

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：32714

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24651030

研究課題名(和文) 都市環境が花粉の2次飛散と体内侵入に与える影響に関して

研究課題名(英文) Research on the influence of urban environment to the Japanese cedar pollen resuspension and exposure phenomena

研究代表者

中根 一郎 (NAKANE, Ichiro)

神奈川工科大学・工学部・准教授

研究者番号：30221451

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円、(間接経費) 630,000円

研究成果の概要(和文)：都市キャノピー層内のスギ花粉挙動を明らかにすることと、その挙動予測に取り組み、次の知見を得た。

都市環境ではビルが大気流動を妨げるため、花粉のピーク時期にキャノピー層内部に飛来する花粉数は、その外縁に比べて少ない。加えて、同層底部では花粉の再浮遊の影響が現れ、飛散数が多くなる。

また、花粉飛散挙動の予測においては、花粉粒子の単純な飛散挙動と鼻孔への侵入挙動は、ストークス抗力・重力を考慮した1wayカップリングとオイラー・オイラー法の組み合わせで予測可能であるが、再浮遊挙動を予測するには粒子間等の衝突を考慮せねばならない。さらに、精度の高い解析のため、直交物体適合曲線座標系の生成手法も発案した。

研究成果の概要(英文)：We discussed about the suspension behavior of the Japanese cedar pollen in the urban canopy layer and the numerical prediction method of this behavior.

Much pollen flies around the outer edge of the urban canopy layer, but less pollen flies into this layer because the high buildings block the wind and the flying pollen. The pollen which flies into the urban canopy layer, is re-suspended on the bottom of this layer.

The pollen suspension behavior without re-suspension is predicted with a combination of Euler-Euler method and 1 way coupling, but the resuspension of the pollen particles can not be predicted without the collision between particles or between particles and objects. Orthogonal body-fitted curvilinear coordinate system is proposed to improve the calculation accuracy.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境影響評価・環境政策

キーワード：花粉症 空中花粉 花粉の再浮遊 花粉曝露 都市キャノピー層 大気流動 固気二相流 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

東京都の「花粉症患者実態調査」(東京都福祉保健局編,2007)においては、大部分が東京で生まれ育っていると判断される0~14歳のスギ花粉症有病率の増加が特に大きく、この20年の間に10倍以上にもなっていると報告されている。このため、我々は、この若年層の著しい有病率の増加が都市特有の環境によりもたらされた可能生の検討を始めることとした。つまり、大規模な大気流動を妨げ突風を引き起こす高層ビルや、再浮遊をもたらす路面舗装と建造物の屋根等が、都市キャノピー層内底部近傍の局所において、飛散・浮遊するスギ花粉量とスギ花粉被曝量の増加をもたらすのではないかという推察である。

なお、研究開始当初も現在も、本研究と同様な観点に立った研究は、管見において見いだすことはできていない。ただし、本研究が対象としているスギ花粉の再飛散に関連しては、佐橋らが疑似花粉により再飛散条件を検討しており(アレルギー, vol.49, No.9/10 (2000), 955.)、加えて、砂塵等を対象としたPyeのフィールドワークから、スギ花粉程度の粒径の粒子は、落下後においても風が強いと低く短く再浮遊(2次飛散)するとこととなる(Academic Press, Aeolian dust and dust deposits, 1987)。また、やはり本研究が対象としている都市部における花粉飛散量の高度による影響に関しては、王らがクレーン車を用いて都市部での花粉飛散量の高さによる違いを計測している(埼玉大学地域オープンイノベーションセンター紀要, vol.1, (2008), 120.)。

2. 研究の目的

上記背景を踏まえ、本研究では、都市環境がスギ花粉の飛散と体内侵入に与える影響、つまり、我々の主たる生活圏である都市キャノピー層内底部近傍でのスギ花粉の飛散・曝露挙動を明らかにするとともに、これを定量的に予測することを目的とした。

