置の概要

表 2. 4. 3. 1 測定種別レーザレーダ (ライダ) の種類

測定量	強度					周波数	偏光
相互作用	ミー散乱	レーリ散乱	蛍光散乱	ラマン散乱	差分吸収	—	—
物理量	エアロゾル	空気分子	気体濃度	高濃度 気体濃度	気体濃度	速度	形状
個別レーザ レーダ名	ミーライダ	レーリ ライダ	蛍光 ライダ	ラマン ライダ	差分吸収 ライダ (DIAL)	ドップラー ライダ	(ミー ライダ)
相互作用の 大きさ	大	小	中 (消光効果 有り)	小	中	大	—

2. 5 主な衛星データ

個々の物体が反射するスペクトル反射特性を人工衛星に搭載したリモートセンサを通して電気信号に変換して数値データとして収集したものが衛星データである。

(1) 衛星データの種類

1972年から本格的に利用され始めた衛星データは、20年以上を経た現在、「図2.5.1」に示すように、LANDSATデータ(MSS:Multi-Spectral Scanner, TM:Thematic Mapper)、NOAAデータ(AVHRR:Advanced very High Resolution Radiometer)、SPOTデータ(HRV:High Resolution Visible)、MOS-1データ(MESSR, VTIR, MSR)等々その種類も多く、利用分野や目的に応じて使い分けることができるようになってきた。加えて近い将来利用可能なものに熱帯降雨観測衛星(TRMM)、地球観測プラットフォーム技術衛星(ADEOS)及び超高解像度衛星(CRSS)等があり10年前とは比べものにならない数である。

しかし、「建設分野での利用」を考えた場合には、人工衛星そのものの種類よりは、それに搭載されているセンサーの中身が問題になる。このような観点からすると、MSS、TM(共にLANDSAT)、HRV(SPOT)、MESS(MOS-1)、AVHRR(NOAA)、AMI(EERS-1のSARモード)、OPS等が代表的なものになる。また、将来型の衛星データとして資源探査を中心にSAR(JERS-1)の利用分野が少しずつ広がりつつある。

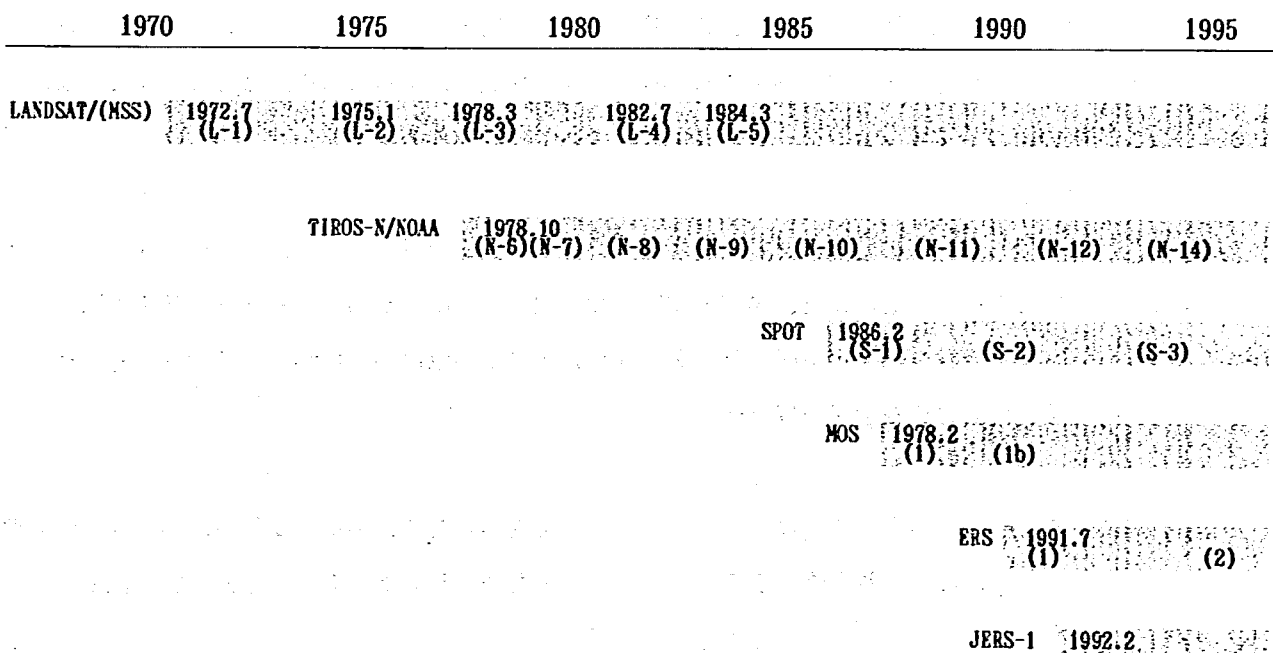


図2.5.1 衛星データの歩み

(2) 地上システム

衛星データは、地上から指令信号で観測地域を指定すると自動的にデータ記録装置に記録され、希望する地上局の上空で再生送信され、世界中の多くの地上受信局で受信されて一般に配付されている。

確実にデータを取得するためには、衛星における姿勢制御から位置の測定、観測機器のモニタリング（地上における追跡、記録を含めた管制システム）及びデータ転送等を行うための地上システムが必要である。

「図2.5.2」に地上システムの構成を示すと共に概略を述べる。

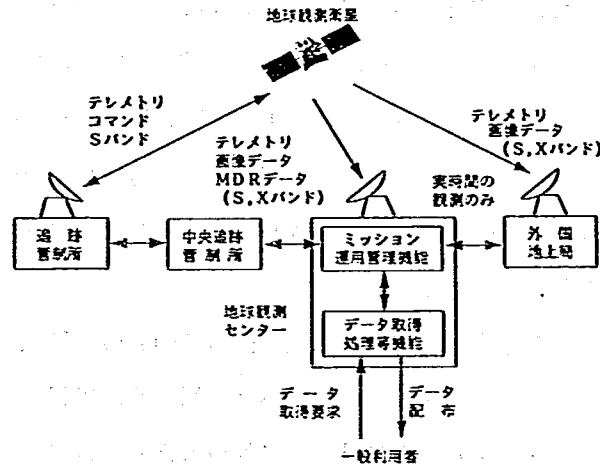


図2.5.2 日本の地球観測衛星の運用システム

① 地球観測センター（EOC：Earth Observation Center）

衛星から送信される観測機器データやテレメトリデータを受信・記録・処理して、いろいろな要求に応じた解析ができるように磁気テープ、フィルム、写真、等を作成し、配布機関を通じて提供する。また、ミッション運用の監視やミッションデータの有用性についても確認作業をする。

② 中央追跡管制所

追跡管制所で受信した衛星の管理に必要な信号を、コンピュータで処理したうえで、衛星が正常に作動するように指令信号を作成する。また、勝浦・増田・沖縄追跡管制所、欧州宇宙機構（ESA：European Space Agency）及びフランス国立宇宙研究センター（CNES：Centre National d'Etudes Spatiales）との間で追跡支援のための相互通信を行なう。

③ 追跡管制所

衛星を追跡して、衛星の管理に必要なテレメトリデータを受信したり、衛星の姿勢が傾いたり、位置がずれているような場合には、それを修正するコマンドデータを発信して衛星の姿勢や軌道を確保する。

④ 外国地上局

衛星が打ち上げロケットから切り離された後、初期段階で欧州宇宙機構（ESA：European Space Agency）やフランス国立宇宙研究センター（CNES：Centre National d'Etudes Spatiales）から追跡管制の支援を受ける。

(3) 衛星データの利用

衛星データは、土地利用状況や穀物の成育状況の把握、火山活動・山火事・赤潮の監視、砂漠や草原の状況把握、水質の分析、森林資源や気象・積雪・海流・海面温度等の調査、地下資源の探査等、建設分野で利用するために役立っていかうとしている。

現在、米国等の民間企業が超高分解能型センサを搭載した人工衛星の適用化運用を計画しており、これらの計画が実現された場合には、地上分解能が1 mとか2 mといった超高解像度の衛星データの取得が可能になるといわれている。そうすると、建設行政における社会資本の整備や維持、管理のための基礎的データの収集に衛星リモートセンシングを利用できる可能性がますます広がることになる。

このように、21世紀を目前にした現在、多くの人工衛星の打ち上げ計画が発表され、衛星データは新しい時代に入りつつあるといえる。ここでは、現在入手可能な主な衛星データについてその概要を示す。

2. 5. 1 LANDSATデータ

1972年米国航空宇宙局(NASA:National Aeronautics and Space Administration)が最初の地球資源実験衛星ERTS-1号(Earth Resources Technology Satellite、後にLANDSAT-1と改名)を打ち上げ、遠く離れた宇宙から地球を観測することに成功した。

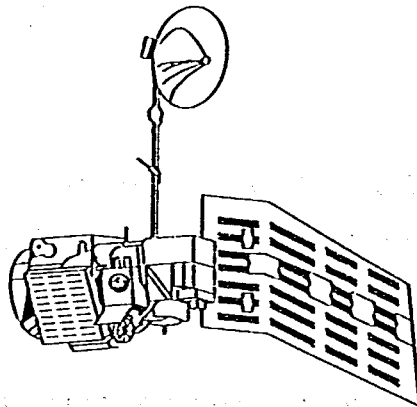


図2.5.1.1 LANDSAT 4及び5号の外観

その時、MSS (Multi-Spectral Scanner) で得られた地球表面のデータは、多くの関係者が予測していた以上の成果であったことから、当初の観測予定を延長してMSSがダウンするまで続けられた。さらに、LANDSAT-2号を1975年に、LANDSAT-3号を1978年に、LANDSAT-4号を1982年に、LANDSAT-5号を1984年に次々と打ち上げ、地球観測に大きな足跡を残してきた。そして、LANDSAT-5号の後継機として、1993年に、LANDSAT-6号が打ち上げられたが失敗に終わり、一部では、リモートセンシングの発展に大きな功績を残したLANDSATの時代が終焉したともいわれている。「図2.5.1.1」にLANDSAT 4及び5号の外観を示す。

(1) LANDSAT/MSS

LANDSAT-1~LANDSAT-3までは全く同じ方式で運用し、MSSでデータ収集が行われた。MSSの波長帯域は「表2.5.1.1」の通りである。これらの衛星は実験用として打ち上げられたものであるが、画像処理技術の著しい発展に支えられて、米国での当初の目的であった鉱物資源の探査、小麦の収穫予測、森林や農地の管理に大きな成果をあげ、予想以上の実用価値があることが確認された。当初、観測されたMSSデータは米国の3ヶ所の地上受信局で受信し、ここで処理されたデータを各国の利用者に配付していたが、現在では世界の17ヶ国に受信局が設置され、衛星からの直接受信を行っている。我が国でも、1979年に地上局が開設されて韓国と中国の一部を含む極東地域のデータが直接受信されている。人工衛星に搭載されたMSSが走査して得られた画像は約79m×58m四方の面積（地域）を単位（これを画素という）として組み立てられている。画素の大きさは画像の空間分解能を示し、画像を識別する限界を示す値である。我が国のように土地利用の単位が小さい地域では1画素の中に道路、家屋、庭など多くの種類の物件が含まれていることが多く、画素を小さくすればそれだけ判別の精度が良くなる。

表2.5.1.1 LANDSAT/MSSの波長帯域

MSSのバンド呼称	波長帯域 (nm)	主な利用分野
MSS 4	450 ~ 520	土壌と植物、針葉樹と広葉樹の 区別及び水質調査
MSS 5	520 ~ 600	活力ある植物からの反射量
MSS 6	630 ~ 690	植物のクロロフィルの吸収性
MSS 7	750 ~ 900	活力ある植物の近赤外反射量

(2) LANDSAT/TM

MSSデータの精度が実績で証明されると、その精度をさらに高めることが当然要求される。これに応えて、LANDSAT-4からMSSの他にTM (Thematic Mapper) が搭載された。「表2.5.1.2」にTMの波長帯域を示す。

表2.5.1.2 LANDSAT/TMの波長帯域

TMのバンド呼称	波長帯域 (nm)	主な利用分野
TM 1	450 ~ 520	土壌と植物、針葉樹と広葉樹の 区別及び水質調査
TM 2	520 ~ 600	活力ある植物からの反射量
TM 3	630 ~ 690	植物のクロロフィルの吸収性
TM 4	750 ~ 900	活力ある植物の近赤外反射量
TM 5	1550 ~ 1750	植物の含水量、雲と雪の区別
TM 6	10400 ~ 12500	熱的特性の調査
TM 7	2080 ~ 2350	熱水作用を受けた岩石の調査

TMデータは現在でも私たちが利用できる最も精度の高いデータの1つである。TMの主な改良点を以下に示す。

- ① 1画素の大きさがMSSに比べて約1/4になった。

② 新しい波長域のバンド帯が加えられた。

③ 反射光の強さをより細かく分級して記録できる。

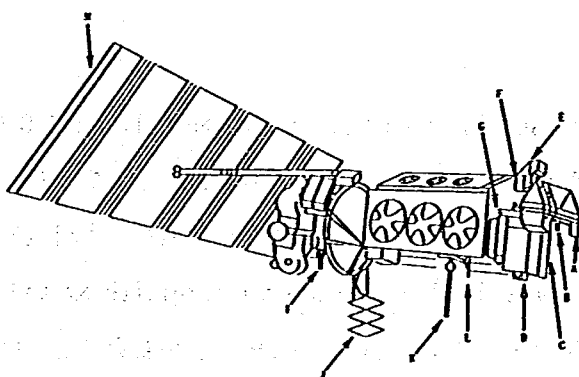
これらはいずれもMSSの経験を通じて得られた成果であり、当時の衛星データとしては画期的な出来事であった。TMデータの特徴の1つはTM5(1550~1750nm、近赤外バンド)の追加である。普通、健康な緑の葉は近赤外で強いスペクトル反射を示すことは前述した通りである。さらに、1400nm付近になると水の吸収帯があり、植物が十分な水分を含んで健康な状態にあるか否かを示す波長で、植物の生育調査に利用されている。米国では小麦の収穫予測が重要な課題であり、灌漑水を管理するときの指標となっている。また、水資源の重要な源となる積雪量の調査にも効果的に利用されている。

絶対温度0度以上の物体は全てそれぞれの温度に応じて、また物質に応じて一定の電磁波を放射している。木炭は常温では全ての光を吸収して黒いが、これに火がつき温度があがると可視光の赤の波長を含むやや短い赤外域の電磁波を出すのはその1例である。常温30℃の物体では8000~12000nm(8~12μm)の波長域(熱赤外)の電磁波をピークとする放射をしている。この場合、波長について積分して得られる全放射量は温度の4乗に比例するという法則(ステファン・ボルツマンの法則)があり、これによって、この波長域の放射量を測れば、その物体の温度を知ることができる。TM6は、この方式で物体の温度分布を測るのに利用され、植物の活性度や水温の分布を知ることができ、夜間での観測が可能な点で利用価値が高い。

TM7は後から追加された波長域である。近年、熱水作用を受けた鉱物の有用性が高まっていることから、地質学者の要望に応じて付加されたが、この波長帯のデータを利用した研究報告はあまり多くない。

2. 5. 2 NOAAデータ

NOAAは米国海洋大気庁(National Oceanic and Atmospheric Administration)によって運用されている第3、第4世代の気象観測衛星である。NOAAは原則として2機が同時に運用されており、同一地点を1機で最低一日2回、計4回以上の観測が可能である。昼間の観測に関しては、1機は午前中、他の1機は午後の観測を行う。「図2.5.2.1」にNOAAの外観を示す。



A: AVHRRセンサー, B: 気圧計ユニット, C: 高度計ユニット
D: マイクロ波ユニット(B~D: TOVS), E: 陽子と電子測定器, F: 高エネルギー陽子の粒子測定器, G: 地球センサー, H: 太陽電池アレイ, I: Sバンドアンテナ, J: VHFアンテナ, K: データ伝送システム用アンテナ, L: Xバンドアンテナ

図2.5.2.1 NOAA衛星の外観

表2. 5. 2. 1 極軌道気象衛星NOAAの気象観測用センサの概要

センサ名	観測波長帯域		観測項目	分解能	観測幅
AVHRR Advanced Very High Resolution Radiometer	1	0.58 ~ 0.68 μm	雲及び地表面マッピング	1.1 km IFOV 1.3 mrad	2700 km FOV $\pm 55.4^\circ$
	2	0.725 ~ 1.10	降水分布		
	3	3.55 ~ 3.93	海面温度、雲マッピング (夜間)		
	4	10.30 ~ 11.30	海面温度、雲マッピング (昼間)		
	5	11.50 ~ 12.50	海面温度		
TOVS (TIROS Operational Vertical Sounder)					
SSU Stratospheric Sounding Unit	1	15 μm	成層圏からの熱放射の探知による 垂直温度分布の測定	147 km	736 km
	2	15 CO2			
	3	15			
HIRS/2 High Resolution Infrared Radiation Sounder Model-2	1	14.96 μm	対流圏からの熱放射の探知による 垂直温度分布の測定の比較的低温 の領域で感度が良い。チャンネル 5、6、7の放射量からは視野内 の雲高、雲量を計算できる。	20 km	2200 km
	2	14.71			
	3	14.49 CO2			
	4	14.22			
	5	13.97			
	6	13.64 CO2, H2O			
	7	13.35			
	8	11.11 μm 窓	地表面温度、雲		
	9	9.71 μm O3	全O3量		
	10	8.16 μm	対流圏の水蒸気探知による垂直温 度分布の測定、薄い巻き雲の検知		
	11	7.33 H2O			
	12	6.72			
	13	4.57 μm	対流圏からの熱放射の探知による 垂直温度分布の測定の比較的暖か い領域で感度が良い。15 μm バン ドよりも雲による影響が少ない。		
	14	4.52			
	15	4.46 CO2			
16	4.40				
17	4.24				
18	4.00 μm	11.11 μm の窓よりも雲及びH2O による影響が少ない。11.11 μm のデータと合わせて雲の検知及び地 表面温度の測定に利用。0.69 μm のチャンネルは4.00及び11.11 μm の チャンネルと合わせて晴れ間を決定す るのに利用。			
19	3.76 窓				
20	0.69				
MSU Microwave Sounding Unit	1	50.31 GHz	波長5.5mmのO2吸収帯の観測によ り、雲を通しての垂直温度分布を 測定。チャンネル1は窓である。	110 km	2347 km
	2	53.73			
	3	54.96			
	4	57.95			

米国の極軌道実用気象衛星はTIROS (Television and Infrared Observation Satellite: 1960年4月打ち上げ)、ESSA (Environmental Science Service Administration Satellite: 1966~1969年にかけてNASAが9号まで打ち上げた一連の極軌道気象衛星。ESSA衛星は最初の実用気象衛星シリーズで1976年まで運用された)、ITOS (Improved TIROS Operational satellite System: 米国航空宇宙局が開発した改良型TIROS実用衛星でITOS-D [4番目] から組織名の変更とともにNOAAと名称変更) を経て1978年10月以降に打ち上げたものをTIROS-N/NOAAシリーズ (最も新しいものはAdvanced TIROS-N (ATN) / NOAA シリーズ) と呼ぶようになった。これは大型の3軸

安定方式の衛星で、高度850～866km、軌道傾斜角102°に打ち上げられ、衛星重量は735kgである。現在運用されている極軌道衛星のプロトタイプとして米国の航空宇宙局（NASA）が開発した第4世代の極軌道気象衛星であり、静止気象衛星（GEOS）と相補って気象と海面の情報を収集・提供している。現在、NOAA-11とNOAA-12が稼働中である。初期のESSAシリーズの成果から、AVHRR（Advanced very High Resolution Radiometer：可視熱赤外放射計）とTOVS（TIROS Operational Vertical Sounder：垂直気温分布測定サウンダ）及びDCS（Data Correction System：データ収集システム）のセンサシステムを搭載している。

「表2.5.2.1」に現在のNOAAに搭載されている代表的なセンサの概要を示す。特に、AVHRRによる観測データは雲、大気、陸上の温度分布をデジタルのHRPT信号（LAC：Local Area Coverage）及びアナログのAPT信号（GAC：Global Area Coverage）で衛星からリアルタイムで世界中に送信されていることから広く利用されている。最近の漁船にはこのAPT信号を直接受信して利用するものが増えてきた。

2.5.3 GMSデータ

昭和52年7月14日、我が国で初めての静止衛星「ひまわり」（GMS：Geostationary Meteorological Satellite）が米国大西洋沿岸のケープカナベラルから打ち上げられ、9月8日始めて地球の画像を得ることができた。赤道上空35800kmの宇宙から沖縄近海を北上して日本列島を狙っている沖永良部台風の様子を見事に捕らえている姿が印象的であったといわれている。「ひまわり」による気象観測を引き継ぐために、昭和56年8月11日にはひまわり2号（GMS-2）が国産のN-2ロケットで宇宙開発事業団種子島宇宙センターから打ち上げられた。さらに、昭和59年8月3日、ひまわり3号（GMS-3）がN-2ロケットで打ち上げられ、平成元年9月6日、H-1ロケットでひまわり4号（GMS-4）を打ち上げ、平成7年まで運用した。その後、ひまわり4号の後継機として、平成7年3月18日にH-2ロケットでひまわり5号（GMS-5）が打ち上げられ、現在、運用中である。

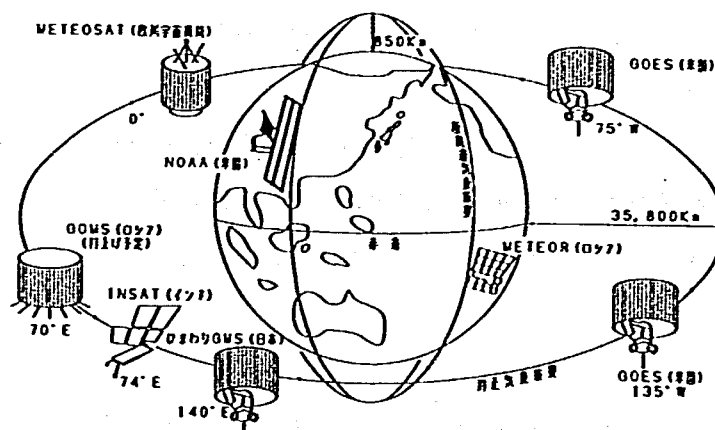


図2.5.3.1 世界気象衛星観測網の概念図

GMSは我が国の気象業務にとって不可欠なものになっているだけでなく、「図2.5.3.1」に示すとおり、世界気象機構(WMO: World Meteorological Organization)の世界気象監視(WWW: World Weather Watch)計画における「世界気象衛星観測網」を構成している。この宇宙からの気象観測網は、観測点の乏しい海洋や砂漠地帯、極地方等の地域を含む、地球規模の大気の流れや雲分布の常時観測を実現するものである。我が国は地球を取り巻く5個の静止気象衛星の1つを担当しており、GMSを東経140度の赤道上に打ち上げ、その直下点を中心に半径6000kmの地域(半球)を観測している。他の4個の静止気象衛星は米国2衛星(GEOS)、欧州1衛星(METOSAT)、インド1衛星(INSAT)である。

(1) GMSデータの機能

① 雲画像の取得

GMSの最も重要な機能は、可視赤外走査放射計(VISSR: Visible and Spin Scan Radiometer)による気象観測である。25分間かけて撮像されたGMSのデータはコンピュータ処理され、雲画像が作成される他、雲の上部の温度、海面水温、上層・下層の風向/風速等が算出される。

② 雲画像の伝送

2つ目の機能は、VISSRによって撮像された雲画像を、各国の気象機関を中心とした利用者に伝送することである。中規模利用局へは高分解能画像をリアルタイムに伝送する(ストレッチVISSR)。また、小規模利用局へは、緯度・経度の入った低分解能の画像を準リアルタイムに伝送する(WEFAX)。

③ 通報局からのデータ伝送

3つ目の機能は、離島、僻地、山岳地、海洋、あるいは船舶や航空機に設置した自動気象観測装置(通報局という)からの気象データを自動的に収集し、気象衛星センターに伝送する。

(2) GMSデータの気象業務への利用

① 台風の監視

台風が発生・発達する海域は観測点のある島や航行する船舶が少なく、気象データが得られにくい地域である。GMSは台風が発生する以前から発生・発達・消滅するまでの様子をあますところなく捕らえ、その中心や広がり、強さを精度よく推定することが可能になった。

② 低気圧や集中豪雨の監視

日本列島付近は、春や秋に低気圧が急速に発達することが多く、また梅雨期末期には、しばしば集中豪雨に見舞われ、強風や大雨による災害が起こることが多い。GMSデータは、低気圧や豪雨をもたらす前線や積乱雲の規模・強度・移動等を把握することに有効であり、的確に予報や警報の発表に威力を発揮している。

③ 数値予報等での利用

GMSデータから、天気予報図を作成するに当たって重要な位置を占める数値予報の基礎データとして、雲の移動量から風向・風速等を算出するとともに、長期予報や気候変動の把握にも不可欠な海面水温や雲量分布も算出している。

④ 気候変動の解明のための基礎データ

GMSデータは、気候変動のメカニズム解明にも有効に利用されている。世界気象機関 (WMO : World Meteorological Organization) と国際学術連合 (ICSU : International Committee of Scientific Union) による世界気候研究計画 (WCRP) の下にある国際衛星雲気候計画 (GPCP) がそれである。これらの計画は、GMSを始め気象衛星によって観測された赤外データから、雲量、雲上部の温度等について全球のデータセットを作成し、世界の研究者に提供している。

2. 5. 4 SPOTデータ

SPOT (Système Probatoire d'Observation de la Terre) はフランスの開発した地球観測衛星で、SPOT-1号は1986年2月22日、フランス国立宇宙研究センター (CNES : Centre National d'Études des Spatiales) によって打ち上げられた。「図2.5.4.1」に外観を示す。地球観測衛星としては始めて地形のステレオデータを収集した点 (ペアの画像は異なる日に撮像したものになる) で、新しい世代を開いた衛星の1つである。また、SPOT衛星の欠点としては、観測幅が狭いので地球を隙間なく観測するためには回帰日数を長くして、パス間隔を狭くしなければならない点である。ちなみに、SPOTの回帰日数は26日で、スキップ数は5である。例えば、今日、110のパスがあったとした場合、翌日は115のパスを通ることになる。なお、SPOTにはSPOT用の座標系 (WRS : World Reference System 世界参照座標系といっている) がある。現在、SPOT-4号が稼働しており、実際の運用はSPOT Image社 (民営運用) が行っている。SPOTは上記するように、語源的には「地球観測システム」の意である。

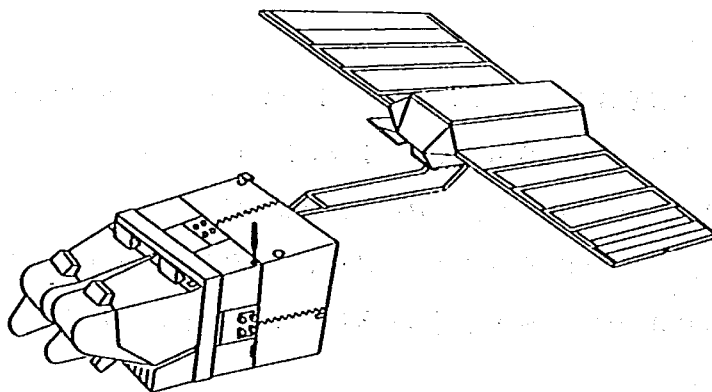


図2.5.4.1 SPOTの外観

(1) SPOT/HRV

SPOTは、高解像度の光学センサである可視近赤外放射計 (HRV : High Resolution Visible) を2台搭載している。SPOT/HRVの仕様は「表2.5.4.1」の通りである。2台のセンサを同時に稼働させれば120 km幅の地表観測が可能であるが、通常は1台のみであることから観測幅はごく限られてしまう点に難点があるといわれている。すなわち、HRVはバンクローマチックモードまたはマルチスペクトルモー

