

論文の内容の要旨

論文題目 Thermal Tides and Topographic Waves in the
Atmosphere of Venus
(金星大気における熱潮汐波と山岳波)

氏名 高木征弘

金星の自転周期は 243 日で非常に長く一太陽日も 117 日である。このため大気の運動に対して自転や太陽熱源移動の効果は第一近似としては無視できるものと考えられ、大気大循環として昼側で大気が加熱されて上昇し夜側で冷却されて下降するような、いわゆる夜昼間対流が卓越しているものと予想された。ところが探査機などによる観測から金星大気中では自転を追い越す向きの高速東西流が卓越していることが明らかになった。高速東西流の風速は地表から高さとともにほぼ線型に増大し、高度 65 km 付近で約 100 m/s に達する。これは金星の自転速度の 60 倍にも相当するスーパーローテーションである。高速東西流は鉛直方向だけでなく南北方向にも広がっており、時間的に変動して剛体回転に近い状態や中緯度ジェットが顕著な状態を示すことが知られている。

このような大気スーパーローテーションの生成・維持メカニズムについて、これまでに多くの研究がなされたが未だ不明の点も多く首尾一貫した理論はないのが現状である。しかしながら興味深い幾つかの説が提出されている。その一つが熱潮汐波に着目したメカニズムである。熱潮汐波とは太陽加熱によって励起される大気波動のうち、太陽からみて定常なものを指す。Fels and Lindzen (1973) はこの波の伝播に伴って運動量が輸送されることに注目し、波が励起される領域で太陽の動きと逆方向の平均流が加速されることを示した。これをスーパーローテーションの生成と解釈する訳である。金星大気中の高度 45 ~ 70 km の領域には硫酸の液滴からなる雲層が全球に渡って存在し入射太陽光を効率良く吸収しているため、ここで励起される熱潮汐波がスーパーローテーションを生成・維持しているのではないかと考えられたのである。時間発展モデルを用いた研究では熱潮汐波の効果によって 10 m/s 程度の平均流加速が得られることが示されている (Baker and Leovy, 1984)。しかしながら、計算に用いた初期値や基本場が非現実的であったことや、時間発展の結果として得られた平均東西流の構造が観測事実を再現しているとは言い難

いといった問題点があり、スーパーローテーションに対する熱潮汐波の役割が十分に明らかにされた訳ではない。また、波の鉛直構造や波に伴う風速場といった熱潮汐波自体に関する考察もあまりなされておらず、熱潮汐波に関しては基礎的な研究も十分とは言えない段階にある。そこで本研究では、観測に基づく現実的な基本場を用いて熱潮汐波を計算しその構造を詳しく調べる。次に、得られた風速分布を基に運動量輸送を計算し、熱潮汐波による平均流加速の評価を行なう。これによって現実の金星大気中での熱潮汐波の役割をある程度定量的に見積もることが可能となる。山岳波についても同様の検討を行なうこととする。

基礎方程式は $\log p$ 座標系を用いた球面上の運動方程式と静水圧平衡の式、熱力学の式、連続の式である。これらの式を基本場の周りで線型化する。水平方向には赤道対称性を仮定した球面調和関数の 15 モードで展開し、鉛直方向には 250 層を取って差分化する。鉛直方向の領域は地表から高度 120 km までとする。境界条件は上下両端で $w' = 0$ である。但し、山岳波の計算においては下端で $w'_B = \bar{u}_B \text{grad} h$ を与えた。ここで h は地形を表すものとする。強制項として与えた太陽光フラックスの鉛直構造は Pioneer Venus の観測 (Tomasko et al., 1980) を参照した (図 1)。太陽光加熱は雲層上部の高度 60 km を中心とした分布になっている。大気成層度は、Venera の観測や Magellan の radio occultation による最近の結果 (Hinson and Jenkins, 1995) を参照した。平均東西流としては剛体回転の場合と中緯度ジェットが存在する場合の二通りを与えた。いずれの場合も鉛直シアは Venera や Pioneer Venus の観測と矛盾しないものである。温度場は cyclostrophic balance の関係を用いて平均東西流分布とバランスするように決定した。モデル大気上端における波の人工的な反射を抑えるため Newton 冷却と Rayleigh 摩擦を用いた。これらの値については Pechmann and Ingersoll (1984) を参考にした。高度 100 km での緩和時間は約 1 日である。

