

東京大学大学院 2005 年度修士論文

情報の認知による室内空気質改善効果に関する研究

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

常名美貴

情報の認知による空気質改善効果に関する研究  
目次

第1章 序論	…1
1.1. 背景	…1
1.2. 対策	…2
1.3. 室内化学物質汚染の問題点	…3
参考文献	…5
第2章 室内化学物質汚染	…6
2.1. ガイドライン	…6
2.2. 物性と毒性	…7
2.3. 放散源	…14
2.3.1. 建材・生活用品	…14
2.3.2. 自然由来の汚染物質	…14
2.3.3. 居住者の行動	…16
2.3.4. 湿気	…16
2.3.5. 室内における反応	…16
2.4. 公定法	…17
2.5. 既往の研究	…17
2.5.1. 室内化学物質と温湿度	…17
2.5.2. 室内化学物質の放散量	…17
2.5.3. 室内化学物質と居住者	…18
2.5.4. 室内化学物質の季節変動	…18
2.5.5. 室内化学物質低減手法	…19
参考文献	…20
第3章 換気	…21
3.1. はじめに	…21
3.2. Basic Ventilation	…22
3.3. Occupant Ventilation	…22
3.2. 必要換気量	…22
3.3. 換気量測定方法	…23
3.3.1. はじめに	…23
3.3.2. トレーサーガスを用いた換気量測定方法	…23
3.3.3. トレーサーガスについて	…24

3.4. 既往の研究	…25
3.4.1. はじめに	…25
3.4.2. 居住環境中の室内 CO <sub>2</sub> 濃度	…25
3.4.3. 学校における CO <sub>2</sub> 濃度	…25
3.3.4. 室内環境のモニタリング – 換気と室内化学物質 –	…26
3.3.5. 居住者による換気	…26
3.3.6. 呼気中 CO <sub>2</sub> を用いた換気量測定	…27
参考文献	…29

第4章 研究の概要	…31
4.1. 背景	…31
4.2. 既往の研究	…29
4.2. 目的	…32
4.3. 調査の概要	…32
4.3.1. 調査の流れ	…32
4.3.2. 対象住宅	…32
4.3.3. 測定項目	…33
4.3.4. 調査期間	…33
4.3.5. 情報提供の方法	…33
4.4. カルボニル化合物の測定・分析方法	…34
4.4.1. サンプルング	…34
4.4.2. 試薬及び分析条件	…35
4.4.3. 濃度算出方法	…35
4.5. VOCs の測定・分析方法	…35
4.5.1. サンプルング	…35
4.5.2. 分析方法及び分析条件	…36
4.5.3. 濃度換算方法	…37
4.5.4. 精度	…38
4.6. 換気率の測定	…38
4.6.1. 平均換気量測定方法の選択	…38
4.6.1. PFT 法について	…38
4.6.2. 測定及び分析方法	…39
4.7. 温湿度及び降水量	…40
4.8. アンケート調査及び生活環境調査	…41
参考文献	…42

第5章 測定結果	…43
5.1. 居住者の属性	…43
5.2. 住宅の属性	…43
5.3. 換気量測定結果	…44
5.4. 化学物質濃度測定結果	…44
第6章 意識の変化	…49
6.1. 意識調査結果	…49
6.2. まとめ	…50
第7章 行動の変化	…51
7.1. 窓開け換気時間の変化	…51
7.2. 意識の変化と窓開け時間の変化	…51
7.3. まとめ	…52
第8章 環境の変化	…53
8.1. 換気量測定結果	…53
8.1.1 換気量の変化	…53
8.1.2. 情報提示の換気量への寄与	…54
8.1.3. 換気率が悪かった住宅	…57
8.2. 室内化学物質濃度測定結果	…58
8.2.1. カルボニル類について	…58
8.2.2. VOCsについて	…63
8.3. まとめ	…67
第9章 総括	…68
謝辞	…71
Appendix1	…A-i
・ 測定機器の設置について	
・ 測定機器の回収について	
Appendix2	…A-ii
・ 呼気中 CO <sub>2</sub> を用いた換気量測定方法に関する研究	

Appendix3

・・・A-iii

- ・ リフォームによる室内化学物質および個人曝露量, 2003 年日本建築学会(名古屋)
- ・ Pilot study on VOCs during indoor renovation, Healthy Buildings 2003 (Singapore)
- ・ 呼気中 CO<sub>2</sub>を用いた換気量測定, 2004 年 室内環境学会(東京)

## 第1章 序論

### 1.1 背景

現在、地球規模での環境問題が深刻化している。しかし、大きな規模での環境問題と共に、室内環境問題も我々の健康リスクを考える上で非常に重要な問題である。

住宅の供給が一定の水準に達した現在においては、環境問題を配慮した住宅の省エネルギー化と共に、居住者の健康に考慮した住宅の確保が必要である。これまで、住宅の省エネルギー化や室内の温熱的快適性などの観点から住宅の高気密化が進められてきた。これにより、日本における住宅の換気量が減少したのに加え、住宅の建材や生活用品等から放散される化学物質の量が増えたことにより、室内空気汚染、いわゆる IAQ(Indoor Air Quality)問題やシックハウス問題が顕在化している。

我が国では、1970年代の石油危機を契機として省エネルギー政策がスタートしている。2度の石油危機により、我が国の経済は大きな影響を受け、省エネルギーの重要性が認識されるとともに、法制度の整備や各種支援などの省エネルギー政策を推進することとなったのである。そして1979年には、「省エネ法」(正式名称を「エネルギーの使用の合理化に関する法律」という。)が、制定され、1997年の地球温暖化防止京都会議(COP3)を背景に1998年6月に改正、1999年4月から施行している。この法律は、地球温暖化防止に関する京都議定書の発効をふまえ、各分野におけるエネルギー使用の合理化を一層進めるため、エネルギー消費量の伸びの著しい運輸分野における対策を導入するとともに、工場・事業場及び住宅・建築物分野における対策を強化する等の措置を講じるというもので、住宅部門においては、建築物の外壁、窓等を通して熱の損失防止のための措置をとることや、建築物に設ける空気調和設備その他の政令で定める建築設備に係るエネルギーの効率的利用のための措置を適確に実施することにより建築物に係るエネルギーの使用の合理化に資するよう努めることを定めている<sup>[1]</sup>。こうした国をあげての省エネルギー政策推進や、住宅の温熱的快適性を追及したことで、住宅の高気密化がよりいっそう進められることとなった。

一方、室内においては建材を中心に、防虫剤、芳香剤などの生活用品や家具、電化製品などから様々な化学物質が放散される。こうした状況に加え、気密性の向上により換気量が減少しているために、居住者は従来と比較し高い濃度の汚染物質にさらされる機会が多くなった。そのため、居住者がこうした室内中の化学物質に曝露することによって体調不良を訴える、いわゆるシックハウス症候群(SBS: Sick Building Syndrome)が社会的な問題となっている。シックハウス症候群は、化学物質過敏症の一種で、一般には無害といわれる微量な化学物質に反応し、頭痛、倦怠感、手足のしびれなどの多種多様な症状を引き起こすものであり、原因となる物質も非常に多種多様なことから、未だ有効な治療法は見つかっていない。こうした居住者への健康影響を防ぐために、これまでに国や企業、研究機関などで様々な技術の開発や化学物質の使用規制、建材の規格化などの対応がなされている。

## 1.2. 対策

化学物質濃度低減のためには、大きく分けて①放散量を減らす、②換気量を増やす、③分解吸着、といった方法が考えられる。以下に室内化学物質の物質収支式 (1) を示すが、

$$C_{in} = C_{out} + \frac{E}{Q} \quad \dots(1)$$

ここで

$C_{in}$  = 室内化学物質濃度 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]

$C_{out}$  = 屋外化学物質濃度 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]

$E$  = 放散量 [ $\mu\text{g}/\text{hr}$ ]

$Q$  = 換気量 [ $\text{m}^3/\text{hr}$ ]

(1)式より、室内化学物質濃度  $C_{in}$  を小さくするには、放散量  $E$  を小さくするか、換気量  $Q$  を大きくすることが効果的であることがわかる。そして、国土交通省は、建材の化学物質放散量について関係各省と協議を行い、特に建築材料を供給する側にある、農林水産省、経済産業省との間で、それぞれが主管する日本農林規格 (JAS) 及び日本工業規格 (JIS) に定められた formaldehyde 放散量基準と規制の方法について検討が行われ、シックハウス対策を強化するため建築基準法の改正を行い、formaldehyde 放散量の規格化及び使用規制を実施に移している。

換気に関しては、省エネルギー化のために気密性が向上している一方で、平成 15 年に建築基準法が改正され、換気量を適度に保つために 24 時間換気設備の設置が義務付けられるなどの措置がとられている。その他の対策として、化学物質の吸着分解などの手法を挙げることができる。木村ら<sup>[2]</sup>は、室内化学物質濃度が高い新築住宅における VOCs 等の化学物質による空気汚染に対する抑制技術として①常時換気システムの運転、②パッシブ型 formaldehyde 除去製品の設置、③formaldehyde 専用空気清浄機の運転、の 3 つの手法による化学物質除去性能の評価を行い、これらの対策により、室内化学物質の濃度低減が可能であり、1 ヶ月経過後も低減効果が維持されていることを確認している。一方、近年オゾン発生器が組み込まれた空気清浄機が市販されている。これは、オゾンの強い酸化作用を用いて、空気中の有害化学物質や細菌などを分解除去しようとするものであるが、オゾンは室内空気中のテルペン類と反応し、formaldehyde などのカルボニルを生成することが知られている<sup>[3]</sup>。

さらに、アメリカ環境保護庁の報告書<sup>[4]</sup>によると、オゾン式空気清浄機で室内空気汚染を効果的にコントロールできるかについては、これまで得られた科学的知見では、健康基準値を超えないオゾン濃度では、室内空気汚染物質はほとんど除去できず、臭いの原因となる多くの化学物質を有効に除去できないことを示す証拠があること、また、その濃度では、ウィルス、細菌、カビなどの生物汚染源を有効に除去できないと報告している。空気清浄機関係の除去方法として、空気浄化フィルター、プラズマ式空気清浄機、イオン式空気清浄機が、空気中の微粒子を除去するためによく使用される。

汚染除去技術の 1 つにベイクアウト (Bake-Out) 法が挙げられる。この手法は、ある一定期間室温

を上昇させることによって、汚染源からの発生を促進させることで、平常時の汚染源からの発生を緩和する方法である。野崎ら<sup>[5]</sup>は、ベイクアウト前後における総揮発性有機化合物(以下TVOC...2章参照)の低減効果について、竣工後3ヶ月の集合住宅においてベイクアウトの実験を行い、formaldehydeが30%、TVOCが50%低減したことを報告している。さらに、野田ら<sup>[6]</sup>は、ベイクアウトにより有効に低減できるVOCs分類とTVOC濃度で評価した低減効果を建材レベルで検討し、接着剤や塗料等の溶剤として使用されている脂肪族炭化水素や芳香族炭化水素類、アルコール類に対する低減効果は大きいものの、自然放散が進んでいる建材やテルペン類の低減には24時間程度のベイクアウトでは効果が期待できないことを報告している。

### 1.3. 室内化学物質汚染の問題点

シックハウス問題の対策として、これまでに各研究機関により実測調査や、化学物質濃度指針値の策定等が進んだ関係で、建材からの室内化学物質放散量は減少傾向にあるといえる。また、2003年7月に建築基準法が大きく分けて換気設備と建築材料に関して改正があった(後述)。個々の問題点は存在するものの、主に新築住宅については法的にも対策が施されつつある。

#### (1) 規制対象とする化学物質

クロルピリホス及びホルムアルデヒドとする。

#### (2) クロルピリホスに関する規制

居室を有する建築物には、クロルピリホスを添加した建材の使用を禁止する。

#### (3) ホルムアルデヒドに関する規制

##### ① 内装の仕上げの制限

居室の種類及び換気回数に応じて、内装仕上げに使用するホルムアルデヒドを発散する建材の面積制限を行う。

##### ② 換気設備の義務付け

ホルムアルデヒドを発散する建材を使用しない場合でも、家具からの発散があるため、原則として全ての建築物に機械換気設備の設置を義務付ける。

##### ③ 天井裏等の制限

天井裏等は、下地材をホルムアルデヒドの発散の少ない建材とするか、機械換気設備を天井裏等も換気できる構造とする。

しかし、竣工後何年も経過している住宅からも高濃度の化学物質が検出されていることから、化学物質放散量の少ない建材を使用したからといって濃度が低減する、あるいは経年に伴って濃度は減少する、ということは一概に言えない。この濃度上昇の原因として、家具やライフスタイル等の生活者由来のものが挙げられる。これは、室内化学物質汚染に対する様々な取り組みが、主に建築学的視点から行われ、実際の居住者の生活からの視点で行われてこなかった結果であるともいえる。2000年4月の住宅性能表示制度以降、居住者が住宅性能を比較することや、レベル設定等に関与することが可能になりつつある。しかし同時に、このことは居住者も責任の一端を負うということの意味する。つまり、室内化学物質汚染の被害を防ぐためには、居住者自身がこ



の問題に対して関心を持ち、住宅性能のリスクを評価、意思決定を行わなければならない。既往の調査においても、シックハウス問題を解決するために「社会的に必要なこと」と思っていることについて住宅建設企業にアンケートをしたところ、教育(市民・ユーザー)と意識向上である、との報告<sup>[7]</sup>もなされている。

これまでに、生活者のライフスタイルに注目し、生活者由来の化学物質の寄与率を推定した研究というものは行われていないものの、居住者由来の汚染源に関する調査はいくつか行われている。山口ら<sup>[8]</sup>は、新潟県の各地域における木造住戸を対象とし、アンケート、室内化学物質濃度調査、シェルター性能の測定を行い、住まい手の意識と室内の化学物質による汚染の程度との関係を調査した。また、土橋ら<sup>[9]</sup>は、市販家具や作りつけ家具の放散速度測定を、大型チャンバーを用いて行い、規格化された部材の使用が formaldehyde 放散量の低減に有効である、といった報告を行っている。このように、建材からの放散量規制は行われているものの、家具に関する規制は進んでいないのが現状である。居住者由来の化学物質汚染被害を減らすためには、汚染に対する居住者意識の改革が必要である。

柴田ら<sup>[10]</sup>によれば、住宅性能表示制度の性能項目のうち、近年「空気環境」の重要順位が高いことが報告されており、シックハウスに対する注目度は上昇していることが伺えるが、具体的な対策としてはまだまだ情報伝達不足であると考えられる。そこで、それぞれ室内化学物質汚染に対する意識が異なる居住者（特にシックハウスに対する情報を持っていない居住者）に対し、何らかの対策を指示し、実際に実行してもらうことにより、居住者意識による対策の効果について検証する必要がある。

