

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	岸 達郎
論文題目	Scaling laws for turbulent relative dispersion in two-dimensional energy inverse-cascade turbulence, (2次元エネルギー逆カスケード乱流における乱流相対拡散のスケーリング則)		
(論文内容の要旨)			
<p>乱流は時空的に乱れた強非線形・強非平衡な運動状態であり、流体として記述できる現象であれば、素粒子から宇宙までスケールに依らず普遍的に観測される。とりわけ、発達した乱流は熱揺らぎに比べ桁違いに大きな混合や輸送能力を持つために、その輸送現象の理解は乱流研究の中心的課題となってきた。</p> <p>熱揺らぎにおいて1粒子拡散が基本であるように、乱流輸送では、乱流の自己相似性を直接反映する2粒子の相対拡散をその基礎として研究されている。この2粒子相対拡散はRichardsonによってスケールに依存した拡散係数を持つ異常拡散として1926年に定式化され、相対距離の2乗が経過時間の3乗に比例する (Richardson-Obukhov則) ことが導かれた。その後、良く知られた1941年のKolmogorovの現象論 (K41) を適用することでもRichardson-Obukhov則が導かれた。しかしながら、K41に従う慣性領域が観測される乱流場において多くの実験や数値シミュレーションが行われたにも拘わらず、この法則は確認されていない。ただし、特定の初期相対距離に対してのみ時間の3乗に比例することが示されており、この意味で乱流相対拡散は長い研究の歴史にも拘わらず未解決の課題である。</p> <p>本学位論文では、流体粒子を追跡するラグランジュ表示での経過時間に依存する統計量に着目し、Richardson-Obukhov則とKolmogorovの現象論の非整合性の解決を目指している。Kolmogorovの現象論では、スケール間の独立な自己相似的エネルギーカスケード過程において散逸率とスケールを用いた次元解析を行う。しかし、2粒子相対拡散に対して適用すると、経過時間を散逸率とスケール (相対距離) で表現するため、ラグランジュ的な時間に関する相関を適切に表せない。第1章では、以上の研究背景を基に問題設定及び基礎的な知識が鳥瞰的に述べられている。</p> <p>第2章では、実験や数値計算で観察された初期相対距離依存性を取り除くため、2つの隣接するスケール間を最初に通過する時間 (初通過時間) を用いたフィルター法を提案する。このフィルターは、Richardson-Obukhov則に従う粒子対を選択的に取り出す。相対的に伸長が遅い粒子対と速い粒子対は相対距離の時間発展に相反的に寄与すること、粒子対の割合が初期相対距離に依存することを勘案することで、Richardson-Obukhov則からのずれやラグランジュ速度相関の初期相対距離依存性の理解を深めた。</p> <p>第3章では、初期相対距離依存性や有限サイズ効果を積極的に評価するために、バッキンガムのII定理を用いて次元解析を拡張しラグランジュ速度2点相関関数に適用する。この結果、次元解析から求まらない2つのスケーリング指数が導入され、直接数値シミュレーションを用いて指数の値を評価した。また、特定の初期相対距離で観測された時間3乗則は、二つの新たな指数で表される2つの相反する効果が打ち消しあうことで実現されるものでRichardson-Obukhov則とは異なること、またレイノルズ数無限大の極限においても有限サイズ効果の寄与を示唆する結果を得た。</p> <p>第4章は学位論文全体のまとめに充てられている。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

コーヒーにミルクや砂糖を溶かすとき、スプーンでぐるぐると数回かき混ぜれば十分であることは、小さな子供でも知っている。しかしながら、この素早い混合現象を物理的に誰にでもわかるように説明するのは難しい。混合を担っている乱流の時空間乱れが粒子に及ぼす寄与を十分理解できていないためである。発達した乱流の自己相似的な時空間乱れを反映するもっとも簡単な統計量は、流体に流される2個の粒子の相対的な距離や速度相関である。これに関して古典的な次元解析から得られるRichardson-Obukhov則は、実験や数値シミュレーションでは確認されていない。この不整合は、粒子追跡に伴う時間相関を適切に評価できていないことに起因する。自然現象の理解や工学的な応用において避けて通れない乱流の異常な輸送現象を理解するためにも、2粒子相対拡散の解明は不可欠の課題である。

本学位論文は、この古典的な現象論と観測との不整合に対して、2次元逆輸送乱流を用いてフィルター法の導入や次元解析の拡張によってその原因の解明を試みるものである。

Richardson-Obukhov則に従わない特異な粒子対をふるい分けるために、初通過時間を用いKolmogorovの相似性を満たす粒子を選別するフィルター法を導入した。この結果、現象論と観測の不整合を引き起こす異常な粒子対を分類することが可能となった。初期相対距離依存性は、異常な粒子対の割合で決まり、相反する粒子対の効果が相殺される場合にのみ時間の3乗則が実現することを明らかにした。この結果は、従来の実験や数値シミュレーションではRichardson-Obukhov則が確認されていないことを定量的に明らかにするものであり、更にラグランジュ速度2時刻相関の定量的な評価を促す先駆的研究成果である。

速度2時刻相関関数に対して、バッキンガムのII定理を用いて初期相対距離依存性や有限サイズ効果を次元解析に取り込み、その効果を見積もることから、次元解析から求まらない2つのスケーリング指数を導入した。数値シミュレーションを用いてこれらの指数が実効的な役割を担うことを明らかにした。この結果は、従来無視されていたラグランジュ2時刻相関関数の時間相関を適切に評価する手法を導いたものであり、今後の乱流、とりわけ乱流輸送現象の理解に大きく寄与するものと期待される。加えて、この2時刻速度相関関数の時間積分として得られる2粒子相対距離に対しても、新たに導入されたスケーリング指数を用いて上記の不整合を説明することが可能となった。これは、拡張された次元解析の有効性を示すものである。

主論文は110ページにわたって丁寧に書かれており、背景、結果、今後の展望が明確に表現されている。これまでに述べたように、本学位論文は積年の課題であった相対拡散におけるRichardson-Obukhov則と観測の不整合に対し、粒子対の時間的相関を取り込む次元解析の拡張を行い、有限サイズ効果の適切な評価を行うことで整合的な解釈を与えた。この成果は、ラグランジュ相関に対する現象論の拡張を可能にする先駆的研究であり、今後の乱流研究の進展に多大の寄与をするものと判断する。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和3年1月15日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 年 月 日以降