

2025年 9月 3日

報道機関 各位

## 雨が降ると脱窒菌が喜ぶ ～土壌における温室効果気体 $N_2O$ の生成メカニズムを解明～

### 【本研究のポイント】

- ・雨が降ると土壌の一酸化二窒素( $N_2O$ )<sup>注1)</sup>放出が活発になることが知られていたが、その理由はよく分かっていなかった。
- ・放出される  $N_2O$  の酸素同位体組成、中でも極微量の  $^{17}O$  を含めた三酸素同位体組成<sup>注2)</sup>を指標に用いることで、降雨時は脱窒反応<sup>注3)</sup>由来の  $N_2O$  の放出が活発化するところを突き止めた。
- ・本研究成果は、土壌からの温室効果気体<sup>注4)</sup>放出を抑制する上で重要な知見となる。また三酸素同位体組成は、自然界における窒素酸化物一般の挙動や起源、生成メカニズム等を解明する上で、有用なツールになる。

### 【研究概要】

名古屋大学大学院環境学研究科の丁 瑋天(てい いてん)日本学術振興会特別研究員(受入機関:名古屋大学)、角皆 潤 教授、中川 書子 准教授らの研究グループは、土壌から放出される一酸化二窒素( $N_2O$ )の三酸素同位体組成を観測し、降雨時は脱窒反応由来の  $N_2O$  の放出が活発化することを突き止めました。

大気中の  $N_2O$  は強力な温室効果気体であり、森林や農地などの土壌はその代表的な放出源となっています。雨が降ると、土壌の  $N_2O$  放出が活発になることは知られていましたが、その理由はよく分かっていませんでした。そこで降雨時に放出される  $N_2O$  の三酸素同位体組成を精密分析し、この  $N_2O$  は、主に土壌中の脱窒反応によって生成したことを突き止めました。一方で晴天時は硝化<sup>注3)</sup>が主要な生成過程となっていることも明らかになりました。

本成果は、農地など土壌からの温室効果気体放出を抑制する上で重要な知見となります。また三酸素同位体組成を指標に用いる本手法は、 $N_2O$  をはじめとする窒素酸化物の挙動や起源、生成メカニズム等を解明する上で、有用なツールになります。

