多孔質固体内部における物質拡散のモデル化とミクロ-マクロモデルによる 室内 VOCs 濃度予測

揮発性有機化合物(VOCs)の吸脱着・放散現象のモデル化とその数値予測 (その2)

MODELING OF MASS DIFFUSION IN POROUS SOLIDS AND PREDICTION OF INDOOR VOCs CONCENTRATION BASED ON MACROSCOPIC MODEL

Physical model and numerical analysis of VOCs emission from building materials Part 2

藤村 淳一*, 村上周三**, 加藤 信介**, 近藤 靖史***, 田所 祐人****

*Jun-ichi FUJIMURA, Shuzo MURAKAMI, Shinsuke KATO,
Yasushi KONDO and Yuto TADOKORO*

In the previous paper, the simulated results of the VOCs concentration in a single room were demonstrated with macroscopic models. In this paper, these models were extended to the multiple room problem and the results of several cases were shown. Some CFD simulations were also conducted to study VOCs distribution in a room based on the standard k- ϵ model, in which the emission rate at material surfaces was evaluated by the macroscopic model and it was given as the boundary condition of CFD. When the diffusion process in solids was regarded as a dominated process, and the convective mass transfer process at the boundary layer was not so important, the mass flux can be estimated only on the basis of the internal diffusion process. This leads to a drastic reduction of the CPU time for analysis, and even the three-dimensional CFD prediction of VOCs distribution in a room can be achieved with reasonable CPU time.

Keywords : VOCs, multiple room problem, CFD, boundary condition, indoor VOCs concentration distribution

揮発性有機化合物(VOCs), 多数室問題, 数値流体解析, 境界条件, 室内 VOCs 濃度分布

1 はじめに

建材内部からの VOCs 等の放散量や室内濃度を予測するモデルとして、前報(その 1) ^{*)}において、建材内部を詳細(ミクロ的)に取り扱い、室内空気は完全混合(マクロ的)を仮定する、ミクロ-マクロモデルを定式化した。また、単室における室内平均濃度の予測を行い、このモデルは計算負荷が小さく、長期の予測に適したものであることを示した。ところで、建築の換気系は一般に複数の空間が開口等で接続される、多数室換気系である。そこで、本報(その 2)ではこのような多数室換気系に対応することを目的として、前報で示した単室を対象としたミクロ-マクロモデルを拡張する方法を提案し、解析例を報告する。

ここで、ミクロ-マクロモデルでは室内空気について完全混合を仮定しているため、解析結果としての室内濃度は平均化されたものである。しかし、室内気流には通常空間的分布が存在するため、汚染質の拡散性状は空間内の位置によって異なり、汚染質濃度は一様ではないのが一般的である。本報(その 2)では、ミクロ-マクロモデルより得られる物質フラックスを境界条件として与え、標準 k- ϵ モデルにより室内濃度分布を解析した計算例を示す。一方、既往の研究(文献 2)では、壁近傍の物質伝達を精度良く求めるため、微細なメッシュ分割を行い低 Re 数型 k- ϵ モデルにより 2

次元解析を行っている。これに対し、今回の解析では、ミクロ-マクロモデルにより、放散量(床面での物質伝達量)を事前に求め、これを境界条件として与えているので微細なメッシュ分割を行う必要がない。この結果、3 次元解析を比較的簡易な計算機資源により行うことができる。

2 ミクロ-マクロモデルの多数室換気系への拡張

2.1 換気回路網モデルによる空気交換量の算定

多数室換気系において、空間相互の空気交換量が得られれば、これによる VOCs 等の輸送量が算定でき、各室の濃度がわかる。各々の空間の換気量は換気回路網計算などによって求められ、この結果とミクロ-マクロモデルによる建材からの VOCs 等の放散量を連成させる事により VOCs の室内空気汚染に関する多数室問題へ対応することができる。

個々の空間の空気交換量を算定するために用いられる換気回路網モデルは多数開発されており、その代表的なものとして CONTAM ^{*)}、COMIS ^{*)}、NETS ^{*)}などがある。特に CONTAM は、Axley ^{*)}らにより、室内汚染質濃度を算定する機能を組み込むように改訂されつつあり、NETS においても同様な計算が可能である。

本論文は、日本建築学会大会学術講演会(1999)において発表した内容をもとにしている。

* 大成建設(株) 修士(工学)

(研究当時 武蔵工業大学 大学院生)

** 東京大学生産技術研究所 教授・工博

*** 武蔵工業大学 助教授・博士(工学)

**** 武蔵工業大学大学院

Taisei Co., Ltd., M. Eng.

