

温度分布がある葉形湿面からの強制対流による水蒸気輸送

誌名	農業氣象
ISSN	00218588
巻/号	284
掲載ページ	p. 213-221
発行年月	1973年3月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



温度分布がある葉形湿面からの 強制対流による水蒸気輸送

武 智 修・長谷場 徹也

(愛媛大学農学部農業気象学研究室)

Water-vapor Transfer by Forced-convection from a Leaf-shaped
Plane Surface with Temperature-distribution

Osamu TAKECHI and Tetsuya HASEBA

Lab. of Agricultural Meteorology, College of Agriculture,
Ehime University, Matsuyama, Ehime Pref., 〒790

1. はしがき

気流中にある植物葉や葉形に相似な湿面等の表面温度は、一般に気流方向の位置によって変化する。薄い葉や葉形湿面では内部熱伝導と水の移動がかなり小さく、温度分布は顕著である。表面温度の分布があれば、それに応じて面上の水蒸気濃度は変化するので、葉面蒸散の解析などに際しては、温度分布がある面の水蒸気輸送係数を知る必要がある。

しかし、温度分布従って水蒸気濃度分布のある有限湿面からの水蒸気輸送を扱った例はない。Parlange *et al.* (1971) は顕熱フラックスが一様である面の輸送係数に触れているが、これのみでは葉温分布が種々の場合の葉面輸送を解析するのに不十分である。

他方、武智・長谷場 (1968, 1971) は植物葉の蒸散内部抵抗を厳密に決定する方法として、葉形湿面蒸発計による方法を提案し、これによる内部抵抗の決定を試みた。この場合、葉形湿面の表面温度を葉温の分布に一致させる必要がある。このように、温度分布のある面からの蒸発を取り扱う場合は少なくない。

ここでは、基礎的に、水蒸気輸送係数及び湿面上と境界層外との水蒸気濃度差を、それぞれ、風速ならびに面前縁から気流方向にとった距離のべき関数の積として表わし、蒸発速度の局所値や平均値ならびにそれらの関係などについて理論的な考察を行なった。

次に、平板状葉形湿面の表面温度を葉温分布に近似的に等しくした場合の蒸発実験を行ない、水蒸気濃度差分布のある面の水蒸気輸送係数を求め、これを理論値と比

較検討した。

2. 理論考察

葉面または葉形湿面からの水蒸気輸送における輸送係数、水蒸気濃度差及び蒸発速度について基礎的に考察する。

1 水蒸気輸送係数

強制対流による局所の水蒸気輸送係数、 D_x (cm/s) は風や境界層の構造、水蒸気濃度差の分布が種々の場合、一般的に次式で表わされる。

$$D_x = Bu^m x^{-n_1} \quad (1)$$

ここに、 u ; 風速 (cm/s), x ; 湿面の前縁から気流方向にとった局所までの面上距離 (cm), B ; 面の形状、傾むき、気流及び境界層の構造、面上の水蒸気濃度の分布、物性定数などで決まる係数。 m_1 , n_1 ; 境界層の構造で決まるべき数である。

いま、気流方向の長さが l cm で単位幅の面を考えると、その全面での平均輸送係数、 D_f (cm/s) は次のように求められる。

$$D_f = \left(\int_0^l D_x dx \right) / l = Bu^m l^{-n_1} / (1 - n_1) \quad (2)$$

強制対流による局所輸送係数は湿面上の位置で変化する、その局所値から平均値を求めるために、局所値に乘すべき補正係数、 α_D は、 $D_f = \alpha_D D_x$ とおき、これに(1)及び(2)式を代入して計算すれば、

$$\alpha_D = (x/l)^{n_1} / (1 - n_1) \quad (3)$$

となる。

したがって、 α_D の値は輸送係数の常数係数や風速に直接には関係なく、 x のべき数、 n_1 と局所位置、 x/l のみで決まる。

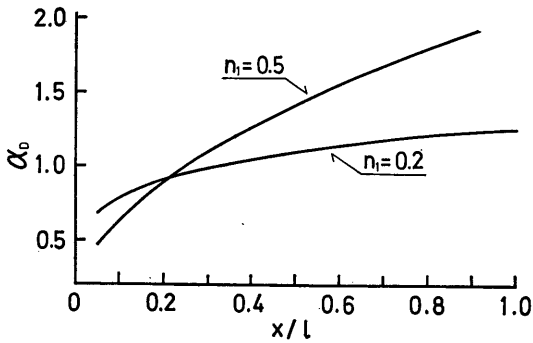


Fig. 1. Correction factors, α_D , for obtaining the average coefficient (D_f) of water-vapor transfer by forced convection, from a local value, $D_x \propto x^{-n_1}$, in the expression of $D_f = \alpha_D D_x$. The boundary-layer is laminar when $n_1 = 0.5$, and turbulent when $n_1 = 0.2$.

x ; distance from the leading edge in the air-flow direction, l ; dimension of surface in the flow direction.

