

宇宙からの地球リモートセンシング技術

中 正夫 Masao Naka

1. はじめに

惑星の地質構造や地球環境などの調査では、ある程度距離をおいて見ないとよくわからない物がある。このような調査や広域の探査には、現地調査や航空機調査よりも、宇宙からのリモートセンシング技術が非常に有効である。そこで宇宙からの地球リモートセンシング技術の現状について、画像取得の方法と得られる画像の特性、取得済み画像データの検索方法、画像データの解析方法、などの基礎事項を紹介する。

2. 地球観測衛星による画像取得の方法と画像の特性

衛星リモートセンシングによる地球観測は、1972年米国のLANDSAT 衛星により開始された。地球を観測するためには地球についての情報が、地球周回衛星（高度500～1000kmの周回軌道上にある）に搭載されたセンサーまで届く必要がある。地球のリモートセンシングには、可視からマイクロ波までの波長の電磁波が用いられる。このうち、可視波長から熱赤外波長までの電磁波、つまり光で観測するセンサーは光学センサー、それ以上長いマイクロ波などの電波で観測するセンサーは電波センサーと呼ばれる。

一方、センサーの働き方からは、受動型センサーと能動型センサーに分けられる。能動型センサーは、電磁波を発射し、それに対する対象物からの反応を測るセンサーである。これに対して受動型センサーは、対象物が自身の性質や状態に応じて出している電磁波や太陽光の反射波を測るセンサーである。

地球のリモートセンシングに最も広く使われているのは受動型光学センサーで、可視近赤外放射計と赤外放射計がある。また最近になって、能動型電波センサーとしてSARセンサー（合成開口レーダー）が使われるようになってきている。以下に、この2つの代表的なセンサーの撮像原理と画像の特徴を簡単に述べる。

光学センサーとその画像

光学センサーは、可視波長（約 $0.40\mu\text{m}$ ）から熱赤外波長（約 $15\mu\text{m}$ ）までの電磁波を用いている。地球は大気で覆われているため、大気中にある水、炭酸ガス、オゾン、塵、雨滴などによって、光は散乱・吸収される。光の透過率が高く、地上からの光がセンサーに届く波長域は、可視から近赤外まで（ $0.4\sim 1.0\mu\text{m}$ ）、中間赤外域（ $1.0\sim 2.5\mu\text{m}$ ）、および熱赤外域（ $8\sim 13\mu\text{m}$ ）の3つに分かれている。

地球観測に用いられる受動型光学センサーの代表的なものに、可視近赤外放射計と赤外放射計がある。これは、イメージング・スペクトロメーターとも呼ばれているもので、観測対象からの

光をいろいろな波長帯に分光して測定することができる。LANDSAT のMSS、TM センサー、SPOTの HRV、MOSのMESSR /VTIRやJERSのOPS、また昨年8月に打ち上げられたADEOSのAVNIR/OCTSなど、すべての地球観測衛星に搭載されている。

ADEOS 搭載AVNIRセンサーの観測概念図を図1に示す。地表分解能約16mの4バンド(マルチバンド、Mu1; 0.42~0.50 μm 、Mu2; 0.52~0.60 μm 、Mu3; 0.61~0.69 μm 、Mu4; 0.76~0.89 μm)と、地表分解能約8mの1バンド(パンクロマチックバンド、Pa; 0.52~0.69 μm)をもち、光電変換検出素子としてCCDリニアアレイ素子(検出素子数はMuバンド5,000個、Paバンド10,000個)を各バンドごとに用いて、地表距離約80kmの観測幅を電子走査する。衛星の進行を利用してこの観測幅で地表を走査していくプッシュブルーム方式で、光学レンズ部で受光した光の強度をCCD面で1画素ごとに電気信号に変換する。また視野方向は衛星の進行と直交する方向に $\pm 40^\circ$ 変更することが可能で、これにより観測頻度が増し、より効率的な観測ができる。

このようにして、マルチバンドでは地表距離16m四方を1画素として、パンクロマチックバンドでは地表距離8m四方を1画素として観測できる。画像データは地表面80km四方を1シーンとして収集し、カタログ化されている。本AVNIRセンサーを搭載しているADEOS衛星は、昨年8月に打ち上げられたもので、世界で最高分解能の画像センサーとして期待されていたが、残念ながら今年6月30日、太陽電池の故障で機能停止した。

AVNIR画像は地表面の反射特性を観測している。植物は観測波長とその生育状況によって反射率が変化するので、植物の種類や生育状況が判別できる。また各物質の反射特性はそれぞれ異なるので、AVNIR画像を用いて地表面の土地利用状況の判別やその状態の把握などが可能になる。また異なる視野角度で特定地域を複数シーン観測できる場合には、ステレオ画像処理によって、標高データや複雑な地形情報を抽出して利用することができる。

SARセンサーとその画像

SARセンサーでは、衛星の進行直交方向(レンジ方向)はパルス圧縮技術を用い、軌道方向(アジマス方向)には合成開口技術を用いることにより、通常のレーダーよりも高分解能化している。SARセンサーは進行方向に直角に斜め下方向にマイクロ波のパルスを次々に送信し、地表面からの反射パルスを受信して、パルスの往復に要した時間からレンジ方向の距離がわかる。距離分解能を高くするためには、パルス圧縮技術を使う。まず、幅の狭い送信パルスは遅延回路を通して送信しやすい幅の広いパルスに広げ、かつそれに高い周波数の信号を乗せて送信する。受信時には、送信時と遅延特性が逆になっている回路を通すことにより、幅の狭いパルスを復元している。日本のJRS-1に搭載されているSARでは、このような圧縮技術でレンジ方向の地上分解能18mを得ている。

