
 論文

スーパーポロメーターと生態・生理学的シミュレーション・モデルを用いたブナ林分蒸散量の推定法*

角張嘉孝**・細川和弘***

角張嘉孝・細川和弘：スーパーポロメーターと生態・生理学的シミュレーション・モデルを用いたブナ林分蒸散量の推定法 日林誌 74: 263~272, 1992 富士山の海拔 1,100 m のブナ林で 1989 年 5 月中旬から 10 月末まで、蒸散速度の日変化および季節変化を調べた。蒸散速度は樹冠の 20 m と 13 m のところでライカー社のスーパーポロメーターを用いて測定した。データ処理は蒸散速度と飽差と光条件の平方根を乗じた関係を用いて行った。この関係を利用して樹冠のいろいろな高さの葉の性質の違いを一つの二次曲線で表現した。除間伐による林分の蒸散量の変化を解析するため、樹冠の葉層における光条件や葉量の違いを表現できる、生態・生理学的モデルを用いた。生育期間の林分蒸散量は 3,200 t で、1 日の蒸散量としては 8 月で 2.5 mm、5 月や 10 月では 1.5 mm だった。蒸散量は午後 2 時頃に最大値を示したが、これは光条件というより、飽差に依存していた。優勢木の蒸散量は亜高木のそれよりもはるかに大きかった。除間伐によって、林分蒸散量は 30 % しか減少しなかったが、これは亜高木や劣性木で蒸散量がそれぞれ 24.6, 21.5 % も増加したことによる。この変化の誘因として、除間伐による光条件の大きな変化が考えられる。

KAKUBARI, Yoshitaka and HOSOKAWA, Kazuhiro: Estimation of stand transpiration of a beech forest based on an eco-physiological computer simulation model and superporometer J. Jpn. For. Soc. 74: 263~272, 1992 The diurnal and seasonal fluctuations of the transpiration rate from mid-May to late-October 1989 in a standing Japanese beech (*Fagus crenata* BL.) tree were measured at 1,100 m above sea level on Mt. Fuji. The transpiration rate was measured with a steady-state porometer (LI-1600, LI-ORCo., Ltd.) at the uppermost (20 m) and the lowest part (13 m) of the tree crown. Data processing was used with a relationship between transpiration measured and the product of the vapor pressure deficit and the square root of the photon-flux density. Positive relationships were recognized for both characteristics of leaves at different heights of the crown. To analyze the difference of total stand transpiration by selective cutting and thinning, an eco-physiological computer simulation model, which was considered with spatial distributions of light intensity and leaf area of different leaf layers within the tree crown, was applied. The total stand transpiration was 3,200 t H₂O/ha. The maximum value of mean diurnal transpiration was 2.5 mm in August, and that of May and October were only 1.5 mm. The diurnal change of transpiration had a peak at 1400 h, and its fluctuation was similar to the vapor-pressure deficit rather than that of the photon-flux density. There were large differences among amounts of transpiration of dominant and suppressed trees. Although stand transpiration with selective cutting decreased by approximately 30%, that of middle- and lower-trees increased about 24.6 and 21.5 %, respectively. The largest cause for the change in this simulation may be related to the change of light conditions by the cutting.

I. はじめに

樹木の蒸散量は森林の水文循環に関する水消費の中心的要素であり、それを計量的に捉えることは、最近の地球規模の環境変化に対する森林の環境緩和機能をよ

り明確にするためにも意義がある。

これまで、蒸散量または蒸発散量を求める場合、いろいろな方法によって推定する試みがなされてきたが、その主なものとして林分の蒸散量を直接求める、熱収支法(2) やライシメーター法(1, 25), ヒートパルス

* 本研究の一部は第 101 回日本林学会大会で口頭発表した。

** 静岡大学農学部 Fac. of Agric., Univ. of Shizuoka, Shizuoka 422

*** パスコ株式会社 Pasco Co., Ltd., Tokyo 107

法(16), 切断試料を用いて, ある一定時間の重量変化を見る切り枝法(15, 20)などがあげられる。環境同調同化箱によって光合成速度とともに蒸散速度をそれらに影響を与える飽差, 日射量, 気温などの諸要因との関連で調べる方法は, 測定装置が高価なこともあり, 森林水文のアプローチからはその研究例はほとんど見あたらない。生理・生態学的研究の立場でも比較的少ない(5, 7~9, 23, 24)。

ここでは自然条件下の蒸散速度を環境要因とともに直接測定し, 蒸散速度を季節を通して詳しく調べ, 並行して環境要因の季節変動も調べた。さらに, 文献資料(6)に基づきブナ林を構成する個体の葉面積の空間分布や光の空間分布を仮定した。実測した蒸散速度と環境要因との関係や環境要因の季節変化のデータなどを用いて, ブナ林の蒸散量を個体レベルで推定できるシミュレーションモデルを開発した。スーパーポロメーターで測定した個葉レベルの蒸散速度のデータをブナ林の林分蒸散量のレベルまでスケールアップして, 富士山の理水試験地(17)に適用していく手法を紹介する。同時に林分の蒸散量に影響を与える環境要因の関係および除間伐を行った場合に予想される林分蒸散量の変化やその変化の個体サイズ依存についても検討する。

この研究の大部分は文部省科学研究費補助金総合(A) 課題番号 63304018 (研究代表者: 村井 宏 静岡大学教授(現岩手大学教授)) によって行われた。野外調査に際して, 静岡大学農学部林学科造林学・森林防災工学教室の専攻生の多大な協力があった。記して感謝申し上げる。

