

金星大気のスーパー・ローテーション

松田 佳久

〈東京学芸大学教育学部 〒184-8501 東京都小金井市貫井北町 4-1-1〉

e-mail: ymatsuda@u-gakugei.ac.jp

高木 征弘

〈東京大学理学系研究科 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

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

金星大気は地表面において 730 K, 92 気圧に達する高温・高圧の大気である。この高温は大気の主成分である二酸化炭素による温室効果によって維持されている。金星大気は固体部分の自転（自転周期 243 地球日）と同じ方向に回転しており、高さ 70 km 付近では固体部分の 60 倍の速さで回転している。このスーパー・ローテーションについて解説する。

1. 惑星気象とは？

われわれの住む地球に太陽光が降り注ぎ、それをエネルギー源としてさまざまな気象現象が展開されていることは、日々、体験していることである。水星を除く太陽系の主な惑星にも、大気が存在し、太陽光も到達している。それでは、地球以外の惑星でも、台風が発生したり、温帯低気圧が発達したりする地球のような気象現象が見られるのだろうか。本稿では、金星に関して、観測により知られている現象を説明することによって、この問いに答えてみたい。

金星大気の置かれている環境と大気的基本的なパラメーターを、表 1 に示した。金星の半径は地球と同程度であり、固体部分に関しては、二つの惑星はよく似ていると言われている。金星は地球よりも太陽に近いので、その軌道での太陽光強度は強いが、太陽光の反射率がかなり大きいので、大気や地面によって吸収される太陽光のエネルギーは地球よりも小さい。したがって、有効放射温度は地球よりも小さくなる。惑星が吸収した太

陽光エネルギーは、惑星が宇宙空間へ放射する赤外線エネルギーとバランスしている。この惑星の放射を黒体放射と見なしたとき、相当する温度を有効放射温度という。また、金星の自転周期は 243 地球日（以下、日は地球日を意味する）と、地球や火星と比べて非常に長い。金星は自転と公転の向きが逆なので、1 太陽日が 117 日となっているが、これも非常に長い。

金星は大気量が非常に多く、地表面気圧が 92 気圧に達している。この大気の 97% が二酸化炭素からなっている。

2. 金星大気の巨大な温室効果

まず、金星大気の鉛直構造を検討したい。図 1 に温度と圧力および雲層の位置が、高度に対して示されている。この図から、（地球表面と同じ）1 気圧になるのは、約 50 km の高さであることがわかる。

金星では約 45 km から 70 km の間で雲層が存在しているが、金星の雲は地球の雲とかなり様子が異なっている。地球の雲は、地球全体で見ると

表 1 地球型惑星の大気のパラメーター

	金星	地球	火星
惑星半径 (km)	6,050	6,380	3,400
重力加速度 (m/s ²)	8.9	9.8	3.7
太陽光強度 (kW/m ²)	2.62	1.37	0.59
太陽光の反射率	0.78	0.30	0.16
有効放射温度 (K)	224	255	216
自転周期 (日)	243	0.997	1.026
公転周期 (日)	225	365	687
太陽日 (日)	117	1	1
地表面気圧 (気圧)	92	1	0.006
大気の主成分	CO ₂	N ₂ , O ₂	CO ₂ , N ₂

