農林地複合生態系流域における
土壌由来温室効果ガスフラックス定量値の
圃場から流域へのスケールアップ

学位論文内容の要旨

土壌は温室効果ガス(GHG)である二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)、亜酸化窒素(N₂O)の排出源である。CH₄は全球排出量の4割、N₂Oは6割が土壌由来であり、また土壌由来CO₂は全球の炭素循環に重要な役割を果たしている。しかし、主に微生物活動に由来するこれらのガスフラックスは極めて大きな時空間変動を持ち、その定量値は未だ不確実性が高い。現在、圃場毎の代表値を用いた複数年にわたる排出量推定が要求されているが、これには労力がかかり、その代表値の見積り方法の検討も十分ではない。そこで本研究は単一流域に立地し、森林・放牧地・採草地・コーン畑を含む静内研究牧場で、クローズドチャンバー法によりこれらのガスフラックスの特徴を評価し、流域全体からのガス排出量の見積り方法を検討した。

1. 牧場内の各土地利用からのGHGs排出パターンとその排出量を把握するために、2年間の通年モニタリングをおこなった。CO₂排出量は気温の上昇と共に増加し、WFPSの低下に伴い減少した。CH₄は畑地、草地において窒素投入によりCH₄酸化能が低下し、CH₄吸収量の低下がみられた。N₂Oは窒素投入とその後の降雨により排出量が増加した。脱窒と硝化の指標となるN₂O/NO比が基肥後は10以下、それ以外の時期は1000に達する場合があり、施肥後のN₂O排出は硝化主体、それ以外の時期は脱窒が影響していると考えられた。年間のCO₂排出は4.6~9.9 Mg C ha⁻¹ y⁻¹で、報告値とよく一致した。CH₄吸収(単位:kg C ha⁻¹ y⁻¹)は森林で-2.7~-3.4で、亜寒帯森林の報告値(-18~-0.1)と同程度であったが、畑地(-0.8~-0.2)・草地(-0.2~-0.1)は報告値(各-1.1、-3.1~-1.8)より吸収が少なかった。N₂Oの年間排出量は0.2~82.1 kg N ha⁻¹ y⁻¹の範囲にあり、圃場によっては年次間で排出量が10倍も異なった。また国内の報告値0.1~28 kg N ha⁻¹のうち極めて大きいグループに入り、年間排出量に占める土壌融解期の寄与も1~37%と大きかった。

2. 牧場内の6圃場で凍結融解期間の深度0~60 cm土壌空気とガスフラックスを調査し、凍結融解期のN₂O排出要因を調査した。凍結期間、土壌は最大で深度35 cmまで凍結し、すべての圃場で凍結層中のN₂O濃度が上昇していた。しかし排出は融解期にのみ見られ、また、排出が見られる圃場と見られない圃場があった。融解期は全ての圃場において硝化過程で排出するNOがわずかながら観測され、土壌融解初期から後期でNH₄-N量および溶存有機態炭素量の減少とNO₃-N量の増加が見

られたため、土壌融解時は硝化が起きていると考えられた。ただし、融解期の全ての N_2O フラックスは $\text{N}_2\text{O}/\text{NO}$ 比の増加に伴い増加していたため、融解期の高い N_2O 排出は脱窒由来 N_2O 主体と考えられた。 N_2O 排出の見られた圃場では凍結部位 N_2O 濃度が特に高く、融解時土壌表層の脱窒活性がなく、融解時 N_2O 排出が凍結層の N_2O 濃度勾配と有意な正の相関を示したことから、凍結層に生成・蓄積した N_2O が融解時排出していると考えられた。一方、 N_2O 排出の見られなかった圃場では融解時土壌表層の脱窒活性が高く、3月以降土壌表層の凍結部位で N_2O 濃度低下がみられ、また $\text{CO}_2 \cdot \text{CH}_4$ 濃度が高かったことから、強い還元状態となった土層中で NO_3 と共に N_2O が N_2 まで還元されている可能性が示唆された。

