

# Non-equilibrium cross-effect of transport phenomena and fluid flow in wavelike external fields

福山, 達也

<https://hdl.handle.net/2324/4059987>

---

出版情報 : Kyushu University, 2019, 博士 (理学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

氏 名 : 福山 達也

論 文 名 : Non-equilibrium cross-effect of transport phenomena and fluid flow  
in wavelike external fields  
(波動伝搬する外場に誘起される輸送現象と流動現象の非平衡クロス  
効果)

区 分 : 甲

## 論 文 内 容 の 要 旨

自然界や我々の身の回りなどエネルギーが出入りする系は非平衡系と呼ばれる。ポテンシャルの勾配下で粒子や分子が勾配に沿って運ばれる現象は輸送現象と呼ばれ、その物理学的機構は完全な解明に至っておらず、その統一的理解は非平衡系物理学における重要課題の一つである。その中で水溶液中の溶質が温度勾配下で輸送される現象は熱泳動と呼ばれ、その力学的機構は近年明らかになりつつある。また光学技術の進歩からレーザーによる  $\mu\text{m}$  スケールの温度勾配が形成可能になり、熱泳動は粒子・分子操作への応用面からも注目を集めている。一方で温度勾配が動く場合や複数種の溶質が含まれた溶液での熱泳動に関する研究は多くなく、基礎・応用の両面から新奇の現象が期待される。我々は高分子水溶液中に動く温度勾配を形成したときに生じる輸送現象の機構解明と新しい分子操作技術の開拓を目指し、実験・理論の両方から取り組んだ。

まず我々は、高分子 Polyethylene glycol (PEG) 水溶液をシリコンゴム Polydimethylsiloxane (PDMS) で作った流体デバイスに封入し、動く温度勾配下における溶液の流れについて調べた。先行研究で高粘性の glycerol 水溶液中の動く温度勾配下で流動が生じることが報告されたが、数%程度の高分子水溶液中に動く温度勾配を形成した系については報告がなく、本研究で流動の発生とその性質を明らかにした。実験では、PDMS デバイス中の PEG 溶液に赤外レーザーを集光し、サイズ  $100\mu\text{m}$  程度の温度勾配を形成した。レーザー焦点を光路中のスキャナによって 2 次元的に円形スキャンすることで周期的に動く温度勾配を形成した。実験の結果、温度勾配の動きと逆向きの流動が生じた(図 1A)。次に温度勾配の動く速さ(周波数)を変えて流速を測定したところ、興味深いことに、数 Hz 程度までは流速が単調増加するものの、それより高周波数側では減少する「共鳴的な」振る舞いが観測された(図 1B)。これは先行研究や既存の理論モデルにはない新奇の現象である。

動く加熱点の前では溶液が加熱され始めるため熱膨張が、後ろ側では冷却され始めるため収縮(緩和)が起きる。しかし、熱膨張・収縮は等方的に起きるため系全体では流れが生じない。一方向の流動を誘起するためには熱膨張による流動の対称性を破る必要がある。熱膨張に加えて加熱点内の溶液の粘性が下がることで、膨張・収縮の流動のうち後ろ向きの流れが促進される。その結果、系全体で動く温度勾配に対し逆向きの流動が生じると考えられる。そこで我々は流動の力学的機構の詳細を明らかにするため、熱膨張する壁を考慮した流体力学モデルを構築した。理論モデルには(1)連続の式、(2)運動量保存則 (Stokes 方程式)、(3)熱拡散現象の3つを考慮した。

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \nabla \cdot (v\mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{K} \quad (2)$$

$$C_V \frac{\partial T}{\partial t} + D \nabla^2 T = I - h \Delta T \quad (3)$$

PEG は温度勾配下で低温側へ輸送されるため、加熱点では PEG が枯渇し溶液の粘性が下がる。PDMS は熱膨張をするため、加熱点前部では流体が押し出され、後部ではその緩和が起きる。また PDMS は粘弾性体であるため、低周波数の刺激（加熱）に対しては大きく変形するが、高周波数の刺激には緩和が間に合わず変形が小さくなる。さらに高周波数側では溶液中の熱拡散より熱源の移動が速くなるため、加熱点と周りの温度差が小さくなる。その結果、高周波数側では流速が小さくなると考えられる。粘性・体積の温度依存性をそれぞれ  $\beta = (1/\eta)(\partial\eta/\partial T)$ 、 $\gamma = (1/V)(\partial V/\partial T)$  とし、粘弾性変形を含めた  $\Gamma_\tau = \gamma(1 - e^{-1/f\tau})$  を導入して式(1)-(3)を解くことで以下の流速(4)が得られた。

