

学 位 論 文 題 名

草地土壌の温室効果ガス・シンク・ソース機能に関する研究

学位論文内容の要旨

農耕地の炭素貯留機能を最大限活用するため土壌有機物の適切な管理の重要性が指摘されている。草地は長期間に渡り不耕起で管理されることが多く、家畜排泄物などの有機物が施用されるため、畑地より炭素貯留機能が大きいことが知られている。しかし、窒素固定能を有するマメ科の牧草による土壌への窒素移譲、更新による草地の耕起、堆肥などの有機物施用は温暖化係数の高いメタン (CH_4) や亜酸化窒素 (N_2O) の排出量を変化させる可能性があるため、草地が持つ地球温暖化抑制効果を適切に評価するためには、 CH_4 や N_2O の排出量にも注意を払う必要がある。本研究では、草地土壌の有機物動態と関わりの深い草種構成、更新に伴う牧草残渣のすき込み、堆肥散布が CH_4 と N_2O の排出量に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、那須の火山灰土壌の草地において実証試験を行った。得られた結果は以下の通りである。

1. 草地の草種構成が CH_4 と N_2O の排出量に及ぼす影響

オーチャードグラス (OG) 単播草地、シロクローバ (WC) 単播草地、OG/WC 混播草地からの CH_4 と N_2O の排出量を観測した。いずれの草種でも CH_4 吸収が認められ、OG 単播草地、WC 単播草地、OG/WC 混播草地の CH_4 吸収量は、それぞれ $1.8, 2.4, 1.8 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ であった。WC 単播草地の容積重は他の植生の草地より小さく、WC は土壌通気性を高めることで CH_4 吸収量を増加させたと考えられたが、 CH_4 年間吸収量に有意な処理間差は認められなかった。いずれの草種でも土壌水分の増加とともに CH_4 吸収量の減少が認められ、土壌通気性が CH_4 吸収量の経時的変化の主因と考えられた。WC 残渣を介した土壌への窒素移譲は、窒素のターンオーバー速度を増加させたが、 CH_4 吸収量を有意に減少させなかった。OG 単播草地、WC 単播草地、OG/WC 混播草地からの N_2O 排出量は、それぞれ $0.39, 1.59, 0.67 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ であり、WC が栽培されると N_2O 年間排出量が有意に増加した。WC 残渣を介した土壌への窒素移譲と植生による窒素吸収量の差が WC 単播草地 > OG/WC 混播草地 > OG 単播草地の順で土壌中の無機態窒素の濃度を高めたため、草種構成により N_2O 排出量が異なったと考えられた。

2. 草地更新時の N_2O 排出量

更新を行った草地 (更新草地) と行わない草地 (対照草地) の N_2O 排出量を測定した。更新作業は 2005、2006 年の 8 月、以下のように行った。まず、収穫後にプラウ耕起を行い、牧草の根と刈株を表層土壌にロータリーですき込んだ。次に、地表面をローラーで鎮圧し、 40 kg N ha^{-1} の窒素肥料を表面散布した後 OG を播種した。対照草地では収穫後に肥料散布のみ行った。更新草地と対照草地の植生はいずれも OG などイネ科牧草が主体であった。この作業から約 2 ヶ月間に渡り N_2O 排出量を測定した。

最初の 2 週間、更新草地からの N_2O の排出量は対照草地より多かった。すき込まれた根と刈株から迅速な窒素無機化が起これば土壌中の無機態窒素の濃度が高まったためと考えられた。また、すき込まれた根と刈株は土壌の嫌氣的部位を拡大させ、牧草残渣と窒素肥料に由来する N_2O 生成を増加させたと推察された。また、耕起によって、更新草地の土壌水分は対照草地より N_2O が生成され易くまた排出され易い領域に分布した可能性も考えられた。2 週間経過以後も降雨後には更新草地から N_2O 排出が認められた。更新草地は裸地に近い状態であったため、地表面が日射で直接温められ、地温が対照草地よりも $2.7 \sim 3.0^\circ\text{C}$ 高く、 N_2O 排出が助長されたと考えられた。

2005 年は、67 日間に更新草地と対照草地から、それぞれ 5.3 ± 1.4 , $2.8 \pm 0.7 \text{ kg N ha}^{-1}$ の N_2O 排出が認められた。2006 年は、65 日間に更新草地と対照草地から、それぞれ 2.1 ± 0.6 , $0.96 \pm 0.42 \text{ kg N ha}^{-1}$ の N_2O 排出が認められ、2005、2006 年とも更新草地からの N_2O 排出量は対照草地より有意に多かった。更新に伴う N_2O 排出量に大きな年次間差が認められた原因は、更新時の土壤水分や更新後の降雨量の年次間差に伴う脱窒による N_2O 生成量の違いと推察された。

