

2024年2月29日

報道関係者各位

国立大学法人筑波大学  
国立大学法人北海道大学

## 藻類の二酸化炭素を固定化する器官が種ごとに独自に進化したことを発見

海産藻類のクロララクニオン藻において、二酸化炭素を有機炭素に固定する細胞内小器官「ピレノイド」で働くタンパク質を明らかにしました。ピレノイドは藻類に広く存在していますが、その中身（タンパク質）は藻類ごとに異なっており、異なる道筋で独立に進化してきたことが分かりました。

我々が作り出す二酸化炭素は、植物や藻類の葉緑体で有機炭素へと固定されており、ルビスコと呼ばれる酵素がこの反応を触媒しています。水中（特に海洋）に溶けた二酸化炭素の多くは重炭酸イオンの形で存在しています。水圏に生息する藻類は、ルビスコを葉緑体内の一か所に集めて「ピレノイド」と呼ばれる細胞内小器官を構築し、重炭酸イオンから変換した二酸化炭素をそこに送り込んで固定反応を促進すると考えられています。しかし、緑藻と珪藻の一部の種を除いて、ピレノイドで働くタンパク質（ピレノイドタンパク質）は明らかにされていませんでした。

本研究では、海産の単細胞性藻類であるクロララクニオン藻より単離したピレノイドを用いて、ピレノイドで機能するタンパク質を網羅的に同定しました。その結果、ルビスコの集合や二酸化炭素の変換に関与するタンパク質が含まれていました。興味深いことに、これらのタンパク質と他の藻類のピレノイドタンパク質では、種類が大きく異なっていました。つまり、二酸化炭素を集めて固定する器官は、おのおのの藻類で独立に進化してきたことを示唆しています。

本研究により、藻類が獲得した「水中で光合成を効率化するメカニズム」の一端が明らかになりました。現在、遺伝子操作により二酸化炭素の吸収効率を高める研究が盛んに行われており、本研究成果はこれらの応用研究に貢献すると期待されます。

### 研究代表者

筑波大学生命環境系

平川 泰久 助教

北海道大学北方生物圏フィールド科学センター水圏ステーション室蘭臨海実験所

長里 千香子 教授

## 研究の背景

我々が作り出す二酸化炭素の約三分の一は、「ピレノイド」と呼ばれる、藻類の葉緑体内にある細胞内小器官で有機炭素に固定されています。ピレノイドの存在は 200 年以上前から知られていましたが、ピレノイドでどのようなタンパク質がどのような分子機構で働いているのかは長らく未解明でした。近年になって、ピレノイドの主な役割は二酸化炭素を濃縮することであり、濃縮した二酸化炭素をピレノイドに集められた酵素ルビスコ<sup>注1)</sup>に届け、固定反応を効率化していることが報告されました。しかし、これらの知見は緑藻や珪藻の一部の種に限定されており、ピレノイドで働く分子機構の多様性や進化を知るためには、さまざまな藻類で研究を進める必要がありました。

## 研究内容と成果

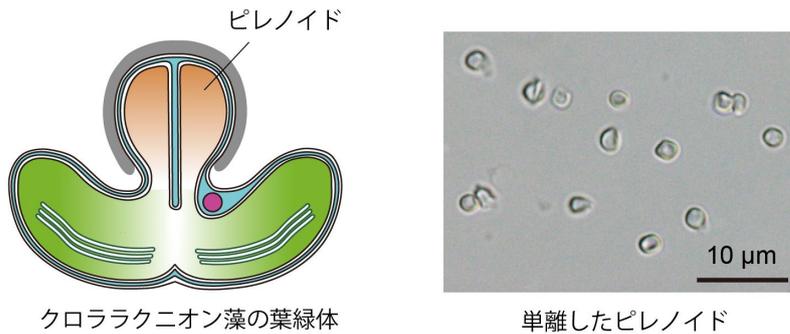
本研究では、海産の単細胞性藻類であるクロララクニオン藻を用いて、ピレノイドで機能するタンパク質（ピレノイドタンパク質）を網羅的に同定し、そこで働く分子機構の一端を明らかにしました。緑藻や珪藻のピレノイドは葉緑体内に埋没して存在しており、それを単離することは簡単ではありません。一方、クロララクニオン藻のピレノイドは葉緑体からコブの様に突出しているため、簡単な操作で夾雑物の少ないピレノイドを手に入れることができました。次に、このピレノイドに含まれるタンパク質を質量分析法で解析し、約 150 個のピレノイド関連タンパク質候補を同定しました。さらに、GFP 融合タンパク質<sup>注2)</sup>を用いた蛍光局在解析と特異的抗体を用いた免疫電子顕微鏡解析<sup>注3)</sup>を行い、最終的に 8 個の新規ピレノイドタンパク質を明らかにしました（参考図）。この中には、二酸化炭素濃縮に関連する炭酸脱水酵素<sup>注4)</sup>やルビスコの集合に関わるとされるリンカータンパク質<sup>注5)</sup>の他、複数の機能未知タンパク質が含まれていました。その多くがクロララクニオン藻に特有で、緑藻や珪藻のピレノイドタンパク質とは異なる種類でした。つまり、各藻類でピレノイドの役割は似ていても、そこで働くタンパク質は大きく違うこととなります。このことから、ピレノイドは異なる藻類群で収斂進化<sup>注6)</sup>した可能性が高いと考えられます。本研究成果は、水中環境で藻類が繁栄するために生み出した光合成を効率化するメカニズムに関して、新たな知見を広げました。

