静穏室内における個別汚染源の人体呼吸空気汚染への寄与に関する CFD 解析

CFD ANALYSIS ON CONTRIBUTION RATIO OF POLLUTION SOURCE TO BREATHING AIR QUALITY IN A STAGNANT ROOM

林 立也*, 加藤 信介**, 村上周三***, 朱 晟 偉****, 梁 楨 訓*****

Tatsuya HAYASHI, Shinsuke KATO, Shuzo MURAKAMI,

Shengwei ZHU and Jeong-Hoon YANG

In this paper, two new indices, CRP1 and CRP2 (Contribution Ratio of Pollution Source 1 and 2), are proposed for evaluating the contribution of an indoor pollution source to human's breathing air quality. CRP1 refers to a ratio indicating how much of the contamination from a pollution source will be inhaled, and CRP2 refers to a ratio indicating how much of the total inhaled contaminant will be from a pollution source. Moreover, CFD methods for the two indices are developed to investigate the breathing air quality of a standing occupant or a lying occupant located in a stagnant room, which is assumed to be air-conditioned by means of displacement ventilation. The results indicate that in such a room, less of the contaminant from the above space will be inhaled by either standing or lying occupant, and it is important to make the floor clean for preventing breathing air from being polluted as expected.

Keywords: Contribution Ratio of Pollution Source, Breathing Air Quality, Computational Fluid Dynamics (CFD), Displacement Ventilation
汚染寄与率、呼吸空気質、数値流体力学、置換換気冷房方式

1. 序

近年、省エネルギー性、温熱快適性の観点から、建築物の高気密・高断熱化が促進され、あらゆる用途の建築物で高気密化が実現されている。一方で、居室環境ではシックビル症候群などの室内空気汚染問題が顕在化^{文¹⁾}し、健康・安全な空気環境を確保すべく、住宅に24時間換気が義務付けられるなど法整備も進みつつある。しかし、従来からの換気設計は完全混合の理論を前提とした換気量（換気回数）による仕様規定で行われている。実際の室内空気質環境は、汚染源位置の偏在や空調方式、発熱体位置及び換気方式など、多くの要因に左右され、通常は室内で大きな分布を有している。これに対し、M. Sandberg^{文²⁾}らをはじめとしてIAQ (Indoor Air Quality) に関して多くの研究がなされてきた^{文³⁾}が、人体が実質的に吸引する空気を視点とした解析は行われていない。人体が在室する場合、人体は代謝活動により自らの周辺に微気象（熱上昇流）を形成しており、この微気象は静穏な室内環境において顕著な空気流動の駆動力となり、自らが吸引する空気質環境に大きな影響を及ぼしている^{文⁴⁾}。すなわち、ある場所の人体が吸引している空気質環境を厳密に評価するためには、その場所に実際に存在する人体の呼吸空気を対象としなければならない。

本研究では人体の呼吸空気の清浄化を目的として、人体に吸引される汚染質の起源を評価する指標を新たに定義し、対応する CFD 解

析手法を提案する。CFD 解析においては、実際の人体形状や熱発生を簡易に再現する人体モデルを取り込み、室内の汚染質濃度分布の検討と合わせて、人体周辺の上昇気流の影響も評価する。なお、本論文では、提案する指標の解析事例として、置換換気方式により冷房される室内において、汚染発生源位置と人体呼吸空気汚染の相関が人体の姿勢によりどの様に変化するかを検討する。

2. 汚染寄与率呼吸

室内汚染源対策を計画する場合、室内のある場所から発生する汚染質が人体にどの程度吸込まれるかは汚染源位置と室内の流れ場に依存する。そのため、汚染源の発生位置をパラメーターとした汚染源の人体汚染吸入量への寄与を評価する新たな指標を2つ提案する。

