

課題名	日本における森林土壌有機炭素放出に及ぼす温暖化影響のポテンシャル評価に関する研究		
担当研究機関	独立行政法人国立環境研究所		
研究期間	平成22-26年度	合計予算額 (当初予算額ベース)	90,475千円 (うち26年度 16,366千円)
研究体制	独立行政法人国立環境研究所 (一部北海道大学へ研究委託)		
研究概要	<p>1. 序 (研究背景等)</p> <p>2010年のNature誌の報告によれば、2008年における全陸域の土壌呼吸量は約980億tCと推定されており、1989～2008年の20年間に地球温暖化によって、土壌呼吸量は年間約1億tCの速度で上昇していたという¹⁾。また、生物圏炭素循環プロセスモデルVISITの計算によれば、地球全体の微生物呼吸量は約582億tC y⁻¹と推定されている^{2,3)}。この土壌有機物の分解により発生するCO₂は人為起源の放出量(95億tC y⁻¹)の約6倍にも相当し、全陸域の炭素吸収能(28億tC y⁻¹)の約21倍に相当する量である⁴⁾。従って、土壌有機物の分解速度が地球温暖化によって僅かでも変動すれば、地球上の炭素収支は著しく影響を受けることになる。しかし、この長期予測を検証できる実測データはほとんど無いというのが現在の状態である。この点から、長期的な温暖化環境化での生態系の応答の予測に資するデータの集積を早急に開始する必要がある。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>本研究では、温暖化に伴って我が国のような湿潤な森林土壌が今まで以上に吸収源として機能するのか、あるいは放出源に転換するのかについて長期的な野外観測を独自に行い、その実測データに基づいて定量的な評価を行うことを目的としている。目的を達成するために、実際の森林土壌において赤外線照射による人工的な昇温とともに、大型マルチ自動開閉チャンバーシステムを用いて土壌呼吸速度をモニタリングすることで、将来予測モデルの検証に必要な情報を提供することを第一の目標とする。また、人工的な温暖化操作実験の結果を補足・検証するために、緯度帯や標高の異なる自然環境間で土壌の移植による模擬温暖化実験を行う。これらの野外操作実験により、長期的な温暖化環境での土壌有機物の分解特性のデータを集積する。また、天塩、苫小牧および富士北麓の3ヶ所の森林フラックス観測地において土壌呼吸を長期連続観測することにより、自然・人工攪乱の影響を検出し短期的な気候変動の影響を抽出する。さらに、放射性炭素(¹⁴C)の分析を実施することで土壌の画分毎の分解のタイムスケールを評価し、将来予測に用いる炭素循環モデル内の、土壌有機物分解に関するパラメータや関係式の最適化を支援する。</p> <p>3. 研究の内容・成果</p> <p>(1) 土壌呼吸の温暖化操作実験</p> <p>(1-1) 赤外線ヒーターを用いた人工的な昇温実験に関する研究</p> <p>温暖化に伴う我が国の代表的な気候帯や森林生態系における土壌有機炭素放出の応答特性を明らかにすることを目的として、代表的な森林生態系である最北域の冷温帯針広混交林(北海道大学天塩研究林)、東北地方のミズナラ林(弘前大学白神山地自然観察園内)、北陸・甲信地方のブナ林(新潟県苗場山)、関東地方のアカマツ林(国立環境研究所構内)、中国地方のアラカシ優占林(広島大学構内)、および九州地方のコジイ林(宮崎大学田野フィールド)を対象に、野外での温暖化操作実験を行った(図1)。</p>		

