



Title	植物葉の光合成に与える粉じんの影響に関する研究
Author(s)	平野, 高司; Hirano, Takashi
Citation	Bulletin of the University of Osaka Prefecture, Series B, 46, 237-271
Degree Grantor	大阪府立大学
Degree Name	博士(農学)
Issue Date	1994
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/20087
Type	doctoral thesis
File Information	thesis.pdf



植物葉の光合成に与える粉じんの影響に関する研究

平野高司

植物葉の光合成に与える粉じんの影響に関する研究

平野高司

農学部・農業工学科・環境調節工学研究室

(Received, 1993)

Studies on the Effects of Dust on Photosynthesis of Plant Leaves

Takashi HIRANO

Laboratory of Environmental Control in Biology,
College of Agriculture

(Received, 1993)

Abstract

Various types of dust are emitted artificially and naturally into the atmosphere through industrial processes, road traffic, volcanic eruptions, dust storms, etc. Around such sources a large quantity of dust cover on vegetation has been frequently observed. A highly alkaline dust like cement dust injures plant leaves visibly; even chemically inert dust affects photosynthesis and transpiration physically when it accumulates on leaf surfaces. Covering and plugging stomata, shading, increasing leaf temperature and removing cuticular wax were reported as physical effects of dust. On photosynthesis, however, almost all the previous studies only guessed the physical effects in their discussions. There are not enough related studies based on well-designed experiments. The aims of this study were to investigate the physical effects of the dust accumulating on plant leaves on photosynthesis, such as shading, plugging stomata and increasing leaf temperature, in detail, and to estimate the reduction in photosynthesis quantitatively.

First, the photosynthetic rate, the transpiration rate, the stomatal conductance and the temperature of cucumber (*Cucumis sativus*) and kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) leaves covered by chemically inert dust (Kanto loam powder and carbon black, JIS Z 8901) were measured under various conditions. Second, the similar experiments were conducted by the use of several kinds of volcanic ash from Mt. Sakurajima and Mt. Unzen-Fugendake. Last, in order to investigate the real conditions of dust, shading coefficients of the dust on the leaf surfaces of satsuma mandarin (*Citrus unshiu*) around the road for dump trucks and *Viburnum awabuki* in the urban area and suburbs in Sakai city were measured, and the reduction in photosynthesis of satsuma mandarin leaves by shading was estimated from shading coefficients and solar radiation.

The results obtained in this study are summarized as follows.

1. The dust was found to decrease stomatal conductance by plugging stomata under a light condition when the stomata were open during dust exposure. The effect was larger when the dust load was larger or the particle size of the dust was smaller. However, the effect was negligible when the stomata were closed during exposure. The dust decreased the photosynthetic rate by shading the leaf surface. The dust with finer particles had a larger shading coefficient. Moreover, the additional absorption of incident short-wave radiation by the dust increased the leaf temperature, and consequently changed the photosynthetic rate in accordance with its response curve to leaf temperature. The increase in leaf temperature increased the transpiration rate.

2. The particle size distribution of volcanic ash was varied with sampling location and the date of eruption. The volcanic ash with smaller particle size and higher light reflectance had a larger shading coefficient. Since ash particles entered stomatal cavities, the stomatal conductance of cucumber leaf was decreased significantly under a light condition, even after they were washed out from the leaf surface. The temperature of the leaf covered with the ash from Mt. Sakurajima at a rate of 50 g m^{-2} increased by 2.5°C under solar radiation of 870 W m^{-2} .

3. A large quantity of dust originated from soil scattering was observed on the upper surface of satsuma mandarin leaves near the road. However, little dust was on the lower surface of the leaves, and the dust load decreased drastically with a distance from the road. While the shading coefficient of the dust on the upper surface of the leaves located in the outside of a crown changed with traffic density of dump tracks and the amount of precipitation, that in the inside little changed. The result of the estimation showed that the shading by dust decreased the net photosynthesis of satsuma mandarin leaves for each month from July to October in 1989 by 5, 9-12, 16-19 and 22-30%, respectively, when shading coefficients were 10, 20, 30 and 40%. In August 1989, the shading coefficients exceeded 30% at trees near the road.

4. The dust contaminated the leaf surfaces of *Viburnum awabuki* gradually in the urban area and suburbs in Sakai city. In October 1990, the mean of shading coefficients of dust on the upper and lower leaf surfaces were 4.9 and 1.6%, respectively. The coefficients around a main road doubled the mean value.

In this study, it was found that dust accumulating on leaf surfaces decreases the photosynthetic rate by the following physical effects, plugging the stomata, shading and increasing the leaf temperature. The results suggest that plants around large dust sources are accompanied by the danger of a chronic decrease in photosynthesis, and consequently in growth. Examination of physical property of dust and understanding of its effect on photosynthesis enable us to estimate damage of plants. It can be said that the estimate of reduction in photosynthesis by dust from the shading coefficient are practical.

目 次

第 I 章 序 論	240
第 II 章 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	241
第 1 節 実験に用いた植物と粉じん	241
第 2 節 粉じんの暴露方法	242
第 3 節 粉じんによる遮光が光合成速度に与える影響	242
第 4 節 粉じんが気孔コンダクタンスに与える直接影響	248
第 5 節 粉じんによる葉温上昇が光合成速度および蒸散速度に与える影響	252
第 6 節 まとめ	254
第 III 章 火山灰の物理的特性および葉温と気孔コンダクタンスに与える影響	255
第 1 節 実験に用いた火山灰と植物	255
第 2 節 火山灰の粒径分布	255
第 3 節 火山灰付着葉の分光反射特性	256
第 4 節 火山灰付着量と遮光率の関係	257
第 5 節 葉面に付着した火山灰が葉温に与える影響	258
第 6 節 葉面に付着した火山灰が気孔コンダクタンスに与える直接影響	259
第 7 節 まとめ	260
第 IV 章 葉面に付着した粉じんが光合成に与える影響評価	260
第 1 節 葉面付着粉じんの遮光率	260
第 2 節 工事用道路周辺における葉面付着粉じんの実態	261
第 3 節 堺市における葉面付着粉じんの実態	264
第 4 節 光合成に与える影響の評価	266
第 5 節 まとめ	267
第 V 章 総括	267
謝 辞	268
引用文献	268

第I章 序 論

わが国では、固定発生源に対する集じん装置の整備、燃料の転換などの削減対策により、比較的粒径が大きく、重力や雨によって短時間に落下する降下ばいじんについてはかなりの改善がみられた¹⁾。しかし、自動車、特に大型ディーゼル車交通量の増大のため、粒径 10 μm 以下の浮遊粒子状物質 (SPM) 濃度は都市部および幹線道路周辺で依然高い状況にある²⁾。このような地域では、葉面に粉じんが付着した植物が多く観察されている³⁾。なかでも、高速道路周辺の樹木では、自動車からのばいじんによる葉の汚染が著しい^{4,5)}。また、雲仙普賢岳や桜島などの活火山は頻繁に噴火を繰り返し、そのたびに大量の火山灰 (粉じん) を噴出している^{6,7)}。このような火山灰は周辺の森林や農地に降下し、植物の葉や地面に堆積して深刻な被害を与えている^{8,9)}。

一方発展途上国においては、近年、都市の人口が急増し、産業活動の活発化および自動車交通量の増大にともなう大気汚染が悪化している。これらの地域では、燃料として石炭が使われることが多い、集じん装置がほとんど普及していない、自動車の排気ガスに対する規制が不十分であるなどの理由から、ばいじんを中心とした大気中の粉じん濃度は高い状況にある^{10,11)}。特に、盆地状の地形の底に位置するメキシコシティ、サンチャゴ、重慶などの都市では、接地逆転層が発達し汚染空気が拡散しにくい状態は深刻である¹²⁻¹⁴⁾。重慶では、多くの樹木の葉面に多量の粉じんが付着しているのが観察された¹⁴⁾。

乾燥地域において飛散する土壌由来の粉じんは風送塵として広い範囲に運ばれる¹⁵⁾。日本にも黄砂として飛来するが、中国の黄河流域や長江下流域では、「雨土」などとよばれる集中的な黄砂の沈降現象が発生する¹⁶⁾。インドでは、乾季に土壌由来の粉じんが植物の葉面にかなりの量付着することが報告されている¹⁷⁾。また、世界には 1000 以上の活火山があり、平均すると毎年約 50 の火山で噴火が起こっている¹⁸⁾。1980 年 5 月に噴火したアメリカのセント・ヘレンズ山では、約 400km 離れた地点で 75 mm 以上の降雨があった後にも、植物の葉面には多量の火山灰が付着していることが観察された¹⁹⁾。

このような葉面に付着した粉じんが植物に与える

影響は、化学的影響と物理的影響に分けて考えることができる。化学的影響については、火力発電所などからのばいじんやセメント工場からの粉じんに関する報告が多い。今村ら²⁰⁾は、火力発電所のばいじんによるカンランの葉の可視害について調査し、被害は、吸湿したばいじんが強酸性の水滴となり表皮などの細胞を損傷・脱水したことが原因であると考察した。松島²¹⁾は、14 種類のばいじんを付着させたウンシュウミカンの果実の被害について検討し、潮解性があり pH が低いばいじんほど大きな被害を与えることを報告した。河野ら²²⁻²⁴⁾は、火力発電所の集じん装置から採取したばいじんをインゲンマメの初生葉に付着させ可視害の程度について検討した結果、吸湿性および潮解性が強く、pH が低く、電気伝導度が高いばいじんでは被害が大きいことを報告した。一方 DARLEY²⁵⁾ と LERMAN and DARLEY²⁶⁾ は、ア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初生葉に障害が現われ、CO₂ 吸収速度が低下すると述べた。KRISHNAMURTHY and RAJACHIDAMBARAM²⁷⁾ は、走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察の結果、セメント粉じんと蒸散の水蒸気によって生じたアルカリ溶液が孔辺細胞を損傷させると報告した。なお沖野ら²⁸⁾は、鋳物工場に隣接するナシ園で発生した果実の汚染について調査し、鋳物工場からの粉じんに含まれる重金属との関連性を強調した。しかし GODZIK *et al.*²⁹⁾ は、亜鉛の製錬所や高速道路周辺では葉内の重金属含有量は高いが、気孔を通して重金属が葉内に取り込まれることはほとんど無視できると述べた。このように、植物体に付着した粉じんの化学的影響はその水溶性成分によって決まり、酸性あるいはアルカリ性の強い粉じんほど被害が大きくなると考えられる。なお、重金属に関しては未解明な点が多い。

物理的影響には火山灰が大量に堆積した場合の枝折れなどの深刻な被害もあるが、大部分は葉面に付着した粉じんによる慢性的な光合成の阻害であるといえる。PEIRCE³⁰⁾ や PARISH³¹⁾ は、セメント工場周辺のオレンジ園を調査し、セメント粉じんがオレンジの葉の上で層状に固く堆積し雨によってもはがれ落ちないことを指摘した。さらに、PEIRCE³⁰⁾ は、セメント粉じんが付着した葉ではアンプルンの合成が減少することを認め、粉じんによる遮光が原因であ

ろうと述べた。ELLER³²⁾は、道路粉じんが付着した葉では日射の吸収量の増大により葉温が約4°C上昇したことを報告し、光合成に与える影響が懸念されると述べた。BORKA³³⁾も、鉄の製錬所から飛来した粉じんによって覆われた葉では、葉温が上昇し呼吸速度が上昇することを報告した。SINGH and RAO³⁴⁾は、セメント粉じん覆われたコムギの蒸散速度が低下し、また成長が抑制されたのは、粉じんによる遮光と気孔が詰まったことによるガス交換の障害が原因であろうと考察した。また THOMPSON *et al.*³⁵⁾は、同様の理由から、化学的に不活性な粉じんを付着させたサングジュ葉で、光合成速度は低下し、気孔の水蒸気拡散抵抗（以下、気孔拡散抵抗とよぶ）は昼間は大きくなったが夜間は逆に小さくなったと報告した。しかし KRAJICKOVA and MEJSTRIK³⁶⁾は、フライアッシュが付着した葉を SEM で観察した結果、粉じんが入り込んだ気孔はないことを認め、さらに粉じんが孔辺細胞を刺激したため気孔拡散抵抗が小さくなったと述べた。LERMAN and DARLEY²⁶⁾も同様の観察結果を報告している。一方 BEASLEY³⁷⁾は、気孔の存在する葉の下面に細かい粒子を付着させると夜間の蒸散量が増大するが、気孔の存在しない葉の上面に付着させても影響がないことを確認し、粒子は気孔の完全な閉鎖を妨げるであろうと述べた。RICKS and WILLIAMS³⁸⁾は、工場の近くのウバメガシの葉では、かなりの割合で粉じんが気孔に入り込んでいることを観察し、気孔が閉じられないため夜間の気孔拡散抵抗が小さくなったと報告した。FLUCKIGER *et al.*³⁹⁾は、ポプラの葉の下面に気孔が開いている状態でシリカゲルを付着させると、粒径 15 μm 以下の粒子では昼も夜も気孔拡散抵抗が低下することを示した。また EVELING⁴⁰⁾は、シリカゲルや粘土などの微粒子の懸濁液が葉面で乾燥する際に、摩擦あるいは吸水作用によりクチクラのワックス層を破壊することを認め、クチクラ抵抗の低下にともなう水分損失について指摘した。なお、形態的な変化についても報告されている。真子ら⁴¹⁾は、砂じんがウンシュウミカンの葉面に長期間付着することによる面積の増大、厚みの減少といった陰葉化が起こったと述べた。このように、植物体に付着した粉じんの物理的影響としてはいくつかあげられるが、光を遮る、気孔に入り込む、葉温を上昇させることによる光合成への慢性影響が最も重要であ

ると考えられる。しかし、光合成への影響について、CO₂ 交換速度の実測に基づいて検討した報告はほとんどなく、推測の域を出ていないのが現状である。被害の実情を把握し適切な対策を考案するためにも、実測に基づいた詳細な検討が必要である。

植物の葉面に付着した粉じんは、化学的に不活性であっても物理的作用により光合成に影響を与え、慢性的な成長阻害を導く可能性がある。本研究では、植物の葉面に付着した粉じんの物理的作用に着目し、それらが光合成に与える影響を明らかにするとともに、その影響を評価することを目的とした。

なお、本論文は平成4年に大阪府立大学へ提出した学位請求論文の概要である。

第II章 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

本章では、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詳細に検討することを目的とした。そのため、化学的に不活性な粉じん（試験用ダスト）を植物の葉面に付着させ、光合成速度、蒸散速度、気孔コンダクタンス（気孔拡散抵抗の逆数）、葉温などを測定し、葉面に付着した粉じんの遮光作用、気孔をふさぐ作用および葉温上昇作用が光合成速度に与える影響について検討した^{42,43)}。

第1節 実験に用いた植物と粉じん

供試植物には、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、インゲンマメでは約2週間、キュウリでは3~4週間、温室内で培養液(大塚ハウス1号, 2号の標準濃度)を用いて育成した。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あるいは第4葉がそれぞれ十分に展開したものをを用いた。なお、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・mm⁻²、キュウリの第3葉ではそれぞれ 210,420 個・mm⁻²であった。このように、インゲンマメとキュウリの気孔密度は、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。

実験に用いた粉じんは関東ローム粉とカーボンブラック(試験用ダスト, JIS Z 8901)である(Table

Table 1. Characteristics of dust used in this study (JIS Z 8901).

Class	Name	Median diameter (μm)	Diameter range (μm)	pH
7	Kanto loam, coarse (KL coarse)	30	—	6.5
8	Kanto loam, fine (KL fine)	8	—	6.6
11	Kanto loam, ultrafine (KL ultrafine)	1.9	—	7.1
12	Carbon black (CB)	—	0.03-0.20	7.2

1)⁴⁴⁾。関東ローム粉は、関東南西部に広く分布する関東火山灰土を母材とし、これを焼成後粉碎したもので、土壌由来の粉じんに類似する。これらは赤褐色で、粒径によって3種類（細粒、微粒、超微粒）に分かれる。一方、カーボンブラックは黒色で、工場の煙突から排出される降下ばいじんに相当する。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。なお表中のpHは、5%濃度(重量)になるようにイオン交換水を加えて攪拌し、24時間後に再び攪拌して測定した値であり、6.5~7.2の範囲にあった。

第2節 粉じんの暴露方法

粉じんの暴露は、葉面に均一に付着させるためDARLEY²⁵⁾と同様の装置 (Fig. 1) を用いて行った。なお、暴露チャンパーには蛍光灯による照明装置を設けた。

暴露を行う前に、植物体を環境制御型風洞内に入れ、光条件を調節して気孔が十分開いている、あるいは閉じている状態にした。暴露中もそれまでの気孔の状態が維持できるように、照明装置を点灯、あるいは消灯し、暴露チャンパー内に植物体を移した。暴露は1個体ずつ行った。暴露チャンパー内のPPFD(光合成有効光量子束密度)は、照明装置を点

灯した状態で $350 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ であった。

粉じんは下から送り込まれた空気により粉じん発生装置内で分散し、パイプを通じて透明アクリル製の暴露チャンパーに導入され、水平に保持された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。付着量は暴露時間で調節し、葉のすぐ側に水平に設置した透明粘着テープ(中川ケミカル、カッティングシート)の暴露前後で増加した重量を単位面積当りに換算して求めた。また、環境制御型風洞内あるいは人工光型グロースチャンパー内で、光量子計(ライカー、LI-190S)を用いて粉じんの付着した透明粘着テープの光透過率(PPFD基準)を測定し、同様に測定した粉じんの付着していないテープの光透過率から粉じんのみの光透過率を求め、粉じんの遮光率(100%-光透過率)を算出した。

第3節 粉じんによる遮光が光合成速度に与える影響

方法

葉の上面に付着した粉じんによる遮光が光合成速度に与える影響を検討するため、以下の実験を行った。

(1) 粉じん付着量と遮光率の関係

粉じんの遮光作用を評価するため付着量と遮光率の関係を調べた。暴露チャンパー (Fig. 1) 内で透明粘着テープに粉じんを付着させ、付着量と遮光率を測定した。暴露時間を変えて両者を測定し、付着量と遮光率の関係を求めた。

(2) 粉じんによる遮光が光合成速度に与える影響

インゲンマメの初生葉の1枚およびキュウリの第3葉に粉じんを付着させ(以下、付着葉とよぶ)、それらの暴露前後の純光合成速度(以下、光合成速度とよぶ)を比較した。なお、付着葉と同一個体にそれぞれ粉じんを付着させない葉(以下、対照葉とよぶ)を設定し、付着葉と同時に光合成速度を測定し

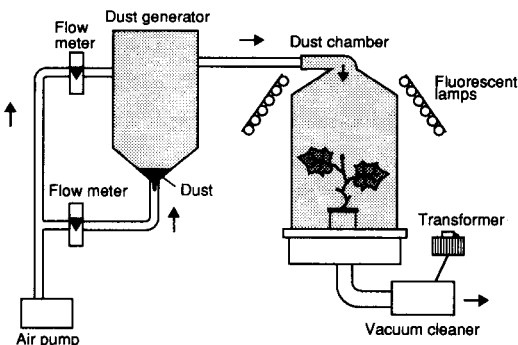


Fig. 1. Schematic diagram of a system for dust exposure.

