

資料 3－2

国宝高松塚古墳壁画保存修理のための
石室解体について

国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会（9）
概要報告書

2007年9月28日

奈良文化財研究所 石室解体処理班

国宝高松塚古墳壁画保存修理のための石室解体について

目 次

I	はじめに	1p
II	石室解体作業（全般概説）	3p
(1)	事前調査	5p
(2)	調整点検準備作業	8p
(3)	最終点検作業	11p
(4)	地切り・小規模移動	12p
(5)	梱包と回転	12p
III	石室解体作業（個々の石材について）	
①	天井石 4	16p
②	北壁石	19p
③	天井石 3	23p
④	西壁石 3	29p
⑤	東壁石 3	33p
⑯	床石 1	37p
IV	参考資料 I 石室解体準備から実施作業終了日	42p
	参考資料 II 使用治具一覧	43p
	参考資料 III 石材の取り上げ状態などのデータ	46p
V	高松塚古墳石室石材の修理施設への搬送	48p
VI	参考資料 IV 取合部の遮蔽施設の設置と PC 版の撤去	66p

国宝高松塚古墳壁画保存修理のための石室解体

I はじめに

国宝高松塚古墳壁画保存修理にともなう石室解体作業は2007年4月3日（火）、天井石4から開始し、まず壁画に関する側壁石、天井石の合計12石について取り上げを実施し、2007年6月26日（火）、最後となった西壁石1を保存修理施設へ搬入して終了した。その後、床石（4石）周辺の発掘調査が進められ、2007年8月20日より取り上げ作業が再開され、2007年8月21日にすべての床石を保存修理施設へ搬入して、石室解体作業は無事終了した。

当初、石室解体作業は、発掘調査が進められ床石を除く天井石、側壁石の12石すべてが露出した段階で、石室解体に関する精密な調査と、治具や梱包用フレーム等の機材の改良をおこなった上で、石室解体に着手する計画が立てられていた。しかし、発掘調査が進むにつれて、地震等による遺構の状況が予想以上に悪く、版築土がすべて取り除かれると、石室が不安定になり発掘作業に危険がおよぶことが予想された。これらの危険を回避する方法として、石室の倒壊防止策（側壁石周辺の土を一部残しておく、目地止め漆喰を解体直前まで取り除かない等）を講じながら、発掘調査と平行して解体作業を実施することになった。

この変更により、露出した段階で石室調査（石材個々の寸法・形状・劣化損傷状況など）をはじめ、石材に合わせた治具の改良、梱包フレームの製作、新しい情報にもとづく実験による安全性の検証を加えて取り上げ法を再検討するなど時間的にきびしい制約のもとで作業が実施されることになった。

発掘調査が進んで、解体実施日程が近づくにつれて、石室石材の形状が当初の予想とは異なることがあきらかにされた（図1.1、1.2）。大きく異なったのは、最初に取り上げが予定されていた天井石4と北壁石である。当初、天井石については天井石1（南側）とほぼ同様な寸法と形状であると推定していた。また、北壁石についても、南壁石と同様な寸法と形状を呈するものと推定していた。そのため、石材を取り上げる治具や梱包フレームも共通して使用できると考えていたが、寸法や形状が全く異なったため、治具と梱包用フレームを大幅に改良することになった。また、天井石4を取り外してはじめて、天井石3の北側の相欠き部分に大きな亀裂が発見され、早急な対策を立てることになった。また、天井石1,2においても上面と側面はほぼ直交していると考えていたが、実際には偏った台形を呈していたり、面が樽型に膨らんでいるなど外形はさまざまであった。床石についても、その厚さが統一され

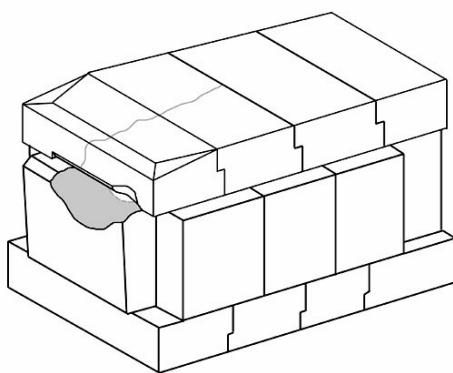


図1.1 実験に用いられた石室の概略図
(規格化された石材の組み合わせを予想していた)

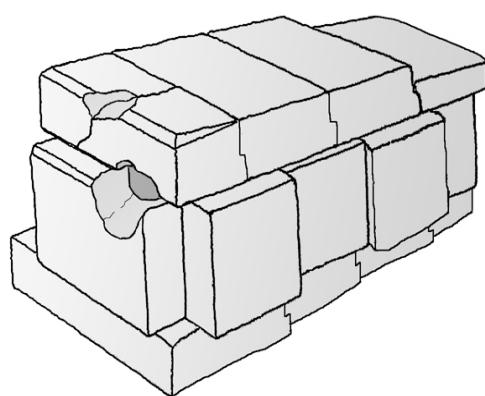


図1.2 高松塚古墳石室のスケッチ（天井石4、東西壁石などが予想外の形状、寸法を示した）

ておらず、それぞれ北側が薄く南側へと厚さが増加するなど予想外の形状であった。

このような予想と異なった石材の形状と寸法は、石材の取り上げに用いる治具と梱包フレームの寸法に重大な影響を及ぼした。特に、治具はその性能を最大限に発揮して安全性を高めるため、寸法に余裕をもたせて作らず、石材の幅に対して両側の合計で±5cm、つまり片側で±2.5cmの許容範囲しかもたせていない。治具と梱包フレームは改良を余儀なくされ、早急な対応がせまられた。いっぽう、東西の側壁石については、石材の設置の方法と床石との相欠き方法が予想外であった。東西の側壁石は床石から版築土に不規則にはみ出して、部分的に詰め石がなされていた。また、床石と東西の側壁石の相欠き状態については、石のカラト古墳のように傾斜した単純な作りを想定していたが、床石はL形に切り込まれ東西の側壁石がその部分にはめ込まれる相欠きで、それぞれの石材はほぼ密着した状態にあった（図1.3）。

また、東西側壁石は、それぞれの石材の厚さが一定しておらず、外観は直線上に配置しておらずバラバラであった（図1.2参照）。

以上の現状を詳しく分析した結果、当初から予定していた取り上げ手法を再検討せざるを得ない結果になった。つまり、石室石材は規格化されたものではなく、作り方もある意味では粗雑であることが作業を困難なものとした一因かもしれない。

石材の劣化・損傷状態に関しては、石室内部からの調査でもある程度の劣化箇所を推定していたが、予想をはるかに超える亀裂や石材の浮き（剥離、ひび割れ等により連続した微小な隙間が生じている）などの劣化が明らかになり（図1.4）、その対策におわれることになった。



図1.3 床石と壁石（東壁石2）の相欠き状態
床石はL字形に削り込まれ、その上に壁石が設置されていた。お互いの石材が接する面は丁寧に仕上げられて、密着した状態にあり、壁石の底部は劣化が進んでいた。従来から計画したスペーサを挿入して治具の先端刃を挿入する方法は危険であると判断され、取り上げ手法の再検討を迫られることになった。

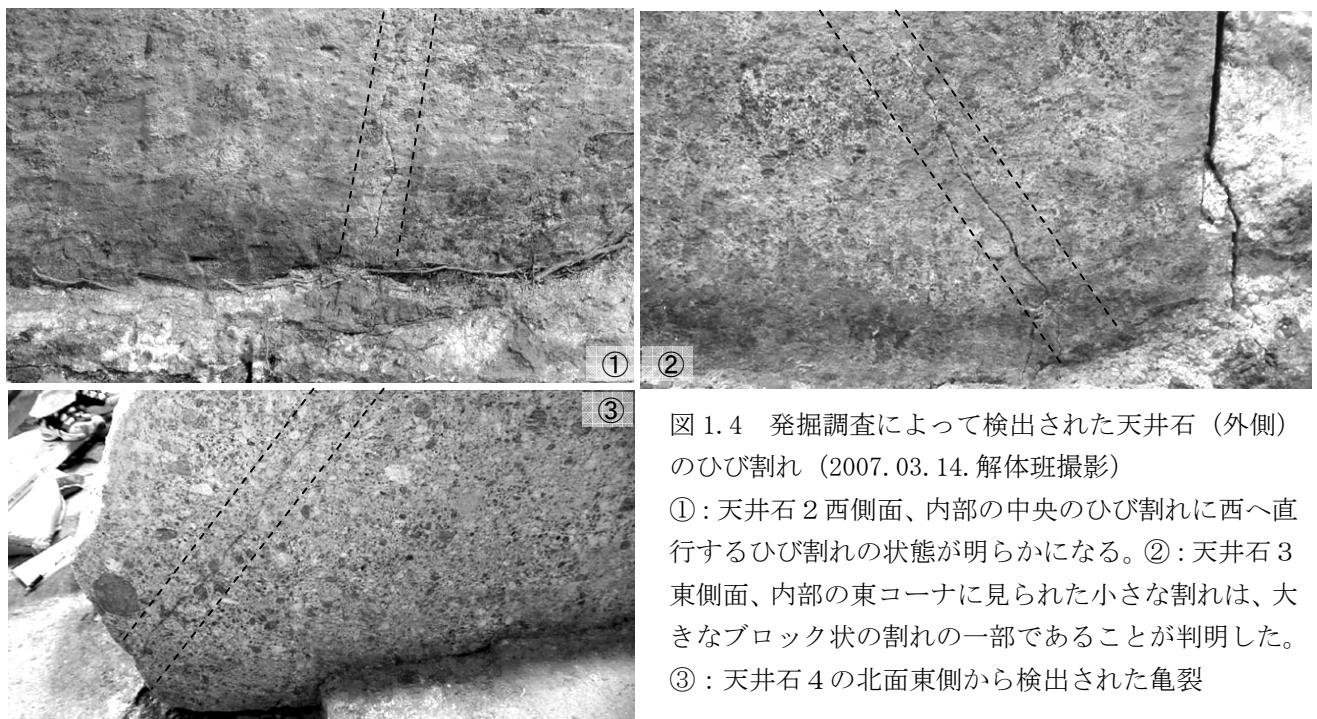


図1.4 発掘調査によって検出された天井石（外側）のひび割れ（2007.03.14.解体班撮影）

- ①：天井石2西側面、内部の中央のひび割れに西へ直行するひび割れの状態が明らかになる。
- ②：天井石3東側面、内部の東コーナに見られた小さな割れは、大きなブロック状の割れの一部であることが判明した。
- ③：天井石4の北面東側から検出された亀裂

II 石室解体作業

石室解体作業は、狭い限られた空間で劣化した石材を取り上げる危険な作業を伴うため、作業上の安全を最優先した。通常の作業と大きく異なるのは、作業スペースが限られ、かつ密閉された空間であるという作業環境に加えて、石材を取り上げる手法も限られることである。つまり、壁画面に触れることが出来ないので、石材を取り扱う上でも限定された箇所した利用できること、また、一つの石材を取り上げることによって、他の石材に影響を与えて構造的に不安定になり石室を崩壊させる危険が生じるなど、リスクに対する万全の体制を要した。以上に関しては、従来から高松塚古墳を模倣した実験場において、同規模の作業スペースで取り上げ実験を繰り返し実施してきた経験を積み重ねることによって、作業上の問題を解決できたことが大きな成果となった。一方、発掘調査が進むにつれ、実際の石室の形状、寸法、劣化の状態が、当初の予想とは大きく異なることが判明するにおよび、石室解体手法の再検討と機材の改良や新たな作製が必要となった。

なお、Aゾーンにおける石室解体作業の工程について図2.1に示す。まず、石室解体作業のための事前調査、および機材搬入等の準備作業については、前日中にすべて終了するように計画した。さらに必要に応じて石材を拘束するポジショニング（位置を調べる）のため、治具を石材に設置する作業などもこの段階で実施した。

実施当日にはそれぞれの使用機材（治具やフレーム、OVHD クレーン、輸送車両なども含めて）の最終点検をおこない、準備が整って異常がなければ石室解体作業を実施した。

