



東北大学
TOHOKU UNIVERSITY



国立大学法人北海道国立大学機構
帯広畜産大学



理化学研究所

2025年9月5日
農研機構
東北大学
帯広畜産大学
理化学研究所

温室効果ガス削減効果を高めたダイズ・根粒菌共生系 を開発

―農地からの一酸化二窒素放出を抑制する革新的技術―

地球温暖化の一因となる一酸化二窒素 (N_2O) は農地からも発生しており、その発生を抑制する方法が世界中で模索されています。農研機構、東北大学、帯広畜産大学、理化学研究所の共同研究グループは、 N_2O を分解する能力の高い根粒菌をダイズに優占的に共生させる技術を開発しました。この技術によって、土壤中でダイズ根粒が崩壊する過程で放出される N_2O の量が減少することを確認しました。ダイズほ場からの N_2O 放出を抑えることで、地球温暖化の抑制に貢献することが期待されます。

N_2O は二酸化炭素の 265 倍の温室効果を示す主要な温室効果ガスの 1 つです。人類の食を支える農業活動は人為的 N_2O 排出量の約 60% を占め (IPCC 第 5 次評価報告書 2013 より)、その中でも農地からの放出が大きな割合を占めています。窒素は植物の生長に必須な栄養源ですが、作物栽培のために農地に投入される大量の窒素肥料や、収穫されずに残る作物残さから N_2O が発生することが知られており、農地からの N_2O 放出量を削減する技術の開発は、世界的に重要な課題となっています。

土壌微生物である根粒菌は、ダイズなどのマメ科植物が根に形成する根粒の内部に共生 (根粒共生¹⁾) して、大気中の窒素を栄養分として植物に供給する有用微生物です。さらに、一部の根粒菌は、 N_2O を窒素へと分解する能力をもっています。窒素は大気的主要成分であり、温室効果に直接的な影響を与えることはありません。

そこで、高い N_2O 分解能力をもつ N_2O 削減根粒菌をダイズに接種して共生させることにより、ダイズの収穫後、根粒が崩壊する過程で放出される N_2O を削減する試みがなされてきました (図 1)。しかし、ほ場の土壌中には多種多様な土着根粒菌が存在し、その多くは N_2O 分解能力をもたないか、弱い能力しかもっていません (図 1)。ほ場にダイズを植え、 N_2O 削減根粒菌を接種すると、土着根粒菌との感染競争が起こり、大多数の根粒には土着根粒菌が共生してしまいます。その結果、 N_2O 削減根粒菌が共生する根粒の割合が低くなり、 N_2O 削減能力を十分に発揮できませんでした (図 2 左)。

そこで農研機構、東北大学、帯広畜産大学、理化学研究所の共同研究グループは、根粒共生にみられる「共生不和合性現象²⁾」を利用して、 N_2O 削減根粒菌が共生する根粒の割合を高めたダイズ共生系を開発しました。不和合性現象とは、特定の「不和合性遺伝子」をもつダイズが、特定の根粒菌が分泌する「エフェクター」と呼ばれるタンパク質を認識して、その根粒菌の感染をブロックし、根粒の形成を阻止する現象です。共同研究グループは、2種類の不和合性遺伝子をあわせもつダイズを作出するとともに、自然変異によりエフェクターを作らなくなった N_2O 削減根粒菌を選抜し、両者を組み合わせました。この組み合わせにより、エフェクターを作らない N_2O 削減根粒菌は、不和合性遺伝子をもつダイズに優占的に共生することができます（図2右）。

その効果を実験室で調べたところ、不和合性遺伝子をもつダイズでは、 N_2O 削減根粒菌が共生する根粒の割合（根粒占有率）が90%以上となり、土壌から放出される N_2O 放出量は、不和合性遺伝子をもたないダイズの15%にまで減少しました。さらに、ほ場試験においても N_2O 削減根粒菌の根粒占有率は64%となり、 N_2O 放出量は、 N_2O 削減根粒菌を接種していない試験区の26%にまで減少しました。

