常緑樹林地におけるリター遮断損失量の推定

Estimation of the Litter interception Loss in the Evergreen Forest

佐藤嘉展*

Yoshinobu SATO

(九州大学大学院生物資源環境科学府)

Graduate School of Bioresource and Bioenvironmental Science, Kyushu University

大槻恭一**・小川 滋**

Kyoichi OTSUKI・Shigeru OGAWA

(九州大学大学院農学研究院)

Faculty of Agriculture, Kyushu University

A simple model to evaluate litter interception losses in the plantation stands of *Cryptomeria japonica* and *Lithocarpus edulis* were developed. We applied this model to simulate the litter interception and evaporation rates under the different rainfall conditions and different shapes of the litter layer. Model parameters were estimated from field data using microlysimeter at each stand. The litter interceptions under various rainfall conditions were estimated using throughfall data. Evaporation rates from the litter layer during the dry periods were estimated by the relative water content of the litter layer. The estimated annual litter interception loss of *C. japonica* stand was 5.1~11.5% of throughfall, and that of *L. edulis* stand was 9.5~18.0% of throughfall. These results suggest that the litter interception process has a significant role in the forest hydrological cycles.

Key words: Litter interception loss, Evaporation rate, *Cryptomeria japonica*, *Lithocarpus edulis*, Model simulation

森林地における林床水分動態を明らかにするため、常緑針葉樹（スギ）および常緑広葉樹（マテバシイ）の人工林分を対象として、林床に堆積するリター層による雨水遮断特性のモデル化を試みた。このモデルは、各降雨日におけるリター遮断量と降雨後のリター層からの蒸発速度を再現するもので、モデルに使用するパラメータは小型ライシメータを用いた現地観測の結果から同定した。各降雨日におけるリター遮断量は樹冠通過雨量から推定し、降雨後のリター層からの蒸発速度は、リター層内含水率から推定した。本研究で構築したモデルによるリター層内含水量の推定値は、実測値の変化パターンを良好に再現し、実測値の変動を85%以上説明した。年間のリター層による雨水遮断損失量は、スギ林では樹冠通過雨量の5.1~11.5%であり、マテバシイ林では樹冠通過雨量の9.5~18.0%にも達し、リター層による遮断損失量が森林地における重要な水収支項となることが示唆された。

キーワード: リター遮断損失量, 蒸発速度, スギ, マテバシイ, モデル

I. はじめに

森林地に降雨として供給された雨水は、そのすべてが土壌へと到達するわけではなく、一部は樹冠部や林床に堆積する落葉・落枝（リター層）によって遮断され、蒸発によって大気中へと戻される。水資源の確保にとっては、樹冠部やリター層による遮断量はできるだけ少なくし、土壌への水分供給量をできるだけ多くすることが望ましい（Helvey and Patric, 1965）。しかし、皆伐や山火事等によって樹冠や林床の被覆がなくなると、雨滴による地表面侵食が進み、表面流出が増加するだけでなく、裸地化

した土壌からの蒸発も増加するため、必要最低限の被覆量は確保する必要がある（Blow, 1955; Rowe, 1955; Dabral *et al.*, 1963; Pradhan, 1973; 塚本, 1976; Park *et al.*, 1998）。

森林地における最終的な土壌への水分供給量は、林外雨量から樹冠遮断量とリター遮断量を差し引いた値として求められ、樹冠構造とリターの堆積構造によってその量は大きく変化する。しかし、リター遮断については、樹冠遮断と比較すると研究成果が少なく、その実態やメカニズムについて明らかにされていない点が多い（Putuhen and Cordery, 1996; Park *et al.*, 1998; Tobon-Marín *et al.*, 2000）。既往の

*・**九州大学農学部附属福岡演習林森林生態圏管理学講座 〒811-2415 福岡県糟屋郡篠栗町大字津波黒394
Research Institute of Kyushu University Forests, Fukuoka 811-2415, Japan.

研究では、リター層の影響については、鉍質土壌とあわせて林床面蒸発の一部として扱う場合が多い (Schaap and Bouten, 1997; Schaap *et al.*, 1997) が、リター遮断による土壌への水分供給阻害やリター層自身の被覆効果を評価するためには、これらを分離して個別に取り扱う必要がある (玉井ほか, 1990; 玉井・服部, 1994; 佐藤ほか, 1999)。

そこで、本研究では常緑針葉樹のスギ林と常緑広葉樹のマテバシイ林を対象として、リター層のみを充填した小型のライシメータを用いた現地観測を行い、リター層内含水量変化の実態を把握した後、各降雨日におけるリター遮断量と降雨後の蒸発速度を再現するモデルを構築し、さらに、このモデルを用いて各林分内に発生する降雨パターンやリター層の堆積構造の影響を反映した年間リター遮断損失量の推定を試みた。

II. 手 法

1. 試験地の概要

リターの採取と現地観測は、九州大学農学部附属福岡演習林10林班内の平坦地に植栽された約30年生のスギ (*Cryptomeria japonica*) および約20年生のマテバシイ (*Lithocarpus edulis*) の人工林分で行った。