第1図は境界層が層流 ($n_1 = 0.5$) と乱流 ($n_1 = 0.2$) の各場合の補正係数, α_D と局所位置, x/l との関係である。局所輸送係数は面の前縁で大きく、後縁程小さいため、補正係数, α_D は前縁で小さく、後縁程大きくなる。面前縁より面寸法の40%の位置での α_D の値は境界層が層流、乱流の場合にそれぞれ1.26, 1.04である。

次に、輸送係数の局所値が平均値に一致する位置(平均輸送係数の発現位置)は、(3)式で、 $\alpha_D = 1$ 、として計算すると次式で表わされる。

$$x/l = (1 - n_1)^{1/n_1} \tag{4}$$

上式から、平均水蒸気輸送係数の発現位置は、面上で前縁から気流方向にとった距離によって表わせば、層流境界層においては面寸法の25%の点で、乱流境界層では約33%の点である。

II 水蒸気濃度差の分布

II-i) 水蒸気濃度差の一般式

葉面ないしは湿面上と境界層外との水蒸気濃度差は面の熱収支から決まり、面の構造などによって種々の場合がある。

面上の水蒸気濃度差は面温度と気温との差(葉気温差または湿面気温差)の関数であり、面気温差は風速と面上の前縁からの距離とのそれぞれのべき関数の積で近似できる(武智ら, 1969)。したがって、水蒸気濃度差を面気温差のべき級数で展開し、その高次項は省略できることから考えて、一般に局所水蒸気濃度差, ΔC_x (g/cm^3) は次式で近似的に表わされる。

$$\Delta C_x = C_0 + bx^{-m_2} x^{n_2} = C_0 + \Delta C'_x \tag{5}$$

ここに、 C_0 は常数であり、面前縁の温度が気温に等しいときは、 $C_0 = (1-r)C_A$ と書けて、水蒸気濃度で表わした空気飽差である。ただし、 r ; 相対湿度, C_A ; 気温での飽和水蒸気濃度、また b は数値係数である。なお、(5)式における $\Delta C'_x$ は局所の水蒸気濃度差の変化項である。

次に、長さ l cm の単位幅湿面の平均水蒸気濃度差, ΔC は次式のように求められる。

$$\begin{aligned} \Delta C &= \left(\int_0^l \Delta C_x dx \right) / l = C_0 + bu^{-m_2} l^{n_2} / (1+n_2) \\ &= C_0 + \Delta C' \end{aligned} \tag{6}$$

ここに、上式の $\Delta C'$ は平均水蒸気濃度差の変化項であ

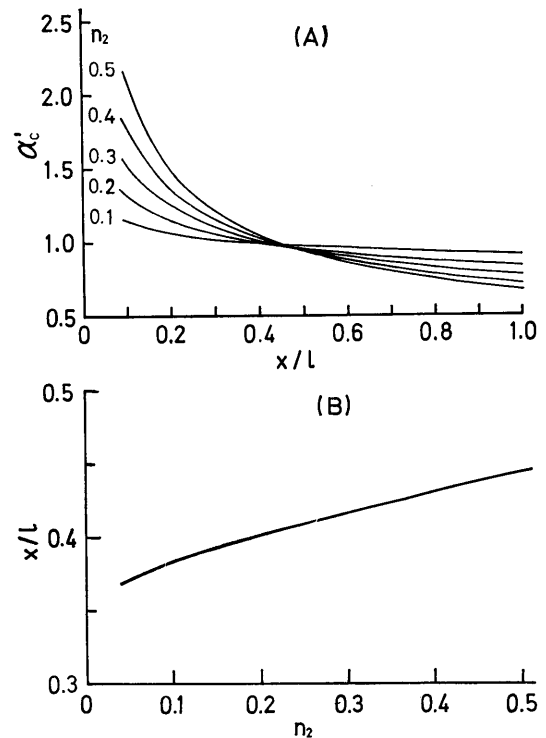


Fig. 2. Average water-vapor concentration departure of wet surface from the air outside the boundary-layer.

(A) Correction factors, α_c , for obtaining the average of vapor-concentration departure ($\Delta C'$) from a local value, $\Delta C'_x \propto x^{n_2}$, in the expression of $\Delta C' = \alpha_c' \Delta C'_x$. Dashes indicate the variation terms of local and average vapor-concentration departures, $\Delta C_x = C_0 + \Delta C'_x$ and $\Delta C = C_0 + \Delta C'$, respectively, where C_0 is a constant.

(B) Position where local value of vapor-concentration departure agrees with the average.

る。

さて、任意の点における局所水蒸気濃度差に乗じて平均水蒸気濃度差を求める補正係数、 α_c は、 $\Delta C = \alpha_c \Delta C_x$ とおき、これに(6)及び(5)式を代入して計算すれば次式で表わされる。

$$\alpha_c = \frac{C_0 + bu - m_2 l n_2 / (1 + n_2)}{C_0 + bu - m_2 x^{n_2}} \quad (7)$$

上式で、補正係数、 α_c は水蒸気濃度差分布における x のべき数、 n_2 のみでは決まらない。

このため、水蒸気濃度差の変化項について、その平均値を求めるために局所値に乗すべき補正係数、 α'_c を求める。

いま、 $\Delta C = \alpha'_c \Delta C'_x$ とおき、これに(5)式の $\Delta C'_x$ 及び(6)式の ΔC を代入すると、

$$\alpha'_c = (x/l)^{-n_2} / (1 + n_2) \quad (8)$$

となり、この補正係数は n_2 のみによって決まる。

第2図(A)は補正係数、 α'_c と局所位置、 x/l との関係を水蒸気濃度差の変化項の分布における x のべき数、 n_2 の各値について示したものである。

補正係数、 α'_c を用いると、平均水蒸気濃度差は次のように書ける。

$$\Delta C = C_0 + \alpha'_c \Delta C'_x$$

次に、水蒸気濃度差の局所値が平均値に一致する位置は、(7)式において、 $\alpha_c = 1$ とにおいて次式のように求められる。

$$x/l = (1 + n_2)^{-1/n_2} \quad (9)$$

この平均水蒸気濃度差の発現位置は水蒸気濃度差の常数係数や風速に直接には無関係で、水蒸気濃度差の分布における x のべき数、 n_2 のみで決まる。なお、(9)式は(8)式で、 $\alpha'_c = 1$ とにおいて得られる結果と同じである。すなわち、水蒸気濃度差の平均値の発現位置はその変化項の平均値の発現位置と一致する。

