

居住空間におけるホルムアルデヒド気中濃度の簡易予測手法に関する検討

野本岳志*、田尻 要*、浅井靖史*

*西松建設(株) 技術研究所

神奈川県大和市下鶴間 2570-4

概要

最近、建材から放散される揮発性有機化合物により居住者が体の不調を訴える「シックハウス症候群」が社会的に注目されている。このような状況の中、厚生省が居住空間におけるホルムアルデヒドの指針値を発表し、また、居住空間の空気質を測定する換気条件として国際的な ISO の換気条件(案)が検討されている。この換気条件に準じて測定を行い厚生省の指針値と比較する場合、測定準備および換気管理を含め長時間を要するために居住者の生活行為に支障を及ぼすなどの諸問題が生じることが考えられる。

そこで本稿では、測定者を含めて施工者や居住者が、実際の居住空間の空気質に関して、ホルムアルデヒドの最大気中濃度を簡易的かつ短時間で予測し、指針値と比較した結果を把握することができる手法の可能性を検討するとともに、この手法に基づき測定した新築の集合住宅における実測値と比較し、精度の検証を行った結果を報告する。

キーワード

室内空気質、シックハウス、ホルムアルデヒド

1. はじめに

最近の居住空間における環境問題として、壁紙接着剤や建材から放散される揮発性の有機化合物による「シックハウス症候群」および「化学物質過敏症」が社会的に注目されている。これは、新築およびリホーム後の居住者が、ホルムアルデヒドに代表される揮発性有機化合物により体の不調を訴えるというものである。

この居住空間における環境問題の実態を把握するため、通産省や建設省などの関連省庁、建材メーカーや住宅メーカーおよび建設関連会社などが積極的に調査を行っており、調査結果の報告とともに対策案の検討が進められている^{1,2)}。このような状況の中、厚生省が平成9年に居住空間内におけるホルムアルデヒドの指針値を、また現在、ISOが居住空間内の空気質測定における国際的な換気基準を検討している。このように、指針値および換気条件・測定方法の整備が進められる中で、木質系の建築部材から発生するホルムアルデヒドの放散量と気中濃度の相関性に関する研究³⁾が行われるなど、この分野に関する研究対象が実態調査から気中濃度の算定式の検討などへと広がっている。今後はさらに、気中濃度算定式を実際の物件における測定へ展開するとともに、対策の検討が進められると考えられるが、現在のところ気中濃度の予測手法に関する研究や予測手法と実測データとの適合性について検討された事例は少ない。また、先述した国際基準である ISO の換気条件(案)が今後導入されれば、国内においてもこの換気条件に準じた測定が行われ、厚生省の指針値により居住空間内の空気質の汚染度を評価することが予想される。しかしながら、実際に ISO 換気条件(案)に準じて測定を行う場合、測定の準備や換気条件の管理が長期に渡ることから、居住者の生活行為に支障を及ぼし、また、測定に関わるコスト増などの諸問題が生じると考えられる。

そこで本稿では、測定者を含めて施工者や居住者が、実際の居住空間の空気質に関して、ホルムアルデヒドの最大気中濃度を簡易的かつ短時間で予測し、指針値と比較した結果を把握することができる手法の可能性を検討する。まず、ホルムアルデヒドの最大気中濃度を予測するための理論式の展開と、測定に関するパラメータの検討を行い、次

に、新築の集合住宅の洋室および和室におけるホルムアルデヒド気中濃度の実測値と比較し、予測式の適合性と精度の検証を行った結果について報告する。

2. 気中濃度の指針値および換気条件の概要

2.1 ホルムアルデヒド指針値

居住空間内の空気質に関する問題に対して先進的な欧米諸国は、ホルムアルデヒド気中濃度の規制値および指針値について独自のガイドライン値を設けているが、日本においては世界保健機関(以下 WHO)のガイドライン値を照会するにすぎなかった。このような中、平成9年6月に、厚生省が一般的な居住空間におけるホルムアルデヒド気中濃度に関して「30分平均で $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ 以下」という指針値を発表した。これは室温において「 0.08ppm 以下」というWHOのガイドライン値と概ね同程度である。この指針値は現在のところ法的拘束力を持たないが、測定結果の評価を行う上で、参考となる重要な指標と考えられる。

