

第9章 地球観測

09.1 概説

地球観測は宇宙での活動によって最も広範囲な用途が得られる分野の一つである。衛星能力のおかげで、周回する軌道上に並列に配置することによって全地球をカバーする広い地域を政治的国境に伴う制約なしに、観測することができる。

地球観測衛星は3つの大きな種別のいずれかに該当する。気象衛星、中分解能のリモセン衛星、そして、当初軍事的な偵察活動に限られていたが、今日では民間用にも用いられるようになってきた高分解能の衛星である。

第一のグループに属する衛星は、通常、非常な広範囲をカバーする画像を提供するが、比較的低い分解能しかなく、複数の軌道に依存している。これらの衛星は地球に対して静止軌道上、または、高度 900km- 1800km 前後の低い円軌道の上端に位置している。いずれの場合も、露の Meteor-2 クラフトや米の NOAA 衛星などのように単一のプログラムに属する衛星群として配備されることがある。

第二のグループに属する衛星は一般的に、さらに低い高度 600km- 1000km の間の円軌道で運用され、長い周回周期で、空間的に高分解能の画像を提供する。米のランドサット、仏の SPOT、インドの IRS 衛星等が例としてあげられる。

第三のグループに属する衛星はいずれも偏心軌道を描き、その最低高度の低頂点付近で観測を行う。多くの宇宙衛星の場合、この低頂点を 160km まで高度を下げることで、このことによって、極めて精細な地上の分解能を得ている。しかし、長寿命設計がされている最近の衛星では円軌道をとるものも多く、最高の分解能を持つものは高度 300 km 以下である。以前は軍事用途に限られていたが、現在ではこのグループの衛星は民間の要求に適合するものも出てきた。1999年に打上げられたイコノス2 (Ikonos2) 衛星は民間会社スペース・イメージング (Space Imaging) の所有するもので、700km 以下の高度の円軌道から m 級の分解能をもつ民間の衛星が現れたと言うことで注目された。(訳注 1.) この高度は、同等の分解能を持つある種の軍事用システムの高度と大きく違わない。

これらの主な3つのグループの運用段階の観点からもそれぞれ異なっている。気象衛星は、時としてワールド・ウェザー・ウォッチ (World Weather Watch) などのような国際的なプログラムの枠組みの中で行政団体に運用されている。製品を商品化させよ

うとする傾向がある一方で、公共サービス提供が依然主導的な関心事である。

リモセン衛星は専ら光学技術に依存しており、レーダ装置を持つ衛星は地図作成や大陸・海洋資源の研究に用いられている。こうしたシステム開発は政府機関による初期資金によって始められ、仏の SPOT Image や米の Eosat などのように政府支援を受ける商業団体に次第に引継がれていく。1995 年から私企業もこの事業分野に並々ならぬ関心を寄せている。

高分解能の衛星は軍事偵察用途の特徴とされてきたが、それでも、ごく稀に民間の地球観測の衛星もある。この民間プログラムという新カテゴリは私的資金に依存しており、少なくとも商工業的な動機に基づく原理に則って運営されている。

どのようにデータが使用されるかについては、衛星の種々のグループ間で区別するのは必ずしも簡単ではない。特に、そのミッションが例えば環境マネジメントやリスク・モニタリングなどのように広範囲にわたる場合はなおの事である。NOAA の提供画像はこうしたものの一例で、気象観測を主目的としているが、リモセンや植物資源などにもかなり使用されている。同様に SPOT 等のような民間のリモセン衛星により収集されたデータが軍事用途に供される可能性もあり、露の軍事衛星の画質を落したデータや米の軍事衛星の公開されたデータが民間の商業目的に使用されることもあり得る。m 級の分解能を持つ民間の商業衛星の出現はさらに利用者の範囲を広げる可能性があるという点でその図式を混乱させている。

高度と衛星の覆域

衛星から観測できる地域は高度とともに広がり、最終的には無限遠の高度において半球全体を見渡すことができる。比較的低い高度においては覆域の変化は顕著である。200km ではアポロ 9 号が 151° の角度範囲で地球の表面の 1.5% を見ることができた。これに対して NOAA 11 の調査 1600km の視点で 10% 以上を見ることができた。逆に高高度になるとその範囲にはほとんど大きな違いが生じなくなる。Navstar は 20000km の高度から 30° の角度で私達の惑星の 38% を見ることができたが、高度 36000km に配備された Meteosat は 17° の角度で 42% と、わずかに数値が改善するに留まっている。

(図 9.1、9.2、9.3)

図 9.1 代表的な高度から地球を見るとき
の覆域

図 9.2 地球を観測する際の高度に対する
角度の関係

図 9.3 高度に対して観測可能な地球
表面の割合

09.2 センサ

センサは幾何学的に定義された視野内から発せられる電磁波放射を計測する。視野の広さはセンサの光学系によって決まる。全視野はスチルカメラやTVカメラのように一回の捕捉で像面の全ての点において同時に取得される場合もあり、また、スキャナ・システムに見られるように順次スキャンすることによって個々の読取りを連続的に並べて完全な像を形作る場合もある。

センサの全視野は観測対象として選定された地理的な領域の大きさに一致している。瞬時視野 (Instantaneous Field of View, IFOV) は時間的なある一点においてセンサが電磁波放射を観測する立体角をもって定義される。センサの全視野と瞬時視野はスチルカメラの場合には一致しており、また、CCD が用いられている場合もある程度一致しているのに対し、スキャナの場合にはこれはあてはまらず、全視野は瞬時視野の連続的な運動に対応している。

スチルカメラ

衛星搭載用のスチルカメラは衛星が飛んでいる真下の地球表面の画像を瞬間的に捕捉する。(図 9.4)

地上での視野は用いられているレンズと衛星が飛んでいる高度によって決まる。写真は通常、衛星の直下の地点に中心があり、視野角は飛行高度に依存しない開口角度が高度に依存する地上の直線距離のいずれかによって定義される。(辺または対角線の長さ)(表 9.1 と図 9.5)

図 9.4 衛星搭載用スチルカメラの例 ラージフォーマットカメラ (LFC)

LFC は米のスペースシャトル・チャレンジャの 1984 年のミッションに用いられた非常に高性能なマルチスペクトルの画像システムで、以下のものからなっている。

- a) 460mm (フィルム方向) × 230mm (フィルム幅方向) のフォーマットで 2400 枚の画像用に構成された高分解能フィルム 1220m をもつフィルムカートリッジ
- b) 露出時カメラを完璧なレベルに保ち、前進運動を補正するための装置
- c) 焦点距離 305mm、視野角 74° のレンズ

さらに、焦点距離 152mm のカメラ 2 台を有する高度参照システム (Altitude Reference System, ARS) が、捕捉のたびごとに星図を記録する。衛星の高度と位置を同時に記録することによって極めて精巧な地図作成ができる。

図 9.5 スチルカメラと TV カメラの全視野

画質は、写真が撮られている間の衛星位置の変化を補償する技術 (前進補正 (FMC: forward motion compensation) として知られている) によって高めることができる。軍事偵察用に用いられているスチルカメラの中には非常に狭い視野、すなわち非常に長い焦点距離を持っていることを特徴とするものがある。露の種々の衛星に装備され、焦点距離 3 m の望遠鏡を持つ KFA3000 高分解能カメラも、こうしたものの一例である。

表 9.1 衛星搭載用スチルカメラと TV カメラの技術的諸元

テレビカメラ

スチルカメラとは大きく異なるものの、TV カメラも瞬時にして完全な画像を得るので、その全視野は瞬時視野に一致する。シャッタを閉じた時、像は電荷蓄積層に保存され、順次スキャニングによって取込まれる。ランドサットの 1 ~ 3 号に載っているリターンビーム・ビジコン (RBV: Return Beam Vidicon) が良い例である。(図 9.6)

図 9.6 ランドサット 1 号、2 号及び 3 号の RBV システム

スキャナとプッシュブルーム・センサ

スキャナは走査線に沿って動きながら瞬時視野内の計測を行う。瞬時視野の地上での幅は捜査方向と直角で、センサと地上の距離が離れるにしたがって広がる。言換えると、視野は衛星の直下の地点 (nadir point) から視野端部 (limb) に向かって離れるにしたがって視野が大きくなる。衛星高度が低いほど、帯状の走査域の幅の変化に与える影響は大きい。さらに、捜査平面内の瞬時視野の地上長さは見る方向からの歪みが増

すにつれて、地上長も長くなる。すなわち、センサが地球表面を一端から他端まで走査する際、瞬時視野で囲まれる地上の面積が顕著に変化するということである。(図 9.7)

図 9.7 視野両端部間をスキャンする際の瞬時視野の地上での寸法

NOAA 2 号から 5 号衛星に搭載されている VHRR センサの例を図示する。

スキャナにより検知される表面は走査によって継続的な線になる。走査経路と走査線は衛星の動きとスキャナ自身の動きが合成された結果になる。

静止衛星に関しては、望遠鏡の方向を決めている機械的装置によって走査線が継続的に得られる。望遠鏡が走査したそれぞれの線画像は直前の線と一定の間隔でずれている。Meteosat 望遠鏡はこのようにして南北に 2500 の経路において 18° の間を移動する。線状走査は衛星の回転を利用して行われている。

静止衛星でない場合、走査線は一般的に衛星が軌道に沿って動くことによって継続的に得られる。走査線は地表の一端から他端まで行くか、または我々の惑星の弧のごく一部でずっと短い距離に制限されているかのいずれかである。

地球の両端部まで撮像するスキャナは円周状に画像を取得するが、この円周のうち地球表面は小さな弧の部分のみである。静止衛星の場合は全 360° の走査のうち最大で 17° の走査となる。このようなスキャナは様々な回転機構を利用している。Meteosat がその一例だが、ある種の衛星では、 360° の走査を衛星自身の回転によって得ている。(図 9.8a) その他のタイプのスキャナでは衛星の速度ベクトルに平行な軸周りにスキャナミラーを回転させているものがある。この例としては NOAA 6 号から 11 号に搭載されている先進型超高分解能放射計 (Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)) がある。完全な円を描くように掃走せずに、地球が見える限られた弧の部分だけを走査するものもある。ランドサット衛星に搭載されている MSS や TM センサなどのように衛星の速度ベクトルに平行な軸周りに振動するミラーを利用して走査している。(図 9.8c) 最後に、コニカル・スキャンをする機械システムもある。この手法の利点はセンサと地上の距離が走査領域を通じて一定に保たれることで、ADEOS 1 に搭載されている OCTS センサがこれにあたる。

図 9.8 主な走査システム

- a) 衛星の回転により地表の一端から他端まで走査するもの。静止衛星 Meteosat の例
- b) ミラーの回転による走査
- c) ミラーの振動による走査
- d) プッシュ・ブルーム方式 (push broom system) 多くの画素を持つ検知器アレイで飛行方向に掃走する。

機械的走査機構を持たないリニアアレイの検知器セルも、プラットフォームの動きを利用して地上を飛行方向に掃走することによって、地上の走査線に沿ってデータを収集するのに用いることができる。(プッシュ・ブルーム方式) SPOT 衛星に搭載されている HRV と HRVIR センサは電荷結合素子 (CCD : Charge Coupled Device) アレイに配列された検知器を用いてエネルギーを計測するもので、この種の方式の例である。(図 9.8d) この種の CCD アレイは、センサ自体に多くの機能を持たせたアクティブ・ピクセルセンサ (Active Pixel Sensors (APS)) に置換えて検知器の電子回路を簡素化することもできる。

走査線の中心に位置する中心線は装置のトラックとして知られている。これは衛星の地上軌道と一致しており、視界と走査は衛星の直下の地点を中心としているが、傾斜した視界を持つセンサの場合は、この地点からオフセットしている。(図 9.9a) 中には視野を衛星直下の地点のどちら側にも傾けることができるセンサもある。例えば、SPOT 1 号から 3 号機の高分解能可視センサ (HRV : High Resolution Visible) 装置は全 54° の範囲で 0.6° おきに 90 通りの異なる傾斜角に調節することができる。(図 9.9b)

図 9.9 傾斜した観測角

- a) 装置のトラックと衛星の地上軌道
- b) SPOT 衛星の傾斜した観測角 観測角は地上から遠隔操作で調整することができる。観測地域は衛星の地上軌道を跨いで幅 950km の帯状地域内になくてはならない。観測シーンの幅は、衛星の直下地点付近での 60 km から、最も端の観測地点での 80 km の範囲である。
- c) 側面に開口のあるレーダの観測域 衛星の直下地点からずれている。

傾斜した観測角での観測を取入れることができる際は、衛星のトラックから遠く離れた位置での画像が可能になり、観測の柔軟性を大きく高めることになる。地上の同じ領域の画像を異なる観測角から得ることによって、地形をステレオ視的に作図することができる。これは SPOT 1～4 号機のように傾斜した観測角によって達成できるが、一方、同じ軌道上の異なる観測点から得られた一連の観測画像によってもステレオ画像を構築することも可能である。JERS 1 の場合のように前方及び衛星の直下地点での観測を結合させるものもこうしたものの中に含まれる。

リモセン装置の性能を定義するのに最も頻繁に用いられている指標は瞬時視野 (IFOV) である。これはセンサの光学系によって決まるもので、ラジアンで表される平面角とステラジアンで表される立体角によって定義される。この瞬時視野は検知器の放射工学的感度の制限を受け、効果的な運用に足るエネルギーを受けられるだけの十分な露出時間が必要である。アレイ型検知器の利用によって、機械走査系よりも長い露出時間を獲得できるようになり、瞬時視野を小さくする上で大いに役立った。このため、今ではこの型の検出がすべての高精細分解能センサに用いられている。満足な観測品質を確保するために最低限のエネルギーを必要とすることは、より高い空間分解能とより精細な分光分解能とが両立しない理由である。SPOT 1 号から 3 号機衛星の HRV を例にとるとパンクロの運用では分解能は 10m に対応しているのに対し、より狭い帯域を用いるマルチスペクトルモードの運用では分解能は 20m になっている。

衛星の高度が低くなるほど、観測軸と地表面のなす角は 90° に近付き、立体角により切取られる地表の領域は小さくなる。領域が正方形として撮られる衛星直下点 (sub-satellite point) においては、その辺の長さは図 9.10 のグラフから読取ることができる。

図 9.10 瞬時視野 衛星高度 (縦軸方向)、瞬時視野の角度 (横軸方向) 及び衛星直下点 (sub-satellite point) における IFOV

遠赤外帯域のデータを収集するセンサは可視または近赤外線波長帯域で運用されるセンサに比べると分解能が低い。一般的に遠赤外線では可視と近赤外のいずれよりも瞬時視野角は大きい。

画像レーダ

自然に発散される光や熱の形での放射を計測するセンサはパッシブ・リモセン装置である。一方、センサ自身が放射を発散し、センサに戻った放射を計測するリモセンはアクティブで、レーダがその一例である。良く用いられる斜からのセンシングを行う衛星の運用高度が与えられたとき、かなりの遠距離においてシステムが拾い上げられる十分なエネルギーを放射しなくてはならない。しかし、こうした大量のエネルギーを衛星上で供給することが困難な問題だといえ、宇宙レーダの利用が航空機用レーダより遥かにおくれている理由がわかるであろう。

レーダ装置は自ら信号を発し、その反射を計測するため、昼夜をとわず運用が可能で、光学機器よりも有利である。また、マイクロ波を用いているため、雲に影響されない画像を得ることができる。

レーダは信号を発散し、返ってくる反射波を受信するが、その反射波はセンサと目標の間の距離に応じて異なった時間で跳ね返ってくる。他のタイプのセンサのように検出角によってではなく、センサと目標物の変化する距離を測定することによって、目標物の位置を定めることができる。合成開口レーダ（SARs）は分解能の高い画像を得るためにドップラー効果によって起こる周波数変化を用いている。

観測は必ず斜めであり、一般的に衛星の軌道の右側または左側の一方のみに制限されている。（図 9.9c）Radarsat の場合、観測は通常飛行経路の右側だが、観測の方向はヨー軸周りに 180° 回転させることによって飛行経路の左側に向きを切り替えることができる。（図 9.11）

図 9.11 レーダサットの南極の観測域 帯は合成開口レーダの第一日の 500km 幅の観測域を示している。左図は通常運用モード、右図は南極モードである。

レーダは垂直（V）または水平（H）偏波を放射と受信に用いることができる。従って、平行偏波の 2 種類（HH と VV）と交差偏波の 2 種類（HV と VH）の 4 つのタイプの画像が得られる。これらの 4 種の順列のタイプは SIR C. において初めて同時運用された。偏波の効果を用いることにより分解能を損なうことなく、画像の放射の品質を改善することができる。

