

## Gashモデルによるヒノキ林の樹冠遮断解析

村上茂樹（森林総研十日町）

**要旨：**茨城県北部の11～12年生ヒノキ林（樹高約6m）で2年間の樹冠遮断観測を行ったところ、18.8～19.1%の樹冠遮断率が観測された。一方、茨城県中部の29～30年生ヒノキ林（樹高13.5m）では樹冠遮断率が21.3～23.4%と報告されている。Penman-Monteith式から予測される樹冠遮断量は樹高が高いほど大きくなり、29～30年生では11～12年生の約1.5倍と予測されるにも関わらず、両者の観測値の差は小さい。そこで本研究はこの原因について検討することを目的とした。29～30年生ヒノキ林ではGashモデルによる樹冠遮断蒸発成分の解析が行われているので、11～12年生においてもGashモデルを適用して両者の蒸発成分の割合を比較した。その結果、11～12年生においては樹体が小さいために保水容量が小さく、降雨終了後の蒸発は29～30年生よりも小さいが、降雨中の蒸発は樹冠遮断全体の79.0～81.7%を占め、29～30年生の62.1～64.7%よりも大きいことが分かった。この結果は、Penman-Monteith式で説明することが困難である。

**キーワード：**Gashモデル、樹冠遮断、Penman-Monteith式

### I はじめに

樹冠遮断は、樹高の低い林分よりもよりも樹高の高い林分において多くなると考えられている。すなわち、熱収支に基づいて導かれるPenman-Monteith式によれば樹高の増加と共に空気力学的抵抗が低下することから、樹冠遮断の主要成分である降雨中の蒸発が樹高と共に増大する(7)。29～30年生ヒノキ林（樹高13.5m）(3)における樹冠遮断量は11～12年生ヒノキ林（樹高約6m）(5)の約1.5倍と予測されるが（文献(6)のFig.7），観測された樹冠遮断率は11～12年生では18.8～19.1%，29～30年生では21.3～23.4%であり、ほとんど差がなかった。29～30年生ヒノキ林(3)ではGashモデル(1)を用いて樹冠遮断の蒸発成分が解析されている。そこで11～12年生ヒノキ林(5)においても同様の解析を行って樹冠遮断の蒸発成分を解析し、29～30年生ヒノキ林(3)の解析結果と比較することにより、両林分間で樹冠遮断率に差異が生じなかった原因について検討する。

### II 方法

**1. 観測** 樹冠遮断の観測は、茨城県北部に位置する森林総合研究所常陸太田試験地の小流域内にある11～12年生ヒノキ林（表-1）で行った(4,5)。観測期間は1999～2000年の2年間である。樹冠通過雨は長さ590cm、幅18cmの樋2本によって、樹幹流下雨は8本の代表木に巻き付けたウレタンマットを用いて、それぞれ集水した。集水した樹冠通過雨と樹幹流下雨はそれぞれ別々のタンクに流入し、タンクの水位の自記記録から樹冠通過雨量と樹幹流下量を求めた。なお、タンクは満杯になると自

動的に排水される。雨量は流域内の露場に設置された2台の雨量計（樹冠遮断プロットからの距離は約20m、及び約170m）で計測した値の平均値とした。また、遮断プロットに近い方の露場では気象観測が行われ、日射、風向、風速、気温、湿度が測定された。

**2. Gashモデル** 本研究では、観測結果に改良版Gashモデル(2)を適用して樹冠遮断の蒸発成分を解析した。一方、比較対象とした29～30年生ヒノキ林（茨城県中部、(3)ではオリジナル版のGashモデル(1)が適用されている。両モデルはいずれも雨量、樹冠通過雨量、樹幹流下量の観測値から樹冠遮断量を逆算すると同時に、樹冠遮断蒸発の5の成分（表-2の一列目）を計算するものである。

Gash(1,2)は、樹冠遮断と降雨の間に成立する経験式(1)式、及び樹冠遮断が降雨中の蒸発と降雨後の蒸発から成ることから導かれる(2)式に着目した。

$$I = aP_G + b \quad (1)$$

$$I = (\bar{E}/\bar{R})P_G + (S + \int_0^t Edt)(1 - (\bar{E}/\bar{R})(1 - p - p_t)^{-1}) \quad (2)$$

