

# 高分子膜のメカニカル・クランプリング転移

副題：しわくちゃ転移する高分子膜とくしゃくしゃに丸めた紙、この似て非なるもの。

東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻

守 真太郎

## 要旨

高分子化膜 (Polymerized Membrane、以下、高分子膜と略す) は高分子と異なり、普通、熱的に激しく揺らいだ平坦相にある事が知られている。そのため、その相転移は高分子とは非常に異なったものなる。ここでは、近年盛んに研究されてきたランダムネスを持った高分子膜の「しわくちゃ転移」(Wrinkling Transition)を理解するにあたり最も本質的な発見である、高分子膜のメカニカル・クランプリング転移についての解説を行なう。また、しわくちゃ転移を行う高分子膜と、くしゃくしゃに丸めた紙は、そのランダムネスが本質的にどう異なるのかについても議論する。

## 1 高分子膜とは？

高分子はモノマーが1次元的につながって出来たものだが、高分子膜は、名前からもわかるとおり、モノマーが2次元的につながって膜を構成したものである。自己排除相互作用を持つ高分子膜の3次元空間中の形は、通常コイル状態にある高分子と異なり、異方的な平坦相にある(図1)。ただ、平坦であるといっても完全に伸びきった真っ平らな状態ではなく、熱的に激しく揺らいでいる。その、メカニズムに関しては以前論じたので、ここでは詳しく述べないが、その本質を簡単にまとめると以下のようなになる[1]。まず、ファントム高分子膜(自己排除相互作用が無い、「お化け」のモデル)は、曲げの弾性定数 $\kappa$ を変化させると、クランプル相(曲げ弾性が小さく柔らかい場合)と平坦相(硬い場合)の間のクランプリング転移をする<sup>a</sup>

<sup>a</sup>膜の場合、コイル相のことを普通クランプル相(Crumpled Phase)と呼ぶ。

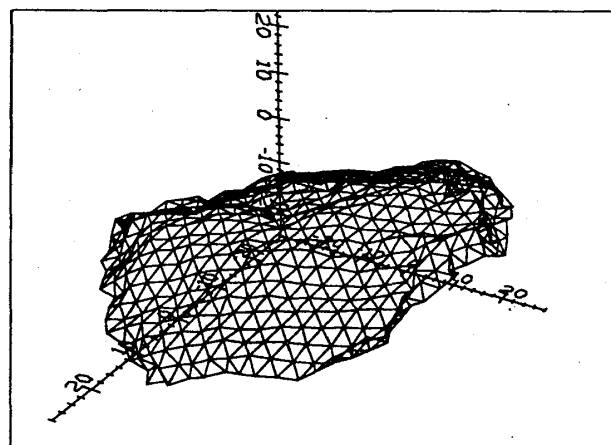


図1 自己排除高分子膜の3次元空間中の配位。(モノマー数  $N = 547$ )  
この状態は平坦であるが完全に伸びきってはいず、膜の垂直方向に激しく振動している。

自己排除相互作用があるときには、モノマーの配位に対して制限がつき、有効曲げ弾性が生み出され、十分大きな膜の場合、クランプル相が不安定化し、平坦な形をとる。図2は、この状況をまとめたものである。図2 a)はファントム高分子膜がクランプル相と平坦相の2つの相を持つことを示し、図2 b)は、あらゆる曲げ弾性の値に対して、自己排除高分子膜が平坦相にある事を意味している。

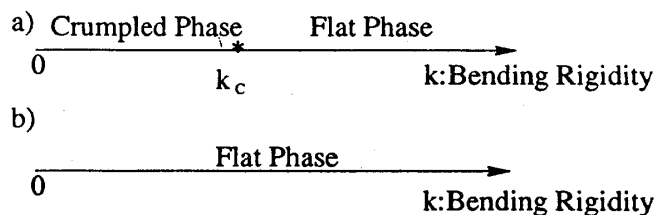


図2 高分子膜の曲げの弾性定数に関する相図。a) ファントム膜の場合。b) 自己排除膜の場合。

## 2 高分子膜のメカニカル・クランプリング転移

ランダムネスの膜への影響を議論する。最も簡単な場合として、三角格子のネットワークの真ん中に、1つの欠陥（ここでは界位）がある場合を考える（図3）。乱雑さを持たないネットワークの場合、端のモノマー以外は6本の足（ボンド）を持ち、モノマー間の長さがほぼ等しい時、平らな形が安定である。しかし、ネットワークの中に5本足や7本足等を持つモノマーがある場合、平らな形が不安定化する。高分子膜の形は曲げ弾性のエネルギーと膜内の弾性エネルギーのバランスにより決り、欠陥を持たない膜は曲げ弾性のエネルギーより平坦な形が安定である。欠陥があっても曲げ弾性率が十分大きいときは、平坦でありうるが、そうでないときは、不安定化し、図の中心にあるモノマーは周りのモノマーが構成する平面から飛び出た配位をとる。こうした変形をバックリングという。

