沿道植栽木の樹葉による粉塵付着に関する 風洞実験およびフィールド調査

NASRULLAH, Nizar*・三沢 彰**・立本英機***・金学永**

Wind Tunnel Experiment and Field Study on Particles Adsorption by Leaves of Roadside Trees

NASRULLAH, Nizar*, MISAWA, Akira**, TATSUMOTO, Hideki***, KIM, Hak Young**

目 要

沿道植栽木の樹葉による大気浄化効果を明らかにするため、風洞を用いて、マテバシイ、シラカシ、キョウチクトウおよびクロマツの4樹種を対象にして、暴露実験を行い、葉による粉塵付着量を測定した。またフィールドにおいてマテバシイおよびクロガネモチの葉による金属 (Zn, Ca, Mn, Fe) の付着量を調査した。

風洞実験結果はクロマツ、キョウチクトウ、マテバシイ、シラカシの順に粉塵付着量が低下した。粉塵付着量は葉面の構造の影響を著しく受け、気孔、葉毛、凹凸のある複雑な葉面構造、粘着性を持つ樹種の葉による粉塵付着量が多かった。また風速が大きくなるほど付着量も増加したが付着量の増加率が樹種によって異なり、クロマツの付着量の増加率が高かった。フィールドにおいてマテバシイの金属付着量は当年葉より旧年葉の方が多かった。それは旧年葉の方が当年葉より大気に暴露されている期間が長かったためと思われる。金属付着量の季節変化パターンは大気中浮遊粒子状物質濃度より降水量の影響を著しく受け、全体として降水量が少ない時期に粉塵付着量は増加した。

1. はじめに

浮遊粒子状物質（粒径 $10\mu\text{m}$ 以下の粒子）による大気汚染は、日本の多くの環境測定局において環境基準を達成していない状況にあり、1983年以降1991年現在までそ

キーワード：沿道植栽，粉塵付着量，葉面構造，大氣中粉塵濃度，降水量

Key words: Roadside planting, Volume of adsorbed particles, Nature of leaf surface, Concentration of suspended particulate matter, Rainfall

* 千葉大学大学院自然科学研究科, 環境科学専攻
Department of Environmental Sciences, Graduate School of
Science and Technology, Chiba Univ.

** 千葉大学園芸学部, 環境緑地学科
Department of Environmental Studies for Open Space,
Faculty of Horticulture, Chiba Univ.

*** 千葉大学工学部, 応用化学学科
Department of Applied Chemistry, Faculty of Engineering,
Chiba Univ.

の達成局数は50%台の横ばい状態が続いている⁴⁾。浮遊粒子状物質には工場および自動車等の人為的な活動によるもの、海塩粒子等の自然発生によるものが含まれており、なかでも大気中粉塵（浮遊粒子状物質を含む総粒子状物質）への自動車の寄与率は高く、都市によって異なるが、40%台の寄与率を示す場合もある²⁾。

現在沿道は、住宅地以外に住民の活動地として利用されている。また土地の立体化利用が進んでいるため道路の上の空間に公園、ビル等が建設されるとともに、自動車排ガスの影響を受ける環境下で活動する住民も増えてきた。このような沿道周辺の生活環境の保全を図るため、発生源である自動車の構造の改良、道路構造や土地利用の改善等による大気汚染対策が提案されている。一方、沿道における大気汚染濃度の低減方法として植栽による大気浄化に期待と関心が高まっているが、その量的把握は不十分である。

植物による大気浄化については人工気象室を用いて気体の汚染物質の浄化に関する研究が行われており、植物が NO_2 、 O_3 、 SO_2 等を吸収することが明らかにされている^{4,5,11)}。また野外でも、実際に植物によってどれだけの大気汚染濃度を低減できるかを述べた調査報告がある。それらの調査は植物群落内外について大気汚染濃度の分布を比較するという研究方法がとられている。その結果、植物群落内では大気中 NO_2 、 O_3 、 SO_2 、浮遊粒子状物質等の濃度が低下したという報告がなされている^{9,10)}。しかし、沿道植栽によって、特に浮遊粒子状物質がどの程度浄化できるか、さらには浄化過程においてどのような要因が影響を与えるのかについての研究は極めて少ない^{3,8)}。

