

金星の大気の謎をさぐる

今村 剛

総合研究大学院大学助教授宇宙科学専攻 / 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部助教授

金星の探査がふたたび始まった。2005年の欧州宇宙機関について、日本も2010年に探査機を打ち上げる。観測のターゲットは厚い雲におおわれた謎の大気。さまざまな観測ミッションによって、「惑星気象学」と呼ばれる新たな地平を切り開いていく。

ふたたび金星へ

2005年11月9日、欧州宇宙機関（ESA）の金星探査機ビーナスエクスプレスがカザフスタンのバイコヌール宇宙基地から打ち上げられた。ビーナスエクスプレスは2006年4月に金星に到着し、金星のまわりを回りながら大気、地表面、磁場などを調べる。2010年には、日本からも金星探査機プラネットCが打ち上げられる（図1）。

振り返ってみると、東西冷戦期、金星にはアメリカとソ連が競い合うように探

査機を送り込んでいる。その後は、1989年にアメリカが打ち上げたマゼラン以来、16年間も探査機が行くことはなかった。近年における惑星探査の対象は火星に移っていたが、世界の少なからぬ惑星

科学者が金星こそ本命と考えてきた。このような金星回帰の動きを受けて、金星の科学に関する国際会議が相次いで開かれ、また金星に着陸機や気球を送り込む大型計画も議論されている。総研大でも2003～2004年に共同研究「金星大気の科学」が採択され、地上の望遠鏡を用いた金星大気の観測や、将来の金星研究

のための新たなリモートセンシング技術の開発を行った（コラム参照）。

地球の双子惑星

金星は、古くから明けの明星・宵の明星として親しまれてきた。金星とは気づいていなくても、多くの人が一番星として見ていることだろう。太陽と月を除くと、全天でもっとも明るい星になる。この明るさは、金星に差し込む太陽光の78%が厚い雲で跳ね返されることによる。ちなみに地球では、この割合は30%である。

金星は、太陽から約1億820kmの距離（地球-太陽間の0.72倍）のところを、周期225地球日で公転する地球型惑星（岩石の地面をもつ惑星）である。自転は地球と逆向きで、その周期は243地球日と大変長い。直径は地球の0.95倍、密度も同じくらいであるため、金星は地球と似た過程で形成された双子のような惑星であると考えられている。

しかしその環境は、これまでの探査が明らかにしたところによれば、地球とは大きく違っている。海はなく、大気は地球に比べて乾燥している。地表面には大規模な火山地形が散在し、数億年前の地殻変動で噴出したと考えられる溶岩におおわれている。地球で生じているような大陸移動の形跡はない。大気は主に二酸化炭素からなり（96.5%）、その量は大変多く、地表面気圧は約90気圧にもなる。

45～70 kmの高さには濃硫酸の雲があり、この雲は地球の雲と違って惑星全体を完全におおっている。

大気中の膨大な二酸化炭素がもたらす温室効果のため、地表面温度は460℃という高温である。地球で問題になっている温暖化は、大気中にごく微量（0.035%）含まれる二酸化炭素が主な原因である。金星では、二酸化炭素は濃い大気の主成分である。金星に入射する太陽エネルギーの大部分は雲で反射あるいは吸収されてしまい、地表に届く量は地球よりはるかに少ない。にもかかわらず、わずかなエネルギーをもとにして地球とは比べものにならないほど効果的に温室効果が働いているのである。

このような金星は、火星とは対照的な環境にある。火星は地球の半分ほどの大きさの地球型惑星で、大気の主成分は二酸化炭素、気圧は0.006気圧、気温は-60℃と大変寒い。乱暴な言い方をすると、金星は大気の量が地球のほぼ100倍、火星は100分の1である。地球環境の特徴を考えると、これら2惑星の存在は大変興味深い。

水のゆくえ

金星と地球はともに約46億年前に誕生した。二つの惑星はなぜ異なる進化をたどったのだろうか？ 一説によれば、原始の金星には地球と同様に大量の水があった。それが、高温のために大気中に蒸発し、太陽からの紫外線によって水素と酸素に分解され、軽い水素は重力を振り切って宇宙空間に流れ出してしまったという。

