

金星大気のスーパーローテーションについて

和歌山大学教育学部 山本 勝 (Masaru Yamamoto)

Faculty of Education, Wakayama University

1. はじめに

金星で観測される「自転の 60 倍で高速回転するスーパーローテーション」は、古くから存在する気象学の未解決問題の一つであるが、今なお確定的な理論は存在していない（スーパーローテーションとは、大気が自転よりも高速で回転することをいう）。従来のスーパーローテーション研究は特殊な仮定を置いた簡単な力学モデルが中心であったが、最近では大気大循環モデル(AGCM)を用いた客観的な（モデルに与える仮定が少ない）研究が可能になりつつある。本稿では、観測されている金星大気スーパーローテーションの形成・維持メカニズムについて（特に、波動擾乱の役割を中心に）紹介する。

2. これまでの研究

金星は、太陽からの距離がおおよそ 0.72 AU の軌道（地球軌道が 1AU）を 225 日周期で公転し、自転は 243 日周期で逆行している。金星の大きさ(半径 6050 km)は地球(半径 6380 km)とだいたい同じだが、大気圧や大気組成は大きく異なる。金星では 90 気圧に達する CO_2 が地表を覆っており、その温室効果によって地表温度は 730 K 程度になる。地球の常温・常圧に近い値をもつ高度は、50-55 km くらいになる。

高度 45 km から 70 km の高度域を厚い硫酸エアロゾルの雲が覆っており、その雲により、アルベドが 0.8 になる。この雲の上端（65-70 km）を紫外線で観測すると、自転の約 60 倍の速さで金星を一周する「4 日循環」と呼ばれる西向き（自転と同じ向き）の高速流が存在している。このスーパーローテーションは赤道域から中緯度にわたり存在しており、 90 m s^{-1} ほどの速度を維持して

いる (Rossow et al., 1990). 温度風バランスにより得られた平均東西流の子午面分布では、高度 70 km あたりで、 120 m s^{-1} を越える西向き中緯度ジェットが観測されている (Newman et al., 1984).

雲層より下では、地表から高度とともに徐々に東西風が増大し、高度 40 km あたりで 50 m s^{-1} ほどの風が吹き、雲層内部では高度とともに急激に東西風が増大し、雲層上端では 100 m s^{-1} ほどに達する (Schubert et al., 1980). 金星は自転軸の傾きが非常に小さく、季節変化が無視できると考えられる。従って、金星大気では、地球で観測されるような風向風速の季節変化は存在せず、常に西向きのスーパーローテーションが広域にわたり形成されているようである。特に、雲層上端のスーパーローテーションである「4日循環」は古くから知られており、諸説が提出されている。これらの理論については松田(2000)の教科書に詳しい解説があるので、ここでは簡単に紹介する。70年代までに、

- 1) Gierasch 説
- 2) 熱潮汐説
- 3) 昼夜間対流説

の説が提案されている。上の Gierasch 説は「子午面循環による角運動量鉛直輸送に基づく理論」に分類され、熱潮汐説と昼夜間対流説は「擾乱による角運動量鉛直輸送に基づく理論」に分類される。

Gierasch 説では、適当な子午面循環と渦拡散によって、4日循環が駆動される (Gierasch, 1975 ; Matsuda, 1980; 1982). 子午面循環による角運動量輸送に基づくスーパーローテーション理論では、非軸対称の擾乱がどうしても必要となる (Hide, 1969). Gierasch (1975) や Matsuda (1980; 1982) では、非軸対称擾乱を渦拡散でパラメタライズしている。子午面循環により上層へ汲み上げられた角運動量が極向きの南北流によって高緯度に運ばれるときに、もし何らかの大きな水平渦拡散が存在すれば、子午面循環の上側ブランチの角運動量は、高緯度域の下降流によって下方に運び去られる前に、赤道方向へ戻される。すると、この上側ブランチに角運動量が蓄積し、4日循環を駆動するというシナリオであ

