

**事例報告**

## 家庭用空気清浄機の化学物質除去性能と 室内濃度予測に関する研究（その1）

一條 佑 介<sup>1)</sup> 野 崎 淳 夫<sup>2)</sup>

1) 東北文化学園大学科学技術学部人間環境デザイン学科

2) 東北文化学園大学大学院健康社会システム研究科

## A study on the chemical substance removal performance of room air cleaners and the indoor concentration prediction (Part 1)

Yusuke Ichijo<sup>1)</sup> Atsuo Nozaki<sup>2)</sup>

1) Department of Human Environment Design,  
Tohoku Bunka Gakuen University

2) Graduate School of Health and Environmental Sciences,  
Tohoku Bunka Gakuen University

### 要約

本研究では家庭用空気清浄機における性能試験法の特徴を明らかにし、望ましい試験法を提案し、また試験時の留意点を明確なものとする。次に、同試験法を用いて機器のホルムアルデヒドとVOC (Volatile Organic Compounds) の除去性能を求め、最後に数学的予測モデル式を用いて家庭用空気清浄機使用室の濃度予測を行い、予測精度を明らかにする。

すなわち、1) 各種試験法の特徴、2) 望ましい試験法が実大チャンバーを用いた定常発生法試験であること、3) 2)の試験法における処理対象濃度の再現性、4) チャンバーサイズと機器風量が試験結果に与える影響を明らかにした。

また、5) 我が国で家庭用空気清浄機が普及し始めた1995年以降の10年間における機器のホルムアルデヒド除去性能の実態を明らかにし、最後に6) 試験的に得られた除去性能と予測式を用いて、空気清浄機使用室におけるホルムアルデヒド濃度予測値を求め、実測値との比較から同予測法の予測精度を明らかにした。  
(臨床環境19:32~45, 2010)

《キーワード》家庭用空気清浄機、ホルムアルデヒド、揮発性有機化合物、相当換気量、吸着率、濃度予測

受付：平成20年11月19日 採用：平成22年8月4日

別刷請求宛先：一條佑介

〒981-8551 仙台市青葉区国見6-45-1 東北文化学園大学 科学技術学部 人間環境デザイン学科

Received: November 19, 2008 Accepted: August 4, 2010

Reprint Requests to Yusuke Ichijo, Department of Human Environment Design, Tohoku Bunka Gakuen University, 6-45-1 Kunimi, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 981-8551, Japan

## Abstract

The present study clarifies the characteristics of performance test methods for room air cleaners and suggests the most desirable test method, and sets out issues that must be kept in mind at the time of the examination.

This test method requires the removal performance of formaldehyde and VOC for the room air cleaner, and a prediction model formula is used for predicting concentrations in rooms with a room air cleaner in order.

As a result, the present study clarified the characteristics on the typical test methods, and clarified that the constant-emission test with use of an actual-sized chamber was the most desirable test method. In addition, we determined the plasticity of the processing object concentration in the constant-emission test. We also determined the influence of chamber size and air volume of room air cleaners on the test results.

Furthermore, the formaldehyde removal performance of the air cleaner for ten years after 1995 was determined experimentally, and the predicted values of formaldehyde concentrations were determined based on the prediction formula. The precision of the prediction method was determined by comparing it with the actual measured values.

It turned out that the present prediction-method realized the concentration pattern correctly in a room with an operation of room air cleaners.

(Jpn J Clin Ecol 19 : 32~45, 2010)

---

《Key words》 room air cleaner, formaldehyde, volatile organic compounds (VOC), clean air delivery rate (CADR), adsorption rate, concentration prediction

---

## I. 緒言

### 1. 研究の背景

近年、健康快適な室内空気環境が求められており、とりわけ室内空気汚染に関する関心が高まっている。そのため、有効な室内空気汚染対策が求められており、身近な対策技術の一つとして家庭用空気清浄機に期待が寄せられている。

家庭用空気清浄機の性能試験法として、日本工業規格 (JIS) がある。JIS C 9615では粉塵、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>について、家庭用空気清浄機の吸込口、吹出口における一過性の濃度測定試験 (single pass method) により、機器の汚染物質除去性能を求める性能試験法を示しているが、この方法では機器の汚染物質除去率が小さい場合には機器性能を正確に表しにくく、測定上の誤差範囲が大きくなり、また機器の実環境での性能が反映されない等の問題が指摘されていた。特に、シックハウスの原因物質とされるホルムアルデヒドや揮発性有機化合物 (VOC ; Volatile Organic Compounds) などのガス状物質除去については、

市販空気清浄機の除去率は小さく、正確な定量的算定が困難な状況にあった。

そこで、機器をチャンバー内で運転し、機器性能を求める試験法 (チャンバー法) が提案され、除去性能をより正確に把握することが可能となった。

これらの背景により、国土交通省、経済産業省、厚生労働省らの省庁、大学、民間企業等で組織された室内空気対策研究会と国土交通省の総合技術開発プロジェクトのシックハウス対策技術の開発委員会ならびに (社) 日本建築学会では、6畳大の大型環境試験室 (実大チャンバー) を用いた家庭用空気清浄機の試験法を示している。また、日本電機工業会 (JEMA) でも、実大チャンバーを用いた新試験法の提案が検討されている。

近年の空気清浄機は室内に浮遊する粉塵を効率よく除去するが、ガス状物質の除去性能は不明であった。そのため、野崎ら<sup>1)</sup>は大型チャンバーを用いた試験法を用いて、2000年度製造の家庭用空気清浄機のホルムアルデヒド除去性能を求め、同

機器のホルムアルデヒド除去性能（相当換気量）は8.10~19.9[m<sup>3</sup>/h]の範囲にあったことを報告している。この研究報告は建築基準法による換気基準<sup>1)</sup>（在室者1人あたり、20 [m<sup>3</sup>/h]の必要換気量）に照らし合わせた場合、1人の在室者がある室の必要換気量に近い値であったため、同機器が室内ホルムアルデヒド汚染対策に有効であるとの期待を持たせた。

海外では、F. Yuan ら<sup>2)</sup>が大型チャンバーを用いる AHAM 試験法<sup>2)</sup>により、機器のバクテリア除去性能を求め<sup>3)</sup>、同試験法における機器の性能指標（CADR）を用いて、測定機器の性能比較を行っているが、ガス状物質の除去性能を定量的に求めた研究例は少ない。

空気清浄機使用室における室内濃度予測に関する研究については、例えば F. Yuan ら<sup>2)</sup>や Jingjing ら<sup>4)</sup>は後述する「濃度減衰法」を用いて機器性能を求め、その値を室内濃度予測値に代入し、予測精度を検証する報告を行っているが、実大チャンバー内での検討を行うには至っていない。

ところで、空気清浄機試験法にはチャンバーへ汚染物質を一時的に供給する「濃度減衰法」と定常的に供給する「定常発生法」があるが、両試験法の関係については、小峯、長谷川らにより定量的に明らかにされている<sup>5)</sup>。実際の室内では建材や生活用品等から化学物質が常時放散されており、「実大チャンバーを用いた定常発生法試験」が、実際の室内環境を良く再現し、実態に即した機器性能を提供する事になる。

