福島県小高町薬師堂石仏群の劣化と水・岩石相互作用

Salt crystallization decay and water-rock interaction of rock-cliff Buddha
sculptures at Yakushido Temple of Odaka Town, Fukushima, Japan

関 陽 太 郎 (Yotaro Seki)*
平 野 富 雄 (Tomio Hirano)**
渡 辺 邦 夫 (Kunio Watanabe)*

Rock-cliff Buddha sculptures of Odaka Town, Fukushima Prefecture, Japan were carved about one thousand years ago on the Neogene dacitic tuffaceous sedimentary rocks.

These sculptures have been badly decayed by (1) the formation of scabs composed chiefly of gypsum, epsomite and thenardite with subordinate amounts of kogarkoite, langbeinite, zoherite, hydroglauzerite, starkeyite, jurbanite, loewite, hexahydrite, alunogen, mirabilite, glauberite, syngenite, hemihydrite and sylvite at the surface of the sculptures by the evaporation of ground-water percolated through the voids and joints in the Neogene volcanogenic sedimentary rocks and (2) the exfoliation of the these scabs and near-surface part of Neogene sedimentary rocks, particularly due to the heaving during the freezing-thawing cycle of seeped groundwater in winter season.

福島小高町泉沢地内に、国指定天然記念物の石仏群(薬師堂石仏)がある(第1図)。この石仏群はもともと9体の仏像と2体の飛天人より成っていたもので、専門家の調査によると、奈良時代の仏像の製作手法をうけついだ平安初期～後期の作であるといわれている(小高町, 1968)(第2図)。

1345年以後今日まで、これらの石仏群は薬師堂とよばれた覆堂によって保護されて来たが、両手なども欠損がいちじるしく印相等は全く不明である。台座は蓮華以下は形状不明になってしまっていて、石仏間の背面にあった光背二重円光の薄肉彫りおよび線彫りも欠損剝落が著しく、残存部も浮き上がり、剝落が進行中である(第3図)。

1966～1969年に、文化庁文化財保護委員会の指導によって、アクリルエマルジョンの全表面噴霧含浸による岩質の硬化、エポキシ樹脂による表面浮き上がり部分の接合がおこなわれた。

それ以後、最近までの間に、各種塩類鉱物の表面形成、上記アクリルエマルジョンの薄膜層の浮き上がりと石仏表面の崩落が著しく、仏像の変相が目立ってはげ

しくなった(第3図と第4図を比較)。このため、1985年に小高町により「薬師堂石仏保存修理調査委員会」が組織され、薬師堂石仏地点の地質調査、気象調査、石仏破損状態調査および保存対策工事が文化庁、福島県、小高町の予算によっておこなわれた。保存対策工事は1987年度もひきつづき実施される予定であるが、1985～1986年に得られた地質・岩石・鉱物についての知見をここに報告する。

薬師堂石仏保存修理調査委員会の江本義理、樋口清治、西浦忠輝、三浦定俊、および内田昭人、文化庁の牛川喜幸、および加藤充彦、東京国立博物館の西川杏太郎、小高町教育委員会の斎藤勝、および門馬政弘の各氏には現場および調査委員会において多くの御援助・御教示を賜った。厚く御礼申し上げる。また、地質調査ボーリングおよび覆堂改修工事に際しては、その高度の技術力を発揮された庄建技術株式会社に敬意を表する。

I. 地 質

薬師堂石仏周辺は新第三紀層鮮新世の竜の口層の珪

* 埼玉大学工学部附属地盤水理実験施設
〒338 浦和市中大久保 255
** 神奈川県温泉地学研究所
〒250-03 神奈川県足柄下郡箱根湯本 997

(昭和62年4月16日受付
昭和62年5月16日受理)

第2図 小高町薬師堂の磨崖仏復元想像図（美術院国宝修理所 1968 年作製）
（小高町，1968）。

ション性の節理面であって、圧縮をとまなう断層運動の産物ではない。したがって、これらの節理面にそって粘土鉱物などがつまっているようなことはない。すなわち、これらの節理面にそう透水性はかなり高いものと考えられる。

地表からの雨水・雪どけ水は、(1) 新第三紀層そのもののもつ粒子間隙と (2) それらの地層をほぼ垂直に切って発達している開口性節理面を通じて、かなり容易に下方に浸透流下する。

II. 表面析出鉱物

薬師堂内の磨崖仏がほり込まれている新第三紀層（この報告の G 層）の表面にはほぼ全面的に白色の鉱物が析出し、それらの析出鉱物層の最大厚さはほぼ 5 mm に達している（第 13 図）。これらの析出鉱物は自重により、又は地震動・風圧などによって容易に新第三紀層の岩盤から剝離して落下し、それにとまって

