

衛星を用いたリモートセンシングの現状

Present State of Remote Sensing Using Satellites

向 井 幸 男*

Yukio Mukai

1. はじめに

衛星によるリモートセンシングは1960年代の始めに米国のNASAによる宇宙開発のマーキュリー計画で地球の写真が撮られたことに始まった。これらの写真は宇宙から地球を観測するという新たな発想を人類にもたらし、地球を観測する衛星（ERTS-1後にランドサット1号と改称）がNASAによって製作され、1972年に打ち上げられた。それ以来衛星からの観測データを色々な分野に応用するための技術開発が行われてきた。宇宙技術は気象観測、通信、放送の分野では実用化されているが、地球観測の分野は開発から実用への中間段階にあるといえよう。数年前から盛んに米国で検討されてきた商業用リモートセンシング衛星が打ち上げられようとしており、これが成功すれば実用化が一段と進むであろう。衛星によるリモートセンシングには、地球観測以外に気象観測の分野があり、1960年に気象観測衛星TIROS-1号が打ち上げられて以来、その後続衛星NOAAが米国の大気海洋庁（NOAA）により打ち上げられている。ここでは主として地球観測の分野について述べる。

2. 現在利用可能な地球観測衛星データ

現在利用可能な地球観測衛星データの概要を表1に示す。ランドサットは米国の地球観測衛星で72年に1号が打ち上げられて以来、その後続衛星が打ち上げられていて現在5号が運用されている。可視から近赤外、中間赤外および、熱赤外まで広い波長域を7つのバンドに分けて観測しており、その観測データは植生分布の把握や資源探査などの広い分野に利用されている代表的地球観測衛星である。スポットはフランスの地球観測衛星で86年に1号が打ち上げられて以来、これま

で2号と3号が運用されていたが、96年11月に3号が故障して運用停止になった。現在利用可能な衛星データの中で比較的地上分解能が高く、また衛星の軌道と直角な方向を観測することが出来るポインティング機能を有していて、この機能により標高データを得るためのステレオデータを取得する事が出来る。またポインティング機能により特定地域を集中して観測することが出来るのでその地域にたいして観測周期を短縮する事が出来、この機能は火山噴火などの災害発生地域の高頻度観測に有効である。表1の観測周期の（ ）内の数値はポインティング機能により観測周期を短縮できる最小の間隔を示している。JERS-1は日本が92年に打ち上げた衛星で、可視、近赤外域と中間赤外での反射を観測する光学センサ（OPS）と衛星からマイクロ波を照射してその反射信号を観測する合成開口レーダ（SAR）¹⁾を搭載している。JERS-1は資源探査を主目的とした衛星で、OPSは岩石の識別に有効である中間赤外域の観測バンドを持っていたが、このバンドは93年12月に故障し、現在OPSは可視と近赤外域での観測を行っている。SARは送信電力が当初の設計の1/4で動作していて、その結果取得画像のS/Nが少し悪いが観測データの収集を行っている。

RADARSATは実用化を目的として95年11月にカナダが打ち上げたCバンドのSARを搭載した衛星である。Cバンドは悪天候に見舞われ易い高緯度地域の海洋や海水の観測に適している。実用化を目的としているので、ユーザの要求に応じてデータを取得することが出来るように、色々な分解能、観測幅および入射角で観測することが出来るような豊富な観測モードを持っている。IRS-1Cは95年12月に、1Dは97年9月にインドが打ち上げた衛星で両方とも同じセンサーを搭載している。熱赤外域のバンドを持っていないが、その他のバンドの波長域はランドサットTMと比較的似ており、ランドサットデータに或程度代替可能なので、ランドサットの運用、データ販売を行っている