ただし、実大チャンバーを用いた定常発生法試験による空気清浄機性能を求める研究は、定常的に汚染物質をチャンバーに供給する技術が整備されていなかったことなどから、殆ど行われなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では家庭用空気清浄機のガス状物質の除去性能を求める試験法について検討し、望ましい試験法とその留意点を明らかにするものである。また、市販機器のホルムアルデヒド除去性能の実態を明らかにし、得られた機器性能と数学的予測モデル<sup>6~8)</sup>により、空気清浄機使用室の濃度予測

を行い、その予測精度を検証するものである。

すなわち、本研究では1) 各種試験法の特徴を明らかにし、かつ望ましい試験法の要件を整理する。また、2) 「実大チャンバーを用いた定常発生法試験」における処理対象濃度の再現性の検証を行い、3) 試験パラメータ（チャンバーサイズと機器風量）が試験結果に与える影響を明らかにするものである。

また、4) 我が国で家庭用空気清浄機が普及し始めた1995年以降の10年間における機器のホルムアルデヒド除去性能の実態を明らかにし、最後に5) 試験的に得られた機器除去性能と予測式を用いて、空気清浄機使用室におけるホルムアルデヒド濃度予測値を求め、実測値との比較から同予測法の予測精度を検証するものである。

## II. 実験方法

### 1. 実験室

本研究では、温度、湿度、換気回数等の環境条件が制御できる2つのステンレスチャンバー（5 [m<sup>3</sup>]、22[m<sup>3</sup>]）を使用した。2つの試験法（濃度減衰法と定常発生法）を行うため、大型チャンバーには汚染ガスボンベ又はガス定常発生装置<sup>9)</sup>が接続されている。（図1）。

また、チャンバー内を所定の環境条件（温度：28±1 [°C]、相対湿度：50±1 [%]、換気回数：0.03±0.003、又は0.50±0.05 [1/h]、気流速度：0.2~0.3 [m/s]）に制御し、同チャンバー内には常時清浄空気を供給した。

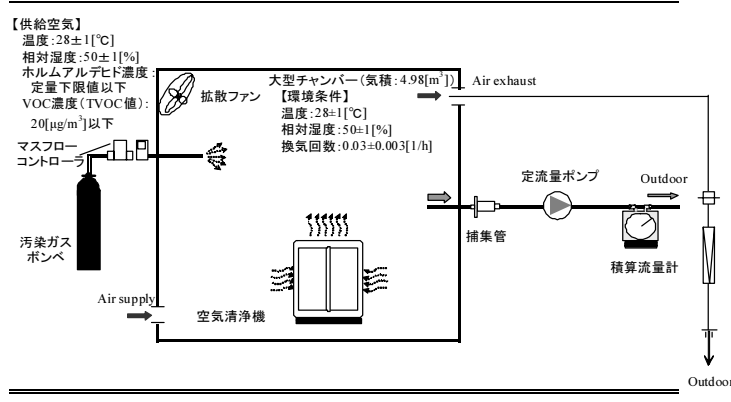
### 2. 実験対象機器

国内で市販される空気清浄機は、吸着方式と分解・再生方式に大別されるが、本実験対象機器は、表1に示すように分解・再生方式（7台）と吸着方式（13台）の計20台であり、除去方式、フィルタ構成、適用床面積等を考慮して選定した。

機器は1995年製（5台）、2000年製（5台）、2002年製（5台）、2003年製（2台）、2005年製（2台）、2006年製（1台）である。

### 3. 測定対象物質

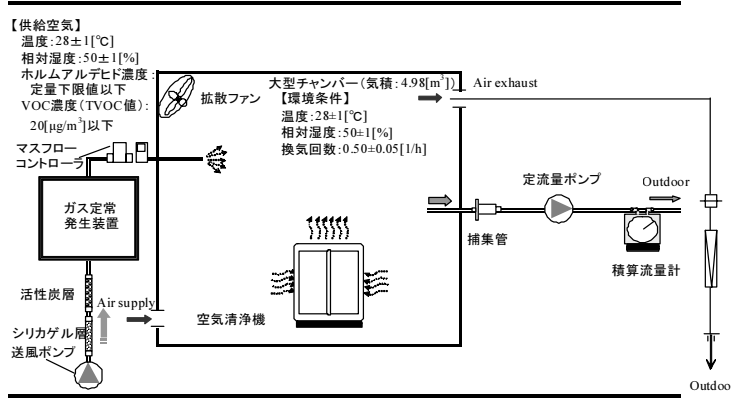
本研究での測定対象物質は、厚生労働省が室内濃度指針値を定めている13物質のうち、毒性が強



(a) 大型チャンバーを用いた試験装置(濃度減衰法)



(b) 濃度減衰法に用いたガスポンペ



(c) 大型チャンバーを用いた試験装置(定常発生法)



(d) 定常発生法に用いたガス定常発生装置



(e) 5[m³]の大型チャンバー



(f) 22[m³]の実大チャンバー

図1 実験概要

表1 試験対象機器

	製造年	機器風量[m <sup>3</sup> /h]					適用 床面積[m <sup>2</sup> ]	フィルタ構成	除去方式
AC-1	1995	138	-	114	-	72	10	①プレフィルタ②集塵フィルタ③脱臭フィルタ④静電フィルタ	吸着方式
AC-2		-	-	-	-	-	-	①プレフィルタ②静電フィルタ③脱臭フィルタ	吸着方式
AC-3		138	-	114	-	60	8	①プレフィルタ②ファイバーフィルタ③脱臭フィルタ	吸着方式
AC-4		180	-	132	-	102	24	①抗菌・脱臭・集塵フィルタ	吸着方式
AC-5		-	-	-	-	-	16	①放電部②ロールフィルタ	吸着方式
AC-6	2000	180	-	-	-	30	18	①プレフィルタ②HEPAフィルタ③脱臭フィルタ④抗菌フィルタ	吸着方式
AC-7		258	204	150	78	36	20	①プレフィルタ②放電部③活性炭・チタン系触媒・ULPAフィルタ	分解方式
AC-8		270	186	120	90	60	21	①ULPAフィルタ②放電部③活性炭フィルタ	分解方式
AC-9		258	180	120	66	30	20	①粗ごみフィルタ(紙製)②脱臭(活性炭)・集じんHEPAフィルタ	吸着方式
AC-10		60	-	-	-	42	24	①放電部②ロールフィルタ	吸着方式
AC-11	2002	312	246	156	72	36	24	①プレフィルタ②活性炭フィルタ③プラズマULPAフィルタ	吸着方式
AC-12		312	246	156	72	36	24	①プレフィルタ②活性炭フィルタ③プラズマULPAフィルタ	吸着方式
AC-13		258	180	-	120	78	20	①プレフィルタ②除菌フィルタ③集塵フィルタ④活性炭フィルタ	吸着方式
AC-14		240	180	-	102	30	19	①プレフィルタ②再生活性炭フィルタ③アパタイト抗菌フィルタ④ULPAフィルタ	分解・再生方式
AC-15		110	-	95	-	75	-	①プレフィルタ②殺菌酵素フィルタ③活性炭フィルタ	吸着方式
AC-16	2003	420	330	240	150	60	29	①プレフィルタ②バイオ抗体フィルタ③静電集塵フィルタ④光触媒フィルタ⑤脱臭触媒フィルタ	分解・再生方式
AC-17		480	306	210	150	60	36	①プレフィルタ②除菌アパタイトHEPAフィルタ③プラズマ触媒フィルタ④特殊活性炭フィルタ	分解・再生方式
AC-18	2005	420	330	240	150	60	29	①プレフィルタ②バイオ抗体フィルタ③静電集塵フィルタ④光触媒フィルタ⑤脱臭触媒フィルタ	分解・再生方式
AC-19		306	-	120	-	30	24	①活性炭・CO触媒フィルタ②活性炭フィルタ③制菌HEPAフィルタ	吸着方式
AC-20	2006	450	330	240	150	60	27	①プレフィルタ②バイオ抗体フィルタ③静電集塵フィルタ④光触媒フィルタ⑤脱臭触媒フィルタ	分解・再生方式