最後に、同じ地域から反射し、ごく近接した2つの軌道に沿って受信するレーダの反射波の位相ずれを用いる干渉として知られる技術も利用することができる。この技術は、ますます広く知られるようになって来ており、特に、デジタルの標高モデルを評価するために、地形の凹凸を再構成する手段として用いられる。決定的な限界は2つのレーダビームが離れてコヒーレンスを失い、干渉しなくなることだが、これは、用いられる波長が長くなるほど大きくなる。Cバンドで運用されているERS衛星で収集されたSARデータの限界長はおよそ800m程度であり、Lバンドで運用されているSeasatの場合よりも短い。

非画像システム

地球観測は、いかなる意味においても地球の画像を作るとはいえないデータを収集するセンサも利用している。こうした非画像センサには異なる多くの種類がある。地球の見える全域に関して計測を行うもの（広い瞬時視野を持つNimbus 7 Earth Radiation Budget (ERB) 機器がこれに当たる。）やERS1レーダ高度計のような地表面のごく限られた範囲に集中するものもある。散乱計(Scatterometer)はごく限られた瞬時視野を持つ別のタイプの非画像センサである。これは海面からの後方散乱を異なる観測角において計測し、計測値を風速と風向の計算に用いる。(図9.12)散乱計はSeasat, ERS1とERS2及びQuikscatに搭載されている。これらのセンサは画像目的には設計されていないが、内挿によって観測した現象の地図画像を作ることができる。

図 9.12 散乱計の観測角 ERS1 と ERS2 搭載の AMI の方式を示す。

波長帯域

地表面を観測するために設計されたすべての衛星リモセン・システムは電磁波の波長帯域のうち、大気を透過する帯域、(このため、「大気の窓」と呼ばれている)を利用している。(図9.13)透過率は、大気の成分(水蒸気の濃度、二酸化炭素、オゾン等)やエアロゾルの含有物など、多くの異なる要因に依存する。また、入射と反射のエネルギー放射が通過する場所の大気密度にも依存する。計測は照射角、観測角、及び観

測する地域の高度に影響を受ける。

人間の目と同じ波長帯域に対応しているセンサは、宇宙からの観測に非常に広く用いられてきた。可視領域の波長(450nm~710nm)において得られる画像は、私達が日常の経験上慣れ親しんだ基準に基づいて解釈することができる。植物帯は可視領域では低い反射率であり、太陽放射は青色と赤色帯域のクロロフィルによって吸収されてしまう。最大の反射率は黄-緑帯域の約 550nm において得られる。一般的には、鉱物の反射率は植物帯の反射率よりも高く、長波長側で大きくなる。しかし、さらに詳細なレベルでは、鉱物学的成分、分子サイズ及び水中濃度が著しい変化をもたらす。

液体状態の水が関わる場合は鏡面反射が重要な役割をするということを強調しておこう。ただし、ある程度強く反射するのは可視領域の短い波長帯域においてのみであり、それが水の広がった領域が青く見える理由である。一般的に水の反射率は、水底の性質にもよるが、主として水中の浮遊物や溶解物質に依存する。主に地上の植物帯が分解して、高潮時に浸水する水路により運ばれる有機溶解物質であるゲルプストフ(黄色繊維)(Gelbstoff)は青色の帯域において非常に高い吸収率を持つことが特徴である。クロロフィルは2つの吸収波長ピークが 460nm と 680nm にあることが特徴である。水中に浮遊している鉱物は青色帯域において強いエネルギー吸収を示すが、500nm~600nm における吸収は弱い。

固体状態の水が関わる場合は状況が著しく異なる。雪の反射率は可視領域においては高く、近赤外領域においてはいくぶん減少する。氷の反射率はこれより低く、純粋な氷から雪解け水に至るまで粒状の氷よりも反射率が小さくなっていく。

可視領域の外側に行くと、近赤外帯域、(NIR)0.7 μ m~1.1 μ m)の帯域は、既に地域写真においてはいつも用いられているが、この帯域での大気散乱が弱いことと反射コントラストレベルが強いため、高く評価されている。例えば、クロロフィルは近赤外では強く反射するが、水は強い吸収を示す。また、極めて多くの衛星においてセンサのレスポンスが可視と近赤外の帯域に限られている。これらの帯域は軍事偵察衛星の写真に最も長く用いられて来た帯域でもある。

近赤外を越える様々な赤外の帯域については専門家と言語によって様々に呼び方が異なっている。1.4 μ m~2.5 μ mの短波長赤外線(SWIR)はSPOT4の文脈において用いられているが、仏語ではMIR(Moyen Infrarouge)のことである。この波長帯域では水による放射の吸収は1.45 μ m、1.95 μ m及び2.5 μ mに近い波長で顕著だが、植物帯で

は $1.65\mu\text{m}$ と $2.2\mu\text{m}$ 帯において反射率は最大値を示す。このうち最初の波長帯は SPOT4 の HRVIR センサに選定されており、また、ランドサット 4 号、5 号に搭載されている TM センサ用はこのうちの 2 つ目の波長帯域を中心とするチャンネルを持つことを特徴としている。

熱赤外 (TIM) は特に気象衛星に多く用いられるもう一つの波長帯域である。対象とするデータは海洋、大陸、及び雲の表面温度を測定するのに用いられる。

熱赤外の大気の窓では水は高い放射率を持っている。鉱物の放射率はそれより低いが、その種類によって大きく異なる。多くの衛星のセンサパッケージはこの帯域の計測を可視帯域での計測値と統合させている。NOAA 衛星の VHRR や前の AVHRR 装置がこの例である。軍事偵察衛星に搭載されているセンサも、米の 1966 年来の KH7 シリーズがそうだったように、特に夜間画像を得るためにこの帯域に頼っている。約 12 時間間隔で繰返し取得するデータの計測値によって、昼間の加熱と夜間の冷却の間で表面温度の変わりやすさに関する情報を得ることができる。この繰返し捕捉は、HCMM のように上昇と下降の軌道の交差によって局所的に得られる (図 2.28) か、NOAA 衛星で適用している配置のように 12 時間離れて同じところを飛行する 2 つの衛星からのデータを統合することによっても得られる。

これまでは航空機上で試験されたただだが、ハイパースペクトルセンサは現在、真剣に衛星搭載用の機器として受取られている。信号の極めて細かい波長分解能を持ち、リモセンの技術範囲を顕著に広げる。ハイパー・スペクトル・システムは入射する信号の連続的スペクトルを多数の狭帯域に分解する。Orbview4 号に搭載予定の Warfighter1 機器は $0.45\mu\text{m}$ から $5\mu\text{m}$ の帯域を約 280 帯域に分解している。ハイパー・スペクトルシステムにより得られる極めて精細な波長分解能は可視のみでなく、NIR、SWIR も分析し、さらに TIR の一部が、特に海水 (クロロフィル)、鉱物及び植物帯の研究において、新展望を拓こうとしている。

マイクロ波などの他のスペクトル領域もますます広く用いられるようになってきている。側方観測の L バンドの合成開口レーダを持つことを特徴とする 1978 年の Seasat 1 の搭載において、衛星レーダ画像が初めて民間目的に用いられた。スペースシャトルにおいても SIR A、SIR B 及び SIR C という 3 つの実験を通じてレーダセンシング・モードが試験された。

最大から最小まで (L、S、C、X) 多くの異なるバンドが用いられている。最大波長で

は大地と植物帯で最も大きな透過が得られる一方、最小波長では鉱物表面の荒さを知ることができる。観測地域の水分の含有に対してはレーダ波の透過力に大きく影響を受ける。マイクロ波は水浸しの土地よりも乾いた大地の方が遥かに遠くまで透過する。従って、この技術を用いて砂漠地帯の乾燥した砂におおわれた目標を検知することができる。

多くの宇宙搭載用レーダは急速に発展することが期待でき、複数波長帯域で（EOS プログラムでは L、C、及び X バンド）様々な入射角で運用されるだろう。大陸の大地の荒さや地表面下の性質に対する新しい知見や海洋の状態地図の基礎を得ることができるだろう。もちろんレーダ画像は軍事面でも大きな関心を持たれるものであり、コスモス 1870 やラクロス衛星などによって顕著な役割が果たされたことは実証済みである。

（訳注 1.） スペース・イメージングは買収され、GeoEye というブランドに代わっている。

09.3 地球の画像

上記のような様々なセンシングシステムから供給された大量の画像は、地球観測衛星のデータアーカイブを形成し、気象学や厳密な意味でのリモセンだけでなく、軍事偵察にも用いられる。

これらの画像ストックが増すにつれ、それらを参照するための単純な指針が必要とされるようになった。採用される指針は、画像内で扱われる主題（雲、水系、陸地）や撮影した領域の地理座標系などを元としている。後者は Landsat(世界参照系:World Reference System)や SPOT(SPOT 参照グリッド; GRS(Grille de Reference SPOT))など、主なりモセン衛星のデータを分類する際によく用いられる。

これら全ての体系の中で、異なった捕捉モードへの対応や、多岐にわたる画像処理手法への対応（依然として、更に大きな課題である）のために、今では直接的な判断基準が求められている。これらの判断基準は、後のデータ保存のために画像をカテゴリに割当てたためだけでなく、教育上の目的も持っている。

縮尺レベル

衛星画像を分類する単純な方法は、領域や分解能などの縮尺の概念に基づくものである。厳密に言えば縮尺の概念は、文字通り絵としての意味での画像に適用される場合にのみ、完全に意味を成す。SPIN2(Space Information)上の KVR100 カメラやスペースラブ・ミッションの計測カメラ、大規模カメラで使われた写真フィルムに記録された画像では、地表での距離とフィルム上の距離の間に幾何的な関係がある。しかし、地表を掃引して視野内の瞬間的な光量を示す信号を収集するスキャナの場合、縮尺の概念は曖昧になり始めて、「画像の基本的な構成要素である1つの画素（ピクセル）で再現される領域」という基本的な地表の単位を意味するようになる。画素の集まりで構成される画像は、スペースラブ・ミッションの計測カメラや MKF6 で撮影された本物の写真を自由に引伸ばしたり、縮小したりするのと同じ方法で、思い通りの大きさに作上げることができる。

縮尺基準は本物の写真には有効であるが、スキャンで得られた画像を参照する上でより有用な概念は、画素に対応する地表の領域（地域や地点）、あるいはそれと密接に関連した地表サンプル距離(Ground Sample Distance, GSD)であるが、どちらも分解能の単位の拡張とみなされる場合がある。

全体の視野、瞬間的な視野、分解能の概念から、以下の3つの縮尺レベルが定義される(図 9.14)。

A: 惑星レベルの画像

惑星の広がり縁から縁まで含んだ範囲を高高度(一般的には地表から 36,000km 以上離れた地球の静止軌道上)から撮影したもの。このレベルの画像はキロメートル程度の分解能を持つ。気象学や地球規模の気候学(放射収支など)に利用される。

B: 地域レベルの画像

もう少し狭い範囲を低高度から撮影したもので、地表の分解能は 10m から 100m 程度。地図作成や地球資源探査に利用される。

C: 局所地域レベルの画像

限定された領域を真上又は斜めから、かなり低高度で撮影されることが多い。10cm から 1m の分解能が得られる。元々は軍事偵察の目的に用いられた。現在は民間用途に 1m レベルの分解能がみられる。

これらの主なレベルの間には多くの中間レベルが存在する。例えば、NOAA 衛星の AVHRR センサで得られる地球の縁から縁までの画像はレベル A とレベル B の中間に位置する。それぞれの画素は地表の 1 平方 km 以上に相当し、気象学と地球資源探査(局所的な深海水湧昇位置やサヘル[アフリカの乾燥地帯]の植物研究など)の両方に利用される。同様に、SPOT 画像やスペース・ステーション・ミールから撮影された写真は、レベル B とレベル C の間に位置する。

処理の種類

もう1つの分類方法は、画像自体の性質や画像に施される処理の種類に基づくものである。この仕組みは、1次画像と2次画像(あるいは処理後画像)の区別によるものである。前者は撮影時の姿勢情報を持ち、特殊な処理の行われていない画像である。これらは「1次画像」と呼ばれるが、1次の状態を定義するのは難しい。写真のネガフィルムは、現像処理を行った後でも依然、1次画像である。しかしアナログの記録をフィルム上に可視化

して得られる画像も1次画像と見なせるであろうか？画像がデジタルサンプリングされている場合、出力される画像は、1次画像、2次画像のどちらであろうか？

航空写真判読の場合とは対照的に、リモセン衛星で撮影された1次画像は、処理後画像に比べると利用頻度はかなり低い。2次画像ははるかに大量に存在し、様々な基準で分類される。最も直接的な方法の一つに、2次画像を得るために使用した1次画像がひとつか、あるいは複数かで分類するものがある。一つの1次画像から得られた画像はモノジェニック、複数画像を合成した場合はポリジェニックと呼ばれる（図 9.15）。

モノジェニック2次画像は、一つの画像から得られる。これらは拡大・縮小・歪み補正・投影法変更・コントラスト調整などの結果である。コントラストは、グレースケールの中で最も暗いグレーを黒、最も明るいグレーを白にするなどの方法で強調される。この操作は、小さな可動ウィンドウの中に適用することで、画像全体の相対的値を考慮せずに局所的コントラストを強める際にも適用される。グレースケールの変化は、必ずしも単調関数に従うわけではなく、最初は増加していても、増加と減少を繰り返すような関数になることもある。

その他の処理は、確率に支配されるだろう。例えばそれぞれのグレーの色調が占める地表の面積が等しい画像や、ガウシアン分布に基づく画像が作られることもある。

原画像は、強度のレベルを減少させたり、情報要素をサンプリングし画素数を減らしたりすることなどで単純化できる。また、1次画像を近隣画素間の値の差分に置換える（勾配画像）ことや、それぞれの画素の値を特定領域で最も頻度の高い値に置換えることでも単純化できる。

ポリジェニック2次画像は、リモセン・データだけを処理した複数の1次画像を合成して得られる生成物である。

最も標準的な種類は、いわゆるフォールス・カラー（擬似カラー）合成である。マルチバンド・センサにより、3つのスペクトル・バンド（波長帯）で同時に取得した3つの1

次画像をそれぞれ、カラーフィルムの減色合成感色層（シアン、マゼンダ、イエロー）や、テレビ・スクリーンの加色合成色（赤、青、緑）の1つとして解釈することで得られる。コンピュータ・ディスプレイが広く使われる様になり、減色合成は原色の加色混合に道を譲った。これは本質的には、画像を得るためのスペクトル技術である。またスペクトル合成処理は、他の多くの種類の画像処理（領域分割による分類や可動点の周りのクラスタリングなど）の基本を構成するものともいえる。

もう一つのポリジェニック処理である時系列処理は、異なる日に撮影された画像の合成に関するものである。簡単に言えば、ある時期に撮影したポジ画像をまた別の日に撮影したネガ画像と重ね合わせるなどして得られるもので、2つの画像の差異が明るい部分、暗い部分として陰影で現れる。もう一つの時系列処理は、地物をその変化によって特定するために画素を参照するものである。この種類の画像は、衛星が任意の軌道を連続して2度通過する間に海岸が浸食成長した領域を定義したり、植生限界の変化や砂漠化で灌木の枯れた地帯を観察するために生成されてきた。時系列的な合成画像には、他の利用方法がある。その一つは、個々の画像の局所的な空白を埋めるものである。例えば、孤立した小さな雲は地表のある領域を隠してしまうことがあるが、連続した日に撮影した画像の上ではその位置が異なっている可能性が高い。雲は地表よりも温度が低いので、温度分布画像のそれぞれの地点において数日間の最大値を採ることで、一般的には簡単に邪魔な雲を取除くことができる。同様に、1年を通して変化する地表画像を合成することで、小領域単位の仮想地図を得ることが出来るようになる。

方角的ポリジェニック処理には、同じ領域を異なる視点から撮影した画像を合成する方法がある。これは、2つの画像から地表の等高線を再構築することが出来る唯一の方法である。この様に、2つの異なる周回の異なる角度から撮影された SPOT 画像から標高モデル (DEM) を生成することが出来る。この種のモデルは、マルチスペクトル画像の放射量から推定された色情報と合わせてコンピュータ計算を行うことで、与えられた任意の視点からの純粋なパノラマ景観図を生成したり、表示したりするのに使われる。つまりコンピュータ処理によって、実際の撮影時の視点とは違う視点からの新画像を生成することが出来る。ここで最も有用なのは方向的な観点である。なぜなら、時系列処理には、2つの映像が撮影される期間に何らかの変化が起こり得るというデメリットが常にあるため、方向的な観

