

都市環境下における花粉再飛散挙動の 物理モデルと数値シミュレーションによる検討

A STUDY OF POLLEN RE-TRANSPORT BEHAVIOR IN THE URBAN ENVIRONMENT BY USING PHYSICAL MODEL AND NUMERICAL SIMULATION

中谷望夢¹⁾, 中根一朗²⁾

Nozomu NAKATANI and Ichiro NAKANE

- 1) 神奈川工科大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 (〒243-0292 厚木市下荻野 1030, E-mail:s1781005@cce.kanagawa-it.ac.jp)
- 2) 神奈川工科大学 工学部 機械工学科 (〒243-0292 厚木市下荻野 1030, E-mail: inakane@me.kanagawa-it.ac.jp)

The patients of Japanese cedar pollinosis are steadily increasing, and a paper reports that the national average of prevalence of it exceeded 26.5%. In addition, the Pollinosis Patients Survey of Tokyo metropolitan government reports that the prevalence rate in the 0 - 14 years age group became more than 10 times during the recent 20 years. It should be judged that this increase in prevalence is caused by the increase of exposure of Japanese Cedar Pollen in Tokyo, because the children of this age group are born and brought up there. We deduce that the pollen exposure amount in Tokyo is influenced by the pollen re-transport. In particular, if the re-transport of fallen pollen on roofs occurs in urban areas, the pollen may be aggregated at the bottom of the urban canopy layer. Though by the physical model and numerical simulation, we discuss the possibility that the re-transport of fallen pollen increases the pollen exposure amount. We measured the amount of Japanese cedar pollen on each height of the urban canopy layer by using Durham samplers, and the results of numerical simulation are compared with these measurements to confirm the influence of pollen re-transport in the urban environment.

Key Words : Pollen Transport, Multi-phase Flow, Numerical Simulation, Modeling, Adhesion Force

1. 緒言

スギ花粉症患者数は依然として増加しており、馬場ら⁽¹⁾は全国のスギ花粉症有病率が 26.5%に達していると報告している。加えて、東京都福祉保健局の行った調査⁽²⁾では、0~14 歳での有病率の増加が非常に大きく、この 20 年間で 10 倍以上にもなっていると報告している。なお、我々は、この東京都の調査結果に特に着目している。東京都下に住む若年層の多くは、もともと都下で生まれ育っていると判断されるので、この若年層の有病率の増加は、東京都下におけるスギ花粉被曝量の増加に起因するものと、我々は考えている。

東京を含めた都市部においては、花粉を吸着しづらい舗装道路や建造物が多く、しかも、大型建造物はビル風を引き起こす。また、都市の廃熱によるヒートアイランド現象によって、上昇気流が発生する。つまり、都市部においては花粉を再飛散させる要素がそろっており、この再飛散による花粉被

曝量増加が、東京都下の若年層の花粉症有病率を 20 年間で 10 倍以上にした要因であると、我々は推察している。

特に、都市部においては、軒を接するように建造物が建てられており、これら建造物の屋根や屋上から花粉が再飛散した場合、都市キャノピー層内の低位な場所にある我々の日常生活圏内においては、漏斗で集めるようにして花粉が飛散してくる可能性すら有ると、我々は危惧している。

ただし、この「花粉が再飛散して被曝量を増加させること」に関しては、現状では単なる推察の域を出ていない。そこで本研究では、都市キャノピー層内高さ毎の花粉尘散量の計測、落下した花粉の移動モデルの作成、都市キャノピー層内での花粉飛散量の数値シミュレーションを通して、都市環境が花粉の再飛散を促進させること、そして、そのために、都市部の花粉被曝量が増加する可能性のあることを検討する。なお、キャノピー層とは、建物や樹木などの地上にある物体が大気

等の流れに影響を与える範囲のことを言い、特に都市においては、建造物の影響が及ぶ範囲のことを都市キャノピー層と呼ぶ。

2. 都市キャノピー層内高さ毎の花粉飛散量の計測

まず、都市キャノピー層内の花粉飛散量を把握するため、花粉飛散時期の3月中旬に、Fig.1に示す場所において、高さ毎の14日間の花粉飛散量と14日間の風向・風速(水平面内)を計測した。得られた花粉の合計量と期間を通しての平均絶対風速の結果を Fig.2 に示すとともに、同図より分かることを以下に列挙する。

