

数値サーマルマネキンに関する研究 (その 3)

CFD による呼気の汚染質濃度解析

Study on Computational Thermal Manikin (Part 3)
Prediction of Contaminant Distribution Affected by Metabolic Heat from Human Body

村 上 周 三*・加 藤 信 介*・曾 潔*
Shuzo MURAKAMI, Shinsuke KATO and Jie ZENG

1. 序

既報^{1),2)}では、静穏や一様気流環境下における人体周囲の流れ性状を低 Re 数型 $k-\epsilon$ モデルに基づく CFD を用いて検討した。室内空気を積極的に混合しない静穏環境下では、人体発熱により生じる熱上昇流が室内の汚染質輸送・拡散に大きな影響を与える。人体が呼吸する空気汚染質濃度は、この人体近傍上昇流の影響を強く受ける³⁾。本報では、この問題に関し、流れ場汚染質拡散場の数値解析により詳細に検討する⁴⁾。

2. ディスプレースメント換気と換気効率

静穏な室内に新鮮な外気や冷房空気を居住域に直接供給する Displacement Ventilation (置換換気) は、室内に生じる温度成層を積極的に利用して、居住域の清浄度を確保する効率のよい換気方式と考えられている。この方式では、室内空気の下方向の混合が温度成層により抑制されており、汚染質の濃度分布にも成層⁵⁾が生じている。このような静穏な流れ場では人体や装置などによる熱上昇流が室内の主要な気流駆動源となる。しかし室内で成層化する汚染質分布は、①汚染質の発生位置、②人体発熱による熱上昇流の鉛直方向の移流性状により大きな影響を受ける。本報では、人体による熱上昇流のある Displacement Ventilation 方式の流れ場において、これらの性状を検討し、更にこの汚染質拡散場性状と人体熱上昇流を関係づける換気効率指標^{5)~7)}である誘引効率 η_e 並びに空気齢、空気余命を用いた定量的に解析する。

3. 誘引効率 (図 1)

人体熱上昇流により下層の空気が人体呼吸位置に誘引される効果を評価する尺度として、P. V. Nielsen ら⁵⁾は (1) 式に示す Entrainment Effectiveness of Human

*東京大学生産技術研究所 第 5 部

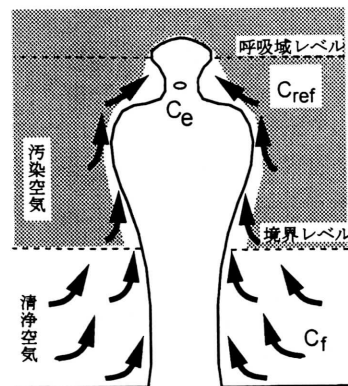


図 1 人体熱上昇流の誘引性状 (η_e が正の場合)

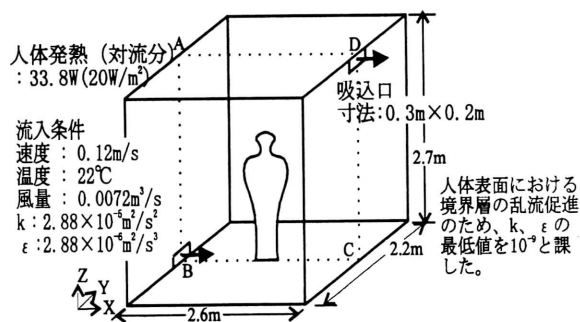


図 2 解析対象

表 1 検討ケース

	汚染質発生位置	流れ場
case1	室内一様発生	図 3
case2	室内一様発生	時間逆転流れ場 (図 5)
case3	天井面において一様発生	図 3
case4	床面において一様発生	同上
case5	マネキン表面から一様発生	同上

Boundary Layer: η_e を提案している。

$$\eta_e = (C_{ref} - C_e) / (C_{ref} - C_f) \quad (1)$$

研究速報

著者らはこれを呼気に関わる人体熱上昇流の誘引効率 η_e^* として次のように拡張する.

$$\eta_e^* = \eta_e \cdot \text{sig}(C_{ref} - C_f) = (C_{ref} - C_e) / |C_{ref} - C_f| \quad (2)$$

但し, $C_f \leq C_e \leq C_{ref}$ 又は $C_{ref} \leq C_e \leq C_f$

$\text{sig}(x)$: 符号関数 $x \geq 0$ $\text{sig} = 1$, $x < 0$ $\text{sig} = -1$

C_e : 人体が呼吸する空気濃度 (ここを呼吸位置と呼ぶ)

C_{ref} : 呼吸位置と同じ高さで人体近傍熱上昇流の影響を受けない領域の代表濃度^{注1)}.

