

惑星ミッションの戦略的開発

向井 利典（宇宙科学研究所）

1. 背景

太陽系の惑星、衛星、小天体はそれぞれにユニークな特徴を持っていることが知られている。この多様性はどのような過程を経て形成されてきたのか、それぞれの起源と進化過程、ひいては太陽系の形成過程の謎に迫っていくというのが太陽系探査の目標であろう。しかし、これは究極の目標であって、一朝一夕に達成できるものではない。なにしろ時間がかかる。「さきがけ」、「すいせい」によるハレー彗星観測から15年近い年月が過ぎたが、今なお「のぞみ」が火星に向かっている途上というのが現状である。一方、米国では現在“Faster, Cheaper, Better”を旗頭にしたディスカバリー計画によって（再び）すさまじい勢いで惑星探査が推進されている。このギャップを埋めるにはどうすべきか、それが「戦略的開発」である。

2. 惑星ミッションはなぜ時間がかかるか？

衛星の場合はロケットの打ち上げが最後の関門であるが、惑星ミッションではそれが直ちにミッション達成に直結するわけではなく、更にもうワンステップが必要である。例えば、惑星のオービターへの投入が大きな関門であり、ランダーやペネトレータを落とす場合には更にもう1つの難関が待ち受けている。対象によっては、打ち上げてから全ての関門を突破するまでに数年の期間がかかる。しかし、ここで議論したいのは、計画がスタートしてから打ち上げまでの期間の長さである。

惑星ミッションだけに時間がかかるわけではない。世界的に第1級のオリジナルな観測をしようというのは、どこの誰もまだやってないことをやるのだから、メーカーに仕様を出して作ればできるというような簡単なものではない。アイデアは必要だが、それだけではできないし、実験室レベルで観測センサーの原理的なことが確認されたから直ちにできるわけではない。実験室とは全く違う環境（打ち上げ時および軌道上での熱真空環境、放射線、等々）の中で、限られたリソースを最大限に生かすための設計・製作・試験は一筋縄ではいかない。20年程前では、衛星のバス系は幾つかの衛星で共通化し、観測装置だけが各分野のお客さんという方式をとっていたが、それではできることも限られている。そもそも惑星探査の場合には、対象によって探査手段も違うし、環境も全く違ってくるので、バス系も含めて新規開発要素が多い。また、既の実績のあるコンポーネントやサブシステムも他のサブシステムとのインターフェースや使用環境などの違いのために再検討する必要がある。

一方、宇宙研のプロジェクト遂行システムが時間を要することにもなっている。まず、宇宙理学委員会の評価（科学的意義、技術的実現性、提案チームの実行力、予算規模）を受けてミッション計画が承認されてから予算要求し、Pre-PM～PMの試作に3年、FMの設計・製作

に3~4年、試験+射場作業1年というシステムになっている。即ち、ワーキンググループにおける検討が始まってから10年近い期間を要する。このシステムの最大の問題は、ワーキンググループで種々の検討をするための予算がないことである。また、PMも名ばかりで、せいぜい新規開発要素の部分試作する程度の予算しかない。それでも、PMがスタートすれば、FMを見越してシステム検討などに入ることができるが、ミッションに新規開発要素が多すぎると、システム検討に不確定性が多く、なかなか進まない。これまで成果を出してきた衛星の場合、FMに入る段階では新規開発要素をほとんど完全にクリアーしている。FMに入ると設計方針を直ちに確定して詳細設計・製作・試験に入るくらいでないと、検討不足になる。細かい検討はいくらしても、し尽くされることがないくらい多岐にわたるのである。

3. 戦略的開発の必要性

米国のディスカバリーミッションはスタートから3~4年で打ち上げに漕ぎ着けているが、宇宙研のシステムではFMに相当するので、実は大差ない。ここで重要なのは、新規開発要素を既にクリアーしている必要があることである。逆にいえば、PMに入る前に1~2年でメドが付く状況でなければいけないということである。米国のディスカバリーが成功しているのは事前の基礎的な技術開発が広範に行われているからである。宇宙研でもこれまで基礎開発研究が行われてきたし、その蓄積のおかげで最近の科学衛星の成果が世界のトップレベルになってきたのであるが、惑星探査の場合、従来の基礎開発レベルと実際の探査技術の差が余りにも大きい。

