宇宙からのリモート・センシング*

丸 安 隆 和**

1. リモート・センシングの意義

新しい仕事を始めるとき、新しい手法を工夫し利用することが、より大きい成功をもたらすために最も重要な条件である。今まで全く例を見ないような環境条件のもとで、多くのたがいにからみ合った問題を考えなければならなかった現在、新しい手法の導入が絶対に必要であることは明らかである。

地球資源が豊富で、人口もそれほど多くなかった時代には、将来予測も容易であり、従来の方法による調査で十分にこと足りた。しかし、現在の状況は一変した。今日のように複雑な条件のもとで将来に禍根を残さない方法で、人類が生存して行くためには、より有効な手法による現象の調査分析が必要である。それに地球全域を対象にして考えることが必要になったために、一層その要請が高まったといえる。

およそ 1/4 世紀の間に生じた種々の社会情勢の変化が地球のより迅速で、より有効な探査方法として初期世代のリモート・センシングの開発をうながした。このシステムの中には、最近の写真技術、写真測量技術、磁気重力探査、地下の電気、弾性波探査などが含まれ、これまでに大きい役割を果たしてきた。

このリモート・センシング・システムは、ここ数年の間に第二世代へと発展した。新しいセンサー（カメラやスキャナー）の開発、これを搭載して運行する機体の進歩が飛躍的にリモート・センシングの効果を高めた。アメリカ航空宇宙局（NASA）が開始したアーツ計画はその大きい契機となったことはいままでのま

い。より高いところから、より広範囲を、より迅速に探査する方法が可能となり、従来の方法ではなし得なかった全く新しい角度から、地球を観測した情報としてわれわれに全く新しい事実を教えることができるようになった。この新しい見方は、一本一本の樹木としてではなく、森として樹木を見ることを可能にし、また、森林を木材資源としてよりむしろ機能構造の要素として見ることを可能にした。現在の環境条件のもとでは誠に大きい進歩といえる。

しかし、このようにして得られた情報は万能であるわけではない。従来の調査方法による裏付けが必要であり、同じ情報でも、これを見る人の専門的な知識によって、読みとることのできる内容は千差万別であり、したがって、興行きもちがええ。応用分野も極めて広いことに注目すべきである。

2. マルチスペクトル写真

従来、写真といえば、いかにありのままを表現するか、カラー写真ではできるだけ自然色に近くなるように工夫され努力されてきた。しかし、物体から反射される電磁波を波長別に、いくつかのバンドに分け、それぞれの波長域の反射の強さを別々に記録する方法がとられるようになった。このような一組の写真をマルチスペクトル写真とよぶ。

前述したように、地上の物体が太陽エネルギーを受けると非常に広い範囲にわたる電磁波を反射する（第1図）。どの波長の電磁波をどのような強さで反射するかは、物質ごとに特有であり（第2図）、逆にこの

第1図 電磁波スペクトル

* 昭和50年6月26日原稿受理 Remote Sensing from Space

** 東京理科大学 Takakazu MARUYASU

第2図 各種物質の反射率

反射パターンを知ることができれば、それがどんな物質であるかを判別することができる。そして、マルチスペクトル写真は、はじめてこのような方法での写真解析を可能にしたといえる。この操作をより高度に行うために、電子計算機技術を導入し、より明瞭にその解析結果を表現するために、対象とする物質を色分けすることもある。このようにしてマルチスペクトル写真は、従来の写真に対する考え方を大きく転換し、情報記録手段としての写真の利用価値を高めるとともに、判読技術も経験的なものから、さらに客観性を持った手法へと大きく発展することができたのである。

3. センサー (カメラとスキャナー)

カメラでフィルムを用いて撮影できるのは $0.4 \sim 1.1 \mu\text{m}$ の範囲である。その中でパングロフィルムは可視域 ($0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$) の反射エネルギーの総量を黒から

Band 4 ($0.5 \sim 0.6 \mu\text{m}$) Band 5 ($0.6 \sim 0.7 \mu\text{m}$) Band 6 ($0.7 \sim 0.8 \mu\text{m}$) Band 7 ($0.8 \sim 1.1 \mu\text{m}$)

各バンドによって雲の透過の状態が変化し、雲の厚さのちがいがわかる。

第3図 ERTS (LANDSAT) I 号の MSS 映像 (オーツック海を蔽う雲)

