

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K05736

研究課題名(和文) 乾燥ストレスがスギ成木の幹の呼吸におよぼす影響解明

研究課題名(英文) Elucidating effects of drought stress on stem respiration in Japanese cedar trees

研究代表者

荒木 眞岳 (Masatake, Araki)

国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等

研究者番号：80353564

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：乾燥ストレスがスギ成木に及ぼす影響を解明するため、スギ林において林内雨遮断実験を行い、シュート(枝葉)呼吸、蒸散速度及び土壌呼吸などを測定した。その結果、土壌の乾燥に伴い蒸散速度、土壌呼吸速度は低下した。一方、スギ成木のシュート呼吸には土壌の乾燥の影響は認めなかった。温暖化がヒノキ成木の幹呼吸に与える影響を明らかにするため、過去のデータを再解析して幹呼吸速度を推定するモデルを作成した。呼吸の温度依存性が年間を通じて一定である従来モデルに対して、呼吸の温度依存性が季節変動する効果を考慮に入れた本モデルの方が、気温上昇に伴う幹呼吸速度の増加程度は小さくなると予測された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国の主要な造林樹種であるスギとヒノキについて、生理学的な観点から乾燥ストレスや気温上昇の影響を明らかにしたことは、気候変動が人工林に及ぼす影響を予測するための炭素収支モデルの精緻化に貢献するとともに、人工林の適応策を考えるうえで有用な知見を提供する。

研究成果の概要(英文)：We examined effects of soil drought, which was caused by the throughfall exclusion experiment for the consecutive three years, on shoot respiration, transpiration and soil respiration rates in a mature Japanese cedar stand. Transpiration rates and soil respiration rates were reduced in accordance with soil drought. Whereas, shoot respiration rates of cedar trees were not affected by soil drought.

Additionally, we developed a model for predicting stem CO<sub>2</sub> efflux of mature Japanese cypress trees by using already obtained data. The model included the process that temperature sensitivity of stem respiration varied with the ambient temperature (temperature acclimation). Predictions by our model demonstrated that the extent of increase in stem CO<sub>2</sub> efflux with future warming was reduced by incorporating the temperature acclimation in comparison with a conventional model which assumed constant temperature sensitivity.

研究分野：森林生態学

キーワード：スギ ヒノキ 乾燥ストレス 温暖化 呼吸 蒸散 土壌呼吸

## 1. 研究開始当初の背景

気候変動により、気温の上昇に加えて、降雨現象の極端化に伴う乾燥がもたらされると予測されている。森林生態系の炭素収支において、樹木の呼吸や土壌呼吸(樹木の根や土壌微生物の呼吸を起源とする土壌表面から放出されるCO<sub>2</sub>)は主要な要因である。そのため、温暖化や乾燥ストレスに対する樹木呼吸と土壌呼吸の応答を解明することは、気候変動が森林の炭素収支に及ぼす影響を評価するうえで大変重要である。

一般に、温度が上昇すると呼吸速度は大きくなるため、温暖化によって呼吸量は増加すると予測されている。一方、乾燥が呼吸速度に及ぼす影響は、土壌呼吸については減少するとの報告が多いものの、樹木呼吸については明らかにされていない。また、樹木の幹内の細胞の呼吸によって発生したCO<sub>2</sub>は、幹表面から放出される前に、樹液流によって幹上部に持ち去られることが広葉樹を中心に報告されている。土壌が乾燥すると樹液流速は低下すると予想されるため、土壌の乾燥は樹木呼吸に直接的・間接的な影響を及ぼす可能性がある。

日本の国土面積のうち3分の2は森林であり、このうち約4割を人工林が占め、スギとヒノキは主要な造林樹種である。したがって、スギ林やヒノキ林を対象にすることは、気候変動が日本の森林の炭素収支に及ぼす影響を予測するうえでも、また人工林管理における適応策を考えるうえでも重要である。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究は、実際のスギ人工林を対象に、乾燥ストレスが樹木呼吸と土壌呼吸に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。具体的には、長期にわたる土壌の乾燥実験を行い、スギ成木の樹液流速(蒸散量) シュート(内部に木部を含んだ主に針葉からなる枝葉)の呼吸速度、幹内部のCO<sub>2</sub>濃度、幹表面からのCO<sub>2</sub>放出速度、および土壌内のCO<sub>2</sub>濃度と土壌表面からのCO<sub>2</sub>放出速度に対する土壌の乾燥の影響を評価することを当初の目的とした。

