

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H03088

研究課題名（和文）荒廃針葉樹人工林はどのような過程で環境に悪影響を及ぼしどのように改善できるのか？

研究課題名（英文）How devastated coniferous plantations negatively affect the environment and how this problem can be remedied?

研究代表者

大槻 恭一（OTSUKI, KYOICHI）

九州大学・農学研究院・教授

研究者番号：80183763

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、非管理針葉樹人工林が環境に及ぼす影響と、その対処法について雨水配分（樹冠通過雨、樹幹流、遮断損失）を中心に検討した。その結果、立木密度が雨水配分に最も影響を与える林分構造指標である、立木密度の増加に伴って、樹冠通過雨率は概ね一定の割合で減少する、樹幹流率と遮断損失率は2500本/ha程度まではほぼ一定の割合で増加するが、立木密度が更に増加すると、樹幹流率はさらに増加し、遮断損失率は減少に転じる、樹冠通過雨率には枯れ枝の状況が影響を及ぼし、林分樹幹集水率は胸高直径に対してべき関数的に減少すること等を見出し、枝打ち・間伐等の保育作業による雨水配分の制御効果を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、豪雨の増加に伴って大規模森林災害が多発し、災害に強い森づくりの重要性が高まっている。森林では、過密になるほど遮断損失が増加し、林内雨（樹冠通過雨と樹幹流の和）が減少するため、豪雨を軽減する効果がある。しかし、樹幹流率が増加して局所的な雨水集中が増加し、樹冠通過雨率は減少するものの、滴下雨成分が増加するため林床により強い雨滴衝撃を与える可能性が高い。本研究は、針葉樹人工林の林分構造と雨水配分の関係を観測し、管理放棄された荒廃人工林とその管理が雨水配分にどのような影響を及ぼすかを明らかにし、枝打ち・間伐等の保育作業によって山地災害軽減の可能性を示唆した点で学術的・社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：This study investigated the environmental influence of unmanaged coniferous plantations and the way of coping with it mainly in the context of rainfall partitioning (RP) into throughfall (TF), stemflow (SF), and interception loss (IL). The results showed that 1) stand density (SD) was the dominant index of stand structure influencing RP, 2) TF ratio almost linearly decreased with increasing SD, 3) SF and IL ratios increased with increasing SD up to about 2500 trees/ha, but in the range more than that, 4) SF ratio increased at a higher rate, but 5) IL ratio took a downward turn, 6) TF ratio was influenced by the situation of dead branches, and 7) stand SF funneling ratio decreased with increasing diameter at breast height (DBH), which implied that forest management such as thinning should control RP of coniferous plantations.

研究分野：森林水文学

キーワード：人工林 雨水配分 樹幹流 樹冠通過雨 環境

1. 研究開始当初の背景

近年、豪雨の増加に伴って大規模森林災害が多発し、森林管理は多面的機能の発揮促進から、災害に強い森づくりへとパラダイムシフトする必要性が生じてきた。

森林では、雨水は樹冠通過雨および樹幹流という形で林床に到達するが(図1)、両要素が与える林床への水食インパクトは林分構造によって変化する。高密度で植栽された針葉樹人工林において、枝打ち・間伐等の保育作業が適切に施されず樹冠が閉鎖された場合、遮断損失が増加し、林内雨(樹冠通過雨と樹幹流の和)が減少するため、水資源貯留機能は低下するが、洪水緩和機能には有効に作用する。しかし、樹幹流率が増加し、樹幹周辺への局所的な雨水の集中が増加する可能性がある。さらに、雨滴径の大きい滴下雨成分が増加し、林床への強い雨滴衝撃が増加する可能性が高い。間伐遅れの過密人工林では、林床に到達する日射が極めて少なく、下層植生がほとんど育たない場合が多い。特にヒノキ林の場合、落葉が容易に分解されるため、過密なヒノキ人工林では林床が裸地状態を呈する場合が多い。このように、非管理の過密人工林において林床の下層植生が少ない場合、樹幹流や雨滴衝撃が林床の裸地土壌面に直接作用するため、浸食や洪水が助長される可能性が高い。

