

空間一様発生法による住宅の換気量測定手法の開発研究 — 居住状態の化学物質放散量に関する調査研究 —

主査 坂口 淳*1

委員 赤林 伸一*2, 山岸 明浩*3, 富永 禎秀*4

本研究では簡便に換気量を測定することができる空間一様発生法に基づく換気量測定手法を開発し、木造戸建住宅の居住時の平均換気量と室内化学物質濃度を同時に測定を行う。トレーサーガスにはHFE7100が使用できることを確認し、毛細管ピペット及びバイアル瓶を用い、トレーサーガス発生量をコントロールする基礎的データを得た。木造住宅を対象とした空間一様発生法による換気量の測定の結果、今回測定した住宅の住宅全体の換気回数は、0.3回/hから0.7回/hの範囲に入り、換気量とVOC濃度からVOC放散速度を算出したところパラジクロロベンゼン、トルエン、ベンゼンの放散速度が多いことが明らかとなった。

キーワード： 1) 換気量, 2) 換気回数, 3) 空間一様発生法, 4) ハイドロフルオロエーテル

A STUDY ON VENTILATION RATE MEASUREMENT USING HOMOGENEOUS TRACER-GAS TECHNIQUE FOR DETACHED HOUSE — Experimental Study on Chemical Emission Rate on Detached House —

Ch. Jun Sakaguchi

Mem. Shin-ichi Akabayashi, Akihiro Yamagishi and Yoshihide Tominaga

In this study, development of the ventilation rate measurement by the homogeneous tracer-gas technique, and the VOC concentration and ventilation rate are measured by this technique for detached wooden houses in Niigata Prefecture. As the results, it confirms that HFE7100 can be used for the tracer gas by this study. It gets the basic data that using pipette with capillary tube and bottle with pinhole controls the tracer gas emission rate. As the results of the measurement for detached wooden houses, the air exchange rate for the whole houses is within the range of 0.3 to 0.8 h⁻¹. The emission rate of Benzen, Toluene, p-Dichlorobenzen is comparatively high.

1. はじめに

近年、住宅の高気密化に伴う自然換気の減少を背景に、新築住宅を中心として床材や壁紙、塗料などの建築材料や生活で使用する殺虫剤や芳香剤などを起源とする化学物質の室内空気汚染（いわゆるシックハウスシンドローム）が社会問題となっている。これまでの室内化学物質空気汚染に関する調査研究は化学物質濃度と人体影響のドーズレスポンスの観点から化学物質が人体に与える影響を明らかにするため、化学物質各種の室内濃度測定^{*1)}やFLECCellなど^{*2)}による建材表面から放散される化学物質の放散量の測定が主な研究対象である。しかし、室内空気中の化学汚染物質の濃度は、室内で発生する化学物質の放散量（発生量）と換気量で決定されるため、測定された住宅の濃度が高い場合、その原因が対象住宅の化学物質放散量が多いためなのか、対象住宅の換気量が少ないためか断言することが出来ず、これらの評価は建材の種類と住宅の気密性能から間接的に評価する

に止まっている。このため、室内濃度測定と同時に換気量の測定をすることがより現象を明らかにするために望ましいと考えられる。

住宅室内で発生する化学物質は、住宅を構成する建材由来のものだけではなく、生活に伴って居住者が室内へ持ち込む防虫剤などの生活由来の化学物質もシックハウスの原因物質の一つである。特に衣類防虫剤や芳香剤に多く含まれているパラジクロロベンゼンは、生活由来の化学汚染物質の代表格で、2000年に厚生省シックハウス検討会で公表された指針値に示され、また多くの研究機関で測定された住宅調査においても室内濃度が高く測定されている物質である。生活由来の化学物質は、室内に持ち込まれる化学物質の量が不明なため、現在の段階では室内でどの程度発生しているか定量的に示すことが困難である。このため、室内濃度の高低の理由を明らかにするためには、人の住んでいる状態の住宅において、換気量と室内に持ち込まれた化学物質の量を明らかにし、

*1 県立新潟女子短期大学 講師
*2 新潟工科大学 助教授

*3 新潟大学 助教授

*4 県立新潟女子短期大学 助教授

生活由来の化学物質の発生量に対するデータを蓄積する必要がある。

住宅の換気量の測定は、一般的に大がかりな装置を対象住宅に持ち込む必要があるため、多くの住宅の換気量を測定することは、時間的・費用的に非常に困難である。住まい方と室内化学汚染の関係を明らかにするためには、簡便で且つある程度の精度で測定可能な新たな換気量測定手法を開発する必要がある。そのため本研究では、空間一様発生法に基づく簡便なパッシブ換気量測定手法を開発し、木造戸建住宅の居住時の平均換気量と室内化学物質濃度を同時に測定し、住まい方と化学物質空気汚染の関係を明らかにすることを目的とする。

2. 換気量測定法の理論

トレーサーガスを用いた換気量測定法は、通常大気中に含まれていないトレーサーガスを対象室内で発生し、トレーサーガス発生量とトレーサーガス濃度から換気量を測定する方法である。基礎方程式を(1)式、図2-1に示す。

$$Kdt = Vdc + CQdt \quad \dots (1)$$

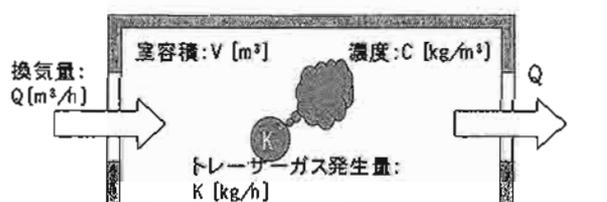


図2-1 トレーサーガス濃度と換気量の関係

換気量測定法は(1)式によると、変数が換気量 Q (換気量には取入外気量と排気量の両方の意味があるが、本研究では取入外気量のことを単に換気量と呼ぶ)、トレーサーガス発生量 K 、トレーサーガス濃度 C の3変数あるため、換気量を求めるためにはトレーサーガス発生量 K もしくはトレーサーガス濃度 C のいずれかを一定とし、変数を減らす工夫が必要となる。既往の研究では種々の換気量測定方法が報告されているが、ここでは室内にトレーサーガスを充満させ、トレーサーガスの供給を停止し、濃度減衰から換気量を測定する濃度減衰法、トレーサーガスを一定供給し、室内濃度から換気量を測定する一定発生法、室内濃度を常時モニタリングし、濃度が一定になるようにトレーサーガスの供給を変化させる一定濃度法の3手法について解説する。

