

## 第 8 章 地球軌道外の探査

### 08.1 探査と地形

昔から、地形学は旅や航海者や冒険者の道程と係わり合いのあるものだった。新しい土地で発見された様々な特徴を理解し説明することが求められ、それは 19 世紀の地形学の原動力となった。

おそらく非常に長期間で居住可能な場所へと開拓する以前に、太陽系の他の惑星の探査は 2 つの理由で有益である。1 つは地形学の全く新しい道を拓くこと、2 つ目は地球自体の物理的研究（気象学、内部及び外部の地球力学、他）にとって豊富な比較対象をもたらすこと、である。

以前の旅行は全て地球上の一点から他の地域を目指すものであり、出発点に関して相対位置は常に同じだったが、宇宙での軌道は出発点の空間・時間上の座標系にもっと深く関係してくる。軌道は、探査機が進む方向が出発時に宇宙空間において占有されていない点を狙う（目指す）ように、そしてその点が、探査機が旅の終りにその対象天体に出会う時まで占有されていないように計算される。さらに対象天体が動いているということは、ある種の打上げにとってはある特定の時期が非常に都合がいいということを意味する。そのような時期は打上げのウィンドウ（窓）と呼ばれ（図 2.49、2.50 参照）、会合周期ごとに繰返し訪れる。

探査の結果、宇宙環境や太陽系内の天体についての更なる理解がもたらされるべきである。そのような知識を得る最初の一步としては地球外の地形の地図製作の探査がある。当然この地形学（的特徴）は、地球の地形学の経験の言葉で解釈される。一方後者は惑星環境の研究からも得られるものであるが、惑星環境は歴史が非常に異なると同時に多くの類似点も有している。

様々な理由で、月と他の惑星は一般大衆や科学者たちの興味を同程度には惹き付けなかった。我々の天然の衛星である月は地球に最も近い天体であり、昔から人類の想像を掻き立ててきた。紀元前 6 世紀、ミレトスのターレスやピタゴラスのような哲学者が既に月を地球と同じ性質のものと決定づけた。そこで月に生命が存在するかどうかについての疑問が突きつけられたのである。紀元後 1 世紀には著書「On the face of the Moon's disk」の中でプルタルコスが再度賛成か反対かの議論を投げかけている。しかし、宇宙への進出を想像し、地形学の分野で新時代の始まりを告げたのはガリレオの望遠鏡であった。観測がより頻繁に行われるようになり、天文学者は月表面のトポグラフィを発見し、最初の地

図を作り変えることすら行った。著書「ソムニア（夢）」の中でケプラーはこの新しい好奇心（発見物）を、異なった昼夜の長さや気温変化の程度などの天文学の最新の発見を読者に普及させるのに利用した。月面上の生命の存在も排除されなかったが、人類の生活形態とは非常に異なった特徴を持つことを明示せざるを得ない。空想の宇宙旅行の物語がウィルキンスやゴドウィン、シラノ・ド・ベルジュラック、また月を旅行者の気まぐれの対象としたエドガー・アラン・ポーやジュール・ベルヌの SF 作品として登場し始めた。今日でも月は地球から離れた人類の一步を感じる唯一の天体である。

月（探査）の後、火星と金星が我々の強い興味を分け合っていた。金星は、太陽方向から 48° 以上動くことはないのだから朝と夕方にはしか見ることができないが、その輝きで我々の興味を惹き付けたおそらく最初の天体であっただろう。しかし観測技術の進歩は確実に火星の方に有利に働いた。赤い惑星・火星はコントラストが高い面が特に反対方向でくっきりと見える。火星の地図は、フォンタナによる最初のスケッチに続き、オランダ人天文学者、ホイヘンスによって早くも 1659 年に作成された。これは、明るさの原因である全球を覆う厚い雲が存在する金星では不可能なことであっただろう。しかし、火星の観測と生命の形態についての疑問は多くの物議を醸し出した。続くウェルズの有名な小説で火星人は文字通り SF 文学界を侵略したのである。

水星や巨大惑星などの他の惑星は、一部の一般大衆に対して決して同じ興味を沸き立てたわけではない。彗星だけは人類の想像力を魅了し、そしてしばしば脅えさせた。探査は、特に 1986 年の黄道面の通過時のハレー彗星の研究である程度まで我々の理解を進展させた。

ちょうど 15、16 世紀の大発見がごく少数の国家の貢献によってなされたように、宇宙探査は少数の国の特権である。当時は海洋へのアクセス手段と資金源、そしてある水準の文化・技術が必要条件であった。同様に惑星探査は、当初自国の特別な要求があつてソ連と米のみが行うことができた。もっとも欧州や日本も以来自国の探査機を打上げている（図 8.6 参照）。最終的には探査計画は政策や予算的な事情に非常に強く束縛されている。1960 年代は最初の無人探査、そしてまた月への有人ミッションの証人となった。一方 70 年代になると、バイキングの火星ミッション、マリナー 10 号、木星、金星、土星へのパイオニア探査機の成功、そしてボイジャの旅立ちで人類は実際に宇宙探査が成し遂げられる瞬間を目の当たりにしたのである。1980、90 年代の間はより洗練され、金をかけた探査機が打上げられた。非常に多岐にわたる科学的機器（ガリレオの 18 個、カッシーニ - ホイヘンスの

20 個) が搭載されたことは設計や開発に非常に長い期間を要することを意味する。

このことは慎重を期する問題とうつつたが、それはうち探査機 2 機の失敗や 1993 年に火星軌道への投入前にマーズオブザーバとの通信が途絶えたこと、マルス 96 の打上げ失敗があったからである。これらの損失はその惑星探査機関において重大な変化の兆しとなった。十分な経済的支援なしで露の探査計画は次々と棚上げされ、今日でも強い(協力、連携、協調)の(刺激、奨励)なしには復活しそうにはない。1994 年のクレメンタイン打上げに始まる、米・国防総省 BMD0(弾道ミサイル防衛局)と NASA との合同で開発された 500kg クラスの探査機は「はやく、うまく、安く(Faster, Better, Cheaper)」方式を採用した。将来のミッションは小型化した、小さいペイロード(20 から 30kg)を搭載しなければならず、実験数を少なく(2 ないし 3)、また開発期間は短く(2 から 3 年)なければならない。が、費用はたった 2 億 5 千万ドル、すなわちマーズオブザーバの 1/3 の費用である。ディスカバリ計画では 1996 年にニア(近地球型小惑星ランデブ)が打上げられ、追ってマーズパスファインダ、ルナ・プロスペクタ、スターダストと続いた。マーズパスファインダ以後、火星探査はすぐに似たような特徴を持った特別な計画(マーズサーベイヤ)からの恩恵を受けた。その後 1999 年にマーズ・クライメット・オービタとマーズ・ポーラ・ランダの連続失敗が起り、「はやく、うまく、安く(Faster, Better, Cheaper)」主義に対する痛烈な批判を引起こした。

同じ頃、欧州の科学界はマーズ 96 の失敗に大打撃を受けていた(搭載された実験装置のほとんどが元々欧州の研究室で作られたものであった。)。露のミッションが先細りになって消滅していくにつれ、欧州が容易かつ比較的安価に宇宙へのアクセスができる手段は危機に瀕していた。さらに、欧州の研究者達は、NASA のミッションでは各探査機に搭載できる機器がほとんどなく、各プロジェクトの初めに一人の PI(Principal investigator)が任命されるために、以前よりも(その機会を)利用しにくくなるかもしれないということ懸念し始めていた。そのため、探査計画においてこの新状況を考慮しなければいけなかった ESA に大きな期待を抱いた。

ESA は 1985 年から 2 つの実質的なミッション、カッシーニ - ホイヘンスとロゼッタを押し進めていた。しかし、マーズ・エクスプレスなどの早くて軽量のミッションがすぐに将来の方向性を特徴づけた。同様の流れで、小型ハイテク探査機の SMART 計画が探査に採用され、小型衛星ミッションがアリアン 5 型 ASAP システムを用いて打上げられるであろう。

## 08.2 月

宇宙時代の最初から、また人類がはじめて宇宙を飛行する以前から、月は格調高い（崇高な）対象天体と見なされてきた。米ソの研究者達はすぐにその秘密をあばくことを企て、1959年10月にルナ3号によって撮影された最初の月の裏側の写真は、ソ連の科学の質の高さを示すため、広く流布された。冷戦の最中のように、そのような出来事が重大な影響を持つことは必至である。月を征服することがついに象徴的となったのは、ケネディがそれを1960年代終りまでの米の宇宙活動の第一の目的と決めた時である。

アプローチ（パイオニア）と軌道（パイオニアオービタ）において何回かの実を結ばない試みの後、NASAは3つの補完計画（図8.1）を通じて有人飛行に関する基本知識を習得した。

レンジャ計画は6度の失敗で始まったが、レンジャ7、8、9号では搭載された4台のRBTVカメラ（広角2台と望遠2台）で約17000枚の画像送信に成功した。異なる分解能の画像は月表面へ衝突する前のたった14分間に撮影されたものである。

ルナオービタ計画では広角カメラを用い中程度の分解能で月表面の99%をマッピングし、また同時に着陸可能な地点を探し、望遠カメラで撮影した高解像度画像を返送した。フィルムは探査機上で現像され、光学的にスキャンされ、無線で地球へ送信された。放射線強度や微隕石、重力に関する（いわゆるマスコンと呼ばれる、しばしば月の海の中央で見られる正の重力異常を解き明かす）更なるデータが集められた。その後探査機は後のミッションを妨害しないよう故意に月表面に衝突させられた。

