

# 隙間換気のある室内における人体による吸引空気性状の解析 Numerical Analysis on Air Quality of Human's Inhaled Air in Room with Infiltration

梁 禎訓, 東京大学大学院, 東京都目黒区駒場 4-6-1, E-mail: yangjh@iis.u-tokyo.ac.jp  
 加藤 信介, 東京大学生産技術研究所, 東京都目黒区駒場 4-6-1, E-mail: kato@iis.u-tokyo.ac.jp  
 村上 周三, 慶應義塾大学理工学部, 横浜市港北区日吉 3-14-1, E-mail: murakami@sd.keio.ac.jp  
 笠原 啓史, 慶應義塾大学理工学部, 横浜市港北区日吉 3-14-1, E-mail: hirofumin\_k@nifty.com  
 林 立也, (株)日建設計, 大阪市中央区高麗橋 4-6-2, E-mail: hayashit@nikken.co.jp  
 Jeong-Hoon YANG, Graduate Student, University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo.  
 Shinske KATO, I.I.S., University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo.  
 Shuzo MURAKAMI, Keio Univ. 3-14-1 Hiyoshi Kouhoku-ku Yokohama.  
 Hirofumi KASAHARA, Undergraduate Student, Keio Univ. 3-14-1 Hiyoshi Kouhoku-ku Yokohama.  
 Tatsuya HAYASHI, Nikken Sekkei Ctd. 4-6-2 Koureibashi Chuou-ku Osaka

In this paper, inhaled air quality is examined with CFD. A modeled human body is placed lying in a room. It is ventilated with natural infiltration. Flow and temperature fields are analyzed by CFD using a standard k-ε model. Based on the predicted flow field, the age of supply air, the residual lifetimes of air and the scale for ventilation efficiencies (SVEs) in the room are also numerically calculated. The results of the CFD analysis indicate that the quality of the breathing air depends on the flow field around a human body.

## 1. はじめに

人体は絶えず代謝により発熱している。この人体発熱は室内の流れ場や温度場などに影響を与える。近年、シックハウスをはじめとした室内化学物質汚染問題の観点から、室内空気中の汚染物質を人体がどのように吸引しているのかを詳細に解明することが試みられている。本研究は、日本家屋の室内のように普段空調設備を使用しない空間を対象として人体が床、壁面等から放散された汚染質をどのように吸入するかを数値流体力学 CFD (Computational Fluid Dynamics) を用いて検討を行う。解析は冬季の隙間換気のある室内で就寝している人体の呼吸による吸入空気性状の詳細に検討し、人体が吸引する空気質の改善策を提案することを目的として行う。

本報では、普段の就寝状態である布団に寝ていることを想定して研究を行う。

## 2. 解析概要

### (1) 解析対象空間

解析対象の室内モデルは Fig. 1 に示す八畳間 (4m × 4m × 2.4m = 38.4m<sup>3</sup>) とする。人体が室中央の床上に就寝しているとして解析を行う。換気方式は建物の隙間を介して行われる隙間換気とし、床面の端から空気が低速で流入し天井面の端から流出するものとする。

### (2) CFD モデル概要

解析の概要を Table.1 に示す。流れ場は標準 k-ε モデル(3次元)により解析する。流れ場は対称性を有するので Fig.1 に示すように対称面 ABCD 断面の半分の領域の計算を行う。アルゴリズムは SIMPLE 法、解析スキームは風上スキームと陰解法を用いる。解析対象の空間メッシュ数は 207,670、表面メッシュ数は 27,850 である。人体モデルは Fig.2 に示すように実人体形状に布団を加えて作成する。

### (3) 境界条件概要

境界条件を Table.2 に示す。床と天井面の空気の通る隙間は幅 0.05m であり、総面積はそれぞれ約 0.395m<sup>2</sup> である。隙間風速は床と天井面の隙間それぞれ 0.0027 m/s と 0.00245 m/s の微風速を与える。