る。しかし、このシナリオの中の「大きな水平渦拡散」が何であるのかはよくわかっていない。また、中層大気の子午面循環が地面に接していれば、地面との摩擦で角運動量が大気に供給されるが、多くの研究では中層大気の子午面循環は地面と接していない(例えば, Rossow, 1983 ; Hou and Goody, 1985). これは、雲が太陽光の大部分を吸収し、中層大気で子午面循環を駆動しているからである。このような状況下で、中層大気の子午面循環へどのように角運動量が供給されるかも問題点の一つになっている。最近, Iga and Matsuda (1999) は、「適当な大きさの渦拡散」と「地面から分離した子午面循環」によって、雲層上端の高速流を再現している。この研究では、雲層の子午面循環のリターンフローが高度 35 km (モデルの下部境界) まで達しており、赤道で 40 m s^{-1} となる剛体回転がその高度で維持されていれば、4日循環が再現可能であることを示している。

2番目の説は、熱潮汐波の鉛直伝播による4日循環形成メカニズムである (Fels and Lindzen, 1974). 雲層上端で発生する潮汐波は平均流より位相速度がはるかに遅く、それが鉛直伝播すると、雲層上端からスーパーローテーションとは反対向きの運動量を取り去り、他の高度域に運ぶので、雲層上端の平均流は加速され、それ以外では減速となる。この説に基づいた数値実験によって、雲層上端のスーパーローテーションが再現されている (Baker and Leovy, 1987 ; Newman and Leovy, 1992). 潮汐波によって雲層上端の平均流は加速されるが、大気密度の薄い 80 km より上の高度域では強い減速が生じ、その減速がレイリー摩擦による加速とバランスしている。本来、レイリー摩擦は平均流にブレーキをかけるために導入されたものなので、加速するのは不自然である(これは、レイリー摩擦が平均流を背景流に戻すようにパラメタライズしてあるため、背景流より平均流が遅くなった場合、レイリー摩擦が平均流を加速してしまうことによる)。これらの結果は、レイリー摩擦によって背景流から角運動量が一時的に供給され、それが子午面循環によって角運動量が全域に広がったと解釈される。このように、この説でも中層大気への角運動量供給機構は明らかでは

3番目の説は、昼夜間の加熱差で生じる傾斜対流に起因する説で、惑星スケールの対流や渦が鉛直方向に角運動量を輸送するというものである (Schubert and Whitehead, 1969 ; Thompson, 1970). Young and Pollack (1977) の数値実験はこの説を支持し、4日循環を再現した.ところが, Rossow et al. (1980) は, Young and Pollack の鉛直渦拡散の不適切な扱いを指摘している. その後, この説を支持する数値実験や理論は提出されていない. 最近, Takagi and Matsuda (1999)は, Thompson 機構を球面状の3次元大気に拡張し, こうしたメカニズムが機能しにくいことを示している.

70年代以降, 徐々に金星の気象観測が蓄積されつつある. 紫外線で雲を観測すると, 赤道域に4日周期の惑星スケール波動が観測される. この赤道4日波に関して, 線形波の三次元構造が Covey and Schubert (1981; 1982)や Smith et al. (1992; 1993)によって調べられたが, 大気大循環における役割については研究されていない. 最近, この波動を力学モデルに組み込んだ研究(Yamamoto and Tanaka, 1997; 1998)が行われ, 4日循環や雲模様(Y字形や帯状模様)をうまく再現している. ところが, この研究では「赤道4日波が下層大気で強制される」という強い仮定が置かれている. この仮定の妥当性を議論するには, 下層大気の観測が不可欠である.

地球のAGCMを金星大気に改変したモデル(e.g., Del Genio and Zhou, 1996)では, 100 m s^{-1} を越えるスーパーローテーション(4日循環)は再現されていないが, 結果はGRWシナリオ(Gierasch説の大きな水平渦拡散は, 順圧不安定 (Rossow and Williams, 1979)による赤道向き角運動量輸送で説明される)を強く支持している. このように, 4日循環が再現されていないにもかかわらず, GRWシナリオは広く信じられている. しかしながら, 4日循環自体が再現されていないので, とても決定的なシナリオとは言えない状況である. そこで, 我々は, 100 m s^{-1} を越えるスーパーローテーションを Venus-like AGCM で再現し, GRWシナリオを再考し, 波動の役割について調べた.