ダイズは、食料や飼料、油糧作物として世界中で幅広く栽培されています。もともとダイズの栽培は温室効果ガスの放出が少ない食料生産システムですが、本研究で開発した技術によって、ダイズほ場から放出される N_2O 量が大きく削減されることで、環境負荷の少ないダイズ生産が可能となり、地球温暖化の抑制に貢献できると考えられます。

本成果は、科学誌「Nature Communications」（2025年9月4日）に発表されました。

<関連情報>

予算：NEDO ムーンショット型研究開発事業「資源循環の最適化による農地由来の温室効果ガスの排出削減」JPNP18016

特許：「根粒菌及びマメ科植物に根粒菌を感染させる方法」

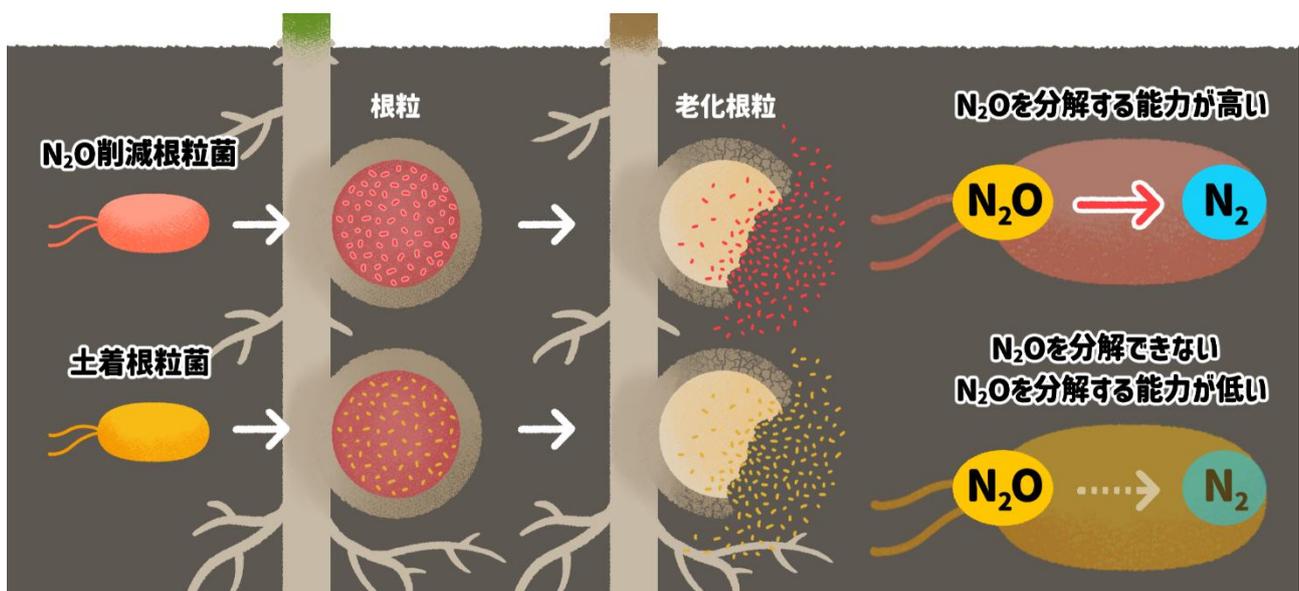


図1 N_2O 削減根粒菌と土着根粒菌

根粒菌はダイズの根に感染し、形成された根粒の内部に共生します。ダイズ収穫後、根粒が老化・崩壊する過程で根粒菌が土壤中に放出されます。その際に老化根粒に由来する窒素源から N_2O が発生します。土壤中に放出された根粒菌のうち、 N_2O 削減根粒菌は土壤中の N_2O を窒素 (N_2) に分解し、 N_2O の発生量を削減することができます。一方、土着根粒菌の多くは N_2O 分解能力をもたないか、能力が弱いため、 N_2O 削減根粒菌のように土壌からの N_2O の発生量を削減することができません。