く、シックハウスの主たる原因物質であるホルムアルデヒドとし、また塗料、接着剤に使用され、問題視されている VOC (エチルベンゼン、m-キシレン、スチレン) とした。

#### 4. 捕集・分析法と使用機器

ホルムアルデヒドと VOC (エチルベンゼン、m-キシレン、スチレン) の捕集・分析法と使用機器は、以下の通りである。

##### 1) ホルムアルデヒド

###### a) 捕集・分析法

固相捕集－溶媒抽出－高速液体クロマトグラフ法 (以下、HPLC 法)

###### b) 捕集装置

- ・定流量ポンプ (Sibata 社製、Model: MP-Σ100)
- ・DNPH カートリッジ (Waters 社製、Sep-Pak Xposure Aldehyde Sampler)
- ・積算流量計 (Shinagawa 社製、DC-1A)

###### c) 分析装置

- ・高速液体クロマトグラフ (日立社製、L-7000 型)

##### 2) VOC

###### a) 捕集・分析方法

固相捕集－加熱脱離－ガスクロマトグラフ／質量分析法 (以下、GC/MS 法)

###### b) 捕集装置

- ・定流量ポンプ (Sibata 社製、Model: MP-Σ30)
- ・炭素系捕集管 (Supelco 社製、Air-toxics)
- ・積算流量計 (Shinagawa 社製、DC-1A)

###### c) 分析装置

- ・加熱導入装置 (Perkin Elmer 社製、Turbo Matrix ATD)
- ・GC/MS (Perkin Elmer 社製、Clarus 500)

なお、GC/MS の分析条件は、スキャンモード： $m/z$ ：40～250、トランスファー温度：280[°C]、インターフェース温度：250[°C]、カラム温度：60～280[°C] (昇温速度：5 [°C/min])、カラム：SPB-1(内径：0.25[mm]、膜厚：1 [μm]、長さ：60[m])、キャリアガス：ヘリウム、キャリア流量：1.3[ml/min]である。

加熱導入装置の運転条件は、チューブ加熱温度：300[°C]、一次脱着：300[°C]、10[min]、二次脱着：300[°C]、38[min]、スプリット流量は Inlet：20[ml/min]、Outlet：10[ml/min]とした。

#### 5. 実験手順

実験手順を以下に示す。

- 1) チャンバーの床、壁、天井面の薬液洗浄を行う。薬液洗浄後は実験室に清浄空気を供給しつつ、実験室内の温度、換気回数、気流速度をそれぞれ40[°C]、3 [1/h]、2～3 [m/s]に増大させ、吸着物質の除去を図る。尚、使用薬液は特性の異なるエタノールとアセトンを用いる。
- 2) チャンバー内に空気清浄機、ミキシングファンを設置する。
- 3) チャンバー内を所定の環境条件に再度制御する。
- 4) チャンバー供給空気中の試料空気を捕集する。
- 5) チャンバー内に対象汚染物質を供給する。
- 6) 機器非運転期間と機器運転期間中のチャンバー内の試料空気を捕集する。
- 7) 試料空気中の汚染物質の定性・定量を行い、捕集量との関係から対象汚染物質の濃度を求める。

### Ⅲ. 室内汚染物質濃度予測式と機器性能算出式

#### 1. 室内汚染物質濃度予測式

家庭用空気清浄機使用室におけるある任意時刻  $t$ [h] の汚染物質濃度は、次式(1)により求められる<sup>6～8)</sup>。

$$C = C_1 e^{-\left(\frac{Q}{R} + \frac{V_i S}{R} + \frac{aA}{R} + \frac{Q_{eq}}{R}\right)t} + \frac{M + QC_0}{Q + V_i S + aA + Q_{eq}} \left(1 - e^{-\left(\frac{Q}{R} + \frac{V_i S}{R} + \frac{aA}{R} + \frac{Q_{eq}}{R}\right)t}\right) \quad (1)$$

ここで、 $M$ ：対象汚染物質の発生量[μg/h]、 $Q$ ：室換気量[m<sup>3</sup>/h]、 $C_0$ ：室内供給空気中の対象汚染物質濃度[μg/m<sup>3</sup>]、 $V_i$ ：対象汚染物質の落下速度[m/h]、 $S$ ：床面積[m<sup>2</sup>]、 $a$ ：対象汚染物質の吸着速度[m/h] (建材や物品表面における化学変化を含む)、 $A$ ：対象汚染物質の吸着面積[m<sup>2</sup>]、 $R$ ：室気積[m<sup>3</sup>]、 $C_1$ ：対象汚染物質の室

内初期濃度  $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ 、 $Q_{eq}$ ：家庭用空気清浄機の対象汚染物質除去性能（相当換気量） $[\text{m}^3/\text{h}]$ とする。

既往の研究<sup>2, 4, 10)</sup>においても、換気回数、気積、汚染物質発生量、時間をパラメータとした室内濃度予測式が提案されているが、野崎らが提案する上記の濃度予測式にはこれらのパラメータの他に室（チャンバー）への吸着速度  $a$   $[\text{m}/\text{h}]$  と汚染物質の落下速度  $(V_l)$   $[\text{m}/\text{h}]$  が含まれている。このうち、落下速度  $(V_l)$   $[\text{m}/\text{h}]$  は、花粉、粉塵、真菌などの浮遊粒子状物質が対象となり、一般のガス状物質は対象とならない。

## 2. 機器性能の評価指標と演算式

家庭用空気清浄機の汚染物質除去性能は、相当換気量  $(Q_{eq})$   $[\text{m}^3/\text{h}]$  として求めることができる。この指標は空気清浄機のある汚染物質に対する除去能力を室換気量に相当させたものである。例えば、 $Q_{eq}$  が  $20$   $[\text{m}^3/\text{h}]$  の機器は、1 時間に  $20$   $[\text{m}^3]$  の対象汚染物質を含まない空気を室に供給することを意味している。