ドのどちらかを選択して運用される。パンクロマチックモードでは観測波長は510～730nmの1バンドのみで、空間分解能は10×10mである。マルチスペクトルモードの場合には「表2.5.4.1」の通りであり、空間分解能は20×20mである。1ライン当たりのピクセル数はパンクロマチックモードで6000、マルチスペクトルモードで3000である。量子化レベルは8ビット、視野角は4.13°である。

HRVの特徴は、ポインタブル機構を有しており（開口部に平面鏡を内蔵しており、地上からの指令でコントロールが可能）、0.6°刻みで衛星直下から±27°まで観測方向を変えて観測できる点（衛星超直下点から左右475kmまでの地点まで撮像できる）で、これよりステレオ画像が得られ、地形情報が得られることが最大の特徴である。

表2.5.4.1 SPOT/HRVの諸元

項 目	数 値 等 デ ー タ
波 長 帯 (μm)	0.50～0.59 0.67～0.68 (多重スペクトル 0.79～0.89 モード) 0.51～0.73 (パンクロモード)
視 野 角	4.13°
観 測 幅	60km (衛星の真下に向いた場合)
解 像 度	20m (多重スペクトルモードの場合) 10m (パンクロマチックモードの場合)
センサ形式	プッシュブルームスキャナー
20m ライン走査時間	3m・sec
符号化 (Cording)	8bit (多重スペクトルモードの場合) 6bit (パンクロマチックモードの場合)
集光レンズ直径	330mm
ミラー指向角	±27° (0.6° 刻み)
ミラー指向時間	15sec以内。天底角0～27°
データ転送レート	24.6862Mbit/sec×2
伝送周波数帯	8253MHz, 差動QPSK
送電電力	20W

(2) SPOTデータの特徴

SPOTデータは、LANDSATデータに比べて、以下のような種々の特徴を有している。

- ① 空間分解能がモノクロ画像で10m、カラー画像で20mと他の衛星データに比して最も高い。
- ② 観測センサ (HRV) が2台搭載されており、異なった日に異なった方向から観測した一対の画像で立体観測ができる。最近多くの研究者によってHRVデータを用いた地形図作成の研究が行われている。縮尺1:100,000の地形図や実体視のできる鳥瞰図等が作成されており、衛星データの新しい利用分野が開かれつつある。
- ③ 可動ミラーにより地表面を斜め方向からも観測できるので、衛星軌道を中心に幅950kmの範囲が観測できる。例えば赤道上では98回（平均して3.7日に1回）、緯度45度では152回（2.4日に1回）の観測が可能になる。観測周期が短くなることは、快晴の日が少ない地域での利用価値が高くなることを意味する。現実には、気象条件の制約から衛星の直下型のデータ観測実績はあまり多くない。熱い気象条件の良い地域をめがけて斜め観測が多くなり、データ使用時に幾何補正等の面で問題が残されている。最近の研究結果では、27度未満の斜め観測データまでは十分に利用できることが報告されている。

2. 5. 5 MOS-1 データ

MOS-1 (Marine Observation Satellite) “もも” は科学技術庁が中心になって各利用分野の要求仕様を取りまとめた基本的要求条件の作成を行い、その結果を受けて宇宙開発事業団で開発した。我が国初の本格的な地球観測衛星として位置づけられている。「図2.5.5.1」に外観を示す。これまでにMOS-1 aが1987年2月19日に始めて打ち上げられ、設計寿命2年を過ぎても順調に稼働し続けた。現在は、後継機であるMOS-1 bが1990年2月7日に打ち上げられて地球観測が続けられている。

この衛星は、地球観測衛星の基本技術の確立と海洋面の色及び温度を中心とした海洋現象を始めとする地球観測を目的としており、高度909 kmの宇宙からセンサを常に地球に向けながら、約103分かけて地球を一周している。

LANDSATの突然の途絶にあって、地球観測データの継続性の問題もあり、MOS-1の存在価値がにわかに大きくなっていることも事実である。

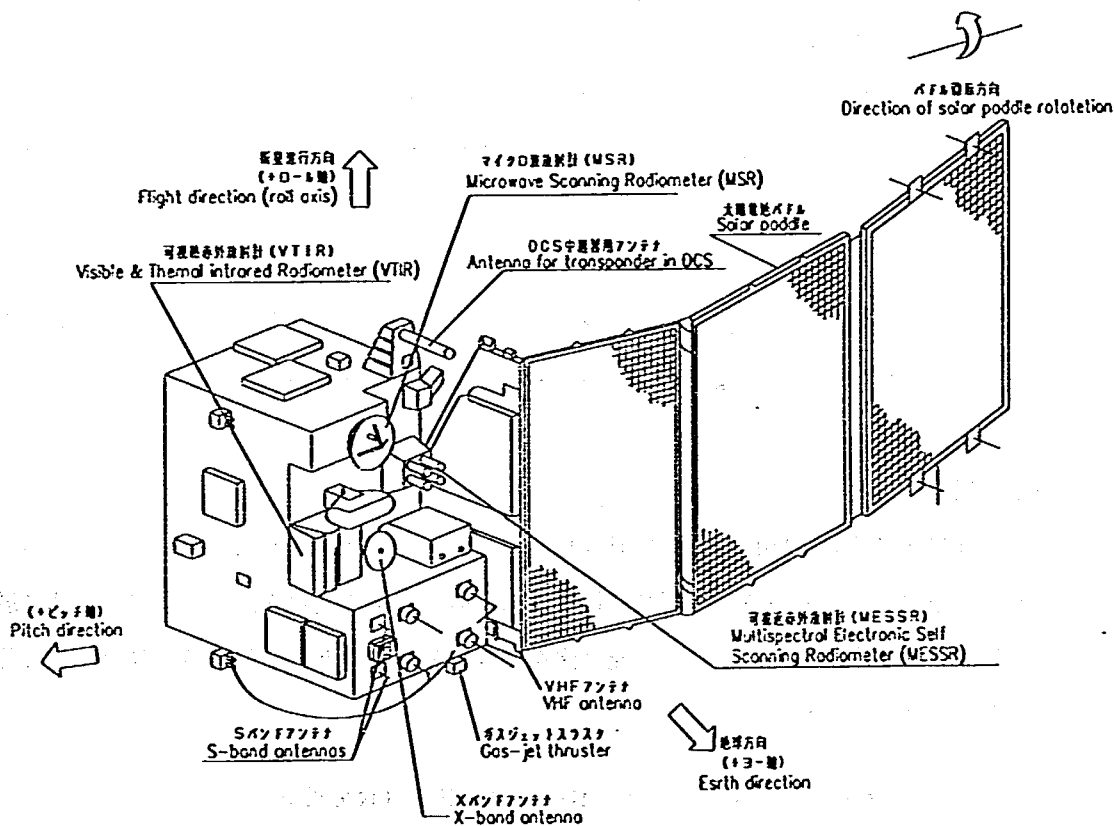


図2.5.5.1 MOS-1の外観

(1) MOS-1の役割

“もも”は四面海に囲まれた我が国が、海洋資源の調査及びその有効利用、海洋環境の保全等の分野における利用を目的として海面の色（海色）及び海水温を中心とした海洋観測ならびに今後の我が国の地球観測衛星に共通する技術の確立を目的としたものである。以下に、MOS-1の役割について記述する。

① 地球観測衛星の基本技術の確立

地球観測衛星のシステム及び主要なサブシステム（三軸姿勢制御系、熱制御系、構体系、太陽電池パドル系等）の設計・制作、インテグレーション・試験技術の確立を目指す。

② ミッション機器による海洋観測

可視近赤外放射系（MESSR）、可視熱赤外放射系（VTIR）、マイクロ波放射系（MSR）により、海洋を中心とした地球全般の観測（海洋の色、温度、土地利用状況等）と、これらミッション機器の開発及び機能・性能の確認を行う。

DCS用地上送信設備は船舶、ブイ、離島等に設置され、そこで観測したデータを衛星に送信する。

③ データ収集システム（DCS）の基礎実験

洋上に浮かぶブイなどで観測したデータをMOS-1を使って収集するデータ収集システムの基礎実験、例えば、ブイの位置を推定する実験を行う。

④ 太陽同期軌道投入技術の習得

太陽同期軌道に衛星を投入するためには、ロケットを南向きに飛行させる必要があり、それまでの静止衛星の打ち上げとは異なる新しい軌道投入技術の習得が必要であった。

⑤ 太陽同期軌道の追跡・管制技術の習得

筑波宇宙センターより、増田（鹿児島県）・勝浦（千葉県）・沖縄（沖縄県）にある追跡管制センターを中継して、衛星軌道（太陽同期軌道）の保持（軌道及び姿勢の決定並びに制御）や衛星の運用（衛星状態の監視及び運用操作）を行う。

⑥ 地球観測衛星運用技術の習得

MOS-1からの地球観測データは、地球観測センター（EOC）で受信される。筑波宇宙センターでは、地球観測センターと情報交換をしながら、MOS-1の運用を行っている。

(2) MOS-1/MESSR

可視近赤外放射計（MESSR: Multispectral Electric Self Scanning Radiometer）は、海域・陸域の情報を取得することを目的としている。海面及び地表面の反射光を可視光から近赤外までの4波長域に分けて、CCDセンサ（固体撮像素子）により二次元画像を撮像するものである。MESSRセンサの仕様は「表2.5.5.1」のとおりである。

表2.5.5.1 MOS-1/MESSRの諸元

地表での走査幅	100 km (2台で約200 km)
画像を構成する1単位 (1ピクセル)	地上で約50×50 m
観測波長 (nm)	0.51~0.59 0.61~0.69 0.72~0.80 0.80~1.10
検出器	2048個のCCD
観測幅	100×2 km
送信データレート	8.78 Mbit/sec
消費電力	89.8 (片側) W
重量	70.70 kg

(3) MOS-1/VTIR

可視熱赤放射計 (VTIR : Visible and Thermal Infrared Radiometer) は、雲及び海面温度等に関する情報を取得することを目的としている。可視及び熱赤外の波長域で、陸域・海域の画像を撮像するものである。VTIRセンサの仕様は「表2.5.5.2」のとおりである。

表2.5.5.2 MOS-1/VTIRの諸元

地表での走査幅	約1500km
画像を構成する1単位 (1ピクセル)	地上で可視域が約900km 赤外域が約2700m
観測波長 (μm)	0.50~0.70 6.00~7.00 10.50~11.50 11.50~12.50
検出器	0.50~0.70μmの範囲はSiPIN それ以外の波長域ではHgCdTe
観測幅	1500km
送信データレート	1.6Mbit/sec
送信電力	46.1W
重量	30.20kg

(4) MOS-1/MSR

マイクロ波放射計 (MSR : Microwave Scanning Radiometer) は、海洋上・大気中の水蒸気量、水量及び海水や積雪等に関するデータ取得を目的としたセンサである。マイクロ波帯域で海域・陸域の画像を撮像する。MSRセンサの仕様は「表2.5.5.3」のとおりである。

表2.5.5.3 MOS-1/MSRの諸元

地表での走査幅	約320km
画像を構成する1単位 (1ピクセル)	地上で約23km~32km
観測波長 (周波数)	垂直偏波 31.4±0.25GHz 水平偏波 23.8±0.20GHz
受信器	Dicke受信機
観測偏	317km
送信データレート	0.002Mbit/sec
消費電力	48.6W
重量	54.0kg

2.5.6 E・ERS-1データ

E・ERS-1 (European Remote Sensing Satellite-1) はESA (European Space Agency, 欧州宇宙機関) が1991年7月17日に打ち上げたESA初の地球観測衛星で、マイクロ波を中心とした、海洋観測を主目的にしたものである。「図2.5.6.1」にE・ERS-1の外観を示す。主な観測機器としては、合成開口レーダ (SAR)、潮風散乱計 (SCAT)、レーダ高度計 (RA)、走査放射計及びマイクロ波サウンダ (ATSR-M) が搭載されており、SAR以外はデータレコーダに記録することができる。衛星高度は780km、傾斜角98.5°の太陽同期軌道で、回帰周期は35日を標準として、3日、176日の3種類の運用モードがある。

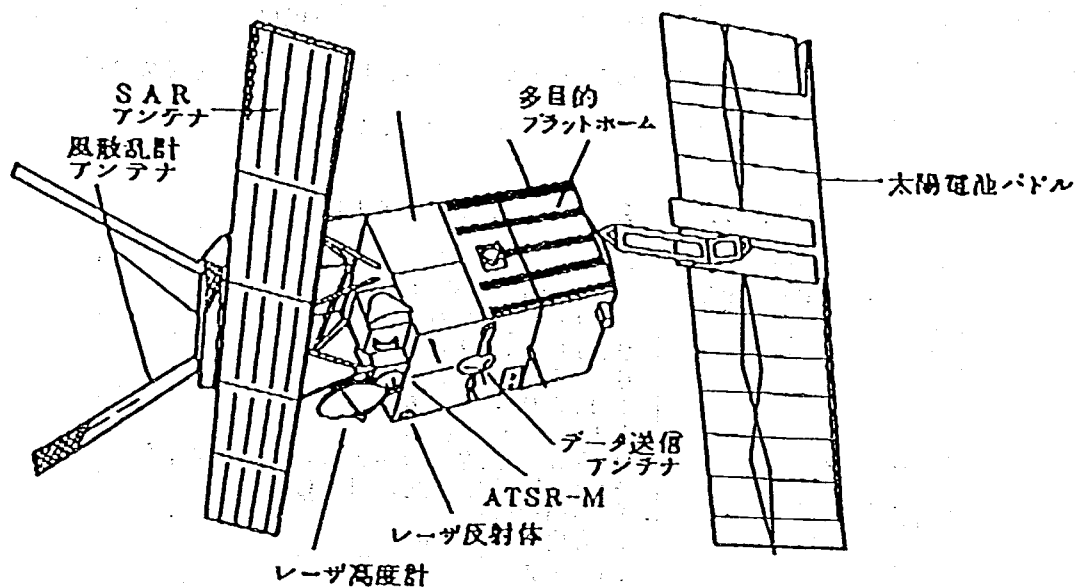


図2.5.6.1 E・ERS-1の外観

(1) E・ERS-1/AMI

AMI (Active Microwave Instrument) は、合成開口レーダ (SAR) と測風散乱計 (SCAT) で構成される。SARは映像モード、波モード、風モードで動作し、SCATは風モードで動作する。

① AMI映像モード

我が国で運用しているJ・ERS-1 (「2.5.7 J・ERS-1データ」を参照のこと) のSARと同様な能動型マイクロ波センサとして機能する。送信周波数としてはCバンドを使用し、走査幅は100 kmで空間分解能30 mを実現している。また、電力上の制約から1パス当たり最大10分間の運用に制限されている。

② AMI波モード

目的は海面の波スペクトルを求めることである (合成開口レーダを二次元処理して海面波のスペクトルを得る)。AMI波モードの時の観測域は5 km×5 kmに制約される。観測間隔は200 kmから300 kmである。

③ AMI風モード

目的は海面上の風向と風速を推定することである。具体的には、500 km幅で海面を45°、135°、90°の方向からRFパルスで照射して風向・風速を求める。観測原理は、後方散乱係数が海上風によって影響を受けた海面の粗さ及び風スペクトルと観測方向との間の角度に依存することを利用している。観測域の大きさは50 km×50 kmで、観測域は衛星直下点において225 kmから725 kmの間の500 kmである。観測周期は地上軌跡25 kmに対応する3.763秒、3方位のアンテナはこの間に3回の観測を行う。

(2) E・ERS-1/RA

レーダ高度計 (RA : Radar Altimeter) は、衛星直下点を照射するパルスレーダである。海面までの衛星高度、海面波高、風速等を観測する海洋モードと海氷面の情報を取得する氷モードの2つがある。RAの主要な性能を列挙すると「表2.5.6.1」に示す通りである。

表2.5.6.1
E・ERS-1/RAの主要性能

項 目	性 能
周波数	13.8GHz (ku-バンド)
バンド幅	
・海面モード	330.0MHz
・氷モード	82.5MHz
ビーム幅	1.3°
高度：範囲／精度	745-825km/10cm
波高：範囲／精度	1 - 20m / 0.5m or 10%
後方散乱係数	0.7 dB rms
ジオメトリック分解能	

表2.5.6.2
E・ERS-1/ATSR-Mの主要性能

項 目		性 能
A T S R	走査幅	500 km
	波長	1.6, 3.7, 11, 12 μ m
	空間分解能	1 km $\times$ 1 km
	ジオメトリック分解能	0.1 k
	精度	0.5k over a 500 $\times$ 500km square with 80% cloud cover
Microwave Sounder	チャンネル	23.8 , 36.5 GHz
	瞬間視野	20 km
	精度	2 cm

(3) E・ERS-1/ATSR-M

走査放射計及びマイクロ波サウンダ (ATSR-M) は、ATSR (Along Track Scanning Radiometer) とMicrowave Sounderで構成される。前者は4種類の観測波長を有した赤外放射計であり、海面温度等を観測する。具体的には、海面に対する入射角が0°と52°の2方向からデータを取得する。一方、後者は23.8GHz及び36.5GHzの2チャンネルを有したマイクロ放射計であり、大気中の水蒸気等のデータを取得する。ATSR及びMセンサの主要な性能を「表2.5.6.2」に示す。

2.5.7 J・ERS-1データ

J・ERS-1は、1992年2月に、我が国が打ち上げた資源探査衛星 (実験衛星) である。英語名はEarth Resources Satellite - 1 (ERS-1) であるが、欧州宇宙機構 (ESA) が1991年7月17日に打ち上げたERS-1 (European Remote Sensing Satellite-1) と略号が同じことからJ・ERS-1として区別している。ちなみに、ESA/ERS-1も、一般には、E・ERS-1の略称で呼ばれている。J・ERS-1の軌道は、衛星高度568km、回帰周期96分、軌道傾斜角97.67度の太陽同期準回帰軌道で回帰日数4.4日、交降点通過時刻は10時30分 $\pm$ 30分であり、衛星重量は1400kgである。J・ERS-1は通産省がミッション機器、科学技術庁と宇宙開発事業団が衛星本体と打ち上げロケットの開発を担当している。「図2.5.7.1」にJ・ERS-1の外観を示す。

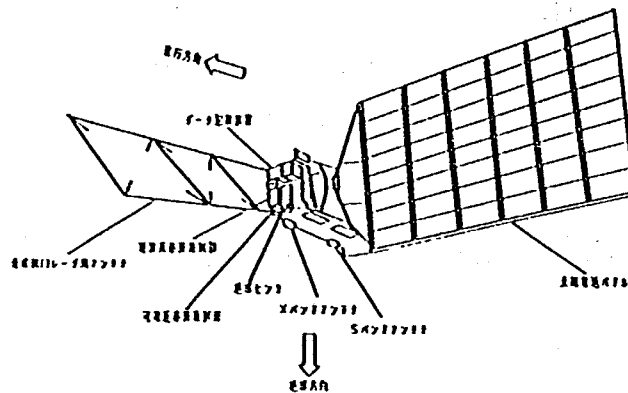


図 2. 5. 7. 1 J・ERS-1の外観

(1) J・ERS-1/OPS

光学センサ (OPS) は、可視近赤外放射計 (VNIR: Visible and Near Infrared Radiometer) と短波長赤外放射計 (SWIR: Short Wave Infrared Radiometer) から構成され、前者は4バンド (立体視1バンドを含む)、後者も4バンドの波長域で走査する電子式走査方式を採用している。OPSの仕様について「表 2. 5. 7. 1」に示す。

表 2. 5. 7. 1 J・ERS-1/OPSの諸元

項 目	仕 様	
波長帯 (μm)	VNIR	0.52~0.60
		0.63~0.69
		0.76~0.86
	SWIR	1.60~1.71
		2.01~2.12
		2.13~2.25
		2.27~2.40
ステレオ視角	15.3° ± 0.21°	
走査幅	75 km	
分解能	レンジ方向	18.3 m
	アジマス方向	24.2 m
検出部	4096素子 CCD/バンド	
走査周期	3.46 msec	
伝送速度	30 Mbps × 2チャンネル	
量子化レベル	64 (6 bits)	

OPSは、衛星の移動方向と直交方向に集光する。集光した光はプリズムまたはフィルタにより分光され、4096素子のCCDセンサにより電子信号に変換される。観測波長域でバンド3とバンド4に同じ波長域が使われているが、バンド4は立体観測用で、同一の軌道上の前後の立体解析用の映像情報 (ステレオ地形情報) が得られる。SPOT衛星の場合にも立体解析用の画像取得が可能であるが、取得する日にかかなりの差が生じる場合が多い。J・ERS-1では、このような問題点を改善している点に特徴がある。

(2) J・ERS-1/SAR

合成開口レーダ (SAR: Synthetic Aperture Rader) は、衛星の進行方向に対して直角の方向にパルス電波を発射する。発射した電波が対象物により反射・散乱されて戻ってきたものを受信する。対象物の後方散乱係数は測定対象の表面及び表面に近い内部の状態や物質の性質によって定まる。従って、測定対象物の後方散乱係数を測定することによって対象物の情報を得ることができる。SARではレンジ方向 (衛星の進行方向に直角方向) とアジマス方向 (衛星の進行方向) に処理を分解し、レンジ方向はパルス圧縮処理、アジマス方向は合成開口処理を行うことによって高い分解能を実現している。「表2. 5. 7. 3」にSARの仕様を示す。

表2. 5. 7. 2 J・ERS-1/SARの諸元

項 目	主 要 な 性 能
送信中心周波数	1 2 7 5 MHz $\pm$ 2 0 KHz
送信周波数帯域幅	1 5 MHz
偏 波	水平偏波送信/水平偏波受信 (H-H)
オフナディア角	3 5° (ノミナル値)
走 査 幅	7 5 k m
分 解 能 (地表分解能)	レンジ方向 1 8 m アジマス方向 1 8 m
雑音等価後方散乱係数	- 2 0.5 d B以下
S/A	1 4 d B以上
送信電力	約 1 3 0 0 W
送信パルス幅	3 5 + 0.5 μ s e c 3 5 - 0.0 μ s e c
送信パルス繰り返し周 波数	1 5 0 5.8 Hz, 1 5 3 0.1 Hz 1 5 5 5.2 Hz, 1 5 8 1.1 Hz 1 6 0 6.0 Hz (ノミナル値)
アンテナ利用	3 3.5 d B以上
観測データ	量子化ビット数: 3ビット 伝送速度: 3 0 Mbit $\times$ 2 チャンネル (ノミナル値)

2. 6 画像処理・解析システム

ここでは、衛星データ利用の前提となる画像処理・解析に際し、不可欠なハードウェアシステムとソフトウェアシステムについてその概要を紹介する。

2. 6. 1 ハードウェアシステム

衛星データは一般に極めて大量のデータから構成されている。また、利用分野によっては、地形情報に代表されるような属性情報を付加して利用する場合が多いことから、その処理・解析には豊富なコンピュータ資源が前提になることが多い。しかし、最近のコンピュータとその周辺機器の発展によって小型のコンピュータでも衛星データのハンドリングが可能になってきたことから、多くのユーザが利用目的に合わせた形でハードウェアシステムを構成して利活用を図っている。パーソナルコンピュータは手軽に対話形式で効率よく操作できる特徴を有していることから、我々に一番身近なりモートセンシングデータ解析装置となっている。基本的には、コンピュータとそれに接続したカラーディスプレイ装置、図形や画像の入力装置（MT装置、FD装置、CD装置、DISK装置、ディジタイザ、フォトスキャナー、プロッター、フォトライター、等）から構成される。以下にパーソナルコンピュータを使用した基本的なハードウェア構成（「図2. 6. 1. 1」を参照のこと）を示し、それぞれの機器の説明を行なう。

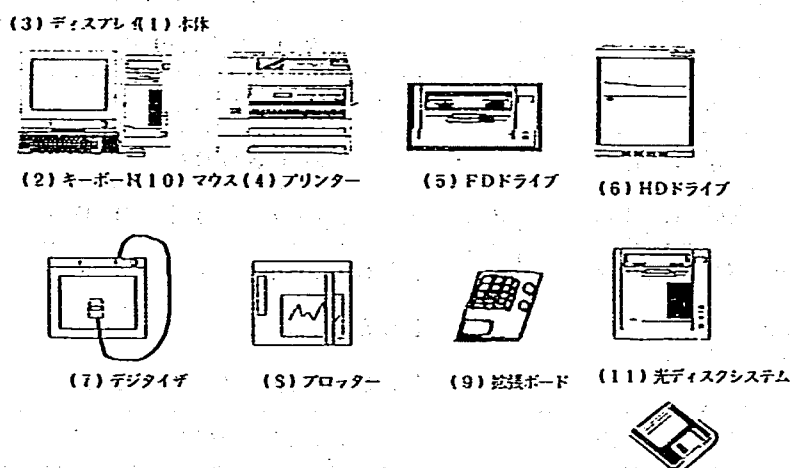


図2. 6. 1. 1 基本的なハードウェア構成

(1) 本体 (CPU)

パーソナルコンピュータシステム全体を制御したりデータの解析処理を行なう、パーソナルコンピュータの頭脳装置である。

(2) キーボード

ユーザが本体に命令を送る代表的装置である。

(3) ディスプレイ

ユーザが入力した命令や、解析処理した画像、計算結果を表示する。リモートセンシング画像を出力する場合、カラーディスプレイを用いることが望ましい。

(4) プリンタ

計算結果を出力する。最近ではカラープリンタも手ごろな価格になり、リモートセンシング画像のカラー印刷も可能である。

(5) FDドライブ

FD（フロッピーディスク）に解析データを入出力する。パーソナルコンピュータによるリモートセンシングデータ解析処理では、外部記憶装置としてFDが広く用いられている。

(6) HD

FDと同様にHD（ハードディスク）に解析データを入出力する。ただし、FDと比較して記憶容量が大きい。

(7) デジタイザ

タブレット上にセットした地図、写真、図面上から、XY座標による点情報の収集を行なう装置である。

(8) プロッタ

グラフ、地図等の作成をする装置である。

(9) 拡張ボード

パーソナルコンピュータに標準装備されたメモリ容量や機能を拡張するために、「メモリ拡張用ボード」、「フルカラー表示用ボード」等を装着する。

(10) マウス

キーボードの補助入力装置で、代表的な使用方法としてはディスプレイ上にカーソルを表示し、メニューを選択する等である。リモートセンシングデータ解析のためには、カーソルを使った座標測定に有効である。

(11) 光ディスク

リモートセンシングデータ解析のために扱うデータの容量は膨大であり、例えばランドサットTMデータの場合1シーンのデータ量は約300Mbyteに達する。ここで脚光を浴びているのが光ディスク装置であり、最近では、情報の記憶媒体の主流となっている。この光ディスクの特徴として大容量及び携帯性があげられる。

2. 6. 2 ソフトウェアシステム

衛星データの特徴はデジタル処理・解析が可能であり、その場合のソフトウェアシステムは多くの基礎技術を総合化した画像の取り扱いが中心になる。「図2. 6. 2. 1」は画像処理・解析システムのソフトウェア構成を示している。

