

風速と光合成に関する研究(7)

誌名	農業氣象
ISSN	00218588
著者	矢吹, 万寿 原藺, 芳信
巻/号	34巻2号
掲載ページ	p. 87-94
発行年月	1978年9月

風速と光合成に関する研究 (7)葉面境界層の構造 II

矢吹万寿・原 藺 芳 信

(大阪府立大学農学部)

Studies on the Effects of Wind Speed on Photosynthesis.

(7) The structure of boundary layer near leaf surface (II)

Kazutoshi YABUKI and Yoshinobu HARAZONO

(College of Agriculture, University of Osaka Prefecture, Sakai, Osaka)

1. ま え が き

葉面境界層が葉面上の拡散抵抗として作用し、光合成量に影響を及ぼしていることが明らかにされている。葉面境界層に関して筆者らは、シュリーレン写真法(矢吹ら, 1970)および微小熱線風速計(矢吹・西岡, 1973)を用いて解析を行って来た。

大気と葉面との物質交換に関する研究においては、室内での模型実験から得られた拡散抵抗や物質輸送係数等の値と、野外で求められたそれらの値との間に差異が見られるのみならず、模型実験の結果だけを比較してもかなりの違いが見られる。これらの差異の原因には、実験結果をまとめる際に層流境界層理論から導かれた式の指数や係数を補正するだけで準用していることや、境界層理論に立脚しているにもかかわらず物質交換や熱伝達が行われる個々の境界層内の状態の検討が不足していることなどが考えられる。

本研究では、葉面境界層を通して行われる物質交換量はその周囲の流れの影響を受けると考え、主流と葉面について種々の条件下で葉面境界層の構造や流れの状態を詳細に解析するとともに、物質交換の機構を解明して従来の報告に見られる結果の差異の原因を明らかにしようとしたものである。このために、特殊な実験装置を試作し、これを用いて境界層の構造や厚さ等の測定を行い、葉面境界層を通して行われる物質交換量を推定することを試みた。なおこの研究を遂行するにあたり、大阪府立大学航空工学科西岡博士より多くの示唆を得た。謹んで感謝の意を表するものである。

昭和52年6月11日 全国大会(盛岡)にて発表

昭和53年6月15日 受理

2. 実験装置および方法

2.1 装置および流れの可視化の方法

葉面境界層近傍の流れを視覚的に調べるために循環型の回流水槽を試作した。本装置は水槽本体、動力部および流れの可視化を行うための周辺装置からなっている。これらの概要をTable 1に示す。

Table 1. Outline of the water channel.

form	rotation type
dimensions	L×W×H: 314×174×50 cm
measuring part	H×W: 40×50 cm rectangular section, length: 150 cm
velocity	1.4~8.0 cm/s (equivalent to 20~125 cm/s in air)
power	alternating current motor: 250 w

流れの可視化の方法としては、流体現象を定量的に把握し易い水素気泡法を採用した。この方法は、測定部に置いた陰陽両電極間に直流電流を流し、使用流体である水を電気分解した時、陰極側に発生する水素気泡をトレーサーとして用いるものである。(浅沼ら, 1965; 種子田, 1975)。

本実験では、陰極に直径15 μ のタングステン線を用いて測定対象の上流部に鉛直に張り、陽極にはニッケル板を用い水槽測定部の底面に水平に置いた。両電極間には間欠的なパルス電流を流した。パルス周波数は流速に応じて4Hzから15Hzまで変化させ、また、電圧も水素気泡の発生状況に応じて30Vから250Vの範囲で変化させた。

2.2 実験および解析の方法

本実験では気流の代りに水流を用いたが、気流と水流との境界層が力学的に相似となるように、双方の流れ条件の Reynolds 数 ($Re = Ul/\nu$) と Strouhal 数 ($S = UT/l$) を同一に保って水流速度を決定した。ここで U は流速、 l は模型葉の代表長、 T は葉の振動周期、 ν は流体の動粘性係数である。

流速は植物群落内外で一般に観測される 25 cm/s ~ 110 cm/s の風速に相当する 1.5 cm/s ~ 7.2 cm/s を設定した。以後、水流速度を気温 25°C の条件で風速に換算した値を () 内に示す。

実験対象葉としては、厚さ 0.08 cm の銅板を切断して作った矩形および楕円形葉を用いた。矩形模型葉は流れに沿った長さ (x) とこれに直角方向の幅 (y) がそれぞれ 7.5 × 10, 7.5 × 5, 7.5 × 2.5, 7.5 × 1, 5 × 10 cm の 5 種とし、楕円形模型葉は短軸 (x) 5 cm, 長軸 (y) 10 cm とした。

