Express dispatches

ビーナス・エクスプレスからの第一報

Andrew p. Ingersoll

ビーナス・エクスプレス・ミッションから、地球の姉妹惑星である金星の過酷な大気に関する最初の報告が届けられた。我々は、金星の大気が地球の穏やかな大気とまったく違ったものになった原因の解明に向かって、また一歩前進した。

Nature Vol.450 (617-618) / 29 November 2007

金星は、距離だけでなく、質量、半径、密度、化学組成においても、地球に最も近い惑星である（図1）。しかしながら、地球が温和な気候に恵まれて生命をはぐくんできたのに対して、金星は地獄のような場所になっている。金星の表面は高温で乾燥している。大気圧は極端に高く、その主成分は二酸化炭素で、硫酸の雲が立ち込めている。金星はなぜ、こんな状態になってしまったのだろうか？

欧州宇宙機関（ESA）のビーナス・エクスプレス探査機は、この疑問に関連したいくつかの大きな問題を解くために、2005年11月に打ち上げられた。金星の水はどこにあるのだろうか？金星にはどんな歴史があるのだろうか？金星の気象はどんな感じなのだろうか？地球の気象とは違うのだろうか？金星の大気の組成を詳しく知ることができれば、その進化についてどんなことがわかるのだろうか？今週号には、ビーナス・エクスプレスからの第一報が8本の論文として掲載されている¹⁻⁸。

まずは金星の水の問題について説明しよう。地球上では、水は最も大量に存在する揮発性化合物であり、海には大気中の300倍の重さの水がある。これに対して金星では、水は大気中の水蒸気が硫酸の雲に溶けた形で微量に存在しているだけであり、約200ppmにしかない。金星には海がない。金星の表面は約730K（457℃）という高温なので、たとえ水が大量にあったとしても、液体として存在することはできないのである。水以外の重要な物質としては窒素と二酸化炭素の2つがあり、地球にも金星にもほぼ同じ量だけ存在している。ただし、二酸化炭素が存在している場所は異なっている。金星では、二酸化炭素は重い大気の96.5%を占めていて、金星表面の気圧は地球の92倍にもなる。

地球では、海水中に溶け込んでいた二酸化炭素が沈殿し、大量の石灰岩として存在している。

金星と地球は多くの点で似通っているため、両者は同じようにして始まったと考えられる。かつては金星にも海ができるほどの水があったにちがいないが、なんらかの機構により、その水は失われてしまった。水蒸気は熱をため込む温室効果ガスであり、大気中の水蒸気の量は、海から蒸発する水の量によりコントロールされている。地球が太陽に接近することがあれば、海の温度が上昇し、より多くの水が蒸発し、さらに温度が上昇するだろう。ある点に達すると、温室効果はコントロー

図1 金星への旅：欧州宇宙機関のビーナス・エクスプレス・ミッションに関する基本的なデータと数字

図2 大気の世界。金星の大気は非常に重く、96.5%の二酸化炭素と3.5%の窒素からなっている。地球を包む穏やかな大気は、およそ79%の窒素、20%の酸素、1%のアルゴンからなり（乾燥空気）、二酸化炭素をはじめとする多くの

種類の微量ガスも含まれている（湿った空気には数%の水蒸気が含まれている）。このグラフは、地球と金星の大気の垂直構造を比較したものである（地球は青い線、金星は緑色の線）。温度プロファイルにおける高度は、気圧が地球の海面での気圧（1気圧）に等しくなる高さをゼロとしてある。また、温度プロファイル上の黒い点は、気圧が10倍になったり、10分の1になったりするところを示している。金星の低層大気は1気圧の高さから50km近く下まで広がっており、表面気圧は92気圧に達している。また、地球の平均表面温度が288K（15℃）前後であるのに対して、金星の平均表面温度は730Kである。1気圧の高さに対しては、どちらの大気中の雲も（地球の雲は水から、金星の雲は硫酸からできているという違いはあるが）同程度の高度幅を占めており、金星の低層大気は相対的に雲が少ない。最も高い山は、金星では平均表面高度よりも12km高く、地球では海拔9kmである。

