

## スーパーローテーション

松 田 佳 久\*

金星では東風が卓越し、その風速は高度70 km 付近で100 m/sに達している。金星は自転が非常に遅いので、これは自転の60倍の速さで自転と同じ方向に大気が回転していることを意味する。この自転を超える大気の回転をスーパーローテーション（超回転）という。この高度では4日で金星を一回りするので、4日循環ともいう。日本の金星探査機「あかつき」はスーパーローテーションの原因解明を主目的とする。以下に、その原因も含めてスーパーローテーションを4つの項目に分けて説明したい。

### 1. スーパーローテーションという現象

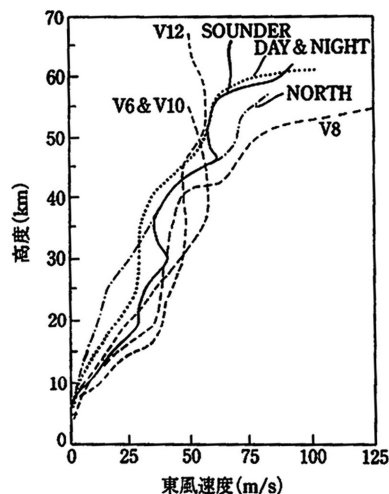
金星の自転はその方向が地球と逆であり、周期は243日（ここで日は24時間、以下同様）である。その結果、1太陽日も117日と長い。金星の地表面気圧は92気圧もあり、その大気の大部分を成す二酸化炭素の温室効果により地表面温度は730 Kにも達している。濃硫酸の液滴からなる雲層が高度45 km から70 km に存在し、全天を覆っている。紫外線で金星をみると、Y字形を横倒しにしたような模様が4日で1周するのが、1960年代に観測された。この模様が風に流されていると仮定すると、100 m/sに達する東風（自転と同方向）が雲頂で吹いていることになる。

その後、米ソの惑星探査機によりいくつかの地点で風が実測され、第1図のような東風の鉛直分布が得られた。これを見ると、至るところで東風が吹いており、その風速は地表面から連続的に大きくなり、雲頂付近で100 m/sに達する（それより上では風速は減少すると考えられている）。金星の自転速度は赤道で約

1.8 m/sなので、大気が自転速度の60倍で回転していることになる。これが金星大気のスーパーローテーションである。

### 2. スーパーローテーションの観測

今までのスーパーローテーションに関する観測はパイオニア・ヴィーナスなどの米ソの探査機、欧州の周回衛星及び地上観測に基づいている。不十分ながらも、興味深い結果が得られている。第2図に紫外線で見た雲頂での模様が模式的に示されている。この模様が東から西へ（右から左へ）流されている。スーパーローテーションの東風速度は一定ではなく、変動している (Kouyama *et al.* 2013)。雲頂での東風速度の



第1図 惑星探査により観測された東風風速の鉛直分布 (Schubert 1983)。V8 はヴェネラ8号を意味する。ヴェネラ以外はパイオニア・ヴィーナスの探査による測定である。

\* Yoshihisa MATSUDA, 東京学芸大学.

ymatsuda@u-gakugei.ac.jp

© 2016 日本気象学会

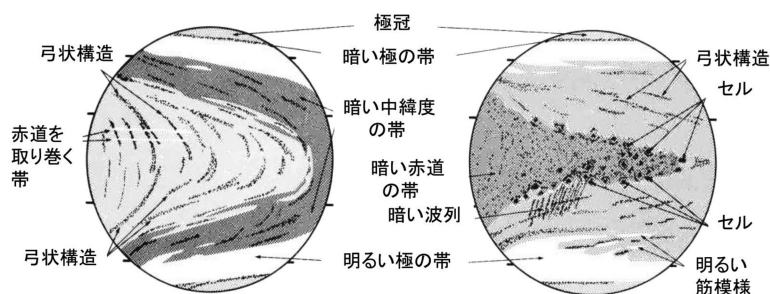
緯度分布も変動し、中緯度でジェットが顕著な時期とジェットが見られない時期がある。第2図の様子は赤道域ではケルビン波と想定されている4日波（周期4日）、中緯度域ではロスビー波と想定されている5日波（周期5日）から成っていると思われる。前者はスーパーローテーションの風速が小さいとき、後者は大きいときによく観測される。

