

「アルカリ因子」についての再考

佐野千絵・三浦定俊

1. はじめに

新しく建てられた博物館、美術館内の展示収蔵環境に関して、保存科学部ではかねてより研究を行なうとともに、依頼を受けて個別に助言や指導を行なってきた。助言や指導の内容はおもに次の4点に関するものである。①温度、湿度の設定と制御、②照明の方法と照度の設定、③大気汚染ガス、「アルカリ因子」などの汚染因子の除去、④資料の収納にともなう初期燻蒸の実施方法。これらの内、特に問題となり、関係者から多くの関心が寄せられる問題は「アルカリ因子」濃度の測定と除去の方法である。

「アルカリ因子」について初めて指摘したのも当部である。登石らが、打立てコンクリート中の霧囲気がアルカリ性の環境にあり、アマニ油に変色をおこし油絵などの美術品に悪影響を与える恐れのあることを、昭和42年(1967年)に指摘した¹⁾。その後、昭和51年度より3年間継続で行われた文部省科学研究費特定研究「自然科学の手法による遺跡・古文化財等の研究」(通称「古文化財」)などの研究^{2~9,14,15)}を通して、各種文化財に与える影響の解析および「アルカリ因子」濃度の簡便な測定法に関する多くの研究を行なった。これら一連の研究を通じて、コンクリート打設後軸体乾燥にはどのような条件でどのくらいの期間を要するか明らかにし、新築した館の適切な開館時期について助言するなど、博物館行政の面からも当部は貢献してきた。しかし、「アルカリ因子」そのものに関しては、当時の研究機器等の条件の制約下では解明し難く、まだ最終的な結論が得られたとはいがたい。

近年の分析機器の発達はめざましく、この取残されていた点に関して解明できるよう研究環境が整備されつつある。また、建築業界の側からも見直しの動きもあり、研究を再開するに足る条件がそろいつつある。そのため、これまでの研究状況や除去対策などの現状を①文化財材質への影響の調査、②原因物質の解明、③環境測定用モニターの開発、④対策の4点で概括し、それらの問題点について再考を行ない、今後の研究への参考とする。

2. 文化財材質への影響の調査

登石らの初期の研究方針は、主として文化財材質にどのような影響があるか検証したもの^{1~5)}で、密閉ケース内にコンクリート塊をいれてコンクリート霧囲気をつくる⁶⁾、あるいは、模擬実験庫としてコンクリートの実験箱(50cm立方)¹⁾または実験庫(2m立方)⁷⁾を作り、その中に染色された絹布(濃縹、浅縹藍染、醺茜三染、蘇芳、浅葱、練、淡紅緋、浅葱藍二染、支子三染、蘇芳三染)、密陀僧、アマニ油、日本画用顔料(藍、鉛丹、酸化鉛、群青、緑青、黄土、朱土)を放置し、変退色度を測定した。その結果、絹は黄味を帯びて強度が低下し、密陀僧は淡い灰色がかった黄色に、アマニ油は赤褐色になり粘着力が低下したと報告されている。濃縹(図1)、浅葱、藍などの青系の染料は退色、蘇芳、淡紅緋、茜などの赤系の染料は青系に比べて変化が少なかった。黄色系の支子三染の変化も認められた。顔料のうち、鉛丹、酸化鉛は退色し¹⁾、朱土はほとんど変化なく、群青、緑青はわずかに、黄土にも影響があったと述べられている⁸⁾にもかかわらず、岩絵具は不变であったという別の報告もある⁶⁾。密閉ケース内のコンクリート霧

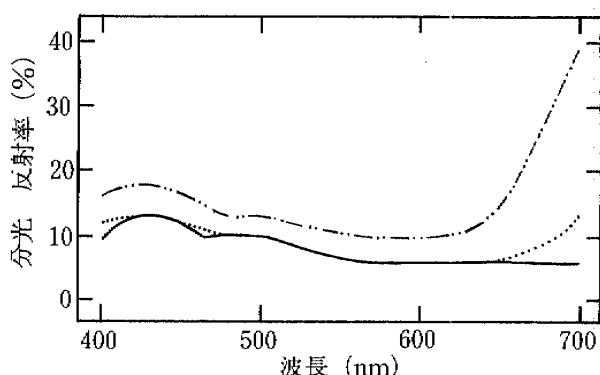


図1 コンクリート箱内に放置した濃縹の退色
(竣工2年後から4年後まで放置)

—— 放置前
- - - 放置後
----- コントロール (空気中に放置)

開気中（温湿度は不明）に一定期間吊るされたアマニ油含浸ろ紙の色は、コンクリート打設直後は赤褐色に変色したが、半年後、1年後と時間の経過に伴い、着色度は薄れ、1年半後、2年後のろ紙の色は、相対湿度75%，55%（温度と日数は不明）に放置して乾燥させたろ紙の色とよく似ていると報告されている（表1）。この実験から、1年半以上コンクリートを自然乾燥すれば正常な霧囲気になると結論づけている。しかし、温湿度により反応速度が変化することが後の研究で明らかにされたので、この1年半という期間は再考を要すると考えられる。

また見城はある美術館の収蔵庫中で、キャンバス上に油絵具を塗った状態で半年間放置したこと、白、赤、青、紫色が弱かったと報告している⁶⁾が、具体的な色名、その色を構成する物質名についての記述は見られない。また、2年近く枯らした収蔵庫に入れた美術品の表面に、かびではない白い粉が生じたことを報告している⁶⁾。コンクリート上に吊るした油絵具を塗った紙片にも、同様な白い粉があらわれると述べている。この白い粉の生成については、文献11の中で説明が試みられている。その中では、「アルカリ因子」により変質したアマニ油がけん化してアルコールや水に可溶になることが述べられ、親水性に変性したアマニ油膜中を通って、親水性の顔料が表面で蒸発乾固して、白い粉が生じたと考えられている。

布に対する影響については、黒坂が絹、綿、羊毛、アセテートの白色度、縮み、色差について報告し³⁰⁾、羊毛への影響が大きいことを指摘している。また、建築用材料一般についても検討が行なわれ²⁸⁾、石膏ボード、石綿、岩綿ボード、フェノール樹脂、尿素樹脂、ゴム、アスファルトおよびエポキシ系接着剤の硬化剤の、アマニ油への影響が顕著であるとまとめられている。アスファルトは纖維類に影響を与え、引張り強度を低下させる。

以上の研究をふまえて、館内環境に関する一連の総論が、見城、小塙等の研究者によってまとめられている^{11~13,16)}。

3. 原因物質の解明

環境をアルカリ性にする原因物質「アルカリ因子」については、大きく分けて、コンクリートから放出される無機物質の微粒子であるとする説とアンモニアガスであるとする説の2説がある。以下に、その研究方法と結果等を簡単に記す。