ル不能になり、海は沸騰して干上がり、水は大気中にしか存在できないようになる⁹。

金星では、まさにこうしたことが起きた可能性がある。金星は、現在と同じ軌道で、水蒸気からなる重い大気をもった惑星として誕生したが、この水蒸気は日光により水素と酸素に分解されてしまった。軽い水素は宇宙空間に逃げていったが、重い酸素は大気中にとどまり、地殻を酸化させて、高温で乾燥した表面を作った。通常の水素は、その重い同位元素である重水素よりも急速に失われる。実際、金星では水素に対する重水素の存在比が地球の100～150倍も高く、莫大な量の水が失われたことの証拠になっている。この比が最初に測定されたのは1978年のことであり¹⁰、NASAが打ち上げたパイオニア探査機に搭載された質量分析計の試料導入部に詰まった硫酸の液滴から測定された。今回、ビーナス・エクスプレスに搭載された装置は、より正確な測定により、この高い値を確認した¹。

今日働いていると考えられる散逸機構には、おそらく太陽風が関係している。太陽風とは、太陽から放射されている荷電粒子の流れであり、これが金星の大気から原子やイオンを剥ぎ取っていると考えられている。しかし、その詳細については矛盾した報告がある。金星には内部磁場がほとんどないため、太陽風は金星の大気中で発生する磁場によってその向きを変えられる。ところがここで、ビーナス・エクスプレスの磁力計を使った測定では、太陽風は大気中に侵入しておらず、その進化に影響を及ぼすことはできないという結果になったのに対して²、同ミッションのプラズマ分析器を使った測定では、正に荷電した水素イオンと酸素イオンが中性

の原子よりも高い割合で金星の軌道に散逸しているという結果になったのである³。正味の結果として、水素と酸素は水分子中と同じ2:1の比率で失われている³。絶対比は、まだ測定されていない。金星の歴史という観点からは、この惑星に今日よりもはるかに大量の水が存在していた時代には、まったく異なる散逸機構があったと考えられる。

金星に残った二酸化炭素を主成分とする大気もたらず過酷な気象は、いくつかの点で地球とは対照的である。金星の大気は重いので、地球の大気よりも効率よく熱を蓄積し、分配するはずである。ゆえに、金星の大気の温度差は、地球の大気よりもはるかに小さくなければならない。パイオニア探査機からは、この考察を裏づける結果が得られた¹¹。今回は、ビーナス・エクスプレスの電波掩蔽（えんぺい）プログラムが、さらなる検証を行った。これは、探査機から金星の大気をかすめるような電波信号を出して、その温度を測定しようという実験である。実験の結果は、金星の高度55～60kmの雲の中では昼と夜で30～40Kもの大きな温度差が生じているという驚くべきものになった⁴（図2）。太陽光を蓄積した熱だけでは、日中にここまで温度を上げることはできない。巨大な下降気流が圧縮によって空気を加熱している可能性もあるが、それは地球上で見られるいかなる大規模下降気流よりも速くなければならない。このほかに、大気中の雲とガスが部分的に電波信号を吸収し、計算された温度に誤差を生じさせた可能性も考えられる⁴。

金星の大気中を高くのぼれば、風速は大きくなり、昼夜の温度差は小さくなる。風速は固体惑星に対して

測定される。金星の自転速度は遅く、金星が恒星に対して1回転するには243地球日かかり、金星の表面から見た太陽は117地球日ごとに昇ったり沈んだりしている（金星の太陽日がかなり短いのは、金星は太陽系で唯一、公転運動とは逆の向きにゆっくりと自転しているからである。金星がなぜこのような状態になったのか、なぜそのままなのかは、まだ明らかになっていない¹²。ひょっとすると、太陽が重い大気中に引き起こす潮汐が、これに関係しているのかもしれない）。

金星の雲は最高で高度70km近くに達し、そこでの風速は秒速100m（時速360km）近くになる。これは、地球の大気中に発生するハリケーンの風力の3倍、航空機の時速11km分も速くしたり遅くしたりするジェット気流の速度の2.5倍に相当する。ビーナス・エクスプレスは、金星の雲を追跡することにより、これらの強風を確認した。金星には紫外線を吸収する未知の機構があり、日によって激しく変動しているが、これを利用して雲の動きを観測したのである⁵。

