

日本の金星大気探査ミッション

中村正人¹, 今村 剛²

1. はじめに

宇宙科学研究所の理学委員会の下に設けられた金星探査ワーキンググループの数年にわたる活動の成果として、2001年1月、第1回宇宙科学シンポジウムにおいて金星大気探査ミッションの提案がなされた。これが初回となる宇宙科学シンポジウムは、宇宙科学研究所理学委員会へミッションを提案する場となり、我々はその先陣を切ることとなった。提案された探査ミッションは金星へM-Vロケットを使って探査機を送り込み、2009年から2年以上金星の周回軌道から金星大気の観測を行うというものである。

提案を受けて宇宙科学研究所理学委員会では評価委員会を設置し、ヒヤリングを含む審査を実施した結果、2001年5月に宇宙科学研究所長に答申が出された。ここでは、金星の大気科学をサイエンスの目標とすることは十分な意義のあることであり、これによって金星の大気科学の進展が望めること、また、搭載機器に十分な妥当性があり、実現の可能性が十分に吟味されていることが述べられた。これにより、金星ミッションをM-V衛星計画として推進することが宇宙科学研究所の方針とされたのである。

さらに2001年7月には宇宙開発委員会に金星探査プロジェクト小委員会(主査:佐藤勝彦東大教授)が設置され、2回に渡って宇宙研外の有識者による審査が行われた。ここでは主にミッションの合理性、サイエンスの意義などが議論され、高い評価を持って、宇宙開発委員会開発評価部会へ報告がなされた。

これら一連の評価過程を経て金星ミッションは日本の2番目の惑星探査機として現実のものとなろうとしている。本稿では、この金星大気探査計画の概要を述べる。ミッションにおけるサイエンスに関しては参考文献[1]および[2]に詳しい。また、金星大気力学の詳細な議論は文献[3]を参照されたい。

2. なぜ金星を探査するのか

金星は我々人類にとって身近な惑星であり、東洋でも古くから「宵の明星」「明けの明星」として知られてきた。地球に近い軌道を持つため、地球と同様の環境を有しているのではないかと想像もたくましくされ、SF活劇小説の舞台ともされた。

金星探査の歴史は古く、アメリカ、旧ソビエト連邦が相次いで探査機を送り込んでいる。特にソビエト連邦のベネラシリーズはプローブを大気中に直接投入し、大気組成、圧力、温度などのデータをもたらした。また、米国のパイオニアビーナスは金星の電離層と太陽風との相互作用を明らかにし、マジェランは金星表面地形をレーダー観測により明らかにしている。そこで判った金星の表層環境は残念ながら地球とは似ても似つかぬもので、高い圧力を持つ高温の大気に覆われていた。海は存在せず、大気の組成も地球とは異なっている。これらの探査機により金星にまつわる幾つかの謎は解かれてきたが、しかし、いまだに金星には多くのサイエンステーマが残されている。

1 東京大学大学院理学系研究科

2 宇宙科学研究所惑星研究系

20世紀の最後に初の惑星探査機「のぞみ」を火星に向けて送り出した日本が、次のターゲットとして同じく地球型惑星である金星を目指すことは、ある意味で自然な流れである。しかし、一つの探査機で多くの科学的成果を挙げようとするとき、そこにはすでに探求の進んだ分野を敢えて避け、今まで誰も手を付けなかった分野に進むことが求められた。ここで我々が選んだ回答が金星気象探査である。

金星は可視光や紫外光では高度数十キロメートルに厚く分布する雲によって光がさえぎられ、その

自明とはいえない。何故かと言うと、金星の本体の自転速度は良く知られているように非常に遅く(周期243日)、其の周りを大気だけが高速回転しているという不思議があるからである。大気を持つ角運動量を考えると、どこから角運動量の供給が無ければ大気自身の粘性や地表との間の摩擦によって、このような高速回転運動は止められてしまうはずである。それが定常的に維持されているということは、大気に角運動量を補給するメカニズムがどこかに存在しなければならない。

