

配布先: 文部科学記者会、科学記者会、名古屋教育記者会

報道の解禁日(日本時間)

(テレビ, ラジオ, インターネット) : 2025 年 4 月 8 日(火) 午前 3 時

(新聞) : 2025 年 4 月 8 日(火) 付朝刊

2025 年 3 月 28 日

報道機関 各位

植物の種子形成に不可欠な「ヘその緒」新組織を発見 ～種子形成科学の新領域、また新規の種子肥大育種法を開拓～

【本研究のポイント】

- ・植物の新組織「笠原ゲートウェイ」による全く新しい種子栄養供給システムの発見。
- ・その「門」は受精すると開いて栄養を受け入れ、受精に失敗すると閉じて栄養を阻む。
- ・AtBG_ppap タンパク質を胚珠^{注1)}に用いることで種子肥大育種法を新たに開発。

【研究概要】

名古屋大学生物機能開発利用研究センターの笠原 竜四郎 特任准教授、野田口 理孝 特任教授、名古屋大学トランスフォーマティブ生命分子研究所(WPI-ITbM※)の研究グループは、植物の種子形成に不可欠な「ヘその緒」新組織(笠原ゲートウェイ)を新たに発見しました。

研究者らは、植物の胚珠(受精して種子になる部分)にある新組織を発見しました。植物の新組織の発見は実に 160 年ぶりとなります。この組織は受精前にカローズ^{注2)}という糊のような細胞膜上の物質を蓄積させて胚珠と、珠柄(胚珠と雌しべの中心をつなぐ柄)の間の物質輸送を塞いでいます。しかし一旦受精すると、胚珠は受精を感知し AtBG_ppap タンパク質を用いてカローズを溶かし、物質の流通を可能にし、母体側の栄養を胚珠側に運んで種子を肥大させますが(開門状態)、もし受精に失敗すると胚珠が受精を感知しないため、カローズが溶かされることなくさらに蓄積し、栄養が胚珠に流入しないため(閉門状態)、種子の壊死が起こることも分かりました。さらに、AtBG_ppap を過剰発現した胚珠は常に開門状態であり、野生型よりも多くの栄養を受け入れることができるため、この方法によってシロイヌナズナとイネの種子を肥大させることも分かりました。本研究は新組織の発見を基軸として今後の植物種子形成科学への基礎研究の発展だけでなく、種子肥大育種に大きく貢献していくことが約束されています。

本研究成果は、2025 年 4 月 8 日午前 3 時(日本時間)付米国科学誌『*Current Biology*』電子版に掲載されます。

【研究背景と内容】

被子植物の花にはめしべとおしべがあり、めしべの中には胚珠があり、おしべにある花粉の中にある精細胞がその胚珠内にある卵細胞、中央細胞と重複受精^{注3)}し(図 1)、種子を作ります。この際、種子本体に母体から栄養が送られるためには受精が必要であることは 2005 年より知られていましたが、なぜ受精が必要であるのか、また胚珠はどのようなメカニズムで受精を感知し、栄養を受け取るようになるのかといった知見は全く存在しませんでした。

