

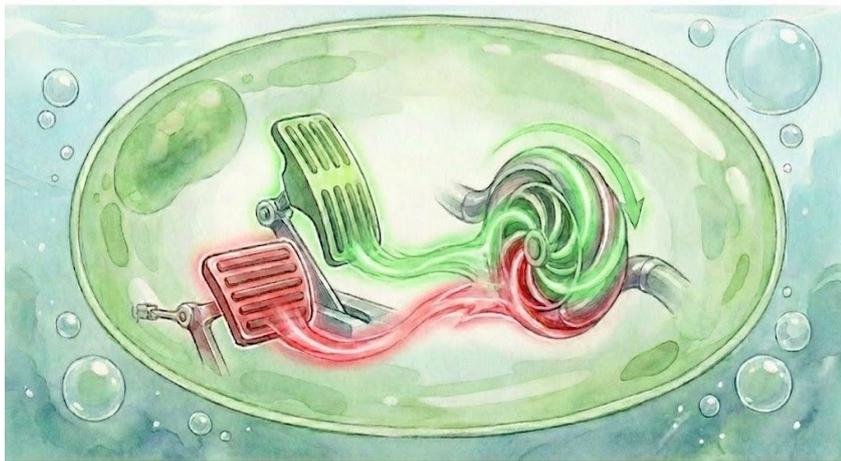
藻類の光合成ターボエンジンを制御する「ブレーキ」を発見 ～高 CO₂ 環境での「空吹き」を防ぎ、バイオ燃料等の省エネ化へ道～

概要

山野隆志 京都大学生命科学研究科 准教授、嶋村大亮 理化学研究所 環境資源科学研究センター 特別研究員（元・生命科学研究科 研究員）、安田詢子 同修士課程学生（研究当時）、山原洋佑 同修士課程学生（研究当時）、中野博文 同修士課程学生（研究当時）、福澤秀哉 京都女子大学高等教育開発センター教授（元・生命科学研究科 教授）らの研究グループは、光合成における CO₂ 濃縮メカニズム（光合成のターボエンジン：水中の乏しい CO₂ を葉緑体内に濃縮し、光合成をフル回転させる仕組み）を、不要な時に抑制する「ブレーキ役」のタンパク質「CBP1」を発見しました。

これまで、CO₂ が少ない環境でターボエンジンを始動させる「アクセル」の仕組みは知られていましたが、工場排ガスのような高 CO₂ 環境（ターボが不要な環境）で、いかにしてエンジンをスローダウンさせエネルギーを節約しているかは謎に包まれていました。本研究により、藻類が環境に応じてアクセルとブレーキを使い分ける精巧な省エネ生存戦略が明らかになりました。この成果は、高濃度 CO₂ を利用した藻類バイオ燃料生産やカーボンリサイクル技術において、エネルギー効率を最大化する藻類の育種に応用できると期待されます。

本研究成果は、2026 年 2 月 4 日に国際学術誌「PNAS」にオンライン掲載されました。



本研究成果の概念図。環境中の CO₂ 濃度に応じて、細胞内のアクセル分子とブレーキ分子が光合成のターボエンジンを精密に制御する。

【研究の概要】

山野隆志 生命科学研究所 准教授、嶋村大亮 理化学研究所 環境資源科学研究センター 特別研究員（元・生命科学研究所 研究員）、安田詢子 同修士課程学生（研究当時）、山原 洋佑 同修士課程学生（研究当時）、中野博文 同修士課程学生（研究当時）、福澤秀哉 京都女子大学高等教育開発センター教授（元・生命科学研究所 教授）らの研究グループは、生命科学研究所 山上あゆみ 助教、中野雄司 教授、岡山大学 資源植物科学研究所 小澤 真一郎 准教授、岡山大学 異分野基礎科学研究所 高橋裕一郎 特命教授、北里大学 獣医学部 得津隆太郎 教授、京都大学 大学院理学研究科 松下智直 教授と共同で、光合成における CO₂濃縮メカニズム（光合成のターボエンジン：水中の乏しい CO₂を葉緑体内に濃縮し、光合成をフル回転させる仕組み）を、不要な時に抑制する「ブレーキ役」のタンパク質「CBP1」を発見しました。