人体の呼吸量は別報<sup>文(1),(2)</sup>で報告したように定常吸気状態

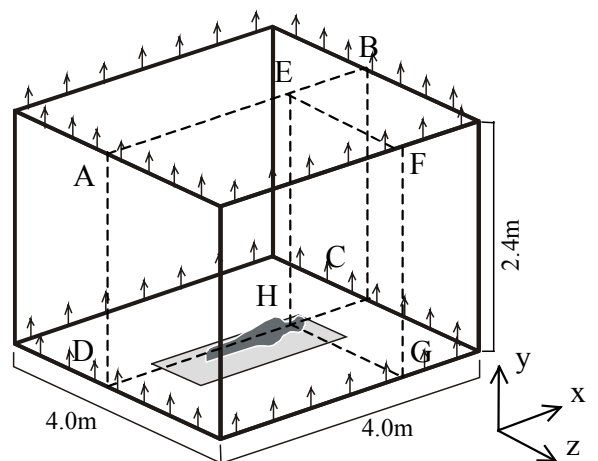


Fig.1 Room model

Table.1 Numerical methods

Turbulence Model	High-Reynolds Number k-ε Model
Algorithm	SIMPLE
Numerical Schemes	Space difference : up-wind method Time difference : Implicit
Grid System	Space grid : 207,670 cells Wall grid : 27,850 cells

を仮定して計算を行う。定常吸気量は 14.4 l/min<sup>(註1)</sup> である。鼻孔の面積を 0.6538 × 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup> とし、吸引風速は 1.8348 m/s とした。

全ての表面境界に関し、風速に対して一般化対数則 (Generalized log law) を適用して境界条件を定めた。温度の境界条件に関しては室内表面は断熱とする。就寝状態の人体モデル (布団表面) は全対流熱伝達量 33.8[W] を人体モデル (布団表面) に分布を考慮して分配し対流熱伝達量 [W/m<sup>2</sup>] を与える。この分布は Fig.3 に示すように、実際にサーマルマネキ