* (財)リモート・センシング技術センター 理事
〒106-0032 東京都港区六本木1-9-9

表1 現在利用可能な地球観測衛星データの概要

衛星	センサー	地上分解能	観測幅	観測波長域	バンド数	観測周期(最小)	観測方向	備考
ランドサット-5	TM	30m, 120m (熱赤外)	185km	可視, 近・中間・熱赤外	7	16日	直下	
	MSS	80m		可視, 近赤外	4			
スポット-2	HRV(P)	10m	60km	可視	1	26日(3日)	軌道に直角な方向に±27°	ステレオデータ可能
	HRV(M)	20m		可視, 近赤外	3			
JERS-1	OPS	18m	75km	可視, 近・中間赤外	7	44日	直下と前方15.3°	ステレオデータ可能
	SAR			マイクロ波(Lバンド)	1		進行方向向右に入射角35°	能動型
RADARSAT	SAR	10~100m	50~500km	マイクロ波(Cバンド)	1	24日(2~3日)	進行方向右に入射角10~60°	能動型, 日本で受信準備中
IRS-1C / 1D	PAN	6m	70km	可視	1	24日(5日)	軌道に直角な方向に±26°	日本で受信準備中
	LISS-3	23m, 70m (中間赤外)	140km	可視, 近・中間赤外	4	24日	直下	
	WIFS	188m	774km	可視, 近赤外	2	5日		
NOAA-12/14	AVHRR	1km	2800km	可視, 近・中間・熱赤外	5	2回/日	直下	
MOS-1 / 1b	MESSR	50m	100km	可視, 近赤外	4	17日	直下	96/4 運用停止
	VTIR	0.9, 2.7km	1500km	可視, 熱赤外	4	1~2日		
	MSR	23, 32km	320km	マイクロ波(K, Kaバンド)	2	5~6日		受動型
ADEOS	AVNIR	8m(バンクロー), 16m(マルチ)	80km	可視, 近赤外	4	41日(2~3日)	軌道に直角な方向に±40°	97/6 故障で停止
	OCTS	700m	1400km	可視, 近・中間・熱赤外	12	2~3日	直下	

Space Imaging EOSAT社が、ランドサット-6号の失敗もあってランドサット-5号の後継用データとしてIRSのデータの利用を積極的に推進している。IRSのPANデータは地上分解能6mであり、現時点では最も高分解能のデータである。RADARSATとIRS-1C、Dのデータは現在日本では受信していないが、受信すべく準備中であり、それらのデータは98年10月頃からユーザに提供可能になるであろう。NOAAは米国の海洋大気庁(NOAA)が打ち上げている気象衛星で現在12号と14号が運用されている。気象衛星であるが、NOAA AVHRRデータは可視と近・中間・熱赤外の観測波長域を持っていて、地上分解能が1kmと粗いが観測幅が広い(2800km)ので、グローバルな植生や海面温度の分布の把握に有効である。NOAAデータは日本では気象庁の気象衛星センターで受信されていて、(財)日本気象協会からユーザに提供されている。

MOS-1 / 1bは日本の最初の地球観測衛星シリーズで87年に第1号が打ち上げられ、96年4月に運用を停止したがこの間に観測されたデータが利用可能である。ADEOSは地球環境監視を主目的として、大気や

海洋などを観測する多くのセンサーを搭載して96年8月に日本が打ち上げた衛星だが、惜しくも97年6月に故障により運用が停止した。AVNIRとOCTSはそれぞれ陸域と海洋の観測を主目的として宇宙開発事業団(NASDA)が開発したコアセンサーで、それらによりADEOSの運用期間中の8カ月の間に観測されたデータが利用可能である。他に欧州宇宙機関(ESA)が打ち上げたCバンドのSARを搭載した衛星(ERS-1 / 2)があるが、この観測データは主として研究用に使用されていて、一般用に配布されていないのでこの表から除いた。表1の衛星データでNOAA以外のデータは、(財)リモートセンシング技術センターが一般ユーザにデータ提供の業務を行っている。

3. 近い将来利用可能な衛星データ

3.1 商業用リモートセンシング衛星

冷戦終結をきっかけとして軍事偵察衛星技術を民間に転用した商業用リモートセンシング衛星の計画が、93年頃から米国で盛んに検討されてきた。現在数社がその計画を進めているが、今後1年以内の近い将来に打ち上げられると考えられる商業用リモートセンシ

