

## 九州国立博物館の壁付展示ケースにおける 換気回数，温度，相対湿度の測定

犬塚 将英・鳥越 俊行\*・石崎 武志・本田 光子\*

### 1. はじめに

九州国立博物館は東京，京都，奈良に次いで4番目に設立される国立博物館である。福岡県太宰府市に建設された同博物館は，「日本文化の形成をアジア史的観点から捉える」というコンセプトを掲げており，2005年10月15日の開館に向けて準備を進めている。これまでに，九州国立博物館設立準備室では，収蔵庫内の環境汚染対策<sup>1)</sup>，IPM計画への取り組み<sup>2)</sup>などに加え，大型の壁付展示ケースに対する気密性能の測定<sup>3)</sup>などを行ってきた。

文化財を保存するための温度と相対湿度の条件として，IIC（国際文化財保存学会），ICOM（国際博物館会議），ICCROM（文化財保存修復研究国際センター）などが表1のような値を基準として勧めている<sup>4)</sup>。これらの条件を適用するにあたっては，急激な温度，相対湿度の変化を与えることは避けなければならない。九州国立博物館では，急激な環境の変化を緩和するために，壁付展示ケースについては気密性を確保するよう換気回数の目標性能値を「1日あたり0.3回」と設定した。

表1 材質に応じた温度と相対湿度の条件

温度	約20（人間にとって快適な温度） フィルムについては，黑白フィルム21， カラーフィルム2（ISO規格）		
相対湿度	高湿度	100%	出土遺物（保存処理前のもの）防黴処理が必要
	中湿度	55-65%	紙・木・染織品・漆
		50-65%	象牙・皮・羊皮紙・自然史関係の資料
		50-55%	油絵
	45-55%	化石	
低湿度	45%以下 30%	金属・石・陶磁器塩分を含んだ物は先に脱塩処理が必要 写真フィルム	

展示ケースの気密性能評価には，トレーサーガスを用いて空気交換率を測定する方法と，圧力差を生じさせて気密性を測定する方法などがある。トレーサーガスを用いた空気交換率の測定に関しては，橋本ら<sup>5)</sup>による炭酸ガスを用いた研究がある。

本研究では，展示室に設けられている壁付展示ケースについて，簡便で安価な換気回数を測定する方法の確立と，測定方法の違いによる換気回数の差異を検証することを目的に，2種類の異なる方法を用いて換気回数の測定を実施した。さらに，展示ケース内における相対湿度の安定性と，換気回数と調湿剤の能力の相関を調べることを目的に，調湿剤の設置個数を変化させて相対湿度変化の影響についても調査を行った。

\*九州国立博物館設立準備室

次節では、今回調査した5つの壁付展示ケースの概要を述べる。3節では、2003年度と2004年度に実施した換気回数の測定方法および結果を示す。4節では、2004年の夏から秋にかけて観測した、展示ケース内外の温度、相対湿度の経時変化についてグラフを紹介し、調湿剤の個数を変化させた場合の影響を議論する。

## 2. 展示ケース

九州国立博物館では、3階の特別展示室に13箇所、4階の文化交流展示室に24箇所の、異なるタイプの大型壁付展示ケースが設置されている。図1は3階の展示室、図2は4階展示室に配置されている展示ケースの配置図である。展示ケースの製作は、3階を株式会社岡村製作所が、4階を株式会社イトーキが担当した。

本研究では表2に示されている5つの展示ケースについて、換気回数の測定と温度、相対湿度変動の測定を行なった。

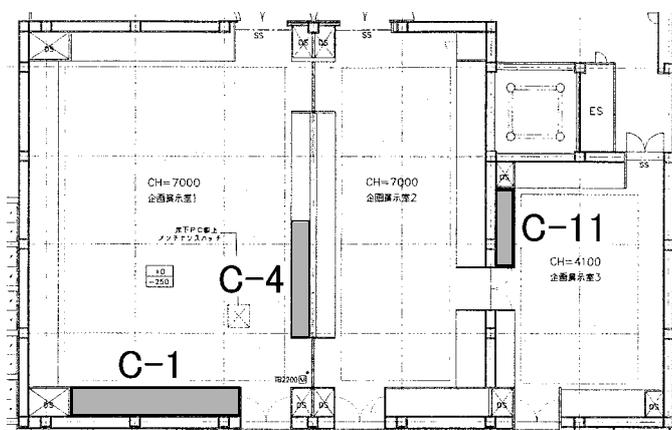


図1 3階展示室の展示ケース配置図



図2 4階展示室の展示ケース配置図

表2 測定した壁付展示ケース

場 所	ケース名	大きさ(幅×高さ×奥行き：mm)
3階特別展示室	C - 1	12868 × 5050 × 1910
	C - 4	7626 × 5050 × 1145
	C - 1 1	6350 × 3500 × 1145
4階文化交流展示室	C - 2 7	5526 × 5050 × 1145
	C - 3 4	8950 × 4050 × 1445

### 3．展示ケースの換気回数の測定

#### 3 - 1．窒素ガスを用いた測定

展示ケースの換気回数の測定方法には、大きく分けて 二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)<sup>5)</sup>、亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)、六フッ化硫黄(SF<sub>6</sub>)などをトレーサーガスに用いて目的のガス濃度を計測する方法、窒素(N<sub>2</sub>)ガスを充満させて酸素(O<sub>2</sub>)濃度を計測する方法、加圧もしくは減圧して圧力差を測定する方法、などが挙げられる。の方法である加圧もしくは減圧をすると展示ケースの前面ガラス扉に圧力が加わり換気回数の測定値が実情よりも大きくなる可能性があることから、九州国立博物館では2003年度の測定に の窒素ガスを用いた空気交換率測定法を選択した。測定に用いた窒素ガスの利点としては、(i) 自然環境に悪影響を及ぼさない、(ii) 不活性ガスであるため展示ケースを構成する材質との反応が生じにくい、という点が挙げられる。