3-1 無機物質微粒子説について

無機物質、殊にカルシウム、マグネシウムなどのコンクリートから放出される無機炭酸塩、

表1 アマニ油含浸ろ紙の変色

経過年数(年)	直後	a. コンクリート実験庫内放置による変色の様子			
		0.5	1.0	1.5	2.0
変色	暗茶褐色	赤褐色	褐色	淡黄褐色	淡黄

相対湿度(%)	100	b. 異なる相対湿度中の乾燥による変色の様子			
		75	55	33	<10
変色	白	淡黄褐色	帶橙黃色	黃色	淡黃

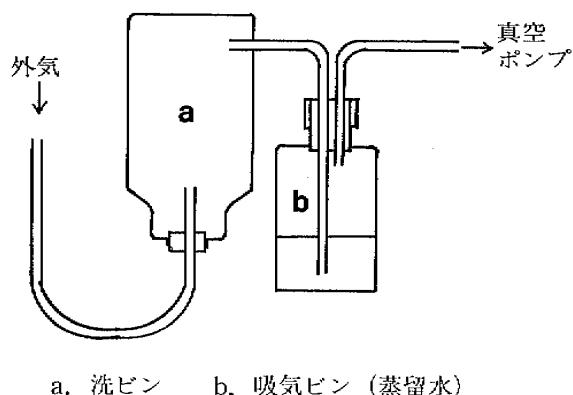
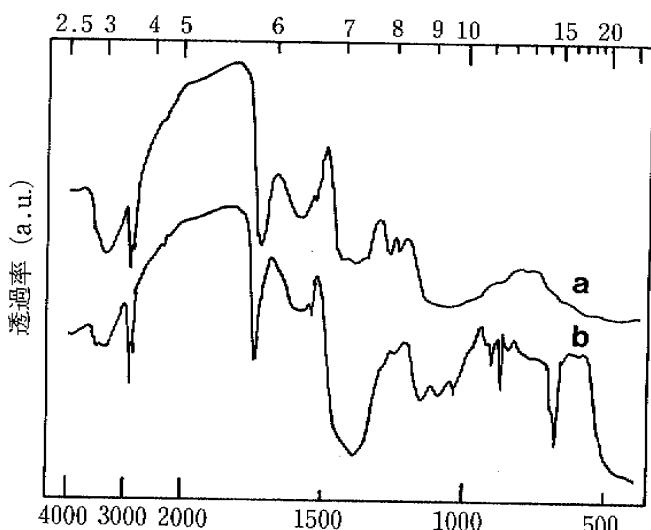


図2 環境汚染物質捕集装置（簡易型）

図3 コンクリート打ち放しの部屋に1年放置した油絵の橙色部の赤外スペクトル
a. 放置前 b. 放置後

塩基性炭酸塩を主成分とする何らかの活性な微粒子により環境がアルカリ性に汚染されるとする無機物質微粒子説は、主に東京国立文化財研究所保存科学部における過去の研究によるものである。この一連の研究は「保存科学」を中心として報告され、特定研究「古文化財」でも、保存環境整備の一環として集中的に取上げられ、概論がその報告書にまとめられている^{6~9)}。

図2のような簡易な装置を使って、汚染物質の蒸留水による捕獲が登石らにより試みられ、カルシウム、マグネシウム、ケイ素、アルミニウム、鉄の各イオンが検出されているが、分析手法については詳しく述べられていない。

また、江本は、コンクリート壁面の析出物の解析をX線回折で行ない、白華現象により硫酸ナトリウム Na_2SO_4 、炭酸カルシウム CaCO_3 、硫酸カルシウム2水塩 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ が生成することを明らかにし⁴⁴⁾、これらの無機炭酸塩および塩基性炭酸塩が空中に飛散し環境を汚染しているものと推定している。

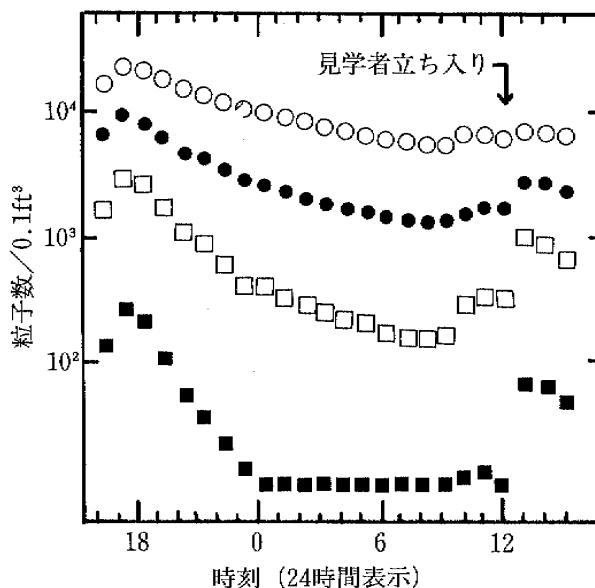
見城は、建築直後のコンクリート打ち放し建物を利用し、油絵具の橙色部について放置前後の赤外吸収スペクトル(ATR法)を測定して炭酸基の増加を検出している⁴⁾(図3)。このことから、無機炭酸塩または塩基性炭酸塩の生成を推定している。

特定研究「古文化財」においては、実在の寺院収蔵庫を1/2スケールで模し、鉄筋コンクリート造りの実験庫および実地試験を行なっている。庫内温湿度のモニタリング^{7,8)}のほか、原子吸光分析によるカルシウム、マグネシウム濃度の測定^{8,9)}がその研究の中心である。

見城の行なった実験方法は以下のようである。庫内の空気を蒸留水50ml中に27% (1時間) 通気した試験液と外気を同じ量導入した対照液、および、ポルトランドセメント粉、壁打ち用の普通コンクリート塊(材令1年半)をくだいて作ったコンクリート粉(50~100メッシュ)それぞれの蒸留水浸出液(2~10mgをはかり、2.5%の蒸留水と振盪し、3時間後上澄み液をとったもの)についてpH測定とカルシウム、マグネシウム濃度の原子吸光法による測定を行なった。その結果(表2)、対照液は岩石土壤由来のCa/Mg比(1~2程度)を示すのに対し、コンクリート起源のもののCa/Mg比は、その値より大きくなる(8~50程度)ことを明らかにした。コンクリート造りで、床面積、空間容積が実在の小規模収蔵庫に対応し、アルカリ環境下にあるある施設内で行なった結果も、大きいCa/Mg比(7以上)を示し、コンクリート由來の微粒子の存在を裏付けた。

