

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 17 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22310019

研究課題名（和文）長期的な温暖化操作が日本の森林土壌の炭素・窒素動態に及ぼす影響

研究課題名（英文）Long-term evaluation of soil-warming effect on carbon and nitrogen dynamics of Japanese forest soils

研究代表者

高木 健太郎（TAKAGI KENTARO）

北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・准教授

研究者番号：20322844

研究成果の概要（和文）：

日本全国の6つの森林において、土壌への加温処理が、炭素・窒素動態に及ぼす影響を評価した。さらには、スギ・ヒノキ苗木への加温処理が成長に与える影響を評価した。土壌の加温処理によって、全ての観測サイトで微生物呼吸量が増加した。針広混交林のみで、加温処理区の土壌水内の溶存有機炭素濃度と溶存全窒素濃度の増加が認められた。加温処理は、苗木のガス交換を抑制したが、限られた期間の実験のため成長への影響は認められなかった。

研究成果の概要（英文）：

Soil warming experiment was conducted in 6 Japanese forests to evaluate long-term effect of soil warming on the soil carbon and nitrogen dynamics. Warming experiment was also conducted to Japanese cypress and cryptomeria saplings to evaluate the effect of warming on the growth. Soil warming enhanced heterotrophic respiration at all of 6 forests, but the increase in the dissolved organic carbon and nitrogen content in the soil water was only observed at a cool-temperate mixed forest. Warming decreased CO₂ and H₂O exchanges of saplings, but did not change the growth rate within 4-month experimental period.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
2011年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2012年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境影響評価・環境政策

キーワード：土壌呼吸・温暖化・森林・日本全国・炭素窒素循環

1. 研究開始当初の背景

現在、全球規模では約1,550 Gt の炭素が土壌中に蓄積されている。この炭素は大気中にCO₂として存在する炭素の2倍におよび、さらに全陸域植物バイオマスとして存在する炭素の2.8倍に相当する（La1, 2006）。土壌は土壌微生物や小動物の有機物分解（微生物呼吸）と植物根の呼吸（根呼吸）によって多量

のCO₂を大気中に放出している。この微生物呼吸と根呼吸を合わせて、“土壌呼吸”と呼ぶ。全陸域生態系の微生物呼吸量は、土壌呼吸量の約71%と推定されており、人為起源のCO₂放出量の約9倍、全陸域生態系の正味のCO₂吸収量（約1.0 Gt C/年；IPCC2007）の約57倍に相当する量である。これまでに多くの陸域生態系において、土壌呼吸量は土壌温度の

上昇とともに指数関数的に増加することが報告されている (Liang *et al.*, 2003, 2004)。したがって、地球温暖化によって僅かでも土壌呼吸が変動すれば、地球上のCO₂収支は著しく影響を受けることになる。

多くの炭素循環予測モデルの中では、土壌呼吸は季節的な温度変化に対する土壌呼吸の反応に基づいて、温度を変数とした指数関数式として表現されており、この指数関数式が将来の温暖化環境下においても不変であることを前提にして将来予測を行っている (Friedlingstein *et al.*, 2006)。しかし、季節変化から得られる温度と土壌呼吸量との関係が、将来の温暖化環境においても不変であるのかについては、観測研究による裏付けが不十分である。

現在、全陸域面積の 30%を占める約 40 億 ha の森林は二酸化炭素 (CO₂) の吸収源として期待されている。一方、森林土壌炭素は、温暖化に伴って CO₂ の吸収源から放出源に転換する可能性がある巨大な炭素プールとして、温暖化環境下における動態の解明が求められている。そのため、野外における温暖化操作実験により、土壌呼吸が温暖化にどのように反応するのかを明らかにすることが急務となっている。