2002年7月に行った毎木調査によると、スギ林の植栽密度は1 467本/ha、平均樹高が15.2m、平均胸高直径は23.2cmであり、マテバシイ林の植栽密度は3 418本/ha、平均樹高が10.2m、平均胸高直径は10.8cmである。各林分とも樹冠は完全に閉鎖し、下層植生は存在していない。

1996年から1997年にかけて各林分で行った観測結果によると、年間のリターフォール量は、スギ林で0.41kg/m²、マテバシイ林で0.86kg/m²であり、これは、齋藤 (1981) によるわが国の森林における年間リターフォール量 (常緑針葉樹林: 約0.45kg/m², 常緑広葉樹林: 0.60kg/m²) に近い値である。

林床部におけるリター堆積量は、スギ林では1998年1月の時点で約1.57kg/m²、マテバシイ林では2002年3月の時点で約2.07kg/m²であり、単位堆積量 (1kg/m²) あたりのリター層の厚さはスギが5.11 ± 1.35cm、マテバシイでは2.89 ± 1.08cmであった。

2. リターサンプリング

各林分の林床に堆積する A₀ 層の大部分は落葉・落枝であり、F・H層は薄く、鉍質土壌層との分離が困難であったため、ここでは腐蝕・分解の進んでい

ない L 層に相当する落葉・落枝のみを林内の複数地点からランダムに採取した。なお、各林分とも A₀ 層内における樹皮や球果等の割合は少なかったため、落葉・落枝以外の林床堆積物が雨水遮断に与える影響は比較的小さいと考えられる。

観測に使用するリターサンプルは、晴天日に先端を刃状に加工した直径20cmの円筒を A₀層に挿入し、鉍質土壌との境界面にプラスチックシートを挿入して採取した。各林分で採取した A₀ 層のサンプルは、実験室に持ち帰った後、樹皮や球果および F・H 層に相当する構成物を除去し、数日間室内環境で自然乾燥させた状態で重量を計測し、単位面積あたりの重量 (kg/m²) が一定になるようにして、野外観測用のライシメータに充填した。

3. 観測手法

本研究ではリター層内含水量の観測用として、重量秤量型のライシメータを使用した。このライシメータは、塩化ビニール製円筒 (314.2cm² × 15cm) の上端および下端にステンレス製ネット (3mm) を取り付け、リターを充填したライシメータの下端からは雨水が自由に排水される構造となっている (図-1)。

リター遮断量および蒸発速度は、毎日定時 (17時) に計測したライシメータの重量変化から推定した。また、リターを充填しない空のライシメータを用いた観測も同時に行い、降雨時に円筒の側面やネットに付着した水分による影響 (interface effect) を除去した。ライシメータの重量計測には、電子天秤 (A&D EK-2000G, EK-12KG) を使用した。この電子天秤の最小目盛りは0.1gであり、水高換算で0.003mmまでの含水量変化を測定できる。

ライシメータへの雨水供給源である樹冠通過雨量については、各観測対象林分に隣接する草地に設置した転倒マス雨量計 (一転倒0.1mm) と各林内に設置した貯留式および転倒マス雨量計 (一転倒0.2mm) の観測データから、佐藤ら (2002a, 2002b) のモデルにより推定した。

ライシメータ内に充填したリターの堆積量 (L_w) は2段階に設定し、ライシメータあたりの充填量は31.4gおよび62.8gで、それぞれ $L_w = 1.0\text{kg/m}^2$ および $L_w = 2.0\text{kg/m}^2$ に相当する。リターを充填したライシメータは各林分に同一堆積量ごとに2台ずつ設置し、解析時にはそれらの観測値を平均したものを使用した。ライシメータによる観測は2002年6月上

図 - 1 野外観測用ライシメータの構造

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

*C. japonica**L. edulis*

図 - 2 樹冠通過雨量とリター遮断量の関係

Fig. 2 Relationships between throughfall and litter interception

旬に開始し、降雨中等で観測不可能であった日を除いて現時点まで継続して行っているが、データの解析には比較的連続したデータが得られている2002年8月5日から12月31日までの観測値を使用した。

III. 結果と考察

1. ライシメータによる観測結果

1) 降雨条件下におけるリター遮断特性

リターの表面や隙間に付着して保持される水量の最大値は、最大保水容量 (Maximum water storage capacity: S_{max}) に相当するが、実際の降雨条件下でリター層内の保持水量が S_{max} になることはまれである(服部, 1983)。したがって、実際の林地におけるリター遮断の実態を明らかにするためには、降雨条件下での雨水遮断特性を正確に把握しておく必要が

ある。

図 - 2 に各林分における樹冠通過雨量とリター遮断量の関係を示す。リター遮断量は、各降雨日に観測されたリター層内含水量からその前日におけるリター層内残存水量を差し引いて算出した。なお、定時観測時 (17時) 以降に降雨が開始した日のデータは、遮断量が算出できないため解析対象から除外した。