Formerly Graduate Student, Musashi Inst. of Tech.

Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Musashi Institute of Technology, Dr. Eng.

Graduate Student, Musashi Institute of Technology

2.2 他の室との空気交換を考慮した室内濃度の算定法

次式により、他の室、あるいは他の空間との空気交換を考慮した室内空気の汚染質濃度が算定できる。

$$\frac{dC_{r,i}}{dt} = \frac{1}{V_i} \left(\sum_j Q_{ji} \cdot C_{r,j} - \sum_j Q_{ij} \cdot C_{r,i} + M_i \right) \quad (1)$$

ここで、

$C_{r,i}$: i 室の室内汚染質濃度 [kg(VOC)/m³ (Air)],

V_i : i 室の容積 [m³], Q_{ij} : i 室から j 室へ流れる空気量 [m³/s]

M_i : i 室での VOCs 等の放散量 [(kg(VOC)/kg(Air))・m³/s]

また、(1)式で定常状態を仮定すると、次式となる。

$$C_{r,i} = (\sum_j Q_{ji} \cdot C_{r,j} + M_i) / (\sum_j Q_{ij}) \quad (2)$$

マイクロ-マクロモデルのうち、Short-Term モデルおよび Long-Term モデルでは(1)式を、Very Long-Term では(2)式を用いて、室内濃度を算定する。

3 多数室換気系の解析概要(2室モデル)

3.1 検討モデル

図 1 に示すように、A室とB室の2室が開口で接続されており、また各室は外部とつながる開口などによって換気がなされているものとする。ここでは、前述の換気回路網モデルなどにより、各開口を通過する風量が既に算出されているものとする。また、汚染質発生源は前報(その1)と同様、SBR(polypropylene Styrene-Butadiene Rubber:合成ゴムの一種)とする。

3.2 検討ケース

表1に示す、5 ケースを解析する。case1 では前報(その1)で検討した条件の室が2室接続している。case2 は汚染質の放散量が異なる2室が接続している状況である。case3 では大量の換気により室内の汚染空気を排出するとともに室内壁表面近傍の汚染質を速やかに取り除く Flushing を行なっている室と行なっていない室が接続している。case4 では室内空気及び室内建材温度を人為的かつ一時的に上昇させ、併せて換気を行うことにより建材からの VOCs 放散を促進させてこれを減少させる Bake out を行なっている室と行なっていない室が接続している。case5 では換気量が少ない室(使用される頻度が少ない室や押入れ・収納家具等の空間を想定)と通常の室が接続している状況である。以上の5 ケースにおいて、0~7 日目まで、および 60~67 日目までの室内濃度履歴を示す(case4 のみは Bake out 期間の5日間)。また、case2~case5 の室内濃度履歴と、基準とする case1 のそれとを比較、検討する。

4 解析結果と考察

4.1 汚染質発生量が異なる2室

図2に case1 と case2 の結果を比較する。case2 では、B室の汚染質発生源である SBR カーペットの面積(放散面積)が、A室の20%[(4.05[m²])と少ないため、B室における室内濃度はA室に比べ低くなっている。またA室の濃度もB室との相互換気の影響によりB室の低濃度空気が、A室の濃度を若干下げている様子がわかる。

図 1 多数室換気系検討モデル(2室)

表 1 検討ケース

B 室の状況					
	換気量 [m³/s]	SBR 面積 [m²]	室温 [°C]	A 室との 空気交換 量[m³/s]	備考 (状態)
case1	0.027	20.25	23	0.0034	標準
case2	0.027	4.05	23	0.0034	低負荷
case3	0.027~0.27	20.25	23	0.0034	Flushing
case4	0.017~0.17	20.25	10~30	0.0017	Bake out
case5	0.0034	20.25	23	0.0017	押入れ

A室の状況:各ケースとも以下の条件

換気量:0.027[m³/s]、SBR 面積:20.25[m²]、室温 23[°C]

4.2 Flushing を実施している室としていない室の2室

図3に case3 の結果を示す。case3 では、前報(その1)の結果同様、B室の濃度は Flushing 時に下がるが、長期的に見るとその効果は顕著でない。一方、A室では Flushing を行なっていないが、B室との空気交換の影響により、B室の Flushing 時に室内濃度が下がる様子がわかる。