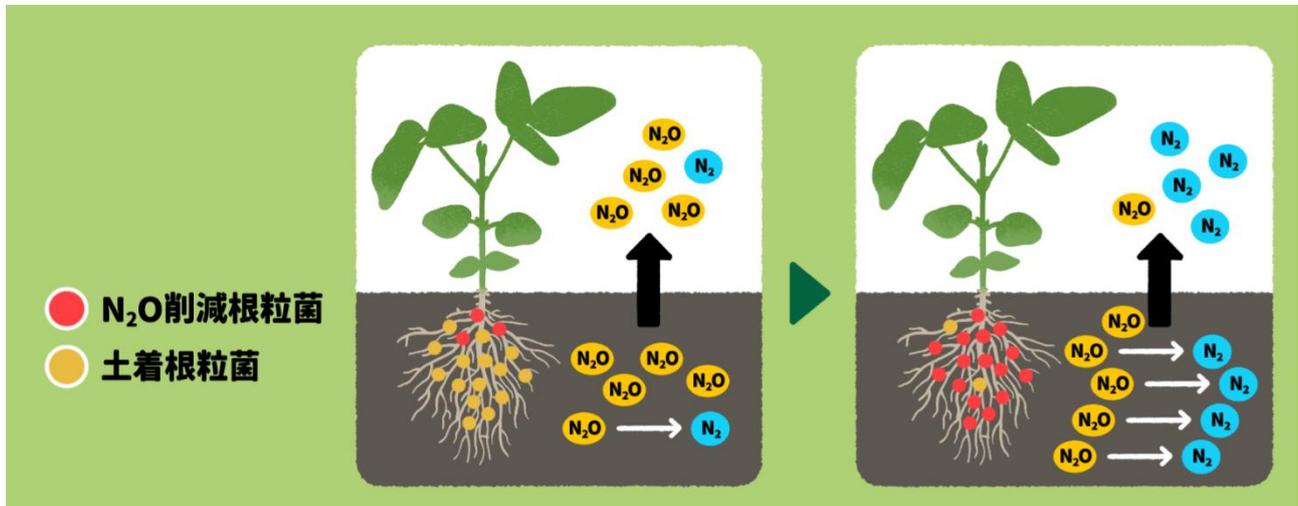


図2 N_2O 削減根粒菌が共生する根粒の割合を高めたダイズ根粒共生系の開発

(左) N_2O 削減根粒菌をほ場のダイズに接種しても、形成される根粒の大部分には土着根粒菌が共生してしまうため、 N_2O 削減根粒菌による N_2O 削減効果を十分に得られませんでした。(右) 土着根粒菌の感染を阻止し、 N_2O 削減根粒菌が共生した根粒の割合を向上させることで、 N_2O 削減効果を最大化するダイズと根粒菌の共生系を開発しました。

問い合わせ先など

研究推進責任者：農研機構 生物機能利用研究部門 所長 立石 剣

研究担当者：同 作物生長機構研究領域 グループ長 今泉(安楽) 温子
研究員 西田 帆那

広報担当者：農研機構 生物機能利用研究部門 研究推進室 遠藤 真咲

Web お問い合わせフォーム

<https://www.naro.go.jp/inquiry/index.html>

本資料は農政クラブ、農林記者会、農業技術クラブ、筑波研究学園都市記者会、文部科学記者会、科学記者会、経済産業記者会、経済産業省ペンクラブ、環境省記者クラブ、環境記者会、宮城県政記者会、東北電力記者クラブに配付しています。

※農研機構（のうけんきこう）は、国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構のコミュニケーションネーム（通称）です。新聞、TV等の報道でも当機構の名称としては「農研機構」のご使用をお願い申し上げます。

開発の社会的背景

一酸化二窒素(N_2O)は、二酸化炭素の265倍もの温室効果をもつガスであり、その排出量は過去数十年間にわたって増加し続けています。この増加の主要な原因のひとつは、農業の拡大です。農地に投入された大量の窒素肥料や、収穫後に残る作物残さが N_2O の発生源となっています。人口増加に伴い食料生産が拡大し続けるなか、農地からの N_2O 放出量を削減する技術の開発は、世界的に重要な課題となっています。

窒素は植物の生長に必須な栄養源であり、大気中に大量に存在しますが、多くの植物は大気中の窒素を直接利用することができないため、作物を生産するには大量の窒素肥料が使用されます。窒素肥料の生産は化石燃料の消費や二酸化炭素の排出などの環境負荷を伴います。

