

金星大気のスーパー・ローテーション

—2003年度堀内賞受賞記念講演—

松田 佳久*

1. はじめに

この度は、気象学会から堀内賞をいただき有り難うございます。気象学会の皆様、特に関係者の皆様のご理解に、深く感謝する次第です。ここでは、前半で金星大気の概観をした後、私の研究対象である金星大気のスーパー・ローテーションについて、私の研究を含めて説明したいと思います。後半で、金星大気の大循環に関する課題について、現在の段階において、私なりに考察を加えてみたいと思います。特に、子午面循環の強度や水平方向の温度差といった大循環の諸量を、高度別に見積もってみたいと思います。従いまして、金星大気の問題についてはじめて関心をお持ちの方は先ずは次節から第6節までを、既にこの問題に詳しい方はそこを飛ばして第7、8節をお読み下さい。

2. 金星大気の概観

まず、金星大気の置かれている状態と大気の基本パラメータを、第1表に示しました。金星の半径は地球と同程度であり、固体部分に関しては、2つの惑星はよく似ていると言われています。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のですが、太陽光の反射率(アルベド)がかなり大きいので、大気や地面によって吸収されるエネルギーは地球よりも小さくなります。従って、有効放射温度も地球よりも小さくなっています。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くなっています。金星は自転と公転の向きが逆なので、夜明けから次の夜明けが来るまでの1太陽日は117日ですが、これも非常に長くなっています。金星の大気量は膨大で、地表面気圧が

92気圧にも達していますが、この大気の97%が二酸化炭素からなっています。

以上が気象学にとっては与えられたデータです。金星大気の鉛直構造から検討していきたいと思います。第1図に温度と雲層の位置が、高度に対して示されています。既に述べたように、金星の地表面気圧は92気圧ですが、1気圧になる高度は約50 kmです。約45 kmから70 kmの間に雲層がありますが、金星の雲は地球の雲とかなり様子が異なっています。地球の雲は、地球全体で見ると所々に散在しているだけですが、金星の雲は全天を完全に覆っています。また、地球の雲粒は水または氷からなっていますが、金星の雲は濃硫酸の液滴からなっています。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ました。この厚い雲の存在が金星大気の大きな特徴の1つです。

次に、温度分布を見ると、地表面で約730 Kに達していて、地球と比べて大変高温になっています。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ます。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となります。金星大気の大部分が温室効果気体である二酸化炭素からなっていることは、温室効果に大変有利な点です。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ますが、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ありません。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、金星の二酸化炭素全量は地球より5桁ほど多いこととなります。結局、地球の場合、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、高めるのに留まっています。

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、温室効果が働か

* 東京学芸大学教育学部地学科。

—2004年8月16日受領—

—2005年4月1日受理—

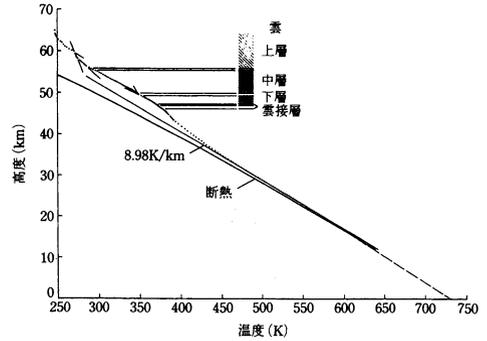
第1表 地球型惑星の大気のパラメータ.

