

展示ケース、展示施設の換気回数測定のための基礎実験

犬塚 将英・石崎 武志

1. はじめに

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）などは、文化財を保存するための温度と相対湿度の基準値を約20℃と約60%と勧めて、その収蔵の履歴も考慮すべきであるとしている¹⁾。これらの条件を適用するにあたっては、文化財を構成する材料の寸法の変化や表層の剥離などが起こらないように、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。特に文化財の展示や保存をするうえで、空調機などでの制御がより難しい湿度の制御が重要となってくる。

展示ケースや展示施設内の相対湿度の大きさに影響を与える主な要因として、(1)温度変化による相対湿度の変化、(2)多孔質材質で構成される文化財や調湿剤による吸放湿性能、(3)外気からの影響、を挙げることができる。

仮に展示ケース内の温度と相対湿度がそれぞれ20℃、60%であったとすると、この展示ケース内の絶対湿度は約11g/m³である。外気との水分の行き来を無視して絶対水分量が一定であると仮定すると、温度が22℃へ上昇したときの相対湿度は53%、18℃へ下降したときの相対湿度は68%となる。よって20±2℃の温度変化に対しては、相対湿度の変動は±10%以下に抑えられることから、（材質の種類にも依存するが）20℃付近での小さな温度変化が資料に与える機械的損傷の危険性はそれほど大きくないと言える²⁾。

調湿剤も含めて多孔質材質は、その質量によって影響の度合いは異なるが³⁾、N.Stolow⁴⁾や神庭⁵⁾らの研究結果にも見られる通り、周囲の急激な湿度変化を和らげる緩和剤のような作用をする。この緩和作用は、多孔質材質からの吸放湿量と空気中の水分量変化に関係するため、展示ケースの換気量が大きいと緩和作用は低下する。

以上のようなことから、展示ケースの気密性が充分高くない場合には外気との空気の交換が、温度変化や多孔質材質の吸放湿性能よりも、ケース内の湿度変動に影響を与える主要な要因であると考えられる。一方、九州国立博物館壁付展示ケースのように気密性が充分高ければ、空気中の水分の移動が抑えられることから、ケース内の相対湿度の変動が軽減される^{6, 7)}。しかし、展示ケースの気密性が良すぎる場合（換気回数～0）、展示ケース内から生じる揮発性有機化合物(VOC)が排出されなくなる恐れがあり、文化財への悪影響が懸念される。相対湿度の安定性とVOCに対する衛生処置⁸⁾の両方の側面を考慮した上で、展示ケースの換気回数の最適値を定量的に定めたい、というのが本研究の目的である。

そのためには換気回数の測定方法を確立する必要があるが、複雑な測定方法や高額な費用を要する測定方法は、一般の博物館や美術館で適用するにあたって現実にそぐわない点が多い。このような事情を鑑みて、本研究では安価かつ簡便な測定方法の選択、その測定精度と測定にあたっての注意点を検討した。

2. 換気回数の測定法

展示ケースのような単一空間の換気回数については、トレーサーガスをを用いた測定方法が一

一般的である。空気調和・衛生工学会規格⁹⁾に示されているように、トレーサーガスをを用いた換気回数測定方法は以下のように分類される：

- ・濃度減衰法：大気中の濃度が極めて小さいトレーサーガスを調べたい空間内に導入し、トレーサーガス濃度減衰の時間勾配から換気回数を求める。

川越市山車収蔵庫施設¹⁰⁾や九州国立博物館の壁付展示ケース⁷⁾では、トレーサーガスとして六フッ化硫黄(SF₆)を用いて換気回数の測定が行なわれた。また、トレーサーガスとして二酸化炭素(CO₂)を用いた測定法に関する評価も報告されている¹¹⁾。