このようなことが起こった傍証として、金星大気中では水素に対する重水素の割合が地球に比べて100倍ほど大きいことがあげられる。通常の水素に比べて重さがほぼ2倍の重水素は比較的流出しにくいいため、大気に取り残されたのである。しかし、かりにそうだとした場合、流出した水素の量がどのくらいなのか、残された酸素はどこへ消えたのか、原始の金星には海があったのかどうか、金星特有の地殻変動に水の消失が影響し

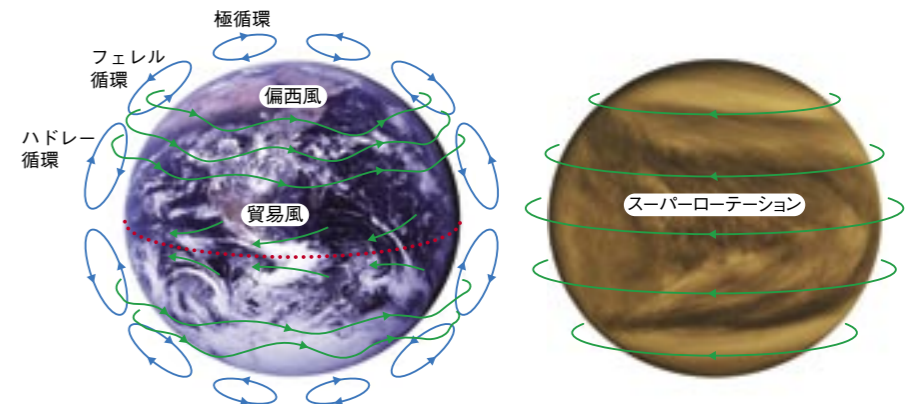


図2 地球（左）と金星（右）の大気大循環のイメージ。金星でのハドレー循環、フェレル循環、極循環に相当するものは分かっていない。

たのかどうかなど、まだまだ分からないことだらけである。現在でも、金星大気中のさまざまなガスが太陽風（太陽から高速で流れ出す電気を帯びた希薄なガス）の作用によって宇宙空間に少しずつ持ち去られているようである。

では、金星に大量に二酸化炭素があるのはなぜだろうか？ 地球にもかつて同じように二酸化炭素があったが、海に溶け込み、炭酸塩という鉱物となって地面に取り込まれてしまったと考えられる。金星では海が失われたため、そのようなしくみが働かず、二酸化炭素がすべて大気中に残ったのかもしれない。ただし、海がなくても地面がある程度の二酸化炭素を直接取り込んでいる可能性もある。

「惑星気象学」の視点で見ると

金星のもう一つの特徴は、惑星スケールの風、すなわち「大気大循環」である。惑星に入射する太陽エネルギーの量は赤道付近でもっとも大きくなる。大気大循環は、この太陽のエネルギー（熱）を惑星全体に分配し、いろいろな物質を運び、また雲を発生させて気候を形成する。

まず、地球の大気大循環はどうなっているのか見ていこう（図2）。熱帯地方の地表面付近では東風（貿易風）が卓越するが、それ以外ではだいたい西風（偏西風）である。そして、このような東西方向の流れとともに、弱いながら南北・上下方向の流れがあり、南北半球それぞれに三つの閉じた循環に分かれる。そのうち、低緯度のハドレー循環と高緯度の極循環

は、暖かい低緯度側で上昇して冷たい高緯度側で下降する「正常な」循環だが、中緯度のフェレル循環は反対方向に回転する少々不思議な流れである。フェレル循環は、地球の自転と極域-赤道間の温度差によって生じる波長数千kmの波（傾圧不安定波）にともなって引き起こされる。これら南北方向の循環と東西風とはたがいに密接に相互作用しあっている。

火星の大気大循環は比較的地球に似ていると考えられているが、そのほかの惑星では相当変わった循環も見られる。そこで、惑星の大きさ、太陽からの距離、大気の成分などの外的条件に応じてどのように循環パターンが決まるのか、風は惑星の進化にどう関わってきたのか、といった問題意識が芽生えてきた。私がこの分野に足を踏み入れたのも、いつも身近に感じている地球の気象をこのように宇宙的な視点から相対化する大胆さに惹かれたからである。