3. T10 Venus-like AGCM の結果

本研究では、物理定数を金星の値に変更した CCSR/NIES AGCM 5.4 を用いて (Numaguti et al., 1995), 高度 90 km 付近までの領域を T10L50 (切断水平波数 10 で鉛直 50 層) の分解能で計算した。ただし、現段階では現実性を追求しているわけではないので、不確定な物理過程を大幅に簡略化している。放射過程は、雲層で極大になる加熱とニュートン冷却を用いた。これに乾燥対流調節を組み入れた Venus-like AGCM となっている。水平風の擾乱成分にもニュートン冷却と同じ時定数をもつレイリー摩擦をかけている。最下層では水平風と気温を 30 日の時定数で地表面の値に緩和させ、最上層では水平風を 30 日の時定数で 0 m s^{-1} の値に緩和させている。また、最大波数で 40 日の時定数をもつ 4 次の水平拡散と $0.15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ の鉛直拡散を与えた。本章では、T10 の数値実験から得られた結果をまとめる。

東西に一様な加熱の結果

東西に一様な加熱の結果 (Yamamoto and Takahashi, 2003) を示す。この実験では、金星標準気温鉛直分布・無風状態からスタートして、50000 日を過ぎた辺りで平衡に達し、63180 日まで時間積分した。以下では、63180 日の結果を示す。「赤道と極の間の加熱差」や「下層大気 (< 40 km) から鉛直伝播する重力波」によって子午面循環が駆動される。角運動量は、この子午面循環によって上層へ汲み上げられ、その後、南北流によって高緯度に運ばれる。そして、その角運動量の一部は波動擾乱によって赤道向きに戻されるので、赤道域で角運動量が蓄積され、 100 m s^{-1} を越える高速流が形成される。これは、Gierasch 理論を支持する。しかし、この理論では、非常に大きな水平渦拡散による赤道向き角運動量輸送が要求されるのだが、この大きな水平渦拡散の正体 (つまり、赤道向きに角運動量を輸送する波動擾乱の正体) が判っていない。

そこで、この実験で得られた気象要素を波数・周波数空間に分解し、モードごとに振幅や運動量 flux を計算し、個々のモードの波動構造を調べ、角運動量輸送に寄与する波の種類を同定した。下層大気では混合ロスビー重力波 (位相速度 $c \sim 0 \text{ m s}^{-1}$,

波数 $s = 1$) が角運動量を赤道向きに運ぶ。雲層付近では、ロスビー波、混合ロスビー重力波、および重力波が、赤道向き角運動量 flux を生み出す。これらの波動は、「位相速度が $0-40 \text{ m s}^{-1}$ の波」と「帯状平均流の流速に近い位相速度をもつ波」に分類できる。雲層より上では、鉛直伝播する重力波 ($c = 0-40 \text{ m s}^{-1}$) が、赤道向き角運動量 flux を生み出す。鉛直方向の角運動量輸送に関しては、子午面循環が上向きに角運動量を輸送し、波動（ほとんどが重力波）が下向きに角運動量を輸送している。

3 D加熱の結果

この実験では、金星標準気温鉛直分布・無風状態からスタートして、25000日を過ぎた辺りで平衡に達し、42120日まで時間積分した。以下では、42120日の結果を示す(Yamamoto and Takahashi, 2002)。

帯状平均東西流の緯度-高度分布について見てみると、下層大気で帯状流が高度と共に増大し、高度 60 km 付近で 100 m s^{-1} を越える高速流が形成される。高度 75 km 付近では、帯状流の減速域が観測される。鉛直流は地面から中層大気に至るまでつながっており、子午面流は帯状流の減速域で強められている。

中高緯度域では、惑星スケールの位相速度が遅い ($|c| < 10 \text{ m s}^{-1}$) ロスビー波が卓越する。赤道域では、波数 1 および 2 の潮汐波が最も大きな振幅をもつ。また、波数 3 以上の重力波も低緯度では無視できない。

