

博物館における 相対湿度環境に関する研究動向(1) 小空間の特性

Review of Studies on the Environment of Relative Humidity in Museums (1)

神庭信幸

はじめに

① 梱包ケース内の環境

② 保存箱の環境

③ 展示ケース内の環境

まとめ

【論文要旨】

文化財を長期にわたって保存するときに勘案しなければならない温度、相対湿度、照明、汚染物質、微生物など、種々の環境因子の中から相対湿度に注目し、保存箱、額縁、展示ケース、梱包ケースなど比較的狭く、閉鎖された空間内における相対湿度環境に関する研究の動向をレビューする。梱包ケース内における相対湿度の研究では、相対湿度を一定に保つことに関心が集中した1970年代までと、梱包された資料の含水率の変化に注目し、一定の含水率を維持できる空間が求められた1980年代以降の研究に分けて研究動向を論じる。また、日本では特に研究が立ち後れている梱包ケース内の振動、衝撃の緩和についても触れている。日本における伝統的保存方法に、桐あるいは杉材を用いた保存箱の利用があるが、保存箱内部の相対湿度の挙動と外気の変化を緩和する能力を取り上げた研究に注目した。展示ケースに関する研究では、塩類を用いた相対湿度調節、高い気密性を前提とした相対湿度調節、展示ケースの空気交換率、空気交換率 $\kappa = 1/\text{day}$ を想定したケースの調湿、ケース内で使用する調湿剤の性能、密閉ケースの性能と問題などに関して研究動向を述べた。

はじめに

相対湿度の急激な変化は、文化財資料の材質に亀裂や変形などの機械的劣化を生じさせる。また高い相対湿度環境が長期間維持されると、材質の劣化は低い相対湿度環境に比較して速く進行し、生物学的被害が発生する頻度も高いことが知られている。相対湿度が主要な因子となって発生するこのような被害は、資料の外観あるいは形態に重大な影響を及ぼすため、他の要因によって発生する被害に比べて比較的短時間で露見しやすい状態に至る。したがって、博物館あるいは美術館の保存担当者の多くは、相対湿度の変動とそのレベルについて、他の環境因子に比べると高い関心と大きな注意を払っていると言える。

工業製品としての写真資料の保存期間についてISO3897 (Photography - Processed photographic plate - Storage practices, 3rd edition, 1992) によれば、中期保存とは実用性を保っている20年間、長期保存は100年程度を指していると言われる。しかしながら、文化財の場合にはそれらを遥かに越えた、ほぼ恒久的な時間を対象とする必要がある。このような長期間にわたって環境が資料に与える影響は、甚大なものであることは想像にかたくない。文化財資料を保存・公開する場所は、保存箱、額縁、展示ケース、梱包ケースなど比較的狭く、閉鎖された空間が多い。こうした空間は展示室などの大空間とは異なる環境状態にあるものと予測されるが、その実態は未だ多くの点で明確になっていないのが現状である。したがって、こうした環境下において、劣化を最小限に抑制するための相対湿度の条件についても不明確な部分が多い。

本稿は、文化財を長期にわたって保存するときに勘案しなければならない温度、相対湿度、照明、汚染物質、微生物など種々の環境因子の中から相対湿度に注目し、保存箱、額縁、展示ケース、梱包ケースなど比較的狭く、閉鎖された空間内における相対湿度環境に関する研究の動向をレビューする。

①……………梱包ケース内の環境

空間の温湿度と資料の 含水率に関する研究

(1) 空気の相対湿度変化の低減 (1970年代までの研究)

多くの展覧会は、国内外の他所の博物館施設から資料を借用することによって成り立っている。展覧会のために資料は所蔵館での移動、梱包、目的地までの輸送、開梱、展示館での移動という一連の過程を少なくとも2回は経験し、それに伴って通常の展示・収蔵では起こり得ない大きな環境的变化を短時間のうちに経験する。国内よりは移動距離がはるかに長くなる国際的規模での輸送は、第二次大戦後から増加の一途を辿っている。初期の輸送を担ったのは鉄道や船舶による輸送であるが、航空旅客輸送の発達に伴って1960年代頃から航空輸送が急増する。

梱包ケースに対する保存科学的研究は、輸送頻度および輸送方法の変化と軌を一にしながら、次第にその数を増してくる。1950年代以前は研究の黎明期に当たる。R. Rosegrantは気密性と断熱性の要素を除いた、衝撃、振動、強度、重量、保安、湿気、資料表面の保護などの要素をあげ、梱包

に関する一般的な方法を示している[1]。50年代に入ると、調湿剤を利用した相対湿度調節の安定化が登石によって初めて提唱された。船舶輸送によって気密性の高い梱包ケースが赤道を通過するとき、温度の上昇により内部の相対湿度が低下するとの予測から、科研ゲルなどの調湿剤の利用による安定化を薦めている[2]。調湿剤は、温度変化に対する反応が早く、吸放湿量が大きく、かつヒステリシスが小さいものほど有効であると述べている。さらに、使用量を式(1)にしたがって計算すると、収納物を木材と仮定して、同量の調湿剤を加えることにより相対湿度の変化量は1/8に抑えることができるとしている[4]。

$$\Delta H \approx \frac{\Delta HT + 4000(w/v)\Delta T}{1 + 11000(\omega/v) + 4000(w/v)} \quad (1)$$

ΔH ：ケース内RHの変化量， ΔHT ： Δt により生じるRH変化量，
 ΔT ：温度変化量， w ：収納物の重量(kg)， ω ：科研ゲルまたはシリカゲルの重量(kg)， v ：ケースの容積(L)

登石は、ケース内の環境要素のうち相対湿度が特に重要視されると同時に、ケースの基本性能として気密性を取り上げ、相対湿度を調節するための必要条件であることを明らかにした。この論文から、理論的な計算に基づくケース内環境の予測が始まったと言える。ただし、ケース内の温湿度変化の傾向に対する予測は、一般の室内における変化と同様なものと仮定しており、後に触れるように実際の状況とは異なっている。

ケース内の温湿度環境を実際に測定したのはN. Stolowが最初で、鉄道による輸送の際に、室内の測定に用いる毛髪自記温湿度計を利用した[6]。使用したケースは、密閉性を高めるために合板の箱の内側にポリエチレンシートを貼り、その上からクッション、調湿剤の機能をもつ木材パルプを圧縮した板（ファイバーボード）を張り付けた。輸送の結果、ケース内温湿度は外部の車両内の環境に比べて十分な安定性を示した。同じケースに対して環境実験槽を用いて行った実験では、ケース内の温度変化と相対湿度変化は同じ向きに起こることが明らかにされ、相対湿度の安定化のために使用する調湿剤の配置と量、断熱方法についての検討が必要ながここで確認された。また、密閉性を高めるために資料をポリエチレンシートで包むことにより、内部に結露が発生し徴が生える危険性があるので、水分を吸収し易い薄い紙で資料を事前に包むか、あるいは防黴剤の散布が必要であることも指摘されている。登石、N. Stolowによる研究を契機として、以後の60～70年代の研究は、安定した相対湿度環境を目差して、調湿剤の積極的な導入と実践が図られた時代であると言える。

密閉空間に吸放湿性能の高い木材などの物質が存在するとき、空間内の温湿度変化の傾向は空気量に対する吸放湿物質の重量に依存することをG. Thomsonは明らかにした[8]。密閉空間内では空気及び物質中の水分量の和が常に一定に保存されることから、

$$\Delta H = - \frac{\left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_A + \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_W}{\left(\frac{\partial M}{\partial H}\right)_A + \left(\frac{\partial M}{\partial H}\right)_W} \Delta T \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_A &: \text{空気の含水量変化の温度依存分} \\ \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_W &: \text{木材の含水量変化の温度依存分} \\ \left(\frac{\partial M}{\partial H}\right)_A &: \text{空気の含水量変化の相対湿度依存分} \\ \left(\frac{\partial M}{\partial H}\right)_W &: \text{木材の含水量変化の相対湿度依存分} \end{aligned}$$

温度変化に対する相対湿度変化は式(2)で表され、空気量が極端に少なくなると、 $(\partial M/\partial T)_A$, $(\partial M/\partial T)_A$ の項が0に近くなり、木材の含水量変化に関する項が支配的になる。温度変化に対する木材の含水量の変化は、空気のそれとは増減の向きが反対なので、木材の分量が一定量(空気100 L 当たり1kg)を超えると温度と相対湿度が同じ向きに変化する。G. Thomsonはその変化の割合が

$$\Delta H = 0.39 \Delta T \quad (3)$$

になることを示した。気密性が高く、空気量が少ない梱包ケース内に温度変化が生じたときの相対湿度変化を予測する場合、式(2)、(3)は極めて重要な関係式となる。

N. Stolowも同様に、水分量が密閉ケース内では保存されることから、空気量が極端に少なく、木材とシリカゲルが存在する空間内の温湿度変化の関係を式(4)のように示した[9]。

$$\Delta H = \frac{0.063W_W}{0.18W_W + 0.6W_S} \Delta T \quad (4)$$

W_W : 木材の重量(kg), W_S : シリカゲルの重量(kg)

係数の0.063(%EMC/°C)は木材の等湿吸放湿曲線の傾き、0.18(%EMC/%RH)は木材の等温吸放湿曲線の傾き、0.6(%EMC/%RH)はシリカゲルの等温吸放湿曲線の傾きを表わす。シリカゲルがなければ、

$$\Delta H = 0.35 \Delta T \quad (5)$$

となり、G. Thomsonの示した値とほぼ同程度の値になる。木材と同量のシリカゲルがある場合には、

$$\Delta H = 0.08 \Delta T \quad (6)$$

となり、相対湿度変化を温度変化の1/10以下に抑えることができる計算になる。1970年の大阪万国博覧会に際して開催された特別展では、展示用のアクリル製密閉ケースに板絵(4985g)とシリカゲル(3639g)を入れてカナダから輸送・展示する試みが行われた[13]。半年後再びカナダに戻

ったとき、両者の重量はそれぞれ4983g, 3635gにわずかに変化しただけである。ケースの高い気密性および十分な量の調湿剤が効果的に働いたとしている。

N. Stolow は同時に、ケースの断熱性を高め、温度半減期 ($t_{\frac{1}{2}}$) を小さくすることが重要であると述べている。温度半減期に影響する要素として、ケースの表面積、熱容量、熱伝導率、厚さを指摘し、温度の半減期との関係を

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693HL}{KA} \quad (7)$$

H：ケースの熱容量 ($W \cdot hr/K$)、L：ケースの厚さ(m),

K：平均熱伝導率 ($W/(m \cdot K)$),

A：内壁面と外壁面の平均の表面積 (m^2)

としている。温度半減期とは、ケース内温度が変化する早さを表す数値であり、大きな値ほど断熱性能が高い。しかし、どの程度の断熱性が必要であるかについては特に言及していない。この論文によって、梱包ケース内部の環境を左右する諸要素である気密性、断熱性、相対湿度、衝撃、振動、強度、重量、湿気、資料表面の保護が一通り指摘されたことになる。

登石は、ケース内で生じる結露について、次の三種類の発生原因をあげている〔10〕。一つめはinertial condensationで、船舶による輸送では気候条件の異なる地域を時間をかけて通過するので、蒸れによる結露が発生し易い。二つめはlow absorption condensationで、ブロンズなどの金属が水分を吸収しないために生じる結露である。三つめがinvasion condensationで、航空輸送によって冷えた状態の梱包ケースを開梱するときに発生する結露である。これらの結露はケースの気密性と断熱性が向上したため以前よりも発生し易くなり、諸条件を考慮した上で適切な対策を講じる必要がある。

1960～70年の間に行われた梱包に関する研究は、N. Stolow等の活動を中心に展開し、一定の相対湿度環境の実現を目差してさまざまな取り組みがなされ、それらの総括は国際会議あるいは著書において同氏により公表されている〔15, 16〕。ただし、当時は梱包ケース内部の環境状態を高い精度で測定できる小型の測定機器がまだ開発されていなかったために、変化を理論的に予測できても、それを実際に確かめることが極めて困難であった。

(2) 資料の含水率変化の低減 (1980年代以降の研究)

80年代に入ると温湿度、圧力、加速度、応力などに関する小型の測定機器が急速に発達し、微小な梱包ケース内の環境測定が容易に行えるようになった。それに伴い、梱包ケース内の温湿度などに関する測定事例が飛躍的に増え、ケース内の環境に対する従来の理論的考察を具体的に検証できる環境が整った。

