

## 事務室における空調方式と換気効率に関する検討

建物の空調・換気効率に関する研究 その1

RELATIONSHIP BETWEEN VENTILATION EFFICIENCY AND  
INLET-OUTLET SYSTEM OF OFFICE ROOMS

Air conditioning systems and ventilation efficiency in buildings Part 1

桑原亮一\*, 赤林伸一\*\*, 水谷国男\*\*\*, 佐藤英樹\*\*\*\*

Ryouichi KUWAHARA, Shin-ichi AKABA YASHI, Kunio MIZUTANI  
and Hideki SATO

In this paper, the relationship between ventilation efficiency and air outlets/return-intake systems are analyzed by experimental study with full-scale model and also by numerical simulation based on computational fluid dynamics(CFD).

1. In the case of heating system, air exchange indices calculated from age of air in the occupied zone are different largely according to the configuration of the inlet-outlet systems. In case of ceiling outlet/ceiling return-intake, air exchange indices are approximately 0.3; which is relatively low value compared with the other cases.
2. In the case of cooling system, increase of supply air rate from the floor-outlets/ceiling return-intake makes air exchange indices large value. But the indices decrease in the case of wall return-intake.
3. In case of ceiling outlet/ceiling intake system, when the difference of the supply air and room air temperature is higher, the value of indices have a tendency to decrease. On the other hand, the value of indices increase in the case of floor outlet/ceiling inlet system.

**keywords:** ventilation efficiency / air conditioning system / model experiment / numerical simulation / Computational Fluid Dynamics(CFD)

換気効率, 空調方式, 模型実験, 数値解析, 数値流体力学

## 1. はじめに

従来, 事務所ビルの空調設備において, 室内空気質の評価には, ビル衛生管理法<sup>1)</sup>で規制されている温度, 湿度, 気流, 一酸化炭素(CO), 二酸化炭素(CO<sub>2</sub>), 浮遊粉塵量が使用されており, 特に, CO<sub>2</sub>は室内空気質汚染の代表的指標とされてきた。しかし, 最近ではCO<sub>2</sub>基準値を越えていない場合にも, ビル衛生管理法の基準に定められていない微量の化学物質, 特に揮発性有機化合物(VOC)やホルムアルデヒドなどの汚染物質が在室者の健康に悪影響を及ぼす場合があることが報告されている<sup>2)</sup>。これは, 通常空調換気設計では, 室内瞬時一様拡散を仮定して行っているものの, 空調方式によっては, 発生した汚染物質が室内に偏在し, 結果として居住域において設計換気量が充足されないことが原因の一つになっている。近年の室内環境に対する利用者の要求の高度化, 多様化は, 空調・換気システムの設計においても, より詳細な性能評価の必要性を認識させるものである。すなわち, 室内環境を評価する上で, 従来の室内代表点だけでなく, 室空間における環境要素の分布状態を考慮した3次元の評価が求められている。

このような状況の中, 空気調和・衛生工学会規格”HASS102換気規準・同解説”<sup>3)</sup>の改訂が発表され, 換気効率を用いた換気設計が提案されている。この規格では, 換気効率の指標は基本

的には室内で一様に汚染物質が発生した場合の室内各点の汚染物質の濃度分布によって評価される。また, 村上らは, 数値解析を用いた濃度分布の計算手法<sup>4)</sup>や事務所ビルの換気効率の実測例<sup>5)~7)</sup>により室内の換気性状を報告している。この中では, 評価方法として, 各種室内における居住域の平均空気齢や居住域濃度の値を用いている。しかし, アトリウムなどの天井の高い空間では, 空間全体に対する居住域の割合が小さく, 一般の事務室に比べ, より効率的な換気設計が必要とされるが, 検討例<sup>8)</sup>も未だ少なく, 空調方式と換気効率に関する実用的なデータは十分とはいえないのが現状である。

本報では, 研究の第一段階として事務所を対象とした模型実験と数値解析により, 評価指標に居住域平均空気交換効率を用いて, 空調方式による違いによる換気性状を把握し, 室内換気設計のためのデータを体系的に整理する。さらに, この結果から, 事務室の推奨的な空調方式を提案することを目的とする。また, 次報においてアトリウムなどの天井の高い空間を対象として, 空調方式と居住域の換気効率の関係を検討し, 報告する予定である。

## 2. 居室模型実験による換気効率の測定

## 2.1 実験装置

実験には, 三建設備工業(株)つくば総合研究所大実験室内に設

\* 新潟大学大学院自然科学研究科 大学院生

\*\* 新潟大学大学院自然科学研究科 助教授・工博

\*\*\* 三建設備工業(株)つくば総合研究所 学博

\*\*\*\* 三建設備工業(株)つくば総合研究所 工修

Graduate Student, Graduate School of Science and Technology, Niigata University Assoc. Prof., Dept. Graduate School of Science and Technology, Niigata University, Dr. Eng.

Scientist, Dept. Tech. Eng., Sanken Setsubi Kogyo Co., Ltd., Ph. D. Scientist, Dept. Tech. Eng., Sanken Setsubi Kogyo Co., Ltd., M. Eng.

置した実物大の居室模型 (5,000mm<sup>D</sup>×3,600mm<sup>W</sup>×2,450mm<sup>H</sup>) を使用する。模型 (図1) は、断熱パネル (硬質ウレタンフォーム40mm) で作成され、吹出口や吸込口の種類、位置並びに吹出温度の変更が可能である。また、室内の熱負荷の模擬は、ペリメータ負荷として、壁面4に5所にパネルヒーターを、インテリア部分は100Wの発熱体を4ヶ所に配置し、冷房負荷を設定することができる。

## 2.2 実験方法

実験は室内各点の濃度がほぼ一定 (20ppm) になるまで、トレー

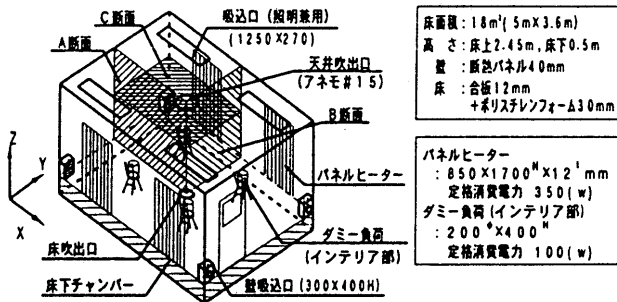


図1 実験に用いた居室模型の概要

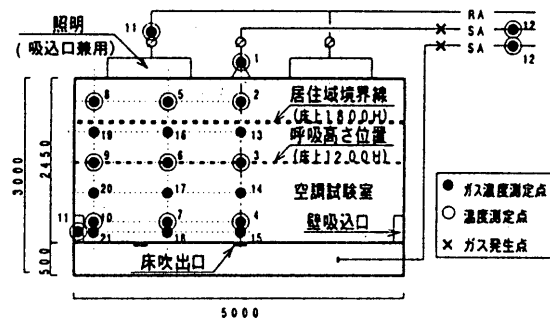


図2 居室模型A断面 (X-Z中央断面)

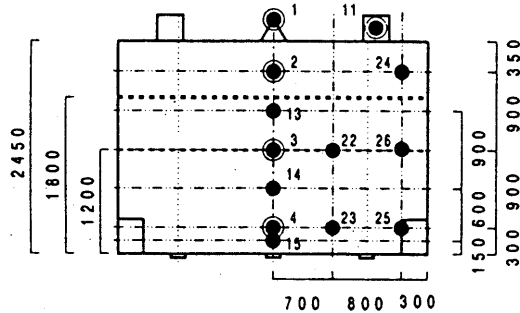


図3 居室模型B断面 (Y-Z中央断面)

