

金星大気における波動による高速帯状流生成への観測的アプローチ

東京大学大学院・新領域創成科学研究科 今村 剛

Takeshi Imamura

Graduate School of Frontier Sciences,

The University of Tokyo

1 はじめに

金星は地球とほぼ同じ大きさの地球型惑星であるが、そこで生じている秒速 100 メートルに達する惑星スケールの東風「スーパーローテーション」は、従来の地球流体力学では説明しがたいものである。この大気循環を波動による角運動量輸送で説明しようとする様々な仮説が提案されてきたが、観測データの不足もあって決め手に欠けており、また地球の大気循環との違いが何に起因するのかもはっきりしていない。一方で、共通性がうかがわれる現象が木星や太陽にも見られるほか、太陽系外惑星の環境形成の観点からも注目されている。本稿ではこの問題の背景と金星気象衛星「あかつき」による研究計画について紹介する。

2 金星気象学

1.1 金星の大気構造

金星（図 1）は太陽から約 1 億 km の距離（地球-太陽間の 0.72 倍）のところを公転する地球型惑星である。大きさは地球とほとんど同じだが、その表面環境は地球と大きく違っている（図 2）。大気は主に二酸化炭素からなり（96.5%）、その量は大変多く、地表面気圧は 90 気圧（水深 900m 相当）である。その二酸化炭素がもたらす温室効果のために地表は 460℃という灼熱の世界である（松田 2000）。高度 50-70km 付近には硫酸の雲が浮かび、惑星全体をおおう。なお、地球にも金星と同程度の二酸化炭素があると考えられているが、地球では二酸化炭素は水に溶解、海中でカルシウムイオンと結合して炭酸塩を生成し、地殻に取り込まれていると考えられている。

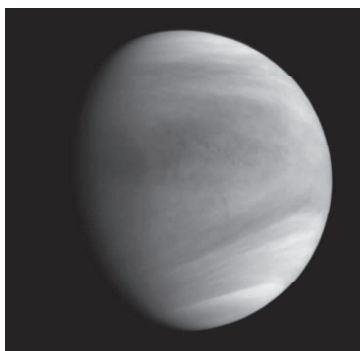


図1 金星探査機「あかつき」が二酸化硫黄の吸収帯（283 nm）で撮影した金星

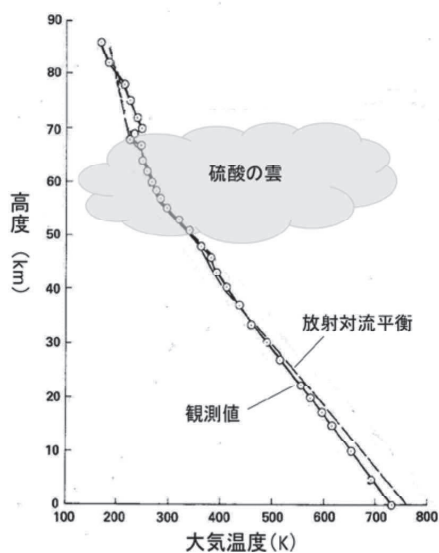


図2 金星大気の温度分布の探査機による観測結果と数値モデルによる計算値（放射対流平衡）（Pollack et al. 1980 を改変）

46 億年前に太陽系が作られた時、金星にも地球と同様に多くの水があったとしたら、海洋が形成されたかもしれない。そのころの太陽は現在より 2～3 割暗かったと考えられており、地球と同様に二酸化炭素が地殻に取り込まれれば液体の水が存在しうる（Kasting 1988）。しかし地球の 2 倍近くの太陽光を浴びる金星は地球よりも暖かく、そのために原始の金星の大気には地球よりも多くの水蒸気が含まれていた

う。水蒸気は徐々に高層大気に運ばれ、太陽紫外線によって水素と酸素に分解され、水素は重力を振り切って宇宙空間に流れ出してしまったということが考えられる。金星の海はこのようにして失われたのかもしれない。