	金星	地球	火星
惑星半径 (km)	6050	6380	3400
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
アルベード	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
大気の主要成分	CO ₂	N ₂ , O ₂	CO ₂

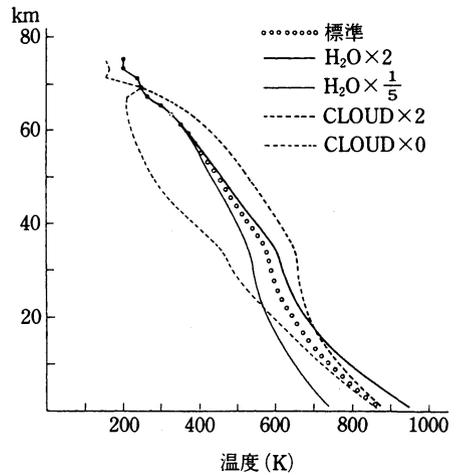
ないことは言うまでもありません。地球の場合、大気が太陽光つまり可視光に対してかなり透明であることが、温室効果が働く有利な条件となっています。ところが、金星の場合、雲層により入射太陽光の78%が反射され、残りも雲層などで吸収されると思われるので、そもそも、太陽光が地面まで到達するのかが問題となります。

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ません。地表面での全球平均太陽光エネルギー吸収量は $17 W/m^2$ です (Tomasko *et al.*, 1980)。このようなわずかなエネルギーに基づいて、高い地表面温度を維持することが可能か否か、実際に研究したのが私の修士論文です (Matsuda and Matsuno, 1978)。

当時は、太陽光がどの程度、地表まで到達しているかについて、ソ連のヴェネラ 8号が初めて情報をもたらした段階でした。また、高温・高圧下での二酸化炭素や水蒸気の赤外線吸収についてのデータも余りありませんでしたが、利用できるデータを使って、金星の放射平衡を計算してみました。それが第2図です。さらに、鉛直対流の効果も渦粘性の形で取り入れて、放射対流平衡も計算しました。これらの結果は、金星表面の高温が温室効果によって維持され得ることを示しています。つまり、放射の効果だけでは地表面温度は観測されている温度よりかなり高くなり、対流の効果も含めて観測値に近くなる、という結果を得ました。この温室効果は主として膨大な量の二酸化炭素によっていますが、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ました。(同様の研究としては、Pollack *et al.* (1980) 参照)。現在では、高温・高圧下の赤外線吸収



第1図 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。松田 (2000) より引用。原図は Seiff (1983)。

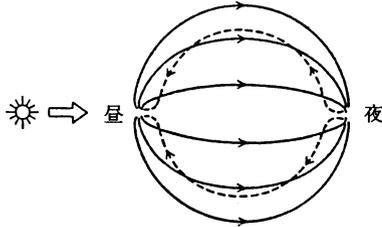


第2図 松田・松野が計算した金星の放射平衡温度分布 (Matsuda and Matsuno, 1978)。松田 (2000) より引用。

のデータが豊富になっているので、それに基づいた精密な放射のモデルによる、放射平衡の計算が可能でしょう。

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、説明したいと思います。地球の気象学の場合は、我々にとって身近な、つまりスケールの小さ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ました。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先ず問題になってきます。台風や梅雨と異なり大気大循環は直接、体験できないので、分かりにくいと思われます。



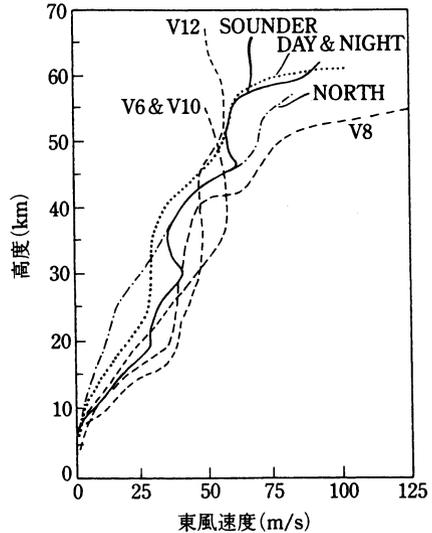
第3図 夜昼間対流の模式図. 昼側で空気が加熱されて上昇し, 夜側で冷却されて下降する循環. 松田 (2000) より引用.

そこで, 先ず, 地球の大気大循環をごく簡単に復習しておきたいと思います.