こうした背景のもとで、従来の気象学とも天文学とも異なる新しい研究分野「惑星気象学」が生まれつつある。惑星ごとに異なる多様な気象や異なる時代の気象を統一的に理解することが最終目標である。金星はこの惑星気象学における第一級の難問を提供しているのである。

超高速でまわる金星の大気

金星の自転周期は243地球日、赤道での自転速度は1.6 m/秒である。大気と地面はたえず（自転軸周りの）角運動量を交換しているので、このように自転の遅い

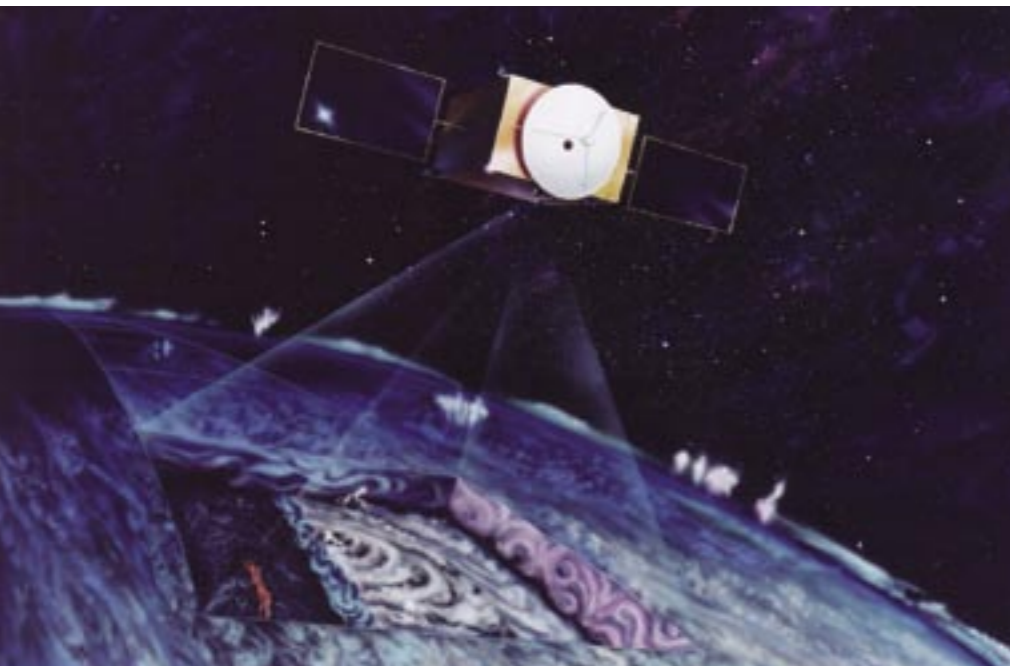
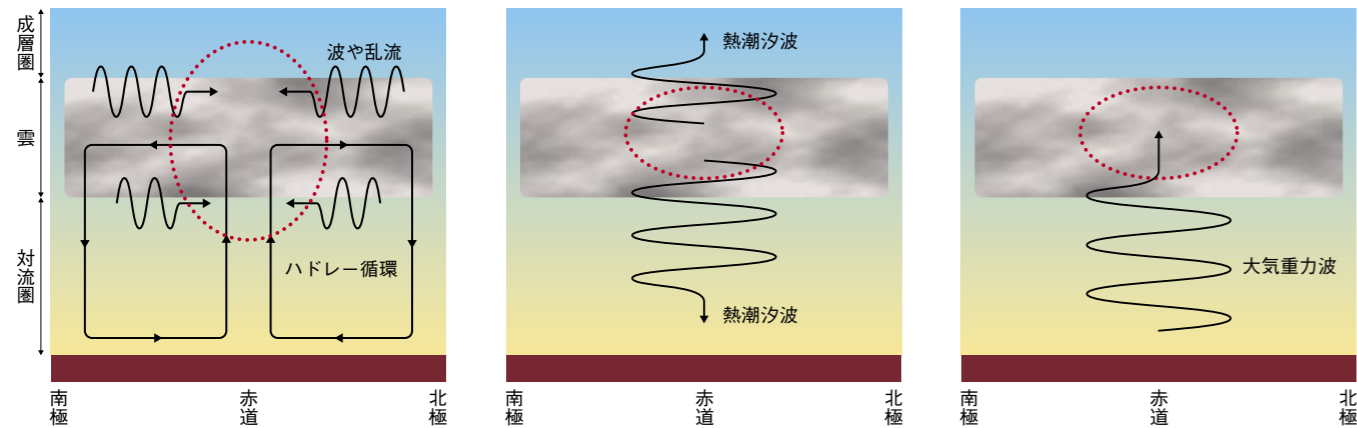


