

JAXAブリーフィング わが国の惑星大気探査の展望

今村 剛¹, 佐藤 毅彦¹, 上野 宗孝², 寺田 直樹³, 高橋 幸弘⁴

(要旨) 惑星大気探査の将来構想を紹介する。今後10年は地球型惑星である金星と火星を対象として研究を深めつつ経験を蓄積し、将来は木星をも対象とする。

1. 金星から火星へ、そして木星へ

惑星大気研究とは、地球のような環境がいかなるバランスのもとに成立し、それが宇宙の視点からどう位置づけられるのかを理解しようとする試みである。わが国における惑星大気への挑戦は、火星大気の散逸過程を探ることを主目的として1998年に打ち上げられた火星探査機「のぞみ」(PLANET-B)に始まる。探査機の不具合により「のぞみ」による火星探査は叶わなかったが、2010年には金星に周回機PLANET-C(Venus Climate Orbiter)を送り込む(図1)。この探査機は金星大気を3次元的にリモートセンシングし、角速度が自転の60倍にも達する高速大気循環「超回転」など大気力学の問題に挑み、惑星気象学の観測的研究に道を拓く。これと平行して惑星観測用宇宙望遠鏡TOPSも2011年度の打ち上げを目指して詳細検討中である。TOPSは、木星の磁気圏のプラズマや、金星や火星の大気が散逸する様子を極端紫外線でとらえ、その動態を解明することを目的とする。

これらのミッションで培った技術を発展させて2010年代半ばに再び火星に挑むことを検討している。温暖化の末に海を失った金星と寒冷化の末に凍りついた火星を独自の手法で続けて調査することにより、地球型惑星の大気科学においてわが国が確固たる地位を築くことができよう。PLANET-Cで取り組む金星の科学の発展形として、金星気球による直接探査も構想されている。さらに2020年代半ばには木星大気の探査を目

指す。

2. 次期火星周回衛星

次期火星探査では、PLANET-Cを受け継ぐ気象リモートセンシングと、「のぞみ」を受け継ぐ大気散逸観測が二つの柱となろう。以下ではこれらについて簡単に紹介する。

2.1 今なぜ火星気象か

火星のイメージは大きく変化しつつある。地下や極冠に大量の水が氷として存在することがわかり、最近にも局所的に水が溢れ出るイベントがあったことが示唆されるなど、一面の砂漠ではなく凍りついた水惑星という形容がふさわしくなっている。これらの水は季節進行の中で大気との間を行き来し、大気中を水蒸気として輸送されて長い時間スケールで配置を変えていく。火星の水がどのような動的平衡(非平衡)状態にあ

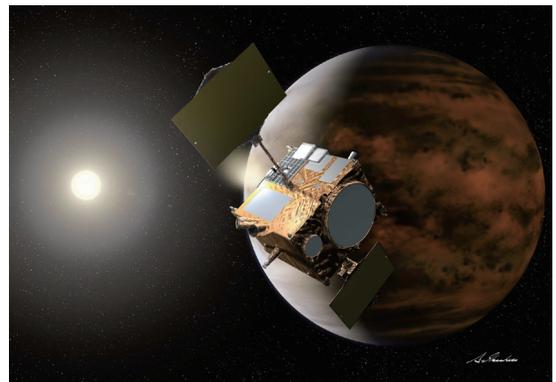


図1: 金星探査機PLANET-Cの想像図(イラスト:池下章裕氏提供)

1. 宇宙航空研究開発機構
2. 東京大学
3. 情報通信研究機構
4. 東北大学

るのかを知ることは環境の変遷を解明する上で重要である。気候変動に伴う氷の再配置が水蒸気の正味の輸送という形で、現在進行形で見えている可能性も指摘されている。

火星は自転が地球と同程度に速いため、流体運動においてはコリオリ力が重要となる。そのため、温帯低気圧やジェット気流など地球と共通の現象が、異なる条件のもとで異なる現れ方をしているはずである。惑星の大気循環は、自転効果が重要となる「地球・火星型」、自転が遅い代わりに大気が高速回転する「金星・タイタン型」、惑星全体が流体として振る舞う「木星型」の3種に大別されるであろう。火星の大気循環を知ることは、地球の気象学では実現しえない現実の大気での広範囲なパラメータスタディを可能にし、「地球・火星型」の普遍的な理解につながる。

これら興味深い問題に取り組む上で、これまでに得られている火星気象のデータはあまりに限られている。まず、基本物理量である広域の風速分布がわからない。高高度から雲や水蒸気やダストの細かなパターンの移動をとらえる方法が考えられるが、これまでの観測は主に低高度の太陽同期極軌道からなされ、同じ地点の高解像度の連続画像は得られていないのである。また、これまでは軌道上から衛星直下を疎らに観測するのみで、惑星規模より小さな構造を可視化できるだけのサンプリング点がなかった。これでは水蒸気の局所的な湧出と輸送、温帯低気圧やダスト嵐のライフサイクルなどの興味深い現象を十分に分解できない。太陽同期軌道では特定の地方時の上を通過するため、日変化を追跡できないことも問題である。火星では1日のうちに50℃もの温度変化があり、これに起因する熱潮汐や熱対流などの時間発展が本質的である。