実験はこれらの模型葉を固定し、主流と平行の水平状態 (迎角 0°), 迎角約 7°, 約 14°, 約 30° の場合、および葉が風に揺れ動く場合を模擬して振動させた場合について行った。

水槽中における葉の振動モデルを決めるために、筆者らは大阪府立大学園場でポプラ、ナス、サンゴジュ等の葉の揺らぎを観測した。この結果やミカン葉に関する報告 (長谷場, 1975) 等から、比較的硬葉の固有振動数は平均して約 4 Hz であることがわかった。振動の大きさは風速・風向の変動によって変化していたが、大きい振幅の出現頻度は少なかった。実験モデルの水槽中での振動数は相似条件から 0.25 Hz とし、振幅は長さ 7.5 cm の模型葉で後端を軸に上下約 7° の比較的小さい振幅として周期的に強制振動させた。

境界層近傍の流れの状態は水槽側面の観測窓から観察写真撮影された。この時、水素気泡の発生する陰極線の位置を幅 (y 軸) 方向に移動させることによって、葉の中心部から側端部まで任意の断面の流れを可視化し写真撮影した。写真から流速・境界層の厚さ等を求めた。

3. 結 果

各種の条件下における流れの状況を写真で示すが、図中、水は左から右へ流れる。縦縞の線は間欠的な電流によって生じる水素気泡の列で、境界層内外の流速の垂直分布を示している。同一流速でも間欠電流の周期が長くなると、気泡列の間隔は広くなる。

3.1 模型葉を固定した場合の境界層

Fig. 1 は模型葉 (5 × 10 cm) を流れに平行に固定した

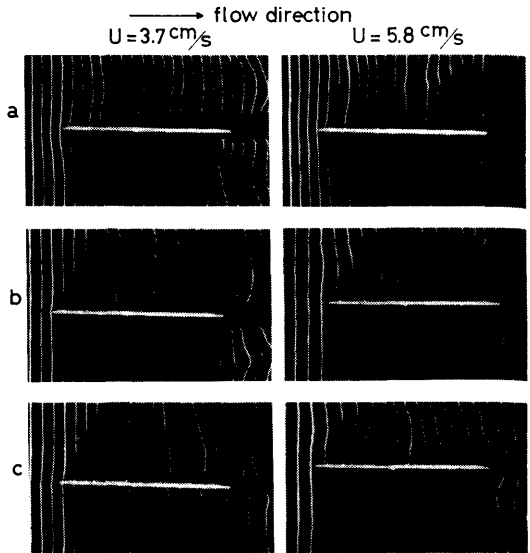


Fig. 1. Profiles of water flow revealing the boundary layer on the model leaf (7.5 × 5 cm), incidence $\alpha = 0^\circ$. The flow speeds $U = 3.7$ cm/s and 5.8 cm/s correspond to wind speeds of 60 cm/s and 90 cm/s, respectively. a: section along the central axis parallel to flow, b: section at 0.5 cm inner from the side tip, c: section at the side tip.

場合 (迎角 0°) の流れの状況を示した写真である。Fig. 1-a は模型葉幅方向の中心線断面を、b は模型葉側端から 0.5 cm 内側の断面、c は最側端における断面を示している。境界層内の流速の垂直分布には乱れが見られず層流の境界層構造であることがわかる。迎角 0° の場合、境界層は流速 1.5 ~ 7.2 cm/s (風速約 25 ~ 110 cm/s, Re 数約 1000 ~ 6000) の範囲で層流構造であると判断された。側端から 0.5 cm 内側の境界層の厚さは流速の速い 5.8 cm/s (風速約 90 cm/s) の場合でも中心線断面の厚さとほとんどが差がないが、最側端では薄くなっており、周縁効果 (edge effect) 現象が見られる。

同じ模型葉を迎角約 7° で固定した場合の境界層の状態を Fig. 2 に示す。Fig. 2-a は前と同様に中心線断面の写真である。流速の違い 2.6 cm/s (風速約 45 cm/s) の場合の境界層は、上下両面側とも層流状態であるが、流速 3.7 cm/s (風速約 60 cm/s) の場合には上面側に剥離が生じ乱流境界層に遷移している。この場合、模型葉前縁付近は乱流構造であるが後縁に近づくと乱れは収束し、流速分布は層流構造に近づく。流速 5.8 cm/s になると、剥離によって上面側に生じた渦は後縁へ進むにつれて発散し大きい乱渦となる。迎角約 14° の場合を Fig. 3 に示