## 今後の展開

ピレノイドに関連する研究はここ十数年で急速に進展していますが、まだ一部の藻類における研究に限定されています。今後は研究対象を広げて、ピレノイドの多様性や進化の謎を明らかにしていきます。

また現在、ピレノイドをもたない陸上植物に、遺伝子操作でピレノイドを構築し、効率的に二酸化炭素を吸収できるスーパー植物を創生する試みが世界中で進められています。本研究で明らかにしたピレノイドタンパク質は、このような二酸化炭素削減に資する応用研究に貢献すると期待されます。

## 参考図



単離ピレノイドに含まれる 154 個のタンパク質を推定



ピレノイドに特異的に局在するタンパク質の絞り込み

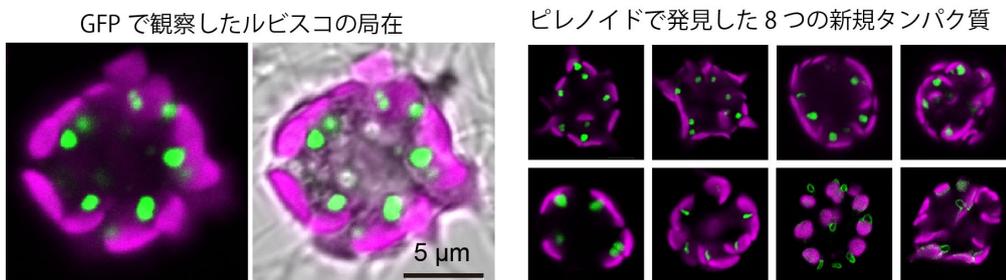


図 本研究の概要

クロララクニオン藻の細胞を超音波処理して、葉緑体からピレノイドを分離し、遠心分離法でピレノイドだけを回収した。質量分析法により単離ピレノイドから同定された 154 個のタンパク質のうち、存在量の多いものに関して、緑色蛍光タンパク GFP を融合して、その細胞内局在を蛍光顕微鏡で観察した。その結果、クロララクニオン藻のピレノイドに特異的に局在する 8 つの新規タンパク質を発見した。

## 用語解説

注 1) ルビスコ

光合成において二酸化炭素を固定化させる酵素で、その反応速度は著しく低いことが知られている。

注 2) GFP 融合タンパク質

目的のタンパク質に緑色蛍光タンパク GFP を融合したもの。細胞内で発現させることで、その局在を蛍光顕微鏡下で観察することができる。

注 3) 免疫電子顕微鏡解析

目的のタンパク質に結合する抗体を用いて、その細胞内局在を電子顕微鏡下で観察する手法。

注 4) 炭酸脱水酵素

重炭酸イオン ( $\text{HCO}_3^-$ ) と二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) の変換反応を触媒する酵素。

注 5) リンカータンパク質

ルビスコに結合する天然変性タンパク質で、その集合に関与すると考えられている。

注 6) 収斂進化

進化・系統的に異なる生物が、類似した形質を独立に獲得する現象。

## 研究資金

本研究は、科研費による研究プロジェクト（18K06358、21K06285）と公益財団法人発酵研究所の研究室助成（LA-2022-011）の一環として実施されました。

## 掲載論文

【題名】 Pyrenoid proteomics reveals independent evolution of CO<sub>2</sub>-concentrating organelle in chlorarachniophytes.

（プロテオーム解析で紐解くクロララクニオン藻の二酸化炭素濃縮オルガネラの独自進化）

【著者名】 R. Moromizato, K. Fukuda, S. Suzuki, T. Motomura, C. Nagasato, Y. Hirakawa

【掲載誌】 *Proceedings of the National Academy of Sciences*

【掲載日】 2024年2月26日

【DOI】 10.1073/pnas.2318542121

## 問合わせ先

【研究に関すること】

平川 泰久（ひらかわ よしひさ）

筑波大学 生命環境系 助教

TEL: 029-853-5600（内線8794）

Email: hirakawa.yoshi.fp@u.tsukuba.ac.jp

URL: <https://yhirakawa.weebly.com/>

【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

北海道大学社会共創部広報課

TEL: 011-706-2610

E-mail: jp-press@general.hokudai.ac.jp