



小特集 長距離相関による自己組織化

7. おわりに

羽 鳥 尹 承

神奈川大学理学部情報科学科

(原稿受付：2011年5月9日)

ここに紹介された各分野の長距離相関による自己組織化現象は感覚的にも明確にその共通性が理解できる。一方、詳しく見れば違う点も数多く存在する。これらを総括する物の見方や原理などは今のところ見つからない。しかし1ないし2年後には単なる感想ではない何らかの共通概念を探したいと思う。以下では今の時点で気がついたこと、わからないこと、したがって興味深いことなどを書いてみたい。

「複雑系」という概念がある。「同種のあるいは似かよった多くの要素からなる系がその構成要素自身は持っていないまったく新しい性質を創発している系」のことを複雑系と呼んでいる。最も典型的な複雑系は「脳」という系であろう。神経細胞という要素が集まって脳を構成し神経細胞にはないまったく新しい脳機能を創発している。

本小特集の「自己組織化」は複雑系の研究課題のなかでも中心的な課題である。自己組織化では、構造のない初期状態から、特定の外部境界条件の下、新しい終構造に変化する過程を解明しようとしている。本小特集で扱った現象の中には一見して多数の要素から成り立っていない場合もある。しかし、拡大解釈すれば複雑系と考えられないことはないと思う。時間発展を記述する基礎方程式が偏微分系である場合には、複数の方程式系ではあるが決して大きな数ではない。それでもこの過程を解明することは困難で十分「複雑」である。基礎方程式と初期・境界条件がわかったからといって、それが示す現象を理解したことにはならない。両者の間には大きなギャップがある。偏微分方程式は時間、空間的に局所的な関係式と見なせる。この局所的な関係式を「要素」としてこれを集め、全体空間と長い時間帯にまで拡張したものを「系」と考えれば偏微分方程式系は複雑系と考えても良いかもしれない。

唐突ではあるが、今回初めて気がつき目から鱗が落ちた思いを紹介したい。流体方程式系が示す渦現象は長距離相互作用の結果だと言ってもよい。ある場所の渦がビオ・サヴァール則にしたがって遠距離の別の場所に流れの速度場を発生させる。しかし、もともと流体の式は多数の粒子系の振る舞いを時間的にも空間的にも粗視化して得られるものである。要素となる多くの粒子間の相互作用は決して長距離力ではない。すなわち、短距離力の多くの粒子が集ま

ると長距離相関を生むのが渦という現象である。これも典型的な複雑系ということができる。

非中性プラズマの研究が近年盛んである。特に電子プラズマの場合はそれ自体では斥力のため有界な系にはならないので閉じ込めるために外部磁場が必要となる。このとき電子群は互いにクーロン力で相互作用をするという描像が消滅してビオ・サヴァール則に支配される系に変身する。本来はスカラーポテンシャルの相互作用がベクトルポテンシャルの相互作用に変身したこととなる。

非圧縮性の一樣等方性乱流は壁などの非等方性を排除した十分に小さなスケールで見た乱流として長い研究の歴史がある。エンストロフィーの等値面の空間的な間欠性など是有名である。旋回運動とせん断運動を区別するため渦の中心軸を同定する可視化を行うと乱流中に局所的な反平行な渦対が発見されるらしい。一樣等方な世界でもフラクタルな空間構造を持ち大きなスケールの自己組織化現象が存在することが確かめられたのは興味深い。乱流における混合・輸送効果はプラズマにおいても古くから異常輸送として中心的課題の一つであった。レイノルズ数無限大の極限とオイラー方程式とは明確な違いがあることも面白い課題である。ナビエ・ストークス方程式のミレニアム問題というのはこのことに関係しているのだろうか知りたいものだ。圧縮性の効果は非圧縮性の乱流の性質を弱めるそうであり、興味深い。

