

展示使用材料から発生する汚染物質とその対策〔事例報告〕

— 展示用ディスプレイと展示室改修の影響 —

佐野 千絵・早川 泰弘・三浦 定俊

1. はじめに

展示にあたって新規に展示室・ケース内に持ち込まれる材料は多岐多数にわたる。特に仮設ケース製作にあたっては、木材や各種合板、クロス、接着剤、パテ、塗料などの多種の化学物質を放散するおそれのある材料が小さな容量の空間内に押し込められ、また乾燥不十分な材料から放出された水分で空間内の水分コントロールが難しい状況となる。このような条件下で十分な通風乾燥期間なしに使用を開始した場合に起こった絵画の変色事例についてもすでに報告した¹⁾。ケースの気密性が高いほど、汚染物質は高濃度になるまでケース内に蓄積されるが、一方ケース外では感知できずに変色という形の被害に結びつくまで気づきにくい。また展示資料側の保有する水分量が多いほど、室内汚染物質のうち水溶性の酸性・アルカリ性成分が資料の保有水分内に濃縮し、化学変化を引き起こしやすくなるため、展示空間の相対湿度を正確に制御することが必須である。特に、資料表面での結露は局部的な濃縮を起こすために厳禁で、そのためにも、使用前にあらかじめ十分に時間をとり展示空間全体を通気乾燥することが対策として何よりも重要である。このような被害を避けるため、事前の計画段階で使用材料を変色試験紙などのモニター紙を使ってあらかじめ吟味する（図1）ことで、多量の汚染物質の持ち込みを減らしてシーズニング期間を短縮することが可能であることも、これまでの研究から明らかになっている。

展示室改修時に新たに持ち込まれる材料もまた多種多様で、新築時に近い空気汚染状況となる。しかし一般的にリオープンまでの期間は不十分で、特にケース内の汚染は被害のおそれのあるレベルとなり、継続して監視が必要となる場合が多いことが、当所のおこなっている環境調査を通して経験的に分かっている。

本報告は、実際の展覧会および展示室改修で起こった事例について、汚染状況とその推移について報告し、その時点で改善のために採った対策とその成果について述べる。また展覧会で使用した展示用ディスプレイ材料については、終了後に入手して材料から放出されたおそれのある放散ガスの種類とその量、放散速度を検討し、最終的に対策が有効であったかどうか評価を行ったので、その結果を報告する。

2. 調査および対策の経緯

2-1 展覧会の実施経緯と対策・結果

2-1-1 展示の進行と対策

作業日程と内容について表1、サンプリングしたケース内空気の汚染物質濃度を表2にまとめる。

展覧会実施の約70日前に、乾漆彩色坐像〔高さ約60cm〕の展示についてどのような展示環

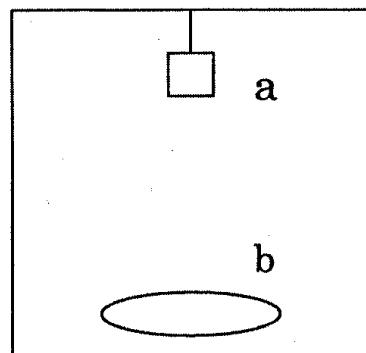


図1 使用材料の試験方法
a.変色試験紙 b.試験体
(22°C, 55%RHが望ましい)

表1 作業日程と内容

日程		温度・湿度制御 調整	試験内容
展示8日前	演示台(下段)仕上がり、風乾		閉扉してデータロガーで計測
展示7日前		温度湿度制御状況確認	
展示5日前	演示台(上段)仕上がり、風乾		変色試験紙で試験
展示3日前	演示台設置		
展示2日前	サンプリング後、除湿器設置		空気サンプリング1
展示作業当日	直前まで除湿乾燥、アンモニア除去シート設置	ロガー、自記記録計設置 調湿剤設置	金属板曝露開始
展示開始4日目			空気サンプリング2
展示開始6日目	1時間閉扉、扇風機で通風、アンモニア・酢酸除去シート設置		
展示開始11日目	5時間閉扉、酢酸除去シートに切り替え、酢酸除去活性炭追加設置	調湿剤追加設置	空気サンプリング3
展示開始13日目	酢酸除去活性炭取り外し	調湿剤追加設置	
展示開始15日目		7日巻き自記記録計変更	
展示開始19日目			空気サンプリング4
展示開始32日目			空気サンプリング5