(2) 当初の予定にはなかったが、ヒノキ成木を対象に、過去に取得した幹表面からのCO<sub>2</sub>放出速度のデータを用いて、幹の呼吸速度を予測するモデルを開発し、将来の温暖化がヒノキの幹の維持呼吸速度に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

(1) 茨城県にある約40年生のスギ人工林内に、降雨(林内雨+樹幹流)を遮断するための10m四方の屋根状の装置を地上高約4mに建設し、土壌乾燥実験を約3年間にわたり行った(乾燥区)。隣接して降雨を遮断しない対照区を設定した。

各処理区において、土壌の水ポテンシャル(乾燥の指標)、土壌中のCO<sub>2</sub>濃度、および土壌呼吸を測定した。また、各処理区のスギ成木3~6個体を対象に、樹液流速、スギシュートの呼吸速度を測定した。

なお、購入予定だったCO<sub>2</sub>センサーが販売中止になり代替品の選定に時間がかかったことや、新型コロナウイルスの影響で思うように現地調査に行けなかったことから、幹内部のCO<sub>2</sub>濃度と幹表面からのCO<sub>2</sub>放出速度は予定通りに測定できなかった。

(2) スギの幹の呼吸に関するデータが取得できなかったため、既存のデータを用いて、将来の温暖化がヒノキの幹の呼吸速度に及ぼす影響を明らかにすることにした。

茨城県にある約50年生のヒノキ人工林において、ヒノキ5個体を対象に幹の下部から上部まで様々な高さ(合計34か所)で、幹表面からのCO<sub>2</sub>放出速度(以下、幹の呼吸速度)と幹温度の日変化、および幹直径を1.5から2か月おきに2年間測定した。まず、幹の呼吸速度と幹温度の日変化のデータを再解析し、呼吸の温度依存性を示すQ<sub>10</sub>の値が季節変化するかどうか調べた。次に、幹の呼吸速度を目的変数、幹温度と幹直径速度を説明変数とした一般化線系モデルを構築した。その際、Q<sub>10</sub>が季節変化する効果(呼吸の温度順化)を考慮に入れたモデルと、従来の炭素収支モデルで仮定されているようにQ<sub>10</sub>が年間を通じて一定であるモデルを開発した。両方のモデルを用いて将来の温暖化(気温上昇)がヒノキの幹の呼吸速度に及ぼす影響を予測し、両者の結果を比較することで、Q<sub>10</sub>の季節変化(呼吸の温度順化)による効果を検討した。

## 4. 研究成果

(1) 土壌の乾燥がスギ林の土壌中CO<sub>2</sub>濃度と土壌呼吸に及ぼす影響

約3年間にわたる降雨遮断処理により、乾燥区では対照区と比べて土壌が強く乾燥した。期間を通じて対照区では0.2MPaを下回ることがなかったのに対し、降雨遮断した乾燥区の土壌水ポテンシャルは最大で0.8MPaまで低下した。2年目と3年目はスギの成長期間にわたって強い土壌の乾燥が維持された(図1)。

土壌CO<sub>2</sub>濃度は、深いところほど高く、夏季に高くなる傾向が見られた。同じ深さの土壌CO<sub>2</sub>濃度は、乾燥区の方が対象区よりも低く、夏季には対照区の50%程度であった(図2左)。この

差は、土壤の乾燥によって土壤微生物の呼吸活性が低下したためと考えられた。

土壤呼吸（土壤表面からのCO<sub>2</sub>放出速度）は、土壤CO<sub>2</sub>濃度の影響を受け、対照区よりも乾燥区の方が低く、土壤の乾燥により最大で80%程度低下した。また、土壤の乾燥によって、土壤呼吸の温度依存性が変化することが明らかとなった（図2右）。