II. 材料および測定方法

1. 蒸散速度の測定

1) 試料木と観測鉄塔

試験地(富士山国有林 169 林班, 富士宮市, 海拔 1,100 m, 面積 900 m²) 内において, 4.5 cm 以上の樹木について毎木調査を行った。測定項目は樹種, 樹木位置, 胸高直径, 樹高, 最下葉高(樹冠の下部の高さ)である。このほかに各個体の空間関係を表すため樹冠投影図を描いた。林分構造を図-1 に 3 次元グラフで示す。図-2 に樹冠投影図を示す。スクリーントーンで示された樹冠はシミュレーションの際, 択伐された個体を示す(後述)。

測定対象木はブナで, 胸高直径 60.0 cm, 樹高 20.8 m, 最下葉高 12.0 m である。5 月はじめに開葉し, 5 月

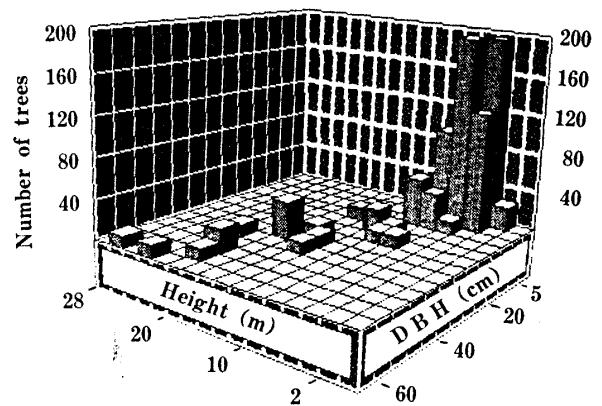


図-1. 富士山ブナ林の林分構造

Three dimensional description of a beech forest at 1,100 m above sea level on Mt. Fuji

Total number of trees is 1,078 per ha.

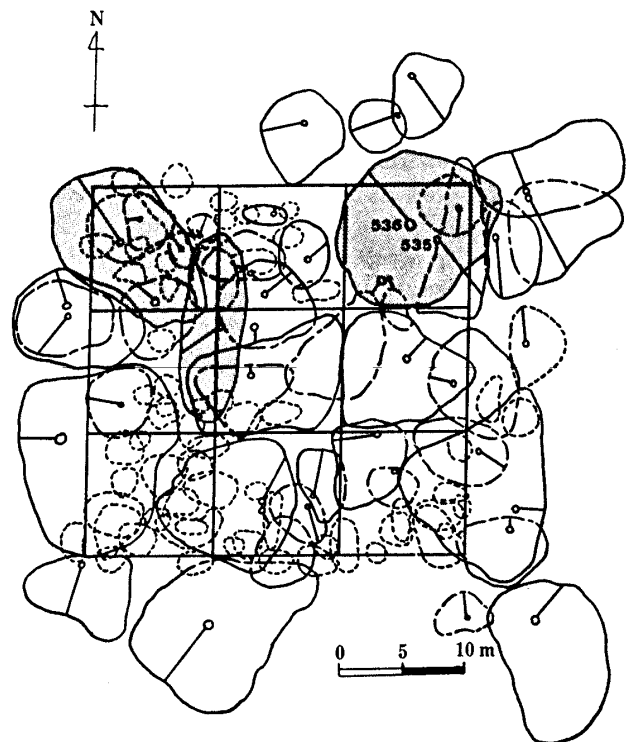


図-2. 富士山ブナ林試験地の樹冠投影図

Crown projection map of beech forest on Mt. Fuji.

スクリーントーンで示された個体はシミュレーションで伐倒されたことを示す。

Dotted area means felled trees by selective cutting, in simulation model which are dominant tree in the beech forest.

中旬には展開が終了した。落葉は陽葉が 10 月下旬, 陰葉が 11 月上旬であった。樹冠のいろいろな高さにおける測定作業を容易に, かつ安全にするため, ブナ樹冠を囲むようにして, 鉄パイプ製の観測鉄塔 (2 mW×2 mL×20 mH) を組み立てた。

2) 測定装置

蒸散速度, 気孔コンダクタンス, 光量子束密度, 気温, 葉温などを測定するためスーパーポロメーター (米国ライカー社製, 12) を, データロガーとしてラムパックおよびラムカードを使用した。

2. 測定方法

ここでは東京都水源林事務所報告 (27) にならって次のような項目について調べた。

1) 季節変化

5月から10月まで毎月, 1~2回測定した。測定のたびに同じサンプルを測定できるように, 葉に印をつけた。サンプル数は15~20個である。

2) 日変化

1日の外的な環境変化にともなう蒸散速度の変化を調べるため, 午前9時前後から夕方5時頃まで, 2時間おきに1日4~5回測定を行った。葉面が濡れている場合, 早朝や夕方など大気湿度が非常に高い場合は原理的にも計測が困難なので測定を避けた。

3) 樹冠の位置による蒸散速度の変化

陽樹冠・陰樹冠の違いによる蒸散速度の差の有無・その程度を調べるため, 陽樹冠は地上18.7m, 陰樹冠は12.0mの位置 (相対照度で5%程度) で測定した。これを1), 2) について測定のたびに行った。蒸散速度の測定は光環境と蒸散速度の関係を求めやすくするために, 快晴かそれに近い日に行った。

3. 環境要因の測定

環境要因のデータ収集はバッテリーにより野外で連続測定が可能なデータロガー (13) の一つであるメモリーセンサー (小糸工業社製, MES-801型) を利用した。センサーとして, 光量子センサー, 温・湿度センサーを用いた。光量子センサーは樹冠を越えた地上22.0mに設置した。温・湿度センサーは地上3.0mに設置した。1989年5月14日から11月20日まで30分間隔で記録した。エプソン社製ハンドヘルドコンピューター (HP-20) を用いて約3週間おきにデータを回収した。研究室で他のコンピューターに転送し, コンピューターシミュレーションモデルの入力データとして用いた。