白までの色調差で記録したものである。カラー写真では可視光域を赤、緑、青の三つのバンドに分けて感光させるが、その結果得られる写真はそれらを総合したものとして表現される。しかし、反射する電磁波は非常に広い波長域にわたっており、直接フィルム上に感光させ記録することのできるのはその一部に過ぎない。この範囲外の電磁波はエネルギーを電気信号にかえて記録しなければならない。スキャナーは、この目的に使用されるセンサーである。センサーではすべての波長域にわたって、波長別にそのエネルギー強さをとらえ、マルチスペクトル画像のデータをマグネティック・テープに記録する。

第4図は、同時に多スペクトル・バンドのデータを記録するスキャナーの機構を示している。地上の走査は1個の回転ミラーで、人工衛星または航空機の直下を

横切って行なわれる。一つの信号として含まれる地上面積一面素 (IFOV) はアーツ、スカイラブのいずれの場合も約 $80\text{ m} \times 80\text{ m}$ である。航空機用のスキャナーでは、瞬間視野が 2.5 mm rad であるから、高度 $2,000\text{ m}$ であれば $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ が一面素として記録される。第1表は、現在使用されているスキャナーの性能を示す。

4. マルチスペクトル写真の解析

ポジのマルチスペクトル写真に、異なった色のフィルターを通して光を送り、重ね合わせると、種々の色合いの写真が合成できる。赤、緑、青バンドの写真に、同じ色のフィルターを通して色合成すると天然色の写真が合成できる。何枚かのポジの中で1枚だけネガを用いると、その波長域のエネルギーがマイナスされて

第4図 熱赤外を含むセンサーの構造

第1表 マルチスペクトル・スキャナー一覧

	スキャナーの種類	スペクトル・バンド数*	走査幅	画素の大きさ (直下)	記録方式Dと Aの別	使用開始年
Space borne	ERTS MSS	4 visible (2)	185 km	80 m	D	1972
	SKYLAB S-192	9 visible 4 IR (3)	75 km	80 m	D	1973
Air borne	NASA MSDS	10 visible 14 IR (2)	高度の2倍	2 mmrad	D	1971
	Bendix M ^s S	10 visible 1 IR (2)	"	2.5 mmrad	D	1972
	Daedalus	10 visible 1 IR (2)	"	2.5 mmrad	A	1972

(注) visible の中で () は $0.7 \sim 1.1\text{ }\mu\text{m}$ の近赤外のバンド数

表現され、それぞれの照度をコントロールすると別な色合いになる。

このような方法で、目的とする対象物をできるだけ鮮明に浮ぼりさせる方法をアナログ処理という。

スキャナーでデジタル化された情報は、量的にも極めて多いので、そのまま計算機処理を行うのが便利で

第 5 図

第 6 図

第 7 図

ある。この場合、物質の種類や状態を識別するのにスペクトル特性が用いられる。この方法を簡単に理解するために第5図を参照しよう。この図は土、水、植物の反射特性を示している。いま、 λ_1, λ_2 の二つの波長について、三つの物質の反射率をプロットすると第5図のようになる。土は λ_1 で最も強い反射を示し、 λ_2 では植物が最も強い反射を示している。したがって三つの物質はそれぞれ異なった位置にくることがわかる。波長を二つに限らず多くの波長について同じ方法を適用すると、多次元空間の位置として、それぞれの物質を認識することができる。

しかし、第7図に見るように同じ植物でも植付けの時期、土壌の性質などにより、必ずしも同じ反射特性を示すとはかぎらない。各波長についての反射エネルギーの強さは分散するものである。ある場合には、他の種類の対象物と重複することもある。この判別はそれぞれの反射エネルギーの強さの分散は正規分布するという仮定のもとで統計的な処理を行うが、より明瞭な識別のために対象物ごとに λ_1 と λ_2 の差、比その他の演算を行った結果を映像化して判別する方法がとられる。この場合、画像がデジタル情報である場合には、計算機処理が便利であり、アナログ的にも処理することができる。

6. アーツ計画の概要

NASA がアーツ計画を開始して、1972年7月その第1号機を打上げて、宇宙からの本格的なリモート・センシングが始まった。アーツ衛星によってとられた写真はすでにわが国でも多数紹介され、いろいろな分野で新しい事実を教えた。

