

文化施設における室内空気のアルカリ成分と コンクリート躯体の吸放湿について

赤沼英男¹⁾・神谷清仁²⁾・石川陸郎³⁾・宮野則彦⁴⁾・東山禎夫⁵⁾・宮野秋彦⁶⁾

1. はじめに

博物館をはじめとする文化施設において、文化財の劣化に施設内の空気環境が大きく関与していることは広く知られている。特に空気中のアルカリ成分については、絵画をはじめとする文化財の劣化を促進する因子として早くから注目され、空気中のアルカリ性状判定やその防除に関する研究が行われてきた（登石健三・見城敏子・石川陸郎：1972，登石健三・見城敏子：1975）。短期間にコンクリート躯体を強制的に乾かす「枯らし」や付帯設備による強制換気などは、主に施設内空間に対する対策、すなわち室内空気のアルカリ成分の低減手段として現在も広く用いられている。

ところで、アルカリ成分の発生が主としてコンクリート躯体と室内の相対湿度ならびに温度と相關することは、アルカリ成分が文化財の劣化因子とされた当初から認識されている。これまでの研究結果に基づけば、その成分の一つとしてアンモニアが指摘されてはいるものの（黒坂五馬：1972）、建築学、とりわけ建築材料学並びに建築環境工学分野でのアルカリ成分発生に関する基礎的研究は少なく、建造物自体をも含めた総合的な対策を施すまでには至っていない。このような状況をふまえ筆者らは、アルカリ成分発生の原因解明と建造物を含めた抜本的対策の確立を目的として、某文化施設における施設内空気のアルカリ性状の経年変化とコンクリート躯体内の水分移動についての実態調査を実施し、併せて非定常状態下におけるセメント系内装建材の吸放湿挙動に関する基礎的研究を行った。その結果、従来言われてきたコンクリート躯体打設後の乾燥に伴う水分の蒸発以外に、乾燥後のコンクリート躯体内での冬季の結露または湿潤とその水分の夏季の蒸れ返しによって、長期間に亙る館内高アルカリ性状が引き起こされることが明らかとなった。以下には、調査・研究によって得られた結果について述べる。

¹⁾ 岩手県立博物館：〒020-0102 岩手県盛岡市上田字松屋敷34

²⁾ 愛知工業大学：〒470-0356 愛知県豊田市八草町八千草1247

³⁾ 元東京国立博物館（1997年7月逝去）：〒110-0007 東京都台東区上野公園13-9

⁴⁾ 日本大学生物資源科学部：〒253-0813 神奈川県藤沢市亀井野1866

⁵⁾ 山形大学工学部：〒992-0038 山形県米沢市城南4-3-16

⁶⁾ 名古屋工業大学：〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町

キーワード：博物館（Museum）、室内空気（Indoor air）、アルカリ性（Alkalinity）

2. 調査対象文化施設の概要と施設内空気湿度ならびにアルカリ性変化の実態

調査対象とした施設は寒冷地に立地した、鉄筋コンクリート造、地下1階、地上2階の総合文化施設である。屋根コンクリートスラブはその下面に約2インチ厚の発泡合成樹脂断熱材を打ち込む工法が採用され、その下面は無仕上げのまま、直接展示フロアの空気に接する状態となっている。一方、コンクリート屋根スラブの上面にはアスファルト防水層、その上には押さえコンクリートが施工され、さらにその上を防水シートで仕上げている。屋根面積は概ね5,200m²である。なお、この建物では完工直後から外壁や一部屋根からの漏水が見られるという状態が続いていた。そこで、種々の調査と検討を繰り返し、屋根防水層の保証期限である10年が経過した時点で、外壁躯体の補修も含めた外装全面にわたる改修工事が行なわれた。建物完成以降の補修経過を要約すると以下の通りとなる。

1980年 4月：施設建物竣工，1987年5～12月：一部外壁補修工事実施，1990年5～12月：外壁全面及び一部内壁の補修工事実施，1995年5～12月：屋根全面断熱防水改修工事実施。

図1・2にはアマニ油含浸紙法（江本義理・馬淵久夫・見城敏子・門倉武夫・石川陸郎・三浦定俊・新井英夫・黒坂五馬・半沢重信：1980）による室内空気湿度と外気温および日射量