表2 空間内の汚染物質濃度

	酢酸 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	アンモニア/ppb
サンプリング1	128	92
サンプリング2	448	102
サンプリング3	339	24
サンプリング4	120	31
サンプリング5	129	32

用材料を厳選して製作するように助言した。最終的に選ばれたものはグラスバウハーン社の製品であったが、この社の製品は原則的に使用材料に対して大英博物館方式のチェック(Oddy Test)を行っている点で安全であり、この時点で展示会期中に問題が生じることは想定していなかった。

展示開始7日前に自立型の行灯ケース[約9 m³]が会場に運び込まれ、温湿度制御能力の確認のためのテストを行った。一日8時間の空調運転下でケース内外の温度・湿度推移について、約2日間の連続測定をし、また変色試験紙で清浄度テストを行った。その結果、非常に気密性が高いことが確認され、またケースの清浄度は高く、ケースには何も問題はなかった。

問題は、箱形の2台の演示台にあった。一段目180cm角、高さ約20cmの演示台は、温湿度測定の前日(展示開始8日前)にできあがったばかりで、3cm角の木材を構造体として組み、シナベニヤ板を張ったものにクロス貼り・緑色ペイント仕上がりが行われたばかりであった。二段目

境が適しているか問い合わせがあった。冬季に東日本太平洋側へ関西から資料が移動するとのことで、輸送の手順やならしの期間についても助言を行った。

展示ケースの仕様については、多数の来館者が見込まれたため気密性の高いものを採用することとし、公開までの期間が十分ではなかったため、あらかじめ使

の台は100cm角、高さ約60cmで、同様に3cm角の木材を構造体にしたものであるが、ベニヤ板には節のある、また水分量の比較的多いラワン材を用いており、展示開始5日前によくできあがったものである。ベニヤ板の厚みはいずれも約1cmであった。当初から木の臭いの他、強い有機溶剤の臭いがした。これらの台は、木部の乾燥具合やペイントの状況からケース内に組み込める状況ではなかったため、同じ展示室内で展示4日前まで放置して、汚染ガスの放散を促した。その後ケース内に組み入れ、一日封入後の展示2日前に、ケース内空気10リットルを超純水2mlに通気して〔通気速度0.15ml/分、捕集高さ一段目上約1m〕室内汚染物質を捕集し、得られた試料溶液中の有機酸イオン、無機イオン濃度をそれぞれ高速液体クロマトグラフ(有機酸分析システム、島津製作所製)およびイオンクロマトグラフIC7000D(横河分析システム製)で定量し、気中濃度に換算した。

得られた汚染物質量は酢酸濃度 $128\text{ }\mu\text{g/m}^3$ 、アンモニア濃度92ppbであった。いずれの物質も十分に飽和するまで時間を経過しておらず、また壁面への吸着量も相当量見込まれる状況にも関わらず、高濃度の汚染状況であったため、改善のために以下の対策方針を立て、この実現のために展示担当者と日程、資材、協力体制および展示意匠との共存のための協議を繰り返した。

対策1 ケース空間の相対湿度を制御可能な状況とする

対策2 ケミカルフィルターを設置して、汚染物質を積極的に低減する

対策3 定期的に換気を行うために、展示時間外にケース扉を開ける

対策4 展示中の状態について、継続して監視体制を取る

ケース内の湿度条件を制御するために一般に調湿剤が用いられているが、その吸放湿特性については繰り返しこれまでにも述べられているように、放湿速度に比べて吸湿速度は遅い傾向があり、高湿度から低湿度へある程度のボリュームの空間を調整するには、あらかじめ持ち込んだ材料の余剰水分を取り除いておく必要がある。今回は、展示作業ぎりぎりまで除湿器をケース内に持ち込み、調湿剤で調整可能な状況になるまで除湿した。この除湿作業は、壁ガラス・クロス等に吸着されている室内汚染ガスの放散を促進する上でも有効な作業である。展示作業の当日(展示1日目)には除湿器を止め、規定量の調湿剤をメーカーの推奨通りにケースの床板の下に設置した。吸放湿速度は表面積および温度に依存し、表面積が大きいほど、また高温で速度が大きくなるため、空間内をできる限り早く調整するには空間内の高い位置に広げて用いることが有効である。この展示ケースは計画段階では床板四隅の約2cm角の孔を通して調整する設計となっており、この時点でも調湿速度は小さいと推定できたが、展示意匠が優先した状態で展示は行われた。しかし、計測結果から調湿剤の効果が小さいことがわかり、資料と同じ空間に直接設置することに変更し、最終的には資料の背面に寝かせて設置することになった。

