

令和 7 年 8 月 22 日

ペプチド伸長因子が光合成のストレス耐性の決定因子であることを解明 —植物のストレス応答の機構解明に向けて—

1 ポイント

- 植物は常に環境ストレスにさらされており、これが光合成活性を低下させる主要因となります。
- しかし、植物は光合成の活性を維持するために、特別なシステムを備えています。その核心は修復機構であり、そこではタンパク合成が重要な役割を果たします。
- 今回の論文では、タンパク質合成に関わる多くの因子の中でも、特にペプチド伸長因子の EF-G と EF-Tu が修復機構で決定的な役割を担っていることを明らかにしました。
- ペプチド伸長因子の働きを制御することで、農作物の高温耐性や紫外線耐性を高めるための応用研究への道が開かれます。

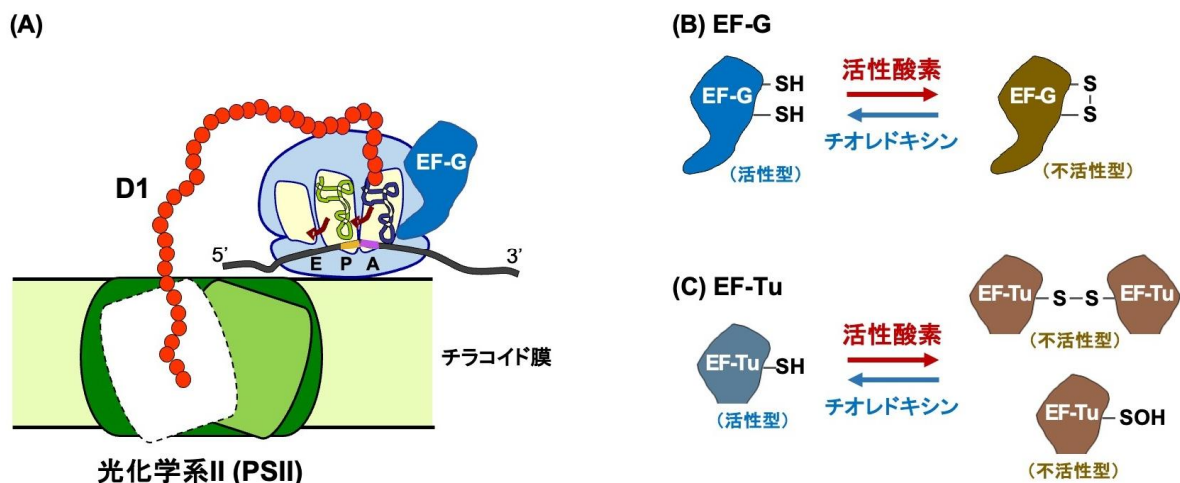


図 1. 光化学系 II (PSII) の修復とタンパク質合成系の酸化還元調節。(A) PSII の修復過程で、D1 タンパク質のペプチド鎖が伸長される様子。(B) ペプチド伸長因子 EF-G の酸化還元。(C) ペプチド伸長因子 EF-Tu の酸化還元。

2 概要

埼玉大学大学院理工学研究科の西山佳孝教授の研究グループは、光合成の環境ストレス耐性にペプチド伸長因子が重要な役割を果たすことを明らかにしました。

この研究では、タンパク質合成系を構成するペプチド伸長因子 EF-G および EF-Tu が酸化傷害を受けるメカニズムや、これらのペプチド伸長因子の酸化が光合成に与える影響が詳細に解明されました。

これらの重要な発見について、関連する知見とともに総説としてまとめられました。本成果は、光合成の環境ストレス応答機構の解明に向けた大きな一歩となることが期待されます。

本成果は、2025 年 8 月 21 日に Cell Press 刊行の植物科学専門誌『Trends in Plant Science』のオンライン版で公開されました。

URL: [https://www.cell.com/trends/plant-science/fulltext/S1360-1385\(25\)00199-2](https://www.cell.com/trends/plant-science/fulltext/S1360-1385(25)00199-2)