表2 カルシウム、マグネシウム量の測定結果

試 料	Ca(ppm)	Mg(ppm)	Ca/Mg
コンクリート (40°C)	1.00	0.023	43.4
" (35°C)	0.40	0.044	9.1
" (28°C)	0.13	0.013	10.0
A庫 (換気なし)	0.86	0.111	7.7
" (エアクリーナー)	0.17	0.025	8.0
" (換気)	0.15	0.013	11.5
" (換気)	0.15	0.012	12.5
セメント蒸留水浸出液	0.60	0.036	16.7
	0.81	0.037	21.2
	0.75	0.048	15.6
	1.65	0.042	39.3
コンクリート蒸留水浸出液	0.39	0.047	8.3
	0.72	0.015	48.0
	0.43	0.050	8.5
外気	0.11	0.066	1.7
	0.03	0.021	1.4
	0.09	0.075	1.2
	0.08	0.067	1.2

図4 寺院収蔵展示室の粉塵の挙動
○0.5μ ●1.0μ □2.0μ ■5.0μ

しかし、通気液の床面からの高さについて表記がなく、床からの粉塵を拾っていないか定かでない。前年の報告書内に粉塵の捕集結果が門倉により記されている⁷⁾が（設定条件については、文献10に詳しい），それによると，2 μより大きな粒子は無色透明の結晶質の粒子を主体とするもので，5時間後に約1/10になり比較的沈降も早いが，人がはいったことによる粉塵の増加の割合も多いことが報告されている（図4）。すなわち，試験者が庫内に立入り通気液の作製をはかったとすれば，通気の終る1時間後でも床面から舞上がった比較的大きな粒子径の粉塵は依然として空气中を充分量漂っており，通気液はこの比較的大きな粒子を捕集している可能性が高い。『コンクリート庫内の霧囲気中のアルカリ土類金属元素は，コンクリートから放出されたものが大部分である』⁹⁾ことは間違いないが，『コンクリート庫内のアルカリ霧囲気の原因としてコンクリートから放出されるCaが大きく寄与している』⁹⁾と限定することは難しい。

一方，鈴木ら¹⁷⁾はセメントやセメント成分の純物質CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, あるいはこれらの混合物に純水を加え，その上にアマニ油含浸紙を放置し黄色指数を観察したところ，単体のCaOでも変化が認められるのを発見した。空気中の存在形態は不明であるが，カルシウムイオン等も大気中に存在する「アルカリ因子」に含まれている可能性は否定できないと述べている。

3-2 アンモニア主因説について

昭和47年，黒坂により日本建築学会関東支部において研究報告がなされ，その後断続的に研究が行なわれて今日に至っている。

黒坂も，研究当初は原因物質の解明のため種々の実験を行なっており，変色後のアマニ油含浸紙の走査電子顕微鏡写真²³⁾を観察し微粒子の存在を認めたり，変色前後の赤外吸収スペクトル²¹⁾を測定し変化が認められなかったことを報告している。後には，図5のような開放系あるいは他に閉鎖系の実験ラインを組み，積極的に気体を回収する方向に実験方針を変更している²⁴⁾。

図5に示すようなラインにおいて，まず0.3μのフィルターを通過することから，微粒子ではなく気体物質であろうと推定し，各種吸収液のフィルター効果を調べた結果，水は最初の数時

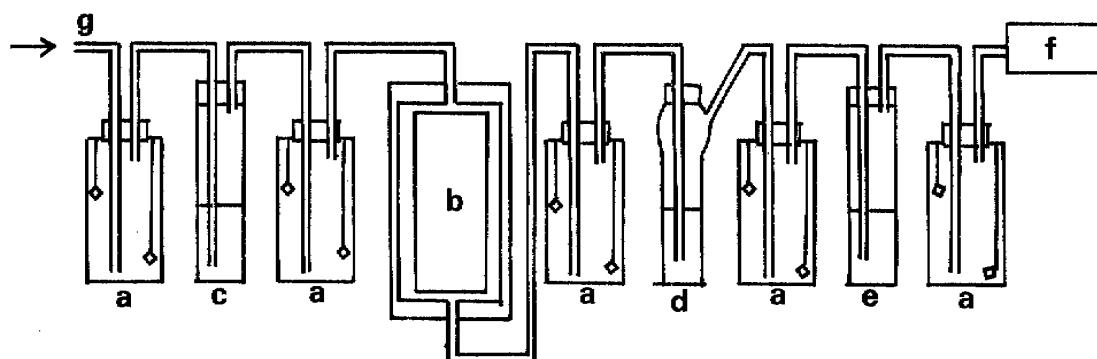


図5 環境汚染物質捕集ライン（開放系）
 a. アマニ油含浸紙 b. モルタル設置 c. 外気洗浄ピン
 d. フィルター（各試薬設置） e. 精製水 f. ポンプ g. 外気取入口

間フィルター効果を示すこと、各種酸性溶液に吸収されることがわかった。このことから、水溶液の状態で比較的蒸気圧の高いアルカリ性ガス、おそらくアンモニアであろうと推定した。その後、ネスラー試薬による検出およびインドフェノール法による濃度の測定を行なっている²⁶⁾。

