

2025年4月1日

報道機関 各位

植物が季節に応じて開花と花茎伸長を促進させるメカニズムを解明 ～作物収量向上などの応用に期待～

【本研究のポイント】

- ・多くの植物種は季節を感じながら適切なタイミングで開花と花茎^{注1)}伸長を同時に促進させるが、季節応答から開花と茎伸長を連動させるメカニズムは不明であった。
- ・植物が季節の変化に合わせてFLP1という移動性のタンパク質を葉で発現させ、花芽形成と茎伸長の両方を促進させていることを明らかにした。
- ・開花に伴った花茎の伸長は、農業収量に多大な影響を与える形質であることから、今後は優良形質作物の作出に応用されることが期待される。

【研究概要】

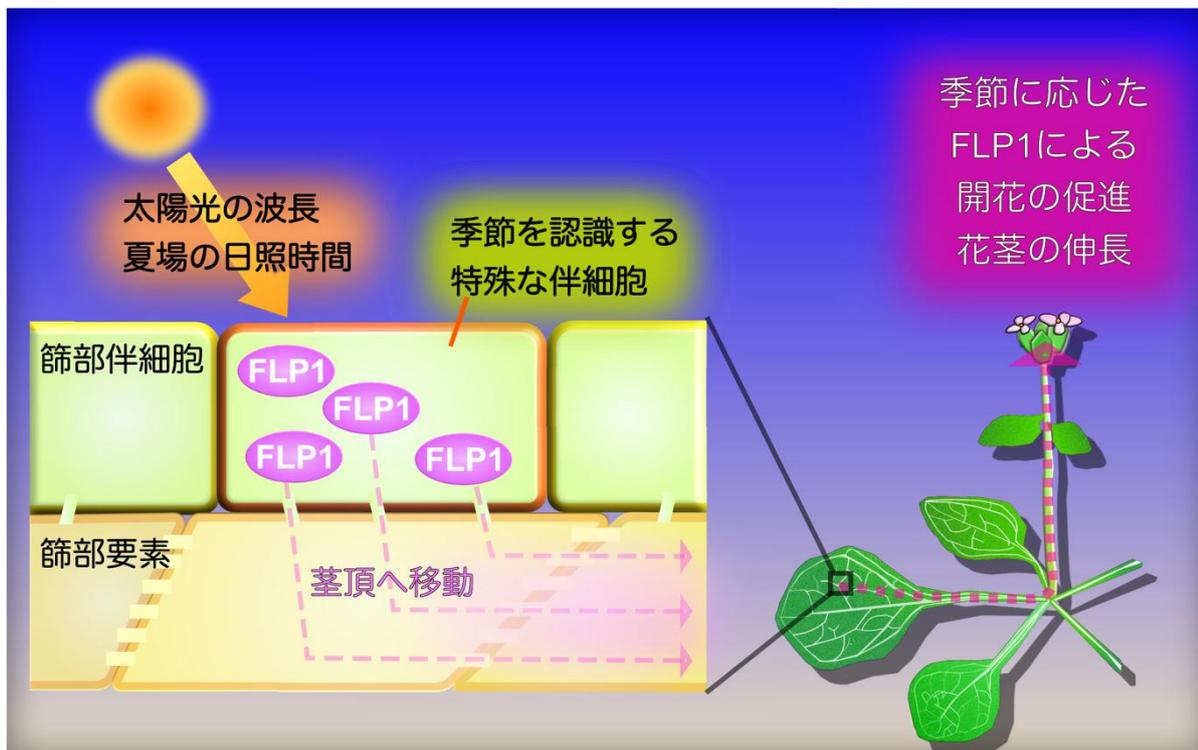
名古屋大学遺伝子実験施設の高木 紘 研究員(現 名古屋大学生物機能開発利用研究センター 特任助教(高等研究院 YLC 教員))、今泉 貴登 客員教授(兼 ワシントン大学教授)らの研究グループは、同大学生物機能開発利用研究センターの野田口 理孝 特任教授(兼 京都大学 教授)、遺伝子実験施設の打田 直行 教授、多田 安臣 教授、トランスフォーマティブ生命分子研究所の栗原 大輔 特任准教授、佐藤 良勝 特任准教授らの研究グループと共同で、植物が適切なタイミングで花を咲かせ、それに合わせて花茎を伸ばす新規の機構を発見しました。

