

児童用椅子設置型パーソナル空気清浄装置の開発 CFDによる Overhead Outlet を対象とした清浄空気勢力範囲解析

Development of a Personal Air Purifier for Schoolchildren's Chair Analysis of Fresh Air Contribution Ratio at Breathing Zone by using Overhead Outlet

堀田 太郎* 伊藤 一秀** 熊谷 一清*** 柳沢 幸雄****

Taro HOTTA, Kazuhide ITO, Kazukiyo KUMAGAI, Yukio YANAGISAWA

Keyword : Personal Air Purifier, CFD, Contribution Ratio of Fresh Air

はじめに

建築基準法に代表される法規制、行政レベルにおけるガイドラインの提示等、室内化学物質汚染に関する対策が積極的に推進されている。しかしながら、住宅を中心としたいわゆるシックハウス問題のみならず、保育園、学校等においてもホルムアルデヒドおよびVOC(揮発性有機化合物)による空気汚染問題が深刻化しており、シックスクール問題として社会問題化している。現在認知されているシックスクール問題は、特に新築校舎に移転した際、ほぼ全校生徒に化学物質過敏症(CS, Chemical Sensitivity)の症状が発症することで顕在化しているが、実際には全校生徒に症状が現れなくとも、1クラスに数名の化学物質過敏症予備軍が存在し、不登校にならざるを得ないという現実も存在する。室内化学物質空気汚染問題に対する対策を講じる上では、適切な換気量の確保、ならびに室内からの化学物質放散源の撤去が基本方針となる。建築基準法においても適切な換気設備の設置を義務化すると共に、ホルムアルデヒドに関しては、その放散速度に応じた建材の使用面積に一定の規制を設けている。しかしながら、既存の建築物から全ての化学物質放散

源を取り除き、適切な機械換気設備を導入することは容易ではなく、ましてや1クラスに数名の生徒のために、既存の小学校、中学校において大規模な改装工事を実施し、換気設備の設置を行うことは容易にはコンセンサスが得られない。

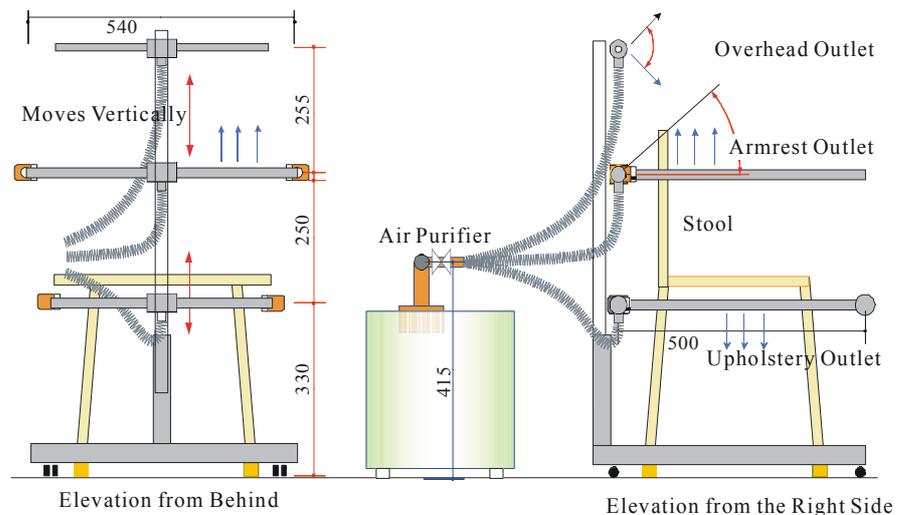
このような背景のもと、本研究では教室内、特に児童の呼吸域周辺の効率的な空気清浄化を目的として、大規模な改修を必要としない、児童用の椅子に着脱可能なパーソナル空気清浄装置を開発し、その有効性を検討することを目的とする。特に本報では、既報で検討した Armrest Outlet からの清浄空気供給に関して、吹出風速を変更した場合の解析を行うと共に、補助的な吹出口として Overhead Outlet を使用した場合の効果を、数値解析をベースとした呼吸域空気質分布ならびに清浄空気寄与率の観点より検討を行う。

1. パーソナル空気清浄装置開発コンセプト

上述の背景のもと、本研究では、緊急かつ応急措置的な対応を前提とし、大規模なダクト工事が不要で簡易に座席に着脱可能なパーソナル空気清浄装置を開発し、必要に応じて個別に空気清浄装置を導入する、との解