III. データ処理

1. 蒸散速度の解析方法

1) 蒸散速度と環境要因との関係

蒸散速度は樹種・樹冠の位置・葉齢・葉面温度のほか, 季節によって, あるいは1日のうちでも外的な環境

要因の変化 (たとえば, 大気飽差) によって異なることが指摘されている (10, 11, 19)。また森林水文分野では比較的密度の大きい森林群落に対して, PENMAN-MONTEITHモデルおよびその修正モデル (たとえば TANら, 1978 (26)) が適用され群落からの蒸発散量の推定に成果をあげている (28)。植物の蒸散作用は樹木が大気圏と地圏との境界に生育するゆえに, つねに水ポテンシャルの勾配に従い樹体内の水が奪われる物理現象にすぎないので, 樹木をとりまく環境要因の中で, まず飽差を関連させることが大切である。

一方, 個体あるいは個葉レベルで得られた蒸散速度のデータを林分レベルの蒸散量へ拡張するには, 樹冠のいろいろな位置における飽差の勾配 (19) に関するデータが不可欠だが, 飽差の蒸散速度に与える理論的な裏付けが保証されても, 林内のいろいろな空間で飽差を測定することは計測機器の経費的な制約などから実務的にかなり無理がある。さらに詳細に検討を続けるために葉面飽差の推定や葉温を計測することはたいへん重要で必要性が高いが, 同じような理由から, きわめて困難である。

ここでは, 蒸散量推定に必要な要因である樹冠における葉温や飽差の直接測定にかえて, 樹冠内の光量子束密度の相対的な減衰の割合 (相対照度の概念と同じ) を便宜的に取り上げる。光要因を取り上げた理由は, 光要因が蒸散速度を左右する気孔開度に直接関連する (3) こと, および樹冠内の光要因の推定によって葉温および葉面飽差を間接的に表現しうられるためである。

実際には次のように手続きを進める。スーパーポロメーターにより富士山ブナ林で季節を通して実測した蒸散速度を飽差と光量子束密度の概念を含む独立変数で, これを最小自乗法によって求めた二次方程式で近似する。ただし, 光量子束密度と蒸散速度との関係はべき乗式になるようにした。その理由として, 光量子束密度と蒸散速度がべき乗式に従うためである。

すなわち,

$$TR = a \times VT^2 + b \times VT + c$$

ここで, TR : 蒸散速度 ($\mu\text{g H}_2\text{O cm}^{-2}\text{s}^{-1}$); VT : 蒸散環境変数 (飽差 (kPa) $\times \sqrt{\text{光量子束密度 } (\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1})}$); a, b, c : 二次式のパラメータ。

ここで取り扱われた変数は, 物理的な意義の理論的根拠はまだ不十分だが, 個体内レベルの蒸散速度の実測データから林分レベルの蒸散量を推定する立場から

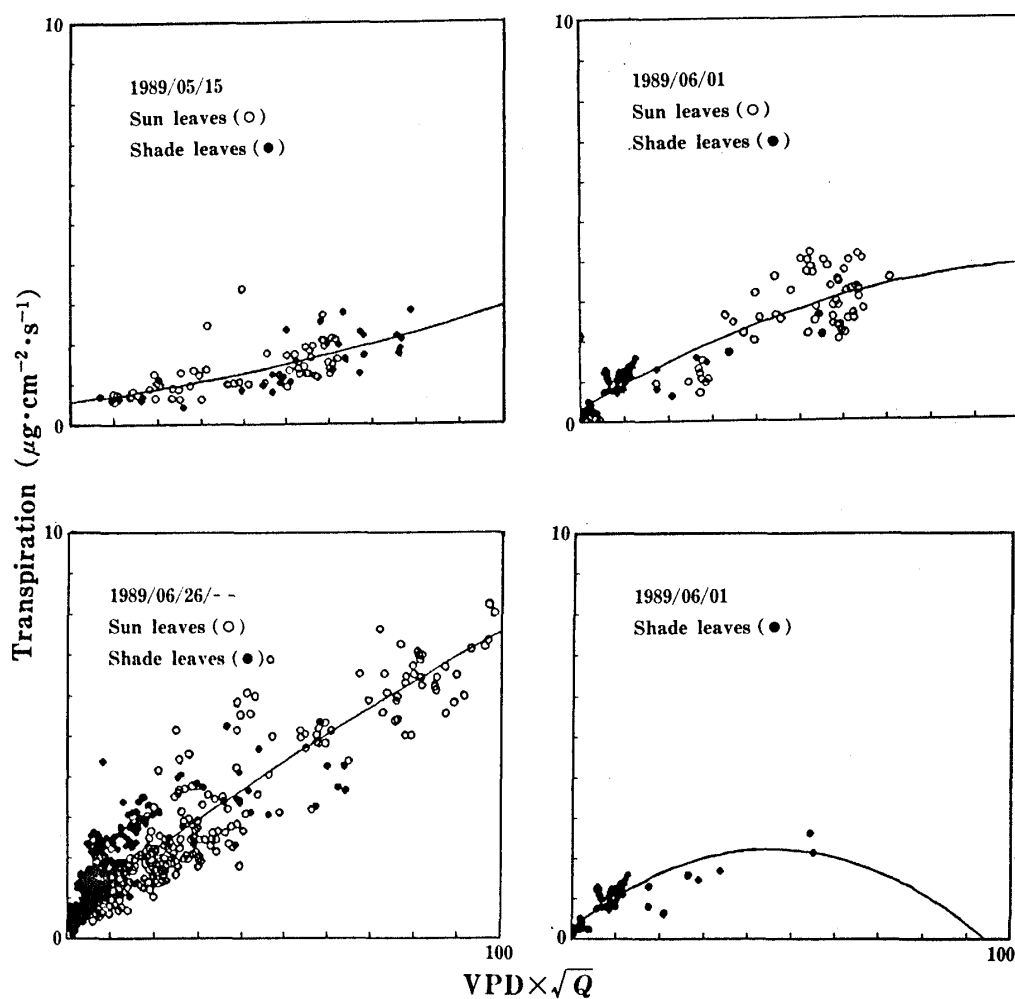


図-3. 蒸散環境変数（飽差に光量子束密度を乗じたもの）と蒸散速度との関係

The relationship between transpiration and variable of transpiration (vapor pressure deficit multiplied by square root of photosynthetically active radiation)