植物は常に季節の変化を感じながら、受粉そして結実に最適なタイミングで花を咲かせ、また開花に伴い茎を伸ばします。これは次世代を残す上で欠かせない役割を果たしていますが、これまで野外で生育する植物が、適切な時期に開花と茎伸長を同調して促進させるメカニズムは不明でした。

本研究チームは、季節変化の認識に重要な役割を果たすことが知られている篩部伴細胞^{注2)}に着目し、同細胞における特有の遺伝子発現パターンを解析しました。その結果、開花が促進される長い日照条件によって、葉の篩部伴細胞で FPF1-LIKE PROTEIN 1 (FLP1) という機能未知の遺伝子が強く発現することが分かりました。さらなる詳細な解析から、葉で発現した FLP1 タンパク質が篩管^{注3)}を通して茎の先端部(茎頂)^{注4)}に移動し、開花と花茎伸長の両方を促進していることが示されました。つまり植物は葉で感知した季節情報を、FLP1 を介して茎頂に伝え、花芽の形成と茎の伸長を同時に促す巧みな機構を持っていることが明らかになったのです。

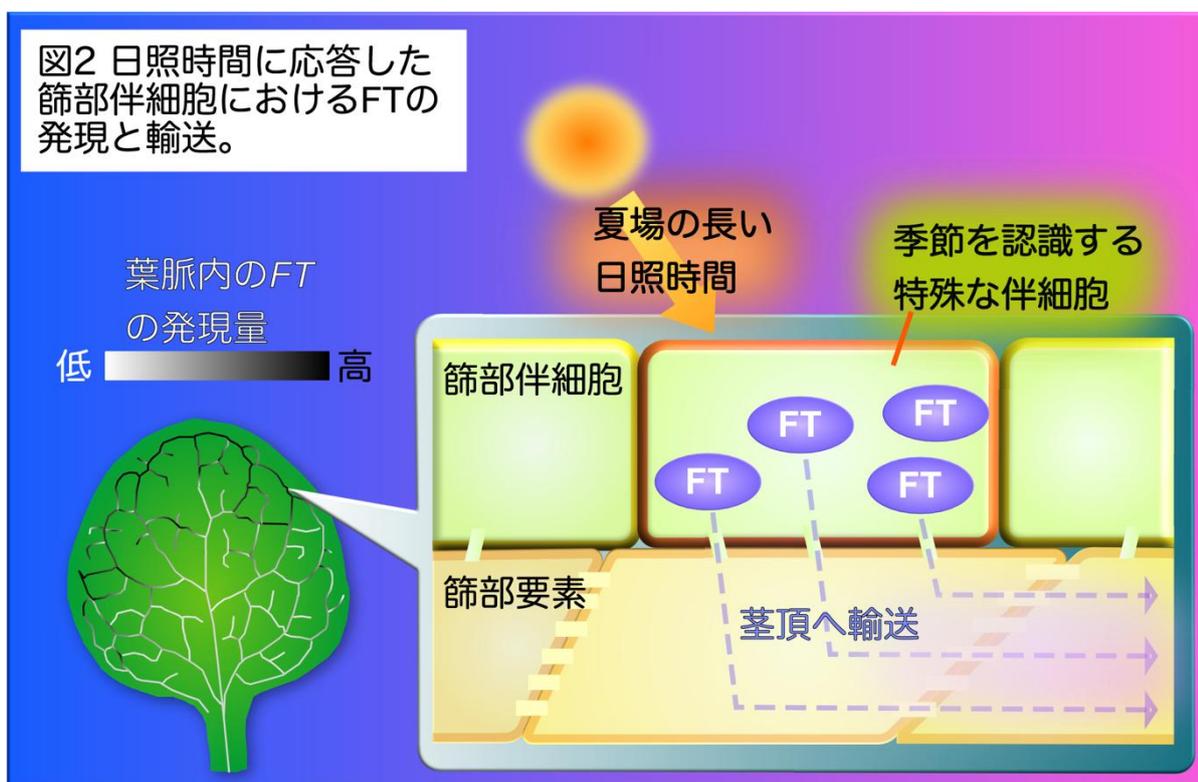
開花の時期と茎伸長の同調性は、農業生産性に大きく影響する形質であり、今後は本研究の知見が優良な作物品種の開発に応用されることが期待されます。

