

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K08178

研究課題名(和文) 硝酸系肥料の利用による農耕地土壌からの一酸化二窒素排出削減技術の開発

研究課題名(英文) Development of agricultural management to reduce nitrous oxide emission by application of nitrate fertilizer

研究代表者

西村 誠一 (Nishimura, Seiichi)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・北海道農業研究センター・上級研究員

研究者番号：70354090

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：寒冷・積雪地域の畑地において、「施肥直後の土壌中での一酸化二窒素(N₂O)生成は主に硝化により、降雨後等のN₂O生成は主に脱窒により」それぞれ生成していることを明らかにした。硝酸系肥料の施用で硝化に伴うN₂O生成がないことを実証し、特に硝化によるN₂O生成が卓越する土壌の圃場においては、硝酸系肥料の活用によって慣行のアンモニウム系肥料よりもN₂O排出を大幅に削減できることを示した。

一方、脱窒によるN₂O生成については、土壌内での局所的な酸素濃度の低下が直接の促進要因となっており、施肥の工夫・改善以外の削減技術の開発が必要であることを、明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

農地土壌から排出される温室効果ガスのN₂Oについては、多くの既往研究が行われてきたにも関わらず、現在でもその有力な排出削減技術は限られている。硝化によるN₂O生成の無い硝酸系肥料は、適切な利用によりN₂O排出を大幅に削減できる可能性があるが、既往の研究例は僅かであった。本研究は、硝酸系肥料の適切な利用によるN₂O排出削減の可能性を示したものであり、農地土壌からの温室効果ガス排出削減のための新たな施肥技術を提案するものである。本研究で得られた知見はまだ断片的なもので、排出削減の効果は土壌・作物・気象条件等により異なると考えられるが、普及を目指して今後の更なる研究の積み重ねが期待される。

研究成果の概要(英文)：In cropland soils in cool-temperate regions, nitrous oxide (N₂O) is produced mainly via nitrification immediately after fertilization whereas mainly via denitrification in other peak periods such as immediately after heavy rainfalls. In this study, we found that N₂O emission can be decreased by application of slow-release nitrate fertilizers than normal or slow-release ammonium fertilizers. Since nitrate fertilizer produce no N₂O via nitrification, the effects for reducing N₂O emission become significant in fields where nitrification is the major N₂O production process in the soil. On the other hand, we also found that decrease in oxygen concentration in soil microsites, not the types of fertilizers applied, was the main responsible factor enhancing N₂O production via denitrification. This indicates that N₂O emission derive from denitrification cannot be reduced effectively by the application of nitrate fertilizers and that other effective strategies are required in future studies.

研究分野：環境農学

キーワード：硝酸肥料 一酸化二窒素 硝化 脱窒 農地土壌

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

一般的に使用されているアンモニア系化学肥料($\text{NH}_4\text{-N}$ 肥料)に対して、硝酸系化学肥料($\text{NO}_3\text{-N}$ 肥料)は、降雨により土壤に施用された硝酸態窒素が地下に溶脱しやすい欠点があるため、露地の作物栽培ではあまり使用されていない。一方で、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 肥料は温室効果ガスである一酸化二窒素(N_2O)の排出が低いことが既存の研究により示唆されており、適切な使用方法の開発により、環境負荷の低い農業技術の確立につながる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 肥料の施用により効果的に N_2O 生成・排出が低減される条件(土壤環境、土壤の物理・化学性 等)を明らかにすることにより、 N_2O 排出を削減するとともに、作物の窒素吸収・収量を確保できる施肥・栽培管理技術を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

圃場での作物栽培試験、および室内土壤培養実験(密閉・通気チャンバー法)を行い、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 肥料および $\text{NH}_4\text{-N}$ 肥料を施用した土壤からの N_2O フラックスを測定・比較することにより、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 肥料を活用して N_2O 排出を低く抑えつつ作物の窒素吸収・収量を確保できる畑作物の栽培管理技術を検討した。

4. 研究成果

(1) 北海道農業研究センター内の試験圃場において、4種類の施肥条件(慣行のアンモニウム系肥料(硫酸アンモニウムまたは尿素; **A**)、被覆尿素(**CU**)、被覆硝酸カルシウム(**CC**)、無窒素(**N**))でニンジン栽培を行い、 N_2O および一酸化窒素(NO) フラックスを経時的に測定した。

