

令和7年1月16日
愛媛大学
農研機構

温室効果ガスを消去する微生物が優占する 土壌物理条件を解明

～土壌団粒の孔隙ネットワークが N₂O 消去菌の群集活性を制御する～

このたび、愛媛大学大学院農学研究科 光延聖准教授と、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）和穎朗太上級研究員の研究グループは、東北大学との共同研究にて、農地土壌から大量に発生する温室効果ガス（N₂O）を消去する微生物の群集活性が土壌団粒内の孔隙ネットワークによって大きく制御されることを突き止めました。この研究成果は、（1）不明な点が多い土壌の N₂O 発生・消去メカニズムの解明、（2）N₂O 発生抑制を目的とする土壌管理法、（3）微生物を使った N₂O 消去資材の開発、を進める上で重要な基礎知見となります。

なお、本研究の成果は、Soil Biology and Biochemistry に掲載され、令和6年12月12日にオンライン公開されました。

つきましては、ぜひ取材くださいますようお願いいたします。

記

掲載誌 : Soil Biology and Biochemistry

D O I : 10.1016/j.soilbio.2024.109684

題名 : First microscale data on depth profiles of microbial N₂O reduction, O₂ availability, and pore networks inside contrasting single soil aggregates
(日本語訳) 土壌団粒内の微生物 N₂O 還元、O₂ 利用性、孔隙ネットワークの初めてのミクروسケール解析

著者 : S. Mitsunobu, R. Wagai, H. Shimada, H. Kato, K. Ito, S. Sato, M. Hayatsu, K. Minamisawa

責任者 : S. Mitsunobu (Ehime University) & R. Wagai (NARO)

本件に関する問い合わせ先

愛媛大学大学院農学研究科

准教授 光延 聖

TEL : 089-946-9843

E-Mail : mitsunobu.satoshi.dy@ehime-u.ac.jp

※送付資料 8 枚（本紙を含む）

【簡易版】

温室効果ガスを消去する微生物が優占する土壤物理条件を解明 ～土壤団粒の孔隙ネットワークがN₂O消去菌の群集活性を制御する～

亜酸化窒素(N₂O)^{*1}は強力な温室効果ガスかつオゾン層破壊物質です。最大の人為的発生源は窒素肥料が大量投入される農地土壤ですが、土壤は非常に複雑な物質であるため、土壤N₂Oの発生・消去機構には未解明な点が多いのが現状です。本研究では、土壤の構成要素かつ微生物の“すみか”でもある土壤団粒^{*2}において、N₂O消去微生物^{*3}の活性と群集がどのような土壤条件(孔隙特性、酸素とN₂O濃度、酸化還元電位、pHなど)によって支配されるのか、団粒1粒子のミクロスケール観察によって丹念に調べました。土壤団粒の孔隙は団粒外大気と繋がった孔隙(Open孔隙)と繋がっていない孔隙(Closed孔隙)に大別されます。本研究では、Closed孔隙が多い団粒内部では大気O₂流入速度の低下によって無酸素環境が形成され、N₂O消去微生物の群集割合が大きく上昇することを見出しました。この現象は黄色土など風化の進んだ粘土質の土壤で観察されやすく、この土壤タイプでは団粒自体がN₂O消去のホットスポットとして機能することを示します。微生物作用による土壤N₂Oの消去に関連して多くの研究がなされてきましたが、本研究では土壤団粒の1粒子分析法を独自に開発、応用することで、ミクロスケールの孔隙ネットワークによって土壤のN₂O消去活性が制御されることを初めて突き止めました。本研究成果は(1)不明な点が多い土壤のN₂O発生・消去メカニズムの精緻化、(2)N₂O発生抑制を志向した土壤管理、(3)微生物を使ったN₂O消去資材の開発を進めていく上で重要な知見です。