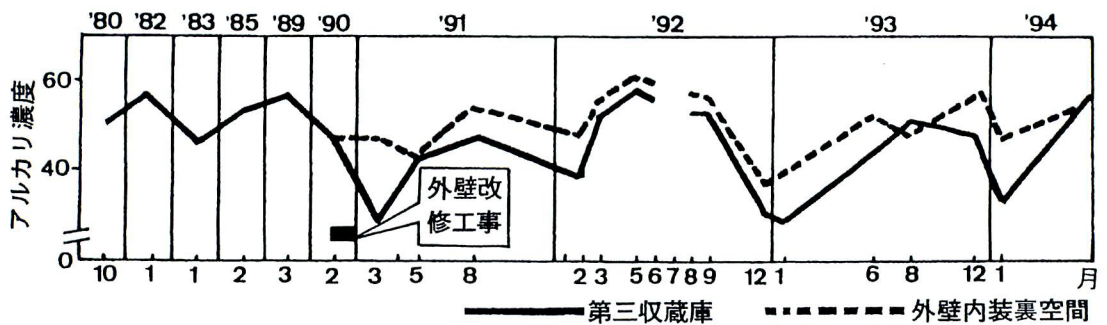


図1 室内空気湿度の経年変化

Fig. 1 Annual variation of Alkaline content included in indoor air systems

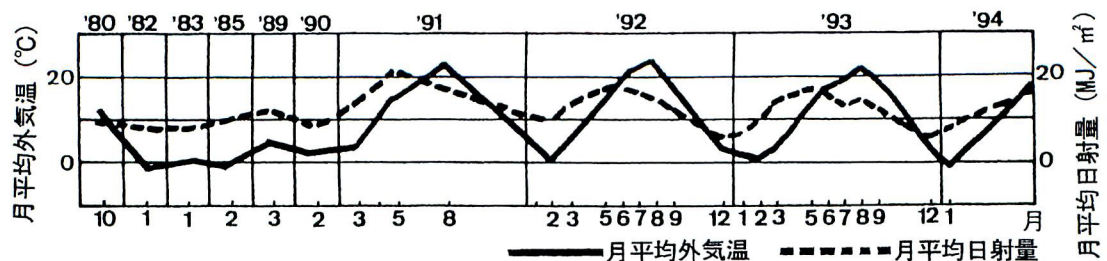


図2 外気温及び日射量の経年変化

Fig. 2 Annual variation of outdoor temperature and quantity of solar radiation

よび日射量の経年変化を示した。通常、アマニ油含浸紙による測定値が20～30にあれば、文化財に対する良好な保存環境とされている。図よりこの施設では14年以上にもわたり施設内空気がアルカリ性状態下にあったこと、そして、アルカリ性状測定結果が外気温と略同位相の年変動を行っていることがわかる。特に、収蔵庫の外壁内装部裏面空間の空気のアルカリ性状変化が庫内よりやや先行している点が特に注目される。この結果は、コンクリートスラブからの吸放湿量と室内空気のアルカリ性状変化の間に強い相関のあることを想定させるものである。この結果を検証するため後述する方法によって、当該建物の屋根スラブとセメント系内装建材の試料片を対象として、実態及び材料特性の面から実験を行った。

3. 測定方法

3-1. コンクリート屋根スラブ内水分挙動の測定

屋根スラブ下面での吸放湿の有無を確認するため、図3に示すように直径50mmの9個の円孔を開けたステンレス製金属箱をスラブ下面の3カ所に取り付け、露点計（光進電気工業株式会社製、DW-1型）で露点温度を測定した。更に、巾50mm、長さ150mmの2本の白金電極を屋根スラブ下から約100mmの深さに35mm間隔で平行に埋め込み電気容量（YOKOGAWA-HEWLETT・PACKARD製、model 4340A）を計測すると共に、別に穿削した小空洞内に湿度センサー（VAISALA製、HMP230型）を挿入して相対湿度を連続測定した。

