

# 始源天体探査と宇宙惑星物質科学研究体制

山本哲生（名大理）

## 1 サマリー

日本惑星科学会将来計画委員会報告彙（1996/6）、および同報告書宇宙惑星物質科学ネットワーク構想（1997/10）をもとに、

- 日本の月惑星探査計画の基本原則と長期戦略、
- 始源天体探査と宇宙惑星物質科学研究体制への提案

の要約を述べる。

## 2 月惑星探査の立案・推進の基本原則と今後の方向

### 2.1 基本原則

探査は多数の人員と多額の費用を要する大規模プロジェクトであるため、国際協力を進めてゆく必要がある。組織としての国際協力を本格的に進めるためには、まず自力で探査を遂行できる基盤と技術力を確立することが必須である。現時点は広く独自の探査能力を確立する重要な時期と位置づけられる。独自の探査能力を確立することによって初めて、わが国の惑星科学の総合的な発展を図ることができる。

現時点および近未来のわが国の月惑星探査の立案・推進の基本原則として以下の5原則を重視したい：

- 1) 第一級の科学目標：惑星科学の本質的問題を解明するうえで重要な成果が期待できる科学目標を掲げるとともに、当該探査の科学的意義を十分に検討する。
- 2) 独自性：探査計画の立案において独自性を重視する。
- 3) 手段の最適化：探査の規模や内容に応じて、打ち上げロケットとしてM-VとH-IIを使い分ける道を拓く。
- 4) 完結性：計画からデータ解析に至る全過程をわが国が独力で行える体制の確立
- 5) 国際協力：4)のもとでの国際協力

1), 2) が科学面の基本方針に当る。1) に関して、現在の惑星科学における本質的問題として、

- 太陽系の起源とその初期環境の解明

- 惑星の形成過程と形成後の進化の解明

があげられる。月惑星探査からこの問題の解明に迫るためには、一般に単発的な探査ではなく、継続的な探査が必要である。また各探査で到達しようとする目標を明確にしておく必要がある。

## 2.2 探査の種類

上記の問題の解明のためには、少なくとも以下の3種類の探査シリーズが必要である。

### A. 月惑星内部構造探査

この探査は月・惑星の形成と進化を解明するうえで欠くことはできない。ペネトレーターがその主要機器となる。これまでのアメリカやソ連の探査の大部分が惑星の表層や大気・磁気圏の探査に限られてきたのに対し、ペネトレーター・ミッションは固体惑星や衛星の内部構造を解明することのできる独創的な探査である。

### B. 始源天体探査

小惑星、彗星、衛星、EKOなどの小天体は、太陽系の初期状態に関する情報を保持した化石天体であるものの、太陽系の起源の研究に直接かつ広く結びつく本格的な探査はなされていない。始源天体探査では、サンプルの持ち帰りや地上の実験室における分析がきわめて重要である。<sup>1</sup>これによって、宇宙惑星物質科学の研究に飛躍的進歩がもたらされることが期待される。また従来の実験室物質科学の研究者も探査に参加する道を開くことができる。

### C. 惑星表層・大気・磁気圏探査

この種類の探査は現在の太陽系環境における現象の解明に重点が置かれている。比較惑星大気・磁気圏学は惑星大気の起源と進化の解明につながる。大気組成や磁場の測定は惑星表層環境の進化や中心核の組成と運動に関する情報を与え、一方、内部構造探査は惑星磁場の起源に対して大きな手がかりを与えることから、AとCの探査は相補的な関係にある。両系統の探査は単にそれぞれ固体探査とガス・プラズマ探査と言うだけでなく、惑星系形成論と比較惑星学と言う惑星科学の両輪を健全に発展させて行く上で欠くことはできない。

上述のどの種類の探査においても、できれば有機物や生命探査機器を相乗りさせたい。この種の探査は新分野であり、これまでほとんどなされていないだけでなく、どのような有機物が存在するかがわかるだけでも、今後の宇宙物質科学や化学進化の研究に大きなインパクトを与える。

---

<sup>1</sup>サンプル分析では in situ 測定とサンプル持ち帰りの比較が問題となる。持ち帰りでは、1) 地上での分析技術の発展に連たて、同じ試料から新たな分析を行なえる、2) 搭載機器と異なり、地梢の分析装置は重量、体積、リソースなどの制限を受けないため、現時点では in situ 分析と比べて格段に精密な分析が可能である、等の与点がある。一方、サンプルの採取および回収の技術開発のためのコスト、地上での汚染を避ける厳しい管理等の問題がある。現時点では持ち帰りの利点の方が大きいと考える。

これらを進めるうえで、探査の立案段階から、研究者間の相互交流を推進してゆく必要がある。この際、従来の枠内に留まることなく、探査になじみの少なかった分野の研究者、たとえば気象学や地質学、鉱物学、生命科学等の研究者が参加できる道を積極的に拓いてゆくことが重要である。

これを現実的にするための第一歩として、次のような施策が求められる。探査の実行は従来のように宇宙研が中心となると考えられるが、宇宙研のプロジェクトとして承認される前の、まだ海のものとも山のものとも分らない段階の研究に、従来以上の予算を投資する必要がある。この種の研究を大学等において多数「培養」しておける広い素地をつくっておくことは、探査を継続的に実行する広い基盤をつくとともに、新しい芽を育てて行くうえでの基礎となす（渡邊氏の稿を参照）。

### 3 新たな宇宙惑星物質研究体制構築に向けて

従来、地球物質や宇宙物質の研究は個々のディシプリンで個別に行なわれてきた。宇宙物質に関しては、隕石、月の石、惑星間塵の研究が進展してきた。最近では、南極隕石研究に見られる隕石研究の拡大・深化と研究者数の増加、洪内の月惑星探査計画、特に MUSES-C プロジェクトの具体化、ISO 等に代表される星間物質研究や原始惑星系円盤の電波・赤外観測の発展など宇宙物質の新しい研究の流れが形成されつつある。今後は個別分野の研究から総合的な宇耽惑星物質科学へと発展させて行かねばならない。このためには、既存の分野た学会組織を越えた協力体制を確立して行く必要がある。

以下では新たな宇宙惑星物質研究体制構築に向けた提案を行ないたい。

### 4 宇宙惑星物質研究ネットワーク

新たな宇宙惑星物質研究体制の一形態として、宇宙惑星物質研究ネットワークとも呼ぶべき組織を提案する。この組織は、従来の共同利用研究所のような一極集中型の組織ではなく、分散型の組織であることに特徴がある。これは 1 研究機関ですべての研究は不可能である宇宙惑星物質科学の多様性から必然の形態である。また一極集中の弊害として従来ともすれば見られた大学の教育・研究の停滞を防止するだけでなく、探査を支える基盤の拡大にもつながる。

ネットワークは以下の 3 種の組織からなる（付図も参照）:

- コアセンター
- サテライトセンター
- 既存の研究機関

## 4.1 コアセンター

共同利用型の研究組織として新設し，宇宙惑星物質科学の研究の核となる共同利用センターとして位置づける．共同利用型の開発研究費・事業費等を持つとともに，後述のサテライトセンターや既存の大学・研究所の研究開発の支援を行なう．

研究部門案として以下があげられる：

### 1) 宇宙物質管理部門 ( curation 部門 )

- 宇宙惑星物質サンプルの curation ( 処理・保管，記載・分類，研究者への配分 )，Curation システムの確立
- 微小サイズの物質の処理・分析設備の開発

### 2) 鉱物分析部命

- 宇宙惑星物質の非破壊分析法の開発
- 鉱物の微細組織，構造，化学組成の高分解能分析

### 3) 有機分析部命

- 宇宙惑星物質に含まれる有機低分子の超微量分析および同位体分析

### 4) 機器開発室

- 機械工作室
- 電子工作室
- 複合 ( 特殊 ) 材料工作室

### 5) 理論部門 ( 客員 )

いずれの部門も，教添 1, 助教添 2, 助手またはポスドク 3，および研究サポートスタッフとして技官 2 程度の人員が望まれる．研究部門に加えて，研究支援事務部の設置が必須である．新しい研究展開に対応した人材，特に機器開発の人材を他分野からも積極的取り込んで行く必要がある．

