

氏名 ヨウ セイエン
YANG JINGYUAN

学位の種類 博士 (工学)

学位記番号 博第1182号

学位授与の日付 2020年3月31日

学位授与の条件 学位規則第4条第1項該当 課程博士

学位論文題目 Statistical properties of incompressible passive vector convected by isotropic turbulence
(等方性乱流により移流される非圧縮性パッシブベクトルの統計的特性)

論文審査委員 主査 教授 後藤 俊幸
教授 尾形 修司
教授 高橋 聡
教授 渡邊 威

論文内容の要旨

熱や様々な物質（黄砂、花粉、大気汚染物質）は乱流により輸送・混合され、環境問題や工学において重要な問題となっている。これらスカラー量の時間・空間にわたる揺らぎの分布は極めて複雑で、揺らぎの振幅は統計的な意味では乱流速度場の揺らぎよりも激しい。この乱流中のスカラー輸送・混合の定量的予測と制御に向けて、揺らぎの統計法則の解明は必須の課題である。本研究の目的は、乱流における流体速度場とこれにより輸送される受動スカラー場の揺らぎの統計特性に大きな相違をもたらす物理的機構を解明することである。乱流により輸送される（速度場には影響を与えない）非圧縮パッシブベクトル場を導入し、この揺らぎの統計的諸特性を速度とパッシブスカラーと比較した。この非圧縮パッシブベクトルの支配方程式はナビエーストークス方程式とよく似ており、非圧縮性を維持するための擬圧力場と擬粘性項が導入されている。一方、流体による移流項は線形である。擬粘性項と線形移流項はパッシブスカラー場の方程式と共通の性格を持つ。速度場とパッシブスカラー場の中間的な性格を持つ非圧縮パッシブベクトル場を導入することにより、速度場とパッシブスカラー場の揺らぎの発生のメカニズムの違いを探ることが目的である。乱流場、非圧縮パッシブベクトル場、パッシブ

スカラー場の大規模直接数値シミュレーションを 1024^3 格子点上で行った。乱流レイノルズ数 R_λ はおよそ 90, 200, 300 と 400 である。各ゆらぎの可視化を行った。よく知られているように、渦度場の 2 乗はチューブ状、パッシブスカラーの勾配の 2 乗はシート状であるが、パッシブベクトルの回転の 2 乗の空間構造はシート状でありスカラー場に近いことが分かった。3 種類の場のゆらぎのスペクトル、輸送フラックス、確率密度分布関数 (PDF)、場の差分量のモーメントのスケーリング指数などの統計量が評価された。パッシブベクトルのエネルギースペクトルは乱流場と同様に $-5/3$ のべき法則に従い、コルモゴロフ定数は、速度、パッシブベクトル、パッシブスカラーそれぞれについて、 $C_K=1.57$, $C_{PV}=1.0$, $C_{OC}=0.67$ であることが分かった。二点間における縦速度差とパッシブベクトル差の 2 乗の積の平均値をパッシブベクトル場の方程式から解析的に導き、それが $4/3$ 則に従うことが分かった。パッシブベクトルの一点 PDF は正規分布に近いが、すそ野は速度とパッシブスカラーのものよりやや幅広い。一方、速度場のエネルギー散逸率とパッシブベクトル場と擬エネルギー散逸率の PDF はともに対数正規分布に極めて近い。それに対して、パッシブスカラーの分散散逸率の対数の分布は正規分布からは遠く、左側のすそ野はべき法則に従うことが分かった。圧力の PDF は負の側に長い裾野を持つ非対称な分布であるのに対し、擬圧力の PDF はほぼ左右対称となる。二点におけるパッシブベクトル差分のモーメントのスケーリング指数は速度とパッシブスカラーの中間の値を取り、異常スケーリング性を示すとともに、高次のスケーリング指数はパッシブスカラー場と同様に非普遍的であることが示唆された。圧力項のないパッシブスカラーと比べることで、(擬) 圧力は速度場およびパッシブベクトルの間欠性を抑制する傾向があることが分かった。さらに、流体方程式の非線形性は速度場のスケーリング指数に普遍的をもたらす一方、パッシブ場の強い間欠性と高次スケーリング指数の非普遍性は方程式の線形性によることが示唆された。

論文審査結果の要旨

熱や様々な物質（黄砂、花粉、大気汚染物質）は乱流により輸送・混合され、環境問題や工学において重要な問題となっている。これらの時間・空間にわたる揺らぎの分布は極めて複雑で乱流速度場の揺らぎよりも激しい。この乱流中のスカラー輸送・混合の定量的予測と制御に向けて、揺らぎの統計法則の解明は必須の課題である。楊静遠氏の研究は、乱流における流体速度場とこれにより輸送される受動スカラー場の揺らぎの統計特性に大きな相違をもたらす物理的機構を解明することを目的としたものである。このために、氏は、乱流により輸送される（速度場には影響を与えない）非圧縮パッシブベクトル場を導入し、この揺らぎの統計的諸特性を速度とパッシブスカラーと比較した。速度場とパッシブスカラー場の中間的な性格を持つ非圧縮パッシブベクトル場を導入することにより、速度場とパッシブスカラー場の揺らぎの発生のメカニズムの違いを探るというアイディアは、きわめて独創的である。

乱流場、非圧縮パッシブベクトル場、パッシブスカラー場の大規模直接数値シミュレーションを 1024^3 格子点上でスパコンを駆使して行った。3つの場の揺らぎのスペクトル、揺らぎの確率密度分布関数(PDF)、場の差分量のモーメントのスケーリング指数などの統計量を系統的に解析した。パッシブベクトルのスペクトルは乱流場と同様に コルモゴロフのべき法則に従うものの、二点におけるパッシブベクトル差分のモーメントのスケーリング指数は異常スケーリング性を示すとともに、高次のスケーリング指数はパッシブスカラー場と同様に非普遍的であることが示唆された。各揺らぎの可視化により、渦度場の2乗はチューブ状であるが、パッシブベクトルの回転の2乗の空間構造はシート状でありスカラー場に近いという、非常に興味深い発見を行った。これらの結果から、流体方程式の非線形性は速度場のスケーリング指数に普遍的をもたらす一方、パッシブ場の強い間欠性と高次スケーリング指数の非普遍性は方程式の線形性によることが示唆された。

得られた成果は、国際的評価の極めて高いPhysical Review Fluids に2編の論文として発表され、国内外の学会でも発表され大きな関心を集めている。以上の成果を鑑み、楊静遠氏に博士（工学）の学位を授与することがふさわしいと判断した。