サーベイヤ計画の探査機は、月接近中に今後の現場となるサイトにより正確な画像を供給し続け、それから軟着陸して月の土壌の強度や組成に関するデータを収集した。これら探査機はまたレーダで制御された着陸のための技術試験も行った。

これらミッションのうち失敗はたった2つのみである。衝突したサーベイヤ2と通信不具合を起こしたサーベイヤ4である。

これら予備的なミッションの一方、1961年5月25日のケネディ演説で表明された有人探査は、NASAによって1960年に最初の提案がなされたアポロ計画の目的となった。3つの基本となる選択肢が明確にされた。直行（軌道）、地球軌道でのモジュール組立て、または月軌道でのランデブである。1961年半ばまでに選択されたのは最後の3番目の選択肢である。司令船（図8.2）とサターン1型打上げ機の試験が1964年5月28日から地球軌道で行われ、アポロ4号の名で司令船と機械船のアンサンブル（GSM）とサターン5型機の試

験が 1967 年 11 月 9 日から行われた。月着陸船のツーステージは 1968 年 1 月、飛行中に試験が行なわれた（アポロ 5 号）。ほどなくして、1967 年 1 月 27 日に地上での重大事故により宇宙飛行士 3 名が命を落とし、有人飛行計画は凍結されてしまった。1968 年 10 月になってやっと人間が初めて低軌道に投入されたのである（アポロ 7 号）。それ以後はさらに急速に事が進むようになった。1968 年 12 月に、アポロ 8 号は 3 名を 20 時間初めて月周回軌道へともたらしめた。1969 年の 3 月には CSM 方向転換マヌーバと月着陸船（LM）のドッキングの総合試験が地球低軌道で実施された（アポロ 9 号）後、1969 年 5 月に月周回の最終試験で有人月着陸船の切離しとドッキングが月表面からわずか 14.5km 上空で行われた（アポロ 10 号）。ついに 1969 年 7 月 16 日、人類は初めて月に降り立ったのである（アポロ 11 号）。

続く 6 回の飛行（図 8.3）のうち、アポロ 13 号だけが、あやうく乗組員の命を犠牲にするほどの事故のせいで失敗に終わっている。アポロ 17 号以降 NASA はこの計画を終了させたが、ヒューストン宇宙センタは 1977 年 10 月まで ALSEP（アルセップ、アポロ月面実験パッケージ）からのデータを継続して受信し、処理を行った。その科学的成果たるや相当なものであり、第一に試料を持帰ったこと（図 8.4）が挙げられる。それらの分析によって文字通り何千本もの論文/出版物が出された。月表面での実験が行われ、とりわけ粒子の検出や大気組成の分析、地面物質の電氣的及び物理的性質の決定、あるいはレーザ反射器の設置などが行われた。ALSEP の装置はアポロ 12、14、15、16、17 によって開発された。これら機器は 5 回のミッションの間に変わっていったが、原子力発電機からエネルギー供給がされており、数年にもわたってデータを送り返すことが可能だった。それらの中には大気圧を測定する冷陰極電離真空計やパッシブな月震実験装置、月面磁力計、月面重力計、熱流量実験装置、そして地下 3km までの地質的特徴についての情報が得られる月震プロフィール実験装置があった。

軌道上ではカメラや分光計はアポロ 15、16、17 号の機械船上の SIMBay（科学機器モジュールベイ、図 8.2）の可動式パネル後方に設置された。機械船を放棄する前にフィルム回収のために宇宙飛行士による宇宙遊泳が必要だった。磁場やプラズマと並んで月の重力（マスコン）を調べるために設計された小型人工衛星 2 機を打出すのにも同じベイが使用された。

ソ連の科学者達も同じ段階を経験した。ルナ 3 号の成功で明らかな通り、当初は彼らの大幅なリードで始まったが、その後は協調の欠如と必要な予算を誤って非常に低く見積も

ったためにずっと遅れをとることになってしまった(13章参照)。第二世代の月探査機は、ルナオービタ(ルナ10、11、12、14号)やサーベイヤ(ルナ5、7、9、13号)と同じミッションをカバーした。有人飛行計画は、N-1ロケットの度重なる失敗を受けて中止されるまで、ゾンド3号から8号まで順調なスタートを切った。

ソ連はその後別の計画へ転向し、無人ロケットは試料持帰りや月土壌の調査のために開発された(図8.4)。この計画はルナ探査機の第三世代によって達成されたものであり、数回の失敗の後、リモコンアームを用い、100g(ルナ16号)、50g(ルナ20号)、170g(ルナ24号)の月の土壌と岩石とをカプセルに入れて運搬することに成功している。直径50cm、重量39kgのこのカプセルはそれから上昇ステージによって地球への直行の帰還軌道へと投入され、パラシュートで降下される。月面探査車ルノホート(ルナローバに相当)が2度月土壌の上に置かれた(ルナ17号と21号)。ルノホート1号は11ヶ月以上の期間に渡って運用され、10540mを走行した。一方ルノホート2号は5ヶ月の間機能し、37kmをカバーした。どちらも膨大な数の画像やパノラマ画像を送信してきた。また、どちらも土壌の物理的および化学的分析を行い、今なお月-地球間距離の決定に使用されている。

人類の探査の最初の段階が成功裏に終わった後、月は米ソ両国からやや忘れ去られていた感がある。月周回のミッション計画を推進したのは日本であった。1990年3月、ジオテイルの前身である磁気圏衛星ひてんが12kgの小型衛星はごろもを7400-20000kmの月軌道に投入した。しかし軌道に入る前に通信が途絶えた。ひてん自体もまた1992年2月15日に月軌道に入り、最後は93年4月10日に月表面に衝突して寿命を終えている。日本は2004年に別の探査機を月に送込もうと計画している。ルナAはルナ・イメージング・カメラ(LIC)を搭載し、2基のサーフィス・ペネトレータを月土壌中に撃込む予定である。1機は月の表側に、もう1機は裏側の地球からは永久に見えない場所に撃込まれる。それらには地震計と熱流量計が装備される。ルナAには、それより1年後に予定されているISAS-NASDA共通のセレーネ(SELenological and Engineering Explorer)計画への道を開くという意図がある。それにはオービタと衛星のリレーが含まれる予定である。オービタには磁力計、X線、およびγ線分光計、マルチバンドイメージャ、マッピングカメラ、レーザ高度計、そしてレーダ・サウンダが装備される予定である。リレー衛星と共に干渉計によって重力場が決定される。プラズマ・イメージャが地球の磁気圏へ向けられ、プラズマ分析器と荷電粒子分光計によって月の環境が調査される。電波科学実験も計画されている。ミッションの終りには推進ステージが探査機から切離され軟着陸を試みる。1994年1月、米ソの月競

争から 20 年以上も経て、米は探査機クレメンタイン 1 号を打上げた。その目的は、ある新技術に宇宙でのお墨付きを与えることであった。そのいくつかは米の SDI（米戦略防衛構想）の一環として開発された小型サブシステム、またいくつかは欧州のもの（オンボードでの JPEG 圧縮）であり、月表面の科学的マッピングを実施させ、小惑星ジオグラフィオスの観測を行わせることであった。94 年 2 月 26 日から 3 月 3 日までの月軌道周回中に、なんら情報を失うことなく 120 万枚の画像が地球に送信されてきた。クレメンタインはその後起こったコンピュータの故障でジオグラフィオスへの航行を断念させられた。

宇宙探査構想（SEI, Space Exploration Initiative）として知られる計画は、人類の最初の月着陸 20 周年にジョージ・ブッシュ大統領が発表したものであり、当初の征服を駆り立てた時とは異なる目的を持って月に対する興味を新たにすることを宣言しているかのように見えた。しかし、後にこの計画への資金供給は拒否された。元々 SEI の最初の段階と考えられていたルナ・プロスペクター・ミッションは、1995 年 2 月、NASA のディスカバリ計画に組込まれた。探査機ルナ・プロスペクターは 98 年 7 月に打上げられている。主目的は  $\gamma$  線分光による地球化学的調査、重力場および磁場計測、そして極クレータの永久に影となっている凹んだ地形の中に水の氷を探すことであった。後者に関しては、水の存在は当然、将来人類が月に居住する際、大変な重要性を持つであろう。相当レベルの水素が中性子分光計によって月の北極、また南ではさらに高いレベルで検出された。このことは、月表面のかなり近くでレゴリスと水の氷が混ざり合っていることを示唆するものと解釈されている。1999 年 7 月 31 日、ミッションの最後に月の南極のクレータの底に衝突するようにルナ・プロスペクターの軌道が修正された。同時に、ハッブル宇宙望遠鏡や多くの地上の観測所がその衝突によって巻き上げられるダストの分光観測をしようと試みた。水の痕跡は何ら検出できなかったが、水の存在を否定するものではない。

そのような訳で長期に亘る一連の米ソのミッションの結果、月は地球に次いで太陽系の中で最もよく知られた天体となっている（図 8.5）。また、岩石試料が手に入っている唯一の天体でもある。

