

空調・換気分離型室内空気環境維持システムに関する研究

F 9 9 G 5 5 8 F 船山 良幸
 指導教官 赤林 伸一 助教授

1 研究目的

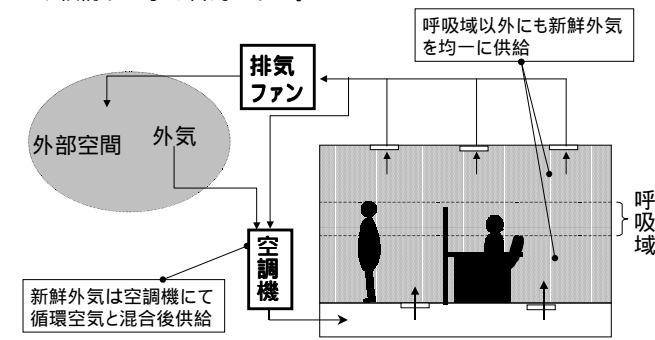
従来の換気設備設計は、室内で発生した汚染質を効率良く排出する。外気により汚染質を希釈し許容濃度以下に保つ、という考え方で行われてきた。前者の排気に関しては、室内の汚染質発生状況を考慮し比較的効率的な排気位置の検討がなされているのに対し、後者の希釈換気の場合には汚染質の一樣拡散を前提としており効率を考慮しているとは言い難い。しかしながら、外気の供給位置を検討することは、排気の場合と同様に重要な問題である。これを検討することにより、在室者に効率的に新鮮外気を供給することができれば、呼吸域の空気質の向上が図れ、さらに効率的な給気により供給外気量の削減も可能となる。

本研究では、オフィス空間を対象として、循環空気に新鮮外気を混入し室内の空気質を維持する従来の方式に対して、呼吸域に直接外気を供給する方式についてその有効性を数値流体解析(CFD)及び実大実験により検討する事を目的とする。

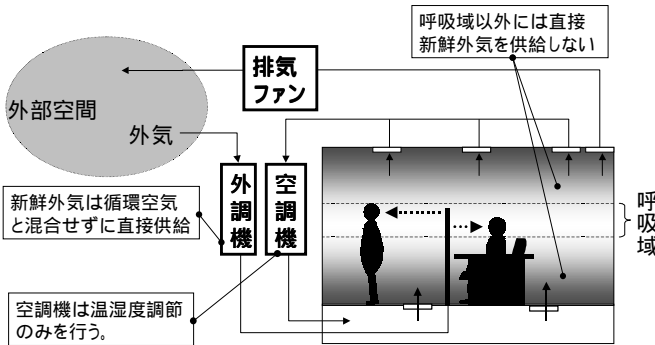
2 各換気・空調方式の概念

各空調・換気方式の概念を図1に示す。図1(a)の方式では、新鮮外気は空調機内で循環空気に混入後、室内に供給される(以下、外気空調機混入方式)。この方式では、新鮮外気は呼吸域以外にもほぼ均一に分配されることになる。これに対して、本研究で提案する図1(b)に示す方式は、新鮮外気を床のフリーアクセスフロアに設置した換気タワーの吹出口から供給することにより、新鮮外気の室内全体への拡散を抑え、呼吸域、特に着座時の執務者及び通路空間に空気齢(新鮮外気が室内のある点に到達する時間)の短い外気を供給する方式である(以下、換気タワー方式)。この場合、空調機は室内の温熱環境の調整のみに使用し、空調空気は室内居住域の平面分布に温度差を生じないように供給する。

この方式に際して使用されるフリーアクセスフロアは、床を二重床とし、その間を配線スペースとして使用するものである。このスペースに外気供給ダクトを配置することにより、換気タワーの設置の自由度が高くオフィスレイアウトや吹出位置の変更、吹出口の増設などに容易に対応することができる。また、この方式により従来の外気空調機混入方式に比較して必要外気量を減少させることが可能と考えられ、換気に関わるエネルギー消費量の削減を図ることができる。更に呼吸域に常に新鮮外気が供給されることにより喫煙など室内で発生する汚染質による空気汚染に関しても、新たな解決法を提案することが期待できると考えられる。



(a) 外気空調機混入方式の一例



(b) 換気タワー方式の一例

図1 各空調・換気方式の概念

表1 CFDによる解析ケース

解析ケース	換気方式	空調方式
1	循環空気に外気を混入後供給	床吹出天井吸込
2	換気タワーにより室内へ直接供給	床吹出天井吸込
3	換気タワーにより室内へ直接供給	天井吹出天井吸込

