

## 史跡・薬師堂石仏における凍結破壊の発生

三浦定俊・西浦忠輝

### 1. はじめに

石造文化財劣化の主要原因の一つは、石中に含まれる水分が凍結・融解を繰り返すことで起こる凍結破壊現象である。これまで石造文化財の凍結破壊は、北海道・東北北部・北陸などの寒冷地でのみ起こると考えられてきたが、筆者らの研究により<sup>1)</sup>冬期温暖と思われる太平洋側でも起こりうる事が指摘された。ここでは実際にそのような凍結破壊が生じた事例について報告する。なお、薬師堂石仏保存のための国庫補助事業として、昭和60年度に劣化原因の調査が行なわれ、その調査結果を受けて昭和61年度より保存施設工事が行なわれているが、この報告は筆者らの関係した凍結破壊の被害に関する調査をまとめたものである。

### 2. 小高町周辺の気象と石仏の現状

史跡・薬師堂石仏は福島県相馬郡小高町泉沢にある。小高町は福島県でも海に面して、冬期、天候は安定し比較的穏やかな気候であるが、朝夕の冷え込みは厳しく、寒暖の差が大きい。凍結破壊発生の目安になる<sup>2)</sup>最高気温が $+4^{\circ}\text{C}$ 以上、最低気温が $-4^{\circ}\text{C}$ 以下という気温の変化のあった日を AMeDAS データを基に数えてみると、昭和58~59年の冬期間に小高町に隣接した浪江町では30日もあった。この日数は同じ時期に、北海道の小樽で3日、帯広で12日、阿寒湖畔で24日に過ぎなかったことと比較すると、小高町周辺の地域で冬期いかに寒暖の差が大きく、その石造文化財が苛酷な気象条件にさらされているかを示唆している。

壁面に刻まれた8体の石仏を覆う薬師堂の手前には高い木々があって、陽が直接当たらず、常に湿った環境である(写真-1)。石仏の石質はシルト岩まじりの粗粒凝灰岩で、薬師堂背後の崖の石質は珪藻土質凝灰岩でいずれもきわめて脆く、凍結破壊の影響を受け易い。実際に冬期、凍結破壊によると思われる裏山からの落石で屋根瓦が時々破壊され、石仏の現状をみても、塩類の析出による表面の白華と、凍結破壊による凸部の欠落の両方の劣化が進行しつつあるのではないかと推察された(写真-2)。石仏の主要な劣化原因を明らかにするため、凍結



写真-1 薬師堂全景

Photo 1 Shelter of "Yakushido" sculptures



写真-2 史跡薬師堂石仏

Photo 2 Rock-cliff sculptures of "Yakushido"

表一 薬師堂石仏の石の物性  
Table 1 Physical properties of stone (tuff)  
of 'Yakushido'

	粒粗凝灰岩 (石仏) Tuff of sculptures	珪藻土質凝灰岩 (屋根上の崖) Tuff of the upper layer of cliff
嵩比重 (g/cm <sup>3</sup> ) Bulk density	1.33	0.96
真比重 (g/cm <sup>3</sup> ) Real density	2.5	2.31
空隙率 (%) Porosity	47	60
破損残存率 (%) Residual weight ratio	62 <sup>*)</sup>	59 <sup>**)</sup>

<sup>\*)</sup> 残存部はほとんど泥化 <sup>\*\*)</sup> ほぼ半分に分れた  
(注) 破損残存率は、試料をあらかじめ飽水状態  
にして下部から水を供給しながら、-4~+4  
°C の気温変化 (48 hours/cycle) 3 cycles  
経過後に測定した。

録した。フィールドメモリー中の RAM にたくわえられたデータは、ほぼ1カ月ごとに、ハンドヘルドコンピュータ (エプソン製, HC 20) でマイクロカセットテープに採録し、さらに HC 20 からパーソナルコンピュータ (NEC 製, PC 9801) に転送して解析した。

採録した温湿度データの解析は次のようにして行なった。まず測定開始日と測定終了日のデータについては、1日24個の測定値がそろわないので捨てる。残りの日について、24時間のデータから、日平均、日最高、日最低を計算した。さらに、各旬、各月ごとに、それぞれ旬(月)

