

2024年2月27日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

イネ科植物が太陽紫外線の下で生き抜くために 独自に獲得した仕組みを解明

【発表のポイント】

- 植物にとって、太陽紫外線 UV-B^(注1)による DNA 損傷（シクロブタン型ピリミジン二量体：CPD）を修復する機能をもつ CPD 光回復酵素^(注2)は必須のタンパク質です。
- イネは、CPD 光回復酵素の N 末端領域の 7 番目のセリンのリン酸化状態を制御することにより、同酵素を葉緑体に輸送していることを発見しました。
- 維管束植物^(注3)のうちイネ科植物のみが、CPD 光回復酵素を葉緑体に輸送して DNA 修復を行う仕組みを、太陽紫外線の下で生き抜くための適応戦略の一つとして獲得したことを明らかにしました。

【概要】

植物は、太陽光に含まれる紫外線 B（UV-B）による障害を、様々な仕組みで修復しながら生きています。CPD 光回復酵素は、UV-B による障害の中でも、植物の生育に最も悪影響を及ぼす DNA 損傷を修復するタンパク質です。

東北大学大学院生命科学研究科の大竹桃大学院生（学際高等研究教育院 博士教育院生）、日出間純准教授らの研究グループは、イネの CPD 光回復酵素は N 末端領域 7 番目セリンのリン酸化状態を制御することで、葉緑体への輸送を調節していることを明らかにしました。さらに、維管束植物の中ではイネ科植物のみが、CPD 光回復酵素を葉緑体に輸送して DNA 修復を行う仕組みを有していました。これらの結果から、進化の過程でイネ科植物が、太陽光の下で生存するために、CPD 光回復酵素を葉緑体に輸送する仕組みを適応戦略の一つとして独自に獲得したことが示唆されました。

本研究成果は、各細胞小器官へのタンパク質輸送の新たな仕組みを解明すると同時に、様々な光環境下で生育する植物における、UV-B 防御・生存適応戦略の仕組みの新たな理解をもたらすものです。本研究成果は、2024年2月12日に植物生理学の専門誌 Plant Physiology に掲載されました。また、本論文は、Plant Physiology の News and Views にも取り上げられ紹介されました。

【詳細な説明】

研究の背景

太陽光を浴びて生きる植物は、可視光線だけでなく、エネルギーが高く、DNAに重篤な損傷を与える紫外線B (ultraviolet-B: UV-B, 280-315 nm) も同時に浴びています。皮膚がんを誘発することで知られるシクロブタン型ピリミジン二量体 (cyclobutane pyrimidine dimer: CPD) は、UV-Bにより誘発される代表的なDNA損傷であり、その蓄積は植物の生育障害を引き起こします。

植物は、誘発されたCPDをCPD光回復酵素により修復する機能をもっており、この酵素は太陽光の下で生きる植物にとって必須のタンパク質です。植物は、細胞内の核、ミトコンドリア、葉緑体のそれぞれの細胞小器官に独自のDNAを持ち、UV-Bを浴びることでこれら全てのDNA上にCPDが誘発されます。これまでの解析から、イネが持つCPD光回復酵素の遺伝子は核ゲノムに1コピーでコードされ、発現後、DNAを有する全ての細胞小器官である、核、ミトコンドリア、葉緑体に輸送され機能するという、非常に珍しいタンパク質であることを見出しました (参考文献1)。さらに各細胞小器官への輸送を調節する仕組みの解析により、核とミトコンドリアへの標的配列^(注4)は同定されましたが (参考文献2)、葉緑体への標的配列並びに輸送調節の仕組みは不明でした。

今回の取り組み

本研究では、体系的に作製した欠失変異体を用いて、イネのCPD光回復酵素の葉緑体標的配列の探索と輸送の仕組みを解析しました。その結果、イネのCPD光回復酵素について、①葉緑体標的配列はN末端領域に存在すること、②小胞体を経由した小胞輸送を介して葉緑体へ輸送されること、③小胞体の経路には、N末端7番目のセリン残基と隣接する疎水性アミノ酸プロリン残基が重要なアミノ酸であること、④葉緑体への輸送は、N末端7番目のセリン残基のリン酸化状態により調節されていることが明らかになりました (図1)。