点が必要とされるのである。この問題点は、いくつかの衛星で使われている装置である程度克服出来る。例えば、JERS1 の B3 チャンネルと B4 チャンネルでは前方視と直下視が同じ回帰で得られ、2つのステレオ画像の撮影時間差は数分の1秒（訳注2：実際には、JERS1 の場合、30秒程度）である。ADEOS シリーズに搭載されている POLDER システムでも同じ方法が用いられ、ある程度離れた2点から撮影した広角画像が合成される。

縮尺的なポリジェニック処理では、異なる縮尺の画像が合成される。Ikonos の1画素 4m × 4m のマルチスペクトル画像と1画素 1m × 1m の単色画像の合成は、それが異なるスペクトル・バンドと異なる地表の領域の合成である場合、スペクトルも縮尺もともにポリジェニック処理となる。

外部ポリジェニック処理は、リモセン衛星以外で取得したデータと衛星データの合成である。この処理の最も優れた例は、衛星画像を背景として地形や地名情報を重畳した地図の作成である。地理情報システム (GIS) は、衛星画像を用いて、この種のポリジェニック画像の大きな需要を生み出す。例えば行政情報や統計情報が、マルチスペクトル画像に基づく分類結果と組合わされる。主題となる事象の徹底的な理解と、本質的に異種のデータの確実な把握を必要とするこの特殊な技術は、民間や軍事の衛星データ調査において急速に注目されつつある。

したがって、画像は生成形態、すなわち単一の1次画像から生成されるものと、複数の1次画像から生成されるものに区別される。後者については適用される処理（スペクトル、時間差分、方向、縮尺など）や、衛星データ以外のデータとの合成処理の有無によって区別される。これらの区別される形態によって、含まれる情報の性質が決まる。画像はまた、それを生成するために行う処理の種類によっても区別される。

データソースや処理形態が多様化した理由の一つに、膨大な画像データを提供する衛星数の増加や、コンピュータによる画像処理技術の進歩が挙げられる。現在ユーザが直面している最大の課題は、与えられた用途に対し、どの画像を用いて、どの処理を適用するかを選ぶことである。

09.4 気象・Meteorology

気象は、人々の安全や海路空路運輸の安全確保に貢献しており、幅広く実用化されている。衛星データ活用により、台風の進路予測などは信頼性がはるかに高まった。そのような予測に基づいて、台風が通過する領域内で航路を変更したり、予防措置を取ることができる。同様に気象情報は、軍事活動の実施や写真偵察任務を計画する上でも重要である。それゆえに国防気象衛星プログラム(DMSP; Defense Meteorological Satellite Program)のような専用の軍事計画が存在する。

気象情報は、一般向け短期予報を必要とするマスコミから常に需要がある。同様に霜、降雨や霧の予報、降雪や旱魃の影響調査の入力データとして農業分野においても関心ごととなっている。

気候学は、気象衛星データが関心ごととされる分野のひとつである。気象学に比べて、データ供給の迅速性という点では要求が少ないが、より長期の時系列データが要求される。

宇宙からの観測が気象学にもたらす恩恵は早い時期から認識されており、まず非静止衛星、そして1966年以降は静止衛星の打上げを促進した。(図9.16)

図9.16：気象衛星年表

[非静止衛星]

地球と太陽の放射の全量を計測する衛星であるExplorer7が早くも1959年に打上げられた。1960年以降は、雲系の画像収集用に設計された一連の試験衛星であるTIROSシリーズがそれに続いた。これは可視領域と熱赤外域を対で計測する初の衛星シリーズであった。TIROSシリーズの初期の衛星(1~7)は、起動傾斜角が約40度であり、地球全体をカバーすることは出来なかったが、当時の赤外センサによる角分解能は比較的低かったにもかかわらず、適切な地上分解能を得るのに十分な低空飛行が可能であった。

TIROS 8は、多くのデータ受信局への自動画像転送(APT; Automatic Pictures

Transmission)に切替えられた。さらに TIROS 9 以降、太陽同期軌道が採用され、常に太陽に照らされているために地球のほぼ全体が観測できるようになった。

TIROS シリーズは、約 1600km の高軌道にもかかわらず空間分解能が改善された点が特徴であるが、米国環境科学業務庁 (ESSA: Environmental Science Services Administration) のシリーズの礎となった。この民事の最前線における活動に並行して、米は DMSP 下で最初のシリーズの打上げも進めていた。それが Nimbus 試験衛星である。

Nimbus 試験衛星によって、NASA では多くの革新探求が可能になり、特に鉛直方向の大気観測技術と、シリーズ最後の衛星による大気と海洋汚染の検知に重点が置かれた。Nimbus 計画の結果開発された多くのセンサが、気象機関が管理する ITOS-NOAA 運用シリーズに装備されるようになった。NOAA6 以降、VHRR センサは AVHRR バージョンに交換され、これらの衛星の性能は急速に改善された。

これらの気象衛星が、多様な計測機器を装備している場合もある。TIROS-N とその後の NOAA が搭載する TIROS 可動垂直探査装置 (TOVS; TIROS Operational Vertical Sounder) は以下の 3 機能を備えていた。

- ・高分解能赤外センサフィルタ (HIRS; High Resolution Infrared Radiation Sounder) : 気圧 10hpa 以下の高度を上限とした大気の湿度と温度プロファイルの構築
- ・マイクロ波サウンディング装置 (MSU; Microwave Sounding Unit) : 雲で覆われた大気の温度プロファイルの構築
- ・成層圏探査ユニット (SSU; Stratospheric Sounding Unit) : 成層圏の温度プロファイルの構築

ソ連、およびその後の露は多くの気象計画を立上げたが、それらは米の計画に少し遅れて開始された。1966 年の Kosmos122 で 3 軸固定を導入、Kosmos144, 156 及び 184 でほぼ 81 度の軌道傾斜角を達成した数々の Kosmos 試験機打上げの後には、3 つの Meteor シリーズが続いた。1969 年以降の Meteor I、1975 年以降の Meteor II、そして 1985 年以降の Meteor III である。ソ連の軍-産複合体制化での民間と軍事の活動統合が、様々な計画において相乗効果を生み出したことに疑念の余地は無い。このことは、厳しい経済状況である今日に

においても、その根本的な能力を維持する助けとなっている。

米では、40 近い軍事専用衛星が既に打上げられている。1994 年の 5 月の大統領命令が、NOAA と DMSP のより密接な結びつきを構築する活動の公的な推進力となった。新シリーズの成果となる最初の衛星は、2005 年に発表予定されている。この計画によって必要な衛星数を半減し、付随する性能も向上させねばならない。

低高度極軌道衛星は地表分解能が高く、それゆえ雲生成や地形、海景とその表面温度の分布に関する詳細描写を保証している。可視領域と熱赤外の両バンドで、異なる日に撮影されたデータ比較も、主に太陽同期軌道の衛星によって円滑に行われている。

雲や地表の温度測定能力はとても興味深い分野である。海面温度に関する情報についても同様であり、今日の気象衛星は海洋学に多大な貢献をしている。

NOAA 等の衛星によって取得された可視領域と熱赤外のデータは、異なる温度の水塊の湧昇流や水平方向の移流についての理解を深めるにあたり大きく貢献している。

このようなデータは、地形変化の研究にも幅広く用いられている。NOAA に装備されている AVHRR センサは、全球領域 (GAC; Global Area Coverage) あるいは、より周波数の高い局地領域 (LAC; Local Area Coverage) の形でデータを提供している。GAC データは $4\text{km} \times 3.3\text{km}$ (直下) の地表区画に相当し、一方 LAC エリアはさらに小さな単位で表現され、その大きさは $1.1\text{km} \times 1.1\text{km}$ (直下) である。

中国が 1988、1990、1999 年に打上げた風雲 (Feng Yun) 1A、1B 及び 1C はそれぞれ高度 890 ~ 900km の太陽同期軌道で運用され、米の NOAA に似た機能を有していた。

Orbimage 社が 1995 年 4 月に打上げた Orbview1 は、世界初の商用気象衛星である。Orbview1 は高度 740km の太陽同期軌道上で運用され、光学過渡検出器 (OTD; Optical Transient Detector) によって気象予報データだけでなく地上では取得不可能な雲間放電の画像も提供する。雷画像の研究は、熱帯地方に限定して 1997 年に打上げられた、日米共同の熱帯降雨観測衛星 (TRMM; Tropical Rainfall Measuring Mission) によって、さらに頻繁に行われてきた (7 章参照)。TRMM の特徴は、NASA が提供する観測装置を多数搭載している点であ

る。分解能 2km で 5 チャンネル可視赤外観測装置 (VIRS; Visible Infra-Red Scanner)、9 チャンネル TRMM マイクロ波観測装置 (TMI; TRMM Microwave Imager)、 $0.77765\mu\text{m}$ を主対象とした雷観測装置 (LIS; Lightning imaging Sensor)、そして NASDA (訳注: 現 JAXA) が提供する TRMM 搭載降雨レーダ (PR; Precipitation Rader) がそれにあたる。なお TMI と LIS の分解能は直下で 4km である。MEGHA Tropics は、ESA によって研究されている台風の最頻経路を可能にするプロジェクトである。

最後になるが、欧州の組織である欧州気象衛星機関 (Eumetsat) は、METOP (METeorological OPerational Satellite) 計画を推進している。これは、NOAA と協力して、2001 年から 2010 年にかけて気象に関する要望に応えるような太陽同期軌道衛星の提供を目標としている。衛星 METOP 1 は、降交点通過時刻は午前 9 時となる見込みで、AVHRR 3 ($0.68\mu\text{m}\sim 12.5\mu\text{m}$ の 6 バンド)、HIRS 3 ($0.69\mu\text{m}\sim 14.95\mu\text{m}$ の 20 バンド)、2 つの新型マイクロ波測定器 (13 チャンネルの AMSU A1 及び 2 チャンネルの A2) を搭載した Envisat のプラットフォームを小型化した設計である。これらの装備は、大気の湿度と温度の分析用に設計されている。

[静止衛星]

静止気象衛星は非静止気象衛星に少し遅れて登場した。最初の静止衛星利用例は、NASA が気象用として、様々な用途に向けて静止衛星環境を利用する技術試験用に設計した応用技術衛星 (ATS; Application Technology Satellites) である。試験の大部分は遠隔通信に充てられたが、気象分野についても決してこの米のプロジェクトから外されたわけではなく、実際 1966 年打上げの ATS 1 は史上初めて 36,000km からの地球画像を提供した。さらにその 1 年後、ATS 3 は同軌道上から初のカラー画像を送信した。クラーク軌道からの気象情報の実運用上のデビューは、1974 年と 75 年に打上げられた同期気象衛星 (SMS1, 2; Synchronous Meteorology Satellite) である。SMS 衛星は、この特殊な赤道上の軌道からは観測不可能な高緯度を除く地球全域をカバーしている静止気象衛星の、輪の一部を構成している。この衛星の輪は、下記の 5 つの局によって提供されている。

- ・ 東経 140 度上 : ひまわり 5 号 (GMS5、1995 年～)、日本
- ・ 東経 74 度上 : Insat (Insat2D、1997 年～。Insat2E は 1999 年から東経 83 度上で待機中)、インド
- ・ 本子午線上 : Meteosat (Meteosat7、1997 年～)、欧州

- ・ 西経 75 度上 : GOES (GOES10、1997 年～)、米
- ・ 西経 135 度上 : GOES (GOES9、1996 年～)、米

これらの名目上の軌道位置に加え、多くの衛星がしばしば異なる待機位置(打上げ直後)やスタンバイ位置(運用寿命の終りや、以下の運用上の突発事故時)に常駐している。1989 年 1 月 21 日に GOES 6 (GOES East) が故障した際には、1989 年春に GOES 7 (GOES West) がまず西経 75 度から 108 度上に移動した。そしてさらに同年秋には西経 98 度上に移動した。この事故によって 1989 年は衛星 4 機だけで運用されていた。

これらの衛星は主として可視領域(図 9.19)と熱赤外域のデータを収集する。時として、短波長赤外域(SWIR)を主とする他の波長域が加わることがある。例として GOES 9 は以下の 5 波長域のデータを収集する。

- ・ 0.55~0.75 μm
- ・ 3.80~4.00 μm
- ・ 6.50~7.00 μm
- ・ 10.20~11.20 μm
- ・ 11.50~12.50 μm

第 2 世代 Meteosat (MSG; Meteosat Second Generation) 衛星は、多くの新センサを搭載している。例えば、SEVIRI (Spinning Enhanced Visible/IR Imager) は、15 分に 1 回、12 チャンネルで地球の見える部分全てのスキャンができ、また HRV (High Resolution Visible) は波長域 0.50~0.90 μm で地表面分解能 1km のデータ提供ができる。MSG 1 は 2002 年 8 月に打上げられている。

静止衛星からのデータは多くの地上局で受信することができ、実際にこれらのデータによって十分な普及と効果的な活用が可能になっている。

例えば Meteosat シリーズの場合は、データは衛星上でデジタル化され、リアルタイムで地上に送信される。そこで幾何補正され、Meteosat に返送されてから配信される。第 1 データ利用局 (PDUS; Primary Data User Station) においてデジタル処理され、第 2 データ利用

局 (SDUS; Secondary Data User Station)においてアナログ処理される。

第2利用局は2000箇所ほど存在するが、第1利用局の数に比べるとかなり少ない。SDUSはWefaxのアナログデータを自由に受信できる一方で、PDUSで受信されるデジタルデータの一部には暗号化が施され、使用料の支払いが必要である。MeteosatはDCS(Data Collection System)地上局によって提供されたデータも配信している。

気象衛星成功によって、様々な実験的計画がすでに実用段階に入っている。

1977年、1981年及び1988年に最初のMeteosat衛星3機の打上げが成功後、1986年に発足したEumetsatは、3新実用衛星3機を含むMOP計画への資金提供という役目を果たした。1989年から1995年まで運用されたMeteosat 4、1991年に打上げられたMetaosat 5、1993年に打上げられたMetaosat 6の3つがそれぞれにあたる。1997年には、EumetsatはMeteosat移行計画下でMetaosat 7を打上げた。

現在では、上で述べた5つの世界気象観測(World Weather Watch)位置に加え、さらに2つの位置に1994年10月31日に打上げられた露の衛星Elektro1(東経76度上)と1997年6月12日に打上げられた中国の衛星風雲2(FengYun2、東経105度上)が常駐している。

図 9.17 : 世界気象監視(WWW; World Weather Watch)計画衛星

気象に関する公共サービスや国際協力の長い伝統は、人工衛星の登場によって新段階に入った。世界気象監視計画の創設はその新たな出発点を示す好例である。

世界気象監視計画は1961年、世界気象機関(WMO; World Meteorological Organization、1951年創立)に対する国連からの推薦のもとに発足した。その計画の概要は、世界気象機関に所属する様々な国家が所有する静止衛星と非静止衛星による全球規模の雲循環観測システムを背景とした、実運用サービス提供である。

この観測システムは、極から8度以内のエリアを除いた全球をカバーできるように、地球を取囲む形で配置された静止衛星5機を中核として構成されている。図の5機の半径は、静止衛星が環状に配置されるようWMOが指定した軌道位置を示している。これらを補完し

ているのが数々の近極軌道衛星で、赤道面からは観測不可能な高緯度地域をカバーしている。近極軌道衛星は、雲に覆われた場所や海洋、大陸の温度分布についてのより詳細データも提供している。

図 9.18 : 静止気象衛星の位置

図の下半分は、これらの衛星が静止軌道外の廃棄用軌道に移されるまでの配置の変化を示している。

図 9.19 : Meteosat の可視領域チャンネル・データで作成された画像(1986年11月4日)

欧州宇宙機関(ESA)によって処理されたこの画像は、西から東方向の走査によって25分かけて取得されたものである。スキャン動作は衛星回転によって得られ、連続した走査線は望遠鏡の軸を北から南に切替えることで得られる。

赤道付近の大西洋から西アフリカにかかる帯状の雲は、熱帯収束帯の湿った空気が上昇して発生している。この雲はアフリカ南部とラテンアメリカにまで及んでいる。高緯度地域に見られる雲の帯は、強い低気圧によって形成された前線によるものである。前線のひとつが西サハラ北部地域にまで伸びている。南アフリカ沿岸沖の不規則な雲の塊は、冷たい海水上で凝結して発生した。快晴の部分は高気圧によってもたらされている(特に欧州全域)。画像は ESA 提供。

