# ー番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その1

## 今村 剛<sup>1</sup>, 佐藤 毅彦<sup>1</sup>, PLANET-Cプロジェクトチーム

(要旨) 金星は地球と似た条件下にありながら地球と大きく異なる大気環境を持ち,惑星気候の比較論の観点から興味深い天体である.この金星に向けて、日本は周回機VCO(PLANET-C)を送り込む.VCOは、高速帯状流のメカニズムなど大気力学の問題を中心に、金星の気候システムを理解するための様々な調査を行う.周回軌道上からは、多波長の連続撮影と電波掩蔽により大気の3次元構造の時間変化を追跡するほか、地表面の光学観測も行う.VCO計画は2010年の打ち上げに向けて、プロトモデルの試験を行いつつ、フライトモデルの製作に入ったところである.

## 1. 金星への道

太陽と月を除くと全天でもっとも明るいこの星を, 多くの人が一番星として見たことがあるだろう.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 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多くの人が考えている(違うかも しれないが).金星と地球の気候は何が共通していて 何が違うのか?そしてそれは何故なのか?地球の 気候システムの成立を理解する上で,金星は貴重なリ ファレンスとなっている.

2010年、日本は金星周回機 Venus Climate Orbiter (VCO, コードネームPLANET-C)を打ち上げる(図 1)[1]. 金星では欧州の金星周回機Venus Expressが 2006年から観測を続けており、そこに合流する形とな る.気球や着陸機による新たな探査の構想も各国で練 られている.かつて東西冷戦の時代、米国とソ連が競 い合うようにして金星へ探査機を送り込んだが、それ 以来の活況と言える.火星や月の探査で次々と成果が もたらされている裏(?)で、静かに金星回帰の潮流

1. 宇宙航空研究開発機構

#### がある.

日本がこれまで行った惑星探査としてはハレー彗星 探査「すいせい (PLANET-A)」,火星探査「のぞみ (PLANET-B)」,小惑星探査「はやぶさ (MUSES-C)」 がある.月探査機「かぐや (SELENE)」も近く打ち 上げられる.しかし「のぞみ」が火星周回軌道に入れ なかったこともあり,1億キロ離れた惑星の周回軌道 に探査機を投入して運用するのはVCOが初めての経 験となる.またVCOが行う観測はこれまでのミッシ



図1:金星に到着して周回軌道に入るために逆噴射をしている VCO の想像図. VCO が観測する夜側の模様(赤外線のみで見える)をイメージとして重ねて描いている.

ョンとはかなり違っている.そのためプロジェクトチ ームでは、これまでの技術を引き継ぎつつも、VCO と今後の惑星探査のために様々な新規開発を行って いる.VCO計画は2001年に提案されたあと2004年に 正式にプロジェクト化され、現在は衛星の様々な構 成要素のPM(プロトモデル:試作品)試験を行いつつ、 FM(フライトモデル:実際に打ち上げられる機器)製 作に入ったところである.

本稿は,金星大気の科学をざっと眺めたあと,計画 の概要と進行中のPM総合試験について紹介する.

## 2. 金星大気の科学

#### 2.1 金星大気の特徴

金星大気は96.5%の二酸化炭素と、3.5%の窒素、そ して微量の二酸化硫黄・アルゴン・水蒸気などから なる[2]. 大気量は多く、地表気圧は90気圧にもなる. 地表温度は460℃という灼熱の世界である.海はなく、 大気中の水蒸気は0.003%程度と、かなり乾燥してい る (地球では1%程度). 地表は火山や溶岩平原におお われている.

高度45 ~ 70km付近には濃硫酸を主成分とする液滴 の雲が浮かび,地球と違って惑星全体をおおっている [3].この雲は太陽光の78%をはね返すため,望遠鏡 で金星を観察してもキラキラと輝く姿(太陽との位置 関係で満ち欠けする)が見えるだけである.この厚い 雲を透して金星の自転周期を決める試みは,レーダー を用いて1960年代に行われた.それによると,金星の 自転は地球とは逆向きで,その周期は243地球日とい う低速である。

雲の成分である硫酸のもとになるのは金星大気に多 く含まれる硫黄化合物であるが、これらが地殻と化学 的平衡状態にあるのか[4]、あるいは近い過去に火山 ガスとして供給されたのかは決着していない問題であ る.金星の雲は光化学エアロゾルとしての性質と大気 運動により生成する凝結雲としての性質を併せ持つ系 であるが,化学過程にも力学過程にも未知の部分が多い[5].関連して,金星で雷放電が生じるかどうかも問題である.いくつかの電波観測から雷放電の発生が示唆されているが,液滴で構成される金星の雲の中でどうやって電荷分離が起こるのかはわかっていない[6].