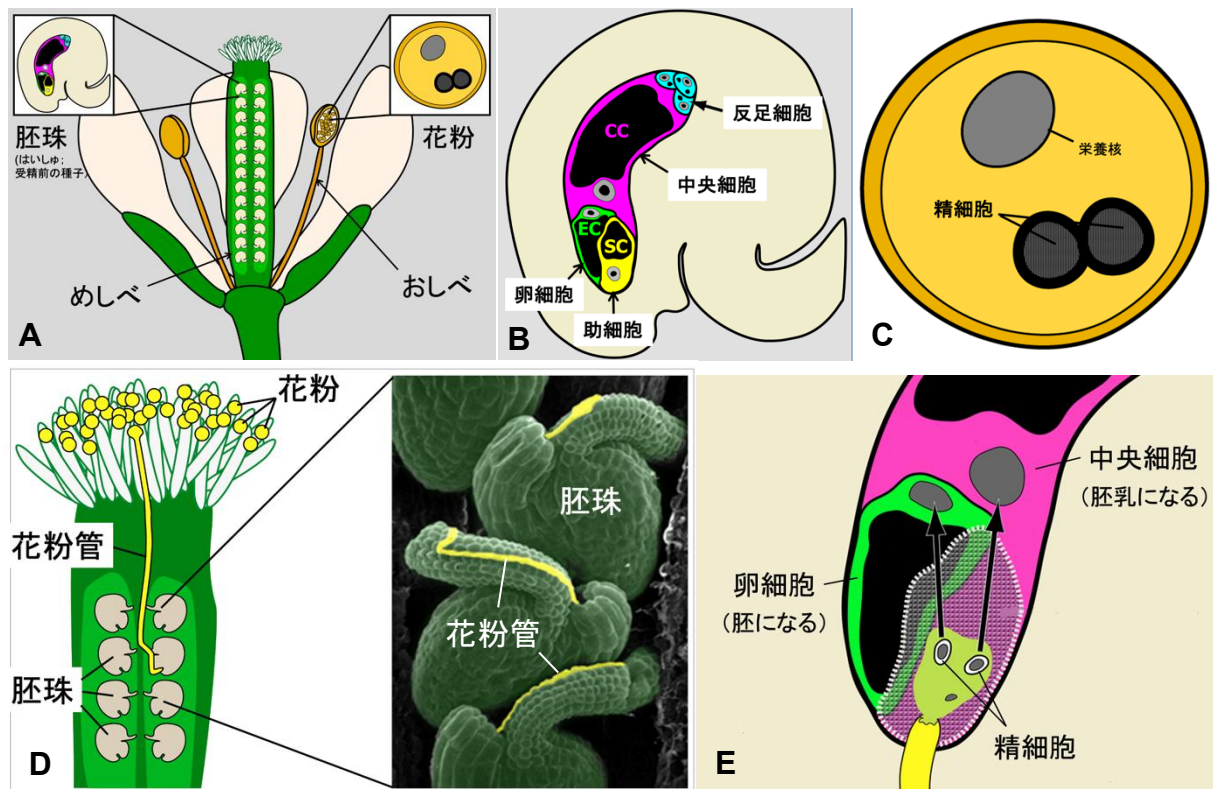


図 1. 植物の花粉管誘引と受精(A)シロイヌナズナの花の構造。シロイヌナズナの花にはめしべとおしべがあり、めしべの中には胚珠がありおしべの中には花粉がある。(B)胚珠の中にはさらに胚嚢と呼ばれる部分があり卵細胞 1 つ、助細胞 2 つ、中央細胞1つ、反足細胞 3 つで構成されている。(C)花粉は精細胞 2 つ、栄養核 1 つで構成されている。(D)花粉が雌しべの柱頭に受粉すると花粉管を伸ばし、胚珠に到達する。(E)胚珠に到達した花粉管は助細胞を破裂させて 2 つの精細胞を放出し、一つは卵細胞もう一つは中央細胞へと受精しそれぞれ胚、胚乳となる(重複受精)。

そこで私たちの研究グループでは、植物が受精に成功するあるいは失敗するタイミングで胚珠を観察し、それぞれどのような変化が胚珠に現れるのかを詳しく観察することにしました。ところが、それらの条件下で観察を続けても、胚珠が大きくなるかならないかの違いがあるだけで、しばらくしても少しも新しい知見を得ることができず混沌とした状態が続きました。そんなある日、私たちのグループがかつて発見した 2012 年公表の「受精リカバリーシステム(受精補完作用)^{注4)}」を確認するためにアニリンブルー^{注5)}で色々な胚珠の花粉管を染めていると、非常に興味深いことに気がつきました。花粉管の挿入されている部位(珠孔側)^{注6)}ではなく、カラザ側^{注7)}にシグナルが発見されました。このシグナルは特に受精に失敗した時に強くなることも同時に分かりました。また、アニリンブルーで染色されるのは「カロース」^{注7)}であるために、受精に失敗するとこの部分にカロースが蓄積するという新しい法則を見つけることができました(図 2)。またこのカロースが蓄積

している胚珠は栄養状態が不良であり、カロースが母体からの栄養をブロックしていることが示唆されました。そこで実際に栄養の流れを受精に成功した胚珠と失敗した胚珠で見比べたところ、成功した胚珠でのみ栄養の流入が観察され、失敗した胚珠では完全に阻止されていることが分かりました(図3)。ここまででこの構造物は栄養の行き来を調節する「門」のような組織であることが判明しました。植物の新組織の発見は実に160年ぶりとなります。