VPD, 飽差 (kPa); Q , 光量子束密度 ($\mu\text{Em}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); 蒸散速度 ($\mu\text{g cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). ○印は陽葉, ●印は陰葉を示す。

VPD, Vapor pressure deficit (kPa); Q , Photosynthetically active radiation ($\mu\text{Em}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); Transpiration ($\mu\text{g cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Symbols ○ and ● mean sunny-and shade-leaves, respectively.

検討すると、蒸散にかかわる微気象環境の程度を示すもので、ここでは仮に蒸散環境変数とよぶ。

例として、図-3 に蒸散速度と蒸散環境変数との関係を示す。図の左下に示したように、ブナの陽葉、陰葉の蒸散速度と蒸散環境変数との関係が一つの近似式で表現できることがわかる。

2) 蒸散速度の垂直的变化

図-3 に示したように、6月26日以降のすべての計測データを込みにして取り扱った場合、ブナの陽葉の蒸散速度は、陰葉のそれに比べてかなり大きいことがわかる。陽葉と陰葉との中間の位置の葉の蒸散速度はほぼ中間的な値になると考えられる。

陰葉の蒸散速度の測定値は一般に被陰下で測定され

ることが多い。したがって蒸散環境変数は小さい値をとることが多い。最小自乗法によって得られたパラメータをそのまま蒸散量推定モデルに適用すると図-3の6月1日の陰葉の例（図-3の右下）のように晴天の日に極端に蒸散が少なく推定されたり、あるいはマイナスの蒸散を示すことが起こる。これは蒸散環境変数の大きなところでの測定点が少ないため蒸散速度が異常に小さい値として推定されることによる。これらはいずれも現実的でないので、ここでは図-3の右上の図のように、陰葉と陽葉のデータを込みにして取り扱うことにした。

3) 蒸散速度の季節変化

蒸散速度の季節変化は図-3 に示したように、5月15

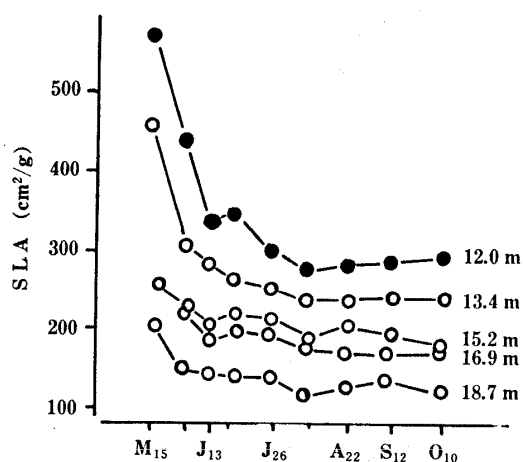


図-4. 樹冠のいろいろな高さにおける SLA の季節変化

Seasonal change of specific leaf areas at different heights of crown

表-1. 蒸散速度と蒸散環境変数との関係を表す二次関数の係数の季節変化

Seasonal fluctuation of relationship between transpiration and variable of transpiration

日付 Dates	係数 Parameters			相関係数 Correlations
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
5/15	1.01 E-4	0.0315	0.5654	0.691
6/ 1	-2.70 E-4	0.0624	0.3336	0.898
6/26	9.90 E-5	0.0356	0.6566	0.752
7/15	-2.62 E-4	0.0935	0.4617	0.938
8/ 4	3.86 E-5	0.0698	1.1618	0.807
8/23	5.52 E-5	0.0607	1.0410	0.944
9/12	1.31 E-3	0.0703	0.6724	0.891
10/ 6	2.27 E-4	0.0563	0.0565	0.943

日付 Dates	係数 Parameters			相関係数 Correlations
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
5/15	1.01 E-4	0.0315	0.5654	0.691
6/ 1	-2.70 E-4	0.0624	0.3336	0.898
6/26~10/06	-1.15 E-4	0.0806	0.639	0.923

上部, 実測値; 下部, モデルに導入されたパラメータ。

Upper part of table, Actual parameter; Lower part of table, Parameter introduced to model.

日, 6月1日の曲線の勾配は6月26日以降に得られたデータを込みにして得られた曲線に比べ勾配が低い。図-4に蒸散速度の測定と同じ日に得られた葉層ごとの比葉面積 (SLA) の季節変化を示す。この尺度は葉の形態的発達段階を表すので生態の分野でよく利用されている。富士山のブナの葉の形態的变化は, 開葉直後から6月上旬まで徐々に厚みを増してくる。したがっ

て5月, 6月の初めの葉の形態的特性はまだ安定していないと考えられる。一方, 6月26日以降は図-4に示したように, 比較的安定していると考えられる。したがって蒸散速度の季節変化を示す二次式のパラメータには, 生育初期の比較的形態が不安定な時期には測定した実際の値を, それ以後の安定した時期以降はそれぞれの時期に得られた測定値の平均値を用いることにした。

