

令和 2 年 5 月 8 日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K07796

研究課題名(和文) 流域水収支で推定した森林蒸発散量の同位体年輪年代学的解析を用いた検証

研究課題名(英文) Verification of forest evapotranspiration estimated by water budget using isotope dendrochronology

研究代表者

久保田 多余子 (Kubota, Tayoko)

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：70353670

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：釜淵森林理水試験地(山形県)では水収支式から求められる蒸発散量に長期的な減少傾向が見られた。試験地の気温は上昇傾向が見られ、これは降水量と流出量の増加につながっていると考えられた。飽差と日射量にも増加傾向がみられ、このことは蒸発散量を増加させる方向へ働くと考えられる。一方で、年輪のセルロースの<sup>13</sup>Cから計算される水利用効率は増加しており、この増加は大気中のCO<sub>2</sub>濃度の上昇に起因すると考えられた。本試験地で蒸発散量に対する日射量と飽差の物理的な影響もあるが、大気CO<sub>2</sub>濃度の上昇による水利用効率の上昇、それに伴う蒸散量の減少が、長期的な蒸発散量の減少に大きな影響を与えていると考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

森林からの蒸発散量は伐採、樹木の成長、気候変動にตอบสนองして変化し、水資源量に影響を及ぼす。森林からの蒸発散量は二酸化炭素の増加にともなう気温の上昇や降水量の増加など物理的な気候変動の影響のみならず、樹木の生理学的な影響を受けて変化する。これまで森林水文学では水収支の一項目としての蒸発散量に対する気候変動の影響について、物理的な影響を調べるものが多く、生理学的な影響を考慮してこなかった。本研究では蒸発散量に対する気候変動の物理的および植物生理学的な影響を明らかにする。このことは、将来的な水資源量の変動予測に役に立つ。

研究成果の概要(英文)：Evapotranspiration (precipitation-discharge) estimated by water budget method has decreased at the Kamabuchi Experimental Watershed in Yamagata prefecture. Temperature has increased, and this might work to increase precipitation and discharge in this watershed area. Vapor pressure deficit and solar radiation have increased, this probably work to increase evapotranspiration. On the other hand, intrinsic plant water use efficiency (iWUE) calculated using <sup>13</sup>C of tree-ring cellulose has increased. The increase in iWUE probably is not caused by drought stress in this humid area, but the increase in the concentration of CO<sub>2</sub> in the atmosphere. Although there is a physical effect of solar radiation and vapor deficit on evapotranspiration, the increase in atmospheric CO<sub>2</sub> concentration leads to an increase in iWUE and a consequently causes long-term trend of evapotranspiration in this watershed.

研究分野：森林水文学

キーワード：流域水収支 蒸発散量 年輪 酸素同位体比 炭素同位体比 水利用効率

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

日本各地の水文観測試験地で 50 年以上の長期の流量および気象観測データが蓄積され、流域水収支法によって推定する蒸発散量 (= 降水量 - 流出量) から、蒸発散量の長期変動を実証的に検証することが可能となってきた。また、薪炭材として使用されていた森林が、化石燃料の使用により使われなくなって放置されたり、戦後拡大造林により一斉に植栽されたりして、現在、国内では壮齢の森林が増えている。このような森林がこれまでに成長する過程で気候変動にどのように応答して蒸発散量を変化させてきたのかを明らかにすることは、将来、気候変動に森林がどのように応答しているのかを予測するためだけでなく、水資源量の予測のためにも重要である。一方、年輪の酸素同位体比 ( $^{18}\text{O}$ ) は降水の  $^{18}\text{O}$  と相対湿度の主に 2 要因で決定され個体差が小さい。また、年輪の炭素同位体比 ( $^{13}\text{C}$ ) は個体差は大きいが大気中の水ストレスに対応した気孔の開閉調節を反映している。このことから年輪の  $^{18}\text{O}$  と  $^{13}\text{C}$  の組み合わせにより、より優れた気候の復元が実現する可能性がある。このように年輪の  $^{18}\text{O}$  と  $^{13}\text{C}$  を調べることにより、森林が気候変動に応答してどのように蒸発散量を変化させているのかを、植物生理学的な面からも明らかにできる可能性がある。

