

# 世界遺産の大気環境と適正環境策定の研究

## A Study of the Effect of Air Pollution on Cultural Properties and Making the Best Environment for Them

西山 要一\*

Yoichi Nishiyama

### 1 はじめに

彫刻・絵画・古文書・考古資料・民俗資料などの有形文化財は、金属・石・木・繊維・紙・皮などの単一もしくは、複数の素材を組み合わせて作られていて、温度・湿度の変化や紫外線・黴・虫などによってしだいに腐食や劣化が進み、やがて消滅する。このような自然環境を要因とする文化財の劣化は、伝統的修理や合成樹脂を使った科学的保存処理を行い、適切に管理することによって損傷を防止することができる。とりわけ、建造物・記念碑など屋外の文化財は、急激な温度・湿度の変化や強い日射、紫外線、風雨など過酷な環境に曝されつつも、さまざまに保存・修復の工夫がなされて現在まで継承されてきた。

しかし、近年、ヨーロッパや日本など先進諸国のみならず、地球全体に大気汚染が著しくなり、大気汚染が原因の文化財の傷みが急速に進んでいることが明らかになってきている（表1）。

表1 文化財に影響を与える主な大気汚染因子

文化財の種類	主な大気汚染因子	文化財の変化
石造文化財	酸性雨・酸性霧・SO <sub>x</sub> ・NO <sub>x</sub> ・Cl <sup>-</sup> 等	溶解・劣化
金属文化財	酸性雨・酸性霧・SO <sub>x</sub> ・NO <sub>x</sub> ・Cl <sup>-</sup> 等	腐食・変色等
木造文化財	酸性雨・酸性霧・SO <sub>x</sub> ・NO <sub>x</sub> ・Cl <sup>-</sup> 等	劣化・変色等
壁画・顔料	酸性雨・酸性霧・SO <sub>x</sub> ・NO <sub>x</sub> ・Cl <sup>-</sup> 等	剥落・変色等
油彩画	アンモニア	油劣化・ニス白濁
染織品	SO <sub>x</sub> ・NO <sub>x</sub> ・Cl <sup>-</sup> ・O <sub>3</sub> 等	変色・褪色・劣化
紙・皮革	SO <sub>x</sub> ・NO <sub>x</sub> ・Cl <sup>-</sup> ・O <sub>3</sub> 等	変色・褪色・劣化
ガラス	SO <sub>x</sub> ・NO <sub>x</sub> ・Cl <sup>-</sup> ・O <sub>3</sub> 等	白濁

## 2 日本の文化財の大気汚染被害

日本では1956年、正倉院校倉の宝物の銀壺の艶・色合いに変化が観察され、わが国屈指の文化財の変化であるだけにその原因がいずれにあるのか注目を集めた。これを契機に大気汚染の影響調査が始められ、正倉院の西側・北側を通り若草山を周遊するドライブウェイを往還するバスや自動車の排気ガスが主な原因であることが判明した。現在では、大気汚染による文化財被害は全国に見られ、その大気観測データとともに被害状況データが多数集積されている<sup>1)</sup>。

金属文化財では、神奈川県鎌倉市の高德院阿弥陀如来座像（鎌倉大仏）、京都府宇治市の平等院阿弥陀堂の鳳凰像と梵鐘、京都市の京都国立博物館のロダン作“考える人”、奈良市の東大寺八角灯籠など、石造文化財では、京都国立博物館の多宝千仏石幢、大阪府の鹿谷寺十三重層塔、大分県の普光寺不動明王磨崖仏など、多くの文化財が被害を受けている。

### (1) 金属文化財の被害（表2）

東大寺大仏殿正面の青銅八角灯籠は1300年間、風雨に曝されながら金鍍金と黒灰色や濃緑色・濃青色の落ちついた姿を保ってきたが、最近40年間に、色調が黄緑色に変化してきた。1998年の東京国立文化財研究所の錆の分析によると、塩基性硫酸銅（プロコンタイト  $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ 、アントレライト  $\text{CuSO}_4 \cdot 2\text{Cu}(\text{OH})_2$ ）および塩基性塩化銅（アタカマイト  $\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ ）が検出され、大気汚染による腐食であることが確認された<sup>2)</sup>（写真1）。

高德院阿弥陀如来坐像でも東京国立文化財研究所による錆の分析で塩基性硫酸銅（ $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ ）や塩基性塩化銅（ $\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ ）、硫酸鉛（ $\text{PbSO}_4$ ）が検出され、京浜工業地帯から東京湾を南下し三浦半島を迂回して飛来する硫化物や海塩中の硫化物などの大気汚染によるものと推測されている<sup>3)</sup>（写真2）。

表2 大気汚染による日本の金属製文化財の被害（註文献等による）

文化財の名称	大気汚染による生成物又は検出物
栃木県・東照宮御旅所本殿銅板葺き屋根	プロコンタイト ( $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ )
東京都・東京国立博物館表慶館銅板葺き屋根	プロコンタイト ( $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ )
東京都・赤坂離宮銅板葺き屋根	プロコンタイト ( $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ )
神奈川県・高德院阿弥陀如来座像（鎌倉大仏）	プロコンタイト ( $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ ) アタカマイト ( $\text{CuSO}_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ , $\text{PbSO}_4$ )
京都府・平等院銅鐘・阿弥陀堂扉金具	プロコンタイト ( $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ )
京都府・浄瑠璃寺三重塔青銅製相輪・九輪	プロコンタイト ( $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ )
京都府・京都国立博物館“考える人”	プロコンタイト ( $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ ) アントレライト ( $\text{CuSO}_4 \cdot 2\text{Cu}(\text{OH})_2$ ) アタカマイト ( $\text{CuC} \cdot 12 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ など)
奈良県・東大寺青銅八角灯籠	プロコンタイト ( $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ ) アントレライト ( $\text{CuSO}_4 \cdot 2\text{Cu}(\text{OH})_2$ ) アタカマイト ( $\text{CuC} \cdot 12 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ など)
岡山県・宝福寺三重塔	アントレライト ( $\text{CuSO}_4 \cdot 2\text{Cu}(\text{OH})_2$ ) アタカマイト ( $\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ )
鳥根県・日御崎神社銅製飾金具	塩化第一銅 ( $\text{CuCl}$ )

また、京都国立博物館のロダン“考える人”は像表面の水筋に沿って塩基性硫酸銅と塩基性塩化銅と思われる黄緑色の錆が発生し像表面の半ば以上を覆うほどになった。京都国立博物館は京都盆地の工場や自動車の排気ガスが吹き寄せる京都盆地の東縁、東山の麓にあり、その原因は大気汚染にあることは明らかである。本彫像は1997年に科学的保存処理が行われ、再び原位置に設置されている<sup>4)</sup> (写真3)。

奈良市の興福寺五重塔の金銅製相輪は、大部分が黒灰色または濃緑色の錆に覆われている中で、水煙の先端部分に黄緑色の錆が発生している。奈良盆地の汚染大気は西風によって盆地東縁の斜面から山に吹き寄せられ、高い位置にあるほどに飛来する大気汚染物質の量も多い。興福寺の塔はこのような環境の下にあって、大気汚染の影響が顕著に見られる例である (写真4)。

