

2024年11月12日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学
学校法人日本女子大学
学校法人早稲田大学
学校法人中央大学

光合成を最適化するイオン輸送体の解明

－ 葉緑体の祖先はナトリウムを利用して光合成を行う －

【発表のポイント】

- 葉緑体の祖先である藍藻（らんそう）^(注1)が、植物は必要としていないナトリウムイオン（ Na^+ ）を利用して光合成を制御することを明らかにしました。
- 光合成を制御する機構に関して Na^+/H^+ 対向輸送体^(注2)の機能と生理学的役割を明らかにしました。
- バイオマス燃料生産や農作物の収量向上など持続可能な社会構築にむけた技術応用が期待されます。

【概要】

脱化石燃料、再生可能エネルギーの生産、食糧増産、環境保全は、現代社会における重要な課題です。この解決策の一つとして、太陽光エネルギーをバイオマスに変換する光合成の効率を最適化することが期待されています。光合成生物の藍藻や植物葉緑体は、太陽光エネルギーを活用し、生体膜に水素イオン（ H^+ ）の濃度差を作り出すことで、 CO_2 から糖を生成するため、 H^+ 濃度の調節機構はきわめて重要です。

東北大学大学院工学研究科バイオ工学専攻の辻井雅助教らは、植物葉緑体の祖先である「藍藻」の Na^+/H^+ の対向輸送体が光合成の制御において重要な役割を果たすことを初めて明らかにしました。藍藻の膜タンパク質である NhaS1 および NhaS2^(注3) と呼ばれる Na^+/H^+ 対向輸送体が、特に強い光の下で細胞内 H^+ 濃度を調節し、光合成を最適化することが確認されました。このイオン輸送体の機能と役割の発見により、光合成の最適化メカニズムの理解が進み、藍藻を活用したバイオ燃料の生産や、農作物の収量向上といった実用的な応用が期待されます。

この研究は、日本女子大学、大阪公立大学、早稲田大学、中央大学、立命館大学との共同研究により行われました。本研究の成果は、2024年10月24日に米国植物生理学会誌 Plant Physiology にオンラインで掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

陸上植物の葉緑体ではカリウムイオン (K^+) /水素イオン (H^+) 対向輸送体が光合成の最適化に寄与することが分かっています。一方、葉緑体の祖先であり海水中にも生息する藍藻は Na^+/H^+ 対向輸送体を持っています。これは、陸上植物が Na^+/H^+ 対向輸送体から K^+/H^+ 対向輸送体を分子進化させることで、 Na^+ が少ない陸上環境に適応したことを示唆しています。しかし、藍藻が Na^+ をどのように利用しているのか、また、 Na^+/H^+ 対向輸送体の具体的な機能や役割については、まだ明らかにされていませんでした。

今回の取り組み

様々な光条件下で Na^+ を添加した培地と無添加の培地で藍藻の生育を比較したところ、 Na^+ を添加した培地でのみ強光条件下（晴れた日の日中ぐらいの光量）での生育が確認されました(図 1)。これは、藍藻が Na^+ を利用して光合成を制御していることを示唆しています。また、 $NhaS1$ および $NhaS2$ が欠損した藍藻では、強光条件下で生育できず、光合成収率が劇的に低下しました。この結果は、藍藻の光合成において Na^+/H^+ 対向輸送体が重要な役割を果たしていることを示しています。さらに、この研究により、光合成生物が進化の過程で陸上に適応する際に、 Na^+/H^+ 対向輸送体から K^+/H^+ 対向輸送体へと分子を進化させて、環境に適応した背景があると考えられます(図 2)。

本研究は、東北大学大学院工学研究科の辻井雅助教、魚住信之教授、同大学大学院生命科学研究科の彦坂幸毅教授、日本女子大学の高木智子助手、永田典子教授、大阪公立大学の小口理一准教授、早稲田大学の園池公毅教授、中央大学の浅井智広准教授らと立命館大学との共同研究により行われました。