石室解体作業の第一段階では、取り上げ予定石材の「地切り」が行なわれた。ここで述べる「地切り」とは厳密に定義されたものではなく、石室構造体として設置されている部材から、対象石材を切り離すことを目的としたもので、多くの場合は石材と石材を切り離して遊離させて、その石材を自由に動かせても他の石材に影響を及ぼさない状態にすることを意味している。つまり相欠き状態を解除させることも含まれている。なお、この「地切り」にあたっては、治具を用いて石材をごくわずか数 mm 吊り上げて他の石材と切り離したり、ジャッキアップしながらコロなど用いてスライド移動するケースなどがある。一般的には、「地切り」は接地状態から吊り上げた状態を意味することが多く、その意味では地切りは一旦接地すると移動のたびに何回も地切りが実施されることになるので、ここでは、便宜的に設置されていた状態から、少し石材を浮かせたり、動かせた状態にすることを意味する。この地切り作業中もしくは作業終了時には、あらかじめ取り除けなかった遊離小片を取り除くことが多い。もちろん石材を大きく移動してから遊離破片を取り除くこともある。

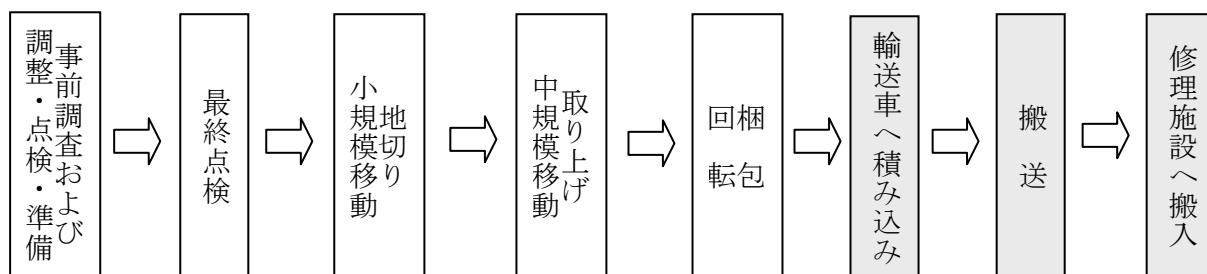


図 2.1 高松塚石室解体の工程と搬送

第二段階では、地切り作業に引き続き、取り上げと移動が実施される。地切り作業は、石材を現位置から数 mm ないし相欠きを外すため数 cm 前後的小規模の移動を伴うが、いずれもわずかしか動かさない。取り上げと移動作業では、現位置を大きく離れて安全な場所へ移動するため数 10cm から数 m におよぶ。場合によっては A→B ゾーンへの移動も伴う。石室から取り外された石材は、引き続いて石材を安全な状態にするため、第三段階として梱包と回転作業を実施した。梱包は、特殊フレーム枠を組み立てて A ゾーンもしくは B ゾーンで石材をフレーム枠に固定梱包するもので、回転作業は梱包後に壁画面を上面にして壁面漆喰を安定状態にするため、回転操作を実施するものである。以上で石室解体にともなう石材の取り上げ作業が完了する。引き続いて、梱包された石材は、B ゾーンから C ゾーンへOVHD クレーンで吊り下げられた状態で移動され、積載補助台に設置された荷台に載せられて、レール上を静かに移動して輸送車両に積み込まれる。なお、車両の荷台は梱包された石材が載せられる前に、梱包材と石材の総重量をもとに、荷台に取り付けた 4 機のエアサスペンションによって緩衝用の最適空気圧に調整した。以下、代表的な作業工程について説明する。

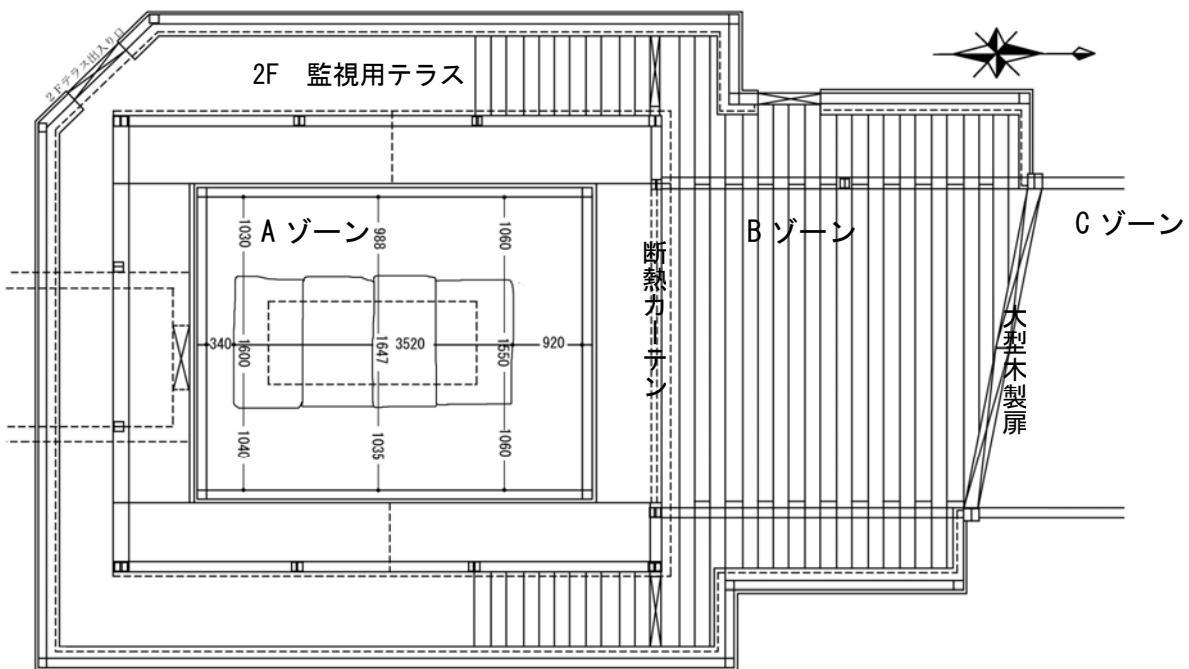


図 2.2 高松塚古墳の石室解体作業場平面図（実験場と比べて B ゾーン、C ゾーンが変形していることや、面積が小さくなっている。A ゾーンはほぼ同等であるが、北側のスペースと南側の前室入り口付近のスペースは狭い。）A ゾーンは温度・湿度のコントロールがなされ、石室内とほぼ同じ環境を保つように設計されている。B ゾーンはバッファゾーンで梱包・回転作業のための場所である。C ゾーンは輸送車への積み込み場所で大気環境にある。

(1) 事前調査

事前調査は石室解体作業を安全に進めるための最終確認の意味も含めて、①石材の欠陥部分を検知するための目視検査に加えて、反射鏡や打診棒を用いた検査などを実施した。同時に②軟岩ペネトロメータを用いた針貫入試験（石材強度分布）、③赤外吸光光度計を用いた含水比測定、④赤外放射温度計やサーモグラフィによる表面温度分布測定も実施した。

①については、石材の欠陥箇所を確認したり、新たな欠陥を発見することが大きな目的でもあり、簡易ファイバースコープや反射鏡を用いた目視観察も効果的であった。特に機材の入らない東西側壁石の底部について欠陥を検知することは困難であるが、反射鏡による目視観察の結果、ジャッキアップ予定部分から、ひび割れ等の欠陥が検知され、ジャッキアップ箇所を変更することにより、石材の破壊を予防できたという大きな成果もえられた。いっぽう、目視観察では検知できない内部欠陥については、打診棒（打音）による調査も平行して進めた。特に石材に生じている「浮き」部分の検出については効果的であった（図 3.1、3.2、3.3）。石材表層付近にわずかな空隙（間隙）が生じている状態を「浮き」と言う。ひび割れが原因していることがあれば、もともとの石材の成因（堆積環境など）に起因することもある。いずれにしても、この「浮き」部分に外力を与えると、簡単に石材表面が破壊される危険性があることは言うまでもない。石材の取り上げ時に実施する石材の拘束にあたって、この浮き部分にパッドを設置して把持した状態で石材を吊り上げると、把持段階で表層の破壊が起こることもある。石材の表層と内部で石材間にスベリを起こすこともある。つまり、石材に内在する「浮き」は吊り上げた石材を落下させる危険な因子となる。

高松塚石室凝灰岩には、多くの見えない「浮き」が存在していた。打診棒による検査では健全な部分と劣化部分では、音の響き方が全く異なっており、劣化部分を簡単に検知することができるので（図 3.3）、事前に危険を回避する有効な手段となった

（このような浮きのある部分は、パッドの位置する部分にあたっても応力を加えず、



図 3.1 東壁石 2 の南コーナー付近に見られる亀裂部分から亀裂のない部分に浮きが発見された。



図 3.2 東壁石 2 の側面上部には亀裂が見えないが、全体にわたって広範囲で浮きが発見された。

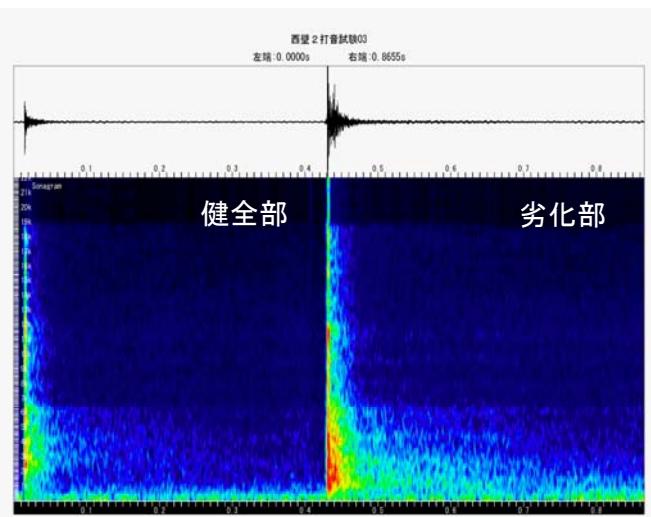


図 3.3 西壁石 2 の健全部分と劣化部分のソナグラム音圧と周波数分布、経過時間の関係を示す。

開放状態にした。つまり浮きのある部分だけではなく、その反対の水平位置にある反力が作用する部分も開放状態にする必要がある)。

②針貫入試験は、石材表面に先端押圧子を押し付けて 10mm の貫入量に要する貫入力 (N)、もしくは 100N の貫入力のときの貫入量 (mm) を測定して針貫入勾配 (貫入力 N/貫入量 mm) を求めて、標準物質と比較して一軸圧縮強度を推定する方法である。現場での測定が簡便で非破壊測定が可能なことから採択しているが、石材の劣化が進んでいる部分については石材を破損する危険があるので測定していない(図 3.4)。2006 年度の調査で、

従来から露出していた南壁石、天井石 1 と東壁石 1、西壁石 1 の一部を調査したところ、高松塚古墳の石室に用いられている凝灰岩の基質部分の一軸圧縮強度は、ほぼ $4.0\text{-}6.0 \text{ MN/m}^2$ ($40\text{-}60 \text{ Kgf/cm}^2$) であり、この数値を基本として石材の取り上げに使用する治具のパッドにかける応力計算をしているので、この数値を基準として検査を進めた。特に、パッドを押し当てる部分について注意した。測定の結果、予想に反して石材全般については従来の強度より大きな値を示したが(図 3.5)、東西側壁石の下部の床石に接する部分は劣化が進んでいるため、測定はできなかった。今回の測定結果において大きな値 (6.0 MN/m^2 : 60 Kgf/cm^2 以上、 $10\text{-}20 \text{ MN/m}^2$ 以上を示す部分も少なくない) を示す理由として、凝灰岩表面から漆喰成分 (Ca) が凝灰岩の基質に進入して石灰質膠着物のような状態になっていると推定された。今後、偏光顕微鏡で表層の状態を調べる必要がある。しかし、この石灰質が内部にまで及んでいるとは考えにくく、単に表層の強度が大きいだけで、表層と内部における強度分布の不均衡が石材に与える影響を評価しておく必要もでてくるかもしれない。つまり、不連続面が形成されている場合は、表層剥落の危険性も否定できない。

③含水比の分布調査(図 3.6)は、全般的に東西壁石の底部が高い傾向を示しており、最大で含水比 15% を示した。また、東西側壁石を取り除いた下部に侵入している土にはかなり水分が含まれているようであった(16-23%)。石材全体としては、いずれも 10% 以下であり乾燥が進んでおり、当初予想したよりは含水比は低い値を示した。石材の取り上げには良好な状態で、天井石について