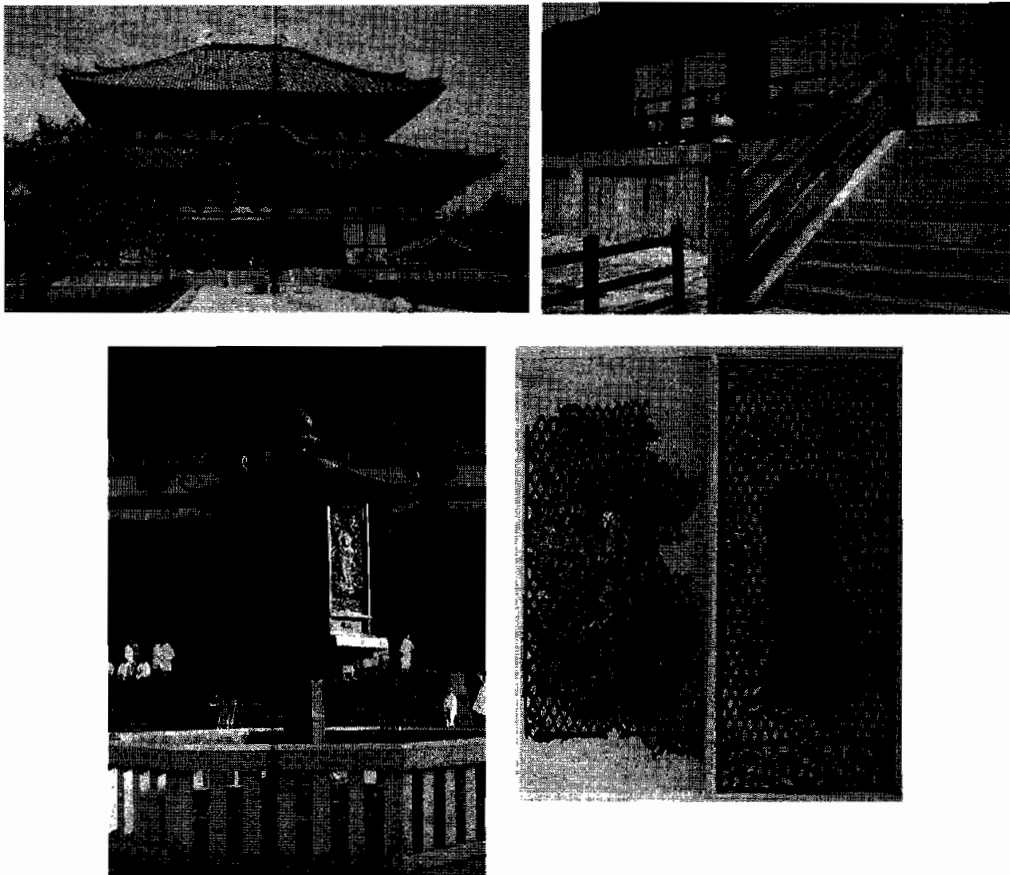


写真1 東大寺 (上左：金堂・大仏殿 上右：金堂石段脇欄干の青銅製擬宝珠、軒下の擬宝珠は黒く、軒下から外れる擬宝珠は黄緑色の錆に覆われ、酸性雨に曝されるか否かの差異が顕著に見られる。下左：金銅八角燈籠 下右：火袋の音声菩薩羽目板、左は1960年代に取り外されて屋内保存され、右はその間も大気にさらされていた。最近40年間の大気汚染の影響の激しさが示されている。



写真2 高德院・阿弥陀如来坐像（鎌倉大仏）

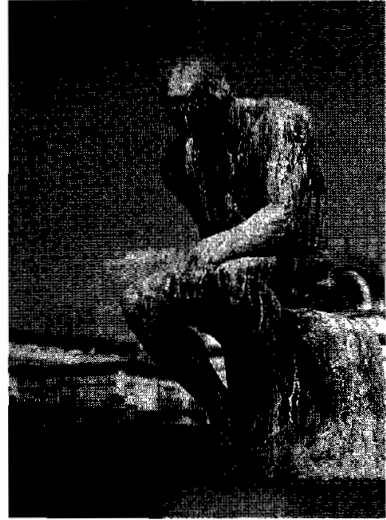


写真3 京都国立博物館・ロダン“考える人”

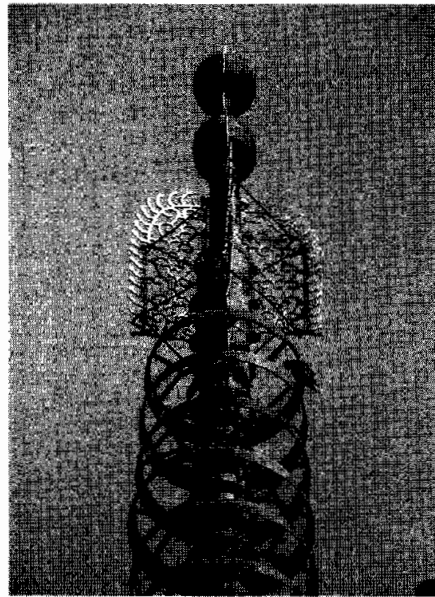


写真4 興福寺五重塔 相輪の水煙先端に大気汚染に特有な黄緑色の錆が見られる

## (2) 石造文化財の被害（表3）

大阪府と奈良県の府県境、二上山の南側竹之内峠近くに奈良時代創建の鹿谷寺跡がある。二上山は凝灰岩の産地として知られ、古墳時代の石棺や寺院建物の基壇覆石の材料として盛んに利用された。鹿谷寺の十三重層塔は凝灰岩の岩盤から削り出された貴重な石塔であるが、屋根上面は黒く汚れてその先端は欠け落ち、表面のいたるところが剥落・溶解するなど、大気汚染による損傷の典型が見られる。大阪平野の大気汚染が西風によって、濃度を高めつつ鹿谷寺付近から竹之内峠を通過し奈良盆地に広がっていることが判明している（写真5）。



写真5 鹿谷寺の十三重層塔 屋根上は黒く汚れ、表面の剥落・溶解が著しい

京都国立博物館の館外の庭に置かれていた中国・遼代の石灰岩多宝千仏石幢は、1927年に展示されて以来45年間風雨に曝されていた。1972年には表面に析出物が生じ、また剥落・溶解して、彫刻された仏像が鮮明さを失い刻まれた銘文が判読できなくなってきた。東京国立文化財研究所が石幢表面に生じた白色析出物を分析したところ硫酸カルシウムであることが判明し、大気汚染の被害であることが確認された<sup>8)</sup>。その後、多宝千仏石幢は引き続き露天に曝しておけば損傷が進み文化財としての価値を失うものと判断され、博物館内に収蔵・展示され現在に至っている。

愛知県犬山市の博物館明治村には近代の多くの建造物が移築・展示されている。京都市から移築された聖ヨハネ教会堂は著名な煉瓦造り建造物であるが、その煉瓦壁の表面に白い析出物が生じ壁の剥落などの損傷が著しくなってきた。析出物分析の結果、硫酸ナトリウム ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) などの大気汚染・酸性雨に起因する結晶であることが判明した<sup>5)</sup>。

大分県別府市では安山岩や凝灰岩の石塔・石仏も大気汚染・酸性雨による硫酸ナトリウムや硫酸カルシウムなどの結晶の成長によって表面の剥落が進んでいることなどが報告されている<sup>6)</sup>。

表3 大気汚染による日本の石造文化財の被害（註文献等による）

文化財の名称	大気汚染による生成物又は検出物
愛知県・明治村聖ヨハネ教会堂煉瓦壁	テナルダイト ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) アフタライト ( $\text{K}_2\text{Na}(\text{SO}_4)_2$ ) トロナ ( $\text{Na}_2\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) サーモナトライト ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )
京都府・京都国立博物館石灰岩多宝千仏石幢	ジプサム ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )
大分県・別府市美術館安山岩塔（五輪塔等）	$\text{NO}_3$ , Ca等
大分県・別府市国東塔・石製灯籠（安山岩）	$\text{SO}_4^{2-}$ , Na等
大分県・普光寺不動明王磨崖仏（凝灰岩）	Ca, $\text{SO}_4^{2-}$ 等

