

# 地球と惑星のリモートセンシング

山口 靖<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

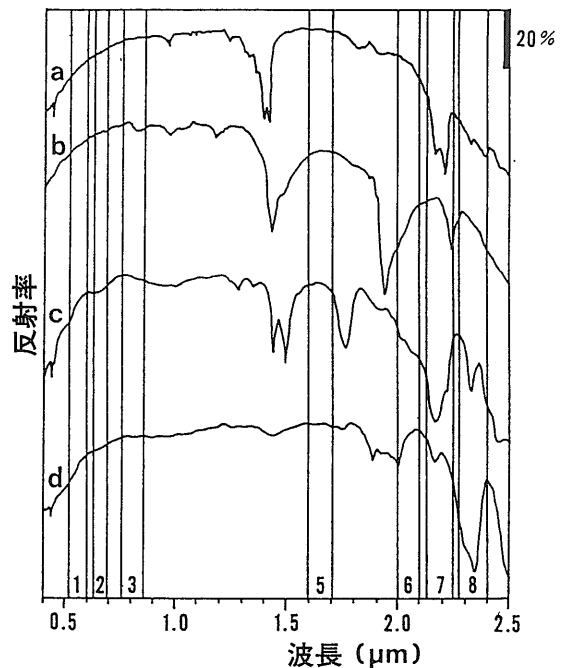
リモートセンシングは、「電磁波を用いた広域探査法」と定義され、惑星探査においては依然として主要な観測手段となっている。特に高分解能のイメージャによって取得された画像について、地質学的な知識に基づいた判読・解析が必要不可欠である。米国航空宇宙局(NASA)による過去の惑星探査ミッションにおいては、それまで地球を対象として研究を行ってきた地質学者が、惑星探査プロジェクトの進展に伴って急遽、大動員され、画像の判読・解析に当たった例もあると聞いている。筆者は、これまで地球を対象としてリモートセンシングデータの解析・判読を数多く行ってきた。最近では、通産省が進めている地球観測衛星搭載用のセンサ開発プロジェクトに対しても、センサの観測性能に対するユーザ要求の明確化を進めている。このような経験は、将来の惑星探査ミッションにも生かすことができるであろう。ここでは、地球観測衛星のセンサと画像の解析例などについて紹介する。

## 2. リモートセンシングで何がわかるか？

### 2.1 スペクトルパターンによる岩相識別

岩石や鉱物は、その組成に応じて電磁波の特定の波長で吸収を示すため、スペクトルパターンの観測を行うことにより、表面の組成をある程度まで知ることができる。可視～短波長赤外域(0.4～2.5  $\mu\text{m}$ )では、太陽光の反射をセンサによって捉えることになるが、この波長域では酸化鉄鉱物や粘土鉱物などが特徴的な吸収を持つ(Hunt, 1979)。例えば酸化鉄鉱物では、 $\text{Fe}^{2+}$  や  $\text{Fe}^{3+}$  の存在のため、波長0.4～0.6  $\mu\text{m}$  と0.8～1.0  $\mu\text{m}$  付近に幅の広い吸収が

