

# 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)		
論文調査委員	主 査	九州大学	准教授 前多 裕介
	副 査	九州大学	准教授 水野 大介
	副 査	九州大学	教 授 木村 康之

### 論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

平衡状態から離れた状態「非平衡系」は素粒子・原子核から宇宙まであらゆる領域で現れる。非平衡系の代表例は温度差のある流体や分子輸送であり、レイノルズ数の大きな系では熱対流が古くから研究がなされている。一方で、レイノルズ数が小さなマイクロ非平衡系でも古くから知られる現象として Soret 効果（または熱泳動現象）がある。集光レーザーで溶液中に熱源を構築し、数十  $\mu\text{m}$  の範囲にわたる温度勾配を形成すると分子が一方向に輸送される。しかし、非平衡輸送現象の微視的な理解は発展の途上にあり、熱泳動現象を利用した分子操作技術の開発や、その物理的知見をもとにしたソフトマターや生命現象の理解は非平衡物理学の重要課題として残されたままである。このような観点から本論文では、新たな非平衡系として動く勾配下にみられる輸送現象と流動現象に関して実験を行い、新たに発見されたダイナミクスについて連続体力学に基づく理論的解析からメカニズムを明らかにしている。さらに、背後にある数理構造の共通性に着目し、創傷治癒過程の細胞集団運動を輸送現象として説明することに成功し、15年来の謎に一つの解答を与えている。

本研究者は第一の研究で、動く温度勾配下の流動現象と分子輸送現象の協同効果について実験的・理論的研究を行った。1480nm の赤外線レーザーを PDMS チャンバーに封入された高分子溶液中に形成し、ガルバノミラーで円形スキャンし熱源を一定速度で空間を伝搬させ、動く温度勾配を形成するシステムを構築した。この動的な温度勾配下で起こる輸送現象を実験的に解析したところ、温度勾配が伝搬する軌道に沿って逆向きに溶液の流れが発生することを明らかにした。この流動現象の特徴として、外場の温度差の二乗で流速が増大すること、温度勾配の伝播速度に対して特定の伝播速度で流速が最大となる共鳴的な周波数応答を示すこと、がわかった。これらの特徴を説明するため、2次元系に Darcy 近似されたストークス方程式、体積保存の連続の式、さらに一定速度で伝搬する熱源下の温度分布を与える熱拡散方程式の3つから温度勾配と逆向きに発生する定常流れを解析的に導いた。動く熱源が溶液の粘性を降下させると同時に、波の前端では流体を拡張させ後端では圧縮させる非対称性が形成されることで逆向きの流動が発生することを明らかにした。周波数依存性もまた、流体の膨張圧縮の特徴と熱伝導の周波数特性から最適な熱源伝播速度が存在することを明らかにしており、実験結果を定量的に説明する解析理論の構築に成功した。この流動現象と高分子溶液中での熱泳動現象を組み合わせることで、熱源の伝播速度を制御パラメータとした分子操作技術の開発にも成功した。従来の光ピンセットと異なり、捕捉対象の電磁氣的な性質によら

ない分子操作技術であることから、生体材料やソフトマターの操作に活用できるものと期待される。

次に本研究者は第二の研究で、動く温度勾配下の流動現象と同様の数理構造を持ちうる系を探索し、細胞集団運動に着目した。裂傷を負った皮膚では上皮細胞の集団が傷口に向かって運動し、これは裂傷治癒として知られている。この上皮細胞の集団運動ではシグナル伝達分子 **MAP kinase ERK** の活性が細胞間を波のように伝搬し、上皮細胞の運動方向は **ERK** 活性の伝搬方向と逆向きになることが知られている。しかし、細胞がいかにして **ERK** 波の伝播方向を検知し運動に転換するかは15年来の謎であり、仕組みは明らかにされていなかった。本研究者は、細胞集団が **ERK** の伝播方向を検知する仕組みを明らかにするため、上述の動く温度勾配下の流動現象の連続体モデルを、**ERK** 波のもとで集団運動する上皮細胞の連続体力学へと拡張した。細胞集団においてもシグナル伝播に誘起される接着力変化と細胞密度変化の相乗的な作用から一方向性の運動を説明することに成功し、実験でも理論モデルから予測される **ERK** シグナル強度依存性や周波数特性を検証することに成功した。創傷治癒過程にも展開しうる一般化された境界条件をも考慮し、創傷治癒と非平衡輸送現象に共通原理を見出した点は、物理学と生命科学にまたがる特筆すべき成果である。

本博士論文の結果は、*Langmuir*, Vol.31 (2015)および *Soft Matter*, Vol. 14 において査読付き原著論文として出版されており、いずれも本研究者が第一著者として主たる貢献を果たしている。さらに、これらの研究内容は日本物理学会誌 Vol.71 でも和文総説を發表しており、*Biophysical Reviews* 誌からも招待付き英文総説論文として2020年に出版予定である。

以上の結果、動く温度勾配下およびシグナル伝搬下に現れる流動現象の普遍構造を明瞭に定式化し、その力学特性に実験的な検証を初めて与えたものである。非平衡物理学・ソフトマター物理学・生物物理学分野において価値ある業績と認められる。よって、本研究者は博士（理学）の学位を受ける資格があるものと認める。