- ・連続発生（供給）法：測定対象空間に連続的にトレーサーガスを発生させ（供給し）、その発生（供給）量と濃度測定データから換気回数を測定する。
- ・一定濃度法：測定対象空間濃度を常時一定にするためにトレーサーガス供給量を制御し、供給量から換気回数を測定する。

熊本城天守閣内の重要文化財「細川家舟屋形」を収納している展示ケースの換気回数はCO₂を用いた一定濃度法で測定された¹²⁾。

一方、九州国立博物館の壁付展示ケースのように、トレーサーガスをを用いる代わりに、窒素ガスを展示ケース内に充満させて酸素濃度上昇の勾配から換気回数を測定したという事例も報告されている^{6,7)}。

この他に、加圧もしくは減圧をして展示ケース内外の圧力差を測定する方法もあるが、加圧（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（小さく）なる可能性があることから、以下ではこの方法については考えないことにする。

3. 換気回数測定のための基礎実験

3-1. 測定方法

前節では幾つかの換気回数の測定方法を紹介した。これらの中で、複雑な測定系や高額な測定器を要しない簡便な測定方法がないかを検討した。その結果、ガスを封入した後で、濃度変化を記録するデータロガーを設置するだけで自動計測が可能な方法として、以下のような2通りの方法を検討してみた：

- ① 窒素ガスを充満させて酸素濃度を自動計測
- ② トレーサーガスをを用いた濃度減衰法

空気調和・衛生工学会規格⁹⁾では、良く用いられるトレーサーガスとして、ヘリウム(He)、CO₂、SF₆、パーフルオロカーボン、エチレン(C₂H₄)、一酸化二窒素(N₂O)の6種類のガスが挙げられている。可燃性、地球温暖化係数、測定器の簡便さと価格を考慮した結果、ここではトレーサーガスとしてCO₂を用いて実験を行った。

換気回数測定の対象として、容積が0.25m³であるデシケーターを使用した。このデシケーターの換気回数は0.2回/日程度であり、九州国立博物館の壁付展示ケースの気密性と近い値を持っている^{6, 7)}。このデシケーターを温度と湿度が制御できる恒温恒湿槽の中に設置して換気回数の測定を行った。①では酸素濃度が5%になるまで窒素ガスを封入し、理研計器製可搬型ガスモニター”GX-3000”（測定分解能=0.1%）をデシケーター内に設置して、1分毎に酸素濃度を自動計測した。②では濃度が2500ppmになるまでCO₂ガスを封入し、（株）ユー・ドム製”CO2デテクタ”（測定レンジ：300~2500ppm、測定分解能=0.2ppm）をデシケーター内に設置して、1分毎にCO₂濃度を自動計測した。図1、図2にそれぞれ①、②における酸素濃度とCO₂濃度の測定例を示す。これらの測定は温度が一定（20℃）という条件下で行った。

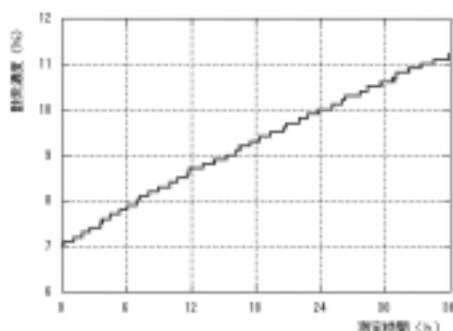


図1 酸素濃度の時間変化

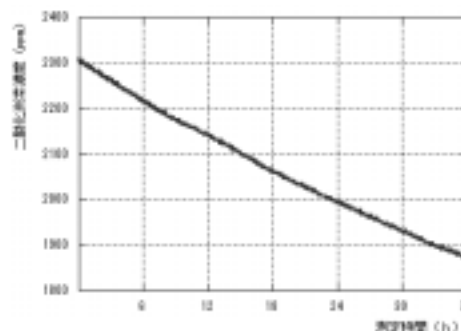


図2 CO2濃度の時間変化

3-2. ガス濃度測定から換気回数への変換

容積が V (m^3)で、一日当たりの換気量が Q (m^3/day)である展示ケースを考える。ある時刻 t でケース内のトレーサーガス濃度を P (m^3/m^3)、ケース外のトレーサーガス濃度を P_0 (m^3/m^3)として、その時の微小時間変化 dt における展示ケース内のトレーサーガス濃度変化を dP とする。この時、ケース内のトレーサーガスの変化量 VdP は、外から流入してくる量 P_0Qdt から外へ流出する量 $PQdt$ を引いた量で表される：