汚染物質として、第一回目の測定ではアンモニア濃度が基準値の30ppbよりかなり高い数値であったため、展示作業時点では、日本エア・フィルター(株)の好意ですぐに入手できたアンモニア吸着能力の高いフィルターろ材(日本エア・フィルター製、積層活性炭イオケミカル®C-RA)を一段目の演示台下に設置した。このフィルターろ材は、繊維状活性炭を放射線処理して末端にアンモニア捕獲用の官能基を備えたもので、一度捕獲したアンモニアを再放出しないタイプのものである。フィルターとしての能力を最大限に發揮するには、確実に空気をろ過するための通風装置と組み合わせることが必要で、また接触時間を長くすることが化学吸着フィルターの能力を最大限引きだすことにつながるため、通過風量は低速に抑えるほうが良いが、この時点では時間に余裕がなく、タイマーを組み込んだバッテリー式の通風装置を準備できなかったため、ろ材を直接敷きこんだ。アンモニアは空気よりも軽く、照明装置の電源を切った夜間に

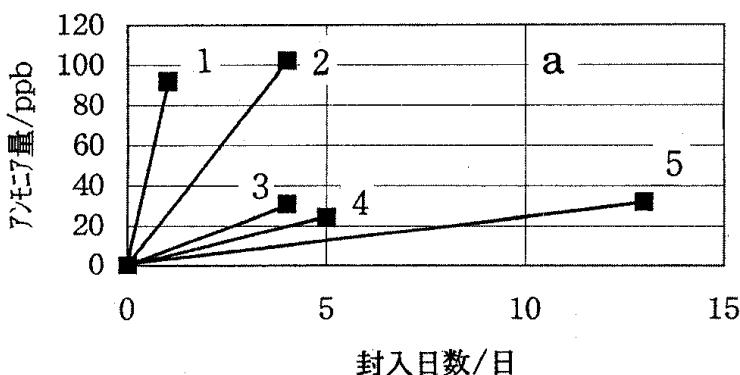


図2-1 封入期間と空間内濃度 (a) アンモニア
1.空気サンプリング 1 2.空気サンプリング 2 3.空気サンプリング 3
4.空気サンプリング 4 5.空気サンプリング 5

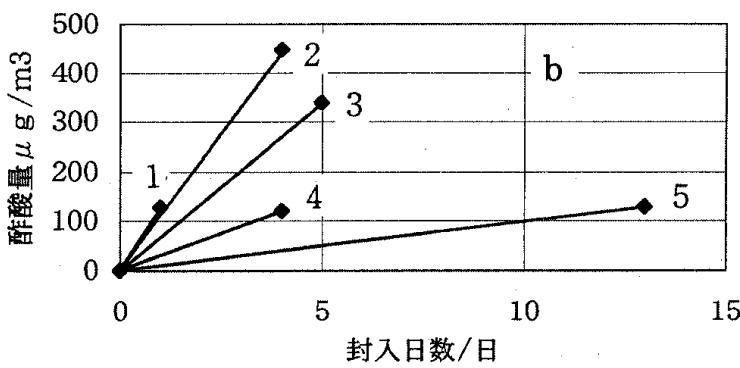


図2-2 封入期間と空間内濃度 (b) 酢酸
1.空気サンプリング 1 2.空気サンプリング 2 3.空気サンプリング 3
4.空気サンプリング 4 5.空気サンプリング 5