上述のような林分構造の変化に伴う雨水配分の変化は、定性的には知られており、問題視されている。しかし、保育作業が実施されていない過密な荒廃針葉樹人工林における雨水配分の実測例は極めて少なく、実態は明らかにされていない。近年、『河川管理者が主体となって行われる水対策に加え、氾濫域も含めて一つの流域として捉え、その河川流域全体のあらゆる関係者が協力し、流域全体で水害を軽減させる治水対策「流域治水」への転換を進めることが必要である』ことが認識されるようになり、その中で森林の洪水緩和機能も考慮すべき重要な事項の一つとなっている。したがって、「荒廃針葉樹人工林はどのような過程で環境に悪影響を及ぼし、どのように改善できるのか?」を明らかにすることが喫緊の課題となっていた。

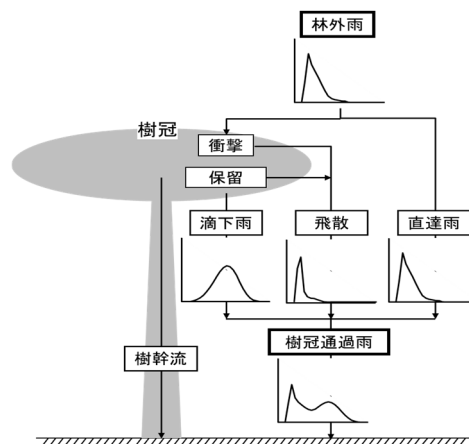


図1 森林の雨水配分模式図 (Nanko,2006 を基に作成)

2. 研究の目的

本研究は、針葉樹人工林の林分構造と水循環素過程の関係を明らかにし、管理放棄された荒廃針葉樹人工林がどのような形で環境に悪影響を及ぼすのかを明らかにするとともに、得られた観測結果から山地災害を軽減する針葉樹人工林の森林管理法を提案することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、研究期間中に、主に針葉樹人工林の林分構造と雨水配分の関係と、樹冠通過雨滴が林床に与える衝撃に関する研究に関して成果を挙げたので、これらの研究で実施した研究方法を以下に説明する。

(1) 雨水配分データ解析

九州大学福岡演習林高田試験地の高密度非管理ヒノキ人工林分2プロット(図2)で2017年4~10月(生育期間)に観測した貯留式雨水配分データと、文献調査から得た従来の雨水配分・林分構造を比較検討し、高密度非管理人工林の雨水配分の特徴(Jeong et al., 2019)、樹幹流量のモデル化(Jeong et al., 2020)、枯死木の存在が樹幹流量推定に及ぼす影響(Jeong and Otsuki, 2021)、枯れ枝が多い林分における遮断損失推定(Jeong et al., 2022)について検討した。

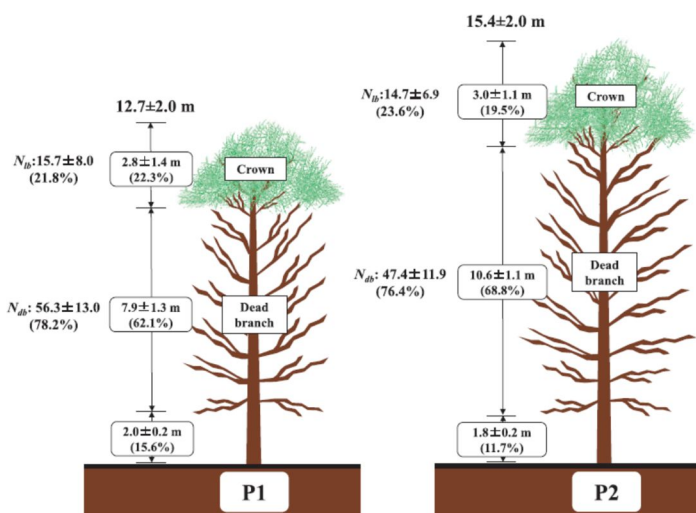


図2 高田試験地の観測2プロット(P1,P2)の概要
 ※プロットサイズは10m×10m。立木密度は2500本/ha。
 ※数値は、平均値±標準偏差。N_{lb}は生枝数、N_{db}は枯れ枝。