2.1 濃度減衰法

濃度減衰法は JIS A 1406-1974 「室内換気量測定方法

(炭酸ガス法)」²³⁾ で知られる最も一般的な換気量測定手法である²¹⁾。(1)式を整理し、積分し、 $t=0$ の初期値の時の室内トレーサーガス濃度を C_0 とすると、(2)式、(3)式となる。

$$C(t) = C_0 e^{-\frac{Q}{V}t} \quad \dots (2)$$

$$\begin{aligned} Q &= \frac{V}{t} \log_e \frac{C_0}{C(t)} = \frac{V}{t} \frac{1}{\log_{10} e} \log_{10} \frac{C_0}{C(t)} \\ &= 2.303 \frac{V}{t} \log_{10} \frac{C_0}{C(t)} \quad \dots (3) \end{aligned}$$

$$\log_e C(t) = -\frac{Q}{2.303V}t + \log_e C_0 \quad \dots (4)$$

室内にトレーサーガスを均一に充満させ、トレーサーガスの供給を停止後、初期濃度 C_0 からの濃度減衰を測定する。(4)式は(3)式を濃度 $P(1)$ の変化でまとめた式である。濃度履歴を(4)式より横軸を経過時間、縦軸に濃度の対数を取り、グラフにプロットした濃度減衰を最小二乗法などで傾きを求め、(4)式より換気量を算出する。濃度減衰法で得られる換気量は濃度変化の傾きから算出するため、測定期間中の平均換気量として定義される。

濃度減衰法に必要な機器はトレーサーガス濃度の測定機器のみであり、トレーサーガスの放出は測定開始前に行うだけであり、測定開始前のガス濃度は濃度測定機器の測定可能範囲の適当な濃度であれば良いので、トレーサーガス放出装置は簡便なもので十分である。

2.2 一定濃度法

一定濃度法は対象室内のトレーサーガス濃度を常時一定に保つようトレーサーガス発生量を調整し、トレーサーガス発生量から換気量を測定する方法である。

$$Kdt = CQdt \quad \dots (5)$$

$$Q(t) = \frac{K(t)}{C} \quad \dots (6)$$

対象室内の濃度を一定であるため、(1)式の濃度変化を示す Vdc はゼロとなり、(5)式となる。(5)式を積分すると(6)式となり、トレーサーガス発生量を計測することにより、極めて単純な計算で換気量が算出できる。一定濃度法の特徴は多数室の取入外気量(換気量)の時間変動をとらえられる点である。濃度減衰法では JIS 規格にもあるとおり、基本的には1室の換気量を対象としたもの

であるため、対象空間が多数室であり、各室の濃度減衰が著しく異なっている場合には空間換気量の影響を考慮する必要がある^{※2)}。一方、一定濃度法では各室のトレーサーガス濃度が均一であり、空間換気量によってトレーサーガス濃度の変化が起こらないため算出される結果は各室の取入外気量が算出される。

一定濃度法の測定に必要な機器は、トレーサーガス濃度計、トレーサーガス発生量を制御可能なマスフローコントローラなどのガス供給装置が必要である。換気量の時間変化が激しい場合、換気量の時間変化に追従することができる応答性の速い濃度計及びガス供給装置が必要となり、一般的に高価で特殊な装置が必要となる。

2.3 一定発生法

一定発生法はトレーサーガスを室内に一定供給し、トレーサーガス濃度から換気量を測定する方法である。換気量が常に安定している状態ではトレーサーガス発生量 K を室内濃度 C で割れば換気量 Q が求まるが、換気量が増える場合では基礎方程式(1)式を逐次計算法等により、換気量の算出する必要がある。

一定発生法の測定手法の方法の一つに、本研究で開発する空間一様発生法がある。数値計算の分野では村上・加藤らは、空気齢の概念による換気評価尺度SVB3を提案している^{※4)}。空気齢とは新鮮空気が入入外気口から室内に供給され、室内のある点に到達するまでにかかる時間を定義したものである。図2-2に空気齢の概念を示す。取入外気口から排気口までピストンのよ

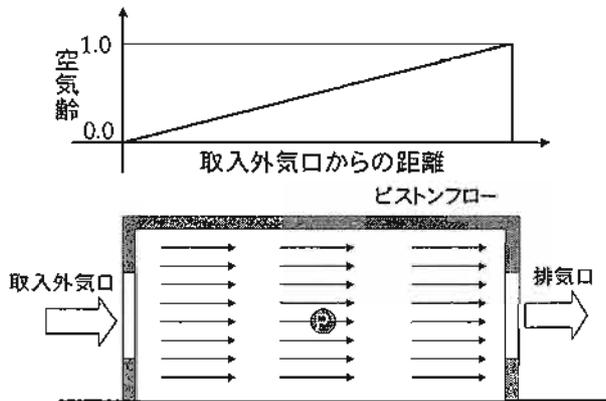


図2-2 空気齢の概念

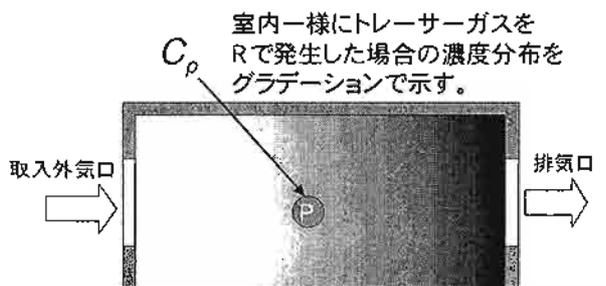


図2-3 濃度と空気齢の関係

うに押し流される換気性状では、排気口の空気齢(V/Q)を1.0とした場合、室内の空気齢の分布は図2-2のように取入外気口からの距離に比例して0.0から1.0へ変化する。図2-3に室内に一樣にトレーサーガスを発生した場合の濃度分布と空気齢の関係を示す。室内の任意の点Pの濃度は(7)式で示される。また排気口の濃度 C_e は(8)式で示される。

$$C_p = \frac{1}{Q} \int_0^x R dx \quad \dots (7)$$

$$C_e = \frac{\int_0^1 R dx}{Q} = \frac{RV}{Q} \quad \dots (8)$$

ここで x は取入外気口からの距離を示す。ガス濃度は取入外気口から排気口に向かって空気齢同様に取入外気口の距離に比例して濃度が上昇する。よってこれより、濃度と空気齢は完全に対応がとれるため、数値解析手法では空間一様にトレーサーガスを発生させ、濃度分布から空気齢を算出することが多い。

ここではピストンフローを例に空気齢を説明したが、完全混合状態の換気性状の場合、室内の空気齢は場所位置によらず排気口の空気齢(V/Q)と同様である。これより、換気量 Q は室容積 V を空気齢で割った値として算出する。この換気量を本研究では空気齢に基づく換気量と呼ぶ。対象空間が多数室の場合、対象空間を一つの系として空気齢を求め、この空気齢に基づく換気量を算出することが多い。

