

# 温度勾配に対する膜の特異な応答を発見

～自然現象の解明や物質の制御・輸送に大きく役立つことが期待～

首都大学東京・理工学研究科の栗田玲准教授、東京大学・生産技術研究所の田中肇教授らの研究グループは、温度勾配中における界面活性剤<sup>注1)</sup>系の膜の挙動を調べ、平衡状態の常識に反して、低温側で揺らぎが増大するという現象が起きていることを実験的に見いだしました。

以前より、温度勾配によって物質が移動することは知られていましたが（Ludwig-Soret 効果）、これまでの研究対象は物質が液体中に孤立分散している系に限られていました。本研究の大きな特徴は、膜という2次元的な幾何学的制約を受けた連続的な構造（連結系）に対する温度勾配の効果を調べた点にあり、今回の実験により、膜が端から端までつながっているという制約のために、温度勾配によって低温側に膜が寄せ集められ、その結果膜がたわみ揺らぎが増大することが明らかになりました。

この結果は、ゲルなどの幾何学的制約がある系や膜上でのタンパク質分子の輸送に対する温度勾配効果の解明につながる可能性があります。

■本研究成果は、9月8日付でアメリカ物理学会が発行する英文誌 *Physical Review Letters* に発表されました。本研究の一部は、学術振興会科学研究費補助金（基盤 B No. 17H02945, 若手 A No. 26707023, 基盤 S No. 21224011, 特別推進研究 No. 25000002）の支援を受けて行われました。

## 【研究の背景】

温度勾配がある環境では、それにより分子が輸送され、結果として濃度勾配が生じることが知られています（Ludwig-Soret 効果）。この効果について、高分子溶液やタンパク質、DNAなどを対象に、これまで精力的に研究が行われ、分子輸送は温度が関係するすべての要素が複雑に関係した結果実現することが分かっていました。

これまで、分子や粒子が液体中に孤立分散している系で温度勾配の影響は調べられてきましたが、ゲルや膜といったつながっているという幾何学的な制約がある系においては調べられてはいませんでした。特に、膜自身や膜上の物質が温度勾配によってどのように輸送されていくかは、生物学的な観点からも興味深い現象と言えます。

本研究では、このような観点から、膜が作る秩序構造の一つであるラメラ相<sup>注2)</sup>やその構造の欠陥が、温度勾配によってどのように変化するかを調べました。

## 【研究の詳細】

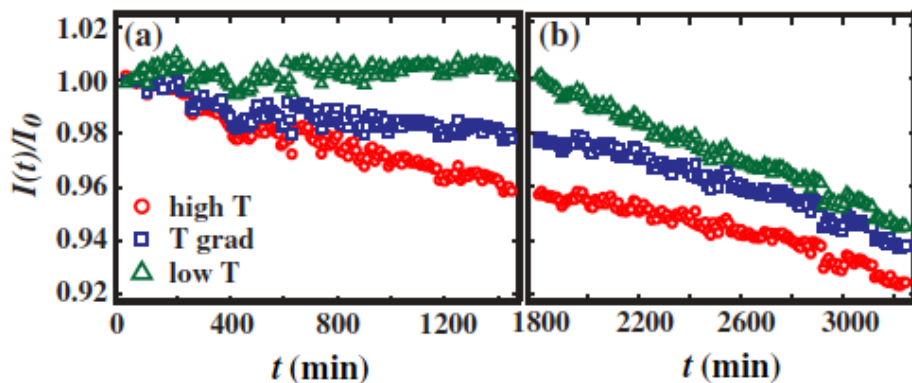
首都大学東京理工学研究科物理学専攻の栗田玲准教授、三井駿（大学院生、当時）、東京大学生産技術研究所の田中肇教授らの研究グループは、非イオン性界面活性剤を用いて、膜が平行に積み重なったラメラ相を形成させ、膜面方向に温度勾配を与えました。非イオン性界面活性剤のラメラ相は熱揺らぎによって安定化しているため、温度に非常に敏感であり、そのため温度勾配の効果が現れやすいと期待されました。

膜を形成する界面活性剤に蛍光色素を付着させ、蛍光顕微鏡で観察を行ったところ、温度勾配の低温側で膜の揺らぎが大きくなっていることが分かりましたが、これは温度が高い方が揺らぎが大きくなるという平衡状態に関する常識に反する現象です。

また、温度を均一に変化させた場合はほとんど変化が見られなかったため、膜中の一部に温度勾配がかかっていることが本質的に重要であることが分かりました。孤立分散系の場合、多くの場合高温から低温に向かって物質は輸送されますが、膜のような連結系の場合、同様の輸送力により低温側の膜が過剰となり、その結果揺らぎが増大したと考えられます。（図1）

