

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04520

研究課題名(和文)水安定同位体を用いた樹冠遮断メカニズムの解明に関する研究

研究課題名(英文)A study on the mechanism of canopy interception using stable isotopes of water

研究代表者

村上 茂樹(Murakami, Shigeki)

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：80353879

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：一般に、林内雨の水安定同位体比は林外雨のそれよりも大きくなる。この性質を利用して降雨に伴う森林からの蒸発が主に樹冠表面から起きているのか、雨滴飛沫の蒸発で起きているのかを明らかにすることを目指した。

しかし、スギ林における測定では林外雨の水安定同位体比が林内雨のそれよりも大きくなり、本研究の前提が成り立たなかった。同様の結果は海外の複数の研究で得られているが、正しい解釈がなされていない。本研究ではこの現象が理論的にも起こりうることを明らかにし、正しい解釈を与えることに成功した。当初の目的は達せられなかったが、森林における水安定同位体を用いた研究に新たな解釈を与える結果である。

研究成果の概要(英文)：Evaporation from forest canopy at the time of rainfall consists of surface evaporation and splash droplet evaporation. Generally, the ratio of stable isotope of water in net rainfall is larger than that in gross rainfall in a forest stand. The objective of this study is to clarify which evaporation is dominant using stable isotope of water.

The result obtained at a cedar stand showed that the ratio of stable isotope of water in gross rainfall is larger than that in net rainfall, and it meant the premise of this study is wrong. The same results were presented abroad; however, their understanding was not correct. We proved that the phenomenon can occur theoretically and succeeded to understand it. Though the initial objective was not achieved, the finding casts a new light on the subject: forest hydrology using stable isotope of water.

研究分野：森林水文学

キーワード：樹冠遮断 水安定同位体 飛沫蒸発

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 樹冠遮断による蒸発の謎

樹冠遮断による蒸発は(以下、樹冠遮断と呼ぶ)、林外雨と林内雨の差から求めることができる。樹冠遮断は世界的には降雨の9%~48%(Hörmann et al., 1996)、わが国では約20%を占めている(服部, 1992)。樹冠遮断は(A)降雨中の濡れた樹冠からの蒸発と、(B)降雨後に樹体に付着した雨水が蒸発・乾燥する二つのプロセスからなる。世界各地における測定から、(A)による蒸発が(B)よりも大きいことが知られている。さらに(A)のプロセスでは、降雨強度(1時間雨量)に比例して樹冠遮断が生じていることが測定で示されている。前述のようにわが国の樹冠遮断は降雨の約20%であり、58mm h<sup>-1</sup>の降雨に対して13mm h<sup>-1</sup>の樹冠遮断が測定された例もある(Hashino et al., 2010)。現在の気象学的知見では降雨強度は蒸発とは無関係であり、かつ(A)の蒸発が大きな値を示すことも説明できず、これらは謎とされている。

### (2) 飛沫蒸発説

降雨強度が増加すると、平均雨滴粒径と単位体積中の雨滴数が増加するので(Marshall-Palmer分布)、降雨の持つ運動エネルギーは増加する。雨滴の飛沫が蒸発すると仮定すると、降雨強度の増加によって雨滴が樹冠に衝突した際に生じる飛沫の量が増加し、樹冠遮断も増加すると考えられる。Murakami (2006)は樹冠表面からの蒸発の他に、このような飛沫の蒸発によって樹冠遮断が生じ得ることを雲物理学の手法を用いた計算で示した。すなわち直径50μmの小水滴は湿度95%の条件下でも約2m落下する間に(落下しなくても約1分後に)蒸発して消滅する。また直径2μm(0.2μm)の小水滴に対する飽和蒸気圧は平水面を100%としたとき100.12%(101.2%)となり(ケルビン効果)、ミクロンサイズの小水滴は湿度100%の条件下でも蒸発して消滅する。Dunkerley (2009)は飛沫蒸発説の妥当性を評価し、大気・植生の水・熱交換プロセスへ取り込むためのパラメーター化を進めるべきであると提言している。Saito et al. (2013)も濡れた樹冠表面からの蒸発だけではなく、飛沫を考慮しなくては樹冠遮断の説明が付かないとしている。