C_f : 人体熱上昇流で誘引される室内下層の代表濃度^{注1)}.

$$C_e = \eta_e C_f + (1 - \eta_e) C_{ref} \quad (3)$$

η_e は (3) 式に示されるように C_e に対する C_f の混合比を示しており, 人体の熱上昇流が下層空間の空気をどの程度呼吸位置まで輸送するかを評価する. 呼気の誘引効率 η_e^* は, 正負の値を持ち, 相対的に室の下層が清浄な場合に正となる. この場合, 下層の相対的に清浄な空気が呼吸位置に輸送される効率すなわち清浄空気誘引効率を示す. $C_e = C_f$ の場合, $\eta_e^* = 1$ となり, 呼吸位置の空気は全て清浄な下層から熱上昇流により運ばれると考える. η_e^* は室の下層で相対的に汚染質濃度が高い場合には, 負の値となり, 汚染空気誘引効率を示す. $\eta_e^* = -1$ の場合, C_{ref} は低いにもかかわらず呼吸位置の空気の全てが汚染濃度の高い下層から運ばれると考える. $C_e = C_{ref}$ の場合, $\eta_e^* = 0$ となり, 呼気の空気質に対する人体の熱上昇流の誘引効果の影響はないと考える^{注2)}. 図1に示すように, η_e^* は C_{ref} で代表される上層と C_f で代表される下層の境界面の高さ, 呼吸位置までの高さの比に深く関係する.

4. 流れ場, 温度場解析

4.1 計算概要 (図2)

解析対象を図2に示す. 解析は3次元低 Re 数型 $k-\varepsilon$ モデルに基づく. 詳細は既報¹⁾を参照. 汚染質は passive

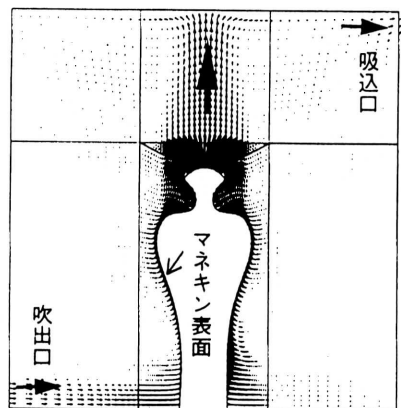


図3 風速の鉛直分布 (ABCD 断面)

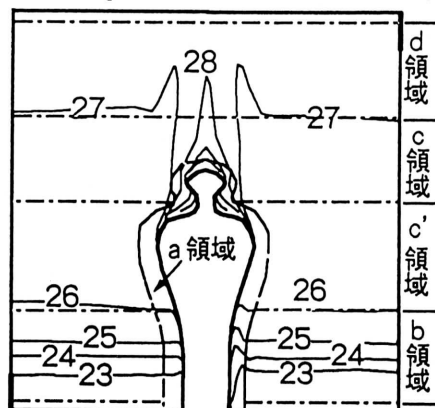


図4 温度の鉛直分布

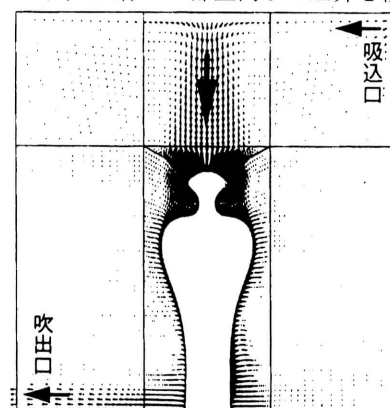


図5 時間逆転進行する流れ場

scalar contaminant を仮定.

4.2 流れ場, 温度場性状 (図3~5)

吹出, 吸込付近と人体近傍以外の空間は全体的に静穏に近い (図3). 人体回りには熱上昇流 (最大風速0.26 m/s) が顕著に生ずる. マネキンの足から腰にかけてやや大きな温度勾配が生じ全体に温度成層が生じている (図4)^{注3)}. 上下方向の移流は主として人体からの熱上昇流によってもたらされる. この空間を温度勾配, 濃度勾配に着目し, 上下方向の各領域に分割し, 各領域の平均濃度を算出する (図4)^{注1)}. 求められた流れ場 (図3) に対し, 空気余命を簡易に算出するための時間進行を逆転した仮想的な流れ場 (時間逆転進行する流れ場) を図5に示す.

