

惑星気象探査の将来

今村 剛 (宇宙科学研究所)

1 多地点同時観測の必要性

他惑星の気象を理解しようとする動機は様々である。第一に、惑星の環境や気候を支配する一要因としての気象プロセスを理解したいという惑星科学的興味がある。大気内部の事情が決めるアルベドや熱輸送や物質循環が、惑星の気候を決め、表層環境の変遷を左右する。このような観点から、最近の一連の火星探査でも気象観測は重要視されている。また、様々な境界条件のもとでの流体運動を統一的に理解したいという気象学的・流体力学的興味もある。惑星大気の運動には非常に多様性があるが、まともに理解できているのは地球だけである。また、ただ単に縞縞や渦巻きがきれいなのでもっとよく知りたいということもあるだろう。いずれの場合にも必要な観測戦略は同じで、それは多地点で同時に観測することである。

惑星（金星、地球、火星、木星型惑星）の風系は知られているかぎりでは第一近似として軸対称の流れ、すなわち東西風である。東西風パターンは、様々な水平スケール（10 - 10000 km）の大気擾乱（波や乱流）と子午面循環による角運動量輸送の結果として生ずる。一般に子午面循環（鉛直方向、南北方向）は遅く、擾乱だらけの大気運動を長期間平均した小さな残差である。擾乱と東西風パターンと子午面循環は互いに拘束・励起しあっていて切り離せない。

このようなわけで、平均的な循環パターンを理解するにも小規模な波や渦の一つ一つを捉えてその役割を明らかにしなければならない。そのためには限られた地点の観測では駄目で、多地点のデータを同時に得る必要がある。地球では当たり前のように行われているこのようなアプローチが他惑星では乏しい。その結果として、金星大気のスーパーローテーション、火星のダストストームのオンセット、木星大気深部の高速風など、本質的な問題がまだ理解されていない。

2 多地点同時観測の方法

多地点の大気パラメータ（風・気温・気圧など）を同時に観測するには、直接探査プローブを沢山ばらまくというのが最も素直である。継続的なデータが欲しいので、ランダーならば地表面に到達してからしばらく観測を継続する。気球なら風に流されながらラグランジュ的に大気運動を観測する。前者のような観測は Viking 火星ランダーにより、後者のような観測は Vega 金星気球により、いずれも 2 機編成で行われた。これらの探査は多くの知見をもたらしたが、2 点観測では多分に地球気象の先入観に頼らざるを得なかった。

小型のプローブを大量に（10 - 100 個）ばらまいて同時に働かせられれば理想であり、今後の一つの方向である。装置の小型化だけでなく、多数のプローブと通信を確保する技術が必要になる。地球磁気圏探査においてはそのような計画が米国を中心に検討されている（Constellation mission）。ただし惑星探査では 1 機を大気圏に突入させるだけでもかなり大掛かりなミッションであり、多数のプローブによる探査を近い将来に実現できるかどうかはわからない。

もう一つの方法はリモートセンシングである。惑星周回軌道あるいは地球の望遠鏡から様々な波長域で分光・撮像観測を行い、気温・雲・微量気体・風速などの全球的な分布を継続的にモニターする。測定可能な物理量は限られるが、広い範囲をほぼ同時にカバーできるメリットは測り知

れない。地球ではたとえば気象衛星が静止軌道から雲の分布や雲頂温度や水蒸気分布などを常時観測している（図1）。気温や微量気体の観測では米国の UARS 衛星が記憶に新しい。その他、降雨レーダ観測、海面高度観測など、様々な地球観測衛星が実現されている。

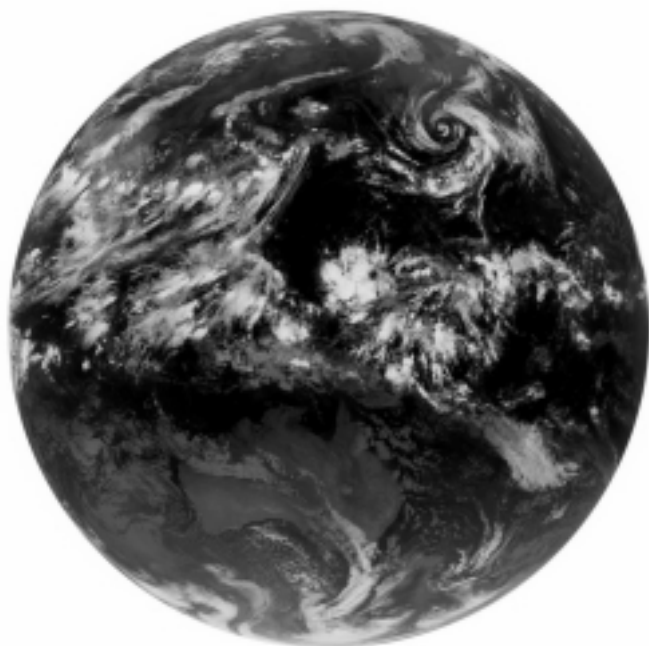


図1 気象衛星ひまわりが波長 $11\ \mu\text{m}$ の赤外光で撮像した地球。対流圏の雲の水平微細構造が見える（明暗反転してあるので明るい部分で雲が厚い）。このような撮像を連続的に行うことにより大気の流れや雲の生成消滅を可視化している。

リモートセンシングは惑星探査においては初期の頃から行われている。取得できる情報は今後も増えていくだろう。同じ波長でも、その惑星への理解が進むごとに、また新しい光学機器が開発されるごとに、違う物理が見えるようになる。たとえば後で述べる金星探査計画では、Pioneer Venus 以後明らかになった大気の「窓」波長領域で、高い空間分解能の観測を行うことにより、これまで見えなかった下層大気の擾乱を可視化することを目指す。