以上から本研究では、植栽が自動車走行に伴って発生する粉塵の浄化効果を明らかにすることを目的に、簡易風洞を用いて樹種別に樹葉による粉塵付着量を測定するとともに、野外において粉塵付着量に及ぼす樹種、気象要因(風速、風向、降水量)および浮遊粒子状物質濃度等の影響を測定した。

2. 実験方法

2.1 風洞実験

2.1.1 風洞の構造および実験処理区の設定

本研究に使用した風洞は、幅100 cm、高さ50 cm、長さ450 cmで、厚さ5 cmの発泡スチロール板を用いて工作したものである(図1)。粉塵の発生源として、2馬力のディーゼルエンジン(ヤンマー NK2)を用い、最大回転数(1500 rpm)で運転し、風洞内に排出ガスを入れた。

図1 簡易風洞の様式図

Fig.1 Design of simple wind tunnel

風洞の送風機は、直径40 cm、3羽の高圧換気扇を用いた。対象とした樹木の葉は、風洞の測定室に配置して20時間暴露させた。風洞内の粉塵(総粒子状物質)濃度は、風洞の測定室においてアンダーセンエアーサンプラー(ダイレック-AV110)を用いて測定した。風洞内の風速は2.1 m/s、3.6 m/sおよび4.8 m/sの3水準を設定した。各風速処理による風洞内の粉塵濃度を表1に示す。

2.1.2 対象樹種およびサンプリング

供試樹種はクロマツ(*Pinus thunbergii* Parl.)、キョウチクトウ(*Nerium indicum* Mill.)、シラカシ(*Quercus myrsinaefolia* Blume)およびマテバシイ(*Pasania edulis* Makino)の4樹種とした。対象樹種については、代表的な道路緑化樹の中から、針葉1種、広葉樹3種を選んだ。切枝を用いて風洞実験を行うため、適当な枝の量を千葉大学園芸学部キャンパス内においてサンプリングし、長さ30 cmの枝をそろえ、ポリエチレンのポットに水差した。暴露する前、あらかじめ、葉面に付着している個体物質(粉塵)を十分に水道水で洗浄し、葉面が乾いてから暴露させた。各樹種は3ポット(切枝)を暴露させるため、各実験処理とも12個(4種×3列)のポット(切枝)を風洞内に配置した。すなわち気流方向の列に3ポットの同樹種、気流に対して直角方向の列に4樹種のポットを配列した。また、風洞の試験室内における粉塵濃度の分布の違いによる影響を避けることを目的として、5時間ごとに気流方向の列の位置を変えた。

2.1.3 粉塵付着量の測定および葉面形態の観察

風洞内に暴露させた葉は、あらかじめ重量を求めておいた100 ml ビーカー中で、蒸留水約50 mlを用いて、その葉面に付着している粉塵を絵筆で洗浄した。洗浄液は恒温器(70°C)の中で乾燥し、水分をすべて蒸発させた後、ビーカーをデシケータ内で放冷し、恒量を求め、葉面積1 dm²当たりの粉塵付着量として求めた。マテバシイ、シラカシおよびキョウチクトウの葉面積は自動面積計を用いて測定した。クロマツの場合、1本の針葉を円筒状にみたてて実測し、その実測値の1/2を葉面積とした。一方、葉面の形態および粉塵の付着状態は、走査電子顕微鏡(JOEL-T200)を用いて、洗浄していない葉を観察した。観察は五酸化リンを入れたデシケータ内に入れ、葉を2時間減圧乾燥し、さらにAu蒸着を行ったものを試料として用いた。

2.2 フィールド調査

2.2.1 対象樹種およびサンプリング

常磐自動車道の流山I.C.～柏I.C.間の堀割構造の沿道(図2)において、植栽木の葉面による金属付着量と交通量、浮遊粒子状物質濃度および気象要因との関係を調査

した。沿道植栽は、主に数種類の常緑広葉樹からなっているが、サンプリングは遮音壁から5～15 m以内の距離の3地点においてクロガネモチ (*Ilex rotunda* Thunb.) の当年葉、マテバシイ (*Pasania edulis* Makino) の当年葉および旧年葉を1992年6月～1993年2月の期間の各月末日に採取した。また現場付近の伊勢原環境測定局の浮遊粒子状物質濃度、風速、風向、および柏環境測定局の降水量のデータを入手した。