2.1 CRP1 (Contribution Ratio of Pollution Source 1)

図1に示すように、CRP1_iはある汚染源(i)から室内への汚染質発生量の内、人体が吸入する割合を示す値であり、(1)式で定義される。

$$CRP1_i = q_i / Q_i \times 100 (\%) \quad (1)$$

q_i : 汚染源(i)から発生した汚染質の人体吸入量 (mg/sec)

Q_i : 汚染源(i)からの汚染質発生量 (mg/sec)

汚染源から発生した汚染質が人体に吸入されることなく、全て室外へ排出されると、人体に対する「汚染寄与率 CRP1」は0%となる。逆に、それを全て吸入すれば100%となる。

* ㈱日建設計 工博
** 東京大学生産技術研究所 教授・工博
*** 慶應義塾大学理工学部 教授・工博
**** 東京大学生産技術研究所 産学官連携研究員・工博
***** 嶺南大学 専任講師・工博

Nikken Sekkei Ltd., Dr. Eng.
Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Ph. D.
Prof., Faculty of Science and Technology, Keio University, Ph. D.
Post Doctor Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.
Lecturer with tenure., Yong-nam University, Dr. Eng.

2.2 CRP2 (Contribution Ratio of Pollution Source 2)

図1に示すように、CRP₂は人体が吸入する総汚染量の内、対象とする汚染源(i)の寄与の割合を示す値であり、(2)式で定義される。

$$CRP2 = q_i / q_{total} \times 100 (\%) \quad (2)$$

$$q_{total} = \sum q_i \quad (3)$$

q_{total} : 汚染源全体からの総汚染吸入量 (mg/sec)

3. 静穏室内を対象とした CRP 解析

人体の汚染吸入に関する汚染寄与率 CRP は、室形状、換気方式、室内人体位置、人体姿勢、人体活動（静止もしくは移動）により変化するものであり、その性状を直ちに包括的に解析することは難しい。ここでは代表性のあると思われる室内形状、換気方式、人体位置、姿勢などを適切にモデル化し、その概括的性状を検討する。

3.1 解析対象

解析対象とする室モデルを図2に示す。室内空調方式は、冷たい新鮮空気を床面近くに低速で供給し、室内熱負荷により加熱された空気が天井面近くで排出される置換換気方式を採用する^{注1)}。ここで、人体姿勢による汚染寄与率の変化を検討するため、室内の在室人数を1名とし、人体姿勢として、立位 (Case1)、臥位 (Case2)^{注2)}の2通りに関し検討を行う。立位状態の人体は室中央部に空調吹出口方向を向いて直立し (図2(1))、臥位状態の人体は空調吹出 airflow が呼吸域に直接及ばないように、吹出口側に足を向け仰向けに寝ている状態を想定した (図2(2))。

3.2 解析概要

解析の概要を表1に示す。流れ場解析は標準 k-ε モデル (3次元) による。壁面では風速に対して一般化対数則を適用し^{文9)}、温度場は人体表面において対流熱伝達量 (立位状態: 20.0W/m²、臥位状態: 30.1W/m²)^{注3)}を与えている。その他の壁面は断熱としている。解析

表1 解析概要

ケース	Case1	Case2
乱流計算モデル	標準 k-ε モデル (3次元)	
差分スキーム	対流項: HYBRID	
メッシュ分割	BFC を使い、メッシュを分割する。また、Y 方向の空間の対称性より半分の領域のみを計算する。	
	メッシュ数: 157,841	メッシュ数: 142,347

表2 境界条件

空調の吹出口	寸法: 0.27m (床面からの高さ) × 0.44m (幅は中心断面に対称)
	速度: 0.12 m/s、風量: 0.0143m ³ /s、温度: 22℃ 風向: 図2に参照 乱流エネルギー k: 2.88×10 ⁻⁵ m ² /s ² 、乱流消散率 ε: 2.13×10 ⁻⁶ m ² /s ³
空調の吸入口	寸法: 0.27m × 0.44m、速度: free slip 温度: free-slip
壁面	速度: 一般化対数則、温度: 一般化対数則、断熱壁
人	表面
	速度: 一般化対数則 温度: 表面に 38.3W の対流熱伝達量を均一に与える (立位状態: 20.0W/m ² 、臥位状態: 30.1W/m ²)。
口	定常吸気量: 14.4 l/min

