

特集「惑星大気」

金星大気力学：大気のスーパー・ローテーション
を中心にして松田佳久¹

1. スーパー・ローテーションとは何か？

大気のない水星を別にすると、自転周期が243（地球）日の金星は自転速度が地球よりも非常に遅い唯一の惑星である。地球のように高速回転の惑星上の大気では、惑星規模で見ると、東西風が南北風に対して卓越し、場が東西方向に一様になる傾向がある。実際、地球の対流圏の中高緯度では偏西風が、低緯度では偏東風が卓越している。木星では、大赤斑のような局所的な現象もあるが、（緯度により風速の異なる）東西風が卓越し、東西方向に温度などがほぼ一様な帯状構造が形成されている。

この東西一様性と東西風の卓越は、惑星の高速

回転（自転）の帰結である。まず第1に、惑星が東西方向に高速回転していれば、大気現象の源である太陽光吸収の分布が東西方向に一様化される。さらに、回転系の流体力学の保存則より、南北風が吹きにくくなる。色々な説明の仕方があり得るが、例えば絶対渦度（＝（惑星渦度）＋（相対渦度））の保存則で考えると、南北風があると、惑星渦度、 $f=2\Omega \sin \phi$ （ Ω は惑星の自転角速度、 ϕ は緯度）の南北移流により、大気の渦度（相対渦度）の方が変化せざるを得なくなる。従って、定常性のためには（惑星規模の大気現象は大雑把に言って定常である）、南北風はやたらと吹いては困るのである。一方、惑星渦度は経度に依存しないので、東西風がいくら吹いても、渦度の変化は生じない。

それでは、唯一の例外である低速回転の金星大

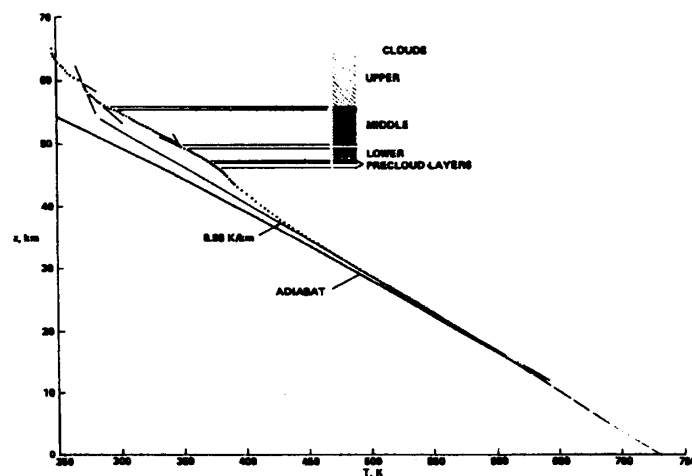


図1. 金星大気の鉛直構造。温度分布と雲層の範囲が示されている。[2] より。

¹ 東京大学大学院理学系研究科

気では、どのような現象が生ずるだろうか。その観測が行なわれる前の予想は極めて単純であった。自転速度が非常に遅いので、第1近似として太陽の地面に対する動きが無視できると考えると、昼側で大気が加熱され上昇し、夜側で大気が冷却され下降する夜昼間対流の卓越が予想される。この循環は太陽直下点とその対蹠点を結ぶ直線について軸対称である。実際には、太陽が地面に対してゆっくり動くので、(金星の一昼夜は117地球日)この夜昼間対流がほぼ形を変えずに、太陽の動きと共に経度方向に移動すると予想された。勿論、他の惑星大気のような東西風の卓越も、東西一様性への傾向も予想されていなかった。

しかし、1960年代に地上からの紫外線の観測により、雲の模様は4日で東西方向に一回転していることが確認され [1]、高さ65km位の雲層上部での100m/sに達する自転と同じ向き(地面から見た太陽の動きと逆向き)の東西流の存在が示唆された。その後の探査衛星の実測により、高速東西流の存在が確認された。自転の非常に遅い金星でも、他の惑星と同様に東西流が卓越していた訳である。但し、他の惑星ではロスビー数、 $U/a\Omega$ (U は代表的風速、 a は惑星半径、 Ω は惑星の自転角速度)が0.1程度以下であるが、金星の高速東西流に対しては60にもなる。大気が固体惑星の60倍で回転している訳であり、この流れがスーパー・ローテーションと言われる理由である。以下に見るように、スーパー・ローテーションは雲層に限定されていない。特に、雲層上部でのスーパー・ローテーションを4日循環ということがある。

このスーパー・ローテーションの生成メカニズムについて多くの研究が今までなされてきたが、未だに不明である。観測から証明された定説がないだけではなく、完全に首尾一貫したスーパー・ローテーション生成の理論もないのが現状である。しかし、多くの興味深い説が提出されている。そ