スギ (*C. japonica*) およびマテバシイ (*L. edulis*) のリター遮断量は、ともに比較的小さな降雨イベント時には樹冠通過雨量の増加とともに急激に増加するが、雨量が多くなるにつれてその増加率は小さくなる傾向がみられた。図中に示す曲線は、樹冠通過雨量に対するリター遮断量の関係を各堆積量ごとに対数関数で近似したものであり、降雨条件下にお

図 - 3 リター層内含水率と蒸発速度の関係

Fig. 3 Relationships between relative water content and evaporation ratio from the litter layer

けるリター遮断量は、樹冠通過雨量からある程度推定可能であることがわかる。樹冠通過雨量に対するリター遮断量の関係については、Tobon-Marin *et al.* (2000) も対数関数で近似できるとしており、村井 (1970) や Pitman (1989) および Putuhena and Cordery (1996) も同様の結果を示している。

佐藤ら (2002b) が行った浸水法 (村井, 1970; 中野, 1976) による室内実験の結果によると、堆積量 1 kg/m^2 あたりの最大保水容量 ($S_{\max}$) は、スギのリター層で 157 mm 、マテバシイのリター層では 150 mm であるが、図 - 2 の結果から、実際の降雨条件下では、各林分のリター層に遮断される雨水の量はともに $S_{\max}$ よりも明らかに小さな値となることがわかった。

したがって、実際の林地における降雨条件下でのリター遮断量を正確に見積もるためには、リター層の最大保水容量だけでなく、各降雨日に林内に発生する樹冠通過雨量の違いによるリター遮断量の変化特性についても正確に把握しておく必要があると考えられる。

2) リター層からの蒸発特性

リター層によって遮断され土壤中に供給されない雨水の量 (リター遮断損失量) は、次の降雨開始直前までにリター層内が完全に乾燥する場合には、先行降雨時にリター層が遮断した雨水の量と等しくな

る。しかし、各降雨時にリター層内に遮断された雨水のすべてが次の降雨開始直前までに完全に蒸発するとは限らないため、降雨条件下におけるリター遮断特性だけではリター層による遮断損失量を正確に把握することはできない。したがって、リター層による遮断損失量をより正確に見積もるためには、樹冠通過雨の発生頻度と降雨後のリター層からの蒸発特性についても明らかにしておく必要がある (Helvey and Patric, 1965)。

そこで、降雨後のリター層からの蒸発速度とリター層内含水率の関係を調べた結果、リター層からの蒸発速度はリター層内含水率と高い相関を示すことがわかった (図 - 3)。また、同一含水率条件で比較すると、マテバシイのリター層からの蒸発速度は、スギのリター層からの蒸発速度の半分程度であった。これは、リターの形状によってリター層からの蒸発特性が異なるためであると考えられ、粗な堆積構造をしているスギのような針葉樹のリターでは、リター層内部の水蒸気に対するコンダクタンスが大きい、平面的な形状の葉による密な積層構造をとるマテバシイのような広葉樹のリターでは、水蒸気に対するコンダクタンスが小さく蒸発が抑制されているものと考えられる。したがって、図 - 3 の結果は、降雨後のリター層からの蒸発速度を推定する場合には、リターの形状や堆積構造による蒸発特性の違い

を考慮しておく必要があることを示唆している。

2. リター層内含水量推定モデルの構築

図 - 2 の結果から、降雨条件下におけるリター遮断量は樹冠通過雨量によって規定され、各降雨日におけるリター遮断量は樹冠通過雨量の対数関数によって推定できることが示された。さらに、各降雨日におけるリター層内含水量がわかれば、その含水率が計算できるので、図 - 3 の結果から、その後の無降雨期間におけるリター層からの蒸発量を推定することが可能である。

そこで、ここでは、各林分内に発生する樹冠通過雨量の発生パターンや、各リター層からの蒸発特性を反映したリター層内含水量の変化を、簡易なモデルによって推定することを試みた。

実測値に対するモデルの適合度は、実測値の全変動 (S_T) を、モデルで説明できる部分 (S_m) と誤差成分 (S_e) に分解して、全変動に対する寄与率 (m) を用いて評価し、それぞれ以下の式で算出した (田口, 1980)。

$$S_T = S_m + S_e \quad (1)$$

$$S_T = (y - \bar{y})^2 \quad (2)$$

$$S_m = (m - \bar{m})^2 \quad (3)$$

$$S_e = (y - \bar{m})^2 \quad (4)$$

$$m = \frac{S_m}{S_T} \times 100 \quad (5)$$

ここで、 y は実測値、 $\bar{y}$ は実測値の平均値、 m はモデルによる推定値である。

1) 降雨条件下におけるリター層内含水量の推定

ここではまず、図 - 2 の結果を用いて、各降雨日における樹冠通過雨量の発生パターンに対応したリター層内含水量 (L_{s0}) を以下の式により推定した。

$$TF_s = aPg - b \quad (6)$$

$$L_s = c \text{Ln}(TF_s) + d \quad (7)$$

$$L_{s0} = L_s + L_{s0-1} \quad (8)$$

ここで、 TF_s は各降雨日における林分平均樹冠通過雨量 (mm)、 Pg は林外雨量 (mm)、 L_s は各降雨日におけるリター遮断量 (mm)、 L_{s0} は各降雨日におけるリター層内含水量 (mm)、 L_{s0-1} は降雨前日におけるリター層内含水量 (mm) を表している。

