

リン酸欠乏時における植物の細胞内リサイクル機構

(膜脂質転換とオートファジー)の関係性の解明

明治大学研究・知財戦略機構 法人ポスト・ドクター (助成時)
明治大学農学部 助教 (現在)

吉竹 悠宇志

1. 研究の背景

1-1. 植物とリン酸 (Pi)

Pi は窒素・カリウムとともに植物の三大栄養素と呼ばれるほど植物の生育に重要な栄養素の一つである。そのため、Pi の欠乏は植物の生育に重篤な被害を及ぼすが、土壤中の Pi はマグネシウムイオンやカルシウムイオンと結合し、植物が吸収できない難溶性の形態をとってしまうため、植物はしばしば Pi 欠乏に晒されている。そのため、植物はいくつかの Pi 欠乏応答機構を有しており、それらは「土壌からの取り込みの活性化」と「細胞内 Pi リサイクル」の大きく 2 つに分けられる。Pi リサイクルでは細胞内の物質を分解し、そこに含まれる Pi を細胞内に再供給する機構である。

1-2. オートファジー

オートファジーとは細胞内成分分解機構の一つであり、分解対象物を隔離膜が包み込み、オートファゴソームを形成し、液胞へ輸送することで、液胞内で対象物を分解する機構である。オートファジーには特定の物質を分解する「選択的オートファジー」と細胞内の物質をまとめて分解する「非選択的オートファジー」が存在する (図 1)。

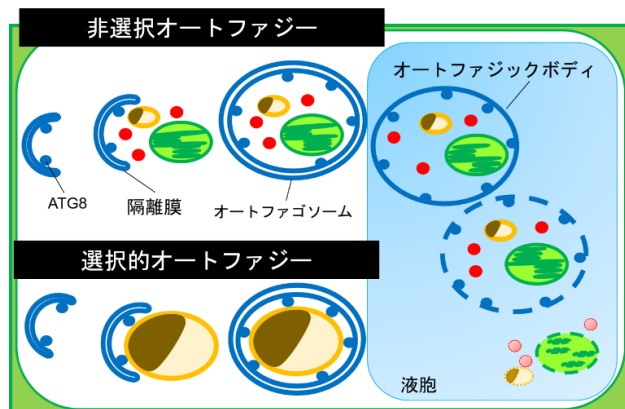


図 1: オートファジーの模式

2. 本研究の目的

オートファジーは窒素や炭素、亜鉛などの栄養欠乏下での植物の生育に重要であることが分かっている [Yoshimoto et al., 2004, Shinozaki et al., 2020]。また、Pi 欠乏時にも根においてオートファジーが誘導されることも分かっているが、このオートファジーは小胞体ストレスを介して誘導されており、Pi リサイクルには寄与しないとされていた [Naumann et al., 2019]。そのため、Pi 欠乏時のオートファジーについて生理学的意義等は未解明であった。

本研究では植物の Pi リサイクル機構の全容解明のために、オートファジーが Pi 欠乏時の植物の生育にどのような影響を与えるの解析を行った。

3. 結果

3-1. 早期 Pi 欠乏時の応答

モデル植物であるシロイヌナズナの野生株とオートファジー不能体とを Pi 欠乏条件下で生育させたところ、オートファジー不能体では生育の悪化、葉の枯死が見られたことからオートファジーは植物の生育に重要であることが分かった。更なる解析の結果、オートファジーは生育の悪化などの Pi 欠乏症状が見られない Pi 欠乏初期段階で、特異的に小胞体を分解する (ER ファジー) ことで Pi リサイクルに関与していることが明らかとなった。これまで、Pi 欠乏時のリン脂質分解は長期間 Pi 欠乏に晒されることで、細胞内の Pi 濃度が減少することで誘導される酵素の働きによって分解されることが知られていた。しかし、本研究により、早期 Pi 欠乏下では Pi 欠乏時に鉄の取り込みが活性化し、過剰な鉄が小胞体膜の脂質を酸化することで ER ファジーが誘導されるということが分かった。それにより、小胞体のリン脂質が分解され、そこに含まれている Pi が細胞内に供給されることも分かった。この際、細胞内に放出された Pi は従来の酵素的反応によるリン脂質分解を抑制していると考えられる (図 2)。これは、従来のリン脂質分解酵素によるリン脂質分解機構とは異なる機構である。

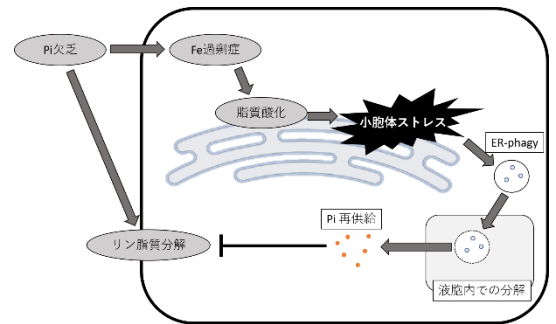


図 2: 早期 Pi 欠乏時の応答機構

3-2. Pi 欠乏下での過剰窒素施肥の効果

これまでの解析で、Pi 欠乏時に生育環境中の窒素の濃度を上昇させると Pi 欠乏ストレスが緩和され、生育が回復することを発見していた。本研究で、そのメカニズムを解析したところ、Pi 欠乏時に窒素を過剰施肥すると細胞内の窒素と炭素のバランスが崩れ、オートファジーによる葉緑体の部分分解が引き起こされることで、Pi 欠乏ストレスが緩和され、リン脂質の分解が抑制されることが分かった。この成果については *Plant Physiology* 誌に発表した。

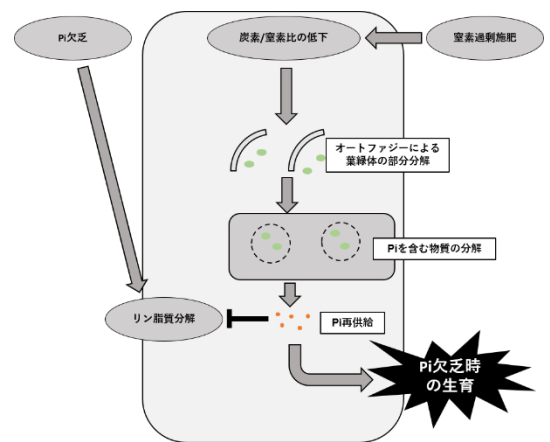


図 3: Pi 欠乏かつ窒素過剰時の応答機構

4. まとめ

本研究により、早期 Pi 欠乏によって引き起こされる新規の Pi 欠乏応答機構が明らかとなった。これにより、植物は Pi 欠乏に対して、早期および後期の応答機構を有していることが分かった。植物は早期および後期の Pi 欠乏応答を使い分けることで、自然界の不均一な Pi 濃度環境下で生育していると考えられる。

また、本研究により、Pi 欠乏下で生育環境中の窒素濃度を上昇させることで植物の Pi リサイクルが活性化されるメカニズムも明らかとなった。これにより、植物は Pi と窒素による複合的なストレスに応答していると考えられる。