

文化財展示・保存施設における室内汚染の予測検討と実態調査

PREDICTION AND INVESTIGATION OF INDOOR AIR POLLUTION
IN A FACILITY WHERE CULTURAL ASSETS WILL BE EXHIBITED AND STORED

山本 拓弥*1, 栗木 茂*2, 市川 菜奈絵*1

Takuya YAMAMOTO, Shigeru KURIKI, Nanae ICHIKAWA

In the construction of facilities to exhibit and store cultural assets, indoor air pollution caused by chemical substances emitted from building materials may cause problems. This paper reports on the implementation of the following countermeasures in order to improve air quality of the exhibit and storage room to be suitable for the display and preservation of cultural assets until the completion of the museum that we are constructing.

- For the materials used inside in the exhibition room, test pieces were prepared and the emission rate of pollutants was measured. In addition, the concentration of pollutants at the time of completion was calculated from the measurement results.
- The change in concentration of pollutants was measured and verified for the period through the completion of building frame works for the museum and interior works. Ultimately, it was confirmed that the concentration of pollutants was below the recommended value, which corresponded to some extent with the calculation result.

Keywords : Museum, Indoor air pollution, Interior material, Emission factor, Ammonia, Organic acid
博物館, 室内空気汚染, 内装材料, 放散速度, アンモニア, 有機酸

1. はじめに

美術館や博物館など文化財を展示、収蔵する施設では展示室や収蔵室の化学物質濃度が問題になる。これは、室内空気汚染が文化財の変退色などの劣化の要因になる場合があるためである。

対象の化学物質について、独立行政法人国立文化財機構東京文化財研究所からアンモニアおよび酢酸、ギ酸、ホルムアルデヒド、アセトアルデヒド（総称し以下、汚染物質）について望ましい値（以下、推奨値）が示されている¹⁾（表1）。推奨値は建築工事の特記仕様書に転載されることがあり、この場合、竣工あるいは引き渡しまでに室内の汚染物質濃度を推奨値以下にする必要がある。

新設建築物の室内空気汚染については、新設建築材料からの放散が主要因であると思われる。例えば新設コンクリート部材からアンモニアが発生することはよく知られるほか、湿式材料と呼ばれる塗料や接着剤、シーリング材なども硬化過程にアンモニアなどが発生することが知られる。また、乾式材料といわれる合板やフローリングなどの木質建材、壁紙などについても、有機酸などを放散するものがあることが報告されている²⁾。

文化財展示・収蔵施設は機能性および意匠・審美性を重視し設計され、使用される建材の種類は、設備などを含めると多岐に渡る。建材すべてについて汚染物質性状を網羅的に把握することは難しい。しかし、少なくとも室の面積を占める建材の汚染物質発生性状を調査し竣工時の室内濃度を検討し、工事期間に汚染物質濃度をモニタリングし推移を把握することは、適切な環境提供のために有用であると思われる。

本報では、当社施工の博物館物件において、室内汚染の予測検討と実態調査を実施した結果を示す。

表1 汚染物質の望ましい基準値¹⁾

汚染物質	望ましい基準値	
	ppb	$\mu\text{g}/\text{m}^3(20^\circ\text{C})$
アンモニア	30	22
酢酸	170	430
ギ酸	10	19
ホルムアルデヒド	80	100
アセトアルデヒド	30	48

2. 建物概要

対象建物概要を表2に示す。対象建物は、2017年3月～2019年3月を工期とし、近隣商業地域に建設されるRC造（一部、S造）地上1階の博物館であった。

表2 対象建物概要

構造種別	RC造、一部S造
階数	地上1階
建物用途	博物館
建築面積	約2,200m ²
延床面積	約2,000m ²

*1 戸田建設株式会社技術開発センター 修士（工学）

*2 戸田建設株式会社技術開発センター

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

Research and Development Center, TODA CORPORATION

対象建物の大まかな建設工程は、躯体工事（鉄筋・型枠工事、コンクリート打ち込みなど）が2018年2月～7月、内装工事（断熱・設備工事含む）が2018年8月～2019年1月であった。

表3に対象室概要を示す。建物内部のうち、展示室系3室（Exh1～3）、展示準備系2室（Perp1, 2）収蔵庫系3室（Str1～3）を対象室とした。対象室のうち、Exh2, 3は隣接しており乾式壁の施工まで1室として取り扱った。また、Perp2は3方が乾式壁であったが、壁施工前後を通して1室として取り扱った。

