

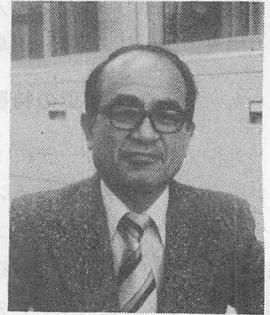
■ 展 望 ■

宇宙利用と資源

Space Utilization for Resources

中山 勝 矢*

Katsuya Nakayama



1. ま え が き

宇宙利用と資源という課題は、大きく三つに分けられると思う。その一つは地球以外の宇宙の資源であり、第二は地球の資源である。そして第三には、宇宙を利用するに当って必要な資源の問題がある。

地球はわれわれの住む本拠地であって、ここにあるさまざまな資源は身近であるとともに最も価値が高いから、特別の扱いをするのは当然である。一方で、人類の活動の宇宙への拡大は、当然そこに利用できる価値ある資源はないのかという問題に関心を向けさせる。ただこの二つは、本来の意味での資源である。鉱物資源であり、エネルギー資源であり、水資源であり、農林水産物資源のことである。

第三の宇宙を利用するに当っての資源というのは、少し異なる。静止衛星を打上げるべき軌道や、取得したデータを送るために必要な電磁波の周波数割当てに関するものである。宇宙は広大無辺だから、どこへ人工衛星を打上げて差支えないように思えるが、地球から眺めて定位置に固定したように見える、いわゆる静止衛星の軌道は無限ではない。現在、通信上の障害を避けるために、経度で2度程度離して赤道上に並べており、そのため180個の席しかない。しかも利用上の優劣があり、よりよい席は国際的な奪い合いが起きる程貴重である。これも大切な資源なので、無関心というわけにはいかない。

電磁波にしても、限られた周波数帯が宇宙用に割当てられているわけで、状況は意外と厳しい。増加するデータ量を処理しようとしても、使用可能な電磁波の方に制約がある。

ここでは、このような宇宙利用に当ってのソフト的な資源のことには触れない。主に宇宙の資源と宇宙からの地球資源探査とにしばって、簡単な展望を試みる

ことにしたい。

2. 宇宙の資源

2.1 難しい地球への運搬

宇宙開発に伴って、これをいかに利用していくかが大きな検討課題となってくるのは当然である。

1957年に、最初の人工衛星スプートニク1号が打上げられて約四半世紀がたった。しかしながら現在までに、地球外の世界から資源として何らかの物質を地球に運んでくるという状況には至っていない。アポロ計画では、実際に人間が「月の石」と称されるものを持ち帰ったし、また無人の火星探査機が直接岩石の分析を行っているけれども、資源として利用するという視点からは極めて遠いものである。

今日までに、実用、さらに商用と言われるレベルにまで達している宇宙利用は、インテルサットに代表される通信やひまわりの名で親しい気象観測などであって、いずれも機能を落さずに軽量化でき、しかも宇宙という高々度を積極的に利用しただけのものである。

仮に、宇宙の鉱物資源を地球に運ぶとすれば、質量そのものだから、軽量化にはなじまない。月の資源を地球へ運搬する方法も検討されている。だが重力の小さな月の引力圏からの脱出は比較的楽であっても、地球上に軟着陸させることは大変な作業なのである。

同様のこととして、小惑星空間に散在する隕石を資源として地球まで運ぶという話もある。網をかぶせてロケットで引くというが如き計画も、実現性は極めて乏しい。量的にも経済的にも問題がある。

詳しいことは別の機会にゆずるとして、結論的に言えば、地球外の空間から多量の物資を経済的に地球に運搬することは、今しばらくの間は難しい。ただ、21世紀になって、現在計画中の宇宙基地が完成し、これを中継点としてスペースシャトルが地球との間を安価に、ひんばんに往復するようになれば、状況は変わる。それでも、ダイヤモンドや金のような純粋で高価なも

*工業技術院電子技術総合研究所極限技術部長

〒305 茨城県新治郡桜村梅園1-1-4

のに限った話になるであろう。

2.2 月での基地建設

月の資源を地球に運んで、精製、利用するという考えが難問だとすれば、逆に月での基地建設に必要な資材は地球から運ばずに、できるだけ月の資源で賄ってみようという発想が生れてきてもおかしくない。