## 2. 研究の目的

森林が植栽されてから長期にわたり成長していく間に、その間の気候変動に対して森林がどのように応答しているのかを、水収支式から求めた森林蒸発散量をもと明らかにする。本研究では降水量と流出量の長期観測データを用いて、水収支式から求めた蒸発散量の長期変動に、気温、降水量、日射量等の気候変動がどのように影響しているのか明らかにするとともに、年輪のセルロースの  $^{18}\text{O}$  と  $^{13}\text{C}$  から、森林が植物生理学的に気候変動へどのように応答しているのかを明らかにする。

## 3. 研究の方法

流量と気象観測およびスギの年輪の採取を森林総合研究所の釜淵森林水試験地 (山形県最上郡真室川町大字釜淵、鶴下田沢国有林内、北緯  $38^{\circ} 56'$ 、東経  $140^{\circ} 15'$ 、標高 160 ~ 250 m) において行った。植生はもともと広葉樹を主とする天然林であり、家畜の飼料を取るために火入れが行われ、燃材・用材の採取のため部分的に皆伐が行われていた。1912 年に伐採跡地にヒノキ、1913 ~ 1915 年にヒノキ、スギ、少数のアカマツの植栽が行われた。現在は主にスギ、コナラやブナの針広混交林となっている。この試験地は 1 ~ 4 号沢の小流域から成る。1 号沢 (3.060ha) と 2 号沢 (2.482ha) は 1939 年に対照流域法を行うために観測が開始され、1 号沢は対照流域として観測開始以降放置され、2 号沢は 1947 - 1948 年にかけての冬に皆伐、その後火入れをして、下層植生が生えないように処理したのち、1961 年にスギを植栽し現在に至る。3 号沢 (1.540ha) と 4 号沢 (1.117ha) は伐採箇所の違いが流出量に及ぼす影響を明らかにするため 1961 年に開始された。3 号沢は 1960 年に針葉樹をすべて伐採、1963 - 1964 年の冬に流域の流域面積の 50% に相当する流路沿いを伐採し、1969 - 1970 年に残りの上半分を伐採して皆伐地とした。4 号沢は 1960 年に広葉樹を伐採し、1963 - 1964 年の冬に流域の流域面積の 50% に相当する尾根沿いを伐採し、1969 - 1970 年に残りの下半分を伐採して皆伐地とした。4 号沢については漏水があると考えられたため、解析から除外した。

気象観測は 1938 年から開始され、1978 年までは流量観測施設から 900m 東の位置、1978 年以降は 1km 南東の場所で行っている。解析では降水量、気温、湿度、日照時間の観測値と気温と湿度から計算した飽差 (VPD)、日照時間から計算した日射量、気温と日射量から計算した可能蒸発量を使用した。欠測や不確定値については気象庁アメダスの新庄の値により補完した。この試験地は多雪地域にあり、降水量の約 40% が降雪による。積雪の影響は 11 月 ~ 5 月までであることから、蒸発散量は 6 月から 10 月までの降水量と流出量により計算した。

年輪のコアを 2 号沢の近くで、直径 12 mm の成長推を用いて、胸高にて樹皮から髓まで採取した。16 個体から 2 方向以上のコアを 44 個採取した。そのうち 4 つのコアを選び、1 mm 厚の薄片にして、薄片のまま亜塩素酸溶液による漂白と水酸化ナトリウム溶液によるアルカリ反応によりセルロースを抽出した後、1 年輪ごとに切り分けた。切り分けた年輪をホモジナイザーで綿状にし、200  $\mu\text{g}$  秤量して銀カプセルに包み、熱分解装置と質量分析計によって  $^{18}\text{O}$  と  $^{13}\text{C}$  を分析した。

