

ヒノキ壮齡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

田中延亮^{*1}・蔵治光一郎^{*2}・鈴木雅一^{*3}・太田猛彦^{*4}

Spatial Distributions of Throughfall beneath Canopies of Understory Trees in a Mature *Chamaecyparis obtusa* Stand.

Nobuaki TANAKA^{*1}, Koichiro KURAJI^{*2}, Masakazu SUZUKI^{*3}
and Takehiko OHTA^{*4}

I. は じ め に

森林の樹冠を通過した降雨は、林外降雨と比較すると不均一な空間分布特性を示す。この樹冠通過雨量の空間分布の不均一性は、降雨の樹冠遮断蒸発量の観測結果の集計において、対象とした林分における樹冠通過雨量の空間代表値の推定やその誤差範囲の決定を困難にさせる。また、樹冠通過雨量分布の不均一性はこのような森林の水収支に関わるプロセスだけでなく、樹冠通過雨の水質の不均一性、土壌水分の不均一性、あるいは土壌浸食の原因となる雨滴衝撃力の不均一性といった様々な水文物理・化学プロセスと関連しており、その実態の解明は課題となっている。そのため、樹冠通過雨量の分布を調べる研究は世界中で報告されてきた。その詳細は次章に整理するが、これらの研究において、得られた結果は多様である。その理由として、調査の対象とされた林分の樹種や林齢の違いがあることのほかに、調査に用いた雨量計の大きさや配置密度の違いなどの計測システムに一定の手法が確立されていないことも挙げられる。

樹冠通過雨量の不均一性を象徴する現象の一つに、林外降雨量よりも多い樹冠通過雨量が観測される点（集中滴下点）の出現がある。集中滴下点は、特に樹冠通過雨量の空間代表値を推定する際に問題となってくるため、いくつかの研究でその実態が報告されてきた（例えば、中北ら、1984, 1985; LLOYD and MARQUES, 1988）。しかし、集中滴下点の降雨毎の出現頻度やパターン、あるいはその空間的な広がり（大きさ）に関する検討は十分とはいえない。これは、既往の研究で樹冠通過雨量の空間分布を測定する際に、各雨量計を離して配置していたことが原因の一つであると考えられる。このような計測から得られる樹冠通過雨量の等雨量図からは、集中滴下点に関する重要な情報が抽出できていない可能性がある。

一般に、樹高の高い森林における樹冠通過雨量の空間分布特性は、上層木の植栽間隔や樹高や樹冠の大きさ程度の空間スケール（数m～数十m）で変化する成分と下層樹木の樹高や枝葉程度

^{*1} 東京大学大学院農学生命科学研究科農学国際専攻

Department of Global Agricultural Sciences, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo.

^{*2} 東京大学大学院農学生命科学研究科附属科学の森教育研究センター愛知演習林

University Forest in Aichi, University Forests, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo.

^{*3} 東京大学大学院農学生命科学研究科森林科学専攻

Department of Forest Science, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo.

^{*4} 東京農業大学地域環境科学部森林総合科学科

Department of Forest Sciences, Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture.

のスケール（数 cm ～数 m）で変化する成分とが考えられる。上述した集中滴下点は、主に後者の空間スケールで生起する現象であると考えられる。そこで、我々は下層樹木の樹冠下における樹冠通過雨量の空間分布を詳細に調べるための新しい測定装置を開発し試行することにした。この樹冠通過雨量コレクターは、1 台につき 100 個の小コレクターを隙間無く並べたものから構成されており、集水面における樹冠通過雨量の空間分布が隙間無く抽出できる装置である。このコレクターを用いて、我が国を代表する人工林樹種のひとつであるヒノキ林における樹冠通過雨量を測定し、その空間分布の実態、集中滴下点の出現頻度や出現パターン、集中滴下点の大きさについて検討をおこなったので、その結果について報告する。

Ⅱ．樹冠通過雨量の空間分布特性に関する既往の研究

森林の樹冠通過雨量の空間分布特性に関するこれまでの研究は、樹幹や樹冠縁からの距離との関係を対象とした研究、小プロット全体の空間分布特性を明らかにしようとした研究、樹冠通過雨量の頻度分布形を統計的に解析した研究の 3 点に着目して行われてきた。

樹冠通過雨量と、樹幹や樹冠縁からの距離との関係については、古くから検討が行われてきたが、相反する結果が報告されている。例えば AUSSENAC(1970)は樹冠縁に近いところで最大であると報告しているのに対し、RUTTER(1963)は樹幹近くで最大、CARLETON and KAVANAGH(1990)は樹冠縁と樹幹の中間で最大、HELVEY and PATRIC(1965)は関係がなかったとしており、樹幹や樹冠縁からの距離との関係が、対象とする森林の樹種構成、林齢、植栽密度、観測した降雨の強度、気象条件などの影響を受けて多様であることを意味している。間島・田瀬(1982)や中西(1995)は複数の樹木を含む小プロットを森林内に設定し、その中にグリッド状に配置した雨量計群を用いて、雨量計から最も近い樹幹や樹冠縁からの距離との関係を調べているが、間島・田瀬(1982)は関係がないと結論づけているのに対し、中西(1995)は樹幹近くで少なく、樹冠縁で多いとしている。JOHNSON(1990)は 0.09 ha のプロット内に直径 29 cm の雨量計を 60 個配置し、樹幹からの距離が大きい雨量計ほど、雨量が大きくなる傾向を見出している。同様な結果は、PEDERSEN(1992)が 3 つの 0.25 ha プロット内にそれぞれ、直径 12.4 cm の雨量計を 30 個配置した結果からも見出されている。一方、中北ら(1984, 1985)は森林内の 1 本の樹木の周囲に、グリッド状に配列した 96 個の雨量計を用いて同様の解析を行った。その結果、対象木の樹冠が隣接木の樹冠と重なっている場合、集中滴下点は重なりの下で多くなるが、重なっていない場合は樹冠縁で多くなり、樹幹に近いほど少ないことを報告している。

小プロット全体の樹冠通過雨量の空間分布特性を対象とした研究は、小プロット内にランダムまたはグリッド状に雨量計を配置することにより、プロット内の等雨量線図を推定することを目的としている。これらの研究は表-1 のように整理できる。FORD and DEANS(1978)のプロットでは、約 1.5 m 間隔で植林された *Picea sitchensis* の樹冠が大きく成長し、樹冠の左右 1/3 づつが隣接木の樹冠と重なり合っている。26.4 mm の降雨に対して、樹冠通過雨量はその 9 % から 97 % の間に分布し、植林列に沿って多く、植林列間で少ないこと、集中滴下点は樹幹の直近にあることが報告されている。ROBSON et al.(1994)のプロットは若年性の *Fagus sylvatica* を主体とした森林に設定されており、3 回の降雨を観測した結果、集中滴下点は樹幹直近にあるが、降雨によらない点と、降雨によって変動する点とがあることが報告されている。中北ら(1984, 1985)のプロットは、森林内の単木を中心として、4 樹種 7 地点に設定されている。この中には隣接木の

表-1 小プロット全体の平面分布特性を対象とした研究
Table 1. Studies on the spatial distribution of throughfall across a small plot.

場所	植生	プロット サイズ	雨量計 サイズ	雨量計個数	雨量計の 面積率	配置	文献
Study site	Forest Type	Plot Size (m)	Collector Size (cm ²)	Number of Collector (個)	Ratio of collecting area to plot area (%)	Location	References
Scotland, England	<i>Picea sitchensis</i> (14-year old)	3.5×3.5	181	104	15.4	均等に 配置	FORD and DEANS (1978)
Fukuoka, Japan	<i>Cryptomeria japonica</i> , <i>Chamaecyparis obtusa</i> , <i>Cerasus yedoensis</i>	3×3	113	96	12	グリッド	中北ら (1984,1985)
Hampshire, England	<i>Fagus sylvatica</i> (20-40 years old)	16×12	181	48	0.452	グリッド	ROBSON et al. (1994)
Tokyo, Japan	<i>Cryptomeria japonica</i> (18-years old)	—	200	35	5.12	グリッド	中西 (1995)

樹冠と重なっている樹木を中心としたプロットと、重なっていないプロットがある。春から秋までの降雨を観測した結果、スギを対象とした、樹冠の重なりのないプロットでは、等雨量線図に樹冠形状が明瞭に現れ、樹冠通過雨量が樹冠下で少ないことが示された。また集中滴下点は、隣接木の樹冠と重なっているところ、垂下した下層枝、樹冠縁などの下で観測されたことが報告されている。中西 (1995) のプロットでは 16 mm の降雨に対し、樹冠通過雨量は最大 17.5 mm (109 %), 最小 2.4 mm (15 %) の間に分布し、樹幹近くで少なく、プロット内のギャップや樹冠縁で多いことが示されている。これらの研究に共通していえることは、表-1 に示されているように、プロット面積に対する雨量計の集水面積の割合が最大 15.4 % と少ないため、集中滴下点の有意なサンプリングができていないかどうか、疑問が残ることである。これらの研究に対して BOUTEN et al. (1992) は 3.5 m × 5.5 m のプロットに TDR 土壌水分計を 48 本設置し、6 mm の降雨前と降雨後の土壌水分分布を観測することにより推定された、樹冠通過雨量の等雨量線図を示しているが、この方法は雨量の大きい降雨イベントに適用することが困難であると考えられる。

樹冠通過雨量の頻度分布形を統計的に検討した研究は多くあり、それらは固定された雨量計群を用いたものと、雨量計を定期的に動かすことより、多数の点で観測を行ったものに分けられる。前者の研究のうち、KOSTELNIK et al. (1989) は 40 個の雨量計を用いて 6 降雨を観測した結果について解析し、2 降雨について樹冠通過雨量の頻度分布形が左に歪んでいる (歪度が正である) ことを指摘した。ROBSON et al. (1994) も観測した 3 降雨すべてに対して歪度が正となる結果を示している。一方で LOUSTAU et al. (1992) は 52 個の雨量計を用いて 33 降雨を観測した結果、正規分布とみなせない降雨は 4 降雨のみであったとしている。後者は観測点数が増える反面、それぞれの観測点において異なった降雨を観測することになるため、林外降雨量で平均化された情報しか得られず、降雨パターンによる違いや、樹冠形状や微気象条件の季節変化の影響も検討できないという欠点を有する。そのため、気候の季節変化のない、降雨パターンが比較的均一な湿潤熱帯地域での適用例が多くある。LLOYD and MARQUES (1988) はアマゾンの Reserva Ducke において 40

表-2 雨量計を定期的に動かす手法により熱帯雨林で樹冠通過雨量観測を行った研究
Table 2. Observational studies on throughfall in the tropical forests using gauge relocation technique.