2.2.2 粉塵中金属の測定

採取葉は100 ml ビーカーの中で95%エタノール約25 ml を用いて葉面に付着している粉塵を絵筆で洗浄した。洗浄液を蒸発させた後、ビーカーに硝酸10 ml および過塩素酸5 ml を加えて、湿式分解を行い、その後、140℃のホットプレート上で蒸発乾固直前まで加熱分解を行い、放冷した。その後0.1 M 塩酸10 ml を加え、煮沸直前まで加熱し、50 ml 容メスフラスコ中に No. 5B 濾紙を用いてろ過し、放冷後定容して供試液とした。原子吸光分析装置 (日立180-30形) を用いて金属量 (Zn, Ca, Fe, Mn)

を測定し、葉面積1 dm² 当たりの重金属付着量を求めた。

3. 結果および考察

3.1 樹種別の粉塵付着量

風洞内の粉塵濃度、樹葉による粉塵付着量を表-1に示す。実験中は、発生源のディーゼルエンジンを最大の回転数で運転させた。その時排出粉塵量、すなわち風速と風洞内の粉塵濃度との積は理論的には一定にならなければならないが今回の実験ではその積は一定にならなかった。これは、風速によって風洞内の粉塵の分布に違いが生じたためと考えられる。しかし、葉面による粉塵付着は粉塵濃度や粉塵排出量によるというよりも風速の違いによって顕著な差が生じた。また各風速における葉面の粉塵付着量は、樹種によって異なり、風速2.1 m/s の時キョウチクトウおよびマテバシイの付着量はシラカシおよびクロマツより多かった。風速3.6 m/s および4.8 m/s の時、葉面の付着量はクロマツ、キョウチクトウ、マテバシイ、シラカシの順に低下した。風速4.8 m/s の時クロマツの付着量は、シラカシの1.9倍、マテバシイの1.7倍、キョウチクトウの1.5倍を示した。葉面における粉塵付着は葉面の凹凸、葉脈、葉毛、気孔周辺において多く観察された(写真1)。なお付着量が最大であったクロマツの葉面全体には気孔、凹凸構造が多数分布し、さらに葉面に粘着性が認められた。キョウチクトウは葉の表側にミクロな葉毛が観察された。マテバシイおよびシラカシの葉の表側は無毛であるが付着量が少ないシラカシの葉に比べ、マテバシイ葉面の凹凸構造がより発達していた。キョウチクトウおよびマテバシイの葉の裏側にはミクロな毛が観察され、さらにシラカシの葉の裏側には複雑な構造が発達するが葉の裏側において粉塵の蓄積が観察されなかった(写真2)。

以上の結果から、付着量は葉面(特に表側)の構造が著しく影響し、毛などの突起物を持った複雑な葉面ほど付着量が多いといえる。それは、複雑な表面構造を持った葉の方が気流によって再び飛ばされる粉塵が減少することによるものと考えられる⁷⁾。

図2 常磐自動車道沿道における樹葉のサンプリング地点の様式図

Fig. 2 Sketch of sampling points of tree leaves in the roadside of Joban highway

表1 風洞内における樹葉の粉塵付着量

Table 1 The volume of particles adsorbed by leaf of trees in the tunnel

風速 (m/s)	粉塵濃度 (mg/m ³)	葉の粉塵付着量(mg/dm ²)			
		マテバシイ	シラカシ	キョウチクトウ	クロマツ
2.1	1.274	4.86	2.37	5.67	2.99
3.6	0.908	4.81	3.81	5.88	5.97
4.8	0.423	5.43	4.81	6.29	9.52

写真1 表側の葉面形態および粉塵付着の形態, A:クロマツ, B:キョウチクトウ, C:マテバシイ, D:シラカシ
Photo 1 Structure of adaxial leaf surface and shape of adsorbed particles

3.2 付着量と風速および風洞内の粉塵濃度との関係

風洞内では, 風速の増加により粉塵濃度が低下したが, 葉面の粉塵付着量は, すべての樹種において風速が大きくなるほど多くなる傾向を示した。それは風速の増加によって葉面の付着効率が增加するためと考えられる¹⁾。また樹種によって葉面付着量の増加率が異なり, 風速2.1 m/s時に対する風速4.8 m/s時における付着量の増加率はクロマツ218.4%, シラカシ103.0%, マテバシイ11.7%, キョウチクトウ10.9%を示した。つまり, 風速が大きくなるほど, クロマツは, 他の樹種より粉塵付着量の増加率が高くなった。これは葉の柔らかさの違いと考えられる。クロマツの針葉は固くて細いので, 風の抵抗が少ないが付着量の増加率が最低であるキョウチクトウおよびマテバシイは葉面積が広いので, 大きい風速の場合, 風による葉の運動が激しいため, 葉面に付着した粉塵が, 再び風によって飛ばされることも一つの原因と考えられた。

