

学 位 論 文 題 名

農地から発生する亜酸化窒素の年次変動に関する研究

学位論文内容の要旨

二酸化炭素 (CO₂) の 298 倍の温室効果を持つ亜酸化窒素 (N₂O) は、農地からの発生量が人為起源発生量の約 42% (2.8 Tg N yr⁻¹) を占める。しかし 1.7~4.8 Tg N yr⁻¹ の大きな不確実性があり、発生量の正確な定量が求められている。農地からの N₂O 発生量の見積もりには、排出係数 (Emission Factor, EF) がよく用いられている。従って本研究では北海道三笠市のたまねぎ畑における長期モニタリングから N₂O 発生量の定量およびメカニズムを明らかにし、EF を用いた N₂O 発生量の年次変動推定モデルの構築とその精度を検討した。また作成したモデル式を用い、将来の気候変動が N₂O 発生量に与える影響および幾春別川流域の農地からの N₂O 発生について検討した。

1. たまねぎ畑 2 圃場 (グライ低地土 GL, 褐色低地土 BL) に 4 処理区 (FOP: 化学肥料施与・有機物施与・作物栽培、F: 化学肥料施与・無栽培、OP: 有機物施与・作物栽培、C: 無施肥・無栽培) を設けた。クローズドチャンバー法を用い、各処理区からの N₂O 発生量のモニタリングを行った (GL で 5 年間、BL で 2 年間)。化学肥料窒素 (N) の投入量は GL で 237~242 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ であり、BL で 284 および 184 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ であった。また有機態窒素の投入量は GL で 81~117 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ であり、BL で 181 および 675 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ であった。化学肥料および有機物の EF (それぞれ EF_C、EF_O) は以下の式から求めた。

$$EF_C(\%) = (\text{FOP 区の N}_2\text{O 発生量} - \text{OP 区の N}_2\text{O 発生量}) / \text{化学肥料 N 投入量} \times 100$$

$$EF_O(\%) = (\text{FOP 区の N}_2\text{O 発生量} - \text{F 区の N}_2\text{O 発生量}) / \text{有機物 N 投入量} \times 100$$

EF_C および EF_O ともに大きな年次変動が確認された。EF_C は GL で 1.32~5.50 %、BL で 1.30 および 1.54 % であった。GL での EF_C と年平均気温との有意な正の相関から ($P < 0.01$)、投入した化学肥料 N から生じる N₂O の割合が気温の上昇に比例することが示唆された。EF_O は GL では -5.22~9.06 %、BL では 1.51 および -1.51 % であった。説明変数間の共線性の問題から GL のみのデータでおこなった重回帰分析の結果から、EF_O は年平均気圧および年降水量に正の影響を受けており ($P < 0.01$)、より湿潤な環境で投入した有機物 N から生じる N₂O の割合が増加することが示唆された。これら 2 つの EF 値と化学・有機態 N 投入量を用いて求めた GL の FOP 区の N₂O 発生量は実測値と良く一致しており、EF の年次変動のモデル式を用いて N₂O 発生量の年次変動を予測できる可能性が示された。一方で BL では実測値とのずれがあり、気象因子の EF_O に対する影響が圃場によって異なる可能性があった。IPCC (2007) は将来の年平均気温と降水量の変化を予測している。本調査地では年平均気圧と年降水量に有意な負の関係が見られたことから ($P < 0.01$)、将来の気候変動の影響を予測できるように年平均気圧を年降水量で変換したモデル式を作成した。

2. 土壌有機物由来の N₂O 発生 (Background N₂O 発生) の調査を行った。5m×8m の裸地区 (無施肥、

無栽培) を設け、2000 年、2002～2006 年の 6 年間の N_2O 発生量をクロードチャンバー法を用いて測定した。 N_2O フラックスは毎年 7 月後半から 10 月にかけて上昇した。全ての年で N_2O と CO_2 フラックスとの正の相関が確認され、土壌有機物分解が N_2O 生成に大きく寄与していることが示唆された。高い N_2O フラックスは $\text{N}_2\text{O}\text{-N}/\text{NO}\text{-N}$ が 100 以上で見られ、かつ WFPS (water filled pore space) が 50～60% の範囲にあったことから、 N_2O が主に脱窒過程で生成されかつ主要な生成物であったと考えられた。平均の年間 Background N_2O 発生量は $5.27 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (不確実性: 78.1%) であった。この値は日本の森林土壌の N_2O 発生量より大きく、Background N_2O 発生が農業活動に起因する発生量として無視できない量であると考えられた。単回帰および重回帰分析の結果、Background N_2O 発生は年平均気圧に負の影響を受けていた ($r^2=0.96, P<0.05$)。作成したモデル式から求めた Background N_2O 発生量の計算値は実測値とよく一致しており、年次変動を気象データから求めることが可能と考えられた。また年平均気圧と年降水量の有意な相関から、年平均気圧を年降水量に変換したモデル式を作成した。