S. Staniforthは小型データロガーを使用して、ロンドン・ナショナルギャラリーが使用する絵画輸送専用の二種類のケースについて、調湿剤を入れない場合の温湿度変化を測定した。断熱材には25mm, 50mmのポリエチレンフォーム (Plastazote) をそれぞれ使用し、額縁との間にはほとん

ど隙間がないためケース内の空気量は少ない。測定の結果、Fig. 1のように温度と相対湿度は同じ方向に $\Delta H = 0.5 \Delta T$ の関係を保つことを明らかにし、Thomson や Stolow の予測とは多少相違があるとしている。一定の安定した相対湿度を維持するには、大量のシリカゲルが必要となるが、ケースの中にはそれを納める空間がない。温度低下による結露は発生しにくい、冷えたケースを開梱するときに周辺の相対湿度との関係で資料表面に結露が発生する可能性が

あり、博物館施設に到着後少なくとも24時間の馴化の必要があることを述べている [17]。S. Hackney 等は断熱材として厚さ100mmの発泡スチロール (expanded polystyrene) を用いた梱包ケースの温度半減期が10時間近くになることを示している。ケース内の温度 (T) および温度半減期 ($t_{1/2}$) は、

$$T = (T_i - T_o) e^{-\kappa t} + T_o \quad (8)$$

$$t_{1/2} = 0.693/\kappa$$

T : ケース内温度 (°C),

T_i : ケースの初期温度 (°C),

T_o : 外部の温度 (°C),

κ : ケースの減衰係数 (hour⁻¹),

t : 時間 (hour)

のように表すことができるので、ケース内部の温度変化を直接測定することにより温度半減期を得ることが可能である [19]。

これまで多くの研究者が一定の相対湿度に注目してきたのに対し、S. Hackney 等は含水率と資料寸法の安定性との関係に注目した。資料の含水率が一定ならば、吸放湿がないので、温度変化によるわずかな膨張収縮を除いては資料の寸法に大きな変化は生じないことになる。一般的に木材の場合、温度による伸縮は変化相対湿度による変化の約15%程度と小さい [3]。一定含水率を維持す

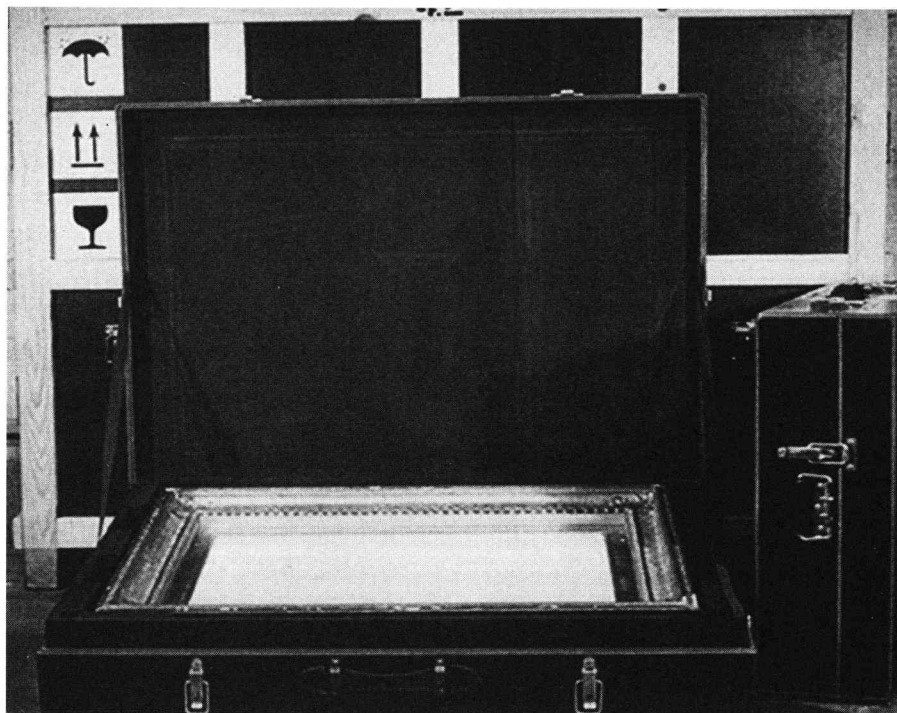


Photo.1 Style 1 case of The National Gallery of London containing painting with style 1 case on right and style 2 case behind. (絵画を梱包したスタイル1の梱包ケース。右側はスタイル1のケース、後ろはスタイル2のケース。ロンドン・ナショナル・ギャラリー) [17]

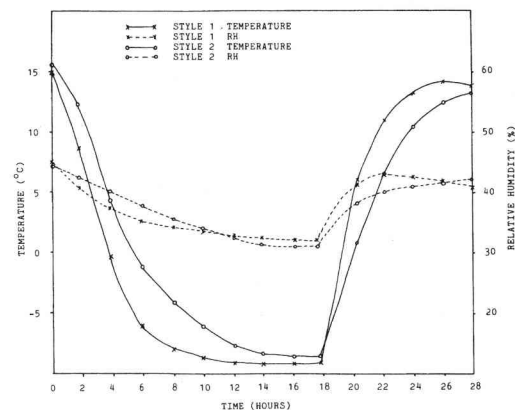


Fig.1 Result of cold test for a packing case of National Gallery. (ナショナルギャラリーが使用する梱包ケースに関する冷却試験の結果) [17]

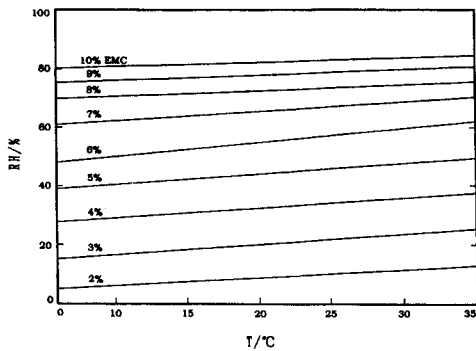


Fig.2 Relationship between temperature and relative humidity at a constant equilibrium moisture content of cotton fiber. (木綿繊維の含水率が一定のときの温度と相対湿度との関係) [47]

るためには、温度が下降する場合には相対湿度も下降、温度が上昇する場合には相対湿度も上昇しなければならない (Fig. 2)。このような環境を作り出すためには、資料をポリエチレンシートなどに密封して気密性を高め、断熱性の高い梱包を行えば温度による変化も少なく、安定した含水率での輸送が可能になると述べている [19, 22]。これは輸送に関する研究の中では画期的な見解であり、それ以降の梱包ケースの設計に大きな影響を与えることになった。

1950年代に登石が先駆的な研究を発表して以後、わが国では経験則に基づく梱包が美術品輸送会社にまかされ、保存科学的な研究はほとんど行われなかったと言える。その間に、調湿剤を用いた一定の相対湿度、断熱材による温度変化の安定、クッション材による衝撃および振動の低減など、ケースの改良に関する積極的な取り組み

が各国で行われた。約30年近いブランクの後、1989年に実際の小袖の輸送に使用された梱包ケース内部の環境測定をわが国では神庭が初めて実施し、ケースの気密性、断熱性、および資料の含水率に関して考察を加えた。その結果、低い断熱性のために激しい温湿度変化が生じていること、温湿度変化と資料の含水率の関係を検討したところ、低い気密性のために資料の含水率が変化していることなどが明かとなり、両方についての改良が緊急に必要なことを指摘した [25, 26]。これを契機にして、わが国でも研究が再開された。

激しい温度変化を伴うときに、一定の相対湿度環境よりは、密封梱包によって含水率の安定を図る方が資料の寸法が安定し、資料の保存に有効であるとする考え方によって、実際の輸送が数多くなされるようになった。断熱性能を向上させることにより温度が安定すれば、相対湿度も安定するので、調湿剤を用いる必要はなくなる。しかしながら、実際にどの程度の相違があるかは、神庭が行った実験によって検証された [44, 45]。木材を入れた密封容器、木材と調湿剤を入れた密封容器のそれぞれに温度変化を与えた場合、木材を実験槽に入れ、相対湿度を一定に保ちながら温度変化を与えた場合の三種類の異なる環境下では、温度変化に連れて相対湿度が同じ方向に変化する木材のみを入れた密封ケースが、最も寸法の安定性が高いことを明かにした。これらの成果を元に、わが国でも断熱材や、密封方法などについて具体的な改善が著者らによって加えられ、かつケース内外の温湿度、気圧測定の実施など、ここに至って世界的な水準での議論が可能になったといえる [47]。

D. Sunders等はロンドン・ナショナルギャラリーの梱包ケースに関して、輸送中の実測値に基づきその断熱性能について評価を加えている。1987年以前のケースの温度半減期 $t_{1/2}$ は3.5～4.5時間、以後のケースは6時間に向上しており、輸送中の温度変化が小さい分だけ相対湿度変化も小さくなっている。開梱は、温度半減期の約4倍程度の時間を経てから行うことにより結露の発生を避けることができる。密封梱包であるために開梱したときの資料の含水率は梱包を行った元の場所の値がそのまま維持され、外部の環境に馴化していないので、開梱場所の温湿度条件がそれと一致しなければ急激な含水率変化が生じることになる。また、輸送中の気圧変化の測定により、離陸による降圧により相対湿度が低下し、着陸による昇圧により相対湿度が上昇することを観測している [29]。

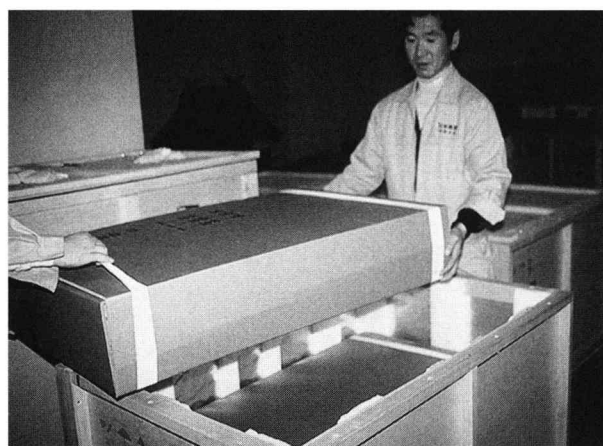


Photo.2 A packing case accommodates three of corrugated paper boxes with Nikka-pellet. (3個の段ボールをニッカペレットと共に収納した梱包ケース) [25, 26]

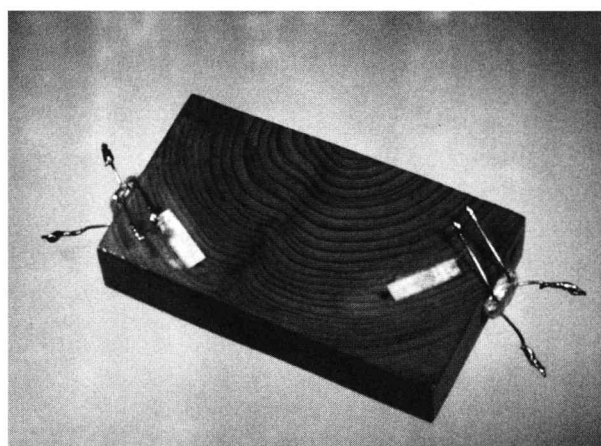


Photo.3 A strain gage adhered to the wood sample. (木材試料に接着されたストレインゲージ) [44, 45]

Stolow は、合成樹脂などの梱包材料には調湿能力はないと述べているが [16], D. Sanders 等は梱包材料が占める割合が空気に対して 7 : 1 以上のときは、木材などと同じような働きを行うと報告している [29]。さらに、額縁の周りに簡単なクッションを施して、ポリエチレンシートで密封するだけの簡易梱包法 (Soft Pack) による絵画の輸送を紹介しているが、ポリエチレンシートの周辺が安定した温度環境のときは内部の相対湿度も安定するので、相対湿度管理よりも温度管理が必要な点を指摘している (Fig. 3, 4) [31]。M. Richard は、密閉度および断熱性が高い梱包ケースならば、安定した相対湿度が得られ、ポリエチレンシートなどで密封された場合、資料の含水率の変化は小さいと述べている。ただし、シートなどで密封する際の問題点は、内部で結露が発生する可能性が高いことであると述べている [32]。ケースの温度半減期と断熱材との関係については Stolow が述べているが [9], P. Wilson あるいは M. Richard はさらに精度の高い関係式を示している。