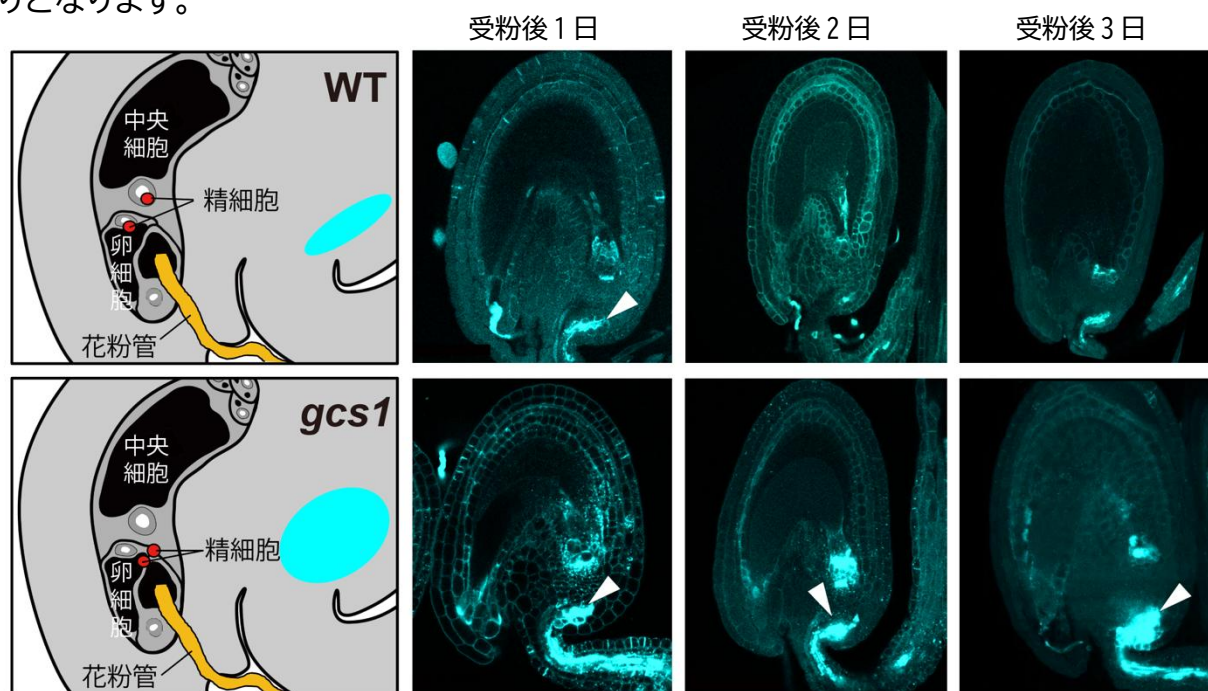


図 2. 受精後のカロース除去と受精に失敗後のカロース沈着 上段:受精後のカロースの除去。WT(野生型)の胚珠は受粉後 1 日ではまだカロースを蓄積させているが(矢尻)、受粉後 2、3 日目にはカロースを除去していることが分かる。下段:受精失敗後のカロース沈着。*gcs1* 変異体(受精に失敗する変異体)では、受粉後 2 日目、3 日目にカロースを強く蓄積させていることが分かる(矢尻)。水色の楕円はカロースの沈着位置と程度を示す。