2. 研究の目的

本研究では、北海道から九州に至る 6 つの日本の代表的な森林において、すでに設置が完了している、野外土壌の人工温暖化実験サイトを利用し、最大 6 年におよぶ長期の加温処理が、土壌の炭素・窒素循環に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。それぞれの実験サイトにおいて赤外線ヒーターを用いて 5cm 深の地温を 2.5~3°C 上昇させ、多点連続観測システムを用いて微生物呼吸量を観測する。また実験サイトにおいて、土壌水の定期的な採水、リタートラップの設置とリターフォールの回収、および土壌のサンプリングを行い、長期の土壌加温処理が土壌中の炭素・窒素動態に及ぼす影響を総合的に評価する。加温処理を長期間継続することにより、有機物量の減少や微生物の順化が起り分解は滞るのか、あるいは温度の上昇に伴って指数関数的に呼吸量が上昇し続けるのかについて明らかにし、炭素循環予測モデルの精度向上に貢献する。土壌の加温処理に加えて、日本の主要な造林樹種であるスギとヒノキの苗木に加温処理を行い、成長に与える影響を評価する。

3. 研究の方法

(1) 微生物呼吸量の温暖化影響評価

北北海道の針広混交林 (北海道大学天塩研

究林)、青森のミズナラ林 (弘前大学百沢寒地気象実験室)、新潟のブナ林 (静岡大学苗場山長期生態学調査地)、茨城のアカマツ林 (つくば市国立環境研究所構内)、広島のアラカシ優占林 (東広島市広島大学敷地内)、宮崎のイタジイ林 (宮崎大学田野フィールド) において (図 1)、10 基の自動開閉式のチャンバを用いて、土壌の微生物呼吸量を 1 時間間隔で連続測定した。アカマツ林、アラカシ林、イタジイ林については、通年観測を行い、針広混交林、ミズナラ林、ブナ林については、無雪期のみ観測を行った。



図 1 調査地の位置図

10 基のチャンバについて、底面の 1m 四方に沿って深さ 30cm の“根切り”を行った後に、塩ビ板で土壌を仕切ることにより、植物の根呼吸の影響を排除し、微生物呼吸量のみを評価した。10 基のうち 5 基のチャンバについては、赤外線ヒーターを高さ約 1.6m に設置し、チャンバ周辺の深さ 5cm の地温を人工的に約 2.5~3°C 上昇させた。5 つの根切り+加温処理チャンバと 5 つの根切りチャンバの計測値を比較することにより、土壌の温暖化が微生物呼吸量に及ぼす影響を明らかにした。アカマツ林 (2006 年開始)、アラカシ林 (2007 年開始)、イタジイ林 (2008 年開始) では通年で加温処理をおこなったが、針広混交林 (2007 年開始)、ミズナラ林 (2008 年開始)、ブナ林 (2008 年開始) では無雪期間のみ加温処理を行った。

温度上昇に伴う土壌呼吸量の増加傾向は Q_{10} 値 (5cm 地温が 10°C 温度上昇した場合の微生物呼吸量の上昇割合: Q_{10} が 2 の場合 2 倍となる。) を指標として、温暖化の影響を明らかにした。

(2) 土壌の炭素・窒素動態の温暖化影響評価

加温処理が土壌水分の化学性に及ぼす影響を明らかにするために、2011年の夏から秋にかけて各サイトで土壌水を採取し溶存有機炭素濃度と溶存全窒素濃度を測定した。

ポーラスカップ付採水器を根除去+加温処理チャンバと根除去チャンバの周囲に各3反復設置し、降水後に土壌水を採水した。宮崎大学において試料水の溶存有機炭素量と溶存全窒素量を全有機体炭素窒素分析計(TOC-V, 島津製作所)を用いて分析した。

(3) 土壌への炭素供給量の評価

樹木地上部から土壌への炭素の供給量を明らかにするために、全サイトにおいて、開口面積0.5 m²のポリエステルメッシュ製リタートラップを地上1.5mの高さに5基設置し、1カ月毎にリタートラップに落下したリターを回収した。5×20 mの方形区を地表面に設置し、方形区内に落下した粗大リターを定期的に回収した。回収したリターは70~80℃の乾燥機を用いて重量が変わらなくなるまで乾燥させた後に重量を測定した。乾燥重量の50%を炭素重量とした。