地球の対流圏の場合, 東西方向に平均した子午面内循環を考えると, 北半球, 南半球それぞれ, 3つの細胞からなる循環があります. 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言います. 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ます. それに対して, フェレル循環は逆方向に回転しています. 地球対流圏の東西風速の分布では, 対流圏の中高緯度で西風 (偏西風), 低緯度の地表面付近で東風 (貿易風) が卓越しています. つまり, 第1近似として, 東西平均した描像, つまり, 東西平均子午面循環と東西風の分布という考え方が有効だということです.

このような地球の大気大循環の形成に関しては, 地球が1日に1回転して, 太陽光吸収が東西方向には均されてしまうことが重要です. その結果, 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) が大循環の基本的な要因となります. また, 地球の自転効果は, 風に働くコリオリ力を生ずるものとしても大変重要であります.

第1表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ま. 実際, その通りで, 火星の大循環は, 偏西風や子午面循環が存在し, 地球の大循環と共通の性質を持っています. それでは, 同じ地球型惑星である金星の大気大循環は, どのようなものでしょうか. まず, 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桁も長いことが注目されます. 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ます. それに伴って, 大循環も第3図に示されている



第4図 金星の東西風速の鉛直分布. 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4つの探査機による観測. 松田 (2000) より引用. 原図は Schubert (1983).

ような夜昼間対流の卓越が予想されます. つまり, 昼が約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予想されます.

それでは, 現実の金星の大気大循環はどうなっているのか, その観測の発展も含めて説明したいと思います. 可視光で金星を見ても, 何も模様が見えませんが, 紫外線で金星を見ると, Y字を横倒したような惑星規模の模様が見えます. これは既に述べた雲層上層での雲の濃淡と関係して模様ができていたのだと思われま. この独特の模様が金星をその自転と同じ方向に4日で1周することが, 1960年代の終わり頃, 地上観測により発見されました. 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の東風が吹いていることとなります. 金星の自転方向は地球と逆で, 東から西方向です. 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で, 単に模様の位相が伝播しているだけという可能性も否定できなかったため, 実際に風が吹いていること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りました.

第4図に, 旧ソ連や米国の探査機が色々の地点で下

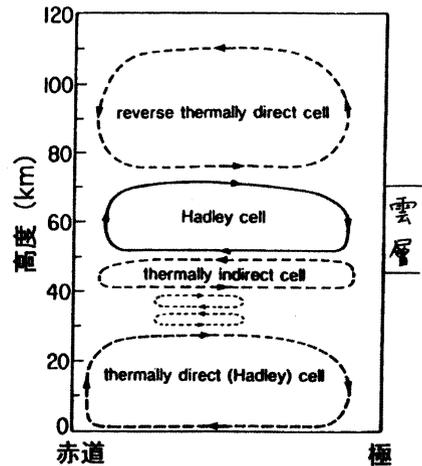
降する間に計った東西風速の鉛直分布が示されています。これによると、65 km~70 km の雲層上部では実際に100 m/s の東風が吹いていることが分かります。その高度での風速が最大で、地面から単調に東風が増大しています。今のところ、西風は観測されていません。

この東西風は大変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ます。なぜ不思議なのか、ここで説明しておきたいとします。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す。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に不思議です。実際、金星の高度100 km 以上の熱圏では、観測によると、夜昼間対流が存在しているので、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訳ではないはずですが、次に、100 m/s の風という、それ自身はたいしたことはないように思われますが（地球のジェット気流、火星の冬半球の高緯度の偏西風はその位の風速に達しています）、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分かります。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します。一方、地球の自転速度は赤道で460 m/s であり、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す。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なく、それを維持するメカニズムが難しいということの意味です。ある時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、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、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はずですが、このメカニズムを考えることが、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大問題です。

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ますと、当初、金星には夜昼間対流が卓越するようなタイプの大气大循環が見られると予想されましたが、観測により、地球や火星のように東西風が卓越することが明らかにされました。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きます。

