

第6章 吸着性建材による室内化学物質濃度の低減に関する実験と数値解

Experiment and 3D-CFD Analysis of Reducing Effect of Pollutant Concentration with Absorptive Building Material

Measuring method of performance of passive adsorption building materials that are used for reducing pollutant concentration in a room is considered. The convective mass transfer characteristic has a great influence on its performance. In order to control the convective mass transfer precisely in the performance test, the authors have developed the Boundary Layer Type Small Test Chamber in which precise control of airflow along the test materials can be done. The equivalent ventilation rate (Q_{ads}) of adsorption performance is drawn as the new index that corresponds to the rate of convective mass transfer rate in the case of the adsorption surface concentration to be zero. To demonstrate the performance test, the adsorption test of the gypsum board that has the ability of decomposing HCHO within the board by the addition of some chemical materials is performed. The absorption rate of the gypsum board predicted by the CFD corresponds well with the experimental result. Result of CFD Analysis on Diffusion Field within a full scale room were shown.

KEYWORDS: Boundary layer type Test Chamber, Passive absorptive material, Mass transfer, Full-scale

6-1 研究目的

シックハウス問題が発生した要因として①建物の気密性の向上に伴う換気量の減少(省エネ対策)②化学物質を用いた建材、施工材、家具、日用品の普及(経済、技術、市場等の変化)③化学物質に過敏に反応する人の増加(化学物質の大量消費)の3点が挙げられる。このような背景を踏まえて、今日の学術研究において開発が強く求められているのは、化学物質の室内濃度の事前予測手法である。これは現在室内の化学物質濃度に関して様々な指針値が出されているが、それらが設計段階で実現可能かどうかを正確に知ることを目的としている。本研究では室内空気中の化学物質としてホルムアルデヒドを対象としているが、化学物質の室内での濃度分布は一般に一様ではなく、汚染質発生位置や室内の気流性状、汚染質を低減させる吸着性建材等におけるシンク効果、化学反応等に左右される。

本研究では室内空気の化学物質汚染への対策として、濃度低減に効果があると期待される吸着性建材に注目している。しかしこの建材を用いた既存の室内の濃度分低減効果に関する数値解析等の研究は吸着性建材の吸着面の濃度を0、つまり永久に大きな吸着力を持つと仮定するなど、建材内での化学物質の吸脱着や化学反応を考慮した解析が行われていない。そこで本研究では、特に吸着建材として石膏ボードを用い、実験および計算流体力学(CFD: Computational Fluid Dynamics)を基本とした解析手法により、石膏ボードの濃度低減性能を確認し、実現象に対応した吸着建材

におけるシンク効果や化学反応を考慮した数値予測モデルの検証を行う。またこの数値予測モデルを実大スケールの居室に適用する事で、室内での吸着建材の化学物質の濃度低減における有効性の検討を行う。

6-2 吸着現象のモデル化

本研究で用いた吸着性建材は石膏ボードにHCHO吸収分解性能を持たせた製品(以下吸収分解石膏ボードと表記)であり、HCHOを捉えた後、化学反応により分解し、再放散しないメカニズムを有する。通常品の石膏ボードは内部拡散支配型建材に分類され、等温過程の建材内部のVOCs輸送現象は(6-1)式で表すことができる。D_cは有効拡散係数[m²/s]であり実験的に測定される値である。吸収分解石膏ボードも内部拡散支配型建材に分類されるが、この建材の吸着現象をモデル化するには、建材内での化学反応を考慮する必要がある。(6-3)式においてρ_{air}CがHCHO、m_aが吸収分解石膏ボード内の吸着剤であり、この2物質の化学反応について本研究では反応速度定数kを用いたモデル化を行う。また用いる建材は建材としての有限な形を持つため恒久的な吸着力はなく、吸着容量を考慮したモデル化を行う。吸収分解石膏ボード内のHCHOの拡散過程はその吸着容量を満たした後に建材深部へHCHOが拡散する(図6-1)。

6-3 吸収分解石膏ボードの濃度低減性能に関する実験とCFD解析

吸収分解石膏ボードを用いた濃度低減性能に関す

る実験と、実験に対応した CFD 解析を行う。吸着面となる部分には表1の吸収分解石膏ボードの数値予測モデルを用いる。実験と CFD の対応からモデル化の妥当性を検討する。

6-3-1 吸着速度の評価

吸収分解石膏ボードの性能を換算換気量によって評価する方法がある。これは建材の吸着速度 ads [$\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$] を清浄空気の流入による換気の効果で表現するものである。吸着速度はテストチャンバーの出入口濃度差 ($C_{in}-C_{out}$) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] とチャンパー換気量 Q_v [m^3/h] 及び試験建材面積 a [m^2] から (6-6) 式で表される。

$$ads = (C_{in}-C_{out}) \cdot Q_v/a \quad \dots (6-6)$$

ads を清浄空気(濃度ゼロ)を導入した場合の換気量 $Q_e^{(注1)}$ で表すと (6-7) 式となる。

$$ads = (C_{in}-C_{out}) \cdot Q_v/a = (C_{out}-0) \cdot Q_e \quad \dots (6-7)$$

これより Q_e は (8) 式となる。

$$Q_e = (C_{in}/C_{out}-1) \cdot Q_v/a \quad \dots (6-8)$$

6-3-2 実験の概要

吸収分解石膏ボードの試験には、建材表面における物質伝達性状(気流性状)の正確なコントロールが必要である。揮発性有機化合物の物質伝達性状は対流熱伝達特性とほぼ相似であり、試験時の建材表面の気流性状を一般に馴染みの深い対流熱伝達特性(室内の対流熱伝達率は一般に $3\sim 6\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ (物質伝達率: $9\sim 18\text{m}/\text{h}$)程度)で表現することは一定の合理性がある。本研究で用いた境界層型小型テストチャンパーは、測定室内を一定風速で換気できる Inner chamber とそれを包含する Outer chamber により構成され、この試験建材の表面の気流性状を正確にコントロールすることができる。Inner chamber の平均風速 $U_{center}=0.1\text{m}/\text{s}$ が、試験建材表面の対流熱伝達率 $5.2\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ (物質伝達率: $15.5\text{m}/\text{h}$) に対応する^(注2)。本実験のサンプリングシステムの流れを図6-2に、解析ケースを表1に示す。HCHO のサンプリングはDNPHカートリッジ、定量分析にはHPLCを用いる。

6-3-3 テストチャンパーに関する CFD 解析概要

実験に対応した CFD 解析を行う。チャンパーの対称性から、1/2 領域での 3次元解析を行う。乱流モデルは低 Re 型 $k-\epsilon$ モデル(Abe-Nagano model)を利用(流れ場解析の詳細と結果は文2参照)。流れ場解析後、Outer Chamber への HCHO 供給濃度を 0.08ppm とし、試験建材設置面に吸収分解石膏ボードの数値予測モデルを適用し HCHO 拡散場を解析する。吸収分解石膏ボード内の HCHO 有効拡散係数はカップ法により求められた値 ($D_c=2\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)^(注3)を用いる。23°Cでの空気中の HCHO 拡散係数は $1.53\times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ を与え

表 6-1 吸着相における支配方程式

1 内部拡散支配型建材(通常品の石膏ボード)に対する輸送方程式

$$\rho_{air} \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho_{air} D_c \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \quad \dots (6-1)$$

ρ_{air} : 空気密度 [$\mu\text{g}_{air}/\text{m}^3$]

C : 気相換算濃度 [$\mu\text{g}_{VOCs}/\mu\text{g}_{air}$]

D_c : 内部拡散支配型建材の有効拡散係数 [m^2/s]

2 吸収分解石膏ボードに対する輸送方程式建材内部での HCHO の化学反応を考慮する。

$$\rho_{air} \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho_{air} D_c \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - S \quad \dots (6-2)$$

$$S = k \rho_{air} C m_a \quad \dots (6-3)$$

$$m_a = m_{ads} - m \quad \dots (6-4)$$

$$m = \int \frac{S}{\rho_{air}} \quad \dots (6-5)$$

k : 反応速度定数 [$1/(\mu\text{g}_{VOCs}/\mu\text{g}_{sol})\text{s}$]

m_a : 建材内の反応化学物質残存量 [$\mu\text{g}_{VOCs}/\mu\text{g}_{sol}$]

m_{ads} : 飽和吸着量 [$\mu\text{g}_{VOCs}/\mu\text{g}_{sol}$]

m : HCHO 吸着量 [$\mu\text{g}_{VOCs}/\mu\text{g}_{sol}$]

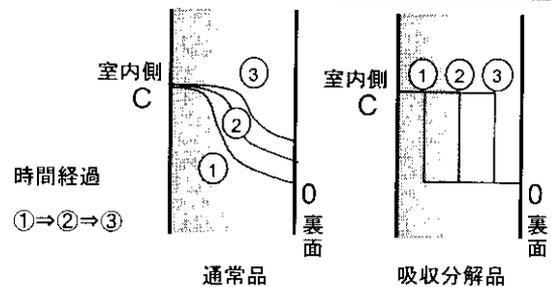


図 6-1 石膏ボード内の HCHO 拡散過程

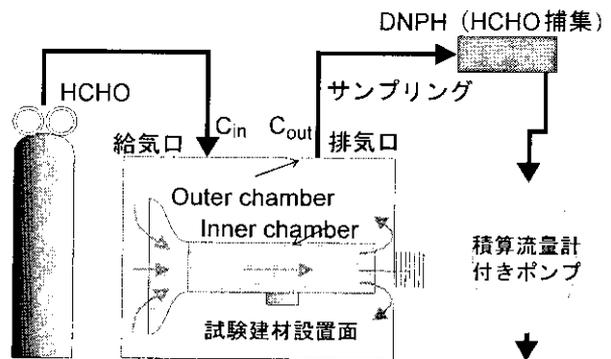


図 6-2 境界層型小型テストチャンパーを含むサンプリングシステム

る^(注4)。吸収分解石膏ボードの吸着力は非常に大きいため、初期条件として建材全体に濃度ゼロを与え、非定常解析を行う。CFD 解析条件を表6-3に示す。

6-3-4 実験・CFD 解析結果

実験結果を図6-3に示す。定常状態の実験結果と CFD 解析の結果を表6-4に示す。CFD 解析はチャンパーに汚染空気を供給し始めた後、12時間経過した時の結果であり、定常に達しているとみなせる。図6-3より、汚染空気を供給し始めてから約6時間後に定常状

態となっていることがわかる。表 6-2, 6-4 より、給気口濃度に対する排気口濃度の低減率が約 8 割となり、吸収分解石膏ボードが室内空気中の HCHO 濃度低減に効果があることがわかる。またこの吸着効果は通常の使用で 3-4 年以上の性能維持が可能であることが報告されている⁽⁵⁾。汚染空気の供給を止めた後、再放散は起きない。表 6-4 より、境界層型小型テストチャンパーにおける実験と、実験に対する CFD 解析の結果がよい対応を示していることがわかる。これは本研究で用いた吸収分解石膏ボードの数値予測モデルの妥当性を示すものである。

6-4 実大居室モデルにおける濃度低減に関する数値解析

吸収分解石膏ボードの吸着性能に関する数値予測モデルの妥当性を検証した。空気中の化学物質の濃度低減に関して境界層型小型 Test Chamber 試験に対する実験と数値解析の結果がよい対応を示した。このことから、この数値予測モデルを利用した吸着現象の数値解析が妥当であることがわかった。またこの chamber 試験において、吸収分解石膏ボードは空気中の化学物質濃度の低減に非常に効果があることが確認された。しかし、この濃度低減効果の結果は chamber における、つまり実際よりも小さなスケールに対しての結果である。本研究で用いた石膏ボードは、実際の住宅等では特に壁材や天井材として用いられることが多い。ここではこの検証された吸収分解石膏ボードの吸着現象に関する数値予測モデルを用い、これを実スケールの居室モデルに適用し、その時の実大室内における化学物質の濃度低減効果の検討を行う。