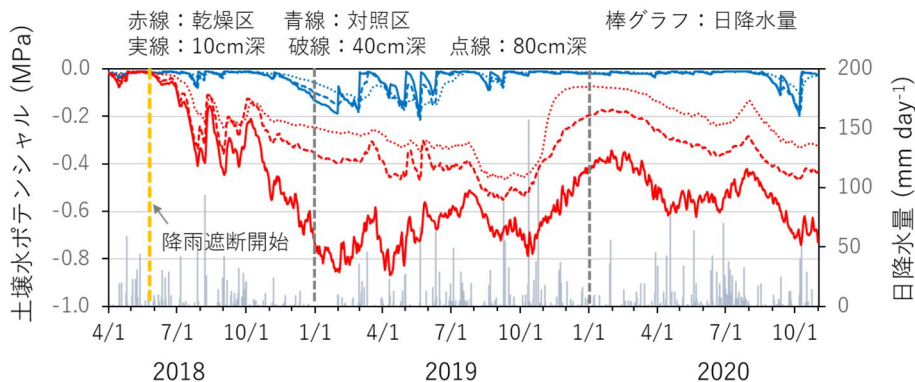


図1 3年間にわたる降水量と土壤水ポテンシャルの季節変化

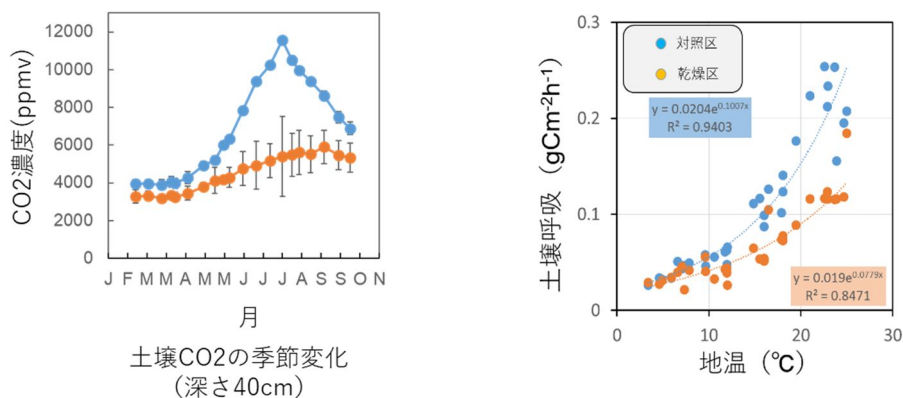


図2 土壤CO<sub>2</sub>濃度（深さ40cm）の季節変化（左）と土壤呼吸と地温の関係（右）  
青い記号は対照区、赤い記号は乾燥区の値を、エラーバーは標準偏差を示す。

(2) 土壤の乾燥がスギ成木の蒸散量とシュートの呼吸速度に及ぼす影響

土壤の乾燥に伴いスギ成木の樹液流速は低下し、対照区に対して乾燥区の個体蒸散量の指標（樹液流速×枝下断面積）は2019年5~6月で80%程度、8月で72%程度であった（図3左）。一般に、空气の乾燥程度は大気飽差で表現されるが、大気飽差が高い（乾燥する）ほど樹木の蒸散が促進され、その結果として土壤水分量が減少すると考えられる。そこで、無降雨期間の土壤水分変化量をスギ林の蒸散量の指標とし、それと大気飽差との関係を調べた（図3右）。大気飽差と土壤水分変化量の回帰直線の傾きに注目すると、対照区では経年変化がなかったのに対し、乾燥区では年を経るにつれて傾きが緩くなった。これらの結果から、スギ成木の蒸散は、短期的な土壤の乾燥によって低下するだけでなく、長期的な土壤の乾燥によって抑制されることが示唆された。