表側に関しては既に地球から観測されてきたが、月の表面は暗い領域と明るい領域から成っている。月の地形中には実際どこにも水は見えないが暗い部分は「海」（マーレ、複数形ではマリア）と呼ばれている。これはラテン語の「海」を意味する語から来ており、国際天文学連合（IAU）によって取決められた約束事に従い付けられた。海は月の裏側ではたった 2% しか占めていないが、表側では 30% 以上を占めている。しかし、表側、裏側それ

ぞれの南側の領域では反対の非対称を示している。海は低い（低地の）やや一様な領域で、概して大規模（広大）な、地球の玄武岩より ferrous iron に富む玄武岩で構成される、火山性の溶岩流でできている。一様な海もところどころクレータによって乱されている。明るい領域は「陸」（テラ、複数形ではテリー）、より一般的には「高地」と呼ばれる。高地は全表面の 84% を覆い、海とは異なる物質からできている。主構成物はわずかにノライトと、時々玄武岩の破片を含んだアノーソサイトの角礫岩である。地形学的には、高地は非常に数多くのクレータが組合わさったものか、あるいは並列したものである。これらのクレータが内因性起源か外因性起源かについての長い議論があった後、今ではそれらが、少なくとも大部分のものは月表面に落下する隕石によって作られた衝突クレータであるということが認められている。クレータは大きさによって 3 種に分類されている。

最も小さくて単純なクレータは、差し渡し 10km、深さ 2km 以内で、一般に内部は平らな地形である。直径 2500m のリンネ・クレータがこの分類の良い例である。

直径 20~200km の大きいクレータはより複雑である。跳ね返り現象によって中央が形成され、それはクレータ内壁に沿って起こる地すべりでできた同心円状の段丘を持つ。直径 85km のティコ・クレータが、中央丘と段丘構造のあるこの 2 番目の分類の良い例である。

差し渡しが 200km にまで上るような最も大きいクレータは、一般に盆地（ベイスン）と呼ばれる。雨の海がこの例で、直径 1100km である。中央丘は、ここではより複雑なリング状の地形に置き換わっている。

月の起源についてはまだ論争が続くが、その後の履歴は今でははるかによく理解されている。相対年代は地形学的観察に基づいて求められる。衝突密度は、その頻度は月の歴史を通して落ちてきているのだが、表面の様々な領域の年代を明らかにしてくれる。一番最近できた地形が古いものの上に上書きされる。さらに新しいクレータは玄武岩層の上ででき、一方、更に新しい玄武岩の流れが古いクレータの外側の壁を飲込む、などということが起こるかもしれない。しかし、月の場合においては U-Pb 法や K-Ar 法などの絶対年代法によって、層序年代が決定されてきた（図 8.5）。

全体として見ると、月の地形は地球上で見られるものとは全く対照的に、方向を持った物質の流れとなんら無関係なものとして解釈されなければならない。我々の住む惑星では指向性のある浸食作用が、侵食された物質を海洋中に体積させながら、水中に埋もれていない領域を摩滅していく傾向がある。月では液体の流れや大気が全く無いせいでそのようなプロセスは全く存在しなかった。



### 08.3 太陽系観測ミッション

地球の重力圏を脱し、探査機は新しい軌道を描いて人類の観測の地平を計り知れない(極めて未知の)程度にまで広げてくれる。

#### **太陽と惑星間媒体を観測する探査機**

太陽中心の軌道に置かれた全ての宇宙機が惑星探査を目的としている訳ではない。惑星間空間の媒体を分析したり、太陽表面での現象を観測することを目的とするものもある(図 8.7)。

パイオニア 5号はそのようなミッションの初のものであり、磁場や太陽プラズマ、宇宙線を調査する機器を積んでいた。続く探査機パイオニア 6号から 9号までは太陽系観測のためのネットワークを形成した。それらは改良された機器を装備しており、より詳細なプラズマの調査や太陽表面の観測、望遠鏡による太陽フレアの観測が可能であった。地球のマグネトテイル(磁気圏尾部)を発見し、太陽プラズマの最初の正確な密度計測をしたのはこれら探査機であった。更にコホーテク彗星の観測や関連した計測も行った。

それらに続いたのは独のヘリオス探査機 2機であった。太陽から 4,800 万 km と 4,500 万 km の近日点で、それらはこれまでに太陽に最も近づいた人工物となった。磁場や太陽プラズマ、宇宙線の調査以外にも、それらのミッションにはマイクロ・メテオライト(微隕石)の検出や黄道光の光度測定が含まれていた。

ユリシーズ・ミッションは太陽周回の極軌道に入り、それまでは黄道面でのみ実施されていた観測を行うよう計画された。これは ESA と NASA との共同ミッションであり、当初は 1979 年に太陽の両極を研究する国際ミッションとして説明されていたものである。探査機 2機が反対方向に打上げられることになっていた。しかし、NASA は 1984 年にそれら探査機の製作を断念せざるを得なかった。このことはいくつかの機器や同時ステレオ観測の可能性をも放棄することを意味していた。数回に渡る延期の後、ついに 1990 年、スペースシャトル・ディスカバリによって打上げがなされた。最初に 1994 年に太陽の南極を、その後 1996 年に北極をフライバイしたのに続き、ユリシーズ・ミッションは 2001 年まで延長され、2000 年と 2001 年に 2 回目の両極のフライバイを行った(図 8.8 参照)。

NASA のディスカバリ計画の一つ、ジェネシスと呼ばれる(探査機)が 2001 年 8 月に打上げられ、太陽近傍を周回し、太陽物質の粒子を捕集して地球に持帰る予定である。このプロジェクトは、原始太陽系星雲の更なる理解へと導く小惑星や彗星物質試料の探求を補

完するものである。

## 火星

ソ連の探査機マルス 1号とゾンド 2号が火星フライバイの前に通信が途絶した(図 8.10) ため、火星に関しては米の探査機マリナー4号がビデオ画像の形式でその場でのデータを 提供し、磁場や大気圧の計測を行った初となった。マリナー6号および7号がこれに続き、 それぞれ 75枚および 126枚の火星の画像を送信したのに加え、フォボスの最初の画像も送 ってきた(マリナー7号)。

ソ連は 1971年のウィンドウに 2機の探査機を打上げ、73年のウィンドウにはもう 4機 を打上げたが、成果はほとんどなかった。1971年の砂嵐によって価値のないものとなった マルス 2号、3号オービタ、マルス 3号の降下モジュールからの数枚の画像、マルス 5号 によって撮影された南半球の一部の高解像度画像 70枚、そして高いアルゴン濃度を突き止 めたマルス 6号降下モジュールによるその場での大気測定などである。1988年のフォボ ス・ミッションまでソ連の計画はなかった。

一方、1971年から 75年までの米のミッションは完全な成功を収めた。火星についての 現在の知識のほとんどはそれらによるものである。マリナー9号はマルス 2号の後に打上 げられたが初の火星周回を果たし、プログラムの非常な柔軟性のお陰で砂嵐が治まるまで 待って火星表面の 90%をカバーする 7323枚もの画像を送ることができたのである。この 探査機はフォボスとデイモスの画像をも収めており、大気圧や地上の温度計測も行った。

バイキング・ミッションで米は火星に最初の降下モジュールを着陸させている。そのよ うにして、大気分子組成や、高度 90kmから地上までの密度、温度、圧力、そして地上風 や表面の化学分析といった一連のデータを得た。生命活動の痕跡も探したが何も得られな かった。後に、表面の物理および化学的状態が過去のいかなる生命の形態の痕跡をも一掃 したであろう可能性が浮上し、そのような痕跡を発見する唯一のチャンスはより深い地点 を探すしかないということになった。デイモスの撮像は別として、それらオービタは全火 星表面を 2500枚の画像でカバーし、また完全な熱サーベイも実現した。

火星探査は 1988年に一度再開されたが、失敗の連続であった。最初のもはソ連のミッ ション、フォボスである。フォボス探査機 2機各々がオービタと降下モジュール(DAS)、 第2の降下モジュール(ホッパー)を持っており、最初のモジュールはフォボスに着陸し てペネトレータの方法を用いて探査機自身を据付け、後者はフォボスの表面 20mの範囲内

を移動する予定だった。不幸にもフォボス 1号はテレメトリ通信エラーによって失敗し、フォボス 2号は火星近傍に到達した時点で地球との通信が途絶した。唯一得られた成果は磁気圏測定および火星表面の一部の領域の分光測光観測であった。

米の探査機マーズ・オブザーバは 1992 年に打上げられたが、93 年 8 月に火星軌道に入る前に通信が途絶えた。この高額ミッション（9 億 8 千万ドル）の主目的は、火星の精確なマッピングをすることであった。ほとんどの ESA 加盟国が参加した露の火星へのミッションは、ソ連の崩壊で長く延期されることになった。最終的に当初の構想より規模を縮小する形でマルス 96 が打上げられたが、1996 年 11 月、打上げ直後に太平洋の藻屑と消えた。

マーズ・オブザーバの失敗を受け、NASA は火星探査計画をマーズ・サーベイヤー計画の軽量探査機へと変更した。1996 年 11 月、マーズ・グローバル・サーベイヤーが打上げられ、97 年 9 月 12 日に火星の極軌道に入った。更に米の探査機マーズ・パスファインダーが 96 年 12 月に打ち上がり、より早い行きの旅の後（打ちあがったが、火星到達までの時間が短縮され）、1997 年 7 月 4 日にパラシュートとエアバッグを用いて火星表面への着陸に成功している。