空調に関しては、エアハンドリングユニット（以下、AHU）により系統ごとに個別に空調される計画であった。AHUには、プレフィルタ、ケミカルフィルタ（以下、CF）、中性能フィルタが組み込まれた。

表3 対象室概要

系統	室名	床面積 (m ²)	室容積 (m ³)
展示室系	Exh1	28.48	123.34
	Exh2	181.33	1033.58
	Exh3	167.95	957.43
展示準備系	Perp1	130.38	743.17
	Perp2	13.81	78.43
収蔵庫系	Str1	230.59	1314.36
	Str2	38.27	218.14
	Str3	44.65	254.51

表4に対象室の主な内装材料を示す。なお、Exh1, 2, Str1～3では、表4の下地のさらに下層に硬質吹付ウレタンフォームが施工される場合があり、特にStr1～3は二重壁構造であった。

表4 対象室の主な内装材料

室名	部位	床	壁	天井
Exh1	下地	構造用合板	GB-R	GB-R
Exh2	仕上	フローリング材 (樹種：ウォールナット)	繊維系壁紙	DR (暗色)
Exh3				
Perp1	下地	(コンクリート)	GB-R	GB-R
	Perp2	仕上	ビニル床シート	EP-G
Str1	下地	鋼製二重床 木質系下地板	フィルム貼り 下地板	木質系 下地板
Str3	仕上	フローリング材 (樹種：ブナ)	調湿 パネル	DR

GB-R:せっこうボード

DR:ロックウール化粧吸音板

EP-G:つや有り合成樹脂エマルジョンペイント塗り

3. 室内汚染物質濃度の予測

対象建物のうち、Exh1～3について検討を行った。具体的には、内装材で作製した試験体について汚染物質放散速度を測定し、Exh1～3の施工面積と空調条件から竣工時の室内濃度を試算した。なお、展示準備系(Perp1,2)と収蔵庫系(Str1～3)では、過去物件より建材からの放散が少ないと判断されたこと、メーカーの責任施工であることなどの理由により実施しなかった。

3.1 汚染物質放散速度の把握

(1) 試験体

表5に試験体概要を示す。表4のうち灰色で示される内装材料について、試験体を下記の手順で作製した。

製造所からサンプルを取り寄せ、100×100mm程度に切り出したのち実験室へ移送した。移送にあたっては、JISA1902-1³⁾を参考に、アルミニウム箔とポリエチレンの袋で梱包した。移送後、①と②については側面と裏面をアルミテープで塞ぎ、③については切り出したまま試験に供した。なお、試験体はそれぞれ3体とし、移送後は測定まで20℃、60%RHの室に静置した。

表5 試験体概要

No.	材料	寸法	備考
①	フローリング材	100×100 mm程度	ウォールナット,単層, UV塗装
②	構造用合板		—
③	繊維系壁紙		不燃認定品

(2) 測定方法

図1に測定概要、表6に使用した検知管を示す。試験場所は22℃55%RHの恒温恒湿槽内部とした。容積26Lの亚克力製デシケータに試験体を入れた。デシケータ内部が0.9回/h換気になるようエアポンプにより槽内空気を供給し、4時間程度経過したとき濃度が定常と見なした。デシケータ内部の空気について、検知管を接続したエアサンプラで吸引し、検知管の変色長さから濃度を定量した。①、②では有機酸、③では有機酸とアンモニアについて測定した。

検知管については、汚染物質の比重を考慮し、アンモニアを測定する際は上方バルブ、有機酸を測定する際は下方バルブにそれぞれ接続した。また、今回測定した有機酸濃度に関しては、製品説明書によるとギ酸と酢酸の濃度の和とされ、両者の比率は不明であった。

測定結果から単位面積当たりの放散速度を式(1)より算出した

$$EF_a = \frac{C_t \times Q}{A} = C_t \times \frac{n}{L} \quad (1)$$

ここで、 EF_a を単位面積当たりの放散速度($\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)、 C_t をデシケータ内部濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)、 Q をデシケータの換気量(m^3/h)、 A を試験体表面積(m^2)、 n を換気回数(回/h)、 L を試料負荷率(m^2/m^3)とした。