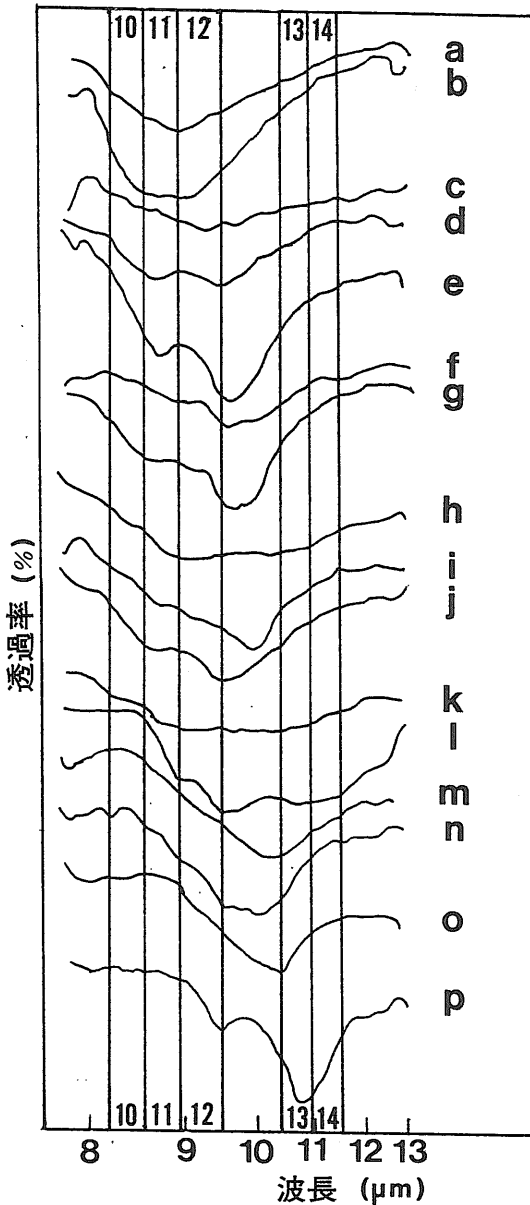
起こる。造岩鉱物として重要な輝石類やオリビンも、波長0.8～1.1  $\mu\text{m}$  付近にブロードな吸収特徴を持つ。輝石類では、吸収のピーク波長とその組成の  $\text{Fe}/(\text{Mg}+\text{Fe}+\text{Ca})$  比との間に直線的な関係が認められる(Adams, 1974)。粘土鉱物では  $\text{OH}^-$  や  $\text{H}_2\text{O}$  により、1.4, 1.9, 2.2  $\mu\text{m}$  付近に強く鋭い吸収特徴が現れる(第1図)。また、炭酸塩鉱物では  $\text{CO}_3^{2-}$  の存在ため2.3～2.4  $\mu\text{m}$  付近に強い吸収が起こる。こうしたことから、地球上での大気の窓に当たる可視～短波長赤外域は、リモートセンシングの地質への応用においては重要な帯域と見なされ、ほとんど



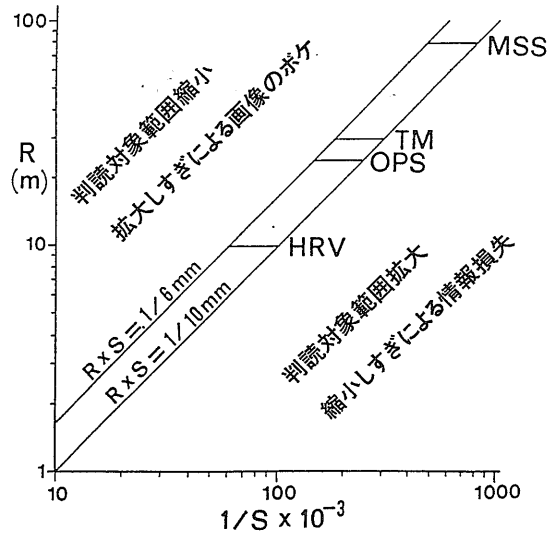
第1図 代表的な粘土鉱物、炭酸塩鉱物の可視-近赤外反射スペクトル。(a) kaolinite, (b) montmorillonite, (c) alunite, (d) calcite. 数字で示した波長域は、地球資源衛星1号(JERS-1)/OPSの観測バンド。

1) 地質調査所 国際協力室

キーワード：リモートセンシング、惑星探査、隕石孔、人工衛星、JERS-1、ASTER



第2図 代表的な岩石の熱赤外域の放射率スペクトル(測定は透過率で行われている; Vickers and Lyon, 1967をもとに加筆修正). (a) dacite, (b) granite, (c) pumice, (d) trachyte, (e) quartz syenite, (f) andesite, (g) nephelene syenite, (h) hypersthene andesite, (i) quartz diorite, (j) augite diorite, (k) basalt, (l) plagioclase basalt, (m) peridotite, (n) serpentinite, (o) limburgite, (p) dunite. 数字で示した波長域は、ASTERの観測バンド.



