

Fig.8 各物質の関係図

であったと考えられる。そこで、対象住宅における1度目の濃度測定結果の分布を Fig.6 及び 7 に示す。これより、formaldehyde、acetaldehyde、toluene、ethylbenzene、xylene、ともに厚生労働省が実施した約 1400 軒の全国調査^[1]と同様の分布をしていることがわかった。測定値がガイドラインを上回った物質は formaldehyde と acetaldehyde のみで、ガイドライン超過率は formaldehyde が 6.3% で全国調査の 5.3% (平成 15 年度実績) と同じレベルであった。また、acetaldehyde の濃度超過率も 8.3% で全国調査の 9.5% とほぼ同じレベルであった。従って、本調査における対象住宅のサンプリングバイアスは、全国調査と比較してもそれほど大きくないと考えられる。formaldehyde、acetaldehyde 以外の物質についてはほとんどの住宅で指針値の 10% 未満の濃度でしか検出されなかった。このことから、規制物質についてはかなり対応が進んでいるものの、カルボニル類については依然としてガイドラインを超過する住宅が存在していることがわかる。

Table1 統計解析結果
検定統計量^b

	V.R. [/hr]
Mann-Whitney の U	70.000
Wilcoxon の W	260.000
Z	-.764
漸近有意確率 (両側)	.445
正確有意確率 [2x(片側有意確率)]	.468 ^a

a. 同順位に修正されていません。

b. グループ化変数: 情報の有無

Table2 I/O 比

Indoor / Outdoor	
Formaldehyde	6.9
Acetaldehyde	3.1
Toluene	2.9
Ethylbenzene	3.9
Xylene	6.0
p-Dichlorobenzene	28.5

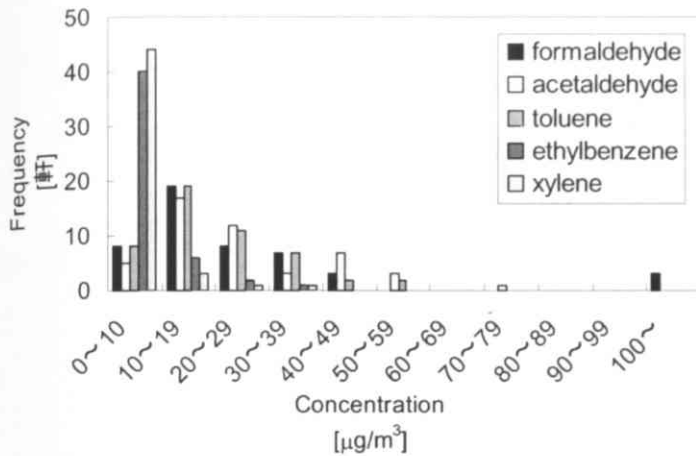


Fig.6 調査対象物質の濃度分布

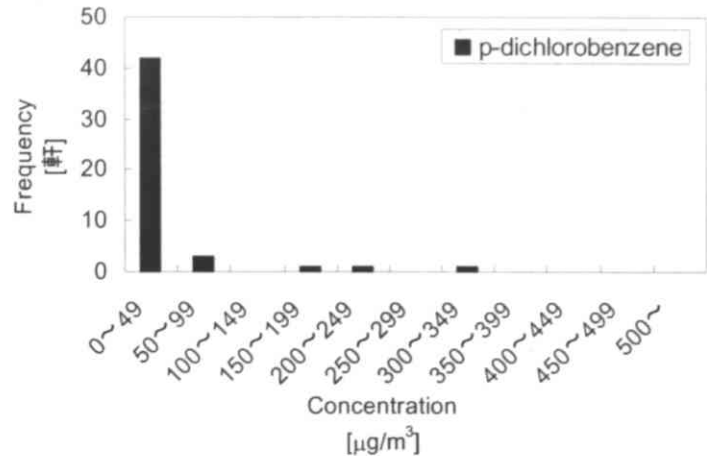


Fig.7 調査対象物質の濃度分布

次に、換気率と同様に対照群と処理群における室内濃度が均質なものであるか検定を行った。使用したのは Mann-Whitney の U 検定である

($\alpha=0.05$)。Table3 に検定結果を示す。Table3 より、いずれの物質にも対照群と処理群の間に有意差は見られなかった。

次に 1 回目の濃度測定結果における各物質の関係を Fig. 8 に示す。最も関係が見られたのは ethylbenzene と xylene である。Fig. 8 より、xylene が高濃度の群と低濃度の群の 2 パターンに分けることができる。xylene が低濃度で ethylbenzene が高濃度領域にある 3 軒はいずれも同じマンションの居住者である。そして、そのマンションを除くと非常に良い関係性が見られることから、放散源は類似しているものと考えられる。その他の物質については強い関係性は見ることができなかった。

次に、屋外濃度について述べる。対象住宅は関東を中心として各地に点在している。Fig.9 に formaldehyde、Fig.10 に toluene の屋外濃度の地域差を示す。データは 1 回目と 2 回目の屋外濃度測定結果を合わせたものである。Other には、静岡、富山、群馬、栃木の住宅が含まれる。formaldehyde 濃度に地域差は見られなかったものの、埼玉が最も高く、次いで東京、という結果となった。一方、toluene についても埼玉県濃度が他の県よりも高く、次いで東京が高かった。排出源データ (Fig.11) によると、toluene、formaldehyde 共に発生源は東京に集中しており、埼玉県にも点在している^[1]。

Table3 濃度の検定結果

検定統計量^a

	formaldehyde	acetaldehyde	toluene	ethylbenzene	xylene	p-dichlorobenzene
Mann-Whitney の U	203.000	197.000	169.500	166.500	208.000	217.500
Wilcoxon の W	294.000	288.000	260.500	257.500	299.000	308.500
Z	-.830	-.962	-1.570	-1.637	-.720	-.380
漸近有意確率 (両側)	.407	.336	.116	.102	.472	.704

a. グループ化変数: 情報提示の有無

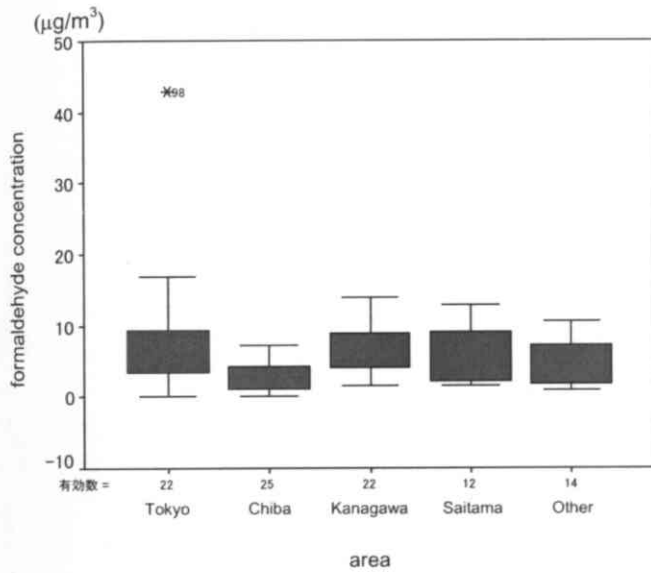


Fig.9 formaldehyde 屋外濃度地域差

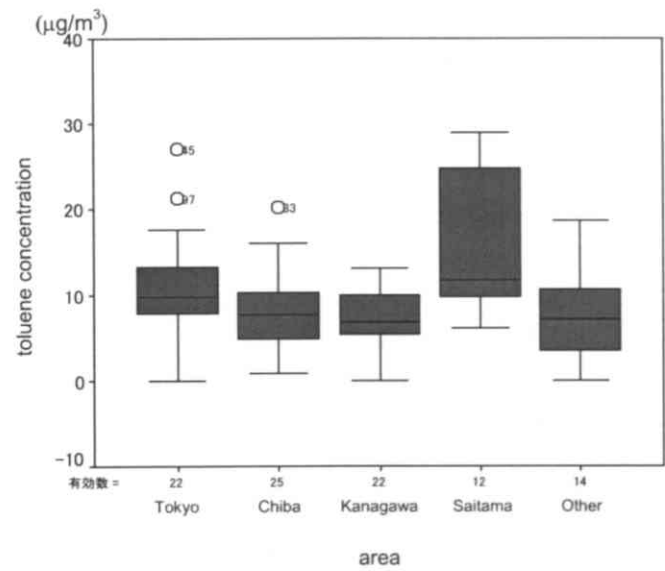


Fig.10 toluene 屋外濃度地域差

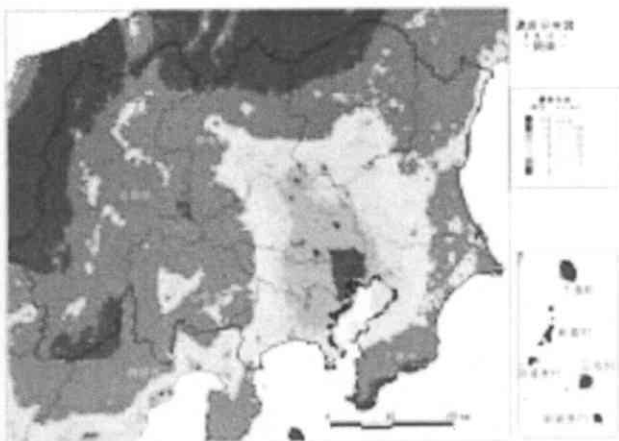


Fig.11 toluene 排出量マップ

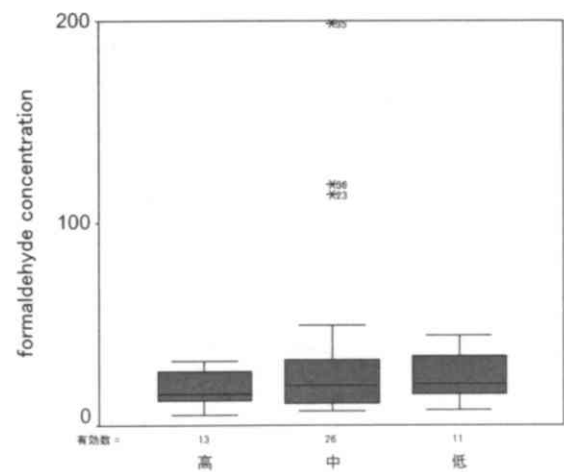


Fig.12 情報提示前意識と室内 formaldehyde 濃度

[参考文献]

- [1] 社団法人環境情報科学センター, 化学物質の排出量・移動量集計データ・マップ (平成 16 年 9 月 16 日更新),
<http://www.prtr-net.jp/index.php>

第6章 意識の変化

6.1. 意識調査結果

Table1 に、情報を提示していない群とした群における化学物質に対する意識調査結果を示す。本調査では、情報提示群と提示していない群の両方で化学物質の意識について高中低3段階で評価をしてもらっている。

Table1 では、評価結果が上がった居住者、変わらなかった居住者、下がった居住者に分け、その内訳を示している。これを見ると、情報提示群の意識が上がったと回答した居住者は11軒で全体の約31%、これに対し意識が下がったと回答した居住者は全体の25%であった。このことから、必ずしも情報を認知したからといって意識が上昇するわけではないということがわかる。また、特徴として、情報提示した群における情報提示後の意識は全体として“中”に集約する傾向があることがわかる。

一方、情報提示をせずに2回連続でアンケートをとった群では基本的に意識は変わらないはずだが、10軒中3軒の居住者が2回目の測定時に意識が変わっていた。2回目に意識が変わった居住者はいずれも“中”に変わっている。これは、始めて化学物質の測定をするという体験から、室内化学物質を意識してしまった結果、つまり、測定自体の誤差か、意識の誤差であると考えられる。

室内の空気という、一般的には室内のほこりを想像する居住者も多いと考えられる。そのため、アンケートではあえて室内の“ほこり”と“化学物質”を分けて質問している。比較のため、室内のほこりに対する意識についての結果をTable2 に示す。ほこりに対する意識では、情報提示を行っていない群については前後で異なることは無かった。また、情報提示を行った群についても、情報提示前後でも評価が変わらない居住者が大多数を占めるという結果となり、情報を与えていない“ほこりに対する意識”の評価としては妥当な結果となった。

次に情報提示前の室内化学物質に対する意識について男性(n=15)と女性(n=35)に分けて示す(Fig.1, Fig.2)。顕著に違い

Table1 意識調査結果

		情報提示なし		情報提示あり	
上がった	中⇒高	0	4		
	低⇒中	1	7		
	低⇒高	0	0		
変わらない	高⇒高	2	1		
	中⇒中	5	12		
	低⇒低	0	3		
下がった	高⇒低	0	1		
	高⇒中	2	4		
	中⇒低	0	4		

Table2 ほこりに対する意識調査結果

		情報提示なし		情報提示あり	
上がった	中⇒高	0	4		
	低⇒中	0	2		
	低⇒高	0	0		
変わらない	高⇒高	1	4		
	中⇒中	6	21		
	低⇒低	0	1		
下がった	高⇒低	0	1		
	高⇒中	0	2		
	中⇒低	0	1		

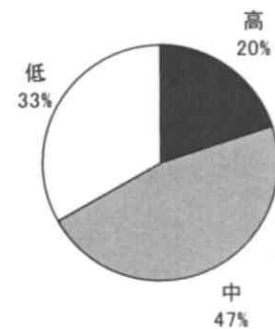


Fig.1 情報提示前の意識(男)

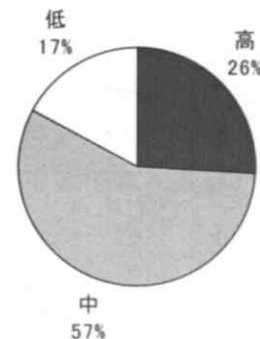


Fig.2 情報提示前の意識(女)

が見られるのが、意識が低いと答えた居住者の男女差である。本研究においては、男性の方が女性よりも化学物質に対する意識が低い人の割合が多い傾向となった。これは、普段住宅内で過ごし、防虫剤や建材の選定など室内化学物質を意識する機会の多い主婦の方が、男性よりも意識が高いことを意味していることが推測できる。

今回、アンケートにおいて、提示した化学物質濃度、換気率などの情報のうち“最も気になった項目”を聞いている。有効回答数 22 軒のうち、acetaldehyde が気になると答えた人は半分以上の 15 軒であった。次いで多かったのが formaldehyde の 3 軒、その他、p-dichlorobenzene、換気なども挙げられていた。acetaldehyde に最も回答が多かった理由としては、acetaldehyde が他の物質に比べてガイドラインが $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と低く、各物質の濃度をその物質のガイドラインと比較した際に、acetaldehyde が最もガイドラインに近い値となってしまうことが原因であると考えられる。

6.2. まとめ

情報提示は、必ずしも居住者の意識を上げる方向には働かず、意識は“中”に収束することがわかった。居住者の室内化学物質に対する意識は、常に意識していなくてはいけない状態というのも好ましくなく、全く意識しないで生活するのも良いとは言えない。従って、適度に意識しておく、つまり“中”程度が適していると考えられる。こうした意味で、情報の認知によって、意識が“中”に集約されるという結果は好ましい結果といえる。

第7章 行動の変化

7.1. 窓開け換気時間の変化

本研究では、居住者自身が空気交換を目的として行った窓開け換気時間の変化を、行動の指標として用いることとした。窓開け時間についてはアンケートによる回答してもらっている。

Fig.1 に窓開け時間の変化を示す。Fig.1 を見ると、情報提示群、対照群共に2回目の測定時に窓開け時間が増加する傾向にあることがわかる。そこで、窓開け時間の変化に統計的有意差があるかどうか検定を行うこととした。統計解析には Wilcoxon の符号付順位和検定 ($\alpha=0.05$) を用いた。検定結果を Table1 に示す。Table1 より、窓開け時間は情報提示群のみ有意 ($P=0.08$) となることがわかった。

そこで、次にアンケートに記載してもらった測定期間中の窓開け時間 [hr/day] について同様に検定 (Wilcoxon 符号付順位和検定、 $\alpha=0.05$) を行うこととした。居住者による窓開け行為は、居住者自身が実際に空気交換を目的として行ったものである。アンケートによる調査であるためその絶対値に信頼性は無いが、居住者自身が意識する窓開け時間の多少を1回目と2回目で比較すること自体は可能である。窓開け時間に増加が見られれば、情報の提示が居住者の行動に影響を与え、その結果として行動が起こったために換気量が増加したと考えることができる。統計解析の結果、有意確率は情報提示群=0.029 で有意差有り、対照群=0.173 で有意差無し、となり、情報提示群が統計的にも有意に窓開け時間が増加していることがわかった。

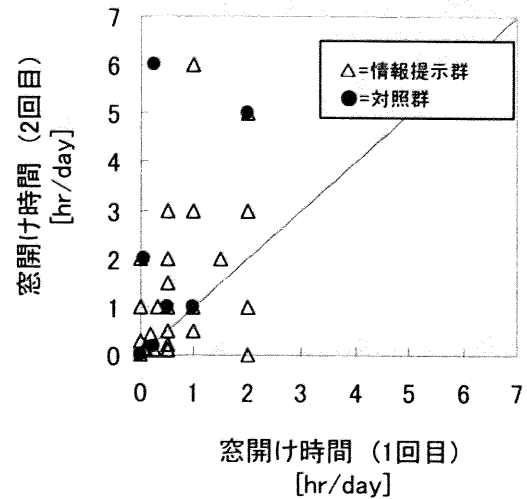


Fig.1 窓開け時間の変化

Table1 窓開け時間変化の統計解析結果
検定統計量^b

	対照群	情報提示群
Z	-1.753 ^a	-2.255 ^a
漸近有意確率 (両側)	.080	.024

a. 負の順位に基づく

b. Wilcoxon の符号付き順位検定

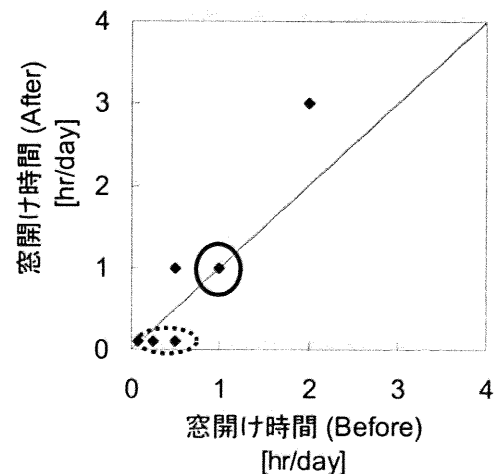


Fig.4 換気率が低かった住宅における窓開け時

7.2. 意識の変化と窓開け時間の変化

次に、情報提示群における意識の変化(意識が上がった・変わらない・下がった)と窓開け時間の関係について Fig.5 に示す。本研究における居住者においては、意識変化と窓開け時間の変化に明確な傾向は見られなかった。これは、1回目の化学物質濃度がガイドラインを超過している住宅が10%程度であり、対策をとる必要性が低かったことや、窓開け時間の多少は意識だけでは

なく、測定期間中の天候なども大きく左右していることなどが原因として考えられる。

7.3. まとめ

本研究における窓開け換気時間の変化を統計解析したところ、情報提示群において有意な上昇が見られた。ただし、窓開け時間の変化は必ずしも情報の提示による意識の変化によるものではないことも明らかになった。