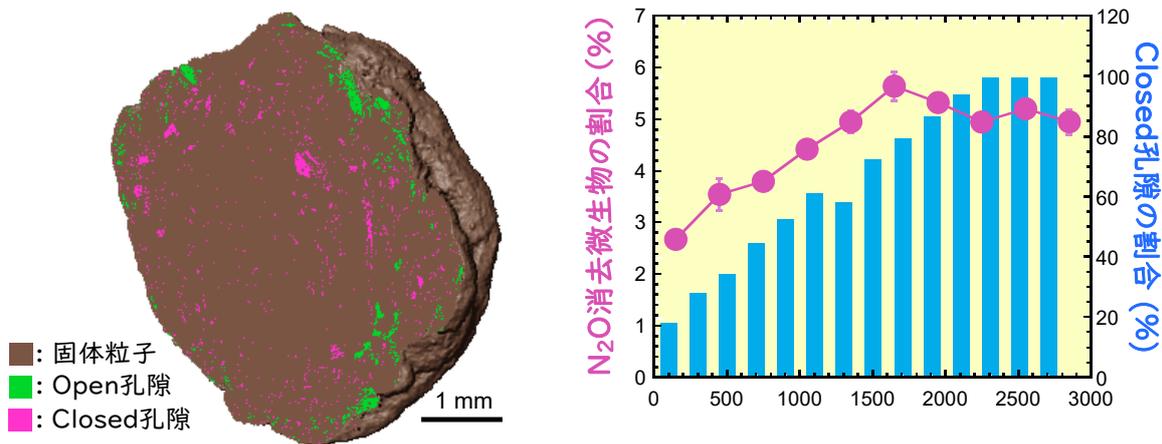


図. 黄色土壤団粒中の孔隙ネットワーク(左). Closed孔隙とN₂O消去菌の団粒深度プロファイル(右).

- *1: N₂Oとは、二酸化炭素の約300倍の温室効果をもつ強力な温室効果ガスかつオゾン層破壊物質であり、窒素肥料を大量に消費する農耕地土壤が最大の人為的発生源とされる。世界的な人口増加に伴い今後も発生量が増加し続けると予想され削減対策が急務とされる。
- *2: 土壤団粒とは、土壤中の微粒子が結合して粒子状になった物体のこと。土壤の構成要素であり、保水性、通気性を高める機能を持つ。N₂O還元菌を含め多くの土壤微生物は団粒内に生息する。
- *3: N₂O消去微生物とは、N₂Oガスを無害な窒素ガスへ還元変換することができる微生物のこと。N₂O還元菌ともいう。土壤に偏在しており、群集の量比・活性が土壤N₂Oの発生(消去)量を左右する。

【詳細版】

温室効果ガスを消去する微生物が優占する土壌物理条件を解明 ～土壌団粒の孔隙特性が N₂O 消去菌の群集活性を制御する～

【はじめに】

亜酸化窒素 (N₂O)^{*1} は、二酸化炭素の約 300 倍の温室効果をもつ強力な温室効果ガスでありオゾン層破壊物質でもあります。N₂O の最大の人為発生源は窒素肥料が大量投入される農耕地土壌です。今後も急激な人口増加によって農業生産は増大し N₂O 発生量も増加し続けると予想されるため、早急な削減対策が望まれます。しかし、土壌は非常に複雑な物質であり、また二酸化炭素やメタンに比べて N₂O の発生場所やタイミングには大きなバラツキがあるため、農地土壌における N₂O の発生・消去機構はよくわかっていません。N₂O の発生と消去にはどちらも土壌微生物の作用が大きく関わっており、これら微生物の生態と生理を理解することが、土壌からの N₂O 発生抑制には不可欠です。本研究では、土壌の構成要素かつ微生物の“すみか”である土壌団粒^{*2}において、N₂O 消去微生物^{*3} (以降、N₂O 消去菌と表記) の活性と群集がどのような物理化学条件 (孔隙特性、酸素と N₂O 濃度、酸化還元電位、pH など) によって制御されるのかについて調べました。

