

深宇宙探査の動向

Trend in Deep Space Exploration

中谷一郎

Abstract

曲がり角にきた、世界の宇宙開発とその中心的な課題となってきた月・惑星探査（深宇宙探査）の現状を中心に概観する。米ソの冷戦を背景にした国家威信をかけた宇宙開発競争の時代が終わり、ポストスペースステーション時代の宇宙開発の柱として、米国が発表した有人の月・火星探査計画につき紹介する。宇宙開発では独走状態の米国が圧倒的な力で惑星探査を進めているが、一方で国際協力も重要度を増している。米ソに1半世紀遅れて立ち上がったものの健闘している日本の深宇宙探査ミッションの現状についても述べる。

キーワード：深宇宙探査，月・惑星探査，宇宙基地，火星探査機，のぞみ，はやぶさ

1. はじめに

世界の宇宙開発全体が今、大きな曲がり角に差しかかっている。そしてその曲がり角の中心的課題は、月・惑星探査である。本稿では月・惑星探査が、にわかに脚光を浴びるに至った背景を中心に、世界の深宇宙探査の動向を述べ、併せて、我が国の深宇宙探査の現状を紹介する。

なお深宇宙探査の定義は必ずしも確定していない。通信分野では「約200万km以遠を深宇宙と呼ぶ」という世界電気通信連合の世界無線規則の定義がよく知られている。この定義によれば月は深宇宙から外れることになる。一方、天文学の分野では、太陽系を遠く離れた星雲や恒星の存在する領域を深宇宙と呼んでいる。しかし、一般に宇宙開発の分野で広く用いられる慣用語としては、漠然と地球周辺を離れた探査を深宇宙探査と呼び、月もこの中に含めることが多い。本稿ではこの定義によって、深宇宙探査を月・惑星探査と同義に用いることとする。

2. 米国の新宇宙政策

2004年1月に米国のブッシュ大統領が火星への有人

探査を目指した壮大な探査計画をぶち上げて注目を浴びた。計画によれば、NASAは、まず月に再び人を送り込み、技術の習得を行うところから始まる。1972年にアポロ計画が中断されて以来40年以上を経て、早ければ2015年には、人類が再び月面に降り立つことになる。NASAはこの目標に向けて、2008年から無人の探査機を月に次々と送り込むことを計画している。予算規模は当面の5年間だけをとっても120億ドル（約1.2兆円）と見積もられている。

米国は日本の1けた上の宇宙開発予算を使っている。その米国が路線変更をすることを宣言した新宇宙政策が世界に与えたインパクトは大きかった。2004年11月にNASA主催でワシントンDCで開かれた宇宙探査に関する国際ワークショップ（International Workshop on Creating New and Sustainable Space Exploration, 2004年11月16～18日）には、日本のほかにESA^(用語)、ロシア、カナダ、中国、インドをはじめとして18か国が参加し、米国の新宇宙政策への協力の可能性を探る議論を行った。いずれの国も米国の新宇宙政策に大きな関心を持ち、国際協力に関しては、前向きの検討が続行されることになろう。

3. 新宇宙政策の背景

上述のように、月、惑星有人探査を目玉とする米国の新宇宙政策は、世界各国の宇宙開発の基本方針に大きな影響を与えることになる。ではなぜ今、宇宙探査が急に

中谷一郎 正員 独立行政法人宇宙航空開発機構
E-mail nakatani@nsl.isas.as.jp
Ichiro NAKATANI, Member (Japan Aerospace Exploration Agency, Sagamiharashi, 229-8510 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.88 No.6 pp.392-396 2005年6月

注目されるに至ったのであろうか。その背景を多少乱暴にまとめると以下のようなようになろう。

世界の宇宙開発は、米ソの国威をかけた競争に始まったということができよう。1957年にソ連が人類初の人工衛星スプートニク1号を打ち上げて米国にいわゆるスプートニクショックを与えたのを皮切りに、米ソの宇宙開発競争が続いた。