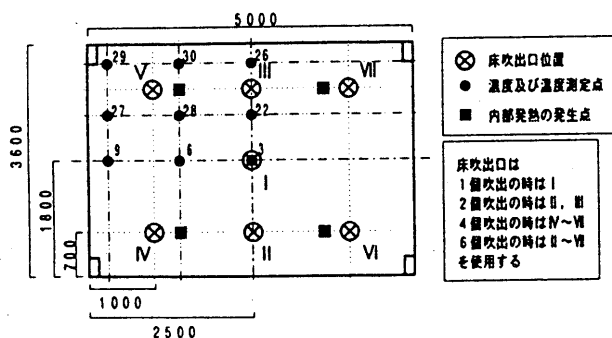


図4 居室模型C断面 (X-Y面: 床上高さ1,200mm)

サーガス (SF<sub>6</sub>) を一定の割合でサプライダクト内に注入しながら、室内各点の濃度変化を測定する (ステップアップ法)。その後、ガスの放出を止め、濃度減衰を測定する (ステップダウン法)。

ガス濃度の測定は、室内27点と吹出口、吸込口、及びサプライダクト内のガス注入位置上流の合計30点について5台のガスモニタを用いて行う。ガス濃度及び温度測定点を図2~図4に、実験に用いた機器を表1に示す。

## 2.3 実験ケース

実験ケースを表3に示す。実験は空調運転時を想定し、3種類の吹出口 (①天井水平吹出口 (アネモコーン下), ②天井垂直吹出口 (アネモコーン上), ③床吹出口), 2種類の吸込口 (①天井吸込口 (照明兼用) と②壁吸込口), 3種類の送風量 (①1.5m<sup>3</sup>/min, ②3.0m<sup>3</sup>/min, ③6.0m<sup>3</sup>/min) 及び2種類の吹出温度差 (①10℃差と②5℃差) を組み合わせて行う。ケースAは等温、ケースBは暖房時、ケースCは冷房時の実験である。次の1~6の数字は空調方式を示す。また-5は吹出温度差を5℃差, 他は10℃差とする。また,-D,-Fはそれぞれ基準風量1.5m<sup>3</sup>/minの2倍, 4倍とし,-DU,-HUは床吹出1個当たりの風量が基準風量1.5m<sup>3</sup>/minのそれぞれ2倍と1/2倍を示す。

吹出口は、実際の事務所ビルで使用されることが多いアネモ型吹出口を選定する。アネモ型吹出口はコーンを上下することによって、吹出風向を変えることが可能であり、冷房時は通常水平吹出 (コーン下: ①), 暖房時は通常垂直向下吹出 (コーン上: ②) に設定される。本実験では、コーンの上下の違いによる吹出 airflow 方向の影響が換気効率に及ぼす影響について検討する。

表1 実験に用いた機器

トレーサーガス	SF <sub>6</sub> (発生量 30cc/min~120cc/min)
ドーザー	マスフローコントローラ×1台 (小島製作所 MODEL3610)
サンプラー	ドーザーサンプラー (6ch用) ×4台 (B&K1303) マルチポイントサンプラー (12ch用) ×1台 (B&K1309)
ガス濃度計	マルチガスモニタ×4台 (B&K1302) シングルガスモニタ×1台 (B&K3425)

表2 実験による空気交換効率の算出方法

### 1. 局所空気齢: $\tau_p$

<StepUp法>

$$\tau_p = \int_0^{\infty} \left\{ 1 - \frac{C_p(t)}{C_p(tc)} \right\} dt \dots (1)$$

<StepDown法>

$$\tau_p = \int_0^{\infty} \left\{ \frac{C_p(t)}{C_p(tc)} \right\} dt \dots (2)$$

ここに、

$C_p(t)$ : ガス放出 (停止)  $t$  分後の各測定点のガス濃度 (ppm)  
 $C_p(tc)$ : 基準濃度 (ppm) = ガス放出量 (cc/min) / 換気量 (m<sup>3</sup>/min)

### 2. 局所空気交換効率: $\varepsilon_p$

$$\varepsilon_p = \frac{\tau_n}{\tau_p} \dots (3)$$

$$\tau_n = \frac{V}{Q} \dots (4)$$

ここに、

$\tau_n$ : 公称時定数 (min),  $V$ : 室容積 (m<sup>3</sup>),  $Q$ : 換気量 (m<sup>3</sup>/min)

### 3. 居住域平均空気交換効率: $\varepsilon_m$

呼吸域高さ平均空気交換効率:  $\varepsilon_{bh}$

$$\varepsilon_m = \sum_{n=1}^k \varepsilon_p(n) \times V(n) / V_m \quad \varepsilon_{bh} = \sum_{k=1}^k \varepsilon_p(k) \times A(k) / A_{bh}$$

ここに、

$V(n)$ : 床上1,800mm以下の図2の2,5,8を除く15点が受け持つ空間の体積 (m<sup>3</sup>)

$V_m$ : 居住域 (床上1.8m以下の空間) の体積 (m<sup>3</sup>)

$A(k)$ : 床上1.2mの図4の9点が受け持つ空間の面積 (m<sup>2</sup>)

$A_{bh}$ : 呼吸域 (床上1.2m以下の空間) の面積 (m<sup>2</sup>)

$n, k$ : 実測値の場合、実測点数を示す。

暖房負荷は、壁面及び天井面からの自然放熱を利用したため、吹出温度と吸込温度差は天井吹出と壁吸込でケース毎に異なる結果となった。しかし、各ケースにおいて、立ち上がり時間を十分に長くとり、試験室周囲の温度変化が小さい時期に測定を行ったため、測定中の吹出-吸込温度差はほぼ一定である。

冷房負荷は主に壁面のパネルヒーターで与え、吹出-吸込温度差が一定になるように制御する。

また、送風量は、1.5m³/min (90m³/h:換気回数約2回/h)、3.0m³/min (180m³/h:換気回数約4回/h)、6.0m³/min (360m³/h:換気回数約8回/h) の3段階に設定しているが、実際の風量としては、ステップアップ法で定常に達した状態における吹出口濃度(基準濃度)とトレーサガス注入量から算出した値を用いる。

表4 数値解析による空気交換効率の算出方法

乱流モデル：標準  $k-\epsilon$  モデル, マッシュ分割：図7) 参照  
 空間差分：移流項は Quick, 他は1次風上 時間差分：Simple 法  
 吹出口：アネモ (1個) 又は床吹出口 (1~6個)  
 (図6, 図7) 流入時の乱流エネルギー  $K_{in}=(U_{in}/10)^2$   
 吸込口：天井(照明兼用) 270W×1200L, 壁(ガラリ) 300W×400H  
 熱負荷：熱負荷は X-Z 面に均一発熱量を与え, 他の面については, 周囲温度(外壁及び天井外側は28℃, 床下は床下給気温度と室温(26℃)の差による貫流熱を考慮した。  
 熱貫流率：天井及び壁は 0.60W/m²℃, 床は 0.93W/m²℃ (床吹出時)  
 $\epsilon_p$  計算法：室内一様に総量  $m$  の汚染質を発生させたときの濃度  $C_p$  より,  
 $\epsilon_p = 1 / SVE3(p), SVE3(p) = C_p / C_s, C_s = m / Q$   
 ただし,  $Q$ : 送風量, SVE3: 村上, 加藤の換気効率指標 3  
 $\epsilon_m, \epsilon_{bh}$ : 各メッシュ毎に算出された  $\epsilon_p$  の値から表2. 3の式を用いてそれぞれ  $\epsilon_m, \epsilon_{bh}$  を求める。