6-4-1 居室モデルの概要

本解析に用いる簡易居室モデルの斜視図を示す。居室はその大きさが 3.52×2.61×2.40 [m³] となっており、公営住宅の 6 畳間を想定している。室内の換気回数は 0.5 回/h とし、床四周の巾木部分から外気（清浄空気）が侵入し、天井の同じく四周部分から漏出するものと仮定する。室内温度は 23°C（等温）とし、外気や各壁面における外部との熱交換はないものとする。この解析対象において汚染物質は床からのみ発生するとし、家電製品や家具、燃焼器具等の汚染質発生の可能性があるものは設置しないものとした。一般に石膏ボードは天井、壁面に利用されることが多いため、本解析でも吸収分解石膏ボードを天井、壁面に適用し、室内空気中の化学物質の濃度低減効果を確認する。解析は居室の対称性を考慮して南北方向の中心（1.305m の地点）において対称面をつくり（図 6-3）居室の 1/2 領域を解析する。

表 6-2 解析ケース^{注2)}

給気口濃度 [μg/m ³] (ppm)	温度 [°C]	湿度 [%]	換気回数 [回/h]	Ucenter [m/s]
100 (0.08)	23	0	0.5	0.1

表 6-3 CFD 解析条件

乱流モデル	低 Re 型 k-ε model (Abe-Nagano model)		
メッシュ 分割	216,600	差分 スキーム	移流項: QUICK
流入境界	outer chamber 給気口 : $U_{in}=1.44\text{m/s}$, $l_{in}=1/7 \cdot L_f$, $k_{out}=3/2 \cdot (U_{in} \times 0.05)^2$, $\epsilon_{in}=C_{\mu} \cdot k_{in}^{3/2} / l_{in}$ (L_f = (inlet 直径) = 7mm)		
流出境界	outer chamber 排気口 U_{out} = (質量保存による) k_{out}, ϵ_{out} = free slip		
inner chamber 内 ファン位置 の境界条件	$U_{fan}=2.69$ (m/s) $k_{out}=3/2 \cdot (U_{fan} \times 0.05)^2$, $\epsilon_{in}=C_{\mu} \cdot k_{in}^{3/2} / l_{in}$ ($l_{in}=1/7 \cdot L_f$, L_f = (fan の半径) = 20mm)		
壁面境界	No-slip		

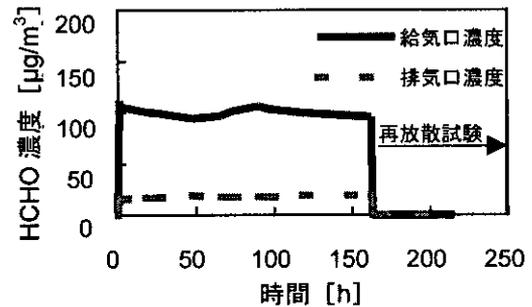


図 6-3 吸収分解石膏ボードの濃度低減性能

表 6-4 定常状態における実験と CFD 解析結果

	排気口濃度 [μg/m ³] (ppm)	平均吸着速度 [μg/(m ² h)]	物質伝達率 [m/h]	換算換気量 [m ³ /m ² h]
実験	18 (0.02)	110	6.11	6.11
CFD	18 (0.02)	102	5.70	5.70

6-4-2 居室モデルにおける CFD 解析の概要

解析は居室の対称性から南北方向の中央に対称面を設け、1/2 領域での 3 次元解析を行う。巾木部分から流入する外気は清浄空気、HCHO 濃度は 0μg/m³ とする。また流入空気の乱れの強さは 5% とする。床面から発生した HCHO は換気により天井四周より排出されるか、建材設置面で吸着されるかのいずれかとし、吸着面以外の壁面では吸着されないものとする。床面からの HCHO 放散量は市販されている FcI 合板について境界層型小型テストチャンパーを用いて試験した結果を用

いる^{注3)}。一定の放散速度のHCHOに対して、吸収分解石膏ボードの設置面数、位置を変化させた場合の濃度低減効果を検討する。解析対象とした居室モデル、数値解析の概要と解析ケースをそれぞれ表6-5、6にまとめる。

(1) 流れ場の解析条件

本解析において流れ場は、壁面や天井面での吸着を考慮するため粘性底層における拡散を精度よく解析する必要がある。そこで乱流モデルは低 Re 型 k-ε model (Abe-Nagano model) を用い、室内の濃度分布を把握するため3次元解析を行う。換気は隙間換気であり、その流入空気である床四周の中木部分からの吹き出し風速は室内の換気回数 (0.5 回/h) から 0.25m/s とし、吹き出し気流の乱れの強さは 5%とする。また流出空気は質量保存により天井四周より排出される。

(2) 拡散場の解析条件

汚染質 (ホルムアルデヒド) は床面から一様に発生するとし、床面以外から発生しないものとする。また床面からの汚染質の放散量は、159.5 $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ とする。この放散量は境界層型小型 Test Chamber の試験建材設置面に、市販されている合板のうち Fc1 のものを用いて試験した結果である。実験条件として、表1においてホルムアルデヒドの供給濃度をゼロ、つまり清浄空気を Outer Chamber へ供給した。床面より放散された汚染質は室内気流により移流、拡散し室内に分布する。また室内に分布した汚染質は吸着面において吸着されるか、天井四周の隙間より排出されるかのいずれかとする。吸着材として用いる吸収分解石膏ボードの吸着面での吸着容量は非常に大きく、吸着面の初期濃度は建材全体でほとんど 0 とみなせるものと仮定した。床四周より室内に流入する空気は清浄空気であり、その空気に含まれる HCHO 濃度は 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ とする。HCHO の室内空気中の拡散係数は室温 23°C (等温) より、 $1.53 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ である。表 6-5 に本解析で用いる居室モデルと数値解析の概要を、表 6-6 に解析ケースを示す。

6-4-3 CFD 解析結果

前述した 1/2 形状の実大居室モデルに関して CFD を用いて解析した流れ場、濃度場の結果を示す。また特にここで流れ場や濃度場は対称面における解析結果を示す。

(1) 流れ場の解析結果

以下に対称面における流れ場と、壁面近傍における流れ場を示す。床四周より流入した清浄空気は壁面沿いに流れ、天井四周より流出するものと、壁面に対し垂直方向に広がり、室中央に向かい室内を循環する流れに大別される。室中央へ向かう流れは、反対領域で同じように室中央へ向かう流れと衝突し、

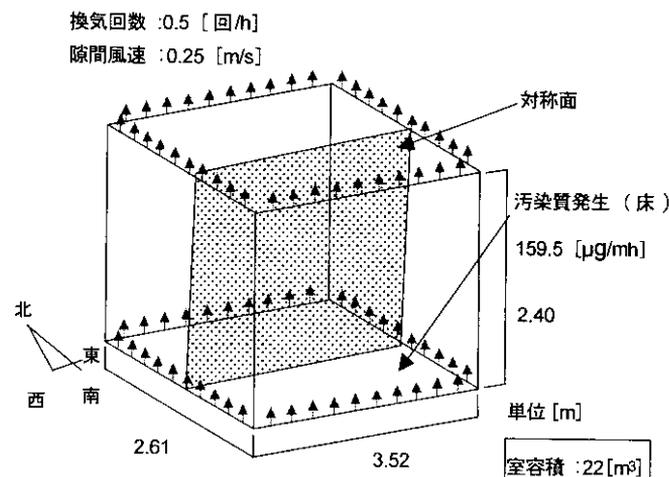


図 6-4 解析対象とした居室モデル
表 6-5 居室モデル、数値解析の概要

室サイズ	3.52 (x) × 2.40 (y) × 2.61 (z) [m]
メッシュ分割	102,714
換気回数	0.5 [回/h]
吹き出し風速	$U_{in}=0.25$ [m/s]
室温	23 [°C]
乱流モデル	低 Re 型 k-ε model (Abe-Nagano model)
差分スキーム	一次風上差分 (運動方程式、スカラー方程式ともに)
流入境界	$U_{in}=0.25$ [m/s] $L_{in}=0.001$ [m] $K=3/2 (U_{in} \times 0.05)^2$ $\epsilon=Cu \cdot K^{3/2}/L_{in}$
流出境界	U_{out} : 質量保存による K_{out}, ϵ_{out} : free slip
壁面境界	No slip
流入空気濃度	$C_{in}=0$
HCHO 放散量	159.5 $\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
空气中拡散係数	$Da=1.53 \times 10^{-5}$ [m^2/s] (23°C)

表 6-6 解析ケース

Case	吸収分解石膏ボード	
	設置面数	設置場所
1	0	なし
2	5	全面 (床以外)
3	1	天井
4	1	壁面 (東)

下降流となる。この下降流の風速は $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 以下である。また清浄空気の入り口付近では吹き出し気流により循環流が巻き込まれる。居室中央付近の床面や、室内中心付近の天井面における流れ (風速) は $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 以下であり非常に小さい (図 6-5)。

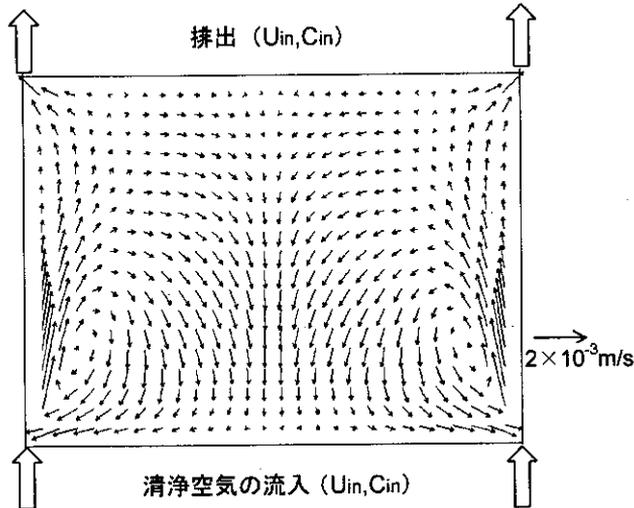


図 6-5 風速ベクトル図

(2) HCHO 拡散場の解析結果

吸着を考慮した HCHO 拡散場 (Case2~4) は HCHO が床面から発生し始めて 90 分経過した時点の結果を示す。全 case で HCHO 発生源である床面近傍 (特に室中央) で高濃度となる。床面から発生した HCHO は室内気流により移流・拡散するが、図 6-5 から分かるように床近傍 (特に室中央) では風速が非常に小さい。このため発生した HCHO は床面に滞留しやすいと考えられる。吹き出し口付近に滞留する HCHO は室中央へ向かう気流により、室内に広く分布する。また流入した外気のうち壁面、天井面沿いの流れは吸収分解石膏ボードの効果もあり、低濃度となる。この流れは徐々に室中央に向かい、下降流となるため室中心付近で低濃度となっていると考えられる。また清浄空気の流入する床四周の流入口付近では濃度が低い。図 6-6、表 6-7 より吸収分解石膏ボードの設置は室内空気中の HCHO 濃度低減に効果があると考えられる。特に建材近傍ではその効果が大きく、Case2 (全面 (床面を除く) 吸着)、Case3 (天井面吸着)、Case4 (東壁面吸着) では、それぞれ建材設置位置の近傍で低濃度となっていることがわかる。CFD 解析において建材表面の濃度はほぼゼロであるため、表 6-7 の物質伝達率は換算換気量を表す^{註4)}。室内の濃度分布に関して Case2 では室内全領域で濃度低減効果がある。Case3 では室内全領域で比較的高い濃度となる。Case4 では室内の東側領域で低濃度となる。これは石膏ボードの設置位置に起因するもので、汚染質は室内気流により発生源となる床付近 (上流) から天井側 (下流) へ移流・拡散する。Case3 の場合、吸収分解石膏ボードは下流側に設置してあるため、室内全域で高濃度の分布となる。また Case4 の場合、上流側に設置してあるため室内への汚染質の移流・拡散を抑制し HCHO 濃度を低減することができる。

