

日本の金星探査計画

今村 剛，金星探査ワーキンググループ

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉

e-mail: ima@isas.jaxa.jp

日本で金星探査計画が進行中である。本計画は気象力学の理解を主目的とし、多波長の撮像装置を用いて大気運動を3次元的に可視化する。暗礁に乗り上げている観のある金星気象学の現状と、そこに本計画がどう切り込もうとしているのかを概説する。

1. 惑星気象学ミッション

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)。探査機の打上げは2009年頃が想定されており、2004年現在、プロジェクトは正式にスタートして衛星設計の段階にある。VCOは地球の気象衛星のように、連続的な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はずである。

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もっていて、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、また水やさまざまな物質を運ぶことによって、惑星の気候の形成に深くかかわっている。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、現在の地球と異なる世界の理解はまだだである。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。後述のように金星では、地球の常識では考えられ

ない不思議な風が吹いている。金星の気象学が理解されれば、惑星同士の比較による統一理論の研究が飛躍的に進むに違いない。

これまで惑星気象学の研究は、とすれば理論先行で実証が不十分なまま議論が進みがちであった。VCOはそのような惑星気象学の研究手法そのものを変革しようとしている。以下では計画の概要を紹介する。詳細についてはホームページ

<http://www.stp.isas.jaxa.jp/venus>

をご覧ください。

2. 金星気象学の問題

金星は大きさや質量など固体部分に関しては地球と似た特徴をもっており、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。しかし大気環境は地球と大きく違っており (図2)、地球型惑星の気候形成の観点から興味もたれている。金星の大気は主に二酸化炭素からなり、その量はたいへん多く、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。地表面温度が460°Cにも達することも特筆に値する。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、地表面や下層大気で吸収される量は地球よりも少ない。しかし大気中の膨大な二酸化

