

学 位 論 文 題 名

Soil-atmosphere exchange of greenhouse gases in forest ecosystems under various environmental changes

(環境変動に伴う森林土壌からの温室効果ガス放出の解明)

学位論文内容の要旨

森林土壌には二酸化炭素 (CO_2) と亜酸化窒素 (N_2O) の発生源、メタン (CH_4) の吸収源としての働きがあり、これら温室効果ガス (GHG) の動態解明が環境変化を低減するための森林管理の技術開発ために必要である。大気 CO_2 濃度は2011年現在393ppmに達した。 CH_4 は質量ベースで CO_2 の約23倍の放射強制力 (正の値は温暖化) を持ち、毎年平均1%ずつ増加している。大気中の N_2O 濃度は年0.25%の増加率で、他のGHGに比べ低いが、一度生成されると大気中に約120年間残存するという。地球規模のGHGに注目すると、土壌中の炭素蓄積量 (1,500 CGt) は、植物現存量の約3倍、大気中の約2倍あり、陸上生態系の蓄積量の3/4を占める。また、 CH_4 と N_2O 放出のうち、 CH_4 は約40%、 N_2O は約50%が土壌来由であり土壌はGHG動態に大きな役割を持つ。

本研究で対象としたGHGは、次の過程によって発生・消費されるという。土壌からの CO_2 放出は土壌中の動物、植物、微生物代謝の最終産物であり、それらの活性によって異なる。 CH_4 は土壌中のメタン酸化バクテリア (好気性) による CH_4 酸化によって土壌へ吸収され、その機能は森林土壌で活発である。また、 N_2O は土壌中の窒素酸化と脱窒化で発生する中間生産物であり、これら二つが N_2O の総発生量の約2/3を占める。森林に対する各種の環境変化や攪乱は植物の光合成産物の転流や水分生理などに影響し、結果としてGHGの動態に影響を与える。GHGフラックスは土壌の理化学性や土壌微生物の活動を介して複合的な作用を受ける。従って、各種環境変化による森林生態系内のGHGの発生プロセスと動態を理解し、これらの制御につなげることが重要である。

大気中の CO_2 濃度上昇は、植物・土壌・微生物の系を介して GHG の動態に影響を及ぼすと考えられる。このため高濃度 CO_2 環境が森林土壌における CH_4 の吸収に与える影響を調べるために、開放系大気 CO_2 増加 (FACE) システムを利用して調査を行った。北海道大学札幌研究林の試験地に FACE 区 (高 CO_2 : 大気+130 ppmv) と対照区 (大気 CO_2 : 設定時 380 ppmv) を3つずつ設置し、各処理区に2種類の土壌タイプ (褐色森林土・火山灰土壌) を設けた。 CH_4 フラックスは2008年と2009年に各処理区の定点で生育期間に4回ずつ閉鎖系チェンバー法を用いてガスをサンプリングし、ガスクロマトグラフ (島津、京都) で分析した。測定期間中、土壌への CH_4 吸収量は対照区に比べて FACE 区で約半分に減少したが、土壌タイプの間には有意的な差はなかった。対照区では CH_4 は全測定地点で土壌に吸収されていたが、FACE 区では CH_4 の発生が観察された。土壌水分は FACE 区で有意的に高かったが、さらに土壌水分と CH_4 吸収量の間に負の相関関係が見られた。

経済活動に伴う窒素酸化物濃度の増加、酪農や堆肥からのアンモニア揮散などによっ

て、大気から陸域への窒素沈着量は増加している。この増加によって、森林域では窒素は不足しがちであるとされていたが、森林植物の要求量を超えた過剰な状態に一部では変化している。また、沈着物中には硝酸とアンモニウムが含まれるが、これらの窒素の動態に注目が集まっている。さらに、窒素沈着が地域の環境に及ぼす変化は、 CH_4 や N_2O の土壌 - 大気間の循環に影響を与えると予想される。