(9)式から得られた平均水蒸気濃度差の発現位置、 x/l と水蒸気濃度差分布における x のべき数、 n_2 との関係を第2図(B)に挙げた。水蒸気濃度差の分布がゆるやかなとき平均水蒸気濃度差の発現位置は前縁に近く、濃度差の分布が大きくなるとその発現位置は後方に移るが、通常的气象条件下で考えられる葉面の水蒸気濃度差分布においては、面前縁から面寸法の40%前後の点の局所水蒸気濃度差がその平均値に一致する。

II-ii) 温度分布に起因する水蒸気濃度差の分布

葉面上に温度分布のあることは古くから気づかれていたが、Waggoner & Shaw (1951), Raschke (1956), Cook *et al.* (1964), Slatyer & Bierhuizen (1964) による観測例があり、武智・伊藤 (1967, 1968) も葉温

分布を詳細に測定している。

また、武智ら (1969) は、葉温が気温より高い場合、葉气温差が近似的に、 $\Delta \theta_x = ax^n$ の形で表わされることならびに葉温分布における x のべき数、 n は葉面位置と風速に関係し、葉面境界層が層流、乱流のそれぞれの場合に、0.5~0.3と0.2~0.05の範囲にあることを理論的に示した。

いま、葉形湿面において面气温差を

$$\Delta \theta_x = ax^n \quad (10)$$

で与えた場合、水蒸気濃度差を面气温差のべき級数で展開すれば、 $\Delta C_x = C_0 + \gamma_1 \Delta \theta_x + \gamma_2 \Delta \theta_x^2 + \gamma_3 \Delta \theta_x^3 + \dots$ である。

ここに、 $\gamma_1 = dC/d\theta|_{\theta_A}$, $\gamma_2 = d^2C/d\theta^2|_{\theta_A/2}, \dots$

常温で、 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots$ は、 $1 \times 10^{-6}, 5 \times 10^{-8}, 2 \times 10^{-9}, \dots$ の Order であり、湿面气温差が 10°C 以下のとき水蒸気濃度差は第2次項までで十分近似できる。

$$\Delta C_x \approx C_0 + \gamma_1 ax^n + \gamma_2 a^2 x^{2n}$$

他方、湿面の極く前縁と後縁付近を除いて、任意の位置、 x の近傍では水蒸気濃度差は近似的に、

$$\Delta C_x = a' x^{n'} \quad (11)$$

と表わされる。このとき、局所における水蒸気濃度差のみかけの x 分布のべき数、 n' は次のように求められる。

$$n' = \frac{\partial \ln \Delta C_x}{\partial \ln x} = n \left(1 - \frac{C_0 - \gamma_2 a^2 x^{2n}}{C_0 + \gamma_1 ax^n + \gamma_2 a^2 x^{2n}} \right) \quad (12)$$

上式において、例えば、気温 20°C 、相対湿度60%、 $a = 5.0$ すなわち、葉气温差が前縁から1cmの位置で 5.0°C のときの n' は局所位置、 x に対して第3図に示すような値となる。

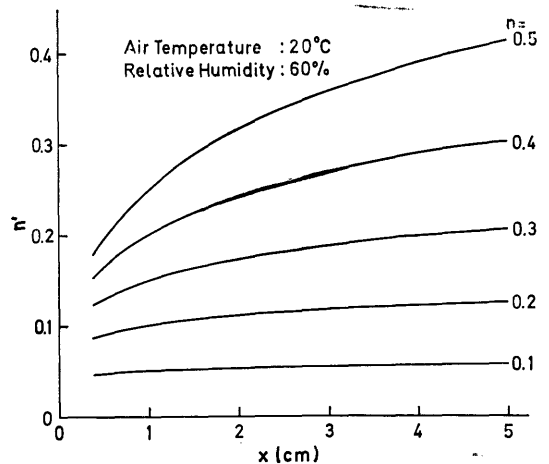


Fig. 3. Distribution of vapor-concentration departure, $\Delta C_x \propto x^{n'}$, due to the distribution of temperature departure of wet surface from ambient air, $\Delta \theta_x \propto x^n$,

通常、水蒸気濃度差のみかけの分布は、水蒸気濃度差に常数項があるため、対応する温度分布よりゆるやかである。

次に、葉気温差が(10)式で近似される場合に、これに起因する水蒸気濃度差を常数項を含む(5)式で表わしたとき、その常数項を除いた変化項の x のべき数、 n_2 と葉気温差の分布における x のべき数、 n との関係は、近似的に次のように得られる。

$$n_2 = \frac{\partial \ln \Delta C_x'}{\partial \ln x} = n \left(1 + \frac{\gamma_2 \alpha x^n}{\gamma_1 + \gamma_2 \alpha x^n} \right)$$

n_2 の値は気象条件と葉気温差にも関係して一義的には決まらないが、例えば気温 20°C 、相対湿度 60% 、 $\alpha = 5.0$ のとき、面の前縁からの局所位置 2cm 付近では、 n_2 は n よりおよそ 10% 大きい値となる。水蒸気濃度差の変化項の分布における x のべき数が温度分布における x のべき数より大きくなるのは、飽和水蒸気濃度の温度曲線の勾配が高温になる程大きくなるためである。