米国における家庭用空気清浄機試験法 (ANSI/AHAM AC-1-2006) においても、相当換気量  $(Q_{eq})$   $[\text{m}^3/\text{h}]$  と同様の意味合いを持つ評価指標 (Clean air delivery rate ; CADR  $[\text{cfm}]$ ) が用いられている。

ところで、機器固有の物質毎に異なる相当換気量は以下のプロセスで求めることができる。

濃度予測式(1)において、対象汚染物質の分子量が比較的小さい場合には  $V_l = 0$   $[\text{m}/\text{h}]$  とし、また  $t = \infty$  とすると、室内濃度  $C$   $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$  は定常濃度  $C_{ss}$   $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$  に置き換えられる。これを、 $Q_{eq}$  について解くと、次式(2)が得られる。

$$Q_{eq} = \frac{M}{C_{ss}} + Q \left( \frac{C_0}{C_{ss}} - 1 \right) - aA \quad (2)$$

また、吸着率  $\alpha$   $[\text{1}/\text{h}]$ 、吸着速度  $a$   $[\text{m}/\text{h}]$ 、吸着面積  $A$   $[\text{m}^2]$ 、室気積  $R$   $[\text{m}^3]$  には、次式(3)の関係が成り立つ。

$$\alpha = \frac{aA}{R} \quad (3)$$

(3)式を(2)式に代入することにより、次式(4)が得られる。本式により、機器の性能指標の相当換気量  $Q_{eq}$  を求めることができ、これを用いて機器性能の大小が判別できる。

$$Q_{eq} = \frac{M}{C_{ss}} + Q \left( \frac{C_0}{C_{ss}} - 1 \right) - \alpha R \quad (4)$$

## 3. チャンバーへの吸着率 $(\alpha)$ の実態<sup>11)</sup>

室内の床、壁、天井等の仕上げ建材の吸着率  $\alpha$   $[\text{1}/\text{h}]$  は、室内濃度に影響を及ぼす。また、上記(4)式の空気清浄機性能算定式に於いても、吸着率  $\alpha$   $[\text{1}/\text{h}]$  を知る必要がある。

ところが、チャンバーへの吸着率  $(\alpha)$   $[\text{1}/\text{h}]$  の実態把握は困難な課題であった。そこで、野崎らはある一定の環境条件の下、ステンレスで覆われたチャンバー内の吸着率の実態を求める研究を行っている<sup>11)</sup>。すなわち、本研究で用いたチャンバーと同仕様の大型チャンバーにホルムアルデヒドの定常発生装置を接続して、チャンバー内の吸着率を測定している。測定はホルムアルデヒド供給量と室内濃度について定期的に行い、上記室内濃度予測式(1)との関係から、時間毎のチャンバー表面材 (SUS304) への吸着率  $\alpha$   $[\text{1}/\text{h}]$  の算定を行っている。

その結果、ステンレス (SUS304) にて覆われたチャンバーに対するホルムアルデヒド吸着率は初期に大きく、時間経過に従って減少し、やがて  $0$   $[\text{1}/\text{h}]$  になる実態が明らかにされている。すなわち、ガス定常発生装置運転1時間後の吸着率  $\alpha$   $[\text{1}/\text{h}]$  は  $0.48$   $[\text{1}/\text{h}]$  を示し、その後徐々に低下し、4時間後にほぼゼロになることが報告されている。

本研究における実験条件は、この報告と同一である。そのため、(4)式を用いて機器性能（相当換気量）を算出する場合には、ガス定常発生装置運転4時間以降の吸着率  $(\alpha)$   $[\text{1}/\text{h}]$  がほぼゼロとなることから、吸着率  $\alpha$   $[\text{1}/\text{h}]$  はゼロとして計算を行った。

## IV. 結果と考察

### 1. 定常発生法について

#### 1) 試験法の特徴

これまで、高濃度の汚染ガスを一時的にチャンパーに供給する濃度減衰法が、空気清浄機の一般的な試験法として使用されてきた。

しかし、室内では建材や家具等の持ち込み物品から、ホルムアルデヒドなどのガス状物質が常時放散される。そのため、定常的に汚染ガスをチャンパーに供給する定常発生法が、実用的試験法として注目されている。

ここでは、濃度減衰法と定常発生法の試験を行い、両試験法の特徴を明らかにする。

#### a) 濃度減衰法

市販の空気清浄機 (AC-16) を用いて試験を行った。すなわち、5 [m<sup>3</sup>] チャンパー内を所定の環境条件 (温度: 28 [°C]、相対湿度: 50 [%]、換気回数: 0.03 [1/h]) に制御し、汚染ガスを接続・供給して、空気清浄機運転に伴う濃度の減衰性を測定した。尚、本濃度減衰法では、「低濃度の処理対象濃度」、あるいは「大きな換気回数」で試験を行うと、チャンパー内濃度が空気清浄機運転以前に低下してしまい、機器運転による濃度低減性の把握が困難となる。そのため、本試験では、一般環境に比較して処理対象濃度は高い値とし、

また換気回数は小さい値としている。

試験の結果、図 2 (a) に示すように機器非運転時の大型チャンパー内のホルムアルデヒド濃度は、約1000 [μg/m<sup>3</sup>] 程度であったが、機器運転に伴い徐々に低下し、機器運転開始から約15分後には約10 [μg/m<sup>3</sup>] まで低下した。

濃度減衰法では機器運転に伴う室内濃度の低減性に一つの特徴がある<sup>1)</sup>。

すなわち、本試験でも処理対象濃度が高い約80~1000 [μg/m<sup>3</sup>] の間の濃度低減率は大きいですが、約80 [μg/m<sup>3</sup>] まで低下すると、その後の低減率は小さくなる現象が示された。測定値は2つの直線 (実線 I と実線 II) にて回帰でき、前者の低減勾配は大きく、後者の低減勾配は小さい。

#### b) 定常発生法

濃度減衰試験と同一の空気清浄機 (AC-16) を用いて試験を行った。すなわち、5 [m<sup>3</sup>] チャンパー内を所定の環境条件 (温度: 28 [°C]、相対湿度: 50 [%]、換気回数: 0.5 [1/h]) に制御し、定常発生装置を接続・運転して、空気清浄機運転に伴う濃度の減衰性を測定した。

結果として、図 2 (b) に示すように、機器非運転時の大型チャンパー内におけるホルムアルデヒド濃度は、約300 [μg/m<sup>3</sup>] 程度であったが、機器運転に伴い徐々に低下し、機器運転開始から約