## [参考文献]

- [1] エネルギーの使用の合理化に関する法律（省エネ法）について，経済産業省(一部国土交通省)，改正平成 14 年 12 月 11 日，<http://www.eccj.or.jp/law/>
- [2] 木村洋，長谷川麻子，小峯裕巳，鎌田元康，新築住宅における化学物質室内空気汚染抑制技術の効果に関する研究，*日本建築学会計画系論文集*, 554, pp.27-34, 2002.
- [3] Zhihua Fan, Pul Liyo, Charles Weschler, Nancy Fielder, Howard Kipen and Junfeng Zhang, Ozone-Initiated Reactions with Mixtures of Volatile Organic Compounds under Simulated Indoor Conditions, *Environmental Science & Technology*, 37, pp.1811-1821, 2003.
- [4] United States Environmental Protection Agency (USEPA), “OZONE GENERATORS THAT ARE SOLD AS AIR CLEANERS: An Assessment of Effectiveness and Health Consequences”, April 4, 2001  
<http://www.epa.gov/iaq/pubs/ozonegen.html>
- [5] 野崎淳夫，飯倉一雄，吉澤晋，堀雅宏，室内化学物質汚染低減化対策としてのベイクアウトの効果(その 1)室内 VOC，ホルムアルデヒド汚染に関する(その 2)研究，*日本建築学会計画系論文集*, 530, pp.61-66
- [6] 野田耕右，石原修，ベイクアウトによる建材に含まれる化学物質の低減効果について，*日本建築学会計画系論文集*, 564, pp.49-54, 2003
- [7] 塩津弥生他，いわゆる「シックハウス問題」について住宅建設技術者が求めているニーズについて，*日本建築学会学術講演梗概集*, 2001 年 9 月
- [8] 山口一他，木造住宅を対象とした居住者意識と室内化学物質濃度・シェルター性能に関する研究，*日本建築学会計画系論文集*, 554, pp.15-20, 2002.
- [9] 土橋芳郎他，建材や家具からのホルムアルデヒド放散速度の測定に関する研究 その 6，ラージチャンバーによる家具試験の結果，*日本建築学会大会学術講演梗概集*, pp.717-718, 1999.
- [10] 柴田幸枝他，住宅性能に対する居住者の意識に関する研究－その 1 既往調査の重視度合に着目した分析－，*日本建築学会学術講演梗概集*, 2003 年 9 月

## 第2章 室内化学物質汚染

## 2.1. ガイドライン

室内化学物質濃度の基準値は各国によって異なるが、代表的なものは WHO(World Health Organization)のガイドラインである。日本の指針値は、WHOのガイドラインを基に厚生労働省より13物質について策定されている。化学物質による居住者への健康被害を受け、現在までに13物質の濃度指針値及び総揮発性有機化合物(以下TVOC)の暫定目標値が策定されている(Table1)。

Table1 室内化学物質ガイドライン

揮発性有機化合物	毒性指標	室内濃度指針値	設定日
formaldehyde	ヒト吸入暴露における鼻咽頭粘膜への刺激	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.08ppm)	1997.6.13
toluene	ヒト吸入暴露における神経行動機能及び生殖発生への影響	260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.07ppm)	2000.6.26
xylene	妊娠ラット吸入暴露における出生児の中枢神経系発達への影響	870 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.20ppm)	2000.6.26
p-dichlorobenzene	ビーグル犬経口暴露における肝臓及び腎臓等への影響	240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.04ppm)	2000.6.26
ethylbenzene	マウス及びラット吸入暴露における肝臓及び腎臓への影響	3800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.88ppm)	2000.12.15
styrene	ラット吸入暴露における脳や肝臓への影響	220 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.05ppm)	2000.12.15
chlorpyrifos	母ラット経口暴露における新生児の神経発達への影響及び新生児脳への形態学的影響	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.07ppb) 但し小児の場合は0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.007ppb)	2000.12.15
di-n-butyl phthalate	母ラット経口暴露における新生児の生殖器の構造異常等の影響	220 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.02ppm)	2000.12.15
tetradecane	C8-C16混合物のラット経口暴露における肝臓への影響	330 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.04ppm)	2001.7.5
di-2-ethylhexyl phthalate	ラット経口暴露における精巣への病理組織学的影響	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (7.6ppb)	2001.7.5
diazinon	ラット吸入暴露における血漿及び赤血球コリンエステラーゼ活性への影響	0.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.02ppb)	2001.7.5
total volatile organic compounds	国内の室内VOC実態調査の結果から、合理的に達成可能な限り低い範囲で決定	暫定目標値400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2000
acetaldehyde	ラットの経気道暴露における鼻腔嗅覚上皮への影響	48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.03ppm)	2002.1.22
fenobucarb	ラットの経口暴露におけるコリンエステラーゼ活性などへの影響	33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (3.8ppb)	2002.1.22

Table1 に示した物質の指針値は、formaldehyde の場合は短期間の曝露によって起こる毒性を指標に、それ以外の物質の場合は長期間の曝露によって起こる毒性を指標として、それぞれ策定されている。厚生労働省では、2000年度から、揮発性有機化合物(以下VOCs)について全国の一般家屋の居住環境中における実態調査を実施し、その調査結果がとりまとめられている<sup>[11]</sup>。対象物質は formaldehyde、acetaldehyde、toluene、styrene、xylene、ethylbenzene の6物質で、新規住宅、追跡調査住宅など1000軒を超える住宅を対象に行っている。その結果、2003年度における formaldehyde 濃度のガイドライン超過率は5.6%となり、平均値は49  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、acetaldehyde 濃度のガイドライン超過率は9.5%で最も高く、平均値は27  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  となっている。これは、ガイドライ

ンの値が  $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$  と低いのに対し、発生源が多数存在することが原因と考える。toluene の平均値は  $0.017 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、xylene は  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、styrene が  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、ethylbenzene  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$  となっている。2000 年度からの毎年の継続調査では各化学物質の濃度は低減傾向にあり、新築 1 年以内の住宅の比較でも、濃度指針値を超える住宅は徐々に減少傾向にある。TVOC の暫定目標値は、この国内家屋の実態調査の結果から、合理的に達成可能な限り低い範囲で決定した値であり、個別物質の指針値とは独立に、室内空気質の状態の目安として利用される。また、防蟻剤として使用されてきた chlorpyrifos については、これを使用する白アリ駆除従事者への健康影響を示唆する報告がなされており、気密性の高い住宅でこれを使用し比較的高濃度での暴露が持続した場合、特に感受性の高い居住者に健康影響が生じる可能性は否定できない。

一方、日本工業規格(JIS: Japan Industrial Standard)及び日本農林規格(JAS: Japan Agricultural Standard)を Table2 に示す。

Table2 建材の formaldehyde 放散量規格

建築材料の区分	ホルムアルデヒドの放散速度	JIS,JASの表示記号
建築基準法の規制対象外	$5 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ 以下	F☆☆☆☆
第3種ホルムアルデヒド発散建築材料	$5 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{h} \sim 20 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$	F☆☆☆
第2種ホルムアルデヒド発散建築材料	$20 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{h} \sim 120 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$	F☆☆
第1種ホルムアルデヒド発散建築材料	$120 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ 超	F☆

JIS では繊維板及びパーティクルボードについて formaldehyde 放散量が規格化されており、JAS では製材を除いた木質系材料について formaldehyde 放散量が規格化されている。formaldehyde の測定方法にはデシケータ法を用いている。デシケータ法とは、日本で最も標準的な formaldehyde 放散量測定法であり、デシケータ中に所定の表面積と試験片と蒸留水を一定時間(24 時間)放置した後、蒸留水中に溶け込んだ formaldehyde 濃度を測定することにより formaldehyde の放散量を見積もることができる。現在のところ、その他有機化合物に関して規格化されているものは少ない。

## 2.2. 物性と毒性

次に、厚生労働省でガイドラインが策定されている 13 種類の物質の物性と構造、毒性などについて述べる。

Formaldehyde

Synonyms: Formaldehyde 37%; Formalin; Morbucid Acid; Methylene Oxide; Methyl aldehyde

CAS No.: 50-00-0

Molecular Weight: 30.03

Chemical Formula: HCHO and CH<sub>3</sub>OH in water

Vapor Pressure (mm Hg): 1.3 at 20°C (68F)

■環境中での挙動<sup>[2][3]</sup>

formaldehyde は、大気中にも存在し、大気汚染防止法で有害大気汚染物質の優先取組物質に指定され、事業者の排出削減が進められている。2002年度のPRTRデータによれば、約29,000トンが環境中へ排出されたと見積もられている。主に大型自動車やディーゼル機関車などの排気ガスに含まれて排出されたものであり、自動車などの排気ガスの中にも含まれる炭化水素から発生すると考えられる。中でもディーゼル車からは formaldehyde の排出量が多いとされている。常温で気体の formaldehyde は、大部分が空気中に存在すると考えられます。対流圏大気中においては主に OH ラジカルとの反応及び直接光分解によって容易に分解され、その半減期は19時間及び6時間程度とされている。

■健康影響<sup>[4]</sup>

高濃度の formaldehyde は吸入曝露により眼や鼻、呼吸器などに刺激性を与えることが報告されている。厚生労働省のガイドラインは吸入曝露の際の鼻やのどの粘膜への刺激を根拠としている。また、高濃度の formaldehyde は皮膚炎の原因となることもあり、「有害物質を含有する家庭用品に関する法律」によって、乳幼児用の衣類や繊維製品などに含まれる formaldehyde の量が規制されている。

人の発がん性に関する証拠は十分ではないが、マウスとラットに14.2～14.7 ppm の formaldehyde を長期間にわたって空気中から取り込ませた結果、鼻腔の扁平上皮がんの発生が認められており、国際がん研究機関 (IARC) はこの物質を2A (人に対しておそらく発がん性がある) に分類していますが、2A から1 (人に対して発がん性がある) に上げるように勧告が出されている。

Acetaldehyde

Synonyms: ethanal, ethyl aldehyde, acetic aldehyde

CAS No.: 75-07-0

Molecular Weight: 44.06

Chemical Formula: CH<sub>3</sub>CHO

Vapor Pressure (mm Hg): 755 at 20 °C

■環境中での挙動<sup>[3]</sup>

大気中の排出源としては、植物、自動車、工場などが挙げられる。その他、VOCs と大気中のオゾンの反応生成物として acetaldehyde が生成される。対流圏大気中においては主に OH ラジカルとの反応によって容易に分解され、その半減期は0.5～1日とされている。

### ■健康影響<sup>[3]</sup>

acetaldehyde は主に肝臓で ALDH(アセトアルデヒド脱水酵素)により代謝されるが、ALDH には遺伝的多形性があり、東洋系ヒト集団の一部で見られるアルコール不耐性の要因となっている。acetaldehyde 蒸気の吸引により眼への刺激や気道刺激、反復や長期曝露においては皮膚炎、結膜炎、赤血球白血球の減少、持続性の血圧上昇などが報告されている。ラットの吸入曝露による発ガン性試験においては、慢性の組織障害が起こる濃度で呼吸器系腫瘍を発生させることが知られている。ヒトと発ガン性との関係は明らかではないが、発ガン性を示す可能性があるとしてい

### Toluene

Synonyms: Toluol; phenylmethane; methylbenzene; Tolu-Sol; methylbenzol; methacide.

CAS No.: 108-88-3

Molecular Weight: 92.13

Chemical Formula: C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>CH<sub>3</sub>

Vapor Pressure ( mm Hg): 0.87 at 20°C

### ■環境中での挙動<sup>[3][4]</sup>

toluene は環境中に放出された場合、物理化学的症候から考えて大気、水、低質圏に広く分布する。対流圏大気中での OH ラジカルとの反応による半減期は、1~3 日と計算されるが、世界各地の大気中で検出されており、生態系への影響も懸念される。2002 年度の PRTR データによれば、toluene はもっとも排出量の多い化学物質で、約 28 万トンが環境中へ排出されたと見積もられている。主に印刷インキ、塗料や接着剤を使う工場や現場などの事業所のほか、自動車やオートバイの排気ガスに含まれて排出されたもので、ほとんどが空気中へ排出される。家庭からも、toluene を含んだ製品を使用する際などに空気中へ排出される。

### ■健康影響

toluene は中枢神経に働き、低用量での中枢興奮作用と高用量での抑制作用を持つ。toluene は薬物依存性を持ち、嗜好的吸入により視野狭窄または眼振や難聴を伴う慢性的中枢神経障害が生じ、CT 検査では脳の萎縮が観察される。また、腎機能障害が認められるとの報告もなされている。職業的に慢性曝露を受けた労働者では、頭痛や頭重感等の増加、記憶力障害や情緒不安定等の神経心理学的症状の高率な出現が報告されている。また、不整脈や頻脈がみられることも報告されている。toluene に変異原性はなく、実験動物及びヒトのいずれにおいても発ガン性は認められていない。

## Xylene

Synonyms: xylene, xylo

CAS No.: 1330-20-7、95-47-6(o-)、108-38-3(m-)、106-42-3(p-)

Molecular Weight: 106.17

Chemical Formula: C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>

Vapor Pressure ( mm Hg): o-xylene : m-xylene: p-xylene = 4.8:6.2:6.5 at 20

### ■環境中での挙動<sup>[3][4]</sup>

xylene は、物理的・化学的性状から大気、水及び低質圏に広く分布するものと予想され、環境庁のモニタリングにおいても水中及び低質から検出されている。対流圏大気中での本物質の半減期は0.6～1.2日と計算され、主な反応機構はOHラジカルとの反応である。あまた、対流圏大気中でのオゾンとの反応による半減期は5000日と計算される。

xylene の大半は化学原料として使用されるが、油性塗料や接着剤、インキなどの溶剤としても用いられている。2002年度のPRTRデータでは、環境中への排出量は約17万トンで、tolueneについて2番目に多い化学物質であった。主に事業所のほか、車の排気ガスに含まれて排出されたもので、ほとんどが空気中へ排出されている。xyleneは無色透明の液体で、o-xylene(オルト xylene)、m-xylene(メタ xylene)、p-xylene(パラ xylene)という3つの異性体があります。xyleneの大半は化学原料として使用されます。また、混合物 xylene と呼ばれる製品の形で、油性塗料や接着剤、印刷インキ、シンナー、農薬などの溶剤に使用される。

o-xylene は主にビニル樹脂の可塑剤の合成原料や、染料・香料などの製造に使われる無水フタル酸の原料として使われます。m-xyleneからは、可塑剤やポリエステル樹脂の原料であるイソフタル酸が得られるが、大半は、o-xylene や p-xylene に変化させて利用される。p-xylene は、テレフタル酸またはテレフタル酸ジメチルの原料に使用される。これらはともに、ポリエステル繊維やポリエステル樹脂の原料となる。なお、ガソリン等や灯油にも各異性体の xylene が含まれている。

### ■健康影響<sup>[3]</sup>

各混合体や他の異性体において毒性に大きな差はない。動物における急性毒性は比較的弱いですが、ヒトでは高濃度曝露による死亡例が報告されている。吸入及び経口による体内への吸収性は高く、主に中枢神経系の抑制作用を示し、大量あるいは長期曝露により肝臓及び腎臓の機能障害を生じる。また、眼、上気道、皮膚に対する刺激性を有し、反復及び長期接触により皮膚炎を生じる。

ヒト及び動物のいずれにおいても胎盤通過性を有し、実験動物では胎児毒性や催奇形性が認められるとの報告もある。ヒトにおいては妊娠中の曝露と新生児の先天奇形の関連性が疑われているものの、これらの症例の多くが様々な溶媒に曝露されていることから、xylene の催奇形性については明らかではない。変異原性はなく、ラット及びマウスによる発ガン性試験で陰性である。