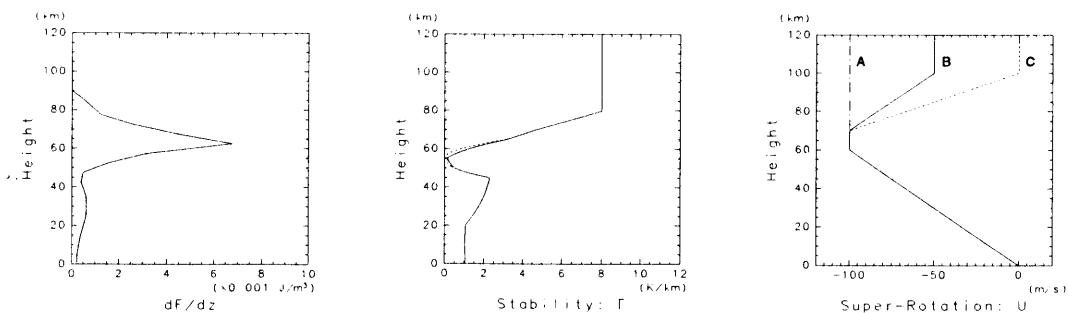


図 1: 基本場の鉛直構造 (左から太陽光吸収率、大気成層度、平均東西流)

熱潮汐波の計算は太陽光加熱の東西波数 1 と 2 の成分に対して行なった。東西波数 1 の熱潮汐波を一日潮、2 を半日潮という。以下、それぞれの結果を示す。

一日潮の鉛直構造を図 2 に示す。鉛直波長は 5 km、波に伴う東西流速は 5 m/s、温度偏差は 10 K 程度である。高度 80 km 以上で波は急速に減衰しそれより上層にはほとんど伝播しない。一方、温度偏差に $\sqrt{\rho}$ をかけた量でみると、一日潮は下方に伝播し高度 20 km 付近で減衰していることがわかる。これまでの研究では雲層内部の大気成層度の小さい領域を波は伝播できないと考えられてきたが、必ずしもそうではないことが示されている。南北流の鉛直構造の高度 60 ~ 80 km の領域にみられる 10 m/s 程度の極向きの流れは夜昼間対流の一部と考えられる。

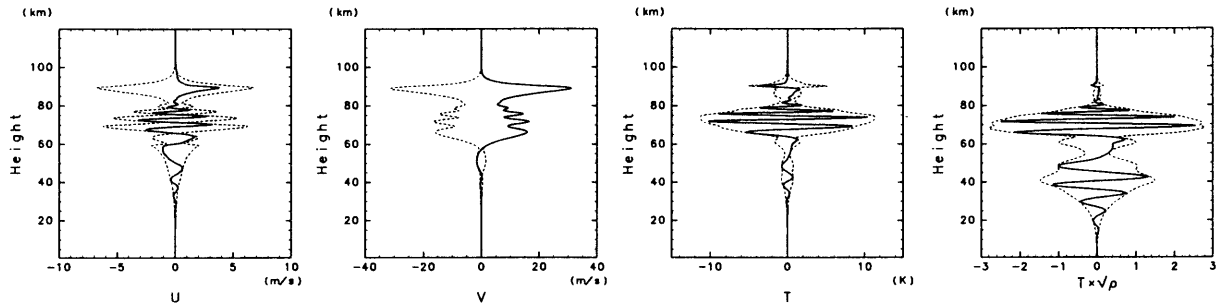


図 2: 一日潮の鉛直構造 (左から東西流、南北流、温度偏差、温度偏差 $\times \sqrt{\rho}$)