子午面循環による角運動量鉛直輸送 flux は、赤道域で正、高緯度で負となる。緯度方向に積分した flux は正なので、子午面循環は角運動量を正味上向きに輸送している。他方、波動による角運動量の鉛直輸送 flux は下向きで、波数 1 や 2 の熱潮汐波や波数 3 以上の重力波による。また、波動による角運動量水平輸送は赤道向きで、主に、惑星スケールの重力波やロスビー波によるものである。これらの波は位相速度が遅く、非断熱加熱の日変化によって生じた惑星スケール波動であると考えられる。上記の過程も、東西に一樣な加熱の結果と同様に、Gierasch 理論を支持する。

上で要約された Yamamoto and Takahashi (2002; 2003) の研究では、Venus-like AGCM

を用いて、自転の 60 倍にも達するスーパーローテーションを再現した。上述のように、数値実験の結果は Gierasch 理論を支持する。東西に一樣な加熱でも 3D 加熱でもスーパーローテーションは再現されるので、これらの実験に関して言うなら、熱潮汐説や昼夜間対流説に基づく「擾乱による角運動量の上方輸送」は重要ではない。

以前の Venus-like AGCM の結果から、Gierasch 理論で要求される赤道向き角運動量輸送は順圧不安定(Rossow and Williams, 1979)によるもの(GRW シナリオ)であると信じられていた。しかし、今回、ロスビー波や重力波による赤道向き角運動量輸送が重要であることがわかった。3D 加熱では、加熱域が 117 日周期でゆっくり回転しているので、 $c \sim 0 \text{ m s}^{-1}$ の惑星スケール波動の寄与が、東西に一樣な加熱の結果と比較して大きくなる。

4. T21 Venus-like AGCM の結果

T10 では十分な水平解像度が得られないので、水平分解能を T10 から T21 に上げた実験をおこなった。ここでは、物理定数を金星の値に変更した CCSR/NIES AGCM 5.6 を用いて、Yamamoto and Takahashi (2003) とほぼ同じ条件で東西に一樣な加熱に関する実験をおこなった。ただし、水平解像度を上げたので、最大波数で 1 日の時定数をもつ 8 次の水平拡散を与えている。標準金星気温分布をもつ静止状態からスタートさせると、帯状平均東西流は 40000 日あたりから平衡に達する。以下では 46800 日における結果を示す。

帯状平均の温度構造に関して、T21 と T10 の結果はよく似ている。プラント・バイサラ振動数が 10^{-2} s^{-1} 以下の低安定度領域は、54–62 km の高度域と 42 km 以下の高度域で形成される。帯状平均東西流は、下層大気では高度とも増大し、高度 50–70 km で 100 m s^{-1} を越える高速流が見られる(Fig. 1)。高度 60 km では、T10 と比較して 1.5 倍の強さの高速流が駆動される。また、中緯度にはジェットのような構造が形成される。この中緯度ジェットは T10 では見られない。絶対角運動量密度は高度 21 km の赤道で $\sim 4 \times 10^{-9} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ の値をもつ(Fig. 2)。上で得られた大気構造は観測と矛盾しない。

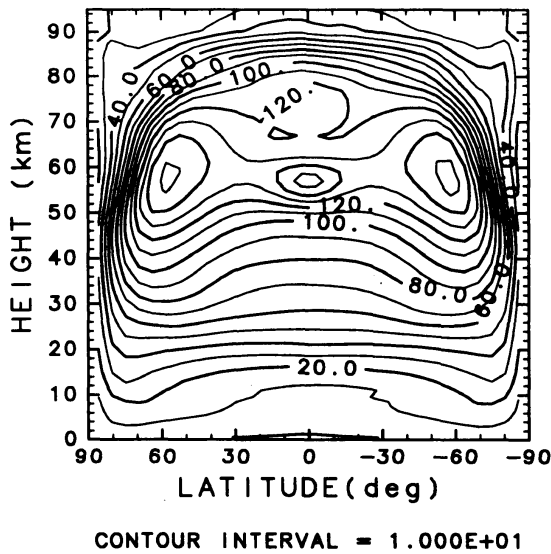


Fig. 1 Latitude-height cross sections of longitudinal average of zonal flow (m s^{-1}).