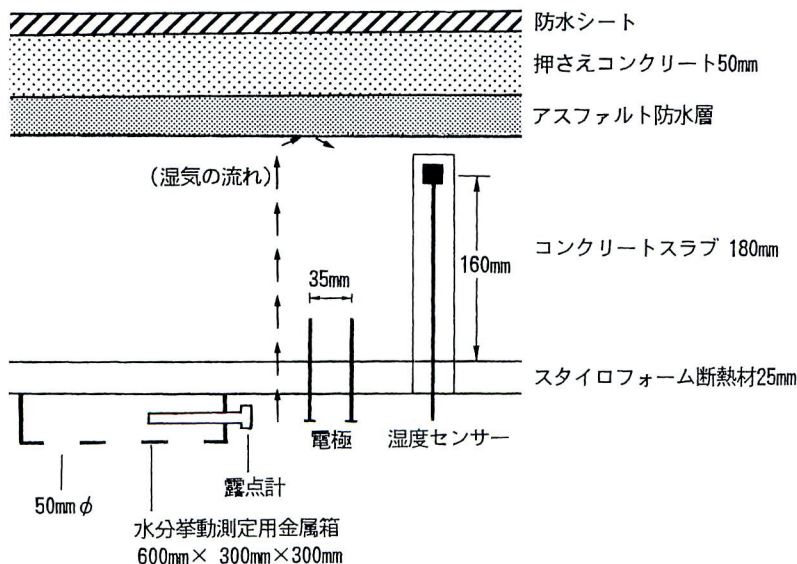


図3 屋根スラブ内の水分挙動測定

Fig. 3 Measurement of the behavior of moisture contained in the concrete roof structure

3-2. セメント系内装建材等の吸放湿特性の検討

ニートセメント及びモルタルのセメント系建材塗装面の吸放湿量の測定は、以下の方法により行った。セメント試料については、約10cm角で厚さが2mm, 6.5mm, 7mm, 18.5mmの型枠を造り、それぞれその中にセメントと蒸留水を3:1, またはセメント, 標準砂, および蒸留水を3:1:1の割合で十分に混合したものを流し込み、振動を与えてできるだけ内部の空気を取り除いた後、自然環境下で3週間以上乾燥した。モルタル塗装面試料については厚さ約5mm及び10mmのものを2枚作成した。作成した各試料の吸放湿面（セメント試料については型枠底部に接した面）以外の5面をアルミシートで断湿したものを測定用試料片とし、降雨及び日射の影響が無く風通しの良い自然環境下に置いて、経時的に電子天秤（秤量2.1Kg, 感量0.01g）で秤量し、併せて外気温湿度を測定した。なお、比較のため他に、プラスタ塗装面, プラスタボード（商品名タイガーボード, 吉野石膏株式会社製）, ゼオライト系セラミックボード（商品名カパライト, 株式会社ヨーケン製）, 珪酸カルシウム系ボード（商品名ヒューミライト, 日本インシュレーション株式会社製）, 及び木材（柎目面, 板目面, 木口面）試料を作成し、それらの測定も同様に実施した。このようにして得られたそれぞれの測定値を基に次式によって、吸放湿量（調湿力）Mを算定した。