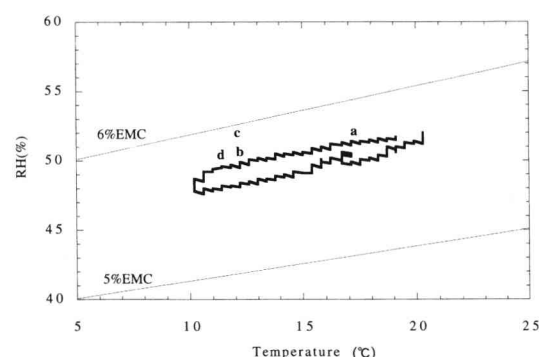


Fig.3 Approximate RH and temperature relations for the different EMC of cotton and changes of temperature and RH during the return journey from New York to Narita. a-take off from New York was at 16:44 February 6, b-landing in Anchorage at 0:03 February 7 for oil supply, c-take off at 1:32, d-landing in Narita at 8:30 February 7. (木綿繊維の平衡含水率と温湿度の関係および輸送中の梱包ケース内の温湿度変化: a-2月6日16時44分ニューヨーク離陸, b-2月7日0時3分給油のためアンカレッジ着陸, c-1時32分離陸, d-2月7日8時30分成田着陸) [47]

$$t_{\frac{1}{2}} = 0.693Ms/2 (U_1A_1+U_2A_2+U_3A_3) \quad (9)$$

$$1/U = d_1/\lambda_1 + d_2/\lambda_2 + \dots$$

M : 収納物の重量 (kg), s : 収納物の比熱 (kJ/(kg · K)),

U_i : ケースの i 番目の面の熱通過率 (W/(m² · K)),

A_i : ケースの i 番目の面の表面積 (m²),

λ_j : 梱包材料の j 番目の層の熱伝導率 (W/(m · K))

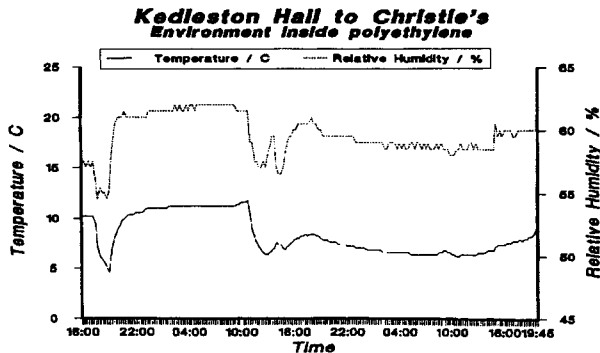


Fig.4 Temperature and relative humidity recorded during transport of a painting inside a soft pack. (絵画をソフトパック方式で梱包した時の輸送中の内部の温湿度変化) [31]

式 (9) より, 断熱材に厚さ50mmの発泡スチロールを使用するのに比べ, 100mmを使用すると温度半減期が1.6倍延びるとしている [23, 32]。ケースの改良による気密性の向上に伴って, 内部での結露発生の可能性に関して事前に予測を立てる必要が高まってきた。

結露の条件は, ケース内の資料周辺の温湿度環境とケースの内壁面の温度によって決定するが, Wilson 等によって示された熱通過率ではケース内外の空気の表面熱伝達率が考慮されていないため, 結露の発生条件を決定することは不可能である。神庭らはこの点を計算に加え, 断熱性能に係わるケースの熱通過率と結露との関係を明らかにした [49]。

$$1/U = 1/h_1 + d_1/\lambda_1 + d_2/\lambda_2 + \dots + 1/h_2 \quad (10)$$

U: ケースの熱通過率 ($W/(m^2 \cdot K)$),

λ : 梱包材料の熱伝導率 ($W/(m \cdot K)$),

h_1 : ケース内の資料とケース壁面との間に挟まれた空気層の表面熱伝達率 ($W/(m^2 \cdot K)$),

h_2 : 微風速を伴うケース外壁表面における表面熱伝達率 ($W/(m^2 \cdot K)$)

厚さ50mmの発泡スチロールを使用すれば熱通過率は $0.6W/(m^2 \cdot K)$ 程度になり, 通常の輸送環境では内部に結露が起らないことを示し, Richardの見解とも一致した [32]。また, 紙などの吸放湿速度の速い物質を資料周辺におくと, 温度変化に伴う相対湿度変化が迅速に行われるために, 結露の可能性がさらに低下することを神庭は示している [51]。

調湿剤を用いない密封方法によって含水率を一定に保つ方法に対して, 調湿剤使用の復活を薦める報告が登石等から出されている [48]。相対湿度が変化することで主要部の木材には問題が生じないが, 主要部である木材に塗布されたアラビアゴムを媒剤とした絵具の部分は, 水分を吸収して反りなどが生じるので, それを避けるためには緩衝剤として調湿剤が必要であるとしている。ただし, 調湿剤として利用されたアートゾープの使用量は $140kg/m^3$ にのぼり, 絵具の部分だけではなく主要部分にも変形が生じているものと思われるが, この点に関しては特に触れられていない。

振動, 衝撃の緩和に関する研究

梱包方法の一般的な方法については, ユネスコが出版した「Temporary and Travelling Exhibition」[7] に詳しい解説が掲載されているが, 衝撃に対する力学的な緩衝効果を検証したものではなく, 従来の経験則にしたがった事例を列挙したものである。衝撃, 振動に関する力学的な考察は, 外力の伝達率 (Transmissibility), 資料またはケースの固有振動数と外力の振動数との共振, そして鉄道, 道路, 海上, 航空など輸送手段による振動数の相違などについて, N. Stolorowが行ったものが最初である [11]。

$$T_{\gamma} = \frac{\text{suspension system Force transmitted}}{\text{no suspension system Force transmitted}} < 1 \quad (11)$$

外力の伝達率 T_{γ} は、ケースや輸送手段の緩衝作用によってケース内に伝わる外力が、緩衝作用のない場合と比べて小さくならなければならないことを示している。実際の輸送では、J. Gordonがミケランジェロの大理石像をヴァチカンからニューヨークへ輸送するとき、落下や転倒による衝撃を緩和し、資料を保護するために衝撃加速度-静的応力の関係を表す動的衝撃緩衝特性曲線を用いてクッション材の設計を行った [12]。

動的衝撃特性曲線は、以下の手順で使用する。資料を納めた内箱の形状が立方体、全体の重量が15kg、高さ75cmから落下したときに受ける最大衝撃加速度の許容値となる易損度を見積って40Gであると仮定する。厚さ10cmのポリウレタンフォームのクッション（密度3kg/m³）を使用するとすれば、Fig. 5の縦軸の40Gから水平に線を引いて曲線と交わる点の静的応力の値を求める。DとFの2点間の静的応力は、落下高さが75cmのときに、資料を保護するのに必要なクッションの条件となる。2点間の最小衝撃加速度に対応する点Gにおける応力0.025kg/cm²（25g/cm²）が最適なクッションの条件を与える静的応力になるので、重量15kgを25g/cm²で割ると最も効果的な負荷面積が算出できる。したがって、資料の各面に対して厚さ10cm、面積600cm²のクッションを用いれば、75cmからの落下に対して衝撃加速度が最小になる。

1980年代に入ると、衝撃、振動に対する研究事例が急速に伸び始める。S. Staniforthは、ロンドン・ナショナルギャラリーが使用する25mmおよび50mmのポリエチレンフォーム（Plastazote）を使用した絵画輸送専用の二種類のケースに対する衝撃試験として、横転（topple drop）、垂直落下（vertical drop）、片側落下（tilt test）を実施し、振動では絵画のカンヴァスが50Hz近傍で、額縁が25Hz近傍の周波数をもつ振動に対して共振し、それぞれ外力の約5倍、約3倍の力の作用を受けることを実験的に明らかにした（Fig. 6）。また、衝撃に対する工業製品の壊れ易さを示す易損度（Fragility）を導入し（Table 1）、文化財資料との対応を試みている [17, 18]。

A. Stephenson-White等は改良を加えたナショナルギャラリーの同ケースに対して同様の試験を実施し、60cmからの垂直落下では内部の額縁にかかる衝撃加速度が65Gから37Gに、横転では90Gから30Gに、90cmからの垂直落下では75Gから48Gに軽減

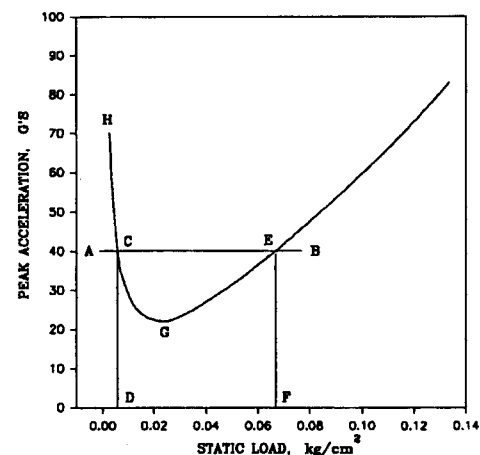


Fig.5 Dynamic cushioning curves for 10cm polyester urethane foam when dropped from a height of 75 cm. The foam density is 33 kg/m³. (10cmの厚さの発泡スチロールに対する動的衝撃緩衝特性曲線，落下高さ75cm，密度33kg/m³) [33]

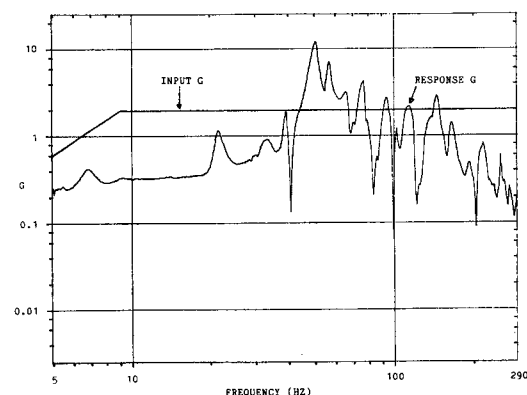


Fig.6 Transmissibility. Response curve for cross-axis vibration measured by accelerometer in centre of canvas in a case standing vertically with vibrational input through standing edge. (外力の伝達率，垂直に立てた梱包ケースの中のカンヴァスの振動。入力2Gの振動) [17]

Table 1 Approximate Fragility Factors of Typical Packaged Articles.
(各種品目の許容加速度) [17]

level	G factor	item
Extremely fragile	15 - 25	Precision instruments
Very delicate	25 - 40	Electric equipment
Delicate	40 - 60	Typewriters, cash registers
Moderately delicate	60 - 85	Television receivers
Moderately rugged	85 - 115	Refrigerators, washing machines
Rugged	115 up	Machinery

され、さらに内部の額縁とカンヴァスは12Hz近傍の周波数の振動に最も影響を受けることを明らかにした [24]。T. Green等は、合板、発泡スチレンの断熱材、ポリエーテルのクッションを使用したテートギャラリーの梱包ケースに対して実験を行い、内部の額縁は20Hz近傍に固有振動数を持ち、10～20Hz近傍に振動の周波数をもつトラックに積載すると共鳴する危険性があることを示している。同じケースを90cmの高さから落下させると、内部の額縁は49Gの衝撃加速度によって損傷するので、衝撃は少なくともこれ以下である必要性を提案している。クッションの設計には動的衝撃緩衝特性曲線から適切なクッションの材料と厚みを求める方法を述べている [19, 20]。一般的には、資料の劣化状態はさまざまであり、工業製品のような易損度の規格化は困難であるが、少なくとも文化財資料にとって許容される最大衝撃加速度は40G付近が許容限界であると考えられる。

また、木枠に貼ったカンヴァスは10Hz付近の低周波に共鳴し易く、外力の5倍近く of 力が働くので (Fig. 7)、作品自体や木枠に処置を加えてカンヴァスの張力を高くする方法を示し、同時に人間の取り扱いがカンヴァスの振動には最も危険であると強調している [34]。C. Sitwellは美術品専用トラックの振動について測定を行い、進行方向の振動よりも上下、左右方向の振動が大きく、上下方向は10Hz以下、左右方向は10～20Hzの振動が路面状態に依存しないで生じることを示した [21]。

