

## 新手法で微生物の電気伝導性測定に成功、その生態系理解に迫る

微生物のコミュニティにおける電気伝導度を測定する新手法を開発しました。微生物を使った電池や電気化学センサーの開発に貢献できるだけでなく、微生物の生態系に電気がどのように関わっているのかを明らかにするためのツールとして利用することが期待されます。

微生物の一匹一匹は目に見えませんが、数千万匹、数億匹の微生物がつくる集団になると私たちでも視認することができます。こうした微生物の集団はバイオフィームと呼ばれ、その中では細胞ごとの機能分化やコミュニケーションが行われるなど、さまざまな生存戦略が立てられています。

微生物の中には電気伝導性を有するものがあり、その微生物がつくるバイオフィームの中では電気が流れることが近年分かってきました。バイオフィーム内で流れる電子は、微生物燃料電池、嫌気性消化、電気化学センサーなどさまざまな環境・エネルギー技術の開発に役立てられていますが、電気伝導が微生物の生態に与える影響や、微生物の世界における電気伝導の普遍性は分かっていませんでした。微生物の電気伝導度測定には電極上へのバイオフィーム形成が必要ですが、これは多くの微生物で難しかったためです。

本研究では、電極上でのバイオフィーム形成プロセスを必要としない、新しいバイオエレクトロニクスシステムを構築しました。バイオフィームの一形態であるコロニーと呼ばれる微生物の集団を寒天上に形成し、それを直接電極へ押し当てて電気伝導度を測定するという極めてシンプルな実験系を新たに考案し、実証しました。コロニーは培養可能な微生物のほとんどでみられる形態であるため、本技術は電気伝導度の測定が可能な微生物種の幅を著しく広げることができます。実際に本技術を用いた研究で、これまで電気伝導度の測定が困難だった日和見菌である緑膿菌や、環境中に広く存在する枯草菌が電気伝導性を有することを実証しました。さらに、本技術により、電気を流すモデル微生物である *Shewanella oneidensis* MR-1 の電気伝導の分子メカニズムを解明することもできました。

本成果は、微生物燃料電池、嫌気性消化、電気化学センサーなど環境・エネルギー技術の開発に役立つ微生物の選定への応用や、微生物の電氣的生態系の解明を加速させる基盤技術として活用されることが期待されます。

### 研究代表者

筑波大学生命環境系  
徳納 吉秀 助教

## 研究の背景

微生物は世界中のあらゆる環境に生息しており、その多くはバイオフィーム<sup>注1)</sup>と呼ばれるコミュニティをつくっています。*Shewanella oneidensis* MR-1<sup>注2)</sup>をはじめとする一部の微生物は電気伝導性<sup>注3)</sup>を有するバイオフィームをつくることが知られ、バイオフィームと電極を組み合わせた微生物燃料電池<sup>注4)</sup>や有機性廃棄物を高い安全性で処理可能な嫌気性消化<sup>注5)</sup>、化合物の高感度検出に用いられる電気化学センサーなど、さまざまな環境・エネルギー技術の開発が進められています。

しかし、バイオフィームの電気伝導度を測定する既存の手法は、ほとんどの微生物に適用することができませんでした。これは、電気伝導度測定に必要な電極上のバイオフィーム形成プロセスが多くの微生物で困難であることに起因します。さらに、電気伝導機構解明のために微生物の遺伝子欠損操作を行うと、バイオフィーム形成能力に変化が生じてしまうことが多く、電気伝導の機構解明は困難とされてきました。そのため、バイオフィームの電気伝導が微生物の生態へ与える影響や、微生物の世界における電気伝導の普遍性はほとんど明らかになっていませんでした。

## 研究内容と成果

本研究では、電極上でのバイオフィーム形成プロセスを必要としない、新しいバイオエレクトロニクスシステムを構築しました。

具体的には、電極上にバイオフィームを形成させる代わりに、寒天上にコロニー<sup>注6)</sup>と呼ばれるバイオフィームの一形態を形成し、コロニーを寒天ごと切り出して直接電極へ押し当てることで電気伝導度の測定を可能としました(図)。寒天上でコロニー形成は微生物の単離や培養目的でよく行われますが、電極を組み合わせることで電気伝導度の測定に応用する試みはこれまで行われていませんでした。本技術で測定された電気伝導度は電極上に形成された既報のバイオフィームと同等であり、今後電気伝導度を測定するための基礎技術として利用できる可能性があります。