スーパーローテーションの成因を考えるに当たって、東西平均子午面循環と夜昼間の循環の観測は極めて重要である。雲頂での紫外線による雲追跡から南北流としておおよそ10 m/s程度が観測されているが、これは後者に伴う南北流を反映しているものと考えられる。前者の南北流はこれよりも小さいと考えられるが、夜側の情報がないのでまだ決定されていない。また、渦運動による東西運動量の南北輸送量もパイオニア・ヴィーナスのデータによる計算結果があるが、精度の良い測定が望まれる。

これらの要望に答えるのが「あかつき」の課題である。「あかつき」は紫外域、 $1\mu\text{m}$ 付近、 $2\mu\text{m}$ 付近、中間赤外域で雲を観測する。また雷・大気カメラも搭載し、電波掩蔽観測も行う。波長域により見える高度が異なるので、雲追跡により3次元的な風速場を求めることができる。これにより、スーパーローテーションの実態や成因に関する重要な情報が得られると期待されている。

### 3. スーパーローテーションの原因に関する古典的理論

金星は自転周期、1太陽日ともに地球の常識からみて非常に長いので、高温の昼側と低温の夜側の間に直接循環（水平対流）が卓越することが予想される。実際、熱圏（高度100 km以上）ではそのような夜昼間対流が卓越している。それでは、何故、雲層以下の大気では夜昼間対流ではなく、スーパーローテーションが卓越しているのだろうか。また、スーパーローテーションが担う角運動量はどこから供給されるのだろうか。さらにはその角運動量は地面との間の摩擦により消散しないで、どのようにして維持されるのだろうか。



第2図 雲頂での紫外線によるイメージの模式図 (Rossow *et al.* 1980). 円周上の横棒は緯度20°と50°を示している。2つの図は2日の間隔で見える。

か。これらの問いに答えるのがスーパーローテーションの力学である。3つの理論が早い段階で提出された。

- (a) 夜昼間対流からスーパーローテーションを励起する説
- (b) 子午面循環からスーパーローテーションを励起する説
- (c) 波動（熱潮汐波）からスーパーローテーションを励起する説

(a)は（赤道上の）東西鉛直断面内での夜昼間対流の傾きから東西一様流（スーパーローテーション）を励起しようとするメカニズムであるが、球面上3次元流体で検討すると、このメカニズムはうまく働かないことが示唆された。そのこともあり、この理論は現在では直接注目されていない。

(b)は子午面循環の鉛直流の移流効果により角運動量を上方に輸送するメカニズムである。このメカニズムでは、金星の自転する固体部分から角運動量が汲み上げられ、上層に蓄積されることになる。金星は自転が遅いので、各半球に高緯度まで広がった子午面循環の1つのセルが存在することが予想され、それが前提となっている。今まで、最も注目された理論ではあるが、子午面循環の（上半部の）極向き角運動量輸送を打ち消すような渦による赤道向き輸送が必要であることなど、未解決の要素も含んでいる。

(c)は熱潮汐波による運動量輸送に基づく理論である。熱潮汐波とは太陽光加熱により励起され（地面から見て）太陽と共に動く波（強制重力波）のことである。波が東西方向の運動量を鉛直方向に運ぶことは、地球の成層圏などの気象力学で確立されているが、熱潮汐波がスーパーローテーションと反対方向の運動量を地面まで運び、そこに捨てることによりスーパー

ローテーションを生成しようというのが(c)の理論である。加熱層(雲層)では熱潮汐波は夜昼間対流とも見なされるので、そこでは(a)のメカニズムと関係してくるかもしれない。従来、臨界レベルが形成され、波がその先に伝播することができなくなり、地面まで到達できないという根本的な欠陥がこの理論にはあると思われていたが、近年この欠陥が除去された(Takagi and Matsuda 2006)。これらの理論は簡単には説明しきれないので、詳しくは文献も含めて松田(2000, 2011)を参照していただきたい。