2.2 測定における換気条件

ホルムアルデヒド気中濃度測定における国際的な換気条件の基準として、ISO/TC146/SC6/N30⁴⁾が検討されている。これによると、居住空間内を十分に換気し、開口部を8時間閉鎖の後、濃度の測定を30分間行うこととしている。測定後はさらに5分間換気し、開口部を1時間閉鎖した後に再度30分間の測定を行うことにより、換気による低減効果も考慮するものである。このISOの換気条件(案)を受け、日本においても建設省を中心とした研究グループが換気条件(案)⁵⁾を提示している。これは、概ねISOの換気条件(案)を踏襲したものであるが、時間的な制約が厳しい実態調査においては所要の平衡を待つことが困難であることを考慮し、開口部の閉鎖時間をISOの換気条件(案)の8時間に対して5時間に短縮した換気条件(案)を提示している。なお、ホルムアルデヒドの最大気中濃度は、居住空間における汚染物質の拡散状況や居住空間の換気量に依存するものの、8時間で十分な平衡状態になるとされており⁶⁾、これはISOの換気条件(案)に記述されている開口部の閉鎖時間と概ね等しい。いずれの場合でも、測定のために管理された換気条件のもとでは、未入居の新築物件などを除き、ドアや窓および扉など開口部を閉鎖状態に保つ必要があるため居住者に著しい制約が生じる。したがって、より短時間の測定で、所要の平衡に達した最大気中濃度を算出することが可能な予測式の確立が期待される⁷⁾。

3. ホルムアルデヒド気中濃度予測式の現状

3.1 デシケータ値からの気中濃度算出方法

建材から発生するホルムアルデヒドの放散量を測定する方法に、デシケータ法、逆デシケータ法、また欧米諸国で規格化されているものとしてチャンバー法、パーホレータ法などがある。特にデシケータ法は、日本工業規格(以下 JIS)および日本農林規格(以下 JAS)で採用されている。

その中で、JIS および JAS に定義されている合板およびパーティクルボードなどの建材に関して、デシケータ法で得られた値から気中濃度の換算式が井上ら⁸⁾によって報告されている。以下にその式を示す。

$$C = (0.158D + 0.017) \times 2 / (1 + Q/S) \times 1.09^{(t-20)} \times (55 + h) / 100 \quad (1)$$

ここで、C：気中濃度(ppm)，D：デシケータ値(mg/l)，Q：換気量(m^3/h)，S：材料表面積(m^2)，

t：温度($^{\circ}\text{C}$)，h：相対湿度 (RH)

式(1)の特徴的なことは、温度および湿度の上昇によって濃度が増加する⁹⁾というホルムアルデヒドの特性に関し

て考慮されている点である。

3.2 瞬時一様拡散による気中濃度算出方法¹⁰⁾

ホルムアルデヒドなどの汚染物質が瞬間的に居住空間に拡散した場合を仮定すると、以下の理論式が得られている。

$$C = C_0 + \frac{EA}{Q} (1 - e^{-nt}) \quad (2)$$

ここで、 C : 室内の汚染物質濃度(mg/m^3)、 C_0 : 外気の汚染物質濃度 (mg/m^3)、 $M=EA$ 、 M : 汚染物質放散量 (mg/h)、 E : 材料からの放散速度($\text{mg}/\text{m}^2\text{h}$)、 A : 材料表面積(m^2)、 $Q=nV$ 、 Q : 換気量 (m^3/h)、 n : 居住空間の換気回数 ($1/\text{h}$)、 V : 居住空間の気積 (m^3)、 t : 時間 (h)

