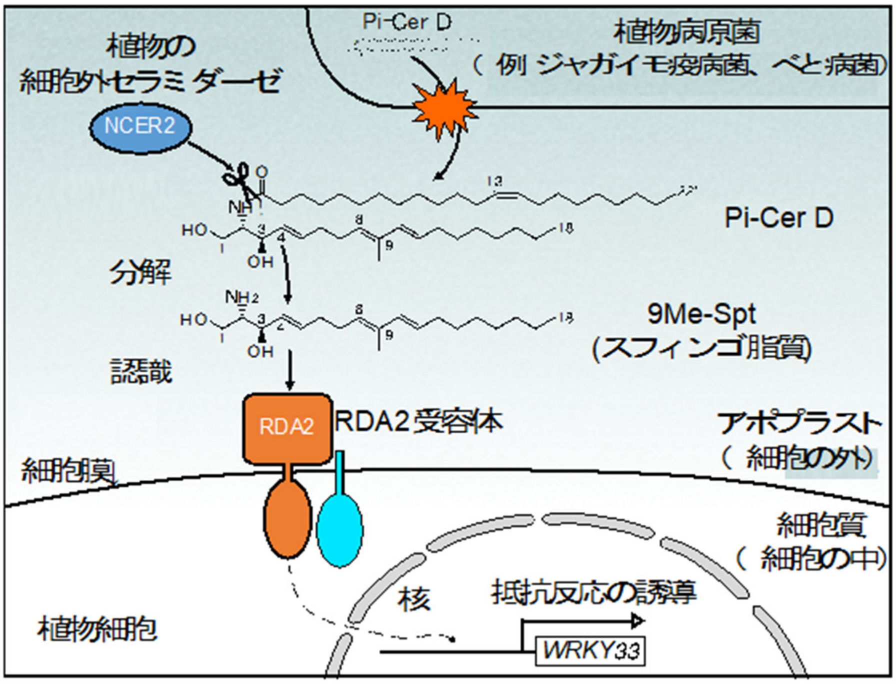


植物が病原菌特有の脂質を認識するしくみ

―ジャガイモ疫病菌のスフィンゴ脂質に対する受容体の発見―

概要

ジャガイモ疫病は、卵菌類[※1]の疫病菌によって引き起こされる深刻な植物病害です。国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院生命農学研究科 竹本 大吾 准教授、小鹿 一 教授、川北 一人 教授、名古屋大学遺伝子実験施設 石浦 正寛 名誉教授は、京都大学大学院農学研究科 加藤 大明 特定研究員、寺内 良平 教授、高野 義孝 教授、大門 高明 教授、小内 清 研究員、(公財)岩手生物工学研究センター 阿部 陽 主席研究員、根本 圭一郎 主任研究員、清水 元樹 主任研究員、理化学研究所および東京大学大学院 白須 賢 グループディレクター/教授、吉田 稔 グループディレクター/教授、理化学研究所 浅井 秀太 上級研究員、石濱 伸明 研究員、松岡 聖二 技師らの共同研究グループと共に、ジャガイモ疫病菌のもつスフィンゴ脂質[※2]を認識して抵抗性を誘導する植物の受容体を初めて発見しました。

ジャガイモ疫病菌の細胞膜に含まれるセラミド[※3]という物質に Pi-Cer D という種類があります。Pi-Cer D は、植物に抵抗反応を引き起こすことが知られています。実験植物シロイヌナズナと Lumi-Map 法という最新技術を用いて、Pi-Cer D 処理による抵抗反応に必要とされる遺伝子を調べたところ、NCER2 セラミダーゼ遺伝子[※3]と RDA2 受容体の遺伝子が見つかりました。病原菌の Pi-Cer D が NCER2 セラミダーゼによって切断されると 9 Me-Spt というスフィンゴ脂質ができ、このスフィンゴ脂質が RDA2 受容体に結合すると抵抗反応が引き起こされるしくみがわかりま