一方、ダイズなどのマメ科植物は、根に根粒菌が感染すると根粒を形成し、根粒の内部に共生している根粒菌が大気中の窒素をアンモニアに変換する窒素固定を行います。固定された窒素を栄養源として利用できるため、ダイズ栽培は少ない窒素肥料で食料を生産できるという利点があります。

しかしながら、ダイズを刈り取った後、土壌中に残った根粒が老化・崩壊する過程で、根粒に含まれる窒素源が土壌に放出され、土壌中の微生物によって N_2O へと変換されるため、ダイズほ場から N_2O が発生してしまいます。ダイズほ場からの N_2O 発生量を削減することで、より環境負荷の少ない作物生産が可能になると考えられます。

研究の経緯

一部の根粒菌は N_2O 還元酵素³⁾をもち、 N_2O を窒素へと分解する能力を有しています。窒素は大気的主要成分であり、温室効果に直接的な影響を与えることはありません。

そこで、高い N_2O 分解能力をもつ N_2O 削減根粒菌を、ほ場で栽培しているダイズに接種することで、老化・崩壊した根粒に由来する N_2O の放出量を削減する試みがなされてきました。しかし、ほ場の土壌中には様々な種類の土着根粒菌が存在し、その多くは N_2O 分解能力をもたないか、能力が低い根粒菌です(図1)。接種した N_2O 削減根粒菌は、土着根粒菌との感染競争に敗れてしまい、ダイズに形成される根粒の大部分は土着根粒菌が共生してしまいます(図2左)。土着根粒菌の N_2O 分解能力は低いいため、 N_2O 削減根粒菌が共生している根粒の割合が低いと、 N_2O 削減能力を十分には発揮することができません。

そこで、 N_2O 削減根粒菌が共生する根粒の割合を高めた根粒共生系を開発することで、 N_2O 削減根粒菌による N_2O 削減効果を最大化できるのではないかと考えました(図2右)。

研究の内容・意義

① 土着根粒菌の感染を阻止する不和合性遺伝子集積ダイズの作出

根粒共生において、特定のダイズ品種に特定の根粒菌が感染できない「共生不和合性現象」が知られています。これは、「不和合性遺伝子」をもつダイズ品種が、特定の根粒菌が分泌する「エフェクター」と呼ばれるタンパク質を認識することで、その根粒菌の感染を阻止する現象です。

日本に生息する土着根粒菌の多くはNopP₆、NopP₁₁₀またはNopP₁₂₂というエフェクターを作ります。一方、不和合性遺伝子*NM1*遺伝子をもつダイズ品種はNopP₆およびNopP₁₁₀エフェクターを作る根粒菌の感染を、不和合性遺伝子*Rj2*遺伝子をもつダイズ品種はNopP₁₂₂エ

フェクターを作る根粒菌の感染を、それぞれ阻止することが知られています（図3）。そこで、土着根粒菌の感染を阻止するために、*Rj2* 遺伝子をもつダイズ品種「ぼんみのり」と *NNL1* 遺伝子をもつ「カラスマメ」を交配し、*Rj2* 遺伝子と *NNL1* 遺伝子を両方もつ不和合性遺伝子集積ダイズを作出しました。

不和合性遺伝子集積ダイズ ダイズの中には、特定の根粒菌を感染させないための『不和合性遺伝子』を持つ品種があります。



図3 土着根粒菌の感染を阻止する不和合性遺伝子集積ダイズ

NopP₆ および NopP₁₁₀ エフェクターを作る土着根粒菌は、ダイズの *NNL1* 遺伝子によって感染が阻止されます。また、NopP₁₂₂ エフェクターを作る土着根粒菌は、ダイズの *Rj2* 遺伝子によって感染が阻止されます。

② エフェクターを作らない不和合性回避型 N_2O 削減根粒菌の選抜

日本のダイズほ場から、高い N_2O 分解能力をもつ N_2O 削減根粒菌 (*Bradyrhizobium ottawaense*) を複数株単離しました。これらの根粒菌は NopP₁₂₂ エフェクターを作るため、不和合性遺伝子集積ダイズに接種すると、ダイズがもつ *Rj2* 遺伝子の働きによって感染が阻止されてしまいます。