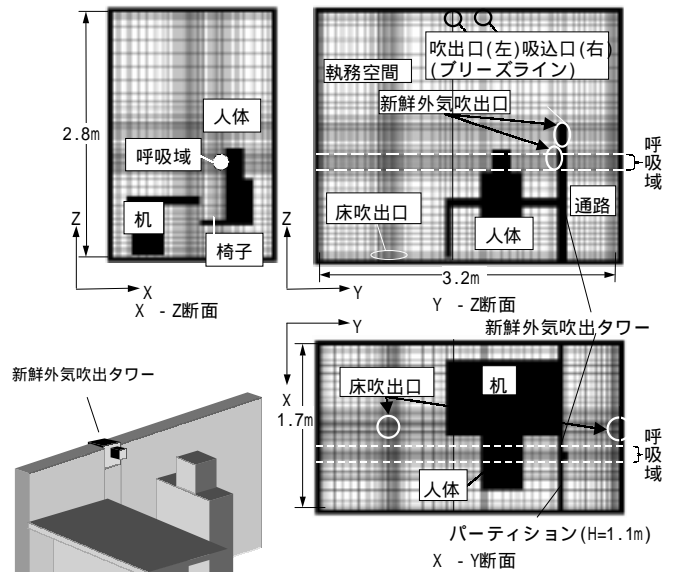


図2 CFD解析に使用したメッシュ分割

3 数値流体解析

実大実験を行う前に、等温状態を対象とした数値流体解析を行い、外気空調機混入方式と換気タワー方式の呼吸域への新鮮外気の供給効率について比較を行い、換気タワー方式の有効性を予め検討することを目的とする。

3.1 解析ケース

オフィス空間の一部を解析対象とする。解析を行ったケースを表1に示す。ケース1は、従来の外気空調機混入方式であり、床から吹き出す。ケース2、3は換気タワー方式であり、ケース2は床から、ケース3は天井から空調する。メッシュ分割を図2に示す。

3.2 解析方法

気流場は定常状態を仮定して解析を行う。その後、気流解析結果からステップアップ法により外気吹出口からトレーサーガスを発生させ、

表2 計算条件

解析メッシュ	: 47(X) × 70(Y) × 55(Z)
乱流モデル	: 標準k-ε乱流モデル
解析法	: SIMPLE法に基づく有限体積法
差分スキーム	: QUICKスキーム
流入条件	: X面壁、通路側Y面壁は連続する空間を想定して Free Slip
新鮮外気量	: 30 m ³ /h
新鮮外気量 + 循環空気量	: 150 m ³ /h
換気回数	: 1.96回/h (換気量 / 室容積)
局所空気齢	: ステップアップ $\rho = \int_0^{t_e} \{1 - C_p(t) / C_p(t_e)\} dt$ ステップダウン $\rho = \int_0^{t_f} \{C_p(t) / C_p(t_e)\} dt$
ここで、	$C_p(t)$: 時刻tの測定点Pでのトレーサーガス濃度 $C_p(t_e)$: トレーサーガス定常濃度 t_e : トレーサーガスが定常に達した時刻 t_f : トレーサーガス濃度が完全に減衰した時刻
名目換気時間	: $\tau_n = 30.5$ 分 (室容積 / 換気量)
SVE3 ¹⁾	: 局所空気齢 / 名目換気時間 (SVE3は、換気効率を表す指標の一つで、値が小さいほど換気効率が良いことを示す。)
換気タワー吹出風速	: $U_{in} = 1.24$ m/s(想定呼吸域での風速がビル管 理法に基づき0.5m/s以下になるように設定)

室内濃度平均が発生ガス濃度と同一になるまでタイムステップ60秒で非定常解析を行い室内の空気齢を算出し、新鮮外気の分配効率と吹出口、吸込口の相対的な位置の関係について検討する。計算条件を表2に示す。

3.3 解析結果

各空調・換気方式における呼吸位置での新鮮外気に注入したトレーサーガスの濃度上昇の経時変化を図3に示す。換気タワー方式(ケース2、3)は1分後に無次元濃度が0.4を越えているのに対して、従来の外気空調機混入方式(ケース1)では約20分後である。また、換気タワーを用いた場合には定常濃度に達するまで約150分かかるのに対し、外気空調機混入方式では約200分と約1.3倍の時間が必要である。

各実験ケースのSVE3¹⁾分布の計算結果をそれぞれ図4に示す。外気空調機混入方式(ケース1)の呼吸域でのSVE3が1.2程度であるのに対し、換気タワー方式では床吹出(ケース2)、天井吹出(ケース3)それぞれ約0.65及び0.70である。このことから、新鮮外気を直接呼吸域に供給することは呼吸域の空気質を向上させる上で有効な手段であると考えられる。呼吸域以外はこのケースにおいてもSVE3は1.1~1.2の値を示す。換気タワーを用いた場合、局所的に短い空気齢の値が得られ、その他の領域の空気齢も相対的には長くない。ケース1、2は供給された空調空気が全体に拡散しているが、ケース3では吹出口と吸込口が近いためショートサーキットが生じている。実際のオフィス空間では空調用吹出口、吸込口の配置の影響も考慮する必要がある。

