

惑星探査の将来

1999年11月12日

仙台市民会館

地球電磁気・地球惑星圏学会

日本惑星科学会

はじめに

1999年11月仙台において地球電磁気・地球惑星圏学会（11月9 - 12日；仙台市民会館）及び日本惑星科学会（11月13 - 15日；東北大学工学部青葉会館）が日程を繋いで開催された。両学会は惑星科学に関して研究領域を共有し、最近の Planet-B や SELENE あるいは水星ミッションなどの月惑星探査ミッションに関わる実活動においては、日常的に学会を越えた協同作業がすでに進められており親密な関係にあるが、学会レベルでの直接交流は合同大会への参加を通じての交流以外にはこれまで行われていなかった。このようなとき地球電磁気・地球惑星圏学会と日本惑星科学会の共催の形でシンポジウムを持ち、「惑星探査の将来」に関して、両学会がそれぞれどのような惑星研究の展望を持ち、惑星探査計画にどのように関わって行くべきかについて議論が行われたことは極めて意義深いと考えられる。

シンポジウムは11月12日午後、仙台市民会館展示室にて行われ、13編の講演と4件のコメントを含む内容の濃い議論が進められた。このシンポジウムの講演内容について、書き物として後に残したいとの要望もあり、また我が国の地球物理学・惑星科学研究の将来を展望される立場の先生方からも、シンポジウムの集録として出版するよう依頼もいただいたため、今回このような形で出版する運びとなった。出版は一部印刷出版の形態をとり、同時に両学会員への公開のため、WEB を通じた電子出版の形態も併用することとなった。

惑星探査はビッグプロジェクトであるためこの問題に関する議論は、複数の機関や多数の研究者が直接関わる事柄に触れることも多く、慎重を期する事柄であるが、多くの方々の参加を得て率直な意見を交換することができたと思われる。講演を引き受けてくださった講演者各位並びにシンポジウムに参加いただいた方々に改めて感謝したい。

2000年1月7日

シンポジウム世話人 小野高幸
大谷栄治
近藤 忠
高橋幸弘
熊本篤志

シンポジウム「惑星探査の将来」開催についてのご案内

この11月に、仙台において地球電磁気・地球惑星圏学会（11月9 - 12日；仙台市民会館）及び日本惑星科学会（11月13 - 15日；東北大学工学部青葉会館）が日程を繋いで開催されます。両学会は惑星科学に関して研究領域を共有する極めて近い関係にあることはご承知の通りですが、学会レベルでの直接交流は合同大会への参加を通じての交流以外に未だ行われておりません。しかし最近のPlanet-BやSELENEあるいは水星ミッションなどの月惑星探査ミッションに関わる実活動においては、日常的に学会を越えた共同活動がすでに進められております。このようなときに地球電磁気・地球惑星圏学会と日本惑星科学会の共催の形で惑星探査に関するシンポジウムを持つことは極めて意義深いことであると考えられます。

そこで今回のシンポジウムでは、「惑星探査の将来」に関する議論を通じて、両学会がそれぞれどのような研究の展望を持ち、惑星探査計画にどのように関わって行くべきかについても考える機会となれば、シンポジウムを共催する意義をさらに高めることになると思われます。

つきましてはシンポジウムに出席していただき、積極的に議論に参加していただきますよう、お願いいたします。

1999年9月

地球電磁気・地球惑星圏学会長

松本 紘

日本惑星科学会長

山本哲生

シンポジウム「惑星探査の将来」プログラム

日時：1999年11月12日 13:00 - 17:00

場所：仙台市民会館 展示室

プログラム

第1部	座長 近藤 忠(東北大)	
1. 惑星探査の意義	13:00 - 13:40	講演時間
日本における惑星探査の生い立ち	大家 寛(東北大)	20
惑星研究実施体制の現状と問題点	中澤 清(東工大)	20
2. 惑星探査の現状	13:40 - 14:30	
「のぞみ」ミッションを実施して	鶴田浩一郎(宇宙研)	15
月・水星・小惑星探査計画	早川 基(宇宙研)	15
SELENEミッションの現状	滝沢悦貞(NASDA)	15
質疑・討論		5
第2部	座長 大谷栄治、小野高幸(東北大)	
3. 今後の惑星探査		
日本の惑星探査の研究戦略	14:30 - 15:30	
惑星ミッションの戦略的開発	向井利典(宇宙研)	15
地上観測との連携	森岡 昭(東北大)	15
始源天体探査と宇宙惑星物質研究体制	山本哲生(名古屋大)	15
コメント	坂本尚義(東工大)	5
	高橋幸弘(東北大)	5
質疑・討論		5
惑星研究の課題・将来展望	15:30 - 17:00	
超高層大気・プラズマ環境	品川裕之(名古屋大)	10
	町田 忍(京大)	10
惑星気象	今村 剛(宇宙研)	15
固体惑星	阿部 豊(東大)	15
巨大惑星探査への展望	渡部重十(北大)	15
コメント	渡辺誠一郎(名大)	5
	飯島雅英(東北大)	5
質疑・討論		15

