

藻類の CO₂ 吸収の鍵となる細胞外タンパク質の機能を解明

－ 40 年来の議論にゲノム編集技術で決着 －

概要

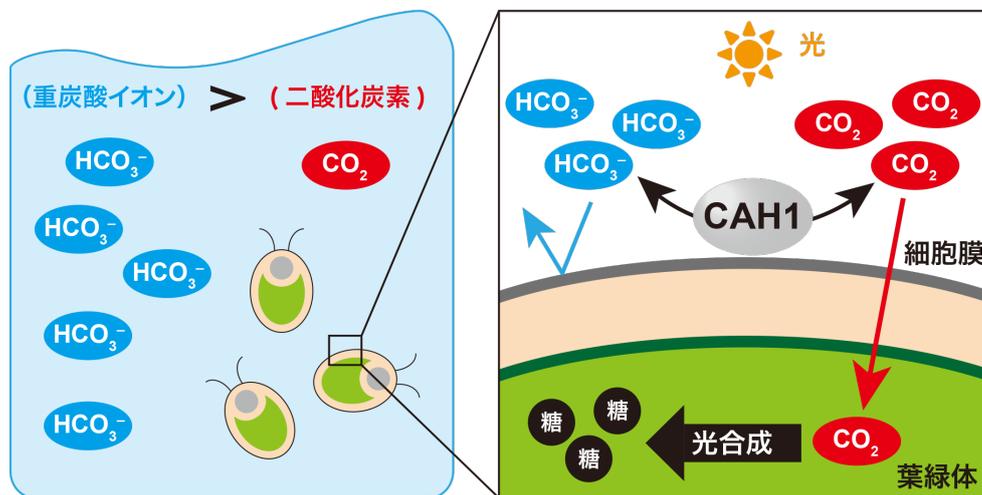
嶋村大亮 京都大学大学院生命科学研究科 研究員（現：理化学研究所 環境資源科学研究センター 特別研究員）、山野隆志 生命科学研究科准教授らの研究グループは、ゲノム編集技術を用いてモデル緑藻クラミドモナスの変異体を作成し、緑藻の細胞外タンパク質 CAH1 の機能を明らかにしました。この発見は、CAH1 の役割をめぐる 40 年来の科学的論争を解決し、水圏における光合成の理解を大きく前進させました。

水中では CO₂ の拡散が陸上の約 1/10,000 と極めて遅く、植物が光合成に必要な CO₂ を十分に取り込むことが難しい状況にあります。多くの水中生物はこれを克服するために、細胞内に CO₂ を濃縮し効率的な光合成を可能にする CO₂ 濃縮機構（CCM）を進化させてきました。CCM の中心的な役割を果たすのが、CO₂ と重碳酸イオン（HCO₃⁻）を変換する炭酸脱水酵素です。

同研究グループは 2015 年に、CCM において HCO₃⁻ を細胞内に濃縮する輸送体を同定しています。今回の研究では、1984 年に同定された細胞外に存在する炭酸脱水酵素 CAH1 の機能に焦点を当てました。CAH1 の役割は長年不明のままでしたが、今回の発見により、藻類が HCO₃⁻ だけでなく CO₂ も効率的に吸収する仕組みが明らかになりました。

今回の発見により、HCO₃⁻ の輸送に加え、CO₂ の効率的な吸収メカニズムが解明されたことで、水中環境での光合成生物の CO₂ 獲得戦略の全体像がより明確になりました。この研究成果は、将来的に植物の光合成効率向上に向けた研究にも大きな影響を与えることが期待されます。

本研究成果は、2024 年 8 月 30 日に、国際学術誌「*Plant Physiology*」のオンライン版に公開されました。



図：本研究成果のモデル図。炭酸脱水酵素 CAH1 が水中に豊富に存在する HCO₃⁻ を CO₂ へと変換し、光合成に利用する様子を示している。

1. 背景

光合成は地球上の生命を支える重要なプロセスです。植物や藻類は、太陽光のエネルギーを使って二酸化炭素（CO₂）と水から炭水化物を作り出し、地球上の全ての生命活動を根底から支えています。この光合成は主に葉緑体^{注1)}という細胞内の特殊な構造で行われます。光合成の効率は、CO₂の取り込み方に大きく影響されるため、植物や藻類がCO₂を効率的に細胞内の葉緑体に取り込むメカニズムを理解することは重要です。

陸上の植物は、葉の表面にある気孔を開閉して、CO₂の取り込み量を調節しています。一方、水中環境での光合成も地球上の一次生産の多くを占めますが、水中では異なる課題に直面します。水中ではCO₂の拡散速度が大気中の10,000分の1に低下し、さらにCO₂の多くが重炭酸イオン（HCO₃⁻）の形で存在します。そのため、水中に生息する藻類はCO₂を取り込むことが難しく、光合成に不利な環境にさらされます。

この問題を解決するため、多くの藻類はCO₂濃縮機構^{注2)}（CO₂-concentrating mechanism, CCM）と呼ばれる仕組みを進化させてきました。CCMは主に3つの要素で構成されています：

1. 細胞膜や葉緑体包膜を介してHCO₃⁻を積極的に取り込む輸送体
2. 取り込んだHCO₃⁻をCO₂に変換する炭酸脱水酵素^{注3)}
3. CO₂固定酵素ルビスコ^{注4)}を効率的に働かせる特殊な構造