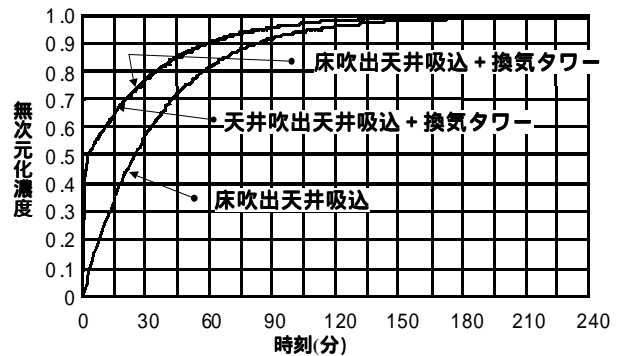


図3 呼吸位置におけるトレーサーガス濃度上昇の経時変化

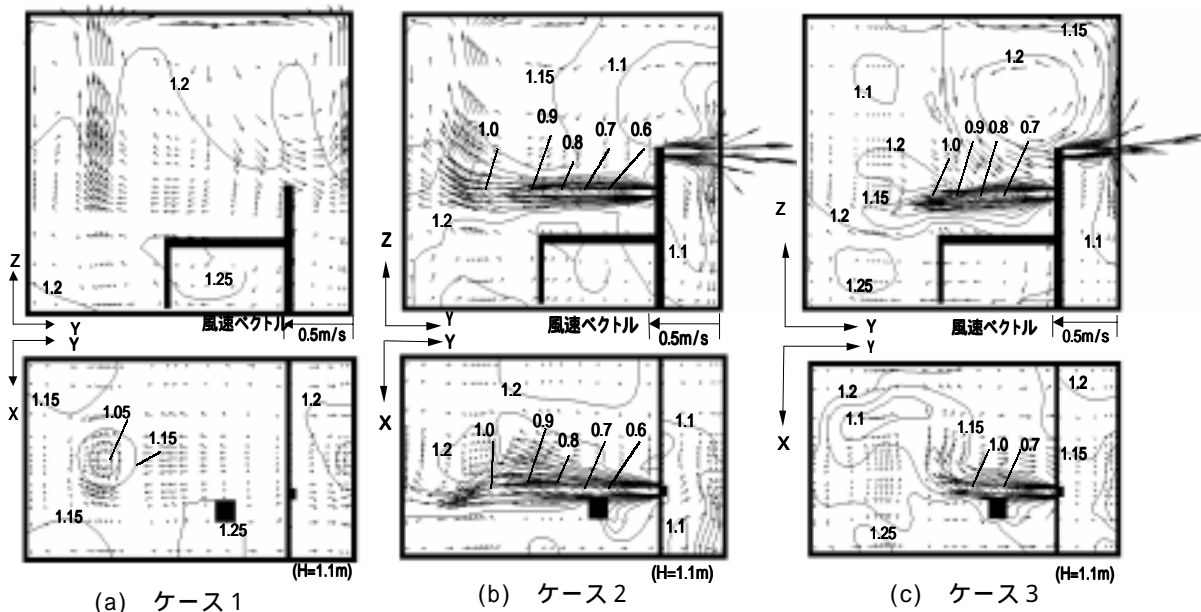


図4 SVE3分布

* 図中の数字はSVE3

4 実大実験

数値流体解析の結果をもとに、各空調・換気方式について空気齢を指標とした実大実験を行い、換気タワー方式の有効性を評価するとともに、基準化汚染物質濃度分布による評価を行う。

4.1 実験用チャンパー

実験用チャンパーの概要を図5に示す。室容積は実験室内で118.3m³である。通路の両側に執務空間を設け、人体モデル、OA機器モデル、机を6セット設置する。更に、人体モデル1体に対して外気を供給する換気タワーを執務空間用(吹出口H=1.2m)と通路用(吹出口H=1.5m)にそれぞれ設置する。

実験用チャンパーの周囲には温度制御可能な隣室チャンパーが設置されている。本実験では隣室もすべて空調された空間(インテリア空間)と仮定し、隣室チャンパーの温度は室温と同一に設定する。

4.2 実験ケース

実験ケースを表3に示す。ケース1~7では室内で一様に汚染物質が発生する場合を想定した空気齢による評価、ケース8、9は室内の特定の位置に汚染源がある場合を想定した基準化汚染物質濃度分布による評価を行う。ケース1、2は「発熱なし」の実験ケース、ケース3~9が「発熱あり」の実験である。「発熱あり」の実験では、H=1.2mの室温が26になるように設定し、換気タワーからの供給外気温度も室温と同一とする。ケース3は天井から、それ以外のケースは床から空調する。ケース6、7は、換気タワーからの供給外気量を30m³/h・人からそれぞれ20m³/h・人、10m³/h・人に減少させたケースである。

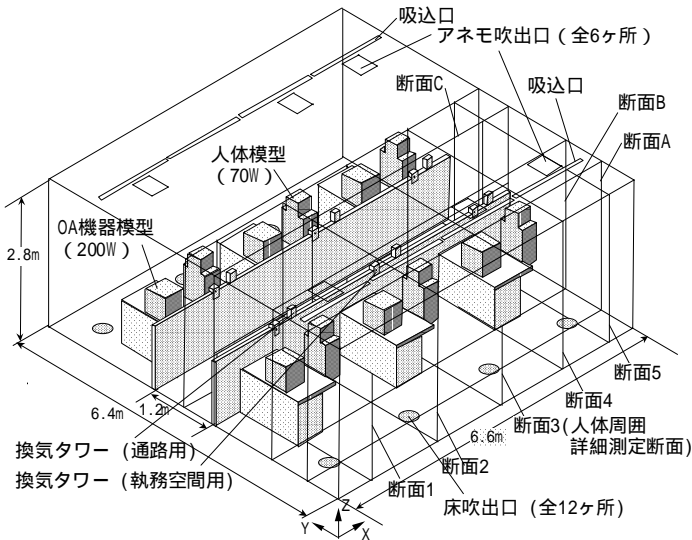
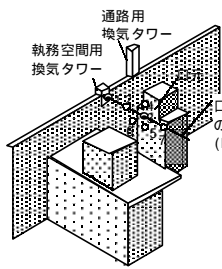