例えば、水星探査では、10ソーラーの太陽光と表面からの強烈な赤外輻射に耐える熱設計は必須であるが、それだけに配慮すると、打ち上げ直後の1AU近辺での低温対策が問題になる。ダイナミックレンジが広いので、熱特性のわずかな誤差がクリティカルになりかねない。ほとんどのセンサーは探査機に窓を開けて外を見る必要があるため、センサーからの熱入力は探査機全体の熱設計やシステム設計に大きく影響する。また、打ち上げてから観測軌道に入るまでに数年かかるので、放射線・紫外線照射による経年変化や寿命も問題になる。ワーキンググループでの予備的な検討結果では実現可能という結論が得られているが、あくまでも机上の計算である。FMに入って直ちに設計を確定するためには、PM以前の段階で少なくともクリティカルなコンポーネントレベルの実証試験をしておくことが必須である。逆に、それができておれば、従来に比べてPM~FM期間を短縮することすら可能であろう。

しかし、実際は、上記のような基礎開発レベルの試験をPMフェーズに入ってから始めることが多く、これから未経験の惑星探査をやるシステムとして無謀という他ない。従来そうせざるをえない理由の一つは予算的制約である。つまり、オリジナルな成果を得るための新規開発を行う場合、従来の基礎開発研究費とは桁違いの経費が必要になり、現実的でない場合が多い。例えば、上記の水星探査における熱環境試験をしようとする、まず、その試験装置の製作から始めなければいけないのが現状である。このような状況を打破しない限り、真にオリジナルな観測をする惑星探査ができるわけがない。換言すれば、ミッション提案前のワーキンググループ段階の検討に従来の基礎開発研究費の枠を大幅に越える予算が必要ということである。相当の予算獲得のためには、当然Peer Reviewで正当な評価を受けた上でなければいけない。同様の例は他にも多々あり、天文分野も同様である。Peer Reviewの評価

は競争原理に則って行われることになる。そこには長期目標に則った戦略が必要であり、その戦略に沿った新規技術の基礎開発が「戦略的開発」である。

4．惑星探査の長期戦略

戦略的開発の前提は科学目標に対する長期戦略である。その策定には学会・コミュニティのコンセンサスが重要であるが、惑星探査は単なる「お題目」ではなく、新技術の発展、開発を見越した実現の見通しが必要なのは云うまでもない。全く新規のものをやろうとすると10年程度は必要なので、長期というのは20年ぐらい先までのことである。しかし、これは20年先のことを決めるわけではない。開発状況の評価をすることにより、少なくとも数年に1度は見直しをしてフレキシブルに対応する事が重要である。

なお、現在進行中あるいは宇宙理学委員会の下でワーキンググループが作られて検討しているものとしては、

- a) 月の表層、内部構造の探査 = = = > 月の形成・進化過程
- b) 小惑星、彗星の物質探査 = = = > 太陽系の始源物質と惑星形成過程
- c) 水星探査 = = = > 極端な環境における惑星形成過程、惑星磁場と磁気圏
- d) 金星・火星探査 = = = = > 地球型惑星の大気構造と運動、変遷
- e) 地球磁気圏の高時間分解能・多点観測 = = = > 高温プラズマの物理

がある。これらはいずれも数年~10年程度の中期目標である。更にその後の10年先を見越した長期計画の議論を盛り上げていく必要がある。

5．最後に一言

これまで、ミッション提案前の戦略的開発の必要性を述べてきたが、それ以前にまず、研究者が中心となった基礎技術の底上げがなくてはどうしようもない。筆者の偏見かもしれないが、日本の惑星探査の場合、衛星プロジェクトのスタート以前ではせいぜい原理的な実験、あるいは机上の計算だけで済ませ、PMがスタートしてから本格的な実験に入っている場合があるように感じられる。これでは予定通りに開発が進まず、思わぬ障壁に当たる可能性も高い。オリジナルな観測装置の製作はメーカーに仕様を出せば済むものではない。限られたリソースの中で最大限の科学成果を得るためには開発段階における研究者の判断と指示がキーである。まずは、実験室レベルの開発実験に時間と人を投入することが肝要であるが、実際はそう簡単なことではない。例えば、探査機による観測技術の開発実験が惑星科学の成果に直接的に繋がるのが少なく、科研費でも評価が低い。その種の予算は宇宙研から出すべきということかもしれないが、それだけでは全体的な底上げにならない。「私は理論屋だからモノ作りは知らない。モノを作るのはあなたの責任ですよ」という風潮は最近なくなりつつあるが、これを更に推し進め、探査機搭載用の観測技術の開発に対するコミュニティ全体としての体制・コンセンサスが必要である。大きな科学目標に向かって理論/実験屋が一体となって新技術をstep-by-stepで開発するという長期戦略に対する問題意識の問題である。