(4) 樹木の温暖化影響評価

日本の主要な造林樹種であるスギとヒノキの成長に加温処理が与える影響を明らかにするために苗木を用いた実験を行った。実験は宮崎大学田野フィールド(演習林)の苗畑で行った。2011年3月に3年生のスギとヒノキの苗木の各10本を素焼き鉢に1本ずつ植栽した。同年7月に地際直径と苗高を測定し、各10本のうち3本を赤外線ヒーターを用いた加温処理に供した。加温処理は同年12月まで継続した。地温は熱電対を用いて測定し、葉温は放射温度計を用いて8月下旬の日中と夕方、10月下旬の夕方に測定した。光合成速度と蒸散速度を10月下旬に携帯式光合成測定装置(LI-6400, Licor, USA)を用いて測定した。

4. 研究成果

(1) 微生物呼吸量の温暖化影響評価

全国6地点の微生物呼吸量は2012年の年間(針広混交林、ミズナラ林、ブナ林は無雪期のみ)の平均値で、3.08(イタジイ林)~3.98(ブナ林) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の範囲であり、サイト間差は小さかった。冬期積雪の無いサイトでは、イタジイ林<アラカシ林<アカマツ林の順で緯度の上昇に伴い平均微生物呼吸量が増加し、積雪のあるサイトでは、針広混交林<ミズナラ林<ブナ林の順に緯度の低下に伴い平均微生物呼吸量が増加した。

土壌の加温処理によって、全ての観測サイトにおいて微生物呼吸量は増加した。針広混交林のみ、とても高い上昇率(112%)が観測された。このサイトは泥炭地上に成立した森林であり、土壌中の炭素蓄積量が多く、気温が炭素分解の制限要因になっていると考えられた。他のサイトでは加温処理による微生物呼吸量の上昇率は14(ミズナラ林)~40(アカマツ林)%の範囲であり、サイト間の上昇率の違いは平均気温や他の環境要因では説明できなかった。

2012年の Q_{10} 値は1.9(アカマツ林)~2.9(アラカシ林・イタジイ林)の範囲であり、西日本の森林と針広混交林(2.6)で高い値を示した。針広混交林、ブナ林、イタジイ林では加温処理によって、 Q_{10} が低下したが、他のサイトでは上昇した。 Q_{10} のサイト間の違いや加温処理による反応と各サイトの環境要因との間には明瞭な関係は認められなかった。

温暖化によって土壌呼吸量が大幅に増加した針広混交林では、2008年(温暖化2年目)から2012年(同6年目)にかけて上昇率の増加が認められた(図2)。この3年間については、観測期間中の平均気温も増加していることから、上昇率の経年増加傾向が気温によるものか、経年効果であるのかを区別することができないが、加温処理による大幅な呼吸量の増加が5年以上継続する例は既存の研究では希有である。豊富に蓄積されている土壌炭素が温暖化影響の長期継続の主要因と考えられた。

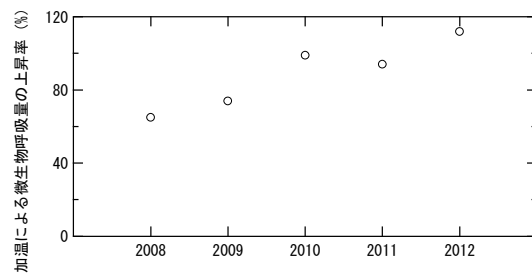


図2 加温処理に伴う微生物呼吸量の上昇率の5年間の変化(針広混交林)

(2) 土壌の炭素・窒素動態の温暖化影響評価

土壌水の溶存有機炭素濃度はアカマツ林と針広混交林では加温区の方が高濃度であったが、ブナ林では非加温区の方が高い傾向を示した(図3上)。溶存全窒素濃度は針広混交林で加温区の方が濃度が高い傾向を示したが、他のサイトでは明瞭な傾向が認められなかった(図3下)。