は複雑人体形状を表現するために BFC (Boundary Fitted Coordinates: 境界適合座標系) を用いて行い、総メッシュを Case1 で 157,841、Case2 で 142,347 とした。

呼吸は非定常現象であるが、口からの呼出空気が、呼吸域に空気を輸送する室内の大きな流れ構造に与える影響は小さいため^{注4)}、本解析では定常吸気状態を仮定して計算を行う。吸気量は人体口位置 (開口面積は約 3.4cm²) で、定常的に 14.4 l/min^{文10)} 注5) 吸入すると想定する。これは、室の換気量 (855 l/min) の 1.7% である。

境界条件の詳細を表2に示す。室内の定常な流れ場、温度場を最初に計算し、その流れ場を用いたトレーサガス拡散解析により CRP1、CRP2 の計算を行う。

※汚染寄与率 CRP2 は、人体の総汚染質吸入量の内、各対象汚染源の寄与している割合を示す値である。

図1 CRP の概念図

(1) 立位状態 (Case1)

(2) 臥位状態 (Case2)

図2 解析対象

3.3 解析結果

3.3.1 温度場 (図 3)

置換換気方式によるピストンフローが室全体に形成され、立位状態臥位状態の場合において、室内に温度成層が形成されている。発熱体である人体が床面付近にのみある臥位状態では温度成層が室下部にのみ形成され、室上部は均質な温度となっている。

3.3.2 流れ場

(1) 立位状態 (図 4(1),(2)) 流れ場は室全体としては静穏である。しかし、人体のまわりにはその生理発熱による上昇流が顕著に生じている。人体口位置では定常的な吸気による 0.22 m/s 程度の比較的速度が観察される。また、呼吸域には生理発熱による上昇流により室下部からの空気が流入しており、人体はその上昇空気を吸引している性状が明瞭に観察される。

図 3 温度分布 (°C)

図 4 Case1における風速分布 (立位人体、ABCD 鉛直断面)

図 5 Case2における風速分布 (臥位人体、ABCD 鉛直断面)

(2) 臥位状態 (図 5(1),(2)) 流れ場は立位時と同様に、室全体としては静穏であるが、人体近傍では生理発熱による浮力上昇流が人体に沿いながら人体中心部 (胸近傍) に収束し、その上部に上昇流が生じている。人体中心での上昇流は最大で 0.16 m/s 程度となり、立位時よりやや小さい。呼吸域では、吸気による流れと床面から上昇してくる流れとが混在し、やや複雑な流れとなっている。

3.3.3 汚染寄与率 CRP1 (図 6)

図 6 に示す床面(F01~06)、壁面(W01~14)、天井面(C01~06)の小領域は汚染質発生源の位置を示しており、() 内の数値が小領域の CRP1 を示している。CRP1 の値は、各汚染源表面濃度を 1.0 として、すなわち発生源強度を同じとして全ての要素に対し個別に拡散解析^{注6)}を行った結果である。

(1) 立位状態 (図 6(1)) 置換換気された室内において、CRP1 の値は室上部と室下部で 2 段階に分かれる。室下部では床面で 2.60~2.81%、側壁面では 1.66~2.91% となり比較的均一に分布している。床面の F05 が汚染源である場合の濃度分布を図 7(1)に示す。この場

(1) 立位状態 (Case1)

(2) 臥位状態 (Case2)

図 6 各小要素の位置と汚染寄与率 CRP1 (解析対象の半分を表示) (上段の記号は汚染源位置を、下段の括弧内の数値は CRP1 を示す。)