そもそも宇宙開発といっても、最も近い恒星まで、秒速15kmのロケットで18万年もかかるから、これは論外である。近い惑星でも金星は高温で高圧、火星は炭酸ガスの強風といったことでは、開発対象はせいぜい月までとしてよい。

現在、1995年頃の初期運用開始を目標に宇宙基地の計画が始まっており、その次の開発課題は月面基地とされている。次第に多くの人の目が月面基地の建設問題に集まってゆくのも時の流れである。そして、恒久的な宇宙基地に対しても月から資材供給がなされるのなら、月の重力が地球の6分の1で、大気もないことから打上げが容易で、運用コスト低源に大きく寄与し得るはずだという議論も出てくる。

月面は、火成岩の岩の散在する砂漠のような景観だが、表1に見るように、酸素、シリコン、アルミニウム、鉄、チタンなどが相当に存在する。地上で豊富に見られる炭素、窒素、水素等は極めて少なく、水も未発見である。しかし砂鉄は多いと言われている。

そこで、これらの資源を使って、自己増殖的に無人工場を逐次建設してゆくという考えが出てきた。人間は適宜参加するにしても、本来人間の生存に快適とは言えない場所だから、ロボット主体に工場を作らざるを得ない等々と、にぎやかに議論がなされている。

現在、月の資源に関しては、このように月面基地の

表1 月の岩石・砂の組成分析の例 (重量%)

	Apollo 11 (Mare Basalt)	Apollo 14 (KREEP)	Apollo 16 (Highland Material)
SiO ₂	42.0	47.9	44.9
TiO ₂	7.5	1.7	0.6
Al ₂ O ₃	13.9	17.6	26.7
FeO	15.7	10.4	5.5
MgO	7.9	9.2	6.0
CaO	12.0	11.2	15.6
Na ₂ O	0.44	0.68	0.48
K ₂ O	0.14	0.55	0.13
P ₂ O ₅	0.12	0.53	0.12
MnO	0.21	0.14	0.07
Cr ₂ O ₃	0.30	0.25	0.12

建設とからめた形で話題が提供され、いくつかの考え方が紹介されている。しかし、プロジェクトとして確定するという段階ではない。このような夢を実現する道を技術的な面から論じているのであって、しばらくの間は、この状況が続くと思われる。

2.3 太陽エネルギーによる発電

地球軌道の付近での太陽光の照射エネルギーは、1㎡あたり約1.4kWで、大変なエネルギー資源である。地球上では大気や雲による吸収散乱があるから、この太陽エネルギーを大気圏外の宇宙空間で捕え、電気エネルギーへ変換し、マイクロ波の形で地上に送って再び電気エネルギーに戻すという宇宙発電所(SPS)構想が生れた。

1968年にP.F.Glaserによって提案され、1977~1980年にNASAと米国エネルギー省とが共同で概念設計を行ったが、その時のレファレンスシステムの主な点は、

- (1) 運用開始は2000年
- (2) 毎年5GW×2で、30年間に300GWを建設
- (3) 地上の受電基地は5GWがユニット
- (4) 静止軌道で運用
- (5) 送電周波数は2.45GHz
- (6) 寿命は30年

といったものであった。

企業側から、図-1のようないくつかの設計が提出されたが、太陽光発電を行うとすると、10GWあたりの太陽電池パネルは100㎞にも達する巨大なものとなることが示された。このような大きな構造物の製造費用は回収できるのかという問題と同時に、製造と建設に伴うエネルギーとの収支バランスの点も検討の必要がある。

巨大な宇宙構造物の建造技術は未完成である。また地上の受電基地に対して、間違いなくマイクロ波ビームを到達させようとする、静止軌道におき、さらに高精度の姿勢制御を行って運用する必要があるが、巨大な構造物の姿勢制御も未経験の技術である。