加温処理により有機物の分解が促進され、加温区の方が溶存有機炭素と溶存全窒素の

濃度がともに高くなると予測していたが、そのような傾向を示したのは針広混交林のみであった。この調査地は平坦な場所にあるために土壌が比較的均一であり、傾斜地に設置されている他のサイトに比べて加温処理の影響を検知しやすいのかもしれない。また、試験開始後の経年変化の影響も無視できない要因である可能性が考えられる。

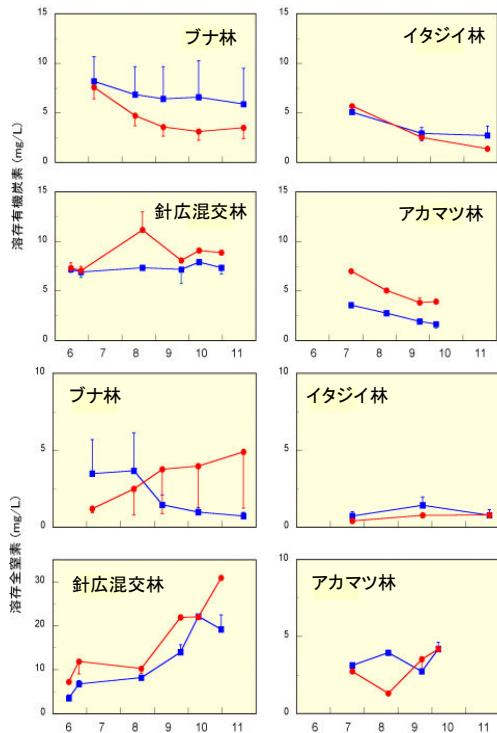


図3 各サイトにおける土壌水中の溶存有機炭素濃度(上)と溶存全窒素濃度(下)の推移。赤線は加温区、青線は非加温区

(3) 土壌への炭素供給量の評価

針広混交林では1年間の落葉落枝量が 1.69 tC ha^{-1} 、粗大リター量が 0.27 tC ha^{-1} であり、総計 $1.96 \text{ tC ha}^{-1} \text{ 年}^{-1}$ の樹木地上部から土壌への炭素供給があった。一方表層30 cmの土壌の炭素蓄積量は $176 \pm 16 \text{ tC ha}^{-1}$ であり、無雪期の微生物呼吸量は1シーズン当たり平均 7.4 tC ha^{-1} であったので、落葉落枝による土壌への炭素供給量は、土壌炭素蓄積量および無雪期微生物呼吸量の1及び26%であることが明らかになった。

宮崎のイタジイ林では、1年間の落葉落枝量が3.48、粗大リター量が0.2、その他が 0.17 tC ha^{-1} となり、総計は $3.85 \text{ tC ha}^{-1} \text{ 年}^{-1}$ であった。年間の微生物呼吸量の約33%の炭素が地上部樹木より土壌に供給されていることが明らかになった。

広島のアラカシ林における落葉落枝量は、微生物呼吸量の半分程度であった。根の更新による土壌への炭素供給量が従来の見解

の通り落葉落枝量の1/2~1/3程度とするならば、針広混交林、アラカシ林、イタジイ林の土壌炭素量はすでに減少しており、森林土壌がすでに CO_2 の放出源になっている可能性が示唆された。

(4) 樹木の温暖化影響評価

加温処理により、地温は平均で両樹種ともに $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 高くなった。葉温は8月の測定では加温処理苗と対照苗で平均値に有意な差は認められなかったが、10月の測定では加温処理苗の方が $1.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 高かった。加温処理期間中の D^2H (地際直径の二乗×苗高)の増加率はスギもヒノキも加温処理苗の方が小さかったが処理区間の差は有意ではなかった(図4)。スギの光合成速度は加温処理苗で有意に小さくなった。