この節では、の方法についての概要を述べてから、2003年12月から2004年2月までの期間に九州国立博物館にて実施された測定に関する結果を示す。

##### 3 - 1 - 1．測定原理

ケース内に窒素ガスを注入し、ある程度まで酸素濃度を低下させる。この時の酸素濃度を初期酸素濃度 $p_1$  [vol%]とする。その後、窒素ガスの注入を停止し、ケース内の酸素濃度 $p$  [vol%]の経時変化を測定する。ここで、ケース内には酸素発生源がなく、酸素濃度が均一であり、換気量が $p$ の変化量に対して充分小さいと仮定すると、 $p$ の時間変化は以下の式で表される：

$$(p - p_0) = (p_1 - p_0) \cdot \exp(- (Q / V) t)$$

ここで、 $t$  [h] は時間、 $p_0$  [vol%] はケース外の酸素濃度、 $Q$  [m<sup>3</sup> / h] は換気量、 $V$  [m<sup>3</sup>] は展示ケースの容積を表している。よって、一日あたりの換気回数、 $n$  [回 / day] =  $24 \cdot Q / V$  は、 $p$  の時間変化から求められる。

##### 3 - 1 - 2．測定手順

図3に測定の概要図を示す。展示ケースの光ファイバー取付用部材もしくは調湿ボックス点検口の孔から窒素ガスを注入し、酸素濃度が5%まで低下した時点で注入を完了する。窒素ガスが均一に攪拌されるように、ケース内にファンを設置し気流を自然対流(0.3m / s) 以下に調整した。ケース内の酸素濃度や温度・湿度の分布が均一であることを確認してから、酸素濃度、酸素濃度分布、温度分布、相対湿度分布をそれぞれ30分毎に24時間測定した。測定に用いられた計測器を表3に示す。

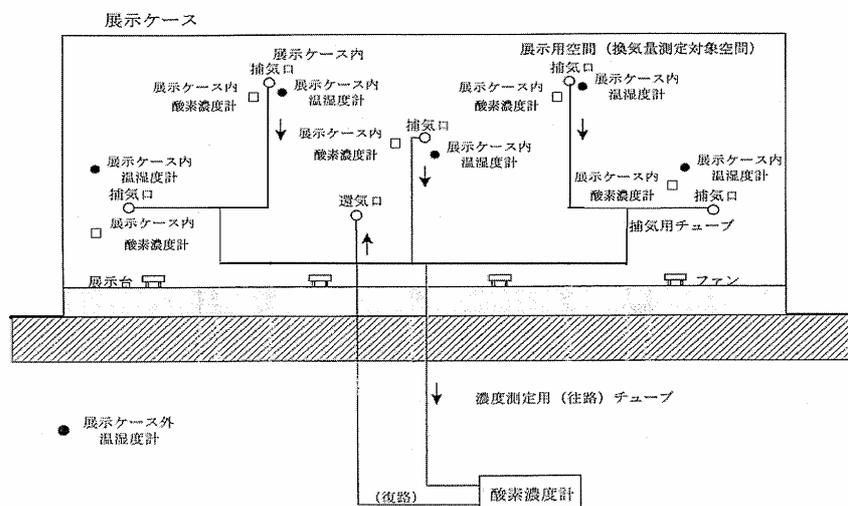


図3 窒素ガスを用いた換気回数測定の概要図

表3 窒素ガスを用いた換気回数測定に使用した機器

	(株)岡村製作所	(株)イトーキ
濃度測定用酸素測定器	(株)島津製作所製POT-8000	(株)フジクラ製FCX-S
分布測定用酸素測定器	理研計器(株)製OX-82	新コスモス電機(株)製XO-326ALA
温湿度データロガー	(株)ティアンドディ製TR-72S	神栄(株)製HA3635

## 3-1-3. 測定結果

気密性を確保するための目標設定値をクリアできるまで展示ケースのシーリング部分などに改良を加えながら，展示ケースの換気回数測定を繰り返した。最終的に得られた換気回数の結果を表4に，測定結果のグラフを図4に示す。

表4 展示ケースの換気回数の測定結果

ケース名	N <sub>2</sub> を用いた測定で得られた換気回数(回/day)	SF <sub>6</sub> を用いた測定で得られた換気回数(回/day)
C - 1	0.27	0.15
C - 4	0.23	0.06
C - 11	0.15	未測定
C - 27	0.14	0.21
C - 34	0.16	0.16