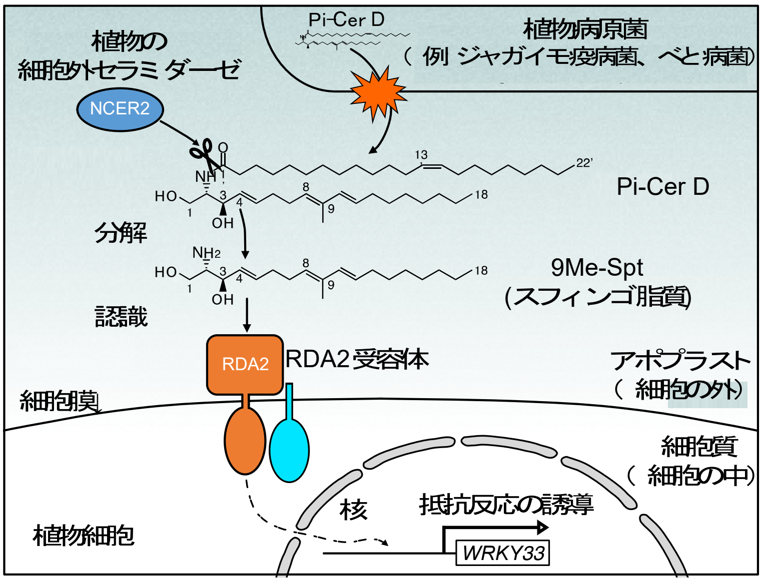


図: ジャガイモ疫病菌などの植物病原菌がもつセラミド脂質にPi-Cer Dという種類があります。Pi-Cer Dは、植物の細胞の外にあるセラミダーゼ(NCER2)で切断されて、9Me-Sptという名前のスフィンゴ脂質を生じます。9Me-Sptが植物細胞膜上の受容体RDA2に結合するとさまざまな抵抗反応がひきおこされます。

した。今後、９Me-Spt と RDA2 受容体の結合のしかたと RDA2 受容体の働くしくみを詳しく調べることにより、外敵のスフィンゴ脂質に対してより敏感な受容体を開発し、病気に強い作物をつくることも可能です。

本成果は、2022 年 5 月 19 日（現地時刻）に米国の国際学術誌「Science」にオンライン掲載されました。

１. 背景

ジャガイモ疫病は、19 世紀アイルランド大飢饉の原因です。この飢饉では 100 万人の犠牲者が出るとともに 200 万人が国外に移住しました。作物の疫病は、卵菌類の疫病菌によって引き起こされ、現在でも深刻な被害をもたらしています。植物の病原菌に対する抵抗性のしくみを解明することは、世界の食料の安定供給において重要な課題です。本研究では、病害に対する植物の抵抗性を高めることを目的に、疫病菌を認識する植物受容体を探索しました。