これらに加えて，時宜に応じて一定期間，大学等の研究グループがコアセンターの一部門として機能することができるフレキシビリティを確保しておくことが望まれる．

## 4.2 サテライトセンター

サテライトセンターは本ネットワークの重要な部分である．従来の共同利用研究所と大学の中間的な研究組織形態として，既存の大学や研究所の中から，宇宙惑星物質科学の拠点になりうる研究組織 / 研究グループをサテライトセンターとして評価・選択し，拠点研究組織として強化する．宇宙惑星物質研究において実績がある研究組織 / グループや

重要であるがこれまで研究が手薄な分野の研究組織/グループがサテライトセンターの候補となる。

サテライトセンターへはコアセンターから定員や事業費を配分する。サテライトセンターは時限組織とし、評価機構において実績評価を行なう。

サテライトセンターとして強化すべき分野の例として以下があげられる：

#### 1) 実験惑星学研究センター

- 原始太陽系星雲や星間雲内における物理・化学過程の再現実験
- 各種分析・実験装置の開発

#### 2) 惑星年代学研究センター

- 極微小領域の同位体・微量元素分析法の確立
- 極微小領域の高時間分解能年代測定法の開発

#### 3) 宇宙生命研究センター

- 生命関連高分子の局所抽出分析および生命探査法の開発

### 4.3 コアセンター，サテライトセンター，既存の研究機関の間の相互関係

コアセンターの教員は大学（または連合大学院；後述）の協力講座教員として，大学院教育に携われるような仕組みをつくっておくことが人材育成のうえで重要である。一方，サテライトセンターや既存の研究機関からも協力講座を通じてコアセンターへ大学院生を送る道を開いておく。

定員や事業費の流れについては付図を参照。

## 5 ネットワーク実現への検討すべき点

#### 1) コアセンターと既存研究機関との関係

サンプルリターンにおいて，サンプルの curation をどこでどのように行なうかは検討が必要である。もし，サンプル採取機関で行なうことが現実的であったとすると，サンプル採取機関がコアセンターの役割を担うことになる。この場合はサンプル採取機関の充実が必須である。MUSES-C 計画においては，宇宙研が curation を行なうことになっている。しかしやや長いタイムスパンで考え，例えば宇宙開発事業団のロケットで月のサンプルリターンを行なう場合等も賛野にいれておかねばならない。種々のサンプルが分散する場合は curation 施設のコストた curation システムの一貫性から望ましくない。

## 2) サテライトセンターの人事権，予算要求権

サテライトセンターはコアセンターから定員・事業費を受ける際，サテライトセンターの人事権・予算要求権をそれが所属する大学や研究所から独立してたつ必要がある．現在の大学等の運営形態からは困難な面があるが，大学等の組織改編を通じてこれが容易な方向に変えてゆく必要がある．

## 3) 教育ネットワーク

コアセンターにおける大学院教育の体制として，当面はコアセンターの研究部門が特定の大学院の協力講座となって人材養成を図ることが考えられる．

しかし，視野の広い総合的な教育を行なうためには，現在の各大学における教育と直交する方向の大学間の壁を越えた分野連合大学院，例えば連合惑星科学研究科のような組織がぜひ必要である．この方向の既存組織として総研大学院大学（総研大）があるが，共同利用研だけで閉じている．

# 6 実現に向けて

ここで述べた今後の宇宙惑星物質科学研究体制についての提案は，必ずしも宇宙惑星物質科学だけに適用する提案ではないことを指摘しておきたい．一極集中型の組織から分散型の組織への転換は多くの分野についても必要とされていると思われる．今後の地球惑星科学発展のためには，従来の個別分野の研究から総合科学としての研究への構造転換のための体制づくりが急務となっている．これらを実現して行くためには，関連学会や既存の研究所の協力が必要なことは言うまでもないが，これだけに終わらず，既存の学会組織の枠組みを越えた議論の場を設定してゆくことがきわめて重要であると思われる．

## 謝辞

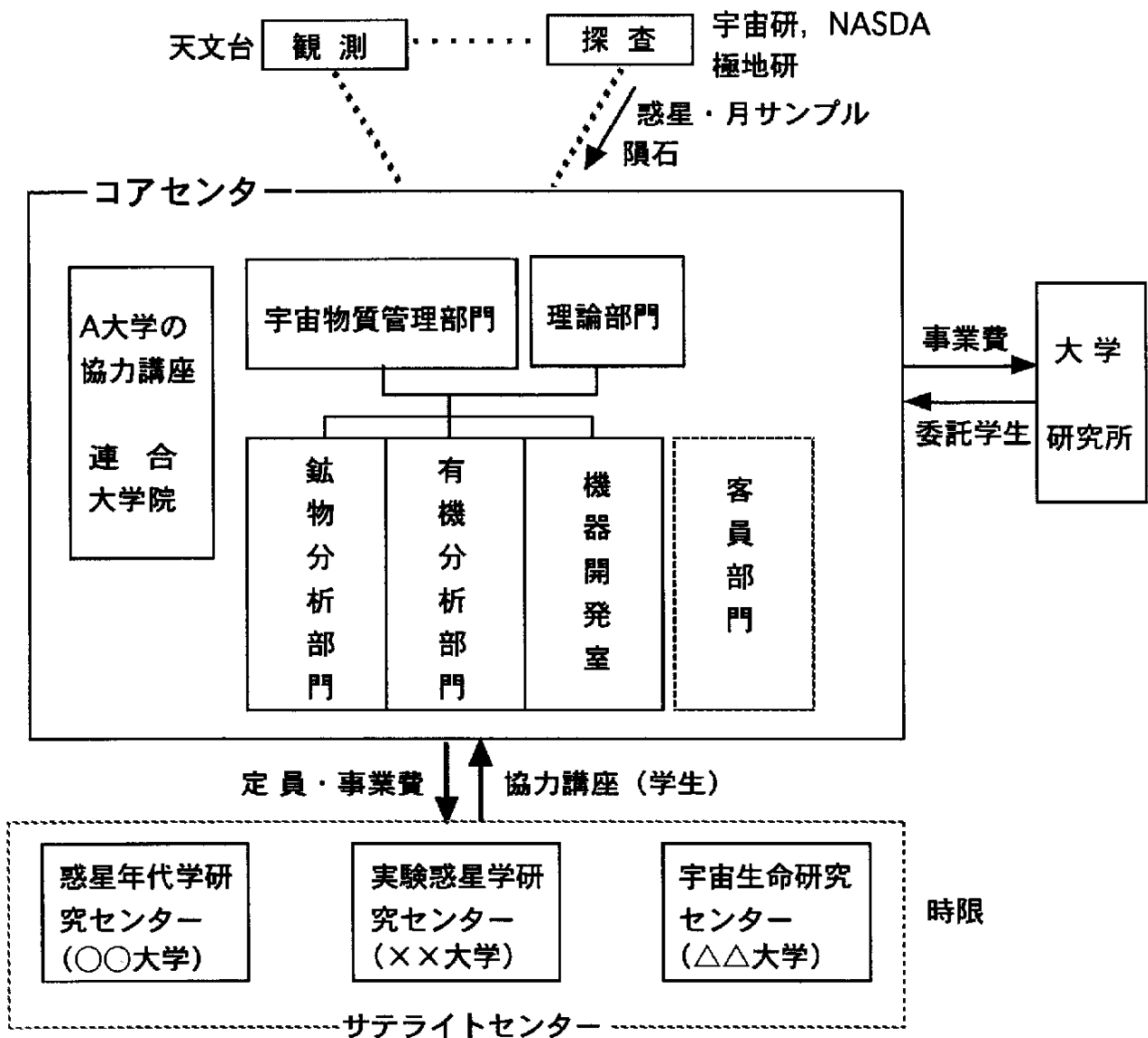
多大な時間をかけて議論を行なっていただいた日本惑星科学会将来計画委或（当時）の方々にお礼申し上げます．