(2) 雨水配分観測

九州大学福岡演習林高田試験地の異なる立木密度のヒノキ人工林分4プロット(1000, 2400, 3000, 3500本/ha)において、2020年12月から転倒マス雨量計(樹冠通過雨量用0.2mm:16~20台、樹幹流量用0.5mm:5~10台)を用いて雨水配分の10分間隔測定を開始した(上谷ら、2022)。

表1 九州大学福岡演習林高田試験地の観測4プロット(T1~T4)の概要

プロット	T1	T2	T3	T4
斜面傾斜角(°)	32	30	29	20
斜面方位	E	SE	SSW	SSE
サイズ(m)	10×10	10×10	10×10	10×10
植栽年(yr)	1955	1985	1984	1984
樹齢(yr)	66	36	37	37
間伐	34%(2015年)	無	無	無
立木密度(本/ha)	1000	2400	3500	3000
	"	"	2900	2800
胸高直径(cm)	28.2±4.5	19.4±3.4	16.6±3.5	15.8±3.5
	"	"	(17.5±3.0)	(16.3±3.2)
胸高断面積(m ² /ha)	62.5	70.6	76.1	58.5
			(69.9)	(58.1)
樹高(m)	21.2±2.0	14.2±1.1	12.3±2.4	12.0±2.2
			(13.2±0.6)	(12.5±1.0)
樹冠長(m)	7.1±1.9	4.6±1.0	3.5±0.9	4.0±1.1
枯枝下高(m)	7.7±5.7	2.5±0.4	2.4±0.5	2.5±0.3
葉面積指数	2.2±0.2	3.9±0.3	3.6±0.4	3.5±0.3
観測開始年月	2021年12月	2021年12月	2020年12月	2020年12月
樹冠通過雨量観測数	16	16	20	20
樹幹流量観測数	5	8	10	10

※数値は平均値±標準偏差。()内の数値は枯死木を除く(生木)の数値。

(3) 雨滴衝撃観測

表1に示した九州大学福岡演習林高田試験地のT1~T3プロット(それぞれ、1000, 2400, 3500本/ha²)において、降雨イベントベースで、林外および林内(樹冠下および下層植生下)で降雨量(林外雨量、樹冠通過雨量)および雨滴衝撃エネルギーを観測した(李ら、2022)。降雨量は、2000ccペットボトルを用いた自作の貯留式雨量計で観測した(写真1a)。雨滴衝撃エネルギーは、豊浦標準砂を充填した100cm³スプラッシュを貯留式雨量計の約20cm横に設置して(写真1a)降雨前後の飛散した砂の乾燥質量から算定した(写真1b,c)。スプラッシュ樹冠下の観測は2021年3月に開始し、下層植生下の観測は同年5月に開始した。解析対象の降雨イベントは、樹冠下の観測結果が10降雨イベント、下層植生下も加えた観測結果は7降雨イベントである。



写真1 雨滴衝撃観測状況 (a)樹冠通過雨量・雨滴衝撃エネルギー観測装置、(b)降雨前スプラッシュカップ表面、(c)降雨後スプラッシュカップ表面

(4) 間伐が森林水文過程に及ぼす効果の文献調査

国際林業研究機関連合(IUFRO: International Union of Forest Research Organizations)の森林と水に関する特別委員会(Forest and Water Task Force)委員として、スペイン、カナダ、トルコの委員計6名と共同で、「間伐が森林水文過程に及ぼす効果の文献調査」を行った。従来の関連文献の中から、メタ解析を行うのに必要な観測データが明示されている「蒸発散」、「雨水配分」、「土壌水分」に関してはメタ解析を実施し、両過程および他の過程(流出、地下水、水質など)に関しては、文献の状況に応じてシステムチックレビューおよびナラティブレビューを行った(del Campo et al., 2022)。