またアジマス方向もレンジ方向と同じ分解能にするためには、数kmものアンテナ口径を必要とするので、開口合成の考え方で計算機処理する。すなわち、地上の観測対象物からの反射波が衛星がA点からB点まで移動する間受信され、これが観測目標点からの情報を含んでいると仮定する。それらの受信信号の振幅と位相を記録しておき、その位相がすべての点からの信号について同じ

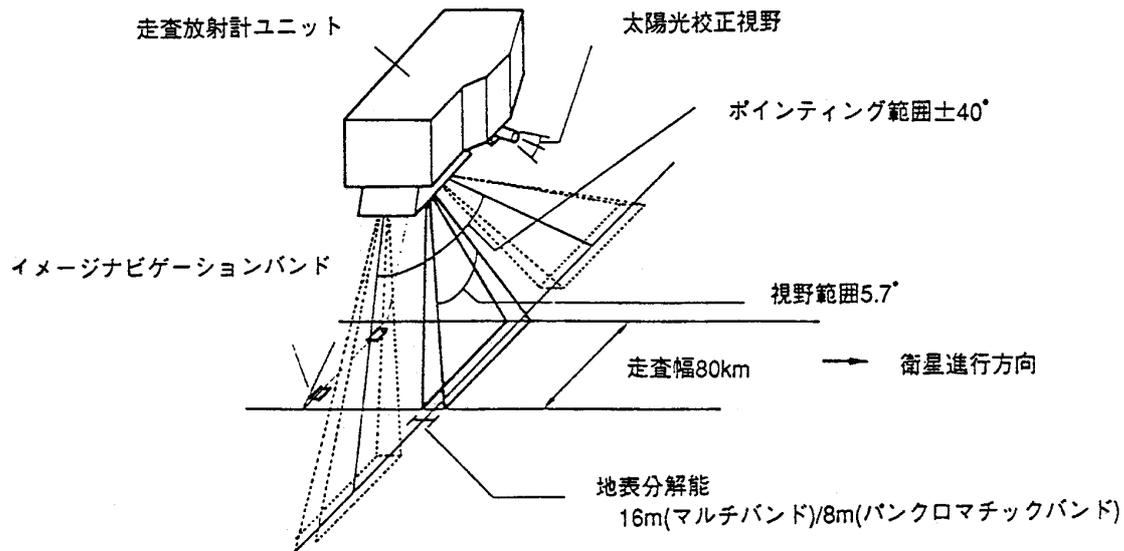


図1 AVNIRセンサーの観測概念図

になるように計算機で合成処理する。JERS-1のSARのアジマス方向の分解能は18m（3ルック）である。本SARデータは地表面18m四方を1画素として観測し、地表面75km四方を1シーンとして収集しカタログ化されている。

SARは電波を利用しているので、昼夜、雲の影響を受けなくて地表面を高分解能で観測できる。SARでは、地形構造、土地利用状況、植物の生育状況（バイオマス）、土壌中の水分量、などの情報が得られるといわれている。また海面の波浪、氷の状況などや、海底の地形が海面の波に影響している場合は、間接的に海底地形などがわかる。またマイクロ波には、物質を透過する性質があるので、条件が整えば光学的に見えない物体がSARで見える可能性がある。LバンドSAR（電波の波長30cm～15cm）は樹木や砂漠の透過性があり、また、植生の下の地形情報がわかるともいわれている。

画像を構成する各画素の濃淡は、 σ° （sigma naught、シグマノート）と呼ばれる「後方散乱係数」の値に対応している。後方散乱係数は、広がりのある面がレーダーの電波を後方散乱する度合いを定量的に表す量である。 σ° が大きければ、画像上では明るく、小さければ暗い。 σ° は散乱面の粗さ、傾き、誘電率、電気伝導度、内部の不均一さ、などによって変わり、また電波の周波数、入射角、送信受信の偏波の組み合わせによっても変わる。

3. 取得済み画像の検索システム

1972年の米国のランドサット衛星以来四半世紀以上になり、世界中で多くの地球観測衛星があげられ、これまでに観測し集積された画像データは膨大なものになっている。このような膨大な画像データの受信・処理や解析処理、あるいはデータベースの効率的な検索・注文には、大規模かつ効率的な分散型の地球観測情報システムが構築されている。この分野の世界各国の衛星計画の調整や衛星データのフォーマットの規格化などを進めている機関であるCEOS（地球観測システム委員会）で検討され構築中のシステムが、地球観測情報システム（EOIS；Earth Observation Data and Information System）である。

EOISはCEOSのガイドラインをもとにNASA、NASDA、ESAでそれぞれシステム構築してきており、各々はネットワークで接続されている。NASDA(宇宙開発事業団)のEOISは、データ総合管理・提供システムとデータ解析処理システムの2つのシステムから構成されている。データ総合管理・提供システムは、地球観測衛星、MOS、JERS、LANDSAT、SPOT、ADEOS等の観測データの受信・記録および標準処理(観測データの輝度補正、幾何歪補正などの前処理を行い、計算機で読み取り可能なテープ化やCD-ROM化する)を行う。データ解析処理システムは、地球観測データの高次処理アルゴリズムの研究・開発、検証のために用いられている。EUS(EOIS User I/F Software)システムはEOISのユーザーインターフェースである。以下に、EUSの機能概要を、データ検索面を中心に紹介する。