図5 実験用チャンパーの概要



- 温度測定点
● 温度・ガス濃度測定点
○ ガス濃度測定点

番号	測定位置
1	換気タワー吹出口
2	吹出口から30cm
3	吹出口から60cm
4	吹出口から60cm上方10cm
5	吹出口から60cm下方10cm
6	吹出口から60cm口元から前方5cm
7	吹出口から90cm

*人体2を除く人
汚染物質濃度測定(Case7,8)のみ

(人体2付近におけるガス濃度・温度測定点の詳細)

4.3 人体モデル及びOA機器モデル

人体モデルは日本人の標準体面積(1.71m²)を参考にし、OA機器モデルは標準的と考えられるOA機器をモデル化する。「発熱あり」の実験における室内発熱は、人体モデルから計420W、OA機器モデルから計1200W、照明からは室全体で480Wである。

4.4 測定項目及び測定位置

ガス濃度・温度測定点を図6に示す。室内は通路(断面C)をはさんで対称であるので、半分の領域について詳細に測定を行う。呼吸域の空気齢の測定は6体のうちの1体(人体2)について詳細に行う。人体前方5cm、H=1.2mの高さを呼吸位置とする。

4.5 換気タワーからの外気の風量及び吹出風速

実験では、執務者の滞在時間が執務空間と通路で同様と仮定し、それぞれの換気タワーからの供給外気量を等しく設定する。換気タワーの吹出風速、吹出口面積は、人体に到達する時点での風速が0.5m/s以下になるように、数値流体解析の結果をもとに設定する。

表3 実験ケース

実験ケース	評価項目	室内発熱	空調*		換気	
			吹出位置	設定循環風量 ()内は実風量	外気供給位置	設定外気量 ()内は実風量
ケース1	空気齢	発熱なし	床	1380m ³ /h(1387m ³ /h)	循環空気に外気を混入後供給	180m ³ /h(187.8m ³ /h)
ケース2			床	1200m ³ /h(1200m ³ /h)	換気タワーより室内へ直接供給	180m ³ /h(194.4m ³ /h)
ケース3			天井	1380m ³ /h(1341m ³ /h)	循環空気に外気を混入後供給	180m ³ /h(187.8m ³ /h)
ケース4			床	1380m ³ /h(1397m ³ /h)	循環空気に外気を混入後供給	180m ³ /h(189.6m ³ /h)
ケース5			床	1200m ³ /h(1221m ³ /h)	換気タワーより室内へ直接供給	180m ³ /h(198.1m ³ /h)
ケース6			床	1200m ³ /h(1200m ³ /h)	換気タワーより室内へ直接供給	120m ³ /h(145.8m ³ /h)
ケース7			床	1200m ³ /h(1190m ³ /h)	換気タワーより室内へ直接供給	60m ³ /h(72.6m ³ /h)
ケース8	汚染物質濃度		床	1380m ³ /h(1366m ³ /h)	循環空気に外気を混入後供給	180m ³ /h(189.6m ³ /h)
ケース9			床	1200m ³ /h(1200m ³ /h)	換気タワーより室内へ直接供給	180m ³ /h(193.2m ³ /h)

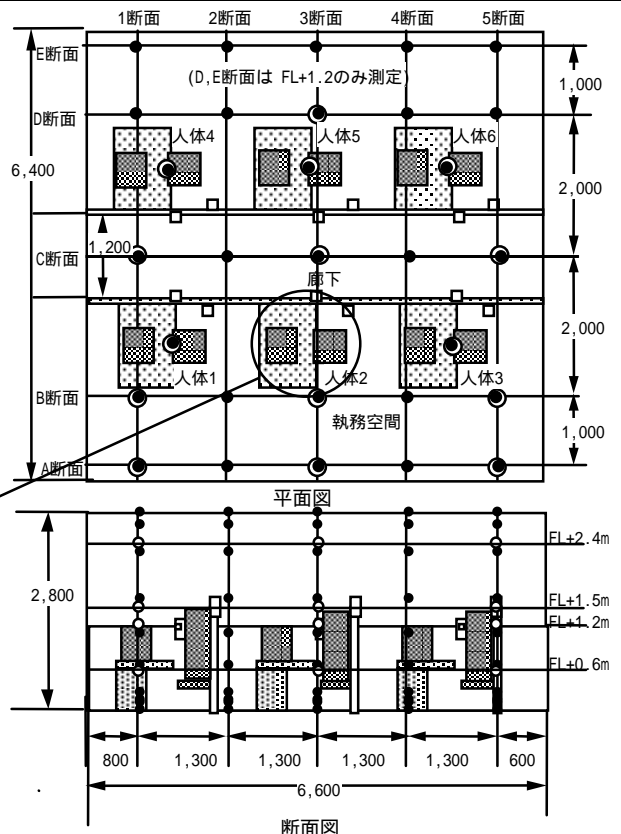


図6 ガス濃度・温度測定点

4.6 実験手順及び評価手順

(1) 空気齢による評価

トレーサガス (SF_6) を外気空調機混入方式の場合ではOAダクト内で、換気タワー方式の場合は換気タワー用のOA取入口で定量 (50cc/min) 供給する。ステップアップ法ではガス濃度の上昇率が1時間前と比べて8%以下になるまで室内の濃度上昇の時間変化を測定する。ステップダウン法ではガス供給停止時のガス濃度が5%以下になるまで濃度減衰の時間変化を測定する。換気効率は、局所空気齢をもとにSVE3¹⁾を用いて評価を行う。SVE3を基準化する際に使用する名目換気時間は、排気ダクト内で測定された空気齢から求める。