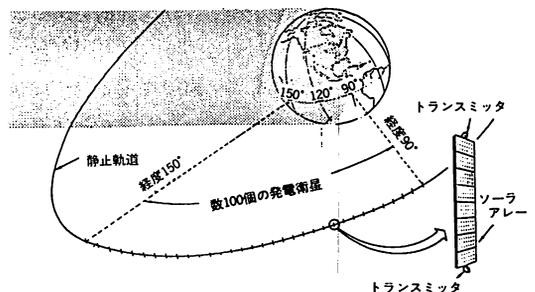


図-1 宇宙発電所構想

マイクロ波の電力密度は太陽光のエネルギー密度に比べ相当程度低減させているとしても、気象や生物に影響がないかどうか。また、太陽に対する地球の断面積が増えた形になることも、気になる点である。さらに、貴重な静止軌道を、こういう形で占有して差支えないのかという問題も考える必要があろう。

3. 宇宙からの地球資源探査

3.1 地球観測の意義

われわれの本拠地である地球の資源を十分に調査するために宇宙を利用するという考え方は、現在非常に盛んである。わが国の宇宙開発においても、地球観測は一つの大きな柱になっている。

もちろん、その中には気象の観測を主目的とした気象衛星の運用も含まれるけれども、水域における温度分布からの漁場の推定、地形や地質からの地下資源の探査、異なる波長の光でとった画像情報による農林資源の分析といったことが、次第に成果をあげてきている。

宇宙飛行士の「地球は青かった」という言葉に象徴されるように、地球外から地球の姿を見、全体とのかかわりのなかで各部分を観測する地球観測の意義は、極めて大きい。

このような高空からの広域探査は、これまでも航空機などによって行われてきた。たしかに航空機による方が高度が低くだけ詳細に観測できる。しかし、航空機の10km程度の高度に比べ、人工衛星のそれは500~1,000kmであり、しかも地球一周を約1時間半という速さである。宇宙からの観測は、このように、非常に広い地域を一望の下に単時間で観測できるという点が優れていて、他に掛け替えのない技術だといえよう。

このような高空からの広域探査は、通常リモートセンシングと呼ばれている。ただ宇宙空間から地球を見るというだけではリモートセンシングにならない。とくに水産資源や鉱物資源は、表面に出ていることは稀である。地球表面を観測したデータから、何らかの処理をくり返し、必要な情報をとり出すという解析、評価を行って、始めて役に立つ。図-2に示すように、このような一連の作業をリモートセンシングと呼ぶの

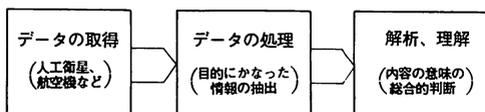


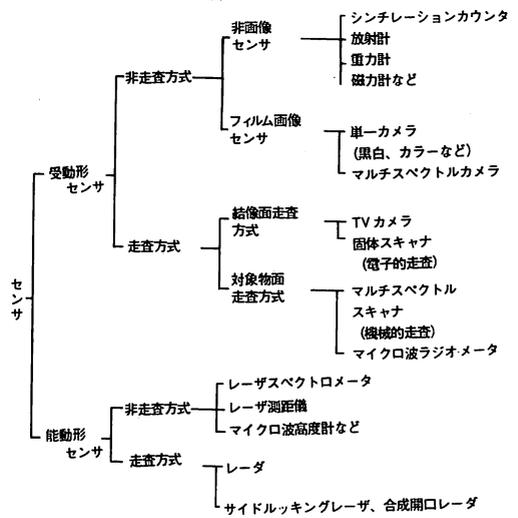
図-2 リモートセンシングの流れ

であって、より精度を高めるために、時にはグラウンドトルースという現場調査も必要になる。

3.2 リモートセンシング衛星

リモートセンシングに使われる観測機器(センサと呼ばれる)は、表2に示すように、いろいろなものがある。初期の航空機リモートセンシングではカメラも使用されている。このようなセンサで得られたデータを単独で使う場合もあるが、地下、あるいは水面下の資源となると解析は簡単ではない。多くの場合、いろいろなセンサから得られるさまざまな情報を組み合わせて判断をしてゆく。

