

溶存 N_2O の同位体分析を用いて泥炭湿地上のオイルパームプランテーション排水路の温室効果ガス N_2O の生成・除去機構を解明

-豊富な有機物による還元作用によって N_2O 間接排出を抑制している可能性-

2023 年 3 月 2 日(木)
国立研究開発法人国立環境研究所
仁科一哉他
東京工業大学
豊田 栄
兵庫県立大学
伊藤雅之
サラワク州立熱帯泥炭研究所
Lulie Melling 他

世界的な需要の高まりを受けオイルパームプランテーションは年々拡大を続けており、近年では泥炭湿地林を変換してプランテーションが拡がり続けています。国立環境研究所、東工大、兵庫県立大、サラワク州立熱帯泥炭研究所の研究チームは、これまで着目されていなかった温室効果ガス N_2O 発生源である泥炭湿地を開拓したオイルパームプランテーションの排水路の溶存 N_2O の観測を行いました。その結果、排水路水中の溶存 N_2O 濃度は雨季と乾季で大きく分布が異なることが明らかになりました。具体的には、雨季では、温室効果ガスの強い発生源となっている地点が多い一方で、強い吸収源となる地点も多いことが明らかになりました。溶存 N_2O の分子内同位体比を調査すると生成された N_2O のほとんどは N_2 まで還元されており、かなりの部分が河川に至るまでに除去されていることが明らかになりました。これは泥炭土壌から供給される有機物が多いために起こるものと考えられます。泥炭湿地上に成立したオイルパームプランテーションの温室効果ガス収支把握の高精度化によって、温室効果ガス発生抑制に向けた N_2O 生成メカニズム解明につながる知見を得ました。

本研究の成果は、2023 年 2 月 20 日付で Elsevier 社から刊行される総合環境学分野の学術誌『Science of the Total Environment』に掲載されました。

1. 研究の背景と目的

現在、食用、産業、バイオディーゼル等への活用といった世界的なパーム油の需要の高まりを受けて、東南アジア、なかでもマレーシアとインドネシアでは広大な土地がオイルパームプランテーションとして開拓され、その面積は年々拡大しています。近年では、これまで高水位のため開発されていなかった泥炭湿地林も近年は作付け対象とされ、排水路建設を伴った農地転用による環境影

響が懸念されています。泥炭湿地には膨大な炭素が有機物層として蓄積しており、排水路建設による乾燥により有機物の分解が加速し、温室効果ガスである二酸化炭素（CO₂）の放出源になることも報告されています。また、温室効果ガスの一つである一酸化二窒素（N₂O）ガスも、オイルパーム農園転用後の窒素化学肥料の施肥により土壌表層からの大きな放出が観測されています。一般的な農地生態系では、窒素の施肥は河川などへの硝酸イオンの流出を加速させ、下流の生態系の富栄養化につながります。硝酸イオンは水系において微生物の作用である脱窒過程によって還元されてN₂Oを生成し、河川表面から大気へN₂Oを放出します（土壌表面からの直接排出と対比して間接排出という）。泥炭湿地のプランテーションでは排水路網を格子状に配置する必要があり、その表面積が農地全体の数%にも及ぶため、一般的な農地と比べ排水路がより重要な発生源になる可能性があります。しかしながら、熱帯域、とりわけ泥炭湿地上に成立するプランテーションにおいてはこれまで観測が行われておらず、N₂O発生源としての重要性はほとんどわかっていませんでした。

そこで、国立環境研究所地球システム領域の仁科らの研究チーム（以下「当研究チーム」という。）は、オイルパームプランテーションにおける排水路水中の溶存N₂O濃度の空間分布を把握するとともに、分子内同位体比（アイソトポマー）分析を行うことで、排水路中における窒素プロセスを解明するための研究を実施しました。これにより、今まで明らかではなかった窒素流出後の窒素プロセス動態を解明するとともに、N₂Oの動態を明らかにすることを目的としました。