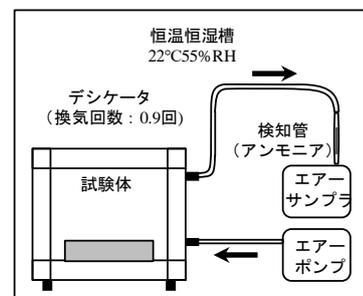


図1 測定概要

表 6 使用した検知管

汚染物質	製品名	測定濃度範囲
アンモニア	美術館用アンモニア 900NHH	10~80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
有機酸 (酢酸・ギ酸)	有機酸(酢酸・ギ酸)910	10~400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

表 7 内装材料の汚染物質放散速度

No.	内装材料	放散速度($\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)	
		アンモニア	有機酸
①	フローリング材	-	267
②	構造用合板	-	240
③	繊維系壁紙	108	192
④	コンクリート ⁴⁾	40	-
⑤	吹付け硬質ウレタンフォーム ⁴⁾	40	-
⑥	ボード用接着剤 ⁵⁾	-	10

(3) 測定結果

図 2 に放散速度測定結果を示す。①, ②については、有機酸を放散することが確認された。放散速度はばらつきが大きいものの、最大値は①②ともに $250 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 程度であった。③については、アンモニアと有機酸を放散することが確認された。これは、基材繊維と難燃剤から放散したものと思われる。放散速度のばらつきに関しては、移送から測定までの期間に試験体の放散速度が変化した可能性があった。

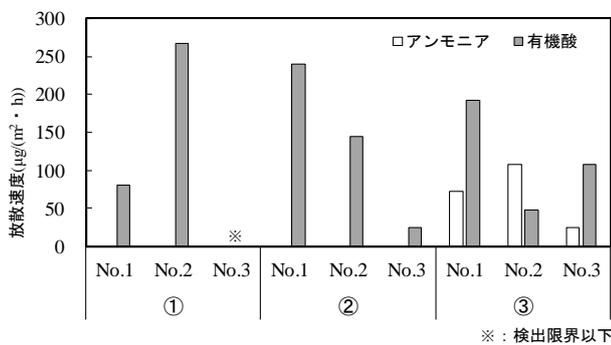


図 2 放散速度測定結果

表 8 内装材料の施工面積

室名	Exh1	Exh2	Exh3	
容積 (m^3)	76.96	587.83	634.66	
面積 (m^2)	①	28.48	167.95	181.33
	②	28.48	167.95	181.33
	③	42.94	173.53	97.02
	④	141.28	381.27	381.27
	⑤	32.21	86.76	-
	⑥	42.94	173.53	97.02

3.2 濃度計算

(1) 計算方法

表 7 に内装材料の汚染物質放散速度、表 8 に室ごとの内装材料の施工面積、図 3 に展示室系統の空調風量を示す。

濃度計算にあたって安全側の評価をするため、内装材料①~③の最も大きな値を汚染物質放散速度とした。また、汚染物質を放散すると思われる内装材料④~⑥について文献^{4), 5)}を参考に放散速度を設定した。

各室において、内装材料①~⑥の放散速度と施工面積の積を算出し、その総和を単位時間当たりの汚染物質発生量とした。

単位時間当たりの汚染物質発生量と空調の風量、室容積から室内濃度を算出した。室内および AHU 内部で汚染物質が瞬時に一様拡散するものとした。また、外気の汚染物質濃度については $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と仮定した。

CF については、高濃度で効果が確認されているものの、一般に入口濃度が低くなると汚染物質の除去効率が低下すると言われ、本検討での濃度範囲において除去率等が明らかでない。したがって、ここでは、CF は単位時間あたりに通過する風量に含まれる汚染物質質量のうち所定割合が消失するものと仮定した。この百分率を CF 除去率とし、0~100%の場合について計算した。

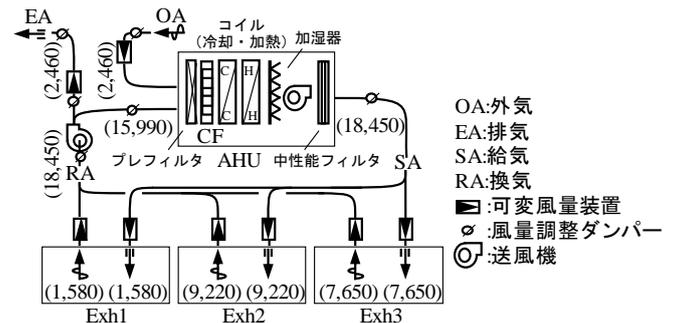


図 3 展示室系統の空調風量 (単位 m^3/h)