D. Sanders等はカントリーハウスに収蔵される資料を輸送するとき、振動によって資料が経験する最も大きな加速度はカントリーハウスの中で資料を移動しているときで、3Gを超える加速度があったと報告しており、博物館施設内での移動に十分な注意が必要である点を指摘している [31]。このように、振動による影響はカンヴァス絵画に特に著しく、人間の取り扱い、トラックの振動がカンヴァスの固有振動に一致する可能性が高いので、十分な注意が必要であることが分かる。

M. Richardは衝撃加速度－静的応力の関係を示す動的緩衝特性曲線を用いたクッションの設計法について述べ、面積に対して厚さが厚いときに発生する座屈現象 (Buckling) を避けるためにKerstnerの最小面積 (Minimum Loading Bearing Area) の計算式に基づいて最小面積を決定する必要があると述べている。

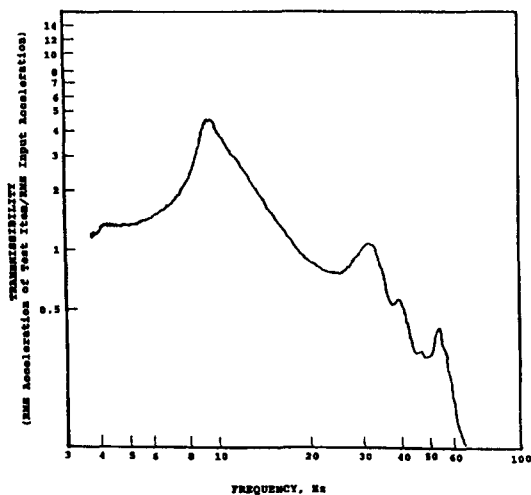


Fig.7 Transmissibility trace from a test frame inside a test packing case. (伝達率。試験用の梱包ケース内のカンヴァスの木枠の振動) [34]

Table 2 Shock Severity. Typical drop heights based on total package weight.
(梱包ケースの重量を基にした想定される落下高度) [39]

Package Weight Range	Handling Method	Drop Height
0-5 kg	1 person throwing	120 cm
5-10 kg	1 person throwing	105 cm
10-20 kg	1 person carrying	90 cm
20-45 kg	1 person carrying	75 cm
45-115 kg	2 person carrying	60 cm
115 kg up	light to heavy equipment handling	45 cm

$$MLBA > (1.33d)^2 \quad (12)$$

MLBA：最小面積(m²)

d：クッションの厚さ(m)

また、二重箱にする場合には内箱の中の資料はしっかりと固定し、内箱全体が動くように外箱にクッションを付けることが重要であると述べている [28]。クッションの設計のために、資料の易損度 (Fragility factor)、想定される落下高度 (Shock severity) (Table 2)、動的衝撃特性 (Dynamic cushioning curve)、座屈現象 (Buckling)、塑性変形 (Compression creep)などを考慮して行う必要性を指摘している [33, 35, 36, 37, 38, 39, 40]。

資料の易損度、動的衝撃特性曲線、最小負荷面積、資料の固有振動数、梱包ケースの固有振動数、輸送手段に固有の振動数などの特徴の理解が進み、衝撃および振動に関する梱包ケースの改良は急速に進捗しているといえる。

このほか、気圧変化が資料に及ぼす影響について M. Richard は、絵画が密閉したアクリル容器に収納され、それ自体が梱包されている場合、アクリル容器の内外で気圧の差が生じ、特に着陸時にアクリル板が絵画に向かってたわみ、表面と接触する可能性があることを指摘している [50]。また、温湿度変化によるカンヴァス絵画の機械的変形について、M. Meckenburg 等はコンピュータを用いてシミュレーションを行い、環境変化が与える影響評価を試みている [42, 43]。これに関連して、X線画像のエッジ強調をアナログ的に行うゼロラジオグラフィー (xeroradiography) [41] や、可視光線を用いた画像解析システムの応用などにより [46]、輸送前後における絵画表面での亀裂や剥落部分の微細な変化を把握する研究が進められ、十分に実用性をもつものと考えられる。

②……………保存箱の環境

資料を箱の中に収納して保存・管理する習慣は世界中で見られる。わが国では特に、桐や杉の板を用いた保存箱が古くから使用され、現在もその伝統は博物館施設だけではなく、個人住宅での保存法として実際に用いられ、極めて重要な保存手段となっている。多くの貴重な資料がこのような保存箱と共に伝存している事実から、箱の内部の温湿度環境を解明することは、保存に必要な環境

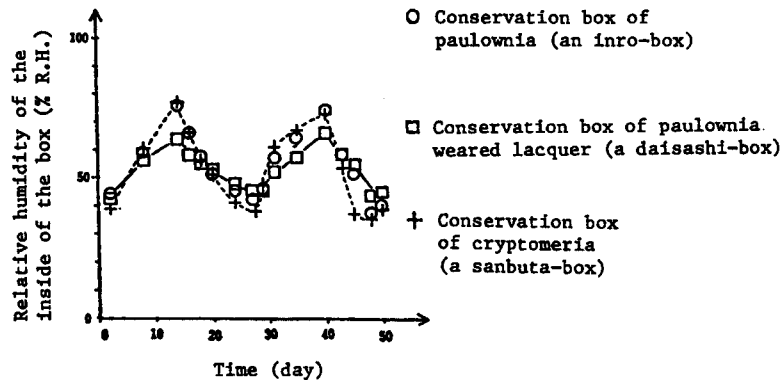


Fig. 8 Changes in temperature and humidity in the inside conservation boxes when reiteratedly moved from a high humidity chamber to a low humidity chamber and vice versa. (高湿度の環境から低湿度の環境へと保存箱を移動させたときの内部の温湿度変化。また、その逆) [54]

を考える上で重要なことであると考えられる。

喜多村ら [52] は正倉院の校倉造りの宝庫や唐びつ内部の相対湿度変化を長期にわたり観察し貴重なデータを提供している。宝庫においた唐びつ内の相対湿度変化は外気の日変化を1/100以下、天候の変化によってもたらされる逐日変化と呼ばれる相対湿度変動を6時間程度の位相の遅れを伴って1/100以下に抑え、年変化は1ヵ月の位相の遅れを伴って外気の2/5であることを見出し、これらを木材の恒湿作用が原因としている。

永田 [53] は文化財の保存環境を検討するために、木製（杉材）の保存箱とトタン製の箱の温湿度環境を比較し、木材の保存箱の特性を調べた。トタン製の箱は温度が上昇すると相対湿度は下降して、温度と相対湿度の変化の位相が逆になり、その時の相対湿度の日較差は7%程度を示す。一方、木製の箱の方は、温度と相対湿度の変化の位相は同じになり、相対湿度変化は小さく、日較差は2%に過ぎない。トタン箱の内部に木綿あるいは和紙など吸放湿性の高い材料を貼ると、相対湿度変化が小さくなることから、木材の吸放湿特性が相対湿度の安定に寄与していると指摘している。

三浦 [54] は桐材と杉材の保存箱に対して、箱の外部の温度変化と内部の相対湿度変化、外部の相対湿度変化と内部の相対湿度変化の関係について実験している。杉材や桐材は他の木材に比較すると、一定相対湿度の下では含水率の温度変化への依存度が高いので、温度変化に対する相対湿度の安定性がより高くなる。密度の高い桐材を使用することによって水蒸気拡散を小さくすることができ、外部の相対湿度変化が内部に伝わりにくくなる。また、外側に漆などを塗装することで、より効果が高まることなどを明かにしている。登石らは桐材、杉材、檜材などを用いて、木材の吸放湿特性に関して実験を行っている [55]。その結果、桐、杉、檜などの比較的比重の小さな樹種は、含水率が温度および相対湿度に対して高い依存性を示し、また温度上昇時の水分の放出速度も比較して早い。したがって、これらの樹種が相対湿度あるい温度変化に対する緩衝材として優れていることを示している。

これら一連の研究により、木質保存箱の内部における相対湿度環境があきらかにされてきたが、さまざまな周期をもって変化する屋外の環境に対してどの程度の緩衝能力を示すかについて、定量的な研究が必要である。神庭は、伝統的な保存箱が示す相対湿度変化に対する緩衝作用についてその定量化を行った [56, 57]。外部相対湿度の変化に対して示す内部相対湿度変化を観察し、箱の木材の水蒸気拡散現象による相対湿度の緩和効果を式 (13) で求めた。

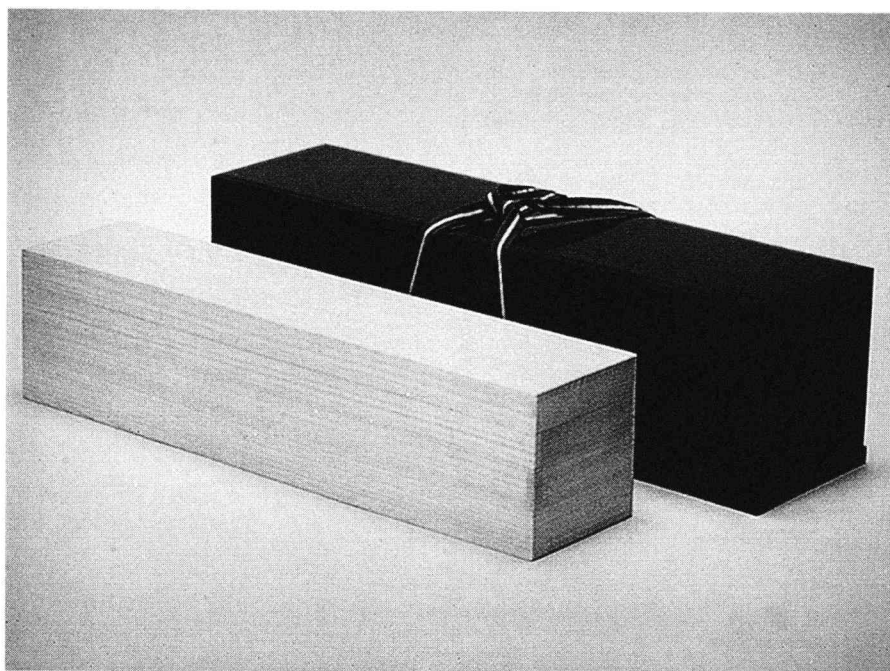


Photo.4 Traditional storage cases of "Daisashi"-case on right and "Inro"-case on left. (伝統的な保存箱。右が台差し, 左が印籠) [56]

$$C = \frac{C_0}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \quad (13)$$

C : 箱内部の相対湿度の変動幅 (%RH)

C₀ : 外気の相対湿度の変動幅 (%RH)

ω : 外気の相対湿度の変動周期 (day)

τ : 相対湿度変化に対して箱が示す緩和時間 (day)

それによれば、保存箱として丁寧に製作された桐箱は、内側の相対湿度変動を外気相対湿度の日変動と週単位の変動に対して、それぞれを1/10以下と1/5以下に抑えることはできるが、季節変動にはそのまま追従する。相対湿度変化のある室内に設置した保存箱の相対湿度変化は、式(13)と一致することから、緩和効果を定量的に推定できることを明かにしている。さらに、精密に製作した伝統的な木製保存箱は、桐や杉材が示す吸放湿特性によって特徴づけられることを再確認した。つまり、含水率の温度および相対湿度への依存性が他の木材に比べ高いこと、温度変化に対する吸放湿速度が速いこと、水蒸気拡散速度が小さいことなどによって、安定した相対湿度環境が作られることになる。箱内の環境が明らかになったことで、長期間にわたる環境制御を考える場合の重要な指針が得られたと考える。

③……………展示ケース内の環境

資料が展示・公開される空間は、空調設備の影響によって温湿度に規則的な変化が生じたり、外気の影響によって急激な変化が生じるなど、保存にとって不適当な温湿度環境になり易い傾向にある。その結果として、収蔵・保管中の資料にはなかった亀裂や歪みなどの物理的変形が展示期間中に生じることになる。このような影響を軽減し、安全な展示を行うために、展示ケースを用いた局所的な環境調節が長年にわたり試みられてきた。ケースの利用は、博物館の展示と同時に18世紀頃から始まったものと考えられるが〔99〕、ケースによる環境の調節が明確に意識されるのは今世紀に入ってからであろう。