マーズ・グローバル・サーベイヤーは、太陽電池パネルが部分的に開いてしまったせいで空力制動フェーズが予定より長くなったが、その後 1999 年 5 月半ばまでにはデータ取得を始めた。探査機には 4 つの主たる機器が搭載されていた。MOC（マーズ・オブザーバ・カメラ）は毎日の広角画像と、中止されたマーズ・オブザーバ・ミッションが提供できなかった精確な地図を編成するために、分解能 1.5m の画像を撮影した。MOLA（マーズ・オービタ・レーザ高度計）は高度データを提供した。熱放射分光計は熱赤外サーベイを実現した（行った）。磁気計／エレクトロン反射率計は地上レベルおよび火星の電離圏での磁場計測を行った。これにより、火星のコアによって生じた古代の双極磁場の証拠となるであろう残留地殻磁場の存在が明らかになった。

マーズ・パスファインダーはソジャーナと呼ばれる 6 個の車輪のついた小型ロボットを火星表面に着陸させた。それには一組のステレオカメラとアルファープトン分光計が装備されており、どちらも独が設計したもので、後者は米国製の X 線分光計と一体となっていた（図 8.9）。ランダは温度、圧力、風力センサと共にデータ送信アンテナを備えていた。

一方、1998 年のウィンドウに関連したキャンペーンは惨憺たる結果であった。マーズ・クライメット・オービタはマヌーバエラーが起こった後火星に衝突して失われ、マーズ・ポーラ・ランダの通信途絶は今だ説明がつかない。

ついに1992年7月2日、日本が火星の上層大気、磁気環境や磁場の観測衛星を打上げた。これがのぞみ（Planet B）探査機である。98年の終りにのぞみを脱出軌道へ向ける際に問題が起こった後、火星ランデブを1999年10月から2003年12月か2004年1月へ遅らせるという打開策が見つかった。

2000年10月、98年の2度の失敗の後、NASAは火星探査計画をマーズ・エクスプローラ・プログラムの枠内に再定義した。以下の内容が含まれる：

- 2時間の火星周回軌道を取るべく2001年4月7日に打上げられたマーズ・オデッセイ。機器は THEMIS（熱放射イメージング・システム）、地形と鉱物を調べるために設計された熱赤外領域の高分解能カメラと分光計、元素、特に表面下の水素同定のための GRS（ガンマ線分光計）、火星近傍での放射？を調べるための MARIE。
- 2003年に2機の火星探査ローバ。
- 2005年に非常に高分解能の（20-30cm）観察のための火星偵察オービタ。
- 2007年に、延長されたり長期に渡るミッションや、また特にサンプル・リターン・ミッション準備のためのモバイル・サイエンス・ラボラトリ。
- 2014年と2016年に2回のサンプル・リターン・ミッション。CNESとASIとの協力で初回が2011年のウィンドウに繰上げられる可能性もあり、（そうなると）試料採集とサンプル・リターン、および通信ネットワークが含まれ、アリアン5型ロケットを利用できる。

メインのミッションは別として、NASAは小型ローバまたは航空機にセンサを取り付ける‘スカウト’ミッションのプロポーザルを待っていた。欧州のプロジェクト、ネット・ランダはこのレベルで建設されるかもしれない。またNASAは、火星静止軌道（areostationary orbit、火星のギリシャ語名、アレスから）上の衛星を基盤にした火星-地球間通信ネットワークも計画していた。

ESAはこれらのプロジェクトを補完するミッションを2003年に決定した。これはマーズ・エクスプレスで、7つの機器を搭載する。太陽風と大気の相互作用を調査するための、高速中性粒子技術を用いる ASPERA3。分解能1mを持つ HRSC（高分解能ステレオ・カラーイメージャ）。表面の鉱物や大気組成を調べる赤外マッピング分光計・OMEGA。電波を用いて重力、圧力、温度変化を計測する MaRS。水蒸気分布を計測する大気フーリエ分光計。大気組成およびオゾン計測用の紫外大気分光計・SPICAM。そして2~3kmの深さまでの氷や水、または乾燥した地面を識別するための地下探査レーダ高度計・MARSIS。小型ランダー（着

陸機) ビーグル 2 が掘削機で掘起こした試料の分析を行い、生命活動の痕跡を探す予定である。カメラと大気センサが積まれる予定である。

他、まだ確定していないが欧州のミッション(ネット・ランダ)では地球物理センサ(地震計)や地球化学センサのネットワークを築くために小型衛星が使用されるであろう。

そして最後に、別の目標、すなわち火星有人飛行の可能性が残っているが、これはずっと後まで延期しなければならないかもしれない。

火星も月のように数多くのクレータによって特徴付けられている。これらの衝突頻度は集積後の段階の時に最も高く、その後徐々に下降した。クレータ密度は地質学的な年代決定に用いることができる。放射性元素測定による絶対年代法で決定された月表面領域の年代と、火星の地質学的特徴の年代との対比が試みられもした。しかし、この方法では2つの天体の隕石爆撃期の間にある関係を仮定しているが、それにはまだ確証がない。そうであっても、絶対年代が決められない時は相対年代によって異なる年代に形成されたことを明らかにしている。最もクレータの密度が高い地域は南半球の高地に広く分布する。それらはノアキス代に相当するものである。でこぼこしたハンモック状平原のようなクレータのある平原やアキダリア平原のある地域の年代は、ヘスペリア代として知られる中期にさかのぼる。火山平原、極冠、そして極周辺の層状をなす地帯の様々な地形(特徴)にはほとんどクレータがなく、最も新しいアマゾン代に相当する。

火星には自然の高度基準面(ゼロレベル)となるものがない。そのため赤道半径 3393.4km の回転楕円面との相対的な定義が用いられる。この基準面から測定すると、高度の変位は $-4\text{km}$ ~ $+25\text{km}$ の間というかなりの幅を持ち、これは地球で見られる最大高度差の 1.5 倍である。

火星地形の最も典型は、おそらく非常に大きな火山活動の中心地によって代表されるだろう。タルシス高地が有名な例で、平均高度 10km、直径 6000km である。高さ 25km のオリンポス山などの最大級の火山もここに位置している。南東には長さ 6000km 以上、深さ 6km にもなる巨大なマリネリス峡谷が位置する。他、高原であるエリシウム高原にもヘカテス・トルスなどの非常に大きな火山が集まっている。

2 番目のタイプの地形は南半球で代表例が見られる。これはたくさんのサイズの異なるやや浅いクレータが密集した平原(プラトー)で、古水路の階層状ネットワーク(網目構造)が縦横に走っており、火星環境特有の地形である。このクレータの密集した平原には大きな衝突盆地ができています。例としてはヘラス平原があり、幅 2000km、底部は $-4\text{km}$ の

ところに位置している（図 8.11）。

なだらかなその低地にはさほどクレータがなく、幅 25km ほどの大きな谷が平原から始まり、1500km にも及んでいる。この平原と低地との間の接触地帯は、おおまかに見て火星の赤道に対して約  $35^\circ$  傾斜した円弧を描いている。緩やかなスロープから崩れてでこぼこした急斜面、そして高さ 2km 以上にもなる堂々とそびえるまっすぐに切り立った小山まで、様々な地形的特徴を呈している。

火星表面の一般的な傾向は根本的に 2 つに分かれ、基本的には 2 つの半球は相反しており、内因性と外因性の両方の要因で説明される。この大区分より小さいスケールでは、火星地形は月の地形よりももっと変化に富んでいる。火星表面に液体の水が存在することは今日ではあり得ないことである。なぜなら平均温度はほぼ  $-60^\circ\text{C}$  程度であり、大気圧はたった 6 ミリバールだからである。それゆえ、水によって形成された地球上の地形に似たこれらの地形が、もっと大気が濃く、気候が厳しくなかったはるか昔から存続しているものであることを前提としなければならない。そうであれば、流れる液体がこの赤い星の表面で見られるような峡谷のネットワークを刻むことができただろう。いずれにせよ、水は表面下深くに埋まった固体の形で存在し、永久凍土を構成しているだろう。

## 金星

ヴェネラ 1 号によって、金星との近接フライバイを行ったのはソ連が最初である。しかし、続くソ連の探査機 4 機と同じく軌道に入る前に通信が途絶した。従って、最初に観測を行ったのはマリナー 2 号による米国であった（図 8.12）。また米は掩蔽法を考案し、実践した。この方法では、探査機が大気の後ろ（裏側、陰）を通過する際に探査機が発するシグナルの歪みから惑星大気に関して温度および密度データが得られる。この方法は以来体系的に用いられている。

ヴェネラ 4 号によって、ソ連の科学者達はフライバイ探査機と降下モジュールを活用する新しい手法を考案し、初めての成果を出した。彼らは金星周辺の水素コロナを発見し、初めて大気温度および圧力のプロファイルを得、また大気の化学分析も行った。降下モジュールはミッションを追って改良され、ヴェネラ 8 号では金星表面の温度、圧力（ $450^\circ\text{C}$ 、100 気圧）に耐えることが可能となり、最初の土壌分析結果を送ってきた。

ソ連の最新モデルはヴェネラ 9 号の打上げの時に登場した。それにはフライバイ探査機と降下モジュールが含まれており、レーダ・システムによりヴェネラ 15、16 号で交換され