1961年に当時の米国大統領ケネディが1960年代に米国が宇宙飛行士を月に送ると宣言し、猛烈な開発の努力を重ねて1969年にそれが実現した。有人月面探査の競争では米国がソ連に勝利する結果となった。世界中が胸を躍らせて見守ったこの壮大なプロジェクトは、純粋科学として、あるいは実用としてもその出費に応じた意義を見いだすことは困難であり、唯一の目的は、冷戦下、ソ連との技術競争に勝つという国家威信の発揚にあったといえるであろう。もちろん、より大きな目で見れば、その底流には人類のフロンティア拡大の本能に基づくチャレンジ精神が脈々として流れていたことは間違いない。元々アメリカはコロンブスによる新大陸発見に続くフロンティア拡大の結果として生まれた国であった。世界の人々に興奮と感動をもたらしたアポロ計画は1970年に第17号をもって打ち切られたのは周知のとおりである。

次なる宇宙開発競争の舞台は、宇宙に恒常的に人間を

■ 用語解説

ESA European Space Agency の略。ヨーロッパの15か国が宇宙開発を協力して行う目的で集まった組織。パリに本部を持ち、研究開発センター（オランダ）、衛星管制局（ドイツ）、宇宙飛行士センター（ドイツ）、情報技術センター（イタリア）、ロケット打上げ基地（仏領ギアナ）のほかに、衛星追跡局を世界中に持っている。

フライバイ 月・惑星などの天体探査の一手法。対象天体のそばを通過する短時間に写真撮影や科学観測を実施する。本格的な周回または着陸ミッションを実施する前の初期段階の探査に用いることが多い。

スイングバイ 探査機が月・惑星・地球などの天体のそばを通過するときに、その天体の重力を利用して、速度ベクトルを変化させる手法。探査機の搭載推進剤の消費を節約するために用いることが多い。

太陽フレア 太陽大気中の大規模な爆発。黒点近くのプラズマガスに蓄えられた磁界のエネルギーが、短時間の間に爆発的に放出される現象であるが、詳しいメカニズムは分かっていない。太陽フレアに伴って太陽から放出されるX線、高エネルギー粒子、プラズマなどが地球を直撃すると短波通信を乱したり、衛星搭載機器の故障を起したり、地上の電力施設に影響を与えるなど、被害を及ぼすことがある。

電気推進 宇宙空間で探査機の推進力を得る一手法。化学推進のように推進剤を燃焼させるのではなく、プラズマ化した推進剤を電磁氣的に加速して放出することにより力を得る。得られる推力は小さいが、長期間用いれば、少ない燃料で大きな速度を得ることができるので、深宇宙探査や静止衛星の軌道保持などに有力である。

住まわせるという宇宙基地構想であった。米国の宇宙基地構想は1984年に当時の米国大統領レーガンによる各国への呼び掛けにより始まり、1988年に国際宇宙基地協力協定が、日本を含む12か国によって署名されて立ち上がったものである。米ソの冷戦の激しいさ中のことであり、仮に、同じ計画がソ連の崩壊後に構想されたら立上げははるかに困難であったことは想像に難くない。

1991年にソ連が消滅し冷戦が事実上終結した後、宇宙基地は上記のような寄って立つ基盤を失った。去年発表された上記の米国新宇宙政策によれば、宇宙基地は2010年までに完成し、その後、宇宙基地の開発と運用の要であるスペースシャトルを引退させるとしている。

米国の（そしてある意味では世界の）巨大宇宙プロジェクトの歴史を振り返ってみると、①アポロ計画（1961年発表）⇒②宇宙基地構想（1984年発表）⇒③有人月・火星探査構想（2004年発表）というように約20年ほど間を置いて立ち上げられてきたことに気付く。しかし、今回の有人月・火星探査構想が前の二つと決定的に異なるのは、米ソの冷戦が存在せず、全く異なる理念から出発することにある。その理念は、ブッシュ大統領が2004年1月に行った演説の最後の節に次のように要約されている。「人類はかつて未知の大陸に海を越えて引き寄せられていったのと同じように今、宇宙に引き寄せられていく。宇宙の探査に踏み切るのは、生活の向上と国家的精神の高揚をもたらすからである。」