これまで、CO₂が少ない環境でターボエンジンを始動させる「アクセル」の仕組みは知られていましたが、工場排ガスのような高 CO₂環境（ターボが不要な環境）で、いかにしてエンジンをスローダウンさせエネルギーを節約しているかは謎に包まれていました。本研究により、藻類が環境に応じてアクセルとブレーキを使い分ける精巧な省エネ生存戦略が明らかになりました。この成果は、高濃度 CO₂を利用した藻類バイオ燃料生産やカーボンリサイクル技術において、エネルギー効率を最大化する藻類の育種に応用できると期待されます。

本研究成果は、2026年2月4日に国際学術誌「PNAS」にオンライン掲載されました。

【研究の背景】

水中の微細藻類にとって、大気中に比べて二酸化炭素（CO₂）が拡散しにくい水環境は、光合成を行う上で非常に過酷な場所です。植物が光合成を行う際に CO₂を取り込む反応を担うのがルビスコ（Rubisco）という酵素ですが、この酵素には「反応速度が極めて遅い」だけでなく、「CO₂濃度が低い環境では酸素と反応してしまう」という性質があります。そこで藻類は、このルビスコの弱点を補うために「CO₂濃縮機構（CCM）」という高度な環境適応能力を進化させました。これは、エネルギー（ATP）を投じて細胞内に CO₂を能動的に濃縮し、ルビスコの周りを CO₂で満たす仕組みで、いわば「光合成のターボエンジン」のような役割を果たしています。

このターボエンジンのおかげで、藻類は CO₂が希薄な水中でも高い生産性を発揮できます。しかし、エンジンの稼働には多大なエネルギーコストがかかります。したがって、工場排ガスの中のように CO₂が十分に存在する環境（高 CO₂条件）では、無駄なエネルギー消費を避けるためにエンジンを停止し、省エネモードに切り替えることが生存にとって不可欠です。これまでの研究では、CO₂不足を感知してエンジンを始動させる「アクセル役（CCM1）」の存在は知られていましたが、十分な CO₂がある時にどのようにしてエンジンを停止させているのか、その「ブレーキ役」の実体

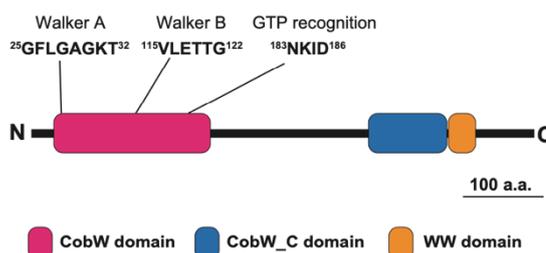


図 1. CBP1 タンパク質のドメイン構造

CBP1 のアミノ酸配列を解析した結果、特徴的な 3 つの領域（ドメイン）を持つことが明らかになった。中央のピンク色の領域（CobW ドメイン）には、金属やエネルギー分子（GTP）との結合に関与する配列（Walker A/B モチーフなど）が存在する。右端のオレンジ色の領域（WW ドメイン）は、一般的に他のタンパク質との相互作用に重要であることが知られている。この特異な構造が、高 CO₂環境下での CO₂濃縮メカニズム（光合成ターボエンジン）の抑制制御を担っていると推測される。

は長年の謎でした。

【研究成果】

本研究グループは、アクセル役であるタンパク質「CCM1」に結合する未知の因子を探索し、新規タンパク質「CBP1 (CCM1-binding protein 1)」を発見しました (図 1)。詳細な解析の結果、CBP1 は細胞の核内でアクセル役の CCM1 と常に結合しており (図 2)、CO₂ が豊富な環境下で CCM1 の働きを抑制する、まさに探求されていた「ブレーキ役」であることが突き止められました。

その証拠として、CBP1 の機能を失わせた変異体 (ブレーキ故障株) を作製したところ、高 CO₂ 環境であるにもかかわらず、CO₂ 濃縮に関わるシステムが誤って作動し続けていることが判明しました。特に、CO₂ と重炭酸イオンの変換を担う「炭酸脱水酵素」の蓄積が顕著であり、細胞の外で CO₂ を取り込みやすくする「CAH1」や、細胞内での CO₂ 漏出を防ぐ「LCIB」といった酵素群が、本来不要な環境下で異常に蓄積し、暴走状態にあることが確認されました。

