

2026年2月17日

報道関係者各位

慶應義塾大学
筑波大学

小さなゆらぎが大きな構造へ：逆カスケードの新機構 —一般化対称性に由来する保存量が大規模構造を導く—

味噌汁をおたまでかき回すと、最初は大きな流れがしだいに細かい渦に分かれていきます。このように「大きな構造が小さな構造へ砕けていく」現象は、流体の非線形な時間発展として現れる乱流^{*1}の典型例です。しかし、条件によっては逆に、小さな渦が集まってより大きな渦や流れの構造へ成長していく逆カスケード^{*2}が起こることがあります。

慶應義塾大学理工学部の山本直希教授、同大学商学部横倉諒助教、筑波大学システム情報系の広野雄士准教授、中国科学院大学杭州高等研究院の鎌田耕平特聘副研究員らの研究グループは、近年注目される一般化対称性^{*3}に基づき、逆カスケードを生み出す新しいメカニズムを提示しました。本研究では、アクシオン電磁気学^{*4}と呼ばれる理論を用いて、一般化対称性に対応する保存量によって、電磁場がより大きな構造へと成長していくこと、さらにその進み方が「形は保ったままスケールだけが変わる」自己相似的なスケーリング則（指数）^{*5}で特徴づけられることを、解析的手法と数値シミュレーションの両面から明らかにしました。本成果は、乱流現象の新たな普遍性の可能性を示すとともに、初期宇宙のインフレーション期^{*6}における電磁場の増幅過程の理解にも手がかりを与えると期待されます。

本研究成果は、2026年2月13日（現地時間）に米国物理学会誌『*Physical Review Letters*』のオンライン版にて公開されました。

1. 本研究のポイント

- ・一般化対称性に由来する保存量が制約として働くことで、乱流のような非線形系で逆カスケードによる大規模構造の形成を導く新しいメカニズムの提案
- ・アクシオン電磁気学を対象に、逆カスケード過程の自己相似的なスケーリング則（指数）を解析的に導出し、数値的計算で整合性を確認
- ・一般化対称性によって特徴づけられる、系の詳細に依らず異なる物理系にまたがって現れうる乱流ダイナミクスの普遍性の可能性の示唆

2. 研究背景

乱流現象は、私たちの身の回りに数多く見られます。たとえば、コーヒーに注いだミルクの混ざり方、タバコの煙のゆらぎ、飛行機で耳にする「乱気流 (turbulence)」のアナウンスなどです (図 1)。さらに視野を広げれば、太陽の磁場の活動など、自然界のさまざまな場面でも乱流的な振る舞いが現れます。乱流の典型的な特徴の一つは、「大きな構造が小さな構造へと砕けていく」ことです。しかし、条件によっては逆に、小さな渦や揺らぎが集まり、より大きな構造へと成長していく逆カスケードが起こります。たとえば、塩水の薄い層のような実質的に 2 次元の流れでは、3 次元の流れとは異なる保存量が存在するため、逆カスケードが生じることが知られています。



図1 水中の青いインクの乱流

一方、近年の理論物理学では、点粒子に対する対称性だけでなく、線や面（ループや膜）といった「広がった物体」に対する一般化された対称性が、場の理論や物性現象の理解を深める枠組みとして発展してきました。しかし、このような対称性が乱流のような非線形現象にどのような影響を及ぼすのかは、これまで十分には明らかになっていませんでした。

3. 研究内容・成果

研究グループは、アクシオン電磁気学と呼ばれる理論を対象に、場が非線形に相互作用して生じる乱流的な時間発展を解析しました。その結果、線（1次元的）のように広がった対象に対応する一般化対称性に由来する保存量が、系の時間発展を拘束することを発見しました。これによって、小さなゆらぎがより大きなスケールへ移る逆カスケードが引き起こされることを示しました。さらに、この逆カスケードの進み方が「形は保ったままスケールだけが変化する」自己相似的なスケールリング則で特徴づけられることを解析的手法と数値シミュレーションの両面から明らかにしました（図2）。