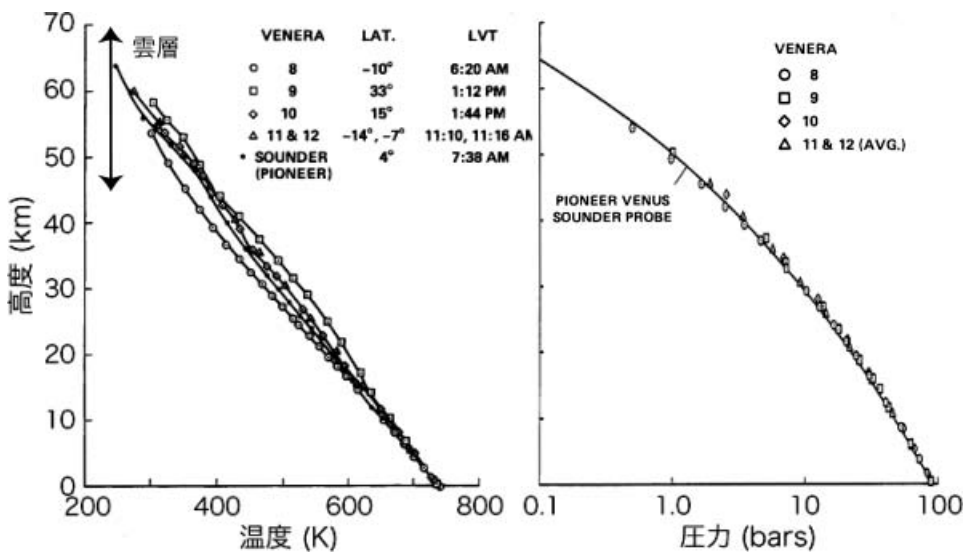


図 1 金星大気の鉛直構造。温度分布と雲層の高度が示されている。

ところどころに散在しているだけだが、金星の雲は全天を完全に覆っている。また、地球の雲粒は水または氷からなっているが、金星の雲は濃硫酸の液滴からなっている。この雲の存在のために、金星大気全部が覆われてしまい、雲層やその下の層の観測が困難になっていた。この雲層の存在が金星大気の大きな特徴の一つであるが、その形成についてもいろいろな人によって活発に研究されている。

次に、温度分布を見ると、地表面で約 730 K に達しており、地球と比べてたいへん高温になって

いる。この高温は温室効果によって維持されていると考えられている。金星大気の大部分が、赤外線を吸収する温室効果気体である二酸化炭素からなっているために、温室効果にたいへん有利になっている。金星の有効放射温度は 224 K であり、温室効果により地表面温度が数倍にも高められていることになる。近年、人間活動による二酸化炭素増大による地球の温暖化が問題となっているが、地球の場合、二酸化炭素や水蒸気といった温室効果気体は、大気的主要な成分ではない。特に、大気中の二酸化炭素は増大したとはいえ、380

ppm 程度であるので、金星の二酸化炭素量は地球より 5 桁ほど多い。結局、地球の場合は、温室効果はその地表面温度を有効放射温度 255 K から数割程度、高めるのにとどまっている。

二酸化炭素のような温室効果気体がいくらあっても、太陽光が地表まで到達しないと、温室効果は働かない。地球の場合、大気が太陽光つまり可視光に対してかなり透明であることが、温室効果が働く前提となっている。ところが、金星の場合、雲層により入射太陽光の 78% が反射され、残りも雲などに吸収されるので、そもそも、太陽光が地面まで到達するのかが問題となる。

ソ連の金星探査衛星ヴェネラと米国のパイオニア・ヴィーナスの観測結果によると、やはり太陽光の大部分は雲層で吸収され、地表面にはわずかの太陽光しか到達していない。地表面での全球平均太陽光エネルギー吸収量は 17 W/m^2 である¹⁾。このわずかなエネルギーに基づいて、高い地表面温度が維持されているので、温室効果気体による保温効果が地球と比べると桁外れに大きなものであることがわかる。すでに述べたように、この効果は主として膨大な量の二酸化炭素によっているが、微量ながらも金星大気中に存在する水蒸気の効果も無視できないことが、放射平衡の計算から

示唆されている^{2), 3)}。

3. 金星大気の不思議な流れ (スーパー・ローテーション)

次に、金星にはどのような風が吹いているのか、説明したい。地球の気象学の場合は、スケールの小さな身近な風の観測から始まって、最後に惑星スケールの風の分布が視野に入ってきた。地球以外の惑星の場合は外部から観測が始まったので、惑星スケールの風の分布がまず問題になってくる。この惑星スケールの風、つまり大気の流れを大気大循環という。もちろん、風に伴う圧力分布や温度分布も、大気大循環論で問題にすることは言うまでもない。台風や梅雨と異なり大気大循環は直接、体験できないため、わかりにくいと思われるので、まず、地球を例として大気大循環とは何か、を簡単に説明したい。

