

筑波森林水文試験地のスギ林分における降雨遮断特性

飯田真一・玉井幸治・清水貴範・延廣竜彦 (森林総研)

壁谷直記・清水 晃 (森林総研九州)

要旨：筑波森林水文試験地におけるスギ壮齢林分を対象として、林外雨量強度 (GR)、樹冠通過雨量強度 (TF)、樹幹流量強度 (SF) の計測に基づいて 1 時間ごとの遮断強度 ($I = GR - TF - SF$) を評価した。 TF と SF の和である正味林内雨量強度は GR とほぼリニアな関係にあったが、両者の差である I 値は降雨初期に大きく、降雨の継続とともに減少し、負の値を示した。負の I 値は GR よりも SF と TF の和が卓越する時間帯があることを示す。 I 値の時系列変化を解釈するためには、負の I 値が蒸発量の変動によるものではなく、主として樹体表面の降雨貯留量の変動によるものと考えた方が妥当であると考えられる。

キーワード：筑波森林水文試験地、スギ壮齢林、降雨強度、遮断強度、降雨貯留量

Abstract: We measured the intensities of gross rainfall (GR), throughfall (TF) and stemflow (SF), and evaluated the intensity of interception ($I = GR - TF - SF$) with the time resolution of 1 h in a mature Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) forest located in the Tsukuba Experimental Watershed, Japan. There was a linear relationship between GR and the sum of TF and SF . The residual between them, that is I , was higher at the early stage of the rainfall event, and after that I decreased to be negative value. Larger values of $TF + SF$ than GR resulted in the negative values of I . We concluded that the trend of time series of I can be explained by the change in the rainfall storage by tree surface rather than by the change in evaporation during the rainfall.

Key words: Tsukuba Experimental Watershed, mature Japanese cedar, rainfall intensity, interception intensity, rainfall storage by tree surface

I はじめに

森林に降った 1 回の雨 (ΣGR ; Σ は 1 回の降雨イベントの積算値を、 GR は雨量強度を表す) の一部は林冠に遮断され、樹冠通過雨 (ΣTF) あるいは樹幹流 (ΣSF)、遮断損失 (ΣI) となる。森林における遮断率 ($\Sigma I / \Sigma GR$) は概ね 10~30% であり (2)、森林を構成する樹木の蒸散と同様に重要な水文過程である。

国内の山地森林地帯にはスギ、ヒノキが大規模に植栽されている。山地森林地帯の水循環および水収支を明らかにするために、これらの樹種によって構成された林分における降雨遮断特性を解明することは重要である。しかし、既存の遮断損失量の計測例はヒノキ林分を対象としたものが多く、特にスギ壮齢林分を対象としたものは少ない (7)。人工林面積に占めるスギ林分の割合は 44% で、ヒノキ林分の 25% を上回っており (8)、スギ林分を対象とした遮断損失量の計測例を蓄積する必要がある。このような背景から、筆者らは茨城県筑波山系に位置するスギ壮齢林分を対象として、降雨遮断計測を行って

いる。これまでに、遮断損失量の定量的評価の前段階として、スギの樹幹流量の個体間差が主として樹冠長によって決定されていることを明らかにした (3)。本研究では、降雨発生時の樹冠通過雨量強度と樹幹流量強度の時系列変化に着目し、スギ壮齢林分の枝葉および樹皮を含む樹木表面で生じる水収支の動態について解析を行った。

II 観測方法

1. 研究対象地 東経 140 度 18 分、北緯 36 度 20 分に位置し、流域面積 3.8ha を有する筑波森林水文試験地内のスギ壮齢林 (林齢: 58 年生) を対象として降雨遮断プロットを設定し、観測を行った。なお、本プロットでは過去にも降雨遮断観測が行われている (1, 5)。

本林分の詳細については既報で詳述しているため (3, 4)、ここでは基本的な情報を列挙する。立木密度は 1,115 本/ha、平均胸高直径 28.6cm、平均樹高 23.0m である。

