

## 葉面境界層と作物の物質生産に関する研究 (2)

|       |                    |
|-------|--------------------|
| 誌名    | 農業氣象               |
| ISSN  | 00218588           |
| 著者    | 原 園, 芳信<br>矢 吹, 万寿 |
| 巻/号   | 38巻3号              |
| 掲載ページ | p. 231-238         |
| 発行年月  | 1982年12月           |

# 葉面境界層と作物の物質生産に関する研究

## (2) 境界層構造の局所的な差異による個葉の 光合成速度分布

原 蘭 芳 信 ・ 矢 吹 万 寿

(大阪府立大学農学部)

Studies on the Effect of the Leaf-Boundary Layer Resistance  
on the Matter Production of Crop.

(2) Distributions of the Photosynthetic Rate Caused by the Local Difference  
in the Boundary Layer Structures of Individual Leaves

Yoshinobu HARAZONO and Kazutoshi YABUKI

( College of Agriculture, University of Osaka Prefecture, )  
Nozu-umemachi, Sakai, Osaka 591

### 1. ま え が き

葉面境界層の拡散抵抗が光合成速度や蒸散速度に影響を及ぼすことから、葉面境界層の構造を明らかにする研究がなされてきた(矢吹・西岡, 1973; Grace and Wilson, 1976等)。筆者らは、葉面境界層の拡散抵抗が植物の物質生産に大きい影響を持つとの観点から、境界層の構造や機能を調べてきた。そして、風速、気流の乱れ、葉の迎え角(気流に対する葉面の傾き)だけでなく、葉の形や大きさ、気流に対する葉の向き等によって葉面境界層の構造が変化し、それに伴って境界層抵抗値も異なることを報告した(矢吹・原蘭, 1978; 原蘭・矢吹, 1979; 1981)。

これまでの結果をもとに、葉面境界層の構造をさらに詳細に解析すると、同一葉面においても境界層の厚さや構造は局所的に異なり(矢吹・原蘭, 1978)、境界層の拡散抵抗値も局所的に偏差が生じると推測される。境界層抵抗値の局所的な差異は、光合成速度、蒸散速度や葉温に影響を及ぼし、葉面上にこれらの高低分布を生じさせると考えられる。葉温の分布に関しては、これまでいくつかの報告が見られるが(Raschke, 1956; Parlange and Waggoner, 1972; Wigley and Clark, 1974)、いずれも断片的であり、葉面境界層との関連を検討した

ものは、赤外放射温度計で求めた葉温分布と水素気泡法で調べた境界層構造との関係を検討した研究(伊達, 1978)が見られる程度である。光合成速度や蒸散速度の葉面分布やこれらと境界層構造の差異とに関する報告は皆無といえる。

そこで、本研究では、葉内で澱粉を合成する澱粉フォスフォリラーゼ酵素を持つツルナシンゲン(*Phaseolus, vulgaris* L.)を用い、いくつかの気流条件下で光合成作用を行わせ、葉内に蓄積された同化澱粉濃度から光合成速度の分布を求めた。また、模型葉を用いて、光合成実験と同様の流れ条件下における境界層の状態を調べ、先に得られた結果(矢吹・原蘭, 1978; 原蘭・矢吹, 1979; 1981)を含めて、拡散抵抗値の葉面分布を推測した。そして、ツルナシンゲン葉について得られた光合成速度分布を、模型葉の境界層構造や拡散抵抗値の予測分布と対比させて検討した。

### 2. 葉面境界層の状態と境界層抵抗値の予測

水素気泡法を用いて模型葉周辺の流れを可視化し、境界層の状態を調べた。実験方法は矢吹・原蘭(1978)と同様である。ここでは、先に得られた結果を含めて、模型葉面の境界層の状態を示し、それから予測される拡散抵抗値の分布をいくつかの流れ条件について示す。