金星が暑いのは太陽に近いせいではない.金星に届 く太陽光は雲でほとんどが反射あるいは吸収されて, 地表まで届く量は地球の10分の1である.にもかかわ らず,膨大な二酸化炭素による温室効果のため,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[7].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なって地殻に取り込ま れるため,大気中の量は小さく抑えられている.

#### 2.2 気候の変遷

金星はどのようにして今の姿になったのだろうか. 46億年前に太陽系が作られた時,金星にも大量に水が あったという考えがある.水は水蒸気となって高層大 気に運ばれた後、太陽紫外線によって水素と酸素に分 解され、水素については外に向かう圧力と重力がバラ ンスできず宇宙空間に流れ出してしまったのかもしれ ない[8]. その根拠として、金星大気では通常の水素 に対する重水素の割合が地球に比べて100倍も大きい ことがあげられる[2]. 大昔の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 は流出しにくいため、より多く大気に取り残されたと いうわけである.ただし、水に含まれていた酸素は宇 宙空間に逃げ出すことが難しい.酸素がどこへ失われ たのかは謎であるが、酸素を宇宙へ逃がす必要がある かどうかは初期の酸化還元状態にも依存する[9].

大昔の金星で水が海として存在したのか,水蒸気と して大気中に存在したのかは興味のあるところであ る.海と平衡状態にある大気が赤外線で宇宙に逃がす ことのできるエネルギーには限界があるために,惑星 に入射する太陽エネルギーがある値を超えると,海は 全て蒸発して厚い水蒸気大気ができる(暴走温室状態). ある計算によれば, 雲による太陽光の反射を考慮しな いとき、誕生直後の金星にはぎりぎり海が存在できる [10]. 雲があると温度が下がるので、海が存在した可 能性がさらに高くなるが、大昔の金星における雲の量 を見積もることは難しい.後述するように金星のよう な低速回転惑星の気象学が理解されていないことが一 つの問題である。海があったとすれば、現在の地球と 同じく,二酸化炭素が海に溶け込んで地殻に固定され るというしくみが働いていたかもしれない. 金星の海 がいつまで存在し, どのように失われたのかは, 惑星 に水が安定に存在する条件は何かという問題に関わっ ている. なお、海がない今の金星でも、大気成分が岩 石と直接反応して地殻に取り込まれることが大気量や 気候に影響してきたという考えがあるが[4], 地表面 組成の情報が不足しており確かなことはわからない.

#### 2.3 大気大循環

金星の気候は力学的にも不思議な状態にある[7]. 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割にも達していない.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.雲の 高度を中心に100 m/秒もの速さで大気が自転方向に



図2:地球と金星の風系.地球(左)では偏西風や貿易風な どの東西風とともに,緯度帯ごとに弱い子午面循環 がある.金星(右)では超回転という自転方向の高速 流がある.子午面循環は分かっていない.なお金星 の自転は地球とは逆方向(東から西)である.

流れ,約4地球日で1周していたのである[11]. この自 転の60倍もの速さの風を「超回転」と呼ぶ.実はこの 風はフランスのアマチュア天文家が先に発見していた らしい[12]. しかし,金星の自転速度を考えれば4日 で1周する風などありえないということで,長らく無 視されていたようである.

超回転のために金星大気は東西方向によく均されて いる一方で、大気がこのように大きな回転エネルギー を持つと、子午面循環(南北・上下方向の平均的な流 れ)は強く制限されると予想される.惑星全体の熱収 支を支配する雲の分布はこのような大気循環に強く影 響される.超回転が金星の気候形成においてどのよう な役割を果たしてきたのかは興味深い問題である.

このような大気大循環の様式は惑星ごとに違ってい る(図2).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 のような東西方向の流れとともに子午面循環があり、 南北半球それぞれに3つの閉じた循環がある.フェレ ル循環の存在は一見奇妙であるが、極域-赤道間の温 度差によって生じる波長数千kmの波動にともなって 生じることがわかっている.火星の大気大循環は基本 的には地球に似ている[7]. 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[13]. タイタンは窒素の大気をもち、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. 超回転大気において子午面循環 がどのような形をとるかはわかっていない.