EUSは、ユーザー(研究者を含むデータ利用者)がインターネットに接続された自分の計算機環境から、全世界の膨大な地球観測データの検索や注文をオンラインで行える情報サービス用ソフトウェアである。SUN4系のUNIXワークステーションおよびWindow用パソコンで利用できる。EUS機能概要として、ディレクトリー情報検索、インベントリー検索、画像データの注文などについて、具体的に述べる。

ディレクトリー情報検索

WWW(World Wide Web)ブラウザを用いて、地球観測データのディレクトリー情報(所在)を検索する。直接、NASDAやNASAサーバーURLに入り、データの所在を確認できる。

インベントリー検索

検索したいデータの種類、地理的範囲、観測期間他を検索条件として入力し、自分の欲しいデータセットを検索することができる。

①データの種類の設定

データセット名、衛星(ソース)名、データの種類あるいは物理名でデータの種類が設定ができる。普通は衛星名を選択すると、ウィンドウ画面の左側に、衛星名のリスト、右側に機器(センサー)名のリストが表示される。たとえば、みどり(ADEOS)衛星を選ぶと、搭載されている機器名(AVNIR(Pa. Mu)、OCTS、IMG、ILAS、RIS、POLDER、NSCAT、TOMS)が表示されるので、必要な機器名を選ぶ。

②地理的範囲の設定

ウィンドウ画面左上部には、検索したいデータ四隅の地理的範囲を緯度・経度、またはGRS/WR(衛星ごとに決められた固有の座標を示す数値)で入力する。このようにキーボードでタイプするか、地図表示画面を指定し、そこに表示された矩形領域の緯度経度のコピー・ペーストによって入力することもできる。フランスのSPOT衛星などの衛星名が決まれば、地理的範囲を設定すると、その領域が含まれるGRS/WRS情報がわかる。この情報を入力すれば、簡単かつ正確に、自分の欲しいデータが含まれる画像データのシーン識別記号を知ることができる。

③観測期間の設定

データの観測開始日、終了日を西暦で入力する。また雲量を0から10の範囲で指定できる。

④検索の実行

検索の実行は画面下部のボタンをクリックすると、システムは検索条件に合致するデータを持ったサーバーへ送信されると同時に、検索ステータス画面を表示する。指定された検索条件に合致する画像データ数（カタログ化されたシーン数）の概算値をサーバーより受け取り、さらに検索の絞り込みができる。ユーザーはこの件数を見て、Continue ボタンをクリックして実際の検索を実行する。またCancelボタンをクリックすると、検索条件設定の画面に戻ることができる。

⑤カタログ情報の詳細表示、カバレッジ表示

検索結果が表示されているカタログ情報表示リストから、カタログを1件選択し、Detailボタンをクリックするとインベントリー詳細情報画面が開き、カタログの詳細情報（たとえば太陽高度、雲量、軌道方向など）が表示される。

また、同様にカタログ情報表示リストからカタログを複数件選択し、Mapボタンをクリックすると、地図表示画面上に、選択された複数のカタログ情報についてカバレッジが表示される。

⑥ブラウザ画像の表示

検索結果が表示されているカタログ情報リストから、ブラウザ画像の有無が有のカタログを選択し、ブラウザ画像を端末で確認することができる。ブラウザ画像は原画像を間引いて512×512画素程度に圧縮して作成されている。表示では、拡大、縮小、強調表示、緯経線のオーバーレイ、表示画像のプリント等が可能である。

画像データの注文

カタログ情報検索結果をもとに、標準処理された画像データ（標準プロダクト）等を注文する。検索結果に表示されているカタログ情報表示リストからカタログ（シーン）を複数件選択し、Pro. Req.ボタンをクリックする。すると注文に必要な詳細情報が表示されるので、ユーザーコード、電話番号、納入先、利用区分、注文パラメーターとして処理レベル、記録媒体、数量などを指定する。最後に、Send Requestボタンをクリックして、注文要求をサーバーへ送信する。Order No.、Item No.が表示されると、注文が受理されたことがわかる。

4. 画像データの応用解析の方法

地球観測画像データをコンピューター解析するための、基礎的方法の一部について述べる。

スペクトルによる分類処理

リモートセンシング画像データの応用解析では、植生、資源、環境、防災等にわたる有益な地表面情報を抽出することができる。現在最も一般化しているのが、マルチスペクトルデータによる、植生や土地被覆分類、あるいは熱赤外データを用いた地表面温度分布、海面温度分布図等を作成することである。ここでは、地表面被覆の分類解析方法の概念を説明する。

地表面にある各対象物はそれぞれ固有の電磁波を反射または放射している。光学画像センサーで得られる画像データは、地表対象物の色など電磁波の分光反射強度特性を計測している。植物、土、水からの電磁波の反射の強さを波長スペクトル別にグラフ化すると、図2のように全く違った曲線になる。このように対象物の反射強度を波長別にとらえて比較すれば、地表面対象物、たとえば植物、土、水をはじめ、森林、田畑、市街地、河川等に分類することが可能になる。これが、分光反射特性にもとづく地表面被覆分類の基本的考え方である。