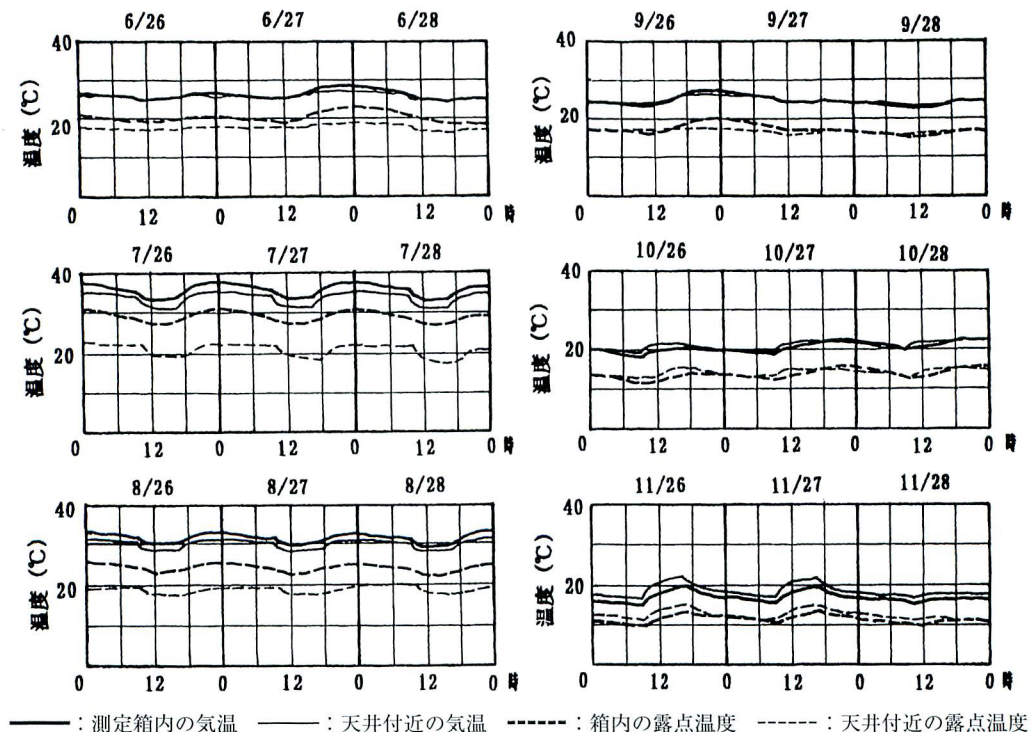


図4 図3の屋根スラブ下面に取り付けた測定箱による測定結果
Fig. 4 Measurement results of the metal box shown in Fig. 3



図5 コンクリート屋根スラブ内水分挙動に伴う電気容量の経時変化
 Fig. 5 The hourly variation of electric capacity accompanied with moisture behavior in a concrete roof structure

$$M = (\Delta m / A) / \Delta H (\text{g/m}^2) / \% \quad \Delta m : \text{含水量の変動較差 (g)}, A : \text{吸放湿面積 (m}^2\text{)}, \\ \Delta H : \text{相対湿度の変動較差 (\%)}$$

4. 実験結果

4-1. コンクリート屋根スラブ内の水分挙動に関する測定結果

図4にコンクリート屋根スラブ下面に設置した金属製測定箱内および近傍室内空気的气温、および露点温度の1994年6月から11月までの6ヶ月間にわたる測定結果を示す。図から明らかなように、6月から8月までの三ヶ月間は測定箱内の露点温度が近傍室内空気露点温度よりも高くなっており、7月をピークとしてコンクリート屋根スラブ下面より室内に向けて放湿が行われていることが確認された。コンクリート屋根スラブからの放湿は9月で止まり、10月からは僅かながら近傍空気露点温度が金属製測定箱内よりも上回るようになる。図5はコンクリート屋根スラブ下面付近に埋め込んだ白金電極によるコンクリート躯体内の電気容量に関する測定結果である。電気容量は7月を最大値とする年変動の傾向が見られ、図4の結果とよく整合している。

4-2. セメント系内装建材等の吸放湿量測定結果

図6には夏季における相対湿度の日変動に対するセメント系内装建材等の吸放湿量と試料厚との関係を示した。図にはモルタル塗装試料の他に、各種比較試料の測定結果を併せてプロットしてある。

図から明らかなように、セメント試料片の場合、全体的に試料厚の範囲では吸放湿量の変化は殆ど無く、2mm厚以上での夏季の吸放湿量は概ね0.25 (g/m²)/%となっている。これに対し、モルタル試料片の吸放湿量は夏季で約0.45~0.50 (g/m²)/%と、セメント試料の約2倍程度である。この結果から相対湿度の日変動に起因するセメント系材料表面での吸放湿に関与する層の深さ

は概ね 2 mm 以下にあり，珪カル板や木材に比べ小さいことが推定される。図 6 の結果から，夏季の相対湿度の日変動に対する吸放湿量は，セメント試料で概ね $0.25 \text{ (g/m}^2\text{)/\%}$ ，モルタル塗装面では約 $0.45 \sim 0.50 \text{ (g/m}^2\text{)/\%}$ の吸放湿を行っていることが明らかとなった。

