農業気象 (*J. Agr. Met.*) 46 (1): 1-7, 1990

植物葉の光合成速度に与える粉じんの物理的影響

平野高司・清田 信・北宅善昭・相賀一郎

(大阪府立大学農学部)

The Physical Effects of Dust on Photosynthetic Rate of Plant Leaves

Takashi HIRANO, Makoto KIYOTA, Yoshiaki KITAYA and Ichiro AIGA

(College of Agriculture, University of Osaka Prefecture,)
Sakai 591, Japan

Dust cover on leaves is considered to affect photosynthesis directly, mainly by shading leaf surface, increasing leaf temperature and plugging stomata. This study was carried out to make clear these physical effects of dust on photosynthesis. Four classes of JIS Z 8901 dust (Carbon-Black and Kanto-loam powder Coarse, Fine, Ultrafine), which were different in particle size and had pH values around neutrality, were applied to upper surfaces of leaves of kidney bean and cucumber plants at various densities. These two species were different in stomatal density. Both net photosynthetic rates and leaf temperatures of dusted leaves and clean leaves were measured at the same time, over a range of light intensities.

The following results were obtained both in kidney bean and cucumber plants.

(1) Photosynthetic rate was reduced by dust. As dust density on leaf surface increased, it was reduced further.

(2) When carbon-black was applied, leaf temperature increased by 3°C at the maximum, but none of three classes of kanto-loam powder increased leaf temperature.

(3) Regardless of dust characteristics or dust density, the reduction in photosynthetic rate was nearly equal to the reduction in PPFD incoming to upper surface of leaf by dust accumulation, in all measurements in this study.

Therefore it seemed that the shading leaf surface was the most important of the injurious physical effects of dust on photosynthesis.

Key words: Dust, Leaf temperature, Photosynthetic rate, Physical effect, Shading

キーワード: 光合成速度, 遮光, 物理的影響, 粉じん, 葉温

1. はじめに

わが国では、粒径 10 μm 以下の浮遊粒子状物質を中心とした粉じんの濃度は、大都市部および幹線道路の周辺で依然高い状態にある(朝来野ら, 1988)。また、土木工事現場や土砂運搬車両が通行する道路からは土壌に由来する粉じんが発生し、その周辺の植物の葉面、特にその上面にかなりの量が付着している(平野ら, 1989)。この

ような状況から、大気汚染物質の植物に与える影響を検討する場合、粉じんを無視することはできない。

粉じんが植物に与える作用として重要なのは、植物の表面積の大部分を占める葉面への付着である。葉面に付着した粉じんは、化学的、あるいは物理的作用により植物に影響を与える。

化学的影響は、主に粉じんの水溶性成分による。河野ら(1977, 1978, 1979)は、酸性を示すばいじんがインゲンマメの初生葉に障害を与えることを報告した。また、Darley(1966)とLerman and Darley(1986)は、ア

平成元年 7 月 25 日 全国大会にて発表

1989 年 9 月 29 日 受領, 1990 年 4 月 5 日 受理

ルカリ性を示すセメント粉じんを露滴とともに暴露すると、インゲンマメの葉に障害が現れCO₂の吸収速度が減少することを見出した。

一方、物理的影響としては、葉面に到達する光を遮る、葉温を上昇させる、あるいは気孔をふさいでCO₂の交換を阻害することによる光合成速度の低下が指摘されている(Eller, 1977; Thompson *et al.*, 1984; Lerman and Darley, 1986)。しかし、粉じんが気孔をふさぐ作用については否定的な報告もある(Ricks and Williams, 1974; Krajickova and Mejstrik, 1984)。このように、光合成速度に与える粉じんの物理的影響については解明されていない部分が多く、実際に粉じんの付着した葉の光合成速度を測定する必要がある。

本研究は、葉面に付着した粉じんが光合成速度に与える物理的影響を明らかにすることを目的としている。そのため、粒径などの異なる4種類の試験用ダスト(JIS Z 8901)を、それぞれ量を変えて葉の上面に付着させ、光合成速度を測定し、比較検討を行った。

