

オフィス空間を対象とした規準化居住域濃度の CFD 解析 汚染質が不均一発生する場合の換気効率解析

空正 ○菊池世政啓(東京工芸大学)
空正 小林 信行(東京工芸大学)

空正 高橋 雄司(川本工業)
空正 伊藤 一秀(東京工芸大学)

1. はじめに

簡易に換気計画を行う際には、室内の完全混合を仮定し、室内における汚染質の濃度分布を無視した状態で必要換気量が算定されることが多い。しかし一般には、室内に汚染源が偏在し、不均一濃度場が形成されていることが多く、居住域、人間の呼吸域周辺、発熱機器或いは調理機器周辺といった室内の限られた範囲における空気質制御が重要となる。特に空気調和・衛生工学会で提案されている HASS 102 換気規準^{*)}においては、完全混合の仮定が成立しない居室においては、室内のなかで特に居住域の換気効率 (= 排気濃度で無次元化された居住域平均濃度、規準化居住域濃度) を加味した換気設計を行うことを推奨している。

本研究ではオフィス空間を対象として5種類の空調方式を設け、各種空調条件の下で流れ場、温度場の CFD 解析を行い、汚染質が空間一様発生する場合の他、床面もしくは呼吸域において不均一発生する場合の規準化居住域濃度(以降 Cn)について検討を行ったので、その結果を報告する。

2. 規準化居住域濃度

換気効率に関する研究は、既に多くの研究成果が蓄積されており、換気効率指標に関しても数多くの提案がある^{*)}。それらの中で最も基本的なものは、局所領域平均濃度と完全混合濃度の比である規準化濃度である。本研究では居住域平均濃度(Cp)と完全混合濃度(Ce)の比である規準化居住域濃度 (Cn)を換気効率指標として用いる。居住域は床面から 1.8m の間の空間とする。Cn の定義を(1)式に示す。

$$Cn = Cp / Ce \quad (1)$$

規準化居住域濃度は空気調和・衛生工学会の換気規格である HASS102 において、換気効率指標として使用されている^{*)}。

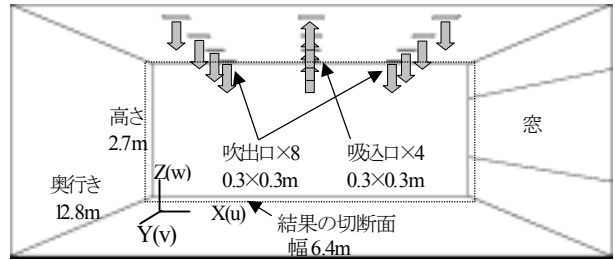
3. オフィス空間の概要

3.1 解析対象オフィス

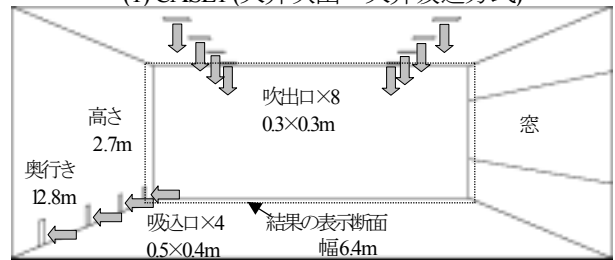
図 1 に解析対象オフィスならびに空調システムを示す。室は幅 6.4m(X)、奥行き 12.8m(Y)、高さ 2.7m(Z)の容積を有する。計算は対称性を考慮し奥行き方向(Y 方向)に関し半分の領域について行う。空調方式は 5 種類を対象とし、オフィスの一般的な空調方式(CASE1 と 2)、室内での温度成層ならびに循環流の生成を意図してモデル化した方式(CASE3 と 4)、ならびに置換換気方式(CASE5)である。吹出口はCASE1~3がグリル型、CASE4がスロット型、CASE5が面状吹出口である。

3.2 解析条件

表 1 に熱負荷条件、表 2 に計算条件、表 3 に解析対象とした空調条件を示す。熱負荷は夏期冷房と冬期暖房を設定する。照明負荷は天井に、人体と OA 機器の負荷は床面にそれぞれ均一に与える。窓面には日射負荷を与える。本解析では先行して放射解析を行い、あらかじめ放射による熱移動量を各壁面に分配して対流計



(1) CASE1 (天井吹出・天井吸込方式)



