

動的非平衡クロス効果：動く温度勾配下の流れと秩序

(九大院理) 福山 達也、前多 裕介

【はじめに】

温度勾配下で溶質分子が輸送される現象 (Soret効果) は非平衡系の物理学の中心課題の一つである。Polyethylene glycol(PEG)高分子溶液中では、温度勾配下のSoret効果と二次的なPEG濃度勾配による拡散泳動の競合を通じて、溶質分子は様々な空間パターンで分布する非平衡クロス効果が生じる[1,2]。しかし従来の研究は静的な温度勾配下での分子輸送を対象としたものがほとんどであり、変動する温度場で起こる現象に関する研究は十分でない。そこで本研究では、動く温度勾配下の非平衡クロス効果について実験的・理論的解析を行った。

【実験結果】

実験においては PDMS チャンバーに 5.0% PEG20000 水溶液を封入し、赤外線レーザー (波長 1480nm) を一定速度で円形スキャンし、動く温度勾配を実現した (図 1 a)[2]。その結果、温度勾配が動く方向とは逆向きに溶液の流れが生じること、レーザー移動速度 2500 $\mu\text{m/s}$ で最大の流速 10.5 $\mu\text{m/min}$ に達することがわかった (図 1b)。動く温度勾配下では非平衡クロス効果のみならず、外場の変動に依存した流動現象が生じることを示している。

【理論モデル】

動く温度勾配下の流動現象の理論モデルを構築し、流速 u_{flow} として次式を得た。

$$u_{flow} = -\frac{u_{laser}}{2} (\beta + \delta c_0 S_T) \gamma (1 - e^{-l/f\tau}) \Delta T^2 \quad (1)$$

図 1c に示すように、 u_{flow} はレーザーの移動速度 u_{laser} とともに増加するが、ある速度で極大値をとる。この結果は、流動をうみだす物理的起源が「温度勾配の波 (温度波) の伝搬による熱膨張・粘性変化・熱拡散のクロストーク」にあることを意味している。

流動を生み出す圧力は壁の熱膨張に由来する。加熱された境界壁では熱膨張 $l/l_0 = \gamma \Delta T$ が起き、変形が緩和する過程で流体の体積は $\Delta V/V_0 = \gamma(1 - e^{-l/f\tau}) \Delta T$ だけ押し出される。

一方、流体の粘性は溶媒の温度変化 $-\beta \Delta T$ と溶質 PEG の濃度変化 $\delta \Delta c$ の双方に依存し $\Delta \eta/\eta = -(\beta + \delta c_0 S_T) \Delta T$ となる。温度波の内外に生じる粘性勾配は対称であるが温度波は一方方向に進み対称性を破るため、連続の式と Stokes 方程式を満たす解として、温度波と逆向きに整流された流動が生じる (図 1d)。

さらに、レーザーの移動速度 u_{laser} があがるにつれ流動は温度差のみで定まり、熱拡散により減衰してゆくことが明らかとなった。過去には Glycerol 溶液中での流動発生[3]が知られているが、流速が極大値を持つ点は温度波と変形する場に由来する新たな特性と考えられる。

【参考文献】

- [1] H.R. Jiang, H. Wada, N. Yoshinaga, M. Sano. Phys. Rev. Lett. **102**, 208301 (2009).
- [2] Y.T. Maeda, A. Buguin, A. Libchaber. Phys. Rev. Lett. **107**, 038301 (2011); Y.T. Maeda. App. Phys. Lett. **103**, 243794 (2013).
- [3] F. M. Weinert and D. Braun. J. App. Phys. **104**, 104701 (2008).

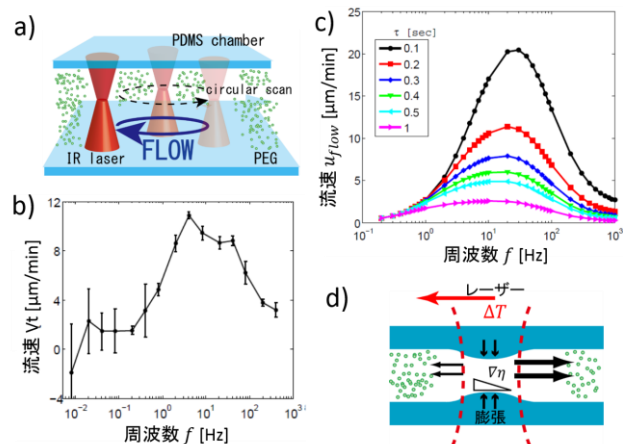


図 1 a)対象とする系 b)実験で観測された流速 c)流速の周波数依存性 d)理論モデルの概念図