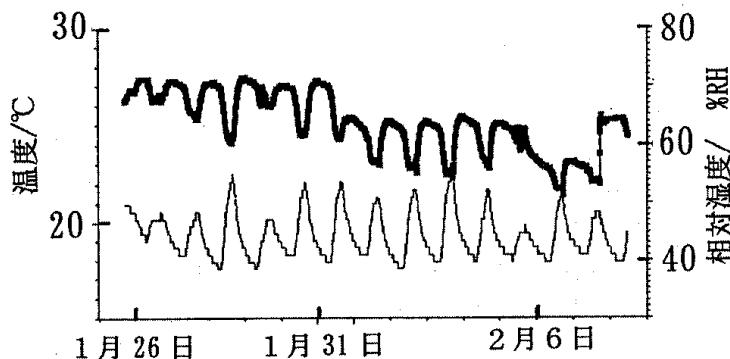


図3 ケース内外の温湿度推移
実線:温度 太線:相対湿度

を継続して監視できる体制を組むことが必要であると痛感したできごとであった。

対策3の展示期間中のケース開放・換気促進は、防犯上の問題もあり、また気密型ケースの本来の導入目的と相対した行為で、通常は決して行わない方法であるが、今回は展示前の計測結果から危険性が高いと判断されたため採用したものである。ケース内の空気をすでに述べた方法でサンプリングし、当所に持ち帰り定量分析を行い、その後の換気頻度や手法について、逐次、担当者と協議した。またサンプリング後には、ケース扉前面を開放し、扇風機で弱風を下段の演示台にあてる形で、空間内濃度を低減させるための作業を行った。結果として、展示4日目、11日目、19日目、32日目に換気促進作業を行った。また換気促進のため、会期中の通常の空調運転時間は8時半～5時半の9時間運転であったが、開始前後30分の延長を行うとともに、閉館後の換気作業中は空調運転を延長した。

は、ケース内の高い位置に濾む可能性があり、本来ろ材をケース内の高い位置に組み込んだほうが除去には有効であるが、観賞上の不都合のため設置できなかった。

フィルターのろ材の選定は、逐次行った空気汚染物質の定量結果をもとに判断し、展示開始6日目にはアンモニアおよび酢酸除去能力の高いろ材（日本エア・フィルター製、積層活性炭イオケミカル®C-RCとC-RAのブレンド品）を資料と同一空間の資料背面に追加設置、アンモニア濃度の下がった11日目には先に設置した両物質対応のろ材を取り除き、酢酸除去用のろ材（C-RCのみ）および酢酸除去用活性炭（粒状、C-RC）約1kgを設置した。酢酸については空気より重く、夜間にはケース下部に濾むと推定され、この点で資料背面下部という設置位置は妥当であった。

汚染物質除去のための多量のろ材・活性炭の設置は、冬季という乾燥期ではケース内の極端な乾燥を引き起こす結果となり、相対湿度の推移を見ながら調湿剤を適宜追加するという作業が付随して起こった。今回の展示資料は乾漆像で比較的乾燥に強い資料で問題はなかったが、いずれの対策についても、採用した時点からその推移

表3 金属板・曝露試験片の蛍光X線分析結果 (単位 X線強度 / cps)

試料		Al-K α	S-K α	Cl-K α	Fe-K α	Cu-K α	Ag-K α
Al	ケース内	122.3	0.0	0.0	2.1		
	展示室	121.8	0.0	0.1	2.0		
Fe	ケース内		0.1	0.1	288.8		
	展示室		0.1	0.1	289.9		
Cu	ケース内		0.9	0.1		201.6	
	展示室		1.1	0.2		204.4	
Ag	ケース内		0.0	7.2			260.2
	展示室		1.5	9.0			261.7

分析条件

X線管球: Sc, 管電圧・管電流: 15kV・10 μ A, X線照射径: ϕ 20mm,
測定時間: 300秒, 測定雰囲気: 減圧 (200~300Torr)

対策4の常時監視体制の確立は、展示意匠や観賞上の制限を受けて、困難な場合も多い。今回は危険な状況であったため、ケース内に自記温湿度記録計を設置し、常時ケース内の状況を監視できるようにすることが必要であった。この記録計は観客の目に直接入らないように資料背面に設置し、記録用紙の取り換え頻度を減らすために31日巻きの計測で開始した。しかし展示開始15日後に、記録用に設置したデータロガー (HoBo-1, Onset社製, 計測間隔5分) の計測結果と比較したところ、空間の温度湿度変化に追随していないことが明らかになつたため7日巻きの記録に切り替え、最終的に記録はデータロガーにまかせて、その場で温度湿度の推移について確認するための設置として記録用紙の取り換えは行わなかつた。