研究者たちは、モデル生物である単細胞緑藻クラミドモナス^{注5)}を使って、このCCMの仕組みを研究してきました。これまでの研究で、葉緑体内に存在する複数の炭酸脱水酵素がCCMに重要であることが示されてきました。さらに、CAH1という炭酸脱水酵素が細胞外のペリプラズム空間^{注6)}に存在し、CO₂が少ない環境で増えることから、CCMにおいて重要な役割を果たすと考えられてきました。しかし、そのCAH1の具体的な機能については長年議論が続いていました。

そこで私たちの研究グループは、最新のゲノム編集技術を使って、このCAH1の機能を詳しく調べ、藻類のCO₂濃縮機構におけるCAH1の役割を明らかにすることを目指しました。

2. 研究成果

本研究グループは、ゲノム編集技術CRISPR-Cas9^{注7)}を用いて、クラミドモナスのCAH1遺伝子を欠損させた変異体を作成し、詳細な解析を行いました。CAH1欠損変異体において、特にHCO₃⁻/CO₂の割合が高くなるアルカリ性環境（pH 7.8）で光合成効率が著しく低下しました。また、細胞外に存在する炭酸脱水酵素の機能を阻害する薬剤を正常な細胞に与えると、CAH1欠損変異体と同様の光合成効率の低下が見られました。さらに、CAH1欠損変異体に外部から炭酸脱水酵素（ウシ由来）を加えると、CO₂親和性が野生型レベルまで回復することも確認されました。これらの結果から、CAH1はアルカリ性環境下でHCO₃⁻からCO₂を生成し、細胞内へのCO₂の供給を促進する重要な役割を果たしていることが明らかになりました。

3. 研究の意義と今後の展開

本研究は、長年議論されてきた藻類のペリプラズム空間に存在する炭酸脱水酵素CAH1の機能を明確に示した点で大きな意義があります。特に、アルカリ性環境下でCAH1がHCO₃⁻からCO₂を生成し、細胞内へのCO₂供給を促進する重要な役割を果たすことを実証しました。この発見は、藻類のCO₂濃縮機構（CCM）の理解を大きく前進させるものです。

この研究成果は、水中環境における光合成生物の CO₂ 獲得戦略の解明に重要な貢献をします。藻類が進化させてきた CCM の仕組みをより詳細に理解することで、地球上の炭素循環や水圏生態系における一次生産の理解にもつながる可能性があります。

さらに、この研究成果は将来的に応用研究にもつながる可能性があります。例えば、藻類の光合成効率を向上させ、バイオ燃料生産などの産業利用に貢献する技術開発や、CCM の仕組みを陸上植物に導入して作物の生産性を向上させる試みなどが考えられます。これらの基礎研究と応用研究を進めることで、地球規模の環境問題や食糧問題の解決に向けた新たな知見や技術が生まれることが期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、科学研究費補助金 (JP20H03073, JP21K19145, JP24K01851) 、JST SPRING (JPMJSP2110) 、GteX Program (JPMJGX23B0) 、旭硝子財団の支援を受けて行われました。

<用語解説>

注¹) **葉緑体**：光合成を行う細胞内小器官。外包膜と内包膜からなる二重の生体膜（葉緑体包膜）に囲まれている。葉緑体の内部は、ストロマと呼ばれる空間で満たされており、チラコイド膜と呼ばれる袋状の膜構造が存在する。

注²) **CO₂濃縮機構 (CCM)**：水中に生息する藻類や一部の陸上植物が持つ、二酸化炭素を効率的に取り込むための仕組み。特に藻類が持つ機構は生物物理的な CCM (biophysical CCM) とも呼ばれる。

注³) **炭酸脱水酵素**：二酸化炭素と水の間の可逆的な反応を触媒する酵素。生物の様々な生理プロセスに関与する。

注⁴) **ルビスコ**：光合成における CO₂ 固定反応を触媒する酵素。正式名称はリブローズ-1,5-ビスリン酸カルボキシラーゼ/オキシゲナーゼ。

注⁵) **クラミドモナス**：単細胞緑藻の一種。ここでは *Chlamydomonas reinhardtii* (和名はコナミドリムシ) を指す。細胞の大きさは約 10 μm (1 mm の 100 分の 1 に相当)。光合成、鞭毛運動、生殖などの基礎研究だけでなく、バイオ燃料生産を目指した応用研究を含めたモデル生物として世界中で利用されている。

注⁶) **ペリプラズム空間**：細胞膜と細胞壁の間に存在する空間。グラム陰性細菌や一部の真核微生物に見られる。

注⁷) **CRISPR-Cas9**：特定の遺伝子を効率的に改変できるゲノム編集技術。標的 DNA 配列を認識して切断し、目的の遺伝子を挿入・削除・変更することができる。

<論文タイトルと著者>

タイトル : Periplasmic carbonic anhydrase CAH1 contributes to high inorganic carbon affinity in
Chlamydomonas reinhardtii

(細胞外炭酸脱水酵素 CAH1 は緑藻クラミドモナスの無機炭素に対する高親和性に寄与する)

著者 : Daisuke Shimamura, Tomoaki Ikeuchi, Ami Matsuda, Yoshinori Tsuji, Hideya Fukuzawa, Keiichi
Mochida, Takashi Yamano

掲載誌 : *Plant Physiology* DOI : 10.1093/plphys/kiae463