#### 2.1 迎え角 $0^\circ$ の場合

Fig.1 a に層流中で主流方向と平行に置いた矩形模型

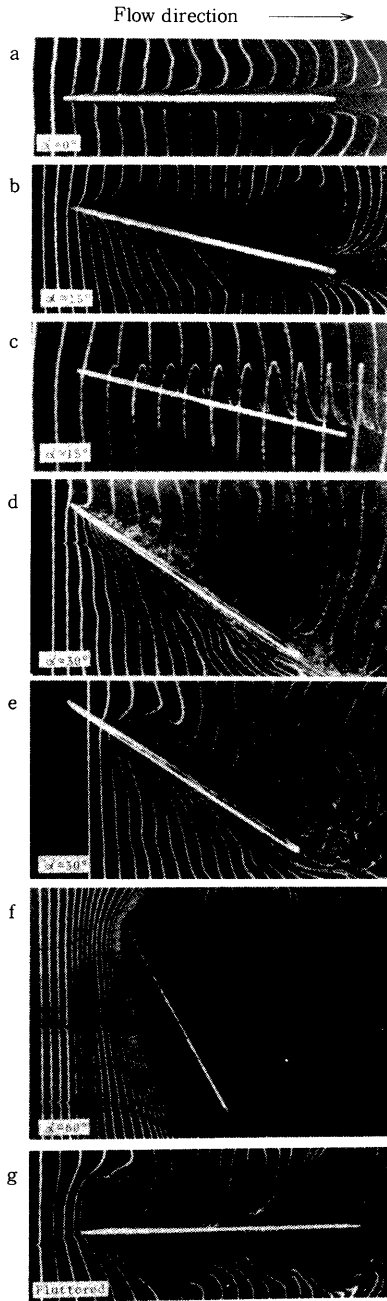


Fig. 1. Photographs showing the structures of boundary layer of model leaves (d and e are delta shapes and others are rectangular ones) for various flow conditions;  $\alpha$  indicates the attack angle of flow on leaves. These are visualized by means of hydrogen bubble technique, and showing the cross sectional view at middle (a, b, d, f, and g), side tip (c), and 1/4 inner from side tip (e).

葉(長さ 10 cm, 幅 5 cm)の境界層の様子を示す。この場合の境界層は層流構造であり、前縁から後縁へ徐々にその厚さを増すが、後縁付近では後流の影響でやや薄くなっている。模型葉の両側端部の境界層の厚さは、周縁効果のために中央部より薄い(矢吹・原蘭, 1978)。これらことから、迎え角  $0^\circ$  の場合の拡散抵抗値の分布は、気流に対する葉の前縁部や側端部で小さく、それに次いで後縁部が小さいが、中央部からやや後縁寄りの部分では相対的に大きい値になると予測される。また、葉幅が狭いほど周縁効果が顕著であることから(矢吹・原蘭, 1978)、葉の細長く突き出た部分でも抵抗値は小さくなると考えられる。

### 2.2 気流に対して迎え角を持つ場合

Fig.1 b に a と同じ矩形模型葉を迎え角約  $15^\circ$  で固定した場合の境界層の状態を示す。下面側の境界層は層流構造であり、その厚さは前縁から後縁まで大差がない。上面側の境界層では、前縁で剥離が生じ模型葉面から離れた所を流れ、中央部付近で再付着した後乱流境界層に遷移している。したがって矩形の葉形の場合、下面側の拡散抵抗値は周縁のわずかな部分を除いてほぼ一様な値となり、上面側では、葉の風上前半部より後縁部の方が拡散抵抗値は小さいと推測される。また、側端部(c)では下面側から上面側へ巻き込む円錐状のら旋渦が生じるが、これは後縁に近づくほどその径が大きくなるので、後縁に近い所ほど拡散抵抗値の小さい部分が拡大すると推測される。迎え角のある場合の上面側の境界層の乱れ、ら旋渦の程度や再付着の位置等は、迎え角や Reynolds 数によって異なるので、供試葉の拡散抵抗値の細部の分布は、葉の大きさや迎え角等により若干変化すると思われるが大略的には上述の分布が予測される。

ツルナシインゲン葉のように先端が凸状に尖った形状の模型葉の境界層の様子を Fig.1 d, e に示す。この場合、側端から約 1/4 中央寄りの位置では(e)、下面側から上面側へ廻り込む流れがあり、前縁で剥離し中央部へ向って流れているが、前縁剥離は矩形模型葉に比べて小規模であり、剥離の後すぐ再付着している。中肋部分では(d)、向斜辺部を廻り込む流れのために剥離が生じず、境界層は薄い層流構造である。一方、下面側の境界層は矩形模型葉の場合と同様である。したがって、風上先端が凸状の葉を正の迎え角で固定した場合には、下面側は前縁から後縁までほぼ均一な拡散抵抗値となり、上面側では、中肋部分と下面側から廻り込む流れが付着する葉の前半部で小さい拡散抵抗値となり、側端では若干大きい値になると考えられる。

迎え角が負の場合には、葉の上面側と下面側とが入れ替った状態となる。

迎え角が更に大きい場合には(Fig.1 f), 風上側前面には淀みの領域が発生し, 背面側には死水域が広がる。淀み領域の発生は約  $45^\circ$  以上の迎え角で観察された。したがって, 迎え角が大きい場合には, 正負いずれの迎え角でも葉の中央部付近が周縁部より大きい拡散抵抗値となり, 中央部と周縁部との差は迎え角  $0^\circ$  の場合より顕著になると推測される。

### 2.3 乱流中で葉が揺らぐ場合

Fig.1 g は, 主流方向の速度成分のみが変動する一次元乱流中で模型葉が Strouhal 数約 1.5 で揺らぐ場合の境界層を示したものである。この場合の境界層は乱流構造と見なせる状態であるが, 境界層内部の模型葉に接した部分には, 部分的に層流構造の等価粘性底層領域が観察される。模型葉の揺らぎ 1 周期について等価粘性底層の部分を重ね合せ平均化したものは, 層流境界層と同様の形状である(原圃・矢吹, 1979)。したがって, 葉が微小に揺らぐ場合の拡散抵抗値は, 平均的には等価粘性底層が薄い, 葉の前縁部や側端部で小さい分布となると考えられる。

