

令和8年10月7日

石川県公立大学法人 石川県立大学
国立大学法人神戸大学

ダイズシストセンチュウ感染に伴い植物細胞内の「物流網」が大きく再編 線虫が栄養を得るために誘導する小胞体ネットワークを3次元で可視化

- ダイズシストセンチュウがダイズ根に寄生し、寄主から栄養を得るために誘導する「シンシチウム」の内部を、3次元電子顕微鏡技術で詳細に解析しました。
- シンシチウム内は、これまで2次元像では捉えにくかった管状小胞体（tER）が、シート状小胞体（cER）とともに密なネットワークを形成していることを明らかにしました。
- シンシチウムの細胞融合部位では、管状小胞体が両細胞を連結するように伸びていることから、物質輸送や栄養供給に重要な役割を果たしていることが示唆されました。

石川県立大学の古賀博則、自然科学研究機構の村田和義、北海道立総合研究機構の東岱孝司、神戸大学の洲崎敏伸、韓国・釜山大学の Chihong Song らの国際研究グループは、ダイズシストセンチュウがダイズ根に寄生し、寄主から養分を得るために誘導する「シンシチウム」を、超高压電子線トモグラフィー（HV-ET）と電界放出形走査電子顕微鏡（FE-SEM）を用いて3次元的に解析しました。

その結果、シンシチウムでは、細胞内で物質輸送や脂質代謝などを担う小胞体（ER）が大きく再編され、シート状小胞体と管状小胞体からなる非常に複雑なネットワークが形成されていることが明らかになりました。シンシチウムは、宿主細胞の融合により生じる多核の巨大細胞であり、融合部位では細胞壁が溶解して開口部が形成されます。この開口部では多くの管状小胞体が両細胞を連結するように伸長している様子が観察されました。これらの結果から、管状小胞体はシンシチウム間の物質輸送や栄養供給に重要な役割を果たしている可能性が示されました。

本成果は国際学術誌『Scientific Reports』に掲載されました。

概要

ダイズシストセンチュウ（*Heterodera glycines*）は、ダイズに大きな被害を与える植物寄生性線虫です。この線虫の非常に興味深い特徴は、単に植物の根から栄養を吸い取るのではなく、線虫が必要とする栄養を得るために植物自身の細胞を作り変えて、その栄養をつくらせていることです。

幼虫がダイズの根に侵入すると、宿主細胞の細胞壁が部分的に失われ、隣り合う細胞の細胞質

がつながります。この細胞融合を繰り返すことによって、「シンシチウム」と呼ばれる多核の巨大な融合細胞が形成されます。このシンシチウムは場合によっては数百個の植物細胞にまで広がり、線虫は発育期間を通じて、そこから栄養を受け取ります。つまり、線虫は植物の中に自分専用の“栄養供給基地”を作り出しているとも言えます。

しかし、大きな疑問が残されていました。多数の細胞が一つにつながったとき、その内部では栄養分やその他の物質はどのように移動しているのでしょうか。

研究グループが注目したのが、細胞内に広がる膜構造である小胞体（Endoplasmic Reticulum：ER）です。小胞体は、タンパク質や脂質の合成、物質輸送などに関わる重要な細胞小器官で、細胞の中に広がるネットワークを形成しています。いわば、細胞内部の「物流網」の一つです。

これまでの研究から、線虫によって誘導されたシンシチウムでは小胞体が著しく増加することが知られていました。しかし、従来の透過電子顕微鏡では試料を非常に薄く切って観察するため、複雑な膜構造を2次元の断面としてしか見ることができませんでした。特に細い管状の小胞体（tER）が、単独で存在しているのか、それとも互いにつながったネットワークを形成しているのかを明らかにすることは困難でした。

小胞体の「立体的なつながり」を3次元で可視化

そこで本研究では、小胞体を高いコントラストで観察できるヨウ化亜鉛－四酸化オスミウム（ZIO）固定法と、厚い試料の内部構造を3次元的に解析できる超高压電子線トモグラフィー（HV-ET）を組み合わせました。通常の透過電子顕微鏡観察では80～85 nm の薄い切片を用いますが、本研究では約400 nm の厚い切片を使用し、1 MV の超高压電子顕微鏡でさまざまな角度から撮影しました。得られた多数の画像をコンピューター上で再構築することで、シンシチウム内部の小胞体を立体的に追跡しました。

その結果、管状小胞体（tER）は直径約120 nm の細い長い管で、枝分かれしながら広がり、複雑な構造をしていました。シート状小胞体（cER）の一部は何層にも重なり、同心円状の構造を形成し、その中に管状小胞体が見られるなど、シート状小胞体と小胞体状小胞体は一体となって、複雑で連続した小胞体ネットワークを形成していました。これまで2次元像では「点」や「短い線」のようにしか見えなかった構造が、3次元で見ることによって、これらが複雑なネットワークを構築していることが明瞭になりました。

