

# チューブ状ベシクルを用いた外場応答性を示すエラストिकाへの可塑性の導入

東大院総合・教授 菅原 正

二種類のリン脂質 (DOPC:POPG = 1:1) からなるチューブ状ベシクルで、その一端が底に固定されたものにつき、チューブの長軸と垂直な方向から磁場 ( $B_{\max} = 5 \text{ T}$ ) を印加すると、印加磁場の増減に伴って、チューブがヒステリシスを示しつつ可逆的に屈曲変形することを見出し、その機構について考察を加えた。また、多重膜ジャイアントベシクルの自己生産系を取り上げ、その機構について単一ベシクルのダイナミクスの共焦点顕微鏡観察および、集団計測の結果より検討を加えた。

## 1. チューブ状ベシクルの磁場による変形に見られるヒステリシス

リン脂質から成るチューブは、脂質の持つ反磁性により、磁場下で種々のダイナミクスを示す。磁場下で形成された曲線構造は、チューブの持つ弾性と磁場応答性とが力学的な拮抗により理解される。我々は昨年度までに、コラさが制御されたチューブが、特徴的なエラストिका構造を取ることを見出している。多くの分子が協同的に振る舞うことで実現されるチューブの変形過程には、単純なバネ的挙動から逸脱した非線形ダイナミクスが出現することが期待される。そこで本年度は、一端を固定された比較的短いチューブに見られる、磁場によるエラストिकाの部分構造を形成、緩和する過程を、前年構築した磁場下でのリアルタイム顕微鏡装置を用いて観測し、そこに見られる履歴現象(可塑性)の存在を確認した。

一端が、プレパラート表面に固定された二種類のリン脂質 (DOPC:POPG = 1:1) からなるチューブに、チューブの長軸方向に垂直な方向に磁場 ( $B_{\max} = 5 \text{ T}$ ,  $1 \text{ T/min}$ ) を印加すると、印加磁場の増大に伴ってチューブの長さが減少した(図1)。その後、印加磁場を減少させると、チューブは元の長さに戻った。変形時にチューブ径の変化が見られないことから、この伸縮は、チューブの湾曲挙動の投影による見かけ上のものであると考えられる(図2)。印加磁場に対するチューブの観測長をプロットすると、強い磁場で飽和するような挙動と共に、顕著なヒステリシス性が見られた(図3)。チューブを弾性的な片持ち梁と考えることで、高磁場で伸縮率が飽和する過程は説明することが出来る。しかしながら、ヒステリシス挙動に関しては、このモデルだけでは説明できないことから、チューブを構成するリン脂質の組成に着目した。Stavansらは、充填パラメータの異なる複数の脂質分子から成るチューブにおいて、チューブを構成する脂質分子の再配置により、湾曲構造を安定化する機構が存在しうること示しているが、二種類の混合脂質からな

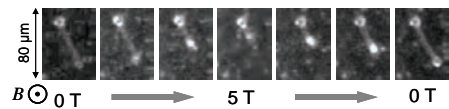


図1 磁場により湾曲するチューブ

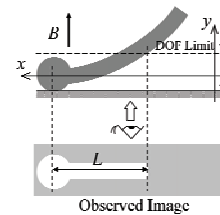


図2 チューブの湾曲と観測長との関係

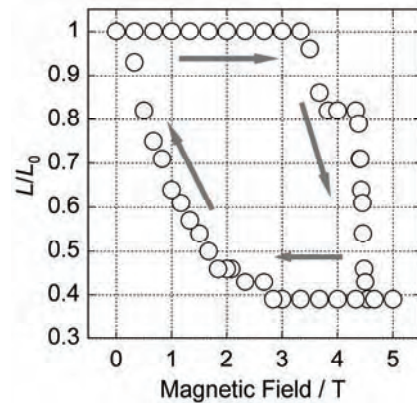


図3 観測長の伸縮率の磁場依存性

るチューブを用いている本系においても、同様の分子の再配向が引き起こされていると考えられる。その結果、高磁場に曲げられたチューブの弾性エネルギーが減少し、より低い磁場でも同様の曲率が維持されたものと解釈される[1]。