日本における惑星探査の生い立ち

東北大学大学院理学研究科

大家 寛

1. はじめに

わが国の宇宙科学研究に惑星探査の実施が折り込まれるようになった。しかし、本格的な観測研究は、21世紀に入ってからのもものと期待されている。たしかに現在までの体制はあくまでも、従来の宇宙科学研究の枠組みのなかでの方策で、決して理想的なものではない。一方惑星探査は、新しい学問分野を開拓する十分な価値をもっている。したがってよりよき計画と、その実現を目指す体制を作っていただきたい。ここに、シンポジウムの冒頭ではあるが、日本においてたどった道を振り返りゆく先の資としたい。

2. 惑星探査計画の開始

計画検討の歴史は共同利用研究所である当時の東大宇宙航空研究所における科学衛星シンポジウムの場を舞台としてはじめられた。1975年惑星探査の意義と計画⁽¹⁾が発表されている。ここでは1)惑星探検、2)惑星に対する科学知識の集積、3)惑星利用と実際面への応用という三段階においていずれも大きな意義をもっている事をのべ、わが国はいよいよ、2)の段階において惑星探査に参加すべきことを強調している。その際かかわってくる学問範囲として、

- a) 惑星科学(Planetology)
- b) 惑星及び惑星間空間プラズマ物理学(Plasma Physics)
- c) 惑星気候学(Climatology)
- d) 太陽系の起源と変遷(Solar System Origin and Evolution)
- e) 生命科学と生命維持(Life Science and Life Support Engineering)
- f) 天文学(Astronomy)
- g) 境界領域(Boundary Fields)

を考えていた。

これらを実現するための計画としては、金星、火星、及び木星探査計画が出されていて、その概要は以下のようになっていた。

イ. 金星探査計画の表から

金星軌道探査体(Venus Orbiter, 200 kg in orbit)PLANET-A,Bの惑星探査に

において最も実り多いものは Orbiter であろう。その意味で金星周囲軌道の Orbiter を第二番手の惑星ミッションとしては是非計画すべきである。その研究内容としては PLANET-A,B と pair として考える。

- i) Venus Atmosphere
- ii) Venus plasma under the solar wind effects
- iii) Space Astronomy (Including solar radio and solar cosmic ray)
- iv) Interplanetary space

ロ．火星探査計画の表から

火星軌道探査体(Mars Orbiter, 200 kg in orbit)PLANET-C。金星 Orbiter の軌道投入の成功と諸観測の実現の結果は、そのまま対象を火星にとることを可能にする。火星はやはり将来 Landing をする惑星の候補として重要で、そのためにも物理的諸条件を一步一步確認してゆく必要がある。探査はしたがってまず、この Orbiter により火星の超高層領域から開始される。

- i) Ionosphere
- ii) Magnetosphere
- iii) Television Camera (Imaging)

ハ．木星探査に関する表から

木星探査計画

観測内容としては

- i) Television Camera
- ii) Infrared Spectrometer
- iii) UV Spectrometer
- iv) X-ray (Including Space Astronomy)
- v) Cosmic-Rays
- vi) Energetic Particles
- vii) Magnetic Fields
- viii) Plasma Detectors
- ix) Plasma Waves
- x) Radio Waves (Including Astronomical Origin)
- xi) Mass-spectrometer

この Jupiter Orbiter は母船を 1ton として、それにはたぶん 3m のパラボラアンテナを装備する必要がある。

となっていた。これらの提言を契機にさらに具体案の検討に入ることになるが、当時宇宙科学がおかれていた Mu-ロケットの限界は直径 1.4m と設定され、それを越えることは許されていなかった。そこでまず第一ステップとして地球周辺で金星ミッションのプロトタイプをかねた EXOS-C ミッションが提言された。これは地球大気・プラズマ観測を主目的とするが、惑星探査時代への先導役もかねていたのである。

3 . PLANET-A 計画

わが国での宇宙開発の一元化問題にからんで、Mu の大型化が禁じられていた。こうした中で東大宇宙航空研究所における工学グループは、M-3S を改良して、地球重力圏外脱出の研究を推進していた。科学側ともいち早くその情報が交換され、PLANET-A 計画が提言された。惑星間空間に脱出した後は、最初金星のフライバイも希望したが、結局 1986 年 3 月に黄道面を横切るハレー彗星にターゲットがしぼられた⁽²⁾。

当初の計画では総重量 120kg で搭載計画のサイエンス・ペーロード 20 kg は、i) 磁場観測器、ii) プラズマ計測器、iii) プラズマ波動計測器、iv) 真空紫外撮像観測器、v) 真空紫外スペクトル測定器であった。この計画は最も効率のよい、しかもコストエフェクティブな優れたものであった。そして宇宙科学は東大から分離し、文部省直轄の宇宙科学研究所として新しい大型プロジェクトの時代に備えたスタートを切ることが、この PLANET-A の計画の出発と同期して行われる事となった。

大変重要な設備投資も行われた。NASA だけしか所有していなかった直径 64m のパラボラを宇宙飛翔体観測専用設立することがきまったのである。

こうして全てが順調なスタートを切った直後、私を見る限り、不幸な体制問題が生じた。宇宙科学研究所は、直接所属するスタッフでないとミッション責任をもてない。とする習慣法のようなものが働きだしたのである。ある意味では惑星研究の世代ではない非常に古い考えしか持たなかった一部の科学者によってミッションの性格が大幅に変えられたのである。それは紫外撮像の S/N 比をあげるという理論家の予測を真に受けた結果、10kg を越すデスパンホイールを搭載するとの決定が十分な検討なく行われ、科学の搭載総重量が極端に落ちた事である。搭載不可能となった観測機器は結局、試験機と観測機に二分割されて、700 万 km の点を通じた“さきがけ”と 20 万 km までせまった“すいせい”になった事はすでに多くが報告されたところである。結果はデスパン・ホイールの効果はまったくなく、やはりバランスを欠いた発想は総合結果

