

CFD による置換換気される居室における複数人体周辺の呼気域空気質に関する研究

正会員 林 立也^{*1}
 同上 村上 周三^{*2}
 同上 加藤 信介^{*3}
 同上 曾 潔^{*1}
 同上 伊藤 一秀^{*1}

1. 序 室内換気において、人体はその呼気域が空気質制御の対象となると共に、汚染質発生源となり、人体発熱による周辺上昇流が室内の気流、汚染質拡散の駆動力になる。人体の呼吸空気質に与える人体熱上昇流の影響を、室内に1人体が在室する場合に関し、各種汚染源位置について検討し報告した^{*1)}。しかし、室内に単独の人体しか存在しない解析では、発熱する汚染源としての人体が他の人体の呼吸空気質に与える影響を必ずしも詳細に検討することができない。そこで、室内の複数の人体が相互に互いの呼吸空気質に影響を与える場合に関して検討を行う。本報では前報^{*2)}に引き続き、特に室内の複数人体間における汚染質拡散の典型例として受動喫煙の観点から、呼気域および室内空気質の検討を行う。人体呼気域の換気性状の評価には既存の換気効率指標を用い、これを構造的に検討する。

2. 解析対象 (図1)

空調方式として冷たい空気を床面近くに低速に供給し、室内熱負荷により加熱された空気を天井面近くで排出する置換換気方式を検討する。人体は立位としてその人体間隔を表1に示す通り、2 TYPE 設定する。同一室内で1人体のみの解析を行う場合と室内気流性状^{*1)}がほぼ同様となるよう、吹出風速・吹出温度を変えず、吹出口・吸込口の形状を変化させ風

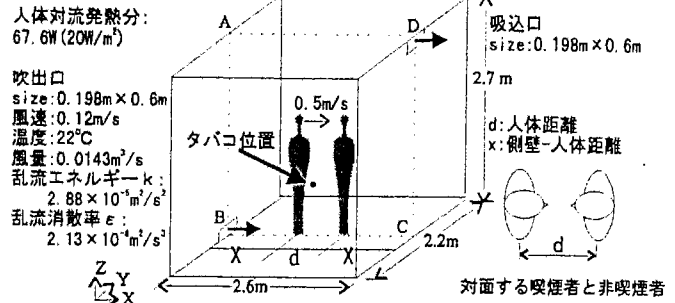


図1 解析対象 (静穏環境)

表1 計算 CASE

	d:人体距離	備考	流れ場
TYPE1	1.3m	オフィスにおける事務作業時の距離	図3 (1)
TYPE2	0.6m	会話時などの近接した場合の距離	図3 (2)

量を2倍にして計算を行う。両人体は対面する関係とする。(呼出煙による)受動喫煙を想定したケースにおいては、指先端高0.615mでタバコの発熱量として4.3Wを与える。

3. 計算概要

流れ場解析は Launder-Sharma 型の低 Re 数型 $k-\epsilon$ モデル (3次元) を用いて行う。総メッシュ数は 179,104。生理発熱による人体からの対流熱伝達量は $20W/m^2$ 。その他詳細は既報^{*3)}

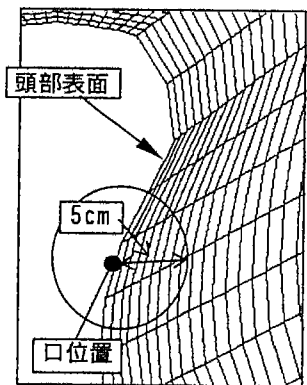
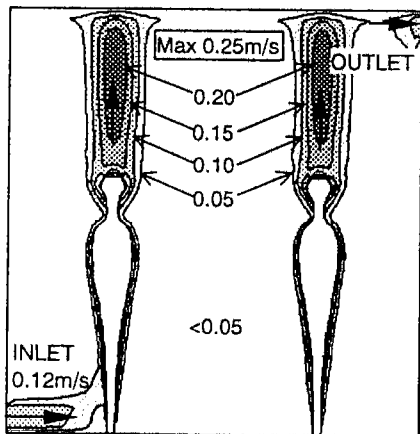
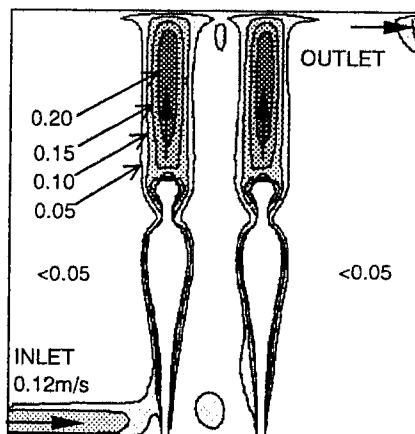