こで、本稿では、次節で金星大気についての観測結果を整理し、第3節でスーパー・ローテーションに関する理論を検討したい。古典的な理論を説明すると共に、最近、日本でなされた研究も積極的に紹介したい。

金星の雲層(45~70km)の下の高温・高圧(地表付近で約730K, 92気圧)の大気層については、観測が非常に少なく、地表付近でどのような循環が形成されているのか不明である。雲層でのスーパー・ローテーションに次いで、この問題も重要であるので、第4節で検討したい。

2. 観測事実

本節では、スーパー・ローテーションを考察する上において必要な観測結果を紹介したい。

2.1 温度構造と太陽光吸収

図1には、金星大気の鉛直構造が示されている [2]。金星大気は CO_2 を主成分(98%)とし、地表で92気圧もある。地表面温度は730Kにも達してい

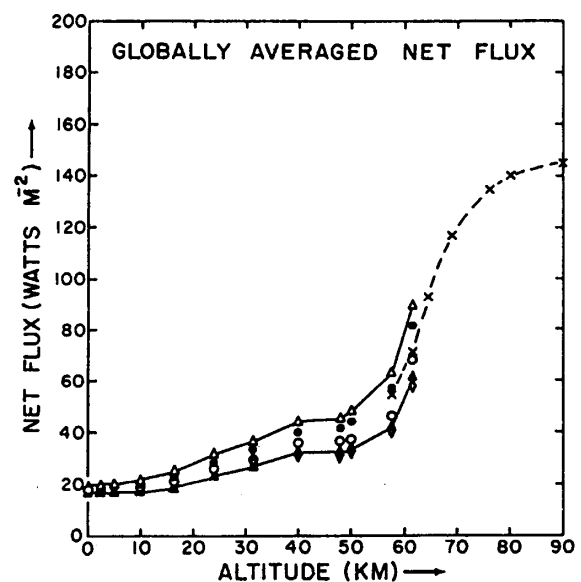


図2. 全球平均された太陽光の全正味フラックスの鉛直分布。パイオニア・ヴィーナスの観測によるもの。[3]より。

る。膨大な量の CO_2 や微量ながら存在する H_2O などによって、温室効果が極めて有効に働き、この高温が維持されていると考えられている。40km以下では、温度変化はほぼ直線であり、この傾きは乾燥断熱勾配に近い。さらに、高さ45km位から70km位までに渡って、濃硫酸からなる雲の層が存在していることも重要である。

温室効果により地表面の高温が維持されていると言ったが、それではどの位の太陽光が地表面まで到達しているのだろうか。そもそも、金星はアルベドが78%と大きく、金星が実際に吸収する太陽光は地球よりも小さい。その吸収量の十数パーセントが厚い金星大気を通して地上まで到達していることを最初に観測したのが、ヴェネラ8号で

あった(1972年)。図2に、パイオニア・ヴィーナスによる太陽光の全正味フラックスの高さ分布が示されている[3]。この結果を整理すると、次のようになる。

- (1) 金星が吸収する太陽光の半分程度が64km以上(上層の雲)で吸収される。
- (2) 中, 下層の雲(57km以下)では太陽光はほとんど吸収されない。
- (3) 残りは, 35km以下で吸収される。
- (4) 特に地上では(全球平均して) 17W/m^2 吸収され, 金星が吸収する太陽光全体の12%に相当する。

つまり、太陽光吸収は58km以上の上層とそれ以下の下層で分離しており、上層と下層である程度独立な循環系が発達している可能性が示唆される。

図3は、パイオニア・ヴィーナスの4つの探査機による大気の成層度の観測結果である[4]。雲層では成層度が複雑に変化していることが分かる。雲層より下では、成層度がかなり小さくなっているが、残念ながら13km以下は欠測となっている。表1にヴェネラによる観測結果がまとめてあるが[2]、これによると下層の安定度はかなり小さい。図1で、下層の温度分布が乾燥断熱線とはっきり区別できなかったのも、当然である。放射平衡温度分布が、偶然、乾燥断熱線に近くなるとは考えにくいので、この結果は金星下層の放射平衡の温度分布が超断熱勾配となり、不安定で、(鉛直)対流が生じ、その結果、乾燥断熱線に近い温度分布が実現したと解釈される。観測されている大気の小さい安定度は、小規模な鉛直対流以外の原因で形成されたものと考えられる。不安定な温度分布の結果生じる対流は、温度分布を中立を越えて、安定の方へ持って行くことはできないからである。最近の研究[4]は、下層の成層度は今まで考えられてきた値より 1K/km 程度、より安定であることを示唆している。