最近、日本を含む東北アジア地域で窒素沈着の越境汚染などの問題が顕在化してきた。そこで窒素沈着が森林土壌における CH_4 や N_2O の動態に与える影響を調べるために、造林樹種として期待の高いグイマツ雑種 F_1 の若齢植林地に対照区と窒素付加区を 4 箇所ずつ設定した。試験地は札幌研究林の実験苗畑（褐色森林土壌）で、対照区には窒素処理を行わず、窒素付加区には $50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 相当の窒素を酸性雨を模して硝酸アンモニウム溶液で処理し、窒素付加は各成長期間に 4 回に分けて行った。土壌からの GHG は 2008 年 6 月から 2009 年 11 月まで各プロットの計 4 ヶ所で無降雪期に 10 回ずつ測定した。また、各プロットのサンプリング場所の近傍において土壌をサンプリングし分析した。 CH_4 と N_2O 濃度は閉鎖系チェンバー法を用いてサンプリングし、ガスクロマトグラフで分析した。窒素付加の前、すべての土壌要因は 2 つの処理区間での差がなかったが、窒素付加の直後にアンモニア態窒素と硝酸態窒素の濃度が窒素付加区で増加した。無機態窒素の増加とともに、窒素付加区で土壌への CH_4 吸収量の減少と土壌からの N_2O 発生量の増加が観測された。 CH_4 吸収量はアンモニア態窒素の濃度と負の相関関係が見られたが、一方、 N_2O 発生量と硝酸態窒素の濃度の間には正の相関関係が確認された。

近頃、世界中で山火事が頻発し、気温上昇や小雨などの環境変化に伴い、その規模も大きくなっている。山火事は土壌の理化性・生物的特性に影響を与えるが、それは主に火事の強度に依存する。森林生態系内の養分元素の量と組成は火事によって発生する気化などのプロセスの複合的な影響を受けて変化する。山火事後の環境の変化は最終的に土壌からの GHG の発生に影響を与える。そこで山火事が森林土壌への GHG の動態に与える影響を調べるために、2007 年 7 月中旬に北海道大学天塩研究林で火入れ実験を実施した。

シラカンバの優占する天塩研究林の無名沢試験地内に、合計 4 林分の試験地を設定した。各試験地には対照区（CON）、炭があるプロット（BURN）、炭を除去したプロット（BURN-CHA）を各 1 つずつ設置した。これらは各 20m 四方を対象にして周辺効果を除くため調査対象地は 5m 四方とした。土壌からの CO_2 、 CH_4 及び N_2O 発生量を火入れ処理前の 2007 年 7 月上旬から測定し 2008 年 11 月まで閉鎖系チェンバー法を用いて、生育期間中、毎月測定した。また、山火事の前後の土壌変化を比較するために各試験地においてランダムに選んだ 3 か所で土壌をサンプリングして炭素・窒素量などを測定した。 CO_2 濃度は赤外線 CO_2 分析器（富士電子システック、東京）にて測定し、 CH_4 と N_2O 濃度はガスクロマトグラフで分析した。

土壌からの CO_2 発生量は地温と同調した明瞭な季節変化を示し、初夏の樹木成長の開始初期から増加して 8 月にピークに達し、秋に減少する傾向をみせた。全試験地において、平均 CO_2 発生量は CON に比べて BURN と BURN-CHA では少なかった。調査期間中に CH_4 は全試験地において土壌に吸収されており、その平均吸収量は CON に比べて BURN と BURN-CHA でやや高い傾向が見られた。全試験地において N_2O は炭除去処理の直後、BURN-CHA での発生量が増加した。処理区間の場合、BURN-CHA での N_2O 発生量は 8 月にピークに達したが、炭の存在する BURN ではピークが無かった。なお、土壌からの N_2O フラックスと土壌温度や硝酸態窒素の間に有意的な相関関係が観察された。

以上、 CO_2 は土壌の温度と水分量に影響され、 CH_4 は大気の高 CO_2 環境が進行すると森林土壌は吸収源として期待が出来なくなること、山火事後の炭の存在は、 N_2O をはじめ各種 GHG の動態に影響を及ぼすことを解明した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 池 孝 良

副 査 教 授 波多野 隆 介

副 査 教 授 平 野 高 司

副 査 准教授 澁 谷 正 人

副 査 助 教 高 木 健太郎（北方生物圏フィールド

科学センター）

学 位 論 文 題 名

Soil-atmosphere exchange of greenhouse gases in forest ecosystems under various environmental changes

（環境変動に伴う森林土壌からの温室効果ガス放出の解明）

本論文は5章からなり、図21、表14、引用文献数223編を含む総ページ数132の英文論文であり、別に6編の参考論文が添えられている。

森林土壌は二酸化炭素（ CO_2 ）と亜酸化窒素（ N_2O ）の発生源、メタン（ CH_4 ）の吸収源とされる。これら温室効果ガス（GHG）の動態解明は、地球環境変化を低減するための森林管理技術開発に必要である。土壌からの CO_2 放出は土壌中の動物、植物、微生物代謝の最終産物であり、それらの活性によって異なる。 CH_4 は土壌中の好気性のメタン酸化バクテリアによる CH_4 酸化により土壌へ吸収され、森林土壌で活発である。 N_2O は土壌中の窒素酸化と脱窒化で発生する中間生産物であり、これらが N_2O の総発生量の約2/3を占める。

