

令和7年2月6日

植物が自ら天気予報！？

夜間の低温を感知して夜明けの光応答を促進する

—センサ分子によって夜明け前後で誘導される植物の新奇プライミング機構を発見—

■本研究のポイント

- 植物は光に反応して気孔を開く気孔開口や、光に向かって伸長する光屈性などの光応答^(注1)を日々誘導することで(図1)、周囲の光条件に合わせて光合成効率を最適化します。
- 本研究では、植物の青色光と温度のセンサタンパク質であるフォトトロピン2 (phot2) が夜間の低温を感知することで、夜明けの青色光応答を促進することを明らかにしました。
- 晴れた夜には放射冷却^(注2)によって地表付近の気温が下がるため、夜の低温を感知した植物は夜明け後に晴れると予測し、夜明け後の光合成を活発に行うために青色光応答を促進する「低温誘導性のプライミング」を示したと考えられます(図1)。

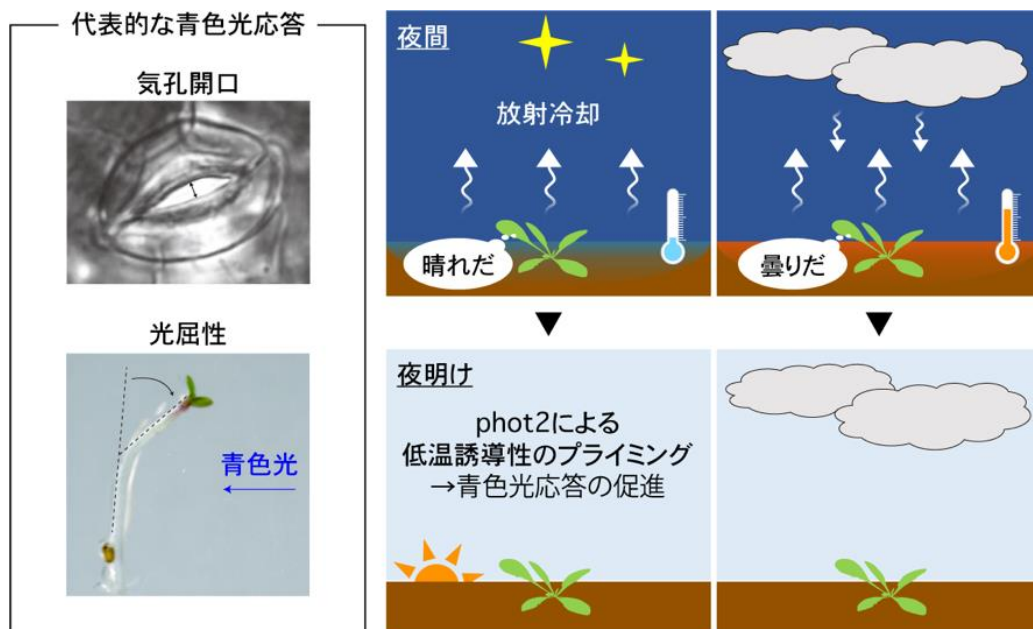


図1. 植物は夜間の低温を感知し、phot2 を介して夜明けの青色光応答を促進する。夜明けの青色光応答を夜間に準備する低温誘導性のプライミングは、植物の“天気予報能力”とも言える仕組みである。

■研究概要

環境の変化を予測し、それに先立って生理的な準備を整えることは、地球上の生物が最適な成長と生存を維持するために重要です。このたび、モデル植物であるシロイヌナズナにおいて、フォトトロピン2 (phot2) というセンサタンパク質が夜間の温度を感知してプライミング（生理的準備）を引き起こし、夜明け後の青色光応答を調整する上で重要な役割を果たすことが明らかとなりました。本研究は、宇都宮大学バイオサイエンス教育研究センターの児玉豊教授を中心とする研究グループによって実施されました。メンバーには同大学大学院地域創生科学研究科博士後期課程3年の野口穂氏、博士前期課程2年の慶野壱星氏、研究支援者の高橋ひとみ氏（研究当時）、藤澤麻美特任技術職員が名を連ね、共同研究者として山口大学の山内翔太博士（現在東京理科大学助教）、武宮淳史准教授、日本工業大学の芳賀健教授、新潟大学の酒井達也教授が参加しました。本研究成果は2025年1月30日付で *Journal of Experimental Botany* に掲載されました。