4. 研究成果

(1) 立木密度と雨水配分の関係 (Jeong et al., 2019, 2020; 上谷ら, 2022)

従来の雨水配分の研究成果と高田試験地の観測結果を整理し、立木密度と雨水配分率(樹冠通過雨率, 樹幹流率, 遮断損失率)の関係を調べた。その結果(図3)立木密度 2500 本/ha 以上の非管理針葉樹人工林では、線形で減少傾向にある樹冠通過雨率が約 50%で底打ち、線形で増加傾向にある樹幹流率は増加傾向を強め、約 30%程度まで増加し、増加傾向にある遮断損失率は頭打ちあるいは減少に転じる可能性があることが示唆された。

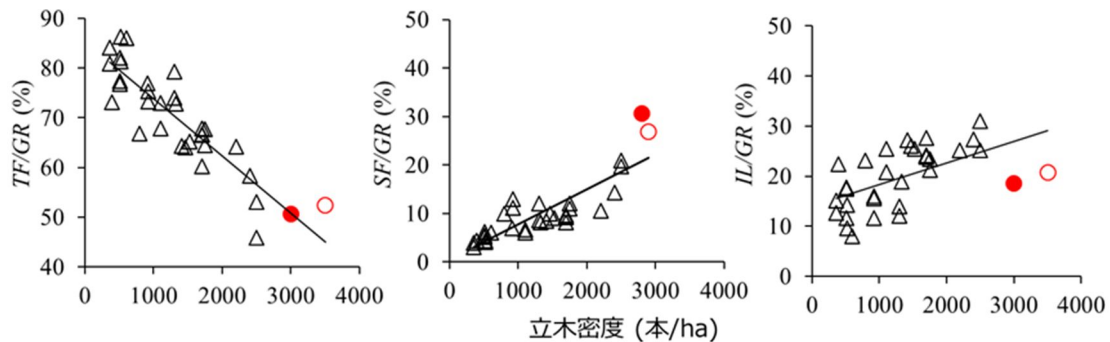


図3 立木密度と樹冠通過雨率 TF/GR 、樹幹流率 SF/GR 、遮断損失率 IL/GR の関係

(2) 枯れ枝の状況と雨水配分の関係 (Jeong et al., 2019)

非管理高密度ヒノキ人工林では、樹冠長が短く、枯れ枝が樹冠下から林床約 2m まで密に分布している。高田試験地の P1 プロットでは、樹高 12.7m に対し、樹冠長 2.8 m、枯枝下高 2.0 m で、枯れ枝本数は 56.3 本 (7.1 本/m)、P2 プロットでは、樹高 15.4 m に対し、樹冠長 3.0 m、枯枝下高 1.8 m で、枯れ枝本数は 47.4 本 (4.5 本/m) であった。両プロットの枯枝本数と樹冠通過雨率との間には正の相関(図 4a)、枯枝間隔と樹冠通過雨率の間には負の相関がみられ(図 4b)、枯枝本数が多いほど、枯枝の間隔が狭いほど、枯枝への降雨遮断が増加することが示唆された。一方、枯枝数と樹幹流率の間には相関は見られず、枯枝に遮断された雨水の樹幹流への寄与は少ないことが示唆された。

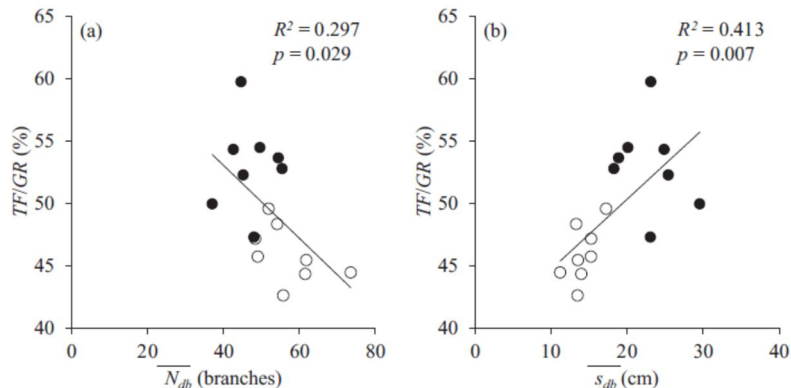


図4 枯枝数 N_{ab} および枯枝間隔 s_{ab} と樹冠通過雨率 TF/GR の関係

(3) 林分構造と樹幹流量の関係 (Jeong et al., 2020)