## 2. 研究の目的

本研究は林外雨と林内雨の水安定同位体比(δD、及びδ<sup>18</sup>O、以下、同位体比と呼ぶ)を解析することにより、飛沫蒸発説を証明することを目的とする。図1(a)は樹冠表面(概念的に一枚の葉で示した)からの蒸発のみで樹冠遮断が生じる場合で、その量は既存の理論で推定できる。この場合、雨水が樹冠表面を流下する過程で蒸発が起き、滴下雨の同位体比は雨滴より大きくなる(濃い色ほど同位体比が大きい水を示す)。図1(b)は樹冠表面

からの蒸発はなく、飛沫蒸発のみで樹冠遮断が生じる場合である。この場合、滴下雨の同位体比は雨滴と同じになる(どちらの色も同じ)。実際に降雨中において図1(a)の傾向を示す論文が存在する(Ikawa et al., 2011)。しかし、Ikawa et al. (2011)は飛沫蒸発についての考察はまったく行っていない。Ikawa et al. (2011)の研究を発展させることによって、飛沫蒸発説の証明を試みるのが本研究の目的である。

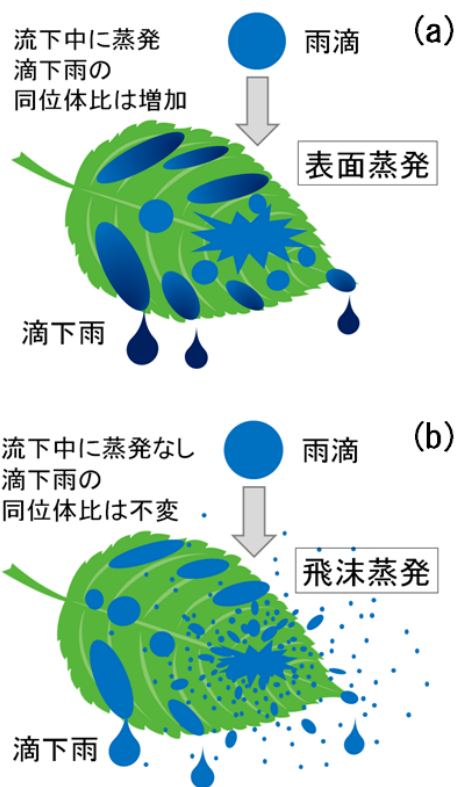


図1 (a)表面蒸発、(b)飛沫蒸発

## 3. 研究の方法

対象としたのは樹高1.65mのプラスチック製クリスマスツリー(Murakami and Toba, 2013)および37年生スギ林(樹高16.8m)である。林外雨の同位体比は時間変化が大きく、一降雨毎の採水による分析・解析では時間分解能が不十分である(Kubota and Tsuboyama, 2003; Ikawa et al. 2011; Kato et al. 2013)。このため本研究では、林外雨と林内雨(スギ林では林外雨、樹冠通過雨、樹幹流)を1時間の高時間分解能で採水し、分析・解析した。クリスマスツリーでは採水は手作業で行った。スギ林では雨水ディストリビューター3台(図2、クライメットエンジニアリング、PD-CLE)を用いて自動で採水を行った。雨水試料の分析にはPicarro L2140-iを用いた。

