

# 日本の月・惑星探査計画

西村 純

〈神奈川大学工学部，宇宙科学研究所名誉教授（自宅）〒202 東京都保谷市東伏見 4-1-19〉

日本で初めて人工衛星の打ち上げに成功したのは1970年の2月の事、重量24kgの『おおすみ』である。その前年、アメリカではアポロ11号により月面に飛行士を送り込んでいる。遅れて出発した日本の宇宙科学研究も地球回りの小型科学衛星の特徴を生かして独自の道を辿り、X線天文学や太陽地球間物理学や宇宙工学の分野で優れた成果を上げてきた。やや遅れて出発したハレー探査に始まる日本の惑星探査計画は、新しいM-Vロケットの登場により『ルナ-A』、『プラネット-B』の準備に入り将来の展望が開けようとしている。

## 1. はじめに

日本で初めての人工衛星『おおすみ』の成功の後、宇宙科学研究所ではM型ロケットの開発と平行して、科学観測衛星としては小型ではあるが頻度を重視して、目標に焦点を絞る方式で数々の成果をもたらして来た。『はくちょう』、『ひのとり』、『てんま』、それに引き続く『ぎんが』、『あけぼの』、最近の太陽X線科学衛星『ようこう』などはその成功を示す良い例である。

しかし、地球回りの小型衛星を打ち上げる能力では惑星探査は難しい。やがてその転機をもたらしたのは1986年のハレー彗星探査であった。

ハレー彗星が太陽系に接近するに機会に、日本も是非この探査を行おうと言う機運が盛り上がってきた。当時のMロケットでは能力が不十分で、更に大幅な改良と開発が必要である。しかし、大学の中でのロケット開発は直径1.4mを限度とすると言う取り決めがある。この制約の中でハレー探査を可能ならしめるよう苦心の末、設計が進められ、完成したのが現在のM-3S II型ロケットである。M-3S II型は初期のM-4Sに比べると

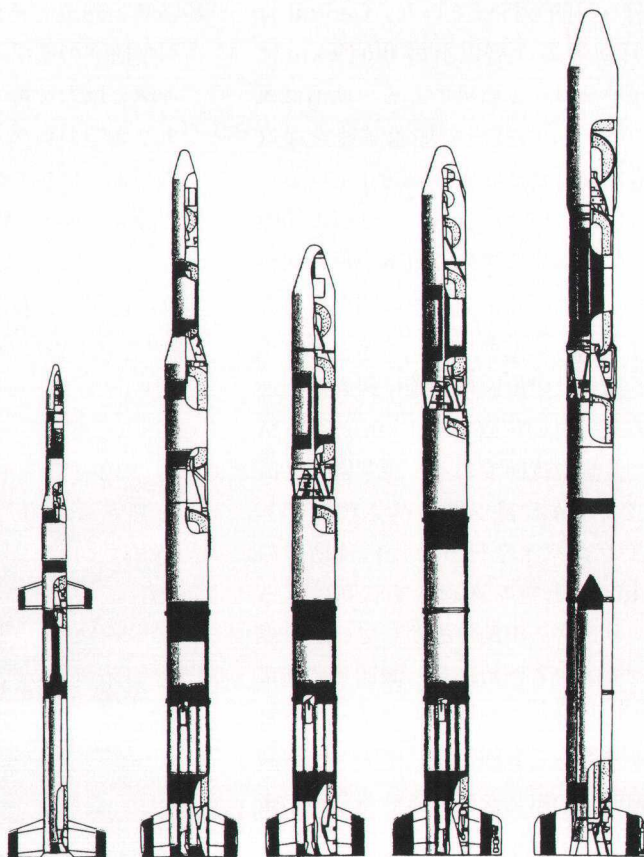
約5倍の搭載能力を持っているが、ここに工学関係者の苦心の後を読み取る事ができる。

## 2. ハレー彗星探査

ハレー彗星の探査にむけてわが国の初の惑星探査機『さきがけ』と『すいせい』が打上げられたのは1985年の事である。ハレー彗星探査は米、ソ、欧の宇宙機関と緊密な協力の下に成功裡に行われた。この成功を期に、協力したNASA(米国航空宇宙局)、ESA(ヨーロッパ宇宙機構)、IKI(ソ連宇宙科学研究所)、ISAS(宇宙科学研究所)はその後IACG(宇宙機関協力機関)を設け、毎年会合を開いて今後の協力体制に付いて議論が進められている。最近では太陽地球間観測を取り上げ、昨年7月に打上げられた日米協力のGeotailはその初号機として活躍中である。NASA、ESA、IKIからもこれから数年にわたり、10機を越える衛星が打ち上げられ、太陽活動と地球の磁気圏の相互作用に付いて広範な研究が展開されようとしている。惑星計画もやがて全体の協力事業としてこの機関で取り上げられて行く事になるであろう。

