

回転球殻熱対流の実験: レビュー

Thermal convection experiments in a rotating spherical shell: A review

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/index.html>

回転する球殻での熱対流の研究は、中心核や木星型惑星での対流、磁場生成を理解する上での基本であり、これまで多くの研究がなされてきた(最近のレビューとして Zhang and Schubert, 2000)。この系は、流体力学のすべての研究と同様、理論、数値計算、実験の3方向からアプローチがされている。ここでは、実験的なアプローチに焦点を当てて、その主要な結果をレビューし、未解決問題を整理したい。

この系の初期の研究は、F. Busse のグループによって開拓された。彼は、遠心力を半径依存する重力の代わりに用い、この系を初めて実験的にシミュレートすることに成功した (Busse and Carrigan, 1974)。そして、線形論と比較しやすいレイリー数が臨界値に近い状態の対流について主に調べた。より低エクマン数、高レイリー数での対流については、90年代初頭からなされてきた。Cardin and Olson (1994) では球殻を用い、Sumita and Olson (2000, 2003) では半球殻の装置を用い、高レイリー数での乱流対流の基本的な性質を調べた。そして、Sumita and Olson (1999, 2002) では、核マントル境界での熱流量不均一をシミュレートするための実験を行った。最近では、詳細な流速測定や、ガリウムを用いた系の実験もなされている (Aubert et al., 2001)。本講演では、私が行った実験を中心に紹介する。

高レイリー数対流の基本的な性質:

作業流体として、水または、1 c s t のシリコンオイルを用い、直径30センチの回転半球殻を207rpmで回転させることにより、低エクマン数 (4.7×10^{-6}) を実現した。半球殻の内側の球に冷却水を循環させることにより、半径方向に温度勾配をつくり、これによりレイリー数が最大、臨界値の約600倍の状態を実現した。これは、最近の数値計算でも達成が困難なパラメータ領域である。対流は、内側と外側の両方の境界から発生するブルームからなるが、これらの2つの境界から発生するブルームの数が異なることが一因で乱流になる。ブルームは、回転軸方向に一樣なシート状になっている。対流場中の温度振幅や流速は、準地衡流バランスを仮定したスケーリング則と良く合っている。また、対流場は西向き帯状流を伴っていることも分かった。

熱流量不均一がある場合の対流場:

外側の境界に局所ヒーターを貼り付けて、上記の基本対流場がどのように変わるかを調べた。その結果、局所ヒーターで暖められた流体は、東向きの流れとなり、冷たい西向きの基本帯状流と停滞前線によって隔てられることが分かった。この停滞前線は、螺旋状の形状を持ち、外側の境界から、内側の境界に向かって伸びており、それに沿って、高速の狭い流れ(ジェット)が外側から内側の殻に向かって流れている。このように、本実験の流れ場は大気や海洋の流れ場と類似点が多い。

数値計算への示唆:

本実験と同条件の数値計算は、まだ存在しない。特に、非線形が重要になる、細いブルーム、前線やジェット、などを再現することは、数値計算をする上での工夫が必要かも知れない。また、前線の形状が、熱流量不均一の大きさでどのように変わるか、また、スケーリング則がフルモデル計算から検証できるかなど、数値計算への課題を提示したい。

文献

Aubert, J., et al, 2001, Phys. Earth Planet Inter., 128, 51-74.

Busse, F. H. and C. R. Carrigan, 1976, Science, 191, 81-83.

Cardin, P and Olson, P. 1994, Phys. Earth Planet Inter., 82, 235-259.

Sumita, I. and P. Olson, 1999, Science, 286, 1547-1549.

Sumita, I. and P. Olson, 2000, Phys. Earth Planet. Inter., 117, 153-170.

Sumita, I. and P. Olson, 2002, J. Geophys. Res., 107, 10.1029/2001JB000548.

Sumita, I. and P. Olson, 2003, J. Fluid Mech., 492, 271-287.

Zhang, K. and G. Schubert, 2000, Ann. Rev. Fluid. Mech. 32, 409-443.