

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成30年6月7日現在

機関番号：82105

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05626

研究課題名(和文) 雨滴の多点観測を活用した樹木の濡れ乾きの3次元物理シミュレーション

研究課題名(英文) 3D physical simulation on tree wetting and drying processes through multipoint raindrop measurements

研究代表者

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：40588951

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,900,000円

研究成果の概要(和文)：樹木が濡れて樹冠通過雨を生成するプロセスの解明が進んだ。雨滴データを活用した樹冠通過雨の3成分(直達、滴下、飛沫)を分離する手法を確立した。この手法を用いて、樹冠通過雨の生成における樹種、葉の有無、降雨強度、降雨の経過時間の影響を抽出した。更に枝や葉の表面の撥水性測定を通して、枝や葉の表面での雨水の付着及び移動の物理特性を明らかにした。これらを総合的に整理し、枝と葉とで植物表面での雨水の滑落・滴下の物理現象の起き方が異なることを明らかにし、針葉樹と広葉樹での樹木の濡れ方と樹冠通過雨の生成プロセスの違いを解明した。

研究成果の概要(英文)：Throughfall drop generation process was clarified. A technique was established to divide throughfall into three drop components, which were free throughfall, splash throughfall, and canopy drip. Through the technique, the influence of tree species, presence and absence of leaves, rainfall intensity, and elapsed time from the onset of rainfall was analyzed for throughfall drop generation process. Rainwater physics of adhesion and transfer on the foliage was clarified based on the measurement of hydrophobicity of the foliage surface. Above all, it is elucidated that the occurrence of adhesion, sliding, and detachment of rainwater from the foliage surface was different between leafy and woody surfaces.

研究分野：森林水文学

キーワード：樹冠遮断 雨滴 林内雨 樹冠通過雨 濡れ 撥水性 樹幹流 枝

1. 研究開始当初の背景

樹冠は雨水を再分配する場である。森林に降った雨は、樹冠により樹冠通過雨・樹幹流・遮断蒸発の3要素に分配される。樹冠遮断による蒸発により降水量の10-50%がそのまま大気に戻される。濡れた樹冠から生み出される林内雨や樹幹流は、地表へ到達する雨水の量と水質について時空間分布を不均一にし、林内の生物動態や土壌水分動態をばらつかせる。

水循環に対する森林や樹木の影響を評価すべく、雨水再分配プロセスについて数多くの事例研究がある。遮断蒸発の定量化を主な目的として、世界中で観測地に依存した結果が得られている。それらは林外雨・林内雨・樹幹流の測定に基づいた経験的な事例研究の集合知となっており、いまなお雨水再分配プロセスを決定づける統一的な要因は特定されず不明瞭なままである。地域的な水収支さえわかれば良いというニーズもそれを助長している。そのため雨水再分配プロセスについて、樹種間比較や地域間比較が十分に行えない、森林管理や気候変動に伴う将来予測を論理的に説明できない、という課題がある。

雨水再分配プロセスについて細かく捉え直すと「枝葉への雨水付着」「付着雨水の蒸発」「付着雨水の枝葉間の移動(側方移動と垂直落下)」の3つの物理現象の組み合わせにはほかならない。これらは物理的に計算しうる。各物理現象に影響を与える樹木要因・気象要因を数値演算とモニタリングから特定できれば、雨水再分配プロセスについて物理的にシミュレートできると着想した。

研究代表者は林内雨滴の粒径と速度の測定を可能にするレーザー雨滴計を開発し実用化した(Nanko *et al.* 2006)。レーザー雨滴計は非破壊的に通過雨量を測定できる。また研究代表者のこれまでの研究実績に基づき、林内雨滴は大きさや速さという一次的な情報だけでなく、樹冠内の雨水挙動の情報を二次的に含む事に気づいた。そこで雨滴測定を樹冠内で高密度かつ3次元に行うことができれば、雨水の再分配プロセスと枝葉における水挙動現象を明らかにすることができるかと着想した。