3 金星周回衛星計画

以下では将来の惑星気象探査の一つのモデルケースとして、金星探査ワーキンググループによって検討が進められている金星探査計画を紹介する。電離圏プラズマ観測やレーダーサウンダ - 観測も予定しているが、ここでは光学リモートセンシングによる気象観測に話を限る。計画はまだ承認されていないが、2007年のウィンドウで探査機を打ち上げることを目指している。

3.1 計画の概要

金星がなぜ地球と極めて異なる環境に保たれているかという興味深い問いはまだ答えられていない。その理由の一つは、そもそも金星の環境がどのような物理に支配されているのかよくわかっていないことである（図2）。たとえば日射・大気組成・地面組成・惑星の自転速度などのパラメータが与えられたとき、雲の分布やアルベドや風系や大気の熱構造がどのように決まるのか、我々は知らない。

惑星の環境を決めるプロセスの一つが大気循環である。金星では、固体惑星の西向き自転速度を遥かに超える西向き風が大気全層で吹いていて、スーパーローテーションと呼ばれている（図3）。土星の衛星タイタンも同様の風系を持ち、自転の遅い惑星に普遍的な気象形態である可能性があ

るが、その発生メカニズムはわかっていない。波や乱流や子午面循環がこの風系を作り上げるものと思われるが、そもそもどのような気象現象が存在するのか知らないのでお手上げである。いくつか仮説はあるが数値実験で再現しようとするとうまくいかない。地球で言えば、なぜ偏西風があるのかわからないようなもので、極めて初歩的なところでつまづいていると言える。厚い大気を横切る鉛直方向の熱や物質の輸送がどうなっているのかもわからない。金星大気研究は 20 年来停滞期にあり、新しい観測によるブレイクスルーが待たれている。

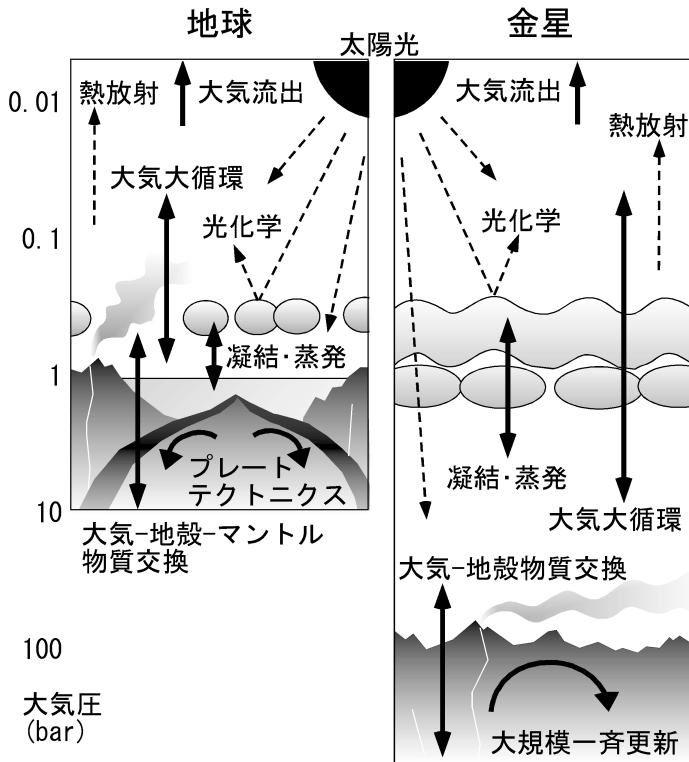
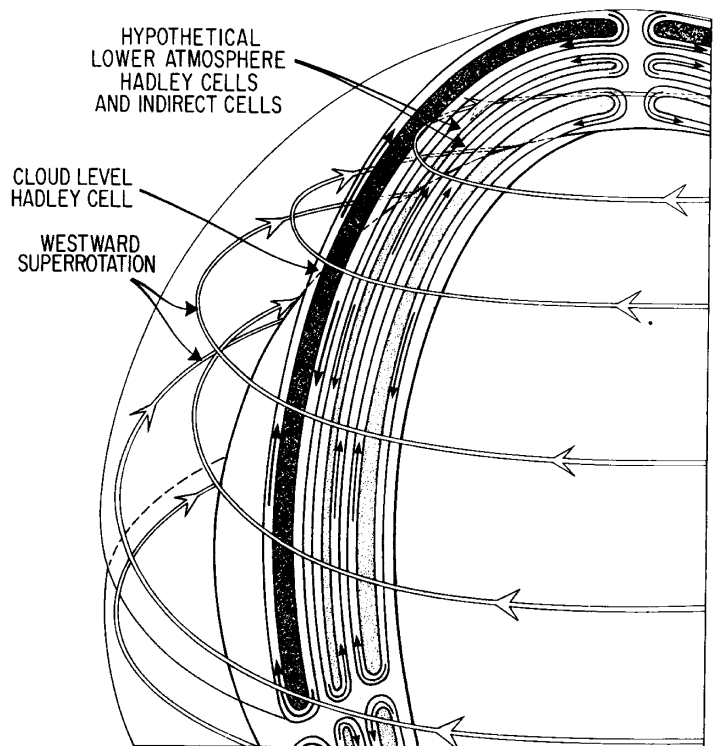


図2 地球と金星の環境を決める要因。気相・固相・液相の間で様々な時間スケールの相互作用や相互変換が起こっている。地球型惑星の環境を理解するためにはこれらの間のフィードバックを一つずつ解き明かしていく必要がある。