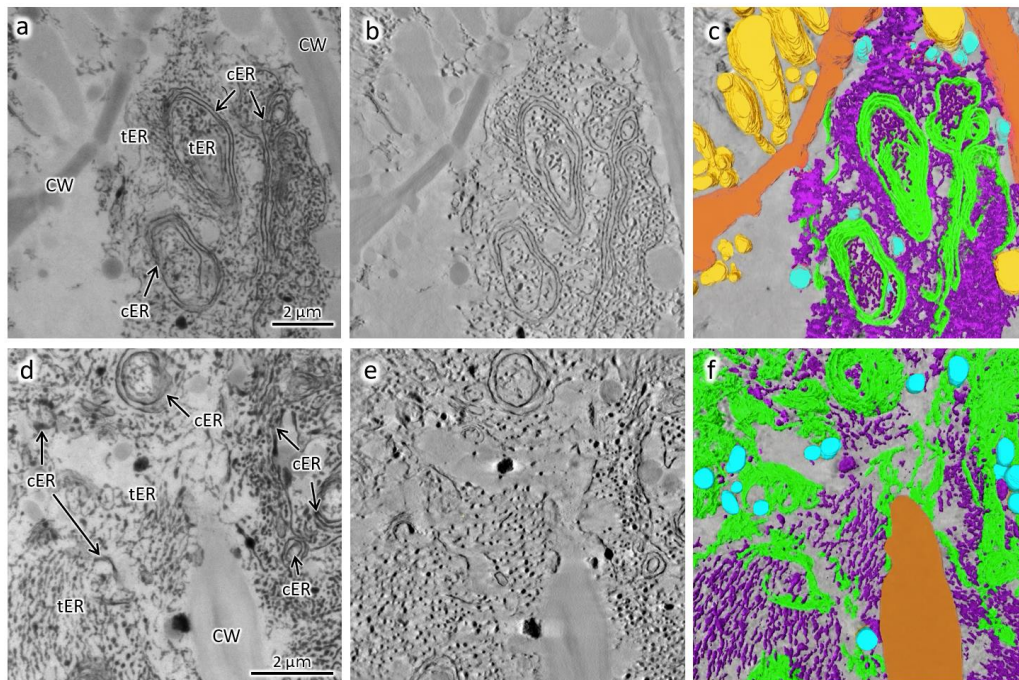


図1. シンシチウム内部の小胞体ネットワークを3次元で可視化 3次元再構築像では、管状小胞体（tER）を紫色、シート状小胞体（cER）を緑色、細胞壁（CW）を茶色で示しています。

細胞壁の開口部周辺に管状小胞体が分布

さらに研究グループは、別の方法であるオスミウム浸軟法とFE-SEMを用いて、シンシチウム内部の膜構造を直接観察しました。オスミウム浸軟法では、細胞質の可溶性成分を除去することで、細胞内部にある膜構造の表面を立体的に観察しやすくなります。その結果、HV-ETとは異なる方法でも、シンシチウム内部に多数のシート状小胞体と管状小胞体が存在することが確認されました。

特に注目されたのが、細胞壁が部分的に溶解して開口部が形成された場所です。本来、植物細胞は強固な細胞壁によって一つ一つ区切られています。しかし線虫がシンシチウムを形成すると、その細胞壁の一部が溶解し、隣り合う細胞の細胞質がつながります。その境界部分には多数の管状小胞体が分布していました。

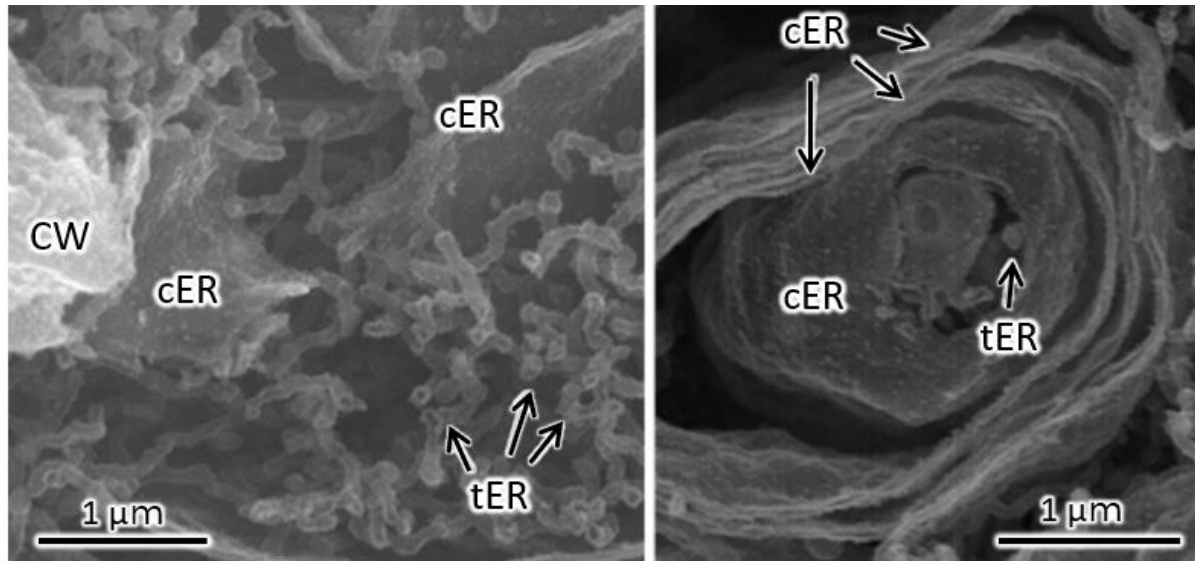


図2. 細胞壁の開口部周辺に分布する管状小胞体.

