

課題名	RF-0902 亜寒帯林大規模森林火災地のコケ類による樹木の細根発達と温室効果ガス制御機構の解明
課題代表者名	野口享太郎（独立行政法人森林総合研究所四国支所森林生態系変動研究グループ）
研究実施期間	平成21～22年度
累計予算額	11,400千円（うち22年度 5,400千円） 予算額は、間接経費を含む。
研究体制	<p>（1）森林火災後の林床植生成長速度と林床植生が樹木根の成長に与える影響の評価（独立行政法人森林総合研究所）</p> <p>（2）森林火災後の林床植生被覆を介した温室効果ガスフラックスとその制御機構の解明（独立行政法人森林総合研究所）</p>
研究概要	<p>1. はじめに</p> <p>亜寒帯林は地球上の全森林が貯留する炭素の30－50%を貯留しており、地球上の炭素動態において重要な役割を担う生態系と考えられている。しかし、近年になり亜寒帯林では森林火災が頻発し、被害面積が急増している。これらのことから、IPCCの第4次評価報告書では、森林火災が将来の生態系に対するキーインパクトの一つとして位置づけられている。亜寒帯林の多くでは地表面がコケ類や地衣類などの林床植生に覆われており、発達すると数十cmにおよぶ厚い林床植生と堆積有機物の層を形成する。これらの林床植生と堆積有機物の層は、樹木根の主な生育の場となっているほか、断熱効果を発揮して土壤温度を低温に保つことにより、土壤呼吸による二酸化炭素（CO₂）放出量に影響を与えていると考えられる。また、林床植生そのものも光合成により炭素を固定するほか、その一部は窒素固定活性やメタン（CH₄）酸化活性などのユニークな機能を持つことから、これらの林床植生の存在は、CO₂、CH₄、亜酸化窒素（N₂O）などの温室効果ガスフラックスを制御する主要な要因の一つとなると考えられる。そのため、森林火災により林床植生が焼失もしくは衰退すると、樹木根の成長に伴う炭素蓄積過程やCO₂、CH₄、N₂Oなどの温室効果ガスフラックスも大きく変化する可能性がある。しかし、このような亜寒帯林の炭素動態および温室効果ガスフラックスに対する森林火災の影響や、火災後の回復過程、その中で林床植生が果たす役割については不明な点が多く、その解明は、陸域生態系の炭素動態について理解を深めるとともに、その変動に関する将来予測の精度を高めるためにも重要な課題となっている。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>本研究では、森林火災後の林床植生と堆積有機物層の発達が亜寒帯林の炭素動態、特に樹木細根の発達と温室効果ガスフラックスに与える効果を定量的に評価することを目的とした。亜寒帯林では、樹木細根の生産量が純一次生産量の50%以上を占めると言われることから、森林火災による細根生産量の変動は、亜寒帯林の炭素動態に与える影響が大きいと考えられる。また、亜寒帯林の森林火災は林床植生とその下部の堆積有機物層の焼失や永久凍土の融解を伴うことから、CO₂、CH₄、N₂Oなどの温室効果ガスフラックスを大きく変動させる可能性がある。</p> <p>そこで、本研究では北米アラスカ州内陸部において火災後5～90年を経過したマリアナトウヒ（<i>Picea mariana</i>）林を調査地として、細根の生産量、林床植生の生産量、地表面におけるCO₂、CH₄、N₂Oなどの温室効果ガスフラックスの火災後の変動について明らかにするとともに、林床植生とその下部の堆積有機物層の発達がこれらの変動に与える効果を明らかにすることを目指した。</p>

3. 研究の方法

(1) 森林火災後の林床植生成長速度と林床植生が樹木根の成長に与える影響の評価

北米アラスカ州内陸部（フェアバンクス近郊）の火災後5年、10年、90年を経過したマリアナトウヒ（*Picea mariana*）林において、2009年8月に調査区を設置した（5年区、10年区、90年区）。各調査区においてミズゴケ類、その他のコケ類、地衣類の分布について調査し、これらの林床植生による被覆率を算出した。また、林床植生～堆積有機物層の厚さを計測し、林床植生の種類との関係について解析した。林床植生の生産量を推定するために、ミズゴケ類、フェザーモス、地衣類の1年間の伸長成長量、個体数密度、地上部長さあたりの重量を測定した。これにより推定した各林床植生群落の生産量と被覆率から、調査林分の1年間の林床植生生産量を算出した。イングロースコア法により1年間の細根生産量を測定し、調査区間の差異とともに、各調査区内の林床植生の状態（林床植生により被覆された場所と火災の燃え跡、もしくはコケ類と地衣類の違い）による細根生産量の変動について解析した。さらに、各調査区におけるマリアナトウヒと低木・草本類の地上部現存量、リターフォール量について測定・解析し、各調査区の細根生産量、林床植生生産量との関係について考察した。