図3 金星大気循環の概念図 (Schubert 1983)。東西風速は高度 70 km 付近で最大 100 m/s に達する。固体惑星の自転は周期 243 日と遅く、大気は地面より最大 60 倍速く回転している。子午面循環（ハドレー循環および間接循環）は、大気が厚いのでこの図のように複数のセルが積み重なるといふ考えがあるが、今のところ空想にすぎない。



過去の観測で欠けていたのは多地点のデータを同時に得ることである。プローブ投下による直接探査が何度か行われたが、先に述べたように1点の観測では不足である。オービターから全球的なりモートセンシングも行われたが、対象が成層圏エアロソル層およびそれより上の領域に限られたために、金星気象の中心となる対流圏（雲層高度以下）の様子はわからなかった。

ところが近年、近赤外の幾つかの波長域（ $1\mu\text{m}\cdot 1.7\mu\text{m}\cdot 2.3\mu\text{m}$ ）で金星の下層大気や地面まで見通せることが明らかになり、状況が変わりつつある（図4）。ここで提案する観測プランは、そのような近赤外での分光撮像を軸に、多波長で3次元的な多地点同時観測を周回衛星から実現しようとするものである（表1）。この計画ではとくに、数金星半径以上の距離から上部対流圏の雲の水平微細構造を連続撮像することによって流れ場を可視化することに重点を置いている（図5）。このような発想の本格的な気象観測を他惑星で展開するのは本計画が初めてのものである。

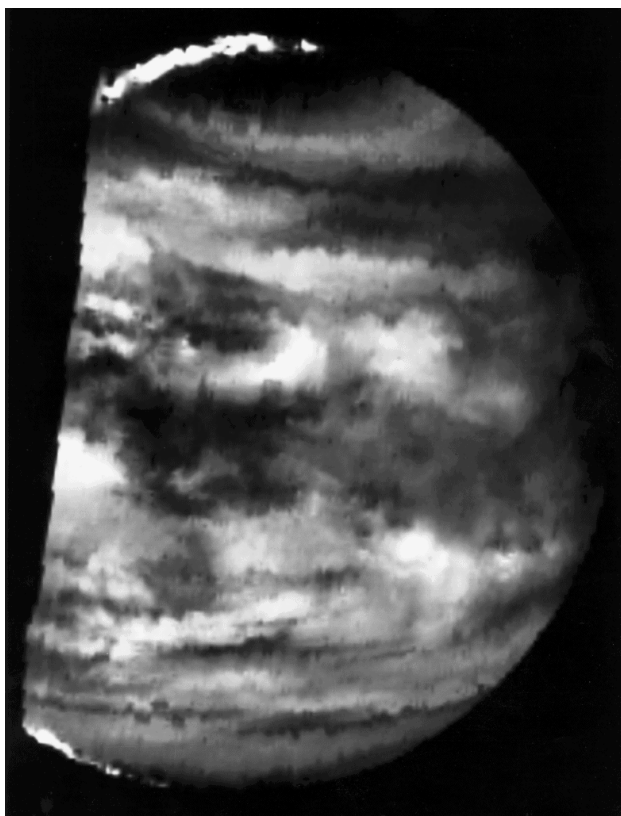
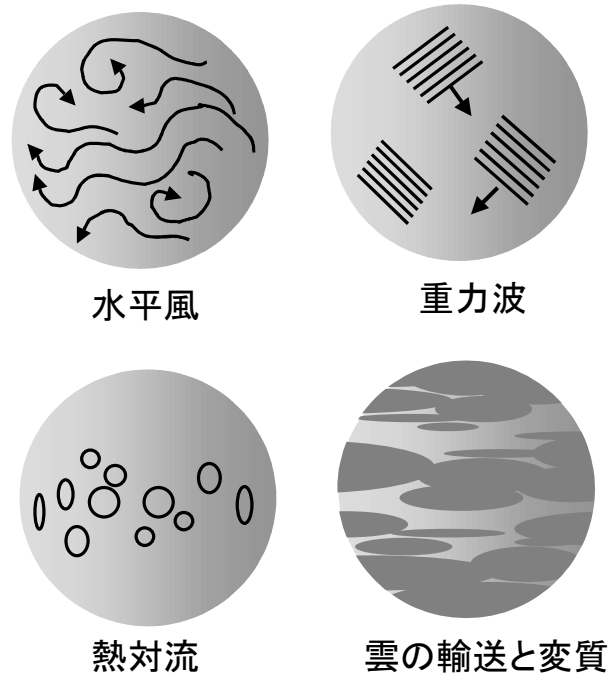


図4 Galileo 探査機が金星フライバイの際に波長 $2.3\mu\text{m}$ の近赤外光で撮像した金星夜側の熱放射。上部対流圏の雲の水平微細構造が見える（暗い部分で雲が厚い）。近赤外の幾つかの波長域で金星大気は透明であり、このように下層からの熱放射を見ることができる。Galileo 探査機は一瞬の姿を捉えたただだが、このような撮像を連続的行えば大気の流れを手にとるように見ることができるはずである。

表1 金星周回衛星計画で検討されている光学気象観測

対象領域	高度	観測対象	波長	放射の種別
上部対流圏	45-55 km	下層雲	近赤外	熱放射・太陽散乱光
下部成層圏	65-70 km	雲アルベド 雲頂温度	紫外 中間赤外	太陽散乱光 熱放射
成層圏	70-90 km	気温	中間赤外	熱放射
対流圏	0-65 km	雷放電	可視	雷発光
対流圏	0-65 km	大気組成分布	近赤外（地上観測？）	熱放射
下部熱圏	90-100 km	大気光	可視 - 近赤外	蛍光
地表面	0 km	火山・emissivity	近赤外	熱放射
対流圏 - 成層圏	35-90 km	気温・硫酸蒸気・乱流	GHz 帯（電波掩蔽）	探査機電波