### 3 世界遺産“古都奈良の文化財”の大気環境

奈良大学が1987年より行っている奈良盆地北部の大気汚染と文化財保存環境の調査・研究では、東大寺、春日大社、平城宮跡などの文化財所在地10地点で1ヵ月曝露型のトリエタノールアミン円筒濾紙法（TEA-CF）によって、二酸化硫黄（SO<sub>2</sub>）、二酸化窒素（NO<sub>2</sub>）、塩化物イオン（CL<sup>-</sup>）の濃度を測定するとともに、文化財の代替サンプルとして金属板と彩色板を大気曝露しその変化を測定している（図1・写真6）。また、奈良公園・奈良町では、1992年から2001年までに5回にわたり1日曝露型の二酸化窒素測定カプセル（筑波総合科学研究所）をおよそ100か所に設置し二酸化窒素濃度を測定している。

その結果、二酸化硫黄の高濃度域は観測域中央の工場群に一致し、主として工場の排ガスが発生源であること、二酸化窒素の高濃度域は国道24号線と国道369号線の交差点付近で、主として自動車排ガスが発生源であること、塩化物イオンの高濃度域は奈良山丘陵付近にあり、奈良市のごみ焼却場（清掃工場）の排煙が発生源であることが明らかとなった（表4・図2）。

1989年以降の経年変化に注目すると、二酸化硫黄は各観測地点で最近15年間、3～5ppb/dayを測定しほぼ変化のない横ばい状況である。二酸化窒素は1989年～1996年までが各観測地点で8～18ppb/dayを測定しその間にはほぼ変化のない横ばい状況であるが、1997・1998年に一旦減少

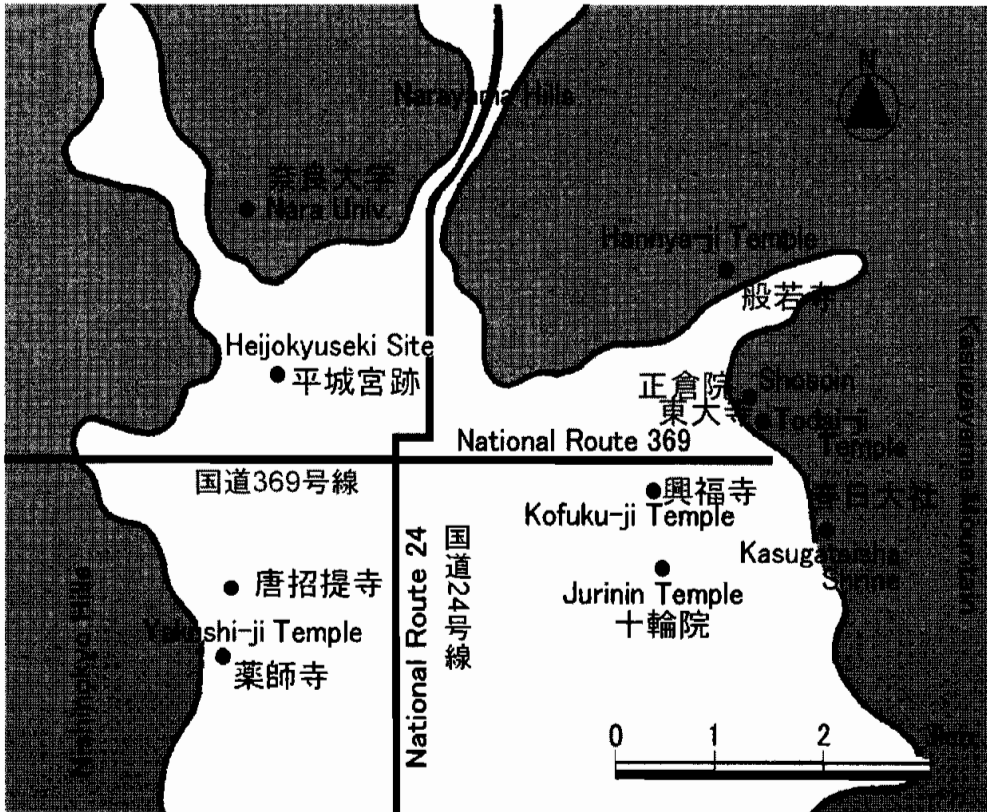


図1 大気汚染観測点

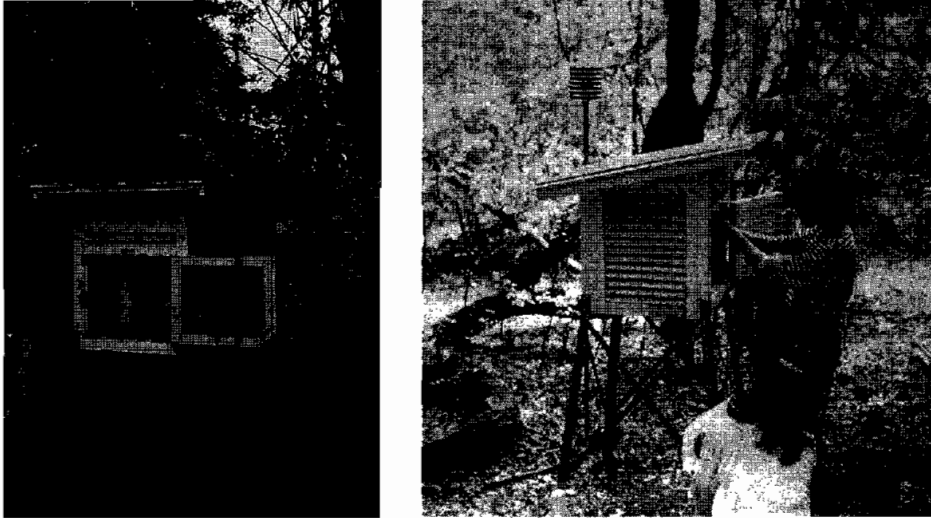


写真6 大気汚染観測 トリエタノールアミンを含ました円筒濾紙を1.8mの高さの円形シェルターに設置し1か月間大気曝露する。百葉箱には自記温湿度計・温湿度データログ、金属・顔料サンプルなどを設置し 1か月に一度、円筒濾紙の回収やデータの収集を行う（左：般若寺 右：春日大社（春日山原始林））

表4 大気汚染測定値（2003年1月～12月の日平均値）

観測地点	二酸化硫黄		二酸化窒素		塩化物イオン ( $\mu\text{g}$ )
	( $\mu\text{g}$ )	(ppb)	( $\mu\text{g}$ )	(ppb)	
奈良大学 外部	13.4	3.6	62.6	17.1	3.6
平城宮跡 外部	13.8	3.5	72.6	18.4	6.8
薬師寺 外部	12.5	3.2	70.1	17.1	5.1
般若寺 外部	11.4	3.1	52.2	14.7	3.7
正倉院 外部	9.2	3.2	44.4	12.9	3.2
	鼓坂門	7.9	2.9	50.7	13.8
東大寺 外部	6.4	3.0	40.2	12.6	3.2
興福寺 外部	6.7	2.8	60.7	15.9	1.9
	駐車場	11.2	3.2	82.8	20.2
春日大社 原生林	6.2	2.8	34.7	11.4	1.7
	駐車場	7.8	3.0	45.1	13.0
十輪院 外部	15.4	3.3	70.0	17.7	5.6

$\mu\text{g}=\mu\text{g}/100\text{cm}^2/\text{day}$  ppb=ppb/day (by empirical formula:  $\text{SO}_2(\text{ppb})=0.043 \times \mu\text{gSO}_3/100\text{cm}^2/\text{day}+2.8$ ,  $\text{NO}_2(\text{ppb})=0.118 \times \mu\text{gNO}_2/100\text{cm}^2/\text{day}+3.3$ )

に転じるものの、1999年から上昇に向かい1990年代前半の水準に戻っている。塩化物イオンは1995年以降ほとんどの観測点で減少傾向が見られる。この減少傾向は、塩化物イオンの発生源であるゴミ焼却の改善、すなわちゴミ焼却に伴うダイオキシン発生問題を契機とするゴミの分別収集の徹底化の結果であろう（図3）。