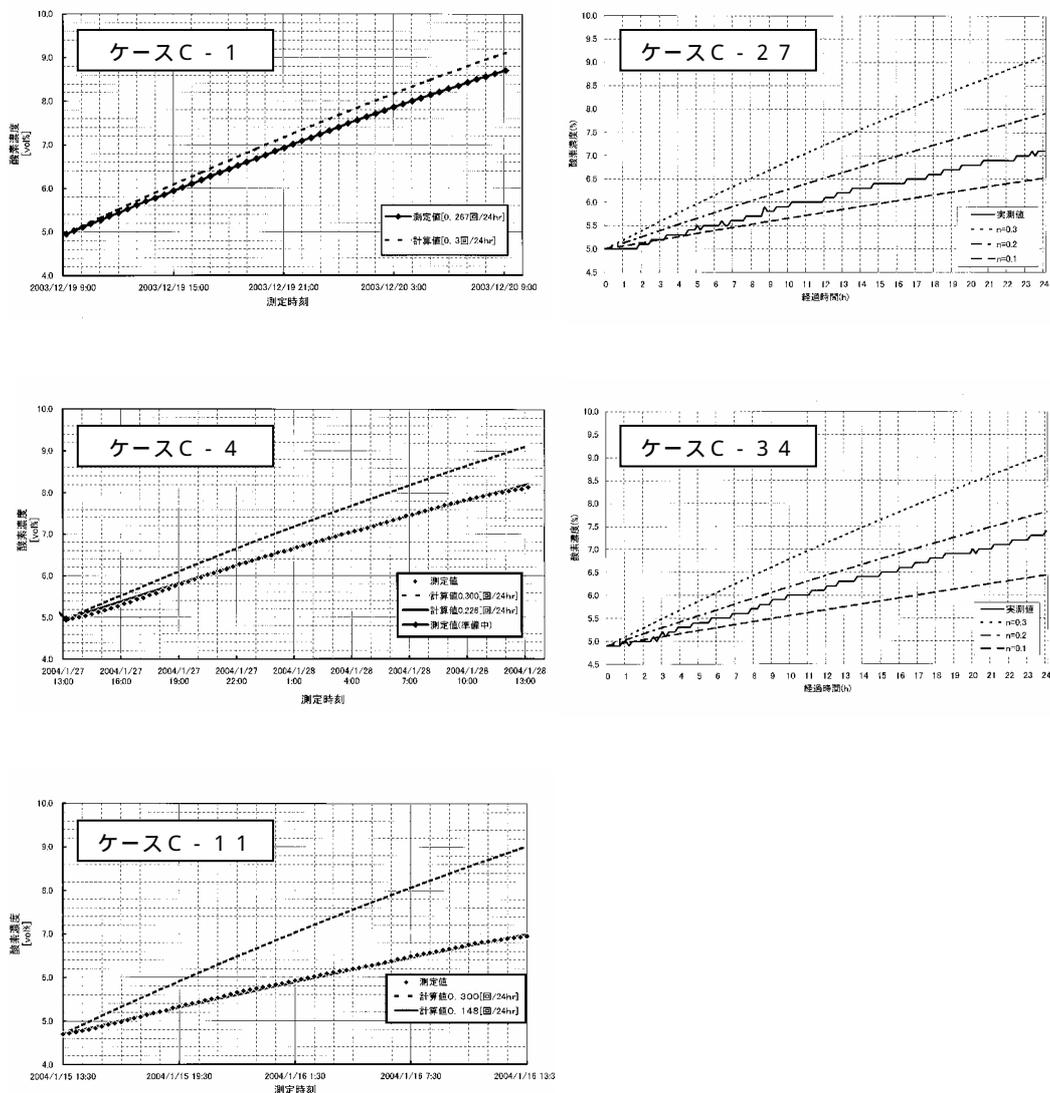


図4 展示ケース内の酸素濃度の時間変化

### 3 - 2 . SF<sub>6</sub>トレーサーガスを用いた測定

前節で示した換気回数の測定では窒素ガスを用いた。しかし，調査した展示ケースは表2に示されるように大容量であるため，測定が大掛かりなものとなった。

一方，SF<sub>6</sub>は拡散性に優れている不活性ガスであるため，換気回数測定のトレーサーガスとして広く適用されている。SF<sub>6</sub>は大気中に測定器で検出できる下限界以上に存在しないガスであることから，換気回数を測定するために必要な濃度は1 ppm程度であり，窒素ガスの測定と比較すると簡便に測定できる。例えば，東京文化財研究所保存科学部では，過去に川越市山車収蔵施設に対して換気回数の測定を実施している<sup>7)</sup>。

2004年11月17日から19日までの期間に，SF<sub>6</sub>トレーサーガスを用いて，3 - 1で測定した展示ケース4箇所(C - 1, C - 4, C - 27, C - 34)に対して換気回数の測定を行なった。

### 3 - 2 - 1 . 測定概要

図5は株式会社巴商会の協力により構築した測定系の概要図である。展示ケースに備え付けられている光ファイバーケーブル取付用部材の孔から二本のPTFEチューブを通した。そのうちの一本を通して展示ケース内のSF<sub>6</sub>を含んだ空気がフーリエ変換赤外分光光度計(FT-IR)<sup>7)</sup>に送り込まれ、約1分間隔でSF<sub>6</sub>の濃度が非破壊でモニターされる。FT-IRの直後にはダイヤフラムポンプが配置されており、FT-IRを通過した空気は再び展示ケース内へ送り込まれる。測定を開始する前には、2%のSF<sub>6</sub>を混合させた窒素ガスを毎分2リットルの流速で展示ケース内に注入した。そして、ケース内のSF<sub>6</sub>濃度が1から2 ppm程度になった時に注入を停止し、SF<sub>6</sub>濃度測定を開始した。SF<sub>6</sub>注入中、及び濃度測定の間は展示ケース内を均一に攪拌するために、風速が約1.0 m/sのファンを床面中央に設置した。

SF<sub>6</sub>の濃度変化と換気回数n [回/day] との関係は3-1-1で用いられた式から容易に求められる。展示ケース外の空気中のSF<sub>6</sub>の濃度を0とするとケース内のSF<sub>6</sub>の濃度 p と換気回数との関係は以下のように表される：

$$p = p_1 \cdot \exp(- (n / 24) t)$$

ここでp<sub>1</sub>とはケース内に注入したSF<sub>6</sub>の初期濃度である。この式からわかるように、一日あたりの換気回数 ,n [回/day] = は ,p の時間変化(t [h])を対数表示した時の傾きから求められる。