第3図 肉眼での画像判読のための最適縮尺(S)とセンサの地上空間分解能(R)との関係(Yamaguchi, 1985をもとに加筆修正).

すべての地球観測衛星で観測対象とされている。

熱赤外域(8~12 μm)は、常温付近の物質が最大電磁放射を行っている帯域に相当し、温度情報を与えてくれる。また、この波長域の岩石の放射率パターンは、岩石中のシリカ(SiO<sub>2</sub>)含有率と相関があるため(Vickers and Lyon, 1967)、熱赤外域の多バンドセンサにより珪酸塩岩の識別を行うことが可能である(第2図)。さらに長い波長のマイクロ波域(1 cm~1 m)では、表面の粗さや誘電率の違いが応答に影響し、岩相識別に役立つことがある。表面の粗さの基準は、照射波の波長や入射角に依存するため、スペースシャトルを用いたSIR実験で行われたような多重波長、可変オフナディア角とすれば、より細かい岩相識別が可能となる。

## 2.2 地形パターンに基づく地質解析

地形パターンの解析は、写真地質判読として古くから行われてきた方法に代表されるが、空間分解能が重要なパラメータとなる。第3図に示すように、肉眼判読では、画像の最適縮尺Sと、センサの空間分解能Rとの間にR×S=1/10~1/6 mmという関係が提案されている(Yamaguchi, 1985; Light, 1990)。すなわち、まず観測目的によって必要な縮尺が決まり、さらにこの関係式によって必要なセン

サの空間分解能が決まる。例えば、縮尺20万分の1程度での広域的な地質構造解析においては20~30 m, 縮尺1万~5千分の1程度での地滑りなどの観察では0.5~1 mの空間分解能が必要である。惑星探査の場合には、対象とする天体の既存情報は、通常は地球よりもはるかに乏しいため、地球観測の場合よりも低い空間分解能でも十分に有効であることが多い。一般にユーザは、空間分解能は高ければ高いほどよいと考える傾向がある。しかし、観測目的に対して不必要に高すぎる空間分解能は、後のデータ処理の負担を増加させるだけである。また、惑星探査では探査機のリソースに強い制約があることが多く、観測刈幅、スペクトル/ラジオメトリックな観測性能、データ量などとのトレードオフを十分に考慮し、観測目的を満たせる範囲内での最適値を選択しなければならない。

また、写真地質判読においては立体視による観察が有効である。立体視における重要なパラメータにBH(基線・高度)比がある。一般にBH比が高いほど地形の垂直誇張率は大きくなり、微細な地形起伏の判読が行い易くなる。しかし、地形が急峻な地域においては、BH比が大きすぎると垂直誇張率が強すぎて、かえって判読がやりにくくなる場合がある。経験的には、BH比0.6前後が肉眼判読には適

当で、1.0ではやや大きすぎるようである。

### 2.3 地形の計測

地形の計測には、いくつかの方式があるが、地球観測衛星で最も広く用いられているのは、光学センサによる立体視である。立体視方式には、JERS-1/OPSで採用された同一軌道内方式と、SPOT/HRVの側方視方式がある。地球を対象とした場合には、雲のない立体視ペアの取得確率を高くできること、立体視ペア間の撮像時間差が小さく対応点が検索しやすいことなどから、前者の方式のほうが優れているとみなされている。センサパラメータとしては、例えば5万分の1程度の大縮尺の地形図(等高線図)を作成するためには、等高線間隔は20 m以下、高さ計測精度は約6 m以下が要求され、これを実現するためには、BH比0.6ならば空間分解能は10 m程度以下とする必要がある。

光学センサ以外では、合成開口レーダ(SAR)の立体視ペアを用いる方法、高度計を用いる方法などがある。しかし、SARの立体視画像ペア上での対応点の検索は、マイクロ波の後方散乱強度の入射角依存性が強いいため、光学センサ画像よりもかなり難しいと言われている。最近では、干渉計型のSARによる地形計測に期待が集まっている。干渉計型