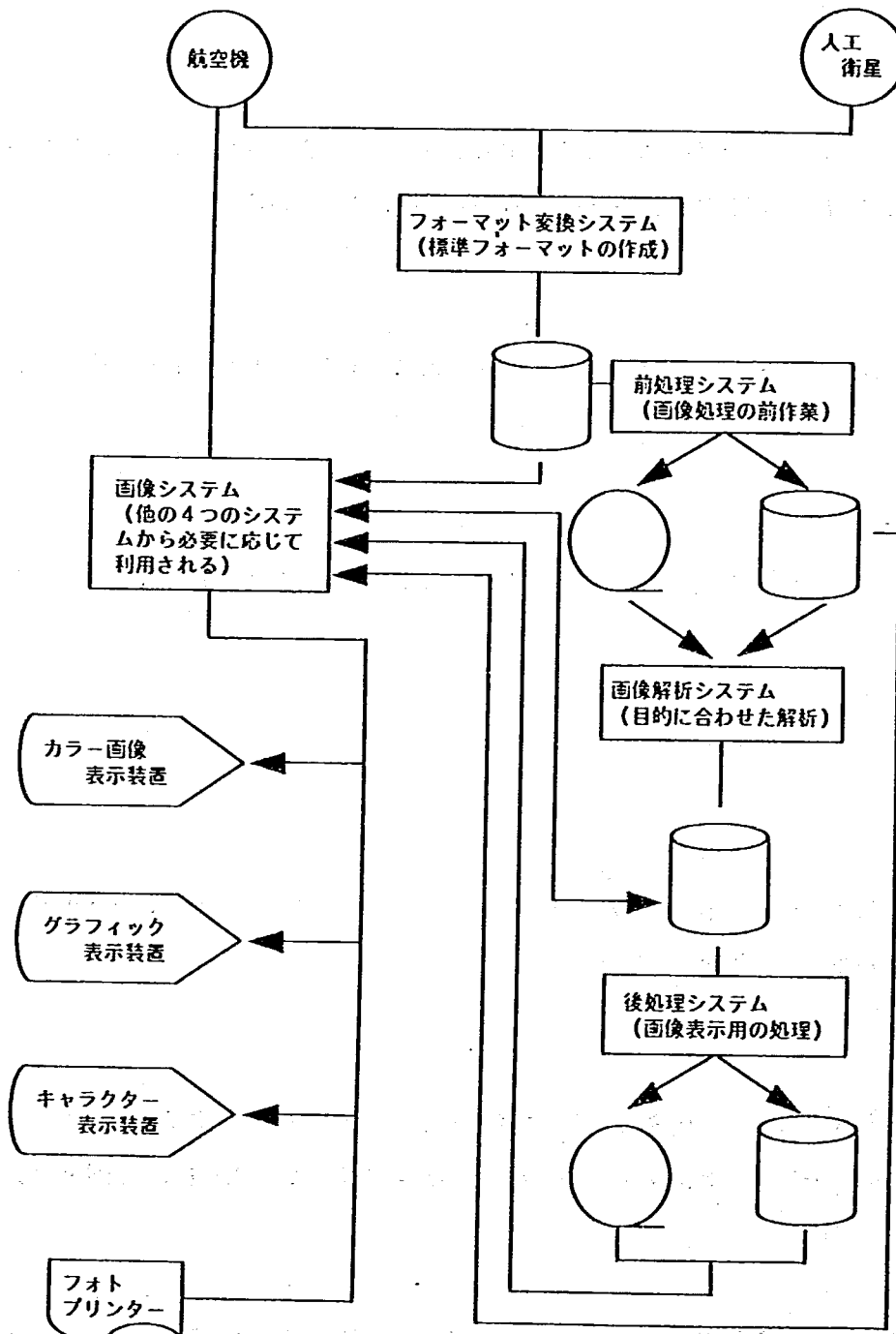


図2. 6. 2. 1 画像処理・解析システムのソフトウェア構成

また、衛星データはセンサーやそれを搭載するプラットフォームの違いによってデータの形式（フォーマット）が異なっている場合が多い。さらに、画像処理・解析に関わる手法は現在発展途上にあり、ユーザの分野によっても要求されるソフトウェアの質と内容が異なる場合がある。そのため、ソフトウェアシステムの特徴・更新を容易にすることと画像処理・解析機能の汎用化（画一化）の目的で、以下のような個別のシステムを統合した形のソフトウェアシステムになっている場合が多い。

- ① フォーマット変換システム
- ② データ前処理システム
- ③ データ解析システム
- ④ 画像の後処理サブシステム
- ⑤ 画像の表示システム

現在は、ハードウェアシステムの発展と同様に、大型汎用コンピュータ用の汎用ソフトウェアパッケージとは別にEWS（エンジニアリング・ワークステーション）やパーソナルコンピュータを中心にした画像処理・解析ソフトウェアパッケージが多く開発され市販されている。その数は20種類以上もある。以下はそれぞれ5つのシステムについての概要を示す。また、「表2.6.2.1」はパーソナルコンピュータをベースとした衛星データ処理・解析ソフトウェアパッケージに装備されている代表的な機能の一覧である。

（1）フォーマット変換システム（Format Conversion System for Input-data）

衛星データを収集するためのプラットフォームとしては、一般に人工衛星が用いられる。一方、航空機を用いる場合には、航空機データ（または航空機リモートセンシング）といて区別する場合がある。それぞれのプラットフォームは軌道や高度が異なるとともに、搭載したセンサも異なる場合が多い。さらに、観測されたデータをコンピュータで処理できるように編集したデータ（CCTデータ：Computer Compatible Tape data）についても利用目的によってはCCTコードが異なる。複雑多岐にわたる機能から構成される画像処理・解析用のソフトウェアをできるだけ汎用化したうえでこれらの全てのデータを入力可能にするには、衛星データを入手した段階でデータのフォーマットを統一する（標準CCTの作成）が必要である。この作業課程をフォーマット変換システムとっている。

（2）前処理システム（Pre-Processing System）

前処理システムは、以後の画像処理、さらには画像解析を効果的に行うために前もって行われる種々の作業を取りまとめたものである。具体的には、画像データが内包している各種の歪みについての補正作業、大きな領域から目的に合致した領域に画像を切り出す作業、異なったシーンとして入力された隣り合わせ（バス方向及びロー方向）のデータから1つの画像を作成する作業（画像のモザイク）、等が含まれる。

（3）画像解析システム（Image Processing System）

画像データ（マルチスペクトルデータ）の解析に際しては、対象物の分光特性の違いを利用した統計的なパターン認識の手法を利用して画像を分類したり、画像が持つ特徴を抽出したりすることが一般によく行わ

れる。この場合の手法には教師有り分類と教師無し分類の2つがあり、一般には、グラントルースデータ（現地調査データ）の有無によって使い分けられている。

教師有り分類とは、グラントルースデータ（現地調査データ）を用いることによって、未知の画像データが確率統計的にどのクラス（対象物）に属するかを判定して分類するものであり、対象とするものの分光特性がわかっている場合や、分光特性がわからなくても対象とする地物が何であるかわかっている場合に用いられる。

一方、教師無し分類とは、グラントルースデータ（現地調査データ）が無い場合に、衛星データが有する分光特性だけを利用して同質と思われるクラス（対象物）に分類していく方法であり、対象物の分光特性や対象とする地物が何であるか不明の場合に用いられる。この分類方法では一般にはクラスタ解析（特徴の類似したデータを「似たものどうし」としてグループ【クラスタ】化する解析手法）が行われる。

表2. 6. 2. 1 パーソナルコンピュータをベースにした画像処理・解析機能一覧



(4) 後処理システム (Post Processing System)

後処理システムは画像解析システムによって目的に応じた画像の解析が行われた後、得られた画像データを整理し、次の表示システムに送り出す作業段階である。解析結果の画像データは基本的には数値データであり、人間の視覚機能に合致しない場合が多い。部分的に色彩を強調したり、タイトルや説明文を追加したり、レイアウトを考えるとといった人間の視覚機能に合致した出力形態に整えることを目的とした細々とした作業内容が含まれる。従って、前処理システムや画像解析システムと同じように画像解析の対象や目的によって作業内容は異なる。また、表示システムで用いられる機器（画像表示装置）によって異なる部分も多い。

(5) 画像表示システム (Image Display System)

衛星データは、一般に、データの入力から前処理、画像解析、後処理といった各作業段階において数値データとして扱われる。数値データはコンピュータ処理には都合がよいが、画像解析の本質であるマン・マシン・コミュニケーションのための媒体としてはあまり良い表現形態ではない。いい換えれば、画像の解析の内容を直接人間が見て評価するには大変難しい。このことから、コンピュータで解析された途中結果を視覚的に評価して、再び、コンピュータに命令をフィードバックしたり、画像解析の結果をアナログ表示することによって、解析結果の数値を強調するといった機能が要求されるようになる。このような目的で用意された機能群が画像表示システムであり、後処理の終わった画像情報を視覚化するだけでなく、入力された画像や前処理の終わった画像、あるいは画像解析の途中結果をチェックし、評価するために用いられる。

2. 7 リモートセンシングの問題点

我が国における衛星データの利用については、これまで、気象、防災、漁業、農業、林業、海洋、地質、資源探査、土地利用調査、地図作成、等々の面で幅広い研究が行われ、実用化について多くの協力が払われてきた。しかしながら、これらの研究の多くの部分は、何度も繰り返しいわれてきたように、詳細で高度な画像処理・解析システムに支えられた狭い地域での問題解決型に意識が集中してきた傾向がある。このような研究や実用化への協力は今後も必要であり、否定できないが、衛星リモートセンシングの特徴はよく知られている通り、広域地域を瞬間に、繰り返し、観測できる点にある。これらの特徴を最も効果的に活かすためには、地球全体をよりよく理解するためのグローバルな研究も必要となる。

さらに、衛星データを有効に利用していくために忘れてはならない留意点をまとめると以下ようになる。

- ① 衛星リモートセンシングで取り扱う対象は自然界に存在するものであり、医療機関や製品検査機関、等で行われる画像処理・解析のように解析目的に応じて観測条件や環境をあらかじめ把握し、制御することはできない。
- ② 新たな手法の開発や適用に関する研究では、従来手法と処理精度の比較検証が必要不可欠である。
- ③ 衛星リモートセンシング（人工衛星を用いた地球環境調査）で必要とされる画像処理・解析技術は処理効率が高く、誰もが容易に利用できる手法であることが大切である。

衛星リモートセンシングに対してユーザが要求するものは、「情報」としての切り口で見た場合、一部のロジスティックな利用を除けば、主として「地表面判読」による「地形の形状認識」と「土地被覆の状況把握」の2つに大別される。これは、ごくおおまかにそれぞれを「地形情報」と「スペクトル情報」に対応できるが、水系パターンのように形態情報に属していながら地形形状把握と土地被覆状況把握の両方に利用されるものもある。また、テクスチャのように、形態情報でありながら土地被覆状況把握に利用されるものもある。このことが、衛星データを取り扱う際に、物事を複雑にしている原因の1つでもある。

衛星データの分解能を考える時、専門的には、地表分解能、観測波長域、量子化ビット数、走査幅（刈り幅）といった評価指標が一般的に使われる。また、観測対象物やそれらが置かれている状況等によっても大きく精度が異なってくる。従って、一口に、「どこまで解析可能か」といわれても汎用的な回答はないといわざるを得ない。一般にいわれている衛星データの空間分解能については、LANDSAT/MSSに代表される衛星データの第1世代（この時点では80m）から30mあるいは部分的には10mの空間分解能が保証されるようになったTM、HRV、MESSRによる第2世代を通じて衛星データの精度は大きな山を越えたといわれている。現在は、マイクロ波センサも加わって、より精度の高いデータが提供されるようになった。現在、十分に保証されているわけではないが、EERS-1やJERS-1に搭載されたセンサから提供される新しい衛星データ第3世代がスタートしている。さらに、1996～1999年にかけて、数多くの精度の高いセンサが開発されつつある。ユーザとしては、大きな期待をかけられる時代であるといっても過言ではない。

一方、センサ開発の技術的な側面から見ると、現在、研究開発としては形状情報の方は人工知能関係を残してほぼ峠を越し、センサ技術への要求も「地表分解能の向上」と「立体視」の2つに絞られてきたといわれている。しかし、衛星データを対象とした「分類技術」の方はこれからが正念場を迎えることになる。分類技術はセンサと人工衛星が新しくなる度に機能と精度を新たに検証する必要性が生じるからである。1990年代の後半から2000年の当初にかけて、衛星データを用いた画像分類の最もエキサイティングな時期であるといってもよい。

またユーザの要求から見た場合、特に建設分野を特定すると、地表分解能は2～5m、1回/日km、量子化ビット数8ビットの立体視データが求められている。いうまでもなく、全ての衛星データが一気に、この段階にまで到達することは難しいが、近い将来、恐らく21世紀の初頭には実現することが期待されており、これらの技術向上によって、建設分野での調査・計画作業の形態は大きく変化していくことになる。建設分野にあっても、近い将来、マイクロ波センサと光学センサの両立した新しい衛星データ利用の時代が到来することになる。

衛星データを利用していく立場から、今後、取り組んでいかなければならない問題を取りまとめると以下の通りである。実際、これらの内容は数年前から各地で提唱され、国際的な活動の基本理念となっている。

（1）国際協調の中でのリモートセンシング

10年以上の昔から、NASA（米国航空宇宙局）が中心になって、「地球を詳細に観測することによって人類の生活環境をよりよいものにしていく」といった哲学の下にEOS（Earth Observation System）と

いった地球観測計画が進められ、現在では、「地球環境保全」の名の下に多くの賛同者を得ている。その他、地球規模での国際共同研究計画が数多く進められている。

このような中であって、リモートセンシングは地球のモニタリングシステムとしてその効果が最大限に活かせるものである。人類が共有する地球の将来のために、リモートセンシングの限界を見極める努力を続ける一方で、その方策を研究するために地球全体のダイナミックな現象を把握し、地球全体をより良く理解する目的で世界的な規模での科学的な地球観測に積極的に参加するためにリモートセンシングを活用する姿勢が大切である。

(2) リモートセンシングの理念の確立

これまでのリモートセンシングはコンピュータ・エンジニアの占める割合が多過ぎる傾向があった。これからは、もっと広い範囲の科学者の参加が必要である。従来、このことが衛星データを利用しようとしている人達にとっての阻害要因の1つになってきたといっても過言ではない。リモートセンシングは画像処理・解析が目的ではなく手段である。目的から見たリモートセンシングは何か、人工衛星でなければならないリモートセンシングとは何か、それぞれの利用分野毎の焦点を決め、時間をかけて真正面に議論する必要がある。リモートセンシングの発展のためには、もう一度原点に立ち帰ってリモートセンシングが内包する本来の意味を思い起こして見るのが大切である。

(3) データ仕様の統一とデータ・ネットワーク・システムの確立

衛星データを利用するに際して、一部では既に世界的に統一されたデータ仕様が使われているが、同じような目的で運用される異なった人工衛星から観測収集される衛星データについても全て同一のデータ仕様に統一されることが必要であることはいうまでもない。ユーザは人工衛星そのものに興味があるのではなく、データの質とそれから得られる情報の量に関心がある。さらに、利用者が容易にデータにアクセスできるようなデータ・ネットワーク・システムを確立することが必要である。それによって、データ利用に対する要望が生じた時点で、ユーザはどのようなデータがどこに保管されているかをリアルタイムで知ることができる。これらは、衛星データを利用するうえでの前提条件であり、ユーザの強い要求によって実現していくものである。

(4) GCPデータベースの整備と統一的な利用体制の確立

衛星データを利用する場合に不可欠な共通情報であるGCP (Ground Control Point) の採取には非常に大きな労力が必要とされている。これが衛星データ利用の普及を阻害してる大きな原因の1つといって良い。このことは、実際に衛星データをハンドリングした者しか理解し得ない問題でもある。そして、これらの情報は一度利用されると、繰り返し利用されることは減多にない。後日、同じ地域のGCPが必要になると再び新たにGCPの採取作業が行われるといった非効率が行われている。当然のことながら、採取者が異なれば、同じ地域でも同じ精度でGCPが得られる保証は無い。画素単位の詳細な解析結果が要求される程、得られる画像処理・解析の情報が異なる結果になる。地球的規模で(少なくとも、日本全土を統一した規模で)

収集したGCPデータベースの整備とその統一的な利用体系が必要である。これらの問題は国家的規模で、あるいは国際的な視野の下で進められなければならない。

(5) データ処理・解析のためのソフトウェアの統一と利用体制の確立

衛星データの処理・解析及び画像表示には、コンピュータとその周辺機器を駆使した大規模なソフトウェアシステムが要求されることは前述した。それらのソフトウェアシステムの開発・整備はユーザの責任に課せられているのが現状である。ソフトウェアシステムの開発・整備は一朝一夕に成就するものではない。長い年月と多大の労力を積み重ねた結果得られるものである。これまでは、多くのユーザがそれぞれの立場でソフトウェアの開発・整備に全精力を使い果たし、本来の目的であるはずのデータ利用にまで余裕を残していなかったといった現象が見られる。また、ソフトウェアシステムが無いばかりに衛星データの利用を絡めているユーザの数も多い。利用分野が異なっても、以下に示すデータ処理の手順に従って分類するとソフトウェアについての共通部分が以外に多いことがわかる。

- ① 衛星データをコンピュータに取り込む（フォーマット変換）
- ② 利用目的に沿った解析を前提にした画像データの前処理
- ③ それぞれの利用目的に応じた画像解析
- ④ 解析された結果を人間が理解できる形態で表示するための画像の後処理
- ⑤ カラー映像表示装置等への画像の表示

ユーザが共通に使うことのできる質の良いソフトウェアの整備とそれを提供する機関が是非とも必要である。ソフトウェアシステムの開放によって衛星データの利用者は飛躍的に増加するはずである。大多数のユーザは画像処理・解析のためのプログラムを開発するのが目的ではなく、それらを利用した解析結果を用いる点に主眼があることを忘れてはならない。

(6) 研究成果の登録制度の確立

リモートセンシングに限定するものではないが、一定の研究水準に達した研究成果は登録制度によって分野別にデータベース化され、誰もが検索・利用できる体制を確立することは多くのユーザにとって大変効果的である。リモートセンシングの研究は20年以上の歴史があるとはいえ、新たに開発されるセンサやそれを搭載するプラットフォームによって新しいデータが次々と提供される。また、利用範囲についてもますますその領域を拡大していくであろうことは想像に難くない。その結果、それまでは斬新な研究成果として効果的に利用されていたものが、その役目を終了することもある。利用価値の低下したもの、考え方の変化したものについては、積極的にそれを公表できる体制が是非とも必要である。これは研究者の責務であるといっても良い。また、研究機関において、あるいは、データ利用の過程において次々と開発される利用方法や解析手法等に関する新しい提案についても、衛星データを利用しようとする者は誰もが参照できる体制が必要である。

(7) 専用DBMSの開発

以上に述べた事柄は、いずれも最新で質の良い大量のデータを保有したデータベースの構築が前提となる。特に、人工衛星を用いた地球観測データを取り扱う場合には、画像、図形、数値といった性質の異なるデータを混在して利用することが不可欠な条件となる。そして、それらのデータはいずれも膨大な量になる。データベースを効果的なものにするためには、これらのニーズに沿った専用のDBMS (Data Base Management System) の開発・整備が重要になる。

(8) システム統合への努力

これまで長い年月にわたって開発・整備されてきたハード・ソフト両面における技術や体制は、それぞれの目的の下に効果的に機能を発揮しているものが多いことはいうまでもない。目的と利用分野が異なるために、多くのシステムや体制がバラバラに存在するように見える場合も少なくない。目的と機能が異なったシステムや体制を衛星データの効果的な利用という大きな1つのベクトルの下に統合化することによって、さらに大きな効用を発揮するようになるはずである。具体的には、上述した各項目を1つ1つ実践することによって、システム統合が可能になるはずである。

3. 建設行政における衛星データの利用

建設行政分野における衛星データ利用のニーズは長年に渡って非常に高いにも関わらず、実際に利用された例は多くはない。

LANDSATが運用を始めた頃から衛星データの可能性に期待して研究を行ってきたこの分野ではあるが、衛星データを他のセンサの置き換えとして利用しようと考えると精度や観測周期に不満足な点が多かった。建設行政分野で衛星データを利用する場合、利用者の希望として高分解能という条件が大きなウェイトを占めており、これを満足するようなセンサの登場はもうしばらく待たなくてはならない。

研究段階にあるものが多いが、これまでに衛星データを適用した例としては河川の流量解析、市街地や緑地の経時変化の抽出、河川水の流出パターンの把握や海岸地形の変化の抽出、管理目的での降雨・降雪や大気の解析などがあげられる。防災分野では斜面災害への適用研究が突出して進んでおり、災害予測も含めて実用化への期待も大きい。ただ、その成果は主題図や分類図を提供することにとどまって、具体的な高次利用のあり方を示すものはほとんどないのがこれまでの実状であった。

少ない実利用から例をあげると、表面地質や海峡潮流の調査、土地利用状況のモニタリング、斜面崩壊の予測や発生地の調査といったものがあるが、今のところこれらの利用には精度的な不安が残る。

衛星データの利用が普及しない原因の一つは、以下の如くデータ提供や解析を行う側とそれを利用する側の相互の認識不足にある。

これまで開発されてきたセンサや解析手法は、必ずしも現場のニーズを反映したものではない。衛星データの利用によって受益者となりうるとしても、データ利用の体制が整備されていないために最適な解析手法の開発からその検証まで行わねばならないのでは、実績のある従来手法から切り替えてまで利用する価値があるとはいいかねる。本来これは研究者によってある程度の成果があがってしかるべきところだが、入手可能なデータが利用者の要求する仕様を満足しない現状にあっては、利用可能なデータをいかに適用するかという部分に研究の重点が置かれ、リモートセンシングのためのリモートセンシング研究になりがちである。広範な建設行政分野全般を対象に研究を進めるよりも、ニーズをくみ取って特定分野への利用を進めるような体制が必要とされる。

現在利用できる衛星データが利用者の要求仕様を満足していないと述べたが、これはあくまでも利用者が要求する最高水準の精度・分解能を満足しないというだけであって、現在でも概査を行う上では十分すぎるほどのデータを提供している。こういった目的でもあまり用いられないことがないのは、利用者が衛星データを特別視しがちなためである。衛星データも、従来の他のセンサデータと同様に多くの入力情報の一つとして扱うべきであるのに、この分野の潜在的な利用者は衛星データがすべてに置き換わることを希望し、衛星データを利用する適切な場面を見落とすことがしばしば見られる。

衛星データは、入手や解析に多くの費用をかけなくてはならないような印象があり、これが利用を思いとどまらせていることも少なくない。確かに衛星データの多くは1シーン当たり数万円ないし数十万円で販売されているが、ここから得られる情報によって実現する省力化の効果を考えれば、その利用価値は十分とい

える。概査にしか利用できないとしても、その結果絞り込んだ対象地域の調査で事足りるのであれば、費用対効果は決して低くない。

衛星データの検証の困難さは、普及を妨げているもう一つの大きな原因である。リモートセンシングの特長である広域性が逆に解析領域全体の検証を難しくしており、建設行政分野では観測対象が多岐に渡るだけにその困難さは特に大きなものとなっている。

データ検証の手法は利用形態によってそれぞれに異なり、分野ごと対象ごとで衛星データの利用が一般化するにつれて確立していくものである。情報の確度を保証することは衛星データの利用を推進する大きな力となりうるので、公的機関の主導で鋭意的行うことが望ましい。

現用の衛星データでも有益な成果が得られることは他の分野で実証されているが、建設行政分野でも観測対象や利用方法でこれらと重複するところが少なくない。例えばSPOT/HRVは現在運用されている衛星のデータとして分解能の最も高いものの一つであるが、時間変動の小さい事象を観測するには十分な観測頻度も持ち合わせており、道路・河川の基本計画に用いる情報主題図を作成したり、またその計画の進捗状況を時系列的に把握するといった目的に十分かなうデータを提供することができる。このほか、地震災害の被害状況などについては特に解析処理による分類等を行わなくとも、定性的な画像判読である程度の状況が把握できることなどが成果として報告されている。

3. 1 衛星データ利用の現状

現在運用中のリモートセンシング衛星の多くは、資源探査や気象観測をその主な目的としている。これはその分野での研究、実利用が数多くなされ、衛星リモートセンシングが重要な位置を占めているからに他ならない。この結果、それらの分野では対象が定まった利用の強みで衛星データに求めるものもより具体的になり、運用する側もその要求に従ったセンサ開発や観測体制の整備、衛星の運用を行うことで、ますますデータの価値を高めるものとなりつつある。

翻って建設行政分野に目を転じると、研究こそ多くなり、様々な成果も報告されるようになってはきたものの、実際に利用した例はごくわずかでしかないのが現状である。

それでも、1995年頃からパーソナルコンピュータでの標準OSとなりつつあるウィンドウズ上で動作するGIS（地理情報システム）や衛星データの解析ソフトウェアが販売されるようになったこともあり、徐々にではあるが衛星データを利用した図表が一般の目に触れることも増えてきている。

また、特に昨年（平成7年）1月17日に発生した阪神・淡路大震災の被害状況を把握するうえで、衛星データは大きな威力を発揮した。この災害現況図は数値標高モデルなどと組み合わせられ、鳥瞰図としても示されたので、被害の甚大さを視覚的に訴えるとともに災害を振りやすい地形条件などもずいぶんと把握しやすくなったようである。

建設行政にはきめ細かさと広域的な視点との双方が要求されるが、これは衛星リモートセンシングの最大の特長と合致するものであり、まずは他のデータ収集手段では労力や経済性の問題などで実現できない部分

で衛星データを活用できると思われる。

また、衛星データは収集したその時点からデジタルデータとして扱われるものであるから、次々にデジタル化される地図などとの相性もよく、収集したデータを計画等に迅速に反映できるという利点も期待されている。よって、潜在的な需要はかなり多く、精度や観測頻度が満足できればそれこそあらゆる面で利用される可能性が大きい。潜在需要を掘り起こすための課題は、まさにその精度と観測頻度とにある。

3. 2 衛星データの利用分野

現在、衛星データの利用については第1世代、第2世代を経て、第3世代に入ったといわれている。具体的には、災害、環境、土木、地質、資源、エネルギー、気象、惑星探査、等々の分野で幅広く利用されるようになってきた。

ここでは、建設行政の分野で利用されている衛星データの利用実態について、とりまとめをおこない、現在私たちが望んでいる衛星データの利用分野別の利用例、利点及び今後の課題等について調査した。

今後は、これらの内容について、ユーザー一人一人が、自分たちが関係する分野について、常に問題意識を持って要求仕様を提案し続けていく姿勢が大切となる。以下に、現在建設行政分野に関係する者にとって、関心の高い衛星データの利用分野について、その利用実態を示す。

(1) 地質調査への利用

航空写真判読を最もよく利用する分野の1つに地質調査がある。リニアメント、水系パターン、地形の起伏状況等をキーとして地質構造を判読調査する作業であり、衛星データが得られるようになるまでは極めて有力な手段として利用されてきた。人工衛星LANDSATも第一の目標は地下資源探査にあったことからすると、衛星データの利用は高度システム化された地質調査がその本命であるといっても過言ではない。しかし、この場合、単に断層とか褶曲など地殻の形状や構造を知るだけに止まらず、地質を構成する鉱物の分類まで行うといった欲張った目的を持っている。そして、既にこの分野では実際に大きな成果をあげるとともに実務において多用されている。現在、鋭意、実用化が進められているマイクロ波センサーの実利用によってこの分野での利用は一層進展することが期待されている。衛星データの資源探査への利用については多くの研究報告がある。

(2) 土地被覆状況の調査

環境調査や地域計画の立案において土地利用現況の把握は最も基本的な情報の1つである。従来、航空写真の判読と図化作業によって長い時間と労力を費やして作成してきた土地利用現況図も衛星データを用いることによって短時間に作成することが可能になるとともに、他の種々のデータ（地形データ、社会データ、統計データ）と重ね合わせることによってさらに付加価値の高い情報が得られるようになってきた。この分野の研究は画像処理や画像解析あるいは画像表現といったコンピュータオリエンテッドな細かい手法論を含め

て非常に詳細な研究成果が数多く提案されている。むしろ、衛星データの画像処理／解析は土地利用現況図の作成を通してデータそのものの精度の検証をしてきたといっても良い。建設行政分野に関係する者にとっては最も関心の高い利用分野の1つである。

(3) 植物と土とその基盤とのEcosystem (Geobotany)

