

令和 8 年 1 月 22 日

報道機関 各位

国立大学法人電気通信大学

立命館大学

国立研究開発法人産業技術総合研究所

トンネル掘削をする細菌！

～細菌が極狭通路を突破する仕組みをはじめて解明～

【ポイント】

- **極狭な通路の突破:** 細菌が、約 1 マイクロメートル四方という、細菌 1 匹がぎりぎり通れるような極めて狭い通路をドリル運動により効率的に自力で通過できることを発見。
- **ドリル運動:** 細菌は自らの「べん毛」を細胞表面に巻き付けて、トンネル掘削機のように回転させる独特の泳ぎ方（ドリル運動）で狭い空間を推進し、方向性のある移動を実現。
- **微小流体デバイスの構築:** 宿主昆虫（ホソヘリカメムシ）の腸内にある狭い共生器官通路を模倣し、約 1 マイクロメートル四方のチャンネルを持つ微小流体デバイスを開発。このデバイス内で共生細菌の狭小空間での運動を再現し、高速蛍光顕微鏡で可視化。
- **ドリル運動の検証とモデル化:** 実験と並行して物理モデルによる数値シミュレーションを行い、ドリル運動が狭い空間で推進力を高める物理的理由を解明。また、遺伝子操作によってべん毛の根元にある「フック」の柔軟性を変化させ、この柔軟性がドリル運動と感染能力に不可欠であることを証明。

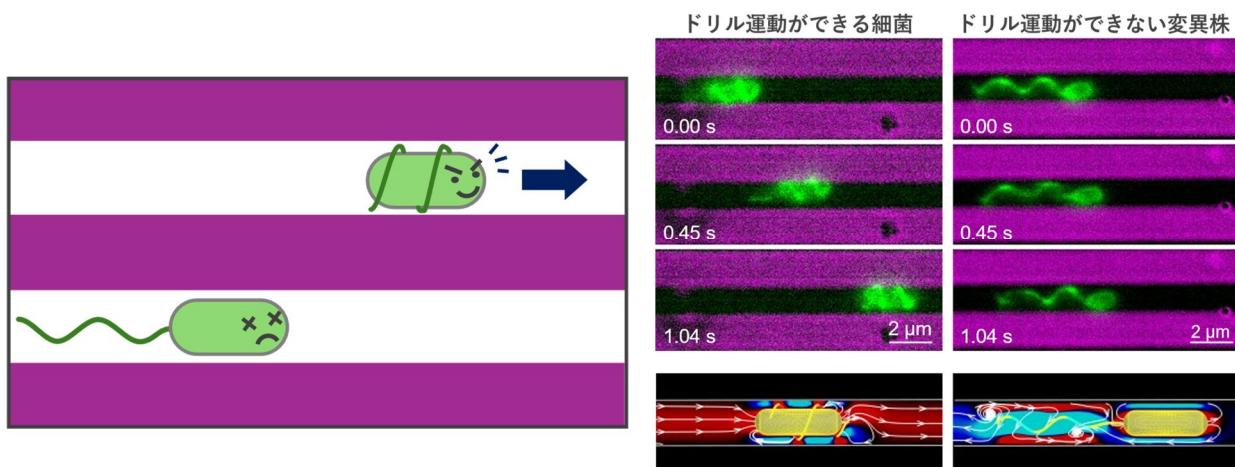


図: 細菌がドリル運動で狭小空間を突破するイラスト (左)。極狭通路を通過する共生細菌。ドリル運動と通常の運動の比較 (右上)。物理シミュレーションの結果 (右下)。本リリース論文 [Yoshioka, et al. *Nat Commun* \(2026\)](#) を参照。



← 「狭小空間を運動する細菌」
左の QR コードまたは
下記の URL に動画があります。
https://youtu.be/9K_wBF9q-3w



← 「狭小空間のドリル運動」
左の QR コードまたは
下記の URL に動画があります。
<https://youtu.be/0Og4p0xUtzc>

【概要】

電気通信大学大学院情報理工学研究科基盤理工学専攻（以下、「電通大」）の中根大介准教授・同研究科機械知能システム学専攻の菅哲朗教授、立命館大学（以下、「立命大」）の和田浩史教授、産業技術総合研究所（以下、「産総研」）の古林真衣子主任研究員・菊池義智研究チーム長らの研究グループは、細菌が自らのべん毛（※1）を細胞に巻き付けて回転させることで、“トンネル掘削機”的に幅 1 マイクロメートル程度の極めて狭い通路を突破できることを発見しました（図左）。研究チームは昆虫の腸内にある共生（※2）細菌の通り道を再現した微小流体デバイス（※3）を構築し、極狭通路では細菌がドリル運動（※4）をする頻度が大幅に増加することを発見しました。またシミュレーションや遺伝子操作実験により、このドリル運動が狭小空間で推進力を生む仕組みと、べん毛の基部の柔軟性がドリル運動に重要な役割を果たすことを突き止めました。本研究成果は、細菌が狭い環境を乗り越える新たな運動戦略を示したものであり、国際学術誌「Nature Communications」に掲載されました。