フィールド調査地における浮遊粒子状物質濃度, 交通量および気象要因を図3に, 沿道におけるマテバシイお

図3 調査地における交通量, 気象要因および浮遊粒子状物質濃度

Fig.3 Traffic flow, climate factors and concentration of suspended particulate matter in the site of study

よびクロガネモチの金属 (Zn, Ca, Fe, Mn) 付着量を図4に示す。調査地における交通量は7-8万台/日 (小型車70-80%, 大型車20-30%) であった。道路方向 (SW-NE) に対するサンプリング期間中の風下風 (WSW, W, WNW, NW, NNW, N, NNE) の割合は月により10.1-76.3%である。このことから, サンプリング地は自動車

写真 2 裏側の葉面形態および粉塵付着の形態, A:クロマツ, B:キョウチクトウ, C:マテバシイ, D:シラカシ
Photo 2 Structure of abaxial leaf surface and shape of adsorbed particles

図 4 沿道におけるマテバシイおよびクロガネモチの葉の金属付着量

Fig. 4 The volume of metals adsorbed by leaves of *Pasania edulis* and *Ilex rotunda* on the road-side

走行に伴って発生する粉塵の影響を受けていたといえる。

マテバシイによる付着量を旧葉と当年葉と比較すると、Ca, Fe, Mn は期間を通じて、また Zn については10月以降、旧葉の方が多かった。これはマテバシイの旧葉は当年葉に比べ、より長い期間大気と接触していたためと考えられる。クロガネモチによる Zn 付着量はマテバシイの当年葉および旧葉より多く、Fe の付着量はマテバシイの当年葉より多かったがマテバシイの旧葉に比べ、7-9月の期間のみにクロガネモチの値が高かった。また Mn の付着量はマテバシイの当年葉よりクロガネモチの

方が多かったがCaの付着量はマテバシイの旧葉より少なかった。サンプリング月、樹種および金属によって付着量が異なった理由は風洞実験結果で示したように葉面構造の違いおよび葉面に対する金属の固着性の違いによるものと考えられる。

クロガネモチによるZn, Ca, FeおよびMnの付着量は測定月によってそれぞれ2.2-12.3 $\mu\text{g}/\text{dm}^2$, 2.7-49.5 $\mu\text{g}/\text{dm}^2$, 59.1-240.0 $\mu\text{g}/\text{dm}^2$ および1.1-6.5 $\mu\text{g}/\text{dm}^2$ の範囲でマテバシイの当年葉のそれらの付着量はそれぞれ1.4-5.8 $\mu\text{g}/\text{dm}^2$, 7.8-37.1 $\mu\text{g}/\text{dm}^2$, 58.0-165.2 $\mu\text{g}/\text{dm}^2$ および1.0-3.7 $\mu\text{g}/\text{dm}^2$ の範囲で変動した。またマテバシイの旧葉の場合、金属付着量は測定月によりZn (2.0-10.9 $\mu\text{g}/\text{dm}^2$), Ca (19.1-44.5 $\mu\text{g}/\text{dm}^2$), Fe (114.2-187.5 $\mu\text{g}/\text{dm}^2$) およびMn (1.9-5.3 $\mu\text{g}/\text{dm}^2$) の値を示した(図4)。

サンプリング期間では浮遊粒子状物質濃度は7月および11月にピークがみられ、9月から11月まで濃度が増加したが11月以降また濃度が低下した。すなわち、風洞内の結果と同様に風速は浮遊粒子状物質濃度と逆パターンを示し、風速が速いと浮遊粒子状物質濃度が低く、風速が弱い時(7月および11月)その濃度はピークとなった。

クロガネモチの金属付着量は(9月のMn付着量を除いて)マテバシイと同様に7, 8月および12月に付着量のピークがみられた。しかし金属付着量は、降水量に影響されたため、浮遊粒子状物質濃度のパターンとはかならずしも一致しなかった。全体として浮遊粒子状物質濃度が増加し、降水量が少ないと、金属付着量が増加し(6→7月, 10→11月), 浮遊粒子状物質濃度が低下しても、降水量が減少する期間は付着量が増加し(7→8月, 11→1月), 浮遊粒子状物質濃度が増加しても降水量が多いと付着量が低下する傾向(8→10月)がみられた。全体として降水量が少ないと葉面に付着されている粉塵が増加した。

