Naphthalene の昇華拡散による葉面熱伝達係数の決定*

長谷場 徹也・武 智 修

(愛媛大学農学部)

A Contribution to the Determination of Heat-Transfer
Coefficients on a Leaf by Naphthalene Vapor Transfer

T. HASEBA and O. TAKECHI

(College of Agriculture, Ehime University)

1. は し が き

柑橘葉面の熱収支については、既に種々の検討を行ない、実験結果と理論との一致性をしらべた^{1,2)}。

すなわち、層流および乱流の気流が葉面に平行にあたる場合について、葉面熱収支式の各項の値を測定し、強制対流による葉面熱伝達係数は、それぞれ、風速の $1/2$ 乗および $4/5$ 乗の函数形になることを見出した。

さらに、層流および乱流の各々の場合について、熱伝達係数の平板における理論式から楕円面に適用できる理論値を導びき、これと葉面熱伝達係数の測定値を比較して、理論値を葉面に適用するための補正係数を求めた。しかし、この補正係数は熱収支式において葉温測定値の補正係数との関係で、一義的に求めた値でなかった。

ところで、対流による熱伝達と物質輸送との間には相似関係があるので、物質の輸送量を測定することにより、実験的に熱伝達係数を求めることができる。

ここでは、柑橘葉面の形に類似した楕円平板から空気中への Naphthalene ($C_{10}H_8$) の昇華拡散量を測定し、さきに柑橘葉面の熱収支で求めた熱伝達係数が妥当であるかどうかを確認するとともに、楕円平板での熱伝達係数の理論値を葉面に適用する場合の補正係数を一義的に決定することにした。

他方、葉面からの蒸散は葉形湿面からの水蒸気輸送を基礎にして考えることができる。蒸散と気象要素との関係をみる場合、気孔開度等の生理要因の変化を知るとともに、葉面上の水蒸気輸送係数の函数形を知る必要がある。蒸散を定量的に取扱う場合、Naphthalene 蒸気の輸送係数は葉面上の水蒸気輸送係数の基礎的知見になるものである。

2. 楕円面からの熱および物質の輸送

1) 葉面からの熱輸送^{1,2)}

葉面での熱収支は、単位時間・単位面積について次式で表わされる。

$$S = H_n + H_f + LW + q \quad (1)$$

* 昭和 38 年 4 月 8 日農気全国大会にて発表

ここに、 S : 葉面で吸収される総輻射量 ($\text{cal/cm}^2\text{sec}$), $H_n = h_{n1} \Delta\theta_1 + h_{n2} \Delta\theta_2 = 5 (1 - 2/5 \alpha_t) h_{n2} \alpha_t \Delta\theta_2'$: 自由対流による平均伝達熱量 ($\text{cal/cm}^2 \text{ sec}$), h_{n1} , h_{n2} : 葉上面および下面からの自由対流による熱伝達係数 ($\text{cal/cm}^2 \text{ sec } ^\circ\text{C}$), 気流構造が層流で葉温が気温より高い場合次のように与えられる。

$$\text{葉上面} : h_{n1} = 0.54 (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{1/4} k_a / l \quad (2)$$

$$\text{葉下面} : h_{n2} = 0.27 (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{1/4} k_a / l \quad (3)$$

$H_f = 2 \alpha_f h_f \alpha_t \Delta\theta_2'$: 強制対流による平均伝達熱量 ($\text{cal/cm}^2 \text{ sec}$), h_f : 強制対流による楕円面での平均熱伝達係数 ($\text{cal/cm}^2 \text{ sec } ^\circ\text{C}$), h_f は気流が楕円の短径に平行の場合、次のように与えられる。

$$\text{層流} : h_f = 0.737 \text{Re}_{2a}^{1/2} \cdot \text{Pr}^{1/3} k_a / 2a \quad (4)$$

$$\text{乱流} : h_f = 0.0380 \text{Re}_{2a}^{4/5} \cdot \text{Pr}^{1/3} k_a / 2a \quad (5)$$

LW : 蒸散熱量 ($\text{cal/cm}^2 \text{ sec}$), q : 生理熱量 ($\text{cal/cm}^2 \text{ sec}$)。