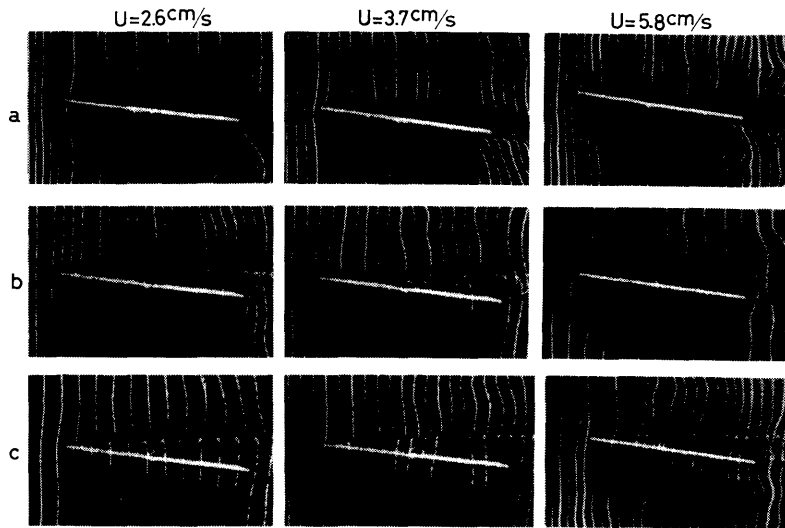


Fig. 2. Same as Fig. 1, for incidence $\alpha = 7^\circ$.
 $U = 2.6 \text{ cm/s}$ corresponds to wind speed of 45 cm/s .

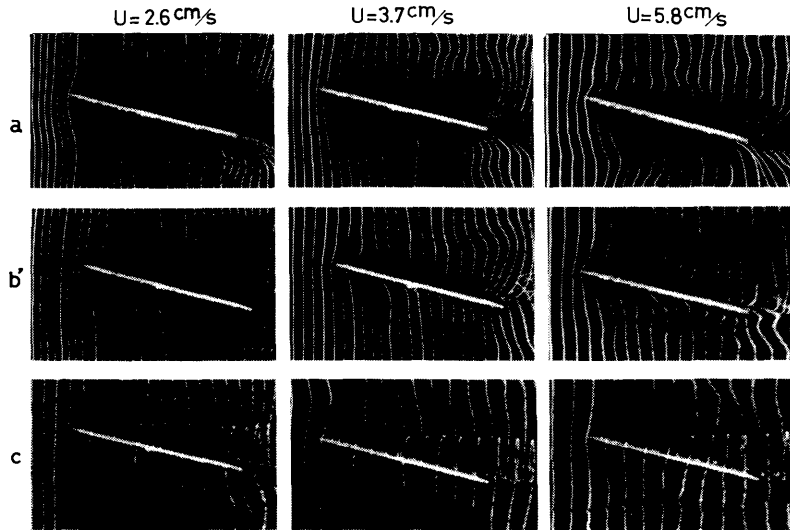


Fig. 3. Same as Fig. 1, for incidence $\alpha = 14^\circ$.
 b' : section at 1.5 cm inner from the side tip, which is different from Fig. 2-b.

す。この場合には低流速 2.6 cm/s (風速約 45 cm/s) でも上面側の中心線断面は乱流境界層になっており、乱れの程度は流速が速くなるほど大きくなる。

一方、主流が直接当たる模型葉下面側は、全体的な流速分布に際立った乱れはなく、層流の境界層構造と判断できる。しかし境界層の厚さは前縁からの距離が長くなっても増加せず、全体的に薄い層状のままで、一般の層流境界層の厚さのように前縁からの距離の 0.5 乗には比例しない。

迎角のある場合、中心部から側端部に近づくにしたがって模型葉上面側の流速分布の乱れは収束し、境界層構

造は乱流から層流へ移る。また側端近傍では下面側から上面側へ流れ込むら旋状の巻込み渦の発生が見られる。この周縁効果による巻込み渦は流速、迎角の増加に伴って顕著となり、流速 5.8 cm/s (風速約 90 cm/s)、迎角 14° の場合には模型葉面の約 40% の範囲にまで及んでいる。

楕円形模型葉についても同様に調べたが、境界層の構造や流れの様子は矩形葉のそれとほぼ同じであった。ただ、迎角のある場合に巻込み渦の発生が矩形葉に比べて中心寄りであり、側端では乱れが収束し巻込み渦も小さくなっていることが若干の違いであった。周縁効果の及