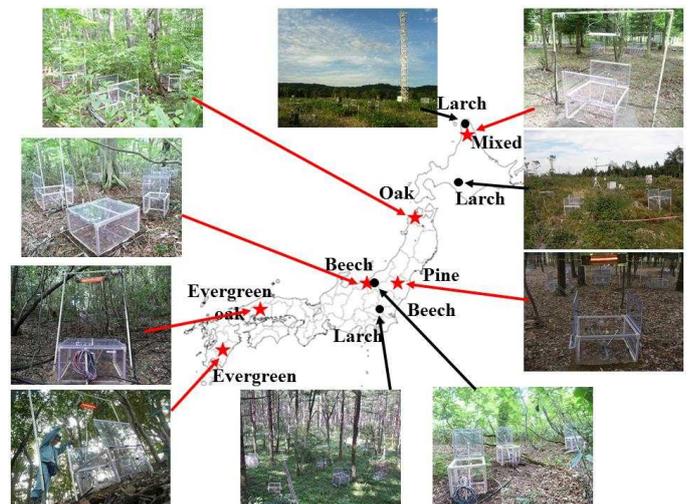


図1. 実験サイトの分布図。

天塩針広混交林における観測は、2007年から開始した(図2)。各処理区の土壤呼吸変動を図2に示す。全観測期間における、各処理区の平均値は、土壤呼吸区で $5.0 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、微生物呼吸区で $3.51 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、温暖化呼吸区で $6.96 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。土壤呼吸の70.2%を微生物呼吸が占めていた。本サイトにおいて、土壤呼吸と地温の間には顕著な指数関数的相関が見られた。また、このサイトにおける全観測期間から導かれた Q_{10} 値は、土壤呼吸区で2.33、微生物呼吸区で2.37、温暖化区で2.32となり、他のサイトと比較しても小さい値となった。本サイトにおける、年別の+約 2.5°C (地温)の温暖化影響に関しては、2007年が+60.7%、2008年が+65.0%、2009年が+87.9%、2010年が+96.8%、2011年が85.9%、2012年が111.7%、2013年が133.3%、2014年が130.7%であった。全観測期間を通じての温暖化効果は、+98.2%であり、温暖化開始後から温暖化効果の上昇傾向が見られた。

弘前温暖化サイトにおける観測は、2011年から開始した。2012年から2014年の共通観測期間(6月3日から11月27日)における、各処理区の平均土壤呼吸速度は、土壤呼吸が $4.81 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、微生物呼吸が $4.48 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。対して温暖化区の微生物呼吸は $5.73 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。微生物呼吸が総土壤呼吸の約93.1%を占め、残りの6.9%が根呼吸によるものであった。本サイトにおいて、土壤呼吸と地温の間には顕著な指数関数的相関が見られた。全期間の観測値から算出した Q_{10} 値は、土壤呼吸では2.53、微生物呼吸では2.51、温暖化区の微生物呼吸では2.22となり、温暖化によって若干低下した。年別の温暖化効果に関しては、2011年が+15.1%、2012年が+19.7%、2013年が+27.6%、2014年が+30.1%であり、全観測期間を通じては、+23.5%であった。本サイトでは、年々温暖化効果が増加する傾向が見られた。

苗場山標高900mにおける観測は、2008年から開始した。全年の共通観測期間(6月19日から11月2日)を通じた土壤呼吸の平均速度は $5.19 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、微生物呼吸は $4.34 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であり、温暖化区は $5.70 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。微生物呼吸が総土壤呼吸の約83.6%を占め、残りの16.4%が根呼吸によるものであった。全測定値からの Q_{10} 値は、土壤呼吸で2.6、微生物呼吸で2.9、温暖化区の微生物呼吸で2.58となり、温暖化によって若干低下した。本サイトにおける約 2.5°C の温暖化効果に関しては、2008年が+23.4%、2009年が+34.4%、2010年が+48.3%、2011年が+40.7%、2012年が+20.3%、2013年が+16.1%、2014年が+28.8%となり、観測期間全体では、+31.0%であった。本サイトにおける温暖化効果は、2010年の+48.3%をピークとして2013年(+16.1%)まで減少を見