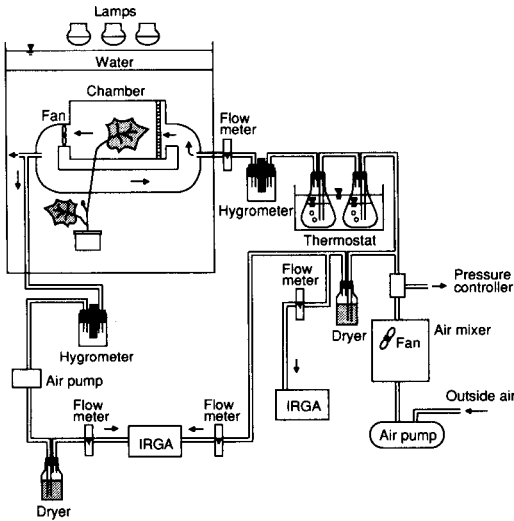


Fig. 2. Schematic diagram of a system for measurement of photosynthesis and transpiration rates.

た。対照葉における結果が暴露前後で異なる場合には、解析の対象から除外した。対照葉は、インゲンマメでは初生葉の付着葉以外の1枚、キュウリでは第2葉とした。暴露時には、付着葉以外をポリエチレンフィルムで覆い粉じんが付着しないようにした。暴露は照明装置を消灯した状態で行った。

光合成速度は、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チャンバー内で測定した (Fig. 2)。差型赤外線 CO_2 分析計 (富士電機, ZALDA) を用いて測定した同化箱の入口と出口の CO_2 濃度差から光合成速度を求めた。測定は、供試植物を測定環境に30分以上順応させた後に行った。なお暴露の前後に測定を行ったが、測定条件は粉じんの付着以外全く同じであった。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ー内で攪拌・混合し、 CO_2 濃度を安定させた。さらに恒温水槽内でバブリングして温度と湿度を調節し、等量ずつ2台の同化箱に送った。1台当たりの通気流量は、インゲンマメでは $6 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 、キュウリでは $15 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ であった。同化箱内の気温は、インゲンマメでは 20°C 、キュウリでは 25°C で、湿度は $75 \pm 5\%$ RH であった。PPFDは、遮光用の寒冷紗の枚数を変えて $0 \sim 730 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の範囲で6~7段階に調節した。なお絶対値型赤外線 CO_2 分析計 (富士電

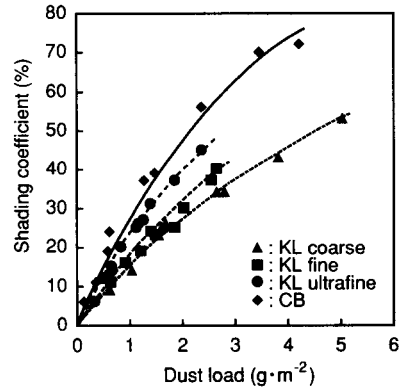


Fig. 3. Relations between the shading coefficient of dust and the dust load.

機, ZEP-5) を用いて流入空気の CO_2 濃度の変動をチェックした。また、葉の下面に直径 0.1 mm の銅・コンスタンタン熱電対を密着させて葉温を測定した。

結果

(1) 粉じん付着量と遮光率の関係

粉じんの付着量と遮光率の関係を Fig. 3 に示す。全ての粉じんで付着量の増加とともに遮光率も大きくなったが、両者の関係は直線ではなく、付着量の増加にしたがい傾きは小さくなった。付着量 $1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ および $2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ での遮光率は、関東ローム粉細粒, 微粒, 超微粒, カーボンブラックでそれぞれ 15, 18, 24, 32% および 27, 33, 40, 52% であった。このように、遮光率は粒径の最も小さいカーボンブラックで最大で、以下関東ローム粉超微粒, 微粒, 細粒と粒径が大きくなるにしたがい小さくなった (Table 1)。付着量 $1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ と $2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ でのカーボンブラックの遮光率は、関東ローム粉細粒のそれぞれ 2.1 倍および 1.9 倍であった。粉じんによる遮光率の違いは主に粒径の違いによると考えられる。同じ量の粉じんでは、粒径が小さい粒子ほど局在することなく平滑に分布するため光の吸収効率が高くなり⁵³⁾、遮光率は大きくなると考えられる。

(2) 粉じんによる遮光が光合成速度に与える影響

粉じん付着葉の暴露前後の光-光合成曲線を、インゲンマメについては Fig. 4 に、キュウリについては Fig. 5 にそれぞれ示す。

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低下した。暴露前後の光合成速

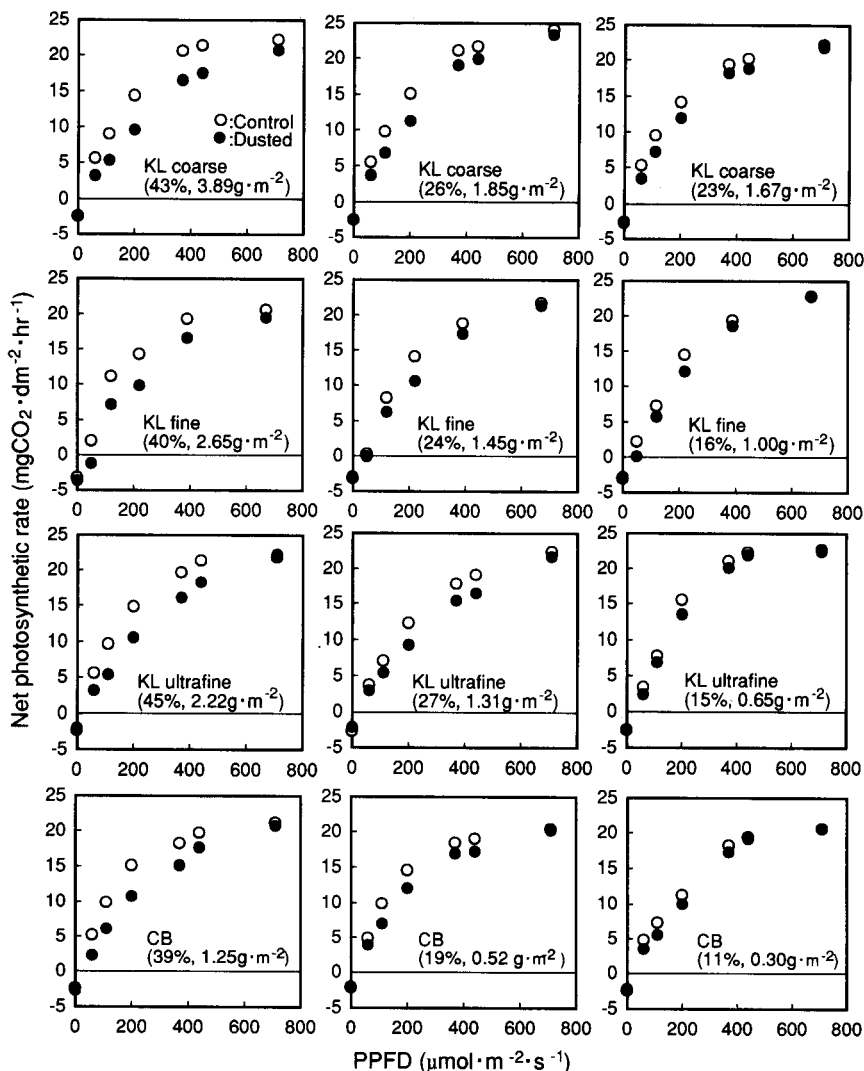


Fig. 4. Relations between the net photosynthetic rate of kidney bean leaves and PPFD. Air temperature was 20°C and humidity was 75±5% RH. The numbers in parentheses indicate the shading coefficient and the dust load.

度の差は、どの粉じんにおいても付着量が多いほど大きかった。なお PPFD 700 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 付近の光合成速度をみると、キュウリでは暴露前後で差がみられたのに対し、インゲンマメでは差が小さく、ほぼ等しい場合もあった。これは、インゲンマメとキュウリで光合成速度の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 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度であったが、キュウリでは 700 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上であった。そのため、インゲンマメでは PPFD 710 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ のとき、

例えば 43% 遮光されても葉面に到達する光は 405 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ となり、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 730 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 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顕著に受ける。

考察

Fig. 4, 5 の結果をもとに、粉じん付着量および遮光率と光合成速度低下率との関係を調べた (Fig. 6~9)。光合成速度低下率とは、暴露前後における光合成速度の低下量を暴露前の光合成速度に対する百

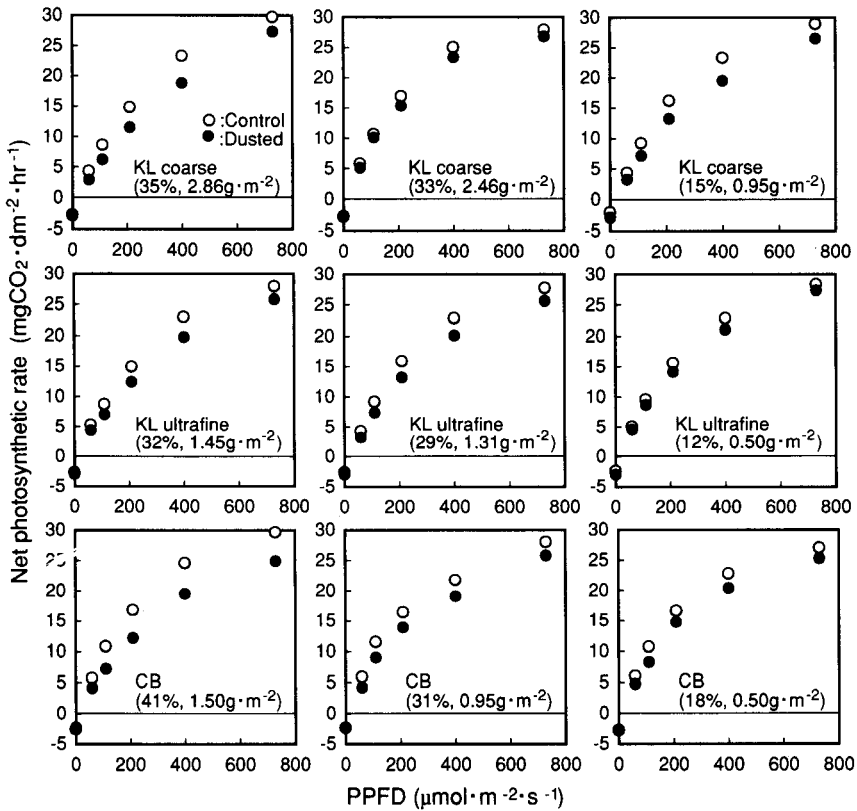


Fig. 5. Relations between the net photosynthetic rate of cucumber leaves and PPFD. Air temperature was 25°C. Other explanation is the same as in Fig. 4.

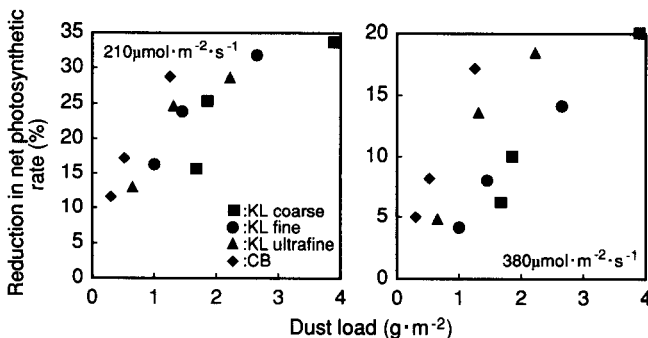


Fig. 6. Relations between the reduction in net photosynthetic rate of kidney bean leaves and the dust load.

分率で表したものである。Fig. 6, 7 はインゲンマメ, Fig. 8, 9 はキュウリについての結果である。

光合成速度低下率は粉じん付着量の増加につれて大きくなったが、両者の関係は粉じんによって異なった。ある付着量に対する光合成速度低下率は、付着量と遮光率の関係と同様にカーボンブラックで

最も大きく、以下、関東ローム粉超微粒、微粒、細粒の順に小さくなった。ところが、遮光率と光合成速度低下率の関係についてみると、インゲンマメ、キュウリともに、多少ばらつきはあるが全ての点はほぼ1つの直線上にあり、両者の関係は粉じんの種類によらずほぼ等しくなった。このことより、光合

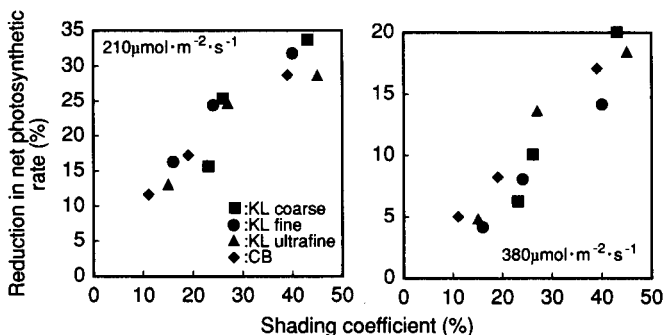


Fig. 7. Relations between the reduction in net photosynthetic rate of kidney bean leaves and the shading coefficient of dust.

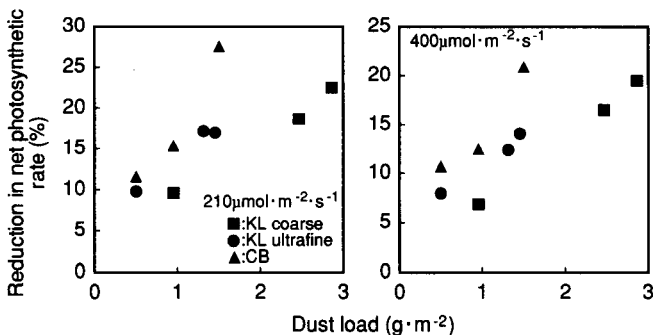


Fig. 8. Relations between the reduction in net photosynthetic rate of cucumber leaves and the dust load.

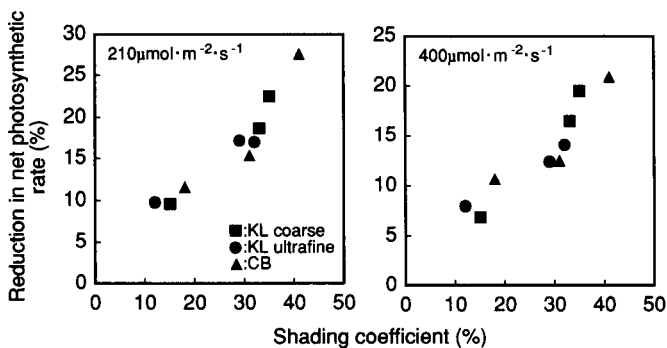


Fig. 9. Relations between the reduction in net photosynthetic rate of cucumber leaves and the shading coefficient of dust.

