

# 広がり巻き込む乱流現象

## 乱流の特集について

会誌編集委員会で企画した乱流の特集がここに完成した。乱流は多様でどこにでも現れるが、明快な定義がないぐらい広範囲なものである。広い視点からの乱流を集めたこの特集が、乱流の普遍性と多様性を鮮明にしていくだろう。

**1. 発達した乱流** 乱流構造の起源を解説している。その本質を異なるスケール間のエネルギーの流れととらえ、それが階層をカスケードしていく動的な非平衡状態をできる限り視覚化している。その構造は、時間空間的に大きく揺らぐ間欠性と非平衡性の上に成立する自己相似で頑強な構造であることが議論される。バンドパスフィルターを通して見えてくる実空間での鮮明な視覚化に驚いている。親渦がその周りに伸長場を誘導し、垂直な子渦がたくさんできていく。その子渦が同様に孫渦を作っていく…。乱流の非線形性とはこのようなものかと感動する。

このような乱流へ至るいくつかのルート（図参照）が、以下様々な視点から解説される。

**2. 層流・乱流遷移** ここではマクロに実現する乱流が議論される。層流状態からレイノルズ数  $Re$  を大きくしていくとまず局在乱流が発生し、それが下流の全領域に浸透するように拡散し乱流に至る。これが「有向パーコレーション」と呼ばれる非平衡相転移現象と同相であるらしいことを学び、その普遍性に驚いている。

**3. 粉体乱流** マクロな流体もマイクロに見れば「粒」だろう。このような粉体は少しでも散逸があれば熱力学的極限  $N \rightarrow \infty$  で流体となりその不安定性から乱流になっていくようだ。乱流は、ナビエ・ストークス方程式に限らず、ボルツマン方程式やもっとマイクロな粒子のニュートン力学的な記述においても出現する、というのは自然ではあるが驚きである。粉体の自己重力系でも乱流になりうるのだろうか？ 一面では、流体と粉体は、マクロに見るかマイクロに見るかの違いであって、乱流はそのような階層を超えた普遍的な構造なのかもしれない。

**4. 量子乱流** 量子力学のマクロ状態であるボーズ・アインシュタイン凝縮も乱流になるらしい。散逸がないので  $Re = \infty$  だろうか。この凝縮体を記述するグロス・ピタエフスキー方程式はオイラー方程式を内包するので流れは出るだろうが、散逸も剪断応力もないのに、どうやって渦や乱流ができるのだろうか。境界から乱流が広がるのか、あるいは大きな流れの時間変化が、(シュヴィンガー効果類似的) 渦対生成を起こすのかもしれない。このような完全流体は、強い相互作用においてもクォークやグルーオンからなるプラズマ状態として出現するようだ。ハドロン化する前に、これも乱流になるのだろうか？ 興味は尽きない。

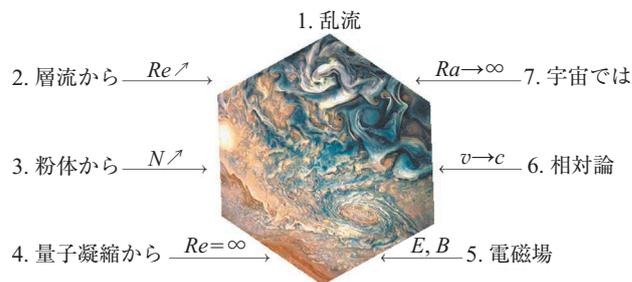


図1 乱流に至る6つのルートが本特集で解説される。  $Ra$  はレイリー数。宇宙では重力定数  $G$  も入っている…。画像は [jpl.nasa.gov](http://jpl.nasa.gov) (Juno から見た木星)。

**5. プラズマ乱流** 電磁場、特に磁場が絡んでくると乱流は様々な波動や不安定性が噴出して一気に複雑化する。宇宙のプラズマは活動的な天体に攪乱されて自然に乱流となる。プラズマはマイクロに見ればローレンツ力の入ったブラゾフ/ボルツマン方程式で記述される。磁場が効きだすと磁気流体力学で記述される。ここでもマイクロとマクロな側面が状況に応じて現れ乱流となるのは面白い。

**6. 相対論的乱流** 宇宙には種々のジェットやブラックホール磁気圏など速度が光速に近い場合や、熱エネルギーや磁気エネルギーが相対論的になる場合が数多くある。従って宇宙プラズマ乱流には相対論的な記述が必須となる。乱流の速度が音速やアルヴェーン速度を超えるため、流体の圧縮性の効果が顕在化するほか、非相対論的領域では見られなかった乱流モード間の結合が生じる。これら相対論効果が乱流に及ぼす影響の解明はまだ発展途上とのことだが、今後の進展に期待したい。

**7. 天体现象における乱流の役割** ここでは、従来の衝撃波による宇宙線の系統的な加速ではなく、乱流によって荷電粒子が多数回散乱され、一部分が統計的に加速していく新しい加速機構が論じられる。乱流が単にランダムで拡散的な運動状態であるだけでなく、系統的に粒子を加速していく可能性があることを知って驚いている。ガンマ線バースト、フェルミバブル、パルサー星雲においても、乱流だらけなので、この乱流による統計的粒子加速機構が効いている可能性があるようだ。乱流がコヒーレントな構造をもつことが推察されて面白い。

乱流の多様性は、本特集で取り上げられたもの(図の6方面)に収まるものではないだろう。乱流の本質が、保存する流れの中で階層的に作られる動的で頑強な非平衡状態であるなら、もっと広い普遍性をもつだろう。エネルギーの流れに限らず、熱流、情報流、交通流や、人や貨幣の流れ、あるいは角運動量や重力エネルギーの流れがある場合、どのような乱流の構造が出てくるのか楽しみである。

(2018年3月31日原稿受付、  
文責：森川雅博，会誌編集委員会)