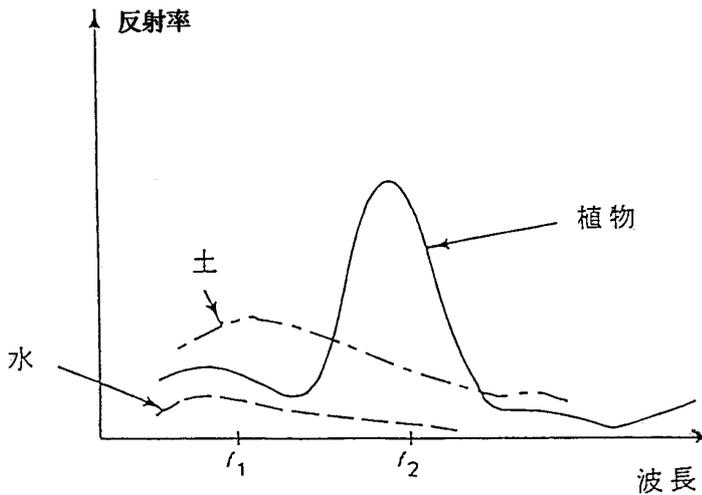


図2 対象物のスペクトル特性

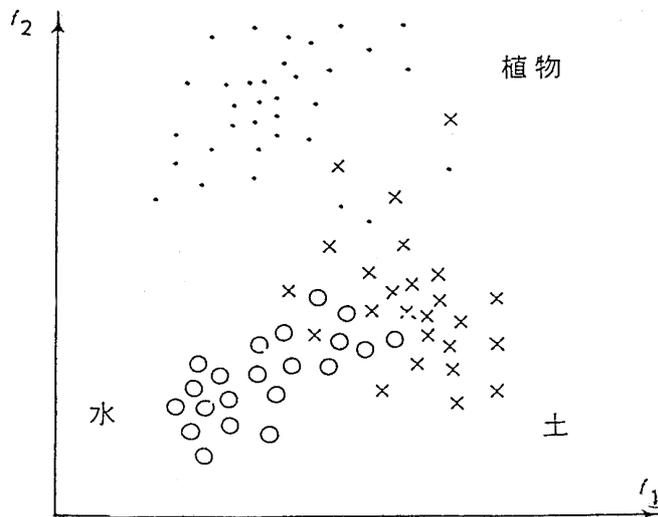


図3 スペクトル空間における対象物の分布

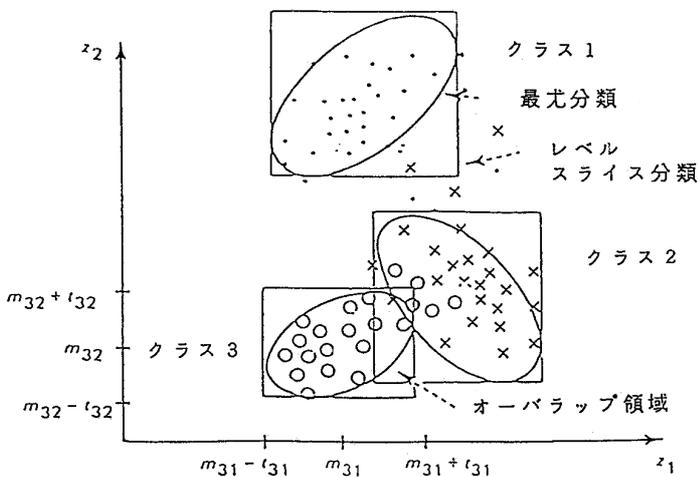


図4 最尤法とレベルスライス法の境界

リモートセンシングでは観測系の雑音や対象物の分光反射特性の変動等のために、観測データはランダム過程からのサンプルデータと見なせる。したがって観測データの特徴、すなわち画像データはランダムな変数である。地表対象物について特定の波長 f_1 、 f_2 における反射スペクトル特性を2次元平面上にプロットすると、この場合のスペクトルパターンの分布すなわちクラスター状況は図3のようになる。このように観測データのスペクトルパターン集合が与えられると、統計的決定理論を用いて、植物、水、土の3クラスに自動分類することができる。この場合、分類境界線は矩形領域、あるいは楕円領域で示することができる(図4)。前者はレベルスライス法、後者は最尤法を適用することにより得られる。

空間的処理の例

空間処理には、リニアメント抽出、ステレオ画像からの標高抽出、立体画像の作成、テクスチャー処理等がある。

リニアメント抽出は、炭化水素や金属資源を始めとする非再生資源、地熱資源や地下水など再生資源の探査、特にこれら資源の広域的な概査段階の資料として利用されている。リニアメントは画像データの濃度やテクスチャーが急激に変化する画像のリニアフィーチャー(エッジ要素、線的特徴など)をエッジ検出オペレーターで求め、これから地質学的に意味のあるものを分類し選択して求められる。エッジ検出には微分フィルター等が用いられる。