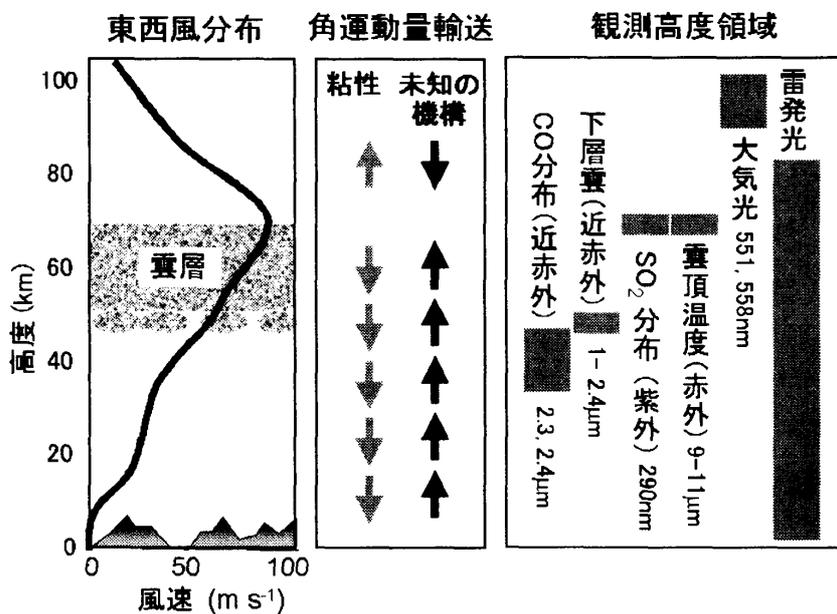


図1：金星大気は高度約70 km（雲頂高度）で最大の東西風速を持ち、その速度は惑星本体の回転速度の60倍になる（図左）。大気の粘性と地面との間の摩擦により大気を持つ角運動量は失われていくから、この運動を維持するためには大気に角運動量を補給する未知の機構が存在しなければならない（図中）。この機構を解明するためには異なる波長の光で異なる高度の大気の動きを調べることが有効である（図右）。

中を見通す事が出来ない。しかし其の雲の最も上層の動きを見ると、雲のパターンが約4地球日で惑星の周りを一周していることがわかる。また、ベネラシリーズによって調べられた風速の鉛直分布は雲の上層部で最も速く約100 m毎秒のスピードを持つ。これは4日で大気が循環するという観測と矛盾が無い（図1左）。このような風系は地球では存在せず、金星に特異なものと考えられるが、その駆動メカニズムは

仮説はいくつかあり、其の中で最も有名なものは子午面循環と水平擾乱を組み合わせるものである（図2）。子午面循環は、太陽に熱せられた大気が赤道域で上昇し、極域で下降することによって生じる大規模な循環である。水平擾乱としては、水平方向に惑星規模の広がりを持った何らかの波動や乱流を想定している。金星は遅いながらも自転をして

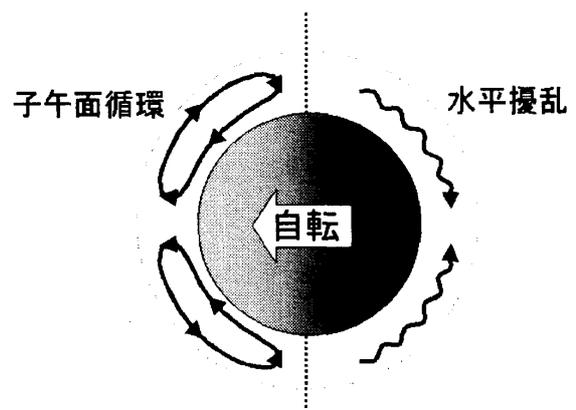


図2：角運動量が惑星本体から大気へ運ばれる仮説。赤道域で得た角運動量を極域へ運ぶ子午面循環と、角速度を水平方向に均す水平擾乱の組み合わせにより、惑星全体では平均的に角運動量が惑星本体から大気に輸送される（本文参照）。