最近の地球環境保全への関心によって、土と木は、それに水が加わって、環境を作りだす重要な要素であるといった認識が強調されている。土と木との組み合わせで自然を守ろうとする会社のソフト化への変化である。地球上の多くの場所で、押し寄せる砂漠化の波に対して、「緑の被覆」を築いて防ぐといった事業が進められている。どの地域にはどのような種類の植物が適しているかを調査して、最も効率的に根づける方法を決定して作業計画を建てる。衛星データの最も得意なところである。

山腹崩壊、斜面崩落、河川改修等に対応にも同じ手法が役立つ。やたらコンクリートの壁だけで自然の力に対抗するよりも植物や微生物の力を借りてやんわりと対抗する方が賢明なやり方であることが立証され始めている。最近の衛星データは、前述した通り、空間分解能や分光分解能の面で大幅に向上・細分化されてきた。今後もこれまで以上の速さで精度の向上が期待できる。その結果、植物の種類だけでなく、その成長度合いや活力度の判別がより精密にできるようになる。このことを利用して、逆に地表面に被覆する植物からその地層の状態を判断することも可能である。このような研究分野がGeobotanyと呼ばれ、衛星データの大きな利用分野になってきた。

(4) 河川の流れの調査

河川の流れを航空写真を用いて追跡する方法は多くの研究者によって利用されてきた。これらの経験から、赤色バンドを用いて河川の濁水の状況が良く把握できることがわかってきた。濁水の調査には、熱赤外域のデータを用いて、水温を媒体として濁りだけでなくその他の水質の分布も含めて調査することが可能であるが、狭い谷間の河川や貯水池では周囲の状況が大きく画像に影響するのでこの点を十分に考慮して解析を行うことが大切である。特に、人工衛星の飛来による観測時期と太陽高度の関係で雲や地形(山)による影が影響している地域のデータは真実とは全く異なった状況を示すことを知っておくべきである。このことは、河川の流れだけでなく、山岳地を対象とした衛星データの解析には、傾斜の向きと勾配によって太陽光の反射輝度が異なっていることを含めて、常に必要な知識となる。

(5) 雨の流出機構と河川被害への対応

衛星データを用いて、流域から河川への降水の流入するメカニズムが精度良く把握できることが立証されてきた。このことは、流出に関連する地表面に関係した要因が正確にかつ一定の周期で観測され、季節の変化や流路の全容が精度良く把握できるようになったからである。特に、TMデータの出現以来、その効果が一段と向上したといわれている。洪水調整を目的とした貯水池は流れ込む土砂に埋まり、当初の目標通りに機能しなくなってきたばかりでなく、逆にダムのために上流側では従来見られなかった洪水の被害が出るような事態も起こっている。河川に付随する構造物の設計も新しい時代の流れに押されて考え直す時期に来て

いる。常に、流域の環境変化に注意してデータを集め、流出に関連する諸要因を遅滞なく捉えて河川の流況の変化に対応することを考えなければ抜本的な解決にならなくなってきた。

諸外国の例をみると、水文学者は流域毎に流出モデルを整理して河川の流況を予測する研究が盛んであるが、これに関連する要因のデータ収集に衛星データが極めて有効であることが立証されている。中でも、青色のバンド帯域（TMIに相当する帯域）は水中に入射した光が懸濁物質あるいは河底から反射する光を透過し、その強さを測定することによって水質に関する情報を得るとともに雪や氷の表層の状態を知ることができる。このように、流域の水に関する情報が直接あるいは間接に収集できるようになったことは衛星データの大きな貢献である。

（6）急傾斜における斜面崩壊地の調査（斜面の安定性評価）

これまで、河川流域や山岳地帯の急傾斜地域での災害は直接踏査して調査することは極めて困難であり、その適切な対策を講ずるにも従来の方法では不可能に近いと考えられていた。衛星データによって、これらの災害の実情を把握し、その直接的な要因を分析するのに極めて有効であることが実証されている。

斜面崩壊と斜面崩落についてはその定義が分かれるところであるが、現在の研究では、降雨の条件を加味したうえで相当小さな斜面までも対象とした崩壊の危険度を数量化できる段階にまで至っている。これらの研究では、地形をどのように定量化できるか、陰になった斜面をどのようにして抽出するか、植生の種類をどの程度まで区別できるか等の問題に解決の余地を残しているが、急速に研究が進展していくものと期待されている。

（7）積雪量及び融雪流出の推定

水力発電計画、用水計画、都市への配水計画等に大きな影響力を持っている積雪量や融雪水量の推定には従来から多くの研究が行われてきた。しかし、積雪時の現地調査は極めて困難であり、実体を把握することさえ不可能な状態にあったといつてよい。衛星データはこの問題に大きな手がかりを与えてくれている。すなわち、冠雪した地域を確定し、これが経時的にどのように変化するかを測定することを可能にした。この問題は特に米国とカナダ国において関心が強く、早い時期から共同研究が実施されてきた。しかし、現在の研究では1つのモデルで各地の雪情報を処理できるまでには至っていない。これは、降雪の最盛期におけるデータの収集ができないことにあるといわれている。さらに、融雪時の豪雨の流出課程が学問的に明らかにされていないために、降雨のピークが可川の流入のピークと一致しない点も未解決のままである。今後の研究成果が待たれる分野である。

以上が現在建設行政分野に関係する者にとって、関心の高い衛星データの利用分野である。しかし、実際の利用にあたっては、観測対象ごとというよりも、データを利用する側、運用する側の視点で分類していくことが必要である。

ここでは、その対象を道路、河川・湖沼、海洋・沿岸、都市計画・地域計画、地盤環境、災害、の6つに分類した。

3. 2. 1 道路

道路に関わる衛星データの利用法としては、車両の動態調査、施設利用状況の調査、道路敷地内の植生、道路周辺環境調査や道路・鉄道施設計画支援などがあげられる。「表3. 2. 1. 1」には、道路に関する衛星データの利用例についての利点や今後の課題を示す。

表3. 2. 1. 1 道路に関わる衛星データの利用例

項 目	衛星観測データの利用例	衛星観測データ利用の利点	今後の課題
車両の 動態調査	・道路上を走行する車両の交通量調査 ・路側に駐車する車両の実態とその交通流への影響調査	・広域に渡る面的交通量の一括把握	・観測頻度を増やし、さらに即時性を向上させることが必要。 ・分解能の向上を中心にした情報精度の向上が必要。
施設利用状況 の調査	・サービスエリア、道の駅などの施設利用状況調査	・各施設に付帯する駐車スペースの利用状況から推定	・地上分解能の向上
道路敷地内の 植生調査	・管理対象となる敷地内の緑被分布調査 ・植生の分類及び細分類と周辺環境への影響調査	・緑被分布概算とその他環境要件の観測	・分布図の精度、森林 植生の細かさの把握 ・年間を通じて季節毎の雲に邪魔されないデータが収集できることが前提になる。
道路・鉄道施設 計画支援	・施設計画への支援情報の提供 ・施工後の周辺環境調査	・計画路線周辺状況の繰り返し観測による時系列変化把握	・2～3mの精度が保証されれば利用価値は大きい
地下空洞の 調査	・道路等計画予定地域または既設道路の路面下での地下空洞調査	・地盤沈下による地下空洞の検出	・地下の地盤情報を収集する技術の開発

3. 2. 2 河川・湖沼

河川・湖沼に関する衛星データの利用法としては、河川・湖沼管理、河口流域の環境監視、ダム流域管理、堆砂情報管理、河川施設計画支援といったものがあげられる。「表3. 2. 2. 1」には、河川・湖沼に関する衛星データの利用例についての利点や今後の課題を示す。

表3. 2. 2. 1 河川・湖沼に関わる衛星データの利用例

河川管理	・周辺の土地利用状況の把握 ・洪水氾濫域や、その他災害による被害状況の把握	・面的評価による管理の高度化、繰り返し観測による状況の時系列変化	・観測頻度を増やし、さらに即時性を向上させることが必要。 ・分解能の向上を中心にした情報精度の向上が必要。
湖沼管理	・湖沼水域での水質管理（汚濁状況、水温変化、等々） ・流入及び流出域の、湖沼水域全体に及ぼすインパクト調査	・水質汚濁の現状及び影響要因の高精度把握	・水中の状態で中層水温の把握技術の開発 ・クロロフィル濃度の推定技術の向上
河口流域の 監視	・河口流域での流出拡散状況調査 ・河川形状及びダムなどの構造物の状況観測 ・周辺の土地利用状況の把握	・モニタリングによる災害対策支援情報の提供	・観測頻度を増やし、さらに即時性を向上させることが必要。 ・分解能の向上を中心にした情報精度の向上が必要。
河川・ダムの 濁度調査	・河川及び河川につくられたダムに流入する濁水の継続的調査 ・ダムに堆積した土砂の観測	・広域観測による濁度の一括把握、土砂堆積量の推定	・地上分解能の向上
河川施設計画 支援	・施設計画への支援情報の提供 ・施工後の周辺環境調査	・周辺状況の繰り返し観測による時系列変化把握	・2～3mの精度が保証されれば利用価値は大きい

3. 2. 3 海洋・沿岸

海洋・沿岸については、沿岸海域の監視、海流追跡、赤潮の監視などで衛星データを利用することができる。「表3. 2. 3. 1」には、海洋・沿岸に関する衛星データの利用例についての利点や今後の課題を示す。

表3. 2. 3. 1 海洋・沿岸に関わる衛星データの利用例

項 目	衛星観測データの利用例	衛星観測データ利用の利点	今後の課題
沿岸海域の監視	・沿岸海域、湾内及び海峡など狭域の海流観測 ・汚染状況の追跡調査	・季節ごとの漁業支援及び海洋構造物計画支援のための情報提供	・年間を通じて季節毎の雲に邪魔されないデータが収集できることが前提になる。 ・クロロフィル濃度の推定技術の向上
海流追跡	・暖流、寒流など海流の挙動観測（流れ、相互作用、陸域への影響）	・広域の一括把握による準同時性の高いモニタリング	・高い分解能は必要としない。 ・温度情報が効果的である。
赤潮の監視	・水質変化による赤潮等の異常発生についての監視と予測	・対策支援情報の提供、誘因観測による予測精度の向上	・海洋事象が対象であることから分解能としては30mくらいあれば充分。 ・1日に数回のデータが収集できることが大切。

3. 2. 4 都市計画・地域計画

都市計画・地域計画の分野では、緑被分布調査、土地利用現況調査、国土基本調査、地域計画の立案といったところで衛星データが利用できると考える。「表3. 2. 4. 1」には、都市計画・地域計画に関する衛星データの利用例についての利点や今後の課題を示す。

表3. 2. 4. 1 都市計画・地域計画に関わる衛星データの利用例

項 目	衛星観測データの利用例	衛星観測データ利用の利点	今後の課題
緑被分布調査	・都市及び地域の緑の面積、植生の分類 ・緑分類や樹木の活力度の調査	・緑被分布の概査、植生分類図及び活力度分布図作成支援	・年間を通じて1回/月程度または季節毎の雲に邪魔されないデータが収集できることが前提になる。 ・解析コストの低減化
土地利用現況調査	・大規模造成地など開発予定地域の土地利用状況の調査 ・市町村単位、県単位での土地被覆状況の調査	・都市計画及び地域計画立案支援のための現況把握	・年間を通じて1回/月程度または季節毎の雲に邪魔されないデータが収集できることが前提になる。 ・分解能については20～10mの場合と2～5mの場合の両方の精度が必要。
都市開発・地域開発の過程調査	・市町村等特定地域の開発進行状況のモニタリング ・開発による周辺環境への影響調査	・土地の改変状況、周辺環境要因の時系列的変化の把握	・年間を通じて1回/月程度または季節毎の雲に邪魔されないデータが収集できることが前提になる。 ・分解能については10m以下、2m程度が望ましい。

3. 2. 5 地盤環境

地盤環境に関する衛星データの利用法としては、土質調査や土壌調査が考えられる。「表3. 2. 5. 1」には、地盤環境に関する衛星データの利用例についての利点や今後の課題を示す。

表3. 2. 5. 1 地盤環境に関わる衛星データの利用例

項 目	衛星観測データの利用例	衛星観測データ利用の利点	今後の課題
土質・地質調査	・地下数mまでの範囲を対象とした土質調査 ・地層及び岩石等の調査	・広範囲の均一な土質図及び地質図作成支援	・地上分解能よりは深度方向の精度向上 ・マイクロ波センサの実利用による一層の進展
湿原の調査	・踏査の困難な湿原地域全体のモニタリング ・周辺環境との相互作用、気候等による影響調査	・湿原の変化の面的及び時系列的把握	・季節、年毎の雲に邪魔されないデータが収集できることが前提になる。 ・分解能については2～3mの地上分解能がのぞましい。
砂漠の調査	・砂漠化が進行する地域の高精度監視及び砂漠化の進行程度、草地や村落との接点におけるモニタリング	・砂漠化防止対策支援情報の提供	・日、季節、年毎の変化成分を抽出できることが前提になる。 ・広域を対象とした画像処理技術の向上。
土壌調査	・陸域の土壌水分調査 ・土壌の利用適性調査	・土壌水分、利用適性の面的把握	・年間を通じて月、季節毎の変化を抽出できることが前提になる。 ・マイクロ波センサの実利用による一層の進展

3. 2. 6 災害

台風や集中豪雨などの気象災害、地すべりや土石流といった土砂災害、火山災害、地震災害等々、一口に災害といっても多くの現象が含まれており、それだけに観測の切り口、対象とする事物は様々に異なる。

「表3. 2. 6. 1」には、災害に関する衛星データの利用例についての利点や今後の課題を示す。

表3. 2. 6. 1 災害に関わる衛星データの利用例

項 目	衛星観測データの利用例	衛星観測データ利用の利点	今後の課題
集中豪雨の監視	・局地的に集中する豪雨の予測 ・豪雨の状況監視 ・豪雨による被害状況の把握	・観測精度の向上、被害予測及び対策支援情報の提供	・観測頻度を増やし、さらに即時性を向上させることが必要。 ・分解能の向上を中心にした情報精度の向上が必要。
土砂災害監視	・土砂災害発生危険地域の調査 ・要因観測による災害発生予測 ・周辺地域の被害状況把握	・構造物の被害予測、避難対策支援情報の提供	・観測頻度を増やし、さらに即時性を向上させることが必要。 ・詳細な気象情報及び地形図との併用が必要。
火山監視	・要因観測による噴火予測 ・火山噴火（溶岩流、火砕流、噴煙）のモニタリング ・周辺地域への影響把握	・構造物や集落への被害予測、対策支援情報の提供	・2～5mの空間分解能が必要。 ・ステレオデータであることが不可欠。 ・噴火時には2～3回/日の観測頻度が必要。
地震災害監視	・大規模地震発生危険地域の調査 ・地震災害発生時の被害予測 ・要因観測による地震予測 ・発生時の被害状況及び復興状況把握	・面的な要因観測、被害状況及び復興状況の時系列的把握	・観測頻度を増やし、さらに即時性を向上させることが必要。 ・マイクロ波センサの実利用による一層の進展
洪水監視	・河川及び湖沼の洪水氾濫域の観測 ・周辺の浸水地域の予測	・洪水状況の面的及び時系列的把握	・観測頻度を増やし、さらに即時性を向上させることが必要。 ・2～3mの地上分解能が望ましい
積雪・降雪観測	・山岳地帯の積雪量の観測 ・降雪及び降水の地域への影響調査	・空間的性の高い面的把握による災害基礎情報の提供	・観測頻度を増やし、さらに即時性を向上させることが必要。 ・精度よりは確実なデータ収集体制の確立（データ保証）が重要

3. 3 衛星データ利用上の課題

これまでの衛星リモートセンシングではセンサ開発が先行し、そのセンサの提供するデータが利用可能な分野を見つけていくというようなアプローチで進められてきた。ところがこれまで述べてきたように、直接的なニーズに結びつかない研究は利用の拡大を促す要素に乏しい。リモートセンシングが一般にはなかなか普及しないという状況を打開するためにも、分野別のニーズを集約してセンサの開発や衛星の運用にこれをフィードバックする体制を作り上げていかななくてはならないと考える。

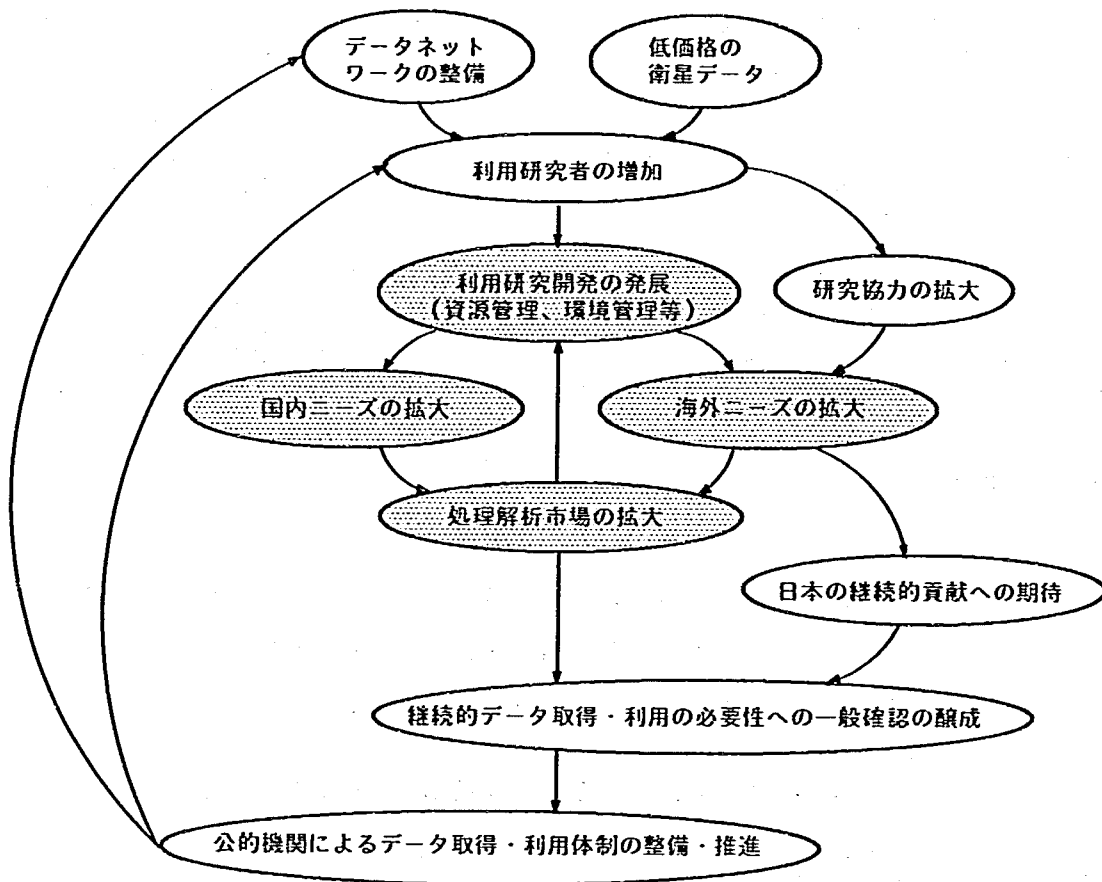


図3.3.1 リモートセンシングの普及・一般化の流れ

「図3.3.1」で示すように、リモートセンシングの普及・一般化の流れは大小2つのループからなっている。ここで示す小さいループは衛星データを利用することによって発展するものであり、大きいループは利用のための環境を整備していくものである。

小さいループの鍵は、ニーズの拡大が握っている。ニーズの拡大は処理・解析市場の拡大を促すものであり、研究開発の分野で処理・解析手法の充実が図られることにつながる。まとまったニーズがあればこれに沿った衛星データの提供もさほど困難ではなくなり、当該分野に適したデータは利用者の増加、研究者の増加を生むこととなる。

近頃では入手可能な衛星データの種類も増えつつあるが、逆にデータ数の増加が処理・解析を複雑にする

ことになり、利用の際にはその目的に応じた最適な衛星データを選択することが重要になってきている。ここで必要とされるのが、データの取得や利用を容易にするための環境整備である。大きいループを形成するための鍵はここにあるといつてよい。

小さいループが十分に発達すると、データの直接の利用者以外にもリモートセンシングの必要性が認識され、利用環境の整備がそれまで以上に求められるようになる。しかしながら、このようなデータの利用環境としては各々の分野がそれぞれにデータネットワークを整備するだけでなく、それらを相互に運用可能なものとするのが望ましい。そのためにもデータの提供形態や様々なサービスを一元的に定めて推し進めていくことが求められる。公的機関としての課題は、こういった環境整備のための方針決定に関わり、利用者全体の利益となるような体制を作りあげるよう注力することにあるといえる。

そういった課題の中には、国際的な研究協力の下で地球規模での観測を行う計画や、衛星データだけでなく研究成果についても共有化するといったことも含まれてくる。

地球規模での観測計画は現在重点的に推進され、これに基づいた衛星や大型プラットフォームの打ち上げも具体化している。近い将来には様々なセンサによる地球環境モニタリングが恒常化し、地球に関する理解も一層深まることになる。この方面では、課題は達成されつつあるといつてもよい。

リモートセンシングは今後、センサの高性能化、解析・処理手法の高度化によってますますその利用範囲を拡大していくであろうが、新たなセンサの登場によってある解析手法そのものが無用となったり、逆にその成果に著しい向上が見られたりといったことが起こってくる。こうした状況の変化や情報を共有することは研究や利用の効率化を図るうえで有用である。

4. 大規模災害における衛星データの利用

台風などはともかく、災害とそれを引き起こす事象の多くは短時間のうちに起こり、またそれらは局所的なものが多い。そのため、現在利用可能な衛星データでは、主として分解能と観測頻度の点で災害の発生を常時監視することはかなり困難である。

さらに、雲が存在するために災害発生時に有効なデータを入手することが必ずしも可能ではないこと、精度等の問題で収集したデータを災害の状況把握や危険度評価に活用しにくいといったことも衛星データの普及を妨げる一因となっている。

そこで、衛星データを有効に利用するためには従来の観測・探査データ、地理情報システム（GIS）あるいは現地調査資料等の他情報と組み合わせて解析することが必要である。

また、災害現象の数値モデルへの適用、中でも特に広域の環境変化に対応した災害発生機構の解明や、その影響と被害の評価・予測等を行おうとするとき、衛星データは他の手段では容易に得られない情報を提供することができる。

昨年（平成7年）1月17日に発生した阪神・淡路大震災では、被害状況を把握するうえで、衛星データは大きな威力を発揮した。この災害現況図は数値標高モデルなどと組み合わせられ、鳥瞰図としても示されたので、被害の甚大さを視覚的に訴えとともに災害を被りやすい地形条件などもずいぶん把握しやすくなっている。

ここでは、大規模災害における被災状況の把握などを目的とした場合の、衛星データの利用について、記述する。

4. 1 衛星データの利用状況

被災状況の把握などを目的として衛星データを利用しようとするとき、データの入手が比較的容易であることが特に望まれる。現在のところ、日本国内で比較的容易に入手できるのはLANDSAT、SPOT、JERS、MOS等のデータである。ここでは、火山災害、地震災害及び風水害等の3つの災害において、これらの衛星データがどのように利用されているのかを記述する。

4. 1. 1 火山災害

火山災害としては、溶岩流、土石流、火砕流によるものや、山体崩壊、斜面崩壊、火山灰による災害などに分類できる。「図4. 1. 1. 1」に雲仙・普賢岳噴火に伴う火砕流による被害の様子を示す。

火山噴火の様子を捉えることについては、これまでもGMSによるモニタリングとMOS/MESSR画像による詳細観測というような組み合わせである程度の成果をあげてきている。また、その噴火による降灰

や噴煙の影響範囲の観測でも、衛星データは実用に足る検出能力を有していると考えられる。

火砕流などの現象をモニタリングすることについては、現在のところこれらを捉えるために必要な観測頻度と分解能とを満足する衛星データは存在しない。これらの現象は短時間のうちに発生するため連続的な観測が必要となるが、要求仕の観点で、またそれを実現し得たとしても費用対効果の面で、当分のあいだ衛星データの利用は実際的な選択とはなり得ない。モニタリングシステムとして運用する場合には、衛星データの利用を云々するよりも現象の発生を検出したときにその対象地域に直ちに通報を行うような機能に重点を置くことになる。

土石流などに関しては、被災地域の予測や対策立案のための事前情報の把握に衛星データは大きな効果をあげることができる。これらの情報は、他の分野でもすでに実績のある地形図作成や、作成した地形図と過去の同じ地域での災害現況図等資料との重畳の成果として得ることが可能である。

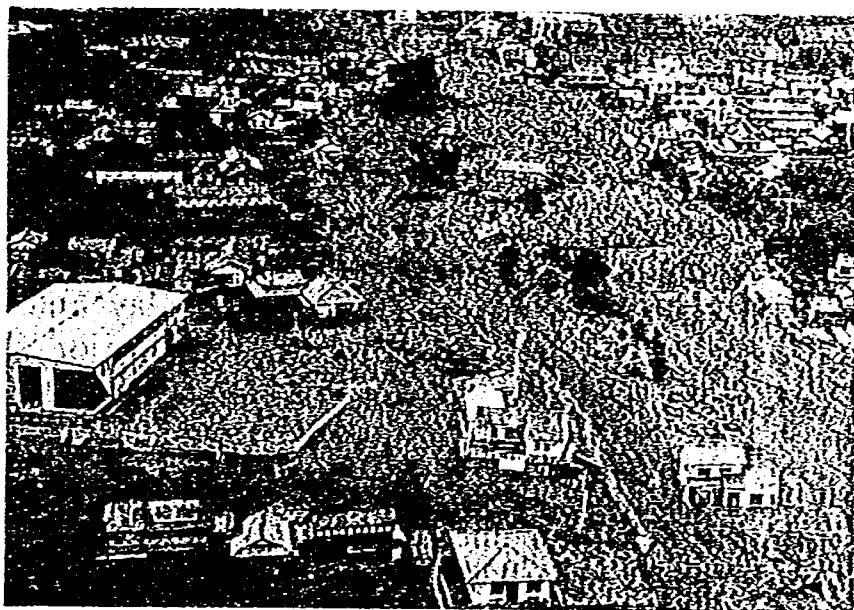


図4. 1. 1. 1 1991年6月雲仙・普賢岳の大規模火砕流による被害の様子

(A Study on the Pyroclastic Flows and Debris Flows associated with the Mount Unzen

Eruption in 1991 Technical Memorandum of PWRI NO.3141 OCTOBER 1992より引用)

4. 1. 2 地震災害

地震災害としては、津波や液状化現象、構造物被害のほかこれに起因する火災などが含まれる。「図4. 1. 2. 1」に阪神・淡路大震災にともなう火災による被害の様子を示す。

地震災害に関しても火山災害の場合と同じく、衛星データの利用は事前情報の把握に十分な効果を見出すことができる。関東・東海地方においては大規模地震の危険が指摘されて久しいが、これについては様々な機関がシミュレーションを繰り返しており、予測被災地域などこれらの結果はたびたび目にしている。こういったシミュレーションに用いる土地利用状況や地質・地盤などの基礎情報はできる限り新しいものが望

ましいが、従来のような航空写真や踏査によるデータの収集よりも繰り返し性・広域性に優れた衛星によっての方が最新性を維持することは容易であるし、また費用面などの利点も多い。

事前情報への利用としては、こういった被災予測だけでなく地震そのものの予測にも衛星データが有効ではないかと考えられ、研究が進められている。例えば、地震予知総合フロンティア研究が科学技術庁主導のもとで開始される。宇宙開発事業団では「地震リモートセンシングフロンティア研究」という題目で合成開口レーダインターフェロメトリによる地殻変動研究と電磁場変動観測技術による地震研究を予定している。