観測地点	雨量計サイズ	雨量計個数	観測点個数	観測期間	文献
Study Site	Collector Size (cm ²)	Number of collectors (個)	Number of Sampling point (points)	Duration of observation (months)	References
Ducke, Brazil	127	36	494	25	LLOYD and MARQUES (1988)
Tai, Ivory Coast	400	47	188	5	HUTJES et al (1990)
Danum Valley, Malaysia	—	40	505	13	WAIDI et al (1992)
Jaru, Brazil	127	30	501	25	UBARANA (1996)
Vale do Rio Doce, Brazil	127	30	—	17	UBARANA (1996)

個の雨量計を494点にわたり動かすことにより、熱帯雨林の樹冠遮断量を観測した。それ以降世界各地の熱帯林で同様の手法により、表-2に示すような研究が行われた。LLOYD and MARQUES(1988)はこの観測で得られた樹冠通過雨量の林外降雨量に対する比の分布として対数正規分布を仮定し、誤差評価をしている。

これらの研究において、得られた結果は非常に多様である。その理由は、上述したように、雨量計の集水面積の大きさや配置密度の違いなどが考えられる。すなわち、雨量計の個数が少ないほど集中滴下点を捉えられる確率が減少し、雨量計の大きさが大きいほど、集中滴下点とその周辺の雨量が平均化されることにより、感度が鈍くなることになる。どのようなサンプリング手法を用いれば、ある森林タイプに対して樹冠通過雨量の平面分布や集中滴下点の分布に関する有意な情報が抽出できるか、という課題は未解決である。

Ⅲ. 観 測

3.1 観測地

観測対象とした森林は、房総半島南部に位置する東京大学農学部附属科学の森研究センター千葉演習林（研究実施時の名称：東京大学農学部附属千葉演習林）袋山沢試験流域（北緯35° 12′、東経140° 07′）のヒノキ人工林である。観測地点の位置を図-1(a)に示す。当試験流域は、森林が水や物質の循環過程に及ぼす影響を対照流域法を用いて総合的に解析することを目的として、1991年に設定された試験流域であり、樹冠通過雨量以外にも、上層・下層樹木の樹幹流下水、流出水の水量や水質、地温、土壌水のサクション、地下水位などの水文・水質観測、土壌呼吸、リターフォール量、植栽木の成長量など炭素動態の観測が同時に行われている。また、当試験地から東に200 mほど離れた新田雨量観測点（図-1(b)）では、降雨量、降雨の水質、微気象要素などの観測が行われている（東京大学千葉演習林袋山沢研究グループ編，2002）。当試験地から南南東に6 kmほど離れた清澄観測点における気象観測結果によれば、年降水量と年平均気温の平

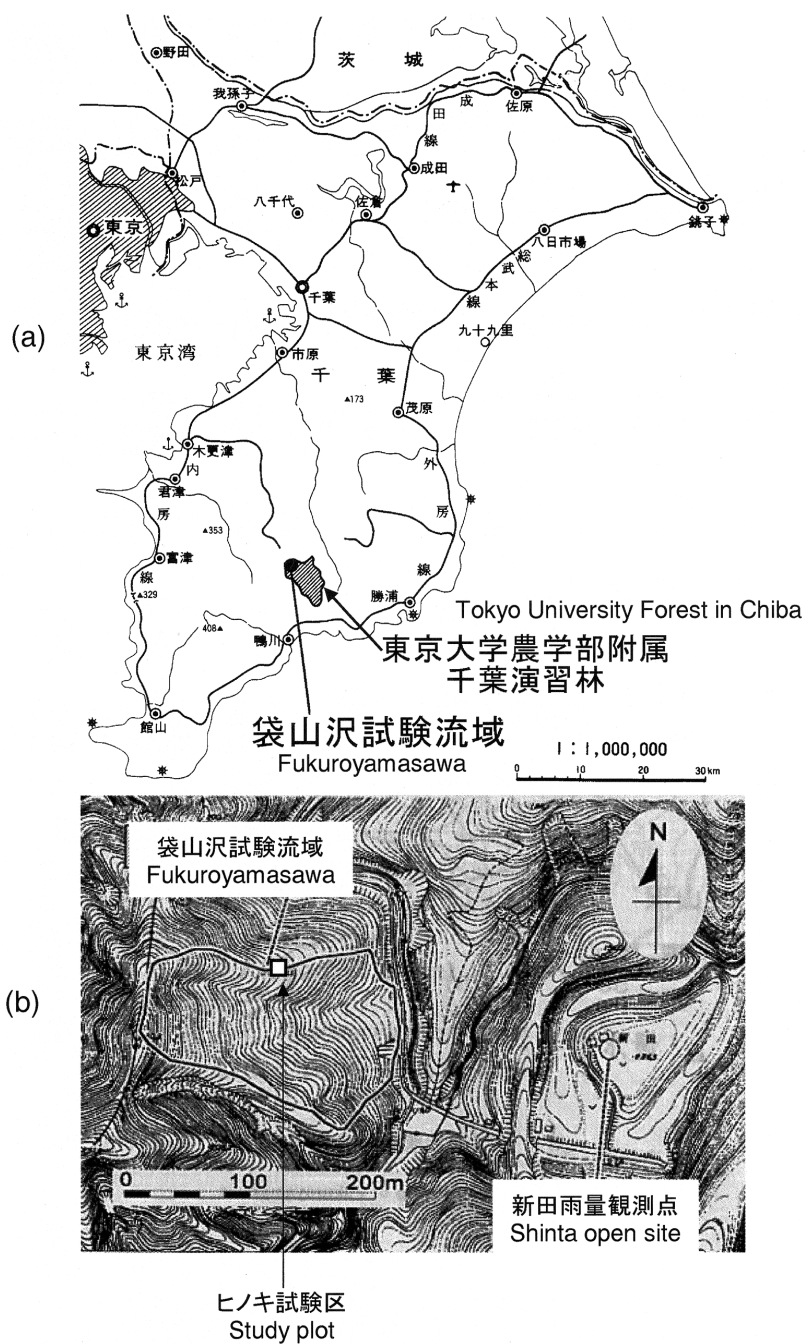


図-1 (a) 観測流域の位置, (b) ヒノキ観測区と新田雨量観測点の位置
Fig. 1. (a) Map of the Fukuroyamasawa watershed and (b) locations of the study plot and the Shinta open site.

年値（1967～1996）はそれぞれ 2,233 mm, 13.7℃であり、降雪は少ない。植生は上層樹木が 1929 年に植栽されたスギ、ヒノキ人工壮齢林である。上層樹木の下層にはアオキ、ユズリハ、ヤブムラサキ、ヤブニッケイ、ヤブツバキ、サカキ、ヒサカキ、カシ類を主体とする樹高 4～15 m の常緑・落葉広葉樹が存在する。1991 年に行われた袋山沢試験流域内毎木調査によれば、流域内のヒノキの平均樹高は 19.1 m, 平均胸高直径は 21.5 cm, 植栽密度は 930 本/ha であった。この流域の尾根上の平坦地にある樹冠遮断観測のために設置したヒノキ試験区（13 × 15 m, 図-1(b)）内において、樹冠通過雨量の観測を行った。なお、試験区におけるヒノキの樹冠はほぼ閉鎖していた。また、ヒノキ試験区内のヒノキの樹高と植栽密度はそれぞれの流域平均値と同程度であったが、平均胸高直径は 34.2 cm であり袋山沢試験流域平均値より大きかった。

3.2 観測の概要

「牛乳パック雨量計」とは、注ぎ口の部分を切り取った 1 リットルの牛乳パック（以下ではグリッドと称する）100 個を、1 辺 10 個の正方形形状に並べて作った雨量計である。グリッドを並べる際、隣り合うグリッドとの境界は、2 つ折りにした金属片で固定し集水面積が一定になり、かつ互いの隙間がなくなるように工夫してある。グリッド 1 個の大きさは一辺 7.1 cm の正方形であるので、牛乳パック雨量計 1 台の大きさは一辺 71.0 cm の正方形となる（図-2(a)）。この牛乳パック雨量計を林床に設置し、降雨終了後に各グリッドの水量を計ることにより、牛乳パック雨量計

