

落葉広葉樹林の蒸発散量と林内の乱流拡散係数

Estimation of Evapotranspiration from a Deciduous Forest and the Turbulent Transfer Coefficients within Canopy Layer

古 藤 田 一 雄*

Kazuo KOTODA

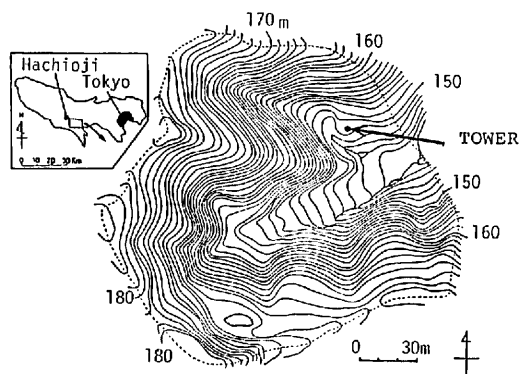
I ま え が き

均一な植生の草地あるいは水田・作物畑などの比較的草丈の低い植物の存在する地表面からの蒸発散量の実測や推定法は、古くから研究され、熱収支法や傾度法などが確立されてかなり良い精度でその推定ができるようになって来た。しかしながら樹高の高い林地からの蒸発散量の実測や推定法は、水面や草地あるいは農地などに比べて植物が地上に高く生長しており、従来の熱収支法や傾度法を適用するにしても、観測にかなりの困難をともなう。林地からの蒸発散は、樹高が高いことと、その樹冠面すなわち植被面の空気力学的粗度が大きいため、傾度法などを適用するには、樹冠上かなりの高さにまで達する観測塔をたてるか、あるいはバルーンを揚げて観測する必要がある。そこで本研究はそのような高い観測塔を必ずしも必要とせず、かつ、樹冠上の風速・温度のプロファイルの形に無関係に直接顕熱フラックスを測定する渦相関法を採用し、これに正味放射量と地中熱流量の観測により、林地の蒸発散量を評価する方法の検討を行なった。この研究は現在も続行中で、本報告はその解析結果の一部をとりまとめたものである。

II 観測地域の概要

観測地域は、東京都八王子市西南部御殿峠付近の多摩丘陵内の実験流域（東京農工大学波丘地利

用実験実習施設内）（第1図）で、流域の標高は145m~180mである。流域の土壌・地質は、場所により多少の差異はあるが、山腹斜面中間部で表層20~30cmは植壊土で、その下部1.5~2.0mの層は、上から順次2次堆積性のローム、シルト質ローム、粘土に移行している。このローム・シルト質粘土層の下には礫層（御殿峠礫層）がみられる。



第1図 観測地域の概観

地表面は、観測塔のある支流域（第1図参照）では、晴天が続くと地表面の流出は止まり、常時流出はみられない。これに対して主流域では、標高160m付近の谷底から地下水の浸み出しが生じており、冬の渇水期などを除いて常に流水がみられ、地表面は割合に湿った条件にある。

植生は、流域のほぼ全域にわたって、落葉広葉

* 筑波大学水理実験センター

(1982年5月8日受理)

樹が分布している。主な樹種は、コナラ、エゴノキ、ヒサカキ、ツクバネウツギ、ムラサキシキブなどである。上記樹種のうちで、上層木として優勢な樹種は、平均胸高直径 16.8cm、平均樹高 16m のコナラで、観測塔付近の林況調査（丹下，1981）によれば、胸高直径 4 cm 以上の立木は 3 樹種 18 本で、このうちの約 72% がコナラで占められている。植生密度は、胸高 4 cm 以上の立木では、1 m² 当り 0.18 本となる。胸高断面積でみると、全樹種の合計胸高断面積（3371.6 cm²）に対するコナラの合計胸高断面積の占める割合は、約 91% となる。また、全樹種の胸高断面積の合計の調査区面積に対する割合（樹木の占有面積率）は、33.7 cm²・m⁻² である。

林床の主要植生は、山腹部ではアズマネザサ、谷底部では春から秋にかけてシダ類が繁茂する。アズマネザサは場所により、2～3 m の草丈で密生しているところもあるが、観測塔付近では、平均草丈 1.5 m 位で中庸の植生密度となっている。第 1 表は、観測地域付近の林況を要約したもので

第 1 表 南の谷落葉広樹林（第 5 区）の樹種、
直径および断面積
(1981. 3. 11. 丹下による)

Area of Site		100m ²	
樹 種	本 数	平 均 胸高直径	合 計 胸高断面積
Species	No. of trees	MBIID*	CBHCA**
	本	cm	cm ²
コ ナ ラ	13	16.84	3058.1
エ ゴ ノ キ	3	8.57	271.3
ヒ サ カ キ	7	1.79	23.0
ニ シ キ ギ	2	1.40	3.1
ツクバネウツギ	6	1.38	9.3
ムラサキシキブ	3	1.16	3.4
イ ス ツ ゲ	1	1.60	2.0
ウ シ コ ロ シ	1	1.10	0.9
ヤ マ グ ミ	1	0.80	0.5
合 計	37		3371.6

* MBHD : Mean Breast Height Diameter

** CBHCA : Cumulative Breast Height Cross
Sectional Area

ある。

III 蒸発散量及び拡散係数の推定法

(1) 蒸発散量の推定法

林地の樹冠面における熱収支の観測によって、林地からの蒸発散量を推定することができる。いま樹冠面の上で測定された正味放射量を R_N 、乱流により上方へ輸送される顕熱輸送量を H 、同じく上方への潜熱輸送量を lE (l は蒸発の潜熱)、地中へ輸送される熱量を G 、林内植物体の温度上昇に使用される熱量を $V_p \int_0^H c_p (\partial T / \partial t) dz$ 、林内気層の温度上昇に使用された熱量を $V_a \int_0^H c_p \rho_a (\partial T / \partial t) dz$ 、同じく気層の水蒸気増加のために使用された熱量を $\int_0^H (\epsilon l / RT) (de / dt) dz$ 、同化にともなう熱量を λP 、移流による熱輸送量を A とすれば、樹冠面における熱収支式は次のように表わされる。

$$R_N = H + lE + G + V_p \int_0^H c_p \frac{\partial T}{\partial t} dz + V_a \int_0^H c_p \rho_a \frac{\partial T}{\partial t} dz + \int_0^H \frac{\epsilon l}{RT} \frac{de}{dt} dz + \lambda P + A \quad (1)$$

ここで V_p 、 V_a は、それぞれ林内植被層の単位立方体に対する植物体の占める割合および空気の占める割合、 c_p および $c_p \rho_a$ はそれぞれ植物体の熱容量および空気の熱容量、 $\partial T / \partial t$ は対象とする層の平均温度の変化、 $\lambda \approx 2500 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1}$ である。

一般に、林地のような植被層においては、丈の低い草地や農作物などの植被層に比べれば、かなりの貯熱量変化があると考えられるが、ここでは取扱いを簡単にするため、(1) 式右辺の第 4、5、6 項は、第 1、2 項に比べて非常に小さいことが知られているので、これを無視し、また、光合成の項および移流項も小さいとして省略すると、(1) 式は次のように示される。

$$lE = R_N - H - G \quad (2)$$

(2) 式の右辺の各項の値は、観測によって求めることができる。

本研究では、 R_N は、正味放射計、 H は超音波温度風速計を利用して渦相関法により、 G は地中熱流板によりそれぞれの値を決定したが、 H および IE はまた次のようにして求めることもできる。

$$H = c_p \rho_a K_h(z) \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_z \dots\dots\dots (3)$$

$$IE = -\frac{\varepsilon \rho_a l}{P} K_v(z) \left(\frac{\partial e}{\partial z} \right)_z \dots\dots\dots (4)$$

ここで P は大気圧、 K_h 、 K_v はそれぞれ顕熱および水蒸気の拡散係数、 l は大気中の水蒸気圧、 ε は同温同圧条件下の水蒸気と乾燥空気との密度との比 ($=\rho_w/\rho_a \approx 0.622$) である。ここで Bowen 比 β は、次のように表わせるので

$$\beta = \frac{H}{IE} = \frac{c_p P}{\varepsilon l} \frac{K_h}{K_v} \frac{\Delta T}{\Delta e} \dots\dots\dots (5)$$

上式を利用して

$$IE = \frac{1}{1+\beta} (R_N - G) \dots\dots\dots (6)$$

$$H = \frac{\beta}{\beta+1} (R_N - G) \dots\dots\dots (7)$$

が得られる。(6)、(7)式による方法はボウエン比—熱収支法と呼ばれるもので本研究では、林床上(地面上 1.2 m)の蒸発散量推定にこの方法を利用した(但し、各項の要素の測定は、地上 1.2 m を基準としている)。

(2) 林内の乱流拡散係数の推定法

いま、林内の任意高さに、単位断面積で、単位厚さの植被層を考え、移流項、光合成の項および、植被層の貯熱変化量の項をも無視し得るものと仮定し、高度 1、2 間の熱収支を考えると、

$$R_{N1} - R_{N2} = (H_1 - H_2) + (IE_1 - IE_2) \dots\dots\dots (8)$$

が得られる。ここで、植被層内の正味放射量の鉛直分布は、近似的に次式で与えることができる(内島, 1962)。

$$R_N(z) = R_N \exp \left\{ -k \int_0^z a(z) dz \right\} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、上式の座標軸は、樹冠面 ($z=0$) より林内植被層内部にとっており、 R_N は、樹冠面における正味放射量、 $a(z)$ は植被層の葉面積密度の鉛直分布関数、は植被層による正味放射量のみかけの吸収係数である。 $a(z)$ の関数形は、実測により決めなければならないが、これを地表面から樹冠面の高さまで積分したものは、葉面積指数 (LAI) と呼ばれている。

$$LAI = \int_0^H a(z) dz \dots\dots\dots (10)$$

(9)式の関係が林地内にも適用できるものとする、と、

$$(R_{N1} - R_{N2}) = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ R_N \exp \left\{ -k \int_0^z a(z) dz \right\} \right\} \dots\dots\dots (11-1)$$

また、顕熱潜熱の輸送項は、

$$(H_1 - H_2) = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ c_p \rho_a K_h(z) \frac{\partial T}{\partial z} \right\} \dots\dots\dots (11-2)$$

$$(IE_1 - IE_2) = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ -\frac{\varepsilon \rho_a l}{P} K_v(z) \frac{\partial e}{\partial z} \right\} \dots\dots\dots (11-3)$$

(11)式を(8)式に代入し、 z について積分し、 $K_h = K_v = K$ が成り立つものと考え、と、

$$R_N \exp \left\{ -k \int_0^z a(z) dz \right\} - c_p \rho_a K(z) \left\{ \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\varepsilon l}{c_p P} \frac{\partial e}{\partial z} \right\} = C \dots\dots\dots (12)$$

が得られる。積分常数は C 、樹冠面 ($z=0$) における熱収支式から定めることができる。

すなわち、

$$C = G \dots\dots\dots (13)$$

とおける。(13)式の関係は、植被層内の貯熱変化量を示す項、光合成による項および移流項が無視し得るものとして省略されており、近似的な関係を示すに過ぎないが、一般的にはかなりの精度で成立つものと考えられる。(9)、(12)、(13)式により、林

内の任意高度 z における乱流拡散係数 $K(z)$ は、次式によって決定できる。

$$K(z) = \frac{R_N(z) - G}{c_p \rho_a \left\{ \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_z - \frac{1}{r} \left(\frac{\partial e}{\partial z} \right)_z \right\}} \quad (14)$$

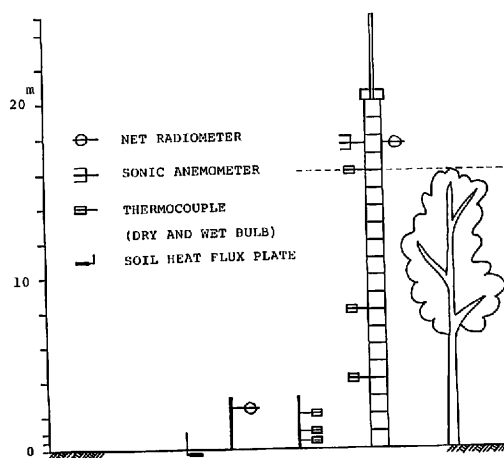
ここに r は、乾湿計定数 (psychometric constant) で、次式で与えられる。

$$r = \frac{c_p P}{\epsilon l} \quad (15)$$

(14)式の水蒸気圧 e を水銀柱 mm·Hg で表わした場合、 r の値は $c_p = 0.24 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}$, $P = 760 \text{ mm Hg}$, $\epsilon = 0.622$, $l = 580 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1}$ とすると、 $r = 0.55 \text{ mmHg} \cdot ^\circ\text{C}$ となる。また、 e を mb で示した場合には、 $P = 1013 \text{ mb}$, $l = 580 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1}$ で、 $r = 0.67 \text{ mb} \cdot ^\circ\text{C}$ となる。

(3) 観測法及び測器

第2図は、観測システムの概略図で、以下、各



第2図 観測システムの概略図

測定要素について概述する。

正味放射量 R_N は、Funk 型放射計 (英弘精機産業社製 CN-11 型放射収支計) を用い、樹冠面上約 1.5m の高さ (地表面からの高さ 17.5m) および林床土 1.2m の高さで測定した。樹冠面上の正味放射量は、京都大学防災研究所水資源研究センターが設置した観測塔で観測したデータを利用

させてもらった。放射計で観測した出力値は、アナログ積算演算器によって積算し、これを電子平衡式打点記録計に自記させた。

気温 (乾球温度 T , 湿球温度 T_W) は、銅コンスタンタン熱電対 (直径 0.32mm) を用いた通風式乾湿温度計を自作して測定した。測定高度は地上 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0m の 6 点である。

地中熱流量 G は、Hy-Cal Engineering 社製の地中熱流板 (B1-2-2000-WP-T 型) を地表面下約 1cm の深さのところに埋設して測定し、地温も同じ場所および深さで測定した。

樹冠面上の顕熱鉛直フラックスは、前述したように本研究では、小型超音波温度風速計 (海上電機社製、DAT-100型) を、観測塔の 17.5m 位置に設置して測定した。使用した DAT-100 型超音波温度風速計は、風速の測定範囲 $0 \sim \pm 10 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ 、温度の測定範囲 $-10 \sim +40 ^\circ\text{C}$ 、超音波の送受信素子 (プローブヘッド) の間隔 10cm で、測定回数が 1 秒間に約 20 回の 1 次元型温度風速計である。顕熱鉛直フラックスは、このヘッドを鉛直方向にセットして、風速の鉛直成分 w および温度 θ を測定し、この変動成分 w' および θ' をアナログ乗算器に通して積を求め、さらに 1 分間の移動平均値に相当する出力を得るためにフィルターを通して、その出力 $\overline{w'\theta'}$ を 10 分ごとにデジタルプリンターに記録した。熱収支の計算に使用した樹冠面上の顕熱鉛直フラックス H は、この 10 分ごとの値の 1 時間平均値に $c_p \rho_a$ を掛け合わせたもので、次式で表わされる。

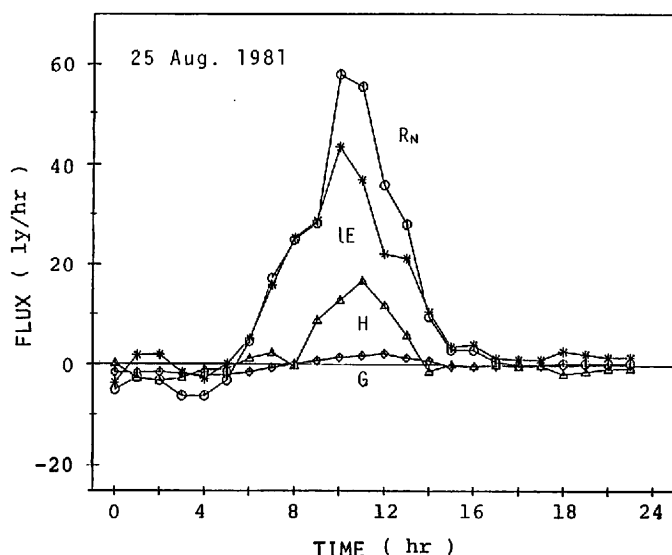
$$H = c_p \rho_a \overline{w'\theta'} \quad (16)$$

渦相関法の利点は、粗度などの蒸発面の性質や、安定度などの大気の特性に特別な考慮を払うことなく直接的な方法でフラックスを測定できることである。

IV 観測結果

(1) 樹冠面における熱収支と蒸発散量

第3図は、完全に展葉した後の夏の晴天日 (19



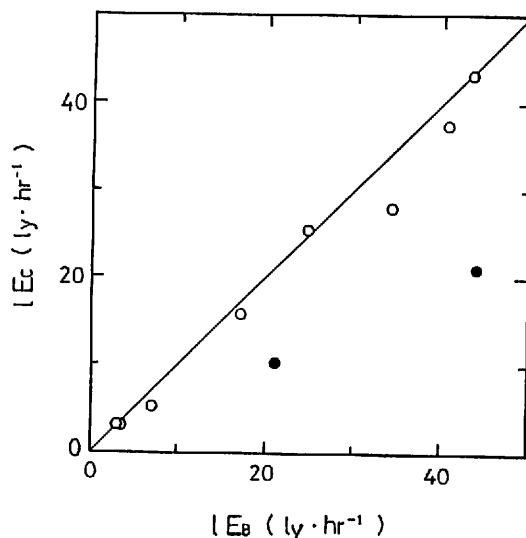
第3図 樹冠面における熱収支項の日変化 (25, Aug. 1981)

- (○).....正味放射量 (net radiation)
- (*).....潜熱フラックス (latent heat flux)
- (△).....顕熱フラックス (sensible heat flux)
- (◇).....地中熱流量 (soil heat flux)

81年8月25日)の落葉広葉樹林の樹冠面における熱収支項の日変化を例示したもので、この観測前の8月23日は、台風15号が襲来し、約80mmの雨を降らせ、地表面はかなり湿った状態であった。

24時間値の各熱収支項は、それぞれ R_N が $255 \text{ ly} \cdot \text{day}^{-1}$ ($10.68 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$, 以下同様), H が $40 \text{ ly} \cdot \text{day}^{-1}$ (1.68), LE が $223 \text{ ly} \cdot \text{day}^{-1}$ (9.34), G が $-8 \text{ ly} \cdot \text{day}^{-1}$ (-0.34) であった。すなわち、林地全体からの蒸発散量は約 $3.8 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ と推定された。 LE/R_N 比は、 0.87 で、正味放射量の約87%の熱量が蒸発散のために消費されている。ボウエン比 β の24時間平均値は 0.18 でかなり小さい値となっている。しかし、 β の日中の変化をみると、朝方6～8時に 0.2 位であったものが、次第に増大し、12～13時には、最大値 $\beta = 0.53$ を示した。そして以後は再び β の値は減少している。

本研究では、渦相関法で顕熱輸送量を測定し、これと熱収支式の組合わせによって蒸発散量を推定したが、この方法が他の方法と、どの程度適合するのかを検討したのが第4図に示されている。



第4図 渦相関熱収支法による潜熱フラックス (IE_c) とボウエン比熱収支法による潜熱フラックス (IE_b) との比較 ●印は14, 15時の値

図は同じ観測塔を使用して池淵ら (1981) が、ボウエン比・熱収支法により求めた樹冠上の潜熱輸

送量 IE_B を横軸に、渦相関・熱収支法による潜熱輸送量 IE_C を縦軸にとって示したもので、第3図に示した観測データのうち、日中（6時～16時）のデータ（1時間平均値）のみを使用した。図を見て明らかなように、両者は1対1で良く対応している。但し、12時から15時までのポウエン比が正から負に移り変る時間帯では、両者の値に大きな食い違いが生じた（図の黒丸、1点は図からはみ出したので描かれていない）。この時間帯は樹冠上での顕熱フラックスの方向がそれまでの上向きから下向きに移り変るときで、渦相関法でも第3図の14時の顕熱フラックスの値が負となっている。しかしその値はポウエン比法によるほど大きな値にはなっていない。

顕熱フラックスが下向きとなり、ポウエン比が負となった場合には、植被層内で熱の貯溜あるいは移流による流出がないかぎり(6)式からわかるように、蒸発散量は $(R_N - G)$ よりも大きな値でなければならないことを意味する。いまの場合、植被層内での熱の貯溜は、午後から夕方にかけて植被層の温度も降下しつつあるので、林内での熱貯溜は考えにくい。移流については不明な点が多いので今後の研究にまたなければならないが、ポウエン比法で IE を求める場合には、 β が正から負に移り変るとき著しく IE の値が大きく算出される傾向が強い。同様の状況が朝方の放射量が急増する時期にも見られる。その発生の時刻は、その時の気象条件などによって異なるが、第3図においては顕熱の上向きの輸送量が減少している8時頃に認められる。例示した8月25日には、ポウエン比法で計算した結果でも、渦相関法で計算した結果でも IE の値はそれ程大きな差異はみせなかったが、時として大きな差異を見ることがある。

G/R_N 比は、日中（6～16）時についてのみの値による計算では、約2%となった。これは、マツ林で求めた値（Moore, 1976；大櫛ら, 1981）3～4%に比べてやや小さい値となっている。本研究の対象樹林は、コナラを主体とする落葉樹林で、樹種も異なり、また当然その植被層の群落構造や葉層構造も異なるので、林内の熱収支構造も

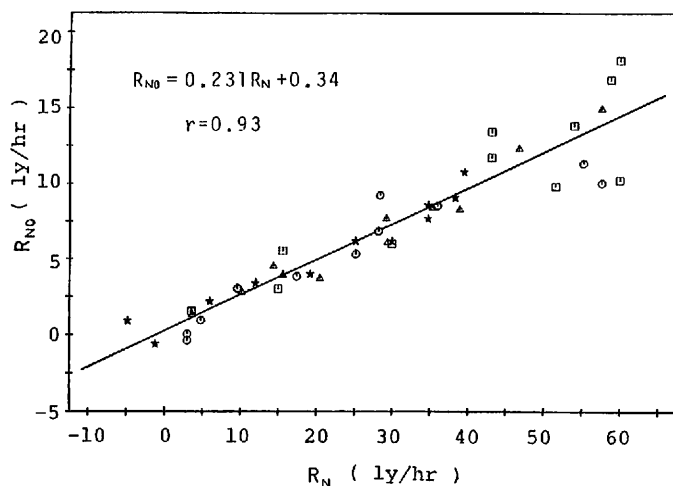
異なると思われるが、このような樹種や群落構造の差異にもかかわらず、 G/R_N 比がきわめて近い値をとっていることは意外とも言える。ただし、8月25日のデータは、晴天と言えども、午後の15時以降からは、薄雲が被い、直達日射がさえぎられて、正味放射も急減した。そこで、雲のない快晴日を選んで G/R_N を求めたところ、5～6%のほぼ一致した値が得られた。データは落葉が始まる前の最繁茂期間のものを使用し、この間は葉面積や葉層構造などが著しく変っていないと考えられるので、さきの G/R_N 2%との違いが問題になるが、同一の林地で、群落構造はこの期間中あまり大きな変化はしていないと考えられるので、その原因は林地内外の温度や水分条件などの違いか、あるいは、放射条件の違いによるものと考えられる。今のところ、この差異は後者に原因して生じたものと考えている。すなわち、雲などがなかった曇天日は、快晴日の場合に比べて直達日射量に対する散乱日射量の割合が多く、このことに起因して G/R_N 比が小さくなったと推定される。

林内に入射した放射は、植被層内で吸収されたり、二次散乱、三次散乱をくりかえしながら林床に達する。その減少の様子は、例えば(9)式で示されるような、葉面積密度の関数として、樹冠面から下方に向かって指数関数的に減少することが知られている。今回の調査では、葉面積の層別分布を測定できなかったので、吸収係数 k を決定することはできなかったが、林床上1.2mの位置に設置した正味放射計により R_{N0} を測定したので、この値と、 R_N を比較してみる。データは、8月25日、26日、30日および10月19日の4日間のもので、6～16時までの日中のデータのみを使用した。但し10月19日のデータは、6時および16時は、 R_N 、 R_{N0} ともに符号が負（上向きの正味放射）になっているので、計算から除外した。

第5図は、 R_N および R_{N0} の1時間積算値をプロットしたもので、最少自乗法により求めた両者の関係は、次式

$$R_{N0} = 0.231R_N + 0.37 \text{ (ly} \cdot \text{hr}^{-1}\text{)}$$

で示ことができ、相関係数は0.93であった。す



第5図 樹冠上の正味放射量(R_N)と林床上の正味放射量(R_{No})との関係(1981年)
○…8月25日, △…8月26日, □…8月30日, ★…10月19日

なわち本地域の晴天日の林床における正味放射量は平均値で R_N の約23%に相当する量となっている。 R_{No}/R_N 比は、太陽高度の違いや季節によって変化すると考えられるが、このデータではこれらの傾向を明瞭に識別することはできなかった。

Yabuki et al. (1978) は、ツブラジイとイチイガシを主体とする照葉樹林内における日射量を高度別に実測して、次の実験式によくあてはまることを示した。

$$I_z = I_H \exp \left[-k_I \left(1 - \frac{z}{H} \right) \right] \quad \text{.....(17)}$$

ここで、 I_z : 地面からの高さ Z における日射量, I_H : 樹冠面における日射量, k_I : 日射の吸収係数, H : 樹冠面の高さである。

Yabuki らは、ツブラジイ・イチイガシ林の k_I

の値として $k_I = 2.92$ を得た。(9)式の近似式として(17)式が、正味放射量にも第1近似として適用できると考えて、次式が得られる。

$$R_N(z) = R_N \exp \left[-k \left(1 - \frac{z}{H} \right) \right] \quad \text{.....(18)}$$

上式の k の値を本研究地域のコナラ林に対して求めると、 $k = 1.56$ となった。この値は樹冠上と林床上の2点の正味放射量の観測値から内挿して求めた値で季節・時刻により異なるので、精確な値は今後の調査にまつ必要がある。しかし、日射が短波長成分のみであるのに対して、正味放射は、短波長放射の他に長波長の成分も含み、 R_{Nz}/R_N の値の比較的大きな値は、長波長成分の放射の寄与によるものが大きいためと推測される。

第2表は、夏季の代表的な晴天日(8月25日、

第2表 コナラ林の熱収支

単位: $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$

	R_N	H	I_E	G	$\frac{G}{R_N}$	$\frac{H}{I_E}$	$\frac{I_E}{R_N - G}$	$\frac{I_E}{R_N}$
樹冠面の熱収支	261.4	24.5	229.0	7.9	0.03	0.107	0.90	0.88
林床面の熱収支	71.3	-1.8	62.5	7.9	0.11	-0.028	1.03	0.91

最繁茂期晴天日(1982年8月25, 26, 30日, 10月19日)の平均値

26日, 30日, 10月19日を平均した, 樹冠面及び林床面における各熱収支項の値を示したものである。表を見て気付くことは, 林床面においては顕熱フラックスが下向きで, 熱は大気から地表面へ向って流れていることで, 夏の裸地面における熱収支構造とは著しく異なっている。また林床からの蒸発散量は樹冠面からの蒸発散量の約28%で, $1.1 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ となっている。これに対して, 樹冠面からの蒸発散量は $3.9 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ となっている。選ばれた日が晴天日で, 樹木や葉に付着した水は少ないと考えられるので, 樹冠面からの蒸発散量と林床からの蒸発散量の差を単純に蒸散量と考えると, この林地からの蒸散量は, 約 $2.8 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ となる。

期間平均値で比較すると, $(R_N - G)$ に対する LE の割合は, 90%で, 樹林に吸収された熱エネルギーの殆んどが, 蒸発散のために消費されている。正味放射量 R_N に対する LE をみても88%で, 蒸発散研究グループ(1967)の水稲田に対する LE/R_N の値よりかなり大きい。

これは, 本調査地域のコナラ林のように樹高の高い植被層においては, 日中, 樹冠面の温度はかなり高くなり, 顕熱鉛直フラックスは, 樹冠面から上方へ輸送されるが, 一方, 地表面の温度は, 樹冠面の温度よりも低いので, 顕熱フラックスは, 下方へも輸送されるので, H/R_N の割合が非常に小さくなるためと考えられる。

服部ら(1981)は, ヒノキ林における蒸発散量(1980年5月13日-6月9日)を熱収支法, Monteith法, Penman法などによって算定し, R_N と比較しているが, この結果と筆者の得た値を比較すると, Penman法で得た LE/R_N の値87%が, 最も近い値となった。

また, 筆者の得た LE/R_N の値は, 統計期間が異なるが, 塚本(1966)が愛知演習林で得た年正味放射量に対する年蒸発散量の比90%より若干小さい値を示している。

Rauner(1972)は, 春先きの若い落葉広葉樹林(カシワ林)の熱収支観測を行なって, 林床(下草および地面)からの日蒸発量 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ を

求め, この量が, 林地全体からの蒸発散量 $3.5 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ の約15%に相当することを示した。本研究地域のコナラ林の林床からの蒸発散量は, $1.1 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ であるから, Raunerのカシワ林の約2倍となっている。しかし, 林地からの全蒸発散量は, コナラ林の $3.9 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ に対して, カシワ林は $3.5 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ で, ほぼ同じオーダーの値となっている。

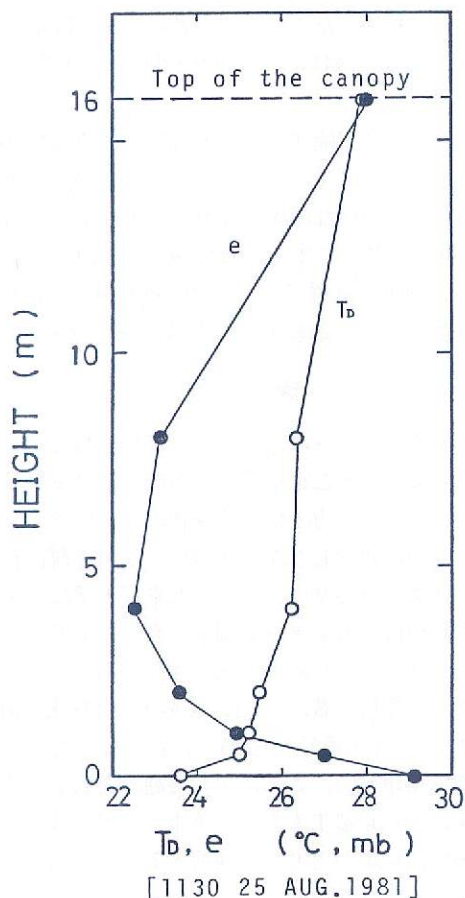
潜熱フラックスに対する顕熱フラックスの割合, すなわちボウエン比 β は, 表2に見られるように, 樹冠面においては0.1, 林床面では-0.03となった。これは, カバ・ポプラの混交落葉広葉樹林(樹高15~17m, 樹令40~50年)で得られた8月最繁茂期の β の値0.3(Rauner, 1976)に比べると, やや小さな値となっている。

(2) 林内の乱流拡散係数の鉛直分布

樹林内の顕熱輸送や潜熱輸送, したがって, 温度分布や空気中の水蒸気の分布は, それぞれの拡散係数の性格に支配される。そこで本研究地域の林内の拡散係数が, どのようなオーダーの大きさの値であるのか, またその鉛直分布などのような性格をもっているのかを明らかにするため以下のような解析を行なった。解析の方法は, 内島(1962)によって示された熱収支法を用いた。なおこの解析は, 得られたデータのすべてにわたって検討した結果をまとめて, 一般化したものではなく, 夏の林地の地表面がかなり湿った条件下における林床面近くの乱流拡散係数の評価を試みたもので, 種々の気象・水文条件下における, 林内拡散係数の一般的性格の解明は今後の研究にゆだねたい。

第6図は, 第3図に示したのと同じ日の11時から12時までの1時間を平均した林内の気温(乾球) $T_d(^{\circ}\text{C})$ と, 同じく林内空気中の水蒸気圧 $e(\text{mb})$ の鉛直分布を示したものである。

図をみてわかるように, T_d は樹冠面(高さ16m)で最も高く, 27.9°C を示し, 下方に向って低くなり, 地表面では 23.6°C となっている。すなわち林地内では, 顕熱フラックスは樹冠面から地表面へ向って流れている。一方, 樹冠面上の超



第6図 林内の気温分布と湿度分布
(1981年8月25日11~12時平均値)

音波温度風速計で測定した顕熱鉛直フラックスは、上向きの流れを示し、沢井(1982)の整理した樹冠上の気温データによっても顕熱フラックスは上向きの流れを示した。このことは顕熱の鉛直フラックスが、樹冠面を境としてその上部では上向きに、下部の林内では下向きに流れ、樹冠面付近が熱の源(source)となっていることを示している。

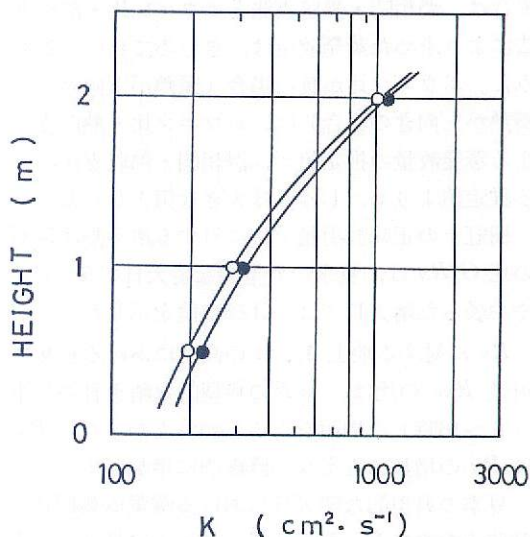
一方、林内の湿度鉛直分布は、これを大気中の水蒸気圧 e (mb) で表わすと、第6図の黒丸を実線で結んだような分布になる。この図からわかるように、 e の鉛直分布は地表面の29.12mbから高さ4mの22.54mbと急激に低下している。しかし

高さ4m以上では再び増加して、高さ16mの樹冠面では e の値は27.99mbになっている。すなわち水蒸気の鉛直フラックスは、地表面から4mぐらいまでの高さまでは上向きに、樹冠面から高さ4mぐらいまでは下向きに流れており、高さ4mぐらいの層が水蒸気フラックスの吸源(sink)となっていることがわかる。

拡散係数の算定は、 T_b および e の鉛直分布の1時間平均値をとり、この間にはほぼ定常とみなせるものと仮定して、地表面から、高度4mまでの範囲の植被層に対して行なった。

林内の正味放射量の鉛直分布は、この時間の樹冠上の正味放射 $R_N = 55.2 \text{ ly} \cdot \text{hr}^{-1}$ と、林床土1.2mの正味放射 $R_{N0} = 11.3 \text{ ly} \cdot \text{hr}^{-1}$ の値から、(8式)の吸収係数 $k = 1.69$ を決定し、この k の値を用いて(8式)により、所定の高度の正味放射量を計算した。また、この時間の地中熱流量は、 $G = 1.8 \text{ ly} \cdot \text{hr}^{-1}$ であった。

第7図は上述の資料を基にして(4式)により算出した林内の地表面近くの乱流拡散係数である。図の黒丸を結んだ曲線は正味放射の減衰を考慮した場合の乱流拡散係数の鉛直分布で、白丸を結んだ



第7図 乱流拡散係数の鉛直分布
(1981年8月25日11~12時平均値)
●.....放射の減衰を考慮した場合
○.....放射の減衰を考慮しない場合

曲線は正味放射量が地表面近くの2 m程度の範囲内では高度に対して一定であるとして計算した結果を示したものである。両者の差は11%ほどで、放射の減衰の少ない地表面付近では、正味放射を一定として取扱っても、拡散係数の算定値にはそれほど大きな誤差は与えていない。

得られた拡散係数は、地上2 mの位置では $1 \times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ の値となったが、地上0.5 mの位置では、 $2 \times 10^2 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ と急激に減少している。そして、この高度における顕熱フラックスは、地表面へ向って約 $3.9 \text{ ly} \cdot \text{hr}^{-1}$ 流れており、潜熱フラックスは逆に上方へ向い約 $14.7 \text{ ly} \cdot \text{hr}^{-1}$ 流れていた。すなわち約 $0.25 \text{ mm} \cdot \text{hr}^{-1}$ に相当する蒸発が生じていた。

V あとがき

従来、あまり観測例の多くなかったコナラを主体とする落葉広葉樹林を研究対象として、林地の蒸発散量を推定するため渦相関・熱収支法による野外観測を行なった。

この結果、以下のことが明らかになった。

ボウエン比が正（顕・潜熱がともに上向き）の場合は、渦相関・熱収支法とボウエン比・熱収支法により求めた蒸発散量は、きわめて良い一致をみた。ボウエン比が負の場合（顕熱が下向きで、潜熱が上向きの場合）は、ボウエン比・熱収支による蒸発散量の推定値が、渦相関・熱収支法による推定値よりも、しばしば大きな値となった。

樹冠上の正味放射量 R_N に対する地中熱流量 G の比 G/R_N は、夏季の典型的な晴天日で5~6%、やや曇った晴天日で2~3%の値を示した。

R_N に対する地上1.2 mの高さにおける正味放射量 R_{N0} の比は、夏季の典型的な晴天日の日中（6~16時）平均値をとると23%となった。 R_{N0} は R_N の増加にともない直線的に増加している。

夏季の典型的な晴天日における落葉広葉樹林の熱収支を求めた。その結果、林床では裸地面と異なっており、下向きの顕熱フラックスが卓越していることおよび、林地からの全蒸発散量が $3.9 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ であるのに対して、林床からの蒸発散量は、

全蒸発散量の約28%で $1.1 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ となることがわかった。そして両者の差を蒸散量と考えると、この量は、 $2.8 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ と見積られる。

林内の水蒸気輸送を支配する乱流拡散係数 K を熱収支解析によって求めた。この結果、日中の蒸発散最盛時の乱流拡散係数は、地面からの高さ0.5 mの位置で、 $2 \times 10^2 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ の値を示し、高さ2.0 mの位置では、 $1 \times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ と地表面付近では、高さとともに K が急増している。

謝 辞

本研究を行なうにあたって、研究の場を心よく提供して下さった東京農工大学農学部丹下勲教授および教職員の方々に厚く御礼申しあげます。また、同地に建設した気象観測塔の使用と観測資料の一部を利用させていただいた京都大学防災研究所水資源研究センター池淵周一教授にも厚く感謝いたします。さらに本研究の遂行にあたっては、文部省科学研究費、「丘陵地域の流出特性に関する研究」（課題番号546205、代表者高山茂美）の一部を使用した。ここに記して謝意を表します。最後に、東京農工大学富沢徳重、富沢実技官には現地で記録紙のとりかえ等種々お世話になり、厚く御礼申しあげます。

文 献

- 池淵周一（1981）：八王子試験熱収支観測資料（未発表）
- 内島善兵衛（1962）：植物群落内の微気候に関する研究（1） 植被層内の乱流拡散係数について、農業気象，18，1—9。
- 大御政行・及川武久・森川清（1981）：平地アカマツ林の熱収支・水収支特性について、「設ヶ浦およびその周辺域の生態系動態におよぼす人間活動の影響」研究班報告書，文部省。
- 沢井 庸（1982）：熱収支法による林地内蒸発散の推定に関する研究，京都大学工学部土木科卒業論文（未発表）。
- 蒸発散研究グループ（1967）：水田の蒸発散，農業気象，22，149—157。

- 丹下 勲 (1981) : 東京農工大学農学部丘陵地利用実験実習施設林況調査資料 (未発表)
- 塚本良則 (1966) : 山地流域内に起る水文現象の解析, 東京農工大演習林報告, 6, 1—79.
- 服部重照・近嵐弘栄・竹内信治 (1981) : エネルギー収支によるモノキ林の蒸発散量の測定, 日林誌, 63, 125—132.
- Moore, C. T. (1976) : Eddy flux measurements above a pine forest, *Quart. J. R. Met. Soc.*, 102, 913—918.
- Rauner, Ju. L. (1972) : 耕地・森林生態系の熱収支——微気象と物質生産——, 189p. 農水産省 (農林水産技術会議事務局連絡調整課邦訳).
- Rauner, Ju. L. (1976) : Deciduous Forest, in “Vegetation and the Atmosphere”, Vol. 2, (ed. Monteith, J. L.), 241—264, Academic Press, London.
- Yabuki, K., Aoki M. and Hamotani, K. (1978) : Characteristics of the forest microclimate, *JIBP SYNTHESIS*, 18, 55—65.