#### 4. スーパーローテーションのGCMによる数値シミュレーション

現在では、スーパーローテーションの理論的研究はGCM(大気大循環モデル)による数値シミュレーションが主流となっている。古くはYoung and Pollock(1977)があり、スーパーローテーションが再現されたと報告された。しかし、よく検討すると、いかなるメカニズムが働いてモデルの中でスーパーローテーションが生成されたのか不明である。一般に、GCMによる研究ではスーパーローテーションが再現されたとしても、いかなるメカニズムがどのように働いたのか、それが働くのに本質的な条件が何であるのかを特定するのは容易ではない。

Yamamoto and Takahashi(2003)は地面での太陽加熱量を過大にすることによりスーパーローテーションを再現したが、そこで働いているメカニズムは(b)である。Hollingsworth *et al.*(2007)によると、現実的な太陽加熱量では子午面循環が鉛直方向に3つに分裂してしまい、スーパーローテーションは再現されない。その後も、このメカニズムに基づいた数値シミュレーションが色々な方向に、現実的な方向に向かっていて、上にも述べたように、このメカニズムでは、角運動量を低緯度に輸送する渦運動が必要であるが、これが何であるかの明確な説明はまだないようである。

一方、(c)のメカニズムに基づいた数値シミュレーションも行われている(Takagi and Matsuda 2007)。最近のレボノアラの数値シミュレーションでも(c)のメカニズムが働いているようである(Lebonnois *et al.* 2010)。

これらの数値シミュレーションにおいて、時間積分の最終結果が初期値に依存することもしばしば報告されている(Kido and Wakata 2008)。つまり、初期

状態によりスーパーローテーションが卓越した状態に落ち着く場合と、そうでない状態に落ち着く場合がある。このことは安定な定常解が複数あることを意味し、Matsuda(1980)の予想したことを裏書することになる。ともかく、GCMによる色々な数値シミュレーションが試みられているが、まだ全ての人が同意するスーパーローテーション生成の確定的なメカニズムは同定されるに至っていないようである。

#### 参考文献

- Hollingsworth, J. L., R. E. Young, G. Schubert, C. Covey and A. S. Grossman, 2007: A simple-physics global circulation model for Venus: Sensitivity assessments of atmospheric superrotation. *J. Geophys. Res.*, **34**, L05202, doi:10.1029/2006GL028567.
- Kido, A. and Y. Wakata, 2008: Multiple equilibrium states appearing in a Venus-like atmospheric general circulation model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **86**, 969-979.
- Kouyama, T., T. Imamura, M. Nakamura, T. Satoh and Y. Futaana, 2013: Long-term variation in the cloud-tracked zonal velocities at the cloud top of Venus deduced from Venus Express VMC images. *J. Geophys. Res. Planets*, **118**, 37-46.
- Lebonnois, S., F. Hourdin, V. Eymet, A. Crespin, R. Fournier and F. Forget, 2010: Superrotation of Venus' atmosphere analyzed with a full general circulation model. *J. Geophys. Res.*, **115**, E06006, doi:10.1029/2009JE003458.
- Matsuda, Y., 1980: Dynamics of the four-day circulation in the Venus atmosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, **58**, 443-470.
- 松田佳久, 2000: 惑星気象学. 東京大学出版会, 204pp.
- 松田佳久, 2011: 惑星気象学入門 金星に吹く風の謎. 岩波書店, 112pp.
- Rossow, W. B., A. D. Del Genio, S. S. Limaye and L. D. Travis and P. H. Stone, 1980: Cloud morphology and motions from Pioneer Venus images. *J. Geophys. Res.*, **85**, 8107-8128.
- Schubert, G., 1983: General circulation and the dynamical state of the Venus atmosphere. In *Venus* (D. Hilten ed.), University of Arizona Press, Tucson, 681-765.
- Takagi, M. and Y. Matsuda, 2006: Dynamical effect of thermal tides in the lower Venus atmosphere. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L13102, doi:10.1029/2006GL026168.
- Takagi, M. and Y. Matsuda, 2007: Effects of thermal tides on the Venus atmospheric superrotation. *J.*

- Geophys. Res., **112**, D09112, doi:10.1029/2006JD007901.
- Yamamoto, M. and M. Takahashi, 2003: The fully developed superrotation simulated by a general circulation model of a Venus-like atmosphere. J. Atmos. Sci., **60**, 561-574.
- Young, R. E. and J. B. Pollack, 1977: A three dimensional model of dynamical processes in the Venus atmosphere. J. Atmos. Sci., **34**, 1315-1351.
-