5. 考察

表 1 には，相対湿度の日変動，旬間変動，及び年変動に伴って生じる吸放湿量を取りまとめて示した。ただし数値は全て年平均値で表してある。

建築用内装材料の吸放湿特性は，一般に，環境温湿度の変動周期によって異なり，日変動を始めとして約 10 日間を周期とする三寒四温的旬間変動を経て 365 日周期の年変動に至るまで，変動周期が大きくなるに従って吸放湿に関与する材料表面からの深さが増す。表 1 の木材一般〔ベイヒ (*Cupressus lawsoniana* Murr.)，ベイツガ (*Tsuga heterophylla* Sarg.)，ヒノキ

表 1 相対湿度変動と吸放湿量
Table 1 Variation of relative humidity and quantity of moisture absorption and desorption

変動周期	試料	D _s	M _s	M ₁₀	M ₂₀
日変動	セメント	2 >	0.2	0.2	0.2
	モルタル	5 >	0.4	0.4	0.4
	セラミック系ボード	6 >	1.6	1.5	1.6
	珪酸カルシウムボード	20 <	-	0.6	0.8
	プラスチックボード	-	-	0.6	-
	木材一般 (柱目, 板目)	6 ~ 7	0.7	0.7	0.7
	木材一般 (木口)	17	2.6	2.2	2.6
旬間変動	木材一般 (柱目, 板目)	12	-	1.9	2.0
	木材一般 (木口)	20 <	-	3.2	-
年間変動	木材一般 (柱目, 板目)	20 <	-	10.0	-
	木材一般 (木口)	20 <	-	11.0	-

D_s: 吸放湿深さ (mm), M_s: 吸放湿量 (g/m²)/%,
M₁₀: 厚さ 10mm の時の吸放湿量 (g/m²)/%,
M₂₀: 厚さ 20mm の時の吸放湿量 (g/m²)/%.

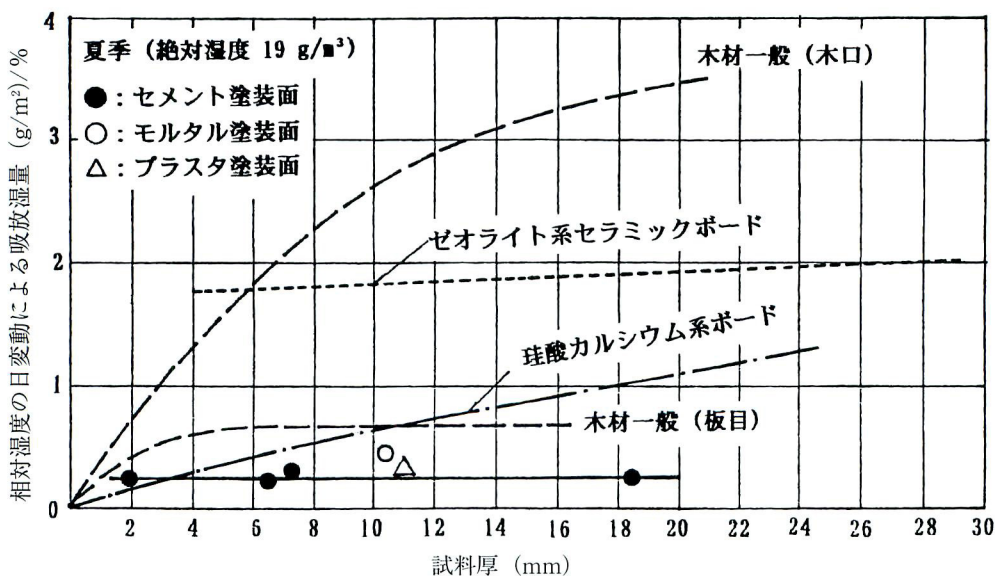


図 6 相対湿度の日変動に対する調湿材の吸放湿量と試料厚の関係

Fig. 6 Relationship between quantity of moisture absorption and desorption of humidity-conditioning materials, for a daily variation of the relative humidity, and thickness of specimens

(*Chamaecyparis obtusa* Endl.)] のDs 値および図 6～図 8 にその傾向を見ることが出来る。すなわち、板目木材面を例にとると相対湿度の日変動に対応する表面からの深さは約 6～7 mm で、旬間変動では 12～13mm となり、年変動では実験試料の最大厚さ 20mm を越える。因に、木口では日変動に対して 17mm であるが、それ以上の変動周期ではやはり今回の実験範囲を越えている。更に、内装材料表面での吸放湿現象は、一般に、外気温並びに日射変動などの外乱による場合と、室内気温変動の内乱による場合とがあるが、最近の建築における断熱建材の普及を考慮して、本論文における小試料実験では、専ら内乱による場合を取り扱っている。

