

目前に迫った「あかつき」の金星大気探査

今村剛（宇宙航空研究開発機構）、あかつきチーム

1. 一番星への旅

金星探査機「あかつき」は 2010 年春、いよいよ鹿児島県にある種子島宇宙センターに運び込まれ、打ち上げに向けた最終調整に入った。この探査計画は 1998 年から検討がスタートし、2001 年にミッション提案、2004 年に JAXA プロジェクトに昇格、2008 年から実際に打ち上げる機器の試験を行い、ついにここまで来た。図 1 は 2009 年 10 月に宇宙航空研究開発機構の相模原キャンパスで撮られた「あかつき」の姿である。写真には 5 つの大気観測カメラが写っている——これほどカメラだらけの惑星探査機は異例である。

この風変わりな探査機の目的地である金星（図 2）は、古くからよく親しまれた天体であり、ヴィーナスやイシュタルなどの名で神話にも登場する。太陽と月を除くと全天でもっとも明るいこの星を、多くの人がそれと気づかないまま一番星として見ているだろう。金星は地球より一つ内側の太陽系惑星で、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考えられている。金星と地球は何が同じで何が違うのか？ そしてそれはなぜなのか？ 地球の生い立ちを理解するために、また地球型惑星が多様な姿に枝分かれする理由を知るために、金星は他に代え難い重要な研究対象であり続けている。

「あかつき」は世界初の、惑星気象衛星の名を冠するに値するミッションである。以下では金星大気の謎と「あかつき」の狙いについて見ていこう。

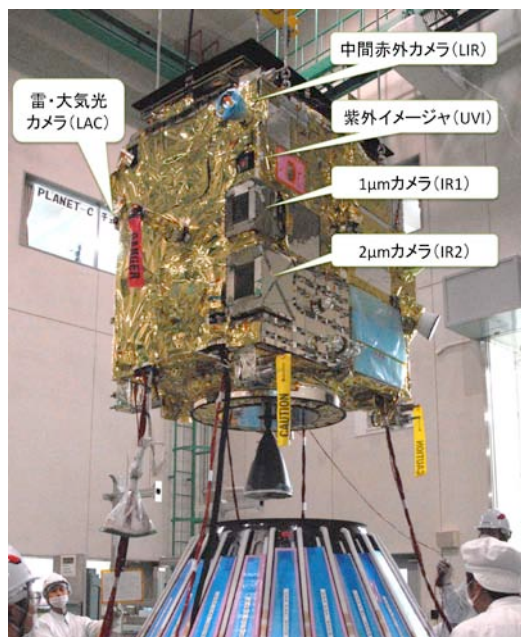


図 1 金星探査機「あかつき」とロケット結合部の適合試験



図 2 米国のパイオニアビーナス探査機が紫外線で見た金星（NASA 提供）

2. 金星の大気と水

金星は地球の 95%の大きさの、固い地表面を持ついわゆる地球型惑星である。厚い大気に地表を隠された姿は人類の想像力をかきたて、宇宙時代が始まるまでは高度な文明の存在まで想像されたりした。しかし実態は違っていた——たとえば、主成分を二酸化炭素とする大気量は地球の 100 倍程度あり、この大気の重さのために地表気圧は 90 気圧（水深 900mに相当）にもなる。大気温度は地表面で 460℃に達し、液体の水は存在しない。

今から 46 億年前に太陽系が作られた時、金星にも多くの水があり、海があったということはあるようなことである。しかし地球の 2 倍の太陽光を浴びる金星は地球よりも暖かく、そのために原始の金星の大気には地球よりも多くの水が水蒸気となって含まれていたであろう。この水蒸気は徐々に高層大気に運ばれ、太陽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流れ出してしまったということが考えられる。そう考える根拠の一つは、金星大気にごくわずかに含まれる水蒸気を調べたところ、通常の水素に対する重水素の割合が地球に比べて 100 倍も大きかったことである。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。ただし酸素は比較的重いいため、簡単に宇宙空間に失われるとは考えにくい。その行方は謎である。

ここで注意しておきたいのは、現在の金星の高温環境は太陽に近いことが直接の原因ではないということである。金星の明るさの一因は金星全体をおおう濃硫酸の雲が太陽光をよく反射することであり、その反射率は 78%にもなる（地球の平均的な反射率は 30%）。この雲が太陽光を遮るために、地表まで届く太陽光は地球の 10 分の 1 にすぎない。にもかかわらず、膨大な二酸化炭素が強力な温室効果をもたらすために、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。近年、二酸化炭素の増加による地球温暖化が問題になっているが、金星は温暖化の究極の姿を見せていると言えるかもしれない。