4.3 Bake out を実施している室としていない室の2室

図4に case4 の結果を示す。case4 では、前報(その1)の結果同様、B室の濃度は Bake out 時に上昇し、Bake out を行なっていないA室においても、B室との空気交換の影響により、B室の Bake out 時に室内濃度が上昇する様子がわかる。

4.4 換気量の少ない空間からの浸入汚染質の影響

押入れや収納家具の内部はホルムアルデヒド等の汚染質濃度が高いという測定結果が報告されている^{*)}。このような付属的な空間からの浸入空気が居室の汚染質濃度に対してどのような影響を及ぼすかを検討した case5 の結果(図5)では、B室は換気量が 0.0034[m³/s](=0.2[回/h])とA室の 0.027[m³/s](=1.6[回/h])と比較して極めて少ないため、B室における室内汚染質濃度は、A室に比べ高い。一方、A室ではある一定の換気量が確保されている状況であり、若干の濃度上昇は見られるもののB室からの浸入汚染質の影響は大きくない。ただし、A室の換気量が一時的に少なくなる場合などは、A室内部での汚染質発生に加え、付属的な空間からの汚染質浸入の影響が懸念される。

5 ミクロ-マクロモデルによる壁面物質フラックスを境界条件とした室内濃度分布解析

建材からの放散は、蒸散支配型と内部拡散支配型の2タイプに大きく分けることができる。本研究では、内部拡散支配型、つまり建材内部における拡散の抵抗が、表面伝達の抵抗に比べ大きく、材料内の拡散がその室内空気中への放散速度を支配している。このような場合建材からの VOCs 放散量は、放散面近

図2 case2 室内濃度の日変化:B室放散面積 25%を想定

図3 case3 室内濃度の日変化:B室 Flushing 実施

図4 case4 室内濃度の日変化:B室 Bake out 実施

図5 case5 室内濃度の日変化:B室未使用を想定

表2 境界条件および計算条件

解析ケース	case A (居室モデル)	case B (オフィス)	case C (オフィス)	case D (オフィス、 置換換気)
パーティション	-	無し	有り	有り
解析メッシュ	40(X)×20 (Y)×30(Z)	72(X)×19 (Y)×24(Z)	72(X)×19 (Y)×24(Z)	72(X)×19 (Y)×24(Z)
流入条件	OA:0.1m/s 開口面積: 0.27 m ²	OA:1.12m/s 開口面積: 0.45 m ²	OA:1.12m/s 開口面積: 0.45 m ²	OA:0.14m/s 開口面積: 1.2 m ²
壁面境界	速度:一般化対数則。床面での VOCs の放散量(5 日目):E=1.7×10 ⁻⁸ [g(VOC)/m ² ・s]			

・吹き出し風量は、1人あたりの必要換気量=30[m³/h・人]を仮定し、外気導入量を空調風量を循環空気量の10%として定めた。流れ場を解析した後、床面から VOCs を想定した拡散物質を一樣に放散させ拡散解析を行う。

・流れ場は等温場であるとし、熱輸送方程式は解いていない^{註1)}。

・流入境界条件としての乱流エネルギー k_{in} 、 k の散逸率 ε_{in} は以下の式を用いて求める。

$$k_{in} = (U_{in}/10)^2 [m^2/s^2], \quad \varepsilon_{in} = 0.09^{3/4} \cdot k_{in}^{3/2} / \ell_m [m^2/s^3]$$

ここで U_{in} : 流入速度、 $\ell_m = 1/2L$ 、 L : 吹出短辺である。

傍の気流の影響を受けない。よって、マイクロマクロモデルにより、ある検討日時の物質フラックスを求め、これを境界条件として与え、CFDにより室内濃度分布を解析することにより、室内濃度分布を予測することが可能である。

5.1 検討モデル

VOCsなどの発生源であるシート状の合成ゴムSBR(polypropylene Styrene-Butadiene Rubber)を想定し、マイクロマクロモデルより得られる物質フラックスを、図6(a)~(d)に示すような居室やオフィスを想定したモデルに与え、床面から一樣にVOCs等が放散した場合の室内濃度分布を標準k-εモデル

ルにより3次元解析する。床面からのVOCs等の放散量は、SBR内のVOCsの有効拡散係数 $D_c = 5.9 \times 10^{-6} [m^2/s]$ (23℃の場合)とした場合の材齢5日目のフラックスを与えた。またオフィスモデルにおいては、1スパン(3[m])を検討対象とし、Y軸方向の面を対称面であるとして、幅1.5[m]の領域の解析を行っている。