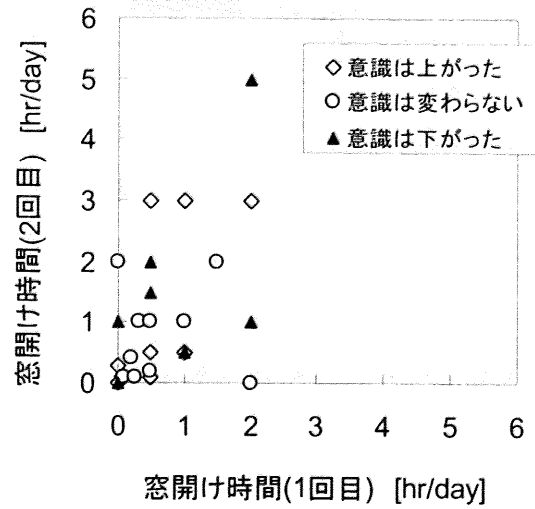


Fig.5 意識別窓開け時間の変化

第8章 環境の変化

8.1. 換気量測定結果

8.1.1 換気量の変化

まず、行動の変化(窓開け換気)によって、実環境中の換気量が上昇しているかどうか明らかにする。換気量の測定はPFT法を用いて行っている。従って、計算上は測定ゾーン内の空気は瞬間完全混合を仮定している。しかし、実際には室容積が大きければ大きいほど瞬間完全混合にはなっていない可能性が高く、PMCH濃度が低く見積もられることで換気量が過大評価される可能性が出てくる。そこで、念のため、室容積と換気率で相関関係を確認したところ、室容積と換気率に相関は見られなかった。尚、本調査では、換気量測定において欠損が多く出てしまった。

Fig.2に情報提示群と情報提示を行っていない群(以下対照群)の1回目と2回目の換気量測定結果を示す(情報提示群 n=21、対照群 n=7)。

Fig.1より、対照群は情報提示前後で大きく変わらない傾向がある一方、情報提示群においては2回目の方が、換気率が高いという傾向があることがわかる。

次に、情報提示群の換気率上昇が統計的にも有意なものであるかどうか、解析を行うこととした。ここで、換気の指標として“換気率[hr]”及び“換気量[m³/hr]”の2つの指標が考えられる。換気量は換気率の値に各住宅の容積をかけたものである。居住者の換気の多くは窓開け行為によるものと考えられる。その場合、換気量[m³/hr]は室内外の圧力差によって決定されるため、各室容積の大小に関わらず、同じ窓を同じだけ同じ時間開けた場合の空気交換量[m³/hr]は変わらないと考えられる。従って、居住者の窓開け行為によって変動する換気の指標としてまず“換気量”を用いて解析を行う。

統計解析に使用したのは、wilcoxonの符号付順位と検定(対応のある2サンプルの検定)である。情報提示群及び情報を提示してない群につ

いて1回目と2回目の換気量[m³/hr]測定結果に有意差があるか検定した($\alpha=0.05$)。Table1に検定

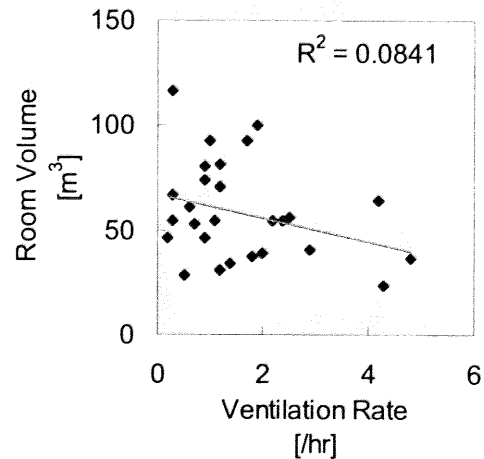


Fig.1 室容積と換気率

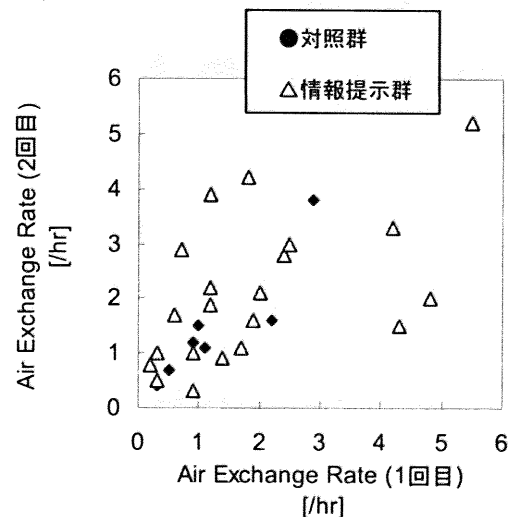


Fig.2 換気率測定結果

Table1 換気量統計解析結果

検定統計量^c

	対照群	情報提示群
Z	-0.507 ^a	-1.755 ^b
漸近有意確率(両側)	.610	.079

a. 正の順位に基づく

b. 負の順位に基づく

c. Wilcoxonの符号付き順位検定

結果を示す。Table1 より、有意確率は情報提示群=0.079、対照群=0.484 となり、情報提示群に統計的有意差は見られなかったものの、対照群と比較すると換気率は増加する傾向が見られた。

8.1.2. 情報提示の換気量への寄与

情報の提示以外に人間の換気行動に大きな影響を与える因子として

- ・ 温度
- ・ 雨天割合
- ・ 室内空気の混合状態
- ・ 室内ドアの開閉状況
- ・ 外部風速

等が挙げられる。従って、換気率の増加が必ずしも情報の効果によるものとは限らない。そこで本研究では、これらの因子のうち、把握が可能であった温度、雨天の状況と比較し、情報の提示がどれだけの効果を持っていたかを重回帰分析によって調べることにした。まず、Fig.3に1回目と2回目の調査期間中の平均外気温を示す。Fig.3より、調査住宅の1回目の外気温(5~10°C)の付近に分布している一部の住宅において2回目の外気温が大幅に上昇(10~20°Cまで)していることがわかる。これは、冬から春にかけての季節の変わり目に調査期間が重なってしまった住宅が存在したためである。

Fig.4に情報提示群における1回目と2回目の換気量の増減分 ΔQ (2回目-1回目)が温度の増減分 ΔT_{out} (2回目-1回目)と関係を、Fig.5に測定日数のうち、雨の日であった日の割合 ΔR (2回目-1回目)と換気量 ΔQ の関係を示す。雨の日か否かは、気象庁による時間毎の気象データのうち、降水量が0だった日を晴れ、1mmでも降水量がある日は雨の日、と定義した。Fig.4より ΔQ と ΔT_{out} に弱い相関($R^2=0.33$)が、Fig.7より ΔQ と ΔR 雨の日が増えると換気量も下がる傾向が見出せる。

このことから、温度条件や雨の日などの相互作用によって、居住者行動や窓開け時間、換気率が異なってくる可能性が指摘できる。

ここで、のモデルにおいて、情報認知の寄与がどの程度あるのかを決定係数より算出する。住宅換気量 Q のモデル式(1)は

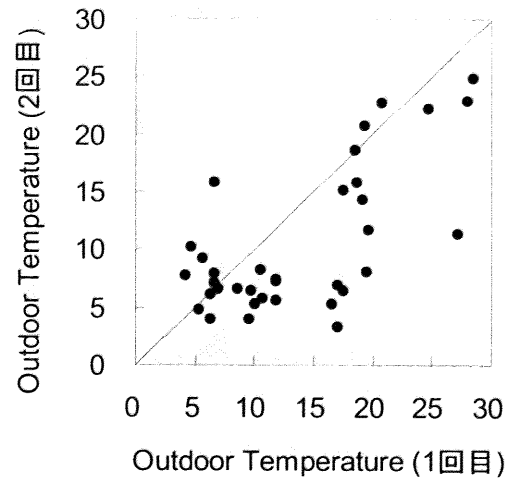


Fig.3 外気温の変化

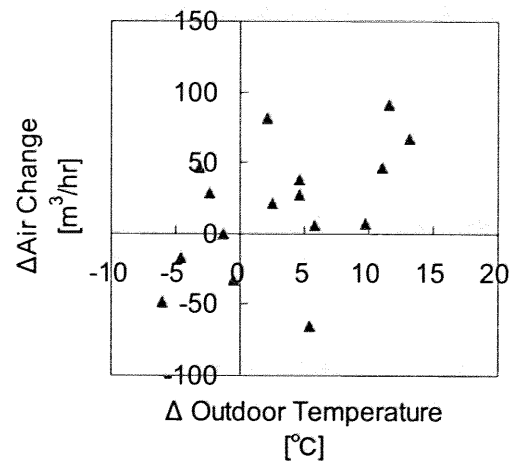


Fig.4 換気量と外気温の変化量の関係

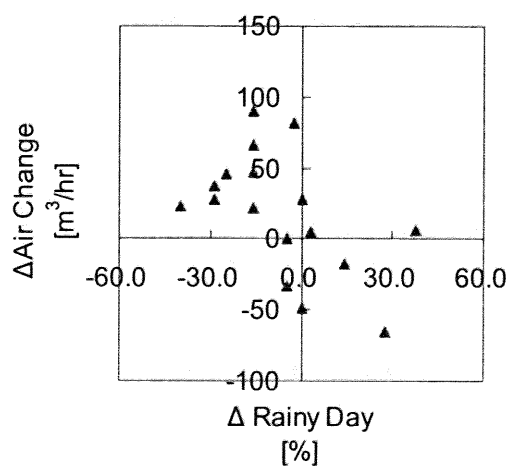


Fig.5 換気量と雨天割合の変化量の関係

$$Q = \alpha + \alpha_1 I + \alpha_2 T + \alpha_3 R + (\text{Basic Ventilation}) \quad \dots(1)$$

ここで

Q =換気量[m³/hr]

I =情報の提示の有無[1, 0]

T =温度に関するパラメーター

R =雨天に関するパラメーター

であると考えられる。*Basic Ventilation*(自然換気量)は1回目と2回目で変わらないと仮定しているため、1回目と2回目における換気量の差 ΔQ 算出のモデル(2)は、以下となる。

$$\Delta Q = \beta + \beta_1 \Delta I + \beta_2 \Delta T + \beta_3 \Delta R \quad \dots(2)$$

ここで

ΔQ =1回目と2回目の換気量の差[m³/hr]

ΔI =情報の提示の有無[1, 0]

ΔT =温度差[°C]

ΔR =雨天割合[%]

重回帰分析①

従属変数：1回目と2回目の換気量[m³/hr]の変化量 ΔQ

独立変数：情報提示の有無[1, 0]

：平均外気温度の差 ΔT_{out} [°C]

：測定期間中雨であった日の割合の差

ΔR [%]

Table2 重回帰分析結果

係数^a

モデル	非標準化係数		標準化係数	t	有意確率
	B	標準誤差	ベータ		
1 (定数)	-23.990	17.772		-1.350	.192
情報提示の有無	29.847	20.735	.244	1.439	.165
雨天割合の差	-104.225	42.519	-.412	-2.451	.024
平均温度の差[°C]	3.906	1.652	.391	2.365	.028

a. 従属変数: $\Delta VENT$

重回帰分析の結果、本モデルの R^2 は 0.379、有意確率は 0.006 となり、情報提示前後の換気量の変動約 38% を情報と温度、雨天割合で説明することができることがわかった。

Table2 に重回帰分析の結果を示す。各パラメーターの有意確率は、 ΔT_{out} が 0.028、 ΔR が 0.024 情報の認知は 0.17 となり、温度や雨天の方が確実に換気量へ影響していることが明らかになった。次に、重回帰分析の結果得られたモデル式に、今回の調査により得られた情報提示群の平均値を代入し、本調査における情報提示の平均的寄与を求めた。その結果を Table3 に示す。

Table3 各パラメーターの換気量への平均的寄与

説明変数	情報提示群の 平均値	換気量への平均的寄与 [m ³ /hr]
情報の有無 I [1,0]	1	29.8
雨天割合の差 ΔR	-7	7.3
外気温度差 ΔT	4.3	16.8

Table3 より、情報認知による換気量変動への効果はこれらの因子の中で最も大きい結果となった。また、情報の効果としては、1時間あたり約 30m³分の換気量の増加に寄与することがわかった。これは、6畳の部屋であれば換気率にして約 1.3回/hr分、8畳の部屋であれば約 1回/hr分に相当する。また、温度の寄与は平均 16.8m³/hr、雨の日は 7.3m³/hrの換気量低下に寄与することがわかった。

次に、温度に関するパラメーターの候補として、デグリーアワー(DH)の概念を用い、居住者は外気温が設定温以上になると窓を開けるという概念をもとに、ある時間に設定温度以上であった時間の温度(°C/hr)を積算したものを指標とした。設定温度は 10 度、12 度、15 度とし、時間帯は朝 6 時から夜 8 時までとした。

重回帰分析②

従属変数：1回目と2回目の換気量[m³/hr]の変化量 ΔQ

独立変数：情報提示の有無[1, 0]

：デグリーアワー…設定温度との差 Δdh [°C/hr]

：測定期間中雨であった日の割合の差 ΔR [%]

重回帰分析の結果、設定温度 10 度、12 度、15 度の際のこのモデルの R^2 はそれぞれ 0.26、0.24、0.22 となり、デグリーアワーよりも平均外気温の R^2 が高い結果となった。また、同様に設定時間や温度を変えて Stepwise で変数選択を行ったところ落ちてしまった。デグリーアワーは（今回の場合）15 分間隔の気温変化に追従できる指標であるが、人による窓開け換気という行動は、そのような時間分解能の高い感度を持つ現象ではなく、平均気温程度の時間分解能の情報に依存するものと考えられる。

8.1.3. 換気率が悪かった住宅

換気量は単純に増えればよいというのではなく、問題となってくるのは換気率が基準値の 0.5 回/hr を下回っている場合である。従って、測定の結果換気率が低かったものに焦点をあてたものを Fig.6 に示す。

Fig.6 より、1 回目に換気率が低かった住宅の全てにおいて、情報提示後に換気率が上がっていることがわかる。また、上昇率が低かった住宅(Fig.6 点線内の 2 点)に関しては、窓開け時間にも差が見られなかった。この 2 点については、居住者が日中家を留守にしているため、行動を起こせず、結果として改善が見られなかったものと考えられる。従って、仕事などで日中外出

していることが多い住宅においては、何らかの対策が必要であると考えられる。一方、情報提示前にガイドラインを超えていた 1 軒が 2 回目の測定時にガイドラインを下回るというケースも存在した。この住宅に関しては、前後で大きな温度の差も認められず、アンケートによる窓開け時間にも差は見られなかった。

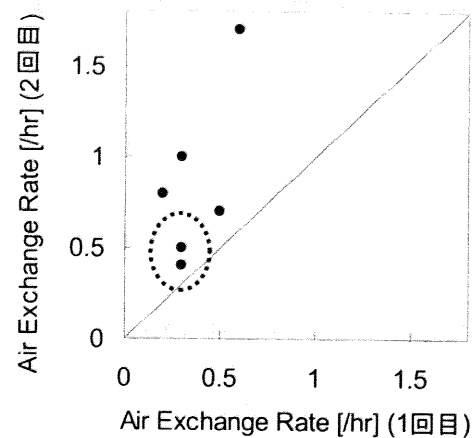


Fig.6 窓開け時間の变化

Table4 独立した 2 サンプルの検定結果

Wilcoxon の W	406.500
漸近有意確率 (両側)	.258

a. グループ化変数: 1

検定統計量^b

	対照群
Mann-Whitney の U	24.000
Wilcoxon の W	52.000
Z	-.064
正確有意確率 [2x(片)	1.000 ^a

a.

b. グループ化変数: 0

ここまでは、1 回目の 2 回目の住宅を対応のあるサンプルとして解析を行ってきた。しかし、実際には、本来そろえておきたい温度、湿度、外部風速、室内のドア開閉状況、居住者の在室時間などの条件が異なってくる。従って、1 回目と 2 回目のサンプルを独立とみなし、換気量に有意差があるかどうか統計解析を行った(Mann-Whitney の U 検定)。その結果を Table4 に示す、情報提示群の有意確率は 0.258 となり、対応のあるサンプルの方がより良い結果となった。

8.2. 室内化学物質濃度測定結果

8.2.1. カルボニル類について

以上述べてきたように、情報の認知によって居住者が窓開け換気を行うことにより、換気量の変動にプラスの効果を生み出すことがわかったため、次のステップとして室内化学物質濃度が低

減していることがわかれば、汚染物質対策としての情報認知の妥当性・有効性を評価することができる。

1回目と2回目のカルボニル類の濃度変化を Fig.7~8 に示す。formaldehyde と acetaldehyde に関しては、情報提示群の濃度が下がるという明確な傾向は見られず、前後で大きな変化は見られないという結果となった。さらに、対照群及び情報提示群の formaldehyde 濃度に有意差があるかどうか統計解析を行った(Wilcoxon の符号付順位和検定 - 対応のある2群の検定, 対照群 N=13, 情報提示群 N=35, $\alpha=0.05$)ところ、対照群は有意確率 0.045、情報提示群も有意確率 0.046 で有意に濃度が増加していることがわかった(Table5)。