表 6-7 吸収分解石膏ボードの濃度低減効果

Case	吸収分解石膏ボード	吸着速度 [$\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$]	物質伝達率 [m/h]	室平均濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	
				260 分	定常時
1	なし	—	—	—	154
2	全面 (床以外)	28.3	0.59	68	72
3	天井面	51.2	0.65	126	141
4	壁面 (東)	38.5	0.52	119	136

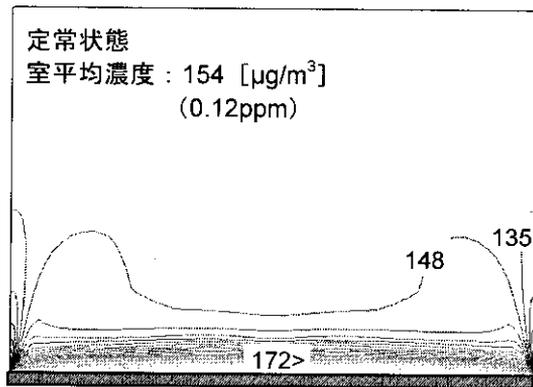
6-5 結論

6-5-1 流れ場の数値解析結果に対する考察

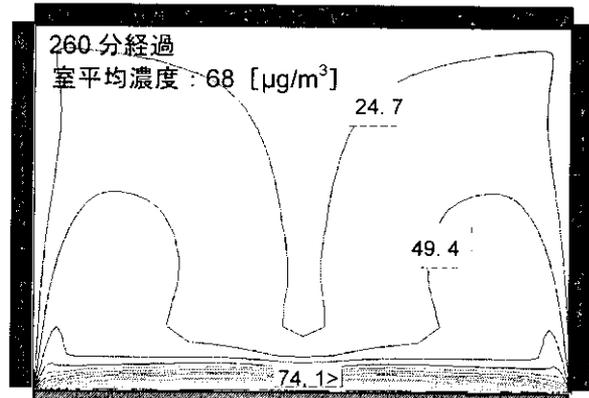
床四周の巾木部分から流入した空気が壁面に沿ってそのまま天井四周より排出されるのはコアアンダ効果によるものであると考えられる (コアアンダ効果とは流れの中に物体を置いたときにその物体に沿って流れようとする流体の性質のことをいう。実大居室モデルにおいて物体に相当するものが壁面であり、流入空気は壁面に沿った流れを生じることになる。排出口は壁面に沿ったところに位置しているため流入空気の一部は室内を循環せずに室外へ排出されることになる。

室内を循環する循環流はジェットの流れを考えると容易に想像がつく。ジェットの流れは吹き出し口付近では吹き出し口と同じ広さの流れであるが、遠ざかる位置でその流れは広がっていく。本解析では吹き出し口が床四周の巾木の隙間部分であるが、吹き出した流れは壁面側には広がることができないのでその垂直方向、つまり居室内側に徐々に広がる。そして天井面にぶつかり居室内側への流れと変わる。またある特定の壁面側の流れを考えた場合、例えば図 6-6 で東側 (右側) 領域の流れを考えた場合、西側 (左側) でも同様に内側へ向かう流れが生じている。室中央で完全な下降流となるのはこの向かい合った流れが室中央でぶつかり、下降流となっているのではないかと考えられる。

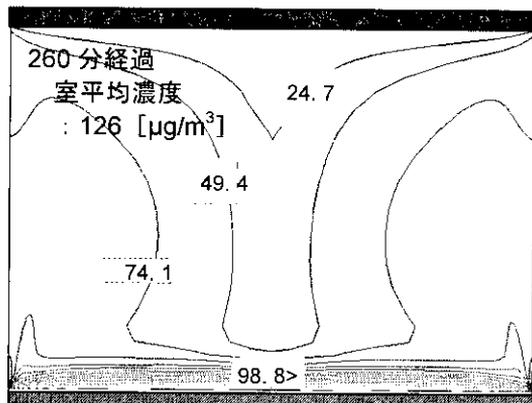
吹き出し口付近の流れは周囲の流れよりも速く、その風速は表 6-1 より $0.25\text{m}/\text{s}$ である。流れが速くなるとそこでは圧力が減少し、結果周囲と圧力勾配が生じる。つまり吹き出し口付近では圧力は周囲よりも低いいためこの流れに巻き込まれるような流れが生じていると考えられる。



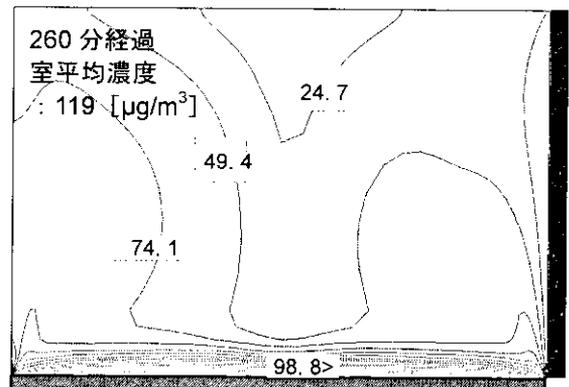
(1) Case1 (吸着面なし)



(2) Case2 (全面(床面を除く)吸着)



(3) Case3 (天井面吸着)



(4) Case4 (東壁面吸着)

図 6-6 居室モデル内の HCHO 濃度分布

6-5-2 拡散場の数値解析結果に対する考察

これまで高気密・高断熱住宅の普及により、0.2 回/h 程度の少ない換気回数の建築物が多々存在し、換気回数を増やす方向に改善されつつある。しかし、case1 のような場合、本解析の条件として換気回数 0.5 回/h を与えたが、室内のホルムアルデヒド濃度が指針値 ($100\mu\text{g}/\text{m}^3$) を大きく上回っている。つまり換気回数 0.5 回/h では、必ずしも室内空気が指針値を下回り安全側に維持されるとは限らない。よって室内を構成する建材、施工材の化学物質の放散量に気を配る必要があり、その上で換気回数を決める必要があると考えられる。

図 6-6 から、全 Case において床面付近で高濃度となっている。これは、室内気流によるものであると考えられる。床面から発生したホルムアルデヒドは室内気流により移流・拡散するが、その気流の分布をみると図 6-4 から床近傍（特に室中央）での風速が非常に小さい。そのためホルムアルデヒドは床面に滞留しやすいと考えられる。床四周より流入した外気のうち、壁面、天井面沿いの流れは吸収分解石膏ボードの吸着効果もあり低濃度となる。この流れは徐々に室中央へ向かい、反対領域からの室中央へ向かう流れと衝突し

下降流となるため、室中心付近で低濃度領域が存在すると考えられる。

解析対象が 1/2 領域であるため、南壁面の吸着速度は算出できない。暫定的に北壁面と同等の吸着力をもつものとする。

特に天井面での吸着速度は小さい。床面から発生したホルムアルデヒドは、まず吹き出し気流により上昇する。上昇する過程で壁面に設置してある吸収分解石膏ボードの吸着効果のために濃度が低減する。つまり天井面付近に汚染空気が到達するまでにはすでに低濃度空気となっているため天井面では吸着速度は小さい。Case2 の吸着速度の算出には全吸着面の吸着速度の平均をとっているため過小に評価される。Case2 のように全面に吸収分解石膏ボードを適用すれば、最も室内空気中の化学物質濃度を低減させることが可能である。しかしこの Case2 のように天井面での吸着効果が小さい場合は設置の必要性がなくなることも考えられる。

また Case3 の場合吸着速度が大きいにもかかわらず、室平均濃度が高くなっている。これは吸収分解石膏ボードの設置位置に起因するものと考えられる。汚染質が室内へ分布する際、室内気流により発生源と

なる床面（上流）側から天井側（下流）側へ移流・拡散する。Case3 の場合、吸収分解石膏ボードは天井に設置しており、「汚染質の流れ」の中では下流側に位置している。天井での設置では床面から放散し始めたホルムアルデヒドを室内に分布する前に効率よく吸着することができず、床面から天井側へ徐々に移流・拡散されるのを待つしかない。よって時間が経つと室内全体が比較的高い濃度となる。また吸着速度は建材近傍の空気相と建材表面の濃度勾配により左右される。Case3 で吸着速度が大きいのは建材表面の濃度はほぼゼロであり居室内が高濃度のため、吸着相一空気相での濃度勾配が大きく吸着速度も必然的に大きくなったのではないかと考えられる。Case4 の場合は、吸収分解石膏ボードは東壁面に設置しており、「汚染質の流れ」の中で上流側に位置している。つまり床面から放散されたホルムアルデヒドに対し、室内に広く分布する前に抑制し、室内空気中のホルムアルデヒド濃度を低減することができると考えられる。このことから吸収分解石膏ボードの設置による室内空気中のホルムアルデヒドの濃度低減効果は、換気方式（室内気流）や建材設置面によって大きく左右されることが考えられる。

【注】

- 1) (6-7) 式で表される建材単位面積あたりの換算換気量は、試験建材表面濃度ゼロ、気中濃度 C_0 とした時の物質伝達率に相当。
- 2) HCHO 濃度低減性能に湿度依存性がないため、0% での実験・解析（文 7）。
- 3) 図 2 の試験建材設置面に市販されている Fc1 合板を用い、給気口濃度をゼロとした実験の結果。
- 4) Case2 は各吸着面の平均値として算出。物質伝達率の参照濃度は室平均濃度を利用。
- 5) 定常時の室平均濃度の算出は吸着面の表面濃度をゼロとして計算した結果。

【参考文献】

- 1) 加藤ら（2001），揮発性有機化合物の放散・吸脱着等のモデリングとその数値予測に関する研究（その 26），日本建築学会大会学術講演梗概集，
- 2) 朱ら（1999），揮発性有機化合物の放散・吸脱着等のモデリングとその数値予測に関する研究（その 14），空気調和・衛生工学会学術講演論文集，
- 3) 太田直希（2001），実験と CFD 解析による建材からの揮発性有機化合物（VOCs）放散・吸脱着等のモデリングに関する基礎的研究（修士論文），東京大学，
- 4) 化学工学協会編（1968）化学工学便覧改訂 3 版
- 5) 安宅ら（2001），定常法による HCHO 吸収分解石膏ボードの濃度低減効果の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集
- 6) 金相王進ら（2001），揮発性有機化合物の放散・吸脱着等のモデリングとその数値予測に関する研究（その 30），日本建築学会大会学術講演梗概集
- 7) 安宅ら（2002），揮発性有機化合物の放散・吸脱着等のモデリングとその数値予測に関する研究（その 33），日本建築学会大会学術講演梗概集

第7章 東北地域の戸建住宅における 室内空気質の実態調査

第7章 東北地域の戸建住宅における室内空気質の実態調査

Investigation of Indoor Air Quality of Detached Houses in Tohoku District

In order to clarify sick house syndrome of detached houses in Tohoku District, measurement were conducted in the winter of 2003. The measurement was also conducted last winter. Additionally, ventilation rate in each house was measured by PFT method. The formaldehyde concentrations in three houses measured were found to be lower than the maximum acceptable concentration of $100\mu\text{g}/\text{m}^3$. The TVOC concentrations in two houses including a house using a vented kerosene heater were higher than the maximum acceptable concentration of $400\mu\text{g}/\text{m}^3$. It was found that emission rate for floor in a house using vented kerosene heater was higher than that in other houses. According to a series of survey from the year before last, it was found that materials used in daily life as well as building materials led to the emission of VOCs in houses. It was suggested that sick house problem would be serious not only in well-insulated and airtight houses but also in ordinary houses that use a vented kerosene heater without ventilation system.