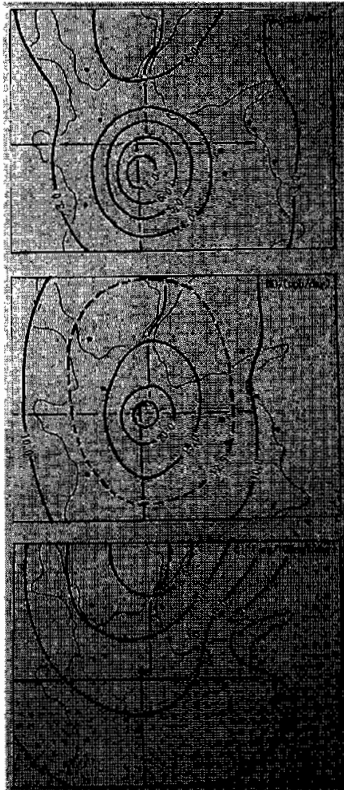


図2 大気汚染濃度分布(2003年)

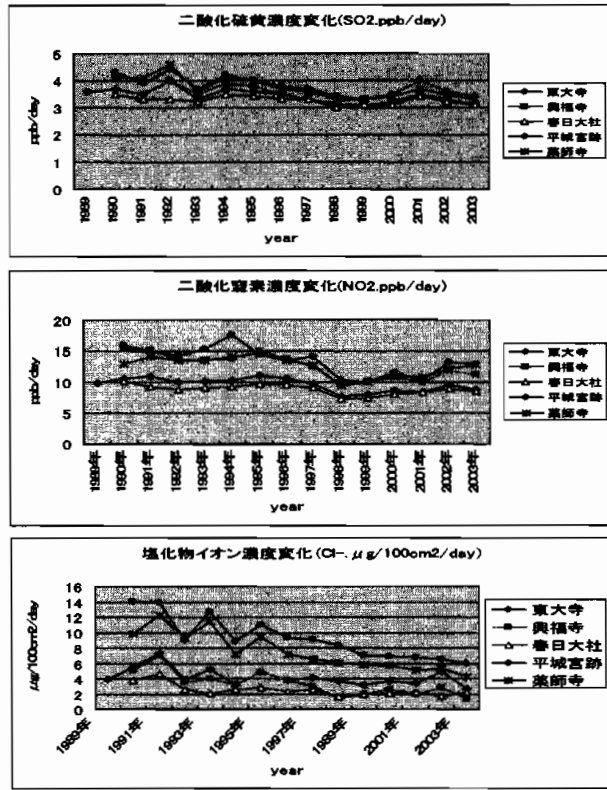


図3 大気汚染濃度の経年変化

また、奈良公園・奈良町の1日曝露型のカプセル測定による二酸化窒素濃度は、2001年の調査では交通量の多い県道沿いで40~50ppbに達し、駐車場もその周辺より高濃度を示し、発生源は自動車排ガスであることなどが明らかになった。各観測点における経年変化に注目すると、2001年の二酸化窒素濃度値は1993年の濃度値の1.5~2倍に達しており、地形・植物林・建造物などの環境条件によって局所的に高濃度域が存在することを示している。北部奈良盆地10か所でトリエタノールアミン円筒濾紙法で測定した二酸化窒素の分布とその経年変化の動向からは推測し得ない結果がここには示されている。(図4)

大気曝露した金属板の表面鍍に含まれる硫黄と塩化物イオンの量(表5)および金属板の色彩変化、顔料彩色の変化について、時間経過と観測地点間の大気汚染濃度差を比較・検討した。その結果、大気汚染濃度と文化財サンプルとしての金属板の色変化および顔料の色変化には明らかに相関関係のあること、すなわち、大気汚染濃度が高い地点ほど文化財サンプルの変化が著しいことが判明した(図5・図6)。実際の金属製の文化財、彩色された文化財にも同様の損傷を及ぼしていることが推測される。



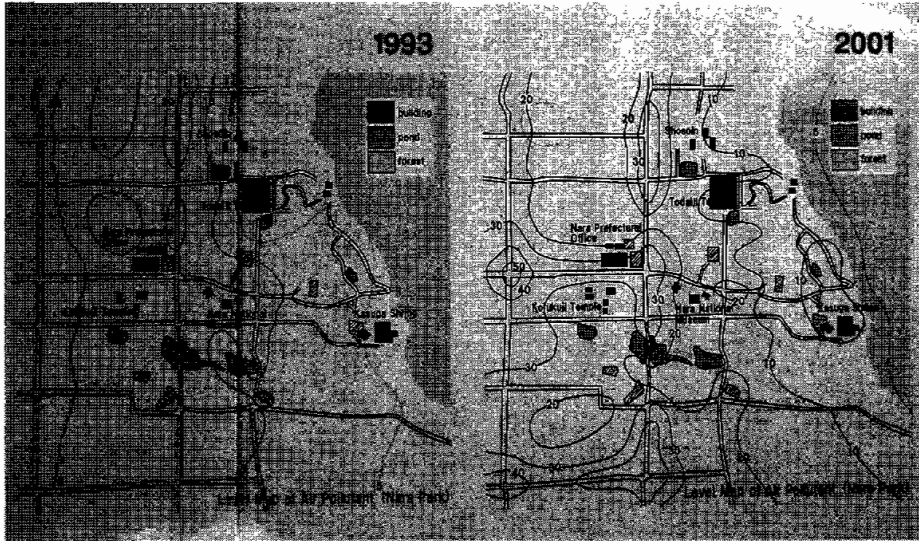
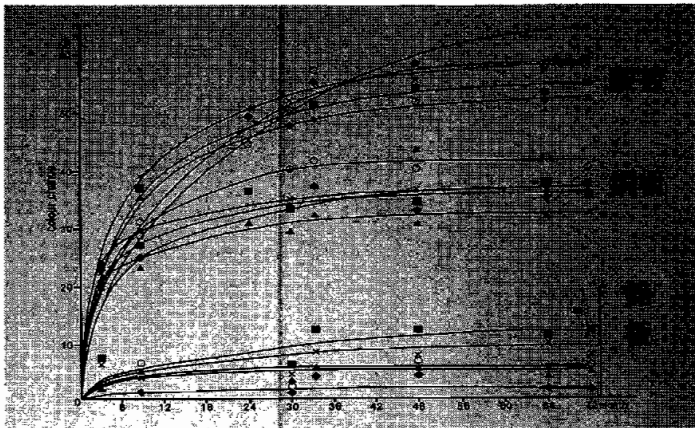


図4 奈良公園・奈良町の二酸化窒素分布 (左：1993年 右：2001年)

表5 金属板テストピースの錆に含まれる大気汚染物質の量 (6月曝露後)

観測地点	硫黄 (mg/100cm <sup>2</sup> )				塩化物イオン (mg/100cm <sup>2</sup> )			
	銀	銅	鉛	錫	銀	銅	鉛	錫
東大寺	2.0	5.4	7.7	0.1	7.9	2.9	3.3	0.7
興福寺	1.3	3.0	7.3	0.1	5.1	1.7	1.6	0.6
春日大社	1.6	3.3	7.3	0.1	4.1	0.9	1.1	0.4
平城宮跡	1.7	3.3	6.6	0.3	8.1	3.6	3.4	1.0
薬師寺	2.1	3.6	8.6	0.3	7.1	2.6	2.7	0.9
奈良大学	2.3	7.0	11.1	0.4	10.4	3.7	3.9	0.9