本研究成果は、2025年2月28日付米国科学雑誌『Developmental Cell』に掲載されました。



【研究背景と内容】

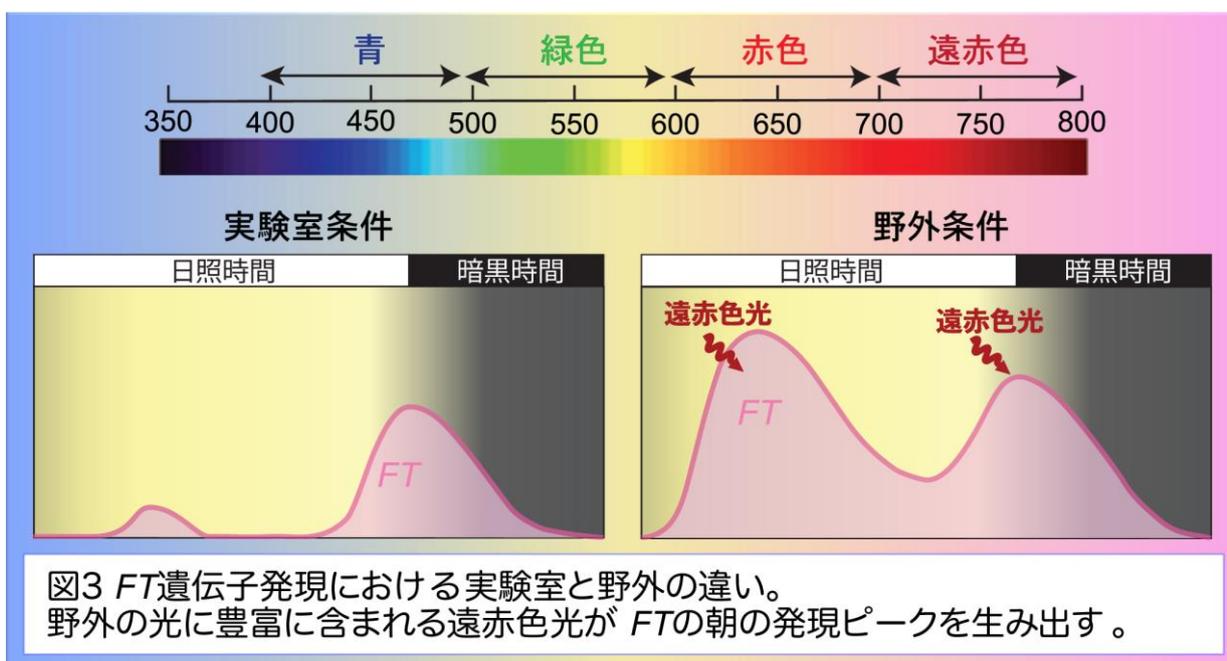
野外で生育する植物は、日照時間、気温などの季節変化を知らせる環境情報を敏感に感じながら、最適なタイミングを見計らって開花します。これら季節情報は、主に葉で感知されています。植物は季節の変化を認識すると、葉でフロリゲンと呼ばれる開花誘導物質を作り、それを茎の先端(茎頂)へと運ぶことで、花の形成を活性化させます。フロリゲンの正体は、その存在が予言されてから 70 年以上謎でしたが、現在では FLOWERING



LOCUS T (FT)^{注5)}と呼ばれる小さなタンパク質であることがわかっています。モデル植物であるシロイヌナズナは、日が十分に長くなったことを感じると、葉の先端に集中する特殊な篩部伴細胞で強く FT 遺伝子を発現させます(図 2)。つまり、植物は葉脈に存在する一握りの細胞を使って、季節応答から開花までを制御しているのです。