図1 金星の厚い雲を透視して大気の大循環や地表面を観測するプラネットCの想像図。くわしくはホームページ <http://www.planet-c.org> を参照。

図3 スーパーローテーションのメカニズムについての仮説



仮説1：ハドレー循環による角運動量の輸送と、波や乱流による南北方向の角運動量の輸送が合わさって、赤道上空の大気に角運動量を運び込み、風を加速する。

仮説2：太陽光が周期的に雲層を加熱することによって励起される波（熱潮汐波）が、上下に伝わり角運動量を運び、反動で雲層付近の大気を加速する。

仮説3：低高度の大気中で励起されて上向きに伝播する波（大気重力波）が、角運動量を運び、上空の大気を加速する。

加速域

ハワイの山頂から金星の大気を探る

佐川英夫

東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 / 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部・博士課程2年生

2005年12月、私たち金星観測グループは、ハワイ島マウナケア山頂に滞在し、金星観測の新しいアプローチを試みた。

この地は、年間を通して大気中の水蒸気量が低いため、湿度の多い日本国内と比較して、大気の透過率が高い。また、標高4200mをこえる山頂部では、雲が眼下を流れることになり、文字通り「満天」の星空が頭上に広がる。天体観測の最適地であるこのマウナケア山頂部には、日本の国立天文台が運用するすばる望遠鏡を含め、世界各国が所有するさまざまなタイプの望遠鏡が悠然と並んでいる。

私たちの観測は、すばる望遠鏡とハワイ大学所有の赤外望遠鏡IRTFを利用して行われた。これまで、国内の望遠鏡を使って、同様の観測を行っている。それでも、金星に望遠鏡を向け、モニター画面に金星画像の第一報が映し出されると、毎回、新鮮な興奮を感じる。この瞬間が、地上観測のいちばんの醍醐味なのではないだろうか。

今回の観測の目的は、マウナケア山頂の良好かつ安定した観測環境を利用し、高い空間分解能で、金星の雲層の微細構造や、大気光の発光分布を探ることだった。地上観測では、地球大気を隔てて観測を行うため、地球大気の揺らぎ（シーイング）の影響で像がにじんでしまうという問題を避けられない。その影響を最小限におさえるため、シーイングの影響の少ないマウナケア山頂に観測地を移し、さらに、シーイングが時間変動しない程度（数10ミリ秒）のきわめて短い露出のデータを取得した。

現在、このような過程を経て取得した大量のデータセットの中から、よりシャープな画像の解析的な抽出を試みている最中

である。大気揺らぎの影響を完全に補正することができれば、金星雲層上での空間分解能は約50kmにまで達し、過去に見られたことがないような超微細構造の可視化を期待できる。

また、今回はすばる望遠鏡を使った中間赤外領域（波長10μm帯）での観測とIRTFを利用した近赤外観測（波長1~2μm帯）を同時に行った。金星大気から射出される熱放射を、光学的な厚みが異なる複数の波長で観測することにより、金星大気の詳細な情報を引き出すことが狙いであった。この観測の直前には、野辺山ミリ波干渉計による観測（波長3mm帯）も行っており、近赤外からミリ波にかけの広い波長域で、ほぼ同時期の金星画像が得られている。この二つの観測結果を比較することにより、単一波長での観測では測定できない物理現象が見えてくる可能性が高く、新たな発見もありうる。

金星が地球にふたたび近づく地上観測の好期は1年半後になるが、今後も観測波長や解析方法を工夫しながら、プラネットCによる衛星探査とはまた別のアプローチで、金星大気謎の解明に取り組んでいきたい。