そこで我々は、自然変異により NopP₁₂₂ エフェクターを作らなくなった N_2O 削減根粒菌を選抜しました。このエフェクターを作らない根粒菌は、不和合性遺伝子による感染阻止を回避し、不和合性遺伝子集積ダイズに多数の根粒を形成したことから、「不和合性回避型 N_2O 削減根粒菌」と名付けました（図4）。

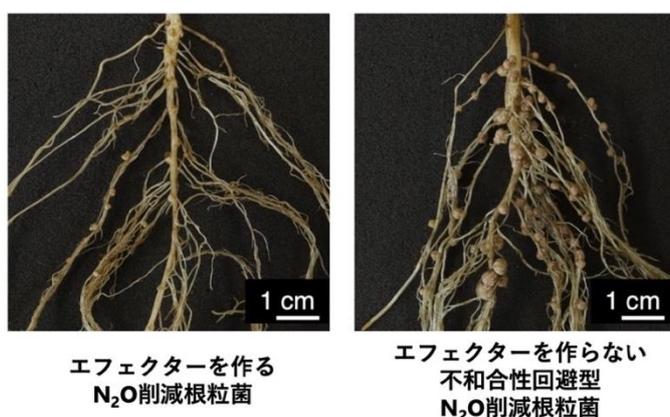


図4 エフェクターを作る N_2O 削減根粒菌（左）および、作出した不和合性回避型 N_2O 削減根粒菌（右）を接種した不和合性遺伝子集積ダイズの根粒形成

エフェクターを作る N_2O 削減根粒菌の感染は阻止され、根粒はほとんど形成されませんでした(左)。一方、エフェクターを作らない不和合性回避型 N_2O 削減根粒菌は多数の根粒を形成しました(右)。

③ N_2O 削減根粒菌が優占して共生するダイズ根粒共生系の開発

作出した不和合性遺伝子集積ダイズと不和合性回避型 N_2O 削減根粒菌を組み合わせることで、土着根粒菌の感染を阻止し、 N_2O 削減根粒菌が共生する根粒の割合を高めることができました。これにより、 N_2O 削減根粒菌が優占して共生する根粒共生系を開発しました(図5)。

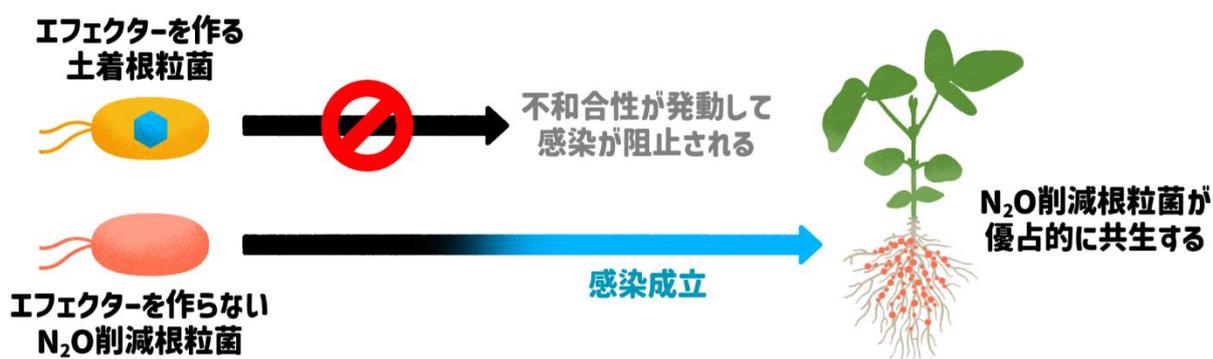


図5 土着根粒菌と不和合性回避型 N_2O 削減根粒菌の感染戦略

土着根粒菌の多くはエフェクターを作るため、不和合性遺伝子をもつダイズはそれらの菌の感染を阻止します。一方、エフェクターを作らない不和合性回避型 N_2O 削減根粒菌は、ダイズの不和合性遺伝子に認識されることなく感染できるため、 N_2O 削減根粒菌をダイズに優占的に共生させることが可能です。

