

複数の吹出・吸込がある室内における CFD による着目吹出口の 空気齢及び吸込口の空気余命の分布性状解析

CFD Analysis on Distribution of Age of Air from Supply Opening and Residual Life Time of Air to Exhaust Opening

加 藤 信 介*・梁 禎 訓*

Shinsuke KATO and Jeong-Hoon YANG

1. はじめに

室内空気の汚染性状の解析は、室内に清浄な空気が供給され、室内の汚染放散源に汚濁され、室外に排出されるまでの過程を詳細に検討するものである。この際、室内の任意の場所で、供給された空気が吹出口から供給された後、どの程度の時間経過を経てその場所に到着したかを示す空気年齢と、室外に排出されるまで後、どの程度の時間が残されているかを示す空気余命という概念が有効になる。

一つの吹出口から吹出された空気の年齢は、吹出空気にパルス状もしくはステップ関数的に混入されたトレーサガスの室内各点での濃度の時間変化を観察することにより算出される。これは室内に複数の吹出口が設けられている場合も同様である。複数の吹出空気それぞれに関して、同様の操作を行うことにより、それぞれの吹出空気の年齢を室内各点で個別に求めることができる。空気余命についても、任意の室内位置でトレーサガスをパルス状もしくはステップ関数的に注入し、各吸込口での濃度変化を観察することにより空気余命が算出される。

しかし、このような原理に沿った空気齢、空気余命の解析を実際に行い、室内での各吹出口、吸込口に対応する空気齢、空気余命の空間分布を求めることは、特に空気余命に関して容易ではない。室内における空気齢、空気余命の分布性状の解析に関し、加藤らは SVE3 (Scale for Ventilation Efficiency 3)、SVE6 として、室内でトレーサーを一様発生させる拡散場解析により容易に求められることを示した¹⁾。しかしながら、この方法は、各々の吹出口から吹出された空気、また各々の吸込口に吸込まれる空気を区別しないため、個別の吹出口や吸込口に対応する個別の空気齢や空気余命の空間分布を求めることはできない。

アンビエント域を全般換気・空調し、タスク域に個別に

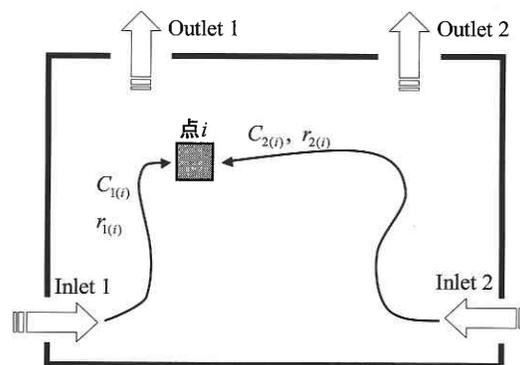


図1 各吹出口の空気齢

タスク換気・空調を行うパーソナル空調は、省エネルギーかつ室内居住者の快適性を向上させる有効な方法と期待されている。本方法は、室内での混合をあまり期待せず、必要な箇所だけ必要なだけの空気清浄度、温熱環境を調整するものであり、その分空間内の吹出空気や汚染物質の移動の性状把握が重要となる。その意味で各吹出口毎の空気齢や各吸込口毎の空気余命の解析は必須のものとなる。

本報では、各吹出、吸込口の各々に対応する空気齢及び空気余命の空間分布を簡易に解析する新たな換気指標 SVE3*、SVE6* を提案する。また、等温吹出パーソナル空調におけるパーソナルユニットの吹出、吸込口に対応する空気齢及び空気余命を詳細に解析する。

2. 各吹出口、吸込口の空気齢、空気余命分布の算出

室内における空気齢は、1式に示す濃度 C に関する輸送方程式で求められる C に対応する。

$$\frac{DC}{Dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C}{\partial x_j} \cdot u_j = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{v_i}{Sc} \right) \frac{\partial C}{\partial x_j} \right] + q_0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