KEYWORDS: Measurement, IAQ, Aldehydes, VOCs, Emission Rate, Ventilation Rate, PFT Method

7-1 目的

東北地域の高断熱高气密住宅におけるシックハウス問題の実態を明らかにし、特に、寒冷地の住宅における問題解決のための基礎資料を収集することを目的として、一昨年、昨年に引き続き、住宅内のアルデヒド類・VOCsの気中濃度および床面からの放散速度に関する冬季実測調査を行った。昨年までの調査結果から、在来型住宅においてもVOCsが高濃度で発生していることや、VOCsは建材や接着剤だけでなく、日常的に使用する生活用品からも発生する可能性が高いことが判った。今回の調査では昨年得られた知見の確認を行うとともに、対象住宅の気密性能と換気性能を明らかにすることを目的とする。

7-2 調査概要

7-2-1 調査対象

実測調査の対象住宅は、秋田市、本荘市近郊に立地する戸建住宅3戸である。表7-1に対象住宅の概要を示す。IZ邸を除く2戸は、断熱気密性が比較的高く、全室連続暖房を行っている木造戸建住宅である。A邸では床下暖房を併用しており、S邸では灯油焚ボイラーによるセントラル温水暖房システムが用いられている。IZ邸は、断熱・気密性があまり高くなく、FF式ストーブ等で局所間欠暖房を行っている在来型戸建住宅である。なお、S邸では2001年冬季に、A邸、IZ邸では2002年冬季に同様の調査を実施している。対象住宅の外観及び平面を図7-1、図7-2に示す。また、対象住宅のうちIZ邸を除く2戸の内部仕様を表7-2、表7-3に示す(IZ邸は不明である)。

7-2-2 調査方法・調査項目

訪問調査方式による。アルデヒド類及びVOCsの測定法は、早稲田大学田辺研究室規定の測定法(厚生省およびISO-16000を基に作成した測定手順)に準拠する。居住住宅を対象とし、24時間法による測定を行う。調査時期は、表7-1に示すとおり、2002年2月下旬から3月上旬である。

調査項目は、以下の6項目である。調査箇所および捕集管の種類等の具体的な測定方法は表7-4に示すとおりである。昨年の調査項目①～④に追加して、本年度は、pentIAQで用いられているPFT法の原理を参考に早稲田大学田辺研究室で独自に作成されたPFT放散源を用いる換気量測定と気密性能測定を実施する。また、昨年までは居間・外気のみを測定していたが、本年度は寝室も測定している。気密性能の測定はA邸を除く2戸で実施する(A邸はメーカーからの回答値を使用)。S邸はコーナー札幌製の気密測定器を用いて測定し、IZ邸は米国製のブロワードアを用いて測定する。気密性能の結果に関しては表7-1中に示している。

- ①アルデヒド類気中濃度(冬季1日):アクティブ法・パッシブ法による
- ②VOCs気中濃度(冬季1日):アクティブ法・パッシブ法による
- ③床面からのアルデヒド類・VOCsの放散速度(冬季1日):ADSEC法による
- ④温湿度(①～③の空気質測定日を含む1週間)
- ⑤換気量(冬季1日):PFT法による
- ⑥気密性能

第7章 東北地域の戸建住宅における室内空気質の実態調査

表 7-1 実測対象住宅の概要

属性項目		A 邸 (本荘市)	S 邸 (本荘市)	IZ 邸 (大内町)
竣工年月		2001 年 1 月	1999 年 12 月	1978 年 1 月
構造・工法		木造軸組 (在来)	木造枠組壁	木造軸組 (在来)
延床面積 [m ²]		151.53	160.64	165.00
1F 容積 [m ³]		226	212	281
2F 容積 [m ³]		141	190	97
天井高 [m]		2.42	2.42	2.40
家族人数 [人]		大人 2 人 + 子供 2 人	大人 3 人 + 子供 1 人	大人 2 人 + 子供 2 人
日中の在宅者数 [人]		0	3	1
喫煙者数 [人]		1	1	0
アレルギー・ぜんそく発症者数 [人]		2	0	0
断熱材の仕様	外壁 [mm]	PFB50	RW75	—
	床 [mm]	—	PFB75	—
	天井 [mm]	RW210	—	—
	屋根 [mm]	—	PFB75	—
	基礎 [mm]	PFB50 (外) PFB30 (内)	PFB75	—
窓	サッシ	プラスチック	アルミ + プラスチック	アルミ
	ガラス	複層	複層	一重 (増築部分のみ複層)
1 階床構成材料 (数字は材厚)		化粧合板フローア-12 (F1 相当品)	木質フローア-12 (F1 相当品)	不明
1 階床下地材 (数字は材厚)		合板 15 (F1 相当品)	構造用合板 15 LVL (F1 相当品)	ラワン合板 12
床貼使用接着剤		ポリエーテル系 ポリウレタン (ASTM 合格)	使用せず	不明
防蟻処理の有無		あり	あり	なし
観葉植物の有無		あり	なし	なし
暖房設備		温風ダクト (冷暖房) + 床下暖房 (温水パネル)	温風パネル	FF 式石油ストーブ
換気設備		第 1 種セントラル	第 1 種	なし (厨房・浴室換気扇のみ)
熱損失係数 Q* [W/m ² K]		1.67 次世代基準適合	1.84 次世代基準適合	不明
日射取得係数 μ* [-]		不明 次世代基準適合	0.057 次世代基準適合	不明
相当隙間面積 [cm ² /m ²]		0.5 (メーカーからの回答)	2.2 (減圧法による実測値)	5.5 (加圧法による実測値)
空気質調査時期 (24 時間)		2003 年 3 月 1 日 ~ 3 月 2 日	2003 年 3 月 3 日 ~ 3 月 4 日	2003 年 2 月 26 日 ~ 2 月 27 日
温湿度調査時期 (約 1 週間)		2003 年 3 月 1 日 ~ 3 月 8 日	2003 年 3 月 3 日 ~ 3 月 10 日	2003 年 2 月 26 日 ~ 3 月 5 日

*熱損失係数及び日射取得係数は、設計図書からの計算値である。なお、実測対象住宅の立地する秋田市、本荘市および由利郡は、次世代省エネルギー基準ではⅢ地域に属する。

PFB: 押出ポリスチレンフォーム板 RW: ロックウール

表 7-2 A 邸内部仕様詳細

部屋名	床仕上げ	巾木仕上げ	壁仕上げ	天井仕上げ
玄関	磁器質無釉床タイル貼り	タイル貼立ち上げ	ビニールクロス貼 (PB12 下地)	ビニールクロス貼 (PB12 下地)
ホール	カラーコーディネートフロアー貼り	木製 (塩ビシート仕上)	ビニールクロス貼 (PB12 下地)	ビニールクロス貼 (PB12 下地)
廊下	カラーコーディネートフロアー貼り	木製 (塩ビシート仕上)	ビニールクロス貼 (PB12 下地)	ビニールクロス貼 (PB12 下地)
洋室	カラーコーディネートフロアー貼り	木製 (塩ビシート仕上)	ビニールクロス貼 (PB12 下地)	ビニールクロス貼 (PB12 下地)
和室	畳敷き	畳寄	ビニールクロス貼 (PB12 下地)	ビニールクロス貼 (PB12 下地)
押入	ベニア合板 ア5.5m/m	雑巾摺	ビニールクロス貼 (PB12 下地)	ビニールクロス貼 (PB12 下地)
WIC	カラーコーディネートフロアー貼り	木製 (塩ビシート仕上)	ビニールクロス貼 (PB12 下地)	ビニールクロス貼 (PB12 下地)
キッチン	カラーコーディネートフロアー貼り	木製 (塩ビシート仕上)	ビニールクロス貼 (PB12 下地)	ビニールクロス貼 (PB12 下地)
洗面脱衣室	ビニール床シート貼り (合板 ア15+12m/m 下地)	木製 (塩ビシート仕上)	ビニールクロス貼 (PB12 下地)	ビニールクロス貼 (PB12 下地)
浴室	下地床 コンクリート叩き (ユニットバス)		ユニットバス	ユニットバス
トイレ	ビニール床シート貼り (合板 ア15+12m/m 下地)	木製 (塩ビシート仕上)	ビニールクロス貼 (PB12 下地)	ビニールクロス貼 (PB12 下地)

表 7-3 S 邸内部仕様詳細

階数	部屋名	床仕上げ	壁仕上げ	天井仕上げ
1F	ホール (玄関タイル)	木質フロアー、せり器タイル	左官レーブ内装用	左官レーブ内装用
	居間	木質フロアー	クロス貼	クロス貼
	食堂	木質フロアー	クロス貼	クロス貼
	台所	木質フロアー	クロス貼	クロス貼
	廊下	木質フロアー	クロス貼	クロス貼
	洗面所	木質フロアー	クロス貼	クロス貼
	便所	木質フロアー	クロス貼	クロス貼
	和室	断熱畳敷	クロス貼	クロス貼
	仏壇	米松合板	クロス貼	クロス貼
	神棚	木目調プリント合板	クロス貼	クロス貼
	寝室	木質フロアー	クロス貼	クロス貼
	ウォークインクローゼット	木質フロアー	クロス貼	クロス貼
	収納	モルタル金ゴテ仕上	収納化粧石膏ボード	収納化粧石膏ボード
2F	階段室	木製階段	クロス貼	クロス貼
	廊下	木質フロアー	クロス貼	クロス貼
	便所	木質フロアー	クロス貼	クロス貼
	主寝室	木質フロアー	クロス貼	クロス貼
	ウォークインクローゼット	木質フロアー	クロス貼	クロス貼
	洋室	木質フロアー	石膏ボード	クロス貼
	居間	木質フロアー	石膏ボード	クロス貼
	ロフト	木質フロアー	石膏ボード	クロス貼
	書斎	木質フロアー	クロス貼	クロス貼
	納戸	木質フロアー	クロス貼	クロス貼