2. 研究の目的

まず、異なる樹種の樹冠内で高密度に雨滴を経時的に観測し、雨水再分配に対する樹種・葉の有無、降雨強度の違いを明らかにする。降雨再分配プロセスは多様で複雑な要因の影響を受けるため、野外観測のみでは解明が難しい。そこで、植栽樹木と人工降雨により林内雨を人工的に再現する実験を行い、降雨強度、樹種、葉の有無が樹冠の降雨再分配プロセスに与える影響を調べた。

そして、試験対象木をPC上で3次元に再現し、枝葉のモジュールごとに雨水の付着・蒸発・移動の物理演算を行い、その積み重ねから樹木全体の濡れ・乾きの様子を再現する。

枝葉における水挙動を規定する気象・樹木要素の感度分析を通して、雨水再分配プロセスを決定づける要因を特定する。

3. 研究の方法

(1) 枝葉の濡れやすさを調べるために、13樹種の枝葉を採取し、自動接触角計を用いて葉の表面、葉の裏面、枝表面の撥水性を調べた。(2) 樹木が濡れて林内雨を生み出す様子を詳細に調べるために、人工降雨による林内雨再現実験を行った。防災科学技術研究所の大型降雨施設内に、樹高3~6mのスギ(*Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L.f.) D. Don)、ヒノキ(*Chamaecyparis obtusa* Sieb. & Zucc.)、シラカンバ(*Betula platyphylla* Sukaczew)、ケヤキ(*Zelkova serrata* (Thunb.) Makino)を各2本移植した。20台のレーザー雨滴計により樹冠の内・下・外で人工降雨と樹冠通過雨の雨滴を測定した。21台の転倒ます雨量計により樹冠下・外の雨量を測定した。各樹木の樹幹流量を転倒ます雨量計により測定した。6種類の降雨強度を設定し(15、20、30、40、50、100 mm h⁻¹)、日ごとに異なる降雨強度の雨を90分ないし120分間与えた。実験途中にすべての葉をむしり取り、幹と枝だけの状態で実験を繰り返した。(3) PC上に樹木を再現し、仮想的に雨を与えて林内雨が生成される様子をシミュレーションした。樹木の3Dデータを得るために、葉むしり前後の樹形をレーザーキャナにより取得した。

4. 研究成果

本課題は研究協力者である Delphis F. Levia 博士(米国デラウェア大学教授)との国際共同研究として主に行った。なお、日本学術振興会外国人招へい事業により Levia 博士を2016年に招へいした(No. S16088)。

(1) 林内雨滴研究の世界初の総説

林内雨滴研究がなぜ必要か、林外雨と比べてどのような特徴を持つのか、どのように測定すればよいのかを整理した。林内雨滴の大きさを決める要因を植物表面、樹冠構造、気象要素の3つの観点からこれまでの研究の到達点としてまとめ直し、今後なすべき研究課題を示した(Levia *et al.* 2017)。

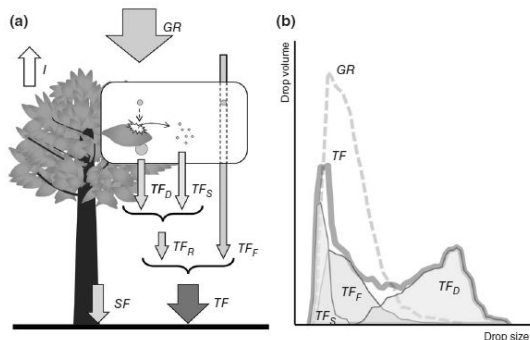
(2) 枝葉表面の撥水性

全体的な傾向として葉の裏、葉の表、枝の順に、撥水性が低く濡れやすかった。過去の研究代表者の成果(Nanko *et al.* 2013)での推測の通り、大きな滴下雨滴を生み出す樹種において撥水性が低かった。モウソウチク(*Phyllostachys heterocycla* f. *pubescens*)とシラカシ(*Quercus myrsinaefolia* Blume)の葉の裏の接触角は120°よりも大きく、全面的に濡れることがなかった。一方で枝表面の接触角は樹種関数が少なく平均で53°であり、葉に比べて濡れやすかった。