3. 堆肥散布が草地からの N_2O と CH_4 の排出量に及ぼす影響

堆肥と化学肥料を組み合わせで散布した草地（堆肥区）と化学肥料のみを散布した草地（化学肥料区）からの N_2O と CH_4 の排出量を測定した。堆肥は、2004 年は 15 Mg ha^{-1} 、2005 年は 30 Mg ha^{-1} を両年とも 11 月に表面散布した、化学肥料は 3、5、7、9 月に堆肥区と化学肥料区に表面散布した。堆肥区は、1 年間に堆肥から無機化する窒素量と硫酸による施肥量の合計が $210 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ となるよう調整した。化学肥料区は、硫酸を $210 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 散布した。堆肥区と化学肥料区の植生は、いずれも OG などイネ科牧草が主体であった。

堆肥区と化学肥料区の N_2O の年間排出量は、それぞれ $7.0 \sim 11.0$, $4.7 \sim 9.1 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ の範囲にあった。 N_2O 年間排出量は堆肥区が化学肥料区より有意に多く、堆肥散布後に排出された N_2O が堆肥区からの N_2O 年間排出量を増加させた原因と推察された。堆肥散布直後の N_2O 排出量は僅かであったが、降雨後に堆肥区の N_2O 排出量が高まったため、堆肥中の無機態窒素と易分解性有機物から新たに N_2O 生成が起こったと推察された。堆肥散布を除けば、地温が高く降雨量の多い時期に施肥により土壤中の無機態窒素の濃度が高まることで N_2O 排出量が増加したと推察された。施肥窒素当たりの N_2O 排出量は施肥後 10 日間の積算降雨量と有意な相関関係が認められ、 N_2O 年間排出量の年次間差は、施肥直後の降雨パターンの年次間差に起因すると考えられた。また、3 月の早春施肥から 11 月の 4 番草収穫までの牧草生育期間中、堆肥散布は N_2O 排出量に影響しなかった。

堆肥区と化学肥料区からの CH_4 年間排出量は、それぞれ $-0.74 \sim -0.16$, $-0.84 \sim -0.52 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ の範囲にあった。堆肥散布は CH_4 年間排出量に有意に増加させなかったが、7～9 月にかけての 3 番草生育期間中は堆肥区からの CH_4 排出量は化学肥料区より有意に多く、夏期の堆肥分解により堆肥区の CH_4 吸収量が相対的に減少した可能性が示唆された。 CH_4 排出量は土壤中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度や土壤水分が高いほど多くなり、 $\text{NH}_4\text{-N}$ による CH_4 酸化阻害や降雨に伴う土壤通気性の低下が CH_4 吸収量の経時的変化の原因の一部と推察された。

4. 結論

本研究は、草地における土壤有機物の動態と関わりの深い草種構成、草地更新に伴う牧草残渣のすき込み、堆肥散布が草地からの CH_4 と N_2O の排出量に及ぼす影響を土壤理化学性などの違いに重点を置いて明らかにした。シロクローバは土壤通気性を改善することで CH_4 吸収量を増加させ、土壤中の無機態窒素の濃度を高めることで N_2O 排出量を増加させた。混播草地からの N_2O 排出量を抑制するため、窒素固定量を考慮して窒素施肥量を削減することが重要と指摘される。草地更新は、牧草の根や刈株を土壤にすき込むことで、土壤中の無機態窒素の濃度を高め、嫌氣的微小部位を拡大し、土壤水分を N_2O が生成され易く、また排出され易い領域に分布させ N_2O 排出量を増加させた。 N_2O 排出量を抑制するため、できるだけ更新頻度を少なくし、地温や土壤水分の高い時期を避けて更新を行うことが重要と指摘される。堆肥散布後の降雨で N_2O 排出量が高まり、堆肥散布は N_2O 年間排出量を増加させた。一方、堆肥散布後の CH_4 排出量は僅かで CH_4 年間排出量に影響しなかった。 N_2O 排出量を抑制するため、堆肥からの窒素無機化量を考慮し窒素施肥量を削減することが重要と指摘される。

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

草地土壌の温室効果ガス・シンク・ソース機能に関する研究

本論文は7章からなり、図13、表13、引用文献133を含む67ページの和文論文で、他に参考論文4編が添えられている。

農耕地の炭素貯留機能を最大限活用するため土壌有機物の適切な管理の重要性が指摘されている。草地は長期間に渡り不耕起で管理されることが多く、家畜排泄物などの有機物が施用されるため、畑地より炭素貯留機能が大きいことが知られている。しかし、草地が持つ地球温暖化抑制効果を適切に評価するためには、 CH_4 や N_2O の排出量にも注意を払う必要がある。本研究では、草地土壌の有機物動態と関わりの深い草種構成、更新に伴う牧草残渣のすき込み、堆肥散布が CH_4 と N_2O の排出量に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、那須の火山灰土壌の草地において実証試験を行った。