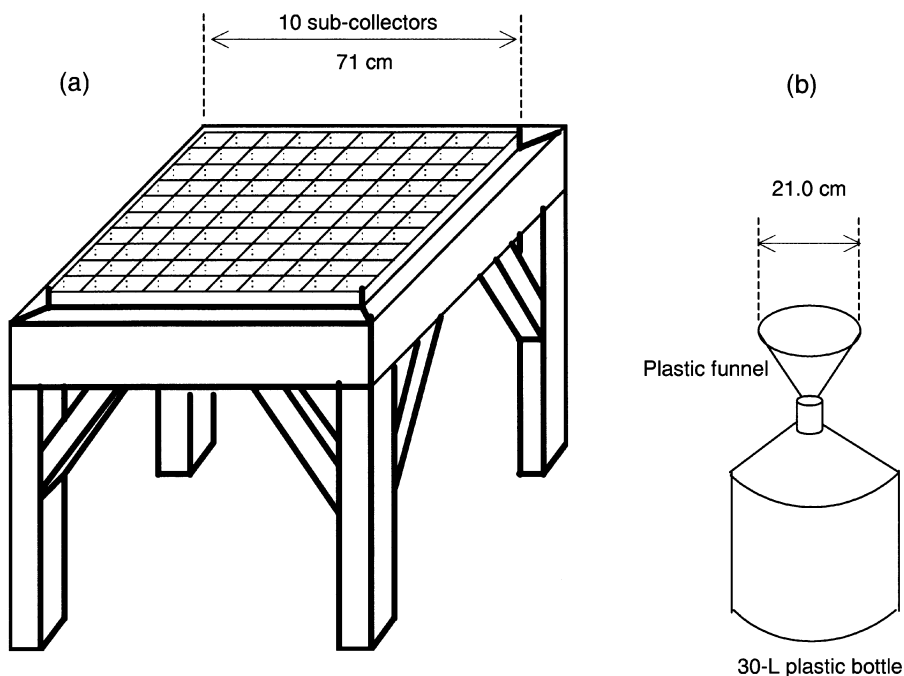


図-2 (a) 牛乳パック雨量計, (b) 簡易貯留雨量計

Fig. 2. Schematic pictures showing (a) a milk-pack throughfall collector containing 100 sub-collectors and (b) a storage-type throughfall collector

の設置された約 0.5 m^2 の範囲における樹冠通過雨量の分布を約 0.005 m^2 の分解能で把握することができる。本研究の樹冠通過雨量の観測では、牛乳パック雨量計 4 台（牛乳パック雨量計 A, B, C, D）と、直径 21.0 cm のプラスチック製ロートと 30 リットルのボトルで作成した簡易貯

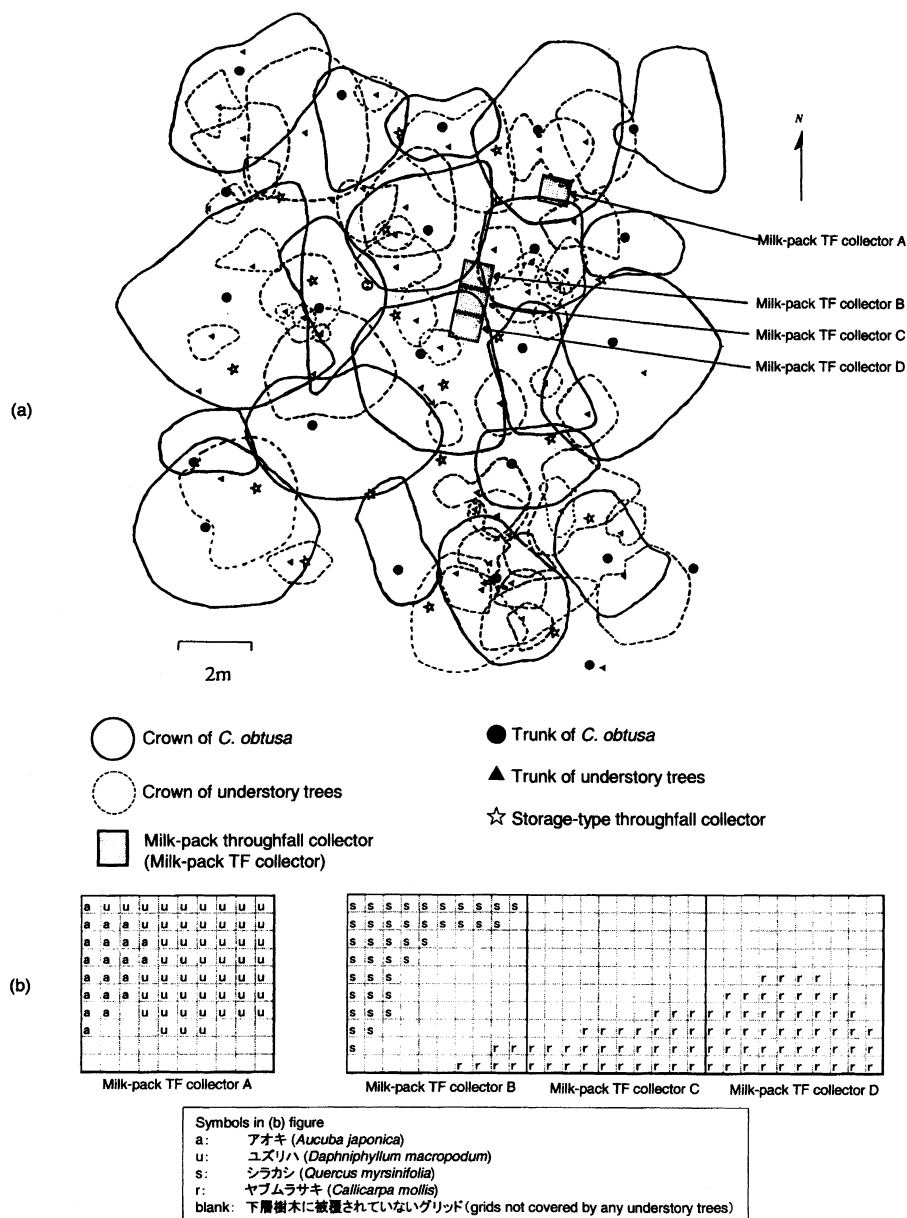


図-3 (a) 樹冠投影図と各雨量計の配置図, (b) 牛乳パック雨量計の各グリッドを覆う下層樹木の樹種
Fig. 3. (a) Canopy projections and locations of throughfall collectors at the study plot. (b) Species of understory covering each milk-pack throughfall collectors.

留雨量計（図-2(b)）20個を用いておこなった。試験区域の樹冠投影図と各雨量計の配置を図-3(a)に示す。牛乳パック雨量計内の各グリッドを覆っている樹冠の状態を把握するため、図-3(a)に示した樹冠投影図とは別に、4台の牛乳パック雨量計の設置場所における樹冠の被覆状態を詳細に調査した。当林分のヒノキの樹冠はほぼ閉鎖しているため、すべての牛乳パック雨量計はヒノキの樹冠で覆われていた。一方、下層樹木の被覆状態が各グリッドで異なることがわかった。図-3(b)は、各グリッドの真上を覆っている下層樹木の樹種を記号で示したものであり、空欄のグリッドはヒノキの樹冠にのみ覆われていることを示している。牛乳パック雨量計Aでは、アオキが21グリッド、ユズリハが52グリッドを覆っていた。牛乳パック雨量計Bでは、その40グリッドがシラカシに、6グリッドがヤブムラサキに覆われていた。牛乳パック雨量計Cのうち30グリッド、牛乳パック雨量計Dのうち50グリッドはヤブムラサキに覆われていた。

牛乳パック雨量計の各グリッドにおける貯留水量は50, 100, 200 cc メスシリンダーを用いて、2.5 cc 単位で測定し、簡易貯留雨量計の貯留水量は1000 cc メスシリンダーを用いて5 cc 単位で測定し、それぞれ受水面積で除して水高に換算した。

3.3 対象降雨

観測対象とした降雨は表-3に示した13降雨である。観測期間は1995年11月から1996年1月（降雨NO.1～NO.5）と1996年4月から5月（降雨NO.6～NO.13）に分かれており、以下ではこれを冬期間、春期間と称する。表-3中の開始時刻、終了時刻は時間単位に整理した自記雨量計の観測値から求めた。降雨量は新田観測点に配置した4個の簡易貯留雨量計（樹冠通過雨量観測

表-3 観測対象降雨一覧
Table 3. Rainfall events occurred during the observation period.

降雨 NO.	開始時刻		終了時刻		継続時間	降雨量	平均降雨 強度	最大10分降 雨強度
Rainfall NO.	Start time		End time		Duration of rainfall	Total rainfall	Mean rainfall intensity	Maximum 10 min rainfall intensity
	(Year/Month/Day)	(time)	(Year/Month/Day)	(time)	(hour)	(mm)	(mm/hour)	(mm/10min)
1	1995/11/7	21:00	1995/11/8	4:00	7	46.6	6.7	12.0
2	1995/11/14	23:00	1995/11/15	3:00	4	7.1	1.8	0.5
3	1995/11/20	10:00	1995/11/20	14:00	4	33.4	8.3	7.5
4	1995/12/29	6:00	1995/12/29	13:00	7	12.6	1.8	1.0
5	1996/1/8	12:00	1996/1/8	19:00	7	25.5	3.6	4.5
6	1996/4/11	21:00	1996/4/12	5:00	8	3.7	0.5	0.5
7	1996/4/16	6:00	1996/4/16	18:00	12	46.3	3.9	2.5
8	1996/4/18	6:00	1996/4/18	11:00	5	28.8	5.8	12.0
9	1996/4/19	17:00	1996/4/21	0:00	31	8.5	0.3	0.5
10	1996/5/2	8:00	1996/5/2	20:00	12	72.7	6.1	4.0
11	1996/5/5	0:00	1996/5/5	11:00	11	45.5	4.1	4.5
12	1996/5/8	23:00	1996/5/9	20:00	21	70.4	3.4	4.5
13	1996/5/13	14:00	1996/5/13	16:00	2	1.1	0.5	0.5