図 3.4 天井石 3 の針貫入試験

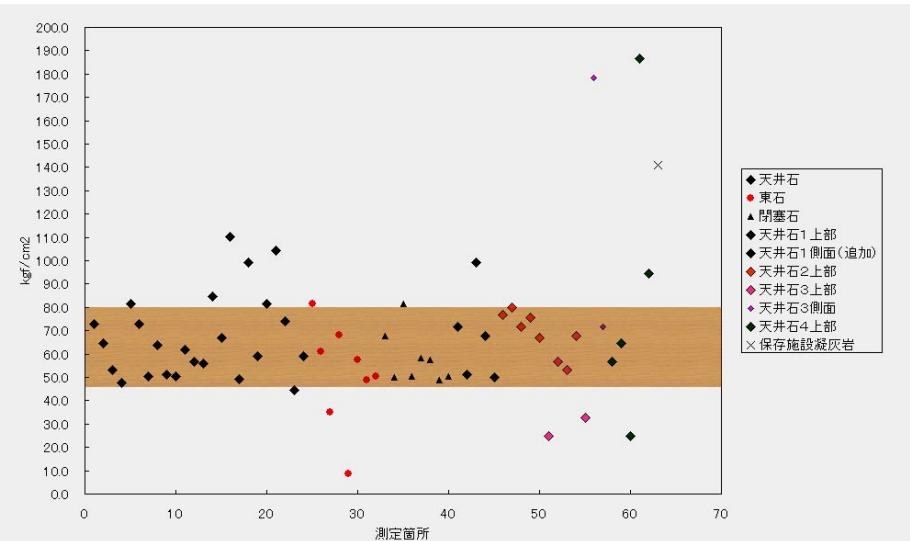


図 3.5 軟岩ペネトロメータを用いた天井石の強度測定結果
一軸圧縮強度は $5\text{-}6 \text{ MN/m}^2$ の範囲に集中しているが、東西の壁石については 10 MN/m^2 前後に集中していた。

は全く問題とはならなかつたが、東西の側壁石底部は比較的高い含水比を示し、劣化が進んでいることが予想され、ジャッキアップやコロ等による移動に際しては慎重な作業がもとめられた。なお、前述のように、含水比の高い部分についての強度測定は、石材を破損する危険があり実施できなかつた。

④温度分布については、サーモグラフィを用いた測定（図3.7）を実施して、部分的な詳細については、赤外表面温度計によつた。

その結果、1個体の石材はほぼ均一と見なせて、±1°Cの範囲にあるものが殆どであつた。ただし、ライトがあたつているような部分は2°C程度上昇していた（光源からの距離による）。サーモグラフィによる調査（図3.7）も同様な結果を示した。AゾーンからBゾーンへ移動した直後には、石材表面温度は1-2°C程度上昇し、さらにCゾーンで輸送車に積み込んで、保存修理施設へ持ち込んだ状態では、表面温度にかなり急激な変化が見られた（仮設修理施設の温度はほぼ21°Cで、輸送車内はAゾーンとほぼ同じ12-15°Cに設定している。結露対策等により、輸送車内で温度を上昇させて調整することもあつた）。



図3.6 赤外吸光光度計を用いた含水比の調査



図3.7 サーモグラフィによる石材表面温度測定

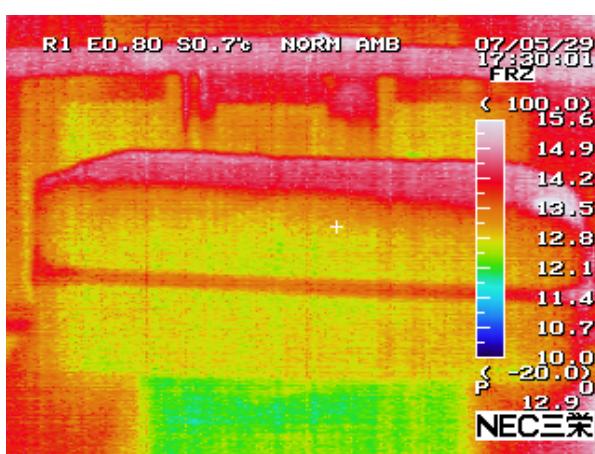


図3.8 サーモグラフィによる表面温度測定

天井石1の温度分布を表しているが、右図で示すようにライトが西上から当たつてゐる部分は、左図の温度分布で白色に表示されより高い温度が示されている。ラッシングベルトも熱を吸収して高い温度を示している。中央のひび割れ部分は光源が当たらないので緑色に表示され、周辺より低い温度を示している。亀裂に水分が含まれている場合はより低い温度を示す。

(2) 調整・点検・準備作業

調整・点検・準備作業は、石室解体作業に用いる機材の搬入から整備・調整、そして A ゾーンにおける石材の取り上げおよび B ゾーンにおける梱包、回転などに必要な機材の設置などを含めた準備作業である。調整・点検作業内容は多岐にわたるので主な項目を以下に示す。

<石材の地切り・取り上げ・移動に関する主な機材と点検>

- 1) 治具のシリンダー、パッドの点検と作動検査およびオイル漏れ等のチェック (図 4.1)。
- 2) 油圧-空圧コンプレッサーの作動確認と出力検査、および耐圧ホースの点検等。
- 3) 治具にストレインゲージを設置して、データロガー、コンピュータに接続してデータサンプリングが正常におこなわれること、通信異常がないことをチェック (図 4.2)。
- 4) ロードセルを用いた使用治具重量測定の実施。
- 5) オーバヘッドクレーンの南北、東西、上下方向移動と速度検査、巻き上げワイヤーの状態チェック、No.1,No.2 の同時作動検査など。
- 6) 使用ワイヤーの種別点検、ワイヤーの滲み出し等の異常点検。
- 7) チェーンブロックの点検と作動状態の確認。
- 8) AE センサー、CM センサー等動作確認と石材への設置 (図 4.3)。
- 9) 使用予定ジャッキの点検と整備。改造作業を含む。
- 10) 上方ジャッキの取り付け H 鋼材、材木の準備。
- 11) ジャッキアップに関連するステンレス板、POM 板、シリコーン、スレンレス丸棒、ゴムシート、テープなど材料一式の準備と点検。
- 12) バンディング用ベルトの準備、コーナ金具の準備と点検。
- 13) トルクレンチの準備と設定確認。

<梱包に用いる主な機材と点検>

- 1) 梱包用フレーム枠のパーツ点検と方向位置、距離の確認 (石材とのマッチング)
- 2) 梱包用フレーム枠の組み立て検査、ボルト、ナット、パッドの状態点検
- 3) 梱包用フレーム一式の重量測定 (積荷重量からエアサスペンションの空圧調整をおこない防振に最適な状態にする) (図 4.4)
- 4) 修理施設での下台フレームのマッチング

<搬送に関する主な機材と点検>

- 1) C ゾーンにおける積載補助装置の点検と設置位置確認
- 2) 積載補助装置と輸送車両とのマッチングに関する点検
- 3) 輸送車両の環境対策の動作確認
- 4) 輸送車両内に設置されている加速度計、歪センサー、GPS 等機材の動作確認 (図 4.5)
- 5) 搬送ルートの路面状態確認と天気予報
- 6) 搬送、搬出時における環境対策の検討
- 7) 修理施設における積載補助装置の点検と設置位置確認
- 8) 修理施設における積載補助装置と輸送車両とのマッチングに関する点検
- 9) 修理施設における積み下ろし時に使用する門型移動リフターの動作確認と点検
- 10) 積み下ろし時に使用するワイヤーの準備と点検

<その他>

- 1) 石材間の漆喰の縁切り状態の最終確認。
- 2) 遊離石材の確認と取り外し。
- 3) 取り上げ対象石材に接する他の石材への影響確認とその対策。
- 4) 石室の構造補強対策の再確認と補強が解除されているときの監視体制確認。
- 5) 停電時におけるバックアップ電源の準備。
- 6) Aゾーンにおいて、石材重量測定、センサーによる記録位置の確認と各種ケーブルの配置等。プレスケールを用いたパッドと石材の接触状況の調査（図4.6）

以下の項目については省略する。



図4.1 Bゾーンにおける機材の点検



図4.2 治具にストレインゲージを設置



図4.3 石材へのAEセンサー等の設置



図4.4 梱包材料の重量測定（ロードセル）



図4.5 輸送車両内におけるデータ収集調整



図4.6 プレスケールを用いた接触状況調査

準備作業については、B ゾーンでの点検作業などと平行して、A ゾーンにおいても、取り上げる対象の石材や取り上げる手法によってさまざまな準備を実施した。

石材の地切り・取り上げに際しては、隣り合う石材間にまたがる壁画漆喰の切り取り作業や壁画漆喰の養生は最も重要な作業であり、養生班により作業が進められた。いっぽう、石材の目地止め漆喰の除去やその隙間に漆喰が侵入して石材と石材が固着した状態を切り離すことも、地切りをスムーズに進めるに当たって重要となった。また、天井石の目地隙間に侵入した根や土、目地漆喰片の除去などの一連の準備作業については、発掘班と共同で作業を進めた。

天井石 2 の取り上げに際しては、天井石 3 を取り上げた後に検出した北面の東部分に大きなブロック状の亀裂（図 4.7）を詳細に調査したところ、東壁石 2 と天井石 2 の隙間に目地止め漆喰が侵入して固着状態にあることが判明した。天井石 2 を取り上げる際に、この漆喰が妨害してブロック状に亀裂石材を脱落させることも予想されたので、ダイヤモンドワイヤーソーを用いて漆喰を切断して固着状態を解除した（図 4.8）。

また、取り上げ準備として、地切り後に用いる梱包用フレーム枠の下台を設置するための補助台を取り付ける作業、実際に治具を石材に取り付けて、石材把持用のパッドが石材にどのように押し当てられるか調べる作業なども準備の一環として実施した（図 4.9）。



図 4.7 天井石 2 の北面東側に見られる亀裂状態と東壁石 2 の接する部分は漆喰によって固着していた。



図 4.8 地切り時に固着部分を取り外す必要があるが、発生していた亀裂部分が耐えられずに、ブロック状となって石材が脱落する危険が予想された。その対策として事前に、ワイヤーソーを用いて固着している部分を切り離した。

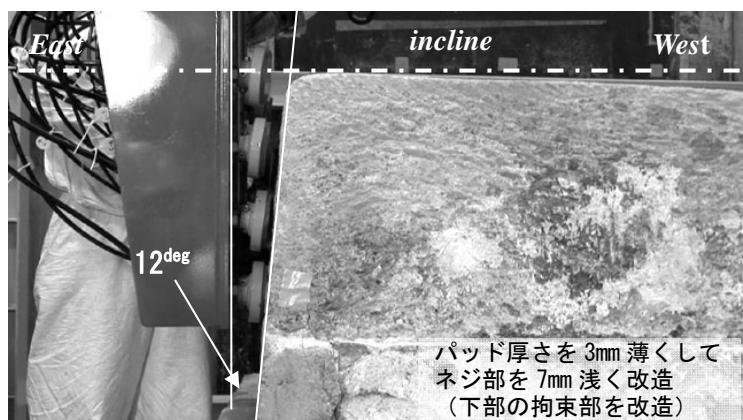


図 4.9 石材に治具を取り付けて状態を調べる
天井石 2 は天井石 1 とほぼ同じように、ほぼ 2 % 傾斜（西落ち）している。さらに南にもやや傾斜して捩れ状態になっており、さらに石材は片側台形歪を呈している。石材の最適拘束点を調べるため、プレスケールを用いた作業が実施され、シリンダー側の下部のピンの長さを変更した。

(3) 最終点検作業

最終点検作業は石室解体作業の当日の最初に実施され、前日までに終了している準備作業の再確認を目的としたもので、さらに当日における作業工程内容の確認と作業役割分担についての再確認をおこなった。

実際の内容としては、オーバーヘッドクレーンの動作確認、使用治具の点検と動作確認、治具に設置されている各種センサーの動作確認、ロードセルを用いた重量測定に関する動作確認と再測定、フレーム枠の組み立て確認と設置法の確認、ワイヤーなどの使用機材の確認点検などを実施した。次いで測定機材、油圧-空圧系機材をBゾーンからAゾーンへ運び込み石材の取り上げ時における計測体制をとった。石材からの異常を検知するためのAE、CMについては動作確認をおこない、石材に治具が設置した後におこなう計測の体制を整えた。

また、この段階では、Bゾーンにおいて治具をオーバーヘッドクレーンに取り付けて（ホイスト、ロードセル、ワイヤー、チェーンブロックなど接続する）チェーンブロック等の調整により水平状態に維持するなどの点検作業も実施した。