2. 研究手法

研究対象フィールドと分析

今回の研究は、マレーシアのサラワク州にあるオイルパームプランテーションサイトを対象としました。本サイトは2000年に泥炭湿地林を開墾して作られました。本研究では、この地域に代表的な季節である雨季と乾季において排水路や排水が流れ込む隣接河川等（図1）から採水して、水質や溶存N₂O濃度などの項目を測定しました。

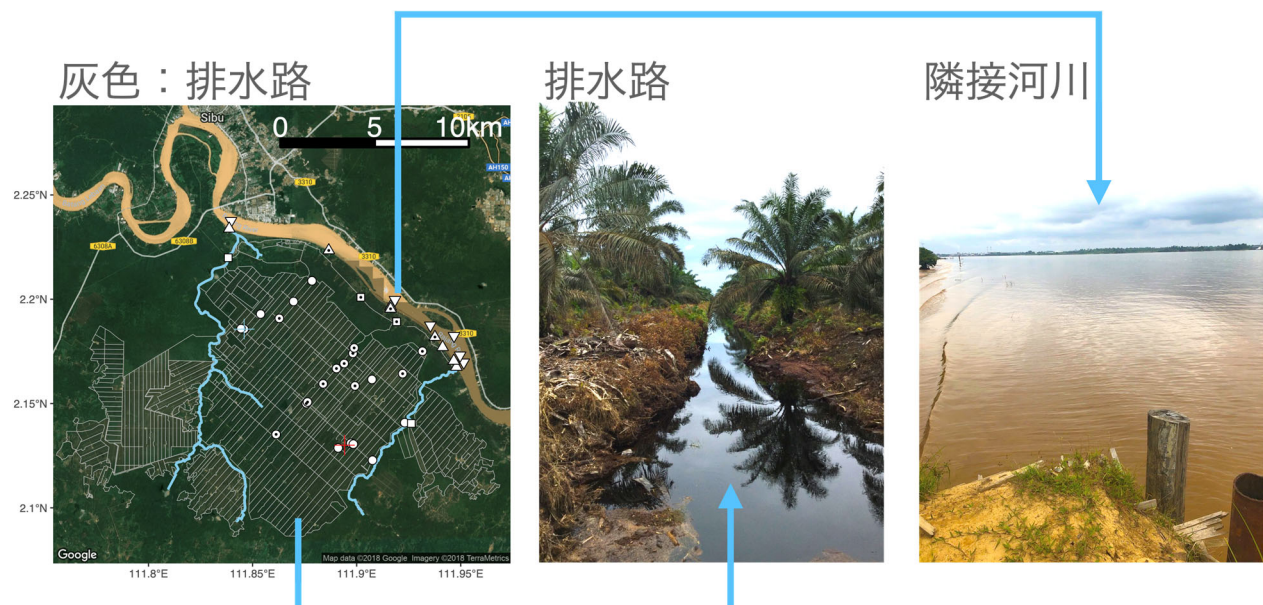


図1 本研究の対象のオイルパームプランテーションサイトとサンプリング地点例

分子内同位体比（アイソトポマー）分析

N₂O分子は窒素二つを有する分子で、分子式はNNOという並びであるため、二つの窒素原子の

それぞれの安定同位体比^{注1}を識別することが可能です。本研究ではガスクロマトグラフ/安定同位体比質量分析計を用いて N_2O の $\delta^{15}\text{N}\alpha$ 、 $\delta^{15}\text{N}\beta$ 、 $\delta^{15}\text{N}^{\text{bulk}}$ ($= (\delta^{15}\text{N}\alpha + \delta^{15}\text{N}\beta)/2$)、および $\delta^{18}\text{O}$ を測定しました。 α 、 β はそれぞれ NNO 分子の中央位、端位を表しており、分子内の ^{15}N の偏りを示す指標として Site Preference ($= \delta^{15}\text{N}\alpha - \delta^{15}\text{N}\beta$) がよく使われます。 N_2O を生成するプロセスは複数あり (図3)、各プロセス (硝化、脱窒など) は、それぞれ固有の Site Preference 値を持っているため、 N_2O の分子内同位体比を分析することによってプロセスの特定が可能になります。さらに Site Preference と $\delta^{15}\text{N}^{\text{bulk}}$ (または $\delta^{18}\text{O}$) の情報を合わせることによって、生成された N_2O がどれくらい N_2 還元されたかを評価することも可能となり、環境中の N_2O の生成・除去機構を明らかにすることができます。