2. 材料と方法

2.1 供試植物と試験用ダスト

供試植物には、葉の上面の気孔密度が大きく異なるインゲンマメ(*Phaseolus vulgaris* L., 品種名: 丸さや河内黒三度)とキュウリ(*Cucumis sativus* L., 品種名: 四葉)を用いた。それぞれパーミキュライトを入れた鉢に播種し、インゲンマメは約2週間、キュウリは約3週間温室内で育成した。灌水には培養液(大塚ハウス1号, 2号の標準濃度)を用いた。実験には、インゲンマメでは2枚の初生葉が、キュウリでは第3葉がそれぞれ十分に展開したものをを用いた。葉の上面と下面の気孔密度は、インゲンマメの初生葉ではそれぞれ60, 400個/mm²、キュウリの第3葉ではそれぞれ210, 420個/mm²であった。このように、気孔密度は下面ではほぼ等しいが、上面ではキュウリがインゲンマメの3.5倍であった。

実験に用いた試験用ダスト(JIS Z 8901: 以下、粉じんとよぶ)はTable 1に示す4種類で、中位径と粒径範囲は山下(1988)を参考にした。これらは成分によってカーボンブラックと関東ローム粉に分かれ、前者は黒

色で工場の煙突から排出されるばいじんに類似し、後者は赤褐色で土壌由来の粉じんに類似する。さらに、関東ローム粉は粒径によって3種類(細粒, 微粒, 超微粒)に分かれる。粒径は関東ローム粉細粒>微粒>超微粒>カーボンブラックである。表中のpHは、5%濃度になるようにイオン交換水に粉じんを加えて攪拌し、24時間後に再び攪拌してpHメーター(堀場製作所, M-7)で測定した値である。pHは6.5~7.2の範囲であった。

2.2 暴露方法

暴露葉には、インゲンマメでは1対の初生葉の1枚を、キュウリでは第3葉をそれぞれ用いた。光合成有効波長域の光量子束密度(PPFD)が約700μE/m²/sである人工光型グロースキャビネット(光源: レフランプ(東芝: RF 220V 500 WH 5個, 松下電器: RF 220V 450 WH 3個)+蛍光水銀ランプ(東芝: RF 400/T 5個, HF 700-SW 2個)+蛍光灯(三菱: FLR 40S-W/M-36 6本))内に供試植物を30分以上おいた後、粉じんが付着しないように暴露葉以外をポリエチレンフィルムで覆い、暴露チャンバー内に移した。

本研究では、葉面に均一に粉じんを付着させるため、Darley(1966)と同様な装置を用いた。つまり、下から空気を噴射して粉じんを装置内に舞い上がらせ、そこへ水平方向から空気を送り込み、パイプを通して透明アクリル製の暴露チャンバーに粉じんを導いた。パイプはチャンバーの最上部につながっており、またチャンバーの底は開放されているため、粉じんはチャンバー内で水平に保持された暴露葉の上面に均一に付着した。粉じんは、葉の下面には付着しなかった。暴露時間(5~15分)を変えて付着量を調節した。葉面の付着量は、暴露中に暴露葉の横に水平に置いた、面積0.0041m²の透明粘着テープ(以下、テープとよぶ)の付着量で表した。

2.3 粉じん付着量と遮光率の測定方法

粉じん付着量は、テープの暴露前後の重量変化から求めた。また、粉じんによるPPFDの遮へい率(100%-透過率: 以下、遮光率とよぶ)も求めた。遮光率を求めるために、まず粉じんの付着したテープの光合成有効波長域(400~700nm)での波長別透過率を、積分球(日本分光, TIS-341)を装備した分光光度計(日本分光,

Table 1 Characteristics of dust (JIS Z 8901).