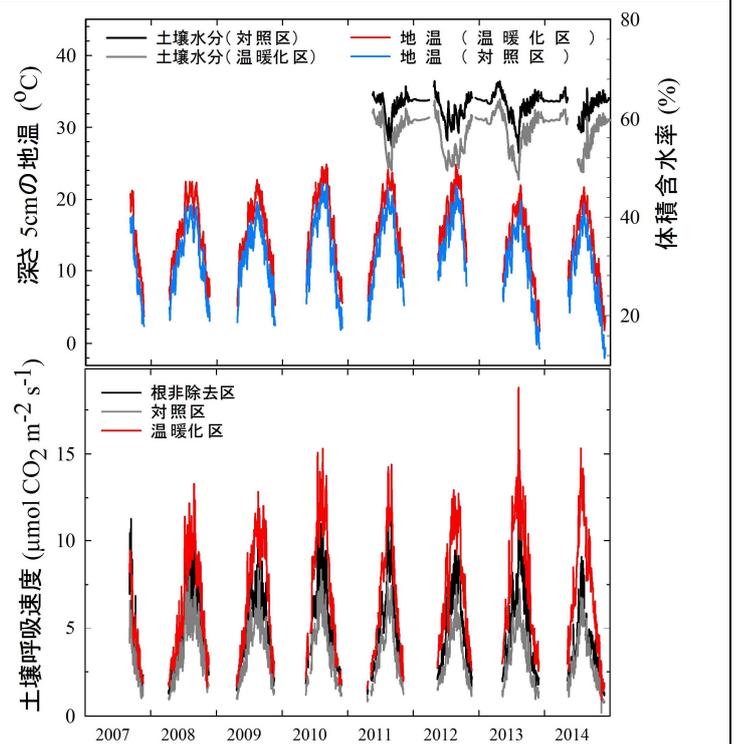


図2. 天塩温暖化サイトにおける土壤水分、地温、各処理区における土壤呼吸量の季節変化。

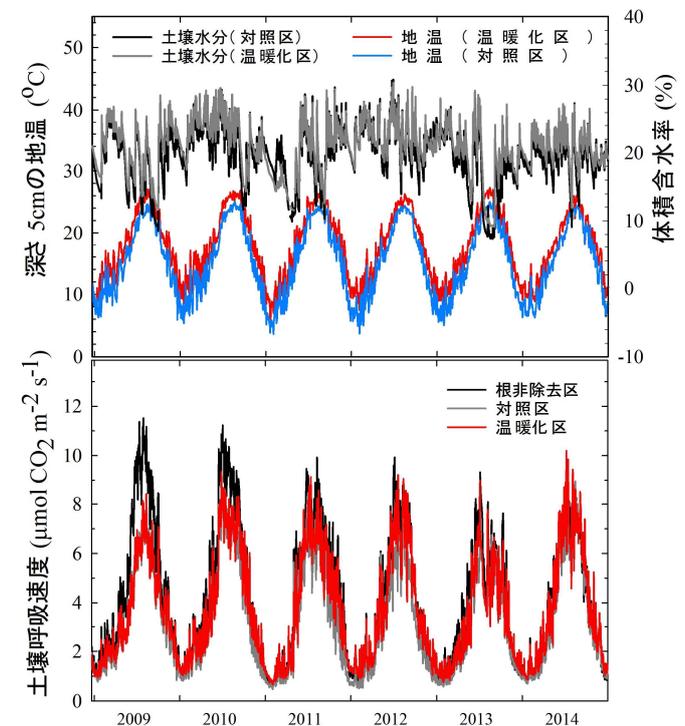


図3. 宮崎温暖化サイトにおける土壤水分、地温、各処理区における土壤呼吸量の季節変化。

せたが、2014年には+28.8%と増加を見せている。そのため、本サイトにおいて順化による温暖化効果の減少傾向が現れているのかは定かではない。

つくば温暖化サイトは通年で観測が可能であり、微生物呼吸と温暖化区の微生物呼吸に関しては、2006年2月から観測を開始し、土壤呼吸に関しては2009年7月から観測を開始した。土壤呼吸チャンパー増設後、2009年7月以降の平均値は、土壤呼吸が $4.71 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、微生物呼吸が $4.11 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、温暖化区の微生物呼吸が $4.32 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であり、微生物呼吸が総土壤呼吸の約 87.1%を占めていた。観測全期間の Q_{10} 値を導くと、微生物呼吸が 2.82、温暖化区の微生物呼吸が 2.49 となり、温暖化によって Q_{10} 値が低下したことが分かる。本サイトにおける約 2.5°C の昇温に対する温暖化効果を導くと、2006年が-31.8%、2007年が+6.3%、2008年が+18.6%、2009年が+10.3%、2010年が+6.4%、2011年が+14.0%、2012年が+8.5%、2013年が+14.3%、2014年が+26.3%となった。また、全観測期間を通じての温暖化効果は、+5.5%であった。2006年の温暖化効果がマイナスであり、非温暖化区の微生物呼吸の方が高くなっているが、これは根切りの際に発生した、チャンパー土壌中の枯死根の分解に起因するものと考えられる。

広島温暖化サイトは通年を通して観測が可能であり、2007年9月から観測を開始した。この観測期間を通じた、各処理区における土壤呼吸の平均速度は、土壤呼吸区で $5.45 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、微生物呼吸で $3.98 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。また、温暖化区における微生物呼吸の平均土壤呼吸速度は $4.64 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。全観測期間のデータから算出された Q_{10} 値は、土壤呼吸区で 2.83、微生物呼吸区で 3.03、温暖化区の微生物呼吸区で 2.76 となった。このことから、温暖化によって Q_{10} 値が下がった事が分かる。また、本サイトでは夏季の土壤呼吸に対し、土壤水分の影響が非常に大きいものであった。温暖化効果に関しては、2007年が+24.6%、2008年が+13.8%、2009年が+8.8%、2010年が+14.5%、2011年が+27.6%、2012年が+17.7%、2013年が+18.6%、2014年が+10.8%となった。また、全観測期間を通じての温暖化効果は、+15.6%であった。2011年にピークとなって以降、2014年まで減少傾向が確認された。

宮崎サイトでは、2008年12月にシステムを設置し、以降継続的に土壤呼吸の観測を行ってきた(図3)。本サイトにおいては積雪がほぼ見られず、一年を通しての観測が可能である。観測開始から2014年12月31日までの土壤呼吸平均速度は、土壤呼吸区で $4.15 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、微生物呼吸区で $3.29 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、温暖化区で $3.70 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。全観測期間を通じた Q_{10} 値は、土壤呼吸区で 3.01、微生物呼吸区で 3.03、温暖化区で 2.90 であり、温暖化によって若干減少した。各年における温暖化効果は、2009年が+5.1%、2010年が+8.9%、2011年が+18.9%、2012年が+28.5%、2013年が+9.0%、2014年が+11.5%であり、観測期間全体では、+13.1%であった。本サイトにおいては、2012年までは温暖化効果が上昇傾向を示し、2013年から2014年にかけて落ち込むという傾向を示していた。