表3 実験及び数値解析の条件と解析結果

ケース	実験条件											数値解析									
	吹出吸込方式		風量 [m³/min]	Co [ppm]	Ts [°C]	Ti [°C]	ΔT [°C]	ε <sub>m</sub>		ε <sub>bh</sub>		風量 [m³/min]	Vs[m/s]		Vr [m/s]	Ts [°C]	ペリメータ 負荷[W]	計算結果			
	吹出口	吸込						UP	DN	UP	DN		Vz	VH				ε <sub>m</sub>	ε <sub>bh</sub>		
等温	A1	天井7ヶ所	水平	天井	1.49	20.2	11.8	12.0	0.2	1.2	1.1	1.3	1.1	1.5	0.44	1.11	0.02	22.0	-	0.8	0.8
	A2	天井7ヶ所	水平	壁	1.44	20.8	8.7	9.1	0.4	1.2	1.1	1.1	1.1	1.5	0.44	1.11	0.05	22.0	-	1.0	1.0
	A3	天井7ヶ所	垂直	天井	1.59	28.9	9.1	10.5	1.4	1.0	1.2	1.0	1.3	1.5	0.88	0.28	0.02	22.0	-	1.1	1.0
	A4	天井7ヶ所	垂直	壁	1.37	22.0	9.4	10.2	0.8	1.0	1.3	1.0	1.3	1.5	0.88	0.28	0.05	22.0	-	0.9	0.8
	A5	床1個	-	天井	1.38	21.7	8.2	9.4	1.2	0.9	1.1	0.9	1.1	1.5	0.1~2.0	-	0.02	22.0	-	0.9	0.8
	A6	床1個	-	壁	1.35	22.2	8.7	9.9	1.2	0.9	0.9	0.9	0.9	1.5	0.1~2.0	-	0.05	22.0	-	1.1	0.9
暖房	B1	天井7ヶ所	水平	天井	1.37	21.8	31.1	18.0	13.1	0.4	0.3	0.3	0.3	1.5	0.44	1.11	0.02	32.0	-	0.3	0.3
	B2	天井7ヶ所	水平	壁	1.59	28.9	32.4	18.9	13.5	0.8	0.8	0.7	0.7	1.5	0.44	1.11	0.05	32.0	-	0.8	0.7
	B3	天井7ヶ所	垂直	天井	1.40	21.4	32.9	18.6	14.3	0.4	0.3	0.4	0.3	1.5	0.88	0.28	0.02	32.0	-	0.3	0.3
	B4	天井7ヶ所	垂直	壁	1.60	18.8	32.9	19.9	13.0	1.0	0.9	1.0	0.9	1.5	0.88	0.28	0.05	32.0	-	0.7	0.7
	B5	床1個	-	天井	1.54	19.5	32.0	20.1	11.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.5	0.1~2.0	-	0.02	32.0	-	0.9	0.8
	B6	床1個	-	壁	1.55	19.4	33.0	22.9	10.1	0.8	0.9	0.8	0.9	1.5	0.1~2.0	-	0.05	32.0	-	1.1	0.9
	B1-5	天井7ヶ所	水平	天井	1.46	20.5	22.2	17.1	5.1	0.2	0.3	0.2	0.3	1.5	0.44	1.11	0.08	27.0	-	0.1	0.1
	B2-5	天井7ヶ所	水平	壁	1.47	20.5	25.5	20.2	5.3	0.5	0.8	0.6	1.0	1.5	0.88	0.28	0.02	27.0	-	0.1	0.1
	B4-5	天井7ヶ所	垂直	壁	1.46	20.5	29.6	23.2	6.4	1.5	1.5	1.8	1.7	1.5	0.88	0.28	0.05	27.0	-	0.9	1.0
	冷房	C1	天井7ヶ所	水平	天井	1.55	24.3	20.5	27.8	-7.3	1.2	0.9	1.2	1.0	1.5	0.44	1.11	0.02	16.0	239.0	1.0
C2		天井7ヶ所	水平	壁	1.53	22.1	16.0	26.1	-10.1	1.1	1.1	1.2	1.1	1.5	0.44	1.11	0.05	16.0	239.0	1.0	1.0
C3		天井7ヶ所	垂直	天井	1.54	21.8	16.0	27.6	-11.6	1.1	1.0	1.2	1.1	1.5	0.88	0.28	0.02	16.0	239.0	1.0	1.0
C4		天井7ヶ所	垂直	壁	1.60	20.7	16.1	26.4	-10.3	1.2	1.1	1.2	1.1	1.5	0.88	0.28	0.05	16.0	239.0	0.9	0.9
C5		床1個	-	天井	1.50	24.2	23.0	33.8	-10.8	1.7	1.5	1.6	1.5	1.5	0.1~2.0	-	0.02	19.0	239.0	1.4	1.3
C6		床1個	-	壁	1.49	24.3	22.1	27.4	-5.3	1.5	1.2	1.5	1.3	1.5	0.1~2.0	-	0.05	19.0	239.0	0.9	1.0
C1-5		天井7ヶ所	水平	天井	1.47	14.7	21.0	26.8	-5.8	0.8	0.6	0.8	0.6	1.5	0.44	1.11	0.02	21.0	88.3	1.0	0.9
C2-5		天井7ヶ所	水平	壁	1.43	22.9	21.0	26.5	-5.5	1.2	1.1	1.2	1.1	1.5	0.44	1.11	0.05	21.0	88.3	1.1	1.0
C3-5		天井7ヶ所	垂直	天井	1.52	23.7	21.1	26.8	-5.7	1.2	1.1	1.3	1.1	1.5	0.88	0.28	0.02	21.0	88.3	1.0	1.0
C4-5		天井7ヶ所	垂直	壁	1.49	20.7	21.0	26.4	-5.4	1.2	1.0	1.2	1.1	1.5	0.88	0.28	0.05	21.0	88.3	0.9	0.9
C5-5		床2個	-	天井	1.48	24.7	24.9	30.1	-5.2	1.4	1.3	1.5	1.4	1.5	0.1~2.0	-	0.02	22.5	88.3	1.4	1.2
C6-5		床2個	-	壁	1.50	26.3	22.9	27.0	-4.1	1.4	1.2	1.5	1.3	1.5	0.1~2.0	-	0.05	22.5	88.3	1.2	1.1
C1-D		天井7ヶ所	水平	天井	3.05	20.2	15.8	26.4	-10.6	0.9	0.8	1.0	0.9	3.0	0.88	2.22	0.04	16.0	540.4	0.8	0.8
C2-D		天井7ヶ所	水平	壁	2.97	20.1	15.9	26.1	-10.2	0.9	0.8	0.9	0.9	3.0	0.88	2.22	0.10	16.0	540.4	1.2	1.2
C3-D		天井7ヶ所	垂直	天井	2.97	20.5	15.9	27.7	-11.8	0.9	0.9	0.9	1.0	3.0	1.76	0.56	0.04	16.0	540.4	1.0	0.9
C4-D		天井7ヶ所	垂直	壁	3.02	20.0	15.9	26.1	-10.2	0.9	0.8	1.0	0.9	3.0	1.76	0.56	0.10	16.0	540.4	0.8	0.8
C5-D		床2個	-	天井	3.00	22.4	17.9	31.7	-13.8	1.5	1.2	1.8	1.4	3.0	0.1~2.0	-	0.02	17.7	540.4	1.5	1.5
C6-D		床2個	-	壁	2.99	22.1	18.5	27.5	-9.0	1.1	1.0	1.3	1.2	3.0	0.1~2.0	-	0.05	17.7	540.4	1.4	1.4
C5-5D		床2個	-	天井	3.07	22.3	21.0	26.7	-5.7	1.4	1.2	1.6	1.3	3.0	0.1~2.0	-	0.02	21.9	239.0	1.4	1.4
C6-5D		床2個	-	壁	3.00	22.5	22.1	26.2	-4.1	1.1	1.1	1.3	1.2	3.0	0.1~2.0	-	0.05	21.9	239.0	1.4	1.4
C1-F		天井7ヶ所	水平	天井	6.07	18.2	15.9	25.5	-9.6	0.8	0.5	0.8	0.6	6.0	1.76	4.44	0.08	16.0	1143.2	0.8	0.8
C2-F		天井7ヶ所	水平	壁	6.02	18.6	15.7	25.7	-10.0	0.7	0.7	0.7	0.8	6.0	1.76	4.44	0.21	16.0	1143.2	0.7	0.7
C3-F		天井7ヶ所	垂直	天井	6.04	18.4	15.7	26.0	-10.3	0.8	0.7	0.8	0.8	6.0	3.52	1.12	0.08	16.0	1143.2	1.1	0.9
C4-F		天井7ヶ所	垂直	壁	6.02	19.4	16.1	26.3	-10.2	0.7	0.7	0.7	0.7	6.0	3.52	1.12	0.21	16.0	1143.2	0.8	0.7
C5-5F		床4個	-	天井	6.04	20.0	20.0	24.2	-4.2	0.9	0.8	0.8	0.9	6.0	0.1~2.0	-	0.08	21.5	540.4	1.1	1.1
C6-5F		床4個	-	壁	6.05	20.0	19.1	23.4	-4.4	1.1	0.9	1.0	1.1	6.0	0.1~2.0	-	0.21	21.5	540.4	1.3	1.2
C5-DU		床1個	-	天井	2.99	21.7	16.8	31.3	-14.5	1.2	1.1	1.2	1.2	3.0	0.20~4.0	-	0.04	17.7	540.4	1.1	1.1
C5-DU		床1個	-	壁	3.04	21.6	19.4	28.2	-8.8	1.2	1.1	1.2	1.0	3.0	0.20~4.0	-	0.10	17.7	540.4	1.1	1.1
C5-HU		床4個	-	天井	3.03	21.9	17.5	30.8	-13.3	1.7	1.6	0.9	1.1	3.0	0.05~1.0	-	0.04	17.7	540.4	1.5	1.3
C6-HU		床4個	-	壁	3.00	22.0	17.4	23.9	-6.5	0.9	0.7	0.4	0.4	3.0	0.05~1.0	-	0.04	17.7	540.4	0.5	0.3