III 蒸発速度

III-i) 蒸発速度の一般式

強制対流による湿面からの蒸発速度の局所値、 w_x ($\text{g}/\text{cm}^2\text{s}$) と平均値、 w_f は(1)と(5)式を用い、それぞれ次のように求められる。

$$w_x = D_x \Delta C_x = BC_0 u^{m_1} x^{n_1} + Bbu^{(m_1-m_2)} x^{-(n_1+n_2)} \\ = w_{x,0} + w'_x \quad (13)$$

$$w_f = \left(\int_0^l w_x dx \right) / l = BC_0 u^{m_1} l^{-n_1} / (1-n_1) \\ + Bbu^{(m_1-m_2)} l^{-(n_1+n_2)} / (1-n_1+n_2) = w_{f,0} \\ + w'_f \quad (14)$$

ここに、

$$w_{x,0} = BC_0 u^{m_1} x^{-n_1} = D_x C_0,$$

$$w_{f,0} = BC_0 u^{m_1} l^{-n_1} / (1-n_1) = D_f C_0 = \alpha_L D_x C_0,$$

である。 $w_{x,0}$ 、 $w_{f,0}$ は、それぞれ水蒸気濃度差の常数項(空気飽差項)による蒸発速度の局所値と平均値である。

また、

$$w_x' = Bbu^{(m_1-m_2)} x^{-(n_1+n_2)} = D_x \Delta C_x' \quad (15)$$

$$w_f' = Bbu^{(m_1-m_2)} l^{-(n_1+n_2)} / (1-n_1+n_2) \\ = D_f \Delta C' \quad (16)$$

は、それぞれ蒸発速度の変化項の局所値と平均値である。

III-ii) 平均蒸発速度

平均蒸発速度は水蒸気輸送係数と水蒸気濃度差とのそれぞれの局所値の積を全面について積分し、面積で除して得られる。しかし、実用的にはそれらの一点の局所値や平均値の積で表わすのが一般的であり、簡単である。

ただし、この場合には補正係数が必要となる。

(1) 任意の点の局所水蒸気輸送係数と局所水蒸気濃度差を用いる表現

この場合、 $w_f = \beta D_x \Delta C_x$ とおけば、係数 β は(13)と(14)式を用いて次のように求められる。

$$\beta = \frac{C_0 / (1-n_1) + bu^{-m_2} l^{n_2} / (1-n_1+n_2) \left(\frac{x}{l} \right)^{n_1}}{C_0 + bu^{-m_2} x^{n_2}} \quad (17)$$

β は、風速、気温、温度及び葉面寸法に関係し、輸送係数と水蒸気濃度差変化項のそれぞれの分布における x のべき数、 n_1 、 n_2 のみでは決まらない。

そこで、水蒸気濃度差を常数項と変化項に分けて平均蒸発速度を表わすと、次のようになる。

$$w_f = D_x (\alpha_0 C_0 + \alpha_1 \Delta C_x') \quad (18)$$

ここに、 α_0 は蒸発速度常数項の平均値を求めるために局所値に乘すべき補正係数で、 $w_{f,0} = \alpha_0 w_{x,0}$ とおいて求められる、

$$\alpha_0 = (x/l)^{n_1} / (1-n_1) = \alpha_D \quad (19)$$

である。

また、 α_1 は蒸発速度変化項の平均値を局所の水蒸気輸送係数と水蒸気濃度差変化項を用いて表わす場合の補正係数で、 $w_f' = \alpha_1 D_x \Delta C_x'$ とおき、これに(16)、(1)及び(5)式の $\Delta C_x'$ を代入して求められ、

$$\alpha_1 = (x/l)^{n_1-n_2} / (1-n_1+n_2) \quad (20)$$

である。この補正係数は n_1 及び n_2 のみで決まる。

第4図(A)は層流境界層 ($n_1=0.5$) の場合における補正係数、 α_1 と局所位置、 x/l との関係である。葉面蒸散において、葉面気孔底の水蒸気濃度は葉温の測定値から求められるが、葉温の測定位置は主葉脈などの影響を避けるため、葉の気流前縁から葉寸法の数十%付近である場合が多い。例えば、葉の前縁から気流方向に葉寸法の40%の位置では、その局所蒸発速度変化項の値に1よりやや大きい係数を乗じると、平均蒸発速度の変化項が得られる。