また、保存修理施設においては、搬入される石材の下部フレーム台と修理用架台のマッチング試験などを行なうこともあった。通常、これらの準備作業はほぼ1時間内に終了し、各担当責任者（解体・処理班では、各専門分野ごとにチームを編成している）から異常がないことの報告を受けて、当日において取り上げ作業を実施することを文化庁に報告し、文化庁からの指示を得て取り上げ作業を実施した。

最終点検作業が終了した後は、実際の石材の取り上げ作業へと進むが、若干の準備作業を行なう。天井石の取り上げに際しては、地切り・取り上げ作業中に、石材間に堆積していた土砂や目地漆喰などが落下するので、受け止め台を設置したり、場合によっては梱包用フレームをAゾーンに設置したり、倒壊防止用材を取り除くなど様々な作業が実施された。

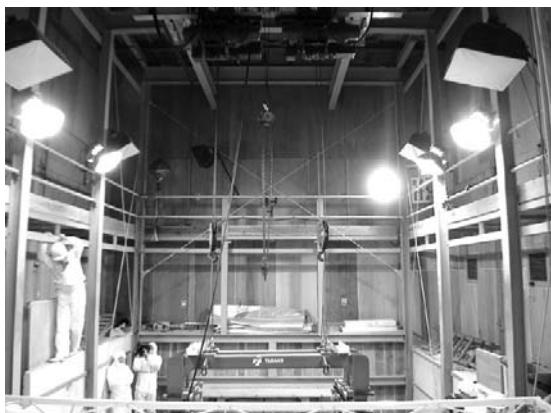


図 5.1 治具を吊り下げる状態での OVHD クレーンの走行試験



図 5.2 チェーンブロックなど機材の目視点検作業



図 5.3 遊離した石材片を最終点検の段階で取り除くこともある。

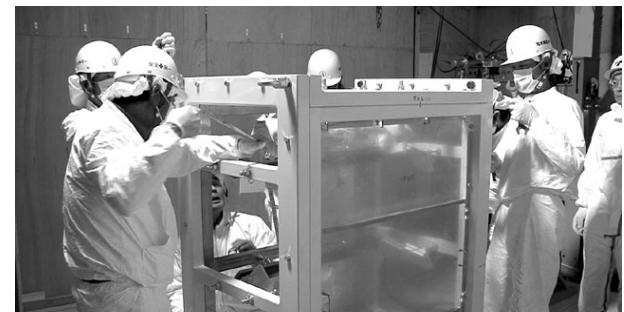


図 5.4 フレーム枠の組み立て状況の点検

(4) 地切り・小規模移動作業→取り上げ・移動

地切り・小規模移動作業は石室解体作業のなかで最初に実施される工程である。「地切り」は対象石材の底面および側面に接する石材と縁を切って、引き続き実施する「取り上げ・移動」作業をスムーズに進める目的としたものである。石室解体作業上、最も重要な工程で、わずかなミスが取り上げ対象石材のみならず隣接する石材にも大きく影響して、大きな損傷を与えることも十分に考えられるので、慎重に作業を進めた。

地切り作業を困難なものとする要因として、相欠き部分や石材同士が接する部分において、不均一に残存する漆喰がある。隣り合う石材と石材が部分的にせよ接着しているので、ある程度の外力を加えないと切り離せない。また、切り離された瞬間に開放された力によって石材が予期しない方向に動くことがあるので、安全な方向に石材が逃れるように注意深く実施した。また、地切り作業では、前述のようにかなりの外力を加えることになるので、石材の亀裂が広がらないようにベルトで固定することや、東西壁石のように、床石に接する垂直に立ち上がった部分は劣化が進んでいるので、コーナー部分を損傷しないように、壁石をできるだけ傾斜しないように、垂直状態で持ち上げることも困難な作業であった。

天井石については、石材の接する相欠き部分が損傷しないように、また、亀裂部分に負荷がかからないように治具を設置して、状況を判断しながら、チェーンブロックの操作により部分的に少し吊り上げたり、全面に均等に吊り上げるなど個々の石材に合わせた方法をもっていた。

地切りの方法は、専用の治具を用いる方法とジャッキアップによる方法により実施した。石材に直接治具を取り付けることが可能な天井石のすべてと南北壁石、東壁石1、西壁石1は、治具を用いて実施し、引き続き取り上げ・移動操作を実施した。いっぽう、直接治具を取り付けることができない東壁石2・3、西壁石2・3についてはジャッキアップにより地切りをおこない、コロなどをを利用してスライドさせて相欠き部分を外した。さらに移動して治具を取り付けられる空間を確保した後に、治具を用いた取り上げ・移動操作を実施した。なお、個々の石材については、別の項目のところで紹介する。

(5) 梱包と回転

石材を梱包して回転する目的は、フレーム枠を組み立てて取り上げた石材を拘束・梱包して、回転することによって壁画面を上面にして、壁面漆喰を安定させた状態にすることにある。また、取り上げた石材をフレームで拘束して梱包することは、搬送や保存修理施設での積み下ろし作業をスムーズにできるなど、移動に関する安全面でのメリットは大きい。

取り上げられた石材は、①Aゾーンで梱包されることもあるが、Bゾーンで梱包されるケースもある。安全性から言えば、石材を梱包フレームで完全に拘束した状態で移動する方がリスクは少ないが、②Aゾーンにおいて梱包する作業スペースが確保できない場合は、石材をAゾーンからBゾーンへ移動した後、Bゾーンで梱包した。また、安全上の必要性から取り上げた石材の底部にのみフレーム枠を取り付けて、治具と一体化させてBゾーンへ移動するケースもあった(天井石3については亀裂状態からこのような安全策を講じた)。いっぽう、回転作業については、Bゾーンで実施したが、一部の梱包された石材についてはAゾーンからBゾーンへ移動する過程で、ゆっくりと90度回転し、Bゾーンで下ろす段階で、壁画面が上になるようにすることもあった。

①Aゾーンで梱包した石材は、東西の壁石1，2，3と北壁石である。最後に取り上げた東西の壁石1については、隣り合う石材がないので、直接ΠⅠB-B型治具を取り付けて、地切りした後に少し吊り上げて移動して、壁画面を南に向かた後、石材の底部に下台フレームを設置した。その後、北面、南面にフレーム枠を取り付けた後、治具を取り除いて、東西の端面および上面にフレーム枠を順次取り付けて、パッドにより石材を完全に拘束してからBゾーンへ移動した。

東西の壁石2，3については、ジャッキアップして地切りした後、コロやステンレス板、POM (Polyacetal, Polyoxymethylene Polymer)板などを用いて石材をスライドして移動した。その後、Γ型治具により少し移動し、さらにΠⅠ型治具に付け替えて、吊り上げ・移動後にフレーム下台に設置するケースや(東壁石3)、石材をスライドさせて隣り合う石材との間に治具を設置できる作業空間を確保した後に、ΠⅠ型治具を用いて石材を吊り上げて移動して、下台フレームに設置した(東壁石2、西壁石3、西壁石2)。下台を設置した後は、同様の方法によりフレーム枠を組み立てて石材を梱包して、Bゾーンへ移動した。

北壁石もΠⅠB-C型治具により石材を拘束して地切り、移動後にAゾーンでフレーム枠を用いた梱包作業を実施した。なお、北壁については今回の解体作業のなかでも最も狭い空間での作業となった。なお、これらAゾーンで梱包した石材については、AゾーンからBゾーンへ移動中に傾斜させながら移動と回転操作を同時に実施して、Bゾーンへ到着する時点では、壁面が上面となるようにしていたが、西壁石3におけるBゾーンへの移動・回転操作時に操作ミスが生じたため(③参照)、より安全性を確保するため、移動中の回転操作は実施せず、Bゾーンに石材が到着した後に実施することにした。

②Bゾーンで石材の梱包・回転を実施したのは、天井石1～4と南壁石である。ただし天井石3は、Aゾーンで石材底部に下部フレームを取り付けた後にBゾーンへ移動した。

天井石1は、ΠⅢ型治具にオクトパスを組み込んで、さらに落下防止ベルトを装着して安全を確保した後、Bゾーンへ移動して梱包・回転操作を実施した。

天井石2については、ΠⅢ型治具を取り付けて地切りを実施した後、少し吊り上げた状態で北方向へ水平移動し、あらかじめ設置していた補助台(下台フレームを設置しているわけではない、落下の防護処置である)へ石材を移動させて、天井石1との相欠き部分を解除してスペースを確保した。次いで、ΠⅢ型治具の上部にチェーンブロックで吊り上げられていたオクトパスを降下させて、静かに上部からオクトパスを装着して石材を拘束した。さらに落下予防ベルトを装着してBゾーンへ移動した。Bゾーンでは、準備していた下台フレームに石材を設置した後、すべての面についてフレーム枠で梱包した後、回転操作を実施した。

天井石3については、亀裂の状態からΠⅡ型の治具を用いてチェーンブロック操作によって地切り後、補助台へ移動して石材底部を取り付けるための下台フレームを石材下部に挿入して、治具によって拘束された石材はフレームと一体化させて、Bゾーンへ移動した。Bゾーンにおいて、すべてのフレーム枠を取り付けて、パッドで拘束して完全に梱包した後、回転操作を実施した。

天井石4については、ΠⅡツインボルト方式の治具で地切後に移動して、ベルトを装着して安全を確保した後、Bゾーンへ移動して梱包・回転した。

南壁石は、ΠⅠB-C型治具により地切りした後、落下防止ベルトを装着した状態で、Bゾーンへ移動させてから、回転操作を実施した。

(3) 西壁石3にともなう移動・回転にともなうワイヤーの掛け方のミスについて

西壁石3にフレーム枠を取り付けて石材を拘束した後、Bゾーンへの移動と回転作業を実施するためオーバーヘッドクレーンのホイスト No.1(西)を利用するため、フレーム枠全体を西側に位置し壁画面を南側に設置した状態で作業を開始した。

まず、チェーンブロックをホイストに取り付けて、ホイストに取り付けられたチェーンブロックの吊り金具と①と②を接続し、さらにワイヤーを用いて、③と④をホイストに接続した(図 6.1)。しかし、この接続ではチェーンブロック操作がしにくいので、責任者の指示によりワイヤーを用いて長さ調整をおこなうため、ワイヤーの付け替えをおこなった(ホイストにワイヤーを接続してこれにチェーンブロックを取り付けて、それぞれ北側の①、②に接続、南側は中継ワイヤーを接続する。接続関係は初期と変わらない)(図 6.2)。

確認作業が行われた状態では、問題となった、③、④からホイストに接続されているワイヤーは⑤、⑥の金具より南側にあり、石材を梱包しているフレーム枠はほぼ垂直に設置された状態で、ホイストは中心よりやや南に位置していた(石材の中央付近)。この状態でホイストをやや上昇させて、状態の確認がなされ、吊り上げ時にフレームの上部がやや北側にふれる可能性があるので、チェーンブロックを操作するにあたり、操作者が鋼材に挟まれないように注意が与えられた(図 6.2 中の白矢印)

少し上昇させて、フレーム枠が少し浮いた状態で、チェーンブロックを少しさげて傾斜した状態から作業が再開された(ほぼ南側に5度傾斜した状態)。



図 6.1



図 6.2

まず、ホイストを微速で上昇させながら、ゆっくりチェーンブロックを下げる方向に操作して、ほぼ 10 度北側に傾斜し、地面より南側で 30-50cm 前後の状態に達した時点です（図 6.3）、⑤（⑥）に位置していたワイヤーが一瞬にしてフレーム枠上をすべて④③のピンよりやや上の位置で停止した（図 6.4、7.5）（ワイヤーは伸縮するのでフレームから瞬間に浮いた状態になる）。このため、⑤で支えていたフレーム枠は、支えを失つて枠全体が南へ 10 度から 4 度まで一瞬にして戻ることになり、合計 8 回程度南北方向の揺れを受けることとなった。

やや南面側が下がって北面側が上がる傾向と、石材の中央より上下方向で南北の揺れの方向が逆向きとなつた。なお、東西方向の揺れはなかつた（以上図 6.1-5 参照）。

さいわいにして、空中での揺れであり、地上に激突したわけではなかつたので、大きな衝撃を伴うものではなかつたが、確認事項の見直しと、安全対策の再検討を早急に実施した。