従来の雨水配分の研究成果と高田試験地の観測結果を整理し、立木密度と林分構造の関係、林分構造と樹幹流率の関係を調べ、多変量解析を行った結果、樹幹流率は立木密度と胸高断面積を説明変数とする重回帰式の推定精度が最も高いものの、立木密度のみを説明変数とする単回帰式で実用上十分な推定精度で樹幹流率を推定できること、ただし、両回帰式は立木密度が樹幹流量に及ぼす影響に関しては反映するものの、樹木の生長に対する樹幹流量の変化を正しく反映しないこと、林分樹幹流集水率は胸高直径に対してべき関数的に減少すること(図5)この関係を利用して構築した胸高直径と立木密度を説明変数とした樹幹流率推定モデルは前述の重回帰式よりも高い精度で、かつ樹木の生長を反映した林分構造の変化に対応する樹幹流量を推定できることを明らかにした。

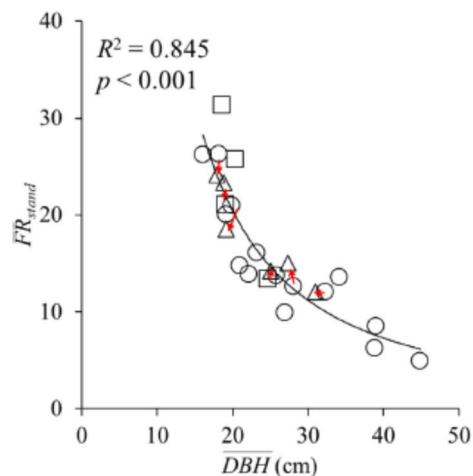


図5 平均胸高直径 DBH と林分樹幹流集水率 FR_{stand} の関係

(4) 枯死立木が樹幹流量に与える影響 (Jeong and Otsuki, 2021)

非管理高密度針葉樹人工林では、樹齢とともに自己間引きが生じ、枯死立木が散見されるようになる。枯死立木が雨水配分に与える影響に関しては、従来から問題視されつつも、定量的な研究は存在しない。そこで、高田試験地の 10m×20m プロットに存在する 50 本のヒノキの立木（生立木：45 本，枯死立木：5 本）中，11 本の生立木と 5 本の枯死立木において樹幹流量を観測し，枯死立木が林分樹幹流量の推定に及ぼす影響について検討した。その結果，枯死立木の胸高断面積は生立木の約 29%，枯死立木の樹幹流集水率は生立木の約 34% であり，枯死立木の樹幹流量は生立木の約 9.7% に過ぎないことから（図 6），林分樹幹流量の推定においては枯死立木は無視できることを明らかにした。

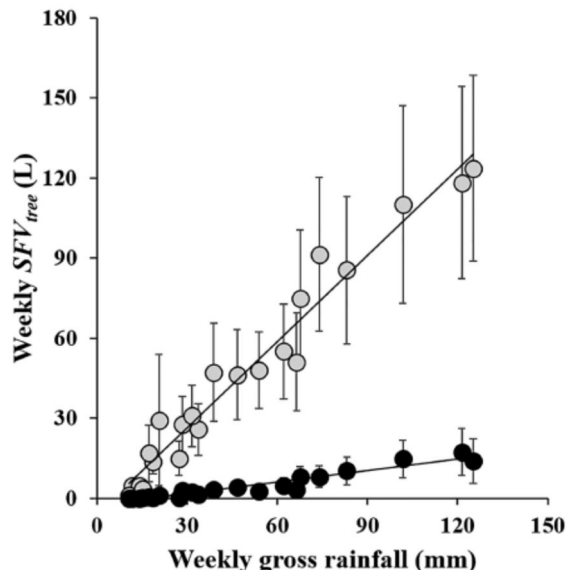


図 6 週間林外雨量と週間樹幹量の関係
※●：生木，●：枯死木

(5) 林分構造が林床における雨滴衝撃に与える影響 (李ら, 2022)