図 2 に東西方向に平均した子午面内の循環（子午面循環という）が示されている。北半球、南半球それぞれ、3つの細胞からなる循環がある。熱帯の循環をハドレー循環、中緯度の循環をフェレル循環、極域の循環を極循環という。このうち、ハドレー循環と極循環は温度が相対的に高い低緯度側で上昇、相対的に低い高緯度側で下降してい

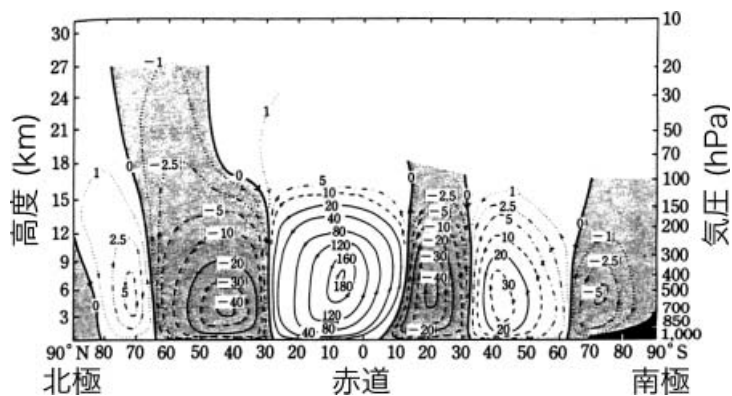


図 2 地球の対流圏の東西平均した子午面内の循環。12-2 月（北半球の冬）の平均値。白地の領域では反時計回りに、陰影のある部分では時計回りに空気が流れている。子午面循環の強度は質量の流れを表す流線関数の値で示してある。数値の単位は 10^9 kg/s (Newell et al., 1972)。

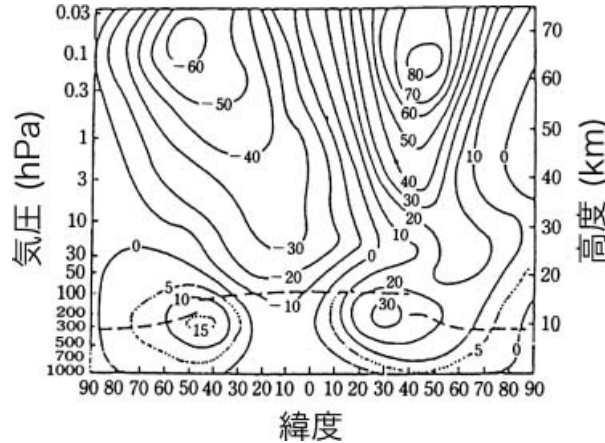


図3 地球対流圏と成層圏・中間圏の東西風速分布 (Murgatoroid, 1969). 東西方向に平均した風速で、正の値が西風、負の値が東風、単位は m/s である。左側が夏半球、右側が冬半球。

ることが、図からもわかる。それに対して、フェレル循環は逆方向に回転している。図3には、地球での東西風速の分布が示されている。対流圏の中高緯度では西風（偏西風という）、低緯度の地表付近では東風（貿易風という）が卓越していることがわかる。

なぜ、図2に示されているような3細胞循環が生じるのか、また、図3に示されているような東西風速分布が生じるのか？ さらに、地球大気に流体力学を適応したとき、その運動方程式の力学的バランスはどのようなものなのか？ こういった問題に答えるのが、大気大循環の問題、ひいては気象学の課題である。図2,3に示したような、地球の大気大循環の形成に関しては、南北方向の太陽光吸収量の差（これが極・赤道間の温度差を作る）が重要である。地球の速い自転により太陽光吸収量が東西方向には均されてしまうからである。また、地球の自転効果は、地面に対して吹く風にコリオリ力が働くことになるという力学効果としてもたいへん重要である。

表1に示されているように、火星の自転周期も（1太陽日も）約1日で、今述べたような自転効果が重要と思われる。実際、そのとおりで、火星の大循環は、偏西風とか子午面循環といった地球の

