

配布先: 文部科学記者会、科学記者会、名古屋教育記者会

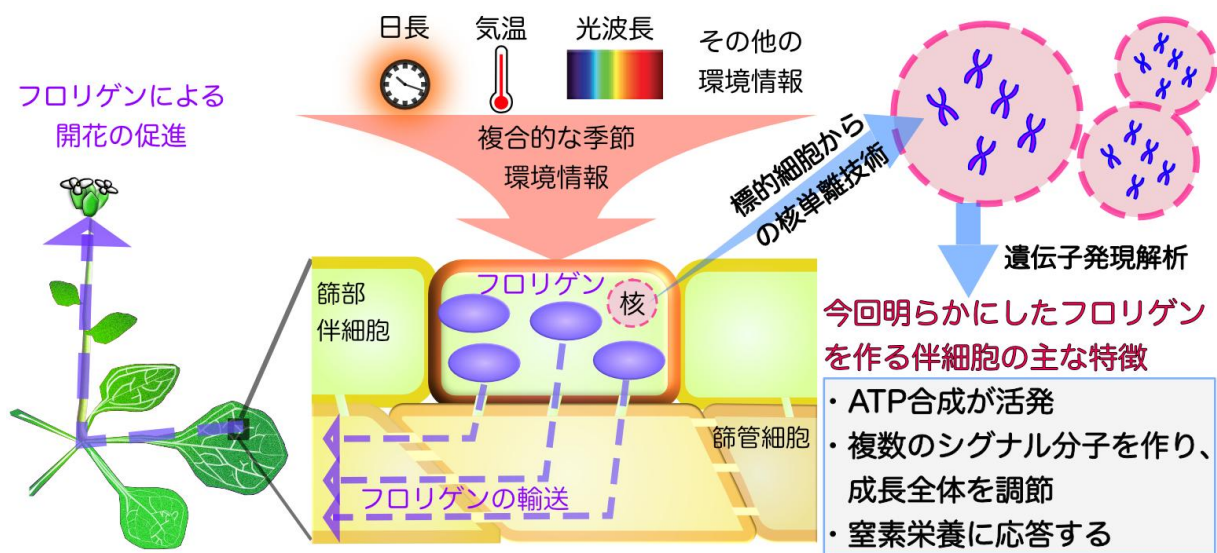
2025年11月11日

報道機関 各位

開花時期を制御する細胞を高解像度で見える化 ～メカニズムの一端を解明、農業への応用に期待～

【本研究のポイント】

- ・植物は、葉脈の中のごく限られた細胞を使って、季節の変化を認識し、開花のタイミングを調節しているが、それら細胞の詳細な特徴はよく分かっていなかった。
- ・これまで困難であった葉脈の中の細胞に特化した1細胞遺伝子発現解析法を開発し、開花を制御する細胞の特徴の詳細を明らかにした。
- ・開花のタイミングは、農業生産性に大きく影響することから、今後は優良な作物品種開発に応用されることが期待される。



【研究概要】

名古屋大学高等研究院の高木 紘 YLC 特任助教(兼 生物機能開発利用研究センター特任助教)とワシントン大学 今泉 貴登 教授(元 名古屋大学客員教授)らの研究グループは、名古屋大学遺伝子実験施設の多田 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、生命農学研究科 木羽 隆敏 准教授(現 岡山大学教授)らと共同で、花を咲かせる植物細胞の特徴を詳細に明らかにしました。

植物は、気温や日の長さなど、季節を知らせる環境情報を常にモニターし、最適なタイミングで花を咲かせます。これは、次世代の生存確率を最大限高めるために重要です。また、開花のタイミングは農業生産性に最も大きく影響する形質の一つであり、私たちの日々の生活とも深く関係しています。しかし、植物がどのように季節の変化を認識し、開花を制御しているのか、まだ不明な点が多く残されています。