$$P_0Qdt - PQdt = VdP \quad \dots (1)$$

時刻 t_i の時の展示ケース内濃度を P_i として、この初期条件で(1)の微分方程式を解くと、任意の時刻 t における濃度 P は以下のように表される：

$$P = P_0 - (P_0 - P_i) \cdot \exp(-N \cdot t) \quad \dots (2)$$

ここで、 $N = Q/V$ は一日当たりの換気回数である。(2)式からわかる通り、トレーサーガスの濃度は時間に対して指数関数的に変化する(図1と図2)。

従って、原理的には、図1や図2で示されるデータを最小二乗法により指数関数に当てはめれば、その勾配から換気回数を求めることができる。しかし、(2)式を変形すると以下のように、データから換気回数への導出が容易になる：

$$Z = N \cdot t \quad \dots (3)$$

ここで左辺は $Z = \ln(P_i - P_0) - \ln(P - P_0)$ である。(3)式から Z は t に比例するので、その直線の傾きから換気回数を求められる。

窒素を充満して酸素濃度の上昇を測定する実験から Z を計算して時間変化を調べたのが図3である。図から Z と t は直線の関係にあるので、換気回数の測定が問題無く実施されたことを意味している。測定点は赤で、最小二乗法から求められた直線は青で示されている。直線の傾きから得られた換気回数は 0.24 ± 0.01 回/日であった。誤差の主な要因は、測定装置の分解能によるものである。

一方、図4には CO_2 をトレーサーガスとした濃度減衰法からの結果を示した。こちらも Z は t に対して良い直線性が得られたことから、測定が問題無く実施されたことを意味している。直線の傾きから得られた換気回数は 0.17 ± 0.01 回/日であった。誤差の主な要因は、外気中の CO_2 (350~450ppm)濃度の不確定性によるものである。

2つの測定結果を比較してみると、窒素ガスを充満して酸素濃度の上昇を測定する方法では、 CO_2 トレーサーガスを用いた濃度減衰法から得られた結果よりも大きい換気回数を得られた。この傾向は、九州国立博物館壁付展示ケースの換気回数測定でも観測されたが⁷⁾、原因は現在調査中である。

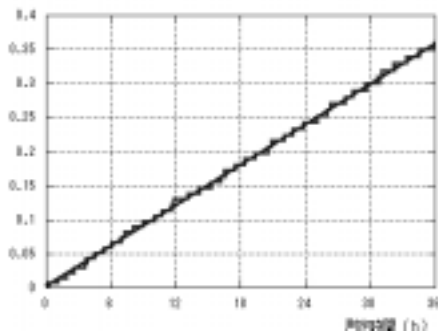
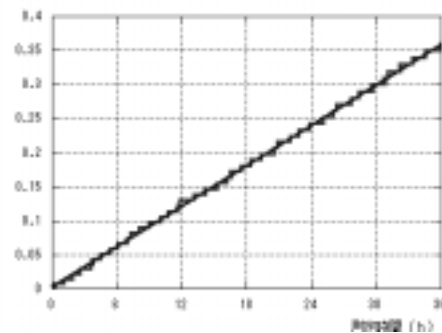


図3 Zの時間変化(酸素)

図4 Zの時間変化(CO₂)

