

深海の従属栄養細菌による炭酸固定を定量

～*Alteromonas* 属が暗所における無機炭素固定の約 2 割を担うと推定～

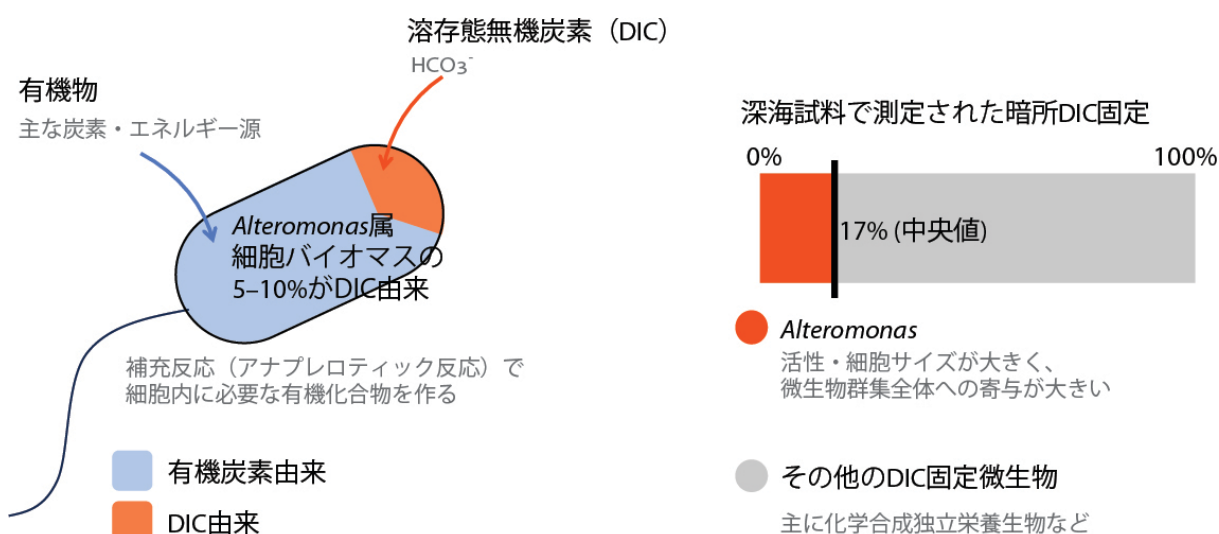
ポイント

- ・海洋細菌 *Alteromonas* 属による炭酸固定を、培養実験と単細胞解析を用いて評価。
- ・*Alteromonas* 属の寄与は、深海における炭酸固定の 17%（中央値）に相当すると推定。
- ・深海微生物による無機炭素固定に従属栄養細菌も大きく関わることを定量的に示した。

概要

北海道大学大学院地球環境科学研究院の天野千恵准教授（研究当時：ウィーン大学博士研究員）、ウィーン大学及び上海海洋大学のフェデリコ・バルター教授らの国際研究グループは、全球海洋の遺伝子データの解析と、太平洋及び大西洋で採取した海水試料の解析を組み合わせ、深海の従属栄養細菌による炭酸固定を評価しました。炭酸固定とは、二酸化炭素や重炭酸イオンなどの無機炭素を材料として、細胞内で必要な有機化合物を作る反応です。解析の結果、有機物を利用する海洋細菌 *Alteromonas* 属が、補充反応（アナプレロティック反応）によって、深海における炭酸固定の一部を担っていることが分かりました。*Alteromonas* 属による炭酸固定の寄与は、深海における炭酸固定の 17%（中央値）に相当し、全球スケールでは年間 0.2 ペタグラム炭素に相当すると推定されます。また、他の従属栄養細菌も同様の補充反応を行うと考えられるため、深海の炭酸固定全体に占めるこの反応の割合はさらに大きい可能性があります。本成果は、深海で測定される無機炭素固定の一部が従属栄養代謝に由来することを示し、海洋炭素循環における従属栄養細菌の役割に新たな視点を与えるものです。

なお、本研究成果は、2026 年 6 月 15 日（月）公開の Nature Geoscience 誌にオンライン掲載されました。



Alteromonas 属による無機炭素の取り込みと、深海における炭酸固定への寄与

【背景】

海洋表層では、植物プランクトンなどが光合成によって二酸化炭素を有機物に変換します。一方、光の届かない深海では、化学エネルギーを使った独立栄養性微生物が無機炭素を固定すると考えられてきました。しかし、動物やヒトを含む多くの従属栄養性生物も、代謝で不足した炭素を補うために、少量の無機炭素を取込み、有機炭素へ変換することが知られています（アナプレロティック反応）。この補充反応は基礎生物学では古くから知られていましたが、海洋全体でどの微生物が担い、暗所において測定された炭酸固定量にどの程度寄与するかは分かっていませんでした。これは、従来の炭酸固定の測定法では、独立栄養の炭酸固定によるものか、従属栄養の補充反応によるものかを区別できないためです。