- 風上側建物と同程度以下の高さにおいては、花粉数がほぼ一定である。ただし、キャノピー層よりも上空の花粉数に比べると、これらの高さにおける花粉数は半分程度である。
- キャノピー層外縁で花粉数が最大となっており、この位置の花粉数は、キャノピー層よりも上空の1.5倍程度で、キャノピー層低位置の3倍程度にもなっている。

なお、ここで興味深いのは、花粉数が高さによって異なることであり、気流速度による影響と花粉再飛散による影響が予

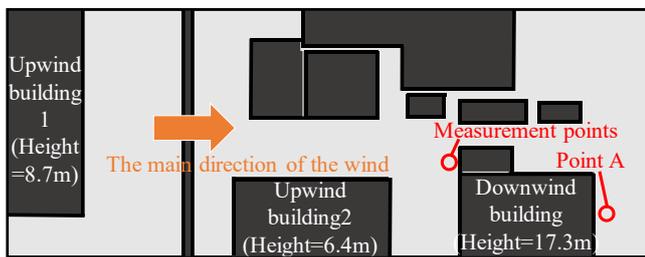


Fig.1 Measurement points where the Durham pollen samplers and ultrasonic wind sensors are placed

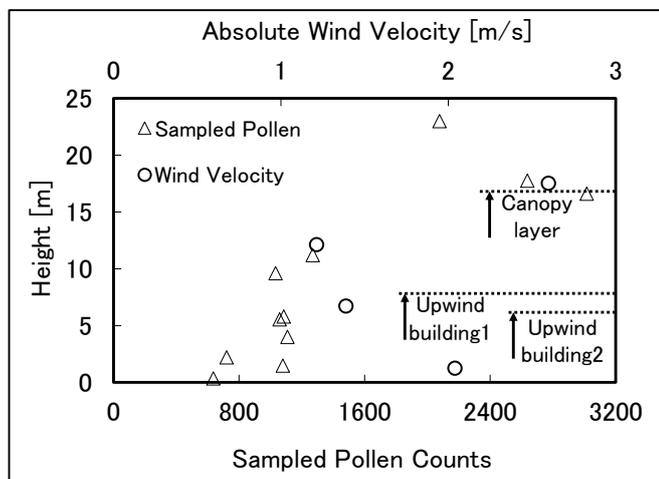


Fig.2 The measurement results of the amount of Japanese cedar pollen and the mean wind velocity on each height (14 days)

測される。特に、風上側建物の屋根高さを越えた辺りで花粉数が最大となっていることから、風上側建物屋上からの花粉再飛散を予見させる。このため、どの程度の風速において花粉再飛散が可能であるかどうかを、次に、物理モデルによって検討する。また、後記する通り、この計測結果を用いて数値シミュレーション結果を評価する。

3. 花粉の再飛散挙動を表す物理モデルの作成

花粉の再飛散の可能性を考えるため、花粉粒子を球形と仮定して、滑面上での花粉の輸送モデルを検討した。滑面上に落下して静止している花粉粒子に作用する力は、Fig.3の通りに、重力、抗力、静止摩擦力、サフマン揚力、付着力の5つとなる⁽³⁾。従って、花粉が輸送されるのは、抗力 $F_D \geq$ 静止摩擦力 F_f + 水平方向付着力 F_A' の場合、あるいは、サフマン揚力 $F_S \geq$ 重力 mg + 垂直方向付着力 F_A の場合である。

なお、上記のモデル化においては、静止摩擦係数 μ と付着力 F_A , F_A' が未知であることから、これらを実験により計測した。ただし実験に際しては、アレルギー発症の問題から、スギ花粉ではなく、下表の通りに空気動力学径がスギ花粉にほぼ等しく、粒径分布が明らかになっている石松子を供試粒子として用いている。

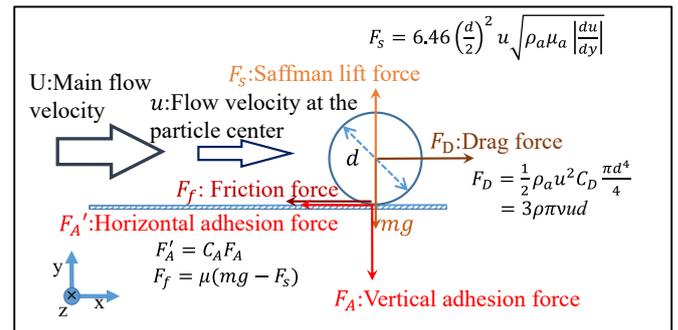


Fig.3 Illustration of forces on the stationary pollen particle

Table 1 The characteristics of Japanese cedar pollen and the test particle (Lycopodium clavatum spore)

