PRESS RELEASE

Saitama University 埼玉大学

令和 8 年 11 月 11 日

微細藻類の光合成の高温耐性を向上させることに成功
—高温に耐える有用物質・食料生産に向けて—

1 ポイント

■ **光合成の熱失活に活性酸素が直接関与することを解明**
高温下では光合成(1)の電子伝達系から活性酸素(2)が大量発生し、光化学系 II(PSII)(3) を直接破壊するとともに、そのタンパク質合成(4)を阻害することを突き止めました。

■ **抗酸化力とタンパク質合成能の二重強化で相乗効果を発揮**
活性酸素消去系酵素(SOD、カタラーゼ)(5)と、酸化に強い改変型翻訳伸長因子(EF-Tu)(6)を同時に過剰発現させることで、高温下でも PSII の構造破壊を防ぎつつ、PSII の修復(7)で主要な役割を果たす D1 タンパク質 (8)の合成を高く維持することに成功しました。

■ **過酷環境下でのバイオものづくりや農作物増産への道**
高温環境下での光合成活性と生存能力が飛躍的に向上することを実証。夏季の培養プールの水温上昇に伴う微細藻類の生育阻害を克服し、バイオ燃料や有用物質の安定生産、さらには農作物の耐熱性向上への応用が期待されます。

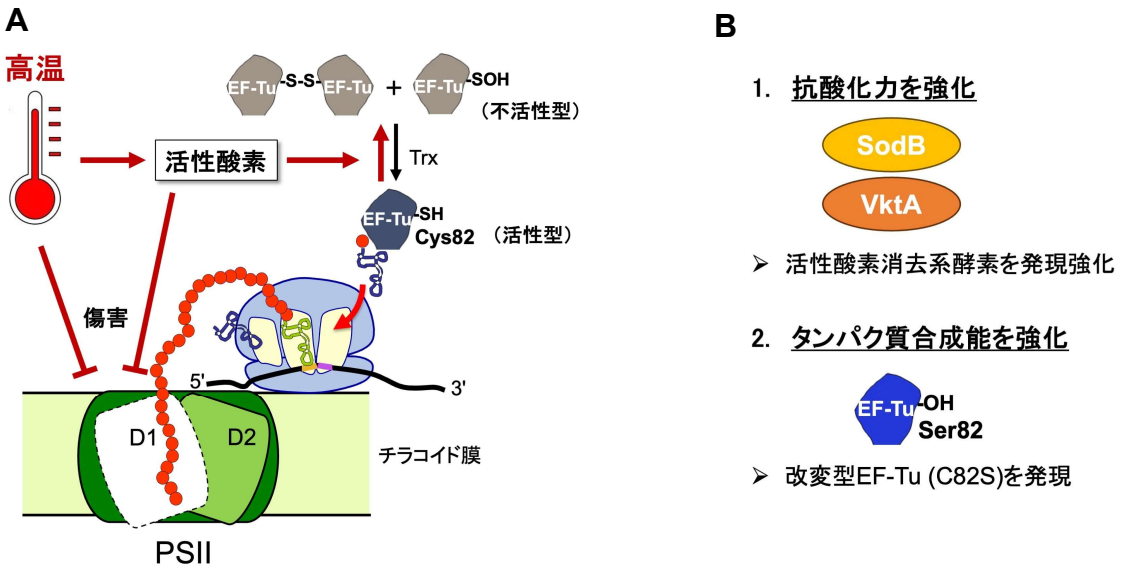


図 1. (**A**) 光化学系 II(PSII)の高温傷害と活性酸素の関係。(**B**) 抗酸化力とタンパク質合成能の同時強化による高温耐性の獲得方法。

2 概要

埼玉大学大学院理工学研究科の西山佳孝教授らの研究グループは、モデル微細藻類シアノバクテリア(9)を用いて、光合成における光化学系 II(PSII)の高温耐性を大幅に向上させる手法を開発しました。

光合成は熱に極めて弱く、高温ストレスを受けると PSII が速やかに失活します。本研究では、細胞内の活性酸素(ROS)を消去する酵素系と、熱で壊れた PSII を修復するためのタンパク質合成系(翻訳因子 EF-Tu)を同時に強化することで、PSII 自体の物理的な熱安定化と、迅速な修復サイクルの維持という「二重の保護」を実現しました。これにより、高温下での光合成活性低下を顕著に抑制し、細胞全体の生育・生存能を引き上げることに成功しました。

本成果は、2026 年 11 月 11 日付で植物科学関連の国際学術誌『*Plant and Cell Physiology*』のオンライン版で公開されました。

URL: https://academic.oup.com/pcp/article-lookup/doi/10.1093/pcp/pcag148

３ 研究の背景

光合成は、光エネルギーを利用して CO_2 から有機物を合成する生命活動であり、植物や微細藻類の生育およびバイオマス生産を支える根幹です。しかし、光合成は環境変化に非常に脆弱で、夏の猛暑や異常高温によって機能が著しく低下します。なかでも、水分解と酸素発生を担う PSII 複合体は熱に最も弱く、光合成全体の能力を制限する最大のボトルネックとなっていました。