09.5 地球資源のリモセン

①地球資源のリモセンは、観測分野では低解像度気象データ取得と超高解像度軍事偵察の中間に位置づけられる。地球リモセン用に設計された衛星が宇宙で運用され始めたのは、非静止気象衛星より後のことだったので、それらによって蓄積された経験が生かされている。しかし、技術的には影響はきわめて明らかであるが、計画の構築方法には両分野に著しい違いがある。衛星気象学は、国際協力を通して推進されたため公益事業と非常に類似していて、慎重に的を絞った要求を出す特定されたユーザに当初から恵まれていた。一方地球リモセンにおいては、実際の要求が出される前に、ユーザが使用できるような機器をしばらくの間作らねばならなかった。またその要求も、多くの場合一部は航空写真で間に合うようなものであった。

②そして、衛星気象学に使われるセンサ大多数が地球の端から端までを視野に入れるのに対し、地球資源リモセンのセンサは、観測機器の視野角によって制限される。これは軍事偵察衛星の場合と同様である。視野角については一般的に、軍事用センサのほうが民生用より狭い。

③宇宙時代のごく初期に、宇宙からの地球観測が地理学に役立つのではないかと考えられ始めていた。ヴォストーク、ヴォスホード、マーキュリ、ジェミニなどの初期有人飛行船に搭乗した宇宙飛行士たちは、低軌道で眼前に繰広げられた地球の姿を直に見たとき、その映像が地球の景観の理解に大きな意味を持つであろうと感銘を受けた。「地理学衛星」について論じるのが当時の常であった。米科学アカデミーの1956年のある報告書には「地理学調査における宇宙船」という表題がつけられ、また、同アカデミーが海軍調査局とNASAからの1965年の委託研究は、「宇宙からの地理学」と題されていた。そして「地理学的」という修飾語がその後使われることが少なくなってきて、資源、環境あるいは単に「地球観測」という言葉が好まれるようになっている現在でも、全体として見れば、衛星は地理学にとって基本的に重要である。

④地球観測衛星は、最初は軍事目的で発展した（12章参照）。国際航空法が国家の統治権をその上空に規定していた状況にあっては、衛星によって描かれる地球の様子は、従来入手困難で不可能とみなされていた地域の情報を得る情報取得の鍵であると考えられた。しかし、最初のリモセン画像は、その戦略的価値に加えて、気象学、地質学および地図学の新しいタイプの情報を利用可能にした。それは、この機密データを入手できた科学者達

によってまもなく明らかにされた。しかし、米では民生用衛星を開発するには、情報の利用拡大が安全保障に不利益になると考える人々の懸念を鎮め、また、ユーザになりそうな人々が力を合わせてひとつの共同計画を進めるよう説得する必要があった。地質学者、地理学者、栽培学者や環境専門家などさまざまなユーザのニーズはそれぞれ非常に異なっていたので、センサの技術的特性を決めるに当たって非常に大きな諸問題が生じ、各計画の運営と商業化のための準備は相当に複雑化した。(図 9.20 参照)

⑤有人宇宙計画によって、革新的実験の好機が到来した。成功を収めたアポロ計画のハードを使用し、スカイラブの飛行は地球資源実験計画(EREP)を構成する各センサなどの新機器試験に利用された。サリュートやミールなどの宇宙ステーションやスペースシャトルも、かなりの観測活動を提供した。たとえば、スペースシャトルは、シャトル画像レーダ(SIR)や、スペースラブ写真計画のメトリック・カメラおよびラージ・フォーマット・カメラのための試験環境を提供した。(同 9.21)

⑥基本的構成に一連の高解像度静止画像カメラ(KATE140、KATE200、KFA1000、KAP350、MKF6MA)を含む宇宙ステーション・ミールは、受動型および能動型リモセン機器を搭載したプリローダ・モジュールの出現によって、環境学、海洋学、大気研究に特化した運用ミッションに対処することができた。独の MOMS0 2 センサは、スペースラブで 2 度、1993 年 4 月にスペースシャトルに、1996 年にプリローダに搭載(MOMS 02P)されて使用された。

⑦ほかに超高精細熱赤外画像に特化された熱容量作図ミッション(HCMM)、いくつかのコスモス衛星、そして特に沿岸域海色センサ(CZCS)を搭載したニンバス 7 号によって多くの実験が行われた。

⑧可視近赤外の運用ミッションは、しばしば熱赤外と組合わされ、いくつかの自動衛星計画のもとに行われた。これらのうちで最も重要なのは、画像提供の高度な継続性と取得画像の安定供給に成功してきているものであり、1872 年に始まった米のランドサット計画、1986 年に準備が始まった仏のスポット計画、1987 年に始まった日本の MOS 計画と、1988 年開始のインドの IRS 計画などである。このようにますます多くの国々を巻き込んでゆく傾向は、中国とブラジルが共同で 1999 年に上げた CBERS 衛星のような従来型システムとともに続いているが、サリー大学開発の Uosat に由来するより簡素で非常に安価なシステム発展のためでもある。こういった比較的簡素なシステムは、後続国が限られた方法でもこの種の応用に慣れるようにすることを意図している。

⑧レーダ画像の分野では、進歩はどちらかといえば遅れ気味だった。1960 年代にはまだ、

計測可能な信号を受信したり、搭載センサの照射波を追尾して 1000 マイル以上「往復」させるのに必要なエネルギーを見込んだ人工衛星搭載映像レーダを飛ばす見込みはほとんどないと考えられていた。レーダは、実用上は航空学用に限られていると考えられ、その分野では既に大変広く用いられていた。しかし、その後の太陽電池とレーダ技術の進歩によって、レーダ画像を衛星の分野に取り入れることができた。宇宙からのレーダ画像は、1978 年 6 月 26 日の米国の Seasat 衛星の打上げによって幕を開けた。この衛星やその他の一連の衛星に用いられた技術は合成開口レーダとあって、衛星軌道に沿った動きを利用して、実開口よりはるかに広い見掛けの開口を実現し、よりよい解像度を得るものであった（図 9.9c 参照）。合成開口レーダは、略称で SAR（図 9.22 参照）と呼ばれることのほうが多い。

⑨軍事利用を別とすれば、地球資源リモセン用のレーダ画像の主ユーザは、露の Almaz 計画、欧州の ERS 衛星シリーズ、日本の地球資源衛星（訳注 1）（JERS）計画およびカナダのレーダサット・シリーズなどであるが、スペースシャトルやミール宇宙ステーションに搭載のプリローダ（モジュール）でもいくつかの業務が実施されている。

SAR システムは、さまざまな入射角や受信あるいは照射時の水平・垂直偏波の使用、周波数帯（9.13 参照）の増加により多様化している。個別の用途に必要な機能は、研究対象地域の地表テクスチャ、植生被覆、含水率によって異なる。

図 9.20 地球資源リモセン実施衛星の年表 多くの露軍事衛星と地球資源ミッションを兼ねるいくつかの気象衛星については、主目的のみを示す。ここに示されている中国の FSW 衛星は、軍事目的も兼ねる。

図 9.21 ラージ・フォーマット・カメラにより撮影された写真 この写真は、1984 年 10 月 8 日に撮影されたもので、スペースシャトルの第 41G 号飛行で高度 230km からとられた。オリジナル画像は 23cm×46cm のフィルムに記録され、縦 344.67km、横 172.33km をカバーしている。フロリダのケープ・カナベラルの周辺が写っている。同地域のより狭い地域を取った SPOT による画像を、図 5.19 の一部に載せた。画像は NASA に帰属。

図 9.22 X-SAR 合成開口レーダによる画像 この独伊共同の実験レーダセンサは、スペースシャトルのミッション STS59 号で飛んだ。X バンドを使用している。1994 年 4 月に撮像された。アルジェリアのサハラ砂漠で抵抗性のある地層の露出に関連したレリーフ模様が

部分的に砂の筋によって隠れ、Xバンドの後方散乱がなくなっていることが示されている。
画像 DLR/DPAF に帰属)

(訳注2) 原文では [Japan Earth Remote Sensing Satellite] となっているが、[Japan Earth Resources Satellite] としての日本語名称とした。

09.6 光学リモセン・システム

ランドサット計画

民生での地球観測計画の考えは、1962年ごろには形を成し始め、有人宇宙船からの地球の写真が非常に広範な観衆の喜びを持って迎えられるという熱狂によって、かつ軍用偵察衛星によって取得された秘指定データにアクセスしている科学者たちの間に生まれた関心によっても促進された。

気象衛星計画もまた、実験が可能な枠組みとして見られた。それでもランドサット・シリーズの最初の衛星が打上げられるまでにはさらに10年を要したのであった。介在している期間の長さが物語っているのは、それが組織的および政治的理由によりアイデアから打上げられ稼働しているシステムになるまでがどれほど困難かである。

1962年から1966年までの間は、こうした計画に対する様々な技術的選択肢の検討をNASAで行うのに費やされた。国防総省はその軍事衛星に盛込まれている技術を公開するのを拒絶していたし、NASAの一群の資源は有人宇宙計画に連結していたので、地球観測実験のプラットフォームとして最初に有人宇宙船に考えが及んだのは殆ど驚くに当たらない。その上NASAの各研究所は主に新センサ技術を開発することに関心があり、それが比較的長いリード・タイムを意味することから、提案計画の殆どはアポロ計画後継の諸用途を目標にしていた。当時の意味付けは、宇宙飛行士達は運用に供せられる自動システムが開発されるまでには多数のシステムを試験する必要があるだろうということであった。

そうした用途に関しては、地質学調査のようなユーザ候補達は比較的洗練されていない衛星を好んだ。そうした衛星は彼等の要求に沿って調整することが可能で短い時間的余地で利用できるようになる。この手法は、3つのタイプの衛星 — 大型、中型および小型 — をベースとした地球観測に関するNASAの最小化選択肢に対応していた。NASA内部での意見の力関係は、これらの最も複雑な組織に向かって傾いていた。

ランドサット計画を進める決定は最終的に、ユーザ省庁、特に当然ながら地質学調査と関係している農務省と内務省からの圧力の下で為された。

NASAにおける自己分析が長引いていることに特に不快感を持っていた内務省は、同省が自

身で開発することを提案していた衛星打上げに資金を付けるよう、連邦議会に要請することまでしていた。

そして NASA は直ちに反応してランドサット計画に対する担当権限を取戻すことに成功したが、衛星を短い期間で開発する約束をしたことになっている自身を見出すこととなった。それにも拘わらず、各センサの選択に関する公式決定が為された 1968 年 10 月までにもう一年が経過した。この衛星はセンサ、搭載記録機およびデータ処理システムに関する例外を除いて既存の技術を用いることになった。各センサを開発する任務は、アポロ後継の用途に注力し続けていた JSC(ジョンソン宇宙センタ)ではなくて、既に気象衛星と地質衛星の経験を持っていたが地球観測については新参であった GSFC(ゴダード宇宙飛行センタ)に割当てられた。何人かのオブザーバによれば、この NASA の決定は一つの基本的欠点があった。それはゴダードのチームが将来のユーザ達の要求を優先するより、彼等の新システムを試験することに目を向けていたことである。他にも幾つかの問題があった：様々なこの計画への参画者達の時に拮抗する諸要求、国防総省との軋轢を避ける必要性および国家政策の指示に適合する必要性。それら総てが高度に機微な領域の物事に関わっている全員にとって受入れ得る技術的能力を特定することを意味していた。

自動衛星から地球資源を研究する計画は最終的に、1969 年に下院で承認された。最終的に浮上して来た政策決定に合わせるため、この計画は人類全体に恩恵をもたらす投資として説明された。本計画の下での最初の衛星がはじめ ERTS(Earth Resource Technology Satellite、地球資源技術衛星) 1 と呼ばれていたが、後に同シリーズの残りにおいて維持された命名、ランドサット 1 に改名された。

ランドサット 1, 2 および 3 は 1972, 1975 および 1978 年にバンデンバーグ宇宙センタから打上げられ、ニンバス気象衛星に使われたプラットフォームをベースにしたが、初期シリーズをこの衛星ファミリで構成した(図 9.20 参照)。これらは高度 920 km、09:30 に降交点通過を有効にした太陽同期円軌道上で運用された(図 2.27)。軌道周期は 18 日であった(図 3.25 参照)。

ランドサット 4 および 5 は、1982 年および 1984 年に再びバンデンバーグから打上げられ、第 2 のシリーズを形成した。これらの軌道は、やはり太陽同期円軌道であったが、高度 690

km に下げられた。

赤道の降交点通過は 09:37 で、軌道周期は 16 日であった(図 3.26 参照)。

写真分析に精通しているユーザの中には、ランドサット・シリーズに写真カメラを装備させたかった人もいたが、この選択肢は技術的制約およびこの問題で剣を交えたくなかった国防総省と NASA の反対の結果として拒絶された。初期のランドサット航行体は 2 種のセンサ、RBV(Return Beam Vidicon、反射ビーム・ビジコン) TV カメラと MSS(MultiSpectral Scanner、マルチスペクトル・スキャナ)を搭載していた。

RBV カメラは最初の頃、レンジャー月観測計画での利用を考えていたが、ランドサットの計器ペイロードがやっと稼働状態になった頃にはもっと進化した版が開発されていた。もっとも特定のミッションは何も割当てられていなかった。

RBV は軍事で使用された機器の一つでしかなかった。

図 9.23. Landsat 1 に搭載された MSS(Multi-Spectral Scanner、マルチスペクトル・スキャナ)で取得したマルチスペクトル画像。

MSS の画像は各々が地上での 56 m×79 m の領域を表す画素群から成っている。

ガンジス・デルタのこの画像はチャンネル 4(黄色)、チャンネル 5(マゼンタ)およびチャンネル 7(シアン)を結合した擬似カラー合成画像である。

ベンガル湾の水は濁っており、そのことを特に支配的な明るい青が示している。

葉緑素が豊富なマングローブの森が赤く示されている一方、取得時期(2 月)を特徴付ける露出した土壌と葉緑素の少ない刈取りが橙色－黄褐色または黄色で示されている。

完全な MSS シーンは長方形ではない平行四辺形(図 3.2 参照)で、その底辺は地上において 185 km を表す。

ここに再生された長方形の抽出部分は地上で 172 km の領域をカバーしている。

画像: NASA 提供。

RBV は軍事使用機器の一つでしかなかった。

センサ適用は内務省の支援を引出したが、それが採択に至るまでにはある程度の反対を克

服しなければならなかった。

ランドサット 1 および 2 は一つの版の REV を装備していたが、この第 1 シリーズの 3 番目の衛星は別のモデルを搭載した(図 9.6 および表 9.1)。

しかしその結果はがっかりさせられるもので、第 2 のランドサット・シリーズでは適用されなかった。

他のセンサ、MSS はミシガン大学における民生研究と軍用研究双方の成果であった。

NASA の科学者達は、農業研究では特にこのマルチスペクトル・スキャナからの恩恵を享受するが、地球科学の専門家達は MSS のより制約の大きな分解能に懸念を持っているという見方をした。

農務省はその重点をセンサを飛行させるための取組みの背後に置いていたが、NASA はこの機会を内務省の権限に対抗するために取込んだ。

1969 年 2 月、衛星に MSS を装備する決定が為された。

第 2 のランドサット・シリーズに搭載された MSS は幅 185 km の刈り幅を走査している。

ランドサット・ファミリーが取得した MSS シーンは、様々な季節における地球の露出した大陸塊表面を網羅する最初のほぼ包括的なデータ収集を構成した。

第 2 シリーズはさらに、空間分解能を向上させた 7 チャネル放射計、TM(Thematic Mapper、セマティック・マップ)を装備していた。

TM で取得されたシーンは全般的に優れた品質で、リモセン走査データの精度の著しい向上を示している。

2 つのランドサット・シリーズでは、使われているデータ送信モードにも違いがある。

第 1 のシリーズにおける衛星では、地上受信ステーションが衛星の視準線上にある時にデータをリアル・タイムで直接送信するか、地上局に対するその後の送信のため機上記録するかのを何れかを行う。

機上処理は第 2 のシリーズではもはや衛星の機能ではない。

第 2 シリーズは、直接的に、若しくは受信したデータを米のホワイト・サンズにある局に向けて再送信する静止中継衛星である TDRSS(Tracking and Data Relay Satellite System、