第1表 地球資源衛星1号(JERS-1)搭載センサの主要諸元。

O P	観測波長域	バンド 1 : 0.52-0.60 $\mu$ m
		バンド 2 : 0.63-0.69 $\mu$ m
		バンド 3 : 0.76-0.86 $\mu$ m
		バンド 4 : 0.76-0.86 $\mu$ m (バンド 4 は前方視)
		バンド 5 : 1.60-1.71 $\mu$ m
		バンド 6 : 2.01-2.12 $\mu$ m
		バンド 7 : 2.13-2.25 $\mu$ m
		バンド 8 : 2.27-2.40 $\mu$ m
S	地上分解能	18.3 x 24.2 m
	立体視 BH比	0.3
	走査幅	75 km
	量子化ビット数	6 ビット
	検出部	4096 素子 CCD/ハント"
	データレート	30 Mbps X 2 チャンネル
S	周波数	1275 MHz (L-ハント")
	地上分解能	18 x 18 m (3 ルック)
	オフナディア角	35 度
A	走査幅	75 km
	NE $\Delta$ $\sigma$	-20.5 dB 以下
R	送信電力	約 1.3 kW
	量子化ビット数	3 ビット
	データレート	30 Mbps X 2 チャンネル



第4図 北海道静内地域の JERS-1/OPS(VNIR)画像(©NASDA/MITI 1992).

SAR では、立体視のように対応点を検索するといった煩雑な作業は必要ない。また、この方法は、理論的には cm 以下の地形変化を検知できるといわれ (Gabriel et al., 1989), もし実用化されれば、火山噴火予知、活断層モニタリングによる地震予知、地滑り監視などに絶大な効果が期待される。惑星探査においても、表面での地質的活動(活断層や地滑り)が起こっているかの確認に使えるはずである。

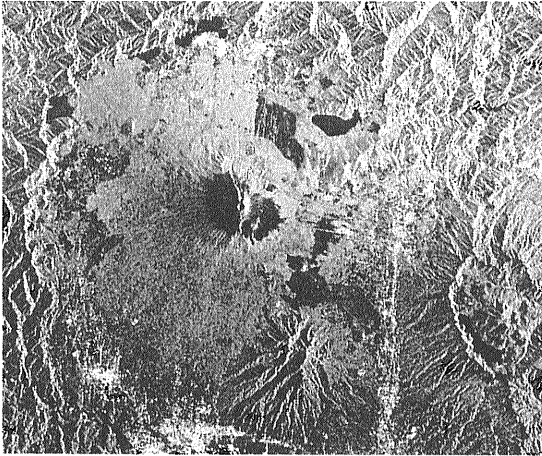
### 3. 地球観測におけるリモートセンサの例

#### 3.1 地球資源衛星 1号(JERS-1)

JERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite-1) は、通産省と宇宙開発事業団が共同開発した地球観測衛星で、1992年2月11日に打ち上げられ、現在、合成開口レーダ(SAR)と光学センサ(OPS)の2つの搭載センサ(第1表)がデータ取得を行っている(山崎, 1993; 西代, 1992)。これらのセンサの仕様については、資源ユーザからの要望を中心に様々な面からの検討が重ねられた。OPSの公称空間分解能は $18.3 \times 24.3$  mで、Landsat/TM(空間分解能

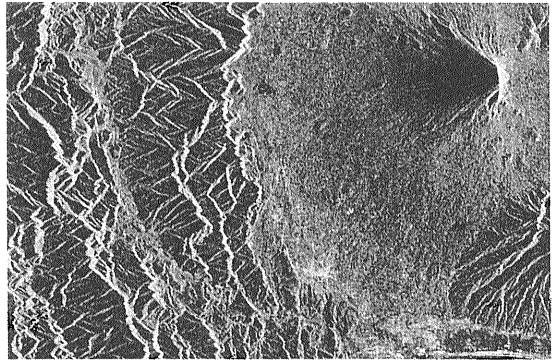
30 m)よりも細かい地形識別が可能のようである(第4図)。OPSの短波長赤外域のバンド6, 7, 8は、粘土鉱物や炭酸塩鉱物などの吸収特徴を捉えることを目的としており(第1図)、熱水変質帯や石灰岩などのマッピングが期待されている(Yamaguchi, 1987)。しかし、これまでの解析結果によれば、これらのバンドで衛星進行方向でのディテクタの応答遅れが認められ、岩相識別への悪影響が懸念されている。また、OPSは前方一直下視方式によるBH比0.3の立体視機能をもつが、これは垂直誇張率では約2倍に相当する。立体視による高さ計測精度は数10 mとみられ、作成可能な地形図縮尺は20万～50万分の1程度である。

