

葉の光学的特性および解剖学的特性がその光質・光合成関係に及ぼす影響 (1)

誌名	農業氣象
ISSN	00218588
著者	弘高, 博 矢吹, 万寿
巻/号	29巻4号
掲載ページ	p. 229-237
発行年月	1974年3月

葉の光学的特性および解剖学的特性が その光質—光合成関係に及ぼす影響 (1)

—葉の表裏両面を照射したときの光合成と光質との関係—

高 博・矢 吹 万 寿

(大阪府立大学農学部・堺市百舌鳥梅町4—804)

The Dependence of the Relation Between Light Quality and Photosynthesis
on Optical and Anatomical Characteristics of Leaves (1)

The relation between light quality and photosynthesis of leaves irradiated from both sides

Bak KO and Kazutoshi YABUKI

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

緒 言

筆者らは、前報で、高等植物の光合成作用スペクトルは作物によって異なり、青色部に極大値をもつもの (Hoover 型)、逆に青色部に最小値をもつもの (Gabrielsen 型)、あるいはこれらの中間的なるもの (中間型) などがあることを実験的に明らかにした。そしてそれは葉内に入った各波長の光減衰曲線によって決定されることを葉内の吸光係数の点から理論的に説明した⁷⁾。しかし、さらにこれらに検討を加えたところ、前報で解析したごとく、単に葉内構造が一樣であるものとしただけでは説明のできない現象が見出され、それは葉内構造が一樣でないことによるものと考えられた。

本報では、数種の作物について、光を葉の表面から照射した場合と表・裏両面から同時に照射した場合の光質と光合成との関係を葉の光学的特性および解剖学的特性の点から検討し、葉内構造のちがいが光合成作用スペクトルにおける青色部の第2極大の発現の有無に及ぼす影響について考察した。

1. 実験材料および方法

供試作物として、キャベツ (*Brassica oleracea* L. var *capitata* L., cultivar, "Ogoshō"), フダンソウ (*Beta vulgaris* L.), キュウリ (*Cucumis sativa* L., cultivar, "Nagafushinari"), インゲン (*Phaseolus vulgaris* L., cultivar, "Tamanishiki"), およびレタス (*Lactuca sativa* L., cultivar, "Great lakes") を使用した。

これらの作物は、2から5月までの期間に最低温度が

昭和46年10月31日 近畿、四国・四国合同年会で発表
昭和49年1月8日 再受理

20°C に保たれた温室内で、ホーランド第2液を培養液とした水耕法によって栽培された。

同化測定装置および光源は前報⁷⁾と同じものを用いた。ただし、本実験では青色光、緑色光、赤色光の三種の単色光についてだけ同化量の測定を行い、橙色光、黄色光については行わなかった。葉の表・裏両面から光を照射する場合は、Fig. 1 に示したように同化箱の上・下方にそれぞれ光源をとりつけ、同時に光照射を行った。この場合も、前報⁷⁾での実験と同じく、同化箱とその上・下方にとりつけられた光源との間にはそれぞれガラス板を2枚おき、光源から発せられる3μ以上の熱線を取り除くようにした。3μ以下のものは同化箱の上・下壁にとりつけられたウォーター・ジャケットの水によって吸収される。

照射エネルギー量は、光源の位置を上下に移動させ、葉面からの距離を変えることによって調節した。

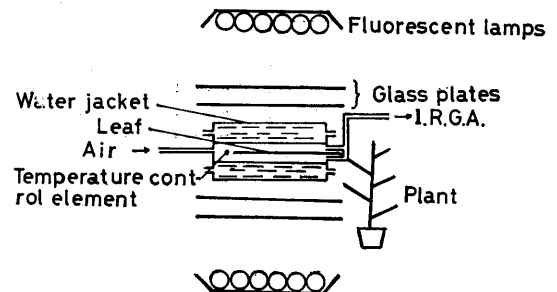


Fig. 1 Apparatus for measurement of photosynthesis.

実験に用いたそれぞれの葉の反射、透過スペクトルは、島津マルチパーパス自記分光光度計 (M.P.S-50型) を用い、400nm~700nm の波長域で、光を表面から照

射した場合と裏面から照射した場合についてもとめた。

葉内の各位置での光透過率は、凍結マイクローム法によって作られた30 μ あるいは45 μ 厚の葉の横断切片について島津顕微分光計(M.S.P-A IV)を用いて測定した。この場合、光のスポットの径は約20 μ とした。測定値はそれぞれ5ヶ所について測定した値の平均値である。

