

多数の柱状物体まわりの流れのシミュレーションと 空気清浄用フィルター最適化への応用

理学専攻 情報科学コース 1740655 倉橋 碧 (指導教員: 河村 哲也)

1. はじめに

現代の重要な環境問題の一つである大気汚染は、人体に深刻な被害を与えている。工場やディーゼル車からの排気ガスなどに含まれる小さなチリ（浮遊粒子状物質, SPM）は、大気汚染物質の主なものとしてある。

こうした大気汚染に対して、室内の空気を空気清浄用フィルターでろ過することは、有害な大気汚染物質から身を守る有効な対策のひとつである。現在、広く使われている空気清浄用フィルターは、ガラス繊維で作られている。ガラス繊維のフィルターは、加工がしやすいうえ耐久性も高く、集塵性能に優れているが、使用済みフィルターは焼却処分することができないため、不燃物として埋め立て処分されている。

そこで本研究では、この廃棄物の問題に対応するために、土に還る生分解性の素材でできた空気清浄フィルターの開発をめざす。生分解性の素材で従来のガラス繊維フィルターと同程度の高い集塵性能を得るためには、フィルターの形状を工夫する必要がある。

本研究では、樹木が大気汚染を改善するという研究 (Hwang et al., 2011) から着想を得て、生物模倣技術 (バイオミメティクス) を活用したフィルター形状を提案し、どのような形状が最も集塵性能が高いかを数値シミュレーションにより実験・考察する。生物模倣技術とは、自然界の生き物に備わっている優れた機能や形状を人工的に模倣し、工学・医療分野などに役立てる技術である。今回は、トリコームという植物の表面に存在する微細な毛状突起に注目した。トリコームは植物を外敵や強い太陽光の刺激から植物を守る役割があるほか、物質を吸着しやすいということも知られている。本研究では、トリコームを模した突起に粒子が吸着する様子を流体シミュレーションで再現し、空気清浄に最適な突起の配置や形状を考察する。

2. 計算方法

2.1 基礎方程式

無次元化した連続の式と Navier-Stokes 方程式を使用する。

連続の式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Navier-Stokes 方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + u \frac{\partial N}{\partial x} + v \frac{\partial N}{\partial y} + w \frac{\partial N}{\partial z} = \frac{1}{Se} \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial z^2} \right) + Q$$

p: 圧力, Re: レイノルズ数, N: 汚染物質濃度

Se: シュミット数, Q: ソース項

2.2 ソース項

Q としてフィルターの各点からの距離の 2 乗に反比例する関数を与え、フィルターによる吸着のモデルとした。

2.3 解法

上記の方程式をフラクショナルステップ法を用いて解く。

3. 格子生成

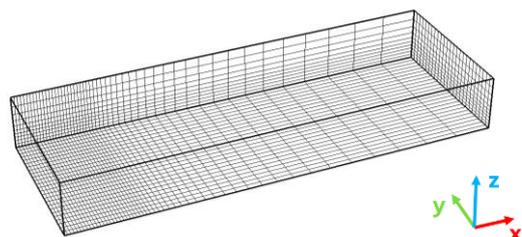


Fig.1 計算格子

突起まわりの流れを細かく計算するため、突起を配置した流れの上流側 (Fig.1 の左側) の格子は細くなるよう計算した。

格子数は $101 \times 101 \times 21$ で、空間の大きさの比率は $22:8:3$ である。

4. 条件

上流に配置する突起の大きさや形を変え、シミュレーションを行った。本研究では $Re = 40$ とした。境界条件は、Fig.1 の左側の面から流入し、右側の面に流出していく一様流れで、空間内の側面は粘着条件、天井と床はすべり壁とした。

今回実験した突起のパターンの中から、代表的なものを 4 種類示す。突起を計算空間の上からみた図を Fig.2 に示す。図の左側が流れの上流で、水色がトリコームを模した突起である。