土着根粒菌が存在する状況でも、不和合性回避型 N_2O 削減根粒菌が優占してダイズに共生するかを調べるために、NopP₆、NopP₁₁₀ および NopP₁₂₂ エフェクターをもつ3種類の競合根粒菌 (*Bradyrhizobium japonicum* USDA6、*Bradyrhizobium diazoefficiens* USDA110 および USDA122) と不和合性回避型 N_2O 削減根粒菌1種類の合計4菌株を等量で混合し、不和合性遺伝子集積ダイズと不和合性遺伝子をもたないダイズに接種しました。

それぞれのダイズに形成された根粒内に共生している根粒菌の種類とその割合(占有率)を調べた結果、不和合性遺伝子をもたないダイズでは N_2O 削減根粒菌の占有率が55%だったのに対し、不和合性遺伝子集積ダイズでは92%まで上昇しました(図6A)。さらに、ダイズの地上部を切断して根粒の老化を促し、根粒を含む土から発生した N_2O 放出量を測定した結果、不和合性遺伝子集積ダイズでは、不和合性遺伝子をもたないダイズの15%しか N_2O を放出していないことがわかりました(図6B)。

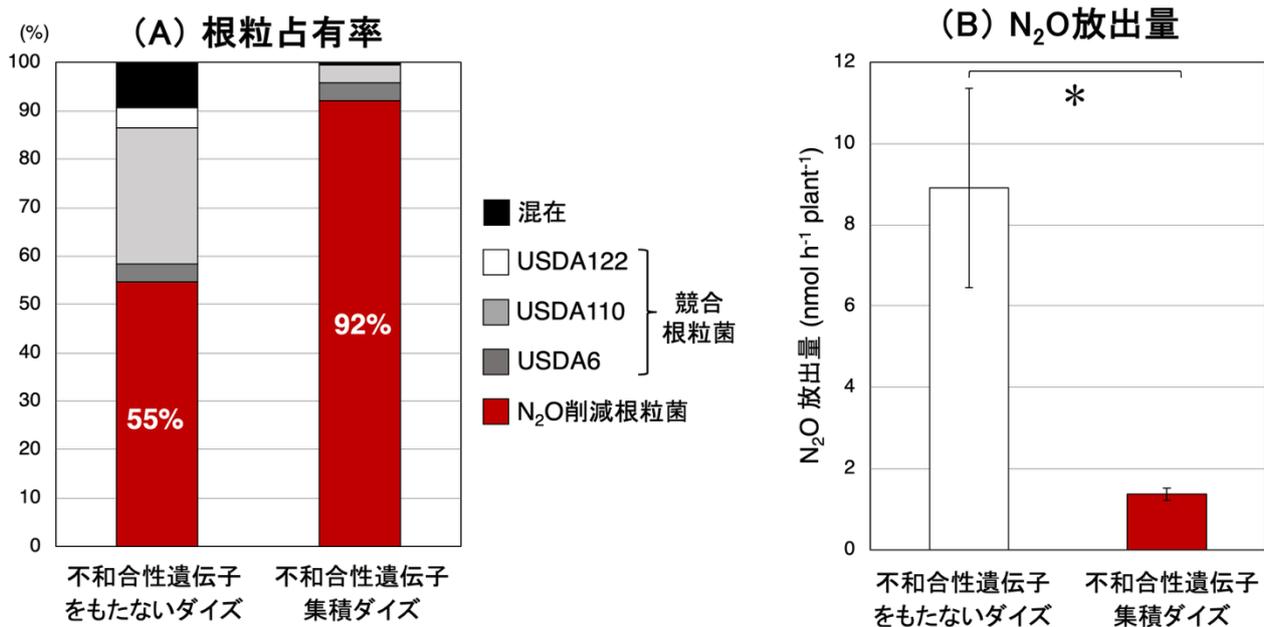


図6 N₂O削減根粒菌と3種類の競合根粒菌の混合接種条件下での根粒占有率 (A) とダイズ地上部切断後のN₂O放出量 (B)