## 3. 月スイングバイの『ひてん』

宇宙科学研究所が発足した1980年代に入ると、



	L-4S	M-4S	M-3C	M-3S (M-3H)	M-3S II
段数	4	4	3	3	3
全長	16.5m	23.6m	20.2m	23.8m	27.8m
直径	0.735mφ	1.41mφ	1.41mφ	1.41mφ	1.41mφ
重量	9.4ton	43.6ton	41.6ton	48.7ton	61ton
搭載能力	約26kg	約180kg	約195kg	約290kg	約770kg

図1 科学衛星打ち上げ用ロケット

わが国初めての人工衛星『おおすみ』を打ち上げたLロケットからM-3S IIまでの開発状況。初期のM-4Sに比べると、M-3S IIは約5倍の搭載能力を持っている。

工学としても将来を見据えた固有の工学衛星を計画すべきだという意見が提起されてきた。その第一号が工学衛星『ひてん』である。将来日本として惑星探査に進もうとすれば、どうしてもそれに関わる技術を確認しておかねばならない。

探査機が月の付近を通過すると、月の重力により探査機の軌道は曲げられる。月は運動しているので月の後方を通るか前方を通るか、月に跳ね

飛ばされるか、やんわりと受け止められて加速されるか減速される。スイングバイを使うと、探査機は燃料を消費しないので、燃料分の重量が節約される。現在木星に向かってアメリカの『ガリレオ』も金星や地球付近を幾度か通過してスイングバイを繰り返して重量の軽減を行なっている。

『ひてん』は昨年打ち上げられた Geotail の軌道

操作の準備と言う目的も持っていた。Geotailは地球近傍から月軌道の3倍以上の140万kmに至る磁気圏の様子を調べる衛星である。軌道に入ってからスイングバイの技術で加速減速を繰返し、目的の軌道に移行させる事に成功している。

『ひてん』が打ち上げられたのは1990年の初頭である。世界的には米ソに次いで日本が月に向かうミッションを打ち上げた第3番目の国となったことに驚きを与えたようであった。スイングバイの技術は月から見てどの位置に正確に探査機を通過させるかである。月の位置で約1kmと言う精密な軌道決定と予測の技術である。後楽園より広い400mの先で1mmと言う驚くべき精度である。8回のスイングバイを行った後には地球の120kmと125kmの上空を通過させ二回に互ってエアロブレーキングの実験も成功している。惑星の衛星軌道に投入するためには、減速して衛星軌道に入れてやらねばならない。大気をもつ惑星の場合には、探査機を大気圏上空に突入させて減速させれば、燃料分の重量を軽減させる事が出来るのが狙いである。1昨年の3月に行ったこの地球大気によるエアロブレーキングの実験では、減速量や各部分の温度上昇について詳細なデータを得る事に成功している。『ひてん』は今本来の目的を終えて月の衛星としての軌道を周回している。

#### 4. M-Vの登場

ハレー探査の『さきがけ』、『すいせい』の重量は140kg、月のスイングバイを行った『ひてん』の重量は190kgであった。惑星に近付きその衛星軌道に投入しようとするれば、更に重量は減り100kg程度になってしまう。より能力の高い打ち上げロケットの必要に迫られて、宇宙科学者からの要望は日に日に高くなっていった。

先にのべたように、Mロケットの開発は直径は最大1.4m迄と言うのはわが国の宇宙政策の一貫として当初から決められていた線である。これを改定するのは仲々困難な事柄であった。しかし、

科学者の熱望とそれまでのMロケットによる宇宙科学研究の成果と効率に国内外の多くの方々のご理解と協力を得て、1989年の宇宙政策大綱の中でより大型のロケットを作る事が可能となった。

このようにして生まれたのが現在宇宙科学研究所で開発中のM-Vロケットである。現在のM-3SIIに比べると直径が約2倍の2.5mとなっており、打上げ能力は約3倍になっている。表にM-Vロケットの打ち上げ能力を示しておいた。