さらに本研究では、CCM の制御が単一ではなく、環境の厳しさに応じた段階的なものであることも明らかになりました。CCM には、CO₂ が少し減った段階で稼働する

「低親和性 CCM」と、極端に欠乏した緊急事態にのみ稼働する、より強力でエネルギー消費の激しい「高親和性 CCM」の 2 種類が存在します。今回発見されたブレーキ役「CBP1」は、主に「低親和性 CCM」を制御しており、CBP1 がなくなるとこのシステムが抑制できなくなることが分かりました。一方で、よりコストのかかる「高親和性 CCM」は CBP1 がなくても停止していたことから、藻類は環境に応じてブレーキを使い分ける、多重の安全装置を備えていると考えられます。

【エネルギー浪費の実証と社会的インパクト】

ブレーキが壊れて「低親和性 CCM」が空回りし続けることは、藻類にとってどれほどの負担になるのでしょうか。これを検証するため、光を弱めて光合成によるエネルギー供給を制限した条件下で培養実験を行いました。その結果、CBP1 欠損株は野生株に比べて生育が著しく遅れることが明らかになりました (図 3)。これは、不要な時にターボエンジンを空吹かしすることで細胞内のエネルギー (ATP) が無駄遣いされ、生育に必要なエネルギーが枯渇したことを示唆しています。

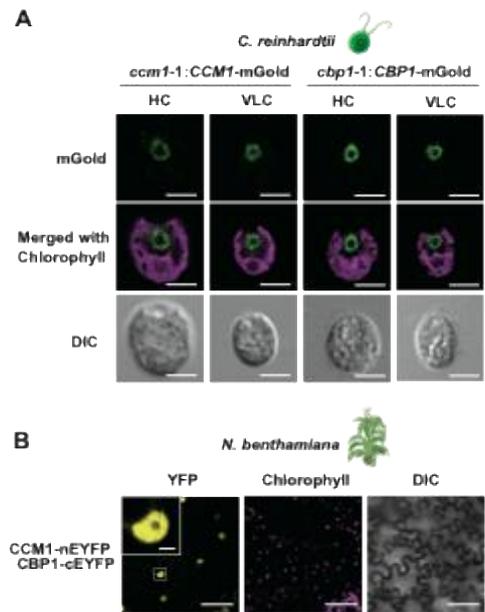


図 2. CCM1 と CBP1 は核で相互作用する

(A) クラミドモナス細胞内における CBP1 および CCM1 の挙動を蛍光顕微鏡で捉えた画像 (上段: mGold の蛍光像、中段: mGold とクロロフィル自家蛍光の重ね合わせ像、下段: 明視野 DIC 像)。CCM1 と CBP1 とも特異的な蛍光シグナルが核に観察されており、これらの因子が細胞質や葉緑体ではなく、遺伝子発現の制御中心である核に恒常的に局在していることを示している。(B) タバコ葉を用いた実験による CCM1 と CBP1 の相互作用の確認。黄色い蛍光が見えている部分は、両者が結合していることを示している。

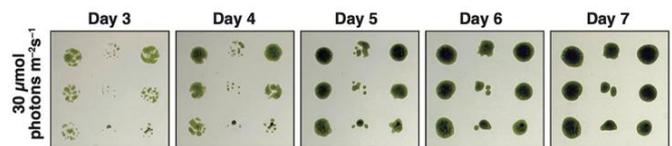


図 3. スポットアッセイによる生育比較

野生株 (それぞれの画像における 1 列目)、CBP1 変異株 (2 列目)、CBP1 相補株 (3 列目) の増殖速度をスポットテストアッセイにより比較した。弱光条件において 3 日目から 7 日目までの経時的な観察を行った結果、CBP1 変異株において生育の遅延が認められ、その表現型は相補株では回復していた。