【実験内容および成果】

まず、研究グループでは農耕地土壌 (黄色土、黒ぼく土) から採取した土壌団粒 (直径約 6mm) を対象として、X 線マイクロ CT で団粒内の孔隙ネットワークを観察しました (図 1)。次に、土壌団粒を環境模擬条件に置いて、酸素 (O₂)、N₂O 濃度、pH、酸化還元電位といった化学条件の団粒内分布を微小電極で分析しました (図 2)。さらに、同じ団粒から深度毎に DNA を抽出後、N₂O 消去菌由来の遺伝子 (nosZ) の量と種類を調べました (図 3)。これら一連の分析法は土壌団粒 1 粒子から、物理、化学、微生物の多面的情報をミクロスケールで得るために研究グループで独自に確立した方法です。

土壌団粒の孔隙は団粒外大気と繋がった孔隙 (Open 孔隙) と繋がっていない孔隙 (Closed 孔隙) に分けられます。我々の実験結果を総合すると、Closed 孔隙が多い団粒内部では大気 O₂ 流入速度が低下し、嫌気 (無酸素) 環境が形成されやすいため、O₂ を嫌う N₂O 消去菌の群集活性が大きく上昇することがわかりました (図 4)。逆に Closed 孔隙が少ない土壌団粒では内部まで O₂ 流入速度が高く、N₂O 消去菌の群集量は低いままです (図 4)。孔隙ネットワークの閉鎖性と N₂O 消去活性の増加傾向は、黄色土など風化の進んだ粘土質の土壌で特に観察されやすく、この土壌タイプでは団粒自体が N₂O 消去のホットスポットとして機能する可能性を示します。

また、N₂O 消去菌は、N₂O 消去遺伝子と酵素特性の違いに応じて、クレード I (多くが脱窒^{*4}能をもつ) とクレード II (脱窒能を持たない) に分けられます。団粒内分布を調べた結果、クレード I と II の多い深度は異なり、その傾向は団粒中の酸化還元電位と N₂O 濃度の深度分布に対応しました。これは、土壌団粒という数ミリメートルの微小領域で N₂O 消

