

2026年3月10日

## シアノバクテリアの「SOS 応答」に潜む予期せぬ多様性 —DNA 修復の司令塔 LexA が辿った進化の分かれ道—

### 1 ポイント

・シアノバクテリアの DNA 修復制御が多様化していることを発見：多くの細菌は、紫外線照射などにより DNA が傷つくと、DNA 修復酵素の遺伝子などを速やかに発現誘導する「SOS 応答」と呼ばれる緊急システムを起動します。本研究では、地球の大気に酸素をもたらした最古の光合成生物であるシアノバクテリアにも SOS 応答が存在するものの、緊急システムとしては働いておらず、その制御方法が多様化していることを明らかにしました。

・LexA に依存した SOS 応答がゆっくりと起動：原始的な種である *Gloeobacter violaceus* PCC 7421 と、糸状性モデル種の *Anabaena* sp. PCC 7120 は、他の細菌と同様、SOS 応答のスイッチとして LexA 転写因子を使っているものの、応答が顕著になるまでに数時間を要することを見出しました。

・LexA が転職した種でも、SOS 応答が起動：一方、単細胞性モデル種の *Synechocystis* sp. PCC 6803 では、LexA が紫外線ストレスに反応しないにも関わらず、DNA 修復遺伝子は他の種と同等以上に発現誘導されることを見出しました。この種では LexA は転職して他の細胞機能の調節に働き、未知の転写因子が SOS 応答のスイッチとして働いていると考えられます。

・砂漠緑化や宇宙開拓の夢を支える分子基盤へ：これらの SOS 応答に関する知見を活用し、シアノバクテリアの紫外線耐性を高めて、過酷な環境に耐え得る種を作出できれば、有用物質の大量生産、砂漠の緑化や、さらに他惑星の環境を改造するテラフォーミングなど、壮大な応用利用にも向けた分子基盤の構築につながります。

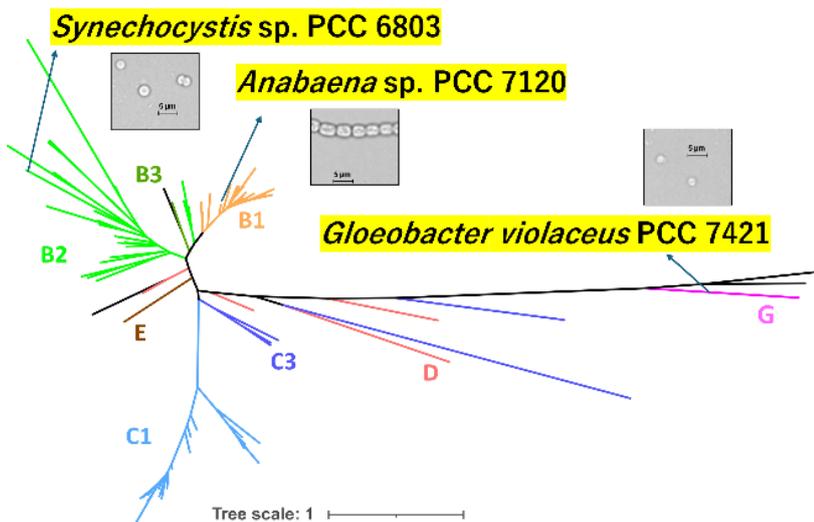


図 1. シアノバクテリア LexA の分子系統樹

LexA タンパク質の系統関係は、アルファベットと色分けで示したシアノバクテリアの種のグループ分けとほぼ一致しており、シアノバクテリアの種分化の過程で、LexA の機能分化も進んだと考えられます。*Anabaena* の LexA と、始原的な種である *Gloeobacter* の LexA は系統樹上で大きく離れた位置に存在しますが、両者とも SOS 応答の制御に働く一方、*Anabaena* の LexA と系統樹上でそれほど隔たっていない *Synechocystis* の LexA は「転職」し、SOS 応答以外の細胞機能の調節を担っていると考えられます。