(6) 式の a 、 b は、佐藤ら (2002a, 2002b) のモデルを用いて算出した樹冠通過雨の空間的なばらつきの影響を考慮した林分平均樹冠通過雨量 (TF_s) と、 Pg との対応関係を直線回帰した式の傾きと定数項

表 - 1 各モデルに用いたパラメータ値

Table 1 Parameter set for model simulation

	<i>Cryptomeria japonica</i>		<i>Lithocarpus edulis</i>	
TF _s -Model	a: 0.744	b: 1.510	a: 0.359	b: 0.167
L _s -Model				
1kg/m ²	c: 0.11	d: 0.38	c: 0.15	d: 0.32
2kg/m ²	c: 0.20	d: 0.67	c: 0.23	d: 0.52
Ei-Model	Smax: 1.57		Smax: 1.50	
1kg/m ²	k: 0.89		k: 0.45	
2kg/m ²	k: 1.10		k: 0.64	

であり、各林内に設置した転倒マス雨量計による観測値を TF_s の値に相当する値に換算して求めた。また、(7) 式の c 、 d は、図 - 2 の観測結果から得られる樹冠通過雨量に対するリター遮断量の関係に対数関数で回帰した際の係数と定数項である。なお、(7) 式で推定されるリター遮断量の値は TF_s が微小の時に負の値になることがあるが、ここでは樹冠通過雨量が微小である場合にはリター層は雨水をほとんど完全に遮断すると仮定し、 $L_s = TF_s$ とした。降雨条件下におけるリター遮断量を推定する各モデル (TF_s-Model, L_s-Model) に用いたパラメータ値の一覧は表 - 1 に示すとおりである。

(6) 式の寄与率はスギ林が 97.7%、マテバシイ林が 96.2% であり、 TF_s の値は林外雨量に対する各林内に発生する平均的な樹冠通過雨量を良好に再現していると考えられる。これに対しライシメータ観測によって得られるリター遮断量の実測値は、林分内の 2 地点のみの観測値であるため、各降雨日における樹冠通過雨の局所的なばらつきの影響を受けることがあり、(7) 式の寄与率はスギ林が 64.7~77.8%、マテバシイ林が 58.4~66.7% となり (6) 式よりも低くなった。

図 - 4 は、各降雨日におけるリター層内含水量について、(8) 式によって算出した推定値とライシメータ観測による実測値を比較したものである。図 - 4 に示される実測値の全変動に対するモデルの寄与率は、スギ林で 88.8~94.3%、マテバシイ林では 93.4~97.2% であった。

2) リター層からの蒸発量の推定

次に、(8) 式によって求められた各降雨日におけるリター層内含水量 (L_{s0}) を初期条件として、降雨後 i 日目におけるリター層からの蒸発速度と、リター層内含水量を以下の式により推定した。

図 - 4 各降雨日におけるリター層内含水量の観測値と推定値の比較

Fig. 4 Relationships between water content in the litter layer of each rainy day estimated by the model and field observations

$$i = \frac{L_i}{L_w S_{max}} \quad (9)$$

$$E_i = k \cdot i \quad (10)$$

$$L_i = L_{i-1} - E_{i-1} \quad (11)$$

ここで、 i は降雨後 i 日目におけるリター層内の含水率、 L_w はリターの堆積量 (kg/m^2)、 S_{max} は単位リター堆積量 (1 kg/m^2) あたりのリター層最大保水容量 (mm)、 L_i は降雨後 i 日目におけるリター層内含水量 (mm)、 E_i は降雨後 i 日目におけるリター層からの蒸発速度 (mm/day) を表す。

(9)式の S_{max} の値は、佐藤ら (2002b) の浸水実験の結果を使用し、(10)式のパラメータ k は図 - 3 の観測結果から得られるリター層内含水率に対するリター層からの蒸発速度の関係を原点を通る直線で回帰した式の傾きの値を使用した。

各リター層からの蒸発量を推定するモデル (Ei-Model) に用いたパラメータ (S_{max} および k) の値は、表 - 1 に示すとおりである。(10)式の寄与率は、スギ林では56.4~86.4%、マテバシイ林では42.4~57.9%であり、各林分ともリター層内含水率に対する蒸発速度の対応関係には若干のばらつきがみられた。これは、リター層からの蒸発速度がリター層内含水率だけでなく、各蒸発期間中における林内の微気象条件の影響を受けるためであると考えられる。

しかし、現時点では林内の微気象条件がリター層からの蒸発速度に与える影響についての解析が不十分であるため、ここではリター層内含水率のみから蒸発速度を推定することにした。