大循環と共通の要素もっている。それでは、同じ地球型惑星である金星の大気大循環は、どのようなものであろうか。金星の自転周期は243日、1太陽日が117日と、地球、火星のそれより2桁も長い。そのため、自転の速い地球や火星と異なり、東西方向に温度などが均されずに、夜昼間の温度コントラストが極・赤道間のそれよりも重要になることが予想される。それに伴って、大循環も図4に示されているような夜昼間対流の卓越が予想される。つまり、昼が50日も続くので、十分昼側が加熱され、暖まった空気が上昇し、上層で夜側に流れ、そこで冷却され重くなり、下降するといった循環が、金星の最も基本的な循環として

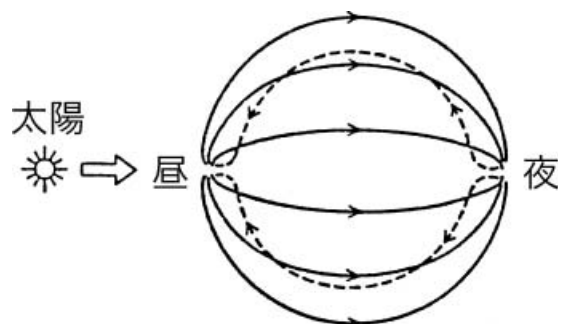


図4 夜昼間対流の模式図。昼側で空気が加熱されて上昇し、夜側で冷却されて下降する循環。

予想される。

それでは、現実の金星の大気大循環はどうなっているのだろうか。その観測の発展も含めて説明したい。紫外線で金星を見ると、Y字を横倒ししたような惑星規模の模様が見える。これは雲層上層での雲の濃淡と関係して模様ができていたと思われる。この独特の模様が金星を4日で東西方向に金星の自転と同じ方向に1周することが、1960年代の終わり頃、地上観測より発見された。もし、実際に東西方向に風が吹いていて、それに惑星規模の模様が流されていると、100 m/sの風が吹いていることになる。金星の自転方向は地球と逆で東から西なので、この風は東風である。その段階では、模様が移動していることが観測されただけなので、模様の位相が単に伝播しているだけという可能性も否定できなかった。どちらであるかを確かめるためには、金星に行って風を実測する必要があった。

図5に旧ソ連や米国の探査機がいろいろの地点で下降する間に、測った東西風速の鉛直分布が示されている⁴⁾。これによると、65-70 kmの雲層上部では実際に100 m/sの東風が吹いていることがわかる。その高度での風速が最大で、地面から単調に東風が増大している。今までのところ、西風は観測されていない。

この東西風は気象学者の間ではたいへん不思議な現象と考えられ、スーパー・ローテーションとか4日循環とか称されている。なぜ不思議なのか、ここで説明しておきたい。まず、上に述べたように、自転の遅い金星では夜昼間対流が卓越するという予想が自然であり、その予想が完全に否定されてしまったということが、第1に不思議である（金星の高度100 km くらいの熱圏では、観測によると、夜昼間対流が存在している。つまり、金星大気に対する夜昼間対流の予想は無条件に誤りというわけではない）。次に、100 m/sの風というと、それ自身はたいしたことはないように思われるが（地球のジェット気流の一部、火星の高緯

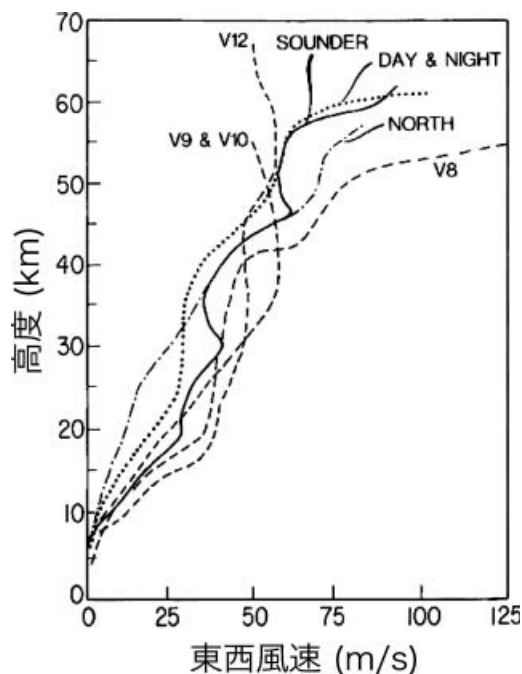


図5 金星の東西風速の鉛直分布⁴⁾。異なった場所に降下した探査衛星により測定された東風。V8はヴェネラ8号を意味し、ヴェネラ以外はパイオニア・ヴィーナスの探査機による観測。