葉内の構造は、葉の中心部に近いところの葉片をゼラチン法で固定した後、横断面切片をパラフィン切片法によって作られ、それを検鏡した。

2. 光質と同化量との関係

各作物の葉について、青色光、緑色光、および赤色光を表面から照射したときと表・裏両面から照射したとき

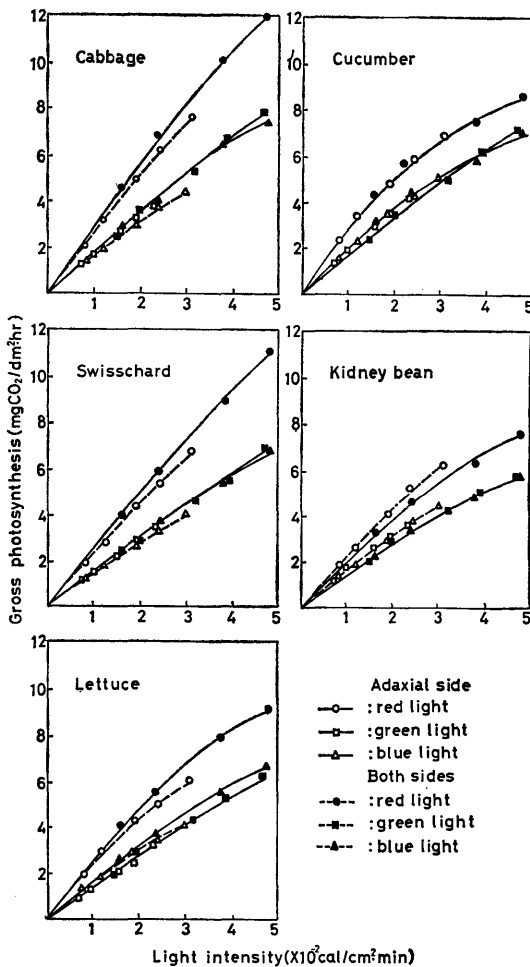


Fig. 2 Relation between the light intensity and gross photosynthesis under the irradiation of red, green, and blue light from adaxial and both sides.

の同化量と照射エネルギー量との関係を Fig. 2 に示す。ここで表・裏両面からの照射の場合は、葉の表面と裏面に等光量で照射しており、照射エネルギー量の表示をそれらの和で示した。したがって片面ではその1/2が照射されたことになる。

a. キャベツ

表面から照射したときの同化量は、赤色光において最も多く、ついで緑色光、そして青色光において最も少なかった。

表・裏両面から照射した場合には、赤色光の同化量が最も多いことには変わりがなかったが、緑色光と青色光との同化量にはほとんど差がなかった。しかし照射エネルギーが大きいくところでは青色光よりも緑色光の同化量が若干多くなっている。

表・裏両面から照射したときの結果と表面から照射したときの結果をくらべると、緑色光の同化量はほとんど変わらなかったが、赤色光、青色光では両面から照射したときの同化量が表面から照射したときの同化量より約10%増加していた。

b. フダンソウ

表面から照射した場合、および表・裏両面から照射した場合とも、それらの光質-光合成関係はキャベツと同じような結果を示した。また、両面から照射した場合の同化量は、表面から照射した場合にくらべ、赤色光と青色光では増加し、緑色光では増加しなかった。

c. キュウリ

表面から照射したときの同化量は、赤色光で最も多かったが、緑色光と青色光とでは差がほとんど見られなかった。

表・裏両面から照射した場合の同化量は、照射エネルギー量が0.035 cal/cm² min よりも小さいときには緑色光よりも青色光のほうが多かったが、照射エネルギー量がそれよりも大きくなると逆転し、青色光でよりも緑色光でのほうが多くなった。赤色光での同化量が最も多いということはこの場合も変わらなかった。

両面から照射したときと表面から照射したときとの同化量をくらべると、本実験の照射エネルギー量の範囲内では赤色光と青色光はほとんど差がなかったが、緑色光は前者のほうが後者よりも少なくなっている。

d. インゲン

表面から照射したときにはキュウリの結果と同じような傾向を示し、赤色光の同化量が最も多く、緑色光と青色光とにおける差がなかった。

両面から照射したときは、キュウリの結果と異なり、表面から照射した場合と同じ光質-光合成関係を示し

た。また、各単色光の光—光合成曲線を見ると、緑色光ではその勾配が一定であったが、青色光、赤色光では照射エネルギー量の増加に応じて勾配が小さくなっている。したがって照射エネルギー量が大きいところでは青色光より緑色光の同化量が多くなっている。

e. レタス

表面から照射したときの同化量は、赤色光—青色光—緑色光の順に少なくなり、作用スペクトルにおける青色部の第2極大が見られた。

表・裏両面から照射したときにも、この同化量の多少の順序は変わらなかったが、青色光と緑色光との差は表面から照射した場合よりさらに大きくなり、青色部の第

2極大がさらに顕著になった。

両面から照射したときと表面から照射したときの同化量の値を比較すると、緑色光では両者の差がみられなかったが、青色光、赤色光では前者のほうが後者よりも大きくなり、キャベツやフダンソウの場合と同じような傾向を示した。

このように、表・裏両面から光を照射した場合の光質—光合成関係は、表面から照射した場合のそれには必ずしも等しくなかった。これらは照射方法と同化量との関係についてまとめると、次の三つのタイプに分けられる。

(1) 青色光、赤色光では表面から照射したときの同化量より両面から照射したときの同化量のほうが多くなるが、緑色光では両者の差がほとんどないもの（キャベツ、フダンソウ、レタス）。