5. 濃度場解析

5.1 検討ケース (表1)

case 1 は, 汚染質が室内全体一様発生させた場合で, 得られた濃度分布は吹出口の空気齢分布⁷⁾に対応. case 2 は, 図5に示される時間逆転進行する流れ場の下で汚染質一様発生させた場合で, 得られた濃度分布は空気余命分布⁷⁾に対応する. case 3 は, 汚染源が天井面にある場合. case 4 は, これが床面にある場合. case 5 はマネキンの全表面から一様発生 (bio-effluent). なお, 図6, 7の汚染質濃度は瞬時一様拡散濃度 (出口濃度) で無次元化して示す.

5.2 室内一様汚染質発生する場合 (空気齢) (case 1, 図6(1), 表2)

汚染質を室内一様発生させる場合, 汚染質の濃度分布は無次元空気齢に対応する⁷⁾. 吹出口が床面付近にあるために, 空間の下層領域bでは0.30と最も低い値となる. この領域の空気が一番新鮮である. 人体近傍では, 熱上昇流の影響で, 下層領域の新鮮空気を呼吸位置まで誘引し, 周辺に比べより新鮮な空気 (0.50) を提供する. 人体近傍に付着する比較的に新鮮な空気が人体の上部空間まで上昇を続

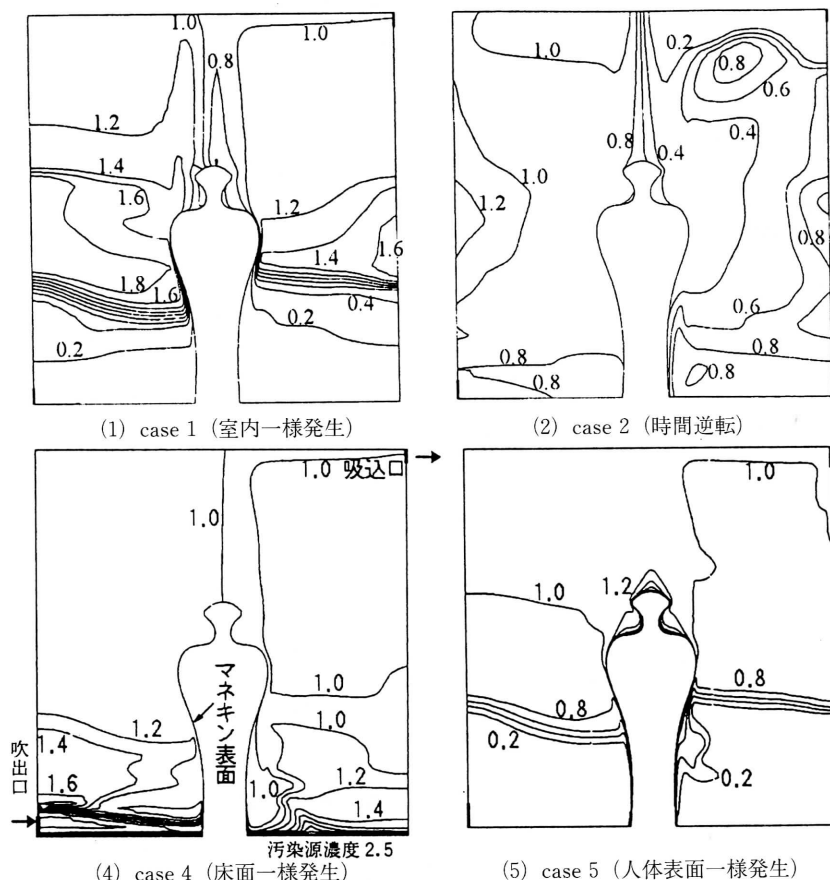


図6 汚染質の鉛直濃度分布 (ABCDEF 断面)

け、次第に高齢となる。その後、一部の空気は吸込口から排出されるが、一部は人体両側の空間まで下降するために、空気齢は一層大きくなる。空間の上層領域dでは、1.10となっている。人体腹部から胸部の高さレベルの空間では、空気齢は最大1.80を越えて、最も高い値となっている。この空気齢の最も高い領域と空気齢の最も低い空間下層領域bの境界は、人体の腰辺りに極めて明瞭に生じている。前節で提案した呼吸に関わる人体熱上昇流の誘引効率 η_e をこの場合に適用すると、79%となる。即ち、呼吸位置の79%の空気が空間下層から運ばれた相対的に新鮮な空気であることを示す。

5.3 時間逆転気流場で室内一様汚染質発生する場合

(空気余命) (case 2, 図6 (2), 表2)