SARはマイクロ波を用いた能動型センサで、雲や霧などを透過して地表面を撮像することができる。SARでは、オフナディア角を大きくするほど画像上の地形歪が小さくなるため、JERS-1/SAR(オフナディア角 $35^\circ$ )のほうが、海洋観測を主目的とする欧州宇宙機構のEERS-1/SAR(同 $23^\circ$ )よりも、地形・地質構造判読に適している(第5図、第6図)。また、JERS-1で採用されたLバンド(波長約20



第5図 富士山周辺のJERS-1/SAR画像(©NASDA/MITI 1992).

cm)のマイクロ波は、草や樹木の葉はほとんど透過し、幹や枝では散乱されるのに対して、EERS-1のCバンド(波長約4 cm)では植物の葉で散乱される。このため、JERS-1/SARのほうが植生の識別、特に森林と草地や農地の識別には有効であった。さらに、SAR画像上で描き出される地形テクスチャは、岩相の違いを反映しており、広域的な地質判読に有効であることが確認された(山口ほか、1992)。



第6図 富士山周辺のEERS-1/SAR画像(©ESA 1991, Courtesy of NASDA).

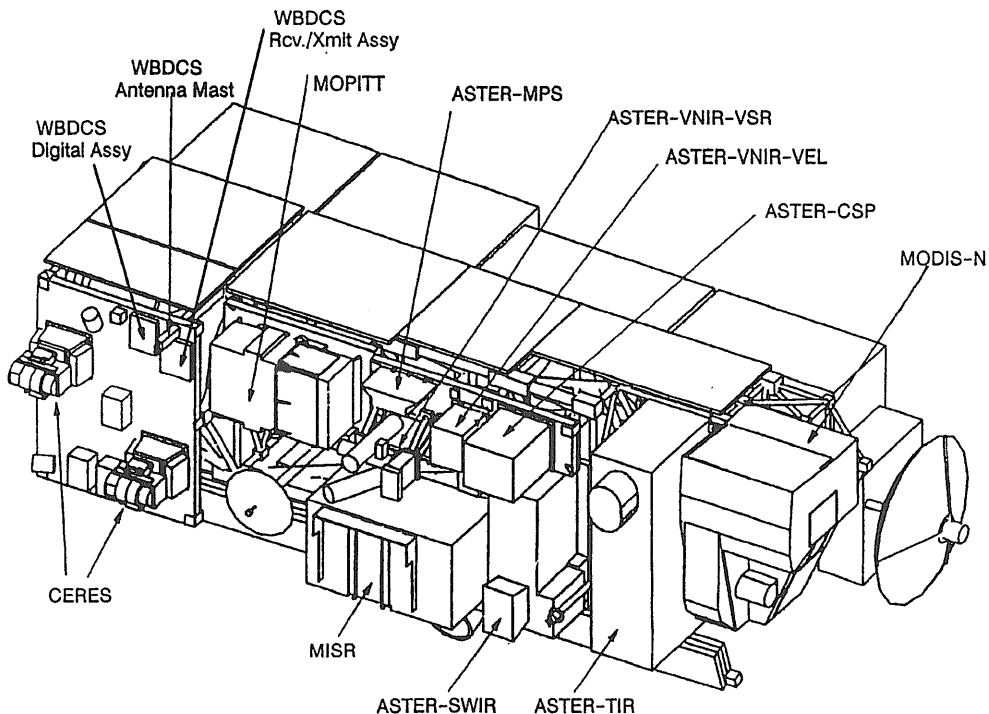
### 3.2 ASTER

米国航空宇宙局(NASA)は、地球環境変動の科学的理解を目的としてEOS (Earth Observing System)計画を進めており、多数の地球観測衛星の打ち上げと、EOS-DIS (EOS Data and Information System)と呼ばれる情報ネットワークの構築を計画している。この計画の一環として1998年に打ち上げられるEOS-AM1衛星へ搭載するため、通産省はASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)という高分解能イメージャの開発を行っている。ASTERは、JERS-1/OPSの後継的な性格を持ち、可視～短波長赤外域