Ethylbenzene

Synonyms: phenylethane, EB, ethylbenzol, ethyl benzene

CAS No.: 100-41-4

Molecular Weight: 106.16

Chemical Formula: C<sub>8</sub>H<sub>10</sub>

Vapor Pressure ( mm Hg): 10 at 20 °C

■環境中での挙動<sup>[3][4]</sup>

対流圏大気中での本物質の半減期は 5.5～24 時間と計算され、主な分解機構は OH ラジカルとの反応である。環境庁のモニタリングデータでは、水質及び低質に検出され、大気中のデータはない<sup>[5]</sup>。主にスチレンモノマーの原料として使われており、混合 xylene の中にも含まれる。2002 年度の PRTR データでは、環境中への排出量は約 40,000 トンである。主に事業所のほか、車の排気ガスに含まれて排出されたもので、ほとんどが空気中へ排出されている<sup>[1]</sup>。

■健康影響<sup>[3]</sup>

ethylbenzene は、ヒトで眼、鼻粘膜、呼吸器系への強い刺激性を示し、100 ppm 以上ではめまい、眠気、頭痛などの症状が見られている。実験動物では、吸入曝露よりモルモットで眼、鼻の刺激を示すほか、高濃度曝露で運動失調、意識消失、振戦、脳の充血、肺の充血などが報告されている。慢性影響については、ヒトでは赤血球数とヘモグロビン値が低値を示すことが知られている。発ガン性はヒトでは報告がないが、実験動物では、経口投与によりラットで悪性腫瘍総数の増加が見られている。

P-dichlorobenzene

Synonyms: 1,4-divhlorobenzene

CAS No.: 106-46-7

Molecular Weight: 147

Chemical Formula: p-C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub>

Vapor Pressure ( mm Hg): 0.6 at 20 °C

■環境中での挙動<sup>[3][4]</sup>

対流圏大気中での p-dichlorobenzene の半減期は 25～50 日と計算され、主な反応機構は PH ラジカルとの反応である。P-dichlorobenzene は、常温で固体の白色の固体です。空気中で、固体の状態から液体にならずに気化し、強い臭いを発します。衣類の防虫剤やトイレなどの防臭剤に使われています。防臭剤とは、脱臭剤（臭気を物理的作用で取り去ったり緩和したりする）や消臭剤（臭気を化学的作用などで取り去ったり緩和したりする）などとは異なり、臭いをほかの香りなどで隠すものとされています<sup>1)</sup>。つまり P-dichlorobenzene の場合、アンモニア臭などを、自ら発する臭いでわからなくする働きをもっているといえます。2002 年度の PRTR データによれば、約 18,000 トンが環境中へ排出されたと見積もられています。ほとんどが家庭から排出されたもので、ほとんどが空気中へ排出されました。



### ■健康影響<sup>[3]</sup>

人が P-dichlorobenzene を体内に取り込む可能性があるのは、主として呼吸によると考えられる。体内に取り込まれた P-dichlorobenzene は、主に血液や脂肪細胞、母乳中に分布する。体内で代謝され、5日以内に91～97%が代謝物として尿に含まれて排せつされる。ヒトの場合、血液、脂肪組織、母乳中へ分布する。また、実験動物において脂肪組織に長時間残存することがわかっている。急性曝露として、血色素減少症、小赤血球性貧血、メトヘモグロビン尿の発生が報告されている。中毒による死亡が報告されており、その例では症状として頭痛、下痢、言語障害、体重減少、黄疸が見られる。慢性曝露による影響としては、肝臓への影響が報告されている。ヒトにおいて1,4-dichlorobenzene に接触した結果、皮膚に赤色斑、紫斑、皮膚炎などが見られ、85 ppm 以上の気中濃度で眼への刺激、鼻への刺激が報告されている。変異原性については陰性を示す報告が多いが、実験動物において吸入曝露によりマウスに肝細胞腺種/癌、また経口投与でマウス、ラットに肝細胞腺種/癌、腎臓の腺癌が報告されている。ヒトでは曝露と発ガンの関連性を示唆する明確な証拠はない。

### Chlorpyrifos

Synonyms: diethyl3,5,6-trichloro-2-pyridyl phosphorothionate

CAS No.: 2921-88-2

Molecular Weight: 350.58

Chemical Formula: C<sub>9</sub>H<sub>11</sub>Cl<sub>3</sub>NO<sub>3</sub>PS

Vapor Pressure ( mm Hg): 2.025E-5

### ■環境中での挙動<sup>[5]</sup>

水生生物に対して毒性が非常に強く、人にとって重要な食物連鎖において、特に魚類、藻類で生物濃縮が起こる。有機リン系殺虫剤として使用され、農薬としての用途のほか、シロアリによる建物への被害を防止する目的で木材に塗布、浸透させる防蟻剤としての用途もある。

### ■健康影響<sup>[6]</sup>

体内への吸収経路：エアロゾルの吸入、経皮、経口摂取、吸入の危険性としては、20℃ではほとんど気化しないが、拡散や噴霧すると浮遊粒子が急速に有害濃度に達することがあるとされている。短期曝露の影響としては、神経系に影響を与え、痙攣、呼吸不全を生じることがある。コリンエステラーゼ阻害剤。許容濃度をはるかに超えると、死に至ることがある。これらの影響は遅れて現われることがある。医学的な経過観察が必要である。

Dibutyl phthalate

Synonyms: dibutyl 1,2-benzenedicarboxylate, phthalic acid dibutyl ester, 1,2-benzenedicarboxylic acid dibutyl ester, n-butyl phthalate

CAS No.: 84-74-2

Molecular Weight: 273.84

Chemical Formula: C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(COOC<sub>4</sub>H<sub>9</sub>)<sub>2</sub>

Vapor Pressure ( mm Hg): 0.1

■環境中での挙動<sup>[18]</sup>

油状の液体で、塩化ビニル、酢酸ビニル、ニトロセルロース、メタクリル酸樹脂等の可塑剤として用いられ、その製造や使用、プラスチックの焼却などによって、大気中に放出されたり、排水に混入したりして環境中に出る。水中に放出されると、中程度の速さで水中の堆積物や粒子に吸着される。中程度の汚れた水の中では3～5日で、よりきれいな水の中では通常3週間くらいで分解されてなくなる。魚類体内で新陳代謝されやすく、生物濃縮性はない。

大気中に放出されると、大気中の粒子状物質と結びつき、重力によって降下する。ガス状のフタル酸ジ-n-ブチルは、光化学反応で生成したヒドロキシ・ラジカルと反応して分解される（半減期は18時間と推定される）。人体の曝露は大気、飲料水、食物及び労働環境からである。良分解性で、濃縮性は低い。

■健康影響<sup>[18][19]</sup>

動物実験による、亜急性～慢性毒性実験では、成長抑制、精巣萎縮等が報告されている。工場等における短期曝露では、目、皮膚、気道に刺激、消化管への影響が報告されている。反復または長期間の接触により皮膚炎を起こすことがある。

Tetradecane

Synonyms: n-tetradecane

CAS No.: 629-59-4

Molecular Weight: 198.39

Chemical Formula: C<sub>14</sub>H<sub>30</sub>

Vapor Pressure ( mm Hg): 1 at 76.4 C

■環境中での挙動<sup>[19]</sup>

tetradecane は工業的に灯油留分をさらに生成して生産されている。従って灯油は主要な発生源になりえる。また、塗料の溶剤等にも使用されている。

■健康影響<sup>[19]</sup>

中毒の情報はあまりないが、高濃度では刺激性で麻酔作用があるとされる。皮膚に直接ついた場合、皮膚の乾燥、角化、亀裂を生じることがある。衣服についてそれが長時間皮膚に接触したような場合には接触性皮膚炎を起こすことがある。

## 2.3. 放散源

### 2.3.1. 建材・生活用品

室内化学物質の中でも最も注目されているのが、常温で揮発する有機化合物の総称である揮発性有機化合物(以下 VOCs: Volatile Organic Compounds)である。構造材や内装材、塗料、家具、生活用品等様々な製品から放散される。Table3~6に室内化学物質の放散源について示す<sup>[10]</sup>。

塗料やマニキュア、除光液、スプレーなど多くの消費者製品は室内 VOCs 汚染の放散源となっている。特に女性などは、十分な換気もせずに様々なヘアスプレーなどを使用することが多い。多くの化学物質についてはそれほど重大な反応を起こさないと考えられるが、稀に殺虫剤などに高濃度曝露してしまった場合などには危険性が高いと考えられる。これらの被害を防ぐためには、安全な代替品の使用、十分な換気、必要最低限の量の使用、といった方法が考えられる。上記以外にも、殺虫剤や芳香剤、家具、カーペット、カーテンなどの生活用品からも化学物質が放散されている。さらに、私たちの身の回りには延べ数百種類もの有機溶剤があり、その多くは揮発性が高い。また、単一の物質への曝露というのはいままでのこと、一般的には混合物質に曝露している。またその多くは揮発性が高い。

人体への影響については、混合物の曝露と単一物質の曝露の双方から研究する必要があると考えられる。従来は強度や耐久性などの規定が重視されていた建築材料の規格において、今後環境安全性などの規定が充実されることが期待される。

### 2.3.2. 自然由来の汚染物質

海外における著名な室内汚染物質の1つにラドンが挙げられる。放射性物質であるラドンは、減衰の過程で $\alpha$ 線や $\beta$ 線、ガンマ線を放出し、DNAに損傷を与える。Radon-222は、岩石や土壌中に存在する uranium-238が起源である。Uranium-238は極めて複雑な減衰反応を通じ、radon-222となる。大気中のラドン濃度は0.1~0.4 pCi/L(pCi=picocurie, 放射能の単位)であるが、室内においては平均1.3 pCi/Lとなっている。EPAは、室内ラドン濃度が4 pCi/Lを超えた際には、速やかに何らかの低減措置をとるよう推奨しており、アメリカの住宅約600~800万世帯がこの値を超えているであろうといわれている。Radon-222の半減期は3.8日であるため、肺に吸い込んでも崩壊するまでに再び排出される。しかし、土壌やゴミなどに混入した半減期の早い polonium-218などラドンの娘元素を吸い込むことで、ガンなどを引き起こしてしまう。

ラドンは空気のみならず、飲料水を介して曝露することも多い。EPAは、水中のラドンの最大許容濃度を300 pCi/Lとしている。ここで、例えば300 pCi/Lの水が10000 Lあったとすると、その際に室内ラドン濃度の上昇は0.03 pCi/L程度である。元々の室内濃度が1.3 pCi/Lだったとすると1.33 pCi/Lに上昇するだけなのであるが、EPAにより、水中ラドンが室内に放出されることにより、毎年ガンによる死亡者数が192人増加すると見積もられている。しかし、アメリカ以外にもイギリス、ドイツなどでも室内において高濃度でラドンが検出されているにもかかわらず、ラドン曝露によるガンのリスクというのはいままで重要視されていないのが現状である。

Table3 塗料から放散される化学物質

材料	有機化合物
合成樹脂ペイント	トルエン、キシレン、トリメチルベンゼン、ケトン系、ミネラルスピリット(デカン)
ラッカー	トルエン、キシレン、アルコール類、エステル類、ケトン類
非水分型塗料	ミネラルスピリット(デカン類)
ビニル樹脂系	キシレン
2液ウレタン系	トルエン、キシレン、エステル類、ケトン類
シーラー系	トルエン、キシレン、エステル類、ケトン類
植物油系	脂肪族炭化水素系、オレンジオイル、ピネン
セラック系	アルコール類
化石樹脂系	トルエン、キシレン、アルコール類
エマルジョン系	アルコール類、グリコール類
水溶性型	アルコール類、グリコール類

Table4 接着剤から放散される化学物質

材料	有機化合物
ゴム溶剤系	トルエン、ノルマルヘキサン、酢酸エチル、シクロヘキサン、ケトン類
酢酸ビニル溶剤系	アセトン、エステル類、アルコール系
合成デンプン系	防腐剤(ホルムアルデヒド)
尿素系	ホルムアルデヒド
その他	アセトン、メタノール、可塑剤、石油ナフサ、防腐剤、トルエン

Table5 生活用品から放散される化学物質

材料	有機化合物
洗剤	ホルムアルデヒド、トルエン
塗料及び関連製品	トルエン
化粧品類	ホルムアルデヒド
自動車用品	トルエン、キシレン
趣味用品など	トルエン、キシレン、ホルムアルデヒド、可塑剤(DEHP)
家具、衣類	ホルムアルデヒド
開放型燃焼機器等	ホルムアルデヒド
タバコ	ホルムアルデヒド

Table6 建材から放散される化学物質

材料	有機化合物
ビニルクロス可塑剤	フタル酸エステル、リン酸トリクレシル
ビニルクロス等壁紙	リン酸トリステル系
雑誌加工剤	
木工用接着剤	酢酸ビニル、アクリル(モノマー)、可塑剤、ホルムアルデヒド
床ワックス	トルエン、キシレン、トリメチルベンゼン、トリエタノールアミン
畳防虫剤	ナフタリン、フェニチオン、フェニトロチオン
木材防腐剤	クロルピリホス、クレオゾート、オキシムピレスロイド、キシレン、アレスリン、フェニトロチオン、フェニチオン、マラチオン、ダイアジノン
クレオゾート	1,1,1-トリクロロエタン、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、デカン、ウンデカン、ナフタリン、ナフタリン系化合物、ジベンゾフラン等
断熱材	フロン11、ジクロロメタン

### 2.3.3. 居住者の行動

喫煙は、居住者の健康リスクに大きな影響を与える。タバコの煙には、粒子や一酸化炭素、benzene、formaldehyde、Cd、Pb など、多くの化学物質が含まれており、ヘビースモーカーの場合、近くに燃焼機器を使用しているのと同じようなものである。特に子供が喫煙者と同居している場合は、注意すべきである。喫煙による発ガンリスクの上昇はよく知られているところであるが、喫煙は、ガンのみならず心疾患やその他の疾患のリスクをも上昇させる。また、喫煙後のくすぶりは、喫煙時よりも CO<sub>2</sub> を多く出すため、喫煙後は完全に火を消すべきである。喫煙のみならず、灯油を用いたストーブや乾燥機が一酸化炭素や一酸化窒素を出すように、その他燃焼機器も室内汚染源となりえる。燃焼機器使用時の高温状態により、酸素と窒素が反応し、目や鼻、喉の痛みなどの症状、あるいは喘息の原因となる窒素酸化物を生成するため、注意が必要である。また、燃焼機器から排出される粒子状物質にも注意すべきである。

1991年には、閉鎖空間における一酸化炭素中毒によりアメリカで594人が死亡している。さらに、一酸化炭素は無色無臭であるため、例え低濃度であっても頭痛や吐き気などの症状が引き起こされてしまうため厳重な注意が必要である。こういった事態を避けるため、消費者製品安全委員会 (Consumer Product Safety Commission) は、一酸化炭素検知器の導入を進めている。

また、室内と連続している場所に車庫を持っている住宅においては、自動車の排気ガスによる室内空気汚染が問題となっている。自動車の排気ガスには、一酸化炭素に加え、Benzene や formaldehyde など発ガン性のある物質も含まれている。

