

原 著

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

野 崎 淳 夫¹⁾ 一 條 佑 介¹⁾ 吉 澤 晋²⁾

1) 東北文化学園大学大学院健康社会システム研究科

2) 国立保健医療科学院

A study on the indoor air pollution countermeasure effects derived from the mass-balance prediction model

Atsuo Nozaki¹⁾ Yusuke Ichijo¹⁾ Susumu Yoshizawa²⁾1) Tohoku Bunka Gakuen University Graduate School of Health and
Environment Sciences

2) National Institute of Public Health

要約

シックハウスの原因となる化学物質の室内発生源は多岐にわたり、建材はもとより、居住者によって室内に持ち込まれる家庭用品も軽視できない発生源である。一方で、室内空気汚染問題に対応した空気汚染対策製品が普及段階にあり、その除去性能に期待がかかる。

そこで、本研究では化学物質発生源、除去機構が混在する一般室内の化学物質濃度予測手法の開発を行うものである。

気積30[m³]のLDK室、寝室を予測対象室とし、室換気量、使用建材と家具の実験的に求めた発生量を筆者らの濃度予測式に代入し予測計算を行った。また、汚染対策として、ホルムアルデヒド低放散建材、吸着建材、および家庭用空気清浄機等を使用した場合の濃度予測を行い、その効果を検証した。

従来の建材仕様により建築されたLDK室のホルムアルデヒド濃度予測値は、117[μg/m³]となり、厚生労働省の室内濃度指針値(100[μg/m³])を超過すると予測された。

そこで、汚染対策により無垢材等の低放散建材とホルムアルデヒド吸着建材(珪藻土壁装材)を用いたところ、室内濃度は63.9[μg/m³]まで低減した。さらに、最新の家庭用空気清浄機を運転させることにより、ホルムアルデヒド濃度は27.0[μg/m³]となり、従来の建材仕様のケースと比較して、75[%]の室内濃度低減効果が示された。VOCについても同様の室内濃度の低減性が確認された。

しかし、これらの効果はあくまで空気汚染対策製品の初期性能により現れたものであり、吸着建材と家

受付：平成18年11月13日 採用：平成19年5月2日

別刷請求宛先：野崎淳夫

〒981-8551 仙台市青葉区国見6-45-1 東北文化学園大学大学院健康社会システム研究科

Received: November 13, 2006 Accepted: May 2, 2007

Reprint Requests to Atsuo Nozaki, Tohoku Bunka Gakuen University Graduate School of Health and Environment Sciences, 6-45-1 Kunimi, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 981-8551 Japan

庭用空気清浄機における同化学物質に対する除去性能の持続性の解明が、今後の検討課題である。
(臨床環境16:30~37, 2007)

《キーワード》室内空気汚染、室内濃度予測、ホルムアルデヒド、VOCs、空気汚染対策製品

Abstract

We have investigated the emission rates on many emission sources and the removal performance on the countermeasure products against indoor air pollution. With this experimental experience, we have known the ideal building materials, furniture and the countermeasure technique or products to indoor air pollution. If we can realize the clean-air residence, it will be able to decrease the sick building syndrome problems. So we aimed at designing the new techniques which can provide the healthy indoor-air environment.

And we also realized the prediction method on the indoor chemical substance concentration. As a result, it showed that the indoor formaldehyde concentration was reduced by 75 percents with use of the paint-less and adhesive-less wooden flooring materials and the operation of an effective domestic air cleaner.

(Jpn J Clin Ecol 16:30~37, 2007)

《Key words》 indoor air pollution, indoor concentration prediction, formaldehyde, volatile organic compounds, indoor air pollution countermeasure products

I. はじめに

健康被害を誘発する化学物質の室内発生源は多岐にわたり、建材はもとより、居住者によって室内に持ち込まれる家庭用品も軽視できない発生源である。一方で、空気汚染対策製品が普及段階にあり、その化学物質除去性能に期待が寄せられている。

筆者らは室内濃度を正しく予測するために、室内発生源の化学物質発生量と空気汚染対策製品の化学物質除去性能の実態を明らかにしてきた。

(図1参照)