3. 牧場内の全土地利用を含むように設定した 2 km のライントランセクト上で、施肥前 (PF) と収穫前 (PH) の 2 回、ガスフラックスの空間分布を評価した。またトランセクト全体からのガスフラックスの定量に必要なサンプル数の試算をおこなった。その結果、 CO_2 、 CH_4 、および N_2O フラックスはそれぞれ土地利用によって異なる分布を示した。各ガスは距離依存性を示す場合もあったが、その依存距離はガスの種類、土地利用、ホットスポット、サンプリング時期によって影響を受けており、距離依存性を考慮した見積もりは十分な効果があるわけではないと考えられた。トランセクト上の CO_2 、 CH_4 、および N_2O 推定排出量の平均値が 95 % の確率で ± 20 % 以内に入るために必要なサンプル数を試算し、1 ha あたりの必要サンプル数に換算したところ、 CO_2 は ± 20 % で 2 点であったが、 CH_4 は 400 点、 N_2O は 1211 点も必要であると試算された。一方、 CH_4 、 N_2O について、1 ha あたりで推奨される 5 反復の測定で推定値を得るならば、それぞれ ± 60 %、 ± 80 % の誤差範囲を持つと試算された。ただし、 CH_4 のホットスポットは窪地周辺で見られたため、この試算からは除外した。

4. 5 年間の年間積算 N_2O 排出量 E_{all} を用いて流域全体からの N_2O 排出量を見積もった。 E_{all} ($n=46$) は窒素投入量と有意な正の相関 ($R^2=0.29$, $p<0.01$) を示したが、ばらつきも大きかった。 E_{all} のうち E_{all} の平均値以上の値を E_{high} ($n=9$)、それ以外を E_{norm} ($n=37$) としたところ、 E_{norm} と窒素投入量、および放牧をしていない圃場の E_{high} と余剰窒素量の間には有意な正の相関が見られた (各 $R^2=0.61$, $p<0.01$, $R^2=0.96$, $p=0.02$)。放牧をした圃場の E_{high} は適当な説明変数がなかったため、放牧により一定の排出量があるとした。 E_{norm} と窒素投入量の関係式から得た推定 E_{norm} 排出量は $2.8 \sim 3.2 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、 E_{high} と余剰窒素量の関係式および放牧地における定数から得た推定 E_{high} 排出量は $30 \sim 38.8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ であった。各年の全 N_2O フラックス測定値の平均値を上回る測定値が出現する頻度は $2.2 \sim 3.6$ % であり、この値を E_{high} 出現確率と定義すると、牧場全体からの N_2O 排出量は $1153 \pm 385 \text{ kg N}$ となった。この値と比較すると、 E_{all} と窒素投入量の関係式からの推定値は $1816 \pm 74 \text{ kg N}$ と有意に高く、IPCC が薦める排出係数を用いた推定値は $726 \pm 8 \text{ kg N}$ と有意に低かったが、各年次の土地利用別平均 N_2O 排出量に各土地利用面積を乗じて合計した推定値 ($964 \pm 347 \text{ kg N}$) と有意差はなかった。この 4 つの推定法の平均値と標準偏差を用いて予測される牧場全体の N_2O 排出量をモンテカルロシミュレーションで求めた結果、 E_{norm} と E_{high} を区別した方法は他の方法に比べ実際の排出量の年次変動を反映し、土地利用変化に依存しない値が得られた。このことより、 E_{norm} と E_{high} を区別した方法は他の方法に比べ流域スケールでの N_2O 排出を見積るための有効な方法であるといえた。

5. 本流域の GHGs 排出は時空間変動が大きく、チャンバー法による CH_4 、 N_2O 排出量の見積りには特に大きな変動を含んでいた。しかし、このような変動があるにも関わらず、 N_2O 排出は、施肥、余剰窒素、

放牧などの要因により区別することができた。このことは今後の精緻化に一定の方向性を与えると期待される。ただし、年間値に大きな寄与を示した融解期の N_2O 排出および、説明変数が得られなかった放牧地の N_2O 排出の精緻化は今後の課題である。

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
副 査 助 教 授 中 原 治

学 位 論 文 題 名

農林地複合生態系流域における 土壌由来温室効果ガスフラックス定量値の 圃場から流域へのスケールアップ

本論文は 10 章からなり、図 38、表 19、引用文献 76 を含む 101 ページの和文論文である。他に参考論文 1 編が添えられている。

土壌は二酸化炭素 (CO_2)、メタン (CH_4)、亜酸化窒素 (N_2O) の温室効果ガス (GHGs) の排出源であるが、それらは大きな時空間変動を示し、その排出量の見積りの精緻化が要求されている。とくに畑では N_2O 排出が問題となっている。本論文は流域に含まれる全ての土地利用において、各種 GHGs をクロズドチャンバー法で測定し、その時空間変動の特徴を解析するとともに、 N_2O について流域レベルの排出量の見積りを検討した。