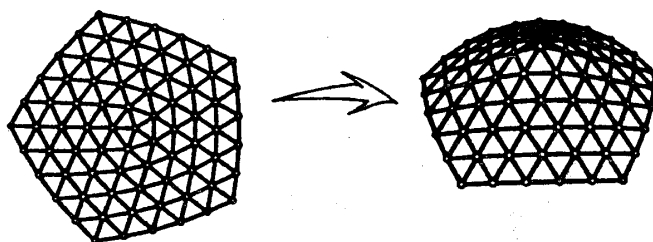


図3 バックリングの様子。  
ネットワークの中心に正（5本足）の界位（disclination）がある時のバックリングの様子を示した。転位（dislocation）の時も同様のことが起きる。

ここで重要なのは、欠陥により膜内にストレスをため込み、そのフラストレーションにより平らな形が壊れるという事である。実際の系では、こうした欠陥が膜状ランダムに分布していたり、他の機構から、系が強いランダムストレスを持ち、そうした系がどのような性質を示すのかが興味深い。

それに対して、十分硬い高分子膜の平坦相は十分小さなランダムストレスに対して有限温度で安定であることはネルソンにより言われ、我々は十分柔らかな自己排除高分子膜はクランプル相にある事を、ランダムネスを持つ一般化されたエドワーズ模型の解析から予言した[2]。つまり、十分柔らかい自己排除膜は、ランダムストレスの強さを変えることにより、平坦相からクランプル相への相転移を行なうことを意味する。この相転移は熱的なものではなく、むしろ弾性エネルギーのバランスによるので、メカニカルなクランプリング転移である。以上の結果をまとめたのが図4である[2]。図5は、ある数値計算のモデルが、メカニカルクランプリング転移を示す様子である。

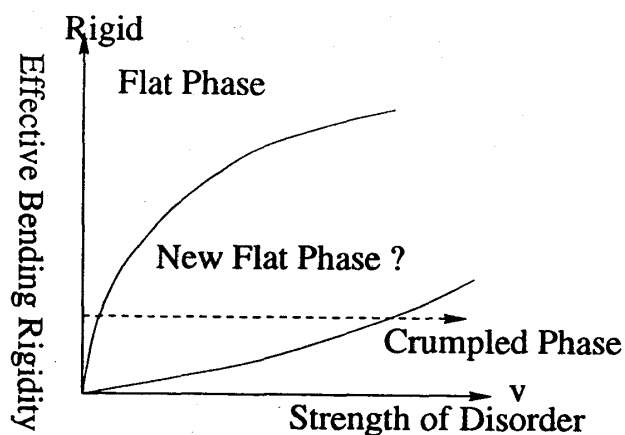


図4 自己排除高分子膜の相図（理論的予想）

縦軸は曲げ弾性定数の大きさをあらわし、横軸はランダムストレスの強さを示す。図中の点線は平坦相からクランプル相へのランダムストレスの変化によるメカニカル・クランプリング転移に対応する。