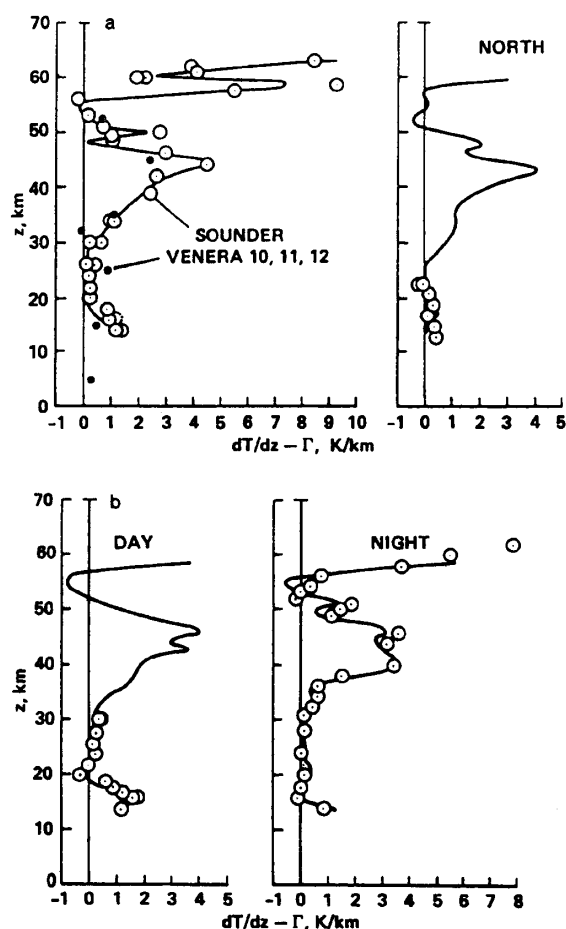


図3. パイオニア・ヴィーナスの4つの探査機の観測による金星大気の成層度。乾燥断熱減率からのずれの鉛直分布が示されている。13km以下は欠測となっている。[2]より。

表1 ヴェネラの観測による大気の安定性 (Γ は乾燥断熱減率). [2] より.

z (km)	$dT/dz - \Gamma$ (K km ⁻¹)
0-10	0.3
10-20	0.5
20-30	0.9
30-40	1.1
40-50	2.4
50-55	0.7

2.2 風の分布

次に、風の分布を検討してみたい。図4に、色々な探査衛星が実測した東西風の鉛直分布が示されている [5]。かなりバラツキがあるが、雲層上部でピークに達し、下に行くに従い単調に減少していて、スーパー・ローテーションが全層に渡った現象であることが分かる。風速に密度をかけた(角)運動量でみると、20km位がピークになる。

それでは、この東西風速流の緯度分布はどうなっているのだろうか。雲層上部より上では、温度分布と圧力分布が探査衛星が出す電波の地上観測

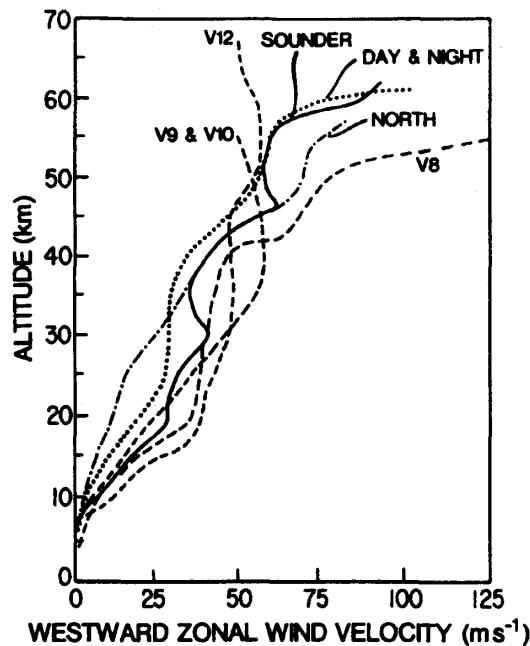


図4. 東西風速の実測値の鉛直分布。向きは西向き(金星の自転方向)。[5] より。

から比較的よく分かっている。その分布から、東西風に働く遠心力と南北の気圧傾度力が釣り合っているという遠心力バランスを仮定して求められた東西風速の子午面分布が、図5に示されている [6]。高速東西流が特定の緯度の現象ではないことが分かる。特に、70kmの高さの中緯度に100m/sを越えるジェットが存在している。

紫外線で見える雲層上部の小規模の雲の追跡によっても、風速分布が求められている。それによると、東西風速の緯度分布は時間変動する。つまり、東西風速の緯度分布が比較的剛体回転に近い時期と、中緯度のジェットが卓越している時期がある [7]。この東西風速の時間変動も、理論的に