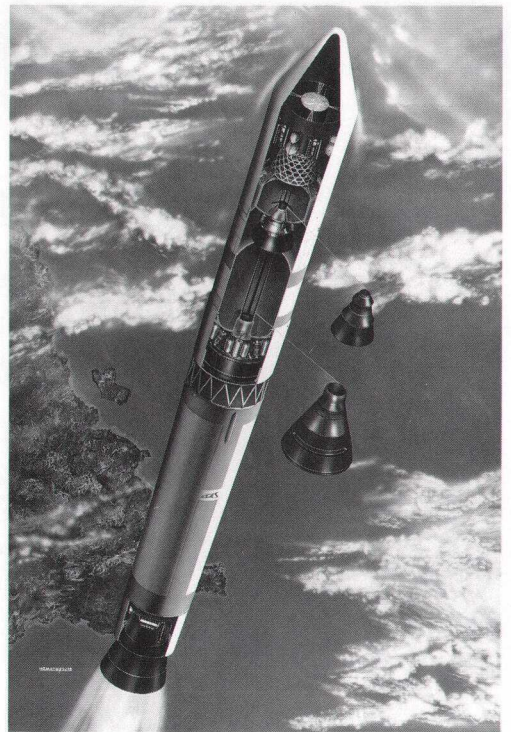


図2 M-V  
直径2.5m、能力はM-3SIIの約3倍。低高度軌道(250km)に換算して搭載能力は約2トンである。

表1 M-Vロケットの打ち上げ能力(概算)

	周回衛星重量
月	300 kg
金星	250 kg
火星	250 kg
水星	80 kg
小惑星(アンテロス)	150 kg
木星/土星(金星スイングバイ)	200 kg

金星、火星については250 kg程度の周回衛星を見込む事ができ、これは現在地球の極軌道を周回中の『あけぼの』と同程度の重量である。特徴のある観測器と良い観測目標に焦点を絞れば十分な成果が期待できる能力となっている。

M-Vの承認に伴ってどのような惑星ミッションから手掛けるべきかは、日本の惑星探査がどのように国際的に独自性を保ち得るかと言う重要な課題である。数多くの討論の後に選択され現在予算化されているのは月の探査『ルナ-A』と火星探査『プラネット B』である。

## 5. 月の探査機『ルナ-A』

宇宙科学研究所ではかなり以前から、全国の関係研究者が集って太陽系の生成と起源を明らかにするにはどのような月・惑星のミッションが有効であるのか、幾つかの計画が検討されてきている。M-Vの開発の目途が付き始めた段階で、まず採り上げられたのが月への探査機『ルナ-A』である。

月がどのようにして造られたかは、太陽系の生成を知る上でも重要である。その鍵となるのは月の内部迄含めた元素組成と地球の元素組成との比較で、月にどのような内部コアが存在するかどうかが決め手となる。

『ルナ-A』の特徴はそれまでの米・ソの探査機が月の表面の地形や月面の岩石の組成の観測に重点を置いたのと違って、月の内部構造を解明し、月の誕生の謎に迫ろうとする点である。月におきる地震（月震）の波の伝わり方から月のコアの様子を診断しようとするものである。観測器の主体を成すものはペネトレータ（貫入体）で、衛星から切り離されて、月面に貫入する。月震を観測する地震計と同時に月の内部からの熱流を計る熱流量計を搭載している。アポロ計画で月面に置かれた地震計の観測によれば、震源は色々有るが、場所は決まっており、更に同じ震源から出た地震波は同じ形をしている。残念な事に、アポロ計画の地震計は月が地球側に向いている面にしか設置さ

