

2023 年 8 月 22 日

国立大学法人筑波大学
国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）

油分解細菌の集団は表面積を広げて油分解効率を高める

海洋に広く存在する油分解性の細菌は、油水界面上に強く付着しながら集団で密集して生育することで、油界面の屈曲を生じさせることを発見しました。これにより油水界面の面積を拡大させ、より多くの細胞が直接油に接触できるようになり、効率的に油を分解していることが分かりました。

実環境中において、多くの細菌はバイオフィームと呼ばれる集団を形成して生存しています。ある種の海洋細菌は、海洋に流出した石油などの油の周囲にバイオフィームを形成し、これを栄養源とし、生分解します。しかし、バイオフィームの形成と油の分解との関連は解明されていませんでした。

本研究では、マイクロ流体デバイスを用いた観察系を構築し、細菌の細胞と微小な油滴との相互作用を高解像度で可視化しました。その結果、油分解細菌の一種である *Alcanivorax borkumensis* が、油と水の界面に強く付着し、生育に伴って油滴の形状を樹状突起のように変形させ、表面積を広げることによって、より多くの細胞が油に直接、接触できるようになり、効率よく油を分解できることが分かりました。また、理論物理モデルを用いて、バイオフィームの形成とその形状のダイナミクスを予測することに成功しました。

さらに、この油滴の形状変化は、細胞が野菊の花びらのように配置している中心から始まることが分かりました。このような油滴表面での特徴的な細胞の配置パターンは、液晶のネマチック相の分子配列（分子は一方向に配向するが、重心はランダム）に類似しています。すなわち、細菌はバイオフィームを形成し、互いに協力して、細胞の成長に伴う圧力を利用することで、野菊の花びら状の中心が隆起し、油界面の突起形成を引き起こして、効率的に油を分解していることが示されました。

本研究の成果は、細菌を用いた環境浄化技術（バイオレメディエーション）の効率化に貢献することが期待されます。

研究代表者

筑波大学 生命環境系

Andrew S. Utada 准教授

研究の背景

多くの細菌は、バイオフィーム^{注1)}と呼ばれる集団を形成して生存しています。バイオフィームは植物、動物、そして人間の健康や生活と関わっており、致命的な感染症や、工業用パイプの詰まりや腐食による経済的損害の原因となります。一方で、廃水処理における浄化にも重要な役割を果たしており、バイオレメディエーション^{注2)}の担い手としても知られています。ある種の海洋細菌は、石油を栄養源として消費し、海洋に流出した油なども生分解します。石油を分解する際、これらの細菌は油滴の周囲にバイオフィームを形成しています（図 1）。しかしながら、細菌による石油分解の研究は、これまで主に試験管内で行われてきたため、バイオフィームやこれを形成する 1 細胞が実際に石油を分解するメカニズムは不明のままでした（図 2 左）。

研究内容と成果

本研究では、海洋に広く存在する細菌が油を分解するメカニズムを明らかにしました。マイクロ流体デバイス^{注3)}を利用して、細菌と微小な油滴との相互作用を時空間的に高解像度で可視化しました。このマイクロ流体デバイスは、人間の髪の毛の直径の 1/2 ほどの大きさの油滴をトラップし、油滴上の油分解性細菌の挙動を 1 週間以上観察し続けることができます（図 2 右）。観察の結果から、海洋細菌 *Alcanivorax borkumensis* が油滴上に 2 つの異なるタイプのバイオフィームを形成することを示しました。この 2 つのタイプを、球状バイオフィーム (spherical biofilm: SB) と樹状バイオフィーム (dendritic biofilm: DB) と名付けました（図 3）。DB は、油界面の面積を広げることによって、SB よりもはるかに速く油滴を分解していました。油と水は混ざらないため、通常、油滴は海水中では球状の構造を保っています。しかし、*A. borkumensis* が油液界面に DB を形成することによって、界面の構造が崩れ、油滴は樹状様構造を示します。これによって油界面の面積が指数関数的に拡大し、より多くの細胞が油に直接、接触できるようになります。

DB 細胞が油滴をどのように変形させるかを明らかにするため、細胞表面の特性を調べたところ、DB 細胞の表面は疎水性が増しており、SB 細胞よりも油に強く付着することが分かりました。さらに、*A. borkumensis* はバイオサーファクタント^{注4)}と呼ばれる分子を分泌して表面張力を低下させ、油との界面を変形しやすくしています。