図5 近赤外の高空間分解能連続撮像によって可視化する金星上部対流圏の大気運動。水平風は小規模な雲の追跡によって、内部重力波や熱対流は雲の生成消滅から観測可能である。複数チャンネルの画像から雲の粒径情報も得られる。



3.2 科学目標

3.2.1 スーパーローテーションの成因

大気の高速回転を引き起こす角運動量輸送を解明するために図6の2つのプロセスを探る。

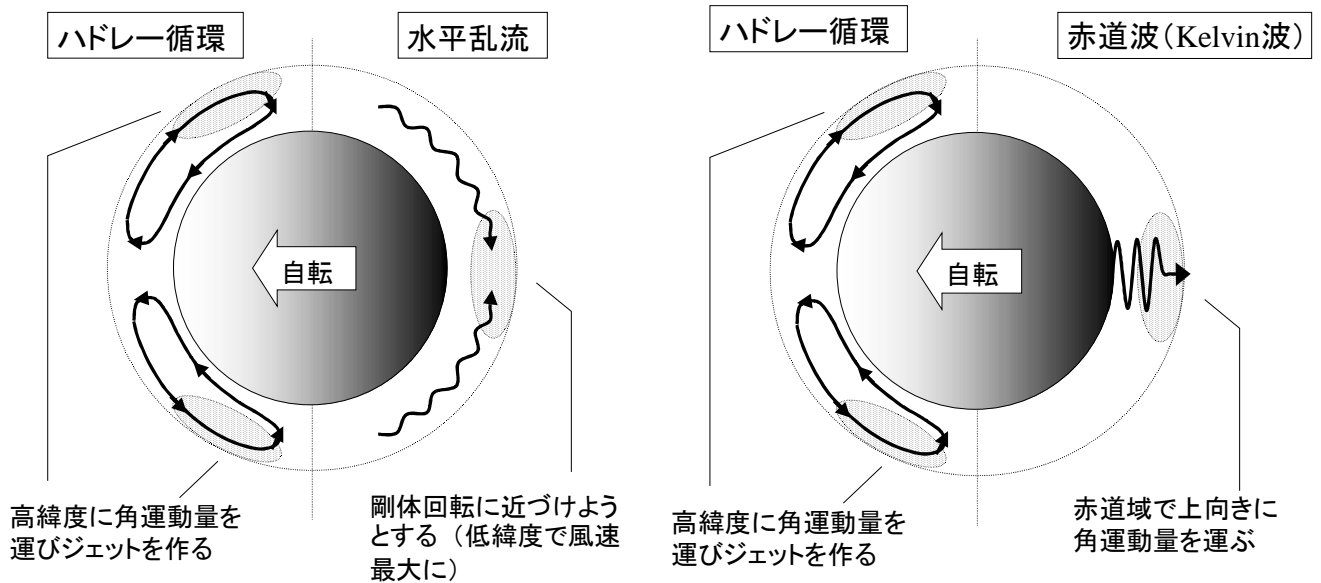


図6

(左) 水平乱流とハドレー循環によるスーパーローテーション生成。ハドレー循環に伴う上昇流が赤道域で角運動量を運び上げ、そのあとハドレー循環に伴う極向き移流で中高緯度に押し流されていく角運動量を、水平スケール 100-1000 km の水平乱流が赤道域に戻す。これら2つのプロセスが同時に働けば、正味で上向きに角運動量が汲み上げられる。

(右) 惑星スケール波動によるスーパーローテーション生成。東向き角運動量を持つ波が角運動量を運び上げる。“雲頂のY字模様”として観測される赤道 Kelvin 波（と思われる）が候補である。

前者の戦略としては、水平乱流を構成する個々の渦による赤道向き角運動量輸送がどのようなサイクルで繰り返すか、その結果として各緯度帯の東西風速がどのように変動するか、を明らかにする。また長期間の統計から水平乱流とハドレー循環による平均的な角運動量輸送を評価する。後者の戦略としては、波の 3 次元構造から波による角運動量輸送を明らかにする。波の盛衰に伴って東西風速がどのように変動するか明らかにし、また長期間平均の角運動量輸送を評価する。現象の特定および定量は風速場（近赤外・紫外撮像）と気温場の観測より行う。

3.2.2 対流圏気象サーベイ

大気循環を理解するためにはそもそも大気中にどのような気象現象が存在するのか知っていなければならないが、高速回転しているということ以外にはほとんど何もわかっていない。そこでサーベイ観測を行い、対流・内部重力波・高低気圧・シア不安定といった 10 - 数 1000 km のスケールの現象がどのように分布するのか明らかにし、その発生メカニズムと大気循環における役割を探る。現象の性質は次の観測から特定する。

- 風速場
- 気温・大気安定度
- 雲の生成消滅
- 雲層より下の微量気体分布およびその変動
- 雷発光
- 乱流強度

3.2.3 上層大気循環のメカニズム

Pioneer Venus Orbiter の観測によれば、金星の上層大気（高度 100-200 km）の夜側大気密度は 1 周回（約 24 時間）のうちに 1 桁にも達する激しい変動をしている。上層大気の激しい変動は、気象学的興味にとどまらず、大気流出など大気の長期的変遷を支配するプロセスにも影響していると予想される。下層の気象現象が大気波動を通して上層大気に影響を与えるなど、異なる高度領域を結ぶメカニズムを以下の観測から探る。