表-1の上部に, それぞれの時期に得られた二次式のパラメータを, 表の下部に, 6月26日以降に得られた測定値を込みにして取り扱ったときのパラメータをその相関係数とともに示す。季節によって二次式のパラメータ *a* の符号および絶対値が大きく変わることがわかる。*y* 切片を示すパラメータ *c* は夏に大きい傾向が見いだされた。

2. 葉および光の空間分布

択伐等による林分構造の変化が林分蒸散量に及ぼす影響を検討するためには, 林分を構成する個体のもつ葉面積と光環境の空間的な分布を個体レベルに立ち入って把握する必要がある(22)。これまでの多くの林分葉量の推定モデルは胸高直径や樹高を独立変数としている(たとえば文献(4, 21)がある)が, こうした方法は, 胸高直径や樹高の変数が場所の次元で解かれない以上, 人為による個体の動態が林分の空間構造を変え, その結果として林分蒸散量がどのように変化する可能性があるかどうかについて検討できない。

ここでは, 生態・生理学的モデル(6)を用いて葉面積・光環境の個体レベルでの推定を行うが, このモデルでは二つのステップにより光と葉の空間的な分布を推定している。

(1) 樹高, 最下葉高, 樹冠半径より樹冠をシリンダとして仮定する。このシリンダはさらにいくつかの層(葉層とよばれる)に分けられる。この層は葉の存在する空間を表す。(2) 樹冠の最頂部の光環境は周辺の競合する隣接木との関係によって決まる。樹冠の最頂部より下の葉層の光減衰はそれより上の葉層にある葉の量によって決まる。光の減衰は BEER-LAMBERT 則(14)に従うと仮定する。

こうして計算された結果は各個体の各層の葉面積, 相対照度として表される。

3. シミュレーション・モデルのアルゴリズム

森林の蒸散量に影響を与える要因として, ここでは, 蒸散速度と蒸散環境要因の関係, 葉層別葉面積, 飽差, 樹冠外の光量子束密度, 葉層における相対的な光量子

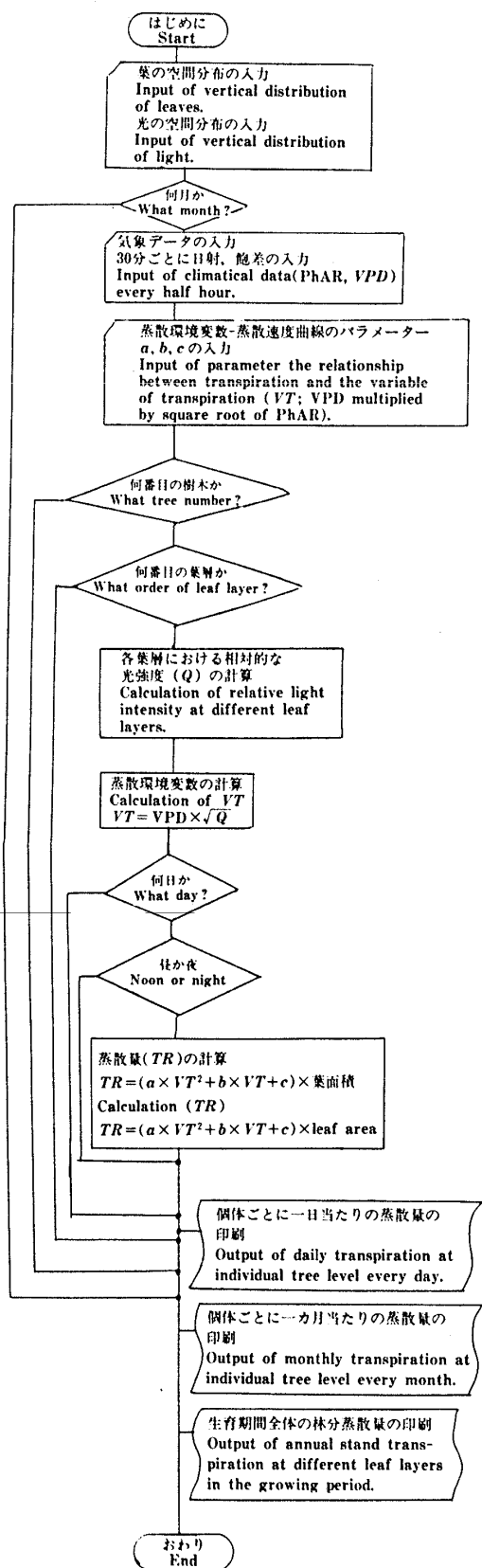


図-5. 蒸散量解析モデルのフローチャート
Flow chart of simulation model

束密度などの環境条件を蒸散量解析モデルの構成要素として取り上げた。

シミュレーション・モデルのフローチャートを図-5に示す。このモデルによって、日単位、月単位、年単位の林分蒸散量を計算した。蒸散量は表-1に示した蒸散速度と蒸散環境変数との関係を示す二次方程式のパラメータ、葉面積および光環境により求まる。

この計算を5月14日から10月31日まで30分ごとに計算した。なお、この場合の蒸散環境変数はメモリーセンサーで集録された湿度および光量子束密度のデータを用いて計算した。

プログラム言語はFORTRAN 77を用いた。環境要因、葉および光の空間分布を別のプログラムで前処理したのでシミュレーションモデルの計算時間を節約できた。使用したソフトウェアはProfessional Fortran, ハードウェアはEpson PC-386+i30387の条件で、計算時間は約25分であった。

IV. 蒸散量のコンピューター・シミュレーションによる解析

1. 年間の林分蒸散量、その季節変化および日変化

林分蒸散量は、5月から10月までの間に、約3,200 t H₂O/haであった。降水量に換算すると約320 mm。同じ期間の降水量(2,372 mm)に対して約13.5%となった。