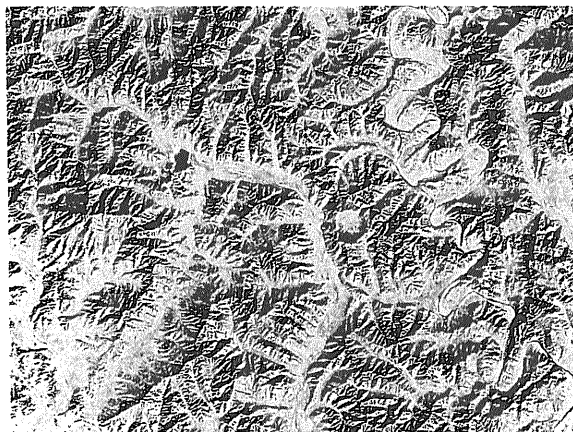
第2表 ASTERに対する基本性能要求。

サブシステム名	バンド No	観測波長域 ( $\mu\text{m}$ )	ラジオメトリック 分解能	空間 分解能
VNIR	1	0.52-0.60	$\leq 0.5\%$	15 m
	2	0.63-0.69		
	3	0.76-0.86		
SWIR	4	1.60-1.70	$\leq 0.5\%$	30 m
	5	2.145-2.185	$\leq 1.3\%$	
	6	2.185-2.225	$\leq 1.3\%$	
	7	2.235-2.285	$\leq 1.3\%$	
	8	2.295-2.365	$\leq 1.0\%$	
	9	2.36-2.43	$\leq 1.3\%$	
TIR	10	8.125-8.475	$\leq 0.3\text{ K}$	90 m
	11	8.475-8.825		
	12	8.925-9.275		
	13	10.25-10.95		
	14	10.95-11.65		

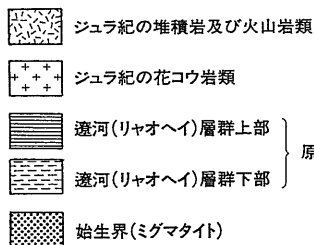
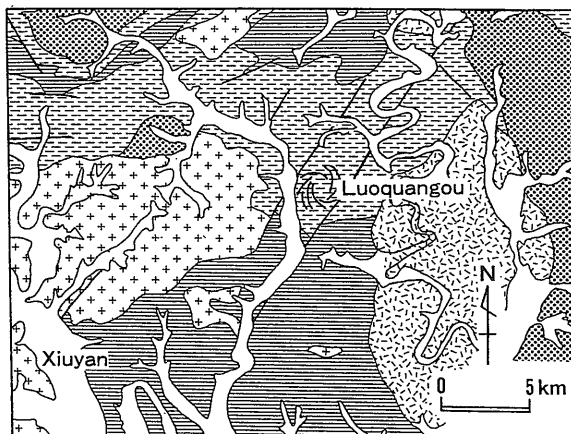
立体視 B H 比	0.6
走査幅	60 km
クロストラック方向の ポインティング機能による 観測可能範囲	272 km



第7図 NASAの地球観測衛星EOS-AM1に搭載されるセンサ。



第8図 中国遼寧省の環状構造周辺のLandsat/TM画像。



第9図 中国遼寧省の環状構造周辺の地質図。

の9つのバンドの他、熱赤外域にも5つのバンドを有し(第2表, 第2図), 高空間分解能での温度測定や, 珪酸塩岩のマッピングに有効なデータを提供することが期待される(津, 1992; Yamaguchi et al., 1993). また, ASTERはBH比0.6の直下/後方視による同一軌道内立体視機能を持ち, グローバルなDEM (Digital Elevation Model)作成などに期