(1-2) 土壌の移植による自然的な昇温実験に関する研究

2011年度に、塩ビ管を用いた簡便な土壌移植実験を考案し、各サイトに移植土壌コアを埋設した。移植用に用いた塩ビ管は直径約11 cm、長さ約32 cmである。一つの温暖化サイトに移植用として24本、比較対照用として24本の合計48本の塩ビ管を用意した。すべての塩ビ管を深さ30 cmまで埋設し、24本については土壌構造を破壊しないように側面から慎重に掘り出した。残りの24本については対照用サンプルとしてそのままサイトに設置した。掘り出した移植用の土壌サンプルについては、天塩（年平均気温 5.5°C ）で採取した土壌サンプルは弘前の温暖化実験サイト（年平均気温 8.3°C ）へ運搬し移植を行った。また、弘前で採取した移植用土壌サンプルを苗場山900 mの実験サイト（年平均気温 7.7°C ）に、苗場山900 mの土壌をつくば（年平均気温 13.8°C ）に移植した。つくばと広島（年平均気温 13.5°C ）で回収した土壌サンプルについては、宮崎温暖化サイト（年平均気温 17.4°C ）に移植を行った。また、同様の手法で苗場山の標高1500 mの実験サイトから900 mの温暖化サイトに土壌の移植を行った（年平均気温差約 3.0°C ）。移植した土壌サンプル入り塩ビ管の上部に、移植先の異なる植生のリターが混入することを避けるために、寒冷紗でカバーを行っている。

2013年度は、苗場山サイトにおいて、既に移植を行った土壌コアの呼吸速度を測定した。苗場山900 mのサイトにおいては、測定時の平均地温は 17.5°C であり、各土壌コアグループにおける平均土壤呼吸速度は、900 m対照土壌コアで $3.45 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、1500 m移植土壌コアで $3.84 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、弘前移植土壌コアで $2.22 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。

苗場山1500 mのサイトにおいては、測定時の平均地温は 15.9°C であり、1500 m対照土壌コアの平均土壤呼吸速度は $2.28 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。苗場山1500 mから900 mへの移植土壌コアと、1500 mにおける対照土壌コアの土壤呼吸速度の比較から、土壤呼吸速度が標高の違いによる自然的な温暖化によって上昇していることが確認された。

2014年は、2013年度新たに苗場山および奥多摩からつくばに移植した土壌コアの呼吸速度を測定

した。そこから、温暖化サイトにおける昇温処理から得られた結果との比較を行った。奥多摩における対照区と、奥多摩からつくばへの移植土壌の土壌呼吸は、いずれも温度の上昇に伴って8月にピークを迎えたが、測定期間を通して、奥多摩からつくばに移植したコアの土壌呼吸速度の方が高かった。

以上の事から、標高の違いによる自然的な温度上昇によって、苗場山および奥多摩から移植した土壌の土壌呼吸速度が増加したことが確認された。

(2) 土壌呼吸に及ぼす気候変動および攪乱の影響の検出

天塩フラックスサイトにおける2003年から2014年の共通積算期間(5月13日~11月16日)における土壌呼吸の積算値は、 7.4 tC ha^{-1} ~ 11.2 tC ha^{-1} の変動を示した。2012年から2014年の生態系呼吸量に占める土壌呼吸の割合は、それぞれ102%、96%、91%であった。

苫小牧フラックスサイトでは、2007年の共通観測期間(5月10日-11月6日)における土壌呼吸量は 3.2 tC ha^{-1} 、2011年から2014年の共通観測期間における土壌呼吸量は平均 5.5 tC ha^{-1} 、微生物呼吸量は平均 5.4 tC ha^{-1} であった(図4)。攪乱後の時間経過によって土壌呼吸量の規模が大きくなり、そのほとんどが微生物呼吸で占められていたことから、長期的には攪乱によって微生物呼吸量が増進した事がうかがえた。また、植生を含めた炭素収支を考えると、2007年の総生産量(GPP)が 6.6 tC ha^{-1} であったものが、2012年には 16.9 tC ha^{-1} 、2013年は 13.5 tC ha^{-1} 、2014年は 13.2 tC ha^{-1} となり、2012年で頭打ちとなって以降、若干減少していた。