ここで、本研究では、特に再飛散挙動を問題としているが、これは、舗装路面からの再飛散だけではなく、建造物の屋根等からの再飛散も問題となるためである。特に、構造物の屋根等において再飛散や移動・落下が発生すると、漏斗のようにキャノピー層内底部にスギ花粉を集めることとなり、これらが再飛散すると大きな影響の出ることが予測される。

また、花粉症の発症は、大気中に浮遊している花粉量ではなく、体内に侵入する花粉量の問題である。そこで、周囲環境、特に人の頭部周りの風速が花粉の体内侵入に与える影響も明らかにする。

3. 研究の方法

上記1. 背景に記したように、本研究では主たる生活圏である都市キャノピー層内底

部近傍において、花粉飛散量の増加することを予測している。ただし、前記した王らの計測結果においては、計測高さ2カ所、計測日数2日と計測データが少ないものの、高度0mに比べて高度35mの方が飛散花粉量の多い結果となっており、一見、我々の予測とは異なっている。そこで、まず、我々の予測を確認するため、都市キャノピー層内の高度毎の飛散花粉数を計測することとした。このため、下図の通りに、花粉採取用タワーを建造するとともに、花粉採取用のダラム型花粉捕集器とカスケードインパクター型花粉捕集器、各8台を製作し、4台の超音波風速計とともにタワー内に設置した。なお、花粉採取用タワーは高さ約18mの10階建て構造であり、大気・花粉の流動を妨げないように床部はメッシュとしている。なお、花粉捕集器により捕集したスギ花粉は、実体顕微鏡によりデジタル画像化され、画像処理ソフトにより捕集数を集計している。

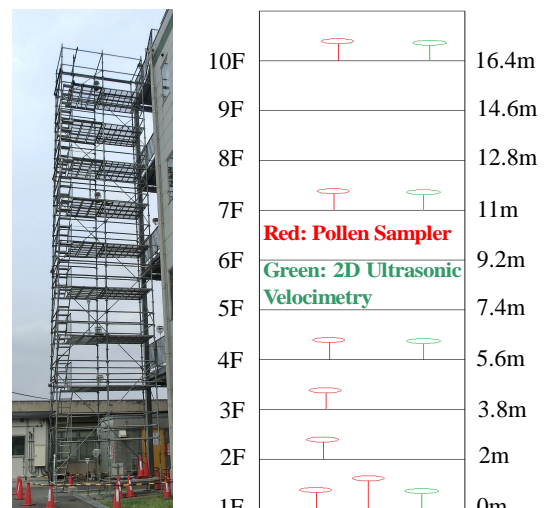


図1 設置した花粉採取用タワーの外観と模式図

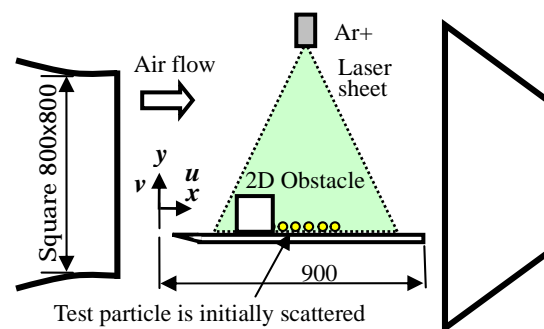


図2 2次元障害物により再浮遊する疑似花粉の可視化計測

次に、上記の花粉採取用タワーによる計測結果において花粉の2次飛散の影響が確認されたことから、上図に示す疑似花粉による風洞実験(可視化計測)と数値シミュレーションにより、表面上の花粉の再浮遊(2次飛散)を検討することとした。なお、この検討は、

平板上の2次元障害物の有無と種類の違い(パイプ、角柱、ステップ)による花粉再浮遊挙動の計測と数値シミュレーションであり、シミュレーション結果を計測結果により評価することで、花粉の再浮遊を予測できる適切な数理モデルを構築することを目的としている。

さらに、周囲気流環境の違いによる花粉の体内侵入量を定量的に予測するため、やはり数理モデルの構築を目的とした実験と数値シミュレーションを以下の手順で行った。

(1) 下図3に示す単純吸気する円柱において、吸気速度・角度の違いによる疑似花粉吸引量を計測するとともに、同条件での数値シミュレーションを行い、現状の数理モデルの適用性を検討した。