4. 深宇宙探査の経緯

深宇宙探査の歴史は古く、スプートニクが打ち上げられた翌年（1958年）には、早くも米国はパイオニアシリーズを立ち上げ、月のフライバイ^(用語)に挑戦している。

しかしパイオニア1～3号はいずれも失敗し、地球の引力圏を脱して、人類初の人工惑星となる栄冠を獲得したのは、ソ連のルナ1号（1959年1月打上げ）であった。

それ以来、米ソを中心に、深宇宙探査機の打上げは200機を超えている。しかし、その中で完全に成功したミッションは実に約半数に過ぎず、深宇宙探査の困難さがうかがえる。

特徴的なミッションを挙げてみよう。米国のパイオニアシリーズは1958年打上げの1号機から11号機まで続き、中でも10、11号機は、外惑星に初めて成功裏に打ち上げられた探査機となった。木星（10、11号機）及び土星（11号機）を近傍より観察した後、太陽系外に向けて飛ばす中である。既に交信は途絶えているが、いずれも太陽系外の知性体へのメッセージを図に託した銘板を搭載している。

1962～1973年に米国はマリナーシリーズの探査機を10機打ち上げ、金星、水星、火星のフライバイを行った。マリナー10号機は金星の重力を用いて軌道を大きく変

える技術（他の天体へのフライバイ技術）を初めて用いて木星に接近した。マリナーシリーズに続いて米国は1977年に、双子の探査機ボイジャー（1, 2号）を打ち上げ、木星（1, 2号機）、土星・天王星・海王星（いずれも2号）の観測を行った。ボイジャーは打ち上げ後27年以上経過した現在、恒星間空間を飛行中であり、地球から最も遠いところに存在する人工物となっている。

我々に最も身近な惑星の一つである火星は、集中的な探査の対象となり既に打ち上げられた火星探査機の数36を数える。特に生命のこん跡が見つかる可能性があること、当面、有人探査の対象となる唯一の惑星であること理由から、近年、その数が増している。NASAは、ポスト宇宙基地計画の有力候補として有人火星探査を早くから検討してきたが、2004年1月の新宇宙政策発表まで、それをアナウンスするチャンスに恵まれなかった。しかし、その間も、生命探査という看板のもとに集中的に火星の無人探査を行うことにより水面下でその機会をうかがっていたと見ることができる。事実、NASAは、1992年以降は、1994年の例外を除いて、約2年に1回の頻度で巡ってくる火星探査機打ち上げが可能な時期ごとに、必ず1~2機の打ち上げを実施してきている。

図1は、世界の火星探査機を、横軸に打ち上げ年を、縦軸に打ち上げ重量をとってプロットしたグラフである。黒く塗りつぶされているのが失敗、アミカケは部分的成功、白は成功を示している。このグラフの示唆する興味深い点は次の2点である。

- (1) 失敗が極めて多いことに気付く。完全な成功は12機（全火星ミッションの3分の1）、部分成功を含めても20機（同、2分の1強）である。しかしこれは深宇宙探査機の全般的な統計と大きくは異ならない。（火星人が火星探査機を打ち落とすのだらうという冗談があるが、それは当たらないことになる！）
- (2) 探査機重量は1960年代から1980年代にかけて上昇し続けたが、1990年代に入って急速に軽量級となった。探査ミッションの規模が大きくなり過ぎて打ち上げ頻度の低下、失敗時のダメージの巨大化が大きな問題となったからである。1992年から2001年にかけてNASA長官であったダニエルゴールディンが強力に推し進めた“smaller, faster, better”路線への転換も影響している。