不和合性遺伝子集積ダイズでは、不和合性遺伝子をもたないダイズと比べて、N₂O削減根粒菌の根粒占有率が上昇し (A)、N₂O放出量が減少しました (B)。図中のアスタリスクは、N₂O放出量の差が統計的に有意であることを示しています。

④ N₂O削減根粒菌を利用したダイズほ場からのN₂O放出量の削減

東北大学のほ場（宮城県）において、不和合性遺伝子集積ダイズを栽培し、エフェクターを作らない不和合性回避型 N₂O削減根粒菌の非接種、および、接種試験区において、根粒占有率と N₂O放出量を測定しました。

その結果、不和合性回避型 N₂O削減根粒菌を接種した区では、N₂O削減根粒菌の根粒占有率が64%まで上昇しました(図7A)。さらに、ほ場からのN₂O放出量は、非接種区の26%程度にまで減少しました(図7B)。これらの結果から不和合性遺伝子集積ダイズとエフェクターを作らない不和合性回避型 N₂O削減根粒菌を組み合わせることで、N₂O削減根粒菌のダイズ根粒占有率を向上させ、ダイズほ場からの N₂O 放出量削減効果を高められることが明らかになりました。

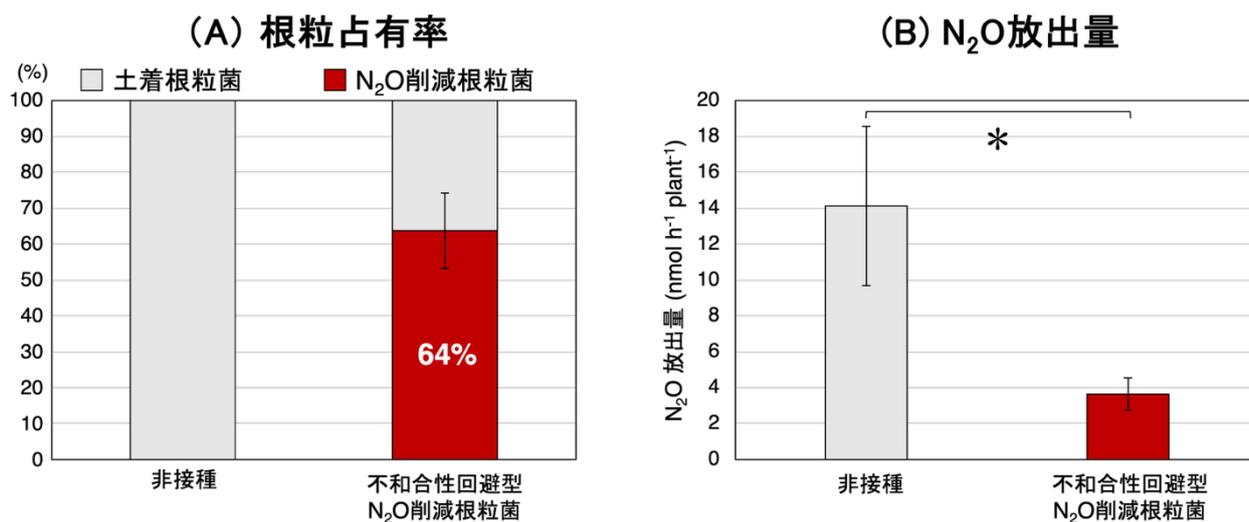


図7 N₂O削減根粒菌を接種したほ場における根粒占有率 (A) とダイズ地上部切断後のN₂O放出量 (B)

不和合性回避型 N₂O削減根粒菌を接種した区では、不和合性遺伝子集積ダイズにおける N₂O削減根粒菌の根粒占有率は64%となり (A)、N₂O放出量が減少しました (B)。図中のアスタリスクは、N₂O放出量の差が統計的に有意であることを示しています。

今後の予定・期待

根粒の内部に共生した根粒菌は、大気中の窒素を変換し、植物に栄養源として供給することから、根粒共生は化学肥料の使用量を削減した作物生産の実現に貢献できると考えられます。

さらに、本研究で開発した、N₂O分解能力の高い根粒菌をダイズに優占的に共生させるシステムを活用することにより、ダイズほ場からの N₂O放出量を削減できることが示されました。