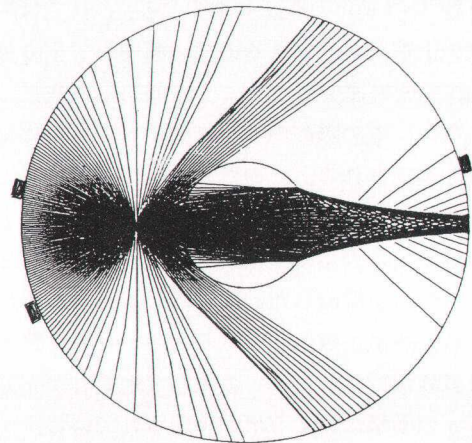


図4 月震波の伝わり方とペネトレータの配置内部コアの様子によって月震波の伝わり方が変る。これによって、月の内部構造を診断する。

れていなかった。したがって、月の内部コアを通ってきた地震波を観測する事は出来なかった。

『ルナ-A』では、アポロの例と違って、3個のペネトレータを図3（=表紙）に示す様に、月の裏側にも配置して、月の内部を通過して来た地震波を同時に観測する。図4に示す様に、月の内部構造によって地震波の伝わり方が変わるので、コアの大きさ、および物性を調べる事が出来る。搭載予定の地震計はアポロの地震計に比べて約10倍の感度、具体的には $10^{-9}g$ （ $g$ は地球の重力常数で $980\text{ cm/sec}^2$ ）、振幅にして $10^{-9}\text{ cm}$ 迄検出出来る物を開発している。 $10^{-9}\text{ cm}$ と言えば普通の物質の原子間の間隔の約 $1/10$ であるので、いかに感度のよい地震計であるかが想像出来る。

しかし、実際にこのペネトレータを限られた搭載重量の中で実現しようとする、色々な技術的な問題にぶつかる。まず、月の表面は昼は $100^{\circ}\text{C}$ を越し、夜はマイナス $100^{\circ}\text{C}$ を下回る。観測器の熱的な環境を考えると、どうしても、温度の安定な地下 $1\text{ m}$ 程度の所に置きたい所である。

このためには、ペネトレータを月面に突き刺してやらねばならない。しかし、衛星から切り離されたペネトレータがそのまま月面に落下したので

は毎秒2~3 km の速度で激突する。これでは衝突の際の衝撃が大きすぎるので、減速して丁度毎秒250 m 程度の速度になるように調節してやらねばならない。その際の衝撃は最大1万 g 付近になるものと推定される。このため、色々な工夫をこらし、能代にある宇宙科学研究所のロケット地上燃焼実験場では大型の空気銃でペネトレータを加速し、月の砂を模擬した砂面への貫入試験が行われている。既に、数十回に亙るペネトレータ貫入の模擬試験が行なわれ、この敏感な地震計が十分に1万 g の衝撃に耐える事が確認されている。

ペネトレータを切り離れた母船は高度を下げて、高度200 km 程度の円軌道に入る。ペネトレータからの電波の中継基地になると同時に、これまであまり測られたことの無い極地方のマッピングをする可能性、他のリモートセンシングを行なう可能性も検討されている。なお重量軽減、全体のシステムの改善と予備テストに努力を傾けている。『ルナ-A』打上げは1997年の予定となっている。

## 6. プラネット B

火星と金星は地球から最も近い惑星である。共に磁場は有ったとしても、地球に比べて何万分の一以下という小さい量である事が分かっている。また、火星と金星は共に炭酸ガスを主とする大気を持っている。しかし、その大気量は著しく異

なっており、各々の惑星の表面で金星は約100気圧、これに対して火星は1/100気圧である。地球と似た大きさの惑星が、どのようにしてそれぞれ異なる進化をたどって来たのであろうか。

火星はほぼ2年毎に地球に近付く。従って、火星探査に都合の良い時期はほぼ2年に一度訪れる。更に、火星と地球の軌道面が同一平面上にならないために、探査機を送り込み易い時期とそうでない時期とがある。この様な観点から、今世紀中に最も探査機を送り込み易い(最も大きな搭載重量を持って行ける)時期は1996年の後半に限られる。

火星は太陽から見て地球より遠い位置にある。このため太陽電池による発電量が低下し、電源に問題があるとされ、金星探査の方が実現性が高いとされていた。しかし、その後の検討によって、地球へ電波を送るアンテナの向きと、太陽電池のパネルの向きについて、比較的簡単に両者を満足させるモードの軌道がある事が見い出されて、効率の良い火星探査機が可能となってきた。

金星や火星のように磁場のない惑星は太陽風が超高層の中性大気と直接相互作用して様々な現象起こす。それが大気の組成変化に及ぼす影響が重要である。『プラネット-B』は1996年の後半に打ち上げ、1997年の9月には火星に到着する。

