阿蘇地域のヒノキ高齢低密度人工林における遮断率の観測

永野美穂^{1,7}・井上昭夫^{*1}・三小田憲史²・宮沢良行³・丸山篤志⁴
高木正博⁵・大槻恭一⁶

熊本県阿蘇地域の定期的に間伐が実施されているヒノキ高齢人工林2林分において、それぞれプロットを設定し（プロットA、89年生；プロットB、92年生；2013年時点）、2014年と2015年に遮断率（林外雨量に対する遮断蒸発量の割合）を観測した。これらのプロットにおける林分密度は、プロットAでは522本 ha^{-1} 、プロットBでは356本 ha^{-1} であり、日本の針葉樹人工林における遮断蒸発に関する研究ではもっとも低かった。観測された2014年と2015年における遮断率は、プロットAでは8.0、12.1%、プロットBでは11.2、13.9%であった。先行研究での結果に今回の観測結果を加えた49個のデータを用いて求めた日本の針葉樹人工林における林分密度と遮断率との関係は、直線式よりもむしろ指数式によって良く表現できることがわかった。以上の結果は、森林の管理が水資源に及ぼす影響を評価する上で有効である。

キーワード：高齢林、遮断蒸発、森林管理、水資源、林分密度

Miho Nagano,^{1,7} Akio Inoue,^{*1} Kenshi Sankoda,² Yoshiyuki Miyazawa,³ Atsushi Maruyama,⁴ Masahiro Takagi,⁵ Kyoichi Otsuki⁶ (2017) Observation of Canopy Interception Ratio in Old-aged Low-density Japanese Cypress Plantations in the Aso District, Southern Japan. J Jpn For Soc 99: 70–73 In 2014 and 2015, canopy interception ratios (the ratio of rainfall interception to gross rainfall) were observed in two plots established in old-aged Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) plantations (plot A, 89-years-old; plot B, 92-years-old; as of 2013) in the Aso district, Kumamoto Prefecture, southern Japan. These stands have been managed by regular thinning regimes. The stand densities were 522 trees ha^{-1} in plot A and 356 trees ha^{-1} in plot B, which was the lowest density among the previous studies on interception ratio of coniferous plantations in Japan. The interception ratios in 2014 and 2015 were 8.0 and 12.1% in plot A and 11.2 and 13.9% in plot B, respectively. The relationship between the stand density and the interception ratio of coniferous plantations in Japan was analyzed using the 49 data from previous studies and this study. The result demonstrated that the relationship was well expressed by an exponential function rather than a linear function. Our results will be effective when evaluating the effect of forest management on the water yield.

Key words: forest management, old plantation, rainfall interception, stand density, water yield

I. は じ め に

水資源の賦存量は、一般に降水量から蒸発散量を差し引くことで求められる。蒸発散量は森林の状態によって変化するため、森林の管理が水資源に及ぼす影響を評価する上で、林分構造（樹高、胸高直径、林分密度など）と蒸発散との関係を明らかにすることは重要である（小松 2007）。

蒸発散の主要な構成要素である遮断蒸発について、わが国では、針葉樹人工林を中心として数多くの観測が行われてきた。これらの観測例から、小松（2007）は1年以上にわたる12個の観測データを収集し、林分密度（ N ）と遮断率（ I/R 、林外雨量 R に対する遮断蒸発量 I の割合）との関係を以下のように定式化し、この関係が樹種、林冠高および降雨量の違いに影響されないことを示した。

$$I/R = 0.00498N + 12.0 \quad (r^2 = 0.43) \quad (1)$$

その後、Komatsu *et al.* (2015) は、3カ月以上（降雨量の多い5～10月を観測期間に含む）にわたる45個の観測データを収集し、小松（2007）と同様、林分密度のみの情報から遮断率を推定することを可能にする以下のような指数式を得た。

$$I/R = 0.308 \{1 - \exp(-0.000880N)\} \times 100 \quad (r^2 = 0.547) \quad (2)$$

これら二つの式を比べると、林分密度の低い範囲において遮断率の違いが顕著である。しかし、これらの結果には、林分密度が500本 ha^{-1} 程度以下（高齢人工林に特徴的な低密度）の林分での観測データが含まれていない。近年、わが国においては、林業労働力の不足や木材価格の低