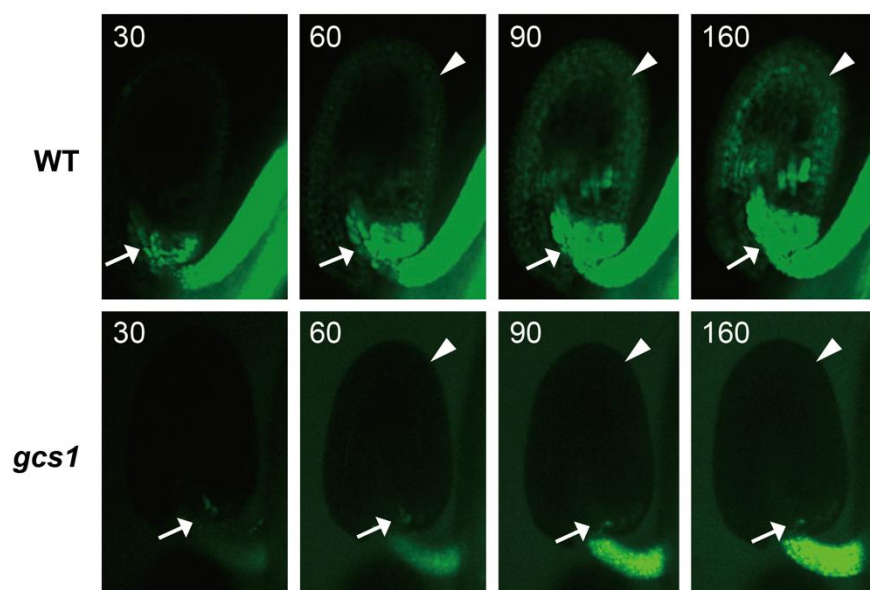


図 3. 受精後と受精に失敗後の栄養吸収の違い 上段:受精後の栄養の吸収。WT(野生型)の受精後の胚珠は栄養マーカーに浸潤後 30 分で既にカラザ側に蓄積しており(矢尻)、60 分、90 分、160 分後には胚珠本体(矢尻)に栄養を蓄積し始めていることが分かる。下段:受精失敗後の栄養の吸収。*gcs1* 変異体(受精に失敗する変異体)の胚珠は栄養マーカーに浸潤後 90 分でようやくカラザ側組織近くまで栄養を運んでいるものの(矢尻)、栄養はこの領域を超えることはなく、胚珠本体に栄養がたどり着くことはない(矢尻)。

次に私たちはこの法則がどのような遺伝子によって制御されているのかを調べるために、私たちのグループがかつて発見した 2016 年公表の「POEM 現象」^{注 8)}のデータより、受精に成功した植物の胚珠でのみ発現しているカロース関連遺伝子の探索を行いました。その結果、*AtBG_ppap* が受精した胚珠のみで発現上昇していることが分かりました。この遺伝子はカロースを分解する酵素をコードしており、野生型ではカラザ側のカロース蓄積がほとんど見られないことから、受精後にこの遺伝子が発現してカロースの分解を促し、栄養を取り込んでいることが示唆されました。そこでこの遺伝子の変異体を CRISPR でゲノム編集し変異体を作成し(*Atbg_ppap*)、実際に栄養の流れを確認したところ、野生型に比べて胚珠本体に流れる栄養が非常に限定されていることが分かりました。また、最終的にこの変異体を作る種子は十分な栄養を得られていないために、野生型と比べて小さな種子を形成することも分かりました。逆に、この遺伝子を過剰発現するとカロースが常に分解されて栄養の流通がよりスムーズになり、多くの栄養を得ることができるため、野生型よりも大きな種子を形成することが分かりました(図 4)。また、イネでも同様にこの過剰発現体作成したところ、野生型よりも大きな種子を形成することが分かりました(図 5)。

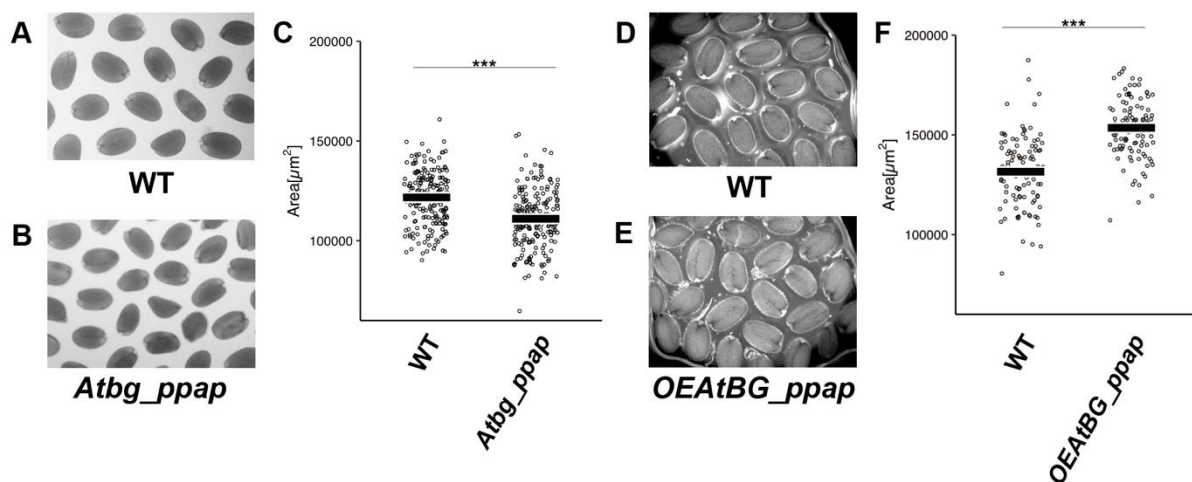


図 4. *Atbg_ppap* 変異体、*AtBG_ppap* 過剰発現体 (*OEAtBG_ppap*) と野生型種子のサイズ比較 カロースを除去できていないため栄養の流通が滞りがちになり、野生型(A)よりも *Atbg_ppap* 変異体(B)の方が 8%小さな種子を形成した(C)。カロースが常に分解されて栄養の流通がよりスムーズになり、野生型(D)よりも *AtBG_ppap* 過剰発現体(*OEAtBG_ppap*)(E)の方が 16%大きな種子を形成した(F)。