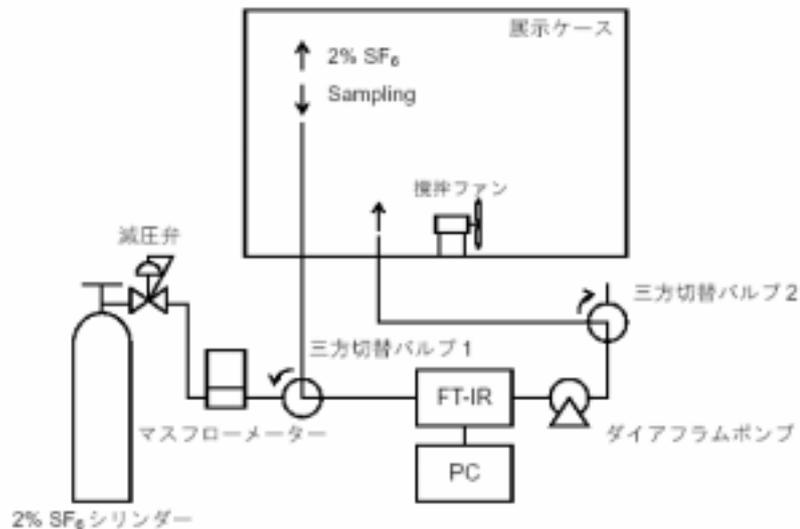


図5 SF<sub>6</sub>トレーサーガスを用いた換気回数測定の概要図

### 3 - 2 - 2 . 測定結果

図6は4つの展示ケース内のSF<sub>6</sub>濃度の時間変化についての測定結果である。図6(a), (b), (c), (d)はそれぞれC-1, C-4, C-27, C-34に関する結果を表している。いずれの展示ケースの場合も最初の数時間は、SF<sub>6</sub>濃度はゆらぎの大きい急激な減少が観測された。その後、濃度変化は安定し、上式で予測されるような指数関数的な減少を示している。解析には初期のゆらぎの大きな部分を除いた測定点のみを使用し、最小二乗法を用いて指数関数に最適化した。このようにして各展示ケースについて得られた換気回数は表4の右列に示されている通りである。

全ての展示ケースの結果で共通して，最初の数時間はゆらぎの大きい測定結果となったが，この原因としてSF<sub>6</sub>ガスがケース内で十分に均一になっていなかったためであると考えられる。また，濃度減少の度合いが安定期と比較すると急激である傾向が観測されたが，これはSF<sub>6</sub>の展示ケース内壁材への吸着がひとつの原因として推測される。表4からもわかる通り，窒素ガスを用いた測定から得られる換気回数と比較すると，明らかに小さい値が得られる傾向が見られた。推測できる原因としては，SF<sub>6</sub>分子は酸素分子よりも大きいので展示ケース外への通過が起こりにくいこと，3 - 1の方法ではケース外の大気中にも大量の窒素が存在するため酸素濃度の増加に影響を及ぼすこと，などが挙げられる。これらについて理解を深めるためには，今後さらに実験室での基礎的な測定を行なう予定である。

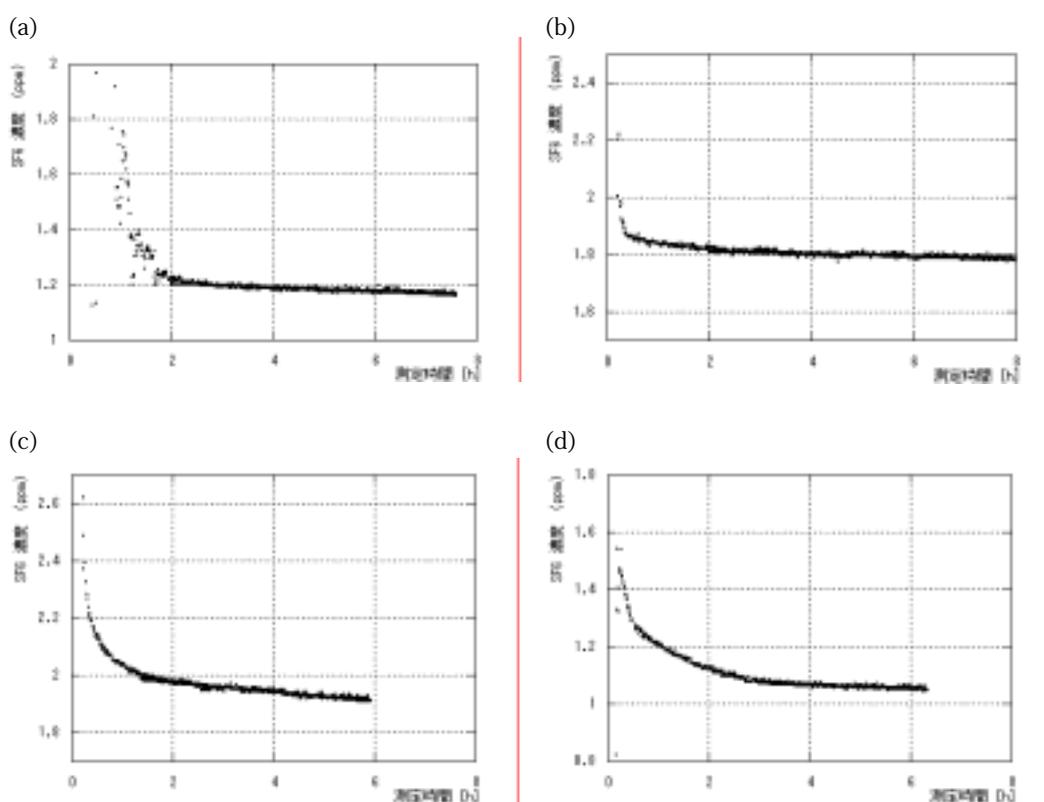


図6 展示ケース内のSF<sub>6</sub>濃度の時間変化。(a), (b), (c), (d) はそれぞれ展示ケース C - 1, C - 4, C - 27, C - 34の結果である。

#### 4. 展示ケース内外の温度と相対湿度の測定

前節に示されているように，本研究で調査した5つの展示ケースの換気回数はおよそ0.2回/dayであることが明らかとなった(表4)。ここでは，このような気密性能を有する展示ケース内における温度と相対湿度の変動について調べた結果を報告する。

九州国立博物館は今回の測定時期は枯らし期間中のため，空調は開館後の制御された運転とは異なり，換気を優先した手動運転を行なっている。今回測定した期間は外気導入量を100%にするなどして多量に外気を取り入れる換気運転を行なっており，一部の期間は更に排煙装置