(2) 青色光、赤色光では両面から照射しても表面から照射しても、それらの同化量は変わらないが、緑色光では両面から照射したときのほうが少くなるもの（キュウリ）。

(3) どの単色光下でも、その同化量は表面から照射したときよりも両面から照射したときのほうが少ないもの（インゲン）。

3. 葉の光学的特性、および吸収光エネルギーの利用効率

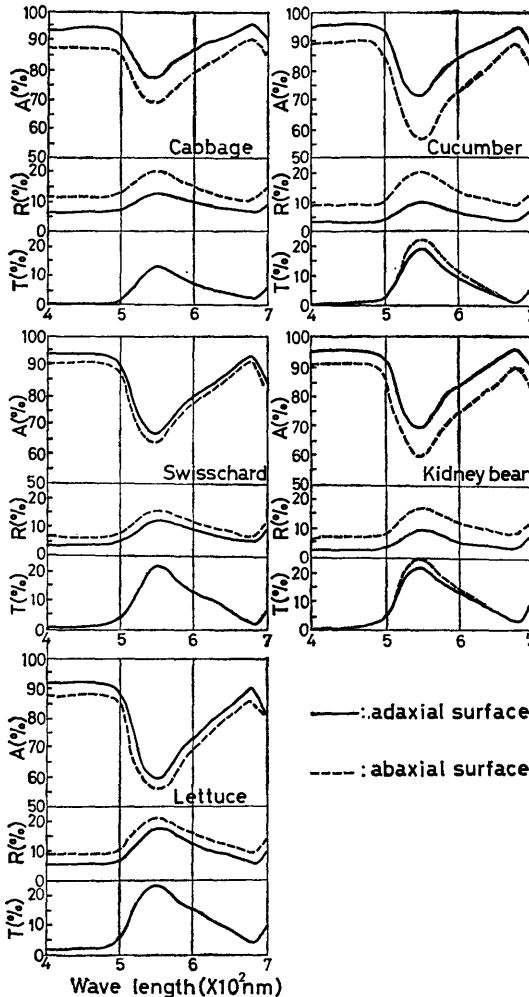
上述のように、光を葉の表面から照射したときと総量が等しい照射エネルギーを両面に等しく分けて照射したときとの同化量の関係は作物あるいは単色光によって異なったものとなった。このような現象が如何にして起るかは、クロロフィルの吸収スペクトルだけから推量することが困難である。そこで、照射された光がどれだけ葉によって吸収され、光合成に利用されるかが問題となる。ここではその点について検討する。

1) 葉の光学的特性

供試葉の表・裏両面から光を照射したときの反射、透過、吸収スペクトルを Fig. 3 に示す。

どの作物の葉においても、表・裏いずれの面に光を照射しても、反射率、透過率は緑色部でピークをもち、青色部、赤色部で低くなっている。しかしながら、それぞれの値は、光を葉の表面から照射した場合と裏面から照射した場合とで差がみられ、その表・裏面での差は波長あるいは作物によって異なる。

反射率は、いずれの作物においても表面でよりも裏面でのほうが高かった。とくにキュウリ、インゲンにおいてその差が著るしく、緑色部で10%、その他の波長域でも5~7%の差があった。



訂正：記号説明の Both sides と Adaxial side を入れかえる。

Fig. 3 Absorption (A), reflection (R), and transmission (T) spectra of adaxial and abaxial surfaces of leaves used for measurement of photosynthesis.

透過率は、キャベツ、フダンソウ、レタスでは表面から照射しても裏面から照射してもまったく等しかったがキュウリ、インゲンでは500~650nmの波長域で表面から照射したときよりも裏面から照射したときのほうが高く、550nm付近では3~4%の差があった。

したがって、吸収率は、キャベツ、フダンソウ、レタスではどの波長においても2~3%の差が見られるだけであるが、キュウリ、インゲンでは青色部、赤色部で5~7%、緑色部で12~14%、それぞれ裏面から照射したときのほうが低くなっている。

このようにキュウリ、インゲンにおいて表・裏面での反射率の差が大きいこと、また光を葉の表面から照射した場合より裏面から照射した場合のほうが緑色部での透

過率が高くなることは興味あることである。

2) 吸収エネルギーの利用効率

上述したように、葉の表・裏面での光学的特性が作物によって異なったものになっている。そこで前節の照射エネルギー—光合成曲線を吸収光エネルギー—光合成曲線であらわしてみた。それを Fig. 4 に示す。ただし吸収光エネルギー量は、同化量測定に用いた単色光光源の分光エネルギーの最大波長におけるそれぞれの葉の光吸収率に照射エネルギー量に乗じて算出した。

これらの吸収光エネルギー—光合成曲線において、その勾配が吸収光エネルギーの利用効率（以下、単に利用効率）となる。

利用効率は、本実験の照射エネルギー量の範囲内ではどの作物においても赤色光—緑色光—青色光と、波長が短い光ほど低くなっている。この順序は表面から照射した場合でも両面から照射した場合でも同じであった。しかしながら、緑色光の利用効率は、どの作物においても照射方法に関係なく、ほぼ一定であるが、青色光、赤色光のそれは、表面から照射した場合と表・裏両面に分けて照射した場合とが必ずしも等しくなく、作物によって異なったものとなっている。すなわち、キャベツ、フダンソウ、レタスなどは表面から照射した場合より表・裏両面から照射した場合のほうが高くなっているが、キュウリは表面から照射しても両面から照射しても差がなく、インゲンは逆に表面から照射した場合より表・裏両面から照射した場合のほうが低くなっている。