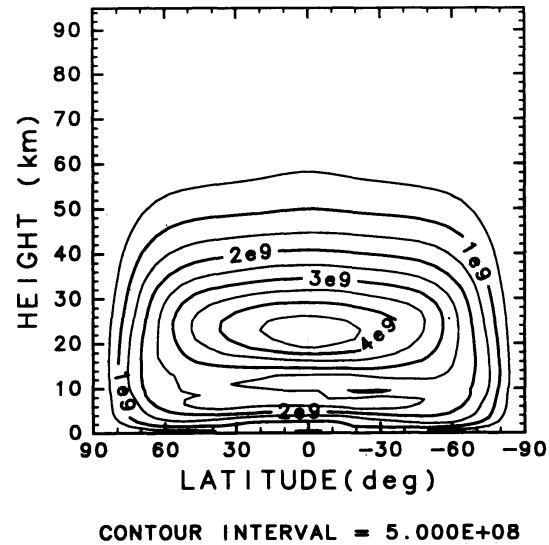


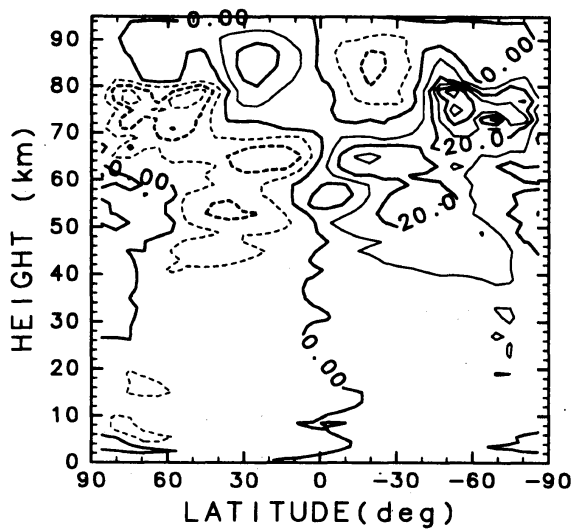
Fig. 2 Latitude-height cross sections of longitudinal average of angular momentum density ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$).

帯状平均南北風は、雲頂（65–70 km）で $\sim 2.5 \text{ m s}^{-1}$ の極向きの流れをもつ。さらに上空の高度 90 km 付近では、 10 m s^{-1} 程の強い極向き南北流が見られる。帯状平均鉛直流に関しては、 1 cm s^{-1} の上昇流が高度 60–80 km の赤道域に形成され、高緯度域では 3 cm s^{-1} の下降流が形成される。鉛直流が惑星表面から上層大気まで途切れることなく続いていることから、単一の子午面循環が支配的である。

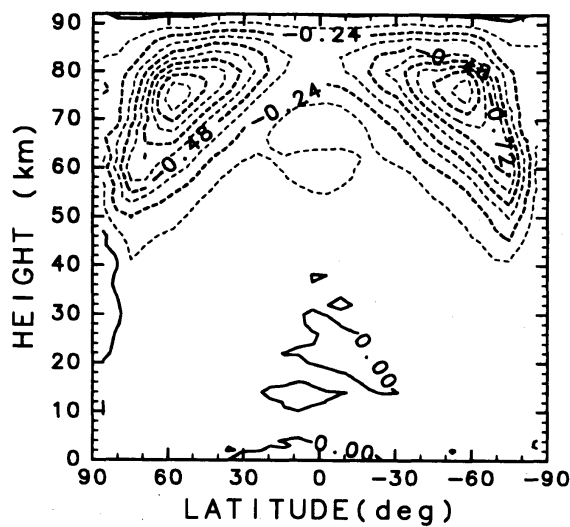
次に擾乱について見てみると、緯度 65 度の高度 55 km 付近で大きな振幅をもつ。これらの波構造は T10 で見られるように、東西波数 1 のロスビー波や混合ロスビー重力波の構造をもつ。この場合、ロスビー波は 3–12 日周期をもち、混合ロスビー重力波は 14 日より長い周期をもつ。ここでシミュレートされたロスビー波は、UV で観測されている中緯度 5 日波(Del Genio and Rossow, 1990)に対応すると考えられる。