た。モジュールの方には、ヴェネラ 13、14 号およびヴェガ探査機の場合にはサンプル採取用のロボットアームが装備されていた。ヴェガ探査機は CNES（仏国立宇宙研究センター）により開発された大気気球を投入した（図 8.13）。主たる成果は大気ガス成分とエアロゾルの分析、稲妻、大気の運動に関するデータ、金星のレゴリスの化学組成（ヴェネラ 13、14 号、ヴェガ 2 号）、レゴリスの密度（ヴェネラ 9、10 号）、地震活動（ヴェネラ 13、14 号）、表面画像（ヴェネラ 9、10、13、14 号）、レーダ・サーベイ（分解能 1.5~2km）、北半球の 1/2 の熱マッピング（ヴェネラ 15、16 号）などのデータ取得であった。

1962 年~1974 年の間、米は独自の金星観測を推し進めた。マリナー 5 号の観測は赤道半径の計算に利用され、一方電離層のデータからは、観測から分かった固有磁場がないという事実と合わせて電離層と太陽風の相互作用の独自モデルが作られた。その後、マリナー 10 号が、水星観測が主だったものの金星フライバイ時に 3500 枚の紫外画像を送信し、それにより金星大気上層の大規模スケールでの運動の理解が大幅に進んだ。

約 10 年の休止期間の後（図 8.6）、米国は 2 つのミッションで金星へと戻ってきた。今もって最も有益なデータを供給したパイオニア・ビーナスとマゼランである。

1978 年 5 月 20 日に打上げられたパイオニア・ビーナス 1 号オービタは鉛直方向に約 200m 以内の精度を持つ金星表面の 83% のレーダ・マップの作成、上層大気の高層雲の撮像、また密度や重力の推定を行った。さらにそれはマリナー 5 および 10 号の金星の電離圏と太陽風との相互作用の観測を補完した。

1978 年 8 月 8 日に打上げられたパイオニア・ビーナス 2 号は輸送ロケット（バス、探査機本体）および 4 機のエントリ・プローブを搭載していた。探査機本体は衝突して壊れるまでに高度 150~115km の間の大気を分析した。プローブ 4 機は下層大気の高層雲やガスの温度、圧力、および組成を調査した。

マゼランは 1989 年 5 月 4 日に打上げられ、90 年 8 月 10 日に金星周回軌道に投入された（図 8.14）。機器 1 台しか搭載していなかったマゼランは、それでもいくつかの重要な成果を出した。金星表面のほぼ 98% をレーダ・マッピングでカバーし、近点で分解能 100m、極では 360m であった。また、鉛直方向の分解能 30m で高度レーダ観測をしたり、電波に対する地面の応答を調べることで表面温度の推定を行った（図 8.15）。

金星と地球は大きさや密度が非常に似通っているため、この 2 つの惑星で見られるテクトニクスと火山現象との多くの比較がされるようになった。とりわけマゼラン探査機から送られてきた画像はテクトニクス運動の兆候を探出するために用いられた。コロナとして知

られる、やや目立った円形の構造が金星表面で観察される。それらは差渡し数 100km にもなり、深い窪地で縁取られ、それら自体も顕著な地形的特徴によって周囲を囲まれている。これらの一風変わった形状は一般にマントルから上昇するマグマが表面に現れたものと解釈されている。コロナのリソスフェア（岩石圏）はその後何らかの沈込み過程で周囲のリソスフェアの下方に押しやられたのであろう。この仮説に関するデータをさらに得るため、NASA はミッションの最後にマゼランの離心率を小さくした。

金星には多くの点で謎が残っているが、これ以降のミッションは、NASA の金星ラボラトリー・ミッションを除いて様々な宇宙機関でまだ明確には定まっていない。そのミッションも 2005–2010 年と大まかにしか決まっていない。しかし、米のパイオニア・ビーナスとマゼラン・ミッションが、十分に活用するにはかなりの時間を要するであろう相当量のデータを提供したことが強調されるべきだろう。現在 USGS (米国地質調査所) で進行中の金星の詳細なマッピングにはかなりの解釈が必要とされ、今後数年間継続することが予想される。

## 水星

太陽に最も近い惑星である水星はこれまでたった 1 機、マリナー 10 号によってのみしか観測されていない。この探査機は金星の方向に打上げられ、エネルギーを節約するため重力の助けを借り水星へと方向転換された。この巧妙な軌道なしでは航行には非常に大きな推進力を必要とし、どんな打上げロケットでも決して探査機を軌道に投入させることができないだろう。このようなミッションにとって天文学的好条件は極度に制限され、およそ 10 年に一度しか巡って来ない。マリナー 10 号の打上げには 1973 年のウィンドウが使用された。探査機は、水星の周期のちょうど 2 倍の周期の太陽離心軌道に投入された。このような方法で水星上空を 176 日毎に飛行することができる (図 8.12)。水星は太陽の周りを 1 回公転する間に軸の周りを 3 回自転するので、探査機は常に同じ位置を観測することになる (図 8.16)。

最初の 3 回の接近通過時の間、探査機との通信が維持された。磁場データの収集のため探査機は夜側を通過飛行しなければならなかったが、太陽に向けた面上を飛行する間に撮像の方が容易だっただろう。一方で、比較惑星学にとって地球や水星周辺の磁場を観測することは極めて重要である。なぜならこの 2 つの惑星では磁場が強く、他方火星や月では無いに等しいからである。マリナー 10 号はまた水星表面の温度計測を行い、ヘリウムが



僅かに存在するが大気は無いことを証明した。

軌道のせいで厳しい制限があるにも関わらず、探査機は太陽を向いた面の 57% をカバーし、高分解能のテレビカメラを用いて 5500 枚の画像を集めることができ、その内 1838 枚は地勢図に使用することができた（最も良い分解能は 100m のオーダ）。

水星の地形的なレリーフはこのようにある程度詳細に部分的にマッピングされた。それまで水星表面については何も分かっていなかったため、全く新しい地名が必要となった。ゴヤ、ベートーベン、ゾラなどというように、天文学者達は特徴的地形に様々な国々や歴史時代、研究分野の著名人の名をつけた。天文学者の名だけでなく、主要な断層にもスキヤパレリやアントニアディという名がつけられた。水星の非常に重要なスカープ（連なった崖）には有名な探検家の帆船の名が与えられた（ヴィクトリア・スカープはマゼランの船からの命名である）が、ベイスン（盆地）の多くは様々な言語で惑星自身と同じ名が付けられている。

水星の景観は驚くほど月と似かよっている。クレータで覆われた高台の間に横たわる、滑らかで暗い平地から成っている。ここではクレータのサイズが小さいもの程その数が更に莫大なものとなっており、それはクレータを作り出した惑星間の天体のサイズ分布を表している。中には幅数 100km にまで及ぶものもあり、最大のものはカロリス盆地で、直径 1300km である。その名はラテン語の「熱い」から来ており、交互の近日点通過の間太陽がその真上に来て、温度が急激に上昇するためである。この巨大なクレータは非常に大きなメテオロイドの衝突により生み出され、その結果周囲にはしわや亀裂ができた。同様の混沌とした地形は水星の反対側でも見られ、衝突によって生じた地震波が惑星中を伝播してちょうどこの正反対の地点に集中したと信じられている。匹敵するくらいの直径であるにもかかわらずクレータは月のものより浅く、月での場合より 2 次クレータの位置は平均して主のクレータに近い。これら 2 つの特徴は水星の重力が強いことに何らかの関係があるのかもしれない。地形学的には水星は巨大なテクトニックスカープ（連なった崖）で知られており、周囲の平地から 1000m 上にまで達し、そのまっすぐな直線は数 100km にも及ぶ。

異なる地域は密度や、それら地形の上に位置するクレータの重なり具合や磨耗した状況によって年代が決定できる。それらを詳細に研究することで水星の地質学的履歴がわかり、最初に激しい隕石爆撃期があり、次に 38 億年程度続いた比較的穏やかな時期を経験したということが示されている。このような年代は月について判っていることと良く一致しており、隕石爆撃期のメインフェイズは太陽系内で同時に起こった可能性があることを示して

いる。

NASAにもESAにも水星を再び訪れようというプロジェクトがあるが、どちらにおいても優先権はない。Messenger (MErcury: Surface Space, ENvironment, GEochemistry and Ranging)は2004年3月打上げ、金星および地球スウィングバイの後、2009年9月到着が計画されているディスカバリ計画である。またESAの水星ミッションも青写真段階にあるが、正確な日程や内容はまだ確定していない。

### **巨大惑星：グランドツア**

火星以遠の、太陽系内のより遠くを探索することは大変な仕事である。技術の進歩や相当な資金調達が必要である。これらのプロジェクトは意欲的で献身的な科学者達に支持されているが、それでもやはり政治勢力によって提起される問題に必ず直面するものである。

1960年代の間に、次は175年後でないと起こらないというめったにない天文学的機会が訪れようとしていることが判った。短期間だが、木星に向け打上げられた探査機が太陽系を後にする前に土星、天王星、海王星へと軌道を延ばすことが可能となる惑星配列が起こるのである。1977年に打上げを行わなければならない、グランド・ツアと銘打った野心的なプロジェクトがNASAによって立案された。人工知能の分野や、放射線や衝突に対する防護の分野における技術革新のお陰で、その原案は高度に洗練された、ゆえに金のかかる事業であった。パイオニア10号、11号ミッションはグランド・ツアの前身として計画されたものである。