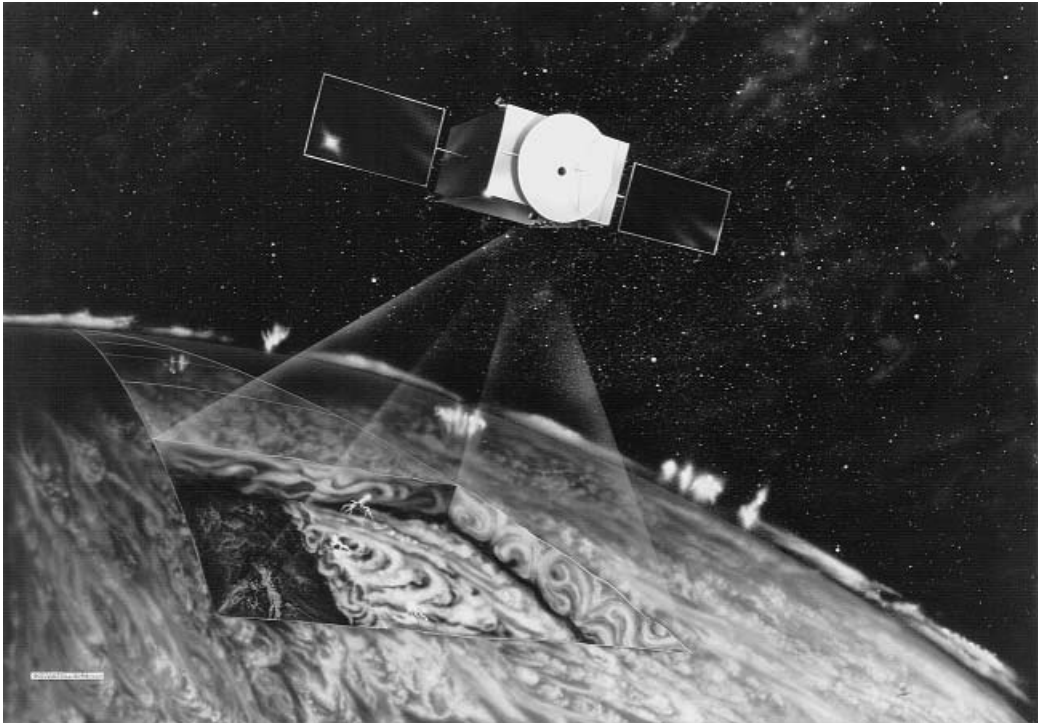


図 1 金星ミッションの想像図。

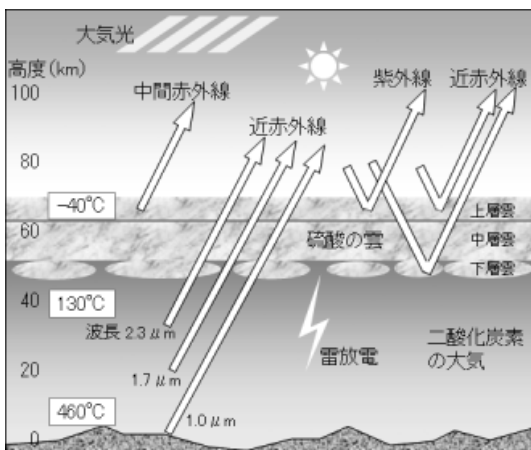


図 2 金星の大気構造と金星ミッションで観測するさまざまな波長の光。

炭素のために、わずかなエネルギーをもとにしてたいへん効果的に温室効果が働いているのである。

さて金星の気象、特に惑星規模の風はどうなっ

ているのだろうか¹⁾。本号の松田氏と高木氏による記事で解説されているように、金星にはスーパー・ローテーションと呼ばれる風系が存在する。観測によれば、あらゆる緯度で西向きの風が卓越し、風速は高さとともに増大して雲頂付近で最大 100 m/s に達する。そのため雲頂の大気は 4、5 日で金星を 1 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。

もちろん、この不思議な風のメカニズムを理解すべく多くの努力がなされてきた。そして大枠としては、子午面循環 (南北・上下方向の平均的な流れ) や大気波動などの協同作業で惑星自転の角運動量が大气上層に運び上げられるのではないかと、と思われるようになった。大気力学においては一般に階層間相互作用が重要であり、スーパー・ローテーションのような惑星規模の構造であっても、さまざまなスケールの擾乱による平均

風加速やエネルギー散逸抜きには成立しえないのである。しかし具体的なプロセスとなると多くの仮説が乱立し、広く認められた一貫したシナリオは存在しない²⁾。

3. Venus Climate Orbiter の挑戦

このような大気力学の問題を解決するためには、まず、どのような波動や循環が存在するのかを観測的に明らかにする必要がある。しかし金星では厚い雲と大気が大気の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、同時に多地点で継続的に計測することが不可欠である。ちなみに地球では、地上に多数配置された観測点に加えて、気象衛星がグローバルに観測することによって、これを実現している。

ところが近年、地上望遠鏡がもたらした発見に

よって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(図2)。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³⁾。

VCO は、この近赤外の窓を最大限に活用した金星気象衛星である。その基本方針は次のようなものである。

- 軌道上の大部分で惑星規模の構造をとらえる。
- 小規模な雲の移動から風速分布を求めるために 10 km 程度以上の高解像度とする。
- 3次元情報を得る。
- 幅広いスペクトルをカバーするために、頻繁かつ長期連続のサンプリングを行う。

