

金星の気象学と日本の金星探査計画

松田佳久（東京大学・理学系研究科）

1. はじめに

金星大気において、どのような現象が発見されているか、また、金星気象学において何が問題となっているかを、気象学の大気大循環論の課題一般と共に説明する。最後に、日本の金星探査計画について説明する。

金星はその半径（6050 km）など、固体部分に関しては地球と類似していることがよく言われているが、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地球よりも大きい。しかし、金星のアルベドは0.78と地球の値（0.3）よりかなり大きく、その結果、金星の有効放射温度は224 Kとなり、地球の255 Kより小さくなっている。

金星の自転周期は243日（地球日、以下同様）と、地球や火星（約1日）に比べて非常に長い。公転周期は225日であるが、自転と公転が逆向きなので、1太陽日が117日となっている。これも、地球や火星と比べると、非常に長い。

金星の地表面気圧は92気圧もあり、大気量が非常に多いことが分かる。この大気の97%はCO₂から成っている。

2. 金星大気の鉛直構造

金星大気の鉛直構造において見られる重要な特徴が2つある（図1参照）。1つは約45 kmから70 kmの高さに濃硫酸からなる雲が存在することである。この雲は地球の雲と異なり、全球を完全に覆っている。その結果、外部からの下層大気の観測が大変困難になっている。もう1つの重要な特徴は、図1に示されているように、下層大気が非常に高温になっていることである。地表面温度が730 Kにも達している。この原因は温室効果であると考えられている。地球大気ではごく微量しか含まれていない温室効果気体であるCO₂が膨大な金星大気の主成分を成していることが、温室効果にとって大変有利な点である。しかし、温室効果が働くためには、太陽光（の一部）が厚い大気を通して地表まで到達していることが、大前提である。金星では、太陽光はどの高度で吸収されているのだろうか。今までの探査衛星の観測によると、大部分が雲層で吸収され、地表で吸収されるのは、全吸収量の十数%でしかない。このわずかなエネルギー量をもとにして、高い地表面温度が維持されていることは、地球などと比べものにならない位、効果的に温室効果が働いていることを意味する。

次に、金星の大気大循環がどうなっているかを説明したいが、その前に地球の大気大

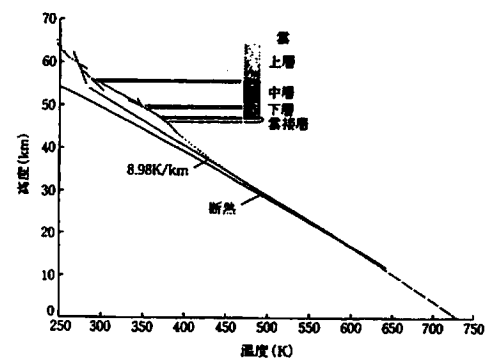


図1 金星大気の鉛直構造 (Seiff, 1983)
温度分布と雲層の範囲が示されている。

循環の特徴を見ておきたい。

3. 地球と火星の大気大循環

地球の対流圏の（東西方向に平均した）子午面循環の様相が図2に示されている。半球に3つの循環が存在していることが分かる。低緯度の循環をハドレー循環、中緯度の循環をフェレル循環、極地方の循環を極循環という。ハドレー循環と極循環は、温度の高い低緯度の方で上昇し、温度の低い高緯度で下降する直接循環であるが、フェレル循環は反対方向に回転する間接循環である。この子午面循環の分布と関連して、東西風が分布している。対流圏では熱帯地方の地表面付近で東風が吹いているが、それ以外はだいたい西風が卓越している。特に、中緯度では西風が高さと共に強くなり、対流圏界面で平均30 m/sにも達する。なぜこのような3細胞循環や東西風速分布が地球の対流圏で現われるのか、それを回転系の流体力学から説明するのが、大気大循環の問題である。このような地球の大気大循環の形成に関しては、地球の自転の力学的効果（コリオリ力）が重要であることが、よく知られている。

火星の自転周期も地球と同様、約1日であることは既に述べた。とすると、火星の大気大循環でも自転効果が重要であり、地球と同じような大循環が形成されているのだろうか。火星の子午面循環の様相を図3に示した。但し、これは観測結果ではなく、大気大循環モデル（GCM）の結果である。これを見ると、北半球が夏の場合でも、冬の場合でも全球で1つのセルが卓越しており、半球に3つもセルがある地球の対流圏と大きく異なっている。但し、この子午面循環は南緯50度より北側にはほぼ限定されている。子午面内の温度分布は、観測によると冬半球の中高緯度では南北温度傾度が非常に大きいですが、それ以外ではゆるやかである。その南北温度傾度の大きな所で、西風が高さと共に増大している。20~30 kmの高さで100 m/sを越えている。

