

Numerical study of convection and dynamo in a rotating spherical shell: Implications for solidification scenarios in planetary cores

谷口, 陽菜実

<https://hdl.handle.net/2324/4474946>

出版情報 : Kyushu University, 2020, 博士 (理学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 谷口 陽菜実

論 文 名 : Numerical study of convection and dynamo in a rotating spherical shell: Implications for solidification scenarios in planetary cores
(回転球殻における対流とダイナモに関する数値的研究: 惑星コアの固化シナリオへの示唆)

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

現在、太陽系内の固体天体においてコアダイナモにより天体規模の磁場が生成・維持されている天体は地球と水星、ガニメデ（木星衛星）がある。これらの天体のコアダイナモを駆動する浮力源は、コアの圧力や温度分布、軽元素の含有量に依存して供給される。その供給プロセスは浮力の供給される場所に注目すると、**bottom-up** 型と **top-down** 型という 2 種類のダイナモが存在する；**Bottom-up** 型ダイナモは地球と水星で、**Top-down** 型ダイナモはガニメデで最も有力なタイプだとされている。これら 2 種類のダイナモは異なる磁場や流れを生成すると認識されているが、それらが異なる物理的な理由はわかっていない。コアダイナモ作用に関する物理を理解することは、ダイナモの歴史はもちろん、天体の内部構造や熱史を決定する上で拘束条件となりえるため、重要である。本研究では、**bottom-up** 型と **top-down** 型という 2 種類の対流・ダイナモの違いやその理由の基本的理解をすることを目的とし、2 種類の浮力供給タイプに関して回転球殻における磁場なし線型安定性解析と MHD dynamo 計算を行う。

まず、**Top-down** 型と **bottom-up** 型の 2 種類の浮力供給がされるブシネスク流体の満ちた半径比 0.2、厚さ 1 の回転球殻を考え、対流の開始点のレイリー数 (= 浮力 / 粘性力) とそのときの流れについて調べた。与える無次元パラメータはプラントル数 (= 組成拡散時間 / 粘性拡散時間) を 1 とし、エクマン数 (= コリオリカ / 粘性力) を 5×10^{-4} から 10^{-3} の範囲で 20 ずつ選んだ。このエクマン数の範囲で、臨界レイリー数 Rac は、**bottom-up** 型で $Ek^{-1.14}$ 、**top-down** 型で $Ek^{-1.28}$ に比例して増加するという関係が得られた。このときの対流構造について、**bottom-up** 型では内側境界に接するように、**top-down** 型では内側境界から離れて球殻中央深さ程度に存在していた。さらに、**bottom-up** 型では、cyclone (anticyclone) 構造と内側境界の接する領域から **inner core tangent cylinder** を貫いて緯度方向に下降 (上昇) する流れが発見できた。この流れは内側境界付近において質量保存する (連続の式を満たす) ために発生した流れだと考えられる。運動エネルギー収支を調べると、エネルギー生成は、対流構造の位置に赤道で最大となるように行われていた。一方、粘性散逸については、**bottom-up** 型では対流構造と内側境界の接する領域で、**top-down** 型では対流構造の上端・下端で活発に行われていた。**Top-down** 型に関しては、Takehiro (2012) の一様熱源タイプと似た散逸構造を持っていた。**Bottom-up** 型に関しては、質量保存するための **tangent cylinder** を通過する流れが粘性法線応力を強め、散逸を活発にし、運動エネルギー収支をバランスさせる役割を担っていると考えられる。最後に、**Relative axial helicity** (流れと渦度の密度で規格化されたヘリシティ密度) を調べると、どのエクマン数でも **bottom-up** 型の方が **top-down**

型に比べて大きかった。一般的に、柱状対流の螺旋度合いが強いほど、磁場の生成効率が良いと言われているため、**bottom-up** 型の方が磁場の生成効率が良い可能性がある。

次に、対流開始点における速度・組成を初期値とし、軸対称双極子磁場の擾乱を与え、磁場や速度、組成の時間発展を計算した。無次元パラメータについて、エクマン数は 10^{-4} 、プラントル数は 1、磁気プラントル数 (= 磁気拡散時間 / 粘性拡散時間) は 3 とし、ダイナモが成功するレイリー数を求め、ダイナモの起こりやすさや磁場・流れ構造について調べた。ダイナモに関する臨界レイリー数について、**bottom-up** 型ではおよそ $20R_{ac}$ 、**top-down** 型ではおよそ $4.5R_{ac}$ 付近であることがわかり、**top-down** 型の方がダイナモを成功しやすいということがわかった。線形安定性解析を踏まえると、双極子磁場を生成しやすいであろう **bottom-up** 型ダイナモの開始が早いと推測できるため、矛盾を感じる結果である。原因として 2 つのことが考えられる。一つは、本研究では赤道対称な流れ・組成に対し、赤道反対称な磁場を擾乱として与えたため、赤道対称性に関するカップリングが存在しないということである。低いレイリー数で **bottom-up** 型ダイナモが成功しなかった理由として、**bottom-up** 型のダイナモ作用では赤道対称性のカップリングが重要、つまり流れや磁場の非線型効果が重要であるという可能性がある。もう一つは、柱状対流の位置である。両方のダイナモ型において内側境界付近で軸対称な方位角方向の流れが強い。一方、柱状対流は **bottom-up** 型では内側境界付近、**top-down** 型では回転軸から離れた外側境界付近で多く見られた。そのため、**bottom-up** 型の柱状対流は強い方位角方向の流れに混ぜられ、十分なポロイダル流れが生成されず、磁場を生成することが難しかったと推測できる。