(2) 詳細に関しては後記するが、上記(1)の結果から、鼻孔のように下方に向けた穴から吸引する場合には、現状の数理モデルによる数値シミュレーションで予測が可能であることが確認された。このため、周囲気流環境によるスギ花粉の人体侵入挙動の違いを、やはり下図3に示すバストアップのファントムモデルを用いて可視化計測するとともに、同条件での数値シミュレーションを行い、評価した。

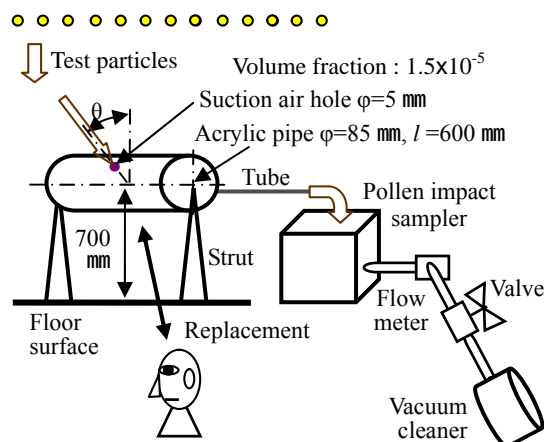


図3 花粉の人体侵入挙動の基礎実験装置

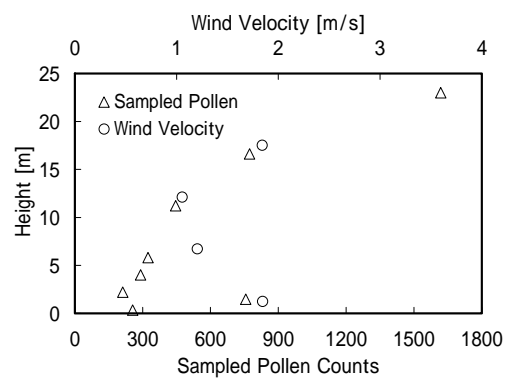
なお、ここまで記した内容から分かる通り、本研究においては、数値シミュレーションが重要な役割を担っている。そして、数値シミュレーションの場合、数理モデルも重要であるが、計算格子が計算精度に多大な影響を及ぼす。特に本研究のように、花粉の人体侵入を予測する場合、最終的には精度の高い数値シミュレーションを可能とする3Dの人体格子を作製する必要がある。そこで、本研究では、人体周りの格子作製法として境界適合曲線座標系を採用することとし、これを用いて高精度の解析を可能とするため、直交境界適合曲線座標系の生成手法を考案し、これを用いた数値シミュレーションを行っている。さらに、人体の3D格子生成が容易でないことから、3Dスキャナーを用いて人体モデルを作製し、そして、この3D人体モデルから直

交境界適合曲線座標系を自動生成するシステム作製にも取り組んでいる。

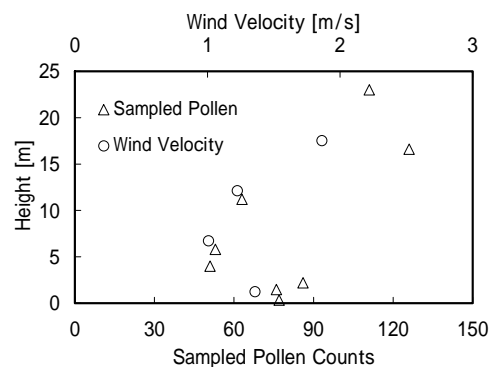
4. 研究成果

(1) 花粉採取用タワーによる計測結果に関して

前記図1の花粉採取用タワーにより採集したスギ花粉の計測数と風向・風速の測定結果を下図に示す。ここで、同図において高度最大の点が、都市キャノピー層外縁に相当する周辺で最も高いビルの屋上での計測結果である。また、図(c)に示すように、平均風向は図(a)、(b)の計測期間内においてほぼ同じであった。なお、図(a)の本年度春のデータは、現在までに集計が終了したものであり、現在もデジタル化した画像データを基にして集計を続けている。