なお、式中に使われた記号は既報の葉温に関する研究^{1,2)}に用いられたものと同じである。

熱伝達係数の補正係数 (α_f) は葉面の周縁効果、葉裏面の葉脈の突起等による効果、葉面の温度分布の効果などを含むものである。

また、葉温測定値に関する補正係数 (α_t) は葉の上下面温度が異なることと表面测温誤差によるものである。

α_f および α_t は層流と乱流の場合について、Trial and Error 法によって、次のように求められている。

$$\text{層流の場合} : \alpha_f = 1.25, \alpha_t = 1.06$$

$$\text{乱流の場合} : \alpha_f = 1.35, \alpha_t = 1.06$$

しかし、厳密にはこれらの数値をそれぞれ独立して決定する必要がある。

2) 物質の輸送

i) 基本式 葉面の形に近似した楕円面からの、対流による単位時間・単位面積あたりの物質の平均輸送量は次式で表わされる。

$$M = D_n \Delta C + D_f \Delta C \quad (6)$$

ここに、 M : 物質の平均輸送量 ($\text{gr/cm}^2 \text{ sec}$), D_n : 自由対流による平均物質輸送係数 (cm/sec), D_f : 強制対

流による平均物質輸送係数, (cm/sec), ΔC : 楕円板表面と境界層外との物質の濃度差 (gr/cm³)。

なお, 対流がない場合には対流輸送の代わりに, 分子拡散を考えればよい。

ii) 自由対流による Naphthalene 蒸気の輸送 Naphthalene 面と周囲空気と間に温度差がある場合には自由対流による物質輸送が行なわれる。

自由対流による物質の輸送係数は熱伝達との相似性から, 水平板で, 気流構造が層流の場合には, 次のように求められる^{1,9)}。

拡散面が上向きで, 表面温度が気温より高い場合または, 拡散面が下向きで, 表面温度が気温より低い場合

$$D_{n1} = 0.54 (\text{Gr} \cdot \text{Sc})^{1/4} d_N / l \quad (7)$$

拡散面が上向きで, 表面温度が気温より低い場合または, 拡散面が下向きで, 表面温度が気温より高い場合

$$D_{n2} = 0.27 (\text{Gr} \cdot \text{Sc})^{1/4} d_N / l \quad (8)$$

ここに, $\text{Sc} = \nu_a / d_N$: Schmidt 数, d_N : Naphthalene 蒸気の空気中への分子拡散係数⁴⁾ (cm²/sec)。

Naphthalene 表面と境界層外との Naphthalene 蒸気の濃度差は次式で求められる。

$$\Delta C = s(\theta_N) / R_N \Theta_N \quad (9)$$

ここに, $s(\theta_N)$: Naphthalene 面での飽和蒸気圧 (gr/cm² sec²) θ_N , Θ_N : Naphthalene 板表面温 (°C 度, °K), R_N : Naphthalene 蒸気の気体常数 (6.49 × 10⁸ cm²/sec² deg)。

自由対流による楕円面からの Naphthalene 蒸気の平均輸送量は (7) または (8) および (9) 式を用いて計算できる。

iii) 強制対流による Naphthalene 蒸気の輸送 板面に平行な強制対流による平板からの局所物質輸送係数は Colburn Analogy⁵⁾ によって次式のように求められる。

層流の場合:

$$D_x = 0.332 \text{Re}_x^{1/2} \cdot \text{Sc}^{1/3} d_N / x \quad (10)$$

乱流の場合:

$$D_x = 0.0292 \text{Re}_x^{4/5} \cdot \text{Sc}^{1/3} d_N / x \quad (11)$$

但し, いづれの場合も, $0.6 < \text{Sc} < 3$,

ここに, D_x : Naphthalene 蒸気の局所輸送係数 (cm/sec), u : 速度境界層外の風速 (cm/sec), x = 平板の前縁から局所までの距離 (cm), Re_x ; x の距離での Reynolds 数。

なお, Naphthalene 蒸気の常温・常圧での Schmidt 数は約 2.5 である。

次に, 局所値から葉面の形に近似した楕円形 Naphthalene 面での平均輸送係数 (D_f) は, 気流が楕円の短径方向に平行の場合, 次のように求められる。

層流の場合:

$$D_f = 2.22 D_{2a} = 0.737 \text{Re}_{2a}^{1/2} \text{Sc}^{1/3} d_N / 2a, \quad (12)$$

乱流の場合:

$$D_f = 1.30 D_{2a} = 0.0380 \text{Re}_{2a}^{4/5} \text{Sc}^{1/3} d_N / a. \quad (13)$$