上記の大振幅の波が角運動量輸送に寄与するとは限らないので、以下では、どのような波動が運動量輸送に寄与するかを調べる。惑星表面から雲頂までの領域では、擾乱は赤道向きに運動量を運んでいる(Fig. 3)。これは Gierasch 機構を支持する。高度

65 km では, $c = 120 - 150 \text{ m s}^{-1}$ の高位相速度の波と $c \ll U$ (U : 帯状平均東西流速) の低位相速度の波が, 赤道向き運動量 flux を生み出している. 高位相速度の波は重力波の構造をもつものが多い, 低位相速度の波はロスビー波や混合ロスビー重力波の構造をもつものが多い. 高度 5 km では, 20 日より長い周期の波が赤道向きに角運動量を輸送する. 中でも, $c \sim 0 \text{ m s}^{-1}$ の惑星スケール混合ロスビー重力波の寄与が大きい. このように, いろいろな波によって生じる赤道向き角運動量輸送が「Gierasch 機構の大きな水平渦拡散」に対応する.



CONTOUR INTERVAL = 1.000E+01



CONTOUR INTERVAL = 1.200E-01

Fig. 3 Latitude-height cross sections of longitudinal average of $\overline{u'v'}$ ($\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$). Dashed curve indicates negative value.

Fig. 4 Latitude-height cross sections of longitudinal average of $\overline{u'w'}$ ($\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$). Dashed curve indicates negative value.

擾乱の鉛直運動量輸送に関しては, 負の運動量 flux が支配的である (Fig. 4). この負の鉛直運動量 flux は $c = 0 - 75 \text{ m s}^{-1}$ の重力波による. 高度 75 km 付近の中緯度域で, これらの重力波は平均流によって吸収され, スーパーローテーションが減速される. この重力波による減速が子午面循環を強化する (Imamura, 1997) ので, 雲頂より上で強い南北流が形成される. 赤道域では, 「負の運動量 flux をもつ $c < U$ の擾乱」と 「正の運動量 flux をもつ $c > U$ の擾乱」の両者が存在するので, 負の運動量 flux が正の運動

量 flux によって相殺される。その結果、赤道域の全ての擾乱を足し合わせた運動量 flux はゼロに近い値をもつ。これは、赤道域でも負の運動量 flux が卓越する T10 の結果と異なる。 $c > U$ の擾乱の幾つかは Kelvin 波に似た構造をもつ。高度 40 km では 3-5 日周期の波数 1 の Kelvin 波が、高度 65 km では 2 日周期の波数 1 の Kelvin 波が見られる。観測されている雲頂の赤道 4 日波と周期に違いがあるものの、T21 で現れた Kelvin 波は赤道 4 日波に対応するものと推察される。

平均流による角運動量密度の鉛直輸送は、低緯度域で正の値をもち、高緯度域で負の値をもつ。全緯度にわたり積分した鉛直輸送は正となるので、子午面循環による角運動量密度の鉛直輸送は正味上向きとなる。他方、擾乱による角運動量密度の鉛直輸送は全域で負の値をもつ。T10 と比較して、擾乱による下向き角運動量輸送が赤道域で非常に小さいので、子午面循環によって角運動量密度が効率よく上方へ輸送される。その結果、T21 では、T10 と比較して 1.5 倍も大きいスーパーローテーションが形成・維持されるようになる。

5. まとめ

本稿では、これまでの金星スーパーローテーション研究の紹介と CCSR/NIES AGCM を用いた結果を中心に述べた。ここでは、Venus-like AGCM の解析結果を基にして、スーパーローテーションの形成・維持のメカニズムにおける波動の役割について議論する。惑星表面から上層大気に至る子午面循環が角運動量密度を下層から上層へ運ぶ。上層の角運動量は子午面循環の南北流によって高緯度へ運ばれるが、その一部は擾乱による赤道向き運動量輸送によって低緯度に戻される。したがって、子午面循環によって汲み上げられた角運動量が上層で蓄積される。また、下層大気でも擾乱が赤道向きに角運動量を輸送するので、下層大気の角運動量が子午面循環の上昇域である赤道域に集められる。その結果、子午面循環の上昇流が効率よく角運動量を上方輸送するようになる。以上の過程(松田(2000)に詳しい解説がある)により、Gierasch 機構が有効に機能している。「Gierasch 機構の大きな水平渦拡散」は、順圧不安定であると信じられていたが、我々の研究では、順圧不安定以外の擾乱による赤道向き運