合、発生した汚染質は空調吸込口の反対側になる人体モデル左側(吹出口側)に滞留するが、人体は空調吹出口からの新鮮空気を効率よく呼吸域に誘引しているため、CRP1 の値は余り高くない。同様の傾向が他の床面から汚染質が発生した場合にもいえる。側壁面(W01~W14)から汚染質が発生した場合、汚染質は鉛直方向に成層化するが、室下部の側壁面から発生した場合(図7(2):汚染源位置W12)も、室上部の側壁面から発生した場合(図7(3):汚染源位置W10)も、人体は汚染源の直接的な影響を強く受けない。また、天井面から汚染質が発生した場合(図7(4):汚染源位置C01)は、置換換気方式の特徴であるピストンフローにより、室上部にのみ滞留し、室下部の空気とはほとんど混合しないため、CRP1 は0.1%以下となり、人体の呼吸空気質に対する寄与は室内の換気量に対する呼吸量の割合と比べて非常に低くなる。

(2) 臥位状態(図6(2)) 人体が床面に寝ている場合、立位の場合と異なり人体の口の位置が床面付近の吸込口側壁面寄りであるため、CRP1 の値に分布が生じる。床面のF03では吹出気流のウェイクにより汚染質が人体の頭方向へと流されるため、CRP1 の値は8.74%と非常に高い値となる(図8(1))。一方、F01, 02では発生した汚染質が人体腰位置付近に生じる生理発熱による上昇流と共に室上部へ速やかに運ばれるため3~4%程度の値となっている。また、天井面でのCRP1 は人体が立位状態の場合に比べて高く評価される。人体の総汚染質吸引量は立位状態の場合に比べて約1.8倍である。

3.3.4 汚染寄与率 CRP2 (図9)

CRP2 は人体が口から吸引する総汚染質量の内、ある汚染発生源から発生した汚染質がどれくらい寄与しているかを示す指標である。ここでは直方体の対象室内の①床面、②吹出口側壁面、③吸込口側

壁面、④奥側壁面、⑤天井面^{注7)}をそれぞれ汚染源位置と設定し、各壁面のCRP2を求める。

(1) 立位状態(図9(1)) 立位の場合、床面①のCRP2は53%に達し、人体が吸引する汚染質の半分以上が床面①に起因するものであることがわかる。すなわち、各壁面から均一に汚染質が発生していると想定した場合、床面からの汚染質発生を0に制御できれば、人体の総汚染質吸引量は半分以下になる。また、吹出口位置、吸込口位置、人体の向きに関わらず、側壁面(②~④)からの寄与は13~17%で比較的均一になっている。

(2) 臥位状態(図9(2)) 臥位状態の場合、床面①のCRP2は73%となり、立位状態の場合よりもさらに高い値となる。側壁面(②~④)のCRP2は立位状態の場合と同様に7~9%と比較的均一になるが、吹出口側壁面②の寄与は小さくなる。これは、人体腰付近で発生する人体周辺の熱上昇流がエアカーテンの役割をし、吹出口側壁面②から発生した汚染質を呼吸域に到達する前に、上部へと輸送する傾向があるためと思われる。天井面⑤のCRP2は2%で立位時の場合と同様に低い値となる。

4. まとめ

①汚染源と人体吸気汚染の関係を評価する新しい指標として、(1)個別汚染源の人体吸気汚染への寄与を評価する汚染寄与率CRP1と、(2)個別汚染源の人体の総汚染質吸入量への寄与を評価する汚染寄与率CRP2を提案し、置換換気方式で冷房された室内において、立位と臥位の人体を対象として解析事例を示した。

②立位状態において、CRP1は室下部で高く、室上部で低い分布となるが、それぞれで比較的均一に分布する。

図7 Case1における濃度分布(立位状態、ABCD鉛直断面)

図8 Case2における濃度分布(臥位状態、ABCD鉛直断面)

(1) 立位状態 (Case1)

(2) 臥位状態 (Case2)