Class	Name	Median diameter (μm)	Diameter range (μm)	Color	pH
7	Kanto-loam (Coarse)	30	—	Redish-	6.5
8	Kanto-loam (Fine)	8	—	brown	6.6
11	Kanto-loam (Ultrafine)	1.9	—	—	7.1
12	Carbon-black	—	0.03~0.20	Black	7.2

Ubest-50)で測定した。それをテープのみの波長別透過率(90%でほぼ一定)で割り、テープの影響を除外した粉じんのみの波長別透過率を求めた。それらを積分し、さらに波長幅で割って平均透過率を求め、遮光率を計算した。

カーボンブラックでは透過率に波長依存性はなかったが、関東ローム粉では波長が短くなるに従って透過率はほぼ直線的に低下した。そのため、関東ローム粉の平均透過率を求めるには、波長ごとに透過率を光量子数で重み付けする必要がある。しかし、カーボンブラック、関東ローム粉ともに、上記の方法で求めた粉じんの平均透過率と、光合成速度を測定した人工光型グロースキャビネット内で光量子計(Licor, LI-190S)によって求めた同一試料の透過率を比較すると、付着量や粒径に関係なく両者は良く一致した。このことから、本研究では簡便な分光光度計による方法で求めた遮光率を使用した。

2.4 光合成速度の測定方法

本研究では、暴露葉の暴露前後のみかけの光合成速度(以下、光合成速度とよぶ)を比較した。そのため、暴露葉と同一個体の未暴露葉の光合成速度を同時に測定し、未暴露葉の光合成速度が暴露前後で異なる場合は対象から除外した。測定に用いた未暴露葉は、インゲンマメでは暴露葉以外の初生葉、キュウリでは第2葉である。

光合成速度は、内部環境条件が等しくなるように同じ様式の透明アクリル製同化箱を2台用いて、人工光型グロースキャビネット内で測定した。同化箱の入口と出口のCO₂濃度差は、差動型赤外線CO₂分析計(富士電機、ZALDA)を用いて測定した。測定は、供試植物を30分以上同一環境下に置いた後に行った。暴露前後の測定時間差は約4時間であった。

測定システムは半閉鎖方式で、コンプレッサーによって取り入れた外気をバッファ内で攪拌し、CO₂濃度を安定させ、恒温水槽内でバブリングして温度・湿度を調節し、等量ずつ2台の同化箱に送った。1台あたりの通気量は、インゲンマメでは6 l/min、キュウリでは15 l/minであった。同化箱内の気温は、インゲンマメでは20℃、キュウリでは25℃、相対湿度は70~80%であった。PPFDは、光量子計(Licor, LI-190S)を用いて測定し、遮光用の寒冷紗の枚数を変えて0~730 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ の範囲で6~7段階に調節した。なお、絶対値型赤外線CO₂分析計(富士電機、ZEP-5)を用いて流入空気中のCO₂濃度の変動をチェックした。また、葉面境界層の影響を小さくするために、ファンを用いて同化箱内の流速を高めた。葉温は、葉の下面に直径0.1 mmの銅・コンスタンタン熱電対を付着させて測定した。

3. 結果と考察

実験に用いた粉じんの付着量と遮光率の関係をFig.1に示す。全ての粉じんで、付着量が多いほど遮光率も大きくなった。しかし、この関係は粉じんの種類によって異なり、同じ付着量に対する遮光率はカーボンブラック>関東ローム粉超微粒>微粒>細粒となった。このように、付着量が同じでも粒径の小さい粉じんほど遮光率が大きかった。

Fig. 1. Relation between shading ratio for PPFD of dust and dust density.

PPFDと光合成速度の関係を、インゲンマメについてはFig.2に、キュウリについてはFig.3にそれぞれ示す。これらはカーボンブラックと関東ローム粉細粒についての例であるが、その他の測定結果も同様の傾向を示した。光合成速度は、PPFDの最大値(インゲンマメ710 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ 、キュウリ730 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$)における暴露前の値を100%とした相対値である。インゲンマメ、キュウリともに暴露前に比べ暴露後の光合成速度は小さく、その差は付着量が多いほど大きい傾向を示した。なお、PPFD 700 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ 付近の光合成速度をみると、キュウリでは差がみられるのに対し、インゲンマメではほぼ等しい。この違いは光飽和点が異なることによると考えられる。光飽和点は、インゲンマメでは400 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ 程度であるが、キュウリでは700 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ 以上である。そのため、インゲンマメではPPFD 710 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ のとき、43%遮光されても葉面に到達する光は405 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ であり、光合成速度はほぼ光飽和に達している。ところがキュウリでは、PPFDが730 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ でも光飽和に達した程度であり、光合成速度は遮光の影響を受ける。

次に、付着量、遮光率と光合成速度減少率の関係を、測定したPPFDについてそれぞれ調べた。これらの関

Fig. 2. Relation between net photosynthetic rate of kidney bean leaves and PPFD under different dust densities (○: clean leaf, ●: dusted leaf). The percentage values of net photosynthetic rate are given as the relative value of the rate of a clean leaf at the maximal PPFD. Numbers in () indicate dust density and shading ratio for PPFD of dust, respectively.