## 4. 研究成果

水収支式から求めた 6 - 10 月の総蒸発散量の長期的な変化として、1 号沢で 11.1 mm/10 年 ( $r^2=0.33$ ,  $p<0.001$ ) の減少傾向がみられ、2 号沢で 3.4 mm/10 年 ( $r^2=0.03$ ,  $p<0.05$ )、3 号沢で 2.1 mm/10 年 ( $r^2=0.12$ ,  $p<0.05$ ) の増加傾向がみられた。

蒸発散量には伐採の影響も見られた。皆伐前の 6 - 10 月蒸発散量は 1 号沢で 465.0 mm、2 号沢で 465.7 mm でありほぼ同じであったのに対し、2 号沢では 1947 - 1948 年の皆伐により、1949 - 1959 年の 10 年間の蒸発散量は間伐前の約 20 % 減少した。その後、2 号沢の蒸発散量は 1961 年にスギを植栽してからも小さいまま推移し、1981 年以降上昇した。2000 年以降は 1 号沢の蒸発

散量を超えた。3号沢は1回目の伐採で蒸発散量が伐採前の25%減少、2回目の伐採でさらに30%減少した。1970年にスギを植栽後は徐々に蒸発散量が増え、2011年以降は3号沢の蒸発散量も1号沢を超えた。

蒸発散量には長期的な傾向と伐採の影響の他に周期的な変動がみられた。そこで、気候要素の変動を調べ、蒸発散量との関係を調べた。気温は0.16 /10年 ( $r^2=0.21$ ,  $p<0.001$ )の上昇傾向が見られた。降水量は15年程度の周期で増減しており、長期的には0.3 mm/10年の増加傾向が見られた。この降水量の増加に対し、森林の変化を加えていない1号沢の流出量は9.4mm/10年の増加傾向が見られた。湿度は-0.1%/10年 ( $r^2=0.48$ ,  $p<0.001$ )、一方で飽差 (VPD) は0.3 hPa ( $r^2=0.35$ ,  $p<0.001$ )の増加傾向があり、試験地付近は乾燥傾向がある。日照時間は3.61h/10年 ( $r^2=0.12$ ,  $p<0.05$ )の減少傾向、日射量は統計的に有意ではないが0.02MJm<sup>-2</sup>/10年 ( $r^2=0.12$ ,  $p>0.05$ )の増加傾向がある。日射量は世界的に1950年代から1980年代にかけて減少し、1990年代から増加に転じており、本試験地でもおおむね同様の傾向が見られた。可能蒸発量は日射量と同様の短期的な変動を示すが、長期的には横ばいで変化がなかった0.00 mm/10年 ( $r^2=0.002$ ,  $p>0.05$ )。

1号沢の蒸発散量と気候要素との相関を調べたところ、1号沢の蒸発散量は日射 ( $r^2=0.07$ ,  $p<0.05$ ) 可能蒸発量 ( $r^2=0.07$ ,  $p<0.05$ ) および飽差 ( $r^2=0.37$ ,  $p<0.001$ ) といずれとも正の相関があった。このことから、1号沢の蒸発散量に見られる短期的な変動は主に日射量と飽差の影響を主に受けていると考えられる。

4個体の年輪に対し、採取した年輪の正確な年代を照合する作業 (クロスデイトィング) をセルロースの <sup>18</sup>O を用いて、すでに年代決定済みの安比高原 (岩手県) で採取したブナと比較することにより行った。年代決定後、4個体の <sup>18</sup>O および <sup>13</sup>C をそれぞれ平均して、本試験地のクロノロジーを作成した。クロノロジーの信頼性を評価する指標である、Expressed Population Signal (EPS) を算出したところ、1939-2014年の年輪で基準値であるEPS 0.85を満たし、この間を信頼できる区間として、1939-2014年の <sup>18</sup>O および <sup>13</sup>C を解析に用いた。