強制対流による楕円面からの Naphthalene 蒸気の平均輸送量は (12) または (13) と (9) 式とを用いて計算できる。

他方, 葉全面を湿面とした場合の, 水蒸気輸送係数の理論値は (12) および (13) 式の Sc および d_N をそれぞれ水蒸気の Schmidt 数および分子拡散係数におきかえれば求められる。この値は蒸散における葉面上の水蒸気輸送の解析に用いることができる。

3) 熱伝達係数と物質輸送係数との関係

水平平板の場合において, 自由対流による熱伝達係数と Naphthalene 蒸気輸送係数との間には (2) と (7) または (3) と (8) 式との比をとって, いずれも次式の関係が得られる。

$$\begin{aligned} h_n / D_n &= (\rho_a c_p)^{1/4} (k_a / d_N)^{3/4} \\ &= h_{n1} / D_{n1} = h_{n2} / D_{n2} \quad (\text{cal/cm}^3 \text{ } ^\circ\text{C}) \end{aligned} \quad (14)$$

また, 面に平行な強制対流については, (4) と (12) または (5) と (13) 式との比をとると, 層流, 乱流いずれの場合にも次式が得られる。

$$h_f / D_f = (\rho_a c_p)^{1/3} (k_a / d_N)^{2/3} \quad (\text{cal/cm}^3 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (15)$$

(14) および (15) 式に含まれる物理常数 ρ_a , c_p , k_a および d_N は温度と気圧とによって決まるが境界層内の温度分布を考慮して, 温度としては境界層内の Reference Temperature⁶⁾ をとる。

このようにして, Naphthalene 蒸気の輸送係数が求められると, その値に対し自由対流では (14) 式, 強制対流では (15) 式のそれぞれの比を用いて換算すれば容易に熱伝達係数が決められる。

4) 強制対流による楕円面からの輸送係数の補正係数

平板に平行気流がある場合, 楕円平板からの強制対流による物質の平均輸送量は (6) 式で求められる。実際の気流中では, 楕円板の周縁効果などで, 輸送量の測定値は (12) または (13) 式を用いて得られる理論値より, 一般に大きくなる⁷⁾。

したがって, 平均輸送係数の実測値と理論値との比から, 物質の輸送係数の補正係数 (α_f)_D を決定する必要がある。

$$(\alpha_f)_N = (D_f)_{\text{obs}} / (D_f)_{\text{Theor}} \quad (16)$$

物質輸送係数と熱伝達係数とは全く相似であるから, Naphthalene 輸送係数の補正係数 (α_f)_N は熱伝達係数

の補正係数 (α_f) と対応する。

3. 実験および結果

1) 実験方法

柑橘葉は厚さが 0.3~0.4mm で、基部および尖端を除いては橢円に近い形をしているので、厚さ 0.1mm のアルミニウム板を使い、短径 5cm、長径 10cm の橢円板を作り、これの片面に Naphthalene を溶融して塗付し厚さ 0.35mm の平板に仕上げた。

Naphthalene 板表面温度の測定には、直径 0.1mm の銅・コンスタンタン熱電対を Naphthalene 表面の極く浅層に埋め込んだ。この結果、測温誤差なく表面温度を測定することができた。この測温法によって、実験的に補正係数 (α_f)_N を独立して決定できるわけである。

今回は Naphthalene 面を上に向け、板に平行でその短径方向に層流の気流をあてた場合および乱流の気流の場合について実験を行なった。いずれの場合も風速は

5m/sec までの範囲について測定した。

2) 物質輸送係数の測定値と熱伝達係数への換算

橢円平板全体の Naphthalene の昇華拡散量の測定値から自由対流による量を差引くと、強制対流による輸送量が得られる。これから平均単位面積あたり単位時間毎の強制対流による輸送量を求めた。

次にこれを、Naphthalene 板表面温度での Naphthalene 蒸気の飽和濃度と物質境界層外の濃度との差 (ΔC) で除して、平均輸送係数の測定値 (D_f)_{obs} を計算した。なお、この場合境界層外の Naphthalene 濃度は零とした。

測定の結果では、Naphthalene 板表面温度と気温との差は、最大の時で 1.0°C 程度であり、測定した多くの場合に検知できない程度のものであった。このことから Naphthalene 板表面温度はほぼ一様で、輸送係数の

Fig. 1. Change in average coefficients (D_f) of naphthalene vapor transfer from a flat elliptic plate in parallel laminar flow with wind velocity (u).

