

Venus Climate Orbiter の現状

ISAS/JAXA 今村 剛
PLANET-C チーム

1 ミッション概要 (ホームページ <http://www.planet-c.org>)

宇宙航空研究開発機構(JAXA)宇宙科学研究本部を中心として、全国の大学等研究機関の参加のもとに、Venus Climate Orbiter 計画(VCO:公式プロジェクト名 PLANET-C)が進行中である(図1)。2004年度からプロジェクトは正式にスタートして、現在、衛星の試作モデルの設計段階(PM、Phase-B)にある。探査機は重量480kg(燃料含む)の3軸安定型で、赤外から紫外までの多チャンネルの5台のカメラと電波掩蔽観測用の高安定発振器を載せて2009年前後にM-Vロケットで打ち上げられる。金星到着後は、地球の気象衛星のように周回軌道上から主に撮像観測によって金星の大気力学の情報を得る。その成果は単に一惑星の理解にとどまらず、惑星気象学の確立のための重要な一歩となるものである。

惑星気象学とは何だろうか? 太陽系のほとんどの惑星は大気を持っていて、それぞれの惑星で独特の気象現象、すなわち風が生じている。風は、熱帯域に降り注ぐ太陽エネルギーを高緯度まで送り届け、また水や様々な物質を運ぶことによって、惑星の気候の形成に深く関わっている。現在の地球で生じている気象現象は近年かなり理解されるようになったが、異なる世界の理解はまだである。私たちが目指す惑星気象学とは、惑星の多様な気象形態を統一的に説明し、地球も含む惑星の気候の形成過程を正面から論じることのできる、新たな知恵である。地球の常識では考えられない金星の気象を解明することにより、惑星同士の比較による統一理論の研究が飛躍的に進むだろう。

なお、金星到着までの飛行中における黄道光(ダスト)の観測や、赤外線による地表面の観測も、大気観測装置で同時に実施可能な研究として科学目標に含まれている。

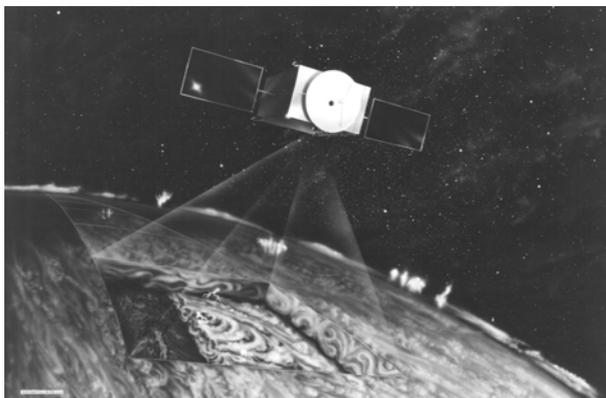


図1 金星探査機の想像図

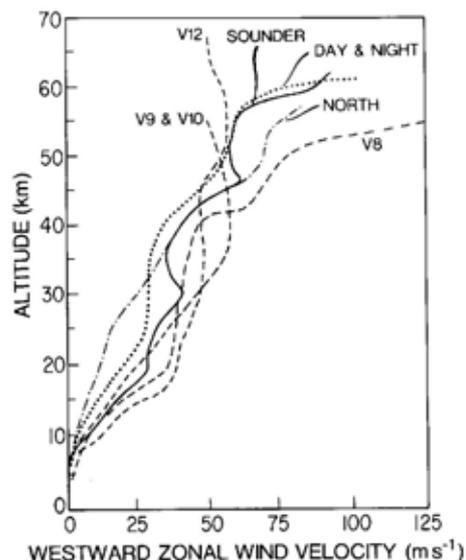


図2 米国とロシアのプローブ投下により測られた金星大気の東西風プロファイル(Schubert et al. 1980)

2 金星気象学の問題

金星は大きさや重さなど固体部分に関しては地球と似た特徴を持っており、地球と似た過程で形成された兄弟のような惑星であると考えられているが、大気環境は地球と大きく違っている。大気は主に二酸化炭素からなり、その量は大変多く、地表面気圧は約90気圧である。高度約45 kmから70 kmには濃硫酸からなる雲があり、この雲は地球の雲と違って惑星全体を完全に覆っている。地表面温度は大気中の膨大な二酸化炭素がもたらす温室効果のために460℃に達する。

金星の気象は、スーパー・ローテーションと呼ばれる大規模な風系で特徴付けられる。観測によれば、あらゆる緯度で西向きの風が卓越し、風速は高さと共に増大して雲頂付近で最大100 m/sに達する(図2)。そのため雲頂の大気は4、5日で金星を一周するが、その角速度は、周期243地球日の自転角速度の実に60倍である。