第7章 東北地域の戸建住宅における室内空気質の実態調査

(a) A邸



(b) S邸



(c) IZ邸

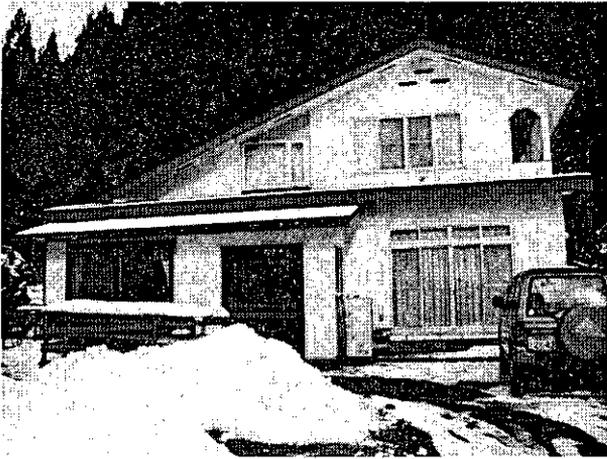


図7-1 対象住宅の外観

(a) A邸

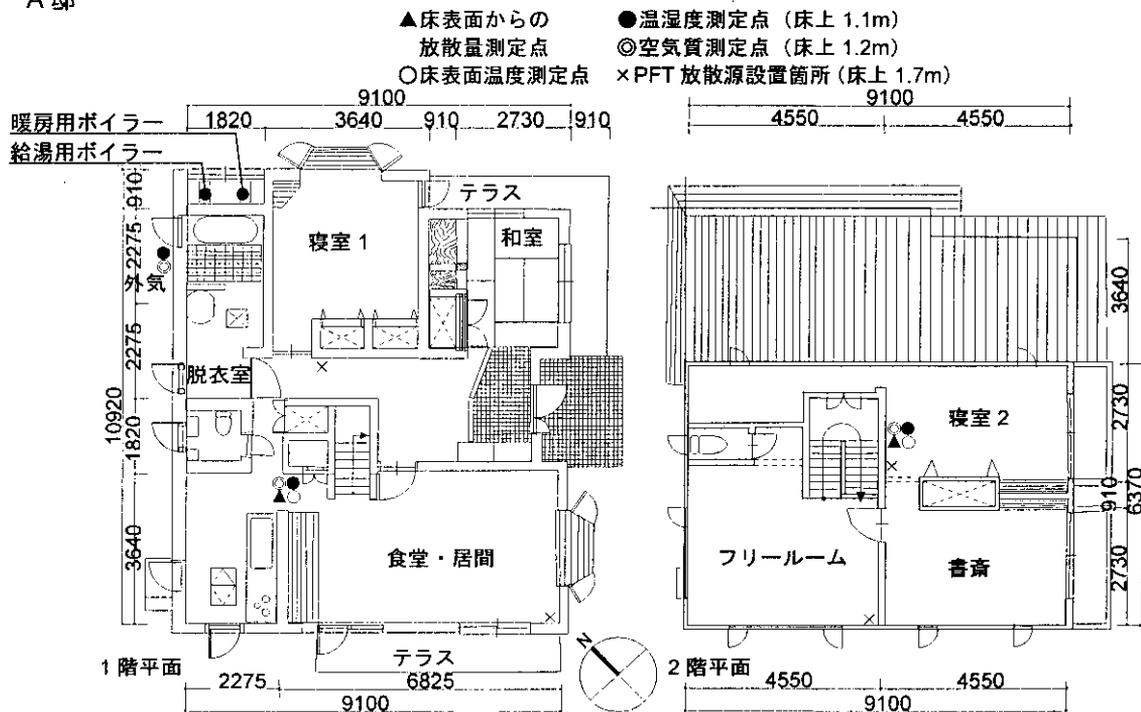
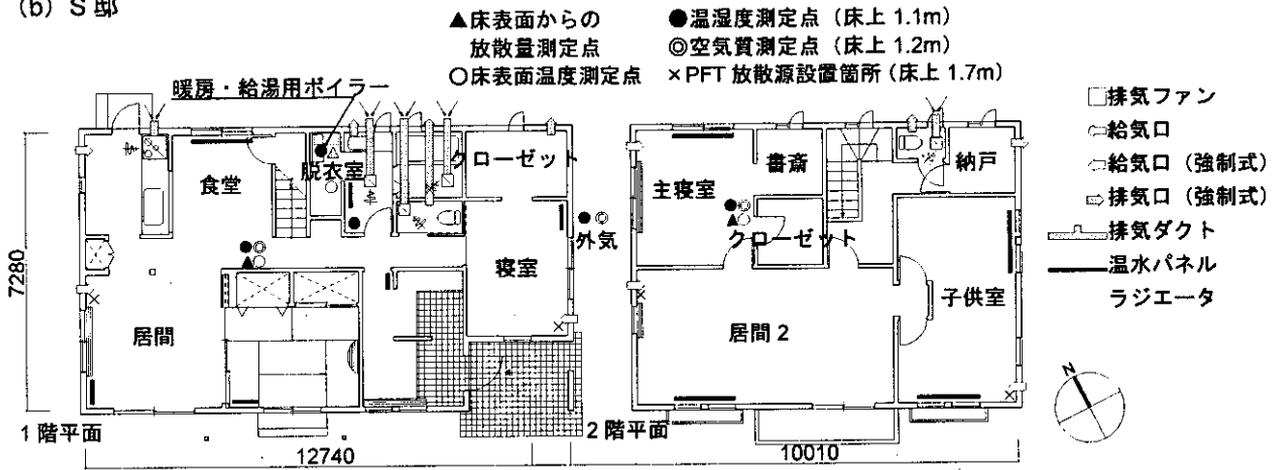


図7-2 対象住宅の平面 (続く)

第7章 東北地域の戸建住宅における室内空気質の実態調査

(b) S邸



(c) IZ邸

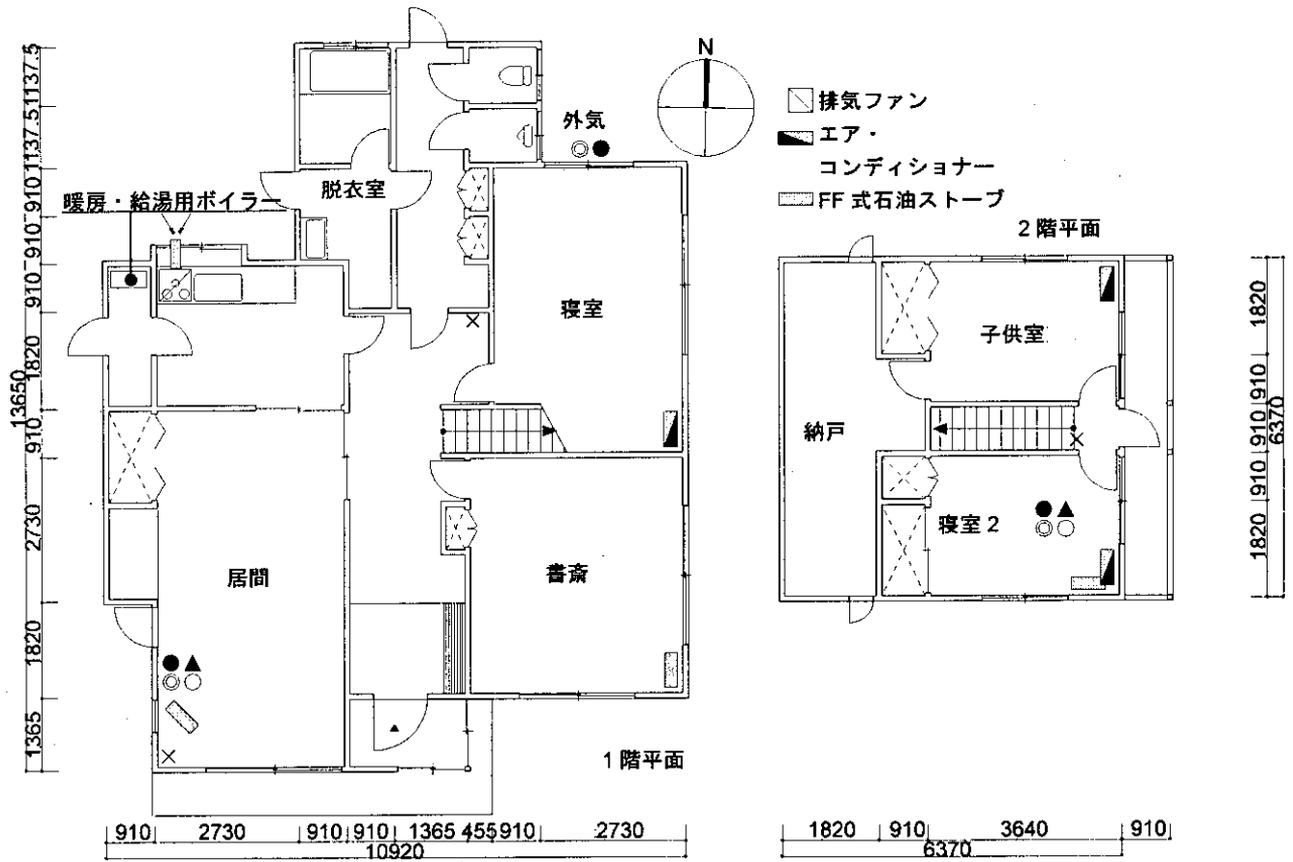


図7-2 対象住宅の平面

表 7-4 測定項目・測定方法

測定項目	測定場所	測定方法
アルデヒド類 濃度	居間・寝室・ 外気 高さ 1.2m	①アクティブ法：Sep-Pak DNPH (Waters 製) をポンプ流量 100mL/min で 24 時間 捕集 ②パッシブ法：DSD-DNPH 拡散サンプラー (Supelco 製) を 24 時間自然放置
VOCs 濃度		①アクティブ法：Tenax TA (Supelco 製) をポンプ流量 100mL/min で 24 時間捕集 ②パッシブ法：パッシブサンプラー-VOC-SD (Supelco 製) を 24 時間自然放置
アルデヒド類・ VOCs の床面か らの放散速度	居間床面 寝室床面	DSD-DNPH 拡散サンプラー、パッシブサンプラー-VOC-SD (いずれも Supelco 製) を床面に設置した Carbonyl-ADSEC、VOC-ADSEC にセットし、24 時間自然放置
温湿度	居間・寝室・ 外気 高さ 1.2m	小型データロガー (T&D 製おんどとり TR-72S、精度：温度±0.3°C、相対湿度±5%) を用いて空気質測定日を含む 1 週間測定 (測定間隔：10 分)
	居間・寝室 床表面	小型データロガー (T&D 製おんどとり TR-71S、精度：温度±0.3°C) を用いて空気 質測定日の 1 日間測定 (測定間隔：10 分)
換気量	1F・2F	PFT 法による。2 種類の PFT 放散源 C ₆ F ₆ (ヘキサフルオロベンゼン)、C ₇ F ₈ (オクタ フルオロトルエン) を用い、階ごと (2 ゾーン) の換気量を算出する。PFT 放散源は 2mm シリコン膜付バイアル瓶に入れたものを使用し、サンプラーはパッシブサンプ ラー-VOC-SD (Supelco 製) を使用する。サンプラー設置より 5 時間以上前に PFT 放 散源を設置する。放散源は換気経路を考慮した位置に各ゾーンの容積に応じて 1~2 箇所設置する。1F に C ₆ F ₆ 、2F に C ₇ F ₈ を高さ 1.7m の位置に設置する。PFT の放散 量、気中濃度を算出し、階ごとの換気量を算出する。

7-2-3 分析方法

アルデヒド類は、ホルムアルデヒド、アセトアルデヒド、アセトン、アクロレイン、プロピオンアルデヒドの 5 物質を分析対象とする。Sep-PakDNPH, DSD-DNPH 拡散サンプラーともに高速液体クロマトグラフィー (HPLC) で分析を行う。DSD-DNPH 拡散サンプラーの換算係数 (Sampling rate) を表 7-5 に示す。

表 7-5 DSD-DNPH の Sampling rate [mL/min]

ホルムアルデヒド	71.9
アセトアルデヒド	59.4
アセトン	51.7
アクロレイン	52.6
プロピオンアルデヒド	51.7

VOCs は 50 物質を分析対象とする。Tenax TA を固体吸着-加熱脱着-ガスクロマトグラフ質量分析法 (GC/MS) により分析し、パッシブサンプラー-VOC-SD は GC/MS で溶媒抽出法により分析する。

表 7-6 居間、寝室におけるアルデヒド類気中濃度

捕集管 (捕集法)	化学物質	A 邸		S 邸		I2 邸	
		居間	寝室	居間	寝室	居間	寝室
Sep-Pak DNPH (アクティブ)	ホルム アルデヒド	17.0	22.0	27.0	27.0	20.0	17.0
	アセト アルデヒド	13.0	14.0	33.0	45.0	17.0	11.0
	アセトン	17.0	21.0	21.0	39.0	15.0	22.0
DSD-DNPH 拡 散サンプラー (パッシブ)	ホルム アルデヒド	16.0	19.0	29.0	25.0	19.0	17.0
	アセト アルデヒド	11.0	10.0	33.0	48.0	13.0	11.0
	アセトン	11.0	13.0	20.0	31.0	10.0	18.0