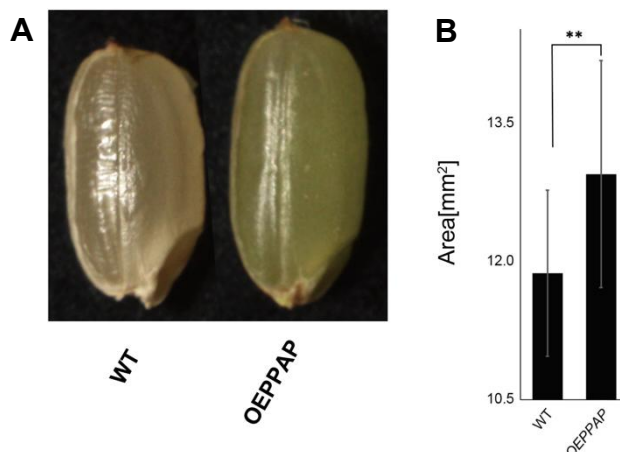


図 5. イネ過剰発現体 (*OEPPAP*) と野生型種子のサイズ比較 (A)野生型(W T)よりも *OEPPAP* 過剰発現体の方が 9%大きな種子を形成した(B)。

次に実際にこの「門」の構造を明らかにするために、顕微鏡でカロースの蓄積を観察しました(図 6)。その結果、この門は特殊な形をした複数の細胞群で構成されていることが分かりました。また、栄養を送る重要な器官である植物体中に張り巡らされた「篩管」^{注 9)}との関係を調べるために篩管マーカーを用いて観察したところ、胚珠内での構造を明らかにすることができ、カロースが蓄積する細胞群の組織と完全に一致することが分かりました。これにより、新しく見つかったこの組織は①受精後にカロースを取り除いて②胚珠本体に栄養を送り届ける 2 つの独立した機能を有していることが分かりました(図 7)。私たちは当初この新組織を「カロースゲート(Callose Gate)」あるいは「篩管末端最終形態 (Final Form of the Phloem End)」としていましたが、今後はこの 2 つの機能を併せ持つ重要な植物新組織、「笠原ゲートウェイ(Kasahara Gateway: KGW)」として研究を進めていきます。動物の持つ「ヘその緒」は受精を経て初めて形成され、胚に栄養を送るようになるという機能がある点がこの組織と非常によく似ており、今回植物で「ヘその緒」が見つかったということは、動植物の垣根を超えた、生物の生殖を理解すると言う点で非常に重要な知見であると言えます。