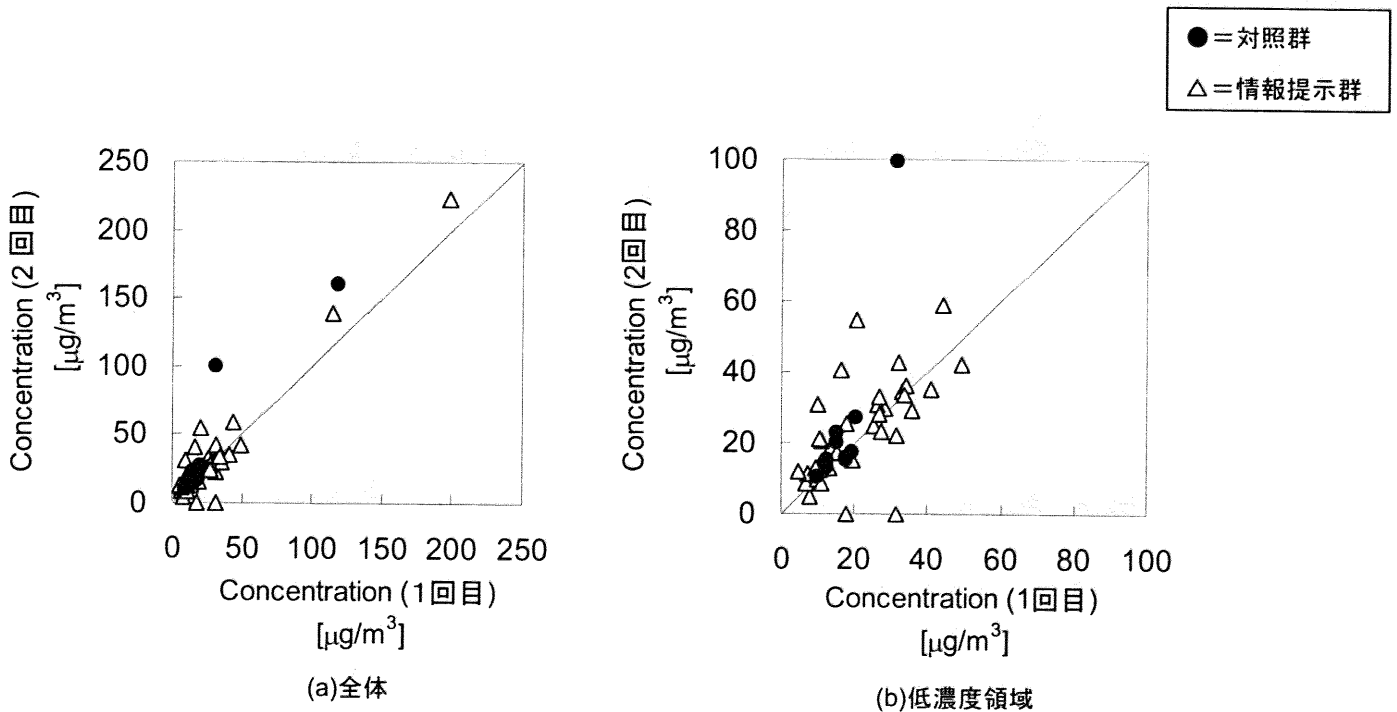


Fig.7 formaldehyde 濃度変化

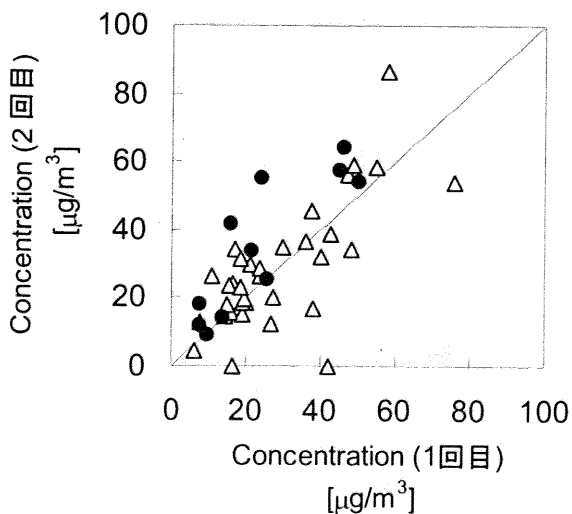


Fig.8 acetaldehyde 濃度変化

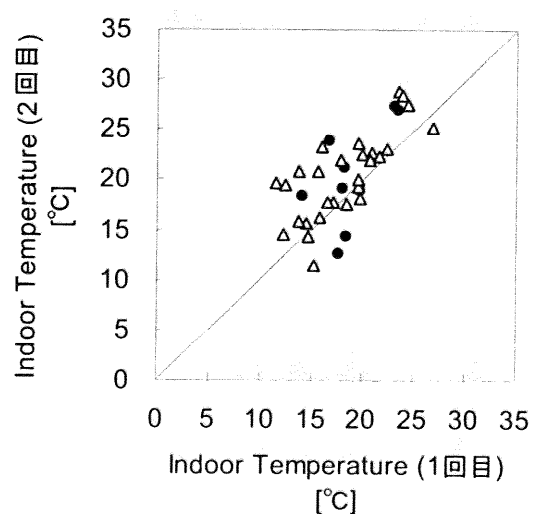


Fig.9 室内温度の変化

Table5 カルボニル類統計解析結果

検定統計量^b

	formaldehyde-対照群-	formaldehyde-情報提示群-	acetaldehyde-対照群-	acetaldehyde-情報提示群-
Z	-2.001 ^a	-1.995 ^a	-2.491 ^a	-1.224 ^a
漸近有意確率(両側)	.045	.046	.013	.221

a. 負の順位に基づく

b. Wilcoxon の符号付き順位検定

換気量が全体として増加傾向にあるにもかかわらず、室内濃度が低減しなかった理由の1つに放散量の増加が挙げられる。そして放散量増加を招く要因として2回目の測定時における室温の上昇が考えられる。Fig.9に1回目と2回目の室温の変化を示す。Fig.9より、測定住宅における室温はやや2回目においてやや上昇する傾向にあることがわかる。そこで本研究では、各住宅の放散量の変化と濃度上昇に関係について調べることにした。

まず放散量については、室内濃度と屋外濃度、換気量から放散量を算出した(式3)。放散量算出の式は以下のとおりである。測定ゾーン内の空気の瞬間完全混合を仮定すると、室内化学物質の物質収支式は以下のようになる。

$$C_{in} = C_{out} + \frac{E}{Q}$$

この式を変形すると、

$$E = Q(C_{in} - C_{out}) \quad \dots (3)$$

ここで、

C_{in} = 室内化学物質濃度[mg/m³]

C_{out} = 屋外化学物質濃度 [mg/m³]

E = 放散量 [mg/hr]

Q = 換気量 [m³/hr]

化学物質の放散量(反応)の温度依存性は以下の Arrhenius の式(4)で表すことができる^[1]。

$$k = Ae^{\frac{-H}{RT}} \quad \dots (4)$$

ここで

k =速度定数

A =頻度因子

H =活性化エネルギー

R =気体定数[$0.08206 \text{ atm} \cdot \text{dm}^3 / \text{K} \cdot \text{mol} = 8.314 \text{ J} / \text{K} \cdot \text{mol}$]

T =温度[K]

これを自然対数の形に変形すると式(5)が得られる。

$$\ln(k) = \frac{-E}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln(A) \quad \cdots(5)$$

つまり、 $\log k$ を $1/T$ に対してプロットすると対数グラフで $y=mx+b$ の直線となる。 k を、化学物質の n 回目の放散速度 $En[\text{mg/hr}]$ とし、1回目から2回目それぞれで式(5)をたて、その差をとってやると式(6)が得られる。

$$\ln\left(\frac{E_1}{E_2}\right) = -\frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) \quad \cdots(6)$$

formaldehyde について、式(6)をプロットしたものを、Fig.10 に示す(アレニウスプロット)。Fig.10 より、対照群では良い相関、情報提示群でも弱い相関が見られ、原点を通った直線となっていることから、換気量が増加したにもかかわらず、formaldehyde 濃度が低減しなかった理由については、formaldehyde の強い温度依存性で説明することができると考えられる。

一方、acetaldehyde についても formaldehyde と同様濃度は低減せず、対照群は有意確率 0.013 で有意に濃度が増加していた。情報提示群では有意確率 0.221 で有意な増加とはならなかった (Table5)。そこで、acetaldehyde 放散量の温度依存性について Fig.11 に示す。Fig.11 より、acetaldehyde は対照群、情報提示群共に相関が見られなかったことから、温度に依らない別の要因が存在している可能性が指摘できる。その例として、食品、飲酒、アルコール系消毒剤など、居住者由来のものが挙げられる。特に飲酒は acetaldehyde の放散源として有名である。ヒトはアルコール(エタノール)を摂取すると、体内で代謝され acetaldehyde となる。この一部が呼気と共に排出されるのである。また、お酒そのものも、空気中で酸化され acetaldehyde となる。本研究では、こうしたことをふまえて、飲酒の有無をアンケートで聞き取り調査している。Fig.12 に飲酒の有無と室内 acetaldehyde 濃度について示す (Fig.12 はすべての測定を独立として扱っている)。Fig.12 より、飲酒の有無と室内濃度に明確な差は見られなかった。これは、アンケートによって飲酒の量などまで詳しく追う調査することができなかったことや、飲酒以外にも放散源が多数存在する事が原因であると考えられる。本調査では、acetaldehyde の放散源として建材、接着剤、飲酒を挙げていたため、その他の生活用品から放散されている危険性を指摘していない。従って、

今後は acetaldehyde のさらなる放散源解析を進めると同時に、居住者由来の生活用品からも多量の acetaldehyde が放散しているという危険性を指摘していく必要性が示唆された。一方、Fig.13、

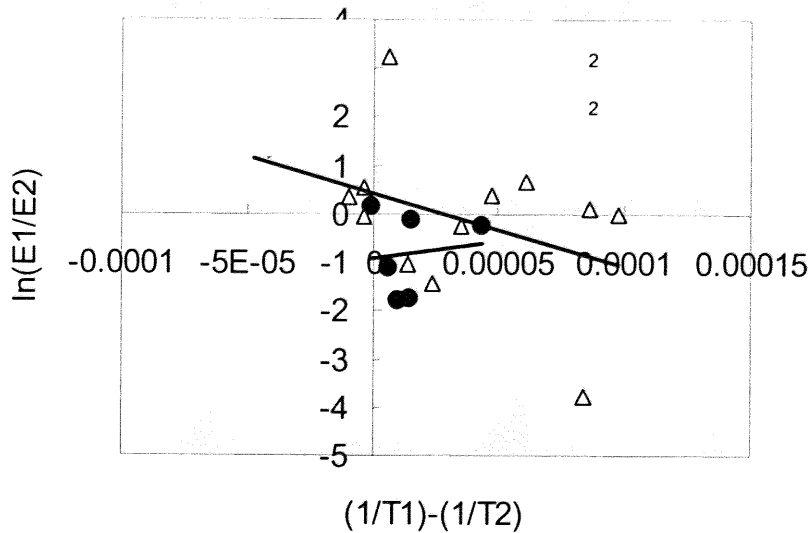


Fig.11 アレニウスプロット-acetaldehyde-

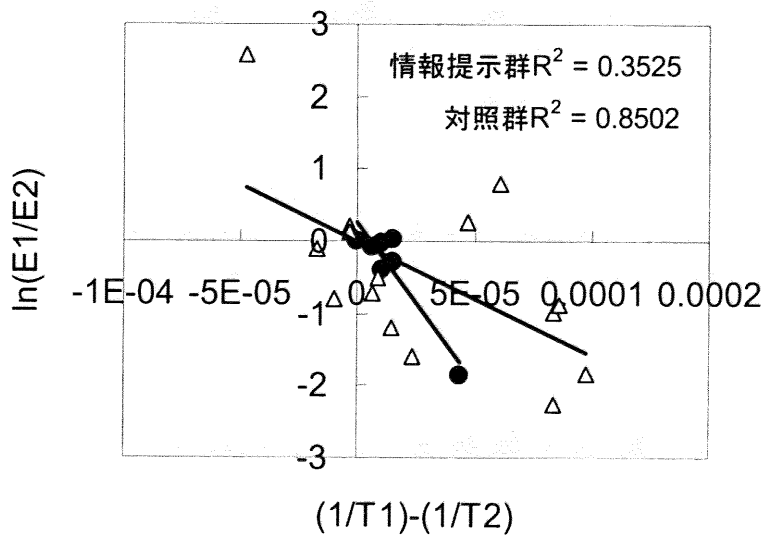


Fig.10 アレニウスプロット-formaldehyde-

14に1回
照群と情報

目と2回目の対
提示群における

飲酒の有無と濃度について示す。1回目と2回目のグラフを示す Fig.13、14 を見てみると、情報提示群は1回目と2回目で大きく変化がないのに対し、対照群における飲酒があった住宅の濃度が上昇していることがわかる。従って、情報提示群よりも対照群に統計的有意の濃度上昇が見られた原因として、飲酒の可能性が考えられる。また、acetaldehyde の屋外濃度も室内濃度を上昇させる原因となりえるパラメーターである。本研究において、この屋外 acetaldehyde 濃度が非常に高濃度で検出された。従って、屋外濃度が acetaldehyde 濃度の変動に強く影響している可能性が推測できる。

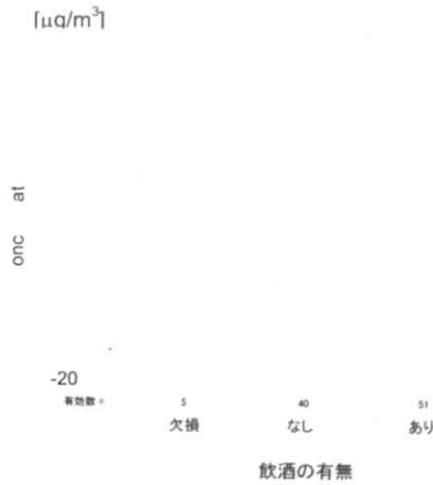


Fig.12 飲酒の有無と acetaldehyde 濃度

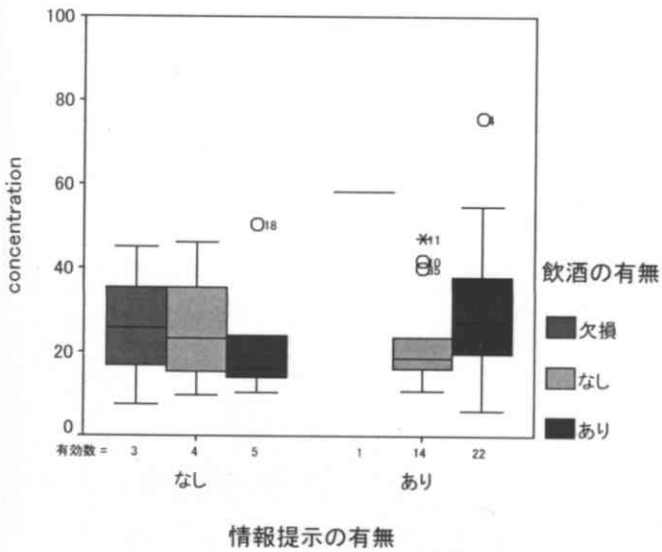


Fig.13 飲酒の有無と acetaldehyde 濃度(1回目)

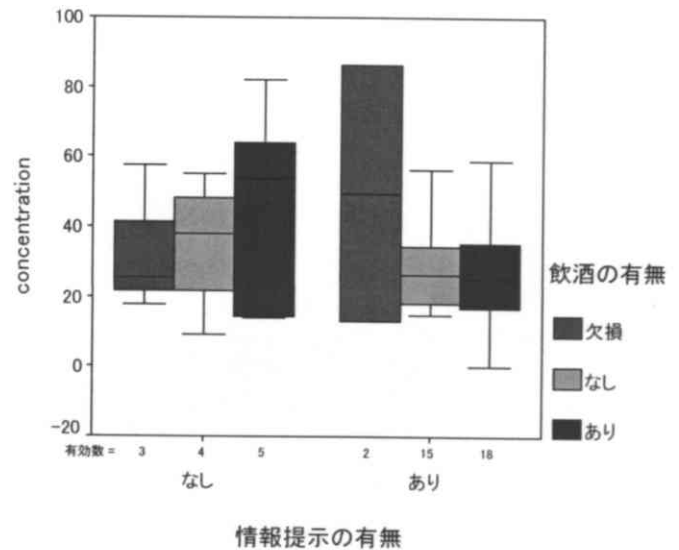


Fig.14 飲酒の有無と acetaldehyde 濃度(2回目)

8.2.2. VOCs について

1回目と2回目の測定における toluene の濃度変化(n=50)について Fig.15 に示す。全体の傾向としては対照群の濃度は1回目と2回目で変わらず、情報提示群については下がる傾向が見える。そこで、統計的有意差があるかどうか検定を行った (Wilcoxon 符号付順位和検定-対応のある2サンプルの検定、 $\alpha=0.05$)を行ったところ、対照群は

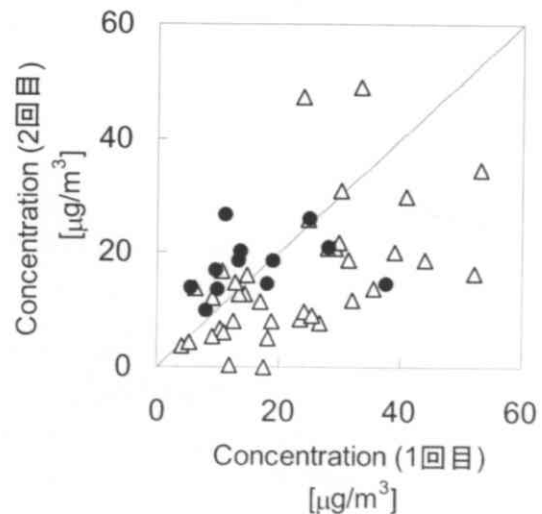


Fig.15 toluene 濃度変化

有意確率 0.35 で有意とはならず、情報提示群は 0.001 で有意差有りとなった(Table6)。

ethylbenzene の濃度変化について Fig.16 に示す。toluene と同様、全体の傾向としては対照群の濃度は 1 回目と 2 回目で変わらず、情報提示群については下がる傾向が見える。そこで、統計的

Table6 VOCs の統計解析結果

漸近有意確率 (両側)	.347	.001	.158	.002	.091	.045
-------------	------	------	------	------	------	------

b. 正の順位に基づく

有意差があるかどうか検定を行った(Wilcoxon 符号付順位和検定—対応のある 2 サンプルの検定、 $\alpha=0.05$)を行ったところ、対照群は有意確率 0.16 で有意とはならず、情報提示群は 0.002 で有意差有りとなった。

m,p-ylene の濃度変化について Fig.17 に示す。
この物質も toluene、ethylbenzene と同様情報提示群のみ濃度が低減する傾向がみてとれる。そこで、統計的有意差があるかどうか検定を行った (Wilcoxon 符号付順位和検定—対応のある 2 サンプルの検定、 $\alpha=0.05$)を行ったところ、対照群の有意確率は 0.091 で有意とはならず、情報提示群は 0.045 で有意差有りとなった。濃度低減の理由として