採水と平行してクリスマスツリーでは林外雨と林内雨を、スギ林では林外雨、樹冠通過雨、樹幹流を、それぞれ10分毎に測定した。これらのデータをタンクモデルと組み合

わせて解析し、表面蒸発と飛沫蒸発の割合を算出することを試みた。

### 雨水ディストリビューター 林外雨



### 雨水ディストリビューター 林内雨



図2 雨水ディストリビューターの設置状況

#### 4. 研究成果

クリスマスツリーでの測定で得られた同位体比と林内外の雨量データをタンクモデル(吉田ら, 1995)と組み合わせ、樹冠遮断に占める表面蒸発と飛沫蒸発の割合を推定した。その結果、当初は両者がほぼ同割合であると推定された。しかし、スギ林でのデータを整理したところ、林外雨の同位体比  $\delta^{18}O$  と  $\delta D$  (図3の  $d_{018\_P}$  と  $d_{D\_P}$ ) が樹冠通過雨 ( $d_{018\_T}$  と  $d_{D\_T}$ ) 及び樹幹流 ( $d_{018\_S}$  と  $d_{D\_S}$ ) よりも大きな値を示す場合があることが分かった(図3の赤矢印以降の時間帯)。これは林内雨の同位体比が林外雨よりも大きくなるとの前提(図1)を覆す事実であり、当初想定していた方法で飛沫蒸発を推定することができないことが分かった。Green et al. (2015)は林外雨の同位体比が林内雨よりも大きくなる観測結果を示し、これは林内でかなりの量の凝結が生じているためと推測している。しかし、熱収支的にはそのような凝結が生じているとは考えにくい。

水面から蒸発する水蒸気中の水安定同位体比を算定する Craig-Gordon 式を用い、様々な条件で試算を行ったところ、湿度が飽和に近い条件では林外雨の水安定同位体比が林内雨よりも大きくなる場合もあることがわかった。これは水蒸気と水の水安定同位

体が平衡になることに起因する。Green et al. (2015)はこれに気付いておらず、世界レベルでこの事実が見逃されている。当初、林内雨の水安定同位体比は必ず林外雨よりも大きくなると考えて本課題を提案・実施してきた。しかし、理論的(Craig-Gordon式)にも測定でも、例外があることが明らかとなった。この結果は、今後の森林における水安定同位体を用いた研究に大きな影響を及ぼすこととなり、既存の研究成果の解釈も再検討を要することとなる。

2016年10月8日 林外雨  $P_G$  36.5mm  
樹冠遮断 / 12.6mm //  $P_G = 34.6\%$

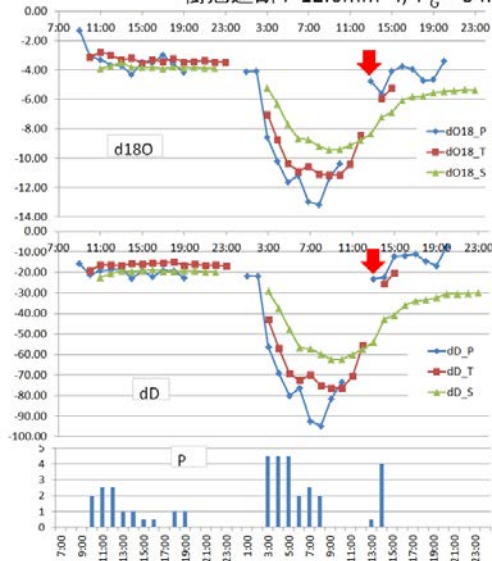


図3 林外雨、樹冠通過雨、樹幹流の同位体比

#### <引用文献>

- ① Dunkerley, D. L. Evaporation of impact water droplets in interception processes: Historical precedence of the hypothesis and a brief literature overview. *Journal of Hydrology* Volume 376, 2009, 599-604.
- ② Green, M., Lamsen, B., Campbell, J., McGuire, K., Kelsey, E. Stable water isotopes suggest sub-canopy water recycling in a northern forested catchment. *Hydrological Processes*, Volume 29, 2015, 5193-5202.
- ③ Hashino, M., Yao, H., Tamura, T. Micro-droplet flux in forest and its contribution to interception loss of rainfall - theoretical study and field experiment. *Journal of Water Resources and Protection*. Volume 2, 2010, 872-879.
- ④ Ikawa, R., Yamamoto, T., Shimada, J., Shimizu, T. Temporal variations of isotopic compositions in gross rainfall, throughfall, and stemflow

under a Japanese cedar forest during a typhoon event. Hydrological Research Letters. Volume 5, 2011, 32-36.