去菌群集のニッチ分割（棲み分け）が起きており、それは N_2O 還元反応の熱力学と各クレードのもつ酵素特性によって説明できる可能性を示しています。

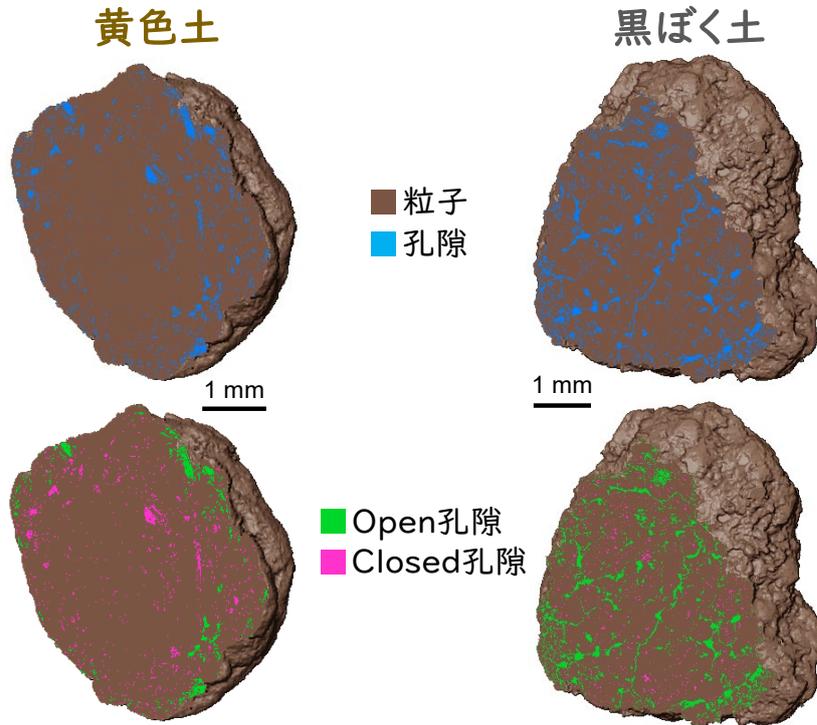


図 1. 可視化した黄色土と黒ぼく土の土壌団粒中の孔隙分布。