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割にも達していない。

しかし、金星の風はこのような予想とはまったく違っていた。1974年にアメリカの探査機マリナー10号が連続撮影した画像では、雲はどこでも自転と同じ方向に100 m/秒もの速さで流れ、約4地球日で1周していたのである（図2）。これは大気が地面の60倍もの速さで回転していることを意味する。

金星にこのような風が吹いていることは、実はフランスのアマチュア天文家が1957年に先に発見していたらしい。しかし同じころ、地上からのレーダー観測により金星の自転速度が大変遅いことがわかったため、4日で1周する風など非現実的であると決めつけられて、長らく無視されていたのである。

この不思議な風は「スーパーローテーション（超回転）」あるいは「4日循環」と呼ばれている。その後、着陸機が大気中を降下しながら観測したところ、風は高度65 kmくらいまで高さとともに強くなっている。大気には粘性（ねばっこさ）があり、地面との間で摩擦が働くので、特別なしくみが働かないかぎり、このような風の分布は徐々にならされてしまい、最終的には自転速度と大差ない風速に落ち着くはずである。

地球を基準に考えると不思議な風であるが、スーパーローテーションは土星の衛星タイタンでも生じていることが、ボイジャー1号や最近のホイヘンス着陸機などによる観測から明らかになっている。タイタンは1.5気圧の窒素の大気を持ち、金星と違って極寒の世界だが、ゆっくりとした自転（周期16地球日）の10倍の速さの風が吹いているらしい。宇宙全体で見ればスーパーローテーションもありふれた大気循環の一つと考えたほうがよさそうである。

スーパーローテーションの発見以来、それを理論的に説明しようと、多くの気象学者が努力を傾けてきた（図3）。広く認められたシナリオはないが、有望な仮

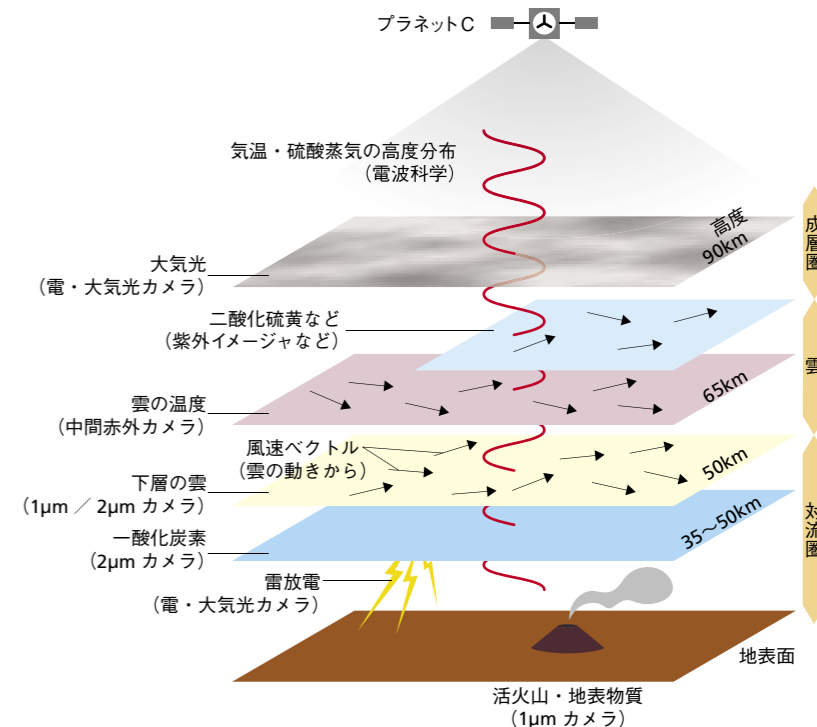


図4 プラネットCによる3次元的な金星大気観測のイメージ

説としては、①ハドレー循環と水平方向に伝わる波や乱流との共同作業により、赤道域の大気が加速される、②雲層の中で励起される波が上下に伝わって大気を加速する、③低高度で励起されて上向きに伝播する波が大気を加速する、がある。しかし、数値シミュレーションではスーパーローテーションの再現はむずかしく、地球・火星型の循環と金星・タイタン型の循環を分ける要因が何なのか、まだわかっていない。

