

チューブ状 2 分子膜のレーザトラップによる形状転移

佐賀医科大学物理、情報科学（*） 末崎幸生、
一ノ瀬浩幸、竹生政資（*）

要約

人工的に流れの場の中で作った脂質 2 分子膜でできたチューブ状膜に対して、レーザ照射によって周期的構造への相転移が観測されている。この観測事実に対して、レーザがチューブへの局所的な温度上昇による圧力上昇をもたらした結果であるという理論的可能性を提言する。レーレー不安定性を手本とする既存の理論とは異なる立場を明確にしながら、この現象に対する真相に迫ってみたい。昨年の報告に加えてフーリエ級数による数値計算の結果を述べる。

ことの起こり

1994年にワイズマン研究所の若い実験研究者の Bar-Giv と Moses は、溶媒の流れの中に脂質（DMPC）を仕込んで 2 分子膜でできたチューブ状膜を形成した [1]。チューブは流れを止めた後も 1 時間以上のタイムスケールで安定であった。実験の詳細が記載されていないので不明な点もあるが、恐らくいびつな形の脂質の塊が、ストークス抵抗の違いによって引っ張られて形成されたチューブ状 2 分子膜の両端には、大きな脂質と水の球滴が付いている。この状態で安定に存在するのであるが、この事実は後で重要になる。従ってこのチューブ状膜は自発的に形成されるチューブ状膜とは異なって熱平衡にはないといえる。安定と言っても平衡な安定ではなく、力学的な準安定状態にあると判断される。彼等はこの膜に 0.3 ミクロンほどに絞った 50 mW のアルゴンレーザを照射したら、周期的構造が瞬時に形成されることを観測した。レーザが強いなどの条件によっては、この周期的構造は真珠のネックレス状になるので、この現象は Pearl instability と呼ばれている。レーザを切ると元のまっすぐなチューブが回復するのである。細く絞った水道の蛇口からの水流がくびれていくレーレー不安定性に類似している。問題はレーザがこの膜系に何をしているのかということである。加えて DMPC の主転移温度は 25 °C 程度であるが、実験は 40 - 49 °C でなされている、即ちチューブ状膜は液膜である。

理論的解析試みの例

この興味深い現象に対していくつか現われた理論的解析はこのレーレー不安定性をお手本にしている [2-5]。昨年の報告にも記述したが [6] 重要なことであるのでここに再び繰り返す。全ての理論の論文は、形成された数珠状のネックレスへ一個づつゆっくり近づいてくる個別の数珠の球の（10 ミクロン/秒のオーダー）ダイナミックスを追いかけている。彼等の論法は以下の如くである。レーザを当てた瞬間に膜が引っ張られて当てた場所以外の膜の界面張力が増加し、それがトリガーとなってレーレー不安定性が起こるとするのである。分子の拡散速度の大きい液膜において、弾力的な遠隔力を仮定した界面張力増加の仮定は不自然である。しかも、そのとき脂質は両端の球滴がリザーバとなって変形に伴って供給されるが、水は供給されないとするのである。即ち、レーレー不安定性と同じくチューブの単位長さ当たりの体積が保存されるという仮定をおくのである。この保存則が成り立つかどうかについては、ビデオテープを見る限りまだ精度的には何とも言えないが、パール形状を見ている限り体積保存が成り立つとは考えにくい。この理論では、界面張力の増加が不安定性の原動力となり、筆者がこの報告で主張する仮説と正反対の仮定である。さらにダイナミックスを追うとき、初期の半径は安定な条件としては求めず初期条件として与えてしまうので、やはり説明に無理がある。

レーザの局所的な温度上昇の提言

実験グループは、温度を 40°C から 0.5°C だけ上下に変化させたが、何も起こらなかったため温度効果ではないと断言している。しかし、一様な温度変化ではチューブの内外でその差に何も変化がないのは自明である。問題は局所的な温度上昇が何をもたらすかということであるが、このことについては以下の (1) 式に示すエネルギーモデル

$$F = \frac{1}{2} \kappa \int (c_x + c_y - c_0)^2 dA + \sigma \int dA - p \int dV \quad (1)$$

でレーザエネルギーの膜への吸収により、チューブ膜内の温度上昇がわずかに外より大きくなり、静水圧 p が大きくなって不安定性が引き起こされると考えてみる。このとき、界面張力は小さい方が不安定性を起こし易いという、これまでの理論 [2-5] と逆の結果を与えることになった [7]。

フーリエ級数による数値計算

前回の報告では、チューブ状膜に正弦関数的な微小振幅の変形を与えたとき、エネルギーの下がる条件を簡単な解析によって示したが、今回はこの 1 次の安定性より大きな変形になったとき、どうなるかを検証した結果を報告する。そのために、半径 R を以下の (2) 式のようにフーリエ級数に展開して、エネルギーを最小にするように展開の係数と波長を決めることを実行したので報告する。