7-3 調査結果

7-3-1 アルデヒド類の気中濃度

アルデヒド類気中濃度の測定結果を表 7-6 に示す。TK 邸のアクティブ法は欠測である。居間、寝室のホルムアルデヒド濃度は、17~27μg/m³であり、厚生労働省の指針値 100μg/m³を大きく下回っている。冬季の実測であること、放散量が低減された建材が使用されていることによるとと思われる。S 邸の気中濃度は他の 2 戸に比べてやや高いが、これはアンケート調査によれば居住者の飲酒による影響であると考えられる。

I2 邸では居間よりも寝室の気中濃度が高い。アセトアルデヒド濃度は、厚生労働省の指針値 48μg/m³を超え

ている住宅はない。図7-3に示すとおり、アクティブ法とパッシブ法の結果には正の相関が見られる。外気のアルデヒド類気中濃度は表7-7に示すとおり低い。表7-8に3戸の昨年までの測定結果を示す。

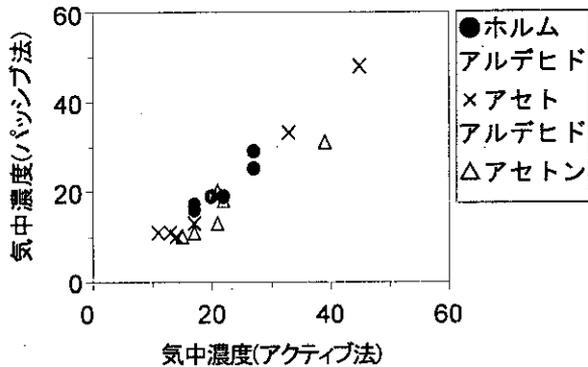


図7-3 アルデヒド類気中濃度のアクティブ法とパッシブ法の比較

表7-7 外気におけるアルデヒド類気中濃度

捕集管(捕集法)	化学物質	A邸	S邸	IZ邸
Sep-Pak (アクティブ)	ホルムアルデヒド	<2	2.0	<2
	アセトアルデヒド	<2	<2	<2
	アセトン	2.2	2.2	<2
	アクロレイン	<2	<2	<2
	プロピオンアルデヒド	<2	<2	<2
DSD-DNPH 拡散 サンプラー (パッシブ)	ホルムアルデヒド	<2	<2	<2
	アセトアルデヒド	<2	<2	<2
	アセトン	<2	<2	<2
	アクロレイン	<4	<4	<4
	プロピオンアルデヒド	<4	<4	<4

表7-8 居間アルデヒド類の濃度 [μg/m³] の経年変化

捕集管(捕集法)	化学物質	A邸		S邸		IZ邸		
		'02	'03	'02	'03	'01	'02	'03
Sep-Pak (アクティブ)	ホルムアルデヒド	16.6	17.0	31.0	27.0	19.8	26.9	20.0
	アセトアルデヒド	13.0	13.0	40.0	33.0	27.7	34.4	17.0
	アセトン	18.5	17.0	29.0	21.0	21.4	22.9	15.0
	アクロレイン	<1.5	<2.0	0.0	<2.0	0.0	<1.6	<2.0
	プロピオンアルデヒド	<2.0	2.3	6.0	3.8	0.0	4.7	2.8
DSD-DNPH 拡散 サンプラー (パッシブ)	ホルムアルデヒド	16.5	16.0	26.0	29.0	12.8	19.9	19.0
	アセトアルデヒド	10.2	11.0	27.0	33.0	20.9	24.9	13.0
	アセトン	9.8	11.0	27.0	20.0	24.3	13.1	10.0
	アクロレイン	<1.5	<4.0	1.0	<4.0	3.4	<1.6	<4
	プロピオンアルデヒド	<2.0	<4.0	6.0	<4.0	2.1	2.3	<4.0

7-3-2 TVOC 濃度

図7-4に、アクティブ法による居間、寝室のTVOC濃度(トルエン換算)の測定結果を示す。機械換気システムを備えていないIZ邸のほか、機械換気システムを備えているS邸においても厚生労働省の暫定指針値400μg/m³を上回っている。特にIZ邸寝室では949μg/m³と高く、石油ファンヒーター使用による発生が影響しているのではないかと考えられる。

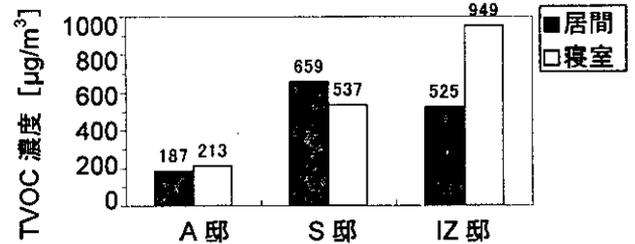


図7-4 TVOC 濃度 (アクティブ法)

7-3-3 VOCs 濃度

図7-5にアクティブ法による居間、寝室のVOCs濃度(トルエン換算)を示す。TVOC濃度の高いS邸とIZ邸では、オクタン、ノナン、デカン等の脂肪族炭化水素類と、キシレンや1,2,4-トリメチルベンゼンを始めとする芳香族炭化水素類の濃度が高い。3戸全てでテルペン類のD-リモネンが検出されており、その濃度は建築後20年以上経過しているIZ邸で最も高い。S邸居間では測定日より数ヶ月前に床用ワックスが使用されている他、測定当日にウェットティッシュや合成糊、油性ペンを使用している。後述のように、床からのVOCs発生量が少ないことから、室内VOCs濃度には生活起因による化学物質発生が多いと推測される。A邸には喫煙者がいるものの、全体的に濃度は低く、24時間換気運転の効果が現れている。

表7-9に、アクティブ法による居間、寝室、外気VOCs濃度の測定結果を物質ごとに示す。

■ 脂肪族炭化水素類 ■ 芳香族炭化水素類 □ テルペン類
 □ ハロゲン類 □ エステル類 ■ アルデヒド・ケトン類
 □ アルコール類その他

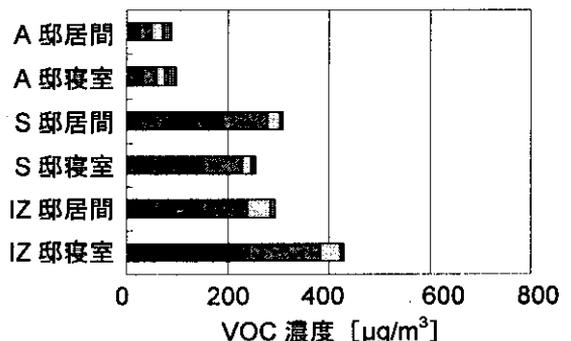


図7-5 居間、寝室のVOCs濃度 (アクティブ法)

第7章 東北地域の戸建住宅における室内空気質の実態調査

表 7-9 アクティブ法による居間、寝室、外気 VOCs 濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

族別	化学物質名	A邸			S邸			I邸		
		居間	寝室	外気	居間	寝室	外気	居間	寝室	外気
脂肪族炭化水素類	n-ヘキサン	0.2	0.1	0.4	1.1	0.3	0.3	<0.1	0.9	0.4
	2,4ジメチルペンタン	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	イソオクタン	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	ヘプタン	0.3	0.3	1.8	5.0	7.7	0.6	1.0	8.9	0.1
	オクタン	1.6	2.0	2.2	24.9	24.9	0.6	9.9	30.6	<0.1
	ノナン	4.3	7.0	2.7	50.5	44.1	0.8	43.8	64.3	0.2
	デカン	4.4	6.9	1.3	39.6	31.8	0.6	35.8	50.6	0.2
	ウンデカン	3.2	4.7	0.6	24.2	15.2	0.4	19.0	31.0	0.1
	ドデカン	3.5	4.0	0.4	20.8	11.9	0.2	17.4	29.0	<0.1
	トリデカン	2.5	2.6	0.2	11.0	6.5	0.2	8.6	14.2	<0.1
	テトラデカン	3.2	2.6	0.1	9.4	6.4	0.1	6.6	9.2	<0.1
	ペンタデカン	1.8	1.5	<0.1	3.9	3.1	0.1	4.1	3.3	<0.1
	ヘキサデカン	1.2	1.0	<0.1	1.7	1.6	0.1	2.5	1.7	0.2
芳香族炭化水素類	ベンゼン	<0.1	<0.1	0.5	<0.1	<0.1	0.7	0.1	0.3	1.0
	トルエン	3.8	3.8	3.3	7.5	7.7	2.2	4.6	13.8	3.1
	エチルベンゼン	6.6	6.8	0.9	9.8	11.0	0.3	10.0	17.2	0.2
	キシレン	8.2	8.9	1.7	16.7	16.4	0.9	18.7	24.7	0.4
	スチレン	0.4	0.4	<0.1	0.5	0.4	<0.1	0.6	0.3	<0.1
	m-エチルトルエン	1.3	1.7	0.6	11.9	10.2	0.3	12.9	18.2	0.1
	p-エチルトルエン	0.4	0.6	0.2	3.4	2.8	<0.1	8.6	6.4	<0.1
	1,3,5-トリメチルベンゼン	0.4	0.6	0.1	4.7	3.5	<0.1	4.1	7.9	<0.1
	o-エチルトルエン	0.6	0.8	0.2	7.4	5.3	<0.1	6.1	11.2	<0.1
	1,2,4-トリメチルベンゼン	2.0	2.5	0.6	19.2	14.0	0.3	19.9	30.9	0.1
	1,2,3-トリメチルベンゼン	<0.1	0.2	<0.1	4.3	3.1	<0.1	3.1	6.8	<0.1
	1,2,4,5-テトラメチルベンゼン	<0.1	0.3	<0.1	0.9	0.6	<0.1	0.7	1.2	<0.1
	テルペン類	α -ピネン	0.7	0.7	<0.1	0.4	0.4	<0.1	0.1	0.4
β -ピネン		0.3	0.2	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	<0.1
D-リモネン		19.0	15.1	<0.1	23.3	17.8	<0.1	45.9	40.6	<0.1
ハロゲン類	ジクロロメタン	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	クロロホルム	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	1,1,1-トリクロロエタン	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	1,2-ジクロロエタン	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	四塩化炭素	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1
	トリクロロエチレン	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	1,2-ジクロロプロパン	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	ブromoジクロロメタン	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	ジブロクロメタン	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	テトラクロロエチレン	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	p-ジクロロベンゼン	1.7	5.1	<0.1	0.5	0.4	<0.1	0.5	0.5	<0.1
エステル類	酢酸エチル	0.7	0.5	0.1	0.2	0.2	<0.1	<0.1	0.4	<0.1
	酢酸ブチル	0.7	0.6	<0.1	1.8	2.5	<0.1	0.4	1.5	<0.1
アルデヒド・ケトン類	アセトン	1.5	1.2	<0.1	1.0	0.7	<0.1	0.2	0.6	<0.1
	メチルエチルケトン	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	メチルイソブチルケトン	0.3	0.3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	ノナール	9.5	8.6	0.1	1.5	2.2	<0.1	4.7	4.1	<0.1
アルコール類 その他	デカノール	6.3	7.5	0.2	3.7	3.6	0.1	3.8	0.4	<0.1
	エタノール	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	イソプロピルアルコール	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1
	1-プロパノール	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
1-ブタノール	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	0.1	
TVOC (トルエン換算)		187	213	50.8	659	537	48.4	525	949	16.3