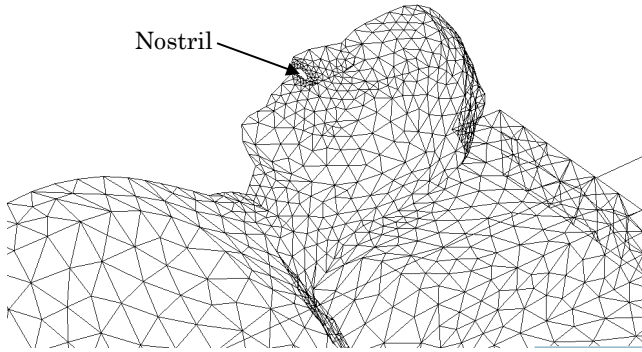


Fig.2 Model of Sleeping Human

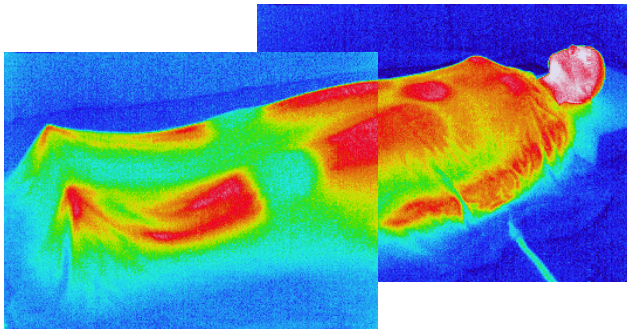


Fig.3 Distribution of surface temperature in thermal manikin of sleeping state

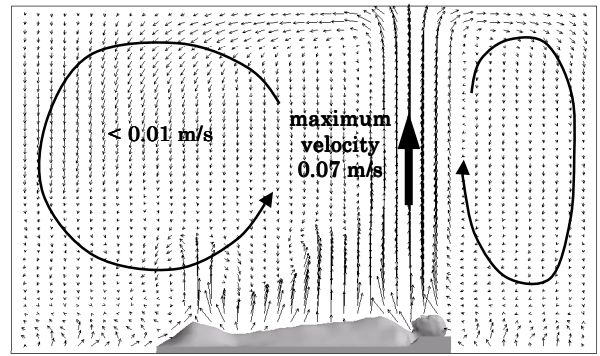
Table.2 Boundary conditions

Infiltration Opening	$U_{in} = 0.0027 \text{ m/s}$ , $T_{in} = 1$ Turbulence Intensity : 10% Length : 0.05m Area : $0.395 \text{ m}^2$ Infiltration length : 0.05m
Exfiltration Opening	$U_{out} = 0.00245 \text{ m/s}$ Turbulence Intensity : 10% Length : 0.05m Area : $0.395 \text{ m}^2$ Exfiltration length : 0.05m
Inhalation	$U_{out} = 1.8348 \text{ m/s}$ Inhaled air volume : 14.4 l/min Turbulence Intensity : 10% Length : 0.01m Area : $0.6538 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Air Change Rate	0.2/h
Wall Boundary	All surface : no-slip, Generalized log law Room's surface : Adiabatic $T_{wall} = 0$ Human's Surface : Human's Metabolic Rate: 0.7met (Convective heat transfer rate from the body surface:33.8W)

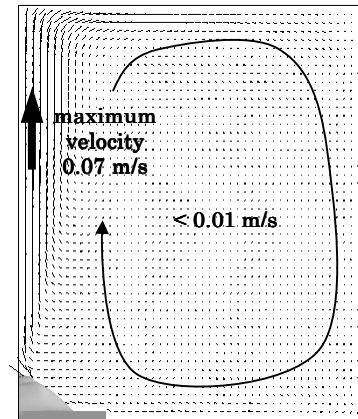
ンを布団に寝かせて就寝状態(代謝量 0.7 [Met])の頭熱放散量を与えて実験を行い、サーモビューアーにより布団上の温度分布を計測し、これに基づいて与えた。

### 3. 換気効率指標

室内の換気性状は加藤<sup>(3)</sup>が提案した換気効率指標



(a) ABCD Section



(b) EFGH Section

Fig.4 Velocity vector

SVEs(Scale for Ventilation Efficiencies)を用いて評価する。

#### (1) 空気齢 : SVE3

空気齢は室内に導入された新鮮空気がある点に到達するまでの時間に対応する。

#### (2) 吸気勢力範囲 : SVE5

複数の吸込み口を持つ室内において、各吸込み口の室内空間での勢力範囲を評価する指標であり、数字(%)はその部分の空気のうち検討している吸込み口を經由して排出される割合を示す。本研究では、吸気している鼻孔を吸込み口に見立て、人体が吸気する範囲(領域)を評価する。