静内牧場を対象流域にし、そこに含まれる全ての土地利用 (森林、採草地、放牧草地、コーン畑) において 5 年間の通年モニタリングをおこなった。その結果、 CO_2 フラックスは気温上昇で増加し、 N_2O フラックスは窒素投入と降雨により増加したが、同じ圃場でも年度により発生量が大きく異なった。 CH_4 は一般に土壌に吸収され、窒素投入により吸収量が減少し、水分率上昇により排出に転じた。年間 CO_2 排出量は報告値と同程度であったが、 CH_4 吸収量は報告値より小さかった。 N_2O 排出量は報告値よりも大きかった。また土壌凍結の融解期の寄与は最大 65 %を示した。

融解期の N_2O 排出が多い圃場では凍結期間中に土壌空気の N_2O 濃度が高まり、 N_2O フラックスが土壌空気の N_2O 濃度勾配と有意な正の相関を示していたことから、凍結期に土層に封入された N_2O が融解期に排出されたと考えられた。 N_2O は硝化と脱窒で生成し、硝化では NO を多く伴うことが知られている。排出量が多い圃場では $\text{N}_2\text{O}/\text{NO}$ 比が 10 以上を示し脱窒による生成が示唆された。ところが、別に測定した融解時の土壌の脱窒活性は排出量の少ない圃場で高かった。さらに、いずれの圃場も凍結期に $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が上昇し、融解期に $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は低下し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が上昇したが、排出量の多い圃場では、凍結期でも $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度上昇がみられ硝化が起こっていた。調査圃場は凍結融解時 N_2O を生成する環境にあったが、その要因の特定は今後の課題である。

流域の GHGs 排出量の見積りに距離依存特性が適用できるかどうかを検討するために、牧場内の全土地利用を含むように設定した 2 km ライントランセクト上で、施肥後と収穫前の 2 回、GHGs の空間分布を評価した。その結果、空間分布とその依存距離はガスの種類、土地利用、ホットスポット、サンプリング時期に影響を受けて異なり、距離依存性に基づく広域の排出量の推定は困難であると判断された。なお、トランセクトからの GHGs 推定排出量の平均値が 95 % の確率で ± 20 % 以内に入るために必要なサンプル数を試算し、1 ha あたりの必要サンプル数に換算したところ、CO₂ は 2 点であったが、CH₄ は 400 点、N₂O は 1211 点も必要であると試算された。

以上の結果から、牧場流域の土壌からの GHGs 排出量は、CO₂ は少ない反復で比較的精度良く見積もられ、CH₄ は平均的には吸収されることから温暖化への寄与は小さかったが、N₂O 排出量は大きく、その精緻化が問題であることがわかる。IPCC は広域の N₂O 排出量を窒素投入量にエミッションファクター (EF) を乗じて算出する方法を提示している。本流域での N₂O 排出量と窒素投入量の関係は大きなばらつきを含んでいたが、有意な直線関係があった ($R^2=0.29$, $p<0.01$)。その傾きから EF は 0.0789 と見積もられた。この EF 値を用いて流域あたりの 5 年間の平均排出量を見積もったところ 1816 ± 74 kg N となり、各年度の土地利用ごとの実測 N₂O 排出量の平均値に各土地利用面積を乗じて求めた 964 ± 347 kg N より有意に大きかった。そこで全 N₂O 排出量測定値の平均値以下を E_{norm} ($n=37$)、平均値以上を E_{high} ($n=9$) としたところ、 E_{norm} と窒素投入量に有意な直線関係 ($R^2=0.61$, $p<0.01$) があり、放牧をしていない圃場では E_{high} と余剰窒素量 (窒素投入量と吸収量の差) の間に有意な直線関係が見られた ($R^2=0.96$, $p=0.02$)。放牧をした圃場の E_{high} は適当な説明変数がなかったため、放牧により一定の排出量があるとした。同一圃場でも年次により E_{norm} となる場合と E_{high} となる場合があったことから、これらの排出が生じる確率を与えることにより年次変動を求めた。排出確率は、ここでは土地利用毎に各年度の全 N₂O フラックス測定値の平均値以上の値が出現する頻度をあてた。排出確率は 0~41 % となり森林、放牧草地で低く、採草地、コーン畑で高かった。この確率を用い、各年度の全ての圃場の窒素投入量と余剰窒素から N₂O 排出量を求め牧場全体からの排出量を推定したところ 1153 ± 385 kg N となり、実測値と有意差がなくなった。さらに E_{high} 出現確率は 5~8 月の降水量と正の相関があった。降水量を説明変数として N₂O 排出量を予測できる可能性が示唆された。

以上のように、本論文は流域の各土地利用からの GHGs 排出の特性を述べるとともに、窒素投入に影響をうける N₂O 排出について流域レベルでの排出量の見積り方法を示したものであり、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、片柳 薫子が博士 (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。