(2) 森林火災後の林床植生被覆を介した温室効果ガスフラックスとその制御機構の解明

上記調査プロットにおいて、それぞれ12点の温室効果ガスフラックス測定用チャンバーを設置した。この際、5年区では、堆積有機物が焼失した場所と燃え残った場所にそれぞれ6点ずつチャンバーを設置し、10年区では燃焼跡とミズゴケ類に被覆された場所にそれぞれ6点ずつチャンバーを設置した。90年区では林床がコケ類（主に *Hylocomium splendens*、*Pleurozium schreberi*）と地衣類（主に *Cladina rangiferina*）に覆われていたため、それぞれの林床被覆上に6点ずつチャンバーを設置した。また、光合成の影響をなくすため、チャンバー内の植物地上部は刈り取った。ガス採取装置を使ってチャンバー内のガスを採取し、赤外線ガス分析計によりCO₂濃度を測定した。チャンバー内CO₂濃度の経時変化から、土壌からのCO₂放出速度（土壌呼吸速度）を算出した。また、ガス採取の際に温度計と水分計により地温と土壌の含水率を測定し、土壌呼吸速度との関係について解析した。年間値の解析に十分な温度範囲のデータをとるために、これらの調査を2009年8月、2010年2月（積雪期）、2010年7月、2010年9月に行った。得られたデータから、土壌呼吸速度の調査区間における変動および各調査区内の林床植生の状態（林床植生により被覆された場所と火災の燃え跡、もしくはコケ類と地衣類の違い）による変動について解析した。また、メタン（CH₄）、亜酸化窒素（N₂O）については2009年8月にガス試料の採取、解析を行い、土壌呼吸速度と同様に調査区間の変動、林床被覆による変動、土壌温度との関係について解析した。

4. 結果及び考察

(1) 森林火災後の林床植生成長速度と林床植生が樹木根の成長に与える影響の評価（図1）

各調査区でマリアナトウヒと低木・草本類の地上部現存量を調査した結果、5年区、10年区、90年区でそれぞれ0.2、1.0、2.7 kg m⁻²で、火災後年数が短いほど小さかった。5年区では火災によりマリアナトウヒの成木は全て枯死しており、回復して火災の跡が見られない90年区では、地上部現存量の96%がマリアナトウヒであった。一方、リターフォール量を測定した結果、5年区、10年区、90年区でそれぞれ20±5、22±5、30±8 g m⁻² yr⁻¹で、調査区間の差異は小さかった。5年区のリターフォールの大半は低木・草本類のものであり、90年区では50%がマリアナトウヒのものであった。以上の結果は、マリアナトウヒ林では、火災により地上部現存量が著しく減少し、火災後数年から10年程度では回復しないが、比較的成長の速い低木・草本類の侵入により、リターフォール量は比較的速やかに回復することを示唆している。

各調査区で林床植生被覆率と林床植生～堆積有機物層の深さを測定した結果、林床植生被覆率は火災後年数が短いほど小さく、5年区、10年区、90年区でそれぞれ37%、73%、98%であった。この結果は、林床被覆率が火災後数年である程度回復することを示唆しているが、5年区では優占種が *Polytrichum juniperinum*で、90年区の主要構成種であるフェザーモス類やミズゴケ類とは種類が異なっていた。地表～堆積有機物層の深さは、5年区、10年区、90年区でそれぞれ8.6±1.6、41±3、35±3 cmであり、5年区の値は10年区、90年区よりも有意に小さかった。これらの結果は、火災が起こるとマリアナトウヒ林の林床植生やその下部の堆積有機物層は減少し、数年～10年程度では十分に回復しないことを示唆している。また、地温モニタリングを行った結果、5年区、10年区、90年区