成速度の低下は粉じんによる遮光と密接に関連していると考えられる。

Fig. 10, 11 は、粉じんを透過して葉面に実際に到達したと推定される PPFd (同化箱内の PPFd × (1 - 遮光率/100)) と光合成速度の関係を示してい

る。Fig. 10 がインゲンマメ、Fig. 11 がキュウリで、それぞれ Fig. 4, 5 の結果をもとに作成したものである。暴露前後の付着葉の光-光合成曲線は、インゲンマメ、キュウリともに、粉じんの種類および付着量によらず良く一致した。

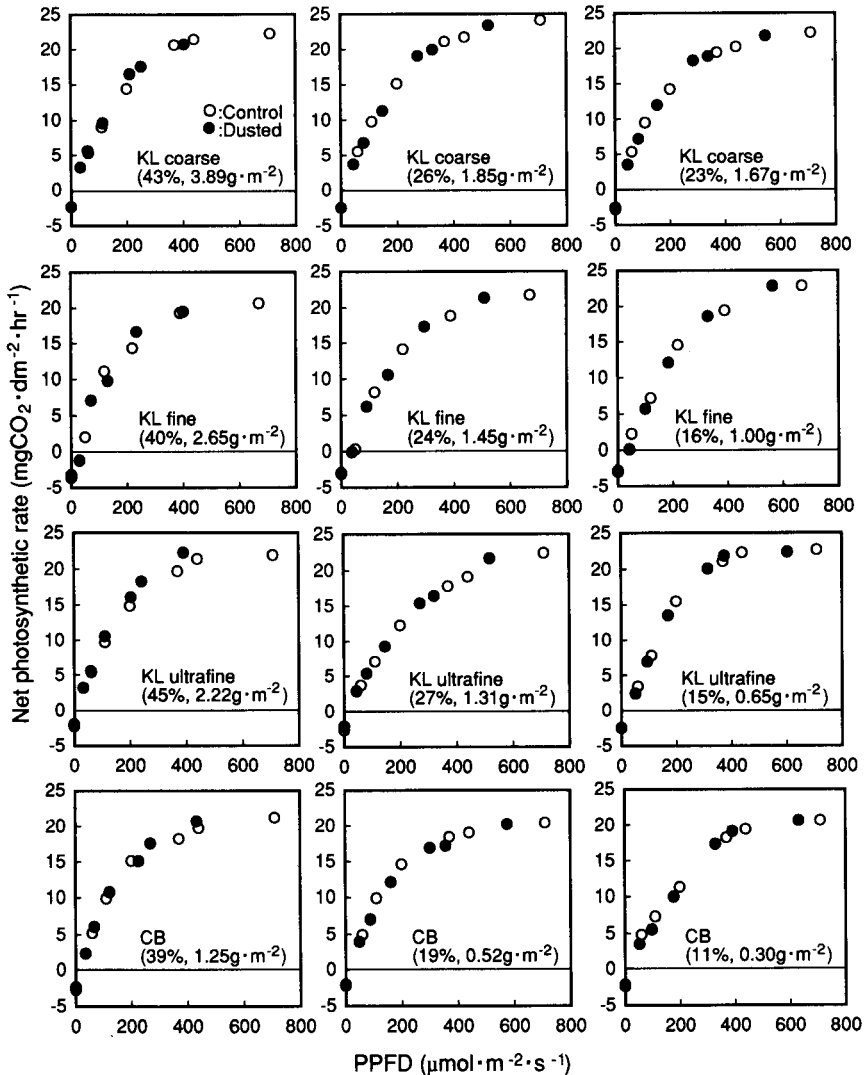


Fig. 10. Relations between the net photosynthetic rate of kidney bean leaves and PPFD. The net photosynthetic rate of dusted leaves are plotted against the PPFD at the leaf surfaces under dust covers, estimated from the shading coefficients of dust. Other explanation is the same as in Fig. 4.

光合成速度の低下についてはいくつかの原因があるが、実験に用いた粉じんの pH が 7 前後であったこと、葉に粉じんを付着させたまま 1 週間以上放置しても全く障害が現われなかったことなどから、化学的影響はなかったと考えられる。

遮光以外の物理的影響についてみる。カーボンブラックを付着させた場合には、2°C 以上葉温が上昇することもあったが、同化箱内の設定気温がインゲンマメで 20°C、キュウリで 25°C であったため、葉

温はそれぞれ 20~25°C、25~30°C とほぼ光合成の適温範囲であった^{45,46)}。そのため、粉じんによる葉温上昇が光合成速度に与える影響は小さかったと考えられる(第 5 節)。また本実験では、照明装置を消灯して暴露を行ったため暴露中は気孔が閉じていたものと推測される。したがって、粉じんが気孔をふさぐことはなかったであろう(第 4 節)。

以上より、本実験における光合成速度の低下は、葉面に付着した粉じんの遮光作用によるものと考え

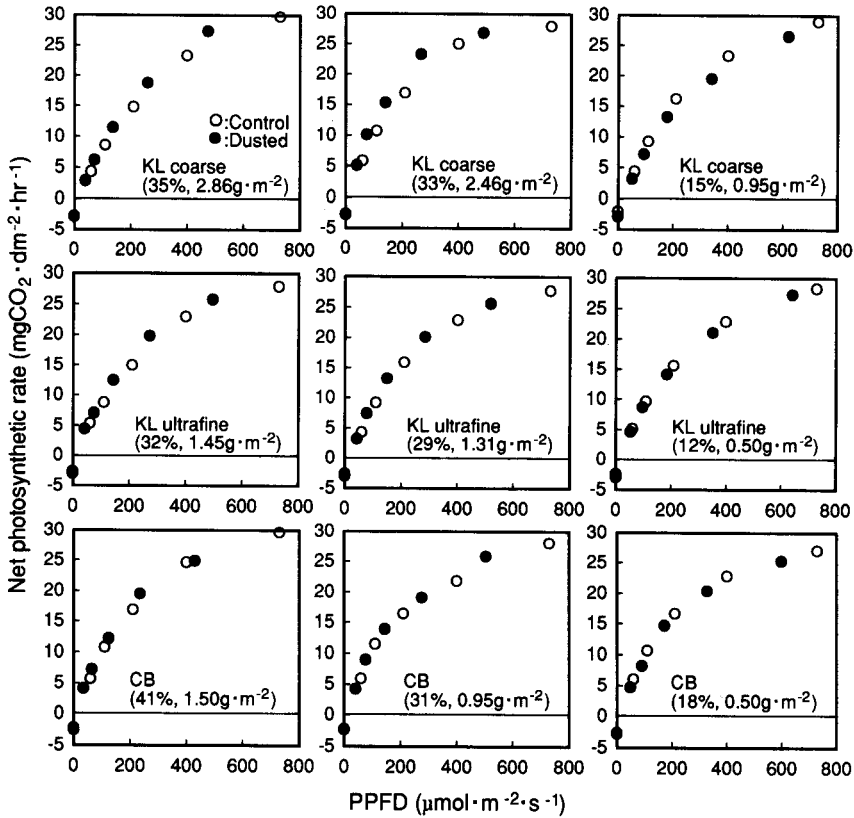


Fig. 11. Relations between the net photosynthetic rate of cucumber leaves and PPFD. The net photosynthetic rate of dusted leaves are plotted against the PPFD, estimated from the shading coefficients of dust, at the leaf surfaces under dust covers. Other explanation is the same as in Fig. 5.

られる。

第4節 粉じんが気孔コンダクタンスに与える直接影響

方法

気孔でのガス交換に与える粉じんの直接影響を気孔コンダクタンスを用いて検討するため、キュウリを用いて以下の実験を行った。

(1) PPFDと気孔コンダクタンスの関係

付着粉じんによる遮光が気孔コンダクタンスに与える影響を検討するため、PPFDが0~550 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の範囲の6段階で気孔コンダクタンスを測定した。実験には5個体を供試した。

(2) 粉じん付着量と気孔コンダクタンスの関係

粉じんには関東ローム粉微粒を用い、気孔が開いている状態で暴露を行った。暴露時間を0~5分間

で6段階に設定し、各3個体、計18個体供試した。なお、5分間暴露したときの粉じん付着量は4.7 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ であった。

(3) 粉じんの種類(粒径)と気孔コンダクタンスの関係

粉じんには3種類の関東ローム粉を用い、気孔が開いている状態で暴露を行った。気孔コンダクタンスが遮光による影響を受けないように、付着量は1.2 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ とした。対照も含めて各3個体、計12個体供試した。

(4) 粉じん付着時の気孔開度と気孔コンダクタンスの関係

気孔が開いている状態と閉じている状態で、3個体ずつ計6個体に関東ローム粉微粒をそれぞれ付着量1.2 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ で暴露した。対照も含めて9個体供試した。

各実験とも、全供試個体を環境制御型風洞内（気温：25°C，湿度：75±5% RH）に入れ、それぞれの光条件下で30分以上順応させた後、第3葉と第4葉の上面と下面の気孔コンダクタンスをポロメータ（ライカー、LI-1600）を用いて測定した。なお、(2)，(3)，(4)では、明（PPFD 550 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ）・暗の各光条件下で測定した。

結果

(1) PPFD と気孔コンダクタンスの関係

気孔コンダクタンスは光強度（PPFD）と密接な関係があるため、粉じんが気孔コンダクタンスに与える直接影響を評価するには遮光による影響を考慮する必要がある。

Fig. 12 に PPFD と気孔コンダクタンスの関係を示す。上下面とも、PPFD が大きくなるにしたがい気孔コンダクタンスも上昇したが、PPFD が大きくなるほど傾きは緩やかになり、上面で約 350 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，下面で約 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上の PPFD では気孔コンダクタンスはほぼ一定となった。このことから、例えば粉じんによって遮光されたとしても、実際の葉面における PPFD が 350 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，あるいは 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上であれば、葉の上面，下面の気孔コンダクタンスは遮光による影響を受けないと考えられる。以下、この点を考慮して検討した。

(2) 粉じん付着量と気孔コンダクタンスの関係

Fig. 13 に粉じん付着量と気孔コンダクタンスの関係を示す。

まず葉の上面 (a) についてみる。明条件（PPFD 550 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ）では、付着量が大きくなるにしたがい気孔コンダクタンスは直線的に小さくなり、粉じんが付着していない対照葉に対して、付着

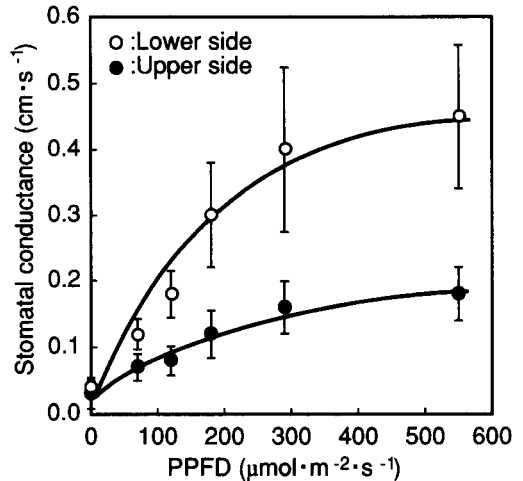


Fig. 12. Relations between the stomatal conductance of cucumber leaves and PPFD. Air temperature was 25°C and humidity was 75% RH. The vertical lines indicate standard deviation (n=10).

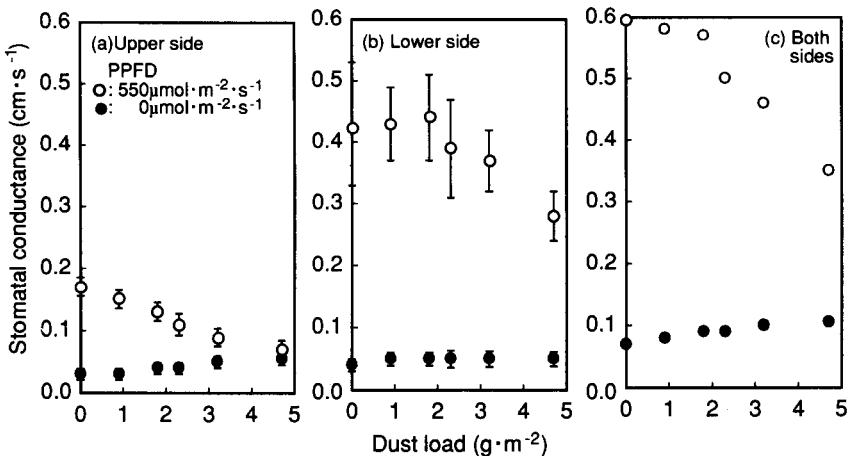


Fig. 13. Relations between the stomatal conductance of the upper (a), lower (b) and both (c) surfaces of cucumber leaves and the dust load. Air temperature was 25°C and humidity was 75% RH. The vertical lines indicate standard deviation (n=6). The exposure of the upper surface of leaves to dust (KL fine) was made when stomata were open.

量 $2.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ で 65%, $4.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ で 41% となった。なお付着量 $2.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ のときの遮光率は 35% であり、葉面における PPFD は $358 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ と推定される。したがって、これ以上の付着量における気孔コンダクタンスの減少には遮光による影響も加わっていると考えられる (Fig. 12)。暗条件では、付着量が多くなるにしたがい気孔コンダクタンスも大きくなったが、傾きは明条件ほど急ではなかった。なお、暗条件での対照葉の気孔コンダクタンスは明条件の約 1/6 であった。

次に葉の下面 (b) についてみる。明条件では、気孔コンダクタンスは付着量 $1.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ までは変化がなく、 $2.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ で小さくなった。それ以上の付着量では、付着量の増加にしたがいほぼ直線的に小さくなり、 $4.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ で対照葉の 65% となった。なお、各付着量に対する遮光率から葉面での実際の PPFD をそれぞれ推定し、そのときの葉の下面の気孔コンダクタンスを Fig. 12 から求めると、Fig. 13

(b) の明条件での結果とほぼ一致した。したがって、葉の下面での気孔コンダクタンスの減少は遮光作用による結果であると考えられる。暗条件では、気孔コンダクタンスは付着量の大小にかかわらずほぼ一定であった。

さらに葉の両面 (c) についてみる。両面での気孔コンダクタンスは上面と下面の値の和となる。明条件では、上面に比べ値の大きい下面の影響を受け、

付着量との関係は下面とほぼ同様となった。つまり気孔コンダクタンスは、付着量 $1.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ まではほぼ一定で、それ以上では付着量の増加にしたがい直線的に低下した。暗条件では上面の影響を受け、付着量が多くなるにしたがって気孔コンダクタンスは徐々に上昇した。

(3) 粉じんの粒径と気孔コンダクタンスの関係

Fig. 14 に 3 種類の関東ローム粉が付着した葉の上面の気孔コンダクタンスを示す。なお付着量は全て $1.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ で、遮光率は関東ローム粉細粒、微粒、超微粒でそれぞれ 15, 20, 25% であった。明条件 (PPFD $550 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) における葉面での PPFD を推定すると、遮光率が最大であった関東ローム粉超微粒が付着した葉でも $413 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ であり、全ての場合で気孔コンダクタンスは遮光による影響を受けなかったと考えられる (Fig. 12)。

明条件では、粉じんの種類によらず付着葉の気孔コンダクタンスは対照葉よりも小さかったが、関東ローム粉細粒、微粒、超微粒と粒径が小さくなるにしたがい気孔コンダクタンスも小さくなった。暗条件では、明条件とは逆に付着葉の気孔コンダクタンスは対照葉より大きかったが、粒径による明確な差は認められなかった。

(4) 粉じん付着時の気孔開度が気孔コンダクタンスに与える影響

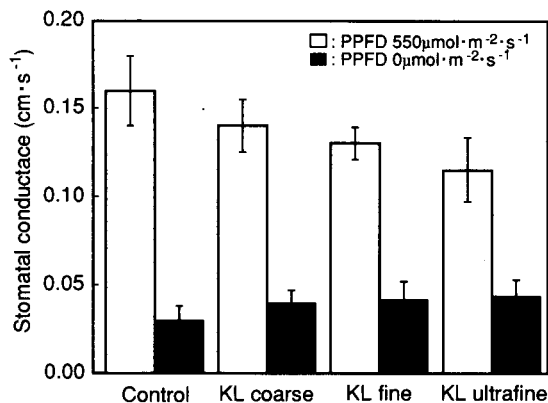


Fig. 14. Stomatal conductance of the upper surface of cucumber leaves exposed to dust with different particle size. The exposure of the upper surface of leaves was made at the rate of $1.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ when stomata were open. Other explanation is the same as in Fig. 13.

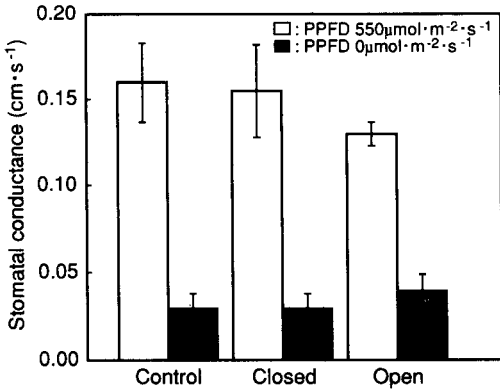


Fig. 15. Stomatal conductance of the upper surface of cucumber leaves exposed to dust (KL fine) when stomata were open and closed. Other explanation is the same as in Fig. 14.

(2), (3) では気孔が開いている状態で葉面に粉じんを付着させたが、気孔が閉じている状態で粉じんが付着することも当然予測される。そこで、暴露中の気孔開度が暴露後の気孔コンダクタンスに与える影響を調べた (Fig. 15)。なお粉じんには関東ローソク粉微粒を用い、付着量は (3) と同様に 1.2 g·m⁻² とした。したがって、遮光による影響はなかったと考えられる。

暴露中気孔が閉じていた場合、明条件での気孔コンダクタンスは対照葉とほぼ等しく、気孔が開いていた場合のような気孔コンダクタンスの低下はみら

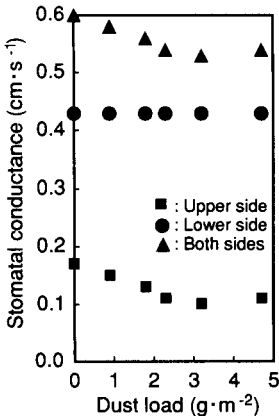


Fig. 16. Stomatal conductance of cucumber leaves reduced by covering and plugging stomata by dust. These were estimated by the use of Fig. 12 and Fig. 13. Other explanation is the same as in Fig. 13.