$$u = -\frac{u_l}{2}\beta\Gamma_\tau(\Delta T)^2 \quad (4)$$

理論モデルは実験結果をよく再現し、溶液の粘性低下と粘弾性的な流体の圧縮が協同して生じる共鳴的な流動の説明に成功した(図 1B)。この流動の機構を利用し、PEG 水溶液中に動く温度勾配を形成したときの DNA 分子輸送制御を検証した。加熱点を往復させるとその軌道上では PEG が定常的に枯渇し、PEG 濃度勾配が形成される。PEG 濃度勾配による拡散泳動の影響で DNA は加熱点軌道に捕捉される。さらに加熱点の軌道における PDMS の変形緩和の非対称性から内向きの流動が生じる。その結果、DNA は加熱点の動きの中心に 30 倍以上に濃縮される分子操作を実現した。

さらに我々は上述の流動現象と共通する機構が細胞集団運動にも現れることを見出した。上皮細胞は組織間を伝搬するシグナルの伝搬方向とは逆向きの集団運動を形成することが報告されている。我々が構築した連続体力学モデル(式(1)-(4))を用いてシグナル伝搬下における細胞集団運動のメカニズムを解析した。その結果、細胞集団を伝えるシグナル波が基板との接着強度変化と細胞の膨張・収縮を誘起し、細胞集団がシグナルとは逆向きに動くことがわかった(図 1C)。理論モデルから予測されたシグナルの伝搬速度と集団運動速度の関係(図 1D)から、細胞集団運動のメカニズム解明だけでなく、本研究の理論モデルが様々な粘弾性体中の流れに波及できる可能性を示している。

結論として、我々は高分子水溶液中の動く温度勾配下における流動現象と分子輸送の非平衡クロス効果を明らかにし、これを用いて分子・細胞操作技術に応用した。さらにこの非平衡クロス効果がシグナル伝播に駆動される細胞集団運動と共通する数理構造にもつことに着目し、15 年来の謎であった細胞運動の力学機構の解明に成功した。以上の研究はソフトマターから細胞組織まで広く流れの非平衡力学の確立に貢献するものと考えられる。

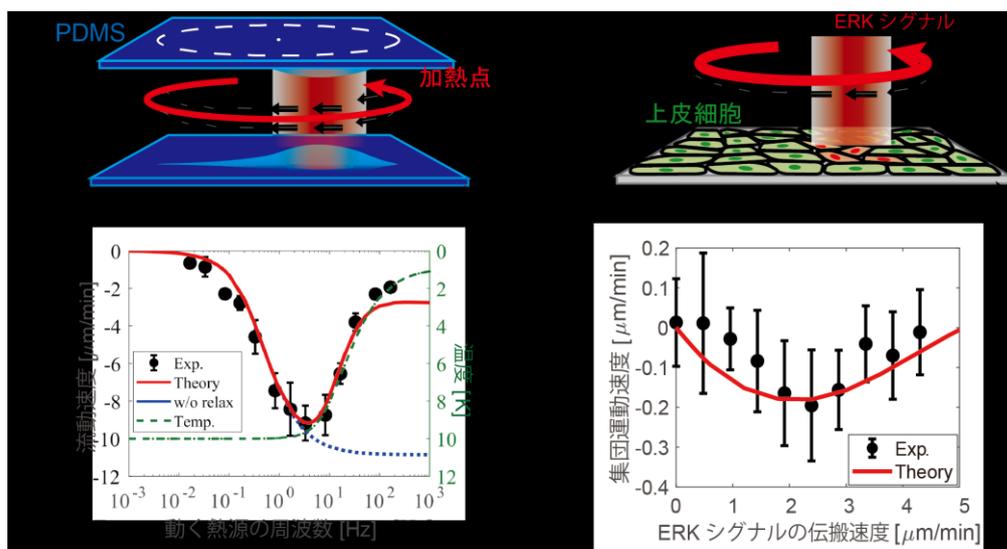


図 1. 伝搬する刺激の波とそれに駆動される逆向きの流動現象。A)動く温度勾配下で駆動される粘性流体の流れ。B)シグナル伝搬下で駆動される上皮細胞の集団運動。