表2 商業用リモートセンシング衛星データの概要

衛星	打ち上げ予定	センサー	地上分解能	観測幅	観測波長域	バンド数	観測周期	ポインティング機能	データレコーダ	データ取得からユーザへの提供時間
Early Bird	1997年12月	パנקロ	3 m	11km	可視	1	平均2~5日(緯度により異なる)	軌道方向に±30° および軌道に直角方向に±28°	有り, 500シーン	15分~48時間
		マルチ	15m	55km	可視, 近赤外	3				
Quick Bird	1999年	パנקロ	0.82m	22km	可視, 近赤外	1	平均1~4日(緯度により異なる)	軌道および軌道に直角な方向に±30°	有り, 100シーン	15分~48時間
		マルチ	3.3m		可視, 近赤外	4				
IKONOS-1	1998年2月	パנקロ	0.82m	11km	可視, 近赤外	1	11日(最小1~3日)	軌道および軌道に直角な方向に±45°	有り, 100シーン	24分~48時間
		マルチ	3.3m		可視, 近赤外	4				

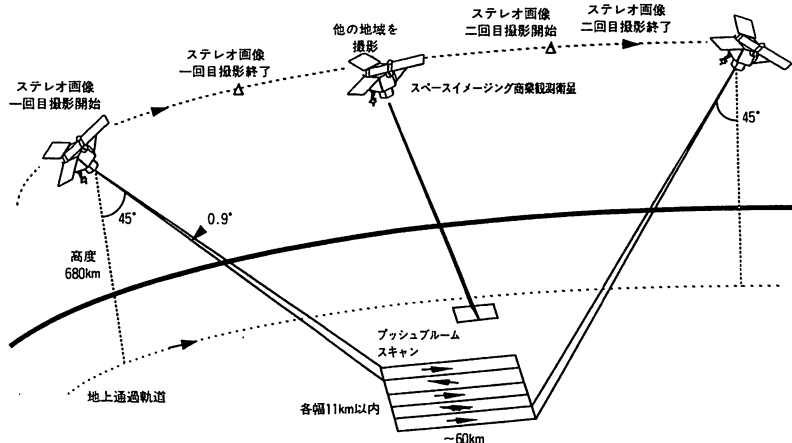


図-1 商業用リモートセンシング衛星の画像撮影要領

衛星として、EarthWatch社のEarlyBirdとQuick BirdおよびSpace Imaging EOSAT社のIKONOS-1があり、それらの衛星データの概要を表2に示す。これらの衛星は、(1) 小型軽量で低軌道、(2) 可視近赤外の波長域で高分解能、(3) ポインティング機能、(4) 観測データのユーザへの迅速な提供等の特徴を持っている。商業用衛星なのでコスト低減が最大の課題であり、小型軽量の衛星をランドサットやスポットより低い軌道に打ち上げようとしている。可視、近赤外域は最も高分解能を実現できる波長域であり、それぞれパנקロとマルチバンドのセンサーを搭載している。パנקロバンドの分解能はEarlyBirdは3mであるが、QuickBirdとIKONOS-1は1m以下である。分解能1mの場合滑走路にある航空機のタイプを識別でき、最大縮尺2500分の1の地図作成が可能である。またこれらの衛星はポインティング機能により衛

星直下から最大30° (EarlyBirdとQuickBird) または45° (IKONOS-1) の範囲内で任意の方向の地域を観測でき、この機能により図-1に示すように同一軌道飛行中に複数箇所観測することが出来る。ポインティング機能により顧客からの要求地域の迅速なデータ取得、異なる方向からの観測によるステレオデータ取得、緊急時の同一地域の高頻度観測等を可能にしている。これらの衛星の観測データはネットワークによるオンライン配布や地域提携局を通じての配布等によりデータ取得から15分~48時間以内にユーザにデータを提供する体制を用意しようとしている。現在地球観測データは受信からデータ配布まで通常1カ月、早くも2週間程度の時間がかかっており、これがデータの有効利用を妨げている要因の1つにもなっている。日本ではEarlyBirdとQuickBirdのデータは日立が、IKONOS-1のデータは三菱商事が提供業務を行うことを計画