- ・ 放散量が減った
- ・ 屋外濃度が下がった
- ・ 換気量が増加した

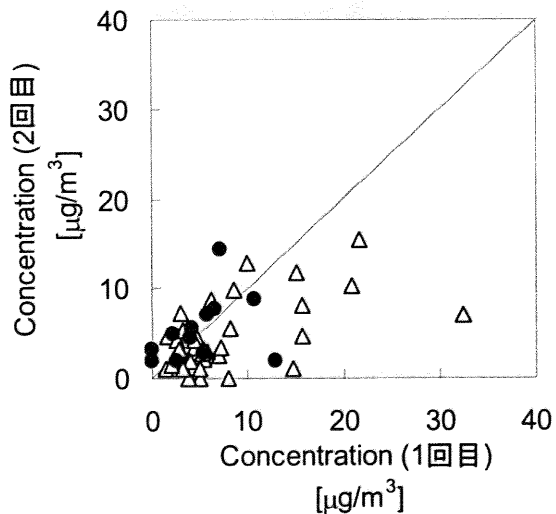


Fig.16 ethylbenzene 濃度変化

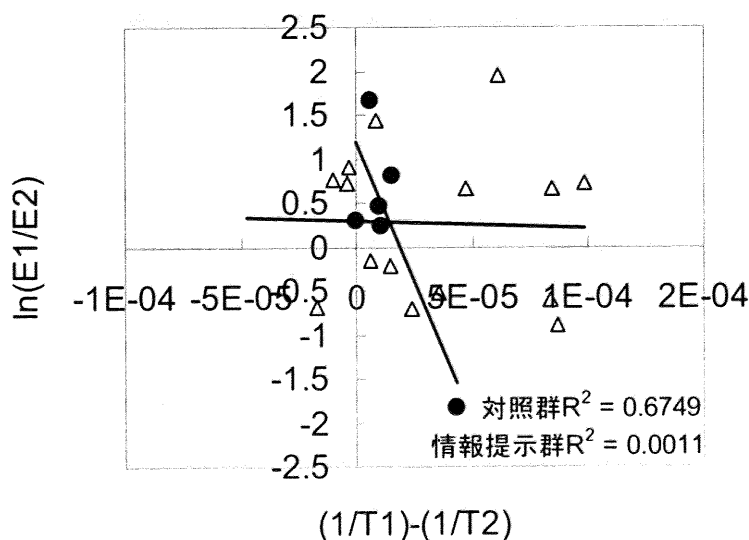


Fig.17 アレニウスプロット—toluene—

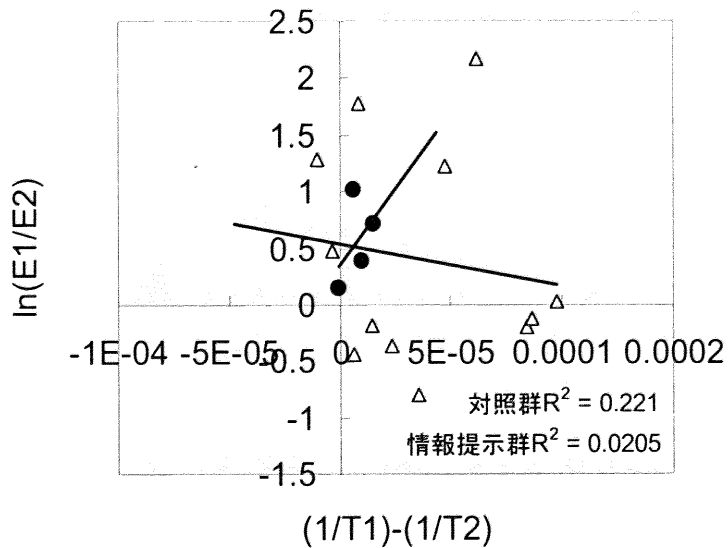


Fig.19 アレニウスプロット—ethylbenzene—

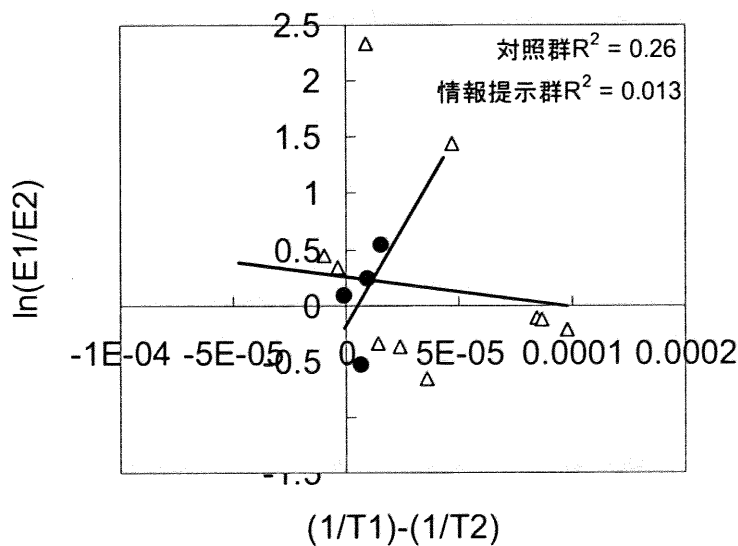


Fig.20 アレニウスプロット—m,p-xylene—

などが挙げられる。そこで、屋外 toluene 濃度について、有意に濃度が下がっているかどうか統計解析を行った。使用したのは Wilcoxon 符号付順位和検定である。結果を Table7 に示す。情報提示群の屋外濃度に有意な低下は見られなかった。従って、屋外濃度の低減が toluene 濃度を低減に大きな影響を与えたとはいえない。また放散量が増加していたとしても、実際に濃度は低減しているので、放散量の増加以上に換気量の効果があったと考えられる。

従って、toluene、ethylbenzene、m,p-xylene については、換気量が増加したことによる換気の効果で濃度が低減されていると考えられる。

一方、toluene、ethylbenzene、m,p-xylene の温度依存性を、Fig.17～19 に示す。しかし、いずれの物質も原点を通る直線とはならず、温度依存性は見られなかった。これは、

Table7 屋外 VOCs 濃度の統計解析

	toluene-対照群-	toluene-情報提示群-	ethylbenzene-対照群-	ethylbenzene-情報提示群-	xylene-対照群-	xylene-情報提示群-
	-1.099 ^a	-1.325 ^b	-2.136 ^a	-2.215 ^b	-1.355 ^a	-1.447 ^a
漸近有意確率(両側)	.272	.185	.033	.830	.176	.148

b. 正の順位に基づく

toluene、ethylbenzene、m,p-xylene が室内で非常に低いレベルで検出されていること

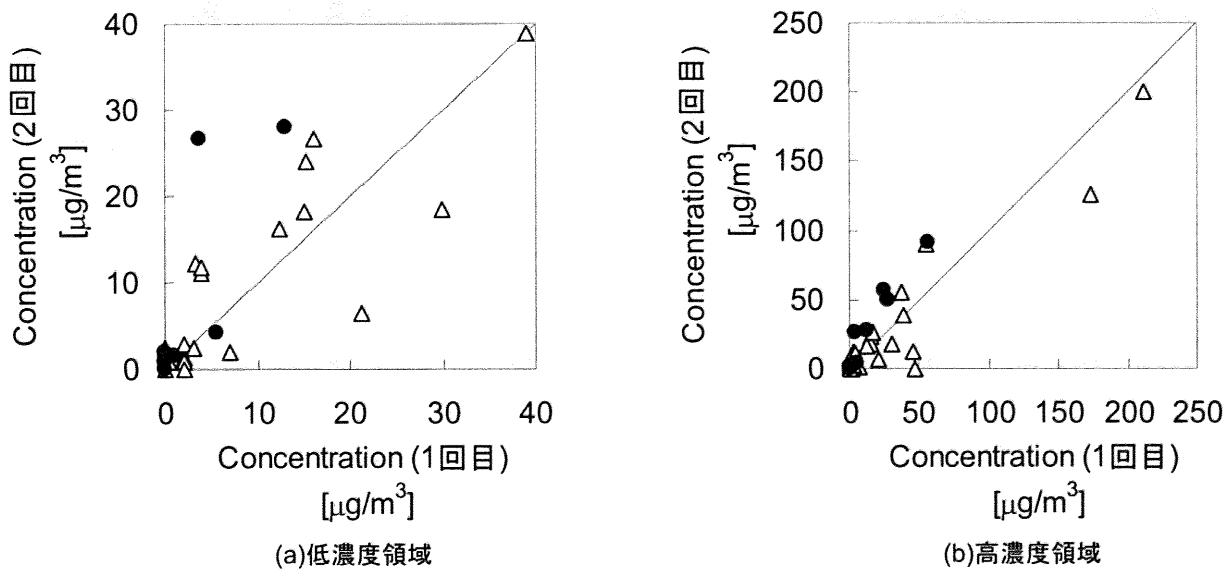


Fig.21 p-dichlorobenzene 濃度変化

・放散源が屋外にも存在することから濃度の変動が室内温度に依存しない
などといったことが原因として挙げられる。

次に、防虫剤に使用される p-dichlorobenzene についてであるが、Fig.21 を見ると、明確な濃度の低下は見られなことがわかる。統計解析(Wilcoxon 符号付順位和検定)を行った結果を Table8 に示すが、対照群の有意確率は 0.214、情報提示群は 0.982 となり、有意差は見られなかった。この原因として、p-dichlorobenzene 濃度を低下させるためには防虫剤の除去が最も効果的であるが、本調査において p-dichlorobenzene の濃度がガイドラインを超過した物件はなく、除去する必要がないと判断された可能性が考えられる。また、換気の効果が出なかった原因としては、

Table8 p-dichlorobenzene 統計解析結果

検定統計量^c

	p-dichlorobenzene-対照群-	p-dichlorobenzene-情報提示群-
Z	-1.244 ^a	-.023 ^b
漸近有意確率(両側)	.214	.982

- a. 負の順位に基づく
 b. 正の順位に基づく
 c. Wilcoxon の符号付き順位検定

防虫剤が使用されているのは寝室のたんす、クローゼットなどであり、主な測定場所である居間に放散源が無かった住宅が存在したことなども挙げられる。

次に、各住宅の1回目及び2回目の測定結果を対応のあるサンプルではなく、独立したサンプルと考え、検定を行った。使用したのは Mann-Whitney の U 検定で $\alpha=0.05$ とした。その結果、対照群の formaldehyde の有意確率は 0.579、acetaldehyde が 0.125、toluene が 0.311、ethylbenzene が 0.390、

xylene が 0.418、p-dichlorobenzene が 0.545 となっており、いずれも濃度の低減は見られない。一方、情報提示群

の formaldehyde の有意確率は 0.245、acetaldehyde が 0.719、toluene が 0.011、ethylbenzene が 0.021、xylene が 0.176、p-dichlorobenzene が 0.913 となり、対応のある 2 サンプルの検定同様 toluene、ethylbenzene に有意差が見られた。

次に、1回目の測定において濃度評価が悪かった住宅について述べる。1回目の調査において、formaldehyde が 3 軒、acetaldehyde が 5 軒の住宅において、評価が B または C で、ガイドラインを超過した。formaldehyde がガイドラインを超過した 3 軒のうち 1 軒は対照群であり、2回目の測定時濃度は上昇した。情報を提示した 2 軒に関しても、濃度の低下は見られなかった。濃度上昇の原因として①温度の上昇による放散量の増加、②在室時間が短い、という 2 点が挙げられるが、濃度がガイドラインを超過した 2 軒の居住者がいずれも昼間在室しておらず、夜遅くから朝までしか在室していない状況であった。従って、このように在室時間が短い居住者の住宅に関しては、不在時の局所換気などの対応が必要である可能性が示唆された。

また、acetaldehyde 濃度がガイドラインを超過した 5 軒のうち 1 軒が対照群であり、濃度は上昇していた。その他の 4 軒のうち、2回目に濃度が低減し、ガイドラインを下回った住宅は 1 軒に留まり、その他の 3 軒に関しては上昇してしまった。濃度が上昇してしまった住宅のうち、少なくとも 1 軒は換気量の増加が認められており、アンケートによって質問した窓開け時間にも増加が見られることから、居住者の窓開け行為による効果が濃度低減に反映されなかったというこ

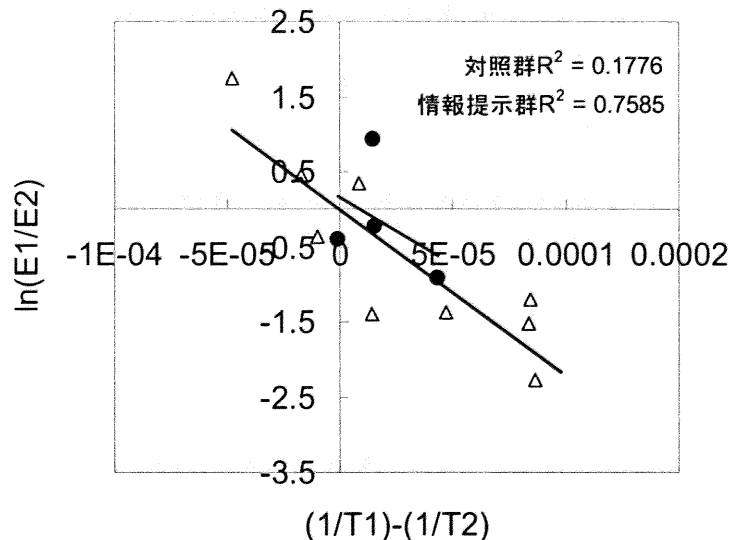


Fig.22 アレニウスプロット-p-dichlorobenzene-

とになる。acetaldehydeは、アルコールの分解などにより、身の回りの生活用品や食品からも発生する物質であるため、こうした発生源から換気量増加分を上回る放散が起こったものと考えられる。しかし、現段階ではacetaldehydeの建材、塗装以外の食品、アルコール性製品からの二次生成量などの室内濃度への寄与割合はわかっておらず、早急に室内放散源の特定及び反応経路を明らかにしていくことにより、acetaldehydeの高濃度曝露を防ぐための注意、呼びかけを居住者に対して行うことが必要である。

8.3. まとめ

室内化学物質及び換気率に関する情報を居住者が認知することによって、住宅の換気量は増加する傾向があることが明らかとなった。そしてその効果は1時間あたり約30m³分である。これは、6畳の部屋であれば1.5回/hrの換気量の相当するものである。また、居住者の換気(窓開け)行為は、温度や雨天の影響と比較すると確実に効果を得られるわけではないものの、情報提示による窓開け換気への寄与が最も大きいことも明らかとなった。

室内環境に関する情報の認知が居住者の窓開け時間を増加させることによって換気率が上昇する傾向があることがわかったため、この換気量増加によって室内化学物質濃度が低減しているかどうかの評価を行った結果、蒸散支配型の物質と考えられるtoluene、ethylbenzene、xyleneについては有意に濃度が低減していることがわかった。一方、formaldehydeについては、温度上昇による放散量の変化により有意な濃度低減は見られなかったが、対照群との濃度が有意に上昇していたにもかかわらず、情報提示群の濃度が上昇することはなかった。一方、acetaldehyde濃度については全体の傾向として有意に上昇も低減もされることはなく、明確な傾向は見られず、温度に依存しない居住者由来のacetaldehyde放散源が存在している可能性が示唆された。

このように、各物質の放散源や蒸散のパターンの違い、室内の反応によって放散量が変化することで、有効に濃度が低減する物質、しない物質に分かれた。特に、濃度がガイドラインを超過することが多く、換気の影響が見えにくかったカルボニル類に関しては、今後何らかの対応が必要であると考えられる。

第9章 総括

室内化学物質汚染が社会的に大きな問題となって以来、化学物質測定方法の開発や、化学物質の室内における反応機構の解明、24時間換気の導入などが進められると共に、自治体による新築住宅における化学物質濃度測定義務化、また、室内化学物質低減マンションなどが竣工し、室内環境の測定に対する関心も高まりを見せている。室内環境の管理は最終的には居住者の自己が必要となってくると考えられる。そして、こうした空気質に関する情報の提示が環境の改善につながる事が明らかとなれば、今後はこうした環境測定を環境改善対策方法の1つとして推進していくことが望ましい。しかし、環境測定の評価の部分に関してはこれまで評価が行われていない。本研究では、居住者に対する室内空気質に関する情報の提示が居住者の意識・行動・に与える影響を明らかにし、効果的な情報提示方法を検討すること、さらに、結果の提示だけでなく、室内化学物質汚染の対策としての“換気”を奨励することにより室内空気質がどの程度改善できるかを検証することを目的とし、

- 1) フィールドを用いた室内環境評価前後の室内空気質及び意識・行動評価
- 2) 室内環境評価（情報提示）効果の検証

を行った。その結果、環境測定における情報の提示及び換気の奨励が居住者の換気行動に結びつき、実際に換気量を増加させる方向に働くことがわかった。ただし、温度や雨天などの条件によってその効果は上下してしまうことも同時に明らかとなった。測定を行った室内化学物質については toluene、ethylbenzene、xylene については統計学的にも有意に濃度が低減した。しかし、換気と同様、室温、室内の部屋同士の空気交換状況、放散量の変化などによって低減が見られない物質も存在した。低減が認められなかった物質のうち、acetaldehyde については、室内濃度の超過率が他の物質よりも高いにも関わらず室内に放散源が多数存在することが原因と見られている。この acetaldehyde の放散源として挙げられるのは、居住者に放散源情報として提示している建材や飲酒などの明確なものや、その他にも知らず知らずのうちに使用しているアルコール系の製品や口にしている食品などである。また、acetaldehyde は大気中でテルペン類とオゾン、紫外線の反応により生成することが知られているが、本研究においては acetaldehyde の屋外濃度が既往の研究における大気濃度のレベルより高い値を示していたことから、今後はこの原因を解明する必要があると考える。

室内環境は多くのパラメーターに影響を受け、変動する。今回は 50 軒の住宅を対象に調査を行ったが、住宅の条件は全く同じものは存在しない。そのため、ひとつひとつのパラメーターを合わせて解析を行うには 50 軒のサンプルでは足りず、細かいところまで解析を行うことはできなかった。しかし、そんな中でも情報提示の効果がある程度明らかにすることができたことは、温度や天候など居住者自身ではコントロールできない、且つ影響力の大きなパラメーターに続いて情報提示の効果が定量化できるレベルの因子であったことを意味すると考えられる。

また、直接居住者の住宅へ赴いての測定を通じて、居住者の多種多様な反応や情報認知によって濃度を低減する上での問題点を把握することができた。そんな中、最も問題であると実感する

のが、居住者が日中外出することが多い住宅における室内空気質汚染である。気密性の高い住宅においては、日中開口部を閉めきりにすることにより化学物質濃度は非常に高いレベルにあるといえる。そして、居住者が帰宅するのは夜であるため、ほとんど換気は行わない。また、夏場・冬場であれば冷暖房器具を使用してしまうため、ますます換気は行われない。行ったとしても就寝までの短い期間に限られるであろう。また、昨今は防犯上長時間の窓開け行為は避ける傾向にあると考えられる。そのため、今回のように、自宅の汚染状況がわかったとしても窓開け換気ではなかなか環境の改善は難しい。実際に、本調査でも3軒の住宅において formaldehyde 濃度がガイドラインを大幅に超過しているが、そのうち2軒は朝から夜まで仕事で不在という住宅であり、帰宅後窓を開けるよう意識したものの、数値として環境の改善はなされていなかったというのが現状である。特に、放散源が主に建材や家具である formaldehyde や放散源の特定が困難な acetaldehyde 等に濃度のガイドライン超過が見られても、その時点で健康被害を受けていない限り工事など大掛かりな対応はとらず、さらに窓開け換気も期待できないとなると、こうした住宅には別の対策が必要であると考えられる。その一例として、外出時にはキッチンや洗面所などの換気扇を回しておくという局所換気が挙げられる。本調査では、室内化学物質汚染の対策として“換気”を推奨しているが、換気の方法については特にふれていない。情報提示の効果をより上げるためには、こうした局所換気の奨励も必要であることが指摘できる。2005年現在、新築住宅においては24時間機械換気設備の設置が義務付けられたが、使用していない例も存在する。また、既存の住宅においては機械換気設備がついていない寝室などでは注意が必要である。

各住宅の調査結果の中で居住者が最も気になった項目である acetaldehyde の放散源として、接着剤、防腐剤に加えて飲酒を提示している。居住者の反応の中で印象的だったのが、飲酒のような一見化学物質汚染とは無関係に見える行為によってガイドラインに定めてある化学物質が発生するという点に非常に興味を持っていたことである。今回調査を行った住宅の中にも何人かの居住者から室内化学物質に対する問い合わせがあった。このように、化学物質が生活に密着しているものであるということを居住者自身が実感を持って知る、あるいは知ろうとするという機会を作るという点において、環境測定には非常に意味があると考えられる。

また、本調査においては室内 CO₂ 濃度の連続モニターを寝室に設置し、CO₂ 濃度の変動を測定している。室内 CO₂ 濃度は、人間の呼気から排出される CO₂ によって非常に高濃度となる。大気中の CO₂ 濃度は 380 ppm 前後であるが、居住者が室内に入ってくるとその濃度は 1000 ppm にも 2000 ppm にも達する。従って、比較的 low cost で簡易に測定することができ、且つリアルタイムでデータを見ることができる CO₂ の連続モニターを居室に設置することにも、室内空気質改善効果がある可能性がある。

