

金星探査計画発進

岩 上 直 幹 , 中 村 正 人

〈東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 〒113-0033 文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: iwagami@eps.s.u-tokyo.ac.jp

e-mail: mnakamur@eps.s.u-tokyo.ac.jp

2009 年周回軌道投入をめざした金星大気探査計画が発進しようとしている。主目的は雲パターン撮像・追跡による大気循環パラメタの定量から、40 年来の謎である「大気超回転機構」を解明することにある。

1. 金星大気の大謎と探査目的

我々に最も近い惑星である金星と火星のうち、火星がその大気の透明さのため比較的良好に観測され、理解が進みつつある印象があるのに対し、金星はその分厚い雲のため表面が見えず、「謎に満ちた」というイメージが付きまとう。筆者の一人が小学生だった 1960 年代の子供向け科学雑誌にあった金星表面想像図では、暗雲垂れこめ稲妻の走る大気の下に原始の海があり、シダ様植物の茂る陸上をトリケラトプス様の動物が歩いていた。しかし、このような描像は 1962 年マリナー 2 による「磁場がない!」という衝撃的な観測を皮切りに、1960–70 年代の旧ソ連の探査機ベネラの着陸プローブなどの観測により変わった。地表は意外に明るかったが、740K・二酸化炭素ばかり 90 気圧の高温・高压世界だったのである。そもそも、金星固体の逆行自転周期さえ電波観測で確定したのは 1960 年代中頃で、それまではどちらに自転しているのかさえ解らなかった。この対恒星 243 地球日周期の逆行自転そのものが太陽系 7 不思議には当確級だが、この探査計画の主題「大気超回転機構の解明」にも深く関わっている。

金星大気が雲頂部 (70 km) で風速 100m/s の「超回転 = 4 日循環」をしているという発見は、1950 年代末にアマチュアの地上観測によってな

れ (発見事情は文献 (1) に詳しい)、その後のマリナー 10 による紫外撮像や、ベネラ、パイオニア・ビーナスなどの降下プローブによる直接観測で確認された (図 1)。ところで、これはなかなか不思議

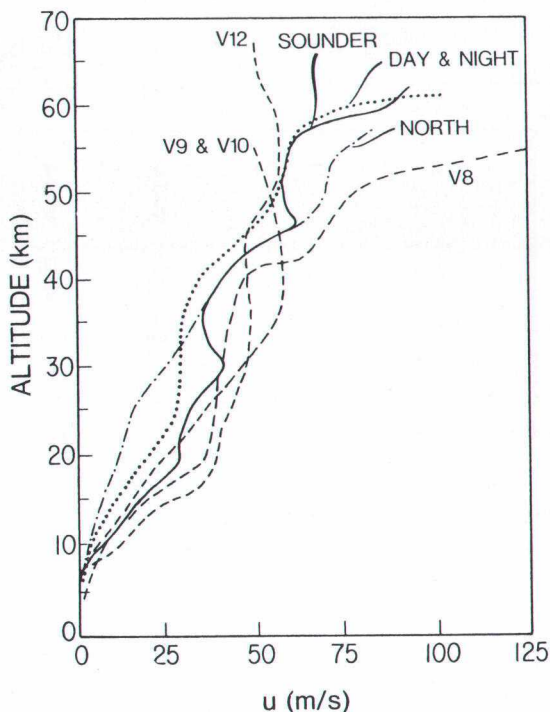


図 1 降下プローブにより測定された東西風速鉛直分布²⁾。V6–V12 は旧ソ連のベネラ、day, night, north, south は米国のパイオニア・ビーナスの降下プローブを示す。

