

微生物も計算する ～最適なタイミングで餌場を移動するバクテリアを発見～

草原に複数の花畑があるなど、環境中に複数の餌場が存在する場合、ある動物個体が1日あたりの栄養獲得量を最大化するためには、最適なタイミングで餌場間を移動する必要があります。これまでに、鳥や昆虫などが、実際にこの「最適採餌戦略」に沿った行動を取っていることが報告されていますが、それには餌場と餌場の間の距離を認識できる高度な認知能力が不可欠で、認知能力を持たない単細胞の微生物には、最適採餌戦略は実行できないとされてきました。

しかしながら本研究チームは、高度な細胞トラッキング技術を用いて直径1マイクロメートルの細菌細胞が餌場に滞在する時間を実測し、その膨大なデータを数理モデルと照らし合わせることで、海洋細菌 *V. ordarii* が、より多くの栄養を得るために、餌場の質に応じて滞在時間を調節し、最適なタイミングで餌場間を移動していることを明らかにしました。この結果は、「単細胞の微生物には複雑な最適採餌戦略は実行できない」というこれまでの常識を覆すものです。

このような能力は、進化の過程を通じて、最適な餌場間移動タイミングが微生物の遺伝的プログラムに書き込まれた可能性、すなわち微生物の持つ「進化を通じた知的解決能力」が、従来考えられていたよりもさらに高度であることを示唆しています。また数理モデリングの結果は、最適採餌戦略を行う微生物は、そうでないものと比べて、最大およそ10倍の栄養を獲得できることを示しており、海洋微生物による物質循環への影響とその見積もりについても改めて検討する必要性を提起しています。

研究代表者

筑波大学生命環境系

八幡 穰 助教

研究の背景

海洋中にはたくさんの微生物（バクテリアなど）が住んでおり、わずか1ミリリットルの海水中に1万个から100万個もの微生物が生息しています。近年の研究から、こうした微生物が海水中の有機物を積極的に吸収、消費することが、海と大気の間での元素のバランスを保つ上で大きな役割を果たしていることが明らかになってきています。そのため、地球環境を下支えしている見えない主役としての海洋微生物の生態の解明に注目が集まっていますが、揺れ動く海水の中で生活する微小なバクテリア(直径1マイクロメートル=1ミリメートルの1000分の1程度)の生態を観察することは難しく、その活動の実態には未解明の点が多く残されています。

一方、生物が複数の餌場を巡りながら栄養を収集する場合、適切なタイミングで、古い餌場から新しい餌場に移動することによって、一日あたりの収穫量を最大化することができます。これを数式化したものが最適採餌理論（Optimal Foraging Theory）であり、実際に鳥や昆虫では、この理論に沿った採餌行動（餌集め行動）が観察されています。しかし、この最適採餌理論の実行には餌場の間の距離を長期的に記憶することが必要と考えられており、単細胞の微生物ではこうした秩序立った行動は見られないとするのが、一般的な考え方でした。

研究内容と成果

海水中では、餌となる有機物は均一に分散しているのではなく、海洋栄養ホットスポットと呼ばれる微小スケールの餌場を形成しています。海水中にはこうした餌場が無数にあり、微生物はこうした餌場を訪れては有機物を取り込んでいる（餌集め行動）と考えられています。本研究チームは、たくさんの種類の海洋細菌について、こうした餌集め行動（採餌行動）を調べる研究の中から、ひときわ奇妙な行動する細菌を発見しました。それが本研究の対象となった海洋細菌 *V. ordarii* です。*V. ordarii* は、沿岸部などの栄養が豊富な海域に住む富栄養性細菌と呼ばれる細菌の仲間で、鞭毛をスクリューのように回転させながら高速で遊泳し、海水中に分布するミクロスケールの餌場を敏感な「嗅覚」（化学走化性）で探し回るハンターのような生活をしています。

こうした富栄養性細菌が遊泳する水中に人工の餌場（栄養をしみこませた小さな寒天の球）を与える実験を行うと、種類によってその反応（行動戦略）は二種類に分かれます。一つは餌場にしっかりと定住し、その餌場の栄養が完全になくなるまで長い時間を過ごすもので、もう一つは餌場に定着せず、常に新鮮な餌場を求めて移動し続けるものです。ところが *V. ordarii* は、そのいずれとも違う行動を示しました。餌場の中の栄養は、拡散によって少しずつ周囲の海水に溶け出して失われ、時間とともに餌場の質は下がっていきます。*V. ordarii* は新鮮で質の高い餌場だけを選んで定着し、さらに「餌場の栄養が少なくなると、もとの餌場を捨てて積極的に新しい餌場を探しに出かける」というこれまでに観察されたことのない「賢い」行動をとることがわかりました（図1）。