#### (3) 吸気余命 : SVE6

空気余命は空気が空間のある点を通過してから室内から排出されるまでの時間に対応する。空気が吹き出し口から供給され排出されるまでの時間を滞在時間とする。

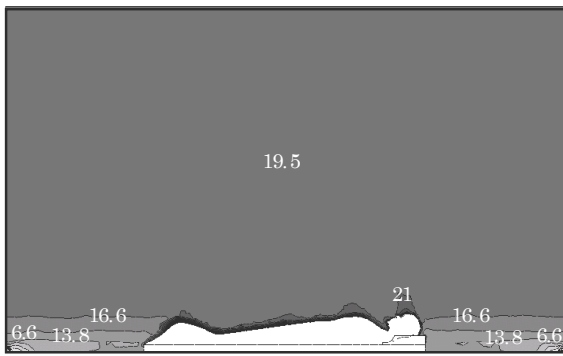
#### (4) 汚染質の濃度分布

解析空間である面に汚染質を発生させ、室内や吸気勢力範囲における濃度分布を確かめる。

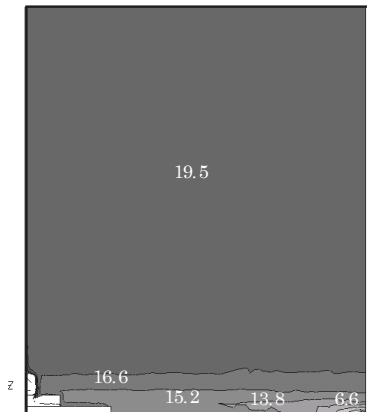
## 4. 解析結果

### (1) 流れ場

流れ場はFig.4に示すように、室内全体的に静穏な分布である。しかし、人体周辺は人体の生理発熱により最大 0.07[m/s]の上昇流が顕著に見られる。このような結果は別報<sup>(1),(2)</sup>で報告した臥位時の最大上昇流 0.16[m/s]より小さめになっている。また、別報では胸の上に強い上昇流が生じていたが、本研究では頭の上に強い上昇流が形成されている。このような差異は、布団に小さい対流熱流束[W/m<sup>2</sup>]を与え、頭には布団より相対的に大きい対流熱流束[W/m<sup>2</sup>]を与えたため、熱上昇

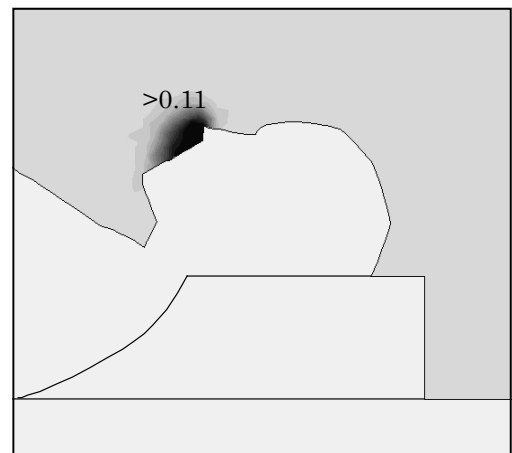


(a) ABCD section

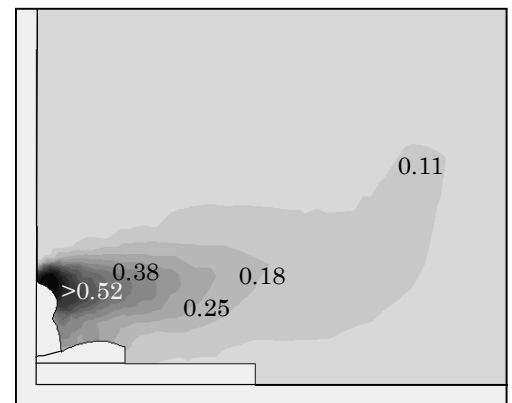


(b) EFGH section

Fig.5 Distribution of air temperature

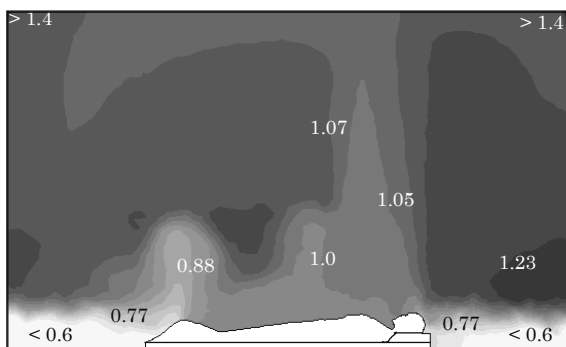


(a) Enlarged of ABCD section

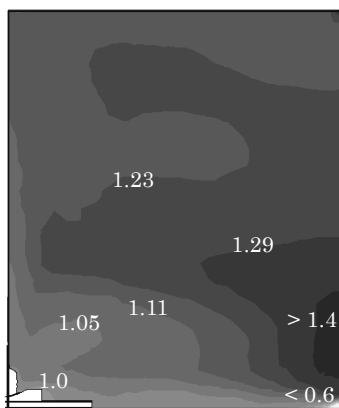


(b) Enlarged of EFGH section

Fig.7 Distribution of inhaled air region : SVE5



(a) ABCD section



(b) EFGH section

Fig.6 Distribution of age of air : SVE3

流が胸の部分ではなく頭の部分で強く発生したものと思われる。

人体から発生した上昇流は天井にぶつかって天井面に沿って空間を循環している。天井にぶつかる風速は0.02~0.04 [m/s]であり、循環流は0.01[m/s]以下である。そして、床の隙間から流入される空気は循環流とともに床面に沿って人体に誘引される。