れなかった。暗条件でも明条件と同様に、暴露中気孔が閉じていた場合には、気孔が開いていた場合のような気孔コンダクタンスの変化はなかった。

考察

Fig. 13 における粉じん付着量の増大にともなう気孔コンダクタンスの減少には、遮光による影響が含まれている。そこで、Fig. 12 を用いて、Fig. 13 の明条件の結果から遮光による影響を除外した (Fig. 16)。葉の下面の気孔コンダクタンスは、付着量の大小によらず一定となった。ところが、上面では付着量が大きくなるにしたがって気孔コンダクタンスは小さくなった。上面と下面の和である両面の気孔コンダクタンスも上面での減少にともない小さくなった。このような遮光以外による上面の気孔コンダクタンスの減少は、粉じんが気孔を覆う、あるいは気孔内に侵入することにより気孔を詰まらせたことが原因だと考えられる^{34,35)}。一方、暗条件での気孔コンダクタンスの増大は、くさび状に気孔に侵入した粉じんが気孔の閉鎖を妨げ、完全に閉じることができなかったことによると考えられる³⁷⁻³⁹⁾。粉じんの粒径が小さいほど影響が大きいこと (Fig. 14) や、気孔が閉じている状態で粉じんが付着した場合に気孔コンダクタンスが影響を受けないという結果

(Fig. 15) は、上記の理由を裏付けるものである。なぜなら、粒径が小さい粒子ほど気孔内に入りやすい。また気孔が閉じている状態では、粉じんが気孔内に入り込むことは不可能である。このように、気孔が開いた状態で葉の上面に粉じんが付着すると、気孔をふさぐことにより明条件での気孔コンダクタンスは小さくなった。しかし、光合成速度に与える影響を検討する場合には、葉の下面も加えた両面の気孔コンダクタンスで考える必要がある。一般に、樹木では葉の上面に気孔が存在しないものが多い⁴⁷⁾。また、実際に野外で葉面に粉じんが付着するとき常に気孔が開いているとは限らない。さらに、光強度によって異なるが、遮光による影響は下面の気孔コンダクタンスにも影響を与える。このようなことから、粉じんの気孔をふさぐ作用が明期の気孔コンダクタンスに与える影響は、遮光による影響ほど大きくないであろう。ただし葉の下面にも上面と同様に粉じんが付着した場合には影響は大きくなる。一方粉じんが気孔の閉鎖を妨げる作用は、汚染ガスあるいは水ストレスにさらされた場合には重要

となる。例えば、トマトは SO_2 、 NO_2 および O_3 によって気孔を閉鎖し⁴⁸⁾、これら汚染ガスの吸収速度は低下する。しかし、粉じんによって気孔の閉鎖が妨げられれば、汚染ガスの吸収速度の低下は抑制され障害が発生する可能性は高くなる。

第5節 粉じんによる葉温上昇が光合成速度および蒸散速度に与える影響

方法

葉の上面に付着した粉じんによる葉温上昇が光合成速度と蒸散速度に与える影響を検討するため、以下の実験を行った。

(1) 光強度と葉温上昇の関係

葉面に付着した粉じんが葉温に与える影響を調べるため、葉温を決定する重要な要因である光強度を変化させて付着葉と対照葉の温度を測定し、それらを比較検討した。実験にはキュウリの第4葉を用い、気孔が閉じている状態で粉じんを付着させた。葉温は、人工光型グロースチャンパー内に設置した透明アクリル製同化箱内で、葉の下面に直径 0.1 mm の銅・コンスタンタン熱電対を密着させて測定した (Fig. 2)。測定は、同じ様式の同化箱を2台用い、付着葉と対照葉について同時に行った。光強度をPPFDが $0 \sim 1300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の範囲で6段階に設定し、各光条件で供試個体を40分以上順応させた。同化箱内は、気温 25°C 、湿度 $70 \pm 5\%$ RHとした。なお、PPFD $1300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ のときの放射束密度は $670 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ であった。

(2) 粉じんによる葉温上昇が光合成速度と蒸散速度に与える影響

粉じんによる葉温上昇が光合成速度あるいは蒸散速度に与える影響は気温によって異なると考えられる。そこで付着葉と対照葉の気温と光合成速度および蒸散速度との関係を調べた。粉じんにはカーボンブラックを用い、付着量 $1.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ で4個体を供試した。また、対照として同じく4個体供試した。測定には第4葉を用いた。なお、粉じんの暴露は気孔が閉じている状態で行った。

光合成速度と蒸散速度は人工光型グロースチャンパー内で透明アクリル製の同化箱を用いて測定した (Fig. 2)。測定は、同化箱内の気温を $15 \sim 40^\circ\text{C}$ の範囲で 5°C おきに設定し、湿度が $70 \pm 5\%$ RH になる

ように調節して、供試個体を40分以上順応させた後に行った。気温は設定値 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内で制御した。PPFDは $1300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (放射束密度 $670 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) とした。光合成速度と蒸散速度は、差型赤外線 CO_2 分析計 (富士電機, ZALDA) と絶対湿度計 (芝浦電子, SM-310) を用いて測定した同化箱の入口と出口の CO_2 濃度と絶対湿度の差から求めた。測定システムは半閉鎖方式で、コンプレッサーで取り入れた外気を混合器内で攪拌して CO_2 濃度を安定させ、恒温水槽内でバブリングして温度と湿度を調節し、通気量 $20 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ で同化箱に送った。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密着させて測定した。

結果

(1) 光強度と葉温上昇の関係

Fig. 17に、光強度 (PPFD) と、付着葉と対照葉の温度差との関係を示す。関東ローム粉細粒および超微粒については微粒とほぼ同様の結果であった。

関東ローム粉、カーボンブラックともに、光が強くなるにしたがい付着葉と対照葉の温度差が大きくなった。また付着量が多いほど温度差も大きかった。しかし、カーボンブラックに比べ関東ローム粉における葉温の上昇はかなり小さかった。PPFD $1300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ における葉温差を比べると、付着量が約 $1.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ のとき、カーボンブラックでは 3.4°C 、関東ローム粉では 0.6°C で、前者は後者の5倍以上であった。なお関東ローム粉では、付着量が $2.85 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ でも葉温差は 0.8°C であった。本実験では付着した粉じんの遮光率は最大でも 42% であり、葉面に到達した光のPPFDは $750 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上であったと推測される。そのため、遮光によって気孔コンダクタンスが低下し、蒸散が抑制されることはなかったであろう (Fig. 12)。また気孔が閉じている状態で粉じんを付着させたため、気孔がふさがれることもなかったと考えられる (Fig. 15)。したがって、このような状況における葉温の上昇は、粉じんによって光エネルギーの吸収量が増大したため^{32,33)}と考えられる。

(2) 粉じんによる葉温上昇が光合成速度に与える影響

実験にはカーボンブラックを用い、付着量は $1.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ とした。対照葉、付着葉ともに気温の上昇にともない温度は上昇した。付着葉の温度は対照葉よ

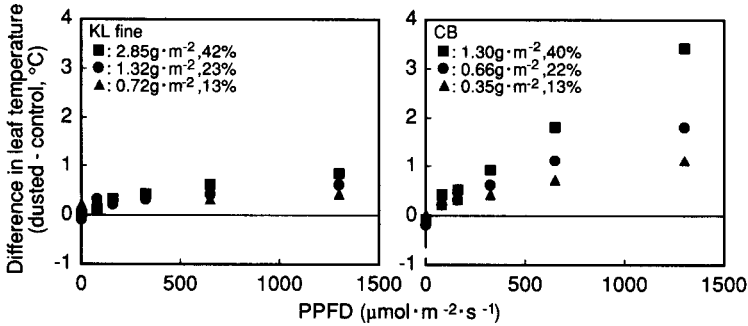


Fig. 17. Increase in the cucumber leaf temperature by dust cover. Air temperature was 25°C and humidity was 70±5% RH. The short-wave radiant flux density equivalent to the PPFD of 1300 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ was 670 Wm^{-2} .

り高く、その差は気温 15, 25, 40°C でそれぞれ 3.7, 3.1, 1.7°C であった。なお付着量 $1.0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ に対する遮光率は 29% であったため、葉面での PPFD は $923 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ と推定される。キュウリの光合成速度は $700\sim 800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ でほぼ光飽和に達するため、光合成速度は遮光による影響を受けなかったと考えられる。また気孔が閉じている状態で粉じんを付着させたため、葉の上面の気孔がふさがれることもなかったであろう。

Fig. 18 (a) に気温と光合成速度の関係を示す。対照葉の光合成速度は、25°C 以下では気温の上昇とともに大きくなり、25~30°C で最大、それ以上では気温の上昇とともに小さくなった。それに対して付着葉の光合成速度は、20°C 以下では気温の上昇とともに大きくなり、20~25°C で最大、それ以上では気温

の上昇とともに小さくなった。両者の光合成速度を比べると、25°C 以下では付着葉、30°C 以上では対照葉の方が大きかった。付着葉の気温と光合成速度の関係は、対照葉の関係を低温側に平行移動させた形となった。このように、粉じんによる葉温上昇は、低温域では光合成速度を上昇させ逆に高温域では低下させた。

Fig. 18 (b) に葉温と光合成速度の関係を示す。葉温と光合成速度の関係は気温の場合と異なり、対照葉と付着葉でほぼ一致した。光合成速度は、ほぼ 29°C 以下では葉温の上昇とともに大きくなり、29~33°C で最大、それ以上では葉温の上昇とともに小さくなった。このように、葉温と光合成速度の関係が対照葉と付着葉で一致したことから、両者で気温に対する光合成速度が異なったのは粉じんによる葉温

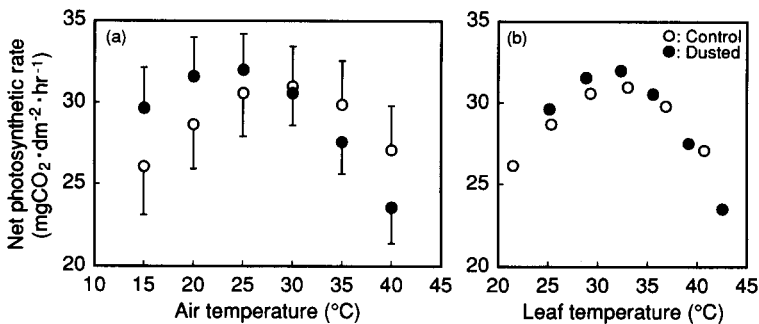


Fig. 18. Relations between the net photosynthetic rate of cucumber leaves and air (a) and leaf (b) temperature. Air temperature was 25°C, humidity was 70±5% RH and PPFD was $1300 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. The vertical lines indicate standard deviation ($n=4$). The exposure of the upper surface of leaves to dust (CB) was made at the rate of 1.0 g m^{-2} when stomata were closed.

上昇が原因だと考えられる。

(3) 粉じんによる葉温上昇が蒸散速度に与える影響

Fig. 19 に気温と蒸散速度の関係を示す。蒸散速度は気温の上昇とともに大きくなった。付着葉の蒸散速度は常に対照葉より大きく、その差は $0.4 \sim 0.6 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ であった。なお蒸散速度は、気孔と葉面境界層の拡散抵抗が一定で葉肉組織の細胞間隙が水蒸気で飽和していると仮定すると、葉温での飽和絶対湿度と葉の周囲の空気絶対湿度の差に比例すると考えられる⁴⁾。そこで、Fig. 20 に気温とこの絶対湿度の差との関係を示す。絶対湿度の差は気温の上昇とともに大きくなったが、常に付着葉の方が対照

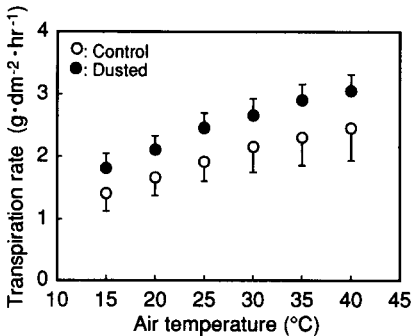


Fig. 19. Relations between the transpiration rate of cucumber leaves and air temperature. Other explanation is the same as in Fig. 18.

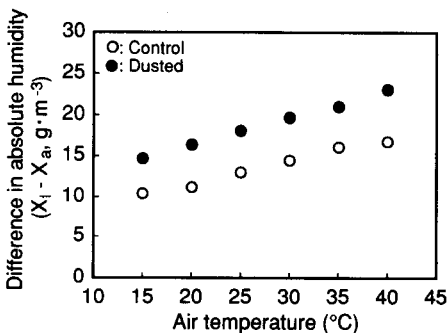


Fig. 20. Relations between the transpiration rate of cucumber leaves and the difference in absolute humidity ($X_1 - X_a$). X_a and X_1 indicate the absolute humidity of air and saturated at the leaf temperature, respectively. Other explanation is the same as in Fig. 18.

葉より大きかった。したがって、付着葉における蒸散速度の増加は、葉温上昇にともない細胞間隙の絶対湿度が上昇し周囲の空気絶対湿度との差が大きくなったことが原因だと考えられる。

考察

光合成速度および蒸散速度の測定において、粉じん（カーボンブラック）を付着させた葉では光の吸収量の増加にともなう葉温の上昇が認められた（ $1.7 \sim 3.7^\circ\text{C}$ ）。付着葉と対照葉の葉温と光合成速度の関係はほぼ一致し、 $29 \sim 33^\circ\text{C}$ で最大となる曲線となった。しかし、両者では気温と葉温の関係が異なるため気温と光合成速度の関係は一致せず、付着葉の曲線は対照葉に対し低温側に平行移動した形となった。本研究における葉温上昇の程度では、光合成速度は適温域以下で上昇し、適温域以上で低下することがわかった。なお、付着葉の蒸散速度は対照葉よりも $0.4 \sim 0.6 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ 大きかった。粉じんが気孔をふさぐことがなかったと考えられるため、付着葉における蒸散速度の上昇は、葉温上昇にともない葉肉組織の細胞間隙の絶対湿度が増大したことによると考えられる。このような蒸散速度の上昇は、水ストレスを引き起こすことにより光合成速度を低下させる可能性が高い。

第6節 まとめ

本章では、葉面に付着した粉じんが光合成に与える物理的影響を明らかにすることを目的に、粉じんの遮光作用、気孔をふさぐ作用および葉温上昇作用について調べ、それらが光合成速度に与える影響について検討した。得られた結果を要約すると以下の通りである。

(1) 粉じんによる遮光作用により光合成速度は低下した。遮光作用による光合成速度の低下は、粉じんの種類にかかわらず遮光率によって評価することが可能であった。なお、遮光率は粒径の小さい粉じんほど大きかった。また、粉じんを透過して葉面に到達する光強度が光合成速度の光飽和点以上のときは、光合成速度は影響を受けなかった。

(2) 粉じんが気孔をふさぎ気孔コンダクタンスを低下させる作用は、粉じんの付着時に気孔が開いている場合に認められた。気孔コンダクタンスの低下は、粉じん付着量が多いほど、粉じんの粒径が小さいほど大きかった。なお、暗条件においては気孔コンダ

クタンスは上昇した。

(3) 粉じんによる光の吸収量の増加にともなう葉温の上昇は、光が強く、付着量が多いほど顕著であった。しかし、その程度は粉じんの種類により大きく異なった。葉温の上昇により蒸散速度は上昇したが、光合成速度は、その適温域以下では上昇し適温域以上では低下した。

以上より、葉面に付着した粉じんは葉に到達する光を遮ることにより光合成を低下させることがわかった。また気孔をふさぐことによりガス交換を阻害し、光合成速度を低下させ、気孔の閉鎖を妨げることにより汚染ガスや水ストレスに対する耐性を低下させるといえる。さらに葉温を上昇させることにより、光合成速度は適温域以下では上昇し適温域以上では低下したが、蒸散速度が上昇したことを考えると、水分状態によっては適温域以下でも低下し適温域以上ではさらに低下することが予測される。

第 III 章 火山灰の物理的特性および葉温と気孔コンダクタンスに与える影響

わが国には 83 の活火山があり、平均すると年に 5 つの火山が噴火している⁷⁾。最近では雲仙普賢岳(以下、雲仙岳)が噴火し、大量の火山灰を噴出して周辺住民へ深刻な被害を与えた。また桜島は 1955 年以来頻りに爆発を繰り返し、鹿児島市内では断続的な降灰が観測されている⁷⁾。

このような火山灰は周辺の森林や農地に降下し、葉や土壌の表面に堆積することにより直接的あるいは間接的被害を植物に与える^{8,9)}。特に大量で集中的な降灰は、枝折れや埋没といった著しい被害をもたらす。しかし、葉面への堆積がそのような可視障害をとまわらない程度であっても、火山灰は光を遮る、葉温を上昇させる、気孔をふさぐなどの物理的作用により、光合成を阻害し慢性的な成長抑制を導くことが予測される。なお雲仙岳周辺では、細かい火山灰粒子がビニールハウス内や雨除け栽培の被覆資材の下にまで侵入し、作物の葉面に付着しているのが観測された⁵⁰⁾。これらは野外のように降雨などによって自然に除去されることはない。

以上より、火山灰による農作物の被害について考える際は、葉面付着火山灰が光合成に与える影響を評価することが必要である。しかし、葉面付着火山

灰が光合成あるいは成長に与える影響に関する報告はほとんどない。そこで本章では、第 II 章で得られた試験用ダストによる基礎的知見をもとに、桜島と雲仙岳の火山灰の粒径分布、遮光率、それらの火山灰を付着させたキュウリの葉の分光反射強度、温度、気孔コンダクタンスを測定し、葉面に付着した火山灰の遮光作用、気孔をふさぐ作用および葉温上昇作用について検討した⁵⁰⁾。

第 1 節 実験に用いた火山灰と植物

実験に用いた火山灰は、桜島のものが 2 種類と雲仙岳のものが 4 種類である (Table 2)。各火山灰は降灰後、降雨がある前に採取した。桜島の火山灰はそれぞれ白灰、黒灰とよばれ、採取場所は同じであるが降灰日が異なる。白灰は黒灰に比べて白く、肉眼で容易に区別することができた。雲仙岳の火山灰はそれぞれ採取場所と降灰日が異なるが、色は全て薄いページュでほぼ等しく、肉眼で区別することは困難であった。火山灰の pH は 5.4~6.0 の範囲で、強い酸性あるいはアルカリ性を示すものはなかった。pH の測定は、火山灰 5 g をイオン交換水 50 cm³ に加え良く攪拌した後約 24 時間放置し、再び良く攪拌した懸濁液を対象に行った。

供試植物には、葉の上面にも気孔が存在する、葉が大きくて実験しやすいなどの理由からキュウリ (*Cucumis sativus* L., 品種名: 山東四葉) を選んだ。実験には、温室内でロックウール (グローダン) を培地とし培養液 (大塚ハウス 1 号, 2 号の標準濃度) で播種後約 4 週間栽培したものの第 4, 5 葉を用いた。

第 2 節 火山灰の粒径分布

方法

火山灰の遮光作用や気孔コンダクタンスに与える影響は粒径分布によって異なると考えられる⁴²⁾。そのため、各火山灰について比重試験 (JIS A 1204)

Table 2. Sampling location and date of fall of the volcanic ashes used in this study.