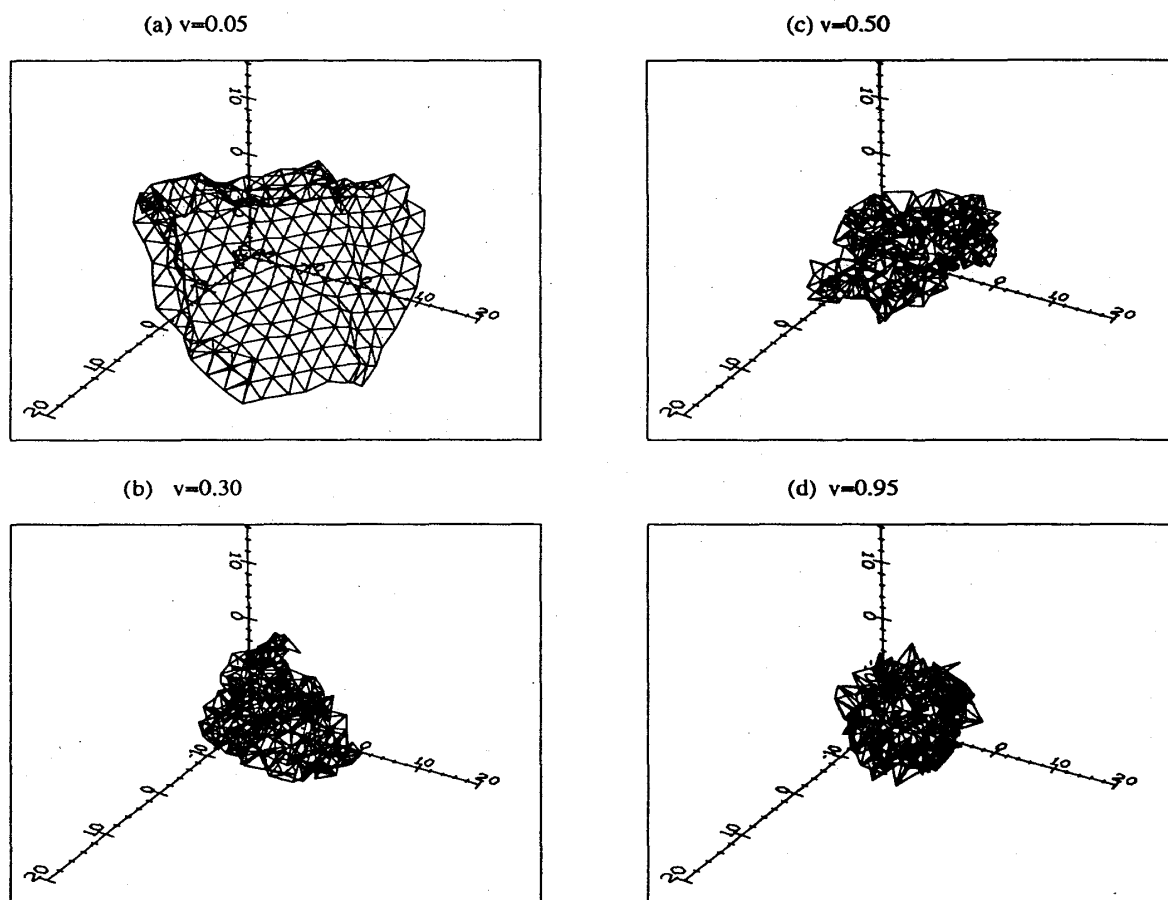


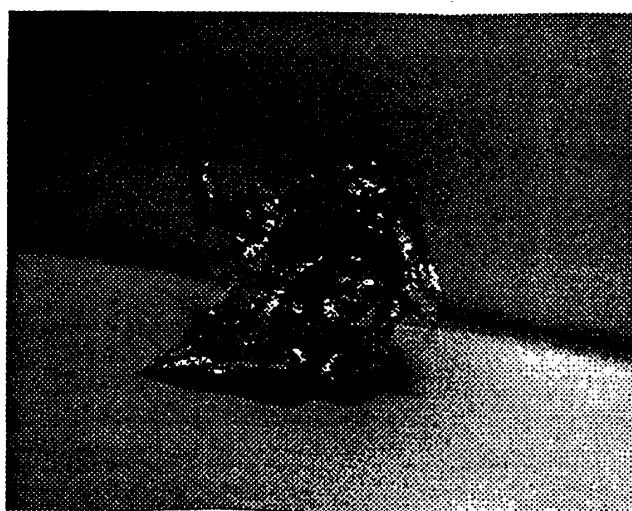
図5 メカニカル・クランプリング転移

自己排除高分子膜のランダムストレスの強さ( $v$ )を変化させたときの様子。

### 3 くしゃくしゃに丸めた紙の持つランダムさ

以上の説明から、ランダムストレスにより系が強いフラストレーションをもち、その結果平坦相が不安定化してメカニカル・クランプリング転移が起こる事を説明した。この相転移が、ランダム高分子化膜において実験で観測されているしわくちや転移の本質だともわれる[1, 2]。

では、手でくしゃくしゃに丸めた紙の持つランダムネスと何処が違うのだろうか？特に、最近の実験により、くしゃくしゃに丸めた紙がランダム系特有の性質を示すことが分かってきた。現在のところ、こうした実験事実を説明できているわけではないが、くしゃくしゃに丸めた紙の持つランダムさに関して少し考えると次のことに気がつくだろう。つまり、単に一回だけくしゃくしゃに丸めた紙の場合、そのくしゃくしゃの状態が基底状態であり、系が強いフラストレーションを持っているわけではない[3]。つまり、ランダムスピン系でよく知られたマチスモデルの様なものである。実験では、何度も何度も(30回)くしゃくしゃにしているため、少しはフラストレーションを持つようになるだろうが、それも神経回路網でいくつものメモリーを覚えさせるようなものである。こうした、アプローチによってくしゃくしゃに丸めた紙の示す性質が理解できるかどうかは別として、メカニカル・クランプリング転移を起こす系とくしゃくしゃに丸めた紙の対比により、系の持つランダムさの本質が分かって頂けたと思います。



くしゃくしゃに丸めた Mylar シートの 1 つの安定な形.  
E.M.Kramer and A.Lobkovsky,  
Universal Power Law in the Noise  
from a Crumpled Elastic Sheet,  
Phys.Rev.E(1996) より。

以上の研究を遂行するにあたり、御指導くださった和達先生、共同研究者である E.Gutter、P. Di Francesco、膜の持つランダムネスに関して御教授下さった D.Nelson および、高分子膜の数値計算に関して色々とお教え頂いた好村先生に感謝いたします。

### References

- [1] 守 真太郎, 和達 三樹 : 岩波「科学」(1月号) 1996 年.
- [2] S.Mori and M.Wadati, Phys.Lett.A185(1994)206, Phys.Rev.E50(1994)867, S.Mori, Phys.Lett.A207(1995)87, J.Phys.Soc.Jpn.65(1996)1988, Phys.Rev.E54(1996)338.
- [3] P. Di Francesco, E.Gutter and S.Mori, Phys.Rev.E (in press).