を悪くするという事例を生んでいる。

勿論ハレー彗星の基本事項は観測されている。そしてある意味では成功を収めたと言って良い。しかし、使われたコストを考える時、もっとすぐれた結果があり得たということを描しているのである。

4 . Mu -大型化の道

PLANET-A の基本的な成功は、新しい宇宙科学研究所ではずみとなった。効果的な惑星探査をめざし Mu ロケットの大型化の要望が出始めた。直接ロケット観測を担当する工学チームはもとより、惑星探査を重要視する全ての科学者は、まず第一ステップとして Mu の大型化計画を強く望んだのである。

なぜ Mu-大型化は問題となったのだろうか。実は科学技術庁の指導のもと宇宙開発事業団が宇宙開発計画を打ち出す時点で、当時の東京大学宇宙航空研究所と、そしてここでは共同利用研究を行う諸大学をふくめて、事業団と合体するという意味の一元化を良しとしてこなかったのである。それぞれ異なる開発方針実行手順等、全てを配慮した結果、文部省における東大宇宙航空研究所と科学技術庁における宇宙開発事業団とはそれぞれ「科学」と「実用」という持ち場をはっきり分け、独自の道をゆくという決定を宇宙開発委員会の了解のもとに進めて行く事になった。しかしその時、東大宇宙航空研究所は、当時直径 1.4m をもっていた Mu の性能向上までを限度とするという基本点も了解したのである。

しかし時代が進むとともに、宇宙開発事業団は一層大型で本格的な H-2 ロケット開発計画に進み、N-ロケット級で宇宙科学のミッションとかかわりをもつよりは、科学は文部省直轄研究所として、新たに直径 2.6m 計画を推進することが了解されるようになった。しかしその理由こそ科学の新しい領域を招く惑星探査にあったのである。そのためにやはり宇宙科学研究所ではシンポジウムを通じ、惑星探査計画のあり方を一層深く検討した。1979 年、宇宙科学研究所におけるシンポジウムでは、全体計画が議論された⁽³⁾。

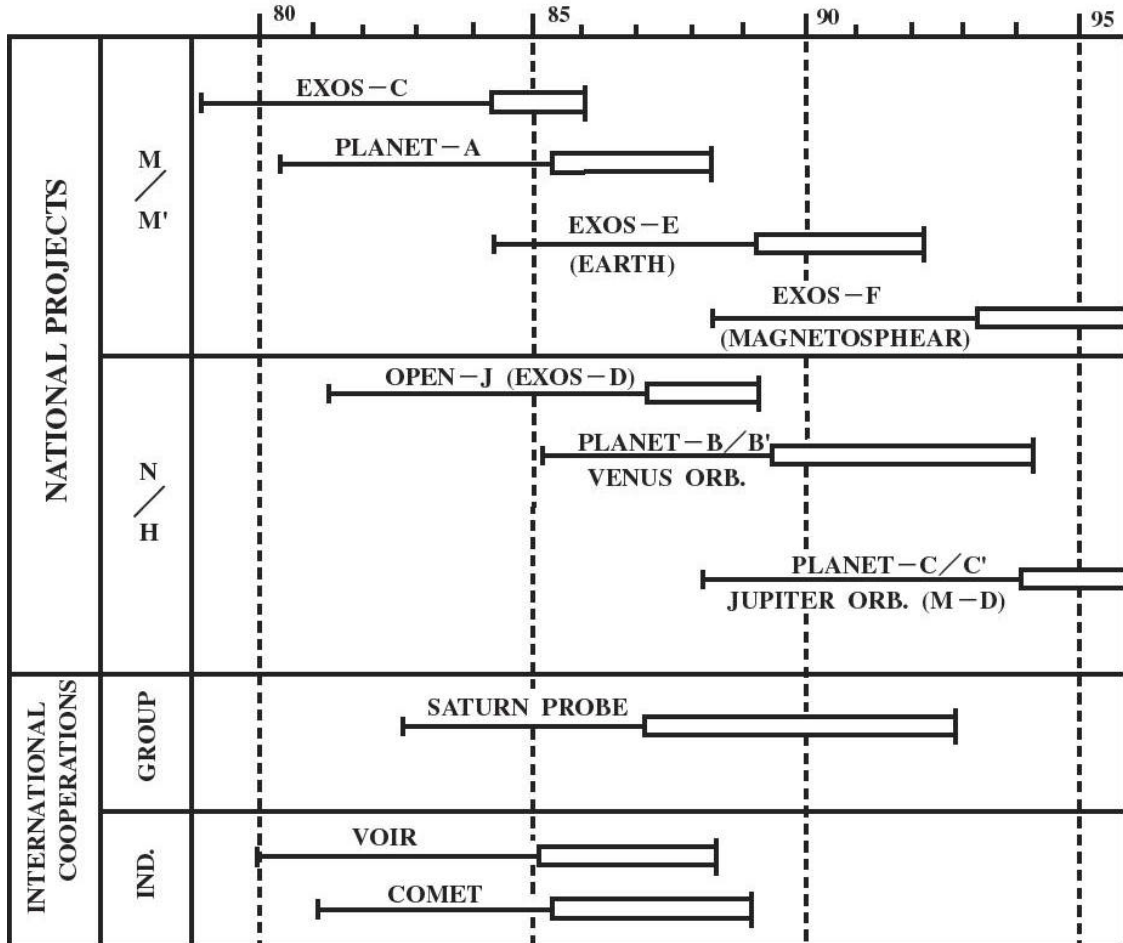
ここでは、

- i) M 及び M 改良形を用いるプロジェクト
- ii) 国家レベルでの計画と N,N 改、H-1 ロケットを用いるプロジェクト
- iii) 大型国際協力
- iv) 各個型国際協力

