



関西学院大学  
KWANSEI GAKUIN UNIVERSITY

## 新しい炭酸脱水酵素の存在を珪藻から発見 海洋光合成の仕組み解明に期待

報道各位

関西学院広報室

関西学院大学理工学部の松田祐介教授およびその研究グループは、葉緑体内の光エネルギーを化学エネルギーに変換する光合成装置の中に、全く新しい酵素が存在することを珪藻で発見しました。この酵素は炭酸脱水酵素の一種で、光合成に不可欠な二酸化炭素と pH のバランスを調節する働きがあります。私たちは呼吸の 5 回に 1 回の割合で、珪藻が光合成によってはき出した酸素を吸っています。珪藻類は、海洋で二酸化炭素を吸収する主役と言ふべき植物プランクトンであり、その光合成量は地球全体の 20% に達しています。この研究成果により、珪藻による海洋光合成の仕組みを解明する重要な一歩となると期待されます。

この研究成果は 8 月 16 日、米国科学アカデミー紀要 (PNAS) の電子版に掲載されました。

### ポイント

- ・新規の炭酸脱水酵素（ $\theta$  型カーボニックアンヒドラーゼ）を海洋性珪藻から発見した。
- ・この酵素が珪藻の光合成と生育に重要な因子であることが分かった。
- ・光、重炭酸イオン、およびプロトンのバランス調整が水中光合成進化の駆動力であることが分かった。
- ・地球温暖化問題にかかわる近未来海洋環境予測や、バイオ燃料生産への応用などに波及する成果。

### 1. 研究の背景と経緯

1997 年に衛星観測と大規模海洋調査によって、海洋性珪藻の光合成量が地球全体の 20% を担うことが判明して以降、珪藻光合成の仕組みは世界的に注目されている。また、珪藻は光合成産物として油脂を多量に蓄積することから、バイオ燃料源としても注目される重要生物である。水中に溶ける二酸化炭素は極めて少量で、植物プランクトンが光合成するために十分な濃度ではない。しかし、彼らは、水中の二酸化炭素がイオン化した重炭酸イオンも積極的に取り込んで細胞内に濃縮することで、極めて高効率な光合成ができる。この仕組みを  $\text{CO}_2$  濃縮機構 (CCM) とよぶ。CCM は様々

な植物プランクトンが地球に現れた後、大気中の二酸化炭素がどんどん少なくなり、逆に酸素濃度が爆発的に上昇した時期（石炭紀：3～3.5億年前）に、それぞれの植物プランクトンで、様々な起源から独立に獲得され、その仕組みも極めて多様と考えられてきた。これまでに、バクテリアであるラン藻、淡水性の緑藻、および海洋性の珪藻で重炭酸イオンの輸送体や、細胞内で二酸化炭素と重炭酸イオンの迅速な変換を行って二酸化炭素を葉緑体へ導く機能を持つ、炭酸脱水酵素が見つっている。しかし、その起源や細胞内で働く部位は生物によって様々で、統一した仕組みは発見されていなかった。海洋性珪藻の光合成の仕組みは、その重要性から植物プランクトンの中でも特に注目されている。

## 2. 研究の内容

海洋性珪藻の一種である *Phaeodactylum tricornutum* を実験材料に使用して、機能未知遺伝子 Pt43233 に、オワンクラゲ緑色蛍光タンパク質 (GFP) 遺伝子を継ぎ合わせて珪藻細胞内で発現させた。その結果、緑色に光る Pt43233 : GFP 融合タンパク質は、葉緑体中心部に存在するピレノイドと呼ばれる部位を貫通するチラコイド膜内部にだけ存在した。研究チームは Pt43233 のアミノ酸配列の特徴から、このタンパク質が炭酸脱水酵素であることを予測した。この酵素を精製して活性を調べた結果、高い炭酸脱水酵素活性を見いだした。炭酸脱水酵素はこれまでに  $\alpha$  から  $\eta$  型まで 7 グループが知られているが、どのグループにも属さないことから、このタンパク質を新たに  $\theta$  型炭酸脱水酵素と名付けた。 $\theta$  炭酸脱水酵素を過剰に作らせた珪藻の光合成効率は上昇し、逆に人為的に抑制すると、光合成効率が低下した。炭酸脱水酵素は重炭酸イオンを水素イオン（プロトン）と結合して迅速に二酸化炭素にすることができる。チラコイド膜の内側は、光が当たって光合成をしている時にはプロトンが蓄積されて酸性になっている。このタンパク質はチラコイド膜内腔で重炭酸イオンとプロトンのバランスを調節しながら二酸化炭素を発生させて、固定回路（カルビン回路）に供給していると考えられる。別起源の炭酸脱水酵素（ $\alpha$  型）に基づいた同様の仕組みが、系統も生育環境も全く異なる淡水性緑藻にも存在すると考えられている。多様な起源から獲得された藻類 CCM の最終段階は、チラコイド膜内腔で光、重炭酸イオン、およびプロトンのバランス調節を駆動力として進化した、統一的な仕組みであることがこの研究から強く示唆された。

## 3. 今後の期待

海洋性珪藻の光合成は、海洋の主要な二酸化炭素吸収（＝酸素発生・食糧生産）源であるため、未来海洋環境の変動予測に、新しい重要因子・理論を提供することが期待される。チラコイド膜内腔の、光に依存した重炭酸イオンとプロトンのバランス調節を駆動力とした光合成進化の仕組みに

ついて、新たな理解が進む。一方、海洋性珪藻はバイオ燃料や油脂源として注目されることから、珪藻細胞と海水を使った物質生産への原料供給システムの遺伝子工学的改良への応用が期待される。

#### 【論文タイトル】

Thylakoid luminal  $\theta$ -carbonic anhydrase critical for growth and photosynthesis in the marine diatom *Phaeodactylum tricornutum*."

【和訳】海洋性珪藻 *Phaeodactylum tricornutum* の生育と光合成に重要な、チラコイド内腔局在新規  $\theta$  型炭酸脱水酵素

【著者名】 菊谷早絵、中島健介、長里千香子、辻敬典、宮武愛、松田祐介

#### 【用語解説】

- 炭酸脱水酵素：二酸化炭素に水が結合して重炭酸イオンとなる反応を両方向に触媒する地上最速の酵素。
- チラコイド膜：葉緑体内に発達した中空の膜構造で、光化学系と呼ばれる光エネルギー変換装置、電子伝達タンパク質、および化学エネルギーの合成酵素を持つ。チラコイド膜内腔には水を分解するタンパク質を有する。膜内外に pH 差を作り出して光から化学エネルギーを作り出す。
- ピレノイド：藻類の葉緑体に存在する巨大なタンパク質集合体。CO<sub>2</sub>固定化酵素を集積しており、CCM に必須と考えられているがその仕組みは分かっていない。
- プロトン：水素イオンとも呼び、pH の決定因子。チラコイド膜が光エネルギーを化学エネルギーに変換する過程で、チラコイド膜内腔に輸送される。光のエネルギーはこのプロトンの濃度差（pH 差）となって様々に利用される。その制御機構や利用の仕組みには多くの謎が残る、光合成研究の中心課題の一つ。

#### 問い合わせ先

- 松田祐介・理工学部教授 E-mail:yusuke@kwansei.ac.jp