破壊の発生状況に付いての調査を昭和60年度に行なった。

### 3. ボーリングコアによる 石質の試験

薬師堂背後の裏山からとったボーリングコアを用いて、石の比重、空隙率、凍結破壊に対する抵抗性を調べた。その結果は次の通りである。通常の凝灰岩 (臼杵, 大谷など) の空隙率はたかだか40%であるから、これらの石の空隙率は大きく、水を良く吸って凍結破壊に対する抵抗性が非常に小さい。

### 4. 薬師堂内外の気象調査

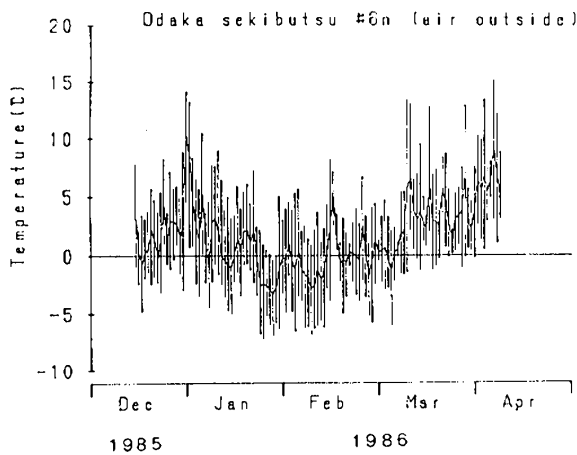
温度測定には、白金測温抵抗体 (Pt 100 Ω), 相対湿度測定には 静電容量式湿度計 (バイサラ) を用い、データロガーとしてのフィールドメモリー (早坂理工製, TS-6, TS-6 T型) に1時間ごとのデータを記

表一2 温度・湿度の測定場所

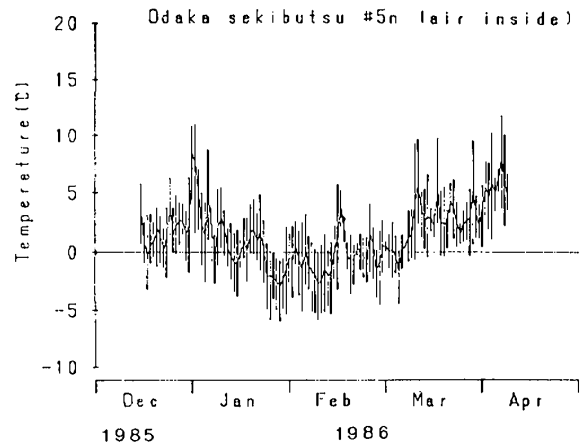
Table 2 Locations of the temperature and RH measurement

番号 (センサ) No. (Sensor)	測定内容 Measurement	測定箇所 Location
① (#1 n)	温度 (Temp.)	岩体内 (薬師如来台座右下) (Rock 1 inside)
② (#2 n)		" (同 右膝前) (Rock 2 inside)
③ (#3 n)		" (同 台座右下) (Rock 3 inside)
④ (#4 n)		" (釈迦如来台座右下) (Rock 4 inside)
⑤ (#5 n)	"	堂内 (気温) (Air inside)
⑥ (#6 n)		屋外 (気温) (Air outside)
⑦ (#1 o)	相対湿度 (RH)	屋外 (RH outside)
⑧ (#2 o)		堂内 (RH inside)
⑨ (#3 o)	温度 (Temp.)	屋外 (気温) (Air outside)
⑩ (#4 o)		岩体表面 (屋外) (Rock surface, open air)
⑪ (#5 o)		岩体内 (屋外) (Rock in the open air)
⑫ (#6 o)		堂内 (気温) (Air inside)