地球観測データから標高データを抽

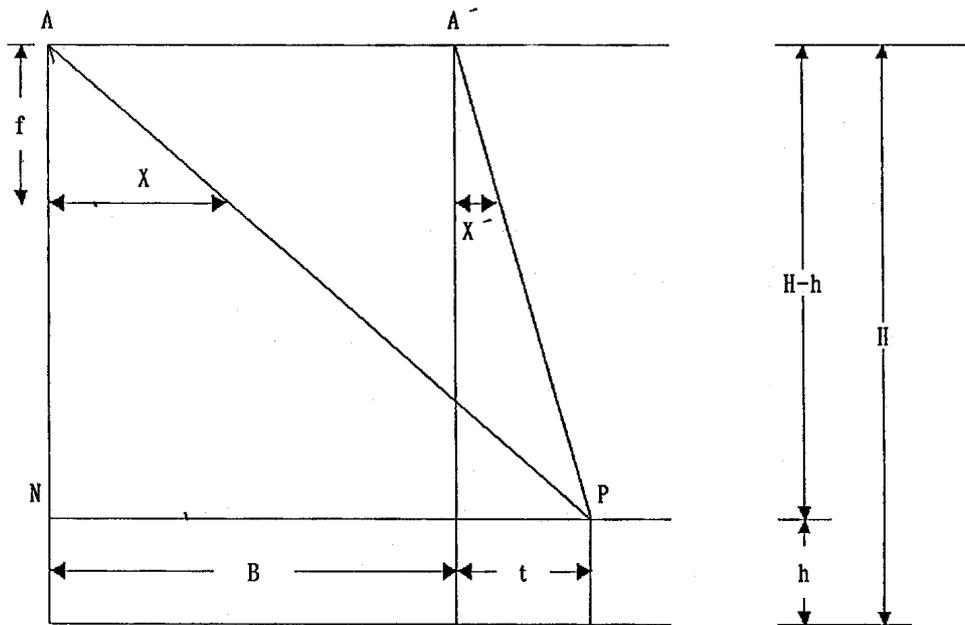


図5 ステレオ画像からの標高データ (h) 算出方法
 A・A' : カメラ位置、P : 撮像点 (高度 h)、H : 衛星の高度、B : カメラ間距離 (ベースライン長さ)
 f : カメラのレンズ焦点距離、p : 左右画像における視差 (X-X')

出することも可能である。フランスのSPOT衛星は、異なる軌道からポイントングミラーの向きを変えて同一の地表面を撮影し、ステレオ画像を得ることができる。この画像をフィルムに焼きつけて写真測量で用いられる解析図化機にかけて、オペレーターが立体観測して視認したステレオ対応点をもとに等高線を描く方法がある。また、デジタルステレオ画像から三角測量原理により、コンピュータープログラムを用いて標高データを自動的に求めることができる。ここでは後者の原理を説明する。

図5のようなカメラ配置でデジタルステレオ画像が撮像されたとすると、三角測量の原理から標高データ h は次式で計算できる。

$$h = H - B f / p$$

視差 p を求めるには、左右画像間の対応点探索が不可欠である。デジタルステレオ画像データの左右の対応点探索を計算機で自動的に行なえば、上式から標高データは簡単に求まる。対応探索処理の基本的な考え方は、まず左右画像の一方から、対応が容易な特徴点を抽出する。それらの特徴点について、他方の画像中で対応探索を行なうことが多い。対応点探索手法は相関法、点や線対応、面や構造的対応、動的計画法などいろいろな手法が研究されている。

SPOT衛星HVRセンサーからのステレオ画像からは、画質にもよるが標高の精度は±5～15m程度が得られている。したがって40m間隔程度の標高データの抽出が可能であるといわれている。

5. おわりに

惑星の地質探査に今後非常に有効な技術手段の1つと考えられる、宇宙からの地球リモートセンシング技術の現状について述べた。不十分な記述であるが、リモートセンシング技術およびその画像データについて、少しでもご理解いただければ幸いである。

(財) リモートセンシング技術センター 解析研究部)

論文紹介

NEAR探査機、マチルドとワルツを踊る

Freible, Elaine, 1997, Spacecraft waltzes past Mathilde. EOS, Vol.78, No.28 (July 15), 285-286.

1996年2月17日に打ち上げられたNASAの近地球小惑星探査機NEAR (Near Earth Asteroid Rendezvous) は、1997年6月27日8時40分(米国東部夏時間)、253番小惑星マチルド(Mathilde)に1200km以内の近距離まで接近し、25分間にわたって撮影(可視光と近赤外画像で500枚以上)や科学観測をおこなった。

NASAは1991年から、1つのミッションが1.5億ドル以下の低予算でできる太陽系探査計画「ディスカバリー計画」を発足させたが、その第一陣として打ち上げられたのがNEARである。2番手のマーズパスファインダーが華やかな脚光をあびたため、NEARはすっかり影がうすくなった感があるが、見逃してはならない重要な成果を上げつつある。

NEARの本来の目的は、1999年1月に433番小惑星エロス(Eros)とランデブーすることで、マチルドの観測は当初から予定されていたわけではなかった。ところが、若干の軌道修正でマチルドに接近できることがわかったため、急きょ近接撮影が企てられたのである。しかし、その実行にはいろいろな困難があった。とくにカメラの走査台がとりつけてないので、撮影のためには探査機自体を回転させねばならなかった。しかもフライバイ時のマチルドは、ほとんど太陽光の当たらない側を向けており、ただでさえ暗いこの天体の撮影を困難なものにした。時速4万kmで飛行しながらこのような小天体を撮影することは、きわめてチャレンジングな試みであったと著者はいう。マチルドがカメラにとらえられたのは最接近の30時間前で、最終的な軌道修正は5時間前という離れわざであった(ガリレオ探査機がガスプラをとらえたのは最接近の53日前、イーダでは33日前だったということを思いおこしてほしい)。探査機による小惑星の光学的近接撮影としては、ガリレオによる1991年10月の951番ガスプラ、1993年8月の243番イーダにつづく3番目の成功である。