【研究手法】

国際研究グループは、以下の異なる三つのアプローチを使って、従属栄養細菌による暗所炭酸固定と、その深海での寄与を調べました。

- 海洋全球のメタゲノム、メタトランスクリプトーム及びメタプロテオームデータベースを解析し、無機炭素固定に関わる酵素の遺伝子発現とタンパク質、それを担う微生物群を調べました。
- 独立栄養的な炭素固定経路の遺伝子を持たない *Alteromonas mediterranea* を培養し、放射性同位体で標識した無機炭素（ ^{14}C 標識重炭酸）が細胞バイオマスに取り込まれることを確認しました。
- 大西洋と太平洋の水深 200～3,500 m で採取した海水について、 ^{14}C 標識重炭酸を用いて、暗所における炭酸固定速度を測定し、そのうち *Alteromonas* 属による寄与率を MICRO-CARD-FISH 法^{*1}により求めました。

【研究成果】

全球海洋データでは、補充反応に関わるホスホエノールピルビン酸カルボキシラーゼ（PEP カルボキシラーゼ）が様々な深度で広く発現していました。特に *Alteromonas* 属ではこの酵素の遺伝子発現量が高く、海洋中層以深でも補充反応が活発であることが示唆されました。培養実験では、*Alteromonas mediterranea* が無機炭素を細胞バイオマスに取り込むことを確認しました。この炭酸固定速度は、培養温度や利用可能な有機物源などの条件によって変化することも分かりました。大西洋・太平洋の広い領域で採取した海水試料を用いて、現場水温・暗所において炭酸固定を測定したところ、*Alteromonas* 属による炭酸固定が全体の 0～43% を占めることが分かりました。全試料を合わせた中央値は 17%（95%信頼区間：10～28%）でした。この寄与を全球スケールに換算すると、年間約 0.2 ペタグラム炭素（95%信頼区間に対応する範囲は年間 0.1～0.4 ペタグラム炭素）に相当すると推定されます。本研究では、従属栄養細菌の代表として *Alteromonas* 属を対象としましたが、実際には本細菌以外の従属栄養細菌も補充反応により炭酸固定を行います。そのため、この得られた値は、従属栄養細菌による補充反応由来の炭酸固定量の下限に近い推定値と考えられます。本研究により、暗所で測定される炭酸固定には化学合成独立栄養微生物だけでなく従属栄養細菌も大きく関わるということが定量的に明らかになりました。一方で、この反応は有機物の利用とそれに伴う呼吸に直接結びつくため、一次生産とは区別して理解する必要があります。

【今後への期待】

今後は *Alteromonas* 属以外の従属栄養微生物による寄与や、固定された無機炭素が細胞内に留まる時間、有機物供給の違いによる補充経路の炭酸固定量の変動などを明らかにする必要があります。

これらを理解することで、暗所炭酸固定の解釈が進み、海洋炭素循環における炭素の流れをより正確に把握できると期待されます。

【謝辞】

本研究は、オーストリア科学基金 (FWF: P34304-B、TAI534、P35248、P35619-B、I5942-N、I486-B09、P23234-B11、P35587-B)、EU Horizon 2020 (869383)、ERC Advanced Grant (268595、101141581)、Spanish Ministry of Science, Innovation and Universities, Spanish State Research Agency (PID2020-118877GB-I00、PID2023-146919NB-C22) の支援を受けて実施されました。

論文情報

論文名	Major contribution of anaplerosis to inorganic carbon fixation in the dark ocean (深海における無機炭素固定への補充反応 (アナプレロシス) の大きな寄与)
著者名	天野千恵 ^{1 (研究当時),8} 、U. Wilhelm ¹ 、T. Koch ¹ 、T. Reinthaler ² 、R. L. Hansman ^{2,3} 、E. Sintes ^{2,4} 、G. J. Herndl ^{2,5} 、J. M. González ⁶ 、F. Baltar ^{1,7} (¹ ウィーン大学機能・進化生態学部門 真菌・生物地球化学海洋学研究グループ、 ² ウィーン大学機能・進化生態学部門 微生物海洋学研究グループ、 ³ ウッズホール海洋研究所、 ⁴ スペイン海洋研究所バレアレス海洋センター、 ⁵ オランダ王立海洋研究所 海洋微生物学・生物地球化学部門、 ⁶ ラ・ラグーナ大学微生物学部門、 ⁷ 上海海洋大学海洋学・生態科学研究院、 ⁸ 北海道大学大学院地球環境科学研究院)
雑誌名	Nature Geoscience (地球科学の専門誌)
D O I	10.1038/s41561-026-02013-1
公表日	2026 年 6 月 15 日 (月) (オンライン公開)

お問い合わせ先

北海道大学大学院地球環境科学研究院 准教授 天野千恵 (あまのちえ)

T E L 011-706-2322 メール chie.amano@ees.hokudai.ac.jp

U R L <https://chieamano.com/>

配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北 8 条西 5 丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

【用語解説】

*1 MICRO-CARD-FISH 法 … Microautoradiography combined with catalyzed reporter deposition fluorescence in situ hybridization の略。放射性同位体で標識した基質を取り込んだ微生物細胞を検出する microautoradiography と、特定の微生物群を蛍光染色する CARD-FISH 法を組み合わせた手法。本研究では、標識無機炭素を取り込んだ細胞のうち、*Alteromonas* 属が占める割合を調べるために用いた。