



度では壁からの揚力と隣のベシクルとの相互作用によって安定化される。我々の体内の毛細血管中を流れる赤血球もこのようなパラシュート状やスリッパ状に変形しながら流れていることが知られている。

単純せん断流では、赤血球やベシクルの運動モード(ベシクル上の膜の回転とベシクル全体の回転)とベシクルの形態変化がカップルして、様々な運動が見られる。興味深いことに、せん断流によって、引き伸ばされる変形だけでなく、収縮する形態変化も起こる。これらのダイナミクスはベシクルの形状と傾斜角の2変数の微分方程式で理解することができる。これが我々を含むそれまでの研究で知られていた。我々はそれを3変数に拡張し、赤血球[7]やマイクロカプセル[8]を扱えるようにした。膜の曲げ弾性に対して、ずれ弾性の値を大きくしていくと、相図が定性的に大きく変わり、2つの回転が同時に起こる領域がなくなることが明らかとなった。これまでシミュレーションでは得られていなかったためにこの共存相は理論のアーチファクトでないかと疑う研究者もいたが、この解析で膜の物性の条件で決まることがわかった。また、曲げ弾性が大きい場合、ずれ弾性に起因する傾斜角の振動とせん断流によるカプセルの形状変化に起因する傾斜角の振動が、複雑に絡んで、カプセルの多様なふるまいが見られる。

### 生体膜におけるエントロピー駆動の構造形成

生体膜におけるエントロピー変化が生み出す構造形成を2つの系について調べた。一つは膜ゆらぎの抑制による膜結合サイトの凝集[9]、もう一つは高分子グラフトによる膜マイクロドメイン形成[10]である。

生体膜間の結合は細胞組織形成や免疫系における異物除去などにおいて行われているが、リガンド-レセプタータンパク間の結合が重要な役割を担っている。リガンド、レセプターが膜上を拡散することによって、吸着領域に集積し膜間の結合が強まることが知られている。最近、このような膜間結合サイト間の膜上の相互作用に対する膜の曲げゆらぎのエントロピーの効果が注目を浴びている。2つの膜が近接した場合、膜ゆらぎの自由度が抑えられるので、膜間には反発力が働く。結合サイトが凝集すると、膜間で反発力を受ける領域が重なりあい小さくなるので、結合サイト間には引力が働く。これは1章のはじめに述べた枯渇効果と同様の引力である。しかし、この引力は非常に弱く、それのみでは凝集隊を形成できないことがこれまでの研究で知られている。我々は、メッシュレス膜模型を用いた粒子シミュレーションと有効ポテンシャルを用いた2次元の格子模型を使って、この相互作用を研究し、集合体を形成するほど引力が強くなる2種類の条件を明らかにした[9]。ひとつは2枚ではなく、3枚以上の膜を結びつける結合サイトを用いた場合(図2)、もうひとつは結合サイトの膜に刺さっているアンカーが周りの脂質膜の曲げ弾性を大きくする場合である。この凝集はサイト間の2体相互作用では記述できないが、多体の有効相互作用を用いると表すことができる。

生体膜において、ラフトと呼ばれる10-100ナノメートルの膜タンパク質が集積した小さな膜ドメインがあり、そこが機能発現の舞台となっていることが考えられている。このため、相分離した膜ドメインのサイズの制御が盛んに研究されている。我々はラフトには糖鎖の生えた糖脂質が集積していることに着目し、高分子のグラフトがドメイン構造に与える影響を調べた[10]。その結果、高分子をグラフトすることにより、ドメイン境界の線張力は下がることがわかった。ドメイン内では高分子はお互いの排除体積によって取れる配置が制限されるが、ドメイン境界ではドメインの外側にも高分子