今回、研究チームは、植物の開花のタイミングを制御する篩部伴細胞(しぶはんさいぼう)^{注1)}とよばれる細胞に着目しました。篩部伴細胞は、光合成産物であるショ糖の輸送などに寄与していますが、一部の伴細胞は季節に応じて「フロリゲン^{注2)}」と呼ばれる開花を誘導する小さなタンパク質を作り、植物に花を咲かせます。つまり、植物の開花制御を理解したければ、フロリゲンを作る篩部伴細胞がどのような特徴を持つ細胞であるのか、詳細に理解することがとても重要なのです。しかし、篩部伴細胞は葉脈の中に強く埋め込まれた細胞であり、物理的に単離することが大変困難でした。

そこで、研究チームはフロリゲンを作る篩部伴細胞の核を蛍光タンパク質で標識し、それをセルソーター^{注3)}と呼ばれる機械で単離する方法を独自に確立しました。また、個々の核の遺伝子発現解析(シングル核 RNA-seq 解析^{注4)})に成功し、謎多きフロリゲン産生細胞の特徴を高い解像度で明らかにしました。この細胞は「生体エネルギー通貨」とも呼ばれる ATP ^{注5)}を積極的に作り出しており、これをエネルギー源にして物質輸送を積極的に行っていることが示唆されました。また、フロリゲン以外の小さなタンパク質を多く作り出しており、その中には開花のブレーキ役を担う「アンチフロリゲン^{注6)}」も存在していたことから、環境に応じてフロリゲンとアンチフロリゲンのバランスを変化させ、開花のタイミングを調整している可能性が考えられました。さらに詳細なデータ解析から、窒素栄養状態によって活性を変化させる転写因子が、フロリゲンの遺伝子発現を調整していることを見出しました。窒素栄養が開花を抑制することは、農業の現場でよく知られる現象でしたが、その分子メカニズムはほとんど明らかにされておらず、今回その一端が明らかになったのです。

開花のタイミングは、農業生産性に大きく影響する形質であり、地球温暖化が進み食料の安全保証が脅かされる今日においてより重要性を増しています。本研究の知見が今後、優良な作物品種の開発に応用されていくことが期待されます。

本研究成果は、正規の査読を経て、2025 年 10 月 30 日付英国科学雑誌『eLife』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、常に気温や日照時間などの季節情報を感知しながら、受粉・結実に最適なタイミングで花をつけます。これは植物にとって、次世代を存続させるためになくてはならない営みです。植物は、適切なタイミングを察知すると、フロリゲンとよばれる移動性の開花促進分子を作り、それを茎の先端(茎頂)へと運ぶことで花を咲かせます。フロリゲンは、FLOWERING LOCUS T (FT)^{注7)}と呼ばれる小さなタンパク質であり、主に葉の篩部伴細胞で作られています。篩部伴細胞は、光合成産物であるショ糖の輸送などで重要な役割を果たしますが、なぜか葉の先端に集中する一部の篩部伴細胞だけが、FT 遺伝子を強く発現します。つまり、葉脈に集まるわずかな細胞が、植物の季節応答から開花までの一連の流れを制御していることになります。そこで研究チームは、これらフロリゲン産生細胞がどのような特徴を持つ細胞であるのか理解することで、植物がどのような戦略を持って開花を制御しているのか、より深く知ることができるのではないかと考えました。

しかし、ここで植物科学研究に特有の大きな問題が立ち塞がります。植物の細胞は、動物細胞と比べて、硬い細胞壁で覆われており、狙った細胞を物理的に単離することが大変困難なのです。特に篩部伴細胞は、葉脈に埋め込まれており、単離が困難です。そこで高木博士らは、細胞を丸ごと取るのではなく、欲しい細胞の核膜を蛍光タンパク質 GFP^{注8)}で標識し、その蛍光を指標に核をセルソーターで回収する方法を独自に開発しました

