

桑葉の蒸散速度とその測定法について

誌名	蠶絲研究
ISSN	00364495
著者	村上, 毅 武田, 友四郎
巻/号	88号
掲載ページ	p. 1-14
発行年月	1973年6月

蚕糸研究 第88号 1973年6月
Sansi-Kenkyu (Acta Sericologica)
No. 88, June, 1973

桑葉の蒸散速度とその測定法について

村上 毅・武田友四郎

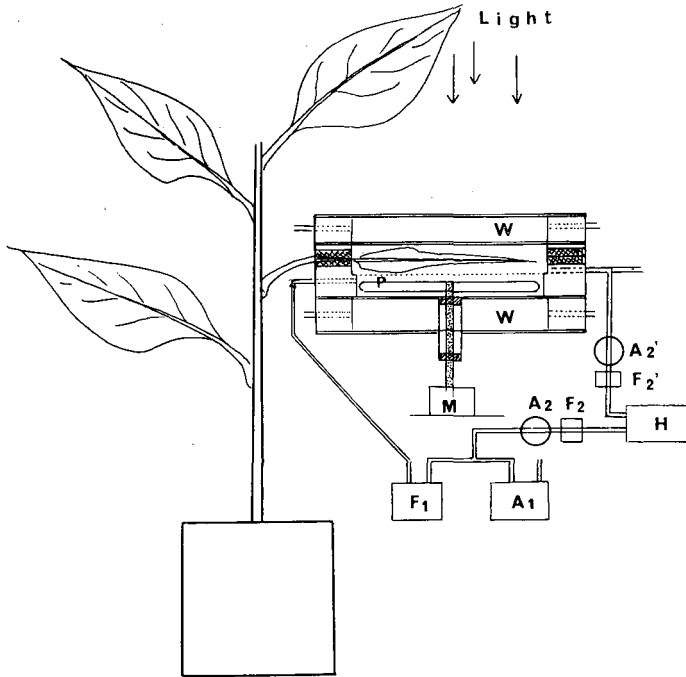
はじめに

この実験は、桑葉の蒸散速度を測定することによって、気孔の炭酸ガス拡散抵抗をあきらかにする目的でおこなったものであるが、実験条件の不備などのため、十分その目的を達成することができなかった。しかし、この実験に用いた方法は、桑葉などからの水の蒸散量を正確に、連続的に測定するのに好都合であることがあきらかになったので、桑葉での測定結果と合わせ、その概要を報告する。なお、この実験は村上が昭和46年度科学技術庁国内留学生として九州大学農学部において武田と共同して実施したものであり、関係者に感謝の意を表す。また報文の作成にあたり適切な助言を与えられた農林省蚕糸試験場、北浦澄栽桑部長および本多恒雄桑繁殖研究室長に感謝の意を表す。

材料および方法

実験材料は桑（一ノ瀬）さし木苗で5月上旬、ポットに植え付け、8～9月に実験をおこなった。

蒸散速度の測定にあたっては、桑をポットごと実験室内に持ち込み、条に着生したままの葉を一葉ずつ同化箱内に密封し、通気する方法を用い、同化箱に入る前の空気と同化箱から出てくる空気の一部をそれぞれ湿度計に導き、43.0°Cの条件下で水蒸気圧を測定した。なお、蒸発散室（この報告では同化箱とよんでいる）の出入口の温湿度を測定して、蒸発散量を求める方法については加藤ら¹⁾の報告があるが、その場合、蒸発散室内での湿度の分布と蒸発散室への通気量との関係はほとんど考慮されず、通気量は湿度計の感度と出口での湿度に制約されるものとして扱われている。しかし、蒸発散量は飽差の影響を強く受けており、当然、葉表面周辺での湿度分布がどうなっているかは重要な問題となる。しかもこの蒸発散室内での湿度分布は通気量によって大きな影響を受けるという関係にある。この実験では同化箱内の湿度分布が通気量によって影響されないようにするため、同化箱内にプロペラをとりつけ、同化箱内の空気を攪拌した。同化箱の構造、照明条件は前報²⁾のとおりであるが、葉面での明るさは52kluxであった。また通気量は毎分2～30 lの範囲で測定した。測定系統の概略を示せば第1図のとおりである。なお、この測



第1図 測定システムの概略図

同化箱に送られる空気は A_1 で示したエアープンプからおくられ、 F_1 の流量計で通気量を測定し、同化箱内では P で示したプロペラによって攪拌される。 A_1 から出た空気の一部は A_2 のエアープンプから F_2 の流量計を経て湿度計に入り、同化箱からはき出される空気の一部は A_2' で示したポンプから F_2' で示した流量計を経てそれぞれ湿度計におくられ、出口側と入口側の空気の湿度を測定する。 M はプロペラ回転用のモーター、 W は葉温調節用のウォーター・ジャケットであり、 H は湿度計を示す。なお、流量計が湿式の場合は F_1 と A_1 の順序を逆にする必要があり、 F_2 および F_2' の流量計は湿式のもの使用できない。