も併用して外気を導入していた。また、換気のため展示室とロビーも前室などの扉を常時開放していたことから、昼の運転時並びに夜間空調停止時の温度・湿度共に変動が非常に大きなものとなっている。空調運転時間についても、機械のメンテナンスや調整などのため運転を不定期に停止していた。

5つの展示ケースそれぞれの内側と外側について、2種類のデータロガーを用いて温度と相対湿度の測定を行なった。測定に用いたデータロガーはオンセット社のHOBOとベリテック社のSPECTRUM SP-2000である。それぞれの温度、相対湿度測定の分解能は表5に示した通りである。以下の節で説明される測定結果では、温度についてはHOBOから得られたデータを、相対湿度についてはSPECTRUMから得られたデータを用いることにした。データロガーは、展示ケース内には中央付近の床面に、展示室には展示ケースガラス面から約1m離れた地点に三脚に載せて設置した。

表5 データロガーの分解能の比較

データロガー名	温度の分解能	相対湿度の分解能
オンセット社 HOBO	0.03	0.5%
ベリテック社 SPECTRUM	0.05	0.1%

4-1では調湿剤を使用しない場合の展示ケース内外における温度と相対湿度の変動についての調査結果を報告する。一方、4-2では調湿剤を調湿ボックスに挿入した後で測定した温度、相対湿度の変動と、調湿剤の量に対する依存性について議論する。各展示ケースに挿入した調湿剤は、富士シリシア化学(株)製、カセットタイプのアートソープである。1つのカセットの大きさは330mm×110mm×40mmで、60%に調湿された特殊シリカゲルが包装されている。重量は約1080gである。各展示ケースに挿入した調湿剤の期間とカセットの単位容積(1m<sup>3</sup>)あたりの個数は表6に示されている通りである(推奨値は1個/m<sup>3</sup>)。調湿剤は9月5日に調湿ボックスに挿入し、追加挿入は10月5日に行なった。

表6 各展示ケースに挿入したアートソープの挿入期間と単位容積あたりの個数

期 間	C - 1	C - 4	C - 11	C - 27	C - 34
2004/7/28 ~ 2004/9/2 個 / m <sup>3</sup>	0	0	0	0	0
2004/9/5 ~ 2004/10/4 個 / m <sup>3</sup>	1/4	1/2	1/4	1/4	1/4
2004/10/5 ~ 2004/11/16 個 / m <sup>3</sup>	1/2	1	1	1/2	1/2

#### 4-1. 調湿剤挿入前の温度と相対湿度

2004年7月28日から9月2日までにかけて、表2にある5つの展示ケースの内側と外側について温度と相対湿度の測定を行なった。この期間中はケース内にはデータロガー以外のものは設置せず、ケースの床下に備え付けてある調湿剤挿入用の箱にも何も置かない状態で測定した。

図7には温度の時間変動を示した。上の2つの図は3階と4階の展示室(展示ケース外側)の温度である。展示室は外気を多量に導入しているため昼間の温度はある程度乱れているが、空調により約26℃で制御されている。一方、夜間は約27℃程度まで温度が上昇していた。これは、ロビーへ通じる扉が開放されており空調されていない空気が展示室内に容易に入る状況で