つぎに、作物間の利用効率の差異を比較してみると、緑色光は、インゲンが若干低くなっているだけで、その他の作物ではほとんど差がみられない。しかし、青色光、赤色光は、作物によってかなり異なっている。吸収光エネルギー量が小さい場合、赤色光では、表面から照射したときの値は、キャベツとキュウリがほぼ等しく、最も高かったが、その他の作物には大した差がみられなかった。両面から照射したときの値は、キャベツが最も高く、キュウリ、フダンソウ、レタスでの差がなくなり、インゲンが最も低くなった。青色光では、表面から照射したときの値は、キュウリが最も高く、ついでキャベツ、そしてその他の作物では差がなかったが、両面から照射したときの値は、キュウリとキャベツの差がなくなり、インゲンが最も低い値を示した。

いずれの作物においても、吸収光エネルギー量が増すにつれて利用効率が次第に低下している。その低下率は緑色光ではどの作物も小さいが、青色光、赤色光では、キャベツ、フダンソウが小さく、レタス、キュウリ、インゲンが大きい。したがって、強光下での青色光、赤色

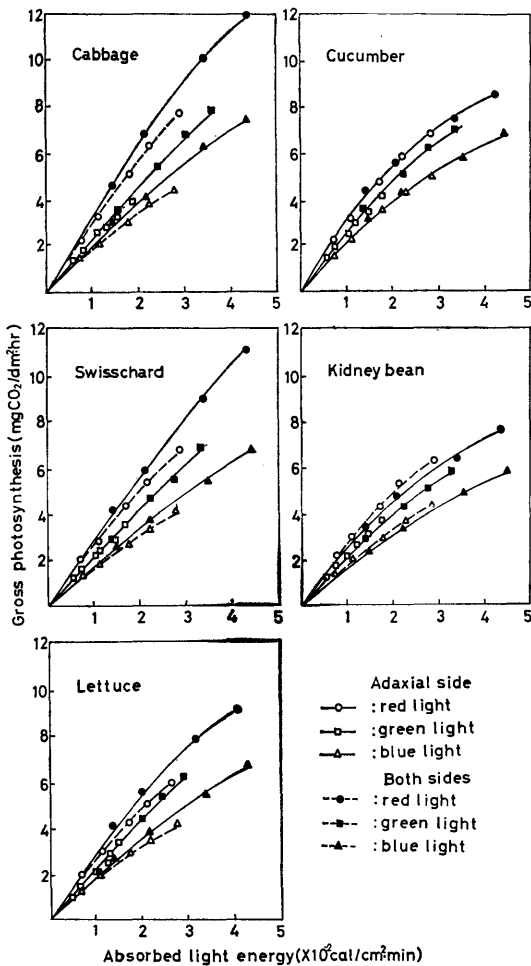


Fig. 4 Relation between the absorbed light energy and gross photosynthesis irradiated by red, green, and blue light from adaxial side and both sides.

光の利用効率の作物間の差異は、弱光下の場合とは異なったものとなっている。

このようなことから、前節の照射方法と同化量との関係における三つのタイプは、利用効率の点からすれば、次のようになる。

(1) 青色光、赤色光の利用効率が表面から照射した場合より両面から照射した場合のほうが高くなるもの（キャベツ、フダンソウ、レタス）。

(2) いずれの単色光においても、利用効率は表面から照射しても両面から照射しても変わらないもの（キュウリ）。

(3) 青色光、赤色光の利用効率が表面から照射したときより両面から照射したときのほうが低くなるもの（インゲン）。

4. 葉の解剖学的特性と同化量との関係

前節において、葉の表・裏面での光学的特性が作物により異なること、そして葉の表・裏両面から照射したときの利用効率が必ずしも表面から照射したときの利用効率と等しくなく、照射した単色光、あるいは作物によって異なることを述べたが、これらは葉の構造のちがいに起因しているものと推察される。そこで、本節では、これらを葉の解剖学的特性、および葉内組織の光学的特性から検討する。

1) 葉の解剖学的特性

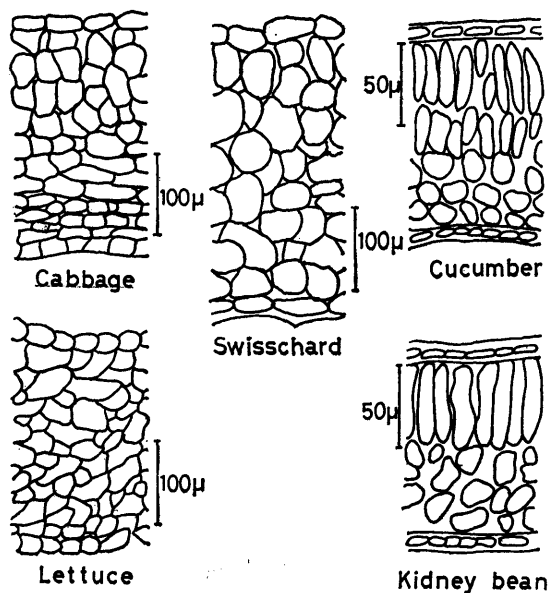


Fig. 5 Mesophyll structure of leaves used for measurement of photosynthesis.