(2) 基準化汚染物質濃度分布による評価

人体2が喫煙している場合を想定し、人体2の口元から50cc/minのトレーサガス (SF_6) を発生させる。室内が定常になった時点でのトレーサガス濃度から基準化汚染物質濃度 (各測定点の濃度/排気口の濃度) を求める。

5 実験結果

5.1 トレーサガスの経時変化

代表的な実験ケースのトレーサガス濃度の経時変化を図7に示す。ケース3 (外気空調機混入方式、天井吹出) では、吹出口の濃度上昇がわずかに早いものの、どの測定点も同様の傾向を示す。この濃度上昇の傾向は吹出口の位置によらず、ケース4 (外気空調機混入方式、床吹出) でもほぼ同様である。ケース5 (換気タワー方式) では、呼吸位置におけるトレーサガス濃度の上昇は、ガス発生直後から他の室内の測定点に比べて早い。

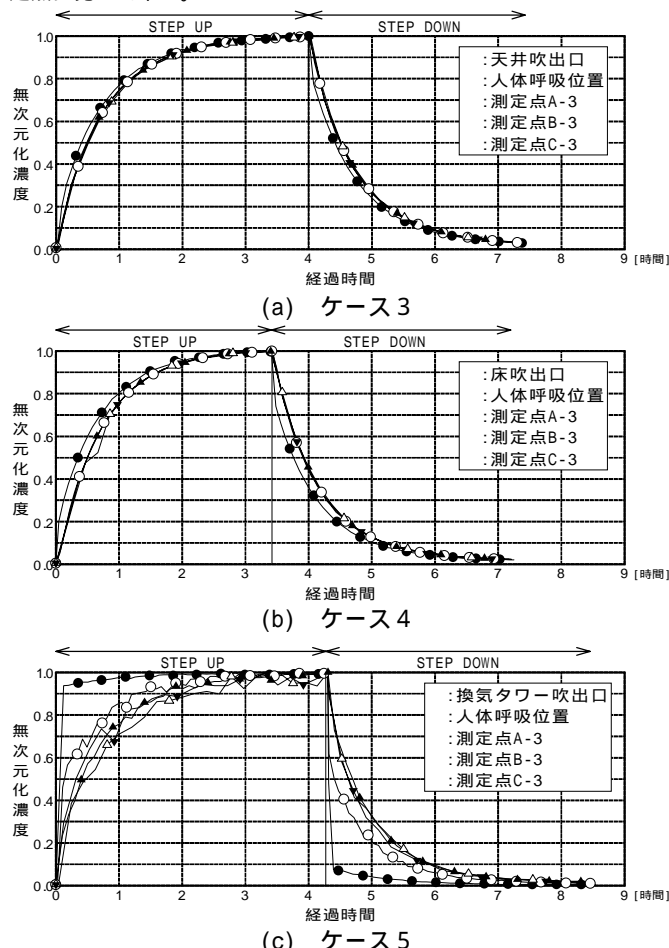


図7 トレーサガス濃度の経時変化

5.2 断面3におけるSVE3分布

代表的な実験ケースの断面3におけるSVE3分布を図8に示す。ケース3 (外気空調機混入方式、天井吹出) のSVE3の値は、天井付近でやや大きい測定点があるものの、ほぼ1.00付近の値を示す。呼吸位置付近でのSVE3の値も室内の測定点と同様である。ケース4 (外気空調機混入方式、床吹出) でも同様な傾向を示し、呼吸位置付近を含めた室内全体でほぼ0.90付近の値を示す。ケース5 (換気タワー方式) では、SVE3の値は呼吸位置付近においてステップアップ法で0.60、ステップダウン法では0.46を示し、室内の測定点の値(0.8~1.2)に比べて相対的に小さい値を示す。

5.3 外気空調機混入方式における天井吹出と床吹出のSVE3の比較

ステップアップ法における外気空調機混入方式の天井吹出(ケース3)と床吹出(ケース4)のSVE3の比較を図9に示す。どちらのケースも、執務室側でSVE3の値が約1.1である測定点が数力所あるものの、ケース4 (床吹出) の執務室側、通路側及び呼吸位置付近のSVE3は、ケース3 (天井吹出) の約0.9倍の値を示す。

5.4 外気空調機混入方式と換気タワー方式のSVE3の比較

ステップアップ法における外気空調機混入方式(ケース4)と換気タワー方式(ケース5)のSVE3の比較を図10に示す。呼吸位置付近のSVE3の値は、ケース4 (外気空調機混入方式) が約0.9を示すのに対して、ケース5 (換気タワー方式) では、約0.4~0.7と小さい値を示す。通路側のFL+1.5mでも、通路用の換気タワーの効果で、ケース5 (換気タワー方式) の方がより小さい値を示している。他の測定点の値については、両者ともほぼ同様な値を示し、約0.9~1.2を示す。