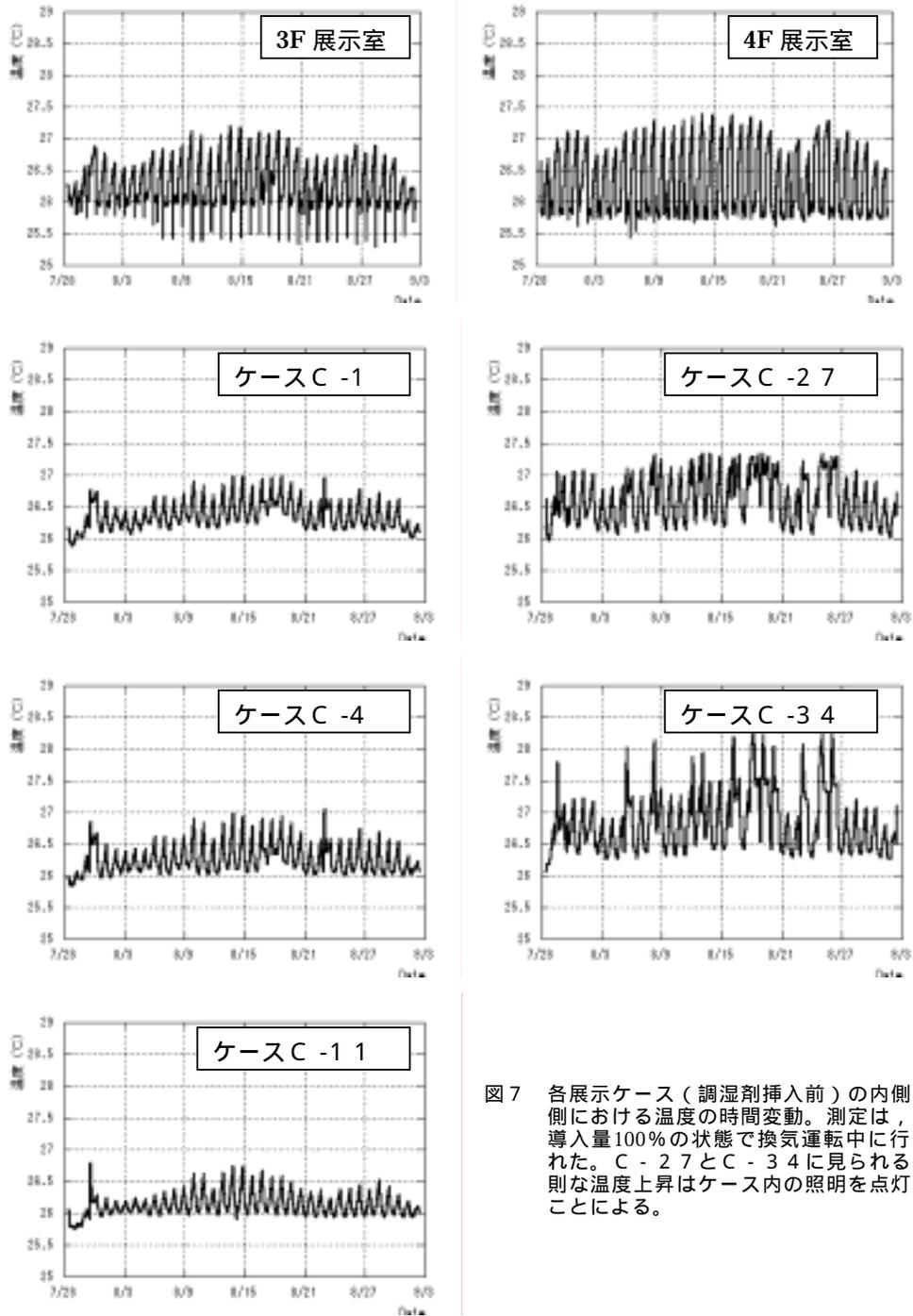


図7 各展示ケース（調湿剤挿入前）の内側と外側における温度の時間変動。測定は，外気導入量100%の状態で行なわれた。C - 27とC - 34に見られる不規則な温度上昇はケース内の照明を点灯したことによる。

あったこと、測定期間が夏期であったことが原因である。C - 1 と C - 4 は同じ展示室(特別展示室 1)に配置されていることから展示ケース内の温度変動はほぼ似た傾向を示した。ケース外と比較するとゆらぎは緩和されていて26 から27 の間で安定していた。C - 1 1 の設置してある特別展示室 3 は温度の変化幅が小さく、C - 1 1 ケース内の温度変動はさらに小さい。これは他の展示室に比べて外気が室内に流入しにくい構造となっていること、天井にメンテナンス用の照明が設置されておらず作業時の温度上昇が抑えられたことなどが考えられる。4階の C - 2 7 (関連展示室北 2) と C - 3 4 (関連展示室北 5) は26 から27.5 の間で外気と比較するとゆらぎが緩和された温度変動を示した。4階の展示ケース内の温度が昼間28 程度まで不規則に上昇しているが、これは作業や調整などで不定期にケース内の照明を点灯したことが原因である。

一方、図 8 には同様に相対湿度の時間変動を示した。3階、4階とも展示室(展示ケース外側)は昼間約50%に空調しているため安定しているが、夜間になるとロビーから高湿度の空調されていない空気が展示室内に流入することにより、展示室の相対湿度も60から65%程度まで上昇する。それに対して展示ケース内の相対湿度の変動は以下に見るように微弱である。

C - 1 と C - 4 (特別展示室 1)のケース内は測定期間を通じて51.0から51.5%の範囲内での変動しかしていない。C - 1 1 (特別展示室 3) は51.5から52.0%までの0.5%幅の変動のみである。4階の展示ケース(C - 2 7, C - 3 4)内の相対湿度は51.5から52.5%までの間でしか変動していなかった。ただし、C - 3 4 は不規則に相対湿度が50.5%まで減少することがあったが、これは展示ケース内の照明が使用された時に温度が上昇したためである。いずれのケース(C - 3 4 の照明点灯時を除いて)内も測定期間を通じて相対湿度の変動幅は1%以下に抑えられていた。測定した温度と相対湿度から絶対湿度を算出すると約12.3 g/m<sup>3</sup>であり、測定期間中は誤差の範囲内で一定であった。

#### 4 - 2 . 調湿剤挿入後の温度と相対湿度

2004年9月5日からは調湿ボックスに調湿剤を挿入して、温度と相対湿度の時間変動を測定した。

図 9 には、調湿剤挿入前(7月28日～9月2日)から11月16日までにかけて各展示ケース内部で測定した相対湿度の経時変化を示した。図 9 からわかる通り、全てのケースについて、調湿剤の挿入および追加挿入後 2 週間ほど経過した時点で相対湿度は定常状態となった。これは、調湿ボックスにファンが設置されていないため、空気の移動が緩やかなためである。4階の展示ケースについて、調湿剤挿入後不定期に相対湿度が減少しているのは、展示ケース内に設置してある照明が不定期に点灯されたためである。

定常状態に達した時の相対湿度の値と挿入した調湿剤の量との間には明らかな相関が観測された。単位容積あたりのカセット数が1/4個/m<sup>3</sup>の場合には定常値は52.5から52.7%、1/2個/m<sup>3</sup>の場合には53.0から53.2%、1個/m<sup>3</sup>の場合には53.6%から53.7%となった。各展示ケースの換気回数と到達した相対湿度の定常値との間の相関は、今回の測定精度の範囲内では検出できなかった。また、温度変動に関する調湿剤の量への依存性も、今回の測定精度の範囲内では確認できなかった。