本研究により、藻類のエネルギー管理における「アクセルとブレーキ」の両輪が解明されました。この成果は、藻類の生理学的な理解を深めるだけでなく、脱炭素社会の実現に向けた産業応用にも大きな可能性をもたらします。例えば、火力発電所や工場からの高濃度 CO₂ 排ガスを利用して藻類を培養する際、CBP1 の働きを強化・最適化できれば、不要な濃縮システムを確実に停止させることが可能になります。これにより、CO₂ 吸収と物質生産におけるエネルギー効率を最大化し、余剰エネルギーをバイオ燃料（油脂）やデンプンなどの有用物質生産に振り向ける「省エネ型」藻類の育種や、カーボンリサイクル技術の高度化に貢献すると期待されます。

【研究プロジェクトについて】

本研究は、科学研究費補助金（JP16H04805, JP23120514, JP21H05660, JP24K01851, JP25H01332, JP25K18301）、旭硝子財団、長瀬科学技術振興財団等の支援を受けて行われました。

【研究者のコメント】

CBP1 との出会いは、今から 18 年以上前、2007 年の夏に遡ります。当時大学院生だった山原君が見つけ出したこのタンパク質は、当初全く機能が分からず、解析のための変異株も作れないまま、研究の中断を余儀なくされることもありました。風向きが変わったのは、近年の「ゲノム編集技術」の登場です。これにより変異株の作成が容易になり、さらに当時大学院生の安田さんが「高 CO₂ 条件でこそ異常が出る」という、私たちの予想とは全く逆の現象を発見してくれました。この意外な発見がブレイクスルーとなり、長く停滞していた謎が一気に解明されました。多くの学生たちの粘り強い努力と、技術の進歩が結びつき、足掛け 19 年を経てようやく実を結んだ、私たちにとって非常に思い入れの深い研究成果です。

【用語解説】

・ CO₂ 濃縮機構 (CCM)

水中の低い CO₂ 濃度でも光合成を行えるように、エネルギーを使って CO₂ を細胞内に濃縮する仕組み。いわば光合成のターボエンジン。

・ ルビスコ (Rubisco)

光合成において、無機炭素である CO₂ を有機物に変換する反応を担う最も重要な酵素。しかし、極めて働きが鈍いだけでなく、CO₂ 濃度が低い環境では酸素と反応してしまう性質がある。藻類は CCM を使ってルビスコの周りに CO₂ を集めることで、この欠点を補っている。

・ 炭酸脱水酵素 (Carbonic anhydrase)

二酸化炭素 (CO₂) と重炭酸イオン (HCO₃⁻) の間の変換を速める酵素。水中に溶けた CO₂ を効率よく細胞内に取り込んだり、細胞内で利用しやすい形に変えたりするために、CCM の重要な構成要素として働く。今回の研究では、主に細胞の外で働くタイプの炭酸脱水酵素 CAH1 と細胞の中で働くタイプの炭酸脱水酵素 LCIB が、ブレーキ役 (CBP1) によって制御されていることが明らかになった。

・低親和性 CCM / 高親和性 CCM

CCM には段階があることが知られている。CO₂ が少し減った時に動くのが「低親和性」タイプの CCM であり、極端に減った時に動くのが「高親和性」タイプの CCM である。後者の方がより強力だが、エネルギー消費も激しいと考えられる。

・CBP1 (CCM1-binding protein 1)

今回発見されたタンパク質。高 CO₂ 下で「低親和性 CCM」を抑制するブレーキ役。

【論文情報】

タイトル : A nuclear CobW/WW-domain factor represses the CO₂-concentrating mechanism in the green alga *Chlamydomonas reinhardtii*

(核内 CobW/WW ドメイン因子は緑藻クラミドモナスの CO₂ 濃縮機構を抑制する)

著者 : Daisuke Shimamura, Junko Yasuda, Yosuke Yamahara, Hirofumi Nakano, Shin-Ichiro Ozawa, Ryutaro Tokutsu, Ayumi Yamagami, Tomonao Matsushita, Yuichiro Takahashi, Takeshi Nakano, Hideya Fukuzawa, Takashi Yamano*

掲載誌 : Proc. Natl. Acad. Sci. USA

DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2518136123>