#### (2) 温度場

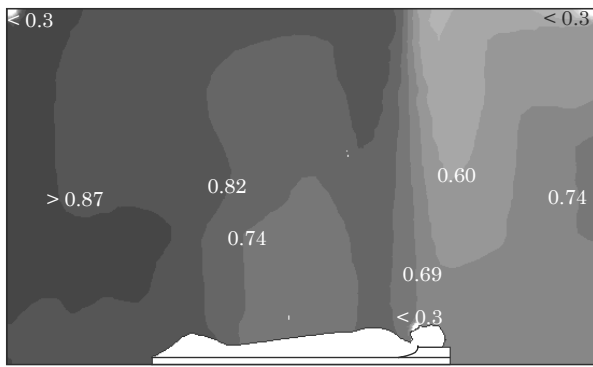
Fig.5に示すように、床面の端から1の冷たい空気が流入され、相対的に高温となる人体周辺にまで温度拡散される。この結果、温度勾配が激しく薄い温度成層が形成されている。人体の生理発熱のため、人体は約21の空気成層に囲まれ、煙突効果により人体発熱が上部に輸送される。人体の上部空間の温度は約19.5である。

#### (3) 空気齢 : SVE3

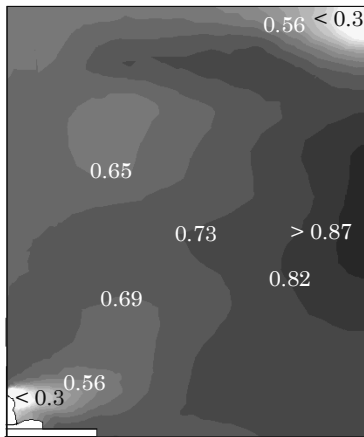
SVE3の方法で、汚染質を室内に瞬時一様拡散させる場合、汚染質の濃度分布は吹出し口の空気齢分布に対応する。この濃度分布を名目換気時間(換気回数の逆数)で無次元化した空気齢分布をFig.6に示す。Fig.6(a)では空気齢0.6以下が人体近くまで分布しているが、Fig.6(b)では隙間近傍のみ分布を見せている。鼻近傍の空気齢は約1.0となっている。本研究の名目換気時間は約5時間であるため、鼻の近傍の空気は隙間から流入されて約5時間が経ってから鼻に吸込まれることを意味している。人体の熱上昇流により、隙間から流入された新鮮空気が室内の上部に輸送され徐々に高齡化する。

#### (4) 吸気勢力範囲 : SVE5

Fig.7に示すように、鼻から吸込んでいる吸気領域は鼻の付近から枕横の周辺に広がっている。この結果では別報<sup>(1),(2)</sup>



(a) ABCD section



(b) EFGH section

Fig.8 Distribution of residual life time of air

で報告した臥位状態で口から呼吸するモデルとの差異が見られる。口で呼吸する場合は、口が天井に向かっており、頭上部や鼻の横側から誘引された空気を吸込む。しかし、鼻の場合は呼吸口が胸の方に向かっており、枕横の周辺に広い範囲に渡って吸気勢力範囲が形成されている。

(5) 空気余命：SVE6

天井の隙間と鼻孔による空気余命を Fig.8 に示す。鼻孔による空気余命は吸気勢力範囲の分布とほぼ同様な様子を見せている。頭側の空気余命は足側に比べて小さい値を示している。これは熱上昇流により輸送された空気を排出させる隙間との距離が、足側より頭側ほうが相対的に近いためである。

(6) 室内の汚染質濃度分布

室内に汚染源を配置して、汚染源から発生する汚染質の室内濃度分布を解析する。汚染源の配置は Fig.9 に示すように人体横の床面 (F01)、人体頭側の壁面 (W01)、人体足側の壁面 (W02)、人体横の壁面 (W03)、天井面 (C01) の5つとする。

人体横の床面 (F01): Fig.10

汚染源の発生位置は人体横の床面上 (F01) である。汚染質は人体の熱上昇流により隙間から誘引される気流に乗って呼吸領域まで運ばれている。人体呼吸域での汚染質の濃度は0.40にまで達している。