	Japanese cedar pollen	Lycopodium clavatum spore
Diameter d [μm]	15~50	20~50
Mean diameter d_m [μm]	30	32
Terminal velocity by Stokes' Law V_t [mm/s]	23.4	32.5
Mean aerodynamic diameter d_a [μm]	27.8	32.8
Particle density ρ_p [kg/m^3]	860	1050

3. 1 摩擦係数と垂直方向付着力の算出

まず、付着力が作用しないように、石松子を薄く堆積させ、さらにアースを取った装置で傾斜実験を行い、摩擦係数 $\mu=0.591$ (ここでは静止摩擦係数=動摩擦係数) を算出した。

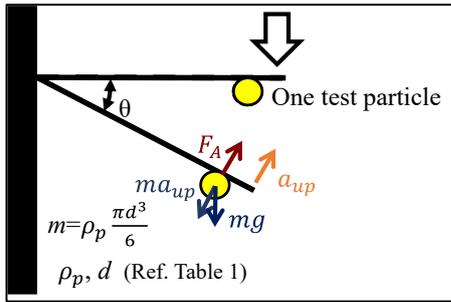


Fig.4 Illustration of forces on the adhesion particle over the cantilever plate spring

次に、Fig.4の模式図に示すとおり、石松子を付着させた板バネを振動させ、板バネが最下点に到達して上昇する瞬間に剥がれ落ちる石松子と板バネの挙動を高速カメラで繰り返し撮影した。そして、この動画から、石松子が剥がれ落ちる板バネの上向き最小加速度 a_{up} を算出し、この加速度から板バネに対して、垂直方向の単位質量当たりの付着力 ($F_A/m = 63.31\text{m/s}^2$) を決定した。

3.2 水平向付着力の算出

上記3.1より、平板に対して垂直方向の付着力を定義したが、水平方向の付着力は仮定できていない。そこで、アモン・クーロンの摩擦法則と同様に、水平方向の付着力と垂直方向の付着力が比例関係にあると仮定した上で、次図に示す風洞実験結果から、これを決定した。ここで、Fig.5は、風洞内に置かれた水平滑面平板上に非常に薄く蒔かれた供試粒子(石松子)が、気流を受けて転動・滑動する様子であり、高速カメラで撮影した時系列画像を1部切り取ったものである。撮影では2次元レーザーを使用して粒子の移動を可視化したため、流れと平行で鉛直平面内の粒子のみの計測となっている。Fig.5(b)は、Fig.5(a)に対して、 $1.0 \times 10^{-3}\text{s}$ 後の画像である。同図より、平板上を移動する石松子と移動せず静止したままの石松子の混在していることが分かる。そこで、撮影範囲内の平板上の全粒子数と移動した粒子数を目視で計測し、この割合を求め、既知である供試粒子の粒度分布⁽⁴⁾に照らし合わせることで、水平方向に輸送される粒子の最大粒径を算出した。この結果がTable2である。ここまでのモデル化より分かる通り、摩擦力と付着力は粒径の3乗に比例するのに対して、抗力は粒径と粒子中心風速に比例する。このため、気流速度を速くすると、より大きな粒径の粒子が転動・滑動することとなる。

また、Table2に記した最大移動粒径のときに、Fig.3で示した水平方向の力が釣り合うことから、この粒径と供試粒子中心流速 u を与えることで、水平方向の付着力の係数 C_A の算出が可能となる。その結果、ここでは $C_A=0.35$ となった。つまり、本研究では、付着力は異方性を有しているものと考えられる。なお、 u に関しては、Fig.5の可視化計測と並行して境界層の速度分布を計測しており、この速度分布を用いたク

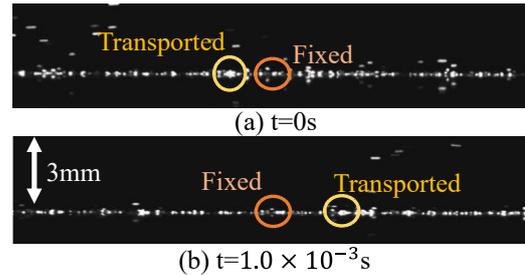


Fig.5 Sequential images of the test particles transported over the smooth surface ($U=5\text{m/s}$)