している。EarthWatchのホームページによるとEarlyBirdは97年末の12月24日に打ち上げられたようである。

3.2 現運用衛星の後続衛星データ

現在運用されている衛星の後続衛星として、今後1年以内に打ち上げられる予定の衛星データの概要を表3に示す。スポットシリーズの後継機スポット-4号が98年3月に打ち上げられる。スポット4号は従来のセンサーHRVに植物の識別に有効な中間赤外のバンドを追加した(地上分解能は他のバンドと同じで20m)センサーHRVIRと、地上分解能1kmで広域(観測幅2000km)を観測するセンサーWIFSを搭載している。尚地上分解能が改善されたスポット-5号が2002年頃打ち上げ予定になっており、利用者にはデータ提供の継続を保証している。次にランドサットシリーズの後継機ランドサット-7号が98年7月に打ち上げられる。ランドサットは6号が93年に打ち上げに失敗したため、84年に打ち上げられた5号が現在尚運用されており、7号が成功すれば久しぶりにランドサットシリーズに新しい衛星が登場することになる。7号のセンサーETM₊は、従来のセンサーTMに地上分解能が15mのパンクロバンドが追加され、また熱赤外バンドの地上分解能が120mから60mに改善されたものである。ランドサット計画は将来NASAのEOS計画²⁾(Earth Observing System: 地球を全球的に観測する計画)に統合されるようで、ランドサット-8号はランドサットタイプのセンサーをEOS計画で打ち上げられる第2号の衛星EOS-AM2に搭載する形になる様であり、ランドサットデータの継続性が保たれる。

ASTERは日本が開発したセンサーで、98年6月に打ち上げ予定のEOS計画の第1号の衛星EOS-AM1に搭載され、地表の植物や鉱物の分布、地形等の情報を取得するもので、性能的にはJERS-1 OPSの後継のセンサーといえる。ASTERはVNIR, SWIR, TIRのサブシステムに分かれていて、それぞれ可視・近赤外域、中間赤外域、熱赤外域を3つ、6つ、5つのバンドに分けて観測し、地上分解能は15m, 30m, 60mである。VNIRは軌道に沿って直下と後方を観測して、JERS-1 OPSよりもB/Hが大きいステレオデータを取得する。SWIRは6バンドになっており、JERS-1 OPSのSWIRの4バンドに比べて多くなっている。TIRはJERS-1 OPSにはなかったもので、熱赤外域を多バンドで観測し、熱慣性や熱赤外域の放射率パターンから岩石の情報を得ることに役立つ。また地上分解能90mはランドサットTMの熱赤外バンドの120mより高くなっている。ASTERのデータは米国で受信されるが、日本へ伝送されてきて(財)資源・環境観測解析センター(ERSDAC)で処理され、ASTERのAO(公募研研究)に応募し、選定された研究者には無償で提供される。EOS-AM1には他に米国やカナダが開発された地球の熱収支や、対流圏の汚染を観測するセンサー等が搭載される。

4. 衛星リモートセンシングデータの利用の現状

4.1 地球環境問題への利用

オゾン層の破壊、地球温暖化、熱帯雨林の激減、酸性雨等地球環境問題は人類の将来に関わる問題として

表3 現運用衛星の後続衛星のデータの概要

衛星	打ち上げ予定	センサー	地上分解能	観測幅	観測波長域	バンド数	観測周期(最小)	観測方向
スポット-4	1998年3月	HRVIR(パンクロ)	10m	60km	可視	1	26日(3日)	軌道に直角な方向に±27°
		HRVIR(マルチ)	20m		可視, 近・中間赤外	4		
		WIFS	1km	2000km	可視, 近・中間赤外	4		直下
ランドサット-7	1998年7月	ETM+(パンクロ)	15m	185km	可視, 近赤外	1	16日	直下
		ETM+(マルチ)	30m, 60m(熱赤外)		可視, 近・中間・熱赤外	7		
EOS-AM1	1998年6月	ASTER(VNIR)	15m	60km	可視, 近赤外	3	48日	直下と後方27.6°
		ASTER(SWIR)	30m		中間赤外	6		軌道に直角な方向に±8.35°
		ASTER(TIR)	90m		熱赤外	5		