このように、自転周期がほとんど同じなのにもかかわらず、大気大循環の様相が地球と火星では異なっている。但し、東西方向に平均した子午面内の分布を上で検討したのは、大雑把にいて、地球や火星の大気大循環が東西方向に一様性を持っているからである。この原因は、地球と火星の速い自転が太陽光の加熱分布を東西に均すという効果と既に述べた力学的効果の結果である。

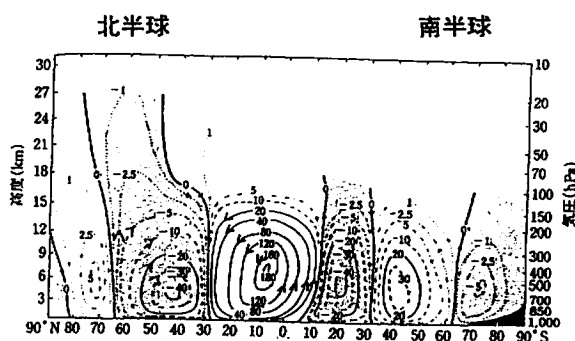


図2 地球の対流圏の子午面循環
北半球が冬の場合が示されている。

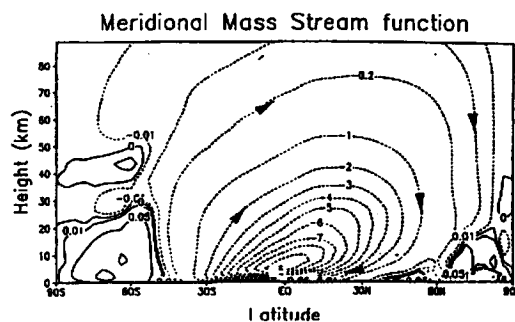


図3 火星の対流圏の子午面循環
北半球が冬の場合が示されている。
Forget et al. (1999)の計算結果。

4. 金星の大気大循環

それでは、金星の大気大循環はどうなっているのだろうか。既に述べたように、金星は自転周期が243日、1昼夜が117日と非常に長い。従って、地球や火星と異なって、夜昼間対流の卓越が予想される。つまり、図4に示されているような、太陽直下で空気が加熱されて上昇し、夜側へ流れ、そこで下降するような循環が生ずると考えられる。もしそうならば、東西流が卓越している地球や火星の大気大循環とかなり異なる大循環が卓越することになる。

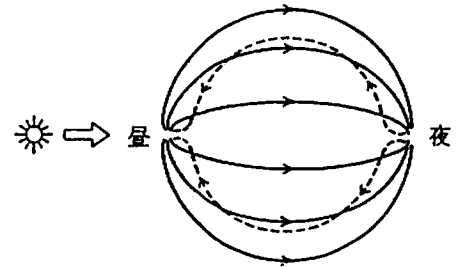


図4 夜昼間対流の模式図

しかし、このような夜昼間対流は観測されていない。観測された卓越風は、やはり東西流であった。色々の地点に降下した金星探査衛星の風速の測定結果が図5に示されている。これによると、金星の自転と同じ向きである東風が70 km位まで高さと共に増大している。60~70 kmで100 m/sに達している場合もある。100 m/sというだけでは、火星の西風の最大よりも遅いし、地球の西風の一部のジェット気流はその位の大きさになることもある。しかし、金星の固体部分の自転は非常に遅く、赤道でも1.6 m/sなので、それと比べると観測された風速は60倍に達する。つまり、絶対系から見て大気が固体部分の60倍の速さで回転していることになる。これが金星大気のスーパー・ローテーションと言われているものである。因に、絶対系から見て、地球の自転速度は赤道で460 m/sである。つまり、平均30 m/sの西風はこれの1割にも達していない。