この時、 q_0 は C の発生項であり、室内で一様である。濃度 C の分布は空気齢の分布に対応する。ここで図1のよう

*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門

な, 2つの吹出口, 吸込口のある室を想定する. この時, (i) 点の Inlet 1 と Inlet 2 の寄与率 (Inlet 1 から来た空気と Inlet 2 から来た空気の組成比) を $r_{1(i)}$, $r_{2(i)}$ と考えると, ある点 (i) の濃度すなわち空気齢 $C_{(i)}$ は

$$C_{(i)} = C_{1(i)} \cdot r_{1(i)} + C_{2(i)} \cdot r_{2(i)} \dots\dots\dots (2)$$

となる. これは (i) 点の空気齢 $C_{(i)}$ は Inlet 1 から空気の空気齢 $C_{1(i)}$ と Inlet 2 から来た空気の空気齢 $C_{2(i)}$ の重み平均であることを示す.

$$r_{1(i)} + r_{2(i)} = 1.0 \dots\dots\dots (3)$$

ここで2式を1式に代入, 整理し4式を得る.

$$\frac{\partial C_1 r_1}{\partial t} + \frac{\partial C_2 r_2}{\partial t} + \frac{\partial C_1 r_1 \cdot u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial C_2 r_2 \cdot u_j}{\partial x_j}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{v_i}{Sc} \right) \frac{\partial C_1 r_1}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{v_i}{Sc} \right) \frac{\partial C_2 r_2}{\partial x_j} \right] + q_0 r_1 + q_0 r_2 \dots\dots (4)$$

ここで, 4式は $C_1 r_1$ に関する輸送方程式, 5式及び $C_2 r_2$ に輸送方程式6の和で表される.

$$\frac{DC_1 r_1}{Dt} = \frac{\partial C_1 r_1}{\partial t} + \frac{\partial C_1 r_1 \cdot u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{v_i}{Sc} \right) \frac{\partial C_1 r_1}{\partial x_j} \right] + q_0 r_1 \dots (5)$$

$$\frac{DC_2 r_2}{Dt} = \frac{\partial C_2 r_2}{\partial t} + \frac{\partial C_2 r_2 \cdot u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{v_i}{Sc} \right) \frac{\partial C_2 r_2}{\partial x_j} \right] + q_0 r_2 \dots (6)$$

5式と6式により, 求められる $C_1 r_1$ 及び $C_2 r_2$ の和は1式の解であり, 室内の空気齢に対応する. 5式は1式と同様に, 微小空気塊の移流拡散移動に伴う濃度増加 (加齢) を示す. 但し1式と異なりその場における Inlet 1 から来た空気の組成比 r_1 を考慮し, 発生量, 濃度それぞれに r_1 の重みが付されている. r_1 は Inlet 1 から来た空気の有効体積率に対応している. その意味で5式は有効体積率 r_1 のポアスな流れ場における濃度輸送方程式に対応している. なお r_1 は SVE 4 すなわち Inlet 1 の寄与率として7式の拡散方程式において

$$\frac{Dr_1}{Dt} = \frac{\partial r_1}{\partial t} + \frac{\partial r_1 u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{v_i}{Sc} \right) \frac{\partial r_1}{\partial x_j} \right] \dots\dots\dots (7)$$

Inlet 1 において流入境界条件 $r_1 = 1.0$, 他の流入口は $r_1 = 0$ を与えて求められる. 吹出口 Inlet 1 の空気齢は $C_1 r_1$ の輸送方程式から求めた $C_1 r_1$ を r_1 で除することにより求まる. 本手法により求められる各吹出口に対応する空気齢を SVE 3 と区別し SVE 3* と定義する. なお寄与率 r_1 の値が小さい領域では C_1 の推定が悪くなる. 本報では寄与率 r_1 の値が 0.05 以下の領域では C_1 を算出しない. Inlet 2 に関

しても同様である. 空気余命に関しては, これを時間逆転した流れ場に適用することにより求まる. 各吸込口に対応する空気余命についても SVE 6 と区別し SVE 6* と定義する. なお本報では各吹出及び吸込口に対応する空気齢及び空気余命は名目換気時間 (換気回数の逆数) で無次元化して評価する.

