研究速報

静穏室内における個別汚染源の人体吸入空気汚染への寄与に関するCFD解析

CFD Analysis on Contribution Ratio of Pollution Source to Inhaled Air in a Room

林　立也*・加藤信介**・村上周三***
Tatsuya HAYASHI, Shinsuke KATO and Shuzo MURAKAMI

1. 序

室内で発生した汚染質は室内の空気流動に応じて，室外に直接排出される他，その一部分は人体に吸引される．人体は代謝放熱によりその周囲に上昇気流を伴っており，呼吸空気質はこの上昇流の影響を強く受ける．既報[文1)]では，この上昇流に伴う人体の吸入空気の経路を辿る，吸気勢力という指標を用いて人体の呼吸空気質を考察した．本報では，室内の様々な位置の汚染源の人体呼吸空気汚染への寄与を評価する指標を新たに定義し，CFDによる解析例を示す．

2. 汚染寄与率

室内汚染源対策を計画する時，室内汚染源が人体吸入にどの程度の係わりがあるかを評価することが重要となる．このような室内個別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．

① CRP 1（Contribution Ratio of Pollution Source 1）

CRP 1_i はある汚染源（i）の汚染発生量の内，どれだけの割合が人体に吸入されているかを示す値であり，(1) 式で定義される．

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

q_i ：汚染源（i）の人体汚染吸入量（mg/sec）

Q_i ：汚染源（i）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，室外へ排出されれば，人体に対する「汚染寄与率CRP 1」は0％となる．逆に，それを全て吸入すれば100％となる．

② CRP 2（Contribution Ratio of Pollution Source 2）

CRP 2_i 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．

$$CRP2_i = q_i / q_{total} \times 100\ (\%) \quad \cdots\cdots (2)$$

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

q_{total} ：汚染源全体からの総汚染吸入量（mg/sec）

3. 計算概要

3.1 解析対象

人体の汚染吸入に関する汚染源寄与率CRPは，室形状，換気方式，室内家具配置，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，換気，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．今回検討した解析対象モデルを図1に示す．空調方式は置換換気冷房方式

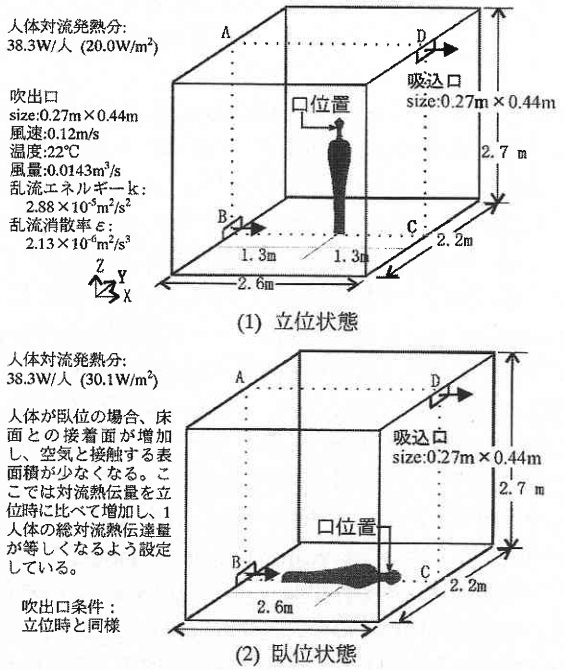


図1　解析対象

*東京大学生産技術研究所
**東京大学生産技術研究所　人間・社会大部門
***東京大学生産技術研究所　情報・システム大部門

(Displacement ventilation) とする[注1]．本報では，立位状態，臥位状態[注2]の人体に関して検討する．立状位態の人体は室中央部において，吹出口方向を向いて立ち（図1 (1)），臥位状態の人体は吹出口の影響が呼吸域に直接及ばないよう，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1 (2)）．

