

木星の大気大循環

General circulation of Jovian atmosphere

林 祥介 [1]

Yoshi-Yuki Hayashi [1]

[1] 北大・理・地球惑星

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

<http://www.gfd-dennou.org/arch/shosuke/godo99/>

木星大気の大規模な運動構造(パターン形成)に関する力学的知見について紹介する。木星の顔の特徴づけているのはその帯状縞々な形状である。縞々なパターンの形成を説明する議論は、二つの相反しそうな枠組、すなわち、回転球殻対流および成層球面(乱流)運動を基点にしてそれぞれ展開されている。前者は系の回転の効果が流体の成層構造の形成に優先する極限での議論であり、後者は系の成層安定性が回転の效果に優先する極限での議論(地球の大気海洋的状况)である。いずれにせよ、議論されるべきパラメータ範囲が不明確であり、現在の縞々な構造の形成維持機構はよくわかっていないわけではない。

観測によれば観測によれば、木星大気は宇宙に向かって全球平均で 14 W/m^2 射出しているが、太陽放射の吸収は 8.5 W/m^2 でしかない。差引 5.5 W/m^2 が木星内部からの熱射出である。内部からの熱輸送が太陽からの熱吸収に比べて小さくないことに焦点をあてれば、木星の循環構造は本質的に木星流体層全層の循環構造としてとらえなければならなくなる。すなわちそれは地球中心核や恒星大気の議論でおなじみの球殻内の熱対流論である。一方、太陽から照らされる表層付近は、その熱供給によって下層に比べ本質的に安定成層し、したがって、運動構造もよい近似で独立に考えればよいはずである、という仮定に立てば、地球の大気や海洋でのそれと同じようなフレームワーク、球面上に拘束された準二次元渦運動、によって記述されることになる。木星表層の雲画像でおなじみの大小さまざまな渦運動はこのとらえ方を正当化しているものとも考えることもできる。

回転系の運動方程式に着目して分類すれば、重力(浮力)とコリオリ力のどちらが場を支配する主たる要因であるかの両極端の議論といえよう。回転球殻対流の通常の理論はレイリー数がさして大きくない範囲で展開されるので、対流層全層を通じてポテンシャル密度はほぼ一様であり重力は第0近似では作用しない(中立)。第0近似の議論は、密度一様の回転系での議論となり、したがって、その特徴としてテイラー柱の議論(運動は回転軸方向に一様である)がなり立つ。回転が粘性消散時間に比べ十分早ければ対流は回転軸方向にそろった構造となる。

球面上に拘束された準二次元渦運動としてとらえる考え方は、これとは逆で、成層が適宜存在していて第0近似においては静水圧平衡状態を得る。かくして、重力軸方向への運動は制限され(オーダーが一つ落ちる)、場は球殻状な対称性を持つことになる。コリオリ力の影響は通常的气象学や海洋学で慣れているような回転軸の重力方向成分だけの影響に限定され、赤道上で回転の効果が小さく極域で大きい、いわゆる β 効果が生まれることになる。

β 効果の存在により、回転球面上の準二次元渦運動による平均流生成(角運動量輸送)は、ロスビー波の力学によって記述されることになる。一方、回転球殻対流問題においても対流による平均流生成はやはりロスビー波の力学として統合される。球殻内に閉じ込められた対流渦はその動経上の位置により軸方向に伸縮するからである。赤道断面で切って2次元運動として整理すれば結局準

2次元的な運動としてとらえなおすことができるのである。

ロスビー波は β の符号によって定まる一方方向の角運動量を持っている。球面上の2次運動においては、角運動量は系の回転と逆符号である。したがって、ロスビー波を射出する緯度帯では高速回転(西風加速)、ロスビー波を吸収する緯度帯では低速回転(東風加速)になる。縞々な構造を作るためにはこの射出吸収の帯が折り重なって起こってくれればよいことになる。単純な回転2次元乱流系を用いた経験によれば、結果として発生する縞々のスケールは、系に与えられた質量あたりの運動エネルギーを E とすれば、 $(E)^{1/4}/(\beta)^{1/2}$ となっている。これは、おおむね、着目する現象のスケールを小さくしていったときに非線形性が強くなっていった、ロスビー波力学から孤立渦の力学に移行するスケールに他ならない。

この議論の自明な問題点は、現実問題として、系がどの程度の運動エネルギーを持っているべきなのか先見的には明らかでないこと(予言力がない)である。さらに、上記スケールはもっとも簡単な系、すなわち、成層の効果が非常に強くて木星の半径に比べてロスビー変形半径といわれる量が無限大とみなすことのできる場合の話についてのものである。ところが、ガリレオ探査機等々による値を用いれば浮力振動数 $N=10^{-3}/s$ 程度、自転角速度が $\Omega=10^{-4}/s$ 程度なので、鉛直スケール $H=100\text{ km}$ の構造に対してはロスビー変形半径は $L = NH/\Omega = 1000\text{ km}$ でしかない。残念ながら重力波が飛び交う状況での準2次元乱流理論に関する考察はまだはじまったばかりと言うのが現状であろう。