一方、米国は近年になってからも、火星以外にも広く太陽系の惑星の探査を進めており、これらは水星（メッセンジャー：2004年打ち上げ）、金星（マゼラン：1989年）、木星（ガリレオ：1989年、JIMO (Jupiter Icy Moon Orbiter)：2010年代予定）、土星（カッシーニ：

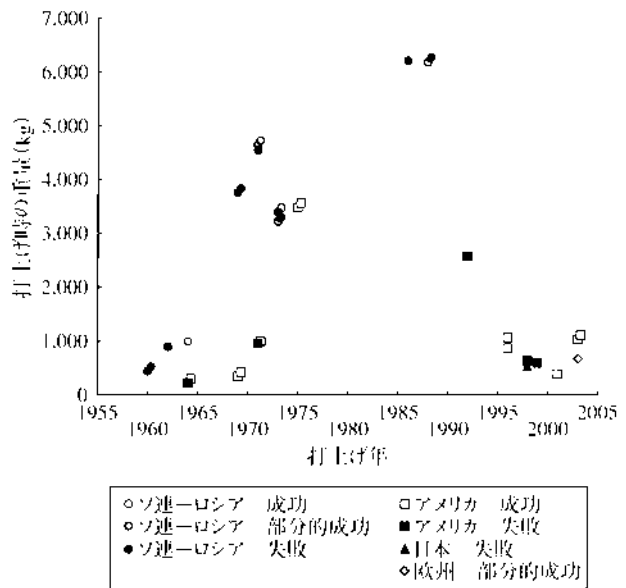


図1 火星探査機の打ち上げ履歴 世界の宇宙機関が打ち上げた火星探査機の重量と成功・失敗の結果を年別に示したグラフ

1997年)、冥王星・カイパーベルト（ニューホライズン：2006年予定）、小惑星・すい星（ニア・シューメーカー：1996年、ディープスペース1：1998年、スターダスト：1999年、カンツア：2002年）、など多岐にわたっている。

また深宇宙探査を目指す技術開発も米国は活発に行っている。例えば、プロメテウスと名付けたプロジェクトは原子力発電を探査機上で行い推進に用いることを目指した極めて野心的な計画である。

現状の探査機は、太陽電池及び化学燃料を主なエネルギー源としており、木星やそれ以遠の土星、天王星、海王星、冥王星あるいは太陽系外などを本格的に探査することは困難である。例えば、太陽に比較的近い外惑星である木星の周回軌道を回る探査機ですら、太陽からの距離が遠いため、もし太陽エネルギーを用いるなら、近地球衛星の実に2.5倍の面積の巨大な太陽電池セルを展開する必要がある。プロメテウスの目指す核分裂を利用した原子力発電が構想どおりに実現すれば、当面100kW級、将来的には実に10MW級の電力が得られるようになる。軌道上で現状の2けたから5けた上の電力を用いることができれば、惑星探査に全く新しい世界が広がることになる。

NASAは、プロメテウスの最初のミッションとして、木星の月を探査するJIMO (Jupiter Icy Moons Orbiter) と呼ばれる計画を2010年代の実現を目指して進めている。このミッションでは木星の三つの月（といってもちょっとした惑星クラスの大きさを持つ）カリスト、ガニメデ、エウロパの周回機をねらっている。これらの月は、厚い氷の下に海を持っていると考えられていて、生命の存在の可能性も指摘されている。

以上では、ソ連崩壊以来、深宇宙探査では、ほとんど独走状態に近い、米国の状況の記述が中心となった。

一方、ヨーロッパは15のメンバー国より構成されるESA (European Space Agency) が、米国の新宇宙政策に3年ほど先立ってオーロラプログラムという、長期的な太陽系探査プログラムを立ち上げた。これも当面は無人で月、火星、小惑星などの探査を実施し、地球外の生命の探査を行うこととしている。究極の目標は2030年ころをめどに、有人の火星探査を実現することにあり、広く国際協力を行うことを前提にしているのも米国の計画と同様である。

