

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18540373
 研究課題名 (和文)
 コーヒーカップから宇宙まで—乱流揺らぎの物理学
 研究課題名 (英文)
 From flows in a coffee cup to those of space - Physics of turbulence fluctuation
 研究代表者
 藤 定義 (TOH SADAYOSHI)
 京都大学・理学研究科・准教授
 研究者番号：10217458

研究成果の概要：

乱流輸送現象の基礎的な現象として乱流相対拡散を取り上げ、粒子対の相対距離の伸縮過程が、自己相似的な相関 (持続性) を持つことを明らかにした。この伸縮過程を記述する確率密度分布関数に対する確率モデル (自己相似電信方程式) を作り、初期値問題を記述することができることを明らかにした。乱流揺らぎが支配的な系において、力学系的な視点から乱流の秩序形成や乱れ生成が理解できることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,400,000	0	1,400,000
2007年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	600,000	4,000,000

研究分野：流体物理学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：乱流、乱流拡散、輸送現象 計算物理、非平衡

1. 研究開始当初の背景

コーヒーに砂糖を溶かすとき、スプーンでほんの数回かき混ぜれば十分である。一方、砂糖を入れて放って置くと、混ざるのに少なくとも1週間はかかるので、拡散時間の比は1万倍を越える。我々物理学者は、この経験事実を初学者に説明できるであろうか。

流体運動は乱流状態であり、その拡散の説明は非常に難しい。申請者の知る限り、分子拡散ほどの適切かつ初等的な説明はない。無論、乱流のもつ桁違いの輸送能力はほとんど

全ての流体现象に関連しており、数多くの研究が為されて来ている。しかし、コーヒーに砂糖を混ぜるといふありふれた現象を説明できる成熟した概念はまだない。

流体運動における乱流揺らぎも、その研究の歴史は決して浅くない。Richardson は 1926 年に、雲の形成には 2 粒子の相対距離の時間発展が本質であることを見抜き、たった 5 点の大気観測データから、相対距離の分散が時間の 3 乗に比例する異常拡散であることを導いた。相対距離 r の分布関数が、 r の $4/3$ 乗に比例する拡散係数を持つ拡散方程式

に従うことを予想した。

その後、1941年のKolmogorovのカスケード理論(K41)によって、乱流揺らぎの普遍性と相似性が定式化された。Richardsonの時間の3乗則も、K41から導かれるべきものである。K41が扱う乱流揺らぎは、熱平衡系の理想気体に相当する『理想的な乱流揺らぎ』であり、これを対象とする統計理論が発展した。

また、この意味では、Richardsonの時間の3乗則に従う2粒子拡散は、ブラウン運動に相当する基本的な輸送現象である。もし、2粒子拡散が完全に理解出来ていれば、冒頭に提示した疑問はナンセンスなものとなったに違いない。

2粒子拡散の相似性は確立したものであるが、係数の絶対値を決定できる理論はまだない。加えて、相対距離の分布関数の具体的な関数形や支配方程式に関して、繰り込み群や安定分布を含む多種多様な理論が提案されているが、決定的なものはやはりまだない。この不幸な状況は、理論を検証できるほどの定量性をもつ2粒子拡散の実験や直接シミュレーション(DNS)すら無かったことが主要な原因である。ブラウン運動の理論がその実験的検証を許す成熟した状況で生まれたことと対照的である。

この事態は2000年を挟んで一変した。乱流中の粒子追跡の技術の開発や、DNSの発展により、2粒子拡散が定量的に調べられることが可能になり、漸く理論の検証が可能となる環境が整った。

2. 研究の目的

乱流がなう、熱揺らぎとは桁違いの輸送能力は多くの現象に関与している。昨年、MacLowとKlessenは、星形成の効率が従来標準理論では説明できず、乱流を考慮する必要性を強調した。宇宙では普遍的な現象である膠着円盤においては、角運動量の乱流拡散が重要であるが、磁気回転不安定性による乱流の励起機構は確立されているものの乱流拡散そのものの定量的な表現はまだない。地球規模の現象や我々の生活スケールの現象における乱流輸送現象の重要性は言うまでもないことであろう。乱流輸送の研究は現象の重要性に応じて多様であり、それぞれの現象に合ったモデルや理論がある。しかし、熱揺らぎに対して理想的な状況で確立された基本的な枠組があるのと対照的に、乱流揺らぎでは、ある種博物的な知識の膨大な蓄積があるのみであり、コーヒーを混ぜることを説明を可能とする輸送現象に関する基本的な枠組はまだ未熟である。言い替えれば、コー