注目を浴びている。衛星観測データは同時広域性、繰り返し観測性の特徴を持っており、この特徴は地球環境の監視に最適である。研究者が地球環境問題の研究に便利のように海面温度や植生など各種のグローバルなデータセットを作成する作業が各国や国際機関のレベルで進められている。日本でも「地球科学技術研究のための基礎的データセット作成研究」プロジェクトとして、主としてアジア・太平洋地域を対象として水文（降水・流出量）、植生、砂漠変動、海洋（海色）のデータセットをアジア・太平洋地域の関連する各機関と共同して作成する作業を進めている。その他にも現在、国際地球圏・生物圏研究計画（IGBP）、国際気候共同研究計画（WCRP）等の国際共同研究計画が進められており、衛星観測データはこれらの計画において重要な入力データと考えられている。

また地球科学技術のための新たな取り組みとして地球科学技術推進機構が設立され（96年3月）、地球温暖化などの地球環境の変動予測モデルを構築し、これに現状の地球環境のデータを入力し、シミュレーションにより地球環境の変動を予測・解明しようとする地球フロンティア研究がスタートした。人工衛星による地球観測は地球環境の現状のデータの収集手段として、この研究の重要な一翼を担っている。

4.2 実利用の代表的利用例

衛星データというのは一般的に色々な波長域で地球表面を観測したデータであり、このデータを使って各波長域の反射の違いを判別する事により地球表面の状況を把握することが出来る。衛星データはその応用方法により、非常に多くの分野に利用可能である。その応用分野を挙げてみると、地図作成、農作物の作付け面積調査や育成状況調査、森林資源管理、植生分布などの環境調査、地下資源探査、沿岸・海洋監視、災害監視等がある。現在、これらの分野への応用方法についてそれぞれ研究開発がなされているが、実際に定常的業務として利用されているケースはまだ少ない。実際に利用されている例としては

- (1) 衛星データ利用の漁海況情報システム
 - (2) 東南アジア地域の熱帯林管理情報システム整備事業への応用
 - (3) 衛星データによる国土数値情報土地利用データの更新
 - (4) 災害監視への応用
- 等がある。(1)は(社)漁業情報サービスセンター(JAFIC)が行っているシステムで、従来から漁海況

図を漁業関係者に提供していたが、JAFICでは85年からNOAA AVHRRデータから得た海面温度分布情報を漁海況図作成に利用している。(2)は(社)日本林業技術協会が行っている事業で、林野庁が海外林業協力補助事業の一環として90年度から10年計画で東南アジアの国々を対象として熱帯林管理情報システム整備事業を進めており、この事業においてランドサットデータを使って作成した林相分類図、林班毎の各林相の面積計算表等を相手国に提供している。すでにタイ、インドネシア、カンボジア、フィリピン、ミャンマー内の一部の熱帯林地域について事業を行った。

(3)は国土庁が74年に整備した国土数値情報の土地利用データの更新作業を、ランドサットやスポットのデータを使って行い、91年から開始し96年に完了した。(4)は火山噴火、洪水、山火事、油汚染等災害状況の把握に衛星データが使用される場合である。災害発生地域は通常災害のために現地へのアクセスが困難であるが、衛星は周期的に観測可能なので災害状況の変化を把握することが出来る。96年の年明け早々日本海でロシアのタンカー「ナホトカ」による油汚染の事故が発生した。冬の日本海は天候が悪く通常の光学センサーではなかなか良いデータが得られなかったが、CバンドのSARを搭載したRADARSATは天候状態に関係なくデータを取得でき、また豊富な観測モードをもって、短い間隔(2~3日)で対象地域を観測することが出来、この油汚染の監視には非常に有効であった。

4.3 資源探査に於ける衛星データの利用

資源探査対象地域はアクセスが困難な場所が多いこと、植生の観測のように繰り返し観測データが必要でないこと等の理由により、衛星データはランドサット1号の打ち上げ以来資源探査に良く利用されてきた。資源探査は予備調査、概査、精査、埋蔵量評価、開発の段階を経るが、衛星データは予備調査や概査の段階で最も良く利用される。ここでは衛星データから資源探査にとってどんな有用な情報が得られるかについて簡単に述べる。

(1) 地形の計測

資源探査において衛星データから得られる情報で最も重要なのは地形の情報であろう。地形の情報は一般には地図の形で表現されるが、世界的に見ても20万分の1よりも大縮尺の地図は十分に整備されているとは言えない。衛星データによる地形の計測には同一地域を2つの異なった方向から観測したステレオデータが

