



2023年3月16日

報道関係者各位

慶應義塾大学
福井大学
理化学研究所

生体から発想を得た分子スケールの水輸送方法の提案 — 極低エネルギーでの水輸送システムの構築に向けて —

水は私達にとって最も大事な資源の1つです。将来の生命の持続可能性のために、水の輸送を自在に制御できる技術の開発が世界各国で進められています。慶應義塾大学理工学部の荒井規允准教授、山本詠士専任講師、泰岡顕治教授、同大学院理工学研究科の平野秀典特任准教授、福井大学工学部の古石貴裕准教授および理化学研究所開拓研究本部戎崎計算宇宙物理研究室の戎崎俊一主任研究員の研究グループは、コンピュータシミュレーションによって、エアコンなどで使われているヒートポンプの仕組みをナノサイズで実現した新しいメカニズムの分子スケール水輸送方法を提案しました。

近年、そのエネルギー効率の高さから生体模倣による機能性材料が注目されています。本研究で提案した水輸送方法は、私達の体内の水輸送との類似性が認められ、その本質を捉えている可能性があります。また、ヒートポンプにおいて理論的に最もエネルギー効率の高い逆カルノーサイクルに相当するシステムであるため、体内システムのような極低エネルギーでのシステムを実現できることが期待されます。

本研究成果は2023年3月8日（現地時間）にイギリス王立化学会誌「*Nanoscale Horizons*」にて公開されました。

1. 本研究のポイント

- ・これまでにない新たな方法で分子スケールの水輸送方法を提案
- ・圧力差や濃度差などが不要な能動的な水輸送ポンプを実現
- ・生体内における水輸送原理について新たな知見を提供
- ・これまでに比べ極めて高いエネルギー効率で水輸送を行える可能性を秘めており、さまざまな水輸送技術への応用・技術革新が期待

2. 研究背景

世界的な人口増加とともに、水不足の問題は今後さらに深刻化すると考えられています。限られた水資源を有効活用するため、水輸送技術の発展とそれによる技術革新は人類の急務であり、これまでさまざまな水輸送方法が提案されてきました。特に分子スケールでの水輸送は、地球環境だけでなく、半導体や電池の高性能化、私達の体内環境（健康）とも密接に関わっているため、幅広い分野で精力的に研究が行われています。

一般的に水は圧力差や濃度差によって駆動され、それらが均一になるように輸送されます。したがって、ある特定の方向に水を輸送したい場合、外部からエネルギーを与え、それを物理的な仕事として変換する必要があります。例えば半透膜を利用した海水淡水化では、仕事として外部

から圧力を与えることで水が輸送されますが、淡水化膜が詰まったり、壊れたりする問題があります。

そこで本研究グループは生体内における水輸送に着目しました。私達の体の中では、健康維持のために分子スケールの水輸送が非常に高いエネルギー効率で 24 時間休みなく実施されています。さまざまな分子や複雑な相互作用が絡まり合っただけでそのような水輸送が達成されていますが、本研究グループはそれを模倣した分子シミュレーションを実施し、能動的かつ効率的に駆動する水ポンプの実現を目指しました。

3. 研究内容・成果

本研究グループでは以前に、疎水性相互作用※1 を利用して気泡を作り出し、高効率の水輸送が実現できることを明らかにしました[1]。本研究ではそれを拡張し、外部エネルギーとして細孔の片側半分の直径に特徴的なゆらぎを与えたときの水輸送現象を観察しました(図1左)。その結果、完全にランダムなゆらぎでは全く水が輸送されなかったのに対し、自然界でよく現れる $1/f$ ゆらぎでは効率的な水輸送が行われることがわかりました。その理由が水分子の濡れと乾きの間に現れるヒステリシス※2 に由来することを特定し、このメカニズムによって水の能動輸送を行う分子スケールのポンプが実現できることを示しました。