第3図 小高町薬師堂の磨崖仏の崩壊状態(1985 年 10 月撮影)。

上，第 2 図の (3) 弥勒仏。

下，第 2 図の (4) 釈迦如来。

頭部の白い表面結晶物はそれぞれ第 2 表の S と X である（第 14 図参照）。

第4図 小高町薬師堂の磨崖仏の崩壊状態 (1966～1967年撮影) (小高町, 1968)。
上と下は第3図のそれぞれと同じ。第3図と
第4図を比較すると18～19年の間における
塩類鉱物の形成と崩落による磨崖仏の劣化の
激しさがわかる。

第5図 小高町薬師堂周辺の地形図および地質図 (第6図, 第1表参照)。VBおよびIBはそれぞれ
垂直および傾斜ボーリングの位置。メートル
は海拔高度。
X-Y線は第6図の断面の位置。

第6図 小高町薬師堂の北北西・南南東方向の断面図 (第5図参照)。A, B…Iは地層区分 (第1表参照)。
VB, IBは、それぞれ垂直ボーリングおよび傾斜ボーリングの位置と深さ。
X-Yは第5図参照。

鉱物層の裏側に付着していた岩盤部分も落下する (関・酒井, 1987)。この小高町の石仏の場合、千葉県館山町の場合とは異なり、凍結した浸透水がとけたあとの、析出鉱物層の浮き上がりと落下が石仏崩壊の主な原因の一つであることは後にのべる。

これらの鉱物析出部分の代表的試料を採取して (第14図) X線回析法および偏光顕微鏡法で鉱物組成を解析した結果を第2表に示す。ごく微量のシルバイトを除くと、ほぼすべてがCa, Mg, K, Na, Alの硫酸塩又は加水硫酸塩鉱物である。

垂直ボーリング (VB) の6.30 m～6.35 mの部分 (E層) のコア約300 gを、100 mlの蒸留水の中に入れ、10日間室内に放置したあとの水の化学組成を第3表に示す。この化学組成は、水が常温においてもこの地域の新第三紀凝灰質岩石と容易に反応して、Na, K, Ca, Mg, SO_4 , Clなどをとかし出すことを示している。第3表の水を蒸留皿に入れ、常温で扇風機を用いて乾固させたものは、石膏、テナーダイト、ハライト、アラゴナイト、エプソマイト、ミラビライト、シルバイトの集合であった。第3表の水の中の SO_4 は岩石を構成

第7図 小高町薬師堂周辺部の新第三紀層に入れた垂直ボーリング、傾斜ボーリングの柱状図。ボーリングの位置は第5図参照。層序区分は第1表および第6図参照。

第8図 小高町薬師堂新第三紀層の細粒凝灰岩層（第1表のD層）の顕微鏡写真（左右は1.2mm）。主として石英、珪藻化石、火山ガラス、粘土鉱物、斜長石、石膏、磁鉄鉱および黄鉄鉱より成る。

第1表 小高町薬師堂付近の第三紀層層序

	層厚 (m)	岩 相
A	>2.1	灰黄色珪藻土質凝灰岩
B	1.0	灰色シルト質凝灰岩
C	0.4	灰黄色珪藻土質凝灰岩
D	1.0~2.3	灰色泥岩～シルト岩
E	3.6	シルト岩まじり粗粒凝灰岩
F	1.0	黄灰色凝灰質シルト岩
G	7.0	シルト岩まじり粗粒凝灰角礫岩
H	1.6~1.9	シルト質細粒凝灰岩
I	>8.0	粗粒凝灰岩～凝灰角礫岩

している微粒の（おそらく biogenic な）黄鉄鉱の酸化作用で生じたものであろう（Milodowski *et al.*, 1985；関・酒井, 1987）。竜の口層の凝灰質岩石、シルト岩、砂岩には炭酸塩鉱物が含まれていないので、 HCO_3^- は実験中に大気の中からとりこまれた CO_2 か、又は、岩石の空隙の中に入っていた空気中の CO_2 からもたらされたものであろう。

県道東側の宅造地の新第三紀層の露頭表面にも白色の析出鉱物層が形成されている（第12図、第2表Q）。

第12図は（a）新第三紀層のもつ細かい空隙を通過してきた浸出地下水と、（b）垂直な節理面にそって浸出してきたものという2つのルートにそった地下水の蒸発乾固による白色析出鉱物層の形成のメカニズムをよく示している。