Rosow et al., (1990) は雲のトラッキングによって子午面循環に伴う南北流速を 10 m/s と推定したが、この値は夜昼間対流の影響を受けて過大評価になっている可能性がある。子午面循環を観測によって推定するためには東西波数 1 の夜昼間対流成分を分離することが必要不可欠である。図 3 に一日潮による平均流の加速・減速の分布を示す。加速・減速とも加熱域に集中し運動量の分配はその領域だけで起こるため、スーパーローテーションに対する一日潮の寄与は小さいと考えられる。

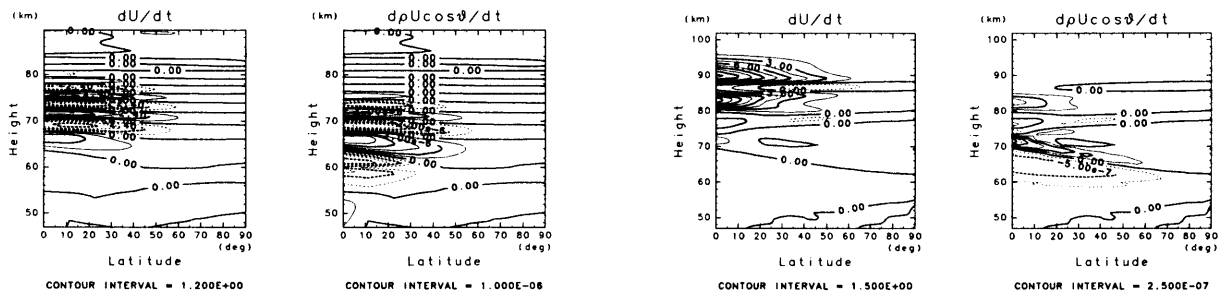


図 3: 熱潮汐波による平均流加速。左が一日潮、右が半日潮の場合で、それぞれについて一日当たりの加速度と角運動量の変化率を示す。

次に半日潮の鉛直構造を図 4 に示す。一日潮の場合と異なり、東西流、南北流、温度偏差とも

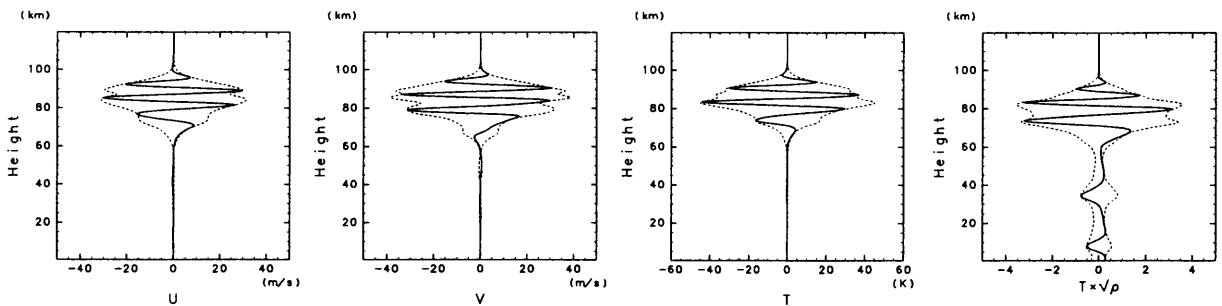


図 4: 半日潮の鉛直構造 (各パネルは図 2 と同様)

良く似た鉛直構造を示している。鉛直波長は一日潮より長く約 10 km である。太陽加熱の強度は一日潮より半日潮の方が小さいにも拘らず、半日潮に伴う水平流速は 15 m/s、温度偏差は 20 K と一日潮よりも大きな振幅になっている。これは半日潮が一日潮よりも上層まで鉛直伝播する