- 対流圏の気象
- 熱圏の風・密度・気温・波状構造（オービターで直接観測）
- 成層圏気温の微細構造
- 大気光の波状構造

3.2.4 雲プロセス

金星の濃硫酸の雲は、上層は主に光化学、下層は主に大気力学に支配され、互いに原料物質やエネルギーの交換を通して密接に関連すると考えられる。雲の分布と、雲化学の結果としての可視・紫外吸光物質の分布が、金星への太陽光エネルギー入力を決める。金星から宇宙空間に放射される熱エネルギーは雲の分布と気温で決まる。雲の分布はこのような熱収支の結果としての大気運動に支配される。金星の気候システムを理解するためにはこれらの間のフィードバックを明らかにする必要がある。以下の観測量の変動の相関から、雲と熱収支を支配する物理を探る。

- 雲の生成消滅
- 雲の原料である硫酸蒸気の分布
- 吸光物質および雲アルベド
- 宇宙空間への熱放射の分布
- 風速場
- 乱流強度
- 気温・大気安定度

3.2.5 地表面プロセス

下層大気観測用の近赤外センサは波長 1 μm 付近では地表面の観測も予定している。長い時間スケールの気候の変遷やバランスを知るには大気-地殻間の物質交換を明らかにする必要がある。ところが金星は厚い大気に阻まれているために、現在の火成活動レベルや活火山の有無

すらわかっていない。また電波領域の emissivity（放射率）に顕著な標高依存性があることから大気-地殻化学相互作用による特殊な風化が進行すると考えられているが、その実態は不明である。そこで波長 1 μm 付近で次のような観測を実施する。

- 地表面熱放射から emissivity 分布を導出
- 熱い溶岩からの熱放射を検出することにより活火山探索

得られた近赤外 emissivity の非一様性が電波領域の emissivity の非一様性とどのように対応しているかを調べ、従来の電波領域の観測だけではわからなかった風化プロセスに一層の制約を与える。また、地表面からの光を観測できる波長 1 μm 付近で Fe_2O_3 など金星表層の酸化還元状態に敏感な鉱物がスペクトル構造を持つので、このような鉱物の分布を観測して表層環境の化学や変遷の有益な情報が得られる可能性がある。

活火山を検出した場合のインパクトは測り知れないが、たとえ見つからなくても火成活動レベルに制約を与えられる。1000 K の熱い溶岩なら 10 km スケールまで検出可能である。

4 前哨戦 - 「のぞみ」

私たちはまだ惑星探査の経験がない。軌道投入後、探査機の位置と姿勢を正確に把握し、事前に練り上げた計画に従って複数の撮像機器を次々にポインティングして連続撮像し、地球に転送したデータを較正ののち惑星上にマッピングし、画像解析によって大気の変動を可視化する。そのようなことがどこまでできるか、まず「のぞみ」の火星探査で試されることになる。「のぞみ」は気象観測に最適化された探査機ではないが、可視カメラ・大気光イメージャー・電波オカルテーションなどで大気の情報取得する予定であり、ダストストームや霧など気象現象の解明も科学目標に含まれる。下層気象リモートセンシングと上層大気直接観測の比較による上下結合解明というユニークな科学は「のぞみ」ならではである。まずはこの火星探査を乗り切り、その経験を将来のミッション（金星探査、木星探査...）の観測戦略に生かしていくことが重要である。

固体惑星

阿部 豊 (東京大学大学院理学系研究科地球惑星物理学専攻)

1. 特徴

ここでは太陽系内の比較的大きな固体天体、地球型惑星、月、氷衛星といったものを念頭に置いて考える。小惑星以下のサイズの天体はいろいろな意味で大型の天体とは異なる面があるので、ここでは考えない。また、隕石も固体ではあるが、ここでは隕石の研究についてもふれない。

固体惑星(あるいは惑星内部)の研究は、惑星電磁圏や惑星大気と比較した場合、一つの特徴がある。それは固体惑星の諸観測事実は、全てその惑星の進化史を反映しているという点である。電磁圏や大気では、大気量や大気組成は確かにその惑星の進化史を反映しているが、そのような例外を除けば、観測される様々な現象は現在の惑星の状態を反映していて、その惑星の歴史を反映してはいない。これは電磁圏や大気圏で生起する現象の時間スケールが基本的に短いためである。それに対して、固体惑星部分では現象が基本的に「地質学的」長時間をかけて起こるために、現在の観測量であっても必然的に過去の歴史を反映している。したがって固体惑星科学においては「現在」の研究と「起源」「進化」の研究は不可分のものになっている。

2. 課題

一般的に惑星研究に関しては2つの興味があると思われる

- ・個々の惑星の様々な謎の解明
- ・比較惑星研究

前者の立場は個々の惑星に見られる謎を個別の問題として解決しようとするものである。通常の地球科学研究は地球という天体の謎解きをしているものと見ることができるから、前者の立場は地球科学を他の惑星で実行していると見ることができる。当然のことながら地球と同様に各惑星でも様々な未解決問題がある。

一方、後者の立場では固体惑星の形成や進化の一般原則・普遍原則を惑星間の比較を通して探ることを目指している。ここでは主に後者の視点、すなわち比較惑星研究としての視点からの課題を考えてみたい。

各惑星を比較して一般原則を導き出すことを目指すにしても、それぞれの惑星の特徴的な問題の謎とき必要である。したがって、前者の立場をとるにせよ、後者の立場をとるにせよ、実際に研究する対象は似たようなものである。しかし、後者の比較惑星研究は一般原則を導くための個別問題検討だから、ある特定の惑星の特定の観測事実を検討している場合でも、常に背後では他の惑星との比較がなされている点で違いがある。