*連絡先筆者 (Corresponding author) E-mail: iakio@pu-kumamoto.ac.jp

¹ 熊本県立大学環境共生学部 〒862-8502 熊本県熊本市東区月出3-1-100 (Faculty of Environmental and Symbiotic Sciences, Prefectural University of Kumamoto, 3-1-100 Tsukide, Higashi-ku, Kumamoto, Kumamoto 862-8502, Japan)

² 埼玉大学工学部 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区大久保255 (Faculty of Engineering, Saitama University, 255 Shimo-Ohkubo, Sakura-ku, Saitama, Saitama 338-8570, Japan)

³ ハワイ大学地理学科 (Department of Geography, University of Hawai'i at Manoa, Honolulu, Hawai'i 96822, USA)

⁴ 農業・食品産業技術総合研究機構農業環境変動研究センター 〒305-8604 茨城県つくば市観音台3-1-3 (National Agriculture and Food Research Organization, 3-1-3 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8604, Japan)

⁵ 宮崎大学農学部 〒889-1702 宮崎県宮崎市田野町乙11300 (Faculty of Agriculture, Miyazaki University, 11300 Otsu, Tano, Miyazaki 889-1702, Japan)

⁶ 九州大学福岡演習林 〒811-2415 福岡県糟屋郡篠栗町津波黒394 (Kasuya Research Forest, Kyushu University, 394 Tsubakuro, Sasaguri, Kasuya-gun, Fukuoka, Fukuoka 811-2415, Japan)

⁷ 現在：熊本県庁農林水産部 〒862-0950 熊本県熊本市中央区水前寺6-18-1 (Agricultural and Forestry Marine Products Division, Kumamoto Prefectural Government Office, 6-18-1 Suizenji, Chuo-ku, Kumamoto, Kumamoto 862-0950, Japan)
(2016年9月29日受付, 2017年2月5日受理)

迷などの理由により、針葉樹人工林の主伐が先延ばしされており、今後、ますます高齢林分が増えていくものと予想される。したがって、今後の森林管理と水資源との関係を考える上で、高齢林分の遮断率に関する知見を集積し、直線式と指数式のどちらが有効であるかについて検討する意義は大きいと考える。

そこで本研究では、熊本県阿蘇地域のヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) 高齢低密度人工林2林分において、2014年と2015年に遮断率を観測した。そして、林分密度から遮断率を推定する上で、直線式と指数式のどちらが有効であるかについて検討した。

II. 方 法

1. 対象地

熊本県阿蘇市三野にある熊本県立阿蘇中央高校清峰校舎小柏演習林9林班内のヒノキ高齢人工林2林分を対象とした (33°0'N, 131°2'E, 標高約800m)。二つの林分は隣接しており、いずれも平坦地に成立している。これらの林分では、ともに2004年と2008年に弱度の下層間伐が行われて以来、間伐作業は行われていない。これら以前にも間伐は定期的実施されているが、その時期については正確な資料が残っていない。また、これらの林分では定期的の下層植生が刈り取られているため、低木層や草本層による遮断蒸発量の観測への影響 (田中ら 2005) は無視できる。

2013年12月、各林分において30m×30mのプロットを一つずつ設定した (以下、プロットA、Bと記す)。プロット設定時の林齢と林分密度は、プロットAで89年と522本 ha⁻¹、プロットBで92年と356本 ha⁻¹であった。プロット内のすべての生立木について、胸高直径、樹高および根元位置を測定した。各プロットの中央に20m×20mのサブプロットを設定した。各サブプロットに設置した25個の貯留式雨量計 (II. 2. で後述する) の上部において、Digital Plant Canopy Imager (CI-110, Bio-Science, USA) を用いて葉面積指数を測定した。調査林分の概要を表-1に示す。

2. 観測方法

プロットAでは2014年6月19日から2015年11月30日、プロットBでは2014年7月3日から2015年11月30日までの期間、林外雨量、樹冠通過雨量および樹幹流量を測定した。ただし、降雨遮断と降雪遮断ではプロセスが異なるため (例えば、Lundberg and Halldin 2001)、いずれのプロットにおいても、降雪の可能性のある期間 (2014年11

月14日～2015年4月15日) については、観測を実施しなかった。Komatsu *et al.* (2015) は、式(2)を求めるにあたって、降雨量の多い5月から10月のうち、少なくとも3カ月間の観測を含むデータを使用している。本研究の観測期間は、この基準を2014年と2015年のいずれも満たしている。