3. 解 析 概 要

図2に示すパーソナル空調されるスペース内に着座する人体周辺の気流性状, 換気性状を検討する.

流れ場解析は標準 k-ε モデルに基づく CFD 解析により行う. k-ε 方程式の移流項には一次風上スキームを用いた.

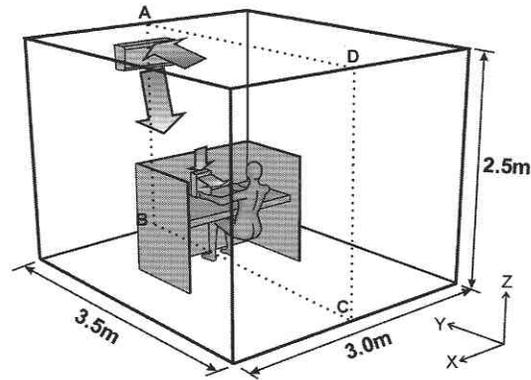


図2 解析対象空間

表1 境界条件

パーソナル空調	吹出口	$U_{P,in} = 0.5 \text{ m/s}$ $T_{P,in} = T_{P,out}$ 寸法: $0.2\text{m} \times 0.24\text{m}$ 風量: $0.024 \text{ m}^3/\text{s}$ 有効直径: 0.247 m
	吸込口	$U_{P,out}, T_{P,out}$: free slip 寸法: $0.2\text{m} \times 0.05\text{m}$
アンビエント空調	吹出口	$U_{A,in} = 0.81\text{m/s}$ $T_{A,in} = 24.0^\circ\text{C}$ 寸法: $0.05\text{m} \times 0.7\text{m}$
	吸込口	$U_{A,out}, T_{A,out}$: free slip 寸法: $0.05\text{m} \times 0.7\text{m}$
呼吸器(鼻) (吸入のみ)		$U_{N,out}, T_{N,out}$: free slip 吸気量(定常呼吸量): 14.4 l/min 面積: $0.146 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
表面		全ての表面: 一般化対数則 部屋の壁面, 家具面: 断熱 人体の皮膚面: 22.8 W/m^2
換気回数 (名目換気時間)注1)		約 7.26 回/h (約 0.14h)
換気量		$0.0524 \text{ [m}^3/\text{s]}$