ちなみに、地球では二酸化炭素は海に溶け込んだあと、炭酸カルシウムという鉱物となって地殻に取り込まれている。大気中の二酸化炭素濃度は、近年の人類活動の影響を除外すれば、このような大気から地殻への固定と火山ガス噴出による地殻から大気への放出との間のバランスで決まっていると考えられる。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。原始の金星に海があったとすれば、地球のような二酸化炭素濃度の調節メカニズムが働いて、大気組成は今と全く違っていただろう可能性がある。金星の環境がどのように変化してきたのかという問題は、惑星が水を保持できる期間、ひいては生命誕生の条件にかかわる興味深いテーマである。

3. 金星の雲

金星のエネルギー収支を支配する濃硫酸の雲は、地球の雲の 10 倍の高さにあたる高度 45～70 km に浮かぶ。この硫酸は、高層大気中で太陽紫外線をエネルギー源として、大気中の硫黄化合物から化学反応で作られると考えられる。雲粒は重力で徐々に沈んでいくので、雲層を維持するためには上層大気まで雲の原材料を運び上げなければならない。このメカニズムとしては惑星規模の対流から小規模な乱流まで諸説あるが、今のところはっきりしない。

金星を可視光で見ると模様がなくてのっぺりしているが、紫外線で見ると、赤道から高緯度まで斜めに伸びる暗い帯や数十 km 規模の細胞状構造など様々な模様が観察される（図 3）。これらの模様こそ雲層を維持する気象プロセスの反映のはずだが、その成因はほとんど分かっていない。暗く見える場所には何らかの紫外線吸収物質があるはずだが、その正体も不明である。金星の雲といえば、ここに雷放電が生じるかどうかは積年の謎である。雷から放射されたことをうかがわせる電磁パルスが金星近傍でとらえられているが、地球では積乱雲の中で氷晶が作られることが雷発生のために必須であることを考えると、暖かく乾燥した金星大気で雷が生じることは簡単には受け入れられないのである。

雲の原材料となる硫黄化合物は火山活動によって供給されている可能性がある。実際、金星の地表はいたるところ火山や溶岩平原におおわれている。ただし、これまでに活火山は見つかっておらず、現在の火成活動は比較的低調ではないかと考えられている。地球で見られるようなプレートテクトニクス（大陸移動）が起こっている痕跡はないが、クレーターの分布から、数億年前に大規模

な火成活動が起こったことが示唆されている。火成活動の様式が地球と異なる理由はわからないが、大規模な噴火のたびに金星の雲量は変化し、気候が変化してきたかもしれない。

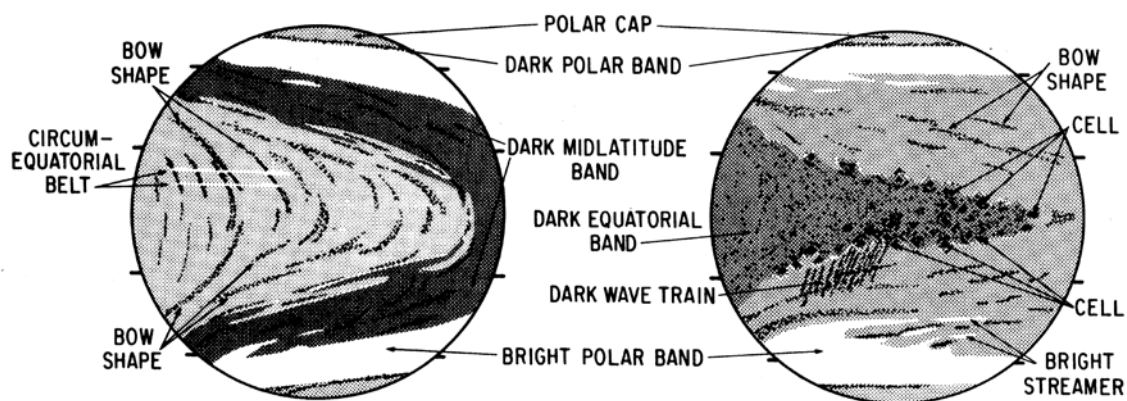


図3 金星の雲頂に紫外線で観察される様々な模様 (Pollack 他, 1980 年)

4. 金星の風

金星ではとても奇妙な風が吹いている。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、全ての緯度で 100 m/秒ほど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 (図 4)。この自転の 60 倍もの速さの風を「超回転 (スーパーローテーション)」と呼ぶ。