Volcanic ash	Sampling location	Date of fall
Sakurajima (white)	Kagoshima city	28 July 1990
Sakurajima (black)	Kagoshima city	7 June 1990
Unzen A	Kunimi-cho	30 May 1991
Unzen B	Shimabara city	4 June 1991
Unzen C	Shimabara city	27 June 1991
Unzen D	Shimabara city	10 July 1991

およびふるい分け法と沈降法による粒度試験 (JIS A 1202) を行い、粒径分布を求めた。なお、試験は各火山灰について3回ずつ行った。

結果と考察

粒度試験によって求めた各火山灰の粒径加積曲線を Fig. 21 に示す。気孔コンダクタンスに与える影響を調べた3種類の火山灰についてみると (Fig. 21 a), 粒径は雲仙岳 B が最も小さく、桜島白灰, 黒灰の順に大きくなった。雲仙岳の火山灰では (Fig. 21 b), A と B の粒径加積曲線は等しいが C と D の曲線はかなり異なった。

火山灰粒子の中で気孔でのガス交換に影響を与えるのは、主に気孔開口部に入り込む粒子である⁴³⁾。気孔開口部の大きさは作物によって異なるが、十分

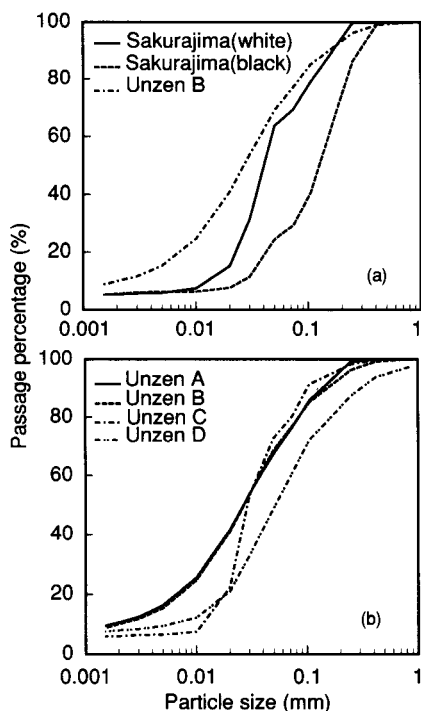


Fig. 21. Particle size accumulation of volcanic ashes (n=3).

Table 3. Particle ($<3 \mu\text{m}$) contents of volcanic ashes.

Volcanic ash	Content (%)
Sakurajima (white)	5.9
Sakurajima (black)	6.3
Unzen A	12.6
Unzen B	11.9
Unzen C	6.6
Unzen D	8.6

に開いた開口部の短径は $3\sim 8 \mu\text{m}$ 程度といわれている⁵¹⁾。そのため、気孔を詰まらせてガス交換に影響を与える粒子の径はそれ以下である。各火山灰の粒径 $3 \mu\text{m}$ 以下の粒子の含有率を Table 3 に示す。桜島白灰と黒灰の粒径加積曲線は異なったが、 $3 \mu\text{m}$ 以下の粒子の含有率はそれぞれ6%程度でほぼ等しかった。雲仙岳の火山灰では、含有率はAとBが12~13%で最も高く、D, Cの順に低くなった。このように雲仙岳AとBの $3 \mu\text{m}$ 以下の粒子の含有率は、桜島白灰, 黒灰や雲仙岳Cの約2倍となった。同じ火山から噴出した火山灰でも、場所や時期が異なれば粒径分布が異なった。これは火口からの距離や噴火の際の風向風速によるものと考えられる⁵²⁾。

第3節 火山灰付着葉の分光反射特性

方法

植物の葉面に付着した火山灰は日射の吸収特性を変化させ、葉温に影響を与えられ⁴³⁾。そのため、火山灰を付着させたキュウリの葉の分光反射強度を分光放射計 (オプトリサーチ, MSR-7000) により測定した。測定波長範囲は $280\sim 2500 \text{ nm}$ で、地表面における日射のほぼ全域を測定できる。火山灰を付着量 $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ となるように3重にしたガゼで包み、葉の上面に均一に振りかけた。その葉を自然光下で切り取らずに水平に保持し、分光放射計の感部が太陽の反対方位から 45° 下向きに葉面を向くようにセットして測定した。陰が影響しない範囲で感部は葉面にできるかぎり近づけた。測定は1991年7月の晴天日の正午前後に行った。火山灰が付着していない対照葉も含めて各火山灰につき3葉ずつ測定した。

結果と考察

火山灰付着葉と対照葉の日射の分光反射強度を Fig. 22 に示す。雲仙岳については4種類の火山灰で測定結果がほぼ等しかったため、Bの結果のみを示す。測定は1991年7月の晴天日の正午前後に野外で行ったが、測定中は太陽が雲によって遮られることはなく、全天日射量は $840\sim 860 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ でほぼ一定であった。

分光反射強度は、火山灰付着葉、対照葉ともほぼ日射のスペクトルに対応して波長 $690, 930, 1120, 1400, 1900 \text{ nm}$ 付近にそれぞれ大きな谷を持ったが、その他の部分については両者で異なった。桜島黒灰

Table 4. Integrated values of the spectral radiant flux density of the reflection from the leaf surfaces covered with volcanic ashes (n=3).

Volcanic ash	Integrated radiant flux density ($W m^{-2}$)				
	280-400	400-700	700-770	770-2500	280-2500 (nm)
Sakurajima (white)	0.5 (167)	7.8 (128)	2.1 (47)	18.7 (55)	29.1 (65)
Sakurajima (black)	0.4 (133)	6.1 (100)	1.9 (42)	15.5 (46)	23.9 (53)
Unzen B	1.0 (333)	14.9 (244)	3.2 (71)	28.6 (84)	47.7 (106)
Control (leaf)	0.3 (100)	6.1 (100)	4.5 (100)	34.0 (100)	44.9 (100)

Values in parenthesis are relative values to control.

Volcanic ash load was $50 g m^{-2}$.

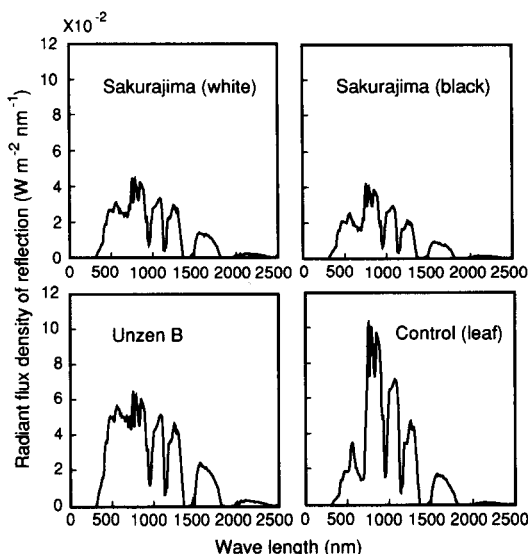


Fig. 22. Spectral radiant flux density of the reflection from the cucumber leaf surfaces covered with volcanic ashes at $50 g m^{-2}$ (n=3).

と白灰の付着葉の分光反射強度は、ピークの高さは異なるが全体的な形はほぼ等しかった。しかし桜島と雲仙岳では分光反射強度はかなり異なった。各火山灰付着葉の反射特性を比較するため、分光反射強度を紫外域 (280~400 nm)、光合成有効放射域 (400~700 nm)、遠赤色域 (700~770 nm)、赤外域 (770~2500 nm) および全波長域でそれぞれ積分した (Table 4)。紫外域と光合成有効放射域では、火山灰付着葉の反射強度は対照葉より大きいか同程度であった。特に雲仙岳 B の付着葉では反射強度が大きく、紫外域と光合成有効放射域でそれぞれ対照葉の 3.3, 2.5 倍であった。逆に遠赤色域と赤外域では対照葉より小さく、桜島の火山灰付着葉では対照葉の約 1/2 であった。測定全波長域では、桜島白灰、

黒灰および雲仙岳 B の付着葉の反射強度は対照葉に対してそれぞれ 65, 53, 106% であった。なお桜島黒灰付着葉の反射強度は全ての波長域で白灰付着葉より小さかった。

ここで火山灰付着葉における日射の吸収について考える。火山灰付着葉では、到達した日射はまず火山灰によって反射および吸収され、残りが透過として葉に到達する。火山灰を透過した日射は、さらに葉によって反射および吸収され、残りが透過日射となる。葉で反射された日射は火山灰と葉の間の多重反射によって大部分は再び吸収され、残りは火山灰あるいは葉を透過する。このように、葉に到達する日射はすでに火山灰を透過する過程で減衰しているため、葉のみを考えた場合、火山灰付着葉では対照葉に比べ日射の吸収量は減少する。しかし火山灰も含めて考えると、反射量がある程度以上増加しないかぎり、透過する距離が長くなる結果として透過量が減少し全体の日射吸収量は増加する。したがって、反射量が減少した桜島白灰あるいは黒灰付着葉では、対照葉に比べ日射吸収量が増加していることになる。

第 4 節 火山灰付着量と遮光率の関係

方法

火山灰の遮光作用を評価するため付着量と遮光率の関係を検討した。分光反射強度の測定と同様の方法で透明粘着テープ (中川ケミカル, カッティングシート) の粘着面に火山灰を付着させ、付着量 10, 20, 30, 40, $50 g \cdot m^{-2}$ の測定試料を作成した。各火山灰について測定試料を 3 組ずつ用い遮光率を測定した。遮光率 (%) は 100% から光透過率 (%) を引いた値とした。火山灰の光透過率は、透明粘着テープのみの光透過率に対する火山灰を付着させた透明粘着テープの光透過率の相対値として求めた。測定

は、1991年8月の晴天日の正午前後に自然光の下で光量子計(ライカー, LI-190 S)を用いて行った。

結果と考察

各火山灰の付着量と遮光率の関係を Fig. 23 に示す。全ての火山灰で付着量の増加とともに遮光率は大きくなったが、両者の関係は直線ではなく、付着量の増加にしたがって傾きが小さくなった。付着量 $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ および $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ での遮光率は、桜島白灰、黒灰、雲仙岳 A, B, C, D でそれぞれ 10, 8, 18, 20, 15, 13% および 56, 45, 70, 73, 60, 55% であった。付着量 $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ というのは軽く付着している状態であり、火山灰はそれほど目立たない。付着量 $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ でも火山灰が大量に付着している感じはなく、薄く付着している状態である。このように、付着量 $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ といった葉面に軽く付着した状態でも雲仙岳火山灰の遮光率は 13-20% とかなり大きいことがわかった。したがって、火山灰が葉面に比較的長期間滞留した場合には遮光による光合成の低下にともなう慢性的な成長の抑制が予測される。特に、曇天が続き日射が弱い状況では影響が大きくなると考えられる。

なお遮光率は雲仙岳 A と B で最も大きく、桜島黒灰で最も小さかった。付着量 $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ と $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$

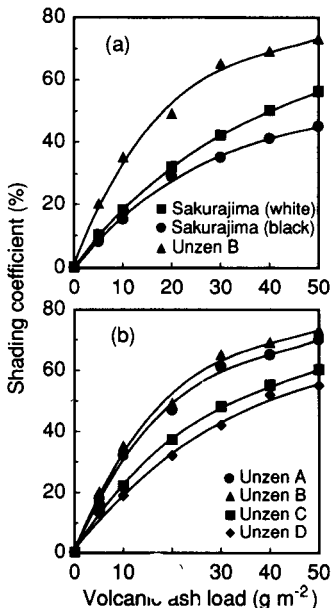


Fig. 23. Relations between the shading coefficient of volcanic ash and the volcanic ash load ($n=3$).

での雲仙岳 A, B の遮光率は、桜島黒灰のそれぞれ約 2.4, 1.6 倍であった。このような火山灰による遮光率の違いは、主に反射特性 (Fig. 22, Table 4) と粒径分布 (Fig. 21) の違いによると考えられる。反射光量の大小は透過光量に直接影響を与え、遮光率を左右する。また、粒径が小さいほど粒子は平滑に分布するため光の吸収効率が高くなり⁵³⁾、遮光率は大きくなると考えられる。分光反射強度がほぼ等しい雲仙岳火山灰の遮光率が、粒径分布の等しい A と B で等しく、粒径の大きい C と D で小さかったことから、このことは支持される。つまり遮光率は光合成有効放射の反射が大きく粒径の小さい火山灰で高くなる。

第 5 節 葉面に付着した火山灰が葉温に与える影響

方法

葉面付着火山灰が葉温に与える影響を調べるため、キュウリの葉の上面に火山灰を付着させて葉温を測定した。

分光反射強度の測定と同様の方法で上面に火山灰を付着させた葉を自然光下で切り取らずに水平に保持し、熱画像計測装置(日本電子, JTG-4200)を用いて葉温を測定した。なお火山灰が気孔に詰まり蒸散を阻害することがないように、供試植物を暗黒条件下に約 2 時間置き、気孔が閉じた状態で火山灰を付着させた。測定は 1991 年 8 月に行った。実験に用いた火山灰は桜島白灰、黒灰および雲仙岳 B の 3 種類である。付着量は桜島黒灰のみ $50, 100 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ で、他は $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ とした。対照葉も含めて各処理につき 4 葉ずつ、計 20 葉を同時に測定した。

結果と考察

Table 5 に日射量が $876, 306 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ のときの測定結果を示す。どちらの場合も火山灰付着葉の温度は対照葉より高かった。日射量が $876 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ のと

Table 5. Increase in the temperature of leaf covered with volcanic ashes.

Volcanic ash	load (g m^{-2})	Leaf temperature ($^{\circ}\text{C}$)		
		Solar radiation	876	306 (W m^{-2})
Sakurajima (white)	50		36.1 ± 0.3	29.0 ± 0.4
Sakurajima (black)	50		36.3 ± 0.4	29.1 ± 0.5
Sakurajima (black)	100		37.4 ± 0.4	29.5 ± 0.3
Unzen B	50		34.9 ± 0.4	28.0 ± 0.5
Control (leaf)			33.7 ± 0.4	27.5 ± 0.4

Each value is the mean \pm standard deviation of 4 leaves. Air temperature and relative humidity were 31.0°C and 61% at 876 W m^{-2} , 29.4°C and 55% at 306 W m^{-2} .

き、火山灰付着量が $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ の葉の温度は、桜島白灰、黒灰および雲仙岳 B でそれぞれ 36.1, 36.3, 34.9°C となり、対照葉との差は 2.4, 2.6, 1.2°C であった。桜島黒灰を $100 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 付着させた葉の温度は 37.4°C で、対照葉との差は 3.7°C であった。日射量が $306 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ のとき、火山灰付着葉と対照葉の温度差は、付着量 $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ の場合、桜島白灰、黒灰および雲仙岳 B でそれぞれ 1.5, 1.6, 0.5°C、付着量 $100 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ の場合、桜島黒灰で 2.0°C であった。このように、火山灰付着葉は日照下で昇温することがわかった。葉温の上昇は火山灰付着量および日射量が多い方が大きく、雲仙岳 B より桜島黒灰、白灰で顕著であった。なお葉温が光合成の適温以上の場合には、火山灰による葉温上昇は光合成を低下させるであろう⁴³⁾。

本実験では、気孔が閉じた葉に火山灰を付着させたため火山灰が気孔を詰まらせて蒸散を阻害することはなかったと考えられる。しかし、葉面付着火山灰による遮光のため気孔コンダクタンスが低下し蒸散が抑制された可能性はある⁴³⁾。遮光率が大きく、日射の反射量が対照葉より大きかった雲仙岳 B の付着葉における温度上昇の原因としては、この点も考慮する必要がある。ただ、桜島白灰、黒灰の付着葉で遮光率が小さいにもかかわらず雲仙岳 B よりも葉温が高くなったことから、葉温上昇は主に付着した火山灰による日射吸収量の増加によるものと考えられる。

第 6 節 葉面に付着した火山灰が気孔コンダクタンスに与える直接影響

方法

第 II 章より、火山灰が植物の葉の上面に付着した状態では、上面の気孔がふさがれ明条件において気孔コンダクタンスが低下することが予測される。しかし、葉面に付着した火山灰は降雨によって洗い流されることも多い。そこで本実験ではそのような状況を設定し、葉面に付着した火山灰を水で洗い流した後、ポロメータ (ライカー、LI-1600) を用いて気孔コンダクタンスを測定した。

まず植物体を環境制御型風洞内 (PPFD: $480 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 気温: 25°C, 湿度: 60% RH) に約 1 時間入れ、葉の上面の気孔コンダクタンスを測定した。気孔が開いていることを確認した後、分光

反射強度の測定と同様の方法で植物体の第 4, 5 葉の上面に火山灰を付着させた。さらに風洞に約 1 時間置いた後、1 個体あたり約 500 cm^3 で葉面に散水し火山灰を洗い流した。翌日再び植物体を環境制御型風洞内に入れて環境条件に約 1 時間順応させた後、葉の上面の気孔コンダクタンスを測定した。測定に用いた火山灰は葉温の測定と同じ 3 種類で、付着量は $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ とした。各火山灰につき 8 葉ずつ、対照葉も含めて計 32 葉について測定した。なお、対照葉についても火山灰の付着以外は同様の処理を行った。