超回転を流体力学で説明しようと多くの気象学者が 努力を傾けてきた.色々な説があるが,基本的には, 大規模な大気波動や子午面循環の作用で地面から大気 へと自転軸周りの角運動量が渡され,それがさらに高 層へと運ばれて自転方向の加速を生じる,というもの である(図3)[7,14,15,16].とは言え,今のところ超 回転を計算機シミュレーションで再現することは難航 している.実際にどのような波動や循環が金星に存在



図3: 超回転のメカニズムについての色々な考え. (1) ハドレー循環による角運動量の輸送と,波や乱流による南北方向の角 運動量の輸送が合わさって,赤道上空の大気に角運動量を運び込み,風を加速する. (2) 太陽光が周期的に雲層を加熱す ることによって励起される波(熱潮汐波)が,上下に伝わって角運動量を運び,雲層付近の大気を加速する. (3) 低高度 の大気中で励起されて上向きに伝播する波(大気重力波)が,角運動量を運び,上空の大気を加速する.

するのかがはっきりしないことが,理解が遅れている ことの大きな要因である.

このように,惑星気象の多様な姿を統一的に説明し, 大気循環が気候進化にどう関わるのかを理解しようと する,惑星気象学という学問分野が作られつつある. VCOは,金星大気の謎に取り組みつつ,それを包括 する惑星気象学の研究に新たな手法を持ち込もうとす るものである.

## 3. Venus Climate Orbiterの挑戦

VCOは打ち上げ時質量が燃料込みで約500 kgの比 較的コンパクトな探査機で,ここに合計約35 kgの科 学観測装置が搭載される[1]. これらの装置を用いて, 可視光では見ることができない厚い大気層の内部の運 動を周回軌道から映像化することにより,超回転のし くみや雲物理などを調べる.表1に観測装置の一覧を 示す.打ち上げに用いるロケットは当初はM-Vが想 定されていたが, M-Vの退役により2006年にH-IIAに 変更された.

2010年夏に打ち上げられて同年末に金星に到着する までの約半年の間, VCOは波長1.65µmの近赤外線(赤 外線天文のHバンド)で黄道光の観測を行う.太陽か らの距離が0.7天文単位までの惑星間空間ダストの分



図4: VCOによる3次元的観測のイメージ

布は、ダストの起源や力学を解明する上で貴重な情報 となる.金星到着後は、赤道面に近い長楕円の周回軌 道(近金点高度 300 km、遠金点高度 13金星半径)に 投入される.軌道周期は30時間で、そのうち遠金点を 中心とする約20時間にわたって雲層下部(高度50 km 付近)での超回転の角速度とほぼ同期する.これは衛 星運動が自転に同期する地球の静止気象衛星と同じ発 想で、この間、VCOは大気の特定の半球と向かい合 って時間変化を精密にとらえる.搭載カメラの視野(お おむね12°)は同期運動中に金星ディスク全体を観測 できるよう最適化されている.近金点付近では地平線 方向をクローズアップで見て大気の層構造を観測する. ミッション期間は2地球年以上である.

229

周回軌道上からは、5台のカメラが異なる波長で異 なる高度の対象を連続的に撮影することによって、3 次元構造の時間変化を追跡する(図4).中でも、波長  $1 \sim 2 \mu$ m付近に存在する大気の窓(下層大気や地表 面まで外から透視できる波長で、1980年代から1990年 代にかけ相次いで発見された)を最大限に活用する [17].VCOはこれらの波長で、水蒸気、雲の濃さ、雲 粒の大きさ、大気が光分解してできる一酸化炭素の分 布などをとらえ、これまでほとんど知られていない下 層大気の循環や雲物理の基礎データを得る.雲の微細 なパターンの移動からはグローバルな風速分布もわか る.地表面が見える1 $\mu$ m付近では、地表面の放射率 の場所による違いをとらえて鉱物組成の不均一を調べ、 また地表面温度の分布から活火山の発見も狙う[18, 19].