3.2 計算条件

計算の詳細は別報[文2]参照．流れ場解析は標準k-εモデル（3次元）による．人体表面において対流熱伝達量（立位状態：20.0 W/m^2，臥位状態：30.1 W/m^2）[注3]を与える．吸気量は人体口位置で，定常的に14.4リットル/min[文3, 注4]吸入とした．これは，室の換気量（855リットル/min）の1.7％である．流体解析のための格子点数は立位時で157,841，臥位時で142,347とした．

4. 計算結果

4.1 流れ場解析

4.1.1 立位状態（図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生じている．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．

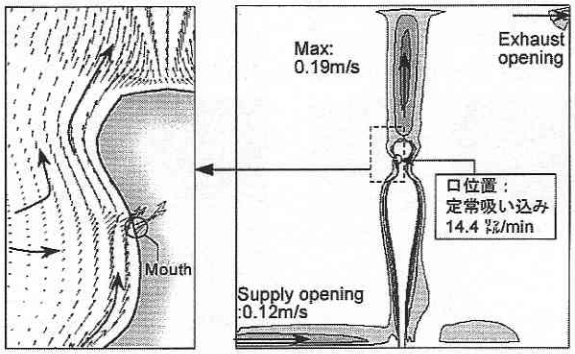
4.1.2 臥位状態（図3）

流れ場は立位時と同様に，室全体としては静穏であるが，人体近傍では自然対流による浮力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．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．

4.2 汚染源寄与率CRP1（図4）

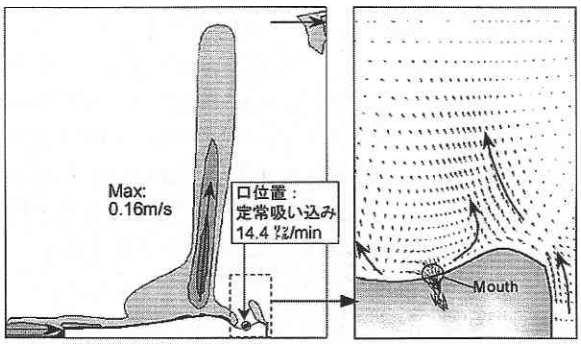
4.2.1 立位状態（図4 (1)）

図4に示す床面（F 01～06），壁面（W 01～14），天井面（C 01～06）の小領域は汚染発生源の位置を示しており，（）内の値が小領域のCRP 1を示している．CRP 1解析はそれぞれの発生源位置から個別に汚染質を発生させた室内汚染質拡散性状解析をそれぞれ実行することにより行っている．置換換気された室内において，CRP 1の分布は室上部と室下部の2層に分かれる．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F 05が汚染源である場合の濃度分布を図5 (1)，(2) に示す[注5]．この場合，発生した汚染



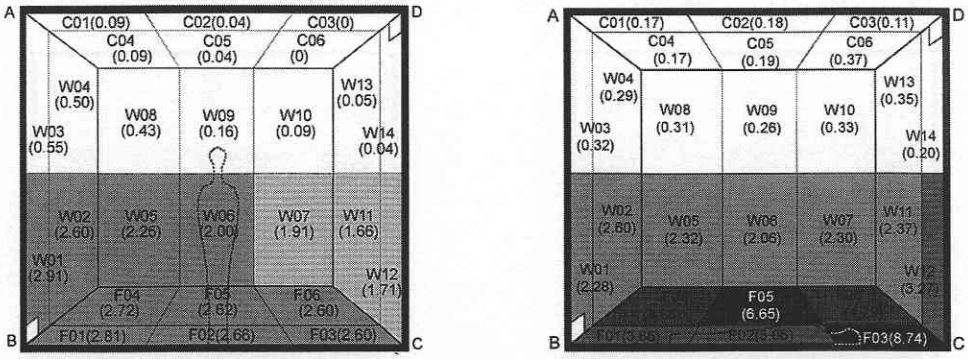
(2)ベクトル風速分布（拡大図）　(1) スカラー風速分布 (m/s)