結果と考察

気孔が開いている状態で葉の上面に火山灰を付着させた後、散水して火山灰を洗い流し、その翌日に気孔コンダクタンスを測定した (Fig. 24)。葉の上面の気孔コンダクタンスは、桜島白灰、黒灰および雲仙岳 B を付着させた葉でそれぞれ 0.144, 0.148, 0.129 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、対照葉で 0.154 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ であった。このように、火山灰を付着させた葉の気孔コンダクタンスは低下したが、対照葉に対して有意差が認められたのは雲仙岳 B のみであった (t 検定 5% 水準)。見かけ上葉面に火山灰が付着していないにもかかわらず雲仙岳 B を付着させた葉の気孔コンダクタンスは小さくなった。気孔コンダクタンスの低下は光

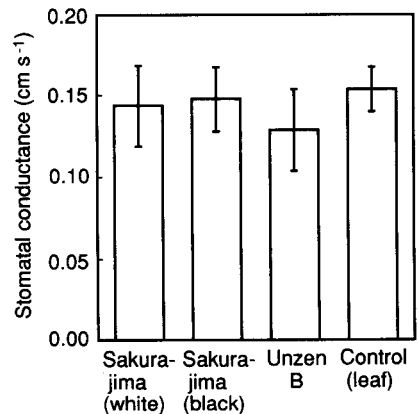


Fig. 24. Stomatal conductance of the upper surfaces of cucumber leaves after washing out volcanic ash. The vertical lines indicate standard deviation (n=8). The volcanic ash load was $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$. Air temperature was 25°C, humidity was 60% and PPFD was $480 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

合成および蒸散を阻害するであろう。

本実験では、気孔が開いた状態で火山灰を付着させたため気孔に入り込む火山灰粒子が存在したと考えられる。このような粒子は、単に付着しているだけの粒子が葉面への散水によって洗い流された後も気孔に留まり、気孔をふさいで気孔コンダクタンスを低下させたのであろう。なお細かい粒子ほど気孔に入りやすいため、桜島白灰、黒灰に比べて $3\mu\text{m}$ 以下の粒子の割合が大きい雲仙岳Bが付着した葉で気孔コンダクタンスの低下が大きくなったものと考えられる。

第7節 まとめ

葉面付着火山灰が光合成に与える影響について検討するため、桜島と雲仙岳の火山灰を用いていくつかの実験を行った。その結果、粒径の小さい火山灰ほど気孔を詰まらせてガス交換を低下させる作用が大きいこと、また粒径が小さく日射の反射量が多い火山灰ほど遮光作用が大きいことがわかった。さらに、日射の反射量が少なく吸収量が多い火山灰ほど葉温を上昇させる作用が大きいといえる。このような火山灰は、葉面に到達する光を弱め、 CO_2 の吸収を妨げ、葉温を光合成の適温以上に上昇させることにより光合成を低下させ成長を抑制すると推測される。

なお野外では葉面付着火山灰は降雨によって洗い流されることも多く、長期間葉面上に留まることは少ないであろう。そのため、前述のような物理的作用による光合成の低下は、それぞれ単独ではそれほど重要ではないかも知れない。しかし、それらが複合的に光合成に影響を与えることは考えられる。また気孔に入り込んだ火山灰粒子は、降雨後も気孔コンダクタンスを低下させ光合成に影響を与える可能性が高い。ただし、火山灰の付着が葉の上面に多いこと、一般に気孔は葉の下面に多く存在し気孔コンダクタンスも下面の方が大きい¹⁴⁾ことなどを考えると、光合成に与える影響の程度については直接的な検討が必要である。ビニールハウスや雨除け栽培の作物の葉面に火山灰が付着した場合には、火山灰は野外のように自然に除去されることがなく長期間葉面に滞留する。施設内は光が弱いため、遮光作用による光合成の低下が懸念される。野外においても、降雨がなく火山灰が長期間葉面に滞留する場合に

は、光合成に与える影響は大きくなるであろう。

葉面に付着した火山灰が光合成に与える影響の評価には、その付着量を把握するとともに粒径分布や反射特性などの物理的特性を調べることが重要である。

第IV章 葉面に付着した粉じんが光合成に与える影響評価

これまでにも、植物葉面に付着した粉じんを葉の汚れとしてとらえ、汚染度といった指標で表したり^{4,5)}、単位葉面積や葉乾物重あたりの粉じんの重さで表す^{3,54)}といった方法で、高速道路や都市部の幹線道路周辺の街路樹あるいは工場周辺の植物について葉面付着粉じんに関する調査が行われてきた。しかし、このような方法では葉面に付着した粉じん量を把握することはできても植物に与える影響を評価することは困難である。実際、そのような影響の評価は行われていない。

そこで本章では、遮光率という指標を用いて工事用道路周辺および堺市内の樹木の葉面に付着した粉じんの実態を調査し、光合成に与える影響の評価を試みた^{55,56)}。

第1節 葉面付着粉じんの遮光率

植物が光合成によって直接利用できる光は光合成有効放射(400~700 nm)である。そのため、粉じんが遮光作用によって光合成に与える影響を評価するには、太陽光の400~700 nmの平均遮光率(100%-平均光透過率)を指標として用いることが有効である。日射計とフィルターを組み合わせた光合成有効放射計を用いて粉じんの平均透過率を測定することは可能であるが、太陽光のスペクトルは太陽高度や天気の状態により変化する^{57,58)}ため、測定条件により値が異なることが予測される。そこで積分球(日本分光, TIS-341)を装備した分光光度計(日本分光, Ubest-50)を用いて平均光透過率を求める方法を検討した。まず、次節の方法で葉面から粉じんを移し取った透明粘着テープの400~700 nmの光透過スペクトルを分光光度計により測定し、それを粉じんが付着していない透明粘着テープの光透過スペクトル(約90%でほぼ一定)で除し、テープの影響を除外した粉じんのみの光透過スペクトルを求めた。さらにそれらを積分し、波長幅で割って平均光透過率

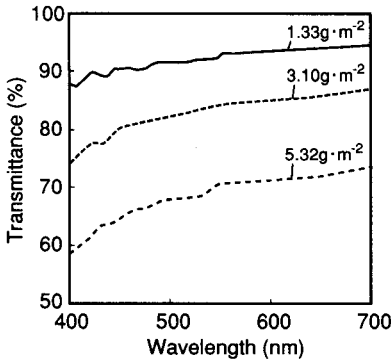


Fig. 25. Spectral transmittance of the dust accumulating on satsuma mandarin leaves. The numbers in the figure indicate the dust load.

を求めた。土壌由来の粉じんの光透過スペクトルの測定例を Fig. 25 に示す。光透過率は波長依存性を示し、波長が短くなるにしたがい小さくなった。そのため平均光透過率を求めるには、各波長ごとに光透過率を日射強度で重み付けする必要がある。しかし太陽放射の平均波長分布⁵⁹⁾で重み付けして粉じんの平均光透過率を求めた結果、上述のように単純に積分して求めた平均光透過率と良く一致した。したがって分光光度計により測定した粉じんの400~700 nm の光透過スペクトルを単純に積分し、波長幅で除して求めた平均光透過率から遮光率を計算した。

第2節 工事用道路周辺における葉面付着粉じんの実態

方法

土砂運搬用の大型車両が通行する道路周辺のウンシュウミカンの葉面に付着した粉じんについて、遮光率と粉じん付着量や降下ばいじん量との関係、遮光率の距離減衰や季節変化、粒径分布などについて調査した⁵⁶⁾。調査地域は大阪府南部の山間部に位置し、一般車両の通行はなく付近に工場などないことから、大型車両の通行が粉じんの発生源であったと考えられる。なお大型車両の通行台数は、最盛期(1989年5月)で1日あたり1283台であった。調査樹には、道路からの距離が1~45 m の範囲に位置する樹高2~3 m の13本を地形などを考慮して選定した。1989年6, 8, 9, 10, 12月に、各調査樹の樹冠外縁部の高さ1 m 付近で、枝の先端から1~4枚目

までの水平な当年葉(春葉)を1本につき16枚ずつ選んだ。葉の上面と下面に2×3 cm の大きさにした透明粘着テープ(中川ケミカル, カッティングシート)を主脈を避けて張りつけ、粉じんを採取し、遮光率を求めた。なお1回の作業で粉じんはほぼ完全に採取できたが、粉じんが大量に付着している場合は不十分であった。そのため新しいテープを用いて葉面の同じ場所から再度採取し、2枚のテープの粘着面を張り合わせて測定試料とした。8月には道路端からの距離が2 m の調査樹で、樹冠外縁部の葉面において粉じんの付着量と遮光率の関係を調べた。粉じん付着量は、主脈によって二分した葉の片方の上面のみを蒸留水で洗い、その洗浄水の蒸発残留物の重量を単位葉面積当たり換算して求めた。また二分した葉のもう片方の上面からテープによって粉じんを採取し、遮光率を求めた。8月には直線上に位置する4本の調査樹(道路端からの距離2, 7, 12, 20 m)の葉の上面から粉じんを採取し、コールターカウンタ(カウンタエレクトロニクス, TA2型)によって粒径分布を測定した。8月と12月には道路端からの距離が2 m の調査樹について、樹冠外縁部と樹冠内部(主幹と樹冠外縁部の中間)の高さ1 m 付近から水平な当年葉を32枚ずつ選び、テープを用いて上面から粉じんを採取し、遮光率を求めた。

なお解析には、ダストジャー法によって測定した6月の不溶解性の降下ばいじん量も用いた。ダストジャーは、各調査樹から距離1 m 以内で、高さ約3 m に設置した。また、調査地域から約2 km 離れた地点の降水量の測定値も用いた。

結果

(1) 葉面付着粉じんの粒径分布

道路からの距離が異なる4本の調査樹の葉の上面に付着した粉じんの粒径分布を Fig. 26 に示す。道路からの距離が2, 7, 12 m の調査樹では、粒径1~2 μm に小さなピークを、10~20 μm に大きなピークをもつ二山型のほぼ同様の粒径分布を示した。道路からの距離が20 m の調査樹においても粒径分布は二山型を示したが、2, 7, 12 m での結果とはかなり異なる形となった。このことから、葉面に付着した粉じんの粒径分布は道路からの距離によって異なるが10 m 程度まではほぼ等しいと考えられる。

(2) 粉じん付着量と遮光率の関係

Fig. 27 に葉の上面における粉じん付着量と遮光

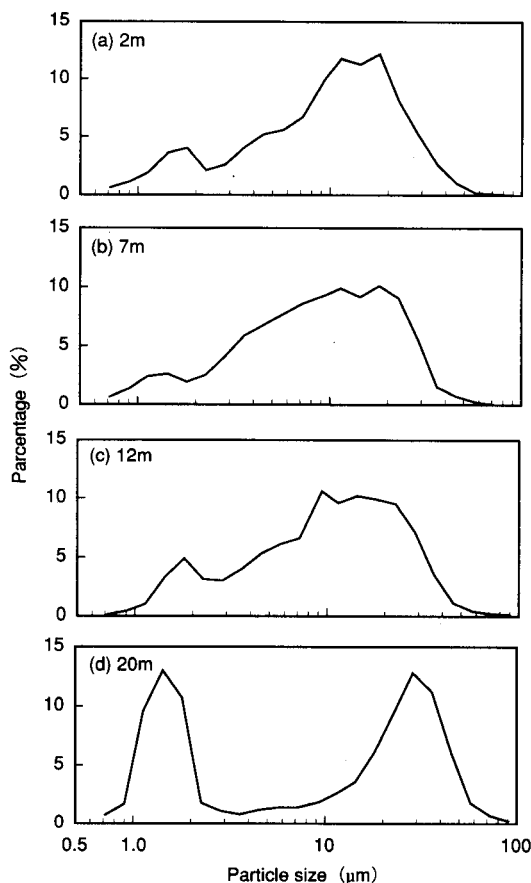


Fig. 26. Particle size distribution of the dust on the upper surfaces of satsuma mandarin leaves. The numbers in the figure indicate the distance from the road.

率の関係を示す。これは、道路から 2 m 離れた調査樹での結果である。粉じん付着量と遮光率との間にはかなり高い正の相関 ($r=0.91$) が認められ、遮光率による粉じん付着量の相対的な評価が可能であることが確認された。

(3) 降下ばいじん量と粉じんの遮光率の関係

不溶性の降下ばいじん量と葉の上面に付着した粉じんの遮光率の関係を図 28 に示す。遮光率は、各調査樹ごとに 6 月の測定結果を平均したものである。付着量と遮光率の関係と同様に、両者の間にはかなり高い正の相関 ($r=0.92$) が認められ、降下ばいじん量の多い場所では葉面の粉じん付着量が多く遮光率も大きいことが確認された。

(4) 道路からの距離と粉じんの遮光率の関係

Fig. 29 に道路からの距離と粉じんの遮光率の関

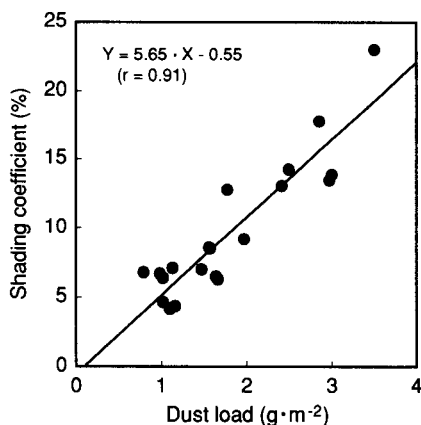


Fig. 27. Relation between the shading coefficient of dust and the dust load on the upper surfaces of satsuma mandarin leaves.

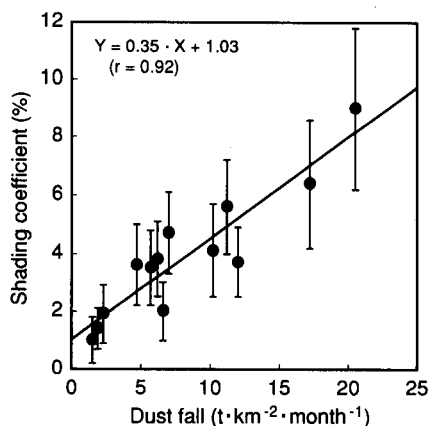


Fig. 28. Relation between the shading coefficient of dust on the upper surfaces of satsuma mandarin leaves and the dust fall. The vertical lines indicate standard deviation ($n=16$).

係を示す。これは調査地域全域で遮光率が大きくなった 8 月の結果で、各調査樹での平均値を示したものである。葉の上面の遮光率は、道路のすぐ側(距離 1 m)では約 30% と高い値であったが、道路からの距離とともに急激に減衰し、6 m 以上ではほぼ一定となった。葉の下面の遮光率は上面に比べかなり小さかったが、上面と同様に道路からの距離とともに減衰し、6 m 以上ではほぼ一定となった。

(5) 粉じんの遮光率の変化

粉じんの遮光率の変化を図 30 に示す。調査樹を道路の近くのもの(距離 6 m 未満)と道路から離

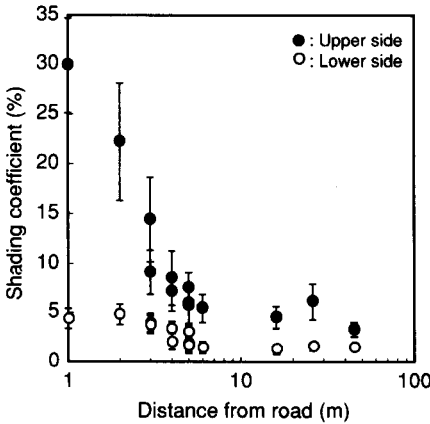


Fig. 29. Relation between the shading coefficient of dust on the surfaces of satsuma mandarin leaves and the distance from the road. The vertical lines indicate standard deviation (n=16).

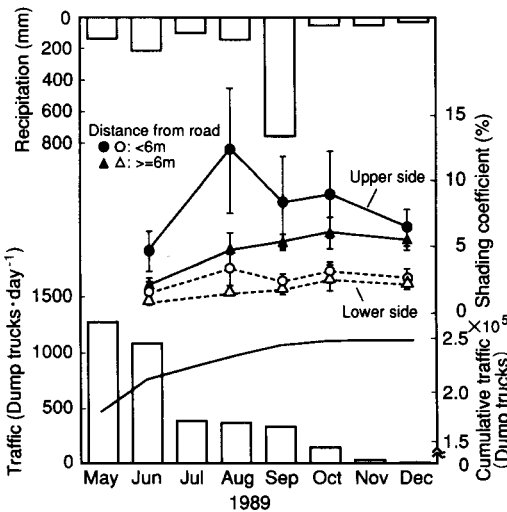


Fig. 30. Seasonal changes of the shading coefficient of dust on the surfaces of satsuma mandarin leaves, traffic and precipitation. The vertical lines indicate standard deviation (n=9 (<6 m) and n=4 (≥6 m)).