人体頭側の壁面 (W01): Fig.11

汚染源の発生位置は人体頭側の壁面 (W01) である。人体呼吸域の鼻付近の汚染質濃度は0.04~0.05となっており、壁面にある汚染源の影響がほとんどないことが分かる。頭側の強い熱上昇流により頭側に発生した汚染質は呼吸領域までの接近が困難となっている。

人体足側の壁面 (W02): Fig.12

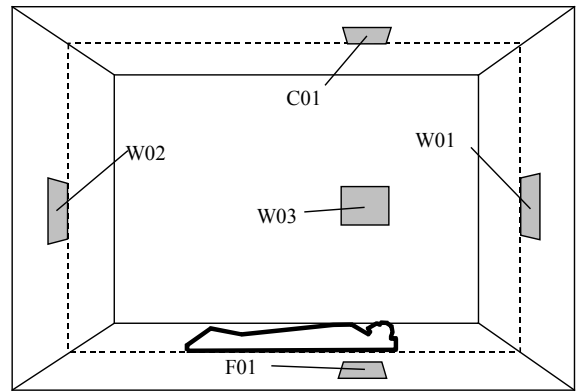


Fig.9 Placement of Pollution Sources

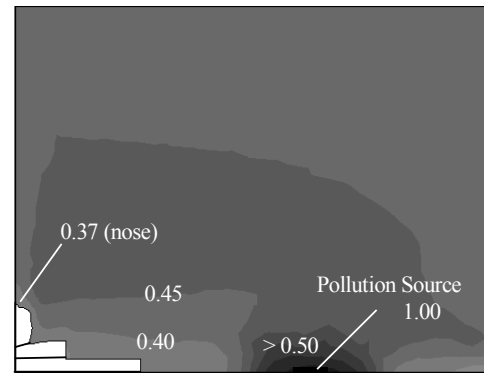


Fig.10 Distribution of Contaminant (F01) (Enlarged of EFGH section)

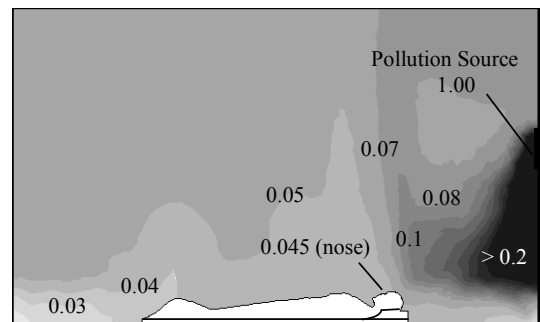


Fig.11 Distribution of Contaminant (W01) (ABCD section)

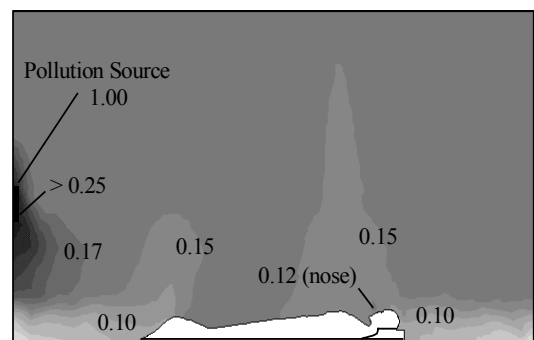


Fig.12 Distribution of Contaminant (W02) (ABCD section)

汚染源の発生位置は人体足側の壁面 (W02) である。人体呼吸域での汚染質の濃度は約 0.12 である。この値は Fig.11 での値よりも大きくなっている。これは人体足側の空気余命

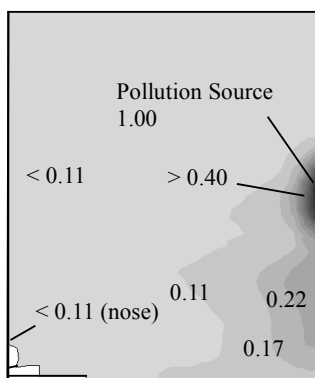


Fig.13 Distribution of Contaminant (W03)  
(Enlarged of EFGH section)