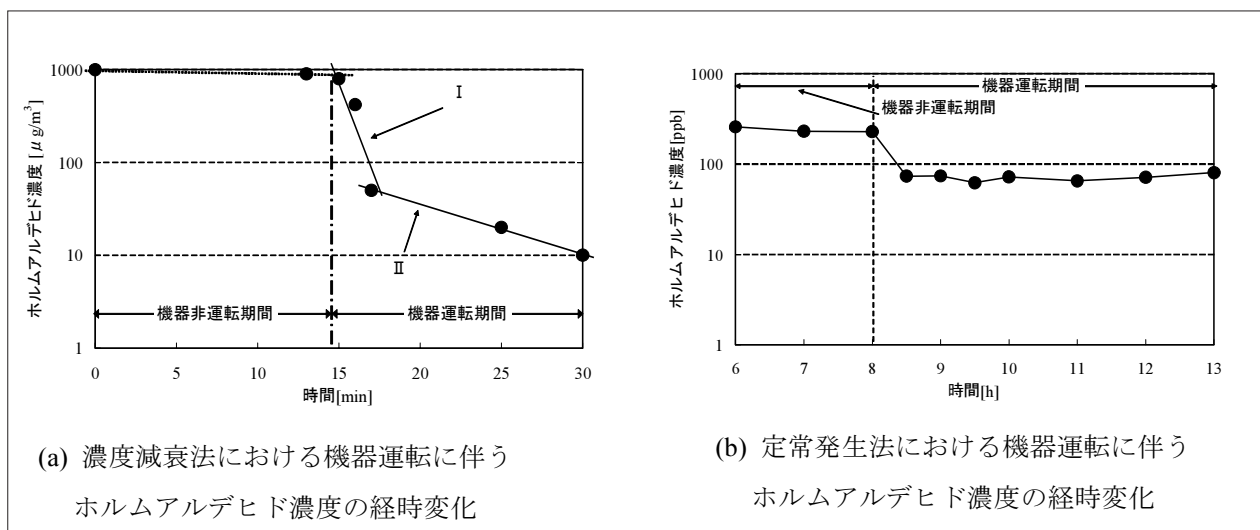


図 2 空気清浄機運転時におけるチャンパー内濃度



1時間後に約80[ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]まで低下し、その後定常状態となった。

### c) 両試験法の比較

両試験法の試験結果は図2(a)と(b)に示されるが、これら検討する場合、同じ処理対象濃度で比較する必要がある。そこで、処理対象濃度が約200から80[ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]に低下する領域で除去性能の比較検討を行った。濃度減衰法では、図2(a)の実線Iで示される区間がこの領域を含むが、この間の相当換気量(平均値)は、25.2[ $\text{m}^3/\text{h}$ ]であった。また図2(b)に示す定常発生法では、相当換気量は16.7[ $\text{m}^3/\text{h}$ ]となった。

結果として、求められた相当換気量は、濃度減衰法が定常発生法よりも、約1.56倍大きい。

ところで、濃度減衰法では空気清浄機の運転に伴い、チャンパー内濃度が徐々に低下するため、初期の処理対象濃度が高くとも、より低濃度領域の除去特性を知ることができる。因みに、図2(a)の処理対象濃度が80から10[ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]に低下する領域(実線II)では、相当換気量3.47[ $\text{m}^3/\text{h}$ ]となる。実線Iの領域と比較して、相当換気量は小さく、かつ大きな性能低下が示されている。

本研究では濃度減衰法の値が定常発生法の値よりも大きくなることが示されたが、小峯らも同様の報告を行っている<sup>5)</sup>。またこれをもとに小峯らはチャンパーを必要としない「定常発生法・ワンパス試験」を機器の実用的試験法として提案しているが、この方法は機器に付属するガス除去フィルタの除去性能を定量的に求める場合に適している。つまり、ワンパス試験(single pass method)では、室内汚染物質に対する機器の凝集能力が反映されない欠点がある。

そこで、前述の「室内空気対策研究会」や「総合技術開発プロジェクトのシックハウス対策技術委員会」では実大チャンパーを用いた試験法が提案されており、AHAMでもチャンパー試験が使用されている。また、JEMAにおいても大型チャンパー試験が検討されている現状にある。

これら総合的に判断すると、チャンパーを用いた定常発生法試験が機器の実用的試験法といえる。

ところで、濃度減衰法が定常発生法の試験値を上回る要因を以下のように考察する。

濃度減衰法では図2(a)中の実線Iに示すように、チャンパー内で急激な濃度低下が生じている。また、本試験で用いた精密分析のDNPH-HPLC法では、数分の捕集時間を要し、求められたホルムアルデヒド濃度は瞬時値ではなく平均値である。

濃度の大きな低下性は測定誤差を生む要因であり、また捕集時間が演算値に及ぼす影響もある。これらが、濃度減衰法による機器性能(相当換気量)が、定常発生法のそれを上回る要因と考えられる。

一方で、定常発生法では図2(b)に示すように、空気清浄機の運転に伴うチャンパー内の急激な濃度低下は生じず、やがて安定した定常濃度が現れる。本法ではこの試料空気を捕集するため、測定値が安定している。そのため、本法では先の大きな濃度低下と捕集時間が演算値に及ぼす影響が回避でき、比較的正しい測定値を得ることができる。

これにより、両者の試験値に差違が生じたものと考えられる。

### 2) 処理対象濃度の再現性

定常発生法を用いて、チャンパー内に低濃度化学物質を安定的に再現することは、高度な制御技術が要求され、とても困難な課題とされていた。

そこで、本研究では用いた試験装置(5[ $\text{m}^3$ ]と22[ $\text{m}^3$ ]チャンパー)の再現性を検証した。

結果として、図3(a)に示すように、本試験装置ではホルムアルデヒドの目標濃度を確実に再現でき、任意の目標値(100および200[ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ])に正しく制御できることが判明した。また、この試験値をもとに、機器性能を相当換気量として算出することができた。

一般にチャンパー内で再現する処理対象濃度が高いほど、空気清浄機の除去性能が高くなる傾向にある。そのため、厚生労働省によるホルムアルデヒドの室内濃度指針値(100[ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ])をもとに、各種試験法案の基準値が定められている。例えば、国土交通省シックハウス総プロ案では150~250[ppb](185~309[ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ](於23°C))とし、日本建築学会では100~450[ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]を処理対象

