

植物の有性生殖における雌雄相互作用分子の探索

東京大学・大学院農学生命科学研究科 藤井壮太

有性生殖は多様性を生み出す機構であり、生物種が予測不可能な未来の地球環境変動へ適応する唯一の統一的手段です。本研究では有性生殖の本質に迫るべく、植物における配偶子の選択の分子メカニズムの解明を目指しました。ふたつの生物的メカニズム、1) 花粉が雌しべに有性生殖を開始させるしくみ、2) 雌しべが異種の花粉を選択的に排除するしくみ、に着目し、生殖に関わる分子を網羅的に見出すことを目的としました。

1) 雌しべが有性生殖を開始するために必要な花粉側の分子の探索

本研究では独自に開発した花粉-雌しべ相互作用検出のためのバイオアッセイシステムを活用し、有機化学的な手法を用い、雌しべを活性化する花粉表層物質の同定を行いました。生物発光を利用したスクリーニングシステムを開発して、花粉発芽に必要なリン脂質輸送タンパク質 Vacuolar Protein Sorting 13a (VPS13a) を発見しました (Tangpranomkorn et al *New Phytol* 2025) (図1)。VPS13は真核生物に普遍的に存在するリン脂質輸送チャンネルですが、被子植物におけるその機能はわかっていませんでした。本研究から、被子植物の VPS13a は主に花粉において機能し、カルシウムイオン依存的に細胞膜に局在するリン脂質チャンネルであることが明らかになりました。また、VPS13a は細胞内の分泌小胞と共局在し、特定のリン脂質分子種の輸送に大きく関わることを示唆されました。本研究からそれらのリン脂質が活性分子として有性生殖を開始する役割をもつことが期待されたため、現在も解明を進めています。

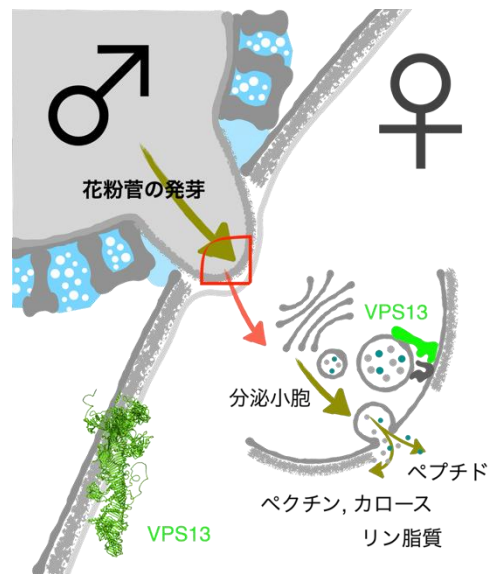


図1 花粉管の発芽における植物 VPS13 の機能モデル

また、受精シグナルに関わる他の因子として、花粉に存在する Glycine Rich Proteins (GRPs)を見出しました。GRP は分子の中央に脂質と結合する疎水性の α ヘリックスを持ち、C 末端に天然変性領域を持つ両親媒性のタンパク質因子ですが、冗長性のためその機能はよくわかっていませんでした。本研究でゲノム編集法によって染色体上でクラスターを形成する GRP 遺伝子群を全て除去したところ、雌しべにおける花粉の吸水効率が著しく減少することが明らかになりました。さらに、GRP 欠損株では花粉コートの脂質体が異常に肥大し、特定のステロイド分子種が減少していたことから、GRP は脂質体の維持や脂溶性分子の保持に必須であることが分かりました。また、性質の異なる GRP 分子種を単独で GRP 欠損株へと導入しても回復は部分的でしたが、C 末端の天然変性領域の配列が大きく異なる 3 種 (GRP16、17、18) を同時に導入すると、吸水能力が完全に回復しました。結論として、GRP は多様なタンパク質を集めつつ脂質体を細かく維持し、両親媒性のエマルジョンを形成することで、花粉の速やかな吸水を可能にしていると考えられます。すなわち、花粉に大量に存在する両親媒性 GRP タンパク質がエマルジョンを生み出し、それによって花粉の表面がマヨネーズのような性質をもつことでスムーズな受精プロセスが進むことが明らかになりました。