さて、NEARの観測で判明したマチルドの直径は $57 \times 53 \times 50$ kmで、ガスプラの約4倍、イーダの約2倍あり、これまでに探査機が撮影した小惑星のうちで最大である。写真に一部みられるように、表面には直径20km以上(最大のもので30km)のクレーターが少なくとも5つある。本体の直径の半分を占める大きなクレーターがこれほどあることは、何を意味しているのであろう。大衝突がおこってもマチルドが分裂してしまわなかったとすれば、何か特別な構造(岩塊がゆるく結びついたようながさがさの状態)をもっていると考えべきなのだろうか。これと関連してわかった驚くべきことは、フライバイ時のNEARの微妙な速度変化の解析から、マチルドの平均密度が予想(2.6g/cm^3)に反して、たった 1.3g/cm^3 しかないの見積もられたことである。やはり上にあげたような内部構造と関係があるのかもしれない。

マチルドは従来からの観測によって、アルベドが3~4%と非常に低く、反射スペクトル曲線の特性からC型小惑星(炭素質コンドライトに似た物質からなると考えられる小惑星)に分類されてきた。NEARのマルチバンドスペクトル画像では、表面組成の変異を示すような色の地域差は認められず、驚くほど画一的な一様さを呈していた。直径20kmをこすクレーターには深さ

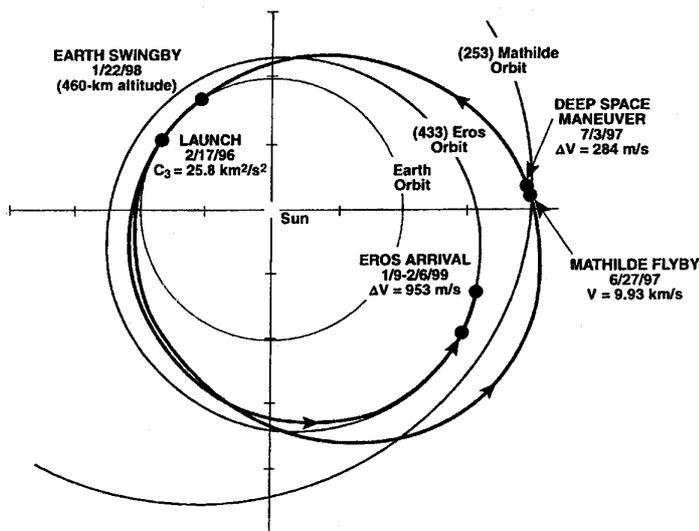


図1 NEARの軌道

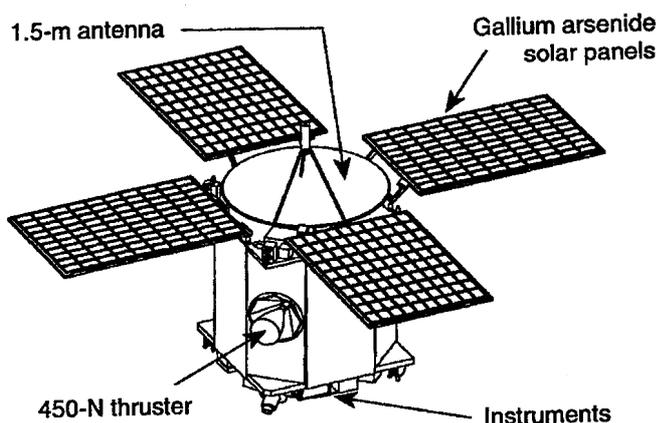


図2 NEARの構造 (重量320kg)



図3 小惑星マチルドの姿

が6 kmに達するものがあるが、その内部も単一の黒い表面をもっていた。このことは、C型小惑星 (の少なくとも1つ) が、未分化のきわめて始源的な天体であることを表しているように思われる。

マチルドでもう一つ注目されるのは、自転周期が17.4日と非常に長いことである。現在知られている限り、自転周期の非常に長い小惑星は、マチルドの他に288番グラウケ (Glauke、98日) と、1220番クロカス (Clocus、31日) があるだけである。マチルドの自転がこのようにのろいこともあって、フライバイ時に撮影できた表面は全体の60%にすぎなかった。このため、マチルドの大きさや体積の見積もりには、まだかなりの誤差があるかもしれない。ゆっくりした自転の由来はまだ謎である。

NEARは、1998年1月23日に地球をスイングバイして加速したあと、一路本来の目標である433番エロスへと向かう。1年後の1999年1月ごろS型小惑星のエロス (推定直径約20km) に到着すると、そのまわりを回る軌道にのって、15kmの高度から撮影や科学観測をおこない、2000年2月にエロスの表面に軟着陸して、すべての使命を終えることになっている。これからの活躍が大いに期待される。

【紹介者注】 この小論を紹介するにあたっては、次の資料も参照して内容を補ったことを付記する。

Farquhar, R.W., and Yeomans, D.K., 1997, Waltzing by Mathilde : NEAR's first asteroid encounter. The Planetary Report, vol.17, no.2 (March/April), 4-8.