3. トレーサーガス発生手法の開発

空間一様発生法による換気量の測定では、当然のことながら対象空間内にトレーサーガスを一様供給する必要がある。トレーサーガスを空間で一様に発生させる方法は空間を均等にメッシュ分割し、メッシュごとにポイントソースによってトレーサーガス発生させる方法があるが、多数室を対象とした測定では、各部屋を瞬時一様拡散を仮定し、各部屋の室容積に合わせて発生量を変化させ、全体で空間一様発生が成り立つことを考える。このため空間一様発生法では必然的にトレーサーガス発生装置が多数必要となるため、簡便にトレーサーガスを発生させる手法を開発する必要がある。本研究ではパッシブ法によるトレーサーガス発生装置について研究を行う。

3.1 トレーサーガス

換気量の測定では、トレーサーガスにエチレン、SF₆、CO₂、パーフルオロカーボンなどのガスが用いられる。本研究では、トレーサーガス発生装置の小型化を考え、

常温で液体の揮発性物質を対象にトレーサーガスを検討する。まず最初に室内濃度分析の簡便性の観点および将来的に室内化学物質空気汚染で問題となっているホルムアルデヒドの室内濃度との同時測定を考え、アルデヒドを含む自然香料を用いることを検討する。シトラール、ペリラルデヒド、バニリンなどの物質を試験管に入れ、放散速度を測定したが、どの物質も蒸気圧が低く、常温状態での放散量が極めて少ないため、トレーサーガスとして使用することは出来なかった。このため、代替フロン的一种である住友スリーエム製HFE7100(メチルパーフルオロイソブチルエーテル・メチルパーフルオロブチルエーテル)をトレーサーガスとすることを検討する^{※3)}。

3.2 トレーサーガス発生装置の概要

トレーサーガス発生装置はトレーサーガス発生量を対象空間の規模に応じて調整する必要がある。そこで、ポリエチレン製毛細管ピペットとバイアル瓶を用いた発生装置を検討する。毛細管ピペットを写真3-1に、バイアル瓶を写真3-2に示す。毛細管ピペットは内径2mm、長さ90mmの市販のピペットを用い、通常はピペット内部に試料を吸引するためにつまむ部分にシリンジでHFE7100をとり、毛細管ピペットの毛細管の長さによる放散速度の変化及び放散速度の温度依存性の実験を行う。

バイアル瓶は外径18mm、高さ40mmのプラスチック製スクリーキャップのついた市販のガラス製バイアル

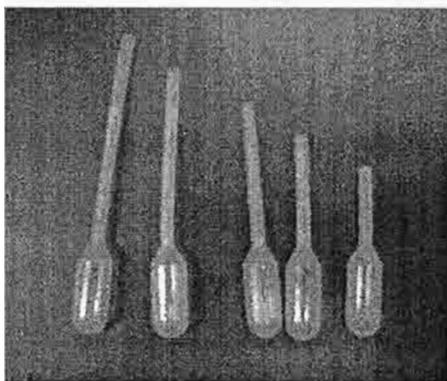


写真3-1 毛細管ピペットの概要

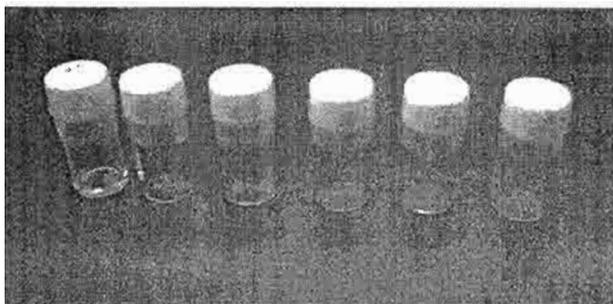


写真3-2 バイアル瓶の概要

瓶を用いる。スクリーキャップに精密ピンバイスを用いて穴を開け、穴の直径の変化による放散速度の変化及び放散速度の温度依存性の実験を行う。

3.3 放散速度

(1)毛細管ピペット

毛細管の長さを24.4, 34.4, 44.4, 54.4, 64.4mmの5種類作成し、HFE7100を充填し、インキュベータにいれ、毛細管ピペットをそれぞれ電子天秤で重量を測定し、重量変化から放散量を測定する。ピペットに充填するHFE7100の量による放散量の違いを調べるため充填量の44.4mmの毛細管ピペットを用い放散速度を調べたが違いがなかった。

インキュベータの温度は15, 20, 25, 30, 35℃に調整し、それぞれの放散速度を算出する。図3-1に25℃の

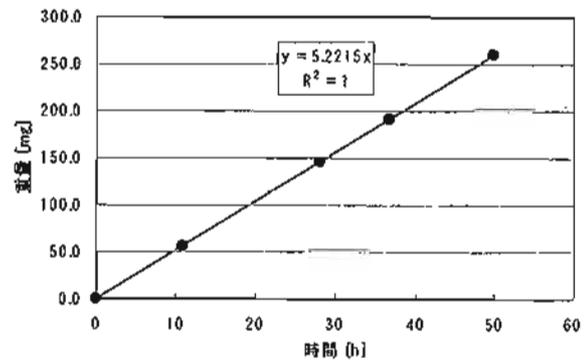


図3-1 HFE7100の重量変化
(毛細管ピペット44.4mm, 25℃)

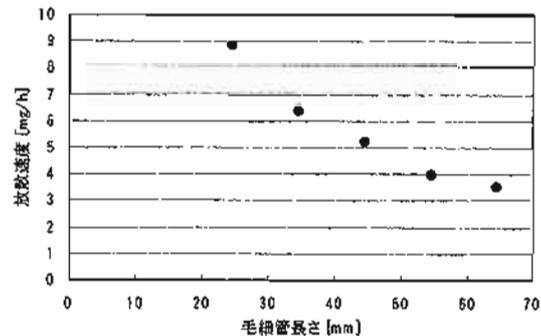


図3-2 毛細管ピペットの長さとの放散速度の関係
(毛細管ピペット, 25℃)