以下では比較惑星研究としての立場から、注目すべき固体惑星現象のいくつかについて考えてみたい。

A. 衝突現象

衝突現象は太陽系内では普遍的な現象であると考えられている。惑星形成過程が微惑星の衝突合体過程である。さらに1回の衝突で解放されるエネルギーが非常に大きいことから、たとえ稀にしか起きない現象であったとしても、惑星表層の環境に多大な影響を及ぼしている。地球でも何度も天体衝突を経験してきたに違いない。

しかし、地球では大気や水の循環、生物の活動などに伴う浸食によって、衝突現象の痕跡は保存が悪い。一方、他の惑星では衝突痕＝クレーターは多数残っている。これらの多数の衝突痕の比較検討によって衝突時に起こる現象を解明することは有意義である。

現在までに室内実験や数値シミュレーションによって衝突現象について多くのことが解明されてきてはいる。しかし、現象の大きさそのものが結果に影響する現象、例えば数百キロメートルを越えるような衝突盆地の形成過程や、衝突現象が大気環境に及ぼす影響、室内実験で再現が困難な高速衝突の結果起こる現象、例えば衝突に伴う蒸発の過程などについては未だに理解が不十分である。

ここで特に注意すべきことは、大規模衝突や高速衝突など、現在理解が不十分な激しい現象ほど、惑星の形成進化・表層環境の変遷に大きな影響を与えたと考えられることである。したがってこれらの問題の検討には重要な意義がある。従来から行われてきた室内実験やシミュレーション技術の向上とともに、惑星上に残されている衝突痕の詳細な比較研究が必要であると思われる。

B. マグマティズム

惑星内部で融解した物質がどのように振る舞うのか、という程度の広い意味でマグマティズムという言葉を使っている。融解現象は惑星内部での物質輸送の最も効率的な過程であり、惑星進化の駆動力である。したがってこの過程の検討の重要性は言をまたない。地表面に噴出した熔融物以外は見ることができないが、表面に現れた熔融物（の固化したもの）からでも、内部からの物質輸送、惑星表層の内因的な原因による更新過程についての情報が得られる。内部からの物質輸送は大気進化の駆動力でもある。どのような物質が、いつ、どのように、どれくらい噴出したのか、ということを経験のデータから明らかにすることは地道な仕事ではあるが、極めて重要である。これは各惑星の熱進化についての重要な制約条件ともなる。また、次に述べる惑星テクトニクス解明の基礎情報でもある。このためには高解像度の地形データ、元素・鉱物の水平分布のデータ、さらには年代データが必要となる。

C. テクトニクス

地球型惑星の中でプレートテクトニクスがはたらいているのは地球だけである。木星の氷衛星のエウロパでも表面の地殻が割れて水平方向に移動したように見える地形はあるが、地球のプレートテクトニクスとは違うように見える。なぜ地球にだけプレートテクトニクスがあるのか？地球におけるプレートテクトニクスは、単に地殻が水平方向に動いて山脈を作ったり、地震を起こしたり、島弧を作ったりという活動を支配しているだけではない。地球内部と表層の物質循環を支配することによって地球表層の環境の維持にも多大な影響を持っている可能性がある。

プレート運動の解明は地球という星の特殊性を理解する上でも極めて重要である。当然のことながら、他の惑星のテクトニクスの解明はそれと表裏一体の関係にある。この問題に関して、各惑星のリソスフェアの構造、厚さ、強度等の解明は重要である。これまでに金星・火星・月のリソスフェアについて、様々な研究がなされてきているが、今後、より高精度の重力・地形データやその他のデータの取得によって十分な比較研究が行われることが必要である。

D. 古環境解析

惑星環境はどれくらい変動するものか？ということは極めて興味ある課題である。過去の環境を反映している情報は大気の組成と惑星固体表面上にしか残されていない。火星の流水地形など、過去の惑星表層環境が現在と異なっていたことを示唆する証拠は現に存在している。惑星表面上に残された情報から環境変遷を読みとることは、個々の惑星の環境変遷を明らかにするだけでなく、一般的に惑星表層環境

の安定性と変動性の解明のために重要である。しかしながら、地球でそうであるように、環境は空間的に一様ではないし、様々な時間スケールで変動する。したがって、おおざっぱな議論だけではこの問題は十分に解決できない。惑星表層環境の理論モデルと協力する形で、高解像度のデータを用いて惑星表面上の各地域の過去の環境情報を抽出する研究が必要である。

3．展望

固体惑星研究を進める上での基本は、地球上で培われてきた固体地球科学である。考え方の基本的なコンセプトは、地球物理学、地質学、地球化学、等々と変わらない。しかし、惑星研究で使われる観測量が地球の場合とは大きく異なっている点で違いがある。

既存の固体地球科学は基本的に固体地球上に観測者がいることを前提として成立している。しかし、惑星上には観測者はいないので得られる情報の大部分はリモートセンシングで得られるものである。例えば

重力場

地形（高度分布）

磁場

表面組成（反射スペクトル、X線、ガンマ線）

などが挙げられる。内部構造に関する情報が少ないことは一見して明らかである。

地球上で行われているような意味でのフィールド調査を実際に人間が行ったのは月だけであるし、機械が行ったものでも移動して観測できたのは火星だけである。調査された面積も極めて小さい。また、我々が起源のはっきりした表面サンプルを持っているのは月だけであり、火星隕石が正しく火星起源であるとしても火星表面のどの地点のサンプルであるのかは本当のところはわからない。

