

## 海洋微生物の活性は深海ほど抑制されている ～高水圧下での微生物活性測定に成功～

深海の微生物群集は高圧環境にさらされています。陸上の多くの微生物は高圧を嫌いますが、深海では高圧を好んだり（好圧性）、高圧に耐えられる（耐圧性）微生物の存在が知られています。従来、海洋微生物の活性は、海水が採取された水深にかかわらず、調査船の船上に回収された後、船内の大気圧条件下で測定されていました。しかし、採水から船上への輸送、その後の船上培養で水圧が変化することから、深海微生物については、その活性を正確に評価できていない可能性が指摘されていました。

本研究では、新たに開発した現場微生物培養装置を用い、地球上の主要な海洋において、現場水圧下での微生物の活性を、有機炭素の消費速度として測定しました。その結果、微生物の活性は、深海の現場水圧下では船上大気圧下に比べて低く、水圧が高くなるほど抑制されていることが明らかになりました。また、深海 1000~4000 m では、微生物群集の約 85%が耐圧性、約 5%が好圧性であることが分かりました。残りの 10%は、水圧が低い方が活性の高い微生物（圧力敏感性）で、これらの微生物が、船上への輸送とその後の培養時の減圧によって活性を取り戻し、時に 100 倍以上活性を上げることがあることを発見しました。

減圧下で極めて高い活性を持つ微生物が深海に存在することは、これまでの調査・測定が深海微生物群集の全体としての活性を過大評価していた可能性を強く示しており、今後の海洋炭素循環研究に大きな影響を与えると考えられます。

### 研究代表者

筑波大学生命環境系

内海 真生 教授

筑波大学大学院生命環境科学研究科生命産業科学専攻博士後期課程

天野 千恵（研究当時、現 ウィーン大学 博士研究員）

## 研究の背景

深海（水深 200 m 以深の領域）は地球上の最も広大な生物圏であり、調査が行き届かない領域でもあります。1,000m 以深は、暗く、一般的に低水温（0~4℃）で、高水圧の環境です。深海の海水は「熱塩循環<sup>注1)</sup>」の一部として、大西洋、インド洋、太平洋を数百から千年もかけて流れ、これにより、冷たい深海水が極域から熱帯に運ばれ、暖かい表層水が熱帯から極域に運ばれます。この海洋循環が本質的に地球の気候を決定しています。

一方、食物連鎖の基礎となる有機物は、太陽光が降り注ぐ海の表層で生成され、表層水中で大部分が二酸化炭素と無機化合物<sup>注2)</sup>に分解されます。また、有機物の約 10~20%は深海に沈降し、深海生物群集の食料源となります。深海では有機物質の分解は主に微生物群集によって行われ、微生物の種類と代謝は水深によって変化します。深海の微生物は、海の表層から供給された有機物を無機化合物に分解するため、物質循環や生態学的観点から重要だと認識されています。

約 50 年前、アメリカの潜水艇「アルビン号」が海洋調査の直前に不慮の事故で沈没しました。事故後に調査が行われ、アルビン号と共に水深 1540 m に一年近く放置された乗組員の昼食用サンドイッチやりんごが腐敗せずに残っていたことが分かりました。これが、高水圧によって微生物の活性が妨げられ、腐敗が進まなかったためであるとする研究結果が発表されました。これをきっかけに、深海の微生物への水圧の影響に関する研究が盛んに行われるようになりましたが、高水圧・低有機物の深海を模擬する微生物活性測定（培養）実験が方法的に難しく、未だに決定的な結論は出ていませんでした。

## 研究内容と成果

今回の研究では、ウィーン大学、筑波大学、スペイン海洋研究所の国際チームが、深海の水圧下で微生物群集の活性（有機炭素の消費速度）を測定することができる現場微生物培養装置（図 1、Amano et al., 2022）を開発し、これを用いて、大西洋・太平洋・南極海の深海（現場水圧下）において微生物群集の活性を測定しました。同じ水深で採取した試料について、現場水圧下と大気圧条件下のそれぞれで測定した結果を比較したところ、現場水圧下では微生物活性がより低いことが分かりました。また、深度が深くなるほど活性は低下し、水深 4,000 m では、調査船上で測定したものの約 1/3 に過ぎませんでした（図 2 a）。