(a) 2014/03/06 ~ 03/12



(b) 2013/05/17 ~ 06/03



(c) Mean wind direction in (a) and (b)

図4 花粉採取用タワーによる計測結果

ここで、これらの結果から分かることをまとめると以下となる。

スギ花粉のピーク(3月)においては、周辺山間部からのスギ花粉流入が著しいため、キャノピー層外縁での花粉飛散数は非常に大

きいが、キャノピー層内部においては、ビル等により大気流動が妨げられるため、飛散数が半分程度以下となっている。

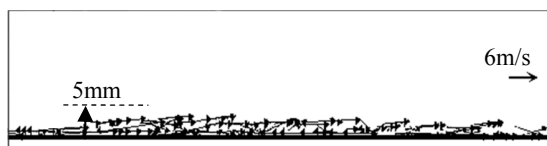
これに対して、スギ花粉飛散のピークを過ぎると、そもそも飛散する花粉数が激減するが、これに加え、キャノピー層外縁と底部との差も少なくなる。

キャノピー層内底部の飛散花粉数は、いずれにおいても、外縁部よりは少ないものの中間部よりは2倍程度も多い。また、これは風速においても同様であり、飛散花粉数と風速の間には高い相関が見受けられる。

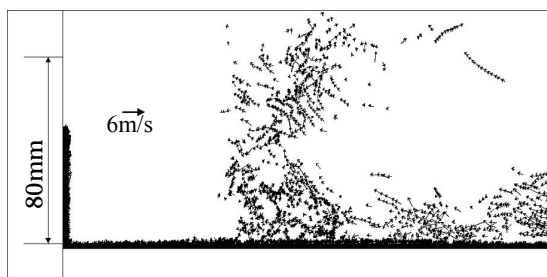
以上より、キャノピー層底部においては、中間部に比べて飛散花粉数が多く平均風速も速いことから、計測花粉数に再飛散の影響が現れていると考えられる。特に、再飛散の場合には、外部からの花粉流入が無くとも花粉が飛散するため、本来花粉飛散の無い日没後等においても留意が必要である。

(2) 風洞による花粉再浮遊のモデル実験と数値シミュレーションに関して

前記図2に示す風洞実験により得られた、疑似花粉の再浮遊挙動の可視化計測結果の一例を以下に示す。なお、この実験で使用した疑似花粉粒子は、空気力学径が $33\mu\text{m}$ であり、スギ花粉に近い石松子である。同図において、図(a)は平板上にまかれた疑似花粉粒子の再浮遊挙動であり、図(b)は一辺が45mmの角柱後方にまかれた疑似花粉の再浮遊挙動である。



(a) Re-suspension on the flat plate



(b) Re-suspension behind the square body

図5 疑似花粉による再浮遊のモデル実験

ここで、まず、図(a)の平板上の再浮遊に関して検討する。詳細は発表論文(機論、B編78(790), 1220-1234, 2012)に記している通りであるが、我々は、平板上での再浮遊は、粒子衝突を考慮したラグランジェ的な数値モデルによりシミュレートできること、そして、サフマン力やマグナス力と言った揚力を考慮しても、衝突をモデル化できないオイラー的なモデルではシミュレートできないこ

とを明らかにしている。そして、図(a)と(b)の何れの場合も発表論文の結果と同じ流速条件であることから、同論文の平板の結果から図(a)の結果を判断すると、ほぼ同程度の結果となっており、再現性が確認される。

これに対して、図(b)のように再循環領域が発生する場合の数値予測に関しては、これまで未検討であることから、図(b)の場合と同一条件での数値計算をおこなった。その結果の一例を図6に示す。図6は再浮遊に関する鉛直方向速度であるが、この結果から、粒子が上向き加速度を有する領域が極わずかであることが明らかであり、平板の場合と同様に揚抗力だけでは可視化実験のような再浮遊の発生しないことが分かる。おそらく図(b)の実験結果の場合も粒子間衝突により高く浮遊しているものと考えられる。