Table 2 The ratio and maximum diameter of the transported particles

Main flow velocity $U(\text{m/s})$	Number of transported particles	Number of fixed particles	Ratio(%)	Maximum transported diameter (μm)
3	0	159	0	
5	31	67	31.6	27.73
10	61	17	78.2	33.93

ラウザーチャートから摩擦速度を算出して決定している⁽⁶⁾。これら計測した単位質量当たりの付着力と水平方向の付着力の係数から、粒径 $30\mu\text{m}$ の供試粒子1個当たりの付着力を算出すると、垂直方向： $9.40 \times 10^{-10}\text{N}$ 、水平方向： $3.29 \times 10^{-10}\text{N}$ となり、この値は、神保による同粒径のアルミナ粉の算出結果(約 $4.5 \times 10^{-10}\text{N}$)⁽⁶⁾に近く、妥当な値であると判断される。

前記の通り、可視化結果の検討では、水平方向の運動と力の釣り合いだけを考慮しており、垂直方向の運動を無視している。これは、本研究が対象としている範囲内においては、サフマン揚力が重力以上になることが無いためである。これに関しては、既報⁽⁷⁾において、滑面水平平板に接している場合、主流風速が 10m/s 程度以下では、供試粒子であっても花粉であっても、気流だけにより浮遊することのないことを報告しているが、本報のモデル化と実験からも、これが確認された。ただし、粒子が何らかの物体の上に乗っている場合にはこの限りではないが、このような状況は種々考えられるため、そのモデル化は一般的ではないと判断している。なお、Fig.5において、浮遊・飛散する粒子も撮影されているが、これは、風洞が回流風洞であるため、風洞内を回流している供試粒子である。また、Fig.3は滑面平板上で静止している粒子に作用する力の釣り合いを示しているため、マグナス揚力を考慮していないが、既報⁽⁷⁾より、輸送されている供試粒子においても、マグナス揚力がほとんど寄与しないことが分かっている。

3.3 花粉が転動・滑動する風速

前記の通り、定式化した摩擦力と付着力は、石松子を対象としたものである。しながら、アレルギー発症の問題から、花粉を対象とした計測が不可能であるため、本研究では、これをそのままスギ花粉に適用することとする。そしてこれにより、転動・滑動する粒子中心風速と粒径の条件(閾値)を、

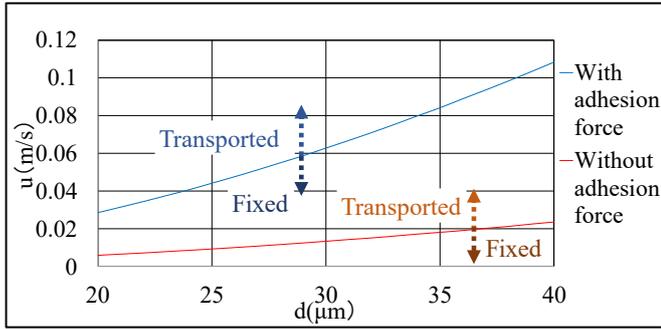


Fig.6 Threshold flow velocity at the center of particle to hold stationary on the flat smooth surface

スギ花粉に対して求めると Fig.6 となる. 同図より分かる通り, 花粉が転動・滑動する粒径 d に対する粒子中心風速 u の閾値は 2 次関数となる. これは, 前記した通り, 摩擦力と付着力が粒径の 3 乗に比例し, 抗力が粒子中心風速と粒径に比例するためである. さらに, 水平方向の単位質量当たりの付着力 ($C_A F_A/m=22.16\text{m/s}^2$) は, 重力加速度の 2 倍以上であるため, 付着力の有無が転動・滑動に対する閾値風速に大きく影響することも分かる. また, Fig.6 の粒子中心風速を 1/7 乗則を用いて主流速に換算すると, 平均粒径 ($30\mu\text{m}$) のスギ花粉が転動・滑動する風速は, 付着力が作用する場合には 5.03m/s 以上, 作用しない場合には 2.19m/s 以上となる. そこで, この 5.03m/s 以上の風速が, 日常的にどの程度発生しているかを, Fig.2 を作成した際の計測結果から判断すると, 1 日あたり, 延べ時間で約 30 分間程度は発生していることが分かった. 従って, 落下した花粉は, 日常的に転動・滑動して輸送されている可能性がある.