二つの調査林分から100m程度離れた開放地において、貯留式雨量計 (直径21cmの漏斗を取り付けた60Lのバケツ) を2個設置し、林外雨量を測定した。また、降雨イベントの回数を把握するために、一転倒0.2mmの転倒マス雨量計 (HOBO RG3-M, OnSet computer, MA, USA) も2個設置した。貯留式雨量計に貯まった雨水の重量は、吊はかり (KHS-7500, 関西衡機, 大阪) によって5g括約で測定した。樹冠通過雨量については、田中 (2005) の研究を参考にして、サブプロットに設定した5mメッシュの格子点上に貯留式雨量計 (林外雨量の測定に用いたものと同じ) を25個設置し、林外雨量と同様に測定した。胸高直径にばらつきがでるように各サブプロットから10本のサンプル木をそれぞれ選び、以下のようにして樹幹流量を測定した。サンプル木の胸高付近に高さ30mm程度の溝をつけたウレタン製のラバー (厚さ30mm) を巻き付け、ラバーの継ぎ目にワイヤーホース (内径19mm) を差し込み、その外側を塩化ビニル製のシートで覆った。樹幹とラバー、ホースおよびシートの隙間を樹脂製剤で埋めて漏水を防ぎ、ホースの先を転倒マス雨量計 (林外での測定に用いたものと同じ) に通水した。林外雨量、樹冠通過雨量および樹幹流量のデータは、月に1～2回の頻度で、降雨のない時間に回収した。用いたすべての転倒マスについて、Iida *et al.* (2012) を参考に流量と転倒回数との関係の検定を行った。各プロットの概要を図-1に示す。

3. 観測方法

観測期間が不連続であるため、本研究では2014年と2015年の観測結果を独立なものとして取り扱うこととした。まず、開放地に設置した貯留式雨量計による観測値の平均値を求め、林外雨量とした。また、降雨イベントを分離するための降雨中断時間を4時間と定義し (Shinohara *et al.* 2013)、2個の転倒マス雨量計による林外雨量の観測値をもとに、観測期間中の降雨イベントをカウントした。次いで、各プロットに設置した25個の貯留式雨量計の平均値として樹冠通過雨量を求めた。樹冠通過雨量の計測誤差 ε を次式によって与えられる Student の t 値を用いて評価した (Shinohara *et al.* 2013)。

$$\varepsilon = \frac{t_{(\alpha, n-1)} CV}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

ここで、 n は貯留式雨量計の数、 CV は変動係数 (%), $t_{(\alpha, n-1)}$ は信頼度 α , 自由度 $n-1$ における Student の t 値ではある。2014年と2015年における樹冠通過雨量の信頼度5%での計測誤差は、それぞれプロットAで4.4%と3.5%、プロットBでは5.6%と5.8%であった。なお、貯留式雨量計ごとの樹冠通過雨の総量は、いずれの年、いずれのプロットにおいても正規分布にしたがっていた

表-1. 調査林分の概要

General description of sample plots.

Plot	A	B
Stand age (year)*	89	92
Stand density (trees ha ⁻¹)	522	356
Diameter at breast height (cm)*.**	38.9 ± 4.6	44.9 ± 6.8
Tree height (m)*.**	23.8 ± 1.0	23.3 ± 1.3
Leaf area index (ha ha ⁻¹)*.**.*	4.2 ± 0.4	4.0 ± 0.7

*As of December 2013, **Average ± SD, ***The value of SD means the spatial variation in LAI measured on 25 storage-type rain gauges.

図-1. 調査プロットの概要

Summary of the plots.

The closed circle, open circle and cross indicate the stemflow measurement trees, other trees and storage-type rain gauge, respectively. The solid and broken lines represent the outer perimeters of the experimental plot and subplot, respectively.

(すべて $P > 0.05$)。そして、10本のサンプル木において計測した樹幹流量の平均値にサブプロット内におけるヒノキの立木本数を乗じ、サブプロットの面積で割ることによって樹幹流量を求めた。一部のサンプル木において、転倒マス雨量計による樹幹流量の欠測期間がみられたので、当該のサンプル木における林外雨量と樹幹流量との関係式を求め、欠測期間の樹幹流量を推定した。さらに、得られた林外雨量 R 、樹冠通過雨量および樹幹流量から水収支法によって、各年における各プロットでの遮断蒸発量 I と遮断率 I/R をそれぞれ算出した。