に使用したものと同じもの) による観測値の算術平均である。

Ⅳ. 結果と考察

4.1 降雨量と樹冠通過雨量の関係

冬期間においては全降雨をその都度観測したが、春期間では観測の都合により、2 降雨をまとめて1回で観測した。各降雨における樹冠通過雨量を表-4に示した。表-4では、樹冠通過雨量を下層樹木の樹冠に覆われていない簡易貯留雨量計9個の平均値(Tf_U)、下層樹木の樹冠に覆われている簡易貯留雨量計8個の平均値(Tf_L)、牛乳パック雨量計Aの平均値(Tf_A)、牛乳パック雨量計B, C, Dの平均値(Tf_B)の4通りのコレクター群の集計結果を比較している。なお、 Tf_U と Tf_L の計算に用いなかった3台の簡易貯留雨量計は、下層樹木の樹冠縁に配置されており、樹冠に覆われていたかどうかの判断が困難であった。そのため、これらの樹冠通過雨量を用いずに樹冠通過雨量 Tf_U および Tf_L の計算をおこなうこととした。図-4は、4種類の樹冠通過雨量の平均値と降雨量との関係を示したものである。 Tf_U と Tf_L の値を比較すると、降雨NO.5以外のすべての降雨において、上層木のみを通過した Tf_U が下層樹木の樹冠も通過した Tf_L の値を上回っていることがわかる。これは、上層木の樹冠を通過した雨水が下層樹木の樹冠部において、下層樹木の樹幹流下量や下層樹木による樹冠遮断蒸発量に配分された結果であると考えられる。次に、 Tf_A と Tf_B を比較すると、降雨イベントNO.5およびNO.6+7以外の2降雨以外のすべての降雨イベントにおいて、 Tf_B の値が Tf_A の値より大きくなっている。これは、牛乳パック雨量計Aのほとんど

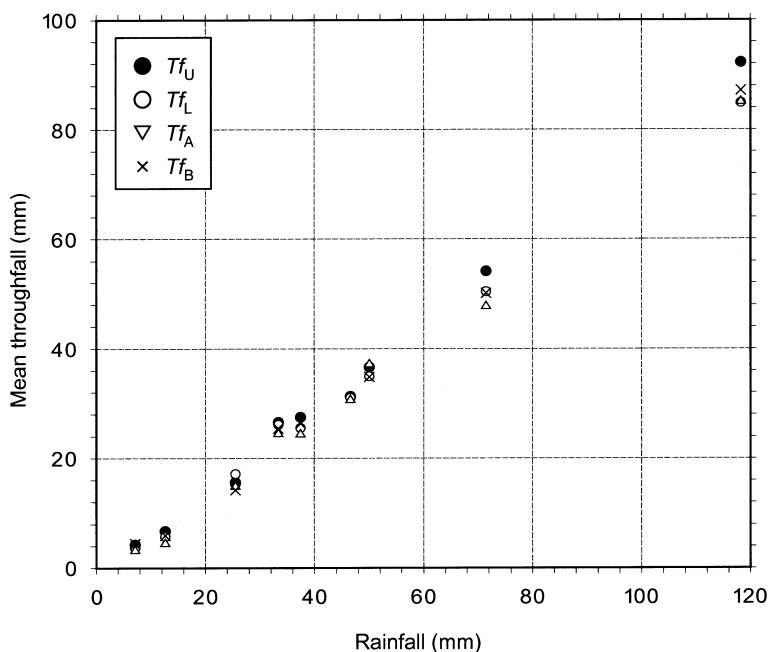


図-4 樹冠通過雨量の平均値 (Tf_U , Tf_L , Tf_A , Tf_B , 略語の詳細は表-4を参照) と降雨量の関係
Fig. 4. Relationship between mean throughfall (Tf_U , Tf_L , Tf_A , and Tf_B , see table4 for detail) and rainfall

表-4 観測対象降雨において観測された樹冠通過雨量の比較
Table 4. Comparison of various mean throughfall and its ratio to total rainfall.

降雨 NO. Rainfall NO.	降雨量 Total rainfall	平均樹冠通過雨量 Mean throughfall							
		Tf_U		Tf_L		Tf_A		Tf_B	
	(mm)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)
1	46.6	31.2	(67%)	31.0	(67%)	30.6	(66%)	no data	
2	7.1	4.2	(59%)	3.6	(51%)	3.1	(44%)	4.4	(62%)
3	33.4	26.5	(79%)	26.1	(78%)	24.4	(73%)	25.4	(76%)
4	12.6	6.7	(53%)	5.7	(45%)	4.4	(35%)	5.9	(47%)
5	25.5	15.6	(61%)	17.1	(67%)	14.8	(58%)	14.2	(56%)
6+7	50.0	36.6	(73%)	34.9	(70%)	37.1	(74%)	34.8	(70%)
8+9	37.4	27.4	(73%)	25.5	(68%)	24.3	(65%)	26.3	(70%)
10+11	118.2	92.2	(78%)	84.8	(72%)	85.0	(72%)	87.1	(74%)
12+13	71.5	54.1	(76%)	50.4	(70%)	47.7	(67%)	50.1	(70%)

下層樹木に覆われた9個の簡易貯留雨量計の平均値 (Tf_L), 上層木の上に覆われた8個の簡易貯留雨量計の平均値 (Tf_U), 牛乳パック雨量計Aの全グリッドの平均値 (Tf_A), 牛乳パック雨量計B~Dの全グリッドの平均値 (Tf_B) の4種類の値が示されている。また、各樹冠通過雨量の降雨量に対する割合をカッコ内に示した。
Mean throughfall for 9 storage-type throughfall collectors under the canopy of understory trees (Tf_L), 8 storage-type throughfall collectors covered only by upper story trees (Tf_U), 100 sub-collectors in milk-pack throughfall collector A (Tf_A), and 300 sub-collectors in milk-pack throughfall collectors B, C, and D (Tf_B), were shown, respectively.

のグリッドが下層樹木で覆われていたのに対して、牛乳パック雨量計 B, C, D では下層樹木に覆われない部分の割合が大きかったことによると考えられる。降雨 NO.5 において、 Tf_U より Tf_L のほうが大きく、また Tf_B より Tf_A が大きくなった。これらの大小関係は、通常の降雨における関係とは違った傾向を示しているため、降雨の平均強度や最大強度といった降雨条件から降雨 NO.5 の特徴を検討したが、その原因については不明であった。また、簡易貯留雨量計で観測された Tf_U と Tf_L が牛乳パック雨量計で観測された Tf_A と Tf_B よりも大きくなる傾向があった (図-4)。これは、降雨終了後から水量の測定までの時間において、簡易貯留雨量計よりも牛乳パック雨量計のほうが貯留水を蒸発させやすい構造をもっていることが原因であると考えられる。

4.2 樹冠通過雨量の空間分布に下層樹木が及ぼす影響

牛乳パック雨量計によって観測された樹冠通過雨量の観測結果の1例として、降雨 NO.8+9 において観測された樹冠通過率 (降雨量に対する樹冠通過雨量の割合) の空間分布を図-5(a) に示した。例に挙げた降雨 NO.8+9 の総降雨量は 37.4 mm, 全牛乳パック雨量計で測定された樹冠通過雨量の平均値は 35.4 mm, 樹冠通過率の平均値は 0.71 である。また、図-5(b) で示した下層樹木の被覆図は図-3(b) とまったく同じものであるが、図-5(a) の分布図と比較するために再掲した。図-5(a) から、全般的に、下層樹木に覆われているグリッドの樹冠通過雨量は、下層樹木に覆われていないグリッドの樹冠通過雨量よりも少ない傾向が読み取れる。ただし、アオキやユズリハの樹冠下では、樹冠通過率が 0.9 以上のグリッド、すなわち林外降雨量に匹敵するかあるいはそれ以上の樹冠通過雨量が観測されたグリッドが存在することがわかる。また、これらの樹冠通過

率の高かったグリッドの近辺には樹冠通過率が0.5以下のグリッドが幾つか存在した。このような極端に樹冠通過雨量が多いあるいは少ないグリッドは、シラカシやヤブムラサキの樹冠下ではほとんど確認されなかった。一方、ヒノキ樹冠にのみ覆われ下層樹木には覆われていないグリッドの大部分において、その樹冠通過率の値は0.7から0.8の範囲に集中していることがわかる。以上のように、ヒノキ人工林で約2 m²の範囲における樹冠通過雨量の空間分布の実態を0.005 m²の分解能で調べた結果、その分布形成に及ぼす下層樹木の樹冠の影響が大きいこと、またその影響の大きさは下層樹木の樹種によって異なることが把握された。

ヒノキ人工林における樹冠通過雨量の空間分布形成に下層樹木が与える影響を樹種毎に検討するため、各下層樹木の樹冠下で観測された樹冠通過雨量の頻度分布を比較したものが図-6である。樹種によりグリッド個数が異なるため、図-6の縦軸は累積相対度数で表現し、横軸は樹冠通過率で示した。なお、図-6で例に挙げた降雨NO.2の総降雨量は7.1 mm、牛乳パック雨量計で観測された樹冠通過雨量の平均値は4.1 mm、樹冠通過率の平均値は0.57である。図-6より、下層樹木に被覆されていないグリッドに分類された場所における樹冠通過率は約0.6に集中しており、その頻度分布が一様であることがわかる。また、ヤブムラサキに覆われていたグリッドにおける樹冠通過雨量は下層樹木に被覆されていないものと同様の分布特性を示していた。これは、葉が小さく枝が細いというヤブムラサキの形態上の特徴が影響した結果であると考えられる。一方、アオキに覆われたグリッドでは、樹冠通過率が0.2から1.8まで幅広く頻度分布しており、