この行動に興味を引かれた本研究チームは、より詳しく調べるために、顕微鏡のステージ上に人工の餌場を作り出し、*V. ordarii* の細胞一つひとつが餌場にどれくらいの時間滞在するのかを分析できる技術を開発しました。ここでは、餌場を寒天の球ではなく平板状に成形するなどの工夫を凝らし、ビデオ顕微鏡と画像解析技術を用いて、およそ1000細胞の餌場滞在時間を同時に追跡することが可能です。このようにして得た大量のデータを分析したところ、微生物が餌場にとどまる時間は、餌場の質（寒天にしみこませた栄養の初期濃度）に応じて大きく変化することがわかりました。餌場の質が高ければ長く、また餌場の質が低ければ短く滞在します。しかしながら、こうした滞在時間の変化を更に詳しく調べてみると、「変動する閾値」という新たな謎が見えてきました。通常、微生物の行動には一定の閾値があり、これを境に行動をスイッチします。ところが、*V. ordarii* がどこまで餌場の質が下がったら餌場を離れるかを調

べてみると、その閾値は最初の餌場の質によってまちまちです（閾値は最初の餌場の質が高いほど高く、最初の質が低いほど低い）。つまり *V. ordarii* は「最初の餌場の質によって餌場を離れる閾値を変えている」ことが、精密な一細胞トラッキング解析から判明しました。

この「変動する閾値」の謎を解く鍵は、マクロスケールの世界の生態学の理論「最適採餌理論」にありました。鳥や昆虫は、「餌場の質」と「餌場間の距離」という二つのパラメーターに応じて、それぞれの餌場における滞在時間を最適に調節することで、一日あたりの餌の収穫量を最大にすることが知られています。この理論と *V. ordarii* の餌場の滞在時間データを比較してみると、まさに *V. ordarii* の滞在時間は、それぞれの餌場の質に対して一日あたりの餌の収穫量を最大にすることができるタイミングであることが明らかになりました。

一方、鳥や昆虫は、「餌場の質」と「餌場間の距離」の二つを認識して滞在時間を調節しますが、「餌場間の距離」の認識には高度な認知能力（長期記憶）を必要とします。*V. ordarii* のような微生物は、細胞に備わった化学濃度センサで「餌場の質」を認識できても、「餌場間の距離」のような抽象的な認識は不可能であると考えられます。*V. ordarii* はどのようにしてこのような制約(Constraints)がありつつ、最適採餌戦略を実行することができるのか、この点の解明にも取り組みました。

数理モデルによる分析を行ったところ、*V. ordarii* の餌場の滞在時間は、「餌場間の距離」が変動しても一日あたりの餌の収穫量が常に高いレベルに保たれるような絶妙なタイミングに設定されていることがわかりました。こうしたタイミングは、*V. ordarii* が海洋環境で進化するうちに選択され、遺伝的にプログラムされていったと考えられます。つまりこの結果は、*V. ordarii* はこの不利な点を「進化的」に問題解決していることを示唆しています。

今後の展開

本研究結果は、微生物の採餌行動に対する従来の考え方を覆し、海洋細菌 *V. ordarii* は餌場の質に応じて餌場に滞在する時間を調節し、単位時間あたりの餌の収穫量を飛躍的に向上させていることを明らかにしました。また、餌場間の移動タイミングを巧みに調節して、これまで考えられていたよりもはるかに効率的に、海水中の有機物を集めていることが明らかになりました。この最適化により、*V. ordarii* は、最適採餌戦略を行わない微生物と比べて、最大およそ 10 倍の栄養を得ることができます。

本研究チームはこれまでも、海洋細菌の共存と種分化が Competition-Dispersal Tradeoff（移動能力と競走能力のトレードオフ）と呼ばれる原理で説明できることを示すなど、一見無秩序に見えるバクテリアの世界も、生態学の原理に基づいて理解できることを示してきました。微生物の採餌行動が数学的モデルで説明できることを示す今回の結果は、この見方をさらに裏付けるものです。こうした原理に基づいた微生物の理解が進めば、例えば、地球温暖化によって海洋微生物の生態にどのような変化が起こるかを予測するモデルの構築などにつながることを期待されます。