富士フラックスサイトにおける2006-2014年の観測では、土壌呼吸量は 6.0 - $8.1 \text{ tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、微生物呼吸は 5.2 - $6.9 \text{ tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ の間で変動を示した。これには気温の年々変動による影響が大きいものと考えられる。また、林床植生が固定した炭素量は、2013年が 0.3 tC ha^{-1} 、2014年が 1.2 tC ha^{-1} であり、林床植生の炭素吸収能が低い事がうかがえた。

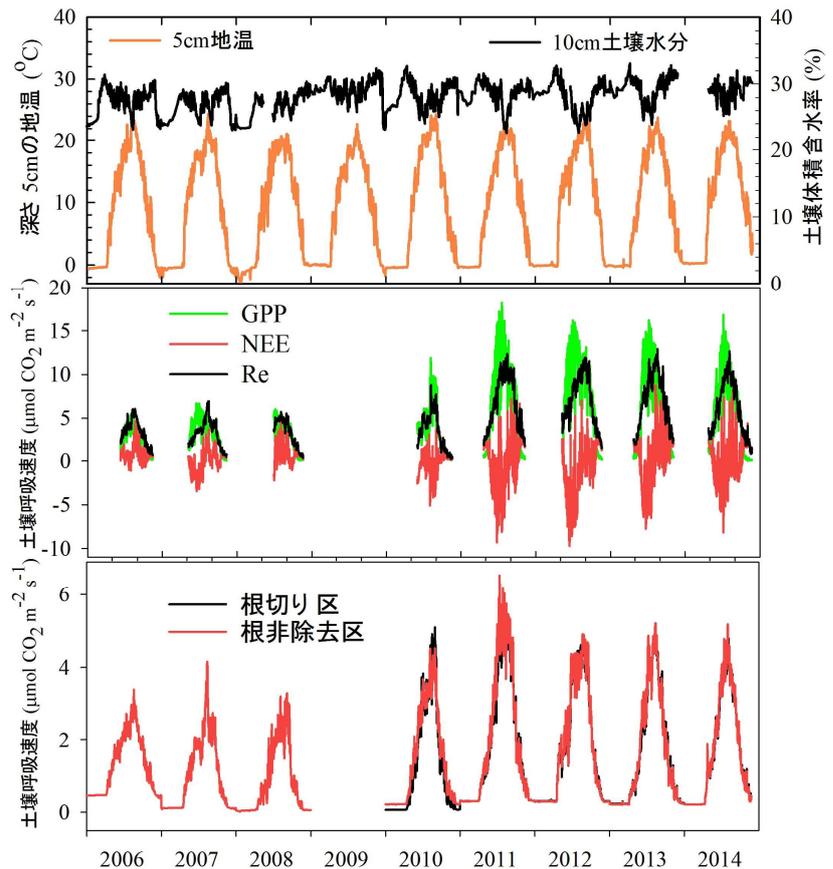


図4. 苫小牧フラックスサイトにおけるチャンバー法で観測された地温、土壌水分(上段)、生態系呼吸量(Re)、総生産量(GPP)、生態系 CO_2 フラックス(NEE、中段)および総土壌呼吸、微生物呼吸(下段)の季節変化。

(3) 土壌有機物の放射性炭素同位体比(^{14}C)の測定

アラカシ優占林(東広島市)、冷温帯針広混交林(天塩郡幌延町)、アカマツ林(つくば市)において、温暖化区および対照区の土壌呼吸測定チャンバー内から30cmの土壌コアを採取して深さ方向1cm間隔でPOC、PON、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 及び $\Delta^{14}\text{C}$ を測定し、温暖化区と対照区の各成分の鉛直分布を比較した。POCの比較から、3つのサイトともに温暖化操作の影響が深さ10~15cm程度にまで及んでいることが確認できた。 $\Delta^{14}\text{C}$ の鉛直分布の解析から、アラカシ優占林では温暖化の進行によって表層(3cm以浅)ではリターや細根などの比較的若い炭素を由来とする有機炭素を、それ以深では蓄積されてからの経過時間の長い有機炭素を分解するという特異的な現象を捉えた(図5)。一方、冷温帯針広混交林とアカマツ林は深度に因らず比較的若い炭素を由来とする有機炭素が選択的に分解されることが分かった。

(4) 実観測データによるモデルの検証

多くのサイトでは夏季の放出ピークの値もほぼ観測とモデル推定が同等になっていた。富士北麓と苫小牧では、モデル推定が系統的に過大評価していたが、両サイトとも成長中の森林であり、炭素ストックとフローが長期的な増加途中にあった可能性がある。広島サイトでは、冬季のフラックス強度は整合していたが、夏季にはモデル推定が大幅に過小であった。白神では 2013 年の推定結果は観測とよく整合していたが、2014 年については過小評価の傾向があった。逆に天塩では 2013 年に過小評価、2014 年の推定が整合的であった。