２. 研究手法・成果

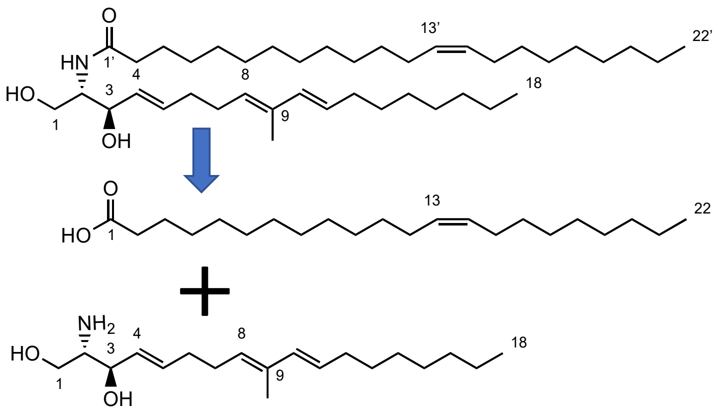
名古屋大学の竹本大吾准教授、小鹿一教授らの研究グループが、ジャガイモ疫病菌の脂質の一種であるセラミドの Pi-Cer D がジャガイモに認識されて抵抗反応を誘導することを明らかにしました（図１上)。Pi-Cer D は、実験植物シロイヌナズナにも認識されて抵抗性を誘導します。そこで独自に開発した Lumi-Map 法（図２）という最新ゲノム解析技術を用いて、シロイヌナズナが Pi-Cer D を認識して抵抗性を誘導する時に必要な遺伝子の種類を調べました。その結果、NCER2 セラミダーゼ遺伝子と RDA2 受容体遺伝子の２つの遺伝子が必要であることがわかりました。さらに、これらの遺伝子がつくるタンパク質の詳細な解析の結果、Pi-Cer D セラミドが NCER2 セラミダーゼにより 9Me-Spt というスフィンゴ脂質に分解され、生じたスフィンゴ脂質が植物細胞膜上にある RDA2 受容体に結合して認識された後に植物に抵抗性が引き起こされることがわかりました。スフィンゴ脂質には多くの種類があり、生物の細胞膜に広く存在します。植物に強い抵抗反応を誘導するスフィンゴ脂質は、９メチル構造[※4]（図１）をもっており、菌類には広く存在しますが、植物にはありません。そこで、植物では９メチル構造をもつスフィンゴ脂質を外敵の印として認識することにより、抵抗性を導くしくみが進化したと考えられます。

図1. Pi-Cer Dと9Me-Sptの構造

ジャガイモ疫病菌セラミド
Pi-Cer D

13*Z*-docosenoic acid
(Erucic acid)

(4*E*,8*E*,10*E*)-9-methyl-4,8,10-sphingatrienine
(9Me-Spt)

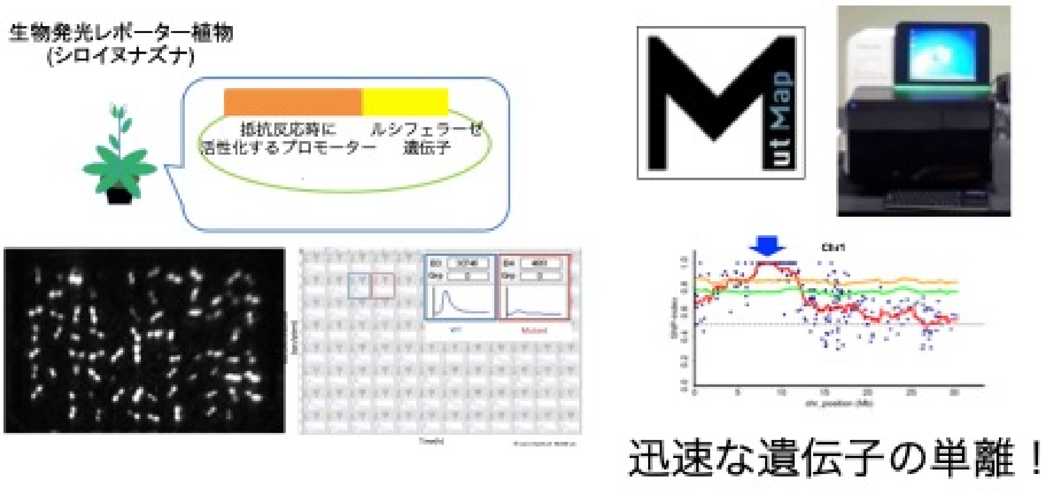


9メチル構造

ジャガイモ疫病菌セラミドPi-Cer D(上)は、セラミダーゼによって切断されてエルカ酸(中)とスフィンゴ脂質（下: 9Me-Spt)になる。9Me-Sptの左から9番目の炭素にメチル基が付いている構造は、卵菌やカビのスフィンゴ脂質には見られるが、植物のスフィンゴ脂質には見られない。

図２ Lumi-Map法の概略図

生物発光による表現型の解析　＋　MutMap法による遺伝子の特定



Kato et. al.
Mol. Plant Microbe Interact. (2020)