度の偏西風はその位の風速に達している)、固体部分の回転との比較で考えると、かなり特異な現象であることがわかる。つまり、金星の固体部分の回転速度は赤道で約1.5 m/sなので、金星での風速100 m/sは大気が固体部分の60倍で回転していることを意味する。一方、地球の自転速度は赤道で460 m/sであり、図3で見た偏西風の平均速度30 m/sは、その1割以下であり、しかも、中緯度の局所的な現象である。大気が固体部分よりはるかに速く回転しているということは、単に特異というだけではなく、それを維持するメカニズムの説明が難しいということの意味する。大気には何らかの粘性や地面との摩擦が働いているので、あるときに大気が固体部分の60倍もの速さで回転していたとしても、高速回転を維持する何らかの特定のメカニズムがうまく働いていない限り、最終的には固体部分と同程度の回転速度に落

ち着いてしまうであろう。このメカニズムを考察することが、スーパー・ローテーションの研究課題であり、ひいては金星気象学の重要問題である。

4. 子午面循環と熱潮汐波

今まで述べてきたことをまとめると、当初、金星には、地球や火星のように東西風が卓越し子午面内に東西平均子午面循環が現れるようなタイプの大気大循環ではなく、夜昼間対流が卓越するようなタイプの大気大循環が見られると予想されたが、観測は東西風が卓越することを明らかにした。そうすると、金星にも子午面循環が存在しないのか、ということが問題になってくる。

紫外光による雲頂高度での小規模な雲の追跡によって、南北風速が求められている（紫外光によるものなので、観測は金星の昼側に限定されている）。それによると、両半球で最大 10 m/s 程度の極向きの南北風速が得られている⁵⁾。この流れは、図 6 に示されているような雲層の子午面循環の上部での流れと解釈されている。つまり、この南北風が観測されたときは、（スーパー・ローテーションより 1 桁小さいが）10 m/s 程度の南北流からなる東西平均子午面循環が存在すると思われる。

しかし、その後の理論的な研究により、子午面循環があったとしても、それほど強くないのでは

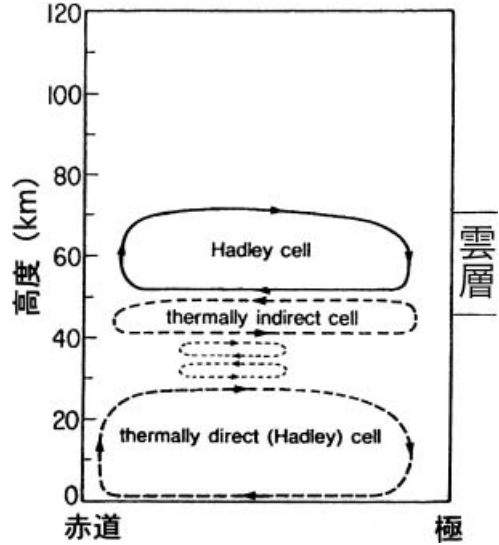


図 6 金星の子午面循環の予想図。

ないかと、思われるようになってきた。筆者らは雲層での太陽光吸収で、どのような波が励起されるかを詳しく計算した⁶⁾。1 昼夜で周期的に変動する太陽光加熱で励起される波を、気象学では熱潮汐波と呼んでいるが、その計算結果によると、高度 70 km 位で図 7 のような流れが形成される。しかも、その南北流速は 10 m/s 程度になっている。つまり、流速はスーパー・ローテーションの 10 分の 1 ほどだが、図 4 に示されたような夜昼間対流のような流れができています。この結果を考慮すると、昼側で観測された極向きの流れは、東西