4. 表面形状が花粉の再飛散挙動に与える影響

前記した通り, 落下したスギ花粉が日常的に転動・滑動して輸送されている可能性があることから, 転動・滑動に大きな影響を与える表面条件の違いによる, 花粉輸送挙動の変化を数値シミュレーションにより検討した. 気流解析に使用したのは, オープン CFD ソルバである OpenFOAM である. 乱流モデルに関しては, 壁面付近などの粘性低層の流れを数値解析することに最適な $k-\omega$ モデルと, 壁面から離れた自由流を数値解析することに適している $k-\epsilon$ モデルを合わせた SST $k-\omega$ モデルを用いた. 計算対象場は, Fig.7 から分かる通り, 1 辺 2m の立方体とその入口あるいは出口底部に高さ 15cm のステップを設けたものである. ここでは, 計算結果を可視化計測結果と比較するため, 計算条件は, 計測結果と同条件とした. 従って, 15°C の等温条件下で x 方向に 5m/s の一様流を流入させている. 他の境界条件としては, 固体壁が滑りのない滑面壁, 流れの出口部は十分に発達した流れ, それ以外の面は対称条件としている. また, 計算自体は非定常で行っているが, Fig.7 は定常となった状態の気流速度の結果であり, カラーコンターにより絶対速度 V_a を, ベクトルの色により y

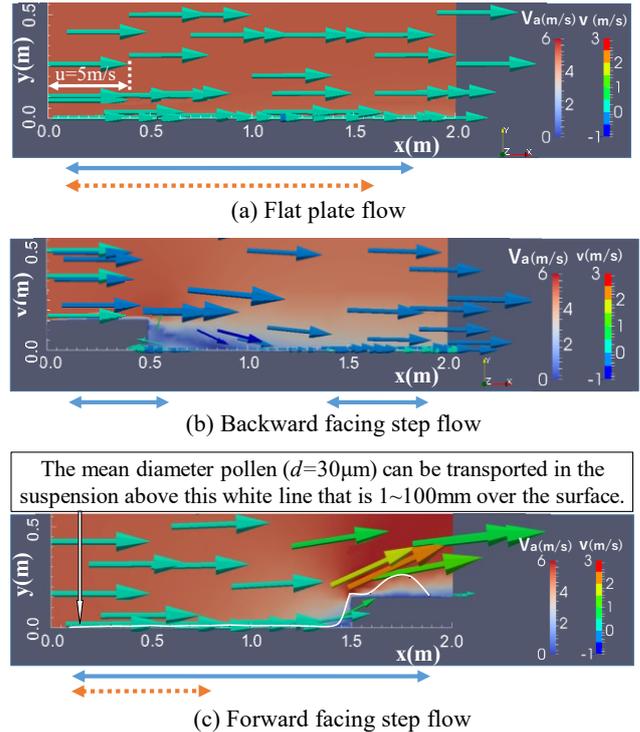


Figure 7 includes a text box: "The mean diameter pollen ($d=30\mu\text{m}$) can be transported in the suspension above this white line that is 1~100mm over the surface." Below the panels, there are two legends: a blue double-headed arrow indicating the range for pollen without adhesion force, and an orange double-headed arrow indicating the range for pollen with adhesion force.

Fig.7 Calculated absolute velocity V_a and predicted behavior of the transported pollen

方向速度 v を示している. この気流速度の結果から, 既報⁽⁶⁾において示した気流速度 (u, v, w) と粒子速度 (u_p, v_p, w_p) の関係係 $u_p=u, v_p=v-V_i, w_p=w$ (V_i : 粒子終端速度)を用いて, $d=30\mu\text{m}$ (平均粒径) のスギ花粉の挙動を検討した.