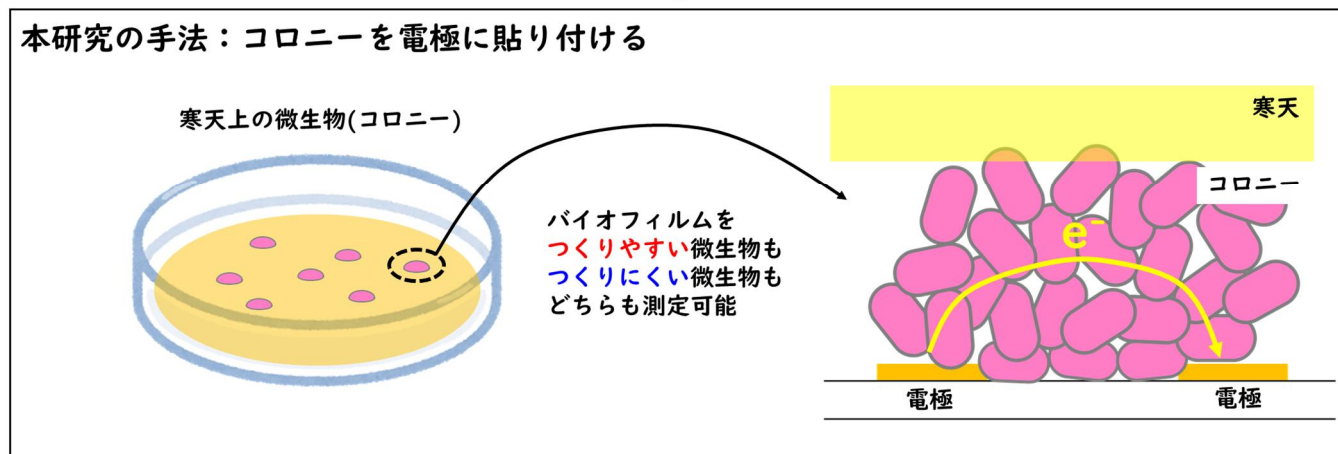
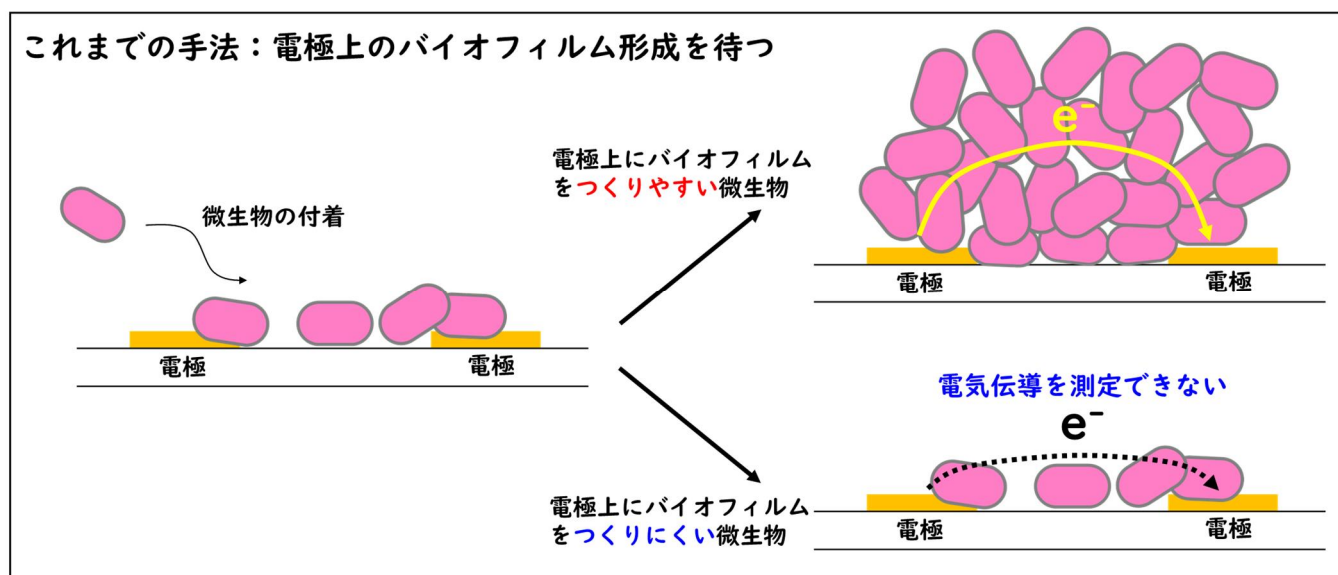
この測定システムは、電極上でほとんどバイオフィームを形成できない遺伝子欠損変異体の伝導性を定量することを可能にし、*Shewanella oneidensis* MR-1の電気伝導の分子機構を解明しました。本技術を用いた結果、*Shewanella oneidensis* MR-1の電気伝導を担うタンパク質がMtrCとOmcAというシトクロムタンパク質<sup>注7)</sup>であること、そしてフラビンという酸化還元分子がOmcAと結合して電気伝導に寄与することが明らかになりました。