このような風は従来の気象学では理解し難いものである。地球にも偏西風があるが、その風速は自転速度の 1 割程度にすぎず、しかも局所的である。スーパー・ローテーションを流体力学的に説明するために多くの仮説が提案されてきたが、未だ決定的と考えられるシナリオはない。

問題解決の鍵は、金星大気中にどのような南北・鉛直循環(子午面循環)や波動が存在し、それらが如何にエネルギーや角運動量を再分配しているのかを、観測的に明らかにすることである。しかし金星では厚い雲と大気が下層大気のリモートセンシングを阻んできたために、気象データは極めて限られている。旧ソ連と米国の着陸機が降下途中で風や温度を測定してはいるが、そのような単発の観測からは波動や循環の空間的な広がりや時間変化を描くことはできない。大気という流体圏の研究のためには多地点で継続的なデータを得ることが不可欠である。ちなみに地球では、多数の地上観測点に加えて気象衛星が全球的に大気変動を観測している。

3 観測装置と観測計画

長い停滞の時期を経て近年、金星大気科学に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「近赤外の窓」(波長 0.9-1.0、1.7、2.3 μm など)が相次いで発見されたのである。これらの波長では、二酸化炭素や水蒸気の振動回転帯による吸収が弱く、雲粒による散乱の際の減衰が小さく、また大気によるレイリー散乱も弱い。そのため、地表面や下層大気から発せられた熱放射は大気を通り抜け、高度 45-70 km にある雲層内での多重散乱を経て、宇宙空間にまで漏れ出す(図 3)。VCO はこの近赤外の窓を最大限に活用し、さらに他の波長も加えて金星大気圏を 3 次元的に観測する金星気象衛星である。

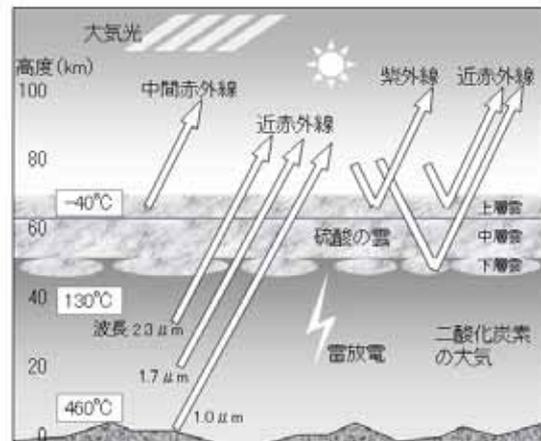


図 3 金星ミッションで 3 次元的大気観測に用いられる様々な波長の光

観測機器としては視野 12 度の屈折光学系のカメラを 5

台搭載する(表 1)。IR1(近赤外カメラ 1)と IR2(近赤外カメラ 2)が近赤外の窓で下層大気の大気や微量気体分布の変動を観測するのに加えて、UVI(紫外カメラ)が雲頂付近の紫外線吸収物質の分布を、LIR(中間赤外カメラ)が雲頂温度の分布をマッピングする。また LAC(雷・大気光カメラ)が雷放電に伴う発光や大気光(高層大気の大気光)を観測する。このように異なる高度での大気変動を同時に観測することによって、個々の力学過程の 3 次元構造を推定する。(IR1 には、熱い溶岩からの熱放射を検出することによって活火山を発見する、というサブテーマもある。) 衛星は 3 軸姿勢制御され、撮像時には衛星姿勢の変更によってカメラを金星に向ける。IR1、IR2、UVI はフィルタホイールで波長を切り替える。IR1 と IR2 は夜面観測時に太陽や昼面からの迷光を避けるために大きなフードを持つ。カメラの制御および画像データ処理のために専用の演算装置も搭載する。