## 参考文献

日本惑星科学会将来計画委員会報告書，1996年6型

日本惑星科学会将来計画委員会報告書 宇宙惑星物質科学ネットワーク構想，1997年10型

# 宇宙惑星物質科学研究ネットワーク



## コメント - 今後の日本の惑星探査の研究戦略に対する -

坂本 尚義（東京工業大学理学部）

日本の惑星探査の明るい将来を期待して、「研究分野間の信頼関係構築」と「そのシーズ育成の場」についてコメントする。

### （１）信頼関係

現在の惑星探査は、探査機と搭載科学機器の設計・製作に始まり、その運用が終わるとプロジェクトが完結する。この範疇に関する限り、宇宙科学研究所に設置されている現行の組織体制は、プロジェクトをおおむね遂行することが可能である。しかしながら、現在プロジェクトが始まったばかりのMUSES-C計画のようなサンプルリターン計画においては、探査機の運用終了までではプロジェクトは完了しない。なぜならば、地球に回収したサンプルのキャラクタリゼーションの結果により、はじめて、本格的な科学的議論が始まるといっても過言ではないからである。つまり、回収サンプルのキャラクタリゼーションをもプロジェクトの一環としてとらえる必要がある。

現在のところ、惑星探査関連研究機関には物質キャラクタリゼーション部門が欠落している。そのため、必然的に、地球化学や地質学等の分野の物質科学者との共同研究が必要になる。共同研究のためにはお互いの信頼関係が必要であるが、筆者はこの信頼関係を築く環境が整備されていないことを危惧している。率直に言って、両者の交流はほとんど進んでいないのである。

では、物質科学者にとって、惑星探査が関心のないテーマなのであろうか？そうではない。物質科学者には、地球科学・環境分野の魅力的なテーマが沢山あり、かつ、それらのテーマの多くは社会からも要請されている。しかも、惑星探査の研究はスケジュール管理が厳しいので、地球科学の研究テーマのほうが自由に研究を進行できるという幻想(?)を持っている。そのため、惑星探査に興味があっても、二の足を踏んでいるという状態なのである。

一方、惑星探査関連の研究者の方は、現在進行中の探査プロジェクトを遂行することで精一杯で、その他に余裕がない状態にあるように見える。これは、現在の人員がプロジェクト遂行に十分でないからといわれている。その研究環境改善のため、自身と関連の組織の拡充で手いっぱいであり、リターンサンプルの取り扱いに対する重要性だけは認識しているとしても、組織として十分にケアできる状況にない。この点も、惑星探査は間口が狭く敷居が高い分野という印象を、物質科学者に与えていることは否めない。

このような状況分析のもとで、筆者はあえて、次のような提案をしたい。惑星探査関連研究者は高い志を持ち、将来へのビジョンを実現していくよう行動してほしい。サンプルリターン計画が、21世紀の惑星探査プロジェクトの主流のひとつとなる魅力的なテーマであるならば、回収サンプルから科学的成果を抽出するための人材の育成がぜひとも必要である。そのシーズを育成するためには、宇宙物質科学に対する非公式なサイエンスワークショップを頻繁に開催し、物質科学者と探査科学者の風通しをよくする必要がある。このため、サロンを運営する部門が惑星探査関連機関にぜひとも必要なのである。サロンの主催者は、少なくとも物質科学全体を理解できる人物でなければならない。探査関連のブレンは周囲に複数名存在するであろうから、この実現のため、探査プロジェクト推進



組織の拡充を我慢しなければならぬかもしれないが、武士は食わねど高楊枝の気概と大志を持つことが探査科学者にできるだろうか？

## (2) シーズの育成の場

以上のようなサロン環境の構築が出来れば、それはサンプルリターンプロジェクトのみならず新しいタイプの惑星探査提案のためのシーズ育成の場になるだろう。そのために、現在の次期研究者育成機関について点検してみよう。それは、「大学」と宇宙科学研究所のような「共同利用機関」に大きく分けられる。

大学はいわゆる重点化という改革がほぼ完了した。旧来の講座制は解体され、大講座制に移行した。これに伴い助手を教授・助教授にアップシフトした。その結果、研究分野が拡大した。しかし、研究分野の拡大と研究者数増加が比例せず、かつ、旧来の分野を取捨選択していく方向になかったため、各大学において分野あたりの十分な教育研究体制が組めなくなる弊害をもたらした。この打撃は、特に実験系に大きく、物質科学研究者の育成も困難な状況におちいつている。このような、余裕のない教育研究体制において、もし大学にサロンを構築することができるとすれば、助教授・助手を持っている（講座解体を実質的に逃れることが出来た）少数の教授たちであろう。しかし、もしこれらの教授にその能力がないならば、大学におけるサロンの実現はほとんど絶望的である。その場合、教授たちは適当な人材のもとに講座制を再編成する方向に積極的であって欲しい。大学の独立行政法人化が一つの好機なのであるが...

共同利用機関は、前述したように、プロジェクト遂行に多忙であるため、十分な教育効果が得られているとは考えがたい。そのため、サロン部門は進行中のプロジェクトから距離をおいた環境につくられる必要がある。このような条件は、宇宙研のような直接惑星探査を執行する共同利用機関では困難であるかもしれない。しかしながら、惑星探査関連のプレーンが少ない共同研究所内ではサロンはうまく稼動しないであろう。一つの解として、隕石センターを所有する国立極地研究所が宇宙科学研究所敷地内にサロン部門をつくることを提案する。なぜ極地研かというと、次のような理由による。(1) 惑星探査執行とは切り離されているため、独立した立場に立脚できること。(2) 隕石という宇宙物質の研究体制構築に一応成功していること。(3) 宇宙塵のキーワードの下で、探査関係と物質関係の若手研究者が現在手弁当で集まり、研究が進行しつつあること。ここに新鮮なエネルギーの息吹を感じる。

複数の機関が共同で新しい部門を作ることはいろいろな障壁があるかもしれない。サロン構築に向け大学が自己改革することも難しいかもしれない。しかし、早急に、従来のしがらみを打ち切り、思い切った活動を保証する場の実現に取り組まんとことを関係各組織に要望する。

# 惑星研究の課題・将来展望

## 超高層大気・プラズマ環境

### (惑星の熱圏・電離圏)

品川裕之 (名古屋大学太陽地球環境研究所)

## 1. はじめに

地球や惑星の超高層大気(熱圏、電離圏)は、宇宙空間プラズマと下層・中層大気の両方の影響を同時に受けているという点で、非常にユニークな領域である。この領域はオーロラや磁気嵐などの現象や短波を用いた通信との関連から古くから研究がされていたが、本格的な研究は第2次大戦後、ロケットを用いた観測が始まってからと言ってもよい。ロケット観測により超高層の中性大気や電離大気の密度・温度分布の情報が直接得られるようになると、研究が定量的に進められるようになった。1960年代からは、人工衛星を用いて惑星間空間から熱圏、電離圏までの広い領域の直接測定が行われるようになると同時に、地上からのレーダーや光学測定技術が大きく発展し、超高層大気の研究は飛躍的な発展を遂げた。最近では、複数の観測手段を同時に用いた方法により、グローバルに超高層大気の研究が進められている。一方、人工衛星による探査は冥王星を除く全ての惑星に及び、超高層大気の研究も惑星にまで拡張されることになった。現在では、大気を持つ惑星の熱圏、電離圏のデータが直接・間接的に得られている。ここでは、これまでの超高層大気の研究、現状と課題、および将来の展望について、金星と火星の熱圏・電離圏を中心に概要を述べる。

## 2. 超高層大気の特徴

超高層大気は、多くの過程が同時に存在する複合プロセスによって支配されている点に特徴がある。例えば、(1)電磁過程、(2)流体過程、(3)粒子過程、(4)光化学過程、などである。超高層大気の研究によって、それぞれの過程を解明すると同時に各プロセス間の相互作用に関する知識をも得ることができる。もう一つの特徴は、太陽-地球/惑星系は、太陽風から磁気圏、電離圏、熱圏、中層・下層大気までが物理的に結合していて、異なる領域間で強い相互作用過程があるということである。これらの相互作用過程の結果、しばしば単一のメカニズムでは説明できない複雑で興味深い現象が観測される。しかし、一見複雑に見える現象にも、しばしば秩序や規則性が存在し、比較的簡単なモデルで現象を記述することが可能な場合もある。