ためと考えられる。このような一日潮と半日潮の相違は WKB 近似を用いて評価した内部重力波の分散関係からある程度理解することが可能である。上層に伝播した半日潮は高度 80 ~ 100 km 付近で減衰し平均流を減速する (図 3)。減速の大きさは一日あたり 10 m/s 程度である。加熱域では平均流を加速するが、下層では密度が大きくなるため加速度自体は小さい。角運動量の変化率でみると高度 50 ~ 70 km の領域で平均流が加速されていることがわかる。このような運動量輸送は主に波に伴う東西流 u' と鉛直流 w' の相関 $\overline{u'w'}$ によってなされている。半日潮は上層だけでなく下層にも伝播し地表にまで到達する (図 4 の右のパネル)。これによって地表付近の東西平均流は減速されるため下層では東風が生じる可能性がある。この東風が地表との摩擦によって解消されるならば、半日潮は金星の固体部分から大気に西向き運動量を汲み上げることになりスーパーローテーションの生成・維持に重要な役割を持っている可能性がある。

太陽光は雲層ですべて吸収される訳ではなく 17 W/m^2 程度が地表面に到達する。これを考慮し太陽光の地表面加熱によって励起される一日潮と半日潮の計算も行なった。一日潮はほとんど鉛直伝播せず上層での振幅は非常に小さくなることが示された。雲層付近での現象やスーパーローテーションに対する寄与などはほとんど無視できると考えられる。これに対して半日潮は上層まで伝播し高度 100 km での東西風速は 5 ~ 10 m/s 程度になる。この波が減衰することによって一日あたり 0.1 m/s 程度の平均流減速が生じる。しかしながら、絶対値としては雲層付近で励起される半日潮の効果の方が大きく、地表面加熱によって励起される熱潮汐波のスーパーローテーションに対する寄与は小さいことが示された。

金星の大規模地形で励起される波の特性を調べるため、赤道を中心とした振幅を持つ理想的な地形を仮定し下端で励起される鉛直流速は東西波数に依らず一定とした。下端の東西風速は 1 m/s である。結果を図 5 に示す。東西波数 2 の波よりも波数 4, 8 の波の方が上層で大きな振幅

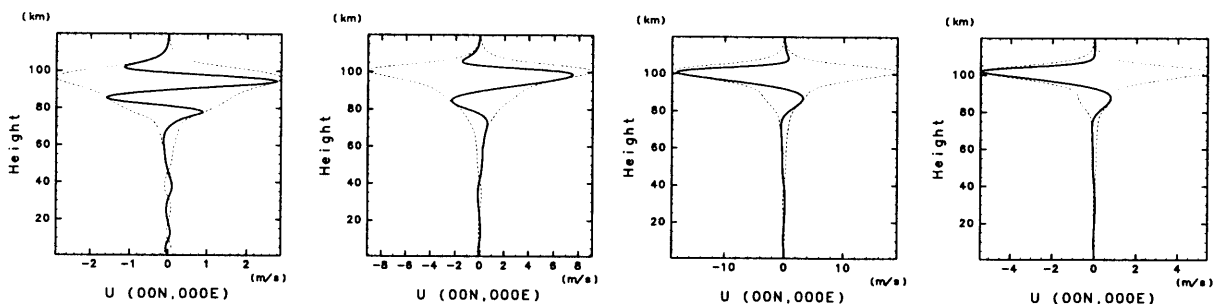


図 5: 山岳波に伴う東西風速の鉛直構造 (左から東西波数 2, 4, 8, 16)

を持っている。また東西波数 1 の波はほとんど上層に伝播しなかった。これは内部重力波の群速度が東西波数に比例して大きくなることと定性的に一致している。東西波数 16 の波は波数 8 の波とほとんど相違がないのは内部重力波の鉛直波数が東西波数が大きくなるに従って N/\bar{u} に漸近することと定性的に一致している。地形で励起された波は上層に効率良く伝播しそこで減衰して平均東西流を減速させる。高度 100 km で波が減衰しているのは人工的なダンピングのため、実際にはより上層にまで伝播しそこで平均流を減速するものと考えられる。金星の中間圏では夜昼間対流と平均東西流が交互に卓越する現象が知られており、以上の結果は鉛直伝播する熱潮汐波や山岳波が無視できない影響を持っている可能性のあることを示している。