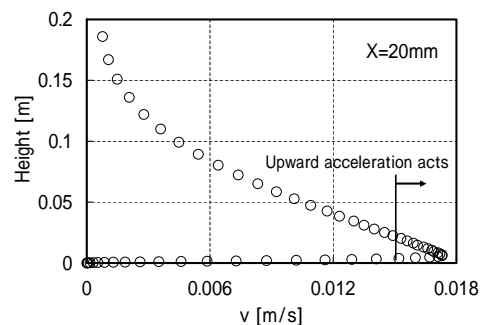


図6 図5(b)の条件で計算した鉛直方向速度

(3) 花粉の人体侵入挙動に関するモデル実験と数値シミュレーションに関して

花粉の体積分率が一定・一定な静止気流を仮定すると、呼吸によりどれだけの量の花粉を吸い込むかは、吸気により発生する気流の抗力と重力との関係により決定される。つまり、重力が気流に比べて無視できるほど小さい場合には、気流中の一定体積分率 f のまま花粉を吸い込むものと判断され、特にこの場合には、鼻孔が上向きでも下向きでも、吸い込む花粉量に変化の無いことが予測される。しかしこれとは逆に、重力が非常に大きい場合には、下に向いている鼻孔から花粉を吸い込むことはほとんどあり得ない。そこで、まず、花粉の吸い込み量に与える吸気角度の影響を、図3に示す2次元モデル実験により検討した。なお、このモデル実験においては、数値計算結果を計測結果により評価することで、どの程度の確かさで予測することができるかも検討する。ここで、実験に際しては、 0.24m/s と 2.4m/s の二通りの吸気速度 V_s において、体積分率 $f=1.5\times 10^{-5}$ の一定濃度で落下する疑似花粉粒子(石松子)を穴の角度 θ を真上(0°)から真下(180°)まで 30° おきに变化させて吸気し、インパクター型の捕集器で捕集された粒子数 N_θ を数える。次に、この場合の数値計算であるが、前記したように、直交境界適合曲線座標系の格子を作製し、これにより計算を行っている。

計測結果と計算結果の比較を図 7 に示す。同図において、横軸の θ は図 3 に示す角度であり、縦軸の N_θ/N_m は各 θ において吸い込んだ粒子数 N_θ を試行回数毎の平均粒子数 N_m で除したものである。同図より分かるように、図(a)の吸気速度 $V_S=2.4\text{m/s}$ の場合には、計測結果と計算結果は良く一致しており、 90° 付近で吸い込む量が最少となるものの、ほぼ一定値であることが分かる。これに対して、図(b)の吸気速度 $V_S=0.24\text{m/s}$ の場合には、計算結果に比べて計測結果 (Run 1~3) の角度変化が大きく、両者はあまり一致していない。