注) 記号 Co: 基準濃度, Ts: 吹出温度, Ti: 室温, ΔT: 吹出吸込温度差, ε<sub>m</sub>: 居住域平均空気交換効率, ε<sub>bh</sub>: 呼吸高さ平均空気交換効率, UP: ステップアップ法, DN: ステップダウン法, Vs: 吹出風速, Vz: 吹出口鉛直方向の風速, VH: 吹出口水平方向の風速, Vr: 吸込口の風速 ケース番号 A, B, Cはそれぞれ等温, 暖房, 冷房. 次の1~6は空調方式を示す. -5は吹出温度差を5℃差, 他は10℃差を示す. また, -D, -Fはそれぞれ基準風量1.5m³/minの2倍, 4倍, -DU, -HUは床吹出1個当たりの風量が基準風量1.5m³/minのそれぞれ2倍と1/2倍を示す. メッシュサイズは天井アネモ, 床吹出1個の場合は, 37(x)×33(y)×35(z)他の床吹出の場合は, 50(x)×45(y)×35(z). ペリメータ負荷は X-Z 壁面に均一に与え, 他の壁面及び天井面については, 周囲温度と室内温度の差による貫流熱を考慮した。

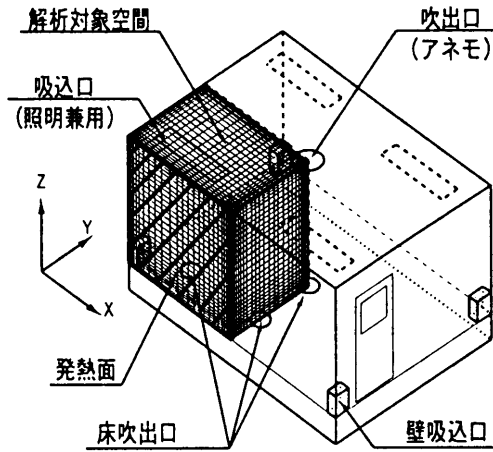


図5 解析対称モデル

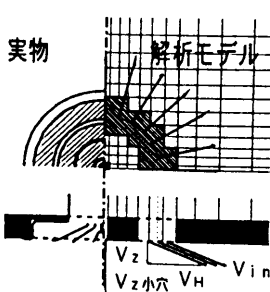


図6 天井吹出口モデル

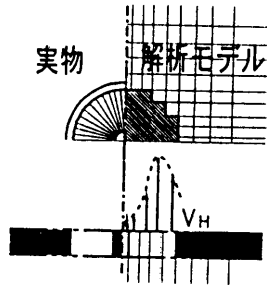


図7 床吹出口モデル

## 2.4 評価方法

計測されたガス濃度履歴から各点の局所空気交換効率 ( $\epsilon_p$ ) により室内の換気効率の分布を評価する。室内が完全混合の場合は、 $\epsilon_p$  は室内全領域において1となるが、完全混合でない場合には、室内に  $\epsilon_p$  の分布が生じる。

本報では居住域に限定した効率的な空調・換気効率を検討するという観点から、室内で活動する領域を床から1,800mmまでの間の空間を居住域と設定し、この居住域の局所空気交換効率の平均を居住域平均空気交換効率 ( $\epsilon_m$ ) とし、空調方式毎の評価を行う。また、居住域内でも特に重要と考えられる執務中(着座)の呼吸域の高さの換気効率を評価するため、床から1,200mmの高さの平均値を求め、呼吸域高さ平均空気交換効率 ( $\epsilon_{bh}$ ) とする。それぞれの算出方法を表2に示す。

## 3. 数値解析による換気効率の計算

数値解析では実験を行った各ケースについて、標準k- $\epsilon$ モデルを用いて気流を解析し、SVE3(村上、加藤の提案した換気効率指標3(文献4))の値から局所空気換気効率を算出する。算出方法を表4に示す。解析は実験を行った居室模型について室の対称性を考慮し、図5に示すように、室全体の1/4の空間を対象とする。数値解析の計算条件を表3に計算結果と共に示す。吹出風速の境界条件は、アネモ及び床吹出口の複雑な形状を図6、図7に示すようにモデル化し、別途行った吹出口周辺の詳細な測定結果を参考に図中斜線部に吹出風速の境界条件を与えている。また、居住域平均空気交換効率  $\epsilon_m$  は、室内床上1,800mmまでの局所空気交換効率  $\epsilon_p$  をメッシュ毎の容積で重み付け平均して求め、 $\epsilon_{bh}$  は、室内床上1,200mm