展示ケースは、資料の鑑賞を妨げない外観が要求される。そのためには、ガラスなどを用いて開口部分を広くし、その存在が鑑賞者に意識されないようにしなければならないので、ケースの断熱性能は必然的に小さくなる。したがって、展示ケースの内部の温度変化は周囲の展示室の温度変化とほぼ同じ傾向を示すと考えてよいであろう。一方、ケース内の相対湿度変化は、展示ケースの材質や展示資料の吸放湿性能、あるいはケースの気密性などに関係する緩衝作用により、周囲に比べて小さくなると考えられる。

G. Thomsonは資料を保存する環境をClass 1とClass 2の二種類に分類し、Class 1は相対湿度を通年 $\pm 5\%RH$ 以内に維持した環境、Class 2

は黴の発生が心配される70%RH以下から資料が固くて脆くなる40%RH以上の間を変動する環境とそれぞれ定義づけた〔71〕。さらに、相対湿度の調節方法に関して、維持管理が容易、購入および維持に要する費用が安い、場所をとらない、エネルギーを使いすぎない、展示の障害にならない、セキュリティを壊さないことなどを同時にあげて指針を示した。展示ケースによる環境調節は、安定した適切な相対湿度を維持するための方法論を中心に、多くの事例がClass 2の状態、



Photo.5 One of the panels of the 'Trinity College Altarpiece', Scottish National Gallery, is shown as it appeared after installation in the new case. (調湿ケースに入れられたパネル絵画)〔58〕

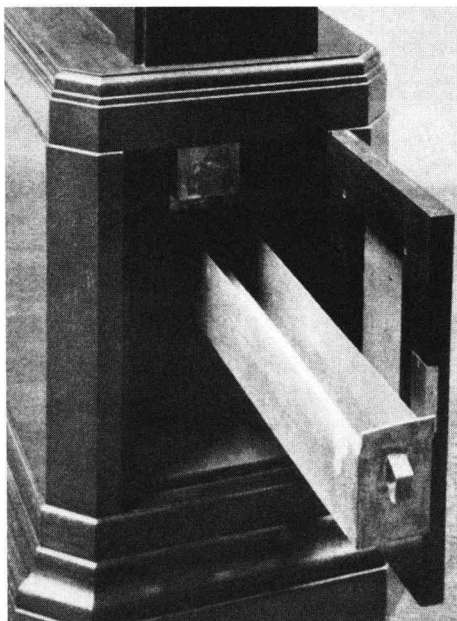


Photo.6 Salts are held in zinc trays set into the pedestal. (亜鉛板のトレーに入れた塩類をケースに納めてある)〔58〕

ごく希に Class 1 の状態が実現され、発展してきたと言える。

塩類を用いた調節

展示ケース内の相対湿度の積極的な調節は、塩類化合物を用いた方法によって始まった。S. Cursiter は、15 世紀フランドルの板絵の展示のために、硫酸亜鉛の水和物の結晶 ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{ZnSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) を用いた調節を試みた (Photo. 5, 6) [58]。Hugo van der Goes 作の板絵の両面が見えるようにした、厚さ 18mm のナラ材とガラスを部材に用いた展示ケースで、板絵に対する空気量は少なく、ケースの部材同士の隙間が小さくなるように配慮してある。内部の相対湿度は適当な大きさの測定装置がなかったために記録されていないが、硫酸亜鉛が密閉空間で示す 15℃、55%RH の状態に近い、比較的安定した環境であろうと推測できる。

S. Sack は、容積 5.86m³ の展示ケースに、4 L の水に溶かした硝酸マグネシウム ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) の飽和水溶液を置き、送風機が 26℃ で作動するようにサーモスタットを取り付け、相対湿度の調節を行っている (Fig. 9)。冬期、ケース周辺の環境は 21～26℃、15～40%RH であるが、ケース内部は 50～52%RH に維持できたと報告している [60]。E. Astrup は、Tertiary Butanol - 真空凍結乾燥法で処置したヴァイキング船の展示ケース内の相対湿度を、硝酸カルシウム ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) を用いて調節している。硝酸カルシウムは密閉ケース内では 18.5℃ のと 56%RH を示すが、実際のケースは乾燥期に 48%RH (周辺 25%RH)、多湿期に 62%RH (周辺 85%RH) を示している [94]。

塩類を用いた湿度調節に対する総括として、塩類結晶による調節は小さな展示ケースに限られ、温度依存性が高いこと、かつ目的の相対湿度を示すように結晶を調節することが困難であると指摘し、また塩類の飽和水溶液による調節は簡便で廉価な実用的方法ではあるが、容器の外へ結晶が析出する可能性があるなどの点を Stolow が指摘している [61, 67]。いずれの方法でも、何らかの原因で塩類が資料に付着し、資料表面が腐蝕する危険性があるので、使用に当たってはその配置に十分な検討が必要であろう。また、調湿効果がケースの気密性に大きく影響を受ける点に注意しなければならないと同時に、ケースの容積に対する塩類結晶あるいは水溶液の使用量を求める必要がある。

高い気密性を前提とした相対湿度調節

R. Organ は、大英博物館の劣化したガラス資料を低湿環境下で収蔵・展示するために、シリカゲルを用いた湿度調節を試みた。容積 2.26m³ の木製ガラスケースの底部に 5kg/m³ のシリカゲルを入れ、送風ファンを用いて緩やかに空気を循環させた。乾燥したシリカゲルを 10 日間から数週間ごとに交換することにより 35%RH を維持することに成功している [59]。R. Brill は、劣化したガラス資料は 40～60%RH の環境が適切であると示し、展示ケース (0.068m³) にシリカゲル (22kg/m³) を入れて、内部の相対湿度を 42～45%RH に維持した [64, 69]。M. Diamond は、板絵 (0.22kg) を壁掛け型の展示ケース (0.0137m³) に入れ、Thomson が示した密閉空間内での温湿度変化の関係 ($\Delta H = \Delta T/3$) を期待したが、結果として密

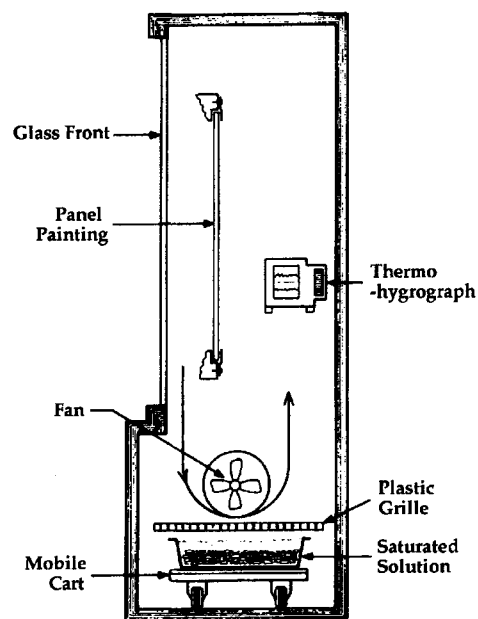


Fig.9 The use of a saturated solution of magnesium nitrate to maintain a level of 50-53%RH. (硝酸マグネシウムの飽和水溶液を用いて相対湿度を 50～53%RH に安定させる) [67]

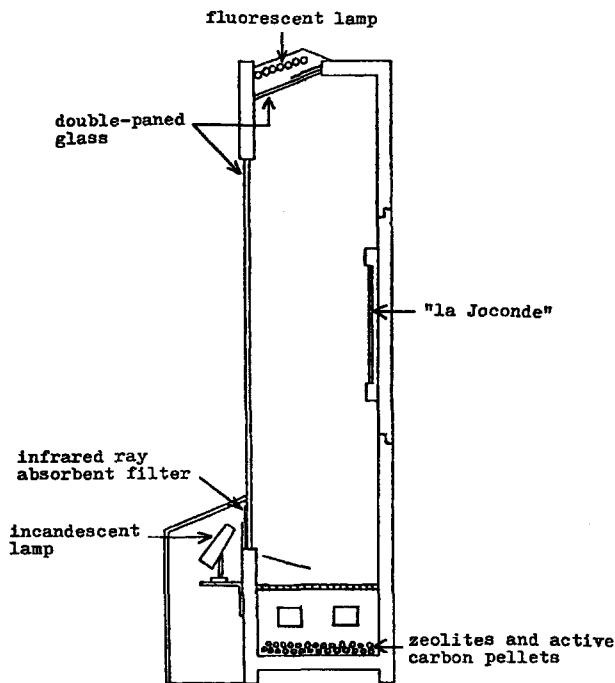


Fig.10 Structure of the showcase of "la Joconde".
(モナリザ展示のための展示ケース) [70]

閉度が低いために相対湿度の変化が大きいことが判明した。そこで32kg/m³のシリカゲルを入れることによって、ケース内の相対湿度変化をケース外に比べ1/4に小さくすることができたと述べている [63]。

登石らはモナリザ展のための展示ケース (10m³) の相対湿度の安定を図った (Fig. 10)。展示ケースは十分な断熱性能をもち、高い気密性により水蒸気拡散などが無いとの判断から、梱包ケースの温湿度変化に関する登石の式 (1) を用いて調湿剤の量を決定した。1kg/m³のゼオライトを入れることにより、温度変化による相対湿度変化が1/10程度に軽減されとしている [65, 70]。実際の相対湿度は極めて安定し、Class 1の環境を実現しているが、その主たる要因は調湿剤の効果もさることながら、ケースの気密性の高さであると考えられる。

展示ケースの空気交換率

Stolowは密閉型の梱包ケース内の温湿度変化 [9]

を表した計算式を、展示ケース内の温湿度変化の予

測に応用している [61]。展示ケースの容積が展示物よりも圧倒的に大きい場合 (500 : 1)、温度と相対湿度は反対方向に変化するが、吸放湿性の高い展示物の割合が大きくなると (5 : 1)、温湿度は同じ向きに変化している [67]。しかし、大部分の展示ケースは空気交換を行うものであると考えられるので、そのまま実際のケースには適用できない。T. Padfieldは水蒸気拡散、温度変化、気圧変化などの影響を基に、ケース内の相対湿度変化を表す式を示している。

$$H = H_0 \{1 + \exp[-(DA t / Vx)]\} \quad (14)$$

H : ケース内の相対湿度 (%RH), H₀ : ケース外の相対湿度 (%RH),

D : ケースの部材の拡散係数 (cm²/s), A : ケースの内表面積 (cm²),

V : ケースの体積 (cm³), x : 材質の厚さ (cm), t : 時間 (s)

伝統的な木製の部材を用いた展示ケースの場合は、空気はほぼ1/dayの割合で交換し、隙間を丁寧に塞ぐことで5/yearの割合まで改善が可能だとしている。Thomsonは、展示ケース内部の相対湿度が外部からの影響をどの程度受けるかを表す目安として湿度半減期 (Hygrometric-half time) の概念を導入した。ケース内の相対湿度変化を小さくするために、調湿剤を用いてケースの湿度半減期を約半年に延長することを提案している [66]。これによって実現される環境は、ほぼClass 1に相当するものとなる。ケースはその構造によってそれぞれに固有の空気交換率をもち、空気交換率の大きさが外部からの影響の受け易さを示す。気密性を高めて空気交換率を小さくすれば、内部

の相対湿度は安定する方向に向かう。湿度半減期は空気交換率から求めることができ、交換率が小さいほど半減期が大きい。空気交換率を変えない場合、調湿剤の利用によって相対湿度を安定させることが可能で、これに対応した湿度半減期が得られる。

$$H = (H_0 - C) e^{-\kappa t} + C \quad (15)$$

H : ケースの相対湿度 (%RH), H_0 : ケースの初期相対湿度 (%RH),
C : 外部の相対湿度 (一定) (%RH), κ : ケースの減衰係数 (day^{-1}),
t : 時間 (day)

となる。Thomson は κ を単位時間当りに行われる空気の交換回数としている。この場合には1日当たりの交換回数となる。ケースの湿度が外部の湿度との中間点に達する時間を湿度半減期 $t_{\frac{1}{2}}$ とすると、

$$\begin{aligned} \exp[-\kappa t_{\frac{1}{2}}] &= \frac{1}{2} \\ t_{\frac{1}{2}} &= \frac{\ln e}{\kappa} = \frac{0.693}{\kappa} \end{aligned} \quad (16)$$

Bkg の調湿剤を使用することによって新たな減衰係数 κ^* は式 (17) から得られる。

$$\therefore \kappa^* = \kappa \frac{0.173}{MB + 0.173} \quad (17)$$

M : Specific Moisture Reservoir ($\text{g}/(\text{kg} \cdot \%RH)$)