■研究背景

生物は、予測可能な環境変化に対して前もって生理反応を調節する機構をもちます。この機構のことをプライミングと呼び、光や温度などの環境因子はプライミングを誘導する代表的な要因のひとつです。

生物は周囲の環境を感知するために複数のセンサを利用します。植物の青色光センサのフォトトロピン (phot) は、青色光を感知して気孔開口、光屈性、葉緑体定位運動などの青色光応答を誘導します。太陽光には様々な波長（色）の光が含まれますが、夕焼けのように、大気の影響を受けて地上に届く光の波長が限定される時間が存在します。夜明けは青色光が優先的に地表に届くため、1日の中で phot が最も力を発揮すると予想されます。

児玉教授らは過去の研究で、葉緑体定位運動を制御する際に phot が低温センサとしても機能することを発見しました (Fujii et al. 2017 PNAS [<https://doi.org/10.1073/pnas.1704462114>])。植物を取り巻く気温は天気や日の出と連動して上下しますが、phot はこうした青色光と気温の変動を同時に感知することが可能です。そこで研究グループは、1日の気温変化が引き金となる植物のプライミング機構に phot が関与するという仮説を立てました。

■研究成果

まず、青色光応答における気温に依存したプライミング機構の存在を明らかにするために、phot の活性が最も高くなると予想される夜明けを模した環境でシロイヌナズナを栽培し、夜間の気温が夜明けの青色光応答に及ぼす影響を解析しました。その結果、青色光照射前に暗所下で低温処理を行うと、気孔開口と光屈性が促進されることが判明しました。

(図2)。事前の暗所低温処理が後に続く常温下の青色光応答を促進したことから、この反応は低温誘導性のプライミングの一種であると考えられます。

次に、シロイヌナズナがもつ2つの phot (phot1, phot2) のうち、どちらの phot が低温誘導性のプライミングに関わるのかを明らかにするために、変異体解析^(注3)を行いました。phot1 または phot2、もしくはその両方を欠損した変異体を解析したところ、phot2 が低温誘導性のプライミングに關与する

ことがわかりました。この結果は、葉緑体定位運動を制御する際に phot2 が低温センサとして機能するという過去の結果と合致します (Fujii et al. 2017 PNAS)。phot2 は葉緑体定位運動以外の青色光応答に対しても低温センサとして機能することが示唆されました。

さらに、暗所低温処理の後に1時間の暗所常温処理を加えたところ、低温誘導性のプライミングが打ち消されました。試験管内での解析からは、温度感知に必要な時間は1分足らずであることもわかりました。このことから、低温誘導性のプライミングには夜明け直前の気温が重要であり、phot2 が温度を感知することで可逆的に制御されることが示唆されました。

過去に報告された低温誘導性の植物のプライミングはいずれも数日間～数ヶ月間の反応期間を要します。phot2 を介した低温誘導性のプライミングは1分足らずの短時間で低温感知が完結するという点で、これまでに報告された低温誘導性のプライミングとは異なる特徴をもつ新奇の環境応答機構であると言えるでしょう。本研究成果は、将来、青色光応答の調節を利用した農作物の生産性向上など、持続可能な農業技術の確立に役立つ可能性があります。

一般に、晴れた日は植物に降り注ぐ日射量が増えますが、放射冷却の影響で夜間の気温は低下します。逆に、昼間の日射量が減る曇りの日の夜は、放射冷却が抑えられ、夜間の気温が低下しません。このように、植物の光合成に重要な昼間の日射量は夜間の気温と連動します。低温誘導性のプライミングは、夜明け直前の気温をもとに夜明けの日射量（雲の量）を予測し、青色光応答を調節することで光合成効率の最適化に寄与すると考えられ