図2 呼気域範囲



(1) TYPE 1 (m/s)



(2) TYPE 2 (m/s)

図3 スカラー風速分布

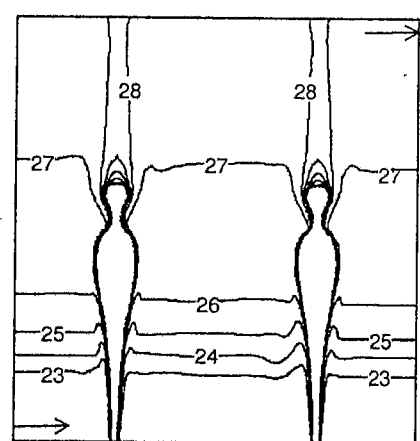


図4 温度分布 (°C) (TYPE 1)

を参照。喫煙を想定したケースでは、口からの吹出風速を 0.5m/s とする。高風速 4.0m/s で吹き出す場合については現在計算中^{注1)}。

4. 呼気域の定義 (図2)

人体が一回に吸入する空気の範囲を呼気域とするが、その範囲を詳細に定義することは困難である。既往の研究では吸入時の気流速度が 0.25m/s 以上となる領域を呼気域と定義している^{文4)}。しかし、呼吸が非定常現象である事や、その範囲が人体熱上昇流の勢力範囲である事等から一概にこれを定義することは出来ない。本報では簡便のため、口位置から半径 5cm^{文5)} 以内に数値解析格子のセル中心が有る領域を呼気域としている。

5. 流れ場・温度場解析結果 (図3 (1)、(2)、図4)

流れ場は室全体として静穏であるが、人体近傍においてはその生理発熱による上昇流が顕著に生じる。今回解析した範囲内では2人体のそれが合成するような相互影響はなく、人体頭頂部で最大 0.25m/s^{注2)} となる。この空調条件では、1人体のみが在室する場合と比べ、人体周辺・室全体のどちらにおいても流れ場・温度場に大きな差異はなく、温度成層により室内空気の上下方向の混合を抑制する置換換気方式の特徴がよく再現されている。

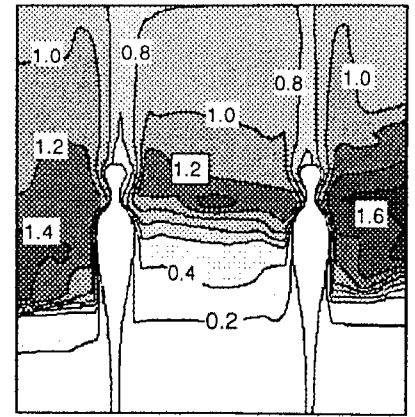
6. 濃度場解析

6.1 検討ケース (表2)

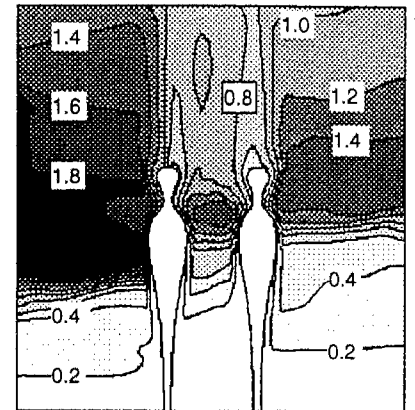
汚染質の発生場所を変えて、表2に示す各CASEに関してその室内濃度分布を解析する。CASE1では汚染質を室内一様発生させて濃度分布を求め、これを吸込口濃度で基準化し、それに対応する無次元空気齢^{文6)}を算出する。CASE2では、時間逆転させた流れ場において、CASE1の空気齢と同様に空気余命分布を算出する。CASE3はより具体的な汚染質発生源として、汚染源が床面にある場合。CASE4は汚染源としてタバコを想定し、喫煙者口(呼気域)から排出する呼出煙についてその拡散性状を解析する。全CASEにおいて汚染質はPassive Scalar Contaminantを仮定。