$$R(z) = \sum_{n=0} r_n \cos \left(\frac{2\pi n z}{\lambda} \right) \quad (2)$$

数値計算は時間を要するので、 $n=3$ までとした。図 1 にその結果を相図として表わした。

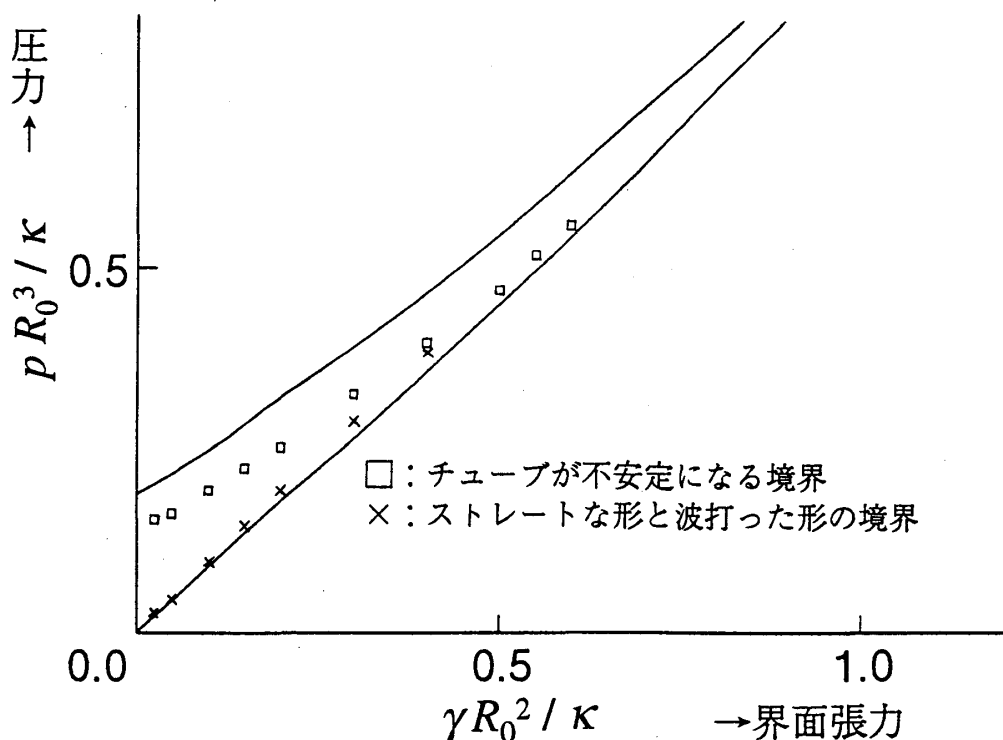


図 1

図1で、実線は前回の1次の安定性を示し、□印と×印の間が今回のフーリエ級数による数値計算の結果の境界を示す。定性的には前回と同様の結果であるが、定量的には周期的変形の領域が近似的計算結果より狭くなった。さらに図2には変形の度合いをヒストグラムにして表わした。明らかに圧力が大きいほど変形の度合いは増加していることが分かり、直観的な描像と一致している。

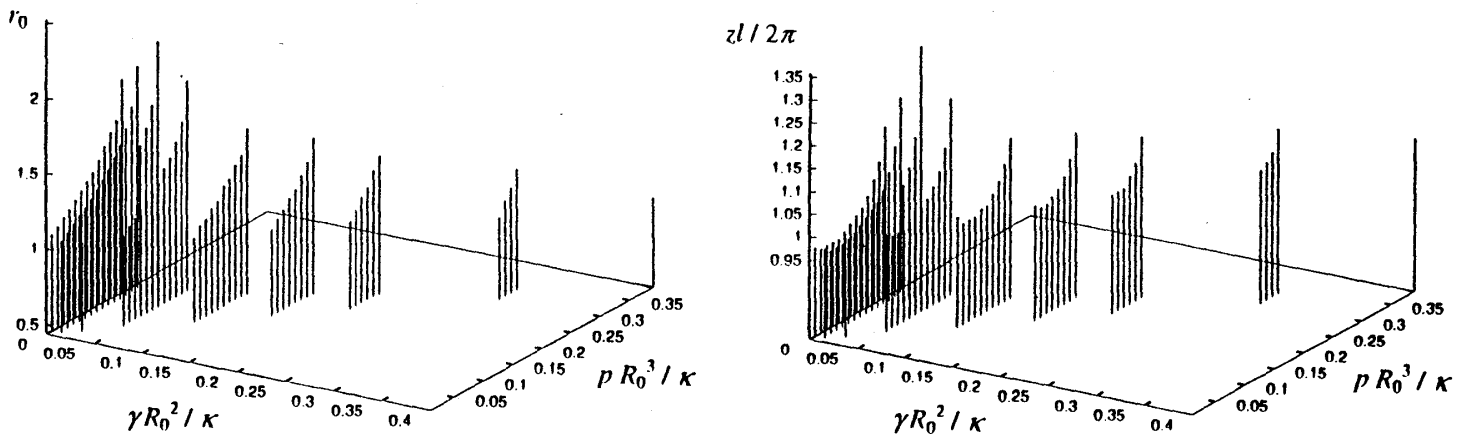


図2

結論

レーザによる局所的温度上昇効果がチューブ状2分子膜の内部の圧力上昇をもたらし、その結果周期的構造への転移が起こるという提言をした。これまで述べなかった仮定を付け加えれば、水の浸透圧による透過係数は小さく ($0.7 \mu\text{sec}$) この実験時間の範囲では無視できることと、50 mW のレーザパワーの 10^{-6} 程度の吸収があれば 10 Pa 程度の圧力上昇が見込めるということが見積もれる。しかしながら、ここで述べた仮説はまだ実験的に検証された訳ではない、実験グループによる検証や追試が待たれている。

参考文献

- [1] R. Bar-Giv and E. Moses, Phys. Rev. Lett., 73 (1994) 1392.
- [2] P. Nelson, T. Powers, and U. Seifert, Phys. rev. Lett., 74 (1995) 3384.
- [3] R. Granek and Z. Olami, J. Phys. II France 5 (1995) 1349-1370.
- [4] R.E. Goldstein, P. Nelson, T. Powers, and U. Seifert, J. Phys. 6, (1996) 767.
- [5] P. D. Olmsted and F. C. MacKintosh, J. Phys. II France 7, 139 (1996).
- [6] 末崎幸生 物性研究 68, No. 3 324 (1997).
- [7] Y. Suezaki, Biophys. Chem. 65 (1997) 101.