金星大気が南北・上下方向にどのように循環しているのかも未知である。地球のハドレー循環やフェレル循環のような循環が上下に積み重なっているという予想もある。熱容量が大きい（熱しにくく冷めにくい）地表近くの大気は、まるで海洋のように、何十年もかけてゆっくりと循環しているのかもしれない。

日本の金星探査計画

金星気象に謎が多い最大の要因は観測データが限られていることである。地球気象学でそうだったように、まず「何が起きているか」を見なければ始まらない

い。たとえば、どのような波や乱流（傾圧不安定波、偏西風の蛇行、積乱雲など）が生じているのか、南北・上下方向の循環はどうなっているのか、ジェット気流のようなものがあるかどうか、スーパーローテーションの速さがどう時間変化しているか、などである。

地球では、たくさんの測候所を配置することで理解が進んできたが、金星ではそうはいかない。では、地球でも活躍している気象衛星ではどうか？ しかし金星は上空を厚い雲がおおっているため、大気圏の大部分は観測不可能だった。ところが近年、新たな可能性が拓けてきた。1980年代から1990年代にかけて、雲の下の大気や地表面まで外から透視できる赤外線（波長1.0、1.7、2.3μm*など）が相次いで発見されたのである。

*1μm（マイクロメートル）=1000分の1mm

金星の地面や低高度の大気からは熱が赤外線として放射されている。そのほとんどは大気や雲に吸収されてしまうが、上にあげたような特定の波長の赤外線は、大気中を通り抜け、上空の雲の中で何度も散乱されたあと、宇宙空間にもれ

気球搭載望遠鏡による金星大気観測計画

田口 真

総合研究大学院大学助教授極域科学専攻 / 情報・システム研究機構国立極地研究所助教授

ガリレオが手製の望遠鏡で初めて惑星を観察して以来、地上光学望遠鏡による観測は惑星大気の姿を知る有力な手段であるが、問題点もある。まず、望遠鏡の空間分解能は大気の揺らぎの影響を受けるため、口径を大きくしても、そのメリットは相殺されてしまう。大気の流出、オーロラ・大気光、雷放電、雲の生成、大気力学等の惑星大気・プラズマ現象を観測的に理解するには、時間経過を追跡することが不可欠だが、地上の一地点での観測では惑星を24時間以上連続的にモニターすることができない。また、大型望遠鏡は長期間の占有がむずかしいという問題もある。

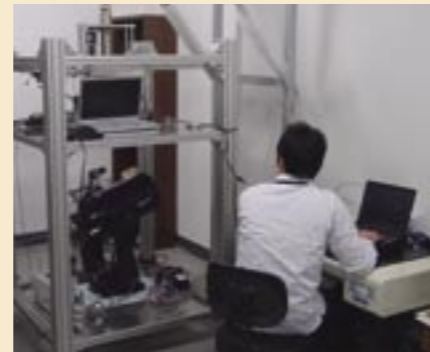
これらの地上観測の問題を解決するために、惑星大気・プラズマの撮像観測を目的とした「気球搭載望遠鏡」システムを考案した。成層圏高度の32kmまで上昇すると、大気密度は地上の100分の1まで薄くなる。そのためシーイングが常に良好であり、小口径望遠鏡でも、地上の大型望遠鏡に匹敵する空間分解能を実現できる。また、対流圏物質による大気吸収も少なく、天候に左右されずに観測できる。

この気球望遠鏡を極点に近い成層圏に浮かべると、24時間以上にわたってほぼ一定の環境条件で惑星を連続観測できるウィンドウが開ける。さらに気球搭載望遠鏡は、地上大型望遠鏡や惑星探査機と比較して、はるかに安価である。技術的には、気球搭載望遠鏡は惑星を周回する望遠鏡衛星の実現に向けてのステップとして位置づけられる。

現在、われわれは2006年度のファーストライトをめざして、気球搭載望遠鏡システムを鋭意開発中である。望遠鏡は量産品

の30cmシュミットカセグレン望遠鏡を使用する。最も重要な開発要素は、望遠鏡が搭載されるゴンドラの姿勢制御である。ゴンドラは気球から紐で吊られるので、揺動や回転運動が発生する。センサーで回転運動を検知し、ゴンドラに搭載されたコントロールモーメントジャイロとデカップリングモーターでゴンドラ方位角を制御する。揺動の周期は長く、振幅は大きくないと予想されるので、目的天体を常に視野中央にとらえるように、望遠鏡の経緯台をフィードバック制御する。さらに、それでも残る追尾エラーは、光軸途中に配した可動ミラーによって補正する。