Farquhar, R., 1996, Mission to gather data on Mathilde, Eros, and Earth. The NEO News, vol.2, no.2-3, 1-7.

NEAR Spacecraft spies Mathilde. *Sky & Telescope*, Sept. 1997, 17.

なお、本論文のタイトルは、有名なオーストラリア民謡「ワルツィング・マチルダ」にあやかっている。この歌は日本でもよく知られ、核戦争をテーマにした映画「渚にて」の主題曲に使われたから、ご存じの方も多と思う。

参 考: 253番小惑星マチルドは1885年11月12日、オーストリアのJohann Palisaによって発見された。名前の由来は当時のパリ天文台副台長Moritz Loewyの夫人を記念してのことといわれる。Mathildeはフランス語の女性名で、英語でのMathildaにあたる。

マチルドの軌道は、平均距離2.649天文単位、離心率0.263、傾斜角 $6^{\circ}.700$ 、公転周期4.312年。エロスの軌道は、平均距離1.458天文単位、離心率0.223、傾斜角 $10^{\circ}.761$ 、公転周期1.761年、である(Kowal, C.T., *Asteroids*, Ellis Horwood Ltd., 1988による)。(小森長生)

論文抄録

カイパーベルト天体1993SCの表面組成

Brown, R.H., Cruikshank, D.P., Pendleton, Y., and Veeder, G.J., 1997, Surface composition of Kuiper Belt Object 1993SC. *Science*, 276, 937-939.

1996年10月2～4日、ケック I 望遠鏡に近赤外カメラをとりつけて、カイパーベルト天体1993SCの近赤外スペクトル観測(波長 $1.42\sim 2.40\mu\text{m}$)をおこなった。スペクトル中の最もつよい吸収は1.62、1.79、1.95、2.20、 $2.32\mu\text{m}$ 付近にあり、同様の特徴はトリトンと冥王星のスペクトル中にもみられる。これらの吸収帯は表面に存在する CH_4 によるものと思われ、他に C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 の存在も示唆される。 CH_4 は単独の水としての他に N_2 との固溶体として存在するものもあると思われる。以上のことから、トリトンと冥王星はカイパーベルト天体群の最大メンバーと考えることもできる。(K)

ポピガイ衝突盆地の形成年代と始新世－漸新世境界

Bottomley, R., Grieve, R., York, D., and Masaitis, V., 1997, The age of the Popigai impact event and its relation to events at the Eocene/Oligocene boundary. *Nature*, 388, 365-368.

中央シベリアの $70^{\circ} 30' \text{N}$ 、 111°E にあるポピガイ衝突盆地(直径100km)から採集した衝突溶融岩について ^{40}Ar - ^{39}Ar 段階加熱法を用いて年代測定をおこなった結果、 $35.7\pm 0.2\text{my}$ の年代値が得られた。イタリア北部のMassignanoの始新世－漸新世境界層($35.7\pm 0.4\text{my}$)から報告されたIr濃集層と衝撃石英は、ポピガイ衝突事件に関係するものかもしれない。一方、北アメリカのテクタイトの起源とされるチェサピーク湾衝突構造の年代($35.5\sim 35.2\text{my}$)もこれに近く、始新世末期には少なくとも2つの大衝突事件がおこった可能性がある。(K)

インドのRamgarh衝突構造

Nayak, V.K., 1997, The Ramgarh structure--An astrobleme (?), Rajasthan, India, An appraisal. *Antarctic Meteorites XXI*, 143-148.

インドのニューデリーの南南西350km、コタの110km東($25^{\circ} 20' \text{N}$, $76^{\circ} 37' \text{E}$)に位置するRamgarh環状構造(直径4km)の成因は、長年論争的であったが、著者は衝突構造(アストロブレム)であることはほぼ確実だと考える。この構造は、インド中部に広く分布する先カンブリア時代(原生代)のビンディヤン系砂岩層上に形成されている。二重構造をもち、外輪直径4km、内輪直径2km。深さ/直径比0.05。周囲の平原からリムの高さは約200m。形成年代は明らかではないが、近くのデカン高原玄武岩との関係を明らかにすることが、その解明の鍵と考えられる。(K)

書籍紹介

岩でできた月へ：ある地質学者の月探査の記録

Don E., Wilhelms, 1993, To a Rocky Moon: A Geologist's History of Lunar Exploitation. Univ. Arizona Press, 477pp, 160×241×40mm.

本書は図や写真が少なく、文字中心の本なのでとつきにくく、購入後しばらく放っておいたが、シューメーカー博士の死をきっかけに目を通して見た。内容は、19世紀末のギルバードから1972年最後のアポロ17号までの、アメリカの月探査にかかわった地質学者の記録である。著者はアメリカ地質調査所の元スタッフで、月の層序学を専門とし、その集大成“*The Geologic History of the Moon*” (1987, USGS Prof. Paper 1348) でご存じの方も多いただろう。一つの研究分野が誕生し、急速に発展するのは、それほど長い年月がかかるわけではない。月の地質学では、1957年から1972年までの15年間のこの時期であった。1962年からアメリカ地質調査所に在職した著者のWilhelmsは、このエキサイティングな時代の月の地質学の発展を目の前で眺め、そして支えた一人である。巻末の70ページに及ぶ注からもわかるように、几帳面な性格の著者と、残された正確な記録があって、はじめて出版できた本であろう。月の地質学におけるシューメーカーの貢献、アポロ宇宙飛行士の地球上での長期間にわたる地質の教育と巡検、白熱するアポロの着陸地点選定の議論など、数々の秘話が語られている。(白尾元理)

月の過去と未来

Paul D. Spudis, 1996, The Once and Future Moon. Smithsonian, 308pp, 160×235×33mm.