2.2 火星気象衛星が拓く世界

ブレイクスルーのシナリオはこうである。赤道面に近い長楕円軌道(ただし極域を見るためにある程度傾ける)から火星ディスク全体を30分～1時間間隔で継続的に分光撮像し、水蒸気・大気温度・地表面温度・氷雲・ダスト・オゾンなどを5～10 km解像度の動画として映像化する(図2)。水蒸気や雲やダストの細かなパターンの移動からは風速ベクトルの全球分布も得る。サブミリ波分光により水蒸気や気温の鉛直分布を求め、輝線のドップラーシフトからも風速を得る。電

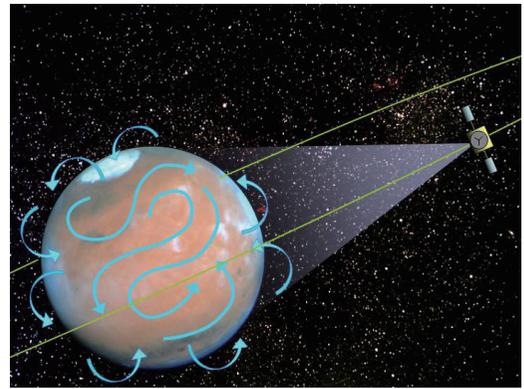


図2: 火星気象衛星のイメージ。大気-地殻間をめぐる水、大気の渦や波、光化学など火星表層の森羅万象を可視化する。

波掩蔽により接地境界層から自由対流圏までの熱構造をとらえる。観測装置の多くはPLANET-Cでの実績をベースに速やかに開発が可能と考えている。

初の精細な水蒸気マッピングにより、季節進行に伴って水蒸気が火星表面のどこで湧き出し、大気中をどのように長距離輸送され、どこに吸い込まれていくのかといったことが手に取るようにわかるだろう。ここから、地域ごとに氷床がどのようなバランスにあるのかを解明していく。局所的な氷の融解に伴う水蒸気増加といった新現象の発見も期待したい。

風速場と温度場からは、波動や乱流の構造を描き、それらがエネルギーや運動量を循環させる様子が初めてとらえられる。地球の温帯低気圧などとの比較から、人類が築いてきた気象学がどれほどの汎用性を持つのかを検証できるだろう。これまで知られていなかった気象現象も多く発見され、われわれの常識に再考を迫るに違いない。

氷雲やダストの精細な動画には、惑星規模から局地規模に至る流体運動の階層構造が映し出されるだろう。氷雲の生成消滅は対流や波動に伴う鉛直流を反映する。前線や対流に伴うダスト変動から、ダストの巻き上げメカニズムも明らかになろう。局地的なダスト嵐が惑星規模の大ダスト嵐にまで発達していく様子を連続的に追跡するのも前例のない試みである。オゾンなど化学成分の観測により、表層環境の酸化状態を決める光化学を明らかにしていくことも、興味深いサブテーマである。

2.3 大気散逸観測

火星にはかつて表面に液体の水を有する温暖な時代があったが、何らかの原因により現在の凍結した惑星へ変化したと考えられている。この要因としては宇宙空間への大気の散逸が有力であり、それが具体的にどのように進行したのかは、大気と液体の水を安定に保有する惑星の成立条件を理解する上で重要である。火星大気の散逸は現在も進行中である可能性が高く、現在の散逸過程を解明することにより過去における散逸についても推定できると思われる。

大気散逸の調査は「のぞみ」が先鞭をつけるはずであった。同様の目標を掲げる探査はその後行われていないが、2013年打ち上げ予定のNASAのMars Scoutは大気散逸が主目標となる可能性が高い。この動向に注意を払いつつ、この問題への日本独自の貢献を検討している。その核心部分は、プラズマの直接(その場)観測に加えて、全体像の把握と時間・空間変動の切り分けのために極端紫外線や遠紫外線で散逸イオンの撮像を行うことである。極端紫外線での撮像は「のぞみ」や「かぐや」で実績がある。この観測を最大限に生かすためには、プラズマの直接観測を担う低軌道のスピコン衛星と撮像を担う三軸制御衛星の2機構成が理想である。直接観測装置は「のぞみ」、Geotail、Bepi Colomboなどでの実績を引き継ぎつつ、これらを発展させたものとなる。たとえば同位体計測も可能な高質量分解能のイオン観測や、プラズマ波動観測によるプラズマ加速過程の解明などが考えられる。