本研究では室内化学物質濃度を低減させる建築仕様を具体的に示し、建築物の設計段階において室内化学物質濃度予測が行える予測手法の提案を行うものである。

すなわち、室内化学物質濃度の低減のために、1)低化学物質発生量の建材を用いた建築設計を行い、2)同住宅に化学物質除去性能の期待できる空気汚染対策製品を導入する。さらに3)この時の室内化学物質濃度の予測を行うものである。

結果として、住宅の入居以前に1)室内化学物

質濃度を知ることができ、2)化学物質に対する個人曝露量の推計が実現する。また、これにより3)製品毎の化学物質の許容発生量、と4)空気汚染対策製品に求められる化学物質除去性能を決定できる科学的資料が得られるものである。

II. 室内濃度予測法について

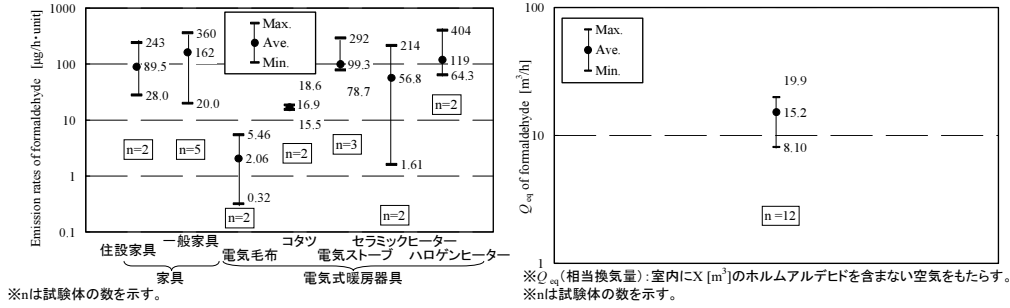
1. 室内化学物質濃度の構成

室内における化学物質の発生源と除去機構を図2に示す。

ある任意時刻の室内化学物質濃度(C)は、1)室内における総化学物質発生量 ($M: M = \sum_{k=1}^n m_k$)、2)空気汚染対策製品の対象化学物質総除去性能 ($Q_{eq}: Q_{eq} = \sum_{k=1}^n (q_{eq})_k$)、3)室換気量(Q)、4)室内における対象化学物質の吸着量と化学反応量(aA)等により構成される。

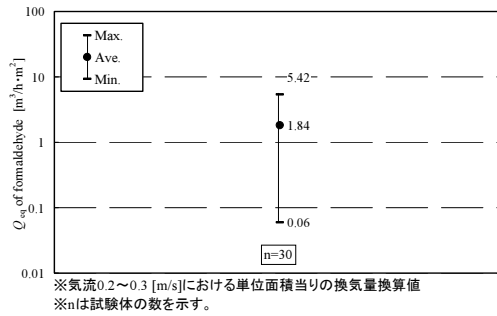
2. 室内濃度予測式の提案

筆者らは、汚染物質の発生源と除去機構が混在する室における室内汚染物質濃度予測式を図3のように提案している¹⁾。本予測式により、室内化学物質濃度の正確な予測が行える。