アジア地域の炭素循環シミュレーションの中で土壌呼吸の時空間分布を再現することが出来た。熱帯林で被覆される低緯度域は年間を通して土壌呼吸が高く、モンスーンの影響を受ける東アジアにかけては成育期間である4~10月に高くなる。対照的に乾燥帯である内陸域や標高が高く寒冷なチベット高原では、同緯度の東アジア域と比較して土壌呼吸速度は明らかに低い。また、モンスーンアジアでも耕作地が優占する地域では土壌呼吸が周囲より低い場合があり、土地利用の影響の重要性も示唆された。

以上の結果を要約すると、以下の様になる。

(1-1) 赤外線ヒーターを用いた人工的な昇温実験に関する研究

全観測期間を通じた温暖化効果：

天塩の針広混交林 (+98.2%)、温暖化 8 年目、温暖化開始後からの温暖化効果上昇傾向
 白神山地のミズナラ林 (+23.5%)、温暖化 4 年目、温暖化開始後からの温暖化効果上昇傾向
 苗場山のブナ林 (+31%)、温暖化 7 年目、2010 年にピーク (+48.3%)、以降減少傾向
 つくばのアカマツ林 (+5.3%)、温暖化 9 年目、2007 年以降 +6.3%~+26.3%の間で変動
 広島アラカシ林 (+15.6%)、温暖化 8 年目、2011 年 (+27.6%) をピークとして、2014 年 (+10.8%) まで減少傾向
 宮崎コジイ林 (+13.1%)、温暖化 6 年目、2009 年 (+5.1%) から 2012 年 (+28.5%) までは上昇傾向、以降 2013 年の 9.0%、2014 年の 11.5%と低調

(1-2) 土壌の移植による自然的な昇温実験に関する研究

苗場山における標高の異なるサイト間および奥多摩からつくばへの移植土壌の土壌呼吸を測定し、土壌呼吸速度が標高の違いによる自然的な温暖化によって上昇していることを確認

(2) 土壌呼吸に及ぼす気候変動および攪乱の影響の検出

天塩フラックスサイト無雪期積算の土壌呼吸量：

2003 年から 2014 年の共通積算期間 (5 月 13 日~11 月 16 日) における土壌呼吸の積算値は、
 7.4 tC ha⁻¹~11.2 tC ha⁻¹ の変動

苫小牧フラックスサイト：

2011 年から 2014 年の共通観測期間 (5 月 10 日-11 月 6 日) における土壌呼吸 5.5 tC ha⁻¹、微生物呼吸 5.4 tC ha⁻¹
 2007 年の総生産量 (GPP) 6.6 tC ha⁻¹、2012 年の GPP = 16.9 tC ha⁻¹、2013 年の GPP = 13.5 tC ha⁻¹、
 2014 年の GPP = 13.2 tC ha⁻¹

富士フラックスサイトの土壌呼吸量：

2006-2014 年で、土壌呼吸は 6.0-8.1 tC ha⁻¹ yr⁻¹、微生物呼吸は 5.2-6.9 tC ha⁻¹ yr⁻¹ の変動
 林床植生が固定した炭素量は、2013 年が 0.3 tC ha⁻¹、2014 年が 1.2 tC ha⁻¹

(3) 土壌有機物の放射性炭素同位体比 (¹⁴C) の測定 (広島アラカシ優占林、天塩冷温帯針広混交林、つくばアカマツ林)

POC の比較：3 つのサイトともに温暖化操作の影響が深さ 10~15cm 程度にまで及ぶことを確認

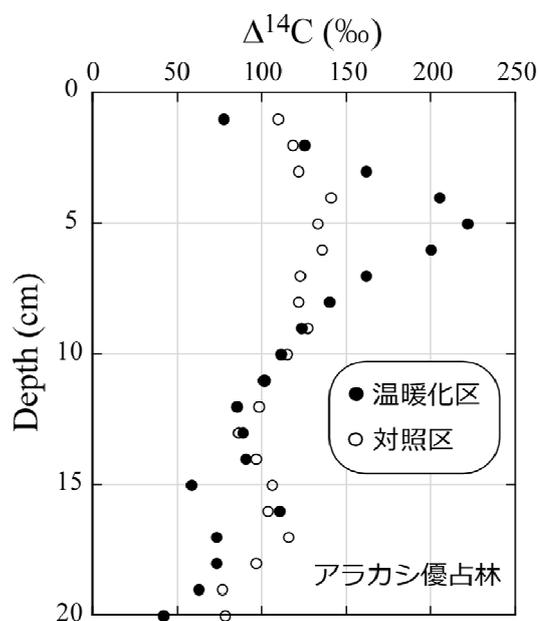


図 5. アラカシ林 (東広島) の温暖化区 (●) と対照区 (○) における表層 20cm 土壌コア中の $\Delta^{14}\text{C}$ の鉛直分布。