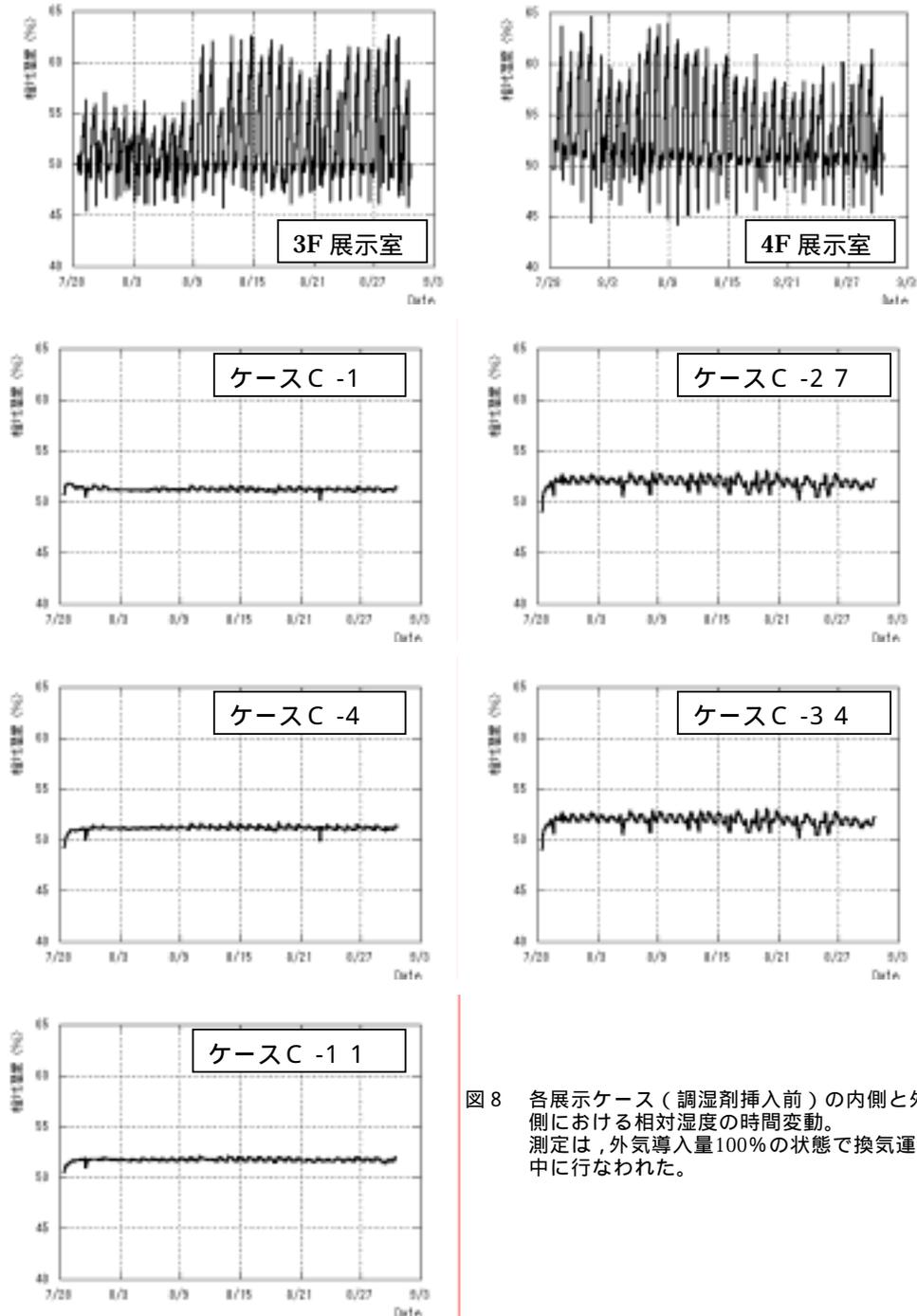


図8 各展示ケース（調湿剤挿入前）の内側と外側における相対湿度の時間変動。  
測定は、外気導入量100%の状態での換気運転中に行なわれた。

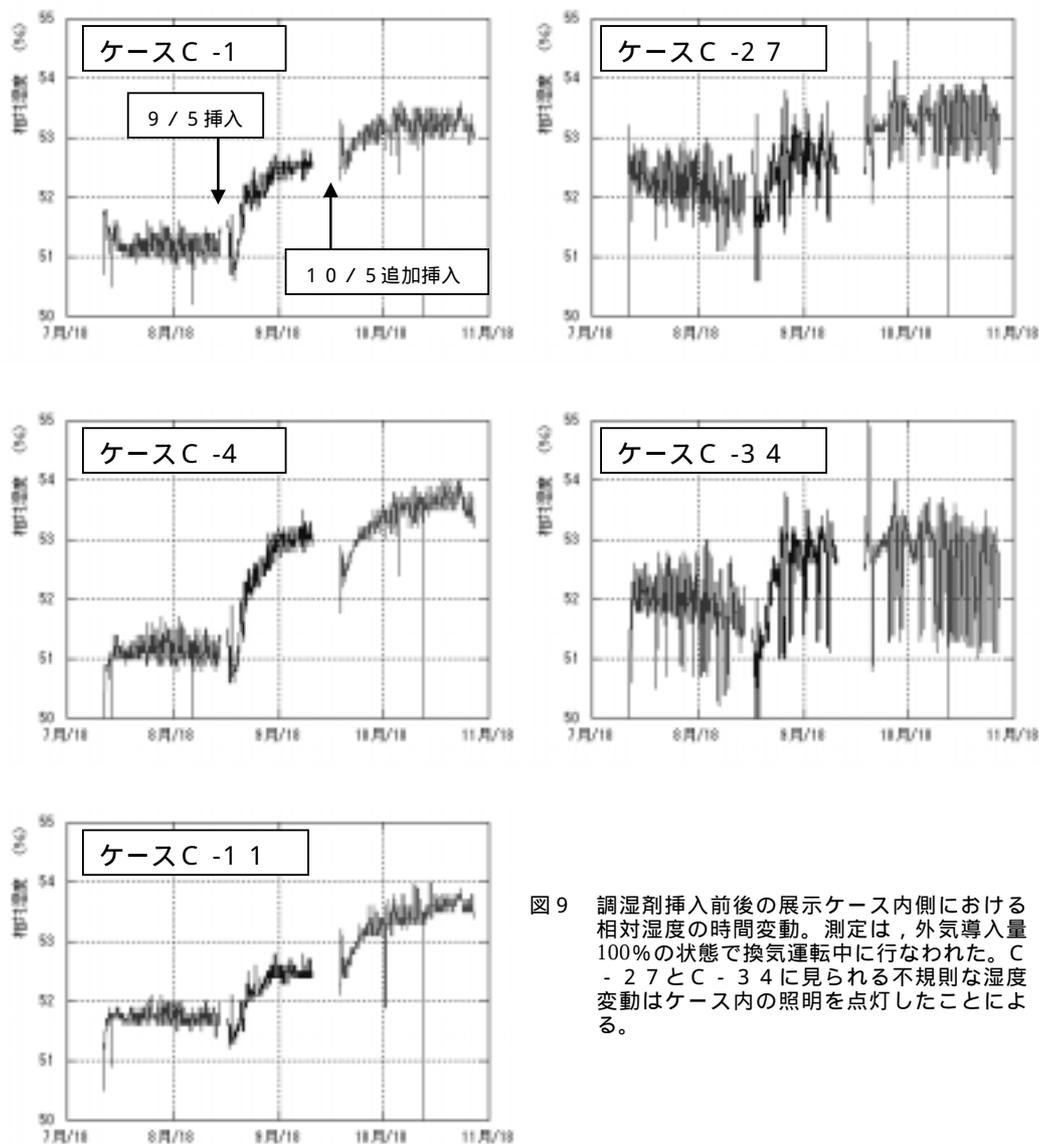


図9 調湿剤挿入前後の展示ケース内側における相対湿度の時間変動。測定は、外気導入量100%の状態での換気運転中に行なわれた。C-27とC-34に見られる不規則な湿度変動はケース内の照明を点灯したことによる。

## 5.まとめ

本研究では、表2に示されている九州国立博物館の壁付展示ケースにおける換気回数、温度、相対湿度の測定を行なった。

壁付展示ケースの換気回数に関しては、2003年度には窒素ガスを用いて、2004年度には $\text{SF}_6$ ガスを用いて測定を実施した。いずれの場合も図4と図6に示されている通り安定した測定が行なわれ、換気回数の測定結果は表4のようになった。今回の測定では、窒素ガスと $\text{SF}_6$ ガスという異なるガスを用いることによる同一の展示ケースに対する換気回数の測定については、異なるガス間の相互関係は明らかとならなかった。

2004年7月28日から9月2日までの期間に、調湿剤を使用しない状態で、温度と相対湿度の時

間変動を測定した。展示ケースの外側の相対湿度は最大15%程度の変動が生じていたが，展示ケース内の変動幅は1%以下に抑えられていた。

2004年10月5日から11月16日までの測定では，60%用の調湿剤を挿入した状態で温度と相対湿度の測定を行なった。展示ケース内の相対湿度は，挿入後約2週間程度で定常状態に達し，その定常値と調湿剤の量との間には強い相関が観測された。各展示ケースの換気回数と到達した相対湿度の定常値との相関，および温度変動に関する調湿剤の量への依存性については，今回の測定精度の範囲内では検知できなかった。

#### 謝辞

窒素ガスを用いた換気回数測定の実施に際し，文化庁(現京都国立博物館)の森田稔氏，東京国立博物館の神庭信幸氏には多大なご助言をいただきました。また，SF<sub>6</sub>トレーサーガスを用いた換気回数測定を実施するにあたって，巴商会(株)の佐藤俊二氏，酒井敦氏，渡辺一哉氏にご協力いただきました。ここに記して感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 日下光彦，佐野千絵，三輪嘉六：九州国立博物館(仮称)における収蔵庫内の汚染対策について，文化財保存修復学会要旨集，25, 228-229 (2003)
- 2) 本田光子，鳥越俊行，日下光彦，三輪嘉六：建設中の博物館におけるIPM計画への取り組み，文化財保存修復学会要旨集，26, 104-105 (2004)
- 3) 鳥越俊行，日下光彦，本田光子，三輪嘉六，和田秋彦，山森博之：九州国立博物館(仮称)における展示ケースのエアタイト性能について，文化財保存修復学会要旨集，26, 106-107 (2004)
- 4) G.de Guichen: Climate in Museums, ICCROM, 1988.
- 5) 橋本修左，井上晴久，竹氏宏和，神庭伸幸：展示ケースの気密性評価方法に関する検討，文化財保存修復学会誌，44, 41-51 (2000)
- 6) 田中俊六，武田仁，足立哲夫，土屋喬雄：『最新建築環境工学[改訂版]』，井上書院，(1999)