2) 異種排除プロセスにはたらく分子メカニズム

野外の植物において、異種花粉の受粉は同種内生殖を阻害する「繁殖干渉」を引き起こし、生態系における重要な選択圧となっています。私たちはこれまでに異種花粉排除因子 **SPRI1** を同定しましたが (Fujii et al., 2019)、本発表では **SPRI1** とは異なる新規因子 **SPRI2**、およびアブラナ科で新たな生殖障壁システムを発見しました。

本研究ではまず、**SPRI1** とは独立した因子として **SPRI2** を見出しました (Fujii et al. *Nature Plants* 2023) (図2)。**SPRI2** の機能を欠損したシロイヌナズナ変異体を用いた解析から、**SPRI2** は本来排除できるはずの異種花粉を排除するために必須であることが明らかとなりました。

SPRI2 は DNA に結合する Zinc-finger ドメインを持っており、核内で転写因子として転写複合体と協働し、細胞壁関連遺伝子の転写調節を行っています。さらに興味深いことに、**SPRI2** は核内で液-液相分離 (LLPS) による構造体に局在し、転写複合体を形成して機能することも示されました。

その一方で、現在 Recurrent evolution of dosage-dependent toxin-antidote system (量依存的な毒-解毒剤システムの再発進化) を発見したため研究を行っています (Miura et al., in preparation)。具体的には、雌しべ側で花粉を排除する分泌型ペプチド Fem fatale (FEM) と、それに対する抵抗性を花粉に与える分泌型タンパク質 Hom capable (HOM) をシロイヌナズナから発見しました。FEM は異種花粉管や一部の同種花粉管に対して伸長抑制効果 (毒性) を示し、HOM はその効果を打ち消す役割 (解毒剤) を果たします。FEM と HOM は生化学的に相互作用し、染色体上でも隣接して座乗していました。さらに、これらはゲノム上でセットとして重複を繰り返しており、コピー数が多い系統ほど雌しべの花粉排除能力も花粉の伸長能力も高いことが判明しました。つまり、FEM と HOM はセットで重複する「量的補償効果」によって、お互い常に釣り合った量で存在しているのです。このセット重複はアブラナ科植物の進化過程で何度も起きており、植物が頻繁に採用する進化パターンであると考えられます。

以上の研究から、雌しべと花粉は単に受精へ向けて協調的に共進化しているだけではなく、雌しべが花粉に厳しい選抜 (毒) を課し、花粉がその抵抗手段 (解毒) を獲得するという関係にあることがわかってきました。生殖の基礎メカニズムにはこのような毒と解毒剂的な関係が頻繁に組み込まれており、その量的関係が崩れた場合に生殖障壁になりうると考えられます。今後は、広い植物種の比較ゲノム解析から、こうした分子システムの普遍性を明らかにしていきたいと考えています。

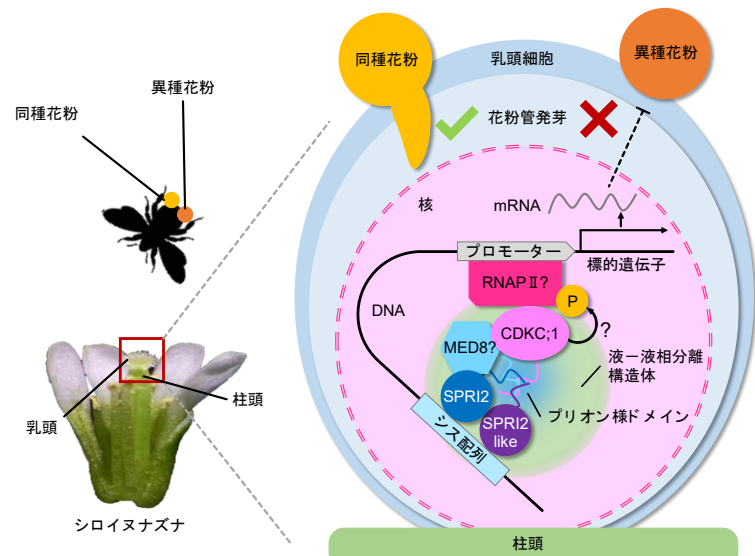


図2 SPRI2 の機能モデル