密閉後の放置期間と空間濃度の関係を図2に示す。当初、平均放散速度 120 μ g/m³・日であったものが、対策を取るに従つて確実に減少していったことが分かる。展示12日目でアンモニア濃度は問題のないレベルまで下がり、その後増えることはなかった。最終サンプリング時点の32日目では平均放散速度 10 μ g/m³・日まで減衰し、会期残りが27日の時点でその後には危険域濃度にはならないと推定し、ここで調査を打ち切つた。

会期中のケース内の温湿度は図3のように推移していた。ろ材等の持ち込みにより、ケース内の相対湿度は乾燥する方向に向かい、その都度、調湿剤を追加して調整してきた経緯が見て取れる。また、展示作業の同日、ケース内外に銀・銅・鉄・アルミの金属板を目視で確認できる位置に設置し、展示中常時、目視比較で影響評価を行つた。その曝露結果は、展示13日目にはケース内で鉄の錆が1点発生し、19日目には錆面が増大していた。しかし、その後ケース内の金属板には特に変化は認められなかつた。会期終了後には、鉄についてはケース内外の錆の面積はほぼ同じになつていた。一方、ケース外の金属板では会期終了後に比較検討したこと、銀、銅に変色が認められ、蛍光X線分析では銀には塩素が、銅には硫黄の増加が認められた [EDAXエネルギー分散型蛍光X線分析装置DX-95, 表3]。多数の観覧客が見込まれる展覧会においては、気密性の高いケースの利用は資料の保護のために必須であることをあらためて確認した。

緊急措置としての対策を積み重ねて、経過を詳細に監視していった結果、展示から約3週間で危険のない汚染レベルまで低減することができた。しかしこれらの対策を取るために、毎回、展示用ディスプレイを取り外す多数の人手が必要で、空調運転も延長せざるを得ず、また防犯面でも危険な状況を作りだしたことなど、展示計画の上で意匠を優先して保存環境整備計画が抜け落ちていたことによって後から生じた問題は多い。

2-1-2 演示台の構成材料からのガス放出

展覧会終了後に演示台の構成材料を入手し、どのようなガスがどの程度放散する可能性があったのか、追試験した。各材料約1gを容量5mlのバイアル瓶に取り、5mlの超純水を加え、15分間超音波をかけて冷水抽出した。得られた抽出液の有機酸イオン、無機イオン濃度をそれぞれ高速液体クロマトグラフ（有機酸分析システム、島津製作所製）およびイオンクロマトグラフIC7000D（横河分析システム製）で定量した。

結果を表4に示す。吉野杉〔白〕の分析値は比較のために載せた。ケース内のアンモニアの発生源は、この結果を見るかぎり演示台のペイントであることがわかる。実際には艶ありのペイントを用いていた。演示台2台を全面塗布するために要するペイント量は、ペイント1mlで10cm²塗布できると推定すると約8リットル、そこから放散するアンモニア量は4gにも及ぶ。しかし分析結果から見積もった32日目までのアンモニア積算放散量はわずかに4mg程度であり、揮発性の高いアンモニアは当初の通気乾燥ですばやく揮散すると推定される。この結果から判断する限り、アンモニアに関しては通気乾燥を十分に行えば、問題のない汚染レベルまですぐに下がることが見込まれる。

酢酸の発生源としてはいくつもの材料が疑われるが、短期間に多量に発生する酢酸の発生源としてはでんぶん系クロス用接着剤が考えられ、長時間にわたって発生が続く場合はベニヤ板が疑わしい。このでんぶん系クロス用接着剤は推奨どおりの希釀で使用した場合には、演示台製作にあたって約600g使用したと見積もれ、この材料からの酢酸発生量は約3gとなる。実際に空気分析で確認された積算放散量は32日目まででは約3mgであった。ベニヤ板のケース内への持ち込み量を約20kgと見積もると、そこからの酢酸放出可能性は積算で約10gと圧倒的に多いが、今回は表面をアルカリ性のペイントで押さえしており、また厚み方向からの揮発速度はかなり遅いと考えられるので、やはり主たる発生源はクロス用接着剤であったと考えている。