地上観測との連携

東北大学大学院理学研究科
惑星プラズマ・大気研究センター
森岡 昭

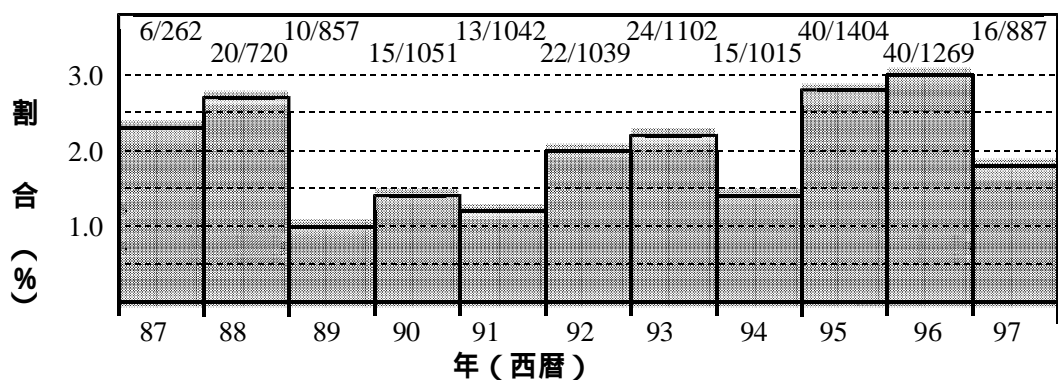
1. わが国の惑星研究

今年、パイオニア10, 11号による木星の直接探査が始まってから数えて25年になる。一方、わが国はというと、昨年惑星（火星）探査へと初の飛翔体が発進したばかりであり、惑星探査の緒についたばかりである。この遅れは、欧米に比べて惑星圏に関する論文数にも、惑星に関する国際研究会への出席数にも、如実に現れている。因みに、第1図に1987年から1997年までに、太陽系惑星に関する日本人著者論文の国際誌への投稿率を示す。わずか3%にも満たないのが現状である。

一方、例えば、わが国の地球磁気圏の研究においては、今や世界に伍して成果を挙げてきており、多くの研究者が活発に活動している。これらの研究者の多くは、木星/惑星磁気圏にも大きな関心を持っている。また、全国的に惑星に強い関心が有ることは、ここ10年ばかりの間に、「惑星」を冠する講座、学部、学科、専攻が急増してきていることを見ればわかる。

しかし、では、なぜ惑星の研究がほとんどないのか。なぜ研究者が少ないのか。その答は、極めて簡単で、惑星研究の具体的手がかり、すなわち自ら惑星に関する観測データをわが国が持たないからと結論して良い。

そこで、欧米に比べて大きく遅れている惑星圏研究を取り戻し、わが国の惑星研究を活発化していくためには、著者の持論は、今すぐできることから、独自の戦略を持って、そしてわが国の特色を出した観測研究を始めるべき、というものである。そしてそれを、地上及び地球周回衛星による遠隔観測から始めよう、というものである。ここで、筆者はSTP関連の人間であり、以後の話と解釈はかなりSTPに偏った見方となることをお許し頂きたい。



第1図 世界の惑星に関する論文に対する日本人著者論文の割合 (%)

2. 惑星の遠隔観測

惑星の直接探査による in-situ 観測は、その場の詳細な物理量を多量に取得する大きな利点をもつ反面、我々が地球磁気圏の衛星観測で経験するように、事象の時間・空間変動分離ができない欠点を持つ。一方、光や電波による遠隔観測は、その観測から得られる物理量の種類や分解能では直接