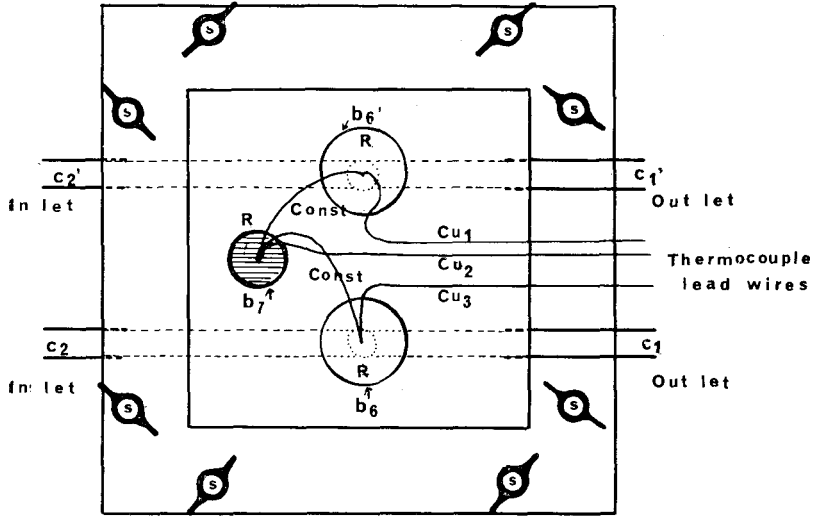
定は光合成速度の測定と並行しておこなった。

(蒸散速度測定装置の概要)

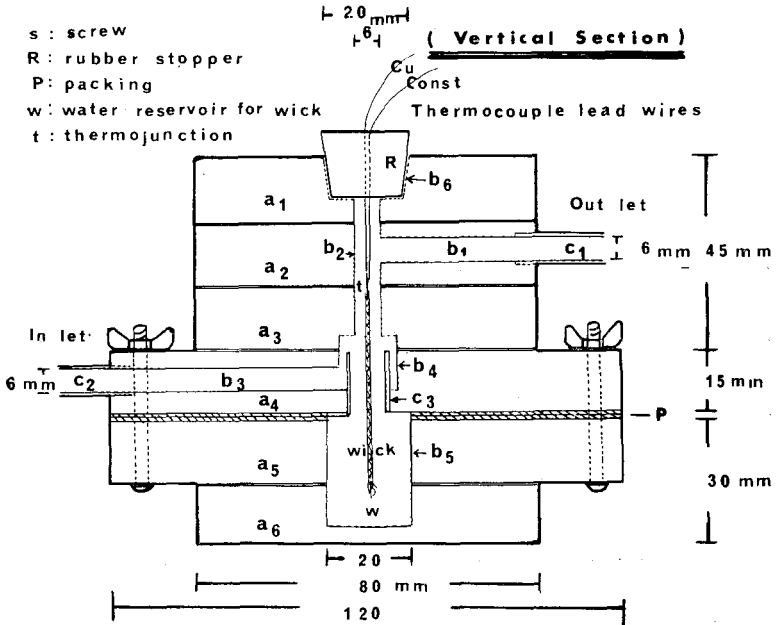
実験に用いた湿度計は、Slatyer (1964)⁵⁾ らが植物葉からの蒸散速度を測定する目的で考案した熱電対による乾湿球湿度計を市販の材料と簡単な工作機械で工作できるように村上が改良したものである。その概要を第2図に示す。

湿度計の感湿部は厚さ 15 mm のアクリル樹脂板 6 枚を重ねたものであり、断面図に示すように a_1, a_2, a_3, a_4 のアクリル板を接着したブロックと、 a_5, a_6 のアクリル板を接着したブロックからなり、両ブロックは間にバックリングをはさんで金具で締めつけ密着するようになっている。また a_1, a_2, a_3, a_6 は 80×80 mm、 a_4, a_5 は 120×120mm の大

(Plane Figure)



(Vertical Section)



第2圖 湿度計感濕部概形
上：平面圖 下：断面圖

きさである。断面図に b_1, b_2, b_3 で示したのは、直径 6 mm, b_5, b_6 は 20 mm, また b_4 は 10 mm の穿孔であり, b_3 は湿球に水を供給するための水つぼである。 C_1, C_2, C_3 で示したのは外径 8 mm, 内径 6 mm のアクリル管であり, 水蒸気圧を測定しようとする空気は C_2 から入り $b_3 \rightarrow b_4 \rightarrow b_2 \rightarrow b_1 \rightarrow C$ の順に流れ, b_2 の部分で湿球と接触する。

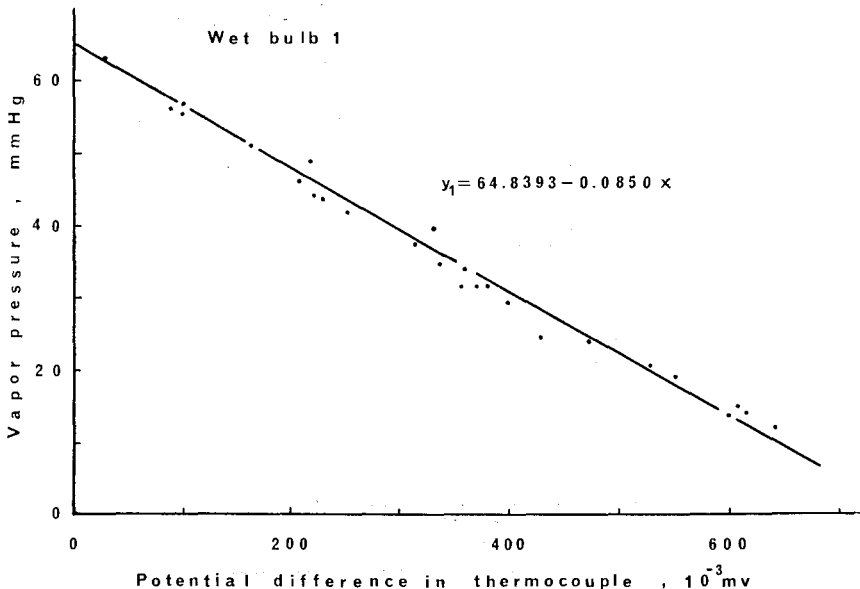
平面図に示すとおりこのような管系が二系統設けられており, 平面図に b_7 で示した窄孔にゴム栓を通して埋設した一つの乾球を共有する二つの湿球をそれぞれの系に対し, b_6, b_6' で示した部分のゴム栓を通して設定してある。