前述のように、岩盤、磨崖仏表面に析出した白色鉱物層はしばしば剥落する（第13図の上）。しかしそのあとに地下水が浸透流下し込みで、蒸発によって再び新たな白色鉱物層が岩盤・磨崖仏表面に析出沈着す

第9図 小高町薬師堂付近の新第三紀層における垂直の節理面の発達状態。

第10図 小高町薬師堂付近の新第三紀層に発達している節理間隔 (C, E, G, 層については第1表, 第5, 6図参照)。

第11図 小高町薬師堂付近の新第三紀層に発達している節理面のステレオ投影(第9図, 第12図参照)。

第12図 小高町薬師堂東方の宅造地における新第三紀層(第6図のC層相当)の地表露出部に発達している垂直の節理面と, 岩盤表面に結晶した白色鉱物(主として石膏より成る)。左下の黒丸はカメラのレンズキャップ。

る。1966～1968年におこなわれた修復・保存事業の時に表面に塗布された樹脂をうきあがらせた白色析出鉱物層の最大厚さは約5mmに達する。従って, 白色鉱物層の沈着成長速度は0.2～0.3mm/年に達すると考えられる。

前述のように, 当薬師堂の石仏の大部分は第3図に示すような状態になり, 9体の石仏のうち, 左端の阿弥陀如来坐像はほぼ完全に消失してしまった。その原因の一つは白色析出鉱物層の沈着・成長→剝落→沈着・成長→剝落というプロセスの繰り返しであると考えられる。

III. ボーリングコアを用いた室内における水・岩石相互作用

地質調査用のため、垂直・傾斜の2本のボーリング行われた。試錐はそれぞれ100%に近いコア採取率であった。垂直ボーリング(VB)の上端から6.40~6.60

第13図 小高町薬師堂磨崖仏の新第三紀層表面に形成された白色鉱物の産状。
上, 第14図のW(左右はおおよそ2m)。
下, 第14図のY(下にナイフがある)。

mのE層のシルトまじりの粗粒凝灰岩および傾斜ボーリング(IB)南端から6.10~6.25mのG層のシルトまじりの粗粒凝灰岩のコアを試料として採取した。それら2ケのコアを100mlのガラスビーカーの中に立て、蒸留水を加えて相対湿度50~70%の室内におき、水が蒸発して減少した分だけ蒸留水をすこしずつ加えていくと、24時間位で、コアの上端部に透明~半透明青白色~白色の美しい結晶が形成されはじめた。第15図は40日後の状態である。このようにして形成された結晶は、石膏、エブソマイト、テナーダイトなどである。

第15図の実験結果は第16図に示すプロセスで説明される。すなわちボーリングコアの中に浸透した水は、岩石を構成している鉱物や火山ガラスと室温条件で反応して、Mg, Na, K, Ca, Al, SO_4 , Clなどをふくむようになり(第3表参照)、コアの中を上昇し、コアの先端付近から蒸発する。その時に、コアの先端に石膏、エブソマイト、テナーダイトなどが晶出したのである。

水と反応したボーリングコアを水中からとり出し、先端晶出物を取り去って十分に乾燥させ、その見掛け比重と孔隙率を測定した結果を第4表に示す。ビーカーの水中にあった部分の一部では、明らかに鉱物又は火山ガラスが水にとけて空隙が増加し、逆に水面上にあった部分の空隙率が小さくなっている。実験後に水から取り出したボーリングコアの先端部付近数cmは乾燥させると、もとのボーリングコアよりはるかにかたく、ハンマーで叩くともとのにぶい音よりもはるかに高い金属音を発するようになっていた。このような硬化したボーリングコアを薄片で検討すると、空隙の大部分が石膏を主とする鉱物で充填されていた(第4表)。

第14図 小高町薬師堂磨崖仏の周辺部の表面に形成された塩類鉱物の採取点(第2表参照)。

第2表 小高町薬師堂磨崖佛の表面に形成された塩類鉱物の種類

		L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
Gypsum	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	○	○	○		○	○	○	○	○	○		○	○		○
Epsomite	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	○	○	○	○		○					○			○	
Thenardite	Na_2SO_4	○	○		○	○		○				○			○	
Kogarkoite	$\text{Na}_3\text{SO}_4\text{F}$		○		○											
Langbeinite	$\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$				○											
Zoherite	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_5(\text{OH})_{26} \cdot 20\text{H}_2\text{O}$				○											
Hydroglauberite	$\text{Na}_{10}\text{Ca}_3(\text{SO}_4)_8 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$				○											
Starkeyite	$\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$						○									
Jurbanite	$\text{Al}(\text{SO}_4)(\text{OH})_5 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$						○									
Loewite	$\text{Na}_{12}\text{Mg}_7(\text{SO}_4)_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$						○					○				
Hexahydrate	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$						○									
Alunogen	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$						○									
Mirabilite	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	○														
Glauberite	$\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$	○											○			
Syngenite	$\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	○	○	○						○			○			○
Hemihydrate	$\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$		○													○
Sylvite	KCl											○				

