

複雑流体の物理：ガラス、コロイド、粉体、バクテリアまで

ガラス(アモルファス)物質、コロイド、粉体からバクテリアまで、様々な複雑流体・ソフトマター系における未解明の非線形・非平衡問題の謎解きを主な目的としている。ソフトマター物理の研究では、粗視化、階層性などの概念が大いに有効であった。これらの概念を援用しつつ、オリジナルな切り口による理論・数値的アプローチによる研究を行っている。

1. ガラス化による流体輸送異常に発現する揺らぎの相関構造の起源とその役割の解明

過冷却液体の【輸送異常】と協同運動との関わりについて取り組んでいる。一連の研究では、流体輸送そのものが有する時空階層性を明らかにした：特に流体輸送異常の顕著な空間スケール依存性と付随する【協同性】は、ガラス化に伴うスローダイナミクスにおいて、相関構造の介在が本質的に重要であることを強く示唆している。また、密度揺らぎの緩和ダイナミクスには、ガラス形成液体の動的クラスに本質的な差異が現れることを示した。これらの数値計算結果を基にして、ガラス転移の現象論の構築も併せて行っている。

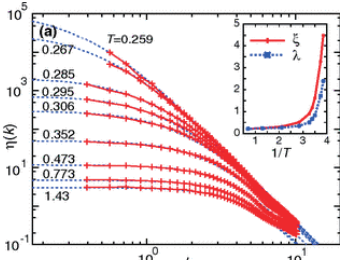


図1. 粘性係数の波数依存性
過冷却度の上昇とともに波数依存性はより顕著となる

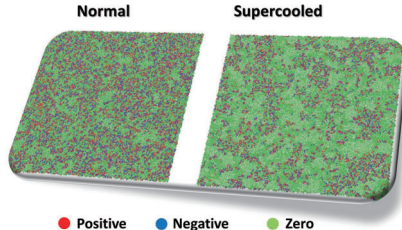


図2. 密度交換イベントの協同性
(左)ノーマルな液体(右)過冷却液体

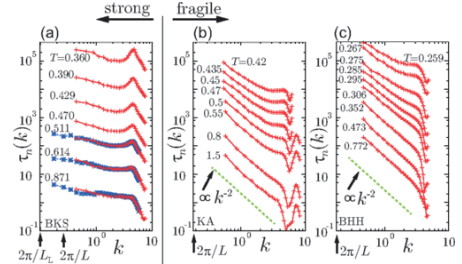


図3. 密度揺らぎの緩和時間の波数依存性:
strong液体(非保存的)、fragile液体(保存的)

2. ガラス形成物質や粉体における非ニュートンレオロジーの理解

変形下のガラス形成物質や粉体懸濁液では、【シアシニング】【シアシックニング】【塑性変形】などの顕著な非ニュートンレオロジーが普遍的に現れる。また、非ニュートンレオロジーの発生に付随して、【シアバンド】や【疲労・破壊】など空間的な不均一化が観測される。このような非線形レオロジー応答に対する包括的な理解を目指して理論、数値シミュレーションの両面から研究を展開している。最近、フラジイル液体の非ニュートンレオロジーを記述する理論式 $\dot{\epsilon}_\alpha(\rho, T, \dot{\gamma}) = \tau_\alpha(\rho_{\text{eff}}, T)$ を提案した。この理論式から導かれるオンセットの剪断率 $\dot{\gamma}_c = [\rho(\partial\tau_\alpha/\partial\rho)]^{-1}$ は実験、シミュレーションと定量的に一致する。

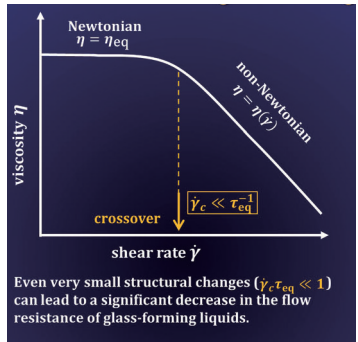


図6. シアシニングの模式図：ガラス形成液体の非ニュートン性の発現の様子は、他のソフトマターと異なる。

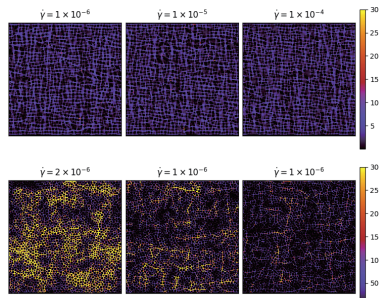


図4. 粉体懸濁液における溶媒散逸の空間相関

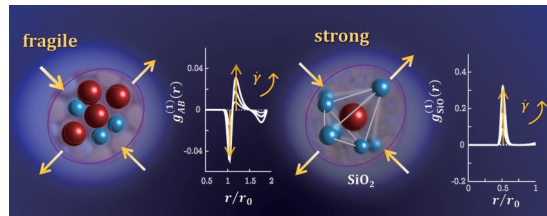


図5. 剪断流下の粒子配置
(左)fragile液体、(右)strong液体：保存則の役割の差異を反映して、粒子配置の様式が異なる

3. 微生物系の集団運動に及ぼす流体力学的相互作用の効果

流体中に分散して存在する微生物系では、【流体力学的相互作用】が輸送やレオロジー特性を理解する鍵となると考えられている。生物に本質的な【能動性】に由来する運動は、常に周囲の流体を励起しており、微生物の運動は流体の運動と不可避的に結合する。この動的結合の効果を理解することが、複雑な非平衡現象を理解するうえで重要となる。この点にフォーカスし、協同運動や異常レオロジーのメカニズム解明を目指している。

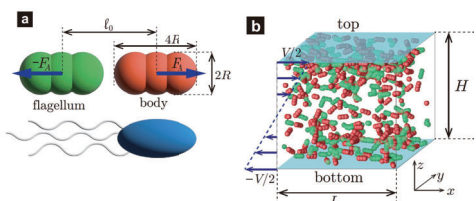


図8. 自己推進性を備えた微生物のミナルモデルの例

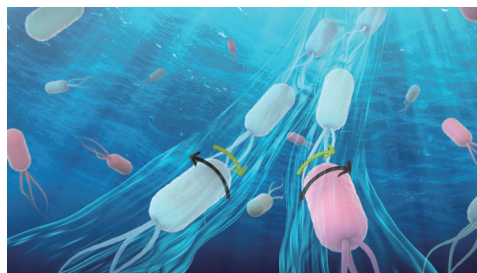


図9. 微生物系のレオロジー

図10. 流体力学的相互作用による泳動状態の決定(概念図)

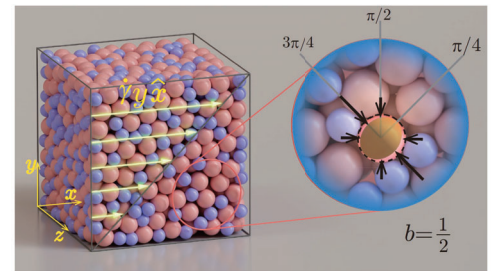


図7. 剪断流れ下の有効体積分率の概念図

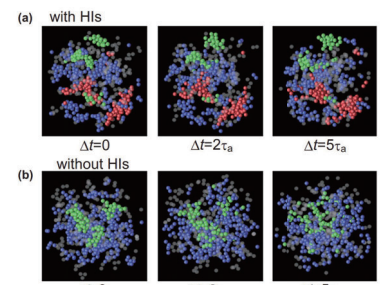


図11. 集団運動に与える流体力学的相互作用の効果