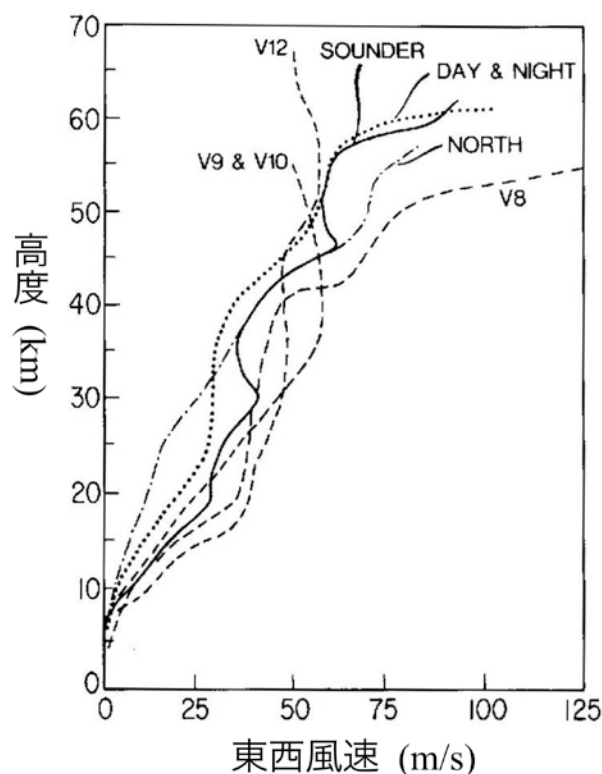


図4 米国とロシアの着陸機によって測られた金星の東風の高度分布 (Schubert, 1983 年を改変)

大気循環のパターンは惑星ごとに違う（図 5）。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。このような緯度ごとの違いは、ハドレー循環やフェレル循環といった南北・上下方向の循環によって生じている。火星の大気循環は地球に似ていると考えられている。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、大気内部の流体力学、すなわち気象学で説明できるだろうというのが多くの研究者の予想である。具体的なメカニズムは特定されていないが、何らかの流体波動（偏西風の蛇行や高気圧・低気圧のようなもの）により地面から大気へと力が伝えられ、大気が加速されると想像されている。波動が運ぶ力とは、たとえば渚で海の波を受け止めると体が押されるのを感じるが、そのようなものと思えば良い。

金星やタイタンで超回転を引き起こす流体现象は、それが何であれ、同じく地球型惑星である地球でも形を変えて生じているだろう。そうだとしたら、それがなぜ地球では超回転にまで至らないのか。例えば地球では、反対方向に加速する別の力があり、スーパーローテーションが打ち消されているのかもしれない。もちろん、我々は地球の気象のしくみをだいたい知っている。しかし金星という隣の惑星に目を向けるとき、地球気象が現在のような姿でなければならない理由を、実はちゃんと理解していないということに気付かされる。

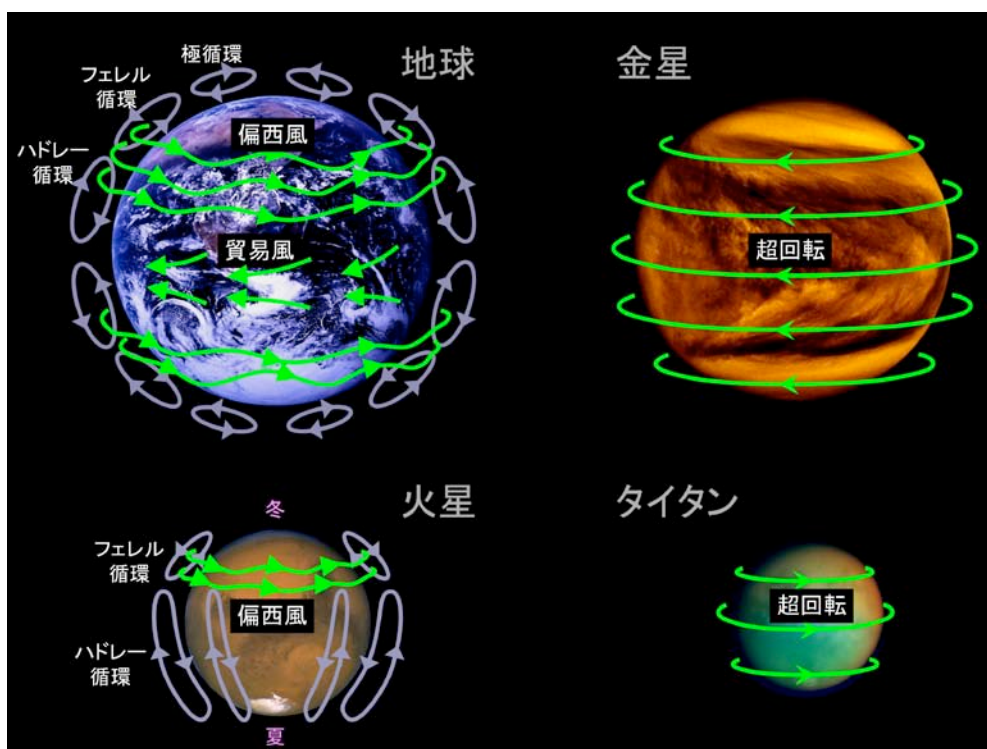


図 5 地球、金星、火星、タイタンの風系。金星とタイタンにおいてハドレー循環やフェレル循環のような流れがどうなっているかは分かっていない。

5. 金星気象衛星の挑戦

「あかつき」はまもなく H2A ロケットで打ち上げられ、半年間の旅を経て金星を巡る楕円軌道に入る（図 6）。そこから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気象学の謎に迫る。これまでに金星にはいくつかの周回機や着陸機が送り込まれているが、「あかつき」のように気象観測を追求したものはない。