最後に、Komatsu *et al.* (2015) の収集した日本の針葉樹人工林（樹種：スギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) とヒノキ) における遮断率データ 45 個に本研究での観測結果 4 個を加えた全部で 49 個のデータを用いて、林分密度と遮断率との関係を直線式と指数式によってそれぞれ回帰した。その際、樹種、林冠高および降水量の違いは考慮しなかった (小松 2007; Komatsu *et al.* 2015)。得られた直線式と指数式の適合度を比較するために、赤池情報量基準 (AIC) と二乗平均平方根誤差 (RMSE) をそれぞれ求めた。なお、統計解析には R ver. 3.3.2 (R Core Team 2017) を用いた。

III. 結果と考察

各年における各プロットでの雨水配分を表-2に整理する。2014年にはプロットAで77回、プロットBで75回、2015年には99回の降雨イベントがそれぞれ観測された。林外雨量は、2014年にはプロットAで1,253 mm、プロットBで885 mm、2015年で1,956 mmであった (2014年については観測期間がプロット間で異なるため、イベント回数と林外雨量も異なる)。樹冠通過雨量は、2014年ではプロットAで1,105 mm、プロットBで767 mm、2015年ではプロットAで1,645 mm、プロットBで1,634 mmであった。樹幹流量は2014年ではプロットAで47 mm、

表-2. 各プロットにおける雨水配分

Rainfall partitioning for each plot.

Year	Plot	Throughfall		Stemflow		Rainfall interception	
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)
2014	A	1,105	88.2	47	3.8	101	8.0
	B	767	86.7	19	2.1	99	11.2
2015	A	1,645	84.1	75	3.8	236	12.1
	B	1,634	83.5	51	2.6	271	13.9

プロットBで19 mm、2015年ではプロットAで75 mm、プロットBで51 mmであった。以上の結果から水収支法によって算出された遮断蒸発量と遮断率は、それぞれ2014年ではプロットAで101 mm、8.0%、プロットBで99 mm、11.2%であった。2015年ではプロットAで236 mm、12.1%、プロットBで271 mm、13.9%であった。

降雨量の大きかった降雨イベント (1 イベント当たり 100 mm 以上; 2014 年では 2 回、2015 年では 5 回) を除いた場合の遮断率を算出した結果、2014 年ではプロット A で 8.1%、プロット B で 11.2%、2015 年ではプロット A で 10.8%、プロット B で 12.8% となり、降雨量の大きい降雨イベントが大きく影響していないことがわかった。また、わが国のヒノキ・スギ人工林における遮断蒸発の観測結果 (Komatsu *et al.* (2015) が Table 1 に整理している 45 事例) と本研究で観測された遮断率、樹冠通過雨量 (林外雨量に対する樹冠通過雨量の割合) および樹幹流量 (林外雨量に対する樹幹流量の割合) とを比較したところ、いずれもこれまでに観測された値の範囲にあった。以上のことから、本研究における遮断率の観測結果は妥当だと考える。

なお、いずれのプロットにおいても、2014 年から 2015 年にかけて、林分密度は変化していないにもかかわらず、2014 年より 2015 年で遮断率の値が高くなった。その理由としては、2015 年に 0.2~10.0 mm の比較的強度の弱い降雨が多くみられ、また、一般に遮断率は降雨強度が弱いほど高まるため (例えば、服部・近嵐 1988) であろうと

考える。実際、いずれのプロット、観測年においても、降雨強度の小さい期間に遮断率の高まる傾向がみられた(データ不掲載)。

Komatsu *et al.* (2015) の収集した日本の針葉樹林におけるデータ(白丸; $n=45$) に本研究での結果(黒丸; $n=4$)を加え、林分密度と遮断率との関係を図-2に示す。なお、本研究の調査林分における密度(522本 ha^{-1} と 356本 ha^{-1}) は、間伐が定期的に行われている高齢人工林では一般的な値であるが、日本の針葉樹人工林での遮断蒸発に関する研究ではもっとも低い。図中の点線(直線式)と実線(指数式)は、それぞれ以下のように書ける(いずれのパラメータも 0.1% 水準で有意であった)。