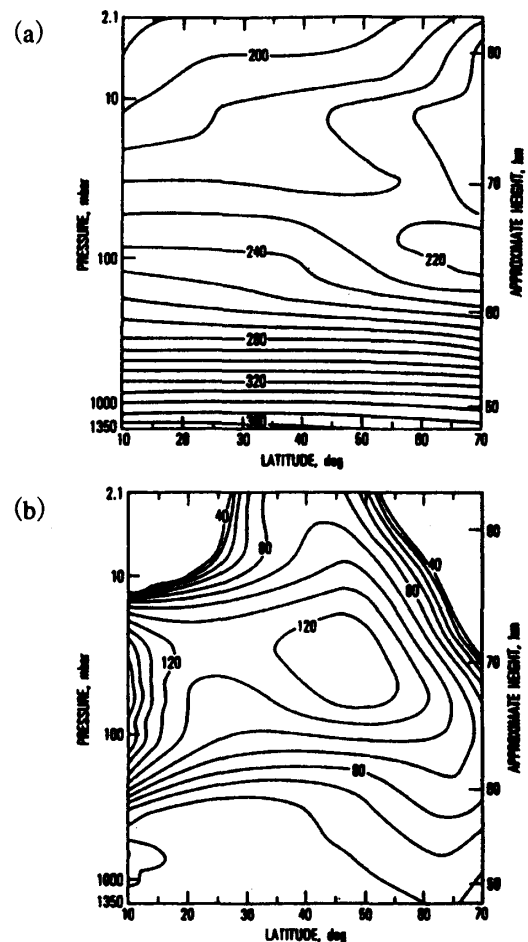


図5. パイオニア・ヴィーナスのラジオ・オカルテーションによる上層大気温度の子午面分布 (a)。温度分布から遠心力バランスを仮定して求めた、東西風速の子午面内分布 (b)。[6] より。

説明しなくてはならない事実である。

小規模の雲の追跡より求めた東西風速分布の時間平均したものが図6に示してある [7]。図中の上と下の破線は、それぞれ、全ての緯度で角運動量が一定、角速度が一定（剛体回転）とした時の東西風速の緯度分布を示している。これによると、雲層上部の現実の東西風では、高緯度の方が、低緯度よりも回転角速度が大きい、低緯度の方が角運動量が大きい。この結果は、以下で見るように、スーパー・ローテーション生成のメカニズムを考える上において重要な意味を持っている。

同様の方法により求めた南北風速が図7に示してある [7]。これによると、北半球で北向き、南半球で南向きの流れがあり、その大きさは数m/sのオーダーである。この風は、低緯度で上昇し、高緯度で下降する子午面循環の上部の流れと解釈されている。

それでは、他の高度での風速分布はどうなっているだろうか。雲層上部より下の観測は少ないが、高さ50kmでは、雲層上部と同様、東西風は中緯度にジェットを持った分布をし、南北風は北半球で極向きで10m/sの程度であることが知られている [8]。つまり、子午面循環の上部（極向きの流れがある範囲）が少なくとも50kmにまで及んでいるこ

とになる。又、バイオニア・ヴィーナスの4つの探査機が25kmで測定した東西風は、剛体回転とした風速分布に乗るようである [9]。

3. スーパー・ローテーション生成のメカニズム

1960年代にスーパー・ローテーション（4日循環）が発見されて以来、特異な現象として関心を集め、70年代において、それを説明する興味深い色々の理論が提出された。これらの理論が、その後の研究の基礎となっているが、今から見るとこれらの理論は以下のような特徴（欠点）を持っている。

- (a) 観測が非常に少ない段階で構築されたので、定性的、抽象的である。
- (b) 金星の大気層は厚く、前節で見たように太陽光が吸収される層も分かれているのに、どの層に理論を適用するのか、余りはっきりした意識を持っていなかった。
- (c) 診断的（diagnostic）ではなく、何もない状態ないしは夜昼間対流から出発して、スーパー・ローテーションを導き出そうとした。