今後の展開

Na^+ は動物にとって不可欠な元素ですが、植物には不要であり、塩害の原因にもなるとされています。しかし、今回の研究により、植物葉緑体の祖先である藍藻が $NhaS1$ と $NhaS2$ を介して Na^+ を利用し、光合成を最適化することが明らかとなりました。この結果は、光合成の詳細なメカニズムの解明に役立つだけでなく、光合成生物による炭素固定や植物栽培技術の向上に貢献する基盤的知見を提供します。これにより、バイオ燃料の生産や農作物の収量向上といった応用が期待されます。

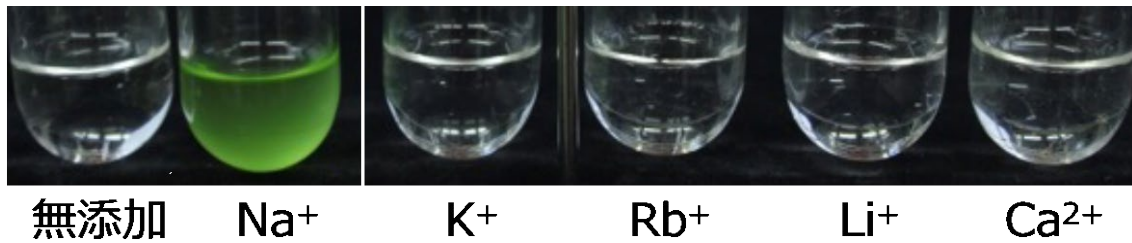


図 1. 強光条件下での藍藻の生育状況。無添加と Na^+ 、およびその他イオンを添加したものとの比較。 Na^+ を添加した培地では強光条件下でのみ藍藻の生育が確認され、他のイオン (K^+ 、ルビジウムイオン (Rb^+)、リチウムイオン (Li^+)、カルシウムイオン (Ca^{2+})) を添加した場合には生育は見られませんでした。強光条件下で藍藻が NhaS1 と NhaS2 を介して Na^+ を利用し、光合成を最適化することが示唆されました。