- ⑤ Kato, H., Onda, Y., Nanko, K., Gomi, T., Yamanaka, T., Kawaguchi, S. Effect of canopy interception on spatial variability and isotopic composition of throughfall in Japanese cypress plantations. Journal of Hydrology. Volume 504, 2013, 1-11.
- ⑥ Kubota, T., Tsuboyama, Y. Intra-and inter-storm oxygen-18 and deuterium variations of rain, throughfall, and stemflow, and two-component hydrograph separation in a small forested catchment in Japan. Journal of Forest Research. Volume 8, 2003, 179-190.
- ⑦ 服部重昭. III. 3(2) 森林蒸発散の構成成分. 塚本良則編著、森林水文学、文永堂出版、東京. 1992, 78-95.
- ⑧ Hörman, G., Branding, A., Clemen, T., Herbst, M. and Hinrichs, A. Calculation and simulation of wind controlled canopy interception of beech forest in Northern Germany. Agricultural and Forest Meteorology. Volume 79, 1996, 131-148.
- ⑨ Murakami, S. A proposal for a new forest canopy interception mechanism: Splash droplet evaporation. Journal of Hydrology Volume 319, 2006, 72-82.
- ⑩ Murakami, S., Toba, T. Experimental study on canopy interception using artificial Christmas trees to evaluate evaporation during rainfall and the effects of tree height and thinning. Hydrological Research Letters. Volume 7, 2013, 91-96.
- ⑪ Saito, T., Matsuda, H., Komatsu, M., Xiang, Y., Takahashi, A., Shinohara, Y., Otsuki, K. Forest canopy interception loss exceeds wet canopy evaporation in Japanese cypress (Hinoki) and Japanese cedar (Sugi) plantations. Journal of Hydrology. Volume 507, 2013, 287-299.
- ⑫ 吉田弘、端野道夫、村岡浩爾(1995) 樹幹流データを利用した降雨遮断タンクモデルによる森林蒸発量の推定法. 水文・水資源学会誌 6巻、1995、19-30.

#### 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)

[学会発表] (計 4件)

- ① Murakami, S. The role of vegetation as feeder of precipitation on a continental scale, JpGU-AGU Joint

Meeting 2017. 2017, AOS13-03. <https://confit.atlas.jp/guide/event/jpuguagu2017/subject/AOS13-03/date?crpytoId=>

- ② Murakami, S. Canopy interception during rainfall, storm break time and after cessation of rainfall: experimental study using artificial Christmas trees, Geophysical Research Abstracts Volume 19, 2017, EGU2017-5920-2. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2017/EGU2017-5920-2.pdf>
- ③ Murakami S., Hattori, S., Uemura, R. A comparison between wet canopy evaporation estimated by stable isotope ratios of water and canopy interception measured by water balance, Geophysical Research Abstracts Volume 19, 2017, EGU2017-10933-1. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2017/EGU2017-10933-1.pdf>
- ④ Murakami, S. Evaporation from forest during rainfall: a basic principle of moisture transport from the ocean to inland continent. Japan Geoscience Union Meeting 2016, 2016, ACG08-09. [http://www2.jpgu.org/meeting/2016/PDF2016/A-CG08\\_all\\_e.pdf](http://www2.jpgu.org/meeting/2016/PDF2016/A-CG08_all_e.pdf)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

村上 茂樹 (MURAKAMI Shigeki)  
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： 8 0 3 5 3 8 7 9

##### (2) 研究分担者

服部 祥平 (HATTORI Shohei)  
東京工業大学・物質理工学院・助教  
研究者番号： 7 0 7 0 0 1 5 2

登尾 浩助 (NOBORIO Kosuke)  
明治大学・農学部・専任教授  
研究者番号： 6 0 3 1 1 5 4 4  
(平成 27 年 7 月 22 日削除)

##### (3) 連携研究者

南光 一樹 (NANKO Kazuki)  
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： 4 0 5 8 8 9 5 1

伊藤 優子 (ITOH Yuko)  
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： 6 0 5 5 3 5 8 8

登尾 浩助 (NOBORIO Kosuke)

明治大学・農学部・専任教授

研究者番号： 6 0 3 1 1 5 4 4