1.2 スーパーローテーション

金星を特徴付ける風「スーパーローテーション」は、およそ 50 年前、地上望遠鏡による雲の動きの観察によって発見された。金星の自転は地球とは逆向きで、その周期は 243 地球日と長い。そのため当初は、金星大気では太陽側と反太陽側で大きな温度差が生じ、それに起因する大きな圧力差によって高高度の大気が太陽側から反太陽側に流れ込み、これを補償すべく太陽側で上昇流、反太陽側で下降流となるような「昼夜間対流」が存在することが予想されていた。しかし実際には自転方向の風速が全ての場所において高度とともに増加し、高度 70 km 付近で 100 m/秒、自転の 60 倍の角速度に達しており、昼夜間対流は存在しない（松田 2000）（図 3）。このような風系は地球と大きく違っている（図 4）。地球の場合、赤道付近では東風、中高緯度では西風が卓越し、いずれも自転速度より遙かに遅い。

ちなみに火星には地球に似た大気循環が存在すると考えられている。一方、土星の衛星タイタンは惑星ではないが窒素を主成分とする大気を持ち、そこでは自転速度の 10 倍程度のスーパーローテーションが生じているらしい。金星とタイタンは表面温度は大きく異なるものの（前者は高温、後者は極低温）、自転が遅いこと（前者は周期 243 地球日、後者は 16 地球日）や、厚いエアロゾル（もや）層におおわれていることが共通している。

近年、太陽系外の惑星（系外惑星）が数多く発見されているが、ここでもスーパーローテーションが重要な役割を果たすかもしれない。中心星の近傍を公転する系外惑星が多く見出されており、そのような惑星は中心星の強い潮汐力のもとで常に同じ面を中心星に向けていると考えられる。すると昼夜間で極端な温度差が生じ、厳しい環境になることが予想される。しかし一方で、このような惑星では自転周期と公転周期が等しくなり、金星やタイタンと似た低速回転惑星となるため、スーパーローテーションが生じて昼夜間の温度差が均されるかもしれない（Joshi et al., 1997）。このことは惑星によっては生命圏の存立のために有利に働く可能性もある。系外惑星が中心星の前を横切る現象を利用した大気の分光観測によってスーパーローテーションのような高速の東西風の存在が見い出されている例がある（e. g., Loudon & Wheatley, 2015）。

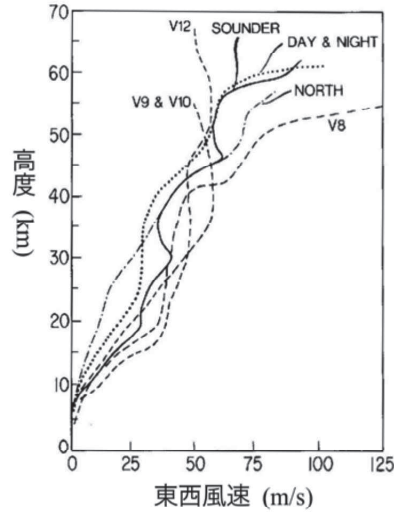


図3 米国とロシアの着陸機によって測られた金星の東風の高度分布 (Schubert et al. 1980 を改変)

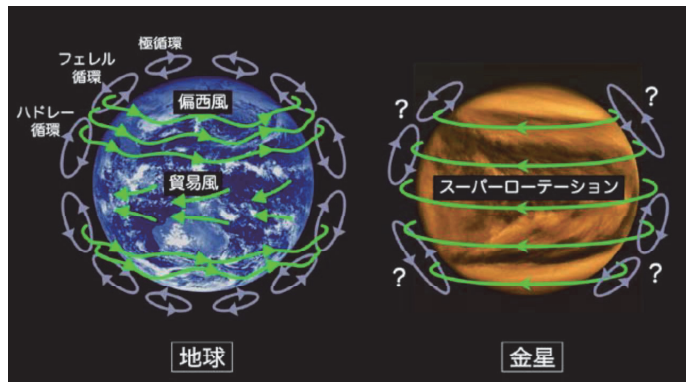


図4 地球と金星の大気大循環のイメージ。金星大気の子午面循環はよくわかっていない。

これまでスーパーローテーションを説明する様々な理論が提唱されてきた (図5) (松田 2000)。まず、Gierasch が 1975 年に提唱し、いくつかの数値実験でそれに沿った説明がなされているものがある (Gierasch 1975)。ここではハドレー循環という、低緯度で上昇流・高緯度で下降流となる南北・上下方向のゆっくりとした循環 (子午面循環) が太陽光加熱によって駆動されると考える。この循環が、低緯度において地