超高層大気の観測方法としては、ロケットや人工衛星による観測の他、地上から

の様々な種類のレーダー・光学観測などがあり、地磁気なども重要な情報を与える。超高層大気物理学は、これらのデータを総合的に解析し、計算機シミュレーションを中心とした理論モデルを有機的に組み合わせることによって大きく発展してきた。

超高層大気の研究は大別すると2つの見方ができる。一つは実験室的観点である。地球や惑星の超高層大気には、数多くの現象や物理過程が存在しており、その領域を、地上の実験室では実現できない希薄大気・プラズマの実験室と見て、微視的プロセスの理解を目指す観点である。例としては、粒子加速・加熱過程、波動・不安定現象、分子拡散、熱伝導・電気伝導、化学反応、分子・原子間の衝突過程、などがある。もう一つは、大気/宇宙環境学的観点である。すなわち、大気の最上層部あるいは宇宙空間への入口である超高層大気を理解することにより、大気環境/宇宙環境の総合的理解を目指すというものである。宇宙天気(予報)、大気の散逸と進化、下層・中層大気との結合などの分野で、グローバルな視点から盛んに研究が進められている。惑星の超高層大気についても同様の見方をすることができる。これら2つの立場は別々のものではなく、それぞれ関連しており、情報を交換しながら同時に発展している。

### 3 . 惑星超高層大気の研究

惑星超高層大気の研究は、地球で得られた知識を基にして、主に米国とロシアの人工衛星による観測データを用いて発展してきた。初期の惑星探査はフライバイのものが多く、超高層大気の情報も限られていたが、米国の探査衛星 Pioneer Venus Orbiter (PVO) は、金星およびその周辺の空間を1978年から10年以上にわたって探査し、超高層大気とプラズマ領域に関する大量のデータを取得した。これにより、惑星超高層大気の研究が定量的なものとなると同時に、超高層大気分野における比較惑星学的研究が始まったといってもよい。

宇宙空間物理学における最も基本的な問題の一つとして、「太陽風プラズマが惑星大気・プラズマに直接ぶつかるとうどうなるか」というものがある。この問題に関しては、古くからいろいろな理論的予測があったが、実際にPVOが金星超高層大気を直接観測して初めてある程度の理解が得られたと言ってもよいであろう。人工衛星探査以前の理論研究では衝撃波や Ionopause (電離圏界面) のような構造はある程度予想されていたが、実際に観測されたものは想像を越える複雑な構造であった。これは様々なプロセス・領域間の相互作用過程が非線形の現象を生みだしているためである。しかし、観測データを解析してみると、複雑なシステムにも規則性や周期性など特徴的な構造等があり、比較的簡単なモデルで現象をある程度記述できる場合があることもわかってきている。

### 4 . 研究の現状と課題

地上からの観測が困難な惑星超高層大気の研究には、人工衛星による直接観測が不可欠である。惑星超高層大気に関して長期間にわたって観測を行ったのは金星だけであるが、それでもこれまでに得られたデータは地球に比べるとはるかに少ない。金星・地球以外の惑星については、まだ定性的な理解も十分に得られていないのが現状である。地球の場合と同様、衛星による観測は1点（あるいは軌道上）での観測であり、領域間の相互作用が本質的に重要である超高層大気では、グローバルな観測が不可欠である。比較惑星学という言葉が使われ始めてからかなりの年月が経ったが、超高層大気においては定量的な意味での比較惑星学はまだ十分に確立しているとは言えない。地球で得られた研究成果が惑星の理解に役に立っているのは当然であるが、惑星の研究が地球の研究に貢献したという例はまだあまり多くない。以下に、理解が最も進んでいる金星と火星を例に、研究の現状と今後の課題について述べる。なお、金星・火星の超高層大気・プラズマ領域に関しては、多くの良い解説論文が書かれているので、詳細についてはそれらを参照していただきたい[参考文献 1 - 9]。

#### ( 1 ) 金星

前に述べたように、金星の超高層大気はPVOの10年以上にわたる観測によって大きな成果が得られ、現在、地球に次いで理解が進んでいるといってもよい。PVOの観測により、金星には固有磁場がほとんど存在していない（表面で数 nT 以下）ことが確認された。他の惑星には固有磁場（火星では地殻の磁場）が存在するために電離圏のダイナミクスは非常に複雑であるが、金星では固有磁場の影響が無視できるため、太陽風 - 無磁場惑星の相互作用や無磁場中での電離圏プラズマのダイナミクス、エネルギー過程などを調べることができる。

もう一つの発見は、電離圏の構造が太陽風のパラメータによって大きく変動することである。太陽風の動圧が電離圏の最大のプラズマ圧より小さい場合には、Ionopause（電離圏界面）と呼ばれるシャープな境界面を境にして太陽風磁場・プラズマの領域と電離圏が隔てられている。この時、電離圏はシールドされ太陽風の磁場はほとんど入り込むことができない。一方、太陽風の動圧が電離圏プラズマ圧に比べ大きい場合には、Ionopause は低い高度に下がって厚さが広がり、電離圏全体がつぶれた構造になる。この状態では太陽風磁場が電離圏にまで入り込み、さらに大気圏にまで侵入していくと考えられている。この状況での太陽風 - 金星相互作用は、電離圏物理や大気の散逸 / 進化の面からも大変興味深いのであるが、残念ながらPVOでは軌道などの関係から十分なデータが得られなかった。太陽風動圧が強い場合に太陽風が電離圏とどのような相互作用を行うかに関しては、今後、総合的な探査が必要である。

また、PVOではプラズマ速度の測定が十分には行われなかった。したがって、電離圏のダイナミクスが何によって支配されているのかまだ決着がついていない。昼と夜のプラズマ圧の違いによって昼から夜への運動が起きていると考えるのが一

般的であるが、太陽風の運動量が電離圏に直接輸送されている可能性もある。このプラズマ輸送の結果、自転周期の大きい金星でも夜側電離圏が存在しているが、その成因に関しては、夜側での電子の降り込みによる衝突電離も重要であることがわかっている。しかし、夜側電離圏の構造は大変複雑で、特に、電離圏上部は宇宙空間に流れ出している可能性があり、大気の進化にとっても重要である。夜側の磁場・プラズマ構造とその形成メカニズムに関してはまだ推測の域を出ておらず、今後の大きな研究テーマである。

熱圏ダイナミクスに関しては、速度の直接測定はなく、中性粒子の組成と密度から推定されているが、主に昼から夜への流れが卓越していると考えられている。しかし、密度・組成の非対称性などもあり、下層・中層大気の影響や電離圏の影響も重要と思われる。電離圏同様、熱圏ダイナミクスの解明には、中性粒子の密度、速度、温度の測定が必要である。

## (2) 火星

火星の熱圏・電離圏構造に関しては、金星に比べると情報は非常に限られている。1970年代以降、探査衛星による電波掩蔽観測で、電子密度分布についてはある程度のデータが得られているが、電離圏の直接観測のデータは非常に少なく、米国の探査衛星 Viking 着陸船の2回の観測と、最近の Mars Global Surveyor (MGS)の観測のみである。これまでに観測されたイオン・電子密度分布は、静水圧平衡の分布よりもスケールハイトが小さく、太陽風の影響を強く受けていることが示唆されている。また、Viking の観測から電離圏磁場の存在が予想されたが、Viking では磁場の観測がなかったために直接の証拠は得られなかった[5]。

また、火星電離圏では、下層大気の色度が大きく変動し、それにより上層大気の色度「高さ」も変動する可能性が指摘されている。電離圏ピーク高度の変動の原因としては、ダストストームによる下層大気の色度上昇、および重力波や潮汐波の影響が考えられる。このうち、ダストストームの影響に関しては、これまでも下層・中層大気の色熱により火星大気全体が持ち上がり、電離圏のピークの高さが増加する可能性が示唆されている。実際、Mariner 9 の初期の観測では大規模なダストストームが発生し、この時の電離圏のピークの高度は他の期間に観測されていたものより 20-30 km 程度高いことがわかっている。