動量 flux も「Gieracsh 機構の大きな水平渦拡散」に対応することが示された。また、「Gieracsh 機構の小さな鉛直渦拡散」は、重力波による下向きの角運動量輸送に対応することがわかった。

主として、角運動量は、子午面循環によって上層へ汲み上げられ、鉛直伝播する擾乱によって下方へ戻される。この結果、 100 m s^{-1} 以上の高速流が形成・維持される。T21 の AGCM で見られるように、 $c > U$ の高位相速度の赤道波による角運動量の上方輸送が $c < U$ の重力波による下方輸送を相殺する場合、赤道域の下向き角運動量輸送過程が機能しなくなる。その結果、擾乱による平均流減速が抑えられるので、雲頂付近の赤道域におけるスーパーローテーションがより強化される。

上で議論したように、擾乱は、「子午面循環による角運動量の上方輸送」や「上層での角運動量の蓄積」の効率が良くなる様に、赤道向きに運動量を輸送する。鉛直伝播する重力波は上層に汲み上げられた角運動量を下層に戻す役割を果たしている。他方、高位相速度の赤道波による角運動量の上方輸送は、赤道域の重力波による角運動量の下方輸送を相殺するので、高位相速度の赤道波は上層のスーパーローテーションをより強化する役割を果たしている。金星大気において、これらの波動擾乱の役割が本当か否かについて議論するためには、観測と平行して、より現実的な Venus AGCM を開発することが不可欠である。特に、本研究で与えた加熱の極大は、Tomasko et al. (1985)の放射計算に比べ 10 km 程低い高度に位置しており、改善されなければならない。今後は、放射過程を精密に組み込んだ AGCM を開発し、上記のシナリオを検証したい。

謝辞

本稿の Venus-like GCM の結果は、東京大学気候システム研究センターの高橋正明氏との共同研究の成果である。また、図の作成には、地球流体電脳ライブラリーを用

参考文献

- Baker, N. L. and C. B. Leovy, 1987 : Zonal winds near Venus' cloud top level: A model study of the interaction between the zonal circulation and the semidiurnal tide, *Icarus*, **69**, 202-220.
- Covey, C. and G. Schubert, 1981 : 4-Day Waves in the Venus atmosphere, *Icarus*, **47**, 130-138.
- Covey, C. and G. Schubert, 1982 : Planetary-scale waves in the Venus atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, **39**, 2397-2413.
- Del Genio, A. D. and W. B. Rossow, 1990 : Planetary-scale wave and the cyclic nature of cloud top dynamics on Venus, *J. Atmos. Sci.*, **47**, 293-318.
- Del Genio, A. D. and W. Zhou, 1996: Simulations of superrotation on slowly rotating planets: Sensitivity to rotation and initial condition. *Icarus*, **120**, 332-343.
- Fels, S. B. and R. S. Lindzen, 1974 : The interaction of thermally excited gravity waves with mean flows, *Geophys. Fluid Dyn.*, **6**, 149-191.
- Gierasch, P. J., 1975 : Meridional circulation and the maintenance of the Venus atmospheric rotation, *J. Atmos. Sci.*, **32**, 1038-1044.
- Hou, A. Y. and R. M. Goody, 1985 : Diagnostic requirements for the superrotation on Venus, *J. Atmos. Sci.*, **42**, 413-432.
- Hide, R., 1969 : Dynamics of the atmospheres of the major planets with an appendix on the viscous boundary layer at the rigid bounding surface of an electrically-conducting rotating fluid in the presence of a magnetic field. *J. Atmos. Sci.*, **26**, 841-853.
- Iga, S. and Y. Matsuda, 1999 : A mechanism of the super-rotation in the Venus atmosphere: Meridional circulation and barotropic instability, *Theor. and Appl. Mech. Japan*, **48**, 379-383.
- Imamura, T, 1997: Momentum balance of the Venusian midlatitude mesosphere. *J. Geophys. Res.*, **102**, 6615-6620.
- Matsuda, Y., 1980: Dynamics of the four-day circulation in the Venus atmosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, **58**, 443-470.
- Matsuda, Y., 1982 : A further study of dynamics of the four-day circulation in the Venus atmosphere, *J. Meteor. Soc. Japan*, **60**, 245-254.
- 松田佳久, 2000 : 惑星気象学, 東京大学出版会, pp. 204.
- Newman, M. and C. B. Leovy, 1992 : Maintenance of strong rotational winds in Venus' middle atmosphere by thermal tides, *Science*, **257**, 647-650.
- Newman, M., G. Schubert, A. J. Kliore and I. R. Patel, 1984 : Zonal winds in the middle atmosphere of Venus from Pioneer Venus radio occultation data, *J. Atmos. Sci.*, **41**, 1901-1913.
- Numaguti, A., M. Takahashi, T. Nakajima, and A. Sumi, 1995: Development of an atmospheric general circulation model, Reports of a new program for creative basic research studies, Studies of global environment change with special reference to Asia and Pacific regions, I-3, 1-27, CCSR.