さらに、深海の高圧条件下での活性低下が、微生物群集全体に生じるのか、それとも一部の微生物のみに関するものかを調査するため、微生物（細菌）1細胞ごとの活性も測定しました（図 2 b）。その結果、深海微生物群集の約 85%が耐圧性<sup>注3)</sup>、5%が好圧性<sup>注4)</sup>であること発見しました。また、これ以外の深海微生物群集は減圧によって活性が高まり（圧力敏感性）、最大約 100 倍高い活性を示すことが分かりました。このような微生物は、深海の高圧力条件に明らかに適応していないことから、もともと海の表層に生息していたものが、表層の沈降粒子（プランクトンの死骸など）とともに深海に運ばれたと推測され、そのため、大気圧状態に戻されると素早く反応して高い活性を示したと考えられます。

## 今後の展開

有機炭素の海の表層からの供給と深海での消費のバランスを明らかにすることは、地球規模の炭素循環の理解につながります。本研究結果は、深海微生物における有機炭素消費量が、これまで考えられていたよりもはるかに低いことを示しており、今後の海洋炭素循環研究に大きな影響を与える可能性があります。また、深海の微生物の大部分が耐圧性であるということは、気候変動対策として二酸化炭素の深海への貯留などが提案された際の望ましい貯留水深などに関する基礎的知見になると考えられます。

参考図

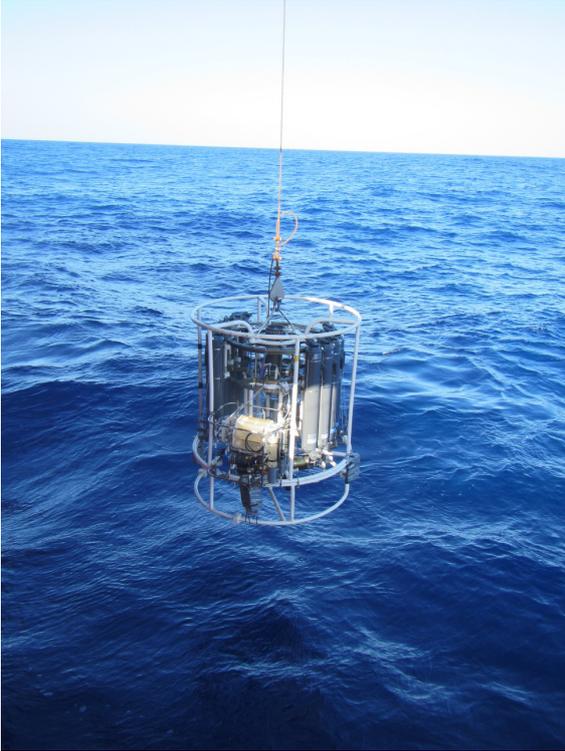


図1 大西洋航海で現場微生物培養装置を調査船から投下する様子（円柱形ゲージの直径は約1.5m、高さ約2m）。海洋調査で汎用されるロゼット採水システム<sup>注5)</sup>に現場培養装置を組み込んでいる。

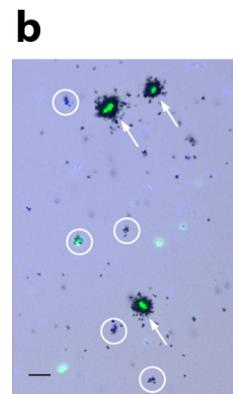
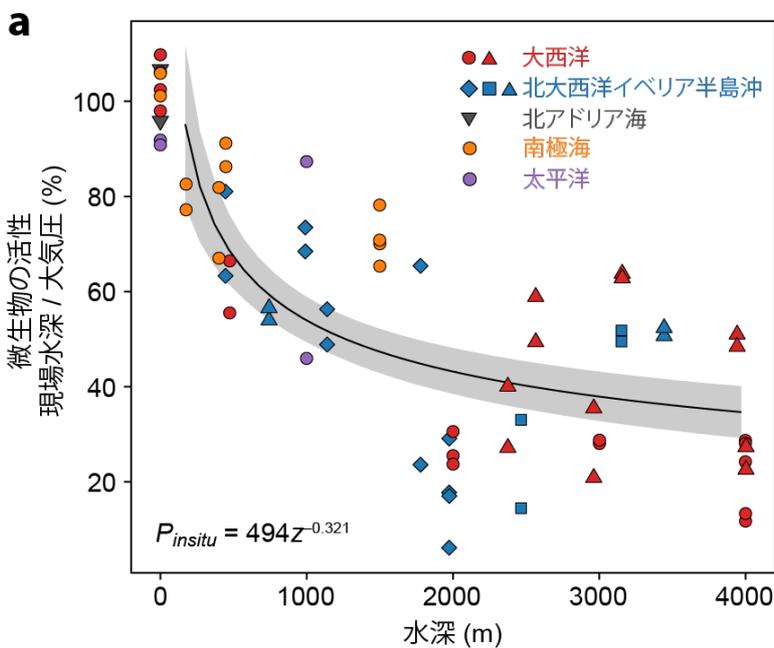