アンモニアに着目した後は、黒坂は発生量の経時変化、温度変化による発生量の変化、含水

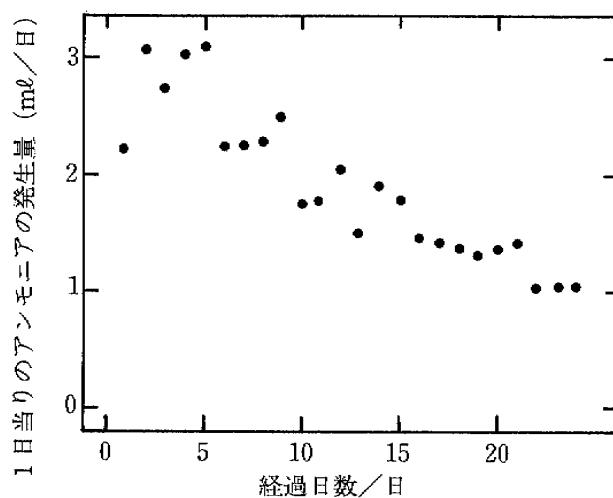


図6 モルタルからのアンモニア発生量の経時変化

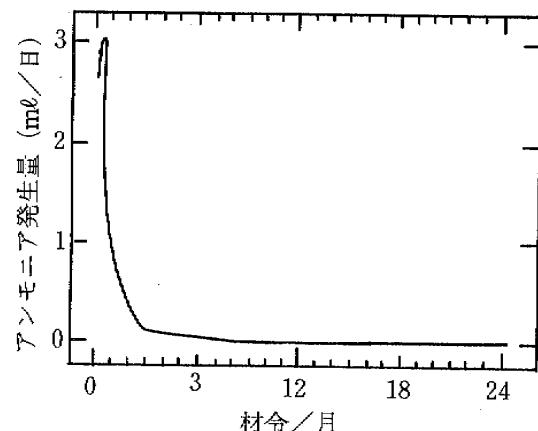


図7 モルタルの材令とアンモニア発生量の関係

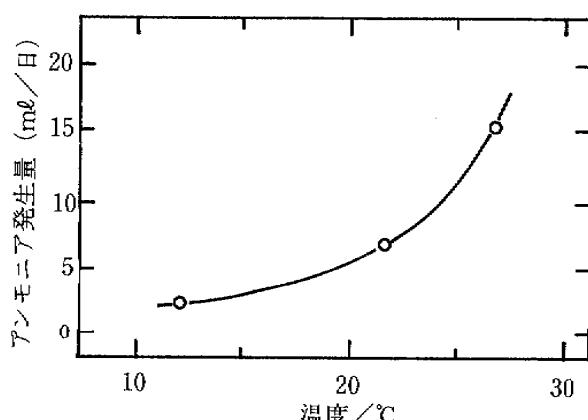


図8 モルタルの温度とアンモニア発生量の関係

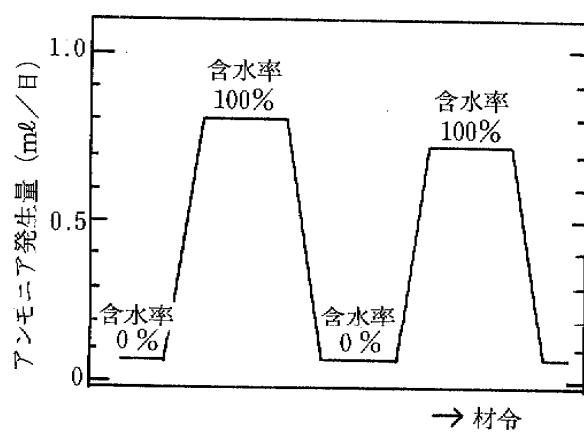


図9 モルタルの含水率の変化に伴うアンモニア発生量

量による発生量の変化、モルタルの形状による発生量の変化を報告し²⁷⁾、材令数日で発生量は最大となり（図6、7）、温度が高いほど発生量は多く（図8）、かつ、一度減少しても加熱により発生量は増加すること、そして一度乾燥した軸体も水の供給により再び多量のアンモニアを放出すること（図9）を見出した。また、発生量は表面積に比例せず体積に依存していることを明らかにした。この後の黒坂の研究は^{28,32,33)}原材料による発生量の差の検討に力点が置かれている。

また黒坂は、ある寺院の収蔵庫中のアンモニアガス濃度を測定している³⁴⁾。その結果（表3）、季節間の変動が大きく、アンモニアガス濃度は経過年数に従って必ずしも減少していないことがわかった。また、調査した寺院ではコンクリート打込み時から半年間の発生量がきわめて多く、約3年後に庫内環境がほぼ良好な状態になったことがわかった。

鈴木ら^{17,35)}は、普通ポルトランドセメントと砂を2:1の配合比で作ったモルタルを用いてモデル実験をし、液体酸素中を通気してアルカリ性物質（「アルカリ因子」）を濃縮し、ガスクロマトグラムでアンモニアを検出している。また、他の方法でもアンモニアを検出したと述べている。その中で発生原因にも言及し、クリンカーの粉碎助剤として用いられるアミン類のうちトリエチルアミンを添加した場合、セメント成分等の硬化に伴いアンモニアに分解してアンモニア臭を生じることを報告している。また、セメントを構成する主成分の純物質（特級試薬）の混合物からつくったセメントからはアンモニアが発生しないことを明らかにし、アンモニアの発生原因について詳しく検討している（図10）。

近年小塩ら¹⁸⁾は、砂、砂利等を用いず、市販のポルトランドセメント単体をイオン交換水で混練後1週間放置し固化させたコンクリートを用いてモデル実験を行ない、アルカリ性物質（「アルカリ因子」）はエアフィルターのフィルターを通過することをアマニ油含浸紙で確認し、「アルカリ因子」はエアフィルターで除去できないほど微小な粒子状物質であるか、またはガス状の物質であると結論づけている。また、コンクリート塊の側面を鉄板で囲い、4ml/分で30mlの純

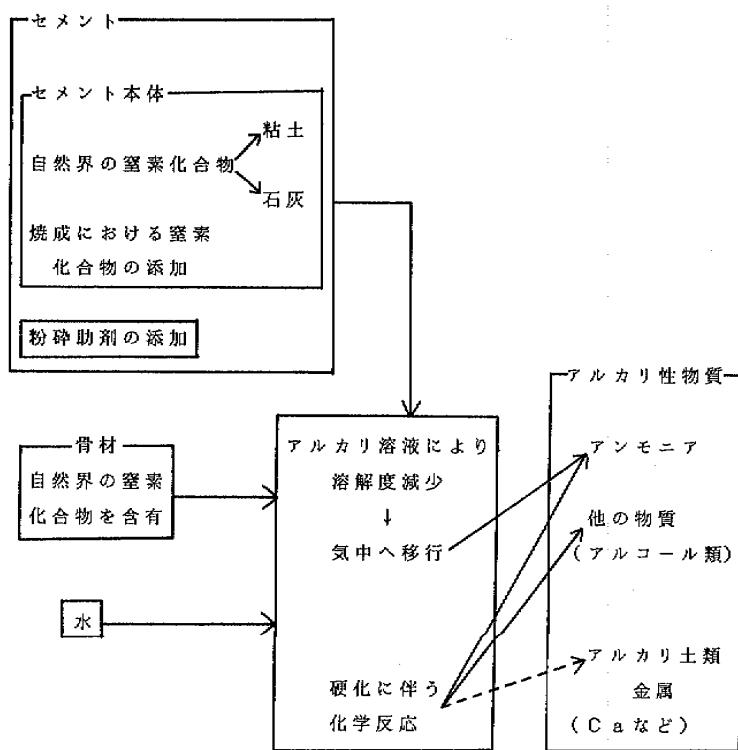


図10 アルカリ性物質（「アルカリ因子」）発生プロセスの概要

表3 T寺院収蔵庫でのアンモニアガスの発生量

経過年数(年)	測定時の状態		測定値 (ml/日)
	平均温度(℃)	平均湿度(%)	
1.2	4.9	63	0.030
2.0	29.0	71	0.050
2.3	17.9	72	0.060
3.8	10.0	65	0.017