このような特徴を持つ「古典的」な理論は、大雑把に言って3つ程に分類できる。後の議論のために、その原型を簡単に紹介しておきたい。

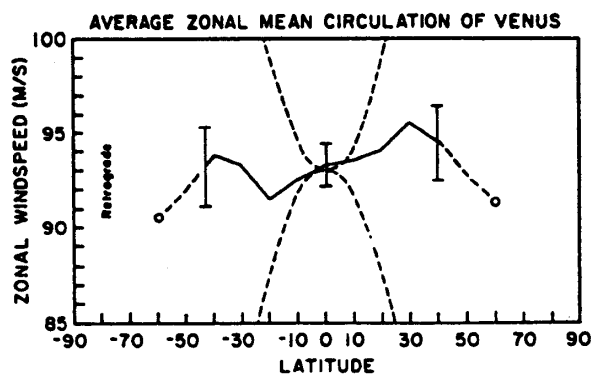


図6. 雲層上部における平均東西風速の緯度分布。小規模な雲の追跡による観測結果。[7]より。

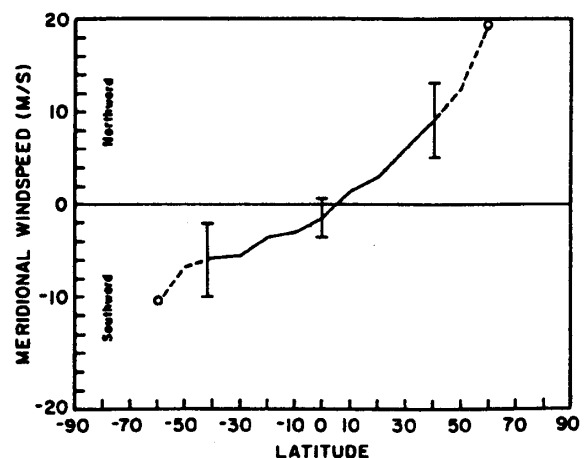


図7. 雲層上部における平均南北風速の緯度分布。小規模な雲の追跡による観測結果。[7]より。

(1) 夜昼間対流に着目する理論

既に述べたように、金星の自転は大変遅いので、太陽直下点とその対蹠点（真裏）を結ぶ線に対してほぼ軸対称な夜昼間対流が卓越すると予想されていた。従って、夜昼間対流から出発して、スーパー・ローテーションを導き出そうと考えるのは、自然な発想であった。この種の理論のうち、最初に提出されたのがmoving flame（動く炎）メカニズムと言われるものである [10]。図8のように、ゆっくりながらも下層を加熱する太陽が左へ移動し、それより上の温度場が熱伝導によって決まるとすると、高さと共に温度場の位相が遅れ、対流の軸が傾く。その結果、東西方向と鉛直方向の速度に相関が生じ ($\overline{u'w'} > 0$)、水平方向の運動量が上方へ輸送され、上層で正 ($\bar{u} > 0$)、下層で負 ($\bar{u} < 0$) の平均東西流が生成される。下層の東西流は地面との摩擦によりつぶされ、上層の東西流のみが残る。これをスーパー・ローテーションと解釈する訳である。

一方、Thompson [11] は、太陽の地面に対する動きを完全に無視した、傾きのない対流でも不安定により自発的に平均東西流が生成されることを示した。つまり、摂動によりわずかでも対流セルが傾くと、 $\overline{u'w'} \neq 0$ より東西方向の運動量の鉛直輸送が起これ、鉛直シアーを持った平均東西流が生じる。それにより対流がますます傾くというポジ

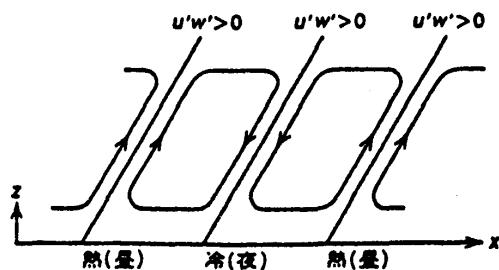


図8. moving flameのメカニズムを示す模式図。赤道上の鉛直断面図で、右方向を正とする。傾斜した軸を持つ対流によって正の運動量が上方へ輸送される。

ティブ・フィードバックが働くことになる (図9)。

(2) 鉛直伝播する重力波に着目する理論

気象力学では、波に運動量が伴い、波が伝播することによって、運動量が輸送されることがよく知られていた。そこで、Fels and Lindzen [12] その他は、太陽加熱により励起された重力波が鉛直伝播し、その結果、重力波に伴う（太陽の動きと同方向の）運動量が鉛直方向に輸送されることに着目した。この運動量の輸送の結果、加熱層では、太陽の動きと逆方向の運動が加速されるはずである。これを、スーパー・ローテーションの生成と解釈しようと言う訳である。しかし、このメカニズムにも、いくつかの問題点がある。加熱層で励起された重力波は、当然、その両側へ伝播して行くはずであり、上層でも、太陽の動きと同方向の平均東西流が生ずるはずである。しかも、上層の方が密度が小さいので、大きな速度の流れが生ずるはずであるが、このような（スーパー・ローテーションと逆方向の）流れは全く観測されていない。

(3) 子午面循環に着目する理論

高速の東西流が生成されると、東西方向の温度差は均されて、夜昼間対流は（元々あったとしても）弱く成るが、（東西一様な）子午面循環は東西流の影響を受けない。そこで、（夜昼間対流の存在

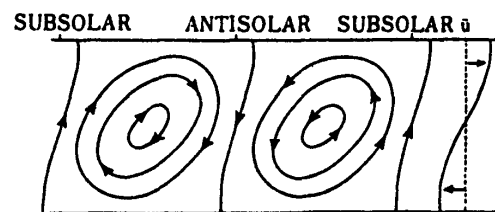


図9. Thompsonのメカニズム（平均流と傾いた対流の相互作用）を示す模式図。

は無視して) 子午面循環によって, スーパー・ローテーションを説明しようという試みがなされた [13,14].

