

北海道の灰色低地土および黒ボク土の畑における

亜酸化窒素の生成・放出の比較

学位論文内容の要旨

気候変動に関する政府間パネルは、地球温暖化の原因として人間活動由来の温室効果ガス排出量の増加をあげている。温室効果ガスの一種である亜酸化窒素(N_2O)は、長い寿命と高い地球温暖化係数を持つため、温暖化への寄与は高く、その影響は長期間に及ぶ。 N_2O の濃度上昇の最大要因は農業と指摘されており、農耕地からの N_2O 放出を早急に低減させる必要がある。しかしながら、 N_2O 放出は時間・空間的変動が非常に大きいため放出量の推定は難しく、2001 年の IPCC の 3 次報告書では人為起源の N_2O 放出量は $2.1\text{--}20.7 \text{ Tg N yr}^{-2}$ の大きな幅を持つことが報告されている。このため、 N_2O 放出量の実測値を積み上げて推定値の精度を上げるとともに、 N_2O 放出量を低減するために、 N_2O の放出要因の解明を進める必要がある。

従って本研究では、北海道中央部に位置する灰色低地土と黒ボク土の畑地の無積雪期において、土壌から大気への N_2O 、二酸化炭素(CO_2)および一酸化窒素(NO)フラックス等を 3–6 年間測定し、 N_2O フラックスの季節推移や N_2O 放出に対する気象および土壌環境の影響を明らかにし、無積雪期の N_2O 放出量を見積もることを目的とした。

1. 土壌構造が発達した灰色低地土タマネギ畑からの無積雪期の N_2O 放出

1995–2000 年に北海道中央部の灰色低地土タマネギ畑において、無積雪期 (4–11 月) に N_2O フラックスとそれに関連する要因を測定した。土壌から大気への N_2O フラックスは $0.00\text{--}1.86 \text{ mg N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ の範囲であり、6 年間同様の季節推移を示した。最も大きな N_2O 放出は 5 月の施肥直後ではなく、降雨頻度が高まる収穫期前後の 8–10 月に認められた。無施肥区では NO フラックスおよび施肥直後の N_2O フラックスの上昇は認められなかったが、施肥の有無に関わらず収穫期前後に N_2O フラックスが上昇した。土壌中の硝酸(NO_3^-)、アンモニウム(NH_4^+)濃度およびフラックスの $\text{N}_2\text{O}\text{--N/NO}\text{--N}$ 比の季節推移より、施肥直後の N_2O 生成は主に硝化、収穫期前後の N_2O 生成は主に脱窒に由来すると考えられた。収穫期前後の N_2O フラックスの上昇はタマネギの植栽によって大きくなる傾向であり、 N_2O と CO_2 フラックスの間には時系列および空間変動ともに有意な相関関係が認められたことから、降雨による土壌への水供給に加えて、タマネギ由来の有機物が N_2O 生成に影響を与えたと考えられた。無積雪期の N_2O および NO 放出量は $0.35\text{--}1.6 \text{ g N m}^{-2}$ および $0.28\text{--}0.99 \text{ g N m}^{-2}$ だった。無積雪期の N_2O 放出量の 70 % は 8–10 月に放出され、 N_2O 放出量を見積もる際には、施肥後だけではなく、年間を通した N_2O フラックスの測定が必要であることが示された。

2. 黒ボク土トウモロコシ畑からの無積雪期の N_2O 放出

1998–2000 年の無積雪期において、北海道中央部の黒ボク土トウモロコシ畑からの N_2O フラックスとそれに関連する要因を調査した。 N_2O フラックスの範囲は $0.00\text{--}6.42 \text{ mg N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ であった。 N_2O フラックスは毎年最初の大雨直後に一度だけ大きく上昇し、この上昇は施肥直後よりも大きかった。化学肥料施用の有無が異なる株間と畝間において N_2O フラックスの季節推移は同様であり、有意差は認められなかった。 NO フラックスは施肥後に株間でのみ上昇し、畝間では常に低く推移し季節変動は認められなかった。土壌の NH_4^+ 、 NO_3^- 濃度とフラックスの $\text{N}_2\text{O}\text{--N/NO}\text{--N}$ 比の推移から、施肥直後に放出された N_2O と NO は施肥窒素の硝化由来、大雨後

に放出された N_2O は脱窒由来と推定された。本圃場の無積雪期における N_2O 放出量は $0.83\text{--}2.3 \text{ g N m}^{-2}$ であった。これまで日本の黒ボク土の N_2O 放出は比較的小さいと報告されているが、本圃場のように地下水位が高く排水性が悪い条件では、大きな N_2O 放出が起こる可能性があることが示された。