3. 異なる C:N 比の作物残渣が土壌発生する N_2O に与える影響をフィールド条件下で調査した。たまねぎの葉 (OL)、大豆の茎葉 (SSL)、稲わら (RS)、麦わら (WS) の 4 処理区と対照区 (NR) を設けた。それぞれの残渣の C:N 比は 11.6、14.5、62.3、110 であった。残渣の投入量は農家への聞き取り調査に基づいて決定し、炭素 (C) と N の投入量はそれぞれ 108、168、110、141、 0 g C m^{-2} と 9.3、11.6、1.76、1.28、 0 g N m^{-2} であった。クロードチャンバー法で N_2O 、 CO_2 フラックスを測定した。OL 区と SSL 区のみで残渣投入直後に N_2O と CO_2 フラックスのピークが見られた。WS 区を除き、 N_2O と CO_2 フラックスに有意な相関があった。投入残渣 N あたりの N_2O 発生割合 ($\text{EFR}_{\text{N}_2\text{O}}$) は 0.43%～0.86% で、残渣の C:N 比と有意な負の相関を示した ($r^2=0.99, P<0.01$)。投入残渣 C あたりの CO_2 発生割合 (EFR_{CO_2}) は 5.8%～45% で、残渣の C:N 比と負の傾向を示した ($r^2=0.78, P=0.11$)。このことから易分解性の残渣ほど残渣 N に由来する N_2O 発生量の増加が明らかとなり、残渣 C:N 比から $\text{EFR}_{\text{N}_2\text{O}}$ の推定が可能と考えられた。

4. EF と Background N_2O 発生量の年次変動モデルを組み合わせた農地からの N_2O 発生量の推定モデルを作成した。推定した N_2O 発生量は比較的実測値に近い値を示したが、不確実性は極端に大きかった 2003 年の値を除いても 170% と大きかった。本研究で作成した年平均気温と年降水量を変数としたモデル式と IPCC (2007) の気温および降水量の予測値を用いて GL における N_2O 発生量を試算した所、2100 年には 1980～1990 年の 13.7 倍に増加する可能性がある。また、幾春別川流域の農耕地全体の N_2O 発生量を試算した所、2002 年から 2005 年にかけて流域の N_2O 発生量は 3.87 Mg N 増加していた。水田から他の作物への転換や休耕地面積の増加が流域の N_2O 発生量増加の一因と考えられた。また N_2O 発生量の寄与が大きいたまねぎ畑や穀類および休耕地における N_2O 発生量削減方法の開発は、今後の気候変動に対する流域レベルの N_2O 発生量の増加抑制もしくは削減に効果的であると考えられた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 波多野 隆 介

副 査 教 授 平 野 高 司

副 査 教 授 長谷川 周 一

副 査 准教授 中 原 治

学 位 論 文 題 名

農地から発生する亜酸化窒素の年次変動に関する研究

本論文は9章からなり図36、表20、引用文献100を含む99ページの和文論文であり、他に参考論文4編が添えられている。

温室効果ガスである亜酸化窒素 (N_2O) は農地からの発生量が人為起源発生量の約42%を占めており、より正確な定量が求められている。本研究では北海道三笠市のタマネギ畑におけるモニタリングから N_2O 発生量の定量とメカニズムを明らかにし、排出係数 (Emission Factor, EF) を用いた N_2O 発生量の年次変動推定モデルの構築とその精度を検討した。さらに将来の気候変動が N_2O 発生量に与える影響および幾春別川流域の農地の N_2O 発生について検討した。

タマネギ畑2圃場 (グライ低地土 GL, 褐色低地土 BL) に4処理区 (FOP: 化学肥料施与・有機物施与・作物栽培、F: 化学肥料施与・無栽培、OP: 有機物施与・作物栽培、C: 無施肥・無栽培) を設け、 N_2O 発生量を GL で5年間、BL で2年間測定した。化学肥料と有機物の EF (EF_C 、 EF_O) は次の式から求めた。

$$\text{EF}_\text{C}(\%) = (\text{FOP 区 } \text{N}_2\text{O 発生量} - \text{OP 区の } \text{N}_2\text{O 発生量}) / \text{化学肥料窒素 (N) 投入量} \times 100$$

$$\text{EF}_\text{O}(\%) = (\text{FOP 区 } \text{N}_2\text{O 発生量} - \text{F 区の } \text{N}_2\text{O 発生量}) / \text{有機物 N 投入量} \times 100$$