供試葉の横断面の構造を Fig. 5 に示す。

図より明らかなように、キャベツ、フダンソウ、レタスは、葉肉組織が柵状組織層と海綿状組織層とに分化しておらず、一様であり、その厚さも比較的厚い。これにたいして、キュウリ、インゲンの葉肉組織は、厚さが前者らの約 $1/2 \sim 1/3$ であるが、柵状組織層と海綿状組織層との2層に分化してゐる。キュウリは、柵状組織層が2層になっており、柵状組織層と海綿状組織層との厚さの比が約2:1であった。インゲンは、柵状組織層が1層で、柵状組織層と海綿状組織層との比が約1:1であった。したがって、これらの作物を葉の構造の点から分類すると、次の三つのタイプに分けられる。

(1) 葉肉組織が分化しておらず一様であるもの（キャベツ、フダンソウ、レタス）。

(2) 葉肉組織が柵状組織層と海綿状組織層とに分化しさらに柵状組織層が2層になり、海綿状組織層より柵状組織層の厚さが厚いもの（キュウリ）。

(3) 葉肉組織が柵状組織層と海綿状組織層との2層に、ほぼ等しい割合で分化しているもの（インゲン）。

この分類は、さきに述べた同化量、あるいは利用効率の点での分類と完全に一致している。

ここで、キュウリ、インゲンの柵状組織層部と海綿状組織層部での薄層（約 30μ 厚）、およびフダンソウの葉

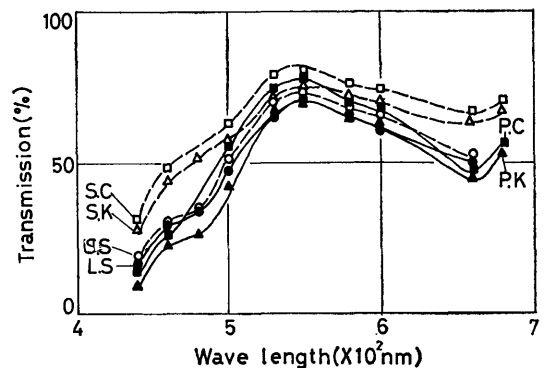


Fig. 6 Transmission spectra of upper and lower thin layers in mesophyll tissue of Swiss chard leaf and thin layers in palisade and spongy tissues of cucumber and kidney bean leaves.

U. S : upper layer of Swiss chrd leaf.
L. S : lower layer of Swiss chard leaf.
P. C : palisade tissue of cucumber leaf.
S. C : spongy tissue of cucumber leaf.
P. K : palisade tissue of kidney bean leaf.

S. K : spongy tissue of kidney bean leaf.

肉組織の表層部と下層部における薄層(約45 μ 厚)の透過スペクトルをもとめてみた。それを Fig. 6 に示す。

どの場合の透過スペクトルにおいても、緑色部の透過率が最も高く、ついで赤色部、そして青色部で最も低かった。しかし、それぞれの値は異なっている。フダニソウの葉肉組織の表層部と裏層部での透過率は、どの波長においてもほとんど差が見られなかったが、キュウリ、インゲンでは、柵状組織層部よりも海绵状組織層部での透過率が高い。その両者の差は、透過率の高い緑色部では小さいが、透過率の低い波長でほど大きくなり、青色部では海绵状組織層部での透過率が柵状組織層部でのその約2倍となっている。

これらのことから、さきに述べた葉の光学的特性の表・裏性の問題は、Gabrielsen (1960)²⁾、Pearman (1966)⁵⁾らが指摘しているように葉の構造のちがいで説明できる。すなわち、葉の表側に柵状組織層、裏側に海绵状組織層をもった葉では、それぞれの組織での細胞、あるいはクロロフィルなどの色素などの密度が等しくなく、海绵状組織層でより柵状組織層で密であるために、裏面から照射した場合より表面から照射した場合のほうが、葉内に入った光をより捕足し、内部反射として葉外に出るものが少なくなる。したがって、キャベツ、フダニソウ、レタスなど、葉肉組織が一樣であるものは、葉の表・裏面での反射率の差が小さく、キュウリ、インゲンなどは大きくなったものと考えられる。

また、キュウリ、インゲンの葉でみられた光を表面から照射した場合より裏面から照射した場合のほうが、緑色部での透過率が高くなる現象も同じようなことから説明できる。すなわち、細胞の状態は海绵状組織層でよりも柵状組織層において密であるため、表面から光の照射した場合、柵状組織層を経た光は、海绵状組織層との境界面で一部反射され、その残りの部分だけが海绵状組織層を経て、透過光として葉外に出る。ところが裏面から光を照射した場合には、海绵状組織層を経た光は、柵状組織層との境界面でほとんど反射されず、柵状組織層を経て、緑過光として葉外に出る。したがって、光を表面から照射した場合より裏面から照射した場合の透過率が高くなり、それは葉内で吸収されにくい波長の光ほど大きくなるものと考えられる。

2) 葉の解剖学的特性と同化量との関係

上述したようなことから、前節での光を表・裏両面から照射したときと表面から照射したときとの利用効率が照射した単色光、あるいは作物のちがいで異なる関係になる現象は、次のように説明される。

(1)のタイプの葉(キャベツ、フダニソウ、レタス)で

は、葉肉組織が一樣であり、葉内のどの位置においても各波長の光透過率が等しいことから、光合成機関(chloroplast)が葉内で均一に分布しており、各波長の光の利用効率が葉内のどの位置においても等しいものと考えられる。したがって、このような葉では、各単色光の照射の方法と利用効率との関係は、葉内の光分布によって決まってくる。

