

( 続紙 1 )

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                     |    |        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----|--------|
| 京都大学                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 博士 ( 理学 )                                                           | 氏名 | 田之上 智宏 |
| 論文題目                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Universality and Information Flow in Turbulence<br>(乱流における普遍性と情報伝達) |    |        |
| <p>(論文内容の要旨)</p> <p>十分に発達した乱流の法則を理解することは物理学において基本的問題のひとつである。乱流はエネルギーのカスケード伝達によって特徴づけられるが、その統計的性質を完全に明らかにする問題は未解決のままである。その一方、乱れた場の時間発展は様々な系で観察されており、その中でカスケード伝達を示す現象が標準的な流体乱流の他にどれくらいあって、それらはどのように分類されるのか、という別の問題が提起される。また、近年の情報熱力学の発展を踏まえて、カスケード伝達における情報の流れを問うのも自然で新しい問題である。本論文では乱流におけるこれら二つの新しい問題が議論される。</p> <p>具体的に、第2章では、オンサーガの理想乱流理論がレビューされる。その理論の核心はエネルギーフラックスを非粘性極限における速度場の特異性と関係づけることにあると説明される。この方法を使って、第3章、第4章、第5章で、様々な系の乱流におけるエネルギーのカスケード伝達が議論される。</p> <p>第3章では、量子乱流が解析される。量子乱流を記述すると考えられているGross-Pitaevskii方程式が量子オイラー方程式に変換され、オンサーガの理想乱流理論が適用される。量子乱流においてもエネルギースペクトルには通常の乱流を特徴づけるコルモゴロフ則が観測されていたが、その理論的説明が与えられることになる。それに加えて、量子応力の効果により、ある高波数領域で新しいカスケード伝達が生じることが示される。</p> <p>第4章では、気液臨界点近くの乱流が議論される。臨界点近くでは密度ゆらぎの相関長がいくらでも大きくなるので、乱流ゆらぎの散逸長より長くなりえる。この状況のカスケード伝達を理論的に解析するために、ファンデルワールス応力の寄与を取り入れたNavier-Stokes-Korteweg 方程式によって乱流が記述されると仮定される。この方程式は、量子オイラー方程式の形と類似しており、オンサーガの理想乱流理論で議論される。その結果、普遍性クラスが同一であることが示される。</p> <p>第5章では、2次元もしくは3次元の格子上で定義された局所相互作用するXYスピン多体系においてカスケード伝達が生じるモデルが提案される。このモデルは特定の現実系を記述するものではなく、非コルモゴロフクラスを示すミニマル模型に位置している。実際に、コルモゴロフ則とは別の普遍性クラスになる機構が説明され、その振る舞いはスピン乱流や大気乱流と類似していることが指摘される。</p> <p>第6章の情報熱力学のレビューを踏まえて、第7章では乱流においてカスケード伝達でエネルギーが流れるだけでなく、情報も伝達される様子が定式化される。具体的に、Sabraシェルモデルに対して、ある決められた波数の高波数側と低波数側の二つの部分系に分けて相互情報量の時間変化から学習率が計算される。また、情報熱力学第2法則から効率が定義され、その値はマクスウェルの悪魔の研究などで知られている値に比べて極めて小さいことが分かる。</p> <p>第8章は全体のまとめであり、今後の展望が述べられる。</p> |                                                                     |    |        |

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

乱流研究の歴史は長く、現在でも難問への挑戦が続いている。本論文の大きな特徴は、既存の問題を研究するのではなく、新しい問題を提案することにある。コルモゴロフ則は乱流の普遍性を象徴する法則として知られるが、それをひとつの普遍性クラスとみなし、その他にも様々な普遍性クラスがあるはずだと予想することから研究がすすめられる。その際、まず、カスケード伝達を示す大自由度系を広い意味の乱流だとし、その分類がカスケード伝達の性質や機構に着目することでなされる。このような分類理論を目指すこと自体が既知の研究にはなく、本論文の独自性をあらわしていると評価される。

本論文では、このような大きな目標の達成を目指して、標準的乱流ではないカスケード伝達が幾つか明らかにされる。量子乱流や気液臨界点近くの乱流では、それぞれ新しい応力の寄与が担うカスケード伝達は新しい現象であり、今後、実験によりその予言の正否が確かめられるであろう。特に、臨界ゆらぎの相関長が乱流ゆらぎの散逸長を超える現象は実験で実現されるだけでも興味深いものであり、そのような実験がなされたときには、まず参照されるのが本論文の結果であり、その意義は極めて大きい。また、臨界現象におけるIsingモデルやHeisenbergモデルを想起すればわかるように、カスケード伝達を示す最小模型を提案してその解析を行うことは分類理論への第一歩となる結果であると認められる。

本論文の第2部では、乱流に対してさらに別の問題が設定される。エネルギーカスケード伝達に付随する情報の流れが取り上げられる。近年、ゆらぎの熱力学が成熟し、情報理論と統合された情報熱力学が発展してきた。そこで得られた考えに沿って定式化される乱流における情報の流れは、理論的に自然な量である。乱流のカスケードに伴う情報流は、本論文において初めて議論されたものであり、その着眼の良さは高く評価される。そこで計算された学習率は大きさの程度としては合理的なものであり、異常に低い効率の位置づけなど不明な点はあるものの、今後の研究の起点となることは間違いない。

ただし、乱流における普遍性による分類や情報伝達を実験科学にまでつなげるまでの道のりは遠い。今後、乱流に関わらず、大自由度の複雑な系において情報の流れを定量化することで、質的に新しい予言や制御につながるような研究に発展することが期待される。

以上のように、本論文は、乱流における新しい側面、普遍性による分類および情報伝達、について重要な結果を提示している。それぞれの章の関係が説明されるなど、論文全体として138ページにわたって丁寧に書かれている。

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5年1月16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。

要旨公表可能日：                      年                      月                      日以降