## 3. 実験方法

個葉の光合成速度分布を測定する方法として, 本研究ではヨウ素澱粉反応による発色を利用した。これは, 一定時間の光合作用によって葉内に蓄積された澱粉を発色させ, その濃淡分布から光合成速度分布を求めるものである。予備実験として, カンショ, ツルナシンゲンおよびダイズでヨウ素澱粉反応試験を行い, 発色に要する光合成の時間や濃淡の程度の比較から, ツルナシンゲンを供試材料に選択した。

実験開始前に供試体を暗黒条件(気温約  $20^\circ\text{C}$ , 相対湿度 95~100%)に 18~70 時間置き, 葉内の澱粉を完全に転流あるいは消耗させた。種々の気流条件について光合成速度分布を測定する前に, 測定葉と同一供試体の隣接する葉についてヨウ素澱粉反応試験を行い, 葉内に澱粉が残留していないことを確認した。

実験は植物育成用風洞(矢吹・宮川, 1970)を用いて行い, 光強度  $280\text{ W/m}^2$  (約  $0.4\text{ ly/min}$ ), 気温約  $25^\circ\text{C}$ , 相対湿度約 75% の条件下で 100~125 分間光を照射した。光照射中は葉面境界層の状態を同一に保つために, 供試葉を直径  $0.3\text{ mm}$  のナイロン糸で枠に固定した。気流が層流の場合には, 気流に対する葉の迎え角を  $0^\circ$  (気流と平行),  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 60^\circ$  に設定した。正の迎え角は葉のうら面が風上を向く設定角度であり, 負の迎え角は葉のうら面が風下となる状態である。気流が乱流の場合には, 供試葉を固定せず, 供試葉の風上に乱流格子を置きこれによって生じる気流の乱れと共に葉が揺らぐように

した。この場合の乱れの強さは  $0.4$  (平均風速  $60\text{ cm/s}$ ) から  $0.2$  (平均風速  $170\text{ cm/s}$ ) であった。風速は  $30\sim 170\text{ cm/s}$  の間で数段階設定した。気流に対する前縁形状や葉形による光合成速度分布の差異を調べる場合には, 光照射開始時に供試葉の先端部分を切除して葉形を変えたり, 気流に対する葉の向きを変えて実験した。

一定時間光を照射した後, ただちに供試葉を熱湯処理し葉内に蓄積された同化澱粉を固定した。続いて約  $60^\circ\text{C}$  に加温した濃度 95% のエタノールに浸し葉緑素を溶出させた。葉緑素が溶出して白くなった葉をヨウ素ヨウ化カリウム水溶液に浸し, 葉内澱粉を赤褐色に発色させた。処理した供試葉は, 同化澱粉濃度に応じて葉面上に赤褐色の濃淡分布を生ずる(以後これを発色葉と呼ぶ)。

発色葉の澱粉濃度分布を定量的に比較するために, フォトパターンアナライザー(応用電気研究所製, PPA-250 型)を用いて濃度を測定した。この分析計では, サンプルの各測定スポットの明暗に比例した電圧がアナログ量で出力されるので, 任意のレベル設定を行い, 走査測定中の出力が設定レベル以下のスポットの部位のみを, X-Yレコーダー上に記録させた。サンプル葉全体の走査が終了すると, 設定レベルの等値曲線とこれにより分割される分布形が得られるので, 個々の発色葉について他に 5~8 段のレベル設定を行い, 等値曲線群を得た。

設定レベルの絶対値は各発色葉毎に異なるため, 得られた等値曲線そのままでは発色葉相互の比較が困難である。そこで, 5~8 段の等値曲線群から, 各供試葉毎に最大濃度の部分と最低濃度の部分との間を 25% 毎の 4 段階に区分し, 相対濃度曲線を描いた。このようにして求めた相対濃度分布では, 濃度の高い部分ほど光合成速度が局所的に高いと考えられるので, 以後この相対濃度分布を光合成速度分布と見なすことにする。

## 4. 葉面上の光合成速度分布

ヨウ素澱粉反応によって発色したツルナシンゲン葉の澱粉濃度の分布状況を Fig.2 に写真で示す。これらを基に, 4 段階の相対濃度区分として求めた光合成速度分布を Fig.3~7 に示す。図中,  $U$  は層流気流の風速を,  $\bar{U}$  は乱流格子の風下での乱流気流の平均風速を示す。

### 4.1 無風状態での光合成速度分布

無風状態で求めた光合成速度分布を Fig.3 に示す。葉面の大部分が同一の光合成速度レベルであり, 光合成速度の局所的な差異はあまり見られない。無風状態では速度境界層が形成されないため, 葉の全面ではほぼ均一な光合成速度となったと考えられる。葉脈に沿った部分, 特に葉柄に近い部分で光合成速度が低下している箇所があるが, これは葉脈近傍で気孔分布数が少ないことや,

