平成 21 年度国立天文台天文シミュレーションプロジェクト成果報告書

回転球殻 MHD ダイナモにおける力学的境界条件の影響

佐々木洋平 (京都大学)

利用カテゴリ　XT4MD ・ SX9MD

近年の計算機性能の向上に伴ない天体固有磁場の生成維持機構の理解を目的としたダイナモの数値計算が幾つかの研究グループによって行なわれ, 導電性流体の回転球殻対流による自励的な磁場形成が計算によって示されるようになった. しかしながら, 現在の計算機資源では実パラメータでの数値実験は困難であり, 現状の数値計算可能な範囲においてパラメータや物理設定に対する解の依存性を把握することが, 観測される天体固有磁場のダイナモ作用についての洞察を深めることにとって有益であると考えられる. 我々は回転球殻 MHD ダイナモにおける初期値および力学的境界条件の影響を調べることを目的としたパラメータ実験を行なってきた.

2009 年度はまず, 国立天文台 XT4 において数値実験を実行するために, これまで開発した数値流体コードの並列化とその効率改善を行なった. その後, 力学的境界条件および初期値条件を変えたパラメータ実験を行なった. 力学的境界条件として, 球殻上端および下端を滑り無し, もしくは応力無しとした 4 通りの場合を設定した. 初期値条件として, 速度場は静止場と磁場の無い熱対流における統計的平衡状態の 2 通りを, ダイナモの「種」として与える磁場として, 微小な軸双極子磁場と, 熱対流の統計的平衡状態の運動エネルギーの 100 倍の強さを持つ強い双極子磁場の 2 通りを設定した. パラメータ設定は, エクマン数を 10^{-3}, プランドル数を 1, 球殻の内径外形比を 0.35 に固定し, 磁気プランドル数を $1 \sim 50$, レイリー数を臨界値の $1.5 \sim 15$ 倍まで変化させた. パラメータ実験によって得られた結果は以下の通りである.

- 球殻上端を応力無し条件, 球殻下端を滑り無し条件とし, 初期磁場として非常に強い磁場を与えた場合には, 球殻両端を滑り無し条件とした場合に比べ自励的なダイナモ解の存在範囲が高レイリー数側に移動した. この計算で得られた解の様相はこれまで良く知られていた α^2 タイプのダイナモ解であった. しかしながら, 初期磁場として運動エネルギーに比して非常に弱い磁場を与えた計算では両端滑り無し条件とした場合は初期磁場に異存せず α^2 タイプのダイナモ解が得られたのに対し, 上端を応力無し条件とした場合にはこれまでとは異なる新しい弱磁場ダイナモ解が得られた.

- この弱磁場ダイナモ解は空間的に二層構造を持つダイナモ解として特徴づけられる. 上層は, 強い順行帯状流と動径外向きに広がった螺旋状の対流渦が支配的であり, この螺旋渦は自転方向に伝播し, あまり組織化されてはいない. その一方で, 下層は自転と逆向きに伝播する柱状の乱流対流渦が支配的である. 上層の強い帯状流は下層で形成された磁場が球殻表面に表れることを妨げている.

  この解の磁場生成過程を調べるために, 下層と上層それぞれの伝播速度で経度方向に移動する座標系で時間平均をとり, 上層と下層それぞれの速度場と磁場の特徴的な構造を抽出することに成功した. さらに, この弱磁場ダイナモ解の運動エネルギーと磁気エネルギーの収支解析を行ない, 運動および磁気エネルギーのトロイダル成分とポロイダル成分のエネルギー変換を明確にした. これらの解析を合わせること

で運動エネルギーのトロイダル, ポロイダル成分が磁場のトロイダル, ポロイダル成分へと変換される領域を特定した.

球殻下層において, 対流渦によるトロイダル磁場の磁力線の引き伸ばしによって渦状のポロイダル磁場が生成される. この渦状の磁力線が間欠的に上層に貫入する対流運動によって持ち上げられ, 球殻上層の螺旋渦に巻き込まれ引き伸ばされてトロイダル磁場が形成される. このトロイダル磁場が間欠的に下層に落ちてきて内側領域の対流渦に引き込まれ, 再び渦状のポロイダル磁場を形成する. これらの過程を繰り返すことで自励的な磁場が生成維持されている (図 1).

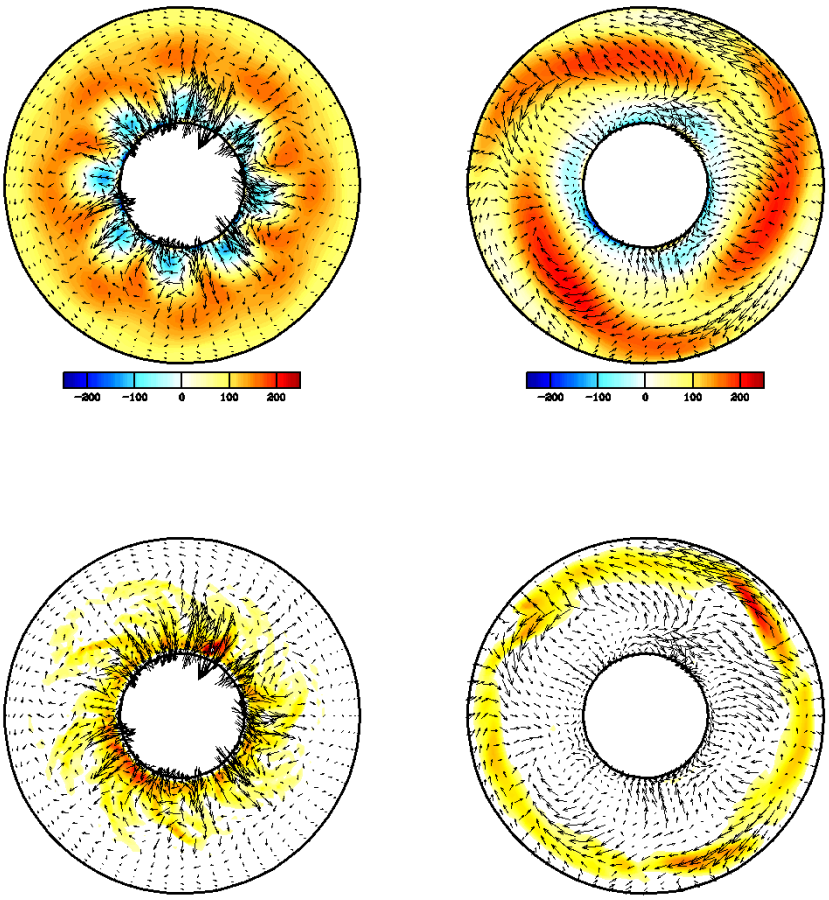

図 1: 伝播速度で時間平均を取ることで得られた構造. 左が球殻下層, 右が球殻上層の伝搬速度での時間平均であり, 上は渦度の回転軸方向成分の分布と磁場ベクトル, 下は運動エネルギーから磁気エネルギーへの変換項と磁場ベクトルの分布である.