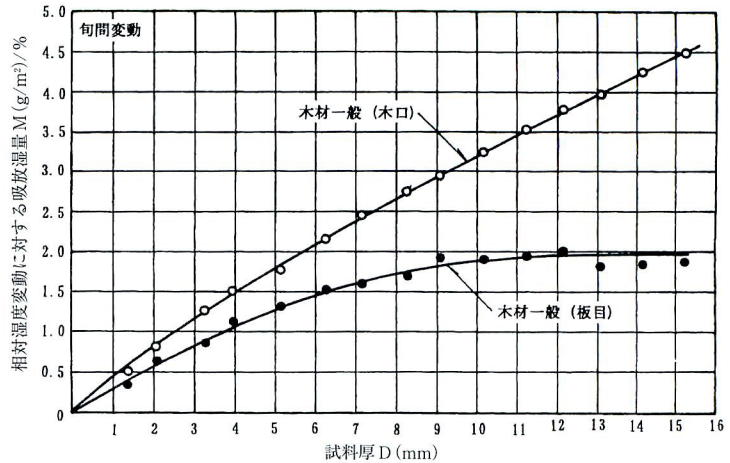


図 7 相対湿度の旬間変動に対する木材一般の吸放湿量と試料厚の関係
 Fig. 7 Relationship between quantity of moisture absorption and desorption of wood, for a variation during a ten-day period of the relative humidity, and the thickness of the specimens

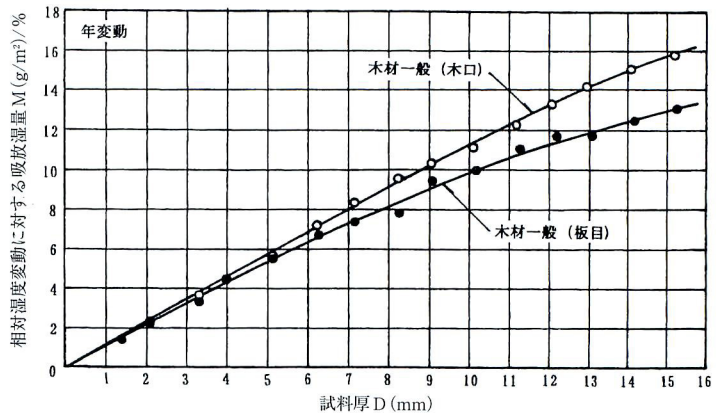


図 8 相対湿度の年変動に対する木材一般の吸放湿量と試料厚の関係
 Fig. 8 Relationship between quantity of moisture absorption and desorption of wood, for an annual variation of the relative humidity, and the thickness of the specimens

これまでに実施された文化財施設の空気環境の測定, とりわけアルカリ性状の測定結果によれば、一般的にコンクリート建造物の場合、竣工後 2～3 年間は施設内空気がアルカリ状態となり、その後次第に中性状態に落ち着くものとされている (三浦定俊・佐野千絵・石川陸郎: 1993)。上述のセメント系材料の吸放湿特性に関する実験結果によれば、相対湿度変動に伴う吸放湿に関与する表面からの深さは 2 mm 以下で、この点だけを考えるとコンクリート面での吸放湿に伴い室内に向かって放出されるアルカリ成分の量はそれほど大きなものではないことになる。

しかし、測定対象とした文化施設では、竣工後 10 年にもおよび、室内空気のアルカリ状態が続

いた。その原因を探る手掛かりとして筆者等は、アマニ油含浸紙法による測定結果に基づく室内空気のアルカリ性状の変化が冬季に減少し、春季から秋季に増加する点と、更に収蔵庫におけるコンクリート外壁内装部裏面空間の空気のアルカリ性状変化が収蔵庫内よりも先行している点に先ず着目した。これに加えて、コンクリート屋根スラブ下に設置した金属製測定箱内の露点温度が、6月から8月までの三ヶ月間は近傍室内空気よりも高く、同時期におけるスラブ内電気容量も減少していることから、この期間にはコンクリート屋根スラブ下面より室内に向かって放湿が行われているという確証を得た。