3. 研究結果と考察

観測の結果として、排水路中の溶存 N_2O 濃度は、乾季と雨季のいずれの時期においても、低濃度から高濃度まで大きくばらついているものの、その濃度分布は大きく変化していました (図2)。この結果は、季節によって N_2O 生成量が大きく異なることを示したもので、本研究によって世界で初めて明らかになったものです。図2は溶存 N_2O の飽和度で示しており、100%を超えると (図中の橙ラインより右) には、排水路の水面から大気へ N_2O が放出されていることを示し、100%以下では逆に排水路の水が大気中から N_2O を吸収します。乾季も雨季も中央値は放出でしたが、いずれの季節も、吸収する地点から放出する地点までであることがわかりました。特に雨季には、濃度分布のばらつきが乾季よりも大きく、より強い放出が見られる地点とより強い吸収が見られる地点の両方が混在することが示されました。これは N_2O 生成と消費 (還元) の双方に関わる脱窒の活性が高まっている結果と考えられます (図3)。

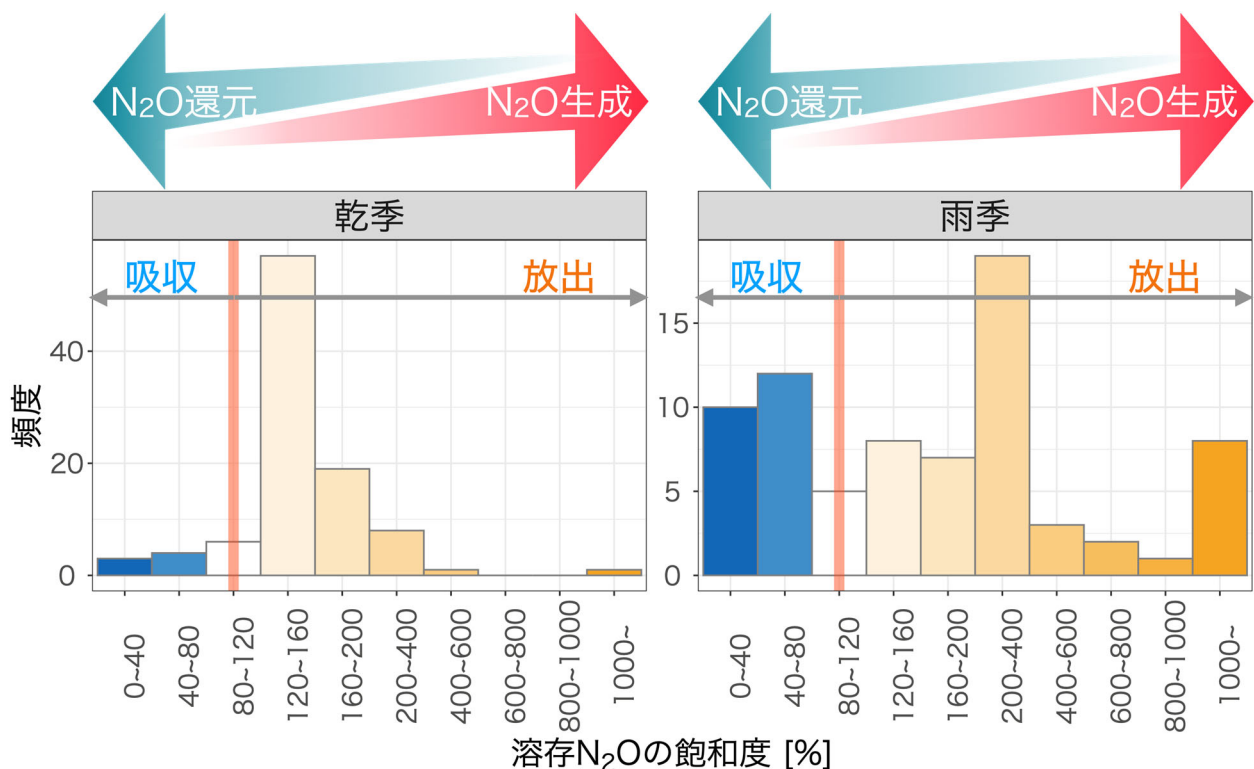


図2 溶存 N_2O 濃度の観測結果を飽和度で示したもの。乾季 (左) と雨季 (右) で濃度 (飽和度)