紫外光による雲頂高度での小規模な雲の追跡によ



第5図 金星の子午面循環の予想図。雲層より上に描かれている逆循環は現在では考えにくく、むしろそこでは夜昼間対流が重要である。

て、南北風速が求められています。（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ます。）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の存在が示されています。この流れは、第5図に描か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ます。つまり、この南北風が観測された時は、（スーパー・ローテーションより1桁小さいが、）10 m/s 程度の東西平均子午面循環が存在するものだと考えられました（Rossow *et al.*, 1990）。

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、それ程大きくないのではないかと、思われるようになってきました。最近、高木ほか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ました（Takagi and Matsuda, 2005）。

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、熱潮汐波と言いますが、高木ほかはこの熱潮汐波を色々な場合について系統的に計算しました。その計算結果によると、高度70 km 位で第6図のような流れが形成されます。第6図に描かれているのは、熱潮汐波の主要な成分であり、1日潮と言われている東西波数1（1日周期）の成分です。昼側では極向き、夜側では赤道向きで、その南北流速は10 m/s 程度になっています。つまり、流速はスーパー・ローテーションの10分の1ほどですが、第3図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。つまり、雲層上部での夜昼間対流は、安定成層大気での加熱によって励

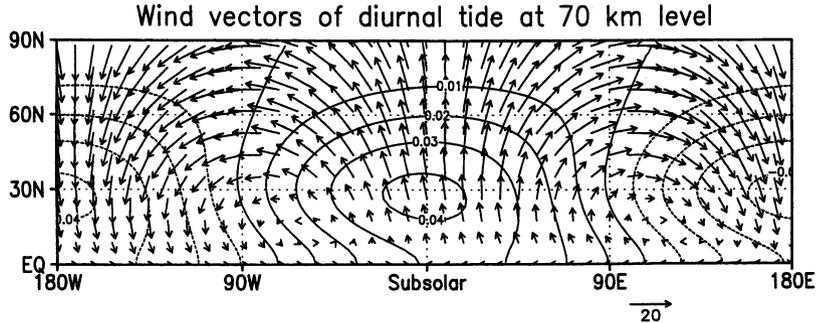
起される線型波動（実体はほぼ慣性重力波）によって表現されます。この結果を考慮しますと、昼側で観測された極向きの流れは、東西一様な子午面循環ではなく、夜昼間の加熱差によって励起された夜昼間対流の南北流に対応していると思われれます。従って、東西平均子午面循環があることは、昼側の南北風の観測結果では確認されないし、あったとしても、数 m/s 程度の南北流速の子午面循環と思われれます。

5. スーパー・ローテーションのメカニズム

それでは、どのようにして高速の東西流は形成されるのでしょうか。具体的には、スーパー・ローテーションに伴う角運動量を、どこから持ってくるのでしょうか。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、その発見以来、議論されている大問題です。

これについては、流体力学的にも興味深い色々の説が提案されていますが、簡単には説明できない面もありますので、松田 (2000) を参照していただきたいと思います。現在でも、十分納得のいく説が無いのが現状です。いずれの説も、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す。私の理論 (Matsuda, 1980, 1982) では、子午面循環による運動量輸送効果と、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ます。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第3図のような夜昼間対流に相当する解の2つが共に、安定な定常解として得られます。勿論、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のですが、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す。

Yamamoto and Takahashi (2003) の大循環モデルでは、子午面循環がスーパー・ローテーション形成に重要な役割を演じています。



第6図 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。等高線は鉛直速度 (m/s) を表す。(Takagi and Matsuda, 2005)

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ります。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す。高木ほかの計算によると、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す (Takagi and Matsuda, 2005)。

6. 日本の金星探査計画

このように面白い理論が展開されているのに、未だに、スーパー・ローテーションの説明がついていないのは、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す。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も分かっていません。そこで、金星大気の観測が必要ということになります。現在、日本で金星探査計画が着々と進行しています。この探査衛星は、上に説明したスーパー・ローテーションを主要な目標とした気象衛星です。今まで外部からは観測されていなかった雲層内部や雲層以下の大気の動きをリモートセンシングにより観測しようという、画期的な観測計画です。この計画については今村ほか (2001) を参照して下さい。