$\Delta^{14}\text{C}$ の鉛直分布の解析：アラカシ優占林では温暖化の進行によって表層（3 cm 以浅）ではリターや細根などの比較的若い炭素を由来とする有機炭素を、それ以深では蓄積されてからの経過時間の長い有機炭素を分解するという特異的な現象を確認

（４）実観測データによるモデルの検証

モデル推定と観測8拠点を比較

→ 多くのサイトでは夏季の放出ピークの値もほぼ観測とモデル推定が同等

富士北麓および苫小牧：モデル推定が過大評価

広島アラカシ林：夏季のモデル推定が大幅に過小

白神ミズナラ林：2013年の推定結果は整合的、2014年については過小評価

天塩針広混交林：2013年に過小評価、2014年の推定が整合的

アジア地域（10°S–80°N、60–180°E）を対象としてVISITによるシミュレーションを実施

→ アジア地域の炭素循環シミュレーションの中で土壌呼吸の時空間分布を再現

4. 考察

（１）土壌呼吸の温暖化操作実験

（１－１）赤外線ヒーターを用いた人工的な昇温実験に関する研究

本研究で観測した6つの温暖化サイトのうち、温暖化効果の増加が確認されているサイトが2か所（天塩、白神）、はっきりとしたトレンドがつかめないが、温暖化効果は維持されているのが2か所（苗場山、つくば）、温暖化効果の減少傾向が確認されているサイトが2か所（広島、宮崎）となり、結果が分かれた。温暖化開始後の上昇傾向に関しては、長期的な温暖化によって、土壌中の有機炭素の分解が累積的に影響を受けた可能性が考えられる。一方で南方のサイトでは、順化の影響を受け、温暖化効果が減少した可能性が考えられる。これらのサイトでは積雪がほぼ見られないため、年間を通じて温暖化処理を行っている。そのため、継続的な温暖化条件下で土壌有機炭素が枯渇し、温暖化効果が減少した事が考えられる。ただし、これらのサイトにおける温暖化効果の減少傾向が、本当に順化によるものなのかを見極めるためには、さらに継続して観測を行っていく必要がある。

各サイトで温暖化効果にばらつきは見られるものの、本研究の観測サイトでは、多くの場合（宮崎、広島を除く）長期的な温暖化処理後も、温暖化効果は維持されていた。これには、日本の森林土壌に含まれる有機炭素量が豊富であるということに起因するものと考えられる。

（１－２）土壌の移植による自然的な昇温実験に関する研究

これまでの測定によって、土壌呼吸速度が標高の違いによる自然的な温暖化によって上昇していることが確認できた。今後の課題としては、測定頻度を上げ、他サイトに移植している土壌コアにも測定の範囲を広げることができれば、人工的な昇温実験結果との比較も、より正確なものになると考える。

（２）土壌呼吸に及ぼす気候変動および攪乱の影響の検出

富士北麓カラマツ林における土壌呼吸の年々変動は大きかった。これには主に温度の年々変動が大きく関わっており、土壌水分の影響は少ないものと考えられた。また、林床植生の炭素吸収能が低いのは、林床部に届く光強度が弱いためと考えられた。苫小牧サイトでは、攪乱後の時間経過によって微生物呼吸量の規模が大きくなったことには、林冠の消失による地温の上昇や、倒木の枯死根分解などが関わっているものと考えられた。また、植生を含めた炭素収支を考えると、2007年の総生産量（GPP）が 6.6 tC ha^{-1} であったものが、2012年には 16.9 tC ha^{-1} で頭打ちとなって以降、若干減少している。これには、更新した植物の多くが草本植物であることが関わっているものと考えられるため、今後シラカンバなどの木本植物の成長に伴い、炭素収支がどの様に変動していくか注目していく必要がある。一方、天塩においては生態系呼吸量に占める土壌呼吸の割合は100%に近く、今後カラマツの成長に伴って、どの様にこの値が変動するのか注目される。

（３）土壌有機物の放射性炭素同位体比（ ^{14}C ）の測定

アラカシ優占林では温暖化の進行によって表層（3 cm 以浅）では若い炭素、それ以深では古い炭素が解される事が分かった。冷温帯針広混交林とアカマツ林は深度に因らず比較的若い炭素を由来とする有機炭素が選択的に分解されることが分かった。しかしながら、アカマツ林についてはコア採取時あるいは温暖化操作以前に対照区土壌の表層数 cm が欠落していた可能性があり、再調査する必要がある。