(3) 樹冠通過雨の成分分離

雨滴データを活用して樹冠通過雨を3成分

に分離する方法を確立した。3成分は直達 TF_F (枝葉に触れずにそのまま落下してくる雨滴)、飛沫 TF_S (枝葉で弾けて小粒径化する雨滴)、滴下 TF_D (枝葉で集合して滴下する大粒径化した雨滴) である。林外雨と樹冠通過雨の雨滴を同時に観測し、雨滴粒径 0.1mm ごとの雨滴の個数や体積を用いて分離した。これによりどの成分がいつ発生したのかが把握できるようになった。



(図は Levia *et al.* (2017)より)

(4) 樹冠通過雨の3成分の樹種間差異

室内実験で得た雨滴データに報告者がこれまでに得てきた雨滴データを合わせて、常緑針葉樹、葉のある広葉樹、葉のない広葉樹での樹冠通過雨の3成分の存在比の違いを明らかにした。葉のある樹木は滴下が主成分であり、葉のない樹木は直達・飛沫が主成分であった。

常緑針葉樹に比べて葉のある広葉樹の方が、滴下の成分比が大きくなり、滴下雨滴の粒径が大きかった。これは広葉樹の方が、滴下点となる葉先の数が少ないために、濡れた表面からの大きな水滴となって滴下する量が多いことを意味している。

(5) 樹冠通過雨の生成過程の樹種間差異

常緑針葉樹、葉のある広葉樹、葉のない広葉樹で降雨開始からの樹冠通過雨の生成過程が異なった。どの樹木でも降雨開始直後は直達と飛沫だけであり、樹冠が濡れた後で滴下が発生した。

常緑針葉樹では降雨継続時間が増えていくに従い滴下の成分比が大きくなり、樹冠が濡れきると安定した。他の樹木に比べて安定に要する雨量が大きかった。これは、常緑針葉樹は葉先が多数存在するため、樹冠が濡れるほどに滴下の生成場所の個数が増え、滴下が主成分となっていくことが要因である。

葉のない広葉樹では、最初は滴下が発生するものの、樹冠が濡れるに従い滴下が減少ないしは無くなる場所が観測された。これは、枝の濡れの進行により枝表面を薄い水膜が覆うようになり、表面粗度や撥水性が減少して滴下するよりも枝の下方に向かって(いずれは幹に向かって)流れ落ちる成分に変化したためである。

葉のある広葉樹では、樹冠が濡れるに従い最初は滴下が増えるが、途中で減少してその後安定した。これは、常緑針葉樹に比べて葉

先が少なく枝からの滴下の発生数が多いため、枝表面の濡れに従い枝からの滴下が減少したことが要因である。

以上により、樹木全体の濡れの進行により樹冠内の雨水分配プロセスが変動することを明らかにした。

(6) 樹幹流量を決める要因

樹幹流の集水率 (funneling ratio) の大小を決める要因が葉の有無により変わることを明らかにした。葉の有無にかかわらず樹木サイズ (樹高、幹の胸高直径、樹木全体のバイオマス量など) が大きいほど樹幹流の集水率が高いことが基本であったが、葉がある樹木では幹枝バイオマスに対する葉のバイオマスの比率が重要であり、葉が無い樹木では幹から伸びる枝の角度と数が重要であった。

(7) 樹冠通過雨生成の物理演算

森林内で樹冠通過雨が生成される様子をコンピュータグラフィクスでリアルタイムに再現するアルゴリズムを開発した。すべての雨滴の動きを物理的に詳細に計算するのは時間がかかりすぎるため、実際に測定した雨滴データを活用し、林内で雨滴が生み出される場所、頻度、雨滴の大きさを簡易に推定できるようにし、森林内の雨が降る風景の再現にかかる時間を大幅に短縮した (Weber *et al.* 2016)。

(8) 転倒ます雨量計の補正

樹冠遮断量の正確な評価のために転倒ます雨量計の動的補正が必要であり、よく使われる3つの転倒ます雨量計について、その補正の重要性と補正式を示した。樹冠遮断評価において2種類以上の転倒ます雨量計を同時に使用しないこと、Davis社のRain Collector IIの補正が特に必要なことを明らかにした (Iida *et al.* 2018)。