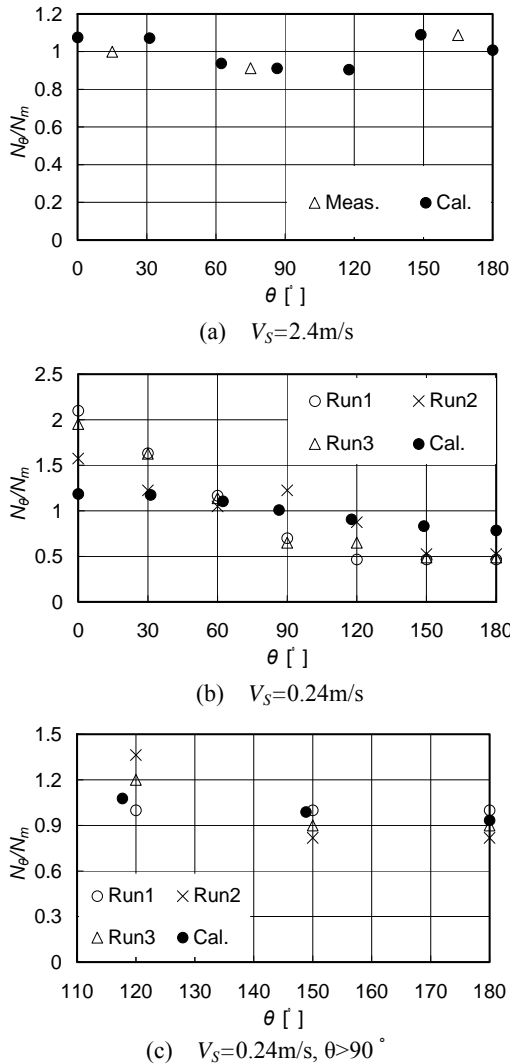


図 7 吸い込む花粉数の計測・計算結果の比較

そこで、この両者の違いについて考えると、この相違は円柱壁面に落下した供試粒子の跳ね返りや転動・滑動に起因していると推察される。つまり、 $V_S=0.24\text{m/s}$ の場合には、吸引力（発生させる抗力）が弱いため、直接穴に吸い込まれることなく円柱壁面に衝突する粒子がある程度存在し、しかも、これらの粒子の内の何%かは、衝突後、跳ね返りや転動・滑動をすることで穴に吸い込まれると推察される。ただし、数値計算においては、前

記した通りに、一度壁面に達すると必ずそこに吸着される条件としており、跳ね返りや転動・滑動を伴った吸引は考慮されていない。またこのため、粒子が跳ね返りや転動・滑動をしても穴に吸い込まれにくい領域 ($\theta > 90^\circ$) のみを取り出して図(c)としてグラフ化すると、計測結果 (Run 1~3) と計算結果はほぼ一致する。なお、 $V_S=2.4\text{m/s}$ の場合に、計測結果と計算結果が一致するのは、吸引力が大きいため、多くの粒子が気流に乗って直接穴に吸い込まれ、円柱に衝突する粒子が少ないためであると考えられる。

上記の結果より、鼻孔のように下方に向けた穴から吸引する場合には、現状のモデルによるシミュレートが可能であることから、より実際に近いモデルにより、スギ花粉の人体侵入を検討した。これが、図 3 の円柱モデルを胸から上のファントムモデルに置き換えた場合であり、やはり一様体積分率 f で供試粒子が充分上方から終端速度で落下する。ただし、この場合には供試粒子の体積分率を $f < 10^{-6}$ 以下に、そして鼻孔位置を床面から 1m の位置に変更している。なお、この場合も、直交境界適合座標系の計算格子としていることから、図 8 にこの計算格子を示す。

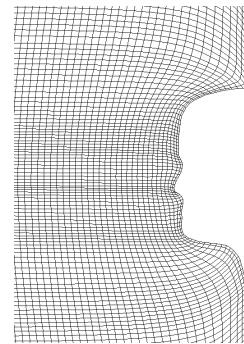


図 8 直交境界適合座標系による計算格子

上記格子を用いて数値計算した気流とスギ花粉粒子の流線の計算結果を図 9 に示す。同図においては、黒線が気流の流線を、赤線が鼻孔に吸引される粒子流線の範囲を示している。ただし、図(b)だけは計算結果の確かさを評価するための図であり、鼻孔に吸引される粒子流線の範囲を可視化計測から得て、これと計算結果を比較している。そしてこの図(b)の一致の程度より、計算の確かさが確認できる。ここで、図(a),(c),(d)より分かるように、空気に関しては鼻孔前面より放射状にほぼ均等に取り込んでいるものの若干下側の流線が密になっている。また、粒子に関しては、特に V_S が遅い場合に、鼻孔に吸い込まれる領域が狭く、そのまま床面あるいは頭部に落下する粒子の多いことが分かる。なおこのため、無風の状態で静かに呼吸をする場合には、広いつば付きの帽子が花粉曝露対して有効であると推察される。

次に、吸引している空気流量に対して、どの程度の割合で粒子を吸い込んでいるのか

を図 10 に示す。なお、図 10 の縦軸は、粒子の体積流量 Q_p を粒子の体積分率（ここでは一定値 f ）と空気の体積流量 Q_a により除したものであり、吸気中に混入する粒子（花粉）の割合に比例する変数である。同図より分かるように、この変数は、 $V_s < 1\text{m/s}$ において V_s に応じて増加するものの、 $V_s > 1\text{m/s}$ においては、ほぼ一定値となる。これは、強い吸気においても、常に一定割合で粒子（花粉）の混入していない空気が吸引されていることを意味し、図 9 では顎近辺にそのような領域が認められる。