これらとは別に,波長10μmの赤外線で雲の温度分 布を映像化する.このデータからは,雲層上部の波動 や対流活動の様子がわかるほか,夜側の雲頂高度にお ける風速分布が初めて明らかとなる.波長283 nmの 紫外線では,雲の形成に関わる二酸化硫黄の分布をと らえるとともに,その変動から雲頂高度での風速分布 を求める.同時に波長365 nmで撮影し,この波長域 で顕著な吸収を示す未知の化学物質の起源の手がかり を得る.可視光では高度100 km付近の高層大気の酸 素が放っ大気光という淡い光をとらえ,この高度で卓 越すると考えられる昼夜間循環の変動や大気波動を映 像化する.やや性質の異なる観測としては,雷放電発 光を超高速撮影でとらえる.金星の雷についてはこれ まで電波という間接的な情報しかなかったが,個々の 発光の時間変化を見ることでノイズとも区別し,動か ぬ証拠を得る.

映像情報とは別に,地球との間の電波通信を利用し た電波掩蔽観測を行う.この電波は,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,金星 大気をかすめてくる.このときの周波数の変化から気 温の高度分布が分かり,ここから大気の熱構造や鉛直 伝搬する波動の情報が得られる.また電波の吸収の大 きさから,雲が蒸発して生じる硫酸蒸気の分布もわか る.この観測のために,発振周波数が極めて安定した 超高安定発振器を搭載する.

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.様々な波や渦が縦横に伝 搬し,エネルギーや物質を循環させる様子が動画とし てとらえられれば,地球との比較による惑星気象の研

観測装置	検出器と視野角	観測波長	観測対象
IR1 (1µm カメラ)	Si-CSD/CCD 1024 x 1024画素 視野角12°	1.01 µm (night)	地表面・雲
		0.97 $\mu$ m (night)	水蒸気
		0.90 $\mu$ m (night)	地表面・雲
		0.90 µm (day)	雲
IR2 (2µm カメラ)	PtSi-CSD/CCD 1024 x 1024画素 視野角12°	1.735 µm (night)	雲・雲粒サイズ
		2.26 µm (night)	雲・雲粒サイズ
		2.32 µm (night)	一酸化炭素
		2.02 µm (day)	雲頂高度
		1.65 $\mu$ m (cruise)	黄道光
UVI(紫外イメージャ)	Si-CCD 1024 x 1024画素 視野角12°	283 nm (day)	二酸化硫黄
		365 nm (day)	未知の吸収物質
LIR(中間赤外カメラ)	非冷却ボロメータ 240 x 240画素 視野角12°	10 μm (day/ night)	雲頂温度
LAC (雷・大気光カメラ)	8 x 8 multi-anode APD (50-kHz sampling in lightning mode) 視野角16°	777.4 nm (night)	OII雷光
		552.5 nm (night)	O <sub>2</sub> Herzberg II大気光
		557.7 nm (night)	OI大気光
USO(超高安定発振器)		8.4 GHz	気温・硫酸蒸気の高度分布 (電波科学)

表1: 搭載する科学観測機器

究が進むだろう.ただしデータの解析や解釈のために, 放射輸送や流体力学計算の体制を一層整備する必要が ある.ちなみに欧州のVenus Expressは分光観測によ る化学の解明が主目的であり,VCOとは互いに補い 合う関係にある.

## 4. PM総合試験

2007年8月から9月にかけて、JAXA宇宙科学研究 本部において「PM (プロトモデル)総合試験」を実 施している.この試験には探査機の構成要素の中から, DHU, DEといった制御装置と、AOCUという姿勢制 御装置,そして5台のカメラが一堂に会して接続される. DHUとは、衛星内や地上とのコマンド・データ通信 を司る主制御装置であり、今回の試験では「はやぶさ」 の試験で使われたものを借用している.これらの機器 はそれぞれ別のところで開発されてきたため、あらか じめインターフェースの取り決めをしているとはいえ、 実際にうまく信号をやりとりできるかどうかは心許な い.そこで、フライト品の製作に入る前に試作機同士 を探査機上と同じ形でつなぎ、実際の探査機運用を模 擬する形で動作させて、ハードウェアとソフトウェア のバグを洗い出すのである.試験には研究所や大学の 機器担当者のほか,実際に製作を担当しているメーカ ーの皆さんが勢揃いし,あまり広くない試験室は大賑 わいとなる.