またESAは、ハレーすい星探査 (ジオット：1985年打上げ)、火星探査 (マーズエクスプレス：2003年打上げ)、すい星探査 (ロゼッタ：2004年打上げ)、土星の衛星タイタン (ホイヘンス：1997年NASAのカッシーニとともに打上げ)、などいずれも野心的なミッションの実績を持つ。

また近年、中国、インドなどの新興の宇宙開発パワーが深宇宙探査に強い関心を持っており、今後の活躍が期待される。

5. 日本の深宇宙探査

日本の深宇宙探査は1985年に、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の母体の一つである宇宙科学研究所 (以下、宇宙研と略す) が打ち上げた二つのハレーすい星観測探査機「さきがけ」及び「すいせい」に始まった。ハレーすい星の76年に1度の地球接近のチャンスをとらえて日本の二つの探査機に加えて、ヨーロッパのジオット、ロシアのベガ1、2号、そして後に仲間に加わった米国のICEの計6機の探査機が協力して観測を行ったものである。我が国にとっては米ソに4半世紀遅れでようやく深宇宙探査の仲間に入った記念すべきミッションであった。

日本が1990年に打ち上げた工学実験衛星「ひてん」は月スイングバイ^(用語)技術を確認するのが主目的であったが、孫衛星「はごろも」を月の周回軌道に投入する試みも行われた。このときに確立したスイングバイ技術はその後の我が国の深宇宙ミッションで大活躍することになった。

1992年に宇宙研が打ち上げた「ジオテール」衛星は、地球磁気圏尾部の構造とダイナミックスの研究を目的とした衛星である。地球の周辺を取り巻く磁気圏は、太陽風に押されて太陽と反対方向の夜側に長く伸びた「尾」を形成している。この尾の部分の観測を集中的に行うためにダブルルナスイングバイ技術を用いて月の軌道をはるかに越える140万kmまで遠地点が達する極めて特異な軌道を保ったのがジオテール衛星であった。日米共同のこのプロジェクトでは、探査機の開発・運用は宇宙研、

Delta IIによる打上げはNASAが担当し、搭載観測機器の受け持ちは、約3分の2がISAS、約3分の1がNASAであった。1プラス1が2以上になった典型的な成功した国際協力として歴史に残るであろう。

我が国が本格的な深宇宙探査に乗り出すことを一つの目的にして宇宙研がM-Vロケットを開発したのは1997年のことであった。1998年に我が国初の惑星探査機「のぞみ」を打ち上げたのはM-V-3号機であった。火星周回衛星「のぞみ」(図2)は火星の上層大気と太陽風の相互作用の解明を主目的として、14種の観測機器を搭載した。これら理学的な観測に加えて、惑星探査に必要な工学技術の確立も大きな目的の一つであった。我が国が「のぞみ」により確立した技術には、超遠距離通信、小型・軽量な搭載機器、軌道計画、精密軌道決定・制御、自律制御技術など主要な惑星探査技術が含まれ、いずれも後の我が国の深宇宙探査に大きく貢献することになる。「のぞみ」は1998年7月の打上げ後、約5か月半の間、地球引力圏にとどまり2回の月スイングバイを実施して同年12月20日に地球を離れた。地球離脱に際しては、地球スイングバイと同時に500ニュートンの主エンジンを噴射したが、バルブの不調により搭載推進剤の過剰消費を招き、そのままでは探査機は火星に到達はするがブレーキをかけて周回軌道に投入するのに足る推進剤が残っていないことが判明し、急きょ軌道計画を変更した。新しい計画(図3)では地球スイングバイを2回行い、太陽の回りを4回周回し、火星到達は約4年遅れ(2003年12月)となった。しかし2003年4月下旬の強