図2　立位時の風速分布（ABCD鉛直断面）



(1) スカラー風速分布 (m/s)　(2) ベクトル風速分布（拡大図）

図3　臥位時の風速分布（ABCD鉛直断面）



(1) 立位状態　(2) 臥位状態

図4　各小要素の位置と汚染寄与率CRPI（解析対象の半分を表示）
（上段の記号は汚染発生源位置を，下段の括弧内の数値はCRPIを示す．）

質は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，それ程高い寄与とはならない．同様の傾向が他の床面から汚染質が発生した場合にも言える．側壁面（W 01 ～ W 14）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5（3）：汚染源位置W 12）も，室上部の側壁面から発生した場合も，人体は汚染源の直接的な影響はさほど強く受けない．また，天井面から汚染質が発生した場合（図5（4）：汚染源位置C 01）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，CRP 1は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い．

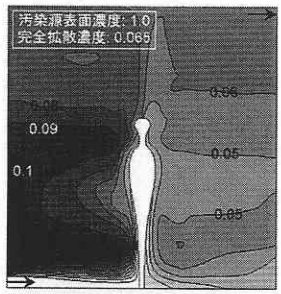
4.2.2　臥位状態（図4（2））

口の位置が床面付近の吸込口側壁面寄りにあるため，CRP 1の値に分布が生じる．床面のF 03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，CRP 1の値は8.74％と非常に高い値となる（図6（1），（2））．一方，F 01，02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CRP 1は3～4％程度の値となっている．側壁面から汚染質が発生した場合，床面付近の空気を人体が誘引するため，室下部では2.06～3.27％と比較的高い値となるが（図6（3）），室上部の側壁面のCRP 1は非常に低い．また，天井面でのCRP 1は人体が立位状態の場合に比べ総じて高く評価される（図6（4））．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．

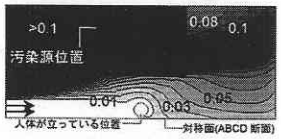
4.3　汚染寄与率CRP2（図7）

4.3.1　立位状態（図7（1））

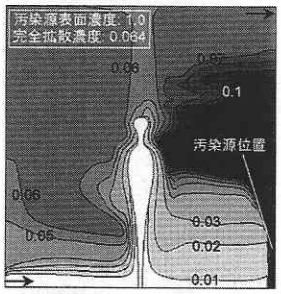
CRP 2は人体が口から吸引する総汚染質量の内，ある汚染発生源から発生した汚染質がどれくらい寄与しているかを示す指標である．ここでは直方体の対象室内の①床面，



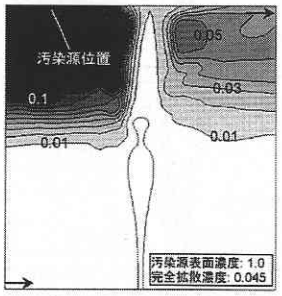
(1)汚染源 F05(ABCD 鉛直断面)



(2) 汚染源 F05
(床上 1cm 水平断面)

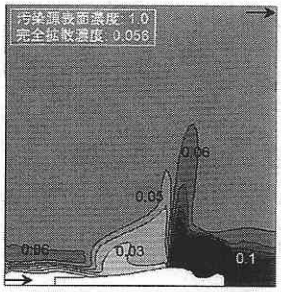


(3)汚染源 W12(ABCD 鉛直断面)

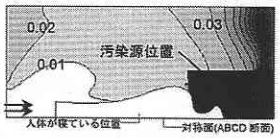


(4)汚染源 C01 (ABCD 鉛直断面)