Fig. 3. Relation between net photosynthetic rate of cucumber leaves and PPFD under different dust densities (○: clean leaf, ●: dusted leaf). Other explanations are the same as in Fig. 2.

係は、どの PPFD でもほぼ同様であったが、光飽和点以下では傾向が顕著であった。例として、PPFD 210 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ のときの結果を Fig.4 に示す。なお、光合成速度減少率とは、暴露前後の光合成速度の差を暴露前の光合成速度に対する百分率で表したものである。

付着量と光合成速度減少率の関係は、粉じんの種類によってかなり異なる傾向を示した。付着量が等しいとき、減少量はカーボンブラックで最大、関東ローソ粉細粒で最小となった。ところが、遮光率と光合成速度減少率の関係は、全ての種類の粉じんではほぼ等しくなった。このことから、光合成速度の減少は粉じんによる PPFD の

遮光と密接に関係していると考えられる。

Fig.5, 6 は、暴露葉の葉面に実際に到達すると考えられる PPFD、つまり同化箱内で測定した PPFD に (1 - 遮光率/100) をかけた値と光合成速度の関係を示している。Fig.5 がインゲンマメ、Fig.6 がキュウリで、それぞれ Fig.2, 3 と同じ実験の結果である。なお、光合成速度は相対値で表した。

暴露の前と後の PPFD と光合成速度の関係を比べると、インゲンマメ、キュウリともに両者の関係は良く一致した。その他の測定結果も同様であった。

このことから、葉の上面に付着した粉じんによる光合

Fig. 4. Relation between reduction ratio of net photosynthetic rate ($100 \times (P_c - P_d) / P_c$) at $210 \mu \text{E/m}^2/\text{s}$ and dust density, and shading ratio for PPFD of dust. P_c indicates net photosynthetic rate of a clean leaf and P_d indicates that of a dusted leaf.

●: Carbon-black, △: K. loam (Ultrafine), ○: K. loam (fine), □: K. loam (Coarse).

成速度の減少は、遮光作用による光合成速度の減少と同程度であるといえる。

光合成速度の減少についてはいくつかの原因が考えられるが、①化学的成分が異なるにもかかわらず、カーボンブラック、関東ローソ粉ともに光合成速度の減少は遮光作用による減少と同程度、②粉じんの pH が全て 7 前後、③実験終了後約 1 週間経過しても葉に全く障害が現れなかったことなどを考慮すると、化学的影響はなく、全て物理的影響であったと推測される。

物理的影響の 1 つとして葉温の上昇が考えられる。本実験でも、カーボンブラックを付着させた場合には最高で約 3℃ 葉温が上昇した。しかし、関東ローソ粉の場合には 3 種類とも葉温の上昇はみられなかった。それにもかかわらず、全ての場合で光合成速度の減少は遮光作用による減少と同程度であった。したがって、粉じんが引き起こした葉温の上昇が光合成速度に与える影響は無視できるであろう。ただ、今回は同化箱内をインゲンマメで 20℃、キュウリで 25℃ としたため、葉温はそれぞれ 20～25、25～30℃ とほぼ適温域 (岩城, 1979; 矢吹, 1985) であった。葉温が適温域より高い場合、逆に適温域より低い場合には、粉じんによる葉温の上昇が光合成速度に与える影響を考慮する必要がある。