図2 火星周回探査機「のぞみ」外観想像図

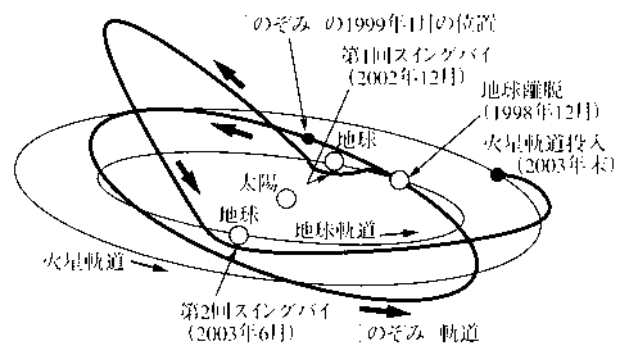


図3 「のぞみ」の新軌道計画



図4 小惑星に着陸する探査機「はやぶさ」の想像図

力な太陽フレア^(用語)の直後に発生した「のぞみ」搭載電気回路の一部のショートの問題により結果的には「のぞみ」は、火星に約1,000kmまで接近しながら周回軌道投入は果たすことができなかった。詳細な検討を行ったが、結果的には、太陽フレアとこの事故の因果関係は明らかにはできず、直接の原因の究明には至らなかった。

2003年5月に、宇宙研は小惑星のサンプルリターンをねらう、工学実験衛星「はやぶさ」(図4)を打ち上げた。「はやぶさ」は工学的に、極めて野心的なミッションで、次のような主要技術の確立を目的としている。

- ① 電気推進^(用語)を主推力とした惑星間航行
- ② 光学航法による小天体へのランデブーと着陸
- ③ 小惑星表面からの資料の収集
- ④ 惑星間軌道からの地球大気への突入

この原稿を書いている2004年12月の時点で、既に①の項目に関しては、技術の確立を達成し、今年(2005年)夏の小惑星「いとかわ」へのランデブーを目指している。

6. おわりに

宇宙開発は、実用の分野では通信・放送、測位、気象、資源探査、環境監視など既に日常生活になくはならな

いものとなっている。これらの実利を目指した宇宙開発は、世界的に、既に冒険やチャレンジの対象ではなくなり、国の宇宙開発機関の手を離れている。私企業の市場経済に任せるか、国の機関が扱う場合も利用を目指す省庁のいわば「設備」となっている。

一方、宇宙は、これとは全く別の側面を持っている。すなわち、人類は未知のフロンティアを開拓し新しい活動領域を目指すという本能を持ち、当面の実用性とは無関係に宇宙に進出していく冒険心と知的好奇心を持っている。このチャレンジ精神こそが人類の生存と発展を支えてきたと考えれば、冷戦終了後の宇宙開発の最も重要な柱の一つが深宇宙探査となりつつあるのは、歴史の必然であるともいえよう。

遠いブラックホールの観測をする科学衛星は、当面の社会福祉には役に立たないし、また月面に、そして火星に人を送る有人探査は市場経済のメカニズムでは全く説明不可能である。しかし国民が一定の予算の範囲でこれらのチャレンジに取り組みたいと思うのは上に述べた理由による。

ここから先は筆者の個人的な感想になるが、有人による探査が始まる前は、まず宇宙ロボットが大活躍すべきで、かつ日本は地上のロボット技術では世界のトップにある。世界第2の経済大国として世界の深宇宙探査に貢献するには、我が国はロボット技術に重点化すべきであろう。

我が国では若者の理科離れが深刻な問題になっているが、近年のヒューマノイドロボットやペットロボットに対する日本人の高い関心を見るにつけても、我が国の得意技術で世界の深宇宙探査に貢献しながら人類のフロンティアに人間の分身であるロボットを宇宙に送り込むことを提案したい。



中谷 一郎 (正員)

1967 東大・工・物理卒。1972 同大学院工学系研究科博士課程了。工博。同年、電電公社通研勤務。1981 宇宙科学研究所勤務。東大大学院教授兼務。衛星・ロケットの開発、探査機自律化、宇宙ロボットの研究に従事。