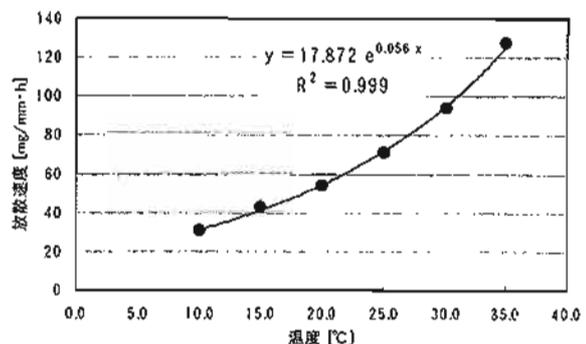


図3-3 温度と毛細管ピペット長さあたりの放散速度の関係

時のHFE7100の重量変化を示す。実験開始時の重量から差し引いた重量（HFE7100が毛細管ピペットから放出した重量）は時間とともに増加する。グラフの傾きは放散速度である。図3-2に25℃の時の毛細管長さとの関係を示す。毛細管の長さとの関係には反比例の関係がある。今回作成した毛細管ピペットでは25℃の時に1個あたり3.53～8.84mg/hの放散量を放出することができる。図3-3に温度と毛細管長さ1mmあたりの放散速度の関係を示す。温度が高くなるにつれて放散速度は増加し、高い相関がある。

(2) バイアル瓶

バイアル瓶のスクリーキャップに精密ピンバイスで直径0.3, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2mm（面積でそれぞれ

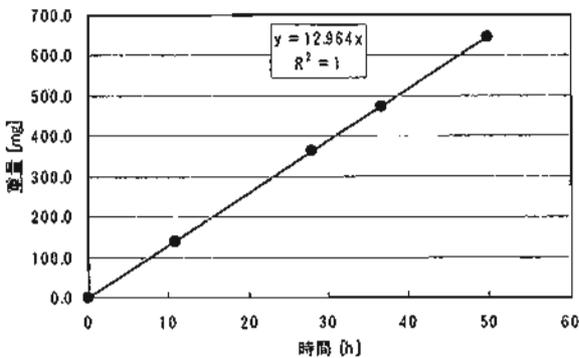


図3-4 HFE7100の重量変化
(バイアル瓶, 直径0.8mm, 25℃)

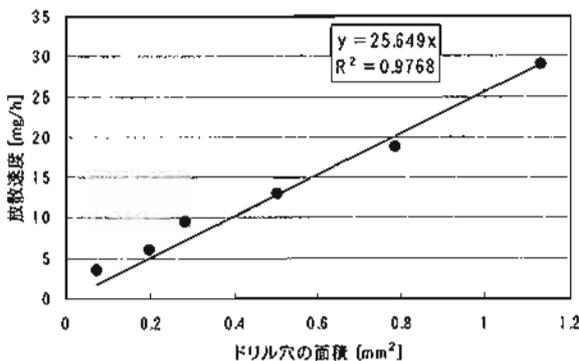


図3-5 ドリル穴の面積と放散速度の関係
(バイアル瓶, 25℃)

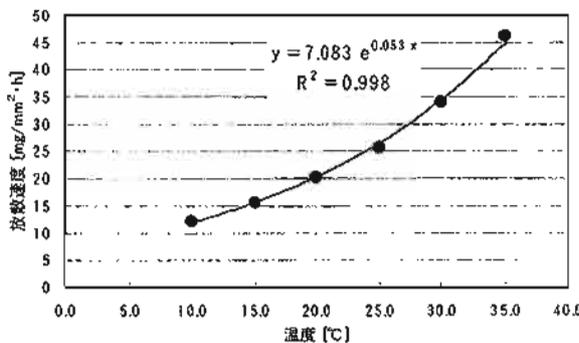


図3-6 ドリル穴の面積あたりの放散速度と温度の関係

れ0.0707, 0.196, 0.283, 0.503, 0.785, 1.13mm²)のドリル穴をあけた6種類のバイアル瓶にHFE7100を入れ、インキュベータにいれ、毛細管ピペットと同様に電子天秤で重量を測定し、重量変化から放散量を測定する。インキュベータの温度は15, 20, 25, 30, 35℃に調整し実験を行う。図3-4に25℃の時の重量変化を示す。実験開始時の重量から差し引いた重量（HFE7100がバイアル瓶から放出した重量）は毛細管ピペットと同様に時間とともに増加する。グラフの傾きは放散速度である。図3-5に25℃の時のドリル穴面積と放散速度の関係を示す。ドリル穴の面積と放散速度には正の相関がある。今回作成したバイアル瓶では25℃の時に1個あたり3.56～29.1mg/hの放散量を放出することができる。図3-6に温度とドリル穴面積あたりの放散速度の関係を示す。温度が高くなるにつれて放散速度は増加し、高い相関がある。

(3) 自然室内における放散量の予測

毛細管ピペット、バイアル瓶ともにHFE7100の放散速度に温度依存性がある。空間一様発生法ではこれらのトレーサーガス発生装置を設置し、パッシブにトレーサーガスを室内に発生させる。室温変化によって放散速度が変化するため、測定期間中のトレーサーガスの総放散量を知るためには、詳細な温度測定が必要不可欠になる。

そこで、自然室内にドリル穴0.8, 1.0, 1.2mmのバイアル瓶を放置し、期間中の温度変化と総放散量の関係を明らかにする。

室内にバイアル瓶を約24時間放置する実験を3回行い、実験開始前後の重量変化から実験期間中の放散量（実測値）を測定する。10分後とに温度を佐藤計量器製作所・記憶計で測定し、10分ごとの温度と図3-6より得られた放散速度と温度の関係式から10分後との放散量を算出し、測定期間中の総放散量を算出する（予測値）。測定期間中の室温は約22℃、最高温度は25℃、最低温度は21℃の範囲であった。

表3-1に結果を示す。予測値と実測値には最大8%の誤差の範囲に入り、精度良く予測することが可能であると思われる。

表3-1 重量測定による放散量と温度測定から推定した放散量

ドリル穴直径 [mm]	実験	実測値 [mg]	予測値 [mg]	誤差
0.8	1	275.2	297.1	8%
	2	267.0	287.7	8%
	3	265.5	287.4	8%
1.0	1	432.8	464.2	7%
	2	418.8	449.5	7%
	3	415.8	449.0	8%
1.2	1	672.6	668.5	1%
	2	648.2	647.3	0%
	3	640.9	646.5	1%

3.3 トレーサーガス分析法

トレーサーガス濃度の測定は、パッシブサンプラーを室内に測定期間中暴露し、測定開始後ガスクロマトグラフ質量分析器によって分析する。

(1)パッシブサンプラー

パッシブサンプラーには活性炭、Tenax, シリカゲル等種類があるが、本研究では活性炭によるパッシブサンプラーについて検討する。本研究では将来換気量と室内化学物質濃度の同時測定を行うことを想定し、サンプリングレート等の情報が多いシグマアルドリッチ・VOC-SD高性能パッシブサンプラー（溶媒抽出用）を用いる。