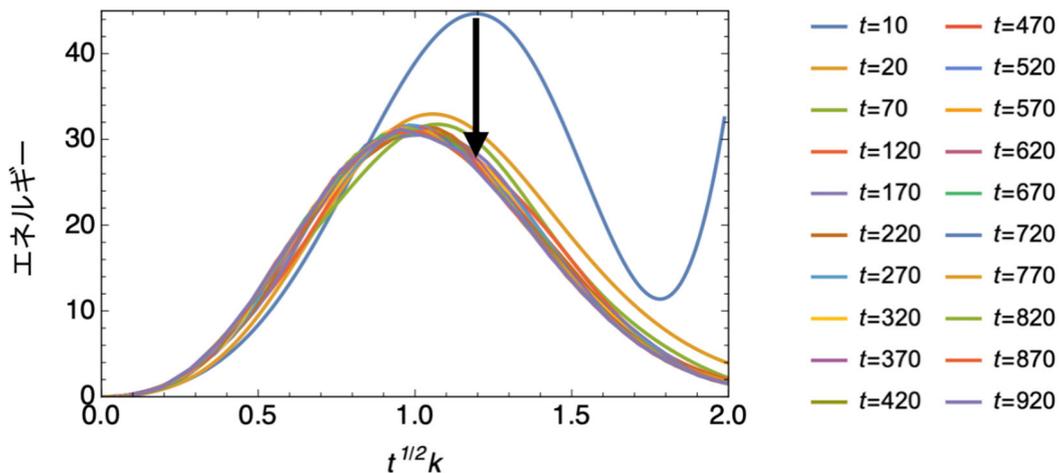


図2 さまざまな時刻 t におけるエネルギーのスペクトル（波数 k ごとのエネルギー分布）を変数 $t^{1/2}k$ の関数として表示したもの。時間が十分に経つと、黒い矢印で示すように、異なる時刻の曲線が1本の曲線に収束し、自己相似的なスケールリング則に漸近していく様子が読み取れる。

4. 今後の展開

本研究の結果は、乱流ダイナミクスに新たな普遍性が存在する可能性を示しています。今後は、逆カスケードや自己相似的なスケーリング則がどの範囲まで一般に成り立つのか、より広い非線形系へ拡張して検証していくことが課題です。

また、本成果は具体的な物理系での応用も期待されます。たとえば、磁性体などで磁気ゆらぎが「有効的なアクシオン場」として振る舞う物質を用いることで、今回提案された乱流的ダイナミクスを物性実験で実現・検証できるかもしれません。さらに宇宙論の分野では、初期宇宙のインフレーション期にアクシオン場が存在した場合、電磁場の増幅過程で類似のダイナミクスが現れる可能性があります。このような現象が観測や宇宙モデルに与える影響を調べるなど、今後の現象論的研究への展開が期待されます。

※本研究は、日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費補助金 (課題番号: JP22H05111, JP22H05118, JP24K23186, JP23K17687, JP22H01216, JP24K00631, JP21K13928, JP25K17394)、JST, PRESTO (課題番号: JPMJPR24K8)、および中国国家自然科学基金 “Theoretical Physics Special Fund for Quantum-Cosmic Theoretical Physics Center” (課題番号: 12547104) による支援を受けています。

<原論文情報>

Yuji Hirono, Kohei Kamada, Naoki Yamamoto, Ryo Yokokura, “Self-Similar Inverse Cascade from Generalized Symmetries” *Physical Review Letters*, (2026).

・ DOI <https://doi.org/10.1103/hyfx-91gm>

<用語説明>

※1 非線形な時間発展と乱流: 入力 (原因) と応答 (変化) が比例せず、効果を単純に足し合わせられない性質を「非線形」と呼ぶ。流体においては、流速の時間変化を決める式の中に流速そのものに依存する非線形項が現れるため、かき混ぜた味噌汁の中のように、運動が複雑で不規則になりやすい。こうした状態を一般に乱流と呼ぶ。

※2 逆カスケード: 小さな渦が合体して、より大きな渦や大規模な流れの構造が成長する現象。

※3 一般化対称性: 従来の対称性が点粒子に着目するのに対し、線や面 (ループや膜) のように広がった対象に対して成り立つ対称性を指す。粒子数のように空間全体で定義される保存量とは異なり、空間の一部で定義される保存量が現れる。

※4 アクシオン電磁気学: 通常電磁気学に、アクシオンと呼ばれる場が結合する理論。

※5 自己相似的なスケーリング則: 時間が経っても形は保たれたまま、スケールだけが一定の規則で伸び縮みする振る舞いを自己相似的と呼ぶ。その変化の規則をスケーリング則といい、ある特徴的な長さが時間のべき乗で変化するなどの普遍的な指数 (スケーリング指数) で表される。

※6 インフレーション: 宇宙が誕生して間もない時期に起きたと考えられている、極めて短時間の急激な加速膨張のこと。この膨張を起こす仕組みには複数の理論モデルがあり、その候補の一つとしてアクシオンのような場が関与するシナリオが提案されている。

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

・研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 物理学科 教授 山本 直希 (やまもと なおき)

TEL : 045-566-1574 E-mail : nyama@rk.phys.keio.ac.jp

筑波大学 システム情報系 知能機能工学域 准教授 広野 雄士 (ひろの ゆうじ)

E-mail : hirono@iit.tsukuba.ac.jp

- 本リリースの配信元

慶應義塾広報室 TEL : 03-5427-1541 FAX : 03-5441-7640

E-mail : m-pr@adst.keio.ac.jp <https://www.keio.ac.jp/>

筑波大学広報局 TEL : 029-853-2040 FAX : 029-853-2014

E-mail : kohositu@un.tsukuba.ac.jp <https://www.tsukuba.ac.jp/>