この建物の場合には、図3に示すように屋根スラブ下に直接断熱材が打ち込まれており、スラブ上部にはアスファルト防水層が施工されているが、寒冷地でこのような躯体設計を採用した場合には屋根スラブが外気温の影響を強く受けて、冬季には甚だしい低温となることが予想される。一方、室内の高温な空気に含まれた水分は断熱材を容易に貫通し、さらにコンクリート躯体内部を移動して防水層下面に達し、屋根スラブ全体が湿潤することになる。このようにしてコンクリート屋根スラブ内に蓄積された水分が、春季から夏季の外気温の上昇と日射量の増大による屋根スラブの温度上昇により蒸れ返し現象となって室内に放出され、同時にコンクリートスラブ中に含有されるアルカリ成分も室内にもたらされたものと考えられる。

以上の検討の結果、この現象は4-2. で述べた内乱による吸放湿ではなく、寒冷地には適切を欠くと思われる内断熱工法を採用したことに起因するコンクリート躯体内の湿潤と蒸れ返しの繰り返し

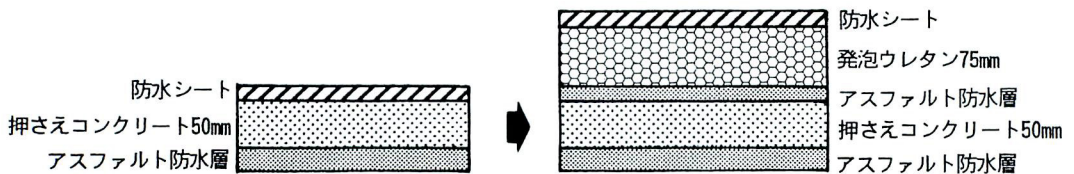


図9 屋根スラブ改修工事の状況
Fig. 9 Repairing of the concrete roof structure

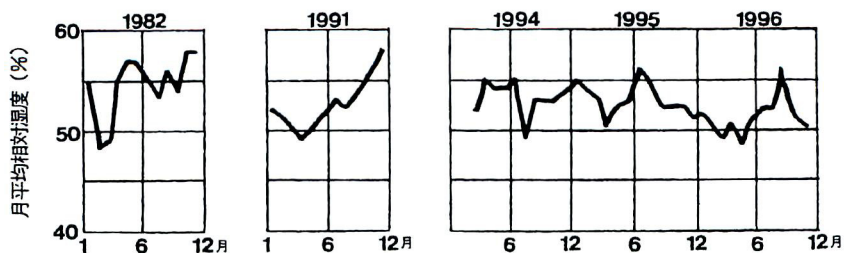


図10 文化施設展示場の月平均相対湿度の経年変化
Fig. 10 Annual variation of relative humidity in the exhibition room of the cultural facility

返しが外乱によって増幅されて甚だしい吸放湿が発生し、館内空気のアルカリ状態が長期にわたって続いたものと判断するに至った。そこで、この検討結果に基づき当該施設の屋上全域を対象とし、図9の右に示したような改修工事、すなわち、先ず既存の防水シートを除去し、その下の押さえコンクリートを補修した後、新たにアスファルト防水層を施工し、その上に75mm厚の発泡合成樹脂断熱材と防水シートを敷設するという断熱防水改修工事を実施することとした。

図10は当該施設内における月平均相対湿度の経年変化であるが、それによれば、蒸れ返しによるコンクリート屋根スラブ内水分の室内放湿に対応するとみられる相対湿度の急激な増加が1982年および1991年には観察されるが、1995年以降はこの現象が消滅しており、屋上の全面断熱防水改修工事によって10年間の湿潤と蒸れ返し現象が回避されたことがわかる。なお、図10に見られる竣工後1年半を経過した後の室内相対湿度の急激な上昇は、同時に改修工事を行った外壁コンクリート躯体の空隙に補修のため充填したコンクリートの水分が蒸れ返しによって施設内に蒸発したことに起因するものと推定される。また、屋根全面に互る防水断熱改修工事が終了した後の室内相対湿度に緩やかな低下傾向がみられるが、この現象は、室内の空調設備による冷暖房が原因となって生じる、いわゆる過乾燥化現象の兆候が現れ始めているものとみることができる。これは特に暖房期間の長い寒冷地に建つコンクリート造建物で共通に見られるようになった現象で、博物館などでは文化財の新たな環境被害の原因としてクローズアップされはじめているものであり、建築設備分野での抜本的対策の確立が必要となっている。