次に、平均蒸発速度の常数項と変化項の発現位置を求めよう。

まず、平均蒸発速度常数項の発現位置は(19)式で、 $\alpha_0 = 1$ とおいて、次のように求められる。

$$x/l = (1-n_1)^{1/n_1} \quad (21)$$

この発現位置は水蒸気輸送係数の局所値が平均値に一致する位置に等しい。

次に、蒸発速度の変化項については、(20)式で、 $\alpha_1 = 1$ とおいて計算すれば、その平均値の発現位置は

$$x/l = (1-n_1+n_2)^{1/(n_1-n_2)} \quad (22)$$

である。

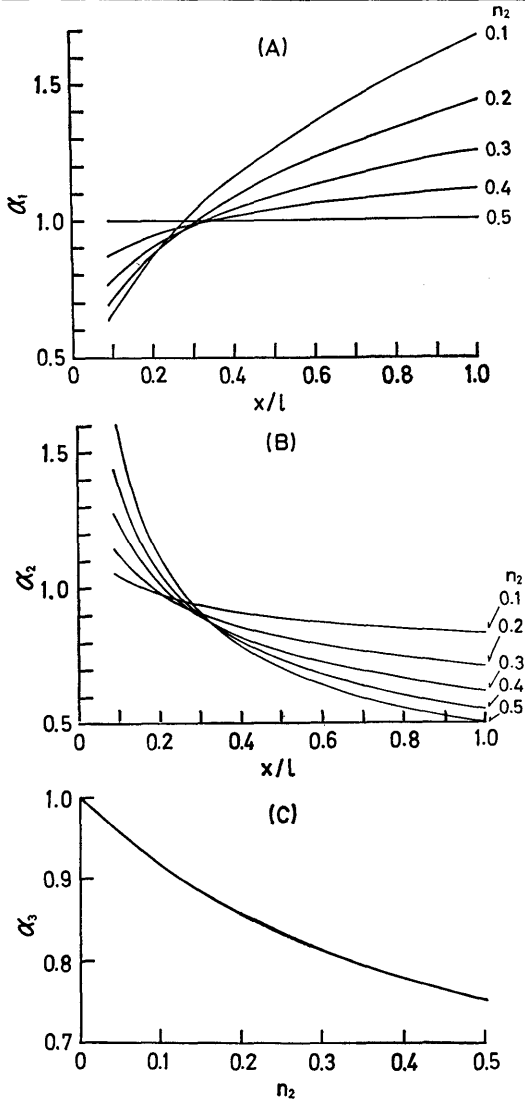


Fig. 4. Variation term of evaporation-rate from wet surface for laminar boundary layer in forced convection.

(A) Correction factors, α_1 , for obtaining average evaporation-rate (w'_f) from the product of local values of vapor transfer coefficient (D_x) and vapor-concentration departure, $\Delta C'_x \propto x^{n_2}$, in the expression of $w'_f = \alpha_1 D_f \Delta C'_x$. Dashes indicate the same notations as Fig. 2., in vapor-concentration departure and average evaporation-rate, $w_f = w_{f,0} + w'_f$, where $w_{f,0} = D_f C_0$, and D_f is average convection transfer coefficient.

(B) Correction factors, α_2 , after expression of evaporation-rate in $w'_f = \alpha_2 D_f \Delta C'_x$.

(C) Correction factors, α_3 , after expression of evaporation-rate in $w'_f = \alpha_3 D_f \Delta C'_x$, where $\Delta C'$ is average value of variation term of concentration departure.

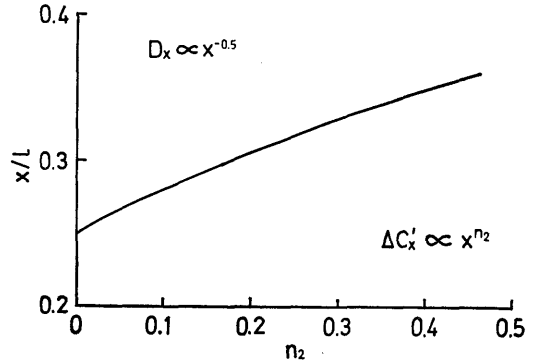


Fig. 5. Position where local value of variation term of evaporation-rate agrees with the average for laminar boundary-layer in forced convection.

第5図は、上式から得られる層流境界層の場合の蒸発速度変化項の平均値の発現位置、 x/l と水蒸気濃度差変化項の分布における x のべき数、 n_2 との関係である。この位置は面上における濃度差の変化が大きいく程、後縁に移動する。例えば、常温で数 m/s 以下の風速のときの葉温分布に対応する水蒸気濃度差の分布がある葉形湿面では、前縁から面寸法の35%前後の蒸発速度変化項の局所値がその平均値に一致する。

ところで、常数項も含めた全平均蒸発速度の発現位置は(17)式で、 $\beta = 1$ を満たす x の値である。例えば、気温 20°C 、相対湿度60%のとき、気流方向の寸法5 cmの矩形面で、境界層が層流 ($n_1 = 0.5$ かつ $n_2 = m_2$, 武智ら, 1969) の場合について計算すると、平均蒸発速度の発現位置、 x の値は、 n_2 が0.3から0.5の範囲で、1.3から1.4cmとなった。なお、この x の値は、気流方向の径が5 cmの楕円面では約1.5cmであった。

すなわち、上の矩形面または楕円面の場合、気流方向に前縁から面寸法のおよそ26ないし30%の位置の局所蒸発速度が全面の平均蒸発速度に一致する。このように全平均蒸発速度の発現位置は蒸発速度変化項のみの平均値の発現位置よりやや前縁に移る。また、平均蒸発速度の発現位置は空気飽差が大きい程、前縁よりになる傾向がある。

(2) 平均水蒸気輸送係数と任意の点の局所水蒸気濃度差を用いる表現

この場合の補正係数は複雑で、(1)と同様に一義的には決まらない。

しかし、

$$w_f = D_f (C_0 + \alpha_2 \Delta C'_x) \tag{23}$$

と表わすことができる。

ここに、 α_2 は、 $w'_f = \alpha_2 D_f \Delta C'_x$ とおき、(16)、(2)及び

(5)式の $\Delta C_x'$ を代入して得られる補正係数で、

$$\alpha_2 = (x/l) - n_2(1-n_1)/(1-n_1+n_2) \quad (24)$$

である。

層流境界層の場合、補正係数、 α_2 と局所位置、 x/l との関係を図4(B)に挙げた。

通常的气象条件下にある葉温に近似の温度分布を持つ葉形湿面では、その前縁から気流方向に面寸法の20ないし25%の点の局所水蒸気濃度差と面の平均輸送係数を用いると、両者の積で補正なしに平均蒸発速度の変化項が求められる。

また、任意の点の湿面温度を測定して、その水蒸気濃度から平均蒸発速度変化項を求めるためには、水蒸気濃度差変化項の x 分布のべき数が分かれば、測定位置で決まる補正係数、 α_2 の値を用いればよく、(23)式は平均蒸発速度を求める最も実用的な式である。