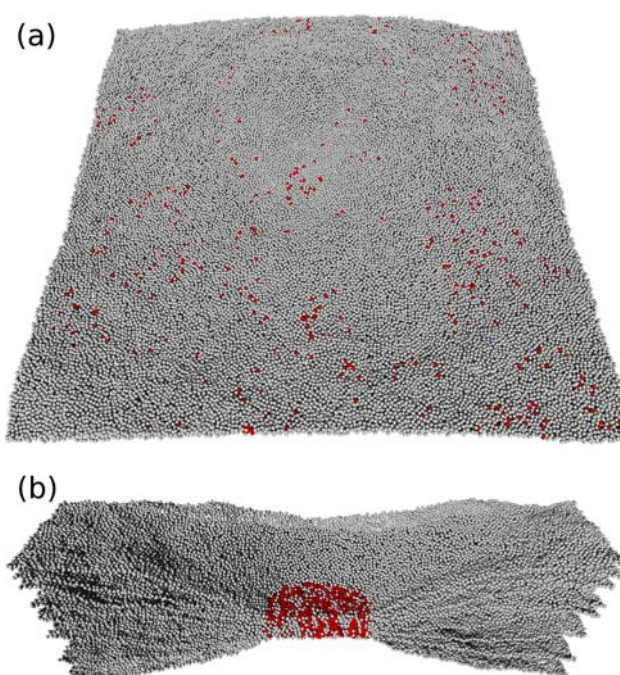


図2: エントロピー駆動の膜結合サイト(赤)の凝集[9]。2枚(a)では凝集しないが、8枚(b)だと凝集して、円形のクラスターを形成する。



は伸びることができ、このエントロピー増加が線張力を下げる。高分子鎖長程度の小さなドメインではその影響は小さくなり、結果、鎖長程度のドメインが安定化される(図 3)。

### せん断流によるロール状構造形成

界面活性剤溶液の実験において、せん断流下で、せん断方向に平行もしくは垂直に 2 重膜のラメラ構造だけでなく、オニオン相と呼ばれる均質な大きさの多重膜ベシクルが詰まった相が形成されることが知られている。1 次元的なシアアの効果がラメラ相より球対照的であるロール状構造やオニオン状構造を安定化させるのは、不思議な現象である。しかし、その形成機構はよくわかっておらず、理論も構造を仮定して不安定性を議論しているものが数件ある程度である。オニオンのサイズはマイクロメートルと大きいため、これまでシミュレーションも行われていなかった。我々は、メッシュレス膜模型による大規模計算を行い、図 4 に示すように相図を得た[11]。密度の高い領域では低もしくは高せん断強度ではせん断方向に平行なラメラ構造が見られるが、中程度のせん断強度ではロール状の構造が得られた(図 5)。流れの方向と垂直要項に不安定化し、膜が波打つ。このロール状の構造はオニオン相形成の過程において中性子散乱などで得られていた散乱パターンと良い一致を示すため、オニオン相形成時の中間体だと考えられる。実験においてもオニオン構造の得られた後さらにせん断強度を上げるとラメラ構造になることが知られている。これまで、散乱パターンとでしか調べられていなかったため、円筒構造か、波打ったラメラ構造のどちらか決められなかったが、この研究によって、ロール状の波打ったラメラ構造が中間体の具体的な構造である可能性が高いことが明らかとなった。今後の転移のメカニズムの解明への重要な足がかりとなると思われる。