今, 東西 (経度) 方向には, すべて一様とする. 正の東西流 ($U > 0$) が存在し, それに子午面循環がいかん作用するかを考える. (東西一様な東西流が, 東西一様な子午面循環に何の影響も与えないことは明らかである.) 低緯度で上昇 ($W > 0$), 高緯度で下降 ($W < 0$) の子午面循環によって, 東西流の角運動量 (M) が, 低緯度で上方に ($M \cdot W > 0$), 高緯度で下方に ($M \cdot W < 0$) 輸送される (図10). この時, 東西流の角運動量 (M) が, 高緯度よりも低緯度の方で大きい状態が実現されていると, 全球平均した正味の角運動量は上方に輸送される. この上方に輸送された角運動量により上層大気は加速され, 角運動量を奪われた下層大気には, 地面から角運動量が供給される. 結局, このメカニズムは, 固体部分の角運動量を汲み上げて, 上層大気に蓄積して, そこでスーパー・ローテーションを生

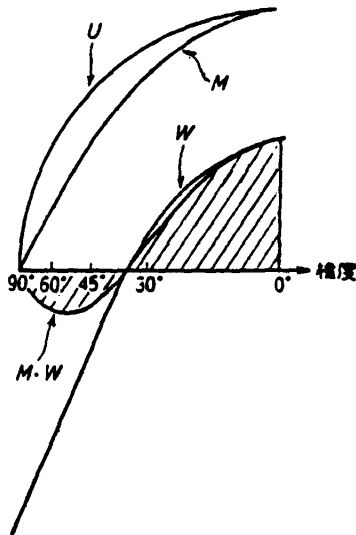


図10. 角運動量の緯度分布と子午面循環による角運動量の鉛直輸送. U と M は剛体回転を仮定した場合の (適当にスケールした) 東西風速と角運動量. W は子午面循環の鉛直速度. 従って, $M \cdot W$ は子午面循環による角運動量の上向きフラックスを意味する.

成しようというものである.

しかし, 子午面循環は角運動量を鉛直方向に輸送するだけではなく, 水平方向にも移流する. 子午面循環の上部では, 角運動量が極側へ移流されるはずであり, そのままでは, 「低緯度の方が角運動量が多い」という, この子午面循環による角運動量上方輸送のメカニズムが働く前提が崩れてしまう. 子午面循環によって中高緯度へ水平移流された角運動量を, 低緯度へ戻す補助的なメカニズムが働くことが, このメカニズムには必須である. 残念ながら, この補助的メカニズムは現在でも明確にされていない.

以上の「古典的」理論の共通した特徴 (欠点) はこの節の最初に述べたが, 現在でも, 「古典的」理論として述べたメカニズムとは, 全く異なる新しいメカニズムが提案されている訳ではない. それらの変形や組み合わせが, 色々試みられている. 例えば, 最近, 山本は (2) で説明した重力波の代わりにケルヴィン波を考え, 子午面循環も考慮したモデルにより, スーパー・ローテーションの再現を試みている [15]. また, (1) で説明したmoving flameの議論もThompsonの議論も (例えば, 赤道上の) 鉛直二次元面内でしか考えられていなかったので, 現実の金星への適用を考えるには, 球面上の3次元流体でこれらのメカニズムが働くかの検討が是非必要であった. 最近になって, ようやくその検討が始められた [16].

それでは, 「古典的」理論の提出された70年代より観測が進んだ現在の段階において, スーパー・ローテーションの成因をどのように考えたらよいであろうか. 約70kmまでは, 東西流が高さと共に単調に増加しているの, それぞれの高さで, 東西流加速のメカニズムが働いているはずである. しかし, 前節でも述べたように, 雲層の大気と地面近くの大気では, かなり離れているし, 太陽光の吸収も上層と下層で分離しているの, 別個の

循環が形成され、別個の東西流加速のメカニズムが働いている可能性がある。

雲層においては、前節で見たように、観測から子午面循環の存在が強く示唆されている。さらに、東西風の角運動量が低緯度程大きいことも、観測より示されていた。とすると、当然雲層では(3)で説明した子午面循環による角運動量の上方輸送が働いていると推測される。従って、問題は、子午面循環の上半部における極向きの流れによって中高緯度に運ばれる角運動量を、いかにして、低緯度へ戻してやるかである。実際、数m/sの極向きの流れが存在するのにもかかわらず、低緯度の角運動量の方が大きいということは、低緯度へ角運動量を輸送する何らかのメカニズムが働いていることを意味する。