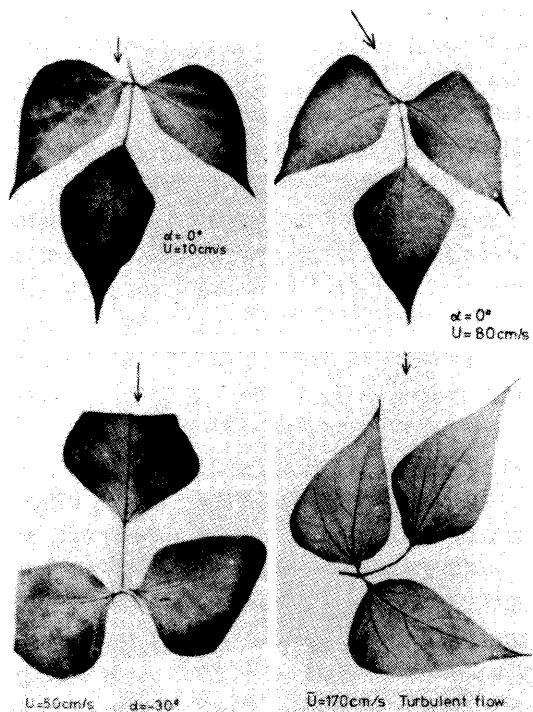


Fig. 2. Photographs showing the distribution of assimilatory starch of bush bean leaves, which are visualized by the iodine test technique.  $U$  and  $\bar{U}$  indicate the speed of laminar air flow and the mean speed of turbulent air flow, respectively.

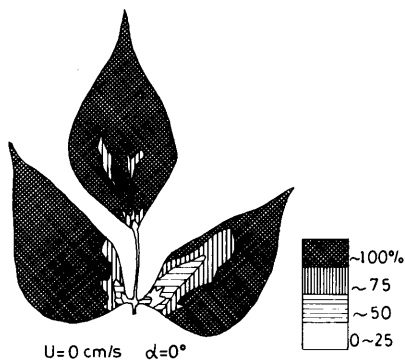


Fig. 3. Distribution patterns of the photosynthetic rate of horizontal bush bean leaves in still air, which are derived from the distribution of assimilatory starch in leaves. Numerical values show the relative concentration of starch (%), and the dark parts on leaves show the areas where the photosynthetic rate is high.

葉脈に近い部分ほど転流が生じ易いことの影響と判断される。また、光照射によって葉面上で生じる熱対流が光合成速度分布に及ぼす影響については、追試実験における葉-気温差は最高 $0.6^{\circ}\text{C}$ 、最低 $-0.3^{\circ}\text{C}$ であり、葉面のGrashof数は $4.5 \times 10^4$ 以下と小さいことから、その影響は無視できる程度といえる。

#### 4.2 層流中に迎え角 $0^{\circ}$ で葉を固定した場合の光合成速度分布

迎え角 $0^{\circ}$ の場合の結果をFig.4に示す。Fig.4Aは葉の先端、Bは葉柄部が風上を向く場合で、Cは葉の先端を切除して葉形を変えた場合である。葉の向きや形にかかわらず、いずれの場合にも風上前縁となる部分で光合成速度が高く、風下後縁部へ向って低下しており、葉面境界層が薄い部分と光合成速度の高い部分とがよく対応している。Dは3枚の葉を一組とした場合の結果である。風上前縁に位置する2枚の葉では、前縁で高く後縁で低い光合成速度分布であるが、風下に位置する葉では、前縁部が低レベルで後縁が逆に高い分布である。迎え角 $0^{\circ}$ の場合には、風上に位置する葉と風下に位置する葉とがほとんど同じ流線上に並ぶことから、風上の葉の境界層

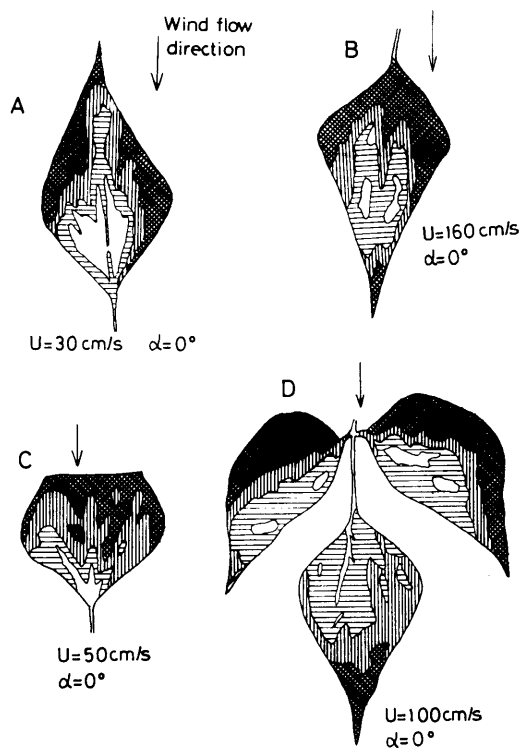


Fig. 4. Changes in the distribution patterns of the photosynthetic rate of bush bean leaves derived from the distribution of assimilatory starch for four different wind speeds. The attack angle of air on leaves  $\alpha$  is  $0^{\circ}$ .