ここで、 $P_G$ は一降雨の雨量、 $I$ は一降雨の樹冠遮断量、 $a$ 、 $b$ は係数、 $\bar{E}$ は飽和した林分からの平均蒸発率、 $\bar{R}$ は平均降雨強度、 $S$ は樹冠の保水容量、 $t'$ は樹冠が飽和に達するまでの時間、 $E$ は蒸発率、 $p$ は直達降雨率、 $p_t$ は樹幹への雨量の配分率である。両式を比較して、

$$a = \bar{E}/\bar{R} \quad (3)$$

$$b = (S + \int_0^t Edt)(1 - (\bar{E}/\bar{R})(1 - p - p_t)^{-1}) \quad (4)$$

これら2つの式は、経験式(1)式の物理的意味を表わし

ている。Gashはさらに、樹冠遮断の蒸発過程を場合分けすることによって、表-2に示した5つの蒸発成分を計算する式を導いている。表-2において樹冠が飽和に達するまでの雨量 $P'_G$ は、オリジナル版Gashモデルでは、  

$$P'_G = -(\bar{R}S/\bar{E}) \ln(1 - (\bar{E}/\bar{R})(1 - p - p_c)^{-1}) \quad (5)$$

と表現される。しかし、(5)式は $(1 - p - p_c)\bar{R} < \bar{E}$ の場合、負の数に対して対数を取ることになり数学的に意味を成さない。例えば、疎林では $p$ が1に近づくのでこの場合に該当することがあるため、改良版ではこの点を改善して、

$$P'_G = -(\bar{R}S_c/\bar{E}_c) \ln(1 - (\bar{E}_c/\bar{R})) \quad (6)$$

としている。ここで、 $c$ を樹冠閉鎖度として $S = cS_c$ 、 $\bar{E} = c\bar{E}_c$ である。これにより改良版Gashモデルではオリジナル版Gashモデルよりも精度の高い解析がなされている(2)。

表-2の計算を行う際に必要となるパラメータを表-3に示した。 $c$ は樹冠測量によって、 $S$ は $I$ と雨量の関係から、 $S_c$ と $p_c$ は雨量と樹幹流下量の関係から、 $\bar{R}$ は雨量データから、それぞれ算出した(1, 2, 3)。 $\bar{E}$ は(1)式、(3)式から算出できる。

解析に用いた樹冠遮断及び雨量データのうち、降水時の気温、日射等の状況から降水が雪と判定された場合、及び観測誤差のために樹冠遮断が負の値となった場合のデータは除外した。なお、29~30年生ヒノキ林(3)では幹からの蒸発を小さいとみなして算出せず、 $S_c$ を $S$ に含めるとして扱っている。

### III 結果と考察

29~30年生のヒノキ林では樹冠遮断の観測値と計算値合計との差が1980年は3.2%、1981年は2.5%と小幅であった(表-2から算出)。11~12年生ではより精度の高い改良版Gashモデルを用いたにも関わらず、観測値と計算値合計との差が1999年に9.2%、2000年に24.4%と大きくなつた(表-2から算出)。この原因は不明である。

蒸発成分の中で最大のものは飽和した樹冠からの蒸発(降雨中蒸発)である(表-2)。11~12年生においては蒸発成分全体の79.0~81.7%を占め、29~30年生の62.1~64.7%を上回っている。2番目に大きい成分は降雨終了後の蒸発で、11~12年生では8.2~9.9%、29~30年生では28.1~29.3%である。両林分とも、これらの上位2つの蒸発成分だけで全体の約9割を占めている。

樹冠が飽和に達しない小さな降雨による蒸発、飽和に達するまでの蒸発、降雨後の蒸発の3成分については、ほとんどの場合に29~30年生での割合が11~12年生と比較して約3倍大きくなっている。これは前者の樹体が後者に比べて大きいため、表-3に示した $S$ と $P'_G$ に約3倍の差が生じたことを反映している。11~12年生では幹からの蒸発が降雨後の蒸発とほぼ同じ量となり、蒸発成分

中3番目に大きくなつた。しかし、29~30年生林分においては幹からの蒸発が算出されていないため、この成分の林分による違いについては検討できない。

11~12年生と29~30年生とで樹冠遮断率にはほとんど差が生じなかつた原因是、11~12年生において降雨中蒸発が29~30年生よりも大きく、これ以外の蒸発成分が29~30年生よりも小さい分を補つてゐるためである。しかし、11~12年生の降雨中蒸発が29~30年生よりも大きくなるメカニズムは現在のところ不明である。

### IV おわりに

11~12年生と29~30年生のヒノキ林で樹冠遮断率にはほとんど差が無かつたことは、Penman-Monteith式によって説明することが困難である。樹冠遮断は降雨強度とともに増加することが指摘されており、これは樹体に衝突した雨滴から発生する飛沫が蒸発するメカニズムによって説明できるとする説がある(5)。今後、この説の考え方を取り入れてさらに樹冠遮断メカニズムの検討を行う。