(1) 空気清浄装置本体&清浄空気供給ユニット



(2) 概要

図1 空気清浄装置

* 東京工芸大学大学院 工学研究科建築学専攻修士課程, ** 東京工芸大学工学部建築学科 助教授 工博
*** 東京大学大学院新領域創成科学研究科 助手, **** 東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授 工博

決策を提案する。

既存のパーソナル空気調和設備の多くは、机上面に箱型あるいは電気スタンドのような吹出口を取り付け、そこから空調空気を供給することで呼吸域もしくは人体周辺微気象を制御するものが一般的である。しかしながら、机上面に吹出口を設置した場合には、周辺児童の視界を妨げる要因となり、かつ限られた机上面を占有してしまう可能性が否定できない。そのため、本研究で開発するパーソナル空気清浄装置は、学校で一般的に使用されされている椅子に着脱可能な構造とし、視界を遮らない吹出口位置とすることを開発の基本コンセプトとしている。

2. パーソナル空気清浄装置ユニット概要

図1(1)に空気清浄装置本体ならびに清浄空気供給ユニットを示す。また図1(2)に概要図を示す。空気清浄装置本体は $W \times D \times H = 405 \times 305 \times 400 \text{mm}$ の大きさで、100V 電源にて作動する。また、1 台の清浄装置本体で 6 系統までの清浄空気供給が可能となっている。空気清浄装置は教室空気を取り入れ、表面処理した特殊活性炭で構成されたケミカルフィルタを通過させることで化学物質除去を行う。供給風量は最大 $0.45 \text{ m}^3/\text{min}$ ($=27.0 \text{ m}^3/\text{h}$) で、Volume Damper を制御することで供給風量を変化させることが可能である。

本パーソナル空気清浄装置は清浄空気をドラフト感無く効率的に呼吸域に到達させるため、人体発熱に起因する熱上昇流に沿った吹出口を基本とし、肘掛け位置に Armrest Outlet を設置する。Armrest Outlet は、直径 3mm の孔を 10mm 間隔で直線的に設置したもので、ほぼ均一にシート状の吹出風速分布を得ることが出来る。さらに補助的な吹出口として頭部へのダイレクトな吹出口である Overhead Outlet を追加で設置可能な構造となっている。空気清浄装置本体・清浄空気供給ユニットは SUS 製のフレキシブルダクトにより結合する。

本報では、児童用の椅子に設置する空気清浄装置の吹出ユニットのうち、肘掛け位置に設置する Armrest Outlet および Overhead Outlet を使用した場合を対象として検討を行う。既報²⁾では、数値解析により Armrest Outlet から吹出風速 0.4 m/s の条件で検討を行ったが、本報では、Armrest ならびに Overhead Outlet の両者の吹出風速 0.8 m/s の条件(吹出風量 $10.0 \text{ m}^3/\text{h}$)とする^{注1)}。

3. 空気清浄装置の化学物質低減性能

椅子設置型パーソナル空気清浄装置の性能を評価するため、静穏環境下に本装置を設置し、各種のバックグラウンド濃度下で、処理空気の化学物質濃度を測定し

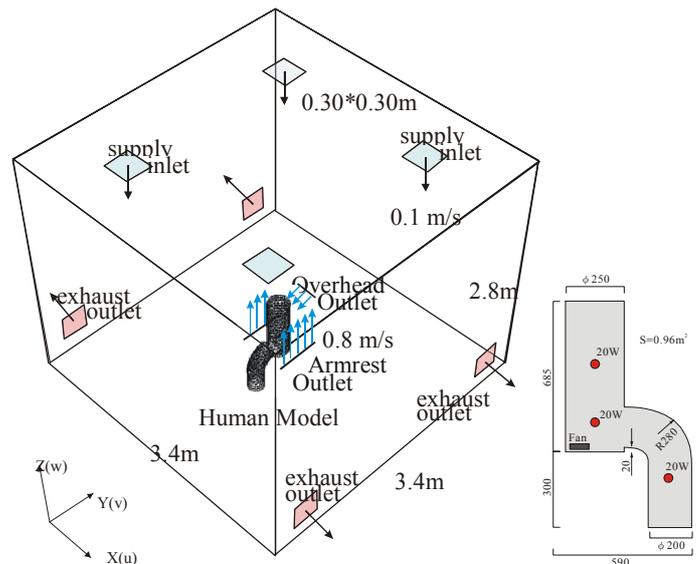


図2 解析対象空間ならびに児童用人体モデル

た結果、雰囲気室内空気に含まれる化学物質濃度レベルに依存せず、処理空気の化学物質濃度は TVOC 濃度で、 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下であることを確認している。