夏期の日中の葉温が加温処理でも高くな

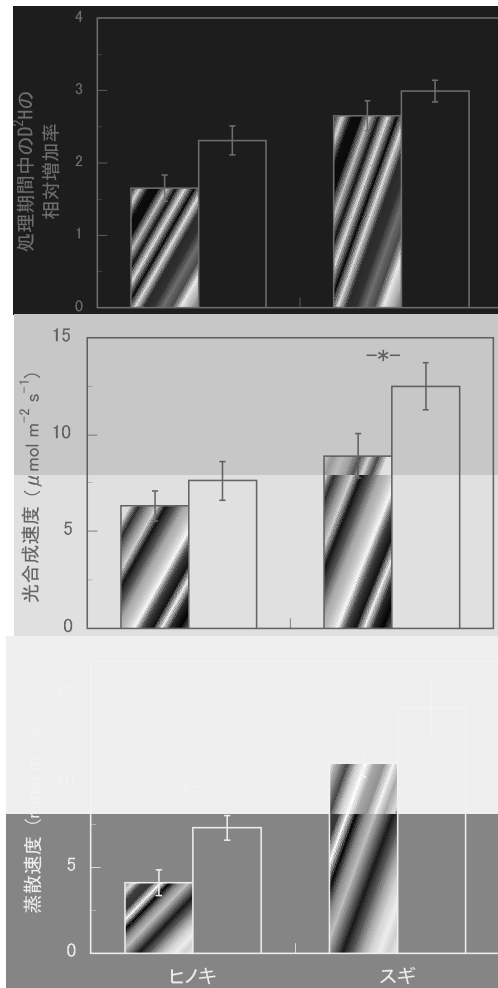


図4 加温処理がスギとヒノキの苗木の成長(上)、光合成速度(中)、蒸散速度(下)に及ぼす影響。縦棒は標準偏差を示し、*は差が $p < 0.05$ で有意であることを示す。

らなかった理由は、蒸散による冷却効果によるものと考えられる。D_Hの相対増加率で示される成長の程度は加温処理により統計的に有意な差は認められなかった。一方でガス交換速度はスギで光合成速度が、ヒノキで蒸散速度がそれぞれ加温処理により低下した。したがって、今回の加温処理は夏から秋にかけての4ヶ月であったが、加温処理をさらに継続した場合は成長に有意な影響が現れる可能性が考えられた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

- ① Aguilos, M.M., Takagi, K. (他11名) (2012) Enhanced annual litterfall production due to spring radiation in cool-temperate mixed forests of northern Hokkaido, Japan. *Journal of Agricultural Meteorology*, 68, 195-204. (査読有)
- ② Wang, X., Nakatsubo, T. and Nakane, K. (2012) Impact of elevated CO₂ and temperature on soil respiration in warm temperate evergreen *Quercus glauca* stands: an open-top chamber experiment. *Ecological Research*, 27, 595-602. DOI: 10.1007/s11284-012-2932-x. (査読有)
- ③ Okada, K., Okada, N., Takagi, K. (他4名) (2012) CO₂ flux estimation for a valley terrain using the atmospheric boundary layer method. *Journal of Agricultural Meteorology*, 68, 165-174. (査読有)
- ④ Makoto, K., Shibata, H., Kim, Y.S., Satomura, T., Takagi, K., Nomura, M., Satoh, F. and Koike, T. (2012) Contribution of charcoal to short-term nutrient dynamics after surface fire in the humus layer of a dwarf bamboo-dominated forest. *Biology and Fertility of Soils*, 48, 569-577. DOI 10.1007/s00374-011-0657-y. (査読有)
- ⑤ Aguilos, M., Takagi, K., Liang, N. (他5名) (2011) Soil warming in a cool-temperate mixed forest with peat soil enhanced heterotrophic and basal respiration rates but Q_{10} remained unchanged. *Biogeosciences Discussion*, 8, 6415-6445, DOI:10.5194/bgd-8-6415-2011. www.biogeosciences-discuss.net/8/6415/2011/ (査読有)
- ⑥ Kim, Y.S., Watanabe, M., Imori, M., Sasa, K., Takagi, K., Hatano, R. and Koike, T. (2011) Reduced atmospheric CH₄ consumption by two forest soils under elevated CO₂ concentration in a FACE system in northern Japan. *Journal of Japan Society for Atmospheric Environment*, 46, 30-36. (査読有)
- ⑦ Liang, N., Hirano, T., Zheng, Z.-M., Tang, J. and Fujinuma, Y. (2010) Soil CO₂ efflux of a larch forest in northern Japan. *Biogeosciences*, 7, 3447-3457, DOI:10.5194/bg-7-3447-2010. www.biogeosciences.net/7/3447/2010/ (査読有)
- ⑧ Takagi, K. (他29名) (2010) Allometric relationships and carbon and nitrogen contents for three major tree species (*Quercus crispula*, *Betula ermanii*, and *Abies sachalinensis*) in northern Hokkaido, Japan. *Eurasian Journal of Forest Research*, 13, 1-7. <http://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/handle/2115/43850> (査読有)
- ⑨ 加藤聖・岡田啓嗣・高木健太郎・浦野慎一 (2010) 河畔湿地における土壌呼吸速度の変動要因. *北海道の農業気象*, 62, 11-18. (査読有)