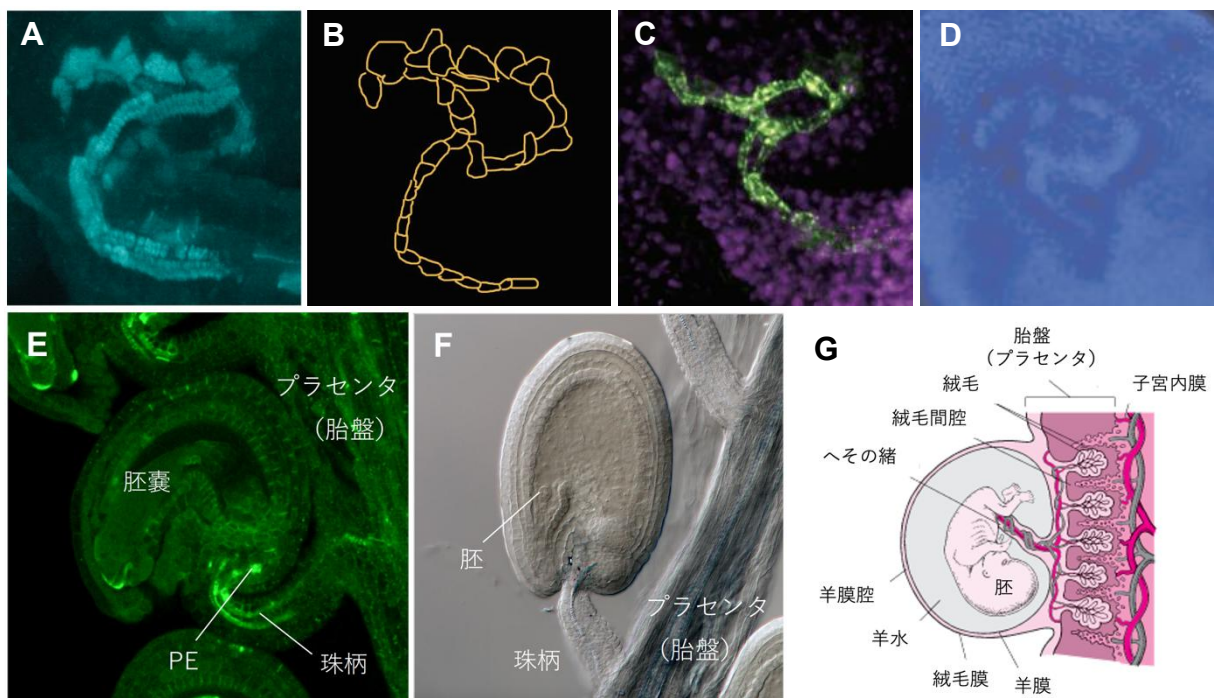
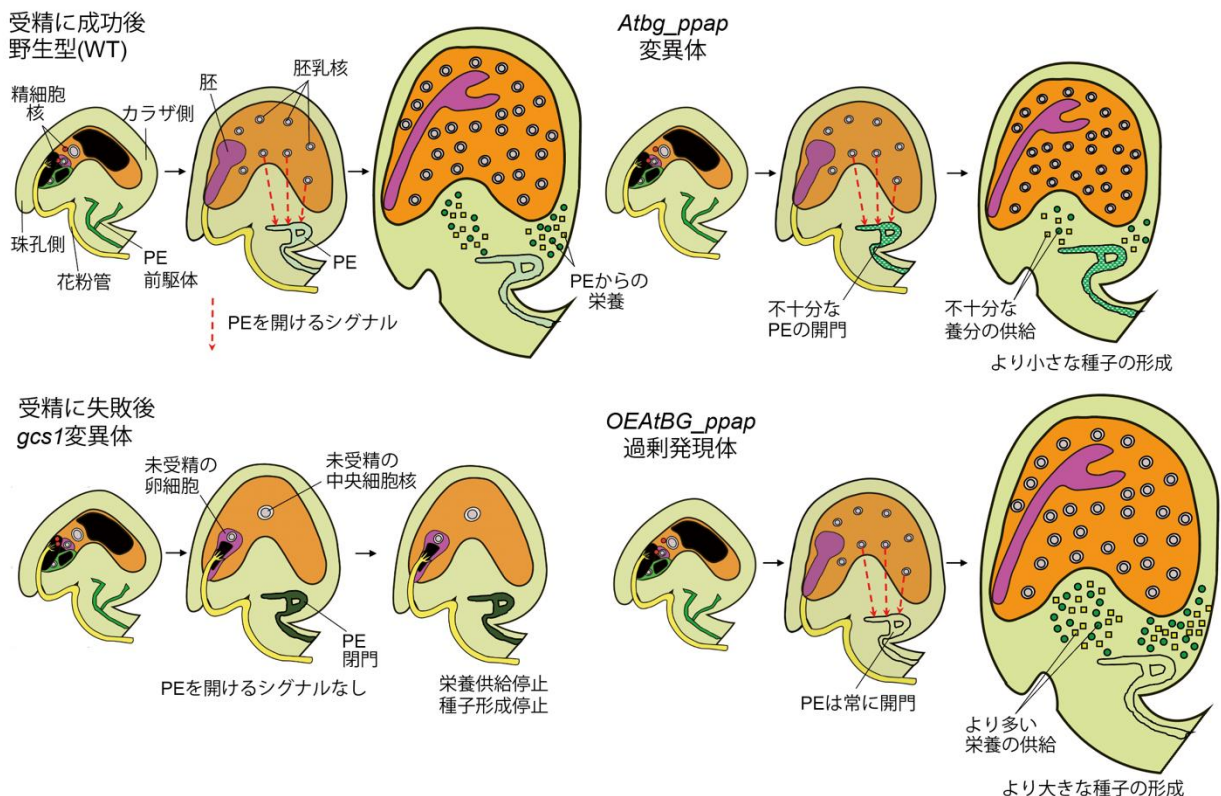