表から上空へと自転軸周りの角運動量を運び、上空で高緯度へと角運動量を運ぶ。その一方で、大規模な擾乱（波や乱流）により赤道向きに角運動量が運ばれれば、大気が持つ角運動量が低緯度ほど大きいような風速分布になる。さらにハドレー循環が継続すると、角運動量の増えた低緯度で上昇流、角運動量が減った高緯度で下降流となるため、正味では上向きに角運動量が運ばれてスーパーローテーションが作られる。赤道向きに角運動量を運ぶ擾乱としては、ハドレー循環が極向きに角運動量を運ぶことにより高緯度にジェット気流が作られ、このジェットが不安定化して蛇行することから生じる（順圧不安定）ことが期待されてきた。

このようなメカニズムは地球では働かないのだろうか。地球対流圏にも中高緯度にジェット気流が存在するが、これに起因する不安定性（傾圧不安定）によりロスビー波という波動が励起され、これが赤道地方から高緯度へと角運動量を運び、赤道大気を減速するとともに高緯度ジェットを強化することが知られている。つまり金星で期待しているのは角運動量輸送の向きが逆である。このような違いが生じる理由として、様々に条件を変えた数値実験をもとに、自転速度が遅くなる、あるいは惑星が小さくなると波の空間スケールが惑星サイズに近くなり、このとき波による加速・減速の分布が変化することが提唱されている（Mitchell and Vallis 2010）。スーパーローテーションが生じている金星もタイタンも自転速度は遅いと言える。

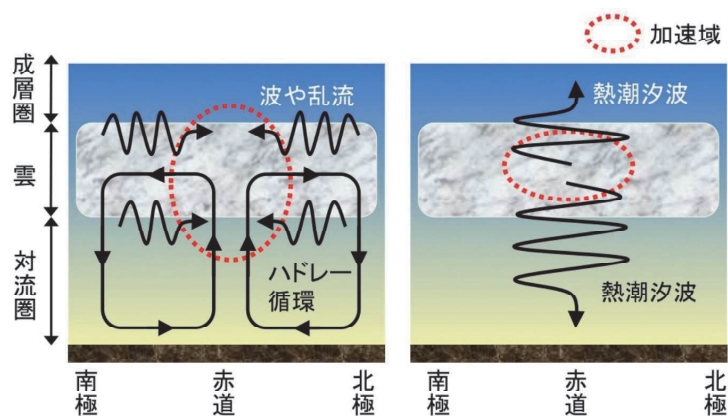


図5 スーパーローテーションのメカニズムに関する2種類の仮説。ハドレー循環によるもの（左）と熱潮汐波によるもの（右）。

他に有力な仮説として、雲層が太陽光を吸収して暖まることによって「熱潮汐波」という惑星スケールの大気重力波が励起され、これが下向きに伝わり、地表まで到達して固体惑星に角運動量を渡す、というものがある (Takagi and Matsuda 2007)。雲層から見ると太陽は自転の反対方向に動くため、太陽光加熱により励起される熱潮汐波は負の角運動量を持つ。そのため熱潮汐波は負の角運動量を固体惑星に渡すことになり、大気に正の角運動量が蓄積してスーパーローテーションとなる。これが正しいとすれば、ある惑星の大気がスーパーローテーションに至るためには、惑星全体をおおって太陽光を受け止める雲やエアロゾルの層が必要ということになる。タイタンも厚いエアロゾルにおおわれており (ただし主成分は炭化水素)、この条件は満たしそうである。

このような仮説はあるものの、期待されるハドレー循環や大規模な波による角運動量輸送の観測的な裏付けはない。数値実験によるスーパーローテーションの再現は難航しており、メカニズムについてコンセンサスはない。スーパーローテーションを再現したとする計算結果においても、現実的な強い風は雲層高度に限られ、下層大気での風は著しく弱い (Lebonnois et al. 2016)。このような問題に取り組むには高精度の数値実験が必須であるが、スーパーローテーションの形成には数十年もの時間がかかると考えられており、それだけの時間をカバーするシミュレーションにおいて大気と地表の間の角運動量のやりとりを正確に解く (全角運動量を保存する) ことが現状では難しいようである。