この補助的メカニズムに関しても、いくつかの考えが提案されている。1つは、波による運動量の鉛直輸送を考えることである。最近、今村は、中緯度のロスビー波の運動量の鉛直輸送による効果を見積もった[17]。又、以前から、中緯度ジェット的不安定によるメカニズムが提案されていた[18]。つまり、低緯度から輸送された角運動量によって中緯度にジェットが形成され、その順圧不安定により生じた渦によって、角運動量が低緯度へ輸送されるというメカニズムである。このメカニズムが働いているとすると、中緯度のジェットが順圧不安定を起こすような強い状態と安定な弱い状態がくり返される可能性もあり、観測されている東西流の時間変化を説明できるかもしれない。

いずれにしても、この角運動量を低緯度へ戻すメカニズムは十分解明されていない。雲層に子午面循環が存在することは確実なようなので、子午面循環の作用とこの補助的メカニズムが調和してうまく働くか否かの検討が、現在最も必要な研究であろう。

4. 下層大気の循環

最後に、雲層より下の層、特に地表付近の循環の様相を議論したい。外部からは厚い雲層によって遮られていること、高温、高圧でin situ observationが困難なことにより、下層大気に関しては、雲層に比べて、情報量が大変少ない。

図11に、地表付近の東西風速の鉛直分布が示されている[19]。上層とくらべると、勿論、東西風速の値は小さいが、金星の(赤道での)自転速度1.5m/sよりも大きな東西風が地上約5km以上で存在している。(5km以上の)大気下層においてもスーパー・ローテーションが存在している訳で、下層でもその生成の何らかのメカニズムが働いていることになる。このメカニズムは、雲層でのメカニズムと同一であろうか。特に注意すべき事は、大気全体の正味の全角運動量は、固体部分から供給される他なく、それを支配しているのが下層の大気の循環であるということである。

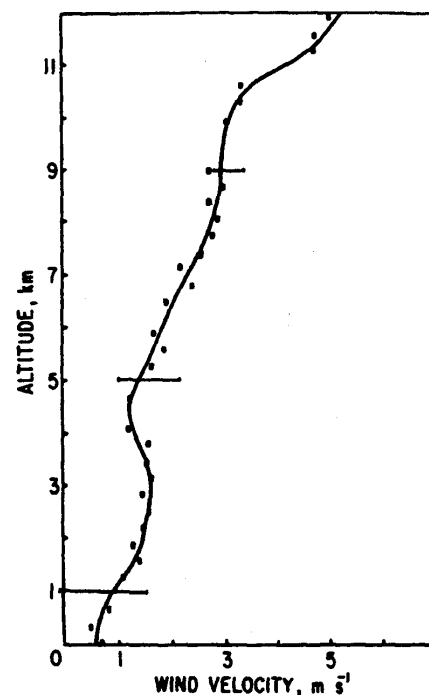


図11. ヴェネラ8号によって観測された地表付近の風速の鉛直分布。[19]より。

それでは、東西風を除いていかなる循環が卓越しているのだろうか。残念ながら、ほとんど観測がないのが現状である。ヴェネラによる地表風の観測結果が図12に示されているが [19]、この図から特定の循環パターンを思い描くのは、困難であろう。一方、地表についた風の痕の観測から風向を推定した研究によると、地表では北半球で南風、南半球で北風（の子午面循環）が卓越しているらしい [20]。しかし、地表での風向がこの研究の通りだとしても、下層の大気全体（例えば、高さ10kmまでの大気）の流れをどの位代表しているか不明である。

高速東西流生成の問題を切り離しても、金星の下層において、いかなる循環が卓越するかという問題は理論的に興味深い問題である。自転が非常に遅い金星では、高速東西流を生成するような特別のメカニズムが働かない限り、第1近似として夜昼間対流が卓越すると予想された。しかし、密度の大きい金星の下層大気は非常に熱容量が大きい。又、二酸化炭素が大部分で光学的にも大変厚い。従って、輻射の緩和時間が1万日程度になり、金星の1昼夜（117地球日）よりはるかに長くなる。又、地表面付近では風速が金星の自転速度（赤道で約1.5m/s）と同程度かそれより小さくなる。従って、1昼夜が非常に長いことから推定された夜昼間対流の卓越は、必ずしも自明ではない。それでは、いかなる循環パターンが金星下層大気のパラメータ領域で存在し得るのか？

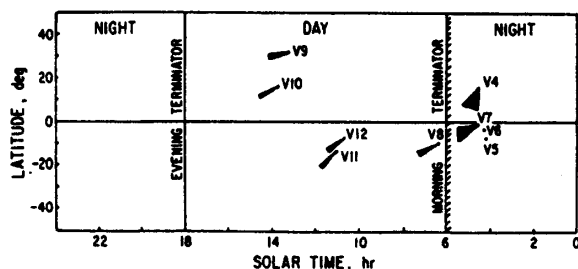


図12. ヴェネラによって観測された地表での風向の分布。 [19] より。

このような動機の下に、金星下層大気の3次元力学モデルによるシミュレーションがこころみられた [21]。その研究によると、一応、夜昼間対流が生じたが、結果は（渦粘性などの）モデルに含まれる不確定のパラメータの値に依存し、パラメータの値によっては、東西一様性が強く、子午面循環や東西風が卓越した状態も有り得ることを示唆している。