乾, 湿球は直径 0.3 mm の銅, コンスタantan熱電対であり, 湿球とした熱電対の接点には, ガーゼをほぐした糸 5 本を巻きつけ, その接点を水つぼにおとし水を供給するようにした。乾球と湿球から出る 3 本のリード線のうち, 乾球から出るものを共有する形でペンレコーダに接続し, 1 mv のレンジで乾湿球間の電位差をそれぞれ記録されるようにした。

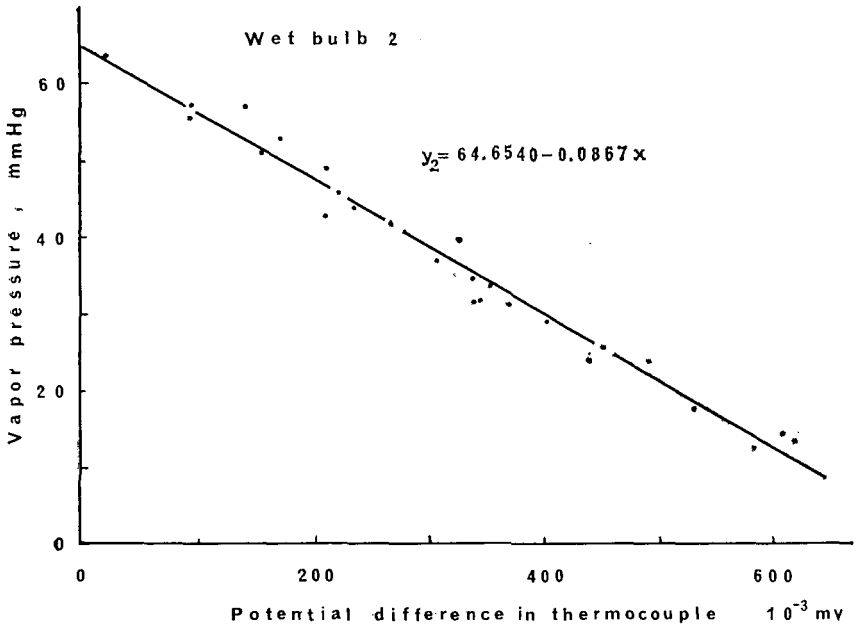
実際の測定にあたっては, 装置全体を恒温槽に沈め測定しようとする空気温度を一定にして測定するが, この実験では恒温槽の水温を 43.0°C に設定した。なお恒温槽の温度変化は $\pm 0.1^\circ\text{C}$ であった。

(温度計の検定)

湿度計に組みこむ前の熱電対について, 乾球とする接点を 43.0°C に保ち, 湿球とする接点を 35~19°C の範囲で変化させ, 湿度差 1°C に対する電位差を測定した。その結果,



第3図 記録計示度と水蒸気圧の関係



第4図 記録計示度の水蒸気圧の関係

Wet bulb 1 とした熱電対では $40.86 \mu v$ ，また Wet bulb 2 とした熱電対では $41.03 \mu v$ の電位差が得られた。

次に，湿度計への通気量が測定結果に影響を与えるので，通気量と記録計示度との関係をしらべた結果， 650 ml/min 以上の通気量であれば測定値に影響を与えなかった。

そこで 43°C で飽和させた空気を $18\sim 41^\circ\text{C}$ の範囲の恒温槽で除湿し， 700 ml/min の通気量で湿度計に送り，乾湿球間の電位差を測定した。ある空気の水蒸気圧はその空気の露点における飽和水蒸気圧に等しいので⁴⁾ 除湿槽の温度での飽和水蒸気圧とその湿度で除湿した場合に実測された電位差の関係を，第3図，第4図に示した。

