

回転球殻熱対流実験から得られる外核の流れ場への示唆

隅田 育郎 [1]
[1] 金大・理・地球

Insights into outer core convection based on thermal convection experiments in a rapidly rotating spherical shell

Ikuro Sumita[1]
[1] Earth Sci., Kanazawa Univ.

<http://hakusan.s.kanazawa-u.ac.jp/~sumita>

Studies on thermal convection in a rotating spherical shell is important for understanding convection and magnetic field generation in planetary cores (see Zhang and Schubert (2000) for a review). As with all other studies in fluid mechanics, combination of theory, numerical calculations and experiments are used to study such convection. Here we review the results obtained from the experimental approaches. Sumita and Olson (2000; 2003) used a hemispherical shell to study the basic properties of the turbulent convection at these parameters. In Sumita and Olson (1999, 2002) experiments with thermally heterogeneous boundary conditions were made to simulate similar conditions at the core-mantle boundary of the Earth.

As a working fluid we use water and 1cst silicone oil, and by rotating a spherical shell with a diameter of 30cm at a rotation rate of 207 rpm, we achieve an Ekman number of 4.7×10^{-6} . By circulating a cooling water through the inner sphere, we impose a radial temperature gradient, and achieve a Rayleigh number of up to 600 times the critical value. This parameter is still beyond that which can be achieved using numerical methods. Thermal convection consists of plumes that originate from inner and outer boundaries. These plumes have different wave numbers, and as a consequence results in turbulence. In 3-D, plumes are uniform in the direction of rotation axis, and take the form of sheets. Temperature amplitude and flow velocity in the convecting fluid agree well with the scaling relation obtained from quasi-geostrophic approximation. We also find that the mean zonal flow is westward.

We next study how the mean convection is affected when there is a thermal heterogeneity at the outer boundary, considered to be important in the outer core (Blokhin and Gubbins, 1987). We find that the warm fluid generated by the heater flows eastward, and is separated by a stationary front with a cold westward flow. The stationary front take the form of a spiral and extends from the outer boundary towards the inner boundary, along which a localized fast flow (jet) flows towards the inner boundary.

Since centrifugal force is used to simulate the radially dependent gravity, a heater in the experiment corresponds to a cold anomaly at the core mantle boundary. Seismic tomography suggest that such an anomaly exists beneath east Asia. Our experiments suggest that there is a cold eastward flow in the Pacific and a warm westward flow elsewhere. Such flow is consistent with that obtained from geomagnetic secular variation under tangential geostrophy assumption (Blokhin and Jackson, 1991). Furthermore, our experiments suggest that there is a large heat flow anomaly at the inner core boundary resulting from such flow. Seismic structure at the inner core boundary do show a longitudinal variation of P-wave velocity (Tanaka and Hamaguchi, 1997), consistent with the experiments.

Currently, there are no numerical simulations at the same conditions as in the experiments. Our experiments suggest that there are two scales of flows in the outer core: a narrow and fast jets and plumes, a wide and slow zonal flow. We consider that it is important that these two scale of motion be simulated in the future numerical simulations.

地球の外核の流れ場の理解は、地磁気の永年変動や、ダイナモの生成メカニズムの理解の上で本質的に重要である。外核の流れ場は、回転している球殻での熱または組成による浮力を駆動元としており、これまでに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、それに基づく、中心核の流れと熱輸送の大局的な構造のモデルを提示したい。

低エクマン数、高レイリー数での回転球殻対流の基本的な性質:

実験装置は、高速回転する半球殻で、遠心力を重力の代わりに用いる。作業流体として、水 (Sumita and Olson, 2000) または、1cstのシリコンオイル (Sumita and Olson, 2003) 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、対流場は西向きの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 (Sumita and Olson, 1999,2002)。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延びており、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。

実験に基づく外核の対流場のモデル：

地球の核マントル境界には、マントル対流による熱流量不均一があり、それが地磁気の永年変動に影響を及ぼしていると考えられている (Bloxham and Gubbins, 1987)。上の実験結果を地球に適用してみると、実験では遠心力を重力の代わりに用いているため、ヒーターは、核マントル境界では冷たい場所に対応する。地震波トモグラフィーによると、東アジアの下のマントル最下部の地震波速度が速く、熱流量不均一を形成していると考えられる。実験によると、太平洋の下には冷たい東向きの流れがあり、それ以外の部分では暖かい西向きの流れがあると推測される。これは、地磁気の永年変動から得られるモデル (Bloxham and Jackson, 1991:特に tangential geostrophy を仮定しているモデル) と整合的である。また、実験は、外核に対流熱輸送の大きい低温の部分と、対流熱輸送の小さい高温の部分があることを示唆しており、これによって、内核の成長速度も経度方向に異なることが予想される。内核の地震波速度構造には、次数 1 の不均一があることが知られており (Tanaka and Hamaguchi, 1997)、この考え方と整合的である。

数値計算への示唆：

本実験と同条件の数値計算は、まだ存在しないが、最近可能になってきた（陰山、2006年連合大会）

本実験は、外核には、細くて速い流れ（ブルームやジェット）と、太くて遅い流れ（帯状流）の2種類のスケールの流れ場が共存していることを示唆しており、これからの数値計算はこれらの2つのスケールの流れを再現できることが大切である。