図 6. シロイヌナズナ、イネの篩管末端最終形態: PE(笠原ゲートウェイ:KGW) (A)PE に蓄積したカロース。この組織は独特の形をした細胞群で構成されている。(B)(A)を元に作成した PE のスケッチ。特にリング状部分の細胞はユニークである。(C)篩管マーカーを用いて PE を染色。この構造はカロースを蓄積する構造(A, B)と完全に一致する。(D)イネの PE におけるカロース蓄積。(A-C)の構造に酷似している。(E)花粉管末挿入の胚珠。受精が完了していないので、PE が観察できる。珠柄によってつながれている胚珠は PE が閉じているためにプラセンタ(動物の胎盤にあたる)から栄養分を受容することはできない。(F)受精後 2 日目の種子。PE がすでに開かれており、プラセンタから珠柄を伝って PE を介し栄養分が供給されているので種子が順調に成長している。(G)PE は動物の胎児と胎盤をつなぐ、「ヘその緒」によく似ている。また PE と同様に受精なしではヘその緒は形成されず、養分を吸収することがないので機能的にも非常によく似ている。当研究で得られた知見は動植物の壁を越え、生物の生殖の理解にとって非常に重要である。

また、この新組織の発見により、2012年に発表した「受精補完作用」に引き続き、植物のしたたかな生存競争の秘密をもう一つ明らかにすることができました。受精していない胚珠はそもそも種子になり得ないため、その胚珠に栄養を送ることは植物にとって「無駄」になってしまいます。そこで被子植物は確実に受精したという確約をもって胚珠本体に栄養を与えるという、極力無駄なことはしない戦術をとって今日まで淘汰されずに生きてきた、陸上植物の70%と言う大多数を占めるまでになったということが考えられます。

A



B

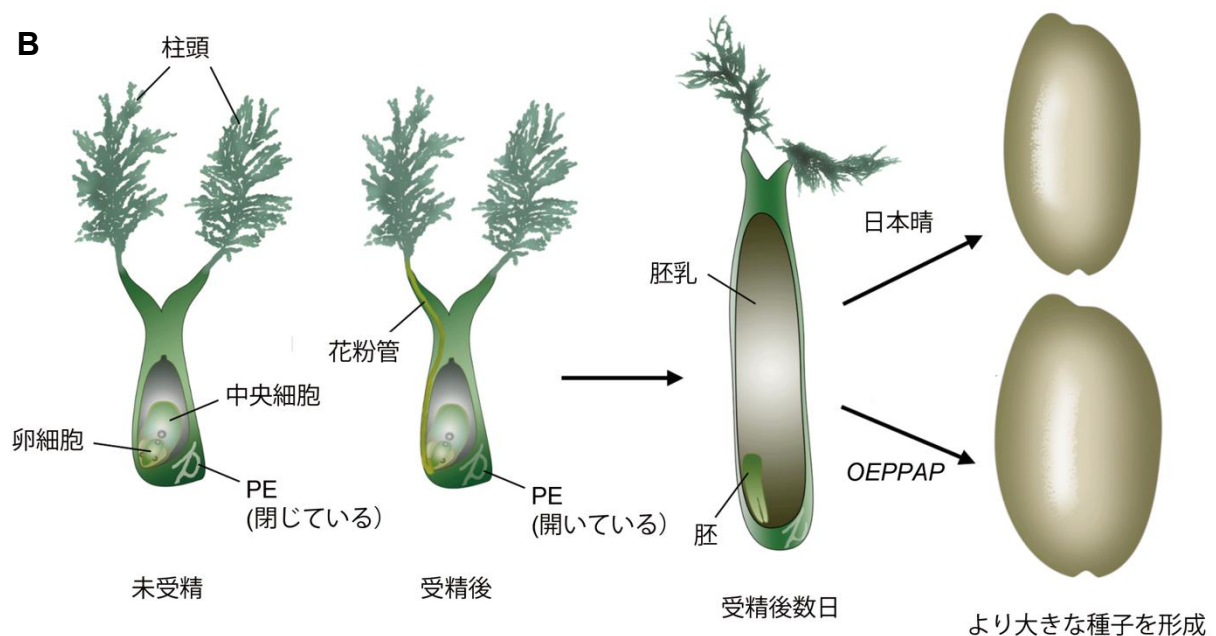


図 7. シロイヌナズナ、イネの篩管末端最終形態: PE の構造と機能 (A)シロイヌナズナの PE とその機能。受精に成功した場合、受精した胚乳細胞は PE を開門するシグナルを送る。そのシグナルを受け取ったら *AtBG ppap* を発現させて開門し、PE からの養分を種子養分として取り込む。受精に失敗してしまうと、PE に送るシグナルが発生しないので、PE は開門することなく栄養を受け取れないため、種子形成が停止する。*Atbg ppap* 変異体の場合、PE の開門が不十分となり、種子に送り込まれる養分が不十分で、より小さな種子を形成する。*OEAtBG ppap* 過剰発現体を用いた場合、PE は常に開門状態となり、より多くの栄養を獲得できるため、より大きな種子を形成する。(B) イネの PE とその機能。シロイヌナズナ同様、PE は受精すると開門し、栄養を取り込んで種子形成する。日本晴の場合、通常の大きさの種子を形成するが、*OEPPAP* の場合はシロイヌナズナ同様、より大きな種子を形成する。