といった四つのカテゴリーで計画を整理している。そして以下の表に示すよう

な計画を立てている。

表1 惑星探査計画（地球関係も含む）



この折りの私の提案では、N/H-1の部分ではいずれも当時の事業団計画と合流して実現させてほしいというものであった。しかしすでにのべたように、Muの大型化が可能になったため必然的にこのN/Hのカテゴリーの一部はM-V計画と読みかえることができるようになった。しかしPLANET-C/C'計画はやはりH-2計画と合流する事が不可欠であることを強調しておかねばならない。

5. 金星から火星へ—PLANET-Bの実施

惑星探査計画の多少暗い陰の部分にもふれなくてはならないだろう。それはM-V計画の実施にともなって提出されたミッション・選択の問題である。

月・ペネトレーターミッションと金星探査PLANET-B計画が、1989年に入って評価委員会によって検討された。しかし、M-V計画の第2号（工学試験衛星

に次ぐ)には、LUNAR-A すなわち、月・ペネトレーター計画が選ばれた。1989年秋の事である。しかし2000年秋を迎えても、ペネトレーター計画は依然として実施不可能である。宇宙科学研究所の評価委員会は月・惑星ミッションの実現性を評価する能力を全く持ち合わせていなかったのである。

選からもれた金星ミッションは再提出のため、部内調整を経たが、火星探査を希望する意見が、所内所属の研究者の声として出され、ワーキンググループでは苦渋の選択として全体のバランスを考慮しつつ、まず一步は、踏み出すべきとの判断に立って火星にターゲットを変更したのである。しかしさまざまな技術改良が要求されることになったのはさけ難いことであった。

6. セレーネ計画

苦悩の月・惑星探査計画に明るい光がともったのは、H-2 ロケットによる科学ミッションを宇宙科学研究所と宇宙開発事業団のチームが協力して推進する月探査計画が実現したことである。これには、宇宙開発委員会レベルで何らかの一元化をはかるべきという時代の進歩に即応する判断があったと同時に宇宙開発事業団、ならびに宇宙科学研究所の各研究者及び技術者が月探査研究において、全国レベルでの有機的な協力の必要性を強く認識する時代に入った事が大きく影響している。

7. 将来に向かって

いま惑星科学会も誕生し、また既存の学会でも惑星研究の指向が高まっている。それは純学問的見地からも

i) 比較惑星論的研究

ii) 太陽系の起源と地球生成過程と変遷の研究

といった二面から地球・惑星科学の広い分野でますます重要視されてくる方向である。こうした研究の重要な焦点こそ、月・惑星探査研究である。これはもはや宇宙開発実施機関の中心性だけで解決不可能であることは、ここに述べてきた歴史の中からも読みとれる。宇宙開発機関に中心拠点をおきつつも、各大学や独立法人系の諸研究機関がそれぞれサブ拠点となって一大協力群を作りながら、適材適所の原則を貫きつつ、実施してゆくことが必要である。こうした活動は常に学会活動と並行しつつ、機関エゴを脱し、世界史に銘打つことのできる惑星探査を実施して行ってほしいと思う。

参考文献

- 1) 大家 寛、惑星探査の意義と計画
東大宇宙航空研究所、科学衛星シンポジウム
129-134, 1975
- 2) 大家 寛、PLANET-A チーム、PLANET-A 計画、
東大宇宙航空研究所、科学衛星シンポジウム
65-74, 1979
- 3) 大家 寛、惑星圏研究観測計画の長期展望
東大宇宙航空研究所、科学衛星シンポジウム
250-256, 1978

惑星探査実施体制の現状と問題点

中澤 清 (東京工大・理工)

1. 惑星探査計画の推進手順

まず始めに、我が国における惑星探査計画がどのように立てられ、どのように実施されているのか、その枠組みについて述べておく必要がある。我が国の惑星探査（各種観測衛星も同様）は、計画立案から打ち上げ、運用に至るまで、概ね以下のような手順にそって行われる（図参照）。まず、研究者有志によって探査計画が立案・検討される。その概要が決まった段階で、計画案は宇宙科学研究所理学委員会に持ち込まれ、探査計画検討ワーキング・グループ（以下、検討WGと略す）の設置要望が出される。理学委員会では、その科学的目的・意義、実施可能性、関連研究者層のポテンシャル等を吟味し、計画を推進すべきと判断したときには、理学委員会の下に、「××探査計画検討WG」が設置される。

検討WGでは、科学探査に直接かかわる研究者のみならず、関連理・工学研究者も構成員として加わり、科学的目標の先鋭化、目標を達成するための技術的問題、新規技術の開発見通し、探査機の基本設計、更には、運用・データ処理方法など、あらゆるステップの具体案が詳細に検討される。具体案が煮詰まると、『検討報告書』が理学委員会に提出され、