このような現状の中で、今後、

地震波を用いた内部構造の研究

サンプルリターン

が期待される今後の方向であろう。

地球内部構造研究における地震波利用の有効性から見ても、地震波の利用は重要なステップである。内部層構造の解明は惑星全体の組成の推定や進化史の解明にとっても有用な情報である。衝突盆地の構造の解明、テクトニクスの解明に関しても有効な手段となる。複数の地震計を（出きれば地震計ネットワークを）惑星表面上で継続的に稼働させることが必要であるが、他の惑星では震源分布や地震活動の頻度、卓越する周波数なども自明ではないので、段階的な研究の発展が必要であろう。

起源がはっきりしたサンプルの取得は、惑星表面でのマグマティズムの解明にとって重要である。特に、サンプルの年代を決めることによって、惑星表面地形の編年の基準が作れる点でも重要である。この点に関しては、どこからどのようにとられたのか、由来がはっきりしているサンプルであることが重要である。

地震波の利用やサンプルリターン研究は今後の重要な課題であり、是非取得したいものである。しかし、そのようなデータの取得が行われる場合であっても、リモートセンシングデータを用いた研究は今後も引き続き主要な研究手段であることは疑いがない。人が住んでいない惑星表面上で、惑星全体の实地調査は困難であり、取得できるであろう地震波データやサンプルの数は著しく制約を受けざるを得ないからである。地震計配置やサンプル取得地点の効率的な設定のためにも、リモート

リモートセンシングデータを用いる研究が主要な役割を果たすという点において、固体惑星研究は従来型の固体地球科学とは異なる性質を持たざるを得ないことに注意する必要がある。これまでの固体地球科学で培われてきたコンセプトや技術を継承しつつも、リモートセンシングデータ「しか」得られない状況では、自ずと発想は異なってくる。この点に注意しつつ、固体地球科学研究で培われてきた概念や技術を固体惑星研究用に転用していくことが必要である。

現状の我が国の固体惑星研究はこの点に関して若干の問題があると言わざるを得ない。これまで、自前の固体惑星探査データが取得されていなかったこともあって、リモートセンシングデータを用いた固体惑星研究が非常に少ないのである。最近数年間に惑星科学会や宇宙科学研究所の月惑星シンポジウムで発表された、「データを用いた研究」、「データの解釈に関わる研究」の数は

1999年月惑星シンポジウム 全講演数64のうち7

1998年惑星科学会秋季大会 全講演数65のうち3

1998年月惑星シンポジウム 全講演数68のうち7

1997年惑星科学会秋季大会 全講演数65のうち2

であった。上記には機器開発に関わる講演は含まれていない。将来的に実地調査・サンプルリターンに進む上でも、局所的な実地調査・サンプルリターンで最大の成果を挙げるためにはリモートセンシングデータを用いた事前研究が必要であるから、今後リモートセンシングデータを用いた研究の裾野を広げていく必要がある。

巨大惑星探査への展望

渡部重十

北海道大学大学院理学研究科

地球惑星科学専攻

1. はじめに

米ソが中心になって実施してきた惑星探査は、国家のプロジェクトとして、国の威信をかけたものであった。惑星探査は膨大な費用を必要とする、ということから考えても当然の成り行きかもしれない。このような惑星探査プロジェクトの中で、科学者は最高の科学を目指して惑星観測を試みた。結果は、20世紀の大きな記念碑として記憶されるべきものであることはいままでもない。

しかし、情勢は明らかに最近変化している。科学者の好奇心を基礎としたプロジェクトとして、あくまでも科学目的として遂行していくことが可能となりつつある。これは、惑星研究が、足を一步踏み入れるという探査の時代から、科学・自然現象の解明の時代へと移行していることを意味している。

2. なぜ巨大惑星探査か

なぜ外惑星（巨大惑星）をねらうのか。我々をひきつける科学は、「巨大惑星とその衛星に生命誕生と太陽系・惑星系生成のなぞが含まれている、初期の太陽系がそこにある」というところにある。巨大惑星とその衛星には、惑星内部・表層・水・氷・大気・プラズマ・太陽風・生命(?)・ミニ太陽系、すべてを含んだ系がある。太陽系・惑星系を一つの非線形な開放システムとして考えるべきである、すばらしい題材がそこにある。

惑星系の研究は、理論・シミュレーションと実験で主に行われてきたが、探査機という道具を用いて、直接観測が可能となってきた。理論・実験・観測という研究手法は相補的なものである。惑星探査機・地上からの観測・実験・理論・コンピュータシミュレーション等を用いて、総合的に惑星研究を進めていくことは、自然現象を解き明かす唯一の方法である。

3. 巨大惑星をどこまで理解したか

巨大惑星の観測は、地球上からの光学観測・電波観測による長い歴史があり、最近ではハッブル望遠鏡による観測も登場した。直接あるいは近距離での巨大惑星の探査は、米国が中心となって実施した。しかし、表1に示すように、ガリレオ探査機による木星観測と2004年に土星の周回衛星となるカッシーニ探査機以外は、フライバイ観測だけである。注意すべきことは、これらの巨大惑星観測は、惑星のごく一部を観測しているにすぎないことである。1回のフライバイの観測から、我々が現在理解している地球・惑星科学から類推して、巨大惑星を理解したつもりになっている。巨大惑星の探査・科学は、パイオニア・ボイジャー等で終わったのではなく、研究は今始まったばかりなのだとは認識する必要がある。