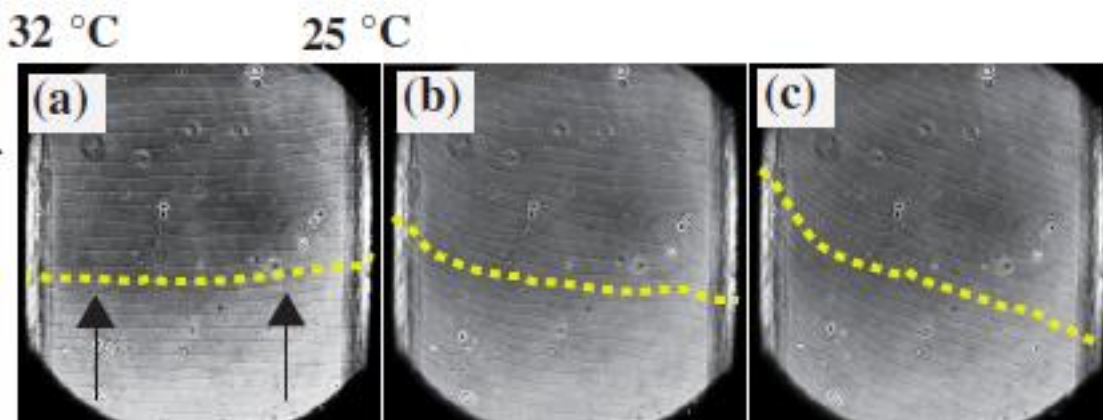
さらにこの性質を用いて、膜の幾何学的欠陥<sup>注3)</sup>の位置を温度勾配により制御することが可能であることが示され、温度勾配の方向を変えることで、欠陥の凝集、離散を制御可能なことを見いだしました。(図2)

図1



- (a) 温度勾配を与えてからの蛍光強度の時間変化。緑が高温側、青が温度勾配がある領域、赤が低温側となっている。低温側では蛍光強度が減少していない。これは低温側で膜の揺らぎが大きくなっていることを示唆している。
- (b) (a)の後に全領域を同じ温度に設定した後の蛍光強度の時間変化。低温側の揺らぎが元に戻り、そのため低温側で早く蛍光強度が減少している。

図2



温度勾配があるときの幾何学的欠陥の移動。(a)0分 (b)300分 (c)600分。黄色の点線が同じ線欠陥を示している。温度勾配が存在していると線欠陥が傾いていく。

## 研究の意義と波及効果

今回の研究成果は、膜に対する温度勾配の効果を示しただけではなく、ゲルなどの連結系における温度勾配の効果を示した最初の研究例です。自然界や生産過程では温度勾配が常に存在しており、本研究成果は自然現象の解明や物質の制御・輸送に大きく役立つことが期待されます。また、生体膜の温度勾配に対する応答、膜上のタンパク質などの非平衡状態での物質輸送に対して、有用な知見を与えると期待されます。

## 【用語解説】

### 注1) 界面活性剤

一分子の中に親水基と疎水基の両方を持っている両親媒性分子を界面活性剤といい、洗剤などで使われている。水にある濃度以上で分散させると、ある条件下で界面活性剤同士が自己凝縮をして、膜を形成する。

### 注2) ラメラ相

膜が平行に積み重なった状態のこと。非イオン性界面活性剤の場合、膜の揺らぎによる立体反発により安定化されている。

### 注3) 幾何学的欠陥

実際の系では無限に膜が平行に積み重なることはなく、膜が折り返す場所が存在する。この折り返しの場所を線欠陥という。この他にも膜が玉ねぎのように球状に積み重なったときの点欠陥など、様々な幾何学的欠陥が存在する。

## 【発表論文】

“Response of Soft Continuous Structure and Topological Defects to a Temperature Gradient”,  
Rei Kurita, Shun Mitsui, Hajime Tanaka  
Physical Review Letters (2017)

## 問合せ先

首都大学東京 理工学研究科 准教授 栗田 玲

TEL : 042-677-2505 (内線 3354)

E-mail : [kurita@tmu.ac.jp](mailto:kurita@tmu.ac.jp)

東京大学 生産技術研究所 教授 田中 肇

TEL : 03-5452-6125 (内線 56125)

E-mail : [tanaka@iis.u-tokyo.ac.jp](mailto:tanaka@iis.u-tokyo.ac.jp)