金星大気はいつからスーパーローテーションしていたのだろうか。この問いに関連して興味深い数値実験がある (Way et al. 2016)。前述のように初期の金星の表面には地球と同様にたくさんの水があり、二酸化炭素が炭酸塩として地殻に取り込まれていた可能性がある。そこで、初期の金星に窒素を主成分とする地球とほぼ同量の大气があり、地表には海があったと仮定する。そのような大気の循環をシミュレートしたところ、スーパーローテーションの代わりに昼側で上昇流、夜側で下降流という昼夜間対流が生じ、上昇流域となる昼側は厚い水氷の雲で覆われるという結果が得られた。仮定した大気は現在の金星大気より熱容量が小さいため、昼と夜の間に大きな温度差がつき、スーパーローテーションよりも昼夜間循環が生じやすいのであろう。昼側を覆う雲は太陽光をよくはね返すため、金星表面は涼しく、生命存在が可能な状態に長く保たれた可能性がある、と主張されている。前述の系外惑星のケースではスーパーローテーションによって穏やかな環境が形成しうるとされたが、ここではその逆である。

スーパーローテーションは地球でも生じうるという指摘も多くある (Lee 1999; Caballero and Huber 2010)。ただしここで言うスーパーローテーションは必ずしも金星ほどの高速ではなく、赤道域を含む広い緯度帯で自転を追い越すような風が吹き、赤道上空で角運動量が最大となるような流れである。たとえば、熱帯地方で発達する大規模な積雲対流群がロスビー波を励起し、これが高緯度へと伝わることにより（高緯度ジェットで励起されるロスビー波とは逆に）角運動量を赤道向きに運び、赤道加速を通じてスーパーローテーション生成に働く。現実の地球にスーパーローテーションが見られないのは、自転軸の傾きのために赤道をまたぐハドレー循環が生じ、これがもたらす角運動量輸送がスーパーローテーションを打ち消すからとされる。しかし現在よりも温暖だった新生代などの地球においては、より活発な積雲対流のもとで強い赤道加速が生じ、スーパーローテーション状態にあったのではないかという推測もなされている。

このように見ていくと、金星と地球の大気循環は一見全く別物であるように見えて、実はその境界は曖昧であり、それぞれが微妙なバランスのもとに成立しているかに思われる。このテーマに対して実証的アプローチを試みる第一歩が「あかつき」である。

2. 金星気象衛星

以上のような問題意識のもと、1990 年代の終わりごろ金星大気探査機の検討が始まった。基礎的な実験、ミッション提案と計画承認、開発を経て、探査機が打ち上げられたのは 2010 年 5 月である。打ち上げ後、探査機は明けの明星にちなんで「あかつき」と名付けられた (図 6)。

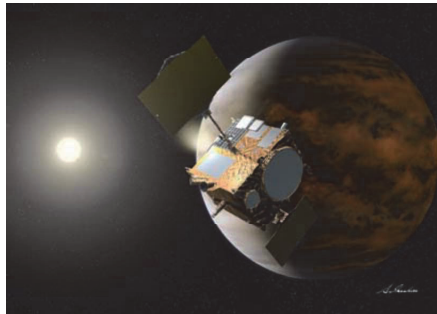


図 6 「あかつき」の想像図。赤外線で観察する雲のイメージを夜側に描いてある。

「あかつき」は2010年12月に金星に接近し、そこで軌道制御エンジンにより減速して金星周回軌道に投入される予定だったが、推進系内部の不具合により軌道制御エンジンのノズルが高温となり破壊され、「あかつき」は金星の衛星になることなく素通りし、太陽を巡る人工惑星となった。しかしその後「あかつき」は再度金星を目指し、5年後となる2015年12月に金星の衛星となった (Nakamura et al. 2016)。

「あかつき」には大気を異なる波長の光で調べるカメラ5台と電波源が搭載されている (図7)。二酸化硫黄など化学物質やエアロゾルの分布を見る紫外イメージャ (波長 283 nm・365 nm)、雲頂の温度分布を見る中間赤外カメラ (波長 10 μm)、雲の深部や雲の下の化学物質を見る 2- μm カメラ (波長 1.7~2.3 μm の間に4波長)、雲や地表を見る 1- μm カメラ (0.9~1.01 μm の間に4波長)、そして雷の発光や高層大気の蛍光 (大気光) を超高速測光でとらえる雷・大気光カメラ (550~770 nm の間に4波長) である。雷・大気光カメラ (LAC) を除く4カメラは金星全体を視野に収めた連続的な撮像を行い、LAC は探査機が金星の影に入り太陽光に邪魔されないときに観測を行う。それぞれの波長で異なる高度の大気現象を可視化し、これらを統合することによって大気の3次元の構造と変動をとらえることができる (図8)。さらに、雲の細かな模様が時間とともに移動する様子を解析することによって、それぞれの高度での風速分布とその時間変化を求める。このことにより、前述のような惑星規模の波動による運動量輸送がスーパーローテーションの維持にどう働いているかを調べることができる。

