武 智 修・長谷場 徹也

(愛媛大学 農学部)

Studies on the Leaf Temperature (4)

Comparison of the temperature of citrus leaves in laminar and turbulent flows

Osamu TAKECHI and Tetsuya HASEBA

(College of Agriculture, Ehime Univ., Matsuyama, Ehime prefec.)

1. は し が き

すでに、柑橘葉面に形式される境界層が層流または乱流の場合について、葉温が風速によつていかに変化するかを測定し、その結果を解析して葉面熱伝達係数の函数形を決定した^(8・6)。

しかし、前報の測定例では、層流と乱流の各場合について、柑橘葉の環境気象条件は異なつていて、それぞれの葉温を直接比較したものではなかつた。

このため、同一の気象条件下で、葉面境界層が層流と乱流である場合の葉面熱伝達係数を計算し、葉面熱収支式から葉温を求めて比較した結果について、ここに報告したい。

一般に、葉面熱伝達係数は、蒸散または同化作用における葉面上の水蒸気輸送係数ならびに炭酸ガス交換係数とも相似な函数形であるので、これらの分野にも関係することである。

2. 葉面熱伝達係数の比較

柑橘葉はその両端を別にすると、ほぼ隋円平板とみなされる。その短直径を $2a$ cm とし、その方向に風が吹く場合、強制対流による葉の上下面から周囲空気中への伝達熱量、 H_f は葉気温差を $\Delta\theta$ とすると、単位面積あたり、単位時間に

$$H_f = 2h_f' \Delta\theta = 2\alpha_f h_f \Delta\theta, \quad (1)$$

と表わされる。ここに、 h_f' は平均葉面熱伝達係数、 h_f はその理論値で

$$h_f = F Pr^{0.33} Re_{2a}^{-1} ka/2a, \quad (2)$$

である。ここに、 Pr : Prandtl 数, Re_{2a} : 長さ $2a$ での Reynolds 数, ka : 空気熱伝導率 (cal/sec・cm・°C) また、 α_f , F , m は気流構造できまる常数である。乱流風の場合、通常葉面上の境界層は風速にかかわらず乱流境界層である。しかし、層流風の場合、低風速域では葉面上の境界層は層流境界層であるが、 Re_{2a} が $10^4 \sim 10^5$ 以上になる高風速で、層流境界層は乱流境界層に移移する。

この場合については、別の機会にゆずることとする。

本報では、葉面上の境界層が乱流遷移する高風速域を除いて、層流風の場合、葉面上の境界層も層流である場合のみをとりあげることにする。

また柑橘葉として、短直径 $2a=5$ cm, 長直径 $2b=10$ cm の隋円葉について述べることにする。

この場合には

$$\text{層流: } \alpha_f = 1.25, \quad F = 0.737, \quad m = 0.5$$

$$\text{乱流: } \alpha_f = 1.35, \quad F = 0.0380, \quad m = 0.8$$

で与えられる^(8・9)。(2)式における空気各物性値は、湿度と温度に關係する。

それらの変化の程度をみるために、乾燥空気と水蒸気のそれぞれの物性値から $1 \sim 7 \cdot 10^\circ$ 相対湿度 50, 100% の湿潤空気について、伝達に關係する物性値を各温度毎に計算した^(5・7)。

これを一般常数表に記載されている乾燥空気のそれと比較すると、植物生育の温度範囲では、各物性値の同一温度での湿度による差異は小さく、数%以下であり、(2)式での物性値の組合せ項では1%以下である。