(2) 結果

図 4 にアンモニア、図 5 に有機酸の CF 除去率と濃度計算結果を示す。

アンモニアについて、CF 除去率 15%以上で推奨値を下回る結果となった。濃度計算結果は、Exh1, Exh3, Exh2 の順で大きかった。これは、主に繊維系壁紙や断熱材の施工面積に対する容積と対応しているものと思われる。

有機酸に関しては、推奨値を酢酸 ($430 \mu\text{g}/\text{m}^3$) とギ酸 ($19 \mu\text{g}/\text{m}^3$) の推奨値の和とした。濃度計算結果は、CF 除去率が 0%の場合においても推奨値 ($449 \mu\text{g}/\text{m}^3$) を下回った。濃度計算結果は、Exh1, Exh3 で Exh2 と比較して大きかった。

以上より、竣工時の Exh1~3 における室内濃度について、CF で 15%以上が除去される場合にアンモニアが推奨値を超過する可能性は低いこと、CF の有無にかかわらず有機酸濃度が推奨値を超過する可能性が低いことが予想された。

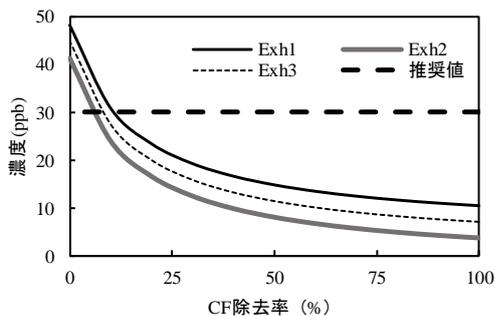


図4 アンモニアのCF除去率と濃度計算結果

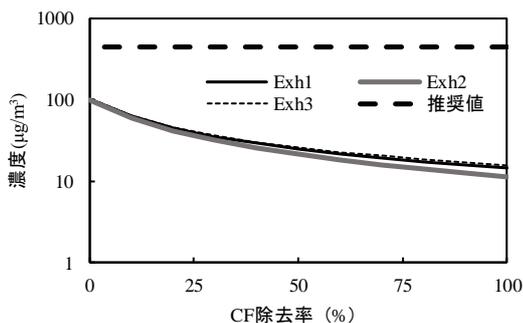


図5 有機酸のCF除去率と濃度計算結果

4. 施工中の室内空気汚染調査

濃度予測結果の確認，施工される建材による室内汚染物質濃度の変化を把握するため，対象建物において測定を実施した。

4.1 測定概要

(1) 検知管による測定

2018年7月～2019年1月までの期間に検知管による汚染物質濃度測定を実施した。

表9に測定に使用した検知管を示す。測定について，場所は対象室の中央部，高さ1000～1500mm程度とし，頻度は1カ月に2回程度を基本とした。また，測定時の温湿度を同時に記録した。

汚染物質のうち酢酸・ギ酸，ホルムアルデヒドについては，床や壁工事が行われる2018年12月から2019年1月までの期間に3回程度測定した。

表9 測定に使用した検知管

汚染物質	製品名	測定濃度範囲
アンモニア	美術館用アンモニア900NHH	10～80 µg/m ³
酢酸・ギ酸	有機酸(酢酸・ギ酸)910	10～400 µg/m ³
ホルムアルデヒド	91TPホルムアルデヒド	0.01～1.75ppm

(2) 分析機器による精密測定

竣工時の濃度について，(1)より高い精度で定量するため，分析機器による精密測定を実施した。

表10に空気捕集方法と分析機器を示す。2019年1月24日に各室の扉を閉め5時間程度空調運転をしたのち室内空気を捕集し，分析機器により汚染物質を定量し室内濃度に換算した。

表10 空気捕集方法と分析機器

汚染化学物質	捕集方法	分析機器	定量下限(ppb)
アンモニア	インピンジャー	イオン クロマトグラフ 法	3.0
酢酸	液体捕集 (超純水)		1.0
ギ酸			1.0
ホルムアルデヒド	アルデヒド類 サンプラー	高速液体 クロマトグラフ 法	8.0
アセトアルデヒド			3.0