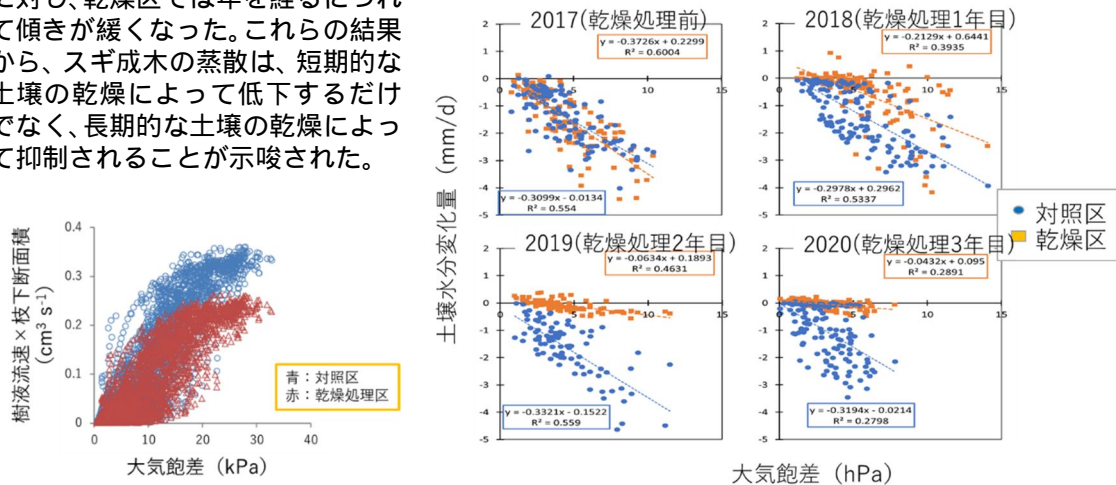


図3 スギ成木の個体蒸散量（左）及び土壤水分変化量（右）と大気飽差との関係

一方、スギ成木のシュート(内部に木部を含んだ主に針葉からなる枝葉)の暗呼吸速度の季節変化を調べたところ、シュートの呼吸には土壤の乾燥の影響は認められなかった(図4)

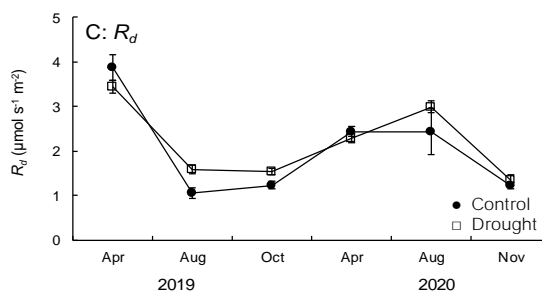


図4 スギ成木のシュートの暗呼吸速度の季節変化(●が対照区、□が乾燥区の個体)

### (3) 将来の温暖化がヒノキ成木の幹の呼吸速度に及ぼす影響

ヒノキ成木の幹における呼吸速度の温度依存性を示す  $Q_{10}$  の値は、夏に小さく冬に大きいという季節変化を示し、周囲の気温(測定日から7日前までの平均気温)と負の相関が認められた。すなわち、気温の季節変化に応じてヒノキの幹の呼吸における  $Q_{10}$  が変化すること(呼吸の温度順化)が明らかとなった。これまで、生育温度や周囲の気温によって草本個体や樹木の葉の呼吸が温度順化することは知られているが、樹木の幹の呼吸も温度順化することを報告した研究は世界的にみてもほとんどない。

将来の気候変動に伴う温暖化が樹木の幹の呼吸速度に与える影響を明らかにするため、開発した2つのモデルを用いて、現在(2012年)の気温と、将来(2070年)年平均気温が2.0度上昇した場合(RCP2.6)と3.9度上昇した場合(RCP8.5)について、土地面積あたりのヒノキの幹における維持呼吸速度の季節変化を予測した。その際、モデルに直径成長速度としてゼロを入力することで、呼吸のうち温度に依存する成分である維持呼吸を対象とした。

2つのモデルとも、将来の気温上昇程度に応じて、ヒノキの幹の維持呼吸速度は増加すると予測した(図5)。しかし、従来のように  $Q_{10}$  が年間を通じて一定であると仮定したモデルの予測結果に対して、 $Q_{10}$  が季節変化する効果(呼吸の温度順化)を考慮に入れたモデルの結果の方が、維持呼吸速度の増加程度は小さくなることが明らかとなった。このことは、従来の炭素収支モデルによる樹木呼吸への温暖化影響予測は過大評価であることを示唆している。

スギとヒノキを対象に、本研究で明らかになった温暖化や乾燥ストレスに対する樹木呼吸や土壌呼吸における応答は、気候変動が日本の人工林に及ぼす影響予測の精緻化に貢献するとともに、人工林管理における適応策を考えるうえで有用な知見を提供する。

