

高速回転球殻中の対流の貫入距離と木星の平均帯状流生成

Penetration thickness of convection in rapidly rotating spherical shells and generation of mean zonal flow of Jupiter

竹広 真一[1]

Shin-ichi Takehiro[1]

[1] 九大・理・地惑

[1] Earth and Planetary Sci., Kyushu Univ.

高速回転する球殻内のテイラーコラム型対流の外側境界付近の安定成層への貫入の様子を調べた。

平面モデルを解析した結果から、安定成層へのコラムの特徴的な貫入距離がコリオリパラメーターと渦の水平スケールに比例し、安定成層内のブラントサイラ振動数に逆比例することが示される。

上層に安定成層を持つ基本場に対して回転球殻内の臨界対流の構造を計算し、成層安定度を変えたときの貫入距離の変化が平面モデルの結果と整合的であることを確かめた。

本研究で求められた貫入距離の表現から、木星大気に見られる平均帯状流を生成している深部の対流の水平スケールが 2000 km 以上であると予測される。

木星大気表面の縞状の帯状流分布の成因として考えられているメカニズムの一つに、木星大気深部のテイラーコラム型対流による説明がある。回転軸方向に伸びた 2 次元的な対流運動が外側境界の影響で傾くことにより、動径方向への運動量輸送が生じるといえる。ところが最近のガリレオ人工衛星の観測によると(Seiff et al, 1996), 5 bar から 16 bar にかけて安定成層が存在することが示唆されている。このような安定成層が存在すると、そこでは対流運動が抑えられるために上記のような運動量輸送による平均帯状流の生成が説明できなくなる可能性がある。この問題に対して Zhang and Schubert (1996, 1997) は上層に安定成層を持つような基本場に対しての回転球殻内の臨界対流の構造を求め、テイラーコラム型の対流が安定成層をたやすくつき抜けることを示し、安定成層が存在しても対流の運動量輸送でもって平均流を作ることが出来ると主張した。

しかしながら、Zhang and Schubert の仮定した基本場での上層の成層はそれほど安定度が強くはない。安定成層での特徴的なブラントサイラ振動数の大きさは慣性振動数に比較して小さな値となっている。対してガリレオ人工衛星の観測による温度傾度からはブラントサイラ振動数が 2 / 30 分程度と見積もられるので、木星の自転による慣性振動数 2 / 5 時間よりも 1 桁大きい。慣性周期に対するブラントサイラ振動数の比は、回転に対する成層の効果の強さを表すので、木星大気の状態は、Zhang and Schubert が示した計算結果の場合よりも成層の効果がより強いと考えられる。そこで本研究では、成層の安定度がより強い場合にテイラーコラム型対流がどの程度貫入するかを調べてみた。

まず、テイラーコラム型対流の貫入のモデルとして、半無限領域に広がった安定に成層しているブシネスク流体を考えた。系の回転軸は重力に対して傾いている。下面境界が球殻内の安定成層と不安定成層の境界面に対応している。内部のテイラーコラム型対流により引き起こされる渦を想定して下面境界にて渦運動を与え、安定成層内の流体がどのように応答するかを計算した。分散関係から鉛直方向への応答の典型的な貫入距離 d を見出すことが出来て、 $d=fL/N$ となる。ここで f はコリオリパラメーターの鉛直成分、 N はブラントサイラ振動数、 L は下面で与えた渦の水平スケールである。回転に対して成層が弱いと対流は成層に大きく貫入することになる。そのときの解は回転軸方向に伸びた構造に近づいていく。これはテイラーブラウドマンの定理の主張に対応している。逆に回転に対して成層が強くなると貫入距離は小さくなっていく。

次に、回転球殻内の臨界対流を計算して貫入距離の見積もりを確かめてみた。扱ったパラメーターは球殻の内外半径比が 0.4、テイラー数が 10000000000、ブラントサイラ数が 1 の場合である。基本場は球殻の内側 3/4 の領域に一樣内部熱源による熱伝導解の温度分布に従う不安定領域を、外側 1/4 の領域に温度傾度一定の安定成層を置いた。境界条件は応力なし、温度固定である。支配方程式と境界条件を水平方向に球面調和函数展開し、各東西波数に対しての線形方程式を構成した。南北波数は 41--53 まで、動径方向の格子点数は 24--32 である。動径方向の微分の評価にはチェビシェフ関数を用いている。外側領域の安定度を様々に変えて臨界対流を計算した。その結果、安定成層での温度傾度が 0(1) 程度では安定成層に深く貫入している流れ場が臨界対流の構造として得られた。しかしながら安定成層での温度傾度が 10 を越えると速度場の貫入が生じなくなっていく。貫入距離は簡単なモデルで導いた表現に整合的な結果となっている。

本研究の重要な結論は、回転球殻内のテイラーコラム型対流は必ずしも上層の安定成層に深く貫入するとは限らないということである。安定成層が強いほど、あるいは対流渦の水平スケールが小さいほど貫入距離は短くなる。この貫入距離の表現を用いることにより、平均帯状流を生成しているかも知れない木星深部の対流渦の水平ス

ケールに対して制限を与えることが出来る。 Seiff et al. (1996) にて見出された安定成層は 5bar から 16 bar の範囲に存在しており、100 km 程度の厚さである。この層をつき抜けるためには対流渦の水平スケールが 2000 km 以上でなければならないことになる。もしも Busse (1983) の平均帯状流生成のシナリオに従うならば、帯状流をつくり出す対流渦のスケールが帯状流の縞の間隔に対応することになり、その大きさは 6000km 程度と見積もられる。この程度の大きさの対流渦ならば安定成層をつき抜けて平均帯状流を生成することが可能であると予測される。