地震災害発生後の状況把握でも、衛星データは有効に活用することが可能である。災害直後の被災状況、またその後の時系列的なデータを得ることは、衛星による観測の特質を十分に活かして、地殻変動によって生じた新たな危険地域の抽出や復興計画の立案の支援情報として役立てることができる。

昨年（平成7年）1月17日の阪神・淡路大震災発生以後は、各機関から衛星データを用いた阪神淡路地方に関する様々な情報が発表された。SAR干渉画像による地殻変動の面的把握、SPOT画像を用いた被災状況判読、地震によって発生した大規模火災を捉えたNOAAの熱分布画像などがそれぞれあり、衛星データと地理情報システムとの重畳を行ったうえで作成した災害現況図やその鳥瞰図は、災害危険地域の特徴的な地形条件や被害の拡散状況を直観的に表現し、地震による被害全般を把握する上で非常に有益であった。

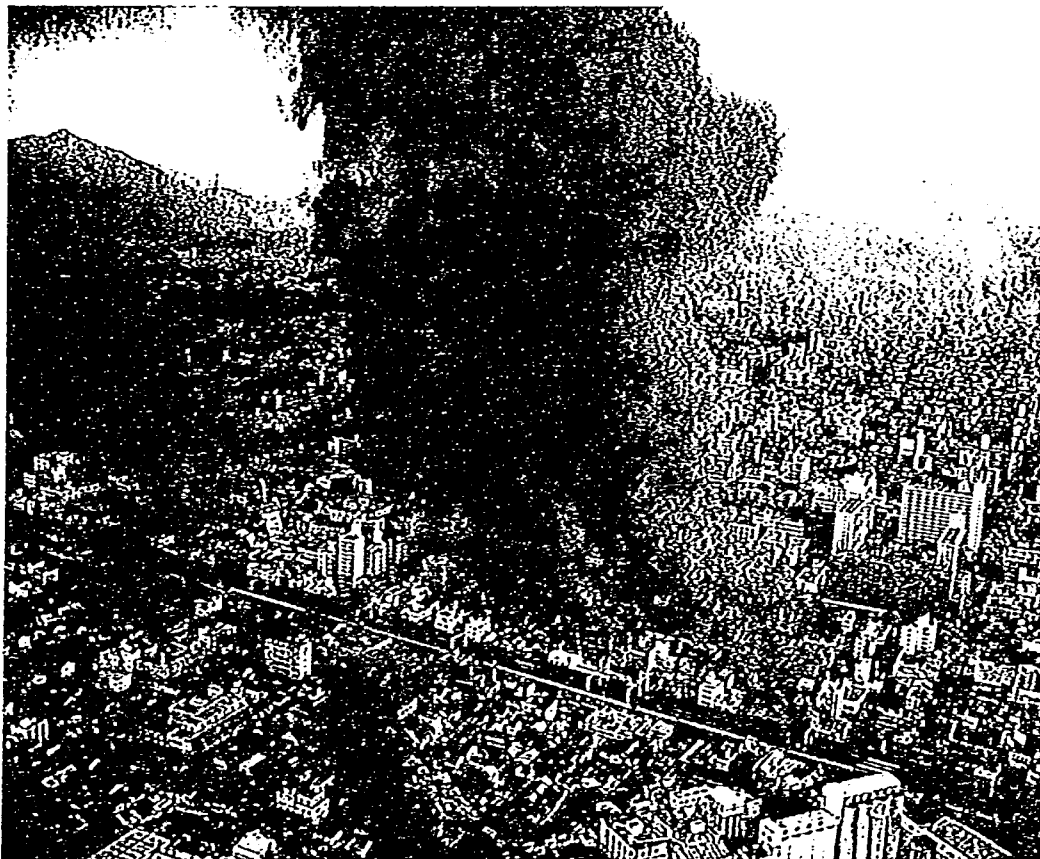


図4. 1. 2. 1 1995年1月 阪神・淡路大震災にともなう火災による被害
(THE 1995 HYGOKEN NANBU EARTHQUAKE Public Works Research Institute Ministry
of construction より引用)

4. 1. 3 風水害及び気象災害

風水害としては、台風・豪雨などによる洪水や構造物被害、また様々な原因で引き起こされる地すべりや土石流といった斜面災害があり、このほか気象災害に含まれるものとして渇水や冷害、豪雪などによる被害があげられる。「図4. 1. 3. 1」に台風10号による小貝川の氾濫の様子を示す。

衛星データをこれら風水害の被災範囲やその状況を把握するために利用することは、「4. 1. 1」及び「4. 1. 2」で述べてきたのと同様の手法によって幅広く研究され、成果もあがっている。

風水害に関して、衛星データから構造物や作物の被害程度を予測することは困難であるものの、地形要因に強い影響を受ける現象、洪水や河川氾濫など降水量に大きく関係する事柄の予測はすでに行われている。またこれらの現象も大きくは気象そのものと密接に結びついており、その点では衛星データの利活用が最も進んでいる分野の一つといえる。よく知られているように、気象庁では対流雲の発生する広域的気象環境を気象衛星によって1時間ごとの映像で常時観測を行っている。同時に、地上のレーダ観測網及び地域気象観測システムのデータを組み合わせたレーダアメダス合成図により、降雨強度の分布とその変動を監視し、短時間予測により豪雨の予警報を行っている。このように困難な予測を、データの併用で可能としているのである。これは改めて「衛星リモートセンシング」ということもないほどに一般化した利用例であり、情報の複合化が最も進んだ形態の一つであるといえる。

今後は全天候型センサともいうべき合成開口レーダ（SAR）の利用可能性が期待されるが、その場合でも、災害と同期した観測を行うことはできないので、他の観測方法等を組み合わせることを考えなくてはならない。

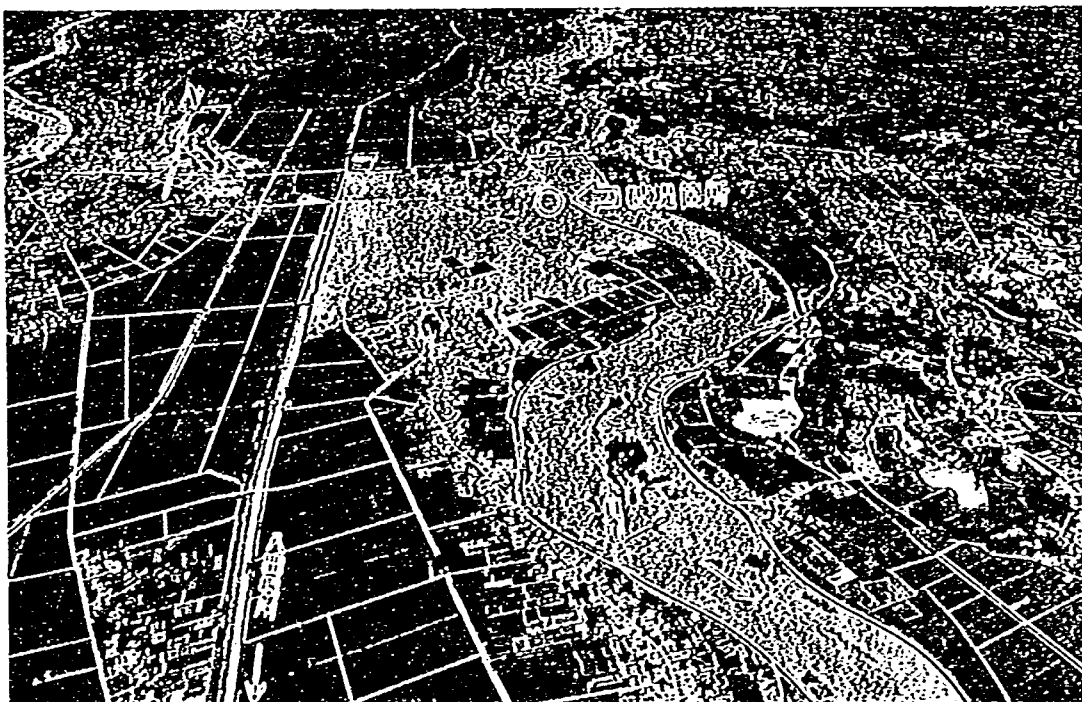


図4. 1. 3. 1 1986年8月 台風10号による小貝川の氾濫

(土木技術資料 第三十五巻 第八号 平成五年八月より引用)

4. 2 衛星データの適用事例検証

現時点では、衛星画像から被災状況を自動的に判読するようなアルゴリズムは実用化されておらず、処理・解析を終えた画像を専門家が判読を行うことによって状況を把握している。

判読によって得られる情報は大きく分けて2つあり、地形の形状と土地被覆状況である。地形形状の認識は形態情報によって、また土地被覆状況の把握は主にスペクトル情報によって行うことができる。

地形形状から把握することのできる被災状況としては、構造物被害や斜面崩壊などがあげられる。

いずれの事象でも、災害発生前後の画像の比較によってその候補地を抽出する方法が主流となっている。この方法は、比較する画像の時間間隔によっては造成などによる地形変化を誤って検出するおそれがあるものの、目視によって定性的な捉え方をしてもある程度の効果をあげられるという利点があり、多用されている。判読の正確さを高めるためには、画像から得られた被災候補地を、土地利用状況などの情報によってさらに区別することが必要となる。

土地被覆状況から得られるものには、火災によって焼失した地域や液状化現象、火山噴煙の降灰範囲、冷害による作物被害等があり、土石流等によって地表面の状況が変化した場合にはその様子も捉えることができる。

大規模な火災や作物被害については比較的容易に判読を行うことが可能で、災害発生後の画像からだけでもその被害地域の候補を捉えられている。土石流や風倒木なども、被災範囲の規模が大きく面的な広がりを持つ場合その判読はさほど困難ではない。また、観測対象が本来持っているテクスチャを手がかりにすることにより、誤判読の割合を低く抑えられるようになってきている。

洪水や河川氾濫は、衛星画像の上では水系パターンの変化として現れる。この変化は地形形状と土地被覆状況とで同時に利用可能なものである。

ここでは、これらの手法を用いて昨年（平成7年）1月17日に発生した阪神・淡路大震災に適用した事例について、その結果を検証する。

4. 2. 1 構造物被害

阪神・淡路大震災では、阪神高速道路が倒壊したことは有名だが、目で見える限りその状況は非常に特徴的であった。倒壊した部分は、路面が砕けたり支柱からずれ落ちたりする代わりに支柱そのものが横倒しになって、並行する道路を約500mに渡って塞いでいた。「図4. 2. 1. 1」は、倒壊した阪神高速道路深江出入口付近の様子を撮影した写真である。

倒壊した道路全体の状況は、周辺地域の航空写真などによって把握することができたのだが、実はその被害を衛星データの画像から判読することは困難で、被害発生前後の画像比較でも倒壊の様子を明確に捉えることは容易ではなかった。「図4. 2. 1. 2」は、倒壊した阪神高速道路深江出入口付近における震災後の衛星データの画像である。

通常の構造物被害では、倒壊によって地表面からの高度差が微少になり、被災前に見られた建築物の屋根

と陰の部分との輝度差が消失するなどの特性変化が生じる。また、これらの特性変化を手がかりとして被害地域の判読を行うことができる。しかし、倒壊した道路は上で述べたような特性変化をほとんど伴わなかったため、構造物被害として抽出することが難しかった。

倒壊した高速道路の分光特性と、直下を並行する一般道路の分光特性とは基本的にほぼ一致しており、この結果から被害の有無を判読することは難しい。また、横倒しになった状態でも構造物としての高さがそれほど失われず、画像からは被災前と似通った輝度差が見られた。そのため、上のような判読の手がかりでは道路の倒壊を構造物被害として捉えることが困難な結果となった。

ここで述べたのは典型的な事例とはいえないが、構造物被害の判読は航空写真との比較によっても解釈が難しいものが少なくない。より高解像度のセンサの登場が待たれるところである。

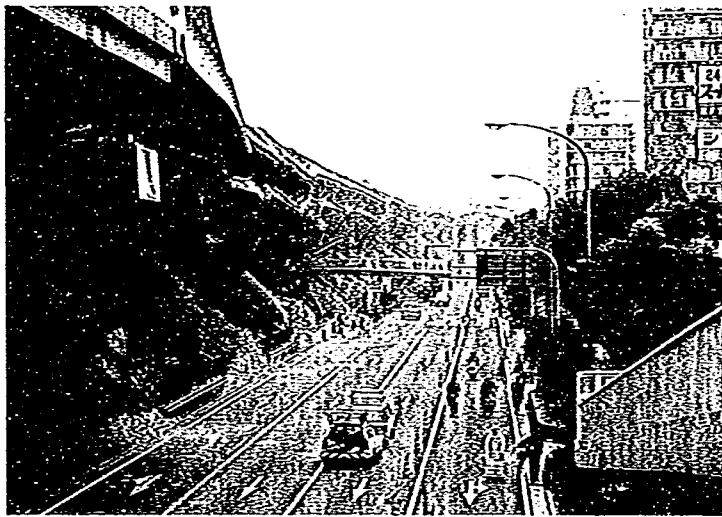


図4. 2. 1. 1 倒壊した阪神高速道路深江出入口付近の様子
(THE 1995 HYOGOKEN NANBU EARTHQUAKE Public works Research
Institute Ministry of Construction より引用)



図4. 2. 1. 2 倒壊した阪神高速道路深江出入口付近のスポット画像

4. 2. 2 液状化現象

阪神・淡路大震災では、ポートアイランド等の埋立地で広範囲の液状化が起こり、一面泥の海と化した。地盤の液状化によって「側方流動」と呼ばれる現象も起き、損壊した岸壁を海へと押し出した。クレーンも軒並み脚柱が座屈したために使用できなくなり、荷揚げ機能は麻痺した。「図4. 2. 2. 1」は、ポートアイランドの液状化の様子を撮影した写真である。

液状化とは、地震の揺れにより地下の砂の粒子の結合力が弱くなって液体のようになり、地下水の圧力が高まって砂と水が同時に地上に吹き出す現象をいう。このような液状化地域では、衛星データの可視・近赤外域のすべてのバンドで反射輝度が大きくなる。「図4. 2. 2. 2」は、ポートアイランドにおける震災前後の衛星データを重ね合わせた画像である。

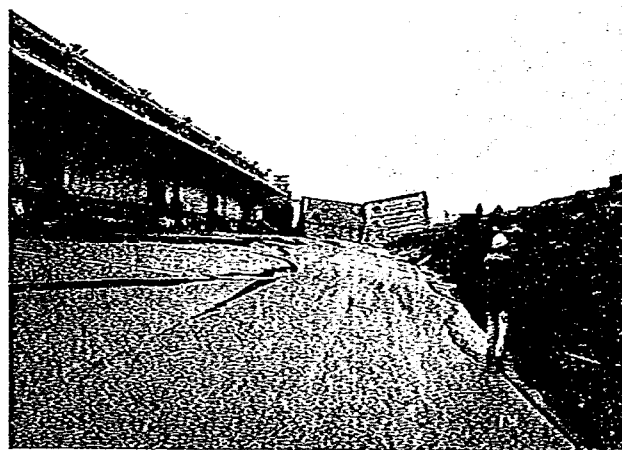


図4. 2. 2. 1 ポートアイランドの液状化の様子

(THE 1995 HYOGOKEN NANBU EARTHQUAKE Public Works Research
Institute Ministry of Construction より引用)

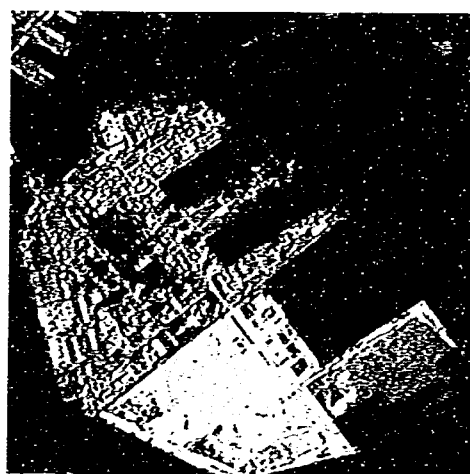


図4. 2. 2. 2 ポートアイランドにおける地震前後のSPOTパナクロデータの
カラー合成画像(地震前：緑 地震後：赤、青)

この衛星データの画像においては、液状化による可視域の反射輝度の上昇がピンク色となって明瞭に現れている。ただし、南部の埋立地の中に現れているピンク色は埋立地自体の変化によるものである。

地盤の液状化は、噴出した砂を手がかりにして抽出を行っている。裸地やコンクリート舗装は噴砂と特性が似通って誤判読されやすいが、災害発生前の画像と比較することで判読の確度を高めることができる。

一つ問題となるのは、液状化が起きやすい地域は埋め立て地などに多く、これらの土地利用状況は変化のサイクルが早いということがあげられる。災害発生前の入手可能な画像が古いものでは、比較参照に利用できないこともあり得る。

4. 3 衛星データの利用体制の確立

衛星データの処理・解析及び画像表示には、コンピュータとその周辺機器を駆使した大規模なシステムが要求される。それらのシステムの開発・整備は一朝一夕に成就するものではない。長い年月と多大の労力を積み重ねた結果得られるものである。そこで今後は、大規模災害における衛星データの利用を目的としたシステムの開発・整備を行い、利用体制を確立していく必要がある。また、このようなシステムが無いばかりに衛星データの利用を諦めているユーザの数も多い。ユーザが共通に使うことのできるシステムの整備とそれを提供する機関が是非とも必要である。システムの開放によって衛星データの利用者は飛躍的に増加するはずである。大多数のユーザは画像処理・解析のためのプログラムを開発するのが目的ではなく、それらを利用した解析結果を用いる点に主眼があることを忘れてはならない。

ここでは、災害情報として衛星データを利用したシステムで、システムの開発・整備が検討されている「災害監視システム」と「防災情報システム」について述べる。

4. 3. 1 災害監視システム

現在、多数の衛星を利用して、地球環境及び各種災害状況を国際的推進体制で定常的に監視するシステム（衛星利用による国際地球環境・災害監視システム [WEDOS : World Environment Disaster Observation System]）を構築することが試みられている。WEDOSは、地球周辺に多数の地球観測衛星を周回させ、静止軌道上に配置したデータ中継衛星を通じて、地球規模での環境監視、災害監視を常時実施するものであり、これにより来世紀にかけての人類の課題とされている地球環境の保全または災害監視に寄与することを目的としている。「図4. 3. 1. 1」にWEDOSの衛星システムを示す。

特に、火山の爆発、山火事、洪水、地震、赤潮の発生等の突発的自然災害や、タンカーの座礁による海洋汚染、焼畑による森林の焼失等の人為的な地球環境の悪化については、現在の体制では十分な対応ができないためWEDOSの実現により、その監視、予知、予測を強化するとともに、地球環境を守り、災害から人類の被害を最小限に食い止めるために役立てようとするものである。

WEDOSの目標は観測衛星により地球上の如何なる地点についても、少なくとも1日1回以上の頻度で同じ地点を観測できる全球的な観測監視システムを構築し、地球環境または災害監視とそのデータ交換、並

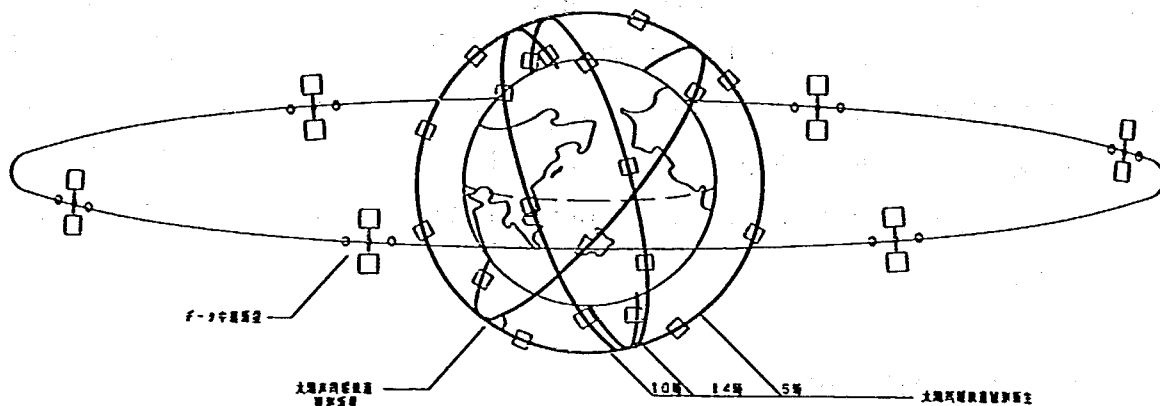


図4. 3. 1. 1 WEDOSの衛星システムの概要

びに、それらを用いた数値予報を始めとする各種の必要なデータ処理を行い、加盟国のユーザの利用に供するため、全球的観測網、通信網及びデータ処理配布システムを確立することにある。また、このシステムにより地球の環境または災害監視情報を必要な世界の国々に即座に提供し、例えば災害に対しては災害情報が天候等に左右されることなく集中的に収集できるような、緊急性のある対応を目指している。

このようなシステムの確立は、世界各地で発生している大規模災害等の被害の軽減に貢献するものであり、21世紀に向けての人類の課題とされている。

4. 3. 2 地理情報システム (GIS) を利用した防災情報システム

大規模災害において、衛星データを利用する場合、被災前後の衛星データを重ね合わせて画像表示するだけでは十分ではないことが多い。例えば、リモートセンシングにより被災箇所が検出されただけでは不十分であり、被災状況や被災による影響などを見だし、今後の防災計画に役立てていくことが重要である。このような防災情報システムを確立するためには、リモートセンシングによる解析結果を交通施設の分布や土地利用規制の指定状況など、多様な地図データと組み合わせてさらに分析する必要がある。また、リモートセンシングデータの解析や判読にあたって、地図などの補完的なデータと組み合わせることで、より精度の高い情報を豊富に得ることが可能となる。

しかし、紙の地図を用いる限り、リモートセンシングの解析結果など多くの情報を同時に表示したり、組み合わせて分析したりすることは困難である。そこで、リモートセンシングデータや地図データが、空間や土地に結び付けることで容易に整理できる情報、つまり地理情報 (geographic information) である点に着目し、コンピュータで蓄積・管理することで、こうした困難を克服することができる。これを可能とするものが地理情報システム (GIS : Geographic Information System) である。

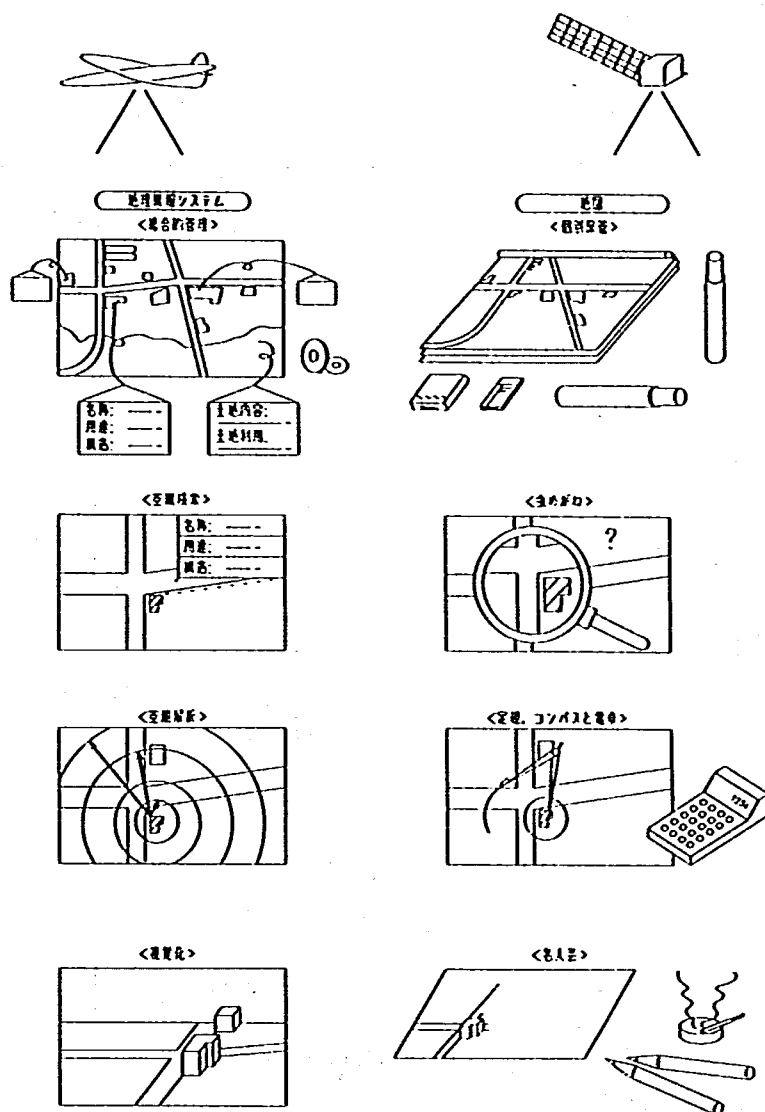


図4. 3. 2. 1 GISと地図における地理情報に関する管理方法の比較

衛星データを利用した防災情報システムを考えるうえで、GISは必要不可欠な道具であるといえる。GISによる情報管理の考え方を、従来の地図による場合と対比したものが「図4. 3. 2. 1」である。

GISを利用したシステムでは、地域のデータをデータベース化するだけでなく、災害に対する安全性の検討や災害が発生した場合の避難計画、災害に強い町づくりを行うための各種検討など、防災面での利用が多く考えられる。これまでも各機関において防災アセスメント等、災害に関する検討業務が行われてきており、それらの中でGISを利用している例も多い。ここでは、GISを利用した防災情報システムへの適用例として、「災害情報データベース・システム」、「災害危険度評価システム」及び「防災計画支援システム」の3つについて説明を加える。

(1) 災害情報データベース・システム

防災計画を行う前段として、過去の災害事例に関して、それらの発生場所や被災の規模、範囲に関する情報のデータベース化が必要となる。

「図4.3.2.2.」は、日本周辺における過去の地震災害の記録をもとに、マッピングを行う例である。属性情報として災害発生日月日及び時間、マグニチュード及び被害の状況などのデータをデータベース化することにより、各種の条件検索によって、地震災害に関する各種の主題図を容易に作成することが可能となる。