7. 現段階での力学的諸考察

以上、私の過去の研究を中心に説明してきましたが、せっかくの機会ですから、現在の段階で金星の大気大循環についてどのようなことが力学的な問題となっており、解決すべき課題となっているのか、考察してみたいと思います。ここでは、特に今まで余り議論されていない問題を取り上げたいと思います。

7.1 大気の成層度

第1図に示されているように、金星の下層の温度減率は乾燥断熱減率(g/C_p)、つまり中立に近くなっています。放射平衡において、偶然、温度減率が乾燥断熱減率に極めて近くなるとは、考えられないので、(鉛直または水平)対流が生じていることは間違いないと思います。さらに、ソ連の探査機やパイオニア・ヴィーナスの探査機の観測によると、わずかに安定ということになっています。(夜側ではかなり安定だという説もあります。)

つまり、問題はまず、(放射平衡温度分布が不安定で、)鉛直対流が生じているのか、また、それが生じているとしたらどこで(昼側で、低緯度地方で?)生じているかが問題になると思います。次に、この安定性が何によってつくられているのかが、問題になります。鉛直対流の作用のみでは、不安定成層が中立成層になるだけで、安定にはなりません。そこで、Utsunomiya and Matsuda (1998)は大循環(夜昼間対流)による上方への熱移流効果により、観測されているような安定成層ができないか調べましたが、上方への熱輸送量が小さすぎて、期待された成層度はできませんでした。ただし、この研究の数値モデルには、放射過程が正確に入っていないので、今後、放射過程と鉛直対流と水平対流の相互作用を正確に検討する必要があると思います。水平対流の効果によって安定成層ができ、鉛直対流の発生が妨げられる可能性も考えられます。そういった意味でも、観測とならんで大気大循環モデルを、金星大気に対して開発して行くことは今後重要だと思います。

7.2 子午面循環は実在するのか

第5図に金星大気における子午面循環の予想図が示されていますが、子午面循環の存在を直接示す観測結果は、今のところ無いようです。雲層上部の極向きの南北流が子午面循環の上半部の流れを意味するのではないかと、思われた時期もありますが、上に述べたように、この南北流は熱潮汐波の1日潮の昼側の部分と解釈されていて、本当に、東西平均子午面循環がある証拠にはなりません。南北熱輸送のためにも子午面循環は必要と思われるが、金星の雲層においても傾圧不安定波が成長する可能性があり(Young *et al.*, 1984)、この意味でも子午面循環がどのような形態をとるか興味深いところです。今後、観測と大循環モデルの双方から、各層での子午面循環の有無と強度を確定する必要があります。

特に、大気下層(地面付近)では水平温度差が数度以下と言われているので、大気大循環による熱輸送が重要なはずですが、子午面循環が卓越するのか、夜昼間循環が卓越するのか、興味深いところです。

7.3 西風は吹いていないのか

今まで、金星の全ての場所、高度で、金星の自転と同じ方向の東風のみが観測されていて、西風が観測されていません。地球の大気大循環論でよく議論されるように、地表面付近で東風と西風(異なった緯度に)共存していないと、大気全体の(角)運動量バランスが成り立たなくなります。東風だけだと、地面の摩擦により大気全体の西向き運動量が減少してしまい、定常状態を保てません。

まだ観測されていないが、地面付近で西風が吹いている所があるのか、特別のメカニズムでも働いているのか、不明です。

7.4 角運動量の水平輸送

もし雲層に子午面循環が存在するとしたら、雲層上部では極向きの流れがあり、それにより高速の西向きの流れが(従って西向きの角運動量が)極方向に移流されます。定常状態を維持するためには、ある程度、この角運動量を赤道方向に戻す必要があります。このメカニズムについては、(子午面循環によるスーパ・ローテーションの生成に関連して、)色々な人が議論しているので、ここでは省略したいと思います。一例をあげれば、伊賀晋一さんが、浅水方程式での不安定モードが赤道向きの運動量輸送をする性質があることを示しています(Iga and Matsuda, 2005)。

