

MHD 流れの乱流起電力とクロスヘリシティ

東京大学 理学部 半 場 藤 弘

地球などの天体で観測される磁場は揺動しながら長い年月維持されている。また、高温プラズマを磁場によって閉じ込める核融合装置では、外部からかけた電場と平行な方向だけでなく垂直な方向にも電流が流れ、磁場分布が維持されることが知られている。もし磁場の方程式で磁気拡散率（抵抗率）の項だけを考えるならば磁場は減衰していきただけであるが、このように磁場が維持されるには何らかの維持機構（ダイナモ機構）があるはずである。それは天体内部の物質やプラズマという電導性流体の運動に起因すると考えられる。特に天体のようにレイノルズ数が非常に大きい場合には流体の速度場や磁場は乱流状態にある可能性が強い。

速度場をあらかじめ与えて磁場のふるまいを調べる運動学的なダイナモ機構はこれまでくわしく研究されてきた。代表的なものは α ダイナモ効果である。これは速度場の鏡像対称性が破れている、すなわち流れがらせん状にねじれていると、磁場の方向に電流が流れる効果である。最近吉澤は乱流モデルの観点から、速度場のふるまいも含めて力学的にダイナモ効果を調べ、もう1つの効果を提案した。速度場 u と磁場 b の相関であるクロスヘリシティ $\langle u \cdot b \rangle$ が0でないとき渦度の方向に電流が流れるという効果である。（ $\langle \rangle$ は平均を表す。）

これらのダイナモ効果を調べるため、本研究ではMHD流れの3次元数値計算を行った。非圧縮性の Navier-Stokes 方程式と磁場の誘導方程式を立方体の領域で周期境界条件を課して解き、速度場と磁場の時間発展を計算した。外力として低波数の速度場を固定し、ヘリカルな速度や磁場の乱れ成分が駆動されるようにした。時間発展を調べると低波数の磁場が維持されていることがわかった。

エネルギーの流れを考えるために、速度と磁場を平均部分 (U, B) と乱れ部分 (u, b) に分ける。ここで平均は平面と時間についてとった。するとエネルギーは平均速度 $U^2/2$ 、平均磁場 $B^2/2$ 、乱れ速度 $\langle u^2 \rangle / 2$ 、乱れ磁場 $\langle b^2 \rangle / 2$ の4つに分けられる。外力から平均速度のエネルギーが注入され、それが乱れ速度と乱れ磁場に移り、そこから平均磁場に移っていることが計算結果からわかった。さらに平均磁場分布（平均をとった面と垂直な座標に関する分布）、電流分布、渦度分布を調べると、 α ダイナモ効果だけでは磁場分布を説明できず、クロスヘリシティと渦度によるもう1つのダイナモ効果が寄与していることがわかった。

乱流のカスケードモデルと近似指数分布

東京大学 理学部 神 部 勉

乱流場の非ガウス分布的統計と場の intermittency とを結びつける新しいダイナミカルモデルを提案した。このモデルは、乱流場を regular な成分とスケール指数が非整数の singular な成分とで表現することから出発する。乱流変動は、このような場の中で、渦度方程式に従って時間発展し、straining を受ける。ここで表現された場は、実験で観測される乱流の縦導関数の統計の skewness と矛盾しない性質を持たせることができる。

渦度方程式から乱流カスケードを記述する非線形モデル方程式が導かれる。これによって、実験および数値シミュレーションで知られている速度場の縦微分、横微分の確率分布の非ガウス分布的ふるまいを説明することができる。そのもとになるのは Kraichnan (1990) の dynami-

cal mapping の考えである。それを適用して、近似指数分布の統計を得ることができる。非圧縮性の速度場の形から、両微分の統計的ふるまいの違いも導かれる。また速度導関数の確率分布の尖り度 kurtosis が微分階数の増加と共に増加する性質が得られ、低次では数値シミュレーションの結果とほぼ一致する。

参 考 文 献

- Kambe, T. (1991). Cascade in turbulence and near-exponential distributions: a dynamical theory, *Fluid Dynamics Research*, 8, 159-173.
 Kraichnan, R.H. (1990). Models of intermittency in hydrodynamic turbulence, *Phys. Rev. Lett.*, 65, 575-578.

圧縮性乱流に関する 2, 3 の話題

東京大学 生産技術研究所 吉 澤 徹

強い密度変化を伴う乱流すなわち圧縮性乱流は、高速飛行と密接した航空工学分野に留まらず、自然科学分野でも本質的な役割を演じている（その一例は、膠着円盤等に関連した天体物理現象である）。

圧縮性乱流と低マッハ数における乱流すなわち非圧縮性乱流との大きな差異は、流れ方向に平均流が減速するとき顕著に現れる。非圧縮性乱流では平均流が減速するとき、他の2方向に流れが生じ、それらが作る速度勾配によって乱れが一般に増大する。この傾向はレイノルズ応力の渦粘性表現とも矛盾しない。圧縮性乱流でこれと似た状況は衝撃波の前後であり、流速はマッハ数1以上の状態から1以下に急激に減速する。しかし、この場合には乱れは衝撃波の背後において急速に減少する。非圧縮性乱流と全く異なるこの状況は、強い圧縮によって力学エネルギーが熱等の熱力学的エネルギーに転化したことによって大雑把には理解できる。

天体物理現象は勿論のこと航空工学現象においてもレイノルズ数は極めて高く、そこでの乱れによるエネルギー散逸機構を数値実験で正しく扱おう見込みは遠い将来にわたってもほとんどない。このようなとき、本来の中性流体ないし電磁流体方程式に何らかのエネルギー散逸機構（通常乱流モデルと総称される）を組み込まねばならない。モデルは平均化あるいは粗視化の程度によっていくつかの形態が考えられるが、特に時間ないしアンサンブル平均に基づくレイノルズ平均乱流モデルと数値計算格子上のフィルタリングに基づくサブグリッド・スケールモデルが代表的である。

前述の圧縮性乱流と非圧縮性乱流の差異をレイノルズ平均乱流モデルで表現しようとするとき、衝撃波の背後で渦粘性が見掛け上減少しなければならない (Yoshizawa (1990a))。他方、同じ現象をサブグリッド・スケールモデルで表すときは、格子粘性が増加しなければならない (Yoshizawa (1991))。このように圧縮性乱流は奇妙で面白い性質を持っているのである。

工学分野では以前から良く知られているが、自然科学分野においても乱流がその本質を制していることが今ほど痛感される時代はかつてなかったのではなかろうか。地球を初めとする天体磁場の研究は電磁流体乱流の研究を除いては考えられない (Yoshizawa (1990b))。また、防災工学分野では大火災に伴う風速等を評価するにはブシネスク近似によらない圧縮性乱流の研究が不可欠である。この方面の研究はほとんど進歩がないにもかかわらず、延焼のシミュレーションをマスコミ等で見聞することがあるが、一体どのような方法で流れを評価しているの