月の概要がわかりやすく書かれた本というのは、意外と少ない。Wilhelmsの*The Geologic History of the Moon* (1987, A3判300ページ)、Heikenらの“*Lunar Sourcebook*” (1991, B5判736ページ)はいずれも優れた本ではあるが、ボリュームがあるので通読するというより、わからない時に調べるリファレンスとして役立つ本である。GuestとGreeleyの“*Geology on the Moon*” (1977, A5変形判、234ページ)はアポロ直後の月の地質学が要領よくまとめられていたが、内容がやや古く、すでに絶版になっている。

本書は、この空白を埋める気軽に読める月の解説書で、カバーの説明によると惑星科学の専門家や学生だけでなく、一般も読者対象としている。著者は、ヒューストンにあるLunar and Planetary Instituteの地質学者である。しかし内容は地質学に限らず、月の起源、マグマオーシャン、現在の月科学の残された課題、将来の月探査・月面基地など、月の科学全般に及んでいる。本書を読んでみると、アポロ以降も月の科学はゆっくりではあるが着実に進歩したことがわかる。もちろんクレメンタインの成果についても解説している。Spudisは現役の研究者であり、仕事に追われているためか、図版・表は不十分（たとえば本来はカラーでないといけない図版がモノクロで掲載されている）で、他の文献からの流用が多い。そういう点では緻密に作られたWilhelmsの“*To a Rocky Moon*”のような美しさはなくて対照的ではあるが、本書の方がはるかに多くの人に読まれ、月の科学の普及には貢献するだろう。やや雑な作りではあるが、月の科学の現在を知る本として、一読を薦められる。(P.M.S.から5240円で購入) (白尾元理)

INFORMATION

●ユージン＝シューメーカー、オーストラリアで交通事故死

7月18日午後、オーストラリアで衝突クレーター調査旅行中の夫妻は交通事故に遭い、ユージン＝シューメーカー博士（1928～1997、69歳）は死亡、妻のキャロライン＝シューメーカーは重傷をおった。事故がおこったのは、アリススプリングスから北西500kmの見通しのきかないカーブが続くラフロードで、対向車との正面衝突でシューメーカー博士は車の中で即死した。骨折で重傷のキャロラインは、救急飛行機によってアリススプリングスの病院に収容された。キャロラインは順調に回復し、8月上旬、フラグスタッフの自宅にもどっている。



ユージン＝シューメーカー博士

（1995年、フラグスタッフのUSGSで）仕事である。1961年アメリカ地質調査所の惑星地質部門を設立し、レインジャー、サーベイヤー、ルナオービター、アポロ、ボイジャー、クレメンタインと多くの探査機での主任科学者を勤めた。オーストラリアの衝突クレーター調査は、内側太陽系での最近30億年の衝突頻度や衝突クレーターの構造の解明が目的で、1981年からは夫妻にとって毎年夏の恒例行事となっていた。シューメーカー博士の1950年代後半～60年代前半の仕事は、その後の惑星地質学の基礎となっており、いわば惑星地質学の父ともいえるべき人である。1992年にはアメリカの科学者として最高の勲章、Presidential Medal of Scienceをブッシュ大統領から授与された。

●ガリレオ計画の延長決まる

NASAは、“ガリレオ”による木星系探査計画を、1997年12月に当初の予定が終了したあとも2年間延長することを決めた。新しい計画は“ガリレオ・エウロパ”と名づけられ、2年間に14回木星を周回飛行する予定である。最初の8回分はエウロパに最接近し、1000枚の写真（最高解像度60m以下）を撮影する。次の4回分はカリストに接近、のこりの2回分は軌道をぐっと下げて、イオに接近（300km以内）する。これらの探査によって、ガリレオ衛星についていっそう詳しいことがわかってくるだろう。

●カシニ探査機まもなく土星へ出発

NASAとESA（ヨーロッパ宇宙機関）の共同開発による土星探査機“カシニ”が、ケネディ宇宙センターから10月6日に打ち上げられる。2004年7月に土星近くに到着すると、土星をまわる軌道にのり、ESAが製作した小型プローブ“ホイヘンス”が放出される。ホイヘンスは土星最大の衛星タイタンの濃密な大気圏に突入し、大気を観測しながら降下をつづけて、最後にタイタンの表面へ着陸する予定である。タイタンの表面にはメタンの海か湖があり、多様な有機物が存在すると考えられているので、その成果が大いに期待される。なおカシニには、打ち上げに先立って8月22日、世界81カ国61万6400人の署名を記録したDVD（デジタルビデオディスク）が搭載された。

編集後記：マーズパスファインダーから送られてきた火星の大洪水跡の景観をまのあたりにして、何億年も昔の火星へタイムトラベルした気分になりました。火星での明けの明星――わが地球（カール・セーガン流に言えばpale blue dot）は、雲にさえぎられて見えなかったとか。日の出前には火星の空にも結構雲がかかるのですね。 (K)