式(2)は材料からの放散速度および材料表面積、すなわち単位時間当たりの汚染物質の発生量と換気量および居住空間の気積(1時間当たり居住空間の空気が何回入れ換わるか)がわかれば、 t 時間後の濃度が算出可能であることを示す。式(2)の特徴的なことは、所要の平衡に達した最大気中濃度を算定するために必要である時間的なパラメータが考慮されている点である。

4. ホルムアルデヒド気中濃度簡易予測式の検討

ここで、3.で述べた式(1)の温度と湿度に関するパラメータおよび式(2)の時間に関するパラメータの両者を考慮することにより、所要の平衡に達した最大気中濃度を、簡易かつ短時間で予測することが可能となる手法を考える。

温度および湿度のパラメータは、所要の平衡に達した最大気中濃度に至るまでの温度および湿度の変化を予測し、式に挿入することが理想である。しかしながら、季節的、日常的な温度および湿度の変動を予想し、そのパラメータを気中濃度予測式に反映することは、式の複雑化を招くばかりでなく、精度の向上に著しく貢献するとは考えにくい。ため、初期値の挿入によりこの問題を解決することを考える。また、簡易化のため式(2)の外気濃度 C_0 を0とする。さらに、各建材からのホルムアルデヒドの放散速度とその材料表面積を乗じた放散量の総和を考えると、式(3)が得られる。

$$C = \sum a_i T_0 b_i \frac{(55 + h_0) E_i A_i}{100 Q} (1 - e^{-nt}) \quad (3)$$

ここで、 a_i : 各部材の温度係数、 T_0 : 初期温度($^{\circ}\text{C}$)、 b_i : 各部材の湿度係数、 h_0 : 初期湿度(RH)、 E_i : 各材料からの放散速度($\text{mg}/\text{m}^2\text{h}$)、 A_i : 各材料表面積(m^2)、 $Q=nV$ 、 Q : 換気量 (m^3/h)、 n : 居住空間の換気回数 ($1/\text{h}$)、 V : 居住空間の気積 (m^3)、 t : 時間 (h)

ところで、気中濃度の算出には、式(3)の各パラメータの値が必要となるが、これらは大別すると以下のように分類することができる。

- 1) 簡易な測定により値の定まるパラメータ : 初期温度、初期湿度、換気量、換気回数
- 2) 建築設計図書などの情報により値の定まるパラメータ : 材料表面積、居住空間の気積
- 3) 測定を繰返すことにより値が定まっていくパラメータ : 温度係数、湿度係数、放散速度

さらに、ここでは式(3)を実際の居住空間として、集合住宅の洋室および和室への適用を考える。これらの居住空間は、洋室の床材(フローリングやカーペットなど)や、壁装材(壁紙)およびクローゼットやドアなどの合板(その他の建材として窓)で構成されている。また和室は、床材(建材畳など)や壁装材(壁紙)および襖などの木質系の複合材料(その他の建材として窓)で構成されている。さらに、式(3)の簡易化のため、ここでは各部材の温度および湿度係

数をそれぞれ 1.09、1 とすると、式(4)が得られる。

$$C = (E_f A_f + E_w A_w + E_o A_o) 1.09 T_0 \frac{(55 + h_0)(1 - e^{-nt})}{100 Q} \quad (4)$$

ここで、 E_f : 床材の放散速度、 A_f : 床材の表面積、 E_w : 壁装材の放散速度、 A_w : 壁装材の表面積、 E_o : その他部材の放散速度、 A_o : その他建材の表面積

A_f 、 A_w および A_o は、建築設計図書などから得られるので、最終的に E_f 、 E_w 、 E_o の 3 つの未知数が残される。そこで、理論的には少なくとも 3 回の測定結果から各建材の放散速度を算出し、式(4)に代入することで、8 時間後の予測値を求めることが可能となる。しかしながら実際の測定において生じる誤差を考慮し、4 回の実測値を得る必要があると思われる。検知管に代表される多くの簡易測定法は、1 回の測定に要する時間が 30 分以下であることから、4 回の測定、すなわち 2~3 時間程度の測定により、8 時間後の最大気中濃度が算出できる(図-1 参照)。図-1 に示すように、短時間の測定により予測式(3)から算出された値が基準値以上または基準値に近い場合、表-1 に示した化学分析法などのより詳細な気中濃度を測定する必要がある。