れたもの（距離 6 m 以上）に分け、それぞれ遮光率を平均した。月降水量と 1 日あたりの土砂運搬車両通行台数の月平均値および累積通行台数も示す。まず葉の上面の遮光率についてみる。道路近くの調査樹では、通行台数が 6 月から 7 月にかけて急激に減少したにもかかわらず、遮光率は 6 月の 4.6% から 8 月の 12.3% まで上昇した。しかし、9 月には雨が多

かったせい 8.4% まで低下し、車両の通行が 1 日あたり 10 台程度まで減少した 12 月には 6.4% まで低下した。一方道路から離れた調査樹では、通行量や降水量の変化にもかかわらず、遮光率は 12 月のわずかな低下以外徐々に上昇し、6 月の 2.1% から 12 月には 5.5% となった。このように道路の近くでは、葉の上面に付着した粉じんの遮光率は、通行台数が多い、つまり粉じんの発生量が多いと上昇するが、通行台数の減少や降水によって低下し、道路から離れた調査樹の遮光率に近づくことがわかった。次に葉の下面の遮光率についてみる。下面の遮光率はかなり小さく上面の 25~40% 程度であったが、その変化傾向は上面とほぼ同様であった。しかし、道路の近くの調査樹における 6 月の上昇は上面ほど顕著ではなかった。

(6) 樹冠の外縁部と内部における粉じんの遮光率の比較

以上は樹冠外縁部についての結果である。ここでは樹冠の外縁部と内部における遮光率を比較した。Fig. 31 は道路からの距離 2 m の調査樹の葉の上面の遮光率を示している。Fig. 30 に示したように樹冠外縁部の遮光率は 8 月から 12 月にかけて大きく低下した。しかし、樹冠内部では遮光率はほとんど変化しなかった。なお外縁部と内部の遮光率を比べると、8 月では外縁部が内部の 2 倍以上であったが、外縁部における遮光率の低下にともない 12 月には両者でほぼ等しくなった。

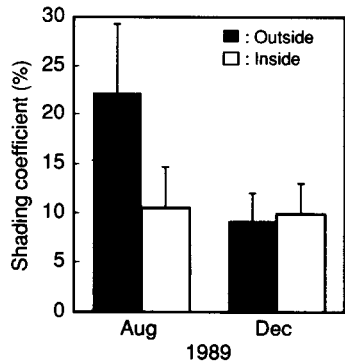


Fig. 31. Comparison of the shading coefficients of dust on the upper surfaces of leaves between outside and inside of a satsuma mandarin crown. The vertical lines indicate standard deviation (n=32).

考察

この調査地域における粉じんの大部分は車両の通行にともなって発生する巻き上げ粉じんなど土壌に由来するものであり、光合成に与える化学的影響はないであろう。一方物理的影響としては、光を遮る、葉温を上昇させる、気孔をふさぐ作用があげられるが、調査地域の粉じんは薄い灰褐色であり、粉じんによる葉温の上昇は小さかったと考えられる⁴³⁾。またウンシュウミカンの葉は下面のみに気孔が存在する片面気孔葉であり、下面の粉じん付着量が少なかった (Fig. 29, 30) ことから、粉じんが気孔をふさぐことによる光合成への影響はほとんどなかったであろう。以上より、この地域のウンシュウミカンの光合成に与える粉じんの影響としては遮光によるものが最も大きいと考えられる。なお粉じんはほぼ葉面に均一に付着していたが、葉の付け根や先端に集積する傾向があった。特に降雨後にその傾向が顕著であった。しかし粉じんが集積する部分の面積は小さく、葉の付け根や先端に集積した粉じんが光合成に与える影響は小さいであろう。

本節では葉面に付着した粉じんの遮光作用に着目し、粉じんによる光合成有効放射の遮光率を簡便に求める方法を考案して工用道路周辺のウンシュウミカンについて測定を行った。道路端からの距離が2mの調査樹についてみると、従来の指標である粉じん付着量 (単位葉面積あたりの粉じん付着重量) と遮光率の関係はほぼ直線で近似できた (Fig. 27)。さらに付着量が多い場合には、両者の関係は直線からずれることが予測される (Fig. 3, 23)。なお粒径や密度によって両者の関係は異なる⁴²⁾が、同じ土壌に由来するため粉じんの密度の場所による違いは小さいと考えられる。また粒径分布も道路端からの距離が10m程度まではほぼ等しかった (Fig. 26, 27)。したがって、道路端からの距離が10m程度までは粉じん付着量と遮光率の関係はほぼ等しいと考えられ、遮光率によって粉じん付着量を表すことが可能である。

粉じんの遮光率は降下ばいじん量ともかなり高い正の相関を示し (Fig. 28)、降下ばいじん量の多い場所では粉じん付着量が多く、遮光率も大きいことが確認された。なお粉じんの遮光率は道路端からの距離とともに急激に減衰し、6m以上でほぼ一定となった (Fig. 29)。

次に粉じんの遮光率の季節変化について考える (Fig. 30)。道路はアスファルトで舗装され、定期的に散水して粉じんの飛散を防いでいたにもかかわらず、道路近くの調査樹の葉の上面での遮光率は8月まで増大し、30%を越えるものもあった。しかし9月には急激に低下し、その後粉じん発生量の減少 (車両通行量の減少) にともないさらに低下した。9月の急激な低下は降水によって洗い流されたためと考えられる⁷⁾。下面も同様の変化を示したが、変化の幅は上面に比べ小さかった。道路から離れた調査樹では、上面、下面とも遮光率は徐々に上昇し、車両の通行が著しく減少した12月には道路近くの調査樹とほぼ等しくなった。これは樹冠外縁部の当年葉についての結果であるが、ウンシュウミカンは常緑果樹であり当年葉と2年生葉が混在している。道路端からの距離が3mの調査樹の樹冠外縁部について6月に測定した結果をみると、5月に展開した当年葉における遮光率 (上面5.6%、下面2.0%) に比べ、土砂運搬車両の通行が始まった時 (前年の8月) から存在していた2年生葉での遮光率 (上面14.9%、下面3.8%) は著しく高い値を示した。なお樹冠内部の遮光率は外縁部と異なる変化を示した (Fig. 31)。樹冠外縁部の遮光率は、車両通行量の減少にともない12月には8月の約1/2まで低下し、その間ほとんど変化のなかった樹冠内部とほぼ等しくなった。粉じん発生量が減少したため、樹冠外縁部では新しく付着する粉じんより雨や風によって葉面から除かれる粉じんの方が多くなり、遮光率が減少したと考えられる。ところが樹冠内部は雨に濡れることが少なく風も弱いため、葉面から除かれる粉じんは樹冠外縁部に比べ少ないであろう。また雨によって洗われた外縁部の粉じんの一部は、地面まで落ちずに樹冠内部に集積したと考えられる。このため粉じん発生量が著しく減少しても、樹冠内部では樹冠外縁部のような粉じん付着量の減少がみられなかったと考えられる。

第3節 堺市における葉面付着粉じんの実態

方法

調査は庭木や生垣などに広く用いられているサンゴジュ (*Viburnum awabuki*) を対象にして行った⁵⁶⁾。堺市全域から均等に試料を採取することを考

慮し、公園や住宅地から調査樹を30本選定した (Fig. 32)。選定に際しては、建物や他の樹木の陰になっているもの、虫害などを受けて外見上健全でないもの、また道路近傍のものは避けた。ただし1番の調査樹のみ幹線道路のすぐ側 (距離2 m) に位置した。1990年10月に各調査樹の樹冠の外縁部に位置する当年葉を各調査樹から5枚ずつ選び、透明粘着テープを葉の上面と下面に別々に張り付けて葉面

付着粉じんを採取した。粉じんが張り付いた透明粘着テープの光透過率を分光光度計で測定し、葉面付着粉じんの遮光率を求めた。遮光率は粉じん付着量を相対的に表している。なお30本の調査樹のうち10本 (番号1, 2, 4, 6, 7, 15, 20, 24, 26, 30) については、1990年7月~11月に毎月遮光率を測定し、その変化を調べた。

解析は、堺市をJR阪和線によって臨海地域と後背地域に分け (Fig. 32)、それぞれの地域で測定結果を平均して行った。JR阪和線以西 (臨海地域) は大阪湾に面した工業地帯を含む人工集中地域で産業活動の活発な地域である。一方JR阪和線以东 (後背地域) は主に住宅地域であるが、山林や田畑が残っている。

結果と考察

堺市における葉面付着粉じんは、工所用道路周辺に比べ全体的に粒径が小さく黒色に近いものが多かった。

まず、1990年10月に測定した30本の調査樹に対する結果 (Fig. 33) についてみる。臨海地域および後背地域での粉じんの遮光率は上面でそれぞれ5.2、4.8%、下面でそれぞれ1.5、1.7%であった。このように両地域での遮光率はほぼ等しく、堺市全域について平均すると上面で4.9%、下面で1.6%となった。なお、道路近傍の調査樹における遮光率は大きく、上面、下面とも約2倍となった。次に粉じんの遮光率の変化についてみる (Fig. 34)。葉の上面で

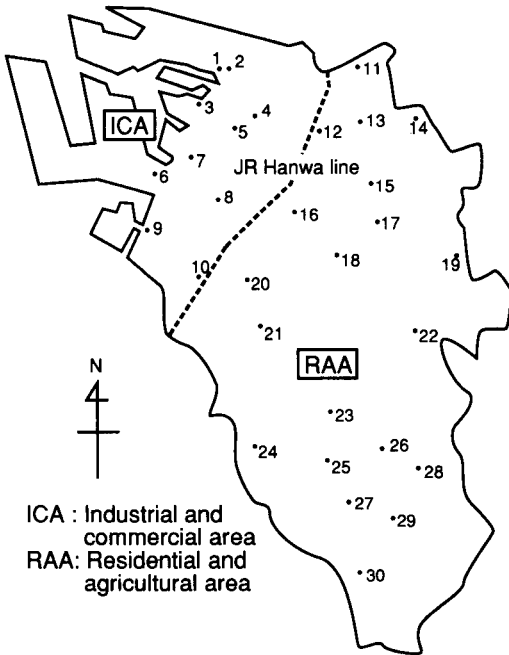


Fig. 32. Distribution of trees for study in Sakai.

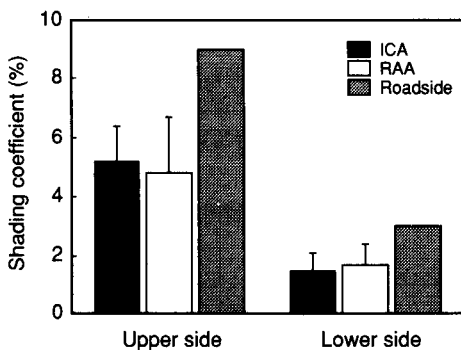


Fig. 33. Comparison of the shading coefficients of dust on the leaf surfaces of *Viburnum awabuki* in Sakai (October 1990). The vertical lines indicate standard deviation (n=9 (ICA) and n=20 (RAA)).

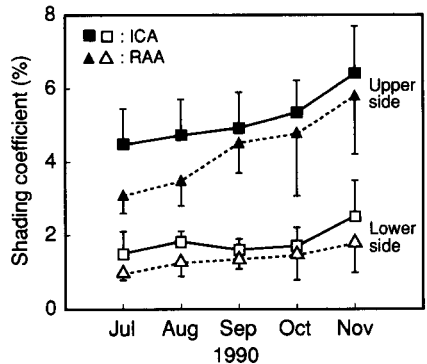


Fig. 34. Seasonal changes of the shading coefficient of dust on the leaf surfaces of *Viburnum awabuki* in Sakai. The vertical lines indicate standard deviation (n=4 (ICA) and n=5 (RAA)).

の遮光率は7月から11月にかけて徐々に上昇した。11月の臨海地域、後背地域における遮光率はそれぞれ6.5, 6.0%で、7月の約1.5, 1.9倍となった。葉の下面においても遮光率は7月から11月にかけて徐々に上昇する傾向を示したが、上面ほど顕著ではなかった。この結果は、春に新しく展開したサングジュの葉が粉じんによって汚染されていく過程を示している。

第4節 光合成に与える影響の評価

方法

工事用道路周辺のウンシュウミカンを対象とした。

粉じんが遮光作用によって光合成に与える影響を評価するため、調査地域で測定した全日射量とウンシュウミカン当年葉の光-光合成曲線（小野⁶⁰の第5図）を用いて光合成量を試算した。使用した光-光合成曲線は光源に白熱灯を用い光強度をlxで表しているため、日射量（ $W \cdot m^{-2}$ ）に適用できるように変換した⁶¹。その際、光合成有効放射は日射量の50%とした⁶²。光-光合成曲線は双曲線に近似させ⁶³、全日射量が $330 W \cdot m^{-2}$ で光飽和に達するとした（Fig. 35）。なお天野⁶⁴が求めた光-光合成曲線もほぼ同様であった。

結果と考察

遮光率を10, 20, 30, 40%に設定し、Fig. 35の光-光合成曲線を用いて1989年の7~10月の毎時の平均日射量から1時間ごとの光合成量を計算し月ごとに積算した。Fig. 36に遮光率0%, つまり粉じんが

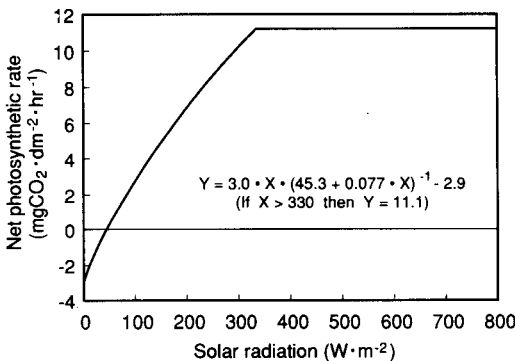


Fig. 35. Relation between the net photosynthetic rate of satsuma mandarin leaves and solar radiation (modified after Fig. 5 of Ono⁶⁰).

付着していない葉の光合成量に対する相対値を示す。また、日積算日射量の月平均値も示す。各月の相対光合成量は、遮光率10%ではほぼ95%であったが、遮光率20%では88~91%, 30%では81~84%, 40%では70~78%であった。相対光合成量は8月に最大で、日射量の少なかった9月に最小となった。7月の積算日射量は8月とほぼ等しかったが、遮光による影響は8月より大きく、積算日射量が $2.4 MJ \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$ 少ない10月とほぼ同程度となった。

粉じんによる遮光作用が光合成に与える影響は月によって異なったが、例えば8月に遮光率30%と最も大きな値を示した調査樹では、その月の光合成量の減少は16%となった。なお遮光作用が光合成に与える影響は日射量によって異なる。光-光合成曲線の傾きは光が弱いときは急であるが、光が強くなるにしたがい緩くなり、光飽和点以上では光合成速度は一定となる。したがって遮光率が同じでも光が弱いほど光合成への影響は大きい。粉じんを透過し実際に葉面に到達する光の強さが光飽和点以上であれば、光合成は遮光による影響を受けない。このように光合成は日射量の少ないときに遮光の影響を強く受ける。同様の理由から光飽和点の高い植物ほど光合成は遮光の影響を受けやすい。また積算日射

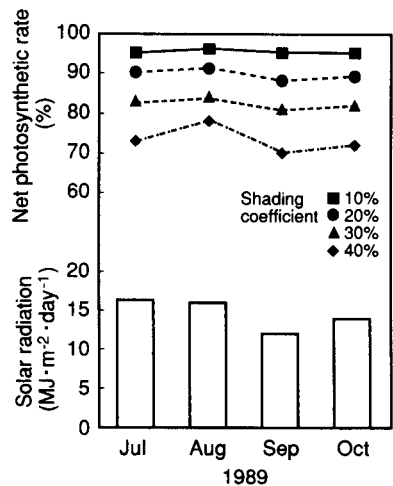


Fig. 36. Estimate of the shading effect of dust on the net photosynthesis of satsuma mandarin. The net photosynthetic rate of shaded leaves are indicated in the relative value to that of leaves without shading in each month.