いるから、大気は赤道域の地表面で金星本体から角運動量をもたらったのち上昇する。この角運動量を保って極域へ流されて行くわけだが、これだけでは金星の自転より速い大気の流れを作り出すことは出来ない。ところが大気が赤道域から極域に移動する間に水平擾乱によって角運動量が低緯度方向へ再分配されると、ここに上層大気に角運動量を溜め込むプロセスが生まれる。極域まで移動した大気は、そこで沈み込み、再び極域から赤道域へ地表近くを移動する間に、地表面との摩擦によって、金星の自転速度に対応する角運動量を得る。

この仮説が正しいかどうかを検証するためには、子午面循環の方向と大きさ、そして水平擾乱の実体とそれがもたらす角運動量輸送の大きさをきちんと計測しなければならない。特に角運動量輸送の大きさは平均の流れからのずれの2次の項で表される量であるから、まず大気の流れの方向、速度を金星全球に渡って精密に測る必要がある。これを行う事が今回の金星大気ミッションの他に対する大きなアドバンテージである。一定時間(それは例えばトレーサーとなる雲の生成消滅の時定数より短くなければならない)毎に、これまで見る事ができなかった金星の下層の雲、あるいは微量気体の分布を周回衛星から写真に撮り、その連続画像の比較から、大気の運動を精密に調べようというのである。

この観測を地球上に設置された望遠鏡で行おうとすると、まず「すばる」クラスの望遠鏡でも空間の解像度の点で金星周回衛星に一桁かなわない。また、

地球からは金星が観測できる時間は日没直後あるいは日の出前に限られて、大気の連続的な撮像が行えない。この為、今まで金星気象の実証的研究には大きな発展が見られなかったのである。この金星大気探査ミッションは、金星のみならず広く惑星の気象の研究において、地球気象の研究と本質的に同等の実証的アプローチを可能にするという新たな展開をもたらすものである。

ここで、何故他国、特に米国、ヨーロッパ、ロシアといった宇宙の先進国が金星気象探査に取り組んでいないかを述べたい。日本の金星大気探査ミッションでは主力の観測装置として近赤外のカメラを2台搭載する。この近赤外の波長域には「大気の窓」と呼ぶ事が出来る複数の波長帯がある。この「窓」からは金星の地表面や、下層の大気からの熱放射が金星大気によって吸収されずに金星の厚い雲の外側に出ることが出来る。この波長の光を観測することによって、雲の下からの情報を得ることが出来るわけだが、この「大気の窓」が発見されたのが十数年前である。したがって、米ソが争うようにして探査機を送り込んでいた時代には、この事実は知られておらず、この為、今まで手の付けられていない研究の処女地となっている。米国の木星探査機「ガリレオ」が木星への途上、金星のフライバイを行った。このとき、「大気の窓」の一つである $2.3\mu\text{m}$ の波長で金星をスキャンしたところ、見事に雲を突き抜けてくる近赤外放射を捉えることに成功している。この新しく発見された観測の窓を有効に生かすことによって初めて金