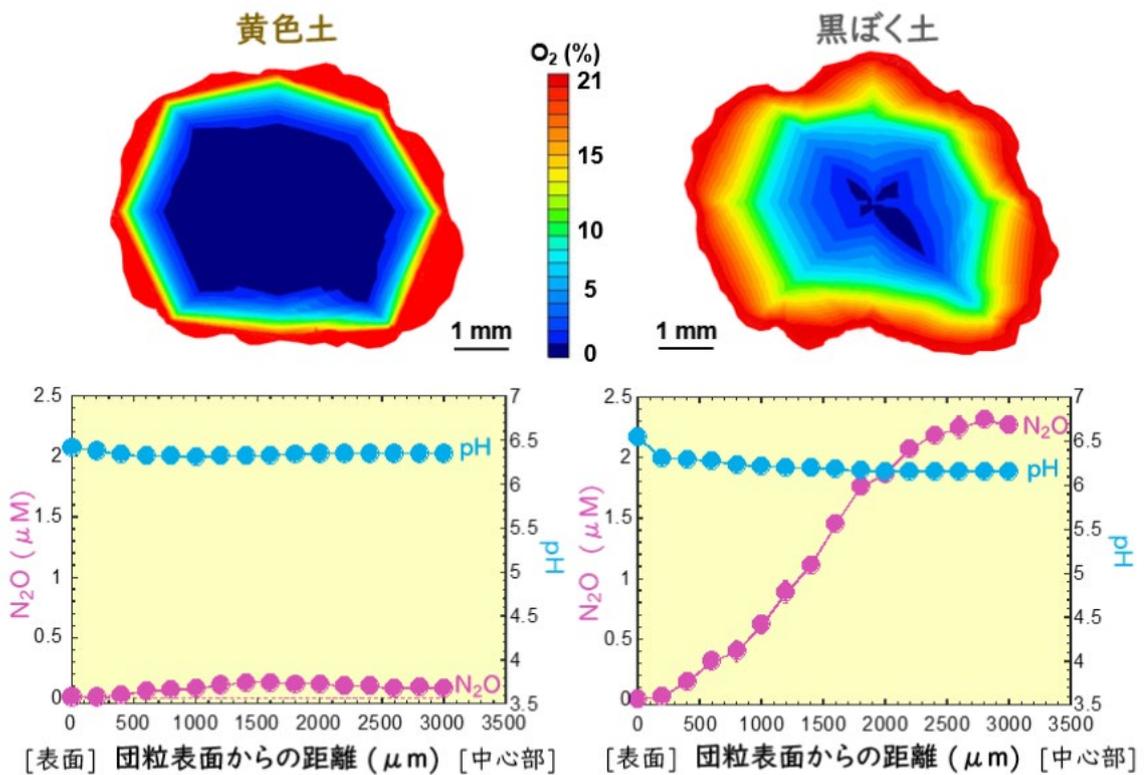


図 2. 土壌団粒中の O_2 濃度、 N_2O 濃度、pH の深度プロファイル。

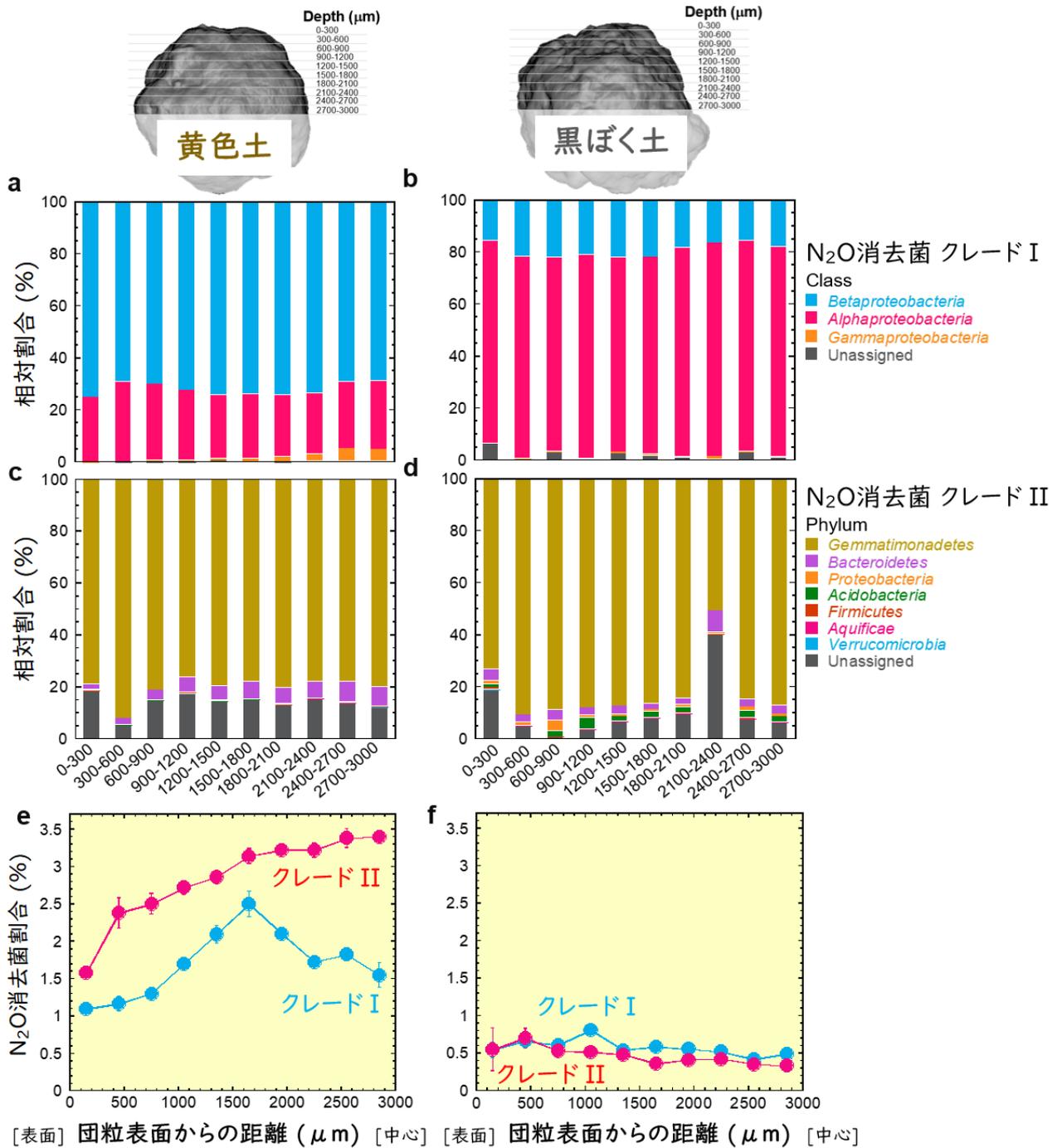


図 3. 土壌団粒中の N₂O 消去菌 (クレード I とクレード II) の群集構造 (a-d) と群集割合 (e-f).