追尾・データ中継衛星システム)を介在させて間接的に、の何れかによるリアル・タイム送信のみに頼っている。

取得された画像の容量とそれら画像の広範囲に亘るユーザとの関係により、ランドサット計画の技術的成功に対する十分な証拠を積上げたが、その状況に関する躊躇が将来に対して疑問符を投げ掛け続けた。

はじめの意図ではランドサットのデータは国際コミュニティに恩恵をもたらし、配布された画像に対する課徴金は殆ど総て焼増しと送付の経費に基づくものというものであった。この方針は、衛星気象データに採択されているものと同様であるが、民生システムの進展に際してのユーザ候補の間に関心を引起こすよう設計された。

1979年頃にはカータ政権は気象衛星管理における NOAA の経験を認知し、その最終的な私有化に向けての一步として、ランドサット・システムを運営する暫定的な責任を与えた。ランドサット・システムを有益に運用できるか否かに関する継続的な議論にも拘わらず、連邦議会は 1984 年、ロナルド・レーガンが政務を執っている間にリモセン・データの商用化に関する法律を採択し、1985 年にランドサット計画に対する責任を私的な団体である EOSAT (Earth Observation SATellite corporation、地球観測衛星会社)に引渡した。

画像の書庫化は商務省に残された。

ただし米政府は気がつくやうに、ランドサット計画を現実の市場の不足に対して試験援助をしている状況である。

NOAA の責任下で EOSAT 向けに構築されたランドサット 6 は、1993 年 10 月 5 日のタイタン II ビークル打上げの失敗時に失われた。

失われた衛星には、可視 6 波長帯、空間分解能 30 m の NIR (Near Infra-Red、近赤外) と SWIR (Short-Wave Infra-Red、短波長赤外)、分解能約 100 m の熱赤外 1 波長帯、そして最後に分解能 15 m の新しいパンクロ波長帯を備えた新しい ETM (Enhanced Thematic Mapper、拡張型セマティック・マップパー)が装備されていた。

ランドサット 7 が打上げられたのは 1998 年になってからであった。

動向はこの頃までには、民生と軍事の目的をタンデム(交互に)に追求することによる節約達成に向かったが、飛行させる各センサに関する DoD と NASA の間の意見の不一致が最初は何らかの障害であった。1994 年に決定が為された時には、途中でこの衛星に対する単独の

主契約者になっていた NASA に対する軍事資金転用を促進する、単一センサ、ETM+を望ましいとする方向に向かった。計画立案組織と衛星データ管理は、NASA、NOAA および環境省の一部である米国地質調査によって共同に実施されている。EOSAT 社は 1996 年に Lockheed Martin によって売却され、現在リモセン画像の民生化に注力している。

ETM+センサはランドサット 6 に搭載されたその前身に負うところが大きい、熱赤外における分解能 60 m への向上を含む改良が多数為された。

ランドサット 7 後の将来に留保されているものは、部分的にしか明らかになっていない。将来のランドサット衛星に ALRSS (Advanced Land Remote Sensing System、先進型陸地リモセン・システム) を装備する計画があり、基本的にリモセン、通信および電力製造に力点をおいた研究・開発計画である NASA の新ミレニアム・プログラム (新千年紀計画) の下での新機器の試験を予想することができる。

地球軌道周回 1 (NME0 [] 1) プラットフォームは、IMAS (Integrated Multispectral Atmospheric Sounder、統合マルチスペクトル大気サウンダ) と共に先進型ランドサットと命名された新世代地表分光放射計を搭載しそうである。これらの開発は、今やランドサットに割当てられた環境監視におけるより広範な役割との調和が取られている。IMAS と新世代地表分光放射計により、戦略防衛構想の下で追及された研究で得られた高度技術プロジェクトに民生目的を結び付けることができる。

SPOT プログラム

SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre 【仏】 Earth Observation Satellite、地球観測衛星) プログラムは 1978 年に仏政府がベルギーとスウェーデンを少数パートナーとして承認した。

この地球の永続的観測のためのものとしては 2 番目の衛星を創設する提案は、これまでも欧州宇宙庁に提出されていたが、承認を得たことは無かった。

図 9.24. 2002 年 05 月 16 日に SPOT 5 (HRG スーパーモード) で取得したパリの画像。

インドのアプローチの独自性は、国内の要求、特に改良された全般地図作成と改良された主要リスク監視を通じてのより効率的土地利用、に高い優先順位を割付けている点に在る。此処に、宇宙での能力が開発途上の亜大陸における陸上使用管理上の優先順位と協調する状況があった。インドの宇宙計画全体に亘るケースであったように、選択された手順は技術移管を促進し、さまざまな宇宙大国との広範囲に亘る共同計画に参画するものであった。

1988年にソ連のロケットに搭載して打上げられた IRS 1A は、高度 900 km の太陽同期軌道を占めた。

軌道周期は 22 日で、降交点通過は 10:25 にされた。IRS 1A は、4 つの分光波長域でデータを収集する機器である LISS (Linear Imaging Self Scanning、リニア撮像自己走査) 1 と LISS 2 を装備していた。同一の特性を有する後継衛星 IRS 1B は、1991 年に打上げられた。

LISS 2 を搭載した IRS P2 衛星は、1994 年にインドの PSLV ランチャによって軌道に投入され、高度 817 km の太陽同期軌道に降交点通過 10:40 頃、軌道周期 24 日で占位した。

IRS 1C はロシアの打上げビークルによって 1995 年 12 月に打上げられ、民間のリモセンをさらに後にはより高い分解能とし、SPOT 衛星 1 号機からの重要な寄与と類似の寄与をほぼ 10 年間もたらした。

これは PAN センサによって可能になったもので、PAN センサはパシクロ波長帯 (0.50 ~ 0.75 μm) において地上分解能約 5 m をもたらした。

他のより低分解能のセンサ LISS 3 および WiFS (Wide Field Sensor、広覆域センサ) も計測機器ペイロードの一部を構成していた。

IRS のデータはインドの Shadnagar ステーションによって受信されているが、世界中のステーションでも受信されている (図 9.2.9)。

IRS のデータは、既に Landsat のデータの商業頒布に責任を負っている Space Imaging-Eosat を通じて商業化される。

同様の仕様を持つ 2 番目の衛星 IRS 1D は、1997 年 9 月 29 日に打上げられた(図 9.30)。

インド製の PSLV ビークルに載せて 1996 年に打上げられ高度 820 km の太陽同期軌道に投入された IRS P3 は、海水中の葉緑素密度研究、植生指数、クラウド・カバー調査および地質地図作成を含む広範囲な環境ミッションを追求するものである。

センサ搭載の衛星は、空間分解能よりも波長分解能を高く設計されている。

1.5 ~ 1.7 μ m バンドのセンサを追加し、計測項目に 580 ~ 2520 m の分解能をもたらす 18-チャンネル MOS (Modular Opto-electronic Scanner、モジュール化電子光学スキャナ) を含めてもいるが、IRS P3 は IRS 1C のように WiFS を採用している。

このシリーズの次の衛星 IRS P4 は、9 つの分光波長域をカバーする OCM (Ocean Colour Monitor、海洋色モニタ) センサを搭載し、1999 年 5 月 25 日に打上げられた。

光学画像に関する分野では、インドのリモセン・プログラムは今や、様々な宇宙大国によって追及されている政府プログラムの中でも最も野心的なものとして浮上しつつある。現在、3 機以上の衛星打上げが予定されており、1 機は主に海洋学のためのものである。IRS P5 と IRS P6 では補完ミッションを追求することになる。農業用途に割当てられた IRS P6 は、(空間)分解能 10 m のマルチスペクトル「植生」センサを搭載予定。IRS P5 は地図作成目的に使われ、2.5 m より良い分解能を持つ予定。高分解能 1 m 程度を備えると理解されている衛星、カルトースットの 2003 年前後の打上げも計画されている。

図 9.30. IRS 1D に搭載された PAN センサで取得された画像。

この画像ではインドのムンバイの町区の一部が示されている。

インド NRSA の提供。

2 つの個別システムを横並びで運用することを選択した際にインドが考慮したのは疑いもなく、同国の PSLV ビークル打上げ能力の範疇に保持し、同国の観測プログラムを実施するに当たって完全な自立性をもたらすことであった。

ところが、このアプローチは情報源の数を大幅に増し、覆域を拡大するという利点を付加

した。

国内の要求への適合に加え、インドは急成長すると予測されているアジア市場にサービス提供する道を探している。

魅力的な価格とライバルより勝った分解能により、IRS 1C は民生市場に打って出ること成功した。Space Imaging-Eosat によって民生化の政策を完全に立証した。

将来の衛星が軍事目的にも使われることが考えられなくはない。政策展開はそうした軍事的ユーザが単に顧客と見なされる限りにおいてインドの宇宙プログラムの民事特性と原則的に相性が悪くないかもしれない。

Resurs システム

Resurs システムは 2 つの衛星ファミリー、Resurs F と Resurs O の周りに構築されている。これは地球資源衛星を目的としたものの距離的能力を補完することを提案しているように見える。

Resurs 衛星は今日まで、パッシブ・リモセンに限定されてきた。

このプログラムは、宇宙大国ソ連の全盛期に現れ、現在、劇的に減らされた資金とその帰結であるプログラムの将来的側面に関する不確定性と戦わなければならない状態である。Resurs 製品の民生化も関係する民生構造の応答性の悪い特性や、国際レベルにおいてますます厳しくなる競争のために、Resurs 製品の民生化も極めて難しいことが明らかになっており、十分な代替資金源を確立する見通しが殆ど立たない。

、

図 9.31. KVR 1000 の画像から抽出したもの。

このバグダッド地域の写真は露製 Yantar Kometa 軍事偵察衛星に搭載された KVR カメラで撮られたものである。

バグダッドの市街地がチグリス川の左岸にそれ程ではない詳細度で見ることができる。

此処に示された抽出図は幅 18.6 km、長さ 16 km の地上面積をカバーしている。

KVR 1000 の画像。

Sovinformsputnik によって処理されたもの。

SPOT Image によって頒布されたもの。

Samara の TsSKB(または OKB Koslov)によって製造された Resurs F 衛星は、早期の Vostok 宇宙船にまで溯ることができ、Kosmos 偵察衛星と密接な関係がある(12 章参照)。

どちらも高度 250 ~ 350 km という低い円軌道を描き、運用寿命が短い。

両者の飛行高度は、必要であれば、200 km 以下に下げてもっと良い分解能を得ることができる。

Resurs 衛星の一般的な特性は第 3 世代軍事偵察衛星のそれ(図 12.1 参照)であるが、製品の幾つかは民生目的に、特に地図製作に責任を負っている機関によって使われている。

こうした傾向は、資金の凋落とシステム能力を維持するために民生供給先を見出すことが増々必要になって来た。

Resurs F1 シリーズの最初の稼働衛星は 1986 年に打上げられ、他に多数がこれに続いた。

Resurs F1 衛星は F2 シリーズの標準軌道上滞空期間 1 ヶ月、1 ヶ月半まで延長可能に比べて僅か 2 週間の平均ミッション期間しかない。

F1 に近付けてモデル化されたがより低い高度で運用された Resurs F3 版は、1993 年に 2 ~ 3 ケースに使われた。

これらの衛星はスチル・カメラ(Resurs F1 では Kate 200 および KFA 1000、F2 では MK 4)を装備し、空間分解能 15 m ~ 5 m である; Resurs F3 に搭載されている KFA 3000 カメラは分解能 ~ 2 m をもたらす。

スターセンサ技法と組合せて、これらの衛星で撮られたマルチバンド写真(図 9.31)により地球の特定画像の精密な地理学的位置決定ができる。

露光した写真は回収可能なカプセルに収めて地球に戻される。

Resurs F 宇宙船に搭載されている写真器材の最大の強みは、その非常に高い空間分解能である。

1994 年に予定されていた F1M 拡張版は、結局 1997 年 11 月までデビューしなかった。

さらに改良を加えた F2M バージョンが 1997 年始めに就役するはずだったが、資金難により打上げを延期せざるを得なかった。

1998年2月17日のYantar KometaクラスのKosmos衛星の打上げは、このタイプのシステムの資金調達と民生化における新たな出発を印した。

このKosmosは露の機関Sovinform Sputnikによる共同ベンチャでの4つのミッションの最初のものである。Sovinform Sputnikは露の宇宙製品の民生化に責任を負い、American Aerial Images Inc.は先進デジタル画像の開発専門家集団である。

その目的は世界中の主要な首都と人口50,000人以上の都市の大部分をカバーする「SPIN 2」画像を提供することである。

2つのカメラ、分解能2mを持つKVR 1000と分解能10mのTK 350により、各々160km×40kmの画像と300km×200kmの画像が得られる。

したがって1枚のTK 350の画像は7枚のKVR 1000の画像と同面積をカバーし、このシステムはステレオ視能力も備えている。

Resurs衛星はMeteor 3シリーズと同じプラットフォームを用いている。

Kosmos 1939という名を冠した最初の稼働飛行ユニットは1988年に上げられた。

Resurs 0衛星は軌道高度600～700kmで運用され、多くの点でLandsatシリーズに装備されているものと類似のマルチスペクトル・センサを備えている。

それらは主に沿岸水域の監視、産業汚染源の探知および農業に関するモニタに使われている。

Resurs 0衛星は運用寿命3～5ヶ月を持つ。

1994年11月に上げられたResurs 01 N3はこのシリーズの最初の衛星であった。

Resurs 01 N3の2つのスキャナの内1番目のMSU SKは、可視(0.5～1.1 μ m、分解能約170m)から熱赤外(分解能600m)に及ぶ波長域で動作し、2番目のMSU Eは分解能45mで可視と近赤外をカバーしている。

Resurs 0のデータは露のコンソーシアムSovzondによって商用化されており、Sovzondの提供物には現在の画像とアーカイブされた画像が含まれている。

Kirunaにあるスウェーデンの局 — SPOT画像も受信している — は幾らかのResurs 0のデータを受信する器材を備えており、欧州の企業Eurimageも商業的に関心が持たれるデータの収集を保有している。

1998年6月10日に Resurs 01 N4 が軌道に投入され、2 ～ 3年後には Resurs 01 N5 がこれに続く予定である。

これらの衛星は多数の新センサ群、あるものはベルギー、独および伊からのもの、を採用しているが、本質的には未だマルチミッション・プラットフォームである。

Samara の TsSKB が開発した新世代 Resurs DK ファミリの1号機は、2003年に打上げ予定である。

しかし、このプログラムは1996年に露の宇宙庁によって優先的地位を与えられたにも拘らず長期に亘り資金が不足状態のままである。一部は宇宙予算全体が非常に少ない結果によるが、利用できる少ない資金が今では長期間に亘り国際宇宙ステーション計画によって殆ど総て食われているからでもある。

かなり野心的であった初期の計画は、199年には縮小していく予算に合わせて幾らか範囲を狭めたが、— 今や技術的仕様が最終的なものであることが保証されているにも拘らず — 資金が相変わらず問題となっている。

したがって同じ年の後半に、この計画はさらに単純化され、同時に露宇宙庁の長官はこの計画が民生要求と軍事要求の双方に対して優先的な地位を占めることを通告した。

重量を7トンとしたこの衛星は、高度400 ～ 600 kmから運用され、就役寿命を3年に延長している。

パンクロ撮像モードにおいて、分解能1 mがもたらされると想定されており、露政府によって現在設定されているこの最小値の他に、分解能2 ～ 3 mのマルチスペクトル・モードと分解能6 ～ 8 mの近赤外波長域を備える。

ADEOS

日本の ADEOS 1 (Advanced Earth Observation Satellite) は1996年8月11日に打上げられたが、衛星との通信が1997年6月30日に途切れ、データ収集ミッションの20%しか完了しなかった。

この故障は原因がさぐられ、太陽電池パドルの構造的損傷とされた。

ADEOS 1 は高度 797 km の太陽同期軌道に投入され、降交点通過が 10:30、軌道周期が 41 日である。

ADEOS 1 は多数の様々な計器ペイロードを積んでいる。

AVNIR(Advanced Visible Near Infrared Radiometer、先進型可視近赤外放射計)は可視(0.42 ~ 0.50 μm , 0.52 ~ 0.60 μm , 0.61 ~ 0.69 μm)と近赤外(0.76 ~ 0.89 μm)の波長域では分解能 16 m で、パンクロ波長帯(0.52 ~ 0.69 μm)では分解能 8 m で幅 80 km の帯状観測幅をカバーしている。