がすぐ後の風下の葉の前縁部にまで覆いかぶさり、風下葉の前縁部の光合成速度が低レベルとなったと考えられる。BおよびDの葉の後縁部で光合成速度が高レベルであるが、これは、葉が細長く尖った部分であり、葉幅の狭い葉の境界層が薄いことに対応したものと見える。

このように、迎え角 $0^\circ$ の場合には、模型葉を用いた境界層の構造解析から予測される分布とよく合致する光合成速度分布となっている。

#### 4.3 層流中に迎え角 $\pm 15^\circ$ , $\pm 30^\circ$ で葉を固定した場合の光合成速度分布

迎え角のある場合には、葉のおもて、うらの各面で境界層の構造は異なり、また、供試葉の気孔分布数はうら面がおもて面の約5倍であったことから、光合成速度分布にはうら面の境界層構造がより大きい影響を及ぼすと推測される。そこで、以下の光合成速度分布は主にうら面の境界層との関連で見ることとする。

Fig.5において、迎え角 $+15^\circ$ の場合(E)の個々の葉について光合成速度分布を見ると、それぞれの葉の大部分が同一のレベルで占められており、葉面上はほぼ均一な分布と見なせる。風下の葉の後縁部に、やや高レベルの光合成速度分布が見られるが、この場合の葉の後縁は気流に押されてわずかに湾曲していたことと、後縁部における後流の影響により境界層が局所的に薄くなったためと考えられる。迎え角 $30^\circ$ の場合(F)も迎え角 $0^\circ$ に比べて光合成速度の葉面分布の差は少なく、各々の葉はほぼ均一な分布であると見なせる。

迎え角 $-15^\circ$ の場合(G)には、先端が鋭く尖った方を風上に向けた葉では、葉の前半部と三角形の両斜辺から中肋部へ廻り込む流れの道筋に沿う部分で、高レベルの光合成速度となっている。同じ葉の最側端部の光合成速度は低レベルである。この気流条件でのうら面の境界層は、おもて面からうら面へ廻り込む流れが両斜辺部で剥離する状態であるが、最側端部では剥離した流れが葉面から離れて再付着しないため、両側端で低レベルの光合成速度分布となったと見られる。同じ迎え角で、供試葉の先端を切除した矩形の葉形とした場合には、後縁部と両端部の光合成速度が高い、馬蹄形状の分布となっている。矩形葉形の場合、負の迎え角のうら面の境界層は、葉幅に対する中心部では、前縁で剥離した流れが葉の前半部を飛び越して後半部で再付着する一方、両側端部では、円錐状の旋渦が葉面を削るように流れる。矩形葉形の光合成速度の馬蹄形状の分布は、境界層の構造とよく対応している。

迎え角 $-30^\circ$ の場合(H)には、風下に位置する矩形形の葉では後縁付近で馬蹄形状に光合成速度の高い分布があり、風下に位置する別の葉では後縁部と凸状になった

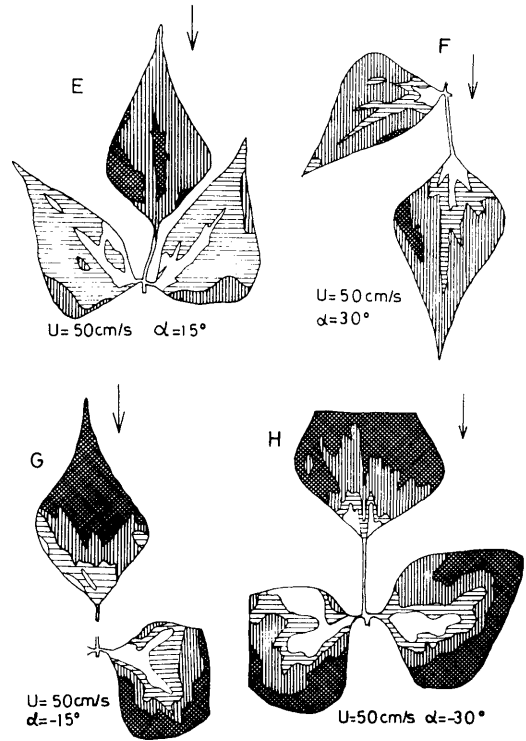


Fig. 5. Same as Fig. 4, when the bush bean leaves are fixed at attack angles of air on leaves  $\alpha = \pm 15^\circ$ , and  $\pm 30^\circ$ .