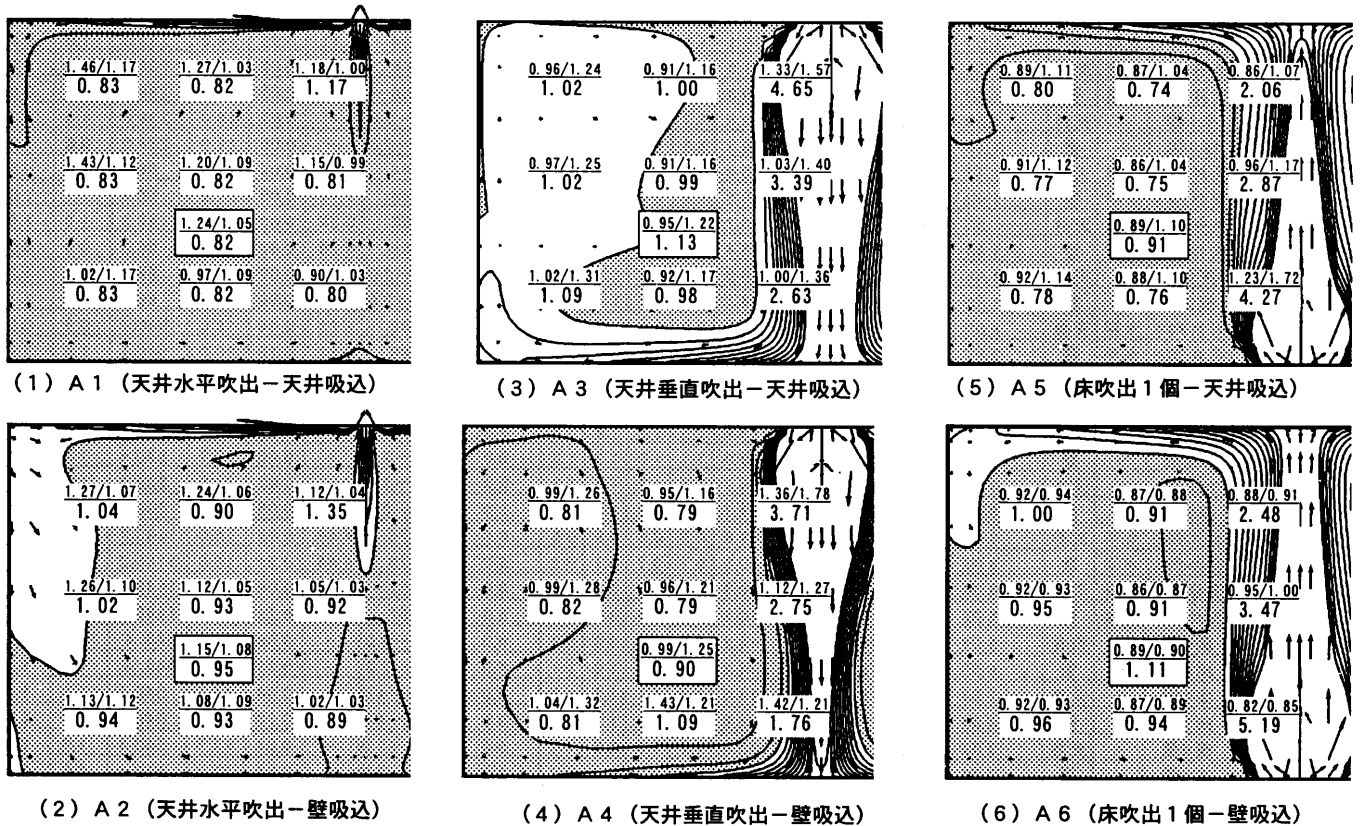


図8 等温時の局所空気交換効率

(上段が実験結果(StepUp/StepDown)、下段が数値解析結果、□内はそれぞれの居住域平均空気交換効率を示す。)

の高さの  $\epsilon_p$  をメッシュ毎の容積で重み付け平均して求める。

#### 4. 実験及び数値解析結果

##### 4.1 等温時の換気効率 (ケースA)

実験及び数値解析によって得られたXZ中央断面の等温時の局所空気交換効率  $\epsilon_p$  及び居住域平均空気交換効率  $\epsilon_m$  の値を図8に示す。なお、併せて数値解析により算出した風速分布と  $\epsilon_p$  分布のコンタを示す。

##### (1) 天井水平吹出方式の場合 (図8 (1), (2))

天井水平吹出のケースA1, A2は吹出気流が天井面に沿って流れ、壁面付近で下降し、室内全体に拡散する。 $\epsilon_m$ は、天井吸込(A1)の値と壁吸込(A2)の値ともにはほぼ同じになり、実験時の  $\epsilon_m$  は1.0~1.2程度となる。

##### (2) 天井垂直吹出方式の場合 (図8 (3), (4))

天井垂直吹出のケースA3, A4は、吹出口からの噴流が床面にぶつかって室内に拡散している。実験、数値解析ともに  $\epsilon_m$  は0.9~1.2となる。しかし、数値解析の  $\epsilon_p$  は、噴流が直接到達する領域では2.0以上となり、実験結果と大きく異なる。

##### (3) 床吹出方式の場合 (図8 (5), (6))

床吹出のケースA5, A6は、吹出噴流が天井に衝突した後、室内に拡散しており、ケースA5がA4, ケースA6がA3の結果を上下を逆にした分布に対応している。また、天井垂直吹出と同様に実験、数値解析ともに  $\epsilon_m$  は0.9~1.1となるが、吹出噴流域の  $\epsilon_p$  の値は大きく異なる。

##### 4.2 暖房時の換気効率 (ケースB)

暖房時のケースB1~B6の  $\epsilon_p$ ,  $\epsilon_m$  および数値解析により求

めた風速分布と  $\epsilon_p$  のコンタを併せて図9に示す。

##### (1) 天井水平吹出方式の場合 (図9 (1), (2))

天井水平吹出-天井吸込(B1)の場合、温風が天井付近に滞留し、居住域(床上1.8m以下の空間)に到達する前に排気される割合が多いため、居住域の  $\epsilon_p$  は極端に低くなり、実験時、数値解析ともに  $\epsilon_m$  の値は0.3~0.4程度となる。

これに対し、天井水平吹出-壁吸込(B2)では、吹出空気は天井付近に滞留するものの、吸込口の位置が床面に近いため、 $\epsilon_m$  の値は約0.8程度と天井吸込に比較して高くなる。

##### (2) 天井垂直吹出方式の場合 (図9 (3), (4))

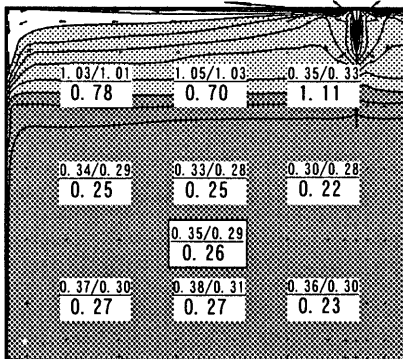
この場合、吹出噴流が居住域まで到達し、室全体に拡散するように設計されるが、今回の解析では、天井吸込の場合の  $\epsilon_m$  が0.3~0.4程度と低くなっており、天井水平吹出の場合とほとんど変わらない。また、別途行った可視化結果では、等温の場合(A3)は噴流が床面まで達しているが、暖房運転時(B3)は吹き出された直後に天井に向かって上昇している。これは、今回用いたアネモの大きさが風量に比較して大きく、吹出風速が暖房時に推奨される値より遅いことが原因の1つと考えられる。

##### (3) 床吹出方式の場合 (図9 (5), (6))

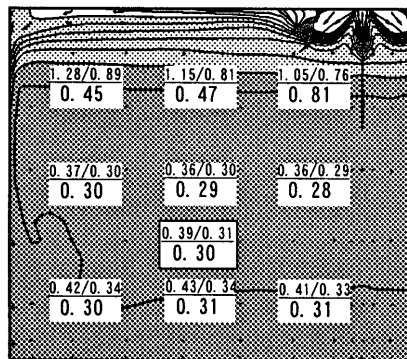
床吹出の場合、実験時の  $\epsilon_p$  の値は吹出口近傍を除いて0.8~1.0とほぼ均一な分布になり、 $\epsilon_m$  は0.8~0.9となる。また、数値解析の場合、吹出噴流域の  $\epsilon_p$  の値が実験時と大きく異なるが、 $\epsilon_m$  の値は1.0前後と実験時とほぼ同等な値となる。

##### 4.3 冷房時の換気効率 (ケースC)

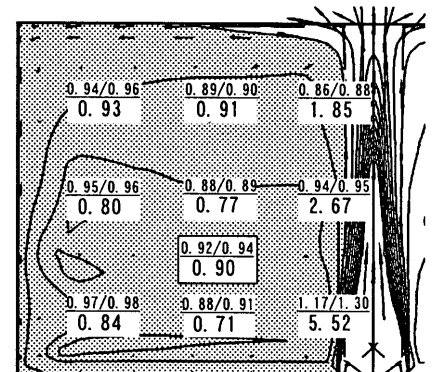
冷房時の基準ケースC1~C6, 吹出個数1個で基準風量の2倍のケースC5-DU及び吹出個数4個のC5-HU, C6-HUについ



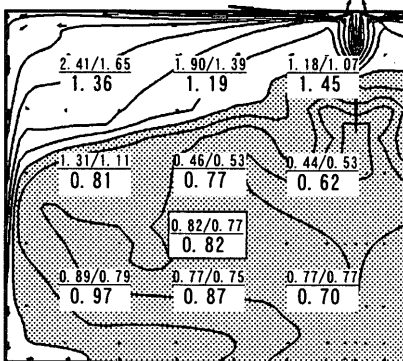
(1) B1 (天井水平吹出-天井吸込)



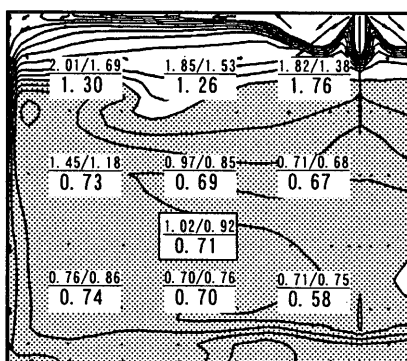
(3) B3 (天井垂直吹出-天井吸込)