観測対象はすべての惑星に及ぶが、最初のターゲットとして金星を選んだ。国内での実験で気球搭載望遠鏡の性能が確認できれば、次年度以降、いよいよ極域での本格的な観測運用に移る。気球望遠鏡は惑星研究の新たなプラットフォームとしての活躍が期待される。



姿勢制御試験中の気球搭載望遠鏡システム

出す。日本が送り出すプラネットCはこの赤外線を観測する金星気象衛星となるのである(図1)。

プラネットCというのはコード名で、別名をVenus Climate Orbiter(金星気象衛星)と言う。プラネットCは2004年度から宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部のプロジェクトとなり、東京大学、北海道大学、東北大学、熊本大学、国立極地研究所、大阪府立大学、総研大、メーカーなどが協同で開発を進めている。これには多くの大学院生も加わっている。探査機重量は燃料も含めて480 kgと、惑星探査機としては軽量である。2010年前

後にM5型ロケットで打ち上げられ、金星へ向けて半年間の旅をする。

金星到着後は金星のまわりを回る軌道上から連続的な撮影を行い、渦巻く大気を雲の上から雲の下まで3次元的な動画として可視化する。雷センサーにより、雷雲活動の証拠も探す。また地表面をくまなく撮影し、まだ発見されていない活火山の探索なども行う。ダイナミックに活動する金星を映し出す、それらの映像は、人類が初めて目にするものである。だれもが目を見張ることになるだろう。研究に携わる私たちも、「金星の息遣いを聞く」日が楽しみである。

五つの目で金星大気的全貌をさぐる

プラネットCには特殊なカメラが5台搭載される。それぞれのカメラが高度の異なる対象を同時に見ることによって、大気全体の姿をとらえる(図4)。

まず、「1 μ mカメラ」は、可視光では見えない低高度の雲を波長1 μ mの赤外線観測する。また地表面が発する赤外線をとらえて、鉱物組成を探ったり、活火山から噴出する熱い溶岩を探したりする。「2 μ mカメラ」は、波長2 μ m前後の赤外線観測で低高度の雲や、場所による雲粒の大きさの違い、二酸化炭素が分解してできる一酸化炭素ガスなどを見る。こ

のカメラはまた、惑星間空間に分布する細かな塵が太陽光を散乱して光る「黄道光」も観測する。

「紫外イメージャ」は、雲頂付近をただよう二酸化硫黄などのガスや、雲の構造を、紫外線で見える。「中間赤外カメラ」は波長10 μ mの赤外線観測で上空の雲の温度を計測し、雲の構造を可視化する。「雷・大気光カメラ」は雷放電にともなう発光を毎秒5万コマの超高速撮影でとらえる。金星に雷があるかどうかは議論のあるところだが、その確証をつかむのが目的である。このカメラはまた、高層大気中の酸素が放つ「大気光」という淡い光を撮影する。

プラネットCは、金星の赤道上空を通る楕円軌道を周回する(図5)。軌道周期は30時間で、金星からもっとも遠ざかる地点を中心とする約20時間にわたって、スーパーローテーションの回転とほぼ同期する。これは地球の自転と同期させる静止気象衛星と似ている。この間、大気の特定の半球を1~2時間おきに継続的に撮影して一種の動画をつくる。これを解析することによって、風速の分布を求め、さまざまな気象現象を検出する。探査機が金星に近づくところでは、局地的な現象をクローズアップで見える。また、夜側の上空では、雷や大気光の淡い光をとらえる。

さらに、地球との間の電波通信を利用した観測(電波科学)も行う。探査機から地球に送信される電波は、地球から見て探査機が惑星の背後に隠れるときと、背後から出てくるときに、金星の大気を水平方向に通過してくるので、その影響で電波の周波数や強度が変化する。これを調べれば、気温の分布や、雲の原料となる硫酸の蒸気の分布、電気を帯びた高層大気(電離層)の構造などがわかる。