3-4. 温度変化による換気回数測定への影響

以上の実験結果はいずれも恒温恒湿槽内の温度を20℃に保って行った結果である。ここでは測定中に温度を急激に変化させた場合に、換気回数の測定にどのような影響を与えるのかを調査した結果を報告する。

図5と図6には、それぞれ酸素濃度の上昇を調べた測定とCO₂をトレーサースガスとした時の測定におけるZと温度の時間変化を示した。

図5には最小二乗法により求めた直線を青で示した。温度が2℃下がった時に測定データは直線よりも大きめに、温度が2℃上がった時に測定データは直線よりも小さになっている。このようなずれが換気回数の測定値に与える影響は約0.03回/日であった。

図6に見られるように、CO₂をトレーサースガスとして用いた濃度減衰法においても、温度が急激に変化した時のZの直線からのずれは顕著である。今回のデータでは、±2℃の温度変化がもたらす換気回数の誤差は約0.13回/日であった。

以上の実験結果から、換気回数の測定を行う際には温度の測定も同時に行うことも重要であることがわかった。そして測定濃度からZを計算し、時間に対する直線性を確認することにより、換気回数測定が正確に実施されたのかを評価できることがわかった。

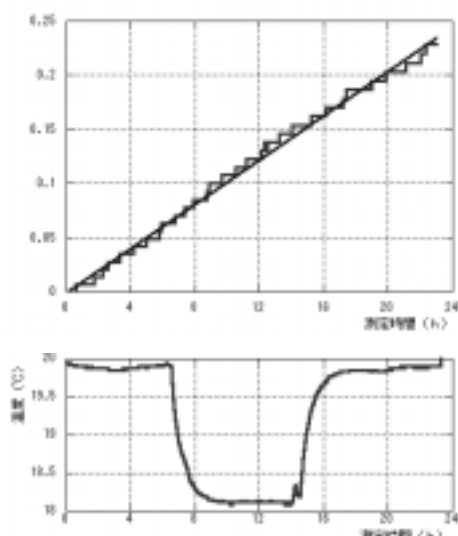
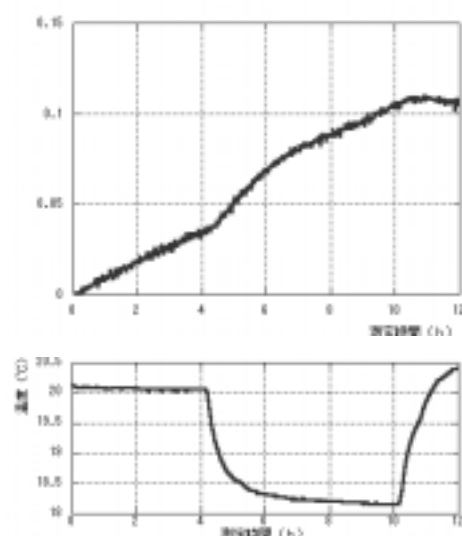


図5 Zと温度の時間変化(酸素)

図6 Zと温度の時間変化(CO₂)

4. まとめ

文化財の保存を考えるうえで、温度と相対湿度の最適条件がICCROMなど推奨値が示されている(約20℃と約60%RH)。それに加えて、材料の寸法の変化や表層の剥離などが起こらないように、温度や相対湿度の急激な変化を避けることが重要である。

展示ケースの気密性を高めれば、空気中の水分の移動が抑えられることから、ケース内の相対湿度の変動が軽減される。しかし、一方で展示ケースの気密性が良すぎる場合(換気回数～0)、展示ケース内から生じるVOCが排出されなくなる恐れがあるので、相対湿度の安定性とVOCに対する衛生処置の両方の側面を考慮した上で展示ケースの換気回数の最適値を定量的に定めたい、というのが本研究の目的である。