4. 空気清浄装置を対象とした CFD 解析概要

4.1 解析対象空間

解析対象空間ならびに簡易化した人体モデルを図2に示す。解析対象空間は天井面に4カ所の吹出口、床面近傍に4カ所の吸込口を設定した単室を仮定する。全体空調システムの吹出風速は 0.1 m/s (換気回数 4.0 回/h) とし、供給空気は 25°C 一定とする。

8 歳程度の児童用人体スケールを再現した人体モデルは、解析対象空間の中心位置に設置し、その両脇にパーソナル空気清浄装置の Armrest Outlet を、頸部後方に Overhead Outlet を設定する。熱上昇流の再現を意図し、人体モデル表面には 60 W の頭熱発熱を与える。

4.2 解析ケース

解析ケースを表1に示す。解析は上述の全体空調システムに対して、児童用人体モデル両脇に設置するパーソナル空気清浄装置の Armrest Outlet から人体に向けて 45° の角度で清浄空気を供給する場合を Case1、Overhead Outlet から人体モデル頸部に対し、水平に清浄空気を供給する場合を Case2 とする。全ケース共に Outlet からの吹出風速は 0.8 m/s とスロット面からのライン状吹出を仮定する。

4.3 流れ場および温度場の解析概要

流れ場の解析は低 Re 型 k- ϵ モデル(Abe-Nagano model)

を用いて行う²⁾。壁面近傍では、 y^+ (Wall Unit)が 10 以下の領域を最低 3 分割以上したメッシュ分割としている。離散スキームは移流項に QUICK、その他は 2 次中心差分を用いる。速度の壁面境界条件は no-slip 条件、温度は各表面の熱収支式より算出される対流熱流束を与える。人体発熱による熱上昇流を正確に再現するため、温度場解析は対流場と放射場を連成して行う。各壁面間の形態係数は Discrete Transfer Method、相互放射は Radiosity Method による緩和計算により算出する。計算および境界条件を表 2 に示す。

4.4 吹出気流の勢力範囲解析概要

本解析では空気清浄装置から供給される清浄空気の拡散性状、分布性状を解析することで、供給された清浄空気が効率的に人体呼吸域に輸送される Armrest Outlet ならびに Overhead Outlet の条件を探索することに主眼がある。そのため両 Outlet から供給される清浄空気の勢力範囲を直接的に評価可能な換気効率指標である SVE 4 (Scale for Ventilation Efficiency 4) ³⁾を用いて形成される清浄空気流れ場の評価を行う。SVE4 は当該吹出口(本解析では Armrest もしくは Overhead Outlet)においてトレーサを混入し、その条件下で室内濃度分布を求めることにより算出する。定義を次に示す。

$$SVE4(X) = \frac{C_X(X, n)}{C_0(n)} \quad \text{--- (1)}$$

$$C_0(n) = \frac{q}{Q(n)} \quad \text{--- (2)}$$

ここで、 n は吹出口番号、 X は空間座標、 $C_X(X, n)$ は吹出口 n から供給されたトレーサにより形成された位置 X における濃度、 q はトレーサ発生量、 $Q(n)$ は吹出口 n から供給される空気量を示す。

5. 流れ場および温度場の解析結果

各ケースの流れ場解析結果を図 3 に示す。Armrest Outlet を用いた場合、清浄空気と人体熱上昇流により人体周りに同心円状の流れ場が形成されている。頭部上方では 0.25m/s 程度の上昇流となっている。Overhead Outlet を用い場合、頸部後方で供給された清浄空気が人体背面に沿って上昇する様子が観察できる。人体前面では上昇流が形成されている。温度場の解析結果を図 4 に示す。両ケース共に人体前面に熱境界層が形成されている。

6. 清浄空気勢力範囲の解析結果

各ケースの Outlet から供給された清浄空気の勢力範囲

表 1 解析ケース

解析ケース	全体空調方式	Armrest Outlet 角度
Case1	天井吹出・ 床面吸込型	45° 吹出 $U_{in}=0.8 \text{ m/s}$
Case2	天井吹出・ 床面吸込型	水平吹出 $U_{in}=0.8 \text{ m/s}$