葉内の吸光係数の大きい青色光は、表面から照射された場合には、表層の部分でほとんど吸収され、内部にはわずかな光が到達するにすぎないが、表・裏両面に分けて照射した場合には、表層部だけでなく、裏層部においても光が吸収され、葉内での光吸収がより均一に行われる。前報⁷⁾で述べたごとく、個々の光合成機関に光飽和現象があると考え、前者より後者のほうが光合成にとって有効な光分布である。すなわち、表面から照射した場合より表・裏両面に分けて照射した場合のほうが利用効率は高くなる^{4,6)}。

赤色光は、青色光におけるほど葉内の吸光係数が大きくないが、吸収された光エネルギーがほとんど光合成に利用されるため、青色光の場合と同じようになる。

緑色光は、葉内の吸光係数が小さいために、表面から照射しても表・裏両面から照射しても、葉内の光分布に著しいちがいが無い。したがって、利用効率は表面から照射しても両面から照射しても変わらない。

これらは、前報で述べた考え方によく一致している。

ところが一方、(2)のタイプ(キュウリ)、(3)のタイプ(インゲン)の葉では、葉肉組織が柵状組織層と海绵状組織層とに分化しており、それぞれの組織層での光透過率が等しくなく、海绵状組織層でよりも柵状組織層で低く、透過率の低い青色部、赤色部でその差が大きかった。このことは、葉内での光合成機関の密度が均一でなく、海绵状組織層でよりも柵状組織層で密であることを示している。したがって、葉内での光の吸収の一部が細胞膜など光合成機関以外のもので行われることから、葉内での各波長の光の利用効率は、海绵状組織層でよりも柵状組織層で高くなっていることが考えられる^{3,4)}。

このようなことから、葉肉組織が柵状組織層と海绵状組織層とに分化している葉の利用効率は、単に葉内での光分布だけでなく、葉に吸収された光エネルギーが柵状組織層と海绵状組織層とにどのような割合で吸収されるかということが問題になる。

そこで、本実験でのキュウリ、インゲンについて、それらが表面から照射された場合、あるいは表・裏両面から照射された場合に各組織層でどれだけの光エネルギーが吸収されるかをもとめる。なお記号は、各波長の光に

ついて次のようにする。

入射光エネルギー	I_0
葉の表面での反射率	R_u
葉の裏面での反射率	R_l
葉の表面から照射したときの透過率	T_u
葉の裏面から照射したときの透過率	T_l
柵状組織層の厚さ	D_p
海綿状組織層の厚さ	D_s
柵状組織層での単位厚 (d) の吸光係数	k_p
海綿状組織層での単位厚 (d) 吸光係数	k_s
柵状組織層面での反射率	r_p
海綿状組織層面での反射率	r_s

葉内での光減衰が Lambert-beer の法則に従うとする¹⁾、葉の表面から光を照射した場合、柵状組織層を経て、海綿状組織層との境界面に到達する光エネルギー (I_1) は、

$$I_1 = (1 - R_u) I_0 \exp\left(-k_p \cdot \frac{D_p}{d}\right) \quad (1)$$

さらに、海綿状組織層を経て、透過光として葉外に出る光エネルギー ($T_u \cdot I_0$) は、

$$T_u \cdot I_0 = (1 - r_s) I_1 \exp\left(-k_s \cdot \frac{D_s}{d}\right) \\ = (1 - R_u)(1 - r_s) I_0 \exp\left(-k_p \cdot \frac{D_p}{d} - k_s \cdot \frac{D_s}{d}\right) \quad (2)$$

となる。

同じように、裏面から光を照射した場合について考えると、海綿状組織層を経て、柵状組織層との境界面に到達する光エネルギー (I_2) は、

$$I_2 = (1 - R_l) I_0 \exp\left(-k_s \cdot \frac{D_s}{d}\right) \quad (3)$$

さらに、柵状組織層を経て、透過光として葉外に出る光エネルギー ($T_l \cdot I_0$) は、

$$T_l \cdot I_0 = (1 - r_p) I_2 \exp\left(-k_p \cdot \frac{D_p}{d}\right) \\ = (1 - R_l)(1 - r_p) I_0 \exp\left(-k_s \cdot \frac{D_s}{d} - k_p \cdot \frac{D_p}{d}\right) \quad (4)$$

となる。

したがって、表面から照射した場合、柵状組織層で吸収される光エネルギー (A_p) は、

$$A_p = (1 - R_u) I_0 - I_1 + r_s I_1 = (1 - R_u) I_0 \\ \left[1 - (1 - r_s) \exp\left(-k_p \cdot \frac{D_p}{d}\right)\right] \quad (5)$$

ただし、 $r_s \cdot I_1$ は柵状組織層ですべて吸収されるものとする。

また、海綿状組織層で吸収される光エネルギー (A_s) は、

$$A_s = (1 - r_s) I_1 - T_u \cdot I_0 = (1 - R_u)(1 - r_s) I_0 \exp \\ \left(-k_p \cdot \frac{D_p}{d}\right) \left[1 - \exp\left(-k_s \cdot \frac{D_s}{d}\right)\right] \quad (6)$$