3. 土壌構造および土壌の理化学性の違いが土壌中の N_2O の生成・放出に与えた影響

これまで、個別に N_2O 放出量と放出メカニズムを検討した 2 圃場は、粗孔隙の発達程度が異なる土壌であった。粗孔隙は土壌中の水やガスの移動に大きく関与するため、土壌構造の違いが、 N_2O および CO_2 生成と放出のメカニズムに与える影響を検討した。5 月下旬から 10 月の無積雪期に、土壌中の N_2O と CO_2 の濃度分布を調査し、深さ 0.3 m を通過する N_2O および CO_2 フラックスを拡散法により求め、チャンバー法で測定した土壌から大気へのフラックスと比較した。灰色低地土と黒ボク土では、土壌中の CO_2 濃度分布は同様だったが、 N_2O 濃度分布は異なり、下層の N_2O 濃度は黒ボク土よりも灰色低地土で高かった。これが二つの土壌から大気への N_2O フラックスの季節推移と N_2O 放出量の違いの原因だと考えられた。両土壌ともに、土壌から大気へ放出された N_2O と CO_2 の大部分は深さ 0.3 m より上で生成されていたが、灰色低地土では下層で生成された N_2O も粗孔隙を通して大気へ放出されたものと推察された。この灰色低地土における下層の N_2O 濃度上昇の原因には、降雨時に粗孔隙を通して水とともに下層に輸送された NO_3^- が脱窒をうけたことが考えられる。 N_2O 生成に影響を与える土壌の性質としては、 pH および炭素含有率がある。本調査地では灰色低地土と黒ボク土の土壌 pH は微酸性で同程度だった。しかし、炭素含有率は作土では灰色低地土よりも黒ボク土で高かったが、下層では灰色低地土で高かった。脱窒は有機炭素が多いほど進みやすいことから、粗孔隙の存在とともに土壌炭素含量が高かったことが、灰色低地土の下層で N_2O 濃度を高めた理由と考えられた。

4. 既往の研究事例との N_2O および NO 放出量の比較

日本の測定事例では測定期間中の N_2O 放出量の大部分は 0.1 g N m^{-2} と報告されている。世界の測定事例における N_2O 放出量の範囲は $0.8\text{--}170 \text{ g N m}^{-2}$ と幅広いが、測定事例の 80% 程度は 0.5 g N m^{-2} 以下であり、本圃場の無積雪期の N_2O 放出量 $0.35\text{--}1.6 \text{ g N m}^{-2}$ (灰色低地土) および $0.83\text{--}2.3 \text{ g N m}^{-2}$ (黒ボク土) は他の測定事例と比べて高い値だった。これは、両圃場ともに排水性が悪い土壌であり、多くの事例で測定期間の最大 N_2O 放出が認められている施肥後よりも、脱窒が起こりやすい環境であった夏以降の大雨後や多雨期に、施肥後と同等かそれ以上の N_2O 放出が起こったためだと考えられた。

以上のように、粗孔隙の発達程度が異なる北海道中央部の灰色低地土と黒ボク土において、無積雪期の N_2O 放出量を推定し、施肥直後の硝化由来の N_2O 放出よりも夏から秋の脱窒由来の放出が大きく、これは北海道の降雨パターンの影響を受けたこと、粗孔隙の有無により土壌中の N_2O 生成深度と大気への移動性が異なり、これが二つの土壌からの N_2O フラックスの季節推移や N_2O 放出量の違いの原因であったことを明らかとした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 波多野 隆 介

副 査 教 授 長谷川 周 一

副 査 教 授 平 野 高 司

学 位 論 文 題 名

北海道の灰色低地土および黒ボク土の畑における 亜酸化窒素の生成・放出の比較

本論文は7章からなり、図 33、表 16、引用文献 136 を含む 94 ページの和文論文で、他に参考論文 3 編が添えられている。

亜酸化窒素(N_2O)は温室効果ガスの一種であり、長い寿命と高い地球温暖化係数を持つ。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は、 N_2O 濃度上昇の最大要因は農業と指摘し、農耕地由来の N_2O 放出を早急に低減させる必要がある。しかしながら、時間・空間的変動が非常に大きい N_2O 放出量の推定は難しく、IPCC の 3 次報告書で示された人為起源の N_2O 放出量は $2\text{--}21 \text{ Tg N yr}^{-1}$ の大きな幅があり、 N_2O 放出量の実測値を積み上げと N_2O 放出要因の解明を進めて、推定精度を上げる必要がある。本研究では、北海道中央部の土壤構造の異なる灰色低地土と黒ボク土の畑地において、無積雪期の土壤から大気への N_2O 放出量を見積もり、その季節推移に対する気象および土壤環境の影響を明らかにすることを目的とした。