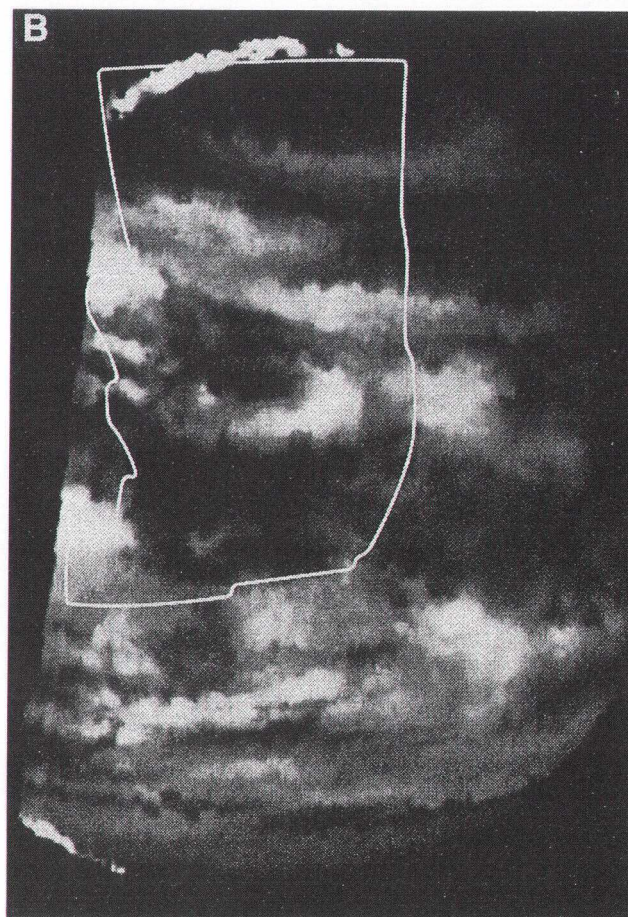


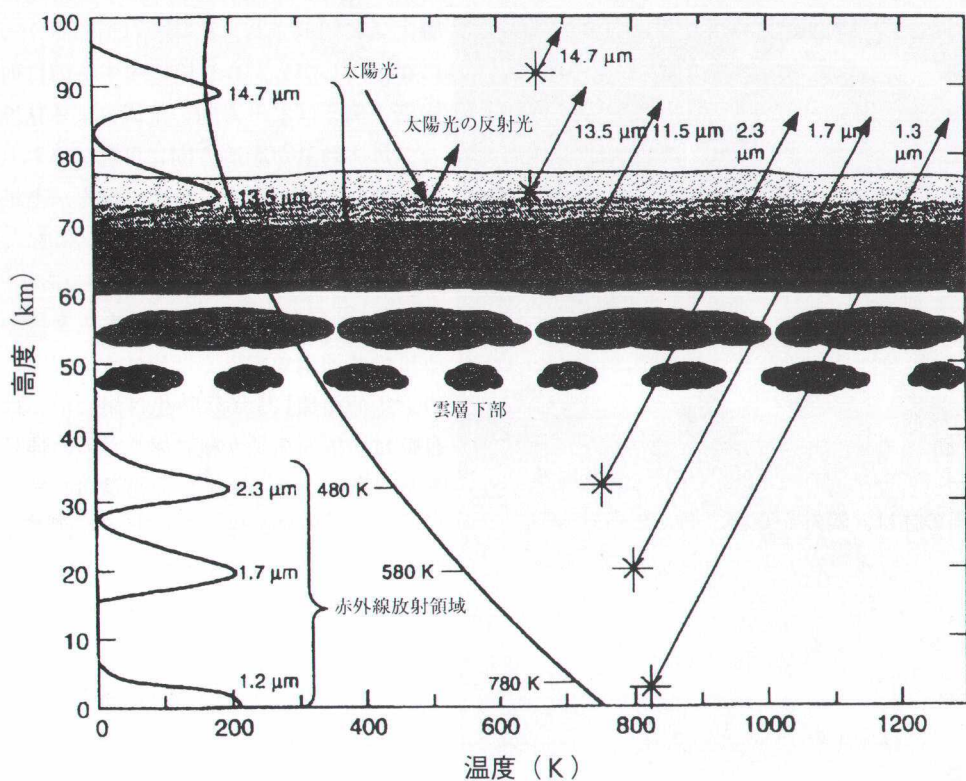
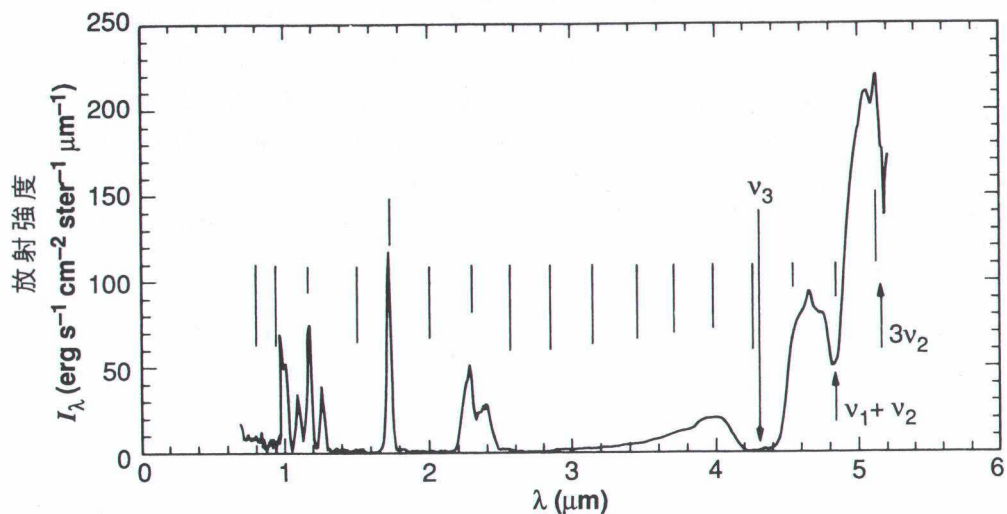
図2 木星探査機ガリレオがスイングバイ時に $2.3\ \mu\text{m}$ で撮像した金星夜面⁶⁾