における植物の成長期間にあたる5月～9月の平均地温（林床表面から深さ10 cm）は、9.9℃、3.3℃、6.1℃で、5年区で高い傾向にあった。これは、火災により林床植生～堆積有機物層が失われて外気温の影響を受けやすくなったためと考えられる。

また、各調査区の林床植生の生産量を推定するために林床植生の伸長成長量、個体数密度、単位長さあたりの重量を測定した。その結果、*P. juniperinum*、*Pleurozium schreberi*、ミズゴケ類、地衣類の伸長成長量は、それぞれ 7.9 ± 1.0 、 5.8 ± 1.2 、 4.9 ± 0.9 、 3.2 ± 0.7 mm yr⁻¹であった。また、得られた伸長成長量と各林床植生の個体数密度、単位長さあたりの重量、林床被覆率をもとに各調査区の林床植生生産量を推定した結果、調査区間の差は小さく、5年区、10年区、90年区でそれぞれ46、33、38 g m⁻² yr⁻¹であった。

また、各調査区において直径2 mm以下の細根の生産量をイングロースコア法で推定した結果、5年区、10年区、90年区でそれぞれ 48 ± 13 、 47 ± 12 、 63 ± 10 g m⁻² yr⁻¹であり、調査区間で有意な差は認められなかった。さらに、各調査区の細根生産量を林床の状態により比較した結果、5年区と10年区ではコケ類の群落下と燃え跡（ミズゴケの枯死有機物）における細根生産量は同程度であったが、90年区では、地衣類を含む群落下の細根生産量がコケ類の群落下よりも有意に小さかった。これらの結果は、林床植生や細根の生産量が火災後数年で速やかに回復することや、細根生産量が林床植生の種類によって変動しうることを示唆している。

以上の結果、マリアナトウヒ林では、火災が生じると地上部現存量、林床植生被覆、地表～堆積有機物層が減少し、これらについては数年から10年程度では十分には回復しないと考えられる。一方で、リターフォール量、林床植生生産量、細根生産量については調査区間の差異が小さく、これらは火災後比較的速やかに回復することが示唆された。その要因としては、火災後に優占してくるカンバやポプラなどの樹木若木、低木類やその他の草本類の成長が比較的速いことや、堆積有機物が失われたことによる地下部環境の変化（地温の上昇など）が考えられる。また、地表の林床植生の種類によって細根生産量が異なる可能性があり、今後、異なる林床植生被覆による地下部環境条件の違いなどについてもさらに解析を進めることが重要と考えられる。

（2）森林火災後の林床植生被覆を介した温室効果ガスフラックスとその制御機構の解明（図2）

2009年8月、2010年2月、7月、9月に林床からの土壌呼吸速度についてクローズドチャンバー法による調査を行った。各調査区における土壌呼吸速度は、5年区では 62 ± 32 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹、10年区で 104 ± 70 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹、90年区で 90 ± 50 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹であった。火災からの経過年数が最も短い5年区では、他の区に比べて土壌呼吸速度が小さく、10年区と90年区では土壌呼吸速度に差は見られなかった。また、各調査区における土壌呼吸速度は地温と正の相関関係を示したが、同じ温度レンジで見ると、5年区では、他の区に比べて土壌呼吸速度が小さく、これは、火災後の林床植生や微生物などによる生物活性の低下によるものと考えられた。各調査区で林床被覆の状態と土壌呼吸速度の関係について解析した結果、5年区では燃焼区（堆積有機物も焼失）の土壌呼吸速度が不燃区（堆積有機物は燃え残った）よりも大きく、10年区では燃焼区の土壌呼吸速度がミズゴケ区よりも大きかった。これらの土壌呼吸速度の差異は、林床被覆の状態による地温や生物活性の違いによるものと考えられた。一方、90年区では林床のほぼ全面がコケ類や地衣類などの林床植生に覆われていたため、コケ類に被覆された場所（コケ区）と地衣類に被覆された場所（地衣区）の比較を行った。その結果、コケ区の土壌呼吸速度が地衣区よりも大きかったが、その原因は地温の差異など対応する環境条件の差異によるものと考えられた。以上により得られた土壌呼吸速度と地温の関係式、地温の経時変動、林床植生被覆率をもとに推定した5年区、10年区、90年区の年間土壌呼吸量は、それぞれ2.10、2.81、2.94 t C ha⁻¹と見積もられ、積雪期間の土壌呼吸量は年間土壌呼吸量の4.5～6.3%の寄与と推定された。