ぶ範囲も矩形葉の場合と同様で、迎角 14° の場合に約 40% の面積に及んでいる。

主流方向と直角な葉面境界層の断面を Fig. 4 に示す。迎角のある場合、上面側の境界層は流速、迎角の増加に伴って、中心付近の厚さが厚い山型の断面形状となり平らな層状でないことがわかる。下面側は側端部から中央部まではほぼ同じ厚さの境界層となっている。側端の後半部では巻き渦のために境界層の厚さを明確に把握できなかった。しかし、側端前半部では境界層の厚さを測定することができ、この部分の厚さは中心部に比べて薄かった。巻き渦の状態から後半部でも前半同様に中心部より薄くなっていると推測し、Fig. 4 には点線で推測部分を描いた。

周縁効果の程度を知るために、長さが等しく (7.5 cm)

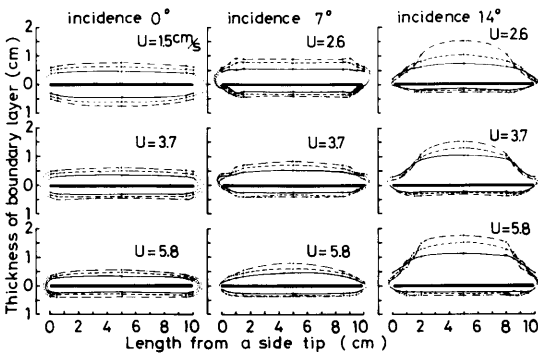


Fig. 4. Extent of the boundary layer at different distances from the leading edge.

— : 2cm from the edge,
 - - - : 4cm from the edge,
 - · - : 6cm from the edge.
 — : section of the model leaf.

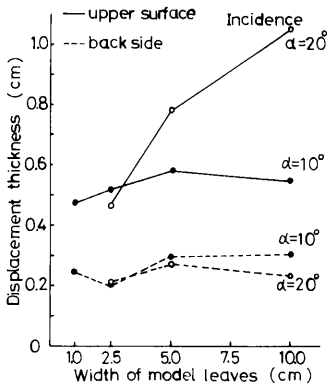


Fig. 5. Edge effect on the displacement thickness. The model leaves are rectangular and the length is 7.5cm.

幅だけが異なる模型葉 4 種 (幅 : 10, 5, 2.5, 1 cm) を用いて、迎角 $10^\circ, 20^\circ$ 、流速 4.7 cm/s (風速約 75 cm/s) の条件下で境界層の厚さを求めた。これを Fig. 5 に示す。縦軸は、葉面境界層を前縁から後縁まで同一厚さの薄膜と見なした場合の厚さに相当する排除厚さ (displacement thickness) であり、葉全体の境界層の体積を葉面積で除したものに等しい。葉幅が小さくなると、上面側の排除厚さは薄くなり周縁効果は顕著になる。下面側の厚さは葉幅に関係なくほぼ一定した薄い層であることがわかる。

3.2 振動する模型葉の境界層

周縁効果の影響が中央部まで及ばないと考えられる縦横比 2 (5×10 cm) の矩形模型葉を振動させた場合の中心線断面における境界層の連続写真を Fig. 6 に示す。これは模型葉の振動 1 サイクル間に撮影した約 16 枚の連続写真の一部である。

Fig. 6-I は流速 2.4 cm/s (風速 40 cm/s)、Fig. 6-II は流速 5.6 cm/s (風速 87 cm/s) の場合の境界層の状態である。剥離渦は模型葉前縁付近で発生し、模型葉に沿って下流へ移動しているが、I と II とでは境界層

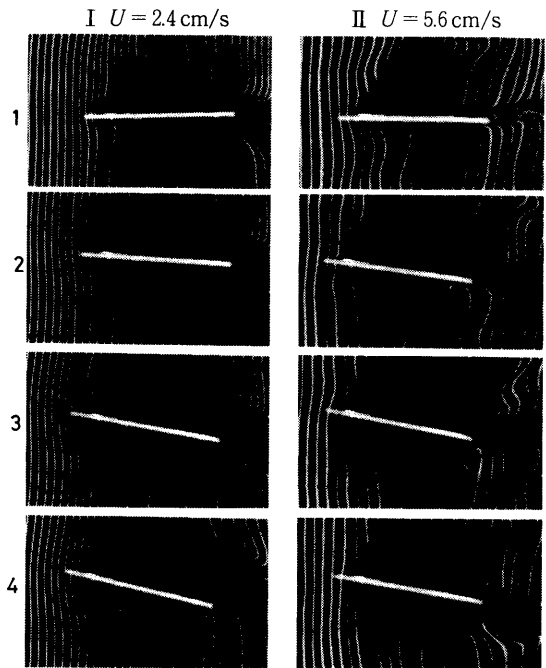


Fig. 6. Continuous photographs of boundary layer under fluttering condition, which display the feature of the central section; frequency=0.25Hz, amplitude= $\pm 7^\circ$. The flow speeds $U=2.4$ cm/s and 5.6cm/s correspond to wind speeds of 40cm/s and 87cm/s, respectively.