5.2 検討ケース(表2)

検討ケースは表2に示す4ケースである。居室モデルを想定したcase Aでは、文献2との比較のため、室内濃度 C を建材内の初期気相換算濃度 $C_0 = 1.92 \times 10^2 [g(VOC)/m^3]$ で無次元化している。オフィスモデルを想定したcase B、C、D(表2)では、給気濃度を0.0、完全混合状態の濃度を1.0として表している。解析条件などを表1に示す。また、本解析では等温場(23℃)を想定している^{註1)}。

6 居室モデルの解析結果および考察(図7)

6.1 気流(図7(a)~(c))

室内では、壁面に沿った大循環流が形成されている。この結果は、文献2と概ね一致している(図省略)。しかし文献2では、床面の隅角部において大循環流と逆向きの2次渦が形成されているが、本解析では十分には再現できていない。これは用いた乱流モデルの違いによるものと考えられる。このように、床面近傍や隅角部などの検討を行う場合においては、低Re型k-εモデルなどの粘性底層の構造を詳細に扱うことの出来るモデルを用いることが望ましい。また、FL+0.4[m](図7(b))とFL+1.0[m](図7(c))の気流平面図より、ほぼ一樣に右から左への流れが見られ、壁体

隅各部においては、2 次渦が見られる。室中央域では、FL+0.4[m](図 7(b))の方が FL+1.0[m](図 7(c))よりも風速は大きい。

6.2 濃度分布(図 7(d)~(f))

鉛直断面は文献 2 の結果と概ね一致した(図省略)。図 7 より室中央部の呼吸域(図 7(d))においては、 $C/C_0 = 1.3 \times 10^{-7}$ ($2.5 \times 10^{-5} [\text{g(VOC)}/\text{m}^3]$)^{註 2)}程度であるのに対し、床面近傍の就寝者呼吸域(図 7(e), FL+0.4m)や、壁面近傍、特に壁隅角部においては比較的高濃度領域($C/C_0 > 1.6 \times 10^{-7}$ ($3.07 \times 10^{-5} [\text{g(VOC)}/\text{m}^3]$)^{註 2)})であることがわかる。このことより乳児や就寝者などの床面に近い位置で生活する人は高濃度に暴露される可能性があることがわかる。また室中央域では、FL+0.4[m](図 7(e))より FL+1.0[m](図 7(f))の方がやや濃度が高い。

図 7 case A(居室モデル)

7 オフィスモデルの解析結果および考察

7.1 気流(図 8(a)~4(a))

case B(パーティション無し)の場合、case A(居室モデル)と同様に壁面に沿った大循環流が形成されている。一方 case C(パーティション有り)の場合、case B の様な大循環流は、パーティションにさえぎられ形成されず、パーティション内部の流速も小さい。

7.2 濃度分布^{註 3)}(図 8(b)~(d)~図 9(b)~(d)、表 3)

case B(パーティション無し)の場合、室全体が完全混合状態(= 1.0)の約 2 倍以内の領域が多く、室全体での平均濃度は 1.5 であった(表 3)。また各 FL+1.0[m]と FL+1.5[m]の濃度平面分布に大きな差は見られない。これに対し、case C(パーティション有り)の場合、作業呼吸域においては、case B と同様であるが、居住域濃度は case B に比べ大きい。これは給気口下部やパーティション下部において高濃度域(完全混合状態濃度の約 3 倍)が形成されるためと思われる。各ケースの比較により、パーティションは、その内部だけでなく、周辺の空気質にも影響を与える可能性があることがわかる。

8 置換換気方式の解析結果および考察

8.1 気流(図 10(a))

case D(パーティション有り、置換換気)の場合、パーティション、に衝突した吹出し空気が一度上昇し、その後パーティション内などを通過した後、排気口へと流れる。

図 8 case B (パーティション無し)

図 9 case C (パーティション有)

図 10 case D (置換換気、パーティション有)

表 3 各領域の濃度平均値 (註 3)、註 4)

平均濃度	case B	case C	case D
室全体	1.5	1.8	1.6
居住域 (Z<1.8[m])	1.6	2.1	2.6
作業呼吸域 (0.8[m]<Z<1.8[m])	1.4	1.5	0.8