表2 リモートセンシングに使われるセンサ



対象物は、一般に図-3に示したように個性的な反射スペクトルをもっている。したがって、特定のスペクトル帯域を選んで比較処理を行えば、目的とする情報がより明確な形で浮び上がることが多い。これが、現在最も普及しているリモートセンシングのデータ処理法

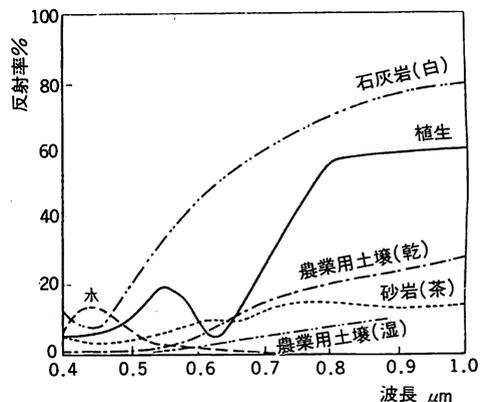


図-3 太陽光による対象物の反射分光特性の例

である。

この目的のセンサを積んだ人工衛星は、1963年頃からNASAが米国農林省などと協力して研究を開始し、1972年に打上げられて、ランドサット1号と命名された。その後、ランドサット2号が1975年、3号が1978年、4号が1982年、5号が1984年に打上げられている。(図-4参照)

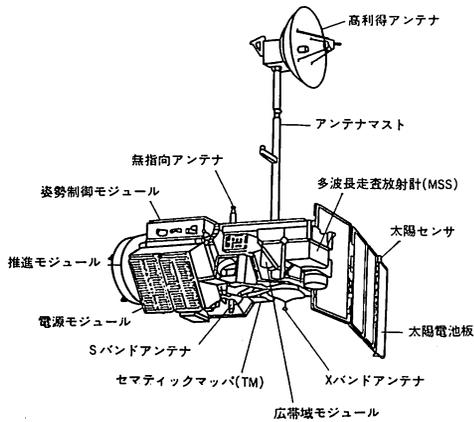


図-4 ランドサット5号衛星

我が国でも海洋観測衛星1号(MOS-1)及び地球資源衛星1号(ERS-1)が開発中であって、近く打上げられることになっている。もちろん欧州にも同じような計画がある。特にフランスが打上げるSPOTと呼ばれる衛星は、立体視の機能を有し、データは一般に頒布されることになっている。

光学センサにおける地表分解能、スペクトル帯域とその区切り方、データ取得の時刻、継続性、反復性などは、目的によって要求が異ってくる。次第に利用に適したセンサの開発が行われるようになっている。

例は多くないが、光学センサの外に、マイクロ波のような電波を使うセンサも搭載されることがある。海面の状況、降雨、水温などの観測に有効だとされている。

3.3 人工衛星データの利用

初期のころからリモートセンシングデータを積極的に利用して成果をあげた分野の一つに、農業がある。特定の植物の反射スペクトルに注目してデータ処理を行い、例えば世界的スケールでの小麦、大豆、とうもろこしなどの作付面積や生育状況の調査と収穫量予測を行うという実験は、米国において1982年に成功している。

実際には、麦の作付状況までは分かるが、どれだけ穂がついて、実が入っているかを知ることは無理があ

らう。しかし、この方法で、人類の最大の関心事である食糧資源に関して、その年の需給状況が見通せるようになってきたことは、注目に値する。

同じようなことは森林資源についても試みられている。伐採、自然災害、病虫害による枯損、造林など、森林のさまざまな時系列変化を広域的に短時間に把握することができる。わが国では農林水産省の林業試験場が中心になって、このような森林資源調査の研究が進んでいる。より精度をあげるためには、宇宙空間で取得したランドサット衛星のデータだけでは十分でなく、図-5に示したような多段サンプリング手法が組合