の様子に違いが見られる。即ち、流速 2.4 cm/s の場合には渦の移動に伴って、片側は葉面の大部分が渦に覆われた乱流境界層、反対側は流速分布の乱れが少ない層流の境界層構造となり、それぞれ迎角の変化に従って交互に出現する。乱流構造の場合に渦の部分を含めた境界層の厚さは極めて厚いが、層流構造の場合は流れに平行に固定した場合と同等の厚さであった。一方、流れを速くした流速 5.6 cm/s の場合には、剥離した渦はすぐに流れ去り葉面を覆うことはなく見かけ上層流の境界層構造である。この時の境界層の厚さは、流れに平行に固定した場合の厚さとほぼ同じであった。

Fig. 6と同じ条件で振動する場合の側端部での境界層の状況を Fig. 7 - I, II に示す。側端部では、迎角をつけて固定した場合と同様に巻き込み渦が発生しているが、振動する場合は迎角が周期的に変わるために、ら旋状の巻き込み渦は紡錘状になっている。ら旋渦の回転方向は模型葉の振動の半周期毎に逆転し、側端部での境界層の状態を複雑なものにしている。しかし、巻き込み渦が葉面に直接接触することはなく、渦と模型葉表面との間に流れが侵入できない部分のあることが観察された。これらの様子は I, II ともほぼ同様で、流速の違いによる差異は見られなかった。

渦を除いた層流部分のみの葉面境界層の厚さを側定し、各境界層断面における排除厚さを求めた。排除厚さとそ

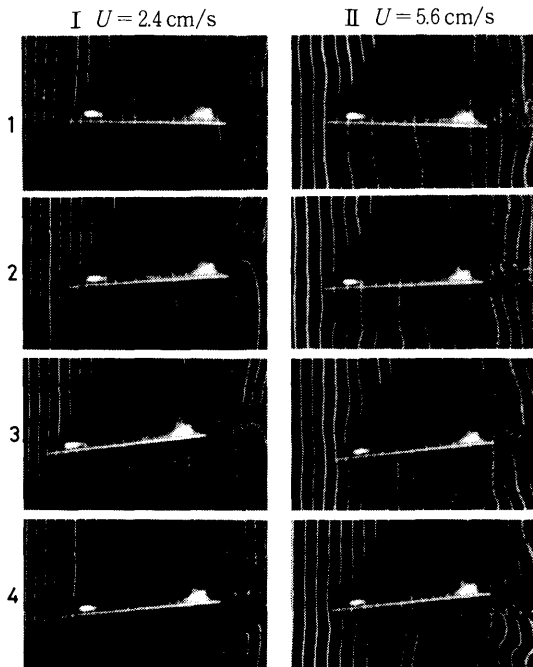


Fig. 7. Same as Fig. 6, for the profiles at the side tip.

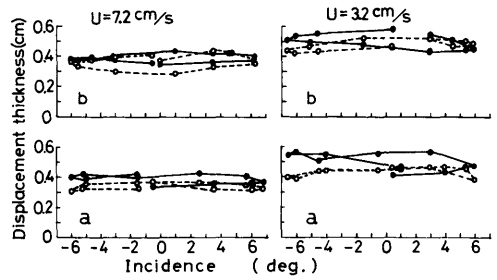


Fig. 8. Showing relation between displacement thickness and incidence under fluttering condition, frequency=0.25Hz, amplitude=±7°. Solid and dashed lines indicate the values of the upper and the lower surfaces of the model leaf, respectively.

の時の模型葉の迎角との関係を示したのが Fig. 8 である。Fig. 8 は、縦 7.5 cm、横 5 cm の矩形模型葉を流速 3.2 cm/s (風速 55 cm/s) と 7.2 cm/s (風速 110 cm/s) の流れ条件下で周期振動させた場合の結果であるが、境界層の状態は Fig. 6 の I, II にそれぞれ対応していた。境界層の状態が異なる 2 つの場合とも、迎角の変化にかかわらず排除厚さはほぼ一定値を保っている。これは、模型葉を迎角をつけて固定した場合に、流速、迎角が増すと上面側の境界層は厚くなって乱流遷移し、下面側では薄い層流構造であったことは対照的である。