さらに、理論物理モデルを用いて、バイオフィームの形成のダイナミクスとその形状を予測したところ、細菌の細胞は油滴表面を隙間なく覆っており、その配置は特徴的なパターンを示していること、この配置パターンが液晶の物理学により説明できることを発見しました。油滴の形状変化は、細胞が野菊の花びらのように配置している領域の中心から始まることが分かりました（図 3）。細胞の成長と密集によってバイオフィーム内の圧力が上昇すると、野菊の花びら状の中心が隆起し、樹状突起様構造の形成が始まります。細胞は、バイオフィームを形成し互いに協力することによって、細胞の成長に伴う圧力を特定の場所に集中させ、その結果、油界面の隆起が起こり、細胞に覆われた油のチューブが形成されます（図 3）。このような細胞の並び方は、液晶のネマチック相（分子は一方向に配向するが、重心はランダム）と類似しています。

今後の展開

近年、アクティブマター (active matter) と呼ばれる、自ら動く能力を持つ物質における複雑な挙動に注目が集まっています。細菌はそのような「物質」の一つであり、私たち人間にはないような特別な能力を持っていることが古くから知られています。本研究の結果から、細菌は物理学を活用して、餌である油

を効率よく利用することを実証しました。このようなメカニズムは、他の類似した生物の研究に応用可能であるとともに、油のバイオレメディエーションの効率化に貢献すると考えられます。