4.2 測定結果と考察

(1) 検知管を用いた測定

図6に測定時の室内温度，図7に測定時の室内湿度を示す。

室内の温度について，外気に影響を受けおおむね夏季から冬季にかけて低下した。他方，2018年12月以降は上昇したが，空調運転の影響と思われる。

室内の相対湿度についても夏季から冬季にかけて低下したが，9月や11月に増加する場合があった。

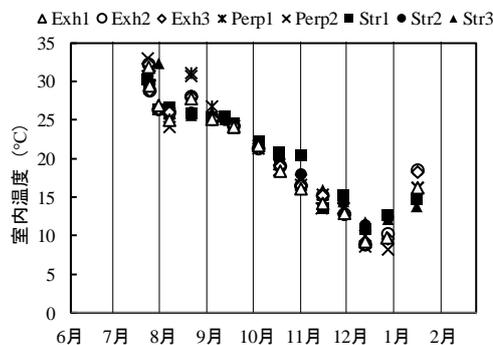


図6 測定時の室内温度

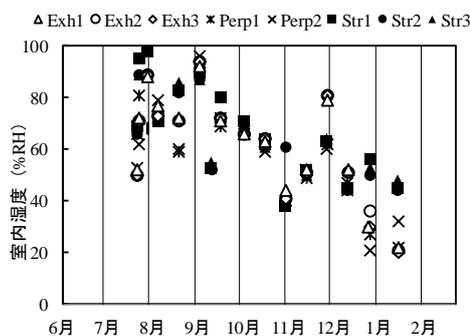


図7 測定時の室内湿度

図8にアンモニア濃度測定結果と工程概況を示す。なお，15ppb以下は測定濃度範囲外であったが，検知管の変色が確認されたため参考として記載した。

躯体のみの時点で，アンモニア濃度は30ppbを下回る室がほとんどであった。これは，コンクリート打込みから比較的天数が経過していたことが要因であると思われる。中でも，Str1～3では他室と比較して濃度が高い。これは，開口部が少ないためアンモニアが滞留しているものと思われる。

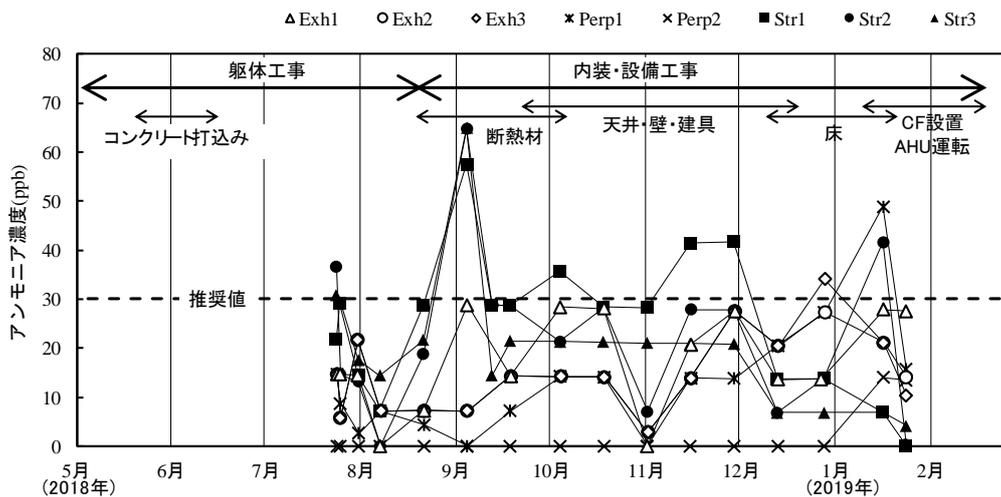


図8 各室のアンモニア濃度推移と工程概況

8～10月の期間では、いずれの室においても濃度が上昇した。Str1～3で顕著であった。これは、断熱材の硬質吹付けウレタンフォームの硬化剤に用いられるアミン化合物の影響と思われる。特に収蔵庫系統では、断熱材が広範囲にわたって施工されていた。

10～12月の期間では、いずれの室もほぼ同時期に濃度が増減した。天井・壁の組み立てや建具の取り付けの進捗にともない、建築全体の開口と室の容積の減少により、室内外における材料施工や通風が全体に及ぼす影響が大きくなったことが原因と思われる。

12月～1月の期間では、床工事の影響のためか、濃度が増加する室が多かった。一方、空調運転開始後に濃度は低下し推奨値を下回った。

図9に有機酸濃度・ホルムアルデヒド濃度測定結果を示す。有機酸については、12月にStr1, 2において10～25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度(酢酸換算2～8ppb程度)であったが、1月にいずれの室においても定量下限以下であった。ホルムアルデヒドについては、12月にExh3とStr1～3で30ppb程度であったが、1月にいずれの室においても定量下限以下であった。