8.2 濃度分布 (註 3) (図 10(b)~(d)、表 3)

case D (置換換気、パーティション有) において作業呼吸域の平均濃度は 0.8 で (表 3)、他のケースに比べ低濃度となっており置換換気方式の特徴が確認できる。しかしこの場合においても排気口下部の領域や、パーティション下部において高濃度域 (完全混合状態濃度の約 3 倍) が見られるため、居住域の平均濃度は他のケースに比べて高くなっている。

9 まとめ

マイクロマクロモデルを多数室換気系の評価に拡張する方法を示した。また、簡単化した 2 室系の解析を数ケース行い、相互換気の室内濃度へ与える影響を検討した。これにより、マイクロマクロモデルによる室内汚染物質濃度予測は、現実的な課題に対し、設計者が手軽に解析できる有用な解析手法であることを示した。また、マイクロマクロモデルで算定した物質フラックスを境界条件とした CFD 解析により、居室やオフィス内での VOCs 等の濃度分布を解析した。これにより、換気設計の際、高濃度域を予測する有効な手法であることを示し、以下の知見を得た。

居室モデルに関し、

- ① 汚染源のある床面近傍 (FL+0.4m) や壁面近傍、特に壁体隅角部においては比較的高濃度領域 ($C/C_0 > 1.6 \times 10^{-7}$ ($3.07 \times 10^{-5} [\text{g}(\text{VOC})/\text{m}^3]$)) が生じる。

またオフィスモデルに関し、

- ② case B (パーティション無し) と case C (パーティション有り) の間には、一部の領域を除き大きな差は見られない。

- ③ case D (置換換気、パーティション有) の場合、他のケースに比べ低濃度域が広く、換気方式により、VOCs 濃度分布に差が生じることが考えられる。

【謝辞】

本研究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。また、本研究にあたり、東京工芸大学 助手伊藤一秀氏ならびに、大成建設 森川泰成氏、洞田浩文氏に多大な協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

【参考文献】

- 文 1) 近藤靖史・村上周三・加藤信介・藤村淳一・伊藤一秀、(2000): 多孔質固体内部における物質拡散のモデル化とマイクロマクロモデルによる室内 VOCs 濃度予測 (揮発性有機化合物 (VOCs) の吸脱着・放散現象のモデル化とその数値予測 (その 1)、日本建築学会計画系論文集 No.535, 2000.9
文 2) 村上周三・加藤信介・伊藤一秀、(1999): 床材からの内部拡散支配型物質放散に対する材料温度の影響と換気除去効果 (CFD 解析による室内の化学物質空気汚染の解明 第 1 報)、日本建築学会計画系論文集 No.523, 1999.9, pp.63-69
文 3) Walton, G.N. (1997): CONTAM96 user manual, NISTIR 6056. Gaithersburg, Md.: National Institute of Standards and Technology.
文 4) Yoshino, H., Liu, J. Feustel, H.E., Millet, J.R. and Mansson, L.G. (1999): Numerical Analysis of Ventilation System Performance by COMIS Model, ASHRAE Winter Meeting, Chicago. CH-99-14-4.
文 5) 奥山博康他 (1998 年 8 月): 熱・換気回路網計算プログラム NETS の開発 (その 2) プリ・ポスト処理システムの概要、空調調和・衛生工学会学術講演会論文集、D-14, PP.269
文 6) James, W. Axley (1996.06): New Mass Transport Elements and Components for the NIST IAQ Model
文 7) 田邊彦坂・中村・山田 (1998 年 9 月): 収納家具内部のホルムアルデヒド気中濃度についての検討、日本建築学会大会

註 1) 実際のオフィスでは OA 機器などによる熱負荷があり、それによる上昇流の形成等が考えられるが、本解析ではモデルの単純化のため考慮しない。

註 2) 空調調和・衛生工学会 HASS102 換気規準では、TVOC の設計基準濃度は $300 [\mu\text{g}/\text{m}^3]$ である。

註 3) case B~case D においては濃度を、排気口濃度で無次元化している。居住域濃度をこのように無次元化した値を HASS102 換気規準では、規準化居住域濃度と呼ぶ。

註 4) 居住域は床面から高さ 1.8[m] までの領域とする。「作業呼吸域」は床面からの高さが 0.8[m] から 1.8[m] までの領域でかつ、壁面から 1.0[m] 以上離れた領域 (机上面) と仮定する。

(2000 年 9 月 10 日原稿受理, 2000 年 11 月 15 日採用決定)