今回用いるパッシブサンプラーのサンプリングレートは文献5などで詳しく検討されているため、本研究ではHFE7100がパッシブサンプラーに吸着できるかどうかを確認する。

パッシブサンプラーとHFE7100をフラスコに入れて放置し、強制的にパッシブサンプラーをHFE7100に暴露する。暴露後、パッシブサンプラー中の活性炭を取り出し、メタノール1mlで5分間超音波抽出する。通常このパッシブサンプラーは二硫化炭素で溶媒抽出することが多いが、HFE7100は二硫化炭素と混合しないためメタノールを用いて抽出した。

(2)ガスクロマトグラフ質量分析器

メタノールで抽出した試料をガスクロマトグラフ質量分析器で分析する。ガスクロマトグラフ質量分析器はHP6890, カラムHP-5MSで分析する。分析結果を図3-7に示す。リテンションタイム約5分のところにHFE7100のピークが比較的感度良く検出される。HFE7100は同じ分子量の2つの物質が混合されているため、ピークが2つに分かれる。前半のピークはメチルパーフルオロブチルエーテル、後のピークはメチルフルオロイソブチルエーテルであると思われる。パッシブサンプラーの回収率も比較的良好であり、HFE7100及びVOC-SD高性能パッシブサンプラーを用いて空間一様発生法を行うことは可能であると思われる。

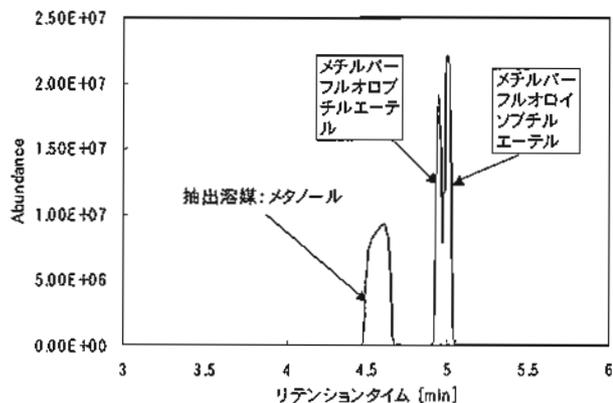


図3-7 ガス分析結果

4. 空間一様発生法による換気量の実測

木造独立住宅6棟を対象に、空間一様発生法による換気量の測定及びパッシブサンプリング法によるVOC濃度測定を行う。

4.1 対象住宅の概要

機械換気システムが設置されている木造住宅6棟を調査対象とする。対象住宅の概要を表4-1に示す。図4-1から4-4に対象住宅の平面図の一例を示す。House

表4-1 測定対象住宅の概要

	延床面積 (m ²)	相当開口面積 $\alpha A'$ (cm ² /m ²)	築後年数 (年)
House A	213.0	6.4	1
House B	222.6	2.2	8
House C	132.5	2.4	3
House D	156.4	3.7	4
House E	150.0	0.8	4
House F	208.2	8.7	1ヶ月

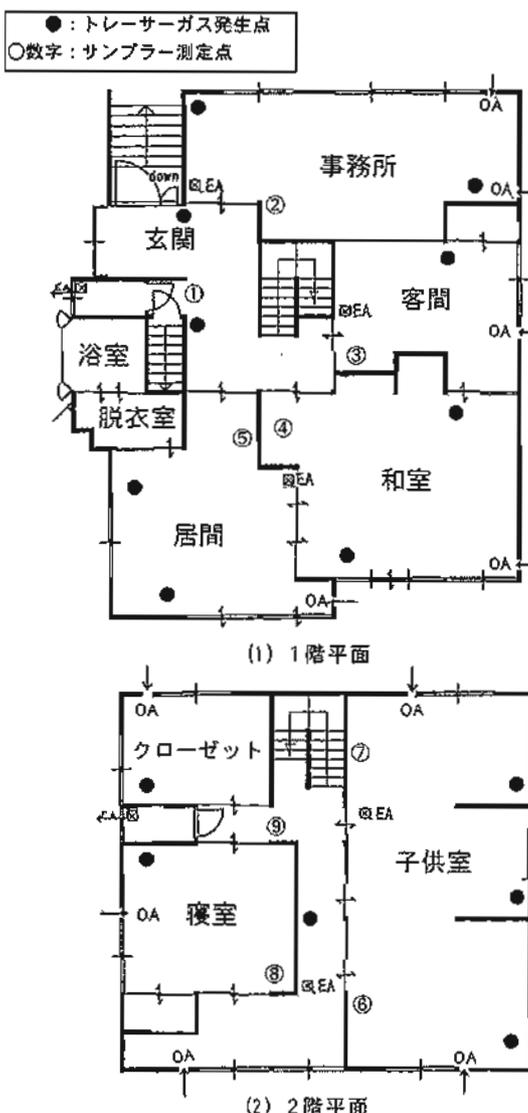


図4-1 対象住宅Aの平面とガス濃度測定点

● : トレーサーガス発生点
○数字 : サンプラー測定点

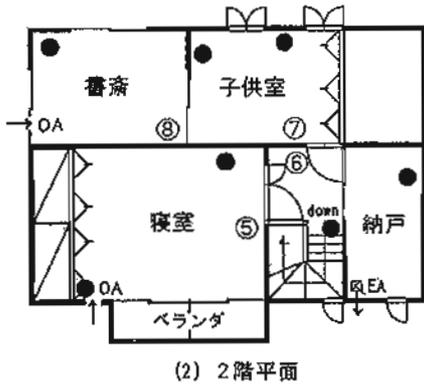
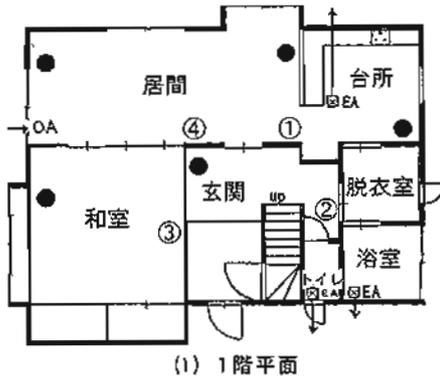