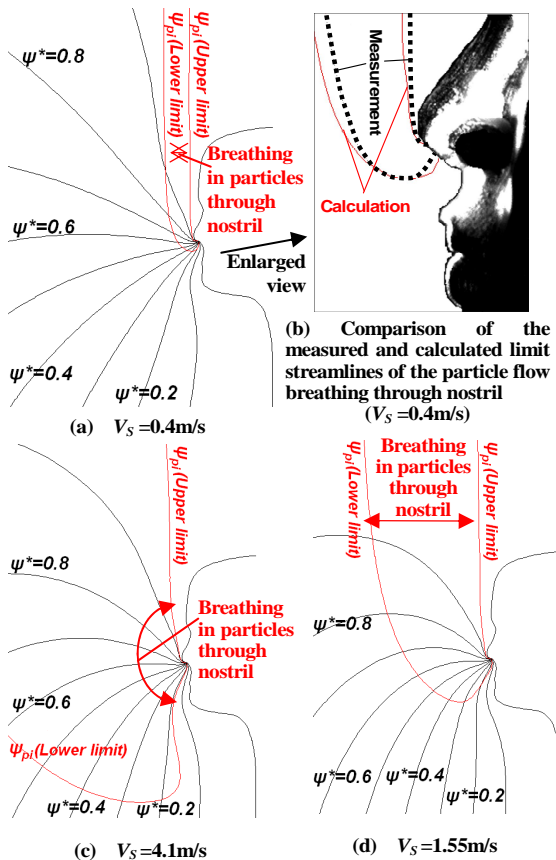


図 9 鼻孔吸引による気流流線と鼻孔から侵入するスギ花粉流線の数値計算結果（開いた空間内で上方から花粉が落下する場合）

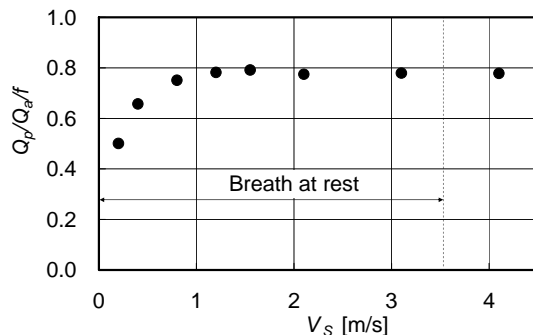


図 10 吸気中に含まれるスギ花粉粒子の割合 ($Q_p/Q_a/f$) の鼻孔吸引流速 V_s に対する相関

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

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、日本機械学会論文集 B 編、査読有、Vol. 78、No.790、2012、1220-1234

中根 一郎、境界適合曲線座標系を用いた流れ解析における格子直交性の効果、査読有、計算数理工学論文集、Vol.12、2012、121 ~ 126

Ichiro NAKANE, Effectiveness of Grid Orthogonality on Body Fitted Curvilinear Coordinate System in CFD, Reviewed, International Journal of Environmental Science and Development, Vol.4, 2013, 173-178

〔学会発表〕(計 3 件)

中根 一郎、顔周りの局所気流環境が花粉の体内侵入に与える影響の予測、第 22 回環境工学総合シンポジウム、2012/07/06、東北大学

Ichiro NAKANE, Grid Orthogonality Effect in Numerical Flow Calculation with Body Fitted Curvilinear Coordinate System ICOM2012/JASCOME 2012, 2012/12/14, Kyoto university

Ichiro NAKANE, Effectiveness of Grid Orthogonality on Body Fitted Curvilinear Coordinate System in CFD, 4th International conference on Environmental Science and Technology, 2013/03/18, Sofitel Luxury Hotels

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等 無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中根 一郎 (NAKANE, Ichiro)

神奈川工科大学・工学部・准教授

研究者番号：30221451

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し