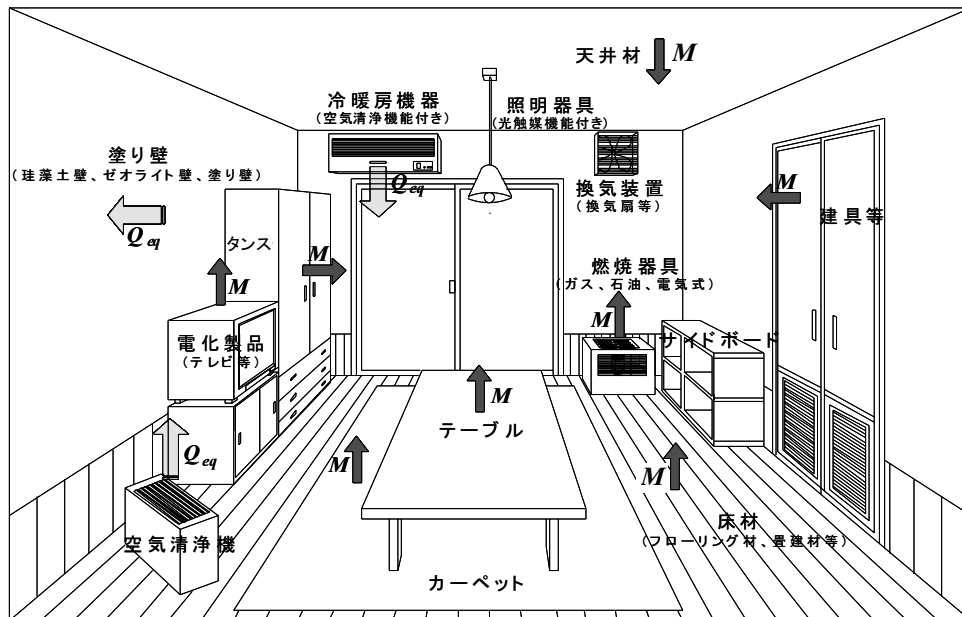
(a)室内発生源のホルムアルデヒド発生量の一例

(b)家庭用空気清浄機のホルムアルデヒド除去性能



(c)化学吸着建材のホルムアルデヒド除去性能

図1 発生源発生量と空気汚染対策製品の除去性能の一例^{1~6, 10, 13, 14)}



※室内には、ある種の化学物質を発生させる建材と家庭用品がある。また、一方で化学物質を積極的に除去する空気汚染対策製品が普及段階にある。図中でMは化学物質発生源の発生量、Q_{eq}は除去機構の除去性能を意味する。

図2 室内における化学物質の発生源と除去機構

在来、ほとんどの室内濃度予測式は、室内の総発生量と換気のみパラメータにより構成されているが、本予測式は各種発生源発生量、空気汚染対策製品の汚染物質除去性能、汚染物質吸着性を考慮したユニークな濃度予測式であり、その予測精度は高い^{7, 8, 12)}。

Ⅲ. 健康的室内空気環境を提供する住宅設計手法とこれによる室内化学物質濃度予測について

1. 建築設計上の基本方針

室内化学物質汚染防止のため、構造材は無垢材を使用し、仕上げ材、施工材(接着剤や塗料など)は、化学物質発生量の小さな建材を使用し、システムキッチンと家具等の家庭用品についても、チェ

汚染物質の発生源と除去機構が混在する一般的室内の汚染物質濃度予測式を理論的に検討した。ある任意の時間における室内汚染物質濃度を C [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]とすると、ある限られた短時間 dt [h]における室内汚染物質濃度の変化 dC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]は、次式(1)で表される。

$$\frac{dt}{R}(M + QC_0 - QC - V_t S C - aAC - Q_{eq}C) = dC \quad (1)$$

M : 対象汚染物質の発生量 [$\mu\text{g}/\text{h}$]	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)
Q : 室換気量 [m^3/h]	A : 対象汚染物質の吸着面積 [m^2]
C_0 : 対象汚染物質の外気濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	R : 室気積 [m^3]
V_t : 対象汚染物質の落下速度 [m/h] (分子量の大きなガス状物質や粒子状物質の場合に適用)	C_1 : 対象汚染物質の室内初期濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
S : 床面積 [m^2]	Q_{eq} : 空気汚染対策製品の対象汚染物質除去性能 (相当換気量) [m^3/h]

ここで、 $t=0$ [h]の時、室内汚染物質濃度を C_1 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]とし、 $C=C_1$ として(1)式を解くと、次式(2)が得られる。

$$C = C_1 e^{-\left(\frac{Q}{R} + \frac{V_t S}{R} + \frac{aA}{R} + \frac{Q_{eq}}{R}\right)t} + \frac{M + QC_0}{Q + V_t S + aA + Q_{eq}} \left(1 - e^{-\left(\frac{Q}{R} + \frac{V_t S}{R} + \frac{aA}{R} + \frac{Q_{eq}}{R}\right)t}\right) \quad (2)$$