一第3，4図によれば，水蒸気圧 $y(\text{mmHg})$ と電位差 $x(\mu v)$ の間には，

Wet bulb 1 の場合

$$y_1 = 64.8393 - 0.0850 x \dots\dots\dots \text{実験式 I}$$

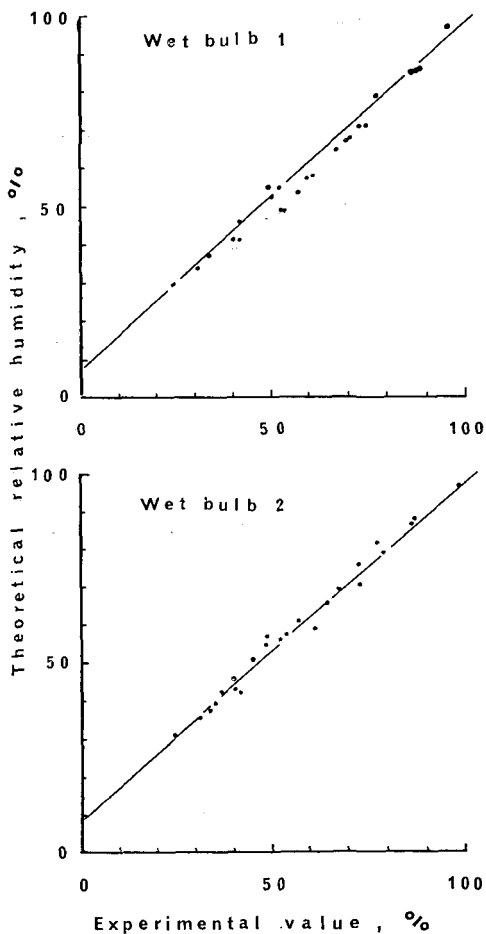
Wet bulb 2 の場合

$$y_2 = 64.6540 - 0.0867 x \dots\dots\dots \text{実験式 II}$$

で示される関係がみつめられた。

一方，実測された電位差を，Wet bulb 1 については， 40.86 ，Wet bulb 2 については 41.03 で除し，乾湿球間の温度差を求め，水蒸気圧 e を次式によって求めた⁴⁾。

$$e = e_w - 0.00070p(1 - 0.0056\theta_w)(\theta - \theta_w) \rightarrow$$



第5図 相対湿度の理論値と実測値の関係

理論値とは除湿槽の温度での飽和水蒸気圧を43.0°Cでの飽和水蒸気圧で除した値に100を乗じたもの、実験値とは電位差を温度差に換算し、乾湿球温度差から水蒸気圧を求め43.0°Cでの相対湿度に換算したものである。

- ただし
- e_w : 湿球温度での飽和水蒸気圧
 - p : 気圧
 - θ : 43.0°C (乾球温度)
 - θ_w : 湿球温度

このようにして求めた、水蒸気圧を43.0°Cにおける飽和水蒸気圧で除し、相対湿度の実

測値とし、除湿槽の温度での飽和水蒸気圧を43.0°Cでの飽和水蒸気圧で除した相対湿度の理論値と比較したのが第5図である。

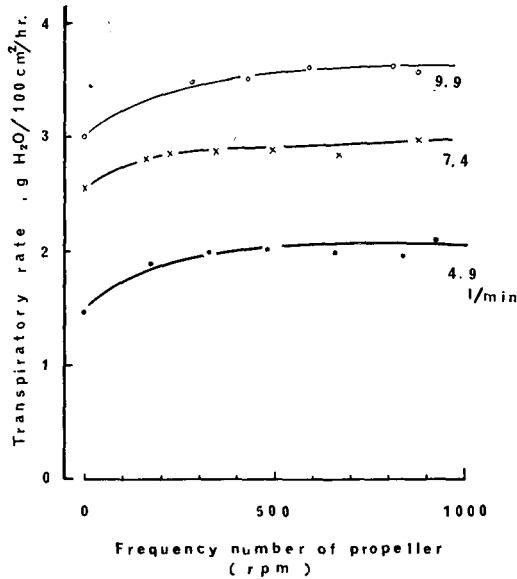
第5図によれば Wet bulb 1, 2 ともに相対湿度40%以上では理論値と実測値の差は5%以内であり、十分実用的に利用できることがあきらかになった。

(蒸散速度の算出)

実際の蒸散量は、同化箱に入る前の空気の一部を湿度計の Wet bulb 2 に導き、実測された電位差 (μv) を実験式Ⅱの x に代入し、水蒸気圧, y_2 (mm Hg) を、また同化箱から出てくる空気を湿度計の Wet bulb 1 に導き、実測された電位差を実験式Ⅰの x に代入して水蒸気圧, y_1 を求め、同化箱に入る前の空気と、同化箱から出てくる空気の水蒸気圧差 ($y_1 \sim y_2$) を計算した。このようにして得られた水蒸気圧差を次式の e に代入して 1 m^3 当り水蒸気量差を計算した。

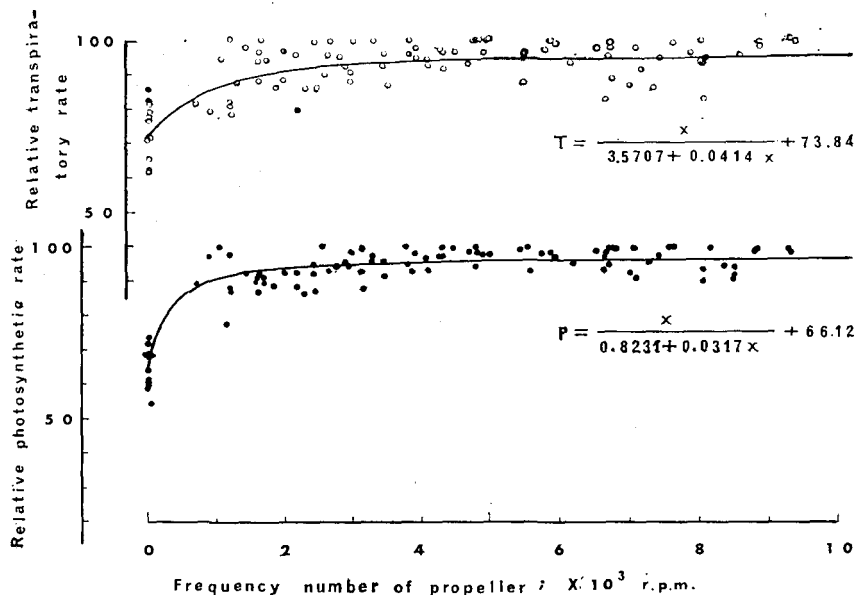
$$D = \frac{804 e}{P_o(1 + 0.00366 \theta)}$$