したがつて、湿潤空気の物性値をその湿度から計算する必要は少なく、通常は乾燥空気の値を用いてよい。つぎに、空気物性値は葉面上の温度境界層における reference temperature θ^* での値をとる必要がある。この θ^* は、気温を θ_0 °C とすると

$$\text{層流の場合: } \theta^* = \theta_0 + 0.58 \Delta\theta,$$

$$\text{乱流の場合: } \theta^* = \theta_0 + 0.50 \Delta\theta,$$

で与えられる⁽³⁾。

したがつて、熱伝達係数 h_f' に含まれる各物性値は、変化する葉温の平均値と気温から求めた θ^* での値を用いる必要がある。(1), (2)式に各温度での物性値と風向方向の葉直径 $2a=5$ cm を入れると、熱伝達係数 h_f' は

$$\text{層流の場合: } h_f' = k_t' (2a)^{-0.5} u^{0.5} = k_t' u^{0.5}$$

$$\text{乱流の場合: } h_f' = k_t' (2a)^{-0.2} u^{0.8} = k_t' u^{0.8}$$

となる。ここに k_t' , k_t' は熱伝達係数の式で風速 u の項以外の係数であり、これらと温度 θ^* の關係が第1図で

*昭和38年12月4日中・四国支部例会で発表

ある。

Fig. 1. k_f' , K_t' and K_n' versus reference temperature θ^* .

図から、 θ^* が 20°C 、 30°C の場合には、C.G.S単位で、 k_f' はそれぞれ 5.60×10^{-5} 、 5.54×10^{-5} となり、 K_t' はそれぞれ 8.91×10^{-6} 、 8.64×10^{-6} となる。

この図と風速 u の測定値から、容易に熱伝達係数 k_f' の値が求められる。

第2図は柑橘葉の平均熱伝達係数 k_f' と風速 u の関係である。第2図Aは夏季の例で、気温 $\theta_0 = 30^\circ\text{C}$ 、日射量 $\theta = 1.21\text{ly/min}$ の場合である。

この場合、層流と乱流での熱伝達係数が等しい値、 $1.23 \times 10^{-3} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ になるのは、風速 $= 50.2 \text{ cm/sec}$ のときである。この風速以上では、乱流での熱伝達係数は層流のそれより大きくなるようにみえるが、実際には層流の境界層は乱流遷移するので、両者はあまり異ならないことになる。

問題は風速が約 5 m/sec 以下の低風速の場合である。低風速域では、層流の熱伝達係数は乱流のそれより大きく、その差異は風速が小であるほど著しい。たとえば、風速 $= 50 \text{ cm/sec}$ では、層流の熱伝達係数は乱流のその約2倍である。

第2図Bは冬期の例で、気温 $\theta_0 = 10^\circ\text{C}$ 、日射量 $Q = 0.6$

Fig. 2. Comparison of heat transfer coefficients for laminar and turbulent boundary layers on citrus leaf surfaces. A : Summer, $\theta_0 = 30^\circ\text{C}$ $Q = 1.21 \text{ ly/min}$; B : winter, $\theta_0 = 10^\circ\text{C}$, $Q = 0.6 \text{ ly/min}$.

1ly/min の場合である。両熱伝達係数が等しくなる風速は 443 cm/sec である。前の例と同様に、低風速域では層流の熱伝達係数は乱流のそれよりかなり大きい。

3. 葉温の比較

定常状態での葉の熱収支式は、葉の上下面の平均葉温と気温の差を $\Delta\theta$ とすると、つぎようになる。

$$\mu Q = 5 \left(1 - \frac{2}{5\alpha_t}\right) h_{n2} \Delta\theta + 2h_f' \Delta\theta + 8\beta\sigma \times$$

$$T_0^3 \Delta\theta + LW. \quad (3)$$

各記号の意味は前報 8・9) と同様である。(3)式において、右辺の第1項と第2項の和が顕熱量と言われるものである。(3)式から $\Delta\theta$ を求めるためには、蒸散速度を与える必要がある。

そこで、第2図の場合に相当する気象条件での柑橘の蒸散速度として、夏季の快晴日の日中平均値をとつて、 $W=4 \times 10^{-6}$ gr/cm²sec とし、第2図Bの場合に相当するものとして、冬季の日中平均値をとつて、 $W=4 \times 10^{-7}$ gr/cm² sec とした。