さらに、コロニーは培養可能な微生物のほとんどでみられる形態であることから、これまで測定が困難だった多くの微生物の電気伝導度測定が可能になりました。本研究ではそれを実証するため、日和見菌として知られる緑膿菌や環境中に広く存在する枯草菌の電気伝導度も測定しました。

## 今後の展開

本研究成果は、微生物燃料電池、嫌気性消化、電気化学センサーなど環境・エネルギー技術の開発に役立つ微生物の選定に応用することが期待されます。また、バイオフィームの電気伝導が微生物の生態系にどのような影響を与えているのかはほとんど分かっていないことから、本技術は微生物の電氣的生態系の解明を加速させる基盤技術となることが期待されます。

## 参考図



図：微生物の電気伝導度測定システム。電極上にバイオフィルムを形成させる既存の手法(上部)の代わりに、寒天上にバイオフィルムの形態であるコロニーを形成し、コロニーを寒天ごと切り出して直接電極へ押し当てる手法(下部)を開発することで、これまで測定が困難だった多くの微生物の電気伝導度測定が可能になりました。

## 用語解説

注1) バイオフィルム

微生物が形成する集合体。微生物細胞と微生物が産生するマトリクス成分(多糖、核酸、タンパク質など)から成る。環境中の微生物の多くは浮遊細胞でなくバイオフィルムの形態で生息しているとされる。

注2) *Shewanella oneidensis* MR-1

鉄還元細菌と呼ばれる代表的な微生物であり、電気伝導性を有するバイオフィルムを形成する。しかし、電気伝導を担うタンパク質やその分子機構は明らかになってこなかった。

注3) 電気伝導性

電場の印加により電子が移動する性質。電気伝導性を有するバイオフィルムに二つの電極を接触させ、その二つの電極に電位差を生じさせるとバイオフィルム中を電子が流れる。

注4) 微生物燃料電池

微生物を利用して発電を行う装置。 *Shewanella oneidensis* MR-1 などの鉄還元細菌は排水中の有機物を分解して電極へと電子を伝達できる。この仕組みを利用することで、排水処理に加え、発電も可能とする創電型排水処理を行うことができる。

#### 注5) 嫌気性消化

嫌気(酸素のない環境)で微生物が生分解性物質を分解する反応。家庭用、産業用廃棄物の安定処理に利用されている。

#### 注6) コロニー

寒天上に形成されるバイオフィルムの一形態。コロニーバイオフィルムと呼ばれることもある。微生物学研究において微生物の単離や培養の際によく利用される微生物形態の一つ。

#### 注7) シトクロムタンパク質

酸化還元機能を持つヘム鉄を含有する、ヘムタンパク質の一種。 *Shewanella oneidensis* MR-1 の細胞表面にはシトクロムタンパク質である MtrC と OmcA が局在することが知られていたが、電気伝導への関与は実証されていなかった。

### 研究資金

本研究は、科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業 ACT-X による研究プロジェクト (JPMJAX211C) の一環として実施されました。また、JST ERATO (JPMJER1502)、科研費(20K15428、23H05471)、筑波大学研究支援プログラムにご支援いただきました。

### 掲載論文

【題名】 Colony-based electrochemistry reveals electron conduction mechanisms mediated by cytochromes and flavins in *Shewanella oneidensis*

(微生物コミュニティ内の導電率測定技術の開発と導電機構の解明)

【著者名】 Y. Tokunou, H. Tongu, Y. Kogure, A. Okamoto, M. Toyofuku, and N. Nomura

【掲載誌】 *Environmental Science and Technology*

【掲載日】 2024年2月27日 (現地時間)

【DOI】 10.1021/acs.est.4c00007

### 問い合わせ先

【研究に関すること】

徳納 吉秀 (とくのう よしひで)

筑波大学生命環境系 助教

TEL: 029-853-5079

Email: tokunou.yoshihide.ga[at]u.tsukuba.ac.jp

URL: <https://trios.tsukuba.ac.jp/ja/researcher/0000004401>

【JST事業に関すること】

宇佐見 健 (うさみ たけし)

科学技術振興機構戦略研究推進部先進融合研究グループ

TEL: 03-6380-9130

E-mail: act-x[at]jst.go.jp

【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

Email: jstkoho[at]jst.go.jp