ただし (D は絶対湿度 (g/m^3)
 P_o は標準1気圧 (760mm Hg)
 θ : 気温 (この実験では43.0°C)



第6図 プロペラの回転数と蒸散速度の関係

葉位、個体を異にする桑葉について通気量 (図中の数字) を一定にしてプロペラの回転数を変化させた場合の蒸散速度と回転数の関係を示したものである。



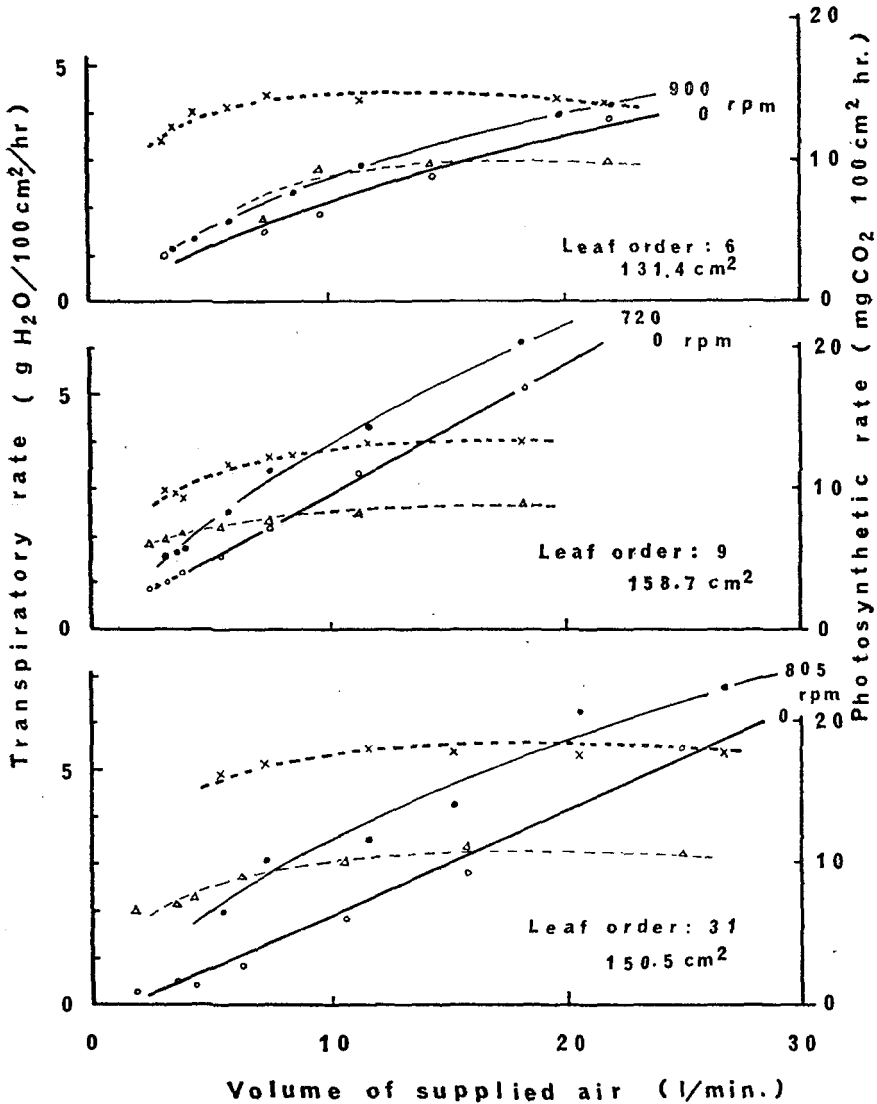
第7図 プロペラの回転数と相対蒸散速度および
相対光合成速度との関係

相対蒸散速度および相対光合成速度は各葉、各通気量ごとに最大の蒸散速度または光合成速度を100として指数化したものである。

上式によって求めた 1 m^3 当りの水蒸気量差を1時間当りの通気量に乗じて蒸散量($\text{gH}_2\text{O/hr}$)とした。また、この蒸散量を葉面積で除した値を蒸散速度とし、 $\text{gH}_2\text{O}/100\text{ cm}_2/\text{hr}$ の単位で表わした。