アーツから地球情報を収集するセンサーには、Return Beam Vidicon Camera (RBV) と Multi Spectral Scanner (MSS) の2種類あり、そのうち MSS だけが実際に活用された。これは4バンド(0.5~0.6, 0.6~0.7, 0.7~0.8, 0.8~1.1 (μm)) の映像を電気信号として video tape に記録するものである。この記録は出力6ビット、15 MB/s の PCM 信号として地上局に送られる。ここで種々補正処理が行われた後、写真画像にして世界各国の研究者に送付される。写真のほか、magnetic tape のままデジタル情報としても利用できる。

アーツ1号(後にランドサットと改称)の諸元は次表のようである。

極を通る円軌道・軌道半径	7285.82 km
地球上からの高度	900~950 km
一周するに要する時間	1 h 43 m 16s
赤道における傾斜角	99°
赤道を横切る現地太陽時	9 h 42 m

アーツからのリモート・センシングには次のような特長がある。

(1) 1枚の写真は185 km×185 km という広域を含みほとんど同じ時刻に、同じ条件のもとで情報が記録される。したがって、変化のはげしい海洋の現象や土地利用条件を調査する上で非常によい。

(2) 一定の周期で一定の時刻に同じ地域のセンシング・データが収集される。したがって、季節的な変化を追跡する場合などには有効である。

(3) MSS でセンシングする範囲は11.56° と非常に狭い。したがって得られた情報は正射投影になっており、直接地図と対比でき、地図の修正や地図のない地域では地図の代用として利用できる。映像はほとんど真上からとられているので、太陽光線の反射方向による影響が少なく、森林や水面を通して地表が見易い。

(4) センシングしたデータが実時間で処理できる施設があれば、災害の情報や気象予報に非常に貴重である。

6. アーツ・データ処理

NASA の Goddard Space Center には、アーツのオペレーション・センターとデータ処理施設 (Data Processing Facility DPF) が設けられている。ここでは年間50万枚にのぼる画像が処理される。第8図はここで行われる処理の概要を示したもので、大別して、(1) bulk processing (粗処理)、(2) precise processing (精密処理)、(3) special processing (特別処理) の3種類になる。

粗処理では、受信した全画面に対してあらかじめ定められた放射線補正、幾何学的補正が行われ、185 km×185 km が1葉の写真となるように、電子ビームで70 mm フィルムにネガ像として焼きつける。これが複製もしくは引伸しされて研究者に配布されるとともに精密処理への入力となる。一方、もとのデジタル信号は、編集されたのち HDDT に11 MB/S の高速で記録され、特別処理への入力となる。

精密処理は地上の基準点を用いてより精密な幾何学的補正をするもので、入力の前記のフィルムが主であ

るが必要があれば AD 変換後 HDDT に書きこむことができる。補正はアナログ的に行われている。

特別処理は HDDT を 300 KB/S の速度に落として再生したものを入力とし、計算機で処理して、その出力を9トラック、1,600 bpi の標準磁気テープにするもので、これのみは全デジタル処理になっている。したがって、デジタル処理の経路は、図に太線で示すようにごく一部であり、数量的にみても、粗処理は全画像に対してなされるのに対して、特別処理はその3% 足らずに過ぎない。

MSS の1バンドの画像1枚は、約750万個の画素からなっている。1画素は6ビットの濃淡をもっているから、4バンドのデータは標準磁気テープ2~4巻分になる。これが1日約200組受信されるので、すべてを計算機処理することは容易でない。

また、デジタル処理を行っても、人間の視覚によるパターン認識能力に基づく判断に比肩することは当分不可能である。しかし、一面人間の取扱える枚数には限度があるから、最終判断は人間にゆだねるにしても、そこに至るまでの各種の段階でデジタル画像処理に期待することも多くなろう。

7. スカイラブ計画の概要

すでに新聞やテレビなどで報道されたように、ポスト・アポロ計画として、人間のつた人工衛星一空飛ぶ実験室 SKYLAB 計画が実施され、最後のクルーをのせた3回目の人工衛星 SL 4 が1974年2月9日無事帰って成功裡にその計画が終わった。それから1年半を経過して持ち帰られた多くのデータについての解析が進められ興味深い多くの事実が既に発表されている。

スカイラブの実験計画は大きく4項目にわたっていた。(1) 無重力状態に長時間生活するときの人間生理の研究、(2) 大気に妨げられることなく行う太陽観測とそのデータの収集、(3) 金属材料の無重力状態における固化と結晶の生成、(4) リモート・センシングによる地球の観測、その他中学生や高校生の素朴な質問に答えるための実験などが含まれている。