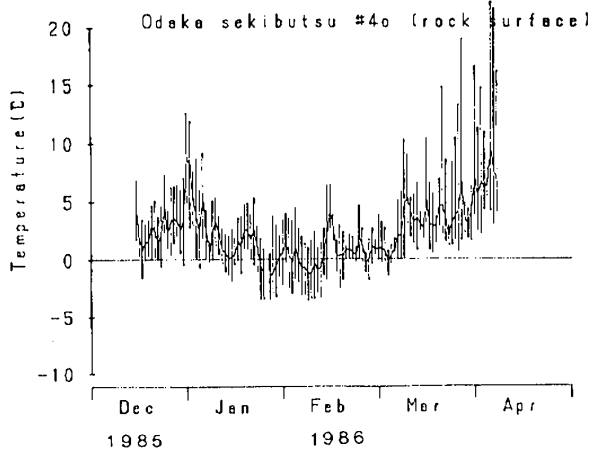
注) 尊像名は修理工事報告書<sup>2)</sup>による



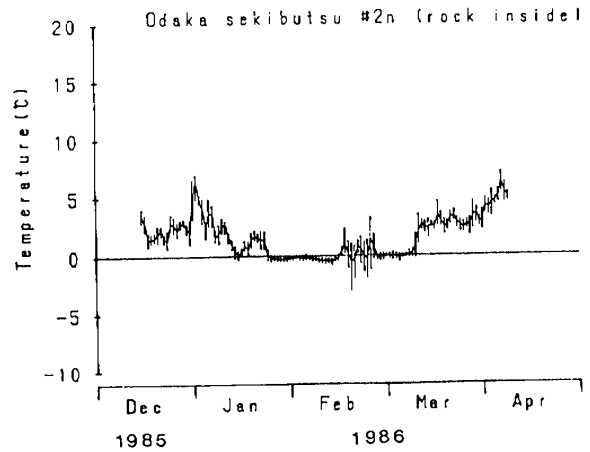
図一1 外気の温度変化(縦の線は日の変化を示す)  
**Fig. 1** Temperature change of air outside, from December 1985 to April 1986 (vertical line indicates the amplitude of temperature change of each day)



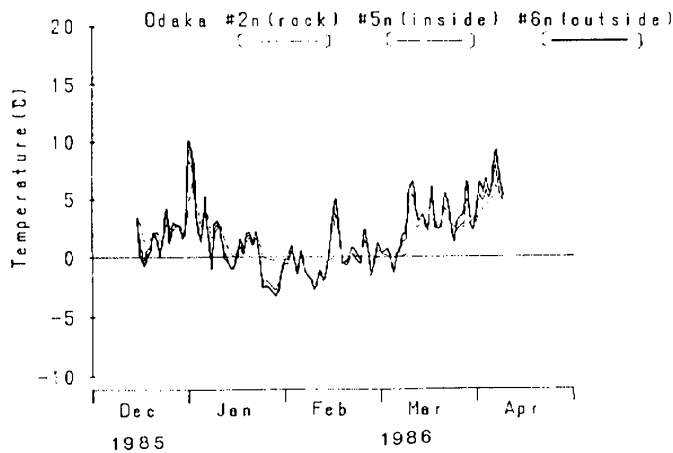
図一2 覆屋室内の温度変化  
**Fig. 2** Temperature change of air in a shelter



図一3 屋外の岩の表面温度変化  
**Fig. 3** Temperature change of rock surface in open air



図一4 石仏岩体内の温度変化(薬師如来台座, 深さ約 2 cm)  
**Fig. 4** Temperature change in a sculpture rock (about 2 cm deep)



図一5 覆屋内外と石仏岩体内の温度変化の比較  
 (太線: 外気 細線: 室内 破線: 岩体内)  
**Fig. 5** Comparison of temperature changes (thickline: air inside fine line: air outside broken line: sculpture rock)

平均, 日最高の旬(月)平均, 日最低の旬(月)平均を求める。また, 各時ごとにとった全部のデータの中で, 各月中で最も大きな値を月最高値, 最も小さい値を月最低値とする。

整理して得られた, 各日の平均・最高・最低を用いて描いた昭和60年12月から昭和61年4月にかけてのグラフを, 図一1から4に示す。温度の日平均線を折線で結び各日の最高と最低は折線に交わる縦の線であらわしている。2月15日以降, 岩体内温度の変動が急に大きくなっている理由は, 凍結

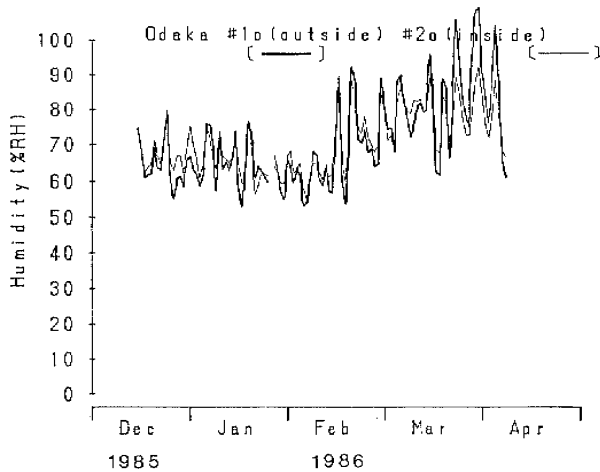


図-6 覆屋内外の相対湿度変化  
(太線：外気 細線：室内)