この操作については、ワイヤーをかける全体位置の見直し、回転時に生じるワイヤーの移動変化の推定、さらに、ホイストの巻上げ機の巻上げに伴うワイヤーの位置変化（ホイストを伸ばした状態から巻き上げると、巻き上げ機のワイヤーの東西方向の軌跡が変化する）、A ゾーンから B ゾーンへ移動中に実施している回転操作の必要性、回転時におけるワイヤーの固定方法などについて検討をおこない、A ゾーンにおける回転操作を中止して、B ゾーンでのみ回転することにした。また、ホイスト 1 機による回転時には、ワイヤーが移動しないように、固定ロープを併用するなどの対策を取ることにした。



図 6.3

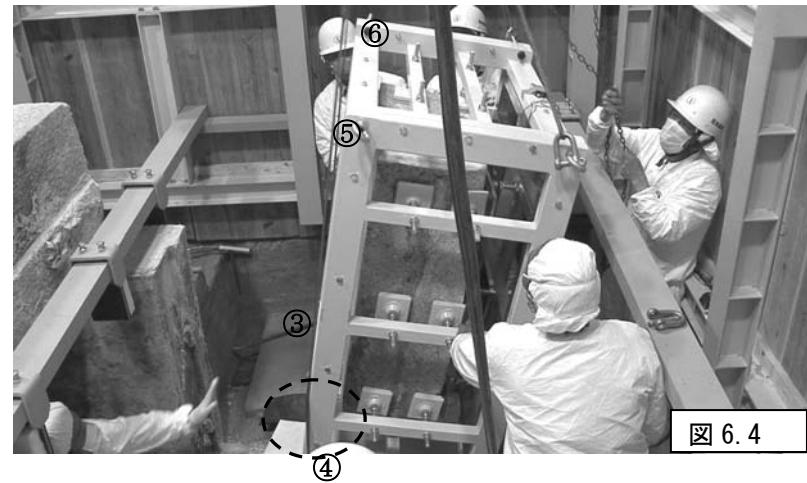


図 6.4

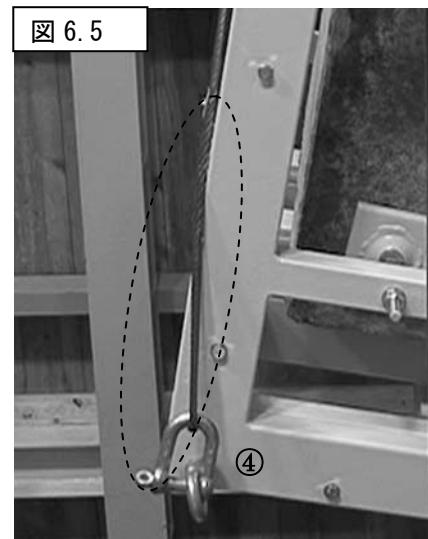


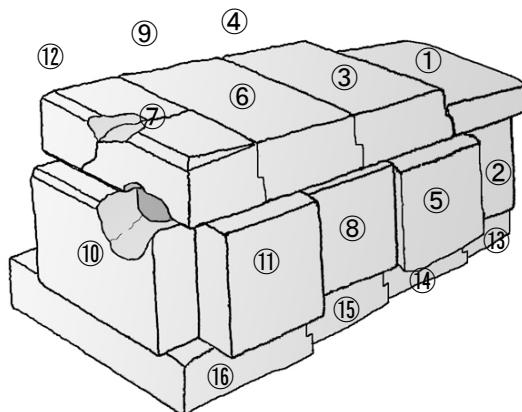
図 6.5

III 石室解体作業（個々の石材について）

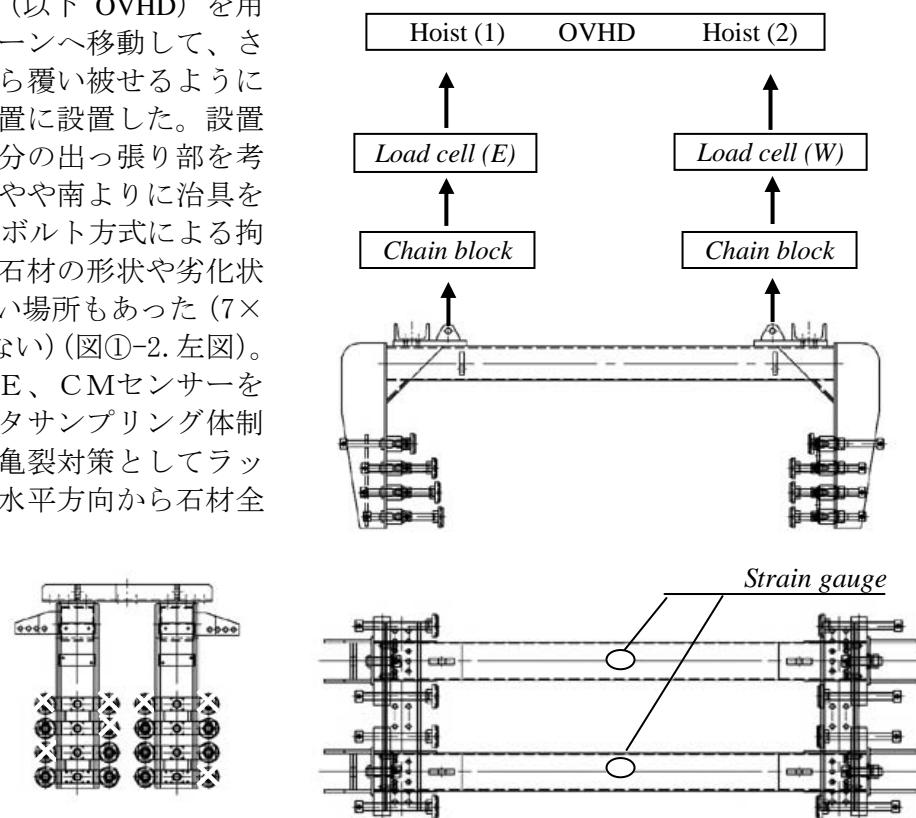
この章では、数種類の石材の取り上げ方法について紹介する。なお、石材の取り上げ順序は、安全性等を考慮して当初の計画を若干変更した（図①-1）。

① 天井石 4：天井石 4 は当初予想した形状・寸法とは大きく異なり、治具を改良する必要があった。石材の状態は比較的良好であるが、北面の東側コーナー中央下部付近から発せられた斜め上方に延びる亀裂（図 1.4. ③参照）、および東側面の北側から南上方に続く亀裂が検出され、安全確保のため、あらかじめ全周をベルトにより拘束した（天井石 3 との相欠き部分にベルトを通せる隙間があった）。この天井石は扁平で、北壁石に載った状態にあるが重心よりやや南側に位置しているので北側がやや下がって、不安定な状態になっていた。

地切りの準備作業として、まず II II B-B ツインボルト型治具の北側梁にそれぞれチェーンブロックを接続して、ロードセルを経由してホイスと No. 1、No. 2 に取り付け、南側にはチェーンブロックを取り付けず、ロードセルを経由して直接ワイヤーでホイストに取り付けた（図①-2）。この状態でオーバーヘッドクレーン（以下 OVHD）を用いて B ゾーンから A ゾーンへ移動して、さらに治具を石材の上から覆い被せるように下降させて、所定の位置に設置した。設置にあたっては相欠き部分の出っ張り部を考慮して石材の中央よりやや南よりに治具を設置した。合計 32 本のボルト方式による拘束を予定していたが、石材の形状や劣化状況に応じて拘束できない場所もあった（7×2 パッドは使用していない）（図①-2. 左図）。治具を設置した後、AE、CM センサーを接続して、各種のデータサンプリング体制をとった。いっぽう、亀裂対策としてラッピングベルトを用いて水平方向から石材全体を固定した。石材の拘束にあたっては、仮の締め付けをおこなって石材の状態を確認した後、応力調整のためトルクレンチを用いたボルト締め操作をおこなって石材の把持を開始した。



図①-1 石材を取り上げた順序



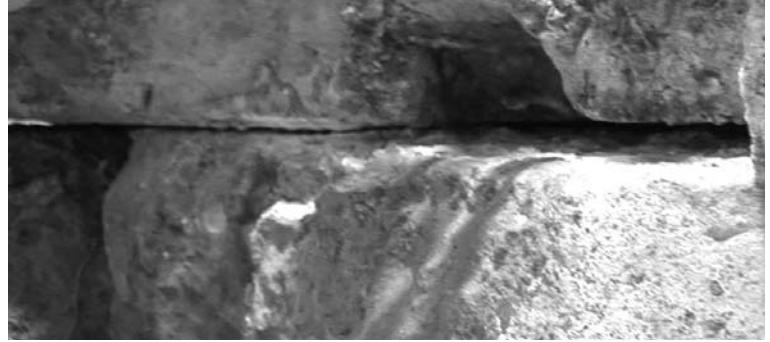
図①-2 天井石 4 に用いた II II B-B ツインボルト型治具とその接続概略
ロードセル、ストレインゲージからの情報により、石材の拘束状態を監視しながら、地切り、吊り上げ、移動等の操作を実施した

地切りにあたっては最初に北側のチェーンブロックを用いて、北側に傾斜している分を修正するため、少し吊り上げて、石材が水平に近い状態になるように調整した（隙間がごく僅かに観察でき、北壁石の北側の一部のみが切り離れてない）（図①-3）。この操作により相欠きの隙間に詰まっていた土が石室内部に入る様子が目視観察により内部から確認されたが、壁面に影響を及ぼすものではなかった。次に石材全体を少し浮かせるため2機のホイストを操作してわずかに吊り上げて石材底面に空間が確認され縁が切れたことが確認された（図①-4）。この時点では数mm程度石材が浮いた状態になったことを確認できたので、ほぼ地切りが成功した。次にOVHDの操作により石材全体を北方向にごくわずか水平移動して、天井石4と天井石3には数cm程度の空間が確保された（図①-5）。相欠き状態がほぼ解除されたと考えられた。しかし、石材の凹凸により北壁石の一部がわずかに接するような状態になったので、No.1ホイスト操作により西側を少し吊り上げて、さらに全体を上昇させてわずかに浮かして水平状態に修正した。さらに1cm上昇させて安全を確保した（2cm前後の空間が確保できた）。

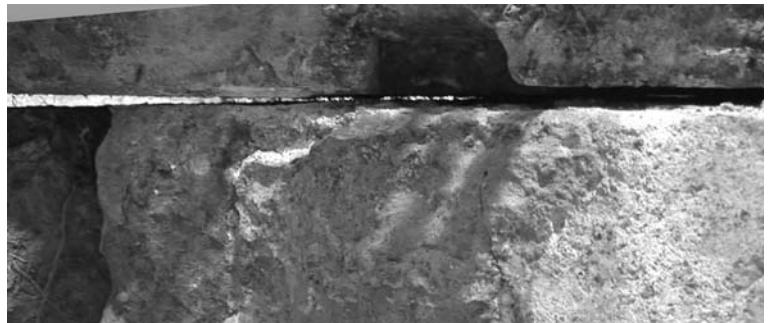
ベルトを挿入するため、さらに上昇して5cm程度を確保し、さらに北側へ移動し、石室内部が完全に見える状態になった。なお、天井石4の南端部が北壁石の北端前後に位置した状態で、亀裂部分にベルトを東西方向（上下の面が通るように）に装着し、さらに落下防止用のベルトを1本づつ東西側に装着した。

ベルト装着状態の点検が終了し、石室内部に異物が入らないようにスチロール製の板で空間を覆った後、AゾーンとBゾーンを仕切っている断熱カーテンを下げて、垂直および水平移動を始めた。Bゾーンでは予め梱包用フレームの下台を用意しており、Aゾーンからの天井石4を所定の位置に下ろして取り上げ・移動作業を無事終了した（図①-6）。

なお、石材の把持に関連する状態変化については、治具の梁にかかる梁応力変化をストレインゲージで検出して、異常なく石材が拘束されているか、パッドにスペリが発生していないか、石材の亀裂等に変化がないかなど測定と記録をおこなった。同時にOVHDに吊り下げられたロードセルにかかる全荷重の変化も同時に測定して、静止状態にて石材の重量を求めた。参考のため図①-7に重量変化、図①-8に治具にとりつけた歪ゲージのデータを示した。