施肥直後の6月には、**A** 区の N_2O フラックスは**CC**、**N** 区よりも高く、このとき**A** 区のみ N_2O フラックスの増加に付随して NO フラックスの増加が観測された(図1)。7月以降にも、降雨後・ニンジン収穫直後等に数回の N_2O フラックスの増加が観測されたが、これらのピークについては、施肥条件による明確な差は観測されず、また**CU** 区で一時的な NO フラックスの増加はあったものの、それ以外には明確な NO フラックスの増加は観測されなかった。また、別に行った小麦の圃場栽培試験でも、同様に施肥直後に**A** 区で**CC**、**N** 区よりも高い N_2O フラックス、およびこれに付随する**A** 区での NO フラックスの増加が観測された(データ省略)。

一般的に、土壤内での N_2O 生成が硝化に伴うものである場合は NO が同時に生成し、一方で脱窒に伴う N_2O 生成である場合は NO があまり生成されないことが、既往研究により知られている。このことから本試験結果により、既往研究で報告されている土壤中での N_2O 生成経路の実態が寒冷・積雪地域の北海道の畑地においても同様であり、「施肥直後の N_2O 生成は主に硝化により、降雨後等の N_2O 生成は主に脱窒により、」それぞれ生成されていることを、示している。なお、ニンジン栽培試験では**CC** 区でのニンジン収量は**A** 区と同等であったが、小麦栽培試験では**CC** 区での収量は**A** 区よりもやや低かった(データ省略)。 N_2O 排出を削減しつつ作物の収量レベル・品質を維持できる栽培技術の開発のために、さらに研究を進める必要がある。

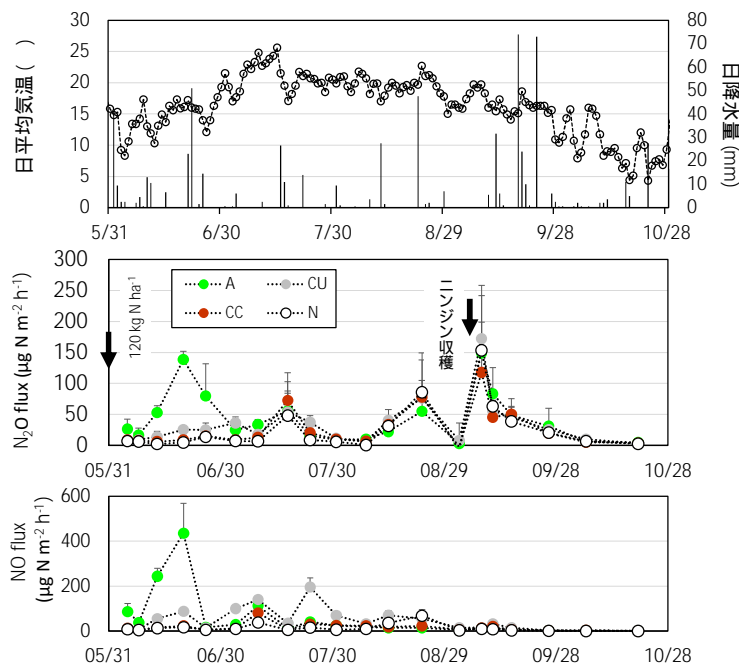


図1 ニンジン圃場栽培試験における、気温・降水量、 N_2O および NO フラックスの経日変化

A 区のみ、施肥直後の6月に硝化由来と考えられる N_2O および NO フラックスの増加が観測された。

7月以降は、どの区も概ね同様に、多量の降雨後およびニンジン収穫後に N_2O フラックスの増加が観測された。

小麦の圃場栽培試験でも同様の試験結果が得られている。

(2) 土壌中での硝化による N_2O 生成に与える施肥種類および温度の影響を明らかにするために、上記と同様の4種類の施肥条件 (A, CU, CC, N) および2段階の温度 (15 および 25) で、室内土壌培養・密閉法による N_2O フラックス測定を行った。土壌水分は、硝化に適したレベルの含水比 (水分/固相) 40%とした。

A 区の N_2O 積算排出量は低温 (15) 条件で高温 (25) より高く、CU 区の N_2O 積算排出量は逆に高温条件で低温条件よりも高くなった。また、A 区と CU 区との比較では、高温条件では CU 区の方が高い N_2O 積算排出量であったが、低温では逆に A 区の方が高い排出量であった (図2)。これらの試験結果は、緩効性 NH_4-N 肥料である被覆尿素では硝化由来の N_2O 生成の本質的な削減効果は明確ではないこと、また寒冷な北海道においても温暖な地域と比べて必ずしも低い N_2O 発生になるとは限らないこと、を示している。またこのことから、既往研究の圃場試験で緩効性 NH_4-N 肥料施用による N_2O 排出削減が示された事例では、硝化に伴う N_2O 生成が低かったために低い N_2O 排出となったのではなく、緩効性 NH_4-N 肥料から徐々に溶出する無機Nが効率的に栽培作物に吸収されたために低い N_2O 排出となった可能性が、高いと考えられた。