ロシアの探査衛星 Phobos では、電離圏の直接観測はできなかったが、火星の夜側のテイルで大量のイオンの流出が観測されている。特に、酸素原子・分子イオン、二酸化炭素分子イオンなどといった電離圏起源の重いイオンが大量に流出していることがわかった。その流出量は大気の色熱にも大きな影響があるという報告もあるが、そのメカニズムはまだ謎である[5]。

最近になって、MGS が初めて火星電離圏での磁場を直接測定した[10, 11]。その結果、火星のかなりの部分に地殻起源と考えられる磁場があり、その強度は局所的には電離圏中でも 1600 nT に達するという驚くべきものであった[11]。一方、火星

のコアに起因するグローバルな固有磁場は、数 nT 以下であることも明らかになった[10]。このような複雑な磁場は、電離圏や周辺のプラズマ領域にも大きな影響を及ぼす可能性が指摘されており、現在研究が進められている。しかし、MGS は十分なプラズマ測定器を搭載していないため、太陽風 - 火星相互作用の解明に関しては、あまり多くの成果は期待できない。わが国の探査衛星「のぞみ」は超高層大気の観測を主な目的としており、2004 年に火星に到着する予定であるが、これが成功した場合には、火星超高層大気の研究に飛躍的な発展が期待できる。

### (3) その他の惑星、衛星

金星、火星以外の惑星や、大気を持つ衛星の超高層大気については、観測データが極めて少なく、まだ理解が進んでいない。木星型の惑星の特徴は、強い磁気圏を持っていることと、超高層大気の組成が水素、ヘリウム、炭化水素類、及びそのイオンからなっていることである。初期の研究では、水素原子イオンなどは寿命が長いこと、木星型の惑星電離圏は太陽紫外線が弱くても、地球や金星並みの電子密度程度に達すると考えられていたが、実際にはかなり密度が低いことがわかった。その原因は、木星型惑星には大気を持った衛星やリング等があり、これらから放出された中性粒子やイオン、氷、ダストなどが電離圏に流入するため、化学反応により電離圏イオンを消滅されていると予想されている。また、木星や土星でははっきりしたオーロラが存在が確認されており、極域の電離圏が磁気圏からの電場や、粒子の降り込みの影響を強く受けていると考えられている。地球の磁気圏 - 電離圏相互作用とどのような類似点・相違点があるのかは重要な研究テーマであろう。しかし、超高層大気の定量的研究には、まだデータの量が不十分であり、今後長期間にわたって超高層大気を観測できるミッションが必要である。Io, Titan, Triton のような大気を持った衛星にも電離圏が存在している。電離源としては、太陽紫外線よりも母惑星の磁気圏粒子の衝突電離のほうが重要という指摘もある。木星型惑星の磁気圏と衛星の電離圏・大気の相互作用は、現在注目されている研究テーマの一つである。また、冥王星も大気を持っており、弱いながらも電離圏の存在が予想されている。

## 5 . 将来の展望

### (1) 観測

惑星の熱圏・電離圏領域の定量的研究には、Pioneer Venus のように周回衛星による長期的かつグローバルな観測が必要不可欠である。しかしながら、人工衛星を用いた探査では、地球の場合と同様、基本的に衛星の軌道上の情報しか得られないという問題がある。惑星の電離圏や熱圏は、様々な時間的・空間的スケールで変動しているため、1つの衛星では時間変動と空間変動を明確に区別することが困難である。惑星のプラズマ領域の現象には、エネルギーのインプットである太陽風のパラメータの測定が本質的に重要である。地球では、2つ以上の衛星と地上のレーダー

等の装置を用いて、惑星間空間の状態と磁気圏・電離圏の状態を同時に比較するのが可能になってきている。その結果、磁気嵐やサブストームといった、太陽風 - 磁気圏 - 電離圏系の相互作用に伴う現象が解明されつつある。惑星の場合についても、太陽風が熱圏・電離圏にどのように影響を及ぼすかを定量的に調べるには少なくとも2つ、できれば複数の周回衛星による同時観測が是非必要である。

最近になって、地球においても超高層大気と下層・中層大気の結合の重要性が指摘され始めている。下層・中層大気から伝搬してくる重力波や潮汐波は、下層・中層大気のエネルギーや運動量を熱圏下部まで運び、その運動に大きな影響を及ぼしていると考えられている。近年、地上からのレーダー観測や光学観測の技術が発展し、エネルギー・運動量輸送過程が明らかになりつつある。惑星大気においても、同様の下層 - 中層 - 超高層結合過程が存在すると考えられているが、まだ定量的なデータは得られていない。特に、火星には大規模なダストストームが発生し、下層大気の構造が大きく変動することが知られており、下層大気の上層大気への影響は地球よりもはるかに大きいことが予想される。また、金星も高速の流れが中層大気に存在しており、その運動量の一部が上層へ伝搬している可能性もある。地球に似た惑星である金星と火星について、下層・中層大気と超高層大気を同時観測することにより、地球型惑星大気の鉛直方向の結合過程を総合的に理解できる可能性がある。最近では、上記の流体的な結合の他に、雷を介した鉛直方向の電氣的なつながりも注目されており、地球と惑星と両方で今後研究を進めていく必要がある。

周回衛星に比べ、技術的にはさらに難しいかもしれないが、将来は惑星（あるいは衛星）表面上に観測機器を置き、地球で行われているような惑星表面上からの大気観測を行うことも大きな意義があると思われる。金星では表面温度が高くほとんど不可能であるが、火星や外惑星の衛星などでは可能であろう。その他、宇宙望遠鏡による観測も間接的ながら、オーロラ、大気光、雷活動などの情報をもたらすことが可能であり、衛星観測と組み合わせることによって、超高層大気に関する有益な情報を得ることができる。

## （2）理論研究

惑星の研究には衛星を用いた探査が基本的であるが、同時に理論モデルや数値シミュレーションの研究・開発を進めていくことが重要である。現在、米国を中心に、惑星でも様々な電離圏モデル、熱圏モデルが開発されている。磁場をほとんど持たない金星は、超高層大気・プラズマ環境に関する限り最もシンプルな惑星であり、金星ではすでに太陽風から電離圏までを含む3次元モデルが開発されている[12]。その結果、昼側の電離圏に関しては、グローバルな観測結果をある程度再現することができるようになったが、夜側ではまだ観測されているような複雑な構造は再現できていない。地球や他の惑星でも様々なグローバルモデルが構築されているが、まだ仮定や近似を多く含んでおり、太陽風から電離圏までを現実的な形で自己無撞着に含む数値モデルは未だに開発されていない。

観測機器の急速な進歩によって、地球では大量のデータが得られるようになり、様々な超高層大気現象が見つかっているが、理論的研究はやや立ち後れている感がある。今後、地球と惑星の両方の分野で、計算機シミュレーションを中心に、理論面でも組織的に研究を進めていく必要がある。計算機の性能ではわが国は世界のトップクラスにあり、これらの資源を十分に活かせば、惑星科学の理論分野で日本が世界をリードできる可能性がある。探査衛星の開発に比べれば、計算機のコストは非常に低く、少ないコストで成果をあげることが十分可能である。

惑星超高層大気における研究テーマとしては、大きく分けて以下のものが重要と考えられる。

- ・ 太陽風 - (磁気圏) - 電離圏系の電磁流体力学モデル
- ・ 太陽風 - (磁気圏) - 電離圏系の粒子 (ハイブリッド) モデル
- ・ 太陽風 - (磁気圏) - 電離圏 - 熱圏結合モデル
- ・ 熱圏モデル、電離圏モデル、熱圏 - 電離圏結合モデル
- ・ 熱圏 - 中層大気 - 下層大気結合モデル
- ・ 超高層大気の運動論的 (Kinetic) モデル

### (3) 大気圏の総合的研究と他分野への応用

今後は単に惑星超高層大気の研究にとどまるのではなく、長年にわたって蓄積された知識を、積極的に地球 / 惑星大気圏の総合的研究や他分野への応用につなげていくべきである。