Case 1: 大きな突起を 1 つ配置する

Case 2: Case 1 の突起を 90 度回転させる

Case 3: Case 1 の突起の半分の幅の突起を 2 つ配置する

Case 4: Case 2 の突起の半分の幅の突起を 2 つ配置する

いずれの場合も、突起の z 方向の高さは格子空間の高さの 3 分の 1 に設定した。

5. 結果

計算結果を Fig.3 ~ Fig.6 に示す。

Fig.3 は、突起の高さと同じ高さでの 2000 ステップ後の濃度分布をそれぞれ上・横方向から見た図である。濃度の高いところは赤色、低いところは青色で表現されている。

Fig.4 は、それぞれの条件において、2000 ステップ後の突起の周りの流れをベクトルで示したものである。

Fig.5 は、Case 1 での実験における濃度変化のようすを 3D volume rendering で示したものである。半透明の赤色で囲われた領域ほど濃度が高く、青色で囲われた領域ほど濃度が低い。

Fig.6 は、突起の下流の $x=75, z=10$ を満たす面に存在するすべての格子点群における濃度の変化に着目し、計算結果を実験した各ケースを比較したグラフである。縦軸は各点の濃度を足し合わせた数値、横軸は時間である。

6. 考察・まとめ

Case 1, Case 2 の実験から, Case 1 のほうが早く濃度が下がったことから, 流れに対して垂直な面が大きいほうがよりよく濃度を下げることが分かった. Case 1 と Case 3 を比較すると, 突起の総体積は同じだが, Case 1 のほうがわずかに濃度の減少速度が速かった. 表面積は Case 3 のほうが大きい, 2つの突起の隙間が小さかったため, 濃度の変化速度にはあまり効果が得られなかったと考えられる. Case 2 と Case 4 では, Case 4 のほうが濃度の減少速度が速かった. Case 4 は Case 2 より表面積が大きいので, 直感に従う結果となった.

これらの結果から, 流れにぶつかるような形状で, かつ流れに触れるように表面積を増すように配置するのがよいと考えられる.

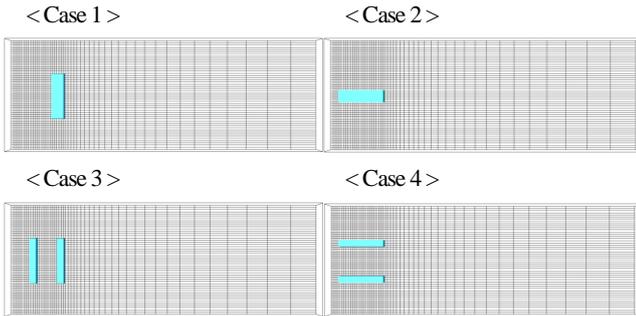


Fig. 2 計算条件

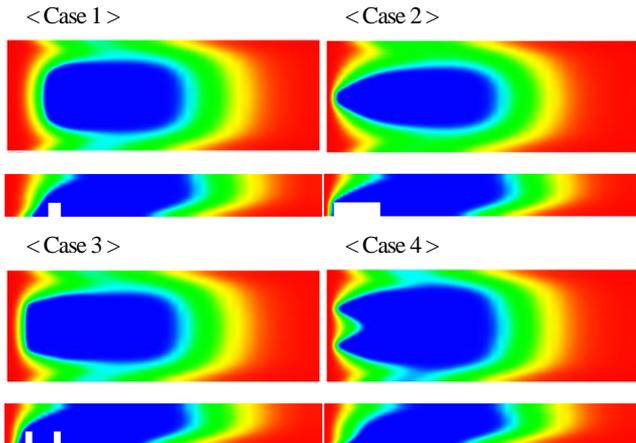


Fig. 3 濃度分布, 2000 ステップ後
(上: 上方向から見た図, 下: 横方向から見た図)