以上の結果を要約すると、風洞実験では葉毛、凹凸のある複雑な葉面構造、粘着性を持つ樹種が粉塵付着量が多く、さらに風速が大きくなるほど付着量も増加する傾向がみられた。またフィールド調査からは主に降水量によって、付着量に変化し、全体として降水量が少ない場

合、粉塵付着量は増加した。これは葉面に粉塵が付着されても降水によって洗い流されているためと考えられる。なお沿道植栽の樹種の選択にあたっては葉の密度がより高く、さらに複雑な葉面構造をもつものが大気中粉塵の浄化効果が大きい。また沿道植栽の粉塵浄化能力を検討する場合、雨水による葉面からの流亡を加味することが必要である。

参考文献

- 1) CHAMBERLAIN, A. C. and LITTLE, P.: Transport and capture of particles by vegetation. Plant and Their Atmospheric Environment (GRACE, J., FORD, D. and JARVIS, P. G., Eds.) 147-173. Symposium of the British Ecological Society, Oxford Blackwell Scientific Publisher, 1980
- 2) 浜中裕徳: 大気保全行政の今後の課題, 大気汚染学会誌 **25**, 103-110, 1990
- 3) HEICHEL, G. H. and HANKIN, L.: Roadside coniferous windbreaks as sink for vehicular lead emission. J. Air Pollut. Contr. Assoc. **26**(8), 767-770, 1976
- 4) HILL, A. C.: Vegetation: A sink for atmospheric pollutant. J. Air Pollut. Control Assoc. **21**(6), 341-346, 1971
- 5) HOSKER, R. P. Jr. and LINDBERG, S. E.: Review: Atmospheric deposition and plant assimilation of gases and particles, Atmospheric Environ. **16**, 889-910, 1982
- 6) 環境庁: 平成5年度環境白書, 各論, 66-67, 1993
- 7) LINDBERG, S. E. and LOVET, G. M.: Application of surrogate surface and leaf extraction methods to estimation of dry deposition to plant canopies. Precipitation scavenging, dry deposition and resuspension, PRUPPACHER et al. (Eds.), Elsevier Science Publishing Co., Inc. **2**, 837-846, 1983
- 8) 三沢 彰・石橋洋司: 東京都内の既存の沿道植栽を対象とした粉塵吸着量に関する調査分析, 千葉大学環境科学研究報告 **11**, 51-57, 1984
- 9) 小川和雄・高野利一: 植物群落の大気浄化効果に関する研究(第一報), 埼玉県公害センター年報 **12**, 45-51, 1985
- 10) 近藤隆之・中島活薫・荒川久雄: 丘陵地の公園における樹木の大気浄化能に関する調査, 大気汚染学会(第31回)講演要旨集, 524, 1990
- 11) ROGERS, H. H., JEFFRIES, H. E. and WITHERSPOON, A. M.: Measuring air pollutant uptake by plants: Nitrogen dioxide. J. Environ. Qual. **8**(4), 551-557, 1989 (1993.10.12受理)

Summary

In order to study the effect of roadside planting in filtering atmospheric pollutant, wind tunnel experiment and

field study were conducted. Leaves of four species of trees were exposed in the tunnel at different wind velocities and their adsorption of particles were measured. In the road side of highway, adsorption of metal (Zn, Ca, Mn, Fe) by leaves of two tree species (*Pasania edulis* Makino and *Ilex rotunda* Thunb.) were also measured.

As results of tunnel experiment, we found adsorption of particles by leaves decreased in the order *Pinus thunbergii* Parl, *Nerium indicum* Mill, *Pasania edulis*, *Quercus myrsinaefolia* Blume. The volume of adsorbed particles were influenced by the nature of leaf surface where hairy leaves, rough and sticky leaves being more efficient at adsorption of particles than smooth one. The volume of adsorbed particles increased with wind velocities and the increasing rate was the highest on *Pinus thunbergii*.

From the field studies, we found that the adsorption of metal by old leaves were higher than new one. It probably due to old leaves being exposed to atmosphere longer than new one. Seasonal variation of metal adsorption were influenced strongly by rainfall rather than concentration of suspended particulate matter. Generally, the volume of adsorbed particles tended to increase when it was small rainfall.