1972年、スペースシャトル計画への着手が決議され、それによってアポロ計画の路線に沿った宇宙の征服を優先することには終止符が打たれた。野心的なグランド・ツア計画は中止された。もっと費用のかからない、またさほど威信に関わらないミッション、マリナ、ジュピタ - サタンに置換えられる予定であったがそれがボイジャ1号、2号となった。後にこのプロジェクトもグランド・ツアと呼ばれたが、それは具体的な計画や宇宙探査分野での存在を維持するために払われないかなる犠牲をもひた隠しにすることへのNASAの関心を窺わせるものだった。このように、1990年まで、たった2つの計画が火星以遠の太陽系探査を実施したが、それぞれ2,3のフライバイ探査機に限定されたものだった。ソ連は、この手のミッションに必要なコンピュータやエレクトロニクス技術を欠くため、彼らとしては疑いなくこれまでに巨大惑星への探査を計画したことはない。

パイオニア10号、パイオニア11号の探査機は望遠写真偏光計（フォトポラリメータ）

しか搭載しておらず、自らの軸回りの自転によって姿勢を安定させていて、そのため撮像には適していなかった。しかしその他の機器は小惑星帯の低密度のダストやデブリ、また木星や土星の磁気圏についての正確なデータを送り返してきた。木星が巨大な磁場を持つことが発見された。さらに、木星大気の化学組成が分析された（図 8.17）。これら探査機 2 機には男性と女性のシルエット、および記号化された印が刻まれた金属板も積まれており、もし存在するならばそれを使って他の世界の科学者達が地理的な出発点を突き止め、探査機の打上げられた日付を知ることができるようになっている。

パイオニア 10 号はカリストやガニメデ、エウロパ、そして木星画像 300 枚を送信した。その中には近接画像 40 枚も含まれており、木星の周回軌道上に 13 番目の衛星が発見された。パイオニア 11 号は同じ 3 つの衛星および木星の北極画像 130 枚を送信し、その後は土星画像を送信したが、それにより新しいリングと 2 つの未知の衛星が発見された。

パイオニア 11 号ミッションでは、少なくともパイオニア探査機の開発中の予定通り、また最終的にはボイジャ 2 号で実現されたように、天王星や海王星へとつながる小さな玄関口が、将来のグランド・ツア探査機に深刻なダメージを与えかねない未知の粒子のリングなどによって妨げられないということを確認することができた。

ボイジャ 1 号、2 号探査機は 3 軸制御でどちらの場合も、テレビカメラ 2 台（視野  $3^\circ$  から  $0.4^\circ$ ）、赤外分光計 2 台、望遠写真偏光計 1 台を搭載したステアリング可能なプラットフォームを備えていた。他の 6 つの機器は、磁力計、宇宙線・プラズマ・低エネルギー荷電粒子用の検出器 3 台、惑星電波観測機器、プラズマ波サブシステムであった。撮像機器からはみごとな高解像度画像の数々が送られてきた（図 8.18）。

ボイジャ 1 号は木星とその衛星のイオ、エウロパ、ガニメデ、カリストの画像 19000 枚（図 8.19）と土星、タイタン、レア、ディオネ、テティス、ミマス、エンセラダスの画像 17000 枚（図 8.20）を送ってきた。

ボイジャ 2 号は木星、アマルテア、エウロパ、ガニメデ、カリストの画像 15000 枚（図 8.21）と土星、フォエベ、イアペトス、ハイペリオン、テティス、エンセラダスの画像 17500 枚（図 8.22）、そして天王星とその衛星ミランダ、アリエル、ウンブリエル、ティタニア、オベロンの画像 6000 枚（図 8.23）を送ってきた。これらの画像から 2 つのリングと木星の重力圏にある 3 つの衛星が新たに発見された。その後同じ領域は米の探査機ガリレオによって 1995 年 12 月に再探査されている（下記参照）。ボイジャ 2 号ミッションでは木星の衛星イオに激しい火山活動があることや、土星の周りにさらに氷と塵のリングがあること、

天王星に衛星 10 個と別のリングがあることもわかった。さらに、ミランダというユニークな衛星は、かつての衛星がいくつか集まって形成された惑星の集合体のようなものと思われており、長いこと忘れられていた大変動によって破壊されたことも示した。この小さな衛星の地形は確かに極度に複雑であり、大きく急な断崖や断層による峡谷、クレータのある平原やグループと呼ばれる溝のある地域などがある。

他にこの計画がもたらしたものとしては、接近した天体の様々な大気の運動、化学組成、温度や、衛星を構成する物質、そして磁気圏の範囲やそれら内部のプラズマの分布がわかったことが挙げられる。さらに、ボイジャ 2 号ミッションは天王星の磁場が自転軸に対して 60° 傾いたところにあるという、この惑星の独自性に関する重要な発見をしている。

ボイジャ 2 号は 1989 年 8 月 25 日に海王星の高度 1300km 以下および衛星トリトンの 6000km 以下を飛行した。

海王星のフライバイに続いて、その地点では両ボイジャ探査機はまだなお良好な状態にあったため、NASA はこの計画を延長し、ボイジャ星間ミッション (VIM) を開始することが可能となった。その目的は、ヘリオスフィア (太陽圏) の最も遠方の地帯の状態を調査することである。探査機 2 機は次々とターミネーション・ショック (末端衝撃波面) とヘリオシース (太陽鞘、星間ガスの勢いが増す領域) を通過しなければならず、それによって初めて星間物質に直面するのである。2000 年 2 月現在、探査機はまだ太陽圏内におり、地球から 11 兆 4990 億 km (ボイジャ 1 号) および 9 兆 1060 億 km (ボイジャ 2 号) の地点にあってそれぞれ速度 17.281 km/s、15.807 km/s の速さで航行している。紫外線分光計のみがまだ作動中であったが、節約のためスキャン・プラットフォーム上の機器類は、ボイジャ 2 号では 1998 年以降、1 号では 2000 年以降暖められてない。磁力計はそれぞれ 2010 年、2011 年からはもはや機能しなくなり、それで他の機器類 (先述の磁力計以外の 5 台) が少なくとも 2020 年まで動作可能となる。

### **巨大惑星：ガリレオとカッシーニ**

巨大惑星の探査は米の探査機ガリレオの打上げによって再開された。この計画はチャレンジャー号の事故によってある期間遅延していた。ガリレオは 1989 年 10 月、スペースシャトル・アトランティスによって打上げられた。2 回の小惑星フライバイの後、探査機は木星へと飛行し、探査機自身が木星周回軌道へ突入する前にプローブを木星へ降下させた (図 8.24)。

ガリレオはボイジャと似たような装置を搭載している。スピンのないスキャン・プラットフォーム（オービタは自転によって姿勢を安定させている）には視野  $0.4^\circ$  の高解像度 SSI（半導体イメージング）カメラ、近赤外マッピング分光計（NIMS）、紫外線分光計（UVS、極端紫外検出器が取り付けられている）、望遠写真偏光計放射計（フォト・ポラリメータ・ラジオメータ）（PPR）が積まれている。他の機器は磁力計、高エネルギー粒子検出器（EPD）、プラズマ粒子検出器（PLS）、ダスト検出器（DDS）、プラズマ波サブシステム、重イオン計測器（HIC）、電波天文学用機器、そして天体力学用機器（天体の質量や大気の構造を決定するためのもの）である。

探査機の一部として降下プローブは、通過する層での温度、圧力、密度、分子量を計測する大気構造測定器（ASI）、中性粒子質量分析計（NMS）、ヘリウム存在度検出器（HAD）、総フラックス放射計（NFR）、および雷や高エネルギー粒子の検出器を搭載していた。

プローブは 1995 年 8 月に投下され、着手するのにかなりの困難があったにもかかわらずその降下は勝利の栄冠を得た。57 分以上の期間においてガリレオを通じて送信されるデータは木星大気の組成や動きの我々の知識を大いに進歩させた。計測された減速度からは大気密度が予想以上に高いことが判った。一方組成分析からはヘリウムとネオンがそれまで考えられていたよりもさほど豊富でないことが判明した。このような観測は科学者達に木星が原始太陽系星雲の代表かもしれないという一般的な見解を再検討させることとなった（図 8.25）。

ガリレオ・オービタは 1995 年 12 月 7 日に木星周回軌道に突入した。木星磁気圏尾部が調査され、特に、東西方向で地球直径の 2 倍以上もある謎に満ちた大赤斑などの木星のすばらしい画像が撮影された。また、大赤斑の周囲を速度 400km/h で反時計回りに回転する風の循環が観測された。オービタは最初、230 日の非常に離心率の高い木星軌道に投入された。ガニメデとの最初のフライバイの後、連続したスイングバイ・マヌーバへと移行した。その目的は元々の計画通りに周期と軌道傾斜角とを修正し、最終的に花びらのような配置の 11 の軌道を達成することであった。これらにより、ガリレオ衛星への近接フライバイが可能となり（図 8.26 および表 8.1）、同様に、内側の小さい衛星のうち最も遠くにあるものへのフライバイやリングの観測が可能となる。12 番目の軌道は、GEM（ガリレオ・エウロパミッション）と命名された計画への拡張の第一歩を刻むものであった。この新ミッションの最初の 8 つの軌道はエウロパの低い高度でのフライバイへと導くものであったが、一方続く 4 軌道はカリストの重力の助けを借りて近木点を下げ、最後の 2 つ（軌道 24