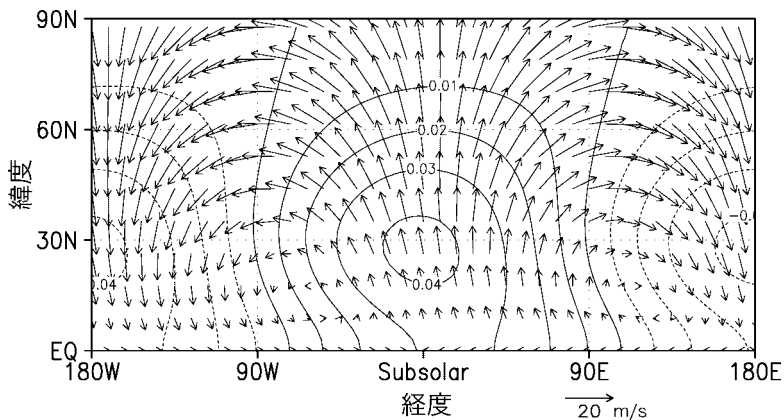


図 7 夜昼間加熱差によって励起される流れの雲頂高度での分布。

一様な子午面循環ではなく、夜昼間の加熱差によって励起された、夜昼間対流の昼側の南北流に対応していると思われる。したがって、東西平均子午面循環があることは、昼側の南北風の観測結果のみでは確認されないし、あったとしても、数 m/s 程度の南北流速の子午面循環と思われる。

5. 子午面内のモーメントのバランス

次に、高速の東西流が存在していると、子午面内ではどのような力学的なバランスが成立しているか、地球の対流圏と対比しながら考えてみたい。金星でも地球の対流圏でも、低緯度の方が高緯度よりも温度が高い。そのため、図8に示されているように、低緯度で正の浮力、高緯度で負の浮力が働き、反時計回りのモーメントが働く。定常状態に達するためには、逆方向のモーメントが働き、この浮力によるモーメントを打ち消す必要がある。単純に考えれば、反時計回りの子午面循環が励起されて、それに働く摩擦力のモーメントが浮力によるモーメントと釣り合うことになるはずである。しかし、これ以外のバランスも可能である。それは惑星の周りを回っている東西風に働く遠心力の鉛直差によるモーメントと釣り合うことである。地球の対流圏の偏西風も金星の東風も、地面から高さとともに増大しているので、図8に示されているように、その東風に働く遠心力も高さとともに増大する。これが時計回りのモーメントを形成し、浮力によるモーメントと釣り合うことが可能である。このようなバランスを、気象学では温度風バランスという。

絶対系から見たときの大気回転速度を U とすると、それは固体部分の回転速度 U_0 と固体部分(地面)に対する大気速度(つまり風速) U_1 の和になっている。

$$U = U_0 + U_1$$

遠心力は U の2乗に比例し、今問題としているモーメントは高度差、つまり鉛直微分と関係す

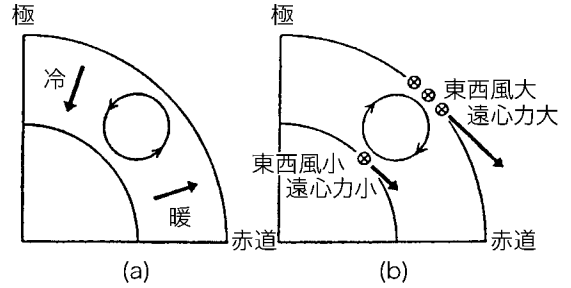


図8 子午面内のモーメントのバランス。(a) 低緯度と高緯度の温度差による浮力のモーメント。(b) 東西風に働く遠心力によるモーメント。

る。地球型惑星の大気は、惑星半径に比べて非常に薄いので、その範囲では U_0 は一定と見なせるので、

$$\begin{aligned} & \text{(遠心力によるモーメント)} \\ & = d(U_0 + U_1)^2 / dz \\ & = 2U_0 dU_1 / dz + 2U_1 dU_1 / dz \end{aligned}$$

と近似できる。地球の場合、 $U_0 = 460$ m/s、 $U_1 = 30$ m/s であるのに対して、金星の場合、 $U_0 = 1.5$ m/s、 $U_1 = 100$ m/s なので、右辺を考えると、地球の場合は第1項が卓越し、金星の場合は第2項が卓越する。金星の東西風がスーパー・ローテーションといわれるゆえんである。