3) モデルによる推定結果

図 - 5 に本研究で構築したモデルによって推定した2002年7月1日から12月31日までの期間における各林分におけるリター層内の含水量変化とライシメータによる観測結果を示す。

モデルによる推定値は、各降雨日における遮断量と降雨後の蒸発によるリター層内含水量変化を良好に再現し、各林分内に発生する異なる降雨パターンに対応したリター遮断特性を反映できることがわかる。また、降雨日における各林分の樹冠通過雨発生開始雨量は、(6)式の x 軸切片値からスギ林が2.03mm、マテバシイ林が0.46mmと推定される。したがって、樹冠通過雨の発生頻度はマテバシイ林の方が高く、リター層からの蒸発速度はマテバシイ林の方が低くなるため、同一堆積量で比較すると全体的にスギよりもマテバシイのリターの方が含水量が多く、スギ林のリター層の方が乾燥しやすい傾向があることがわかる。

図 - 5 [c] および [d] で8月29日から9月2日かけて推定値と実測値とのずれがかなり大きくなっ

図 - 5 リター層内含水量の実測値と推定値の比較

[a] スギ: 1kg/m^2 , [b] スギ: 2kg/m^2 , [c] マテバシイ: 1kg/m^2 , [d] マテバシイ: 2kg/m^2

CTF: スギ林における樹冠通過雨量, LTF: マテバシイ林における樹冠通過雨量

Fig. 5 Comparisons of observed and estimated water content of the litter layer

[a] *C. japonica*: 1kg/m^2 , [b] *C. japonica*: 2kg/m^2 , [c] *L. edulis*: 1kg/m^2 , [d] *L. edulis*: 2kg/m^2

CTF: Throughfall in the *C. japonica* stand, LTF: Throughfall in the *L. edulis* stand

ているが、これは、この期間に台風が通過しており、マテバシイ林では樹冠通過雨がわずかに発生していたが、風速が大きかったため、リター層からの蒸発速度が通常よりも速くなり、リター層内の含水量が急激に減少したためであると考えられる。また、10月20日と12月4日の降雨後は数日間曇天日が続いたため、各林分ともライシメータからの蒸発があまり起こらず、推定値とのずれが大きくなったものと考えられる。

本研究で構築したモデルによるリター層内含水量の推定値は、日積算樹冠通過雨量とリター層内含水率のみで決定されるため、このような降雨期間中や降雨後の微気象条件によるリター層内含水量の変化を正確に反映することはできない。また、(6)～(8)式によって推定される降雨日におけるリター層内含水量は、降雨当日におけるリター層からの蒸発量の影響を考慮していないため、ライシメータによる定時観測時(17時)以前に降雨が終了し、その後完全に晴れるような場合にも、モデルによる推定値と実測値との間にずれを生じる可能性がある。したがって、より厳密にリター層内含水量の変化を把握する必要がある場合には、林内の微気象要因や降雨の終了時刻等に関する情報の解析が必要であると考えられる。

実測値の全変動に対する、モデルによる推定値の寄与率は、スギ林では86.1～89.1%であり、マテバシイ林では87.6～89.9%であり、本研究で構築したモデルは、各林分におけるリター層内含水量の実測値の変動の約85%以上を再現可能であった。また、データ数は少ないが、モデルによる推定値は、キャリブレーション期間とは独立した期間(2002/7/1～7/31)における実測データの変化ともよく一致した。

3. リター層が森林地における水循環過程に与える影響

1) 年間リター遮断損失量

各降雨日におけるリター遮断量は、樹冠通過雨量や無降雨期間の発生頻度によって異なるため、長期間のリター層による雨水の遮断損失量を推定する際には、リター層からの積算蒸発量による推定が現象の実態を最も適切に反映すると考えられる。そこで、ここでは2000年から2002年までの3年間における各林分の年間リター遮断損失量を、林外雨量の観測データから(6)～(11)式のモデルによって蒸発量の積算値として推定を試みた(表-2)。

雪の影響については、Rowe(1955)が降雪期間中のリター層からの蒸発は無視できると報告しており、本研究の観測期間中における福岡演習林での積雪は1日以内に融けて雨量として観測されている。したがって、本研究における日単位以上の時間スケールを対象とした解析には雪は大きな影響を与えないと考えられる。

2000年から2002年における年間降水量の観測値は1223.7～1685.6mmであり、(6)式からスギ林の平均樹冠通過雨量は749.3～1071.1mm、マテバシイ林の平均樹冠通過雨量は418.1～580.2mmと推定された。無降雨日における積算蒸発量として算出された年間リター遮断損失量の推定値は、スギ林で $L_w = 1 \text{ kg/m}^2$: 44.6～55.0mm, $L_w = 2 \text{ kg/m}^2$: 78.9～96.1mmとなり、マテバシイ林の $L_w = 1 \text{ kg/m}^2$: 45.7～54.9mm, $L_w = 2 \text{ kg/m}^2$: 70.9～85.7mmと比較しても、両者に大きな違いはなく、ともに $L_w = 1 \text{ kg/m}^2$ の場合で年間降水量の3～4%, $L_w = 2 \text{ kg/m}^2$ の場合で年間降水量の5～7%程度の値となった。