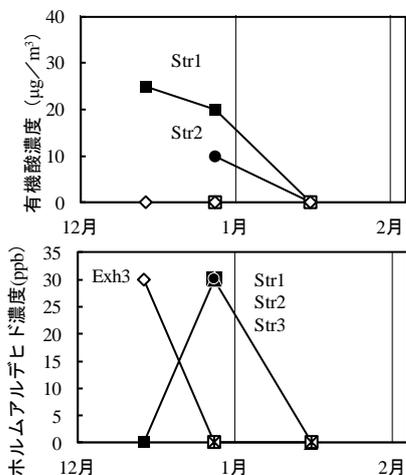


図9 有機酸・ホルムアルデヒド濃度測定結果

(2) 分析機器による精密測定結果

図10に分析機器による精密測定結果を示す。ホルムアルデヒドに関しては、全室で定量下限値以下であったため省略した。

汚染物質濃度はいずれの室においても推奨値を超過することはなかった。

Exh1～3について、濃度はExh1, Exh2, Exh3の順で高くなり、濃度計算とは順位が異なるものの、Exh1で高くなる傾向が共通した。アンモニアに関してはCF除去率30%での計算結果に近い値となった。酢酸、ギ酸に関しては、足し合わせると12～26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 範囲になりCF除去率50～100%に近い値となった。他方、Exh1～3でアセトアルデヒドが検出され、濃度はExh3, Exh2, Exh1の順で高くなった。アセトアルデヒドの発生源としては木質建材が疑われた。

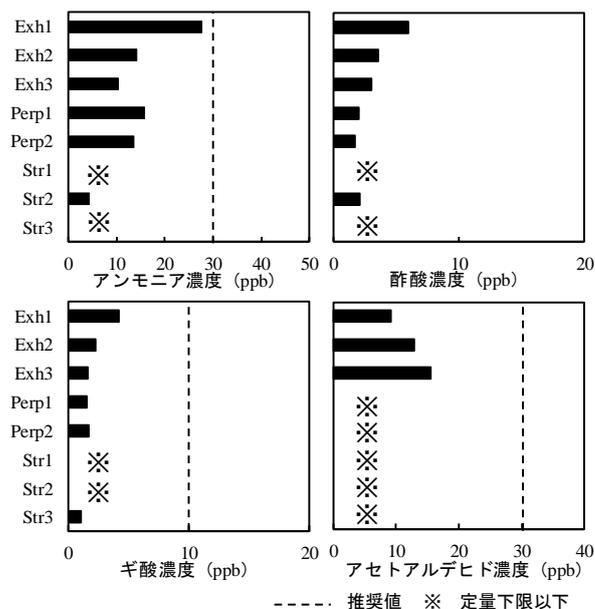


図10 分析機器を用いた精密測定結果

5. 総括

本報では、当社施工の博物館物件において、文化財の保存に適した環境を提供するため、内装材料から放散する汚染物質放散速度を測定し、建築および設備の仕様から室内の汚染物質濃度を予測検討した。その結果、竣工時の汚染物質濃度は予測結果とある程度対応することを確認した。また、施工に伴う室内濃度について、工事期間を通して測定した結果を示した。

建築物において室内汚染が発生したとき、多様な建材の中から原因を特定することが困難な場合が少なくない。建築材料を整理し、あらかじめ室内濃度を予測し、並行して実際の濃度との対応を検討しておくことは竣工時のみならず施設供用期間においても有用と思われる。

一方、ppb オーダーの濃度における CF の除去性能やアセトアルデヒドの放散源については不明点も多いため、今後の課題とする。

参考文献

- 1) 文化財公開施設の室内汚染物質測定に関するお問い合わせについて、<http://www.tobunken.go.jp/~hozon/announcement/ann3.html>
- 2) 古田嶋 他：展示収蔵施設に用いられる木質材料の放散ガス試験，保存科学，52，197-205，(2013)
- 3) JIS A 1902-1：2015 建築材料の揮発性有機化合物（VOC），ホルムアルデヒド及び他のカルボニル化合物放散量測定におけるサンプル採取，試験片作製及び試験条件-第 1 部：ボード類，壁紙及び床材
- 4) 山東 他：博物館の収蔵・展示室における室内空気汚染対策について，国土交通省近畿地方整備局研究発表会論文集，No.14，(2012)
- 5) 斎藤 他：水系接着剤から放散される化学物質による室内汚染度の予測，室内環境学会誌，Vol.8，No.1，p15-26（2015）