4. 考 察

4.1 固定した模型葉

毛茸や葉脈の存在が、境界層の構造に影響を及ぼすかどうか問題となるが、 Re 数 1000~6000 の流れ条件下で平滑面とろ紙面との境界層の状態を比較した場合、その影響は認められなかった。葉表面から 0.1 cm 位の境界層の底層部(粘性底層)は、水素気泡法を用いて流れの可視化を行っても、明確にその状態を把握することが困難であった。ろ紙面の粗さはこの底層内に埋れてしまい、毛茸程度の突起と粘性底層の構造との関係といった微細な解析は行えなかった。しかし、葉面の温度分布を測定した結果では葉脈の影響が見られることから、微視的に考えるならば、葉脈が粘性底層の構造に影響を及ぼし、局所的な熱伝達に変化が生じたものと推察される。

迎角をつけて模型葉を固定した場合、下面側では流速の垂直分布を示す水素気泡の列に乱れがなく、境界層は層流構造を維持している。しかし、その厚さは前縁からの距離の 0.5 乗に比例して厚くならないことや、この傾向が流速、迎角の変化に無関係であることから、下面側の境界層は層流と言うよりむしろ粘性底層に近いものだと考えられる。

粘性底層内の流速は非常に遅く、また壁面からの距離に比例して極めて緩やかに増加する (Rotta, 1972) ことが知られている。このことから、粘性底層は境界層における熱伝達や物質交換に大きい抵抗作用を示すと思われる。したがって、迎角をつけて固定した場合の下面側の境界層は質的に大きい拡散抵抗値を持つ部分となる。しかし、この場合の排除厚さは流れに平行に固定した場合のそれより薄く、また側端付近では巻込み渦によって境界層厚さはさらに薄くなっているから、ここでの境界層抵抗値は流れに平行な場合より若干小さくなるものと考えられる。

上面側では、約 7° の小さい迎角でも風速 45 cm/s に相当する流速で乱流境界層に遷移している。実際の植物葉が風向にランダムな傾きを持つことから考えて、大部分の葉面境界層は乱流遷移していると推測される。乱流遷移した境界層は流速が増加しても更に構造的な変化を生じることはなく、乱流構造の底部に見られる粘性底層の厚さが若干薄くなるだけである。

上面側における物質交換量は乱流境界層および粘性底層の厚さに影響される。迎角 $7^\circ \sim 14^\circ$ の場合には、乱流渦拡散と周縁での巻込み渦による強制的な拡散とが同時に働くため、境界層抵抗値は小さくなり物質交換は促進されると考えられる。しかし、迎角が更に大きくなると乱流境界層は厚くなり巻込み渦も強くなるが、渦と葉面との間の流速の遅い部分も拡大する。この流れの停滞域は粘性底層と連続しており、拡散抵抗値の大きい死水域として取扱える。したがって迎角が大き過ぎる場合の上面側の境界層では、巻込み渦などの乱れによる物質交換の促進作用と死水域の拡大による抵抗の増加とが平衡し、見かけ上流れに平行な場合の層流境界層抵抗値とはほぼ等しくなり物質交換量も同等になる (Parkhurst et al., 1974) ものと考えられる。

本実験により、葉の側端部では境界層が薄くなり、また迎角を持つと乱流境界層に遷移したり側端で巻込み渦が発生して、境界層の断面形状は山型になることが明らかにされた。このことから、葉における物質交換量や熱伝達量は葉の中央部より側端部の方が多くなると推定できる。葉が小さい場合には側端部での物質交換の比率が増すから、葉の大きさが物質交換速度に重要な意義を持

つことが考えられる。一方、葉幅が狭くなると周縁効果は顕著となり排除厚さも減少することから、同一長さの葉でも葉幅が狭いほど、また切れ込みの多い葉ほど葉面境界層での物質交換量は多くなるものと推測される。

4.2 周期振動する場合の境界層

模型葉を周期的に振動させた場合、境界層の構造は乱流に遷移し易いと考えて実験を開始したが、本実験の結果では層流またはそれに準ずる場合が多く、振動によって境界層の乱流遷移が早まることはなかった。

低流速の場合に片面が渦に覆われた乱流境界層構造になる場合があったが、これは剥離渦が模型葉の振動に引きずられてその移動が停滞したために起きた現象と考えられる。これに対して高流速では、渦は主流によって葉面上を押し流され、境界層構造は層流構造になったものと考えられる。

葉面近傍では模型葉の振動に伴って境界層領域の膨張、圧縮が繰返されることから、振動時の境界層は非定常な圧力変化の影響を受けていることが考えられる。したがって振動時の境界層構造は見かけ上層流であったが、ここでの境界層抵抗値は非定常な圧力変化のために普通の層流境界層より小さくなるのが推測できる。