【背景】

自然界の微生物が暮らす環境には、土壤中の細孔や動植物体内的管腔など、微小で閉ざされた“極狭通路”が数多く存在します。動物と微生物の共生の中には、宿主が狭窄部と呼ばれる極めて細い通路を作り、共生に適した細菌だけを奥の器官へ通過させる例があります。例えば、農業害虫であるホソヘリカメムシの消化管には直径約 1 マイクロメートルの細い管状の構造が存在し、環境中の特定の共生細菌のみがそこを通り抜けて腸内の共生器官へ到達します（[産総研プレスリリース 2015 年 9 月 1 日](#)）。しかし、そのような極狭通路をどのようにして細菌が通過するのか、そのメカニズムは不明でした。

近年、このホソヘリカメムシの共生細菌（*Caballeronia insecticola*）において、通常の運動「べん毛を後方にたなびかせて泳ぐ」様式に加え、「べん毛を前方で自分の体に巻き付けて泳ぐ」様式が報告されました（[学習院大学・産総研共同プレスリリース 2017 年 12 月 25 日](#)）。しかし、このようなべん毛巻き付き運動が狭い空間でどのような利点をもたらすのか、その生態学的意義は十分には検証されていませんでした。

【手法】

研究グループは、微小流体デバイスと呼ばれる微細加工技術を用いたモデル装置を製作しました。この装置は高さ・幅とも約 1 マイクロメートル程度（1 ミリメートルの 1/1,000 の大きさ）の極狭通路を有し、カメムシの腸内にある狭窄部を再現しています。このデバイス内で共生細菌が移動するとき、べん毛纖維を蛍光標識して可視化し、蛍光顕微鏡で撮影しました。また、この巻き付き泳法の物理的原理を探るため、細菌を狭い筒状空間内で泳がせる物理シミュレーションを実施しました。さらに、遺伝子操作により細菌のべん毛フック（※5）を改変する実験も行いました。具体的には、ドリル運動細菌（*C. insecticola*）と非ドリル運動細菌（近縁の *Burkholderia anthina*）との間でべん毛フックと呼ばれる部分の遺伝子を交換した変異株を作製し、フックの柔軟性が運動に及ぼす影響と、昆虫への感染効率への影響を評価しました。電通大が光学顕微鏡観察とデバイス作製、立命大・東北大が物理モデル（※6）の構築、産総研・秋田県立大が遺伝子解析を担当しました。

【成果】

微小流体デバイス内で観察した結果、共生細菌は極狭通路でべん毛を高頻度で巻き付け、巻き付

いたべん毛を回転させることでスムーズに前進する様子が捉えられました（図右上）。一方、通常の広い空間では同じ細菌でもべん毛を巻き付ける頻度は低く、べん毛を後方になびかせて泳ぐ頻度が高くなっていました。つまり、**空間の狭さそのものが細菌のドリル運動を誘発することが示されました**。微小流体デバイス内では、共生細菌の約 65% が巻き付き状態で泳ぐのに対し、開放的な標準チャンバー内ではその割合が 15% 程度と大きな差がみられました。さらに別種の細菌についても調べたところ、狭い環境下でドリル運動を行う種（例えば *Pandoraea* 属の一部）では移動速度がほとんど低下しないのに対し、**ドリル運動ができない種では狭い空間に入ると著しく遊泳速度が低下することが明らかになりました**。

物理シミュレーションの結果、狭い空間ではべん毛を伸ばしたままでは周囲の液体をうまく後方へ押し出せないことが示されました（図右下）。一方、べん毛を細胞に巻き付けた状態では、**液体を掻き出しながら前進する流れが発生していました**。これは、**狭い隙間では壁との摩擦で流体が停滞しやすく、通常のべん毛運動ではほとんど推進力を生み出せないのに対し、ドリル運動では巻き付けたべん毛は壁との隙間をねじ込むように流体を動かして推進力に変えている**ためです。実際に、ドリル運動は極狭通路では速度低下がほとんど見られず、広い空間での通常遊泳と同程度の速度で前進できることが確認されました。

遺伝子改変実験では、**ドリル運動細菌 (*C. insecticola*) の柔らかいフックを、非ドリル細菌 (*B. anthina*) の少し硬いフックへと交換したところ、極狭通路でべん毛を巻き付けられなくなり、移動距離はほぼゼロに低下しました**。逆に非ドリル運動細菌の少し硬いフックを、ドリル細菌由来の柔らかいフックへと交換すると、チャンネル内で部分的にではあるものの巻き付き泳法が現れ、移動距離も増加しました。このようなフックの硬さがドリル運動に重要であることは、物理シミュレーションでも再現できました。さらに、フックを硬くしたドリル運動細菌は、宿主カメムシへの感染競争力（共生器官へ定着する能力）が大幅に低下することも判明しました。これらの結果から、**べん毛フックの柔軟性が巻き付き運動の鍵**であり、狭小空間での移動効率、ひいては宿主への感染成功率が左右されることが実証されました。