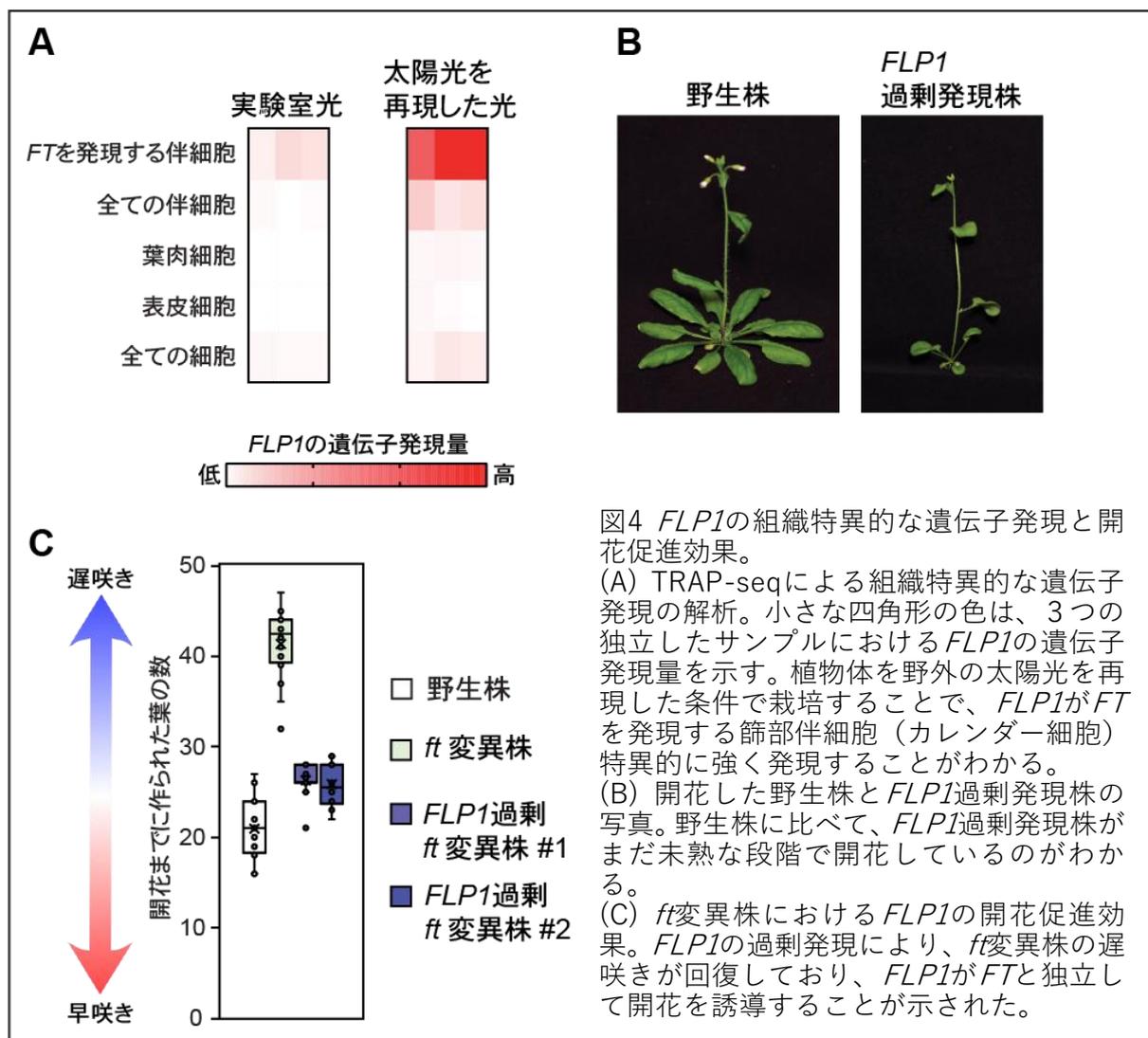
しかし、その重要性にも関わらず、FT 遺伝子を発現する伴細胞がどのような特徴を持つ細胞なのかはほとんど明らかになっていませんでした。研究チームは、この謎多き伴細胞を、季節応答を司る情報を統合しているという意味から『カレンダー細胞』と呼び、その特徴を明らかにしようと試みました。具体的には、組織特異的な遺伝子発現解析を可能にする TRAP-seq^{注6)}という解析手法を用いて、カレンダー細胞に固有の遺伝子発現パターンを探索しました。