森林に対する各種の環境変化や攪乱は光合成産物の転流や水分生理などに影響し、GHGの動態に影響を与える。GHGフラックスは土壌の理化学性や土壌微生物の活動によって複合的影響を受ける。従って、各種環境変化による森林生態系内のGHGの発生プロセスと動態を理解し、これらの制御を目指す。

高濃度 CO_2 環境が森林土壌における CH_4 吸収に与える影響を調べるために、開放系大気 CO_2 増加（FACE）施設にて調査を行った。北海道大学札幌研究林の各 3 つの FACE 区（高 CO_2 ：大気+130 ppmv）と対照区（大気 CO_2 ：設定時 380 ppmv）、各処理区に 2 種類の土壌タイプ（褐色森林土・火山灰土壌）を設けた。 CH_4 フラックスは各処理区で生育期間に閉鎖系チェンバー法を用いてサンプリングし、ガスクロマトグラフで分析した。土壌への CH_4 吸収量は対照区に比べて FACE 区で約半分に減少したが、土壌タイプ間に有意差はなかった。対照区では CH_4 は全測定地点で土壌に吸収されていたが、FACE 区では CH_4 発生

が観察された。土壌水分は FACE 区で有意に高く、土壌水分と CH_4 吸収量の間に負の相関があった。

最近、東北アジア地域で窒素沈着の越境汚染が顕在化してきた。そこでグイマツ雑種 F_1 の若齢植林地に对照区と窒素付加区を 4 箇所ずつ設定し、 CO_2 と N_2O の動態を調査した。札幌実験苗畑では对照区には窒素付加を行わず、窒素付加区では $50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ を硝酸アンモニウム溶液で処理し、各成長期間に 4 回に分けて窒素を付加した。土壌からの GHG は各プロットの計 4 ヶ所で無降雪期に 10 回ずつ測定した。また、サンプリング場所近傍にて土壌を得て分析した。窒素付加の前、土壌要因は 2 つの処理区間での差はなく、窒素付加後にアンモニア態窒素と硝酸態窒素の濃度が増加した。無機態窒素の増加とともに、窒素付加区で土壌への CH_4 吸収量の減少と土壌からの N_2O 発生量増加が観測された。 CH_4 吸収量はアンモニア態窒素の濃度と負の相関があったが、一方、 N_2O 発生量と硝酸態窒素の濃度の間には正の相関があった。

近頃、世界中で山火事が頻発し気温上昇や小雨などに伴い、その規模も大きくなっている。そこで山火事が森林土壌での GHG 動態に与える影響を調べるために、2007 年 7 月中旬に北海道大学天塩研究林で火入れ実験を実施した。シラカンバ優占林に合計 4 林分の試験地を設定した。各試験地には对照区 (CON)、炭有りプロット (BURN)、炭除去プロット (BURN-CHA) を各 1 つずつ設置した。土壌からの CO_2 、 CH_4 及び N_2O 発生量を火入れ処理前の 2007 年 7 月上旬から測定し、翌年 11 月まで閉鎖系チェンバー法を用いて、生育期間は毎月調査した。また、各試験地の 3 か所で土壌をサンプリングして炭素・窒素量等を測定した。 CO_2 濃度は赤外線 CO_2 分析器 (富士電子システック) にて測定し、 CH_4 と N_2O 濃度はガスクロマトグラフで分析した。

土壌からの CO_2 発生量は地温と同調した季節変化を示し、初夏から増加して 8 月にピークに達し秋に減少した。全試験地の平均 CO_2 発生量は CON に比べ BURN と BURN-CHA では少なかった。調査期間中に CH_4 は全試験地において土壌に吸収されており、その平均吸収量は CON に比べ BURN と BURN-CHA でやや高い傾向であった。全試験地において N_2O は炭除去処理の直後、BURN-CHA での発生量が増加した。処理区間の場合、BURN-CHA での N_2O 発生量は 8 月にピークに達したが、炭の有る BURN ではピークが無かった。なお、土壌からの N_2O フラックスと土壌温度や硝酸態窒素の間に有意な相関があった。

以上、 CO_2 は土壌の温度と水分量に影響され、 CH_4 は大気の高 CO_2 環境が進行すると森林土壌は吸収源として期待が出来なくなること、山火事後の炭の存在は、 N_2O をはじめ各種 GHG の動態に影響を及ぼすことを解明した。よって審査委員一同は、金 容爽が博士 (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。