および 25) は探査機がイオを観測するのに十分な距離に接近させる。ミッションはこれで終りにすべきであった。なぜならイオのトーラスの放射線や電流が回路をだめにする予想されたからである。実際は、プローブはこれら 2 つの通過を生き延び、更なるミッションへの拡張 (ガリレオ・ミレニアム・ミッション) がエウロパとイオとのフライバイによって 2000 年に開始された (図 8.28)。

イオは木星に最も近いガリレオ衛星であり、その軌道は木星の磁力線を横切っている。このことは探査機が強い電荷を帯びることを意味し、これにより衛星と母惑星との間に閉じた電気回路が形成される。ガリレオはこの衛星の地形学的進化に関する興味深い観測を行った。探査機ボイジャによって撮られた連続画像によって既にイオの地形の運動学的解析が可能になっていた。ガリレオは、ボイジャとガリレオ・ミッションを隔てる 17 年以上の期間に起こった急速な変化を証明することができた。ここ数年間は、亜硫酸ガスによって特徴付けられるイオの火山地形の激しい地形学的進化が目撃された。地球は別として、マウント・ペレやマスビ火山のような活火山を持つ星はイオだけである。これら火山の多くは時に高度数 100km にまで物質を柱状に吹上げている。それらは主に硫黄化合物からなるデブリと共にイオ表面を覆っており、温度変化によって化合物は赤からオレンジ、黄色から白までの様々な色でそれらを飾り立てている。

ガリレオはその経路の 1 つでエウロパに 201km 以内に接近した。月とほぼ同じ大きさで、氷の世界であることが明らかになった (図 8.27)。既に 1979 年のボイジャ・ミッションで発見された通り、表面を縦横に走るおびただしい数の縞模様や割れ目のような地形が 2 つの暗い外側の縁とより明るい物質の中央部分から成る 3 つのバンドに分解された。それらはテクトニクスで解釈され、また塵の間欠泉が関係する新説によっても解釈がなされた。後者の説では氷と暗いケイ酸塩の塵の混じったものが表面まで運ばれ、明るい中央の輝線は非常に純粋な水の氷が盛上がることで形成されたとするものである。

衝突クレータがほとんど存在しないのは一般に、そのような地形は表面の氷の層が新しく形成されるにつれ、連続したプロセスによって消滅したと考えることで説明されている。エウロパもまた宇宙生物学者にとって特に興味深い研究の場を提供している。水および内部の熱源の存在は、表面の氷の下に液体の海があることを意味する可能性がある。2000 年 1 月のフライバイで、塩水のような導電性の液状媒体の動きに関係する、磁場中の方向における変化があることが判った。

ガニメデは太陽系最大の衛星であり、接近飛行の際に加速度が変化するお陰でガリレオが

測定可能となった磁場を持っている。ガニメデの密度（地球の僅か 1/3）は、衛星の構造に關与した相当量の水があるかもしれないということを示唆している。この水は氷の地殻を形成し、その下に岩石のマントルがあり、その中に金属の核が存在する。ガニメデの表面には 2 つの非常に異なった種類の領域がある。衝突クレータの密集した暗い地域がより若い氷からなる色の明るい地帯によって分けられている。

最後に、カリストにはケイ酸塩を含んだ氷の地殻があり、数多くの衝突クレータが一様に点在する。後者は、氷の動きによって表面が新しくなることがなく、ガリレオ衛星よりはるかに古い表面であることを示唆している。

もう 1 つの意欲的な計画—1983 年に NASA の太陽系探査委員会によって推奨された 4 番目のプロジェクト—米のバックアップを受けたオービタ、カッシーニと ESA のホイヘンス降下プローブとを結びつけた。このミッションは 1985 年に採用されたが予算上の理由で延期され、最終的にタイタン 4 センタウア・ロケットの助けを借りて 1997 年 10 月 15 日に地上を脱した。探査機は金星の引力を利用した 2 回のスイングバイをし、1 つは 2000 年の木星との接近前に地球を通過し、2004 年に土星近傍へと航行を続ける。同年 11 月に探査機は土星の最も遠方の衛星であるフォエベから 52000km の距離を通過する（図 8.29）。

カッシーニ・オービタ（17 世紀に土星の研究をした仏天文学者、ジャン・ドミニク・カッシーニから命名）は 3 軸で姿勢を安定させている。搭載機器は可視赤外マッピング分光計（VIMS）、焦点距離 250 および 2000mm の可視波長用の ISS カメラ（イメージング・サイエンス・サブシステム）、13.8GHz レーダ、イオン中性質量分光計、宇宙塵分析器、プラズマ／電波分光計、プラズマ研究（PSI）用分光計、紫外イメージング分光器、磁気圏イメージング用機器（MIMI）、両用技術磁力計、電波科学サブシステム（RSS、惑星の重力場）、そしてコンポジット赤外分光計である。探査機は 4 年のノミナル・ミッションの間に 63 回土星を周回するだろう。これらのうち 33 回はタイタンの上を飛行し、レーダ・マップが取られるだろう。予定されている再接近距離は 950km である。接近観測はイアペトス、エンセラダス、ディオネとリアでも計画されているが、一方テティス、ミマス、ハイペリオンは遠方からの観測となる。

タイタンの最初のフライバイの間、カッシーニはホイヘンス・プローブを降下させる。これは 1655 年にタイタンを発見したオランダの天文学者、クリスチャン・ホイヘンスに因んで名づけられた。プローブは、2 つの連続して展開されるパラシュートを用いて降下スピードを落としながら、まずタイタンの大気中を降下する間にその大気を調査する。着地

の後、まだ数分の間プローブが機能することがあり得るだろう。それからカッシーニ・オービタを通じて地球に情報が送られるのである。ホイヘンスの機器は大気構造測定器(ASI)、ガスクロマトグラフ質量分析計(GCMS)、エアロゾル捕集機／熱分解器(ACP)、降下イメージャ／スペクトル放射計(DISR)、地表の科学測定パッケージ(SSP)、そしてドップラ風計測器(DWE)である。

タイタンは水星よりも大きく、ボイジャ1号探査機が既に6500kmの距離の所を飛行している。画像にはオレンジ色がかかった霧のやや一様なボールが写っている。その非常に濃い大気は80%の窒素と約6%のメタンだが、他の炭化水素や分子水素も含まれている。タイタンの大気や表面は、その歴史のごく初期においては、宇宙生物学的な推測につながる炭素を含む化合物があり、地球と似通った組成を持っていたことが考えられる。

ガリレオやカッシーニは最近の2つの主要な外惑星探査ミッションである。今後のミッションは規定が待たれるところだが、それらがディスカバリ計画の枠の中でこの規模で存続できるかどうかは疑わしい。

2つの可能性としてエウロパ・オービタと冥王星・カイパー・エクスプレスが検討中である。エウロパ・オービタはこの木星の衛星と、存在するとされる海をガリレオでは使用できない機器を用いて調査するものである。すなわちレーダ、高分解能のレーザ高度計、そして地震調査を行うためにエウロパ表面に設置されるプローブである。

冥王星・カロンの系は、外惑星を越えたところで引力に引かれ、ますます小天体の帯にある構成要素のように思われる(これまでに直径200~2000kmの間のものが35個記録されている)。これらは、ちょうど内惑星に対するメインベルトの小惑星のように、外惑星が集積したプロセスから取残されたものを代表しているのかもしれない。それはカイパーベルトと呼ばれてきた。冥王星・カイパー・エクスプレス計画は2機の小型探査機を冥王星へ向けて送り、各々が冥王星の別々の半球の上空を飛行するものである。探査機はその後カイパーベルト天体のいくつかに向け誘導されるであろう。

### **小惑星と彗星**

小惑星は19世紀に初めて発見された。それらは火星と木星の間、ちょうど太陽系内惑星の日心距離に関するボーデの法則によって特定される距離のところに帯状に見つかった。しかし、それら(小惑星)を理解するという点において決定的な進歩を遂げることができた宇宙機による接近航法で始めて可能になったことである(図8.30)。多くの小惑星観測ミ



ッションやサンプル・リターン・ミッションが1980年代に案出された。ベスタ・ミッションはソ連と欧州が共同で主小惑星帯へ向けて探査機4機を打上げることになっていたが、1989年、クラスタやカッシーニの方に戻ることを選んだESAによって中止となった。中でも米のGRAF（彗星ランデブおよび小惑星フライバイ）計画がCタイプ小惑星の(449)ハンブルガとコプフ彗星を調査するはずであったが、1992年初めに予算上の理由から中止された。そのミッションの最初の案ではカッシーニはメインベルトの小惑星を観察する予定であったが、より重要な課題へ向けての探査機の進行を遅らせるとしてNASAが反対した。

結局、1991年10月29日、木星への航行中に最初に小惑星のフライバイ画像を撮影したのはガリレオであった。対象天体は(951)ガスプラ、直径18kmの小惑星である。ガリレオ探査機はその後(243)イダへと向かい、1993年8月のフライバイ時に衛星ダクティルを発見した。

ガリレオの成功に続き、米のディスカバリ計画はNEAR（近地球型小惑星ランデブ）ミッションで始まりを告げた。それにより小惑星の軌道周回が始めて成し遂げられた。1997年2月17日に打上げられ、最初にマチルダから1212kmのところを（97年6月）、次いでエロスから3828kmのところを（98年12月）通過したが、周回軌道を得ることはできなかった。ついに323km地点でのランデブに成功したのは2000年2月14日であった。この距離は徐々に縮められ、僅か15kmまでになる（図8.31）。搭載機器（CCDカメラ、ガンマ線、エックス線および近赤外線分光計、磁力計、レーザ高度計）が小惑星の詳細な物理、化学、および鉱物学的な調査をするであろう（図8.32）。