(4) 実観測データによるモデルの検証

観測データでは、天塩や苫小牧など高緯度のサイトから、広島や宮崎など低緯度のサイトにかけて、緯度的に土壤呼吸の総量が増加する傾向がある。陸域モデルの推定でも、そのような傾向はおおよそ再現されているが、広島サイトの夏季に見られるように、高い土壤呼吸フラックスピークの再現性には問題が見られた。また、苫小牧と富士北麓のサイトのように若齢なサイトでは、炭素循環が平衡状態に近いことを仮定する陸域モデルの推定は大幅に過大評価する可能性が示された。そのため、より現実的な推定を行うには、各サイト（格子点）における林齢や攪乱履歴を考慮する必要がある。今後の課題としては、攪乱履歴の考慮、温度依存性パラメータの再検討、そして2012年以前の観測データを用いたさらなる観測とモデル推定の比較検討が挙げられる。

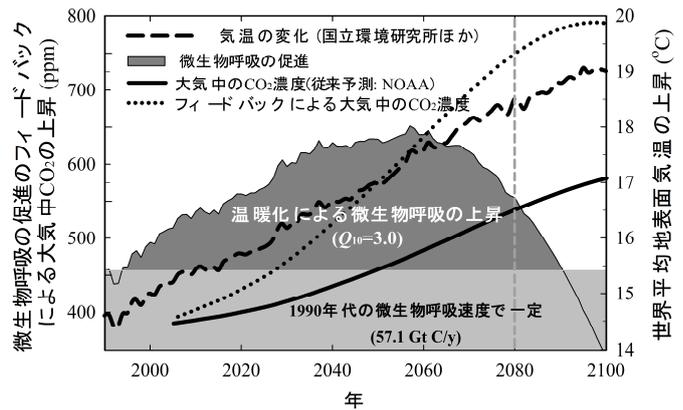


図 6. 土壤呼吸の Q_{10} を 3.0 とした場合の、気温の上昇に伴う微生物呼吸の促進とそれによる大気中 CO_2 濃度への影響。

5. 波及効果

本プロジェクトは、日本の森林土壌が、温暖化に伴って炭素の吸収源であり続けるのか、それとも放出源に転換するののかという重大なテーマに関する、数少ない科学的根拠を提供するものである。IPCC 第 5 次レポートの RCP8.5 シナリオ（温暖化対策を行わない）に沿った将来予測では、地球全体の平均気温は、1986-2005 年の基準値と比べて、2081~2100 年には 2.6~4.8°C 上昇する⁵⁾。一方、本研究から得られた結果を基に、土壌有機物分解速度の Q_{10} 値（土壌呼吸速度の温度依存性を表す指数であり、温度が 10°C 上昇したときの土壌呼吸速度の変化率を意味する）を 3.0 として行った試算では、気温の上昇に伴い微生物呼吸が促進され、2080 年までに土壌炭素の約半分（750 GtC）が大気中に放出されることになる（図 6）。そして、大気中の二酸化炭素は従来の Q_{10} 値を 2.0 とした予測よりも、さらに 209 ppm 上昇する事が示唆された。環境省地球環境研究総合推進費「B-073：土壌呼吸に及ぼす温暖化影響の実験的評価」の課題から導かれた結果からも、日本の森林土壌における Q_{10} 値が概ね 3.0 であること、即ち、上記の将来予測が現実となる可能性が示されている。ここから言える事は、従来の Q_{10} 値を 2.0 とした将来予測に基づく温暖化対策よりも、一層効果的な対策が必要になるという事である。しかしながら、本研究は日本での観測結果に限られており、今後アジア地域へ観測を拡大し、検証を行う必要があるものと考えている。その上でよりグローバルな視点から将来予測を行えば、環境政策策定者に対する提言を行うための重要な知見として成立するものである。

本研究の重要性に関しては、マスメディアからも注目を得ており、今後も成果を積極的に公表していくものである。また、本研究によって得られる長期的な温度-土壌呼吸速度反応に関する実験結果は科学論文としても徐々に公開されてきており、科学的な貢献度はこれからより一層大きくなる。また、今後得られたデータセットを公開することにより、世界レベルでの温暖化対策の拠り所となる、今後の IPCC レポートの作製に貢献する事が期待される。

参考文献

- 1) Bond-Lamberty B and Thomson A (2010) Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature* 464: 579-U132
- 2) Inatomi M, Ito A, Ishijima K, Murayama S (2010) Greenhouse gas budget of a cool temperate deciduous broadleaved forest in Japan estimated with a process-based model. *Ecosystems* 13: 472-483.
- 3) Ito A (2010) Changing ecophysiological processes and carbon budget in East Asian ecosystems under near-future changes in climate: Implications for long-term monitoring from a process-based model. *Journal of Plant Research* 123: 577-588.
- 4) Le Quéré C, Peters GP, Andres RJ et al. 2014. Global carbon budget 2013. *Earth System Science Data* 6: 235-263.
- 5) IPCC2013 (2013) *Climate Change: The Physical Science Basis*. Cambridge Univ. Press.