ここで、洋室および和室で使用されている壁紙に含有しているホルムアルデヒドは、単位平方メートルあたり $7 \mu\text{g}$ 、また、現在流通しているゼロホルム系接着剤のホルムアルデヒドの含有量は単位重量あたり $5 \sim 7 \text{ppm}$ 以下¹¹⁾とされている。放散速度は、単位平方面積当たりの含有量を時間で除したものであるから、いま、壁紙および壁紙接着剤のホルムアルデヒドの揮発する期間を 2 週間と仮定すれば、放散速度はそれぞれ $0.00002 \text{mg/m}^2\text{h}$ および $0.00072 \text{mg/m}^2\text{h}$ となる。また、洋室のフローリングの放散速度を、壁紙と壁紙接着剤の合計の 35 倍¹²⁾と仮定すれば 0.00259mg/m^2 となる。洋室の合板、和室の畳および襖などの木質系建材は、実測値から算出することとする。以上の放散速度を、表-2 に示す。

表-1 代表的なホルムアルデヒド測定方法

分類	手段・方法	要旨	所見
簡易法	検知管法	検知剤の変色長を读取する	・ホルムアルデヒド妨害ガスの除去剤を使用 ・目視による測定誤差が生ずる ・検知管は低価格
	検知紙法	呈色反応による比色	・濃度の表示が5段階 ・検知紙は低価格
化学分析法	4-75/3-ピ'ラ'ジ'ノ-5-メカ'ト'1, 2, 4-トリ'ア'ゾ'ル'吸光度法 (AHMT 法)	HOCHO ^{注)} をほう酸溶液に吸収させた後、塩基性として AHMT を加えて発色させ、その吸光度を測定する	・分析器を使用する中であっては比較的簡便で精度が良いが、ある程度の化学の知識が求められる ・分析費はやや高価格
	2, 4-ジ'ニ'トロ'ヒ'ク'リ'ソ'リ'ン'捕集高速液体クロマトグラフ法 (DNPH-HPLC 法)	DNPH 溶液含浸捕集剤充填のカートリッジに HOCHO ^{注)} を捕集した後、アセトニトリルで溶離し、HPLC に導入する	・ある程度の化学の知識を有し、機器に対する熟練度が求められる ・分析費は高価格

注) HOCHO は、ホルムアルデヒドを表す

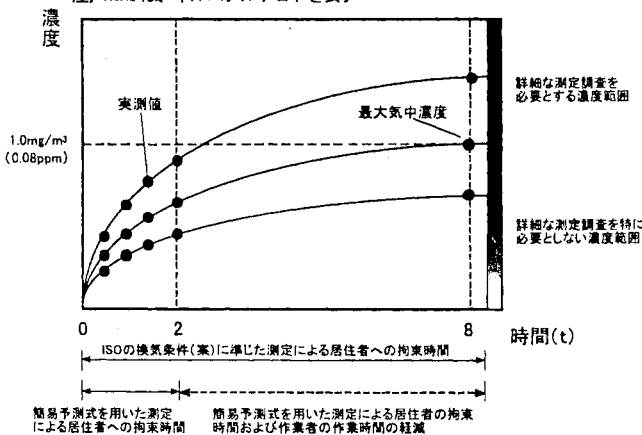


図-1 簡易予測式を用いた測定の概念図

表-2 各建材からの放散速度

室タイプ	建築部材	放散速度 (mg/m ² h)
洋室	壁紙	0.00002
	壁紙接着剤	0.00072
	フローリング	0.00259
	合板	実測値より算出
和室	壁紙	0.00002
	壁紙接着剤	0.00072
	畳	実測値より算出
	木質系建材	実測値より算出