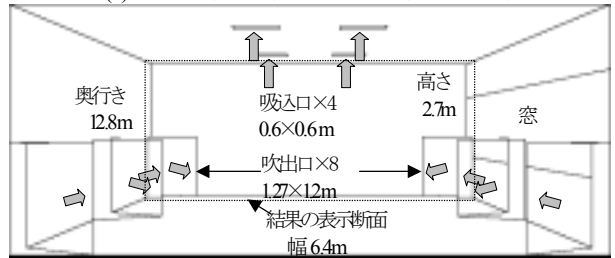
(2) CASE2 (天井吹出・壁下部吸込方式)



(3) CASE3 (壁下部吹出・天井吸込方式)



(4) CASE4 (壁上部吹出・壁下部吸込方式)



(5) CASE5 (置換換気方式)

図 1 解析対象オフィスと空調方式

算の境界条件を与えている。流れ場は低 Re 型 k-ε モデル (Abe-Nagano model) に基づく 3 次元解析を行っている。

汚染質の発生条件は①人体からの呼気による CO₂ の発生を模擬し床上 1.0m~1.2m の間の呼吸域で発生させた場合、②床面にあるじゅうたんや接着材からの化学物質の発生を模擬し床面全体に一

様発生させた場合、の2種類とし、汚染質は passive contaminant を仮定する。空調条件は設計目標温度と室内熱負荷を同一とし吹出風量と吹出温度を変化させて空調条件を設定している。

4. 解析結果と考察

気流分布・温度分布・空間様に汚染質を発生させた場合の濃度分布の解析結果は既報^{5,6)}を参照。図2に汚染質が呼吸域発生の場合を、図3に床面一様発生の場合の結果を示す。濃度分布は空間各部の濃度を吸込口の濃度(完全混合濃度)で無次元化している。各CASEの図は、それぞれ等温換気と、冷房・暖房時のCnが最小な解析結果、すなわち換気効率が最も良いもの、以上の計3種類を並べて示している。

4.1 呼吸域発生の場合の濃度場解析結果

CASE1(図2(1)~(3))では、各空調条件とも吹出気流による鉛直方向の循環流が形成され、天井面の吸込口より汚染質が排出されることで居住域の濃度は低くなっている。循環流の中心では汚染質が滞留している。CASE2(図2(4)~(6))では、等温換気と冷房時の居住域濃度は吸込口側の濃度が窓側よりも低くなっている。暖房時は吹出気流が浮力により上昇し上部に拡がる。居住域の汚染質は壁下部の吸込口から排出され居住域の濃度は完全混合濃度より低くなっている。CASE3(図2(7)~(9))では、等温換気時は循環流が生じ呼吸域周辺の濃度が高くなっている。冷房時は吹出気流の温度が低く風速も遅いため循環流は発生せず吹出気流は居住域に拡がり居住域の濃度が低くなっている。暖房時は2つの循環流が生じており汚染質が滞留し居住域の濃度は高くなっている。CASE4(図2(10)~(12))では、各空調条件とも吹出気流による循環流が形成され吹出気流は居住域に達する。冷房時は壁下部の吸込口より汚染質が効率よく排出され居住域の濃度は低くなっている。循環流の中心では汚染質が滞留している。CASE5(図2(13)~(15))では、等温換気と冷房時は吹出気流が居住域を通過することにより居住域の濃度が低くなる。暖房時は浮力により上昇する吹出気流が呼吸域の汚染質を空間の上部に輸送し、天井吸込口から排出されることにより居住域の濃度が低くなっている。

以上の解析結果から、呼吸域で汚染質を一様発生させた場合では、CASE5の置換換気方式のCnが等温換気・冷房時・暖房時を通して最小であった。CASE1は室内に生じている循環流の中心の位置が呼吸域と重なり汚染質が滞留しやすく、同様に循環流により汚染質が滞留する場合があった。

4.2 床面発生の場合の濃度場解析結果

CASE1(図3(1)~(3))では、各空調条件とも吹出気流による鉛直方向の循環流が形成されている。床面から発生した汚染質は、この循環流により室の上部に運ばれ天井面の吸込口より汚染質が排出され居住域の濃度は低くなっている。CASE2(図3(4)~(6))では、等温換気と冷房時はCASE1と同様な循環流がある。室内上部の濃度は天井面に吸込口がないためCASE1の濃度よりも高い。暖房時は吹出気流が浮力により上昇し、室の上部に気流が拡がるため上部の濃度が低い。また室の下部は壁下部の吸込口から汚染質が排出されるため濃度が低くなっている。CASE3(図3(7)~(9))では、等温換気は吹出気流が床面に並行に流れるため、床近傍の汚染質が吹出気流により運ばれ床付近の濃度が低い。室内に生じた循環流による影響で室内の吹出口側の濃度が高く居住域全体では濃度が高くなる。冷房時は吹出温度が室温に近く風量も多いため居住