議論・検討は再び公の場に移る。理学委員会は、検討WGからの報告を受け、検討に値すると判断すれば、計画具体化の是非を検討するための評価委員会を設ける。評価委員会は研究所内外の関連分野の研究者、他分野の理系、工系の研究者から構成され、検討WGからの報告をもとに、新規技術の開発可能性、実施体制の妥当性、諸外国の計画や他分野の探査（衛星）計画との比較、などを詳細に検討し、計画推進についての是非を判断する。この結果は理学委員会に報告され、理学委員会では更に広い観点から検討を加えた後、委員会としての正式の判断を下す。理学委員会が計画推進を是とすると、宇宙科学研究所の正式

惑星探査計画の推進手順

研究者有志・・・(探査計画概要の立案)

宇宙研・理学委員会

検討WG・・・(具体案の検討)

評価委員会・・・(計画推進の是非判定)

推進決定

探査チーム

(開発、設計、・・・・打ち上げ)

(運用、データ取得、解析)

のミッションとして位置づけられ、その後、同研究所の上位会議の議を経て、予算化など実行段階に入っていく。

予算化が実現すれば、探査チームが正式に組織され、機器開発・設計から打ち上げまでの探査実施に向けた超多忙な準備が始まる。そして、無事打ち上げが成功すると、その後、探査機の運用、データ取得、解析なども探査チームが中心になって進めることになる。

このように、探査計画推進にかかわる一連の意思決定は、すべて宇宙科学研究所を中心とした研究者集団の手によって行われ、国威発揚など政治的意図や産業界からの介入はない。『科学の論理』だけで物事が進んでいくこの推進手順は、我が国の誇るべき特徴であり、諸外国の研究者からも高く評価されている。

2. 厳しい宇宙開発環境

しかし、手放して喜んではいられない。探査実施には、いくつもの困難や問題点が山積みしている。これまで言い古されたことではあるが、それらを列挙すると、

- 1) 計画推進・支援スタッフの絶対的な不足
- 2) 開発費の不足・硬直化
- 3) 単年度予算のしぼり
- 4) 基礎的技術開発の遅れ

などなどである。特にここ10年、我が国の国家財政、経済活動を反映して、『経済的、効率的』に開発計画を進めることが強く要請され、ぎりぎりの状況下で探査計画を推進しなければならなくなっている。他方、輸送系推進能力の向上に伴い、探査機は大型化し、多岐にわたる高度観測機器が多数相乗りする。それだけに、事前の十全な準備が必要となるが、各パーツの徹底したテストや機器集積後の綿密な総合試験を行おうにも、予算不足、人手不足、時間不足のため、それもままならぬ状況になっている。それだけ、リスクも大きくなっている、と考えねばならない。

我が国の場合、諸外国に比べ、1探査機あたりの打ち上げコストが高すぎる、もっとコストを下げるべきである、との議論がある。しかし、こういった議論を展開することは間違いである。宇宙開発を強力に進めてきたほとんどの国にあっては、その本来の目標が国威発揚にあった。長い年月をかけ、多くの失敗を繰り返しながら、『金に糸目を付けぬ』やりかたで、莫大な資金が投入されてきた。その結果、多くの基礎的な技術や経験が蓄積され、今や比較的安価な探査機が作れるようになっている。我が国がそのようなステップを踏まずに『安上がり』の宇宙開発をめざしても、そううまくは行かず、結局は『もっと高価な』ものになってしまう。ある時期、資金と人材を集中的に投入することが、より早く『効率的な』宇宙開発を達成することになる。今はその時期にある。

ともあれ、上に掲げた諸問題を克服するには、我々の守備範囲を超えた行政的・政治的な理解がどうしても必要である。あらゆる機会をとらえ、各方面に訴え続けて、改善に取り組まなければならない。

3 . 危機回避の仕組み

上述した諸問題は、いわば外堀の問題である。しかし問題はそれだけではない。現行の惑星探査実施体制が内在している異種の問題も見逃してはならない。それは、現実施体制がいわゆる『危機回避の仕組み』を持っていないことである。

2で述べたように、予算執行上、極めて窮屈な開発費とスケジュールの中で探査準備が進められる。その際、どこかで何らかの不具合が発生しないとも限らない。その時には、決められたスケジュールをこなすことが重要なのではなく、問題となる不具合を本質的に解決することが重要である。更に言えば、準備段階にあって、つねに「予期せぬ不都合が起こるのではないか」と予め『危機』に目配りし、事前に手を打つことがもっと重要である。しかし、現在の探査実施体制には、このような機能は用意されていない。

1で述べたように、探査計画が実行段階に入るまでは、議論・検討は公に行われ、いろいろな立場の人たちからアドバイスや批判を受けられる形になっている。しかし、一度、実施段階にはいると、すべてが探査チーム内に閉じてしまい、進捗状況や問題点の有無は見えなくなってしまう（それらが見える時には、もはや抜き差しならぬほど重症になっている場合が多い）。探査機が大型化・複雑化し、新規技術が多く盛り込まれ、更に、準備のために長い年月を要する昨今の探査計画にあっては、開かれた形で準備を進め、できるだけ多くの知恵を動員することが重要である。例えば、探査実施計画を推進する節目、節目で『進捗状況の評価』を行い、場合によっては、開発費、開発スケジュールなどを見直すことも可能にすべきである。組織保全など政治的配慮を廃し、あくまでも『科学的態度』を貫くことが何よりも重要である。