比較のため、同じ観測期間の日照時間、平均気温のデータを用いてHAMONの式(18)で林分蒸発散量を推定した。降水量に換算すると447.8 mmであった。富士山のブナ林にHAMONの式を適用した場合、HAMONの式による結果が蒸散量のほかに蒸発量も含まれるとはいえ、かなり多いことがわかる。

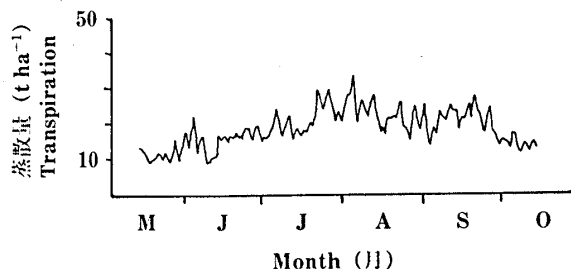


図-6. 富士山ブナ林の1日の林分蒸散量の季節変化
Seasonal fluctuation of daily total stand transpiration of beech forest on Mt. Fuji

1日のha当たり林分蒸散量は8月、6月ではそれぞれ30 tと10 tである。

Daily total stand transpiration per unit area in August and in June was 30 and 10 t per ha, respectively.

また蒸散環境変数の計算に用いた湿度が3m部位のもので実測のポロメーターの湿度より高いので蒸散速度を過小に推定する原因の一つになっていると思われる。

林分蒸散量の季節変化は図-5のフローチャートに従い、30分おきに記録した気温、相対湿度、光量子束密度の気象データを利用して計算した。このとき相対湿度と気温から飽差を計算した。林分蒸散量は図-6に示したように、8月をピークとする季節変化を示した。

1日当たりでみると8月には30 t H₂O/ha/dayを超えるが、6月では10 t H₂O/ha/day程度に留まる。6月に蒸散量が低い理由は、梅雨期の霧の発生にともなう低照度、高湿度などのためである。

2. 高木と亜高木の蒸散量の違い

高木、亜高木の蒸散量の日変化を環境要因の変化と関連させて図-7に示す。位置関係を図-2の樹冠投影図で示すと高木は個体番号536で右上のスクリーンで示された個体である。亜高木はその右下の個体(個体番号535)である。蒸散量の日変化(1989年6月1日快晴の例)は日射、気温、飽差の日変化と関連するが、とくに光が十分であれば飽差の日変化(飽差は14時頃最大値を示す)とよく関連していることがわかる。高木の蒸散量は亜高木のそれよりも、約5.4倍も多いことがわかった。

3. 伐採にともなう蒸散量の変化

伐採が林分または個体の蒸散量に与える影響について考えるため、試験林分から高木3本(図-2でスク

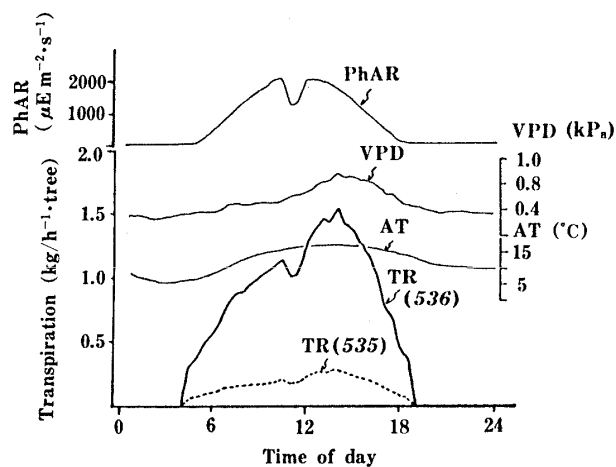


図-7. 個体レベルの蒸散量の日変化と気温(AT)、飽差(VPD)、光合成有効波長域日射量(PhAR)の日変化(6月1日)

Diurnal fluctuation of transpiration in case of dominant and sub-dominant trees together with air temperature (AT), vapor pressure deficit (VPD) and photosynthetically active radiation (PhAR) on the 1st of June

個体番号536は高木、個体番号535は亜高木。

Note: Tree numbers 536 and 535 are dominant and sub-dominant trees, respectively.

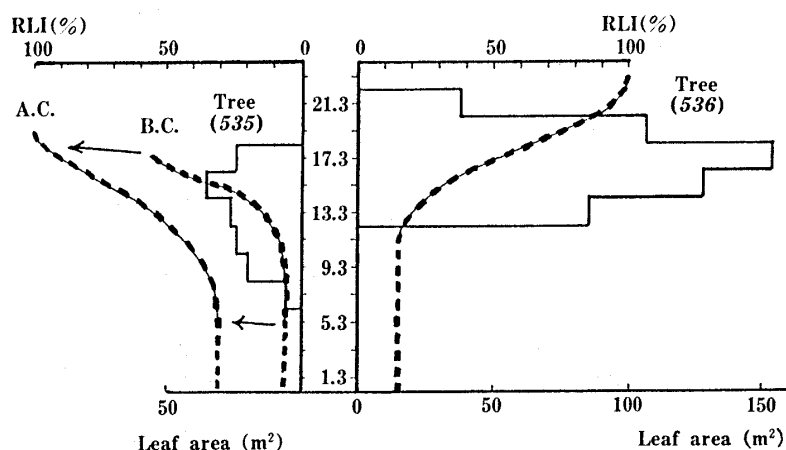


図-8. 高木(個体番号536)の伐採前後における亜高木(個体番号535)の光条件の変化

Light condition changes at sub-dominant tree (tree number 535) before and after cutting (tree number 536)

B. C. は伐採前を、A. C. は伐採後を示す。RLIは林外の明るさを100とする相対照度で示す。

Notes: A. C. and B. C. mean light condition changes after and before cutting, respectively. RLI means relative light intensity.

表-2. 伐採にともなう蒸散量の個体サイズによる変化

Dependence of stand transpiration upon a tree size before and after selective cutting

階級 Classes	個体数 Tree numbers	年総蒸散量 Ann. Transp.(t)			平均樹高 m. t. h.(m)	平均樹冠半径 m. c. r.(m)
		伐採前 b. s. c.	伐採後 a. s. c.	増加量 Increments		
10 t~	1	27.1	30.3	3.2(11.8%)	23.6	5.3
1~10 t	10	33.7	42.0	8.3(24.8%)	14.1	3.2
~1 t	25	6.5	7.9	1.4(21.5%)	6.2	1.7

カッコ付き数字は蒸散量の変化量を伐採前の蒸散量に対する相対値で示す。

Note: Percentages in parentheses mean the increments of transpiration to those before selective cutting.

Legend: m. t. h., Mean tree height; m. c. r., Mean crown radius; b. s. c., Before selective cutting; a. s. c., After selective cutting.

リーントーンで示した部分)を伐倒木として選び(30%択伐に相当),シミュレーションを行った。上層木の伐採により,林分の蒸散量は3,172tから2,170tに,およそ32%減少した。

伐倒木(高木)の場合を例にとって,伐採にともなう光環境の空間的な変化を垂直的に表したのが,図-8である。伐採によって光環境が大きく変わったようすがわかる。伐倒木(高木)の下層木にあたる亜高木の場合,快晴の日の蒸散量の変化量は伐採前の5.14kgから伐採後の6.98kgまでおよそ35.8%も増加した。

伐採木周辺(半径8.5m以内)に生育する隣接木の蒸散量の変化を整理したのが表-2である。この表は個体の蒸散量を三つのクラスに分け,それぞれの個体サイズ依存を調べたものである。これによると,蒸散量が1tから10tまでのサイズにおいて最も伐採の影響がある(24.6%)と考えられる。つまり,亜高木が最も変化が大きく,低木(21.5%),高木(11.8%)の順で影響が少ないと考えられる。低木および高木において蒸散量の変化が少なかったのは,伐採による光強度の変化の影響より,低木の葉量が絶対的に少ないことや,高木の樹冠の重複割合が少ないことが反映していると思われる。

上層択伐を行えば高木の伐採によって林分全体の蒸散量は減少する。しかし亜高木や低木では局所的な光環境の変化によって蒸散量がかなり増えるので,林分全体では蒸散量はそれほど急激に減らない。亜高木や低木を残す施業が行われると,皆伐されるよりは低木が林内に残り,林内の飽差環境を緩和することになる

表-3. 気温,光合成有効波長域日射量,飽差の変化が林分蒸散量に与える影響

Change of transpiration affected by air temperature, photosynthetically active radiation (PhAR), and vapor pressure deficit (VPD)

要因 Items	1) 温度 Temperature	+2°C	+6.2%	3368.3 t/ha
		-2°C	-5.6%	2993.9 t/ha
		Actual	—	3171.7 t/ha
	2) 光量子束密度 PhAR	+20%	+4.6%	3317.6 t/ha
		-20%	-5.1%	3009.6 t/ha
		Actual	—	3171.7 t/ha
	3) 飽差 VPD	+20%	+9.6%	3476.7 t/ha
		-20%	-9.7%	2863.8 t/ha
		Actual	—	3171.7 t/ha

ので,地表面からの蒸発散の緩和に役立つなど,他の水収支項目についても緩衝効果が間接的だが期待できると思われる。

4. 環境要因の変化と蒸散量との関係

環境要因の変化にともない森林の蒸散量がどの程度影響を受けるかシミュレーションモデルを用いて検討した。環境要因として,温度,光量子束密度,飽差を取り上げた。

なお,温度要因の場合,温度の変化は大気の飽差が変化(飽和蒸気圧が変わる)するので,蒸散量に影響する。大気の蒸気量を一定とみなした場合に,一定温度の変化が蒸散量の変化にどのように影響するかを表-3に示した。

表-3に示したように,温度が2°C前後変化すると,蒸散量はおおよそ6%変化することがわかった。また温度を気温ではなく葉温にすると,陽樹冠の葉温が気温よりも3~7°C高いことから葉面飽差がさらに高まり(7),蒸散量にもっと直接的な影響を与えることになるとと思われる。

光条件が20%前後変化すると,蒸散量はおおよそ5%変化した。光条件の影響は比較的少ないことがわかった。この理由として,陰葉の蒸散能力が陽葉に比べて低く,しかも光の変化に対して蒸散速度の変化が直線的に対応しないこと,葉の分布が陽樹冠に集中しているため樹冠内部で光が急速に減衰していること,陰樹冠部の葉量が少ないことなどから全体の蒸散量の変化に与える影響が少ないと考えられる。

飽差が20%前後変化すると,蒸散量はおおよそ10%変化することがわかった。このことから蒸散量の変化に最も影響のある要因は飽差であることがわかった。こうした傾向は蒸散そのものの特性を考えると当然の

ことではあるが改めてこの要因の重要性が認識される。

V. あ と が き

これまで、個葉レベルの蒸散速度の実測データから林分レベルの蒸散量を推定するにあって必要な手続き、およびそれぞれのレベルでの諸問題について現実的な検討を加えた。また求められたブナ林の蒸散量についてモデルを用いて解析した結果についても述べた。

すでに述べたように推定された林分蒸散量の信頼性は葉面積、蒸散環境変数（相対照度、飽差）の各要因の推定誤差に大きく左右される。またスーパーポロメーターによる実測値と蒸散環境変数を求めたときの湿度のデータの測定位置による違いから生ずる問題についてもまだ未解決である。しかし、ここに紹介した手法は林分蒸散量推定の一つの可能性として評価できるのではないかと考えている。