図4-2 対象住宅Cの平面とガス濃度測定点

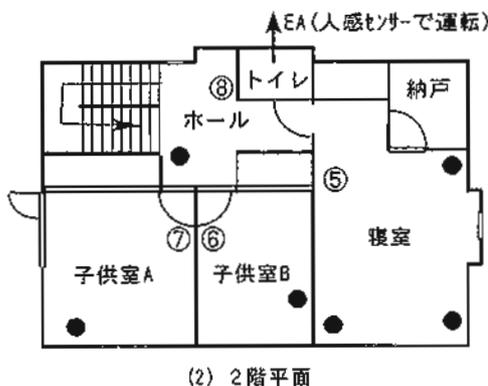
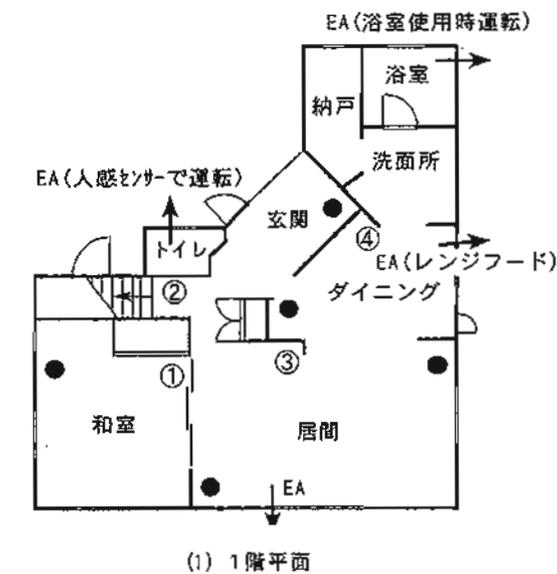


図4-3 対象住宅Dの平面とガス濃度測定点

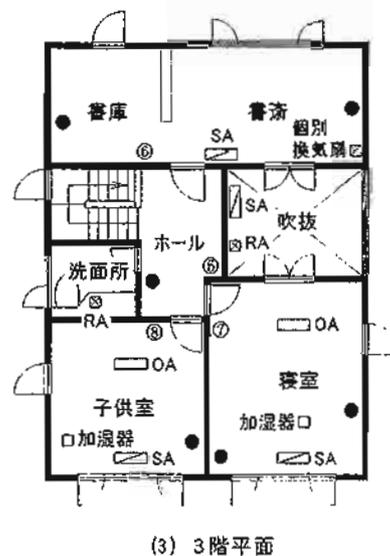
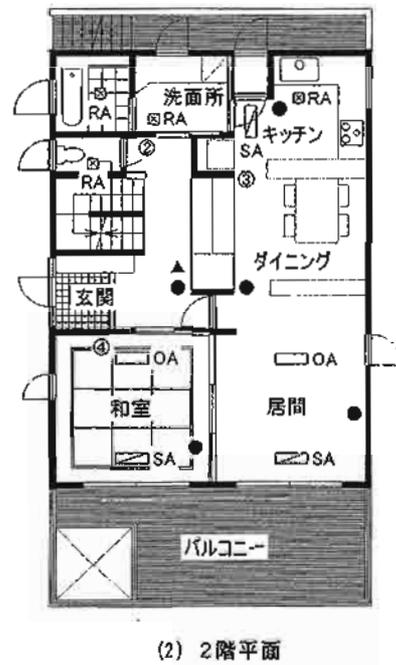
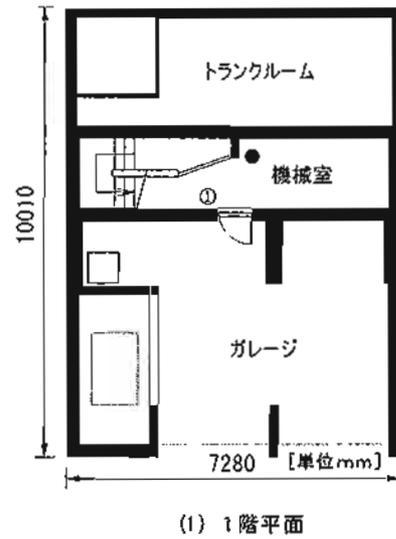


図4-4 対象住宅Eの平面とガス濃度測定点

A～Eは測定中常時換気システムを運転しているが、House Fは機械換気システムを運転していない。調査対象住宅の延床面積は、132.5 m²から222.6 m²である。House Aは築1年の住宅であり、House Bは築8年の住宅、House C、D、Eは、築3～4年の住宅である。House Fは、竣工後1ヶ月の新築住宅である。工法は、House Aは押し出し発砲ポリスチレンを用いた外断熱の在来軸組工法、House E(図4-4)は押し出し発砲ポリスチレンを用いた外断熱の枠組壁工法の住宅である。House B、D、Fは、グラスウールを用いた在来軸組工法である。House Cは、ウレタン断熱材入り構造パネルを用いたパネル工法の住宅である。

4.2 VOC 濃度測定方法

VOC濃度の測定は3M有機ガスモニタ3500を約10日間、居間、寝室、和室で暴露し、10日間の平均濃度を測定する。ガス濃度の分析方法は、二硫化炭素1.5mlで溶媒抽出し、ガスクロマトグラフ質量分析器でガスモニタに吸着されたVOC12成分の量を測定し、吸着量とガス濃度、暴露時間の関係から室内のVOCの濃度を算出する。

4.3 空気齢にもとづく換気量の測定方法

本測定ではトレーサーガスにスウェーデンPenflAQ製ヘキサフルオロベンゼン及びオクタフルオロトルエンのポイントソースを用い、サンプラーにSRK社製カーボンサンプラー用い、空間一様発生法による空気齢及び空気

齢に基づく換気量・換気回数測定を行う。測定結果を表4-2に示す。換気量の測定は住宅全体の一つの系と考え、各部屋で行っているが、ここではVOC濃度を測定した居間、和室、寝室と住戸全体の換気量及び換気回数を示す。対象住宅の住宅全体の換気回数は、0.3回/hから0.7回/hの範囲に入る。

4.4 パッシブサンプラーによるVOC濃度の測定結果

VOC濃度の測定結果を表4-3に示す。築1年のHouse Aは、比較的VOCの濃度が高い傾向が見られる。特にパラジクロロベンゼンの濃度が高い傾向が見られる。パラジクロロベンゼンが高い理由および発生源は特定できなかった。着工後1ヶ月のHouse Fは、トルエン及びブチレンの濃度が相対的に高い。House Fのブチレンが相対的に高い理由は発生源の特定が出来なかったため断定できないが、この住宅は全室温水式床暖房が設置されており、床暖房の効率の観点から床暖房配管の下部にポリスチレンフォームの断熱材が敷設されており、この点が他の住宅と大きく異なる点である。House Eは今回調査した住宅の中では一番相当開口面積が小さいが、比較的VOCの濃度が低い。House Eは相対的に換気回数が多いためであると考えられる。