左図：細胞壁（CW）の開口部周辺に分布している多数の管状小胞体（tER）。

右図：層状・同心円状のシート状小胞体（cER）。この中に管状小胞体が見られます。

線虫感染に伴い、植物細胞の「内部」まで大きく再編

今回の研究で重要なのは、単に「シンシチウムには小胞体がたくさん存在する」ことを確認しただけではありません。線虫感染によって、植物細胞の中に存在していた小胞体ネットワークそのものが再編され、シンシチウムにおいて隣接の細胞同士が連続した小胞体ネットワークでつながれている可能性が示されたことです。研究では、細胞壁が部分的に溶解した部分に多数の管状小胞体が存在し、一部は細胞間の開口部に入り込む、あるいはそこを横切るように見えました。この結果は、線虫感染に伴い、細胞内部の物質輸送システムまで大きく再編されている可能性を示しています。

小胞体ネットワークが実際に一つの連続した輸送経路として働いているとすれば、巨大なシンシチウムの中で栄養やその他の物質を効率よく分配する仕組みの一つとなっている可能性があります。また、小胞体は脂質やステロールの合成にも重要な役割を持っています。シストセンチュウはステロールを新規に合成することができず、宿主植物から得る必要があることから、今回観察された小胞体ネットワークが寄生を支える代謝にも関与している可能性があります。

ただし、本研究で明らかにしたのは小胞体ネットワークの構造です。実際にこのネットワークを通して栄養やシグナルが輸送されていることを直接証明したのではなく、その機能については今後さらに検証する必要があります。

研究開発者からのひとこと

植物寄生性線虫は非常に小さな生物ですが、宿主植物の細胞を大きく作り変え、自分自身が成長に必要な栄養を供給できるようにします。これまでシンシチウムの内部に多くの小胞体が存在することは知られていましたが、薄い切片を観察する従来の電子顕微鏡法だけでは、それらが実際にどのような立体構造を持っているのか十分に分かりませんでした。今回、相補的な二つの電子顕微鏡法を組み合わせることで、管状の小胞体がシンシチウムの内部に複雑なネットワークと

して広がる様子を捉えることができました。

特に興味深かったのは、もともと細胞と細胞を隔てていた細胞壁が部分的に溶解する場所に、多数の管状小胞体が分布していたことです。線虫が植物細胞をどのように改変し、自分自身のための巨大な栄養供給システムを作り上げるのか。その仕組みを理解するための一つの手がかりになればと考えています。

今後の展開

今後は、今回明らかになった小胞体ネットワークが、実際にどのような機能を持つのかを明らかにすることが重要です。特に、シンシチウム内部で栄養分や脂質、シグナル分子などがどのように移動しているのか、また管状小胞体はその輸送にどの程度関与しているのかを検証していく必要があります。さらに、感染の初期段階から成熟したシンシチウムが形成されるまでを時系列で解析することで、もともと別々であった植物細胞の小胞体が、どのようにして広範なネットワークへと再編されるのかを明らかにできる可能性があります。

こうした研究が進めば、植物寄生性線虫が宿主植物の細胞を操作する仕組みへの理解が深まり、将来的には農作物における線虫被害の制御を考える上でも新たな知見につながることを期待されます。

<論文情報>

掲載誌 : Scientific Reports

論文タイトル : Three-dimensional architecture of the endoplasmic reticulum network in soybean roots reveals extensive remodeling during cyst nematode parasitism

著者 : Hironori Koga, Kazuyoshi Murata, Takashi Todai, Toshinobu Suzaki, Chihong Song

責任著者 : Chihong Song (Pusan National University)

DOI : 10.1038/s41598-026-70405-9

掲載日 : 2026年10月6日

研究助成 : National Institute for Physiological Sciences Collaborative Study Program (20-243)、National Research Foundation of Korea (RS-2024-00440289、RS-2026-25476185)

<用語解説>

- **ダイズシストセンチュウ (*Heterodera glycines*)** : ダイズの根に寄生する植物寄生性線虫です。根の内部に特殊な栄養供給構造（シンシチウム）を形成し、そこから栄養を得て発育します。
- **シンシチウム** : 線虫感染により多くの植物細胞の境界が部分的に失われ、細胞が融合した巨大な栄養供給構造です。
- **小胞体 (ER)** : 細胞内に広がる膜性のネットワークです。本研究では主にシート状小胞体 (cER) と管状小胞体 (tER) の立体配置を解析しました。
- **高圧電子線トモグラフィー (HV-ET)** : 厚い試料をさまざまな角度から電子顕微鏡撮影し、その連続像から細胞内部の微細構造を3次元再構築する手法です。