(図 2)。さらに回収した核を、シングル核 RNA-seq に供試し、個々の核の遺伝子発現を捉えることに成功しました。まず、遺伝子発現様式を指標にクラスタリング解析を行い、細胞を 11 の異なるクラスターに分けることができました(図3左)。驚いたことに、FT 遺伝子を強く発現する細胞は、クラスター7 番に限られており、標的としていた開花のタイミングを制御する細胞を高い解像度で捉えることができました(図3中央)。また、この細胞でどのような遺伝子が、FT と共発現しているのか調べたところ、「生体エネルギー通貨」とも呼ばれる ATP の合成に関わる遺伝子群が発現を高めていることが分かりました(図3右)。篩部伴細胞は、ATP のエネルギーを利用してショ糖やアミノ酸を取り込んでいるといわれています。FT を作る篩部伴細胞もまた、物質輸送のために積極的に ATP を作り出しているのかもしれない。

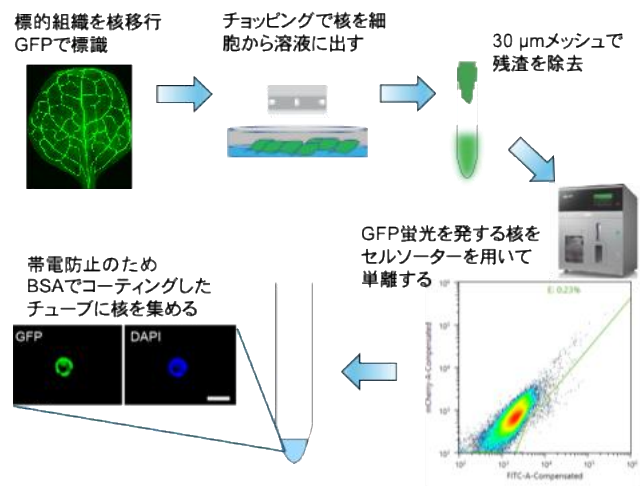


図2. 組織特異的な核の単離法。標的とする細胞の核を GFP で標識した形質転換個体を、少量のバッファ上で細かく切り刻む。次に、バッファをメッシュでろ過し、セルソーターを用いて GFP 蛍光を持つ核をチューブに回収する。DAPI は核染色試薬。

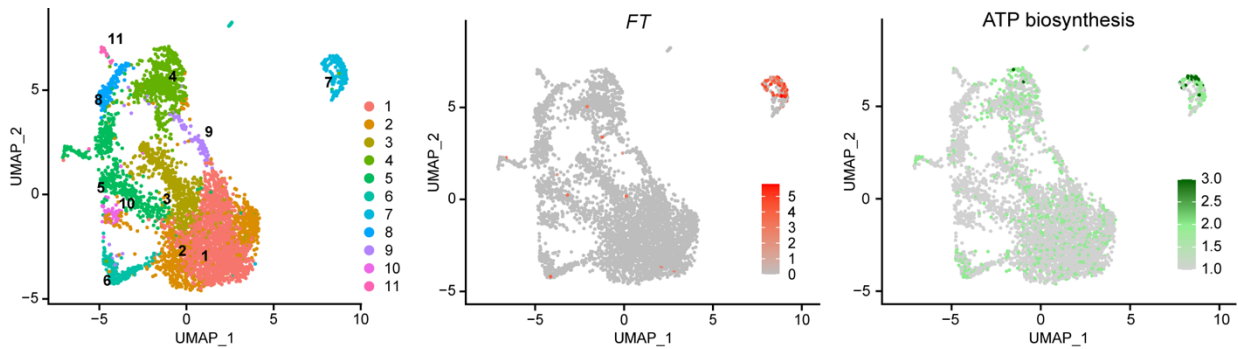


図3. 篩部伴細胞から回収した核を用いたシングル核 RNA-seq の結果。(左) 遺伝子発現を基本としたクラスタリング解析。11 のクラスターに分類した。(中央) *FT* 遺伝子の発現レベル。発現の強度は赤色のスケールバーを参照。(右) ATP の合成関連遺伝子の発現強度。複数遺伝子の平均発現レベルを緑色のスケールで示した。