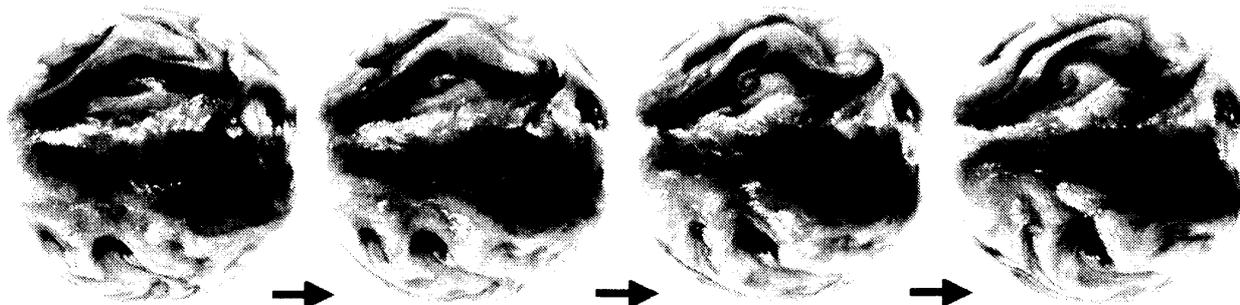


図3：米国の気象衛星GOES-10による地球の水蒸気画像（12時間間隔）。

星大気ミッションが成立するのである。

3. 観測計画

今回のミッションでは金星大気の運動を周回軌道上から精密に測定する。このためには金星全球にわたり立体的に大気運動を可視化する必要がある。如何に赤外放射を観測しても大気運動そのものが見えるわけではないから、実際には大気運動によって流される雲や大気中の微量成分(CO, SO₂)の空間分布のパターンを、一定時間ごとに観測し、パターンの流れる様子から風向, 風速をもとめるのである。この点は後に再び述べる。

図3に地球の気象衛星で得られた12時間毎の水蒸気のパターンを示すが、このような画像を金星で取得しようというのである。もちろん、目で見ての作業ではなく、画像間の相関解析を行って雲や微量気体成分の動きを求める。ここで、データの質、出てきた風向風速ベクトルの信頼性のチェックが重要なプロセスであることは言うまでも無い。パターンの移動が大気の動きに完全に直結するという保障すらないのである。ここでの解析手法には地球で気象衛星データから風の場合を求める方法が大いに参考になるであろう。

地球の気象衛星は静止軌道に置かれる。これは地球の同じ地域をいつも観測するためであるが、金星

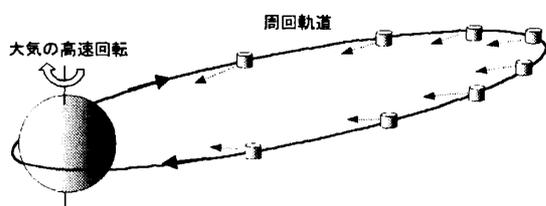


図4：衛星軌道の模式図。金星大気の回転方向と同じ向きに回る軌道を取り遠金点高度を約13金星半径とすると、軌道運動の角速度と大気の回転運動が、軌道周期30時間のうち(近金点付近を除く)20時間にわたってほぼ同期する。従って一定時間ごとに探査機から写真を撮れば(図)、金星大気の特定の半球で生起する気象現象を継続的に観察できる。

大気探査計画でも同様の手法をとる。ただし、金星では惑星本体の自転と同期させるのではなく、高度50 km程度の大気の高速回転に合わせた運動をさせる。残念ながら惑星ミッションでは搭載できる燃料が限られているために、多くの燃料を使う円軌道には投入できない。しかし、長円軌道の遠金点を高度13金星半径に置くことで、周回軌道上の約7割の時間を惑星大気運動とほとんど同期した動きをとることが出来る(図4)。軌道周期は約30時間であるから、2時間に一度画像を取得することにしても大気の移動に合わせた10枚の連続画像が得られる。

観測のために搭載するカメラは5種類である。これを表1にまとめる。近赤外カメラは地表や下層大気からの熱放射が「大気の窓」を通して外に漏れ出すのを測るのだが、これらの光は途中の雲やCOによって吸収散乱を受け、雲の濃い部分では暗くなり、薄い部分では明るくなる。金星下層大気気温は0次近似として緯度経度方向に一様であると考えられるので、そこからの赤外放射も一様であると仮定でき、ちょうど均質な光源を背景とした影絵を見るように我々は雲の分布を可視化することが出来るのである。ちなみにCOの分布は近赤外カメラ2で測る2.3 μmと2.4 μmでのCO吸収の差を見ることによって知ることになる。