2. 開空度の計測 遮断プロット内の合計 6 地点において全天空写真を撮影し、得られた画像データから開空

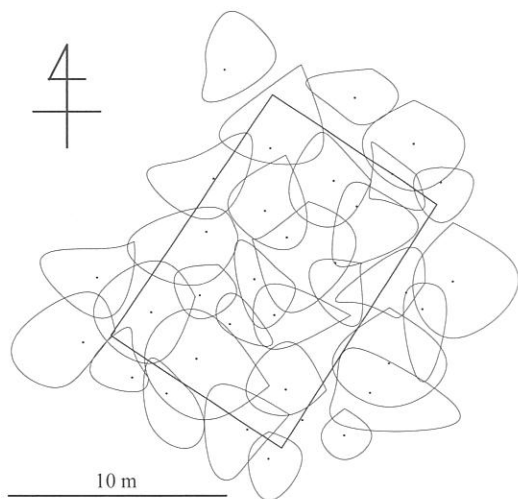


図-1. 降雨遮断計測プロット周辺の樹冠投影図. 図中の方形枠が遮断損失量の算出に用いたプロット面積を表す

Fig.1 Canopy projection areas, and the quadrat showing the plot area

度を算出した (使用ソフトウェア: LIA32 [http://www.agr.nagoya-u.ac.jp/~shinkan/LIA32/author-e.html], カメラ: ニコン Coolpix 4500, レンズ: ニコン FC-E8)。なお, 対象地点の直上の樹冠状況を反映するように, 天頂角 $0^{\circ} \sim 14^{\circ}$ の範囲の画像データを開空度の計算に用いた。

3. 観測塔を用いた微気象要素測定ならびに降雨遮断計測 計測プロットに隣接した観測塔において通風乾湿計 (英弘精機社製 MH-020T) を高度 24.1m に設置し, 飽差 (VPD) を計測した。また, 高度 25.5m における正味放射量 (R_n) (REBS 社製 Q7.1), ならびに高度 25.3m における風速 (Young 社製 03101) をそれぞれ計測した。これらの項目はデータロガー (Campbell 社製 CR23X) を用いて 10 分平均値として記録した。

樋 (幅 20cm, 長さ 10m, 受水面積 $2m^2$) を 2 台用いて樹冠通過雨を集水し, 2 台の転倒マス型流量計 (池田計器製作所製 TXQ-400) を用いて計量した (1 転倒が樹冠通過雨 0.2mm に相当)。得られた 2 台の値を算術平均し, 樹冠通過雨量とした。また, プロット内に存在する全 14 個体のスギについてウレタンマットを用いて樹幹流を集水し, 転倒マス型流量計 (大田計器製作所製 34-T (RA-1), ウィン製 UIZ-TB200 および池田計器製作所製 TQX-200) を用いて計量した。これらの樹幹流量を積算し, プロット面積で除すことによって対象林分の樹幹流量を得た。すべての転倒マス型流量計はデータロガー (Campbell 社製 CR10X, マルチプレクサーSDM-SW8A)

に接続し 10 分間隔で積算転倒回数を記録した。林外雨量は尾根部において 1 転倒 0.2mm の転倒マス型雨量計を用いて計測した (センサー: Onset 社 RG-2M, ロガー: 同社 HOBO Event)。高強度の雨量, 樹冠通過雨量および樹幹流量が発生した場合の転倒マス型流量計および雨量計の過小評価を既報 (4) による結果を用いて補正した。なお, 降雨記録後より 12 時間が経過しても次の降雨が観測されなかった場合に, その降雨は終了したとみなした。林外雨量計測地点における天頂角 45° まで開空度は 100% であるが, それ以上になると開空度は 100% を下回るため (4), 周囲の樹木の影響を受けて林外雨が過小評価される可能性がある。そこで, 本研究では降雨中の風速が常に $3m/s$ を下回るイベントのみを解析対象とした。