ATP 合成関連以外にも、分子量の低いタンパク質をコードしている遺伝子が、*FT* と共発現していることも分かりました。その中には、*BROTHER OF FT AND TFL1* (*BFT*) という *FT* に構造が類似しているが、*FT* と拮抗(きっこう)して開花を遅らせるアンチフロリゲンをコードする遺伝子が含まれていました(図 4)。ここから、開花を制御する細胞は、フロリゲンである *FT* とアンチフロリゲンである *BFT* を同時に送り出すことで、*FT* による花芽の分化が過剰に促進されるのを防いでいるのではないかと考察されました。*BFT* は、塩ストレスなどの過酷環境で発現が高まることが分かっており、環境に応じて寄与を変化させているのかもしれません。

次に、クラスター 7 番の細胞で強く発現する *FT* および *FT* と共発現する遺伝子群が、どのような転写因子の制御を受けて調整されているのか知るため、それら遺伝子のプロモーター^{注9)}領域に濃縮する転写因子結合サイトをデータ解析から推定しました。

その結果、NITRATE-INDUCIBLE, GARP-TYPE TRANSCRIPTIONAL REPRESSOR 1 (*NIGT1*) と呼ばれる転写因子ファミリーの結合サイトが、プロモーターに多く存在することが見出されました(図 5 上)。*NIGT1* は、土壌中の硝酸栄養に応じて発現が高まり、硝酸吸収に関わる遺伝子を直接抑制することで、硝酸の過剰な吸収を防ぐ役割を果たしています。一方で、硝酸をはじめとする

図5. 窒素依存的な開花抑制因子 *NIGT1* の発見。(上) *FT* を含むクラスター 7 番で高く発現する遺伝子のプロモーター領域に濃縮する配列として浮上した *NIGT1.2* 転写因子の結合サイト。(下) *NIGT1.2* および *NIGT.4* の過剰発現による開花の遅延がみられた。開花の早さは開花時の葉の数を基準に測定した。葉が多ければ遅咲き。WT: 野生株(コントロール)。

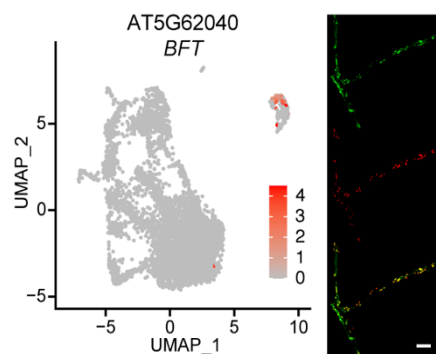
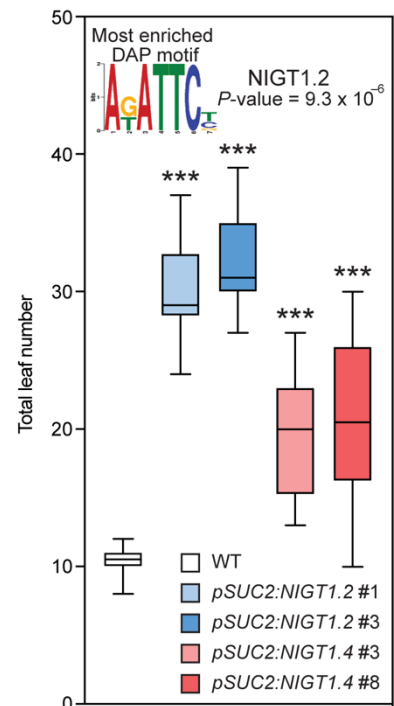


図4. *BFT* と *FT* の遺伝子発現の空間的な重なり。(右) *FT* 遺伝子の発現が高いクラスター 7 番において、*BFT* の高い発現がみられる。(左) 緑が *FT* を発現する細胞、赤が *BFT* を発現する細胞、黄色がそれらの重なりを示している。