1. 灰色低地土タマネギ畑からの N_2O 放出

1995–2000 年の無積雪期(4–11 月)に、灰色低地土において N_2O フラックスと関連要因を測定した。土壤から大気への N_2O フラックスは $0.0\text{--}1.9 \text{ mg N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ の範囲で、施肥区では毎年 5 月の施肥直後と同等かそれ以上の N_2O が、降雨頻度が高まる収穫期前後に放出され、一酸化窒素(NO)フラックスは施肥直後のみに上昇した。無施肥区では NO および施肥直後の N_2O フラックスの上昇はなく、収穫期前後に N_2O フラックスが上昇した。土壤中の無機態窒素濃度およびフラックスの $\text{N}_2\text{O}/\text{NO}$ 比より、施肥直後の N_2O 生成は主に硝化、収穫期前後の N_2O 生成は主に脱窒由来だと考えられた。収穫期前後の N_2O フラックスはタマネギの植栽によって上昇し、 N_2O と二酸化炭素(CO_2)フラックスの間には時系列および空間変動ともに有意な正の関係が得られたため、降雨による土壌への水供給と、タマネギ由来の有機物が N_2O 生成を促進したと考えられた。無積雪期の N_2O 放出量は $0.4\text{--}1.6 \text{ g N m}^{-2}$ であり、この 70 % は 8–10 月に放出された。従って、施肥後中心の N_2O フラックスの測定では放出量を過少評価する可能性がある。

2. 黒ボク土トウモロコシ畑からの N_2O 放出

1998–2000 年の無積雪期において、黒ボク土からの N_2O フラックスと関連要因を調査した。 N_2O

フラックスの範囲は $0.0\text{--}6.4\text{ mg N m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ であった。化学肥料の有無に関わらず、 N_2O フラックスは毎年最初の大雨直後に一度だけ大きく上昇し、これは施肥直後よりも大きかった。 NO フラックスは施肥後に化学肥料を施用した株間でのみ上昇した。土壌の無機態窒素濃度とフラックスの $\text{N}_2\text{O}/\text{NO}$ 比から、施肥直後に放出された N_2O は硝化由来、大雨後に放出された N_2O は脱窒由来と推定された。無積雪期の N_2O 放出量は $0.8\text{--}2.3\text{ g N m}^{-2}$ であった。これまで比較的 N_2O 放出が小さいと言われている日本の黒ボク土でも、本圃場のように地下水位が高い条件では、大きな N_2O 放出が起こる可能性がある。

3. 土壌の違いが N_2O 生成・放出に与える影響

灰色低地土と黒ボク土は土壌中の水やガスの移動に大きく関与する粗孔隙の発達程度が異なる土壌であり、灰色低地土は黒ボク土と異なり下層まで連続した粗孔隙を持つ特長を有する。この違いが N_2O の生成放出メカニズムに与える影響を検討した。無積雪期に土壌中の N_2O の濃度分布を調査し、深さ 0.3 m を通過する N_2O フラックスを拡散法により求め、チャンバー法で測定した土壌から大気へのフラックスと比較した。下層の N_2O 濃度は黒ボク土よりも灰色低地土で高く、これが二つの土壌から大気への N_2O 放出の推移と量の違いの原因だと考えた。両土壌ともに、土壌から大気へ放出された N_2O の大部分は深さ 0.3 m より上で生成されていたが、灰色低地土では下層で生成された N_2O も粗孔隙を通して大気へ放出されたと推察した。灰色低地土の下層の N_2O 濃度上昇の原因には、降雨時にこの粗孔隙を通して水とともに下層に輸送された NO_3^- が脱窒をうけたことと考えた。脱窒は有機炭素が多いほど進みやすく、灰色低地土では粗孔隙の存在とともに下層の土壌炭素含量が黒ボク土よりも高かったことも、下層の高い N_2O 濃度の一因と推定した。

4. 既往の研究事例との N_2O 放出量の比較

日本の N_2O 放出量測定事例の大部分は 0.1 g N m^{-2} 以下、世界の測定事例の 80%程度は 0.5 g N m^{-2} 以下で、これらと比べて本論文における N_2O 放出量は高かった。これまでの報告では、施肥後に最大 N_2O 放出を認めてきたが、本論文では、施肥後以外の時期に、施肥後と同等かそれ以上の N_2O 放出が認められたためである。従って施肥後のみの調査では、土壌の N_2O 放出量を評価するには不備があると指摘した。

5. 結論

以上から、北海道中央部の灰色低地土と黒ボク土では、北海道の降雨パターンの影響を受けたため、施肥直後の硝化よりも夏から秋の脱窒由来の N_2O 放出が大きく、粗孔隙の有無による土壌中の N_2O 生成深度と大気への移動性の違いが、二つの土壌からの N_2O 放出の季節推移や量の違いの原因であったこと、本調査地の無積雪期の N_2O 放出量は世界的にみても大きかったと結論した。

以上のように、本研究は、農地土壌における N_2O 生成放出について検討し、土壌の違いを明らかにしたものであり、関連学会等で高く評価されている。よって、審査員一同は、草佳那子が博士（農学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認めた。