表1 熱負荷条件

	照明	人体	OA機器	日射	熱貫流(窓)	壁面蓄熱	合計
夏期冷房	1638 (20)	1104 (13)	3200 (39)	2765 (34)	625 (8)	—	9332 (114)
冬期暖房	—	—	—	—	-2028 (-25)	-6810 (-83)	-8838 (-108)

(単位はW、()の値は床面積当りの発熱量W/m²、室内に向かう熱流を正(+)とする)

域の濃度が低くなる。暖房時は吹出気流が上昇するため床の汚染

表2 計算条件

解析メッシュ数	CASE1 78(x)×35(y)×72(z)=196,560 CASE2, CASE3 67(x)×27(y)×63(z)=113,967 CASE4 72(x)×68(y)×51(z)=249,696 CASE5 64(x)×64(y)×27(z)=110,592
乱流モデル	低Re型k-εモデル(Abe-Nagano model)
アルゴリズム	SIMPLE(定常解析)
流入境界	U _n は表3を参照 k _n =3/2(U _n ×0.05) ² , ε _n =C _μ ·k _n ^{3/2} /l _n l _n は吹出し幅の1/7, C _μ =0.09
流出条件	U _{out} =質量保存, k _{out} =free slip, ε _{out} =free slip
壁面	No-Slip
汚染質	passive contaminant, ①呼吸域発生・②床面一様発生

表3 解析対象とした空調条件

解析ケース	空調種別 ()内は吹出温度差Δθ	設計目標温度(°C)	吹出温度(°C)	換気回数(回/h)	吹出風速(m/s)	Ar数	Re数(×10 ⁶)
CASE1-1	①等温換気	—	—	10.0	0.85	0	0.16
CASE1-2	②冷房(-16°C)	26	10	3.9	0.67	-3.13	0.13
CASE1-3	③冷房(-10°C)	26	16	6.3	1.07	-0.76	0.21
CASE1-4	④冷房(-3°C)	26	23	21.0	3.58	-0.02	0.69
CASE1-5	⑤暖房(+10°C)	22	32	6.0	1.02	0.85	0.20
CASE1-6	⑥暖房(+3°C)	22	25	19.9	3.39	0.02	0.65
CASE2-1	①等温換気	—	—	10.0	0.85	0	0.16
CASE2-2	②冷房(-16°C)	26	10	3.9	0.67	-3.13	0.13
CASE2-3	③冷房(-10°C)	26	16	6.3	1.07	-0.76	0.21
CASE2-4	④冷房(-3°C)	26	23	21.0	3.58	-0.02	0.69
CASE2-5	⑤暖房(+10°C)	22	32	6.0	1.02	0.85	0.20
CASE2-6	⑥暖房(+3°C)	22	25	19.9	3.39	0.02	0.65
CASE3-1	①等温換気	—	—	10.0	0.15	0	0.03
CASE3-2	②冷房(-16°C)	26	10	3.9	0.12	-96.56	0.02
CASE3-3	③冷房(-10°C)	26	16	6.3	0.19	-23.58	0.04
CASE3-4	④冷房(-3°C)	26	23	21.0	0.65	-0.64	0.12
CASE3-5	⑤暖房(+10°C)	22	32	6.0	0.18	26.29	0.04
CASE3-6	⑥暖房(+3°C)	22	25	19.9	0.61	0.71	0.12
CASE4-1	①等温換気	—	—	10.0	1.71	0	0.33
CASE4-2	②冷房(-16°C)	26	10	3.9	1.34	-0.78	0.24
CASE4-3	③冷房(-10°C)	26	16	6.3	2.15	-0.19	0.41
CASE4-4	④冷房(-3°C)	26	23	21.0	7.17	-0.01	1.38
CASE4-5	⑤暖房(+10°C)	22	32	6.0	2.04	0.02	0.39
CASE4-6	⑥暖房(+3°C)	22	25	19.9	6.79	0.09	1.31
CASE5-1	①等温換気	—	—	10.0	0.05	0	0.01
CASE5-2	②冷房(-16°C)	26	10	3.9	0.04	-900.52	0.01
CASE5-3	③冷房(-10°C)	26	16	6.3	0.06	-220.27	0.01
CASE5-4	④冷房(-3°C)	26	23	21.0	0.21	-5.94	0.04
CASE5-5	⑤暖房(+10°C)	22	32	6.0	0.06	245.17	0.01
CASE5-6	⑥暖房(+3°C)	22	25	19.9	0.20	6.62	0.04