の分布が異なることが分かる。低濃度（図中の橙の 100% ラインより左）のときには大気中濃度の平衡よりも溶存 N_2O 濃度が低いため水が大気から N_2O を吸収し、100%を超える高濃度の時は水面から大気に N_2O が放出される。

アイソトポマーを用いた N_2O 生成消費機構の解析では、脱窒が主たる発生要因であること、また 9 割以上の N_2O がさらに脱窒の影響を受けることで N_2 まで還元されていることが明らかになりました。排水路の水は泥炭土壌から滲出しており pH が 3 から 4 を示しましたが、このような強酸性の条件でも、排水路中あるいは泥炭土壌内で脱窒が盛んに行われており、いわゆる完全脱窒（ N_2 まで脱窒が進むこと）が起きていると考えられます（図 3 下）。排水に含まれる硝酸イオンは、局所的な窒素源（パーム油製造工場の廃液処理排水が排水路に流れ込む箇所）の周辺を除けば、かなり低い値に抑えられており、泥炭湿地上に成立したオイルパームプランテーションは脱窒により高い窒素負荷の除去能力を持つことが明らかになりました。泥炭土壌浸出水である排水路の水は、脱窒菌が利用する溶存有機物濃度が高いこと、また高い水温を示していることが高い活性を有する要因であると考えられます。