一方、剥離によって生じた渦は主流より速い円周速度で回転しており、渦内での拡散抵抗値は小さいと考えられる。したがって振動する場合には、層流および粘性底層が境界層抵抗の大部分を占めることになる。Fig. 8 では渦の部分为非流体部分と見なして除外した。

振動する場合の葉面境界層における物質交換を考察するために、Fig. 8 に示した排除厚さを振動の一周期全体について平均した値と、これと同じ流れ条件下で模型葉を流れに平行に固定した場合の排除厚さとを比較した。これを Table 2 に示す。中心部より側端部の排除厚さが厚くなっているが、これは渦の形状によるものと思われる。すなわち、渦は中心部の直径が大きい紡錘状であるために、側端部で境界層厚さが減少しているにもかかわらず、渦領域を除外した中央断面の排除厚さの方が薄くなったものである。Table 2 を基に、同じ条件における層流および粘性底層の境界層領域から、葉面全体の平均排除厚さを求めたのが Table 3 である。

流速 3.2 cm/s (風速 55 cm/s) の場合、中心付近の境

Table 2. Mean displacement thickness of boundary layer at different sections (cm).

equivalent wind velocity (cm/s)	rigid leaf (central section) $\alpha = 0^\circ$	fluttering leaf ($f = 0.25 \text{ Hz}$)		
		central section	1 cm inner from tip	side tip section
55	0.56	0.47	0.50	0.33
110	0.37	0.36	0.37	0.27

Model leaf is 7.5×5 cm rectangular plate.

Table 3. Mean displacement thickness on model leaf (cm).

equivalent wind velocity (cm/s)	rigide leaf ($\alpha=0^\circ$)		fluttering leaf ($f=0.25\text{Hz}$, $A=\pm 7^\circ$) including edge effect
	theoretical value	including edge effect	
55	0.56	0.54	0.36
110	0.37	0.36	0.34

A: amplitude.

界層厚さは流れに平行に固定した場合に比べて約20%薄くなり、側端部では周縁効果加わるために、葉面全体の平均排除厚さは固定した場合より約35%減少する。したがってこの場合の境界層抵抗値は、剥離渦による低減効果と振動による非定常効果とによってかなり小さくなり、葉面境界層における物質交換量は固定した場合に比べて最大1.6倍になると推定できる。

一方、高流速7.2cm/s(風速110cm/s)の場合、中心付近の境界層厚さは固定した場合とほぼ同じになり、中心部の排除厚さの比較では振動による境界層抵抗の減少効果は認められない。しかし高流速では周縁効果が顕著であるために側端部の境界層が薄くなり、葉面全体の平均排除厚さは約10%低下する。結局、この場合の葉面境界層抵抗値は周縁効果と若干の非定常効果によって固定した場合より約10%減少するに過ぎず、葉が振動しているにもかかわらず物質交換量はそれほど増加しないことになる。

振動する場合の葉面境界層における物質交換については、固定した場合の 1.4 ± 0.1 倍に増加するという報告(Schuepp, 1972)があり、また熱伝達に関しては、固定円板に比べて約6%以下のNusselt数の増加しか見られない(Parkhurst et al., 1968)ものから、熱伝達の抵抗が固定した場合の40%にまで減少する(Parlange et al., 1971)という報告まで、結果にかなりの相違が見られる。本実験からわかるように、葉が振動する場合でも流れの条件によって境界層抵抗の値には差異が生ずる。したがって、従来の報告に見られる結果のばらつきは境界層の状態の違いによると考えられ、境界層の状態を把握することなしには統一的に説明できないと思われる。

本研究により、葉面境界層における物質交換速度やその機構は、境界層の状態を解析しその構造を把握することによって解明できることが明らかになったと考えられる。本実験では主流が層流の場合のみを取扱ったが、今後は流れ自体の乱れによって葉が振動する非定常な場合について解析を進めたい。

5. ま と め

循環型の回流水槽を試作し、水素気泡法を用いて流れ

の可視化を行い、境界層の構造や葉の近傍の流れを詳細に調べた。この結果をもとに光合成など葉面境界層を通して行われる物質交換について考察した。

葉面境界層は一般に考えられているような膜状ではなく、葉を包む立体的な形状であった。流速、迎角が増大すると境界層は乱流遷移し、側端部では周縁効果が顕著となりその断面形状は山型となってくる。

葉が振動する場合、振動のみによって境界層の乱流遷移が一律に促進されることはなく、流れや振動の条件によって乱流構造になる場合と層流構造を維持している場合とに分かれた。

一般に、葉面境界層での物質交換や熱伝達は層流境界層理論に基づいて解析されるが、実験によって境界層の構造や厚さを解析した結果、葉面境界層での物質交換量は平行流れの場合の境界層理論値に比較して、次のように変化することが明らかになった。