表-2 年間リター遮断損失量の推定結果

Table 2 Estimation of annual litter interception loss

	Pg (mm)	TF (mm)	Litter interception loss(1kg/m ²)		Litter interception loss(2kg/m ²)	
			(mm)	(% of Pg)	(mm)	(% of Pg)
<i>Cryptomeria japonica</i>						
2000	1223.7	749.3	49.0	4.0	6.5	86.1
2001	1685.6	1071.1	55.0	3.3	5.1	96.1
2002	1224.1	757.7	44.6	3.6	5.9	78.9
<i>Lithocarpus edulis</i>						
2000	1223.7	418.1	48.6	4.0	11.6	75.3
2001	1685.6	580.2	54.9	3.3	9.5	85.7
2002	1224.1	418.5	45.7	3.7	10.9	70.9

図 - 6 林外雨量に対する [a] リター層内含水率および [b] リター遮断率の推定

CL : スギのリター, LL : マテバシイのリター

Fig. 6 Relationships gross rainfall and relative water content [a] litter interception estimated by the model [b] CL: Litter layer of the *C. japonica*, LL: Litter layer of the *L. edulis*

Rowe (1955) は, 年間降水量1000mm 前後のアメリカ東部のマツ林 (*Pinus ponderosa*) における年間リター遮断損失量を年間降水量の2.8~3.2%と見積もっている. Helvey and Patric (1965) は, 南部アパラチア山脈の広葉樹林における年間リター遮断損失量は約50.8mm で年間降水量の2~5%と報告している. また, Putuhena and Cordery (2000) は, 年間降水量755mm のオーストラリアのユーカリ林 (*Eucalyptus rossii*, *Eucalyptus mannifera*) における年間リター遮断損失量を年間降水量の4.2~9.6%と報告しており, ユーカリを伐採後マツ (*Pinus radiata*) を植林した際の年間リター遮断損失量の変化を0.2~13.7%と報告している.

気候条件や対象とする樹種が異なるリター遮断損失量を単純に比較することはできないが, 年間降水量に対する比率でみると, 本研究で構築したモデルによる推定値は, 既往研究で報告されている値に近い. また, 樹冠通過雨量に対する比率でみると, スギ林では5.1~11.5%となり, マテバシイ林では9.5~18.0%にも達し, リター層による遮断損失量が水収支項として無視できない値となることがわかった.

2) リター遮断特性・推定遮断損失量

本研究が対象としたスギ林とマテバシイ林では, リター層に雨水を供給する樹冠通過雨の発生パター

ンが異なるにもかかわらず, 年間のリター遮断損失量の値にはほとんど違いが見られなかった.

そこで, ここでは各林分におけるリター遮断特性について, モデルによる推定結果を用いてさらに詳しく検討を行うことにした.

図 - 6(a)は, (6)~(8)式のモデルによって林外雨量に対するリター層内含水率の変化を推定した結果を示したものである. この推定結果から, 同一樹種のリターで比較すると, 堆積量が少ない方がリター層内含水率が高くなる傾向があることがわかる. この結果は, 単純にリターの堆積量が2倍になってもリター層内含水量は2倍にはならないことを示唆しており, 同様の結果を Rowe (1955) も示している. これは, 降雨条件下ではリター層内に完全に雨水が行き渡るわけではないため, 堆積量が2倍になってもリター層内含水量は単純に2倍にはならないためであると考えられる.

一方, 同一堆積量でスギとマテバシイのリター層内含水率を比較すると, スギよりもマテバシイの方が常に高い値を示しており, 同一降雨日にはスギよりもマテバシイの方がより多くの雨水を遮断することがわかる. このスギとマテバシイの遮断特性の違いは, リターの形状の違いに起因し, スギのような針葉のリターでは, リター層内に空間が多く形成さ

図 - 7 蒸発によるリター層内含水率の変化特性

Fig. 7 Drying pattern of the litter layer estimated by the model

れ、雨水がリター層内を鉛直方向のみに移動しやすく、リター層内全体に雨水が行き渡りにくい、平面的な形状したマテバシイのような広葉樹のリターでは、リターが層状に積み重なっているため、雨水はリターの表面を伝わって側方にも移動しやすく、結果としてリター層内により多くの雨水を供給しやすい性質を持つためであると考えられる。このような樹種によるリター遮断特性の違いについては、Dabral *et al.* (1963) も、針葉樹のリターより広葉樹のリターの方がより多くの雨水を遮断すると報告しており、Putuhena and Cordery (1996) や Crockford and Richardson (2000) も同様の結果を示している。