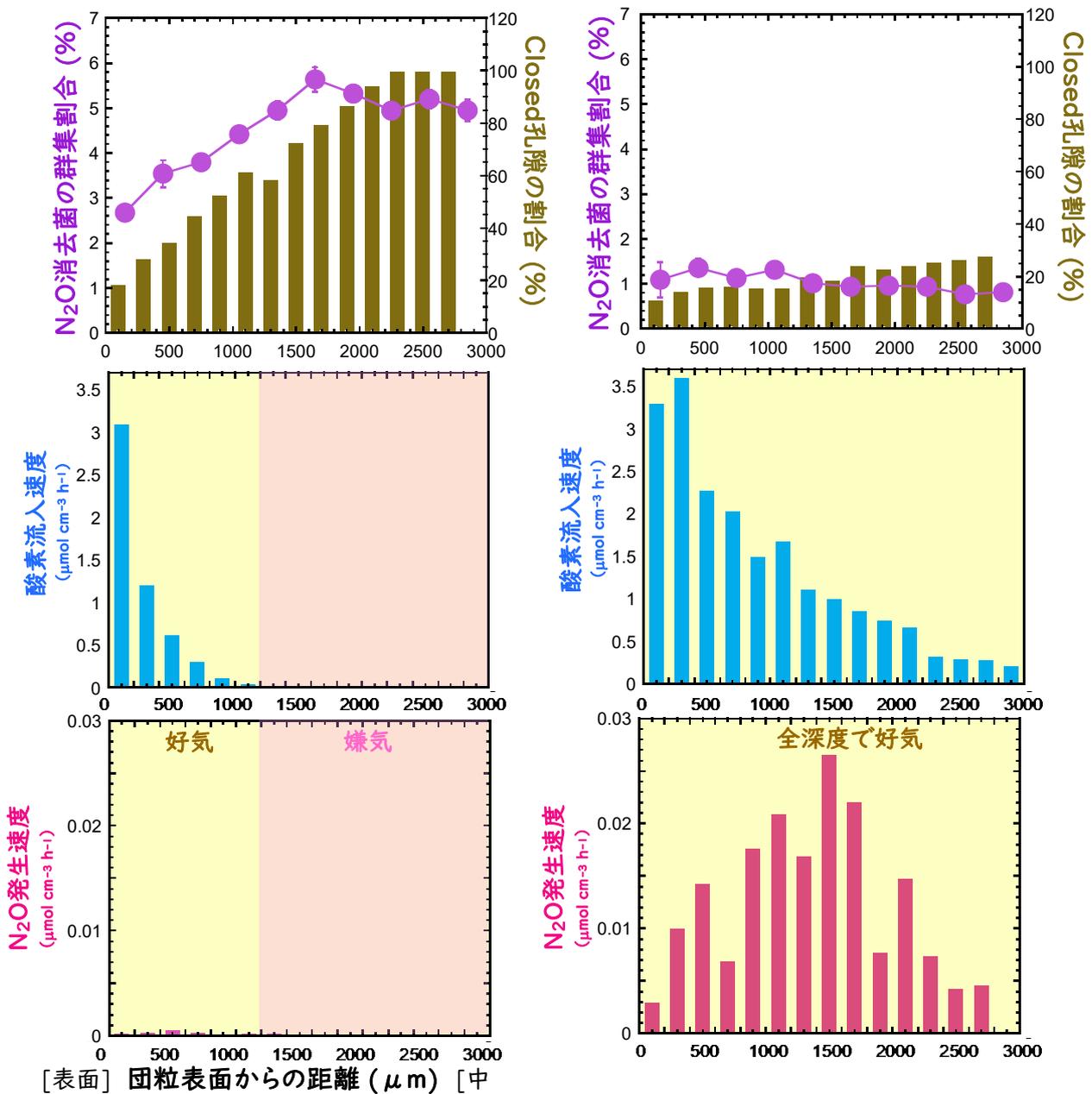


図 4. 土壌団粒内の N₂O 消去菌の全群集割合、酸素流入速度、N₂O 発生速度の深度分布。

【成果の意義と波及効果】

土壌中の N₂O 消去は微生物の作用によっておきるため、土壌中の N₂O 消去菌の活性やその制御要因について多くの研究がなされてきましたが、土壌は非常に複雑な物質であるため、N₂O 消去菌の生態解明は大きな課題でした。本研究では、土壌団粒の 1 粒子分析法を独自に開発、応用することで、ミクروسケールの孔隙ネットワークによって土壌中の O₂ 利用性、N₂O 消去菌の群集活性が制御されることを初めて突き止めました。