【今後の期待】

本研究では、**ドリル運動は細菌が極狭通路を突破するために進化させた巧みな移動戦略であることを示しました**。この知見により、これまで不明だった**微小空間における細菌の行動原理や、宿主-共生菌間の相互作用のメカニズムが解明**に近づくことが期待されます。特に、本研究で対象とした昆虫共生菌だけでなく、病原細菌であるカンピロバクター や ヘリコバクター、緑膿菌などでもドリル運動が報告されており、粘液層や腸陰窓のような**粘性が高く狭い領域で宿主体内へ侵入・定着する普遍的な戦略である可能性**があります。したがって、この運動を阻害あるいは促進することで、害虫防除や病原菌感染の制御につながる応用も考えられます。また、微生物が持つ巧みな運動様式は、**マイクロマシンやナノロボット開発などへの着想**を与える可能性もあり、生物模倣技術の観点からも注目されます。今後、本研究で開発した微小流体デバイスを応用して土壤や生体内など様々な狭小環境での微生物の振る舞いを調べることで、環境中の細菌生態や共生システムの解明が一層進むことが期待されます。

（論文情報）

掲載誌：Nature Communications

タイトル：Bacteria break through one-micrometer-square passages by flagellar wrapping

著者：Aoba Yoshioka, Yoshiki Y. Shimada, Toshihiro Omori, Naoki A. Uemura, Kazutaka Takeshita,

Kota Ishigami, Hiroyuki Morimura, Maiko Furubayashi, Tetsuo Kan, Hirofumi Wada, Yoshitomo Kikuchi, Daisuke Nakane

論文 URL : <https://doi.org/10.1038/s41467-025-67507-9>

DOI : 10.1038/s41467-025-67507-9

公表日 : 2026 年 1 月 20 日

(外部資金情報)

本研究は、JSPS 科学研究費補助金 学術変革領域研究 (B) 微生物が動く意味 (22H05066, 22H05067, 22H05068)、JST 創発的研究支援事業 (JPMJFR2411) の支援を受けたものです。

(用語説明)

※1 : べん毛 (鞭毛)

細菌の細胞から伸びるらせん繊維状の運動器官。根本のモーターが繊維を回転させることで推進力を生み出す。

※2 : 共生

異なる種類の生物同士が密接な関係を結んで生活すること。本研究ではカメムシと細菌の共生関係に注目している。

※3 : 微小流体デバイス

マイクロメートルサイズの微細な流路 (チャンネル) を持つ実験デバイス。微小空間での液体の流れや微生物 1 匹の挙動を制御・観察できる。

※4 : ドリル運動

細菌は自らの「べん毛」を細胞表面に巻き付けてドリルのように回転させる独特の泳ぎ方 (ドリル運動) で狭い空間を推進し、方向性のある移動を実現する。

※5 : フック

細菌べん毛の基部にある短く柔らかい構造。モーターとべん毛繊維を繋ぎ、回転力を繊維に伝達させる役割を担う。

※6 : 物理モデル

本研究では狭い空間内での液体の流れや、べん毛繊維の柔らかさを変化させた際の細菌の運動を計算機上で再現するために用いたモデル。

【連絡先】

<研究内容に関すること>

電気通信大学 大学院情報理工学研究科 基盤理工学専攻

【職名】准教授

【氏名】中根 大介 (NAKANE Daisuke)

Tel : 042-443-5146

E-Mail : dice-k@uec.ac.jp

電気通信大学 大学院情報理工学研究科 機械知能システム学専攻

【職名】教授

【氏名】菅 哲朗 (KAN Tetsuo)

Tel : 042-443-5413

E-Mail : tetsuokan@uec.ac.jp

立命館大学 理工学部 物理科学科

【職名】教授

【氏名】和田 浩史 (WADA Hirofumi)

Tel : 077-561-5017

E-Mail : hwada@fc.ritsumei.ac.jp

産業技術総合研究所 バイオものづくり研究センター 生物共創制御研究チーム

【職名】研究チーム長

【氏名】菊池 義智 (KIKUCHI Yoshitomo)

Tel : 050-3522-8903

E-Mail : y-kikuchi@aist.go.jp

<報道に關すること>

電気通信大学 総務部 総務企画課広報係

Tel : 042-443-5019 Fax : 042-443-5887

E-Mail : kouhou-k@office.uec.ac.jp

立命館大学 総合企画部 広報課

Tel : 075-813-8300 Fax : 075-813-8147

E-Mail : r-koho@st.ritsumei.ac.jp

産業技術総合研究所 ブランディング・広報部 報道室

E-Mail : press-ml@aist.go.jp