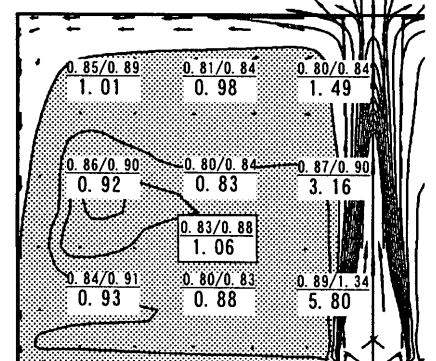
(5) B5 (床吹出1個-天井吸込)



(2) B2 (天井水平吹出-壁吸込)



(4) B4 (天井垂直吹出-壁吸込)



(6) B6 (床吹出1個-壁吸込)

図9 暖房時の局所空気交換効率算出結果

(上段が実験結果(StepUp/StepDown), 下段が数値解析結果, □内はそれぞれの居住域平均空気交換効率値を示す。)

て、実験及び数値解析による  $\varepsilon_p$ 、 $\varepsilon_m$  の値、数値解析により求めた風速分布と  $\varepsilon_p$  のコンタと併せて図10に示す。

(1) 天井水平吹出方式の場合 (図10(1)~(2))

天井水平吹出の場合 (C1, C2), 冷風が天井に沿って流れ、室内全体に拡散している。このため、吸込口の配置に関係なく、室内の実験時の  $\varepsilon_p$  の分布は、ほぼ等しくなる。

(2) 天井垂直吹出方式の場合 (図10(4), (5))

天井垂直吹出の場合 (C3, C4) は、吹出噴流が床面まで到達し、室内に拡散している。しかし、天井垂直吹出は冷房時は吹出空気が直接居住者に当たり、コールドドラフトの危険性があるため一般の空調では採用されない。換気効率の観点からの評価では、各  $\varepsilon_m$  の値は水平吹出との差異はあまり見られない。

(3) 床吹出方式の場合 (図10(3), (6), (7)~(9))

基準風量の場合、天井吸込の場合 (C5) は、室上部まで拡散し、実験、数値解析ともに  $\varepsilon_m$  は約1.4~1.6と高くなる。しかし、壁

吸込のとき (C6) は、室内全体に拡散する前に床面付近の吸込口から排出されるため、 $\varepsilon_m$  は天井吸込と比較してやや低くなる。

噴流が天井まで達するように吹出風速に設定した場合 (C5-DU) は、室内全体に拡散し各  $\varepsilon_m$  は1.1~1.2となる。

次に、吹出個数を多くして室内に均等に配置した場合、吹出風速が小さく、噴流の到達高さが低くなり、吹出空気は床面に近い高さで水平に拡散する。その結果、天井吸込の場合 (C5-HU) は、居住域に吹出空気が拡散し徐々に排気され、ピストンフローに近い流れ場となるため、実験時の  $\varepsilon_m$  の値は1.6~1.7と高くなる。また、逆に壁吸込 (C6-HU) の場合は、低層部の壁面から排気されるため、天井吸込に比べて極端に  $\varepsilon_m$  は低くなる。

また、床吹出の場合、室内の  $\varepsilon_p$  は、実験結果と比較して、数値解析の値は吹出噴流域で高く、他の領域ではやや小さい。

4.4 実測結果と数値解析結果の相違

数値解析による室内の流れ場の解析は、模型実験時の周囲環境の

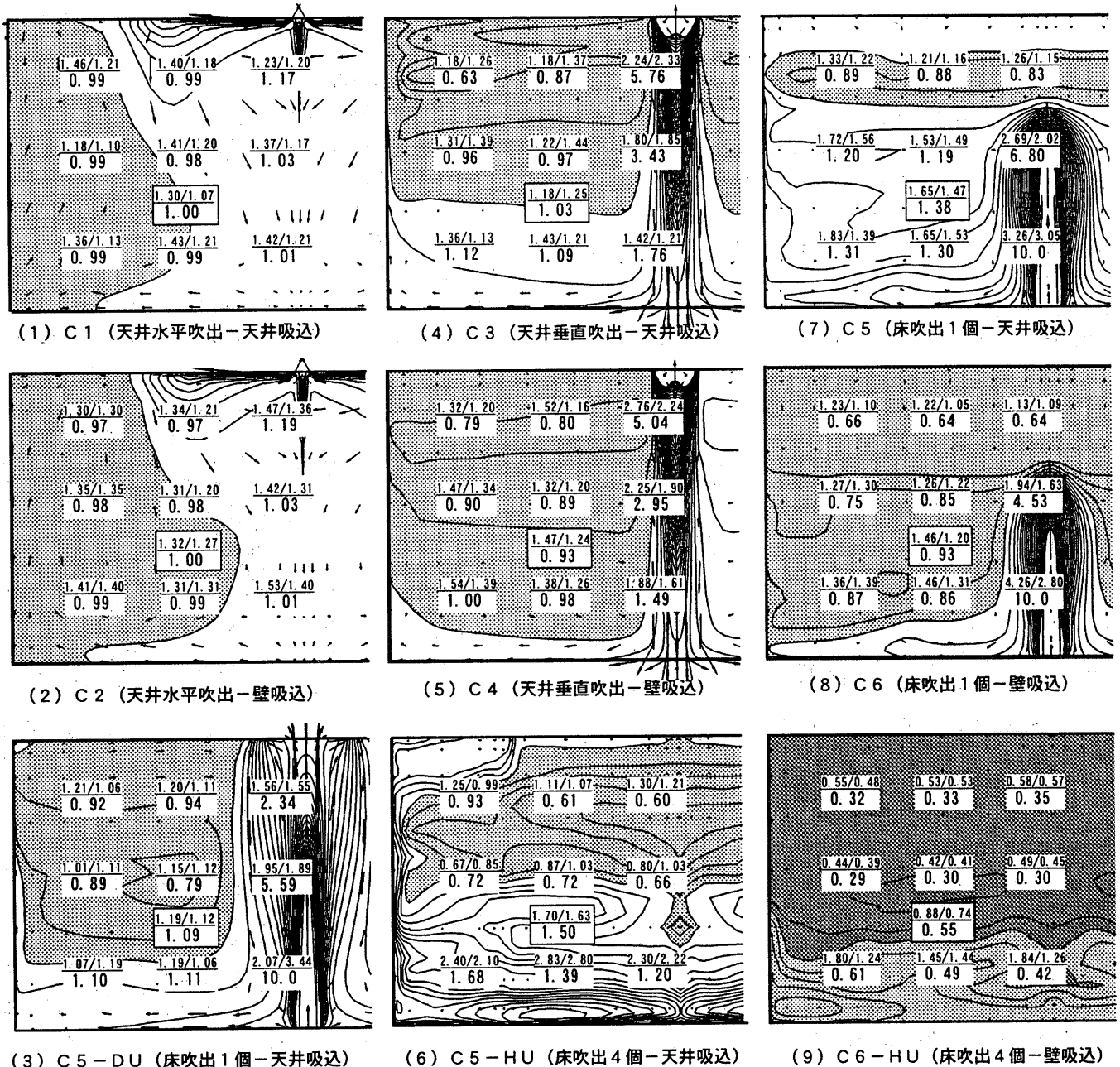


図10 冷房時の局所空気交換効率算出結果  
(上段が実験結果(StepUp/StepDown), 下段が数値解析結果, □内はそれぞれの居住域平均空気交換効率を示す。)

影響を受けずに、同一条件のもとで空調方式の違いについて比較検討が可能である。実測と数値解析の結果の比較では、局所空気交換効率  $\epsilon_p$  に関して、吹出近傍や壁面近傍において必ずしも一致していないケースが認められた。吹出近傍は、数値計算上の境界条件を十分に再現できていないためと考えられ、壁面近傍では実験時に外部からの貫流熱に起因するドラフト気流が原因と考えられる。