このような成果は、いわゆる「磁性」の根源である強磁性成分を全く持たない反磁性分子集合体であっても、分子間の相関をうまく利用することで、ヒステリシスのような非線形現象を実現できる可能性を示すもので、本特定の成果としてきわめて興味深い。

## 2. 化学反応により時間発展するソフトマターのダイナミクスと集団挙動

人工膜分子からなるベシクルの表面や内部で、もとと同じあるいは異なる膜分子を、化学反応により生成させると、ベシクルの肥大や分裂と言ったマクロなダイナミクスが引き起こされることを、我々は既に見出している。このようなダイナミクスは、生命活動における細胞分裂に現れるダイナミクスの非線形性との関連から、近年興味を持たれている。

人工膜分子からなるマルチラメラベシクルに、外部から膜前駆体分子を添加すると、ベシクル膜表面が前駆体を膜分子へと変換する反応の効率良い反応場となり、ベシクル自身が自らを生産していく系が構築された[2]。本年度は、その詳細を単一ベシクルのダイナミクスおよび、集団挙動として明らかにする研究を行った。単一ベシクル計測に関しては、膜分子添加直後に起こるベシクル変形過程を、高速度レーザー共焦点顕微鏡(LCM)による三次元イメージとして観測し、比較的サイズの大きな真球状ベシクルが、膜生成反応の進行と共に複数のサイトからバディングを起こす様子を捉えることに成功した(図4)[今井研究室(A02 班)との共同研究]。前駆体分子はベシクル周辺にほぼ均一にあると考えられるため、このような対称生の低い構造体が自発的に産み出されていく機構は興味深い。

さらに、このベシクル自己生産系を対象としたフローサイトメトリーによる集団計測結果をもとに、数万個のベシクルに対する統計的解析を行った。その結果、自己生産前の第一世代のベシクルに膜前駆体を加えることで生じた第二世代以降のベシクルは、特別な鋳型を用いていないにもかかわらず、第一世代とほぼ同じ粒径分布を持つことが明らかとなった[3]。膜分子の表面張力や、周辺に存在する電解質の濃度がベシクルの形状を定めているものと考えられるが、その理由は明確ではない。現在、第一世代のベシクルをサイズにより3分画して分取し、それぞれの集団の自己生産過程を追跡することで、ベシクルのサイズ分布の維持機構につきて検討を加えている。

### <参考文献>

- [1] K. Suzuki, T. Sugawara *et al.*, *Polyhedron* **28**, 253-256 (2009).
- [2] K. Takakura, T. Sugawara, *Langmuir* **20**, 2832-3834, (2004).
- [3] T. Toyota, T. Sugawara *et al.*, *Langmuir* **24**, 3037-3044 (2009).

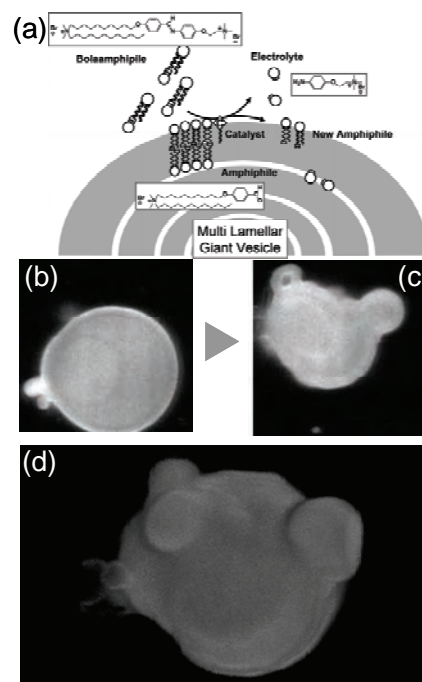


図4 自己生産するジャイアントベシクル。(a)模式図。(b)前駆体添加直後の LCM 断面像。(c) 前駆体添加約 20 分後の LCM 断面像。(d) (c) の三次元像