また、室内発生源の汚染物質総発生量 M [$\mu\text{g}/\text{h}$]は、建物に起因した建材関連の発生量と居住者による持ち込み品(家庭用品等)の発生量 m_k [$\mu\text{g}/\text{h}$]の総和で示され、次式(3)が成立する。

$$M = \sum_{k=1}^n m_k \quad (3)$$

さらに、空気汚染対策製品の対象汚染物質総除去性能 Q_{eq} [m^3/h]は、空気清浄機等の除去性能 $(q_{eq})_k$ [m^3/h]の総和により示され、次式(4)が成立する。

$$Q_{eq} = \sum_{k=1}^n (q_{eq})_k \quad (4)$$

(3)、(4)式を(2)式に代入することにより、汚染物質の発生源と除去機構が混在する一般的室内の汚染物質濃度予測式(5)が得られる。

$$C = C_1 \cdot e^{-\frac{Q + V_t S + aA + \sum_{k=1}^n (q_{eq})_k}{R} t} + \frac{\sum_{k=1}^n m_k + QC_0}{Q + V_t S + aA + \sum_{k=1}^n (q_{eq})_k} \left(1 - e^{-\frac{Q + V_t S + aA + \sum_{k=1}^n (q_{eq})_k}{R} t}\right) \quad (5)$$

図3 室内汚染物質濃度予測式

表1 家具と建材の化学物質発生量^{4~6, 10, 13)}と室内濃度予測条件

	対 策 前				対 策 後					
	家具と建材	発生量 M[μ g/h]	仕 様	予測条件	家具と建材	発生量 M[μ g/h]	仕 様	予測条件		
L D K 室	オーデオラック(ホルムアルデヒド)	286	上段：パーティクルボード(F☆☆☆☆)、合板(F☆☆☆☆)、下段：MD F(F☆☆☆☆)、集成材 フロアユニット：メラミン樹脂、パーティクルボード、合板、PET系シート、人造大理石(不飽和ポリエステル)アップユニット：メラミン樹脂、パーティクルボード、合板、PET系シート APE 塗装(F☆☆☆☆)、珪酸カルシウム板、LGS 下地 ビニルクロス(F☆☆☆☆)、接着剤(澱粉系)(F☆☆☆☆)、石膏ボード 0.5[1/h]、 気積：30[m ³]、 室換気量：15[m ³ /h]	換気回数：0.5[1/h]、 気積：30[m ³]、 室換気量：15[m ³ /h]	オーデオラック(ホルムアルデヒド)	286	対策前と同様	換気回数：0.5[1/h]、 気積：30[m ³]、 室換気量：15[m ³ /h]		
	オーデオラック(VOC)	1158			オーデオラック(VOC)	1158				
	システムキッチン(ホルムアルデヒド)	236			システムキッチン(ホルムアルデヒド)	236				
	システムキッチン(VOC)	2083			システムキッチン(VOC)	2083				
	天井材(ホルムアルデヒド)	82.0			天井材(ホルムアルデヒド)	5.80			杉無垢材(表面塗装、フィンガージョイント無し)	
	天井材(VOC)	404			天井材(VOC)	35.0				
	壁材(ホルムアルデヒド)	142			壁材(ホルムアルデヒド)	0			珪藻土壁(F☆☆☆☆)：炭酸カルシウム、珪藻土	
	壁材(VOC)	460			壁材(VOC)	1.39				
	フローリング材(ホルムアルデヒド)	1004			合板(F☆☆☆☆)、UV 塗料	フローリング材(ホルムアルデヒド)			5.80	杉無垢材(表面塗装、フィンガージョイント無し)
	フローリング材(VOC)	2254				フローリング材(VOC)			35.0	
寝 室	ベッド(2台)(ホルムアルデヒド)	224	杉無垢材、マットレス：ウレタン、スプリング AEP 塗装(F☆☆☆☆)、珪酸カルシウム板、LGS 下地 合板(F☆☆☆☆)、UV 塗料	換気回数：0.5[1/h]、 気積：30[m ³]、 室換気量：15[m ³ /h]	ベッド(2台)(ホルムアルデヒド)	224	対策前と同様	換気回数：0.5[1/h]、 気積：30[m ³]、 室換気量：15[m ³ /h]		
	ベッド(2台)(VOC)	1164			ベッド(2台)(VOC)	1164				
	天井材(ホルムアルデヒド)	55.0			天井材(ホルムアルデヒド)	5.80			杉無垢材(表面塗装、フィンガージョイント無し)	
	天井材(VOC)	271			天井材(VOC)	35.0				
	壁材(ホルムアルデヒド)	107			壁材(ホルムアルデヒド)	0			珪藻土壁(F☆☆☆☆)：炭酸カルシウム、珪藻土	
	壁材(VOC)	346			壁材(VOC)	1.39				
	フローリング材(ホルムアルデヒド)	672			合板(F☆☆☆☆)、UV 塗料	フローリング材(ホルムアルデヒド)			5.80	杉無垢材(表面塗装、フィンガージョイント無し)
	フローリング材(VOC)	1508				フローリング材(VOC)			35.0	