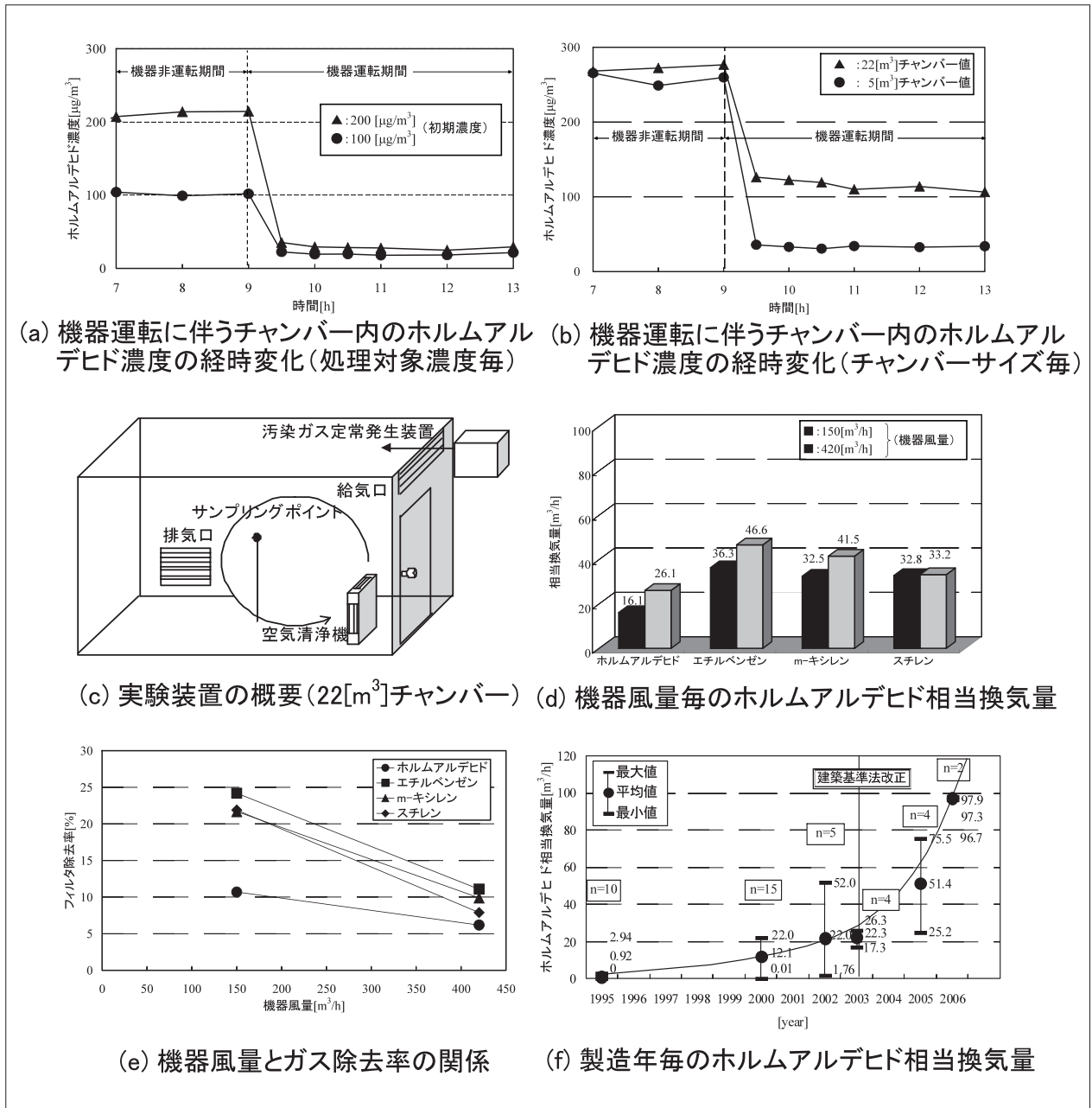


図3 実験結果

濃度と位置づけている。

2. 望ましい試験法の提案とその留意点

本研究ではチャンバーを用いた濃度減衰法と定常発生法による試験法を比較した。その結果、両試験法には以下の特徴があることが判明した。

定常発生法は室内における建材や家具等の持ち込み物品から、常時放散されるガス状化学物質に

よる室内汚染を再現できる。そのため、本法はガス状化学物質による室内環境汚染をより忠実に再現することになり、当該環境での空気清浄機性能を求めるに適したものと言える。

一方、濃度減衰法ではその試験結果には注意を払う必要がある。空気清浄機運転に伴うチャンバー内濃度の低減性を見ると、運転直後に大きく、そ

の後低減性が小さくなる。この現象は市販の空気清浄機が高濃度のホルムアルデヒドガスに対しての除去率が高く、逆に20~30 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]以下の低濃度ではその除去率が大きく低下することに起因している。

すなわち、濃度減衰法ではどの濃度範囲で得た測定値を演算式代入するかが、重要であり、試験結果に大きな影響を及ぼす。また、定常発生法では実環境を想定した濃度が処理対象濃度となるが、濃度減衰法の場合でもこの濃度範囲での測定値を求める必要がある。ただし、この場合チャンバークラスが小さいと短期間に室内濃度が低下してしまい、試料空気の捕集が困難となる問題がある。そのため、濃度減衰法では処理対象濃度を高くし、実験室の換気回数を小さくする必要が生ずる。

また、同法では処理対象濃度が極端に高いと、機器性能が大きめに評価されがちになる。

以上により、チャンバーを用いた定常発生法による試験が、より実用的な試験法と言えるが、本試験法を行う上での留意点を以下のように、考察し整理する。

### 1) チャンバーサイズ

チャンバーサイズが定常発生法の試験結果に与える影響を求めるため、気積の異なる5 [ $\text{m}^3$ ]と22 [ $\text{m}^3$ ]のチャンバーを用いて実験的検証を行った。

すなわち、定常発生法により、両チャンバーを所定の環境条件（温度：28 [ $^{\circ}\text{C}$ ]、相対湿度：50 [%]、換気回数：0.5 [1/h]）に制御して、空気清浄機運転に伴う濃度の減衰性を測定した。

図3 (b)に示すように、機器運転後にチャンバークラス内濃度は低下し、やがて定常状態になる。

結果として、5 [ $\text{m}^3$ ]、22 [ $\text{m}^3$ ]チャンバーにおける濃度低下性から求めた。相当換気量の平均値は、それぞれ97.3、117 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]であり、22 [ $\text{m}^3$ ]チャンバークラス値は5 [ $\text{m}^3$ ]チャンバークラス値と比較して、16.8 [%]大きい結果となった。

この差違は、当該機器運転時のチャンバークラス内における汚染物質濃度の分布により生じたものと推測される。つまり、図3 (c)に示すように22 [ $\text{m}^3$ ]チャンバークラス内において、当該機器では室内汚染物

質の運搬が充分に行われず、チャンバークラス内汚染物質濃度にある一定の分布が生じているものと考えられる。

すなわち、5 [ $\text{m}^3$ ]のチャンバークラス内では、空気清浄機に搭載されたファンにより、チャンバークラス内がほぼ均一に攪拌され、1) ガス定常発生装置を通して供給される対象汚染物質（ホルムアルデヒド）を含む汚染空気、2) 給気口を通してチャンバークラスに供給される清浄空気、3) チャンバークラス内空気、そして4) 空気清浄機による浄化空気と1)~3)の空気が混合され、瞬時に一様拡散される。そのため、気積の小さなチャンバークラスでは、チャンバークラス内に濃度分布は生じにくい。

一方、22 [ $\text{m}^3$ ]の実大チャンバークラスでは、機器風量が小さいとチャンバークラス内濃度に大きな差違、すなわち濃度分布が生ずる。室内空気の拡散性が劣る、いわゆる機器風量の小さな機器では、機器から離れた室隅各部などの汚染物質は除去されず、室全体の濃度低下は起こらない。すなわち、チャンバークラス内濃度に偏分布が生ずる。ただし、この偏分布こそが機器性能の実態を現す指標となる。