<sup>18</sup>O は7月の湿度との間に負の相関 ( $r^2=0.07$ ,  $p<0.05$ )、6-10月の日照時間 ( $r^2=0.16$ ,  $p<0.001$ )、日射量 ( $r^2=0.11$ ,  $p<0.05$ ) と可能蒸発量 ( $r^2=0.11$ ,  $p<0.05$ ) の間に正の相関が見られた。一般に年輪のセルロースの <sup>18</sup>O は夏季の降水量と湿度との間に負の相関が見られるが、本研究では降水量との間には相関がみられなかった。また、<sup>13</sup>C は気温 ( $r^2=0.37$ ,  $p<0.001$ ) と飽差 ( $r^2=0.48$ ,  $p<0.001$ ) との間に負の相関、湿度 ( $r^2=0.40$ ,  $p<0.001$ ) と日照時間 ( $r^2=0.24$ ,  $p<0.001$ ) の間に正の相関が見られた。また、<sup>13</sup>C から計算される水利用効率 (iWUE) は増加傾向があり、化石燃料由来のCO<sub>2</sub>濃度が急激に上昇し始める1960年代以前の1941-1950年の平均で83.3 μmolm<sup>-2</sup>、2001-2010年で121.6 μmolm<sup>-2</sup>であった。本試験地は降水量が少ない時でも常に同程度の蒸発散量があり、土壌水分の不足は見られない。このことから、水利用効率の増加は二酸化炭素濃度の増加に起因していると考えられる。水利用効率が増加すると、樹木は気孔を開かなくても光合成が可能であることから蒸散量が減少する。

釜淵森林理水試験地では水収支式から降水量-流出量で求められる蒸発散量は、伐採の影響のない1号沢では、短期的な変動の他に長期的な減少傾向が見られた。試験地の気温は上昇傾向が見られ、一般的に気温の上昇は飽和蒸気圧の増加、大気中の可降水量の増加が降水量の増加をもたらす、土壌水分量を増加させて流出量の増加につながると考えられる。本試験地の降水量と流出量は増加する傾向があり、気温の上昇が降水量と流出量の増加につながっていると考えられる。本試験地では飽差と日射量にも増加傾向がみられ、このことは蒸発散量を増加させる方向へ働くと考えられるが、本試験地の蒸発散量には減少傾向が見られた。一方で、年輪のセルロースの <sup>13</sup>C から計算される水利用効率は増加しており、本試験地では土壌の乾燥によるストレスの影響がないことから、水利用効率の増加は大気中のCO<sub>2</sub>濃度の上昇に起因すると考えられる。本試験地で蒸発散量に影響を与えているものとして伐採の影響が最も大きい、それ以外では、気候変動の物理的な影響よりも、大気CO<sub>2</sub>濃度の上昇による水利用効率の上昇、それに伴う蒸散量の減少が、長期的な蒸発散量の減少に大きな影響を与えていると考えられた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 久保田多余子	4. 巻 70(1)
2. 論文標題 樹幹流の安定同位体比および溶存化学成分の1降雨中の時間変化	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 関東森林研究	6. 最初と最後の頁 85-88
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

1. 著者名 Tayoko Kubota, Akira Kagawa, Naomi Kodama	4. 巻 32
2. 論文標題 Effects of salt water immersion caused by a tsunami on $\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$ values of <i>Pinus thunbergii</i> tree-ring cellulose	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Ecological Research	6. 最初と最後の頁 271-277
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11284-017-1437-4	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 久保田多余子、香川聡
2. 発表標題 釜淵試験地のスギ年輪 $\delta^{18}O$ ・ $\delta^{13}C$ と77年間の降水量・流出量との関係
3. 学会等名 日本森林学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久保田多余子
2. 発表標題 樹幹流の安定同位体比および溶存化学成分の1降雨中の時間変化
3. 学会等名 関東森林学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久保田多余子
2. 発表標題 森林施業が森林蒸発散量の長期変動に及ぼす影響
3. 学会等名 第21回東北森林科学会大会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔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
連携研究者	香川 聡 (Kagawa Akira)  (40353635)	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)	