ンバー実験で発生量を確認し、発生量の小さなものを使用するものとする(表1参照)。

2. 室内化学物質濃度の予測

予測対象室は8畳大の2室(LDK、寝室)で、LDK室、寝室共に(幅)：3.50[m]×(奥行)：3.50[m]×(高さ)：2.50[m]のサイズを有する。室内化学物質濃度の予測計算を行う場合の予測条件は表1に示されている。

3. LDK室における予測結果

表1にオーデオラック、システムキッチン、使用建材の化学物質発生量と予測対象室の換気回数等が示されている。

図4(a)に示されるように、在来仕様の建材で施工し、家具などを設置する以前のLDK室のホルムアルデヒド濃度は81.9[μ g/m³]と予測される。同様に、図4(b)に示すようにVOC濃度は208[μ g/m³]となる。ところが、家具などを設置すると、ホルムアルデヒド濃度は81.9から117[μ g/m³]に、VOC濃度は208から424[μ g/m³]

に上昇し、厚生労働省室内濃度指針値(ホルムアルデヒド濃度)または暫定目標値(TVOC濃度)を超過する。

ここで、VOCは揮発性有機化合物(Volatile organic compounds)の略称であり、脂肪族炭化水素(13物質)、芳香族炭化水素(14物質)、テルペン類(3物質)、ハロゲン類(11物質)、エステル類(2物質)、アルデヒド類(2物質)、ケトン類化合物(3物質)からなるもので、TVOCは上記VOC物質の総和とする。

4. 汚染対策のLDK室の化学物質濃度に与える影響

床材を合板で構成される複合フローリング建材から、化学物質発生量の小さな無垢材フローリングへと変更し、壁材もビニルクロス仕上げ(石膏ボード+化学糊)から、化学物質の吸着性を有する珪藻土建材(ホルムアルデヒドキャッチャー剤添加)へと変更した。