金星周回軌道は図 4 のような長楕円軌道(近金点高度 300km 遠金点高度 13 金星半径)である。軌道周期は 30 時間で、そのうち遠地点を中心とする約 20 時間にわたって、高度 50 km 付近でのスーパー・ローテーションの角速度とほぼ同期する。自転に同期させる地球の静止気象衛星と同じ発想である。この間、大気の特定の半球を 1 - 2 時間おきに連続的に全球撮像し、その画像解析(スペクトル解析、雲追跡による風ベクトル導出など)によって、惑星スケールからメソスケール(数百 km 以下)までの大気変動を抽出する。たとえば温帯低気圧や潮汐波のような大規模構造から、対流セルや内部重力波のような小規模構造まで、重要なプロセスを根こそぎにできるだろう。衛星が金星にもっと近づくと、局地的な小構造のクローズアップ撮影に加えて、夜側に近寄って雷や大気光の淡い光を捉える絶好の機会である。近地点付近では地平線方向を見て、大気や雲の鉛直構造を周縁(リム)観測する。また、地球から見て衛星が惑星の背後に隠れる時と背後から出てくる時に、探査機から送信されて地球へ届く電波の周波数や強度の変化を調べて、気温や硫酸蒸気(雲の原料)の鉛直構造を探る(電波掩蔽)。金星での観測期間は 2 年以上を予定している。このように密で重層的な気象データが地球以外の惑星で得られるのは初めてであり、地球気象学の常識に収まらない多くの新現象の発見が期待される。

4 開発状況

衛星試作(PM)フェーズが始まった 2004 年度には、M - V ロケットで打ち上げ可能な重量 480kg(燃料含

む)の3軸姿勢制御衛星の構造・熱設計を行った。太陽に近い金星周回軌道では地球近傍に比べて太陽光による熱入力が大きく、今回のように赤外線による観測を行う衛星にとって厳しい環境である。このため、特に熱入力や各機器の電力消費の低減を検討し、詳細な熱解析により金星探査機が熱的、構造的に実現できることがわかった。

表1 VCO に搭載される光学観測機器

機器名称	検出器	フィルター	観測内容	担当
近赤外カメラ1 (IR1)	可視CCD 1040×1040画素	1.01 μm (夜)	窓波長で地表面からの熱放射をとらえ、活火山や下層の雲の分布などを観測	東大、東北大 SHI、ニコン、 株馬越
		1.01 μm (昼)	下層の雲の分布を太陽散乱光で観測	
近赤外カメラ2 (IR2)	PtSiショットキバリア型検出器 1040×1040画素	1.73, 2.26 μm (夜)	窓波長で下層大気からの熱放射をとらえ、下層の雲の分布や粒径分布を導出。	熊本大、東京大、JAXA、 SHI、ニコン、 株馬越
		2.32 μm (夜)	一酸化炭素の吸収帯。2.26 μmとの比較から雲より下の一酸化炭素分布を観測	
		2.02 μm (昼)	CO ₂ 吸収帯で雲からの太陽散乱光を測り、雲頂高度の分布を導出	
		1.65 μm	太陽系ダストによる黄道光を観測	
紫外イメージャ (UVI)	可視・紫外CCD 1024×1024画素	280 nm (昼)	雲による太陽紫外線の散乱をとらえ、雲頂付近の二酸化硫黄の分布を観測	北大、東北大 NTスペース、 ニコン
		365 nm (昼)	雲による太陽紫外線の散乱をとらえ、雲頂付近の未同定吸収物質を観測	
中間赤外カメラ (LIR)	非冷却ボロメータ 320×240画素	8 12 μm (昼・夜)	雲からの熱放射をとらえ、雲頂温度の分布を観測	極地研、 JAXA NTスペース
雷・大気光カメラ (LAC)	アバランシェフォトダイオード 8×8画素	777 nm (夜)	雷放電を観測。50 kHzサンプリング	東北大、極地研、大阪府立大、明星電気
		551 nm (夜)	酸素分子Herzberg II 大気光を観測	
		558 nm (夜)	酸素原子OI大気光を観測	
画像処理装置 (DE)	-	-	画像の較正、積算、圧縮など	JAXA NTスペース
高安定発振器 (USO)	-	-	電波オカルテーション (掩蔽) 観測用	JAXA Timetech