6.2 CASE1-室内一様汚染質発生する場合: 空気齢分布 (図5)

吹出口が床面付近にあるため、室内下部の空気齢は低い値を取る。人体周辺の空気齢は人体周辺の上昇流のため、下部からの新鮮な空気の誘引により比較的低い。表2に室内平均、呼気域平均の値を示す。TYPE1では下部の空気を上部に輸送する駆動力となる人体上昇流が室に均等に配され、ピストンフロー的となる置換換気の特徴が室全体で比較的均等に作用するため、TYPE2に比べ左右対称な分布となり、室全体の平均値も0.74と低い値になる。逆にTYPE2では、吸込口と反対側の領域で吸込口に吸引されなかった空気が人体両脇に下降するため、TYPE1より高い値を示す。呼気域における平均空気齢は、TYPE2右側(吸込口側)人体が最も低い値を示す。1人体が単独に在室する場合^{文1)}と比べてどの人体もこの呼気域の空気齢に大きな差異はないが、室内の平均空気齢では両TYPEとも1人体の場合(0.91)に比べて低い値(TYPE1:0.74, TYPE2:0.82)となる。

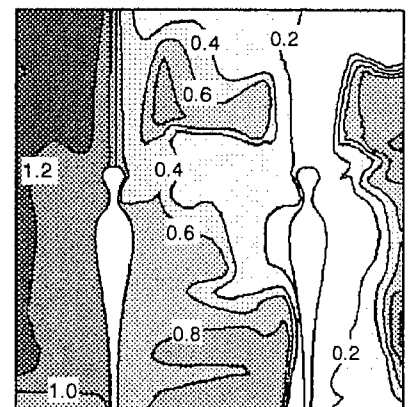


(1) TYPE 1

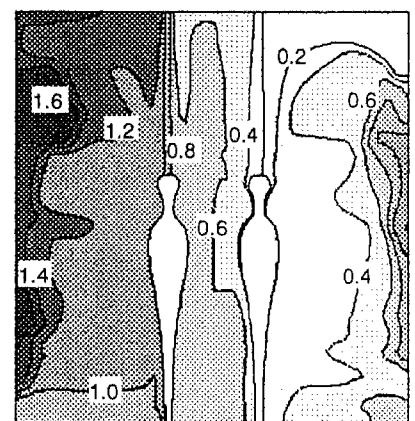


(1) TYPE 2

図5 空気齢分布(CASE1:濃度分布)



(1) TYPE 1



(2) TYPE 2

図6 空気余命分布(CASE2:濃度分布)

6.3 CASE 2-時間逆転気流場で室内一様汚染質発生する場合：空気余命分布（図6）

空気余命の室内平均は TYPE 1 において 0.74、TYPE 2 では 0.81 と、1 人体が単独に室に在室する場合の 0.91 と比べて低くなる。表 2 に示される様に吸込口側の人体の呼気域空気余命（タバコ呼出煙の室内滞在時間に相当）の値は TYPE1 で 0.22、TYPE2 では 0.37 と、吹出口側人体の呼気域空気余命が TYPE1 で 0.70、TYPE2 で 0.63 となるのと比較して、両 TYPE とも非常に小さい値を取る^{注3)}。呼気域空気余命は人体が吸込口に近いほど低い値となり、置換換気方式に置いても天井面付近の吸い込み口位置が汚染質発生人体位置に関係して重要となることを示唆している。