### 2.3.4. 湿気

湿気は室内においてカビや細菌、バクテリアを繁殖させる原因となる。カビなどから発生する微粒子は呼吸時肺に入り、呼吸疾患を悪化させる。湿気は、空調不良や換気不足、冷蔵庫などが要因で発生する。その他、屋根裏などにおいて、外気温で冷やされた壁付近に室内の暖かい空気が触れ、冷やされることにより結露が発生することも多い。室内湿度の推奨値としては30%から50%の範囲が良いといわれているが、室内の湿度が30%を越えてしまうと細菌や微生物は繁殖してしまう。そのため、夏期に関しては、必然的に高湿度となってしまうものの、もし室内が非常に乾燥した状態にある場合、蒸気発生装置などを使用するよりは水分補給を行った方が衛生的には良いと考えられる。

### 2.3.5. 室内における反応

この他にも、室内中における化学物質の反応によって、健康影響が懸念される物質が生成されることがわかっている。こうした室内中の反応について、Fanら<sup>[7]</sup>は、25m<sup>3</sup>のCEF(Controlled Environmental Facility)中で23種混合VOCsとオゾン・テルペン類の反応について実験を行ったところ、VOCsのみを投入した際は何の変化も見られなかったのに対し、VOCsに40ppbのオゾンを加えたところ、アルデヒド類や有機酸等のガス状物質及び粒子状物質の生成が確認された。一方、混23種混合VOCsからテルペン類を除いた21種混合VOCsとオゾンを反応させたところ、23種の反応生成物はほとんど確認できなかった。さらに、オゾンとテルペン類を反応させたと

ころ、23種と同様の結果となったことから、オゾンとテルペン類の反応によって、室内にカルボニル類や有機酸などの物質が生成されている可能性を指摘している。

## 2.4. 公定法

厚生省が通知した室内大気中の formaldehyde 等のカルボニル類サンプリン方法では、対象住宅を新築住宅と居住住宅の2つに分け、それぞれ異なるサンプリン手順がとられている。新築住宅においては、30分換気後5時間以上密閉し、30分採取という方法がとられ、既築の住宅の場合は、平常時における化学物質の濃度や曝露量を推定することを目的とし、24時間サンプリンを行うこととされている。また、新築の場合は、一日のうち、最大濃度となるのは午後2~3時であることから、サンプリン時刻は午後2~3時が望ましい。

採取場所は、居間、寝室、屋外が基本であり、部屋の中央付近で、壁から1m以上離れた、高さ1.2~1.5mの位置で行うことが望ましいとされている。また原則として2回ずつ採取し、測定平均と測定値の間に開きがある場合には欠測扱いとすることとされている。記録事項は、建物種別、規模、建築年数(竣工年月日、引渡し日時)、改修の有無、気温、湿度等である。

## 2.5. 既往の研究

### 2.5.1. 室内化学物質と温湿度

一般的に、化学物質の放散量は温度が上昇すると増加する。

佐藤ら<sup>[8]</sup>は、内装工事中の VOCs 濃度を把握するために、RC造集合住宅を対象に、各内装工事施工段階において室内に揮散する化学物質濃度等の24時間連続測定を行い、工程ごとに、芳香族・脂肪族、蒸散支配型・拡散律速型などに分類し考察した。その結果、完成後最も多量に検出されたのはメチルアルコールだった。また、styreneが断熱材より常時放散されつづけた。さらに、formaldehyde、acetaldehydeなどのカルボニル化合物は親水性であるため湿度が高いと凝縮してしまう可能性を指摘している。

桑沢ら<sup>[9]</sup>は、戸建住宅における実測調査を行った結果、気温とTVOC濃度に高い相関があることを報告している。また、温度を20℃以下に抑えれば比較的低濃度の状態となることや、絶対湿度は気温ほどではないが濃度との相関が見られることを報告している。

### 2.5.2. 室内化学物質の放散量

Brownら<sup>[10]</sup>はチャンバーを使用して家具やパーティクルボードから放散する formaldehyde と VOCs の放散量を長期間連続測定した。その結果、formaldehyde の放散量は数ヶ月では減衰しないことがわかった。また、パーティクルボードや家具からの VOCs の放散量は比較的早く進み、約2週間程度で減衰したことが報告されている。

田辺ら<sup>[11]</sup>も、室温、換気量調節可能な実大モデルルームにおいて、施工終了後からカルボニル及び VOCs の気中濃度測定及び F L E C を用いた床壁天井の放散速度測定を行っているが、Brownらと同様、VOCs は3日程度でかなり減衰が進んだものの、formaldehyde 及び acetaldehyde の放散速度は遅いことを報告している。

内山ら<sup>[12]</sup>は、竣工直後の室内空気汚染を検討するために、新築住宅における HAPs 濃度を、入居前から入居後半年間にわたって測定した。その際、拡散サンプラー（DSD サンプラー）用い、多点測定を行い、また、FLEC を用いて放散源の特定も行った。その結果、入居前の時点では、formaldehyde、toluene、acetone、CFC-11（断熱材の発泡剤）の濃度が際立って高いということ、そして、入居後は formaldehyde 濃度が一旦下がるが、竣工後の夏に再び上昇するという傾向が見られたことを報告している。

Clarisse ら<sup>[13]</sup>がパッシブサンプラーを用いて、61 軒の住宅 3 部屋（Kitchen, Living, bedroom）で 6 種のカルボニル(formaldehyde, acetaldehyde, propionaldehyde, benzaldehyde, pentanal, hexanal)の測定を行ったところ、1 年以内に床貼り替えを行っている場合は formaldehyde 及び pentanal に影響を及ぼすこと、1 年以内に壁紙の貼り替えを行っている場合には、pentanal, hexanal 濃度に影響すること、特に半年以内の壁紙の貼り替えはアセトを除く全ての aldehyde に影響を与えること、喫煙によって acetaldehyde, pentanal, hexanal の濃度が上昇すること、平均二酸化炭素濃度の上昇が acetaldehyde, pentanal, hexanal 濃度の上昇と関連していること、温度の上昇はカルボニルを除く全てのカルボニルに影響したが、湿度との関連は見られなかったこと、壁や、床の違いによって大きな差異は見られず、建材の量や材齢も影響しなかったことなどを報告している。

### 2.5.3. 室内化学物質と居住者

山口ら<sup>[14]</sup>は、新潟県の各地域における木造住戸を対象とし、アンケート、室内化学物質濃度調査、シェルター性能の測定を行い、住まい手の意識と室内の化学物質による汚染の程度の間関係を明らかにすることにより、汚染質の濃度がどのように変化するかを捉え、今後の住環境の向上を促すための資料を得ることを目的とした調査を行っている。化学物質濃度とアンケート項目の累積頻度の関係をみたところ、①室内空気質への関心は高まっている②気密性能が向上すると室内の formaldehyde 濃度が高くなる傾向がある③築年数が長い場合には formaldehyde 濃度は低くなる傾向④toluene 濃度はワックスを使用していると高くなる傾向⑤p-dichlorobenzene は殺虫剤を使用している方が同じ累積頻度の際に高い傾向⑥TVOC は窓を開けているほうが開けていない時よりも低い傾向⑦クロス集計より、住まい方も室内空気質に大きな影響を与える、といった結果を報告している。

佐武ら<sup>[15]</sup>は、夏期、居住されている住戸では、窓を開けるか、または室温を冷房することによって室温を調整している。夏期の居住時を想定して、冷房時の VOC 濃度及び放散量の測定を行ったところ、toluene 濃度の影響因子を重回帰分析したところ、閉め切り時間と共に 30 分前の床温度と日射量の影響度が大きい結果となっている。

### 2.5.4. 室内化学物質の季節変動

Rehwagen ら<sup>[16]</sup>はドイツにおいて 1994 年から 2000 年まで、室内及び屋外の濃度測定が行われた。この研究では、室内の季節変動及び長期間の濃度の変動を調査している。（1499 軒の indoor 及び 222 点の outdoor）7 年間の各月間変動を調査したところ、1 月に高濃度となり、6 月に低濃度となる傾向が見られた。ベンゼンは、大気中濃度が下がると共に室内ベンゼン濃度も低下した。

### 2.5.5. 室内化学物質低減手法

Shaw ら<sup>[17]</sup>は、4軒の住宅のリフォーム前とリフォーム後で VOCs の濃度、換気量などを比較している。うまくいった住宅としては、カーペットを取り除くことで VOCs を抑制できた例、一方で、カーペットを除いたところで抑制できない例もあったことを報告している。



## [参考文献]

- [1] 室内空気中の化学物質濃度の実態調査結果, (財)住宅リフォーム・紛争処理センター, <http://www.chord.or.jp/>
- [2] 独立行政法人製品評価技術基盤機構「自動車に係る排出量」  
<http://www.prtr.nite.go.jp/prtr/pdf/estimation13/toe13sba10-16.pdf>
- [3] 環境省, 化学物質ファクトシート, <http://www.env.go.jp/chemi/communication/>
- [4] (財)化学物質評価研究機構「既存化学物質安全性 (ハザード) 評価シート」  
<http://qsar.cerij.or.jp/>  
[http://www.cerij.or.jp/ceri\\_jp/koukai/date\\_sheet\\_list/list\\_sideindex\\_cot.html](http://www.cerij.or.jp/ceri_jp/koukai/date_sheet_list/list_sideindex_cot.html)
- [5] Environmental Information & Communication Network, <http://www.eic.or.jp/index.html>
- [6] 国際化学物質安全性カード, <http://www.nihs.go.jp/ICSC/>
- [7] Zhihua Fan, Pul Liroy, Charles Weschler, Nancy Fielder, Howard Kipen and Junfeng Zhang, Ozone-Initiated Reactions with Mixtures of Volatile Organic Compounds under Simulated Indoor Conditions, *Environmental Science & Technology*, 37, pp.1811-1821, 2003.
- [8] 佐藤重幸他, 内装工事中の VOCs の放散推移, *日本建築学会計画系論文集*, 564, pp.99-106, 2003.
- [9] 桑沢保夫他, 健康的な居住空間形成技術の開発 第五報 室内空気質調査結果の VOC 濃度に関する検討, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, pp.737-734, 2000年9月.
- [10] S.K.Brown, Chamber Assesment of Formaldehyde and VOC Emission from Wood-Based Panels, *Indoor Air*, 9, pp.209-215, 1999.
- [11] 田辺新一 他, 実大モデルルームを用いた室内化学物質汚染に関する研究, *空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集*, pp.701-704, 2001.
- [12] 内山茂久他, 新築集合住宅における揮発性有機化合物の挙動と発生源の推定, *日本建築学会計画系論文集*, 547, pp.75-80, 2001.
- [13] B.Clarisse, et al., Indoor aldehydes: measurement of contamination levels and identification their determination in Paris dwellings, *Environmental Research*, 92, pp.245-253, 2003.
- [14] 山口一他, 木造住宅を対象とした居住者意識と室内化学物質濃度・シェルター性能に関する研究, *日本建築学会計画系論文集*, 554, pp.15-20, 2002.
- [15] 佐武良祐 他, ホルムアルデヒドの少ない建材を使用した集合住宅における濃度の実態 その3 夏期冷房時の VOC 濃度と放散量, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, pp.921-922, 2001
- [16] M. Rehwagen, et al., Seasonal cycle of VOCs in apartments of VOCs in apartments, *Indoor Air* 13, pp.283-291, 2003.
- [17] C.Y.Shaw, V.Salares, R.J.Magee, M.Kanabus-Kaminska, Improvement of indoor air quality in four problem homes, *Building and Environment*, 34, pp.57-69, 1999.
- [18] 神奈川県環境科学センター環境ホルモン情報集, <http://www.k-erc.pref.kanagawa.jp/hormone/sheet/019.htm>
- [19] 室内空気中化学物質についての 相談マニュアル作成の手引き, <http://www.hokenkai.or.jp-8-PDF-8-18.pdf>

## 第3章 換気

## 3.1. はじめに

換気とは室内空気環境を衛生的に維持することを目的とし、“常に、出入り口を明確にして、必要な量の新鮮な量の空気を取り入れ、汚染空気を排出する”ことである。従って、換気は室内汚染物質低減につながるが、省エネルギーの観点からは換気による熱損失をできる限り抑えなければならないため、やたらに換気を行えばよいというものでもない。

古くからの日本の住宅は隙間が多い構造で、特に換気を意識する必要はなかった。しかし、一連のシックハウス問題を受け、あらためて換気の必要性が提起されつつある。ところが、国内の換気に関する現状はといえば、その手法や選択方法、定量方法が整備されているとは言いがたく、今後の対応が待たれる。

住宅の換気量は主に

- ① Basic Ventilation(漏気+自然換気量)
- ② Occupant Ventilation(居住者による換気量)

の二つに分類することができ、実際に換気量として算出されるのはこの2つの換気量の和(Total Ventilation)である。概念図を Fig.1 に示す。

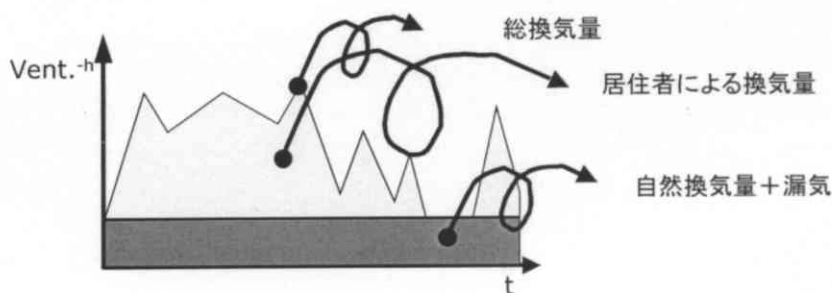


Fig.1 換気概念図

3.2. Basic Ventilation <sup>[1]</sup>

Basic Ventilation は住宅の換気量のベースとなる部分であり、漏気及び自然換気がこれにあたる。この漏気・自然換気に大きく影響するのが住宅の持つ気密性能である。

気密性能とは、その建物がどの程度気密であるか、または、どの程度隙間があるかを示す住宅性能の一つであり、床面積あたりの隙間相当量[ $\text{cm}^2/\text{m}^2$ ]で表される。従って、気密性能は Basic Ventilation と深く関わる部分である。気密性能は、同じ建物でも年をとるにつれ、あるいは季節によって変化する。これは、温度や湿度の影響で構造材が膨張伸縮するからである。従って、湿気の多い夏は隙間相当量が減り、冬場は増加することとなる。

自然換気は主に“風” “温度差”の2つの要因によって起こる。“風”によるものは風上から侵入し、風下から出て行く圧力差が生じる。同様に室内外の“温度差”が増えれば増えるほど空気の比重に差ができるため、1階から入り2階から出て行く圧力が作用する。従って、気密性能が低ければ低いほど漏気・自然換気量は増えるため、寒冷な地域の方が温暖な地域よりも温度差換気の影響は大きくなる。

これに関し、趙ら<sup>[2]</sup>は、モデル住宅の条件、外部環境、換気方式の条件を組み合わせた20000ケースに対して換気計算を行い、その結果に基づき経験式と統計解析によって換気方式別の簡易予測法を開発している。換気計算はモデル住宅の条件、外部環境、換気方式の条件を組み合わせた20000ケースに対してCOMISモデルを用いて行われた。その結果、当然のことながら室内温度差 $\Delta T$ や外部風速 $U$ の増加に伴い換気量は増大した。また、建物の気密性能 $\alpha A'$ が大きくなると換気量が増えることも明らかであり、換気量は気密性能、室内外温度差に比例し、風速の2乗に比例すると報告している。