注1) 名目換気時間: 換気回数の逆数

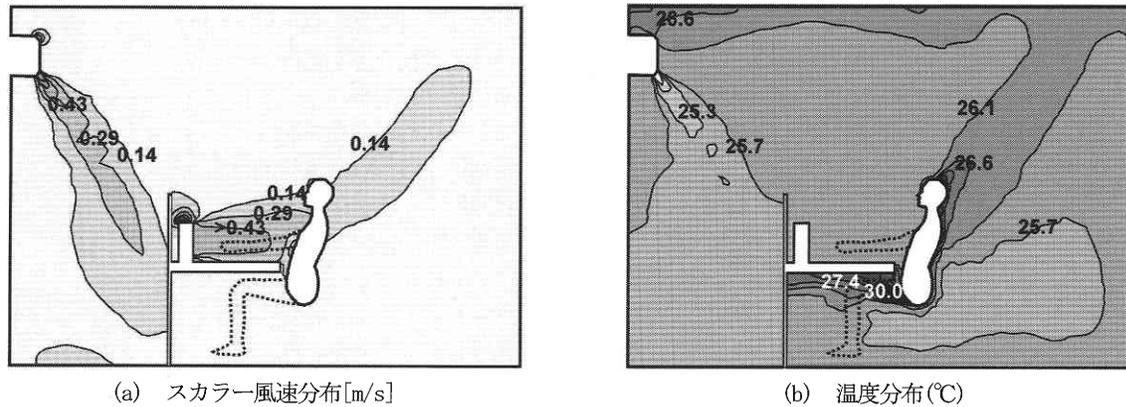


図3 室内のスカラー風速及び温度分布

境界条件を表1に示す。パーソナル空調の吹出温度はパーソナルユニットの吸込口温度と等しくし、等温吹出し気流となるよう設定する。人体の呼吸は定常吸気を仮定する。吸気は鼻から行い、定常吸気量は $14.4 \ell / \text{min}^2$ になるよう境界条件として与えている。全ての固体表面に関して、人体表面も含め風速に対して一般化対数則 (Generalized log law) を適用している。温度の境界条件として、部屋の壁面と家具面は断熱とする。人体モデル表面の発熱は対流熱伝達量の総量 ($33.8 \text{ W}/\text{人}$) を $22.8 \text{ W}/\text{m}^2$ として与える²⁾。パーソナル空調の吹出口から人体までの距離は吹出口有効直径の約3倍となる。

4. 換気効率の評価指標

換気効率指標は加藤らが提案した SVEs (Scale for Ventilation Efficiencies) と本研究で対案した新たな喚起効率指標 SVE 3*, SVE 6* を用いる。

- (1) 吹出口の勢力範囲 (SVE 4) : 複数の吹出口を持つ室内において、各吹出口の勢力 (具体的にはその点における各吹出口由来の空気の組成率) を評価する。
- (2) 吸込口の勢力範囲 (SVE 5) : 複数の吸込口を持つ室内において、各吸込口の勢力 (その点における各吸込口から排出される空気の組成率) を評価する。
- (3) 各吹出口の空気齢 (SVE 3*) : 複数の吹出口を持つ室内において、各吹出口に対応する空気齢である。
- (4) 各吸込口の空気余命 (SVE 6*) : 複数の吸込口を持つ室内において、各吸込口に対応する空気余命である。

5. 解析結果

5.1 室内のスカラー風速及び温度分布 : 図3

パーソナルユニットから 0.5 m/s の低風速で吹出され、

人体の顔周辺まで約 0.14 m/s の気流場が形成されている。人体の熱上昇流が頭後部に生じている。

人体の発熱で加熱された空気は浮力により室内の天井部に輸送され、アンビエント空調の吸込口から除去されている。この熱上昇流は、吹出風速の影響により風下側となる頭の後方向に形成されている。室内の上下温度差及び温度分布が約 1.0°C 以下で均一な環境となっている。また、アンビエント空調の吸込口からのリターン温度は約 26.3°C となっている。

5.2 アンビエント空調の効果 : 図4

人体の呼吸領域において、アンビエント空調の吹出口の勢力範囲は約 $0.3 \sim 0.1$ 程度以下となっている。呼吸領域の空気齢は約 0.9 である。人体の呼吸領域における吸込口の勢力範囲は約 0.6 程度であると、対応する空気余命は概ね 0.6 である。

5.3 パーソナル空調の効果 : 図5

パーソナル空調吹出口の人体の呼吸領域での勢力範囲は約 0.8 以上となっている。パーソナル空調吹出口からの空気齢は人体呼吸領域でも約 0.3 以下となっている。呼吸領域においてパーソナル空調の吸込口の勢力範囲は約 0.3 であり、空気余命は約 0.8 である。

6. ま と め

複数の吹出・吸込口が存在している室内において、各々の吹出口と吸込口の空気齢及び空気余命を評価する新たな換気効率指標 SVE 3*, SVE 6* の算出法を提案した。