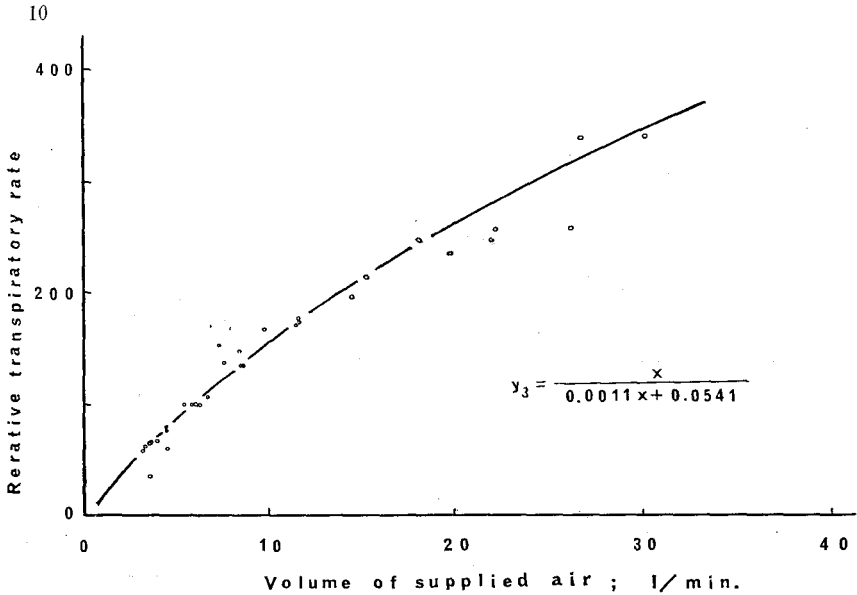
実験結果と考察

第6図は、同化箱内に取り付けたプロペラの回転数と蒸散速度の関係を示したものである。第6図によると、蒸散速度は葉位や個体により異なるが、プロペラを回転させれば蒸散速度が高まり、回転数250~300 rpmではほぼ最高に達し、それ以上に回転数を増しても蒸散速度は大きくならなかった。そこで、個体間の差をなくし、プロペラの回転数と蒸散速度の関係をみるため、回転数を変えて測定した蒸散速度について各葉、各通気量ごとに最大値を100とする指数に換算した。その指数を相対蒸散速度と呼び、相対蒸散速度とプロペラの回転数との関係を第7図に示した。なお、第7図には同様の方法によって求めた相対光合成速度とプロペラの回転数との関係も併記した。またこの実験では個体ごとに通気量がことなるが、プロペラの回転数を変化させる場合には通気量を一定に保った。第7図によれば、プロペラの回転数が300 rpmまでは回転数が増すにしたがって、相対蒸散



第8図 同化箱への通気量と光合成速度および蒸散速度との関係

- ×……× : プロペラを回転させた場合の光合成速度
- △……△ : プロペラを回転させない場合の光合成速度
- : プロペラを回転させた場合の蒸散速度
- : プロペラを回転させなかった場合の蒸散速度



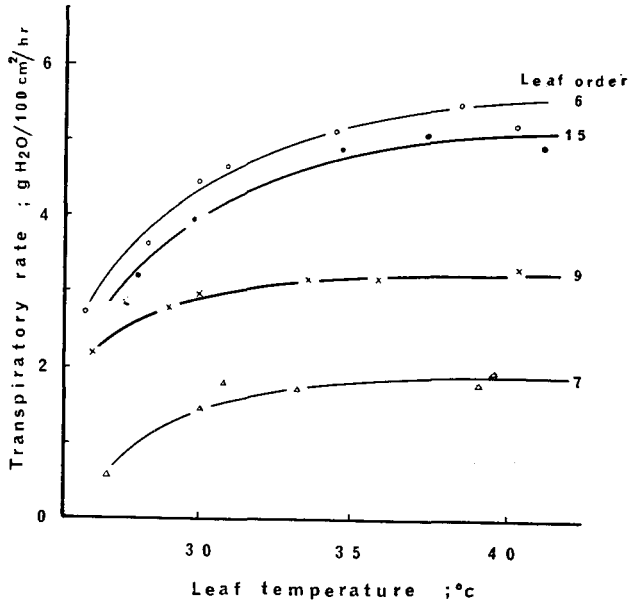
第9図 同化箱への通気量と相対蒸散速度の関係

相対蒸散速度は各葉ごとに通気量 5.0 ± 0.5 l/min での蒸散速度を 100 とする各通気量ごとの蒸散速度の指数である。

速度も大きくなるが、それ以上の回転数では相対蒸散速度が変化しないことがみとめられ、これは光合成速度についても同様であった。このことは光合成速度についてすでにあきらかにされているように蒸散速度についても葉の周辺の空気の流れ（風）の影響がみとめられ、ある程度以上の風速であればその効果に差がないことを示しているといえよう。なお、葉温はプロペラを回転させなかった場合には $2 \sim 3$ °C 程度高くなる傾向を示したが、回転している場合にはほぼ一定であった。

次に同化箱内の空気をプロペラの回転数 300 rpm 以上でかくはんした場合と、しなかった場合について、それぞれ同化箱への通気量を変化させ蒸散速度を測定し、通気量と蒸散速度の関係を検討した。その結果は、第8図に示すとおりである。なお、第8図には同時に測定した光合成速度と通気量の関係も付記した。