な現象である。金星固体の自転速度は赤道で 1.8m/s しかないのに、雲層大気がその 60 倍の速さで同方向に運動している理由は簡単には理解できない。ジェット気流と呼ばれる 100m/s 級の強風系が地球中緯度にもあるが、赤道自転速度 500m/s より遅く、さして不思議ではない。

大気超回転の説明には多くの仮説が提案されているが、その中では「子午面循環による角運動量汲み上げ説³⁾」が比較的有力と考えられている。この説によれば、金星でも赤道・極間の熱入力差によって、地球のハドレーセルに対応する子午面循環ができ、角運動量を上層大気の極方向に運ぶ。

このまま極で沈降してしまえば、角運動量は下層大気に回収され、正味では何もなかったことになる。しかし、もし極に達する前に何らかの機構（例えば水平方向の乱流による粘性）によって角運動量が赤道方向に再配分されれば、正味の汲み上げが起こることになる。土星の衛星タイタン（自転周期 18 地球日）にも大気超回転があるということが確認されつつあり⁴⁾、この現象は自転が遅くかつ濃密な大気を持つ惑星・衛星の共通現象である可能性がでてきた。上記の子午面循環による汲み上げ説に沿えば、遅い自転は子午面循環が極に届くための必要条件であり（自転が速いと子午面循環はコリオリ力で曲げられ、地球の場合と同じく極までは届かない）、濃密大気（加熱率が小さい）は遅い子午面循環が実現するための必要条件とも理解できる（角運動量再配分のほうが速く起こる）。

この大気超回転の加速域は図 1 にみられるように、雲層（ $45\text{--}70\text{ km}$ ）とその下にあり、それらの高度での情報が得られない限り理解の進展は望めなかった。この手詰まり状態は 1980 年代半ばに地上観測によって破られた。近赤外の $1.7\ \mu\text{m}$ と $2.3\ \mu\text{m}$ に窓があり、雲下が透けて見えるというのである⁵⁾。二酸化炭素と水蒸気（平均 30 ppm 程度しかないが）の強力な吸収帯、 90 気圧 大気によるレーリー散乱、さらに雲粒（硫酸エアロゾル：地球成層圏にもある）によるミー散乱をくぐり抜けて、雲下からの熱放射が見えるというのは驚きだった。計算してみると、確かに 90 気圧 二酸化炭素大気のレーリー散乱光学厚みは $2\ \mu\text{m}$ でわずか 0.12 しかない。雲粒のミー散乱厚みは 30 というようなオーダーらしいが、純吸収が少ないため多重散乱の末に透過する。この $2\ \mu\text{m}$ 帯でみえるパターン（図 2）は、高度 $20\text{--}40\text{ km}$ の大気熱放射を光源として見た、雲層下部構造（ 50 km ）の影絵と解釈されている（図 3）。つまり、その追跡から風速場、乱流場など様々な雲下の大気循環パラメタを導ける可能性がみえてきた。その後 $1.2\ \mu\text{m}$

