

乱流のラグランジュ的相関関数 —— 理論とシミュレーションの比較 ——

名古屋工業大学 後藤 俊幸
名古屋大学 工学部 金田 行雄

様々な物質や熱を大量にかつ広範囲に効率よく運ぶためには流体による方法が適している。たとえば大気中では、熱や水蒸気あるいは黄砂なども空気の流れによって運ばれてくる。これらの場合流れは大抵乱流であり、また逆に乱流を特徴づける性質としてその大きな輸送能力をあげることもできる。この輸送能力は一般に拡散係数で表わされるが、この物理量は流体粒子の速度の相関関数の時間積分で与えられる。大事なことは、速度はある一つの流体粒子を追いかけていくラグランジュ的速度でなければならないという点にある。ところが乱流の実験やシミュレーションで得られるのは、空間の固定された点でのオイラー的速度場であるという場合がほとんどである。乱流拡散理論の難しい点の一つはこのラグランジュ的速度とオイラー的速度場を関係づけることにある。従来、この追跡は各計算格子における速度場を用いた内挿法により行われてきた。しかし、この方法は計算誤差が時間とともに累積したり、多数の流体粒子を追跡する場合無駄な粒子や無意味な点があるなど計算上あまり効率がよくない。我々はこれに代わる新しい方法を開発した。それは粒子を追跡する代わりに、ある時刻における速度場を初期条件としてその場を分子拡散を持たないスカラー場にとえて時間発展させるものである。これはFFTを用いて解くことができるので計算精度や数値計算プログラムは速度場のそれと同様であり、たいへん効率のよい方法である。この方法を2次元乱流に応用し、その数値計算結果をラグランジュ的乱流統計理論(LRA)による結果と比較し、以下の結果を得た。

A. shear flow のない場合

1. LRA とシミュレーションの結果はよく一致する
2. ラグランジュ相関とオイラー相関の減衰の速さは乱流のエネルギースペクトルによる
3. 拡散係数などの one-point closure はエネルギースペクトルの形による
4. ラグランジュ相関の異方性はオイラー相関のそれより小さい

B. shear flow のある場合

1. LRA とシミュレーションの結果はよく一致する
2. レイノルズ応力はラグランジュ相関関数の時間原点での勾配を与える
3. オイラー相関関数は平均流の大きいところほど速く減衰し、ラグランジュ相関関数は平均流に間接的に依存する
4. 渦粘性の符号はエネルギースペクトルの形による

乱流モデルによる逆転磁場ピンチの数値計算

東京大学 生産技術研究所 半場 藤弘

逆転磁場ピンチはトーラス型の核融合プラズマ閉じ込め装置の一つで、らせん状の磁力線をかけて金属容器の中にプラズマを閉じ込める。プラズマや磁場の巨視的なふるまいを調べるためにプラズマを一粒子流体として近似し、Navier-Stokes 方程式と磁場の誘導方程式を考える。磁場や速度場には数値計算の格子ではとらえ切れない細かいスケールの乱れがあるので乱

流モデルが必要である。本研究では2種類の乱流モデルを用いた。フィルター平均（計算格子幅程度の空間平均）に基づくLES (large eddy simulation) モデルと、アンサンブル平均に基づく3方程式モデルである。平均磁場の方程式に現れる速度と磁場の擾乱の相関項すなわち乱流起電力を、ダイナモ項と乱流拡散項でモデル化する。ダイナモ項は小さいスケールの乱れが大きいスケールの磁場を作り出す効果を表し、乱流拡散項は乱れが平均磁場に対する拡散効果を増大させることを意味する。トーラスの形状を、軸方向に周期境界条件を持つ円柱で近似する。LESモデルを用いた3次元の数値計算では実験と定性的に合う平均磁場の分布が得られた。モデルを用いない場合は壁近くで表皮電流が現れ実験と合わない。また3方程式モデルを用いた1次元の計算でも実験と合う磁場分布が得られ、数値解に対する境界条件の影響が明らかにされた。これらの乱流モデルは逆転磁場ピンチだけでなく地球や天体磁場の維持など他の物理現象にも応用できると期待される。