B : 調湿剤の重量 (kg)

M (SMR) 値は相対湿度変化1%RHについて調湿剤1kgが吸収または放出する水分量をgで表したもので、大きいものほど調湿剤の効果が高いことを示す数値である。新たな湿度半減期 $t_{\frac{1}{2}}^*$ は、

$$\begin{aligned} \therefore t_{\frac{1}{2}}^* &= \frac{0.693}{\kappa^*} \\ &= \frac{0.693 (MB + 0.173)}{0.173 \kappa} \\ &\approx 4MB/\kappa \end{aligned} \quad (18)$$

となる。木材とガラスで構成される一般的な展示ケースの空気交換率をほぼ1/dayと推定すると[62], $20\text{kg}/\text{m}^3$ のシリカゲル (SMR = 2) をケース内に設置することによって半減期は160日になる。このようにして、ケース内の相対湿度変化は、ケースの空気交換率および内部の調湿剤の性能と重量によって記述することができることが示された。M. Cassar [84] は、気密性に対する配慮がなく空気交換が起こり易い場合は $\kappa > 1/\text{day}$, 比較的丁寧に製作された場合は $\kappa = 1/\text{day}$, 空気

交換を小さくするような工夫を行ったケースは $\kappa < 1/\text{day}$, 気密性を優先した密閉型のケースは $\kappa < 5/\text{year}$ と, それぞれのケースを空気交換率に基づいて分類している。

このように, 推定の域を出ない展示ケースの空気交換率に関して, B. Ramer [74, 82] らは Graham の法則を用いて, ケースに対する酸素あるいは二酸化炭素の減衰率の測定から相対湿度の減衰率の求め方を示し, さらに式 (17), (18) を一般化している。

$$\frac{\kappa_1}{\kappa_2} = \sqrt{\frac{MW_2}{MW_1}} \quad (19)$$

κ_1, κ_2 : 気体 1, 2 に対する減衰率 (day^{-1}),

MW_1, MW_2 : 気体 1, 2 の分子量

$$\kappa^* = \kappa \frac{\rho_0}{\rho_0 + Ba} \quad (20)$$

$$t_{\frac{1}{2}}^* = \frac{0.693 (Ba + \rho_0)}{\rho_0 \kappa} \quad (21)$$

ρ_0 : 飽和水蒸気量 (g/m^3), a : $M/10$

G. Martin [102, 105] らは, トレーサーガス試験 (Tracer Gas Test) 法を用いて測定を実施し, 空気交換率の測定法の標準化を目差している。Tracer Gas Test 法は, 気体として二酸化窒素を用い, ファンでケース内を攪拌しながらノズルを通して二酸化窒素を一定量濃度まで注入し, 自然換気によって濃度が低下する過程を赤外吸収スペクトル法で測定する方法である。ヴィクトリア・アンド・アルバート博物館の展示ケースを試験したところでは $0.08 \sim 3.36/\text{day}$ の換気率を示している。神庭は, 展示ケースの空気交換率を入館者によって放出される二酸化炭素濃度の日変化から式 (13) を用いて求め, ケース内部に使用された吸放湿性の物質によって見かけの空気交換率が小さくなることを示した。目的の相対湿度に調節した空気を展示ケースに送風する方法を提案しているカナダ国立文化財研究所 (CCI) の R. Lafontain らは, 機械の能力が展示ケースの容積と空気交換率に依存することから, ケースの構造と交換率について調べている。隙間が 0.1mm 以内のときは, 拡散現象が支配的で $\kappa = 0.1/\text{day}$ 以下, 0.3mm 以上のときは対流現象が支配的で $4/\text{day}$ 以上の交換率になるとしている [89]。

S. Michalski はケースの空気交換率に関するこれまでの研究をさらに進め, 空気交換率 $\kappa = 1/\text{day}$ は空気交換が比較的頻繁に起こっている状態であると認識する必要があることを指摘している。また, 改良によって交換率を $\kappa = 0.03/\text{day}$ まで小さくすることは十分に可能であり, その場合には相対湿度の季節変動は, 調湿剤を使用しなくても相当程度に小さくなるとしている [106]。

**空気交換率 $\kappa = 1/\text{day}$
を想定したケースの調湿**

Thomson は, 展示ケースの湿度半減期を 150 日程度に延長するために, 約 $20\text{kg}/\text{m}^3$ のシリカゲルが必要であると述べている。その場合の前提

となる条件は、ケースの空気交換率が $\kappa = 1/\text{day}$ であることである。Thomsonの論文が発表された後は、ほとんどの研究事例が $20\text{kg}/\text{m}^3$ をシリカゲルの使用量に対する指針として用いている。しかしながらそれらの多くは、実際にはケースの空気交換率が測定されていない場合が多いので、必ずしも $20\text{kg}/\text{m}^3$ が適当であるかどうかは判断できない。Lafontaineはシリカゲルの利用に当たっては、ケースの空気交換率、調湿剤の平衡含水率、調節方法、設置場所などに関する考慮の必要性を述べている〔90〕。ここでも、隙間を小さくするように配慮したケースの空気交換率は $\kappa = 1/\text{day}$ 程度であると想定している。

De Guichenは、楽器を展示するケースにシリカゲル $20\text{kg}/\text{m}^3$ を利用することによって日変動は1%RH程度、月間の変動は3%RH、年間の変動が5%RHの範囲に抑えることできたと報告している〔85〕。さらに、シリカゲルが有効に作用するケー

スの容積の限界は $4\sim 5\text{m}^3$ であるとしている〔78〕。F. Schweizerはガラス、アルミニウム、プラスチックを使用した実験用の展示ケースを用いて、効果の程度を試験している〔88〕。内部の短期的な変動幅は3%RH以内を示し、長期的な変動をみると40~58%RHを示している。結果として、相対湿度を60%RH前後に維持するとした場合、外気の相対湿度変動に年較差があるときは調湿剤の管理の必要性が小さくなるが、外気の相対湿度が高低のどちらかに偏っている場合には、調湿剤の管理の必要性が高まる点を指摘している。この点については、既にThomsonがシミュレーションの結果として述べているところである〔66〕。この他にも、Bradleyらがシリカゲル $20\text{kg}/\text{m}^3$ の有効性について報告している〔99, 101〕。ケースの気密性が具体的に把握できていないが、比較的隙間等の少ない状態と考えられるケースでは、シリカゲル $20\text{kg}/\text{m}^3$ の指針が妥当な数値であることは、多くの事例から判断できる。

シリカゲル $20\text{kg}/\text{m}^3$ に対して懐疑的な事例はAshley-Smithらによる報告で、短期的な変動は抑制可能であるが、長期的なものについてはほとんど効果がないとしている〔86〕。ただし、シリカゲルの調節方法、設置場所、ケースの気密性などに関して不明な点が多い。

調湿剤の性能

調湿剤を効果的に利用するためには、調湿空気が展示ケース内に均一に分布する必要がある。そのためには調湿剤の設置場所と空気の循環、つまりケースの構造が重要であることが、実際の応用の面から指摘されている〔90〕(Fig. 11)。

一方、調湿剤そのものの性能を高める研究やより高性能な調湿剤を求める研究も実施されており、簡便な相対湿度調節法として調湿剤を積極的に利用するためには重要な分野である。対象としては、相対湿度変化に対する応答速度、ヒステリシス、M (SMR) 値 (相対湿度変化1%RHについて調

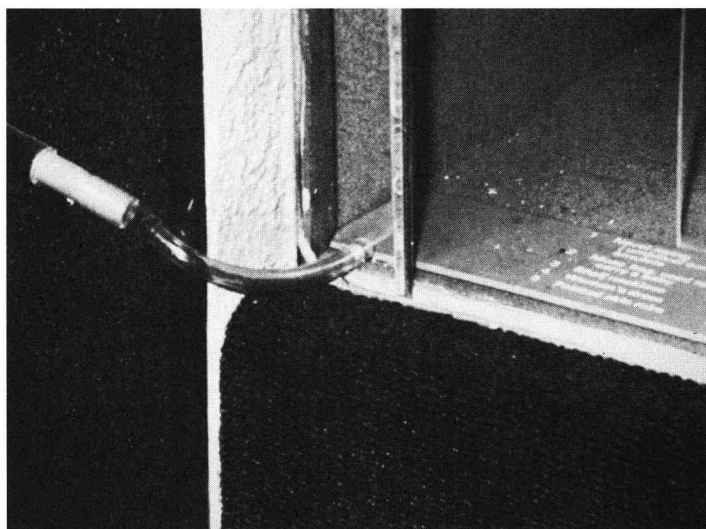


Photo.7 Close-up of four-millimetre-diameter plastic tube that supplies RH-controlled air to a wall display case in the National Museum of Man, Ottawa. The acrylic strip through which the hole is drilled was fitted during installation of the module to improve the air-tightness of the original glass front. (展示ケースに接続された4mm径のプラスチックチューブを通じて、調湿した空気を送る。国立人類博物館、オタワ)〔89〕

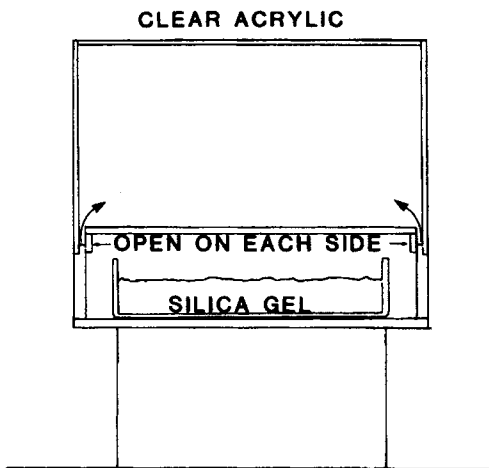


Fig. 11 Example of suitable case design which allow transfer of moisture from silica gel to the upper part of the case. (調湿された空気がケースの上部に行き渡るように工夫を施した例) [90]

湿剤 1kg が吸収または放出する水分量を g で表したもので、大きいものほど調湿剤の効果が高いことを示す数値) などがあげられる。

見城は、ニッカペレット単体とそれを和紙の繊維に漉き込んだものについて、相対湿度変化に対する応答速度を比較している。温度変化を与えた時に相対湿度の変化が変化前の状態に回復するのに要する時間は、和紙の使用によって 5～12 時間から 1～1.5 時間に短縮されることから、応答速度の改善が図れるとしている [76, 81]。S. Weintraub, 三浦らは各種の調湿剤の応答速度、ヒステリシス, M (SMR) 値について詳細に検討している。0～100%RH の相対湿度範囲に対して、実際に使用する相対湿度範囲 (例えば 40～70%RH) での性能を比較すると、ヒステリシスは小さく現れ、応答速度も速くなると指摘している。使用する相対湿度範囲内における M (SMR) 値を DM (M value within Designated RH range) と表し、シリカゲル (RD, ID, III), ニッカペレット, B タイプゲルなどについて DM 値を求めている [77, 79]。三浦はさら

に、 M (SMR) 値は展示ケースの静的特性に直結し、またケースの動的特性は調湿空気がケース内に均一に分布する速度によって決定されることを示している [80]。神庭は、 M 値の動的特性に関して検討を行った。空気交換率 κ とは本来独立な変数である M 値が、展示ケースの中ではケースの空気交換率が大きくなると共に水蒸気の拡散速度の影響を強く受けるようになるため、その実効

値が小さくなることを実験により示した [98]。また、工業製品としての調湿剤に代わるさまざまな材料を求めて、乾燥穀物、木材、動植物繊維などの応答速度、ヒステリシス, M (SMR) 値などの静的特性の検討を実験により行った。その結果、 M (SMR) 値は 1～2 の範囲内で、応答速度は工業製品より優れたものがあることなど、多くの材料に関して基本的な水分特性を明かにした。調湿剤としての実用化にはさらに多くの検討が必要だが [92]、種々の材質からなる文化財と相対湿度との関係を考えるときには基本的な特性として有用なものとなる。

その他、調湿剤が調湿空気を酸性に偏らせる可能性の有無について、De Witte らはシリカゲル中に存在する塩化コバルト ($CoCl_2$), 硫酸ナトリウム (Na_2SO_4) などに注目しながら実験を行っているが、明確な結果は得られていない [94]。