右辺の第1項は葉気温差がある場合の葉上下面からの自由対流による伝達熱量であり、第2項の強制対流による伝達熱量に加算される。

葉気温差が正の場合での葉下面、または葉気温差が負の場合での葉上面の自由対流による熱伝達係数 h_{N2} は

$$h_{N2}=0.27(Gr \cdot Pr)^{1/4}ka/\ell, \quad (4)$$

で表わされる。ここに、Gr: Grashof 数、 ℓ : 葉の短軸と長軸の平均(cm)

h_{N2} を葉気温差の函数として表わし、空気 の物性値と $\ell=a+b=7.5$ cm を入れると

$$h_{N2}=K_N \ell^{-0.25} \Delta\theta^{0.25}=K_N' \Delta\theta^{0.25},$$

となる。 K_N' と温度の関係は第1図に示している。 θ^* が 20°C, 30°C の場合には、C. G. S. 単位で、 K_N' はそれぞれ 3.04×10^{-5} , 2.98×10^{-5} となる。 $\alpha_t=1.06$ であるので、 $5(1-2/5\alpha_t)=3.11$ を h_{N2} に乗じると、葉の上下面の自由対流による平均熱伝達係数が求められる。

(3)式を書直すと

$$\mu Q - LW - (2h_f' + 8\beta\sigma T_0^3) \Delta\theta = 3.11 K_N' \Delta\theta^{5/4}, \quad (5)$$

となる。この代数方程式から $\Delta\theta$ が求められる。

ただし、風速が大きい場合自由対流伝達熱量は他の項より小として無視すれば、左辺項のみとなつて容易に $\Delta\theta$ が決定できる。

しかし、ここでは図式解法で (5) 式の $\Delta\theta$ を求めた。(5) 式の左辺と右辺をそれぞれ縦軸に、 $\Delta\theta$ を横軸にとつて、与えられた気象条件で線図を画いた。この図で、左辺は $\Delta\theta$ の増加と共に減少する直線となり右辺は原点を通り、 $\Delta\theta$ の増加と共にその 5/4 乗で増加する曲線となるので、両者の交点から容易に $\Delta\theta$ が決定された。

第3図は第2図に対応する気象条件での葉気温差 $\Delta\theta$ と風速 u の関係である。第3図Aは第2図Aに対応する夏季の例である。風速が約 5 m/sec では、層流と乱流での葉気温差は一致し、風速が小になる程葉気温差は大きくなるが、同一風速で比較すると、乱流での葉気温差は層流でのそれよりかなり大きく、その差異は低風速になる程著しい。

両者を比較すると、風速 $u=200$ cm/sec では、葉気温差は乱流では 5.6°C、層流では 4.5°C、 $u=100$ cm/sec ではそれぞれ 8.0°C、5.8°C、 $u=60$ cm/sec では 10.0°C、6.9°C、 $u=20$ cm/sec では 13.8°C、9.5°C となる。

Fig. 3. Comparison of temperature departures of leaf from air for laminar and turbulent boundary layers on citrus leaf surfaces.

A: Summer, $\theta_0=30^\circ\text{C}$, $Q=1.2$ ly/min,

$W=4 \times 10^{-6}$ gr/cm²sec; B: Winter, $\theta_0=10^\circ\text{C}$, $Q=0.6$ ly/min, $W=4 \times 10^{-7}$ gr/cm²sec.

このように、低風速では葉気温差は著しく大きいから、層流での葉気温差が乱流でのそれよりかなり小さいことは、夏季、ガラス室内で人工送風する場合、植物の高温障害を小にする上で、考慮を要することである。

第3図は第2図Bに対応する冬期の例である。日射量が小であるので、全体として葉気温差は小である。しかし、風速が小である程葉気温差は大となり、また層流での葉気温差が乱流のそれより小さいことは、前の例と同様である。

さて、いままで蒸散速度は一定としてきたが、つぎに蒸散速度が変化すると葉気温差がどのように変化するかをしらべてみたい。このことは(5)式で、蒸散速度 W に種々の値を入れて、葉気温差 $\Delta\theta$ を求めればよい。第2図Aに担当する夏季の例で風速 $u=100$ cm/sec とした場合、葉気温差と蒸散速度の関係が第4図である。葉気温差は蒸散速度が増加するにつれて低下する。同一の蒸散速度で

Fig. 4. Relation between temperature departure of leaf from air, $\Delta\theta$ and transpiration rate, W . Summer: $\theta_0=30^\circ\text{C}$, $Q=1.2 \text{ ly/min}$, $u=1 \text{ m/sec}$.