Fig. 6 Changes of RH outside and inside the shelter (thick line: outside fine line: inside)

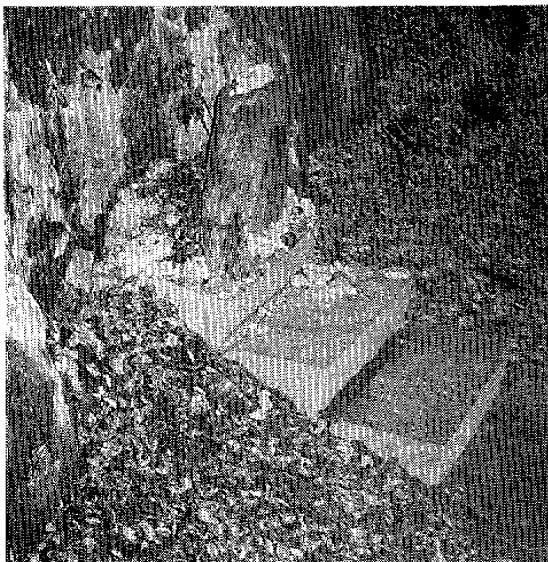


写真-3 薬師堂脇の崖の状況 (1月初め)  
Photo 3 View of a cliff near "Yakushido"  
(beginning of January)



写真-4 同 (2月末)  
Photo 4 ditto (end of February)

破壊で天井から岩石が落下して、センサが穴から抜け落ちたためである(図-4, 写真-6(後出))。

いくつかの測定について、平均値の変動を比較した結果について述べる。図-5に屋外気温、室内気温、岩体内温度を比較する。外気温の変動に比べて室内気温の変動はいくらか小さく、岩体内の温度変動はさらに小さくなっているが、外気温の低下とともに岩体内温度はだんだん  $0^{\circ}\text{C}$  近くになっていく。室内気温がほぼ  $-2^{\circ}\text{C}$  以下になった1月下旬から2月中旬の間は終日氷点下で、次章で述べるようにこの間に岩石の凍結破壊が起きた。

覆屋内部の気温が  $-2^{\circ}\text{C}$  以下に下がる日の数は、昭和61年は1月下旬から2月上旬にかけて10日ほどあった。薬師堂の近くで長年月気象観測を続けている、梅田敏雄氏の観測記録によると、日平均気温が  $-2^{\circ}\text{C}$  以下になったと思われる日は、昭和53年には1月下旬から2月中旬にかけて約10日、昭和55年には2月初旬から中旬にかけて数日あった。石仏は裏山からの地下水により常に湿った状態にあるので、これまでも冬期1月から2月にかけて気温の低くなった時期に凍結による破壊を受けて、石仏の劣化が進んだ可能性が高い。

図-6は薬師堂の内と外の相対湿度を示した図である。本来乾燥するはずの冬期にも、堂内外とも平均して70%前後という高い湿度を示し、石仏が湿った環境にあることを表わしている。なお、相対湿度が100%を越えた日があるように見える理由は、測定値を線形補正しているため、100%近くでは補正誤差を生じるためである。

## 5. 凍結破壊発生状況

薬師堂から阿弥陀堂へぬける道ぞいの崖を、1月始めと2月末に撮影した写真-3, 4を比較すると、1月から2月の寒さで崖の石が大きく破壊され、多量の土や石が崩



写真-5 凍結破壊による崖崩れ  
**Photo 5** Damage to cliff due  
 to frost shattering

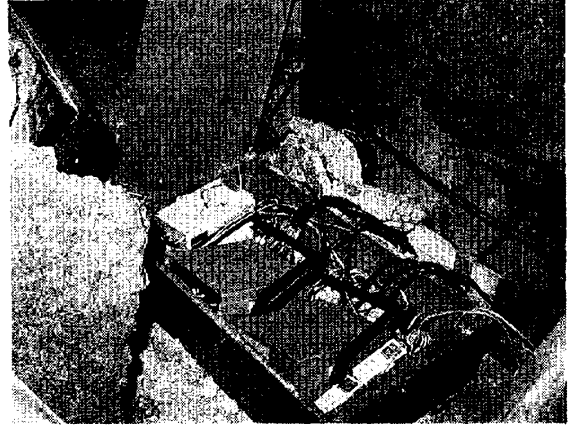


写真-6 凍結破壊による落石で壊れた測定器  
**Photo 6** Measuring device broken by a falling  
 rock due to frost shattering