安価かつ簡便な換気回数測定法として、窒素ガスを充満して酸素濃度の上昇を調べる方法とCO₂を用いた濃度減衰法とを、気密性の高いデシケーターを用いて検討した。実験結果から、換気回数の測定を行う際には温度の測定も同時に行うことも重要であることがわかった。そして測定濃度からZを計算し、時間に対する直線性を確認することにより、換気回数測定が正確に実施されたのかを評価できることがわかった。

今後、Heガスをトレーサーガスとして用いた換気回数測定の可能性も調査する予定である。

謝辞

九州国立博物館の鳥越氏には壁付展示ケースの換気回数測定の際に多大なご協力をいただきました。また、北九州市立大学・白石靖幸氏と東京工芸大学・伊藤一秀氏には平成17年度保存科学部研究会「展示ケース、展示施設の換気回数と湿度の安定性」にて、貴重なご意見と情報をいただきましたので、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) G.de Guichen: Climate in Museums, ICCROM, 1988.
- 2) 三浦定俊, 佐野千絵, 木川りか: 『文化財保存環境学』, 朝倉書店, (2004)
- 3) G.Thomson: "Relative humidity-variation with temperature in case containing wood", Studies in Conservation, 9, 153-169 (1964).
- 4) N.Stolow: Controlled environment for works of art in transit, Butterworths, 1966.
- 5) 神庭信幸: 美術館輸送時の環境-梱包ケース内の温湿度-, 文化財のための保存科学入門, 京都造形芸術大学編, 角川書店, 350-361 (2002).
- 6) 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第26回大会要旨集, 106-107(2004)
- 7) 犬塚将英, 鳥越俊行, 石崎武志, 本田光子: 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, 保存科学, 44, 83-96 (2004)
- 8) 伊藤一秀: 建築基準法による化学物質発散に対する衛生処置, 平成17年度保存科学部研究会「展示ケース、展示施設の換気回数と湿度の安定性」予稿集, 22-29(2005).
- 9) 空気調和・衛生工学会規格 SHASE-S 116-2003 トレーサガスを用いた単一空間の換気量測定法
- 10) 石崎武志, 高見雅三, 古谷太慈, John Grunewald: 川越市山車収蔵施設内の温湿度変化の実測と解析
- 11) 橋本修左, 井上晴久, 竹氏宏和, 神庭信幸: 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 (2001).

- 12) 白石靖幸：熊本城細川家舟屋形の展示ケース内の温湿度・換気量の実測と数値シミュレーションによる検証, 平成17年度保存科学部研究会「展示ケース, 展示施設の換気回数と湿度の安定性」予稿集, 11-19(2005).

キーワード：換気回数(ventilation rate)；展示ケース(showcase)；濃度減衰法(concentration decay method)；一定濃度法(constant concentration method)；トレーサーガス(tracer gas)

Study of Ventilation Rate Measurements for Showcases and Facilities in Museums

Masahide INUZUKA and Takeshi ISHIZAKI

The most suitable temperature and relative humidity for the conservation of cultural properties are said to be about 20°C and 60%RH, respectively, by ICCROM, for example. In addition, care has to be taken so that cultural properties would not suffer from rapid changes in temperature and relative humidity because they would destroy cultural properties.

If a showcase is significantly air-tight, variation of relative humidity inside the showcase will be decreased by using a relative humidity buffer. However, if the air-tightness is perfect, VOC emitted from the inner wall would not be discharged, perhaps causing chemical damage to objects. The purpose of this study is to obtain quantitatively the best value of ventilation rate for showcases by considering the relative humidity and VOC emission inside showcases.

For this purpose, first, it is important to understand the measurement of ventilation rate. It is also better for curators if the method of measurement is simple and does not cost much. In this report, two methods are selected and evaluated: (i) concentration decay method using CO₂ as a tracer gas and (ii) monitoring concentration of O₂ after introducing N₂ into a showcase. The accuracy of these measurements is evaluated and the results from both methods are compared. The impact of a rapid change in temperature on the ventilation measurements is also discussed in this article.

