学位論文要旨

A study on the phenomenological method for the mesoscopic scale, focusing on the power laws and an analysis by using Shannon entropy

冪数則とシャノン・エントロピーを用いた解析を中心としたメゾスコピックスケールの現象論的方法論の一探究

環境資源共生科学専攻　森林資源物質科学大講座
丸岡敬和

本稿は自然における階層構造を意識しつつ、ミクロスケールとマクロスケールの中間に位置するメゾスケールにおける現象を概観し、そしてその方法論を探求することを目的とする。特に本稿ではメゾスケールにおいて特徴的、かつ頻出に見出されながら、未だその物理的解釈に置いて分かれている冪数則に着目し、それをシャノン・エントロピーを導入することで解析したことを一つの特徴としている。

メゾスケールはおおよそ 10^{-3}~10^{-9} の間のスケールに位置し、それは直接的に五感で接触可能なマクロスケールから、直接的な接触は困難でも計測機器において首尾よく観測される領域の間に位置する。現象としてはちょうど高分子および microfluidics がこのスケールに位置するが、この領域はマクロとミクロの計測手法が及ぶ中間に位置し、必然的な不均一性を伴っている。しかし、その領域自体はタンパク質が生体構造に関わることからも、また近年のテクノロジーの興味からも大変興味深い領域でありながら、既存の方法論が必ずしも適用できないむずかしさを持っている。著者が所属していた牛木研究室ではこのメゾスケールの方法論を伝統的に問題にし､著者はその上で研究をまとめる。

二章ではバイオテクノロジーの基礎技術を支えている microfluidics の観点から、ミリ・オーダーの現象を概観する。油を流れている管に、赤と青でそれぞれ着色された水滴をそれぞれ異なる管から syringe pump で生成し、それらを管を T 字路でつなぐことで、合流させる。すると赤と青の水滴の列ができるが､それがそれぞれの水滴周期でどのような規則性があるのかをモデル化した。今回はそれを床関数、天井関数を用いた Discrete model で記述した。

三章では対象はμオーダーを対象とした。油／水／界面活性剤を混合した系に動的ズリ流動場をかけることで、μm オーダーの単分散の多層球場構造ができることが知られている。そしてその球場構造の緩和過程がこれは指数に冪がかかった拡張型指数関数で記述できることがわかっている。この拡張型指数関数はメゾスケールにおいて頻出し、経験的によく緩和過程を記述していることが知られているが、その冪の由来は永く、そして今でも議論になっている関数である。ズリ速度として定速ズリ、矩形波ズリ、サイン波ズリと異なる振動数を用意し、それらの条件の違いがどのように緩和過程において現れるかを調査した。今回はその解析に緩和過程を記述する分布関数にシャノン・エントロピーを導入した。シャノン・エントロピーは情報論において選択肢の度合い、確率過程の均一性を評価する関数として導入されている。従来拡張型指数関数が緩和過程における分布の不均一性に由来することが示唆されていたため、その不均一性をシャノン・エントロピーで評価することを試みた。すると解析的に一次モーメントを導入したエントロピーは冪 $\beta=1$、つまり通常の指数関数で最大になることがわかった。このことから拡張型指数関数は不安定な緩和過程であることが示唆され、他の研究報告とともに考察し、整合性があることが示唆された。

四章では三章の方法論を発展させ、核関数を指数関数にした場合において得られる分布関数のエントロピーの挙動及び、エントロピーに導入する統計量を二次、n 次モーメントや分散に変えた場合の挙動を考察した。

五章では三章において拡散現象との関連が示唆されたことから、議論を抽象化し、拡散定数が冪的に時間変化する系を考察することで拡張型指数関数の自己相関関数を得た。さらに拡張型拡散方程式からボルツマンのエントロピーを計算し、シャノン・エントロピーとの関連性を考察した。後半では Bunde 等のスケールサイズの有限性から拡張型が生じるとの報告から示唆され、有限性による揺らぎが顕である場合に、それらの影響は現象関数にどう寄与するかが考察された。そのような関数はスケールによって、現象する関数はその冪は変化し、スケールの増大と共に冪 $\beta=1$ へと収束することがわかった。そしてこれらの考察から、この問題は Barenblatt によって体系的にまとめられた intermediate asymptotic 及び second kind problem と関連することが示唆され、さらにスケールとの必然的な関連性が示唆された。

六章では総論として、一章での問に答える形で冪数則がやはり有限スケールによって引き起こされていることを議論する。その上で今後のメゾの方法論にはこの有限性の前提が欠かせないこと、またその有限性を前提とした方法論をさらに考察することで、今後のメゾスケールの研究との展望として議論した。その際他の学問研究との関連性も議論した。