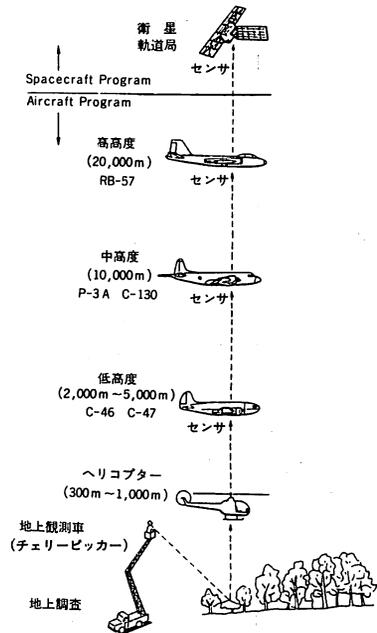


図-5 多段的データ収集システム

わされるが、経費のかかる大変な仕事である。現在では、熱帯林から寒帯林までのさまざまな森林タイプを、ランドサット等のデータから、その気候的情報を加味することにより、実利用できる精度で解析可能な技術レベルに達している。ただ雲の多い熱帯多雨林地域のデータ取得は難しい。このような地帯の森林資源調査は今後の課題である。

リモートセンシングによる海域観測は、各国の重要な産業である海洋生物資源についての有用な情報を与える。それは大別して

- ① 生産性の高い漁場についての経時的な情報
- ② 漁場を合理的に管理するための情報

となる。米国では1972年以来、漁場と魚群の挙動を航空機と人工衛星を使って調査し、そのデータをも

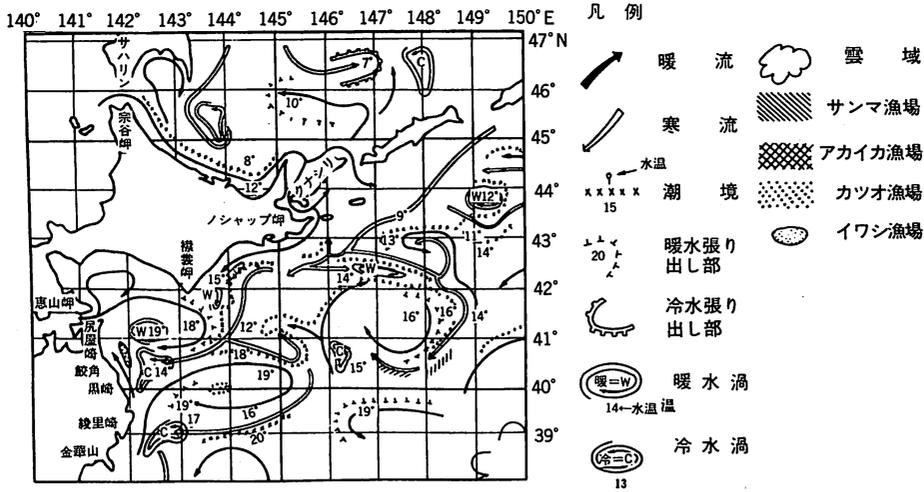


図-6 人工衛星利用漁海況図

とにシミュレーションと漁船の漁獲量による検証実験とが実施されている。わが国では漁業情報サービスセンターが同様の試みを行い、図-6に示したような漁海況図を作り、無線ファックス等で洋上の漁船に定期的に広報配布するまでになっている。

漁場の予測は、直接魚の姿が見えるわけでもないので、海水温、クロロフィル量、海水の混合層、潮目など、魚群との関連の深い項目から解析してゆくより仕方がない。必要とする測定器の有無、精度、軌道などから、現在ランドサット衛星とノア衛星（米国の環境衛星）のデータが使われている。それでも日本海のように雲の多い海域のデータ入手、中層と表皮水温の差違など、まだ問題が残っている。ブイを使って水深50m付近の水温を測定し、人工衛星により短時間にデータを収集していくシステムも検討されている。

3.4 地熱と鉱物資源の探査

わが国は世界有数の火山国で、地熱資源に富んだ国土を持っている。したがって、古くからこれをエネルギー源として利用しようという試みがなされてきた。特に石油危機からは、サンシャイン計画の一環として新エネルギー総合開発機構が担当し、全国地熱資源総合調査を実施して地熱資源の賦存量の把握を目ざしている。

この調査では、レーザ映像、ランドサット衛星のリモートセンシングデータ、空中磁力（キューリー点法調査）、重力などの物理探鉱技術を駆使する。これらの解析結果の組合せから、地下構造図や地質構造図が作られる。