Fig.7 より, 障害物のない平坦な表面上では付着力の有無によらず, ほぼすべての位置で転動・滑動する. これは, 石松子を用いた可視化結果並びに Fig.6 の結果と齟齬なく一致している. ステップを付けた場合には, ステップ位置によって大きく変わる. 入り口にステップが有る場合, 付着力が作用していると花粉粒子は移動することはなく, 付着力が作用していない場合も, その移動する範囲は狭い. これに対して, 出口にステップの有る場合には, Fig.7(c)中の表面から 1mm 程度の高さを書いた白実線の上において, スギ花粉粒子を浮遊させることができるような上向き気流が発生する. ただし, この上向き風速も, 表面から 1mm 程度以上離れて発生しているため, 表面上に有る花粉粒子は, 転動・滑動する可能性はあるものの, 浮遊する可能性はない. つまり, 平均粒径の花粉が表面上に落下した場合の輸送形態は, 基本的には転動・滑動だけである. なお, モデル化の関係上, ここまでの検討は滑面を前提としていたが, 実際の建造物の屋根や屋上は粗面であり, 粗面の付着力は滑面に比べて 1 桁以上小さいとさ

れている⁽⁸⁾。従って、粗面であると仮定すると、滑面で付着力が作用する場合の3割弱の粒子中心風速で花粉が移動することとなり、付着力が作用しない場合と同程度の範囲で転動・滑動する。そのため、この場合には、15cm程度の段差があっても、5m/s程度の風がある場合には、花粉粒子は移動可能である。つまり、多少の段差を持つ屋根や屋上等からでも、転動・滑動をして落下、再飛散する可能性があると考えられる。

花粉の再飛散を検討する際、本来は屋根や屋上の個々の条件を加味する必要があるが、条件は無数に存在する。そこで、次章の都市キャノピー層内における花粉再飛散の検討においては、後記の条件により、Fig.7のほとんどの領域において花粉が転動・滑動する主流速 6.8m/s を与え、1つの条件として、屋根・屋上から必ず再飛散するものとして検討する。

5. 都市キャノピー層内の花粉飛散挙動の予測

前記の通り、実際の都市環境下において、屋根や屋上からの再飛散の影響を、数値シミュレーションにより検討する。この場合に使用したのは Ansys Fluent であり、空気と花粉の固気2相流を2流体モデルにより解析した。解析対象場は、Fig.1に示した場所をモデル化した場であり、Fig.1に示した主たる風向き方向をx(領域100m)、水平方向をz(領域25m)、鉛直方向をy(領域80m)としている。そしてこの場において、計測位置よりも風上側建物の屋上から花粉が必ず再飛散する場合と、しない場合の両方をシミュレートし、この結果を計測結果と比較することで、屋上からの花粉再飛散が実際に発生しているかどうかを、まず、確認する。ここで、再飛散の有無に関わらず、共通する計算条件は以下の通りである。

- 流入する花粉・気流の速度：Fig.2の高さ17mの結果から算出した5m/s以上(転動・滑動の閾値)の風速の計測期間の平均値 6.8m/s
- 流入する花粉の体積分率：環境省による神奈川県庁での計測結果⁽⁹⁾から算出した計測期間の平均値 7.01×10^{-12}
- 境界条件：花粉・気流ともに、建物や地面は滑りのない壁、出口部は充分発達した流れ、それ以外の面は対称面

また、屋根・屋上から花粉が必ず再飛散する場合には、すでに堆積している花粉量を考慮してこの量を体積分率により 1.26×10^{-9} とし、主流速から算出した粒子中心風速で計算時間内に均等に移動するものとした。ここで、この堆積量に関しては、Fig.2に示した結果を基にして、5m/s以上の風が周期的・間欠的に計算時間分だけ繰り返し発生すると仮定した場合に、その間の無風時に堆積する量としている。

上記の条件により、1分間の非定常計算を行った結果をFig.8に示す。同図は、Fig.1に示す計測位置を通り、主たる風向き方向に平行な断面(x:0~95m, y:0~50m)の結果であり、Fig.8(a)が風上側建物屋上からの再飛散が無い場合、Fig.8(b)が再飛散を加えた場合である。同図とFig.2を比較すると、

Fig.8(a)も(b)もどちらも、風上側建物高さ程度の位置までの体積分率は、ほぼ一定であり、Fig.2と同様な傾向を示している。しかしながら、Fig.8(a)では、キャノピー層外縁付近での花粉量の増加が現れていない。これに対して、Fig.8(b)ではFig.2と同様に、キャノピー層外縁付近での花粉量の増加が現れており、計測結果に近い傾向を示している。なお、Fig.8(b)においても、再飛散による花粉量の増加が恣意的であるとの印象を与えないため、計測位置直近の下流側建物の屋上からは、花粉を再飛散させていない。従って、Fig.8(b)におけるキャノピー層外縁付近での花粉の体積分率の上昇は、風上側建物からの再飛散の影響であると考えられる。