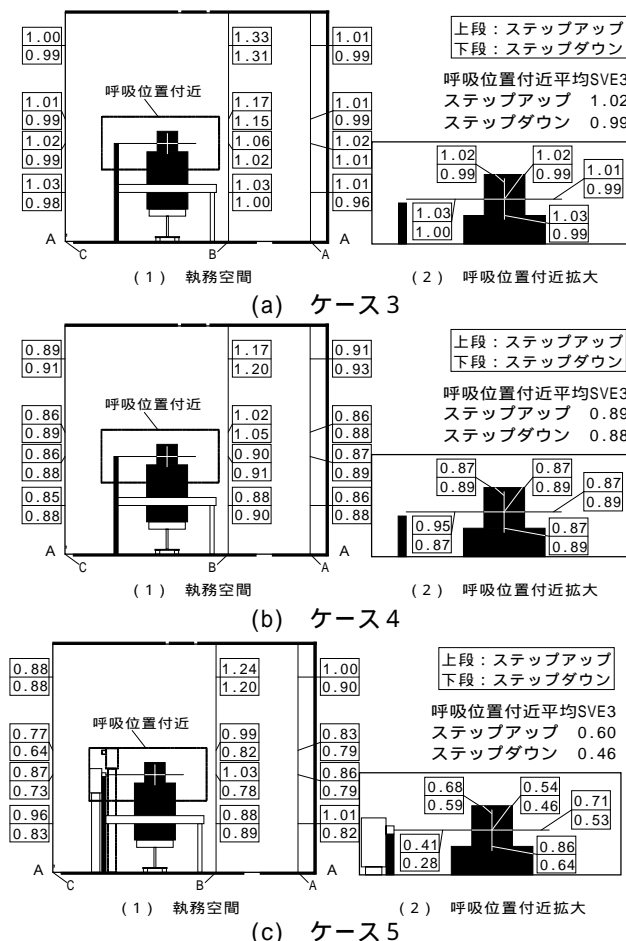


図8 断面3におけるSVE3分布

5.5 高さ毎の空間平均 SVE3、FL+1.2m、1.5mの面積平均 SVE3、室平均 SVE3

ステップアップ法における高さ毎の空間平均 SVE3、FL+1.2m、1.5mの面積平均 SVE3、室平均 SVE3を表4に示す。換気タワー付近の詳細の測定は、人体2のみで行っているが、ここでは他の人体の呼吸位置と通路の換気タワー付近は人体2周囲と同様の性状であると仮定している。

呼吸位置の SVE3は、外気空調機混入方式(ケース1、3、4)では0.9~1.0であるのに対し、換気タワー方式(ケース2、5~7)では約0.5を示す。また、FL+1.0~1.8mの空間平均 SVE3は、全ケース0.9~1.0で同様な値を示す。このことから、局所的に呼吸位置付近のみに新鮮外気が供給されていることがわかる。FL+1.2m(執務室のみ、室全体)、FL+1.5m(室全体)についてもどのケースでも同様な値を示す。FL+1.5m(通路のみ)については、吹出口、パーティション配置の影響のため、どのケースにおいても低い値を示しているが、方式の違いによる SVE3の相違はほとんどみられない。

5.6 換気タワーの外気量を減少させた場合

外気量が30m³/h・人の場合を基準として外気量を20m³/h・人(ケース6)及び10m³/h・人(ケース7)に減少させた場合の SVE3の値(ステップアップ法)を図11に示す。ここで20m³/h・人及び10m³/h・人の SVE3は、すべて30m³/h・人の排気口の局所平均空気齢により基準化している。これは、外気を減少させた場合の SVE3が1.0未満であれば、外気量が30m³/h・人で瞬時一様拡散の場合よりも良好な換気性状であることを示

している。

ケース6(外気量20m³/h・人)の SVE3の値は、執務空間、通路の数力所の測定点では大きくなりばらついているものの、その他の室内空間は、ケース5(外気量30m³/h・人)と比較して値に大きな相違はみられない。呼吸位置付近については、 SVE3の値はほとんどの測定点で1.0を下回っている。

ケース7(外気量10m³/h・人)の SVE3の値は、ケース5(外気量30m³/h・人)と比較して明らかに大きく、1.9~2.2となる。外気量を10m³/h・人に減少させた場合に呼吸位置付近の測定点でばらつきが大きくなるのは、換気タワー吹出口から供給される新鮮外気の影響範囲が小さくなり、測定点が影響範囲の境界となったためと考えられる。また、呼吸位置付近以外の空間において SVE3の値が大きくなるのは、吸込口が換気タワーに比較的近いところにレイアウトされたこと、影響範囲の小さくなった新鮮外気の気流が人体、OA機器の発熱により生じる上昇流の影響をより受けやすくなったことによりショートサーキットを生じていると考えられる。

6 基準化汚染物質濃度分布

非等温状態における外気空調機混入方式(ケース8)と換気タワー方式(30m³/h・人、ケース9)で、人体2の呼吸位置で喫煙を想定したトレーサーガス(SF₆)を発生させた場合のFL+1.2m及び断面3の基準化汚染物質濃度分布を図12に示す。