地熱にも勝って重要なのは、金属、非金属などの鉱

物資源、また石炭、石油、天然ガスなどの化石燃料資源の調査である。この場合も地表に露出していれば、そのものの反射分光特性をたよりに解析ができるかも知れないが、実際問題として例が少ない。鉱床自体の規模も、宇宙から得られるリモートセンシングデータの地表分解能（現在30m程度）に比べて、それほど大きなものではないから、本来案に発見できるという性質のものでもない。さらに多くの場合、表面は植物で覆われている。

宇宙からの調査は、現地調査やボーリングの前の概査段階で広域データを経済的に取得するのに有効だとされている。リモートセンシング衛星からのデータに加えて、レーザ映像、航空機による空中磁力、重力などを利用することは、地熱の場合と同じである。

このような各種データを組み合わせて地下構造や地質構造を推定し、その後のボーリングに至る探査の方針を決定していくわけである。わが国では通産省の地質調査所、金属鉱業事業団、石油公団、資源観測解析センターなどが中心となって、この分野で研究と開発を進めている。

最近話題になっている南九州地方菱刈における高品位金山の発見過程において、宇宙からのリモートセンシングデータが利用されたと言われ、それに基づく地質構造の科学的理解の進歩が成功に結びついたものと考えてよい。

このような短時間の広域データ取得には、将来の宇宙基地を別にすれば、人工衛星をおいて外にない。それで、わが国でも1991年に打上げる予定で、地球資源衛星ERS-1の開発を進めている。この衛星の特徴

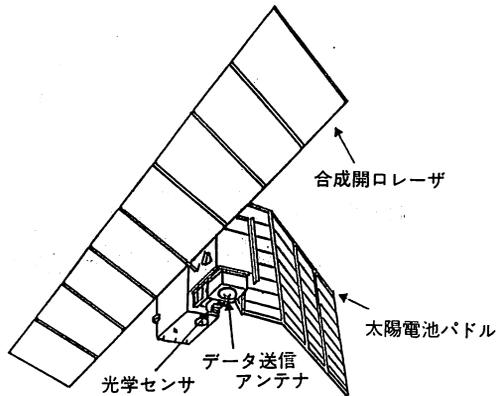


図-7 地球資源衛星ERS-1

は合成開口レーダ（SAR）と呼ばれる画像レーザにより地形情報が雲の有無にかかわらず取得できること、短波長赤外領域のセンサを搭載すること、地表分解能として20m以下を目指していることなどである。計画中の衛星の概要を図-7に示す。

資源という点では水も大切である。各地の冰雪状況や世界的な降水量の調査などは、今後の課題だとされる。冰雪の場合、厚さを知る必要があるが、宇宙からこれを調査することは難しい問題である。雨については、短時間の降水が乾燥地帯と言われている地域でも存在するのではないかという意見もあり、地球規模で

の衛星による継続的モニタリングシステムを作る提案が出ている。

農林水産関係の生物資源と異なり、地熱や鉱産物関係の資源の場合、定期的に継続性をもってリモートセンシングデータを取得する必要性は薄い。極端に言えば、よいデータを一回だけ取ればよいとも言える。むしろ異った種類のデータを多数集めることの方が役に立つことが多い。

4. おわりに

今後の宇宙開発と利用とはどのようなになるのか、むずかしい問題である。使い捨てロケット時代から、スペースシャトルのような宇宙往還システムの時代となり、有人の宇宙基地を中心とした活動が盛んになると見てよいのではないだろうか。

それにもかかわらず、地球外の資源の利用は、宇宙発電所構想も含めて、当分困難だと思われる。むしろ宇宙基地を含めていろいろな形での地球観測が行われる。そして、そのデータから資源を解析する技術の向上とあいまって、地球上の資源問題についての宇宙の寄与は一段と大きくなるに違いない。

地球規模での観測こそ意義がある故に、わが国もこの分野で、積極的に人類すべてに貢献する姿勢をとることが大切である。なお一層の発展を願ってやまない。