側端部で高い分布となっている。風上に位置する葉は先端部を切除してあるが、前縁と両斜辺部ならびに斜辺を廻り込む気流の道筋の部分で高い光合成速度分布である。

光合成速度分布に及ぼす葉脈の影響を見ると、正の迎え角の場合には太い主脈の近傍で光合成速度の低下が見られるが(Fig.5 E, F)、負の迎え角の場合には明瞭な影響は見られない(G, H)。同じ正の迎え角でも、葉脈が気流方向に平行な場合より直交する場合のほうが葉脈近傍の光合成速度が低い傾向である。また、気流と葉脈が平行な場合でも、風上側に太い主脈がない場合(Eの中央葉)には葉脈の影響が見られない。これらは、負の迎え角の場合には葉脈に直接気流が当たらないこと、正の迎え角で気流が太い葉脈に当たる場合には葉脈が境界層内の流れを遮り、局所的な死水域を形成するために生じたと考えられる。このようなことから、葉脈近傍での光合成速度が低いことは、転流による影響よりも、主に葉脈が葉面境界層の微細構造に影響したことのためと判断される。

#### 4.4 層流中に迎え角 $\pm 60^\circ$ で葉を固定した場合の光合成速度分布

Fig.6は迎え角 $\pm 60^\circ$ で葉を固定した場合の光合成速度

分布である。迎え角 $+60^\circ$  (I),  $-60^\circ$  (J) 双方の場合とも葉の周縁部が高く中央部で低い分布である。供試葉の先端部を切除し葉形を変えた場合 (J の中央葉) の光合成速度分布も、他の葉と同様に周縁部で高い分布となっている。このように迎え角が $\pm 60^\circ$  程度の大きさになると、葉の前縁形状の差異は光合成速度の分布にほとんど影響しなくなり、死水域と淀みの領域の発達による影響が顕著に現われている。

Fig. 6 では Fig. 5 の E, F で見られたような、太い葉脈近傍における光合成速度の低下が顕著でない。迎え角 $\pm 60^\circ$  の場合には、葉の中央部全体が死水域や淀みの領域に覆われるために、葉脈が境界層の内部構造を変化させることが少ないためと判断される。

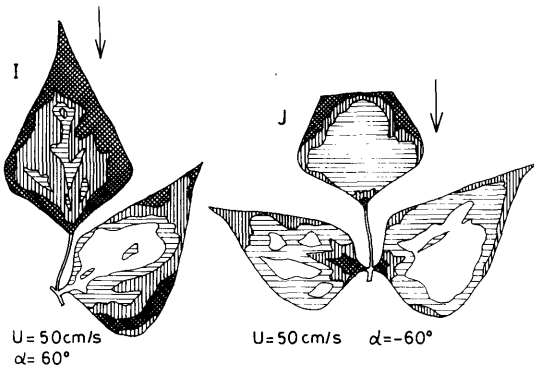


Fig. 6. Same as Fig. 4, when the bush bean leaves are fixed at attack angles of air on leaves  $\alpha = \pm 60^\circ$ .

4.5 乱流中で葉が揺らぐ場合の光合成速度分布

気流が乱流の場合の光合成速度分布を Fig. 7 に示す。この場合には供試葉を固定しなかったため、葉が振れたり湾曲することが多かった。このような場合の境界層の構造を詳細に把握することは困難であるが、実験中の平均的な葉の傾きや気流に対する向き等についての境界層の状態は類推できるので、これを基に光合成速度分布を検討した。

Fig. 7 K は供試葉が気流とほぼ平行な状態で微小に揺れていた場合 (振動数 2~3 Hz, 振幅約 1 mm) の結果である。光合成速度は葉の風上前縁から後縁へ向って低下しており、層流中に迎え角  $0^\circ$  で固定した場合 (Fig. 4 B) と似た分布形である。一次元乱流中の模型実験では葉面に接して層流構造の等価粘性底層領域が観測されたが、この結果は、通常の乱流気流中においても等価粘性底層領域が形成されていることを示したものと見える。

Fig. 7 L は中央の葉と左側の葉が気流に対して約  $15^\circ$ 、右側の葉が約  $-15^\circ$  の迎え角を中心として揺れた場合の

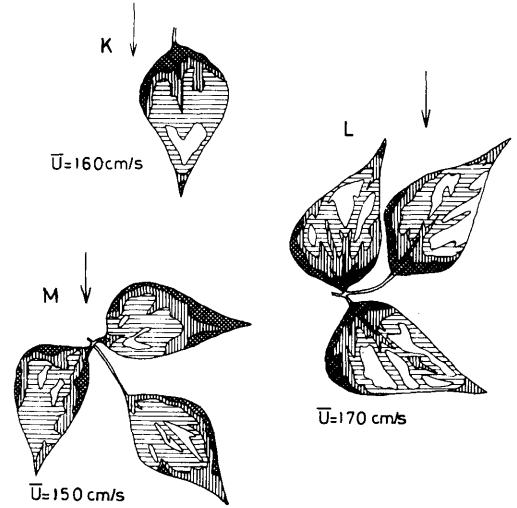


Fig. 7. Same as Fig. 4, when the bush bean leaves are fluttered freely in the turbulent air flow.