量が同じでも日射のパターンが違えば、光合成に与える影響は異なる。今回は最も光合成能が高い樹冠外縁部の当年葉^{65,66)}を対象として粉じんによる影響を検討したが、ウンシュウミカンの乾物生産は、照度が樹冠外部の50%程度となる樹冠内部の葉量が最も多い部位で最大であるといわれている⁶⁵⁾。そのため影響の詳細な評価を行う場合には、そのような部位での検討も必要となる。なおリンゴやブドウなどの落葉果樹の光飽和点はウンシュウミカンに比べて高い⁶⁷⁾。したがって落葉果樹の光合成は粉じんによる遮光の影響をより強く受けるであろう。

本節では、樹木の葉面に付着した粉じんが光合成に与える影響を粉じんの遮光率と日射量をもとに光-光合成曲線を用いて評価した。この方法はウンシュウミカンのような照葉樹では有効であると考えられる。しかし針葉樹や葉面に毛の多い樹木などではテープによる粉じんの採取が困難なため、この方法の適用についてはさらに検討する必要がある。なお葉の上面に気孔が存在する樹木では、遮光作用以外に粉じんが気孔をふさぐ作用も無視できないであろう⁴³⁾。またディーゼルエンジンから排出される粒子のような黒色の粉じんが大量に付着した場合には、葉温の上昇による影響も考慮すべきである⁴³⁾。

第5節 まとめ

工事用道路周辺のウンシュウミカンおよび堺市内のサングジュの葉面に付着した粉じん量の実態について主に遮光率という指標を用いて調査し、光合成に与える影響を試算した。

工事用道路周辺のウンシュウミカンを対象とした調査で、遮光率が葉面付着粉じん量の相対値を表していること、また降下ばいじん量の多い場所では葉面付着粉じん量も多いことが確認された。道路に近いウンシュウミカンの葉の上面には土壤に由来する粉じんが多く付着し、遮光率が30%を越える場合もあった。しかし葉面付着粉じん量は道路からの距離とともに減衰し、6 m以上ではほぼ一定となった。なお葉の下面の付着粉じん量は上面に比べかなり少なかった。道路の近くでは、樹冠外縁部の葉の上面における遮光率は粉じん発生量や降水量の影響を強く受け大きく変化した。樹冠内部での変化は小さかった。

堺市内に分布するサングジュの春に展開した当年

葉は粉じんの付着によって徐々に汚染されていくことがわかった。当年葉における10月の粉じんの遮光率は、堺市全域の平均で上面、下面それぞれ4.9、1.6%であった。幹線道路の近傍では、遮光率は約2倍であった。

ウンシュウミカンを対象に、光-光合成曲線と日射量の測定値を用いて粉じんによる遮光が光合成に与える影響を試算した。遮光による影響は日射量によって異なった。遮光率10、20、30、40%での各月の光合成量は粉じんが付着していない場合のそれぞれ95、88~91、81~84、70~78%となった。1989年8月に遮光率が30%を示す調査樹があったが、その月の光合成量の減少は16%と推定された。

第V章 総括

本研究では、葉面に付着した粉じんが光合成に与える物理的影響を明らかにするとともに、その影響を評価することを目的とした。

まず第II章で、試験用ダストを用いた実験によって葉面に付着した粉じんの遮光作用、気孔をふさぐ作用および葉温を上昇させる作用を調べ、それらが光合成速度に与える影響について検討した。第III章では実際の火山灰を用いた実験を行い、それらの物理的特性および遮光作用、気孔をふさぐ作用、葉温上昇作用について検討した。第IV章では、遮光率という指標を用いて工事用道路周辺および堺市内において葉面付着粉じんの実態を調査し、それらの遮光作用が光合成に与える影響の評価を行った。

得られた結果を要約すると以下の通りである。

(1) 葉面に付着した粉じんは遮光作用により光合成速度を低下させた。また気孔が開いている状態で粉じんが付着すると、それらは気孔内に入り込み、明期には気孔をふさいで気孔コンダクタンスを低下させた。逆に、暗期には気孔の閉鎖を妨げ気孔コンダクタンスを上昇させた。以上の現象は粒径の小さい粉じんにおいて顕著であった。粉じんには葉温を上昇させる作用が認められた。粉じんによる葉温上昇により蒸散速度は上昇したが、光合成速度は、適温域以下では上昇し適温域以上では低下した。

(2) 火山灰の粒径分布は降灰日、採取場所によって異なった。粒径が小さく光の反射量が多い火山灰ほど遮光作用が大きかった。粒径の小さい火山灰粒子は水で葉面を洗い流した後も気孔に留まり、明期の

気孔コンダクタンスを低下させることがわかった。なお桜島の火山灰は雲仙岳のものに比べ日射の吸収量が多く、葉温を上昇させる作用が大きかった。桜島の火山灰が $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 附着した葉の温度は、夏の晴天日の正午前後に約 2.5°C 上昇した。

(3) 工事用道路周辺の調査で、降下ばいじん量の多い場所では葉面附着粉じん量も多いことが確認された。道路に近いウンシュウミカンの葉の上面には土壌に由来する粉じんが多く附着し、遮光率が30%を越えるものもあった。しかし葉面附着粉じん量は道路からの距離とともに減衰した。なお葉の下面の附着粉じん量は上面に比べかなり少なかった。道路の近くでは粉じん発生量や降水量の影響を強く受け、樹冠外縁部の葉の上面における遮光率の変化は大きかったが、樹冠内部での変化は小さかった。粉じんによる遮光がウンシュウミカンの光合成に与える影響は日射量によって異なった。遮光率10, 20, 30, 40%での各月の光合成量は、粉じんが附着していない場合のそれぞれ95, 88~91, 81~84, 70~78%となった。1989年8月に遮光率が30%を示す調査樹があったが、その月の光合成量の減少は16%と推定された。

(4) 堺市内のサンゴジュ葉は粉じんの附着によって徐々に汚染されていくことがわかった。堺市全域の平均値でみると、10月の粉じんの遮光率は葉の上面で4.9%、下面で1.6%であった。幹線道路近傍での遮光率は約2倍であった。

一般に植物葉の気孔は下面に多く存在する。気孔コンダクタンスも下面の方が大きい。葉の下面に附着する粉じんは少ない。また光合成速度の適温範囲は比較的広く、葉温の変化が光合成速度に与える影響は光強度に比べて小さい。適温域以下では、葉温の上昇は光合成速度を上昇させる。このような理由から、葉面に附着した粉じんが光合成に与える物理的影響としては遮光作用が最も大きいと考えられる。

本研究において、水溶性成分が少なく化学的に不活性な粉じんであっても、植物の葉面に附着すると、光を遮る、気孔をふさぐ、葉温を上昇させるといった物理的作用により光合成を低下させることが明らかとなった。したがって粉じん発生量の多い地域では、植物の光合成速度は慢性的に低下し生育が悪化している可能性が高い。粉じんの物理的特性を把握

し、それらが光合成に与える影響を評価することにより効果的な粉じん対策が可能となる。本研究において検討した粉じんの遮光率を用いる評価法は、実用性も高く有効であると考えられる。

謝 辞

本論文作成にあたり終始懇切な御指導、御鞭撻を賜りました大阪府立大学農学部相賀一郎教授に衷心より謝意を表します。本論文を御校閲いただき、懇切な御指導を賜りました大阪府立大学農学部小元敬男教授ならびに大阪府立大学農学部桑原孝雄教授に謹んで感謝の意を表します。研究着手当初より御指導いただいた大阪府立大学農学部環境調節工学講座の清田 信助教授に謹んで感謝いたします。また、有益な御助言をいただいた同研究室の北宅善昭講師（現在千葉大学園芸学部助教授）に感謝いたします。さらに、研究に対する取り組みなどに対し、数多くの御教示をいただいた大阪府立大学矢吹萬壽元学長に深く感謝いたします。

なお、実験および調査に際し、多くの方々の協力を得ました。九州大学農学部鈴木義則教授、大阪府立大学農学部の河瀬憲次教授、一谷多喜郎教授、矢部勝彦助教授、谷川寅彦助手、農林水産省果樹試験場口之津支場の柳瀬春夫支場長、高辻豊二室長（両名とも現在農林水産省果樹試験場）、鈴木勝征主任研究官、長崎県島原農業改良普及所の内海 稔所長、中山忠治専門幹、島原市農業協同組合の松尾祐次氏、福岡西産業公害防止センターの佐川直史次長、浜部 薫課長、千葉悦子係長、堺市環境保全部環境保全課の皆様ならびに大阪府立大学農学部環境調節工学講座の専攻生であった喜野達浩氏、田中幸治氏（両名とも現在堺市役所）、池田茂昭氏、今村 太氏（現在日本工営㈱）、関 和雄氏（現在同研究室大学院生）に心からお礼申し上げます。

引用文献

- 1) 寺部本次 (1987). エアロゾルと降下ばいじん。空気清浄のための浮遊微粒子の計測・制御総合技術（諫早典夫ら編）。R & Dプランニング, 255-263.
- 2) 朝来野国彦・西山健一郎・佐藤静雄 (1988). 浮遊粒子状物質の現状と対策—自治体における対応—。大気汚染学会誌, 23, 129-142.

- 3) 三澤 彰(1981). 緑地帯の大気浄化機能に関する研究—特に自動車走行にともなう粉塵の葉面吸着量について—. 造園雑誌, 44, 191-202.
- 4) 日本道路公団・道路緑化保全協会 (1977). 道路緑化樹木及び沿道植物に対する排出ガスの影響度調査研究. 32-43.
- 5) 大阪府立大学農学部・日本道路公団大阪建設局(1975). 自動車排ガスが温州ミカンに及ぼす影響についての調査報告書(NO. 1). 13-16.
- 6) 大木 章・前田 滋 (1991). 鹿児島市における降下ばいじんの調査(1987年4月~1990年3月調査). 大気汚染学会誌, 26, 273-278.
- 7) 気象庁地震火山業務課(1991). 活火山の追加と最近の火山活動. 気象, 35 (5), 13-15.
- 8) 山本良三・江幡守衛・河野恭広・田代 亨・石川雅士・吉田正夫 (1980). 1979年御岳噴火の降灰による農林地の被災の調査ならびに降灰実験. 日作東海支部研究梗概, 89, 1-8.
- 9) 森田重則・小原秀雄・窪田 廣 (1981). 桜島火山降灰の量と分布域. 鹿児島県農業試験場研究報告, 9, 8-18.
- 10) CAO, H. (1989). Air pollution and its effects on plants in China. *Journal of Applied Ecology*, 26, 763-773.
- 11) 阿部重信(1989). 中国における環境の現状と課題. 環境研究, 74, 67-79.
- 12) 早川守彦(1989). メキシコ市首都圏の大気汚染の現況. 環境研究, 74, 14-22.
- 13) 伊藤政志 (1989). サンチャゴ市(チリ)の大気汚染. 環境研究, 74, 23-33.
- 14) 相賀一郎・平野高司・清田 信 (1992). 中国重慶市の大気汚染による植物被害. 大気汚染研究協会近畿支部生物影響部会講演会資料, 1-8.
- 15) 上田 豊・岩田修二 (1991). 風送塵の発現と輸送. 黄砂(名古屋大学水圏科学研究所編). 古今書院, 3-4.
- 16) 石 廣玉(1991). 黄砂の大陸—中国. 黄砂(名古屋大学水圏科学研究所編). 古今書院, 9-16.
- 17) YUNUS, M., DWIVEDI, A. K., KULSHRESHTHA, K. and AHMAD, K., J. (1985). Dust loadings on some common plants near Lucknow city. *Environ. Pollut. Ser. B*, 9, 71-80.
- 18) 気象庁 (1989). 異常気象レポート'89. 大蔵省印刷局, 182-185.
- 19) KENNEDY, R., A. (1980). Ash from Mt St Helens. *Nature*, 287, 581.
- 20) 今村三郎・沖野英男・稲垣育雄 (1974). 火力発電所粉じんによるカンランの被害. 愛知県農業総合試験場研究報告 B (園芸), 6, 102-107.
- 21) 松島二良(1976). ばいじん及び二酸化硫黄による温州ミカンの被害. 三重大学環境科学研究紀要, 1, 113-127.
- 22) 河野吉久・高梨成行・石川春彦 (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. 電力中央研究所報告, 477001, 2-20.
- 23) 河野吉久・高梨成行・石川春彦 (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. 電力中央研究所報告, 478001, 1-10.
- 24) 河野吉久・高梨成行・石川春彦 (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. 電力中央研究所報告, 479001, 1-14.
- 25) DARLEY, E., F. (1966). Studies on the effect of cement-kiln dust on vegetation. *Jour. Air Pollut. Control Assoc.*, 16, 145-150.
- 26) LERMAN, S., L. and DARLEY, E., F. (1975). Particulates. In "Responses of Plants to Air Pollution" (ed. by MUDD, J. B. and KOZLOWSKI, T. T.). Academic press, New York, 141-158.
- 27) KRISHNAMURTHY, K., V. and RAJACHIDAMBARAM, C. (1986). Factors associated with reduction in photosynthetic oxygen evolution in cement dust coated leaves. *Photosynthetica*, 20, 164-168.
- 28) 沖野英男・今村三郎・稲垣育雄 (1974). い物工場の粉じんによるナシ果実の汚染. 愛知県農業総合試験場研究報告 B (園芸), 6, 108-

- 112.
- 29) GODZIK, S., FLORKOWSKI, T., PIOREK, S. and SASSEN, M., M., A. (1979). An attempt to determine the tissue contamination of *Quercus robur* L. and *Pinus sikvestris* L. foliage by particulates from zinc and lead smelters. *Environ. Pollut.*, 18, 97-106.
- 30) PEIRCE, G. (1910). An effect of cement dust on orange trees. *Plant World*, 13, 283-288.
- 31) PARISH, S., B. (1910). The effect of cement dust on citrus trees. *Plant World*, 13, 288-291.
- 32) ELLER, B., M. (1977). Beeinflussung der Energiebilanz von Blättern durch Strassenstaub. *Angew. Botanik*, 51, 9-15.
- 33) BORKA, G. (1984). Effect of metalliferous dusts from dressing works on the growth, development, main metabolic processes and yield of winter wheat *in situ* and under controlled conditions. *Environ. Pollut. Ser. A*, 35, 67-73.
- 34) SINGH, S., N. and RAO, D., N. (1981). Certain responses of wheat plants to cement dust pollution. *Environ. Pollut. Ser. A*, 24, 75-81.
- 35) THOMPSON, J., R., MUELLER, P. W., FLUCKIGER, W. and RUTTER, A., J. (1984). The effects of dust on photosynthesis and its significance for roadside plants. *Environ. Pollut. Ser. A*, 34, 171-190.
- 36) KRAJICKOVA, A. and MEJSTRIK, V. (1984). The effect of fly ash particles on the plugging of stomata. *Environ. Pollut. Ser. A*, 36, 83-93.
- 37) BEASLEY, E., W. (1942). Effects of some chemically inert dusts upon the transpiration rate of yellow coleus plants. *Plant physiol.* 17, 101-108.
- 38) RICKS, G., R. and WILLIAMS, R., 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.
- 39) FLUCKIGER, W., OERTLI, J., J. and FLUCKIGER, H. (1979). Relationship between stomatal diffusive resistance and various applied particle sizes on leaf surface. *Z. Pflanzenphysiol.*, 91, 173-175.
- 40) EVELING, D., W. (1986). Scanning electron microscopy of damage by dust deposits to leaves and petals. *Bot. Gaz.*, 147, 159-165.
- 41) 真子正史・田中一字・大垣智昭 (1974). 自動車による未舗装農道の砂じんおよび運搬がミカンに及ぼす影響. 神奈川県園試研報, 22, 13-19.
- 42) 平野高司・清田 信・北宅善昭・相賀一郎 (1990). 植物葉の光合成速度に与える粉じんの物理的影響. 農業気象, 46, 1-7.
- 43) 平野高司・清田 信・相賀一郎 (1991). 粉じんによる気孔閉塞作用と葉温上昇作用が植物葉の光合成速度に与える影響. 農業気象, 46, 215-222.
- 44) 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.
- 45) 岩城英夫 (1979). 群落の機能と生産. 朝倉書店, 16-19.
- 46) 矢吹萬壽 (1985). 植物の動的環境. 朝倉書店, 50-51.
- 47) 藤沼康実・町田 孝・岡野邦夫・名取俊樹・戸塚 續 (1985). 大気浄化植物の検索—広葉樹種における葉面拡散抵抗特性の種間差異—. 国立公害研究所報告, 82, 13-28.
- 48) 近藤矩郎 (1984). 大気汚染ガスに対する気孔反応による防御. 国立公害研究所報告, 64, 78-87.
- 49) GAASTRA, P. (1959). Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature and stomatal diffusion resistance. *Meded. Landbouwhogeschool Wageningen*, 59, 1-68.
- 50) 平野高司・清田 信・関 和雄・相賀一郎 (1992). 雲仙普賢岳と桜島火山灰の付着がキュウリの葉温と気孔コンダクタンスに与える影響. 農業気象, 48, 139-145.
- 51) 星川清親 (1971). 光合成器官としての葉の構造. 作物の光合成と物質生産 (戸苅義次監修),

- 養賢堂, 16-19.
- 52) 田原迫昭爾・宮里 満・宮部芳照 (1988). 農作物自動防灰装置の開発—火山灰の粒径分布と透過光量について—. 鹿児島大学農学部学術報告, 38, 237-242.
- 53) 柴田和雄 (1974). スペクトル測定と分光光度計. 講談社, 21-24.
- 54) BRABEC, E., KOVAR, P. and DRABKOVA, A. (1981). Particle deposition in three vegetation stands; A seasonal change. *Atmos. Environ.*, 15, 583-587.
- 55) 平野高司・清田 信・相賀一郎 (1991). 温州ミカンの葉面に付着した道路粉じんの遮光作用が光合成に与える影響評価. 大気汚染学会誌, 26, 352-358.
- 56) 矢吹萬壽・平野高司・清田 信・青木正敏・今村 太・相賀一郎 (1992). 堺市におけるサンゴジュの葉内重金属含有量の20年間の変化. 環境情報科学, 21, 102-106.
- 57) TAYLOR, A., H. and KERR, G., P. (1941). The distribution of energy in the visible spectrum of daylight. *J. Opt. Soc. Am.*, 31, 3-9.
- 58) HENDERSON, S., T. and HODGKISS, D. (1963). The spectral energy distribution of daylight. *Brit. J. Appl. Phys.*, 14, 125-131.
- 59) 桜谷哲夫・岩崎 尚・奥山富子・内嶋善兵衛 (1985). 関東(筑波)における太陽放射の波長組成. 太陽放射エネルギーの季節的・地理的变化. 農林水産技術会議事務局, 154-167.
- 60) 小野祐幸・工藤和典・大東 宏 (1978). 温州ミカンの光合成作用および生産構造に関する研究 第1報 環境要因が光合成速度に及ぼす影響について. 四国農試報, 31, 147-157.
- 61) 高 清吉・今井 勝・村田吉男 (1981). 放射束密度単位(光の強さ)の換算. 光合成研究法(加藤 栄ら編集). 共立出版, 501-502.
- 62) 内嶋善兵衛 (1986). 農業気象用語解説集. 日本農業気象学会, P. 82.
- 63) MILTHORPE, F., L. and MOORBY, J. (1979). *An introduction to crop physiology*, Cambridge university press. (玖村敦彦・深井 周訳 (1981). 作物生理学. 朝倉書店, 110-112).
- 64) 天野勝司・日野 昭・大東 宏・倉岡唯行 (1972). 果樹の光合成作用に関する研究(第1報)環境条件が光合成速度に及ぼす影響. 園学雑誌, 41, 144-150.
- 65) 小野祐幸・大東 宏 (1982). 温州ミカンの光合成作用および生産構造に関する研究 第4報 樹冠内光合成作用の部位別相違と果実の発達. 四国農試報, 40, 59-77.
- 66) 森永邦久・池田富士夫・木原武士 (1985). カンキツの光合成作用と果樹生産に関する研究 第1報 ウンシュウミカンの光合成作用の個葉間の差異について. 四国農試報, 45, 147-156.
- 67) 小野祐幸 (1991). 果樹の生理, 生態的反応. 果樹の施設栽培と環境調節(渡部一郎ら編著). 博友社, 116-120.