

ラメラ相におけるコロイド粒子の動的階層構造

九州大学大学院理学研究院物理学部門 木村康之¹

1 はじめに

生体をはじめとするソフトマターで構成される複合系はその内部にさまざまな空間スケールの構造を階層的に有しているために、典型的な複雑流体としてその巨視的スケールでの物性の理解は十分に進んでいない。このようなソフトマター複合系のミクロな構造やダイナミクスを理解するために各構造に対応したさまざまな時空間スケールで物性測定を行い、それらに関する知見を得ることは重要である。

近年、ミクロンサイズの粒子をプローブとしてゲルや高分子溶液中に分散させ、その粒子の揺らぎを測定することで周囲の媒質の局所的な力学物性を測定する「マイクロレオロジー」と総称される方法が開発され、ソフトマターのメソスコピックスケールでの局所力学物性の研究が進んでいる。我々は従来の受動的な揺らぎ測定法に加えて、不均一な内部構造を持つソフトマター中にナノサイズの荷電コロイド粒子を分散させ、その交流電場に対する応答である複素電気泳動易動度あるいは複素誘電率を測定することにより、媒質であるソフトマターの局所的なダイナミクスに関する、より広い時空間スケールにおける知見を得ることを目指した研究を進めている。

本研究では内部構造を有する典型的なソフトマター系として非イオン性界面活性剤ペンタエチレングリコールモノデシルエーテル ($C_{12}E_5$) とヘキサノールからなる 2 分子膜と水が交互に積層して作るリオトロピックラメラ相を選び、その膜間に膜間隔より小さな直径を有するラテックス粒子を分散させ、そのダイナミクス測定を交流電気泳動光散乱スペクトロスコピー、誘電緩和スペクトロスコピーならびに蛍光顕微鏡を用いた直接観察により行った。本研究で用いたラメラ相では膜の曲げ弾性率が熱エネルギー程度と柔らかく、大きな熱揺らぎを伴った膜同士の立体斥力によりその膜間隔が数百 nm 程度にまで広がることが知られている。

2 ラメラ相に分散したコロイド粒子の複素電気泳動易動度スペクトル

図 1 にラメラ構造中でのラテックス粒子の複素電気泳動易動度スペクトル $\mu^*(\omega)$ ($=\mu' - i\mu''$) の測定例を示す。1kHz および 3Hz において 2 つの緩和過程が存在する。図中の実線は 2 つの単一緩和スペクトルの和による最適当てはめ曲線である。測定に用いたコロイド粒子の水中における易動度は周波数依存性を示さないことから、観測された緩和はラメラ相中の特徴的な構造による立体障害に起因したものであると考えられる。測定された緩和周波数から緩和を引き起こすポテ

¹E-mail: kim8scp@mbox.nc.kyushu-u.ac.jp

ンシャルの空間的スケールを見積もると、高周波緩和では 33nm、低周波緩和では 500nm となり、これらは膜間隔の半分および膜の配向の相関長にほぼ一致している。

高周波領域（領域 I）において粒子は膜間に挟まれているという静的な拘束を受けるために、その易動度は水中より減少しているものの、粒子は膜間を自由に揺らぐことができる。しかし、膜の揺らぎの特徴的な周波数と同程度の周波数になると粒子の運動は膜と粒子との相互作用により誘起される膜の歪みのダイナミクスに影響されるようになる。すなわち中間の周波数領域（領域 II）では粒子は膜間隔程度のサイズを持つ歪み場に動的に束縛されつつ、拡散するために易動度が減少する。さらに低周波領域（領域 III）では粒子がラメラ構造中の欠陥等のために配向の相関長程度の領域のなかに束縛され、易動度がほぼゼロになると考えられる。また、上述した高周波緩和に対応する緩和は複素誘電率スペクトルにおいても観測された。

3 ラメラ相に分散した蛍光コロイド粒子の顕微鏡観察

領域 III では電気泳動易動度が小さくなり、その測定精度が低下するために $\mu^*(\omega)$ から定量的な情報を得ることは難しくなる。また、誘電測定の場合には電極分極のために低周波緩和すら観測することが困難となる。一方、ラメラ中に分散した蛍光コロイド粒子の蛍光像の重心位置の時間変化を計測した結果、図 2 に示すように粒子はあるサイトに束縛されつつも $1\mu\text{m}$ 程度の距離をジャンプしながらゆっくりと拡散することがわかった。この結果、長時間スケールでは粒子の運動は再び拡散的になり、その際の実効的な粘度は水の 10^4 倍程度まで増加することがわかった。

4 おわりに

本研究で対象にしたような不均一構造を有する媒質中における粒子のダイナミクスには一般的に媒質の空間的な階層構造に対応した動的階層構造があらわれ、それらは例えば生体中における輸送現象やダイナミクスに重要な役割を果たしていると考えられる。

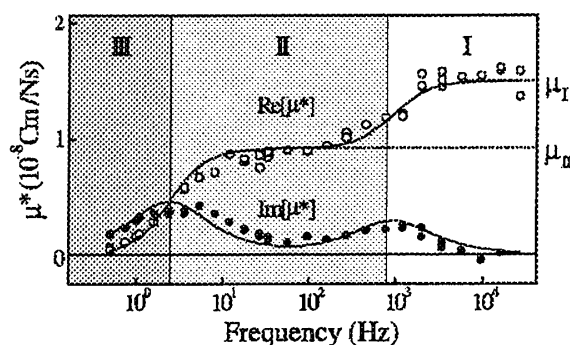


図 1: ラメラ中でのラテックス粒子の複素電気泳動易動度スペクトル。

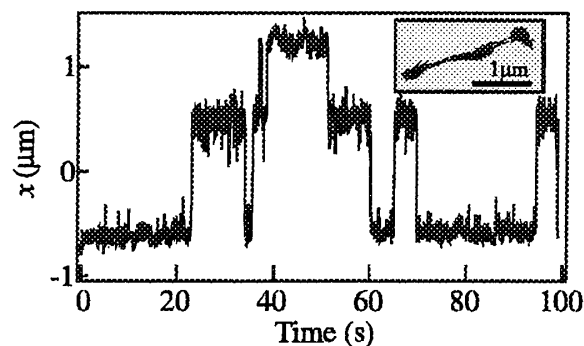


図 2: ラメラ中での蛍光粒子の重心位置の運動。