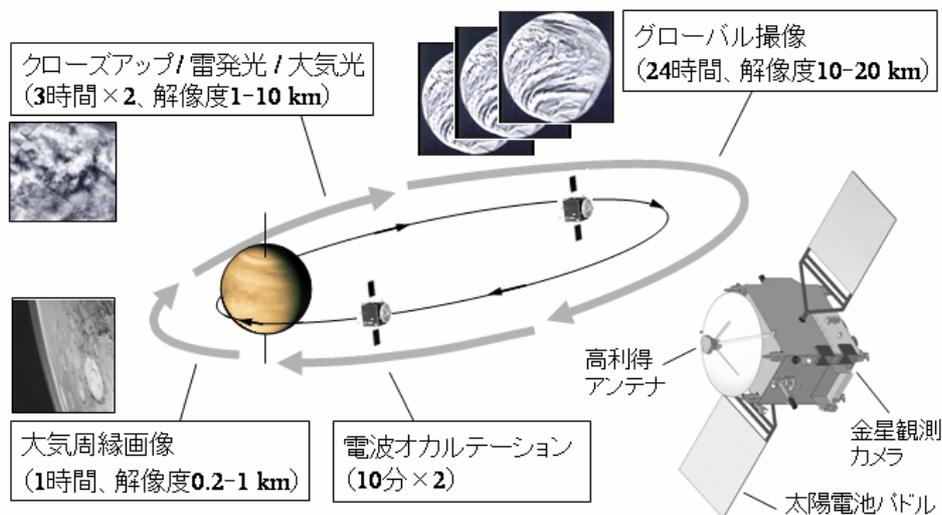


図4 金星周回軌道での観測計画

衛星サブシステムの多くは MUSES-C (はやぶさ) など過去の衛星での実績を踏襲するが、推進系におけるスラストチューブの採用、デジタルトランスポンダの採用、超高安定発振器の搭載、バッテリー容量の増大、モーメントムホイールの大型化、データレコーダの設計変更など既存の衛星サブシステムと異なる部分を中心に仕様検討を行い、その結果を ICD (インタフェースコントロール文書) として集約し、インタフェースの調整を行った。

各カメラの光学設計・基本構造設計・熱設計は概ね完了し、コマンドやデータ伝送のインタフェースも基本方針が固まった。部品レベルの放射線試験や振動試験もクリティカルなものについては概ね完了している。カメラを十分に涼しい環境に維持できるかどうか、とくに 65K で動作する IR2 の検出器をそのような温度に冷却できるかどうか大きな課題であったが、熱設計と試作機での実験を経て許容温度範囲に収められることがわかった。検出器が電氣的なノイズに弱いことが想定されるため、今後の開発においては EMC (電磁適合性) 基準を設けてそれを守るべく事前に単体で試験する。各装置の個別の状況は以下のとおりである。

IR1 (近赤外カメラ 1)

- ・ 基本設計完了
- ・ エレキ部の詳細設計が進行中
- ・ 検出器の開発がほぼ完了
- ・ フィルタホイール耐久試験完了
- ・ 硝材が放射線照射後も屈折率が変化しないことを確認

IR2 (近赤外カメラ 2)

- ・ 基本設計完了
- ・ 冷却時のレンズ保持機構がほぼ完成、アライメント精度確認
- ・ 検出器の 65K 冷却を始めとする熱設計がほぼ完了、熱モデルでの実験も実施
- ・ 検出器の開発がほぼ完了
- ・ フィルタホイール耐久試験完了
- ・ 屈折率の温度依存性を近々計測予定

LIR (中間赤外カメラ)

- ・ 基本設計完了
- ・ 機器温度が許容温度範囲に収まることを確認
- ・ 観測波長帯域を 8-12 μm に拡大したが収差が許容範囲であることを確認
- ・ 試作機で性能試験を行い、種々の電氣的ノイズについて原因究明中

UVI (紫外カメラ)

- ・ 基本設計完了
- ・ 検出器を冷やすために専用放熱板を追加して成立性を確認
- ・ 近日中に CCD サンプルで性能試験

LAC (雷・大気光カメラ)

- 軽量化のために設計を以下のように大幅変更して成立性を検討中
- ・ フードを除去し、日陰時の観測に絞って近距離に重点
 - ・ フィルタホイールを除去し、フィルター直前に干渉フィルターを置いて分光
 - ・ 8x8 画素のうち、777nm は 5x8 画素、551/558/545nm はそれぞれ 1x8 画素でスキャン
 - ・ 5 金星半径の距離に最適化し、FOV を 12 度から 16 度に変更
 - ・ 温度環境に強くするために検出器を MCP から APD に変更
 - ・ 近く電気系 BBM 納品があり各種試験予定

DE (画像データ処理装置)

- ・ DE につながる IR1・IR2・UVI・LIR のシーケンサ機能を持たせる方向で検討
- ・ 演算・圧縮を専用チップ (ASIC) で行う方針に決定
- ・ 運用シーケンスを詳細化中

周回軌道での運用についても熱設計の観点から新たな検討を加えている。太陽からの入熱を逃がすために大きな放熱面を設ける必要があり、すると每周回巡ってくる日陰時に衛星を保温するためにヒータ電力を多く消費する。このことがバッテリー重量の増加を招き、重量マージンを圧迫している。そこで金星周回軌道での運用計画を詳細化し、こまめに太陽光入力を避ける姿勢に移行することを検討している。例えば、金星指向時に太陽がカメラの妨害光回避角 (26 度) より内側に入るような場合には原則として観測を休止し、熱入力の小さい姿勢に退避する。