抵抗反応にともなって活性化される植物遺伝子プロモーターとホタルのルシフェラーゼ遺伝子を結合した人工DNAで形質転換したシロイヌナズナ植物は、病原菌の分子を感知して光を出す。この生物発光レポーター植物に突然変異処理をほどこし、多数の個体の中から病原菌分子に反応しなくなった個体を選抜する。不反応の個体でDNA配列が変化している遺伝子をMutMap法（Abeら、Nature Biotechnol. 2012)というゲノム解析技術で迅速に単離同定する。

（参考文献）加藤ら、Mol. Plant Microbe Interact. DOI：10.1094/MPMI-05-20-0118-TA

３．波及効果、今後の予定

タンパク質構造解析などを用いて RDA2 がスフィンゴ脂質に結合するしくみを明らかにし、スフィンゴ脂質とより結合しやすい受容体を設計すれば、病原菌が侵入するとすぐに抵抗性を発揮する作物をつくることができます。また、RDA2 がスフィンゴ脂質を認識した後にどのようにして抵抗性を導くかを研究することにより、病気に強い作物の開発が可能です。

４．研究プロジェクトについて

本研究は、日本学術振興会科学研究費 JSPS 科学研究費若手研究 20K15528, JSPS 科学研究費基盤(B) 20H02995, JSPS 科学研究費基盤(B) 17H03963, JSPS 科学研究費基盤(S) 17H06172, JSPS 新学術領域研究（研究領域提案型）18H05503, JSPS 科学研究費基盤(S) 19H05640, JSPS 科学研究費基盤(B) 20H02985, JSPS 科学研究費基盤(S) 21H05032, JSPS 科学研究費 挑戦的研究（萌芽）21K19112, JSPS 科学研究費基盤(S) 15H05779, JSPS 科学研究費基盤(S) 20H05681 の支援を受けて実施しました。本研究は、京都大学大学院農学研究科、（公財）岩手生物工学研究センター、名古屋大学、理化学研究所、東京大学の共同研究成果です。

＜用語解説＞

※1 卵菌類：不等毛類に属する原生生物のなかま。腐生または寄生の生活をする。

※2 スフィンゴ脂質：構造中にスフィンゴイド塩基を含む複合脂質の総称。

※3 セラミド、セラミダーゼ遺伝子：スフィンゴイド塩基と脂肪酸が結合した高分子、セラミダーゼはセラミドをスフィンゴイド塩基と脂肪酸に切断する酵素。

※4 メチル構造：末端にメチル基（$-CH_3$）が付加されている構造。

＜研究者のコメント＞

植物が病原菌から身を守るしくみを明らかにすることは、食糧の安定生産において重要な意味をもちます。今回、卵菌類や糸状菌が特徴的にもっている脂質を、植物が切り出して認識することにより病原菌から身を守っていることをつきとめることができました。今後もたくさんの仲間と協力しながら、丁寧で確実な研究を積み上げ、農学の発展に貢献していきたいと思います。（加藤）

本発見は、日本の多くの研究室の共同成果です。異なる研究分野の専門家の連携により初めて実現しました。ご協力くださった皆様に心より感謝いたします。（寺内）

＜論文タイトルと著者＞

タイトル：Recognition of pathogen-derived sphingolipids in Arabidopsis(シロイヌナズナが病原菌由来のスフィンゴ脂質を認識するしくみ)

著　　者：H. Kato, K. Nemoto, M. Shimizu, A, Abe, S. Asai, N. Ishihama, S. Matsuoka, T. Daimon, M. Ojika, K. Kawakita, K. Onai, K. Shirasu, M. Yoshida, M. Ishiura, D. Takemoto, Y. Takano, R. Terauchi.

掲 載 誌：*Science*

DOI：10.1126/science.abn0650

URL：https://www.science.org/doi/10.1126/science.abn0650