- 平城宮跡
- ◆ 薬師寺
- × 奈良大学
- 春日大社
- ▲ 興福寺

図5 金属サンプルの色彩変化

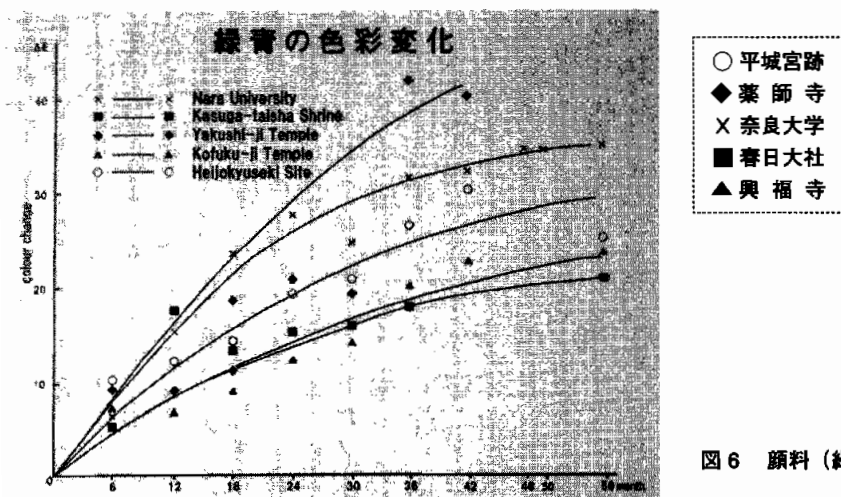


図6 顔料（緑青）の色彩変化

#### 4 校倉・木櫃・樹木の大气汚染浄化効果

正倉院の宝物が1300年後の今日まで原形・原色を保つすばらしい状態で保存できたのは、校倉建物と唐櫃の調温・調湿の効果であるといわれている。奈良大学が行っている東大寺経庫（校倉）の調査でもそれは示されている。経庫の温度の日較差は、校倉外部は14度、校倉内部は4度、木櫃内は2～3度、湿度の日較差は、校倉外部は55%、校倉内部は15%、木櫃内は1～2%と、櫃内では殆んど変化しないと言ってもよいくらいである。木櫃内には日射に含まれる紫外線が届かず、文化財を損傷するさまざまな要因が最少限に抑制され、保存環境としては理想的であるといえよう。正倉院宝物の保存には定期的な曝涼（虫干し）と点検、防火・防災など日常の管理の果たした役割も大きい。

さらに、経庫における大気汚染値に注目すると、二酸化硫黄は、校倉内部は外部の13分の1、櫃内は外部の15分の1に、二酸化窒素は、校倉内部は外部の2分の1、木櫃内は外部の140分の1に、塩化物イオンは、校倉内部は外部の11分の1に、木櫃内部は外部の16分の1に減少している。校倉の外部と内部と木櫃内に置いた金属板と彩色板の文化財サンプルの色彩変化が、外部は大きく内部は小さく、木櫃内はほとんど変化していないことから、木造の校倉や木櫃が大気汚染物質の内部浸入を防ぎ、汚染大気を浄化する効果の大きいことを示している（写真7・図7）。

また、奈良公園や奈良町（元興寺周辺の旧市街）の調査においても、樹木が同様な温湿度調整と大気汚染浄化の機能を果たしていることが判明した。春日大社原生林中の温度の日較差は平均7.5度、湿度の日格差は平均35%に対し、奈良山丘陵の疎林に囲まれた奈良大学の温度の日較差は平均9.2度、湿度の日較差は平均36%で、鬱蒼とした原生林中のほうが温湿度変化の小さいことがわかる。

奈良公園の二酸化窒素の分布においても、県道高畑一紀寺線沿いに対して飛火野の芝地は約21%減、春日大社参道周辺のマツ・ヒノキなどの植栽疎林中は約33%減、マツ・クヌギ・シ

イ・アセビなど針葉樹と広葉樹が渾然とする原生密生林は約54%減と、樹木の種類が豊富で深い森林であるほどに汚染大気の流入が少なく、且つ、汚染大気を浄化する力の強いことがわかる。原生林は、東大寺経庫、十輪院本堂等の木造建造物や興福寺国宝館（コンクリート建造物）と同程度の大気汚染防御の効果がある（表6）。

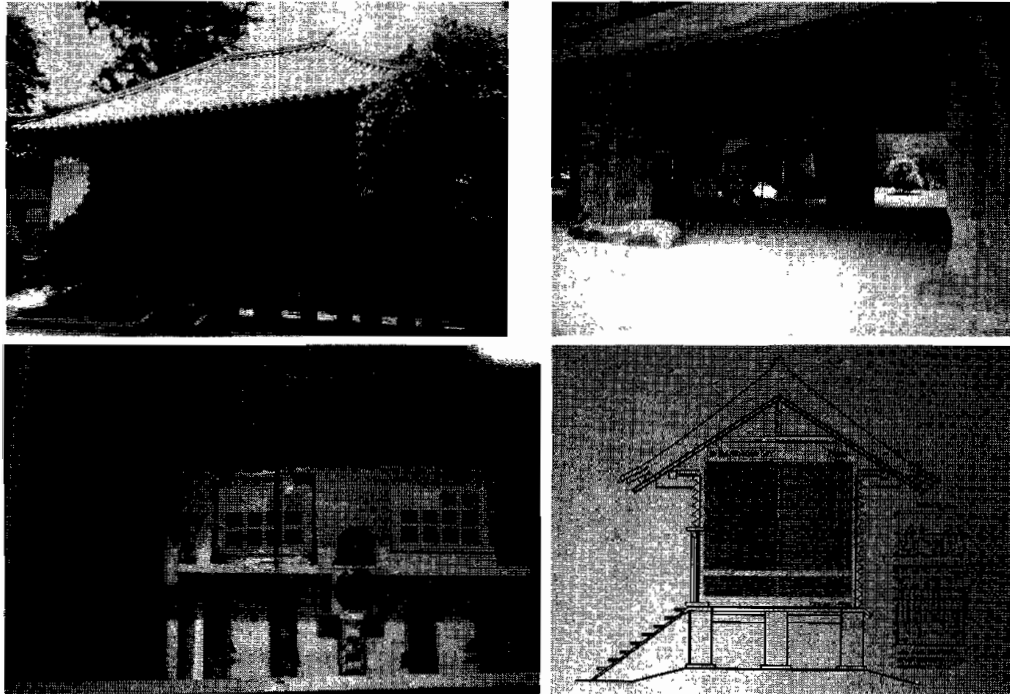


写真7 上左：東大寺経庫（校倉）上右：経庫外部の大気観測 下左：経庫木櫃内の観測機器・サンプル

図7 経庫の温度・湿度・大気汚染

表6 木造建物・校倉・原生林・鉄筋コンクリート建物の大気汚染防除効果（2003年1月～12月の日平均値）

観測地点	二酸化窒素 減少率		二酸化硫黄 減少率		塩化物イオン 減少率		備 考	
	μg(ppb)	(%)	μg(ppb)	(%)	μg	(%)		
東大寺経庫	外 部	40.2(12.6)	100.0	6.4( 3.0)	100.0	3.2	100.0	8世紀の高床木造建物（校倉）
	内 部	21.0( 7.9)	52.2	0.5(<2.8)	7.8	0.3	9.3	
	内部櫃内	0.3(<3.3)	0.7	0.4(<2.8)	6.3	0.2	6.3	
十輪院本堂	外 部	70.0(17.7)	100.0	15.4( 3.3)	100.0	5.6	100.0	12世紀の木造建物
	内 部	42.5(13.3)	60.7	2.3(<2.8)	14.9	0.7	12.5	
春日大社	駐 車 場	45.1(13.0)	100.0	7.8( 3.0)	100.0	2.8	100.0	鉄筋コンクリート建物
	原生林内	34.7(11.4)	76.9	6.2( 2.8)	79.5	1.7	60.7	
	宝物館内	15.6( 7.9)	34.6	0.8(<2.8)	10.3	0.3	10.7	
興 福 寺	外 部	60.7(15.9)	100.0	6.7( 2.8)	100.0	1.9	100.0	鉄筋コンクリート建物
	国宝間内	28.1( 9.1)	46.3	1.3(<2.8)	19.0	0.4	21.1	
奈良公園	高畑紀寺線	(15.7)	100.0					2000年5月の二酸化窒素測定カプセル（24時間曝露）による
	芝 生 地	(13.1)	83.4					
	植栽林内	(11.8)	75.2					
	原生林内	( 9.0)	57.3					