図 7-6 にパッシブ法による居間、寝室の VOCs 濃度 (トルエン換算) を示す。パッシブ法で検出された成分はアクティブ法で検出された成分とはやや異なり、エステル類が多く検出されている。エステル類として検出された成分のほとんどは酢酸エチルである。VOCs に関してはアクティブ法とパッシブ法の相関がアルデヒド類ほど良好ではないように見受けられる。エステル類を除けば、アクティブ法とパッシブ法の傾向は概ね一致していることがわかる。

表 7-10 に、アクティブ法による居間、寝室、外気 VOCs 濃度の測定結果を物質ごとに示す。

■ 脂肪族炭化水素類
□ テルペン類
■ エステル類
■ 芳香族炭化水素類
□ ハロゲン類
■ アルデヒド・ケトン類その他

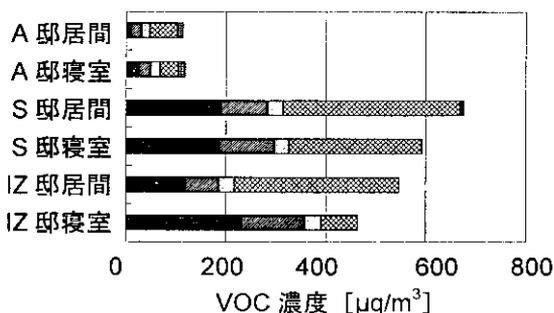


図 7-6 居間、寝室の VOCs 濃度 (パッシブ法)

表7-10 パッシブ法による居間、寝室、外気 VOCs 濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

族別	化学物質名	A邸			S邸			IZ邸		
		居間	寝室	外気	居間	寝室	外気	居間	寝室	外気
脂肪族炭化水素	nヘキサン	0.0	0.0	0.0	6.9	7.2	0.0	0.0	0.0	0.0
	2,4ジメチルペンタン	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	イソオクタン	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	ヘプタン	0.0	0.0	2.3	16.0	24.8	0.0	5.5	13.1	0.0
	オクタン	0.0	0.0	3.0	24.2	26.8	0.0	10.9	28.1	0.0
	ノナン	2.8	6.0	3.5	50.8	48.2	0.0	33.6	69.7	0.0
	デカン	7.8	11.4	7.0	45.7	43.7	7.2	34.4	58.3	4.1
	ウンデカン	0.0	8.3	0.0	48.0	34.4	0.0	34.0	60.6	0.0
芳香族炭化水素	ベンゼン	0.0	0.0	3.0	0.0	4.3	0.0	0.0	0.0	0.0
	トルエン	6.7	6.4	4.4	18.4	20.7	2.6	10.9	17.1	2.4
	エチルベンゼン	5.2	5.9	0.0	11.2	16.0	0.0	10.0	21.5	0.0
	キシレン	8.4	10.6	3.0	36.1	41.7	0.0	27.7	53.6	0.0
	スチレン	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1,3,5-トリメチルベンゼン	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	0.0	0.0	6.5	0.0
	1,2,4-トリメチルベンゼン	0.0	2.2	0.0	19.5	16.6	0.0	13.8	22.6	0.0
	1,2,3-トリメチルベンゼン	0.0	0.0	0.0	5.7	5.3	0.0	4.2	6.9	0.0
テルペン類	α -ピネン	4.6	6.4	0.0	10.4	9.0	0.0	0.0	3.5	0.0
	D-リモネン	11.8	11.3	0.0	22.1	21.1	0.0	32.0	29.5	0.0
ハロゲン類	クロロホルム	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1,2-ジクロロエタン	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1,1,1-トリクロロエタン	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	四塩化炭素	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1,2-ジクロロプロパン	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	クロロジプロメタン	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	トリクロロエチレン	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	テトラクロロエチレン	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
p-ジクロロベンゼン	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
エステル類	酢酸エチル	55.2	35.6	151	326	237	62.3	319	41.8	16.7
	酢酸ブチル	0.0	0.0	3.2	27.1	30.0	0.0	12.0	31.1	0.0
アルデヒド・ケトン類・その他	メチルエチルケトン	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	メチルイソブチルケトン	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1-ブタノール	12.1	14.0	0.0	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

7-3-4 床面からの放散速度

Carbonyl-ADSEC, VOC-ADSEC による捕集量を捕集面積と捕集時間で除してアルデヒド類、VOCs の放散速度をそれぞれ算出した。表 7-11 に結果を示す。

図 7-7 に、ホルムアルデヒド、アセトアルデヒドの気中濃度と床面からの放散速度の関係を示す。IZ 邸居間を除けば床面からの放散量は小さい。IZ 邸居間の気中濃度は床面からの放散の影響を受けていると考えられる。昨年の測定結果でも述べていたように、IZ 邸ではホルムアルデヒドの放散が大きい建材を使用している可能性が高い。VOCs の中では酢酸エチルの放散速度が3戸とも高い。図示はしないが、酢酸エチルの気中濃度は3戸とも低いことを確認している。

表 7-11 床面からの放散速度 [$\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$]

測定方法	化学物質名	A邸		S邸		IZ邸	
		居間	寝室	居間	寝室	居間	寝室
Carbonyl-ADSEC	ホルムアルデヒド	1.1	1.1	2.5	2.2	19.0	2.3
	アセトアルデヒド	0.8	0.8	3.1	3.1	2.5	1.6
VOC-ADSEC	トルエン	15.7	18.5	4.6	4.6	2.8	2.8
	スチレン	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	31.5	17.6
	酢酸エチル	20.4	16.7	32.4	23.1	31.5	164.8
	1-ブタノール	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	19.4	14.8

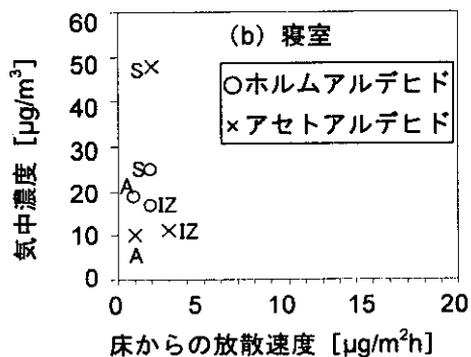
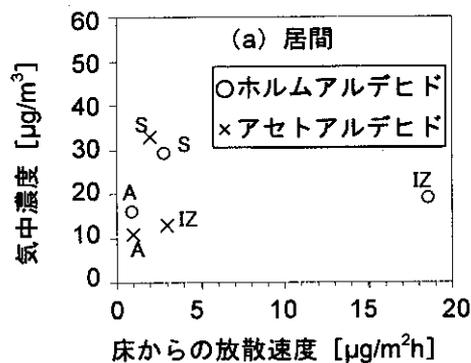


図 7-7 ホルムアルデヒド、アセトアルデヒドの気中濃度と床面からの放散速度の関係

図7-8に、ホルムアルデヒドとアセトアルデヒドの居間床面からの放散速度を2001年冬季、2002年冬季と比較した結果を示す。ホルムアルデヒドの放散速度はA邸、S邸で年を経るごとに減少傾向にあるが、I邸では2002年に減少し、2003年に増加している。アセトアルデヒドはA邸、I邸で年を経るごとに減少し、S邸ではやや増加している。いずれの変化も経年変化と呼ぶほど大きい変化ではないと考えられる。

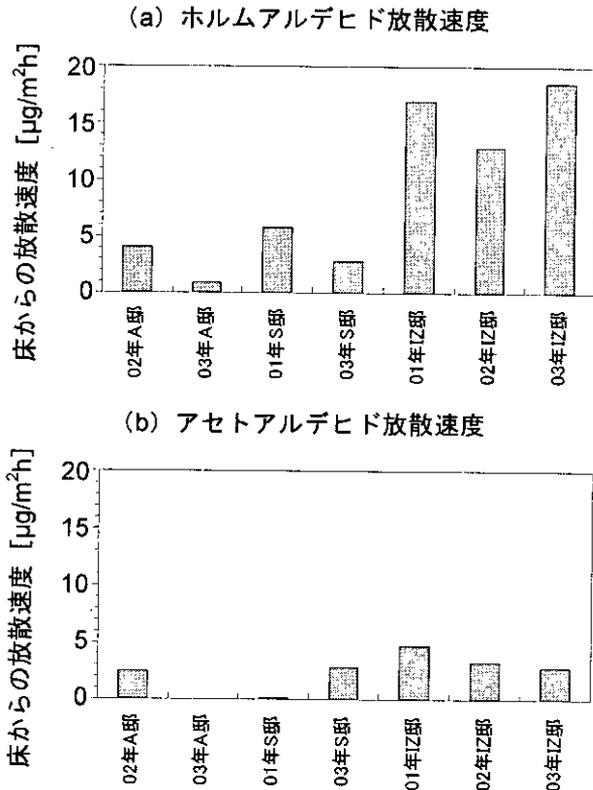


図7-8 ホルムアルデヒド、アセトアルデヒドの居間床面からの放散速度の2001年、2002年結果との比較

7-3-5 換気量

新鮮外気導入量を各室の換気量と考え、PFT法による換気量測定原理に基づいて各階の換気量、換気回数を算出した。PFT法による換気量測定原理を図7-9および式(7-1)～(7-6)に示す。

$$Q_{2,1}C_{A2} - Q_{1,0}C_{A1} - Q_{1,2}C_{A1} = -M_A \quad \dots (7-1)$$

$$Q_{2,1}C_{B2} - Q_{1,0}C_{B1} - Q_{1,2}C_{B1} = 0 \quad \dots (7-2)$$

$$Q_{1,2}C_{A1} - Q_{2,0}C_{A2} - Q_{2,1}C_{A2} = 0 \quad \dots (7-3)$$

$$Q_{1,2}C_{B1} - Q_{2,0}C_{B2} - Q_{2,1}C_{B2} = -M_B \quad \dots (7-4)$$

$$Q_{0,1} = Q_{1,0} + Q_{1,2} - Q_{2,1} \quad \dots (7-5)$$

$$Q_{0,2} = Q_{2,0} + Q_{2,1} + Q_{1,2} \quad \dots (7-6)$$

$Q_{X,Y}$: ゾーンXからゾーンYの方向を正とした場合のゾーンX, Y間の換気量 [m³/h]

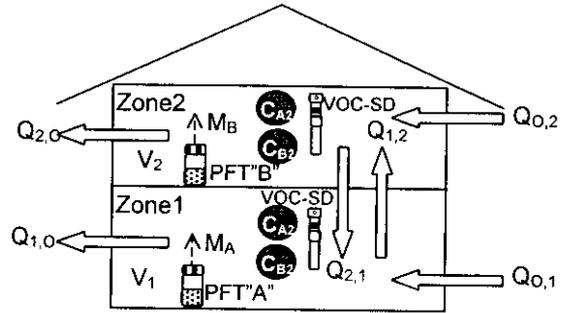


図7-9 PFT法による換気量測定原理 (2ゾーンのの場合)

C_{AX}, C_{BX} : PFT“A”, “B”のゾーン X における気中濃度 [µg/m³]

M_A, M_B : 種類の異なるPFT“A”, “B”の放散量 [µg/h]

本調査ではPFT“A”をC₆F₆、PFT“B”をC₇F₈の2種類とし、対象住宅を1F, 2Fの2ゾーンに分けて換気量を算出する。

PFTの単位時間当たりの放散量は温度に依存する。したがって、C₆F₆、C₇F₈の放散量をシリコン厚さ2.0mmの式(7-7)、(7-8)からそれぞれ算出する。式(7-7)、(7-8)はシリコン厚さ2.0mmのときの式であり、測定時における各ゾーンの平均温度を代入することにより算出する。

$$M_{\theta} = M_{25} (=5.85) \times 1.03 (\theta - 25) \quad \dots (7-7)$$

$$M_{\theta} = M_{25} (=1.89) \times 1.04 (\theta - 25) \quad \dots (7-8)$$

M_{θ} : 温度 $\theta^{\circ}\text{C}$ のときの単位時間当たり放散量 [mg/h]