3 研究の背景

光合成は、光エネルギーを化学エネルギーに変換する反応で、植物や藻類など光合成生物にとって生存に不可欠な生命活動です。しかし、光エネルギー変換という役割とは逆に、強光に弱いという性質をもちあわせています。なかでも、光エネルギー変換で中心的な役割を担っている光化学系 II (PSII) は、光に対して感受性が高く、強光下では速やかに失活してしまいます。この現象は光阻害と呼ばれ、光合成生物の生育を妨げる大きな要因になっています。

光によって損傷を受けた PSII は、速やかに修復されます。修復の過程では、損傷を受けた反応中心 D1 タンパク質が速やかに分解され、その後、新たに合成された D1 タンパク質が PSII に挿入されて PSII が再活性化されます(図 1A)。PSII の光阻害は、PSII の損傷の速度がその修復の速度を超えた時に起こります。

一方、強光下では光化学系から大量の活性酸素が発生して、酸化ストレスが生じます。近年、当研究グループらの研究によって、活性酸素が PSII の修復を抑制して光阻害を促進させることが明らかになりました。活性酸素の発生は、低温ストレスなど他の環境ストレスでも誘導されるため、活性酸素による修復阻害は、様々な環境ストレスに共通した阻害要因だと考えられます。しかし、活性酸素がどのように PSII の修復を阻害するか、そのメカニズムは不明でした。

4 研究内容

4-1. PSII 修復における活性酸素の作用

光合成微生物シアノバクテリア *Synechocystis* sp. PCC 6803 を研究対象に、PSII の修復で中心的な役割を果たす D1 タンパク質の新規合成に着目して、活性酸素の作用機序を解析したところ、活性酸素は D1 タンパク質の合成をペプチド伸長過程で抑制していることがわかりました。また、D1 タンパク質だけではなく、ほとんどすべてのタンパク質の合成が活性酸素によって抑制されることから、タンパク質合成系そのものが活性酸素に感受性が高く、失活しやすいことが示唆されました。

4-2. タンパク質合成における活性酸素の作用

シアノバクテリアのタンパク質合成系を生化学的に解析したところ、2 種類のペプチド伸長因子 EF-G と EF-Tu が活性酸素の標的となり、失活しやすいことがわかりました。これらのペプチド伸長因子は、ともにタンパク質合成の中でペプチド鎖の伸長反応(翻訳伸長反応)を担うタンパク質です。

4-3. ペプチド伸長因子の酸化メカニズム

シアノバクテリアの EF-G は、分子内に 5 つのシステイン残基がありますが、そのうち 2 つのシステイン残基が酸化されると、分子内ジスルフィド結合を形成して失活することがわかりました(図 1B)。EF-Tu も、単独で存在するシステイン残基が酸化されると、分子間ジスルフィド結合またはスルフェン酸を形成して失活することがわかりました(図 1C)。これらの酸化型ペプチド伸長因子は、チオレドキシンによって還元され、再活性化されることもわかりました(図 1B,C)。このようにペプチド伸長因子の酸化失活は、可逆的な反応であることが考えられます。

4-4. ペプチド伸長因子の酸化と PSII 修復の関係

酸化標的システイン残基をセリン残基に改変した EF-G をシアノバクテリアで発現させたところ、強光下で D1 タンパク質合成と PSII 修復が促進され、PSII の光阻害が緩和されました。EF-Tu も同様に、その酸化標的システイン残基を改変したタンパク質をシアノバクテリアで発現させたところ、PSII 修復が促進され、PSII の光阻害が緩和されました。したがって、これらのペプチド伸長因子の特定のシステイン残基が酸化されると、PSII 修復が抑制され、PSII の光阻害が促進することが裏付けられました。

4-5. ペプチド伸長因子の酸化の生理学的意義

改変型 EF-Tu を発現させたシアノバクテリアでは、野生株に比べ強光下で活性酸素の発生が上昇し、生育阻害が生じました。これは、改変型 EF-Tu により PSII の修復能力が増強され、強光下でも電子伝達活性が高く維持されていたことが原因だとわかりました。したがって、酸化されやすいシステイン残基が EF-Tu に保持されていることにより、強光ストレス下で大量の活性酸素が発生しないように PSII 修復にブレーキをかけていることが推測されます。このような酸化標的システイン残基は、EF-Tu や EF-G の中に原