次に、林外雨量に対する各リター層の雨水遮断率を推定した結果を図 - 6 (b) に示す。林外雨量が 50mm 以上になると遮断率の値に樹種や堆積量による違いはほとんどみられなくなるが、林外雨量が少なくなるにつれて、スギよりもマテバシイのリター層の方が明らかに遮断率が高くなり、その差も大きくなる傾向がみられた。このことは、各降雨日におけるリター遮断量のすべてが蒸発するとみなしてリター遮断損失量の推定を行うと、本研究が対象としたスギ林とマテバシイ林では、林内に発生する日樹冠通過雨量の 90% 以上が 20mm 以下である (Sato *et al.*, 2002) ため、年間のリター遮断損失量はスギ林よりもマテバシイ林の方が多くなることを示唆して

いる。

そこで、各降雨日にリター層が遮断する雨水のすべてが遮断損失量になると仮定した手法 (佐藤ら, 2002b) を用いて、2000 年から 2002 年における年間リター遮断損失量を推定した結果、リター堆積量が $L_w = 1 \text{ kg/m}^2$ の場合、スギ林で 4.1~5.1%, マテバシイ林では 6.2~7.5% という値が得られた。

しかし、このような各降雨日におけるリター遮断特性のみからリター遮断損失量を推定する手法では、リター層内の残存水量や各リターの蒸発特性の違いが考慮されないため、各林分におけるリター遮断損失量を過大に評価していると考えられる。

これに対し、本研究で構築したモデルでは、各降雨日におけるリター遮断特性だけでなく、降雨前日の残存水量や降雨後の蒸発特性の影響についても考慮し、リター層からの積算蒸発量としてリター遮断損失量を見積もっているため、表 - 2 に示した年間リター遮断損失量の推定値は、実際の各林分におけるリター遮断損失量の実態をより正確に再現していると考えられる。

3) リター層からの蒸発特性

図 - 7 に、(9)~(11) 式のモデルによって推定した飽和状態 (含水率 1.0) からの各林分におけるリター層内含水率の経時変化特性を示す。図 - 6 (a) の結果からスギのリター層の場合、林外雨量が 100mm を

超えるような条件でも，リター層内含水率は60%程度にしか達さないため，スギ林の $L_w = 1 \text{ kg/m}^2$ のリター層は降雨後3～4日程度で完全に乾燥し， $L_w = 2 \text{ kg/m}^2$ でも降雨後9～12日程度で乾燥することがわかる．これに対し，マテバシイのリター層の場合，林外雨量が10mm以上になるとリター層内含水率は70%を超えるため， $L_w = 1 \text{ kg/m}^2$ のリター層でも完全に乾燥するまでには降雨後10日以上の日数が必要で， $L_w = 2 \text{ kg/m}^2$ のリター層の場合では降雨後20日以上経ってもリター層内は完全には乾燥しないことがわかる．また，樹冠通過雨の発生頻度がスギ林よりもマテバシイ林の方が高いため，林内における無降雨期間（蒸発期間）もマテバシイ林ではスギ林よりも短くなりやすい．このため，図-6(a)のように降雨時にスギのリターよりもマテバシイのリターの方がより多くの雨水を遮断したとしても，マテバシイ林ではそれが完全に蒸発する前に次の降雨が発生し，結果としてリター遮断損失量は抑えられ，年間スケールでみればスギ林と同程度の値になったものと考えられる．したがって，無降雨期間が十分にあり，その間にリター層内に保持された水分がほとんど蒸発してしまうような降雨パターンが続けばスギ林よりもマテバシイ林の方がリター遮断損失量が多くなる可能性がある．しかし，実際の各林分における樹冠通過雨の発生パターン（図-5）をみると，10日以上は無降雨期間はほとんど発生していないため，本研究が対象とした林分では，スギ林のリター層の方が乾燥しやすく，マテバシイ林のリター層は乾燥しにくい傾向があると考えられる．

IV. 結 論

本研究では，森林地における林床水分動態を把握するために，小型ライシメータによる野外観測を行い，降雨時のリター遮断特性，および降雨後の蒸発特性を反映したリター層内含水量を推定するモデルを構築した．

常緑針葉樹のスギ人工林と常緑広葉樹のマテバシイ人工林における野外現地観測データをもとに，降雨時のリター遮断量を樹冠通過雨量の対数関数で，降雨後のリター層からの蒸発速度をリター層内含水率の線形関数で推定した．これらのモデルによって降雨日におけるリター遮断特性や降雨後のリター層からの蒸発特性を推定した．

ライシメータによる観測の結果，降雨条件下でのリター遮断量は，リター層が保持できる最大保水容

量よりも明らかに小さな値になることがわかった．また，降雨後の蒸発速度は，同じ堆積量あたりで比較すると，スギのリター層はマテバシイのリター層よりも約2倍速かった．

モデルによるリター層内含水量の推定値は，ライシメータ観測による実測結果をよく再現した．年間樹冠通過雨量に対するリター遮断率は，スギ林で5.1～11.5%，マテバシイ林では9.5～18.0%にも達し，リター層による雨水の遮断損失量が森林地における重要な水収支項となることが示された．