となる。

表・裏面から照射した場合、表面からのみ照射された場合の $1/2$ の光エネルギーで表・裏面にそれぞれ照射されるものとする、柵状組織層で吸収される光エネルギー (A'_p) は、

$$A'_p = \frac{1}{2} [(1 - R_u) I_0 - (1 - r_s) I_1] + \frac{1}{2} [(1 - r_p) I_2 - T_l \cdot I_0] \\ I_0 = \frac{1}{2} I_0 \left\{ (1 - R_u) \left[1 - (1 - r_s) \exp\left(-k_p \cdot \frac{D_p}{d}\right)\right] \right. \\ \left. + (1 - R_l)(1 - r_p) \exp\left(-k_s \cdot \frac{D_s}{d}\right) \left[1 - \exp\left(-k_p \cdot \frac{D_p}{d}\right)\right] \right\} \quad (7)$$

となり、海綿状組織層で吸収される光エネルギー (A'_s) は、同様に、

$$A'_s = \frac{1}{2} I_0 \left\{ (1 - R_l) \left[1 - (1 - r_p) \exp\left(-k_s \cdot \frac{D_s}{d}\right)\right] \right. \\ \left. + (1 - R_u)(1 - r_s) \exp\left(-k_p \cdot \frac{D_p}{d}\right) \left[1 - \exp\left(-k_s \cdot \frac{D_s}{d}\right)\right] \right\} \quad (8)$$

となる。ただし、この場合も、 $r_s \cdot I_1$ 、 $r_p \cdot I_2$ は、柵状組織層あるいは海綿状組織層ですべて吸収されてしまうものとする。

ここで、 R_u 、 R_l 、 T_u 、 T_l は、Fig. 3 の反射、透過スペクトルより各波長での値が得られ、 k_p 、 k_s は、Fig. 6 に示した各組織層での薄層の透過スペクトルからもとまる (ただし、 $d=10\mu$ とした)。 D_p 、 D_s は、Fig. 5 において D_p/D_s の値が得られ、また(4)式において各文字に赤色部あるいは青色部での値を入れ、 $r_p=0$ とすると、 D_p 、 D_s だけが未知数となるから、これらの両式からもとまる。

これらの値を(2)、(4)式に代入すると、 r_p (緑色部での値)、および r_s がもとまる。実際計算してみると、キュウリ、インゲンとも、大略、緑色部 (530nm) では、 $r_p=5\%$ 、 $r_s=15\%$ となり、青色部 (460nm)、赤色部 (660nm) では、 $r_s=0\sim10\%$ が得られた。

上述の値をそれぞれ(5)、(6)式、および(7)、(8)式に代入して、各単色光での A_p 、 A_s 、および A'_p 、 A'_s を計算した。その結果は、次のようである。ただし、青色光：460nm、緑色光：530nm、赤色光：660nm として計算した。

キュウリでは、表面から照射した場合、青色光、赤色光は、大部分、柵状組織層で吸収されてしまい、海綿状

組織層ではわずかに吸収されているにすぎないが、緑色光は、約15%が海綿状組織層で吸収されている。表・裏両面に分けて照射した場合には、いずれの単色光においても約25~30%が海綿状組織層で吸収されている。

インゲンでは、表面から照射した場合には、海綿状組織層で、大略、青色光：5%，赤色光：10%，緑色光：20%が吸収されているが、表・裏両面に分けて照射した場合には、いずれの単色光においても約40%が海綿状組織層で吸収されている。

このように、葉内に入った光が柵状組織層と海綿状組織層で吸収される割合が表面から照射した場合と表・裏両面から照射した場合とで異なり、その差は、キュウリでは青色光：25%，赤色光：20%，緑色光：10%，インゲンでは青色光：35%，赤色光：25%，緑色光：15%であった。ただし、これらの計算では表皮での光の吸収については考えておらない。

このようなことから、キュウリもインゲンの葉では、葉内の吸光係数が大きい青色光や赤色光を表・裏両面に分けて照射した場合は、表面から照射した場合にはくらべて、葉内の光分布の点では光合成に有利になるが、それと同時に海綿状組織層での光吸収の割合が増すことによる利用効率の低下が生じ、葉全体の利用効率が(1)のタイプの葉ほど高くならなかつたものと考えられる。

緑色光では、柵状組織層、海綿状組織層での吸光係数がともに小さいため、表面から照射しても両面から照射しても、葉内の光分布、および各組織層での光吸収の割合に著しい差異が生じない。したがって葉全体の利用効率は、照射方法に関係なく一定になったものと考えられる。

ここで、このような点から、前報⁷⁾での結果をもう一度考えてみる。前報で述べた考え方からすれば、葉の光透過率のちがいに応じて光質—光合成関係が異なったものになることが考えられ、そのことから、キャベツ、レタスの結果をよく説明できた。しかし問題になるのは、フダンソウ、キュウリ、インゲンにおける現象である。すなわち、フダンソウの葉の光透過率がキュウリ、インゲンのそれらに比べて等しいが、むしろ高くなっているにもかかわらず、光質—光合成関係は、フダンソウが Gabrielsen 型を示し、キュウリ、インゲンが Hoover 型と Gabrielsen 型の間中型を示している。これは、前報での考え方とは矛盾するようであるが、上述したような葉の構造のちがいを考えるとよく説明できる。

