

投稿

日本の金星探査機の挑戦

～気象学・環境科学の教材として～

今村 剛（宇宙航空研究開発機構）、PLANET-C チーム

1. はじめに

2010年夏、金星周回衛星 PLANET-C が日本から打ち上げられる[1]。この探査への興味を広く喚起するために、探査機の愛称の公募や、探査機に搭載するネームプレートに刻印する名前の募集などを、2009年の夏から秋にかけて実施する予定である。これらのキャンペーンを始め、今後の教育・アウトリーチ活動においては教育分野の方々にもお力添えをお願いしたいと考えている。そこでこの場を借りて探査計画の概要やデータの教育目的利用の可能性について紹介させていただく。

金星といえば明けの明星、宵の明星（つまり一番星）であり、古来より地域や人種を問わず親しまれてきた天体である（図1）。金星の大きさと密度は太陽系で唯一地球と同じくらいであり、地球と似た過程で作られた双子のような惑星と多くの研究者が考えている。金星と地球は何が同じで何が違うのか、そこに地球環境の成立過程を理解する鍵がある。PLANET-Cはこの天体の大気の大謎に迫ることを第一の目的としている。なお、ミッションの最新情報についてはホームページ <http://www.stp.isas.jaxa.jp/venus/> をご覧いただきたい。



図1 硫酸の雲に覆われた金星（NASA 提供）

2. 金星の環境

金星の輝きは、金星全体を覆う濃硫酸の雲が太陽光をよく反射するために生じている。大気の主成分は二酸化炭素で、その量が多いために地表気圧は90気圧にもなる。大気温度は地表面で460℃に達するが、この高温は金星が太陽に近いことが直接的な原因ではない。金星に届く太陽光は厚い雲によりほとんどが反射あるいは吸収されて、地表まで届く量は地球の10分の1である。それにもかかわらず、膨大な二酸化炭素による温室効果のために、わずかなエネルギーをもとにして効果的に暖まっているのである。ちなみに地球では二酸化炭素は海に溶け込んだあと炭酸カルシウムとなって地殻に取り込まれている。金星には海がないため、二酸化炭素はほとんど全て大気中に存在するのだろう。

地表は火山や溶岩平原におおわれているが、活火山は見つかっておらず、現在の火成活動レベルはわかっていない。地球で見られるプレートテクトニクスは金星では起こっていないようであるが、地表面は比較的新しく、数億年前に大規模な火成活動で表面の大部分が塗り替えられたらしい。

46億年前に太陽系が作られた時、金星にも大量の水があり海が形成されたということはあることである。水は徐々に水蒸気となって高層大気に運ばれた後、紫外線によって水素と酸素に分解され、少なくとも水素は重力を振り切って宇宙空間に逃げ出してしまったのかもしれない。そう考える根拠の一つは、金星大気では通常の水素に対する重水素の割合が地球に比べて100倍も大きいことで

ある。もともと金星の水には地球と同様に、通常の水素に混じってごくわずかに重水素が含まれていたが、通常の水素に比べて重さが2倍の重水素は流出しにくいいため、より多く大気に取り残されたというシナリオである。

3. 金星の風

私たちはとくに金星の不思議な風に注目している[2]。金星の自転周期は243地球日と長く、赤道での自転速度は1.6 m/秒である。大気と地面の間には摩擦が働くので、このように自転の遅い惑星上で吹く風は自転と同程度に遅いと予想される。たとえば地球の偏西風は30 m/秒程度で、これは赤道での自転速度460 m/秒の1割にも達しない。しかし探査機が見出した金星の風はこのような予想とはまったく違っていた。雲層が存在する高度60 km付近を中心に100 m/秒もの速さで大気が自転方向に流れ、約4地球日で1周していたのである。この自転の60倍もの速さの風を「超回転」と呼ぶ。実はこの風はフランスのアマチュア天文家が先に発見していたらしい。しかし金星の自転速度を考えればそんなことはありえないとされて、探査機が再発見するまで無視されていたようである。

大気の循環パターンは惑星ごとに違っている(図2)。地球の場合、熱帯地方では東風が卓越するが、それ以外ではだいたい西風(偏西風)である。このような東西方向の流れとともに南北・上下方向の流れ(子午面循環)があり、南北半球それぞれに3つの閉じた循環がある。火星の大気大循環は基本的には地球に似ている。一方、土星の衛星タイタンでは金星と似た超回転が生じていることが明らかになってきた。タイタンは窒素の大気を持ち、金星と違って極寒の世界だが、上空では自転速度(周期16地球日)の10倍の速さの風が吹いているらしい。宇宙全体で見れば超回転もありふれた風系の一つなのかもしれな