結果である。この場合の平均風速は 170 cm/s と実験中最大であり、供試葉は最も激しく揺らいだ (葉の先端部約半分は振幅約 5 mm, 振動数 3~4 Hz, 葉全体は 1~2 Hz で不規則に揺れた)。光合成速度分布を見ると、風向・迎え角による影響が見られず、葉の中央から先端部分の光合成速度が低く、葉柄に近い周縁部が高くなっている。葉の揺れは先端部ほど激しかったことから、先端部での蒸散量が過剰となり気孔が閉じたか、あるいは水の移動に対して機械的な阻害作用が及んだため、葉柄に近い部分の光合成速度が先端部より高い結果になったと考えられる。

Fig. 7 M は、中央の葉と葉柄に向かって左側の葉は共に約  $-5^\circ$  の迎え角を中心として揺れ、右側の葉は約  $-50^\circ$  の迎え角の状態を微小に揺れた場合 (振幅 2~3 mm, 振動数約 1 Hz) である。三枚の葉は全て裏面が凹状に湾曲し、特に右側の葉の窪みが大きかった。光合成速度分布は気流に対する各葉の前縁部が高く、葉の中央部では低い。このことは、乱流気流中で葉が微小に揺らぐ場合でも、葉の凹状に窪んだ部分は死水域となり  $\text{CO}_2$  拡散が阻害されていることを示したものと見える。

以上のように、乱流の気流中で葉が揺らぐ場合には、揺らぎの状態によって光合成速度分布に差異が見られた。しかし、揺らぎが微小な場合には、供試葉の風上側周縁部の光合成速度が高レベルとなり、大略的には境界層が薄い部位と対応している。これらの結果は、葉が揺らぐ場合には固定された場合より周縁効果が顕著であること、葉面に接して形成される等価粘性底層が層流境界層と同様の機能と構造を持つこと等、境界層の構造解析結果

(原蘭・矢吹, 1979)と合致する。

## 5. 考 察

本研究で得られた光合成速度分布は、光強度 280 W/m<sup>2</sup> で 100~125 分間照射し、その間に葉内に蓄積された同化澱粉を固定して求めたものである。したがって、この間に光合成産物が葉内で移動したり、他の器官へ転流した可能性があるため、これらの影響が光合成速度分布にどの程度含まれるか検討する。

転流の経路が単純で短い、一葉挿しのカンショ葉では、90 分で約 20% の光合成産物が塊根・根・腋芽等の受容体 (sink) へ転流される (加藤ら, 1972) ことが報告されている。しかしながら、本研究で求めたツルナシンゲン葉の光合成速度分布には、転流による明確な影響は認められない。光合成作用時の気流条件や供試葉の形を変えると、それに対応して光合成速度分布は変化しており、葉の特定の部位だけが常に高・低の分布となることはない。また、得られた分布は、気流条件に特有な葉面境界層の構造から予測されるものとよく合致する場合が多い。

このように、本研究結果に明確な転流の影響が見られないのは、実験開始前に供試体を長時間暗黒状態に置いたことによると考えられる。植物を長時間暗黒条件下に置いた直後には、連続的に光を受けている場合より光合成速度がかなり高くなり (Milford and Pearman, 1975)、また、転流の経路が短いほど光合成速度は高くなる (武田・福山, 1975) とされている。本実験のように、長時間暗黒状態に置かれた直後は、葉自体が光合成産物の転流の受容体となり、光合成産物はほとんど移動することなくその場で澱粉に固定され蓄積されたものと推測される。したがって、他の場所への移動や他器官への転流は、長時間の光合成で受容体が十分に満たされた次の段階として生じると考えられる。

一方、予備実験においては、光合成反応時間を 60 分とした場合にはヨウ素澱粉反応が見られず、約 90 分とした場合にわずかに発色した例があった。葉内澱粉の濃度分布が識別可能な程度に検出されたのは、100~125 分間光を照射した場合であった。葉内におけるブドウ糖から澱粉への合成は、澱粉フォスフォリラーゼによって化学平衡に達するまで連続的に行われ、澱粉のブドウ糖基 6 個につき 1 個の割合でヨウ素が結合する (Bonner and Galston, 1952)。したがって、本実験で光照射した 100~125 分の時間は、ヨウ素澱粉反応によって識別できる量の澱粉が生産されるのに必要な反応時間、あるいは積算光量を示すものといえる。

葉脈の近傍において光合成速度が低下していることについては、結果の項で検討したように、主に、気流が葉

脈に当たる際に葉脈と葉脈との間の凹部が小規模の死水域となるためと考えられる。ただ、無風状態の場合 (Fig. 3) に、葉脈近傍で光合成速度が低下しており、死水域の形成だけで説明できない部分もあるが、全体的な光合成速度分布には葉脈近傍での転流の明瞭な影響は認め難い。

以上、いくつかの観点から光合成速度分布について検討したが、本研究で得られた光合成速度分布は、主に葉面境界層の構造的差異に基づく境界層抵抗値の局所的な偏差によって生じたものといえる。