8. 高度別の大循環の見積もり

松田(2000)において、金星大気の大循環のおおよその見積もりがなされています。これは、Golitsyn (1970)の次元解析的な議論に基づいて、金星大気をひとまとめにして、(子午面)循環の風速や水平方向の温度差を見積もったものです。(Golitsyn (1970)の議論についても、松田(2000)を参照して下さい。)しかし、金星は鉛直方向に大気が厚い上に、(大部分の太陽光が地面で吸収される地球と異なり、)太陽光は大部分が雲層で吸収され、残りのわずかな量が地面付近で吸収されます。そこで、ここでは金星大気下層(35 km以下)と雲層(50 km以上)に分けて、見積もりを行ってみたいと思います。

第2表に、左から単位面積当たりの大気量(M)、単位面積当たりの吸収エネルギー($F(1-A)/4$)、単位質

第2表 金星大気の諸量の見積もり。 F は太陽光フラックス, A はアルベード, C_p は空気の定圧比熱, T_e は有効放射温度, σ はシュテファン・ボルツマン定数, a は惑星半径。

	単位面積当りの 大気量 M (kg/m ²)	単位面積当りの 吸収エネルギー $F(1-A)/4$ (J/m ² s)	単位質量当りの 吸収エネルギー Q (J/kg s)	輻射の緩和時間 $C_p M T_e / \sigma T_e^4$ (日)	一昼夜 (日)	代表的 温度差 ΔT (K)	代表的 風速 V (m/s)	子午面循環 の1周時間 $\pi a / V$ (日)
火星	2×10^2	10^2	8×10^{-1}	3	1	70	50	3
地球	10^4	2×10^2	2×10^{-2}	100	1	20	10	20
金星	10^6	10^2	10^{-4}	2万	117	1	0.7	300
下層	10^6	3×10^1	3×10^{-5}	7万	117	0.4	0.4	600
雲層	10^4	10^2	10^{-2}	200	117	10	7	30

量当たりの吸収エネルギー (Q)、放射の緩和時間が示されています。放射の緩和時間は大気を持っている熱エネルギーを単位面積当たりの吸収エネルギーで割ったものです。つまり、放射の緩和時間は、現在大気を持っている熱エネルギーを与えられた吸収エネルギーにより0から構築するのに要する時間です。次の欄には一昼夜の時間、その次には一昼夜と放射の緩和時間との比が示されています。

以上の欄を見ると、金星全体と金星下層の放射の緩和時間が数万日と、非常に長いことが分かります。これは金星の大気量が非常に多いことによっています。金星下層大気に関しては、太陽光吸収が少ないことにより、金星全体よりもさらに放射の緩和時間が長くなっています。それと比べると、金星の117日という(地球に比べて)長い一昼夜も短く、夜昼間の温度変化が下層ではかなり小さいことが示唆されます。それに対して、雲層では放射の緩和時間は200日程度で、地球並であり、一昼夜との比は、地球よりも火星に近いことが分かります。(実際には、高速東西流が吹いているので、事情が違ってきますが。)

次に、Golitsynの理論を使って循環(水平対流)に伴う水平風速と水平方向の温度差を見積もってみます。その結果が第2表の右の方に書いてあります。これによると、金星下層の水平温度差は1K以下となり、風速も1m/s以下になります。子午面循環の一周時間は600日程度になり、それ自身は大きいですが、放射の緩和時間の1/100です。つまり、金星下層では、圧倒的に循環による熱輸送が卓越し、温度分布が局所的放射平衡から大幅にずれること、つまりほぼ等温になることが予想されます。この予想は、金星の地表付近では水平方向の温度差が数度以下という観測結果と一致します。