また、2009年8月には、CH₄吸収フラックスとN₂Oフラックスについても調査を行った。その結果、CH₄吸収フラックスは、5年区、10年区、90年区でそれぞれ、 -78 ± 28 、 -38 ± 29 、 -52 ± 22 μg CH₄-C m⁻² h⁻¹で、5年区のCH₄吸収フラックスは10年区、90年区よりも大きかった。N₂Oフラックスは、5年区、10年区、90年区でそれぞれ、 0.22 ± 0.39 、 2.61 ± 3.4 、 0.22 ± 0.33 μg N₂O -N m⁻² h⁻¹で、10年区のN₂Oフラックス10年区、90年区よりも大きかった。重回帰分析の結果、N₂Oフラックスは、土壌水分率が高く、土壌呼吸速度が大きいほど大きくなることが明らかになった。

以上から、土壌呼吸速度、CH₄およびN₂Oフラックスの地点による違いは、林床被覆の状態や林床植生の回復状況を反映することが示唆され、これら温室効果ガスフラックスに対する火災の影響や火災後の経年変化に伴う温室効果ガスフラックスの変動を評価する際には、林床植生との関係を明らかにすることが重要と考えられる。

(3) 森林火災がマリアナトウヒ林の地表面の炭素収支に与える影響 (図3)

サブテーマ1で解析を行った細根生産量、林床植生生産量、リターフォール量は、地下部への有機物供給源と考えられる。逆に、サブテーマ2の課題である土壤呼吸速度は地下部からのCO₂放出速度である。そこで、この両者を比較して地表面における炭素収支の火災後の変動について考察した。サブテーマ1の結果から、5年区、10年区、90年区における細根生産量、林床植生生産量、リターフォール量の合計値は、それぞれ115、102、131 g m⁻² yr⁻¹であった。この結果は、5年区における地下部への有機物供給速度が90年区の90%近くになることを示唆している。同様に、サブテーマ2の結果は、5年区の土壤呼吸速度が90年区の約70%であることを示している。これらの結果は、5年区における地表～堆積有機物層の厚さ(90年区の25%)が火災により大きく減少したままであるのに対し、地下部への有機物供給速度や地下部からのCO₂放出速度が火災後数年間の間に比較的速やかに回復する可能性を示している。一方、本研究で得られた細根生産量、林床植生生産量、リターフォール量の合計量を、炭素含有率を50%として炭素量に換算すると、5年区、10年区、90年区における地下部への炭素供給量は0.57、0.51、0.66 t C ha⁻¹ yr⁻¹となり、これらを土壤呼吸速度(2.10~2.94 t C ha⁻¹ yr⁻¹)と比較するとかなり小さい。この原因については、本研究で得られた細根生産量などの推定値の過小評価にあるのか、あるいは菌根菌の生産量など未測定要素の寄与が大きいことにあるのか、現時点では不明であるが、今後、さらに研究を進める上での重要な課題と考えられる。

