

階層構造は存在するか？—流体とプラズマの科学的記述をめぐって—

草野 完也

独立行政法人海洋研究開発機構

時間空間スケールの違いによって全く異なる振る舞いを示す現象があることは様々な分野で良く知られている。ミクروسケールでは離散的な分子の集合体が、マクروسケールでは流体や弾性体として集団的に振る舞うことはその典型である。こうした現象の階層性は様々な多体系においてしばしば現れる。多体系における階層的現象を如何に記述し、理解するべきかは多くの科学分野における重要な課題となっている。

ミクروسケールの法則の総体としてマクروسケールの現象は現れるので、ミクロスケールの法則によって原理的に現象を「記述した」とする立場もある。しかし、バルク物質に含まれる原子の数、雲を構成する水滴の数、宇宙に存在する銀河の数、経済活動に参加する個人や事業体の数、生態系を構成する個体の数などはおびただしい。こうした超多体系では、ミクロスケールの法則を知り得たとしても、システムとしての多体系における解を得ることはできない。それゆえ、ミクロスケールの法則は現象理解の助けにほとんどならない。

こうした観点から、流体や荷電粒子系の気体であるプラズマでは、マクロスケールの法則性を統計的手法とある種の近似のもとに導出する試みが進められた。微量である平均自由行程とマクロスケールの比をスケールパラメタとしてボルツマン方程式から流体力学方程式を導く、チャップマン・エンソック展開はその最も代表的な数学的手順である。その結果として導かれるオイラー方程式やナビエ・ストークス方程式は流体现象の理解に極めて重要な役割を果たす。

イオンと電子から成る荷電粒子多体系であるプラズマにおいてもマクロスケールの法則性を抽出する試みが繰り返されてきた。ただし、プラズマでは衝突のみならず電磁場を介した相互作用が複数の特徴的パラメタを生み出すため、粒子的描像と流体的描像（特に、電子とイオンをすりつぶした 1 流体電磁流体力学）の間により複雑な階層性が生まれる。

しかし、こうした記述上の階層性はある種の近似のもとで導出される数学的フレームワークであり、現象の階層性をつねに明確に分離することが困難な場合があることが近年の研究から認識されつつある。例えば、階層性の分離が難しい現象として高温プラズマ中で発生する磁気リコネクションがある。磁気リコネクションは反平行方向を向く磁力線がつなぎ変わる現象で、太陽フレア、磁気嵐、核融合プラズマの崩壊現象などで重要な役割を果たす。磁気リコネクションは磁力線のトポロジーが変化するプラズマ中の大規模現象であり、その結果大規模なエネルギー解放が生じる。ただし、粒子衝突がほとんど起きない高温プラズマ中のつなぎ換えは、プラズマの粒子性に起因して生まれる電場によって生じる。それゆえ、磁気リコネクションはミクロスケー

ルからマクロスケールに至る多階層過程が相互に影響を与えあいながら進行するマルチスケール現象のひとつである。プラズマ以外でも、固体破壊、燃焼流体、雲なども同様のマルチスケール現象と捉える事ができよう。雲は水滴の集合体であり、その成長は個々の水滴の物理条件（粒径、エアロゾルなど）とマクロスケールの気象場に依存すると同時に、気象場そのものを変化させる働きをもつ。

こうしたマルチスケール現象を如何に記述するかは様々な分野に共通の大きな課題である。前述した通り、ミクロスケールの階層に立ち戻るならば原理的法則を書き下すことはできるが、現象の理解は困難となる。マクロスケールの階層にとどまるならば現象を記述することができない。それゆえ、階層間の情報交換を記述する新たな方法論と数学的枠組みを見出す必要がある。

数値的な手続きによってこれを行う方法論が近年提唱されている。こうした新しい数値的現象記述の概念として、“連結階層シミュレーション”、“**Heterogeneous Multiscale Method**”, “**Equation-free Method**”などが挙げられよう。本講演では、流体およびプラズマ現象を例にとり、現象の階層性と多階層性の両者を比較すると共に、階層を超える現象理解の新しい取り組みについて紹介する。