図①-3 治具を取り付けた状態（地切り前）



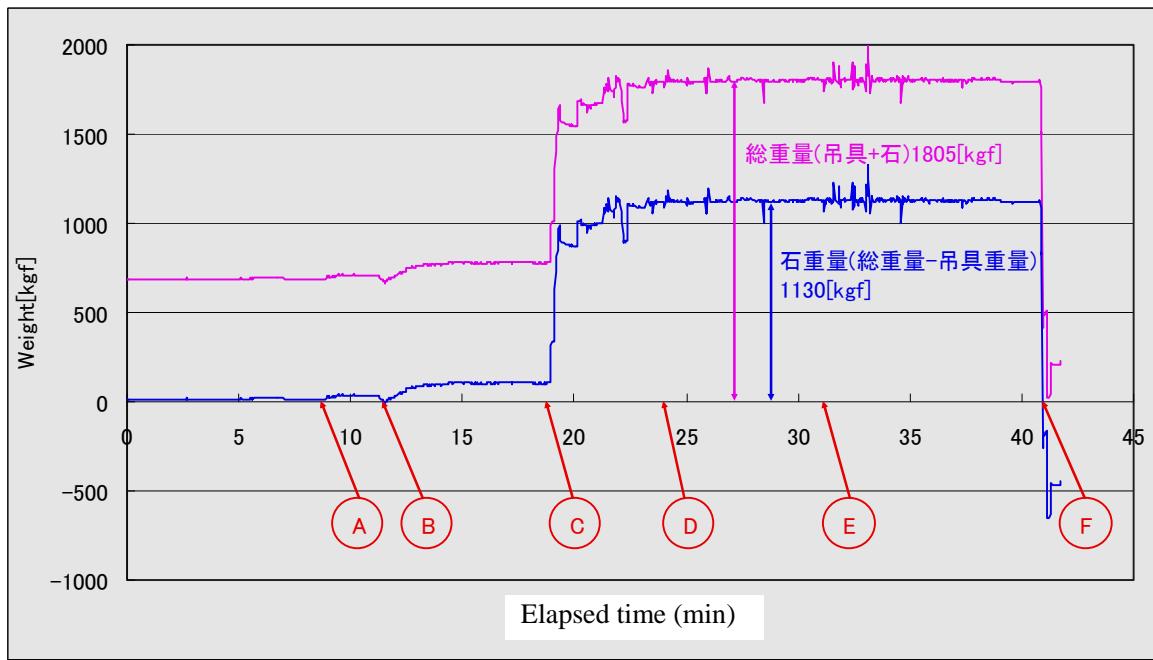
図①-4 北壁石と縁が切れた直後の状態



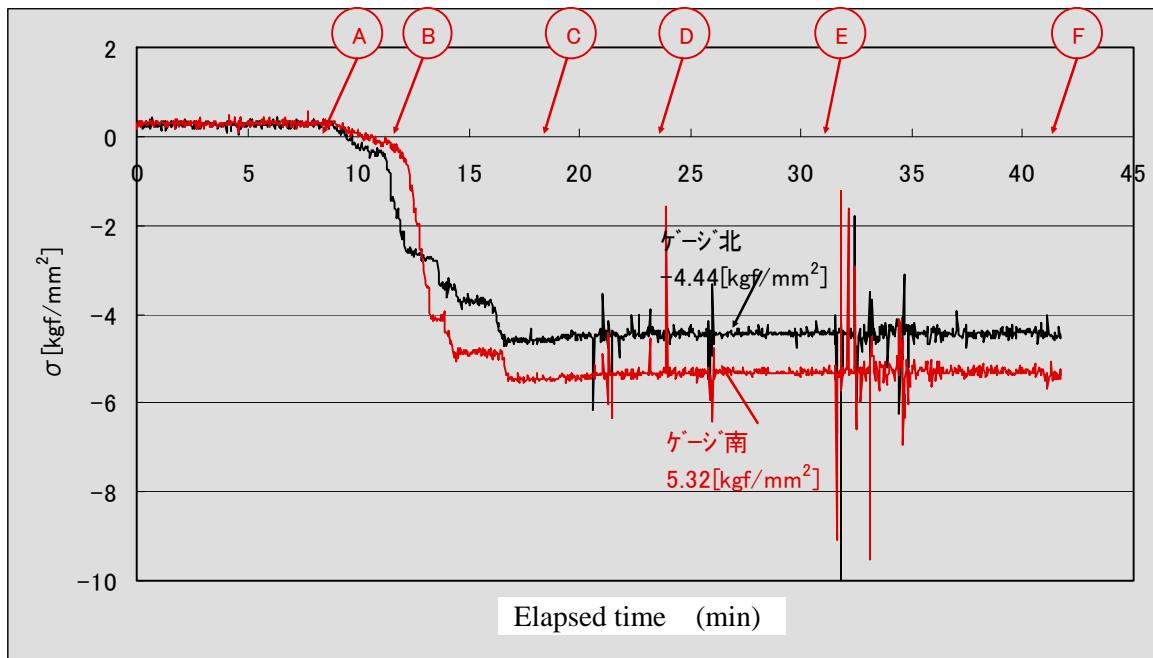
図①-5 相欠きが解除される寸前



図①-6 石材が取り上げられて移動



図①-7 総重量と石材重量測定結果（天井石 4）



図①-8 治具の応力測定結果（天井石 4）

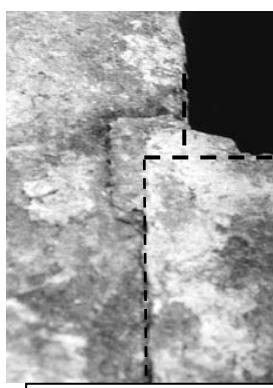
A;仮止め開始 → B;把持開始 → C;吊り上げ開始 → D;空中に吊りあがっている状態 → 落下防止ベルト装着 → E ; 移動（上昇）開始 → 上昇-水平移動-上昇-水平移動 → B ゾーンへ → 棚包枠への位置決め → F;棚包枠に設置（到着）（注）OVHD クレーンからのノイズ信号が含まれる。

② 北壁石：北壁石の取り上げについては、治具を用いた地切り、吊り上げ、梱包を A ゾーンで実施して、完全に石材をフレーム枠で梱包した後、B ゾーンへ移動する実施計画が立てられていた。北壁石と遺構壁面を強化する支保鋼との間の有効作業スペースは、ほぼ 1m で、この空間内で石材を梱包するフレーム枠を組み立てる困難な作業であった。

北壁石は、当初、南壁石とほぼ同寸法であると推定していたが、東西の寸法がかなり大きいことが判明して以来、短期間に内に治具の改良とその寸法にあわせたフレーム枠の作製をおこなった。北壁石に使用する II I B-C 型治具が現地に運び込まれて公開されたのは、地切り予定期の 3 日前（2007.04.13）であった。治具が到着した後、B ゾーンへ油圧系、空圧系コンプレッサー、計測器等の機材を搬入して、治具調整の準備を開始した。午後からは、発掘調査班による漆喰目地の取り外し作業が開始され、石材の全容が明らかになったのは翌日であった。

発掘調査班による作業が終了して、A ゾーンにおける調査と準備作業が実施できたのは、北壁石の地切り作業が予定期されている 24 時間前であり、すべての調査と準備がこの時間内に実施された。

A ゾーンにおける最終調査は、通常実施している目視観察による石材の状態調査、軟岩ペネトロメータを用いた石材強度測定、赤外吸光度計（赤外水分計）を用いた石材の含水比測定（図②-1）、石材表面温度分布などである。この調査においては、石材を把持する部分や亀裂状態について注意して、あらかじめ取り外しが可能な遊離した石材片については、北壁石本体から取り外し、その断面についてはアクリル樹脂で仮強化処置をおこなった（図②-2）。いっぽう、東西壁石と北壁石の相欠きの上部において、目地漆喰が残存していたので、それも取り外した。相欠き部分は密着した状態になっていることが明らかになり、地切り時に相欠きを破損しないような石材の取り上げ法が検討された（図②-3）。また、北壁石の底部には、花崗岩の角礫詰め石が 4 個体詰められており、取り除けるものについては、取り外して、木製のキャンパを挿入して安定性を高めた。



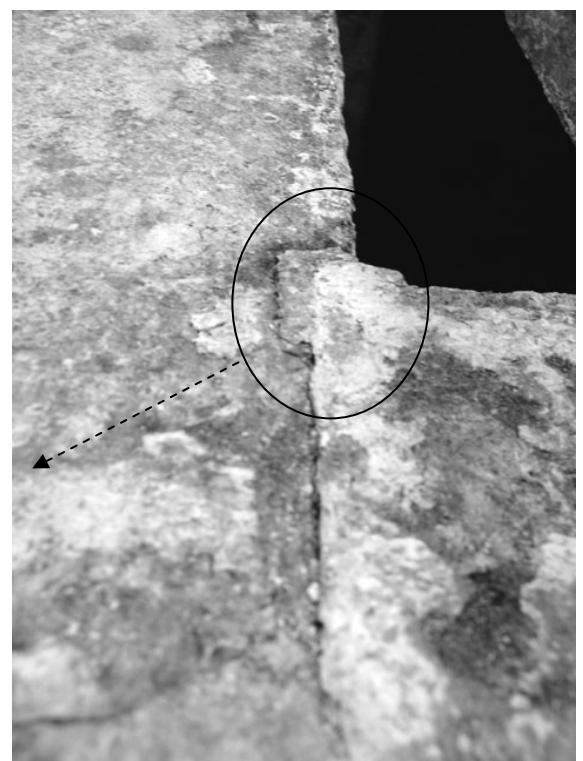
点線は相欠きの境



図②-1 赤外水分計による含水比の測定



図②-2 遊離石材片を取り除いた後に、アクリル樹脂による破断面の強化処置を実施した



図②-3 北壁石と西壁石の相欠き状態
漆喰が覆っているので境が見えにくい。

準備作業は主として B ゾーン内で実施した。治具の動作試験、歪センサーの設置、治具重量およびフレーム重量の測定、OVHD（オーバーヘッド）クレーンの動作試験などを実施して、使用機材すべてについて異常のないことを確認して、B ゾーンにおける準備作業を終了した。いっぽう、C ゾーンにおいては、輸送車両に石材を積み込む補助台の点検作業を実施し、さらに仮設修理施設においては、フレーム下台と修理施設へ運び込むリフトの取り付け試験も実施した。準備作業の最終段階では、A ゾーンで使用するフレームの設置スペースの確認をおこなうため、あらかじめ作製していた木製模造品をなった。

地切り、石材の取り上げ作業にあたっては、まず、B ゾーンであらかじめセンサーを取り付けた治具を A ゾーンへ移動し、一旦停止して治具に油圧系-空圧系を接続し、さらにロードセル、歪センサーからのケーブルを計測機器に接続した。治具をしづかに下降させて、水平移動、東西調整をおこなって、石材と平行するように北側へ一旦降ろして（石材上部とは 30cm 前後の空間スペースをとっている）、OVHD クレーン操作により南側へゆっくり水平移動して石材へ取り付けられる位置にして、さらに電動ホイストを用いて下降させて予定位置に治具を設置した。石材への把持を開始する前に、ボルトの仮締めを開始して設置位置調整を完了した。その後、AE、CMセンサーを取り付けて、ロードセル、歪センサー、AE センサーなど、同時計測を開始した。石材を把持するため、まず、油圧系の一次圧の上昇を開始し、シリンダへの出力をおこなった。一次圧を 0.8MPa から 0.2MPa ステップ単位で上昇させながら、目視観察に加えて、AE からの信号に注意して上昇を続けて、3.0MPa に到達させて、把持を開始した。さらにボルト締めを完了して石材の拘束を終了した。地切りの開始はチェーンブロック操作により、数 mm 上昇させて（図②-5）、次に OVHD クレーンのセンターをわずかに北側へ移動させるようにする。この状態では石材は動いていない。

さらにチェーンブロックにより少しずつ巻き上げてゆき、地切りをおこなった。最初に石材の動きが観察されたのは、相欠き部分が少し開いた状態である。6-7mm の空間が確認された。石材はやや北側へ傾斜した状態である。開いた相欠き部分へ、キャンパ（木製の楔）を挿入して、石材の戻りを防止した（図②-6）。チェーンブロックで少し吊り上げて、さらにホイストにより少し上昇させて、ほぼ相欠きが解除された。石材の状態を点検して、下部の詰め石 2 個体を取り除いた。さらに 5-6mm 上昇させて、北へ 1cm 移動した。さらに、状態を観察し