(3) 平均水蒸気輸送係数と平均水蒸気濃度差を用いる表現

このときも、全面の平均蒸発速度を求める補正係数は一般に複雑であるので、

$$w_f = D_f(C_0 + \alpha_3 \Delta C') \quad (25)$$

とおく。

ここに、補正係数、 α_3 は、 $w'_f = \alpha_3 D_f \Delta C'$ とおき、(16)、(2)及び(6)式の $\Delta C'$ を代入して得られる。

$$\alpha_3 = (1-n_1)(1+n_2)/(1-n_1+n_2) \quad (26)$$

層流境界層の場合の α_3 の値を図4(C)に挙げた。水蒸気濃度差変化項の平均値と平均輸送係数の積から蒸発速度変化項の平均値を求めるためには1より小さい補正係数を乗ずる必要がある。この補正係数は水蒸気濃度差の分布が大きい程小さい。

3. 実 験

用いた湿面は電気発熱体を内蔵した両辺が 5.0cm × 7.5cm、厚さが約 1.5mm の矩形湿面である。

発熱体には直径約 0.17mm、長さ約 170cm、電気抵抗約 90Ω のニクロム線を4本用いた。厚さ 0.01mm の矩形雲母板の長さ 5cm の短辺を4等分して、それぞれの部分にニクロム線を等間隔に板の長辺方向に這わせ、耐熱性の合成接着剤で固定し、その上を厚さ約 0.01mm の雲母板で被覆して発熱基板とした。

この基板を防水加工した後、両面をガーゼで被覆して湿面とした。矩形板の短辺側で、湿面から引き出した長さ約 10cm のガーゼの織糸を2束にまとめてビニール管に通し、水を入れた容器に導いた。容器内の水位は湿面上に極く薄い水膜が常に形成されるように調整した。

なお、矩形湿面板の側面には合成樹脂を塗付して蒸発

を止めた。

湿面の気流方向前縁には適当長さの starting section を付けた。

蒸発の実験は矩形湿面を口径 35cm の吹出型層流風洞のテストセクション中央で、長さ 5cm の短辺を気流方向に一致させて行なった。

加熱電源には直流電源を用い、4個の各ヒーター毎に変換抵抗器を回路に直列に接続し、各発熱量を制御して任意の湿面温度分布を作った。

蒸発量は重量変化から求めた。

湿面温度と気温との差は 0.1mmφ の銅・コンスタンタンの示差式熱電対を湿面に接着して測定した。測温位置は湿面前縁から 1, 2, 3 及び 4cm の4点とした。

風速の測定には熱電対式加熱風速計を用いた。

気温計及び湿度計にはそれぞれ 0.1mmφ の銅・コンスタンタン熱電対の単式と示差式乾湿計を用いた。

これらの測定要素は電位差記録計に自記録させた。

湿面温度分布は、 $\Delta \theta_x = ax^n$ の形で、発熱量を調節して、 a は 5.0 で一定にし、 n を 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 及び 0.5 の各値に近似させた。各場合とも風速を 0.5, 1, 2 及び 4 m/s の4段階に変えて実験した。

まず、4点の湿面温度を上述の各局所値に調節した上、気流方向の湿面温度分布を別の熱電対で詳しく測定し、前縁と後縁の極く一部を除いて必要な温度分布になっていることを確認した。

また、両対数グラフに描いた局所水蒸気濃度差と局所位置との関係から求めた水蒸気濃度差の x 分布のみかけのべき数、 n' はすべての測定例で、(12)式から計算される n' に近い値を得た。

次に、蒸発量の測定値から蒸発速度の自由対流効果分(長谷場, 1967)を差引いて求められる平均の強制対流蒸発速度、 w_f を用い、(23)式から強制対流による平均水蒸気輸送係数、 $D_{f,OBS}$ を求めた。

$$D_{f,OBS} = w_{f,OBS} / (C_0 + \alpha_2 \Delta C'_x)$$

このとき、水蒸気濃度差の常数項は、 $C_0 = (1-r)C_A$ であり、変化項は、 $\Delta C'_x = C_x - C_0$ から求めた。ここに、 C_x は局所湿面温度での飽和水蒸気濃度であり、測定値の処理は、 $x = 2$ cm の測定値について行なった。

湿面温度が一樣 ($n=0$) のとき、水蒸気濃度も一樣 ($n'=0$) であるが、このとき得られた強制対流による平均輸送係数、 $D_{f,OBS}$ は気流に平行な平板上層流境界層の理論式の値 (Pohlhausen, 1921; 長谷場, 1967) とよく一致した。

次に、水蒸気濃度差の x 分布があるとき、強制対流による平均輸送係数、 $(D_{f,OBS})n'$ と水蒸気濃度差がない

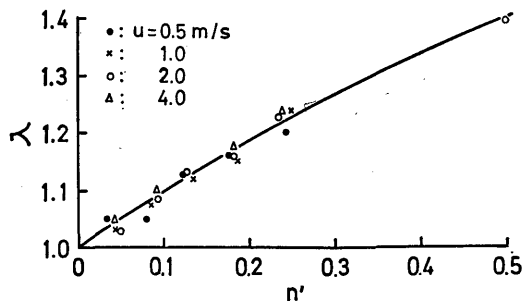


Fig. 6. Ratios, λ , of the average water-vapor transfer coefficient (D_f) over leaf-shaded wet surface, parallel to air-flow, with distribution of vapor-concentration departure to the average transfer coefficient ($D_{P,f}$) over the uniform concentration surface, for laminar boundary-layer in forced convection, where n' is the exponent of x in the concentration departure distribution due to surface-temperature distribution, u ; wind velocity.

Real line indicates the theoretical ratio of D_f to $D_{P,f}$.