解析ケースはCASE(空調方式)-(空調種別)

Δθは(吹出温度)-(室温)

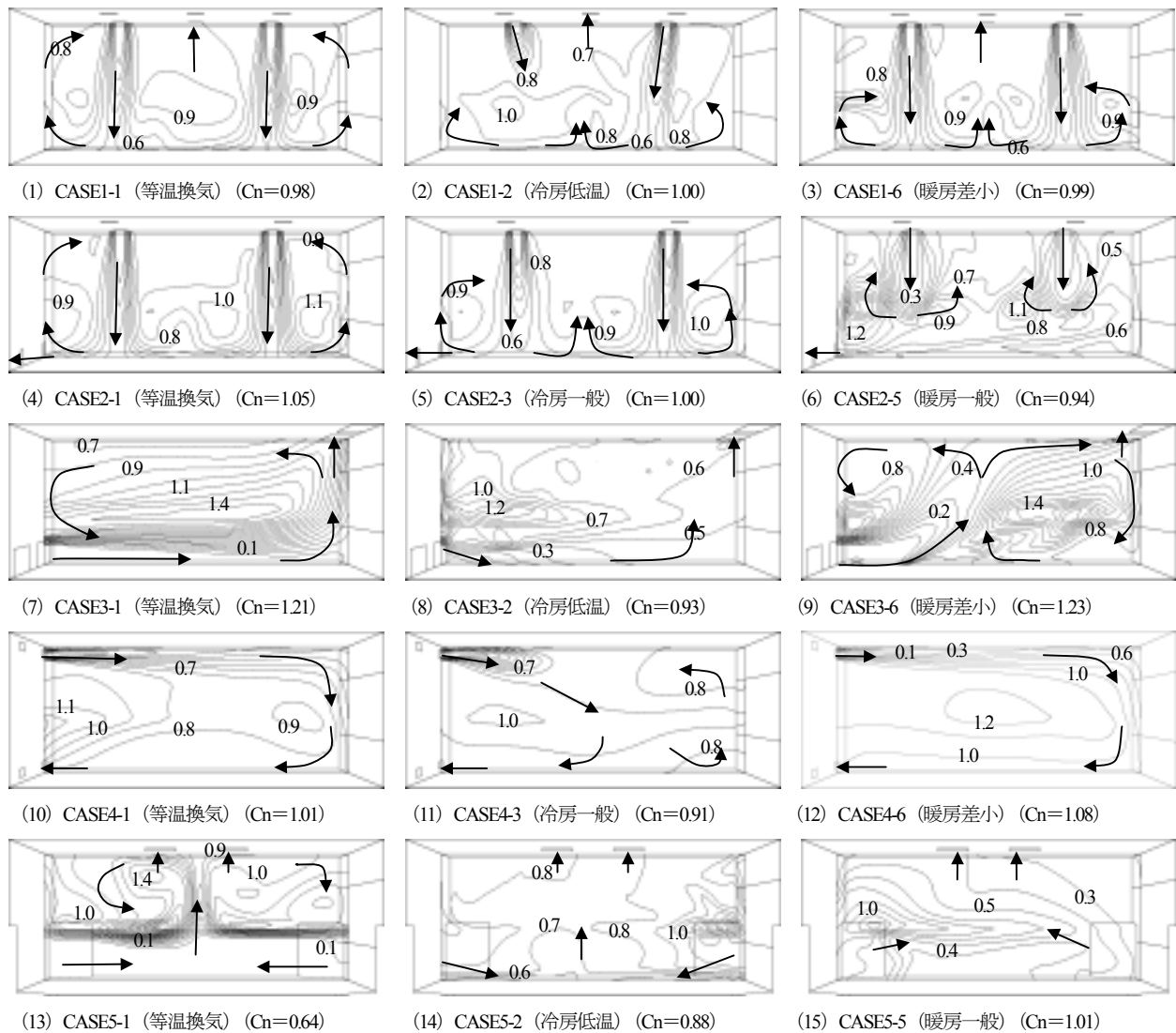


図2 呼吸域発生の場合の無次元濃度分布 (矢印は気流の流れを示す)