後に、製造メーカーの技術部に問い合わせたところ、木材用の接着剤は木材からのやに止めのために酸性側にpH調整してあり、酢酸を使用して6程度に調整しているとのことであった。やにがにじむと白いクロスにシミ状になり、クレームが増加するため、木材用接着剤としてpHを酸性側に調整することは欠かせないとのことであった。

2-2 展示室改修の経緯と対策

展示室の全面改修を行った施設から、9月に環境調査の依頼があり、10月より調査を開始した。改修部分は床張り替えも含む内装全体であり、展示ケースも新設されていた。改修前から改修計画についての相談があり、改修後に十分なシーズニング期間を取れないことがわかつっていたため、あらかじめ内装使用材料の空気汚染能をテストすることを勧め、また引き渡し前の空気汚染状況についても計測しておくことを推奨していた。業者から提出のあった8月時点でのデータは

表4 使用材料中の汚染物質の放散可能量〔冷水抽出〕

	ギ酸	酢酸	アンモニア
ベニヤ板 単位μg/g材	69	527	0
演示台骨格 単位μg/g材	93	203	0
水性ペイント・艶あり 単位μg/ml材	232	397	506
水性ペイント・艶なし 単位μg/ml材	126	4198	214
でんぶん系クロス用接着剤1 単位μg/g材	18	5636	-
でんぶん系クロス用接着剤2 単位μg/g材	32	5128	-
吉野杉〔白〕 単位μg/g材	64	23	0

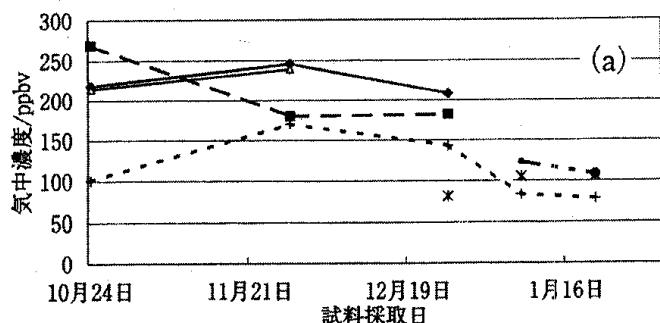


図4-1 改修直後の施設の室内汚染ガス気中濃度推移
(a) アンモニア
◆= 地下1階収蔵庫 ■= 1階展示室 △= 2階エントランス
×= 2階ギャラリー * = 3階展示室 ●= 3階展示ケース + = 4階展示室

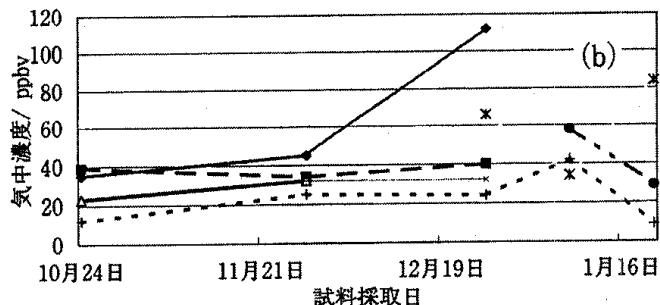


図4-2 改修直後の施設の室内汚染ガス気中濃度推移
(b) ギ酸
◆= 地下1階収蔵庫 ■= 1階展示室 △= 2階エントランス
×= 2階ギャラリー * = 3階展示室 ●= 3階展示ケース + = 4階展示室

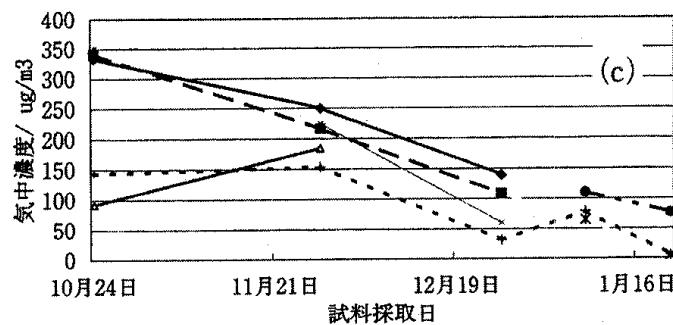


図4-3 改修直後の施設の室内汚染ガス気中濃度推移
(c) 酸酢
◆= 地下1階収蔵庫 ■= 1階展示室 △= 2階エントランス
×= 2階ギャラリー * = 3階展示室 ●= 3階展示ケース + = 4階展示室