今後研究すべき課題としては、以下のものが重要となる。

- ・ 個々の素過程のより精密な理解 (例えば、大気波動現象、化学反応など)
- ・ 太陽風、磁気圏との相互作用
- ・ 下層・中層大気との相互作用
- ・ 大気環境の変動と大気の進化の研究
- ・ 固体地球 (火山、表層、地形など) との相互作用
- ・ 惑星相互の比較、地球との比較
- ・ 地球大気環境学への貢献
- ・ 宇宙天気研究への応用
- ・ 他分野への応用 (例えば、彗星、星間ガス、原始太陽系星雲、惑星系の形成と進化の研究など)

## 6. まとめ

超高層大気は、下層・中層大気あるいは固体惑星に比べると密度もエネルギーも小さく、惑星環境全体に直接与える影響は小さい。しかし、物理的には、様々な過程が同時に存在する非常にダイナミックな領域であるとも言える。この領域を詳しく調べることにより、多くの情報・知識を得ることができ、いろいろな分野への応



用も可能である。惑星の研究が他分野の研究の発展につながり、それがまた惑星の研究の発展をもたらす形が理想である。そのためには、今後、惑星科学分野と他の研究分野との連携を積極的に進めていかなければならない。

## 参考文献

- [1] Whitten, R. C., and L. Colin, The ionospheres of Mars and Venus, *Rev. Geophys. Space Sci.*, 12, 155, 1974.
- [2] Schunk, R. W., and A. F. Nagy, Ionospheres of the terrestrial planets, *Rev. Geophys. Space Sci.*, 18, 813, 1980.
- [3] Hunten, D., T. Donahue, L. Colin, and V. Moroz (ed.), *Venus*, Univ. of Arizona Press, Tucson, Arizona, 1983.
- [4] Luhmann, J. G., The solar wind interaction with Venus, *Space Sci. Rev.*, 44, 241, 1986.
- [5] Luhmann, J. G., and L. H. Brace, Near-Mars space, *Rev. Geophys.*, 29, 121, 1991.
- [6] Russell, C. T. (ed.), *Venus aeronomy*, *Space Sci. Rev.*, 55, 1991.
- [7] Kieffer, H. H., B. M. Jakosky, C. W. Snyder, and M. S. Matthews (ed.), *Mars*, Univ. of Arizona Press, Tucson, Arizona, 1992.
- [8] Luhmann, J. G., M. Tatrallyay, and R. O. Pepin (ed.), *Venus and Mars: Atmospheres, ionospheres, and solar wind interactions*, *Geophys. Monog.*, 66, AGU, Washington, D.C., 1992.
- [9] Bougher, S. W., D. M. Hunten, and R. J. Phillips (ed.), *Venus II*, Univ. of Arizona Press, Tucson, Arizona, 1997.
- [10] Acuna, M. H., et al., Magnetic field and plasma observations at Mars: Initial results of the Mars Global Surveyor mission, *Science*, 279, 1676, 1998.
- [11] Acuna, M. H., et al., Global distribution of crustal magnetization discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER experiment, *Science*, 284, 790, 1999.
- [12] Tanaka, T., Effects of decreasing ionospheric pressure on the solar wind interaction with non-magnetized planets, *Earth Planets Space*, 50, 259, 1998.

# 超高層大気・プラズマ環境

町田 忍

京都大学大学院理学研究科 地球惑星科学専攻

## はじめに

地球の電磁圏の静的構造や動的構造を決定する上で、太陽風との相互作用が本質的な役割を果たしているのは疑う余地がない。同様に、惑星電磁圏の静的・動的な構造を決定する上で、太陽風の果たす役割を理解することは極めて重要であると考えられる。惑星における太陽風の役割を理解することによって、地球に対する現在のわれわれの理解・研究がさらに進展がすることが期待される。

太陽風を特徴付けるパラメーターとしては、惑星間空間磁場 (IMF) の向きがある。地球では、これが南向きになった時に昼間側磁気圏境界で磁気再結合がおり、太陽風のエネルギーが磁気圏の中に盛んに取り込まれることが知られている。また、もう一つの重要なパラメーターとして太陽風の動圧がある。それが増大すると磁気圏全体が圧縮され、磁気圏境界面を流れる電流が増大することに端を発し、磁気圏の大局的な構造変化が活発になる。これらの性質は、恐らく固有磁場をもった惑星、すなわち、水星・地球・木星・土星・天王星・海王星・(冥王星)で共通であることが想像される。それに対して、金星や火星では惑星の固有磁場が微弱なために、太陽風の動圧と惑星の電離大気の静圧がつりあって相互作用を行っている。火星の南半球の局在化した部分では、惑星表面の地殻物質の帯磁に起因する磁場の持つ圧力と太陽風動圧がつりあっていて、地球型の相互作用が行われていると考えられるが、基本的には金星型とここでは考える。以下、順番に地球型と金星型のものに分け、それぞれで、どの様に太陽風と相互作用を行うかという観点で話を展開してゆく。

## 地球型電磁圏と太陽風の相互作用

この型の惑星 (水星・地球・木星・土星・天王星・海王星・(冥王星)) では、昼間側磁気圏境界面で起こる IMF と惑星磁場の再結合が重要である。地球においては、その結果として夜側磁気圏に磁場の形で蓄積されたエネルギーが、再度、夜側の磁気圏尾部でおこ

磁気再結合などによって解放されるシナリオが確立されており、その際に引き起こされる数々の変動はサブストームと呼ばれている。同様の現象が他の惑星でも起こることが期待されるが、唯一、確実にその存在が認められているのが水星である。その根拠は、米国の探査機マリナー10号が水星の夜側磁気圏を通過する際に、夜側に引き伸ばされていた磁場が、約5分程の間隔で元の双極子型の磁場に戻る現象が観測されたことで、この時、同時に高エネルギー粒子のバースト現象が観測された [Christon, 1987]。水星に周回衛星を飛行させて、長期にわたる観測を実施すれば、高い科学成果を挙げることは間違いない。是非、近い将来、我が国を中心とした水星の探査計画が実現されればと考える。また、強い固有磁場をもった惑星として知られる木星も電磁的に非常に活発であり、興味深い研究対象である。次に、この惑星について取りあげたい。

木星の位置（太陽中心より約5 AU）では、太陽風の非線形的な発達が著しく、大きな太陽風の動圧変動をもたらされる。そのために磁気圏境界面の位置は、この大きな太陽風の動圧変動に呼応して、顕著に変化する。現に、図1に示す様に、その位置は木星の中心から太陽方向に木星半径の50 - 100 倍の範囲で大きく変動する [Schardt and Goertz, 1983]。明らかに太陽風の動圧が磁気圏の大きさを極端に変え、大規模な構造の変化を引き起こしている。しかし、その一方で、惑星間磁場の方向に対する応答という観点からは、地球でみられる IMF が南向きで昼間側の磁気再結合が活発化する様な内容の話は、まだ観測事実として報告されていない。木星磁気圏への運動エネルギーの供給は唯一、木星本体の巨大な回転によっているという立場の考えもある。従って、昼間側の磁気再結合によって、木星の夜側磁気圏尾部に磁気エネルギーが蓄積され、それが、突然、あることを契機とし