一方、CC 区からの N_2O 排出は、温度条件に関わらず N 区とほぼ同等の低い値であった (図2)。このことは、被覆 NO_3-N 肥料は硝化に伴う N_2O 生成をしないという理論を裏付けるものであり、被覆 NO_3-N 肥料が本質的に N_2O 排出削減のために非常に有効な肥料資材であることを、あらためて示すものである。

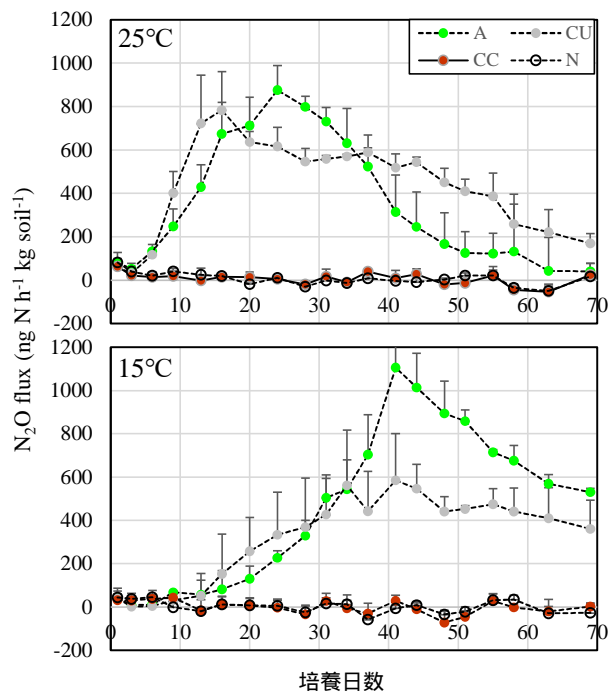


図2 室内土壌培養試験 (密閉法) での N_2O フラックスの経日変化 (例)

上段: 高温 (25) 下段: 低温 (15)

類似の試験を複数回繰り返したが、いずれも同様の N_2O フラックス経日変化を示した。

(3) 通気式ガスフラックス連続測定システムを用いた室内土壌培養試験により、低酸素 (O_2) 濃度条件が脱窒および N_2O 生成に与える影響を直接検証した。25 恒温器内で土壌を培養し、系内の O_2 濃度を 21% (大気レベル) 1% 0.1% 0.01% 0.003% 0% 0.003% 0.01%

0.1% 1% 21% と段階的に変化させて、通気チャンパー法により N_2O , NO フラックスを同時連続測定した。供試土壌は北海道の淡色黒ボク土、土壌水分は含水比 (水分/固相) で 40% (WC40) および 70% (WC70) の二段階とした。なお本試験では、他の要因を排除して N_2O 排出に与える O_2 濃度の影響のみを明らかにするために、施肥は行わなかった。