写真-7 石仏の首のつけねに形成された氷  
**Photo 7** Ice formed at the neck of a sculpture

れ落ちている。薬師堂左脇の崖に打ち込んでおいたステンレスのボルトの目盛りでは、凍結破壊により一冬で3cm程度、崖は削られていた(写真-5)。

薬師堂内部にも凍結破壊がみられた。右端の薬師如来近くでは、天井から落下した石屑が石仏の前の足場に厚く積もり、重さ30kg以上にも上るとされる大石が床へ落下して計測器をいたした箱を直撃し、一部の機器を破損させる事態すら生じた(写真-6)。

石仏に含まれる水分の凍結はおもに石仏の上半部、特に首や顔と壁の境目に顕著にみられたが(写真-7)、表からみて異常ないようにみえる部分も、寒さが続くと表層全体が凍結により持ち上げられて破壊された(写真-8)。今回の調査中にも、樹脂強化された表面層の下側で凍結が起り、2月の寒さで壁面の一部の剝落が観察された(写真-9)。

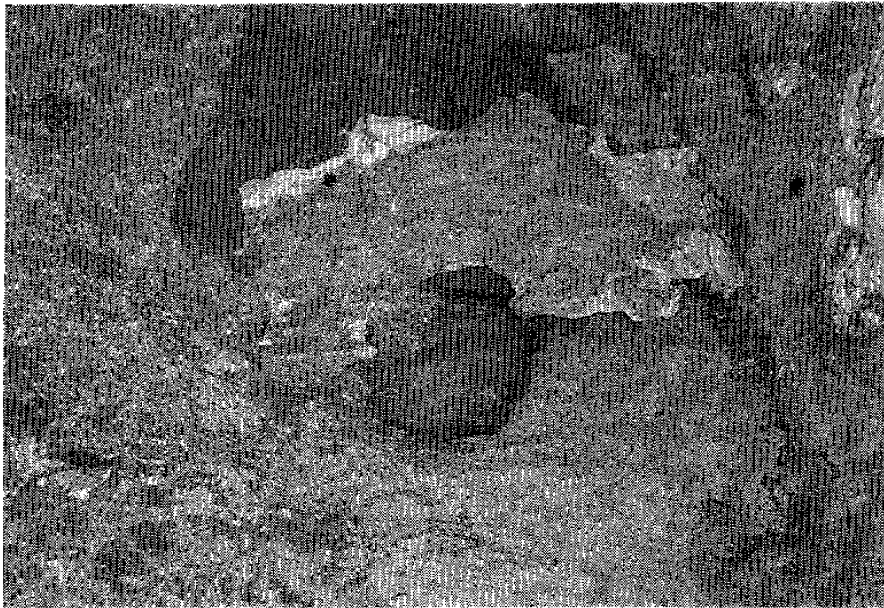


写真-8 水分の凍結により持ち上げられ剝離した壁面

Photo 8 Flaking part due to ice formed below surface layer

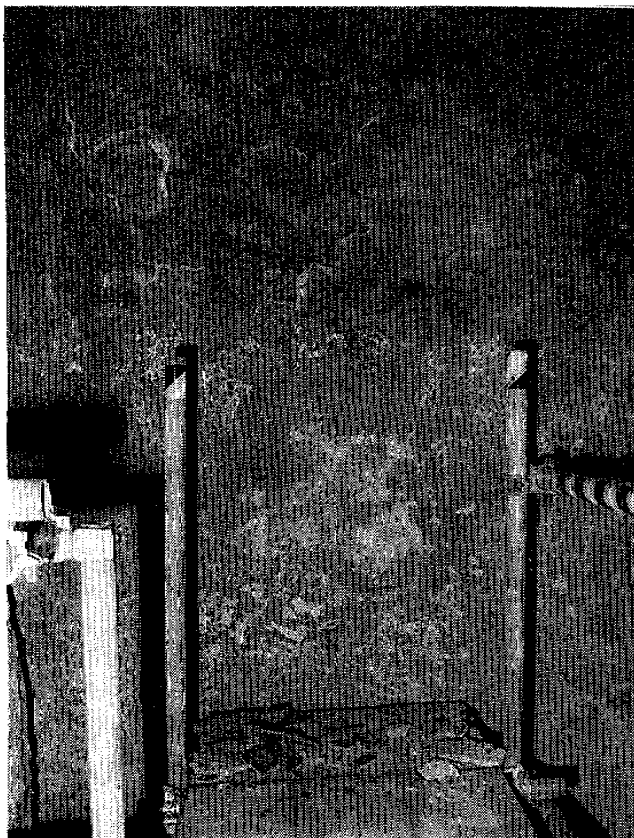


写真-9 凍結により破壊され落下した壁面の一部

Photo 9 Broken and fallen relief due to frost shattering

## 6. ま と め

薬師堂石仏のある小高町周辺の気象環境は、冬期寒暖の差が大きく凍結破壊のおきやすい環境であり、石仏を構成する石質も空隙率が大きく凍結破壊を受けやすい。今回の調査結果でも、凍結破壊による被害が多くみられ、薬師堂石仏劣化の主要原因は凍結破壊であると判断された。

保存修理調査委員会によって凍結破壊防止対策として、裏山に屋根をかけて裏山からの水の供給を断ち、薬師堂の断熱を良くして真冬でも堂内の気温が $0^{\circ}\text{C}$ 以下に下がらないようにする工事を行なうことが決められた。断熱工事は昭和61年の秋に完成し、61年から62年にかけての冬、堂内の気温は零下に下がらず、断熱工事の成果が十分現われていることが実証された。これらの保存対策工事の成果については、いずれ工事報告書など他の機会に述べる予定である。

### 謝 辞

本調査を行なうに当たり、小高町教育委員会の門馬政弘氏をはじめとする小高町及び福島県教育庁の方々、文化庁記念物課の牛川善幸主任調査官（当時）及び加藤允彦調査官他多くの方々のお世話をいただいた。また、小高町の梅田敏雄氏からは貴重な観測記録を拝借した。これらの関係の方々に深く感謝申し上げます。その他、薬師堂石仏保存修理調査委員会委員長である東京国立文化財研究所江本義理前保存科学部長、同樋口清治修復技術部長及び埼玉大学工学部の関陽太郎教授、北海道大学低温科学研究所の福田正己助教授には研究上のご指導をいただいた。厚くお礼申し上げます。

本報告の取りまとめには財団法人福武学術文化振興財団からの昭和61年度研究助成金を用いた。

### 参 考 文 献

- 1) 三浦定俊・福田正己・西浦忠輝：凍結劣化とその対策、「石造文化財の保存と修復」, 9--46 (1985)
- 2) 福島県相馬郡小高町：「史跡薬師堂石仏・史跡観音堂石仏修理工事報告書」, 5 (1968)