そこで、さらに、Fig.2の花粉計測場所に対応する位置において、飛散する花粉の水平方向の流束密度を算出した。この結果がFig.9である。ここで、この流束密度を算出したのは、計測に使用したダーム型花粉捕集器においては、その構造上、花粉の水平方向流束密度に対応した量の花粉を捕集していると判断したためである。つまり、Fig.2の結果を、シミュレーション結果により確認したのがFig.9である。同図より

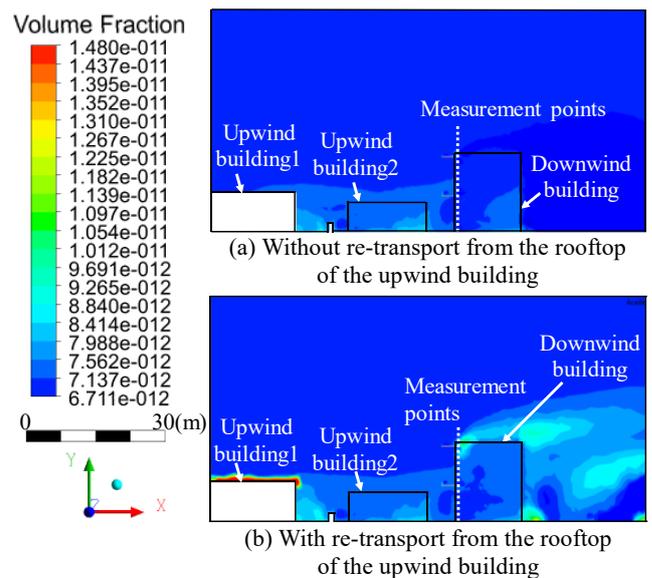


Fig.8 Calculated pollen volume fraction

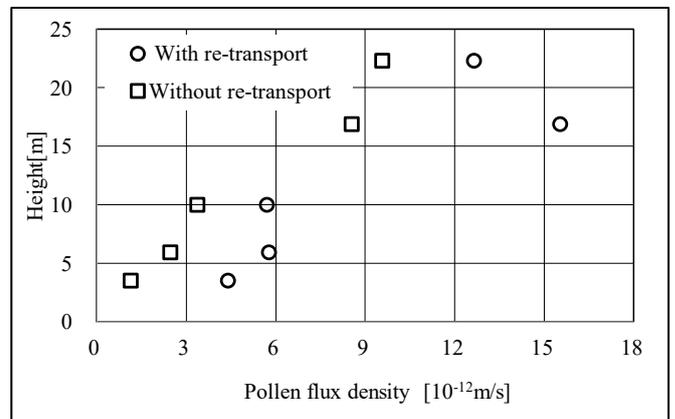


Fig.9 Calculated pollen flux density at the measurement points

明らかのように、風上側建物屋上からの花粉の再飛散が無い場合には、高さ按比例して飛散している花粉の流束密度が上昇している。これは、Fig.8(a)より分かるように、再飛散が無い場合には花粉の体積分率の高さ方向変化が少なく、花粉の流束密度が水平方向速度の影響を大きく受けるためである。

これに対して、風上側建物屋上からの再飛散が加えられた結果では、地表面近くの花粉尘束密度がやや小さいものの、その上から10mまでがほぼ一定となること、17m付近で最大となり、その上方では減少すること、さらに、17m付近の最大値が10m以下程度の一定部分の約3倍であること等、Fig.2と良く一致した結果となっている。このため、作成した計算場において、非常階段や建物の複雑な形状を簡易化していることや、建物屋上からの再飛散量の仮定が曖昧であること等を差し引いても、シミュレーション結果はある程度の信頼性を有しているものと考えられ、実際の環境においても、屋上等から花粉が再飛散している可能性は高いと判断される。

Fig.2とFig.9は、齟齬なく辻褃が合っており、花粉の再飛散が生じることにより、花粉被曝量の増加することが予測される結果となっている。しかしながら、この結果では、低い位置ほど花粉数や花粉流束密度が小さく、当初に予見した「我々の生活圏である都市キャノピー層内の低位な場所に、集まるように花粉が飛散してくる可能性」は見受けられない。ただし、これはあくまで花粉計測位置での結果であり、他の場所では結果が異なる。そこで、花粉の再飛散を加えていない計測点よりも風下側の建物の後ろにあるFig.1のA点での結果をFig.10に示す。