Fig. 2. Same as Fig. 1, in parallel turbulent flow.

h 測定値と理論値の比である (α_f)_N は表面温度の板面分布による効果は殆んどないと考えられる。すなわち (α_f)_N は主として周縁効果によるものと考えられる。

橢円面からの Naphthalene 蒸気平均輸送係数と風速との関係を層流の場合については第 1 図に、また乱流の場合は第 2 図に示した。なお、すべての測定値は Reference Temperature が 28.0°C での値に換算してある。

層流および乱流の場合とも、強制対流による Naphthalene 蒸気輸送係数と風速の測定値の対数値は直線関係にある。輸送係数の測定値は層流の場合には風速の 1/2 乗に、乱流の場合には 4/5 乗に比例してい

て、(12) または (13) 式から計算した橢円面での平均輸送係数の理論値を表わす実線と充分平行である。

また両図とも、測定値は理論値より大きい値となっていて、両者の比すなわち補正係数は風速によらず一定であることを示している。

次に、(15) 式を計算すると

$$h_f/D_f = 6.42 \times 10^{-4} \text{ cal/cm}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

となり、この値を第 1 図の Naphthalene 蒸気の輸送係数の測定値に乗ずると強制対流による熱伝達係数が得られる。その結果は、葉面熱収支解析で求めた強制対流熱伝達係数とかなりよく一致する。第 2 図における乱流の場合にも、同様なことが言える。

3) 補正係数

強制対流による橢円面からの Naphthalene 蒸気の平

均輸送係数の測定値と理論値とから (16) 式によって補正係数を求めた。その結果、補正係数 $(\alpha_f)_N$ の平均値は、層流の場合に 1.29、乱流の場合に 1.36 となった。

これらの値は柑橘葉面の熱収支解析で求めた熱伝達係数の補正係数 (α_f) の値とかなりよく一致する。

α_f には周縁効果以外に、葉面の場合葉脈の影響などが加わっているが、ここで得られた $(\alpha_f)_N$ と葉面での α_f との値がかなりよく一致することから、葉面熱伝達係数の補正係数は殆んどその周縁効果によるものと考えられる。

なお、 α_f を層流の場合に既報^{1,2)} の 1.25 から 1.29 に、乱流の場合 1.35 から 1.36 に変え、既報の α_s の値はそれぞれ 1.04 および 1.05 となる。

4. ま と め

柑橘葉に近似した楕円形 Naphthalene 面からの昇華拡散量を板面に平行な気流が層流の場合と乱流の場合について測定した。

物質輸送と熱伝達との相似則を用い、強制対流による Naphthalene 蒸気の平均輸送係数を柑橘葉面での平均熱伝達係数に換算した。得られた熱伝達係数は既報の柑橘葉面における熱収支解析から得た値とよく一致した。

また強制対流による楕円形 Naphthalene 面からの平均輸送係数の測定値を理論値と比較して、理論値に対する補正係数を求めた。この補正係数は葉面熱収支解析で

得た平均熱伝達係数の補正係数と比較して大体一致するが、層流の場合にはやや大きい値となり、乱流の場合にはよく一致した。

葉面熱伝達係数の補正係数は、ここで得られた結果から、主として周縁効果によるものと考えられる。

今後さらに、気流が葉面に平行でない場合や自然風の場合の葉面熱収支の解析においても、それらの熱伝達係数を、Naphthalene の昇華拡散実験から求められる値と比較したい。他方、葉面蒸散における水蒸気輸送については、ここに得られた結果を適用して、測定および解析を進めたい。

参 考 文 献

- 1) 武智 修・長谷場徹也 (1962): 葉温に関する研究 (2), 農業気象, 18: 92~97.
- 2) ——— (1963): 同上 (3), 19: 7~10.
- 3) 山本義一・三浦 晃 (1949): 自然対流による蒸発, 気象集誌, II-27: 342~345.
- 4) 佐藤正一 (1954): 物性定数推算法, 丸善, p. 129.
- 5) ROHSENOW, W. H. & H. Y. CHOI (1961): *Heat, Mass and Momentum Transfer*, Prentice-Hall, p. 415.
- 6) JOHNSON, H. A. & M. W. RUBESIN (1949): Aerodynamic Heating and Convective Heat Transfer, A. S. M. E., Transactions, 71: 447~456.
- 7) 栗野誠一・葛岡常雄 (1954): 伝熱工学, 丸善, p. 46.