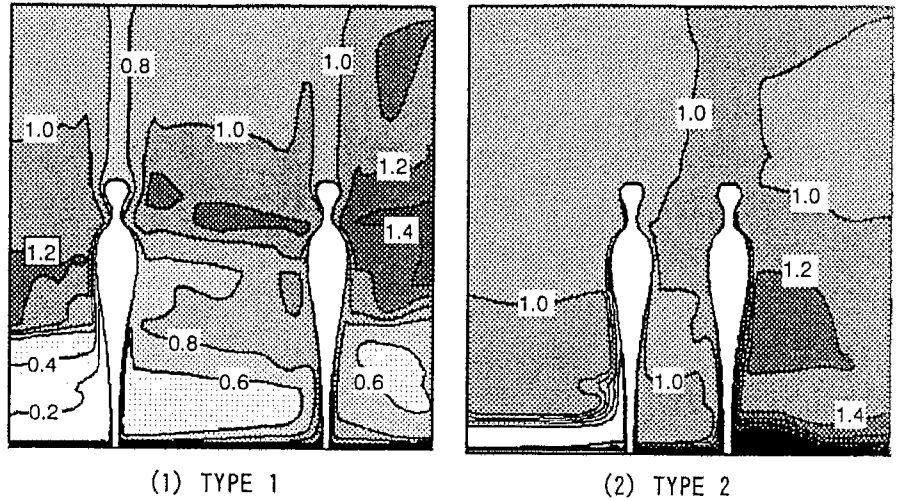


図7 濃度分布（床面から汚染質を発生：CASE 3）

6.4 CASE 3-床面一様汚染質発生する場合（図7）

汚染源が床面にあるとき、汚染質は人体生理発熱による上昇流により、上部へと輸送されるため、人体周辺は総じて高濃度となる。呼気域濃度も、両 TYPE において高い値をとる（表2）。特に TYPE 2 吸込口側人体においてはその呼気域で 1.07 と高い値をとっており、高い濃度の汚染質を吸引することになる。室内平均は TYPE 1 において

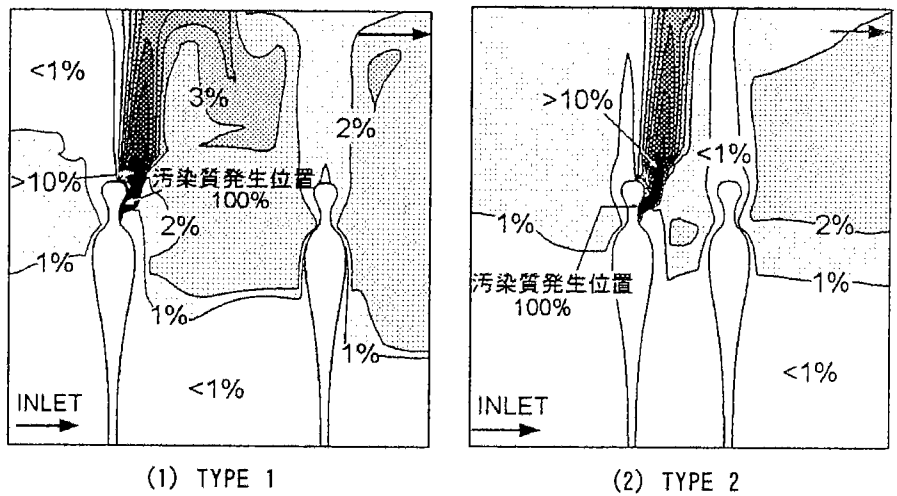


図8 喫煙（呼出煙）による汚染質の希釈率分布（CASE 4）

0.74、TYPE 2 において 0.94 であり、一人体が在室する場合の 1.06 より低い値となる。TYPE 2 においては、その分布や値は一人体の場合と類似している。これは、TYPE 2 では、2 人体の熱上昇流が近接しており、天井付近で TYPE 1 の様に一度天井に衝突した上

表2 呼気域・室全体における各値

TYPE No.	TYPE 1 (1.3m)			TYPE 2 (0.6m)		
	対象領域	呼気域		対象領域	呼気域	
CASE No.	室全体	左側人体	右側人体	室全体	左側人体	右側人体
CASE 1(空気齢)	0.74	0.50	0.65	0.82	0.55	0.47
CASE 2(空気余命)	0.74	0.70	0.22	0.81	0.63	0.37
CASE 3(床面一様発生)	0.74	0.73	0.95	0.94	0.92	1.07
CASE 4(主流煙)			1.2%			0.4%
PFR		0.058	0.059		0.061	0.060
V.F.		1.026	1.001		1.028	1.093

昇流がその後両者の中間で下降するというような傾向が見られないためである。

6.5 CASE 4-受動喫煙（図8）

汚染源としてタバコ呼出煙の場合を解析する。この場合、吸込口が遠い左側人体を喫煙者、吸込口に近い右

側人体を非喫煙者とした。両人体は向かい合っており、喫煙者は口位置から低風速 0.5m/s で煙(100%)を排出する。詳細は前報参照²⁾。口から排出された煙は人体上昇流の影響を顕著に受け、上部へと輸送される。又、非喫煙者は室下部から新鮮な空気を誘引しているため、呼気域において比較的低い値をとる。非喫煙者呼気域は、TYPE 1 では 1.2%、TYPE 2 では 0.4%となる。人体間距離が近いにも関わらず、Case 2 でより低い受動喫煙となるのは、口からの吹出風速が 0.5m/s 程度では基本的に室全体の流れ場に大きな変化は生じさせず、上述したように、TYPE 2 非喫煙者呼気域が最も低い平均空気齢をとり、新鮮空気を良く誘引しているためと考えられる。喫煙者と非喫煙者の位置を交換した場合に関しては現在計算中である。