ヒーカップでの乱流拡散や混合が理解できれば宇宙の現象まで、その基本的な枠組から出発できる可能性を秘めている。

ブラウン運動の研究がその後の非平衡統計力学の発展の礎となったように、2粒子拡散の研究は乱流輸送の非平衡統計力学の礎となると期待される。現状は、まだまだ不十分ながらようやく定量的な扱いが可能になって来た状況にある。従って、より現象の本質を掴むために、現象論レベルの基礎研究がまず必要である。

本課題は、以上の状況を鑑み、乱流輸送現象の基本となる乱流中の2粒子拡散に焦点をあて、その基本的な枠組の構築を目指すものであった。

更に、乱流揺らぎが支配的な系の具体的な例として、チャンネルの中の流れに置ける乱れ生成過程や乱流中の巨視的な秩序形成を取り上げ、力学系的な立場から乱流を理解することの可能性についても取り組んだ。

3. 研究方法

乱流相対拡散においては、粒子対の伸縮過程を定量的に理解するために、直接数値シミュレーション(DNS)を行った。更に、DNSで得た知見を基に粒子対の相対距離に対する分布関数の時間発展を記述する確率モデルの構築を行った。

チャンネル乱流の乱れ生成過程や発達した乱流状態の大規模構造を力学系的な視点から理解するために、数値的な厳密解を求め、位相空間の構造として記述することを試みた。この手法は、星間物質中に形成される、低温で濃度の濃い領域の形成過程にも適用した。

4. 研究成果

本課題では、乱流相対拡散を記述する確率モデルの構築が中心課題であるが、乱流揺らぎが支配的な系の力学系の視点からの理解についても行った。

4.1 乱流相対拡散を記述するモデルの構築

2次元熱対流乱流を用いた発達した乱流の直接シミュレーションを行い、乱流にパッシブに流される流体粒子の相対距離の統計が、予想された統計的相似性を持つとともに、伸長過程に強い相関を持ち、相似性を保つ持続的な伸縮を行うことを明らかにした。

この事実を拡散モデルに反映させるため

に、粒子対の伸長及び収縮過程が確率的に入れ替わることで持続性を考慮する、自己相似電信方程式モデルを提案した。通常の粒子拡散の場合と異なり、自己相似電信方程式モデルでは、持続的な伸縮過程においても自己相似的な速度揺らぎにより伸縮が起きるために、密度分布関数の裾と分散の広がる時間依存性が同じである。このことにより、自己相似電信方程式は、相似解を持ち、有限の幅の裾をもつ分布関数を与える。

また、持続性を考慮したために、従来の拡散モデルが記述できなかった初期のパチュエラ-則と呼ばれる持続的(弾道的)伸長過程を正しく表すことが可能になった。また、モデルに用いた物理的な仮定から、方程式に表れる係数を決めることが出来るため、直接シミュレーションとの比較が可能になった。

有限な自己相似領域しかもたない実験やシミュレーションの結果と本モデルの結果を比較するために、有限の長さスケールを初期条件に与え分布関数に対する時間発展問題を取り扱った。この結果、分布関数の形をふくめ比較的良い一致を与えることが明らかになった。

4.2 乱流揺らぎが支配的な系の力学系の視点からの理解

乱流を理解する立場として従来からの統計的な立場に加え、乱流の位相空間の構造、すなわち乱流アトラクターの性質から理解する立場がある。

本課題では、チャンネル乱流の乱れ生成過程と発達した乱流状態に観測される大規模運動に対応する乱流アトラクターに埋め込まれた定常解や不安定周期解を数値的に求める手法を開発した。その手法により、求める解を得ることができた。

これらの定常解や周期解は、乱流の統計的な性質や動的な過程をうまく記述できる。更に、複数の異なるスケールが共存する場合に置いてもそれぞれのスケールに対応する位相空間の部分空間に局在する解が存在し乱流全体がこの部分空間が弱く結合した系として記述することができる可能性を示唆する結果である。

不安定な厳密解を利用して乱流を理解する方法を、星間物質中に形成される、低温で濃度の濃い領域の形成過程にも適応した。この結果、観測によって知られているこの領域がもつ異常に長い寿命を、双曲的不安定な解への漸近プロセスとして理解できることを示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

①H. Yatou and S. Toh, Extraordinary increase of lifetime of localized cold clouds by the viscous effect in thermally unstable two-phase interstellar media, *Physical Review E* 査読有 79 2009 36314

②K. Kanatani, T. Ogasawara, S. Toh, Telegraph-Type versus Diffusion-Type Models of Turbulent Relative Dispersion, *Journal of Physical Society of Japan*、査読有 78 2009 24401

③T. Matsumoto, T. Mizukami and S. Toh, Numerical Study of 3D Free Convection under Rotation: Mean wind and Bolgiano-Obukhov Scaling, *IUTAM BOOKSERIES*, 査読有, 4, 403-407 (2008).