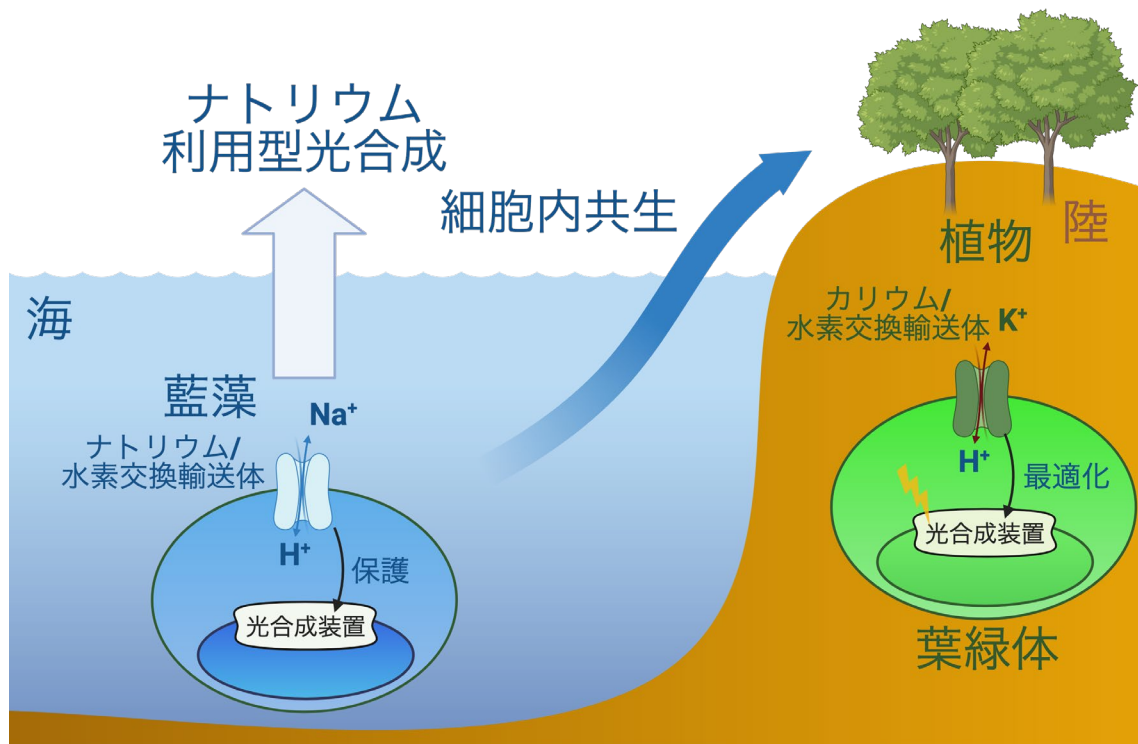


図 2. 藍藻は 10 億年前に細胞に共生して葉緑体になりました。藍藻は海水成分の Na^+ を利用して光合成装置を最適化します。

【謝辞】

本研究は、科研費 (JP20KK0127, JP21KK0268, JP22K19121, JP23K13862, JP24K08709, JP24H00295, JP24H02253, JP24H00495)、JST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2033) の支援を受けました。また、掲載論文は東北大学「令和 6 年度オープンアクセス推進のための APC 支援事業」により Open Access となっています。

【用語説明】

- 注1. 藍藻（らんそう）：藍色の藻類のことで、太陽エネルギーによって光合成を行う独立栄養生物。植物葉緑体の祖先であり、最近ではシアノバクテリア、または藍色細菌と呼ばれることも多い。
- 注2. Na^+/H^+ 対向輸送体: 細胞膜や細胞内小器官の膜を介してナトリウムイオン (Na^+) と水素イオン (H^+) を交換する輸送体で、生物界に広く保存されている。細胞内 pH、もしくは細胞内ナトリウムイオン濃度の調節に貢献する。
- 注3. NhaS1、NhaS2: 藍藻の *Synechocystis* sp. PCC6803 株が保持する膜タンパク質で、生体膜を介して Na^+ と H^+ を交換する機能をもつ。光合成の促進や強光からの保護に重要である。

【論文情報】

タイトル : Na^+ -driven pH regulation by Na^+/H^+ antiporters promotes photosynthetic efficiency in cyanobacteria

著者 : 辻井雅*、小林歩夢、狩野文香、解良康太、高木智子、永田典子、児島征司、彦坂幸毅、小口理一、園池公毅、浅井智広、稲垣知実、石丸泰寛、魚住信之

*筆頭著者 : 東北大学大学院工学研究科バイオ工学専攻 助教 辻井雅

掲載誌 : Plant Physiology (オープンアクセス)

DOI : 10.1093/plphys/kiae562

URL : <https://academic.oup.com/plphys/advance-article/doi/10.1093/plphys/kiae562/7834953>

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

東北大学大学院工学研究科バイオ工学専攻 教授 魚住信之

TEL: 022-795-7280 Email: uozumi@tohoku.ac.jp

(報道に関すること)

東北大学大学院工学研究科情報広報室 担当 沼澤みどり

TEL: 022-795-5898 Email: eng-pr@grp.tohoku.ac.jp

日本女子大学 法人企画部 広報課

TEL: 03-5981-3163 Email: n-pr@atlas.jwu.ac.jp

早稲田大学 広報室 広報課 担当 朝日貴大

TEL: 03-3202-5454 Email: koho@list.waseda.jp

中央大学 研究支援室

TEL: 03-3817-7423 FAX: 03-3817-1677

Email: kkouhou-grp@g.chuo-u.ac.jp