OCTS(Ocean Colour and Temperature Scanner、海洋色・温度スキャナ)はもっと粗い空間分解能(700 m)とより大きな(1400 km)帯状観測幅をもたらすが、可視域(0.402 μm -0.422 μm , 0.433 μm -0.453 μm , 0.479 μm -0.500 μm , 0.511 μm -0.529 μm , 0.660 μm -0.680 μm)、近赤外域(0.745 μm -0.785 μm , 0.845 μm -0.885 μm)、短波長赤外域(3.55 μm -3.88 μm)、および熱赤外域(8.25 μm -8.80 μm , 10.3 μm -11.4 μm , 11.4 μm -12.7 μm)での分光分解能はもっと細かい。

OCTS(Ocean Colour and Temperature Scanner、海洋色・温度スキャナ)はもっと粗い空間分解能(700 m)とより大きな(1400 km)帯状観測幅をもたらすが、可視域(0.402 μm -0.422 μm , 0.433 μm -0.453 μm , 0.479 μm -0.500 μm , 0.511 μm -0.529 μm , 0.660 μm -0.680 μm)、近赤外域(0.745 μm -0.785 μm , 0.845 μm -0.885 μm)、短波長赤外域(3.55 μm -3.88 μm)、および熱赤外域(8.25 μm -8.80 μm , 10.3 μm -11.4 μm , 11.4 μm -12.7 μm)での分光分解能はもっと細かい。

これらの波長帯の数は特に海水に含まれている物質の研究に良く適合しており、さらに特定すれば葉緑素分布の研究に適している。

OCTS の計測値は、回転スキャナを用いればさらに多くのデータが取得され、生じた斜視角により太陽光線の大洋表面からの鏡面反射の大部分を除去することができた。

NASA は 2 つの計測器材を提供した: Seasat モデルから派生し NROSS(Navy Remote Ocean Sensing System、米海軍リモート海洋検知システム)計画の一部として米海軍向けに改良された散乱計 NSCAT(NROSS は 1988 年にキャンセルされた); および TOMS(Total Ozone Mapping Scatterometer、総合オゾン・マッピング散乱計)

CNES が供給した POLDER (POLarisation/Directionality of Earth Reflectance、地球反射の偏光/指向性) センサは 1440 km×1920 km の領域に亘りデータを収集した。これは指定された領域を連続する通過において異なる角度から観測できることを意味した。

計測は可視と近赤外の自然光と偏光光について 8 つの波長帯において実施された。

このように収集されたデータは、地球および大気によって反射される太陽放射の指向特性をより良く理解するのに寄与するだろう。

このシリーズの 2 番目の衛星 ADEOS 2 は、2002 年に打上げ予定で、その前身と同じような軌道で運用される予定。

ADEOS 2 は NASDA が開発したセンサを搭載する予定。その一つは AMSR (Advanced Microwave Radiometer、先進型マイクロ波放射計) になる予定。

図 9.32. ADEOS 1 の AVNIR で取得されたマルチスペクトル画像。

この画像は図 9.39 に出てくるのと同じ地域 (日本の岩手県の部分) を示している。(c) NASDA

Seastar

Orbimage 社の OrbView 2 または Seastar と呼ばれる衛星は 1997 年 8 月に打上げられた。

OrbView 2 は 402 ~ 885 nm の波長域をカバーする 8 チャンネル・センサ SeaWiFS を装備している。

収集されたデータは、海洋および陸地内の湖沼における葉緑素、humic 物質および沈殿物のレベルと大気エアロゾル密度を決定するのに使われる。大気エアロゾル密度の情報は信号補正決定の基礎をもたらす。

OrbView 2 の画像は陸地植生もカバーしている。

OrbView 2 の 2800 km の刈り幅は、地球表面の日毎の全域カバーに充分で、衛星からのカラー画像が連続的にリアル・タイムでダウンリンクされており、HRPT 地上局で取得することができる。

UoSat

小型衛星 UoSat シリーズは、1985 年に Surrey 大学によって研究活動から産業開発および商業開発への技術移管をサポートするために創設された企業である SSTL (Surrey Satellite Technology Ltd.) によって設計・製造されたものである。

UoSat シリーズは衛星の小型化を試験するためにも使われている。

これら多数のミニ衛星は、空間分解能が低い場合が多く、例としては韓国との共同プロジェクト Kitsat (1992 年) やポルトガルとの連携 Posat (1993 年) になるが、様々のリモセン機器を備えている。

このシリーズで最も強力な衛星は 325 kg の UoSat 12 で、シンガポール大学との協働ベンチャで、1999 年 4 月 21 日に Baikonur 基地から打上げられた。

UoSat 12 は分解能 31 m の 4-バンド・マルチスペクトル・センサと分解能 10 m のパングロ・センサを搭載している。

生成される画像は各々地上面積で 33 km×33 km と 10 km×10 km の領域をカバーしている。

CBERS, ZY2

CBERS (China Brazil Earth Resource Satellite、中国・ブラジル地球資源衛星) プログラムは、Landsat のカテゴリの衛星 2 機を開発する際の、中国とブラジルによる創造的協力の素晴らしい例である。

1988 年に承認され、このプログラムは中国に初期の衛星の開発、製造および打上げのための外部資金をもたらした。

このプログラムはまた、中国に設計期間 2 年の民生衛星への高速ルートにもなった。— FSW カプセルで許された僅かな観察期間に比べてはるかに厚遇である。

ブラジルにとってこの契約は、ブラジルのハイテク製品を中国市場に紹介することを目的とした国境政策の一環であり、1978 年以來のブラジルの宇宙計画において高い優先順位が置かれている衛星画像の協力リンクを拡張する手段でもあった。

このプログラムは 1993 年までに稼働させるはずであったが、ブラジルの出資遅れで実際に CBERS 1 が軌道に載ったのは 1999 年 10 月になってからであった。

後続の衛星 1 機がブラジルで実施されているのと同様、統合化を図って打上げられる予定

で、さらに 2 機のユニット CBERS 3 および CBERS 4 について製造の議論が継続されている。

CBERS シリーズはブラジルの能力には似つかわしくなく、マルチ・センサ・ペイロードを積み、高い再帰頻度を持ちつつ全地球に亘る覆域を有している。

WFI (Wide Field Imager、広視野イメージャ)は、地球の概況を 5 日ごとに空間分解能 260 m でもたらし、同時に限定的なステレオ視能力を持つ高分解能 CCD カメラが 5 つの波長域において分解能 20 m の画像を提供できるものである。

WFI によって広視野で検知された諸現象を、3 日以下の遅延時間を伴うものの、CCD によってズーム・アップすることができる。

最後になったが、IRMSS (Infra-Red Multi-Spectral Scanner、赤外線マルチスペクトル・スキャナ)が 4 つの波長帯で動作し、分解能 80 m の観測幅 120 km を撮像している。

最後の 2 つのセンサは、26 日周期で全地球をカバーしている。

商業化政策が採るであろう形態が未だ、未決定のように見えるだろうが、

しかし、高分解能センサに関して西洋企業に対して採られた手法から判断すると、分解能の向上が新衛星の特徴になるように見える。

将来の CBERS とは別に、中国は ZY 2 として知られる別の計画も追究している。

ZY 2 においては商業化には優先順位が置かれておらず、2 国が各々の領分を開発する必要があることを表明している。

Ikonos

一連の失敗 — Early Bird, Lewis および Ikonos 衛星 1 号機 — と意志決定が闇の中にあって進展しなかった時期の後に、1999 年 9 月 24 日の Space Imaging による Ikonos 2 の打上げ成功により、非常に高分解能の商業リモセンが熱心に進められるようになった(図 9.33)。

Ikonos は以下の 2 つの項目で重要な新たな出発を印した: 提供される分解能と私的資金への依存性である。

米最大の宇宙企業 Lockheed Martin が、1991 年には商業リモセン・システムに関する計画を作成していた。そして 1993 年 6 月に分解能 1 m の画像をカバーするライセンスを申請した。

この要請は次の 4 月に、1994 年 3 月 23 日の大統領指示に従い米国務省によって承認された。

これは 1994 年 12 月に Lockheed Martin, Raytheon の E Systems および三菱商事による Space Imaging の創立につながった。

Eosat が保有していた Hughes の株式の Lockheed Martin による買取りに伴い、新たな関係会社と共に Space Imaging Eosat となったこの会社は、終始一貫した能力式の取得を継続した。

現在の見積もりが示唆するところでは、Space Imaging 事業部(衛星 2 基, ランチャ 2 式, 1 次局 1 ヶ所と 2 次局 2 ヶ所およびイメージングのハードとソフト)の全体経費は一年の収入とほぼ等価な 5 億ドル程度に上るかもしれない。

この会社の戦略は、三菱商事(によって)認められたもののような地域のフランチャイズを助成する一方で、同社の技術的優位性と財政的強みをフルに利用するというものらしい。

(訳注 3.)

高度 681 km の太陽同期円軌道からの運用では、衛星は天底での 0.82 m から天底の何れかの側に 26° で 1 m、45° で 1.12 m まで変化する分解能のパンクロ・モード(0.45 ~ 0.90 μ m)での画像を提供する。

Landsat が利用している波長帯: 0.45 ~ 0.52 μ m, 0.52 ~ 0.60 μ m, 0.63 ~ 0.69 μ m, 0.76 ~ 0.90 μ m、においても 3.2 ないし 8 m の分解能のマルチスペクトル画像も提供する。帯状観測幅は 13 km に限定されている。

衛星を 1 機だけ使った時の回帰日数は、パンクロ・モードでの分解能 1 m とマルチスペクトル・モードでの分解能 4 m に対しては 3.9 日; 分解能 0.82 m では回帰日数の値は 11 日となる。

図 9.33. Ikonos-2A 衛星で取得された初画像。

この m-レンジ分解能の画像にはワシントンの町並みが示されている；ワシントン・モニュメントと Ellipse が左側に認められ、右側には国立米国歴史博物館と商務省の建物群が見られる。

(C) Space Imaging。

対となっている衛星が利用可能な場合は、再帰周期 3.2 日の能力が達成され、緯度 51° にある地域では 1 日にもなる。

最後になったが、この衛星は通過する 2 ~ 3 分前までに最終的なプログラミングが可能なので、非常に柔軟なデータ収集が提供できる。

Ikonos のデータはオクラホマ州(米)にある Norman Station によって世界中にある多数の局：Shadnagar(インド)、Dubai(アラブ首長国連邦)、Neustrelitz(ドイツ)および Chung-Li(台湾)、に転送される

ただし分解能 1 m の画像の一般頒布に関しては、国際的な競合者から入手できるものより高分解能であったイスラエル地域の画像の頒布を、1996 年に米連邦議会が投票で法律違反とした時に制限が設けられた。

EROS

露の打上げビークル Start 1 によるイスラエルの衛星 EROS A1 の 2000 年 12 月の打上げは、分解能 1 m の画像に対する市場における新たなプレーヤの到来を知らせるものであった。この 250 kg の衛星は高度 480 km の円軌道を辿り、パナクロ・モードで 1.8 m、オーバサンプリング技法(図 9.34)を用いた場合は分解能 0.8 m をもたらす。

これは、少なくとも 2 つの EROS A 衛星からなるコンステレーションの最初の要素となり、2 番目の要素は 2002 年の打上げが予定されている。その後の 5 年間に渡って 6 機の EROS B 衛星が打上げられる予定である。

システムに敏捷性が与えられると、単独の衛星では 1.8 日の平均回帰日数となり、2 機の衛星ではこれが 1.1 日に短縮され、衛星 6 基によれば全地球上のあらゆる点が 1 日に 1 回以上(の回帰周期)でカバーされ、衛星 8 機では 1 日に 2 回以上の回帰周期が可能になろう。

これは民間のプログラムではあるが、イスラエルは軍事偵察分野の取得経験を適用している。

実際、目的の一つは軍事衛星 Ofteq の開発への幾らかの財政的見返りを得ることである。市場展開に責任を負う企業は ImageSat で、本社は Cyprus にあるが、多くは Tel Aviv が運営している。

ImageSat はイスラエルの企業 IAI と ELOP、および米の企業 Core Software Technology の共同ベンチャである。

その市場展開政策は、SOP (Satellite Operating Partnership、衛星事業提携) として知られる特別に交わされた契約の枠組みの中で政府機関に画像を販売することを望んでいる。各技術仕様は、都市計画および石油とガスの産業開発を含むセキュリティ需要のような民間(需要)に適合するよう設計されている。

宇宙からのデータで航空写真製品を補完することが意図されている。

このことが、市場要求がそれを正当化すれば、EROS A1 より好ましいとして実際に打上げられるであろう EROS B に計画されている分解能 50 cm の理由説明になる。

EROS のデータは 3 つの主要チャンネル: AAD (Acquisition, Archiving and Distribution、取得、書庫化および頒布)、PAS (Priority Acquisition Service、優先順位取得サービス)、および SOP (Satellite Operating Partnership、衛星事業提携)、を通じて取得することができる。

いわゆる AAD システムは現在、データのダウンリンク、保存および転送をすることができる中継局 13 ヶ所をベースにしている。

これらの中継局は南ア、アルゼンチン、韓国、伊、日本、露、シンガポール、スウェーデン、台湾、米、ノルウェーおよびカナダに設置されている。

第 2 の選択肢は、既存の SOP の範囲内でどの顧客でも実施することが可能である。

優先順位取得サービスの提携者は、衛星の任務割当における優先順位を有している。

提携者たちが地上管制局に画像のリクエストを提出すると、彼等のリクエストが AAD 提携者たちによって提出されたリクエストの中で第一に設定される。

PAS 提携者たちのリクエストは次に利用可能な衛星で取得する画像のリストのトップに行く。

地理学的に隣接している PAS 提携者二者の間の競合は「先に来たものを先に提供する」ことをベースに調停され、最もタイムリに応答できた場合には、その画像が利用できるまでの納期は 48 時間となる。

一番最初の提携形態は 3 番目のもので、その場合、顧客は地上受信局から半径 2000 km の範囲の上空にいる衛星を割当てられ、その衛星で作成される画像に対する排他的権利を保有することができる。

アップリンクとダウンリンク両能力を持つこの地上局は SOP プログラムの一環として ImageSat から提供されている。

これにより顧客は、当該衛星が関係する覆域ゾーンに飛来して来るやいなや、その衛星が見る角度を制御することができる。

するとその衛星は要求された画像を排他的に SOP 顧客に対してダウンリンクする。

ImageSat は、決められたゾーンにおいて 1ヶ国だけが 1つの SOP を持つことができるので、同一のゾーンで指令が競合を起こす可能性は無いと主張している。

幾つかの国が別の衛星を介して同一ゾーンにアクセスするのは、衛星数が増えればできるだろう。

イスラエル国防省は ImageSat International に対して、EROS 1 民間衛星が撮影したイスラエル領土の総ての写真に対する排他的権利に対して約 1500 万ドル支払っていると考えられている。

この排他的受信権は 2001 年 1 月 3 日に調印され、イスラエル領土のみならず半径 2000 km 内の地域にも及んでいる。

この領域は西はリビア、南はスーダン、東にはオマン湾、北は CIS (Commonwealth of Independent States、独立国家共同体) 諸国に及んでいる。

イラク、イランおよびシリアの全土がこの地域に含まれており、リビアの殆ど全土、スーダンと旧ソ連のイスラム共和国群の大部分も含まれる。

このように、EROS プログラムの成功は、政府諸機関と調達された多数の SOP によって示された関心に負っている。

図 9.34. EROS A1 で取得した Izmir の画像

(c) Image Sat

(訳注 3.) 買収により Space Imaging は現在は GeoEye のブランドに変わっている。

09.7 合成開口レーダ搭載地球資源観測システム(SAR-equipped Earth resource systems)

Seasat シーサット

米のシーサット衛星1号(Seasat1)は、1978年6月26日に打上げられ、合成開口レーダを用いて衛星から地表のリモセンを行った初の人工衛星となった。同年の10月1日に機能を停止するまでにシーサット1号は北米、西欧、北太平洋地域、極地域及び北大西洋地域における1億2500平方kmの範囲からの画像を送信していた。シーサットは他の多くのプロジェクトに道を開いたのである。

シーサット搭載の合成開口レーダ(SAR)は単一の右側を指向するレーダアンテナを装備し、殆ど固定された諸元で、使用波長(L帯; 23cm)、入射角(オフナディア角20度)、HH偏極化、を可変にするという構想は無かった。この欠点にもかかわらず、得られた最も重要な科学的な成果は特に海洋の膨張方向、海中波動の兆候、地形学的な傾斜、地表の表面粗さ及び地質学的構造の研究に関連するSAR画像を示したことであった。