比較すると、層流での葉気温差は乱流のそれより常に小さい。

第4図で葉気温差の蒸散速度による変化が直線にならないのは、(5)式から図式解法で葉気温差を求めたためである。もし、風速が数m/secで自由対流項を無視すると(5)式から葉気温差 $\Delta\theta$ は

$$\Delta\theta = \frac{\mu Q - L W}{2T_0 + 8\beta\sigma T_0^3}, \quad (6)$$

となり、葉気温差は蒸散速度の増加と共に直線的に低下する。第4図では風速 $u=1 \text{ m/sec}$ であるので、葉気温差の変化曲線はかなり直線に近い。

第4図に相当する気象条件での柑橘葉の正常な蒸散速度 W は、ほぼ $3 \times 10^{-6} \leq W \leq 5 \times 10^{-6} \text{ gr/cm}^2 \text{ sec}$ である。

例えば、蒸散速度を $3 \times 10^{-6} \text{ gr/cm}^2 \text{ sec}$ とすると、葉気温差は層流では 6.2°C 、乱流では 8.5°C である。

柑橘葉の日射吸収率は0.55であるので⁸⁾、葉の日射吸収熱量を100とすると、顕熱量は65、潜熱量21、正味長波幅射熱量は14となる。

これから、葉面上のBowen比を求めると3.1となり、植被層での値と著しく相違する。これは、日射下の単葉の場合であり、植被層としての群葉と異なるのは当然である。

なお、種々の気象条件に対して、第4図に相当する線図を画いておけば、葉気温差の測定値から蒸散速度を推定することが可能である。特に、制御室、温室内では蒸散見積りが容易である。

4. 摘 要

任意の気象条件下で、葉面に平行な風が吹くとき、葉面上の境界層が層流と乱流の場合について、柑橘葉面の平均熱伝達係数を求めた。

同一風速で比較すると、低風速域では、層流の熱伝達係数は乱流のそれより大きく、その差異は風速が小である程著しい。風速が大きくなると、両者の差は小になり、風速が $4 \sim 5 \text{ m/s}$ では差異は殆んど無くなる。

熱伝達係数の値を葉面熱収支式に入れて、葉気温差を求めると、低風速域では葉気温差はかなり大きい。同一風速で比較すると、層流での葉温は乱流での葉温よりかなり低い。また、葉気温差と蒸散速度の関係をみると、気象条件が一定であれば、葉気温差は蒸散速度の増大と共にほぼ直線的に低下する。

これらのことは、夏季、ガラス室内で植物の高温障害を小にするため効果的な通風をするとき、風の構造と風速について考慮を要することである。また、葉温測定から蒸散速度の見積りも可能である。

参 考 文 献

- 1) American Institute of physics Handbook (1957): Mcgraw-Hill, 2-84, 4-71, 4-84.
- 2) 栗野誠一・葛岡常雄 (1954): 伝熱工学, 丸善, 293.
- 3) Eckert, E.R.G (1950): *Introduction to the Transfer of Heat and Mass*, Mcgraw-hill, 93, 115, 269, 274.
- 4) Kreith, F.(1966): *Principles of Heat Transfer*. International Textbook, 595.
- 5) List, R.J. (1958): *Smithsonian Meteorological Tables*, 290-295, 341-342.
- 6) McAdams, W.H. (1954): *Heat Transmission*, Mcgraw-Hill, 457.
- 7) 佐藤一雄 (1954): 物性定数推算法, 丸善, 74~75, 84, 96, 118.
- 8) 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.
- 9) 武智修, 長谷場徹也 (1963): 葉温に関する研究 (3) 農業気象, 19, 7~10.
- 10) 坪内為雄, 加藤清雄共訳 (1963): グレーベル/エルク/グリグル: 熱伝達の基礎, 朝倉書店, 459.