今までに出された成果については次のような方法で公表されまた公表される予定になっている。

(1) Symposium

- ◎ Hardware and operational aspect of SKYLAB
1974年8月、アメリカ宇宙学会主催、
その Proceeding の copy は、AAS. 6060 Duke
St. Alexandria, V. A. 22304 で取扱われている

- ◎ Scientific Experiment of SKYLAB
1974年11月 アメリカ航空宇宙学会

第8図

第9図 スカイラブ軌道の一例

- ◎ 宇宙における物質処理 1974年4月
NASA Document M-74-5
- ◎ 宇宙における人間生理 1974年8月
NASA Document TMX-58154
- NASA Document は National Technical Information Service (NTIS) Springfield, VA. 22151 で取扱われる。

(2) 出版物

- ◎ MSFC SKYLAB Mission Report, Saturn
Workshop TMX-64814: MSFC でコピーがつけられ, NTIS で取扱われている。
- ◎ Catalogue of SKYLAB Information (M-GS-

74-6) (レポート, フィルム, テレビジョン・テープを含む)

MSFC Public Affairs Office で取扱われる。

- ◎ SKYLAB Earth Resources Catalogue (JSC-0916) 小冊子でスカイラブからとった地球の写真のほか EREP および成果の説明書

The Superintendent of Documents, U.S.

Government Printing Office, Wash, D.C.

20402 Stock no. 3300-00586

8. スカイラブによるリモート・センシング

スカイラブは, 傾斜角 50° , 高度 435 km の軌道で,

第2表 各種センサーとその役割

第10図 各センサーの波長の関係

93分で地球を1周し、5日でもとの軌道にもどる。スライプでの実験は多種にわたり、非常に多忙なスケジュールであり、また天候にも支配されるので、EREP（地球資源観測用機器）による観測は、継続して行うことはできなかったが、それでも非常に多くの観測データが既に持ち帰られ、処理され、解析がなされている。

EREPを構成する機器とその役割を第2表および第10図に示した。この中には、光学カメラとスキャナーとが含まれている。光学カメラは画像解像力が非常にすぐれているし、スキャナーはスペクトル解像力を利用できる特長があり、それぞれ相補なって、リモート・センシングの効果を高めることを期待している。

EREPによる観測は、予めNASAと打合わせ、地上の観測も同時に行って、いわゆる ground truth を収集することを建前としている。わが国でも1974年1月11日と2月10日の2回を予定していたが、生憎天候が悪く九州南部、瀬戸内海小豆島付近の記録が得られたに過ぎない。しかしアーツ映像と比較して細部がよく記録され新しい知見が得られた。

スカイラブに用いられているマルチスペクトル映像のスペクトルバンドとその利用分野を総括すると第3表および第4表のようになる。

9. 宇宙写真の利用価値

アーツ計画が始まり、わが国にもその参加のよびかけがあり、科学技術庁に設けられた判読検討会が設けられ話し合いをしたとき、専門家間でさえ、日本の狭い国土に対する利用価値にそれほど大きい期待をもっていなかった。しかし実際にNASAから送られてきた写真を見て、従来見たことのない宇宙写真に驚きの目を見はった。スキャナー、マルチスペクトル写真、これらはわれわれには初にお目にかかる対象であり、その鮮明さと新しい目で捉ええた広域の克明な記録に新しい技術の発展を知らされた。

第11図は72年10月24日にとられた大阪湾を含むバンド5の写真である。潮の満干時におこる鳴門海峡の、うずはよく知られているが、この写真で見ると、紀伊水道（友ヶ島水道）からは非常に大きい渦をまき

ながら外海の水が大阪湾に流入していることがわかる。明石海峡からも、帯状に連なった汚れた水が瀬戸内海に流れ込み、よく見ると鳴門海峡にも友ヶ島水道と同じように右廻りの大きい渦がある。しかも、これらの汚れた水は外洋に出ると部分的に稀釈されるが、相当長い期間水塊となって移動するものであることを示している。おそらく干潮時には、大阪側の岸に沿う流れから潮がひき始めるのであろう。