図②-4 石材を梱包するフレーム枠の下台を設置するスペースを検討する



図②-5 地切りの開始は、チェーンブロックによる



図②-6 地切り操作を開始して、わずかに相欠き部分に隙間が生じた段階でキャンパを挿入する

ながら 5-6mm 上昇、北へ 1cm 移動した。その後、点検をおこなったが、異常はなかった。ただし、相欠き部分に残存していた遊離した目地漆喰は、石材の移動とともに落下していた。この状態で一旦治具を取り外して B ゾーンへ治具を退避して、地切り作業を完了した。

石材の取り上げに際しては、まず、石材の底部に受けるフレーム下台を B ゾーンから A ゾーンへ移動し、さらに降下させて予定された位置に設置した。次いで、B ゾーンで退避していた治具を A ゾーンへ移動して、前述の要領で石材に取り付けて、石材を移動してフレーム枠の下台に据え付けた（図②-7）。この段階で、石室が解放状態になるので、応急的にビニールシートで北側を覆い、密閉した状態にした。石材が下台フレームに設置された後、治具を取り外して B ゾーンへ移動し、次いで、フレーム枠を A ゾーンへ持ち込んで、組み立て梱包を開始した。フレーム枠の組み立て順序は、東側、西側、南側（玄武）、北側（回転後は実際の底部になる）、上側フレームである（図②-8）。フレームの組み立てが終了して、パッドによる石材の把持を実施して梱包作業は終了した。

石材の移動は、梱包フレーム枠に拘束された状態で実施した。東西の No.1、No.2 のホイストを用いて、それぞれフレーム枠に接続したチェーンブロックとワイヤーを繋いで、位置調整と水平調整を行ない、少し北側に移動してから、ほぼ 30cm 上昇させて状態観察した。異常がないのでチェーンブロック操作により北側をやや降下させて、10 度前後傾斜させた状態で上昇させ、第一ステージ付近で北側へ水平移動（図②-9）、さらに上昇を繰り返して、断熱カーテンを通過して B ゾーンへ到達した段階で、チェーンブロック側を下げて、壁画面が上を向く状態に回転して接地した。これで、梱包、回転、移動作業がすべて終了した。この地切りから移動までのすべての作業にあたっては問題はなく、無事終了した。作業スペースが極端に狭いので、事故等には十分に配慮した作業となった。

B ゾーンにおいて詳細な点検を終了した後、C ゾーンでの搬送車への積み込みをおこない、保存修理施設へ無事搬入した。

なお、地切り、取り上げ時における重量変化および応力測定結果については図②-10-11 に示した。

石材を接地して安定させて石材、壁画等の



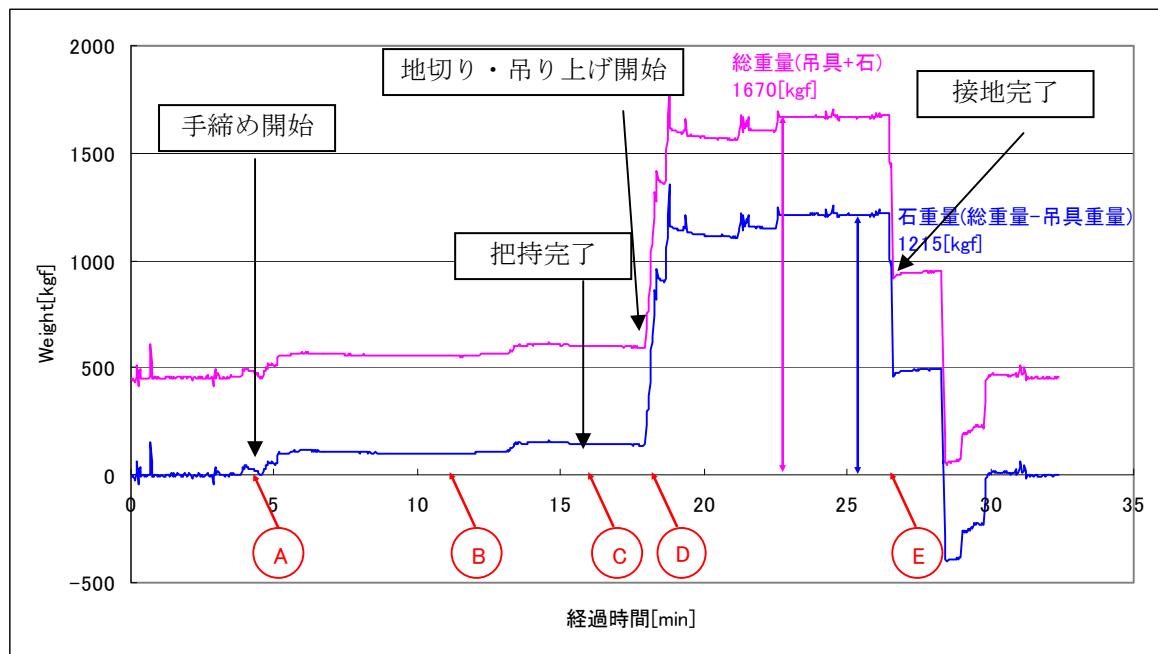
図②-7 梱包の第一段階では、石材を移動して下台フレームに設置する



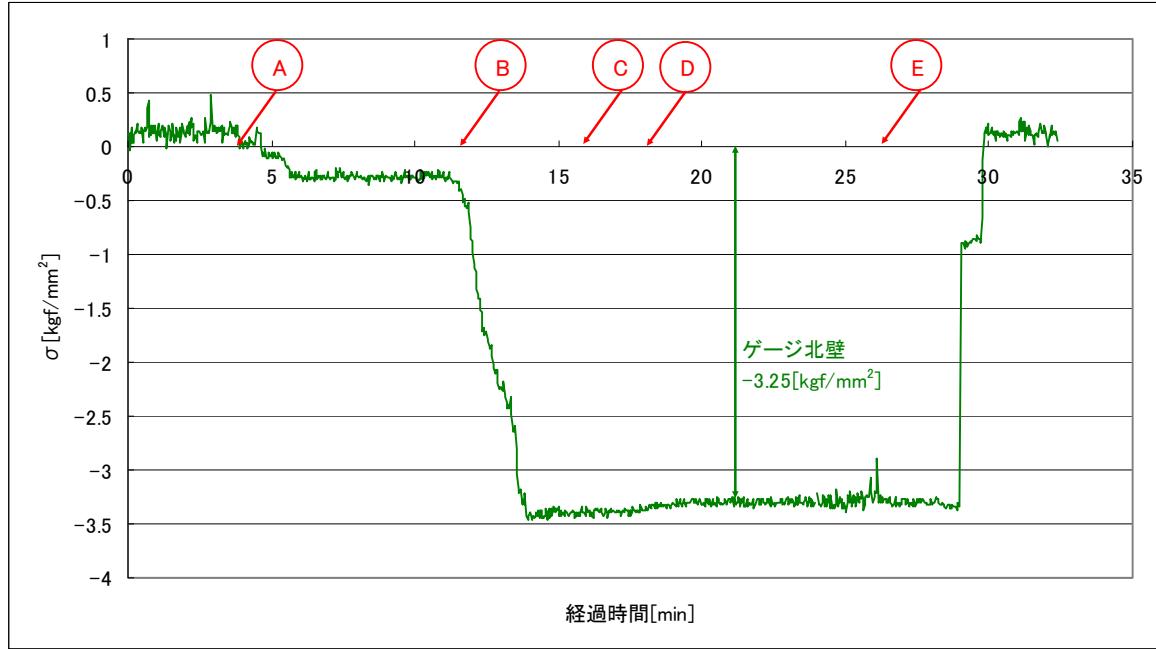
図②-8 上部フレーム枠の取り付け



図②-9 移動と回転



図②-10 総重量と石材重量測定結果



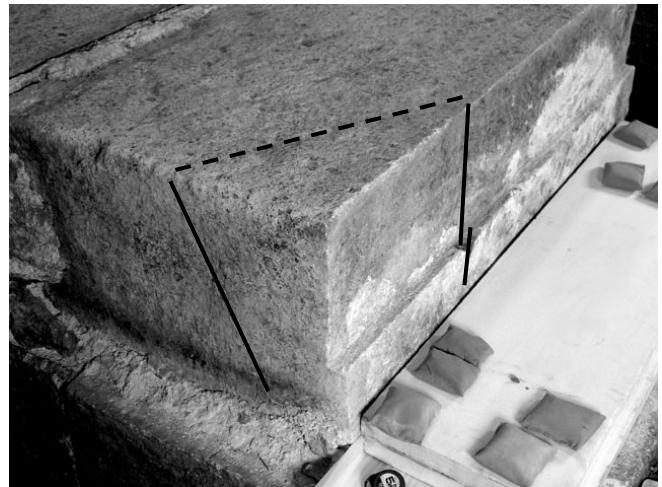
図②-11 治具の応力測定結果

③ 天井石 3：天井石 3 については当初の計画段階では比較的安定した状態にあると予想されていた。ただ、石室内部からの観察では東隅に三角状の亀裂部分があり、小片が挟まっている程度と考えていた。しかし、発掘調査が進むにつれて、東側面にテコ穴から上方約 45 度南側に伸びる大きな亀裂が検出され、さらに天井石 4 が取り除かれた段階で検出した、天井石 3 北側面の東から 1/3 の部分に発生する亀裂は、一連のおおきなブロック状を呈する石材の割れであることが判明して（図③-1）、その対策のためのベルトによる固定のための実験も実施した。なお、天井石 3 と天井石 2 の相欠き部分はベルトを通して隙間があり、あらかじめ亀裂対策を実施できた。

石材取り上げるための準備作業として、まず、A ゾーンにおいて石材の強度測定、含水比測定、表面温度測定などと平行して、目視観察、打診棒等による調査により、石材の亀裂状態についての確認をおこなった。また、天井石間に残存する土や目地止め漆喰片をできるだけ取り除くなどの作業も実施した（図③-2）。これは、天井石 4 を取り上げたとき、予想以上の残存する土や目地漆喰片が落下した反省から実施し、さらに、これらの堆積物が落下しても壁画面に影響しないように、落下物の受け皿を養生班から提供を受けて、天井石下面よりほぼ 10cm の位置に設置するなどの対策を実施した（図③-3）。

解体作業当日における準備、点検作業として、B ゾーンへ梱包枠フレームを搬入して、フレームの全重量および、フレーム枠の下台のみの重量を測定、そして使用を予定している II B-C 型治具の重量測定と動作確認、油圧-空圧系の点検を行い、B ゾーン内での測定装置をすべて取り外して A ゾーンへ持ち込み測定準備をはじめた。いっぽう、石材の異常を検地するための AE、CM センサーを石材に取り付ける作業を実施した。これらのセンサーの取り付けについては、シクロドデカンを用いて、石材に鉄板を貼り付け、センサーに取り付けられている磁石を利用してセンサーを設置した。

A ゾーンにおいては、石材の最終点検を終了して、崩落寸前の状態にある遊離石材を取り除いた。天井石 3 の外側の東面 3 箇所および西面の 2 箇所、そして、東壁石 3 と東壁石 2 の接する内側上部の漆喰が剥落している部分の石材が動いていることが確認されて、天井石 3 が取り除かれた段階で崩落することが予想されたので、これらの遊離破片を取り外した（図③-4）。また、安全対策として、天井石 3 が取り除かれた段階で、東西の側壁石にかかっていた荷重が除去され、地震等の万一の外