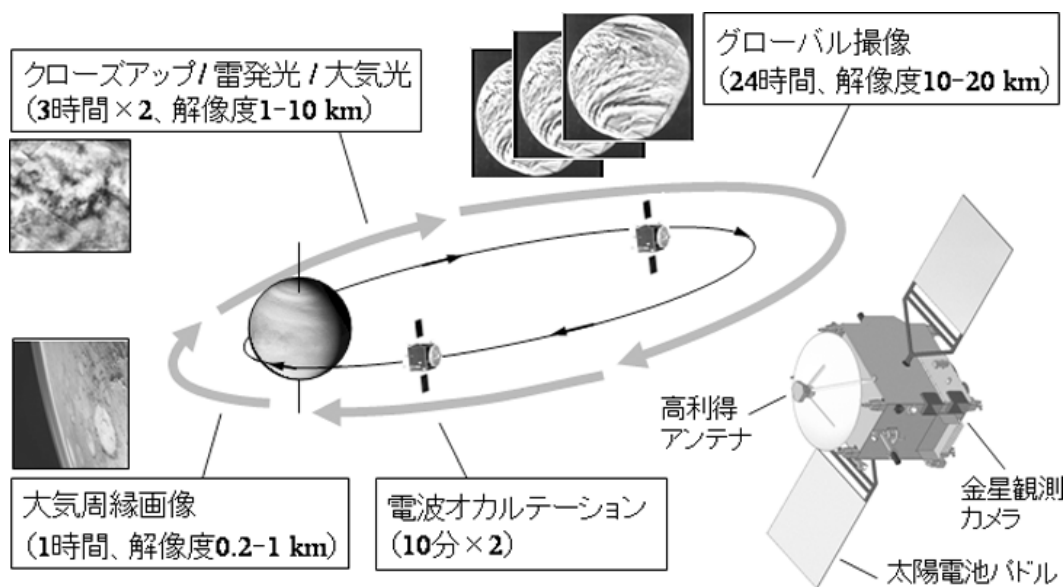


図3 金星周回軌道での観測計画。

表 1 搭載観測機器

機器名称	検出器	フィルター	観測内容	開発グループ
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	東京大学 東北大学
		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、下層の雲の分布を観測。また他波長との比較から粒径分布を導出。	熊本大学 東京大学 JAXA
		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量の分布を観測。	
		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	北海道大学 東北大学
		365 nm (昼)	雲による太陽紫外線の散乱をとらえ、雲頂付近の未同定紫外吸収物質の分布を観測	
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	極地研究所 JAXA
雷・大気光カメラ (LAC)	マイクロチャンネルプレート 8×8画素	777 nm (夜)	雷放電を観測。50 kHzの高速サンプリングで発光の時間変化をとらえる。	東北大学 極地研 大阪府立大
		551 nm (夜)	酸素分子 Herzberg II 大気光を観測	
		558 nm (夜)	酸素原子 O ⁺ 大気光を観測	

- 毎周回、広い地方時をカバーする。

これらを実現するために、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とIR2が近赤外の窓で下層大気を観測するのに加えて、UVIが雲頂付近の紫外線吸収物質を、LIRが雲頂温度をマッピングする。またLACが雷放電に伴う発光や大気光(高層大気の化学的発光)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目論見である。(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調節によってカメラを金星に向ける。

金星周回軌道は図3のような長楕円軌道である。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(雲層下部)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。例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、主要な力学過程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ころは、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とら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金星の背後に隠れるときと背後から出てくるときに、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、気温や硫酸蒸気の鉛直構造を探る(電波オカ

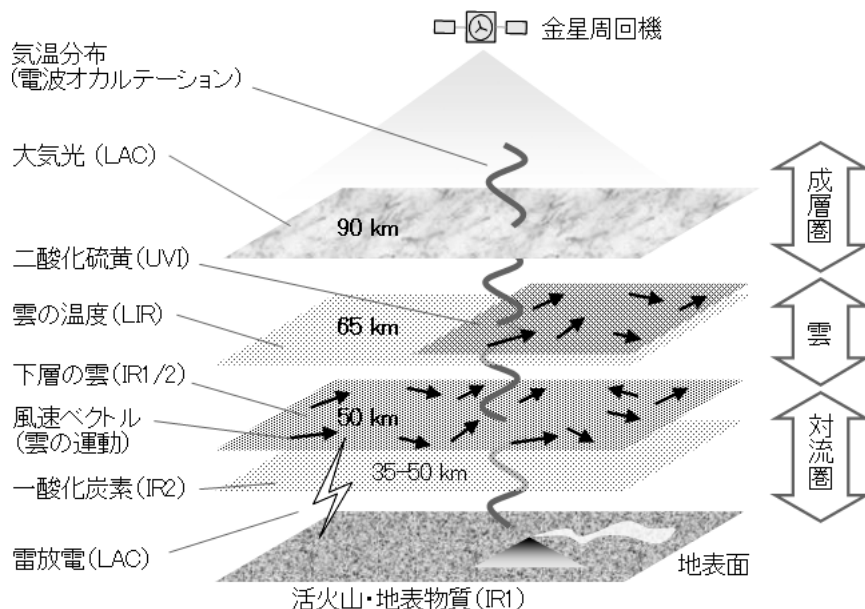


図 4 3次元的な大気観測の概念図.