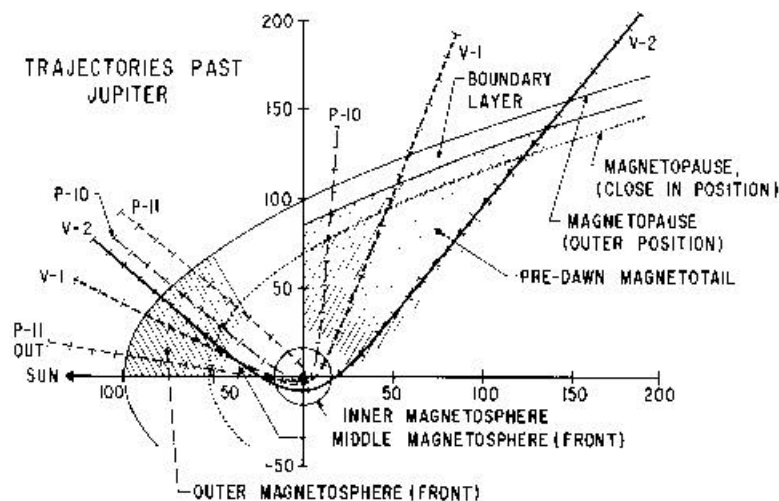


図1：木星磁気圏の赤道断面図、磁気圏境界面の形が太陽風の動圧が非常に高い時（内側）と低い時（外側）に対して描かれている。

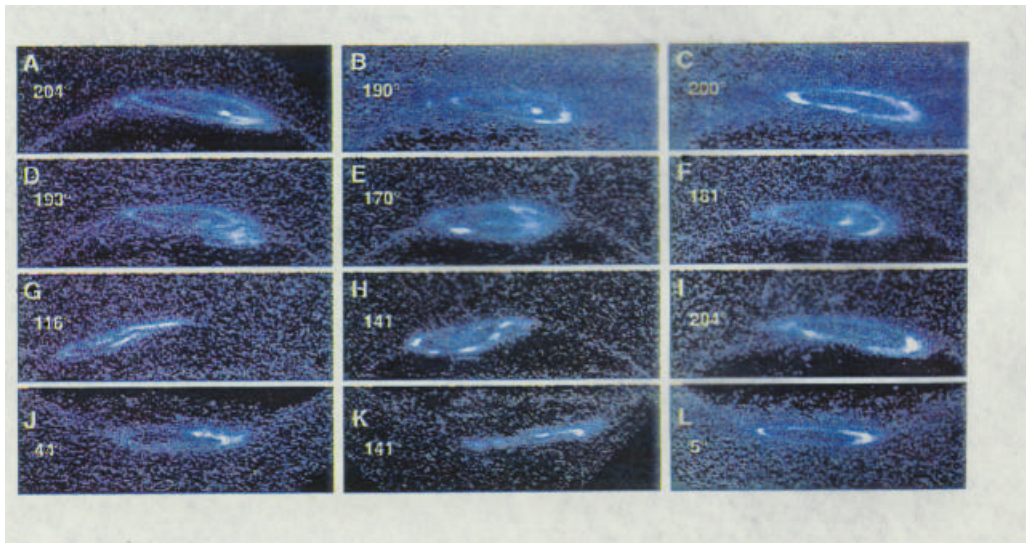


図2：ハッブル宇宙望遠鏡（紫外線）でとらえた木星のオーロラ。（J.K. I）は南極、それ以外は北極に出現したものである。

て粒子の運動エネルギーや沿磁力線電流を介在した電離圏へのエネルギー輸送という地球・水星で考えられているサブストームのシナリオが適用されるものか、依然、謎のままである。今回の学会では、3次元のMHDシミュレーションによって、木星でサブストームが発生し、それに伴う粒子加速過程・プラズモイドの形成がみられるという内容の興味深い研究発表があった [Miyoshi and Kusano, 1999]。今後の進展に注目したい。

また、木星ではガリレオ衛星のひとつであるイオから大量の中性粒子が、衛星表面で起こるスパッタリングやイオの火山活動によるガス噴出により、磁気圏に供給されている。この中性粒子は電離されて木星磁気圏の重要なプラズマの供給源となっている。イオを源とする中性および電離ガスはイオの軌道に沿って分布してトーラス状の構造を形成しており、 $S^+$ 、 $S^{++}$ などのイオン、また、Na、Kなどの中性粒子は地上の望遠鏡などによって観測されている。また、最近では、 $H_3^+$ イオンを赤外線の波長領域で、木星の極冠域やイオにつながる磁力線の付け根の部分撮影することなども行われている [Connerney et al., 1993; Satoh et al., 1996]。さらに、紫外線領域の観測では、図2に示す様に、地球と同様な極冠域を取り巻く様な形でオーロラの発生する姿がとらえられている [Clarke et al., 1996]。

木星では、地上や衛星による撮像観測によってグローバルな空間構造や時間変化をとらえながら、衛星による直接観測を実施し、巨視的な過程と微視的な過程を結びつける研究を実施することが確実にできる。考えてみると、このようなことは地球では光学的な薄さのために実現不可能である。それが場を変えて、木星で実現することができる。この点で、非常に魅力的な研究対象と考えている。

### 金星型電離圏と太陽風の相互作用

金星はよく知られている様に、固有磁場を持たない惑星である。また、火星も固有磁場が殆どなく、基本的には金星と同様、太陽風が惑星の大気に直接衝突して相互作用を行う。しかし、このような状況でも、太陽風磁場の向きは相互作用の仕方に大きな影響を及ぼしている。すなわち図3に示す様に、IMFの方向と太陽風のベクトルが平行な時は  $E = -V \times B$  の関係から与えられる電場は、惑星に静止した系ではゼロとなる。ところが、それ以外の場合、特に  $V$  と  $B$  が直交する場合には大きな電場が惑星の系で存在することになる。惑星電離圏に起源をもつ酸素などのイオンは、この電場によって効率良くピックアップされて太陽風に取り込まれて逃げ去ってゆく。この過程では、先ず最初にイオンが電場の方向に運動をするという性質のために、面白いことに、ピックアップされたイオンの密度が電場の指す方向に偏るといふことがおこる。酸素などのイオンの質量は太陽風の主成分である陽子の質量の十数倍もあるために、少量でもその運動論的な効果は非常に大きく重要である。現に、そのため、図4にみられる様に、金星では Ionopause の高度が、電場の方向と、その逆の領域で大きく異なることが PVO の観測から判明した [Phillips et al., 1988]。

また、ここでは示さないが、バウショックも IMF の向き (電場の向き) に依存して軸対称からずれた構造を示すことが報告されている。IMF の方向は時々刻々と変化するので、Ionopause や Bow Shock の位置もそれにつれて、時々刻々と変化しているはずである。この変動が、金星電離圏の熱的プラズマの運動にいかなる効果を与えているのか興味深い。酸素イオンの空間分布を撮像によってとらえれば、電場、すなわち、IMF の方向の変化に呼応して、酸素イオンの発光強度と空間分布が変化することが期待される。IMF と太陽風プラズマの観測を行いながら、酸素イオンの撮像を同時に実行しようとする試みは、将来の金星探査において、胸が躍る様な面白い挑戦ではないだろうか？

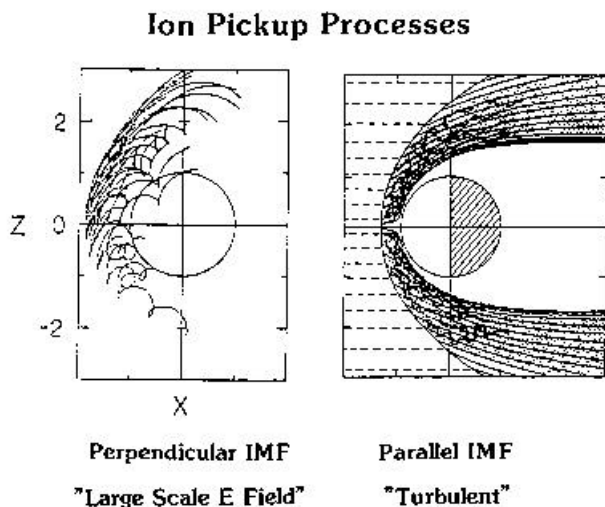


図3：太陽風磁場が太陽と惑星を結ぶ直線に対して垂直な場合(左)と平行の場合(右)。左の場合にはピックアップイオンの運動方向に偏りが生じる。

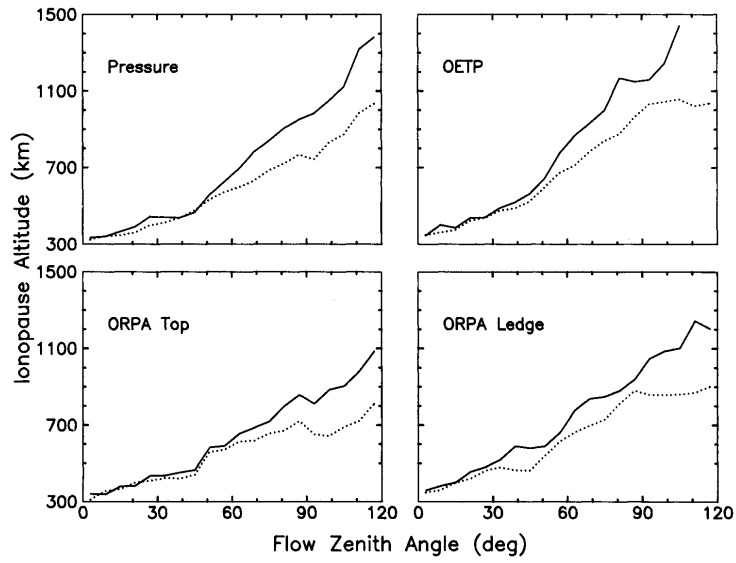


図4：金星探査機 Pioneer Venus Orbiter によって求められた平均的な Ionopause 高度。実線が電場と逆方向、点線が電場の方向に対応し、Ionopause 高度が天頂角に対してプロットされている。4種類異なる Ionopause の求め方について結果が示されている。