L, M……Zなどの採取点は第14図参照。但し、Qは薬師堂の東の宅造地の斜面(第12図参照)のもの。

大丸, 主成分鉱物; 中丸, 副成分鉱物; 小丸, 微量成分鉱物。

第3表 小高町薬師堂の新第三紀層のボーリングのコア(1B, 6.00~6.07 m 深)約300 gを10日間ひたした1,000 mlの蒸溜水の化学成分

pH	6.49	Cl	1.61
E.C.	64	(ppm)	
($\mu\text{S}/\text{cm}$)		SO_4	10.2
Na	2.97	(ppm)	
(ppm)		HCO_3	18.9
K	0.929	(ppm)	
(ppm)		NO_3	0.49
Mg	1.01	(ppm)	
(ppm)		H_2SiO_3	9.94
Ca	2.60	(ppm)	
(ppm)

第15図 小高町薬師堂周辺の新第三紀層におけるボーリングコアをビーカーの中の蒸溜水にひたし、水をすこしずつ補給しつつ、湿度50~70%の室内に、40日放置した時にボーリングコアの先端付近に形成された白色の鉱物。主として石膏、エプソマイト、テナーダイト、ジュルバナイト、コガルコアイトなどより成る(第16図参照)。

第 15, 16 図のようにして形成された塩類鉱物層は、その鉱物種と量比、結晶の形態などの点で、実際に石仏およびそのまわりの新第三紀層の表面に形成されている塩類鉱物とほぼ同じである。このような白色の析出鉱物層の裏面に岩石そのものの薄層が付着したまま剥落してしまう点も、前章で述べた石仏表面における自然の状態と同じである。

IV. 凍結現象について

著者の一人(関)が、1986 年 1 月 31 日に、この石仏群とその周辺部の調査をしていた時、覆堂の気温の外気温はほぼ同じで $-2 \sim -3^{\circ}\text{C}$ であった。はじめは全く気付かなかったが、調査を一応終えた午後になり、石仏群とその周辺の覆堂内岩盤表面のかかなりの部分が異常に光沢をもっていることに気づいてよく見ると、それは岩盤からしみ出した地下水が凍結した氷であった(第 17, 18 図)。注意深く見ると、石仏や岩盤表面の岩

石の薄層又は塩類鉱物層を浮き上がらせる形で水が成長している状態(第 19 図)も観察された。同年 2 月 24 日保存修理調査委員会が現在調査をした時には 2 月初旬からの気温の上昇によって氷の大部分はすでに溶け去っていたが、覆堂の中の石仏と岩盤の表面部の浮き上がり・剥落が著しいことが観察された。また、調査委員会の全員が覆堂から退出した直後に、大きな音とともに第 2 図の(3)と(4)の間の飛天人部分が全面的に剝離落下し細粉化してしまった。専門家の談によると、この飛天人部の細かい破片をあつめてもとの位置に復元することはおそらく不可能であるという。

関・酒井(1987)によると、千葉県館山市大福寺の磨崖仏の劣化の原因は、(1) 地下水の浸透・蒸発、(2) 石膏を主とする塩類鉱物層の表面析出、(3) 塩類鉱物層の剥落のくりかえしである。同様のことは、本論文の II, III で述べたように、この薬師堂の磨崖仏の場合でも劣化の重要な原因の一つとなっている。

千葉県館山市は気候温暖であって、大福寺磨崖仏においては真冬でも外気・覆堂内とも 0°C 以下、特に -2°C 以下になるのはごくまれである。

それにくらべて、福島県小高町の薬師堂磨崖仏の場合は、三浦定俊氏の測定によると、1986 年 1 月だけでも初旬に 1 日、中旬に約 4 日、下旬は 20 日以降 2 月半ばまでひきつづき外気温・覆堂内気温ともに 0°C 以下であり、特に 1 月 21 日～1 月 31 日は $-2^{\circ}\text{C} \sim -4^{\circ}\text{C}$ であった。小高町薬師堂磨崖仏のように冬期の気温が低い地域の場合は、地表から岩盤内を浸透流下して来る

第 4 表 第 15 図の実験によるボーリングコアの先端部の見掛け比重と空隙率の変化

	見掛け比重	空隙率 (%)
水と反応させる前のボーリングコア	1.28	43.8
水中に 40 日ひたして先端部に塩類鉱物が形成されたボーリングコアの上部	1.64	26.1