火星周回衛星に先駆けて打ち上げられる宇宙望遠鏡TOPSは直接探査ではなく、地球周回軌道上から金星や火星の大気散逸の観測を行うことを目的の一つとしている。この衛星には先に述べた極端紫外線の技術を活かした分光器が搭載され、太陽風に対する大気散逸率の応答を調べる観測を行う。直接探査のように大気散逸の素過程を調べることはできないものの、太陽風の強さに応じて惑星の外圏や電離圏の応答や散逸する大気の総量変化を調べることを目指しており、これらの太陽風に対する依存性を明らかにすることがTOPSの究極目標である。太陽系の歴史を遡ると、中心星である太陽の可視光における輝度は現在よりも小さかったはずであるが、太陽風や極端紫外線などに反映される太陽活動度は現在よりも桁違いに大きかったことが

知られている。従って、大気散逸の太陽活動度に対する依存性を調べることは、主として太陽系の前半期に起こったと考えられている大気散逸の歴史を推測する上で重要である。

3. 金星気球

PLANET-C以後の金星探査においては、周回衛星からでは限られた情報しか得られない、高度45～65 kmに広がる雲層よりも下の世界を、長距離浮遊する気球により踏査する。欧州と米国でも気球による大気や地表面の観測が検討されているが、われわれの最初の挑戦では気象学を中心に大気科学で世界初の成果を狙う。PLANET-Cと相補的な情報を得ることはもちろん、地球には存在しない濃密大気の運動と物性を直接観測すること自体が惑星流体への普遍的な理解を加速させるはずである。

第1に、大気大循環のメカニズムを探るために、気球の軌跡を地球からのVLBIで追跡することにより大規模な波動や子午面循環の構造を知る。仮に地球の上部対流圏に気球を投下すれば、蛇行するその軌跡から傾圧不安定という大気大循環の主要過程を読み取ることができるはずである。この観測により、これまで想像にとどまっていた金星下層大気の力学が初めて明らかになるだろう。

加えて、惑星大気の熱構造がどのように決まるかという問題に迫るために、気温と気圧の時系列データから気球の上下動と乱流熱流束を推定し、鉛直熱対流の有無を明らかにする。これまでの観測によれば金星下層大気の温度分布は断熱温度勾配に近く、このことから小規模な鉛直対流が鉛直熱輸送を担う「放射対流平衡」が成立していることが想像されるが、一方で子午面循環による熱輸送こそが大気構造を決めるという考えもある。運動量輸送を担う内部重力波の検出も行う。

大気組成や微粒子の観測により雲の材料物質についても手がかりを得たい。金星下層大気では上層大気の光化学で作られた物質と地表近くの熱化学で作られた物質が入り混じっていると考えられる。この領域の化学を理解するためには気球による組成と大気運動の同時観測が有効である。また、長期浮遊する気球は同位体計測などにおいて長時間積分を可能にし、高精度化に道を拓く。地球型惑星の大気の起源に迫るための強

力な道具となろう。

現在のベースラインは，膜内に水を入れた小型の気球を金星大気に放出し，周囲の高温大気からの熱流入により内部の水を蒸発させて水蒸気を浮力媒体として浮遊し，高度35 km付近(大気温度200℃)で超回転の風に流されながら数週間にわたって観測を行うというものである。この高度は，雲より下に行きたいという理学的要請と，これ以上低いところでは材料や電子部品が高温に耐えられないという工学的要請から設定されている。このミッションのための技術開発がJAXA宇宙科学研究本部を中心に続けられている。実施形態としては，気球ミッションの単独実施，科学観測とデータ中継を担う金星周回衛星との組み合わせ，海外の金星ミッションとの相乗りなど様々な可能性が考えられる。ここで開発される技術の多くは将来，他の惑星の大気圏を直接探査するときにおいても基礎となるものである。

4. 木星探査

木星は本体のほとんどが流体でできていること，太陽光エネルギーよりも内部熱源が重要であること，惑星形成時に原始太陽系星雲ガスを多く取り込んでいると思われることなど，地球型惑星の大気科学にはない側面を持つ。金星・火星に加えて木星までを調査対象とすることにより，宇宙における惑星の環境形成について統一的な理解に近づくことができる。しかし木星を訪れた探査機はまだ少なく，地球型惑星に比べて理解は遅れている。たとえば，表面で観察される帯状風や大赤斑はどのように維持されており，それらが内部の流体運動とどういう関係にあるのか，といった惑星構造の基本が理解されていない。Galileoプローブは木星大気に水が予想外に少ないことや太陽光が届かない深部でも強い風が吹いていることなどを見出したが，ホットスポットと呼ばれる特殊な領域に突入したため，そのデータの代表性には疑問が持たれている。

2020年代半ばに国際協力による大型木星探査が構想されており，この中で新たな大気観測を行うことが考えられる。たとえば周回衛星からの連続的な分光撮像により，雲や組成の変動，風速分布などを可視化し，積乱雲の発達過程とそれらが帯状風を駆動する過程を明らかにする。高い解像度によって雲塊の間に水蒸気

を検出できる可能性もある。あるいはまた，雷放電発光を検出することにより対流圏下部の積乱雲活動の情報を得る。雷放電に伴って作られる化学物質を分光で検出することもできよう。新たな突入プローブにより水蒸気などを計測する可能性についても議論している。