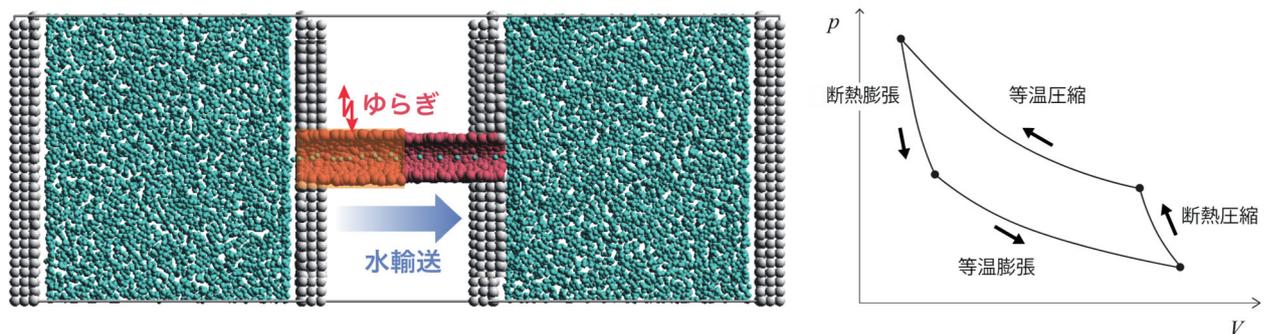


図1 ゆらぎによる水輸送システムと対応する逆カルノーサイクル

4. 今後の展開

本研究で提案したポンプシステムは理論効率が最も高い逆カルノーサイクル(図1右)と対応していることから、極低エネルギーによる水輸送システムの構築が可能となります。例えば、水質浄化や海水の淡水化など水不足問題に直接アプローチする装置だけでなく、燃料電池内における水移動の制御や半導体内の冷却技術などへも応用の可能性を秘めています。

さらにこの水輸送システムはサイズがナノスケール(100万分の1ミリメートル)ととても小さいため携帯性に優れ、かつ高集積化により24時間365日の安定稼働が求められる人工臓器などへの応用も期待できます。

<参考文献>

[1] Nanotube Active Water Pump Driven by Alternating Hydrophobicity (疎水性相互作用を利用した水の能動ポンプの実現)、N. Arai. *et al.*、*ACS Nano*、**15**、2481 (2021)。

<原論文情報>

タイトル(和訳): Wetting hysteresis induces effective unidirectional water transport through a fluctuating nanochannel (濡れのヒステリシスを利用した水の能動輸送ポンプ)

掲載誌 : *Nanoscale Horizons* (DOI: 10.1039/D2NH00563H)

著者名 : 荒井 規允¹、山本 詠士²、古石 貴裕³、平野 秀典⁴、泰岡 顕治¹、戎崎 俊一⁵

1 慶應義塾大学理工学部機械工学科、2 慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科、

3 福井大学工学部応用物理学科、4 慶應義塾大学大学院理工学研究科、

5 理化学研究所開拓研究本部戎崎計算宇宙物理研究室

<用語説明>

※1 疎水性相互作用

疎水性とは水と親和性が低い（水をはじく、または水と混ざりにくい）性質である。疎水性を持つ分子同士が水中に存在するときは、水からはじかれる形で互いが集合し、この引力効果が疎水性相互作用である。体内の細胞の形成やタンパク質の安定化にも重要な役割を果たすと考えられている。

※2 ヒステリシス

系の状態が現在だけでなく、過去の経路にも影響を受ける現象のこと。ここでは、同じ細孔サイズでも、今から水が流入するか、それとも流出するかで、細孔内の水分子の個数が変化すること。

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、福井県教育・スポーツ記者クラブ、各社科学部等に送信させていただいております。

・研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 機械工学科 准教授 荒井 規允（あらい のりよし）

TEL : 045-566-1846 FAX : 045-566-1495 E-mail : arai@mech.keio.ac.jp

福井大学 工学部 応用物理学科 准教授 古石 貴裕（こいし たかひろ）

TEL, FAX : 0776-27-8663 E-mail : koishi@u-fukui.ac.jp

・本リリースの配信元

慶應義塾広報室（望月）

TEL : 03-5427-1541 FAX : 03-5441-7640

E-mail : m-pr@adst.keio.ac.jp <https://www.keio.ac.jp/>

福井大学 広報課

TEL : 0776-27-9733

E-mail : sskoho-k@ad.u-fukui.ac.jp <https://www.u-fukui.ac.jp/>

理化学研究所 広報室 報道担当

TEL : 050-3495-0247

E-mail : ex-press@ml.riken.jp <https://www.riken.jp/>