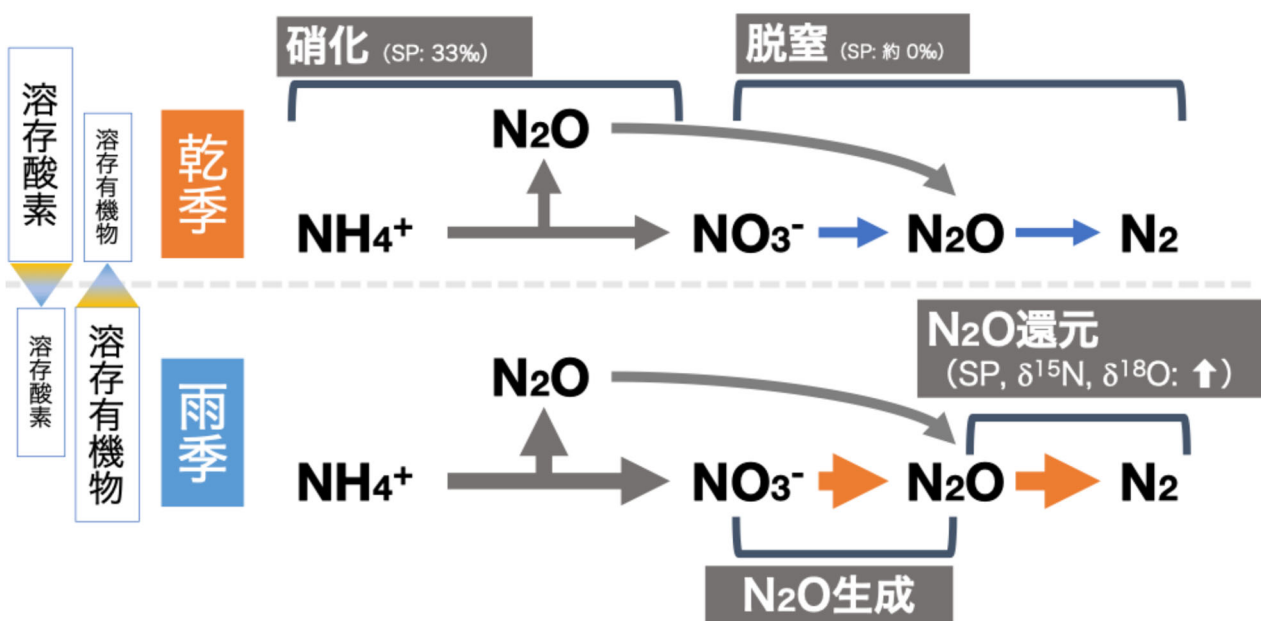


図 3 排水路網中での N_2O の生成・消費と季節による各過程の相対速度を示した模式図。雨季は乾季に比べて N_2O 生成、 N_2O 還元（いずれも脱窒活性）が活発化していると考えられる。これは雨季にはより新鮮な溶存有機物が泥炭土壌から供給されるため起きている可能性がある。

4. 今後の展望

本研究では N_2O のアイソトポマー測定という手法を、泥炭湿地上に成立したオイルパームプランテーションの排水路の水に適用し、排水路が N_2O の吸収源・放出源の双方として機能していることを明らかにしました。乾季・雨季の観測から、排水路中の N_2O 濃度は明確な季節性を示すこと、特に雨季には脱窒により N_2O 生成・消費の両方が活性化されることが示されました。そのため N_2O 収

支の評価には季節性を考慮することが重要となります。一方で、脱窒の N_2O 還元作用によって N_2O 発生がかなり抑えられていると考えられますが、この高い活性は泥炭土壌が含む豊富な有機物を脱窒菌の基質として供給できることと、熱帯の高い水温環境によって脱窒に適した還元的な環境が発達していることによって支えられていると予測されます。今後さらに泥炭の分解が進んだ場合など、排水路からの溶存有機物の供給が少なくなれば、 N_2O 排出が増加する可能性があります。熱帯泥炭湿地帯における溶存 N_2O 動態の観測は本研究以外にはほとんどなく、オイルパームプランテーションの N_2O 放出、ひいては GHG 収支を理解するには、さらなる観測が必要です。

5. 注釈

注 1. 安定同位体比: 同位体は原子番号が同じで質量数が異なる元素で、窒素では ^{14}N と ^{15}N 、酸素安定では ^{16}O 、 ^{17}O 、 ^{18}O といった同位体がほぼ一定の比率で自然界に安定に存在しています。物理化学反応では軽い安定同位体の方が先に反応しやすい性質があるため、環境条件によって安定同位体比がわずかに変化します。すなわち安定同位体比を知ること、どのような化学反応があったのかを類推することができるため、環境中の物質動態の把握によく使われるツールとなっています。

6. 研究助成

本研究の一部は JSPS 科研費 17H01867, 18H02238 の支援を受けて実施されました。

7. 発表論文

【タイトル】

Dissolved N_2O concentrations in oil palm plantation drainage in a peat swamp of Malaysia

【著者】

Kazuya Nishina; Lulie Melling; Sakae Toyoda; Masayuki Itoh; Kotaro Terajima; Joseph W.B. Waili; Guan X. Wong; Frankie Kiew; Edward B. Aeries; Ryuichi Hirata; Yoshiyuki Takahashi; Takashi Onodera

【掲載誌】 Science of the Total Environment

【URL】 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723006782?via%3Dihub>（外部サイトに接続します）

【DOI】 10.1016/j.scitotenv.2023.162062（外部サイトに接続します）

8. 問合せ先

【研究に関する問合せ】

国立研究開発法人国立環境研究所 地球システム領域
物質循環モデリング・解析研究室 主任研究員 仁科一哉

【報道に関する問合せ】

国立研究開発法人国立環境研究所 企画部広報室
kouhou0（末尾に"@nies.go.jp"をつけてください）

東京工業大学総務部広報課
media（末尾に"@jim.titech.ac.jp"をつけてください）

兵庫県立大学姫路環境人間キャンパス経営部総務課
u_hyogo_kankyou（末尾に"@ofc.u-hyogo.ac.jp"をつけてください）