シーサットは他にも、10cmの垂直精度で波高を計測するレーダ高度計、海洋風の速度と方向を計測するレーダ散乱計(図9.35)をはじめとする、多くの機器も搭載していた。搭載機器はこの他に可視・赤外用の走査型放射計及びニンバス(Nimbus)7のものに類似の走査型多チャンネルマイクロ波放射計(SMMR)という2種類のパッシブセンサも特筆されるべきものである。

Almaz (ダイヤモンド)

アルマツ衛星シリーズで、ソ連の地球観測プログラムは新しい段階に入った。アルマツ・プラットフォームは、同名の軍事基地にちなんで付けられたのだが(その基地はその後サリュート・プログラムに戻された)、現NPOのマチノストロエンヤ(Machinostroienya)であるOKB Tchelomeiによって創設された。

最初の衛星は1981年に運用開始できるように準備された、しかしその打上げは首席エンジニアのV. N. Tchelomeiと特に折合いの悪かった当時の国防大臣D. Ustinovによって拒否された。そのプログラムは両方の人物が死去する1984年までは日の目を見ることは無かった。KOSMOS1870という名称のプロトタイプが1987年7月22日に打上げられ2年間のテスト・プログラムが実行された。アルマツ1号は初の実用衛星であったが、1991年3月30日にバイコヌール(Baikonur)から打上げられた。設計寿命は2~3年であったが、

実際には 1992 年 10 月には作動停止した。重量 18 トン、両端長 15m に及ぶこの巨大衛星は傾斜角 73 度、軌道高度 300km で作動した。軍事衛星ではよく見られるが衛星からクローズアップ画像を得られるように軌道が調整可能であった。全推進用燃料搭載質量 1350kg に対して 1 日わずか消費量 100 g であり、十分な備蓄が利用可能でこの余裕推進力は前記の基本的軌道変更にも用いられた。

アルマッツ 1 号は X バンドで作動し左右両方を指向する二つのアンテナを有する HH 偏波の SAR を搭載していた。その SAR の（電波の）入射角はナディアの片側で 30 度から 60 度の範囲内で調節できるものであった。分解能約 15m であった。アルマッツのデータはアメリカン・スペース・コマース社、アルマッツ社やその他ヒューズ STX のような配布会社によって商業利用されている。2 台の SAR を含んでいずれは実現されるであろうと考えられるさらに多くの搭載機器を積んだアルマッツ 1 号 b 型の打上げられるかどうかは米露の（共同出資）会社であるソコール・アルマッツ・レーダ社が必要な資金を安定に管理するかどうかにかかっている。

（環境衛星プログラム）*The ERS, Envisat Programme*

欧州の宇宙開発機構のヨーロッパ・リモート・センシング・サテライト (ERS) プログラムは当該開発機構の 12 人のメンバ及びカナダによって 1982 年に推進が宣言された。レーダによるセンシング選定を決定したことは多くの ESA のメンバに気に入られている様子で、主に気象条件特に雲に覆われた状態で有利ということで決定された。西独は特にこの分野が産業的に得意であるという観点から、この決定には重要な役割を演じた。

ERS1 は高度 785 km で太陽同期軌道を取る。1993 年 12 月 20 日までは 35 日軌道周期で飛翔したがその後 3 日周期に切替えられた、というのは北極の冬季間氷の覆域を研究するのに回帰日数がより適していたからである。回帰周期はその後、測地線の研究用として 168 日に延長され、それが 2000 年 3 月 10 日の衛星の運用寿命まで継続された。これらの周期変更は高度と傾斜角をわずかに変更することで得られた効果であった。

搭載観測機器は先進技術を用いた広範囲のセンサにおよんだ。アクティブ・マイクロ波機器 (AMI) には、VV 偏波の C バンド (5.3GHz) で作動する SAR が含まれていた。SAR は画像モードで作動することができるが、その画像は地球表面を 100km 幅の帯でカバーし、その中心軸は衛星軌道の側面に対して fig. 9.9a に示すように約 300 km に位置する。第 2 の動作モードでは視野 5 km X 5km で断続的な画像を 200~300 km 毎に準備する。両モードは

お互い排他的である。AMI にはレーダ散乱計も搭載されており、このセンサは衛星の軌道の右側に、孤立した 250 km から 750 km の間の 500 km にわたるスワース幅を取って計測することにより、海面の風向風速を決定するのに用いられた。計測はレーダ直下から派生する 3 軸の関連データを取得する。1 軸は衛星軌道に直交、他の 2 軸は衛星の地上軌道と最初の軸がなす角を前方と後方で 2 分したものである (fig9.11 参照)。海面の与えられた点に対応して読込まれた後方散乱データはこのようにして短時間の間に前方ビーム→直交ビーム→後方ビームと連続的に取得される。

ERS1 はまた精度 10 cm で垂直距離を計測できる Ku バンド (13.9 GHz) レーダ高度計も搭載している。この高度計は海面の流動面と氷塊の境界、極地方の氷結高度あるいは海洋膨張の有義高を決定・活用することができる。ERS1 搭載のその他のペイロードは衛星軌道方向に沿ったスキヤニング・ラジオメータ (ATSR) で、赤外域で作動する高精度パッシブ・マイクロウェーブ装置である。ERS1 搭載の最後の二つの機器は距離と距離変化計測 (PRARE) を精密に計測する装置、(この装置は衛星打上げ時から正しく作動しなかった)、及びレーザ反射板である。SAR によって搭載した記録装置の容量をはるかに超えたデータが収集されるので、地上の受信局にリアルタイムで 1 秒当り 100 万ビット以上の速度で送信された。

ERS 衛星はその対象分野が必然的に多くの学問分野にかかわっている。海面温度に関して赤外放射計によって提供される情報及び極地方の氷覆の進展に関してレーダ高度計 (アイスモード) によって提供される情報は環境の研究やグローバルな変化の研究に多大に関連している。氷結地域の研究で得られる傑出した成果はキルナ (Kiruna)、トロンソ (Tromso)、フェアバンク (Fairbanks)、ヒギンズ (Higgins)、昭和 (Syowo)、マクマード (Mc.Murdo) における受信設備の地理的な位置から明らかである (fig9.36 参照)。レーダ高度計の大洋モード (Ocean Mode) ではかなり多くの海洋の地形 (Topography) 情報が得られその情報を基に海流の強さ—ある気象変動に対する海流に応動した変化—を導出することができる。

AMI によって供給される SAR 画像は各軌道で 10 分それも受信地点の視野内にいる時にしか動作できないにもかかわらず、環境知見を得る上で最も重要な ERS の貢献となっているであろう。これらの画像は生物学、地質学、水理学、地勢学の各分野全域に対して広い範囲で有効な素材を提供している (fig. 9.37 参照)。続いて ERS2 衛星は 1995 年 4 月 21 日に打上げられ、ERS に搭載されたと同様の AMI 及びレーダ高度計の他に、性能改善された ATSR、改良型 PRARE 及び、グローバル・オゾンモニタ実験用の新たな機器が搭載された。衛星 2

機は 1995 年 8 月 16 日から 1996 年 5 月中旬までシリーズに運用された。2002 年以来そのデータ (fig. 9.38 参照) はエンビサット 1 (ENVISAT1) (第 7 章 169 ページ参照 (E 版)) によって得られた。

JERS (ふよう 1)

1987 年の MOS1, 1992 年の JERS レーダ衛星、最新では 1996 年の ADEOS という日本による打上げは衛星観測における強力で首尾一貫した狙いを示している。JERS1 に搭載された L-バンド SAR という形態で分解能 18m を実現する民生レーダの開発は、この周波数バンドでは初のものである。OPS センサは同じ分解能 18m でステレオ視の光学データを供給するがこれらの様相はランドサットと大部分同じである。しかしながら JERS データの価格付けに関する日本の迷いは日本の宇宙政策の矛盾を露呈している。搭載機器を担当する通産省 (総務省) は価格を低く設定することを望んだのに対しプラットフォームを担当する NASDA は、SPOT のやり方に習ってより商業ベースに沿う立場を取った。民生分野における反対派の政策に抗する (すなわち、国内産業に国際的な競合で優勢な展開を図るための政策構想) ための日本の義務は、米との特別な関係から生じるのであるが、疑いもなく低価格の採用に貢献した。他の観点は良き世界市民と見られることと気前の良い政策を通じて地域の影響力を互角に保持することに関連している。最後に、陸域より海域の観測に重点が置かれていることはこのプログラムの科学的・実験的な本質を強調している一どんな場合でもこの種の最初の衛星を超えて得られるものではないが。

JERS1 (Japanese Earth Resources Satellite), は 1982 年 2 月に打上げられ、高度 568km の太陽同期軌道からデータ収集を行った。この比較的低軌道により正規の 44 日周期を維持するために週間ごとの軌道修正要求を達成している。JERS1 の作動は 1998 年秋に終了した。

JERS は可視・近赤外のデータを収集する光学センサ (OPS) 及び SAR (fig. 9.39 参照) を搭載している。OPS は 7 種のスペクトル帯で動作する、それらは B1 (0.52 μm ~ 0.60 μm), B2 (0.63 μm ~ 0.69 μm), B3 及び B4 (0.76 μm ~ 0.86 μm), B5 (1.60 μm ~ 1.71 μm), B6 (2.01 μm ~ 2.12 μm), B7 (2.13 μm ~ 2.25 μm), B8 (2.27 μm ~ 2.40 μm)。ステレオ視を行うために B4 帯が前方 15.3 度に対して B3 帯はナディアを見るよう設定されている。全スペクトル帯とも分解能 18m である。撮像される情景は衛星進行方向に対して分解能 24.2m、直交方向に対して 18.3m で 75km X 75km の範囲の覆域を得ている。JERS が 1998 年秋の設計寿命に至った時、ADEOS1 ミッションは 1 年を少し超えたところであまりにも短命だったの

で、日本の地球観測機能は一時的に停止するに至った。そして 2002 年打上げ予定の ADEOS2 は高分解能センサを搭載しないので、2004 年に打上げ予定の ALOS 衛星(分解能 10m の SAR, 2.5m の PAN) は、日本が民生及び軍事偵察両用の高分解能を得るという観点を重要視しつつある時点で、より大きな優先順位となる。

このような関連を意図して、新政策綱領が北朝鮮のテポドンミサイルが発射された 1998 年 8 月創設された政策によって日本に対する戦略的な優先順位を監視する地域を作成することが、そのプログラムをより高度の装備に移行することを可能ならしめた。しかしながら、1999 年に認可された捜索衛星プログラムは現存する宇宙開発能力を形成している民間の思想とわずかしか共通点のない防衛用途に刺激されながら、大なり小なり複数の民間のプログラムに展開されるだろう。安全保障における米と日本の特別な関係すなわち特別な防衛協定で具体化された関係は国家的産物を選択する際に米のシステムを適宜に採用するという結果となるだろう。

Okean and Sich

Okean 0 衛星は高度 650km の円軌道で動作し、ウクライナの工場である NPO Yuzhnoye で建造された。最初の実用衛星 Okean 01 は 1988 年に打上げられた。氷結地域の研究及び海洋学のために設計されたこれらの衛星は X バンドの SAR と幾種類かの走査型放射計を搭載していた。1 日にその衛星が 2 度同じ地点を通過する軌道が選択された。一旦メテオール(Meteor)の最初の基地で受信された Okean のデータは処理され、静止衛星 Ekran 経由で関係船舶にリレーされる。

ソ連邦(USSR)とウクライナ(Ukrainian)の独立に対する合意の分裂の後に建設された衛星のシリーズの初号機は Sich 1 で 1995 年に打上げられた。この衛星は露とウクライナの相互所有となったが、引続いて得られるデータは両国のために別々に示されるのが適している。露の Okean 0 衛星は 1999 年 7 月 17 日に打上げられ、地球観測及び大気研究用に追加されるセンサに適合している。

ウクライナの Sich 2 衛星は現在計画段階である。どうなるかまだはっきりしない次の Sich 3 の開発予算と異なり、SAR が搭載されることが期待されている。

レーダサット (RADARSAT)

レーダサットプログラムは長い歴史を持っていて、最初の選択はカナダの物理的な位置

と性格に大きく左右された。レーダリモセンに対するカナダの付託は多くの地理的束縛に起因したものであった。すなわち、広大で時として手が出せないような地域、天然資源開発への関心、分厚い雲、氷の研究に指名された優先順位等である。レーダはこれらのニーズに適合するもっとも効果的な手段と同時に国家的産物に対して幾分排他的な開口を見出すことにかかわる高度な技術—世界中の宇宙部門の管理者お気に入りなのだが—における特別な能力を育成する機会を提供した (fig. 9. 40 参照)。

レーダサットに設定された目標は、1960年時点にさかのぼった実証プロジェクトである PEXSAT という文脈に見出される事項で最初に言及されたことなのだが、大変野心的でそのことが疑いもなくそのプロジェクトがはるかに遅れかつ予算をはるかに超えてしまったという理由なのである。しかし、そうはいつでもレーダサットは現存する唯一の民生実用衛星レーダシステムである。このプログラムの主な位置づけの確立はカナダ宇宙庁とレーダサット2の製造元であるマクドネル・デトウイラー社の同意の結果で決まった。

レーダサット1は、1995年11月に打上げられ、高度約800kmの太陽同期の未明から夕闇 (dawn-dusk) 軌道で周回する (fig. 2. 29 参照)。それは SAR ただ一機だけのセンサを搭載したものである。この先進的な装置は H-H ポラリゼーションで C バンドの波長で作動し入射角 20 度から 50 度の変化を利用することが可能で実験目的のためには、10 度から 20 度及び 50 度から 60 度の入射角も可能である。スウオース幅もまた視野方向に応じて変化する。基本的には北極地方の研究支援のために設計された、レーダサット1はその軌道の右側—すなわち北方向—に対して通常は斜視 (oblique viewing) になる。しかし視野方向は南極の観測に適合させる—そしてこの地域の殆ど全てがカバーされるようになるための二つの理由で左側に連続的に変えられる (fig. 9. 11)。このことを実現するために、衛星はその垂直軸周りに2回180度回転する。レーダサットで得られるデータに対するユーザの熱意とこの種の画像に対するカナダの増大する市場占有率はレーダサット2プログラムの進展を異なった方向にはあるが導出している。事実、この進展は公共主導から民間の個人財政へと正規に転換させている。新しい手法を採る予定のレーダサット3もまた主に個人投資の方向へ向かいつつあるとはいえ、協調を基本としている。

分解能 3 m を公約とするレーダサット2の打上げは2003年に予定されている。このプロジェクトは進歩すると確約されたデータ部を買取することをカナダ政府が同意し個人企業が開発費を負担するという革新的な財政上の配分を利用しているのだが、競合と協調のゴールの組合せによって推進されている。しかしながら衛星打上げに対する米による最初の言

質は競合的な脅威であるレーダサットが NASA および個人企業によって開発されている新軽量 SAR 衛星 (Light SAR SAT) を中止に追込むかも知れぬことおよび防衛部門からカナダの新衛星があきらかに実現しようとしている分解能の安全保障について表明されていることに関するものであった。エンビサットと相補的である点を強調した、協調的な同意に基づいて ESA と連携することを調査するいくつかの試みの後に、欧州のリモセン・プラットフォームとレーダサット 2 は米によって商業的に打上げられた。カナダと米は 2 国の国家的利益を保証するためにデータ配布に関する特別条約を締結している。レーダサット 3 の開発に関する MDA とのミッション・フィージビリティ・スタディを遂行するために 2001 年 2 月にカナダ宇宙機構が下した意思決定はしかしレーダサット 2 とは異なる論理指向であった。レーダサット 3 はレーダサット 2 のすぐあとに打上げて二つの衛星を連携させた用途から得られる利点を得ようというのである。このねらいは環境に関する地球規模の理解に貢献すると同時に付加価値部門の共同体によってカナダの商業化能力を強化することである。欧州のプログラム GMES との共働は依然として決定されていて (7 章参照)、これもまた想定されていることである。