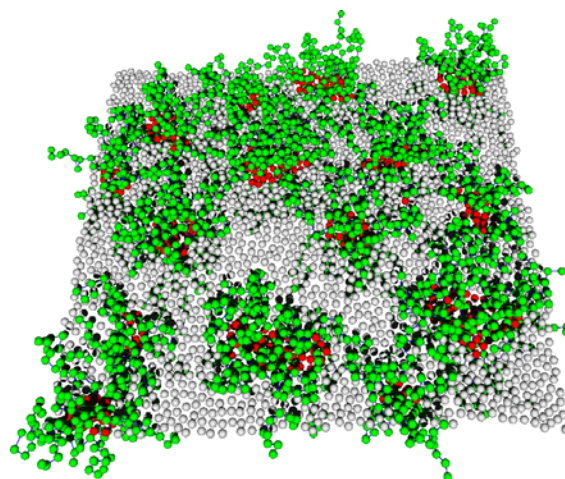


図 3 : 高分子グラフトによるマイクロドメイン形成[10]。

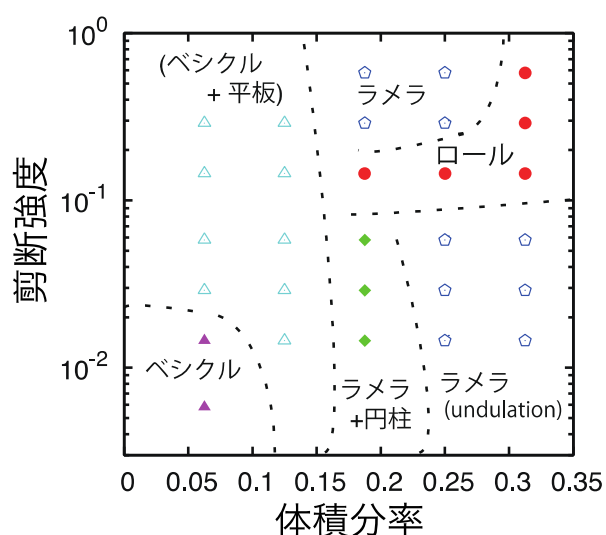


図 4 : せん断流下における界面活性剤膜の形態の相図[11]。

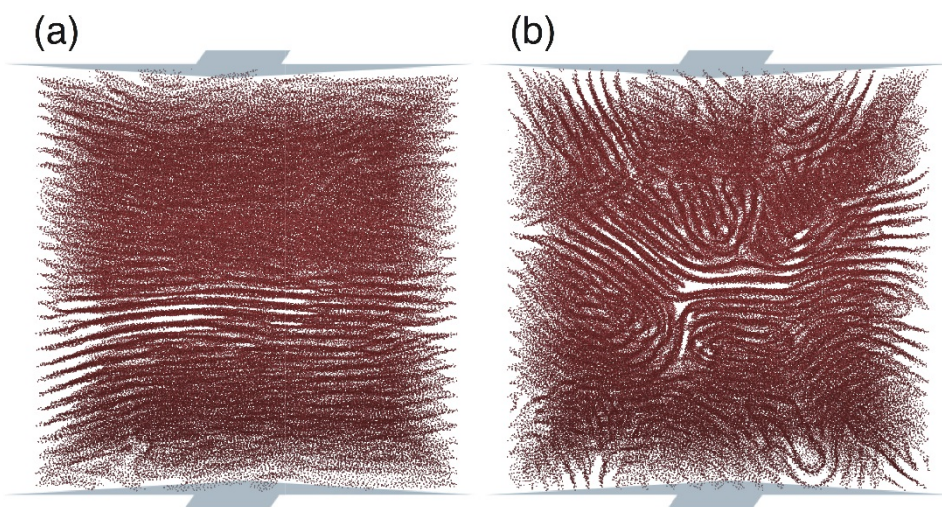


図 5 : せん断流下における界面活性剤膜のスナップショット[11]。

(b) 低せん断強度。(b) 中程度のせん断強度。上下の矢印は流れの方向を示す。

## 細胞小器官の形態形成

細胞内には、機能に応じて特徴的な形をした様々な細胞小器官が存在する。これらの形態を理解することを目指して研究を進めている。まず、ミトコンドリアは2つの膜からなるが、内側の膜が外膜より大きな面積を持つことに着目し、狭い空間の拘束による脂質ベシクルの形態変化を調べた[12]。この3月の博士号を取った坂下氏がお茶大(現在は東北大)の今井正幸研究室で脂質ベシクルの形状を自分で観察し、それを野口研でシミュレーションし、各々の形状の形成条件を決定した。その結果、図6に示すように、2重ストマトサイトやダブルレットと名付けた形状など、拘束のない条件では見られない多くの形状が得られた。ミトコンドリアの内膜で見られるクリステと呼ばれるヒダ状の構造も得られた。

2つめに、核膜の基礎模型として、多くの genus を持つベシクルを考える。まず、genus-1, 2 の場合について、平衡状態を詳細に調べ、軸対象形状が最安定だと思われていた領域でハンドルを持つディスコサイトなど、軸対象でない形態が平衡状態であることを明らかにした[13]。現在、より高い genus でのベシクル形態の解析を進めて

いる。また、細胞内ではタンパク質が局所的な曲率を制御していると考えられているが、そのようなタンパク質の吸着によるベシクルの形態変化についても研究を進めている。最終的には、空間拘束など幾何学的な効果とタンパク質による局所的な効果を組み合わせて、細胞小器官の形態がどのように制御されているか明らかにすることを目指している。

## 現在進行中の研究

最後に述べた2つの課題は現在まだ引き続き進行中である。他に現在力を入れている課題としては非平衡下におけるソフトマターのダイナミクスがある。M2の中川氏は化学反応下での界面活性剤集合体の形態変化を計算しており、ベシクル形成確率が油粒子の増加によって上がるなど興味深い結果が得られている。D3の多羅間氏は細胞運動を理論解析とシミュレーションを用いて研究している。

## 3. スーパーコンピュータ

物性研着任後、物性研スパコンの運営にかかわってきた。2011年度からはスーパーコンピュータ共同利用委員長を任されている。2011年は地震後の運用停止と縮退運転で大変であったが、その後は大きな問題もなく運用されている。電気料金の値上がりなど頭のいたい問題はあるが、今後も物性コミュニティに安定した計算資源を提供できるように努力したい。

上で述べた野口研の研究の中で最も物性研スパコンをもっとも多く利用したのは、芝助教の行った界面活性剤膜のロール状構造形成の計算である。物性研スパコンがなければこの構造を見つけられてはいなかった。他にも、レプリカ交換法を用いた自由エネルギー計算など様々な計算でスパコンを利用している。