μg = μg/100cm<sup>2</sup>/day ppb = ppb/day（経験値による）

## 5 屋内文化財の大気汚染影響

日本の古代金銅仏を代表する東大寺盧舎那仏（大仏）は、天平勝寶4年（751）に完成し開眼供養が行われた。しかし、鎌倉時代・治承4年（1180）の平重衡の南都焼き討ちによる東大寺金堂（大仏殿）の炎上と重源による建久6年（1195）の再建、さらに室町時代・永禄10年（1567）の松永久秀の三好三人衆攻めによる再度の金堂炎上と江戸時代・元禄5年（1692）の公慶による再興と、2度にわたる被災と再建を繰り返してきた。大仏は被災のたびに像上部が失われ、再建のたびに消失部分を追加鑄造した結果、現在の大仏は蓮華座から膝までが天平時代、腹部が鎌倉時代、胸から頭部が江戸時代の造作といわれている。

東大寺大仏のような金銅製文化財の劣化は、大気（酸素）と雨（水）などによるゆるやかな酸化が原因とされてきたが、近年になって大気汚染の影響が加わり、急激に腐食損傷の進む例が多く見られるようになってきた。高德院阿弥陀像（鎌倉大仏）や東大寺八角灯籠がその例である。しかし、東大寺大仏は大仏殿内にあつて直接の風雨に曝されない事、そして毎年8月のお身拭いによって輝きが甦ることもあつて、腐食・劣化についてはあまり問題視されてこなかったが、詳細に観察すると、蓮華座下部や像の髻・隅の部分などさまざまな部位に黄緑色や緑色の錆の発生が見られる。

また、奈良市の旧市街・奈良町に所在する十輪院は、鎌倉時代の書院様式を思わせる落ちついた風格ある本堂と、同時代の作とされる石造地藏菩薩と石仏龕で知られている。いまは東京国立博物館にある校倉造りの経蔵ももとは十輪院にあつたものである。十輪院石仏龕は本堂建物内にあつて直接の風雨に曝されることはなく、しかも、堅固な花崗岩で作られていることもあつて顕著な劣化・損傷は見られず、地藏菩薩立像をはじめ仏龕に彫られた釈迦如来・多聞天などの薄肉彫りと線刻の諸像も極めて良好な保存状態にあり、後者には彩色も残されている。しかしながら、細部を詳細に観察すると、持国天像・多聞天像や闕石などに白色の析出物が生じ、僅かながら表面が剥落しているのを見ることができる。

東大寺金銅盧舎那仏と十輪院石造地藏菩薩はともに建屋内にあるものの劣化損傷が懸念され、早急な保存のための原因究明と対策が急がれる。

### (1) 東大寺の大気環境

東大寺大仏殿では建物内外で、温湿度と大気汚染濃度を観測し、観測値を東大寺経庫（校倉）と比較した（2003年8月～12月の値・表7）。

大仏殿の気温は、殿外気温の最高最低の較差は37℃、殿内気温の最高最低の較差は34℃、湿度は殿外湿度の最高最低の較差は66%、殿内湿度の最高最低の較差は65%で、大仏殿内外の温湿度はほとんど変わらない。これは、大仏殿正面の扉が毎日開扉され、四周の連子窓からは常に外気が流入するからである。常に閉じられている経庫の庫外気温の最高最低の較差は37℃、庫内気温の最高最低の較差は30℃、湿度は庫外湿度の最高最低の較差は69%、庫内湿度の最高最低の較差は33%で、建物内外に大きな差のあることがわかる。

表7 東大寺大仏殿と経庫（校倉）の大気汚染濃度と温湿度（2002年8～12月）

大気汚染物質		大仏殿内		経庫（校倉）			単 位
		外	内	外	内	櫃内	
二酸化硫黄 (SO <sub>2</sub> )		3.4	2.9	3.1	<2.8	<2.8	ppb/day
二酸化窒素 (NO <sub>2</sub> )		10.4	8.7	9.4	5.5	3.4	ppb/day
塩化物イオン (Cl <sup>-</sup> )		3.9	1.3	3.2	0.1	0.9	μg/100cm <sup>2</sup> /day
温 度	最 高	34	32	35	31	31	℃
	最 低	3	2	2	1	2	
湿 度	最 高	100	99	98	88	74	%
	最 低	34	34	29	50	55	

大仏殿内の大気汚染濃度は殿外に比して、二酸化硫黄は15%の減少、二酸化窒素は17%の減少、塩化物イオンは66%の減少である。経庫内の大気汚染濃度は庫外に比して、二酸化硫黄は10%の減少、二酸化窒素は42%の減少、塩化物イオンは97%の減少である。大仏殿内には開扉と連子窓からの外気の流入とともに大気汚染物質が侵入していることがわかる。

毎年8月7日の東大寺大仏のお身拭いは、奈良の風物詩としてよく知られる年中行事である。この日、大仏は生まれ変わり再び輝きを増す。筆者は2002年8月のお身拭いに参加し桶一杯集められた塵埃を、東大寺のご好意により採取することができた（写真8）。

塵埃は大仏の頭上・膝上・蓮華座上・基壇上の4ヵ所に別けて採取した。何れの塵埃も細かい土埃・綿埃、木葉・木小片・松の種、蛾・蝶・昆虫・小鳥の死骸、人工物としては金箔・朱塗木片・銅錆片などが含まれていた。

これらの塵埃のうち、細かい土埃と綿埃を採取箇所ごとに化学成分を純水で抽出し、イオンクロマトグラフィーで分析した（表8）。その結果、塵埃には金銅と化学反応して錆を発生させる陰イオン（Cl<sup>-</sup>・NO<sub>2</sub><sup>-</sup>・NO<sub>3</sub><sup>-</sup>・SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>）が多く含まれること、通常の降下物に見られる陽イオン（Na<sup>+</sup>・NH<sub>4</sub><sup>+</sup>・K<sup>+</sup>・Mg<sup>2+</sup>・Ca<sup>2+</sup>）のほかに、大仏の頭上の塵埃にはリン（PO<sub>4</sub><sup>2-</sup>）が含まれていた。リンは線香や蝋燭が燃焼降下したものであろうか。

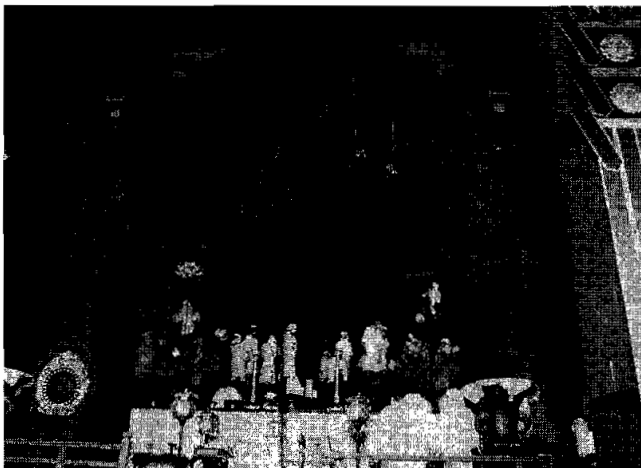


写真8 大仏のお身拭い

表8 大仏上から採取された塵埃の分析

採取位置	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
1 頭上	0.10	2.25	0.02	15.19	7.47	21.18	7.0	0.1	0.1	0.1	0.1
2 膝上	0.23	40.58	0.03	442.46	0.00	789.05	123.5	0.9	1.8	0.6	0.1
3 蓮座上	1.15	24.45	0.12	195.43	0.00	536.21	49.5	6.4	0.6	0.2	0.1
4 基壇上	1.11	40.20	0.19	303.02	0.19	509.13	87.1	19.4	1.4	0.3	0.1