参考図

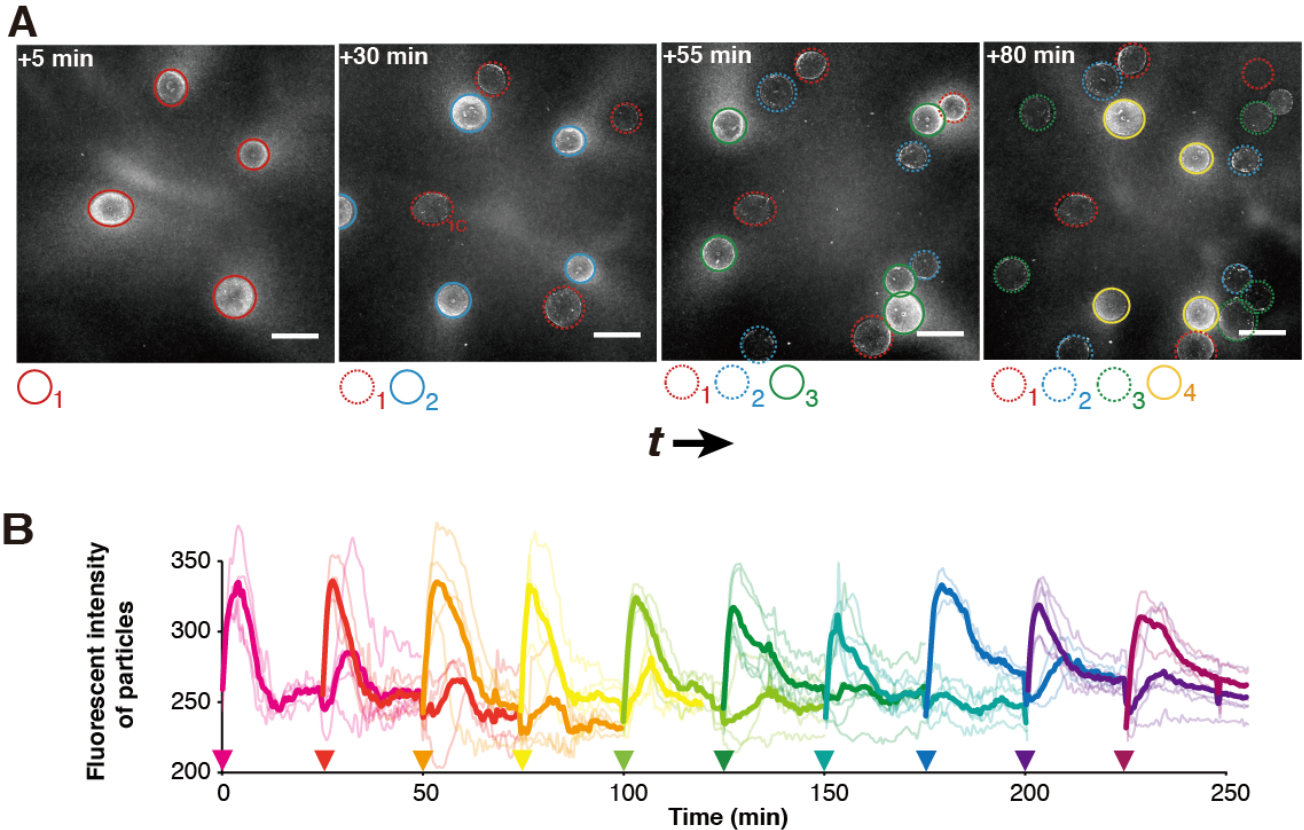


図1 海洋細菌 *Vibrio ordarii* の「賢い」採餌行動

A. 海洋細菌 *V.ordarii*が遊泳する水中に人工の餌場（栄養をしみこませた小さな寒天の球）を与える実験を行うと、*V. ordarii*は新鮮で質の高い餌場（実線）だけを選んで定着し、時間の経過に伴って、餌場の栄養が少なくなった古い餌場（点線）を捨てて積極的に新しい餌場を探しに出かけるという、これまでに観察されたことのない「賢い」行動をとる。B. 餌場あたりの細胞数の時間変化（縦軸：餌場あたりの細胞数）。新しい餌場を投入するたびに、最近では餌場に集まるが、餌場の質が下がるとそこから去って行く。

研究資金

本研究は、文部科学省が助成する卓越研究員事業（八幡 穰）、Gordon and Betty Moore Marine Microbial Initiative Investigator Award GBMF3783 (to R.S.), Simons Foundation Grant 542395 (to R.S.)の助成によって実施されました。

掲載論文

【題名】 Constrained optimal foraging by marine bacterioplankton on particulate organic matter
(海洋細菌における認知制約下での最適採餌戦略)

【著者名】 Yawata, Y.^{1,2,3†}, Carrara, F.^{1†}, Menolascina, F.⁴, Stocker, R.¹

¹ Institute of Environmental Engineering, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, ETH Zurich, Zurich, Switzerland.

² Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, Japan.

³ Microbiology Research Center for Sustainability, University of Tsukuba, Tsukuba, Japan.

⁴ School of Engineering, Institute for Bioengineering, The University of Edinburgh, Edinburgh, UK.

† These authors contributed equally to this work

【掲載誌】 Proceedings of National Academy of Science, U.S.A.

【掲載日】 2020年9月21日

【DOI】 10.1073/pnas.2012443117

問合わせ先

【研究に関すること】

八幡 穰 (やわた ゆたか)

筑波大学 生命環境系 助教

URL: <https://yawatalab.jp>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報室

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp