作物群落内におけるエネルギーとガスの交換に関する研究 (8)*

—トウモロコシ群落内の拡散係数と葉面拡散速度—

内島善兵衛¹⁾・宇田川武俊²⁾・堀江 武¹⁾・小林 勝次[†]

(農業技術研究所, 気象科¹⁾, 生理第2科²⁾)

Studies of Energy and Gas Exchange within Crop Canopies (8)

—Turbulent transfer coefficient and foliage exchange velocity within a corn canopy—

Z. UCHIJIMA, T. UDAGAWA, T. HORIE and K. KOBAYASHI

(National Institute of Agricultural Sciences, 1. Div. of Meteorology and

2. 2nd Div. of Plant Physiology, Nishigahara 2-1, Tokyo, 114)

1. は し が き

作物群落内における微気象ならびに光合成に関する研究の進展につれて、炭酸ガス環境をふくむ微気象環境の成立機構が実験のおよび理論的に研究されるようになってきた。筆者の1人 (UCHIJIMA, 1961) は、群落内微気象環境の成立において乱流拡散係数・純放射・葉面積密度の垂直分布のもつ重要性を指摘した。そして、乱流拡散係数を求める熱収支法を工夫した (内島 1962, 斎藤 1962)。

その後、群落内での水蒸気や炭酸ガスの放出・吸収を基礎として微気象を研究する拡散モデル (БуАдгсвский 1964, PHILIP 1964, WAGGONER 1968 など) の発展につれて、群落条件下での葉面拡散速度 (Foliage exchange velocity) や気孔拡散速度 (Stomatal exchange velocity) への関心がたかまつてきた。群落内の各葉層の葉面拡散速度を求めるために2～3の方法が提出されている。UCHIJIMA (1966), BROWN・COVEY (1966) は葉層の熱収支にもとづいて葉面拡散速度と気孔拡散速度を求めている。IMPENS (1966), IMPENS *et al.* (1967) はポリエチレン膜を被覆した葉と非被覆葉との熱収支の差から葉面拡散速度を求める方法を用いている。また Молдау (1969) は葉面の純放射を急激に変化させたときの (直達太陽放射をささげる) 葉温の変化から気孔拡散速度を求める方法を提出している。

以上の実験の結果は、群落内微気象の実体を明らかに

する以外に、群落微気象のシミュレーションおよび拡散モデルの検討にも利用できる。しかしながら、群落内での葉面拡散速度、気孔拡散速度ならびに葉面相対湿度 (Foliage relative humidity) に関する資料はまだ余り多くない。とくに、群落内での水蒸気拡散の研究において重要な役割を果す葉面相対湿度に関する資料は村田 (1962) の報告を除いてほとんどえられていない。筆者ら (内島・宇田川 1969) は葉面熱収支式を用いて簡単なモデル計算を行ない、葉面相対湿度が周辺空気中の相対湿度と葉面純放射によつて変化することを見出した。

モデル計算の実施と平行して、われわれは作物群落内における乱流拡散係数および葉面拡散速度などの実体を明らかにするために、主として熱収支法を用いて実験的研究を行なつている。それらの結果は、群落内におけるエネルギーとガスの交換に関する研究として発表されているが、ここでは1967年のトウモロコシ群落内での観測資料からえた結果を報告する。

2. 観 測 方 法

熱収支計算ならびに炭酸ガス環境の研究に必要な微気象観測は、埼玉県立畜産試験場 (埼玉県大里郡江南村) のトウモロコシ圃場で行なわれた。観測は1967年夏のトウモロコシ生育期間を追つて、約2週間間隔で2～3日ずつ4回 (July 18–20, Aug. 2, 3, Aug. 24, 25, Sept. 5, 6) 行なつた。圃場内の観測地点は主風向 (日中は主として南) を考慮に入れてえらび、約100mのfetchが確保された。観測は早朝 (0600) より夜 (2200) まで大体1時間間隔でくりかえされ、観測時間は10分間であつ

* 昭和44年4月1日全国大会にて発表

† 現新潟統計調査事務所

Fig. 1. Schematic diagram of installation in the field.

1. Beckman net radiometer; 2. Solarimeter; 3. Albedometer; 4. Air sampling tower; 5. Intake nozzle; 6. Guiding cable; 7. Funk type net radiometers; 8. Fine anemometers; 9. Infra-red gas analyzer; 10. Millivolt chart recorder; 11. Heat flow plates; 12. Tube type solarimeter; 13. Rotary oilless pump; 14. Digital millivolt recorder; 15. Millivolt chart recorder; 16. Cross section of sampling tower.

た。観測に用いた測器の群落内における設置状況が模式的に第1図に示されている。気温と湿度の測定のために、熱電対乾湿球が空気採取口のシュルター内に設置されている。群落各層の葉—気温差を測定するための熱電対温度計が約30cm間隔で葉層内に設置されている。つぎに、第1図の測器による観測法とデータ整理法を説明しよう。

a) 純放射量の分布

上に説明したように群落内での純放射量の垂直分布は微気象環境の成立に大きな役割を果している。群落内での放射強度は垂直方向のみならず水平方向にもかなり大幅に変化している。それゆえ、群落内での平均的純放射量のプロフィールをうるには空間的に平均化することが必要である。この目的のために、小型純放射計(7)をケーブル(6)に吊し、観測時間中に水平に移動させる方法を用いた。各純放射計からの出力は自動切換スイッチを通つてレコーダー(15)に与えられた。10分間の観測時間中に約7mを移動し、その間12~16回の記録が各レベルについてえられた。これを平均して純放射量の平均プロフィールが決定された。なお、純放射計の移動で植物葉の折損が生じ易いので、この方法には一層の改良が必要である。

b) 葉—気温差の分布

葉面拡散速度や気孔拡散速度の計算において葉—気温差の値は重要な役割を果す。群落内における葉—気温差

の測定はかなり困難であるが、近似的な方法としてつぎのようにした。直径0.1mmの熱電対温度計を5個直列につなぎ、片側の熱電対を葉裏面に約3cmの間隔で透明粘着テープ(5×5mm²)で密着させ、片側の熱電対は葉の日陰になるように約5cm離しておいた。これらの熱電対温度差計を各葉層(6高度)に設置して葉—気温差の分布を求めた。なお、各温度計の出力は直読ミリボルト計で10分間に3回よみとり平均した。

c) 気温と湿度の分布

作物群落内外の各レベルから試料空気採取するために特別な空気採取塔(4)が作成された。これは所定のレベルに吸気ノズル(5)があり、下端に空気ポンプと連結用の枝のついている内径12mmのアルミ筒10本を円周上に並べたもので、高さ2mと4mとに調節できるようになっている。各筒は長さ30mのポリエチレンチューブを通じて空気ポンプ(13. 吸気量約270l/min)と連結される。各レベルの吸気ノズルにはシュルター付き熱電対乾湿計がとりつけられるようになってい。空気採取のための大量の吸気(各ノズル約20l/min)は、通風乾湿計に十分な通気(300cm/sec以上)を与えた。各熱電対の片方は攪拌機つき大型ジャー内の水中に浸した。各乾湿計とジャー内水温との差に相当する電気出力は自動スキュンニング Digital mV計で記録された。mV計は2秒おきに記録するようセットされているので、10分間に約15回の測温が可能であつた。ジャー内の水温は各観測時間の直後に水銀温度計で測定した。以上のデータを平均化して、平均的な温・湿度のプロフィールを求めた。

d) CO₂ 濃度の分布

空気採取塔を通して各レベル(本観測では9レベル)から採取された空気の1部は、空気ポンプ(13)に入るまえに分岐されて赤外線ガス分析機(9)に与えられるようになってい。手動コックを用いて空気流をきりかえ、各レベルのCO₂濃度を求める。10分間に3~4回の観測しか出来ないの、スムーズなCO₂濃度プロフィールを求めることはかなり困難であつた。この欠点を克服するには、さらに空気採取システムの改良が必要である。

e) 風速の分布

作物群落内の風速場の研究には、熱電対式風速計(8)を使用した。小型熱電対式風速計を群落内の所定のレベルに設置し、その出力は電磁オシログラフで5分間記録した。5秒おきに読取つたデータを基礎として平均風

速、乱れの強さ、乱流速度などを求めた。また、電磁オシログラフの使用できない時には、自動切換スイッチを通してレコーダー（15）が用いられた。10分間に約10～15回の測定値がえられるので、平均風速だけを求めた。

f) その他の観測

以上の主要な要素のほか、到達全短波放射量、反射短波放射量、群落上の純放射量、群落下の全短波放射量ならびに地中伝導熱量を測定した。これらの測定値は記録計（10）からよみとつた。気象要素のほかにトウモロコシ群落の幾何学的構造の特徴を明らかにするために、葉の分布と配置が各観測時期ごとに調査された。それらの結果は別に報告されている。

3. 拡散係数の決定

群落内の拡散係数の値ならびにその分布は微細気象的に非常に重要な意味をもっている、ここ10年間に多くの研究が発表されている。著者の1人（内島 1962）は、群落各層における熱収支式から群落内の拡散係数はつぎのように与えられることを明らかにした：

$$K = \frac{S_z - B}{-c_p \rho \left(\frac{dT}{dz} \Big|_z + \frac{l}{c_p} \frac{dq}{dz} \Big|_z \right)} \quad (1)$$

ここで K 、拡散係数 (cm^2/sec)； S_z 、高さ z での純放射量 (ly/sec)； B 、地中伝導熱量 (ly/sec)； c_p 、 ρ 、空気の定圧比熱と密度； $\frac{dT}{dz} \Big|_z$ 、 z での気温傾度 ($^{\circ}\text{C}/\text{cm}$)； $\frac{dq}{dz} \Big|_z$ 、 z での比湿傾度 ($\text{gH}_2\text{O}/\text{g air cm}$)； l 、蒸発の潜熱。上式は若干の改良を加えられながら、群落内微気象の研究に利用されている (BEGG *et al.* 1964, DENMEAD 1964, BROWN・COVEY 1966, Будагский・Каргушкин 1969)。すでに2・3の研究者によつて指摘されているように、温度および比湿の垂直傾度を正確に決定することはかなり困難である。そこで、われわれはつぎのような近似的方法を拡散係数の決定に利用した。

作物群落内のあるレベル (z) における熱収支式はつぎのように表わされる：

$$R_z = -K_z \left(c_p \rho \frac{dT}{dz} + l \rho \frac{dq}{dz} \right) \quad (2)$$

ここで $R_z = S_z - B$ 。群落内においては、 R_z ならびに K_z は垂直方向に変化しているが、対象とする層の厚さ ($h = z_2 - z_1$) がうすい時には、それらはつぎのように直線関係で近似することができる (DENMEAD 1968)：

$$\begin{aligned} K &= K(z_1) + a\xi, \\ R &= R(z_1) + b\xi, \end{aligned} \quad (3)$$

ここで a と b は比例係数である。(3) 式を (2) 式に

代入して、 ξ について 0 から h まで積分すると、つぎの関係がえられる。

$$\begin{aligned} R(z_1) \int_0^h \frac{d\xi}{\{K(z_1) + a\xi\}} + b \int_0^h \frac{\xi d\xi}{\{K(z_1) + a\xi\}} \\ = c_p \rho \left(\Delta T + \frac{l}{c_p} \Delta q \right), \end{aligned} \quad (4)$$

ここで $\Delta T = T_1 - T_2$ 、 $\Delta q = q_1 - q_2$ 。拡散係数、拡散速度 D_{0-h} 、拡散抵抗 r_{0-h} の間には、つぎの関係がしられている。

$$r_{0-h} = \frac{1}{D_{0-h}} = \int_0^h \frac{d\xi}{\{K(z_1) + a\xi\}}.$$

上式と (4) 式とから、対象とする層の拡散速度 D_{0-h} はつぎのようになることがわかる：

$$D_{0-h} = \frac{R(z_1)}{c_p \rho \left(\Delta T + \frac{l}{c_p} \Delta q \right) - A}, \quad (5)$$

ここで

$$A = \frac{a}{b^2} \left[bh - K(z_1) \ln \left\{ \frac{K(z_1) + bh}{K(z_1)} \right\} \right].$$

すると、この層内の平均拡散係数 $\bar{K}$ は近似的につぎのようになる：

$$\bar{K} = h \cdot D_{0-h}. \quad (6)$$

われわれが求めるものは、層の中心 ($z_1 + 0.5h$) の拡散係数であるので、 $K(z_1 + 0.5h)$ と $\bar{K}$ との関係を明らかにしておくことが必要である。(3) 式の関係を変形して、次式から求めた関係が第2図に示されている。図にみられるように、対象とする層内での拡散係数の変化に

Fig. 2. Relationship between $\bar{K}/K(z_1 + 0.5h)$ and $K(z_2)/K(z_1)$.

Table 1. Comparison of values of term A and of $C=c_p\rho(\Delta T+l\Delta q/c_p)$ within corn canopy (July 19, 1967).

Time	Term	Height, cm								
		200	180	160	140	120	100	80	60	40
1035	$A \cdot 10^4$	0.004	0.008	0.002	0.056	0.119	0.098	0.059	0.040	0.042
	$C \cdot 10^4$	0.71	0.83	0.97	1.09	1.20	1.33	1.49	1.68	1.97
	A/C	0.056	0.009	0.023	0.051	0.099	0.074	0.039	0.024	0.021
1205	$A \cdot 10^4$	0.004	0.008	0.017	0.046	0.069	0.099	0.067	0.097	0.045
	$C \cdot 10^4$	0.71	0.76	0.82	0.91	1.02	1.17	1.35	1.59	1.91
	A/C	0.006	0.011	0.021	0.051	0.068	0.085	0.049	0.061	0.024
1435	$A \cdot 10^4$	0.005	0.007	0.016	0.016	0.015	0.019	0.027	0.028	0.019
	$C \cdot 10^4$	0.14	0.16	0.19	0.24	0.30	0.36	0.45	0.62	0.92
	A/C	0.036	0.044	0.084	0.067	0.05	0.053	0.060	0.045	0.021
1635	$A \cdot 10^4$	0.010	0.024	0.029	0.012	0.010	0.011	0.005	0.011	0.007
	$C \cdot 10^4$	0.12	0.13	0.14	0.16	0.19	0.22	0.29	0.38	0.47
	A/C	0.083	0.185	0.207	0.075	0.053	0.050	0.017	0.029	0.015
1735	$A \cdot 10^4$	0.001	0.003	0.006	0.008	0.006	0.006	0.006	0.003	0.003
	$C \cdot 10^4$	0.100	0.11	0.13	0.13	0.16	0.18	0.21	0.25	0.29
	A/C	0.010	0.027	0.046	0.062	0.038	0.033	0.029	0.012	0.010

$$\frac{\bar{K}}{K(z_1+0.5h)} = \frac{a \cdot h \{ \ln[K(z_2)/K(z_1)] \}^{-1}}{K(z_1+0.5h)} \quad (7)$$

つて、(6) 式から求めた平均拡散係数と層の中心の拡散係数との違いははしだいに増加してくる。しかしながら、 $h=10\text{cm}$ とおくと、トウモロコシ群落内では、多くの場合つぎのようになる：

$$\frac{K(z_2)}{K(z_1)} < 1.40.$$

それゆえ、(6) 式から求めた拡散係数 $\bar{K}$ は対象とする層の中心の拡散係数に非常に近いといえることができる。(5) 式右辺の分母の A と $c_p\rho(\Delta T+l\Delta q/c_p)$ の値をトウモロコシ群落について求めてみると第 1 表のようになる。 A の値は、その時の $c_p\rho(\Delta T+l\Delta q/c_p)$ の値の $1/10 \sim 1/100$ である場合が多い。 A/C の平均値は 0.049 となり、拡散速度 D_{0-h} の決定における項 A の無視による誤差は (ただし $h=10\text{cm}$ の場合)、平均的にみて約 5% といえることができる。すなわち、 A を無視すると約 5% 拡散速度を過大評価することになる。この程度の誤差は許されるので、(5) 式において項 A を無視することができるだろう。一方、(6) 式を用いて拡散係数を求める場合には若干過小評価される傾向があるので (第 2 図参照)、拡散係数の決定における誤差は 5% より幾分小さくなるだろう。ボーエン比および乾湿公式を用いると (5) 式はつぎのようになる：

$$\left. \begin{aligned} D_{0-h} &= \frac{R_z}{5.62 \cdot 10^{-4} \Delta e (1+\beta) - A}, \\ D_{0-h} &= \frac{R_z}{2.84 \cdot 10^{-4} \Delta T_w (1+2\varphi) - A}, \end{aligned} \right\} \quad (5a)$$

ここで Δe 、 ΔT_w 、 z_1 と z_2 との間での水蒸気圧力 (mm Hg) と湿球温度 ($^{\circ}\text{C}$) の差； $\beta=0.5\Delta T/\Delta e$ ； $\varphi=de/dT$ 、飽和水蒸気—温度曲線の気温での傾度 (mmHg/ $^{\circ}\text{C}$)。 (5a) 式の下関係を利用すると、湿球温度差、純放射量および地中伝導熱量の観測から、拡散速度したがって乱流拡散係数のプロファイルを決定することができる。

さきに説明したように、純放射・気温・湿度の 10 分間平均プロファイルから $h=10\text{cm}$ として気温差・湿度差・純放射量を 25cm または 50cm おきに求めた。これらのデータを (5, a) 式と (6) 式で処理して、群落内の拡散係数を求めた。結果の一例が第 3 図に示されている。拡散係数は植被上層から深さにつれて、最初は急減するが、下層で変化は若干ゆるやかになっている。拡散係数の変化は、群落上層で乱れの発達しやすい日中時に比べてとくに著しい。すなわち、群落上層での $2000\text{cm}^2/\text{sec}$ の値から、群落下層の約 $100\text{cm}^2/\text{sec}$ まで減少している。ここに示されている高度変化の特徴は現在までの結果 (UCHIJIMA・WRIGHT 1964, BROWN・COVEY 1966) とよく一致している。トウモロコシ群落やイネ群落内では拡散係数はつぎのように深さにつれて減少することが

Fig. 3. Height dependence of transfer coefficient within corn canopy. Numerals on each curve denote the time of observation.

報告されている：

$$K = K_H \exp \left\{ -\alpha \left(1 - \frac{z}{H} \right) \right\}, \quad z \leq H \quad (8)$$

ここで K_H 、群落表面 ($z=H$) での拡散係数。減衰係数 α は群落密度・気象条件などによつて変化するが、イネ科植物の群落内では 2.5~3.5 の間にあることが知られている。

上の関係の妥当性を検討するために、各観測シリーズの値を用いて K_z/K_H と $(1-z/H)$ との関係をしらべた。その結果が第4図に示されている。図上の各点は18

Fig. 4. Dependence of non-dimensional transfer coefficient on canopy depth. Each vertical line denotes values of standard deviation.

~22回の計算データを平均化して求めたものである。それぞれの点上の垂線は標準偏差を示している。図にみられるように、標準偏差はかなりの値に達しており、とくに群落下層では変動係数はかなり大きい。しかしながら、無次元拡散係数の平均プロフィール（日中時）は、すでに報告されているように指数関数で近似できるようなのである。減衰係数 α を図上の直線から求め、群落の生態学的特徴と共に示すと第2表のようになる。減衰係数 α は群落内の最大葉面積密度 $f_{L,max}$ とともに増加するようにみえるが、それらの関係を明らかにするには資料が不足している。群落内での拡散係数の減衰への指数法則の適用は、平均的なものであつて、個々のケースにおいては著しい外れがみられる。それは図上の各点に印されている標準偏差の値の大きいことから理解できることである。Будаговский・Карпушкин (1969) もトウ

モロコシ群落内の K-profile が気象条件によつて変化することを報告している。

Table 2. Extinction coefficient of K-profile within corn canopy.

Date	LAI	H, cm	$f_{L,max}$ cm²/cm³	α
July 19, 20, 1967	2.7	200	0.032	2.88
Aug. 2, 3, 1967	4.9	275	0.041	2.88
Aug. 24, 25, 1967	3.3	250	0.024	2.46

Note, $f_{L,max}$ is the maximum leaf area density within the canopy.

4. 葉面拡散速度と気孔拡散速度

葉面における熱伝達・水蒸気拡散・炭酸ガスの吸収などにおいて、葉面と周辺空気中との交換過程は重要な役割を果たしている。交換過程の強度を示すには、一般に顕熱伝達係数、拡散速度、拡散抵抗などが用いられている。これらの係数や拡散速度を決定するには、熱伝達理論が広く利用されている（武智・長谷場 1962, GATES 1953, 1966, Молдау 1969 など）。このほかに、自然条件下での群落内で葉面拡散速度を熱収支から求める方法も提示されている（UCHIJIMA 1966, BROWN・COVEY 1966, IMPENS 1966）。

対象とする物理量によつて葉面拡散速度を求めるための関係式は若干ちがつてくる。いま、顕熱伝達量を対象としてえらぶと、 $z_2 \sim z_1$ 層内の平均葉面拡散速度 $\bar{D}_f$ はつぎのように表わされる。

$$\bar{D}_f = \frac{\Delta L}{2c_p \rho \Delta F (T_f - T_a)}, \quad (10)$$

ただし $\Delta L = \Delta S - \Delta LE$,

ここで ΔL , ΔS , ΔLE , $z_1 \sim z_2$ 間での顕熱フラックス, 純放射フラックスおよび潜熱フラックス (ly/sec) の変化量; T_f , T_a , 葉温と気温 ($^{\circ}\text{C}$); ΔF , z_1 と z_2 との間の部分葉面積指数。右辺分母内の 2 は葉の両面での熱伝達を考慮するための係数である。

葉面から周辺空気中までの熱と水蒸気の拡散を特徴づけている拡散速度がひとしいと考えると, 葉内から気孔を通つて葉面までの水蒸気の拡散を特徴づけている気孔拡散速度 (D_s , cm/sec) はつぎのように与えられる。

$$D_s = \frac{D_f \cdot D_{eff}}{(D_f - D_{eff})}, \quad (11)$$

ここで D_{eff} は葉内から周辺空気中までの全拡散行程を通じての水蒸気の拡散を特徴づけている有効拡散速度で, つぎのように表わされる:

$$\bar{D}_{eff} = \frac{\Delta LE}{2\rho \Delta F (q(T_f) - q_a)}, \quad (12)$$

ここで $q(T_f)$, q_a , 葉温での飽和比湿と周辺空気中の比湿 ($\text{gH}_2\text{O/gair}$)。なお, (10, 12) 式の右辺分母の上つきバーは $z_1 \sim z_2$ 層内での平均差を表わしている。

次節で説明するような方法で求めた各深さの潜熱フラックス (25cm 間隔) と純放射フラックスとから, 間接

的に顕熱フラックスを求めた。 $z_2 - z_1 = 25\text{cm}$ として, (10) 式から求めた群落内における葉面拡散速度の変化が第5図に示されている。群落下層では葉一気温差の測定が困難なので, 計算を省略した。図にみられるように, 若干の点のばらつきはあるが, 葉面拡散速度は群落の深さにつれて減少している。減少は表層で急で, 奥深く入るにつれて次第にゆるやかになっている。この傾向は現在までの実験の結果とよく一致している (UCHIJIMA 1966, BROWN・COVEY 1966, IMPENS *et al.* 1967)。

上図のデータを用いて日中期間についての平均葉面拡散速度を求めると, 275~250cm 層で 3.8, 250~225cm で 2.6, 225~200cm で 1.9, 200~175cm で 1.7, 175~150cm で 1.0, 150~125cm 層で 0.9cm/sec と変化している。IMPENS *et al.* (1967) はトウモロコシ群落内で, いわゆる wet and dry leaves 法を用いて葉面拡散抵抗 ($r_f = 1/D_f$) の測定を行なつている。これを D_f に換算して上記の結果と比較すると, 群落上層では両者はよく一致しているが, 中・下層では IMPENS *et al.* の値は著者らの葉面拡散速度の約2倍になっている。この原因としては測定方法の違いなどが考えられるが, IMPENS らの群落では $f_{L,max} = 0.022$ であるのに反して, 著者らのそれは $f_{L,max} = 0.041$ と約2倍になっていることも関係しているように思われる。

Будагевский (1964) は拡散係数の群落内での変化との類推から, また著者の1人 (UCHIJIMA 1966) は実験結果から, 作物群落内における葉面拡散速度の変化はつぎのような指数法則にしたがうことを明らかにした。

$$D_f = D_{fH} \exp \left\{ -m_1 \left(1 - \frac{z}{H} \right) \right\}, \quad (13)$$

ここで D_{fH} , $z=H$ での葉面拡散速度 (cm/sec)。減衰係数 m_1 について, Будагевский は葉面上の層流境界層を仮定して, (8) 式の α のほぼ $1/2$ になるといつている。一方, トウモロコシ群落内での実験では $m_1 \approx 1.31 \sim 1.77$ となり (BROWN・COVEY 1966, UCHIJIMA 1966, IMPENS *et al.* 1967), $\alpha/2$ より大きいことがわかつた。葉面上に形成されている境界層の特性 (層流, 乱流, 遷移状態) ならびに葉の大きさ・気孔数などとの関係で, m_1 はつぎの範囲に変化するものと思われる。

$$0.5\alpha \leq m_1 \leq \alpha.$$

第5図に示されている全データを用いて, m_1 を求めるとつぎのようになる:

$$m_1 \approx 2.8.$$

これは第2表に示されている α の値と非常によ

Fig. 5. Foliage exchange velocity (D_f) with height in corn canopy.

く一致している。上にも説明したように、 α や m_1 の値は作物群落内の風速場を規定している耕地上の風と群落構造によってかなり変化することが予想されるので、この点に関する理論的および実験的研究が必要である。

群落内での気温・湿度分布ならびにフラックスの形成過程をモデルでシミュレーションする場合、群落内の拡散係数の分布から葉面拡散速度の分布をある程度確実にすることが出来れば、問題の解決がかなり容易になる。この問題について PHILIP (1964) は若干の検討を加え、両

者の間には近似的に比例関係がなりたつといっている。

$$D_f = n \cdot K, \quad (14)$$

n は比例係数で、PHILIP は $n=1 \times 10^{-3}$ という値を提出している。また、UCHIJIMA (1966) は実験的に両者の間に比例関係を認め、 $n=0.73 \times 10^{-3}$ という値を報告している。第3, 4, 5図のデータを用いて、群落各レベルの D_f と K との関係をしらべた結果が第6図に示されている。図にみられるように、測点のちらばりはかなり大きい。葉面拡散速度は周辺空気中の拡散係数の増加につれて次第に大きくなっている。拡散速度の増加は直線関係より若干大きくなっている。拡散速度の増加は直線関係より若干上向きの曲線によりよく近似されるように見えるが、粗く考えて直線関係がなりたつとして、両者の間の回帰方程式を求めるとつぎのようになる：

$$D_f = 0.56 + 1.25 \times 10^{-3} \cdot K.$$

比例係数は $n=1.25 \times 10^{-3}$ となり、さきの値 (0.73×10^{-3}) より大きい。 n の値は群落構造、葉の大きさ、群落内外の風速ならびに温度分布などによつて大幅に変化することが予想されるが、これらの関係を明らかにするには実験データがまだ整えられていない。

群落各葉層の葉面拡散速度と水蒸気拡散について

の有効拡散速度 (D_{eff}) がわかると、(11) 式から葉の生理学的特徴の一つである気孔拡散速度 (D_s) を求めることができる。有効拡散速度は (12) 式から計算した。それらの結果の一例が第7図に示されている。気孔拡散速度は群落表面から深さにつれて、最初は急に、あとはゆるやかに減少している。群落内における気孔拡散速度の変化は日射の強い期間において若干大きい。日中期間における気孔拡散速度の平均値の深さによる変化をみるとつぎのようになる。群落表層の 0.29 cm/sec から群落中層の 0.11 cm/sec へと約 $1/3$ に減少している。IMPENS ら (1967) のデータを用いて D_s の変化をしらべてみると、日中平均値は群落上層の 0.34 cm/sec から群落下層の 0.10 cm/sec へと約 $1/3$ に減少している。深さに伴う

Fig. 6. Relationship between transfer coefficient (K) and foliage exchange velocity (D_f) in corn canopy.

Fig. 7. Stomatal exchange velocity (D_s) with height in corn canopy.

layer, cm	275—250	250—225	225—200	200—175	175—150	150—125
$\langle D_s \rangle_{\text{daylight}} \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$	0.29	0.21	0.17	0.13	0.12	0.11

D_s の減衰に若干の違いはあるが、筆者等のデータと IMPENS らの気孔拡散速度の絶対値はかなりよく一致している。

さきの報告 (UCHIJIMA 1966) で、気孔拡散速度の群落内での減衰もほぼ指数法則にしたがい、このような現象は深さがますにつれて水蒸気拡散に高い抵抗の組織をもつ老化葉の増加のためであるだろうと説明した。この他に、このような現象の主な原因として、葉面の放射強度の減少に伴う気孔開度の変化も考えられる。うへの説明のように、気孔拡散速度の変化もつぎのように近似できる：

$$D_s = D_{sH} \exp \left\{ -m_2 \left(1 - \frac{z}{H} \right) \right\}, \quad (15)$$

ここで D_{sH} 、群落上面の葉の気孔拡散速度 (cm/sec)。減衰係数 m_2 はつぎのようになる：

$$m_2 = 2.29.$$

一方、IMPENS らのデータを整理してみると、 $m_2 = 1.67$ という値がえられる。減衰係数の値の違いの原因としては、最大葉面積密度と葉面積指数の違いが考えられるが、詳細な研究が必要である。

第7図の示しているもう一つの重要な結果は、気孔拡散速度とくに太陽放射にさらされ易い上層葉のそれが明瞭な日変化をえがいていることである。すなわち、上層葉の D_s は朝の約 0.2 cm/sec から、正午頃は約 0.5 cm/sec に増大し、1605には再び 0.1 cm/sec へと減少している。放射強度によって気孔拡散速度 (または気孔抵

抗) が変化することは室内実験では広く認められているが (例えば、GAASTRA 1959, SLATYER・BIERHUIZEN 1964), 自然条件下での例はまだ報告されていないように思われる。そこで、筆者らのデータと IMPENS ら (1967) のデータとを用いて、上層葉の気孔拡散速度と全短波放射量 ($Q+q$) との関係をしらべた。その結果が第8図に示されている。測点のちらばりはかなり大きい、上層葉の気孔拡散速度は全短波放射の増加につれて最初は急激に増加する。その後は増加はかなり緩やかになっている。この模様は室内実験のそれとよく一致している。もう一つの重要な特徴は、午後になると同一放射強度でも気孔拡散速度がかなり小さくなっていることである。これは、葉内水分状態によって気孔開度が影響されていることを示している。最近、Mолдау (1969) は15種の本植物葉の気孔拡散抵抗 ($r_s = 1/D_s$) を自然条件下で測定し、土壌水分状態によって r_s が大幅に変化することを見出している。この理由として、彼は水分状態による気孔開度の変化をあげている。また、長谷場・武智ら (1967) はミカン葉の蒸散効率 (これは D_{eff} に似た量である) が午前中大きく午後に急減することを報告している。上図に示されている午後における気孔拡散速度の低下は、午後における葉内水分の低下のためと考えられる。午後における D_s の値を除いて関係曲線を求めると図上の曲線のようになり、それは次式で表わされる：

$$D_s = \frac{2.13(Q+q)}{1+3.72(Q+q)}. \quad (16)$$

筆者ら (内島・宇田川 1969) は葉面ボーエン比や葉面湿度の計算に GAASTRA (1959) のデータから求めた次式を利用した。

$$D_s = (Q+q) / (0.1 + 1.78(Q+q)).$$

常数の差はあるが、両者はほぼ似た $D_s \sim (Q+q)$ 関係を示している。関係曲線の形は葉令や水分状態でかなり変化することが予想される。

5. 蒸散強度と葉面相対湿度

作物群落内における水蒸気フラックスの形成は PENMAN・LONG (1960) によって始めて研究されてから農業気象における一つの重要な問題となっている。そして、理論的にも実験的にも色々な試みがなされている。前節で説明したように、葉面拡散速度および気孔拡散速度の決定には、群落内

Fig. 8. Radiation intensity dependence of stomatal exchange velocity of upper leaves in corn canopy.

の水蒸気フラックスのプロフィールをすることが必要である。群落内のあるレベル z において、つぎの関係がなりたつとして

$$-\rho K(z_1 + 0.5h) \frac{dq}{dz} \approx \rho D_{0-h}(q_1 - q_2),$$

次式からレベル z での水蒸気フラックスを求めた。

$$E \approx \rho D_{0-h}(q_1 - q_2), \quad (17)$$

ここで q_1, q_2 は、 z_1 と z_2 での比湿。 $z_2 - z_1 = h = 10\text{cm}$ として計算を行なった。

上の仮定を検討するために、比較的うすい層内での比湿変化をつぎのようにおく：

$$q = q(z_1) + c\xi,$$

ここで $q(z_1)$, z_1 での比湿； c , 比例係数 ($\text{gH}_2\text{O/g air cm}$)； ξ , z_1 レベルからの距離 (cm)。関係 (6), (17) ならびに上式を利用すると、 $z_1 \sim z_2$ 層内の midpoint での水蒸気フラックス E_K と拡散速度を用いて決定したフラックス E_D との比はつぎのようになる：

$$\frac{E_D}{E_K} = \frac{D \cdot c \cdot h}{K(z_1 + 0.5h) \cdot c} = \frac{\bar{K}}{K(z_1 + 0.5h)}. \quad (18)$$

(7) 式および第2図に示されているように、トウモロコシ群落内 ($h = 10\text{cm}$ で) では、 $\bar{K}/K(z_1 + 0.5h)$ は 0.95 より大きいのが普通である。それゆえ、 E_D/E_K はほぼ 1 に近いといえることができる。

ある層内の葉の平均蒸散強度 $\bar{E}_f (\text{gH}_2\text{O/cm}^2 \text{ sec})$ は次式から求めた。

$$\bar{E}_f = \frac{E_2 - E_1}{2\Delta F}, \quad (19)$$

ここで E_2, E_1, z_2 と z_1 のレベルで拡散速度から求めた水蒸気フラックス； ΔF , $z_1 \sim z_2$ 層内の部分葉面積指数。平均蒸散強度の決定にあたっては、25cm 間隔を用

いた。なお、 cm^2 は葉面積を表わす。(19) 式でデータを処理してえた結果が第9図に示されている。なお、群落下層では葉面積密度の急減のために誤差が大きくなるので計算は行なわなかった。蒸散強度の垂直分布は、さきの報告 (UCHIJIMA 1966) の結果とかなりよく一致している。群落上層から深さにつれて蒸散強度は減少するが、中層以下での変化はすくない。群落上層では、蒸散強度は早朝の $1 \times 10^{-6} \text{g/cm}^2 \text{ sec}$ から正午頃の $2 \sim 3 \times 10^{-6} \text{g/cm}^2 \text{ sec}$ へと増加し、午後しだいに減少して、夕刻には $1 \times 10^{-6} \text{g/cm}^2 \text{ sec}$ 以下となつていく。このような日変化は中層葉においてもみられる。群落各層の蒸散強度の日変化は、葉面純放射量・乱流状態・空中湿度などの変化によつてもたらされるものと思われる。

葉面純放射量 (S_f) と葉面蒸散強度 (E_f) との関係が空中湿度によつてかなり影響されることを前報 (内島・宇田川, 1969) で報告したが、August 2, 3 (1967) のデータを用いて、蒸散強度と同じレベルの純放射量 (正確には葉面純放射量を使用すべきであるが、便宜的に水平面純放射量を用いた) との関係をしらべると、第10図のようになる。点のちらばりはあるが、純放射量と葉面蒸散強度との間には密接な関係のあることがわかる。すなわち、最初はほぼ直線的に増加するが、純放射の値が大きくなると、蒸散強度の増加は若干ゆるやかになつてくる。この関係は次式で近似できるようである：

$$E_f = \frac{3.7 \times 10^{-6} S}{1 + 0.73 \cdot S}, \quad (20)$$

ここで S , 純放射量 (ly/min)。TOTSUKA (1963) はヒマワリの切断葉を用いて、上に近い関係をえている。また、葉位によつて函数の形が若干変化することを報告し

ている。

このような現象の原因として気孔開度と放射強度との関係をあげている。第10図に示されている関係は、著者ら (内島・宇田川 1969) がモデル計算でえた蒸散強度と純放射量との関係曲線群のなかの空中湿度の低い場合のそれによく似ている。

葉面相対湿度を用いると、葉面蒸散強度 (E_f) はつぎのように表わされる：

$$E_f = \rho D_f (R_f q(T_f) - q_a),$$

ここで R_f , 葉面相対湿度 ($0 \sim 1.0$)。この関係を用いると群落内における水蒸気拡散の記述が簡単

Fig. 9. Transpiration intensity per unit leaf surface with height in corn canopy. Numerals on each curve denote the time of observation.

Fig. 10. Net radiation dependence of transpiration intensity in corn canopy.

Fig. 11. Foliage relative humidity with height in corn canopy.

になる。さきの報告 (УСНЦІМА 1966) で群落内における R_f を求め、日中には上層の $R_f \approx 0.6$ から下層葉の約 0.8 と深さにつれて増加することを報告した。また、葉面熱収支式から葉面相対湿度はつぎのように表わされることを明らかにした。

$$R_f = \frac{D_s}{D_f + D_s} \left[1 + \frac{D_f}{D_s} R_a \left\{ 1 + \frac{\varphi_a \Delta T_f}{q(T_a)} \right\}^{-1} \right], \quad (21)$$

ここで R_a , 周辺空気中の相対湿度 (0 ~ 1.0); $q(T_a)$, 気温での飽和比湿; $\varphi_a = dq/dT$, 飽和比湿—温度曲線の気温での傾度 ($\text{gH}_2\text{O/g air } ^\circ\text{C}$); $\Delta T_f = T_f - T_a$, 葉—気温差 ($^\circ\text{C}$)。上の式は葉面相対湿度が気象条件や葉の生理的条件に関係した量であることを示している。モデル計算から R_f は葉面純放射につれて最初は急に、あとはやや緩やかに減少することがわかった。群落内における D_s , D_f , R_a , T_a などのプロファイルからのデータを上式で処理してえた結果が第11図に示されている。図にみられるように、葉面相対湿度は群落上層での 0.6 ~ 0.7 から中層での 0.7 ~ 0.8 へと増加している。日没近くになると、葉面相対湿度は上・中層とも 0.7 ~ 0.8 に維持されており、プロファイルの発達は弱くなる。以上の傾向ならび絶対値は別の方法で求めた結果 (УСНЦІМА 1966) とよく一致している。これらのデータを用いると群落内の水蒸気場に関するモデル実験がかなり容易になるものと思われる。

6. 要 約

1967年の夏にトウモロコシ圃場で行なつた観測データを用いて、作物群落内の拡散係数・葉面拡散速度・気孔拡散速度などの分布を明らかにすることを試みた。それらの結果を要約するとつぎのようになる。

1. 群落内の拡散係数の決定には熱収支法を使用した。拡散係数は表面から深さにつれて最初急に、あとはゆるやかに減少した。その模様は指数法則で近似でき、減衰係数は 2.46 ~ 2.88 となり、現在までの結果と一致した。しかし、拡散係数の減少は気象条件によつてかなり変化することがわかった (第3, 4図参照)。

2. 群落内における顕熱フラックスの変化と葉—気温差とから、各層の平均的な葉面拡散速度 (D_f) を求めた。日中平均値は、上層の 3.8 cm/sec から中層の 0.9 cm/sec へと、深さにつれて減

少した。深さに伴う D_f の減少は指数関数で近似でき、減衰係数は 2.8 になった。 D_f は周辺空気中の拡散係数につれて増加し（第 6 図参照）、比例係数は 1.25×10^{-3} となった。これは現在までの値より若干大きい。

3. 葉面拡散速度と蒸散についての有効拡散速度とから、気孔拡散速度を求めた。気孔拡散速度は群落上層から深さにつれて減少するが、それは正午頃において特に著しかった。日中平均値は上層の 0.29cm/sec から中層の 0.11cm/sec へと約 1/3 に減少した。これは指数関数で近似され、減衰係数は 2.29 となった。上層葉の拡散速度と入射全波放射との間には双曲線的関係が見出された（第 8 図参照）。これは室内実験の結果とよく一致している。

4. 水蒸気フラックスの垂直分布と葉面積密度分布とから、各葉層の蒸散強度を求めた（第 9 図）。蒸散強度は深さにつれて減少した。群落上層のそれは朝方の 1×10^{-6} から正午頃の 3×10^{-6} へと増加し、午後は減少して 1×10^{-6} g/cm² sec 以下となった。各層の蒸散強度と純放射量（水平面）との間には双曲線的関係が見出された（第 10 図）。群落内の水蒸気場のシミュレーションで重要な役割を果たす葉面相対湿度は上層の 0.6~0.7 から中層の 0.7~0.8 へと増加した。午後おそくには、葉面相対湿度の高度変化は弱くなった。

本研究を遂行するにあたって多大なご援助を頂いた農技研気象科の井上栄一・谷信輝両博士ならびに埼玉県立畜産試験場の関係各位に厚く感謝する。なお、本研究は文部省特定研究「生物圏の動態」の一環としてなされ、研究費の援助をうけたことを記して感謝にかえる。

引用文献

1. BEGG, J.E., BIERHUIZEN, J.F., LEMON, E.R., MISRA, D.K., SLATYER, R.O. and STERN, W.R. (1964). Diurnal energy and water exchanges in bulrush millet in an area of high solar radiation. *Journ. Agric. Meteorol.*, **1**, 294-312.
2. BROWN, K.W. and COVEY, W. (1966). The energy-budget evaluation of the micrometeorological transfer processes within a corn field. *Journ. Agric. Meteorol.*, **3**, 73-96.
3. Будагский, А.И. (1964). Испарение Почвенной Влаг, Изд. Наука, Москва, (耕地の蒸発散, 1965, 内島訳, 畑地農業研究会).
4. Будаговский, А.и. • Карлушкин, Л.Т. (1969). Основы аэродинамического метода определения углекислого газообмена в растительном покрове. В сб. [Общие теоретические проблемы численного моделирования], Изд-во Наука, Ленинград, 166-174.
5. DENMEAD, O.T. (1964). Evaporation sources and apparent diffusivities in a forest canopy. *Journ. Appl. Meteorol.*, **3**, 383-389.
6. DENMEAD, O.T. (1968). Carbon dioxide exchange in the field, its measurement and interpretation. *Proceedings of WMO seminar on agricultural meteorology, Melbourne 1966*, 445-482.
7. GAASTRA, P. (1959). Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature, and stomatal diffusion resistance. *Meded. Landb. hogesch., Wageningen*, **59**, 1-68.
8. GATES, D.M. (1964). Leaf temperature and transpiration. *Agronomy J.*, **56**, 272-277.
9. GATES, D.M. (1964). Transpiration and leaf temperature. In *Annual Review of Plant Physiology*, **19**, 211-238.
10. 長谷場徹也・武智修・伊藤代次郎 (1967). 蒸散に関する研究 (2) カンキツ蒸散の年変化について. *農業気象*, **23**, 19-24.
11. IMPENS, I.I. (1966). Leaf wetness, diffusion resistances and transpiration rates of beech leaves through comparison of "wet" and "dry" leaf temperatures. *Oecologia Plantarum*, **1**, 327-334.
12. IMPENS, I.I., STEWART, D.W., ALLEN, L.H., and LEMON, E.R. (1967). Diffusive resistances at, and transpiration rates from leaves in situ within the vegetative canopy of a corn crop. *Plant Physiology*, **42**, 99-104.
13. Молдау, Х. (1969). Сопротивления устьиц в естественных условиях. В сб. [Вопросы эффективности фотосинтеза], Тарту, 132-142.
14. 村田茂三 (1962). 葉面からの気孔蒸散に関する研究 (1, 2). *植物学雑誌*, **75**, 391-400, 473-482.
15. PENMAN, H.L. and LONG, I.F. (1960). Weather in wheat; an essay in micrometeorology. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **86**, 16-49.
16. PHILIP, J.R. (1964). Sources and transfer processes in the air occupied by vegetations. *J. Appl. Meteorol.*, **3**, 390-395.
17. 斎藤隆幸 (1962). 植物群落内部の蒸散量及び拡散係数の高度分布に対する熱収支法の適用. *農業気象*, **17**, 101-105.
18. SLATYER, R.O., and BIERHUIZEN, J.F. (1964). Transpiration from cotton leaves under a range of environmental conditions in relation to internal and external resistances. *Australian J. Biol. Sci.*, **7**, 115-130.
19. 武智修・武谷場徹也 (1962). 葉温に関する研究 (2) 層流中のカンキツ葉の熱伝達について. *農業気象*, **18**, 92-97.

20. TOTSUKA, T. (1963). Theoretical analysis of the relationships between water supply and dry-matter production of plant communities. *Journal of the Faculty of Science, Univ. of Tokyo*. III, Botany, 8, part 9, 341-375.
21. UCHIJIMA, Z. (1961). On characteristics of heat balance of water layer under paddy plant cover. *Bull. Nat. Inst. Agric. Sci., A*, **8**, 243-265.
22. 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.
23. UCHIJIMA, Z. (1966). Micrometeorological evaluation of integral exchange coefficient at foliage surfaces and source strengths within a corn canopy. *Bull. Nat. Inst. Agric. Sci., A*, **13**, 81-93.
24. 内島 善兵衛・宇田川武俊 (1969). 作物群落内におけるエネルギーとガスの交換に関する研究(7) 葉面ボーエン比と葉面相対湿度. *農業気象* **25**, 107-118.
25. UCHIJIMA, Z. and WRIGHT, J.L. (1964). An experimental study of air flow in a corn plant-air layer. *Bull. Nat. Inst. Agric. Sci., A*, **11**, 19-66.
26. WAGGONER, P.E. (1968). Simulation of the temperature, humidity and evaporation profiles in a leaf canopy. *Journ. Appl. Meteorol.*, **7**, 400-409.
27. WRIGHT, J.L. and BROWN, K.W. (1968). Comparison of momentum and energy balance methods of computing vertical transfer within a crop. *Agronomy J.*, **59**, 427-432.

Summary

Turbulent transfer coefficient, foliage exchange velocity and stomatal exchange velocity within a corn canopy are approached using the heat balance method. Measurements of air temperature, water vapour pressure, net radiation and wind speed were made at several levels within and above the canopy during the growing season of corn crops. Instruments presented schematically in Fig. 1 were used for the measurements. The results obtained can be summarized as follows:

1: The exchange velocity in the interval h is given by

$$D_{0-h} = \frac{R(z_1)}{c_p \rho \left(\Delta T + \frac{l}{c_p} \Delta q \right) - A},$$

where $R(z_1) = S(z_1) - B_s$; $\Delta T = T_1 - T_2$; $\Delta q = q_1 - q_2$; $S(z_1)$, T_1 , q_1 , net radiation, air temperature and specific humidity at height z_1 ; T_2 , q_2 , air temperature and specific humidity at height z_2 ; B_s soil heat flux; c_p , ρ , specific heat and density of air; l , latent heat for evaporation. A is a term for considering the influence of changes of S and K in the interval on the exchange velocity. Mean transfer coefficient in the interval is given by

$$\bar{K} = h \cdot D_{0-h}.$$

Preliminary computations indicate that the influence of the term A can be disregarded with acceptable errors in the canopy, provided the interval h is so small as 10 cm (see Table 1). Fig. 2 shows that the transfer coefficient at the mid-point in the interval is in fairly good agreement with the mean transfer coefficient in the interval. Although the initial decrease of the transfer coefficient with the canopy depth is rapid, the decreasing rate diminishes gradually with the canopy depth. Values of the transfer coefficient at the canopy top are by one and two orders of magnitude larger than those in the lowest layer. The normalized profiles of the transfer coefficient (K/K_H) are shown in Fig. 4. Each point is the average of the respective normalized values for the 10-min profiles. The mean profiles were approximated by an exponential function. The values of its extinction coefficient vary from 2.46 to 2.88, and agree well with those presented in literatures. The extinction coefficient seems to increase slightly with the maximum leaf area density within the canopy, but it requires further experimental studies.

2: The mean foliage exchange velocity ($\bar{D}_f$) in the interval of 25 cm was calculated by

$$\bar{D}_f = \frac{\Delta S - \Delta l E}{2c_p \rho \Delta F (T_f - T_a)},$$

where ΔS , $\Delta l E$, the divergence of net radiation and latent heat fluxes in the interval (ly/sec); ΔF , the partial leaf area index; $(T_f - T_a)$, leaf-air temperature difference. The magnitudes of the foliage exchange velocity averaged for the daylight hours (0900-1700) are 3.8, 2.6, 1.9, 1.7, 1.0, 0.9 cm/sec respectively in the layers of 275-250, 250-225, 225-200, 200-175, 175-150, 150-125 cm. The absolute values of the foliage exchange velocity within the canopy are in fairly good agreement with results obtained by IMPENS *et al.* (1967) using a different method. The profiles of the foliage exchange velocity were also approximated by an exponential function. The value of extinction coefficient was found to be 2.8.

Fig. 6 shows the foliage exchange velocity as a function of transfer coefficient. The following relation was obtained by regression analysis

$$D_f = 0.56 + 1.25 \cdot 10^{-3} K.$$

3: The following was used for calculating the stomatal exchange velocity (D_s , cm/sec) of leaves within the canopy

$$D_s = D_f \cdot D_{eff} / (D_f - D_{eff}),$$

where D_{eff} is the effective exchange velocity for considering the influence of internal and external pathways on water vapour transfer. The results are presented in Fig. 7. The stomatal exchange velocity averaged for the daylight hours decreased with the canopy depth from 0.29 cm/sec in the top layer (275–250 cm) to 0.11 cm/sec in the middle layer (150–125 cm). The stomatal exchange velocity presented in Fig. 7 agreed well with results obtained by IMPENS *et al.* (1967) in the profiles and in the absolute values. Another important fact is that the stomatal exchange velocity in the top layer has clearly diurnal change with the maximum at noon. Fig. 8 indicates the dependence of the stomatal exchange velocity of upper leaves (275–250 cm) on the total short-wave radiation ($Q+q$). The slight decrease of D in the afternoon seems due to the imbalance of water in the leaves. The following relation was obtained between D in the forenoon and short-wave radiation.

$$D_s = 2.13(Q+q) / \{1 + 3.72(Q+q)\}.$$

The hyperbolic dependence of D_s on radiation intensity is in fair agreement with results obtained in laboratory experiments.

4: The vertical profiles of the transpiration intensity (E_f) within the canopy are presented in Fig. 9. The transpiration intensity shows a clear diurnal change in phase with the diurnal change of radiation. E_f decreases with the canopy depth. This is mainly due to the extinction of net radiation and due to the increase of aged leaves with depth. Fig. 10 was drawn to relate the values of E_f to the net radiation at each level. The relation was approximated by

$$E_f = 3.7 \times 10^{-6} \cdot S / (1 + 0.75 \cdot S).$$

This is in fairly good agreement with results obtained by model computations (UCHIJIMA and UDAGAWA 1969). The foliage relative humidity within the canopy was evaluated from Eq. (21) and illustrated in Fig. 11. R_f in the upper layer of the canopy decreased to about 0.6 with increasing radiation, but its value in the middle layer was retained at about 0.7. R_f in late afternoon (1600) was approximately constant with the value of about 0.8 over the canopy.