$$I/R = 0.00496N + 13.56 \quad (r^2 = 0.449, P < 0.001) \quad (4)$$

$$I/R = 0.290 \{1 - \exp(-0.00110N)\} \times 100 \quad (5)$$

ただし、(5)式については、非線形最小自乗法を用いて求めているため、決定係数は算出されていない。なお、切片をもつ(原点を通らない)指数式でも林分密度と遮断率との関係を回帰したが、切片のパラメータは有意でなかった($P=0.137$)。本研究で観測された林分密度と遮断率との関係は、いずれの年、いずれのプロットにおいても、直線式よりも下方にプロットされていた。また、AIC の値は直線式で 305.3、指数式で 300.3 となり、指数式の方が高い適合度を示すことがわかった。RMSE の値を比較すると、(4)式で 24.4%、(5)式で 23.2% となり、指数式において小さい値を示した。さらに、600本 ha^{-1} 以下の林分密度が低い範囲にデータを限定すると($n=9$)、RMSE の値は(4)式で 15.9%、(5)式で 15.5% となり、わずかで

図-2. 日本の針葉樹人工林における林分密度と遮断率との関係
Relationship between the stand density and the interception ratio in coniferous plantations in Japan.

The open and closed circles indicate the results from previous studies and this study, respectively. The broken and solid lines represent the linear and exponential equation, respectively.

はあるが指数式の方で小さい値を示した。このことより、特に、林分密度が低い範囲において、直線式よりも指数式の方が、林分密度と遮断率との関係に対して良く適合していると考えられる。以上の結果は、直線式よりも指数式の方が、林分密度から日本の針葉樹人工林(特に高齢林)における遮断率を推定する上では有効であることを示唆している。

IV. お わ り に

本研究では、阿蘇地域のヒノキ高齢低密度人工林2林分において、2014年と2015年の2年にわたって遮断率を観測した。これらの林分の林分密度は、これまでの日本の針葉樹人工林における遮断蒸発に関する研究の中でもっとも低い点において、今回の観測結果の意義は大きいと考える。先行研究の結果も含めて解析した結果、わが国の針葉樹人工林における林分密度と遮断率との関係は、直線式よりも、むしろ指数式によって良く表現できることが示唆された。林分密度は、もっとも簡単に計測できる林分統計量であるので、得られた指数式は、森林の管理が水資源に及ぼす影響を評価する上で有効だといえる。

本研究を行うにあたり、熊本県立阿蘇中央高校清峰校舎の高島弘毅氏と鳥江太介氏をはじめとする教職員の方々には、調査地の使用をご快諾いただくとともに、調査に際し種々ご便宜を図っていただいた。熊本県立大学環境共生学部の鶴田純子助手ならびに森林生態学研究室の学生諸氏には現地調査にご協力いただいた。査読者の先生方には、論文審査の過程を通して、有益なコメントをいただいた。本研究は、科学研究費(#26292088, 代表:井上昭夫)、環境研究総合推進費(#4RF-1301, 代表:宮沢良行)および平成26年度熊本県立大学学長特別交付金(代表:井上昭夫)の助成を受けて実施した。ここに記してお礼申し上げる。

引用文献

- 服部重昭・近嵐弘崇(1988)ヒノキ林における間伐が樹冠遮断に及ぼす影響. 日林誌 70: 529-533
- Iida S, Shimizu T, Kabeya N, Nobuhiro T, Tamai K, Shimizu A, Ito E, Ohnuki Y, Abe T, Tsuboyama Y, Chann S, Keth N (2012) Calibration of tipping-bucket flow meters and rain gauges to measure gross rainfall, throughfall, and stemflow applied to data from a Japanese temperate coniferous forest and a Cambodian tropical deciduous forest. Hydrol Process 26: 2445-2454
- 小松 光(2007)日本の針葉樹人工林における立木密度と遮断率の関係. 日林誌 89: 217-220
- Komatsu H, Shinohara Y, Otsuki K (2015) Models to predict changes in annual runoff with thinning and clearcutting of Japanese cedar and cypress plantations in Japan. Hydrol Process 29: 5120-5134
- Lundberg A, Halldin S (2001) Snow interception evaporation: review of measurement techniques, processes, and models. Theor Appl Climatol 70: 117-133
- R Core Team (2017) R: A language and environment for statistical computing. <http://www.R-project.org> (参照: 2017-1-25)
- Shinohara Y, Komatsu H, Kuramoto K, Otsuki K (2013) Characteristics of canopy interception loss in Moso bamboo forests of Japan. Hydrol Process 27: 2041-2047
- 田中延亮・蔵治光一郎・鈴木雅一・太田猛彦(2005)ヒノキ壮齢林の下層樹木の樹冠下における樹冠通過雨量の空間分布特性. 東大演報 113: 133-154