時間逆転気流場 (図5) を用いて、室内一様汚染質発生させた場合、汚染質の濃度分布は汚染質の無次元排出時間 (空気余命) と対応する⁷⁾。この分布性状を図6 (2) に示す。吸込口のすぐ近くの空気は余命が小さい値となり、速やかに排出されることを示している。空間下部領域bでは、排出されるまで長い時間が必要であり、余命が0.94と高い値となる。人体の右側の区域では、吸込口に近く、また人体

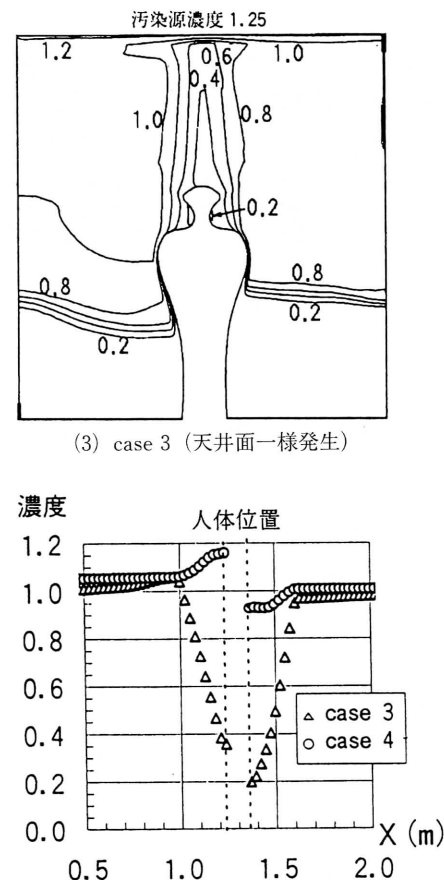


図7 呼吸位置レベルの水平濃度分布 (Z=1.45 m)

周囲熱上昇流が生じるために、空気の室内に残る滞在時間が短く、比較的速やかに排出されることが示されている。一方、人体の左側の空気は、余命が比較的長くて、排出されるのに時間がかかる。空間全体的に空気の平均余命は0.91、人体呼気位置は0.50と小さい。また、人体近傍領域aの空気の平均余命は0.69と比較的に小さい。これは、人体近傍の熱上昇流により、近傍の空気がより速やかに空間上部に移流、排出されることを示す。

5.4 天井面から汚染質発生する場合 (case 3, 図6 (3), 図7, 表2)

マネキンの腰あたりで明瞭な汚染質の濃度成層が生じている。これはcase 1の空気齢分布の明瞭な境界に対応しており、流れ場の構造を考えれば、充分納得できる結果である。汚染質の室内平均濃度は0.60であるが、下層b領域では1.00と大きい。マネキン表面に沿う熱上昇流により、空間下層から清浄な空気が上層に運ばれるため、人体より離れたc'領域 (0.43) に比べ低い。呼吸位置近傍の汚染質濃度は図7に示すように顕著に低下している。清浄空気の誘引効率 η_e は75%にも達する。これはcase 1の79%と良く対応する。即ち呼吸位置の約75%の空気が空間下層か

研 究 速 報

表 2 各領域における平均濃度と η_e^*

	case1	case2	case3	case4	case5
全室平均	0.91	0.91	0.60	1.05	0.63
a 領域 (人体近傍)	0.68	0.69	0.37	0.99	0.54
b 領域 (下層領域を代表させる。代表濃度 C_f)	0.30	0.94	0.02	1.20	0.06
c 領域	0.91	0.95	0.43	1.06	0.46
c 領域 (呼吸レベルの領域を代表させる。代表濃度 C_{ref})	1.28	0.95	0.94	1.04	0.98
d 領域 (上層領域)	1.10	0.80	1.00	1.04	1.00
呼吸位置濃度 (C_a)	0.50	0.50	0.25	1.15	1.20
誘引効率 η_e^*	79%	—	75%	—69%	—

ら運ばれた相対的に清浄な空気であり、これがマネキン周囲における汚染された空気を希釈して、呼吸域の空気質を向上させている。このような現象は Nielson らの実験⁵⁾でも確認されている。

5.5 床面から汚染質発生する場合 (case 4, 図 6 (4), 図 7, 表 2)

汚染発生源が床面近傍にあるため、汚染質は下層領域 b で多少滞留し、濃度は 1.20 と高くなっている。上層空間 (c, d 領域) ではほぼ均一分布 1.04 となっている。汚染源のある床面近傍を除き室内は概ね均一な濃度になり、他ケースのような顕著な濃度成層は生じていない。人体の近傍 (人体より約 15 cm の範囲, 図 7 参照) では上昇流により下層の高濃度空気が輸送され、濃度が少々高くなっている。汚染空気の誘引効率 η_e^* は -69% となる。この絶対値は case 1 の 79%, case 3 の 75% とほぼ対応。これよりわかるように、効率的な清浄度管理のためには室内下層部における汚染発生は避けることが望ましい。