4.5 VOC 放散速度の算出

各部屋の換気量と化学物質濃度から単位時間あたりの化学物質放散量(放散速度)を算出することができる。

表4-2 空間一様発生法で測定した対象住宅の換気量、換気回数測定結果

	House A			House B			House C			House D			House E			House F		
	居間	寝室	和室															
室容積 (m ³)	53.3	31.8	63.8	53.7	45.6	22.8	74.3	41.5	41.5	57.9	60.7	33.4	100.5	38.5	32.6	53.9	34.2	78.3
換気回数 (1/h)	0.49	0.45	0.60	0.77	0.66	0.69	0.37	0.32	0.39	0.53	0.27	0.62	0.64	0.8	0.8	0.55	0.45	0.58
換気量 (m ³ /h)	26.1	14.3	38.3	41.3	30.1	15.7	27.5	13.3	16.2	30.7	16.4	20.7	64.3	30.8	26.1	29.6	15.4	45.4
全体の換気量 (m ³ /h)	266			170			98			124			218			243		
全体の換気回数 (1/h)	0.54			0.70			0.33			0.34			0.70			0.52		

表4-3 パッシブサンプラーで測定したVOC濃度の測定結果

単位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$ N.D.: 未検出

	House A			House B			House C			House D			House E			House F		
	居間	寝室	和室	居間	寝室	和室	居間	寝室	和室	居間	寝室	和室	居間	寝室	和室	居間	寝室	和室
1,1,1-Trichloroethane	1.7	3.0	2.0	1.0	0.8	0.6	0.9	2.5	0.6	0.9	2.0	1.6	1.8	2.7	1.7	0.8	1.4	0.8
Benzene	98.1	N.D.	117.4	42.2	39.2	25.0	32.4	N.D.	22.6	N.D.	N.D.	15.3	N.D.	6.4	21.0	3.3	4.4	4.8
Tetrachloroethane	2.5	3.5	3.4	3.1	2.8	2.0	2.5	3.3	1.8	2.6	2.8	4.8	2.4	3.1	2.7	1.6	1.3	1.4
Trichloroethylene	1.3	1.9	1.7	0.9	0.5	0.6	3.1	3.8	2.4	1.0	1.1	1.3	1.7	2.4	1.8	1.2	1.0	1.2
Toluene	231.2	314.5	273.6	42.6	38.6	24.4	91.2	125.6	64.2	24.2	48.2	34.2	35.8	52.7	56.4	111.9	69.4	123.9
Tetrachloroethylene	1.7	10.7	2.0	0.2	0.3	0.2	0.8	1.6	1.0	0.6	1.0	1.0	0.5	1.2	0.4	0.8	1.2	1.7
m,p-Xylene	25.1	37.5	29.7	15.7	14.5	9.1	23.2	31.6	15.7	18.5	28.2	33.3	4.7	6.3	7.9	25.3	16.3	39.1
Styrene	2.0	3.4	2.2	0.8	0.7	0.5	0.3	2.5	1.0	0.8	0.9	0.6	1.4	1.4	4.4	215.7	127.1	294.7
o-Xylene	17.2	25.4	20.0	11.7	10.9	6.9	16.2	21.9	10.8	9.5	15.1	15.5	3.3	4.3	4.6	N.D.	N.D.	N.D.
1,3,5-Trimethylbenzene	9.2	13.8	10.5	7.4	7.0	4.5	6.0	6.9	3.5	6.1	9.5	7.2	0.7	0.9	1.5	N.D.	N.D.	N.D.
1,2,4-Trimethylbenzene	21.6	32.9	25.4	15.2	14.5	9.2	12.4	14.2	7.2	13.2	19.3	16.1	1.4	2.0	2.1	7.0	5.1	6.8
p-dichlorobenzene	935.0	2695.3	1078.5	10.8	13.4	6.3	46.4	160.5	44.8	4.2	25.8	6.0	7.9	12.7	20.3	7.6	5.2	14.7
Total VOCs	1346.5	3141.9	1566.5	151.7	143.2	89.4	235.3	374.3	175.7	81.6	153.8	136.9	61.7	96.0	124.7	375.3	232.5	489.1

(9)式に算出式を示す。

$$M = CVN \quad \dots (9)$$

M: 放散速度 (mg/h) C: VOC 室内濃度 (mg/m³)

V: 室容積 (m³) N: 換気回数 (1/h)

(9)式で算出した各部屋のVOCの放散速度を表4-4に示す。また、築年数と放散速度の関係を図4-5に示す。放散速度はHouse Aが最も高く、居間のTotal-VOCで35.2mg/hである。次に竣工後1ヶ月のHouse Fの放散速度が多い。築年数3~4年のHouse C, D, Bと築年数8年のHouse BはHouse A, Fと比較して顕著な違いは見られない。対象VOC12成分のうちHouse Aではパラジクロロベンゼンの放散速度が多く、その他の住宅では、トルエンの放散速度が最も多い。