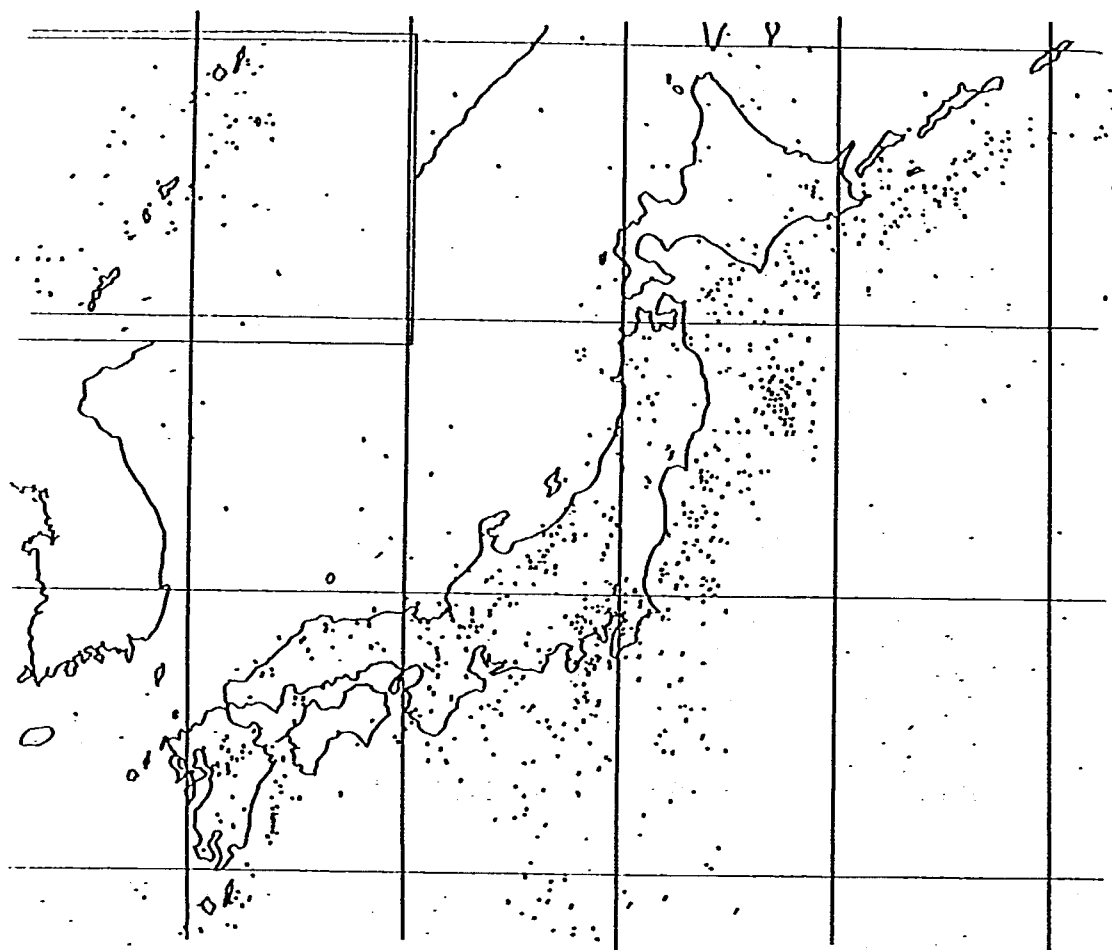


図4.3.2.2 災害情報データベース・システムによる地震災害分布の表示例

(2) 災害危険度評価システム

災害が発生した場合の、脆弱性を評価したものとして「図4.3.2.3」に示すようなハザードマップと呼ばれる主題図がある。ハザードマップの作成方法に関しては、これまでも各自治体や研究機関によって多くの研究が行われており、現在でも地域計画における重要な地理的情報として利用されている。衛星データとGISの利用によって、それらのデータを蓄積した災害危険度評価システムは、地域の防災投資計画を初めとした各種の計画に有効に利用されると思われる。



図4.3.2.3 災害危険度評価システムによるハザードマップの表示例

(3) 防災計画支援システム

防災計画と一言でいっても、それには避難場所の設定に関する計画から防災に強い構造物の計画まで、各種のものが含まれる。ここでは、それらの中から避難計画に的を絞り、避難場所の設定ならびにライフライン計画について、若干の説明を加える。

① 避難場所の設定

災害時の避難場所の設定においては、被災確率の低い（災害に強い）地区を選定するとともに、それらの避難場所へ対象地区の住民全員が安全かつ早急に避難を行えるよう、一時避難場所から広域避難場所といった各段階の避難場所を設定する必要がある。

一般には、災害時の避難場所は生活単位地区ごとに定められており、住民は災害発生時には、あらかじめ指定された避難場所へと避難することとなっている。仮に災害が発生した場合に住民それぞれが、居住する家から最も近い避難場所へと避難を行うと考えた場合に、各避難場所にどの程度の人口が集中するかを考える必要がある。

そこで、人口分布などのデータをデータベース化することにより、人口密度や道路密度をもとに適切な避難場所の設定が可能となると考えられる。「図4.3.2.4」は、避難場所の設定の例である。



図4.3.2.4 防災計画支援システムによる避難場所の設定の表示例

② ライフライン計画

地震等の災害が発生した場合には住民の避難誘導、救急車両の通行、復旧のための交通手段の確保のために、交通ネットワークの確保が重要な課題であるばかりでなく、各種のライフラインを災害時に確保すべく、防災対策を行うことが重要視されている。災害時における避難路の計画においては、道路の幅員や道路構造、道路自体の安全性等を考慮して、現存する道路ネットワークの非常時における機能確保といった評価が必要となる。こうした計画業務においては、防災計画支援システムの属性を用いた処理やネットワーク解析の機能はかなり有用であると期待されている。「図4.3.2.5」は、ライフライン計画の例である。



図4.3.2.5 防災計画支援システムによるライフライン計画の表示例

5. 衛星リモートセンシングに関する技術動向

リモートセンシングは1970年代のLANDSAT/MSS (第1世代) から1980年代のLANDSAT/TM (第2世代) を経て新しい衛星データが提供される時代 (第3世代) に入ろうとしている。これからの世代は光学センサを主流に、マイクロ波センサを加えて地表分解能とステレオデータの利用に主眼が置かれていくことになる。さらに、NASAのEOSDIS (Earth Observation System-Data Information System) に代表されるように、衛星データは人類共通のかけがえのない地球環境モニタリングシステムとして利用価値が定着していくと予想される。

ここでは、超高解像度衛星を中心に、衛星リモートセンシングの技術動向に関する項目について、その調査内容を記述する。

5. 1 超高解像度衛星

現在、米国等の民間企業が超高分解能型センサを搭載した人工衛星の適用化運用を計画しており、これらの計画が実現された場合には、地上分解能が1 mとか2 mといった超高精度の衛星データの取得が可能になるといわれている。そうすると、建設行政における社会資本の整備や維持、管理のための基礎的データの収集に衛星リモートセンシングを利用できる可能性がますます広がることになる。超高解像度化される利点は、「今まで見えなかったものが見える」事であり、解像力が向上する事により、より細かいものまで判読でき機能的な分類が行なえるようになると思われる。

ただし、目視判読が容易になる一方、画像解析の方は、従来1画素に含まれ現れなかった影などの画像に存在する各種ノイズが単独画素として現れ、細かく解析できる利点とは別に、細かく見えることによる解析の困難さが生じてくると予想され、新しい解析手法の開発が望まれる。

以上のように、超高解像度化されるに従い、判読精度は飛躍的に向上するが、コンピュータ処理による解析手法、分類項目には変化が生じると考えられ、早急に、用途、解析限界を把握する必要がある。

ここでは、超高解像度衛星の国際的な動向を把握するために、現在 (1996年2月) わかっている範囲において、今後打ち上げが予定されている超高解像度衛星の諸元について整理した。

5. 1. 1 「Early Bird」及び「Quick Bird」

1993年1月にワールドビュー・イメージング社が民間商業衛星運用第1号として認可を受けた。その後資本参加会社を募り、日本では日立製作所が資本参加と日本国内の販売総代理店権を取得している。

1994年9月にボールエアロスペースが米国商務省の認可を得た上で両者が合併してアースウォッチ社を設立し、1号機 (衛星名: Early Bird) はワールドビュー・イメージング社、2号機 (衛星名:

QuickBird) はボールエアロスペース社がそれぞれ担当することになった。

現在、公表されている参加企業はCTI (米)、TVA (米)、テレスパチオ (伊) 及び日立製作所 (日) である。衛星データは、北米、欧州、アジアの3地域で取得する予定である。集中的な受信、データ・アーカイブと最新のネットワーク技術を使って、ユーザにとって速くて使いやすいデータ・アクセスと配布をうたっている。

「図5.1.1.1」に「EarlyBird」の外観を示し、「図5.1.1.2」に「QuickBird」の外観を示す。また、「表5.1.1.1」に「EarlyBird」及び「QuickBird」の仕様について記述する。

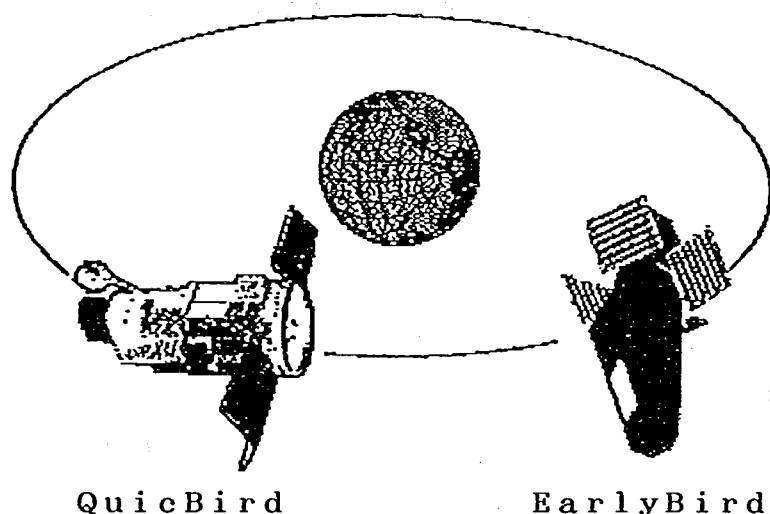


図5.1.1.1

「EarlyBird」および「QuickBird」の外観

表5.1.1.1 「EarlyBird」及び「QuickBird」の主要諸元

項 目	EarlyBird	QuickBird
打ち上げ予定時期	1996年6月	1997年9月
衛星寿命	5年間	5年間
衛星高度	470 km	470 km
搭載センサ	・パンクロマチックセンサ (白黒画像) ・MSS (マルチスペクトラルセンサ: カラー画像)	・パンクロマチックセンサ (白黒画像) ・MSS (マルチスペクトラルセンサ: カラー画像)
バンド数	3バンド (パンクロ+マルチ2バンド)	4バンド (パンクロ+マルチ3バンド)
周 期	94分	94分
回帰日数	20日	20日
再帰観測日数	2機運用: 最短2日 1機運用: 最短4日	2機運用: 最短2日 1機運用: 最短4日
画素数	2,000×2,000	未 定
観測領域 (直下)	パンクロ: 6 km×6 km マルチ: 30 km×30 km	パンクロ: 未定 マルチ: 30 km×30 km
ステレオ視角	進行方向左右: ±30°	進行方向左右: ±30°
地上分解能 (直下)	パンクロ: 3 m マルチ: 15 m	パンクロ: 1 m マルチ: 4 m
備 考	・「EarlyBird」と「QuickBird」の2機より構成される。 ・衛星データは北米、欧州及びアジアの3地域で取得する予定。	

5. 1. 2 CRSS

CRSSは、1994年5月に米国のロッキード・マーチン社とE-システムズが商務省の許可を得て設立したスペースイメージング社により、1997年12月に打ち上げが予定されている超高解像度衛星である。25年間に製作数450機以上という実績を有するロッキードは宇宙システムを担当し、20年以上の画像解析実績を有するE-システムズは地上システムの担当にあっている。

受信局は米国内3局（コロラド、アラスカ、ワシントン）のほか外国の直接受信も認めており、この海外地域の衛星運用権を地域ライセンス企業に付与している。日本では三菱商事が資本参加して日本の受信局から半径2,500km以内の直接送受信権とデータ販売権を獲得している。しかし、中国、ロシア等社会主義国の受信は認めていない。

CRSSデータの大きな特徴は、超高解像度とステレオ観測機能にある。この特徴を活用した成果品としてDTMデータの供給が計画されている。また再帰観測日がほぼ毎日に近いと、防災需要等の緊急観測への可能性が高い点があげられる。解像度が高いこと以外にGPSやジャイロを使って衛星自身の位置情報を正確に割り出し、そのために観測データが始めから高い位置精度を持っているという特徴を打ち出している。また、同システムは1機運用であるが、予備機によるバックアップがすぐに行える体制になっている。

「図5.1.2.1」にCRSSの外観を示す。また、「表5.1.2.1」～「表5.1.2.3」にCRSSの仕様について記述する。

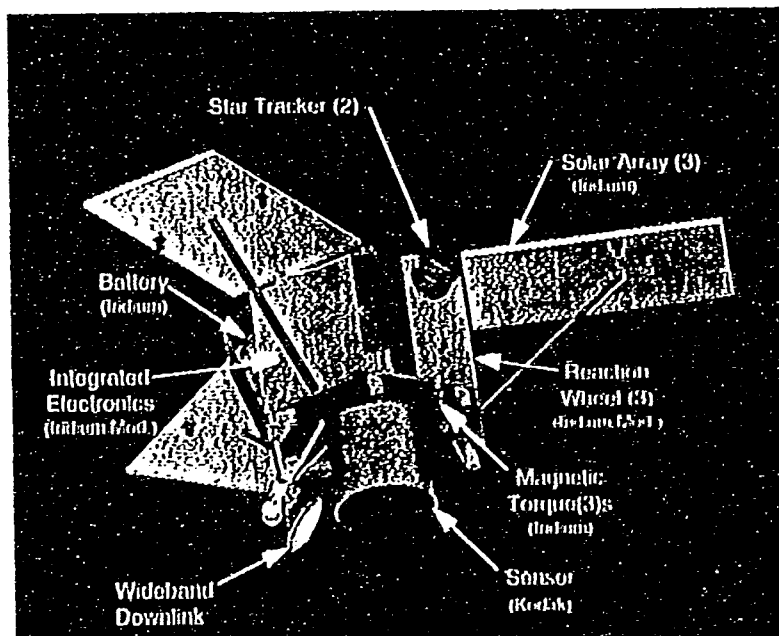


図5.1.2.1 CRSSの外観

（三菱商事（株）／商業高分解能衛星高解像度画像データサービス〔CRSS〕の説明資料より引用）

表5. 1. 2. 1 CRSSの主要諸元

打ち上げ予定時期	1997年12月
サービス開始	1998年 1月
運用体制	2機体制 : 1機運用、1機地上予備 (ないし軌道上予備) 衛星の管制: 米国デンバー管制局
衛星寿命	設計寿命: 7年間 事業計画: 5年間
衛星重量	700kg
衛星高度	680km
搭載センサ	・バンクローマチックセンサ (白黒画像) ・MSS (マルチスペクトラルセンサ: カラー画像)
センサ形式	プッシュブルームスキャナ
バンド数	5バンド (バンクロー+マルチ4バンド)
搭載位置計測機器	・軍事モードのディファレンシャルGPS ・恒星センサ (Star Tracker) ・軍事モードのジャイロ
軌道	太陽同期軌道
周期	100分
回帰日数	11日
再帰観測日数	バンクロー分解能2m以内: 1. 6日 バンクロー分解能1m以内: 3. 5日
画素数	15,000×15,000
観測領域	直線連続観測: 11km (幅) × 1,000km (進行方向) スポット観測: ・1単位 ; 11km×11km (120km ²) ・最大領域; 10×10単位 (110km×110km=12,000km ²)
ステレオ視角	進行方向左右: ±45° 進行方向前後: ±30°
符号化 (階調)	11bit/8bit圧縮
記録装置	・65GBのレコーダ・メモリ搭載 ・20分相当の撮影画像を収録 (11km×11kmの標準画像換算120枚相当) ・アラスカ受信局で衛星データを受信し、地上回線によるデータ供給可能

表5. 1. 2. 2 CRSS/バンクローマチックセンサの諸元

波長帯 (μm)	0.45~0.90
解像度	軌道直下 : 1m オフナディア角45° : 1.5m

表5. 1. 2. 3 CRSS/MSSの諸元

波長帯 (μm)	MSS1: 0.45~0.52 MSS2: 0.52~0.60 MSS3: 0.63~0.69 MSS4: 0.76~0.90
解像度	軌道直下 : 4m オフナディア角45° : 6m

5. 1. 3 OrbView

米国のOSC、GDF及びITEKの3社合弁によるアイグラス社は、1994年5月に商務省の許可を得た。しかし、その後資金面などの問題から計画が見直され、ITEK、GDFが合弁から抜けて代わりにサウディアラビアのEIRADが加わることになった。

1995年5月にアイグラス社は解散し、オービタル・イメージング社が引き継いだ。衛星の名前は「オーブビュー」である。同衛星は、パンクロで1mと2mの2つのバンドを持っていることが特徴である。

受信局は3地域を予定し、米国内OSCのDulles局以外に、外国の直接受信も認めることになっており、サウディアラビアの受信が決まっているが、それ以外の受信局についての公表はされていない。また、インターネットを用いたデータネットワークを利用することも検討している。

EIRADは1.5～2億ドルを融資する代わりに、中東地区における独占的販売権を得た。但し、イスラエルの観測は認められていない。

「図5.1.3.1」にOrbViewの外観を示し、「表5.1.3.1」にOrbViewの仕様について記述する。



図5.1.3.1 OrbViewの外観

表5.1.3.1 OrbViewの主要諸元

打ち上げ予定時期	1998年初頭
衛星寿命	不明(2000年に後継機打上予定)
衛星高度	460km
搭載センサ	・パンクロマチックセンサ(白黒画像) ・MSS(マルチスペクトラルセンサ:カラー画像)
バンド数	パンクロ:2バンド マルチ:4バンド
周期	不明
回帰日数	16日
再帰観測日数	最短3日(赤道上)
画素数	4,000×4,000(地上分解能2m時)
観測領域(直下)	8km×8km(最大:92km×85km)
ステレオ視角	進行方向前後左右:±45°
地上分解能(直下)	パンクロ:1m、2m マルチ:8m
備考	・パンクロで1mと2mの2つのバンドを持っている。 ・衛星データの受信局は3地域を予定し、インターネットを用いたデータネットワークを利用することを検討中。

5. 1. 4 EROS

イスラエルのIALと米国コアソフトウェアの合併会社として設立されたEROS CORPは、他社に比べて後発でもあるため、受信料をタダにしてロイヤリティを高く取る等の奨励措置を掲げて精力的に直接受信を勧誘している。特に中国などアジア諸国に重点施行をしているように見える。

本システムは「EROS-A」と「EROS-B」の2機より構成され、各国地上局で受信したデータは、イスラエルに提供することが条件になっている。コアソフトウェアは画像検索システムであるイメージネットの開発者であるため、利用者はインターネット経由で検索できるようにシステムの構築を検討中である。

「表5. 1. 4. 1」にEROSの仕様について記述する。

表5. 1. 4. 1 EROSの主要諸元

項 目	EROS-A	EROS-B
打ち上げ予定時期	1995年後半	1997年
衛星寿命	不 明	不 明
衛星高度	480 km	600 km
搭載センサ	・HRIS ・MRIS	・HRIS ・MRIS ・STIS
バンド数	不 明	不 明
周 期	94.2分	96.7分
回帰日数	7日	15日
再帰観測日数	最短3日	最短3日
画素数	不 明	不 明
観測領域 (直下)	HRIS: 11 km×11 km MRIS: 100 km×100 km	HRIS: 30 km×30 km MRIS: 40 km×40 km STIS: 30 km×30 km
ステレオ視角	不 明	不 明
地上分解能 (直下)	HRIS: 1.8 m MRIS: 19 m	HRIS: 1 m MRIS: 10 m STIS: 5 m
備 考	・「EROS-A」と「EROS-B」の2機より構成される。 ・受信したデータはイスラエルに提供が条件で、受信料をタダにしてロイヤリティを高く取る等の奨励措置を掲げて精力的に直接受信を勧誘している。インターネット経由での画像検索も検討中。	

5. 1. 5 ALOS

ALOSはNASDAが2001年の打ち上げ・運用を目標としている超高解像度衛星である。

ALOSに搭載されるセンサは、ADEOS/AVNIRの改良型であるAVNIR-II及び、JERS-1/SARの後継とされるVSARより構成される。詳細な性能は未定であるが、AVNIR-IIはポインティング及びステレオ視が可能なものが考えられている。

ALOSでは搭載する光学センサのポインティング機能によって数日間隔での観測が可能で、SARによる全天候観測も行うことができる。また、空間分解能は2.5 m程度が検討されており、LANDSATやSPOTでは十分な解析が行えなかった都市防災の分野にも容易に利用可能であろうと考えられる。

このALOS計画は、国連が推進する国際協調行動「国際防災の10年(IDNDR)」のプロジェクト

の1つとして1995年6月に登録認定された。

ちなみに、この1995年5月に開催されたIDNDRの世界会議では、GMSによる台風観測システム、GPSや測距衛星を用いた地震予知システム、火山活動のモニタリングや、複数の観測衛星とデータ中継衛星の組み合わせによる災害監視システム構想などが紹介、提案された。

「図5.1.5.1」にALOSの外観を示し、「表5.1.5.1」にALOSの仕様について記述する。

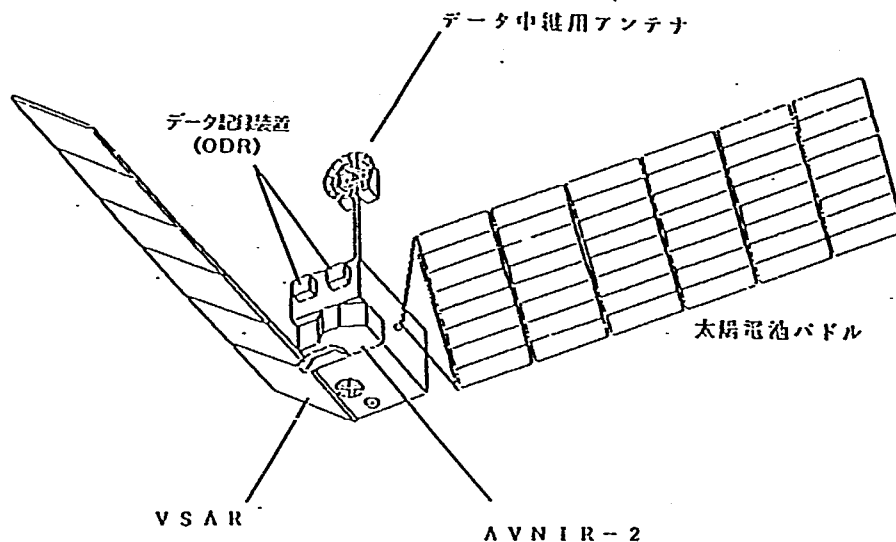


図5.1.5.1 ALOSの外観

表5.1.5.1 ALOSの主要諸元

打ち上げ予定時期	2002年初頭
衛星寿命	5年(ミッション運用期間)
衛星高度	700km
搭載センサ	・AVNIR2(高精度可視近赤外放射計) ・VSAR(可変オフナディア合成開口レーダ)
バンド数	AVNIR2-バンクロー:1バンド AVNIR2-マルチ:4バンド VSAR:Lバンド
周期	不明
回帰日数	不明
再帰観測日数	AVNIR2-バンクロー及びVSAR:45日 AVNIR2-マルチ:2日
画素数	14,000×14,000(AVNIR-2)
観測領域(直下)	35km×35km(AVNIR-2) 70km×70km(VSAR)
ステレオ視角	AVNIR2-バンクロー:進行方向前後±40° AVNIR2-マルチ:進行方向左右±40°
地上分解能(直下)	AVNIR2-バンクロー:2.5m AVNIR2-マルチ:10m VSAR:10m、100m
備考	・詳細な性能は未定だが、センサはADEOS-AVNIRの改良型のAVNIR-II(ポインティング、ステレオ視可能)及びJERS-1/SARの後継とされるVSARより構成される予定である。

5. 2 地球観測プラットフォーム技術衛星

この衛星は、環境破壊現象の監視、高空間分解能センサによる地表面の観測、複数センサによる大気・海洋のグローバル観測等を目的としている。

極軌道プラットフォーム以外に、宇宙ステーションや静止軌道プラットフォームの計画もある。

宇宙ステーションでは放射収支計測のCERESや大気化学観測のためのSAGE IIIが搭載候補となっており、熱帯中心の観測を行いながら、静止軌道プラットフォームのデータ補完にも利用する。一方、静止軌道プラットフォームは常時観測が可能である特長を持ち、搭載センサとしては90GHz～220GHzのマイクロ波マルチチャネルによる水蒸気観測用のMIMSや、3.5～18μm帯で5kmの分解能を持つ干渉スペクトロメータGHISが候補となっている。

また、NOAAは従来のシリーズの後継として、Free Flyerと呼ぶ大型極軌道衛星を1998年に打ち上げる計画を発表している。

ここでは、地球観測プラットフォーム技術衛星の国際的な動向を把握するために、現在(1996年2月)わかっている範囲において、今後打ち上げが予定されている地球観測プラットフォーム技術衛星の諸元について整理した。

5. 2. 1 ADEOS

ADEOS (Advanced Earth Observation Satellite) はMOS-1a、MOS-1b、JERS-1に続いて我が国が打ち上げる予定にしている技術衛星である。現在、1996年冬季の打ち上げが予定されている。

この衛星は、環境破壊現象の監視、高空間分解能センサによる地表面の観測、複数センサによる大気・海洋のグローバル観測を目的としている。

(1) ADEOSシステム

ADEOS衛星を中心に、地上局、実験用データ中継・追跡衛星(EDRTS: Experimental Data Relay and Tracking Satellite) 及びその前段階の試験を行う技術試験衛星VI型(ETSVI) 等から成るシステムである。EDRTSを利用することにより、地球の70%をカバーするデータを集めることができ、これによりグローバルな地球観測データの収集が可能になる。

衛星の平均高度は796.61km、軌道傾斜角は98.60度、回帰周期は100.92分の太陽同期準回帰軌道で回帰日数は41日である。また、交降点通過時刻は10時15分～45分(地方時)である。AVNIRのデータが赤道上で隙間なく得られるには41日かかるが、OCTSは観測幅が約1400kmと広いので3日間で前地球をカバーするデータが得られる。

「図5.2.1.1」にADEOSの外観を示し、「表5.2.1.1」にADEOSの諸元について記述する。

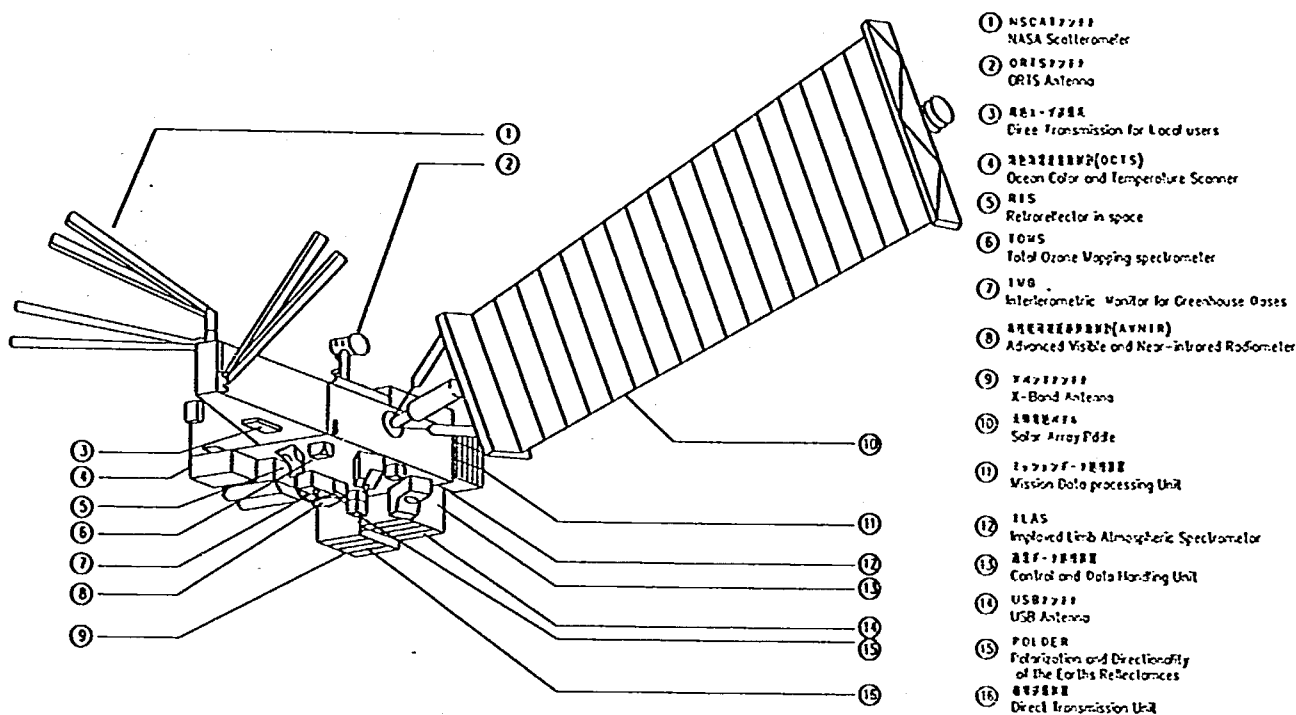


図5. 2. 1. 1 ADEOSの外観

表5. 2. 1. 1 ADEOSの主要諸元

打ち上げ予定時期	1996年冬季
衛星寿命	3年
衛星重量	3.5トン(打ち上げ時)
衛星高度	797km
搭載センサ	・OCTS(海色海温走査放射計) ・AVNIR(高性能可視近赤外放射計) ・公募センサ(宇宙開発事業団以外の機関が開発した複数のセンサ)
姿勢安定方式	・3軸姿勢制御方式 ・ゼロモーメントム
軌道	太陽同期準回帰軌道
周期	101分
回帰日数	41日
再帰観測日数	2日(ポインティング機能使用時)
画素数	不明
ステレオ視角	進行方向左右: $\pm 40^\circ$
備考	・AVNIRは、空間分解能及びクロストラック方向のポインティング性能が特に高く、赤道上においては、2日毎の同一地点観測が可能である。