奈良市における粒子状物質の年平均濃度 (μg/m <sup>3</sup> )											
F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
0.00	0.81	0.00	0.00	2.98	0.00	5.49	0.67	2.14	0.24	0.23	0.00

(2) 十輪院の大気環境

十輪院本堂では1993年から大気環境測定を行ってきた。2002年の大気汚染濃度においては、本堂内は本堂外に比べて二酸化硫黄は24%の減少、二酸化窒素は30%の減少、塩化物イオンは75%の減少であった。また、2002年12月11日～2003年1月13日の温湿度においては、本堂内は本堂外に比べて、温度の日較差は77%の縮小、湿度の日較差は47%縮小して、木造建造物である本堂が大気汚染と温湿度変化を緩和し、石造仏の良好な保存環境を保っていることが判る。また、2003年3月3日に行った石仏龕の東西南北面の照度と紫外線強度測定値も低く、彩色がよく保存されている要因の一つでもあろう。

また、石仏龕の表面pH値、白色析出物のX線分析、石仏龕表面の塵埃の分析も行った。石仏龕表面4か所で地表からの高さを変えながらpH測定を行った。石仏龕東面では、上方に行くにしたがって酸性度が高まるが(表10)、他の3か所のpH値も同じ傾向である。白色の析出物は蛍光X線装置とX線回折装置で分析した。持国天線刻像の地表上122cmに発生している析出物はナトリウムと硫黄からなる硫酸ナトリウム、鬮石の地表上8cmに発生している析出物はカルシウムと硫黄からなる硫酸カルシウムおよび硫酸ナトリウムであることが判明した(表9・図8)。石仏龕表面7か所に降下している細かい塵埃を採取し純水で化学成分を抽出し、イオンクロマトグラフィーで分析した。その結果、陰イオンではF<sup>-</sup>・Cl<sup>-</sup>・Br<sup>-</sup>・NO<sub>3</sub><sup>-</sup>・SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、陽イオンではNa<sup>+</sup>・NH<sub>4</sub><sup>+</sup>・K<sup>+</sup>・Mg<sup>2+</sup>・Ca<sup>2+</sup>が検出された(表11・12)。

東大寺金堂盧遮那仏と十輪院石造地藏菩薩は大気汚染や温湿度変化・光などの外気環境から、木造建造物である大仏殿や本堂によって守られているとはいえ、汚染物質を含んだ大気は入り口や窓、建物の隙間などから容赦なく建物内に進入し、その影響は日々重なり徐々に進んでいる。

盧遮那仏の表面に積もった塵埃中の酸性物質は、湿度の高い梅雨時などに発生する盧遮那仏の表面結露に溶け込んで、塩酸・硫酸・硝酸の水溶液となって金銅の盧遮那仏を侵し錆を発生させている。この原因の一つである大気汚染物質を含む塵埃を一年に一度取り除くお身拭いは、盧遮那仏の腐食を防止する極めて効果の高い保存方法である。

十輪院石仏の表面に発生している白色析出物は石材表面を剥落させている。地面近くにおい



写真9 十輪院の地蔵菩薩石仏

表9 析出物の組成分析（蛍光X線分析）

元素	持国天像 (122cm)	多聞天像 (136cm)	闕石 (8cm)
Na	47.8	6.5	10.0
Al	0.0	9.0	2.9
Si	1.1	20.3	6.3
S	48.3	1.6	24.6
Cl	0.1	1.4	1.2
K	0.5	4.5	2.3
Ca	1.0	49.5	40.3
Ti	0.1	0.6	0.5
Fe	1.1	6.6	3.9

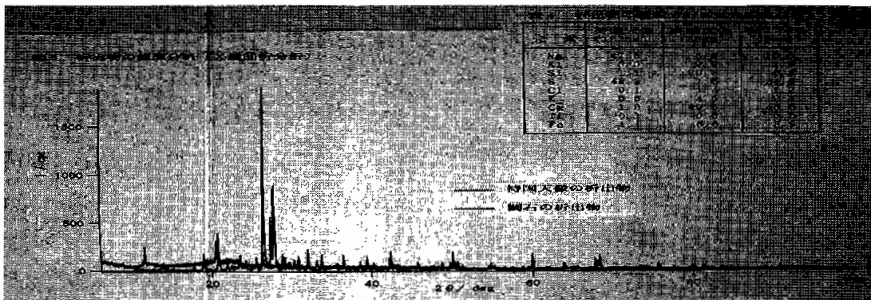


図8 析出物の組成分析（X線回折分析）

表10 石仏龕表面のpH値（純水pHは測定に使用した純水のpH値）

石仏龕内東側十王		石仏龕外北面		東経塔	
高さ190cm	4.20	高さ210cm	3.65		
150	4.45	150	4.60		
100	5.55	100	5.05	高さ 65cm	4.20
50	4.30	50	5.60	50	4.73
20	4.65	20	6.45	40	4.57
10	4.20	10	5.75	20	4.37
5	4.05	5	6.10	5	4.57
1	4.90	1	6.35	1	4.97
0	5.40	0	5.85	0	5.67
純水pH 5.3		純水pH 6.15		純水pH 6.18	

表11 十輪院石仏龕の塵埃の分析

	F <sup>-</sup>	Cl	NO <sub>2</sub>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
龕上	0.05	0.83	0.00	0.00	1.46	0.00	14.17	1.03	0.28	0.52	0.47	6.22
2 m	0.06	0.53	0.00	0.00	0.53	0.00	1.49	0.32	0.07	0.12	0.06	0.82
1 m	0.06	0.86	0.00	0.00	9.03	0.00	4.81	2.10	0.03	1.05	0.21	5.70
地表	0.08	1.55	0.00	0.00	10.01	0.00	9.50	2.18	0.08	0.96	0.39	9.19
平均	0.06	0.94	0.00	0.00	5.26	0.00	7.49	1.41	0.12	0.66	0.28	5.48

表12 奈良市における粒子状物質の年平均濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sub>2</sub> <sup>+</sup>	Ca <sub>2</sub> <sup>+</sup>
0.00	0.81	0.00	0.00	2.98	0.00	5.49	0.67	2.14	0.24	0.12	0.56

では地下水の上昇と溶出による石材中のカルシウム・ナトリウムと大気および塵埃中の硫酸化物が結合して硫酸カルシウムと硫酸ナトリウムとなり、上部では酸性物質を含む塵埃および大気水分の結露により石材中のナトリウムが溶出・結合して硫酸ナトリウムとなっている。

従来考えられているように、金銅盧遮那仏や石造地藏尊の基壇を上昇してくる地下水分の道を断ち切ることとともに、結露の防止、塵埃の除去、大気汚染の軽減など総合的な環境整備が必要である。

さらに、伝統行事である東大寺盧遮那仏（大仏）や薬師寺金銅薬師三尊仏のお身ぬぐいは、大気汚染物質を含む塵埃を毎年一度取り除き、錆を防ぐ、科学的な保存管理方法の一つである。

## 6 結 語

文化財は、金属・木・繊維などの単一もしくは、複数の素材からなり、温度・湿度の変化や紫外線・黴・虫などの自然環境の作用によってしだいに腐食や損傷が進む。こうした自然環境に起因する文化財の劣化は、伝統的修理や科学的保存処理によって劣化を遅らせたり新たな損傷を防止することができる。しかし、急速に深刻化する大気汚染に起因する文化財の損傷は個々の文化財のみならず、地域・国境を越え、全地球上の文化財に影響を及ぼすまでに進んでいる。現在、早急な現状把握と対策が必要とされている。