09.8 リモセン その行く末 Remote sensing-the way ahead

過去 10 年間にわたって、リモセン・システムの数は急速に成長し、提供機能の範囲はより拡大してきている。このことは拡大ユーザー層を反映したものである。現在、二つの開発動向に分けることができる。第 1 の開発動向は巨大なスケールの大地の形状を調査するためのセンサによって現在実現されているよりももっと強力な分解能を開発することである。この分野における民間活動はその応用製品がほんの最近になって市場の俎上に上ってきて、航空写真に対する深刻なライバルになりつつある極めて高分解能なシステムの到来で沸きだっているかに見える。第 2 の開発動向はこの技術のグローバルな観点及び積上げられたポテンシャルすなわち広大な地表を単一の値で特徴付けを可能にすることを開拓することである。ここでの進歩は時系列を長期化すること、広いレンジのスペクトルバンド及び同時に異なる現象に関するデータを収集することができるさらに優れたセンサによってささえられる。これは以前には夢にも思わなかった地球規模のモデリングの可能性を開くものである。

センサの拡張されたレンジ Widening range of sensors

最も初期のリモートセンサの目的（使命）は光学センサに頼っていた。それらの引続いた歴史は段階的な多様化を踏まえつつ継続されてきたことが特筆される。米と仏は専用処理システムに投資したり、いくつかのケースでは自分のデータ受信局さえ建設する顧客によって期待されるように、サービスの連続性に対する公約を行ったランドサットやスポット衛星プログラムで先行する動きを見せている。と同時にこの種の製品を供給する業者の範囲が拡がり始めている：すなわち、インドは自国の衛星開発を開始し日本は光学的な一加えるにレーダ映像も一能力を有するに至っている。他の路線では協調関係が推進されている。すなわち一例をあげれば CBERS 衛星におけるブラジルと中国による共同開発がある。最後に、UOSAT のように現在市場に登場しつつある小型衛星で多くの国が検出能力が高められるような自身の衛星を得ることが可能になっている。しかしながら標準フォーマットで映像を供給するという要求は進歩しつつあるセンサの設計でも、満足されていない。なんでランドサット 6（軌道に達することができなかったのだが）、ランドサット 7、及び SPOT4, 5 号機がデータ連続性を保つべき前号機のものとは異なっているのかである。

ところで、多くの民間のリモセンに対する要求は成功裡に行われた SIR の飛行や、1999

年までにいくつかの特製モジュールを用いたミール (MIR) 宇宙基地に搭載されるなど、米と露の有人宇宙船プログラムにおける飛行の機会を優先的に利用しつつあった。例えば、Priroda モジュールは X 及び L バンドで作動する側方開口レーダの他に Ikar II ラジオメータのような極めて先進的な多くのセンサを搭載していたのに対し、Sperktr モジュールは低空大気と地表を計測するための全項目に対応する機器を搭載していた。しかし、有人宇宙飛行の使命は革新的な実験と創造的な観測というねらいを持っていたのと、ミールは光学写真画像で豊かな穀物の収穫を実現するというものであったので、地球の系統的で連続的な画像収集には不相当であった。

光学センサ (EOS) に対する SAR というほど意思決定には至ったわけではないが、レーダ・センシングの発展とアルマツ (Almaz)、レーダサット、エルス (ERS)、ジェルス (JERS) 衛星の打上げで、重点化志向の変化が 1990 年に生じたようである。レーダ・センシングは雲を通して見ることができるとは限らず、種々の入射角や偏波 (ポラリゼーション) の違いによって得られる多くの様々な画像を見ることができる。米の Light SAR プロジェクトは多重偏波 (multipolarisation) と 1m ないし 3m に強化された距離分解能を有する L バンドレーダを搭載するように構築される。干渉技術を用いることにより、地表のきわめてわずかな変化も検出することができる。

リモセンは新しいプログラムでもまた推進されつつある。欧州の極軌道観測ミッション (POEM) の要求のもとに、2002 年打上げ予定の METOP (243 ページ参照) と ENVISAT1 という 2 基の衛星が軌道配置されるだろう。予算上の理由で、ENVISAT ミッションは地球観測を目的として単独で極軌道に配置されるであろう。ENVISAT は初期の衛星に搭載されていたものとは異なるが、進化型合成開口レーダ (ASAR)、や進化型のアロング・トラック走査ラジオメータ (ATSR) を搭載して、いくつかの方法で ERS1 を引継ぐだろう。

入力信号を多くのスペクトルバンドに分解するように設計された超広帯域スペクトルセンサを利用する計画もある。そのようなセンサを含む Lewis 衛星に搭載される機器のペイロードは事前には航空機でしかテストされないのだが、ミッションの失敗は遂行されている実験によって防止される。米の NASA における多くのプロジェクトで超広帯域を目玉にしているものは、新ミレニアムプログラムのもとでハイパーイオン (Hyperion) センサをテストする計画が推進されていること及び海軍と空軍が海軍地球地図観測器 (Navy Earth Map Observer: NEMO) と Warfighter1 プロジェクトに鋭意興味を示していることである。豪州もまたこの種センサを搭載する小型のオーストラリア資源情報環境衛星 (Austrian

Resource Information and Environment Satellite: ARIES) を準備中である。

この動きは他の非映像地球観測技術の開発をも発展的に共存せしめている。例えばレーダ高度計は第一義的にはこの惑星の寸法についての現象を解明することに寄与することではあるが、かつてない洗練されたモデルの基礎を築いている。すでに、何回も取得された地表全体をカバーする利用可能な画像があり、目下のリモセンのメインユーザである地図作成に対する要求が制限されるなら市場の飽和は遠くはないであろう。しかし、リモセン画像市場はより高分解能画像の利用性及び農地ライフサイクルによって決まる特定日程における作物調査や洪水・火山噴火のような自然災害監視のための非常事態の要求で拡張し続けている。

向上する高分解能化性能 *Increasingly high resolving power*

高分解能化されひいては空間精度が高められたセンサで、いまや地上対象物の生態的状況認識が可能となってきた。白黒光学写真モード (Panchromatic mode) で SPOT によって開発された 10m 分解能及びインドの IRSIC 衛星から利用可能な 5m 分解能はこの傾向の前兆であり、この種の画像市場の成長は衛星リモセンと従来写真による判定法の差を狭めることを意味する。同時にこの進展は森林や建造地域のような多くの環境における管理目的に用いられる地理的な情報システムのリモセンデータの積み上げを促進する。この一般的な傾向は当初クラークプロジェクトで開発されたセンサーを近頃装備したスペースイメージング (IKNOS, 232~264 ページ (E) 参照)、オーブイメージ : Orbimage (Orbview3) 及びアースウォッチ : Earth Watch (Quick Bird), のような商業衛星に見られるように、1~5m オータの超高分解能が可能で多くの民間衛星の目標性能をさらに高めつつある (図 9.41 参照)。

分解能の民間部門での到達点は軍用の宇宙の性能として過去からの明確な進展を注視している利用可能な状態に接近しているけれども、そのインパクトが何であるかを言うのはまだ早いだろう。というのは、高分解能データに対する民間ユーザからの会合要求が新市場を創造するかもしれないとはいっても、この種の産物の戦略的な含みは心配の種である。周回域に適用すべき特別立法制度は、それらの地域の上空を飛ぶ事前の了解を課すことはできないだろうから、国家に対する潜在的な脅威及び国際的な安全保障も定義に含む。1994 年度の宇宙商業化行為への従事に関し私企業に対して免許授与で米国商務省は効果的に宇宙からの観測の自由に関する議論を再開した。しかしながら、データ配布は依然と

して米の管理下に大きく依存していることを覚えておくべきである。もし他の情報源から得られたものより提案された分解能が高いなら、イスラエルとその他の地域の画像の収集・配布は違法であるという追加条項を 1996 年に米議会が通貨させた事実は、世界全体に一般に配布するという原則は少しの打撃を受けるかもしれない。

地球全域のモデル化における統合 (インテグレーション) *Integration in global modeling*

1980 年代後半以来、並行開発の中で地球観測は、地球の全体の環境に影響を及ぼす仕組みの統合した学際的研究の必要性の認識が高まり、システム・コンセプトに基づいた新次元の様相を益々呈するに至っている。目下、進行中の広域変動プログラムはそのニーズに正確に対応している。しかし、衛星資源はこの種の業務を引受けるには必須ではあるのだが、グローバルな変化や恒久的な広域監視を行う相互作用の考えられる複雑さにとっては決して十分なものではない。このことが NASA をして惑星地球をいざなう深宇宙の探査能力をもたらし基本的な着想である地球科学エンタープライズとして知られる新しいミッションを立上げているゆえんである。

グローバルな環境とその進化は太陽放射とその輝度の変化、銀河エネルギー流及び地上の火山活動のような地球の要素を含む自然の要素の状態によって条件付けられる。生物の地理的・化学サイクルにおける自然の変化に加えて、生態系は企業活動と森林の退化、不毛化した生物域の拡散、土地の肥沃さや海の生産性の変化によって象徴される世界全域の光景に対して恒常化した猛攻撃による増加基調にある侵略的な人類の仲裁をテーマとしている。

環境状態を知る上で有意義な宇宙資源の範囲は広大だが、特筆すべきは恐らく DMSP の SSM/I (マイクロ波イメージ) からのデータと結合した NOAA 衛星データから導出されたもので、そのデータは最近の大気エネルギー交換を述べ説明するためのツールとして、大気の 3 次元熱流モデルを作成する業務の基礎を形成している。他の特に価値の高いデータ源は 1985 年に初検出されたオゾンホールの原因に関する現状を示すのであるが、1991 年に打上げられた UARS 衛星である。オゾンの消耗現象は露の METEOR-35 衛星、先に搭載されたニンバス 7 (NIMBUS7) 及び日本の ADEOS1 によっても研究されているだろう。

海洋観測は大気観測より難題であり進歩はいま一步である。その観測は海面熱分布図 (NOAA 及び ADEOS1: fig. 9.42a 参照) だけではなく、1978 年打上げの NIMBUS 7 に搭載された CZCS のような精密なスペクトル分解能有する特別なセンサによる海水の色の計測にも頼

っている。稼動中のその種センサの数は例えば ADEOS 搭載の OCTS, Seastar 搭載の SeaWiFS, InsatP4 搭載の OCM (fig9.42 参照) のように、1996 年以来急増している。衛星高度計の校正は海岸地帯における孤立した潮汐計測によって実効を上げることができる (Seasat, ERS1 及び 2, TOPEX-Poseidon 及び Jason)。

海氷とその可溶解の状況把握は気象変動を説明する努力に対するキー入力データである。この分野の進歩は海洋と大気の交換すなわちこの両者間の区切りの一種を形成する海氷及び海氷の高いアルベドに起因するエネルギー収支不足の評価を喚起している。大陸の広大な大地の観測は惑星のモデリングに関連する第 3 の調査分野である。そして、本当に衛星観測は大陸域で重要である、そこでは人間活動の影響が特別な重みで感じられる。生物空間の調査で最も広く使われている表示は、正規化差分植生 (Normalized Difference Vegetation: NDVI) であり、それは近赤外と可視域における反射率の値の差を正規化することによって砂漠化のような現象を定量化することが可能になる。このことは炭素周期及び海洋と大気そして大陸と海洋の植生の交換に関する種々の視点の理解を深化させる。NOAA 衛星と SPOT4 に搭載された植生機器はこの分野で特に有意義な貢献を果たしつつある (fig. 9.43 参照)。多くの有力な国際的プログラムがグローバルな現象の共同研究のために提起されている。世界気象研究プログラム (WCRP) は 1980 年にさかのぼり、気象システムの物理的な側面を取扱う、これに対して国際地勢植生空間プログラムは 1986 年に起動され化学と生物学の相互作用の補完的事項を扱う。当初の予算削減のあと引続いたラウンド及び宇宙以外の科学を第 2 順位に追込んでしまった宇宙活動の展望で科学者達の広範な関与という背後事情に対して、NASA はついに地球科学エンタープライズ・プログラムを選定し、そのプログラムは新システム研究開発に対してより大きな優先権を与える新しいやり方を具現するものである。過去・現在・未来のリモセンシステムはそんなわけで環境の研究を強調するグローバルな考え方に立戻ることなのである。この関連で衛星取得データの長期シリーズものの存在は—より最新の商業的なデータ記録媒体に対してより古い部分のそれは自然環境遺産アーカイブと呼ばれる—特別な重要性を帯びている。その遺産的アーカイブを注意深く保管することは最も古いデータのコピーの必要性を伴うので、特に国家機関でその全部はコスト上の理由でいつもできるとは限らない。このことはそのようなデータによって、地球の光景の変化や砂漠の侵食や都市化の研究を行うことができることを思えば確かに残念なことである。

地球科学エンタープライズは創始者を引合いに出すと ‘全地球システム及びグローバル

な環境に関する人類の影響を理解することにささげる’ ということである。そのプログラムは第一義的には地球上の陸域、水域、空域及び生命間の多くの相互作用を分析しモデル化することを模索する。このねらいを追求することで、NASA は広汎な協同体制を確立している。その協同体制とは NOAA 及び USGS のような米国内のパートナー、国際地勢・生態プログラムや国連環境プログラムのような国際協同体あるいは多くの海外の宇宙開発機構である。地球科学エンタープライズは ESA の生きている惑星プログラム (Living Planet Programme) と提携している。NASA はまた第 7 章で示したように直接多くの自身のプログラムを推進している、そして前節で述べたようなランドサット 7 や GOES のような多くの衛星を利用している。

Fig. 9.35 シーサットのマイクロ波散乱計が読取ったデータを基にした海上風の地図による表現

グローバルなレベルの風の現象を解明することはエネルギー収支の研究にとって必須である。この分野における業績は長い間雲の移動の研究に頼ってきたが現在では衛星搭載の散乱計データを基礎にした海上風のマッピングによってバックアップされている。この種研究の最も早いものは 1978 年にシーサットを利用して実施された。—太平洋の海上の風向・風速の画像はシーサット散乱計を用いて得られた。カラーは風速を示し矢印は風向を示す。NASA 画像は JPL によって作成された。

Fig. 9.36 ERS1 データ受信局 2000 年 1 月

Fig. 9.37 Seasat 及び ERS1 SAR で得られた画像

- a) Seasat : 1978 年 8 月 27 日に Seasat SAR (L バンド) によって取得された満潮でのアイギロン (Aiguillon ; 西仏) での入江の画像。黒っぽく示されるより小さな後方散乱部分は入江の外周の均質な土壌の平坦な特性である。後方散乱は水面で最強である。瞬時の海岸線は極めて滑らかで平坦な土壌が水の後方散乱と境界付けられている部分が特に明快に線で描かれている。©NASA

b) ERS1 : 1991 年 11 月 8 日に ERS1SAR (C バンド) によって取得された引潮のアイギロンでの入江の画像。この画像には明らかに表面粗さの方向性に対するコントラストがあらわれている。黒っぽく示されるより弱い後方散乱の部分はアーケイ (Arcay) 岬における入り江と浜辺の外周部の均質な平坦土壌の特性である。より強い後方散乱の部分はさざなみがレーダ・ビームに直行して走行する部分 (Serve Nortraise 地方の北方にある入り江の中央部) か運河の土手がレーダ・ビーム方向に直交する部分に見られる。強い後方散乱領域は画像上では白で示される。A:Aigullion cove;P:Arcay headland; S:Serve Niotraise.

Image ERS1, ©ESA(R), Processed by Geosysstemes

Fig. 9. 38 Envisat1 ASAR センサで得られたマルチスペクトル画像

この画像はウエーデル (Weddel) 海及び南極の半島を示す。

Fig. 9. 39 JERS1 SAR イメージ 1992 年 10 月 16 日に得られた

この画像は fig. 9. 32 で示されているのと同じ地域の部分を示している。©NASA1992

Fig. 9. 40 レーダサット 1 で取得された最初の SAR イメージ

カナダ宇宙庁のご好意による

Fig. 9. 41 民生地球観測システムにおけるセンサの高分解能化の進歩

80m ないしはそれ以下の分解能のセンサのみが提示されている。衛星名は上方に示され、ここで知られるセンサは下方に示される。衛星はクイックバード (Quick Bird)、スピン 2 (Spin2), プリオダ : ミールのモジュール (Prioda:Mir module) 及びレーサーズ (Resurs F) を除いて全て太陽同期軌道である。

Fig. 9. 42 1997 年 1 月 - 6 月の間の ADEOS1 から得られた海岸線を高輝度化して示した平面球体図

a) 海面温度

b) クロロフィル - 集中心

©NASDA 1997

Fig. 9.43 SPOT4 センサで作成された大陸の陸地部分を高輝度化して示した平面球体図
擬似カラーの合成は 1999 年 3 月 1-10 日に収集されたデータで作成された。用いられた 3
バンドは赤（図中青で示す）、近赤外（図中赤で示す）、中赤外（図中緑で示す）である。
北方領域の積雪地帯は紫がかった広大な広がりで見られる。