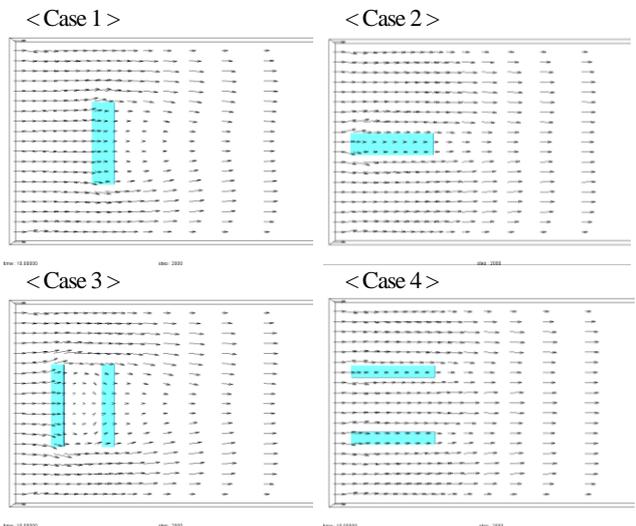


Fig. 4 速度ベクトル, 2000 ステップ後

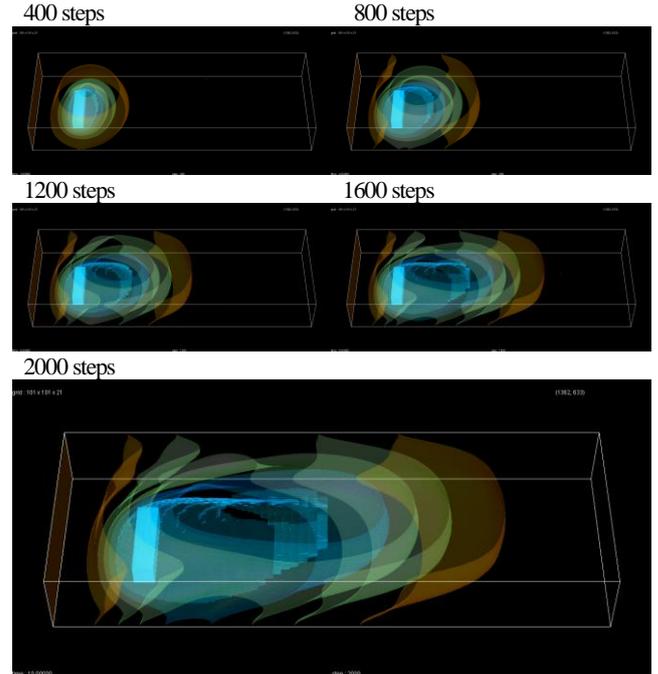


Fig. 5 Case1 における 3D volume rendering

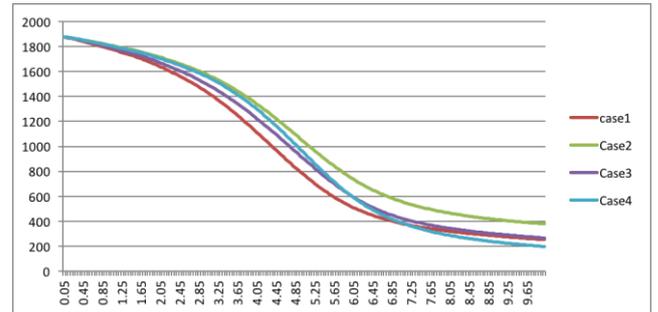


Fig. 6 同じ地点での各条件の濃度変化

参考文献

- Hee-Jae Hwang, Se-Jin Yook, Kang-Ho Ahn, “Experimental investigation of submicron and ultrafine soot particle removal by tree leaves”, (2011)
- Janne V. Räsänen, Toini Holopainen, Jorma Joutsensaari, Collins Ndam, Pertti Pasanen, Åsmund Rinnan, Minna Kivimäenpää, “Effects of species-specific leaf characteristics and reduced water availability on fine particle capture efficiency of trees”, (2013)
- 大塚信一, “岩波講座 地球環境学 3 大気環境の変化”, 岩波書店, (1999), ISBN4-00-010903-0
- 田中俊逸, “地球環境サイエンスシリーズ 3 地球の大気と環境”, 三共出版株式会社, (1997), ISBN4-7827-0348-1
- 河村哲也, “流体解析 I”, 朝倉書店, (1996), ISBN4-254-11402-8