本研究成果は、2025年9月1日15時(日本時間)付でEGU(欧州地球科学連合)の学術誌『Biogeosciences』オンライン版に掲載されました。

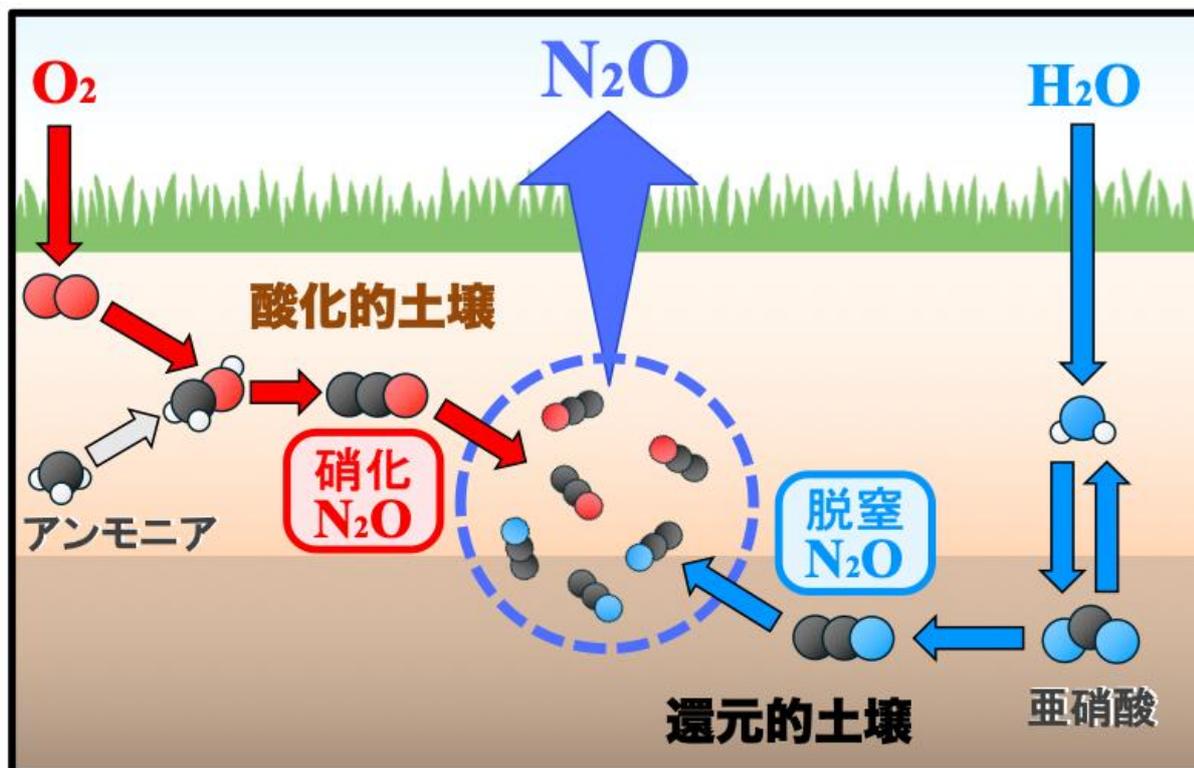


図 1 土壌中における一酸化二窒素( $N_2O$ )の主要な生成経路である硝化反応と脱窒反応の模式図。経路間で酸素原子の由来が異なるので、放出される  $N_2O$  の三酸素同位体組成を指標に両者を区別できることを示している。なお図中では土壌の上部を酸化的、下部を還元的として示しているが、実際は酸化的な部分と還元的な部分が混在している。

### 【研究背景と内容】

大気中の一酸化二窒素( $N_2O$ )は強力な温室効果気体<sup>注4</sup>の1つであり、森林や農地などの土壌はその代表的な放出源となっています。また、雨が降ると、土壌の  $N_2O$  放出が活発になることも明らかになっていますが、その理由は明らかになっていませんでした。そもそも土壌中では硝化と脱窒という2種の  $N_2O$  生成過程が存在することが知られていますが、降雨に伴って放出される  $N_2O$  がいずれの反応によって生成したものか、明らかになっていませんでした。

そこで本研究グループは、 $N_2O$  の酸素原子を構成する三種の安定同位体の相対比(三酸素同位体組成)に着目しました。大気中の酸素( $O_2$ )の三酸素同位体組成には、特徴的な  $^{17}O$  の欠乏が見られるのに対して、雨水や地下水( $H_2O$ )の三酸素同位体組成には見られません。さらに土壌中で硝化反応や脱窒反応が進行しても、三酸素同位体組成は変化しません。したがって、土壌から放出される  $N_2O$  の三酸素同位体組成と、その土壌中の酸素( $O_2$ )や亜硝酸( $NO_2^-$ )の三酸素同位体組成を比較することで、放出される  $N_2O$  の酸素原子が酸素( $O_2$ )由来、すなわち硝化反応由来なのか、あるいは亜硝酸( $NO_2^-$ )由来、すなわち脱窒反応由来なのか、区別できると考えました(図 1)。

そこで森林土壌から放出される  $N_2O$  と、その下の土壌中の亜硝酸( $NO_2^-$ )の三酸素同位体組成をその時間変化とともに観測したところ、降雨に伴って放出される  $N_2O$  は、主に脱窒によって生成したことを突き止めました。一方で晴天時は硝化が主要な生成過程となっていることも明らかになりました。

## 【成果の意義】

降雨に伴って土壌から活発に放出される一酸化二窒素( $N_2O$ )が脱窒によって生成したことが明らかになったので、土壌からの温室効果気体放出を抑制する上で有用な知見となります。また天然の三酸素同位体組成を指標に用いて  $N_2O$  の生成メカニズムを解明する本手法は、天然の窒素同位体比を指標に用いる従来法で問題となっていた反応進行度に依存した同位体比変化の影響を受けないので、結論が明確になる利点があります。また人工的に濃縮した安定(もしくは放射性)同位体や、各種反応阻害試薬の投入を必要とする従来法に比べると、はるかに簡便かつ経済的でありながら、自然環境下における(=人為的な擾(じょう)乱を対象に加えることなしに) $N_2O$  の生成メカニズムを解明できます。さらに培養等の複雑な実験操作も、また実験終了後の煩雑な廃棄物処理等の作業も不要となります。今後各種物質の起源や循環を解明する上で、三酸素同位体組成は有用なツールになります。

本研究は、2017-20 年度の科研費基盤研究 A『硝酸の三酸素同位体異常を利用した非培養型の窒素循環速度定量法確立』(研究代表者:角皆 潤)および 2023 年度から始まった科研費基盤研究 B『窒素酸化物の三酸素同位体組成定量:オゾンを生成する窒素酸化物を判別する』(研究代表者:中川 書子)の支援のもとで行われたものです。

## 【用語説明】

注 1)一酸化二窒素( $N_2O$ ):

亜酸化窒素とも呼ばれ、大気中では温室効果気体であると同時にオゾン層の破壊にも寄与する。対流圏の平均濃度は 0.3 ppm 程度で、二酸化炭素(約 400 ppm)やメタン(約 2 ppm)と比べると少ないが、年間 1 ppb(=0.001 ppm)前後のペースで濃度が増大し続けている上に、1 分子あたりの温室効果は二酸化炭素の約 300 倍あるため、産業革命以降の温室効果への寄与率は 6%( $CO_2$ は 65%)に達する。またその多くは、農地や森林などの土壌中で生成し、大気中に放出されたものと考えられている。土壌からの放出量の削減は当然として、これを実現するために生成メカニズムの解明が必要とされている。なお 1 分子あたりの温室効果が大きいので、1 分子あたりの削減の効果も大きく、削減の効率が良いという側面もある。

注 2)三酸素同位体組成:

酸素原子は三種の安定同位体( $^{16}O$ ,  $^{17}O$ ,  $^{18}O$ )から構成される。酸素原子を含む化合物が化学反応や相変化をすると、酸素の三種の安定同位体の相対比も若干変化するが、一般的な化学反応や相変化では、 $^{16}O$  に対する  $^{17}O$  の相対比と、 $^{16}O$  に対する  $^{18}O$  の相対比は、比例して変化する。ところが、大気中で進行するごく一部の化学反応では、この比例関係から大きく逸脱して相対比が変化する。その結果、大気中のオゾン( $O_3$ )には  $^{17}O$  の相対的な過剰が見られ、他方大気中の酸素( $O_2$ )には  $^{17}O$  の相対的な欠乏が見られる。また海水や雨水( $H_2O$ )には、過剰も欠乏もほとんど見られない。この  $^{17}O$  の過剰度(欠乏度)を数値化したのが三酸素同位体組成であり、海水を基準として、これより  $^{17}O$  の過剰が大きくなると数値はプラスとなり、欠乏するとマイナスとなる。また、土壌中で進行する一般的な化学反応(硝化反応や脱窒反応)では、三種の安定同位体の相対比が変化しても、三酸素同位体組成(= $^{17}O$  の過剰度)は変化しない。したがって、土壌中の一酸化二窒素( $N_2O$ )の三酸素

同位体組成を測定し、これを酸素( $O_2$ )や亜硝酸( $NO_2^-$ )の三酸素同位体組成と比較することで、その  $N_2O$  中の酸素原子が酸素( $O_2$ )に由来するのか、あるいは亜硝酸( $NO_2^-$ )由来するのか、区別できる(図 1)。

### 注 3)硝化・脱窒:

いずれも微生物による窒素化合物の代謝反応であり、一酸化二窒素( $N_2O$ )を生成する可能性がある。硝化は、好気的な環境下(= $O_2$  が共存する環境下)でアンモニア( $NH_3$ )を酸素( $O_2$ )と反応させて酸化し、最終的に硝酸( $NO_3^-$ )を生成する代謝反応である。 $N_2O$  はこの硝化反応の副生成物で、 $NO_3^-$ とともに生成する。一方、脱窒は、嫌気的な環境下(= $O_2$  が共存しない環境下)で硝酸( $NO_3^-$ )を酸化剤とする代謝反応であり、 $NO_3^-$ は還元され、亜硝酸( $NO_2^-$ )を経て、最終的に窒素ガス( $N_2$ )となる。 $N_2O$ は亜硝酸( $NO_2^-$ )が窒素ガス( $N_2$ )となる反応の中間生成物であり、生成すると同時に分解もされる。これ以外の  $N_2O$  生成反応として嫌気性アンモニア酸化(Anammox)反応が存在し、微生物学的には硝化・脱窒と大きく異なるが、三酸素同位体組成は脱窒と区別できないので、本論文では脱窒の一部として取り扱っている。

### 注 4)温室効果気体:

太陽が放射する可視光線を通す一方で、これを吸収した地表面が放射する赤外線も吸収して大気を暖め、地球の気温を上昇させる働きをする大気成分。代表的な温室効果気体として、水蒸気( $H_2O$ )、二酸化炭素( $CO_2$ )、メタン( $CH_4$ )、一酸化二窒素( $N_2O$ )などがある。これら温室効果気体の濃度が増加すると地球に温暖化を引き起こすため、人間活動に起因した放出量の増大を抑制する必要があるとされている。

## 【論文情報】

雑誌名: Biogeosciences(欧州地球科学連合の科学雑誌)

論文タイトル: Triple oxygen isotope evidence for the pathway of nitrous oxide production in a forested soil with increased emission on rainy days

著者: Weitian Ding<sup>1</sup>, Urumu Tsunogai<sup>1</sup>, Tianzheng Huang<sup>1</sup>, Takashi Sambuichi<sup>1</sup>, Wenhua Ruan<sup>1</sup>, Masanori Ito<sup>1</sup>, Hao Xu<sup>1</sup>, Yongwon Kim<sup>2</sup>, Fumiko Nakagawa<sup>1</sup>(丁 瑋天<sup>1</sup>, 角皆 潤<sup>1</sup>, 黄 天政<sup>1</sup>, 三步一 孝<sup>1</sup>, 阮 文鏢<sup>1</sup>, 伊藤 昌稚<sup>1</sup>, 許 昊<sup>1</sup>, Yongwon Kim<sup>2</sup>, 中川 書子<sup>1</sup>)

※1. 名古屋大学, ※2. University of Alaska Fairbanks (UAF)

DOI: 10.5194/bg-22-4333-2025

URL: <https://bg.copernicus.org/articles/22/4333/2025/>



東海国立大学機構は、岐阜大学と名古屋大学を運営する国立大学法人です。  
国際的な競争力向上と地域創生への貢献を両輪とした発展を目指します。

東海国立大学機構 HP <https://www.thers.ac.jp/>