一方、室内化学物質汚染の対策として換気を奨励してはいるものの、必ずしも換気を行う事が良いというわけではない。屋外空気が汚れている場合もあるからである。典型的なのが春先の花粉である。この時期は窓を開けるにはちょうど良い季節ではあるが、花粉が入ってくるので開けられないという住宅も多いであろう。また、農村地域では農薬散布時に換気を行うことは望ましくない。このような状況の場合、ただ窓開け換気をやめてしまう、ではなく、どのようにしたら

汚染を最小限に防げるか、必要換気量が得られるのか、といったことを自ら考え判断することが居住者には必要であると考えられる。

本研究においては、よりよい環境測定手法及び居住者への情報提示手法提案するための前段階として、まず、情報の提示そのものもが室内空気質の改善に繋がるかどうかの評価をパイロット的に行った。これにより、居住者が室内環境を知ることによる環境改善の妥当性を評価することができた。今後は、環境測定の推進や、室内化学物質汚染問題の教育を進めていくことにより、より効果的な情報提示方法を模索していく必要がある。

謝辞

本研究にあたっては、多くの方々のご指導、ご支援、ご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を述べさせていただきたいと思います。

指導教官である柳澤幸雄教授には、ゼミやディスカッションを通じて、忙しい中多くのご指導をいただくと共に、ものごとの考え方やためになる知識を大変多く賜りました。また、環境システムコースの吉永淳助教授には、ゼミを通じて多くのご指導をいただきました。ここに感謝の意を表します。

産業技術総合研究所の山崎章弘主任研究員には、ゼミやディスカッションを通じて多くのアドバイスをいただきました。お忙しい中、夜遅くまでディスカッションに付き合っていたいただいたこと、深く感謝しております。

熊谷一清助手には、ゼミやミーティング等を通じて、大変お世話になりました。多くの教訓を学ばせていただいたこと、感謝しております。

本研究室博士課程の柳田秀隆さん、井上靖雄さん、山本尚理さん、飯塚淳さん、倪悦勇さん、水越厚史さん、本研究室の卒業生である篠原直秀さん、荒川千夏子さん、奥泉裕美子さん、塩尻一尋くん、勝山泰郎くん、甲斐雄也くんには、本当に長い間、多くのご指導、ご協力、アイデアをいただきました。研究のみならず、入試勉強や数学、化学、雑学、日本語、スポーツ全般についてもご指導いただき、ここに深く感謝いたします。

また、柳澤研究室学生の皆様、柳澤研究室 OB の皆様、吉永研究室学生の皆様には、研究のみならず、公私にわたり大変お世話になりました。楽しく有意義な学生生活を送ることができたのも、皆様のおかげだと思っております。感謝いたします。

柳澤研究室秘書の川名紀子さん、木口千代子さん、学術研究支援員の野口美由貴さんには、研究のみならず、学生生活全般にわたり多大なご協力と支援をいただくと共に、貴重な経験を多くさせていただきましたこと、心から感謝しております。

本研究にあたって、50 軒もの居住者の方々のご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

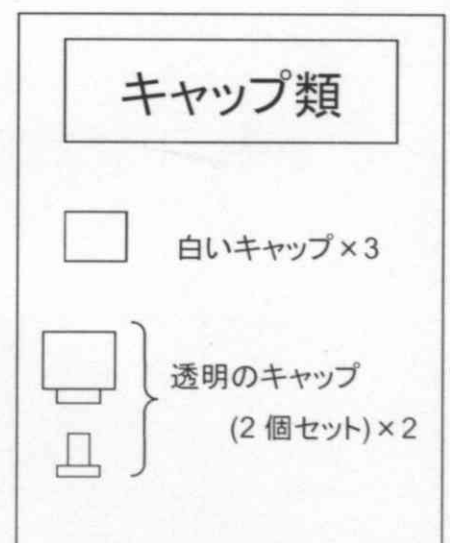
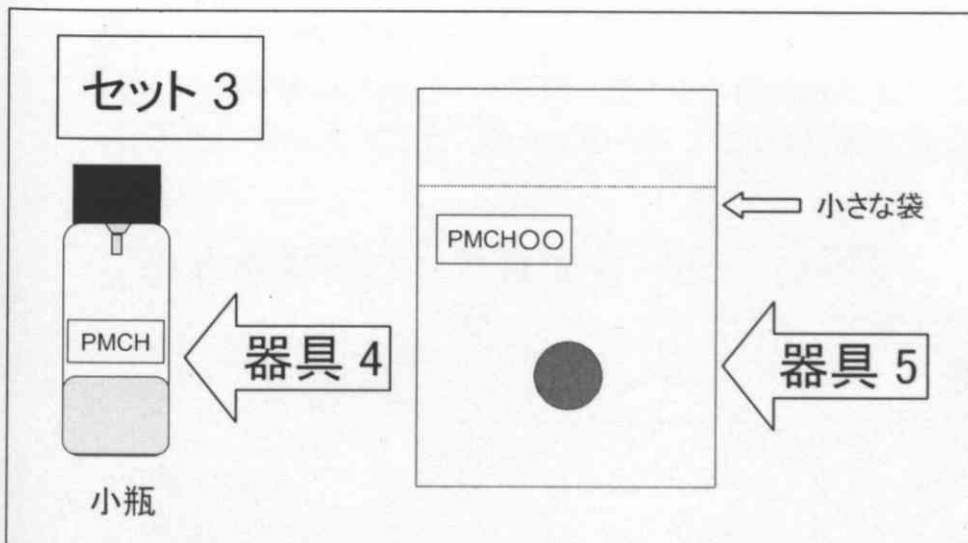
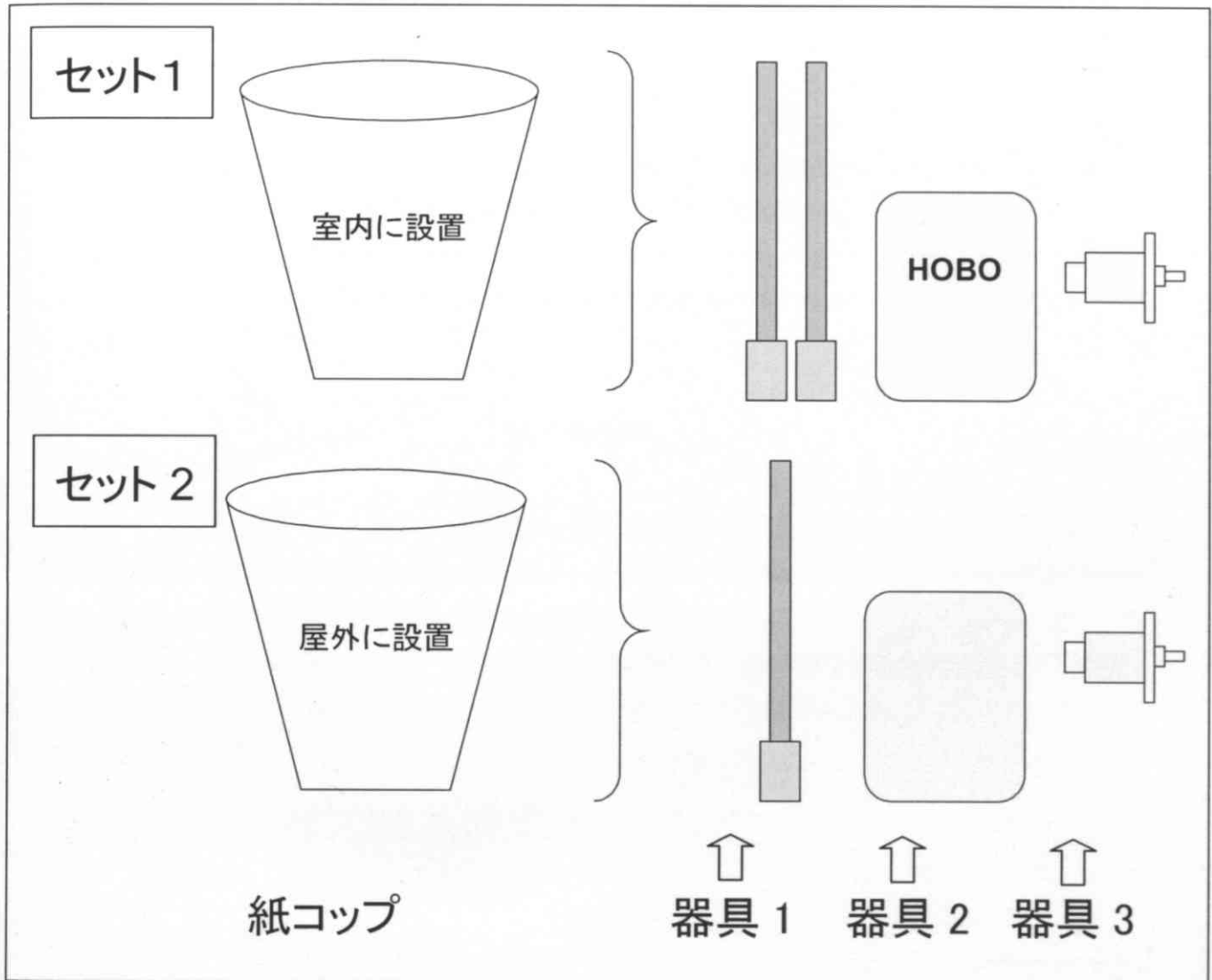
最後になりましたが、両親、友人をはじめ、多くの支援、激励をくださった方々に感謝いたします。

2005年8月 常名美貴

測定機器の回収について

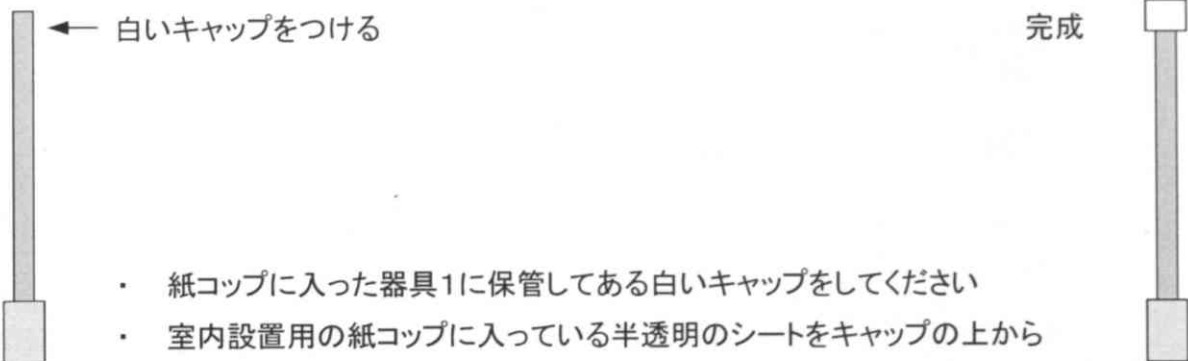
注:このシートは、アンケート・測定器などと一緒に回収いたしますので大切に保管してください。

①回収物の確認



②セット1の回収方法 : キャップを付ける作業です。

【器具 1 について】

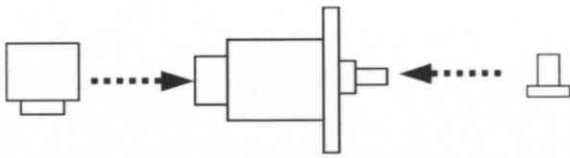


← 白いキャップをつける

完成

- ・ 紙コップに入った器具1に保管してある白いキャップをしてください
- ・ 室内設置用の紙コップに入っている半透明のシートをキャップの上からぐるぐる巻き、隙間から空気が入らないようにしてください。

【器具 3 について】



・紙コップに入った器具 3 の両端に、別途保管してある透明のキャップをしてください。

- ・以上の作業が終了しましたら、紙コップごと箱に入れてください。
- ・以上でセット1の回収は終了です。セット1について、キャップをした時間を以下に記入してください。

器具 1 にキャップをした時間＝

月	日	時	分
---	---	---	---

③セット 2 の設置方法

- ・セット1と同様の作業(キャップ付け)を行い、箱に入れてください。
- ・以上で作業は終了です。セット2のキャップ付け作業が終了した時刻を以下に記入してください。

③の作業が終了した時間＝

月	日	時	分
---	---	---	---

④セット 3 の回収方法： 三角の器具とシートを付け替える作業です
操作1)

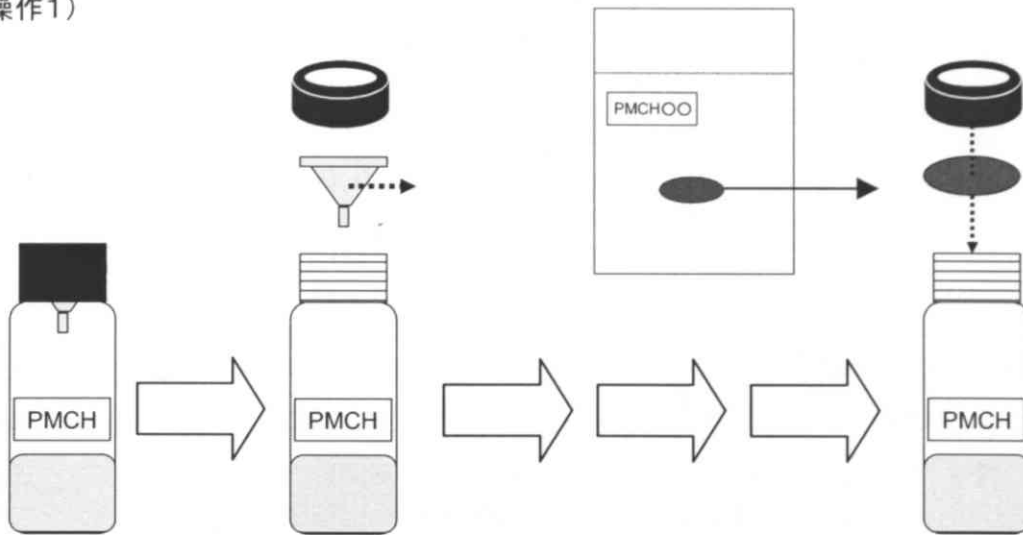


図1

注：いずれも、小ビンと小さな袋の数字 (PMCHOO ← 数字) 同士を交換してください。
注：同封した封筒には Blank と書いた小ビンが余分に入っていますが、そのままにしておいてください。

- ・器具 4 の黒いフタを開け、中の三角の器具を取り出し、小さな袋にしまします。
- ・小さな袋に入っている赤いシートを取り出し、図 1 のように黒いフタと小瓶の間にはさみ、しっかりフタを締めます。
- ・フタをした小瓶と三角の器具をしまった小さい袋を同封の封筒に入れ、箱 1 の外側にセロテープなどで貼り付けてください。
- ・④の作業は以上です。以下に作業終了時刻を記入してください。

④の作業が終了した時間＝

月	日	時	分
---	---	---	---

⑤モニターの回収方法

・電源を抜き、そのまま箱1にしまってください。

モニター回収時間＝

月	日	時	分
---	---	---	---

★全ての作業が終了しましたら、宅急便で郵送をお願いいたします。

★宛先は、同封した宅急便記入用紙に書いてあります。

ご不明な点、わからない点などありましたら以下の連絡先までお願いします。

常名美貴(ジョウナミキ)

東京大学大学院新領域創成科学研究科
環境学専攻 環境システムコース
柳澤研究室

研究室電話番号)03-xxxx-yyyy

携帯)090-xxxx-yyyy

E-mail) miki.jona@yy.t.u-tokyo.ac.jp

呼気中 CO₂を用いた換気量測定方法に関する研究

1. 緒言

近年になって、温湿度やホルムアルデヒドなどに関しては、ある程度の精度・確度を確保しつつ居住者の目的に沿った簡便な測定方法が開発されつつある。換気量測定に関しては、0.5 回/hr とした規制は存在するものの、簡易測定手法は確立されていないのが現状である。SF₆ は一般に大気中に存在せず、非常に安定していることから、これまで多くの換気量測定に用いられてきた。しかし、温暖化係数が非常に高いことや SF₆ 濃度が測定できる特殊な装置が必要であることから、住民レベルでの使用は困難である。そこで、換気量測定に関し、居住者から何らかの要求があった際、大掛かりな装置や化学物質を用いずに手軽に換気量を測定できる方法が必要である。

その案として呼気中 CO₂ や水蒸気をドーザーとして用いた換気量測定方法が挙げられる。この方法は、居住者が室内に居ることが前提となるものの、SF₆ のような温暖化係数が非常に高い特殊なガスを用いない上に、簡易な CO₂ モニターあるいは水蒸気測定装置さえあれば気兼ねなく簡易に測定できるため、居住者の視点で考えると“簡易”且つ“低コスト”な手法であると考えられる。

2. パイロットスタディーその1

2.1. 測定の概要

そこで本研究では、これまでに確立されていない、居住者行動期間中における呼気中 CO₂ 及び水蒸気量を用いた簡易な換気量算出方法の確立を目的とし、誤差要因の検討や、応用方法の提案を行う。今回は、ワンルームマンションにおいて夜間における換気量測定を実際の住宅で行い、SF₆ 法との比較を行った。

Table1 に測定の概要を示す。測定は 2004 年 3 月 26 日～29 日及び 4 月 22 日～29 日において、ワンルームマンションの一室(22 m³)にて行った。居住者は成人男性 1 名である(3 月 28 日、4 月 25 日に関しては男性 1 名、女性 1 名)。居室において CO₂ 濃度及び水蒸気量をモニタリングすることにより就寝時間から起床時間における換気量を算出し、既往の換気量測定方法である SF₆ 法の測定結果との比較を行う。

Table1 換気量測定の概要

測定項目	CO ₂	SF ₆	水蒸気	行動記録
測定装置	Multi Gus Monitor	Multi Gus Monitor	HOBO	アンケート
測定場所	部屋中央	部屋中央	ベランダ・部屋中央	—
方法	連続発生	濃度減衰	連続発生	—

CO₂ 及び SF₆ 濃度はマルチガスモニター(B&K)を用い 6 分毎(3 月)及び 10 分毎(4 月)に、湿度については HOBO(onset 社)を用い室内外で 10 分毎に測定を行った。Fig.1 に測定住宅の平面図を示す。アンケートでは、a)就寝時間 b)起床時間 c)住居環境 d)在室者の人数、について記載してもらった。

SF₆ 法は、就寝時に SF₆ ガスを撒き、その濃度減衰から換気量を算出する。また、呼気 CO₂ 法では、就寝時から起床時まで濃度を連続的に測定し、その定常濃度から換気量を算出する。簡易換気量測定の際求められる精度としては、対象居室の換気量が、