5. 簡易予測式の適合性と精度の検証

5.1 測定の概要

式(4)に示した予測式の適合性と精度の検証を行うために、ホルムアルデヒドの気中濃度の実測値との比較を行った。測定は、神奈川県内の地上6階建鉄筋コンクリート造新築集合住宅で実施した。対象住戸の概要を表-3に示す。換気量の測定は、JIS A 1406 屋内換気量測定法(炭酸ガス法)の検知管法を、また、ホルムアルデヒド気中濃度の測定は、簡便かつ迅速に結果の得られる簡易測定法のひとつである北川式検知管を採用した。測定位置は、居住空間の中央で床上1.2mとした。

表-3 測定対象住戸の概要

測定対象	地上6階鉄筋コンクリート造新築集合住宅		
測定時期	平成10年1月		
測定場所	4階:3LDK		
	洋室	和室	
内装仕様	床	E ₁ ¹⁾ バニリンボード F ₂ ²⁾ フローリング	建材畳
	壁	石膏ボード	石膏ボード
		下地 ²⁾ ニモロス	下地 ²⁾ ニモロス
	天井	石膏ボード	杉板化粧
		下地 ²⁾ ニモロス	石膏ボード
押入れ	---	F ₂ ²⁾ 合板	
壁紙接着剤	ゼロホルムアルデヒド仕様		
床材表面積(m ²)	9.44	11.6	
壁装材表面積(m ²)	3.65	45.4	
その他建材表面積(m ²)	9.40	6.66	
気積(m ³)	24.1	27.8	
換気量(m ³ /h)	0.89	0.52	
初期温度(°C)	7.5	11.8	
初期湿度(RH)	70.0	56.0	

1) JIS規格のホルムアルデヒド放出量による区分、E₁は1.5mg/l
2) JAS規格のホルムアルデヒド放数量による区分、F₂は5 mg/l

5.2 実測値との比較

測定は、開始から30分間隔で、ホルムアルデヒド気中濃度が所要の平衡に達したと考えられる8時間後まで実施した。洋室および和室におけるホルムアルデヒド気中濃度の実測値と簡易予測式により算出した値を図-2 および図-3にそれぞれ示す。図中の●は、簡易予測式に適用した実測値を、○は適用しなかった実測値を表す。また、図中には(4)式において温度および湿度のパラメータを考慮していない場合の予測値も示している。

図-2中の洋室の実測値と予測値に着目すると、●に示した測定開始から4回(2時間程度)の実測値を用いることで、8時間後の実測値と比較的良好に予測できることがわかる。一方、式(4)で提案した予測式は温湿度パラメータを考慮しているが、温度および湿度のパラメータを考慮しない場合の予測値と実測値を比較すると、図-2および図-3に示すように大きな差が生じることがわかる。これは、ホルムアルデヒドの放散メカニズムを瞬時一様拡散律束と仮定し、また温度および湿度パラメータを考慮することの妥当性が示された考える。これらの結果から、筆者らが提案した簡易的かつ短時間で最大気中濃度を求める予測式が、実際の居住空間における測定に適用できる可能性が示されたと考える。