4. どのように探査を進めていくか

巨大惑星の探査は、フライバイ観測とはいえ多くの情報を我々にもたらした。これは、次の観測では、より適切な測定器を探査機に搭載できることを示唆している。日本の測定機器、惑星探査に必要な衛星開発・通信・センサー技術、コンピュータ技術は、いまやトップレベルであり、日本独自の信念をもって、国際プロジェクトとして科学の発展に寄与できる状態にある。我々は、巨大惑星科学の基本をきちんと理解・構築するために、観測・理論の両面から、巨大惑星の科学を組み立てていく必要がある。実施しなければいけないのは

- ・探査機による直接観測・リモートセンシング
- ・地上・地球周回衛星上からのモニタリング観測
- ・理論・コンピュータシミュレーション

である。ビッグプロジェクトとなる惑星研究は、学会の枠を超えた国際共同研究として進め、人類共通の知的財産・文化となるべきものである。惑星観測と理論の直接比較は、惑星研究を数ステップ上げるために不可欠である。

表1 巨大惑星の探査

木星	1973年	パイオニア10号	
	1974年	パイオニア11号	
	1979年	ボイジャー1号	
	1979年	ボイジャー2号	
	1995年～	ガリレオ	(周回衛星)
土星	1980年	ボイジャー1号	
	1981年	ボイジャー2号	
	2004年	カッシーニ	
天王星	1986年	ボイジャー2号	
海王星	1989年	ボイジャー2号	
冥王星	(2010年)	Pluto-Kuiper Express)	

5.おわりに

WEB (<http://www-mgcm.arc.nasa.gov/>)上に火星気象が毎日出てくるようになった。これは、惑星探査の時代から明らかに脱却しつつあることを示唆している。このようなことが可能となってきたのは、観測と理論・シミュレーションの直接比較ができるからである。惑星研究を発展させるためにも、若い世代へと研究を引き継いでいかなければならない。しかし、我々の問題点は、忙しすぎる・研究者数が少ない・学会の枠を超えた情報の共有が少ない・個々の研究者の知的好奇心で終わっている場合もある、ということである。

巨大惑星とその衛星へ行こうとしているのは、科学者の知的好奇心、初期の太陽系がそこにある、太陽系・惑星系生成の解明や生命誕生の解明のヒントがある、ということはもちろんであるが、太陽系・惑星系を理解することは地球をより深く理解し、かつ我々の存在そのものを理解することに繋がるからである。我々はどこから来て、どこへ行こうとしているのか。そのヒントは惑星とくに巨大惑星とその衛星にあるかもしれない

コメント：ミッション案プールで臨界状態を

渡邊 誠一郎 (名大院理)

日本の惑星探査の進め方に対する私見を述べる。

これまでの日本の惑星探査は、人材層の薄い中、宇宙研主導で、早期にミッションの枠組が決定され、上からの召集でPIが決まっていく感が強かった。次期ミッションが、実現可能性の評価も不十分うちに実質上決まってしまう、研究者は、その方向に(無理矢理)結集されるか、探査に関与せずかの、二極分化してしまっている。理想論で言えば探査は下から積み上げて造り、夢を生かせるような形が望ましいのだろうが...

重要なのは、30年後までも視野にいれて、一続きの連鎖として探査群をデザインすることに違いない。目前の探査を青息吐息で繋げる自転車操業ではなく、5年に一度のペースで打ち上げる探査群をセットとしてベストになる道を取らねばならない。構造改革し、基盤整備して、後継者も育てながらやっていかないと途切れてしまう。

では、どうやって30年後まで見通すのか。不可能だ。だが、考えられるやり方がある。

ミッションは、複数のプロジェクトの有機的結合だ。プロジェクトの種を、今よりずっと多くの惑星科学者とグループが、常時暖めていないと始まらない。拠点研究機関が核となり、これらの種をリンクし実現可能なミッション案に育む。

ポイントは、こうしたミッション案をいくつもため込むプールを維持することだ。ちょうど原始生命を育んだ遺伝子プールの遺伝子群のように、このプールでは、複数のミッション案が活動し互いに競争する。プロジェクトの移動やミッション案同士の融合もフレキシブル。新参者も、こんなプールならプロジェクトの種を持って飛び込み易いだろう。このプールの質(活性度)を向上させるには、実現可能性の判断ができるレベルまで機器開発等を進められる環境作りが重要だ。それにはこのミッション案プールに現状より1桁以上大きな投資が必要だ。探査経験者の参画・助言も欠かせない。

このプールの中から採用されるミッションがコンペによって決まり、中核は宇宙研に移って5年で打ち上げに漕ぎ着けられるようにする。ミッション案の段階での完成度を高め、採用から打ち上げまでを短縮させる¹。一方、次点となったミッション達は、すぐに投資が打ち切られはせず、プールの中で次期を狙い精進できるようにする。こうしてプールを熟成させていく。すると、採用ミッションが長引くような事態が万一発生しても、即座にこれを遺伝子プールに戻す決断も可能になる。

つまり、30年後を見通すと称してミッション群を机上で立案するのではなく、「ミッション案のプール」での活発な競争を通して、決定を進化の摂理にゆだねる戦略である。このプールが、魅力ある探査案を次々と生み出す活性度の高い「臨界状態」に無いと、惑星探査の連鎖は維持できない。それには、多少打ち上げ間隔を延ばしてでも、採用決定前のミッション案への投資配分をずっと増やすことが急務と考える。

これからの惑星探査の目玉の一つに前生命的環境での有機物進化の現場を捉えるものがある。探査ミッションの進め方自体を遺伝子プールの原理に学んで構築してみても、いかがであろうか。

¹日本の惑星探査の最大の問題点が打ち上げまでに要する時間が長すぎることにあるのは周知の通り。