TRAP-seq を行うにあたり研究チームは、植物を太陽光の波長を再現した環境で栽培しました。チームは以前、FT 遺伝子の発現パターンが実験室と野外では大きく異なり、それが自然光に豊富に含まれる遠赤色光成分に由来することを見出していました(図 3)。すなわち、野外で生育する植物が本来起こしている季節応答が、実験室の人工的な栽培条件では、しばしば見過ごされてしまってきたのです。



研究チームは TRAP-seq を用いた組織特異的な遺伝子発現解析から、FT を発現するカレンダー細胞が *PPF1-LIKE PROTEIN 1 (FLP1)* という遺伝子を強く発現していることを発見しました(図 4A)。この遺伝子は従来の実験室の光条件では発現が高まらず、重要性が見過ごされてきた因子であると考えられました。FLP1 タンパク質は機能未解明な小さなタンパク質ですが、1990 年代後半にスイスの研究チームが、FLP1 遺伝子と相溶性が高い *FLOWERING PROMOTING FACTOR 1 (FPF1)* という遺伝子が、茎頂付近で発現し、開花を促進していると報告しています。そこで、FLP1 も FPF1 同様に開花を促進する機能を有するのではないかと考え、FLP1 が開花に及ぼす影響を精査しました。その結果、図 4B の FLP1 過剰発現株の例に示すように、FLP1 が強い開花促進効果を持つことが明らかとなりました。さらに興味深いことに、FLP1 は FT 遺伝子を欠損

した株 (*ft* 変異株) においても開花を促進させる効果を持つことが分かりました(図 4C)。つまり FLP1 は、開花の誘導に必須であるとされてきたフロリゲン FT とは独立して開花を誘導する機能を持つことが示されたのです。



次に研究チームは、なぜ植物が FT と FLP1 という異なる2つの開花促進因子を持つ必要があるのか、という疑問に迫りました。その手がかりとなったのは、名古屋大学・生物機能開発利用研究センターの芦苜 基行 教授のグループが最近報告した ACE1^{注7)} とよばれるイネの茎伸長を促進する因子です。研究チームは、FLP1 が ACE1 と高い相同性を持つタンパク質であることに着目し、FLP1 もシロイヌナズナの花茎を伸ばす効果があるのではないかと考えました。そこで、FLP1 が花茎の伸長に及ぼす影響を精査した結果、茎を素早く伸ばす作用を持つことが明らかになりました(図 5A と B)。つまり、FT が開花に特化したタンパク質であるのに対し、FLP1 は開花促進に加えて、花茎を伸長させる機能を持ち、野外で生育する植物が次世代を残すために欠かせない役割を果たしていると考えられました。