質が滞留し濃度が高くなっている。CASE4(図3(10)~(12))では、各空調条件とも吹出気流による循環流が形成され吹出気流は居住域に達する。壁下部の吸込口より床面で発生した汚染質が排出され居住域の濃度は低くなっている。CASE5(図3(13)~(15))では、等温換気では、吹出面の前方は濃度が低い。これは、吹出気流が床と平行に流れるためである。空間の上部には循環流があり中心が高濃度になっている。冷房時は吹出気流が下降し床面に広がり居住域は低濃度である。吹出気流は室の中央で衝突後、上昇し天井面の吸込口に向かって流れる。汚染質はこの流れにより排出されている。暖房時は浮力により吹出気流が上昇する為、床付近部分は吹出気流が到達せずに汚染質が滞留している。

以上の解析結果から汚染質発生が床面一様に発生する場合には、CASE4の壁上部吹出・壁下部吸込の換気方式のCn値が等温換気・冷房時・暖房時を通してが0.5前後であり最も低い値となった。

5. 汚染質の発生場所と規準化居住域濃度Cnの比較

図4に汚染質の発生条件別の規準化居住域濃度Cnを示す。既報^{文4)}で報告した汚染質が空間で一様発生する場合のCnも合わせて記載する。ほとんどの解析CASEのCn値は、汚染質が呼吸域や床

面等で偏在発生する場合と空間一様発生の場合を比較すると後者のCn値の方が大きくなっている。すなわち実空間における汚染質発生条件が不確定の場合には、汚染質空間一様発生のは、換気効率算定の際に安全側の仮定となることが確認された。

6. 結論

- (1) 汚染質が呼吸域のみで発生する場合、床面のみで発生する場合、ならびに空間一様で発生する場合の各汚染質発生条件の下で、オフィス空間を対象として規準化居住域濃度の解析を行った。
- (2) 汚染質が呼吸域で発生する場合は、CASE5の置換換気の空調方式の場合においてCn値が最小となった。室内で循環流が形成される場合には、汚染質の発生源と室内の循環流の中心が重なり汚染質が滞留する傾向が見られた。
- (3) 汚染質が床面で発生する場合は、CASE4の壁上部吹出・壁下部吸込の空調方式の場合においてCnが最小となった。床面が汚染源の場合、床面に沿った流れを形成することで発生汚染質を効率的にページが可能である。
- (4) HASS102-1997換気規準・同解説では汚染質の発生位置を特定