火星に近付いた後、近火点150 km、遠火点3万

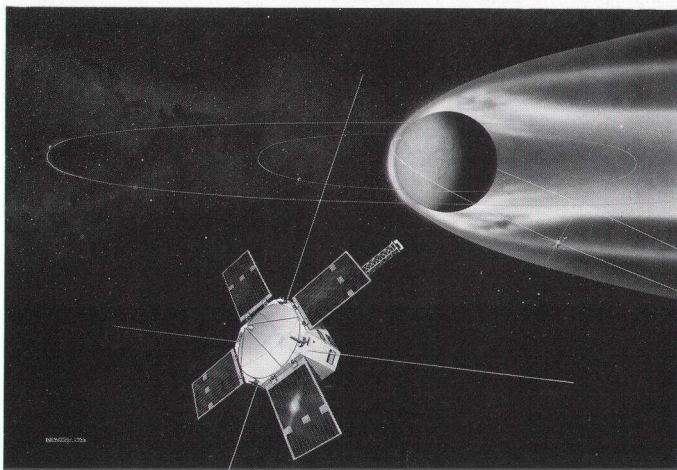


図5 『プラネット B』  
火星の周回軌道に入り、高層大気の組成や構造、太陽風との相互作用を調べる。

km 程度の楕円軌道に投入する。近火点 150 km というのはこれまでの衛星には無い低い高度で、これにより超高層の大気を詳しく調べようとする狙いである。搭載する機器は既に『あけぼの』の観測によってその優れた性能が確認されている

- 電波探査のためのトップサイドサウンダー
- 紫外線撮像装置
- イオン分析機
- プラズマ観測装置
- 磁場観測装置

等で、これらの観測器により、上層大気の組成、火星における太陽風と上層大気との相互作用による電離層の生成、粒子の加速現象の解明、イオンの生成等を解明する。太陽風との相互作用により一日当たり約 1 トンの酸素イオンが流れ出ていることが 1989 年ソ連の『フォボス-2 号』で観測されているが、『プラネット-B』はこうした火星、超高層大気の状態、太陽風との相互作用をさらに調べて、惑星大気の生成進化と組成変化についての関係を明らかにしてくれるものと思われる。

## 7. 検討中の惑星ミッション

以上述べた月・火星の探査機に次いで、検討中の今後の計画についても簡単に触れておきたい。

小惑星は火星と木星の軌道の間主にその軌道を持つ天体で、確認されているだけで数千個存在している。その大きさは 1 km から 1000 km に及

んでいる。この内、アポロ・アモール群に属する小惑星は火星と地球軌道を横切っている。殆どの小惑星は不規則な形をしており、大きな天体同士が衝突して壊れてできた物か、あるいは、未発達の惑星なのかもしれないとされている。小惑星と隕石との関係等、数多くの謎を秘めていて、太陽系起源について大きな手掛かりを持っている。

現在検討されているのは比較的近寄り易いアポロ・アモール群の小惑星についてどのように近付き、その表面の形と、組成分布をどのようにして観測するかという検討である。小惑星に近付いた後はまず高度 5 km 程度の周回軌道に入り、表面の観察を行った後、表面数十 cm のぎりぎりの近くまで降りて、ホバリングの状態で蛍光 X 線による方法で元素分析を行おうというものである。

金星は地球から見一番近い太陽側にある惑星で、半径は約 6000 km で地球とほぼ等しい。金星は表面で約 100 気圧という厚い大気に覆われ、その温度は 500°C に達している。また、高度 40 km 付近には厚い雲があり、金星の表面を観測する事はばんできた。ソ連のベネラ-9, 10 の着陸船により短時間の観測が行われたが、最近ではアメリカのマゼラン衛星の合成開口レーダにより表面の様子が明らかになってきた。より精密な光学的な観測が必要になってくるのはいうまでもない。