さらに興味深いことに、シロイヌナズナの *FLP1* をタバコで過剰発現させても茎の伸長

促進が観察されました (図 5C)。すなわち、FLP1 の茎伸長効果は、植物種の違いを超えて発揮されるということが示されたのです。

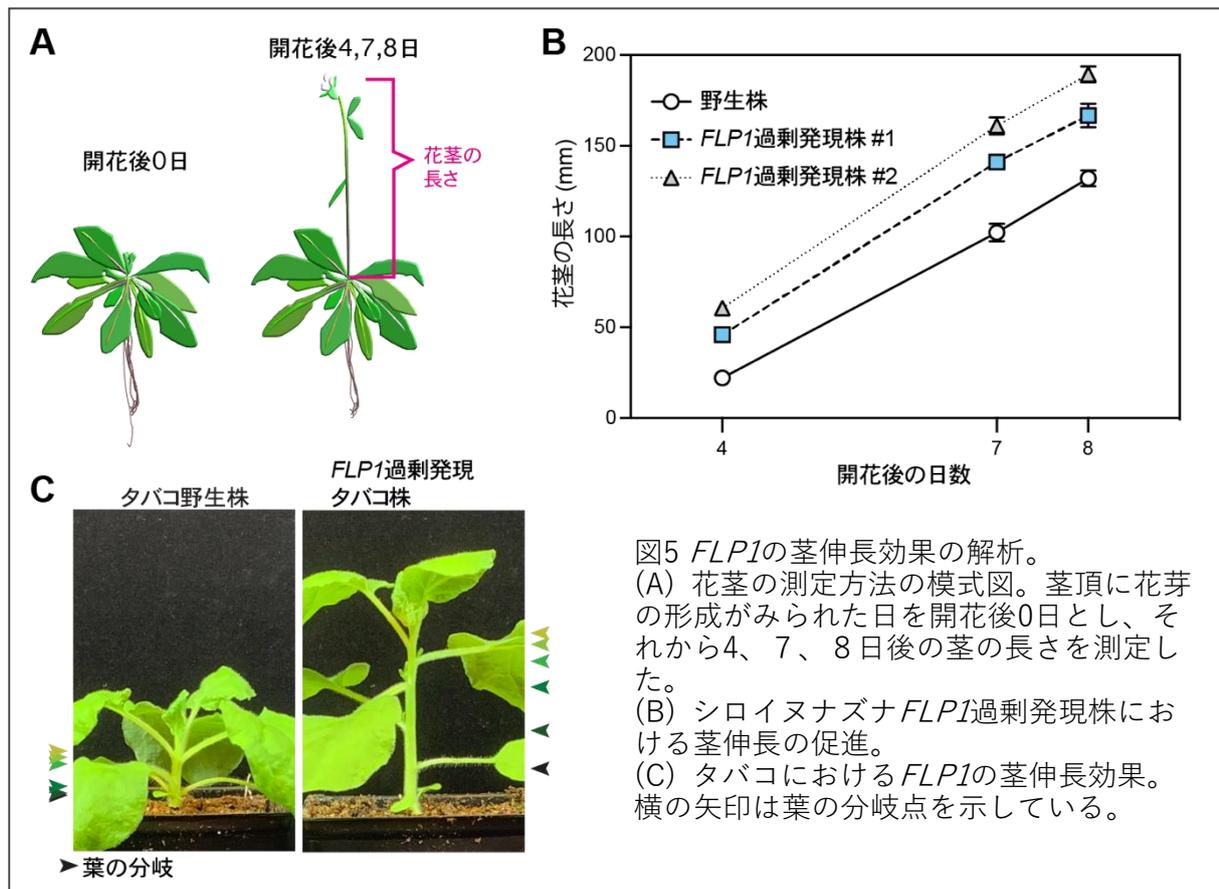


図5 *FLP1*の茎伸長効果の解析。
 (A) 花茎の測定方法の模式図。茎頂に花芽の形成がみられた日を開花後0日とし、それから4、7、8日後の茎の長さを測定した。
 (B) シロイヌナズナ *FLP1*過剰発現株における茎伸長の促進。
 (C) タバコにおける *FLP1*の茎伸長効果。横の矢印は葉の分岐点を示している。