【成果の意義】

この新規の組織と種子栄養流通様式を同定したことで、今後は種子形成科学に大きく貢献していくことが予想されます。現在のところ受精後にカロースを分解することによって「開門」し栄養を流通させるところまで明らかになりましたが、受精後にどのようなシグナルが受精した細胞から出され、そのシグナルを胚珠側のどの細胞がどのように受け取るかなどを知る手掛かりとなるため本成果はまず植物種子形成科学の基礎研究の新展開につながることから大きな意義をもちます。また、新たに見つかった、*AtBG ppap* を過剰発現することによりシロイヌナズナ、イネの種子を肥大させることができたので、今後、食用または工業用、その他の種子を肥大させることにも繋がり、植物育種学的にも本成果は大きく貢献していくことが予想できます。

本研究は主に、令和 4(2022)年度から始まった文部科学省『科学研究費助成事業(学術研究助成基金助成金)(国際共同研究加速基金(帰国発展研究))種子形成に必須の新組織「篩管末端最終形態」を利用した作物の種子肥大育種(課題番号: 22K21366)』の支援のもとで行われたものです。

【用語説明】

注 1)胚珠:

被子植物の雌しべ内部にある受精して種子になる部分。シロイヌナズナの場合、雌しべの中には 50~60 個、イネの場合 1 個の胚珠がある。

注 2)カロース:

さまざまな植物の発生・生育過程において、細胞壁と細胞膜の間に一時的に沈着し、重要な生理機能を担う。

注 3)重複受精:

被子植物の受精様式。シロイヌナズナの場合、花粉の中にある 2 つの精細胞が卵細胞、中央細胞とそれぞれ受精し、種子を作る。

注 4)受精補完作用:

植物が 1 本目の花粉管で受精に失敗した場合、2 本目の花粉管が胚珠に進入し受精を補完する作用。(Kasahara *et al.*, 2012)

注 5)アニリンブルー:

この試薬を用いることによってカロースを染色することができる。植物の花粉管を染色するために主に用いられる。

注 6) 珠孔側:

胚珠を水平方向から観察したときに、花粉管が挿入される側をいう。

注 7) カラザ側:

花粉管が挿入される逆側をいう。

注 8) POEM 現象:

花粉管依存的胚珠肥大。植物の胚珠は花粉管を受け入れるだけで、受精することなしに胚珠を肥大させることができる。(Kasahara *et al.*, 2016)

注 9) 篩管:

植物が光合成によって作られた栄養分を葉や花、根に運ぶ管。

【論文情報】

雑誌名: *Current Biology*

論文タイトル: Fertilization-dependent phloem end gate regulates seed size

著者: Xiaoyan Liu, Kohdai P. Nakajima, Prakash Babu Adhikari, Xiaoyan Wu, Shaowei Zhu, Kentaro Okada, Tomoko Kagenishi, Ken-ichi Kurotani, Takashi Ishida, Masayoshi Nakamura, Yoshikatsu Sato, Yaichi Kawakatsu, Liyang Xie, Chen Huang, Jiale He, Ken Yokawa, Shinichiro Sawa, Tetsuya Higashiyama, Kent J. Bradford, Michitaka Notaguchi, Ryushiro D. Kasahara. (赤字は名大生物機能開発利用研究センター、青字は名大 ITbM)

DOI: 10.1016/j.cub.2025.03.033



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/>



※【WPI-ITbM について】(<http://www.itbm.nagoya-u.ac.jp>)

名古屋大学トランスフォーマティブ生命分子研究所(ITbM)は、2012年に文部科学省の世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI)の1つとして採択されました。

ITbMでは、精緻にデザインされた機能をもつ分子(化合物)を用いて、これまで明らかにされていなかった生命機能の解明を目指すと共に、化学者と生物学者が隣り合わせになって融合研究を行うミックス・ラボ、ミックス・オフィスで化学と生物学の融合領域研究を展開しています。「ミックス」をキーワードに、人々の思考、生活、行動を劇的に変えるトランスフォーマティブ分子の発見と開発を行い、社会が直面する環境問題、食料問題、医療技術の発展といったさまざまな課題に取り組んでいます。これまで10年間の取り組みが高く評価され、世界トップレベルの極めて高い研究水準と優れた研究環境にある研究拠点「WPI アカデミー」のメンバーに認定されました。