探査に譲るものの、時間・空間変動の分離や長時間の観測が可能となり、グローバルな惑星圏変動を見ることができるといった大きな特長がある。また、直接探査と遠隔観測のタイアップがあってこそ、初めてその惑星を理解できることになる。このことは勿論一般論としては、よく理解されていることである。しかし、対象が惑星となると、遠く惑星の希薄なガスや大気を物理的に意味のある量として検出することに関し、観測の有用性への不信感があったことも事実である。

しかし、手をこまねいては、いられない。これまでのわが国の地球周辺の遠隔観測開発と研究で実績をもとに、最近目覚ましい進展を遂げている電波・光学精密計測技術を応用・開発し、格段の分解能を持った観測を行い、広く惑星の磁気圏、プラズマ圏、大気圏等とその境界域を組織的に究明していくことが、「今すぐできる」緊急な課題である。わが国には、そのポテンシャルは十分にある。特にある惑星のいろいろな領域を対象とした観測を、各機関が協力して、同時に連携・連続しておこない、惑星の広い領域で互に関連し合っている生じている変動現象を解明していく研究は、世界においても未だ実現されておらず、わが国の特色を出せる未開の研究領域となっている。そしてこれらの活動は、惑星研究者を増やし、育てることになり、近い将来わが国の活発な惑星直接探査へと導くことにつながる。

3. 遠隔観測で何ができるか

では、遠隔観測でどの程度のことのできるのか。ここでは、例を木星磁気圏に取らせていただく。木星磁気圏は、地球の100倍のスケールをもち、高速で回転している。この磁気圏の特長とそこに含まれる課題を3つ挙げるとしたら、以下の3点になる。

(1) 高速自転と太陽風相互作用

木星の高速自転エネルギーは、定常的に磁気圏プラズマに供給され続けている。一方、磁気圏に吹き付ける太陽風は間断なく変化し、木星の外部磁気圏に大きな変動を与えている。この両者のエネルギーがどのようにカップルして、急激な粒子加速や電波バースト現象を引き起こし、また高温のプラズマや超高エネルギーの粒子をつくり出すのか。地球磁気圏とは異なる未知の物理過程が数多く残されている。

(2) プラズマ源

太陽系で最も活動的な火山を持つイオ衛星からの火山ガスは、木星磁気圏のプラズマ90%を占めているとともに、外部磁気圏においても高エネルギー重イオンとして多量に分布している。内部磁気圏で発生する火山性中性のガス雲がどのようにイオン化され、加熱・加速を受け、磁気圏に充満していくのか、さらにいかに高エネルギー粒子へと加速されるのか、未だ解明されていない。

(3) 大気・磁気圏相互作用

Brice and McDonough(1973)の古い指摘にもあるように、木星の上層で生じる激しい大気の擾乱が引き起こすダイナモは、木星磁気圏に投影され、内部磁気圏にかなりの電磁擾乱を及ぼすであろう。このことを直接指し示す現象はまだ明かではないが(一部、木星放射線帯粒子変動から言及され始めている)、地球との対比で見たとき、重要な研究課題である。

これらの木星磁気圏にかかわる課題の究明に関し、直接観測研究に加えて、地球・地球周辺からのグローバルな木星磁気圏・大気圏の観測・研究が、すでに始められており、成果を挙げてきている。その例として、これまでの地上及び地球周回衛星観測から得られた木星磁気圏・大気圏2次元観測データを、第2図に示す。各項目について詳細な説明は省略するが、これらの観測データは、上述の木星磁気圏の3つの課題に答えていく重要な情報を多くもたらしつつある。また、これらの観測研究は各国がすでに個々に開始し、またわが国もその緒につく研究を開始してきている。

しかしこれらの観測研究は、ハッブル衛星を含めて共同利用の大型設備を用いた観測が主であること（マシンタイムの問題）、またこれに加えて地上観測の制約（天候）から、one-shot に近い観測がほとんどであり、対象とする現象のダイナミクスを議論するに至っていないものがほとんどである。また、小さなグループが個々の領域を独立に観測研究している状況にあり、それぞれが観測研究の成果が、木星磁気圏の研究として有機的に結合していないのが現状である。