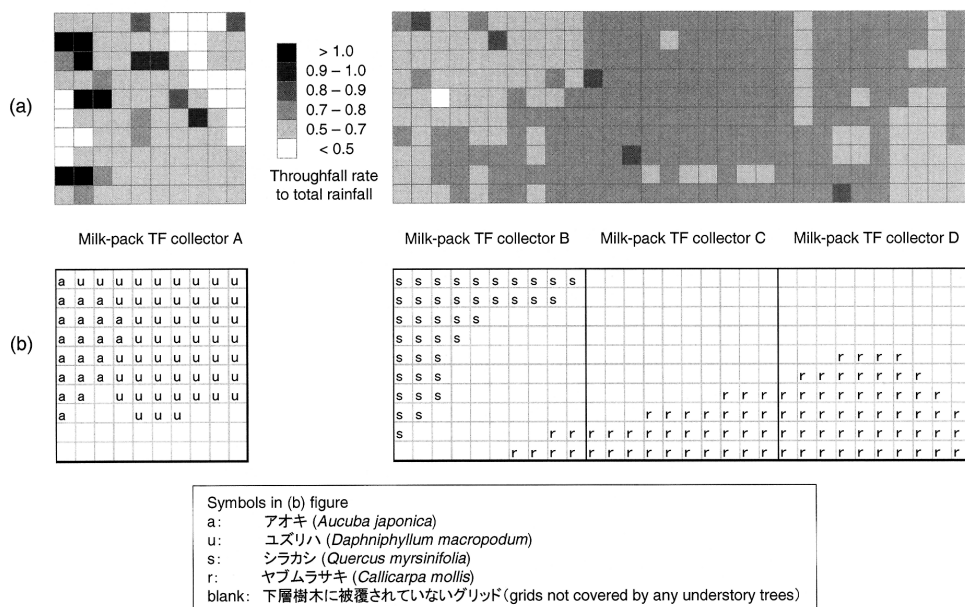


図-5 (a) 牛乳パック雨量計による樹冠通過雨量分布の観測結果(降雨NO.8+9の例, 降雨量37.4 mm)
(b) 牛乳パック雨量計の各グリッドの下層樹木の被覆状況

Fig. 5. (a) Spatial distribution of throughfall observed by four milk-pack throughfall collectors. A result of rainfall NO. 8+9 was drawn as an example.
(b) Detailed canopy cover projection of understory trees which covered the four milk-pack throughfall collectors.

不均一な空間分布特性を示すことがわかる。樹冠通過率が1.0以上の極端に多い樹冠通過雨量（以下、集中滴下点と称する）が観測される場所は、アオキの樹冠で覆われたグリッドであった。ユズリハの樹冠下で観測された樹冠通過雨量の頻度分布は、アオキの樹冠下で形成されたものに似ていたが、降雨 NO.2 の測定結果では集中滴下点の存在は確認できなかった。このようにアオキやユズリハの樹冠下でばらつきの大きい樹冠通過雨量の空間分布が形成される理由として、アオキ・ユズリハの葉は大きいことが考えられる。さらに、アオキの場合は、その形態上の特徴のある弓状の枝の形状が、その特徴的な樹冠通過雨量の空間分布形成に影響していたと考えられる。シラカシのように葉の大きさがヤブムラサキとユズリハ・アオキの間にあるような下層樹木によって覆われたグリッドで観測された樹冠通過雨量の頻度分布は、ヤブムラサキとアオキ・ユズリハの中間的な特性を示していた。以上の考察により、下層樹木の樹冠下で形成される樹冠通過雨量の空間分布特性は下層樹木の樹種により異なることが明らかとなった。また、少なくとも本研究で取り扱った4樹種の結果からは、下層樹木の葉の大きさが大きくなるほど樹冠通過雨量の空間分布のばらつきが大きくなるという結果となった。

4.3 集中滴下点の出現パターン

ヒノキ人工林において、約 2 m^2 の範囲内の樹冠通過雨量分布を詳細に調べる牛乳パック雨量計を配置して観測を行った結果、特定の下層樹木の樹冠下で降雨量を大きく上回る樹冠通過雨量が発生する集中滴下点の存在が確認された。ここでは、降雨毎の集中滴下点の発生頻度や出現パターンについて検討を加える。図-7は、集中滴下点が頻繁に出現した牛乳パック雨量計 A における樹冠通過雨量の分布を観測毎に並べて示したものである。図-7のすべての図は樹冠通過率で表現されているため、樹冠通過雨量の空間分布形状を相互に比較しやすくなっている。また、すべての図において黒色で示されたグリッドは樹冠通過率が1.0以上であり集中滴下点の出現を意

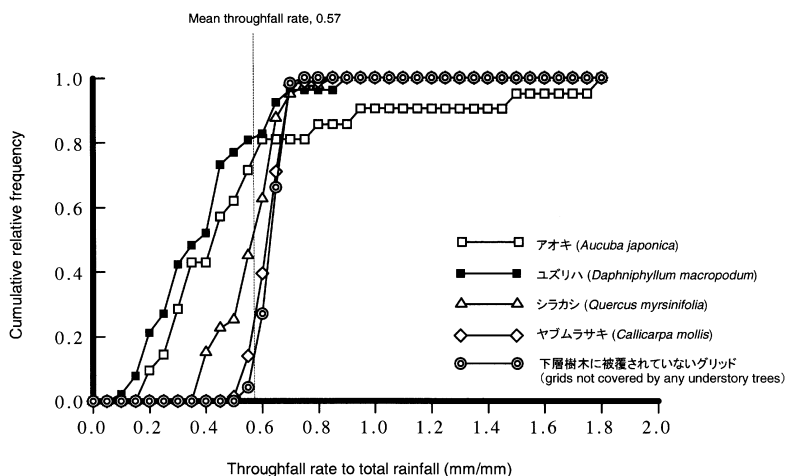


図-6 下層樹木の樹種による樹冠通過雨量の頻度分布特性の違い（降雨NO.2の観測結果の例）

Fig. 6. Difference in frequency distributions of throughfall observed beneath the canopy of various understory trees in the *Chamaecyparis obtusa* stand. A result of rainfall NO.2 was shown as an example.

味している。

降雨 NO.2 と NO.4 の結果において樹冠通過率が全体的に低くなっている。一般に、樹冠通過雨量の降雨量に対する割合は、一雨降雨量が少ないほど低くなることが知られている（例えば、村井 1970, 服部ら 1982）。降雨 NO.2 や NO.4 の降雨量は比較的少なく、これらの降雨で観測された樹冠通過率が低いことは既往の研究結果とも一致する。ただし、これらの2降雨では全体的に樹冠通過率が低かったにもかかわらず、各降雨の分布図にはそれぞれ2グリッドの集中滴下点が出現している。これらの集中滴下点は少ない降雨でも出現していることから、降雨の比較的初期の段階から集中的な雨水の滴下が始まることにより形成されたと推察される。一方、降雨 NO.1 と降雨 NO.5 では、集中滴下点が観測されなかった。これらの降雨の総降雨量は降雨 NO.2 や降雨 NO.4 よりも大きかったことから考えると、降雨量以外の要因が集中滴下点の形成が阻害しているはずである。降雨 NO.1, NO.2, NO.4, NO.5 以外の各降雨では、牛乳パック雨量計 A の全 100 グリッドのうち 4～8 グリッド、平均的には約 6 グリッドの頻度で集中滴下点が出現するという結果となった。ヒノキ人工林における樹冠通過雨量の集中滴下点の出現頻度を 9 降雨について検討した結果、牛乳パック雨量計 A の範囲内（約 0.5 m²）において、降雨量の少ない場合にはその出現頻度は少ないが、降雨量が多い場合には約 6 % の範囲が集中滴下点であった。また、降雨量が比較的大きいにもかかわらず、集中滴下点の出現が全く確認されない降雨が 2 降雨存在した。

次に、集中滴下点の出現パターンについて検討する。図-7 に示された 9 回分の結果は、おおまかに 3 種類の出現パターンにわけることができる。第 1 パターンは降雨 NO.2 と降雨 NO.4、第 2 パターンは降雨 NO.3, NO.6+7, NO.8+9, NO.10+11, NO.12+13、第 3 パターンは降雨 NO.1 と NO.5 の出現パターンである。第 1 パターンである降雨 NO.2 と NO.4 における樹冠通過雨量の空間分布形状は互いに共通する部分が多く、集中滴下点の出現パターンも似ている。これらの集中滴下点は、アオキあるいはユズリハの樹冠下で発生していた。上述したようにこれらの 2 降雨はともに降雨量が少なかったが、それが出現パターンの共通性を示す原因であると考えられる。

第 2 パターンに分類された降雨は、多くの集中滴下点が確認されたグループである。これらの降雨で出現した集中滴下点の位置は、降雨によって 1 グリッド分程度移動することはあっても、樹冠通過率が高かった 0.9～1.0 に分類された比較的樹冠通過雨量の多かったグリッドを含めて考えると、降雨毎に共通する部分が多いことがわかる。つまり、これらの降雨では同じようなグリッドに樹冠通過雨量が集中したという結果である。第 2 パターンに分類された降雨では、第 1 パターンでアオキ・ユズリハの樹冠下で確認された集中滴下グリッドに加え、別のグリッドでも集中滴下点が出現した。これらは、アオキやユズリハの樹冠下で出現する場合と、下層樹木の樹冠の外側に相当する部分（図-3(b)）でも集中滴下点が発生する場合があることがわかる。下層樹木の樹冠の外側で集中滴下点が観測されたケースは降雨量の少ない降雨（降雨 NO.2 や NO.4）では確認されなかったことから、ヒノキや下層樹木の樹冠が雨水で十分に飽和した時点から、これらのグリッドへの樹冠通過雨の集中滴下が開始する可能性が考えられた。