第8図によると、蒸散速度は葉位、個体により異なるが、通気量が大きくなるにしたがって高まる傾向を示している。一方、光合成速度についてみると、通気量 $7 \sim 10$ l/min ではほぼ最大に達し、それ以上通気量を多くしても、光合成速度はほとんど変化しなかった。また、通気量と蒸散速度の関係は、プロペラを回転させない場合には単純な比例関係であるが、プロペラを回転させた場合には、二次式で示される曲線の関係にあることがみとめられた。これは通気量が、同化箱内の風速と湿度に影響を与え、その結果が蒸散速度に反映していることを示唆しているものと考えられる。そこで、プロペラを回転させた場合に



第10図 葉温と蒸散速度との関係

ついて、各葉ごとに、通気量 5.5 ± 0.5 l/min での蒸散速度を 100 とし、各通気量ごとの相対蒸散速度を求め、相対蒸散速度 (y_3) と通気量 (x) の関係を示したのが第9図である。第9図によると、相対蒸散速度と通気量の関係は、

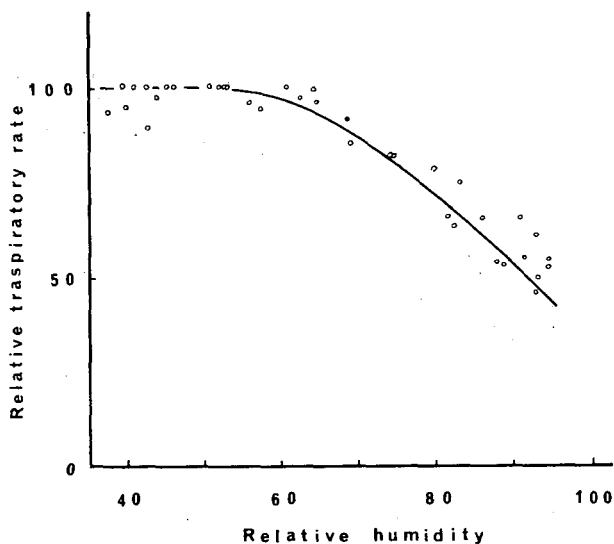
$$y_3 = \frac{x}{0.00x + 0.0541} \dots\dots\dots \text{実験式 III}$$

で示される実験式とよく一致することがみとめられた。この関係を用いれば、ある通気量 (x_a) で実測された蒸散速度 (T_a) が与えられれば、他の任意の通気量 (x_n) の場合に期待される蒸散速度 (T_n) は次式によって推定することができる。したがって次式を利用すれば、ある任意の通気量で実測された蒸散速度を他の任意の通気量の場合に期待される蒸散速度に補正することができるはずである。

$$T_n = T_a \frac{y_3(n)}{y_3(a)}$$

ただし $y_3(a)$ は通気量 x_a における相対蒸散速
 $y_3(n)$ は実験式 III の x に x_n を代入して得た値である

第10図は、葉位や個体を異にする桑葉について、それぞれ葉温を変化させた場合の蒸散速度と葉温の関係を示したものである。この場合の通気量は各葉ごとに異なるが、その範囲は $4 \sim 10$ l/min であり、一葉ごとにみればほぼ一定の通気量であった。またプロペラは 350 rpm 以上で回転させた。



第11図 同化箱に入る前の空気の相対湿度と相対蒸散速度の関係

相対湿度は葉温での飽和水蒸気圧に対する相対値である。また相対蒸散速度は相対湿度50±5%での蒸散速度を各葉ごとに100とし、他の相対湿度条件下での蒸散速度を指数化したものである。

図示するにあたっては、通気量が蒸散速度に大きな影響を与えていることがすでにあきらかなので、実験式Ⅲを用いてすべて10 l/minの通気量で期待される蒸散速度に補正した。

第10図によれば、通気量に対する補正をおこなってもなお、個体や葉位によって、蒸散速度に差がみとめられた。また各葉ごとに葉温と、蒸散速度の関係をみると、葉温35°C附近までは葉温の上昇に伴い蒸散速度も高まっているが、35°C以上、42°Cまでの範囲では葉温が上昇しても蒸散速度はほとんど影響を受けていない。これは植物にとって蒸散が潜熱の放出によって体温の調節機能をはたしていると考えれば、桑葉においてはその機能の限界が葉温35°C附近にあるのではないかという可能性を示唆していると考えられる。

蒸散速度は桑葉周辺の空気中の相対湿度、より直接的には飽和差に大きく影響されると考えられる。そこで同化箱に入る前の空気中の水蒸気圧をその際の葉温における飽和水蒸気圧で除した相対湿度と蒸散速度との関係を第11図に示した。第11図では蒸散速度の個体間差を消去するため測定に用いた各葉ごとに、相対湿度50±5%の場合の蒸散速度を100とする相対蒸散速度に換算してある。

第11図によれば、相対湿度60%以上の場合には相対湿度が低下するにしたがって、蒸散速度は高まるが、相対湿度60%以下では相対湿度の変化が蒸散速度にほとんど影響を与え

ていないことがみとめられた。

ただ、この実験では 同化箱に通気する空気の相対湿度を十分コントロールしていないため、低葉温で50～60%の相湿度を実現した場合の測定例が含まれていないので、比較的高い葉温に偏ってきらいがある。そのため、葉温の変化に伴う蒸散速度の変化と、相対湿度の変化に伴う蒸散速度の変化が十分あきらかでない。したがって、両者の効果を相対的に評価することができなかった。