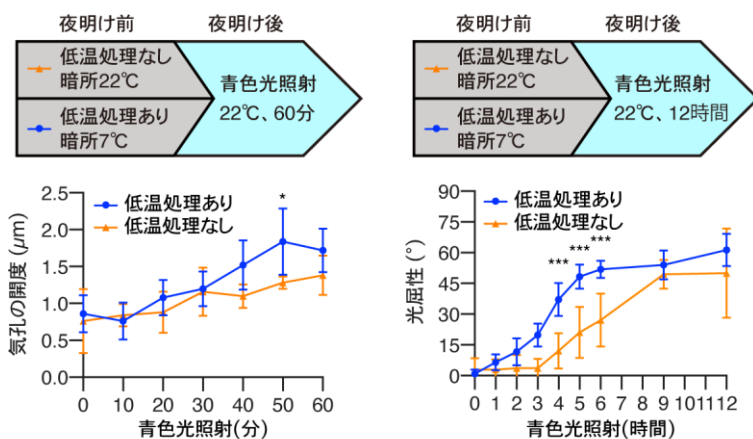


図2. 暗所低温処理は、後に続く明所常温での青色光応答を促進する。

ます。言い換えれば、植物は夜の気温を感知して夜明けの青色光応答を準備する“天気予報能力”を備えることが示唆されました。

■今後の課題

植物を取り巻く環境は不均一かつ連続的に変動します。変動環境に対する植物の適応機構を解明することは、野外における植物の生存戦略の本質を理解する上で重要です。本研究では、変動環境を実験的に再現することで phot2 を介した新奇のプライミングを発見しました。しかし、phot2 の下流でプライミング誘導に関与する因子は未解明であり、その分子機構の解明は今後の課題です。

■研究支援

本研究は、MEXT 科研費（21H05665、23H04202、20H05905、20H05910）の支援により実施されました。

■用語解説

（注1）光応答：

光の波長（色）、強さ、方向などによって植物が生理・成長を調節するしくみ。植物は、光合成では光をエネルギー源とする一方で、光応答では光を情報源として利用する。気孔開口、光屈性、葉緑体定位運動は青色光によって誘導される日々の光応答である。

（注2）放射冷却：

昼間の日射によって温められた地面が、夜間に熱を放出することで気温が低下する現象。放射冷却の影響は晴れた日に大きくなる。曇りの日には雲が断熱材の役割を果たすため、放射冷却の影響が小さくなる。

（注3）変異体解析：

遺伝子組換え技術によって特定の遺伝子を破壊した変異体を解析すること。任意の生理応答に関与する遺伝子の同定に用いられる。

■論文情報

論文名：Phototropin 2 mediates daily cold priming to promote light responses in *Arabidopsis*（シロイヌナズナのフォトトロピン2遺伝子は、日々、低温プライミングを介して光応答を促進する）

著者：Minoru Noguchi[†], Issei Keino[†], Hitomi Takahashi[†], Shota Yamauchi, Mami Fujisawa, Ken Haga, Tatsuya Sakai, Atsushi Takemiya, and Yutaka Kodama^{*}

*責任著者

† 同等の貢献を示す

掲載誌 : *Journal of Experimental Botany*

URL : <https://doi.org/10.1093/jxb/eraf040>

■ 英文概要

Organisms adapt to predictable environmental changes via a biological mechanism called priming. *Phototropin* (phot) is a plant-specific blue light photoreceptor that mediates daily light-induced responses, such as chloroplast relocation, stomatal opening, and phototropism, to optimize photosynthesis. Phot also functions as a thermosensor for chloroplast relocation that may sense daily temperature decreases at night, thereby modulating light-induced responses at dawn; however, this hypothesis has not yet been fully explored. Here, we reveal that phot mediates daily cold priming to promote stomatal opening and phototropism in *Arabidopsis* (*Arabidopsis thaliana*) under dawn-mimicking conditions. A cold pretreatment in the dark enhanced subsequent blue light-induced stomatal opening and phototropism at normal temperatures, suggesting that daily cold priming is involved in these physiological responses. *Arabidopsis* has two phot proteins (phot1 and phot2), and we show that phot2 clearly mediates the cold priming of stomatal opening and phototropism. Cold priming appears to be based on phot-mediated thermosensing just before dawn, which plants use to optimize their light-induced responses in anticipation of dawn.