この手法により、パーソナル空調の吹出、吸込口が人体の呼吸空気質に及ぼす影響を容易により詳細に評価することが可能となった。

パーソナル空調の吹出口は人体の呼吸領域に十分な勢力を持っており、低い空気齢を形成させ、人体が清浄な空気

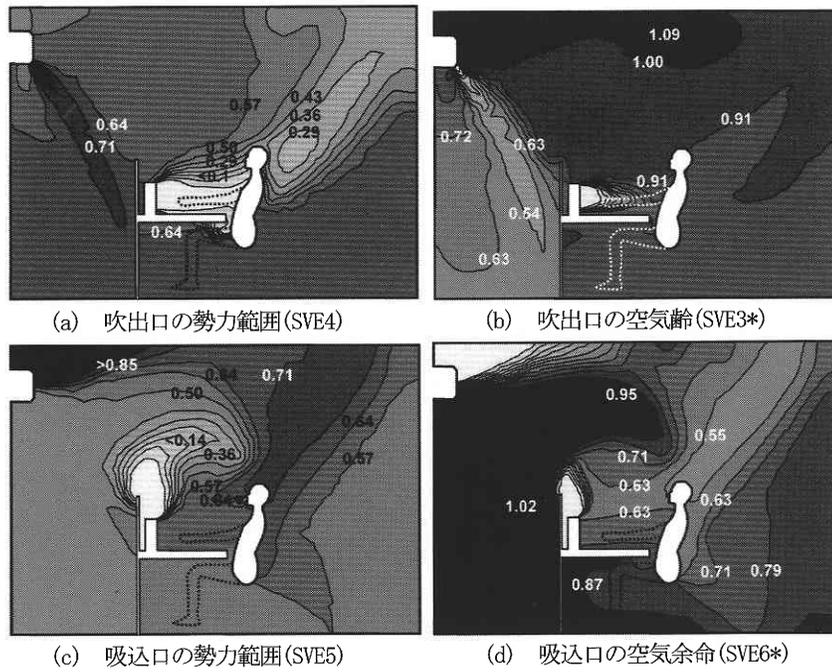


図 4 アンビエント空調の吹出口・吸込口

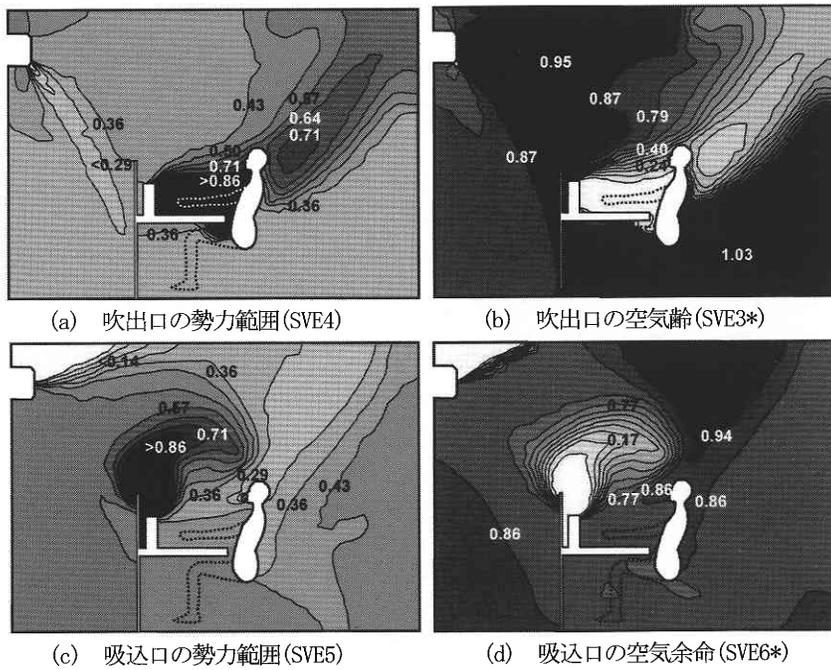


図 5 パーソナル空調の吹出口・吸込口

研 究 速 報

を吸引していることを SVE 3* により明確に確認した。

(2002 年 11 月 22 日 受理)

参 考 文 献

- 1) S. Kato *et al*: New Ventilation Efficiency Scales Based on Spatial Distribution of Contaminant Concentration Aided by Numerical Simulation, ASHRAE Trans. Vol. 94(2), 309-330, 1988.
- 2) 梁ら, パーソナル空調における人体の呼吸空気質の CFD 解析 (その 1) 等温吹出パーソナル空調における吹出風速の違いが人体の呼吸空気質に及ぼす影響, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 161-164, 2002. 9.
- 3) 加藤ら, パーソナル空調における人体の呼吸空気質の CFD 解析 (その 2) 複数の吹出・吸込がある室内における CFD による着目吹出口の空気齢及び吸込口の空気余命の分布性状解析, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 165-168, 2002. 9.