これらの観測にかかる物理量の高度分布は図1の右側に示されている。角運動量が汲み上げられていくと考えられる雲層の下から雲頂に至るまでを上記のカメラ群でカバーしていることがわかる。また、これらの異なる高度領域のデータを有機的に組み合わせることによって、新たに発見される大気現象の立体構造を明らかにし、その正体を同定することを容易にする。

4. 探査機について

本稿で述べている金星探査計画はM-Vロケットに

よる金星軌道投入を前提としている。打ち上げは2007年2-4月期を正規の打ち上げウィンドウとしている。この時期に地球周回のフェージングオービット(惑星間軌道投入までの待ち時間調整フェーズ)に投入された衛星は同年6月に地球を離脱し地球と併走する軌道に入る。さらに一年後の2008年6月に地球をスイングバイし、金星に向かうが、この時期にバックアップの打ち上げウィンドウが設定されている。つまり、2008年2-4月期に打ち上げると、2007年打ち上げの正規の軌道に接続することが出来、まったく同じ衛星構造、搭載燃料、キックモーターを使って金星への軌道に投入することが出来る。この2つの機会を逃すと、次に金星に十分な観測機重量を持っていけるウィンドウは2015年まで存在しない。

いずれの打ち上げ時期をとっても金星到着は2009年9月8日である。このウィンドウを使った場合、探査機総重量は647kgでこの内の約半分は燃料および酸化剤である。搭載可能な観測機の総重量は35kg程度であり、前項に上げた5つのカメラを積むに十分である。

金星周回軌道に投入された後は平均近金点高度300 km、遠金点高度13金星半径(金星中心から14金

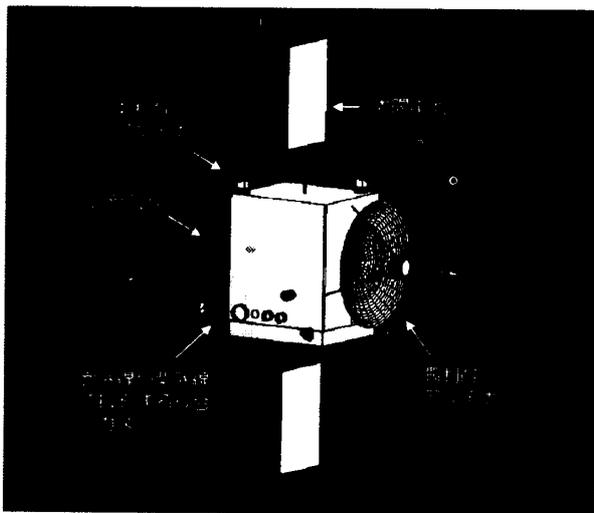


図5：探査機外観図。観測機器は探査機の側面に並び、この面を金星に向ける姿勢制御により撮影を行う。

星半径)、軌道傾斜角172度、軌道周期約30地球時間をとる。軌道傾斜角が180度に近い値をとるということは、逆行軌道、つまり西向き(地球から見ると)の周回軌道に入ることであるが、これは金星の大気が西向きに運動していることに対応している。この軌道上から最低2地球年(3金星年)の観測を行う。

図5に衛星の概念図を載せる。衛星は3軸制御、つまり内蔵されたモーメントホイールに角運動量を貯めこむことによって衛星の姿勢擾乱を吸収し、姿勢を安定させる方式を取っている。これは衛星の側面に搭載されたカメラ群を、衛星そのものの姿勢を動かすことによって金星に正対させ、安定した状態で撮像を行う為である。衛星には固定された高利得アンテナが取り付けられ、これによって地球と4kbps @1.7天文単位から32kbps@0.3天文単位の通信回線確保するが、通常は衛星はカメラを金星に向ける姿勢を維持しており、地球との通信回線を開くときのみ衛星姿勢を変更して高利得アンテナを地球に向ける。衛星の南北面には太陽電池パドルが伸びている。このパドルは軸周りに回転し、衛星姿勢にかかわらず常に衛星に電力を与えられるように制御される。大事なのは衛星のカメラが南面に接して取り付けられていることである。この南面は太陽光が当たらない面として設計されていて、ここを宇宙空間に熱を捨てる放熱面とする。特に近赤外カメラ2は冷凍機を使って赤外検出素子を60-65Kに冷やすため、こ