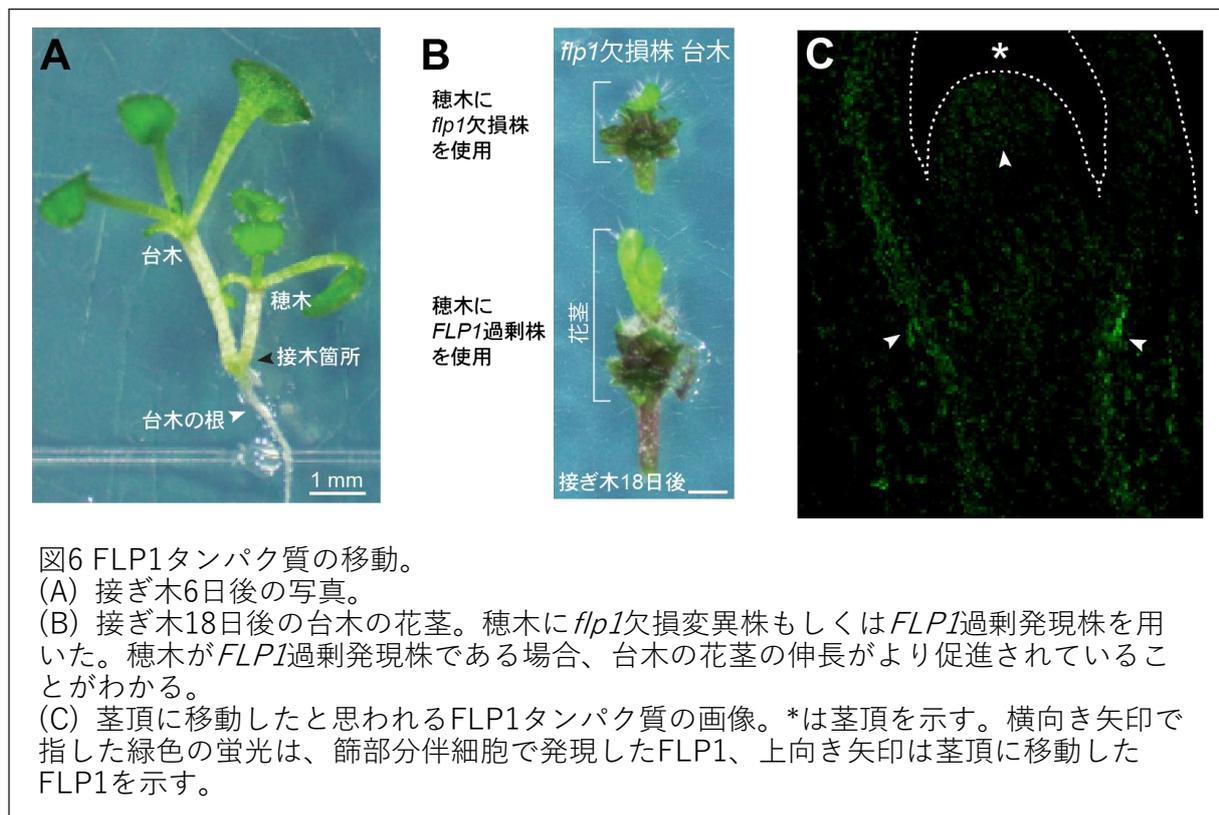


図6 *FLP1*タンパク質の移動。
 (A) 接ぎ木6日後の写真。
 (B) 接ぎ木18日後の台木の花茎。穂木に *flp1*欠損変異株もしくは *FLP1*過剰発現株を用いた。穂木が *FLP1*過剰発現株である場合、台木の花茎の伸長がより促進されていることがわかる。
 (C) 茎頂に移動したと思われる *FLP1*タンパク質の画像。*は茎頂を示す。横向き矢印で指した緑色の蛍光は、篩部分伴細胞で発現した *FLP1*、上向き矢印は茎頂に移動した *FLP1*を示す。

最後に研究チームは、FLP1 タンパク質が、FT タンパク質のように葉から茎頂に移動して開花と茎伸長を促進しているのか、詳細に解析しました。まず、チームは台木に穂木を挿入する特殊な接ぎ木を行いました(図 6A)。台木には *FLP1* 遺伝子を欠損した *flp1* 変異株を用い、穂木には *flp1* 変異株もしくは *FLP1* 過剰発現株を使用しました。仮に穂木の FLP1 タンパク質が移動していれば、台木である *flp1* 変異株の開花や花茎伸長が促進されると考えられます。解析の結果、穂木に *FLP1* 過剰発現株を使用した場合、*flp1* 変異株を使用した場合に比べて、台木の花茎伸長が促進されました(図 6B)。つまり、FLP1 が茎頂に移動して作用している可能性が強く示唆されたのです。

また、研究チームは茎頂に移動した FLP1 タンパク質を可視化する技術開発にも取り組みました。図 6C は篩部伴細胞で FLP1 を過剰に発現する組み換え体の茎頂の画像です。FLP1 タンパク質が存在する細胞が緑色の蛍光を発する工夫がしてあります。横向き矢印で示した伴細胞と思われる箇所に加えて、上向き矢印で示した茎頂先端でも緑色の蛍光が見られたことから、FLP1 タンパク質が伴細胞から茎頂に移動すると考えられました。

【成果の意義】

植物の開花のタイミングは野外に生育する植物の生存にとどまらず、作物の農業生産性、特に低緯度地域由来の多くの作物種の高緯度地域での栽培を可能にするために決定的な役割を果たします。例えば中国南部由来のジャポニカ米は、もともと日照時間が短くならないと出穂(稲の開花)しない植物でしたが、日照条件に非感受な品種が作られ、北はシベリアの高緯度地域まで栽培することが可能になっています。これまで開花の制御に関する研究は、FT 遺伝子の発現制御や FT タンパク質の挙動を中心としたものでありましたが、研究チームが今回 FLP1 という新たな因子を発見したことで、当該研究分野に新たな方向性が示されたと思われます。