しかし、空間平均した居住域空気交換効率  $\epsilon_m$  は実測、数値解析結果ともに大きな差は見られず、数値解析により求めた  $\epsilon_m$  により居住域の換気効率の評価が可能であると考えられる。今後、吹出口の境界条件などを検討課題としたい。

## 5. 冷房時の吹出風量と換気効率の関係

### 5.1 天井吹出の場合

天井吹出風量を、 $1.5\text{m}^3/\text{min}$  (C1~C4)、 $3.0\text{m}^3/\text{min}$  (C1-D~C4-D)、 $6.0\text{m}^3/\text{min}$  (C1-F~C4-F) に変化させたときの実験と数値解析結果を図11に示す。

吹出風量が増加するにつれて、居住域平均空気交換効率 ( $\epsilon_m$ ) が減少する傾向が見られる。また、呼吸域高さ平均 ( $\epsilon_{bh}$ ) は、 $\epsilon_m$  とほぼ同じ値になる。

吹出風量が  $1.5\text{m}^3/\text{min}$  の場合、実測値と数値解析ともに  $\epsilon_m$  の値は  $1.0 \sim 1.2$  になり、吹出方向、吸込口の配置に拘わらず完全混合に近くなる。吹出風量が2倍の  $3.0\text{m}^3/\text{min}$  の場合は、数値解析の1ケース (C2-D) を除いた、各  $\epsilon_m$  の値は  $0.8 \sim 1.0$  とやや低くなる。さらに吹出風量が  $6.0\text{m}^3/\text{min}$  の  $\epsilon_m$  の値は、ほとんどのケー

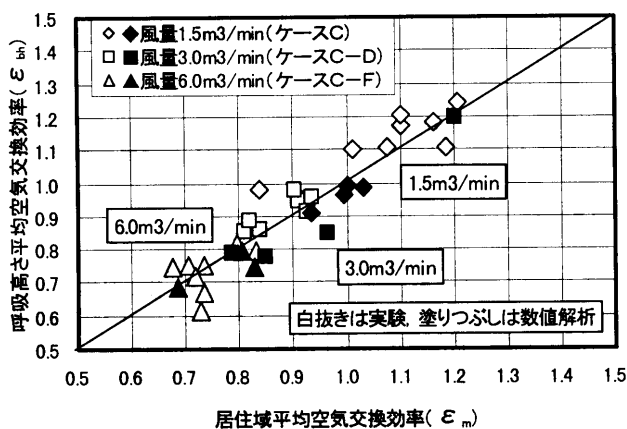


図11 吹出風量と居住域の換気効率の関係

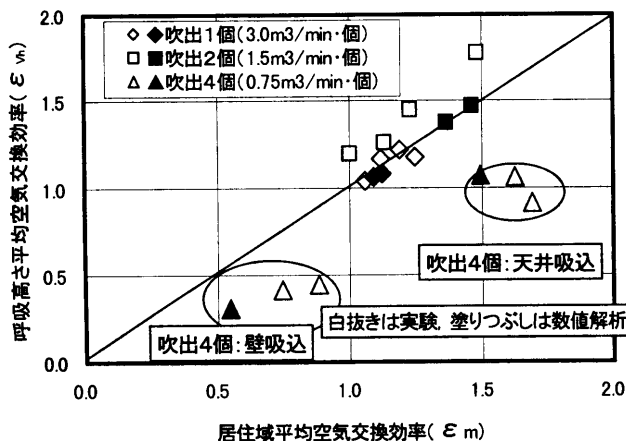


図12 床吹出個数と居住域の換気効率の関係

スで  $0.8$  以下になっている。吹出風量が増加しても、換気回数の逆数である名目換気時間で無次元化するため、 $\epsilon_m$  は一義的に換気効率の上昇には繋がらない。例えば、天井水平吹出の場合、風量が増加すると吹出気流が天井面及び壁面に沿って流れ、天井及び壁面に設置された吸込口から、相対的に空気齢の若い、新鮮な空気が排出されるようになり、居住域に到達する割合が少なくなる。したがって、吹出風量を多くしても、天井や壁面に付着流的性状の強い空間では、 $\epsilon_m$  が逆に低下し、吹出風量を多くしても居住域を効率よく換気することにはならない。

### 5.2 床吹出1個当たりの風量が異なる場合

総吹出量を、 $3.0\text{m}^3/\text{min}$  一定として、吹出風量を  $3.0\text{m}^3/\text{min} \times 1$  個 (C5-DU, C6-DU)、 $1.5\text{m}^3/\text{min} \times 2$  個 (C5-D, C6-D)、 $0.75\text{m}^3/\text{min} \times 4$  個 (C5-HU, C6-HU)、にしたときの実験結果と数値解析結果をを図12に示す。

1個当たりの風量が  $3.0\text{m}^3/\text{min}$  の場合は、 $\epsilon_m$ 、 $\epsilon_{bh}$  ともに高く、 $1.2 \sim 1.4$  となる。また、1個当たりの風量が  $1.5\text{m}^3/\text{min}$  の場合は  $\epsilon_m$ 、 $\epsilon_{bh}$  ともに  $1.0$  程度となる。

吹出個数を多くして、室内に均等に吹出口を配置すると吹出風速が小さくなり、吹出噴流の到達高さが低くなる。このため、天井吸込 (C5-HU) の場合はピストンフローと同様の状態となり  $\epsilon_m$  は高くなるが、壁吸込 (C6-HU) の場合は、吹出空気が上昇する前に排気されるため、 $\epsilon_m$  は低くなる。また、このときの  $\epsilon_{bh}$  の値は  $\epsilon_m$  に比べて  $0.2 \sim 0.5$  程度低くなる。これは、 $\epsilon_m$  が床面付近の極端に高い  $\epsilon_p$  の値を含むためで、この場合  $\epsilon_m$  のみによる評価は過大評価になる。したがって、吹出空気が呼吸域高さまで到達しない床吹出方式の評価は、 $\epsilon_m$  よりも  $\epsilon_{bh}$  を用いるべきであると考えられる。

## 6. 吹出温度差と換気効率の関係

吹出風量が  $1.5\text{m}^3/\text{min}$  のとき (ケースA~ケースC) の吹出-吸込温度の差 ( $\Delta T$ ) と  $\epsilon_m$  の関係を図13に示す。

### (1) 天井水平吹出-天井吸込の場合 (図13(1))

$\Delta T$  が  $0^\circ\text{C}$  以下 (等温、冷房) のときは、 $\epsilon_m$  は  $1.0$  前後の値となる。しかし、 $\Delta T$  が  $5^\circ\text{C}$  以上 (暖房) になると、吹出空気が天井付近に滞留するため  $\epsilon_m$  は  $0.3$  程度と極端に低くなる。

### (2) 天井水平吹出-壁吸込の場合 (図13(2))

他の方式に比べて  $\Delta T$  の影響が小さく、冷房、暖房ともに  $\epsilon_m$  の値は  $0.8 \sim 1.2$  の範囲に入る。

### (3) 天井垂直吹出-天井吸込の場合 (図13(3))

$\Delta T$  が  $0^\circ\text{C}$  以下 (等温、冷房) のときは、 $\epsilon_m$  は  $1.0$  以上になる。しかし、暖房時は下向きに吹出された温風が浮力によって上昇し、居住域に到達せずに排気される割合が増加するため換気効率が低下し、 $\Delta T$  が  $10^\circ\text{C}$  以上になると  $\epsilon_m$  は  $0.5$  以下になる。

### (4) 天井垂直吹出-壁吸込の場合 (図13(4))

数値解析では、冷房時と暖房時の差が小さく、 $\epsilon_m$  は  $1.0$  程度の値となるが、実験では等温並びに暖房時 ( $\Delta T$  約  $5^\circ\text{C}$ ) のときの  $\epsilon_m$  の値が高くなっている。これは、模型実験では、周囲温度が数値解析で想定した場合より低く、そのため、室内に温度成層が生じ、気流がピストンフローに近くなったことによると考えられる。