表4 変色試験溶検定液の組成

色素名	
Chlorophenol Red	0.5%グリセリン溶液
Bromocresol Green	0.5%グリセリン溶液
Butylthymol Blue	0.5%グリセリン溶液
Phenol Red	0.5%グリセリン溶液

上の色素のグリセリン溶液を等量ずつ混合して、検定液とした。（この濃度の単位に関しては、文献11ではweight(g)/volume(ml)と書かれている。）

水中に通気した通気液（何分間通気したかは明記されていない）について、カルシウム、マグネシウムを原子吸光法で、アンモニアをイオンクロマト法で分析したところ、カルシウム、マグネシウムは検出されなかったのに対し、アンモニアの発生量は時間経過に伴い減少し、測定開始時には $1.2\text{mg/m}^2\cdot\text{h}$ であったものが、1年後には $0.1\text{mg/m}^2\cdot\text{h}$ になったと報告している。また、市販のセメント中には $3\sim12\mu\text{g/g}$ のアンモニアが含有されていることを明らかにした。一方、新築美術館内の環境を測定し、外気の約10倍の100ppbのアンモニアを検出したのに対し、カルシウムなどの無機物質の濃度は外気の約10分の1であったと述べ、これらの結果から、環境を汚染している主な物質はアンモニアであると推定している。

同文献中で、内装材に用いられる防炎剤、塗料からもアンモニアを検出したことを述べている。

4. 環境測定用モニターの開発

特定研究「古文化財」において、見城らは環境測定用モニターの開発に力を入れている。

4-1 pH 測定⁶⁾

吸収液には蒸留水に希硫酸を加え pH5.5としたものを50ml用い、捕集瓶中で90%/30分通気し、pH メーターで測定する。アマニ油が赤褐色に変色するような状態では pH は6.0以上に上がり、変色がほとんど認められない条件での pH は5.6~5.7であることから、pH5.8以上の場合、環境が悪いと判断する。

この方法の問題点は、希硫酸の使用により、本来水にほとんど不溶な粉塵をも溶かしてしまう可能性が高いことである。また、Ca の濃度が非常に高い場合(例えば、大きな粒が1粒入った場合)には、 CaSO_4 の溶解度は水温20°Cで0.205重量%とあまり大きくなないので沈殿を生じやすく、結果に誤差が含まれやすいことである。また、容器にガラスを使用した場合、ガラスからのアルカリ分の溶出があり、ポリエチレン容器を使用すべきであると鈴木らに指摘されている³⁵⁾。

4-2 変色試験紙法^{7,8,11)}

表4のような検定液中ろ紙(東洋ろ紙 No. 5, 2 cm×2 cm)を浸し、余分な液を取除いて試験紙とする。1昼夜放置し、pH 7にほぼ相当する黄緑色を示す場合、その環境は安定したと判断する(肉眼)。低湿度の折には変色が遅く、アマニ油との併用が望ましいと報告されているが¹¹⁾、日本の場合、低湿度=冬には、次項に述べるように、温度が低いためにアマニ油の変色速度も遅いので、併用しても同じ様な問題が残ると考えられる。

4-3 アマニ油含浸紙法^{7,8)}

油絵に使用するアマニ油をろ紙に浸して、黄色指数の値が20になるまで硬化させた¹¹⁾後用いる。当初、1カ月放置していた⁷⁾が、10日間放置⁹⁾に変更されている。肉眼で淡黄褐色になった時点、あるいは600nmの分光反射率を計測し、その値が落着いた時点で正常と判断していた⁷⁾が、後に、塗装技術の分野で乾燥によるアマニ油の黄変の度合いを測るために用いているとされる黄色指数を採用している⁸⁾。

$$\text{黄色指数} = \frac{100Y - 84.674Z}{Y}$$

(Y, Z: 3色刺激値)

具体的には判断基準値が30であったり⁸⁾、肉眼で褐色とあったりして、最終報告書⁹⁾にも統一した記載はない。またアマニ油は、乾燥によってもアルカリ性物質との反応によっても黄変する以上、「アルカリ因子」濃度の測定にあたっては、両者の区別ができるない黄色指数の利用には、充分な注意が必要であろう。

最終報告書には記載されていないが、昭和52年度の年次報告では見城はアマニ油の着色速度の温度依存性について検討しており、低温期には庫内のpHが高いにもかかわらずアマニ油の着色が薄く、高温になるにしたがってpHの変化がなくともアマニ油の着色が濃くなる現象があることを、実験庫で確認、報告している(図11)。アマニ油の着色速度にこのような温度依存性があることから、この報告では収蔵庫内の「アルカリ因子」濃度の測定には、前の変色試験紙の使用を勧めている。

このほか、絵画で使用されているアマニ油には種類もいろいろあり不純物も特定しにくいことなど、本判定法の応用には充分な注意を要する。

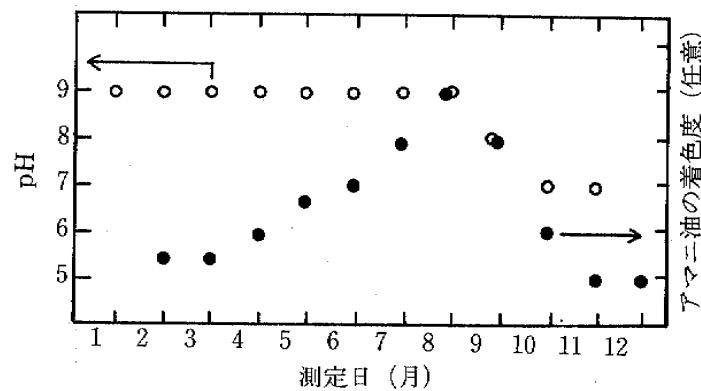


図11 実験庫での環境モニター結果
○ 変色試験紙によるpH測定結果
● アマニ油含浸紙による着色度測定結果
(600nm 分光反射率測定値, 任意目盛)

4-4 アルカリ土類金属（カルシウム、マグネシウム）濃度⁹⁾

3章で述べたように、特定研究「古文化財」の報告書内で見城は、コンクリート起源のCa/Mg比は、岩石土壤由来の値より大きくなることを明らかにした。そして庫内空気を通気した蒸留水とポルトランドセメント粉、くだいたコンクリート塊それぞれの蒸留水溶出液の3種類のいずれの溶液においても、カルシウム濃度が大きければ溶液のpHは高く、小さければ低いという傾向がみられたことから、 $(\text{Ca} + \text{Mg}) / (\text{Ca} + \text{Mg})_{\text{外気}}$ 比が2以下となったとき、展示収蔵に適した状態となったと判定することができる¹¹⁾と述べている。しかし、新設美術館のカルシウム、マグネシウム濃度はいずれも外気の10分の1以下であったという小塩の報告¹⁸⁾もあり、カルシウム濃度の測定が実際の館内の「アルカリ因子」濃度の測定になるのか不明である。