Summary

Under any micro-meteorological condition, the average heat transfer coefficients over flat elliptic leaves in the forced flow parallel to the surfaces are expressed in the following equations: for the laminar boundary layer, $h_f' = 2 \times 1.25 \times 0.733 P_r^{0.03} Re_{2a}^{0.5} Ka / 2a$, and for the turbulent, $h_f' = 2 \times 1.35 \times 0.038 P_r^{0.03} Re_{2a}^{0.8} Ka / 2a$, where P_r = prandtl number, Re_{2a} = Reynolds number, Ka = thermal conductivity of air, and $2a$ = leaf length in wind direction. Comparing the laminar coefficient with the turbulent one, the former is considerably larger than the latter, under the same low wind velocity. Therefore, even though the fully sun-shined leaf temperatures are considerably high to the bulk air temperature, particularly in the breeze, the leaf temperature is fairly lower in the laminar flow than in the turbulent. With increasing wind velocity, the leaf temperatures in the laminar and the turbulent flows tend to approach near the air temperature, until they are equal at high Reynolds number. These results that the sun-shined leaf temperature is considerably declined to the air temperature by the wind and the laminar heat transfer coefficient over a leaf is larger than the turbulent one, are considered to be significant to the prevention of over-heating injury of plants in glass houses in summer.

支部だより

I. 近畿支部総会(41年度)開かる

41年11月19日京都府立植物園集会所で気象学会関西支部と協同して研究発表会と総会が開かれた

研究発表

1. 気温日変化の最高および最低起時に関する一考察
東 (京都府大)
2. 京大原子炉敷地内における最低気温分布について
水間・佐野(京大原子炉実験所)
3. 温室簡易冷房用padの熱伝達特性 松本(大阪府大)
4. 直火暖房によるプラスチック・ハウスの微気象特性
矢吹・石橋(大阪府大)
5. 牧草畑の土壌水分 蒸発散研究グループ(農技研)
6. 通風型有効放射計の通風速度について
佐橋(京大) 田端(瑞穂中)
7. ヒマワリ群落内の葉の光合成強度ならびに直達光照射葉面積の垂直変化について 堀江(農技研)
8. ダム水温の垂直分布経年変化と農業との関係
檀上(大阪管区気象台)

国際学会出席報告

1. 第4回国際生気象学会における農業気象部会の概況
西内 光(大府大・農)
2. カナダ農業試験場の農業気象研究
西内 光(大府大・農)

3. 農業気候学の方法に関する第1回国際シンポジウム
黒岩澄雄(京大・理)

4. フィールドデータのProcessingに関するシンポジウム(キャンベラ)

光田 寧(京大・防災研)

II. 関東支部例会開かる

41年11月22日電力中研会議室で開かれた。

研究発表

1. 岩 切 (防災センター) : 水稻栽培期間気候の農業気候学的研究, 第1報生育期間平均気温の年変動について
2. 高 谷 (気象庁) : 気象資料からの蒸発量の簡易計算
3. 斉 藤 (農技研) : 植物群落の夜間冷却におよぼす放射量および風速の影響
4. 渡 部・関 山 (農電研) : 農用サーモスタットの試作
5. 宮 川(農電研) : ペレットハウスの光量光質について
6. 泊 (農技研) : 降雨による桜桃の実割防止(二)果実表面のOED膜の透過定数について
7. 中 川(園試) : 果樹の気象的適地に関する研究 第6報
果実の成熟日数と気温の関係
8. 谷 (農技研) : 気象災害対策実施の条件について

特別講演

丸 山 (気象庁) タイ国の農業気象事情