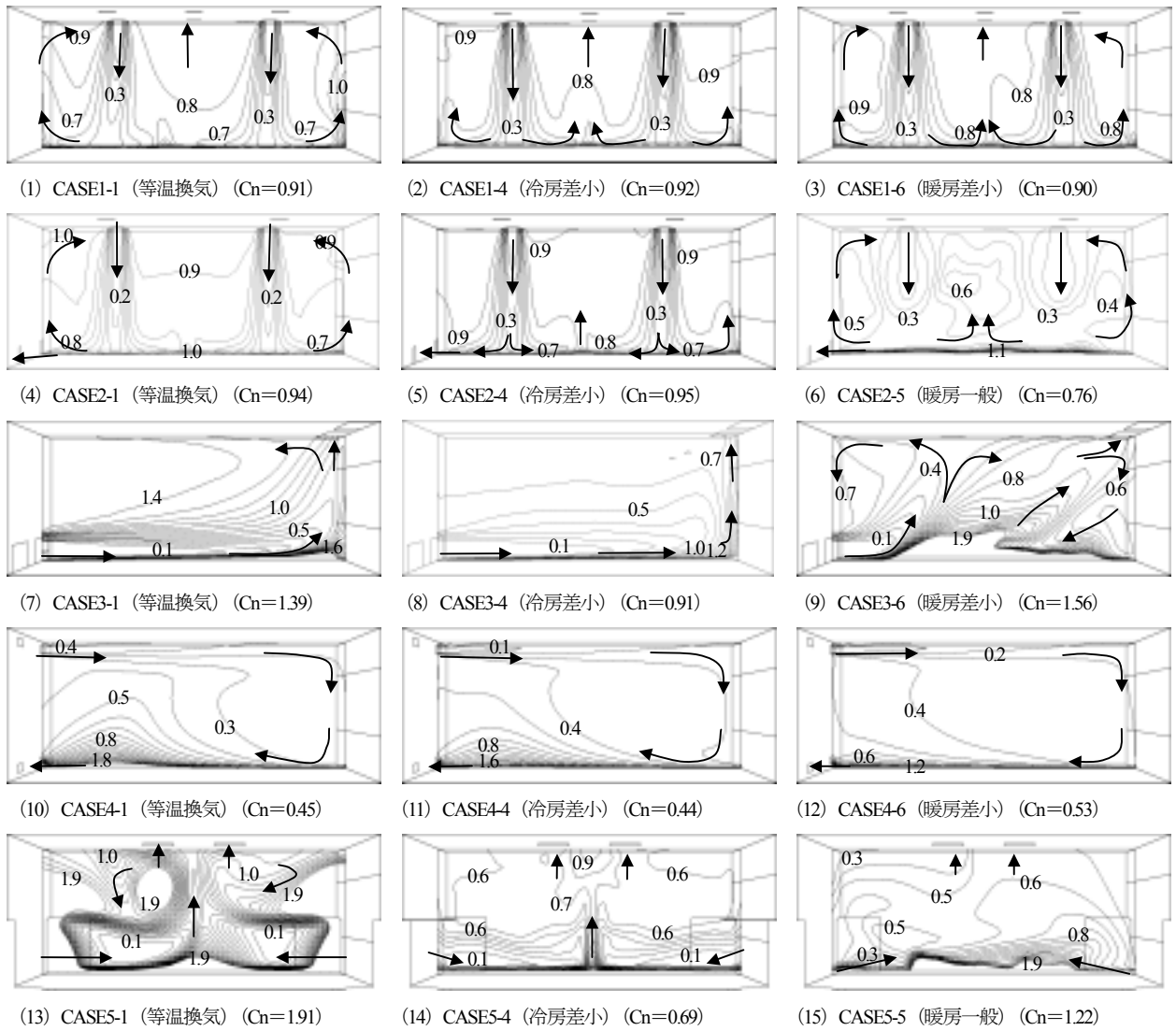


図3 床面発生の場合の無次元濃度分布 (矢印は気流の流れを示す)

することが困難な場合は汚染質は空間一様もしくは居住域一様に発生を仮定するのが一般的とあり、今回の解析結果から空間一様発生を仮定は換気効率を過大に評価せず、安全側の仮定であると確認できた。

参考文献

- 1) HASS102-1997 換気規準・同解説, 空気調和・衛生工学会規格, 1997.10
- 2) Mats Sandberg : Building Ventilation, Theory and Measurement, John Wiley & Sons, 1996
- 3) Sandberg, M. and Sjoberg : The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms, Building and Environment, 18, pp.181-197.1983
- 4) 菊池世欧啓, 高橋雄司, 小林信行, 伊藤一秀 : オフィス空間を対象とした規準化居住域濃度に関する研究(第1報) 各種空調システムにおける流れ場・温度場・汚染質濃度場のCFD解析 : 日本建築学会計画系論文集, No. 562, 2002.12, pp 45-52

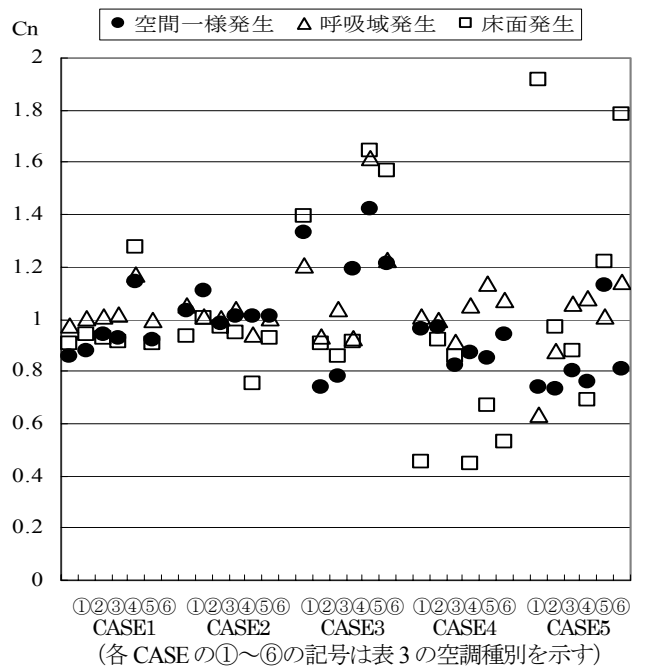


図4 汚染質の発生源別の規準化居住域濃度 Cn