「あかつき」は 5 台の特殊なカメラを使って、異なる波長の光で異なる高度の大気を同時かつ連続的に撮影することにより、大気の 3 次元の運動をとらえる（図 7）。1 μm カメラと 2 μm カメラ

は、金星大気がほぼ透明になる波長 $1\sim 2\mu\text{m}$ の 6 つの赤外線波長を活用し、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。赤外線で地表面を撮影して鉱物組成の分布や活火山についても調べる。 $(1\mu\text{m}$ は 1mm の 1000 分の 1)

中間赤外カメラは波長 $10\mu\text{m}$ の赤外線で雲の温度分布を映像化し、雲頂の凹凸や大気の運動を調べる。紫外イメージャは紫外線で雲の生成に関わる化学物質の分布をとらえ、その変動から雲頂高度での大気の運動を調べる。雷・大気光カメラは雷放電の発光を超高速撮影でとらえ、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、この高度の大気の運動を映像化する。

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に金星大気をかすめるが、このとき地上で受信する電波の周波数や強度の変化から気温の分布などがわかる。

このようにして惑星全体に広がる 3 次元の流体運動を可視化して、画像解析によって風速、温度、化学物質の輸送といった情報を取り出す。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。「あかつき」はこれまで乏しいデータに頼ってきた惑星気象学の研究方法を変えてしまう力を持っている。

広くて深い金星の科学の中で、「あかつき」が手をつけられる範囲は限られている。それでも「あかつき」は、惑星探査では新参者の日本が送り出す渾身の一手である。いよいよ始まる挑戦を、暖かく見守っていただきたい。

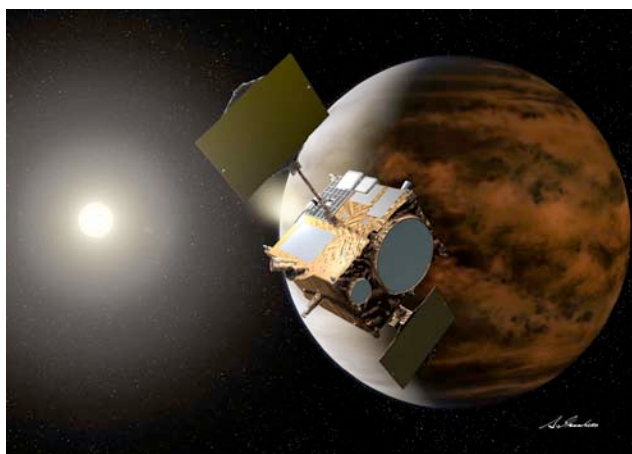


図 6 金星に到着した「あかつき」の想像図。
赤外線でしか見えない夜側の雲の模様も表現してある。

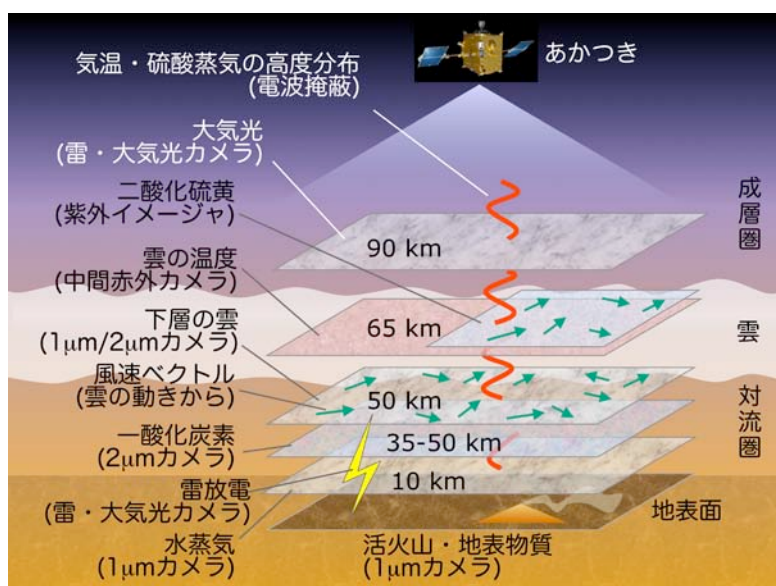


図 7 「あかつき」による 3 次元大気観測のイメージ