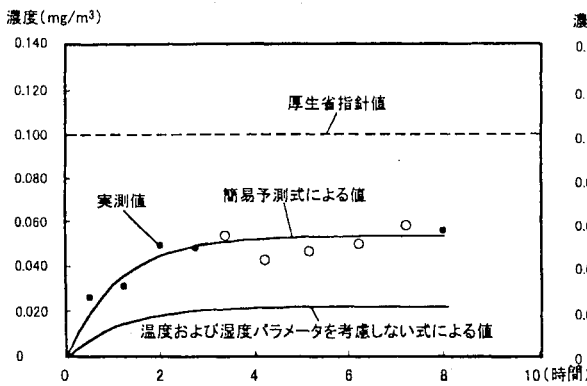


図-2 洋室における実測値と予測値

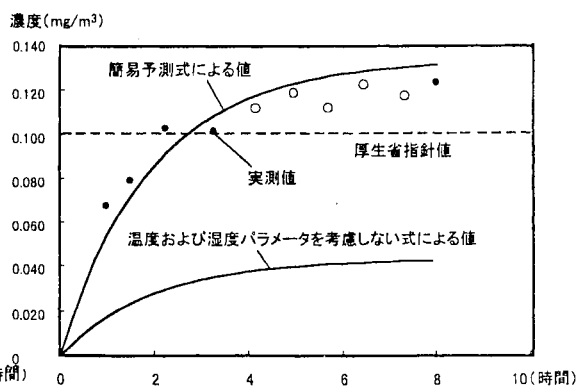


図-3 和室における実測値と予測値

6. まとめ

ISO 換気条件(案)に準じて、居住空間内のホルムアルデヒド気中濃度を測定した場合、測定の準備や換気条件の管理が長期に及ぶため、居住者の生活行為に支障を及ぼし、また、測定に関わるコスト増などの諸問題が生じることが考えられる。そこで、測定者を含めて施工者や居住者が、実際の居住空間の空気質に関して、ホルムアルデヒドの最大気中濃度を簡易的かつ短時間で予測し、指針値と比較した結果を把握することができる手法の可能性を検討するとともに、この手法に基づき測定した新築の集合住宅における実測値と比較し、精度の検証を行った。その結果、瞬時一様拡散の理論式に温度および湿度のパラメータを考慮することにより、短時間の測定から得られる実測値から、所要の平衡に達した最大気中濃度の予測値を求められることがわかった。また、求められた予測値と実測値は比較的良好に一致することから、実際の居住空間における測定に適用できる可能性が示されたと考える。

最後に、今後の課題を以下に示す。

- (1)各建材からの放散速度のデータベース化により、提案した予測式の精度の向上を図る。
- (2)より多くの実測値と比較し、提案した予測式の妥当性を検証する。

謝辞

本研究を行うにあたり、測定現場を提供してくださいました関係各位に感謝の意を表します。また、貴重な御指導、御助言を頂いた森林総合研究所の井上明生先生に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1)池田耕一,松村年朝,堀 雅宏,木村 洋:集合住宅における室内空気質実態調査 (その1)HCHO の測定,空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会,pp.373-376,1997
- 2)野崎淳夫,吉澤 晋,池田耕一,堀 雅宏:室内 HCHO,VOC 汚染に関する研究,集合住宅におけるベイクアウト効果に関する研究 (その1),空気調和・衛生工学会学術講演会,1996
- 3)井上明生:ホルムアルデヒド気中濃度のガイドライン対策,木材工業 Vol.52,No.1,1997
- 4)ISO/TC 146/SC 6/N30,Measurement of Indoor Air Pollutants Sampling Strategy for Formaldehyde, 1997
- 5)大澤元毅,坊垣和明,吉野 博:健康的な居住環境形成技術の開発,日本建築学会大会学術講演梗集,1998 (掲載予定)
- 6)花井義道:横浜国立大学環境科学研究センター紀要,第22巻,第1号,pp.1-10,1996
- 7)田辺新一:設計・施工時における対策,日本建築学会,建築雑誌,pp.30-37,Vol.113,No.1421, 1998
- 8)守屋正裕,河内 武,桜町多佳子:新築集合住宅における HCHO 濃度の実態調査,空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会,pp.367-372,1997
- 9)Alan R. Hawthorne,Thomas G. Matthews :Models for Estimating Organic Emissions from Building Materials Formaldehyde Example,pp.419-424
- 10)環境工学教科書研究会編著:環境工学教科書,pp.134-137
- 11)山下洋一,壁紙財団法人 住宅・建築 省エネルギー機構,pp.29-34,Vol.19-2, No.107, 1998
- 12)吉田弥明,壁紙財団法人 住宅・建築 省エネルギー機構,pp.21-28,Vol.19-2, No.107, 1998