6. スーパー・ローテーションのメカニズム

以上述べた子午面内のモーメントのバランスの話は、もしスーパー・ローテーションのような高さとともに増大する高速の東西流があったならば、温度風バランスが可能であるということであった。それでは、どのようにして高速の東西流は形成されるのだろうか。具体的には、スーパー・ローテーションに伴う角運動量を、どこからもってくるのだろうか。これがスーパー・ローテーションの形成メカニズムの問題であり、発見以来、議論されている大問題である。

これについては、流体力学的にも興味深いいろ

いろいろの説が提案されているが、簡単には説明できない面もあるので、詳しい説明は「惑星気象学」⁷⁾を参照していただきたい。現在でも、十分納得のいく説がないのが現状である。いずれの説も、大気全体では運動量は保存するので、東向きの運動量と西向きの運動量を（異なった高度で）対生成させ、スーパー・ローテーションと逆向きの東向きの運動量を地面との摩擦でつぶしてしまい、大気中には西向き（東風）運動量のみを残そうという点では共通である。松田の理論⁸⁾では、子午面循環による運動量輸送効果と、前節の子午面内のモーメントのバランスを同時に考慮した非線型モデルが構成されている。その定常解を求めると、スーパー・ローテーションに相当する解と図4のような夜昼間対流に相当する解の二つが共に、安定な定常解として得られる。もちろん、夜昼間対流が現実の金星で安定的に存在できるなど、実証できるはずもないが、素朴に予想される状態と現実の状態を共に安定定常解として含んでいるところが、このモデルのユニークなところである。

また、4節で述べたような熱潮汐波によって運動量を鉛直方向に輸送して、スーパー・ローテーションを生成しようという試みもある。つまり、スーパー・ローテーションと逆方向の運動量を波によって下層まで運び、地面に捨ててなくし、スーパー・ローテーションと同じ向きの運動量を大気に残そうというメカニズムである。筆者らの計算によると、雲層で励起された波も、結構、地面まで伝播していくようである⁹⁾。

このように面白い理論が展開されているのに、いまだに、スーパー・ローテーションの説明がっていないのは、雲層および雲層以下の観測が、絶対的に不足しているためである。子午面循環が金星大気にあるのか、あるとしたらどのようなものなのかわかっていない。そこで、金星大気の観測が必要ということになるが、これについては、本号の今村さんの解説を読んでいただきたい。

い。

観測と並んで、天気予報や気候研究に使われる大気大循環モデルを、金星大気に対して開発していくことも重要であろう⁹⁾。

参考文献

- 1) Tomasko M. G., et al., 1980, *J. Geophys. Res.* 85, 8167
- 2) Matsuda Y., Matsuno T., 1978, *J. Meteor. Soc. Japan* 56, 1
- 3) Pollack J. B., Toon O. B., Boese R., 1980, *J. Geophys. Res.* 85, 8223
- 4) Schubert G., 1983, in *Venus*, eds. Hunten D., et al., p. 681
- 5) Rossow W. B., Del Genio A. D., Eichler T., 1990, *J. Atmos. Sci.* 47, 2053
- 6) Takagi M., Matsuda Y., 2004, to be submitted
- 7) 松田佳久, 2000, 惑星気象学 (東京大学出版会)
- 8) Matsuda Y., 1980, *J. Meteor. Soc. Japan* 58, 443
- 9) Yamamoto M., Takahashi M., *J. Atmos. Sci.* 60, 561

Superrotation Observed in Venus Atmosphere Yoshihisa MATSUDA

*Department of Astronomy and Earth Sciences,
Tokyo Gakugei University, Nukuikita-machi 4-4-1,
Koganei, Tokyo 184-8501, Japan*

Masahiro TAKAGI

*Department of Planetary and Earth Sciences,
Tokyo University, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku,
Tokyo 113-0033, Japan*

Abstract: Venus has a dense and high-temperature atmosphere with 92 atm and 730 K at the surface. The high temperature near the surface is maintained by the greenhouse effect due to a huge amount of carbon dioxide, which is a main constituent of the atmosphere. It is observed that the Venus atmosphere rotates in the same direction with the solid part (its rotation period is 243 Earth days) and at 70 km altitude this atmospheric rotation is 60 times faster than the solid part. This superrotation is introduced in detail.