### 3.3. Occupant Ventilation<sup>[1]</sup>

換気量を測定する際、それが自然換気量であるのか、機械換気システムによるものなのか、居住者によるものなのか、あるいは建物全体の換気量であるのか、といった定義はこれまであまり明確にされてこなかった。Kvisgaardら<sup>[3]</sup>は、28軒の住宅について居住者が存在する状態で換気量の測定を行い、Basic Air Change、User-Influenced Air Change、Total Air Changeに分類し各々の換気量について述べている。一定濃度法(SF<sub>6</sub>) 5ppmで部屋中央部の換気量を測定。約2時間のBasic Air Change測定を行ったところ、住宅によって換気量は0.2回/hから1.56回/hまで大きく差があったことから、居住者による換気率への影響は大きく、平均63%程度を占めていることがわかった。また、この調査では温度による換気量への影響は見られなかったと報告している。

### 3.2. 必要換気量

必要換気量の算出に用いられている室内CO<sub>2</sub>濃度1000ppmという基準は、例えばASHRAE Standard<sup>\*1</sup>においては、人から放散される様々な汚染物質(臭い、CO<sub>2</sub>、VOCs、粒子状物質等)に着目し、健康影響を考慮するというよりもむしろ密室にいる人の約80%が臭氣的に満足するという量=(人ひとりあたりに一時間に8リットルの外気)を供給するところから計算されている。そして、一般的に、室内汚染物質の濃度がどの程度であれ、定常状態になるまでの時間を決定するのはその居室の換気率である。そこで、放散量が呼気濃度、屋外濃度=400ppm、室内濃度=1000ppm、居住者1名と設定した場合の一人あたりの必要換気量は式1より算出することができるため、これが、今日一般に使用されている一人あたりの必要換気量の根拠となっている。そして、日本のみならず先進国には、それぞれ必要換気量の基準が存在する。その規定の内容は様々であるものの、多くの国で住宅全体の換気率は0.5/hr程度である。改正前の建築基準法における必要換気量は、換気に有効な開口部の大きさの規定(床面積の1/20)と機械換気による場合における在室者一人あたりの必要換気量(20m<sup>3</sup>/h)から計算されていた。しかし、2003年に建築基準法が改正になり、原則として全ての建築物に機械換気設備の設置を義務付けることとなっ

た。守らなければ違法となり、無理やり建てると罰金 30 万円が課せられる。これは、シックハウス問題に関連し、特定の化学物質の濃度を抑制するための追加対策が必要であると判断されたため、対象となった物質は formaldehyde 及び chlorpyrifos である。formaldehyde に関しては建材

Table1 建材の使用制限

建築材料の区分	ホルムアルデヒドの 放散量	JIS・JASなどの表示 記号	内装仕上げの制限	換気回数と使用可能面積	
				0.5回/h	0.7回/h
建築基準法の規制対象外	少ない	F☆☆☆☆	制限なしに使える		
第3種ホルムアルデヒド発散建築材料		F☆☆☆	使用面積が 制限される	2Aまで	5Aまで
第2種ホルムアルデヒド発散建築材料		F☆☆		0.3Aまで	0.8Aまで
第1種ホルムアルデヒド発散建築材料		F☆	使用禁止		
	多い				

の放散量レベルと換気量に合わせて使用面積の制限が設けられ、chlorpyrifos については使用禁止となった(Table1)。機械換気義務付けの根拠は、冷房使用が多く、窓が閉鎖される夏季においては、居室床面積の 1/20 の開口部では自然換気量が見込めないと判断されたからである。

### 3.3. 換気量測定方法

#### 3.3.1. はじめに

換気は、室内化学物質汚染の対策として有効であり、情報提示により最も影響を受けやすい因子の1つであることから、本調査では測定対象とする。換気は、1時間の流入外気量を示す換気量( $m^3/hr$ )や、1時間あたりの対象空間の空気が入れ替った回数を示す換気回数(1/hr)で表される。改正建築基準法が施行され、建築物の居室には原則として機械換気設備の設置が義務付けられることとなった現在、設置された換気設備の性能試験については現段階では義務付けられていないが、今後様々な機会に換気量測定が必要となることが予想される。また、これまでは住宅のある期間における総換気量が最も有効な換気量として測定が行われてきたが、日常の換気量というのは変動が大きく、特定の期間がその住宅の換気量を代表しているとは言いがたい。このように、これまでの住宅の換気量の定義というのは非常に曖昧な状態である。そこで、今後は居住者が換気量を知りたいと考えた際に、それぞれの目的にあった換気量を簡易に測定できる方法が必要であると考えられる。

#### 3.3.2. トレーサーガスを用いた換気量測定方法<sup>[4]</sup>

トレーサーガスを用いた換気量測定方法は、単一ゾーン(トレーサーガス濃度分布が均一に維持され、外部との間のみで空気が交換されるゾーン)とみなすことができる空間を対象とし、対象空間にトレーサーガスを撒き、その平均濃度や濃度変化から換気量を求めるものである。その適用範囲は、閉鎖された空間内で、通風のような大量の空気交換がない場合、且つ、空間内の空気の瞬間完全混合を仮定している。通風のような大量の空気交換が生じている場合、トレーサーガス濃度に分布が生じると共に、時間的にも大きな変動があるので、基本的には対象にはしない。

換気量測定方法には主に、濃度減衰法(concentration decay method)、連続発生法(continuous dose method)、一定濃度法(constant concentration method)に分類することができる。

共通して適用される基礎方程式は(1)で表せる。

$$\frac{dV_{gas}(t)}{dt} = m(t) - C_E(t)Q(t) \quad \dots(1)$$

ここで、

$V_{gas}(t)$ : 時刻  $t$  に対象空間に滞留しているトレーサーガス量 [m<sup>3</sup>]

$t$ : 時刻 [h]

$x$ : 空間位置

$Q(t)$ :  $t$  における排気風量 [m<sup>3</sup>/h]

$C_E(t)$ :  $t$  における平均排気濃度 [-]

$m(t)$ :  $t$  におけるトレーサーガス発生量 [m<sup>3</sup>/h]

#### 濃度減衰法

測定開始時点で測定対象ゾーンにトレーサーガスを供給し、その後の濃度減衰データから換気量・換気回数を計算する。室内空気の攪拌等により一様分布とした場合、あるいは平均排気濃度の正確な測定が可能である場合には、測定点を1点とすることができる。1度の測定で消費するトレーサーガス量は少なくすむが、長時間の測定は一般的に困難である。

#### 連続発生法

測定対象ゾーンに連続的にトレーサーガスを発生させ、その発生量と濃度データから換気量を算出する。トレーサーガス発生状態状態で室内濃度が一様であることを要求する測定法を用いる場合、濃度の一様性確認のため、複数点による測定が必要となる。発生させるトレーサーガス量は増えることとなるが、長時間に及ぶ測定も可能である。

#### 一定濃度法

測定対象ゾーンの濃度を常時一定とするためにトレーサーガス供給量を制御し、その供給量から換気量を求める手法である。ゾーン内の空気が一様混合でない場合も、多数のトレーサーガス供給点と測定点を設けることによって室内濃度分布を一様にするすることができる。しかし、装置立が大掛かりとなるという欠点がある。

### 3.3.3. トレーサーガスについて

換気量を測定するためのトレーサーガスとして主に、“He” “CO<sub>2</sub>” “SF<sub>6</sub>” “Per fluorocarbon(PFC)” “C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>” “N<sub>2</sub>O” などが使用される。このうち、CO<sub>2</sub>は大気中に存在し、且つ人間の呼気からも大量に発生するために居住者が室内に存在する状態での使用は困難である。そのため最近では不活性ガスであり毒性が低く、且つ、大気中に存在しないSF<sub>6</sub>やPFCがトレーサーガスとして持ちられることが多いが、これらは温暖化係数(Global Warming Potential)が非常に高く(Table2)、大量の使用は控える必要がある。

Table2 温暖化係数

温室効果ガス	地球温暖化係数※	用途・排出源
二酸化炭素(CO <sub>2</sub> )	1	化石燃料の燃焼など
メタン(CH <sub>4</sub> )	21	燃料の漏洩、農業・畜産など
一酸化二窒素(N <sub>2</sub> O)	310	燃料の燃焼など(特に自動車)
ハイドロフルオロカーボン(HFC)	百数十～1万程度	スプレー、エアコン・冷蔵庫の冷媒など
パーフルオロカーボン(PFC)	数千～1万程度	溶剤、半導体製造など
六フッ化硫黄(SF <sub>6</sub> )	23,900	電気絶縁ガスや半導体製造など

### 3.4. 既往の研究

#### 3.4.1. はじめに

現在換気は、多くの住宅、オフィス、商業施設等において、好ましい空気質を保つために行われており、日本においては室内汚染対策として住宅の24時間機械換気設備の設置が義務付けられることとなっている。一方で、歴史的な観点から見ると、換気は居住者の快適性を保つためや、居住者由来の臭いをコントロールするために行われていた<sup>[5]</sup>。そして、CO<sub>2</sub>は室内の換気状況を良く示す指標のうちの1つである<sup>[6]</sup>。そのため、近年、CO<sub>2</sub>を指標とした換気のコントロール(Demand control Ventilation(DCV))が広く研究されてきている<sup>[7][8]</sup>。

#### 3.4.2. 居住環境中の室内CO<sub>2</sub>濃度

##### CO<sub>2</sub>濃度と健康

オフィスのような人が多く集まる場所における室内環境は、就業者の作業効率に大きな影響を与えると考えられる。Milton<sup>[8]</sup>らは、オフィスにおいて、高い換気率と低い換気率のフロアの短期病欠割合の比較を行ったところ、換気率が低いと、一人あたりの年間病欠日相対リスクが約1.53倍(1.22日⇒1.92日)になると報告している。

##### オフィスにおける実測調査例

Chuahら<sup>[9]</sup>は、オフィスのCO<sub>2</sub>、formaldehyde濃度を4日間に渡りモニターし、同時に換気率も測定を行った(SF<sub>6</sub>濃度減衰法)。その結果、CO<sub>2</sub>の濃度は窓を閉め換気率が低下すると同時に1800ppmまで上昇するが、任意の開け閉めによって600-800ppmに保たれていることがわかった。これに対し、formaldehyde濃度は、労働時間帯(在室時)低く、夜間急激に上昇していることが示唆されている。

#### 3.4.3. 学校におけるCO<sub>2</sub>濃度

##### CO<sub>2</sub>濃度と健康

住宅やオフィスのみならず、学校でも問題となる室内汚染は、教室における換気や出席率、生徒の行動にも影響を与える可能性がある。Shendellら<sup>[10]</sup>は、室内環境が学生の出席、健康、行動にどの程度影響を与えるのかを調べることを目的に、ワシントンとアイダホの434教室において上昇分のCO<sub>2</sub>濃度(外気濃度を差し引いたもの)、助成金等の有無、学年、校舎のタイプ、学校の場所、民族の割合を独立変数として多変量解析を行った。その結果、CO<sub>2</sub>濃度が1000ppm増加

すると、年間出席率が 0.5-0.9%低下すると報告している。また、Myhrvold ら<sup>[11]</sup>は、スイスの学校における CO<sub>2</sub>濃度(<1500 と 1500-4000ppm)と、生徒の①頭痛・不快臭・疲労感、②咳・喉・鼻水などの健康状態の関係を統計解析したところ、CO<sub>2</sub>濃度が高い群では咳・喉・鼻水系の症状を訴える生徒が多いこと、さらに、パフォーマンステストの成績も落ちることが報告されている。このように CO<sub>2</sub>濃度が高い状況では学生の健康状態に何らかの影響を与えている可能性が示唆されている。

#### 学校における実測調査例

Lee ら<sup>[12]</sup>は、香港の学校の教室（5 教室/各 40 名程度）において、CO<sub>2</sub>・SO<sub>2</sub>・NO・PM<sub>10</sub>・formaldehyde の濃度の同時モニタリングを行った。その結果、どの教室においても CO<sub>2</sub>濃度は最大 2000ppm にまで達し、最大で 5600ppm にまで達する教室も存在した。また、同時に外気由来である PM<sub>10</sub>による汚染も確認されていることから、大気が汚染されている地域においてはフィルターを取り付けるなどの対策の必要性が示唆される。また、合原ら<sup>[13]</sup>は、小学校の普通教室において開口部開閉状況と換気扇使用状況を調査すると共に、CO<sub>2</sub>濃度、換気回数及び室温の測定を行った結果、夏季は窓開けにより CO<sub>2</sub>濃度は概ね 1000ppm 以下に保たれていたものの、冬季は開口部を開けないために CO<sub>2</sub>濃度が 2000ppm を超過した(1.52/hr)。しかし、開口部を全て閉じた状態で換気扇 2 台を回すことで、換気率は 3/hr となり、大きな室温低下も防げたことが報告されている。

#### 3.3.4. 室内環境のモニタリング —換気と室内化学物質—

Stuart ら<sup>[14]</sup>は、オフィスにおいて TVOC 濃度と CO<sub>2</sub>濃度をモニタリングし、日常的な濃度変化を調査、既往の文献との比較を行った。その結果、TVOC と CO<sub>2</sub>の濃度には相関が見られ、特に平日における職員勤務時間帯(昼間)に TVOC が高濃度になる傾向があることを明らかにした。TVOC の濃度上昇の原因としては、在室者の行動(コピーなど)による影響が大きいとされている。一方で、Hodgson ら<sup>[15]</sup>は、コールセンターにおいて換気率、CO<sub>2</sub>、VOCs 濃度のモニタリングを行っている。その結果、人間の呼気由来の物質と考えられる CO<sub>2</sub>及び isoprene の濃度は、換気量と放散量とのマスバランスが一致し、建材由来の acetaldehyde、hexanal なども換気率が低下すると共に濃度が上昇するなど、換気が濃度に直接影響を与えていることを示すデータが得られた。一方で、検出された全ての物質で、換気率と濃度に明確な関係が見られたわけではないことも述べられている。

#### 3.3.5. 居住者による換気

換気量を測定する際、それが自然換気量であるのか、機械換気システムによるものなのか、居住者によるものなのか、あるいは建物全体の換気量であるのか、といった定義はあまり明確にされていない。Kvistgaard ら<sup>[16]</sup>は、28 軒の住宅について居住者が存在する状態で換気量の測定(一定濃度法 (SF<sub>6</sub>) 5ppm で部屋中央部の換気量を測定)を行い、総換気量を住宅性能としての換気量と居住者による換気量に分類し各々の換気量を算出している。その結果、居住者による総換気率への影響は大きく、居住者由来の換気量は平均で 63%程度を占めていることが報告されてい

る。また、岩下ら<sup>[17]</sup>は集合住宅7世帯において居住状態(クーラーの使用、在室状況等)の変動とトレーサーガスによる換気率の測定、TVOC濃度の測定を行い、その関係を調査した。その結果、窓や玄関扉の開放頻度やクーラーの使用頻度には周期性があり各住戸の換気量に大きな影響を与えていることや、窓を開放することが多い昼間は夜間の5~10倍の換気量があり、換気率が下がる夜間にはTVOC濃度が昼間の最も低い濃度の3倍にも達したことがわかっている。