もう1つ、ニュー・ミレニアム・ミッションの最初の探査機、ディープ・スペース1が1998年10月に小惑星マコーリフおよびウエストーコホーテクイケムラ彗星へ向けて打上げられた。その主目的は、新しい小型化された技術（探査機は重量僅か365g）、特にイオン推進モータを宇宙で実地テストすることにあった。

ミューゼスCは小惑星サンプル・リターン・ミッションである。ISASによって2002年に打上げが予定され、2005年9月に小惑星1998SF36（編注1）に到着し、2007年6月に帰還することになっている。探査機にはCCDカメラ、エックス線および近赤外分光計、ライダ（レーザ高度計）、そしてSSVという、JPLによって開発され表面に設置される予定の小型ローバが積まれている。探査機は小さな飛翔体を発射し、破片をサンプルホルダに送込むという方法でサンプル採集する。有効な断熱材を備えたサンプルホルダは、探査機が近くを通過した時、地球へ帰還する軌道へと投入される。それはスペースシャトルの大気

圏再突入時の 30 倍もの温度に耐えなければならないだろう。

しかしながら、観測、解析、そして予定されている彗星からのサンプル・リターンは科学界に更に大きな熱狂を引起こすことだろう。一般に支持されているように、もし太陽系が 40 数億年前に氷と塵の原始太陽系星雲の重力崩壊から始まったのであれば、また、彗星が確かに最も変成を受けていない最古の天体であるならば、プレソーラ粒子や原始的な凝縮物の痕跡が彗星物質の中に見つかることは明らかである。このような粒子を太陽、小惑星や様々な惑星からの物質と比較することで、太陽系形成へとつながる現象を更により良く理解できるであろう。

IUE やハッブル、ISO のように多くの地球周回衛星から既に彗星についての分光データが提供されている。しかし、科学者達は観測は間近ですべきと考えており、それによりサンプル採集やその場 (in situ) 分析も可能となる。プローブを手段として周期彗星のその場 (in situ) 探査をするいくつかの重要なミッションが進められている。もっとも興味深いことが多いのだが、予期せぬ彗星というのは、ミッションの準備に多くの時間を要するため、行き着くには非常に困難が伴う。

NASA-ESA 共同の衛星 ISEE 3 (国際太陽地球間探査衛星) は ISEE 2 および ISEE 1 と連携して太陽風計測のため運用された。この衛星は 4 年間ハローの軌道に留まったが、今なお宇宙探査機となるのに十分な蓄えがあった。月の重力を利用する方法で元の軌道から離され、1900 年にジャコビニによって仏で発見され、再度 1931 年にツィナーによって独で発見された古い彗星とランデブするために送り込まれた。以降衛星は名前を ISEE 3 から ICE (国際彗星探査機) へと変えた。1985 年 9 月 8 日、ICE はジャコビニーツィナー彗星の核の後方ちょうど 7800km 地点を飛行した。カメラは搭載していなかったものの、探査機は彗星通過に伴った電気的および磁気的効果に関する全く新しいデータを送信することが可能だった。そしてこれは当初の計画より 50 倍も遠い距離だった (図 8.33)。

紀元前 240 年以來 76 年ごとに定期的な飛来が観測されてきた神秘的なハレー彗星は、1986 年に太陽近傍を通過する時、天文学者がその方向でいくつかのミッションを計画するのに充分正確に軌道がわかっている。相補的な目的を持つ全部で宇宙探査機 5 機がこの機会に送り込まれた (図 8.34) が、NASA は、多くの米国科学者にとって非常に残念なことであったが、ハレーへ探査機を送る計画を取りやめた。

ソ連は仏や他の国と共同して探査機ベガ 1 号およびベガ 2 号をそれぞれ 1984 年 12 月 15 日と 21 日に打上げた。ベガという名の 2 つの音節はこの計画の 2 つの目的を表しており、

一部は金星探査に、一部は Galleia の調査に充てられた。Galleia とはハレーの露語名である。1985 年 6 月、降下モジュールを下ろした（図 8.13）金星フライバイの後、これら探査機はハレー彗星へ向けての飛行を続け、1986 年 3 月には 10000km 以内に接近した。ESA は、伊の画家の名をとった探査機ジオットを打上げた。画家ジオットは 1304 年にフレスコ画作品の 1 つにハレー彗星を描いている。ジオットは 8 ヶ月後の 1986 年 3 月 13、14 日に彗星とのランデブを果たした。彗星はその時 8km/s で動いており、彗星核からわずか 596km の距離にジオットを配置させるには非常に正確な飛行が求められた。このよう絶好の地点から、核が黒い塵で覆われた物体であることを示す 2000 枚もの画像が送られてきた。他の 2 機の探査機、さきがけとすいせいは日本の探査機である。

2 機は 1986 年 3 月に同じランデブで姿を現したが、彗星からは非常に遠い距離にあった。分析のため地球に持帰られた月の岩石試料は我々の理解に相当の進歩をもたらした。彗星核からのサンプル・リターン・ミッションの考えは 1984 年から主要な宇宙機関によって考慮されてきた。その方法には 2 つある。最も簡単なものはコマを通過し、核から塵を採集しようとするものである。他の選択は核自体に一つかそれ以上のペネトレータを下ろし、表面もしくは更に望ましいのは内部でサンプリングを行う方法である。どちらの場合にも試料は再突入時用に断熱を施した密閉カプセルで地球に持帰られる。

最初の解法は ESA では CAESAR 計画（彗星大気および地球サンプル・リターン）を、ISAS では SOCCER ミッションを生み出したが、その後最終的には NASA が、JPL によって提案されたスターダスト探査機を保守した。スターダストは 1999 年 2 月、分析用に充分大きい（15 ミクロン以上）彗星粒子を採集するという願いと共に地球を離れた。ヴィルド第 2 彗星とのランデブは 2004 年 1 月に予定されている。また、星間塵も採集予定である。試料の入るカプセルは次に地球近傍を通過する 2006 年に投下される予定となっている。

2 番目の解法は 1984 年の、元々 NASA-ESA の最初の共同ミッションのテーマであった。この計画は 1988 年に、エジプト象形文字の解読につながったロゼッタストーンの名をとってロゼッタと名づけられた。NASA はマリナー・マーク 2 バスを、ESA はランダとリターン・カプセルを提供することになっていた。しかし、その計画は 1996 年 NASA によって維持されなかった。ESA がこのミッションを、ホライズン 2000 計画が 1993 年に考案された時にその 3 番目の要としたため、多少の変更があったものの名を変えずにその計画の一部として維持された。このミッションは 2003 年 1 月に打上げが迫っていた。ヴィルタネン彗星の周回軌道に入るオービタ（図 8.35）と、その場分析を行うランダが搭載されているが、

その時以降サンプル・リターンの考えは破棄されたためである。

オービタにはイメージャ 4 個を搭載している。OSRIS (高および中分解能の 2 台の可視波長カメラ)、ALICE (紫外線分光計)、VIRTIS (可視および赤外マッピング分光計)、そして MIRO (マイクロ波分光計) である。探査機はまた 4 つの複合分析器を配置する予定である。ROSINA (中性ガスおよびイオン分光計)、MODULUS Berenice (ガスクロマトグラフによる軽元素の同位対比)、COSIMA (ダスト質量分析計)、そして MIDAS (粒子の形状) である。更に、電波実験 (RSI)、彗星プラズマ環境および太陽風相互作用の研究 (RPC)、ダスト研究 (GIADA)、そして電波探査による核のトモグラフィ調査 (CONSERT、オービタとランダの両方に搭載) である。

ランダは深さ 1m までの試料採取をし、彗星物質の詳細分析のために装備された。その技術には X 線、 $\alpha$  粒子、陽子スペクトログラフィ (APX) による元素分析、質量分析およびガスクロマトグラフィによる熱分解および分析 (COSAC)、そしてガスおよび同位体組成分析 (MODULUS Ptolemy) が含まれている。CIVA 機器は赤外分光計と関連した光学のステレオ顕微鏡であり、SESAMI (表面電子および音響モニタリング実験) はダスト衝突モニタである。MUPUS は表面および地表下科学用多目的センサ、ROMAP は磁力計およびプラズマモニタである。

他の 2 つの彗星 (探査) 計画はディスカバリ計画の枠組みに含まれる。CONTOUR 探査機 (彗星核ツア) は 2003 年、2006 年、2008 年の 3 つの彗星とのランデブに向けて 2002 年に打上げられ、NEAR と似たような使命を担う。今回この探査機はもし新彗星が発見されれば速やかにプログラムを作り変えることが可能である。構成要素の変更が難しくなるため、太陽系内部の最初の通過時に彗星と会合することが確かに望ましい。最後に、2004 年に予定されているディープ・インパクト探査機が、テンペル 1 彗星との高速衝突に向けて 500kg のマスを送り出す予定である。搭載高分解能カメラや赤外分光計が、その時の衝突クレータや核から巻き上がるデブリを 700km の最接近通過をしながら観測することになっている。

(編注 1.) 原文では 1998FR36 となっている。