### 引用文献

- (1) GASH, J. H. C. (1979) An analytical model of rainfall interception by forests. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 105 : 43-55.
- (2) GASH, J. H. C., LLOYD, C. R. and LACHAUD, G.. (1995) Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. J. of Hydrol. 170 : 79-86.
- (3) 服部重昭・近嵐弘栄 (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.
- (4) 村上茂樹 (2002) スギ・ヒノキ人工林におけるLAIと蒸発散の林齡依存性およびその水源林管理への応用の可能性。水文・水資源学会誌 15 : 461-471.
- (5) MURAKAMI, S. (2006) A proposal for a new forest canopy interception mechanism : Splash droplet evaporation. J. Hydrol. 319 : 72-82.
- (6) MURAKAMI, S., TSUBOYAMA, Y., SHIMIZU, T., FUJIEDA, M. and NOGUCHI, S. (2000) Variation of evapotranspiration with stand age and climate in a small Japanese forested catchment. J. Hydrol. 227 : 114-127.
- (7) 鈴木雅一 (1992) 森林蒸発散の理論(森林水文学、塚本良則編、319pp., 文永堂出版、東京) 54~78.

表-1 対象林分の林況

	m	11~12年生	29~30年生	文献 <sup>(3)</sup>
		1999年	2000年	1982年
平均樹高	m	5.8	6.3	13.5
平均胸高直径	cm	7.0	8.1	18.2
林分密度	本/ha	2944	2944	1750
葉面積指數	ha/ha	3.7~4.3*	3.9~5.2*	5.7

\*季節変化が明瞭<sup>4)</sup>

表-2 樹冠遮断蒸発成分の計算値と観測値

計算値または観測値	計算式	11~12年生				29~30年生				文献 <sup>(3)</sup>	
		1999年		2000年		1980年		1981年		mm	%
		mm	%	mm	%	mm	%	mm	%		
①樹冠が飽和に達しない小さな降雨による蒸発 (m回)	$c \sum_{j=1}^m P'_{Gj}$	6.3	1.8	5.6	1.8	13.1	3.9	16.0	5.2		
②樹冠が飽和に至るまでの降雨による蒸発 (n回)	$ncP'_G - ncS_c$	3.3	1.0	3.7	1.2	11.1	3.3	10.3	3.4		
③降雨終了までの間の飽和した樹冠からの蒸発 (n回)	$(c\bar{E}_c/\bar{R}) \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_G)$	285.4	81.7	251.9	79.0	219.6	64.7	189.6	62.1		
④降雨終後の蒸発 (n回)	$ncS_c$	28.7	8.2	31.7	9.9	95.5	28.1	89.3	29.3		
⑤幹からの蒸発 $q : P_G > S_t/p_t$ となる降雨回数	$qS_c + P_t \sum_{j=1}^{n-q} P_{Gj}$	25.7	7.3	26.0	8.2	-	-	-	-		
計算値合計		349.4	100.0	319.0	100.0	339.3	100.0	305.2	100.0		
樹冠遮断観測値／樹冠遮断率		320.1	19.1	256.4	18.8	328.9	21.3	312.9	23.4		
年間雨量		1673.3		1365.0		1542.5		1336.4			

表-3 計算に用いたパラメータ

	1999年	11~12年生		29~30年生		文献 <sup>(3)</sup>
		1999年	2000年	1980年	1981年	
$c$ : 樹冠閉鎖度 ( $0 \leq c \leq 1$ , $p = 1 - c$ )	0.81	0.94	0.80	0.80		
$P'_G$ : 樹冠が飽和に達する雨量 (mm)	0.57	0.52	1.73	1.73		
$S$ : 林分の樹冠保水容量 (mm)	0.41	0.44	1.24	1.24		
$S_c$ : 樹冠の保水容量 $S_c = S/c$ (mm)	0.33	0.41	-	-		
$S_t$ : 幹の保水容量 (mm)	0.19	0.13	-	-		
$p_t$ : 雨量の樹幹流への分配割合	0.04	0.05	-	-		
$\bar{R}$ : 平均降雨強度 ( $\text{mm h}^{-1}$ )	1.63	1.36	1.56	1.54		
$\bar{E}$ : 林分の平均蒸発強度 ( $\text{mm h}^{-1}$ )	0.29	0.26	0.25	0.26		
$\bar{E}_c$ : 樹冠の平均蒸発強度 ( $\text{mm h}^{-1}$ )	0.23	0.24	-	-		