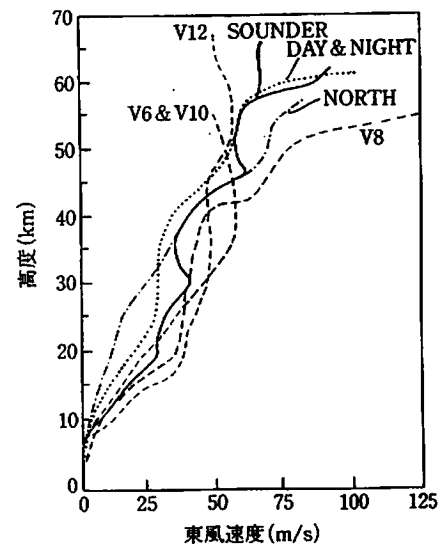


図5 探査衛星により測定された風速の鉛直分布 (Schubert, 1983)
V8はヴェネラ8号を意味する。ヴェネラ以外はパイオニア・ヴィーナスの探査機。

大気中には何らかの粘性があるので、特別なメカニズムが働かない限り、図5に示されているような風速分布は均されてしまい、最終的には絶対系から見て、固体部分の回転速度と大差ない風速に落ち着くはずである。従って、スーパー・ローテーションの問題点は、先ず第1に、上層の高速東西流を維持するメカニズムは何か、また、この大気の角運動量はどこから来たか、ということである。最初の予想の観点からは、なぜ夜昼間対流が卓越しないのか、という問い方もできよう。

5. 子午面内のモーメント・バランス

スーパー・ローテーションのメカニズムの説明に入る前に、子午面内のモーメントのバランスという問題を考えてみよう。地球の対流圏や金星の雲層では、低緯度の方が高

緯度よりも温度が高い。その結果、相対的に低緯度では正の浮力、高緯度では負の浮力が働き、図6 aに示されているような向きのモーメントが子午面内で働く。このモーメントをどのような逆方向のモーメントによって打ち消して、定常状態を実現するかという問題が、子午面内のモーメント・バランスの問題である。

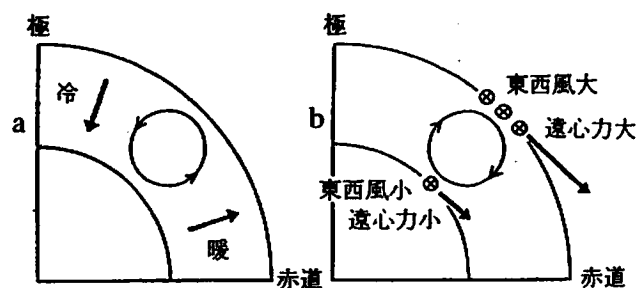


図6 子午面内のモーメント・バランスの模式図

これに対する、最も簡単な答えは、

浮力のモーメントの向きに回転する子午面循環（直接循環）が作られ、それに働く逆方向の摩擦によるモーメントが、浮力によるモーメントと釣り合う、というものである。上に述べた地球のハドレー循環はこの場合に相当する。しかし、これ以外の大気の運動によっても、定常状態に達することが出来る。それは図6 bに示されているように、高かさと共に東西風が増大するような状態である。絶対系から見て、極の周りを回転する東西流には遠心力が働く。風速が大きくなれば、遠心力も大きくなる。図6 bに示されているような風速分布の場合、浮力によるモーメントと逆方向のモーメントが働き、両者が釣り合うことが出来る。

大気に働く遠心力は、絶対系から見た風速の2乗に比例するので、

$$(U_0 + U)^2 = U_0^2 + 2 U_0 U + U^2$$

に比例する。ここで、 U_0 は固体部分の自転速度であり、 U は大気の固体部分に対する相対的な回転速度である。モーメントはこれを高さで微分したものに比例するが、ここで考えている大気層が惑星半径に比べて大変薄いので（図6ではわざと厚く描いてある）、 U_0 の微分は無視出来、

$$\frac{\partial(U_0 + U)^2}{\partial z} = 2U_0 \frac{\partial U}{\partial z} + 2U \frac{\partial U}{\partial z}$$

に比例する。地球の場合、 $U_0 = 460 \text{ m/s}$ 、 U (の最大値) $\approx 30 \text{ m/s}$ であるが、金星の場合、 $U_0 = 1.6 \text{ m/s}$ 、 U (の最大値) $\approx 100 \text{ m/s}$ である。従って、地球の場合は第1項が卓越して、浮力によるモーメントと釣り合い（温度風バランス）、金星の場合は第2項が卓越して、浮力によるモーメントと釣り合う。以上の考察から、地球大気の場合、顕著なスーパー・ローテーションが現れ得ないことが理解される。顕著なスーパー・ローテーションと言えるのは、 U が少なくとも U_0 と同程度位になっている場合であろう。そうすると、上の式の右辺は第1項だけでも、現在の値の10倍以上になってしまう。勿論、南北温度差が現在の10倍つまり、数百度になればバランス出来る訳であるが、傾圧不安定波（温帯低気圧）による南北熱輸送もあり、この南北温度差は現実的ではな