1: 常に 0.5 回以下 ⇒建築基準法以下

2: 0.4~0.6 回 ⇒建築基準法ライン

3: 0.5~1 回

4: 1~1.5 回

5: 1.5 回以上

の、どの範囲に位置するのかがわかる程度を想定している。

2.2. 影響因子について

大気中 CO₂ 濃度や料理、燃焼機器から放散される CO₂、植物、居住者呼気 CO₂ 濃度の個人内変動などは算出結果の誤差要因となり、これが本測定法の欠点でもある。詳細に関しては今後検討する予定であるが、本測定は就寝時の測定であり、室内に観葉植物等も存在しなかったため、料理や植物の影響は無く、個人内変動もほぼ無いものと仮定した。また、屋外濃度については地球全体の平均が 360ppm 程度であると言われているが、人間活動に由来する日変化は植物活動によって生じる変化に比べてより局所的であり、また一般性にも乏しい。そのため、測定期間内で大気 CO₂ 濃度に大きなばらつきがある場合、屋外濃度も同時に測定を行う必要がある。そこで、東京都における CO₂ 濃度日内変動(4月5日~7日)をマルチガスモニターで測定した結果、この期間の東京都の CO₂ 濃度はおおよそ 450 ppm 前後で変動した。そこで、この測定で得られた値を参考に屋外 CO₂ 濃度 450 ppm に設定した。しかし、地域や測定日によっては濃度に大きな差が生じる可能性もあるので、より精度の高い測定を行うには室内外の同時測定が望ましいと考えられる。

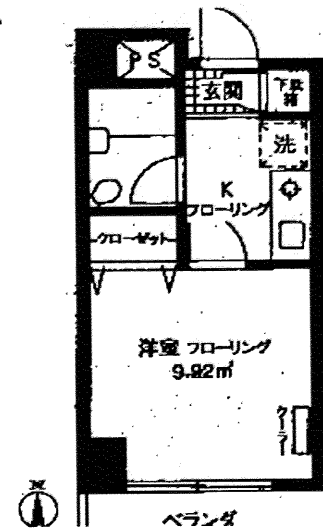


Fig.1 測定住宅平面図

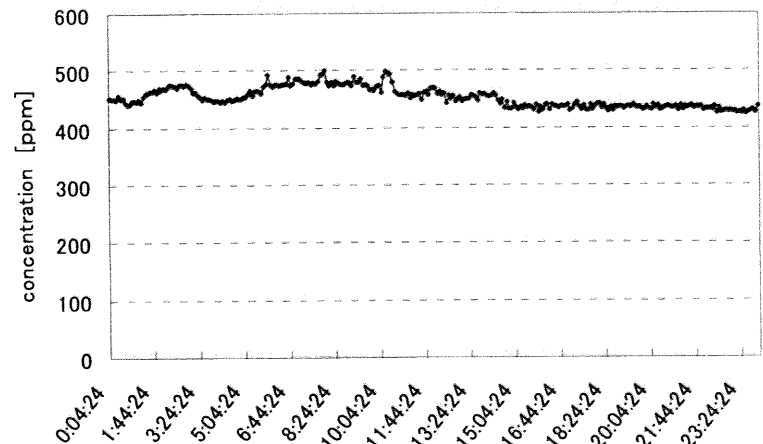


Fig.2 屋外濃度推移

2.3. CO₂ 呼出量及び水蒸気発生量について

成人男子一人あたりの CO₂ の呼出量は労働強度によって変わる。しかし、就寝時の CO₂ 呼出量はほぼ一定であると考えることが出来る。Table2 は、計算に使用する基準を作業強度で分類したものである。この値は、平均的な日本人男性が、気温が 21 度の所で絶対安静にしている場合の代謝(=基礎代謝)に対する労働代謝の比をとったエネルギー代謝率(RMR 値)と呼ばれる指標を用いて算出されている(式 1)。ここでエネルギー代謝率は、各作業について Table2 を参考として決定する。女子は男子より少なく 80%、児童は成人の 40%~70%、平均 50%として計算する^{*1}。水蒸気発生量に関しても同様に Table3 の値を用いた^[2]。

$$CO_2 \text{ 排出量} = \left\{ \frac{60(RMR + 1.2)}{5} \right\} \times 0.95 \quad [l/h] \cdots (1)$$

Table2 成人男子一人あたりのCO₂呼出量

エネルギー代謝率	作業程度	CO ₂ 呼出量 (m3/hr)	計算採用呼出量 (m3/hr)
0	就寝時	0.011	0.011
0-1	極軽作業時	0.0129-0.0230	0.022
1-2	軽作業	0.0230-0.0330	0.028
2-4	中等作業	0.0330-0.0538	0.046
4-7	重作業	0.0538-0.0840	0.069

Table3 成人男子一人あたりの水蒸気発生量

状態	室内温度(°C)			
	10	20	25	35
静座	32	39	65	151
軽動作	52	125	175	298
普通動作	73	182	290	358
重動作	162	311	373	442

2.4. 結果と考察

SF₆法(濃度減衰法)×呼気CO₂法(連続発生法)

測定結果及び測定期間中の住居環境、天候をまとめたものを Table4 に示す。また、在室1名の際のSF₆法とCO₂法換気量測定結果を Fig.3 に、相関図を Fig.4 に示す。Fig.3, 4 より、サンプル数はまだ少ないもののSF₆法とCO₂法が良く相関した結果となり、一般家庭で換気量を測定する場合に必要な精度は十分に満たしているのではないかと考えられる。CO₂呼出量が一定であることや、新鮮外気濃度を450ppmと一定であると仮定していることなどから呼気CO₂法の測定精度は低いと考えていたが、少なくとも夜間の測定においては目的に対し問題ない程度の精度が得られていることが示唆された。しかし、ドアが開いた状態での測定データは非常にばらつきが大きい結果となった。これは、空気交換が多く行われる隣室との間にあるドアを開けた状態で換気量の測定を行ったため、空気の流れによって測定地点における濃度の推移を追いきれなかったためであると考えられる。また、Table4 より、居住者が1名の時はCO₂法の換気量がSF₆法よりも小さく、2名の時は逆にSF₆法 1.3 回/hr→CO₂法 1.7 回/hr、また、SF₆法 0.45 回/hr→0.53 回/hr と、CO₂法の方が換気量大きい傾向がある。この原因として、居住者のCO₂呼出量の仮定を大目に見積もっている可能性が考えられ、やはり呼出量の誤差によって換気量に影響が出ている可能性がある。しかし、今回のような単室閉鎖時の簡易換気量測定において、この誤差は許容できる誤差であると考えられる。

さらに、今回の居住者1名での換気量繰り返し測定において、開口部の状況や風速がその部屋の換気量に与える影響などを十分に反映するデータをSF₆法からもCO₂法からも良い精度で得ることができたため、住宅の換気量が天候によって大きく異なることがわかった。今回の住宅で言

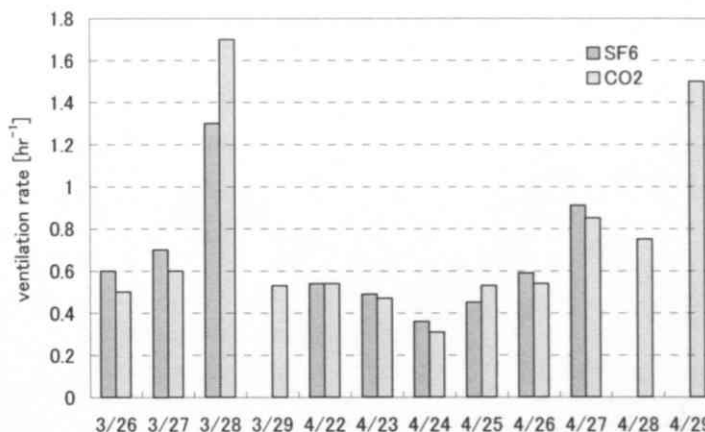


Fig.3 換気量測定結果

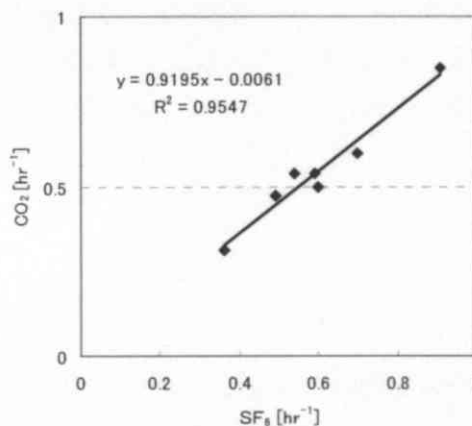


Fig.4 SF₆法×CO₂法相関図

例えば、この部屋の夜間の換気量は0.5回/hr前後であり、これは建築基準法のボーダーラインである。また日によっては0.3回/hrと非常に低い日もあれば逆に0.8回/hrという日もあるため、一度の換気量測定による結果がその家の代表値であるとは一概に言えないと考えられる。この原因として当然のことながら室内温度差や外部風速の増加が影響していることが挙げられる。また、建物の気密性能が大きくなればさらに換気量への影響が増えることも明らかである。既往の研究では、換気量は気密性能、室内外温度差に比例し、風速の2乗に比例することがわかっている³⁾。今回は参考として測定期間中の東京練馬の風速データを入手し比較を行った。その結果を測定期間中の東京練馬の風速データと比較してみると、明らかに普段より換気量の多い4月27日は強風であったことから、風速の影響を強く受けている可能性が示唆されるが、今回の測定では現場の風速は測定していないため、断定は出来ない。また、室内外温度差と換気量に相関は見られなかった。

SF₆法(濃度減衰法)×水蒸気法(連続発生法)

水蒸気は換気量測定に初期に用いられていた方法である⁴⁾は精度が悪く、SF₆法などの方法が確立されるとほとんど使用されなくなった。しかし、水蒸気法もCO₂法と同様、簡易測定方法には比較的適していると考えられる。現在になって水蒸気濃度をリアルタイムで精度良く測定することが可能になったこともあり今回測定を行った。しかし、室内外で湿度差が無いと測定できず、12日間の測定のうち、換気量を算出できたのは半分以下の5日に留まった(Fig.5)。測定回数が少ないことから、換気量の大小の傾向は見る事ができるものの、SF₆法と同程度の精度を得ることはできなかった。この原因として、水蒸気はCO₂以上に室内に吸収・放散源が多く存在するため、換気以外の要因で濃度が上下してしまったことが挙げられる。このような吸脱着作用は居室ごとに異なるため、一般化は難しいと考えられる。

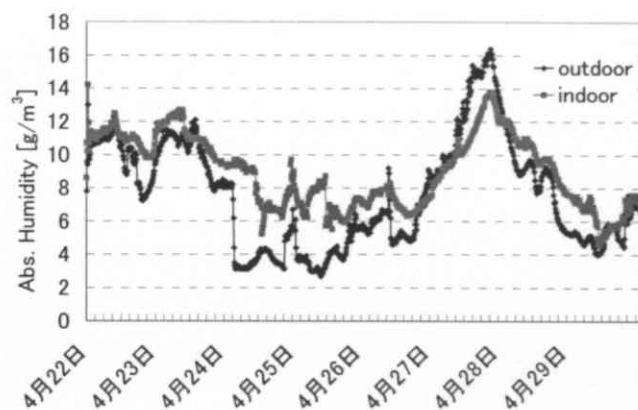


Fig.5 室内外湿度差

測定回数が少ないことから、換気量の大小の傾向は見る事ができるものの、SF₆法と同程度の精度を得ることはできなかった。この原因として、水蒸気はCO₂以上に室内に吸収・放散源が多く存在するため、換気以外の要因で濃度が上下してしまったことが挙げられる。このような吸脱着作用は居室ごとに異なるため、一般化は難しいと考えられる。

2.5. まとめ

- ・呼気CO₂を用いて、夜間の換気量測定を行ったところ、既往の手法と良く一致したことから、この方法をさらに応用できる可能性が示唆された。
- ・居住者が複数人になった場合や、対象容積が増え不完全混合領域が増加するに伴い誤差が大きくなる事が示唆されたため、呼気CO₂法で測定の限界について今後検討が必要である。
- ・水蒸気法を用いての換気量測定は可能であるが、外気湿度や吸収・放散源に大きく左右されるため、一般化するには呼気CO₂法の方が適している。
- ・一般住宅の自然換気量は外部風速などの影響で大きく変動することから、一度の測定がその部屋の換気量を代表しているとは言いがたい。

3. パイロットスタディーその2

3.1. 簡易CO₂モニターを用いた換気量測定の可能性

室内のCO₂濃度の監視を行うために使用されている簡易CO₂モニターの原理は、ほとんどがNDIR(非分散型赤外線方式)である。そのため、精度の低い簡易CO₂モニターは、水蒸気等の

干渉を強く受けることにより実際の濃度よりも高く見積もられ、結果換気率を実際より少なく計算する可能性が高い。そこで、居室において、マルチガスモニター〈MGM〉(B&K)と簡易 CO₂ モニター〈SCM〉(Talaire7001)を同時に稼働させ、それぞれの濃度推移から居室の換気率を算出した。

測定方法

測定は夜間就寝時、一般的な一戸建て住戸の一室 (27m³) を閉め切りにした状態で2分間隔で行った。トレーサーとして呼気中 CO₂ を用い、在室者は女性 1 名で CO₂ のエミッションは 270mg/min(男性の 80%)で一定とした²⁾。測定中は室内をより完全混合に近づけるため FAN を回し続けた。屋外濃度は 400ppm に設定した。サンプリングはマルチガスモニター (光音響分光法) と簡易 CO₂ モニターを用い部屋中央で行った。

換気量算出方法

換気率は、基礎方程式(式 1)から計算した室内 CO₂ 濃度の理論値を実測値にフィッティングさせることにより算出した。測定結果を Table1 に示す。

$$C_{in(t)} = C_{out} + (C_{in(0)} - C_{out})e^{-\frac{Q}{V}t} + \left(\frac{E}{Q}\right)\left(1 - e^{-\frac{Q}{V}t}\right) \quad \text{式(1)}$$

C_{in} = 室内濃度 [mg/m³]

C_{out} = 外気濃度 [mg/m³] Table2 測定結果

Q = 換気量 [m³/hr]=const.

E = 放散量 [mg/hr]=const.

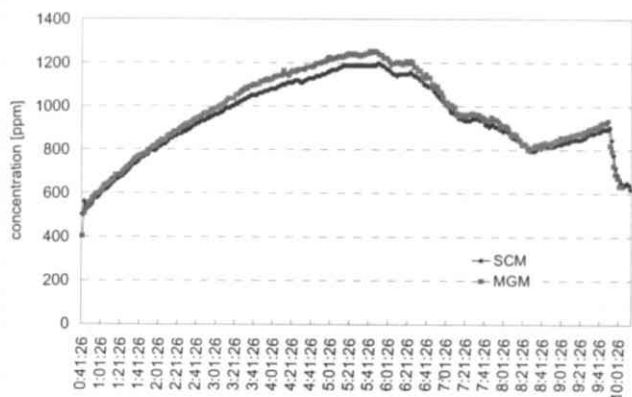
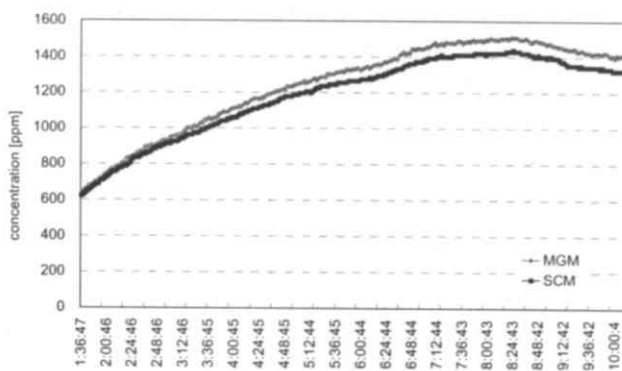
V = 室容積 [m³]

結果

測定結果を Fig.6、7 に 6/25、26 日における濃度推移を、Table4 に換気量測定結果の比較を示す。これを見ると、朝方になると濃度が減少しているのがわかる。そこで、換気率はそれぞれ濃度が下がりだす直前までのカーブから算出した。n 数は少ないものの、マルチガスモニターと簡易 CO₂ モニター、及び SF₆ を用いての換気率はいずれもよく一致した。また、マルチガスモニターと簡易 CO₂ モニターの濃度推移の傾向もうまく一致していることがわかる。しかし、やはり数値自体は完全には一致せず、30~50ppm

Table4 測定結果

Day	Time	Ventilation Rate CO ₂ Monitor [hr]	Ventilation Rate Multi Gas Monitor [hr]	Ventilation Rate SF ₆
6/25	0:41-5:41	0.32	0.32	-
6/26	0:36-8:22	0.26	0.26	0.26
6/27	3:07-8:00	0.32	0.34	0.30

Fig.6 2/25 室内 CO₂ 濃度推移Fig.7 2/26 室内 CO₂ 濃度推移

程度ずれが生じたが、この程度の誤差は許容範囲であると考えられる。さらに、本調査で用いたエミッションは既往の文献より^[3]男性の80%としたところ、換気率はSF₆の結果とほぼ一致したことより、この値を使用することができると考えられるが、詳細は今後も検討が必要である。

今回の調査において、測定室の状況は変わらないにもかかわらず、朝方になるとCO₂濃度が低下するという傾向が見られ、濃度減衰時の換気率は25日が0.81回/hrにも達する時間帯が存在する。この原因として以下の二点を考えた。

①測定室における空気交換は外気との交換がメインであった場合(特に単室の場合)、最も可能性が高いのは、外部風速の影響である。今回の場合も同様に、屋外濃度が下がった、あるいは外部風速、室内外温度差の影響で換気率が上がったという原因が考えられる。そこで、住宅付近の気象データを入手し、その時間帯の室内外温度差、外部風速に顕著な変化があるかどうか調べた結果をFig.8,9に示す。しかし、風速や室内外温度差の増加は見られなかった。

そこで次に考えられるのが②である。

②仮に測定室における空気交換は室内間の交換がメインであった場合、他の居住者の活動(移動、窓・ドアの開閉、換気扇の使用等)により圧力差が生じることにより換気率が上昇した可能性。特に一般的な住宅には開口部の下に隙間が存在するため、室外が換気扇の駆動などで陰圧になると換気率が上がると考えられる。

測定室の状況は何も変化しなかったものの、濃度が低下し始めた時刻と他の居住者が起床した時間帯がほぼ一致していることから、可能性としては高いと考えられる。そこで、昼間(居住者活動時)の測定室の換気率をSF₆をトレーサーとした濃度減衰法で別途測定したところ、換気率は0.51回/hrとなり、夜間の換気率よりも大きい値となった。実際に複数のトレーサーを用いて空気交換率を測定したわけではないので、断定はできない。

今回の調査において、人の活動(移動、食事準備時における換気扇の稼働、別室のドアの開閉)により測定室の換気率が大きく変動しうる可能性が示唆された。このことは上記にも述べたよう