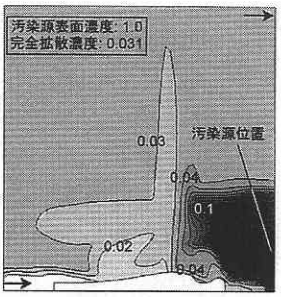
図5　濃度分布（立位）



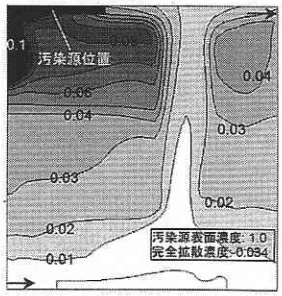
(1)汚染源 F03(ABCD 鉛直断面)



(2) 汚染源 F03
(床上 1cm 水平断面)

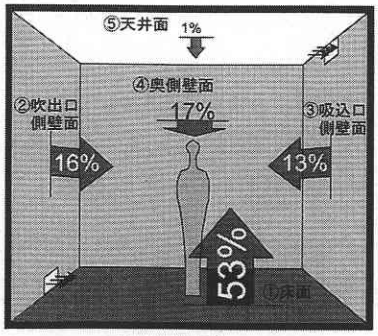


(3)汚染源 W12(ABCD 鉛直断面)

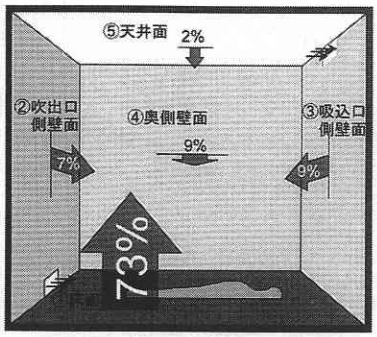


(4)汚染源 C01 (ABCD 鉛直断面)

図6　濃度分布（臥位）



(1) 立位状態



(2) 臥位状態

図7　汚染寄与率CRP2の分布

②吹出口側壁面，③吸込口側壁面，④奥側壁面，⑤天井面[注6)]をそれぞれ汚染源位置と設定し，各壁面のCRP 2を求める．立位の場合，床面①のCRP 2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．

4.3.2 臥位状態（図7（2））

臥位状態の場合，床面①のCRP 2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CRP 2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CRP 2は2％で立位時の場合と同様低い値となる．

5. 結　　論

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CRP 1と，(2) 個別汚染源の人体の総汚染質吸引量への寄与を評価する汚染寄与率CRP 2を提案し，置換換気方式で空調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例を示した．

② 立位状態において，CRP 1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．

③ 臥位状態において，CRP 1は吹出口や吸込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，CRP 2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吸気汚染を防ぐ事が示唆された．

注

注1）本報の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，本報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．又，臥位状態の人体に置いては，室内空気に接する体表面積が小さいため，総発熱量（33.8 W）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）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．又，今回の呼吸量は6.0リットル/min（呼吸回数は10回/min．すなわち0.6リットル/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．

注5）図5，6に示される濃度分布の値は，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拡散解析を行った空間濃度分布である．

注6）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．

謝　　辞

本研究の一部は，科学技術庁科学技術振興調整費（生活・社会基盤研究　生活者ニーズ対応研究「室内化学物質空気汚染の解明と健康・衛生居住環境の開発」）に基づいて設けられた建築学会学術委員会・室内化学物質空気汚染調査研究委員会（委員長:村上周三　東京大学生産技術研究所教授）の活動の一環として実施したものである．関係各位に深甚なる謝意を表する次第である．

（2000年11月13日受理）

参 考 文 献

文1）林，加藤，村上，高島：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4）姿勢の違いによる吸気勢力範囲の変化に関するCFD解析：空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，497–500, 1999.9.

文2）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7）個別汚染源の人体吸入空気汚染に関するCFD解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，895–896, 2000.9.

文3）温熱生理学，中山昭雄編，理工学社，1981.

文4）加藤，小林，村上：不完全混合室内における換気効率・温熱環境形成効率評価指標に関する研究（第2報）CFDに基づく局所領域の温熱環境形成寄与率評価指標の開発，空気調和・衛生工学会論文集，No.69, 39–47, 1998.4.