量子渦はGP方程式という非線形シュレディンガー方程式で記述されるそうだがそれも近似的には超流動流体と粘性流体の2流体モデルで記述されるらしい。このことより量子力学的現象であっても古典渦との共通点は多々あるに違いない。渦乱流、渦格子などの存在は共通している。どこが本質的な違いなのかを明確に理解することが最も重要だろう。量子渦の循環はすべて量子化され、しかもすべて等しい。しかしこのモデルは古典点渦系のモデルでも同じである。また、量子渦は位相欠陥である。このことは古典渦と量子渦の間にどのような物理的違いを生んでいるのだろうか。さらに、渦芯のサイズであるコヒーレンス長はどのような違いを生むのだろうか。液体ヘリウムの超流動液体と近年の冷却原子気体BECの渦ではどのような違いがあるのだろうか興味深い。

7. Conclusion

HATORI Tadatsugu

author's e-mail: hatori@info.kanagawa-u.ac.jp

逆2乗則の力で相互作用している閉じた多体系は重力系以外には考えられない。電荷を持つクーロン系では外場の助けがない場合斥力になるからである。宇宙における大域的構造の緩和過程においては流体近似が成立しないそうである。分布関数を使って記述され無衝突系に近い。宇宙の進化を論ずるときにカオスが役割を果たすということ、それも自由度の大きなカオスであることなどは興味深い。しかも単純な緩和ではなくカオスの遍歴をするのも面白い。多くの天体が存在するとカオスのリアプノフ数は何故か非常に微小になるらしく弱いカオスの世界となっている。このような状況であるから「新しい統計力学」を構築する必要があるため、野心的な研究意欲をかきたてられる。宇宙にはダークマターやダークエネルギーが大量に存在すると聞いているので、天文学の観測データとシミュレーションや理論的結果と突き合わせる時に困難が生じなければよいかと懸念している。

核融合プラズマ閉じ込めにおいて、RFPのフォースフリー配位への緩和はテラーの理論として知られていて私も興味を持っていた。この理論にはさらに先行研究がありチャンドラセカール・ボルジャーの理論があり宇宙における緩和過程の理論として知られているそうである。電流には遮蔽効果はなくむしろ逆に細い電流が集まって束をつくる方向に自己組織化されるということだろうか。テラー以来現在にいたるまで実験的にも理論的にも発展があったようであるので勉強したい。ただ、この緩和過程はすべて変分原理的に理解できるのだろうか。RFPに限ることなく、自己組織化はすべて何らかの変分原理で記述されるべきものなのだろうか。最近の研究の中では、プラズマ中の

静電場の役割、したがってプラズマの流れの役割、が重要視されていると私は理解した。

非中性プラズマの研究が近年盛んに行われてきたが、その面白さや意義がわかりかけてきた。ダストプラズマも近年研究が進んだ分野である。両方とも静電場が重要な役割を担うわけである。しかし、実は本質の違いがあって後者はクーロン力の世界であるのに対して、前者はビオ・サヴァール則の世界である。すなわち渦現象の一種である。もとは重力多体系のために開発されたMDGRAPEという特殊目的並列計算機をビオ・サヴァール則に基づく渦現象に応用し、2次元の場合は点渦系として大規模直接シミュレーションが展開され、いろいろ新しいことが明らかになりつつある。現在は2次元に限っているが将来は3次元渦糸系の直接シミュレーションや、拡張されたMHD系の電流・渦糸モデルによる直接シミュレーションへ拡張されることを望みたい。2次元の逆カスケードと呼ばれる現象はよく知られていて、本特集ではこれを自己組織化と呼び変えたい。3次元世界で起こる自己組織化は局所的には2次元自己組織化が起こっているはずだから3次元を理解する上でカスケード過程と逆カスケード過程の絡み合わせで理解したいものだ。2次元では渦は近接すればマージするが、離れると互いに回転するだけである。したがって渦群がカオス的に運動する中で接近した渦どうしがマージを重ねて自己組織化されるというイメージになるであろう。

以上、各話題ともきわめて興味深く読ませていただき著者に感謝するとともに、これらを総合的に理解する試みに挑戦してみたくなった。一つの手掛かりは情報科学的な自己組織化へのアプローチが参考になるのかもしれない。