(2) 搭載センサ

ADEOSには海色海温走査放射計(OCTS: Ocean and Temperature Scanner)と高性能可視近赤外放射計(AVNIR: Advanced Visible and Near Infrared Radiometer)が搭載される。この他にも、公募センサとして、宇宙開発事業団以外の機関が開発した複数のセンサが搭載されることになっている。

「表5. 2. 1. 2」～「表5. 2. 1. 4」にADEOSに搭載されるセンサの仕様について示す。

表5. 2. 1. 2
ADEOS/OCTSの仕様

項 目	仕 様
波長 (μm)	(中心波長) 0.412, 0.440, 0.490, 0.515, 0.560, 0.660
	(波長幅) 0.20
	0.770/ 0.880 0.040/0.080 3.70/ 8.50 0.30/0.50 11.0/ 12.0 1.0
視野/瞬時視野	約 1400km/0.85 μrad
傾き	$\pm 20^\circ$ (5 $^\circ$ 刻み)
走査方式	機成方式
量子化レベル	12 bit
重量	260 $\pm$ 30kg
電力	300 $\pm$ 30w

表5. 2. 1. 3
ADEOS/AVNIRの仕様

項 目	仕 様
波長 (μm)	(中央波長) 0.45, 0.57, 0.67, 0.87, 0.64, (1 $^\circ$ ノック)
	(波長幅) 0.10 0.10 0.20
観測幅	5.7 $^\circ$ (800kmからの時80km)
瞬時視野	20 μrad (800kmからの時16m, 1 $^\circ$ ノックでは8m)
ポインティング精度	$\pm 40^\circ$
走査方式	機械方式
重量	200 kg
電力	250 w

表5. 2. 1. 4 ADEOSに搭載されるセンサー一覧
(宇宙開発事業団以外の機関が開発したセンサ)

センサ名	提案国	提案機関	観測目的	
NSCAT マイクロ波 散乱計	米国	米国航空宇宙局/ ジェット推進研究所	海上の風向・風速の測定	・観測幅: 1200 km ・風速測定精度: 2 m/s ・観測波長: 14 GHz ・風向測定精度: 20度
TOMS オゾン全量分光計	米国	米国航空宇宙局/ ゴダード宇宙飛行 センター	オゾン量及び二酸化硫黄の グローバルな分布	・観測幅: 2795 km ・観測波長: 304.0, 312.5, 325.0, 332.6, 360.0 nm
POLDER 地表反射光観測 装置	仏国	(フランス) 国立 宇宙開発センター	地球表面や大気で反射される 太陽光の偏光と方向性の測定	・観測幅: 1440 $\times$ 1920km ・観測波長: 435, 670, 880 490, 520, 565, 950 nm
IMG 温室効果ガス観 測装置	日本	通産省立地公署局	大気中のCO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, その他の温室ガスの 地域分布の測定	・観測幅: 20 km ・観測波長: 3~15 μm
ILAS 改良型大気周縁 赤外分光計	日本	環境庁企画調整局	極地における大気微量成分 (オゾン, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, エアロゾル) の高度 分布の測定	・観測波長: 735~784 nm 4100~6900 nm 7300~11800nm ・観測高度: 10~60 km
RIS 地上・衛星間レ ーザ長光路吸収 測定用リトロリ フレクタ	日本	環境庁企画調整局	地上から発射するレーザ光と 地上-衛星間の長光路吸収測 定による地上極上空のオゾン 、フロン、二酸化炭素などの 濃度測定	・観測波長: 300~14000 nm ・レーザ反射用コーナキュ ープリフレクター: 開口 ϕ 50 cm

(メモ)

NSCAT : NASA Scatterometer
TOMS : Total Ozone Mapping Spectrometer
POLDER : Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances
IMG : Interferometric Monitor for Greenhouse Gases
ILAS : Improved Limb Atmospheric Spectrometer
RIS : Retroreflector in Space

① ADEOS/OCTS

海色海温走査放射計 (OCTS) は、広画角の放射計 (海色計を含む) として、MOS-1/VTIR で培われた技術を反映している。このOCTSは、特に海洋中の植物プランクトン、黄色物質などを詳細に調査するため多バンド化を図り、また分光特性を高めることに注力した。これらのデータは、海洋の基礎生産量及び炭酸ガス循環の把握などへの利用が期待されている。

② ADEOS/AVNIR

高性能可視近赤外放射計 (AVNIR) は、狭画角の放射計やサウダとして、MOS-1/MESSR で開発された可視/赤外放射計の技術を引き継いでいる。空間分解能はMESSRでは50mであったものが16mにまで向上が図られ、ポインティング機能や分解能8mのバンクバンド観測などを実現する。AVNIRの観測データは、熱帯林破壊、砂漠化、水質汚染等の環境問題として注目されている現象の把握や監視に利用することが期待されている。

③ 米国の提案によるセンサ

米国の提案によるセンサとしては、マイクロ波散乱計 (NSCAT) とオゾン全量分光計 (TOMS) とが搭載される。これらはそれぞれ、海上の風向・風速の測定、オゾン量のグローバル分布の測定を目的としたものである。

④ 仏国の提案によるセンサ

ADEOSに搭載するセンサの一つ、地表反射光観測装置 (POLDER) はフランスが開発を行っている。日本ではすでにこのセンサの航空機搭載型の実験データを用いて、大気モデルや植生による反射特性の違いなどの研究を進めている。

⑤ 日本の提案によるセンサ

日本の提案によるセンサとしては、改良型大気周縁赤外分光計 (ILAS) の開発が行われ、同時に温室効果ガス観測装置 (IMG) 及び地上・衛星間レーザ長光路吸収測定用リトロリフレクタ (RIS) も搭載することになっている。これらによって、極域の大気の微量成分の高度分布や、CO₂を始めとする温室効果ガスの地域分布を測定することになっている。

(3) 将来計画

ADEOSの開発に引き続いてすでにADEOS-IIの開発研究が行われており、1995年9月に基本設計審査を実施、基本設計が完了している。

ADEOS-II計画はADEOSの観測を継承し、グローバルな水・エネルギー等の循環を解明することを目的としている。そのため、エネルギー循環の解明に必要な物理量としては雲分布、表面温度、雪氷面積など、水循環の解明に必要な物理量としては海上風速、積算水蒸気量、降水強度等のデータセットを作成することを目標としている。

ADEOS-IIには5つのセンサを搭載する予定である。このうち、POLDERはADEOS搭載と同じもので、ILAS-IIはILASの、グローバルイメジャGLIはOCTSを34バンドにした発展型である。また、やはりアメリカの提案で搭載する予定の海上風観測装置SeaWindsは、NSCATを

固定アンテナからスピンアンテナに改良したものとなっている。

マイクロ波放射計 AMSR は MOS-1/MSR のアンテナ径を 2 m に大型化したもので、海面温度、土壌水分量、海上風速、降水強度等のデータが得られる。このデータは、気候システムの研究の他に、気象予測の入力パラメータとして用いることで予測精度の向上が期待される。

これらのセンサを効果的に運用できるよう、衛星自体も発生電力の増強や姿勢制御精度の向上などが図られている。この ADEOS-II は、1999 年 2 月の打ち上げを目指している。「図 5. 2. 1. 2」に ADEOS-II の外観を示す。

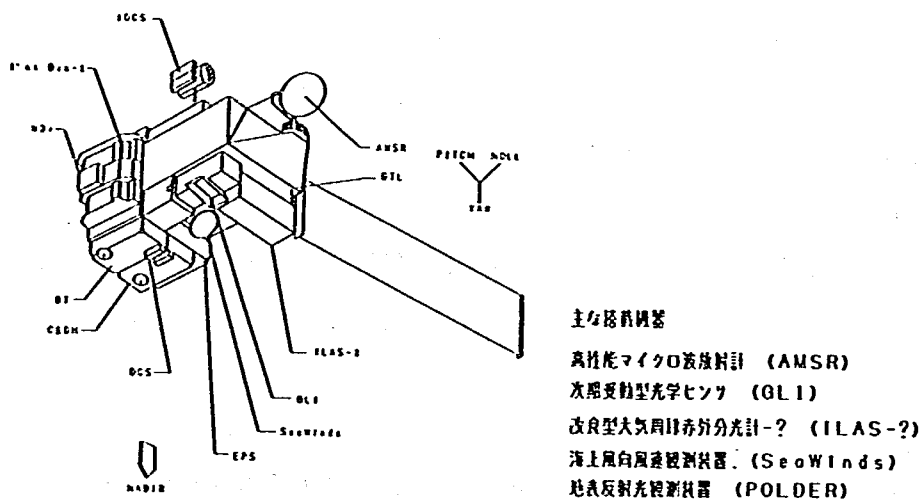


図 5. 2. 1. 2 ADEOS-II の外観

5. 2. 2 EOS 計画

昔から、地球科学は伝統的に大気圏、地殻、生物圏、海洋と氷河など、個々の要素の研究を通して発展してきた。しかし、最近の地球科学はそれらの要素を統合し、総合的でダイナミックな相互作用を解明する研究へと移行しつつあるといわれている。このことは、人工衛星を使ったグローバルな観測や新しい宇宙技術や定量モデルの開発により、地球の進化とそのグローバルな変化について、複雑でしかも相互に影響しあう諸プロセスを探ることが可能になってきたからである。このような背景から、「地球を 1 つのシステムとしてグローバルに捉える」という基本的な立場から、以下のような目的で 1983 年に NASA の科学諮問委員会は「地球システム科学委員会」を設置して地球システム科学の目標を明確にした。

- ① 地球に関する科学をレビューする。
- ② グローバルな地球の研究を遂行するための方策を提言する。
- ③ 同時に地球システム科学に対する NASA の役割を明らかにする。

この地球システム科学委員会の提言に基づいて、米国はこれからの地球観測計画を「地球システム科学」という立場を進めることを明らかにした。すなわち、米国における地球観測の姿勢を「グローバルな変化を継続的・長期的に測定するため、科学的に必要とされる総合的でグローバルな地球観測の新しい時代を開く」とことと方向づけた。

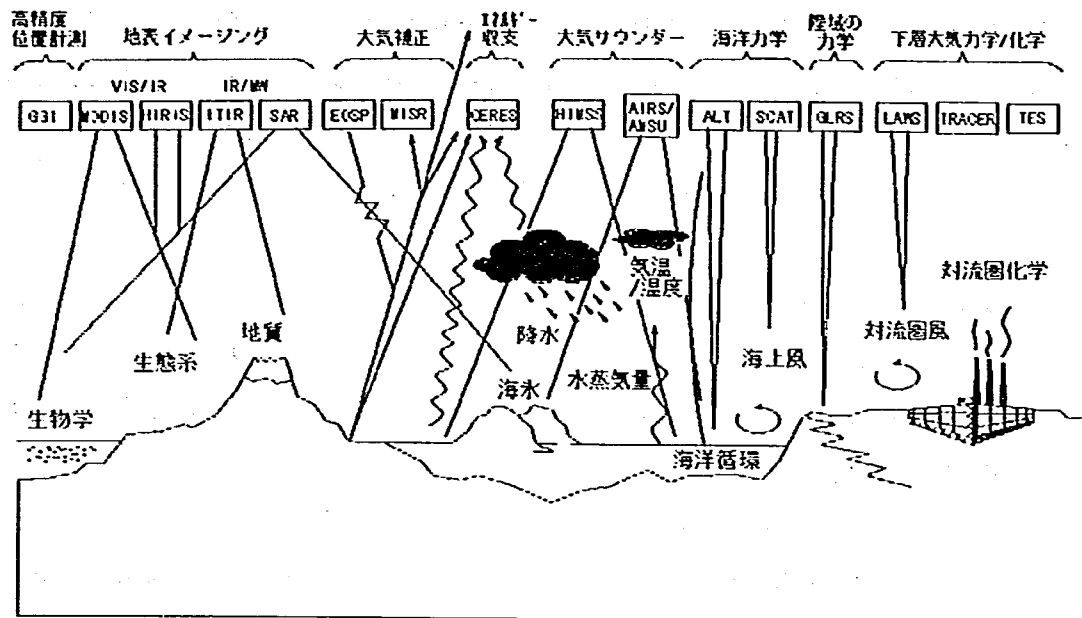


図5. 2. 2. 1 EOS計画による地表面及び対流圏の観測概念図

特に、1995年以降の宇宙ステーション時代における地球観測の理念がこの「地球観測システム (EOS : Earth Observation System) 計画」である。「図5. 2. 2. 1」にEOS計画における地表面及び対流圏の観測概念について示す。すなわち、将来の地球観測を国際協力によって有効かつ効率的に実施するために宇宙ステーション計画の構成要素である極軌道プラットフォーム (POP : Polar Orbiting Platform) による地球観測計画が提唱され、米国、欧州、日本及びカナダの4ヶ国が協力のもとで進めている。

アメリカのそれはNPOPと呼ぶもので、3年～5年ごとに機器を交換しながら、12年～15年の運用を行う予定である。このプラットフォームに搭載するセンサは公募の形をとって、日本からはマイクロ波走査放射計AMSUと中間赤外放射計ITIRの2つがほぼ決定している。NPOP初号機は1996年、2号機は1998年の打ち上げを目指している。

このプラットフォームからの画像データは地上局が直接受信するほかに、追跡データ中継衛星を経由して取得することも可能となる。この中継システムは3機の衛星で構成され、地球全域をカバーしている。

ヨーロッパのEPOP、日本のJPOPもNPOPと同じくこの計画の一翼を担うもので、EPOPは1997年と2000年に、JPOPは1998年に打ち上げられる予定である。

5. 2. 3 POP計画

国際極軌道プラットフォーム (IPOP: International Polar Orbiting Platform) または単にPOPと呼ばれている計画は、NOAAシリーズの後継として計画されたものである。NASAとESAが他の国々にも呼びかけて、1990年代の後半に極軌道に大型の地球観測衛星の打ち上げを予定し、宇宙ステーション計画の一環として計画されている。この計画には「表5. 2. 3. 1」に示す通り、いくつかのプラットフォームが打ち上げを公表している。

打ち上げロケットにはNPOP及びEPOPがタイタン4とアリアン5またはスペースシャトル、JPOPはH-II型ロケットが予定されている。組み立ては宇宙基地の支援の下で行われ、寿命は12～15年が想定されている。機器の交換は3～5年毎に行われる。それぞれのプラットフォームは共に2～3トンのペイロード重量 (衛星が持つ耐重量) を可能にしている。

POPからの画像データは地上受信局直接またはTDRS (地上局と低軌道周回衛星を結ぶ追跡データ中継システムを確立するためにNASAがスペースシャトルから打ち上げた追跡データ中継衛星で3基から構成されている。地球全域をカバーする世界最大の通信衛星といえる) 経由のどちらかを選択できる。

表5. 2. 3. 1 今後打ち上げを予定しているPOPの主要諸元

衛星名	NPOP-1	NPOP-2	EPOP-1/A1	EPOP-1/B1	JPOP-1
打ち上げ国	米国	米国	ESA	ESA	日本国
打ち上げ予定時期	1996年	1998年	1997年	2000年	1998年
打ち上げ用ロケット	タイタン4、 タイタン5 または スペース シャトル	タイタン4、 タイタン5 または スペース シャトル	タイタン4、 タイタン5 または スペース シャトル	タイタン4、 タイタン5 または スペース シャトル	H-II
衛星寿命	12～15年	12～15年	12～15年	12～15年	12～15年
機器の交換	3～5年毎	3～5年毎	3～5年毎	3～5年毎	3～5年毎
ペイロード重量 (衛星が持つ耐重量)	2～3トン	2～3トン	2～3トン	2～3トン	2～3トン
衛星高度	705 km	705 km	824 km	705 km	800 km
搭載センサ	・ AMSR ・ ITIR ・ HIRIS ・ MODIS	研究用センサ (NASA、 ESA、日本) 実用観測センサ (NOAAの後 継センサ)	研究用センサ (NASA、 ESA、日本) 実用観測センサ (NOAAの後 継センサ)	研究用センサ (NASA、 ESA、日本) 実用観測センサ (NOAAの後 継センサ)	・ グローバル イメージャ ・ AMSR
赤道通過時刻	13時30分	13時30分	不明	10時～ 10時30分	不明 (太陽同期 極軌道)
備考	・ POPからの画像データは、地上受信局直接またはTDRS経由のどちらかを選択できる。				

(1) NPOP及びEPOP

最初に打ち上げられるのはNPOPであるといわれているが、これには我が国から高性能マイクロ波走査放射計 (AMSR) と中間赤外放射計 (ITIR) の2つのセンサの搭載がほぼ決定している。

この他にも高分解能画像分光計 (HIRIS、192バンド)、MODIS (中解像度画像分光計、40

バンド) など19個のセンサが候補にあがっている。

NPOP及びEPOPに搭載する候補センサの内、研究用センサはPOP計画のミッションの中の中核を成すもので、NASA、ESA、日本国が開発を担当している。

これに対して、実用観測センサは現在運用されている極軌道気象衛星NOAAの観測を継続するセンサである。この計画のためにIPOP調整会議が頻繁に行われている。

(2) JPOP

JPOP-1は、気圏、水圏、生物圏、及びそれらの相互作用に重点を置いたグローバルかつ継続的な状態及び変動の監視、雪氷圏・水文要素の精密観測をミッションとして、1998年の打ち上げを予定している我が国の国際極軌道プラットフォームである。

このJPOP-1に搭載するセンサの一つに、ADEOS/OCTSをさらに発展させた±55度の視野角を持つ24チャンネルのグローバルイメージャがある。

この種のセンサにも狭画角のセンサと同様の課題があるが、走査鏡の反射率やディテクタの感度向上、偏光の低減化、冷却技術の向上などを図っている。

またJPOP/AMSRでは、MOS-1/MSRで開発された狭観測幅、2周波、片偏波のマイクロ波放射計の技術から発展して、12周波、両偏波を実現しようとしている。

いかにして種々の要因の影響を除き、観測対象の物理量抽出アルゴリズムの精度を向上させるかが課題となっており、温度分解能と低周波での空間分解能の向上、校正精度、ミリ波、サブミリ波技術の向上が技術的な目標となっている。

5.3 その他の衛星

人工衛星によるリモートセンシングは、先進国、開発途上国を問わず地域社会の発展のために広く利用することができる。1986年6月、国連の宇宙空間平和利用委員会において、「宇宙からの地球のリモートセンシングに関する原則」が採択され、観測衛星の利用は、平和利用、無差別公開などの基本原則に基づくこととされている。地球観測分野における国際協力は極めて重要であるとの共通認識から、各国の観測衛星計画は、搭載センサの種別、開発分担、利用方針などの関連事項について、国際的な調整あるいは情報交換を十分に行いつつ進められている。

近年では地球の温暖化、オゾン層の破壊、酸性雨、海洋汚染、熱帯林の減少、砂漠化の進行などのいわゆる地球環境問題の分野において、その解明のため、人工衛星による地球観測が地球環境の有効なモニタリング手段として大きな期待を集めている。

ここでは、「超高解像度衛星」及び「地球観測プラットフォーム技術衛星」以外の人工衛星(その他の衛星)によるリモートセンシングの国際的な動向を把握するために、現在(1996年2月19日)わかっている範囲において、今後打ち上げが予定されている「その他の衛星」について整理した。

5. 3. 1 アメリカ

アメリカの関わるプロジェクトの多くは国際協力の下で計画され、実現している。今後もその傾向はますます高まるであろうが、機器間インタフェースの統一など協力体制の整備を進めていくことが必要である。

ここでは、いままで述べてきた衛星の計画の他に、アメリカの関わるプロジェクトで、現在明らかになっているものについて記述する。また、「表5. 3. 1. 1」にアメリカにおける、その他の衛星の将来計画について示す。

表5. 3. 1. 1 アメリカにおけるその他の衛星リモートセンシング将来計画

	～1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001～
LANDSAT			6	7			
Earth Probe							
NOAA		L	H	N			
GOES	K		L				
SeaWiFS							

：開発計画 ：計画運用期間 ：継続運用予定

(1) LANDSAT

EOSATが実施機関となっているLANDSATは、従来からの継続である6号、7号でもTMの性能がわずかに向上したに留まって今後の計画は明らかになっていない。打ち上げの失敗もあって計画は縮小方向にあり、おそらくはEOS計画に取り込まれるものと考えられているが、運用面では衛星データの販売とEOS計画の中での実験との関係が明確にならないままで棚上げされている。

(2) Earth Probe

特定ミッション専用の中型衛星という位置づけでEarth Probeがあり、2、3年に一度の割で打ち上げが計画されている。

極地方を中心に全球のオゾンホールの変化を測定するセンサであるTOMSは紫外線スペクトル領域のオゾンサウンダーで、火山からのSO₂の測定も可能であり、他の衛星への搭載も予定されている。

(3) NOAA

NOAAは当初NPOP（米国が打ち上げる予定の極軌道プラットフォーム）への参加を表明していたが、1989年に独自の「Free Flyer」と呼ぶ大型の極軌道衛星計画（1998年、高度824 kmに打ち上げ予定）を発表した。

(4) GOES

GOESは気象観測用のスピン衛星で、センサとしてVISSR、VASを搭載している。従来からの継続であるGOESは静止軌道プラットフォームに吸収されるものと考えられているが、プラットフォームの打ち上げ予定がずれ込んでいるため、イメージャとサウンダの2種類のセンサを搭載するGOES-NEXTの検討もなされている。

(5) SeaWiFS

SeaWiFSは海洋と大気の相互作用、植物性プランクトンの量と分布の調査を目的とする海色センサ、MFEはNASAとCNESの固体地球に関する地球磁場測定の実験ミッションである。

5. 3. 2 ヨーロッパ

ヨーロッパにおける関心事としては、酸性雨による森林・湖水破壊や地球温暖化に伴う海面上昇といった環境問題があげられる。このため、衛星による環境監視を促進する強い要求があり、ESAではリモートセンシング衛星や極軌道プラットフォームの計画を推進している。

ドイツやフランスでは独自の衛星開発計画も有しており、また、アメリカや日本との協力プロジェクトに関連した計画も数多い。

ここでは、いままで述べてきた衛星の計画の他に、ヨーロッパの関わるプロジェクトで、現在明らかになっているものについて記述する。また、「表5. 3. 2. 1」にヨーロッパにおける、その他の衛星の将来計画について示す。

表5. 3. 2. 1 ヨーロッパにおけるその他の衛星リモートセンシング将来計画

	～1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001～
ERS-2							
ARISTOTELES							
POEM			M1			N1	
SPOT	4					5	
GLOBSAT							
BEST							
ATMOS							

注：計画運用期間

(1) ERS-2

ERS-2のシステムはすでに運用が行われているものだが、このシステムは海洋観測を主目的とした地球観測衛星と、地上設備である複数の地上局、EECF、MMCC、PAF'Sから成っている。初号機となったERS-1はAMIなどによる観測で様々な成果を上げており、現在のところ2号機に障害が発生しているものの、今後も観測は継続の方向にある。

地上設備の役割としては、EECFがユーザへのデータ提供やデータの品質管理を行い、データの処理、保存、検索などはPAF'Sが担当している。また、MMCCは運用と観測の計画を行っている。地上局はESAとして4局運用しているほかに域外にもいくつかあり、日本では宇宙開発事業団地球観測センターがその任を負っている。

ERSデータの受信・処理・配布は、通信回線を用いた準リアルタイム伝送も考慮されている。

(2) ARISTOTELES

NASAとの協力の下でも打ち上げを予定しているのがARISTOTELESである。ここではRadio Metryによる地球重力の測定、Vector and Scalar Magnetometerによる地球磁気の測定を行う予定である。

(3) POEM

POEMと呼ばれる極軌道プラットフォームは、ESAのCOLUMBUSプログラムの一環として実施するもので、1997年の打ち上げを予定している。このプラットフォームは、高度700km~850kmの軌道を太陽同期で周回する計画で、4年~6年の寿命を想定している。

搭載候補にあげられているのは、オペレーショナルパッケージがAVHRR、HIRS、ARGOS、MCP、S&R、コアセンサとしてはMERIS、RA-2、A-SAR、A-SCATT、MIPASである。そのほか、AASTR、CERES、PRARE、SCIAMACHY、GOMOS、AURIO、APAF0といったセンサが名を連ねている。

(4) SPOT

SPOTデータはSPOT IMAGE社が販売活動を行い、LANDSATデータと同様にすでに広く利用されている。このデータは現在一般に入手することのできる最も分解能の高いものの一つである。現在も継続的に運用されており、2000年には分解能5mの新型センサを搭載したSPOT-5が打ち上げられる予定である。

(5) GLOBSAT

GLOBSATは、極軌道プラットフォームの環境監視の先駆けとして、温室効果、成層圏・対流圏の化学、大陸及び海洋の生態系のプロセスを理解し、環境パラメータの変化を把握することを目的とする衛星である。この衛星には、赤外分光計や可視赤外放射計、海色観測装置などを搭載している。

(6) BEST

BESTはWCRPの一環としてGEWEXの基本条件を満たすために打ち上げられ、これに搭載するDoppler Lidarによって熱帯風を、rainradarによって降雨分布を観測する。LidarはLAWSと類似した観測機器で、4つの望遠鏡でCO₂レーザーの大気散乱波のドップラーを計測するものである。rainradarは地表面から高度20kmまでを水平分解能1.6kmで観測可能で、観測域は300kmの内から100kmの範囲を選択するようになっている。

(7) ATMOS

大気・海洋観測衛星ATMOSには、大気観測用としてMIPAS、SCIAMACHY、AMASがあり大気の微量成分、大気パラメータを測定する。海洋観測用としてはROSISを搭載する。

5.3.3 日本

我が国も、国際社会に貢献するとの立場から、地球観測衛星の研究開発、観測データの利用促進をより一層積極的に推進している。

主な取り組みとしては、プラットフォーム技術の開発を主な目的とした地球観測プラットフォーム技術衛星の開発があげられるが、一方ではLANDSAT、SPOT、MOSなど、これまで打ち上げられてきたような従来型観測衛星についても、一機あたりの制作費が低く、同種の衛星を継続的に運用する場合、さらに量産効果が期待でき、経済的であること、特殊な目的あるいは特定期間に限るような弾力的観測に適することなどの理由から、プラットフォーム型観測衛星が実用に至った時代にも、その補完的な役割を果たしてゆくものと考えられている。

ここでは、いままで述べてきた衛星の計画の他に、日本の関わるプロジェクトで、現在明らかになっているものについて記述する。また、「表5.3.3.1」に日本における、その他の衛星の将来計画について示す。

表5.3.3.1 日本におけるその他の衛星リモートセンシング将来計画

	～1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001～
TRMM		■	■	■	■		
JEM				■	■	■	■
WCRP-1						■	■
SIDUSS						■	■
DUOS						■	■