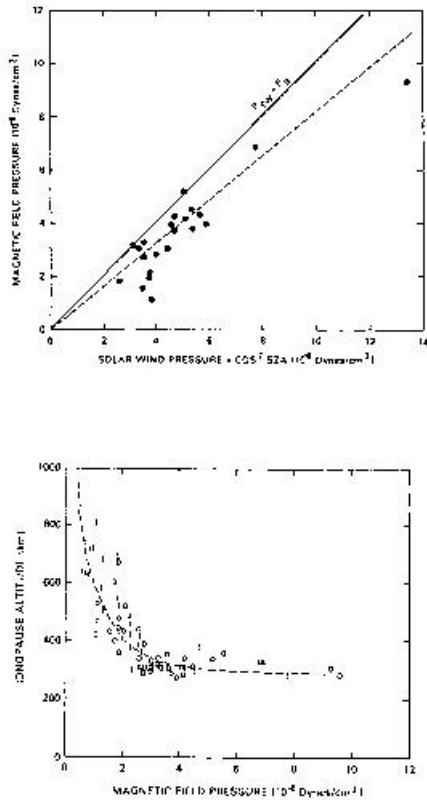


図5：金星探査機 Pioneer Venus Orbiter によって求められた Ionopause 付近の太陽風動圧と磁気圧の平衡の関係（上）および磁気圧と Ionopause 高度の関係。

一方、太陽風の動圧が増大した時には、金星型の惑星で、どのような変化が期待されるのでしょうか？ 従来、この点についてあまり考察されていなかった感がある。PVO の観測によると、太陽風の動圧の変動によって、スケールハイトはあまり変化しない。図 5 に Brace et al. [1980] によって求められた太陽風の動圧、Ionopause 周辺の磁場の圧力、熱的なプラズマの静圧の関係が示してある。金星の Ionopause 周辺における圧力の釣り合いは、先に述べた様に、若干複雑な過程が入り込んでいて、惑星電離大気の上層部分に太陽風の磁場がまとわりついて、その磁気圧が上流の太陽風の動圧とつりあい、また下流のプラズマの静圧ともつりあっている。しかし、結局、太陽風の動圧と下流のプラズマ静圧がつりあうかたちになっているので、図からわかる様に、太陽風の動圧が相当量変化しても、Ionopause は僅かに高度を下げるのみで、新たなバランスを成立させる。これを理解するための議論において、決定的な何かを見落としていることが、しばしば指摘されるが、おそらく、それは太陽風が下流側に侵入する際の荷電交換反応やイオン-中性粒子間などの衝突過程によるプラズマ運動方程式の衝突項の寄与であろう。その点を正しく理解するためにも、酸素イオンの精密な観測を実施するべきである。太陽風動圧が上昇した際に、Ionopause 付近の発光強度の上昇が検出されるかも知れない。また、最近開発の進んでいる高速中性粒子撮像観測の手法によっても、荷電交換過程を介したピックアップの様子がとらえられるかも知れない。これらの観測は未解明な基礎過程の研究に大いに役立つであろう。

金星の夜側にはプラズマテイルが形成されている。この領域でも地球にみられる様なプラズマの対流が存在するのであろうか？ もしも対流運動があれば、それは金星のプラズマテイル内に電圧・電流源が存在することと等価なので、金星のテイル領域と電離圏を結ぶ沿磁力線電流が存在するはずである。金星の夜側には、図 6 に示す様に、酸素の 130.4nm の波長で、発光現象が観測された [Phillips et al., 1986]。それと関連した金星電離圏-テイル領域を結ぶ 3 次元的な電流の構造はいかなるものであろうか？

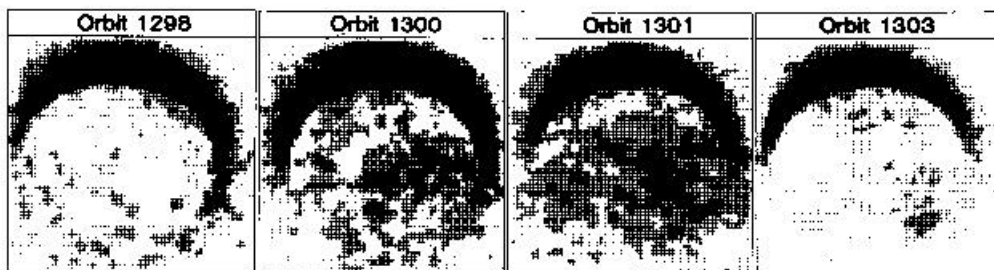


図 6 : 波長 130.4 nm でとらえた金星夜側の発光 (オーロラ) 現象。

## まとめ

地球型の惑星の代表として水星・木星についてふれ、また金星型惑星については金星そのものについて説明を行なったが、いずれにおいても太陽風と惑星電磁圏の相互作用が重要である。すなわち、IMF の方向および太陽風動圧の変動が両者のカテゴリーの惑星において、地球と同様、非常に重要なパラメーターである点を強調したい。惑星磁気圏と電離圏の結合という視点に立った研究も、地球では非常に詳細な議論が展開されているにもかかわらず、他の惑星では、殆ど手つかずのまま残されている。これらを本格的に解明するために、将来、ぜひとも我が国が中心となった惑星探査計画を実施すべきである。水星・木星・金星など、いずれの惑星の探査計画においても、実行にあたっては太陽風をモニターするための衛星を1機、それから惑星電磁圏を直接探査するための衛星を1機飛行させるべきである。過去の惑星探査計画において、われわれは、太陽風のパラメーターの重要性を認識しながらも、常にこの点が、おざなりにされてきた。そのために、われわれが真に地球で学んだ事柄との比較という点で、深い検討や議論を行うことができなかった。また、遠方で太陽風をモニターする衛星には、撮像衛星としての位置付けもあわせて行い、惑星オーロラや惑星電磁圏プラズマの撮像観測、さらに高速中性粒子の撮像観測など、最新の技術を導入して計画を実施するべきであろう。そうして、地球では光学的な薄さのために、到底実行できないことを惑星を新たな舞台として展開してゆくことを、ここに提案したい。

## 参考文献

- Brace, L. H., et al., J. Geophys Res., 85, 7663, 1980.
- Christon, S. P., Icarus, 71, 448, 1987.
- Clarke, J. T., et al., Science, 274, 404, 1996.
- Connerney, . E. P., et al., Science, 262, 1035, 1993
- Miyoshi, T, and K. Kusano, 第 106 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演予稿集 A21-04, 1999.
- Phillips, J. L., A. I. F. Stewart, and J. G. Luhmann, Geophys. Res. Lett., 13, 1047, 1986.
- Phillips, J. L., J. G. Luhmann, W. C. Knudsen, and L. H. Brace, J. Geophys. Res., 93, 3927, 1988.
- Satoh, T., J. E. P. Connerney, and R. L. Baron, Icarus, 122, 1, 1996.
- Schardt, A. W., and C. K. Goertz, in Physics of the Jovian Magnetosphere, edited by A. J. Dessler, p157, 1983.