それぞれの処理区の N_2O 発生量には大きな年次変化があり、そのために EF_C 、 EF_O 共に大きな年次変動が確認された。GL の EF_C と年平均気温の有意な正の相関から ($P < 0.01$)、化学肥料 N 由来の N_2O の割合が気温上昇に比例することが示唆された。重回帰分析より EF_O は年平均気圧と年降水量に正の影響を受け ($P < 0.01$)、より湿潤な環境で有機物 N に由来する N_2O 割合の増加が示唆された。モデル式を用いて求めた GL の FOP 区の N_2O 発生量は実測値と良く一致し、 N_2O 発生量の年次変動を予測できる可能性が示された。BL の計算値と実測値とのずれから気象因子の EF_O に対する影響が圃場で異なる可能性があった。

土壌有機物由来の N_2O 発生 (Background N_2O 発生) の調査を行った。裸地区 (無施肥、無栽培) を設け、2000、2002～2006年の6年間の N_2O 、 CO_2 発生量を測定した。全ての年で N_2O と CO_2 フラックスの正の相関があり、土壌有機物分解の N_2O 生成に対する大きな寄与が示唆された。高い N_2O フラックスは主に脱窒過程で生成されかつ主要な生成物と考えられた。Background N_2O 発生量は平均 $5.27 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ で森林土壌での報告値より大きく、農業活動に起因する発生量として無視できない量と考えられ、また年平均気圧に負の影響を受けていた ($r^2 = 0.96$ 、

$P<0.05$)。モデル式から求めた計算値は実測値とよく一致しており、年次変動を気象データから求めることが可能と考えられた。

異なる C:N 比の作物残渣が土壌から発生する N_2O に与える影響をフィールド条件下で調査した。タマネギ葉 (OL)、ダイズの茎葉 (SSL)、稲わら (RS)、麦わら (WS) の 4 処理区と対照区 (NR) を設け、 N_2O 、 CO_2 フラックスを測定した。残渣の投入量は農家への聞き取り調査に基づいて決定し、それぞれの残渣の C:N 比は 11.6、14.5、62.3、110 であった。WS 区を除き N_2O と CO_2 フラックスに有意な相関があった。投入残渣 N あたりの N_2O 発生割合 (EFR_{N_2O}) は -0.43% ~ 0.86% で、残渣の C:N 比と有意な負の相関を示した ($r^2=0.99$, $P<0.01$)。また、投入残渣 C あたりの CO_2 発生割合 (EFR_{CO_2}) は -5.8% ~ 45% で、残渣の C:N 比と負の傾向を示した ($r^2=0.78$, $P=0.11$)。このことから易分解性の残渣ほど残渣 N に由来する N_2O 発生量の増加が明らかとなり、残渣 C : N 比から EFR_{N_2O} の推定が可能と考えられた。

IPCC(2007)は将来の年平均気温と降水量の変化を予測している。本調査地の 30 年間の年平均気圧と年降水量に有意な負の関係から ($P<0.01$)、年平均気圧の項を年降水量で変換した EF と Background N_2O 発生量のモデルを組み合わせ農地の N_2O 発生量推定モデル式を作成した。IPCC (2007) の気候変動の予測値を用い GL の N_2O 発生量を試算した所、2100 年には 1980 年代の 13.7 倍に増加する可能性があった。また、幾春別川流域の農耕地全体の N_2O 発生量は 2002 年から 2005 年にかけて 3.87 Mg N 増加していた。この一因として、水田から他の作物への転換や休耕地面積の増加が考えられた。またタマネギ畑や穀類、休耕地の N_2O 発生量削減方法の開発は、流域レベルでの N_2O 発生量の増加抑制や削減に効果的と考えられた。

以上のように、本研究は、農地土壌からの N_2O 発生量の時間変動の要因を解析しその削減についての方向性を検討したものであり、2007 年度土壌肥料学会優秀ポスター賞を受賞するなど関連学会においても高く評価されている。よって審査員一同は、当真 要が博士(農学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認めた。