(9) 今後の展望

本課題を基盤として2017年度に国際共同研究加速基金 (国際共同研究強化) の研究課題「雨は樹木の垂直構造をどう旅して地面に達するのか? 化学分析を活用した物理モデル開発」が採択された。本課題で叶わなかった、樹木が乾いていく様子の3次元物理シミュレーションを継続して行う。今後も前述のLevia博士との国際共同研究を更に密なものとし成果創出を図る。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

Iida, S., Levia, D.F., Nanko, K., Sun, X, Shimizu, T., Tamai, K. Shinohara, Y. (2018) Correction of canopy interception loss measurements in temperate forests: a comparison of necessary adjustments among three different rain gauges based on a dynamic calibration procedure. *Journal of Hydrometeorology*, Vol.19, pp.547-553, 査読有

DOI:10.1175/JHM-D-17-0124.1

Levia, D.F., Hudson, S.A., Llorens, P., Nanko, K. (2017) Throughfall drop size distributions: a review and prospectus for future research. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, Vol.4, e1225, 査読有 DOI:10.1002/wat2.1225

Weber, Y., Jolivet, V., Gilet, G., Nanko, K., Ghazanfarpour, D. (2016) A phenomenological model for throughfall rendering in real-time. Computer Graphics Forum, Vol.35, pp.13-23, 査読有 DOI:10.1111/cgf.12945

〔学会発表〕(計7件)

Nanko, K., Levia, D.F., Iida, S., Sun, X., Shinohara, Y., Sakai, N. (2017) Temporal sequencing of throughfall drop generation as revealed by use of a large-scale rainfall simulator, 2017 AGU Fall Meeting

Levia, D.F., Iida, S., Nanko, K., Sun, X., Shinohara, Y., Sakai, N. (2017) Use of a large-scale rainfall simulator reveals novel insights into stemflow generation, 2017 AGU Fall Meeting

飯田真一、Delphis F. Levia、南光一樹、Xinchao Sun、篠原慶規、酒井直樹 (2017) 降雨強度と樹種の違いが樹幹流量に及ぼす影響 人工降雨実験に基づいた検討 . 第128回日本森林学会大会

Levia, D.F., Hudson, S.A., Llorens, P., Nanko, K. (2016) Disdrometers: a useful tool to measure throughfall drop size distributions. Irish National Hydrology Conference 2016

Nanko, K., Levia D.F. (2016) Relationship between foliage wettability and throughfall drop size. Plant Trait Workshop, Interdisciplinary German-Japanese Symposium, iJaDe2016

南光一樹 (2016) Physical interpretation of the difference in drop size distributions of leaf drips among tree species. 日本森林学会奨励賞受賞者講演

南光一樹、Sean A. HUDSON、Delphis F. LEVIA (2015) 落葉広葉樹の着葉期と落葉期における林内雨滴形成過程の差異. 水文・水資源学会 2015年度研究発表会

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

<雑誌の表紙写真>

・Levia, D.F., Hudson, S.A., Llorens, P., Nanko, K. (2017) Cover Image, Volume 4, Issue 4. Wiley Interdisciplinary Reviews:

Water, Vol.4, e1233

DOI:10.1002/wat2.1233

<Advanced Science News>

・"Throughfall Drop Size Distributions: A Review and Prospectus for Future Research" [http://www.advancedsciencenews.com/through-](http://www.advancedsciencenews.com/through-fall-drop-size-distributions-review-prospectus-future-research/)

[fall-drop-size-distributions-review-prospectus-future-research/](http://www.ffpri.affrc.go.jp/research/saizensen/2017/20170629-03.html)

<森林総合研究所ウェブサイト>

・森林における水・物質循環を駆動する林内雨滴についての解説

<http://www.ffpri.affrc.go.jp/research/saizensen/2017/20170629-03.html>

・森のなかに降る雨の風景をコンピュータグラフィックスで再現する

<http://www.ffpri.affrc.go.jp/research/saizensen/2016/20160817-02.html>

・森を抜ける雨滴の大きさは季節とともに変化する

<http://www.ffpri.affrc.go.jp/research/saizensen/2015/20150710-01.html>

・葉や枝に集まり大きくなる雨粒

<http://www.ffpri.affrc.go.jp/snap/2016/5-ame.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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：40588951