ダイズは世界中で広く栽培されており、需要の増加に伴ってその作付面積も拡大しています。現在我々は実際に食用として栽培されているダイズ品種への不和合性遺伝子集積を進めています。本研究の成果を活用することで、ダイズほ場からの N₂O放出量を削減し、地球温暖化の抑制に貢献できると考えています。

用語の解説

1) 根粒共生

ダイズなどのマメ科植物は、土壌細菌である根粒菌との相互作用によって、根に「根粒」とよばれるコブ状の器官を形成します。根粒の中に共生した根粒菌は、大気中の窒素をアンモニアへと変換（窒素固定）し、宿主植物へ窒素栄養として供給します。その代わりに、植物が生産した光合成産物を受け取ります。時間経過とともに根粒は老化し、やがて崩壊して、根粒に含まれる窒素源や根粒菌が土壌中に放出されます。

2) 共生不和合性現象

特定のダイズ品種が、特定の根粒菌の感染を阻止する現象です。根粒菌は「エフェクター」と呼ばれる分泌タンパク質を作り、ダイズに感染を試みる際に植物の細胞内に分

泌します。根粒菌の種類により分泌するエフェクターの種類は異なります。

一方、ダイズでは根粒菌のエフェクターを認識して感染を阻止する「不和合性遺伝子」が複数同定されており、品種によって保有している遺伝子の種類が異なります。

共生不和合性は、特定のエフェクターと不和合性遺伝子の組み合わせによって発動し、ダイズの不和合性遺伝子に認識されるエフェクターを作る根粒菌の感染は阻止されま

す。

3) N₂O 還元酵素

N₂O を窒素に分解（還元）する機能をもったタンパク質です。一部の微生物のみが N₂O 還元酵素を保有しています。

図 1, 2, 3, 5 ; Illustrated by Hiroko Uchida

発表論文

Genetic design of soybean hosts and bradyrhizobial endosymbionts reduces N₂O emissions from soybean rhizosphere

Hanna Nishida, Manabu Itakura, Khin Thuzar Win, Feng Li, Kaori Kakizaki, Atsuo Suzuki, Satoshi Ohkubo, Luong Van Duc, Masayuki Sugawara, Koji Takahashi, Matthew Shenton, Sachiko Masuda, Arisa Shibata, Ken Shirasu, Yukiko Fujisawa, Misa Tsubokura, Hiroko Akiyama, Yoshikazu Shimoda, Kiwamu Minamisawa, Haruko Imaizumi-Anraku

Nature Communications (2025) DOI: 10.1038/s41467-025-63223-6. 2025/09/04 公開

<著者情報>

農研機構 生物機能利用研究部門

グループ長 今泉(安楽) 温子

研究員 西田 帆那

研究員 Khin Thuzar Win

上級研究員 下田 宜司

契約研究員 藤澤 由紀子

農研機構 作物研究部門

主任研究員 李 鋒

作物連携調整役 高橋 浩司

上級研究員 Matthew Shenton

農研機構 農業環境研究部門

研究員 坪倉 美紗

グループ長 秋山 博子

東北大学大学院生命科学研究所 土壤微生物分野

特任教授 南澤 究

特任助教 板倉 学

特任助教 大久保 智司

特任助教 鈴木 敦夫

学術研究員 Luong Van Duc
学術研究員 柿崎 芳里
帯広畜産大学 生命・食料科学研究部門 食品科学分野
准教授 菅原 雅之
理化学研究所 環境資源科学研究センター 植物免疫研究グループ
グループディレクター 白須 賢
研究員 増田 幸子
テクニカルスタッフⅡ 柴田 ありさ

研究担当者の声



担当研究者の西田（左）と今泉

生物機能利用研究部門 作物生長機構研究領域
グループ長 今泉（安楽）温子

「不和合性遺伝子とエフェクターの関係性を考える中で、『優占させたい根粒菌がエフェクターをもっていないのであればいいのに』と思い付いたのがこの研究の出発点となりました。」

研究員 西田 帆那

「我々の研究成果が世界中のダイズほ場で活用され、温暖化問題の解決につながることを期待しています。」