図3 金星大気放射の模式図⁷⁾図4 木星探査機ガリレオがスイングバイ時に測定した金星夜面の赤外スペクトル⁶⁾. 多数の大気の窓 (1.2 μm , 1.7 μm , 2.3 μm) と雲頂からの熱放射 (3 μm 以上) がみえている。

付近にも窓が見つかった(図4)。特に、 $1\ \mu\text{m}$ 帯は地表および地表付近の大気からの熱放射と考えられ、探査機マゼランの電波観測により得られた地表高度分布に対応するパターンが見いだされている。高度分布に対応する気温分布が熱放射強度のパターンとして見えていいると考えられる。ただし、硫酸雲によるミー散乱のため、水平分解能はマゼラン並み(120 m)は遠く望めず、 $1\ \mu\text{m}$ で100 km程度しかない。その後、1990年にガリレオ・1999年にカッシーニがそれぞれ木星・土星への旅の途上にスイングバイに金星を使ったため、その短いチャンスを生かして近赤外観測が行なわれ、雲下大気情報が実際に測定された^{8), 9)}。この金星大気探査計画の柱は、紫外から熱赤外まで多波長での雲パターン撮像・追跡から大気循環パラメタを導出し、大気超回転 = 4日循環をはじめとする大気循環過程を理解しようとするところにある。

ガリレオおよびカッシーニでは一酸化炭素(CO)、水蒸気(H_2O)、硫化カルボニール(OCS)、二酸化硫黄(SO_2)など組成の分光観測も行なわれた。これらの化学情報は現在の金星の740 K・90気圧という大温室状態がなぜ・どのようにして今あるのかという問題の解釈に重要な意味を持つ。なぜなら、可視域に0.8ものアルビド(反射能)を示す分厚い硫酸雲は、大気熱収支を支配しているはずだが、その原料である $\text{SO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ の供給源ははっきりしていない。数年周期で SO_2 の量が変化しているという観測結果もあり、「ひょっとすると火山が源か?」とも考えられている。地球の場合は正にこれで、成層圏の硫酸エアロゾルは火山噴火により(偶然)ほぼ10年の周期で変動している(1961年バリのアグン、1973年南米フエゴ、1982年メキシコのエルチヨン、1991年フィリピンのピナツボ、2002年?)。もし溶岩流があれば、 $1\ \mu\text{m}$ 撮像で検出できる可能性がある。この波長は地表740 K黒体放射ピークの短波長側にあたるため、熱放射強度は温度に敏感に応答する。

地表で740 K・90気圧という高温・高压状態の

ため、大気組成は地表物質との熱化学反応に支配されていると考えられる。現在の世界標準である炭酸塩を大気のパuffaとする説では CO_2 量をうまく説明できるが¹⁰⁾、 SO_2 現在量は平衡値の100倍にもなってしまう。これは火山供給説に呼応しているようにもみえるが、なんとなく気持ちが悪い。さらに、この説に従うと現在の気候は不安定平衡にあることも指摘されており¹¹⁾、ますます気持ちが悪い。一方では黄鉄鉱をpuffaとし、現在の SO_2 量を必然的平衡値として説明する説¹²⁾もある。 $\text{CO} \cdot \text{H}_2\text{O}$ はいずれも雲物質 H_2SO_4 の生成・消滅に関わるため、その分布から雲化学過程および大気循環過程が議論できる。雲の生成・消滅はアルビドを通して熱収支・温室効果に影響する。 H_2O は平均30 ppm程度と微量だが、 CO_2 の窓をふさぐ重要な温室効果気体であり、金星大気の現状を理解する上で重要な鍵をにぎる。 H_2O の供給にも火山説のほか彗星衝突説などがある。90気圧の CO_2 があっても、740 Kの温室効果は必ずしも自明ではない。この計画では SO_2 を紫外で、CO(と H_2O)を近赤外で定量する。