1. 流れに平行に固定した場合、側端部の境界層は薄くなり物質交換量は境界層理論値より若干増加する。
2. 迎角 $7^\circ \sim 14^\circ$ の場合、下面側の境界層は薄くなり上面側は乱流構造に遷移し、物質交換量は境界層理論値に比べて多くなる。
3. 迎角が更に大きくなると、上面(背面)側では死水域が増大し拡散抵抗が増すために物質交換量は1の場合とほぼ同等となり、下面側では2と同様な状態で層流境界層理論値よりやや多い。
4. 振動により境界層が乱流状態となる場合は境界層抵抗値が小さくなり物質交換量は流れに平行に固定した場合の境界層理論値より約60%増加するが、層流構造となる場合は約10%増加するに過ぎない。

葉面境界層における物質交換や熱伝達は、境界層の状態を把握することなしには統一的に議論できないことを明らかにした。

引用文献

- 1) 浅沼 強, 武田定彦, 1965: 水の電気分解による流れの可視化について, 機械学会論文集, **31**, 223-232.
- 2) 長谷場徹也, 1975: 風に揺れる葉形湿面からの水蒸気輸送, 農業気象, **31**, 135-143.
- 3) Parlange J. Y., Waggoner P. E. and Heichel G. H., 1971: Boundary Layer Resistance and

- Temperature Distribution on Still and Flapping Leaves, I. *Plant Physiol.*, **48**, 437-442.
- 4) Parkhurst D. F., Duncan P. R., Gates D. M. and Kreith F., 1968: Wind-Tunnel Modelling Convection of Heat Between Air and Broad Leaves on Plants. *Agric. Meteorol.*, **5**, 33-48.
- 5) Parkhurst D. F., Pearman G. I., 1974: Convective Heat Transfer from a Semi-Infinite Flat Plate to Periodic Flow at Various Angles of Incidence. *Agric. Meteorol.*, **13**, 383-393.
- 6) Schuepp P. H. 1972: Studies of Forced-Convection Heat and Mass Transfer of Fluttering Realistic Leaf Models. *Boundary-Layer Met.*, **2**, 263-274.
- 7) Rotta J. C., 1972, 大路通雄訳, 乱流, 岩波書店, 東京, 140-151.
- 8) 種子田定俊, 1975: 流れの可視化法と流動解析, 機械学会誌, **78**, 724-731.
- 9) 矢吹万寿, 宮川秀夫, 石橋 惇, 1970: 風速と光合成に関する研究(第1報), 農業気象, **26**, 65-70.
- 10) 矢吹万寿, 西岡通男, 1973: 風速と光合成に関する研究(第3報), 農業気象, **29**, 173-177.

Summary

Using a water channel and the flow visualization technique (hydrogen-bubble visual observation method), we investigated the structure and flow patterns of the boundary layer near leaves. We discussed the mass transfer through the boundary layer, which plays an important role on photosynthesis, by use of the experimental results.

The shape of the boundary layer of a leaf was not flat film, but that was of the three dimensional shape which enveloped a leaf. Increasing the velocity and/or the incidence of flow on leaf, the boundary layer became turbulent, and the sectional form of that became convex on account of the edge effect at the side tip.

It was observed that under fluttering condition, the transition from laminar to turbulent flow was not promoted by fluttering of leaf alone and that the structure of the boundary layer was found to be turbulent or laminar according to the conditions of flow and flutter.

Generally, mass and heat transfer through the boundary layer is analyzed by using a laminar boundary layer theory, but the mass transfer estimated by our experimental results differs in following respects from that by the boundary layer theory.

1. Under the flow condition parallel to the leaf, the boundary layer at the side tip becomes thin, and the estimated amount of mass transfer seems to be slightly more than that of the calculated value by the theory.
2. When the incidence is $7 \sim 14^\circ$, the boundary layer on the lower surface becomes thin, and the boundary layer on the upper surface is converted into turbulent structure. The estimated amount of mass transfer becomes more than the above case 1.
3. In the case of larger incidence, the resistance to diffusion at the upper surface increases as the dead water region expands. The estimated value of mass transfer is nearly equal to case 1. The feature of the boundary layer on the lower surface is the same as case 2.
4. In the case that the leaf flutters, the resistance decreases when the boundary layer is turbulent. The estimated value of mass transfer is by about 60% larger than the theoretical value, but it is by only 10% larger than the theoretical value when the boundary layer is laminar.

It is found that the mass and heat transfer through the boundary layer can not be dealt with without the understanding of the features of boundary layers.