緑色光は、葉内の全層で吸収されるため、どの場合の利用効率もほぼ等しくなるが、青色光は、葉肉組織が一様であるフダンソウの葉より、葉の表側に柵状組織層を

もったキュウリ、インゲンの葉において利用効率が高くなる。とくにフダンソウは、本実験において見られたように、他の作物にくらべて、葉厚のわりには光透過率が高いことから、葉内のクロロフィル密度が低く、青・赤色部の利用効率が低くなっていることが考えられる。したがって、上述のような現象がみられたものと考えられる。

以上のようなことから、光質と光合成との関係は、前報で明らかにしたごとく、各波長の光が葉内でどのような減衰曲線をたどるかということ、すなわち葉内の吸光係数、葉厚、照射エネルギー強度などによって異なったものになるが、葉の解剖学的特性のちがいが葉内の光学的特性を複雑にし、それによってもまた異なってくるのがわかった。

摘 要

前報において、単葉の光質—光合成関係は、各波長の光が葉内でどのような減衰曲線をたどるかによって決まってくることを葉内の吸光係数の点から明らかにした。

本報では、数種の作物について、各種単色光を葉の表面から照射したときと表・裏両面から照射したときとの同化量を比較することによって、葉の解剖学的特性が光質—光合成関係に及ぼす影響について検討した。

作物、あるいは照射した単色光によって、表・裏両面から照射したときと同化量が表面から照射したときと同化量より多くなる場合もあり、少なくなる場合もあった。また両者が等しくなる場合もあった。これらを葉に吸収された光エネルギーの利用効率であらわすと、緑色光は、どの作物でも照射方法に関係なく一定であったが、青色光、赤色光は、作物によって異なり、表面より照射したときより表・裏両面から照射したときのほうが高くなるもの、低くなるもの、あるいは変わらないものがあつた。

この相異は、葉の葉肉組織が一様であるか、あるいは柵状組織層と海綿状組織層とに分化しているかどうかによって決まってくる。すなわち、葉肉組織が一様な葉では、葉内のどの位置においても利用効率が等しいため、光質—光合成関係は、各波長の光が葉内でどのような減衰曲線をたどるかによって異なってくるが、葉肉組織が柵状組織層と海綿状組織層とに分化した葉では、光学的特性がそれぞれの組織層で異なり、それに応じて各組織層での利用効率が異なるため、光質—光合成関係は、葉内に入った光が各組織層にどのような割合で吸収されているかによっても異なってくる。

文 献

- 1) GABRIELSEN, E. K., 1948: Effect of different chlorophyll concentration on photosynthesis in foliage leaves. *physiol. Plant.* 1, 5—37.
- 2) GABRIELSEN, E. K., 1960: Lichtwelllänge und Photosynthesis. In "Handbuch der Pflanzenphysiologie" 5 (2), (E. D.) W. RUHLAND, Springer, Berlin, Göttingen, Heiderberg, (1960), 8—48.
- 3) 玖村敦彦, 石井竜一: 葉における光の反射, 吸収, 透過, 戸刈義次監修, 作物の光合成と物質生産, 養賢堂 (1970), 29—34.
- 4) MOSS, D. N., 1964: Optimum lighting of leaves. *Crop Sci.* 4, 131—136.
- 5) PEARMAN, G. I., 1966: The reflection of visible radiation from leaves of some western Australian species. *Aust. Jour. Bio. Sci.*, 19, 97—103.
- 6) 田中孝幸, 松島省三, 1970: 水稲の成立原理とその応用に関する作物学的研究 (第94報), 個葉の表面および裏面の光強度と同化量との関係, 日作紀, 39, 325—329.
- 7) 矢吹万寿, 高博, 1973: 数種の蔬菜の光合成と光質との関係, 農業気象, 29, 17—23.

Summary

It was proved in the preceding paper that the action spectrum of photosynthesis in the leaf of higher plants differs with absorbing rate of each light of different wave length, assuming that the structure within the leaf was uniform.

From the viewpoint of optical and anatomical characteristics, the present paper discusses the dependence of the difference in the mesophyll structure on the action spectrum of photosynthesis by investigating each photosynthetic rate of leaves irradiated by red, green and blue light from adaxial side and both sides. Five plants, cabbage, Swiss chard, cucumber, kidney bean, and lettuce, were provided as materials. The results obtained were as follows:

- 1) The photosynthetic rates of Swiss chard, cabbage and lettuce, when irradiated by red or blue light from both sides, were much more than those obtained under the irradiation from adaxial side.
- 2) The photosynthetic rate of cucumber, when irradiated by red light from either adaxial side or both sides, was the same as that under blue light. The photosynthetic rate in green light was less for both sides than adaxial side.
- 3) In all cases, the photosynthetic rate of kidney bean when irradiated from adaxial side was much more than that for irradiation from both sides.
- 4) The efficiency of absorbed light in red and blue light depended on the variety of plants in the same way as the photosynthetic rate. In green light, however, the efficiency was equal in all leaves whether irradiated from adaxial side or both sides.
- 5) The leaves of cabbage, Swiss chard, and lettuce had the uniform mesophyll layers. The leaves of cucumber and kidney bean had the palisade and the spongy tissue layers.
- 6) The transmission spectra of thin layers were the same anywhere within the mesophyll layer in the leaf of Swiss chard. But the transmission of thin layers within the palisade and the spongy tissue was not exactly alike in the leaves of cucumber and kidney bean. It was higher in the spongy tissue layer than in the palisade layer. The difference between these two layers increased at the wave length which gives lower transmission.