これにより、図4(e)と図4(f)に示されるように、

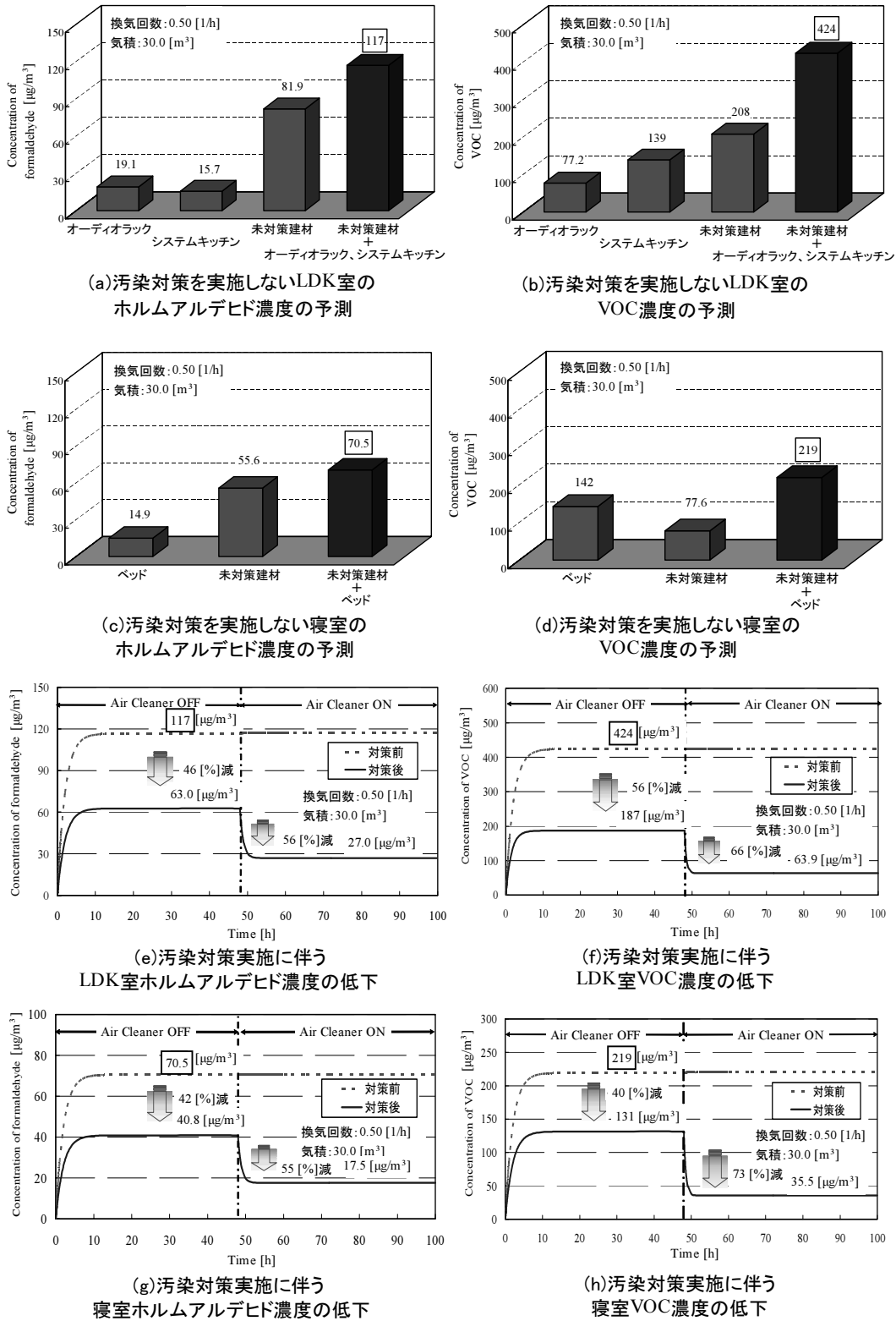


図4 室内化学物質汚染対策の実施に伴う室内濃度の低減性

LDK 室の化学物質濃度はホルムアルデヒドが 117 から 63.0 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] に、VOC は 424 から 187 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] に低下し、ホルムアルデヒド濃度は 46 [%]、VOC 濃度は 56 [%] 低減する。

また、実験的に検証した家庭用空気清浄機の中で一番性能が良いものを室内で運転させた場合、ホルムアルデヒド濃度はさらに 63.0 から 27.0 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] に低下し、56 [%] 低減する。また、VOC 濃度は 187 から 63.9 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] に低下し、66 [%] 低減する予測結果が示された。

ちなみに、実験的に検証した空気清浄機は 12 台で、求められたホルムアルデヒド相当換気量は 8.10~19.9 [m^3/h] の範囲にあり、平均値は 15.2 [m^3/h] であった。

また、濃度予測計算に用いた家庭用空気清浄機は、ガス除去フィルタに活性炭が使用されているフィルタ濾過式の器具でホルムアルデヒド相当換気量：19.9 [m^3/h]、VOC 相当換気量：16.3 [m^3/h] で、機器風量は 312 [m^3/h] である。

5. 寝室における化学物質濃度予測

LDK 室と同様に、表 1 に示す在来仕様の建材とベッドを使用した時の室内ホルムアルデヒドと VOC 濃度の予測を行った。図 4 (c) と図 4 (d) に示されるように、ベッドを持ち込む以前のホルムアルデヒド濃度は 55.6 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]、VOC 濃度は 77.6 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] と予測される。ベッドを持ち込むことにより、ホルムアルデヒド濃度は 55.6 から 70.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] に、VOC 濃度は 77.6 から 219 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] に上昇する。

6. 汚染対策の寝室の化学物質濃度に与える影響 (寝室)

寝室においても、LDK 室と同様の対策を行った。すなわち、床材を合板の複合フローリング建材から化学物質発生量の小さな無垢材フローリングへと変更し、壁材もビニールクロス仕上げ (石膏ボード+化学糊) から、化学物質の吸着性を有する珪藻土建材 (ホルムアルデヒドキャッチャー剤添加) へと変更した。ただし、珪藻土建材に添加されているホルムアルデヒドキャッチャー剤は、VOC に対して化学吸着力が無いことが判明しており、VOC に対しては珪藻土の物理吸着力のみ