第 16 図 小高町薬師堂周辺の新第三紀層でのボーリングのコアを蒸留水の中に入れて数日～数か月の間室内に放置した時に形成された塩類鉱物の成長(第 15 図参照)。

雨水、雪どけ水が石仏およびその周辺の岩盤の表面付近で凍結し、その時に発生する氷圧によって石仏、岩盤の表面部が浮き上がったり微粉化し、気温の上昇、氷の融解とともに剝落することが劣化の原因の一つと

第17図 小高町薬師堂磨崖仏のまわりに1986年1月31日に形成された氷の状態(点線でかこまれた部分)の例。
上、第4図の(3)の弥勒仏の、向って左側頸部。
下、第4図の(4)の観音菩薩の、向って左側頸部。

なっている(福田, 1984, 1985; 三浦ら, 1985)。三浦定俊氏が薬師堂磨崖仏岩盤のせまい割れ目にそって深さ1~2 cm にさしこんだ温度センサーの記録によると、外気温・覆堂内気温ともに $-2^{\circ}\sim-4^{\circ}\text{C}$ になっていた時でも、岩盤の温度は1~2 cm 深さでは $0\sim+1^{\circ}\text{C}$ 近くであった。この事実は、外気が $-2^{\circ}\sim-4^{\circ}\text{C}$ になっても、新第三紀竜の口層の岩盤内は地下水がかなり自由に滲透流下できる状態にあることを示す。

小高町薬師堂石仏群は1985年12月~1986年2月の一冬の間で激しく剝落した。これはこの石仏群が、主として(1)塩類鉱物層の形成と剝離および(2)浸透水の凍結融解によって、現在急激な劣化の進行の過程に

第19図 岩盤中の微小間隙または節理面にそって浸透してきた水が氷結して、この図で点線状であった岩盤表面が氷圧によって左側実線のように浮き上がり、氷がとけ去ると風圧・震動などによって浮き上がった岩盤表面層が剝落する。浮き上がる部分が浸透水の蒸発によって岩盤表面に形成されていた各種塩類析出層である場合もある。

第18図 小高町薬師堂磨崖仏の周辺の新第三紀層の表面において、1981年1月31日に観察された氷結部分(砂目)。

あることを示している。

V. あとがき

薬師堂石仏保存修理調査委員会のアドバイスにもとづいて、1986年12月に文化庁、福島県、小高町の予算により、覆堂の改修（覆堂の壁面、床面、天井面のすべてに断熱材をはり、覆堂と岩盤との間のすき間を密閉し、覆堂の戸、障子をサッシュにする）がおこなわれた。この結果、1987年1月～3月の間に外気温が -2°C 以下に低下した日がかかなりあったにもかかわらず、覆堂内の気温はつねに 0°C 以上に保たれ、覆堂内での浸透水の凍結はおこらず、このため石仏とその周辺の岩盤の剥落がほとんど起きなかった。

今後、雨水浸透防止のために山頂に大屋根を架設するプランが考えられている。これが実現すると、石仏、岩盤表面での塩類鉱物の析出もほぼ停止するであろう。

文 献

福田正己(1984), 小梅手宮洞窟壁面遺蹟の凍結破損防止にかかわる基礎研究. 低温科学, 第43集, 171-

180.

福田正己(1985), 岩石の凍結破砕の機構. 石造文化財の保存と修復, 12-18.

Milodowski, A.E., Bloodworth, A.J. and Wilmot, R. D. (1985), Long term effects on potential repository sites: The alteration of the lower Oxford clay during weathering. Rept. of Fluid Processes Research Group, British Geological Survey, 1-51.

三浦定俊, 福田正己(1985), 凍結-融解サイクル出現頻度の全国分布, 石造文化財の保存と修復, 33-40.

三浦定俊, 福田正己, 西浦忠輝(1985), 凍結劣化とその対策. 石造文化財の保存と修復, 9-11.

小高町(1968), 史蹟薬師堂石仏・史蹟観音堂佛修理工事報告. 1-29.

関 陽太郎, 酒井 均(1987), 千葉県館山市大福寺船形磨崖佛十一面観音像の劣化と水・岩石相互作用. 岩鉱, 82, 230-238.

Suzuki, K. and Nakagawa, H. (1971), Late Pleistocene flora from the Pacific Coast of Fukushima Prefecture, Japan. *Sci. Rept. Tohoku Univ., Ser. II (Geology)*, 42, No. 2, 187-198.

時津孝人(1956), 福島県相馬地区珪砂鉱床調査報告. 地質調査所月報, 7, No. 2, 9-14.