図9 汚染寄与率 CRP2 の分布

③臥位状態において、CRP1 は吹出口や吸入口と人体の関係に大きく影響を受けるが、室上部では立位状態の場合と同様に非常に低い値となる。

④立位状態、臥位状態において、CRP2 は床面で圧倒的に高い値を示し、置換換気された室内では床面の清浄化対策が人体呼吸空気汚染を防ぐことが示唆された。

注1) 解析対象室内で想定している置換換気方式は、住宅の居室等における、内外温度差が大きく換気回数が小さい煙突効果による換気と類似したものである。

注2) 臥位状態の人体形状は、立位状態の人体形状を基本的に踏襲しているが、床面に接する部分は平面となっている。但し、体積を立位状態のそれと等しくするために多少のモデル化を施している。

注3) 人体代謝量は人体の活動状況によって異なるが、ここでは比較のため立位状態と臥位状態で発生熱量、すなわち対流熱伝達量を等しくしている。また、臥位状態の人体においては、室内空気に接する体表面積が小さいため、総発熱量 (33.8W) が立位時の人体と等しくなるように対流熱伝達率を割り増ししている。

注4) 本解析では呼吸現象を定常吸気と仮定して解析を行う。これに関しては、PIV 風速計を用いた呼吸するサーマルマネキン呼吸域の風速測定、及び呼吸域の非定常解析により、人体呼吸域の流れ構造が呼吸の非定常性の影響を大きく受けないことを確認した^{文11)}。

注5) 呼吸量は酸素消費量 (活動量) から求まるが、ここでは比較のため立位状態と臥位状態で同量を仮定している。また、今回の呼吸量は 6.0 l/min (呼吸回数は 10 回/min. すなわち 0.6 l/回) の呼吸現象の吸気部分が均一に定常的に続くと想定している^{文11)}。

注6) 濃度計算はガス状汚染質を想定し、シュミット数を 1 とした CFD の Passive Scalar 解析法により行っている。

注7) 各微小面要素の面積比は最大で(床面) : (奥側壁面) = 1 : 1.2 程度である。

参考文献

- 1) Wadden RA, Scheff PA. : Indoor Air Pollution. New York: Wiley-Interscience, 1983
- 2) Editorials. Sick Building Syndrome, the Lancet 1991, 338:1493-4
- 3) M. Sandberg : Ventilation effectiveness and purging flow rate - A review. International Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, University of Tokyo, ISRAVE ASHRAE, pp17, 1992.7
- 4) S. Kato, S. Murakami, and J. Zeng. : Numerical Analysis of Contaminant Distribution around a Human Body, Roomvent'96, Vol.2, pp.129-136, 1996.7
- 5) T. Hayashi, Y. Ishizu, S. Kato, and S. Murakami : CFD Analysis on Characteristics of Contaminated Indoor Air Ventilation and its Application in the Evaluation of the Effects of Contaminant Inhalation by a Human Occupant, Building and Environment, 37, pp.219-230, 2002
- 6) SW. Zhu, S. Kato, S. Murakami, and Y. Hayashi : Study on Inhalation Region by Means of CFD Analysis and Experiment, Building and Environment, 40, 2005
- 7) M.G. Apte., and J.M. Daiscy : VOCs and "Sick Building Syndrome": Application of a New Statistical Approach for SBS Research to U.S. EPA Base Study Data., Indoor Air' 99, 1, 117-122, 1999.8
- 8) 加藤、曾、村上：数値サーマルマネキンに関する研究 (その2) 静穏環境下における立位人体周囲の汚染質濃度分布に関する CFD 解析、日本建築学会計画系論文集、No.509, pp.21-26, 1998
- 9) B.E. Launder, and D.B. Spalding : The Numerical Computation of Turbulent Flows, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3, pp.269-289, 1974
- 10) 温熱生理学、中山昭雄編、理工学社、1981
- 11) 朱、林、加藤、村上：可視化実験と数値解析による静穏室内の人体呼吸域流れ性状の検討、日本建築学会環境系論文集、No.583, pp.37-52, 2004.9

(2005年8月20日原稿受理、2006年1月25日採用決定)