④ K.E.Lonngrén and S. Toh, Invariants of the Richardson equation, *Chaos, Solitons and Fractals*, 査読有, 35,148-150 (2008).

⑤H. Yatou, T. Ogasawara, T. Matsumoto, and S. Toh, Self-similar structure formation process in thermal turbulence *Springer Proceedings in Physics*, 査読有, 117,367-369 (2007).

⑥K. Kanatani, T. Ogasawara and S. Toh, The Effect of Persistent Separation in Turbulent Relative Dispersion: Self-Similar Telegraph Equation”, *Springer Proceedings in Physics*, 査読有, 117, 523-525(2007)

⑦ T. Ogasawara and S. Toh, Model of Turbulent Relative Dispersion: A Self-Similar Telegraph Equation. *J. of Phys. Soc. of Japan*, 75,083401(pp.1-4)(2006)

⑧ T. Ogasawara and S. Toh, Turbulent Relative Dispersion in Two-Dimensional Free Convection Turbulence, *J. Phys. Soc. of Japan*, 75, 104402pp1-12(2006)

[学会発表] (計19)

①藤定義、板野智昭、森田浩之、「発達したチャンネル乱流における大規模構造ダイナミックスの同定とその不安定周期軌道との関連」日本物理学会、2008年9月20日 岩手大学

②藤定義、小笠原健、金谷健太郎、「乱流相対拡散を記述する自己相似電信方程式の拡張、同上

③八登浩紀、藤定義、「宇宙星間空間における局在構造形成」日本物理学会、同上

- ④藤定義、板野智昭、森田浩之、「チャンネル乱流の大規模構造の性質を持つ厳密解」日本物理学会 2009 年 3 月 27 日 立教大学
- ⑤加藤峻輔、松本剛、水上拓也、藤定義、熱対流乱流特性に対する大規模循環流の影響」同上
- ⑥水田敦、藤定義、松本剛、「2 次元逆カスケード乱流中の相対粒子拡散」同上
- ⑦藤定義、板野智昭、「Dynamical characterization of large scale structures in channel flow turbulence」国際会議 Wall bounded shearflow: transition and turbulence、2008、英国 ニュートン研究所
- ⑧金谷健太郎、小笠原健、藤定義、「乱流相対拡散に対する初期相対距離の影響」日本物理学会 2008 年 3 月近畿大学
- ⑨八登浩紀、小笠原健、松本剛、藤定義、「自由熱対流系での乱流遷移段階における渦構造形成過程」同上
- ⑩藤定義、森田浩之、板野智昭、「チャンネル乱流における共維持過程の動的モデル」日本物理学会 2007 年 9 月北大
- ⑪八登浩紀、藤定義、「星間媒質における空間局在構造の緩和過程」同上
- ⑫松本剛、水上拓也、藤定義、「3 次元熱対流乱流の乱流特性と大規模流」日本物理学会 2007 年 3 月鹿児島大学
- ⑬金谷健太郎、小笠原健、藤定義、「有限な慣性領域における乱流相対拡散」藤定義、板野智昭、「チャンネル乱流の秩序模構造の動力学」同上
- ⑭金谷健太郎、小笠原健、藤定義、「乱流相対分散に対する自己相似電信方程式の直接数値シミュレーションによる検証」日本物理学会 2006 年 9 月千葉大学
- ⑮八登浩紀、小笠原健、松本剛、藤定義、「乱流遷移段階における自己相似的構造形成過程の定量的解析」同上
- ⑯藤定義、板野智昭、「チャンネル乱流にお

る大規模構造と壁近傍構造の共維持機構」

同上

⑰K. Kanatani, T. Ogasawara and S. Toh, The Effect of Persistent Separation in Turbulent Relative Dispersion: Self-Similar Telegraph Equation, The 11th EUROMECH European Turbulence Conference, 2007, Porto, Portugal

⑱H. Yatou, T. Ogasawara, T. Matsumoto, and S. Toh, 「Self-similar structure formation process in thermal turbulence」, 同上

⑲ S. Toh and T. Itano, "Unstable Periodic and Travelling Wave Solutions Corresponding to Large Scale Structures in Channel Flow Turbulence", SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, Snowbird USA, 2007,

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤定義 (TOH SADAYOSHI)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：10217458