火星探査機「のぞみ」開発に携わって

宇宙科学研究所 鶴田 浩一郎

1. はじめに

「のぞみ」はわが国初の惑星探査機として昨 1999 年 10 月に火星軌道に投入され、現在は火星上層大気とその散逸機構に関する多くの新しい情報をもたらしているはずであった。残念なことに、地球軌道離脱時の不具合によって火星軌道投入は 2004 年 1 月まで待たなければならないことになった。従って、「のぞみ」の開発という意味では未だ道半ばであり「のぞみ」開発について云々するのは時期尚早である。ただ、これから始まる「のぞみ」のいわば本番を控え、ここで、これまでの出来事を大まかに振りかえっておくこともあながち無意味ではなからうと思ひ筆をとることにした。

2. プロジェクト立ち上げの頃

惑星探査機による惑星の実証的な研究では米国、ソ連邦が 30 年以上先行しており、日本もその仲間入りが出来そうになったのは M-V ロケットの開発が本決まりになった 1980 年代半ばからである。いくつかのグループが M-V による惑星探査の検討を開始したが地球型惑星探査ワーキンググループ（主査：大家）もその一つであり、当初は金星を主な対象として無磁場惑星の上層大気と太陽風の相互作用の研究を柱に検討を進めていた。当時、私は磁気圏衛星「あけぼの」（1989 年 2 月打ち上げ）の開発に忙殺されており、本格的に検討に加わったのは「あけぼの」が無事打ち上げられ、運用も一段落した 1990 年頃からである。

数十年の遅れをもって惑星探査に参加しようとする我々には当時から二つの困難が予想された。一つは米ソの探査によって、最初の「簡単な」探査は既に行われており 90 年代後半の探査計画としては米ソの探査を踏まえ、更に一步踏み込んだ探査が必要であるということ。もう一つは、惑星探査の実績が無い我々が一步踏み込んだ探査をしようとする場合の技術的なハードルの高さである。一般的に、惑星探査を技術的な難易度から並べると、惑星フライバイ（ハレー彗星探査機「さきがけ」、「すいせい」で実施）、惑星周回衛星、惑星着陸、惑星からの帰還という順番になる。我々は周回衛星の段階で探査計画を立てることとした。観測対象の選定には紆余曲折の末に火星の上層大気構造の解明をテーマとして取り上げることとなった。同じカテゴリーのテーマとしてワーキンググループで検討がなされてきた金星上層大気の解明があったが、これまでに、PVO (Pioneer Venus Orbiter)

で長期の観測がなされている金星よりも、ほとんど観測の無い火星をターゲットとすることを最終的には選択した。米国とソ連で計画されていた巨大な火星探査機、Mars94(ソ連：失敗)や Mars Observer(米国：失敗)との競合を避け、どれだけ独自性を出した計画に出来るかということが大きな課題であった。

M-V で火星(金星でも同じことだが) 周回衛星を実現しようとする時、一番の課題は十分な観測が出来るだけの観測機を搭載できるか、軌道の最適化が出来るかということであった。「あけぼの」衛星や「Geotail」衛星の実績をベースに探査機の重量配分を検討してみると観測機を搭載する余裕がなくなってしまい探査機の意味が無くなってしまう。私達は軽量化の可能性について検討し、実績ベースではなく目標ベースで探査機の検討を行った。その中で

1) 近火点を 150km 程度まで下げて上層大気的主要部分の直接観測を可能とする。

2) フルセットの観測を実現するために観測装置として 30kg 以上の重量を確保する。この2点を守るべき条件とした。最初から相当に困難な技術課題を抱えていたことになる。理学委員会での評価のときに出た意見の一つに「たかが 30kg 程度の観測機しか搭載できない Planet-B(「のぞみ」のコード名)で意味のある成果が出せるのか」というものがあった。2~3 トン級の探査機が普通であった当時としては当然の意見であった。外国の反応も似たようなもので国際会議で「のぞみ」の紹介をしても半信半疑で受け取られていたようである。私達は「のぞみ」を小さな巨人に仕立て上げたいと望んでいた。

3. 観測項目の選定

「のぞみ」が搭載しなければならない観測装置は「のぞみ」の探査目標を「火星上層大気と太陽風の相互作用」と決めてしまえば略、自動的に決まってしまう。問題は、限られた重量の中でどこまでそれを実現できるかということであった。重量の制約から出てくるもう一つの問題は国内に十分な観測技術の蓄積がない観測をどうするかということであった。そのような項目として中性ガスの質量分析装置があげられるが、国外の機器を導入した場合、重量問題で紛糾する可能性もあって判断に苦しんだ。

火星の上層大気は下層の大気構造に強く影響を受けている。下層大気を適切に監視する装置が是非ほしいと考えたがここでも重量問題が立ちはだかることになった。下層大気の温度構造を調べるには赤外放射計の搭載が望まれるが軽量の装置開発の目処がつかなかった。結局、赤外放射計は Mars Observer との共同観測(当時「のぞみ」は 1996 年打ち上げを想定していた)に頼ることにして、搭載カメラで気象のモニターをすることにした。地球観測衛星で培われた技術が我々の惑星探査には重量の問題で生かされなかったことは残念なことであった。