図2 a：大気圧下に対する現場水深の微生物活性の割合。図中の曲線は、各調査航海での実験で得た値から求めた回帰式（べき乗関数）を、網掛け部分は回帰の95%信頼区間を示す。b：大西洋2000m水深から採取した海水試料を大気圧下で培養した際の微生物活性（蛍光顕微鏡写真）。緑色に光るのがバクテリア細胞（CARD-FISH染色）。細胞の周りの黒い部分は銀粒子で、この部分の大きさが細胞の活性を示す。矢印で示した細胞が減圧によって活性が増大したと思われる細胞、丸で囲まれたのが減圧しても活性が変わらない細胞。スケールバーは5  $\mu\text{m}$ 。

## 用語解説

### 注1) 塩熱循環

海洋の深層循環は、海水の水温と塩分による密度差によって駆動されていることから、深層循環のことを熱塩循環とも呼んでいる。

### 注2) 無機化合物

ここでは、タンパク質や脂質など生物を構成する有機物を微生物が分解して再生産される無機物質を指す。主要なものとして、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素およびリン酸態リンがある。

### 注3) 好圧性（微生物）

常圧下では発育できず、数百気圧以上の高圧下で良く発育・増殖する微生物（細菌）の総称。「常圧下と比較し高圧下での増殖速度の方が高いか、同程度を示す菌」と定義されている。

### 注4) 耐圧性（微生物）

大気圧のもとで最適に成長するが、高い圧力（約400～600気圧）下でも成長できる微生物の総称。広圧性ともいう。

### 注5) ロゼット採水システム

海洋調査で一般的に使用される装置で、船上からの信号送信により任意の深度で採水できる。複数の筒型採水器を円筒状ゲージに配置し、ワイヤーでつるして船上から投下する。

## 研究資金

本研究は科研費の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】 Limited carbon cycling due to high-pressure effects on the deep-sea microbiome.

（深海での微生物を介した炭素循環の真実—高圧力による炭素循環の制限と深海微生物群集への影響—）

【著者名】 Chie Amano<sup>1</sup>, Zihao Zhao<sup>1</sup>, Eva Sintés<sup>1,2</sup>, Thomas Reinthaler<sup>1</sup>, Julia Stefanschitz<sup>1,7</sup>, Murat Kisadur<sup>1</sup>, Motoo Utsumi<sup>3,4</sup> & Gerhard J. Herndl<sup>1,5,6</sup>

1: ウィーン大学機能・進化生態学部門生物海洋学・海洋生物学ユニット、2: スペイン海洋研究所 (IEO-CSIC)、3: 筑波大学生命環境系、4: 筑波大学微生物サステナビリティ研究センター、5: ユトレヒト大学王立オランダ海洋研究所海洋微生物学・生物地球化学部門、6: ウィーン大学ウィーン・メタボロミクス&プロテオミクスセンター

【掲載誌】 Nature Geoscience

【掲載日】 2022年11月28日

【DOI】 10.1038/s41561-022-01081-3

## 問い合わせ先

【研究に関すること】

内海 真生（うつみ もとお）

筑波大学生命環境系 教授

URL: <https://trios.tsukuba.ac.jp/researcher/0000001380>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

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