「なぜ水は地球には大量にあるのに金星には少なく、なぜ CO_2 は地球には少量なのに金星には90気圧もあるのか?」という問題は一応かたがついているようにみえる。つまり、「地球の場合は太陽からの距離が適当だったため、水が液体として存在でき、水溶性の CO_2 は海に溶けて炭酸塩として海底に沈殿して大気中から除かれ、残った N_2 に植物が光合成で酸素を加えて、現在の地球大気組成を作った。一方、金星では太陽放射束が地球の2倍あったため H_2O が液体で存在できず、90気圧の CO_2 がそのまま大気中に残り740 Kの温室となってしまった。」とされている。地球地殻中の炭酸塩鉱物を CO_2 大気に換算すると90気圧程度になることは、上記の説を支持しているようにみえる。

もともと金星にあった2次大気(捕獲大気消失後に内部からの脱ガスで生じた大気)には CO_2 の他に H_2O も多量に含まれていたはずだが、 H_2O の

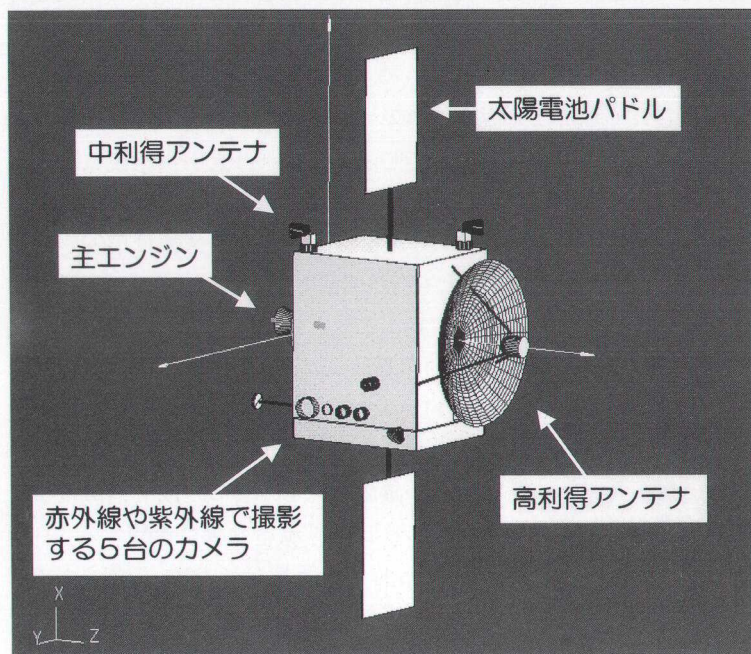


図5 探査機概観。撮像時は衛星の姿勢を制御して側面に並んだカメラを金星に向ける。

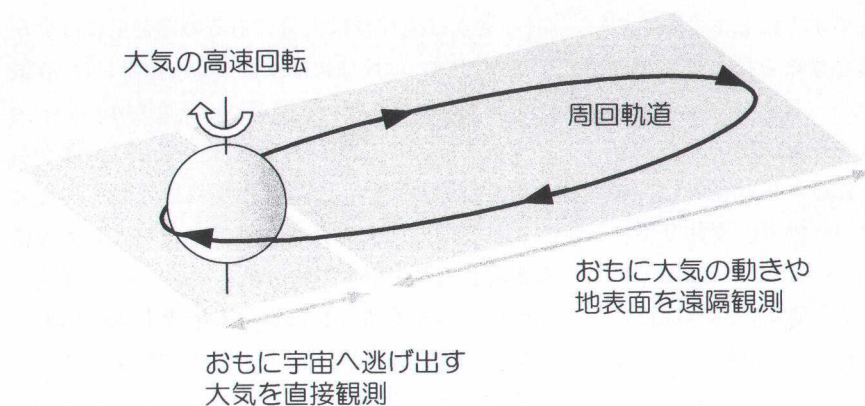


図6 金星周回軌道。遠金点付近で4日循環（超回転）と同期する。

光解離の後にHは大気外に逃散しOは地殻の酸化に使われた、ということになっている。実際、大気中のD/H比（重水素Dの水素Hに対する比）は1/100と地球の1/10000に比べて100倍も大きく、大気進化にHの逃散が重要な役割を果たしてきたことがうかがわれる。DはHの2倍重いため熱逃散はHに比べて少ない。しかし、磁場のない金星では熱逃散以外の機構が働いてきた可能性がある。それは、太陽風による剥ぎ取りなどプラズマとの相互作用である。地球大気は磁場によるバリヤ（磁気圏と呼ばれる）によって太陽プラズマ流から守られており、太陽風による大気の剥ぎ取りは重要ではないが、金星では太陽風が大気と

直接に相互作用し、この現象がHの逃散ひいては H_2O の消滅に大きな役割を演じてきたらしい。

我々は大气超回転維持機構の解明を中心に、雲化学フィードバックによる気候安定性の理解、さらに逃散現象から大気進化に関する知見にも及ぶ期待をこめて、この金星大気探査計画を練っている。

2. 計画の現状と日程

金星大気探査計画を遂行する作業部会は1998年6月に宇宙科学研究所・小山孝一郎教授を中心

表 1 カメラ構成

	UV カメラ	雷・大気光カメラ	1 μm カメラ	2 μm カメラ	10 μm カメラ
波長	290, 380 nm	551, 558, 777 nm	1.0 μm	1.7, 2.3, 2.4 μm	10 μm
対象(夜)	—	O ₂ 大気光 (100 km) O 大気光 (100km?) 雷 (? km)	地表 (火山)	雲パターン (50 km) CO 分布 (35 km) (H ₂ O 分布, 黄道光)	雲頂温度 (70 km)
対象(昼)	雲パターン (70 km) SO ₂ 分布 (70 km) 未知物質分布 (70 km)	—	雲パターン (50 km)	—	雲頂温度 (70 km)
空間分解能 (km) (遠金点)	17	2200	17	17	70
検出素子	Si-CCD	マルチアノード PMT	Si-CCD	PtSi	ボロメタ
素子数	1024 × 1024	8 × 8	1024 × 1024	1024 × 1024	240 × 240

に作られ、科学目的の設定とそれを実現するための測器構成を議論してきた。検討結果は2001年1月に同所理学委員会に提案され、その理学的意義と工学的実現性が吟味されたのち5月に承認され、この計画は宇宙科学研究所のプロジェクトとして動き出した。

打ち上げには宇宙科学研究所のM-V（エムゴと読む）ロケットを用い、全重量650 kg（うち周回軌道投入用燃料350 kg、科学測器は35 kg）の3軸制御探査機（図5）を周期30時間、近金点高度300 km、遠金点高度13金星半径（79000 km）の準赤道逆行長円軌道に投入する（図6）。この軌道は、遠金点付近での探査機の運動が4日循環（超回転）とほぼ同期し、雲パターンの撮像に適している。打ち上げのチャンスは2007年2-4月と2008年2-4月にあり、いずれの場合も2009年9月に到着する。金星・地球の会合は1.6年毎にあり、両惑星とも軌道離心率は小さいので、どの会合でも同じように思えるが、この会合における探査機重量条件（金属周回軌道に投入できる重量制限）

は群をぬいて良く、同等のチャンスは2015年までない。2007年を目指して準備を進め、2008年の窓をバックアップとしたい。

3. 測器構成と測定戦略

表1に示す5台のカメラを中心測器として10波長での全球撮像を考えている。つまり、地球で気象衛星ひまわりが行なっているように、撮像した雲パターンの追跡からの風速場・乱流場などの定量を多波長つまり多高度で行なうことを中心戦略としている。大気逃散についても極端紫外での共鳴散乱光撮像、粒子計測器による直接測定、高速中性粒子による撮像などを検討しているが、ここでは主にカメラについて述べる。

上記のような測定戦略から、カメラデザインに際して以下の要求を満たす必要がある：(1) 全球同時撮像、(2) 20 km 以内空間分解能（遠金点での紫外・近赤外カメラ）、(3) 3秒以内露出。(1)、(2)は科学目的からきており、(3)は工学的制約からきている。この結果、カメラデザインは以下の共通性を

含むことになった：(1) 干渉フィルタによる簡易分光，(2) 視野 12 度の結像系（紫外以外は屈折系），(3) 2 次元撮像素子。

5 台のカメラのうちの主力と言える $2\ \mu\text{m}$ カメラは、夜面の下層雲パターンを遠金点で 17 km の分解能で撮像し、その追跡から大気循環パラメータを定量する。これらの波長は地上大望遠鏡からも使えるが、空間分解能は数百 km しかない。 $2.3\ \mu\text{m}$ と $2.4\ \mu\text{m}$ は CO 検出のための差分吸光ペアで、CO 分布からは雲化学や大気循環に関する情報が得られる。この波長域にさらにチャンネル加えての H_2O の定量、および金星到着までの巡航期間における黄道光の観測も検討している。検出素子の PtSi は Si-CCD などに比べ量子効率が 1/10 しかないが、他の赤外検出素子と異なりモノリシック製法のため均質性が高く、きれいな絵が期待できる。温度サイクルにも強く、さらに国産品が使える点が安心できる（赤外は軍事用途が多いため、輸入できないことがある）。ただし、65 K まで冷やさねばならない。これには機械冷凍機で対処するが、電力 40 W・重量 9 kg の資源を要する。太陽に近いと電力には余裕があるが、測器に割り振られている重量は 35 kg で 9 kg はかなりつらい。

もうひとつの主力 $1\ \mu\text{m}$ カメラは昼には雲層全体からの散乱光を撮像する。この波長では大気の光学厚みが小さいため、紫外で見る散乱光（雲頂 70 km）より深い所（50 km）を見ることになり、両者の比較から鉛直運動量輸送に関する情報が得られる。夜には地表が見えるはずで、火山の検出をひとつの目的にしている。火山は大気中の SO_2 や H_2O （つまり雲の原料）の供給源候補とされており、火山活動を定量できれば大気の現状の理解に貢献できる。検出素子には、使い慣れた Si-CCD が使え、冷却も 270 K までの放射冷却ですむので、重量資源のジレンマはない。

$10\ \mu\text{m}$ カメラは昼夜の雲頂（70 km）からの熱放射（230 K 程度）を見て気温のムラを検出し、対流や大気波動を狙う。検出素子には非冷却のボロメタ

を用いる。「常温のカメラで 230 K が見えるか？」と疑問を感じる読者もいるかと思うが、原理的にはカメラ温度の安定性さえ充分あれば問題はない。

紫外カメラは昼の雲頂（70 km）からの太陽散乱光を見て、やはり雲パターンを抽出・追跡する。 $290\ \text{nm}$ は SO_2 の吸収域で、この波長で見えるコントラストは SO_2 のムラに由来する。ところが、紫外にはさらに未同定の吸収物質があり、 $380\ \text{nm}$ はその検出にあてる。この波長域では太陽放射束が大きく未知物質吸収は大気熱収支にも影響する。検出素子には Si-CCD が常温で使える。雷・大気光カメラは以上 4 カメラとはやや目的が異なり、大気循環ではなく雷の検出を主目的にしている。金星大気中の雷の存在については、これまで是と否が相半ばしており、これも長年の論争が続いている。そもそも、地球大気中の雷の生成過程には氷晶による電荷輸送が不可欠であり、そのようなものが存在しそうな高温・高圧の金星大気中で確認されれば、それだけで意義は大きい。酸素原子 777 nm 線は疑似金星雷実験から、なぜか特に強く放射されることが知られている。また、地球では 1990 年代に雷雲から下方の地面へと共に上方の電離圏にも放電する現象がみいだされ、国内では東北大学のグループが観測を続けており、同様のものが金星でもみつかると可能性がある。検出素子には応答時間を重視して 8×8 マルチアノードの光電子増倍管（PMT）を用い、雷信号自体をトリガーに使う高時間分解能でデータを取得する。波長 551 nm は O_2 大気光で、高度 100 km 以上の大気の昼夜対流と大気超回転をモニターできる。つまり、昼側で CO_2 や N_2 の光解離で生成された C, O, N などの原子が昼夜対流で夜側に運ばれ、真夜中付近で沈降して再結合する際に励起分子が作られて光っている。金星超高層大気には、このような「昼夜対流大気光族」とでも呼べる大気光群が知られている。夜面でのこれらの発光分布中心は朝側に数十度偏っており、その高度域（100–120 km）での大気超回転による「ひきずり効果」とされている。

また、酸素原子 558 nm は地球のオーロラ・大気光の代表的輝線だが、1975 年のベネラ 9/10 の観測では検出できず¹³⁾、金星にはないことになっていた。ところが、最近ハワイでの地上観測で地球並みの強度が検出され¹⁴⁾、話題になっている。どちらの観測も間違いとも思えず、なぜ見えたり見えなかったりするのかは今のところ解らない。金星にもあるという、オーロラのような現象¹⁵⁾の可能性もある。夜面の観測時期が内合前後に限られる地上観測と異なり、継続観測が可能のため、この謎も解決できるかもしれない。

これらカメラによる撮像は主に天底方向測定のため高度分解能が 10 km 程度しかない。そこで、これらに高度分解能に優れた電波掩蔽法を組み合わせ情報に補足する。これは測定方法としては古典的で、地球から見た探査機の金星ディスク縁出沒時に、探査機に積んだ超安定発振器からのピーコンを受信し、その強度・位相変化から伝播経路上の中性・電離大気情報を得る。密度・気温などを高高度分解能 (1 km) で測定できるので、鉛直スケールの小さな波動なども検出できる。

4. 展望

この探査計画は他惑星の大気循環つまり気象学を対象とする新しい試みといえる (気象屋ではない筆者達がこのようなことを言うのはややおこがましいが)。地球という特殊な枠のなかで発展してきた気象学が今回はじめて全く異なる対象を扱うことになる。火星の場合は地表気圧が地球の 1/100 で、ちょうど地表に成層圏が直接乗ったような形となっており、地球型気象学の延長上での理解が一応可能だった。しかし、金星そして木星型惑星の気象学はおそらくそのようにはいかず、どこかで相転移を経た全く異なる世界を扱わなければならない。金星大気循環の理解はそのような普遍的惑星気象学の始まりであり、地球の気象学自体をこれまでとは異なるより深い理解から眺め直すことを可能にするだろう。

参考文献

- 1) Sheehan W., Dobbins T., 1999, Sky and Telescope, July p56
- 2) Schubert G., et al., 1980, J. Geophys. Res. 85, 8007
- 3) Gierasch P., 1975, J. Atm. Sci. 32, 1038
- 4) Kostituk T., et al., 2001, Geophys. Res. Lett. 28, 2361
- 5) Allen D. A., Crawford J.W., 1984, Nature 307, 222
- 6) Carlson R.W., et al., 1991, Science 253, 1541
- 7) Taylor F.W., 1998, Adv. Space Res. 21(3), 409
- 8) Belton M J. S., 1991, Science 253, 1531
- 9) Baines K.H., et al., 2000, Icarus 148, 307
- 10) Fegley B. Jr., Treiman A. H., 1992, in 'Venus and Mars', p7, American Geophysical Union
- 11) Hashimoto G. L., et al., 1997, Geophys. Res. Lett. 24, 289
- 12) Klose K. B., et al., 1992, J. Geophys. Res. 97, 16353
- 13) Krasnopolsky V. A., 1983, in 'Venus', p459, University of Arizona Press
- 14) Slangier T. G., et al., 2001, Science 291, 463
- 15) Phillips J. L., et al., 1986, Geophys. Res. Lett. 13, 1047

Japanese Venus Mission Project Ready to Go

IWAGAMI, N. and NAKAMURA, M.

Department of Earth and Planetary Science, Univ. of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033

Abstract: A Japanese project to send a mission to Venus in 2009 is ready to start. The main scientific goal is to solve a long-standing mystery 'The Super Rotation' by quantifying atmospheric circulation parameters from imaging/tracking cloud patterns.