Fig.10より分かる通り、建物よりも低い位置では、花粉再飛散を付加した場合と、していない場合で傾向が逆であり、付加していない場合には、Fig.9と同様に、地面に近いほど小さくなるのに対して、再飛散を付加した場合には地面に近いほど花粉の流束密度が大きくなっている。従って、このA点においては、都市キャノピー層内低位位置ほど、再飛散による花粉被曝量の増加が予測され、Fig.9とは異なっている。つまり、都市キャノピー層内の花粉被曝は、特に花粉の再飛散が

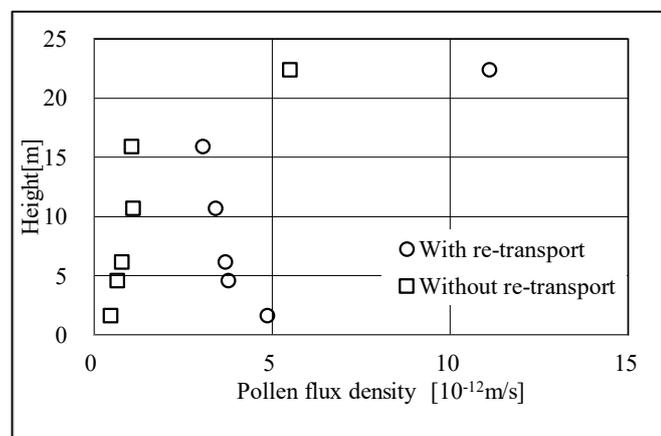


Fig.10 Calculated pollen flux density at the point A in Fig.1

発生する場合に周囲環境により変化することが分かる。なお、この結果においても、花粉再飛散を付加した場合は、付加していない場合よりも花粉流束密度が大きく、特に人の身長程度の高さにおいては、付加した場合としていない場合で10倍以上も異なっている。

6. 結言

本研究では、都市環境下における花粉再飛散挙動を物理モデルと数値シミュレーションにより検討し、以下の知見を得た。

- ① 建物屋上から花粉が再飛散している可能性が高く、これによって、都市キャノピー層内の花粉被曝量の増加することが予測される
- ② 都市キャノピー層内の花粉被曝量は、特に花粉の再飛散が有る場合に、周囲の建物環境の影響を受ける
- ③ 表面上に落下した花粉は、転動・滑動する可能性はあるものの、浮遊する可能性は極めて低い
- ④ 花粉とほぼ同じ空気力学径を有する石松子の付着力を計測し、花粉の再飛散挙動の予測を可能とした

参考文献

- (1) 馬場 廣太郎, 中江 公裕: 鼻アレルギーの全国疫学調査2008(1998年との比較) - 耳鼻咽喉科医およびその家族を対象として -, Progress in Medicine, Vol. 28, No. 8 (2008), pp. 2001-2012.
- (2) 東京都福祉保健局: 花粉症患者実態調査報告書, (2007), p. 17.
- (3) 長谷部 弥, 山田 容子, 鈴木 良延: クリーンルーム内のダクトなどに蓄積した微粒子の気流による再飛散に関する検討, エアロゾル研究, Vol.29, No.3(2014), pp. 190-195.
- (4) 日本粉体工業技術協会: APPIE 標準粉体石松子添付資料, (2015), p. 1.
- (5) Ichiro Nakane: Re-transport Mechanisms Of Fallen Pollen By Surface-Creep And Saltation, International Journal of Mechanical and Production Engineering, Vol.3, No.5(2015), pp. 1-6.
- (6) 神保 元二: 1個粒子としての粉体の付着力測定法の検討, 材料, Vol.16, No.164(1967), pp. 291-297.
- (7) 中根 一郎: スギ花粉の浮遊飛散挙動と落下後の跳躍挙動に関して, 日本機械工学会論文集(B編), Vol.78, No.790(2012), pp. 1220-1234.
- (8) 近沢 正敏, 武井 孝: 粉流体の表面化学と付着現象, 日本海水学会誌, Vol.41, No.4(1967), pp. 168-180.
- (9) 環境省: 環境省花粉観測システム(はなこさん), <http://kafun.taiki.go.jp/index.aspx>, 2017年9月30日