7. 平均 V. F. (Visitation frequency)

Visitation frequency (訪問回数)とは、解析対象とする領域で発生した汚染質が一度排出された後、再度その領域に戻って存在する回数である。V. F. =1 は対象領域から発生した汚染質が、その領域に1回のみ存在すること、即ち発生してその領域から一度排出された後、再びその領域には戻らず室外に排出されることを示す⁵⁾。平均拡散場においても、その領域に出入りする汚染質フラックスの評価により V. F. を導出することが出来る。ここでは呼気域を対象領域と定義する。表2に示されるように、各領域において V. F. はほぼ1であり、この領域から発生した汚染質が再びここに戻ってくる可能性はほとんどない。即ち、呼出煙を排出した人体が、自己の排出した呼出煙を室内循環した後、再びこれを吸引する可能性は限りなくゼロに近い。

8. Purging Flow Rate (PFR)

PFR (Purging Flow Rate) は局所領域に対する実質的な換気空気の流入量 (または汚染質の排出量) を示す。室の換気量で基準化した呼気域の PFR は両 TYPE においていずれも約 0.06。この値は室床面積の 0.04%の断面積しかない呼気域の実質的換気量が室に供給される換気量の 6%相当もあり、効率的に呼気域が換気されていることを示す。汚染質の名目換気時間で無次元化した平均滞在時間⁴⁾は、上昇流の影響を強く受け、その値は 3.3×10^{-4} であり汚染質の排出が速やかである事が示されている。

9. 結論

①人体間距離が 60cm と狭くなる場合、2人体の間で下降する流れが打ち消され、1人体在室のときと類似した換気性状となる。②今回定義した呼気域においても人体の生理発熱による上昇流は、呼気域の空気清浄に大きな役割を果たす。しかし、呼気域の定義に関しては今後とも検討が必要である。③2人体が室に在室する場合、1人体が在室する場合と比較して、空気齢、空気余命ともに、室内平均値で低い値をとる。呼気域の空気齢は吹出口に近ければ低い値をとるという訳ではなく、人体配置に影響を受ける。呼気域空気余命は、吸込口に近い人体の呼気域でより低い値をとり、呼出煙による汚染質が速やかに排出される。④ PFR を用いて呼気域の局所換気量を算出した。⑤今後、人体上昇流が室内気流により大きな影響を受けると思われる室内混合型換気方式を用いた場合においても検討が必要である。

(注1) たばこ煙を口から排出する場合、その吹出風速は最大で 4.0m/s 程度の高風速である。(注2) 今回の計算において放射による影響は考えていないため、室内の温度成層を緩和する人体からの放射放熱、壁面での対流放熱というプロセスがなく人体上昇流がやや過大評価されている。放射を連成した場合において、上昇流は最大風速 0.23m/s となる。(注3) 今回、空気余命の計算では口からの吹き出しを考えていない。口からの吹き出しがある場合、その吹き出す風速によって空気余命も変化する可能性がある。(注4) PFR は下式で定義される。

$$PFR = \frac{Vol}{(平均V.F.) \times T_p} \quad \dots (1)$$

Vol: 対象領域体積、 T_p : 汚染質平均滞在時間

【参考文献】

- 文1) 村上、加藤、曾：数値サーマルマネキンに関する研究(その6) 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、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp. 676-680、1995. 10
- 文2) 林、村上、加藤、曾：受動喫煙に関する研究(その1)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp661-662、1997. 9
- 文3) 曾、村上、加藤：人体表面の対流熱伝達に関する CFD 解析、第8回数値流体力学学会シンポジウム、pp. 189-192、1994. 12
- 文4) Henrik Brohus, CFD simulation of personal exposure contaminant sources in ventilated room、Vol1. pp.215-226、Ventilation '97、Canada
- 文5) Carl Erik Hyldgaard, Human as a source of heat and air pollution、Roomvent'94、Krakow.
- 文6) 加藤、村上、小林：、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、pp. 701-704、1992. 10.