

## 回転球殻熱対流の超臨界状態：実験的研究

## Experiments on highly supercritical thermal convection in a rapidly rotating hemispherical shell

# 隅田 育郎[1]

# Ikuro Sumita[1]

[1] 金大・理・地球

[1] Earth Sci., Kanazawa Univ.

<http://hakusan.s.kanazawa-u.ac.jp/~sumita/%20hemisphere.html>

はじめに：

地球の流体核における流れは回転の効果が卓越し、その指標であるエクマン数（粘性力/コリオリ力）は $10^{-15}$ 程度と非常に小さい。回転は対流を抑制するため、低エクマン数下での熱対流は必然的に高レイリ-数となる。低エクマン数下では対流は短波長となり、高レイリ-数下では乱流になりやすい。このような条件下での流れの研究は、地磁気の成因と考えられている流体核中の流れや、木星型惑星の大気の流れの理解の基礎をなすが、流れの非線形性が卓越するため、いまだ十分な理解がなされていない。

近年、低エクマン数( $10^{-7}$ から $10^{-6}$ )、高レイリ-数（臨界の約50倍まで）の回転球殻熱対流を実験的に詳しく調べる研究が、水(Sumita and Olson, 2000)や、ガリウム(Aubert et al., 2001)を用いて行われるようになってきた。これらの実験のパラメタ-領域は、現在の数値計算で実現可能なものより一桁程地球のものに近い。さらに重要なこととして、数値拡散やグリッドの影響がないため、スケールの小さな乱流を調べるのに適している。

Sumita and Olson (2000)は、エクマン数が $4.7 \times 10^{-6}$ 、レイリ-数が臨界の約50倍までの範囲で実験を行い、地衡流乱流の基本性質を調べた。本研究では、彼らの研究をさらに高レイリ-数領域へと拡張し、Cardin and Olson (1994)で提案されている地衡流乱流のスケーリング則が成り立つかどうかを調べることを目的として、1cSt シリコンオイルを用いて実験を行った。1cSt シリコンオイルを用いることにより、Sumita and Olson(2000)と同じエクマン数下で、レイリ-数を $1.2 \times 10^{10}$ （臨界の約500倍）と1桁拡張することが可能である。これは回転球殻熱対流としては現在世界最高の値である。なお、1cSt シリコンオイルのプラントル数は13.9であり、弱非線形論の結果(Zhang, 1992)から、流れ場は水( $Pr=7.1$ )の場合と大きくは異ならないと推定される。

実験方法：

装置は外径30cmの銅製の半球殻、内径10cmの銅球からなり、それらを同軸のシャフトが貫いている。この装置を1分間に206回転させ、冷却水を内球の中に流すことにより、内壁(ICB)を外壁(CMB)より低温に保つ。これによって、遠心力に対する浮力が得られ、対流が駆動される。流体中の温度の時間変動と、内側の球における熱流量はサーミスタで計測した。流速は、シリコンオイルと同密度のメタノール水溶液の蛍光トレーサーを注入して、赤道面での流れをビデオ録画に撮って測定した。

実験結果：

平均温度構造：温度は半径方向にはICB付近に顕著な熱境界層を持ち、その厚さはレイリ-数と共に薄くなる。それ以外の領域での温度勾配は小さく、高レイリ-数では殆ど等温にある。

温度の時間変動：温度は不規則な変動を示し、その振幅はCMBに向かって小さくなる。温度変動は、主としてブルームが帯状流によって流されているため起こり、その振幅は温度勾配が決められていると理解される。振幅は熱流量の約0.6乗に比例して増加し、これはCardin and Olson (1994)のスケーリング則で理解できる。また、レイリ-数とともに、高周波成分が卓越し、これは帯状流が速くなるためと理解される。

流速：帯状流は西向きで、その速度は $Ra/Rac = 277$ で約3mm/sであり、(注： $Ra/Rac=44$ で約0.4mm/s: Sumita and Olson, 2000)、レイノルズ応力によるものと考えられる。

2層対流：シリコンオイルが内側、水が外側と密度成層する時の2層対流について、ICBとCMBの温度差が一定の時に熱流量が厚さ比と共にどう変化するかを調べた。その結果、内側の層の厚さが増加するにつれて、熱流量が増加することが分かった。これは、球における2層がカップルした場合の熱輸送を考察することにより理解される。

結論：

本研究により非線形性を考慮したスケーリング則が $Ra/Rac=0(100)$ のオーダーまで成立することが示された。また球殻における2層対流実験より、内核外核境界の直上に密度の高い薄い層が存在すると、熱流量が強く抑制されることが示唆された。

謝辞：本実験はジョーンズホプキンス大学で行われた。研究を支援して下さったピーターオルソン教授に感謝する。

文献：Aubert, J. D. et al., 2001.PEPI, 128, 51.

Cardin, P. and P. Olson, 1994. PEPI, 82, 235.  
Sumita, I. and P. Olson, 2000. PEPI, 117, 153.  
Zhang, K. 1992. J. Fluid Mech., 236, 535.