本稿の執筆時はまだPM総合試験の前であるが,こ れに先立って8月初めに,DEとカメラ群を接続して 動作させる予備的な試験を行った(図5).DEとは, LAC(雷・大気光カメラ)を除く4つのカメラを制御 して画像データの機上処理やデータ圧縮,データ記 録までを行う専用の制御装置であり,複数の波長の映 像を統合解析するVCOにおいてはこの機器の設計が 要となる.VCOは探査機と金星と太陽の位置関係や, 金星と地球の距離(これがデータ転送速度を制限する) によって,波長ごとの撮像時間間隔や機上処理を様々 に変える.そこで,このような多様な観測モードをあ らかじめDEに記憶させておき,探査機のDHUはこれ らのうちいずれかの実行を定期的にDEに命ずること で,見通しの良い運用を実現する.

試作機とはいえ、フライト品とほぼ同等の機器が並 べられて実際の運用さながらにプログラミングされた 手順に従って動作する様子には、まるで自分たちが金 星周回軌道に居るような錯覚を覚える.とはいえ、試 験では予期せぬトラブルが続出し、何度も機器の動作 が異常終了したり出力データに異常が見られたりした.



図5: PM 総合試験に先立って行われた、カメラ群の予備的な接続試験の様子

それでも、その場で色々な改修を加えながら毎日の課 題をこなし、最終日には一通りの動作を確認できたの は、関係者の粘り強い努力の賜物である.

PM総合試験と並行して観測装置の性能評価と較正 も進めている、これらをきちんと行って初めて、得 られるデータが科学的に価値のあるものになる.ま た、2008年の春にかけてMTM、TTMといった試験 も控えている. MTM (Mechanical Test Model) とは, フライト品とほぼ同等の骨組みで作られた探査機本体 に,力学特性を模擬した搭載機器のダミーを取り付け て, 打ち上げ時に想定される振動・衝撃を加えて各搭 載機器に加わる振動・衝撃の大きさを評価するもので ある. このデータを用いて搭載機器の最終設計が十分 な強度を持つことを確認する. TTM (Thermal Test Model)とは、同様にフライト品とほぼ同等の探査機 本体を用いて、真空中で様々な温度環境にさらして探 査機内の熱輸送を詳細に評価するものである. これら の他にも,新規開発した通信装置など,様々な構成要 素の試験を進めている。次回以降のレポートでは、こ れらの状況をはじめ、関連する研究の最前線について 順次紹介していきたい.

## 参考文献

- Nakamura, M., et al., Planet. Space Sci., doi:10.
  1016/j.pss. 2007. 01. 009, 印刷中.
- [2] 阿部豊, 1997, 岩波講座地球惑星科学12 比較惑 星学(岩波書店), 233.
- [3] Esposito, L. W., et al., 1983, Venus (Univ. Arizona Press), 484.
- [4] Hashimoto, G. L., and Abe, Y., 2005, Planet. Space Sci., 53, 839.
- [5] Imamura, T. and Hashimoto, G. L., 2001, J. Atmos. Sci., 58, 3597.
- [6] Grebowsky, J. M. et al., 1997, Venus II (Univ. Arizona Press), 125.
- [7] 松田佳久, 2000, 惑星気象学 (東京大学出版会).

- [8] Kasting, J. F. and Pollack, J. B., 1983, Icarus 53, 479.
- [9] Hashimoto, G. L., et al., 2007, J. Geophys. Res.
  112, E05010, doi:10.1029/2006JE002844.
- [10] Kasting, J. F., 1988, Icarus 74, 472.
- [11] Schubert, G., 1983, Venus (Univ. Arizona Press), 681.
- [12] Sheehan, W. and Dobbins, T., 1999, Sky & Telescope 56.
- [13] Bird, M. K., et al., 2005, Nature 438, 800.
- [14] Yamamoto, M., and Takahashi, M., 2003, J. Atmos. Sci. 60, 561.
- [15] Iga, S. and Matsuda, Y., 2005, J. Atmos. Sci.62, 2514.
- [16] Takagi, M., and Matsuda, Y., 2007, J. Geophys.
  Res. 112, D09112, doi:10.1029/2006JD007901.
- [17] Taylor, F. W., et al., 1997, Venus II (Univ. Arizona Press), 325.
- [18] Hashimoto, G. L., and Sugita, S., 2003, J. Geophys. Res. 108, 5109.
- [19] Hashimoto, G. L., and Imamura, T., 2001,. Icarus 154, 239.