一方、雲層に関しては、放射の緩和時間が200日と短

くなり、下層より夜昼間の温度コントラストは重要になるはずですが、Golitsynの理論によると、水平温度差は10K程度、風速は10m/s以下ということになります。子午面循環の一周時間は放射の緩和時間の1/10程度で、局所的放射平衡からは大幅にずれますが、下層ほどではありません。

高度130km以上の熱圏に関しても同じような見積もりをしてみました。大気が薄くなり(黒体放射からかけ離れてくるので、)放射の緩和時間の見積もりなどに不確実性が含まれるので、表には書き入れませんが、大気が非常に薄くなるので、放射の緩和時間が1日以下になります。水平温度差は数百K、風速も数百m/sで、循環の一周時間は1日程度となりました。今度は放射の緩和時間の方が一周時間より短くなり、局所的放射平衡に近づきます。温度差は極赤道間よりも夜昼間の方が大きくなり、循環も夜昼間循環になると思われます。

以上の議論を整理して、大気の種類を試みてみたいと思います。

$$\tau_{\text{rad}} (\text{放射の緩和時間}) = C_p M T_e / \sigma T_e^4 \propto M$$

なので、放射の緩和時間は単純に大気量 M に比例します。一方、循環(水平対流)に伴う風速 V は、大気量が多くなると小さくなりますが、Golitsynの理論によると M ではなく、 M の平方根に反比例します。つまり、

$$\tau_{\text{dyn}} (\text{力学の緩和時間}) = \pi a / V \propto \sqrt{M}$$

従って、金星下層大気のように厚い大気では M が大きいので、放射の緩和時間の方が、力学的な緩和時間(循環の一周時間)より遙かに大きくなり、ほぼ等温な大気が実現されると思われます。それに対して、金星でも上層の大気や火星大気は薄いため、 M が小さく、

放射の緩和時間は力学的緩和時間と比べて、同程度かまたは小さくなります。その結果、局所的放射平衡に近く、水平方向の温度差は大きくなります。地球や金星の雲層は、両者の中間です。放射の緩和時間の方が長い、極端に差があるわけではありません。

要するに、金星の下層大気が等温に近いという結果は、大気が非常に厚いことから理解できる、ということです。

最後に、以上の見積もりから得られた金星の下層と雲層の水平温度差を南北温度差と解釈して、それを与えて、さらに東西風に働く遠心力とコリオリ力、それと南北方向の気圧傾度力とのバランス（傾度風バランス）を仮定して、地面から東西風を積み上げて見ました。実際に計算してみると、高度70 kmで100 m/s近い風速が得られました。勿論、既に述べたように、この東西風の運動量の由来が問題なわけですが、この結果は意味が無いわけではないと思います。水平対流（子午面循環）の効果として極・赤道間の温度差が決まり、それに傾度風バランスするように「傾度風調節」が行われて、東西風が吹くと考えてもある程度よいということを示唆しているからです。

9. おわりに

2節でも述べたように、私は東大大学院の修士課程において松野太郎先生の指導の下で、金星の放射対流平衡の計算を行いました。さらに、博士課程でスーパ・ローテーション（4日循環）の研究に取り組みましたが、その成果が私の博士論文です。この論文はスーパ・ローテーションのメカニズム論と大循環の分類を統合した研究ですが、それ以外にも、（流体力学の）非線型問題、特に複数の定常解に対する関心という隠されたモチーフが伏在しています。従って、大変分りにくいので、上でもその一部にごく、簡単に触れただけです。このモチーフはMatsuda (1983)において、分岐点の対称性による分類という形で展開されました。Matsuda (1987)はその応用です。これらについては、松田・余田 (1985)と松田 (2000)の解説を参照して下さい。

これらは私の院生時代及びその直後においてなされた研究です。このような研究ができたのは、学部学生時代以来の松野太郎先生のご指導の成果と思います。岸保勘三郎先生、廣田 勇先生、田中 浩先生には、研究に関心を持っていただいただけでなく、励ましの言葉を掛けていただき、大変、元気付けられました。