中性ガスの質量分析装置は、米国で AO を出して米国の装置を搭載することにしたが、AO

を出すに当たって NASA は当然のことながら「確実な搭載」の約束を要求し、我々は確約が出来無い状態が続いて、結局 AO を出せたのは 1992 年の半ばになってしまった。幸い、PVO で実績のある GSFC のグループが担当することになったので立上がりの遅れは吸収することが出来た。

結局、「のぞみ」は 14 の観測機器を 30kg 強で作り上げるという決断をして開発ににとりかかることになった。その中には NASA の他にスエーデン、カナダ、ドイツ、フランスの寄与も含まれている。下層大気の問題は残したものの、上層大気と太陽風の相互作用を研究する上で、ほぼ、完璧な観測装置のセットとなったと考えている。

「のぞみ」は、初めての惑星探査機として、出来るだけ多くの分野との共同研究が出来ることが必要だと考えた。カメラは気象、地表、ダスト及びフォボス、デイモスの観測を念頭に開発されたし、電離層用のサウンダーは「SELENE」程ではないが地表面の反射を積極的に検出する「高度計モード」を取り入れた。重さ約 500g のダスト計測器は惑星間空間のダストやフォボスの作り出すかもしれないダストリングの計測を行うことになっている。

4 . 軽量化対策

M-V で実現できる火星探査機は約 540kg であり、その内、280kg 程度が燃料である。残りの 260kg 程度から搭載している推進系の重量を差し引くと探査機の重量は 200kg を割り込んでしまうことになる。M-V は地球周りの低軌道に 2 トン近い衛星を打ち上げる能力を持っているが、惑星の周回軌道に投入できる衛星の重量はその 10 分の一程度になる。換言すれば、探査機を軽く作ることが出来なければ地球周りの衛星の 10 分の一程度のことしか出来ない探査機になってしまう。

当初の計画では、「のぞみ」の打ち上げは最適なウインドウである 1996 年に設定されていた。開発が始まって間もなくして、同時進行で進んでいた M-V の開発に少し遅れが出る可能性が見えてきた。打ち上げは未だ先のことであり、地球周りの衛星であればそのまま独立に衛星の開発を進め、ロケットのスケジュールに合わせて打ち上げれば良いということだけのことである。しかし、惑星探査機の場合は事態は深刻であった。1996 年の次の打ち上げウインドウは 1998 年であるがこのウインドウは「良い」ウインドウではなく 1996 年打ち上げ用に最適化して製作した探査機は 1998 年には打ち上げることが出来ない。探査機は燃料と構造重量の比率の最適化の下にかろうじて成立しているので両方のウインドウに合致した探査機の製作は不可能である。万が一ロケットの完成が若干遅れた場合に、せっかく開発した探査機がお蔵入りになる危険を冒すわけには行かない。そのような訳で、打ち上げを 1998 年と再設定してして設計を進めという決断を下すことになった。(この決断の結果、火星磁場発見の一番乗りを MGS に譲ることになったのは大変残念なことであった。) 打ち上げを 1998 年に設定したことで、もともと、厳しかった重量問題が一層深刻なものとなった。普通の軽量化設計では観測装置を一つも搭載しなくても火星の衛星になるかどうか

か危ぶまれる状態に陥った。当時の秋葉所長の言葉「Planet-B は火星に燃料を運ぶのが目的じゃないんだよ」に当時の状況の一端が伺える。このような状況を打開すべく、宇宙研では特別に予算処置を講じ 1 年間の軽量化開発期間を設けることにした。地球周り衛星から惑星探査へ飛躍するための期間と経費を設けたわけである。

この間、探査機を構成する略全てのコンポーネント開発チームに軽量化の指令が出された。工学の中谷教授を先頭にマネージンググループが各チームと会合を重ね、1 g でも軽くをモットーに軽量化の努力が続けられた。科学機器については性能と項目はそのままに軽量化することが要求された。これは 4 つの国外機器についても例外ではなく適用された。軽量化の結果を 1990 年当時と打ち上げ時の重量で比較すると

	1990 年	1998 年
電源系	62.4	43.7 kg
通信系	19.3	11.7 kg
コマンド系	17.8	10.0 kg

となっており 3 割から 4 割の減量に成功したことが分かる。もともと衛星のコンポーネントは軽量化を前提に開発されてきているものであるから、新たな技術の導入無くしては軽量化は功を奏さない。「のぞみ」の場合、電池の開発、半導体データレコーダー、太陽電池セルの高効率化、実装方法の改善等々が行われた結果である。

軽量化とは別に、打ち上げ能力を実質的に増強する手段として「エアロキャプチャー」の適用が空力チームを中心に検討された。これは、火星での減速に火星の大気を利用しようというもので搭載燃料を大幅に削減できる可能性があるものである。幅 10km 程度の狭い投入回廊に探査機を入れることが出来るか、投入時の発熱に如何に対処するか、火星大気の高高度プロファイルはどの程度予測できるか。といったことが 1 年近く検討された。結果的には火星大気の安定性に問題が残って採用に至らなかったが、この検討は惑星探査の基本技術の一つとして重要な検討であったと考えている。