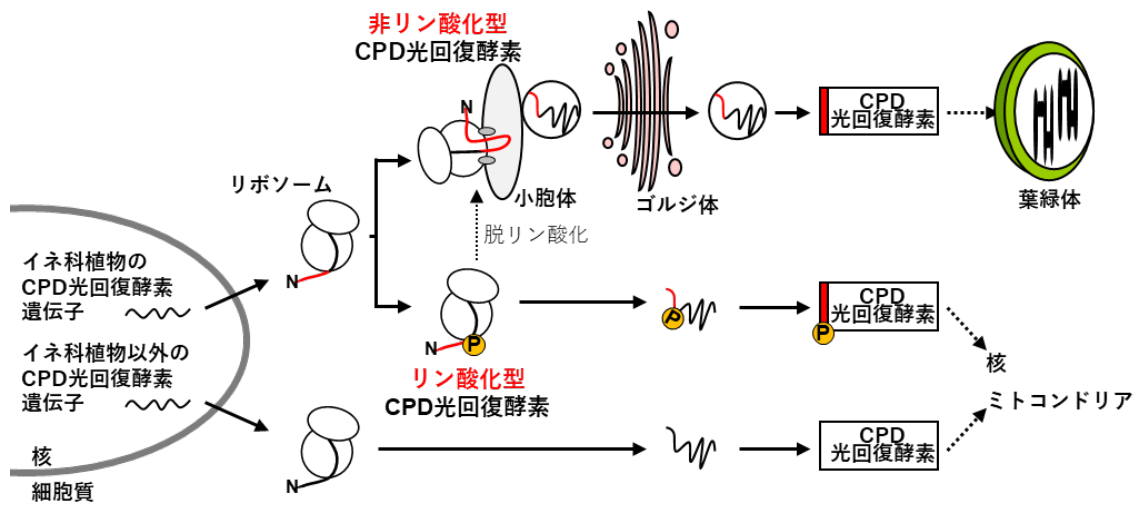


図 1. CPD 光回復酵素の各小器官への輸送の仕組み
赤線：疎水性アミノ酸の多い N 末端領域、P：リン酸化

さらに、イネの CPD 光回復酵素と様々な維管束植物の CPD 光回復酵素のアミノ酸配列と比較したところ、本研究で特定された葉緑体標的配列は、イネ科植物では高度に保存されているものの、他の植物では保存されていないことが判明しました。そこで、種々の維管束植物の持つ CPD 光回復酵素の葉緑体局在解析を行った結果、イネ科植物のみが、CPD 光回復酵素を葉緑体に輸送して、DNA を修復する機能を有することで UV-B 抵抗性を獲得していることが明らかになりました (図 2)。