表 2 計算・境界条件

乱流モデル	低 Re 型 k- ϵ model (Abe-Nagano model)
スキーム&mesh	移流項：QUICK, 729,262 mesh
全体空調吹出口	$Q_{in}=130\text{m}^3/\text{h}$ (換気回数 4.0 回/h), $U_{in}=0.1\text{m/s}$, $T_{in}=25^\circ\text{C}$, $k_{in}=3/2(U_{AO} \times 0.05)^2$ $\epsilon_{in}=C_{\mu} k_{in}^{1.5}/L_{in}$ $L_{in}=(\text{Supply opening width})/7$
全体空調吸込口	U_{out} (質量保存) k_{out} , ϵ_{out} , T_{out} (勾配 0)
Armrest Outlet or Overhead Outlet	$U_{AO}=0.8\text{m/s}$, $k_{in}=3/2(U_{AO} \times 0.05)^2$ $\epsilon_{in}=C_{\mu} k_{in}^{1.5}/L_{in}$, $T_{in}=25^\circ\text{C}$
壁面	速度：no-slip, 温度：断熱 放射：放射率はすべての壁面で 0.9
人体モデル (児童用モデル)	人体表面積：0.96 m ² , 発熱量：60 W

SVE4 の解析結果を図 5 に示す。Armrest Outlet から 0.8m/s で清浄空気を供給した場合、呼吸域での SVE4 は 0.15 程度となり既報で報告した 0.4m/s の場合(0.30 程度)と比較し、寄与率が低下する結果となった。0.8m/s の供給風速では、清浄空気が人体熱上昇流と混合せず、人体側面に沿って上昇していくことが原因と考えられる。また Overhead Outlet を用いた場合、呼吸域の SVE4 はゼロであり、頸部後方から清浄空気を供給しても呼吸域空気質改善には全く寄与しないことが明らかとなった。今回の Armrest および Overhead Outlet の設置条件では、人体周辺に形成されている熱上昇流に効率的に清浄空気を混入させることが出来ておらず、人体前面での Outlet 等、より効果的な吹出口の設置を検討する必要がある。

7. 結論

- (1) Armrest Outlet より供給された吹出気流は人体側面に沿って上昇し、人体前面に形成されている熱上昇流の十分に混合しないため、呼吸域周辺における清浄空気の寄与率は 15~20%程度と低い値となった。
- (2) Overhead Outlet より供給された吹出気流は人体の頸部後方で衝突し、人体近傍に形成されている熱上昇流に遮断されるかたちで上方に拡散する。そのため、呼吸域まで清浄空気が回り込まず、清浄空気の寄与率はゼロとなった。

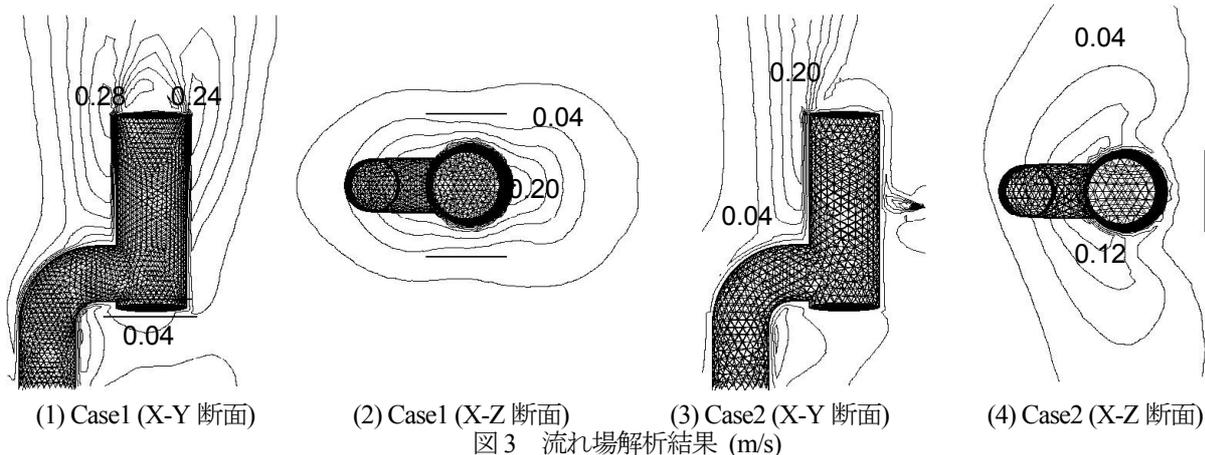


図3 流れ場解析結果 (m/s)