ときの平均輸送係数, $(D_{f,OBS})_{n'=0}$ との比, λ_{OBS} を求めた。

$$\lambda_{OBS} = (D_{f,OBS})_{n'}/(D_{f,OBS})_{n'=0}$$

第6図は λ_{OBS} と n' との関係である。まず, Levy (1952) が平板上の層流強制対流熱伝達について, 面気温差を, $\Delta\theta_x = ax^n$ とおき, エネルギー方程式を解いて得た熱伝達の解析結果から熱伝達係数を計算した。これから得られる気流に平行な温度分布のある平板の熱伝達係数と温度一様の場合の熱伝達係数との比, λ を図に実線で示した。

測定値, λ_{OBS} と理論値 λ はよく一致している。

なお, 補正係数, λ は水蒸気濃度差の分布における x のべき数, n' のみで決まる。 λ は n' とともに大きくなり, 水蒸気濃度差の分布がない場合から分布の x のべき数が 0.5 になるに従い, 1.0 からおよそ 1.4 まで変化した。

この結果から, 葉面のように温度分布すなわち水蒸気濃度分布のある気流に平行な面の層流境界層での水蒸気輸送係数の局所値, D_x と平均値, D_f は温度一様の面の輸送係数, $D_{P,x}$, $D_{P,f}$ を基準にすると, それぞれ, 次のように表わされる。

$$D_x = \lambda D_{P,x}$$

$$D_f = \lambda D_{P,f}$$

ここに,

$$D_{P,x} = 0.332 Sc^{1/3} Re_x^{1/2} d/x$$

であり, $D_{P,x}$; 局所水蒸気輸送係数 (cm/s), $D_{P,f}$; 面の平均輸送係数で矩形面では, $D_{p,f} = 2D_{P,f}$, Sc ; 水蒸気の Schmidt 数, Re ; Reynolds 数, d ; 空気中への水蒸気の分子拡散係数 (cm²/s) である。

4. むすび

葉面蒸散において, 強制対流による水蒸気輸送に及ぼす葉面温度分布の効果を解析するため, 温度分布のある葉形湿面の蒸発について基礎的な考察を行なった。

葉面からの境界層水蒸気輸送の基準となる連続湿面において, 局所の水蒸気輸送係数, D_x 及び水蒸気濃度差, ΔC_x はそれぞれ, 風速, u と面前縁からの局所位置, x の関数として,

$$D_x = Bu^{m_1} x^{-n_1},$$

$$\Delta C_x = C_0 + bu^{-m_2} x^{n_2},$$

と近似的に表わされる。この場合,

I 水蒸気輸送係数, 水蒸気濃度差及び蒸発速度のそれぞれについて,

(1)局所値に乗じて平均値を求めるための補正係数ならびに, (2)局所値が平均値に一致する位置 (平均値の発現位置) が一般式として表わされた。

例えば, 常温・常湿で風速が数 m/s 以下のとき, 平板状矩形または楕円葉の水蒸気輸送では, 葉の前縁から気流方向に葉寸法のおよそ 26~30% の局所位置の水蒸気輸送量が平均値と一致する。

II 平均蒸発速度の表現方法を, (1)水蒸気輸送係数と水蒸気濃度差のそれぞれの局所値を用いる場合, (2)平均水蒸気輸送係数と局所の水蒸気濃度差を用いる場合, ならびに(3)水蒸気輸送係数と水蒸気濃度差の両平均値を用いる場合の各場合について示した。

III 気流方向の湿面温度と気温との差, ΔC_x の分布が, 葉気温差の気流方向における分布, $\Delta\theta_x = ax^n$ に等しいとき, 温度分布に起因する水蒸気濃度差は, 面の前縁と後縁の極く近傍を除いて近似的に, 気流方向に前縁からとった面上距離, x のべき関数 ($\Delta C_x = a'x^n$) で表わされた。この場合の水蒸気濃度差のみかけの x 分布のべき数, n' と面気温差の x 分布のべき数, n との関係を示した。

さらに, 湿面上に水蒸気濃度差の分布がある場合に適用できる水蒸気輸送係数は一様濃度面の輸送係数と異なることを明らかにし, 両者の比と濃度差分布の x のべき数, n' との関係を求めた。

次に, これらの理論結果を実験的に確かめるため, 内部発熱の湿面を用いて, 温度分布と水蒸気濃度分布の関係, 一様温度面と温度分布のある面との水蒸気輸送係数

の関係調べ、これからの実験結果を理論値と比較し、その一致性を確かめた。

例えば、通常の層流境界層の葉温分布における x のべき数、 n が 0.3 から 0.45 のとき、葉面水蒸気濃度差の分布におけるみかけの x のべき数、 n' は 0.17 から 0.27 であり、この場合に適用される葉面水蒸気輸送係数は一様温度面（一様水蒸気濃度面）の輸送係数より 16 から 24% 大きかった。

参考文献

- 1) COOK, G.D., DIXON, J.R. and LEOPOLD, A.C., 1964: *Science*, **144**, 546—547.
- 2) 長谷場徹也, 1967: 日農気全国大会, 講演要旨, 昭和42年度, 21—22.
- 3) LEVY, S., 1952: *J. Aeronaut. Sci.*, **19**, 341—348.
- 4) PARLANGE, J-Y.; WAGGONER, P.E. and HEI-CHEL, G.H., 1971: *Plant Physiol.*, **48**, 437—442.
- 5) POHLHAUSEN, E., 1921: *Z. angew. Math. Mecn.*, **1**, 115—121.
- 6) RASCHKE, K., 1956: *Planta*, **48**, 200—238.
- 7) SLATYER, R.O. and BIERHUIZEN, J.F., 1964: *Aust. J. Biol. Sci.*, **17**, 115—130.
- 8) 武智修・長谷場徹也, 1968: 日農気全国大会, 講演要旨, 昭和43年度, 40—41.
- 9) ———, 1971: 農業気象, **27**, 67—72.
- 10) ———・伊藤代次郎, 1969: 日農気全国大会, 講演要旨, 昭和44年度, 29.
- 11) ———・伊藤代次郎, 1967: 日農気全国大会, 講演要旨, 昭和42年度, 32—33.
- 12) ———, 1968: 日農気全国大会, 講演要旨, 昭和43年度, 38—40.
- 13) WAGGONER, P.E. and SHAW, R.H., 1951: *Plant Physiol.*, **27**, 710—724.