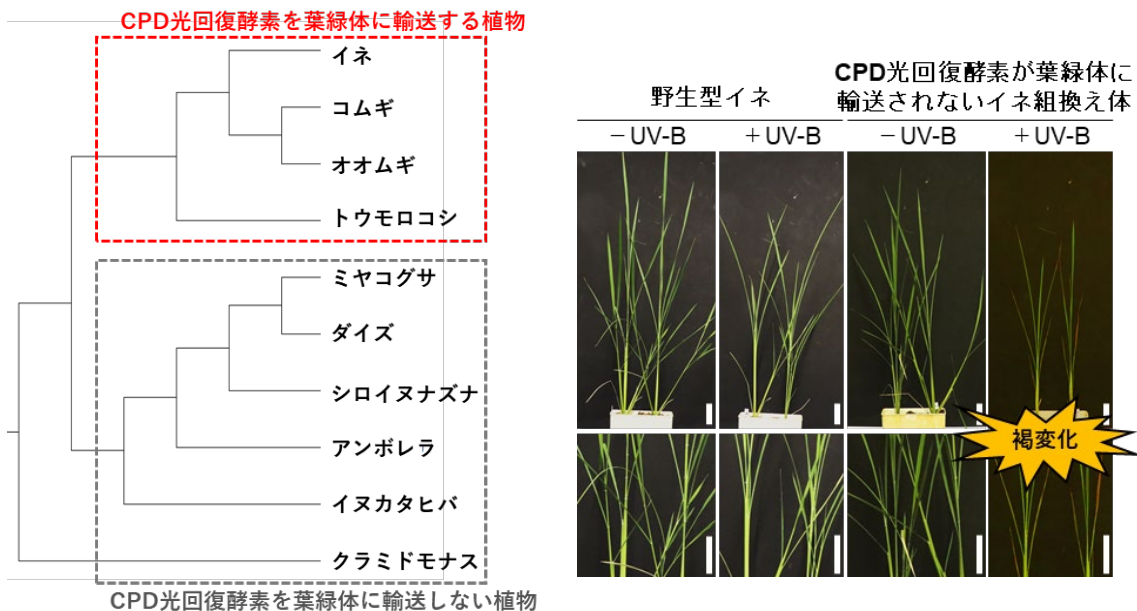


図 2. CPD 光回復酵素のアミノ酸配列による系統樹と CPD 光回復酵素による葉緑体 DNA 修復の重要性

今後の展開

イネの CPD 光回復酵素のように、核、ミトコンドリア、葉緑体という 3 つの細胞小器官に輸送されて機能する酵素は、生物の中でも大変希有なタンパク質です。どのような仕組みで 3 つの細胞小器官への輸送が調節されているのか、この調節機構の全容解明は、人工的にタンパク質を数か所の器官に輸送させる技術へと応用されることが期待されます。

また、植物は進化の過程で様々な環境変化に適応するための、様々な仕組みを獲得することで生育地を広げてきました。本研究で発見した結果は、UV-B によって葉緑体 DNA に生じた損傷を修復する仕組みを獲得することが、イネ科植物が太陽光の下で生き抜くために必要であったことを意味します。

したがって、本研究成果は、植物が進化の過程で様々な環境で生き抜くための適応の仕組みを理解する上で、太陽紫外線環境は重要な環境要素であることが示されました。一方で、CPD 光回復酵素が葉緑体に輸送されない多くの植物は、どのような仕組みで太陽紫外線を防御して生きているのか、未だ明らかにされていない新たな紫外線防御の仕組みがあると考えられます。この新たな仕組みの解明は、更なる植物の環境適応戦略の仕組みの理解、そして激変することが危惧される未来環境での植物育成技術の確立へと繋がることを期待されます。

【謝辞】

本研究は、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム (JPMJSP2114) 並びに JSPS 科研費 (JP21H05665, JP20H04330) の支援を受けて行われました。

【参考文献】

1. M. Takahashi et al. (2011) Cyclobutane pyrimidine dimer (CPD) photolyase repairs ultraviolet-B-induced CPDs in rice chloroplast and mitochondrial DNA. *The Plant Journal* 66, 433-442.
2. S. Takahashi et al. (2014) Transport of rice cyclobutane pyrimidine dimer photolyase into mitochondria relies on a targeting sequence located in its C-terminal internal region. *The Plant Journal* 79, 951-963.

【用語説明】

注1. 紫外線 B (ultraviolet-B: UV-B)

太陽光の一部であり、280-315 nm の波長の光。UV-B の大半はオゾン層に吸収されるが、一部は地上に届く。一般的に短波長の光ほど生体への影響が強く、UV-B による DNA 損傷の蓄積は、ヒトでは皮膚がん、植物では生育障害の主な原因となる。

注2. CPD 光回復酵素

紫外線によって誘発される DNA 損傷の 1 つであるシクロブタン型ピリミジン二量体 (CPD) を特異的に修復する酵素である。この酵素は有胎盤哺乳類を除くすべての生物が保有する酵素であり、青色光を利用して修復する。紫外線を含む太陽光の下で生きる植物にとって、重要な酵素である。

注3. 維管束植物

通道組織である維管束をもつ植物の総称。種子植物やシダ植物が含まれ、高等植物とも呼ばれる。

注4. 標的配列

細胞内で合成されたタンパク質が特定の細胞内小器官に特異的に輸送されるための情報を含むアミノ酸配列。

【論文情報】

タイトル : *Poaceae* plants transfer cyclobutane pyrimidine dimer photolyase to chloroplasts for ultraviolet-B resistance

著者 : Momo Otake, Mika Teranishi, Chiharu Komatsu, Mamoru Hara, Kaoru Okamoto Yoshiyama, Jun Hidema*

*責任著者 : 東北大学大学院生命科学研究科 准教授 日出間純

掲載誌 : *Plant Physiology*

DOI : 10.1093/plphys/kiae060

URL : <https://doi.org/10.1093/plphys/kiae060>

【紹介記事】

Plant Physiology News and Views : <https://doi.org/10.1093/plphys/kiae094>

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

東北大学大学院生命科学研究科

准教授 日出間純

TEL: 022-217-5690

Email: jun.hidema.e8@tohoku.ac.jp

(報道に関すること)

東北大学大学院生命科学研究科広報室

高橋さやか

TEL: 022-217-6193

Email: lifsci-pr@grp.tohoku.ac.jp