- 7) Takeshi Ishizaki, Masazo Takami: Environmental Study of Storage Houses for Floats (Dashi) in Japan, The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Eindhoven, The Netherlands, 19-22 September 2004.

キーワード 九州国立博物館(Kyushu National Museum)；展示ケース(showcase)；換気回数(ventilation rate)；温度(temperature)；相対湿度(relative humidity)

## Measurements of Ventilation Rate, Temperature and Relative Humidity inside Showcases Equipped on the Walls in the Kyushu National Museum

Masahide INUZUKA, Toshiyuki TORIGOE<sup>\*</sup>,  
Takeshi ISHIZAKI and Mitsuko HONDA<sup>\*</sup>

The Kyushu National Museum is the fourth national museum in Japan, founded after the Tokyo, Kyoto and Nara National Museums. Scheduled to open on October 15<sup>th</sup>, 2005, various preparations and studies are ongoing now.

One of the main issues for preparation is the construction of showcases with sufficient air-tightness. In order to avoid large fluctuations of air condition, the museum has set the upper limit of the value of ventilation rate at 0.3 times/day for showcases equipped on the walls.

In this study, the authors measured the ventilation rate of five showcases, with two different methods independently: using nitrogen gas and SF<sub>6</sub> tracer gas. The results from both measurements indicate that the obtained values of ventilation rate meet the requirement. In addition, temperature and relative humidity were measured inside and outside the showcases for several months in 2004. The stability of temperature and relative humidity was investigated as a function of ventilation rate and the amount of silica-gel inserted.

---

<sup>\*</sup>Kyushu National Museum