第 3 パターンに分類された降雨 NO.1 と NO.5 では、上述したように、十分な降雨量であったにもかかわらず集中滴下点の出現がなく、他の 7 降雨の結果とは明らかに違った樹冠通過雨量の空間分布形状をしていることがわかる。これらの樹冠通過雨量は、他の 7 降雨の結果と比較すると一様な空間分布を示しており、それらは互いに似ていることがわかる。このような樹冠通過雨量の分布が形成される原因について、表-3 に挙げた降雨強度や最大 10 分降雨強度といった降雨条

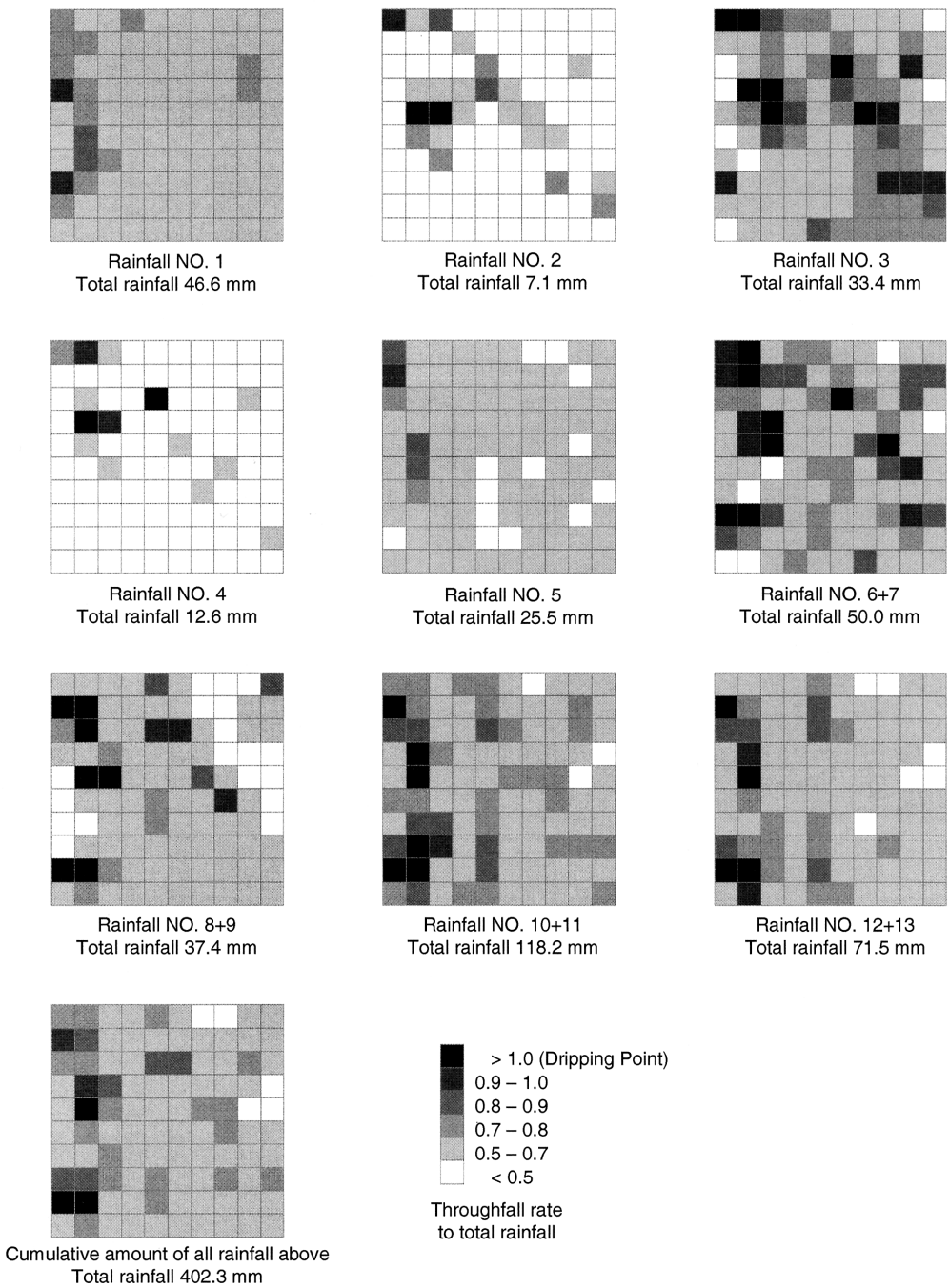


図-7 牛乳パック雨量計Aで観測された樹冠通過雨量の空間分布の経時変化
Fig. 7. Time changes in throughfall distribution observed by milk-pack throughfall collector A.

件から検討したが有意な情報は抽出できなかった。上述したように、降雨 NO.5 において簡易貯留雨量計によって観測された樹冠通過雨量の平均値 Tf_U と Tf_L の大小関係が通常の降雨とは違った傾向を示していた。つまり、通常の降雨では下層樹木の樹冠下での樹冠通過雨量 (Tf_L) が下層樹木に覆われていない場所での樹冠通過雨量 (Tf_U) よりも少ないが、降雨 NO.5 では Tf_L のほうが Tf_U よりも多いという関係があった。また、降雨 NO.1 では、 Tf_U と Tf_L の値はほぼ同じであった。本研究では、これらの観測事実と集中滴下点が出現しなかったことについて直接関係付けることはできなかったが、今後は、降雨条件以外の要因、例えば降雨中の風速条件やその他の気象条件と集中滴下点の出現の関係についての検討が必要である。全9降雨によって生じた樹冠通過雨量をグリッド毎に積算した値の分布図を図-7の最下段に示した。樹冠通過雨量の積算した図において、集中滴下点が下層樹木の樹冠の外側に2グリッドとアオキの樹冠下に1グリッド、樹冠通過率が0.5以下のグリッドがユズリハの樹冠下に5点存在しており、その空間分布のばらつきが大きいことがわかる。積算値の分布図にも集中滴下点が現れたのは、第2パターンの集中滴下点の位置が降雨毎にほとんど変化しなかったことが原因である。

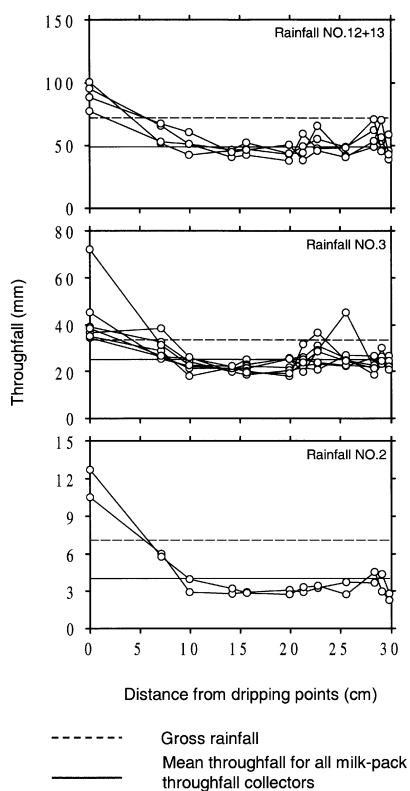


図-8 集中滴下点からの距離と樹冠通過雨量の関係
Fig. 8. Relationship between throughfall amount and distance from dripping points.

4.4 集中滴下点の大きさ

ここでは、図-7で示した各集中滴下点の周辺グリッドにおける樹冠通過雨量の大小、つまり1点の集中滴下点の空間的な広がりについて検討する。図-8は、全9降雨のうち降雨量の異なる3降雨NO.2, NO.3, NO.12+13で出現したすべての集中滴下点に着目し、それらの集中滴下点から離れるにしたがい、樹冠通過雨量がどのように変化していたかを示したものである。なお、それぞれの降雨で確認された集中滴下点はすべて牛乳パック雨量計Aに出現したものであり、その数は降雨NO.2が2点、降雨NO.3が7点、NO.12+13が4点である。図-8の縦軸は樹冠通過雨量、横軸は各集中滴下点からの距離、図中の点線は林外降雨量、実線は牛乳パック雨量計A～Dの平均樹冠通過雨量をそれぞれ表している。集中滴下点からの距離は、ある集中滴下グリッドに隣接する4つのグリッドとの距離は7.1 cm, 斜め方向に隣接する4つのグリッドとの距離は $7.1 \times \sqrt{2}$ cmとして計算している。また、集中滴下点から等しい距離にある牛乳パックが複数個ある場合には、それらの樹冠通過雨量の平均値をプロットした。

図-8 から、降水量を大小に関係なく、集中滴下点から約 7 cm 離れた場所の樹冠通過雨量は、

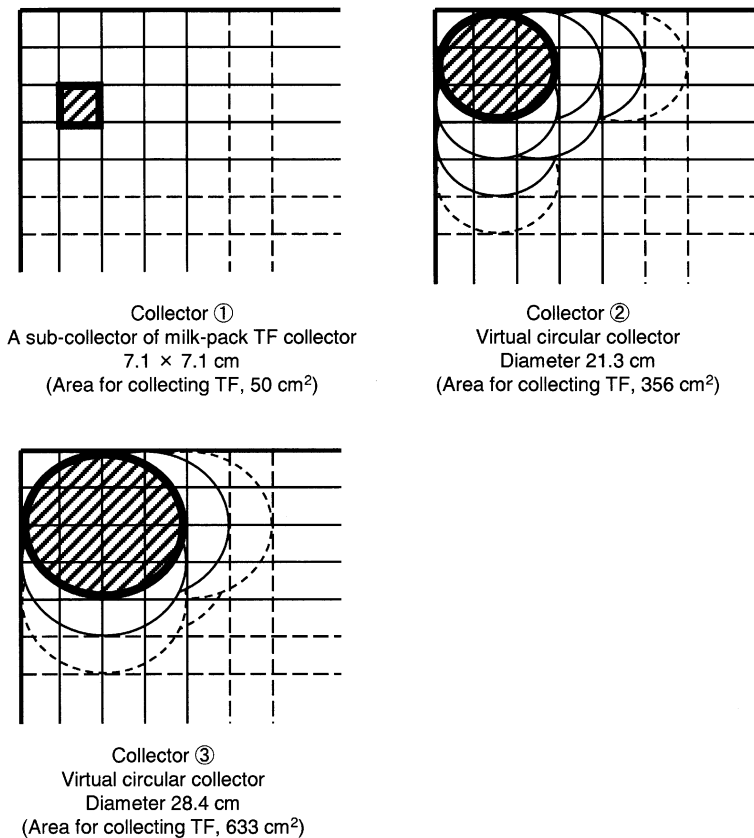


図-9 集水面積の違う3タイプの樹冠通過雨コレクターと牛乳パック雨量計のグリッドの関係
Fig. 9. 3 types of virtual throughfall collectors in relation to the milk-pack throughfall collectors.