樹体表面の水収支に着目すると, 1 時間ごとの林外雨量強度 (GR), 樹冠通過雨量強度 (TF), 樹幹流量強度 (SF) には以下の関係が成立する。

$$GR = TF + SF + I \quad (1)$$

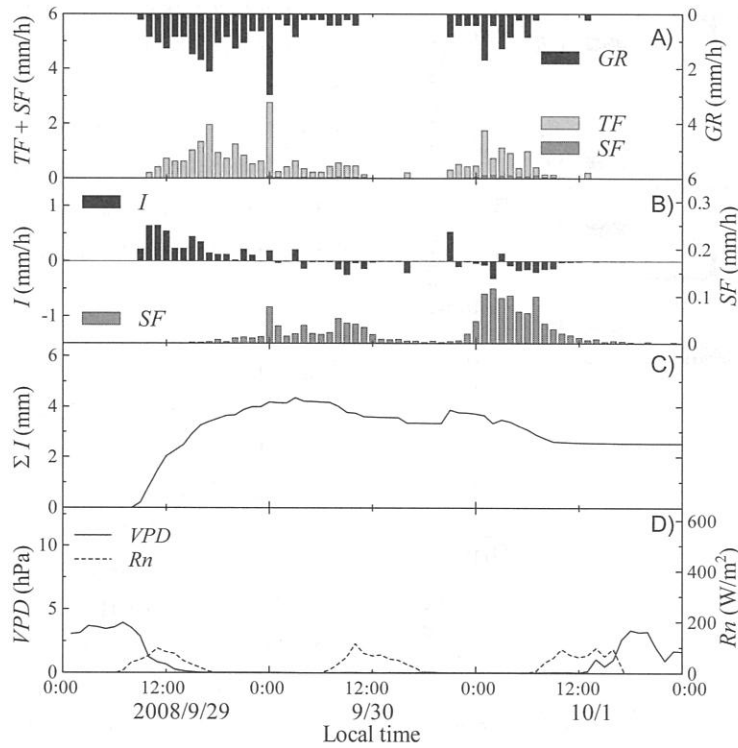
1 式から 1 時間ごとの遮断強度 (I) を残差として算出するとともに, 降雨開始からの任意の時刻における累積遮断量 (ΣI) を得た。

III 結果および考察

1. 林外雨量強度が低いイベントにおける降雨遮断特性 2008 年 9 月 29 日から 10 月 1 日に計測された降雨イベントにおける各計測項目の時系列を図-2 に示す。このイベントの ΣGR は 30.0mm で, GR は降雨イベント中, ほぼ $2mm/h$ を下回っていたことが分かる。最大 GR も約 $3mm/h$ であり, GR は全般的に低いイベントであった。

GR 発生から大きく遅れることなく TF が発生した (図-2A)。 TF は, 樹冠に触れずに林床面まで到達する直達雨と, 樹冠を濡らした後, 枝葉から生じる滴下雨から構成されている。本林分の 2008 年夏季における開空度は概ね $20 \sim 30\%$ であった。樹冠の開空度は TF に占める直達雨の割合とほぼ等しいと考えられるため (6), 滴下雨の発生を待たずに TF が検出されたものと考えられる。

計測を行った 14 個体の供試木間で差があるものの, すべての供試木で SF が発生するまでには TF と比較してさらに 5 時間を要した (図-2B)。 SF は枝葉や樹幹表面に付着した雨水が林床面まで樹幹表面を流下する現象であり, その発生には枝葉や樹幹を含めた樹体表面が降雨によってある程度濡らされる必要があるためと考えられる。このイベントでは降雨が中断したが, この間の飽差および正味放射量は小さいため樹体は乾きにくい状態に



図一2. 2008年9月29日から10月1日の降雨イベントにおける計測項目の時系列図。A) 林外雨量強度 (GR), 樹冠通過雨量強度 (TF), 樹幹流量強度 (SF), B) 遮断強度 (I), 表示スケールを拡大した SF , C) 降雨開始から積算した遮断量 (ΣI), D) 飽差 (VPD) および正味放射量 (Rn)