- Rossow, W. B., 1983 : A general circulation model of a Venus-like atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, **40**, 273-302.
- Rossow, W. B. and G. P. Williams, 1979: Large-scale motion in the Venus stratosphere. *J. Atmos. Sci.*, **36**, 377-389.
- Rossow, W. B., A. D. Del Genio and T. Eichler, 1990 : Cloud-tracked winds from Pioneer Venus OCPP images, *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2053-2084.
- Rossow, W. B., S. B. Fels and P. H. Stone, 1980 : Comments on "A three-dimensional model of dynamical processes in the Venus atmosphere", *J. Atmos. Sci.*, **37**, 250-252.
- Schubert, G. and J. A. Whitehead, 1969 : Moving flame experiment with liquid mercury: Possible implications for the Venus atmosphere, *Science*, **163**, 71-72.
- Schubert, G., C. Covey, A. D. Del Genio, L. S. Elson, G. Keating, A. Seiff, R. E. Young, J. Apt, C. C. Counselman III, A. J. Kliore, S. S. Limaye, H. E. Revercomb, L. A. Sromovsky, V. E. Suomi, F. Taylor, R. Woo and U. von Zahn, 1980 : Structure and circulation of the Venus atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **85**, 8007-8025.
- Smith, M. D., P. J. Gierasch, and P. J. Schinder, 1992 : A global traveling wave on Venus, *Science*, **256**, 652-655.
- Smith, M. D., P. J. Gierasch, and P. J. Schinder, 1993 : Global-scale waves in the Venus atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, **50**, 4080-4096.
- Takagi, M. and Y. Matsuda, 1999 : Interpretation of Thompson's mechanism for Venus' atmospheric superrotation and its extension to the spherical geometry, *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 971-983.
- Thompson, R., 1970 : Venus's general circulation is a merry-go-round, *J. Atmos. Sci.*, **27**, 1107-1116.
- Tomasko, M. G., L. R. Dose, and P. H. Smith, 1985 : The absorption of solar energy and the heating rate in the atmosphere of Venus, *Adv. Space Res.*, **5**, 71-79.
- Yamamoto, M. and H. Tanaka, 1997 : Formation and maintenance of the 4-day circulation in the Venus middle atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, **54**, 1472-1489.
- Yamamoto, M. and H. Tanaka, 1998 : The Venusian Y-shaped cloud pattern based on an aerosol-transport model, *J. Atmos. Sci.*, **55**, 1400-1416.
- Yamamoto, M. and M. Takahashi, 2002 : Roles of atmospheric waves in Venus' superrotation : results of a Venus-like GCM for a 3D thermal forcing, *Theor. and Appl. Mech. Japan*, **51**, 225-230.
- 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.