い。

超回転は外部からの力で引き起こされるわけではなく、大気内部の何らかの流体力学、すなわち気象力学で説明できるだろうというのが気象学者の一致した見解である。ただし具体的なメカニズムとなると決め手がない。基本的には大規模な流体波動(偏西風の蛇行や高気圧・低気圧のようなもの)の働きで地面から大気へと自転軸周りの角運動量が渡されて大気が加速されると想像されているが、計算機シミュレーションによる再現はうまくいっていない。我々は地球の大気循環のしくみを概ね知っているが、金星という隣の惑星に目を向けるとき、惑星の大気循環パターンがどのような要因で決まるのかを実はよく分かっていないということに気付かされる。

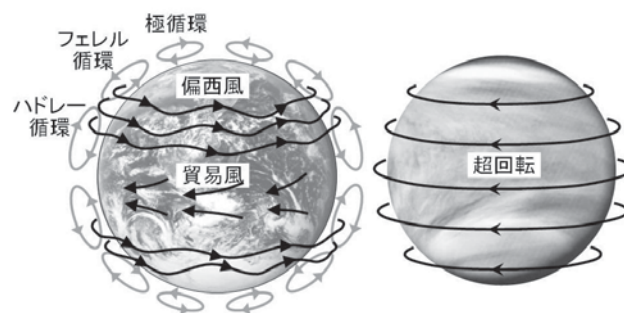


図2 地球(左)と金星(右)の風系。

地球では緯度帯ごとに違う向きの東西風があり、また緯度帯ごとの南北・上下方向の循環が雲の分布に影響している。金星では超回転という自転方向の高速流がある。南北・上下方向の流れは分かっていない。

4. 金星気象衛星 PLANET-C

PLANET-Cの狙いは、金星周回軌道からのリモートセンシングにより厚い大気層の内部の運動を映像化し、超回転のメカニズムや雲の生成過程などを解き明かすことである(図3)。PLANET-Cは2010年にH2Aロケットで打ち上げられ、半年間の旅を経て金星の赤道面に近い長楕円の周回軌道に投入される。

軌道周期は 30 時間で、そのうち遠金点を中心とする約 20 時間にわたって雲層高度での超回転の角速度とほぼ同期する。この間 PLANET-C は大気の特定の半球と向かい合って時間変化を精密にとらえる。近金点付近では雲を立体視したり地平線方向を見て大気の層構造を観測したりする。

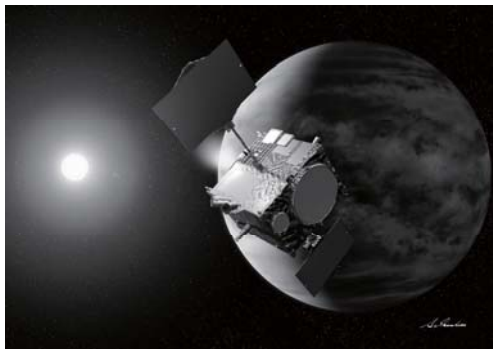


図3 金星に到着した PLANET-C の想像図。赤外線で見つかる大気深部の雲のイメージを夜側に描いてある。

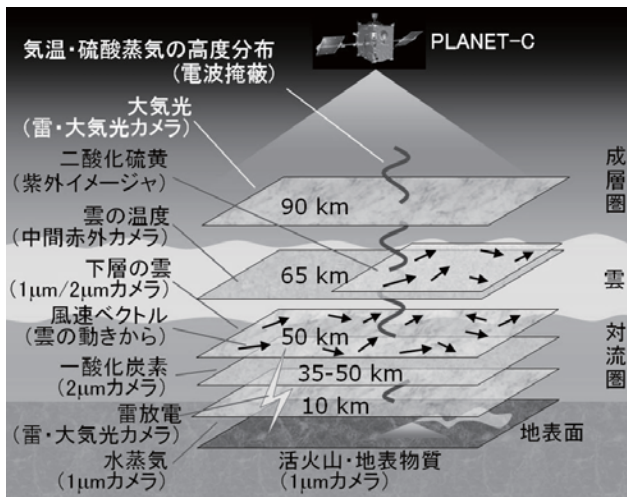


図4 PLANET-C による 3 次元的観測の概念

PLANET-C は 5 台の特殊なカメラを搭載し、異なる波長で異なる高度の対象を同時に撮影することによって大気の 3 次元構造をとらえる(図 4)。1 μm カメラと 2 μm カメラは、金星大気がほぼ透明になるいくつかの赤外波長(1~2 μm 付近にある)を活用し、可視光