## 6. ま と め

ツルナシンゲン葉を供試し、約 2 時間の光合成作用により葉内に蓄積された同化澱粉の濃度分布から、相対光合成速度分布を求めた。

層流の気流中に、迎え角 0° で葉を固定した場合の光合成速度分布は、同様の流れ条件下での境界層の構造解析から予測される分布とよく合致し、葉内澱粉の濃度分布は光合成速度の局所的な差異によって生じたものと判断した。迎え角を変えて求めた光合成速度分布も、境界層の構造解析から予測される分布と合致し、乱流の気流中で葉が微小に揺れる場合も同様であった。

これらのことは、葉面境界層の拡散抵抗値の局所的な差異が、個葉の光合成速度やその分布に、大きく影響していることを明らかにしたものといえる。

本研究の実験には本学学生平松幹夫君の協力を得た。記して感謝する。

## 引用文献

- 1) Bonner, J. and Galston, A. W., 1952: 高宮 篤・小倉安之訳, 植物の生理, 岩波書店, p.450.
- 2) 伊達 潔, 1978: 葉温に対する研究, 大阪府立大学大学院修士論文, 137 P.
- 3) Grace, J. and Wilson, J., 1976: The boundary layer over a populus leaf. *J. Exp. Bot.*, **27**, 231-241.
- 4) 原蘭芳信・矢吹万寿, 1979: 風速と光合成に関する研究, (8) 乱流中で自由振動する時の葉面境界層抵抗値, 農業気象, **35**, 153-164.
- 5) 原蘭芳信・矢吹万寿, 1981: 葉面境界層と作物の物質生産に関する研究, (1) 気流方向, 葉の迎え角がカンショの葉面境界層抵抗値に及ぼす影響, 農業気象, **37**, 103-110.
- 6) 加藤真二郎・小林宏信・北条良夫, 1972: 甘しょ一葉挿し植物における<sup>14</sup>C-光合成産物の転流, 日作紀, **41**, 147-154.
- 7) Milford, G. F., Jr. and Pearman, I., 1975: The relationship between photosynthesis and the



- concentration of carbohydrates in the leaves of sugar beet. *Photosynthetica*, **9**, 78-83.
- 8) Parlange, J. Y. and Waggoner, P. E., 1972: Boundary layer resistance and temperature distribution on still and flapping leaves, II Field experiments. *Plant Physiol.*, **50**, 60-63.
  - 9) Raschke, K., 1956: Über die Physikalischen Beziehungen Zwischen Wärmeübergangszahl, Strahlungsaustausch, Temperatur und Transpiration eines Blattes. *Planta*, **48**, 200-238.
  - 10) 武田友四郎・福山正隆, 1971: イネ科植物における光合成に関する研究, (1) イネ科植物の垂科レベルにおける光合成速度とその系統関係, 日作紀, **40**, 12-19.
  - 11) Wigley, G. and Clark, J. A., 1974: Heat transport coefficients for constant energy flux models of broad leaves. *Boundary-Layer Meteorol.*, **7**, 139-150.
  - 12) 矢吹万寿・宮川秀夫, 1970: 風速と光合成に関する研究, (2) 風速と光合成の関係, 農業気象, **26**, 137-141.
  - 13) 矢吹万寿・西岡通男, 1973: 風速と光合成に関する研究, (3) 葉面境界層内の気流の構造, 農業気象, **29**, 173-177.
  - 14) 矢吹万寿・原蘭芳信, 1978: 風速と光合成に関する研究, (7) 葉面境界層の構造 II, 農業気象, **34**, 87-94.

### Summary

The diffusion resistance of the leaf-boundary layer is different locally with the individual leaves, and it has an effect on the photosynthetic rate ( $P$ ). Therefore, it is expected that the local difference of the boundary layer resistance makes individual leaves produce the distribution patterns of  $P$ . Then, bush beans were used as an example crop and experiments were carried out under various air flow conditions.

The distribution patterns of  $P$  were determined by the difference of concentration of assimilatory starch in leaves. Starch was made to appear brown color by means of the iodine test method, and its concentration was quantitatively measured by means of Photo-Pattern Analyzer and divided into 4 levels. The results are as follows;

- 1) When the attack angle of air to a leaf ( $\alpha$ ) is  $0^\circ$ , higher parts of  $P$  are distributed at both the leading edge and side tip of leaves.
- 2) The distribution patterns of  $P$  are almost uniform when  $\alpha$  is positive, in other words when the air flow runs against the leaf's abaxial surface.
- 3) When  $\alpha$  is negative, higher parts of  $P$  are distributed around the course of the air flow which turns around slant leading edges of the delta shaped leaves, while for rectangular shaped leaves they distributed around the side and trailing edges like a horseshoe shape.
- 4) When  $\alpha$  is  $\pm 60^\circ$ , distribution of  $P$  is low at the center of leaves.
- 5) When the leaves vibrate freely in the turbulent air flow, higher parts of  $P$  are distributed at the front margin of leaves, which correspond to the thinner parts of equivalent viscous sublayers.

As mentioned above, the distribution of  $P$  of a single leaf agrees well with that expected from the detailed analysis of the boundary layer structure for model leaves. From these results it has been confirmed that the slight difference of the leaf-boundary layer produces a great effect on the photosynthetic rate of a single leaf.