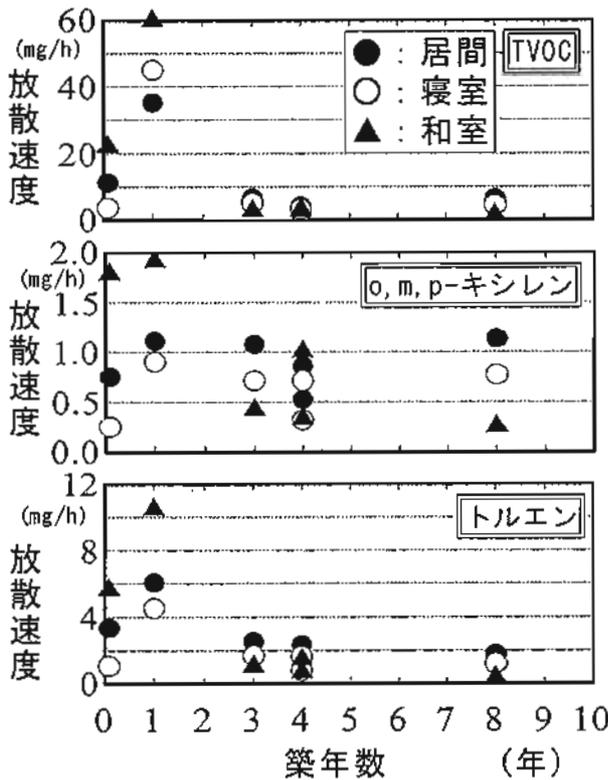


図4-6 築後年数と放散速度の関係

表4-4 VOC 放散速度の算出結果

単位: mg/h N.D.: 未検出

	House A			House B			House C			House D			House E			House F		
	居間	寝室	和室	居間	寝室	和室	居間	寝室	和室	居間	寝室	和室	居間	寝室	和室	居間	寝室	和室
1,1,1-Trichloroethane	0.04	0.04	0.08	0.04	0.02	0.01	0.03	0.03	0.01	0.03	0.05	0.03	0.11	0.08	0.04	0.02	0.02	0.04
Benzene	2.56	N.D.	4.49	1.75	1.18	0.39	0.89	N.D.	0.37	N.D.	N.D.	0.32	N.D.	0.20	0.55	0.10	0.07	0.22
Tetrachloromethane	0.07	0.05	0.13	0.13	0.08	0.03	0.07	0.04	0.03	0.08	0.05	0.10	0.15	0.10	0.07	0.05	0.02	0.07
Trichloroethylene	0.03	0.03	0.06	0.04	0.02	0.01	0.08	0.05	0.04	0.03	0.02	0.03	0.11	0.07	0.05	0.04	0.02	0.05
Toluene	6.04	4.50	10.48	1.76	1.16	0.38	2.51	1.67	1.04	0.74	0.79	0.71	2.30	1.62	1.47	3.32	1.07	5.63
Tetrachloroethylene	0.04	0.15	0.08	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.01	0.02	0.02	0.08
m,p-Xylene	0.66	0.54	1.14	0.65	0.44	0.14	0.64	0.42	0.25	0.57	0.46	0.69	0.31	0.19	0.21	0.75	0.25	1.78
Styrene	0.05	0.05	0.09	0.03	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01	0.09	0.04	0.11	6.39	1.96	13.38
o-Xylene	0.45	0.36	0.77	0.48	0.33	0.11	0.44	0.29	0.18	0.29	0.25	0.32	0.21	0.13	0.12	N.D.	N.D.	N.D.
1,3,5-Trimethylbenzene	0.24	0.20	0.40	0.31	0.21	0.07	0.17	0.09	0.06	0.19	0.16	0.15	0.05	0.03	0.04	N.D.	N.D.	N.D.
1,2,4-Trimethylbenzene	0.36	0.47	0.97	0.63	0.44	0.14	0.34	0.19	0.12	0.41	0.32	0.33	0.09	0.06	0.05	0.21	0.08	0.31
p-dichlorobenzene	24.42	38.57	41.29	0.45	0.40	0.10	1.28	2.13	0.72	0.13	0.42	0.12	0.51	0.39	0.53	0.22	0.08	0.67
Total VOCs	35.17	44.96	59.96	6.27	4.31	1.41	6.47	4.97	2.84	2.50	2.52	2.84	3.97	2.96	3.25	11.13	3.58	22.21

5. まとめ

本研究は換気量測定手法の一つである空間一様発生法の測定手法を検討し、測定法に必要なトレーサーガス発生装置及びトレーサーガスサンプラーの検討を行った。また、戸建木造住宅を対象とした室内VOC濃度と換気量を同時に測定した。まとめは以下のとおりである。

(1) トレーサーガスにHFE7100が使用できることを確認した。従来トレーサーガスに使用されている六フッ化硫黄(SF6)やフロンガスよりも温暖化ガス係数(GWP)が小さく、SF6のGWPが23900であるに対してHFE7100のGWPが320であるためこれらの観点からも有用なトレーサーガスであると思われる。

(2) 毛細管ピペットを用いたトレーサーガス発生装置は25℃の時に1個あたり3.53~8.84mg/hの放散量を放出することが可能であり、毛細管の長さを調整することにより任意の放散速度をえることが可能である。

(3) バイアル瓶を用いたトレーサーガス発生装置は25℃の時に1個あたり3.56~29.1mg/hの放散量を放出することが可能である。またバイアル瓶のスクリーキャップのドリル穴面積をかえることにより任意の放散速度をえることが可能である。バイアル瓶の大きさを変えることにより、長期間に多量のHFE7100を放散することが可能であると思われる。

(4) 空間一様発生法による換気量を測定を行った結果、今回測定した住宅の住宅全体の換気回数は、0.3回/hから0.7回/hの範囲に入る。

(5) 築後年数の短いHouse A, FのVOCs濃度は相対的に高い傾向がみられる。

(6) 対象住宅の中で相当開口面積の小さいHouse Eは、相当開口面積が小さいのに拘わらず、比較的低い濃度となっている。これは、House Eは相対的に換気回数が多い

いためである。

(7) VOCの放散速度は、パラジクロロベンゼン、トルエン、ベンゼンが多い。

<注>

- 1) JIS A 1406-1974では、濃度減衰法だけではなく、トレーサーガスが一定供給される場合の濃度変化を扱う濃度上昇法についても規格化されている。
- 2) 一般的に多数室の室間換気量の測定は測定機器や解析手法に困難な課題が多い。わが国では奥山による方法^{*6)}、絵内による方法^{*7)}の研究がある。
- 3) HFE7100を採用した大きな理由は、人体に対する安全性と地球温暖化係数(GWP)、オゾン破壊係数(ODP)が比較的低いためである。HFE7100の物性を以下に示す^{*8)}。

注-1 HFE7100の物性値

化学式	C ₄ F ₉ OCH ₃
比重	1.5g/ml(液体)
沸点	61℃
引火点	なし
発火点	405℃
ODP	ゼロ
大気寿命	4.1年
GWP	320
許容濃度(TWA)	750ppm

<参考文献>

- 1) 山口 一, 赤林伸一, 坂口 淳: 木造独立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実態調査, 住宅における室内化学物質汚染に関する調査研究 その1, 日本建築学会計画系論文集, 第554号, pp.15~20, 日本建築学会, 2002.4
- 2) 内山茂久, 長谷川修司, 田辺新一: 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, 第547号, pp.75~80, 日本建築学会, 2001.9
- 3) JIS A 1406-1974: 室内換気量測定方法(炭酸ガス法), 日本規格化協会
- 4) 村上周三: CFDによる建築・都市の環境設計工学, 東京大学出版会, 2000.9
- 5) 田辺新一他: 住宅における生活環境の衛生問題に実態調査, 平成11年度厚生科学研究補助金報告書, 2000.12
- 6) 奥山博康: 建築物の熱回路網モデルに関する理論的

研究, 博士論文, 1987.12

- 7) 島田潔, 福島史幸, 繪内正道, 澤地孝男, 瀬戸裕直: 多種トレーサーガス法による多室間換気量測定法の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集[中国]02, pp.633~634, 日本建築学会, 1999.9
- 8) 住友スリーエム(株): Novec HFE製品カタログ, 住友スリーエム
- 9) 斎藤平蔵: 建築気候, 共立出版, 1974.5
- 10) David Etheridge, Mats Sandberg: Building Ventilation, Theory and Measurement, John Wiley & Sons, 1996