5 . 地球軌道離脱とトラブル

「のぞみ」は 1998 年 7 月 4 日、無事軌道に乗って後、順調に機器の立ち上げ、月スイングバイをこなしながら月や地球の写真を撮って搭載カメラの校正を行ったり、XUV で地球のプラズマ圏の撮像をしたりしてきた。「のぞみ」の前半最後の難関は 12 月 20 日に予定されていた地球軌道離脱であった。直前の月スイングバイに引き続き、近地点でエンジンを作動して加速し地球の重力圏を脱して火星へ向かう軌道に入るための操作である。近地点通過であるため DSN 局を含め地上局と「のぞみ」とのリンクが取れない状態でのオペレーションとなった。火星軌道投入と同じように「のぞみ」は全自動でこの大役を果たさなけ

ればならなかった。大役の中身は、噴射姿勢への変更、スピナップ、噴射、自動停止、スピンドウン、姿勢変更であるが、この全てを「のぞみ」が一人でやる必要があった。結果は、全てのシーケンスは予定どおりに進行したがエンジンが不調で予定の増速量を達成できなかった。近地点を過ぎた地点で急遽、速度の補正を行う必要があり、このために燃料を過剰に使ってしまう結果になった。これがトラブルのあらましであるが、この結果、予定していた 1999 年 10 月の火星投入は燃料不足により不可能になってしまった。その後の検討によって、残燃料は増速量換算で約 1060m/s であり、火星投入に必要な 1135 m/s を確保できていないことが分かった。すぐに軌道設計グループを中心に勢力的な代替軌道の検討が行われたが、火星の周回軌道に安全に投入できる軌道はなかなか見つからなかった。次の軌道修正は「のぞみ」が地球を大きく離れないうちに実施しないと燃料効率が悪くなり、少ない燃料を更に無駄にすることになるというあせりもあった。緊迫した雰囲気の中で様々な軌道の候補が検討されたが、1 月の 6 日になってようやく 2004 年に火星に到着する軌道が見つかった。この軌道は、到着時期こそ遅れるものの当初予定に軌道に「のぞみ」を投入できるものである（皮肉なことに、このことはみごとなレスキューオペレーションとして国際的に高い評価を受けた。）惑星探査の難しさを思い知らされた事故であった。この事故は、搭載エンジンの一部に「安全のため」導入したバルブの故障が原因であった。先に火星投入に失敗した米国の Mars Observer の事故原因から得られた教訓にもとづいて導入した「安全装置」が災いのもととなってしまったのである。

6. 「のぞみ」の後半について

最初に述べたように、「のぞみ」プロジェクトは未だ道半ばである。気分的に道半ばであるという意味ではなく技術的な意味で道半ばである。科学研究という意味では始まりにも達していない。2004 年初頭に予定されている火星投入は打ち上げに匹敵する大仕事であり、その後の火星軌道上での作業も気にし始めたら夜も眠れなくなるほど難しい操作を必要としている。「のぞみ」の観測開始は 4 年以上遅れることになったが、その科学的価値は保たれている。むしろ、「MGS」による磁場観測の結果などから「のぞみ」への期待は一層高まっているといえる。当初、半信半疑で「のぞみ」を眺めていた国際社会も現在では時代を先取りした小型高性能の探査機としてその成果に期待を寄せている。STP とか固体という便宜的な研究分野にとらわれずに火星研究という広い関心のもとで米国やヨーロッパの探査機と問題意識をシェアしながら幅広い研究の道具となればよいと考えている。

また、「のぞみ」の立ち上げから国際社会での認知に至る過程で多数の国外の研究者の支援があった。これらの支援に答える最善の道は「のぞみ」の観測を成功させることであろう。

7. 第二世代の惑星探査に向けて

「のぞみ」の開発が始まった 1990 年頃に比べて惑星探査をめぐる世界の情勢も国内の情勢も大きく変わりつつある。変化の一つはソ連邦の崩壊の後、米国を中心とする一極体制が惑星探査の世界も覆いつつあることである。このような動きはイタリア、ドイツ、フランスを巻き込みつつあるように見える。各国が持つ歴史的な背景や価値観の違いを大切にす
る視点も必要だろうとやや気になる風潮である。

米国は大型ミッション中心の戦略を修正し、Faster、Better、Cheaper を掲げて技術集約度の高い中・小型ミッションに勢力を注ぎ始めている。我々の「のぞみ」はやむなくこの戦略をとってきたわけだが、米国が本格的に戦略変更を試みると後発の我々には苦しいことになるだろう。特に、着想からミッションの実現まで 10 年近い歳月をかけている現状では、Faster で実施する米国の後塵を拝することになり兼ねない。わが国の開発体制を見直して、先を見た技術開発を可能にしていくことがますます大切になってきた。

M-V で始まった惑星探査は、M-V の規模を超える探査へと広がっていくだろう。「のぞみ」
「Lunar-A」
「MUSES-C」はそれぞれ大気・表層探査、内部探査、始源天体探査の分野で最初の探査機である。最初の探査機は現有の技術の制約に縛られる度合いがある程度大きくなるのは仕方が無い。惑星探査の基本となる技術が進めばこの制約は次第に緩和されてより高度の探査が可能になっていくだろう。打ち上げ手段も「SELENE」計画に見られるように、M-V に加えて更に大型の H- も視野に入ってきている。これらの、好ましい環境の変化を散発的なミッションの実施で終わらせないためにも、わが国が取り組んでいく惑星探査の方向について、地に足のついた議論が一段と重要になってきたと考えている。