5.6 マネキン表面から汚染質発生する場合 (case 5, 図 6 (5), 表 2)

マネキン表面に沿う熱上昇流により、マネキン表面から発生する汚染質は下層から上層へ運ばれる。汚染質の鉛直濃度勾配はマネキンの腰あたりで大きく、空間内には顕著な成層が生じている。室全体の汚染質平均濃度は 0.63 である。濃度成層以下の b 領域では濃度が小さく、0.06 となっている。一方、マネキン頭部及びそれ以上の空間では排気濃度と等しい 1.00 となる。汚染源が人体表面のため人体近傍の汚染質濃度が高く、呼吸位置の汚染質濃度は約 1.20 と大きい。なお、室内に多人数がいる場合、室の上部領域の汚染質濃度は人数分上昇し、結果的に呼吸レベル領域の濃度は高くなる。この場合、例えば自身により汚染された空気でも、室内上部より室下部より誘引される低濃度の空気を呼吸することになり、呼吸域の空気質は向上する。

6. ま と め

- ① displacement ventilation 空調方式で空調される静穏な環境下では温度成層が生じ、同時に濃度分布にも成層が生じる。この性状は吹出空気の無次元空気齢の分布に明確に対応している。

② この濃度成層はマネキン表面の熱上昇流と連成されて、人体呼吸位置の空気質に大きな影響を与える。これは空気齢の分布も明確に示している。

③ この効果を評価する指標として呼吸に関わる人体熱上昇流の誘引効率 η_e^* (正の時清浄空気誘引効率, 負の時汚染空気誘引効率) を提案し、適用した。

(1995年11月21日受理)

注 1) : ここでは、室内を次のような領域に分割して考える。①人体近傍域の a 領域, ②温度勾配の大きい床上から人体腰位置までの b 領域, ③首までの c' 領域, ④頭の少し上までの c 領域, ⑤それ以上の d 領域。b 領域の平均濃度で c_f を代表させ、c 領域の濃度で c_{ref} を代表させる。

注 2) : 実際には上層と下層の境界の生成が必ずしも明確でないこともあり、また各代表汚染質濃度の評価に曖昧さを残すため、算出される効率の値は多少変動する。特に、①空間に汚染質濃度成層が明確に生じず均一な濃度分布となる場合、②濃度成層の位置が人体の呼吸位置より高くなる場合、③人体自身が汚染源となり、 c_e が c_f と C_{ref} の混合で説明できない等の場合、この指標は有効ではない。しかし Displacement Ventilation の場合には、この指標の考え方は一般に有効であると考えてよい。

注 3) : 上昇流の大きさや人体表面熱伝達が既往の実験に良く対応することは既報¹⁾で示した。

参 考 文 献

- 1) 曾, 村上, 加藤: 人体表面の対流熱伝達に関する CFD 解析, 第 8 回数値流体力学シンポジウム, pp. 189-192, 1994. 12.
- 2) 曾, 村上, 加藤: 数値サーマルマネキンに関する研究 (その 5) 一様水平流に晒された人体表面の対流熱伝達特性に関する CFD 解析, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp. 673-676, 1995. 10.
- 3) 金, 本間, 二宮: 人体発生換気対象物質等の室内における流動分布について (その 8) 人体モデル数による換気効率への影響, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp. 1093-1096, 1992. 9.
- 4) 村上, 加藤, 曾: 数値サーマルマネキンに関する研究 (その 5) 人体熱上昇流が呼吸位置濃度に与える影響に関する解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 593-594, 1995. 8.
- 5) Henrik Brohus and P. V. Nielsen: Contaminant Distribution around Persons in Rooms Ventilated by Displacement Ventilation, ROOM VENT '94 Poland, pp. 294-312.
- 6) Shuzo Murakami: New Scales for Ventilation Efficiency and Their Application Based on Numerical Simulation of Room Airflow, ISRACVE University of Tokyo, pp. 22-37, 1992. 7.
- 7) 加藤, 村上, 小林: 不完全混合室内における局所領域の換気効率の同定に関する研究 (その 2) 吹出口・吸込口の環境形成影響度と空気余命に関する新たな換気効率指標の提案, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp. 701-704, 1992. 10.