5. 除去対策

5-1 エアクリーナー（空気清浄機）による汚染物質の除去^{8,9)}

門倉は、コンクリート造りで、床面積、空間容積が実在の小規模収蔵庫に対応するような施設内で、各サイズの粒子の除去効率を測定した。2μmを境にして粒子の性質が大きく異なり、それ以下の粒子は黒色のカーボン状のものであり、それより大きな粒子は無色透明の結晶質の無機塩類が主体であることがわかった。0.5μm以上の粒子の浄化能力は85%程度あり(図12)，エアクリーナー稼働により、カルシウム量は明らかに減少することが原子吸光分析で確かめられた。それに伴い通気液のpHも減少し、変色試験紙の色も正常な状態に近付くことが、実験データから認められる。

しかし、『短期間での汚染因子の除去法としては、エアクリーナー稼働による効果は比較的大きい』と見城により表現されているにもかかわらず1つの報告書内の異なるページに、『空調設備をもたない施設でのエアクリーナーの使用効果は、粉塵に対しては大きいが、アルカリ

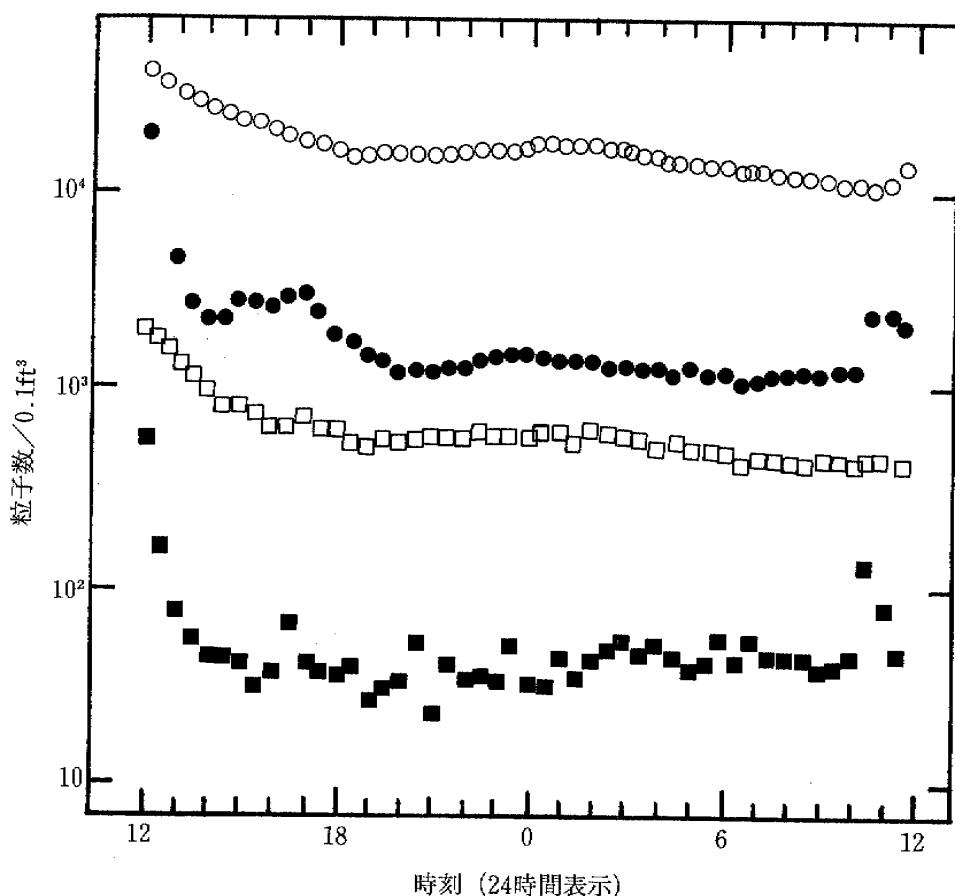


図12 エアークリーナー運転による粉塵の挙動
 0.5 μ ○ エアークリーナーOFF ● エアークリーナーON
 2.0 μ □ エアークリーナーOFF ■ エアークリーナーON

汚染因子に対しては効果が小さく』、『特殊フィルター、吸収剤の選択、組合せなどの検討が必要となる』と述べられていて、具体的な検討はなされていない⁹⁾。

5-2 強制換気による除去⁹⁾

見城らは、これまでの研究で「アルカリ因子」の発生量は経過年数と共に減少し、約2年ほどたてば比較的良好な環境になるが、実在の美術館で空調設備を用いて強制的に換気して環境をモニターしたところ、コンクリート打込み後約1年で良好な状態になったので、強制換気によって「枯らし」の期間を短縮できると述べている。

5-3 加熱による除去¹⁷⁾

鈴木らは、モルタルの加熱温度を変化させてアルカリ性物質の発生量を測定し、60°Cでは80時間で発生量が平衡に達することを明らかにし、あらかじめ一定の形で打設して養生後加熱処理を行なったプレキャストコンクリートの使用により、アルカリ物質の発生を低濃度に抑えることができる可能性を示唆している。

5-4 吸着剤による除去

鈴木ら¹⁷⁾はまた、市販の各種吸着剤による除去についても、モデル実験で検討を行なっている。ゼオライト系の吸着剤は除去効率は高いが吸着量が少ないため実用的ではなく、ヤシガラ

活性炭を用いた添着剤と表現される吸着剤による除去が有効であったと述べられている。

小塩ら¹⁸⁾は美術館内の環境は主にアンモニアで汚染されていると推定し、各種吸着剤のアンモニア除去性能を測定し、ゼオライト系の吸着剤が効果があったと報告している。ある美術館内で清浄化試験を行ない、アマニ油の黄色指数を用いて吸着剤の性能を評価した結果モデル実験と同様な結果が得られ、新築美術館の環境清浄化に対し市販脱臭剤の適用が可能であると述べている。

6. まとめ

これまでの研究の問題点と今後に残された課題を整理してみると、4つの側面に分けることができる。第1は「アルカリ因子」の材質に与える影響の明示であり、第2は原因物質の解明、第3は温度湿度などの複合要因に左右されない定量的なモニターの開発、第4は除去対策である。これらの点について述べて、本稿のまとめとする。