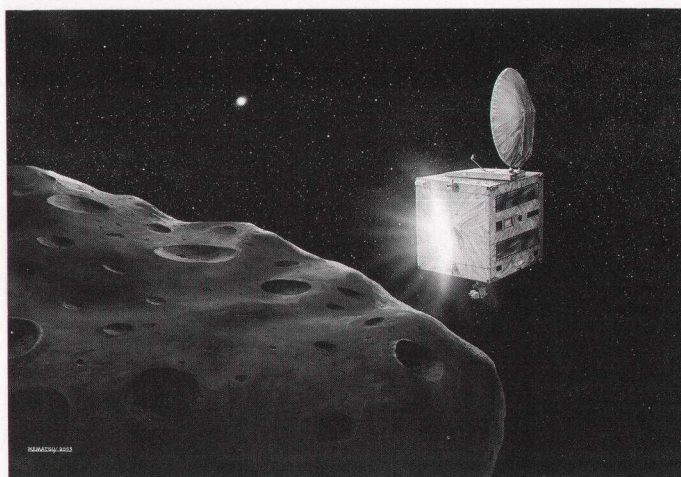


図6 小惑星の探査  
小惑星に近付き、ホバリングを行なって、小惑星の組成分析を行なう。

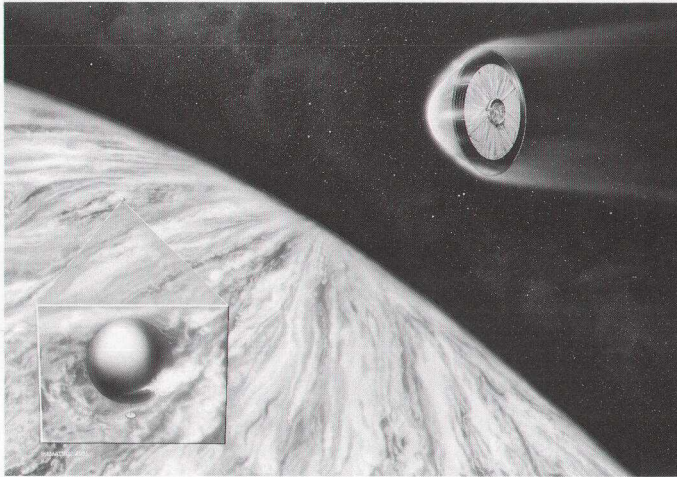


図7 金星エアロキャプチャーと金星気球

母船はエアロキャプチャー（大気減速）により周回軌道に入り観測を行う。一方母船から離れたTi合金内圧型気球は雲の下、高度10-20kmに浮遊して大気および金星表面の観測を行う。

物質を集塵器で捕え、地球に持ち帰って精密な分析を行おうという野心的な計画である。

金星大気については、スーパー・ローテーションといわれる極めて速い大気の流れ、大気組成については太陽系惑星の生成の鍵となるXeなどの希ガス、同位体の組成比等これから解明すべき事柄が多い。検討されているのは、金星大気によるエアロプレーキングによる周回軌道への投入と雲より低い高度10~20kmでの気球浮遊である。この高度では大気圧は50~20気圧、気温は300~400°Cに及ぶので、普通概念の気球とは違う。むしろ潜水艇に近い物である。検討されているのはTi合金による直径1m程度の内圧型の気球である。高度10~20kmの範囲で数kgの搭載機器が可能で有るが、更にCFRPなどの新しい材料の活用によって搭載機器重量を増やす事が検討されている。

問題はこのような高温下におけるテレメータを初めとする電子素子と電源である。高温用の電子素子は原子炉、地熱発電、カー・エレクトロニクスに関連して研究されているが、SiC、GaP、ダイヤモンド等の新しい素子、セラミックチューブなどを含めて検討が行なわれている。このような金星低高度気球が実現すると、金星の大気運動、大気生成について、又、金星の地表の状況変動に付いて画期的な道が開けるものと期待している。

彗星のサンプルリターンは前回のハレー探査を一步進め、彗星を構成している塵やコマの一部の

月、火星ローバー計画は、小型ではあるがインテリジェントな車で月面や火星面を動き、岩石の組成分析をしようという計画である。

## 8. おわりに

M-Vの登場によって、長年待ち望んでいた惑星分野の研究が、またこれまでの分野についてはやや大型のミッションが可能となり、わが国の宇宙科学研究は新しい局面を迎えようとしている。惑星計画については実際のミッションが少なかった事もあって、これまで経験を積んできた高エネルギー天文や太陽地球間物理の分野に比べてコミュニティの形成や将来の惑星探査を目指しての技術の蓄積が大切な時期である。こんな事もあって惑星科学学会が昨年新たに生まれ、また今年の2月には、惑星探査の専門家を集めての国際シンポジウムが宇宙科学研究所で計画されている。

一方、NASAでは、これまでの日本の小型衛星の効率的な活用に着目して、惑星計画に就いても小型衛星の利点を生かすべく新たな方針を打ち出してきている。M-Vの特徴を生かしつつ、また将来の大型ミッションに付いては国内、国際協力などを通して日本の惑星計画が長期的な戦略の下に独創性のある発展を遂げる事を期待して筆をおきたい。

(写真提供：文部省宇宙科学研究所)