い。

6. 金星の子午面循環と熱潮汐波

以上の考察により、もし観測されているような高速東西風があれば、南北温度差によるモーメントと釣り合えることが分かったが、問題なのはこのような鉛直方向にシアを持つ高速東西風を力学的にどのように作るか、ということである。これに関しては、今まで多くの説が提案されてきたが、まだよく分かっていないのが現状である。提案された色々な説を文献(1)で詳しく解説してあるので、ここではその説明を省略したい。ただ、最も有力な説として、子午面循環による角運動量

の上方輸送というメカニズムがある。この説の根拠として、雲層での子午面循環の想定がある。雲頂高度(65~70 km)で、東西流速の1/10程度の大きさの極向きの流れが紫外線によって観測されており、これが子午面循環の上部と解釈されてきた。ところが、最近、高木(2)が雲層の太陽光吸収によって励起される波(熱潮汐波)を詳しく計算したところ、その1日周期の成分(1日潮)の速度場が雲頂(高度65 km)で図7のようになることが分かった。この結果によると、昼側で10 m/s程度の極向きの南北風があることが分かる。紫外線観測は昼側のみなので、子午面循環に伴う南北流と解釈したものには、1日潮の成分が含まれている可能性がある。従って、本当の東西平均子午面循環の強度を求めるためには、夜側の観測が必要になる。雲層では勿論、他の層でも子午面循環の存在及びその強度は、スーパー・ローテーションの力学を考える上において基本的な量なので、その観測が是非必要とされている。

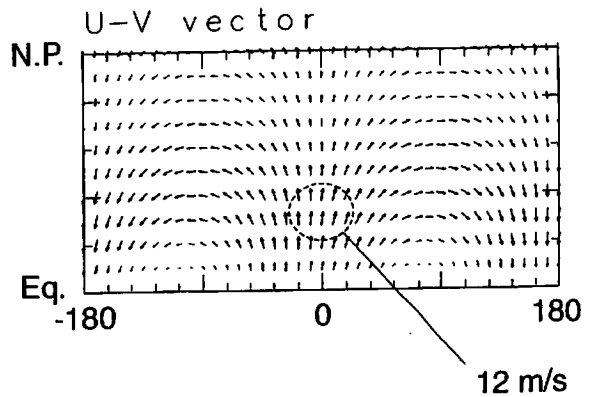


図7 金星の熱潮汐波(1日潮)の速度分布(65 km) 高木(2001)による。

7. 日本の金星探査計画

以上で説明したように、スーパー・ローテーションを生成・維持するメカニズムは現在においても、よくわかっていない。その根本原因は、金星大気の観測が絶対的に不足していることである。しかし、下降する探査機によって観測したのでは、ある一点での風速などの鉛直分布が分かるだけである。一方、上空からのリモート・センシングでは、厚い雲により遮られ雲中や雲層以下の観測ができない。金星大気の観測には、このような困難が存在していた。しかし、いくつかの特殊な近赤外の波長では、大気層の下部や地表まで透視できることが知られてきた。しかも、波長により見える高度が異なっている。これを利用して、

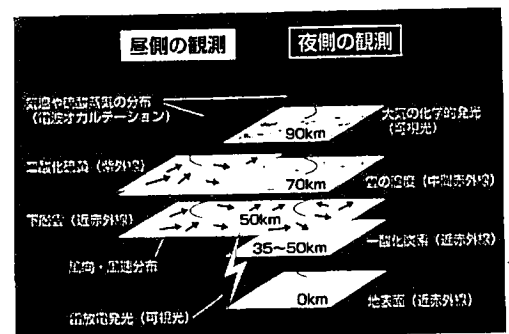


図8 金星探査衛星の観測の概要 色々な波長で観測することにより、大気の3次元構造を明らかにする。

金星周回軌道の衛星から金星大気の3次元構造を明らかにしようという画期的な試みが、日本の金星探査計画として進められている（図8参照）。宇宙開発委員会で高い評価を得て、現在、概算要求の段階である。

文 献

- (1) 松田佳久、「惑星気象学」、東京大学出版会、2000年
- (2) 高木征弘、金星大気における熱潮汐波と山岳波、東京大学博士論文、2001年
- (3) 松田佳久、今村剛、金星大気の謎にせまる日本の金星探査計画、科学、Vol. 71, No. 9, 1162-1164, 2001