ルテーション). 金星での観測期間は2地球年以上を予定している.

これら異質な観測を統合して大気運動の3次元構造を描き出すというのが、我々の狙いである(図4). このように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. スーパー・ローテーションのメカニズムにとどまらず、雲形成の力学、雷のメカニズム、雲模様の成因などもターゲットである. なお、周回衛星で惑星大気を調べる場合、後述の *Venus Express* のように極軌道からの分光観測を中心に据えるのが普通である. まず平均的な南北・鉛直構造を把握しようという考えに立てば、これは正しい. それに対して *VCO* は、幅広い時空間スペクトルをカバーすることに最適化して、あえて異なる方法をとる.

4. 今後の展開

VCO に搭載される観測機器は現在、表1に記載された研究グループを中心として開発の最終段

階にある. 基礎技術の開発や基本設計はおおむね終了し、部品レベルの放射線試験や振動試験を経て、詳細設計に入りつつある. 画像データに対して機上で較正やデータ圧縮を行うデータ処理装置も開発中である. なお、本ミッションの観測機器はたいへん軽量であり(5台合わせて35 kg)、金星以外のミッションでも活躍することが期待される. 例えば将来の地球観測衛星の一つとして、そのような構想が有志メンバーでまとめられつつある.

探査機の打ち上げはしばらく待たねばならないが、このミッションでは地上の望遠鏡による観測との連携も重視している. 空間分解能は探査機に敵わないが、地上観測には、波長分解能の優れた装置を使える、何年にもわたる長期的な変化をモニターできる、新しい観測のアイデアをすぐに応用できる、などの強みがある. すでに金星の地上観測プログラムが始まっており、その成果の一部は本号の上野氏らの記事で紹介されている.

一方、欧州宇宙機関でも *Venus Express* という金星探査計画があり、こちらは極軌道上から分光

観測を主体にして主に大気化学の情報を得る。打上げは 2005 年である。火星探査機 Mars Express の設計をベースにすることによってコスト削減と開発期間の短縮を狙っているため、搭載観測機器は Mars Express と共通のものが多い。化学研究に最適化した Venus Express と力学研究に最適化した日本の Venus Climate Orbiter は相補的な関係にあるため、プロジェクトチーム間では双方の企画段階から緊密な協力関係を築き、相乗効果でより大きな成果が得られるように協議を重ねてきた。地球の兄弟の星とも言える金星の理解のために、日本とヨーロッパの兄弟のような二つのミッションを、ともに成功に導きたい。

参考文献

- 1) Schubert G., 1983, in Venus, eds. Hunten D. M., et al. (Univ. of Arizona Press, Tucson) p. 681
- 2) 松田佳久, 2000, 惑星気象学 (東京大学出版会)
- 3) Taylor F. W., Crisp D., Bézard B., 1997, in Venus II: Geology, Geophysics, Atmosphere, and Solar Wind Environment, eds. Bougher S. W., Hunten D. M. and Phillips R. J. (Univ. of Arizona Press, Tucson) p. 325

Venus Orbiter Mission of Japan

Takeshi IMAMURA

*Institute of Space and Astronautical Science,
Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1
Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa 229-8510,
Japan*

Abstract: A Venus orbiter project is proceeding in Japan. The goal of the mission is to understand the atmospheric dynamics of Venus, including the mysterious wind system called the super-rotation. The spacecraft will carry 5 multi-wavelength cameras to explore the atmospheric motions in three dimensions. The science background and the strategy of the mission are described in this article.