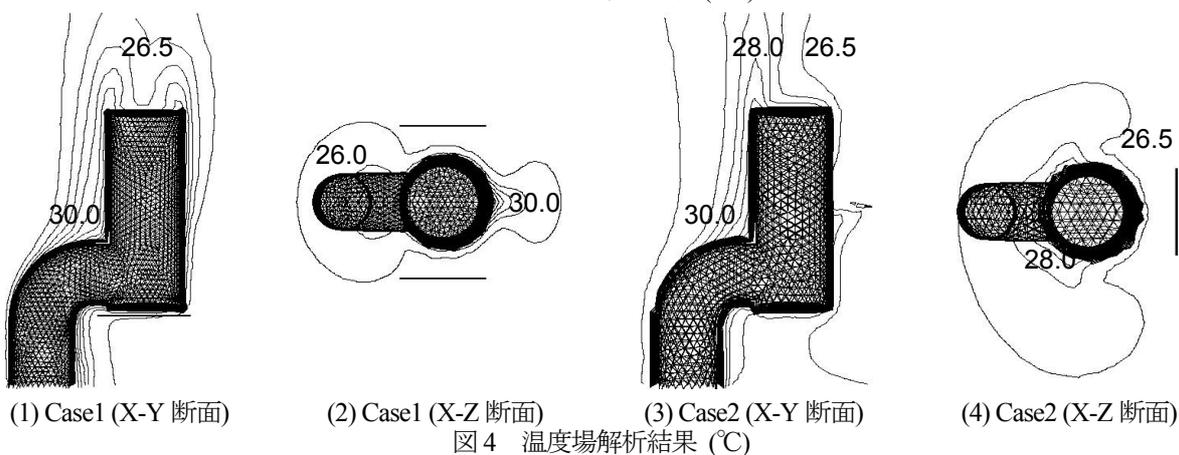


図4 温度場解析結果 (°C)

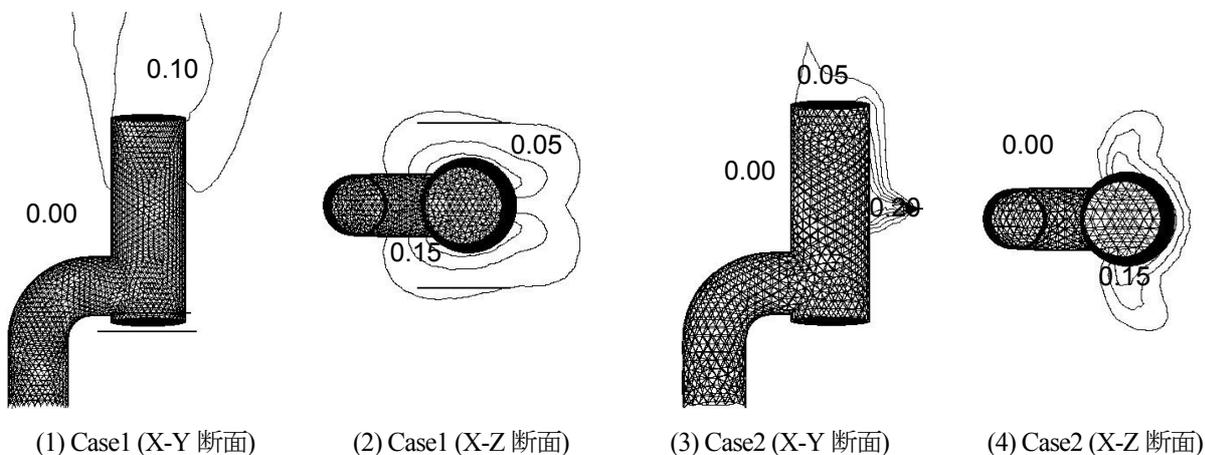


図5 清浄空気勢力範囲 SVE4 解析結果

(3) 本解析より、Armrest および Overhead Outlet にかわる清浄空気吹出口位置の検討を行う必要があることが明らかとなった。今後、人体前面に清浄空気吹出口を設置した場合の検討を行う予定である。

注

[1] 既報²⁾では Armrest Outlet の吹出風速を 0.4 m/s とした場合の呼吸域周辺における清浄空気の寄与率解析を行った結果、最大でも 30%程度であることが確認されている。これは、スリット吹出口より供給された吹出気流が即座に減衰・拡散し、人体近傍に形成されている熱境界層まで到達しないことが

主因と予想されたため、本報では吹出風速を 0.8 m/s と大きくした場合の検討を行った。

参考文献

[1] 熊谷, 伊藤, et al (2004) 児童用椅子設置型パーソナル空気清浄装置の開発と CFD による清浄空気勢力範囲解析 (第1報): 空気調和・衛生工学会論文集, No. 92, pp101-109
 [2] 安部, 長野, 近藤 (1992) はく離・再付着を伴う乱流場への適用を考慮した k-ε モデル, 日本機会学会論文集 B 編, 58 巻, 554 号, pp. 57-64
 [3] Kato, S., Murakami, S., et al. (1994) New scales for evaluating ventilation efficiency as affected by supply and exhaust openings based on spatial distribution of contaminant, 12th ISCC in Yokohama