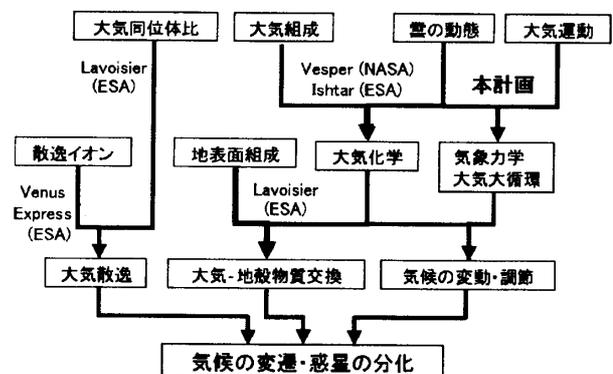


図6：世界における金星探査計画と本計画の位置づけ

この面からの放熱が大切である。高利得アンテナの反対の面には推力500ニュートンの2液式スラスタがそのノズルを突き出している。

5. 国際協力

最後に、本計画と諸外国の計画について述べておきたい。考えられる金星ミッションには様々なバリエーションがあり、我々がその内の一つである大気運動に焦点を絞るという戦略を立てたことは第1章に述べた。ここでは「大気運動」や「雲の動態」といった研究テーマに重点を置き、そこから気象力学、大気大循環といったテーマにアプローチしていく。一方、米国やヨーロッパは別の計画を立てている。これらの計画と、その相互の関係を図6にまとめた。

まず米国のVesper, ヨーロッパのIshtarといった探査機は精密な分光観測から大気組成を調べ、大気化学の研究を進めようとしている。これは、我々の気象力学と結びついて、気候の変動や調節がどの様に行われているのかという研究テーマに結びつく。またヨーロッパのLavoisierは地表面の組成を測り、これが大気化学と結びついて「大気-地殻物質交換」という惑星自身の進化の研究へと結びつく。

これらとは異なるアプローチをとる研究もある。大気散逸というテーマを調べるために前述のLavoisierでは大気中に含まれるDとHを始め様々な

元素の同位体比を測定する。これらの値が地球や火星、隕石の値とどのように異なっているかは、太陽系の進化の歴史を調べる重要な鍵とみなされている。さらに直接的にヨーロッパのVenus Expressは大気がプラズマとなって散逸していく様子を直接調べようとしている。

これらのいくつかの大きなテーマについて理解が進めば、これらを総合的に判断して、金星と地球がいかにして異なった環境を持つ星へと分化してきたのかという問題に答えることが出来るようになるだろう。すなわち、我々の金星大気探査ミッションは金星探査の大きな流れの一翼を担うものであり、これを成し遂げることは国際社会での日本の責務であるといっても過言ではなからう。

参考文献

- [1]松田・今村, 2001: 科学 71 (9) , 1162-1164
- [2]今村他, 2001: 天気 48 (7) , 59-64.
- [3]松田佳久, 2000: 惑星気象学, 東京大学出版会, 204pp.

表1 搭載機器

	観測波長	観測対象	得られる主な物理量
近赤外カメラ1	1.0 μ m	雲層による太陽散乱光 (昼面) 地面からの熱放射 (夜面)	下層雲構造、風速場、 活火山、地表面放射率
近赤外カメラ2	1.7,2.3,2.4 μ m	下層大気からの熱放射 (夜面)	下層雲構造、風速場、 雲粒サイズ、CO分布
中間赤外カメラ	9-11 μ m	雲頂からの熱放射 (昼夜面)	雲頂温度分布
紫外カメラ	290nm	雲頂による太陽散乱光 (昼面)	SO ₂ 分布、風速場
雷・大気光カメラ	551,558,777nm	O, O ₂ 大気光、雷発光	雷活動の頻度・分布 大気光発光強度分布