

乱流中の情報の流れ

理学研究科 宇宙地球科学専攻

助教 田之上 智宏

Researchmap <https://researchmap.jp/TomohiroTanogami>

研究の概要

乱流には普遍的統計則が宿っていると予想されているが、乱流ゆらぎが示す強い非線形性・非平衡性ゆえに、その証明は古くからの難問である。近年、熱力学と情報理論を統合した情報熱力学が確立し、非平衡状態にあるゆらぐ系が従う普遍的統計則の解明が進展している。本研究では、この情報熱力学を乱流に適用することで、乱流ゆらぎが示す普遍的性質の一端を解明した。具体的には、速度場に関するゆらぎの情報がマクロスケールからミクロスケールへと伝搬されていることを証明した。さらに、このスケール間の情報伝搬によって、乱流ゆらぎが増幅されうることも明らかとなった。これらの結果は、乱流の新たな性質を解明したものであると同時に、情報熱力学的観点から流体現象を理解するための新たなアプローチをもたらしていることを示している。

研究の背景と結果

乱流はさまざまな空間スケールの渦からなる乱雑な流れであり、宇宙空間から生体内に至るまで遍在的に現れる。一見すると乱流の振る舞いには何ら規則性がないように見えるが、その背後には系の詳細によらない普遍的な統計則が宿していると予想されている。この乱流ゆらぎが従う普遍的統計則を明らかにすることは「理論の墓場」とも称される古くからの難問である。この困難の背後には、幅広いスケールにわたる非線形相互作用がある。この非線形相互作用によって、かけ離れたスケール間のゆらぎが干渉し合い、スケール分離に基づく従来の理論解析が通用しなくなる。

一方で統計物理学分野においては、非平衡状態にあるゆらぐ系に対して熱力学的枠組みを拡張する試みがなされ、90年代にはゆらぐ系の普遍的統計則を論じる理論的枠組みが確立した。特に、2010年代にはそれをさらに情報理論と融合させた情報熱力学という枠組みが確立し、情報という概念がゆらぐ系が従う普遍的統計則を理解する上で本質的であることが明らかにされた(図1)。情報熱力学は量子系から生体系に至るまで幅広く応用され始めているが、流体現象に対しては有用な知見をもたらすかどうかは不明であった。

本研究では、この情報熱力学を乱流に適用することで、乱流ゆらぎが従う普遍的性質の一端を解明することを目指した。その結果、ゆらぎに関する情報がマクロスケールからミクロスケールへ、いわば伝言ゲームのようにスケール間を順繰りに伝搬していることが明らかとなった(図2)。これは普遍的かつ厳密な結果であり、数値モデルの種類や詳細によらず成立する。また、このスケール間の情報伝搬の大きさが乱流ゆらぎの下限を定めていることも判明した。すなわち、任意のあるスケールにおける乱流ゆらぎは、それよりも大きいスケールからのゆらぎの情報を受け取ることによって増幅されうる。これらの結果は、乱流ゆらぎの新たな性質を解明したものであると同時に、情報熱力学的観点から乱流に対する新たなアプローチとなりうることを示している。

研究の意義と将来展望

本研究は、情報熱力学を流体現象に適用した世界で初めての例である。この学際的なアプローチをさらに推し進めていくことで、乱流に限らず、さまざまな流動現象の予測・制御の普遍的限界を解明する「情報流体力学」とでもいふべき新しい流体科学を構築できる可能性がある。特に、この情報熱力学的観点を従来のデータ同化や機械学習と組み合わせることで、気象予測・制御の精度向上に繋げていくことができると期待される。

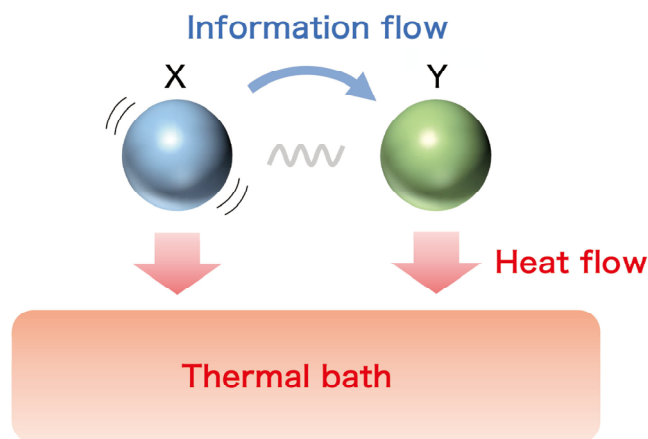


図1：情報熱力学の典型的な設定。マクロな平衡熱浴に接した部分系XとYのゆらぎの性質が部分系間の情報の流れによって普遍的に制限される。

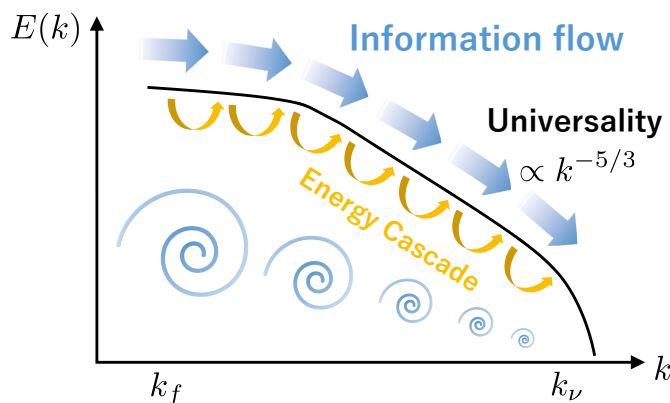


図2：乱流が示すエネルギースペクトルの波数依存性およびスケール間の情報伝搬の概念図。

特許

論文

Tanogami, Tomohiro; Araki, Ryo. Information-thermodynamic bound on information flow in turbulent cascade. Physical Review Research. 2024, 6, 013090. doi: 10.1103/PhysRevResearch.6.013090

Tanogami, Tomohiro; Araki, Ryo. Scale-to-scale information flow amplifies turbulent fluctuations. Physical Review Research. 2025, 7, 023078. doi: 10.1103/PhysRevResearch.7.023078

Tanogami, Tomohiro. Scale locality of information flow in shell models of turbulence. Journal of Statistical Mechanics. 2025, 093405. doi: 10.1088/1742-5468/adff66

参考URL

<https://sites.google.com/view/tomohiro-tanogami/%E3%83%9B%E3%83%BC%E3%83%A0japanese>

キーワード

乱流、情報熱力学、統計物理