また、Barnesら<sup>[18]</sup>は、南アフリカの住宅において、居住者自身による室内環境改善対策の受容可能性と適用の可能性について検討している。これは、室内汚染の対策として、換気量を増やすことやタバコの使用制限、固形燃料を用いたストーブの使用制限などを推奨後、居住者の行動や意識調査を行ったものである。その結果、29の住宅全てが換気を好意的に受け入れ、そのうち20の住宅におけるストーブ使用時の窓開け率が、朝の平均で9%から17%、夜の平均で10%から23%に上がったことが報告されている。しかし気温が低い期間においては、換気に好意的だった9軒の対象住宅のうち4軒が実際に換気を積極的に行っていなかったことがわかっている。このことから、冬季における換気の推奨は受容されない可能性が示唆される。さらにこの効果の持続性も確認されている。

### 3.3.6. 呼気中 CO<sub>2</sub>を用いた換気量測定

#### CO<sub>2</sub>を用いた換気量測定例

呼気中 CO<sub>2</sub>を用いた換気量測定は、在室者の CO<sub>2</sub>放散量と屋外 CO<sub>2</sub>濃度、部屋の容積から換気量を算出するものであり、ASHRAE Standard<sup>[5]</sup>にその方法論が示されている。Andrewら<sup>[19]</sup>は、本手法を用いて換気量の測定を行ったが、実環境では定常状態になっていないことが多く、定常状態になる前で測定してしまうことにより換気量が過小評価されてしまうこと(換気量を多く見積もってしまうこと)や、100%新鮮外気との交換を仮定していることなどを、問題点として指摘している。また、Robert<sup>[20]</sup>は、特に多人数が集まる場所(ホール、会議室など)における換気量測定を目的とし、長期間(10時間)の在室によりほぼ定常状態となった室内 CO<sub>2</sub>濃度の減衰から換気量を算出した。これにより、特に忙しいオフィスにおける CO<sub>2</sub>を用いた簡易換気測定方法としての有効性が示されている。

Andrewら<sup>[21]</sup>は、3つのオフィスを用いて室内 CO<sub>2</sub>濃度を測定し、その1時間ごとのピーク値を定常濃度と仮定し、呼気による CO<sub>2</sub>の放散量から算出した理論値との比較を行った結果、理論値と実測値が大きく異なった。これは、測定時の CO<sub>2</sub>が定常濃度でなかったことが大きく効いていることが原因と考えられることから、大人数(エミッションを増やし早く定常状態にするために)が一定時間同じ部屋に在室していないと測定は困難であることが示唆されている。

#### CO<sub>2</sub>の室内濃度分布

連続発生法による換気量算出値は空間平均濃度、瞬時一様拡散、完全混合を仮定していることから、室内濃度分布は、本手法における換気量測定で大きな問題となってくる項目の1つである。西澤ら<sup>[22]</sup>は、既知濃度の SF<sub>6</sub>を点放散させた場合の室内の複数ポイントにおける濃度推移を、ファンを使用した場合としていない場合で測定し、それぞれ理論値との比較を行っている。その結果、いずれのポイントにおいても、濃度の立ち上がり、瞬時一様拡散を仮定した理論値よりも



高くなった。この結果が他のケースにも当てはまるとは言えないが、夜間の換気量をガス濃度の上昇カーブから算出する際に検討すべき重要な項目となると考えられる。また、類似の研究として、Barankova ら<sup>[23]</sup>は、呼気中 CO<sub>2</sub> をトレーサーとした換気量測定の基礎実験として、換気システムが備わった実験ルーム 2 部屋とサーマルマネキン(CO<sub>2</sub> 放散源)を用いて 3 つの条件下—①単室における測定、②居住者のアクティビティーがある場合(窓の開放を仮定し換気量を 0.5 から 1.5/hr に上げる)、③2 ゾーンの場合(廊下あるいは共有のドアが開放(15cm, 50cm)されている場合)、での測定を行っている。その結果、単室においてはファンを回さなくても全ての測定地点における CO<sub>2</sub> 濃度の平均値からの偏差は 50ppm 以下と、良好な結果が得られている。また、再現性もとられた。②の、窓開放の影響に関しては、長期間在室時における短時間(10 分)の窓の開放はほとんど無視することができる範囲であることが示されている。しかしながら、容積の大きい部屋になると濃度差が大きくなることや、放散源上部付近での測定値が測定平均値を大きく上回ることが問題として指摘されている。さらに、Naydenov ら<sup>[24]</sup>は、単身用のアパートを用いて就寝時の CO<sub>2</sub> 濃度の変動をファンを用いずに測定している。この研究においても、サンプリングポイント(呼吸域)付近におけるサンプリング値が他のサンプリングポイントと比較し非常に高い値で推移していることが危惧された。しかし、極端に高濃度な値については排除してしまうことで偏差は 130ppm に抑えられることがわかっている。

## [参考文献]

- [1] 財団法人 住宅・建築 省エネルギー機構, IBEC, No.79, vol.14-4, 1993.
- [2] 趙雲他、住宅における換気量の簡易予測法, 日本建築学会計画形論文集, 第 512 号, pp.39-44, 1998.
- [3] Bjorn Kvisgaard and P.F.Collet, The User's Influence on Air Change , ASTM STR1067, pp.67-76, 1990
- [4] トレーサーガスを用いた単一空間の換気量測定、空気調和衛生工学会シンポジウム資料、社団法人 空気調和・衛生工学会、(2003)
- [5] ASHRAE Standard 62-1989.
- [2] Thad Godish and John D.Spengler, Relationships Between Ventilation and Indoor Air Quality: A Review, *Indoor Air* , 6, pp.135-145, 1996.
- [6] Mike Schell and Dan Int-Hout, Demand Control Ventilation Using CO<sub>2</sub>, *ASHRAE Journal*, pp.18-29, 2001.
- [7] Steven J.Emmerich, Andrew K.Persily, Literature Review on CO<sub>2</sub>-Based Demand Controlled Ventilation, *ASHRAE Transactions*, 103, 2, 1997.
- [8] Donald K.Milton, P.Mark Glencross and Michael D.Walters, Risk of Sick Leave Associated with Outdoor Air Supply Rate, Humidification, and Occupant Complaints, *Indoor Air* , 10, pp.212-221, 2000.
- [9] Y.K.Chuah, Y.M.Fu, C.C.Hung, P.C.Tseng, Concentration Variations of Pollutants in a Work Week Period of an office, *Building and Environment*, 32, 6, pp.535-540, 1997.
- [10] D.G.Shendell, R.Prill, W.J.Fisk, M.G.Apte, D.Blake, D.Faulkner, Associations between Classroom CO<sub>2</sub> Concentrations and Student Attendance in Washington and Idaho, *Indoor Air* , 14, pp.333-341, 2004.
- [11] A.N.Myhrvold, E.Olsen and O.Lauridsen, Indoor Environment in School-Pupils Health And Performance In Regard to CO<sub>2</sub> Concentrations, *Proceedings of Indoor Air '96: The 7<sup>th</sup> International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, Nagoya, Japan, July, Vol.4, pp.369-374, 1996.
- [12] S.C.Lee and Maureen Chang, Indoor Air Quality Investigations at Five Classrooms, *Indoor Air* , 9, pp.134-138, 1999.
- [13] 合原妙美, 岩下剛, 鹿児島市内の小学校における室内空気環境実測(その 2 小学校高学年教室における二酸化炭素濃度と開口部開閉状況), *日本建築学会計画系論文集*, 559, pp.29-36, 2002.
- [14] Stuart Batterman and Chi-ung Prmg, TVOC and CO<sub>2</sub> Concentrations as Indications in Indoor Air Quality Studies, *American Industrial Hygiene Association*, 55, pp.1080-1083, 1994.
- [15] A.T.Hodgson, D.Faulkner, D.P.Sullivan, D.L.DiBartolomeo, M.L.Russell, W.J.Fisk, Wffect of Outside air Ventilation Rate on Volatile Organic Compound Concentrations in a Call Center, *Atmospheric Environment*, 37, pp.5517-5527, 2003.
- [16] Kvisgaard and P.F.Collet, The User's Influence on Air Change, *ASTM STR1067*, pp.67-76, 1990.
- [17] 岩下剛, 坂元真樹, 赤坂裕, 夏期の集合住宅における居住者の在室状況と換気量及び室内空気汚染度の時刻変化に関する試験研究, *日本建築学会計画系論文集*, 501, pp.93-99, 1997.
- [18] B.R.Barnes, A.Mathee, L.Krieger, L.Shafritz, M.Favin and L.Sherburne, Testing Selected Behaviors to Reduce Indoor Air Pollution Exposure in Young Children, *Health Education Research*, 19(5), pp.543-550, 2004.

- [19] Andrew K., Persily, Ph.D., Ventilation, carbon dioxide and ASHRAE Standard 62-1989, *ASHRAE journal*, July, pp.40-45, 1993.
- [20] Robert Olcerst, Quantification of an Indoor Population by Means of Air Change Rates and Carbon Dioxide Gas Concentration, *American Industrial Hygiene Association*, 55, pp.1080-1083, 1994.
- [21] Andrew Persily and W.Stuart Dols, The Relation of CO<sub>2</sub> Concentration to Office Building Ventilation, *ASTM special technical publication* / American Society for Testing Materials.
- [22] 西澤繁毅, 島田繁, 福島史幸, 絵内正道, トレーサーガスに影響を及ぼす有効混合面積の検討, *日本建築学会学術講演梗概集, 東北, D-2*, pp.543-544, 2000.
- [23] Barankova, K.G.Naydenov, A.K.Melikov and J.Sundell, Distribution of Carbon Dioxide Produced by People in a Room, *Roomvent 2004*.
- [24] K.G.Naydenov, P.Barankova, J.Sundell and A.K.Melikov, Distribution of Carbon Dioxide Produced by People in a Room:Part2-Field study, *Roomvent 2004*.

## 第4章 研究の概要

### 4.1. 背景

室内化学物質汚染が社会的に大きな問題となって以来、多くの研究機関において研究が行われ、法律の改正や建材の規格化が進められてきた。しかし、家具の持ち込みや規制外物質による室内空気質汚染問題は未だ解決に至っていない。このことは、規制による室内化学物質の管理手法には限界があることを示している。また、近年24時間換気システムの設置が義務付けられたが、その管理は居住者の自己責任となっているため、健康影響を考慮する上で十分な換気量が確保できていない可能性もある。こうしたことから、室内空気質を快適な状態に保つためには居住者自身の手による対策・行動が必要であると考えられるが、室内化学物質は目に見えないことや、居住者が簡便に測定できる方法がないことから対策は遅れがちである。従って、今後室内化学物質汚染を防ぐためにも、居住者への正しい知識の教育と共に居住者自身が自分達の居住環境を知ることが重要であると考えられるが、情報の認知が居住者に与える影響に関してはこれまでに研究が行われていない。

### 4.2. 既往の研究

発展途上国における室内化学物質汚染が、5歳未満の児童に呼吸器系の疾患(肺炎)などの影響を与えるとして問題となっている。これまでに、こうした発展途上国における室内化学物質汚染についての情報認知による環境改善効果に関する研究が行われている。Brendonら<sup>[1]</sup>は、子供の室内汚染物質曝露量を減らすための行動を特定することを目的とし、観察調査とアンケート調査を行い、統計解析をおこなった。その結果、ストーブのメンテナンスを行うこと、ストーブ使用中は少なくとも2箇所における開口をとり換気を行うこと、子供がストーブの近くで過ごす時間を短縮させることなどが、曝露量を減らす対策として挙げられた。また、Barnsら<sup>[2]</sup>は、南アフリカにおける室内汚染物質の子供への曝露量を減らすために望まれる4つの行動（ストーブのメンテナンス、換気、子供がストーブの周りにいる時間を減らす、固体燃料を使用しない）を起こすためのモチベーションがあるかどうか、あるいは行動を起こせない理由は何なのかを明らかにすることを目的に、介入調査を行っている。方法は、居住者のもとを調査員が訪れ、室内汚染の原因や推奨される行動などについて居住者に説明のみを行い、4週間後に再度住宅を訪問、説明後にどのような行動を行ったか、あるいは行っていないのかを聞き取るというものである。この調査結果を統計解析したところ、ストーブのメンテナンス及び固体燃料の使用を行わないという曝露量低減方法をとるのは難しいことが明らかとなり、居住者側の対策としては、子供がストーブのそばにいる時間を減らす、あるいは換気が有効であるという結論となっている。

## 4.2. 目的

本研究では、情報の認知が居住者の意識・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証すること、さらに、結果の表示だけでなく、対策を指導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・行動調査

②室内環境評価（情報提示）の効果の検証

を行う。このように、情報提示の違いによる室内空気質や居住者の意識、行動の変化を確かめることにより、評価法や情報の提示方法の妥当性を評価する。有意に室内空気質が改善していれば、最適な情報提示方法の提案ができると考える。

## 4.3. 調査の概要

### 4.3.1. 調査の流れ

Fig.1 に調査のフローを示す。まず、調査住宅を対照群と情報提示群の2群に分けた。対照群は、同一住宅内変動を考慮したものであり、2回連続で測定する。分類は1回目の測定前に無作為抽出した。情報提示群では、まず1回目の測定を行い、測定期間中にアンケートに回答してもらった。1回目の測定終了後1週間～2週間の間に結果及び評価を知らせ、2回目の測定を行った。得られた1回目及び2回目の測定結果及びアンケート結果を統計解析することによって居住者の意識や行動・室内汚染状況に変化があるか否かを解析する。

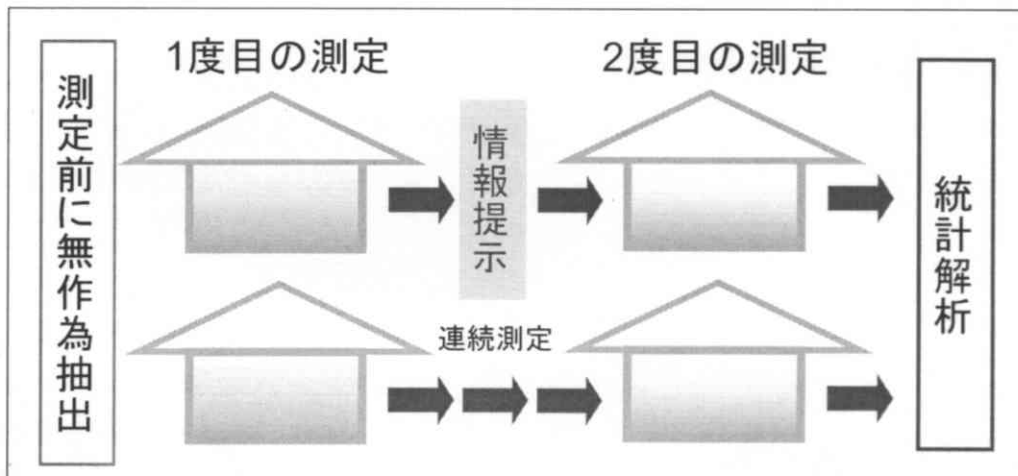


Fig.1 調査のフロー

### 4.3.2. 対象住宅の抽出

対象住宅は、調査協力を依頼し承諾を得ることができた住宅のうち、これまでに室内環境測定を行ったことのない(室内化学物質についての情報を知らない)50軒で調査を行った。調査対象住宅は東京、千葉、神奈川を中心として日本各地に点在している。戸建て、マンションなどの住宅の種別は問わない。室内の測定場所は、居住者の生活の拠点となっている場所とし、主に居間で

あるが一部寝室等にも設置している。また、外気の化学物質濃度を把握しておくために屋外濃度も同時に測定した。屋外の設置場所は、雨風のあたりにくいベランダや玄関先とした。