そこで、22 [ $\text{m}^3$ ]のような実大チャンバークラスにおいて、複数の試料空気のサンプリングを行い、室内の各所毎の除去性能（相当換気量）を明らかにすることが、機器性能の実態を表すことになる。この様な評価手法こそが望ましいと考えられる。

### 2) 機器風量

機器風量が定常発生法の試験結果に与える影響を求めるため、5 [ $\text{m}^3$ ]チャンバークラスを用いて実験的検証を行った。

すなわち、定常発生法により、5 [ $\text{m}^3$ ]チャンバークラスを所定の環境条件（温度：28 ± 1 [ $^{\circ}\text{C}$ ]、相対湿度：50 ± 1 [%]、換気回数：0.50 ± 0.05 [1/h]、気流速度：0.2~0.3 [ $\text{m}/\text{s}$ ]）に制御して、試験を行った。

図3 (d)に示すように、ホルムアルデヒド、VOC（エチルベンゼン、m-キシレン、スチレン）の相当換気量を算出した結果、機器風量が標準（150 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]）の場合、それぞれ16.1、36.3、32.5、32.8 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]であり、大（420 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]）の場合はそれぞれ26.1、46.6、41.5、33.2 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]となった。

ところで、フィルタの汚染物質除去性能を示す汚染物質除去率  $\eta$  [%] と機器の処理風量  $Q_a$  [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]、ならびに相当換気量  $Q_{eq}$  [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] には次式(6)の関係が成立する。

$$Q_{eq} = \eta \times Q_a \quad - (6)$$

(6)式は機器風量  $Q_a$  [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] とガス除去率  $\eta$  [%] の積が相当換気量  $Q_{eq}$  [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] になることを示しており  $Q_a$  [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] と  $\eta$  [%] が大きければ  $Q_{eq}$  [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] も必然的に大きくなる。

ただし、図 3 (e) に示す様に、機器風量の増大に伴い、ホルムアルデヒドと VOC のいずれにおいても、ガス除去率が低下する実態が示された。

機器風量の増大に伴い、ガス除去率  $\eta$  [%] の低下する要因は、対象化学物質のフィルタ通過速度により説明されている。

すなわち、機器風量の増大に伴い、汚染物質の通過速度が大きくなり、汚染物質とフィルタ面との接触時間が短縮され、ガス除去率  $\eta$  [%] も低下したものと言える。機器風量の増加に伴うガス除去率の低下性については、小峯らも<sup>5)</sup>同様の結果を報告している。

そのため、各機器の性能を求める際には、同一風量下での試験が求められる。この値によりある風量における機器性能の相互比較が実現する。例えば 25、50、150、300 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] の機器風量毎に性能を求めることで、各機器性能の相互比較が実現する。

### 3. 家庭用空気清浄機の製造年別性能推移

本研究では、定常発生法を用いて、5 [ $\text{m}^3$ ] チャンバー内を所定の環境条件 (温度:  $28 \pm 1$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]、相対湿度:  $50 \pm 1$  [%]、換気回数:  $0.03 \pm 0.003$  [1/h] (濃度減衰法)、 $0.50 \pm 0.05$  [1/h] (定常発生法)、気流速度:  $0.2 \sim 0.3$  [m/s]) に制御して、試験を行った。

機器のホルムアルデヒド除去性能を実験的に求め、製造年毎の機器性能の推移を明らかにした。

図 3 (f) に示すように 1995 年からの 10 年間で機器性能は大きな向上を示し、特に 2003 年の改正建築基準法の制定に伴い、より大きな機器性能の向上が見られた。

機器性能を向上させた要因は、1) 機器風量の増大、2) ガス除去フィルタに用いられる活性炭使用量の増大、3) 各種ガス除去フィルタの組み合わせの多様化などである。

近年の機器では、活性炭の物理吸着作用を利用する吸着方式のみならず、触媒技術、プラズマ技術などを用いて化学物質を化学的あるいは電氣的に分解・除去する分解再生方式に大別される。また、これらを併用する製品もある。

今日の技術革新により、機器のホルムアルデヒド除去性能は飛躍的に向上している。

ただし、本研究では機器の初期性能を求めたに過ぎない。筆者らは活性炭吸着方式の機器のホルムアルデヒド除去性能が、通常環境における 2 ヶ月間の使用で半減する実態を報告しており<sup>12)</sup>、機器性能の劣化性に大きな課題がある。

今後の課題は如何にして機器性能を持続させるかにあると言える。

### 4. 空気清浄機使用室のホルムアルデヒド濃度の予測

5 [ $\text{m}^3$ ] チャンバーにより求めたある空気清浄機の相当換気量  $Q_{eq}$  [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] を(1)式に代入し、22 [ $\text{m}^3$ ] チャンバー内で家庭用空気清浄機を使用した場合のホルムアルデヒド濃度予測値を求めた。次に、22 [ $\text{m}^3$ ] チャンバー内で同機器を運転し実測値を求めた。そして、22 [ $\text{m}^3$ ] チャンバー内の実測値との比較を行ったが、予測値と実測値との一致割合を示す「符合率」について、(7)式を用いて求めた。

$$F[\%] = (C_p/C_m) \times 100 \quad - (7)$$

ここで、 $F$ : 符合率 [%]、 $C_p$ : 濃度予測値 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]、 $C_m$ : 濃度実測値 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] とする。

また、予測条件は以下の通りである。図 4 (a) に示す定常発生装置からのホルムアルデヒド発生量  $M$  [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ]、および換気回数:  $n=0.50$  [1/h]、室気積:  $R=22.0$  [ $\text{m}^3$ ]、実験開始 8 時間後に大型チャンバー内は定常濃度に達するために吸着率:  $\alpha=0$  [1/h] とし、各パラメータを予測式に代入した。これにより、空気清浄機運転に伴うチャンバー内濃度予測が行えるが、予測値と実測値を図



4 (b)、(c)に示す。

結果として、濃度予測値と実測値とは良く一致し、平均値で94.5[%]の割合で符合した。本予測法により、精度良く空気清浄機使用室の濃度予測を行うことができる。

V. まとめ

本研究では以下の知見が得られた。

1. 濃度減衰法と定常発生法の特徴を明らかにした。
2. 実大チャンバーを用いた定常発生法試験が、機器の実用的な試験法である。
3. 実大チャンバーを用いた定常発生法試験では、ある一定の処理対象濃度を再現する高度技術が要求されるが、本研究で用いた実験装置におい

て、任意の処理対象濃度を再現することができる。

4. 実大チャンバーを用いた定常発生法試験において、試験パラメータのチャンバーサイズと機器風量が試験結果に与える影響を明らかにした。
5. 家庭用空気清浄機が普及し始めた1995年からの10年間における機器のホルムアルデヒド除去性能の実態を明らかにした。
6. 予測式を用いて、ホルムアルデヒド濃度予測値と実測値との比較を行ったところ、94.5[%]の割合で一致した。