では見えない低高度の雲や微量ガスの分布を映像化する。雲が時間とともに移動する様子からは大気の運動がわかる。赤外線による地表面の撮影によって鉱物組成の分布や活火山についても調べる。これらとは別に、中間赤外カメラが波長 10 μm の赤外線で見つかる雲の温度分布を映像化し、雲頂の凹凸やこの高度での大気運動を調べる。紫外イメージャは紫外線で雲の形成に関わる化学物質の分布をとらえるとともに、その変動から雲頂高度での大気運動を調べる。雷・大気光カメラは雷放電発光を超高速度撮影でとらえ、雷があるかどうかという積年の謎に終止符を打つ。また雲よりも高いところで酸素が放つ大気光という光をとらえ、この高度の大気運動を映像化する。

映像情報とは別に、地球との電波通信を利用した電波掩蔽という観測を行う。探査機が送信する電波は地球から見て探査機が金星の後ろに隠れるときと出てくるとき金星大気をかすめるが、このとき地球上で受信する電波の周波数の変化から気温分布などがわかる。

このようにして惑星全体に広がる様々なスケールの流体運動を可視化し、画像解析などによって風速分布、温度分布、物質輸送といった気象学情報を取り出す。これほど密な気象データが地球以外の惑星で得られるのは初めてのことである。これまでの惑星気象学の研究は乏しいデータをもとにした概念的な議論が多かったが、PLANET-C を契機に地球気象学レベルの緻密な考察を求める新たな段階に進むことが期待される。

5. 教育における活用

この探査の特徴として、得られるデータのほとんどが映像であることが挙げられる。1 億 km 彼方からのデータ転送では通信回線が細いため、高頻度のサンプリングで滑らかな動きを実現するのは難しいが、刻々と変化する

る雲や大気の流れを実感するには十分だろう。個々の画像は1メガピクセルで、ハイビジョン並みの精細さである（ただし横幅は狭い）。このような映像群はおそらく、専門家でない方々にとっても興味を引くものであり、教育現場での活用の余地があるのではないかと思われる。地球気象衛星による雲の映像と見比べれば、日頃見慣れてしまった地球の気象の特徴を再認識する契機になるだろう。

科学的にはあまり意味がないが、まずは適当な時期の金星の雲画像（雲の厚みの分布がわかる2 μ mカメラのもの）と、同じ期間中の地球気象衛星による雲画像を、見比べてみるのはどうだろうか。記憶に残っているあの天気のある日に金星ではこんな空だった、という発見をすることで、地球大気を相対化する視点が得られよう。

さらに、映像を眺めつつ素朴な（しかし本質的な）疑問を喚起することができるだろう。たとえば—

・金星は雲で全面が覆われている。一方地球では、曇っているところもあれば晴れているところもあり、緯度によっても雲量が全く違う。これはなぜだろう？

・金星の赤道域には塊状の雲が多く分布するが、そのような特徴は地球でも見られる。これはなぜだろう？

・金星ではどこでも東から西へと風が吹いている。一方地球では緯度によって風向が違う。これはなぜだろう？

・金星の雲は比較的まっすぐ流れていくように見えるが（実際は少し違うかもしれない）、地球の雲は蛇行しながら現れたり消えたりしている。これはなぜだろう？

金星の「なぜ？」に答えるのは研究者のこれからの仕事だが、地球の「なぜ？」には現時点でもきちんと答えることができる。

合わせて、金星が二酸化炭素による温室効果で灼熱の世界になっていることは、地球温

暖化の仕組みを理解させるための入口になるだろう。金星とは逆に寒冷な火星も持ちだして一緒に並べれば、地球のような液体の海を擁する環境がいかにか絶妙なバランスで成り立っているのかを考えさせることもできよう。暗黒の宇宙と金星の境目のクローズアップ画像には硫酸の雲の雲海が広がっているはずである—これが遠い昔には水の雲だったかもしれないと想像することは、地球に46億年にわたって海が維持されている（そのおかげで生命がはぐくまれた）ことの不思議を体感することにつながるだろう。

金星は肉眼や簡単な望遠鏡で容易に観望できる天体であり、実際に眺めながらの学習も考えられる。PLANET-Cがもたらす映像情報を中心に様々な素材を組み合わせることで、我々が親しんでいる地球の気象の本質を理解し、そこからひとつつながりに地球環境の不思議、太陽系の不思議までを俯瞰するような教育プログラムを、作れるように思う。ぜひ教育方面のプロフェッショナルな皆様のご指導、ご協力を仰がせていただきたい。

文 献

- [1] Nakamura, M., et al. (2007) 'PLANET-C: Venus Climate Orbiter mission of Japan', *Planet. Space Sci.*, **55** : 1831.
- [2] 松田佳久 (2000) 『惑星気象学』, 東京大学出版会.