M_{25} : 温度 25°C のときの単位時間当たり放散量 [mg/h]

次に、パッシブサンプラーのPFT捕集量から気中濃度を式(7-9)にて算出する。式(7-9)にて本測定の捕集時間は24時間である。式(7-9)中のサンプリングレートは捕集したゾーンの空気温度に依存するので、パッシブサンプラーのC₆F₆、C₇F₈それぞれのサンプリングレートを式(7-10)、(7-11)にて求める。なお、本式中に記載の係数(11.09, 5.20)はパッシブサンプラーの分析を加熱脱着法にて行った場合の値である。

$$C = W / (K \times t) \quad \dots (7-9)$$

$$K (C_6F_6) = 11.09 \times (273 + t) / (273 + 25) \quad \dots (7-10)$$

$$K (C_7F_8) = 5.20 \times (273 + t) / (273 + 25) \quad \dots (7-11)$$

C: 気中濃度 [µg/m³]

K: パッシブサンプラーのサンプリングレート [m³/h]

t: サンプラーの捕集時間 [h]

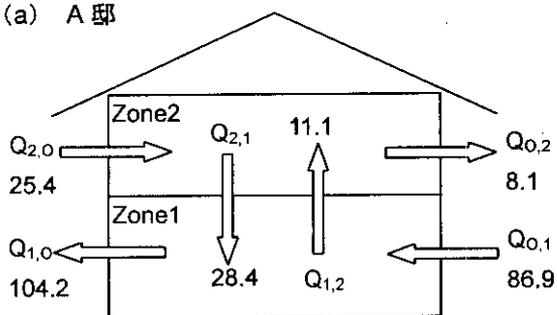
W: パッシブサンプラーの捕集量 [µg]

放散量、気中濃度を式(7-1)～(7-6)に代入して各階の換気量を算出する。

各階の換気量の算出結果を図7-10、表7-12に示す。在来型のIZ邸では居間のC₂F₆気中濃度が0となり、換気量を算出することができなかった。IZ邸のように、自然換気量が多い住宅ではPFT法による換気量測定が難しいと考えられる。また、IZ邸では冬季において締め切った生活をしており、空間相互の換気量がほとんどないこともわかった。

なお、本調査ではパッシブサンプラーVOC-SDの分析は溶媒抽出法にて行っている。先述のようにパッシブサンプラーのサンプリングレート算出式(7-10)、(7-11)では加熱脱着法にて分析した場合の係数が用いられているが、分析方法の違いによってパッシブサンプラーの捕集量にそれほど大きな違いはないものと考えられるため、式(7-10)、(7-11)を用いて算出した。

(a) A邸



(b) S邸

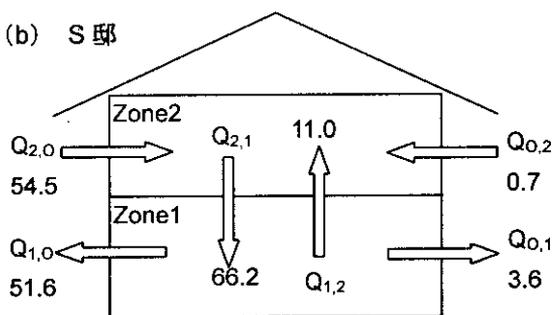


図7-10 A邸・S邸における各階換気量(単位: m³/h)の算出結果

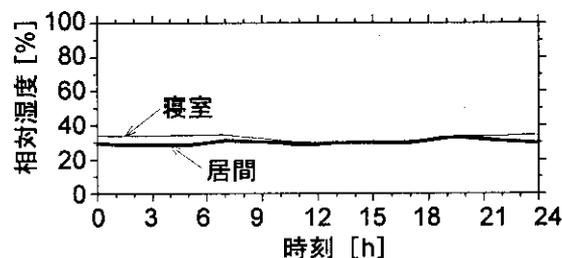
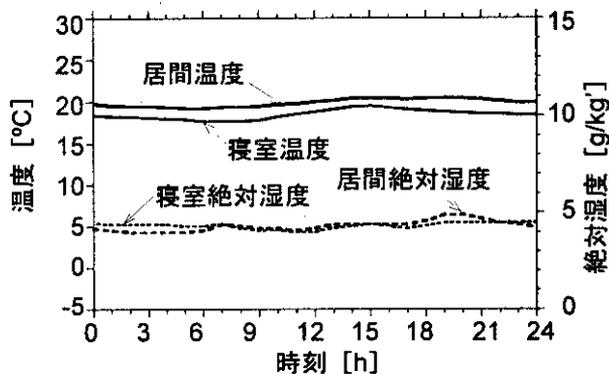
表7-12 各階の換気量と換気回数

住宅名	ゾーン	容積 [m³]	換気量 [m³/h]	換気回数 [回/h]
A邸	1F	226	87	0.4
	2F	141	25	0.2
	全体	367	112	0.3
S邸	1F	212	0	0.0
	2F	190	55	0.3
	全体	402	55	0.1
IZ邸	1F	281	NA.	NA.
	2F	97	NA.	NA.
	全体	378	NA.	NA.

7-3-6 温湿度

空気質の測定日を含む1週間の温湿度データを時刻別に平均したものを図7-11に示す。また、表7-13に、空気質実測日の温湿度の測定結果(日平均値)を示す。A邸の外気は欠測である。

(a) A邸



(b) S邸

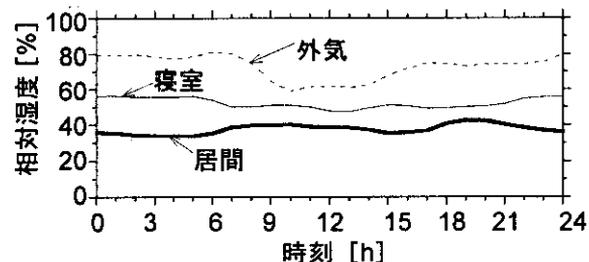
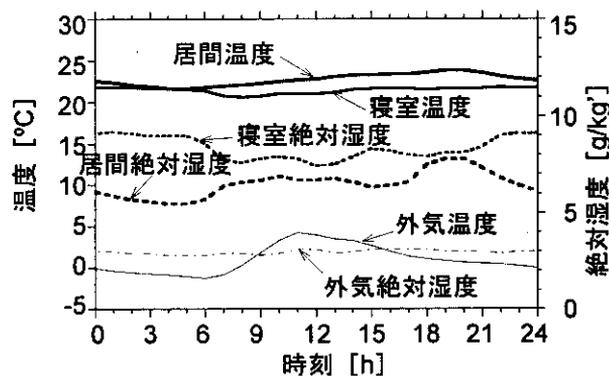


図7-11 (1/2) 温湿度日変動 (A邸, S邸)

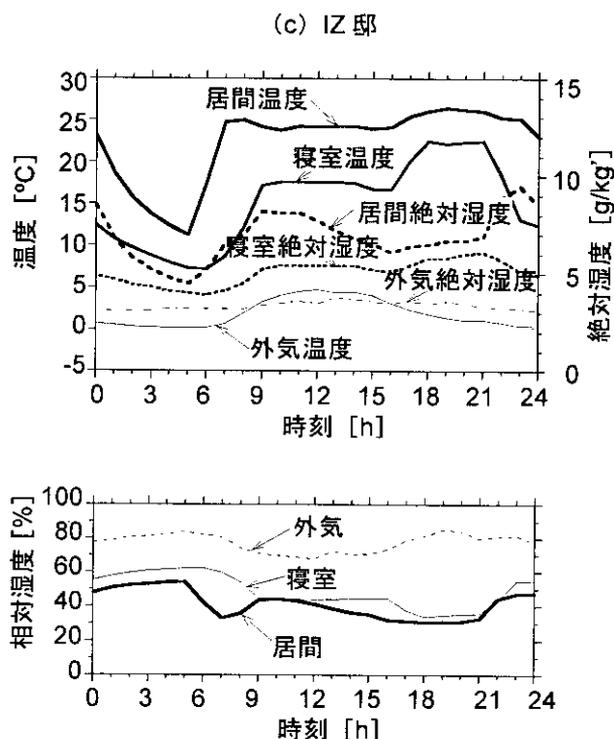


図 7-11 (2/2) 温湿度日変動 (IZ 邸)

表 7-12 空気質実測日の温湿度 (日平均値)

	項目	A 邸	S 邸	IZ 邸
居間	温度 [°C]	19.8	21.8	23.4
	相対湿度 [%]	37	37	40
	絶対湿度 [g/kg]	5.3	6.1	7.0
	床表面温度 [°C]	19.2	10.4	17.5
寝室	温度 [°C]	18.9	20.5	16.1
	相対湿度 [%]	38	51	49
	絶対湿度 [g/kg]	5.1	7.7	5.3
	床表面温度 [°C]	20.6	9.8	12.9
外気	温度 [°C]		-1.7	1.0
	相対湿度 [%]	欠測	82	94
	絶対湿度 [g/kg]		2.7	3.8

FF 式ストーブの間欠運転による部屋別暖房を行っている IZ 邸を除けば、他の対象住宅における居間の温度は、概ね安定している。特に床下暖房を併用している A 邸では居間・寝室とも温度が一日を通じて一定に保たれており、床表面温度も 20°C 前後と高い。IZ 邸では 7~24 時までの居間温度は 25°C と高いが、0 時以降温度が急激に低下し、5 時には 10°C まで低下している。寝室温度は明け方 10°C 以下まで低下している。

室内相対湿度は A 邸では居間、寝室とも 30%前後であり、乾燥傾向にある。S 邸では居間の相対湿度は 35%前後であるが、寝室では加湿器使用により 21~6 時の

相対湿度が 50%程度まで上昇している。IZ 邸では湿度の変動が大きい、これは洗濯物を干す等の住まい方の影響を受けているものと推測される。

7-4 まとめ

断熱・気密性が高く全室連続暖房を行っている 4 戸の木造戸建住宅と、断熱・気密性の低い局所間欠暖房を行っている在来型戸建住宅 1 戸の計 5 戸の住宅を対象として、アクティブ/パッシブ法によるアルデヒド類・VOCs 気中濃度、ADSEC 法による床面からの放散速度を実測した。その結果、以下のような知見が得られた。

- 1) ホルムアルデヒド気中濃度は 3 戸とも厚生労働省の指針値である 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下であるが、TVOC 濃度は 3 戸中 2 戸で厚生労働省の指針値 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を上回っている。換気設備のない従来型住宅でもシックハウス問題は存在する可能性があることを考慮する必要がある。
- 2) VOCs は建材や接着剤からの放散ばかりでなく、日常使用する様々な生活用品から発生している可能性が高い。
- 3) 在来型住宅におけるホルムアルデヒド気中濃度は床材からの放散の影響を受けている可能性が高い。
- 4) PFT 法による換気量測定を行ったところ、自然換気量が多い従来型住宅への適用には課題が残った。今後、多教室温湿度・汚染質濃度計算プログラムを用いた数値計算を用いて、気密性能と PFT 濃度の関係を調べることにより、PFT 法の適用範囲について検討する予定である。

なお、本年度は、筆者の作成した多数室非定常温湿度・熱負荷予測プログラム TASP++ Ver.3 を改造し、各種汚染ガス濃度の計算を含むプログラムに発展させた。本年度中に、VOCs 濃度と気密性能に関する数値計算を各種行い、実測調査を補強する知見を得る予定であったが、プログラム改造結果の十分な検証を行うところまで至らなかったため、本報告書では触れていない。今後の課題として、早急に取り組むこととしたい。