#### 4.3.3. 測定項目

室内空気質評価を行うために、室内化学物質濃度測定と換気率の測定を行うこととした。対象とする化学物質は、厚生労働省で指針値が策定されている VOCs のうち室内で頻繁に検出される formaldehyde、acetaldehyde、toluene、xylene、ethylbenzene、p-dichlorobenzene とした。換気率は、測定期間中の平均換気率を測定することとした。また、室内外の温湿度の測定も行った。

#### 4.3.4. 調査期間

化学物質濃度、換気量ともに測定期間は約1週間である。第1回目の測定を行った後、情報を提示し、その後約2週間後に第2回目の測定を行うこととした。第1回目の測定と第2回目の測定において、居住者の生活パターンの違いによる影響を少なくするように、調査開始曜日は第1回目と第2回目とで同一曜日にすることで測定期間中の生活サイクルをそろえるように考慮した。

調査は2004年12月～2005年7月までの間に行い、1住宅における2回の測定は季節の違いによる生活パターンの差などを排除するよう、できるだけ1ヶ月以内に行った。ただし、居住者の都合により住宅ごとに前後している。

#### 4.3.5. 情報提供の方法

居住者への提示情報としては、室内化学物質濃度測定結果(Table1)及び、換気量測定結果(Table2)、主要な放散源(Table3)、また、室内空気質測定の結果をもとに、室内環境評価を総合的にAAAからDまでで評価したものの(Table4)を用いることとした(室内環境学会案)。さらに、汚染対策としては換気を推奨した。

情報提示の際、居住者に対する予備情報の量によって、情報提示内容

Table1 室内化学物質測定結果の例

	ガイドライン [μg/m <sup>3</sup> ]	測定値 [μg/m <sup>3</sup> ]	評価
ホルムアルデヒド	100	20.0	AA
アセトアルデヒド	48	70.0	C
トルエン	260	40.0	AA
エチルベンゼン	3800	5.0	AAA
キシレン	240	4.0	AAA
パラジクロロベンゼン	870	不検出	AAA

Table2 換気量測定結果

	必要換気量	測定値	評価
平均換気量	0.5回/時間	0.4回/時間	B

Table3 主な放散源

化学物質	主な用途
ホルムアルデヒド	合板・パーティクルボード・壁紙用接着剤・防腐剤
アセトアルデヒド	接着剤・防腐剤・飲酒
トルエン	内装材の施工用接着剤・塗料
キシレン	内装材の施工用接着剤・塗料
エチルベンゼン	内装材の施工用接着剤・塗料
パラジクロロベンゼン	衣類の防虫剤・トイレの芳香剤

Table4 評価表(室内環境学会案)

評価	測定値/ガイドライン値 (%)	評価とアドバイス
AAA	～ 10	ガイドラインの10分の1未満です。この物質による健康影響の可能性が低いので、現状を維持しましょう。
AA	10以上 ～ 50	ガイドラインの半分以下ですので、この物質による健康影響の可能性が低いので、現状を維持しましょう。
A	50以上 ～ 100	ガイドライン以下ですが、健康のために換気などに注意して生活しましょう。
B	100以上 ～ 125	ガイドラインを越えています。健康のために換気などに注意して生活しましょう。
C	125以上 ～ 200	ガイドラインを越えています。健康に影響を及ぼす可能性があるため、生活環境の改善が必要です。
D	200以上 ～	ガイドラインの倍以上の濃度です。健康に影響を及ぼす可能性があるため、生活環境の改善が至急必要です。

にバイアスがかかり、結果として居住者の行動に違いをもたらしてしまう可能性があるため、情報提示は口頭でなく、情報を記載した用紙を居住者に渡す(郵送あるいは直接受け渡し)ことでのみ行い、居住者に情報が伝達される方法に違いはないよう配慮した。

#### 4.4 カルボニル化合物の測定・分析方法

##### 4.4.1 サンプリング

室内化学物質のサンプリング方法には、ポンプを使用するアクティブサンプリング法と、ポンプを使用しないパッシブサンプリング法がある。アクティブサンプリング法は、ポンプを用いて空気をサンプラー内に導入し、空気中の化学物質をサンプラー内の吸着剤に吸着させることによって化学物質をサンプリングする方法である。この方法は、ポンプによって空気を大量に導入することができるため、低濃度や短期間の測定にも適している。その反面、操作に手間がかかることや、サンプリングの際に起こるポンプの騒音、電源の確保等の問題がある。一方、パッシブサンプリング法は、分子拡散現象により対象物質を吸着剤にサンプリングする方法であり、ポンプが不要のため非常に簡便である。多点測定や個人曝露量測定に大変有効であると考えられる。しかし、分子拡散現象を利用して捕集しているため、アクティブ法に比べ長時間の測定でなければ定量限界を超える捕集量を得ることは困難である。

カルボニル類のサンプリングは、可能な限りその部屋を代表すると考えられる1点において、分子拡散のみを利用するパッシブサンプリングで行うこととした。パッシブサンプリングでは、サンプラー(Picture1)両端の開口部から分子拡散原理を利用し化学吸着される。サンプラーとして、2,4-dinitrophenylhydrazine (DNPH)カートリッジ (Sep-Pak XPoSure Aldehyde Sampler, Waters Ltd.)を用いた。formaldehyde等のカルボニル化合物は不安定であるため、VOCsの捕集に使用する活性炭でサンプリングすることができない。そこで、サンプラー内で2,4-Dimethylphenylhydrazine(DNPH)と反応させることにより、安定なヒドラジン誘導体として捕集する。カルボニル化合物の誘導体化反応式を Fig.2 に示す。サンプラー中に測定対象の空気を通過させると、空気中のカルボニル化合物は DNPH と反応し誘導体化され、シリカゲルに化学吸着で捕集される。

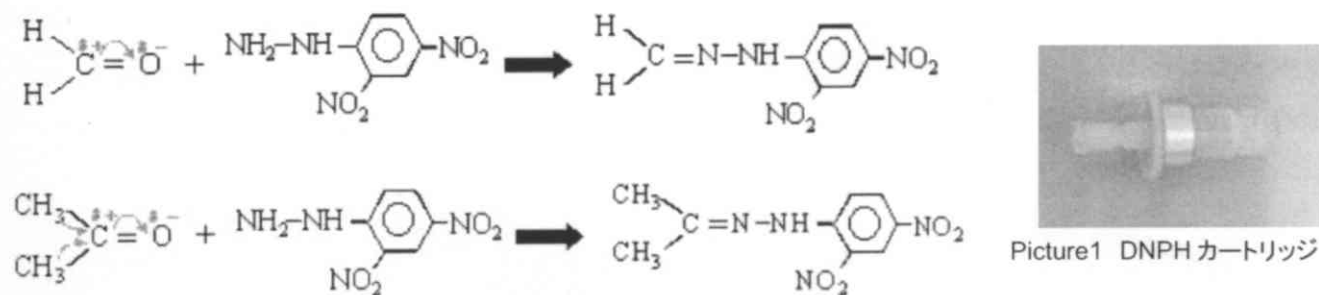


Fig.2 カルボニル化合物の誘導体化反応式

DNPH 誘導体はオゾンにより分解され測定値にマイナスの影響をおよぼすことが知られている。特に屋外大気を捕集する際に DNPH カートリッジの前に GL-Pak mini AERO Ozone Scrubber を接続することでオゾンによる DNPH 誘導体の分解を防ぐことができる。しかし、本研究で対象とす

る住空間は主に室内であり、オゾン濃度が高くないことから、操作の簡素化のため Ozone Scrubber は装着せずにサンプリングを行った。測定風景を Picture2 に示す。



Picture2 測定風景

#### 4.4.2. 試薬及び分析条件

捕集後、できるだけ早い期間のうちに溶媒 10 mL で抽出した。溶媒には和光純薬製のアセトニトリル(HPLC 用純度 99.8%)を使用、高速液体クロマトグラフィー(HPLC: High Performance Liquid Chromatography )(picture3)に 10  $\mu$ L 打ち込み、分析した。分析条件は Table5 に示す。

Table5 HPLC 分析条件

Instrument	Condition
Column	ZORBAX Eclipse XDB-C18 4.6mm $\times$ 250mm(5mm)
Mobile Phase	CH <sub>3</sub> CN:H <sub>2</sub> O=6.5:3.5
Flow Rate	1.0 mL/min
Injection Volume	10 $\mu$ L
Column Temperature	34 $^{\circ}$ C
Detector	Diode Array Detector (DAD)365nm



Picture3 HPLC

#### 4.4.3. 濃度算出方法

カルボニル化合物の濃度換算方法は次の通りである。

$$\text{室内化学物質濃度}[\mu\text{g}/\text{m}^3] = \frac{\text{抽出液中の濃度}[\mu\text{g}/\text{mL}] \times \text{抽出液量}[\text{mL}]}{\text{SamplingRate}[\text{L}/\text{min}] \times \text{測定時間}[\text{min}]}$$

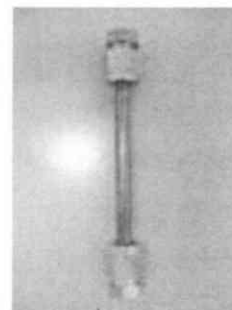
Sampling Rate とは、アクティブ法とパッシブ法による捕集量の相関を基に、経験的に求められた分子拡散による捕集速度の値である。パッシブ法はポンプを用いたアクティブ法と異なり、正確な空気のサンプリング量の把握が困難であるため、パッシブ法から濃度を算出するには分子拡散による捕集速度(Sampling Rate)の情報が必要である。今回用いた Sampling Rate は、既往の研究<sup>[4]</sup>により求められたものを使用した。

#### 4.5. VOCs の測定・分析方法

##### 4.5.1. サンプリング

##### サンプラーについて

VOCs のサンプリングは、可能な限りその部屋を代表すると考えられる 1 点において、カルボニル化合物と同様、パッシブサンプリングで行うこととした。サンプラーとして、加熱脱着用ステンレスチューブ(Perkin Elmer Ltd.)を用いた(Picture4)。パ



Picture4 加熱脱着用ステンレスチューブ



ッシブサンプリングでは測定物質をチューブ内の吸着剤への分子拡散原理を利用し吸着、捕集するため、拡散長(入り口から吸着材表面までの距離)やチューブ内径を全てそろえることにより Sampling Rate を一定にする必要がある。そこでサンプラーの内径は 48 mm、拡散長は既往の文献<sup>[5]</sup>を参考に 135~137 mm とした。

#### 吸着材について

吸着材としては、C5 から C14 までを吸着できる Carbo-pack B(supelco Ltd.)を使用することとした。この吸着材を使用することにより、測定対象 VOCs 及び換気量測定に使用する Perfluorocarbon を同時に捕集することができる。吸着材の充填量は 1 サンプルあたり 200 mg とした。

#### Sampling Rate

Sampling Rate とは、アクティブ法とパッシブ法による捕集量の相関を基に、経験的に求められた分子拡散による捕集速度の値である。パッシブ法はポンプを用いたアクティブ法と異なり、正確な空気のサンプリング量の把握が困難であるため、パッシブ法から濃度を算出するには分子拡散による捕集速度(Sampling Rate)の情報が必要である。今回用いた Sampling Rate は、既往の研究<sup>[3]</sup>により求められたものを使用した(Table6)。

Table6 VOCs の Sampling Rate

Compounds	Sampling Rate(mL/min)		Correlation Coefficient
	Theory	Experiment	
Benzene	0.64	0.46	0.91
Toluene	0.56	0.62	0.94
Ethylbenzene	0.50	0.41	0.89
m,p-Xylene	0.50	0.4	0.89
o-Xylene	0.50	0.55	0.93
Alpha-Pinene	0.43	0.29	0.86
p-Dichlorobenzene	0.49	0.68	0.95

#### 4.5.2. 分析方法及び分析条件

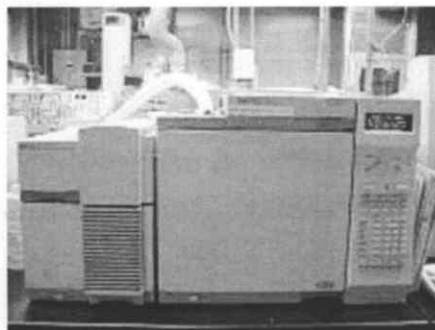
VOCs の前処理方法としては、現在までに溶媒抽出法(solvent extraction)、加熱脱着法(thermal desorption)、容器採取法が一般的に用いられている。溶媒抽出方法は、吸着剤(=活性炭)を充填した捕集管に試料を捕集し、溶媒で抽出することにより回収する方法である。溶媒抽出方法回収の際、溶媒により希釈されることや、抽出した試料の少量しかキャピラリーカラムに導入することができないため、定量下限が高くなるといった欠点があるが、試料の再分析や未同定物質の測定が可能である。一方、加熱脱着法は吸着剤(Carbo-pack B)に試料を捕集し、加熱脱着により回収する方法である。捕集試料の全量をカラムに導入することが可能であるため、低濃度試料の分析に適する。1本の吸着管で1回の分析しかできないが、前処理で二硫化炭素などの危険な溶媒を使用しないというメリットがある。容器採取法は、容器を使用して試料を採取する方法である。多成分の同時採取が可能で、採取した試料は数回の分析が可能であるが、機材の価格が高いことや、装置が大掛かりであるという欠点がある。本研究では、換気量測定に使用する。

Perfluoromethylcyclohexane(PMCH)を同時に分析することができる固相吸着-加熱脱着法を採用することとした。

VOCsの分析には主に Gas Chromatography-Mass Spectrometry(GC-MS)法あるいは Gas Chromatography-Flame Ionization Detection (GC-FID)が用いられていることが多い<sup>[3]</sup>。GC-MSは未同定物質の定性が可能であるが、(GC-FID)の方が低濃度までの測定が可能である。本研究では、加熱脱着(Perkin Elmer Ltd., ATD-400)/GC(Hewlett Packard Ltd., HP6890 Series)-MS(Hewlett Packard Ltd., HP5973 Mass Selective Detector)法を用いることとした(Picture5)。分析条件は既往の研究<sup>[4]</sup>を参考に行った(Table7)。

Table7 ATD/GC-MS 分析条件

Instrument	Condition
Desorption meth.	ATD400(Perkin Elmer)
Primary Desorption	300°C 10 min
Secondary Desorption	5°C→40°C/min→300°C(10 min)
Analytical meth.	GC-MS/HP6890-HP5973
Column	HP5MS 30 m×0.25 mm×0.25 μm
Carrier Gas	He
Flow Rate	1.0 mL/min
Column Temperature	40°C(4 min)→10°C/min→280°C



Picture5 ATD(左)/GC-MS(右)

#### 4.5.3. 濃度換算方法

VOCsの濃度換算方法は次の通りである。

$$\text{室内化学物質濃度}[\mu\text{g}/\text{m}^3] = \frac{\text{捕集量}[\mu\text{g}]}{\text{Sampling Rate}[\text{l}/\text{min}] \times \text{Sampling 時間}[\text{min}]} \times 10^6$$

定量下限値は、検量線の最低濃度(5 μg/m<sup>3</sup>)を、それぞれのサンプリング時間に換算して算出した。

#### 4.5.4. 精度

既往の研究<sup>[5]</sup>において、同地点で7本のサンプラーを用いて5日間のパッシブサンプリングを行い、その捕集量のばらつきから精度を確認している。その結果、検出できた38物質中26物質について、RSDは10%以下という良好な結果が得られている。