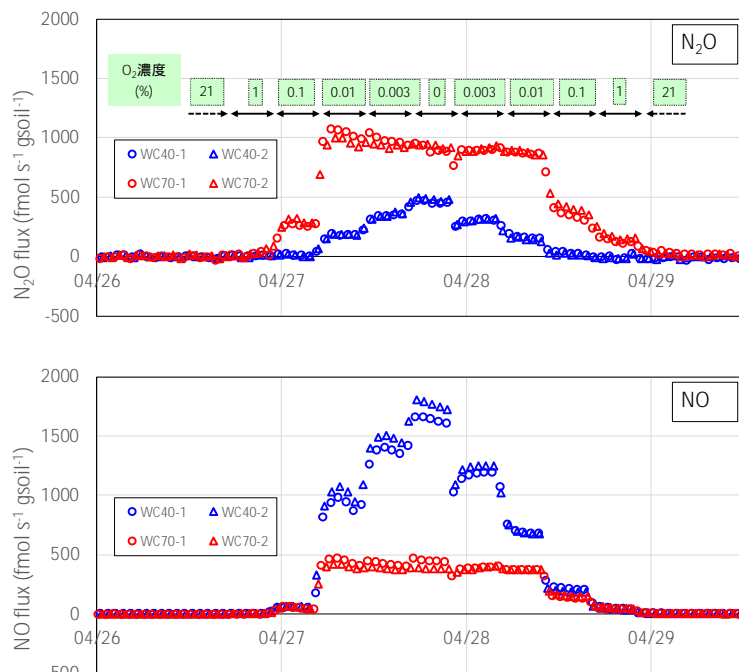


図3 室内土壌培養試験 (通気法) での N_2O および NO フラックスの経日変化

WC40, 70 各2反復で培養・測定を行った。凡例の -1, -2 は各々の反復を示す。

N_2O 、 NO の有意なフラックスはともに、 O_2 濃度が 0.1% 以下（大気レベルの $1/200$ 以下）になったときにのみ観測された（図 3）。 O_2 濃度を再度大気レベルに戻すと N_2O 、 NO フラックスは共に低下した。含水比 70% のときは、 N_2O フラックスの増加が観測されたのは O_2 濃度が 0.01% までであり、 O_2 濃度がそれより低いときは O_2 濃度に関わらず N_2O 、 NO フラックスは共に一定の値を示した。含水比 40% のときは、 O_2 濃度を 0.01% 以下にすると、さらにフラックスが増加した。含水比 40% と 70% との比較では、 N_2O フラックスは 70% の方が高い値で推移したのに対し、 NO フラックスは逆に 40% の方が高い値で推移した。また、アセチレン（ C_2H_2 ）添加により、 N_2O フラックスはやや高くなった一方で、 NO フラックスには明確な変化は観測されなかった（データ省略）。

これらの試験結果は、脱窒による N_2O 生成には O_2 濃度低下が密接に関わっていることを示しており、圃場試験でしばしば観測される降雨後等の N_2O フラックスの顕著な増加を引き起こす直接の要因が、土壌内気相の O_2 濃度が局所的に 0.1% 以下まで低下することであることを示している。また、無施肥土壌から N_2O が排出されたことから、 O_2 濃度の低下に伴う脱窒由来の N_2O は、施肥の有無・種類に関わらず土壌内に残存するごく少量の無機態窒素を基質として生じ得ることが示された。さらに、 C_2H_2 添加によって N_2O から窒素（ N_2 ）への還元が抑制されたことから、低 O_2 条件で生成された N_2O の一部はさらに N_2 に還元されて大気中に排出されていることが併せて示された。

以上のとおり、本研究の結果から、下記の成果が得られた。

- ・ 既往研究で報告されている土壌中での N_2O 生成経路の実態が、寒冷・積雪地域の北海道の畑地においても同様であり、「施肥直後の N_2O 生成は主に硝化により、降雨後等の N_2O 生成は主に脱窒により、」それぞれ生成されていることが、明らかになった。

- ・ 理論のとおり、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 肥料の施用では硝化に伴う N_2O 生成がないことが検証された。またこのことから、特に硝化による N_2O 生成が卓越する土壌の圃場においては、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 肥料の活用によって、慣行の $\text{NH}_4\text{-N}$ 肥料と比べて N_2O 排出を大幅に削減できる可能性のあることが、示された。

- ・ 一方、脱窒による N_2O 生成は、土壌内気相で局所的に O_2 濃度が低下することが直接の促進要因となっており、この過程は施肥の有無・種類に関わらず土壌内に残存するごく少量の無機態窒素を基質として生ずることから、施肥の工夫による排出削減は難しいと考えられた。脱窒由来の N_2O 排出削減のためには、土壌内の O_2 濃度低下を防ぐことが本質的に重要であり、例えば暗渠整備による圃場の排水改善や、ポリフィルムによる土壌被覆栽培によって土壌内への雨水流入を防いで土壌内の O_2 濃度を低下させないことなどが有効と考えられるが、これらについては今後さらに研究を進める必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nishimura Seiichi, Sugito Tomoko, Nagatake Arata, Oka Norikuni	4. 巻 119
2. 論文標題 Nitrous oxide emission reduced by coated nitrate fertilizer in a cool-temperate region	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nutrient Cycling in Agroecosystems	6. 最初と最後の頁 275 ~ 289
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10705-020-10116-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 西村誠一、米村正一郎
2. 発表標題 低酸素濃度条件における土壌からのN ₂ OおよびNO発生
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2018年度神奈川大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西村誠一、杉戸智子、長竹新、岡紀邦
2. 発表標題 北海道の露地ニンジン栽培圃場における被覆硝酸肥料の施用によるN ₂ O排出削減効果
3. 学会等名 2020年度日本土壌肥料学会北海道支部秋季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	米村 正一郎 (Yonemura Seiichiro) (20354128)	県立広島大学・生物資源科学部・教授 (25406)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------