1. 草地の草種構成が CH_4 と N_2O の排出量に及ぼす影響

イネ科のオーチャードグラス (OG) 単播草地、マメ科のシロクロバ (WC) 単播草地、OG/WC 混播草地からの CH_4 と N_2O の排出量を測定した。いずれの草地ともには CH_4 吸収されていた。 CH_4 吸収量は、OGで1.8, WCで2.4, OG/WCで $1.8 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ であった。WCは土壌通気性を高めることで有意ではないが、 CH_4 吸収量を増加させた。また、降雨による土壌通気性の変化が CH_4 吸収量の季節変化の主因と推察した。 N_2O 排出量はOGで0.39, WCで1.59, OG/WCで $0.67 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ であり、WCでは N_2O 年間排出量が有意に増加した。その理由として、WCの残渣からの大きな窒素無機化が原因と考えた。

2. 草地更新時の N_2O 排出量

更新を行った草地 (更新草地) と行わない草地 (対照草地) の N_2O 排出量を約2ヶ月間測定した。いずれもイネ科牧草主体である。更新草地は、収穫後にプラウ耕起を行い、根と刈株を表層土壌にロータリーですき込み、地表面をローラーで鎮圧し、 40 kg N ha^{-1} を表面散布した後OGを播種した。対照草地は、収穫後に肥料散布のみ行った。更新草地と対照草地から、それぞれ2.1~5.3, $0.96 \sim 2.8 \text{ kg N ha}^{-1}$ の N_2O 排出が認められ、更新草地からの N_2O 排出量は対照草地より有意に多かった。その理由として、更新草地では、すき込まれた根と刈株から窒素無機化が起こり、土壌中の嫌氣的部位が拡大し、更新草地の土壌水分は対照草地より N_2O が生成され易く、また排出され易い領域に分布したためと推察した。 N_2O 排出量には年次間差が見られた。その原因を、更新時期の

土壌水分や更新直後の降雨量の差に伴う脱窒による N_2O 生成量の違いによると推察した。

3. 堆肥散布が草地からの N_2O と CH_4 の排出量に及ぼす影響

堆肥と化学肥料を散布した草地（堆肥区）と化学肥料のみを散布したイネ科牧草主体の草地（化学肥料区）からの N_2O と CH_4 の排出量を測定した。堆肥は、 $15\sim 30 \text{ Mg ha}^{-1}$ を 11 月に表面散布した、化学肥料は 3, 5, 7, 9 月に表面散布した。堆肥区は、堆肥の窒素無機化量と硫酸の合計が $210 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ となるよう調整した。化学肥料区は、硫酸を $210 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 散布した。堆肥区と化学肥料区の N_2O の年間排出量は、それぞれ $7.0\sim 11.0$, $4.7\sim 9.1 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ の範囲にあった。 N_2O 年間排出量は堆肥区が化学肥料区より有意に多く、堆肥散布後に排出された N_2O が堆肥区からの N_2O 年間排出量を増加させた。とくに地温が高く降雨量の多い時期の施肥により N_2O 排出量が増加した。施肥窒素当たりの N_2O 排出量は施肥後 10 日間の積算降雨量と有意な相関関係が認められ、堆肥散布後の降雨によって無機態窒素と易分解性有機物から新たに N_2O 生成が起こったと推察された。堆肥区と化学肥料区ともに CH_4 は吸収されていた。年間吸収量は、堆肥区で $0.74\sim 0.16 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、化学肥料区で $0.84\sim 0.52 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ の範囲で、両者に差はなかった。 CH_4 吸収量は土壌中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度や土壌水分が高いほど小さい傾向があった。

4. 結論

以上から、草種構成、草地更新に伴う牧草残渣のすき込み、堆肥散布は、とくに N_2O 排出量に強く影響を及ぼすことが明らかとなった。そして、1) 混播草地からの N_2O 排出量を抑制するため、窒素固定量を考慮して窒素施肥量を削減することが重要である、2) 草地更新による N_2O 排出量を抑制するため、更新頻度を少なくし、地温や土壌水分の高い時期を避けて更新を行うことが重要である、3) 堆肥散布による N_2O 排出量を抑制するには、堆肥からの窒素無機化量を考慮し窒素施肥量を削減することが重要である、と結論づけた。

以上のように、本研究は、草地管理に伴う温室効果ガスの放出について検討し、その抑制方法を提示したものであり、関連学会等で高く評価されている。よって、審査員一同は、森昭憲が博士（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。