次に、粉じんが気孔をふさぐ作用について検討する。

本研究では、粒径の異なる粉じんを大量に付着させた場合も、インゲンマメ、キュウリともに光合成速度の減少は遮光作用による減少と同程度であった。また、葉温の上昇による影響も無視できることから、結果として、粉じんが気孔をふさぐことによる光合成速度への影響は小さいといえる。ただ、粉じんが付着した葉の上面では気孔がふさがれていた可能性は考えられる。矢吹 (1985) は、キュウリの光合成速度は葉の下面の方が大きく、上面の 3～4 倍であると述べている。したがって、上面の気孔が多少ふさがれても下面の気孔がふさがれなければ、光合成速度に与える影響は小さいであろう。キュウリに比べ上面の気孔密度が小さいインゲンマメについても同様のことがいえる。このことを明確にするには、葉の上面と下面の光合成速度を別々に測定する必要がある。

葉面に付着した化学的に不活性な粉じんによる光合成速度の減少は、そのほとんどが遮光による影響である。粉じんの種類や粒径により付着量と遮光率の関係が異なるため、粉じんの光合成に与える影響を評価する場合には、粉じんの付着量ではなく、その粉じんによる PPFD の遮光率を指標として検討することが重要である。

Fig. 5. Relation between net photosynthetic rate of kidney bean leaves and PPFD under different dust densities (○: clean leaf, ●: dusted leaf). But the net photosynthetic rates of dusted leaves (●) are plotted against incoming PPFD to leaf surface estimated from shading ratio for PPFD of dust. Other explanations are the same as in Fig. 2.

Fig. 6. Relation between net photosynthetic rate of cucumber leaves and PPFD under different dust densities (○: clean leaf, ●: dusted leaf). But the net photosynthetic rates of dusted leaves (●) are plotted against incoming PPFD to leaf surface estimated from shading ratio for PPFD of dust. Other explanations are the same as in Fig. 2.

引用文献

- 朝来野国彦・西山健一郎・佐藤静雄, 1988: 浮遊粒子状物質汚染の現状と対策. 大気汚染学会誌, **23**, 129-142.
- 岩城英夫, 1979: 群落の機能と生産, 朝倉書店, 16-19.
- Darley, E. F., 1966: Studies on the effect of cement-kiln dust on vegetation. *J. Air Pollut. Control Ass.*, **16**, 145-150.
- Eller, B. M., 1977: Road dust induced increase of leaf temperature. *Environ. Pollut.*, **13**, 99-107.

- 平野高司・喜野達浩・清田 信・相賀一郎, 1989: ミカン樹葉面へ到達する光に及ぼす道路粉じんの影響. 第30回大気汚染学会講演要旨集, 354.
- 河野吉久・高梨成行・石川晴彦, 1977: ばいじんの植物におよぼす影響に関する研究, 1) インゲン初生葉のばいじん付着障害とばいじんの pH および電気伝導度との関係. 電力中央研究所研究報告, No.477001, 1-20.
- 河野吉久・高梨成行・石川晴彦, 1978: ばいじんの植物におよぼす影響に関する研究, 2) ボイラー燃料とインゲン葉におけるばいじん障害との関係. 電力中央研

- 究所研究報告, No.478001, 1-15.
- 河野吉久・高梨成行・石川晴彦, 1979: ばいじんの植物におよぼす影響に関する研究, 3) インゲン初生葉におよぼす水溶性成分の影響, 電力中央研究所研究報告, No.479001, 1-14.
- Krajickova, A. and Mejstrik, V., 1984: The effect of fly ash particles on the plugging of stomata. *Environ. Pollut. (Ser. A)*, 36, 83-93.
- Lerman, S. L. and Darley, E. F., 1986: *Airborne particles*. (和田攻ほか訳), 東京化学同人, 187-196.
- Thompson, J. R., Mueller, P. W., Fluckiger, W. and Rutter, A. J., 1984: The effect of dust on photosynthesis and its significance for roadside plants. *Environ. Pollut. (Ser. A)*, 34, 171-190.
- Ricks, G. R. and Williams, J. H., 1974: Effects of atmospheric pollution on deciduous woodland part 2: Effects of particulate matter upon stomatal diffusion resistance in leaves of *Quercus petraea* (Mattuschka) Leibl. *Environ. Pollut.*, 6, 87-109.
- 矢吹萬壽, 1985: 植物の動的環境, 朝倉書店, 51-52, 60.
- 山下憲一, 1988: 標準粉体の規格と物性, 島津科学器械ニュース, 220, 16-18.