Fig. 2 Time series from 29 Sep. to 1 Oct., 2008: A) intensities of gross rainfall (GR), throughfall (TF) and stemflow (SF); B) intensity of interception (I), closed up SF ; C) cumulated I (ΣI); D) vapor pressure deficit (VPD) and net radiation (Rn)

あった (図一2D)。樹体が濡れたままの状態再び GR が発生すると、速やかに SF が発生したことから前述の傾向が裏付けられよう (図一2B)。

TF と SF の和、すなわち正味林内雨量強度は GR と基本的にリニアな関係にあるが (図一2A), 両者の差である I は降雨開始直後に大きく、降雨の中盤以降は減少してゆくと共に負の値も計測された (図一2B)。イベント中飽差と正味放射量は小さく、樹体表面は乾燥しにくいものと考えられる。したがって、 ΣI は主として樹体表面に付着する水分量、すなわち降雨貯留量に相当し、降雨終了後に蒸発するものと推定される。以下、この仮説を用いて降雨中の I の時間変化について説明を試みる。

樹体表面の濡れ具合は、当然、降雨開始直前に最も低い状態にある。降雨開始とともに、直達雨となった成分を除けば、雨水は一時的に樹冠に遮断されることになる。これは降雨開始直後に樹木直下で雨宿りが可能であることから感覚的に理解できよう。滴下雨が発生した後も、樹幹流が発生するまでの間を考えると、滴下雨に直接寄与しない部位に雨水は付着する。また、樹体表面がまんべんなく濡れる前に SF は発生するために (2), 樹幹流

発生後しばらくの間雨水は樹体表面に付着し続けるものと考えられる。以上のプロセスによって、9月29日の24時まで ΣI が単調増加したのと考えられる。

GR が激減した9月30日の1時以降、ゼロあるいは負の I 値が多くなった (図一2C)。 ΣI の絶対値はその後減少を続けており、このイベントの条件下での降雨貯留量の最大値に達したと考えられる。すなわち、最大 $GR = 3\text{mm/h}$ により一時的に付着可能な水量を超えた結果、滴下が高強度で発生し、 GR を超えた TF が発生したのと考えられる。また、 GR が停止した後も TF と SF は発生し続けており、 GR の停止と同時に遮断過程は終了しない。降雨終了後も樹冠下で滴下雨が残存することを目視で確認しており、上述の傾向を裏付けるものである。

2. 林外雨強度が強いイベントにおける降雨遮断特性 $\Sigma GR = 51.2\text{mm}$, 最大 $GR = 9.0\text{mm/h}$ が計測された2009年6月29日~30日におけるイベントについても (図一3), 先に検討した GR の弱いイベント (図一2) と基本的には同じ傾向が確認された。すなわち、樹体表面が乾燥していた降雨前半に I は大きい、 GR が減少した後も一時的に付着した雨水が TF あるいは SF として発生し続けるた