降雨量よりも低い値を示すが、平均樹冠通過雨量よりも多い値を示している。この結果を考慮して、図-7の樹冠通過率の分布を再度確認すると、1つの集中滴下グリッドに隣接したグリッドは、比較的樹冠通過率の高いグリッドである場合が多い。しかし、集中滴下点から約10 cm以上離れたグリッドでの樹冠通過雨量は、図-8が示すようにおおむね平均樹冠通過雨量に近い値となっていることがわかる。また、降雨 NO.2や降雨 NO.3 では、集中滴下点から約10 cm離れたグリッドでは、その樹冠通過雨量が平均樹冠通過雨量よりも小さい値を示す例が確認された。仮に、1点の集中滴下点の周りに存在した平均樹冠通過雨量よりも多い樹冠通過雨量が観測された部分を集中滴下点の一部とすると、本研究で観測された1点の集中滴下点の大きさは半径約7 cmの円の範囲であるといえる。

4.5 樹冠通過雨コレクターの集水面積と樹冠通過雨量の頻度分布形との関係

森林の樹冠通過雨量の面積平均値を推定する際に用いるコレクターは、その集水面積、形状、配置方法、個数に関して決められた手法が無いのが現状である。今回開発した牛乳パック雨量計は小さな雨量計の集合体であるため、より集水面積の大きいコレクターを、その受水範囲内に配置したと想定することができる。そこで、本研究の観測結果を用いて、コレクターの集水面積を大きくした場合に樹冠通過雨量の頻度分布形がどのように変化するのかについて検討した。

樹冠通過雨量のバリエーションが最も大きかった牛乳パック雨量計Aの受水面の範囲内に、図-9に示した集水面積の異なる仮想雨量計②と③を配置したと想定した。図-9の雨量計①は牛乳パック雨量計の1個のグリッドである。仮想雨量計②と③は図-9に示すように牛乳パック雨量計

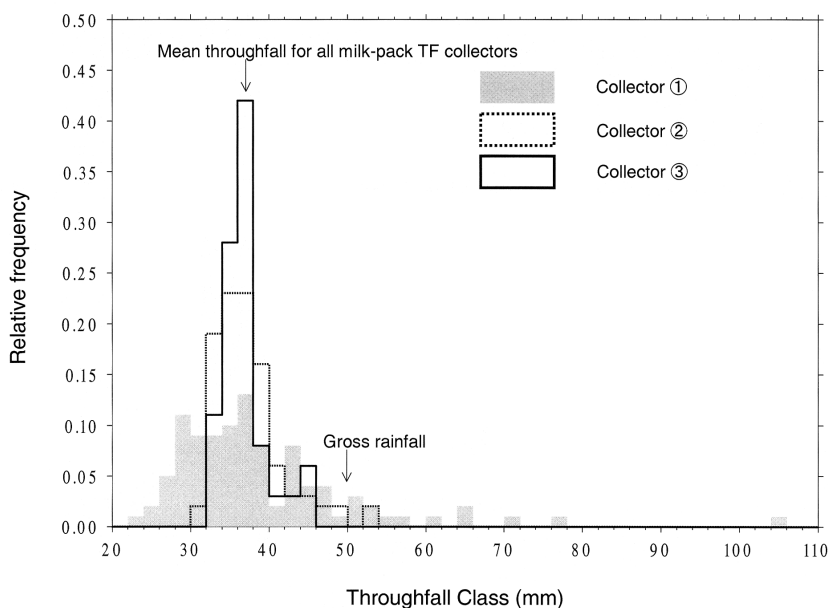


図-10 3種類の樹冠通過雨コレクターを用いて測定された樹冠通過雨量の頻度分布（降雨NO.6+7の例）
Fig. 10. Frequency distribution of throughfall measured or calculated using 3 types of throughfall collectors. A result of rainfall NO. 6+7 was shown as an example.

Aの受水範囲内に配置された(②では64通り, ③では49通り), 各仮想雨量計が捕捉する樹冠通過雨量を, 仮想雨量計の集水枠に含まれる範囲のグリッドで測定された樹冠通過雨量を足し合わせるにより算出した。なお, ある仮想雨量計が1グリッドを中途半端に仕切るような場合(例えば, 図-9の仮想雨量計②の左上角のグリッド), 1グリッドの集水面積(約 50 cm^2)とその仮想雨量計の集水枠内とされた部分の面積の比率を考慮して, 仮想雨量計の樹冠通過雨量に加算した。

図-10は, 降雨 NO.6+7(降雨量 50.0 mm , Tf_A は 37.1 mm)において観測された樹冠通過雨量を用いて, 雨量計①と仮想雨量計②および③によって観測あるいは計算された樹冠通過雨量(①は100通り, ②では64通り, ③では49通り)を頻度分布図で比較したものである。雨量計の種類によって標本個数が異なるため, 図-10の縦軸は相対度数で表現されている。降雨 NO.6+7における Tf_A が 37.1 mm であるのに対して, 雨量計①が 22 mm から 106 mm の範囲に幅広く分布していることがわかる。一方, 雨量計①に対して約7倍の集水面積をもつ仮想雨量計②で観測される樹冠通過雨量の分布幅は, 30 mm から 54 mm の範囲となり, そのばらつきの範囲が狭くなったことがわかる。ただし, 仮想雨量計②を用いて樹冠通過雨量を観測した場合でも, 配置場所によっては, 林外降雨量(50.0 mm)を超えるような集中滴下点を観測する可能性があることを示している。さらに, 仮想雨量計③のように集水面積 633 cm^2 まで大きくした場合, 観測される樹冠通過雨量の分布の幅は 32 mm から 46 mm となり, その変動幅が非常に小さくなった。仮想雨量計③のような雨量計を用いた場合には, 牛乳パック雨量計Aのどの場所に設置しても, 集中滴下点は観測されることはないといえる。

図-10において, Tf_A は $36 - 38\text{ mm}$ の階級に分類されるが, 各雨量計①, ②, ③が示す樹冠通過雨量 $36 - 38\text{ mm}$ の階級の相対度数は, それぞれ約 0.13 , 0.24 , および 0.42 となっている。この結果は, 仮に牛乳パック雨量計の集水範囲の樹冠通過雨量を各雨量計1台で測定しようとした場合, 雨量計①を用いた場合には約 13% の確率で, 雨量計②を用いた場合には約 24% の確率で, また雨量計③を用いた場合には約 42% の確率で, その面積平均値をおよそ $\pm 1\text{ mm}$ の誤差で測定できるということを意味している。本研究で用いた簡易貯留雨量計(集水面積 346 cm^2)は, 本研究をおこなったヒノキ林分における樹冠通過雨量の林分平均値を推定するために, 林床にまばらに配置された雨量計群である。この簡易貯留雨量計の集水面積は, 図-9における仮想雨量計②(集水面積 356 cm^2)とほとんど同じ大きさである。当林分の樹冠通過雨量の林分平均値あるいはその推定誤差を簡易貯留雨量計の測定結果から推定する際に, 図-10で得られた隙間無く実測された樹冠通過雨量の頻度分布形の情報を活用していくことが今後の解析の課題となった。

V. ま と め

本研究の観測をおこなったヒノキ人工壮齢林は, 上層木が樹高 20 m 前後の樹冠の閉鎖したヒノキ, 下層樹木が樹高約 $2 - 7\text{ m}$ の広葉樹で構成されており, わが国における手入れされた典型的な人工林のひとつであるといえる。このような森林における約 2 m^2 の範囲の樹冠通過雨量を集水面積約 50 cm^2 の小雨量計(グリッド)400個を格子状に隙間なく並べて観測した結果, その空間分布の実態が明らかとなった。また, その空間分布特性を検討した結果, 以下のことが示された。

(1) 下層樹木の樹冠下にあるグリッドで観測された樹冠通過雨量は, おおむね下層樹木に覆わ

れていないグリッドの樹冠通過雨量よりも少ないが、一部のグリッドでは樹冠通過率が0.9以上となり樹冠通過雨が集中していることがわかった。特に、アオキの樹冠下では樹冠通過率が1.0以上のグリッド、すなわち集中滴下点の出現が確認された。これらの集中滴下点は、シラカシやヤブムラサキの樹冠下では観測されなかった。また、下層樹木の樹種毎にその樹冠下で観測される樹冠通過雨量の頻度分布を比較した結果、本研究で取り扱った4樹種の比較からは、樹木の葉の大きさが大きくなるほど樹冠通過雨量の空間分布が不均一になるという結果を得た。