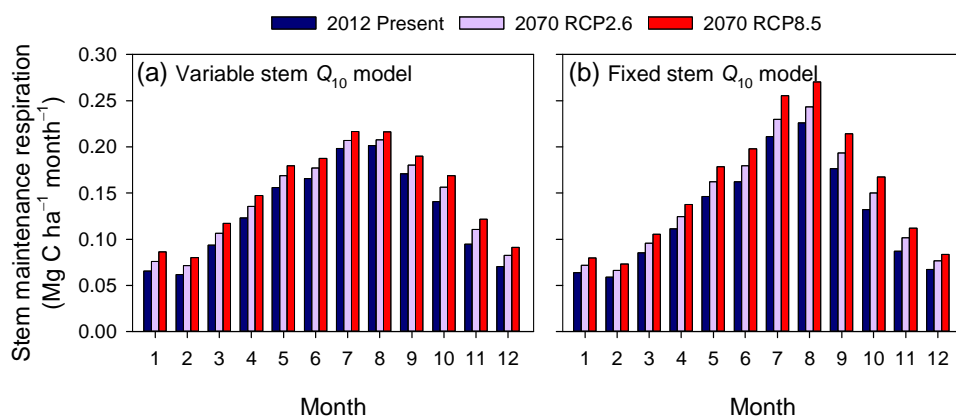


図5 地球温暖化が約50年生のヒノキの幹における維持呼吸速度(土地面積当たり)の季節変化に及ぼす影響予測。現在の気温(2012年、●)から、将来(2070年)年に平均気温が2.0度上昇した場合(RCP2.6、□)と3.9度上昇した場合(RCP8.5、■)について予測した。呼吸速度の温度依存性を示す  $Q_{10}$  が年間を通じて一定であるモデル(右)に比べると、 $Q_{10}$  が季節変化するモデル(左)の方が、温暖化に伴う幹の維持呼吸速度の増加量は小さいと予測した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kenzo Tanaka, Inoue Yuta, Araki Masatake G., Kawasaki Tatsuro, Kitaoka Satoshi, Tsurita Tatsuya, Sakata Tadashi, Saito Satoshi	4. 巻 12
2. 論文標題 Effects of Throughfall Exclusion on Photosynthetic Traits in Mature Japanese Cedar ( <i>Cryptomeria japonica</i> (L. f.) D. Don.)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Forests	6. 最初と最後の頁 971 ~ 971
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/f12080971	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 平谷理人、安江恒、荒木眞岳
2. 発表標題 スギにおける樹幹のCO2放出速度と肥大成長及び樹幹の形態的要素との関係
3. 学会等名 日本森林学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阪田匡司、釣田竜也、荒木眞岳、小林政広
2. 発表標題 降雨遮断によるスギ人工林乾燥処理試験区の土壤水分収支
3. 学会等名 日本森林学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阪田匡司、釣田竜也、荒木眞岳
2. 発表標題 降雨遮断を用いた強度な土壤乾燥条件下での土壤呼吸の変化
3. 学会等名 日本土壌肥料学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荒木眞岳、井上裕太、釣田竜也、阪田匡司、田中憲蔵、川崎達郎、齊藤哲
2. 発表標題 3年間にわたる土壌の乾燥がスギ成木の蒸散と成長に及ぼす影響
3. 学会等名 日本森林学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阪田匡司、釣田竜也、荒木眞岳、古澤仁美、小林政広
2. 発表標題 2生育期間におよぶ降雨遮断をおこなったスギ人工林の土壌水分変動
3. 学会等名 日本森林学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 壁谷大介、井上裕太、北岡哲、荒木眞岳
2. 発表標題 スギ・シュートにおける貯蔵炭水化物の時間変動パターン
3. 学会等名 日本森林学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒木眞岳、玉泉幸一郎、梶本卓也
2. 発表標題 Temperature acclimation of respiration may mitigate a response of canopy respiration to climate warming , in a hinoki cypress stand
3. 学会等名 日本生態学会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阪田匡司、釣田竜也、荒木眞岳、小林政広、古澤仁美
2. 発表標題 降雨遮断による土壤乾燥処理に伴う土壤水分の挙動
3. 学会等名 日本森林学会大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 (一社)日本森林学会	4. 発行年 2021年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 694
3. 書名 森林学の百科事典	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	壁谷 大介 (Kabeya Daisuke)  (30353650)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等  (82105)	
研究分担者	阪田 匡司 (Sakata Tadashi)  (50353701)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等  (82105)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------