核生物から真核生物にまで高度に保存されています。

一方、強光環境に適応したシアノバクテリアでは、細胞内の EF-Tu 量が 2～3 倍に増えていました。EF-Tu 内に酸化されやすいシステイン残基を保持しながら(酸化還元調節を維持しながら)、その量を増やしてタンパク質合成能力を高めることは、環境変動に適応するための重要な生存戦略であると考えられます。

5 今後の展開

ペプチド伸長因子にあえて酸化されやすいシステイン残基を保持することによって、酸化ストレス条件下でタンパク質合成を一時的に抑え、その結果として光合成を抑制する仕組みが存在することが見えてきました。この仕組みは、環境ストレスに対して光合成の恒常性を維持するための安全弁(セイフティネット)として働いていることが考えられます。

一方、改変型 EF-Tu を発現させたシアノバクテリアをもとに、活性酸素消去系酵素の発現強化によって抗酸化能力を増強させると、活性酸素の発生量を低いレベルに保ちながら、PSII の強光耐性を増大させることに成功しました(埼玉大学プレスリリース、2023 年 11 月 21 日)。この“スーパーシアノバクテリア”は、強光下で高い増殖能力を有していました。この手法を、バイオ燃料など有用物質を生産するシアノバクテリア株や他の微細藻類に適用すれば、屋外環境など厳しいストレス条件下で有用物質の生産を促進させることが可能になると期待されます。また、この手法を農作物などに利用すると、その強光耐性や高温耐性、紫外線耐性などストレス耐性を高める技術開発に繋がると期待されます。

6 論文情報

雑誌名	<i>Trends in Plant Science</i>
論文名	Elongation factors regulate the repair of photosystem II oxido-reductively 翻訳因子の酸化還元による光化学系 II 修復の制御
著者	Yoshitaka Nishiyama*, Haruhiko Jimbo, Norio Murata (*責任著者)
DOI	10.1016/j.tplants.2025.07.006
URL	https://www.cell.com/trends/plant-science/fulltext/S1360-1385(25)00199-2

7 研究支援

本研究は、文部科学省科学研究費助成事業(科研費)学術変革領域研究(A)「あらゆる地球環境で光合成を可能とする超分子構造制御(光合成ユビキティ)」(24H02066)、科研費・学術変革領域研究(A)「ジオラマ環境で覚醒する原生知能を定式化する細胞行動力学(ジオラマ行動力学)」(21H05305)、科研費・基盤研究(C)(22K06259)、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、大気の約 21%を占める酸素層を形成しており、人類を含む地球上のすべての好気生物の呼吸を支えています。

(2) 光化学系 II

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。

(3) 光阻害と修復

光化学系 II 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光化学系 II 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 タンパク質が光化学系 II に挿入されて、光化学系 II が再活性化します。ただし、修復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。

(4) タンパク質合成系

翻訳系とも言われます。タンパク質を合成する巨大な分子装置。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) EF-Tu

タンパク質合成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。

(6) EF-G

タンパク質合成系を構成するペプチド伸長因子の一つ。ペプチジル-tRNA をリボソームの A サイトから P サイトに移行させる役割を担っています。EF-Tu 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。

(7) 酸化還元

化学反応において、物質間で電子のやり取りが行われる現象のことです。ある物質が電子を失う変化が「酸化」、同時に別の物質が電子を得る変化が「還元」と呼ばれます。

(8) 活性酸素

反応性の高い酸素分子の一種。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、一部の電子の不对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($\cdot\text{O}_2^-$)、過酸化水素(H_2O_2)、ヒドロキシラジカル($\cdot\text{OH}$)、一重項酸素($^1\text{O}_2$)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免的に発生します。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。

(9) システイン

タンパク質を構成するアミノ酸のひとつ。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。

(10) チオレドキシン

ほぼ全ての生物に存在する低分子量の酸化還元タンパク質。標的となるタンパク質や酵素のシステイン残基間に形成されたジスルフィド結合を還元して、そのタンパク質・酵素を活性化したり、不活性化したりします。生体内では非常に重要な役割を果たす多機能なタンパク質として知られています。

(11) 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 27 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)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。

9 問い合わせ

(研究について)

埼玉大学大学院理工学研究科

担当教員 西山 佳孝(ニシヤマ ヨシタカ)

環境応答研究室ウェブサイト:

<https://park.saitama-u.ac.jp/~kankyo/nishiyama/index.html>