## Frost Shattering of Rock-cliff Sculptures at Odaka

Sadatoshi MIURA and Tadateru NISHIURA

“Yakushido Sekibutsu” (rock-cliff sculptures) are located at Odaka, northeast of Tokyo. Since this district faces the Pacific Ocean, the climate of Odaka is thought to be rather moderate. At present, all sculptures have already lost their noses, ears and other thrust parts, and salts have effloresced on their surfaces. Researches have been carried out since the fall of 1985 on the climate of the environment for the improvement of a shelter.

Temperature and RH data were stored every hour in a data-logger (Field Memory, HAYASAKA). Then the data were transferred to a personal computer (PC 9801, NEC) by a hand-held computer (HC 20, EPSON).

When the mean temperatures of several successive days were lower than  $-2^{\circ}\text{C}$ , the temperature in a sculpture rock (about 2 cm deep) also became below the freezing point. As water exudes from the cliff where the sculptures are carved, on those days the water froze at the surface or in the gap between the surface and subordinate layer. This caused a severe frost shattering to the sculptures and reliefs. Some damages actually observed are shown in the photographs No. 6—9.

Since it was considered from our researches that the main reason of the degradation is frost shattering, the shelter was improved to maintain the ambient temperature of the sculptures higher than  $0^{\circ}\text{C}$  even in the coldest days. No frost shattering was observed the following winter (1986—1987) owing to this improvement.