これまで、PSII の光阻害（強光ストレスによる失活）については研究が進んでおり、生じた損傷を迅速に修復する「D1 タンパク質の合成・修復サイクル」が防御に不可欠であることが知られていました。一方、高温下では PSII 複合体自体が物理的に壊れるだけでなく、この修復サイクル自体も抑制されてしまうことが示唆されていましたが、その詳細な阻害機構や具体的な克服手段は未解明のままでした。

地球温暖化の加速に伴い、夏季の熱波による農作物の減収や、微細藻類を用いた屋外培養プールにおける水温上昇・生産効率低下が深刻な地球規模の課題となっています。このため、熱による光合成失活の根本原因を分子レベルで突き止め、高温下でも光合成を維持できる耐熱性生物の開発が求められていました。

４ 研究内容

4-1. 光合成の高温傷害における ROS の直接関与を発見

シアノバクテリア *Synechocystis* sp. PCC 6803 を通常生育温度（32℃）から高温（46℃）に曝露すると、野生株では光合成電子伝達系由来の ROS 発生量が約 4 倍に増加しました。タンパク質合成阻害剤を用いた解析により、熱ストレス下では ROS が PSII 複合体の構造破壊そのものを直接加速させるとともに、PSII の修復を阻害していることが判明しました。

4-2. 抗酸化力とタンパク質合成能の同時強化による相乗的保護

研究グループは、以下の *Synechocystis* 改変株を作出して比較解析を行いました。

- 活性酸素消去系酵素強化株（*sodB*+*vktA*）：スーパーオキシドディスムターゼ SodB およびビブリオ菌由来の高活性カタラーゼ VktA を過剰発現。
- 翻訳因子改変株（C82S）：ROS による酸化を受けないようシステイン残基[(10)]を変異させた翻訳伸長因子 EF-Tu[(6)]を発現。
- 二重強化株（C82S+*sodB*+*vktA*）：上記の両方を併せ持つ株。

その結果、二重強化株において 46℃下での PSII 熱失活が最も抑制されました。活性酸素消去系酵素が ROS 蓄積を大幅に減少させて PSII の構造崩壊を防ぎ、改変型 EF-Tu との相乗効果によって修復に不可欠な「D1 タンパク質」の新規合成能が野生株の約 1.6 倍に維持されることを確認しました。

4-3. 光合成活性と細胞生存率の大幅な向上

この相乗効果により、46℃環境下における全光合成活性（酸素発生能）の低下が大幅に緩和されました。さらに、持続的な高温ストレス条件（40℃）における長期培養試験では、野生株が白化・死滅する環境下でも、二重強化株は高い細胞密度を保ちながら長期間生存・増殖し続けることが確認されました。

５ 今後の展開

微細藻類を用いたバイオ燃料や高付加価値物質の屋外大量培養では、夏季の培養池の水温上昇が大きな生産阻害要因となっていました。本技術により、酷暑環境でも冷却コストを抑えつつ安定した高効率バイオ生産が可能になると期待されます。

さらに、光合成の PSII 複合体や翻訳機構（EF-Tu、D1 タンパク質）は、微細藻類から高等植物（農作物）に至るまで進化的に極めて高度に保存されています。本研究で実証された「抗酸化系と翻訳系の協調的強化」という基本原理をイネ、コムギ、大豆などの主要作物へ応用することで、地球温暖化に伴う熱波下でも収量が落ちない耐暑性作物の分子育種への展開が期待されます。

6 論文情報

雑誌名	*Plant and Cell Physiology*
論文名	Simultaneous reinforcement of the antioxidant defense and translational systems enhances the thermotolerance of photosystem II in *Synechocystis* sp. PCC 6803
	抗酸化系と翻訳系の協調的強化による *Synechocystis* sp. PCC 6803 の光化学系 II 高温耐性の向上
著者	Pornpan Napaumpaiporn, Rattanaporn Songserm, Anchalee Sirikhachornkit, Yoshitaka Nishiyama*(*責任著者)
DOI	10.1093/pcp/pcag148
URL	https://academic.oup.com/pcp/article-lookup/doi/10.1093/pcp/pcag148