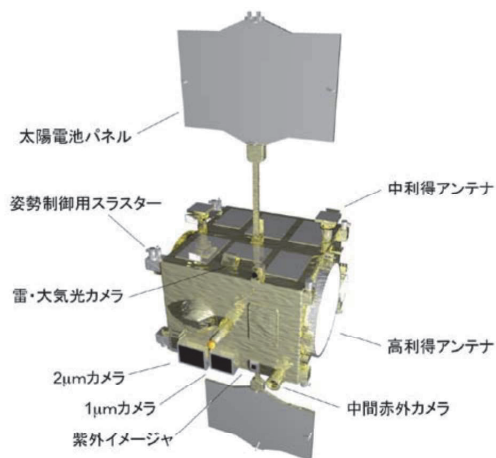


図7 あかつきの外観。太陽電池は探査機から突き出た軸の周りに回転可能であり、この軸が概ね南北方向に沿うように探査機が運用される。

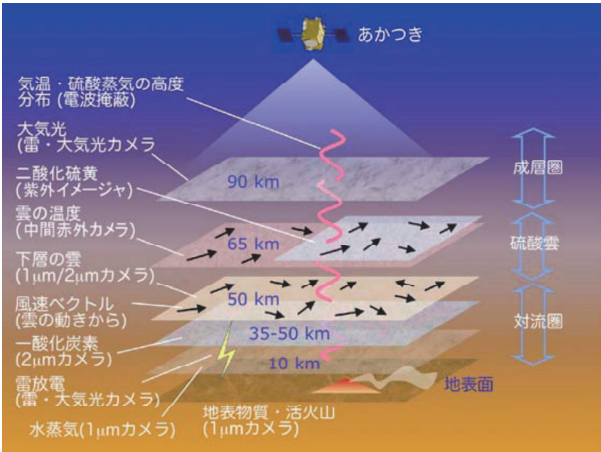


図 8 複数波長でのリモートセンシングで大気の 3 次元の動きをとらえる。

電波掩蔽（えんぺい）という観測のための、周波数が極めて安定した特別な電波源も搭載されている。地球から見て探査機が金星の向こう側に隠れる時と出てくる時に、この電波源から送信されて金星大気をかすめた電波を、地上の深宇宙用アンテナで受信する（図 9）。電波の周波数や強度の揺らぎを調べることで、金星大気の温度や、雲が蒸発して生じる硫酸蒸気の濃度、電離層の電子密度の高度分布を知ることができる。

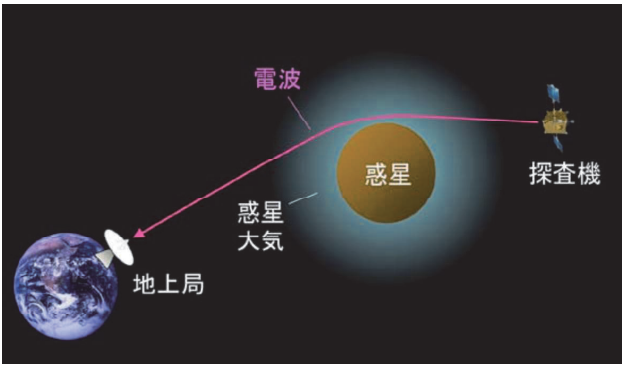


図 9 電波掩蔽観測の概念図

「あかつき」の特色である多波長撮像データからは、これまでに知られていなかった

た興味深い特徴を読み取ることができる (Limaye et al. 2016)。たとえば中間赤外線で撮影した金星の雲の温度分布には、赤道をまたいで北極域から南極域まで伸びる弓のような模様がしばしば見られる (図 10) (Fukuhara et al. 2017; Kouyama et al. 2017)。この構造は地表に対してほぼ静止していることが判明し、表面地形に風が作用することによって作られた大気重力波と推察された (Navarro et al. 2018)。このような表面地形により励起される波動は、スーパーローテーションの維持において重要な大気-地表間の運動量交換の手がかりになることが期待されている。