Summary

After Colburn Analogy between heat and mass transfer, the heat transfer coefficient can be determined by the mass transfer coefficient for forced or free convection.

The average vapor transfer coefficients (D_f) over a flat elliptic plate of naphthalene in the forced flow parallel to the minor axis are given by the following equations:

for the laminar boundary layer,

$$D_f = 0.737 \cdot Re_{2a}^{1/2} \cdot Sc^{1/3} d_N / 2a$$

and for the turbulent,

$$D_f = 0.0380 \cdot Re_{2a}^{4/5} \cdot Sc^{1/3} d_N / 2a$$

where Re_{2a} = Reynolds number, Sc = Schmidt number, d_N = molecular diffusion coefficient of naphthalene vapor into air, and $2a$ = length of minor axis.

For the free convection in the laminar range, the average coefficients on the upper surface of a horizontal elliptic plate are given as follows: for a warm plate,

$$Dn_1 = 0.45 (Gr \cdot Sc)^{1/4} d_N / 1$$

and for a cold plate,

$$Dn_2 = 0.27 (Gr \cdot Sc)^{1/4} d_N / 1$$

where Gr and 1 are the Grashof number and the mean length of major and minor axes.

For obtaining the heat transfer coefficient (h_f or h_n) from the corresponding mass transfer one, it is necessary to use conversion factors.

The conversion take the following forms :

for the forced convection,

$$h_f/D_f = (\rho_a \cdot c_p)^{1/3} (k_a/d_N)^{2/3}$$

and for the free convection,

$$h_n/D_n = h_{n1}/D_{n1} = h_{n2}/D_{n2} = (\rho_a \cdot c_p)^{1/4} (k_a/D_N)^{3/4},$$

where ρ_a =density, c_p =specific heat, k_a =thermal conductivity of air.

These factors should be calculated when the reference temperatures are known.

On a small elliptic plate like a citrus leaf, it is obliged to recognize the edge effect increasing the heat and mass transfer in comparison with their theoretical values. This effect may be expressed by a corrective factor (α_f), that is the ratio of the observed to the theoretical value of the average transfer coefficient.

In this experiment, the transfer rates of naphthalene vapor into the air from a flat elliptic plate, whose major and minor axes are 5 and 2 cm respectively, were measured in the range of wind velocity from 5 to 500 cm/sec.

As the result, the observed values of the average vapor transfer coefficients are proportional to one-half power of wind velocity in the laminar flow and to the four-fifths power in the turbulent, as shown in Figs. 1 and 2.

Then, the heat transfer coefficients are calculated from these values using the conversion factor, and compared with the values on a citrus leaf reported in previous investigation of "Leaf Temperature" (1962 and '63). The values calculated from the naphthalene vapor transfer are in good agreement with the values for the citrus leaf.

Moreover, it is found the corrective factors (α_f)_N for the naphthalene vapor are almost constant, independent of wind velocity. The mean values of (α_f)_N are 1.29 in the laminar flow and 1.36 in the turbulent.

These values are nearly equal to the previously given values of α_f for the heat transfer coefficients over a citrus leaf.

From these results, it may be proved that the corrective factor (α_f) is mainly due to the edge effect.

抄 録

Effects of daylength and light intensity on growth of barley II. Influence of incandescent light on apical development : PALEG L. G., D. ASPINALL, Bot. Gazette, 125-3 (149~155), 1964

20°C 恒温条件下において、蛍光灯光線をベースとし、それに白熱光線を補足して麦の伸長生長・花器の發育並びに節間伸長等に与える影響を報告している。(光の強度は植物体と光源との距離を変えることによつて調整し、サーモパイルで輻射を測り、単位輻射光量当りの生

長あるいは發育度を比較するという法を採用している)。

白熱光線を補足すれば、長日条件においては麦の伸長生長ならびに花器の發育を促進するけれども、短日条件ではその影響がなかつた。長日条件における伸長生長は、白熱光の輻射強度と対数的直線関係があるが、蛍光灯の輻射強度の影響は少い。花芽の分化に対する白熱電燈光の影響は、節間伸長の始まる前に明らかに現われるが、節間伸長は花芽の分化に附随して促進される。これら生長や發育を促進させる最適波長は、白熱電燈光線のうち近赤外部 (730m μ) である。(氷高信雄)