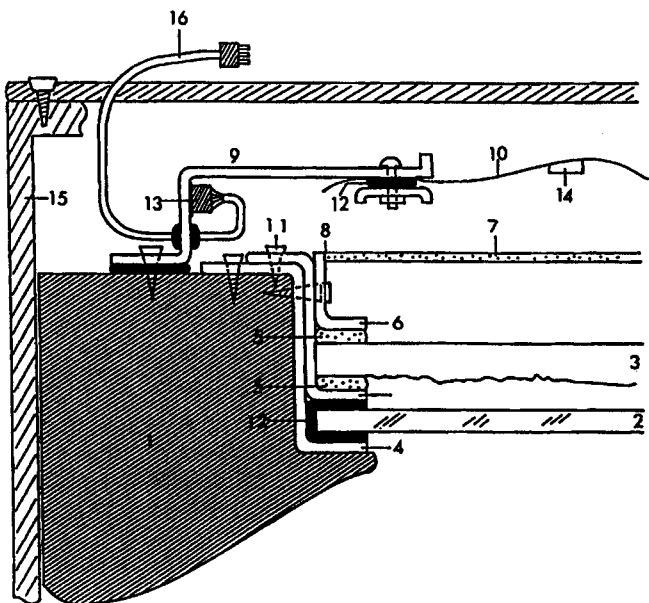


Fig. 12 Cross-section of a designed airtight case. 1 wooden frame, 2 glass, 3 painting, 4 metal frame, 5 felt, 6 metal fitting, 7 ART-SORB, 8 thread, 9 top, 10 plastic sheet, 11 nail, 12 silicon gasket, 13 electric sensor, 14 humidity indicator, 15 wooden cover, 16 cord. (密閉型額縁の断面図) [96]

密閉ケース

密閉型展示ケースの使用は、Stolow が製作した板

絵を収納・展示できる額縁型の密閉ケースが最初であろう。このケースは、作品を国外などに輸送する際、輸送中および展示中の相対湿度を安定させるために特別に気密性を考慮し、かつ微小な空間に大量の調湿剤を封入してあるのが特徴である。実際、輸送中および展示期間中の相対湿度変化は微々たるものであった〔14〕。Rotheらは展示用にアクリル製の額縁型の密閉ケースを作製し、 $80\text{kg}/\text{m}^3$ のアートゾープを封入して、ケース内の相対湿度を14～16%RH程度高く維持している〔91〕。登石らも、アートゾープを封入した額縁型の密閉ケースを作製したが、内部に気圧変化による大気の流入を防ぐために、エアバッグを取り付けて気圧差を軽減する工夫をしている。エアバッグの効果はあるとしている〔96〕。

まとめ

文化財資料が博物館や美術館の間を移動する限り、輸送過程の環境変化によって生じる資料の劣化は避けられない。現在、移動する距離は長く、頻度はますます多くなってきており、梱包ケース内の資料の安全性を一層図らなければならない。1940年代から半世紀以上にわたる梱包ケースに対する保存科学的研究により、温度、相対湿度、衝撃、振動に関する基礎的研究は高い水準に達したものと考えられる。また、多くの事例報告からも明らかなように、実際の応用面でもケース内環境は資料の損傷が少ない環境へと確実に変わりつつあると言える。梱包、輸送に関する保存科学は、世界的な規模の文化交流を支え、資料の利用・活用の促進につながる重要な研究領域である。

密閉空間内における物質間での水分移動については、まだ完全に理解されたとは言えず、材質の吸放湿特性、重量などが微量な空気を介した水分の授受にどの様に影響するのか検討が必要である。それによって、梱包ケース内での調湿剤の利用の功罪が一層明確になるものと考えられる。また、環境の変化が与える影響の測定とその評価は、現在研究が最も遅れている分野であり、研究の早急な着手が望まれるところである。梱包ケースの設計、輸送手段について世界共通となる指針をまとめ、それらの普及および梱包ケース内環境の特殊性に対する啓蒙を図る必要があるだろう。

わが国に限って言えば、梱包ケースによる文化財の輸送を世界的にみて最も多く利用している国と考えられるが、諸外国に比べこの分野の研究事例が極度に少ない。世界各地の文化財を利用する側の立場として、安全な輸送方法の確立は国家的な責任であると考ええる。こうした中で、事例は少ないが、温湿度に関する研究は世界的水準であろうと考えられる。しかし、衝撃、振動についてはこれまで研究例は1件もなく、輸送業者に完全に任されていると言える。従来、日本の梱包は丁寧かつ慎重な取り扱いのために安全性が高いと言われてきたが、展覧会の激増と共に、輸送の要求量と梱包の熟練者との数の間にアンバランスが生まれていることは今日いぬめない事実である。したがって、決して安全な梱包ばかりとは言えない状況であると考えられる。ここに必然的に保存科学的研究の必要性が生まれるわけである。わが国の研究者による積極的な取り組みを期待したい。

保存箱に関しては、丁寧に製作されたものであるならば、その湿度半減期（拡散現象などにより保存箱に外気の相対湿度が伝達される速度）は2日から6日の間にある。したがって、外部の相対湿度の日変動は箱の内部では10%以下、半旬変動は20%以下に緩和される。年変動については緩和効果がなく、そのまま追従する。箱の板が厚く、外側に漆などの塗装がある箱の方が高い緩和効果

を示すことから、温湿度変化に対して高い湿度緩和効果を持つ保存箱は、桐材を用い、外気に触れる外側は漆などの防湿効果のある塗装を施し、内部は塗装をしないで木地のままがよいと言える。わが国における資料保存の伝統は、保存箱などを主に用いた相対湿度環境下で行われてきた。保存箱はさらに蔵などに保管され、箱と蔵との複合的な緩和効果によって箱内部の相対湿度変動は一層小さくなっているものと考えられる。このような相対湿度環境が資料の劣化の抑制に有効であったと評価できるならば、収蔵施設における相対湿度調節の在り方として導入できる可能性がある。特に、許容される相対湿度変動の範囲を導き出すために、一つの基礎的条件を与えるものと思われる。

エアータイト型展示ケースと換気型展示ケースとを比較すると、前者の方が相対湿度変動が圧倒的に小さい。エアータイト型は外部湿度の日変動、1週間程度の周期変動にはほとんど追従することなく、ほぼ一定である。1年を周期にする季節変動に関しては数%RHの変化が見らる。一方、換気型は外気湿度の日変動および1週間程度の周期変動をある程度に緩和するが、1年を周期にする季節変動には追従している。この相違は、ケースの空気交換率による。換気型展示ケースであっても、ケース内部に調湿剤や塩類を効果的に配置することによって相対湿度の安定化は達成できる。

(国立歴史民俗博物館情報資料研究部)

引用文献

- [1] Rosegrant, R.G., 'Packing problems and procedure', *Technical Studies in the Field of Fine Art*, vol. X, No. 3 (1942), 138-156.
- [2] 登石健三, 見城敏子: 密閉梱包の湿度調節, *古文化財の科学*, 12 (1956), 28-26.
- [3] 堀岡邦典: 材質改良の基礎としての木材の材質について, *林業試験場報告*, 68, 15-66 (1956).
- [4] Toishi, K., 'Humidity control in a closed package', *Studies in Conservation*, 4 (1959), 81-87.
- [5] Toishi, K., 'Relative humidity in a closed package', *Recent Advances in Conservation*, 13-15, 1963.
- [6] Stolow, N., 'Some studies on the protection of works of art during travel', *Recent Advances in Conservation*, 9-12, 1963.
- [7] Temporary and Travelling Exhibition, UNESCO, 1963.
- [8] Thomson, G., 'relative humidity-variation with temperature in case containing wood', *Studies in Conservation*, 9 (1964), 153-169.
- [9] Stolow, N., *Controlled environment for works of art in transit*, Butterworths, 1966.
- [10] Toishi, K., 'Jet transport of art objects', *Preprints of the IIC conference on Museum Climatology*, 41-44, 1967, london.
- [11] Stolow, N., 'Standards for the care of works of art in transit', *Preprints of the IIC conference on Museum Climatology*, 271-284, 1967, London.
- [12] Gordon, J., 'Packing of Michelangelo's 'Pieta'', *Studies in Conservation*, 12 (1967), 57-69.
- [13] Stolow, N., 'Environmental control during transport of an early italian painting for Canada to Japan', *Preprints of the 3rd Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, 1/1, 1972, Madris.
- [14] Cannon-Brookes, P., 'The transportaton of a consignment of paintings from Cape Town to Southampton by sea', *Preprints of the 5th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, 78/12/2, 1978, Zagreb.
- [15] Stolow, N., *Conservation Standards for Works of Art in Transit and Exhibiton*, Unesco, 1979.
- [16] Stolow, N., 'Care of works of art in transit and on exhibition: review and assessment', *Preprints of the 6th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, 81/12/1, 1981, Ottawa.
- [17] Staniforth, S., 'The testing of packing cases for the transport of painting', *Preprints of the 7th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, 84/12/7, 1984, Copenhagen.
- [18] Staniforth, S., 'Packing: A case study', *National Gallery Technical Bulletin*, 8(1984), 53-62.
- [19] Green, T., Hackney, T., 'The evaluation of a packing case for paintings', *Preprints of the 7th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, 84/12/1, 1984, Copenhagen.
- [20] Green, T., 'Shock and vibration-Test results for framed paintings on canvas supports', *Preprints of the 8th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, 585-606, 1987, Sydney.
- [21] Sitwell, C., 'Vibration test results on an air ride suspension vehicle and design considerations for a packing system',

-
- Preprints of the 8th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, 601-596, 1987, Sydney.
- [22] Hackney, S., 'The dimensional stability of paintings in transit', *Preprints of the 8th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, 597-600, 1987, Sydney.
- [23] Willson, P., 'Mathematical predictions of transit case performance; "Topplability", thermal insulation, weight and volume', *Preprints of the 8th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, 617-619, 1987, Sydney.
- [24] Stephenson-Write, A., White, r., 'Packing: An updated design, reviewed and tested', *National Gallery Technical Bulletin*, 11 (1987), 36-41.
- [25] 神庭信幸：輸送中に生じる梱包ケース内の温湿度変化、古文化財の科学, 34(1989), 31-37.
- [26] Kamba, N., 'Variations in relative humidity and temperature as measured in a packing case', *Preprints of the 9th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, 405-409, 1990, Dresden.
- [27] Cannon-Brookes, P., 'The transportation by sea from Southampton to Cape Town of oil paintings in a container with environmental monitoring', *Preprints of the 9th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, 401-404, 1990, Dresden.
- [28] Richard, M., 'Packing delicate art objects for transit', *Preprints of the 9th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, 410-414, 1990, Dresden.
- [29] Saunders, D., Clarke, R., 'Monitoring the environment within packing cases containing works of art in transit', *Preprints of the 9th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, 415-422, 1990, Dresden.
- [30] Sturman, S., Ozone, J., 'The courier experience', *Preprints of the 9th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, 423-427, Dresden, 1990.
- [31] Saunders, D., Sitwell, C., Staniforth, S., 'Soft pack, The soft option', in *Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings*, National Gallery of Art, Washington DC, 311-321, 1991.
- [32] Richard, M., 'Control of temperature and relative humidity in packing cases', in *Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings*, National Gallery of Art, Washington DC, 279-297, 1991.
- [33] Richard M., 'Foam cushioning materials: Techniques for their proper use', in *Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings*, National Gallery of Art, Washington DC, 269-278, 1991.
- [34] Green, T., 'Vibration control: Paintings on canvas supports', in *Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings*, National Gallery of Art, Washington DC, 59-66, 1991.
- [35] Green, T., 'Performance criteria for packing', in *Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings*, National Gallery of Art, Washington DC, 49-57, 1991.
- [36] Green, T., 'A cushioned transit frame for paintings', in *Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings*, National Gallery of Art, Washington DC, 37-48, 1991.
- [37] Hackney, S., Green, T., 'Packing case designs', in *Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings*, National Gallery of Art, Washington DC, 69-77, 1991.
- [38] Marcon, P., 'A circular slide rule for protective packing design', in *Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings*, National Gallery of Art, Washington DC, 93-106, 1991.
- [39] Marcon, P., 'Shock, vibration, and the shipping environment', in *Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings*, National Gallery of Art, Washington DC, 121-132, 1991.
- [40] Marcon, P., 'Shock, vibration, and protective package design', in *Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings*, National Gallery of Art, Washington DC, 107-120, 1991.
- [41] Murray, A., Green, R., Mecklenburg, M., Fortunko, C., 'Nondestructive evaluation of works of art', in *Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings*, National Gallery of Art, Washington DC, 249-260, 1991.
- [42] Mecklenburg, M., Tumosa, S., 'Mechanical behavior of paintings subjected to changes in temperature and relative humidity', in *Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings*, National Gallery of Art, Washington DC, 173-216, 1991.
- [43] Mecklenburg, M., Tumosa, S., 'An introduction into the mechanical behavior of paintings under rapid loading conditions', in *Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings*, National Gallery of Art, Washington DC, 137-171, 1991.
- [44] Kamba, N., Nishiura, T., 'Measurement of the dimensional change of wood in a closed case', *Preprints of the 10th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, 406-409, 1993, Washington.
- [45] 神庭信幸, 西浦忠輝：密閉空間に置かれた木材の温湿度変化にともなう伸縮と調湿剤の作用, 古文化財の科学, 38(1993), 20-27.
- [46] Burmester, A., Muller, M., Schwemer, F., 'Locating transportation damages by digital imaging: Two case studies', *Preprints of the 10th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, 401-405, 1993, Washington.
- [47] 神庭信幸, 田中千秋：輸送中の梱包ケース内における温湿度環境と調湿剤の効果, 古文化財の科学, 38(1994), 28-36.
- [48] Toishi, K., Gotoh, T., 'A note on the movement of moisture between the components in a sealed package', *Studies in Conservation*, 39(1994), 265-271.
-