紫外線で撮影した画像 (図 1) には、雲の上に二酸化硫黄が多く存在する領域が暗部として分布している (Yamazaki et al. 2016)。ここからは、雲の下にある二酸化硫黄が主に低緯度の様々な力学過程によって雲の上に運び上げられ、太陽紫外線のもと硫酸エアロゾルに変わっていくことがうかがわれる。ここから、スーパーローテーションの維持に関わる子午面循環の構造を読み解くことができそうである。

二酸化炭素の吸収帯にあたる近赤外線 (波長 $2.02\ \mu\text{m}$) で撮った昼側の画像 (図 11) には、雲頂高度の分布が可視化されており、極域で急激に雲頂が落ち込む様子や、低緯度の全面に細かな雲の凸凹があることがわかる (Satoh et al. 2016)。雲頂付近は安定成層であることがわかっているため、低緯度に見られる凹凸が地球の積雲対流群のようなものとは考えにくく、成因は謎に包まれている。ともあれ、このような構造は大気の下混合によってスーパーローテーションの運動量の鉛直拡散を担うかもしれない。

金星大気による吸収があまりない近赤外線 (波長 $2.26\ \mu\text{m}$) で撮った夜側の画像 (図 12) には、雲層の内部のダイナミックな構造が精細に映し出されている (Satoh et al. 2016)。シアー不安定を思わせる渦列や、スーパーローテーションより速く伝播する前線のような構造など、多くの新現象が発見されている。雲層の下に滞留する硫酸蒸気が大気運動によって持ち上げられて凝結するなど、地球の雲に似たプロセスが働いていることが想像されるが、解釈は進んでいない。このような構造は、高緯度から低緯度に向けて角運動量を運んでスーパーローテーション維持に関わる水平渦がカスケードして作られるということも考えられる。

雲の様子が時間とともに移動する様子を検出することにより得られた風速データからは、雲層深部の赤道域に平均的なスーパーローテーションを越える速い流れが発見され、赤道ジェットと名付けられた (Horinouchi et al. 2017)。大気波動による東西流加速の一端をとらえた可能性がある。

電波掩蔽による大気温度の高度分布の観測からは、硫酸雲の中に存在する対流層や、

対流層の上に伝播する波動、といった特徴がとらえられている（図 13）（Imamura et al. 2017）。対流層の厚みの地方時依存性が初めて見出されつつあり、雲物理の日周期サイクルが初めて明らかになりつつある。雲層高度で励起されて上下方向に伝播する熱潮汐波もとらえられており、この波動のスーパーローテーションへの寄与が評価されつつある。

データ同化の手法によって観測データを数値シミュレーションと統合し、4次元の気象データセットを構築することも試行中である。以上のような正攻法の気象学的アプローチが可能となったことで、地球気象と金星気象の緻密な比較論が始まりつつある。観測データは世界に向けて公開され、世界から多くの研究者が研究に参加してスーパーローテーションをはじめとする金星気象学の解明に努めている。

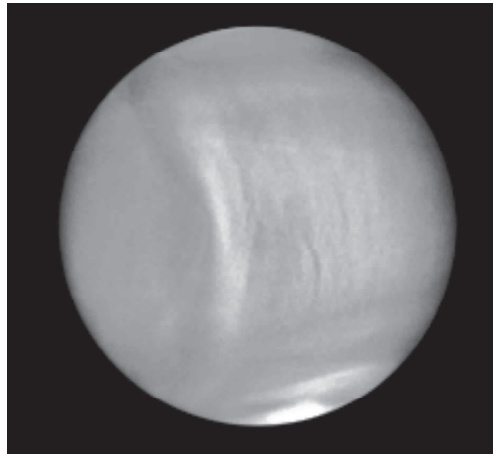


図 10 中間赤外カメラ（波長 10 μm ）で撮影した雲頂の熱放射。

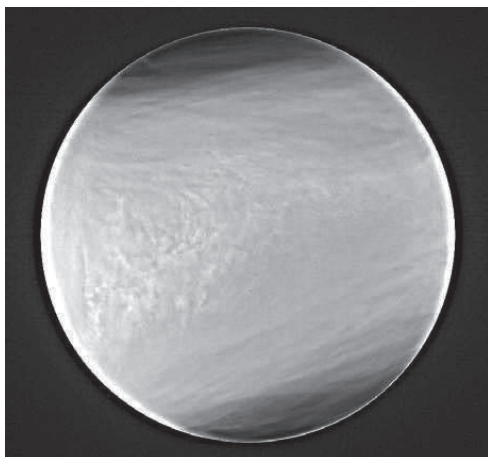


図 11 $2\text{-}\mu\text{m}$ カメラが二酸化炭素の吸収帯 ($2.02\text{ }\mu\text{m}$) で撮影した雲頂の太陽散乱光。明るいところは雲頂が高く、暗いところは雲頂が低いことを示す。空間スケールの小さい成分を強調してある。

