

高速回転する球殻の高レイリー数熱対流： 室内実験とその外核の流体運動への応用

Experiments on High Rayleigh number thermal convection in rapidly rotating hemispherical shell and the Earth's outer core

隅田 育郎 [1], Peter Olson [1]

Ikuro Sumita [1], Peter Olson [2]

[1] ジョンズホプキンス大地球惑星

[1] Earth and Planetary Sci., Johns Hopkins Univ., [2] Dept. Earth and Planetary Sci. Johns Hopkins Univ.

非線形性が強い領域にある地球の外核の対流を理解するために、エクマン数 5×10^{-6} における回転球殻熱対流の実験を行った。レイリー数によって以下のregimeが見つかった。(1) $Ra/Rac < 1$: 安定密度成層。(2) $1 < Ra/Rac < 4$: Penetrative convection、内殻からの cold plume のみによって対流が駆動され、これらは東に螺旋するバナナ状の低気圧セル列をなし、西方移動する。(3) $Ra/Rac > 4$: dual convection、cold plume に加えて、外殻からの warm plume が対流を駆動し、地衡流乱流を形成する。乱流は2つの plumeの波数が合わないことによる。

地球の外核の対流は低エクマン数(粘性力/コリオリ力)、高レイリー数で特徴付けられる。外核に対応するパラメータ領域を直接調べることは数値計算も実験も共に現在不可能であるが、実験の方が比較的容易に低エクマン数を実現することができる。我々は高速回転する半球殻を用い、遠心力と重力を組み合わせて球対称重力を近似し、エクマン数が 5×10^{-6} における熱対流を実験的に達成した。このパラメータ領域は現在計算可能な下限と同様の小型の装置を用いた実験 (Cordero & Busse, 1992) よりさらに約一桁小さく、外核の条件下により近い。我々は外核の対流を理解するために、この条件下でレイリー数(Ra)を最高 8×10^8 (臨界 Rac の21倍) まで変える一連の実験を行った。そしてこのような実験によって、線形論や数値計算で見られる対流とは違った対流の様式を見出した。装置は外殻の直径が30cm、内殻の直径が10センチの半球殻からなり、内殻(ICB)を低温、外殻(CMB)を高温にし、作業流体として水を用い、毎分206回転させ、遠心力に抗する浮力により熱対流を駆動した。そして粉末により可視化されたパターンの観察、トレーサーによる流速測定、そしてサーミスタによる温度測定を行った。

レイリー数によって以下の3つの領域が区別された。

(i) $Ra/Rac < 1$: 半径方向の流れのない安定成層。

(ii) $1 < Ra/Rac < 4$: Penetrative convection. ICBから回転軸方向に一樣なカーテン状の cold plume が生成し、赤道面を見てCMBに向かって東向きに螺旋するバナナ状のセル列をつくる。これらのセルはすべて低気圧(回転と同じ渦度を持つ)で、波数約60でゆっくり(1分間に約10度)西方移動する。Zonal flow は同じ速度で西向きに流れ、従ってパターンが移流されていると解釈される。

(iii) Dual convection: $Ra/Rac > 4$: 対流はICBからの cold plume とCMBからの warm plume (波数約108) の双方で駆動される。これらの plumeの波数が異なるのはセルと底面のなす傾斜角の違いにより (Busse, 1970)、波数の小さなセルが波数の大きなセルに合わせようとするため結果的に乱流になる。また、温度変動の解析により、セルの西方移動に伴う特徴的な周期が存在すること、球での対流であることから生ずる非正弦波的な変動が記録された。また熱輸送は赤道域で卓越し、(ii) - (iii) 遷移時に熱輸送効率が上昇することが判明した。

本実験における対流は例えば $Ra/Rac=19$ では、レイノルズ数250という移流が卓越する状態にある。回転軸方向に一樣な構造は高レイリー数まで維持され、従って地衡流乱流と言える。Plumeが卓越するのは高レイリー数のためであり、低気圧が卓越するのはエクマン層での収束が顕著であるためと理解される。低気圧ばかりの状態では、半径方向に互いに逆向きに流れる plume が隣接し、このため渦度生成が相殺され、ロスビー波のような波動が起きにくいと考えられる。西向き zonal flow は主として Reynolds stress によるものと考えられ、2次元構造が常にあることから温度風の寄与は小さいと見積もられる。本実験がこれまでの他の研究と異なるのはそれが非線形性の強い領域であるということであることと、細かいスケールまで分解しているということにある。低気圧の卓越は数値計算からも指摘されていたが、本実験程顕著ではなかった。plumeの厚さスケールはエクマン層厚程度であり、これほどまで細かいスケールの plume が実現されたのは初めてである。数値計算でこのような現象が見えないのは、レイリー数が小さいことに加えて、これらのスケールが分解されていないことによると考えられる。

実験に基づき、外核について以下のことが推察される。まず、2次元性が卓越するため、外核は乱流下においても内核に接する仮想的な円柱の内外で二分され、この間での混合が抑制されている可能性がある。また、外核では低気圧ばかりであることも示唆され、これは木星のように高気圧が卓越する系と対比される。また、実験結果はパターンの西方移動は zonal flow による移流であり、波動ではないことを示しているが、これは地球磁場の永年変化の解釈に重要である。最後に温度測定データの解析は、地球の磁場変動の新しい見方を提供する。以上

の実験結果に従うと、地球の外核の対流が地衡流的であるならば、2次元的で高波数もしくは乱流的な状態になっていると推察される。現実の地球ではさらに核マントル境界における熱流量の水平不均質が外核の対流を制御している可能性が指摘されており、この効果が及ぼす影響についての実験結果も紹介したい。