6. おわりに

某文化施設の竣工後十数年に互る施設内空気のアルカリ性状と温湿度変化、ならびにコンクリート躯体からの吸放湿に関する実態調査と、セメント系内装建材等による吸放湿特性についての実験結果について検討した。今後、文化施設内空気のアルカリ傾向の増加を抑制し、施設内空間の相対湿度の過度な増減を防止するためには、文化施設に相応しい、コンクリート躯体の断熱、防湿設計を計ることはもちろん、コンクリート躯体の吸放湿変動に対応した施設内空間の調湿機能を確保するための材料及び設備分野での開発研究が急務と考える。

(1999. 5. 14 受理)

引用文献

- 1) 江本義理・馬淵久夫・見城敏子・門倉武夫・石川陸郎・三浦定俊・新井英夫・黒坂五馬・半沢重信 (1980) 新設展示施設及び収蔵庫内の汚染現象と収納文化財への影響とその防除法。考古学・美術史の自然科学的研究, 古文化財編集委員会編, 日本学術振興会: 544-556
- 2) 黒坂五馬 (1972) コンクリートから出る遊離物質が他の物質に及ぼす影響 (その1) モルタル組成物による亜麻仁油の変色。昭和47年度日本建築学会関東支部研究報告集

- 3) 登石健三・見城敏子・石川陸郎 (1972) コンクリート建造物内空気の偏苛性, 偏酸性. 保存科学, 8 : 61-72
- 4) 三浦定俊・佐野千絵・石川陸郎 (1993) 新設博物館・美術館における保存環境調査の実際. 月刊文化財, 355 : 34-42
- 5) Kenzo Toishi and Toshiko Kenjo (1975) Some aspects of the conservation of works of art in buildings of new concrete. Studies in Conservation, 20 : 118-122

Alkaline Content of Air and the Absorption and Desorption of Moisture from a Concrete Structure inside Cultural Facilities

Hideo AKANUMA ¹⁾, Kiyohito KAMIYA ²⁾, Rikuo ISHIKAWA ³⁾, Norihiko MIYANO ⁴⁾,
Yoshio HIGASHIYAMA ⁵⁾, Akihiko MIYANO ⁶⁾

1) Iwate Prefectural Museum, Ueda Matsuyashiki, Morioka, 020-0116, Japan

2) Aichi Inst. of tech., Yachigusa, Yagusa-cho, Toyota, 470-0356, Japan

3) Former staff of Tokyo National Museum, Uenokouen, Taito-ku, Tokyo, 110-0007, Japan

4) Nihon Univ., Kameino, Fujisawa, 253-0831, Japan

5) Yamagata Univ., Jyonan, Yonezawa, 992-0038, Japan

6) Nagoya Inst. of tech., Gokiso-cho Shouwa-ku, Nagoya, 466-8555, Japan

It is widely acknowledged that the air environment in a room where cultural assets are exhibited or stored is a factor in the deterioration of these assets. At one relatively old cultural facility, it was noted that the air within the building was alkaline for a considerably long period since the completion of the building, and that there was a seasonal rise in humidity. To clarify the reason of such phenomena, a survey of the relationship between the transfer of moisture in a concrete roof structure and the relative atmospheric humidity within the building was carried out. At the same time, a control test in natural conditions of the moisture absorption and desorption, using a small-scale test piece made of cement, mortar, and so on, were carried out.

The results of both the test and the survey showed that the increase of both alkaline content and humidity is mainly attributable to condensation and humidity within the concrete roofing slabs in winter, and the transfer of moisture back to the indoors during summer. For the long-term maintenance of a suitable atmosphere, for storing and exhibiting cultural assets in a concrete structure, it is important to bear in mind the local environment when considering the thermal insulation and vapor barrier. Furthermore, to prevent excessive aridity and humidity inside the building, it is important to use humidity-conditioning materials. These materials will maintain an appropriate level of humidity on a long-term basis.