(2) 集中滴下点が頻繁に出現した約0.5 m²の範囲を対象にして、降雨毎の集中滴下点の発生頻度を調べた結果、降雨量の少ない場合には集中滴下点の出現頻度は少ないが、降雨量が多い場合には平均6グリッドの範囲が集中滴下点であった。また、降雨量が比較的大きいにもかかわらず、集中滴下点の出現が全く確認されない降雨が、全9降雨のうち2降雨存在した。その原因についての検討は今後の課題となった。集中滴下点の出現パターンはおおまかに3種類の出現パターンにわけることができた。本研究の観測対象となった降雨の結果からは、9降雨のうち明らかに空間分布形状の異なる2降雨を除いて、おおむね同じグリッドに集中滴下点が出現することが明らかとなった。

(3) 1点の集中滴下点の大きさについて検討をおこなった結果、本研究で観測された集中滴下点の大きさは半径約7 cmの円の範囲であることがわかった。集中滴下グリッドから10 cm以上離れたグリッドでの樹冠通過雨量は、平均樹冠通過雨量とほぼ同じ値かあるいは若干少ない値を示していた。

(4) 樹冠通過雨のコレクターの集水面積と樹冠通過雨量の頻度分布形の関係についての検討をおこなった結果、集水面積が大きくなるほど樹冠通過雨量の頻度分布のばらつきは小さくなることが示された。これらの関係を、樹冠通過雨量の林分平均値やその誤差範囲の推定に応用していくことが今後の課題となった。

謝 辞

本研究に用いた牛乳パック雨量計の材料である牛乳パックの収集（1995年夏）にあたり、東京大学農学部1号館の匿名の皆様にご協力をいただいた。また、現地での一降雨あたり400回に及ぶ水量計測にあたっては、当時の東京大学農学部森林理水および砂防研究室の執印康裕助手（現・同講師）、白木克繁氏（現・東京農工大学助手）をはじめ、学部生、大学院生の皆様、特に大塚彩子氏、藤田俊忠氏、田中友理氏には大変にご協力いただいた。さらに、千葉演習林の井出林長（現・東京大学大学院農学生命科学研究科教授）や鈴木誠講師をはじめ職員の方々には、袋山沢試験流域における実験全般にご理解を示していただき、また現場での作業や観測が円滑に行えるようにとり計らってくださった。ここに記して謝意を表します。

要 旨

ヒノキ人工壮齡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を明らかにすることを目的として、隙間なく格子状に並べた雨量計群を用いて複数の降雨における樹冠通過雨量を測定した。その結果、下層樹木の樹冠下における樹冠通過雨量は、おおむね下層樹木に覆われていない部分の樹冠通過雨量よりも少ないが、一部で樹冠通過雨が極端に集中する箇所（集中滴下点）の存在が確認された。これらの集中滴下点は、アオキやユズリハといった葉の大きい樹木

の樹冠下で出現したが、シラカシやヤブムラサキといった葉の小さい樹木の樹冠下では観測されなかった。降雨毎の集中滴下点の発生頻度を調べた結果、降雨量の少ない場合には集中滴下点の出現頻度は少ないが、降雨量が多い場合には出現頻度が高くなる傾向があった。ただし、降雨量が比較的大きいにもかかわらず、集中滴下点の出現が全く確認されない降雨が、全9降雨のうち2降雨存在した。その原因についての検討は今後の課題となった。また、これらの2降雨以外の7降雨では、おおむね同じ場所に集中滴下点が出現することが確認された。また、1点の集中滴下点の大きさについて検討をおこなった結果、本研究で観測された集中滴下点の大きさはただか半径約7 cmの円の範囲であることがわかった。本研究の観測結果を林分の樹冠通過雨量やその誤差の推定に応用することを念頭において、いくつかの集水面積の異なる樹冠通過雨コレクターを用いて樹冠通過雨量の仮想的な測定をおこない、それぞれのコレクターで測定される樹冠通過雨量の頻度分布の形状を明らかにした。

キーワード： 樹冠通過雨・空間分布・ヒノキ壮齡人工林・下層樹木・集中滴下点

引 用 文 献

- AUSSENAC, G.(1970) Action du couvert forestier sur la distribution au sol des precipitations. *Ann. Sci. Forest.* 27: 383-399.
- BOUTEN, W., HEIMOVAARA, T.J., and TIKTAK, A.(1992) Spatial patterns of throughfall and soil water dynamics in a Douglas Fir stand. *Water Res. Res.* 28: 3227-3233.
- CARLETON, T.J., and KAVANAGH, T.(1990) Influence of stand age and spatial location on throughfall chemistry beneath black spruce. *Can. J. For. Res.* 20: 1917-1925.
- FORD, E.D., and DEANS, J.D.(1978) The effects of canopy structure on stemflow, throughfall and interception loss in a young sitka spruce *Picea sitchensis* plantation. *J. Appl. Ecol.* 15: 905-917.
- HELVEY, J.D., and PATRIC, J.H.(1965) Canopy and litter interception of rainfall by hardwoods of Eastern United States. *Water Res. Res.*, 1(2): 193-206.
- HUTJES, R.W.A., WIERDA, A., and VEEN, A.W.L.(1990) Rainfall interception in the Tai forest, Ivory Coast: application of two simulation models to a humid tropical system. *J. Hydrol.* 114: 259-275.
- JOHNSON, R.C. (1990) The interception, throughfall and stemflow in a forest in highland Scotland and the comparison with other upland forests in the U.K. *J. Hydrol.* 118: 281-287.
- KOSTELNIK, K.M., LYNCH, J.A., GRIMM, J.W., and CORBETT, E.S.(1989) Sample size requirements for estimation of throughfall chemistry beneath a mixed hardwood forest. *J. Environ. Qual.* 18: 274-280.
- LLOYD, C.R., and MARQUES, F.A.de O. (1988) Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rainforest. *Agric. For. Meteorol.* 42: 63-73.
- LOUSTAU, D., BERBIGIER, P., GRANIER, A., and MOUSSA, F. El H.(1992) Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. 1. Variability of throughfall and stemflow beneath the pine canopy. *J. Hydrol.* 138: 449-467.
- 間島政紀・田瀬則雄(1982) アカマツ林内の降雨量の空間的分布について、筑波大学水理実験センター報告6: 75-82.
- 中北理・井倉洋二・細川雅永・丸谷知己・竹下敬司(1984) 林内における降雨パターンについて、第95回日林論: 517-518.
- 中北理・静孝明・丸谷知己・竹下敬司(1985) 林内における降雨パターンについて(Ⅲ), 第96回日林論: 537-538.
- 中西康二(1995) スギ林内における雨量と物質濃度の空間分布形成, 東京農工大学修士論文(未発表)。
- PEDERSEN, L.B.(1992) Throughfall chemistry of Sitka Spruce stands as influenced by tree spacing. *Scand. J. For.*, 7: 433-444.
- ROBSON, A.J., NEAL, C., RYLAND, G.P., and HARROW, M.(1994) Spatial variations in throughfall chemistry at the small plot scale. *J. Hydrol.* 158: 107-122.

- RUTTER, A.J.(1963) Studies on the water relations of *Pinus sylvestris* in plantation conditions 1. Measurements of rainfall and interception. *J. Ecol.* 51: 191-203.
- 東京大学千葉演習林袋山沢研究グループ編(2002) 東京大学千葉演習林袋山沢における総合対照流域法調査に関する報告書, 東京大学大学院農学生命科学研究科森林科学専攻森林理水および砂防工学研究室, 東京. 260.
- UBARANA, V.N.(1996) Observations and modelling of rainfall interception at two experimental sites in Amazonia, In *Amazonian Deforestation and Climate*, GASH, J.H.C., NOBRE, C.A., ROBERTS, J.M., and VICTORIA, R.L.(eds.), 151-162.
- WAIDI, S., WONG, W.M., DOUGLAS, I., and SPENCER, T.(1992) Throughfall, stemflow, overland flow and throughflow in the Ulu Segama Rain Forest. *Sabah. Phil. Trans. Roy. Soc. London B* 335: 389-395.

(2004年6月30日受付)

(2005年1月12日受理)

Summary

Spatial distributions of throughfall beneath canopies of understory trees in a mature *Chamaecyparis obtusa* stand were observed by grid-type throughfall collectors. Throughfall amount beneath the canopies of understory trees tended to be smaller than that observed at grids covered only by canopy of *Chamaecyparis obtusa*. However, dripping points, where throughfall exceeded gross rainfall, often appeared under canopies of *Aucuba japonica* and *Daphniphyllum macropodum*, the species with relatively large leaves, and never appeared under canopies of *Quercus myrsinifolia* and *Callicarpa mollis*, the species with smaller leaves. With respect to frequency of appearances of dripping points, we found that the dripping points appeared more frequently in large storms than in small storms. However, no dripping point was found in two relatively large storms among nine observations, which seems to be exceptional. The pattern of the distributions of dripping point over a grid-type collector had a tendency to be fixed in most of the storms. The size of one dripping point found in this forest was a circular area with diameter of approximately 14 cm. As an example of applying the result of this study to estimations of mean throughfall of this forest or its error ranges, a relationship between area of collecting throughfall and possible errors in measuring throughfall was shown by supposing to measure throughfall in the area of a grid-type collector with some virtual throughfall collectors.

Key words: Throughfall, Spatial distribution, mature *Chamaecyparis obtusa* stand, Understory trees, Dripping point