-
- [49] 神庭信幸, 田中千秋: 梱包ケースの断熱と結露の発生, 古文化財の科学, 39(1994), 8-18.
 - [50] Richard, M., 'The transport of paintings in microclimate display cases', *Preprints of the IIC Congress on Preventive Conservation*, 185-189, 1994, Ottawa.
 - [51] Kamba, N., 'Relative Humidity variation and dew condensation within a protective enclosure for glass plates',
 - [52] 喜多村一男: 正倉院の気象, 大阪管区気象台, 1960
 - [53] 永田四郎: 箱内の温度と湿度, 元興寺仏教民俗資料研究所年報, 5(1971), 1-7.
 - [54] Miura, S., 'Characters of the wooden box for conserving picture scrolls with regard to temperature and humidity', *Proceedings of the 1st International Symposium on the Conservation and Restoration of Cultural Property - Conservation of Wood*, 1977, 165-174, Tokyo.
 - [55] 登石健三, 見城敏子: 空気湿度変化緩和材としての木材の樹種による相違, 保存科学, 6(1970), 25-35.
 - [56] 神庭信幸: 相対湿度変化に対する収納箱の緩和効果, 古文化財の科学, 37(1992), 36-45.
 - [57] Kamba, N., 'Perfomance of wooden storage cases in regulation of relative humidity change', *Preprints of the IIC Congress on Preventive Conservation*, Ottawa, 1994, 181-184.
 - [58] Cursiter, S., 'Control of air in cases and frames', *Technical Studies*, 5(1936), 109-116.
 - [59] Organ, R., 'The safe storage of unstable glass', *Museums Journal*, 56(1957), 265-272.
 - [60] Sack, S., 'A case study of humidity control', *Brooklyn Museum Annual*, 59 (1963/64), 99-103.
 - [61] Stollow, N., 'Fundamental case design for humidity sensitive museum collections', *Museum News Technical Supplement*, 11(1966).
 - [62] Padfield, T., 'The control of relative humidity and air pollution in show-cases and picture frames', *Studies in Conservation*, 11(1966)8-30.
 - [63] Diamond, M., 'A micro-micro-climate', *Museums Journal*, 73(1974), 161-163.
 - [64] Brill, R., 'Crizzling - A problem in glass conservation', *Preprints of IIC Congress on the Conservation in Archaeology and the Applied Arts*, Stockholm, 1975, 121-134.
 - [65] 登石健三, 三浦定俊: モナリザ展示に際しての温湿度調整, 保存科学, 14(1975), 1-7.
 - [66] Thomson, G., 'Stabilization of RH in exhibition cases: Hygrometric half - time', *Studies in Conservation*, 22(1977), 85-102.
 - [67] Stollow, N., 'The microclimate: A localized solution', *Museum News*, 53(1977), 52-63.
 - [68] Stollow, N., 'The effectiveness of preconditioned silica gel and related sorbents for controlling humidity environments for museum collections', *Preprints of ICCROM Conference on Climatology*, Rome, 1978.
 - [69] Brill, R., 'The use of equilibrated silica gel for the protection of glass with incipient crizzling', *Journal of Glass Studies*, 20(1978), 100-118.
 - [70] Miura, S., 'Control of climate in a showcase by means of zeolite; Report of the exhibition of "La Joconde"', *Preprints of ICCROM Conference on Climatology*, Rome, 1978.
 - [71] Thomson, G., 'Climate control policy', *Preprints of the 5th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, Zagreb, 1978, 78/18/1.
 - [72] Kuzmitsh, L., Zaitsev, A., 'Protection of works of art by environment', *Preprints of the 5th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, Zagreb, 1978, 78/12/1.
 - [73] Schweizer, F., Rinuy, A., 'Zur Mikroklimatisierung zweier Vitrinen mit Ikonen fur eine temporare Ausstellung', *Maltechnik*, 86(1980), 239-243.
 - [74] Stollow, N., 'Microclimate control for Renaissance and Baroque panel paintings: Some recent experiences', *The Preservation and use of Artistic Cultural Heritage: Perspectives and Solutions*, The Metropolitan Museum of Art, New York, 1980, 37-42.
 - [75] Ramer, B., 'Stabilization relative humidity variation within display cases: The role of silica gel and case design', *Preprints of the 6th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, Ottawa, 1981, 81/18/6.
 - [76] 見城敏子: 湿度調節剤に関する研究(第1報), 保存科学, 20(1981), 1-4.
 - [77] Miura, S., 'Studies on the behavior of RH within an exhibition case. Part (I): The static and dynamic characteristics of sorbents to control the RH of a showcase', *Preprints of the 6th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, Ottawa, 1981, 81/18/5.
 - [78] De Guichen, G., 'Why curators do not use silica gels or the three uses of silica gel', *Preprints of the 6th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, Ottawa, 1981, 81/18/7.
 - [79] Weintraub, S., 'Studies on the behavior of RH within an exhibition case. Part (II): Measuring the effectiveness of sorbents for use in an enclosed showcase', *Preprints of the 6th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, Ottawa, 1981, 81/18/4.
 - [80] 三浦定俊: 環境システムとしての展示ケース, 保存科学, 21(1982), 55-59.
 - [81] Kenjo, T., 'A rapid - reponse humidity buffer composed of Nikka Pellets and Japanese tissue', *Studies in Conservation*,
-

-
- 27(1982), 19-24.
- [82] Michalski, S., 'A control module for relative humidity in display cases', *Preprints of IIC congress on the Science and Technology in the Service of Conservation*, Washington D.C. 1982, 28-31.
- [83] Brimblecombe, P., Ramer, B., 'Museum display cases and the exchange of water vapor', *Studies in Conservation*, 28 (1983), 179-188.
- [84] Cassar, M., 'Report on a survey of the literature on microclimate control in museums', *ICCRUM*, 1983.
- [85] De Guichen, G., Gai, V., 'Control du Climate autour de 197 Instruments de musique', *Preprints of the 7th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, Copenhagen, 1984, 84/17/19.
- [86] Ashley-Smith, L., Moncrieff, A., 'Experience with silica gel for controlling humidity in showcases', *Preprints of the 7th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, Copenhagen, 1984, 84/17/1.
- [87] Ramer, B., 'The design and construction of two humidity-controlled display cases', *Preprints of the 7th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, Copenhagen, 1984, 84/17/46.
- [88] Schweizer, F., 'Stabilization of RH in exhibition cases: An experimental approach', *Preprints of the 7th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, Copenhagen, 1984, 84/17/50.
- [89] Lafontaine, R., Michalski, S., 'The control of relative humidity-Recent development', *Preprints of the 7th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, Copenhagen, 1984, 84/17/33.
- [90] Lafontaine, R., 'Silica gel', *Technical Bulletin of Canadian conservation Institute*, 10, 1984.
- [91] Rothe, A., Metro, B., 'Climate controlled show cases for paintings', *Museum*, 146(1985), 89-91.
- [92] Kamba, N., 'A study of antural materials as RH buffers and application to a showcase', *Preprints of the 8th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, Sydney, 1987, 875-879.
- [93] Astrup, E., 'Is it worth-while re-looking at salt solutions', *Preprints of the 8th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, Sydney, 1987, 853-858.
- [94] Dupas, M., Salies, A., De Witte, E., 'The presence of soluble salts in silica gel', *Preprints of the 8th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, Sydney, 1987, 867-869.
- [95] Newey, H., '17 years of dehumidified showcases in the British Museum', *Preprints of the 8th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, Sydney, 1987, 901-907.
- [96] Toishi, K., Koyano, M., 'Conservation and exhibition of cultural property in the natural environment in the far east', *Preprints of IIC Congress on the Conservation of Far Eastern Art*, 1988, 90-94.
- [97] Hall, M., 'On Display', 1987, *Lund Humphries*, London.
- [98] 神庭信幸：天然素材の湿度調節剤への応用，国立歴史民俗博物館研究報告，12(1987)，139-186.
- [99] Cassar, M., 'Choosing and using silica gel for localised protection in museums', *Preprints of SSCR Meeting on the Environmental Monitoring and Control*, Dundee, 1989, 30-46.
- [100] Brown, J., 'Low humidity environmental control', *Preprints of SSCR Meeting on the Environmental Monitoring and Control*, Dundee, 1989, 88-90.
- [101] Bradley, S., 'Environmental monitoring and control in the galleries of the British Museum', *Preprints of SSCR Meeting on the Environmental Monitoring and Control*, Dundee, 1989, 68-77.
- [102] Martin, G., 'Showcase design', *Preprints of the Meeting on Conservation Science in the U. K.*, Glasgow, 1993, 103-105.
- [103] Ashley-Smith, J., Umney, N., Ford, D., 'Let's be onest-realistic environmental paremeters for loaned objects', *Preprints of IIC Congress on the Preventive Conservation*, Washington D. C. 1994, 28-31.
- [104] Erhardt, D., Mecklenburg, M., 'Relative humidity re-examined', *Preprints of IIC Congress on the Preventive Conservation*, Washington D. C. 1994, 32-38.
- [105] Cassar, M., Martin, G., 'The environmental performance of museum display cases', *Preprints of IIC Congress on the Preventive Conservation*, Washington D. C. 1994, 171-173.
- [106] Michalski, S., 'Leakage prediction for buildings, cases, bags and bottles', *Studies in Conservation*, 39(1994), 169-186.
-

Review of Studies on the Environment of Relative Humidity in Museums (1)

KAMBA, Nobuyuki

Relative humidity gives great influence on cultural property stored in museums. The paper reviews studies on the environment concerning relative humidity in small spaces such as packing cases, storage boxes, and display cases. A large number of measurements for packing cases are focused on just a constant relative humidity before 1970's, and afterwards the concern moved to a constant moisture content of the cultural property. When packing cases are hermetically sealed against moisture diffusion and air exchange, the interior temperature of the cases is influenced by the variation of the ambient temperature. A rise in temperature causes a rise in relative humidity and vice versa. The ratio is $\Delta H / \Delta T = 0.4$ in the case which contains cellulosic materials such as wood and paper. It is the smaller amount of moisture in the air relative to the content that causes this phenomenon.

Some papers pointed out wooden storage boxes regulate relative humidity variation effectively. It depends on the construction, thickness of the wood, and the ratio of interior surface against interior volume of the box. Within well constructed traditional boxes, relative humidity variation is reduced to less than 10% of the ambient daily periodical change, and to less than 20% of the weekly periodical change. However, over a seasonal periodical change, there is no such reduction.

The interior relative humidity of display cases is influenced by the ambient relative humidity. The main cause of relative humidity variations constructed of metal and glass cases is air convection, related to the air exchange rate of the case. Relative humidity variation is controlled by better sealing the cases and by introducing moisture buffering materials in the cases. M values of moisture buffering materials introduced into the display cases are easily affected by the air exchange rates of display cases.