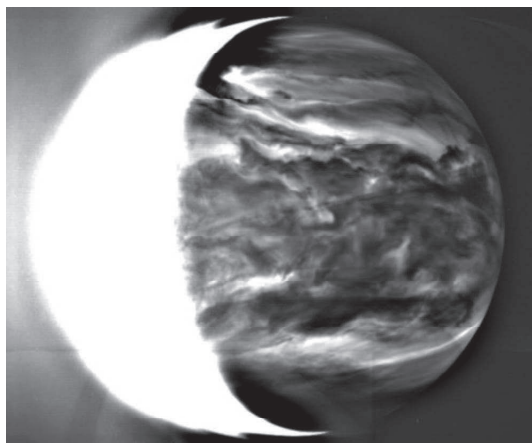


図 12 $2\text{-}\mu\text{m}$ カメラが金星大気の窓波長 ($2.26\text{ }\mu\text{m}$) で撮影した下層の雲の分布。左側の白いところは太陽光に照らされた昼面。右側の夜面に雲の構造を見て取れる。

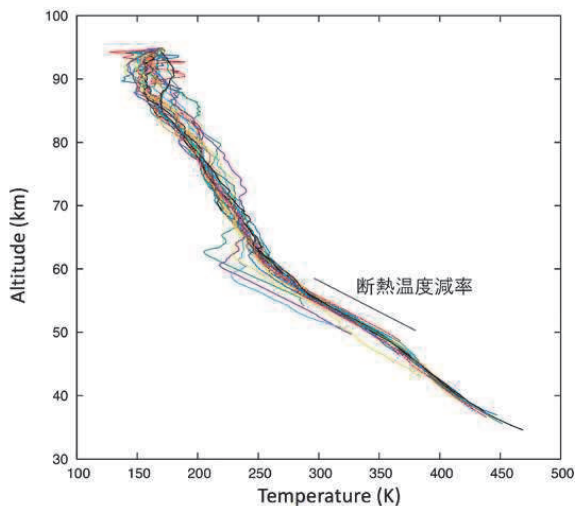


図 13 電波掩蔽観測で得られた気温の高度分布を重ねたもの。高度 50–65 km で温度が低下しているのは高緯度での計測。

参考文献

- Caballero, R. and M. Huber (2010) *Geophys. Res. Lett.* 37, L11701
- Fukuhara, T. et al. (2017) *Nature Geo.* 10, 85
- Gierasch, P. J. (1975) *J. Atmos. Sci.* 32, 1038
- Horinouchi, T. et al. (2017) *Nature Geo.* 10, 646
- Imamura, T. (2017) *Earth Planet Space* 69:137
- Joshi, M.M. et al. (1997) *Icarus* 129, 450
- Kasting, J. F. (1988) *Icarus* 74, 472
- Kouyama, T. et al. (2017) *Geophys. Res. Lett.* 44, 12,098
- Lebonnois, S., N. Sugimoto, and G. Gilli (2016) *Icarus* 278, 38–51
- Lee, S. (1999) *J. Atmos. Sci.* 56, 1353
- Limaye, S.S. et al. (2016) *Earth Planets Space* (2018) 70:24
- Louden, T. and P. J. Wheatley (2015) *Astrophys. J.* 814:L24, 2015
- 松田佳久 (2000) 「惑星気象学」(東京大学出版会)
- {oMitchell, J. L. and G. K. Vallis (2010) *J. Geophys. Res.* 115, E12008
- Nakamura, M. et al. (2016) *Earth Planets Space* 68:75

- Navarro, T. et al. (2018) Nature Geo. 11, 487
- Pollack et al. (1980) J. Geophys. Res. 85, 8223
- Satoh, T. et al. (2017) Earth Planets Space (2017) 69:154
- Schubert, G. et al. (1980) J. Geophys. Res. 85, 8007
- Takagi, M. and Y. Matsuda (2007) J. Geophys. Res. 112, D09112
- Way, M. J. et al. (2016) Geophys. Res. Lett. 43
- Yamazaki, A. (2018) Earth Planets Space 70:23