すでにのべたように、同化箱に通気する空気の水蒸気圧を十分コントロールすることができなかったため、全体として、比較的高い相対湿度条件下での実験結果となった。したがってただちに、一般的な結論を導くことは危険であるが、以上の結果を総括すれば下記のとおりである。

蒸散速度と光合成速度の関係は、葉温についてみると、蒸散速度が葉温35℃付近まで葉温の上昇と共に高まっていくのに反し、すでに報告したように³⁾ 光合成速度は葉温27℃付近で最大に達し、それ以上の高温ではむしろ低下する関係にある。また通気量との関係でみると、光合成速度は比較的すくない通気量で最大値に達し、それ以上通気量を多くしても光合成速度はほとんど変化しないのに対し、蒸散速度はかなり多量の通気量になっても、最大値に達して安定する現象がみられなかった。この原因はおそらく、光合成速度が空気中の炭酸ガス濃度0.03%程度という比較的低い炭酸ガス分圧を基準として生ずる濃度勾配に拡散速度が規定されるのに反し、蒸散速度が比較的大きな水蒸気分圧を基準として生ずる濃度勾配によって、その拡散速度が規定されることによるものであろうと考えられる。したがって、蒸散速度の測定を通じて気孔の炭酸ガス拡散抵抗を測定しようとする考え方は合理的ではあるが、かなり厳密な測定条件の設定が前提とならなければならないと思われる。なお、葉面での拡散抵抗については第7図からもあきらかなように、同化箱内の空気をプロベラでかくはんすることによって、かなり効果的に小さくすることができるとみなされる。

第9, 10, 11図からあきらかなように、蒸散速度は通気量、葉温および相対湿度に大きく影響されており、同化箱内をプロベラでかくはんした場合には、通気量はおそらく同化箱内空気中の相対湿度を支配する要因として大きな意味を持っていると考えられる。したがって同化箱に送られる空気の水蒸気圧を低くし、同化箱内での相対湿度を50～60%程度まで低下させれば、通気量の持つ意味ははるかに小さくなるのではないかと考えられる。

また葉温は空気中の水蒸気圧を一定にすれば葉温が高いほど相対湿度が低下することになり、それだけでも蒸散速度を大きくする要因となるが、この点ではさらに葉温と水蒸気圧を同時に変化させ、いろいろの葉温で相対湿度を一定に保った場合の蒸散速度の変化をしらべる必要がある。この実験の範囲では葉温35℃付近で蒸散量が最高に達し、それ以上葉温を高めても蒸散速度は高まらなかった。このことは、葉温を高めれば当然、その周辺の空気の水蒸気圧との間の勾配を大きくし、その結果として蒸散速度が高まるが、ある程度以上に蒸散量が增加すれば、たとえば葉への水の供給が制限要因となっ、蒸散速度をそ

れ以上高めさせないというような生物的機能の限界が作用してくることも考えられる。この場合、蒸散による体温調節機能の大きさと、その限界などは興味深い問題といえよう

摘 要

1) 桑葉の蒸散速度を測定するため、銅・コンスタンタン熱電対を用い乾湿球型湿度計を試作し実験をおこなった。その結果この方法によってかなり正確に、連続的に蒸散量の測定が可能であり、これは植物葉や蚕体などからの蒸発散速度の測定に利用できると考えられる。またこの方法によって、切断葉の秤量に限られていた葉位ごとの蒸散速度の測定についても、着葉状態のまま測定できることがあきらかになった。

2) 桑葉の蒸散速度に影響を与える条件として風、空気中の相対湿度、葉温があげられるが、風の効果については二つの要因が考えられる。その一つは葉面に比較的湿度の高い空気の幕が作られることによって蒸散が阻害されるが、葉がフラッタリングを起こすことによってこの抵抗をなくすること。もう一つは相対湿度のよりマクロな変化を引き起こすことであるが、前者は単葉を密封した場合でも、内部をプロベラでかくはんすることによって除去できることがあきらかになった。後者の効果については通気量と相対湿度を変化させてより詳細な実験が必要である。

3) 蒸散速度におよぼす葉温の影響については、葉温35℃までは葉温が高まるにしたがって、蒸散速度も大きくなったが、35℃以上では葉温が高まってもほとんど蒸散速度に変化がおこらなかった。その原因は十分あきらかにはなっていない。

4) 葉の周辺の空気の相対湿度と蒸散量の関係は、全体として高温にかたよったため、必ずしも十分あきらかにできなかったが、同化箱入口での空気中の水蒸気圧を葉温での相対湿度に換算した場合には、相対湿度100%から60%までは湿度の低下とともに蒸散速度が高まり60%以下では蒸散速度にほとんど影響を与えなかった。

引用文献

- 1) 加藤一郎・内藤文男・谷口利策・鴨田福也, 1910 東海近畿農業試験場研究報告 栽培第2部第2号
- 2) 村上 毅・武田友四郎, 1973 日蚕雑 42巻 第2号 157~
- 3) 村上 毅・武田友四郎, 1973 日蚕雑 (投稿中)
- 4) 松代正三他 工業計測技術大系 10 湿度・水分測定 日刊工業新聞社
- 5) R. O. Slatyer and J. F. Bierhuizen, 1964 plant Physiology 1051~