

氏 名	お が さ わ ら たけし 小 笠 原 健
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 3088 号
学位授与の日付	平 成 18 年 11 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Turbulent Relative Dispersion : Self-Similar Telegraph Model and Its Comparison with Results of Direct Numerical Simulation (乱流相対拡散：自己相似電信方程モデルと直接数値計算結果との比較)
論文調査委員	(主 査) 助教授 藤 定 義 教 授 太 田 隆 夫 教 授 早 川 尚 男

論 文 内 容 の 要 旨

乱流における相対粒子拡散は、乱流の重要な性質である高い混合能力を特徴づける最も簡単な現象である。1926年に Richardson によって粒子間相対距離の時間発展が異常拡散を示すことが見いだされて以来、乱流相対拡散は理論、応用の両面から広く研究されてきた。

これまでに相対距離の確率分布の時間発展を記述する方程式は複数提案されており、その中で最も実験や数値計算結果を良く記述するものは Richardson の拡散方程式であることが、近年の実験や数値計算によって明らかにされている。

しかし、現実の乱流中には微細秩序構造に代表される自己相似的なコヒーレント構造が存在している。これらの影響のため粒子対の運動の平均自由行程は相対距離に依存し、粗視化によって粒子対の運動が無相関になると見なすことはできない。このことは拡散方程式で良く記述されることと矛盾するが、未だ解決されていない。

申請論文では、まずこの矛盾を解決するために、粒子対の自己相似的かつ持続的な有限速度の運動を取り込んだ自己相似電信モデルが提案された。このモデルでは粒子対の相対距離分布の時間発展は自己相似電信方程式によって記述される。この方程式は相似解を持ち、ある最大相対距離において粒子対の存在確率はゼロとなる。これは拡散方程式とは本質的に異なる。また、相対距離が平均と比べて小さい領域では方程式自体を Richardson の拡散方程式にドリフト項を加えた形で近似することができる。これにより、実験や数値計算において Richardson の拡散方程式が支持されていることの理由が明らかとなった。

次に、二次元自由熱対流乱流において相対粒子拡散の数値計算を行い、粒子対の運動を Exit-Time 統計を用いて調べることによって、実際の粒子対の運動を詳細に解析した。Exit-Time の確率密度関数を調べることで、粒子対のある特定の空間スケールにおける運動は「持続的」なものと「ランダムと見なせる」ものの二つが混ざっており、更にこの二つはどちらも自己相似性（スケーリング則）を満たすことが明らかにされた。これは自己相似電信モデルの導出において用いた仮定を支持するものであり、モデルの正当性を示唆している。

更に、Exit-Time 統計を用いて自己相似電信モデルのパラメータ推定が行われた。推定されたパラメータを二次元逆カスケード乱流での結果と比較することにより、モデルのドリフト項は乱流場の微細秩序構造と関係していることが議論された。

参考論文では、空間スケールを固定したままその周辺での粗視化を行ったとき（Exit-Time 統計でスケールを荒っぽく見たとき）に、Exit-Time の確率密度関数がどのように変化するかについてのモデルを提案している。

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

乱流は、文字通り乱れた流れの状態であり、我々の身の回りから宇宙現象に至るまで遍在している。乱流の揺らぎは、巨視的なスケールにおいてエネルギーや物質の輸送・混合を促進する働きを持つため、基礎及び応用の両面から広く研究され

てきた。しかしながら、乱流が強非線形・強非平衡現象であるためにその理解は未だ十分ではない。小笠原氏は、乱流輸送現象の中でも最も基本的な乱流相対拡散—乱流による2粒子の相対距離の伸長—を理論的に取り扱い、従来の理論及び実験結果の矛盾点を解決するモデルを提案して、今後の乱流輸送現象の研究の基礎を与えた。

乱流相対拡散は通常の拡散現象とは異なり、ブラウン運動で記述することが出来ない。これは、乱流の慣性領域における自己相似性のため、粒子間相対距離の平均自由行程を一意に定義することができず空間スケールに依存して決まることと、乱流中の自己相似なコヒーレンスのため相対距離の運動が持続性を持つことによる。これら二つの性質のため、乱流相対拡散は拡散方程式型の方程式では記述されないと考えられるが、現在のところ、実験や数値計算では Richardson の拡散方程式が乱流相対拡散のモデルとして支持されている。しかし実験や数値計算で乱流相対拡散の統計を取るためには極めて多数の粒子対の運動を長時間追跡する必要があるが、近年の実験や数値計算でも未だ粒子対の運動の詳細な分析は難しく、相対距離の分布について決定的な結果が得られているとは言い難い。また粒子対の運動そのものについては、実際に実験や数値計算の結果を詳細に分析することができるようになったのは近年のことであるため、相対拡散の背後にある粒子対の運動の物理的描像はまだ確立されていない。

小笠原氏は、二次元自由熱対流乱流における相対粒子拡散を Exit-Time 統計を用いて詳細に分析した結果を元に、実際の乱流中での粒子対の自己相似的かつ持続的な有限速度の運動をモデル化し、相対拡散の新しいモデルである自己相似電信モデルを提案している。このモデルにより、自己相似性、持続性、有限速度の三つの特徴を取り込んだ相対距離の確率密度関数に対する閉じた発展方程式（自己相似電信方程式）が初めて得られ、乱流相対拡散の研究は大きく前進した。更に、自己相似電信方程式は相対距離が平均よりも十分小さい領域において Richardson の拡散方程式にドリフト項を加えた形で近似されることが示された。これにより、実際の実験や数値計算において粒子対の運動が持続的なものであっても Richardson の拡散方程式の予想に近い結果が得られる事の理由が明らかとなった。

また、本研究では自己相似電信モデルのパラメータを実験や数値計算の結果から Exit-Time 統計を用いて見積もる方法も提案された。実際に二次元自由熱対流乱流と二次元逆カスケード乱流においてパラメータを見積もり比較した結果、ドリフト項に対応するパラメータが乱流場の秩序構造を特徴付けることを示す結果が得られた。これは相対粒子拡散に対して秩序構造が影響することを示す初の結果であり今後の乱流拡散、混合の研究に大きな影響を与えると期待されるものである。

以上の結果から本申請論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問した結果、合格と認めた。