## 4. 国際ワークショップ、研究会

2010年8月にソフトマター物理に関する国際ワークショップを2週間、開催した。テーマはソフトマターの分野の中で、近年発展が目覚ましい“Structural Rheology”と“生体膜とベシクル”の2つに絞った。他の国際会議、シンポジウムを連携して、合わせて「ソフトマター月間」を構成するようにした。猛暑の年で、開催期間中、晴天がずっと続いたが、

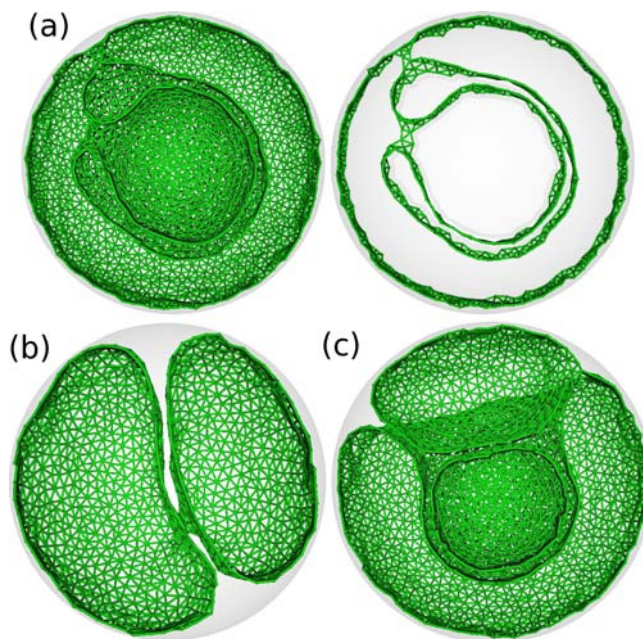


図6：球内に拘束された脂質ベシクルの形態[12]。  
(a) 2重ストマトサイト。(b) ダブルレット。(c) トリプレット。

125名の参加者(両セッション参加12名)があり、暑い議論が活発に行われ、質疑応答時間を超過することもたびたびあった。数名の他大学の先生に組織委員としてご協力していただいた。多くの事務作業があったが、芝助教と秘書の松下眞弓氏と小貫美幸氏には多大な負担をかけてしまった。彼らの協力なしには開催できなかった。関係者の皆様には改めて感謝したい。

その他、着任後すぐの2009年2月に川島所員と杉野所員らと物性物理における大規模計算に関する国際ワークショップを、柴山所員らとソフトマターに関する小さい研究会を2回、開催した。

## 5. 人

表1に示すようにこれまで少数のメンバーで研究を行ってきた。昨年、一時的に学生が4名に増え、にぎやかであったが、今年は2名になり少し静かになった。最初の頃はあまりに少ないため、研究室セミナーがセミナーらしくならず困ったが、最近はそれらしくなってきた。少数であるが、優秀な学生が多く、活発に研究を進めている。

表1：現在までの研究室メンバー

年度	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
助教				芝隼人			
客員			谷口貴志				
学生				Hao Wu			
					坂下あい		
						多羅間充輔	
						中川恒	

## 6. 参考文献

- [1] 秋山良, 生物物理 **51**, 036 (2011).
- [2] H. N. W. Lekkerkerker and R. Tuinier, *Colloids and the Depletion Interaction* (Springer, Dordrecht, 2011).
- [3] H. Noguchi, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78**, 041007 (2009).
- [4] H. Noguchi, *J. Chem. Phys.* **134**, 055101 (2011).
- [5] 野口博司, 日本物理学会誌 65,429 (2010).
- [6] J. Liam McWhirter, H. Noguchi, and G. Gompper, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **106**, 6039 (2009).
- [7] H. Noguchi, *Phys. Rev. E* **81**, 061920 (2010).
- [8] H. Noguchi, *Phys. Rev. E* **81**, 056319 (2010).
- [9] H. Noguchi, *EPL* **102**, 68001 (2013).
- [10] H. Wu, H. Shiba, and H. Noguchi, *Soft Matter* **9**, 9907 (2013).
- [11] H. Shiba, H. Noguchi, and G. Gompper, *J. Chem. Phys.* **139**, 014702 (2013).
- [12] A. Sakashita, M. Imai, and H. Noguchi, *Phys. Rev. E* **89**, 040701 (2014).
- [13] A. Sakashita, M. Imai, and H. Noguchi, arXiv: 1405.3076 [cond-mat.soft].