謝辞

本研究は、暮らしの科学研究所(株)の協力を得て行われ、また、特定非営利活動法人 室内環境技術研究会の社会活動の一環として行われた。関係各位に深甚なる謝意

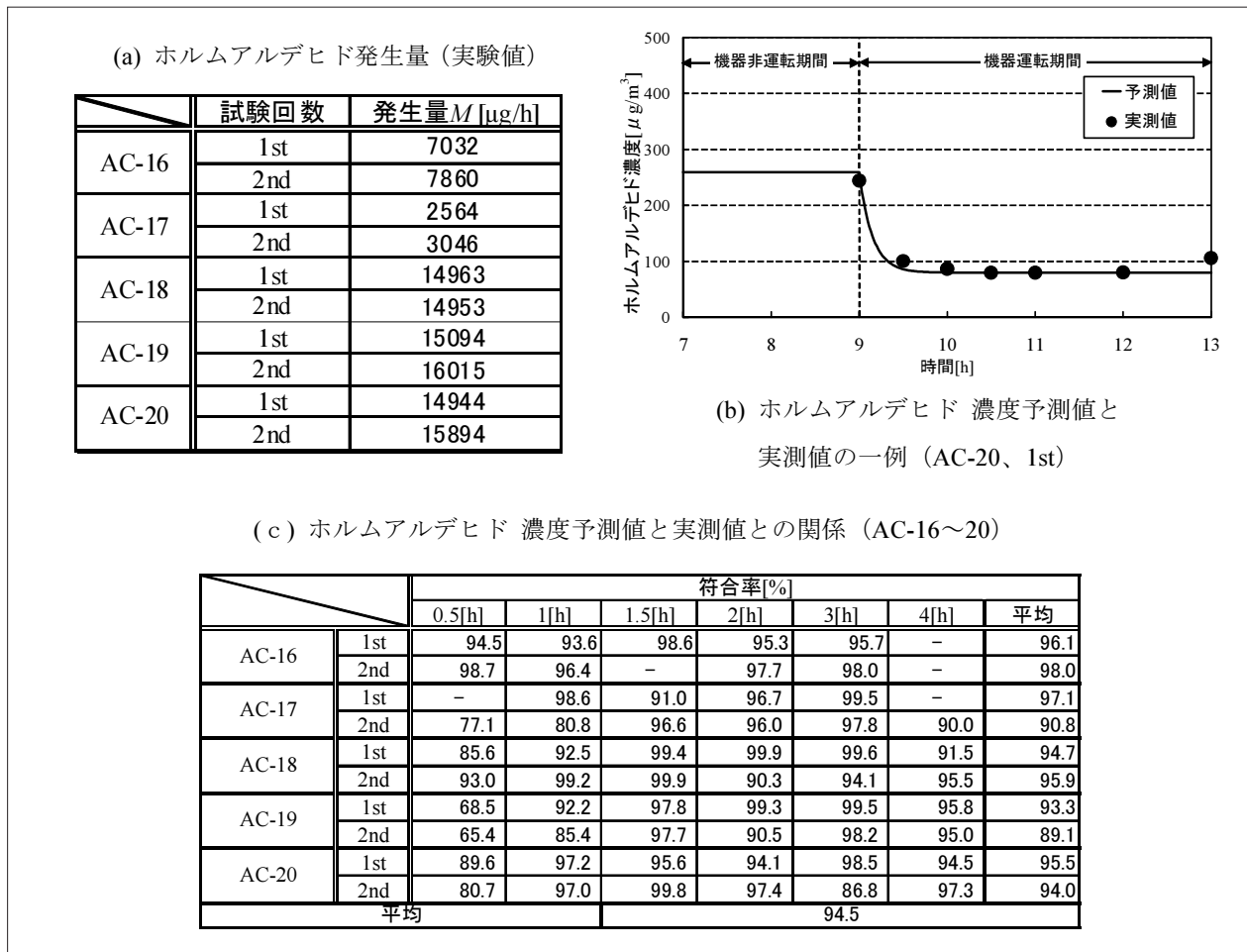


図4 濃度予測値と実測値



を表す。

## 注釈

### 1) 建築基準法第20条の2

この式において、 $V$ 、 $A_f$  及び  $N$  は、それぞれ次の数値を表すものとする。

$V$  : 有効換気量 (単位  $\text{m}^3/\text{時間}$ )

$A_f$  : 居室の床面積 (特殊建築物の居室以外の居室が換気上有効な窓その他の開口部を有する場合においては、当該開口部の換気上有効な面積に20を乗じて得た面積を当該居室の床面積から減じた面積) (単位  $\text{m}^2$ )

$N$  : 実況に応じた1人当たりの占有面積 (特殊建築物の居室にあつては、3を超えるときは3と、その他の居室にあつては、10を超えるときは10とする。) (単位  $\text{m}^2$ )

### 2) AHAM 試験法

AHAMとは Association of Home Appliance Manufacturers の略であり、AHAMによる家庭用空気清浄機試験法のANSI/AHAM AC-1-2006は、米国における大型チャンバーを用いた空気清浄機の標準試験法である。

## 文献

- 1) 野崎淳夫、飯倉一雄、他：家庭用空気清浄機のガス状物質除去特性に関する研究. ホルムアルデヒド除去効果. 日本建築学会計画系論文集 554 : 35-40、2002
- 2) F Yuan, et al: Function Research of Plasma Air Cleaner. Proc. of Indoor Air 2909-2913, 2005
- 3) ANSI/AHAM AC-1-2006: Method for Measuring Performance of Portable Household Electric Room Air Cleaners. 2005
- 4) Jingjing Pei, et al: Simultaneous Measurement of Single-pass Efficiency and Clean Air Delivery Rate for In-duct Air Cleaners—Test Methods, Results and Implications. Proc. of Indoor Air 181, 2008
- 5) 国土交通省国土技術総合政策研究所：家庭用空気清浄機の評価試験方法、総合技術開発プロジェクト「シックハウス対策技術の開発」報告書：58～73、2004
- 6) 野崎淳夫、清澤裕美、他：家庭用空気清浄機の汚染物質除去性能と室内濃度予測に関する研究 (その1). 環境タバコ煙に対する除去効果. 日本建築学会環境系論文集 576 : 37-42、2004
- 7) 清澤裕美、野崎淳夫、他：家庭用空気清浄機の汚染物質除去性能と室内濃度予測に関する研究 (その2). 花粉粒子に対する除去効果. 日本建築学会環境系論文集 586 : 29-35、2005
- 8) 野崎淳夫、橋本康弘、他：室内化学物質発生源と室内空気汚染対策製品の測定評価システムの性能に関する研究. 臨床環境医学 16 : 21-29、2007
- 9) 野崎淳夫、一條佑介、他：室内化学物質濃度予測式を用いた汚染対策の効果に関する研究. 臨床環境医学 16 : 30-37、2007
- 10) 長谷川麻子、小峯裕己、他：単体ガス成分に対する家庭用空気清浄機の性能試験方法に関する検討. 日本建築学会環境系論文集 572 : 55-62、2003
- 11) 野崎淳夫、一條佑介：ラージチャンバーにおける化学物質の吸着性に関する研究. 空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集 : 320-321、2008