今後は林内での飽差の測定の精度をあげ、生態・生理学的モデルによる推定をより精度の高いものとするとともに、樹冠内の個葉レベルでの蒸散速度・葉の拡散抵抗値も詳細に考慮できるようにしたい。また機会があれば異なる樹種や蒸散量推定法との比較を行ってみたい。

引用文献

- (1) 近嵐弘栄・服部重昭・竹内信治 (1979) 斜面ライシメーターにおける植被別水収支の研究. 林試研報 303 : 1~46.
- (2) 服部重昭・近嵐弘栄・竹内信治 (1981) エネルギー収支によるヒノキ林の蒸発散測定. 日林誌 63 : 125~132.
- (3) 石原 邦・平沢 正・飯田 治・木村昌久 (1981) 水稻葉身の蒸散速度・気孔開度・木部の水ポテンシャルおよび葉の水ポテンシャルの日変化. 日作紀 50 : 25~37.
- (4) KAKUBARI, Y. (1977) Distribution of primary productivity along the altitudinal gradient. JIBP Synth. 16 : 201~212.
- (5) 角張嘉孝・佐藤 潤・杉山厚吉 (1985) データ計測制御装置をそなえた樹木のCO₂・H₂Oガス代謝計測システムとブナ林での計測例. 静大演報 9 : 1~14.
- (6) KAKUBARI, Y. (1987) Modelling the productive structure and function of natural forests of *Fagus crenata* at different altitudes in Naeba Mountains. An analysis of dry matter production with an eco-physiological computer simulation model based on an individual tree. Bull. Tokyo Univ. For. 76 : 107~162.
- (7) 角張嘉孝・山本茂弘 (1987) 17年生クスギ萌芽林の陽樹冠・陰樹冠における光合成・呼吸・蒸散速度. 静大演報 11 : 75~88.
- (8) 角張嘉孝・半田 繁・守谷孝志 (1988) 軽量・小型光合成・蒸散測定装置の機能とその応用. 99回日林論 : 777~778.
- (9) KOCH, W., KLEIN, E., and WALZ, H. (1968) Neuartige Gaswechsel Meßanlage für Pflanzen im Laboratorium und Freiland. Siemens Z. 42 : 392~404.
- (10) KRAMER, P. J. (1969) Plant and soil water relationships. A modern synthesis. 258~390, McGraw-Hill, New York.
- (11) LARCHER, W. (1975) Physiological plant ecology. 252 pp, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, New York.
- (12) Li-COR, Inc. (1981) LI-1600 Steady state porometer instruction manual, Nebraska.
- (13) メモリーセンサーマニュアル, (1984) 小糸工業(株) 49 pp, 東京.
- (14) MONSI, M. and SAEKI, T. (1953) Über den Lichtfaktor in den Pflanzen Gesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. Jpn. J. Bot. 14 : 22~52.
- (15) MORIKAWA, Y. (1971) Daily transpiration of a 14-year-old *Chamaecyparis obtusa* stand. J. Jpn. For. Soc. 53 : 337~339.
- (16) MORIKAWA, Y. (1974) ヒノキの樹液の流れ—林木の水収支と関連して. 東大演報 66 : 251~297.
- (17) 村井 宏編 (1990) ブナ等落葉広葉樹林の水土保全機能の定量化とのぞましい施業法に関する研究. 315 pp. 文部省科学研究費補助金(総合 A) 研究成果報告書.
- (18) 中野秀章 (1976) 森林水文学蒸発散. 水文学講座 13. 95~120, 共立出版, 東京.
- (19) PISEK, A. and TRANQUILLINI, W. (1951) Transpiration und Wasserhaushalt der Fichte (*Picea excelsa*) bei zunehmender Luft- und Bodentrockenheit. Physiol. Plant. 4 : 1~27.
- (20) SATOO, T. (1949) Relation between rate of transpiration and rate of absorption of water in seedlings of *Cryptomeria japonica* exposed to artificial wind. Bull. Tokyo Univ. For. 37 : 19~30.
- (21) SATOO, T. (1979) Standing crop and increment of bole in plantations of *Chamaecyparis obtusa* near an electric power station in Owase, Mie. Jpn. J. Ecol. 29 : 103~109.
- (22) 佐藤大七郎 (1983) 育林. 288 pp, 文永堂, 東京.
- (23) SCHULZE, E. D. (1970) Der CO₂-Gaswechsel der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Abhängigkeit von den Klimafaktoren im Freiland. Flora 159 : 177~232.
- (24) SCHULZE, E. D., FUCHS, M., and FUCHS, M. I. (1977) Spatial distribution of photosynthetic capacity and performance in a mountain spruce forest of northern Germany. I. Biomass distribution and daily CO₂ uptake in different crown layers. Oecologia 29 : 43~61.
- (25) 竹内信治 (1988) ヒノキおよびコナラ幼樹木の蒸発散

- と裸地からの蒸発量の比較. 99回日林論: 555～556.
- (26) TAN, C. S., BLACK, T. A., and NNYAMAH, J. U. (1978) A simple diffusion model of transpiration applied to a thinned Douglas-fir stand. *Ecology* 59: 1221～1229.
- (27) 東京都水源林事務所 (1968～1977) 森林水文調査報告 (1～4). 東京都水道局.
- (28) 山野井克己・丸山 温・坪山良夫・大谷義一 (1990) ヒノキ群落における水輸送過程の観測. 46 pp, 「土-植生-大気連続系の水輸送」研究会要旨集. 水文・水資源学会研究グループ, 東京.

(1990 年 12 月 12 日受理)