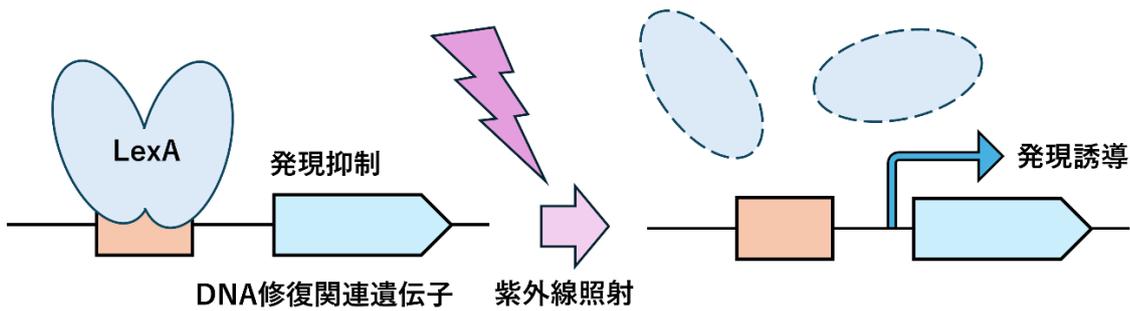


図 2. SOS 応答のスイッチとして働く LexA

多くの細菌において、ストレスのない通常条件下で、LexA は DNA 修復遺伝子など SOS 応答に関わる遺伝子群の上流領域に結合し、その発現を抑えています。紫外線照射などにより DNA が大きく傷つくと、LexA は自ら切れて不活化し、発現抑制されていた遺伝子群が一斉に発現誘導されます。本研究で用いた 3 種のシアノバクテリアのうち、*Anabaena* と *Gloeobacter* の LexA は、このような SOS 応答のスイッチとして働いていると考えられますが、紫外線照射後に LexA 量が減少し、発現抑制されていた遺伝子群が誘導されるまでに数時間を要します。「自ら切れる」分子機構が働いているかどうかはまだ明らかになっていません。

## 2 概要

多くの細菌では、紫外線や薬剤により DNA が傷つくと、DNA 修復遺伝子の発現が速やかに誘導される「SOS 応答」と呼ばれる緊急システムが起動すること、転写因子 LexA がそのスイッチとして働くことが知られていますが、地球の大気に酸素をもたらした最古の光合成生物であるシアノバクテリアについては、SOS 応答の実態は不明でした。

埼玉大学大学院理工学研究科の日原由香子教授の研究グループは、3 種類のシアノバクテリアに紫外線を照射した後の応答を比較することで、シアノバクテリアでは SOS 応答がゆっくり起動されること、またその調節方法が多様化しており、LexA をスイッチとして使う種がいる一方で、LexA を使わずに SOS 応答を起動する種もいることを明らかにしました。本成果は、シアノバクテリアの紫外線耐性を人為的に高め、過酷な環境に耐え得る種を作出し、応用利用するための分子基盤の構築につながると期待されます。

本成果は、2026 年 3 月 3 日に米国植物生理学会誌『Plant Physiology』のオンライン版で公開されました。

URL: <https://doi.org/10.1093/plphys/kiag102>

## 3 研究の背景

多くの細菌は、紫外線や薬剤で DNA が大きく傷つくと、壊れた DNA を早く直して生き延びるために、DNA 修復に関わる酵素などの遺伝子を速やかに発現させる「SOS 応答」と呼ばれる緊急システムを起動します。細菌間に広く保存されている LexA 転写因子がこの応答のスイッチとして働くことが知られています。ストレスのない通常条件下では、LexA は SOS 応答に関わる遺伝子群の上流領域に結合し、リプレッサーとしてその発現を抑えています。DNA が損傷すると LexA は自ら切れて不活化し、その結果として抑制されていた遺伝子群が一斉に発現誘導されるのです。

一方、オゾン層がない時代から、光合成を行うために、強い紫外線と向き合ってきたシアノバクテリアは、さまざまな紫外線防御機構を発達させたり、ゲノム DNA のコピー数を増やしたり

## PRESS RELEASE

して、高い紫外線耐性を獲得してきたと考えられていますが、その SOS 応答の実態は不明でした。

### 4 研究内容

本研究では、分子生物学研究のモデル種として用いられている単細胞性の *Synechocystis* sp. PCC 6803 と糸状性の *Anabaena* sp. PCC 7120 に加え、シアノバクテリアの系統樹の根元に位置する原始的な *Gloeobacter violaceus* PCC 7421 の 3 種のシアノバクテリアを選び、紫外線 (UV-C、UV-B) 照射後の LexA タンパク質量の変化と、全遺伝子レベルでの発現変動を比較しました。

*Anabaena* と *Gloeobacter* では、紫外線照射後に LexA が減少し、それに伴い DNA 修復遺伝子が発現誘導されたことから、これらの種では他の細菌と同様、LexA が SOS 応答のリプレッサーとして機能していることが明らかになりました。ただし、LexA の減少と DNA 修復遺伝子の誘導が顕著になるまで、3 時間近くを要することから、シアノバクテリアは SOS 応答を緊急システムとして使用していないと考えられます。また、この誘導の遅さが、シアノバクテリアにおいてこれまで SOS 応答が報告されていなかった一因であると考えられます。

