巻頭言　　UDC 533.93：537.84：532.517.4

乱流ダイナモに見る乱流の多様性

Diversity of Turbulence Phenomena from the Viewpoint of Turbulent Dynamo

吉澤　徴*
Akira YOSHIZAWA

地球磁場の存在機構と核融合におけるプラズマ閉じ込めの機構の間に何か共通点があるかと問われたとき，これに答えられる人は専門家を除いて極めて少ないであろう．地球磁場は地球内部の電導性流体の運動と密接に関係しているが，その維持機構（ダイナモ）を十分説明することはまだできていない．電導性流体が速度 $\boldsymbol{u}$ で磁場 $\boldsymbol{b}$ 中を動くとき，$\boldsymbol{b}$ は磁場誘導方程式

$$\frac{\partial \boldsymbol{b}}{\partial t}+\nabla\times(\boldsymbol{b}\times\boldsymbol{u})=\lambda\nabla^2\boldsymbol{b} \qquad (1)$$

に従う（λ は磁場拡散率）．流体運動が乱れていない（層流）と考えると，$\boldsymbol{u}$ として特殊な流れを考えない限り，われわれのよく知っている北極から南極へ向う磁場を維持できない[1]．

他方，核融合分野には現在最も活発に研究がなされているトカマク方式に加えて，逆転磁場ピンチ（Reversed-Field Pinch）によるプラズマ閉じ込め方式がある．両方式とも，トーラス環（ドーナツを想像されたい）の表面にコイルをまき，コイル電流の作るトーラス環軸方向（トーラス環の円形切断面の中心方向）の磁場（トロイダル磁場）とトーラス環内部にプラズマ電流を流すことによって生じる円形切断面内の同心円状の磁場（ポロイダル磁場）の両者によってプラズマを閉じ込める．トカマク方式とRFP方式の大きな違いは，前者ではトロイダル磁場がポロイダル磁場に比べてずっと大きいのに対し，後者ではその大きさが同程度になることである．更に，RFPにおいてはポロイダル磁場の符号がトーラス円形切断面内で反転するため，トロイダル磁場とポロイダル磁場の作る磁場ピッチが逆転する．このような逆転配位より生じる強い磁場勾配は，プラズマの安定的閉じ込めに有利であることが知られている．この事実がRFP研究の大きな動機となっている[2]．

それでは，先に述べた地球磁場のダイナモ研究とRFPの研究には何か類似点があるであろうか．これが本文の冒頭で述べられた問いの言い換えである．RFPでは，初期にトーラス表面にコイル電流，内部にプラズマ電流を流したとき，上述の逆転配位は存在せず，ある種の不安定性によって同配位へ移行する．しかも，この逆転配位は不安定性の一過程として期待されるより長い持続時間を有している．この事実の説明，更に実用的プラズマ閉じ込めのために逆転配位を長時間持続させるには，その維持機構を理論的に見つける必要がある．ここにおいても，地球磁場ダイナモと同じようにプラズマ流が層流的とすると，上の維持機構を説明することはむずかしい．その結果，乱流ダイナモ機構をRFPにおいても考えねばならない．これが冒頭の設問への解答となる．

それでは，電導性流体の運動が乱流であるとしたら，どのような影響が出るのであろうか．磁場 $\boldsymbol{b}$ を平均 $\overline{\boldsymbol{b}}$ とそれからのずれ $\boldsymbol{b}'$ に分けると，$\overline{\boldsymbol{b}}$ の方程式は（1）より

$$\frac{\partial \overline{\boldsymbol{b}}}{\partial t}+\nabla\times(\overline{\boldsymbol{b}}\times\overline{\boldsymbol{u}})=\nabla\times(\overline{\boldsymbol{u}'\times\boldsymbol{b}'})+\lambda\nabla^2\overline{\boldsymbol{b}} \qquad (2)$$

となり，乱流の影響は右辺第1項のみに現れる．地球磁場やRFPの逆転配位の維持が説明できるとしたら，この第1項以外にはない．したがって，$\overline{\boldsymbol{u}'\times\boldsymbol{b}'}$ をいかに $\overline{\boldsymbol{b}}$ 等と結びつけるかが乱流ダイナモにおける中心課題となる．

非電導性流体の立場から見ると，$\overline{\boldsymbol{u}'\times\boldsymbol{b}'}$ のモデル化は，平均速度 $\overline{\boldsymbol{u}}$ に対するレイノルズ応力 $-\overline{u_i'u_j'}$ のモデル化と本質的には同一である．したがって，非電導性流体に対して開発されてきた統計理論的，数値解析的手法は，乱流ダイナモの研究において有力な手段となるであろう．とくに，本特集号で多用されているLESは将来乱流ダイナモの研究においても重要な役割を演ずると期待される．このとき，いわゆるサブグリッド・モデルが不可欠であるが，同モデルの導出には統計理論的研究が不可欠となるであろう[3]．

以上に見るように，乱流は日常的，工学的現象にとどまらず，実に様々な分野に現れることが想像できるであろう．

（1986年7月23日受理）

参考文献

1) H.K. Moffatt, *Magnetic Field Generation in Electrically Conducting Fluids* (Cambridge University,1978)
2) H.A.B. Bodin and A.A.Newton,Reversed-Field-Pinch Research, *Nucl.Fusion* **20** (1980) 1225
3) A.Yoshizawa,Statistical Theory for Magnetohydrodynamic Turbulent Shear Flows, *Phys. Fluids* **28** (1985) 3313

*東京大学生産技術研究所　第1部