4. これからの戦略

以上、木星磁気圏・大気圏研究を例に取り、遠隔観測の現状を述べた。これらをふまえ、今後惑星の遠隔観測としてどのような研究の進め方があるのかを表に要約して以下に示す。

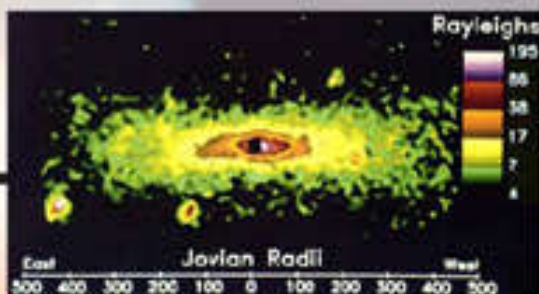
項目	現 状	こ れ か ら の 戦 略
観測時間	・ One-Shot 観測に基づく空間構造の研究	・ 連続観測に基づく variability 検出からダイナミクスの研究へと発展
観測装置	・ machine time 制約が大きい大型設備による観測	・ 惑星観測専用設備の設置をはかる ・ 新技術の応用による高性能装置の開発
観測の連携	・ small groupe による、特定の領域の独立の観測	・ Co-ordinated 観測及び Net-work 観測による、多領域・同時・連携観測
観測条件	・ 地上観測の制約が大きい 天候 大気の揺らぎ 地球大気吸収 地球大気放射	・ 最適地(海外・移動)での観測実施 小型可搬・高性能観測装置の開発 ・ Space からの惑星遠隔観測計画推進 連続・高分解能観測が可能 UV, X線観測が可能

5. まとめ

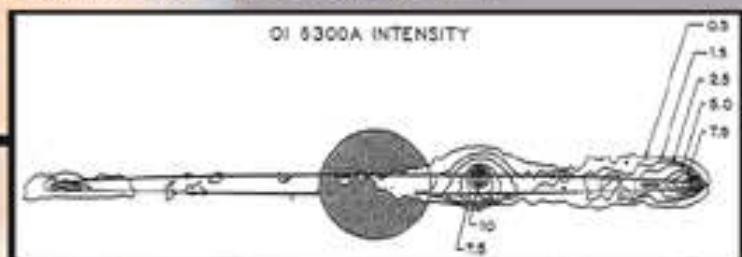
わが国の特長をだした、「今すぐできる」惑星観測をまず始めることが必要である。たとえば、惑星のガスやプラズマの分布・変動をとらえるためには、分解能は犠牲にしても、超高感度撮像を、専用の（小型）望遠鏡で、無光害・乾燥・晴天・高地に出掛けて、連続して行うことにより、ガス・プラズマのダイナミクスに関する新しい情報が得られるであろう。また、新技術の応用をもとに、従来の固定概念にとられない観測装置、手段の開発を進めることが必要である。そしてその延長には、近未来に地球周回軌道の惑星遠隔探査衛星を実現させる、という戦略を持つことが重要である。

第2図. これまで地上及び地球周回衛星により観測されている木星磁気圏・大気圏の2次元画像。図中、X-ray Aurora, および UV Aurora は衛星観測によるもので、他は地上観測による。これらは観測のほとんどは、現状では、one-shot の観測であり、それぞれの現象のダイナミクスを議論する連続観測データは極めて少ない。

Jovian Magneto-Nebula



Io/Io Plasma Torus



Radiation Belt



DAM/HOM Radiation



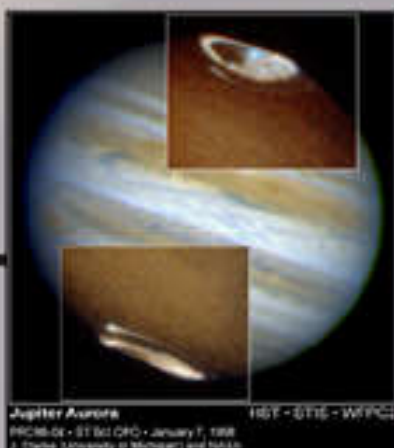
X-ray Aurora



IR aurora



UV Aurora



Atmosphere