待が集まっている。ASTERが搭載されるEOS-AM1には、性格の異なる様々なセンサが同時に搭載される予定で(第7図)、これらのセンサとの複合的なデータ利用により、データ解析や相互校正などの精度向上が見込まれている。

#### 4. リモートセンシングによる衝突クレータの発見

月や内惑星などの表面には、数多くの衝突クレータが認められる。しかし、地球上では水による強い侵食作用により、小さな衝突クレータは他の天体におけるよりも極めて短時間で消滅してしまう。地球表面に残っている衝突クレータを効率的に捜し出す手段として、宇宙空間からリモートセンシングによって撮った画像が有効であることは、NASA等の研究者が古くから主張してきた。筆者らは、中国東北部遼寧省のLandsat/TM画像(第8図)において、直径約1.2 kmの明瞭な環状構造(凹地)を発見した(Yamaguchi, 1989)。この構造は、従来の中国側地質図では渦巻状断層として描かれているが(第9図)、現地調査の結果、衝突クレータである可能性が高いものと考えている。こうした例は、高分解能の画像の普及により今後も増えてゆくであろう。

#### 5. おわりに

今後、わが国でも惑星探査ミッションが計画、実施されてゆくことは確実である。地質調査所には、ここで紹介したリモートセンシングデータの解析・判読をはじめとして、地球を対象とした様々な分野での研究経験がある。今後、機会があれば、このような経験を惑星探査にも生かしてゆきたいと考えている。

#### 引用文献

- Adams, J. B. (1974) : Visible and near-infrared diffuse reflectance spectra of pyroxenes as applied to remote sensing of solid objects in the solar system. *Jour. Geophys. Res.*, 79, 32, 4829-4836.
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M. and Zebker, H. A. (1989) : Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. *Jour. Geophys. Res.*, 94, B7, 9183-9191.
- Hunt, G. R. (1979) : Near-infrared (1.3-2.4  $\mu\text{m}$ ) spectra of alteration minerals —potential for use in remote sensing—. *Geophysics*, 44, 1974-1986.
- Light, D. L. (1990) : Characteristics of remote sensors for mapping and earth science applications. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56, 1613-1623.
- 西代 孝(1992) : JERS-1 初期画像の解析と今後の展望. *機械振興*, 25, 9, 18-28.
- 津 宏治(1992) : ASTER プロジェクトの概要. *機械振興*, 25, 9, 36-41.
- Vickers, R. S. and Lyon, R. J. P. (1967) : Infrared sensing from spacecraft —a geologic interpretation. *Proc. Thermophysics Spec. Conf. American Institute of Astronautics*, Paper 67-284.
- Yamaguchi, Y. (1985) : Image-scale and look-direction effects on the detectability of lineaments in radar images. *Remote Sensing of Environment*, 17, 117-127.
- Yamaguchi, Y. (1987) : Possible techniques for lithologic discrimination using short-wavelength-infrared bands of the Japanese ERS-1. *Remote Sensing of Environment*, 23, 117-129.
- Yamaguchi, Y. (1989) : Origin of Luoquangou circular structure in Xiuyan Area, Liaoning Province, northeast China. *Rep. Inter. Research and Development Cooperation ITIT Project No. 8713*, 73-81.
- 山口 靖・津 宏治・浦井 稔・佐藤 功・宮崎芳徳(1992) : JERS-1 ユーザ要求仕様の画像データによる予察的評価. *日本リモートセンシング学会誌*, 12, 3, 93-98.
- Yamaguchi, Y., Tsu, H. and Fujisada, H. (1993) : Scientific basis of ASTER instrument design. *Inter. Soc. Optical Engineering (SPIE) Proc.*, 1939, 150-160.
- 山崎 章(1993) : 地球資源衛星1号(JERS-1)の現状と方向について. *日本リモートセンシング学会誌*, 13, 1, 59-66.
- 
- YAMAGUCHI Yasushi (1994) : Remote sensing of the earth and planets

〈受付：1993年5月27日〉