(日本ピュアテック(株), ピュアラインTU-20型, フィルタータイプ:F) を用いてアンモニア気中濃度を制御した。稼働後10日程度で気中濃度は約20ppbに下がり、以後良好である。

これらの結果から、新たな発生源を持ち込まない場合、改修後の展示室でも3ヶ月程度で気中の酢酸濃度は下がり、清浄な空間となることがわかった。一方ギ酸については発生源が多様で、特に仮設壁やケースの構成材料からの発生が疑われ、改修後には容易に下がらず注意が必要であることが分かった。なお、ギ酸については十分な影響試験がまだ完結していないので指針値は設定していないが、清浄度の目安として10ppbという数値を仮採用している。

良好であった。

10月から1月にかけて、月1回、室内空気10リットルを超純水2mlに通気して[通気速度0.15ml/分、捕集高さ約1m]室内汚染物質を捕集した。得られた試料溶液を持ち帰り、0.45μmのフィルターでろ過後、有機酸イオン、無機イオン濃度をそれぞれ高速液体クロマトグラフ(有機酸分析システム、島津製作所製)およびイオンクロマトグラフIC7000D(横河分析システム製)で定量し、気中濃度に換算した。トラベルブランクについても同様に分析し、コンタミネーションの有無について確認した。冬季の試料移動であったため、試料溶液からの有機酸の飛散は少ないと想定し、移動にあたって今回は冷蔵しなかった(移動時間30分)。

結果を図4に示す。引き渡し後約1ヶ月間、換気等が不十分な状況に置かれたために、室内汚染は悪化していた。しかし、気中酢酸濃度は、換気回数2回/時間、空調運転8時間の状況で順調に下がった(新鮮外気の取り込み量については不明)。12月半ばに仮設壁および仮設ケースの持ち込みがあり、多量に持ち込まれた3階展示室では仮設壁で空気の流通が遮られたせいもあって、空気環境は悪化した。仮設壁等の持ち込みが少ない4階および2階においては、ギ酸濃度も順調に低減した。アンモニアについては室内に発生源があったため、空気清浄機

3. ま　と　め

展示にあたって持ち込まれた展示用ディスプレイによる室内汚染とその対策、および展示室改修後の室内汚染物質の低減について、2つの事例をもとに報告した。これらの結果から、ペイントや接着剤など比較的塗膜層が薄いものは汚染物質の揮発が早く、3週間程度の通気乾燥で確実に清浄な状況になることが分かった。また改修のように木材やベニヤ板が多量に持ち込まれた空間の改善には時間がかかり、換気が十分に取れていても3ヶ月程度はかかることが分かった。

対策としては、空間の相対湿度制御がまず重要であり、緊急に気中濃度を低減するにはケミカルフィルターの利用が大変有効であることが実証された。しかし、展示準備や改修後の期間を十分に取ることで、これらの緊急的な処置は不必要となる。文化財資料の寿命を少しでも延ばすためには、このような危険な状況に繰り返しさらすような展示計画は慎むべきである。

謝辞

ケミカルフィルターろ材の入手に関し、便宜を図っていただいた日本エア・フィルター株式会社技術部開発グループ岡本正行氏に心より感謝いたします。

キーワード：室内汚染物質（indoor air pollutant）；対策（counter measure）；ケミカルフィルター（chemical filter）；低減（decrease）；酸性ガス（acidic gas）

Case Study: Indoor Air Pollutants Emitted from Display Materials in Museum

Chie SANO, Yasuhiro HAYAKAWA and Sadatoshi MIURA

Often a temporary museum case is made immediately before an exhibition starts. This report describes the way to lessen the pollutants brought with display materials during an exhibition. We planned the case door to be open every three days and we measured the ammonia / acetic acid concentration in air by collecting them in water.

At first, the amount of both pollutants were so much as to change the color of the pigments which are used on the surface of the sculpture exhibited in the case. Then we tried to install some chemical filters to remove these pollutants in the museum case. At the end, the concentration of the pollutants was lowered in three weeks. After the exhibition was finished, all the display materials were tested. It turned out that the paint material for the finishing of the display table emitted ammonia gas and that plywood emitted acetic acid gas.

The condition of the exhibition room immediately after having redone the interior finishing is also reported