木村龍治先生には、博士論文の主査になっていただいただけではなく、貴重なコメントを頂きました。また、これらの研究に多大なご理解を持っていただき、色々な意味でご支援をいただいた瓜生道也先生が既におられないのは、本当に残念です。

私自身は大学院を修了してから、教育畑の仕事にずっと就いていたので、教育業務に専念してきました。私としては若い頃は研究の方に向いていたのだと思いますが、そういう機会はありませんでした。ただ、気象大学校や東京大学理学系に在職中は、優秀な指導学生に恵まれたので、いろいろなテーマに関して共同研究を行うことができました。彼らとした研究の一部（金星に関する研究）については、上にも述べました。

現在、金星探査計画が進行しており、若い人たちを中心に金星大気の研究の機運が高まっています。今回、堀内賞を受賞できたのも、このような流れのお陰だと思います。名前はあげませんが、関係者に深く感謝する次第です。

最後に、この原稿に親切なコメントを頂いた編集委員の大淵さんと匿名の査読者にお礼を申し上げます。

参考文献

- Golitsyn, G. S., 1970: A similarity approach to the general circulation of planetary atmospheres, *Icarus*, **13**, 1-24.
- Iga S. and Y. Matsuda, 2005: Shear instability in a shallow water model with implications for the Venus atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, in press.
- 今村 剛, 松田佳久, 中村正人, 山中大学, 2001: 金星探査計画グループ, 金星大気探査計画について, *天気*, **48**, 499-504.
- 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.
- Matsuda, Y., 1983: Classification of critical points and symmetry-breaking in fluid phenomena and its application to dynamic meteorology, *J. Meteor. Soc. Japan*, **61**, 771-788.
- Matsuda, Y., 1987: Further study on the structure of critical point in fluid systems—Effects of disturbance on the bifurcation point, *J. Meteor. Soc. Japan*, **65**, 1-11.

- 松田佳久, 2000 : 惑星気象学, 東京大学出版会, 204pp.
- Matsuda, Y. and T. Matsuno, 1978 : Radiative-convective equilibrium of the Venusian atmosphere, *J. Meteor. Soc. Japan*, **56**, 1-18.
- 松田佳久, 余田成男, 1985 : 気象とカタストロフィー気象学における解の多重性, 気象研究ノート, (151), 1-145.
- Pollack, J. B., O. B. Toon and R. Boese, 1980 : Greenhouse models of Venus' high surface temperature, as constrained by Pioneer Venus measurements, *J. Geophys. Res.*, **85**, 8223-8231.
- 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.
- Schubert, G., 1983 : General circulation and the dynamical state of the Venus atmosphere, "Venus", The University of Arizona Press, 681-765.
- Seiff, A., 1983 : Thermal structure of the atmosphere of Venus, "Venus", The University of Arizona Press, 215-279.
- Takagi M. and Matsuda Y., 2005 : Sensitivity of thermal tides in the Venus atmosphere to basic zonal flow and Newtonian cooling, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L02203, doi : 10.1029/2004GL020060, accepted.
- Tomasko, M. G., L. R. Doose, P. H. Smith and A. P. Odell, 1980 : Measurements of the flux of sunlight in the atmosphere of Venus, *J. Geophys. Res.*, **85**, 8167-8186.
- Utsunomiya, T. and Y. Matsuda, 1998 : The linear response of a slowly-rotating atmosphere to mobil heating : Numerical experiments of relevance to the Venusian atmosphere, *J. Meteor. Soc. Japan*, **76**, 783-797.
- 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., H. Houben and L. Pfister, 1984 : Baroclinic instability in the Venus atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, **41**, 2310-2333.

Superrotation of Venus Atmosphere

Yoshihisa MATSUDA

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

(Received 16 August 2004 ; Accepted 1 April 2005)