Summary

Fundamental analyses and some experiments regarding to water-vapor transfer by forced convection over a wetted leaf-shaped plane surface were made.

In general, for a leaf-shaped plate, local water-vapor transfer coefficient (D_x) which is a function of wind velocity (u) and distance (x) over the surface from the leading edge in the direction of air-flow is written as follows:

$$D_x = Bu^{m_1} x^{-n_1},$$

where, B is a numerical coefficient affected by the shape of the plate, its relative position to wind, natures of air-flow and the boundary-layer, the vapor-concentration distribution over the surface, properties of air and so on; m_1 and n_1 are exponents related to the structure of the boundary-layer, respectively.

Water-vapor concentration departure (ΔC_x) of the surface from the air outside the boundary-layer is generally expressed as follows:

$$\Delta C_x = C_0 + bu^{-m_2} x^{n_2},$$

where, b is a numerical coefficient and C_0 is a constant. When the temperature of the leading edge of the plate is identical to the air temperature, C_0 is the saturation deficit of air in vapor-concentration.

A local evaporation-rate is obtained as the product of the local values of vapor transfer coefficient and vapor-concentration departure.

Then, the relationships between a local and the average values of transfer coefficient, concentration departure and evaporation-rate were theoretically analysed and the effect of the surface-temperature distribution in the air-flow direction upon the convection vapor transfer coefficients was experimentally examined.

I. For the plane-surface with the above described transfer coefficient and the distribution of vapor-concentration departure, each correction factor for obtaining the average value of transfer coefficient, concentration departure or evaporation-rate from each local value was calculated. These results are shown in figures (Figs. 1, 2-A and 3). For example, the correction factor of vapor transfer coefficient at the point where the distance from the leading edge in the air-flow direction is 40% of the surface dimension are 1.26 and 1.04 for laminar and turbulent boundary-layer, respectively.

Further, the positions where a local value coincided with the average value for each quantity were derived. The distance of the position where a local vapor-concentration departure agrees with its average is about 40% of the surface dimension from the leading edge in the flow direction.

The position for evaporation-rate is complicated as it is related to air-temperature, humidity, wind velocity, surface dimension and temperature departure of the surface from air. However, under moderate air conditions local evaporation-rates at positions whose distance from the leading edge being between about 26 and 30% of the surface-dimension in the flow direction agrees with the average rate for a flat leaf.

II. Three representations of average evaporation-rate were shown in the cases of using (i) both local values of transfer coefficient and vapor-concentration departure, (ii) the average transfer coefficient and a local concentration departure, (iii) both average values of transfer coefficient and concentration departure.

Practically, when using a local surface-temperature and the average transfer coefficient, the average rate of vapor transfer (w_f) over a unit-width surface with the dimension of l , for forced convection is expressed as follows :

$$w_f = D_f(C_o + \alpha_2 \Delta C'_x),$$

where, $D_f = Bu^m l^{1-n_1} / (1-n_1)$; average vapor transfer coefficient, $\Delta C'_x$; variation-term of local vapor-concentration departure in the expression of $\Delta C_x = C_o + \Delta C'_x$, and α_2 ; correction factor in the expression of $\Delta C'_x = \alpha_2 \Delta C'_x$, for obtaining the variation-term ($\Delta C'$) of the average vapor-concentration departure that is written as $\Delta C = C_o + \Delta C'$. The factor is obtained as follows :

$$\alpha_2 = (x/l)^{-n_2} (1-n_1) / (1-n_1+n_2).$$

III. As temperature difference ($\Delta \theta_x$) between the surface of a leaf-shaped plate and air is proportional to the n -th power of surface-position (x) similarly to leaf temperature distribution, the distribution of vapor-concentration departure caused by the temperature distribution could be approximately represented by the following formula, except for the vicinities of the leading and trailing edges of the surface ;

$$\Delta C_x = a' x^{n'}.$$

The relation between n and n' was calculated. The vapor-concentration departure distribution was slightly gentle compared with the temperature distribution.

IV. Measurements of evaporation from the surface of a thin rectangular plate with included electrical heaters between wet surfaces were made for several values of the exponents of x in the distribution of surface-temperature and for the wind velocities ranging from 0.5 to 4 m/s.

After the experiments, it was confirmed that the average convection vapor transfer coefficients for a plane-surface with vapor-concentration distribution were larger than the coefficients of uniform vapor-concentration surface. For example, in the case of the values of the exponent (n) of x in leaf-temperature distribution for laminar boundary-layer, from 0.3 to 0.45, the exponents (n') of x in the distribution of vapor-concentration departure were between 0.17 and 0.27. Then, these distribution of vapor-concentration departure were associated with increases from 16 to 24% in the transfer coefficients, compared with those of uniform concentration-departure surface.

Such increase in transfer coefficients was analogously interpreted after Levy's theoretical solution (1952) regarding to heat transfer from a plate having variation-temperature surface with the fluid flowing parallel to the surface.