### (5) 床吹出-天井吸込の場合 (図13(5))

等温・暖房運転時は  $\epsilon_m$  がほぼ  $1.0$  になるが、冷房時は  $\Delta T$  の絶対

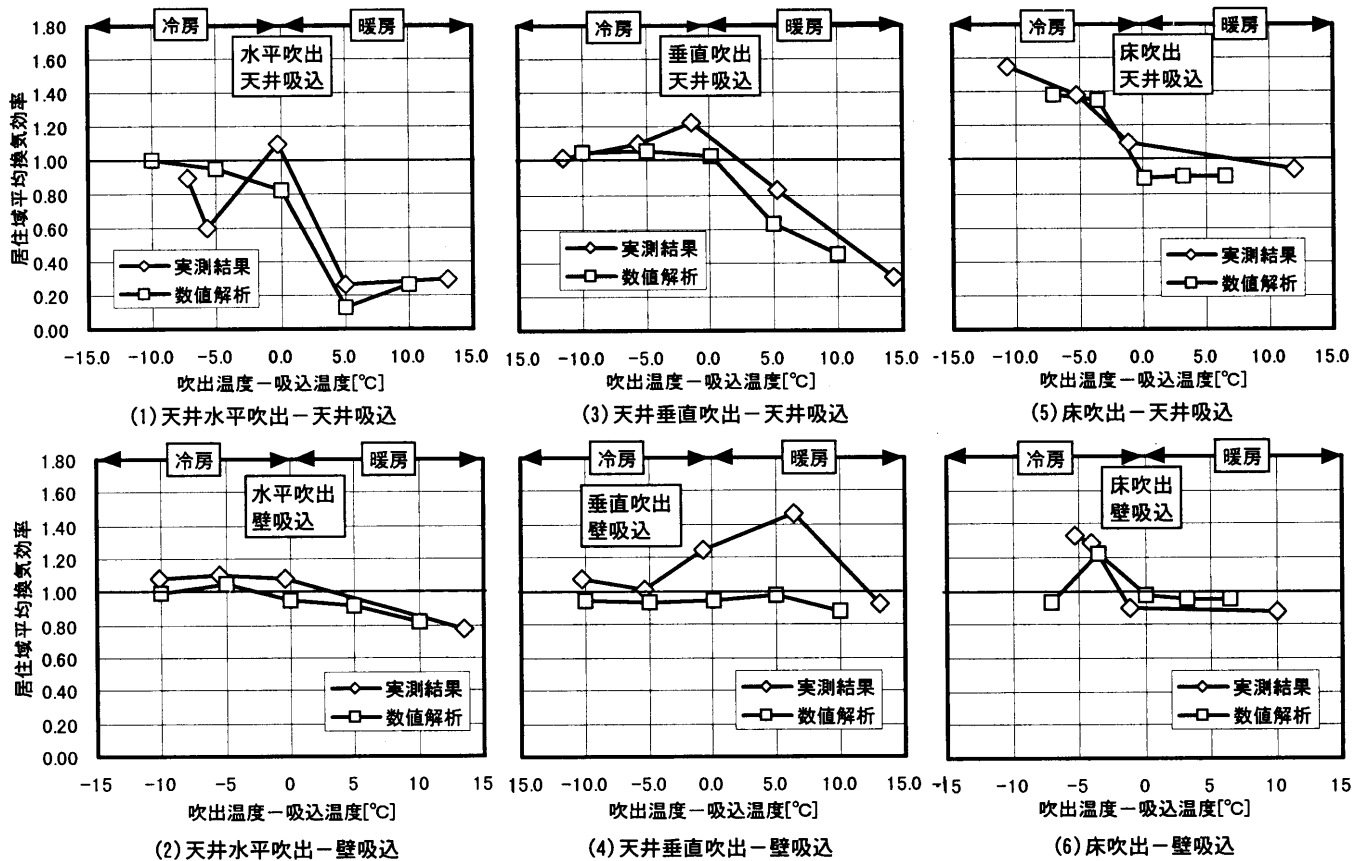


図13 吹出温度-吸込温度と空気交換効率の関係

値が大きくなるほど高くなり、 $\Delta T = -10^\circ\text{C}$ で1.5以上になる。

(6) 床吹出-壁吸込の場合 (図13(6))

等温・暖房運転時の $\epsilon_m$ は、ほぼ1.0になる。冷房時は $\Delta T$ が $0^\circ\text{C}$ ~ $-5^\circ\text{C}$ の間で実測、数値解析ともに $\epsilon_m$ の値が高くなり、 $\Delta T = -7.5$ で $\epsilon_m$ は低くなる。この原因は、 $\Delta T = 0 \sim -5^\circ\text{C}$ において、吹出噴流の持つ慣性力と浮力のバランスによって、吹出空気がちょうど居住域の高さに到達し、居住域の空気交換が効率的に行われたためと考えられる。

7. 結論

- (1) 等温運転時の吹出、吸込口の組み合わせは、各方式ともに、 $\epsilon_m$ の値は0.9~1.2程度となり、空調方式による差が小さい。
- (2) 暖房時の空調方式の組み合わせとしては、天井吹出の場合、排気口を天井にすると吹出方向に拘わらず、ショートサーキットが生じ、 $\epsilon_m$ が極端に低くなるので、排気口は床近傍の壁に設置する方が効率的である。また、床吹出の場合は、排気口の配置に関係なく $\epsilon_m$ は高くなり、暖房時の空調方式に適している。
- (3) 冷房時に吹出1個当たりの風量を多くしても、天井吹出の場合は、吸込口のある天井や壁面に沿う流れが強くなることもあり、 $\epsilon_m$ は逆に低下し、吹出風量を多くした効果が少ない場合がある。
- (4) 冷房時の床吹出の場合、吹出口1個当たりの風量が少ないときは、排気口を天井にすると $\epsilon_m$ が高くなり効果的である。
- (5) 暖房、冷房を通じ、効率的な空調方式としては、天井吹出-壁吸込や床吹出-天井吸込などの上下に吹出、吸込口を配置した方が好ましい。
- (6) 今回の数値解析では、 $\epsilon_p$ の分布が実測値と異なるケースも

あったが、 $\epsilon_m$ の値には大きな差がなく、数値解析から求めたこの指標により、居住域の換気効率の予測・評価が可能である。

【謝辞】

実測にあたり東京ガス(株)大森俊明氏並びに東京大学生産技術研究所村上研究室よりご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 厚生省生活衛生局企画監修, ビル衛生管理法, 1990
- 2) R. A. Wadden, P. A. Scheff: 日本建築学会訳: 室内空気汚染, 1990
- 3) 空調調和・衛生工学会 空調調和設備委員会 換気効率・基準小委員会: HASS102-1995換気規格(案)に関するシンポジウム資料
- 4) 村上, 加藤: 新たな換気効率指標と三次元乱流数値シミュレーションによる算出法, 空調調和・衛生工学会論文集, No. 32, 1986. 10, pp91-102
- 5) 松本, 加藤: 居室模型を用いた換気効率の測定法に関する研究その1, 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学, 1992. 8, pp625-628
- 6) 樋渡, 村上他: オフィスビルを対象とした換気効率の実測調査その1~その3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学, 1994. 8 pp117-123
- 7) 加藤, 村上他: 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・吸込口の環境形成影響と空気余命に関する新たな換気効率指標の提案, 空調調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 1992. 9, pp701-704
- 8) 小林, 村上: 南面ガラス張り大空間オフィスの室内気候に関する実測 その2 換気効率による機械換気システムの性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学, 1993. 9, pp125-126
- 9) ASHRAE Standard(Second Public Review Draft), Measuring Air Change Effectiveness, BSR/ASHRAE, 129P(1996)
- 10) 桑原, 赤林, 水谷他: 換気効率を考慮した室内設計手法に関する研究(その1~3) 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 環境工学, 1996. 9, pp857-862
- 11) 桑原, 赤林, 水谷他: 換気効率を考慮した室内設計手法に関する研究(その4~6) 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 環境工学, 1997. 9, pp585-590

(1998年3月10日原稿受理, 1998年9月29日採用決定)