窒素栄養が豊富な環境であると、開花が遅延するということが実際の農業現場ではよく知られていましたが、それがどのような機構によって制御されているのか、未だよく分かっておらず、NIGT1 が窒素環境に応じて *FT* を直接抑制することで開花遅延させている可能性が考えられました。そこで実際に *NIGT1* 遺伝子を過剰発現させると、*FT* の発現が著しく低下し、開花が遅延することがわかりました(図5下)。また、実際に *NIGT1* が *FT* のプロモーターに直接結合することが複数の実験から示されました。さらに、*NIGT1* による *FT* の抑制効果は、低窒素環境において減退したことから、*NIGT1* が窒素依存的に、生殖成長への移行を制御している可能性が示唆されました。

【成果の意義】

昨今、急激に進行する地球温暖化によって、農作物の高温被害が相次いでいます。まさに今、世間を騒がせている「令和の米騒動」もまた、イネの高温障害が原因の一旦となっています。植物は、受粉・結実のタイミングで高温被害を受けやすく、開花時期を制御することで開花期の高温を回避することも可能です。今回、研究チームは季節応答から開花を制御する細胞の特徴を詳細に明らかにすることに成功し、開花制御を介した新たな優良品種の作出に繋がる道筋を示しました。

【支援・謝辞】

本研究は、日本学術振興会 学術変革領域研究(A)[JP20H05910: 今泉貴登]、基盤研究(S)[JP22H04978: 今泉貴登]、若手研究[24K18139: 高木紘]、米国 National Institute of Health grant [R01GM079712: J.T. Cuperus, C. Queitsch, 今泉貴登、1R35GM139532: C. Queitsch]、National Science Foundation [2240888: C. Queitsch, 1755452: J.L. Pruneda-Paz]の支援を受けて行われました。

【用語説明】

注1) 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への積み込みを行う。一部の篩部伴細胞は *FT* ^{注7)} を産生し、季節応答に関与している。

注2) フロリゲン

開花を誘導する移動性の分子。茎頂へと輸送され、花芽分化を促進する。

注3) セルソーター

細胞から発せられる蛍光を指標に、細胞を仕分ける機械。

注4) シングル核 RNA-seq

個別の細胞の遺伝子発現を測定するシングルセル RNA-seq を、細胞の代わりに核を用いて行う解析。本研究では、個々の細胞を油滴に閉じ込め、ライブラリー調節を行う 10x Genomics 社のキットを採用した。

注5) ATP

アデノシン三リン酸。「生体エネルギー通貨」とも呼ばれる細胞の活動エネルギーの源。

注6) アンチフロリゲン

フロリゲンと似た構造を持つが、フロリゲンと拮抗することで花芽分化を遅らせる因子。

注7) FLOWERING LOCUS T (FT)

開花を誘導する移動性のシグナル分子。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わずか 20 kDa の小さなタンパク質。

注8) GFP

緑色蛍光タンパク質。オワンクラゲが持つタンパク質に由来する。

注9) プロモーター

転写される遺伝子配列の上流の DNA 配列。これに転写因子が結合することで、遺伝子の発現が制御される。

【論文情報】

雑誌名: eLife

論文タイトル: Companion cells with high florigen production express other small proteins and reveal a nitrogen-sensitive *FT* repressor

著者: *高木 紘、伊藤照悟、Jae Sung、久保田茜、Andrew K Hempton、Nayoung Lee、鈴木孝征、Jared S Wong、Chansie Yang、Christine T Nolan、Kerry L Bubb、Cristina M Alexandre、*栗原大輔、*佐藤良勝、*木羽隆敏、Jose L Pruneda-Paz、Christine Quietsch、Josh T Cuperus、今泉貴登（*本学関係者）

DOI:10.7554/eLife.102529.3



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/>