#### 4.6. 換気率の測定

##### 4.6.1. 平均換気量測定方法の選択

SF<sub>6</sub>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、前述したように、温暖化係数が非常に高いことやSF<sub>6</sub>濃度が測定できる特殊な装置が必要であり、騒音なども発生することから、居住者の生活に障害を与える可能性があるために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、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。そこで本研究では、大掛かりな装置立てがいらず、精度良く簡便に換気量を測定できる手法としてPFT法を選択することとした。

##### 4.6.1. PFT法について

PFT法(Perfluorocarbon Tracer Technique)は、室内にPFCの入ったドーザー及びサンプラーを設置し、ドーザーからのトレーサーガス放散量とサンプラーのPFT捕集量から換気量を算出するものであり、定常発生法に分類される。この手法は、これまで換気量を測定する際に必要とされた大掛かりな装置必要とせず、居住者自身が設置することが可能な手法として、本研究で行うような多くのフィールド調査を行うのに適していることから、本研究においては換気量測定方法として採用することとした。PFT法を用いた換気量は以下の式を用いて算出する。

$$V \frac{dC}{dt} = E - FC(t) \quad \dots(1)$$

ここで、

$F$  = 換気量 [m<sup>3</sup>/hr]

$V$  = 室容積 [m<sup>3</sup>]

$E$  = トレーサーガスの Emission Rate [g/hr]

$C$  = トレーサーガス濃度 [g/m<sup>3</sup>]

本研究では、PFT法で使用するトレーサーガスとして、既往のトレーサーガスのうち、危険物に指定されておらず、比較的安価な Perfluoromethylcyclohexane(PMCH)(Sigma Aldrich Ltd.)を使用することとした。PMCHの物性について以下に示す。

## Perfluoromethylcyclohexane (PMCH)

Synonyms: trifluoromethylundecafluorocyclohexane

CAS No.: 355-02-2

Molecular Weight: 350.05

Chemical Formula: C7F14

Vapor Pressure (mm Hg): 12.6 at 25°C

### 4.6.2. 測定及び分析方法

#### サンプラー及び吸着剤について

PMCHのサンプリングは、VOCsと同じATD用ステンレスチューブを用いたパッシブサンプリングを行い、分析もATD-GC-MSを用いVOCsと同時にを行った。

#### Sampling Rate

今回用いた Sampling Rate は、既往の研究<sup>[5]</sup>により求められたものを使用した(Table8)。

Table8 PMCH の Sampling Rate

Compounds	Sampling Rate(mL/min)		Correlation Coefficient
	Theory	Experiment	
Perfluoromethylcyclohexane	0.4	0.49	0.91

#### 検量線の作成

決定した分析条件下でのPMCHの定量範囲を求めるために、検量線を作成した。使用装置は加熱脱着装置(Perkin Elmer Ltd., ATD-400)/GC (Hewlett Packard Ltd., HP6890 Series)-MS(Hewlett Packard Ltd., HP5973 Mass Selective Detector)である。

#### —使用器具—

- carbopackB(supelco Ltd.)を充填したステンレスチューブ
- ATD用シリンジ(Hamilton 社製)
- マイクロシリンジ(Hamilton 社製)
- 1L 大気捕集管(GLサイエンス社製)
- Perfluoromethylcyclohexane(シグマアルドリッチ社製)

#### —方法—

- ①1L 大気捕集管に乾燥窒素を流し、パージする。
- ②ATD用シリンジをメタノールで洗い、PMCH10 μL をパージした大気捕集管に導入し、気化させる。
- ③ガスタイトシリンジを用い、気化させたPMCHを、窒素を流しながらATD用ステンレスチューブに導入する(0, 5, 10, 50, 100 μL)。

## ④ATD/GC-MS で分析する。

検量線の作成結果を Fig.3 に示す。Fig.3 より良好な直線性を得ることができたため、この検量線を使用することとした。定量下限は検量線の最低濃度の 5  $\mu\text{g}/\text{sample}$  を測定時間に換算した濃度を使用することとした。

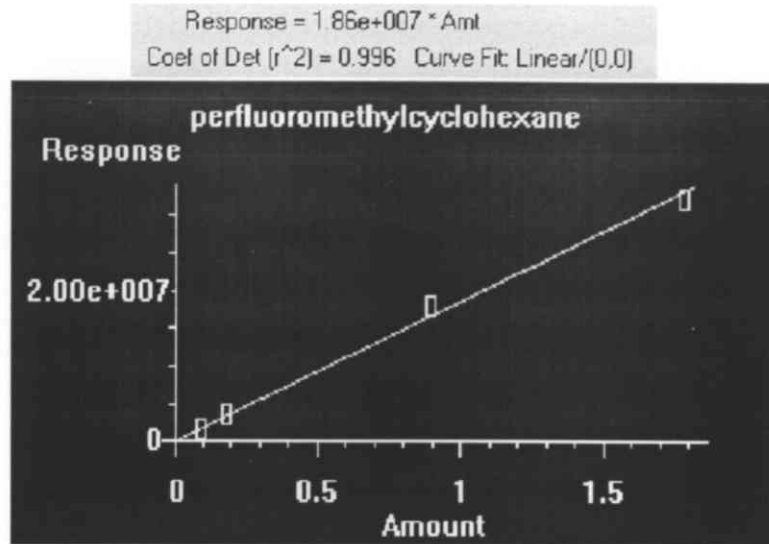


Fig.3 PMCH 検量線の直線性

**ドーザー**

PMCH を室内に放散させるためのドーザーとして 15 mL バイアル(Agilent Ltd.)

を使用した(Picture6)。PMCH を放散させる際はセプタムをはずし、ディフュージョンキャップを使用した。ディフュージョンキャップ(Agilent, Ltd.)は拡散長 8.0 mm、内径 1.0 mm のものを使用した。

換気量算出のための **Emission Rate** は、理論的な計算及び実験値によって求めることができる。理論的な計算値は以下の式で求めることができる。

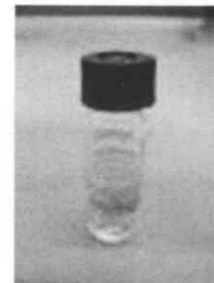
$$E = C_d \times S_d \times k_d$$

ここで

$C_d$ : ドーザー内濃度 [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]

$S_d$ : 拡散抵抗の孔の面積 [ $\text{m}^2$ ]

$k_d$ : ドーザー拡散抵抗部の物質移動係数 [ $\text{m}/\text{sec}$ ]



Picture6 ドーザー

本研究では、**Emission Rate** として測定前と測定後の重量減少から **Emission Rate** を算出した。ドーザー輸送時は、ディフュージョンキャップの代わりにテフロン製のセプタムを用いることで、ドーザーからの減少を防ぐと共に、セプタムをしたままのブランクを用意することでその輸送時の重量減少を予測した。

**4.7. 温湿度及び降水量**

温湿度計には HOBON(onset 社)(Picture7)を使用した。設置場所は化学物質のサンプリングと同じ場所である。屋外サンプリング場所は、ベランダや玄関先などできるだけ雨風があたらない場所を居住者に選定していただいたため、場所によっては直射日光などにより記録温度が急激に上昇してしまう時間帯ができてしまった。そこで、気象庁の気象統計データベース<sup>[6]</sup>から各地の温度を参考に、修正を加えたものを使用した。測



Picture7 HOBO

定間隔は基本的に15分とした。また、降水量についても気象庁の気象統計データより、単位時間あたりの降水量データを参考にした。

#### 4.8. アンケート調査及び生活環境調査

アンケート調査では、家族構成・回答者の属性(年齢、職業など)・室内環境への関心度(高中低)、情報提示後の対策の有無とその内容・理由、関心を持った項目等を質問する(Appendix 参照)。生活環境調査として、化学物質の放散源となりえる”飲酒の有無” ”喫煙の有無” ”防虫剤の使用” ”芳香剤の使用” ”暖房機器の使用”等について質問した。また、1日あたりの空気交換を目的とする換気時間についても質問した。アンケートは各測定終了時に回収した。

## [参考文献]

- [1] Brendon R. Barnes, Angela Mathee, Lonna B. Shafritz, Laurie Krieger, Susan Zimicki, A Behavioral Intervention to Reduce Child Exposure to Indoor Air Pollution: Identifying Possible Target Behaviors, *Health Education & Behavior*, vol31 (3), pp.306-317, 2004.
- [2] B. R. Barnes, A. Mathee, L. Krieger, L. B. Shafritz, M. Favin and L. Sherburne, Testing Selected Behaviors to Reduce Indoor Air Pollution Exposure in Young Children, *Health Education & Behavior*, vol19 (5), pp.543-550, 2004.
- [3] Hodgson, A.T., A Review and a Limited Comparison of Methods for Measuring Total Volatile Organic Compounds in Indoor Air, *Indoor Air*, 5, pp247-257, (1995).
- [4] 篠原直秀, 化学物質過敏症患者の症状を発現させる化学物質の同定及び定量法の確立, 2000年度東京大学大学院修士論文,
- [5] 奥泉裕美子, 単一レーザーガス測定による複数ゾーンの換気量推定法をその信頼性評価に関する研究, 平成16年度東京大学大学院修士論文
- [6] 気象庁, 気象統計データベース, <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>

## 第5章 測定結果

## 5.1. 居住者の属性

Fig.1 に本調査で対象となった居住者の家族構成を示す。本研究の対象者の50%以上が夫婦・子供から成るファミリーとなっている。また、アンケート回答者の性別を Fig2 に示すが、7割近くが女性となった。家事など家の中の作業の多くは女性が任されていることは多いため、本調査に関して特に問題はないと考えられる。尚、今回のアンケート回答者の中には、日中働いていて在室時間は短いという居住者も多く含まれている。

## 5.2. 住宅の属性

次に対象住宅について述べる。測定を行った住宅は全部で50軒である。Fig.3、4に対象住宅の所在地及び住宅の建築年数を示す(n=50)。ほとんどの住宅が東京、千葉、埼玉、神奈川に所在しているが、一部に北関東や東海、北陸の住宅も存在する。建築年数が1年以内の住宅は8軒で全体の約16%である。一般的に入居間もない新築住宅の濃度は高く、その後の数ヶ月で自然と減衰すると考えられることから本調査における誤差要因となりえる可能性がある。本研究の対象住宅のうち、築半年以内の住宅は、6軒であったが、ほとんどの住宅は築1年以上が経過しており、自然減衰の影響は少ないと考えられる。今回の調査物件はファミリー(子供有り)の割合が多く、アンケート回答者はやはり主婦が多いことから女性が6割強となっている。全体的に見ると、属性にそれほど偏りのない住宅が集まったと考えられる。

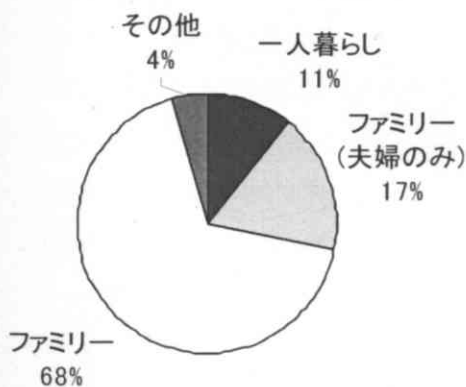


Fig.1 居住者の家族構成

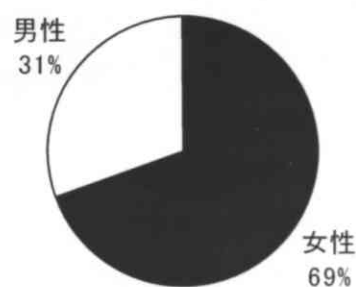


Fig.2 アンケート回答者の性別

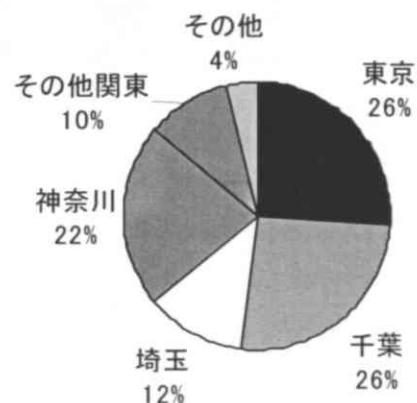


Fig.3 対象住宅の所在地



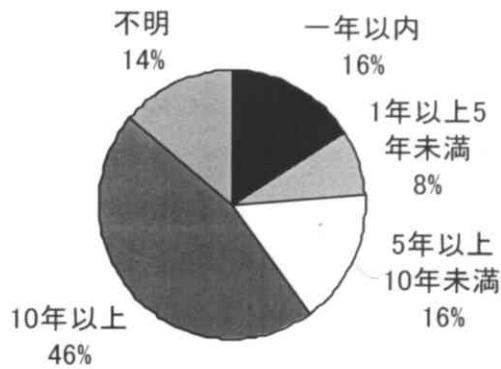


Fig.4 建築年数

### 5.3. 換気量測定結果

Fig.1 に本調査における 1 回目の換気量測定結果を示す。測定を行うことができた住宅は全部で 40 軒である。測定対象住宅のうち 7 軒(全体の約 18%)が、必要換気量である 0.5 回/hr を下回る結果となった。このことより、新築住宅については必要換気量を保てるよう機械換気設備の設置が義務付けられているが、既築住宅については必要換気量を確保できていない住宅が数多く存在する可能性が指摘できる。

本調査では、測定開始前にサンプルを対照群と処理群の 2 つに分けている。そこで、2 群の均質性を確認するために 2 個の独立サンプルに有意差があるかどうか検定を行った。統計解析に使用したのは Mann-Whitney の U 検定 ( $\alpha=0.05$ ) である。検定結果を Table1 に示す。Table1 より、 $P=0.47$  となり、対照群と処理群に有意差は見られなかった。

### 5.4. 化学物質濃度測定結果

Table2 に今回測定した物質の室内濃度と屋外濃度の比(I/O 比)の平均値を示す( $n=49$ )。I/O 比が 1 を超過している場合、その物質の放散源は主に室内にあると考えられる。本調査における測定物質の I/O 比は全てにおいて 1 を大きく超えた。従って、測定した化学物質の発生源は主に室内

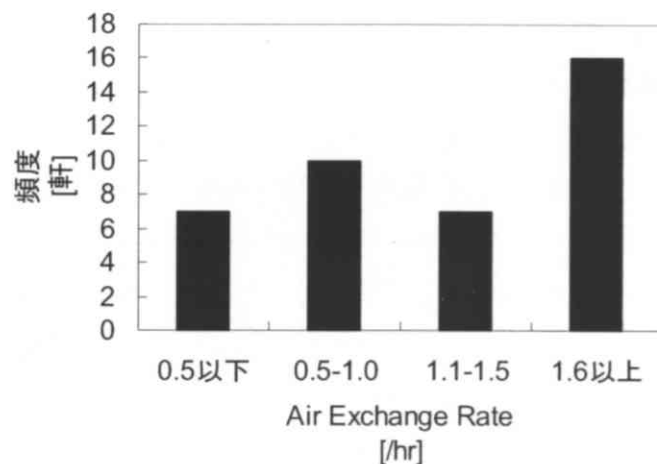


Fig.5 1 回目の換気率