が期待できる。

図 4 (g) と図 4 (h) に示すように、建材仕様の変更に伴い寝室のホルムアルデヒド濃度は 70.5 から 40.8 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] に、VOC 濃度は 219 から 131 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] に低減する。建材仕様の変更に伴う汚染対策後の室内濃度低減率はホルムアルデヒドが 42 [%]、VOC 濃度では 40 [%] である。

また、建材仕様を変更した後に、LDK 室同様の家庭用空気清浄機を運転して室内化学物質濃度の低減を図ったところ、ホルムアルデヒド濃度はさらに 40.8 から 17.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] に低下し、VOC 濃度も 131 から 35.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] に低下した。

IV. まとめ

1. 化学物質の発生源発生量と除去機構の化学物質除去性能を筆者らの予測式に代入することで、建築物の設計段階における室内化学物質濃度の予測が実現した。
2. LDK 室と寝室に室内化学物質濃度の汚染対策を施すことにより、室内濃度が有効に低減することが示された。
3. 吸着建材と家庭用空気清浄機における化学物質除去性能の持続性の解明が、今後の検討課題である。

V. 今後の課題

1. 理論値と実測値との比較検討を行うこと。
2. 市販の空気汚染対策製品の中には、VOC 分解機能を備えたものもあり、この場合ホルムアルデヒド等のカルボニル類が新たに生成される可能性がある。したがって、当該問題に対する新たなパラメータを予測式中に設けること。

文献

- 1) A Nozaki, S Yoshizawa : Studies on the NO_x Emission Characteristics from Domestic Kerosene Fired Space Heaters with Indoor Oxygen Depletion. Proceedings of INDOOR AIR 3: 177-182, 1993
- 2) A Nozaki, S Yoshizawa, et al: A Study on the Prediction of Nitrogen Oxides Indoors

- with Flue-less Kerosene Space Heaters. *Healthy Buildings 2*: 167-172, 1994
- 3) 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1)。日本建築学会計画系論文集 576：37-42、2004
 - 4) 野崎淳夫、浅野康明：電気式暖房機器の化学物質発生量、日用品からの化学物質の発生に関する研究(その1)。日本建築学会環境系論文集 591：23-29、2005
 - 5) 野崎淳夫、折笠智昭、他：開放型石油暖房器具からのVOCの発生、開放型燃焼器具からのガス状汚染物質の発生に関する研究(その1)。日本建築学会環境系論文集 591：31-35、2005
 - 6) 野崎淳夫、成田泰章：機器備品による化学物質汚染と室内濃度予測に関する研究(第1報)、事務機器のオゾン発生量算定と室内濃度予測法。空気調和・衛生工学会論文集 100：9-16、2005
 - 7) A Nozaki, Y Ichijo, et al：Studies on Chemical Substance Removal Rates of Domestic Air Cleaners and Development on the Indoor Pollutant Concentration Prediction Method. *Proceedings of INDOOR AIR*: 2991-2995, 2005
 - 8) 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 596：29-35、2005
 - 9) 野崎淳夫、工藤彰訓、他：家庭用空気清浄機のVOC除去性能の実態解明、家庭用空気清浄機のガス状汚染物質除去特性に関する研究(その2)。日本建築学会環境系論文集 599：67-72、2006
 - 10) A Nozaki, Y Hashimoto, et al: A Study on the Chemical Substance Emissions from Electric Household Appliances, *Proceedings of Healthy Buildings II*: 317-320, 2006
 - 11) A Nozaki, Y Hashimoto, et al: A Study on the Mitigation Technique for Indoor Chemical Pollution by Circulating Ventilation System with Air Purifying Devices. *Proceedings of Healthy Buildings V*: 23-27, 2006
 - 12) A Nozaki, Y Ichijo, et al: Studies on Formaldehyde Removal Rates of Domestic Air Cleaners and the Indoor Concentration Prediction. *Proceedings of Healthy Buildings I*: 229-232, 2006
 - 13) A Nozaki, A Suzuki, et al: Study on the Emission of Chemical Substances from Housing Equipments. *Proceedings of Healthy Buildings II*: 259-262, 2006
 - 14) 野崎淳夫、山下祐希、他：グラフトン重合技術利用吸着材の化学物質除去性能に関する研究。日本建築学会大会学術講演梗概集 D-II：969-970、2006