また植物の茎伸長も同様に、野外に生育する植物の生存戦略であるだけでなく、農業生産性に大きな影響を与えます。有名な例として、茎の比較的短い主要穀物品種の開発によって世界の食糧危機を救った『緑の革命』が挙げられます。また、私たちが普段食べている野菜が花茎を伸ばすことを『トウ立ち』と呼び、これにより商品価値が著しく毀損されます。FLP1 が茎の伸長にも寄与していることから、これを人為的に制御することで、今後優良な作物品種の作出にも繋がる可能性があります。

【支援・謝辞】

本研究は、主に学術変革領域研究(A)[JP20H05910: 今泉貴登、JP20H05905: 松下智直]、基盤研究(S)[JP22H04978: 今泉貴登]、米国 National Institute of Health grant [R01GM079712: J.T. Cuperus, C. Queitsch, 今泉貴登]、National Science Foundation [RESEARCH-PGR grant no. 1748843, PlantSynBio grant no. 2240888: C. Queitsch]、また一部に日本学術振興会・若手研究[24K18139: 高木紘]、韓国 National Research Foundation of Korea grant [NRF-2021R1A4A1032888: Y.H.Song、RS-2023-00301974: N.Lee)の支援を受けて行われました。

【用語説明】

注1) 花茎:

花を高い位置に持ち上げて支える茎。

注2) 篩部伴細胞(しぶはんさいぼう):

光合成産物などを輸送する篩管の周辺に存在する細胞質に富んだ細胞。篩部伴細胞は光合成で産生されるショ糖や他の成長に必要な低分子の篩管の積み込みを行う。一部の篩部伴細胞は FT を産生し、季節応答に関与している。

注3) 篩管(しかん):

ゴルジ体、液胞、核を失った篩部要素と呼ばれる特殊な細胞が連なり、管状構造を形成する組織。ショ糖や他の成長に必要な低分子の輸送を担っている。

注4) 茎頂:

茎の先端部で細胞分裂が活発な組織。新しい葉や花はここで作られる。

注5) FLOWERING LOCUS T (FT)

開花を誘導する移動性のシグナル分子、すなわちフロリゲンの分子実体。ホスファチジルエタノールアミン結合タンパク質ファミリーに属する僅か 20 kDa の小さなタンパク質。

注6) TRAP-seq

Translating Ribosomal Affinity Purification sequencing の略称。RPL18 とよばれるシロイヌナズナのリボゾームタンパク質に FLAG タグを付与し、免疫沈降することで翻訳過程の RNA を単離することができる。さらに FLAG タグ付きの RPL18 を組織特異的なプロモーターで発現させることで、組織特異的な RNA が単離でき、それをシーケンス解析に用いることで大規模に組織特異的な発現プロファイルが解析できる。

注7) ACE1

ACCELERATOR OF INTERNODE ELONGATION 1 という浮イネ(洪水で冠水すると茎が伸びるイネ)の茎の節間伸長を促進する因子。FLP1 と高い相同性を持つタンパク質。

【論文情報】

雑誌名: *Developmental Cell*

論文タイトル: *Florigen-producing cells express FPF1-LIKE PROTEIN 1 to accelerate flowering and stem growth in Arabidopsis*

著者: *高木 紘、Nayoung Lee、Andrew K. Hempton、Savita Purushwani、*野田口理孝、山内孝太、白井一正、*川勝弥一、*上原晋、William G. Albers、Benjamin L.R. Downing、伊藤照悟、鈴木孝征、松浦恭和、森泉、光田展隆、*栗原大輔、松下智直、Young Hun Song、*佐藤良勝、*野元美佳、*打田直行、*多田安臣、花田耕介、Josh T. Cuperus、Christine Queitsch、*今泉 貴登 (*本学関係者)

DOI: 10.1016/j.devcel.2025.02.003

URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1534580725000656>



東海国立大学機構は、岐阜大学と名古屋大学を運営する国立大学法人です。
国際的な競争力向上と地域創生への貢献を両輪とした発展を目指します。

東海国立大学機構 HP <https://www.thers.ac.jp/>