各降雨時のリター遮断特性および降雨後の蒸発特性は，リター層の最大保水容量や堆積量だけではなく，樹冠通過雨の特性やリターの形状によっても大きく変化することが明らかになった．

今後の課題としては，林床における微気象条件および降雨日のリター層からの蒸発速度の推定方法の改善が示唆された．

謝辞：本研究の遂行にあたり，九州大学アイソトープ総合センターの大崎 進教授には，観測対象林分における年間リターフォール量の観測データを提供して頂いた．また，九州大学農学部附属福岡演習林の技術室の皆様には試験地の設定と毎木調査にご協力頂いた．なお，本研究成果の一部は，日本学術振興会科学研究費補助金（特別研究員奨励費）および基盤研究B（課題番号14360088，代表者：大槻恭一）の交付を受けて行った．ここに記して感謝の意を表します．

引用文献

- Blow, F. E. (1955) Quantity and hydrologic characteristics of litter under upland Oak forests in Eastern Tennessee, *J. Forestry*, **53**, pp. 190-195.
- Crockford, R. H. and Richardson, D. P. (2000) Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate, *Hydrol. Proc.*, **14**, pp. 2903-2920.
- Dabral, B. G., Premnath and Ramswarup (1963) Some preliminary investigations on the rainfall interception by leaf litter, *Indian For.*, **89**, pp. 112-116.
- 服部重昭 (1983): ヒノキ林における地面蒸発量の季節変化, *日林誌*, **65**, pp. 9-16.
- Helvey, J. D. and Patric, J. H. (1965) Canopy and litter interception of rainfall by hardwoods of east-

- ern United States, Water Resour. Res., **1**, pp. 193-206.
- 村井 宏 (1970): 森林植生による降水のしゃ断についての研究, 林試研報, **232**, pp. 25-64.
- 中野秀章 (1976): 蒸発散. 水文学講座 13 森林水文学, 共立出版, 東京, pp. 95-120.
- Park, H., Hattori, S. and Tanaka, T. (1998) Development of a numerical model for evaluating the effect of litter layer on evaporation, J. For. Res., **3**, pp. 25-33.
- Pitman, J. I. (1989) Rainfall interception by Bracken litter - Relationship between biomass, storage and drainage rate, J. Hydrol., **111**, pp. 281-291.
- Pradhan, I. P. (1973) Preliminary study on rainfall interception through leaf litter, Indian For., **99**, pp. 440-445.
- Putuhen, W. M. and Cordery, I. (1996) Estimation of interception capacity of the forest floor, J. Hydrol., **180**, pp. 283-299.
- Putuhen, W. M. and Cordery, I. (2000) Some hydrological effects of changing forest cover from eucalypts to Pinus radiata, Agric. For. Meteorol., **100**, pp. 59-72.
- Rowe, P. B. (1955) Effects of the forest floor on disposition of rainfall in Pine stands, J. Forestry, **53**, pp. 342-348.
- 齋藤秀樹 (1981): 森林におけるリターフォール研究資料, 京都府大演報, **25**, pp. 78-89.
- 佐藤嘉展・熊谷朝臣・小川 滋 (1999): リター層による雨水遮断と土壌蒸発抑制, 日林誌, **81**, pp. 250-253.
- 佐藤嘉展・大槻恭一・小川 滋 (2002a): マテバシイ林における年間樹冠遮断量の推定, 九大演報 **83**, pp. 15-29.
- 佐藤嘉展・大槻恭一・小川 滋 (2002b): リター層による降雨遮断量の推定, 第6回水資源に関するシンポジウム 論文集, pp. 609-614.
- Sato, Y., Otsuki, K. and Ogawa, S. (2002) Experimental studies on litter interception of *Cryptomeria japonica* and *Lithocarpus edulis*. INTER-PRAEVENT 2002: 973-980.
- Schaap, M. G. and Bouten, W. (1997) Forest floor evaporation in a dense Douglas fir stand, J. Hydrol., **193**, pp. 97-113.
- Schaap, M. G., Bouten, W. and Verstraten, J. M. (1997) Forest floor water content dynamics in a Douglas fir stand, J. Hydrol., **201**, pp. 367-383.
- 田口玄一編 (1980): 経営工学シリーズ5 統計解析, 日本規格協会, pp. 3-10.
- 玉井幸治・小林忠一・服部重昭 (1990): 落葉広葉樹林における地面蒸発の特性, 水文・水資源学会1990年研究発表会要旨集, pp. 144-147.
- 玉井幸治・服部重昭 (1994): 落葉広葉樹林における林床面蒸発のモデル化と流域への適用, 日林誌, **76**, pp. 233-241.
- Tobon-Marín, C., Bouten, W. and Sevink, J. (2000) Forest floor water dynamics and root water uptake in four forest ecosystems in northwest Amazonia, J. Hydrol., **237**, pp. 169-183.
- 塚本良則 (1976): 森林樹冠と雨滴侵蝕, 森林立地, **17**(2), pp. 5-9.
- (受付: 2003年1月29日, 受理: 2003年6月21日)