7 研究支援

本研究は、文部科学省科学研究費助成事業・学術変革研究(A)ジオラマ行動力学領域(21A402)における計画研究「ジオラマ・パノラマ環境下における有害赤潮藻の集積アルゴリズムの解明」(21H05305)、及び 学術変革研究(A)光合成ユビキティ領域(23A305)における公募研究「赤潮形成藻シャットネラ属の光合成環境適応機構」(24H02066)、科学技術振興機構(JST)COI-NEXT「Bio-Digital Transformation(バイオ DX)産学共創拠点」(JPMJPF2010)、物質・デバイス領域共同研究拠点の支援を受けて行われました。

8 用語解説

(1) 光合成
光エネルギーを使って二酸化炭素と水から糖を生産する一連の反応。植物や藻類、シアノバクテリアなどの光合成生物にとって生存上欠かすことのできない重要な生命活動です。また、光合成によって作られた糖は、地球上のすべての生命の炭素源となっています。
光合成反応で生み出される酸素は、地球大気の約 21%を占め、人類を含む地球上の好気生物の呼吸を支えています。

(2) 活性酸素
反応性の高い酸素分子の一種。ROS(Reactive Oxygen Species)と略称されます。化学的に安定な酸素分子が電子や励起エネルギーを受け取ると、一部の電子の不対性を持つ不安定な状態に変化することがあります。これを活性酸素といい、タンパク質や核酸、脂質など様々な生体物質に酸化傷害を及ぼします。スーパーオキシド(・O_2^-)、過酸化水素(H_2O_2)、ヒドロキシルラジカル(・OH)、一重項酸素($^1O_2$)が代表的な活性酸素です。光合成が働くときには活性酸素が不可避的に発生します。捕集した光エネルギーを反応中心に移動する際や電子伝達反応の過程で発生します。

(3) 光化学系 II(PSII)
光合成の中で、光エネルギーを化学エネルギーに変換する最も重要な装置。チラコイド膜に存在しており、タンパク質 20 種類以上、クロロフィル約 40 分子、他にカロテノイドや脂質を含む巨大な分子複合体です。ここで太陽の光エネルギーが電子伝達の化学エネルギーへと変換されます。このエネルギー変換過程で酸素が発生します。

(4) タンパク質合成
翻訳とも言われます。タンパク質を合成する巨大な分子装置で起こります。タンパク質合成系(翻訳系)はリボソームや RNA 分子から構成されており、ここで mRNA の配列情報をもとにタンパク質が合成されます。

(5) 活性酸素消去系酵素
活性酸素を消去して無毒化する酵素。その代表的なものに、スーパーオキシドを過酸化水素に変換するスーパーオキシドディスムターゼ(SOD)や、過酸化水素を水に変換するカタラーゼ、ペルオキシダーゼがあります。

(6) EF-Tu
タンパク質合成系(翻訳系)を構成するペプチド伸長因子の一つ。アミノアシル-tRNA をリボソームの A サイトに運搬する役割を担っています。EF-G とともに、アミノ酸を一つずつ繋げてペプチドを形成する

ペプチド伸長反応を支えています。西山教授らの研究によって、EF-G とともに活性酸素の標的となって失活することが解明されました。

(7) PSII の修復
PSII は光阻害を受けやすく、強光下では容易に失活します。この現象は光阻害と呼ばれます。一方、生体内では失活した PSII は、速やかに修復されます。損傷を受けた反応中心の D1 タンパク質が分解され、転写・翻訳を経て新たに合成された D1 タンパク質が PSII に挿入されて、PSII が再活性化します。ただし、損傷と修復のバランスがとれているときは、光阻害は顕著には現れませんが、損傷の速度が修復の速度を上回ったとき、光阻害が起こります。光阻害に限らず、生物のからだの中では常に分解と合成が起こっています。

(8) D1 タンパク質
PSII の反応中心を構成する主要タンパク質。PSII の光エネルギー変換(電荷分離)は D1 タンパク質にあるクロロフィル分子で起こります。PSII が光で損傷を受けると、その初期に損傷を受け分解されます。しかし、修復サイクルが働き、D1 タンパク質は転写・翻訳を経て速やかに PSII 複合体に挿入されます。

(9) シアノバクテリア
植物葉緑体の祖先と考えられている原核性の光合成微生物。約 32 億年前に地球上に誕生し、酸素を発生する光合成を初めて行なったと考えられています。現在もほぼ昔の姿をとどめ、湖沼や海洋に生息しています。シアノバクテリアの一種 *Synechocystis* sp. PCC 6803 は、日本の研究グループ(かずさ DNA 研究所)によってゲノムが 1996 年に解読され、形質転換(遺伝子操作)も容易なことから、モデル生物として光合成研究などに世界中で利用されています。

(10) システイン残基
タンパク質を構成するアミノ酸の一つであるシステインの側鎖。システイン残基が酸化されると、2 つのシステイン残基間でジスルフィド結合が形成されたり、1 つのシステイン残基でスルフェン酸が形成されたりします。システイン残基の酸化還元で活性が調節されるタンパク質や酵素は数多くあります。