



Title	Temporal and Spatial Features of the Turbulent Kinetic Energy Cascade
Author(s)	荒木, 亮
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/92991
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論 文 内 容 の 要 旨

氏 名 (荒 木 亮)	
論文題名	Temporal and Spatial Features of the Turbulent Kinetic Energy Cascade (乱流運動エネルギーカスケードの時空間的特徴)
論文内容の要旨 3次元の乱流は「外力や境界条件によって大スケールへ注入されたエネルギーがより小さなスケールへ輸送され、最後は分子粘性によって熱として散逸する」というマルチスケール機構によって特徴づけられる。この「エネルギーカスケード」は乱流の統計理論に基礎づけを与える広く受け入れられた概念的描像であるものの、その精緻な理解はいまだ得られていない。本学位論文は三部からなり、乱流の運動エネルギーカスケードを時間・空間・そしてスケールの観点から議論する。 第一部では、定常な外力で駆動される乱流にみられる時間準周期的なふるまいを議論する。Reynolds数の低い周期流を外力・エネルギー・エネルギー散逸率を代表するスケールに分割することで、準周期変動を再現するミニマルな3方程式モデルを構築する。また、相空間での軌道や分岐解析を通じて、この低自由度のモデルと乱流の類似性を評価する。 第二部では、乱流の非線形相互作用の物理空間における局所性を議論する。具体的には、Navier-Stokes方程式の非線形項を空間局所に制限した系を通じて、非線形相互作用の空間局所性とマルチスケール性の関係を調べる。その結果、半径Rの空間局所領域で定義される非線形相互作用が波数$\geq 1/R$でのエネルギーカスケードを維持しうることを明らかにした。 第三部では、大スケール変動が励起する乱流の非平衡スケーリングを議論する。まず、大スケールの非一様性をエネルギースペクトルの$k^{-5/3}$波数スケーリング周りの摂動として考慮することで、$k^{-7/3}$に比例する非平衡スケーリング修正を導出する。この平衡スケーリングより波数の関数としてはやく減衰する非平衡スケーリングは数値的に確認された。さらに、同様の手法を大スケールの非一様性と非定常性に対して適用することで、無次元化されたエネルギー散逸率とReynolds数の変動の間に統一的に成立するスケーリング則を提案する。	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (荒 木 亮)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教 授	後藤 晋
	副 査	教 授	河原 源太
	副 査	教 授	杉山 和靖
	副 査	教 授	半場 藤弘 (東京大学)
論文審査の結果の要旨 本論文には、流体の乱れた運動（乱流）の維持機構であるエネルギーカスケード現象に関する研究成果がまとめられている。エネルギーカスケード現象は、乱流の小スケールの統計の普遍性やコルモゴロフの相似則の起源を理解する上で極めて重要な概念であり、これまでに多くの研究がされてきた。しかし、乱流は強い非線形性を伴う現象であり、その数理的な理解は十分ではなかった。本研究では、この基盤的な問題に対する理論的なアプローチを行った。具体的な研究成果は、以下の通りである。（一）時間的に定常な境界条件あるいは外力に駆動される乱流であっても、そのエネルギーやエネルギー散逸率が時間周期的に時間変動することが知られる。この準周期的な挙動は、まさにエネルギーカスケード現象に関係する。本研究では、まず、フォン・カルマン流とよばれる流れにおけるこの準周期的挙動の物理的起源を解明した。次に、周期境界条件下で定常外力に駆動される乱流の準周期的挙動の統計を詳細に調べ、低レイノルズ数における周期流と高レイノルズ数における乱流の準周期的挙動の接続性を明らかにした。さらに、得られた知見に基づいて、乱流の準周期的挙動を的確に模擬するミニマルモデルを提案した。（二）エネルギーカスケードはスケール局所的に起こることが知られる一方で、その空間局所性に関しては議論の余地があった。そこで本研究では、非線形相互作用を人工的に空間局所に限定した力学系を構築し、その挙動を数値的に調べた。その結果、相互作用距離よりも短いスケールに対しては、通常と同様のエネルギーカスケードが維持され、コルモゴロフの相似仮説から予想されるエネルギースペクトルの3分の5乗則が観察されることを示した。一方で、相互作用距離も長いスケールに対しては、非線形相互作用に起因する渦伸長が抑制されるために、エントロフィが実質的に保存量となり、エネルギースペクトルの3乗則が観察されることを示した。（三）コルモゴロフの相似仮説の破れに関する研究を行った。具体的には、空間的な非一様性および時間的な非定常性がある場合の乱流統計量の理論的な解析を行った。その結果、エネルギースペクトルのコルモゴロフ則からのずれや、エネルギー散逸率の平均値からのずれの挙動を統一的に記述する枠組みを提案した。以上、（一）から（三）のいずれの研究成果も乱流の統計理論に関する全く新しい知見を与えるものであり、博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認める。			