[学会発表] (計8件)

- ① 高木健太郎 (2012) 森林と温暖化. 日本農業気象北海道支部 60周年記念公開シンポジウム「北海道の気象と農業」, 12月1日, JA北農ビル, 札幌市.
- ② 石田祐宣 (2012) 地球温暖化と青い森のこれから. 青森地方気象台気候講演会-地球温暖化あなたならどうする-, 11月7日, 観光物産館アスパム, 青森市.
- ③ Wang, X., Nakane, K., Sasaki, A., Yoshitake, S. and Nakatsubo, T. (2012) Effects of experimental warming on the soil heterotrophic microbial community in a warm temperate evergreen broad-leaved forest of Japan. The 5th EAFES International Congress. 19 March, Ryukoku Univ., Otsu, Japan.
- ④ Aguilos, M., Takagi, K. (他5名) (2012) Northern Japan's cool-temperate forest reaches its carbon compensation point 7 years after clearcutting. The 5th EAFES International Congress, 18 March, Ryukoku Univ., Otsu, Japan.

- ⑤ Aguilos, M., Takagi, K., Liang, N. (他9名) (2011) Effect of disturbances to the carbon budget of forests in northern Japan. 生物地球科学会10周年セッション, 10月22日, 北海道大学, 札幌
- ⑥ Aguilos, M., Takagi, K., Liang, N. (他5名) (2010) Soil warming in a cool-temperate mixed forest enhances heterotrophic and basal respiration rates, but Q10 remains unchanged. AsiaFlux Workshop 2010, 2 Dec., Yanling Hotel, Guangzhou, China.

[図書] (計2件)

- ① 高木健太郎 (2012) 森林土壌への温暖化の影響. 北海道の気象と農業, 日本農業気象学会北海道支部会(編著), 北海道新聞社, 355-359, 札幌.
- ② 高木健太郎 (2011) 森林のCO₂固定. 北海道の森林, 北方森林学会(編著), 北海道新聞社, 116, 札幌.

[その他]

ホームページ等

<http://researchmap.jp/read0065362/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高木 健太郎 (TAKAGI KENTARO)
北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・准教授
研究者番号: 20322844

(2) 研究分担者

高木 正博 (TAKAGI MASAHIRO)
宮崎大学・農学部・准教授
研究者番号: 70315357

梁 乃申 (LIANG NAISHEN)
国立環境研究所・地球環境研究センター・主任研究員
研究者番号: 503911173

石田 祐宣 (ISHIDA SACHINOBU)
弘前大学・理工学研究科・助教
研究者番号: 60292140

角張 嘉孝 (KAKUBARI YOSHITAKA)
静岡大学・農学部・教授
研究者番号: 60126026
(2011年度まで)

水永 博己 (MIZUNAGA HIROMI)
静岡大学・農学部・教授
研究者番号: 20291552
(2012年度のみ)

中根 周歩 (NAKANE KANEYUKI)
広島大学・生物圏科学研究科・教授
研究者番号: 00116633
(2011年度まで)

中坪 孝之 (NAKATSUBO TAKAYUKI)
広島大学・生物圏科学研究科・教授
研究者番号: 10198137
(2012年度のみ)

(3) 連携研究者
なし