基準化汚染物質濃度は、ケース8(外気空調機混入方式)では、天井

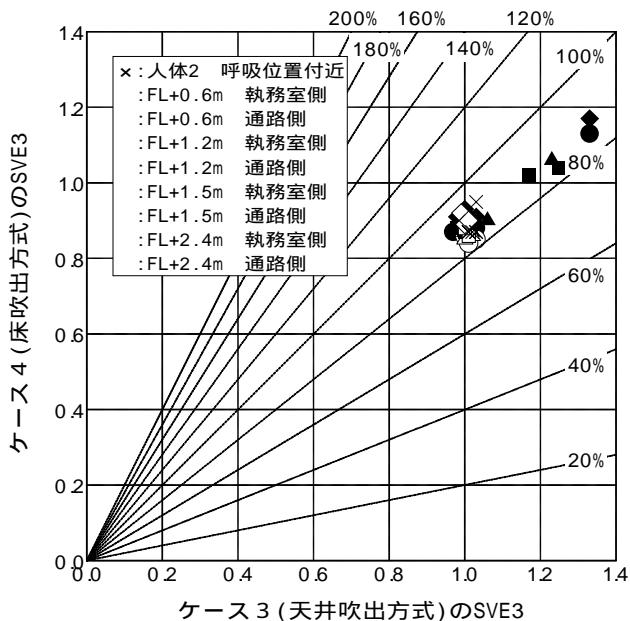


図9 外気空調機混入方式における天井吹出と床吹出の SVE3の比較(ステップアップ法)

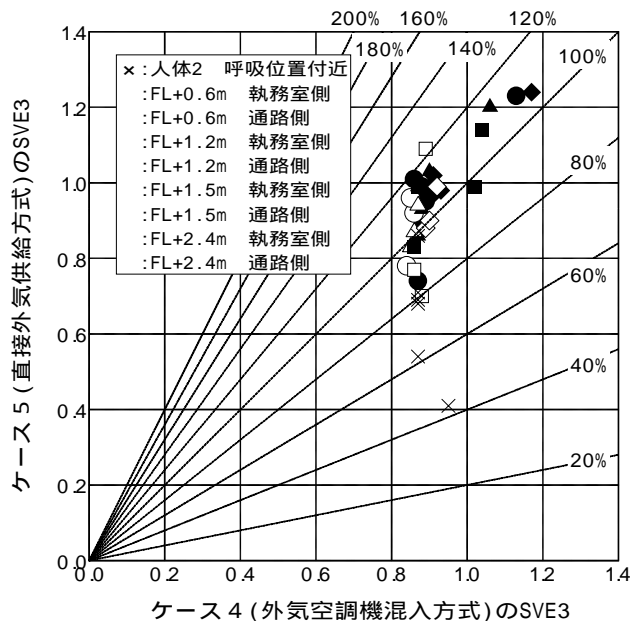


図10 外気空調機混入方式と換気タワー方式の SVE3の比較(ステップアップ法)

表4 高さ毎の空間平均、FL+1.2m、1.5mの面積平均、室平均(ステップアップ法)

	空間平均				室全体 SVE3	面積平均			
	呼吸位置	FL±0-1.0m	FL+1.0-1.8m	FL+1.8-2.8m		FL+1.2m (執務室のみ)	FL+1.2m (室全体)	FL+1.5m (通路のみ)	FL+1.5m (室全体)
ケース1	0.92	0.94	0.93	0.96	0.95	0.93	0.92	0.85	0.95
ケース2	0.57	0.98	1.00	1.04	1.01	1.02	1.01	0.82	0.98
ケース3	1.02	1.06	1.06	1.08	1.07	1.06	1.05	0.95	1.07
ケース4	0.87	0.92	0.91	0.97	0.94	0.92	0.91	0.83	0.93
ケース5	0.54	0.97	0.97	1.03	0.99	1.00	0.98	0.79	0.97
ケース6	0.55	0.87	0.86	0.89	0.87	0.85	0.85	0.78	0.84
ケース7	0.79	0.99	1.00	0.99	0.99	1.02	1.02	0.94	1.00

付近を除きいずれの測定点でも約 1.0 を示し、ほぼ均一に汚染物質が拡散している。ケース 9 (換気タワー方式) では、汚染物質濃度分布に偏りが生じる。執務空間のトレーサガス発生位置付近では、基準化汚染物質濃度は 2.0 ~ 3.5 と高い値を示すのに対して、呼吸位置では 0.6 ~ 0.75 と低い値を示す。呼吸位置 5ヶ所の基準化汚染物質濃度の平均値は、ケース 8 (外気空調機混入方式) で約 1.00 であるのに対して、ケース 9 (換気タワー方式) では約 0.70 である。よって、非喫煙者の呼吸域では煙草の影響が相対的に少なく、比較的良好な空気環境を得ることができる。ただし、呼吸域以外の執務空間では、換気タワーの吹出気流によって局所的に煙草の影響を受ける空間もある。

6 まとめ

新鮮外気を直接呼吸域の供給することにより、呼吸位置での SVE3 の値は、空調機に新鮮外気を混入する方式と比較して約 60% の値となり、効率良く外気を供給することができる。

換気タワーを用いた場合、換気タワー付近で局所的に非常に小さい SVE3 を示しても、それ以外の空間では SVE3 が高くなることが懸念されたが、従来の外気空調機混入方式と同程度の SVE3 の値を示す。

換気タワー方式において、外気供給量を $30\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{人}$ から $20\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{人}$ に減少させた場合でも SVE3 の値はほとんど変化せず、比較的良好な換気性状を示す。