得られればよい。ステレオデータの取得には軌道に直角的な方向に取得する(クロストラック)方式と、軌道に沿って取得する(アロングトラック)方式とがあり、アロングトラック方式の方が、B/H比を大きくしにくいという欠点があるが、ステレオデータが同一気象条件で取得されるので、ステレオデータが得られる確立が高く、また地形情報を得るための処理が容易なので、優れているようである。JERS-1 OPSとASTERはアロングトラック方式である。地形の情報から鉱床が形成される可能性の高い線状構造や環状構造などを判読する。

(2) スペクトル情報による地表面地質や岩石の判別

衛星データは地表面の可視・近赤外から熱赤外の波長域における反射あるいは放射特性を観測することが出来、それらのデータから地表面の地質や岩石を判別することが出来る。可視・近赤外域(0.4~1.3 μm)のデータからは土地被覆分布状況を把握する事が出来、地肌が露出している地域については地表面地質を判別することが出来る。中間赤外域(1.3~3.0 μm)は短波長赤外域とも呼ばれているが、水分による吸収帯であって、この波長域で複数のバンドを設けて観測することにより、金属鉱床胚胎の可能性の高い熱水変質帯を抽出することが出来る。資源探査を主目的とするセンサーのJERS-1 OPSとASTERは中間赤外域の観測バンドをもっている。熱赤外域(7~15 μm)のデータから地表面の温度の情報が得られ、昼と夜の温度差から得られる熱慣性の情報から堆積岩を或程度区分できる。また熱赤外域を多バンドで観測したデータから、各バンドでの放射率を推定し、その放射率パターンから珪酸塩岩の識別が可能である。ASTERは熱赤外域を5つのバンドに分けて観測する。

(3) 合成開口レーダ(SAR)による観測

合成開口レーダ(SAR)は衛星が高速で飛行することを利用して、地表面を高分解能で観測したデータを取得することが出来る2次元映像レーダである。衛星搭載用SARとしてはLやCバンドのマイクロ波がよく使用され、マイクロ波の波長は雲の粒子より遥かに大きいので雲を透過して観測することが出来、雲に覆

われていることの多い熱帯雨林地域や極地域の観測に威力を発揮する。一般的にLバンドは陸域の、Cバンドは海洋の観測に有効であり、JERS-1 SARはLバンドを使用している。SARは通常斜めに電波を照射して地面による反射信号を受信するので、照射面は明るくその影は暗く観測され、資源探査にとって重要な情報である地質構造の判読に有効な地形の起伏情報を読みとることが出来る。またマイクロ波は特にLバンドは波長が長いので、地表面を覆っている植生を或程度透過する。植生下の土壌や岩石の情報を得るのは難しいようであるが、SARデータが熱帯雨林下の遺跡の検出などには有効³⁾の様である。土壌や岩石の透過に関しては含水率の影響が大きく水分が多いと減衰が大きく、乾燥している場合は減衰が少なくある程度透過する。スペースシャトルに搭載したLバンドSARにより北アフリカの砂漠の数m下の古い水系パターンが検出⁴⁾されたことが報告されている。

5. おわりに

衛星によるリモートセンシングの現状として、現在および近い将来利用可能な衛星データ、衛星データの利用の現状、および資源探査に於ける衛星データの利用について述べた。商業用リモートセンシング衛星の第1号であるEarlyBirdは97年12月24日に打ち上げられたが、これが成功し、衛星データが利用者に提供されるようになれば衛星データの実利用が益々進むであろう。

参考文献

- 1) 畚野信義; 合成開口レーダ, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 1, No.1 (1981), 49~107.
- 2) M. P. Lizotte and G. Asrar, THE EARTH OBSERVING SYSTEM, EARTH OBSERVATION MAGAZINE, May (1993), 38~43.
- 3) 駒井二郎; JERS-1 画像によるマヤ文明遺跡の検出—宇宙考古学におけるSARデータ利用の試み—, 写真測量とリモートセンシング, Vol.34, No. 4 (1995), 36~47.
- 4) J. F. McCauley et al., Subsurface valleys and geoarchaeology of the eastern Sahara revealed by shuttle radar, Science, Vol.218 (1982),1004~1020.