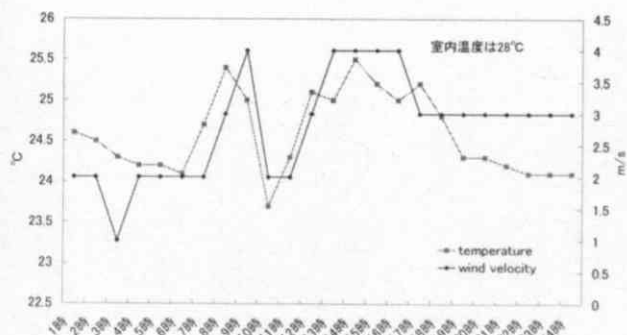


Fig.8 25日風速及び温度温度

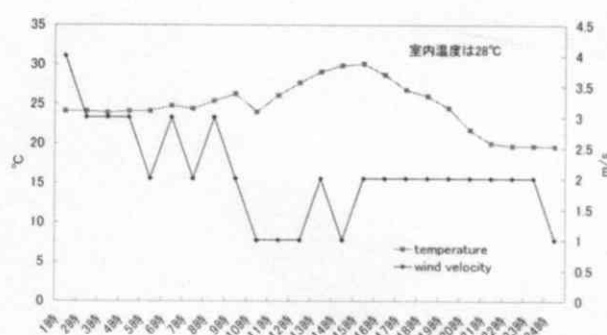


Fig.9 26日風速及び温度温度

に、換気率に影響を与えてしまうため、測定は人の活動が無いときに行う必要があることが示唆するが、一方で、別の空間を換気することで測定室自身の空気交換も可能であることも示唆された。

3.2. 測定可能な容積の検討

例えば冬季などは特に室温が低いことから、部屋に扇風機を回して寝るなどということはしたくない。また、ファンを回すことはそもそもその部屋自体の換気率を変化させてしまう可能性がある。前回の6畳(22m³)における測定では、ファンを回さずに完全混合に近づけなくても換気量を測定することが可能であった。しかし、エミッション(測定室にいる人の人数)は変わらずに、居室の容積が増加した場合、居住者が寝ている間に定常状態には至らない。そのため、換気率を濃度上昇カーブに理論値をフィッティングさせることにより算出すると、エミッションから測定点までの位置によっては換気率を過大評価、あるいは過小評価する可能性が高い。

そこで、前回の調査同様、簡易CO₂モニターを部屋の中心に設置し、就寝時の換気率を算出した。Fig.10にCO₂濃度推移を示す。初期の濃度上昇カーブから換気率を算出した結果、0.02回/hrと非常に低い値となった。これは、室内が定常になっていない上、エミッションから測定点まで距離による影響を大きく受けたことが原因であると考えられ、8畳で測定する場合、ファンを回してより完全混合に近づけなければ換気測定は難しいと考えられる。

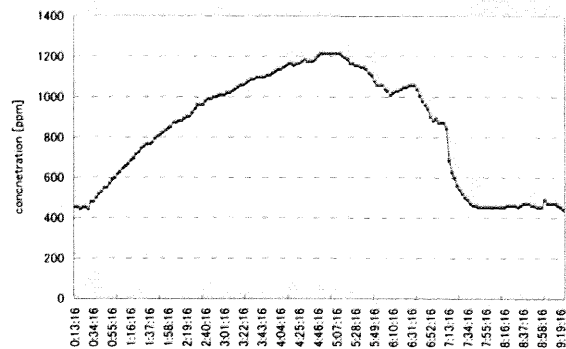


Fig.10 FAN 不使用時

3.3. まとめ

- ・簡易CO₂モニターでも十分な精度で換気率を測定できることがわかった。
- ・8畳の居室に居住者1名の状態ではファンを用いることによって換気率の測定が可能であったが、ファンを回さない状態ではできないことがわかった。
- ・測定室の開口部を閉め切った状態であっても、最低限の換気率を測定するためには就寝中に測定を行う必要があることがわかった。
- ・居住者の活動が室内の換気率に大きく影響することや、人の活動による空気の流れを用いて、開口部を閉め切っている居室の換気率を上げることができる可能性が示唆された。

【参考文献】

- [1] 建築学大系 22 室内環境計画, 彰国社版, p.415
- [2] 建築環境工学, 山田由紀子著, 培風館
- [3] 趙雲, 荏原幸久, 吉野博他, 住宅における換気量の簡易予測法, *日本建築学会計画系論文集*, 第 522 号, pp.39-44, (1998)
- [4] David Etheridge, Mats Sandberg, *Building Ventilation: Theory and Measurement*, JOHN WILEY & SONS, p.591

リフォームによる室内化学物質および個人曝露量

リフォーム 個人曝露量 VOCs
カルボニル類 室内化学物質

正会員 ○常名美貴*¹ 正会員 藤井実*⁴
正会員 熊谷一清*² 正会員 飯尾昭彦*⁵
正会員 篠原直秀*³ 正会員 柳澤幸雄*⁶

1. 緒言

現在、省エネルギーや熱的快適性の観点から住宅の高気密・高断熱化が進められている。また、新工法や新建材、居住者が持ち込む家具、生活用品などから発生する化学物質による室内化学物質汚染の居住者への健康影響が懸念されている^[1]。

リフォームの特徴について紹介すると、リフォーム物件は新築物件と異なり、行政の管理下になく、法的な規制もない。特に、リフォーム中においては、新築時と異なり居住者が室内で生活した状態で施工が行われることが多く、さらに夜間は防犯上の理由より開口部を締め切ることにより濃度が上昇し、居住者が高濃度の化学物質に曝露していることが危惧される^{[2][3]}。ところが、リフォーム中および後の室内 VOCs 濃度および個人曝露量についてデータがないのが現状である。そこで、本研究では、リフォームによる VOCs 濃度および個人曝露量を定性・定量的に把握することを目的とする。

2. 測定概要

2.1 測定対象住宅

測定対象住宅は築 22 年の 2 階建て木造 2×4 住宅(延床面積: 140.4m², 1F: 82.9m², 2F: 55.5m²) である。内部仕上げを表 1 に、工事の工程表を表 3 に示す。

なお、フローリング材には全て Fc0 建材で、施工時に接着剤の使用は無かった。また、クロスに接着剤にもノンホルムのものを使用した。

施工時は玄関及び勝手口は開放したままになっており、換気量のコントロールは特に行わなかった。

2.2 測定項目

以下の項目について測定を行った。

- ①室内化学物質濃度(VOCs, カルボニル類)
- ②屋外濃度(VOCs, カルボニル類)
- ③個人曝露量(被験者: 居住者 ABC+施工者 D)
- ④温湿度

2.3 測定分析概要

測定及び分析の詳細を表 2 に、サンプリング期間と作業内容を表 3 に示す。

3. 結果及び考察

図 1 に toluene の部屋別濃度推移を示す。toluene は塗装工事の際に一時的なピークが見られ、その他 ethylacetate や m,p-xylene などの VOCs ピークも同じ傾向を示している。これらは塗装起源であると考えられるがピークは一時的なものでその日のうちに減衰していることがわかった。しかし toluene は非常に高濃度となった

表 2 分析方法

	VOCs	カルボニル類
サンブラー	活性炭チューブ	DNPHカートリッジ
方法	Active法・Passive法	Active法・Passive法
抽出溶媒	二硫化炭素	アセトニトリル
分析機器	GC-MS	HPLC

表 1 内部仕上げ表

室名	床	壁・壁	天井
玄関	現況のまま	ビニルクロス貼り替え	ビニルクロス貼り替え
玄関ホール	現況のまま	ビニルクロス貼り替え	ビニルクロス貼り替え
トイレ	フローリング	ビニルクロス貼り、 下地プラスチックボード	ビニルクロス貼り 下地プラスチックボード
納戸	フローリング	ビニルクロス貼り替え	ビニルクロス貼り替え
台所・食堂	フローリング	ビニルクロス貼り替え、 一部キッチンパネル貼り	ビニルクロス貼り替え
居間	フローリング	ビニルクロス貼り替え、 一部キッチンパネル貼り	ビニルクロス貼り替え
和室	現況のまま	現況のまま	現況のまま

表 3 サンプリング期間と作業内容

個人曝露量測定期間		室内濃度測定期間		方法	作業内容
before	2002/10/21-10/23	before	2002/10/21朝-10/23朝	Active	建材搬入
1st-week	2002/10/23-10/28	1st-D	2002/10/25朝-10/26夕	Active	24日までに居間天井下地貼り終了。居間床板貼り。作りつけ棚。
		1st-N	2002/10/26夕-10/27朝	Active	
		2nd-D	2002/10/27朝-10/27夕	Active	フローリング作業終了。
2nd-week	2002/10/28-11/5	5th-D	2002/10/29朝-10/29夕	Active	壁の下地貼りを前日に終了。棚の取り付け。
		5th-N	2002/10/29夕-10/30朝	Active	
		8th-D	2002/11/1朝-11/1夕	Active	キッチンの取り付け。
		8th-N	2002/11/1夕-11/2朝	Active	
3rd-week	2002/11/5-11/11	12th-D	2002/11/5朝-11/5夕	Active	塗装工事。
		12th-N	2002/11/5夕-11/6朝	Active	
		14th-D	2002/11/7朝-11/7夕	Active	クロス工事。
		14th-N	2002/11/7夕-11/8朝	Active	
		15th-D	2002/11/8朝-11/8夕	Active	クロス工事。
4th-week	2002/11/11-11/18	18th(after)	2002/11/11-11/13	Active	
		20th(after)	2002/11/13-11/14	Active	再塗装。
		21th(after)	2002/11/14-11/15	Active	
5th-week	2002/11/18-11/26	25th(after)	2002/11/18-11/26	Passive	
6th-week	2002/11/26-12/3	33th(after)	2002/11/26-12/3	Passive	
7th-week	2002/12/3-12/10	40th(after)	2002/12/3-12/10	Passive	

め、今後検討が必要である。図2 に toluene の個人曝露量の推移を示す。これより、室内 toluene の濃度ピークと個人曝露量のピークにずれが生じていることがわかった。また、ethylbenzene、m,p-xylene も同様の推移を示した。図3 に acetaldehyde の部屋別濃度推移を示す。室内 acetaldehyde 及び、formaldehyde 濃度(Living Room、Japanese Room) はリフォーム中よりリフォーム後に上昇していることがわかった。温度や湿度に顕著な変化は見られなかったことから、換気量の変化によるものであると考えられる。また、今回測定を行った1階 Living Room よりも、2階 Bed Roomの方が高濃度で推移した。そのため、2階にはリフォーム起源ではない放散源が存在すると考えられる。Living Room、Japanese Room の室内濃度には相関が見られたため、これらの物質はリフォーム起源であると考えられる。図4 に acetaldehyde の個人曝露量の推移を示す。subjectA と subjectB の acetaldehyde 曝露量には相関が見られたことから、居住者の acetaldehyde 曝露量はリフォームによって影響を受けていると考えられる。合板や接着剤に放散量の少ない建材使用したことにより、測定期間を通じ formaldehyde の濃度が厚生労働省の濃度指針値を上回ることはなかった。

6. まとめ

本件調査では以下の知見を得た。

- ・リフォーム中の formaldehyde 及び VOCs の主な放散源は塗装時であったが、ピークは一時的なものであった。
- ・リフォームによる室内化学物質汚染に強く影響を及ぼした物質は formaldehyde の代替物質として使用されている acetaldehyde と考えられるや塗装起源である toluene、ethylbenzene 等の物質であった。
- ・個人の生活状況によって、個人曝露量には大きな差が生じたものの、リフォームによる個人曝露量に有意に変動が見られたのは塗装起源の VOC のみであった。

【参考文献】

- [1] World Health Organization, (1998). Indoor Air Quality: Organic Pollutants. EURO Reports and Studies No.111, World Health Organization, Copenhagen.
- [2] Brown, S.K., (2002). Volatile Organic Pollutants in New and Established Buildings in Melbourne, Australia, Indoor Air, 12, pp55-63.
- [3] Elke, I., et al., (2001). Aromatic Hydrocarbons in the Atmospheric Environment-Part II: Univariate and Multivariate Analysis and case Studies of Indoor Concentrations, Atmospheric Environment, 35, pp-1253-1264

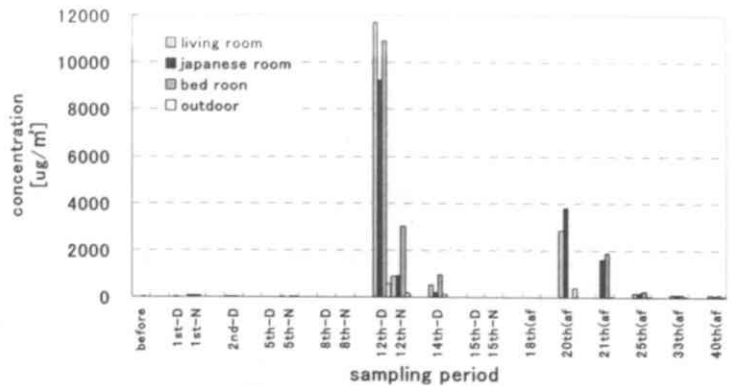


図1 toluene 部屋別濃度推移

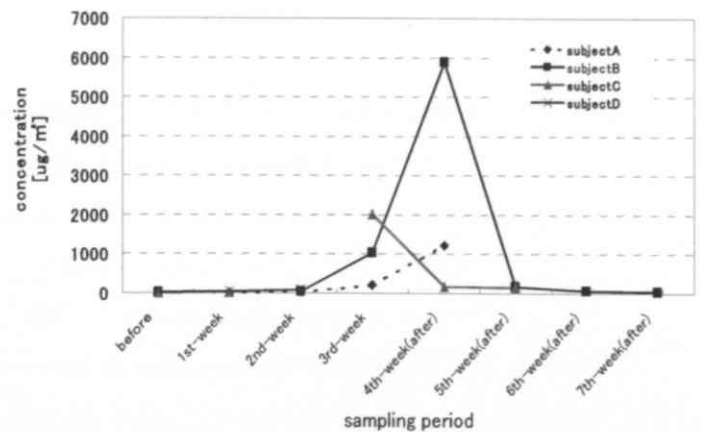


図2 toluene 個人曝露量推移

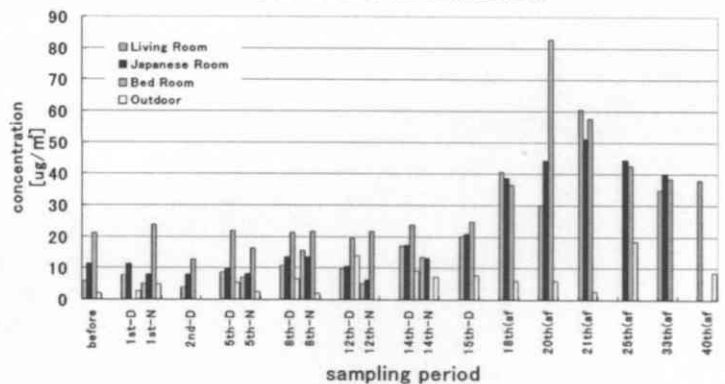


図3 acetaldehyde 部屋別濃度推移

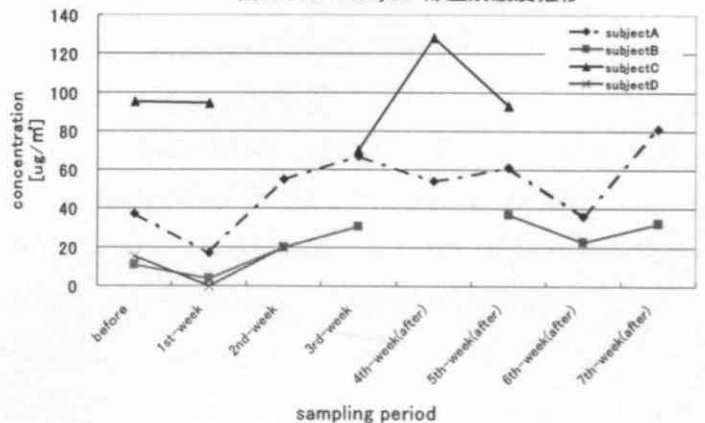


図4 acetaldehyde 個人曝露量推移

*1 東京大学工学部 研究生

*2 東京大学大学院新領域創成科学研究科 助手、工務、公衆衛

*3 東京大学大学院新領域創成科学研究科 博士課程 環修

*4 産業技術総合研究所 特別研究員、博士(工学)

*5 日本女子大学 教授、工学博士

*6 東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授、工学博士

*7 Research Student, Dept. of Engineering, The Univ. of Tokyo

*8 Research Associate, Graduate School of Frontier Science, The Univ. of Tokyo, M. Sc.(Eng.), M.P.H.

*9 Graduate Student, Graduate School of Frontier Science, The Univ. of Tokyo, M. Eng.

*10 Postdoctoral Researcher, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Dr. Eng.

*11 Professor, Japan Woman's University, Dr. Eng.

*12 Professor, Graduate School of Frontier Science, The Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

Pilot study on VOCs during indoor renovation

Miki Jona^{a,*}, Kazukiyo Kumagai^b, Naohide Shinohara^b, Minoru Fujii^b, Akihiko Iio^a, Yukio Yanagisawa^b

^a*Japan Women's University, Japan;* ^b*University of Tokyo, Japan*

ABSTRACT

The concentrations of volatile organic compounds (VOCs) were measured during renovation of a residence. In order to determine the relationship between indoor concentration and the phase of the renovation process, samplings of indoor concentrations and personal exposures were divided into 19 and 8 periods, respectively. VOCs were sampled by active charcoal and analyzed using GC-MS. Carbonyl compounds were sampled by 2,4-dinitrophenylhydrazine (DNPH) cartridges and analyzed using HPLC. It was revealed that the most causal process influencing the personal exposure during renovation was painting. The renovation in this study was conducted to reduce formaldehyde. Use of a material with less formaldehyde content was to effective for the reduction of formaldehyde concentration during renovation.

INDEX TERMS

Renovation; Personal exposure; VOCs; Carbonyl compounds

INTRODUCTION

Although many field studies have been done on the concentration of indoor volatile organic compounds (VOCs) in Japan, most of these studies focused on indoor residential environment after construction. There are few studies, however, on indoor VOC concentrations during renovation. In the course of renovation, the occupants continue to live in the residence where half-dry paints or adhesive materials release organic solvents and, as a result, VOC concentrations may become considerably high. The purpose of this study was to determine the personal exposure to VOCs including carbonyl compounds emitted from building materials, paints and so on during renovation.

METHODS

The residence of renovation was a two-floor wooden house built 22 years ago (Architectural area, 140.4 m², 1F: 84.9 m², 2F: 55.5 m²). Most of the renovation was

*Corresponding author.

conducted in the living room. During the renovation, the front and kitchen doors were kept open.

Standardized material with formaldehyde emission less than 0.5 mg/L was used as flooring. 'Non formaldehyde bond' was used to cover the wall with wallpaper. The paint used was left out of the consideration to reduce chemical compounds. The items measured were as follows:

- Personal exposure [Subjects A, B, C, D (Subject D is the carpenter)]
Subject A stayed in the 1st floor for most of the time
Subject B stayed in the 1st floor during the daytime and 2nd floor during the night.
Subject C stayed in the 2nd floor for most of the time.
Subject D stayed in the 1st floor for most of the time.
- Indoor air concentration [Living Room, Japanese-style Room, Bed Room (upstairs)]
- Outdoor air concentration
- Temperature and humidity.

SAMPLING

The concentrations of VOCs were measured by an active sampling method and were sampled for some periods of 24 days of renovation using charcoal tubes (SIBATA Kagaku, Japan) at a flow rate of 750 ml/min. Sampling was done separately during the daytime when the renovation was taken place and the night time when the carpenter left and the openings were closed. A passive sampling to measure the 1 week average concentration was carried out for every week until the 47th day from starting the renovation using Passive gas tubes (SIBATA Kagaku, Japan). Personal exposure was measured by passive sampling with the passive gas tubes every week (Table1).