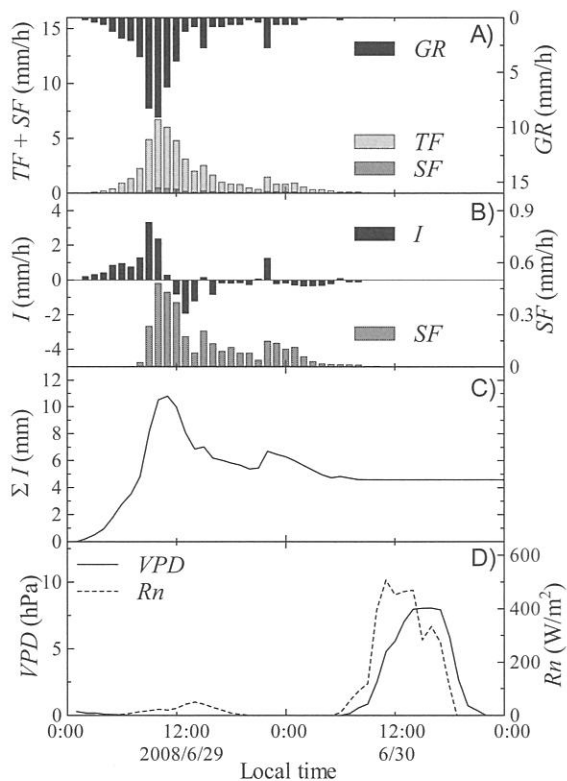


図-3. 2008年6月29日から6月30日の降雨イベントにおける計測項目の時系列図. 図中の記号の説明については図-2を参照のこと

Fig. 3 Same as Figure-2, but from 29 to 30, Jun., 2008

め、降雨の後半では負の I 値が計測されている。

降雨強度の小さいイベントと比較して特筆すべきであるのはイベント中における ΣI の最大値である。すなわち、このイベントでは最大 $\Sigma I = 10.8\text{mm}$ を記録しており、降雨強度の小さいイベントにおける最大 $\Sigma I = 4.3\text{mm}$ を大きく上回っている。本研究で提唱した仮説に基づくと、この違いは2つのイベント間における樹体表面に一時的に付着可能な水分量の差に相当し、降雨強度の差異によって生じたことになる。前述したように、樹幹流が発生するほどの十分な雨量であったとしても、樹体表面、特に樹幹表面がまんべんなく濡れた状態になることは少ない。降雨強度が強いイベントでは SF も大きくなるため、その流路が複雑になった結果、低い雨量強度では濡れることのなかった部位にも雨水が到達し、樹体表面に付着する水分量が増加した可能性が考えられる。

IV まとめ

国内で大規模に植栽されているにも関わらず知見が不足しているスギ壮齢林を対象として、林外雨量強度、樹冠通過雨量強度および樹幹流量強度を計測し、1時間ご

との遮断強度を評価した。この結果、本研究対象林分では降雨初期に遮断強度は大きいものの、後半から終了にかけては負の遮断強度が計測された。この現象は樹体表面の濡れ具合に対応した雨水の貯留現象として説明することが可能である。一方、降雨強度によってイベント中の積算遮断強度の最大値は異なることが明らかとなった。今後は、積算遮断強度の最大値と降雨強度の相関関係に着目して解析を継続する予定である。

引用文献

- (1) 細田育広・坪山良夫・志水俊夫 (1991) スギ人工林における樹冠遮断の季節変化. 日林関東支論, 42: 133-134.
- (2) 飯田真一 (2009) 植生による降雨の分配. 杉田倫明・田中正 編著, 筑波大学水文科学研究室 著, 水文科学, 103-117, 共立出版株式会社, 東京.
- (3) 飯田真一・清水 晃・壁谷直記・延廣竜彦・玉井幸治・清水貴範 (2010) 筑波森林水文試験地のスギ林分における樹幹流量の個体間差. 関東森林研究, 61: 207-210.
- (4) SHIN'ICHI IIDA, TAKANORI SHIMIZU, NAOKI KABEYA, TATSUHIKO NOBUHIRO, KOJI TAMAI, AKIRA SHIMIZU, ERIKO ITO, YASUHIRO OHNUKI, TOSHIO ABE, YOSHIO TSUBOYAMA, SOPHAL CHANN, NANG KETH (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.
- (5) 延廣竜彦・清水 晃・壁谷直記・張健軍・細田育広 (2004) 筑波森林水文試験地における遮断量の変化について—1990年と2003年の比較—. 日林関東支論, 55: 261-262.
- (6) 佐藤嘉展・久米 篤・大槻恭一・小川 滋 (2003) 樹幹構造の違いが樹冠通過雨の分布特性に及ぼす影響—スギ林とマテバシイ林における樹冠通過雨特性の比較—. 水文学会誌, 16: 605-617.
- (7) 田中延亮・蔵治光一郎・白木克繁・鈴木祐紀・鈴木雅一・太田猛彦・鈴木 誠 (2005) 袋山沢試験流域のスギ・ヒノキ壮齢林における樹冠通過雨量、樹幹流量、樹冠遮断量. 東大演報, 113: 197-240.
- (8) 林野庁 (2007) 森林資源の現況 (平成19年3月31日現在). <http://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/index.html>