■ : 計画運用期間 ■ : 継続運用予定

(1) TRMM

熱帯降雨観測衛星 (TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission) は、地球規模の気候変動の解明や環境変化のモニターに重要な熱帯地域の降雨強度やその分布に関わるデータを取得することを目指したものである。

この計画は、日米共同プロジェクトとして、宇宙開発事業団 (NASDA) がH-IIロケットによる打ち上げ及び主要観測機器である降雨レーダの開発を担当し、米国 (NASA) が衛星本体の開発、降雨レーダ以外の観測機器の開発及びデータ中継衛星を用いた衛星の運用を担当することになっており、この計画を進めるに当たって、宇宙開発事業団と郵政省通信総合研究所が共同で降雨レーダの開発に取り組んできた。

(2) JEM (GEOS-1)

JEMは静止地球観測技術の開発を目指すもので、宇宙ステーションに搭載するJEMの曝露部で実験を行う予定である。

(3) WCRP-1

WCRP-1は太陽同期傾斜軌道プラットフォームで、その軌道は日変化の観測に適している。気圏、水圏の相互作用等の主要気候要素の日変化を含めた観測に加え、大気圏科学・固体地球サイクルの観測をミッションとし、15年~20年に渡って監視することを前提に構想されている。

(4) SIDUSS

SARを搭載する小型衛星システムとして、インタフェロメトリ双子SAR衛星システムSIDUSSが研究されている。これまでの、単一の衛星によって行われてきた観測では、その1回目と2回目とで地表面の相関が変化することが処理の障害となっており、また相互の軌道間距離が制御されていないことに相関処理の成否が強く影響を受けてきた。SIDUSSでは同一軌道上に2個のSAR衛星を運用することでそれらの影響を排し、恒常的にインタフェロメトリ画像を取得することを目的としている。

(5) DUOS

DUOSは、日本の人口密集地帯である太平洋ベルト地帯を高頻度、高分解能で観測することを目的とする小型地球観測衛星である。これまでの地球観測衛星がほぼ全球を観測しようとするのに対して、DUOSは観測領域を限定して軌道傾斜角を40度以下にし、太平洋沿岸を効率的に観測できるように考えられている。さらに同一軌道上に2個の衛星を配して観測頻度を一層高め、雲などによって取得できないデータがあってもその影響を低く抑えるように計画されている。

搭載するセンサはAVNIRを想定しており、都市環境把握、土地被覆分類、沿岸域および火山活動監視等に利用可能である。

5. 4 合成開口レーダ

マイクロ波センサには、自らマイクロ波を対象物に照射して、その散乱や反射を捉える能動型と、対象物が自ら発するマイクロ波を捉える受動型がある。マイクロ波センサの特徴は、天候に左右されないことである。能動型のマイクロ波センサである合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar ; SAR) は、近年特に注目されているリモートセンシングセンサの一つで、SEASAT (海洋表面のリモートセンシングに関する研究を目的として1978年にNASAが打ち上げた地球観測衛星) 以降、短期間のSIR-A、Bの観測と航空機SARによる実験が行われてきたが、現在は全地球の観測が可能な衛星搭載用SARが開発されて日本の地球資源衛星1号 (JERS-1) や欧州リモートセンシング衛星1号 (E-ERS-1) に搭載されている。特に、海氷状況の観測には冬季の日照時間の少ない、霧の多い地域での電波センサが有力視されている。

光学センサに対してSARでは一定の信頼のおける予想のもとにデータを取得することができる大きな特徴を持つ。ただし、使用する電磁波がマイクロ波領域なので、観測情報や画像の特徴は従来の光学センサとは異なるため、SARにより光学センサの代用ができるとは考えていない。

ここでは、SARに関する技術的な動向を把握するために、現在 (1996年2月) 検討もしくは採用されている幾つかの新機軸について整理をおこなうこととする。

(1) Wave Mode SAR

これは、E-ERS-1に採用されているシステムで、海洋波浪の観測の場合、波浪の状況は割合一様であることを前提にして伝送するデータを少なくするための技術である。衛星の進行方向に通常の走査幅の中心に沿って200kmまたは300kmごとに (間隔は指令により切り換える) 5km×5km区域をサンプリングすることによりデータ量を少なくしている。そのデータは衛星搭載のデータレコーダに記録されるので全地球のデータが観測される。また、この画像データは2次元処理を行い波浪の周波数スペクトルを求めることができる。

(2) Scan SAR

これは、RADARSAT、EOS/SARに採用されているシステムで、通常のSARの走査幅を分解能を犠牲にして数倍に広げる技術である。マルチルックと同じ原理ではあるが、マルチルックでは同じ場所を独立に何回か観測して平均を求めるのに対して、「Scan SAR」では場所をレンジ方向に移動して走査幅を広げるものである。ただし、マルチルックと同様に走査幅を広げれば広げるほど分解能は低下する。

(3) Down Dusk Orbit

これは、RADARSATで計画されているシステムで、任意の時間に観測を実施でき、衛星の温度制御も非常に楽になる技術である。電波センサは太陽の地表面への照射に関係なく観測でき、太陽光は単に衛星の電源のみに関係することになる。そこで、衛星が電波センサのみの場合は、午前6時と午後6時に赤道を

通過する軌道を選べば、衛星は殆どいつでも日照が得られることになる。例えば、太陽同期のため軌道傾斜角を 98.6° とすると、南半球の冬に最大約17分の日陰を生じるだけである。したがって、SARは任意の時間に観測を実施でき、衛星の温度制御も非常に楽になる利点がある。

(4) Polarimetric SAR

これは、EOS/SARで計画されているシステムで、偏波に関する総ての情報を含むことにより、全地球の土壤水分や森林の情報を良く表現できることが期待されている技術である。通常のSARでは反射波が有する特定の偏波(HH、HV、VH、VV)の強度のみを測定しているが、「Polarimetric SAR」では4つの偏波の反射強度と同時に位相を測定して散乱マトリクスSで表示する。Sにより偏波に関する総ての情報を含むことになり、全地球の土壤水分や森林の情報が「Polarimetric SAR」で良く表現できることが期待されている。

(5) FOCUS Mode

これは、SPOT/SARで考慮されているシステムで、Az方向(衛星の進行方向)にアンテナビームを可変にして、特定の地域を標準の場合よりも長時間観測し合成開口長を大きくしてAz方向の分解能を向上させる技術である。この場合は、分解能をあげる分だけ観測しない地域が生じる。

(6) インターフェロメトリックSAR

これは、最近最も注目されているSARの利用技術の一つである。軌道が僅かにずれた時の2つのSARデータは干渉データをなす。この干渉データからは等高線に準じた縞模様が得られ、地表の標高(凹凸)を検出できる。さらに、干渉データの変化から地震による地殻変位を検出した例が報告され、mmオーダの変位を検出できる可能性が唱えられている。「ステレオSAR」は同一地域を離れた軌道から取るのに対し、「インターフェロメトリックSAR」は軌道の僅かなずれを利用しており、光学センサの応用にはないSAR特有の処理技術である。「インターフェロメトリックSAR」が成立するには、軌道間隔条件と地表の散乱特性不変の条件が必要である。

5. 5 地球観測情報システム

将来、人工衛星による観測データは種類・量ともにますます豊富になることから、利用者の要求により柔軟に対応できるデータ提供システムが必要とされている。利用者の要求は目的に応じて多様であるため、準リアルタイムでのデータ取得を必要とする場合、長期間に渡り継続的にデータを必要とする場合、特定地域の部分的データのみを必要とする場合、地球規模の広い範囲のデータを必要とする場合などいろいろと考えられる。また、必要なデータが何処にあって、どうすれば入手できるかを利用者が簡単に知ることができれば、地球観測データを使った調査・研究がより円滑に進められ、観測データの利用促進・普及に大いに役立つ。

つものと考えられる。

このような要求に応え、観測データを環境監視へ効率的に活用できるようにするため、世界各国が協力して各国の観測データ保有機関のデータベースをネットワーク化し、オンライン検索により必要な情報を得ることのできるシステム（地球観測情報システム）の構築構想がある。

この地球観測に関するデータと情報管理システムや、地球規模のネットワークの構想は、国際的な議論の場である地球観測衛星委員会（CEOS: Committee on Earth Observation Satellites）によって提唱されたものである。

また、インフラストラクチャの整備においては、地球観測情報システムは学術情報ネットワークを利用してこれに基づいた分散型とすることが望ましい。しかしながら、これを構築し実的な利用を行おうとするときには、膨大な衛星データが恒常的にネットワーク上を流通することになるため、現在一般的に利用される回線とは桁違いに広帯域のネットワークが求められる。身近な例としては、インターネットの利用が一般化してネットワークのデータ流通量が増大するにつれ、アクセス件数の多いサイトでは情報提供に多くの時間を要するようになっている。こうした分散型のデータセンターの利用が普及すればするほど、また、衛星データの高解像度化・多バンド化によって利用対象の情報量が多くなるにつれて、問題は深刻化する傾向にある。ちなみに、NOAAのデータ量は1日当たり600MB~800MB、GMSのそれは約2.2GBであり、この2種類だけでも毎日3GBのデータを処理していかななくてはならない。衛星データの利用を容易にするためにも、大容量のデータを高速に処理し、かつデータベース化する手法の研究開発があわせて必要とされる。また人員の有機的な結合及び研究利用機関と開発機関との連帯強化、国際的な研究計画との整合性を考慮した研究環境基盤を整備しなくてはならない。以下に、現在計画、利用されている地球観測情報システムの例を示す。

(1) CEOS-IDN

地球観測技術の発達により、毎年多くの観測や測定データが様々な所で発生するようになり、こうしたデータの分散を防ぎ、地球科学関連分野の研究に役立てることを目的として、データの所在情報を収めたデータベースを構築しようという計画が、先進国サミットの勧告に基づいて発足した国際組織「CEOS」によって提唱された。CEOS（地球観測衛星委員会）において検討しているユーザインタフェースや国際協力機関との記録、データ交換、ネットワーク標準等の規則のもとで構築されたCEOS国際ディレクトリネットワーク（CEOS-IDN: CEOS-International Directory Network）というのはデータベース・システムであり、地球観測情報システムの一つである。世界の主要宇宙開発機関（宇宙開発事業団を始め、米国航空宇宙局、欧州宇宙機関、カナダリモートセンシングセンター）を中心に運用が行われている。

ここでは、衛星による地球観測データを主として扱っており、世界の主要宇宙開発機関は、国際ノードとして互いにデータセットの交換を行っており、ユーザはパソコン通信やインターネットを利用して、それぞれのノードから全世界のデータセット情報を検索、入手することができるようになっている。

以下にCEOS-IDNのノードの1つである米国航空宇宙局（NASA）がサービスを行っているWWW（World Wide Web: 電子掲示板）のホームページのURL（Uniform Resource Locators: リソースを開く

ためのアドレス)を示す。

<http://gcmd.gsfc.nasa.gov/ceosidn>.

(2) EOSDIS

EOS (地球観測システム) 計画が開始されると、約1TB (1,000GB) /日の衛星データが得られるようになる。このデータを有効に活用するためのシステムがEOSDIS (Earth Observing System-Data and Information System) である。EOSDISは、米国航空宇宙局 (NASA) のMTPE (the Mission To Planet Earth) プログラムによって開発された、衛星データとそれに関する各種情報システムである。

EOSDISは、NASAが所有する地球観測衛星のデータや測定プログラムのデータを管理し、データ交換やデータの配布及び情報管理サービスの提供を行う。以下にEOSDISにおけるWWWのホームページのURLを示し、「図5.5.1」にEOSDISの構成について示す。

eos.nasa.gov/eosdis

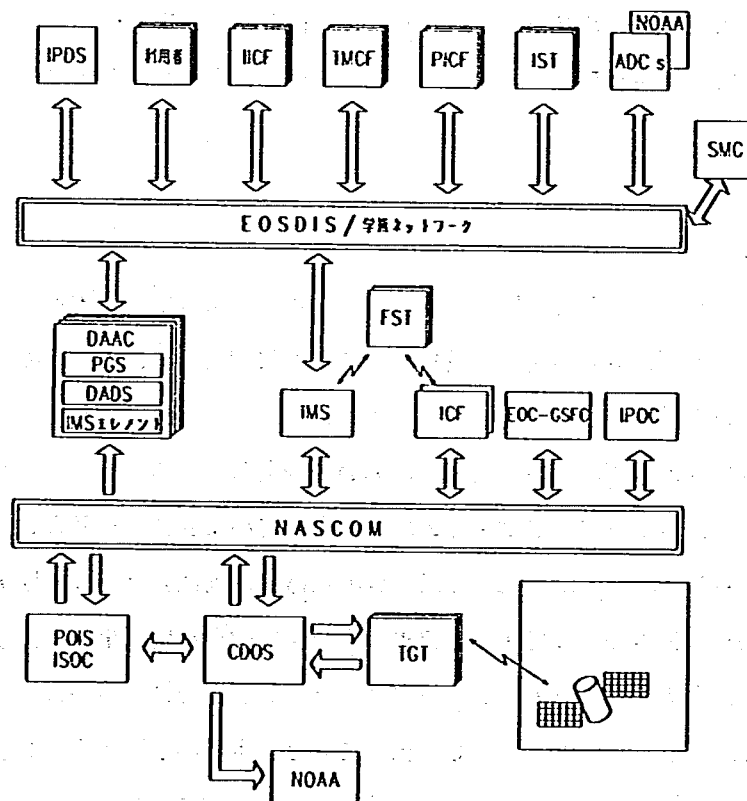


図5.5.1 EOSDISの構成

(3) EOC-IS

日本では地球観測センター（EOC）が、衛星データとそれに関する各種情報のオンライン提供サービスを行うデータベース・システムを運用しており、これを地球観測センター情報システム（EOC-IS: Earth Observation Center - Information System）という。EOC-ISは、地球観測衛星等から得られた地球観測データの有効利用を促進するために開発されたシステムである。

EOC-ISには、地球観測データの所在情報（ディレクトリ情報）のオンライン検索機能（CEOS-IDN）、地球観測データのカatalog情報（インベントリ情報）のオンライン検索機能（SINFONIA）及び研究者間のコミュニケーション等を行う機能（BBS）が用意されており、サブシステムとしてCEOS-IDNを利用することができるようになっている。BBSはパソコン通信やインターネットで利用できる電子掲示板システムで、衛星の軌道情報や各種イベント等を掲示している。SINFONIAは品質管理情報の文字型データベースである。EOCにある衛星データのシーンごとの緯度・経度、観測日、雲量などの情報を提供している。

EOC-ISを通じて地球観測データの所在、連絡先、個々のデータの品質、管理状況などを知ることができる。EOC-ISを使用するにあたっては特別な訓練はいらず、使用料は無料である（但し、地球観測センター迄の電話料金を除く）。「図5.5.2」にEOC-ISの構成について示す。

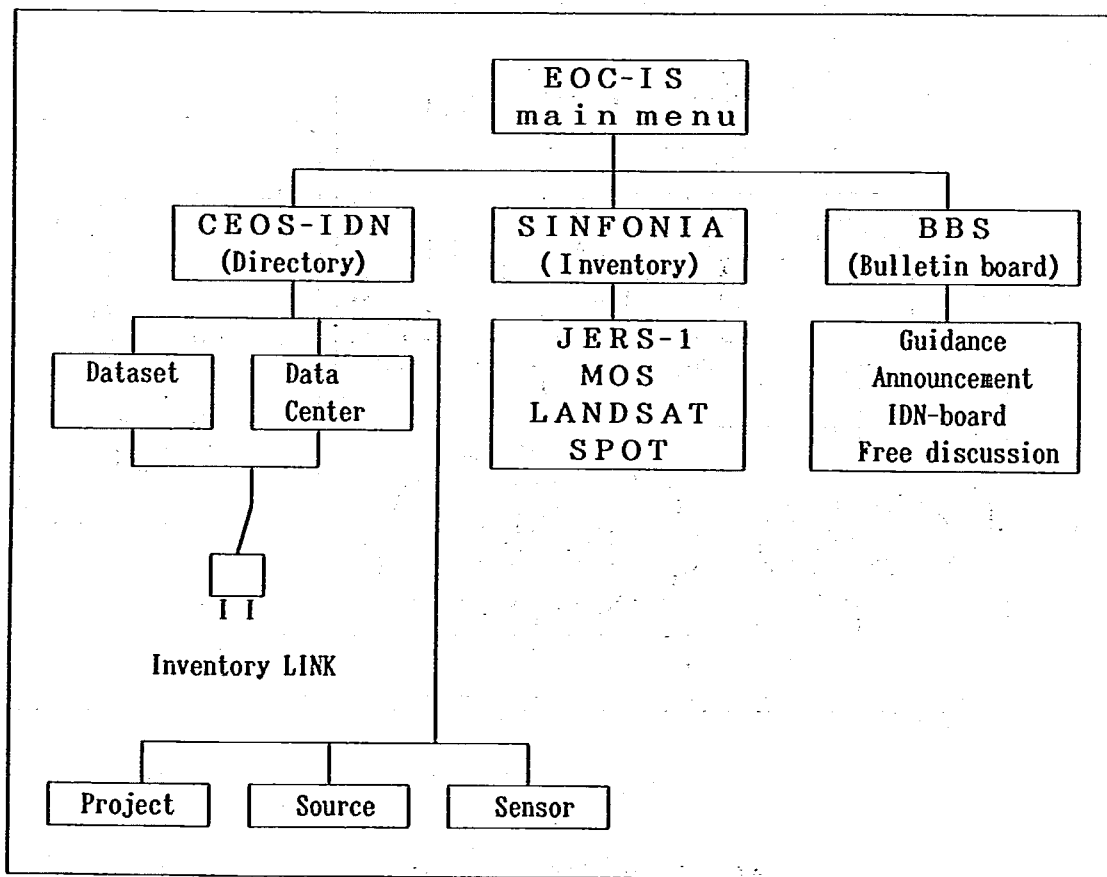


図5.5.2 EOC-ISの構成

(4) EOIS

EOC（地球観測センター）はすでに次世代の地球観測情報システム（EOIS：NASDA Earth Observation Data and Information System）の開発を進めており、地球科学者に、地球環境の解明に役立つデータや、関連情報、解析環境等を提供するプロジェクトを進行させている。

EOISは、ユーザの様々な要求を柔軟に取り組めるように段階的に構築され、第一段としては、1996年初めに打ち上げられる地球観測プラットフォーム技術衛星（ADEOS）からの衛星データサービスの充実を目標として開発される。その後、順次、1997年打ち上げの熱帯降雨観測衛星（TRMM）、1999年に頃打ち上げ予定のADEOS-IIなど新規に打ち上がる国内外の地球観測衛星に対応していく予定である。また、EOISは諸外国の地球観測情報システム（例えばEOSDIS）に対応し、CEOSの勧告に準拠したシステムとして構築される予定である。「図5.5.3」にEOISの構成について示す。

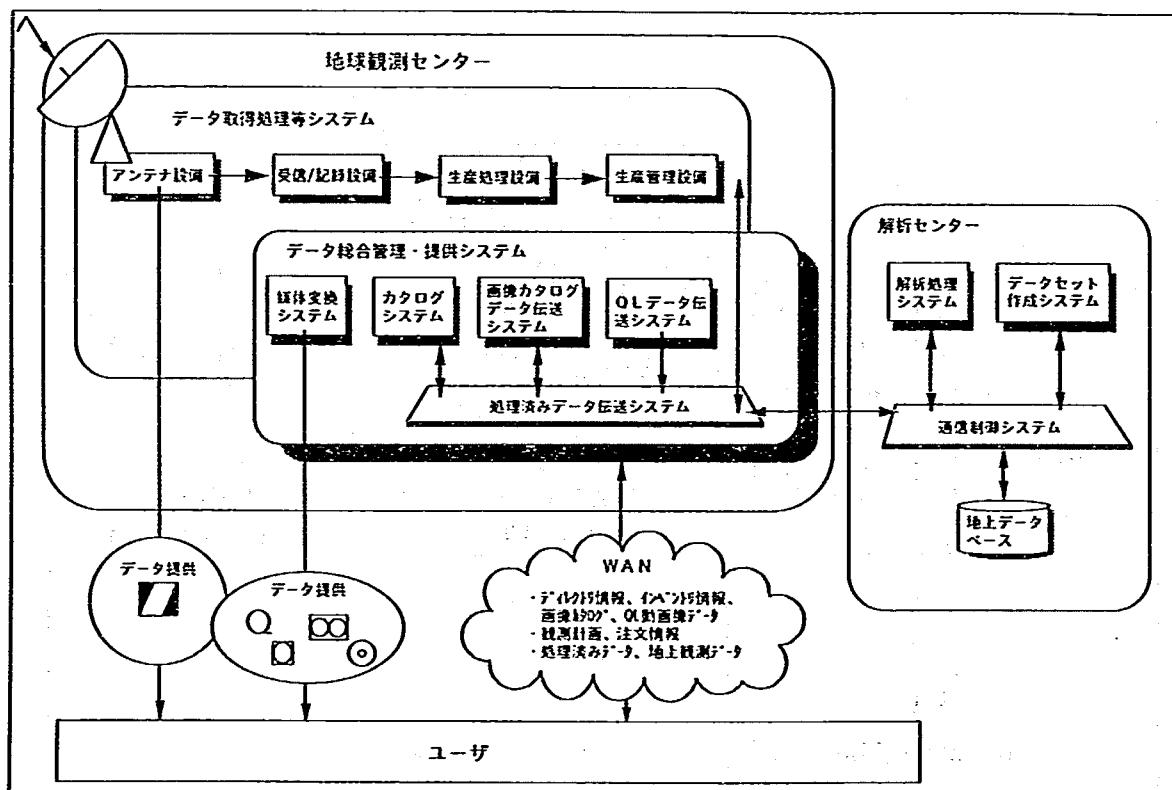


図5.5.3 EOISの構成

(5) JAIDAS

日本画像データベース (JAIDAS : JApan Image DAtabaSe) は、人工衛星NOAAのAVHRRデータを用いて作成した可視及び赤外画像のデータベースである。

東北大学理学部大気海洋センターではNOAAデータの常時受信と保存を行っており、東北大学大型計算機センターと協同でJAIDASを作成し、公開している。衛星データの受信と東日本・西日本画像の作成、データベースへの登録は自動化され、東日本の画像は1990年4月から、西日本の画像は1994年4月からデータベース化されている。

このデータベースは、計算機ネットワークを通して、全国のどこからでも利用でき、東北大学大型計算機センターの汎用大型計算機で提供されているJAIDASの利用促進のために、WWW対応のJAIDASのサービスも行われている。このJAIDASのホームページからは、オリジナルの画像を1/4のサイズに間引いた画像が利用できる。以下にJAIDASにおけるWWWのホームページのURLを示す。

<http://www-db.cc.tohoku.ac.jp/jaidas/>

6. 今後の課題

現在すでに行われている衛星データの利用は、ほとんどの場合専門家による判読であるとか、航空写真との比較が必要であり、これを元に作成した各種の情報もある一定の条件下で利用するように留意しなくてはならないことが少なくなかった。また、特に建設行政に関連した分野での利用は実験的な意味合いが強く、その成果も利用可能性の示唆にとどまるなど具体性に乏しい。

様々な機関が観測システム、解析システムを構築し、衛星データを元に各種情報が生成できるようになってきているものの、その情報を利用するための技術が成熟したとはいえない。そのため、衛星データの利用には専門家を必要とし、専門家の不足が衛星データ利用の普及、一般化を阻んでいるといえる。

しかし利用技術の成熟は、衛星データの利用が一般化することによって促されるという側面が強い。この成熟を待ち普及を進めることは非常に重要であり、その推進のための尽力が望まれるが、それと同時に解析システムの高度化、特殊な処理を必要としない高精度、高分解能のセンサの登場が衛星データの利用に弾みをつけることとなる。観測の段階、解析の時点で情報の曖昧な部分を取り除ければ、利用者が情報を得るために高度な知識や複雑な作業を要求される場面をなくすことができる。

こういった高性能センサの登場が間もないことはすでに述べた。分解能1 m～2 mのセンサとこれを搭載する衛星は、いずれもアメリカの民間企業が中心となって計画されている。このことは、アメリカでは衛星リモートセンシングがすでに一般化しており、データの販売で運用が行えるような程度の市場規模になっていることを意味する。日本でも提供されるこれらの衛星データを積極的に活用していくことは、データ利用のスケールメリットを一層高め、利用体制の整備、提供データの低価格化などを推し進めるうえでも有利に働くことになる。

実利用の観点でいえば、例えば地球地図の作成などでは比較的短期間で更新を行っていくこととなるが、作業量や効率の点から一度に広い範囲を観測可能な衛星データをできるだけ活用し、かつ自動または半自動で処理が行えるようなシステムを構築する必要がある。これらシステムの開発を効果的に進めるためには、研究成果をまとめて、容易に再利用できるように管理していくことが求められる。

衛星データの解析については未だ解決していない問題も多いが、データ解析で必要となる地上基準点(GCP)の分布密度や観測方法の確立はその重要な1項目である。このGCPデータを自由に使うことのできるGCPデータベースの構築は衛星データ解析のうえで不可欠の条件であり、各国の思惑や企業の損得勘定を抜きにしておこなっていかなくてはならないと考える。

衛星データは、これまで20年余にわたり多くの分野で利用されて、その有用性が実証されてきた。そして、最近では急速に衛星データの多様化と高精度化が進み、一部では地上解像度が1 mとか2 mといった超高精度の衛星データの取得が現実のものとして議論されるとともに新しい利用の時代を迎えようとしている。衛星データはいうまでもなく、即時性、広域性及び繰り返し性(継続性)を有しており、従来の情報収集手段には無い利点の実証されている。一方、建設行政に関連した分野では、衛星データの利用の有用性が議論されてきたにも係わらず、具体的な利用事例は必ずしも多くない。

今後は、データ利用の面から、従来の調査、計画、設計、施工管理といった業務において利用されている建設行政の情報を衛星データに置き換えた場合のメリット、デメリット等を調査・研究する必要がある。

特に、最近の傾向として、衛星データの多様化（ユーザが目的に合わせて選択できる）と高精度化が急速に進んでおり、この面から新たな利用の利点を探ることも本研究の大きな目的の1つである。

来年度以降は、地上解像度が1 mとも2 mともいわれている超高解像度衛星データが入手されることを前提として、以下に示す項目について調査・研究を行なう。

- ① 衛星データの利用方法、利用手段、利用による利点等の調査及び研究。
- ② 建設行政の実務で使用する場合の「使用者マニュアル」の検討及び作成。
- ③ 建設行政側から、将来のセンサー開発側に対する、ニーズの提言が可能な仕様書の検討及び作成。

リモートセンシングデータの
有効利用に関する調査

土木研究所資料第3461号
平成 8 年 10 月 (1996)

平城 正隆, 小野 祐明, 二階堂 尚宏

要 旨 本論文は、社会資本の整備及び維持管理において高度化、省力化
が期待できるリモートセンシングについて、基礎知識をとりまとめるとと
もに、建設行政における利用手法について調査し、紹介するものである。

キーワード：衛星リモートセンシング、衛星データ、光学センサ、マイク
ロ波センサ、LANDSAT、NOAA、GMS、SPOT、MOS-1、
E・ERS-1、J・ERS-1、画像処理、建設行政、大規模災
害、被災状況把握手法、地理情報システム、超高解像度衛星、
EarlyBird、QuickBird、CRSS、OrbView、EROS、
ALOS、地球観測プラットフォーム技術衛星、ADEOS、
EOS、POP、合成開口レーダ、地球観測情報システム

郵便はがき

50円切手
をはいて
下さい

305-□□

茨城県つくば市旭一番地

建設省土木研究所

積算技術研究センター
御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所

○



共同研究報告書第 3461 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属(住所)

氏 名

印

土木研究所資料第3461号