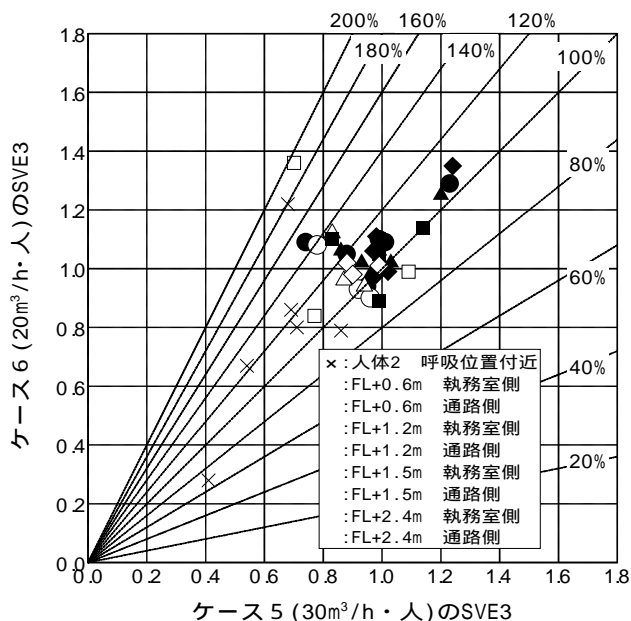
新鮮外気を直接呼吸域に供給することにより、呼吸位置付近での濃度は空調機に新鮮外気を混入する方式と比較して約 70% の値となり、換気タワー方式では非喫煙者は喫煙の影響を受けにくい。

SVE3 分布及び汚染物質濃度の分布を比較した結果、新鮮外気を換気タワーを用いて直接呼吸域に供給することは、居住者に新鮮な外気を供給するために有効な方法である。また、呼吸位置の空気質を現状のまま維持しつつ、外気量を削減し省エネルギーをはかるうえでも有効な手法と考えられる。

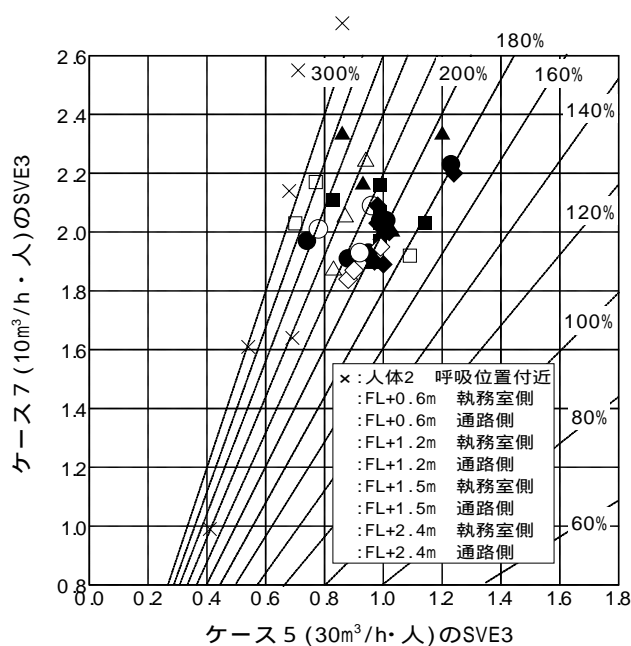
実際のオフィス空間では、ショートサーキットが起こらないように吹出口、吸込口の配置の影響を考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 村上周三, 加藤信介: 新たな換気交換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 - 換気効率の評価モデルに関する研究 - 空気調和・衛生工学会論文集, No. 32, pp. 91 ~ 101 (1986. 10)

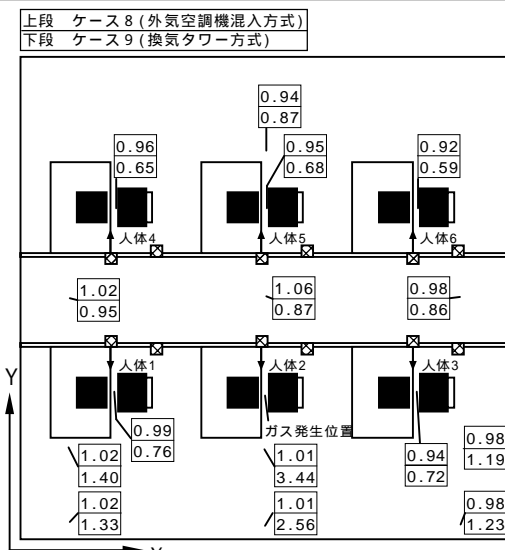


(a) 外気量 $30\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{人}$ と $20\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{人}$ の場合の比較

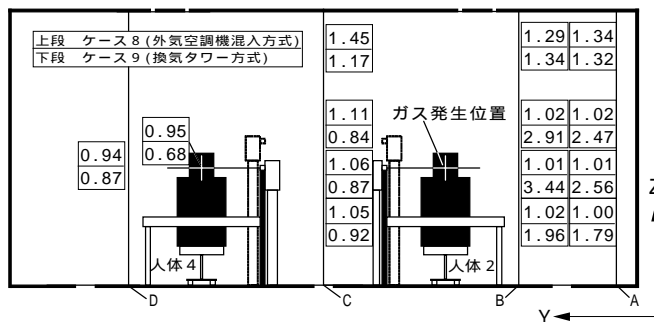


(b) 外気量 $30\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{人}$ と $10\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{人}$ の場合の比較

図 11 換気タワーの外気量を減少させた場合の SVE3 の比較 (ステップアップ法)



(a) FL+1.2m における基準化汚染物質濃度分布



(b) 断面 3 における基準化汚染物質濃度分布

図 12 喫煙を想定した場合の基準化汚染物質濃度の比較