The concentration of carbonyl compounds was measured by an active sampling and a passive sampling using 2,4-dinitrophenylhydrazine (DNPH) cartridges (Xposure, Waters Ltd, USA). The sampling period was the same as that for the VOCs. The flow rate was set at 100 ml/min. Personal exposure was measured by passive sampling using DNPH cartridges for every week.

ANALYSIS

VOCs were ultrasonically-extracted from the sampler by agitating for 10 min in 1 ml carbon disulfide (Wako Pure Chemicals Co.Ltd, Japan). Determination of the VOCs was conducted by gas chromatography/mass spectrometry (GC-MS, 6890-5973, Agilent Technologies, USA) (Table2).

The DNPH cartridge was eluted with 10 ml of HPLC-grade acetonitrile (Wako Pure Chemicals Co.Ltd, Japan), and 20 µl aliquots were injected into a High Performance Liquid Chromatograph (Hewlett-Packard 1100, U.S.A.) (Table3).

Table1 Sampling schedule

personal exposure		indoor and outdoor concentration		method	renovation
before	2002/10/21-10/23	before	2002/10/21day-10/23day	Active	carry the building material in
1st-week	2002/10/23-10/28	1st-D*	2002/10/25day-10/26night	Active	plywood(ceil, floor), shelf
		1st-N**	2002/10/26night-10/27day	Active	
		2nd-D	2002/10/27day-10/27night	Active	flooring
2nd-week	2002/10/28-11/5	5th-D	2002/10/29day-10/29night	Active	plywood (wall),
		5th-N	2002/10/29night-10/30day	Active	
		8th-D	2002/11/1day-11/1night	Active	kitchen set
		8th-N	2002/11/1night-11/2day	Active	
3rd-week	2002/11/5-11/11	12th-D	2002/11/5day-11/5night	Active	paint
		12th-N	2002/11/5night-11/6day	Active	
		14th-D	2002/11/7day-11/7night	Active	cloth
		14th-N	2002/11/7night-11/8day	Active	
		15th-D	2002/11/8day-11/8night	Active	cloth
4th-week	2002/11/11-11/18	18th(after)	2002/11/11-11/13	Active	
		20th(after)	2002/11/13-11/14	Active	paint
		21th(after)	2002/11/14-11/15	Active	
5th-week	2002/11/18-11/26	25th(after)	2002/11/18-11/26	Passive	
6th-week	2002/11/26-12/3	33th(after)	2002/11/26-12/3	Passive	
7th-week	2002/12/3-12-10	40th(after)	2002/12/3-12-10	Passive	

*D: for Daytime **N: for Nighttime

Table2 Analytical conditions of GC-MS

Instrument	Condition
Column	HP5-MS capillary column 30 m × 0.25 mm (0.25 μm)
Carrier gas	He
Flow rate	1 ml/min
Injection volume	1 μl
Split ratio	10 : 1
Injector temperature	250 °C
Column temperature	40 °C (4 min) - (10 °C /min) - 280 °C.

Table3 Analytical conditions of HPLC

Instrument	Condition
Column	ZORBAX Eclipse XDB-C18 4.6mm × 250mm (5 mm)
Mobile phase	CH3CN : H2O = 65 : 35 (v/v)
Flow rate	1ml/min
Injection volume	20 ml
Column temperature	35 °C
Detector	Diode Array Detector (DAD) 365nm

RESULTS AND DISCUSSION

VOCs

Figure1 shows the variation of toluene concentration. Toluene concentration rose during painting. Moreover, the concentration of ethylacetate, m,p-xylene and so on. showed a similar tendency. Therefore, the source of elevation of the concentration of those compounds was assumed to be the paint but it was temporally elevated and decayed during the daytime.

Figure2 shows the personal exposure variation of toluene. For subjects A and B, personal exposure is over $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (toluene concentration guideline in Japan is $280 \mu\text{g}/\text{m}^3$) during the paint.

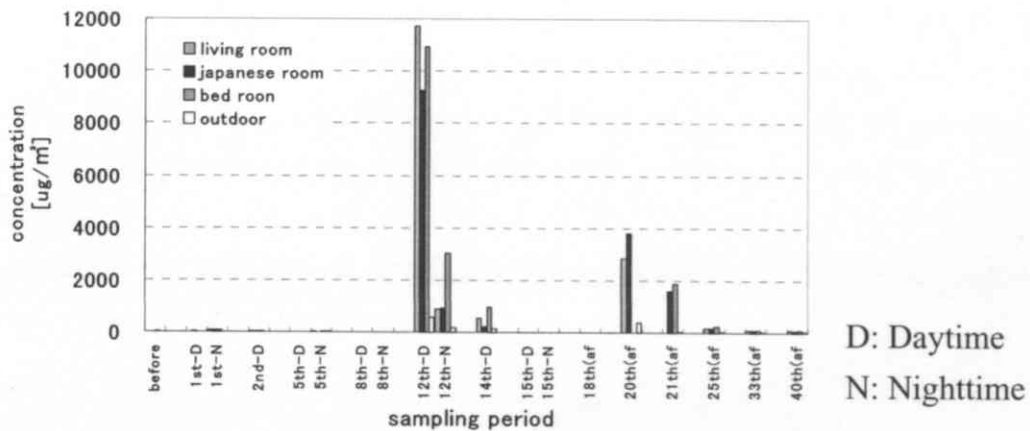


Figure1 The variation of indoor air concentration—toluene.

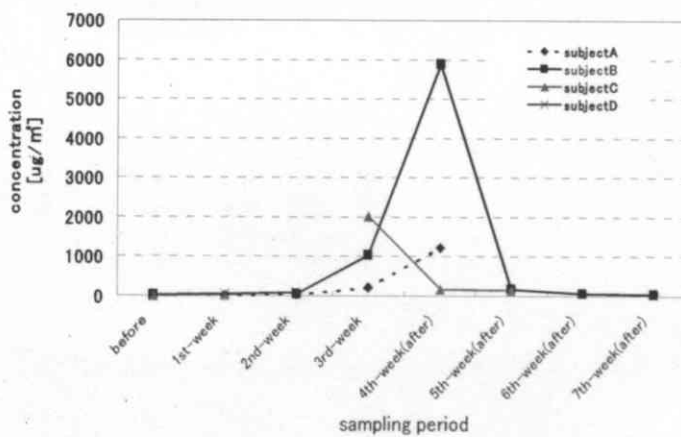


Figure2 The variation of personal exposure—toluene.

Carbonyl Compounds

Figure 3 shows the variation of acetaldehyde concentration. The concentration of acetaldehyde in the living room, Japanese room and bed room exceeded the guidelines for Japan ($48 \mu\text{g}/\text{m}^3$) after the renovation. There was no remarkable change of temperature and humidity so this elevation was responsible for the ventilation rate. The highest concentration was observed on the 20–21 day. The formaldehyde concentration did not exceed the Japanese guidelines during the sampling period.

Furthermore, formaldehyde and acetaldehyde concentrations in the bedroom on the 2nd floor were higher than those in the living room, so there was a possibility of another source besides the renovation in the bedroom. There was a correlation between acetaldehyde concentrations in the living room and acetaldehyde concentrations in the Japanese room, so it is postulated that in these rooms was derived from the renovation.

Figure 4 shows the time series of personal exposure of acetaldehyde. Exposure of subjects A and C to acetaldehyde exceeded the guidelines. Subject C stayed on the 2nd floor for most of the time. The high concentration in the 2nd floor might cause the high exposure level observed in subject C. Personal exposure of formaldehyde did not exceed the guideline ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Figure 5 shows the variation of crotonaldehyde concentration. The concentration of crotonaldehyde increased during the flooring and painting phase.

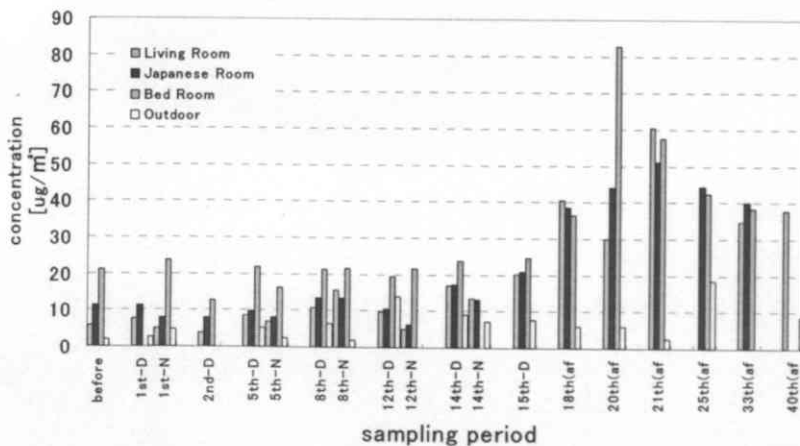


Figure 3 The variation of indoor air concentration—acetaldehyde.

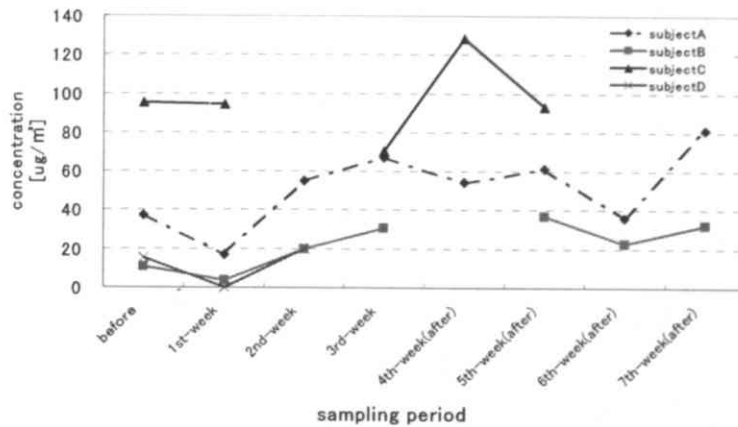


Figure4 The variation of personal exposure—acetaldehyde.

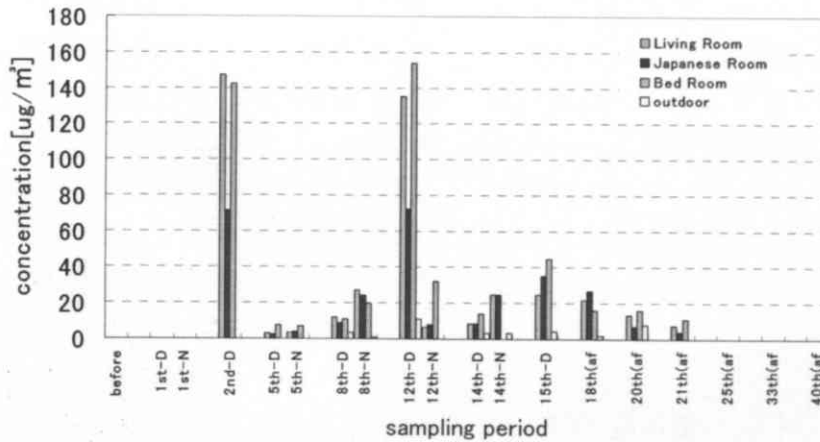


Figure5 The variation of indoor air concentration—crotonaldehyde.

CONCLUSION

- The most probable process influencing personal exposure during renovation was painting.
- Personal exposure varied widely among the occupants living in the same residence.
- The concentration did not increase remarkably during the nighttime, when the openings were closed.
- Use of material with lower formaldehyde content was actually effective for the reduction of formaldehyde concentration during renovation.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to express their appreciation to those who cooperated during this survey.

呼気中 CO₂ を用いた換気量測定

Method of Measuring Ventilation Rate Using CO₂ From Exhaled Air

常名 美貴*1, 熊谷 一清*1, 柳澤 幸雄*1

Miki Jona, Kazukiyo Kumagai, Yukio Yanagisawa

keywords : Ventilation Rate, CO₂, Exhaled Breath

換気率、CO₂、呼気

1. はじめに

近年になって、温湿度やホルムアルデヒドなどに関しては、ある程度の精度を確保しつつ居住者の目的に沿った簡便な測定方法が開発されつつある。しかし、換気量測定に関しては、0.5回/hrといった規制は存在するものの、簡易測定手法は確立されていないのが現状である。そこで、換気量測定に関し、居住者から何らかの要求があった際、大掛かりな装置や化学物質を用いずに手軽に換気量を測定できる方法が必要である。その案として呼気中 CO₂ をドーザーとして用いた換気量測定方法が挙げられる。この方法は、居住者が室内に居ることが前提となるものの、SF₆ のような温暖化係数が非常に高い特殊なガスを用いない上に、簡易な CO₂ モニターさえあれば気兼ねなく簡易に測定できるため、居住者の視点で考えると“簡易”且つ“低コスト”な手法であると考えられる。

2. 目的

そこで本研究では、これまでに確立されていない、呼気中 CO₂ を用いた簡易な換気量算出方法の確立と実用化を目的とし、誤差要因の検討や、応用方法の提案を行う。

2. 測定の概要

本報ではまず、ワンルームマンションにおいてパイロット的に夜間における換気量測定を実際の住宅で行い、SF₆ 法との比較を行ったので報告す

る。測定は2004年3月26日～29日及び4月22日～28日のうちの数日間にわたり、ワンルームマンションの一室(22 m³)にて行った。サンプリングポイントは居室の中央である。尚、25日～27日についてはファンを用いて測定対象空間を攪拌した。居住者は成人男性1名である。SF₆ 法をトレーサーとした濃度減衰法、また、呼気 CO₂ 法は居住者の呼気中 CO₂ をトレーサーとした連続発生法の2測定方法での比較を行った。CO₂ 及び SF₆ 濃度は INNOVA マルチガスモニター 1303(Bruel&Kjaer 社)を用い6分毎に測定した。

3. CO₂ 排出量について

呼気中 CO₂ 排出量は、O₂ 排出量の推算式(1)に呼吸商(=0.83)をかけることにより算出した*1。また、体表面積は 1.8m² とし、平均的な就寝時の代謝率は 0.7met とした*1。

$$V_{O_2} = \frac{0.00276 A_D M}{(0.23 RQ + 0.77)} \quad \dots(1)$$

A_D = 体表面積[m²]、 M = 体表面積あたりの代謝率[met]、 RQ = 呼吸商(0.83)

4. 換気量算出の誤差要因

呼気 CO₂ 法による換気量測定を行う際の誤差要因として、調理時の燃焼による CO₂ の放散、植

*1 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 環境学専攻

物からのCO₂の放散、屋外CO₂濃度のばらつき、呼気CO₂の個人内変動、などが挙げられる。本測定は就寝時の測定であり、室内に観葉植物等も存在しなかったため、料理や植物の影響は無く、個人内変動もほぼ無いものと仮定した。屋外CO₂濃度は、地球全体では380ppmと言われているものの、非常に局所的なものであり一般性にも乏しいため、測定期間や地域で大気CO₂濃度に大きな変動がある場合、屋外濃度も同時に測定を行う必要がある。しかし、本測定方法はできるだけ簡易に換気量を測定したいため、屋外CO₂濃度を測定する手間はできれば省きたい。そこで、屋外濃度の参考値として、換気量を測定した住宅がある東京都におけるCO₂濃度日内変動(4月5日~7日)を測定した(Fig.1)。その結果、測定期間中における東京都のCO₂濃度はおおよそ450ppm前後で変動したため、この測定で得られた値を参考に屋外CO₂濃度を450ppmに設定した。仮に屋外濃度が600ppm、あるいは380ppmと、設定値とは大きく差がある場合でも、得られる換気回数の誤差は換気回数0.5回/hrの場合、想定される誤差はそれぞれ13%、7%程度であると考えられる。

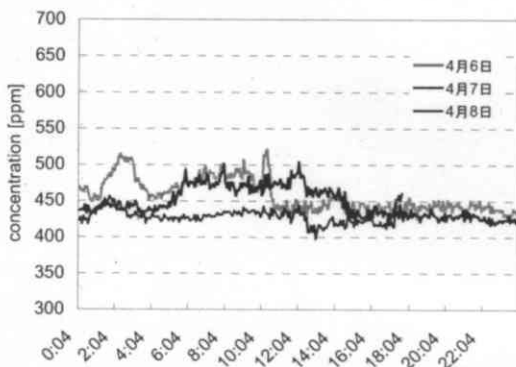


Fig.1 東京都における大気中CO₂濃度の日変動

5. 結果と考察

測定結果をFig.2に示す。Fig.2より、CO₂法による換気測定結果とSF₆法による換気測定結果は、ファンを使用しなかった期間(3/26~3/24)及び使用した期間(4/25~4/27)とも測定結果に大きな違いは出なかった。また、Fig.3より、両測定方法による結果は1:1で良く一致し、誤差は20%以内であった。さらに今回の測定は居住者1名での換気量繰り返し測定であるにもかかわらず、0.3回

/hrから0.8回/hrと日によって大きくばらついた。この原因として当然のことながら室内温度差や外部風速の増加が影響していることが挙げられる。今回は参考として測定期間中の東京練馬の風速データを参考にしたところ、明らかに普段より換気量の多い4月27日(0.8回/hr)は強風であったことから、風速の影響を強く受けている可能性が示唆されるが、今回の測定では現場の風速は測定していないため、断定は出来ない。

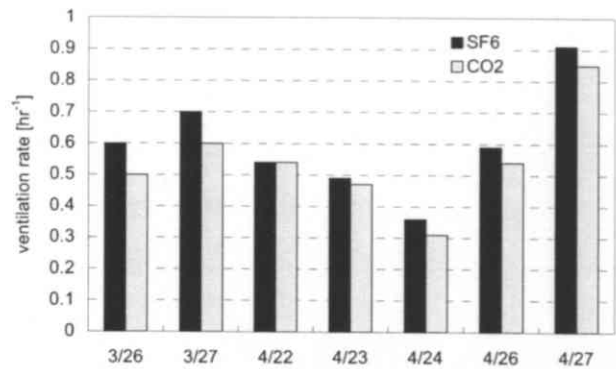


Fig.2 換気量測定結果

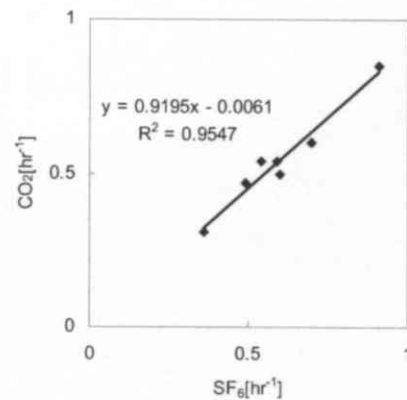


Fig.3 換気量測定結果相関図

6. まとめ

呼気中CO₂を用いた簡易な換気量算出方法の確立と実用化を目的とし、誤差要因の検討及びSF₆法による換気量測定法との比較を行ったところ、想定誤差範囲内で換気量を算出できる可能性が示唆された。

[参考文献]

1. ASTM STANDARDS ON INDOOR AIR QUALITY, D-6245-98, pp.190-199