日本では1956年、正倉院宝物に変化が生じたのを契機に大気汚染の文化財への影響調査が始まり、今日までに多くの文化財被害が確認されている。

東大寺大仏殿前の青銅八角灯籠は1300年間風雨に曝され黒灰色や濃緑色・濃青色の落ちついた錆に覆われた姿を保ってきたが、最近40年間に、色調が黄緑色に変化してきた。1998年の東京文化財研究所による錆の分析では塩基性硫酸銅および塩基性塩化銅が検出され、大気汚染に起因する腐食であることが確認された。鎌倉大仏も同様に塩基性硫酸銅や硫酸鉛が検出され、京浜工業地帯から飛来する硫化物や海塩中の硫化物などの大気汚染によるものと推測された。京都国立博物館のロダン“考える人”は水筋に沿って塩基性硫酸銅と塩基性塩化銅と思われる黄緑色の錆が発生し全体の半ばを覆うほどになった。京都市中の工場や自動車が排出する大気汚染が原因である。

奈良・大阪の府県境の竹之内峠近くの鹿谷寺跡の凝灰岩十三重層塔は黒く汚れ、各層屋根の先端は欠け、表面のいたるところ剥落・溶解するなど、大気汚染による損傷の典型が見られる。京都国立博物館中庭の中国・遼代の石灰岩多宝千仏石幢は長期間風雨に曝されて表面が溶解し、銘文や文様が判読できなくなり1972年には表面の白色析出物が分析され硫酸カルシウムであることが判明し、大気汚染に起因する損傷であることが確認され、現在では博物館内に収蔵展示されている。



奈良大学が1987年より行っている奈良盆地北部の大気汚染と文化財保存環境の調査・研究では、東大寺、春日大社、平城宮跡などの文化財所在地11地点で酸性大気汚染物質である二酸化硫黄、二酸化窒素、塩化物イオンの濃度を測定し、金属板と彩色板のサンプルを大気曝露しその変化を測定している。また、奈良公園・奈良町では、1992年から5回にわたり二酸化窒素を測定した。観測の結果、二酸化硫黄の高濃度域は工場群に一致し、主として工場排ガスが発生源であること、二酸化窒素の高濃度域は国道の交差付近で、主として自動車排ガスが発生源であること、塩化物イオンは、奈良山丘陵付近に高濃度域があり、ごみ焼却場の排煙によることが判明している。そして、大気曝露した金属板の表面錆の硫黄と塩化物イオンの量・色変化について、時間経過と観測地点間を比較した結果、大気汚染濃度とサンプルの変化には明らかな相関関係のあることが判明した。実際の金属製の文化財、彩色された文化財も同様の変化をきたしていると推測される。

正倉院宝物が今日まですばらしい状態で保存されてきたのは、校倉建物と唐櫃の調温・調湿の効果であるといわれている。東大寺経庫（校倉）の調査でも、温度の日較差は、校倉外部14度、校倉内部4度、櫃内2～3度、湿度の日較差は、校倉外部55%、校倉内部15%、櫃内1～2%と、櫃内では殆ど変化しないと言ってもよいくらいに安定している。日射や紫外線が届かず、定期的虫干し（曝涼）の果たした役割も大きい。さらに、大気汚染物質の二酸化硫黄は、校倉内部は外部の13分の1、櫃内は外部の15分の1に、二酸化窒素は、校倉内部は外部の2分の1、櫃内は外部の140分の1に、塩化物イオンは、校倉内部は外部の11分の1、櫃内部は外部の16分の1にそれぞれ減少している。校倉の外部と内部と櫃内に置いた金属板と彩色板のサンプルの色彩変化が、外部は大きく内部は小さく、櫃内はほとんど変化していないことから、木造の校倉や木櫃が大気汚染物質の内部浸入を防ぎ、汚染大気を浄化する効果の大きいことがわかる。

さらに、奈良公園・奈良町の調査においても、樹木が同様な温湿度調整と大気汚染浄化の機能を果たしていることが判明した。奈良公園の二酸化窒素の分布は、県道高畑一紀寺線沿いに対して飛火野の芝地は約21%、春日大社参道周辺のマツ・ヒノキなどの植栽林中は約33%、マツ・クヌギ・シイ・アセビなど針葉樹と広葉樹の原生林は約54%それぞれ減少し、樹木の種類が豊富で深い森林は汚染大気の流入が少なく、かつ、汚染大気の浄化力の強いことがわかる。原生林は、東大寺経庫や十輪院本堂等木造建造物や日中開扉している興福寺国宝館（コンクリート造）と同等の大気汚染防御効果がある。さらに、伝統行事である東大寺盧遮那仏（大仏）や薬師寺金銅薬師三尊仏のお身ぬぐいは、大気汚染物質を含む塵埃を毎年一度取り除き錆の発生を防ぐ科学的な保存管理方法でもある。

現代社会にとって石油を原料とする化学燃料は不可欠であり、そこから発生する大気汚染を削減するのは容易ではない。しかし、たとえ大気汚染濃度が低いものであっても、回復力のない文化財は影響を受け続け損傷を積み重ねる。東大寺八角燈籠の最近40年間の急激な損傷を目の当たりにすると、自然環境の劣化作用の何十倍・何百倍もの速度で傷つき、まさに文化財が消滅する危機にあることが認識できる。

文化財を大気汚染からまもるには、工場や自動車、ゴミ焼却場等から発生する汚染を削減し、文化財の環境基準を策定して保護ゾーンを設け、汚染源を遠ざけることが必要である。奈良市のパーク・アンド・バスライドの制度やアイドリング・ストップ条例が徹底されればより効果が上がるであろう。

また、文化財の四周に樹木帯を設けることによって大気汚染の影響を半減する、風雨から保護する覆い屋を設ける、必要ならば、科学的保存処理を行い、収蔵庫に保管するなど、さまざまな保存法を活用するとともに、常に管理を怠ることのない心がけも重要である。



写真10 文化財の密集する奈良では、文化財の環境基準と保護ゾーンを設定し、自動車・工場などの排出ガス規制、交通規制などの施策の徹底が望まれる（左：東大寺・若草山を望む 右：奈良公園飛火野付近の交通渋滞）

#### （註文献）

- 1) 大阪管区気象台『正倉院の気象』（1960）、江本義理・門倉武夫「文化財保存環境としての各地の大気汚染度の測定結果」（東京国立文化財研究所『保存科学 3』1967）、江本義理『大気汚染による文化財に対する影響調査研究報告書』（京都市衛生局 1969）など。江本・門倉による40年間および研究が特筆される。
- 2) 松田史朗・青木繁夫・川野邊渉「東大寺国宝金銅八角灯籠の表面に生成する腐食生成物の解析」（東京国立文化財研究所『保存科学 第36号』1997年）
- 3) 松田史朗・青木繁夫・「高徳院国宝銅造阿彌陀如来座像の表面に生成する腐食生成物の解析」（東京国立文化財研究所『保存科学 第35号』1996年）
- 4) 黒川弘毅「京都国立博物館蔵ロダン『考える人』保存について」（文化財保存修復学会『文化財保存修復学会第20回大会講演要旨集』1998）
- 5) 井上正『遼代多寶千佛石幢』京都国立博物館（1973）
- 6) 朽津信明「博物館明治村で観察された蒸発岩」（『岩鉱 第87巻第9号』1992）
- 7) 古賀文敏「石造文化財の保存に関する研究（第一報）—大気汚染が石材劣化に及ぼす影響」（文化財虫害研究所『文化財の虫害菌 No23』1992）  
古賀文敏「石造文化財の保存に関する一考察」（大分県立宇佐風土記の丘歴史民俗資料館『大分県内石造文化財の現状と課題—保存のための基礎調査概報—』1994）
- 8) 西山要一「大気汚染・酸性雨が文化財に与える影響（奈良大学『奈良大学総合研究紀要 1』1993）  
西山要一「大気汚染から奈良の“世界遺産”をまもる（奈良大学・元興寺文化財研究所『保存科学の今そして未来』1999）など
- 9) 「金属腐食に関する大気管理目標検討の基本的考え方」（環境庁大気保全局大気規制課『大気汚染による金属材料の腐食測定法指針』1988）、奈良市の観光期のパーク・アンド・バスライド、奈良市アイドリングストップ条例（2000年4月施行）などで試みられている。