参考図

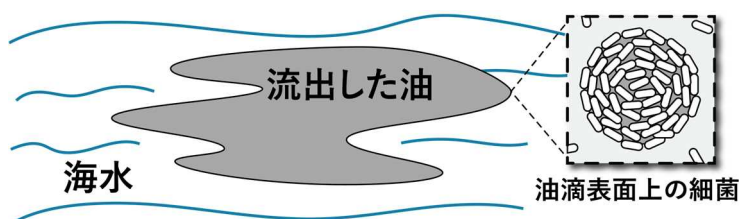


図 1. 海水中の油滴表面上に存在する細菌の模式図

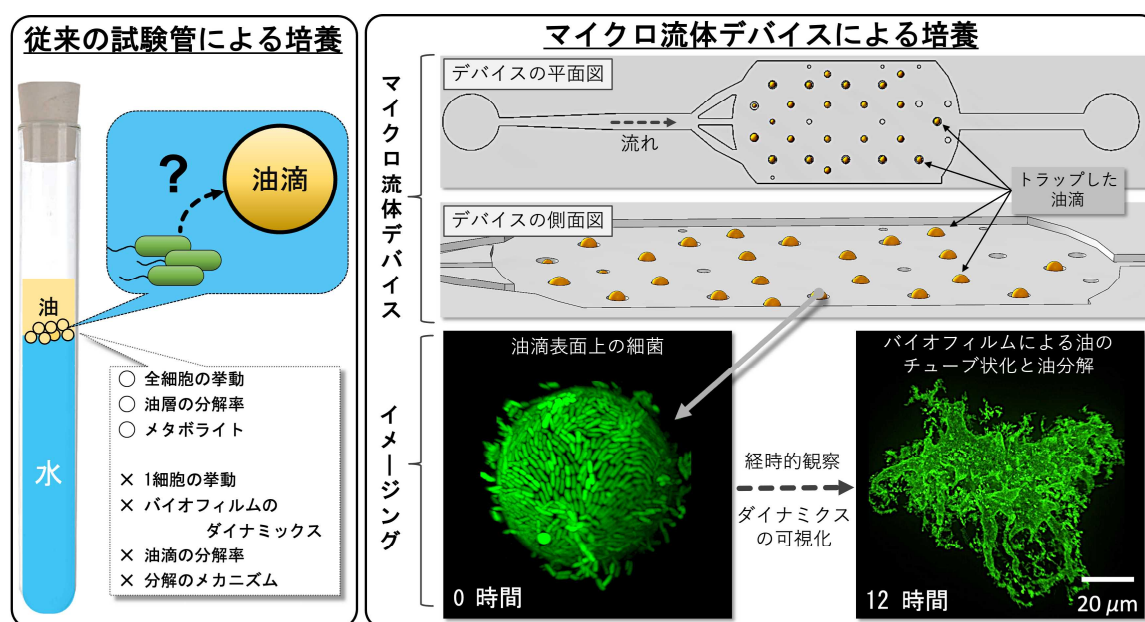


図 2. 本研究で使ったマイクロ流体デバイスを用いた油滴上細菌の観察技術

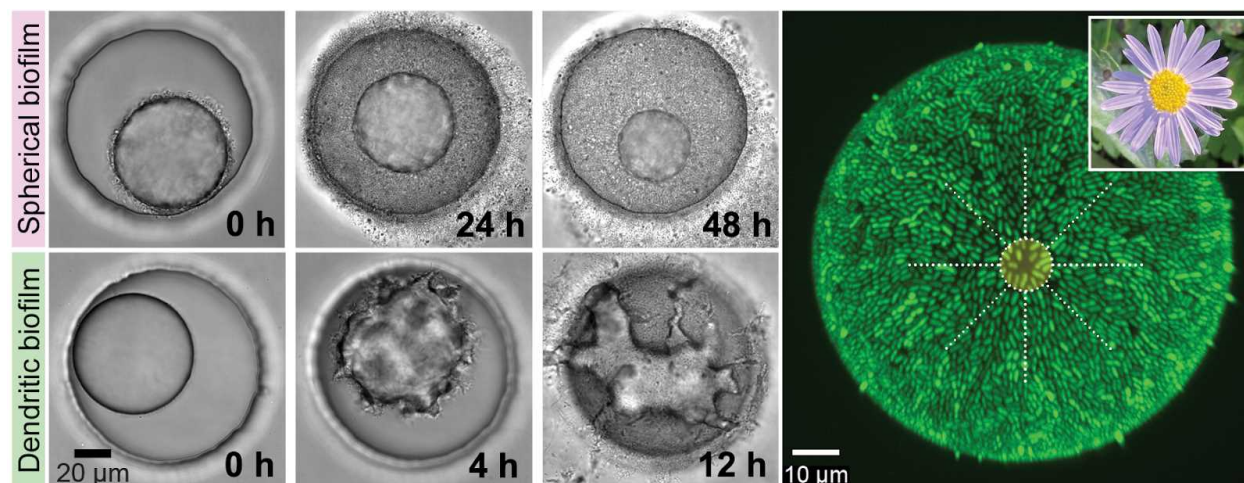


図 3. 共焦点レーザー顕微鏡^{注5)}による油滴上における球状バイオフィーム（SB）と樹状バイオフィーム（DB）の画像。SB では油滴は球状を保っているが、DB では油滴が樹状突起のような形状に変化し、油

がチューブ状に伸びている。右図は油滴の隆起が起きる直前の油滴上の細菌細胞の配置を示す。挿入図は野菊の写真。野菊の中心部に当たる部分から油滴の隆起がはじまる。

用語解説

注1) バイオフィーム (biofilm)

微生物が形成する集合体のこと。微生物の細胞と微生物が自ら産生するマトリクス（多糖やタンパク質、核酸など）から成る。

注2) バイオレメディエーション (bioremediation)

微生物や植物などの生物を用いて、有害物質で汚染された土壌、地下水や海洋を浄化する技術のこと。

注3) マイクロ流体デバイス (microfluidic device)

微細加工技術を利用して樹脂やガラスなどの基盤に微小流路を形成した装置。

注4) バイオサーファクタント (biosurfactant)

微生物が生産する界面活性剤。本来混じり合わない油と水の界面に作用して混ぜ合わせる働きがある。

注5) 共焦点レーザー顕微鏡 (confocal laser scanning microscope)

レーザー光を観察対象上を走査させながら像をつくる顕微鏡で、高解像度かつ三次元的なイメージを得ることができる。

研究資金

本研究は、科研費（38559WJ、21H01720）と JST-ERATO（JPMJER1502）による研究プロジェクトの一環として実施されました。

掲載論文

- 【題 名】 *Alcanivorax borkumensis* Biofilms Enhance Oil Degradation By Interfacial Tubulation
(*Alcanivorax borkumensis* のバイオフィームは界面のチューブ化によって油の分解を促進する)
- 【著者名】 M. Prasad, N. Obana, S.-Z. Lin, S. Zhao, K. Sakai, C. Blanch-Mercader, J. Prost, N. Nomura, J.-F. Rupprecht, J. Fattaccioli, A. S. Utada
- 【掲載誌】 Science
- 【掲載日】 2023 年 8 月 18 日
- 【DOI】 10.1126/science.adf3345

問い合わせ先

【研究に関すること】

Andrew S. Utada

筑波大学 生命環境系 准教授

TEL: 029-853-5348

Email: utada.andrew.gm[at]u.tsukuba.ac.jp

URL: <https://andrew-utada.com/>

URL: <https://trios.tsukuba.ac.jp/researcher/0000003853>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu[at]un.tsukuba.ac.jp

科学技術振興機構広報課

TEL: 03-5214-8404

E-mail: jstkoho[at]jst.go.jp

【JST事業に関すること】

科学技術振興機構研究プロジェクト推進部ICT/ライフイノベーショングループ

今林 文枝

TEL: 03-3512-3528

E-mail: eratowww[at]jst.go.jp