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といえるだろう。地球での常識におさまらない新現象がどれほどたくさん発見されるか、それを楽しみに、探査チームは観測装置の開発に取り組んでいる。

プラネットCの金星での観測期間は2

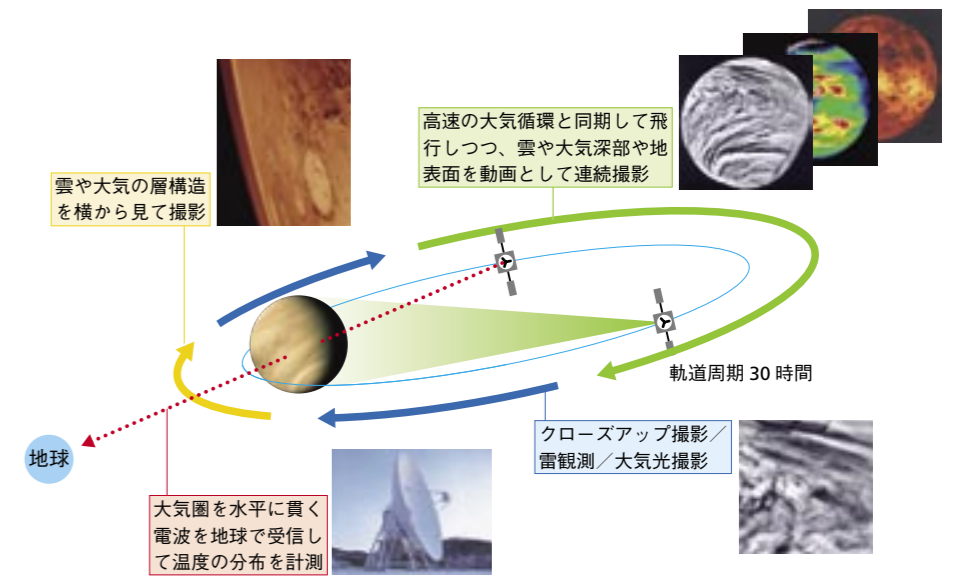


図5 プラネットCの軌道上での観測計画

年以上の予定である。先に金星に到達する欧州宇宙機関のビーナスエクスプレスも大気観測を行うが、カメラではなく分光装置による化学組成の観測が主体である。大気の流れ力学に重点を置いたプラネットCとは相補う観測データが得られるわけで、日欧の探査チーム間の密な協力が期待される。

新たな挑戦に向けて

金星の地表や大気深部を透視できる赤外線が発見されて以来、地上の望遠鏡を用いた研究も世界的に活発化している。日本にも3、4の観測チームがあり、国内の大口径の光学望遠鏡や、電波望遠鏡、ハワイの山頂にある「すばる」望遠鏡などを用いて、世界トップレベルの成果が生み出されつつある。これらの観測には、全国の大学から多くの大学院生が主体的にかかわっている。

新たな観測に触発されたかのように、理論的な研究も近年盛り上がりを見せており、大気大循環や気候進化に関して新しい考え方が提案されている。ここでも日本は世界の最前線におり、実際、最近10年ほどの間に金星の大気に関して発表された研究論文の大半が日本発である。もともと日本は気象学分野で世界のトップレベルにあるということも関係しているかもしれない。

私たちは今、プラネットCの次に向けた議論も始めている。宇宙科学研究本部が基礎開発を進めている金星気球による観測もその一つである。金星の低高度に気球を浮かべて長時間浮遊させ、その軌跡から大気の循環や大気の組成を調べ、また地表の様子を写真に撮る。このように多種多様な観測が行われることによって、金星の大気の謎が次々に解き明かされていくことであろう。



今村 剛(いまむら・たけし)
地球の天気への興味がやがて惑星へ。惑星を知ることで、自分たちを包む地球環境や日々の天気の見え方まで変わってくる、そこが研究の魅力だろう。火星探査機「のぞみ」の電波科学の担当を経て、現在は金星探査機プラネットCの科学観測の取りまとめ役を務める。近年の欧米の探査機による火星大気観測データを学生たちと一緒に眺めるのも最近の楽しみ。