6-1 文化財材質に対して与える影響について

大気中に存在する「アルカリ因子」の文化財への影響については、アマニ油のけん化を起こし絵画等の表面に白い粉を生じさせるなど、文化財材質に与える影響が明らか、かつ具体的な場合を除けば、顔料等に変退色を起こすというあいまいな結果しかこれまでの研究では得られていない。変退色は、温度・湿度・光・酸素など、各種要因により起こるため、条件を一定にするのが困難で定量化しにくい。より具体的で定量化可能な影響を捕まえ、経過を観察することが重要である。

ことに、原因物質の1つとしてアンモニアガスが挙げられている以上、この物質の材質への影響をモデル実験などで確認することが急務である。また、カルシウム、マグネシウムなどの炭酸塩や塩基性炭酸塩に関しては、その付着により影響を受ける可能性のある材質を選定して影響を調査する必要がある。他方、具体的な展示収蔵のためのガイドラインを作ろうとするなら、汚染因子の許容範囲という考え方も導入して、今後考察していく必要があると考えられる。

6-2 原因物質の解明について

原因物質に関しては、天然物を多量に使用している以上、1つに限る必要はないと思われる。ただし、各原因の与える影響度合いについては検討する必要がある。

6-3 定量的なモニターの開発について

現在使用しているモニター（変色試験紙法、アマニ油含浸紙法）は、そのモニターを変化させる各種要因の積算結果を示すもので、要因それぞれの濃度に関する情報がない。例えば、内部に木造の内庫をもつ2重構造の収蔵庫では、木材による酸性雰囲気とコンクリートによるアルカリ性雰囲気の総和が示され、判断を誤りやすい。今後は、各因子との定量的な因果関係がはっきりしたモニターを開発することが必要である。

6-4 短期間での強制的な「枯らし」により生じる問題について

あらかじめ決められた開館期日に間に合わせるために、湿度を40%まで下げて空調をフル稼働し、短期間にコンクリート軸体を乾かす「枯らし」が対策の1方法として行なわれ、打設後開館まで半年という館すらあるようであるが、あまりに短期間の「枯らし」によりコンクリートそのものに対して悪い影響はないのか、新たな面からの検討をする。コンクリートの固化

や炭酸化、白華に伴う化学変化等に関しては、小林らにより精力的に研究が行なわれている。それによると、一般的にコンクリートがある程度の強度をもつまで1カ月、内部の化学反応がかなり進むには1年かかるといわれている。館内空調による強制的な水分排除は内部での水分移動を促進するが、反応完結前であるため内壁表面近くに「す」を生じる。この孔を通して水の移動がより活発に行なわれる結果炭酸化はますます促進され^{38,42)}、ナトリウム、カリウム等のアルカリイオンのコンクリート表面への移動^{40,41,43)}を誘発し、内壁表面での白華(炭酸ナトリウム等の生成³⁶⁾)がおこり、コンクリート本来の構造は壊され³⁷⁾強度が著しく低下する。またこの現象は次第に内部に進むため³⁹⁾、水分の移動とともに内部の未反応物質を常に大気中へ誘導放出する可能性がある。また、水分蒸発速度がはやい条件で生じた白華は微細粉末となるため³⁶⁾空気中に飛散しやすく、新たな汚染源を常に供給する可能性がある。

また、コンクリート内部に木造の収蔵庫を設けた2重構造の場合、強制換気により水の水分が急速に失われ、接合部のくるい、木の反り等が現われ、2重構造の利点が著しくそこなわれた例もみられるなど、あまりに短期間の「枯らし」が引起こす問題は多い。コンクリート打設から十分な時間をとって開館する余裕をもつことが、展示収蔵品の保存のためだけではなく、建物の維持管理のためにも大切であることを理解しておく必要があろう。

(注)図表の引用にあたっては、全体の研究の流れを読者が理解しやすく把握できるように、部分的に省略したり、図表の説明を書き換えたものがある。できるだけ原著の主旨を尊重するようにしたが、もし原著者の意向と反するものがあればお詫びする。不明な点や詳細については参考文献を見て、原著にあたっていただきたい。

謝 辞

関係資料の収集に当たり、鹿島建設技術研究所の寺内伸氏、東京大学生産技術研究所図書室、日本建築学会ほか、多くの方々にお世話をなったことを深く感謝申し上げます。

[参考文献]

- 1) 登石健三、見城敏子、うちたてコンクリート箱内に於いて美術品の材料がうける影響、保存科学3号、30-39、(1967)
- 2) 登石健三、見城敏子、うちたてコンクリート室内における美術品の材料の変化とその危険度の判定法に関する基礎実験、色材協会誌、41、179-181(1968)
- 3) 登石健三、見城敏子、石川陸郎、コンクリート建造物内空気の偏嗜性・偏酸性、保存科学8号、61-72(1972)
- 4) 見城敏子、登石健三、つくりたてコンクリート室内霧開気が油絵に及ぼす影響、保存科学9号、35-41(1972)
- 5) Kenzo Toishi and Toshiko Kenjo,: Alkaline material liberated into atmosphere from new concrete, *Journal of Paint Technology*, 39,152-155 (1967)
- 6) 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、昭和51年度特定研究「古文化財」年次報告、(1977)
- 7) 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、昭和52年度特定研究「古文化財」年次報告、(1978)
- 8) 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、昭和53年度特定研究「古文化財」年次報告、(1979)
- 9) 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、特定研究「古文化財」総括班、(1980)
- 10) 門倉武夫、文化財周辺気中の塵埃に関する研究 [III] 塵埃粒子の組成、保存科学19号、29-34(1980)
- 11) 見城敏子、収蔵物の保存法—酸、アルカリ対策および調湿、空気調和・衛生工学、57、759-763(1983)
- 12) 小塙良次、美術館の空調システム、冷凍、64、201-205(1990)
- 13) 小塙良次、美術館用空調システムの機能と特徴、設備と管理、No. 12, 53-57(1989)
- 14) Kenzo Toishi and Toshiko Kenjo,: A simple method of measuring the alkalinity of air in new concrete buildings, *Studies in Conservation*, 13, 213-214 (1968)