一方、*Synechocystis* の LexA は、自ら切れて不活化するために必要なアミノ酸残基が、他のアミノ酸に置換されており、紫外線を当てても LexA の量は減少しませんでした。しかし、それにも関わらず DNA 修復遺伝子は顕著に誘導されたため、別の転写因子が SOS 応答のスイッチとして働いていると考えられました。

ストレスのない通常条件下では、*Anabaena* と *Gloeobacter* の *lexA* 遺伝子は、他細菌と同様、LexA 自身によってその発現が抑制されていることが、本研究から明らかになりました。一方、*Synechocystis* の *lexA* 遺伝子は、通常条件下において光合成関連マスター転写因子である RpaB により発現誘導されることをこれまでに明らかにしています。通常条件下で自己抑制することも、紫外線照射下で不活化されることもない *Synechocystis* の LexA は、SOS 応答ではなく、細胞運動、水素生産、塩ストレス耐性、脂肪酸合成など他の様々な細胞機能の制御に関わることが、これまでの研究から示されています。

### 5 今後の展開

本研究で得られた知見は、シアノバクテリアの増殖が比較的ゆっくりであること、さまざまな紫外線防御メカニズムを備えていること、ゲノム DNA が複数コピー存在することなどの理由から、LexA をスイッチとする SOS 応答を緊急システムとして使う必要性が低く、その分 LexA が別の細胞機能の制御に「転職」しやすい進化の余地があった可能性を示しています。

今後、*Anabaena* と *Gloeobacter* の LexA が紫外線照射後に減少する分子機構を明らかにすること、これらの株で紫外線照射時に高発現する遺伝子の機能を解析すること、また *Synechocystis* において SOS 応答のスイッチとして働く転写因子を明らかにすることで、シアノバクテリアの紫外線耐性を人為的に高める設計指針を得ることができます。高い紫外線耐性を有し、過酷な環境に耐え得る種を作出できれば、有用物質の大量生産、砂漠の緑化や、さらに他惑星の環境を改造するテラフォーミングなど、壮大な応用利用にも向けた分子基盤の構築につながると期待されます。

## 6 論文情報

掲載誌	Plant Physiology
論文名	The SOS response and functional diversification of the transcription factor LexA in cyanobacteria.
著者名	Haruka Kubodera, Hiroki Inoue, Aoi Ando, Tomoko Takahashi, Yukako Hihara
DOI	10.1093/plphys/kiag102
URL	<a href="https://doi.org/10.1093/plphys/kiag102">https://doi.org/10.1093/plphys/kiag102</a>

## 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）」（JP23H04962）の支援を受けて行われました。

## 8 用語解説

### （1）シアノバクテリア

植物と同じ酸素発生型の光合成を行う細菌で、約 27 億年前に地球上に出現し、光合成を開始したことで、酸素に富む現在の地球大気が形成されました。植物の葉緑体の祖先とも考えられており、地球の生命史上、重要な役割を果たしてきた生物とも言えます。地球上の至るところに生息域を広げて現在も繁栄しており、その光合成能の高さと増殖の速さ、環境耐性の高さなどから、有用物質生産や砂漠緑化などの応用利用に適した生物として注目を集めています。

### （2）遺伝子発現

DNA に書かれた遺伝情報をもとに、タンパク質などの機能を持つ物質を作り出す一連の過程を指します。この過程では、DNA の遺伝情報をメッセンジャーRNA (mRNA) に写し取り（転写）、その mRNA の情報を基にリボソームでアミノ酸が連結されてタンパク質が合成されます（翻訳）。

### （3）転写因子

DNA の遺伝情報を mRNA に写し取る「転写」を調節するタンパク質の総称で、DNA 上の特定の配列に結合して、転写酵素である RNA ポリメラーゼの働きを助けたり（活性化）、妨げたり（抑制）することで遺伝子発現を制御します。特定の遺伝子の発現を増減させることで、細胞の機能や発生を制御する重要な役割を担っています。転写の活性化に働く転写因子をアクチベーター、抑制に働く転写因子をリプレッサーと呼びます。

### （4）SOS 応答

DNA が強く傷ついたときに、DNA 修復に関わる多くの遺伝子の発現を一斉にオンにする、細菌に広く見られる緊急システムです。

## PRESS RELEASE



### (5) LexA

多くの細菌において、DNA 修復遺伝子など SOS 応答に関わる遺伝子群の発現を抑制する転写因子（リプレッサー）であり、DNA 損傷時には自分自身を切断して不活化し、それまで発現が抑制されていた遺伝子群が一斉に発現するスイッチとして機能します。