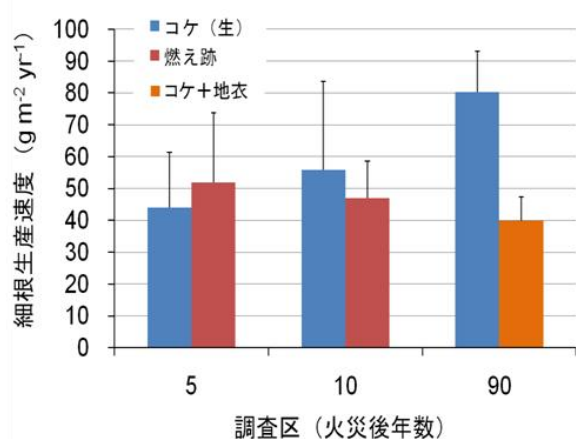


図1. 林床被覆状態の異なる場所における細根生産速度。

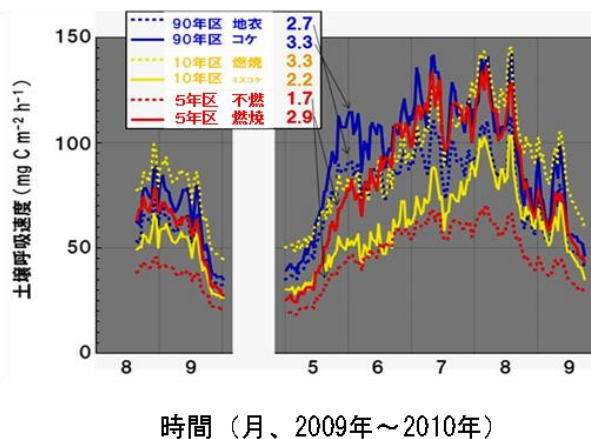


図2. 林床被覆状態の異なる場所における土壌呼吸速度。凡例中の数値は5~9月における推定土壌呼吸量 (t C ha⁻¹)。

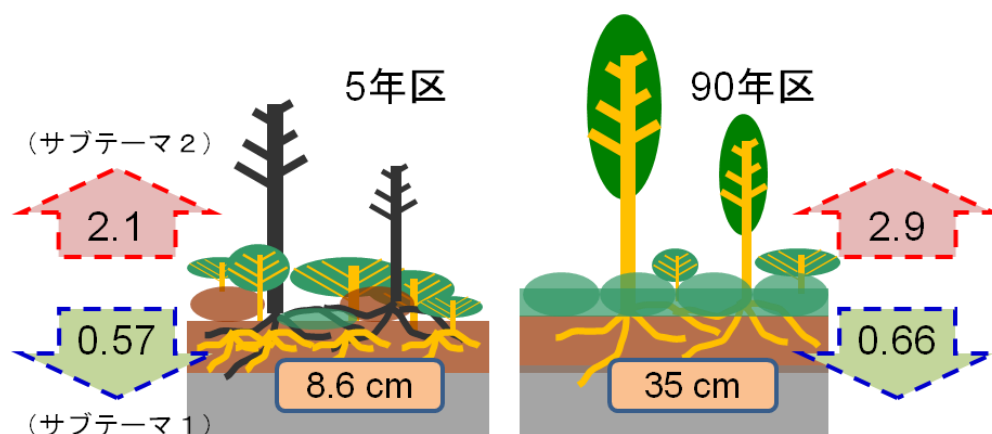


図3. 火災前後における地下部への有機物供給速度と地下部からのCO₂放出速度 (単位は t C ha⁻¹ yr⁻¹)。

※有機物供給速度は細根生産速度+林床植生生産速度+リターフォール量

は林床植生～堆積有機物層の厚さ

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

亜寒帯林では樹木細根や林床植生の炭素動態への寄与が大きいと考えられるが、その動態に関する研究例は少ない。また、温室効果ガスフラックスのデータについてもまだ十分とは言えないのが現状である。特に、森林火災の影響や火災後の回復過程における細根や林床植生の動態、温室効果ガスフラックスについてはほとんど研究が行われてこなかったため、本研究で新たに得られた火災後の細根生産量、林床植生生産量、温室効果ガスフラックス変動やこれらと林床被覆との関係についてのデータは科学的に貴重なものである。また、これらの成果は亜寒帯林の炭素動態、温室効果ガス動態について理解を深めるとともに、温暖化予測などの精度を上げるためにも重要であり、その科学的意義は大きいと考えられる。

(2) 環境政策への貢献

現時点では、本研究の成果が直接的に環境政策等に利用された事例はないが、IPCCの第4次評価報告書において、森林火災は将来の生態系に対するキーインパクトとして位置づけられていることから、本研究で得られた、火災の影響を受けた亜寒帯林の細根生産量、林床植生生産量、土壌呼吸速度、CH₄吸収速度、N₂O放出速度に関するデータは、今後、亜寒帯林の炭素動態や温暖化予測、温暖化対応をより適切に行ってゆくための技術開発に貢献できる可能性がある。

6. 研究者略歴

課題代表者：野口享太郎

1971年生まれ、東京大学大学院農学生命科学研究科修了、博士（農学）、現在、独立行政法人森林総合研究所 四国支所 森林生態系変動研究グループ 主任研究員

研究参画者

(1)：野口享太郎（同上）

(2)：森下智陽

1974年生まれ、北海道大学大学院農学研究科修了、博士（農学）、現在、独立行政法人森林総合研究所 四国支所 森林生態系変動研究グループ 主任研究員

7. 成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

(1)査読付き論文

なし

(2)査読付論文に準ずる成果発表

該当しない