- 15) Kenzo Toishi and Toshiko Kenjo,: Some aspects of the conservation of works of art in buildings of new concrete, *Studies in Conservation*, 20, 118-122 (1975)
- 16) 見城敏子, 酸アルカリとその対策, 博物館資料館設計ファイル, 建築知識, 26, 135-137(1984)
- 17) 鈴木良延, 梶間智明, 打ちたてコンクリートから発生するアルカリ物質の除去, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1985)
- 18) 小塙良次, 松田弘一, 浅見欽一郎, 美術館用空調設備, 第9回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集, (1990)
- 19) 黒坂五馬, コンクリートからである空中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, (1972)
- 20) 黒坂五馬, コンクリートからである空中遊離物質が他の物質に及ぼす影響(その2)モルタルに入れた混和材及び鉄筋による亜麻仁油の変色, 日本建築学会関東支部第43回(昭和47年度)学術研究発表会, (1972)
- 21) 黒坂五馬, コンクリートからである空中遊離物質が他の物質に及ぼす影響(その3)空気組成ガスによるアマニ油の影響及び変色アマニ油の化学反応機構(1)昭和49年度日本建築学会関東支部研究報告集, (1974)
- 22) 黒坂五馬, コンクリートからである空中遊離物質が他の物質に及ぼす影響(その4)硫黄成分による亜麻仁油の変色, 昭和50年度日本建築学会関東支部研究報告集, (1975)
- 23) 黒坂五馬, コンクリートからである空中遊離物質が他の物質に及ぼす影響(その5)変色アマニ油の反応機構(2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), (1972)
- 24) 黒坂五馬, コンクリートからである空中遊離物質が他の物質に及ぼす影響(その6)空中遊離物質の化学的性質, 昭和51年度日本建築学会関東支部研究報告集, (1976)
- 25) 黒坂五馬, コンクリートからである空中遊離物質が他の物質に及ぼす影響(その7)空中遊離物質による沈殿物の解析と変色アマニ油の反応機構(3), 昭和51年度日本建築学会関東支部研究報告集, (1976)
- 26) 黒坂五馬, コンクリートからである空中遊離物質が他の物質に及ぼす影響(その8)空中遊離アンモニア(その1), 昭和51年度日本建築学会関東支部研究報告集, (1976)
- 27) 黒坂五馬, コンクリートからである空中遊離物質が他の物質に及ぼす影響(その9)空中遊離アンモニア(2), 昭和52年度日本建築学会関東支部研究報告集, (1977)
- 28) 黒坂五馬, 美術館博物館の展示室収蔵庫における使用建築材料から放出される空中遊離物質面よりみた設計上の留意点, 昭和52年度日本建築学会関東支部研究報告集, (1977)
- 29) 黒坂五馬, コンクリートからである空中遊離物質が他の物質に及ぼす影響(その10)空中遊離アンモニア(3), 昭和53年度日本建築学会関東支部研究報告集, (1978)
- 30) 黒坂五馬, 建築材料からの空中遊離物質が他に及ぼす影響コンクリート住居の収納設備と収納物との関係(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (北海道), (1978)
- 31) 黒坂五馬, コンクリートからである空中遊離物質が他の物質に及ぼす影響(その11), アンモニアガスの確認(1)日本建築学会大会学術講演梗概集, (九州), (1981)
- 32) 黒坂五馬, コンクリートからである空中遊離物質が他の物質に及ぼす影響(その12), 空中遊離アンモニア(4)日本建築学会大会学術講演梗概集, (北陸), (1983)
- 33) 黒坂五馬, コンクリートからである空中遊離物質が他の物質に及ぼす影響(その13)関東地方の実使用天然骨材へのスラグ骨材の混合状態の推測, 昭和60年度日本建築学会関東支部研究報告集, (1985)
- 34) 黒坂五馬, コンクリートからである空中遊離物質が他の物質に及ぼす影響(その14), 実在建物からのアンモニアガスの捕獲とアマニ油の変色(1)日本建築学会大会学術講演梗概集, (北海道), (1986)
- 35) 鈴木良延, 梶間智明, 大内孝司, コンクリートから発生するアルカリ物質の除去について, 清水建設株式会社技術研究所所内報告, 保管番号 LR-84-5335, (1984)
- 36) 小林一輔, 白木亮司, 星野富夫, アルカリ骨材反応によって早期劣化を生じた大規模集合住宅の調査研究(6)一白華現象とアルカリ分の移動一, 生産研究, 39, 480-483(1987)
- 37) 小林一輔, 白木亮司, 星野富夫, アルカリ骨材反応によって早期劣化を生じた大規模集合住宅の調査研究(7)一炭酸化による劣化一, 生産研究, 39, 525-528(1987)
- 38) 小林一輔, 宇野祐一, コンクリートの炭酸化に関する研究(1), 生産研究, 40, 241-244(1988)
- 39) 小林一輔, 宇野祐一, コンクリートの炭酸化に関する研究(3), 生産研究, 40, 570-572(1988)
- 40) 小林一輔, 白木亮司, 宇野祐一, 河合研至, 塩化物を含んだコンクリートの炭酸化による塩素の濃縮現象(1), 生産研究, 40, 573-576(1988)
- 41) 小林一輔, 白木亮司, 宇野祐一, 河合研至, 塩化物を含んだコンクリートの炭酸化による塩素の濃縮現象(1), 生産研究, 41, 234-236(1988)
- 42) 小林一輔, 宇野祐一, コンクリートの炭酸化のメカニズム(1), 生産研究, 41, 677-380(1989)
- 43) 小林一輔, 白木亮司, 正木俊行, コンクリート部材に形成されるアルカリの濃度勾配(II)一EPMAによる分析結果一, 生産研究, 40, 403-406(1988)
- 44) 江本義理, 汚染空気による生成物の分析, 保存科学 8号, 29-38(1972)

Reconsideration on the "Alkalinity" of Air in a New Concrete Building

Chie SANO and Sadatoshi MIURA

In 1967 Toishi and Kenjo first indicated the effect of new concrete on painting materials. They demonstrated that air in a new concrete building is alkaline and that film of linseed oil becomes dark in that atmosphere. Since then many researches have been made in Japan mainly by them and also by Kurosaka. As it is strongly recommended by the Agency of Cultural Affairs (Bunkacho) to reduce alkalinity in a museum to a certain level before its opening, this is a subject of deep concern for constructors as well as for people working for museums and detailed new studies have been conducted recently by them.

In this report all those researches are reviewed from the following four points: 1) the effects of alkalinity on art materials, 2) the causes of alkalinity, 3) the methods of evaluating damage risks, and 4) countermeasures. The first conclusion of this review is that a highly susceptible material quantitatively related to alkalinity should be chosen to evaluate the effect and the danger of an alkaline atmosphere. The second is that the effect of a small amount of ammonia gas in air to art materials should be studied more, because ammonia gas has been suspected as the probable cause of alkalinity in recent studies.

The authors point also out a problem which might be caused by a rapid drying of concrete. It is that various small alkaline particles are released easily from the concrete surface to the atmosphere during the drying process and that, even worse, concrete loses its strength if excessively dried. Such extreme dehumidifying is occasionally done to reduce alkalinity in a newly constructed museum building so that the museum may be opened according to a fixed schedule.