この研究成果は、不明な点が多い土壌の N₂O 発生・消去メカニズムを理解するうえで重

要な知見であり、また全球レベルの N_2O 発生モデルの精緻化にも役立つ知見です。土壌の孔隙特性や団粒形成能は土壌管理によって可変であるため、 N_2O 発生抑制を目的とした土壌改良が可能であることを示しています。また、本研究は N_2O 消去菌が優占する複数の土壌条件（例、高い孔隙閉鎖性、低い O_2 利用性、低い酸化還元電位など）を明らかにしており、土壌微生物の工学利用を加速する知見を提供します。現在、我々の研究グループでは N_2O 消去菌を利用した団粒資材の開発を進めており、今回の研究成果を社会実装する応用研究を精力的に進めています。

【用語解説】

- *1: N_2O とは、二酸化炭素の約 300 倍の温室効果をもつ強力な温室効果ガスかつオゾン層破壊物質であり、窒素肥料を大量に消費する農耕地土壌が最大の人為的発生源とされる。世界的な人口増加に伴い発生量の増加が予想され、削減対策が急務とされる。
- *2: 土壌団粒とは、土壌中の微粒子が結合して粒子状になったもの。土壌の構成要素であり、保水性、通気性を高める機能を持つ。 N_2O 還元菌を含めほとんどの土壌微生物は団粒内に生息する。直径 2mm 以上をマクロ団粒、それ以下をミクロ団粒と呼ぶ。
- *3: N_2O 消去微生物とは、有害 N_2O ガスを無害な窒素ガスへ還元変換することができる微生物のこと。 N_2O 還元菌ともいう。土壌中に偏在しており、群集の量比・活性が土壌 N_2O の発生量（消去量）を左右する。 N_2O 消去遺伝子と酵素特性の違いに応じて、クレード I（多くが脱窒能をもつ）とクレード II（脱窒能を持たない）に分けられます。
- *4: 脱窒とは、硝酸態や亜硝酸態の窒素を還元し、分子状の窒素ガスとして大気へ放出する現象。嫌気条件下で進む反応であり、脱窒能を保有する微生物を脱窒菌と呼ぶ。

【発表論文】

論文タイトル: First microscale data on depth profiles of microbial N_2O reduction, O_2 availability, and pore networks inside contrasting single soil aggregates

タイトル邦訳: 土壌団粒内の微生物 N_2O 還元、 O_2 利用性、孔隙ネットワークの初めてのミクロスケール解析

著者: 光延聖 (愛媛大)、和穎朗太 (農研機構)、島田紘明 (農研機構 *研究当時)、加藤広海 (東北大)、伊藤虹児 (農研機構)、佐藤修正 (東北大)、早津雅仁 (農研機構 *研究当時)、南澤究 (東北大)

掲載紙: Soil Biology and Biochemistry

電子版発行日: 2024 年 12 月 12 日

【問い合わせ先】

○研究に関すること（本論文の共同責任著者2名）

愛媛大学 大学院 農学研究科 生物環境学専攻
准教授 光延 聖（みつのぶ さとし）
E-mail: mitsunobu.satoshi.dy@ehime-u.ac.jp
TEL: 089-946-9843

農研機構 農業環境研究部門
上級研究員 和穎 朗太（わがい ろうた）
お問い合わせフォーム：<https://www.naro.go.jp/inquiry/index.html>

○報道に関すること

愛媛大学 総務部広報課
E-mail: koho@stu.ehime-u.ac.jp
TEL: 089-927-9022

農研機構 農業環境研究部門研究推進室
お問い合わせフォーム：<https://www.naro.go.jp/inquiry/index.html>

【備考】

本研究は NEDO ムーンショット型研究開発プロジェクト「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（課題番号 JPNP18016）」によって実施されたものです。本プロジェクト「dSOIL 微生物による地球冷却」の情報はホームページ(<https://dsoil.jp/>)にも掲載しています。