このような事実は、いままでわれわれにはほとんど

第3表 各バンドの利用分野

波長 (μm)	利用価値	利用分野
0.41~0.45	水中・藻の部分の透過性	海洋測量
0.44~0.52	大気の研究	環境
0.49~0.56	植物の種類判別と活力	海洋測量, 農業,
0.53~0.61	雪, 沿岸海面の汚水排水 水中の透過性, 汚濁度, 海水分布, 土壌, クロロ フィル・プランクトン分 布	林業, 牧草 水資源, 環境 土地資源管理
0.59~0.67	土地形状の区別, 開発状 況, 流出パターン, 土壌 の区分, 地質構造, 水質, 作付分布, 都市域の調査	農業, 林業 地質, 鉱物資源 土地資源管理 環境分析, 水資源
0.64~0.76	土地利用, 海岸形状, 陸水分布, 作物の区別, 湿地の分布	土地資源の管理 水資源, 海洋資源 農業, 林業, 牧草地 地質, 鉱物資源
0.75~0.90	陸水の判別, 地形の区別	地質, 鉱物資源
0.90~1.08	植生の分類, 地表の含水 量, 地質構造, 地表水, 洪水域の分布, もやの透 過性, 市街化地域, 水汚 染, 植物の種類, 病害	土地資源管理 水資源 農業, 林業, 牧草地 海洋測量, 環境
1.00~1.24	地表の含水量	水資源
1.10~1.35		
1.48~1.85	植生分類, 地表含水量	水資源
2.00~2.43	地表の起伏	農業, 林業
10.2~12.5	岩石, 土壌の熱特性 土壌含水量, 流路 地熱, 湖沼, 河, 海洋へ の流出水の挙動	地質, 環境, 水資源, 林業 土地資源管理

第4表 好ましいバンドの組合わせ

地球資源探査 の目的	波長 μm														
	Band 1 0.41-0.45	Band 2 0.44-0.52	Band 3 0.60-0.68	Band 4 0.63-0.67	Band 5 0.72-0.81	Band 6 0.84-0.91	Band 7 0.93-1.05	Band 8 1.00-1.08	Band 9 1.10-1.24	Band 10 1.20-1.35	Band 11 1.60-1.65	Band 12 2.00-2.13	Band 13 10.2-11.5		
鉱物資源・ 地質構造			2	1	1	1	1						1		
農業、森林資源		1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1			
土地資源・ 管理		2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2			
水および海洋 資源	1	1	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1			
環境	2	2	1	1	1	2	1	1							

1 = 最も好ましいバンド 2 = 有利可能なバンド

第11図

知られていなかったし、それをこのように明瞭に示した資料はなかった。一瞬も停止することのない海象を、このように明瞭に写し出す方法はなかったのである。衛星写真は見事にそれを可能にした。われわれが海を考えると、新しい事実を衛星写真が提供して正しい開発への手引きを与えてくれることは極めて貴重といわなければならない。

アメリカでは現在、穀物の収穫予想とその対策をランドサットを用いて行うためのプロジェクトを進めている。土地利用の現状を把握し、その有効利用の資料とすることができるといふ利得も予想以上に大きいものであったという報告が出されている。わが国では、残念ながら土地構成の単位が小さいので、一画素が約80m四方というランドサット・データからは、アメリ

カのような利用価値をそのまま適用することはできないが、海に関しては他の手段では得ることのできない貴重な資料が提供されることが明らかになった。

アーツ1号への参加のとき、わが国から提出された課題に“中規模気象の解明”が含まれていた。従来、災害といえば台風時に起るものときめていたのが、最近集中豪雨によるものがはるかに大きいパーセントを占めるようになってきた。台風による被害の軽減は気象衛星などを用いて早くから予報ができ、これに対処する準備ができるようになったことが大きい理由であろう。残念ながら、集中豪雨の発生を正確に予報することは、いまのところ不可能であるようである。アーツ計画によせられた中規模気象の解明への課題は、集中豪雨や集中豪雪の解明への糸口を探ろうという期待からであった。もし、衛星写真がこれらの期待に応えることができるなら、“災害から守る”という消極的な効果だけではなく、極めて貴重な“水資源”の有効利用に益すること測り知れないものがある。

現在、ランドサット2号では特に経済的效果の評価を一つの大きい目標としているが、これらが明らかになると、資源実験衛星は実用衛星となり、常に大きい視野から見た資料をわれわれに届けてくれることになるはずである。わが国にも地上受信局を設けて、リアル・タイムに衛星からの情報が入手できるようになることが望まれているし、それが欠けがえのないものとわかれば、わが国でも独自に資源衛星を打上げることにもなる。それが実現するためには、その有効性を自らの手で証明して行かなければならない。