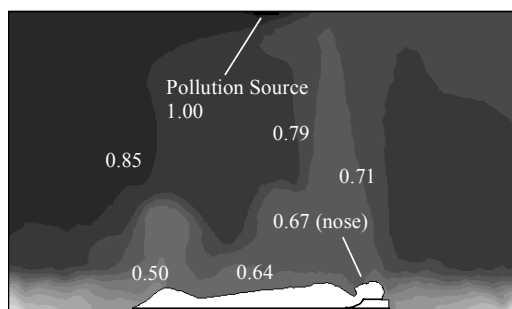


Fig.14 Distribution of Contaminant (C01)  
(ABCD section)

が頭側よりも大きいため、W02 で発生された汚染質の影響が W01 より大きくなっている。

人体横の壁面 (W03): Fig.13

汚染源の発生位置は人体横の壁面 (W03) である。人体呼吸域での汚染質の濃度は 0.11 以下となっている。循環流により汚染質が拡散されていて、人体呼吸域には直接の影響はあまりない。

天井面 (C01): Fig.14

汚染源の発生位置は天井面 (C01) である。この場合では、汚染質の室内への拡散が激しく全般的に高濃度分布が生じている。汚染質が天井にぶつかる人体の熱上昇流に乗って循環流とともに室内全般的に拡散されている。これにより人体呼吸域の汚染質の濃度は約 0.65 と大きい値を示している。

## 5. まとめ

隙間換気のある室内で就寝している人体の呼吸空気質について CFD 解析を行った。

人体の発熱により、最大 0.07m/s の熱上昇流が生じる。温度場は人体近傍まで約 15 の激しい温度勾配が生じ、温度成層が形成される。

鼻周辺の空気齢は約 1.0 を示す。

吸気勢力範囲は鼻の下部から枕周辺に分布する。

頭上部の空気余命が他空間に比べて相対的に低い値となる。

汚染質の人体呼吸域への影響の度合は、人体呼吸域と汚染源の位置との相対的な距離よりも、流れ場と汚染源の位置から決まる汚染質の拡散性状による。

(注 1) 呼吸量は酸素消費量 (活動量) から求まるが、ここでは別報(1),(2)と同様(Fig.15)、 $6.0 \frac{\text{ℓ}}{\text{min}}$  (呼吸回数は 10 回/min。すなわち  $0.6 \frac{\text{ℓ}}{\text{回}}$ ) 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。

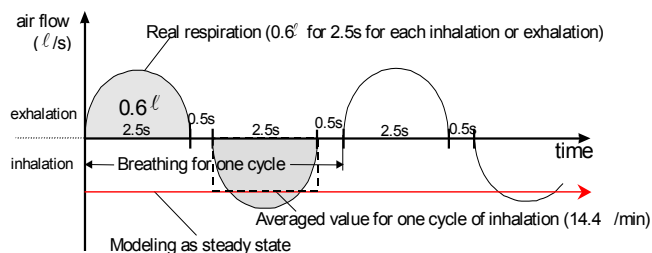


Fig.15 Modeling of respiration as steady state

## 参考文献

- (1) 林、加藤、村上、朱、“室内化学物質による呼吸空気質汚染の数値解析とその制御に関する研究(その 8)、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp13-16,2000.9
- (2) 林、加藤、村上、“静穏室内における人体の吸気領域に関する CFD 解析、日本建築学会計画系論文集、第 547 号、61-66、2001.9
- (3) Kato, S., S. Murakami, and H. Kobayashi. 1992. New scales for evaluating ventilation efficiency as affected by supply and exhaust openings based on spatial distribution of contaminant, ASHRAE, Room Air Convection and Ventilation Effectiveness: 177-186.
- (4) Sandberg, M, and M. Sjoberg. 1983. The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms, Building and Environment, 18:181-197.
- (5) Murakami, S., S. Kato, and J. Zeng. 1998. Numerical simulation of contaminant distribution around a modeled human body: CFD study on computational thermal manikin - Part , ASHRAE Transaction, 104: 226-233.