立木密度の異なる高田試験地の 3 プロット（T1：1000 本/ha，T2：2400 本/ha，T3：3500 本/ha）で樹冠通過量および雨滴衝撃エネルギーを観測した。その結果，樹冠通過雨量率は，T1：約 82%，T2：約 56%，T3：約 49% で，立木密度が小さいほど樹冠通過雨量率は大きかった。林外に対する林内の雨滴衝撃エネルギーは，T1：約 4.5 倍，T2：約 3.1 倍，T3：2.9 倍で，雨量は林外より林内の方が少ないにも関わらず，雨滴衝撃エネルギーは林内の方が大きく，林内では樹冠通過雨量が多いほど雨滴衝撃エネルギーは大きかった。T1 には下層植生が存在し，下層植生下の雨量は樹冠通過雨量の約 89% であったが，下層植生下の雨滴衝撃エネルギーは樹冠下の雨滴衝撃エネルギーの約 53% で，T2・T3 の樹冠下の雨滴衝撃エネルギーより小さく，下層植生の雨滴衝撃緩和機能は高いことが明らかにされた。雨滴衝撃エネルギーとヒノキの生枝下高の間には正の線形関係がみられ（図 7），間伐によって適切な立木密度で健全に育った樹木ほど林床への雨滴衝撃エネルギーが大きくなる可能性があるが，下層植生が存在することによって，雨滴衝撃エネルギーが大幅に緩和されることが明らかにされた。

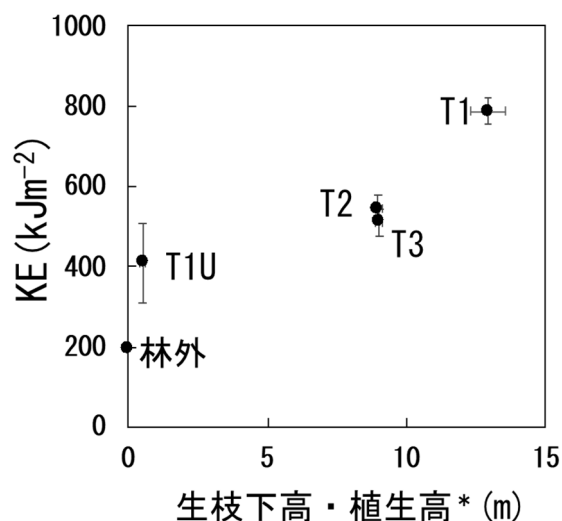


図 7 ヒノキ生枝下高（T1～T3）・下層植生高（T1U）と雨滴衝撃エネルギー KE の関係
※ここで，生枝下高と植生高は，スプラッシュカップ表面からの距離

(6) 間伐が森林の水循環に与える影響 (del Campo et al., 2022)