地表面に到達した太陽光で駆動される循環によって、第2節で述べた大気安定成層を説明できないか、ということも、この研究 [21] の動機であった。高温の所で上昇し、低温の所で下降する循環は、鉛直流と温度との相関により熱を上方に輸送し、安定成層を形成し得るからである。計算結果によると、残念ながら、形成された成層度は観測値と比べて大変小さかった。従って、別の説明が必要と思われる。

参考文献

- [1] Boyer, C. and P. Guerin, 1966: Etude de la rotation rétrograde, en 4 jours, de la couche extérieure nuageuse de Vénus. *Icarus*, **11**, 338-355.
- [2] Seiff, A., 1983: Thermal structure of the atmosphere of Venus. "Venus", The university of Arizona press, 215-279.
- [3] Tomasko et al., 1980: Measurements of the flux of sunlight in the atmosphere of Venus. *J. Geophys. Res.*, **85**, 8167-8186.
- [4] Meadows, V. S. and D. Crisp, 1996: Ground-based near-infrared observations of the Venus nightside: the thermal structure and water abundance near the surface. *J. Geophys. Res.*, **101**, 4595-4622.
- [5] Schubert, G., 1983: General circulation and

- the dynamical state of the Venus atmosphere. "Venus", The university of Arizona press, 681-765.
- [6] Walterscheid, R.L., Schubert, G., Newman, M., and Kliore, A. J., 1985: Zonal winds and the angular momentum balance of Venus' atmosphere within and above the clouds. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 1982-1990.
- [7] Rossow, W. B., Del Genio, A. D., and Eichler, T., 1990: Cloud-tracked winds from Pioneer Venus OCPP images. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2053-2084.
- [8] Carlson, R. W., Baines, K. H., Encrenaz, Th., Taylor, F. W., Drossart, P., Kamp, L. W., Pollack, J. B., Lellouch, E., Collard, A. D., Calcutt, S. B., and Soderblom, L. A., 1991: Galileo infrared imaging spectroscopy measurements at Venus, *Science*, **253**, 1541-1548.
- [9] Allison, M., Del Genio, A.D., and Zhou, W., 1994: Zero potential vorticity envelopes for the zonal-mean velocity of the Venus/Titan atmospheres. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 694-702.
- [10] Schubert, G. and J. A. Whitehead, 1967: Moving flame experiment with liquid mercury: Possible implications for the Venus atmosphere. *Science*, **163**, 71-72.
- [11] Thompson, R., 1970: Venus general circulation is a merry-go-round. *J. Atmos. sci.*, **27**, 1107-1116.
- [12] Fels, S. B. and Lindzen, R. E., 1973: The interaction of thermally excited gravity waves with mean flows. *Geophys. Fluid. Dyn.*, **6**, 149-192.
- [13] Gierasch, P., 1975: Meridional circulation and maintenance of the Venus atmospheric rotation. *J. Atmos. Sci.*, **32**, 1038-1044.
- [14] Matsuda, Y., 1980: Dynamics of the four-day circulation in the Venus atmosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, **58**, 443-470.
- [15] Yamamoto, M. and Tanaka, H., 1997: Formation and maintenance of the 4-day circulation in the Venus middle atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 1472-1489.
- [16] Takagi, M. and Matsuda, Y., 1998: Stability of the convection between day and night side. (to be submitted) .
- [17] Imamura, T., 1997: Momentum balance of the Venusian midlatitude mesosphere, *J. Geophys. Res.*, **102**, 6615-6620.
- [18] Rossow, W. B. and Williams, G. P., 1979: Large-scale motion in the Venus stratosphere. *J. Atmos. Sci.*, **36**, 377-389.
- [19] Kerzhanovich, V. V. and Marov, M, Ya, 1983: The atmospheric dynamics of Venus according to Doppler measurements by the Venus entry probes. "Venus", The university of Arizona press, 766-778.
- [20] Greeley, R., Bender, K., Thomas, P. E., Schubert, G., Limonadi, D., and Weitz, C. M., 1995: Wind-related features and processes on Venus: summary of Magellan results. *Icarus*, **115**, 399-420.
- [21] Utsunomiya, T. and Matsuda, Y., 1998: The nonlinear response of a slowly-rotating atmosphere to mobile heating. (submitted to *J. Meteor. Soc. Japan*)