金星が地球やその他の惑星と共有している特徴の1つに、極付近の広い領域に見られる極渦とよばれる大気の循環がある。地球の極渦は、極付近の低温の空気を核として、それぞれの半球の冬に出現する。これに対して金星の極渦には低温の環があり^{4,6}、その内部には、周囲よりも温度が約10K高い、双極子の形をした奇妙な特徴がある。この暖かい特徴も、太陽光による加熱だけでは説明することができない。その成因としては、強い下降気流による圧縮効果が考えられる。双極子の形をした特徴は、低緯度で暖められた空気が上昇し、上空を極地方まで移動し、そこで冷却されて下降し、地表付近を低緯度まで戻っていく「ハドレー循環」が拡大したものなのかもしれない。金星では、高度65km以上の高さでは、赤道は極付近よりも低温である（参考文献4）。ハドレー循環がこのような状態を保っているしくみはまだ解明されていない¹³。

金星では、固体惑星が非常にゆっくり自転しているため、大気は独自に回転している。大気の回転方向は惑星の自転方向と同じであり、公転運動とは逆の向きに回転している。高度が上がり、大気が薄くなるにつれて太陽からの影響が大きくなるため、より少ないエネルギーを吸収して、より大きな温度変化を生じるようになる。高度90km以上では太陽からの影響が支配的になり、自転軸の周りを回転していた大気は、昼側から夜側へと流れるようになる。昼側から夜側への空気の流れは、昼側で生成して夜側へと運ばれる一酸化窒素、一酸化炭素、酸素などの化合物や、昼側で破壊されて夜側から別の化学反応の副産物として供給され

るフッ化水素や塩化水素などの化合物の測定によって裏づけられている^{1,7}。

地球と金星の大気に関する興味深い現象として、最後に雷について説明したい。金星の雲は地球のスモッグのようなものであるため、雷が発生するはずがない。実際、金星の昼側でも夜側でも、はっきりした稲妻が確認されたことはない。しかし、ビーナス・エクスプレスはホイッスラーを検出した⁸。ホイッスラーとは、1秒足らずの間だけ持続する低周波の電磁波であり、放電により生じると考えられている。金星の昼側では対流する大気のセルが確認されたが⁵、セル中の雲物質の量は、地球で雷が起こる場合の100分の1にも満たない。これは、地球上では雲を帯電させるには不十分な量である。

このように、金星の雷をめぐる証拠には矛盾がある。雷が存在しているなら驚くべきことだが、我々はまだ、惑星の大気中で電気を発生させるすべての方法を検討してみたわけではないのかもしれない。地球上での経験にもとづく我々の直観が外れることは、これまでに何度もあったのだから。

ビーナス・エクスプレスの燃料は2013年までもつ。ミッション・コントローラーがこの探査機の能力を把握してくるにつれて、観測シークエンスはより野心的なものになり、金星に関する我々の知識も増大するだろう。2011年には、日本の金星気象衛星プラネットCも金星にやってくることになっている。将来の金星ミッションとしては、バルーンを使って風速を測定したり、微量ガスやその同位体採取したり、灼熱の惑星表面から岩石をつかみ取って涼しい高度までもっていき、そこで分析を行ったりすることが考えられている。いつの日か、地球の気象プロセスを調べるように金星の気候を研究できるようになったら、我々は気候全般を理解できるようになるのかもしれない。

Andrew P. Ingersoll, カリフォルニア工科大学 (米)

- Bertaux, J.-L. *et al. Nature* **450**, 646.649 (2007).
- Zhang, T. L. *et al. Nature* **450**, 654.656 (2007).
- Barabash, S. *et al. Nature* **450**, 650.653 (2007).
- Patzold, M. *et al. Nature* **450**, 657.660 (2007).
- Markiewicz, W. J. *et al. Nature* **450**, 633.636 (2007).
- Piccioni, G. *et al. Nature* **450**, 637.640 (2007).
- Drossart, P. *et al. Nature* **450**, 641.645 (2007).
- Russell, C. T. *et al. Nature* **450**, 661.662 (2007).
- Ingersoll, A. P. *J. Atmos. Sci.* **26**, 1191.1198 (1969).
- Donahue, T. M., Hoffman, J. H., Hodges, R. R. & Watson, A. J. *Science* **216**, 630.633 (1982).
- Seiff, A. *et al. J. Geophys. Res.* **85**, 7903.7933 (1980).
- Yoder, C. F. in *Venus II. Geology, Geophysics, Atmosphere, and Solar Wind Environment* (eds Bougher, S. W. *et al.*) 1087.1124 (Univ. Arizona Press, Tucson, 1997).
- Gierasch, P. J. *et al. in Venus II. Geology, Geophysics, Atmosphere, and Solar Wind Environment* (eds Bougher, S. W. *et al.*) 459.500 (Univ. Arizona Press, Tucson, 1997).