間伐が森林の水循環に与えるメタ解析を行った結果，間伐によって林内雨量（1.19），土壤水分量（1.14），単木水利用（1.56）は有意に増加するのに対し，樹幹流量（0.42），蒸散量（0.60）は有意に減少することを明らかにした（()内の数値は効果サイズ）。また，約 50%の本数間伐が水循環に有意な変化をもたらす閾値であることを示すとともに，間伐の効果が維持される期間は，樹冠通過雨量の場合 2.6～4.3 年，土壤水分および蒸散の場合 3.1～8.6 年であり，水循環を制御するためには定期的な間伐を継続する必要があることなどを示唆した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Farahnak Moein, Mitsuyasu Keiji, Ide Jun' ichiro, Chiwa Masaaki, Enoki Tsutomu, Jeong Seonghun, Otsuki Kyoichi, Shimizu Kuniyoshi, Kume Atsushi	4. 巻 -
2. 論文標題 Soil pH and divalent cations after clear-cutting on a Japanese cypress plantation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Forest Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/13416979.2022.2048987	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 Jeong Seonghun, Otsuki Kyoichi	4. 巻 14
2. 論文標題 Effects of tree mortality on the estimation of stemflow yield in a self thinning coniferous plantation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Ecohydrology	6. 最初と最後の頁 e2327
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/eco.2327	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 Jeong Seonghun, Otsuki Kyoichi, Shinohara Yoshinori, Inoue Akio, Ichihashi Ryuji	4. 巻 290
2. 論文標題 Stemflow estimation models for Japanese cedar and cypress plantations using common forest inventory data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Agricultural and Forest Meteorology	6. 最初と最後の頁 107997 ~ 107997
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.agrformet.2020.107997	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 Farahnak Moein, Mitsuyasu Keiji, Otsuki Kyoichi, Shimizu Kuniyoshi, Kume Atsushi	4. 巻 10
2. 論文標題 Factors Determining Soil Water Repellency in Two Coniferous Plantations on a Hillslope	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Forests	6. 最初と最後の頁 730 ~ 730
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/f10090730	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Jeong Seonghun, Otsuki Kyoichi, Farahnak Moein	4. 巻 75
2. 論文標題 Relationship between stand structures and rainfall partitioning in dense unmanaged Japanese cypress plantations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Agricultural Meteorology	6. 最初と最後の頁 92 ~ 102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2480/agrmet.D-18-00030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Jeong Seonghun, Kume Tomonori, Shinohara Yoshinori, Farahnak Moein, Otsuki Kyoichi,	4. 巻 13
2. 論文標題 Application of the reformulated Gash analytical model for rainfall interception loss to unmanaged high-density coniferous plantations laden with dead branches	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Forests	6. 最初と最後の頁 657
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/f13050657	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 del Campo Antonio. D., Otsuki Kyoichi, Serengil Yusuf, Blanco Juan. A., Yousefpour Rasoul, Wei Xiaohua	4. 巻 519
2. 論文標題 A global synthesis on the effects of thinning on hydrological processes: Implications for forest management	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Forest Ecology and Management	6. 最初と最後の頁 120324
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.foreco.2022.120324	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

[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 李昱竺・上谷梨咲・鄭聖勲・智和正明・大槻恭一
2. 発表標題 ヒノキ人工林における間伐が樹冠通過雨の雨滴衝撃エネルギーに与える影響
3. 学会等名 第133回日本森林学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上谷梨咲・李昱竺・鄭聖勳・大槻恭一
2. 発表標題 老齡高密度非管理ヒノキ人工林における雨水配分
3. 学会等名 第133回日本森林学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鄭 聖勳, 大槻 恭一, Farahnak Moein
2. 発表標題 過密非管理ヒノ構造キ人工林における林分と雨水配分に関する研究
3. 学会等名 水文・水資源学会2019年度研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 大槻 恭一（編集：恩田 裕一、五味 高志）	4. 発行年 2021年
2. 出版社 東京大学出版会	5. 総ページ数 260
3. 書名 水資源対策としての森林管理—大規模モニタリングデータからの提言—	

〔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
研究協力者	南光 一樹 (Nanko Kazuki)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	篠原 慶規 (Shinohara Yoshinori)		
研究協力者	井上 昭夫 (Inoue Akio)		
研究協力者	久米 篤 (Kume Atsushi)		
研究協力者	久米 朋宣 (Kume Tomonori)		
研究協力者	井手 淳一郎 (Ide Jun'ichiro)		

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		
中国	中国科学院水利部水度保持研究所		
スペイン	Universitat Politecnica de Valencia	Public University of Navarre	
トルコ	ciIstanbul University Cerrahpasa		
カナダ	University of British Columbia	University of Toronto	