図③-1 天井石東北隅に検出されたブロック状亀裂



図③-2 相欠き間に残存する目地止め漆喰の除去



図③-3 落下物の受け皿を石室内に配置する

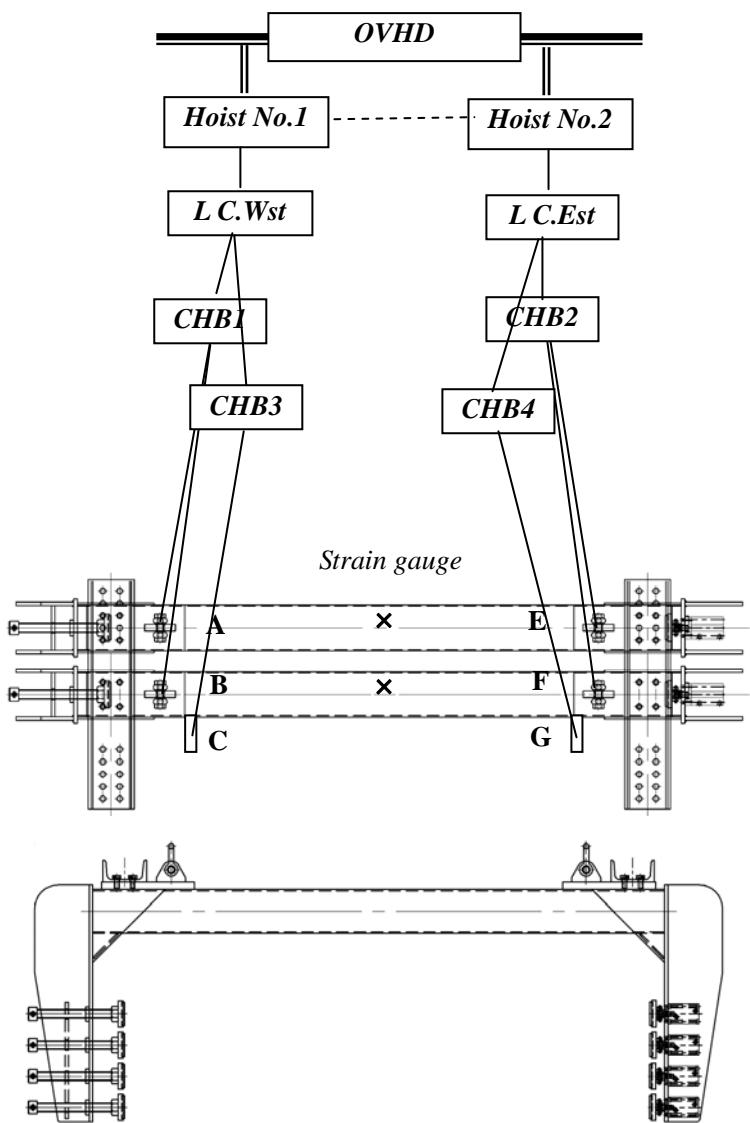
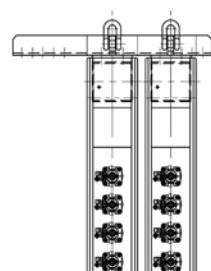


図③-4 壁画面上部の遊離石材の取り外し

力から直接影響を受けて倒壊しやすくなるので、倒壊防止用のフレームを設置するための鋼材を土留め支柱に追加設置して、緊急時にも対応できる対策を講じた。

今回の天井石3の取り上げにあたっては、東北隅に発生する大きなブロック状の亀裂を落下させずに移動することが最大の課題となり、天井石3の下にフレーム枠下台をとりつけて、いわば「お皿に豆腐を載せる」要領で石材を移動する計画を立てた。この計画を実行するにあたり、あらかじめ天井石と同じ高さに位置できる木製の補助台をAゾーンに搬入して、東西壁石の北側面に密着するようにして据え付けた（接する部分には、緩衝材としてゴムシートとウレタンゴムシートを貼り付けてある）。取り上げ準備の最終段階では、Bゾーンでチェーンブロックやセンサーなどが取り付けられた治具をAゾーンへ移動して石材への設置試験を実施した。なお機材の取り付け状態については、治具上部の梁に取り付けられたそれぞれのフック部にチェーンブロックを接続して、ロードセルを介してホイストにつないだ（図③-5）。また、治具の各パッドにはプレスケールを取り付けて、パッドと石材との接触状態を調べることや、治具を設置する位置の確認等に関する試験を実施した。石材への設置にあたっては、西側には把持用シリンダーを、東側にボルトを位置するようにしている。移動にあたっては、OVHDクレーンによる東西南北方向、そして吊り上げの上下移動については、取り付けているNo.1、No.2の両ホイストを利用し、さらに水平状態の調整など傾斜微調整のためチェーンブロック4機を用いた。石材への設置は、石材の北側の相欠き部分東からほぼ60度の傾斜角で伸びる亀裂、連動する東面に発生している下部から上部に達する亀裂がつながってブロック状の大きな亀裂が発生している部分を拘束できないので、石材の1/2程度の位置に治具の北端が位置するような、南半分に偏った吊り上げ法しかできなかつた。治具を設置して、まず、東側のボルトによる仮止めをおこない、さらにシリンドラーによる拘束を開始した。0.3MPa程度の状態で治具の位置調整を再確認して、1MPaから2MPaまで30秒間にすこしづつ一次圧を上昇させ、状態確認後さらに110秒間に3MPaに到達させた。さらに、トルクレンチをもついてボルト締めをおこない、把持を完了した。治具の設置状態、石材に異常が発生していないことを確認して、把持を解除したのち、ボルトを緩めて石材と治具に隙間をつくり、北側への移動と上昇により治具を石材から取り外した。治具を補助台付近へ移動したのち、プレスケールをはずして、一旦Aゾーンの断熱カーテン付近に退避して、チェーンブロック等の取り付け状態を再点検した。

石材の取り上げのため、まず、亀裂部分の対策として、相



図③-5. 天井石3を取り上げる治具と機材の接続状態

欠きの上段に2本、そして、下段に1本のラッシングベルトをほぼ等間隔にて巻き付けて石材ブロックを安定化させた。なお、石材のコーナ部分には保護金具をとりつけて角部分が損傷しないような対策を講じた（図③-6）。この状態で石材の異常が発生していないか点検した後、治具を石材へ取り付けるため移動した。

石材への取り付けは、試験で実施したのと同様に、石材の1/2の部位に治具の北側パッドが位置するように、水平移動してから降下させて設置した。石材の拘束にあたっては、まず東側のボルトによるパッドの仮止めが実施され、治具の状態確認がなされた。この段階で、AE、CMセンサーの接続がなされ、測定が開始された。ボルトの仮止めが完了して、次いで西側のシリンダーによる拘束が開始された。まず、0.8MPaからすこしづつ一次圧を高めて2MPaまで上昇させた。1MPaから2MPaに到達に要した時間はほぼ30secである。状態を確認してさらに3MPaまでほぼ36secかけて到達させた。ボルト側の締め付け確認を終了して把持を開始した。この状態では石材に何の変化も起こっていない。

地切り作業の開始は、東西のチェーンブロック1、2を同期させて、わずかに吊り上げを開始して一旦停止して状態確認して、チェーンブロック3、4の操作によりわずかに石材が浮き上がったことを確認した。内部カメラによってもわずかに石材が動くことを確認しており、地切りが無事終了した（図③-7）。外部の石材には影響は認められなかっただし、内部観察でも天井の漆喰等には全く変化がなかった。さらに、チェーンブロック操作により3mm程度浮き上がらせて水平状態を維持した。再度石材外部から内部に至る周辺の状態の確認をおこない、異常のないことを確認して、さらに、治具の梁側を上昇し、次いで北側の操作を実施するなど調整を取りながらほぼ3cm前後、石材が吊りあがった状態にすることができた。石室内部の点検でも異常は認められなかっただ。

この状態で、OVHDを用いて北側へ1cmの水平移動を試みる。ホイスト操作により少し上昇して、さらに北側へ少し水平移動する。この時点で、下にある壁面の位置調整のためOVHDにより西へ1cm移動を試みるが、実際は3cm程度移動したので、東へ1cm程度移動して調整した。この状態で、石材間の高さが確保できたので、安全のための亀裂対策として、石材の亀裂が存在する東側で石材を垂直方向にも固定できるように、南北方向にベルトを取り付けた。この状態で、さらに石材全体を1cm上昇すると同時に、北側へ3cm移動する。こ



図③-6 亀裂ブロック固定のためのベルトによる拘束



図③-7 チェーンブロック操作により地切り



図③-8 石材をフレーム枠下台へ取り付ける



図③-9 石材とフレーム枠下台を一体化する

の状態では南側の相欠きが完全に解除されており、さらに上昇して高さを確保した後、東西壁石3の上部にアクリル板を挿入して、ちょうど天井石3の壁面下にアクリル板が設置された状態にした。石材の移動に際して天井漆喰が剥落しても床に落下して破損しないように、最小の被害で食い止める対策を講じた。なお、アクリル板の下にはシリコーンゴム板を挟んでタワミや落下がおこらないようにした。

この状態では、天井石3は補助台に設置されているフレーム枠より、やや高い位置にあるが、さらに安全のため石材を2cm程度上昇させて、フレーム枠を石材の下に押し込むようにして2/3程度が奥に入り込んだ状態にした。さらに壁画面がフレーム枠に設置したシリコーンゴムシートに接しないように位置調整するため、ホイストの移動操作により東側に1cm水平移動し、さらにフレーム枠と石材の平行を調整した(図③-8)。なお、壁画面の状態については下部から文化庁担当者(建石技官)が監視を続けていた。

フレーム台へ石材を設置する最終調整操作として、OVHD操作により北側へ30cm水平移動して位置確認した後、降下させて設置した。

次に、Bゾーンへの移動に備えて準備作業を実施した。まず、C、Gに接続していたチェーンブロックを取り外して、これをフレーム枠のそれぞれ東西に取り付けて、治具とフレーム枠を一体化した。この状態でホイスト操作により石材を少し吊り上げてみると南側に力がかかりやや北側が下がるので、再び治具の北側張り出し部(図③-5のC部分)にヒッパラーを取り付けてバランス調整をおこなって水平状態にした(図③-9)。ホイスト1、2を用いて吊り上げて上昇させて、北側へ水平移動と同様な操作を慎重に繰り返して、断熱カーテン付近で一旦停止して状態確認と(図③-10)、断熱カーテンを下げて再び上昇と水平移動によりBゾーンへ無事運ばれた。

Bゾーンへ到着後、フレーム下部を角材上に設置して、フレームとチェーンブロックを接続していたワイヤーを取り除き、さらに治具を少し上昇させて南北方向に取り付けたベルトを取り除いた。治具を降下させて状態を確認後、石材の把持を開放状態にして、さらにストレインゲージの接続を切り離し、治具を石材から取り除き、石材の取り上げは完了した。

Bゾーンにおいて取り上げられた石材の点検を終了した後に、各フレーム枠を石材に取り付けた。組み立てにあたっては、まず仮組み立てをおこない、石材を拘束するパッド位置がベルトによって妨害されるので、下段のベルトを取り除いた(上段の2つのベルトはそのままの状態)。フレーム枠の組み立ては、最終的に上部に位置するステンレス枠(回転後は下に位置して石材の受け台となる)を組み入れた(図③-11)。各フレーム枠のボルト締めが完了してから、拘束用パッ



図③-10 石材の移動（A→Bゾーンへ）



図③-11 フレーム枠の組み立てと梱包

ドの締め付けにより石材を完全に動かないように拘束した。フレーム枠への取り付け作業が完了した後、回転操作に備えた石材の点検、ワイヤー等の点検をおこなった。なお、石材は石室にあった方向と全く同じ位置関係に設置されている。

回転作業は、まず、南側フレームの両端上部をチェーンブロックに接続し、北側フレームの両端下部にはそれぞれ No.1、No.2 のホイストにワイヤーで接続した。次いでフレーム全体をほぼ 20-30 cm 上昇させた後、チェーンブロック側（南）を下げて、ホイスト側（北）を上昇させる操作によって、90 度回転して一旦接地させて、すべての接続を解除した。点検後、さらに 90 度回転させるため、南側フレームの上部両端にチェーンブロックを取り付けて、北側にはそれぞれホイスト No.1、No.2 を接続した。フレーム全体をほぼ 30cm 程度吊り上げて、チェーンブロックを下げて、ホイスト側を上昇する操作により 90 度回転して一旦、接地してすべての接続を取り除いた。さらに 90 度の回転を行うため、南側フレーム上部両端にチェーンブロックを取り付けて、北側には下部の両端にそれぞれホイスト No.1、No.2 を接続した。同様にフレーム枠全体を上昇させ、チェーンブロック側を下げて、ホイスト側を上昇させて 90 度回転して壁画面を上面にした。この操作が終了して、すべてのワイヤーを取り外して石材の状態を点検して異常のないことを確認した。取り上げた石材はフレームに梱包された状態でビニールシートで覆い、環境変化を緩和できるようにした。取り上げと回転作業が終了してから、A ゾーンにおいて、東西壁石 3 は天井石がなくなったため、支えを失って不安定な状態となっているので、安全対策の一環として倒壊防止装置を 2 機設置した。これで天井石 3 の取り上げ・移動作業を終了した。



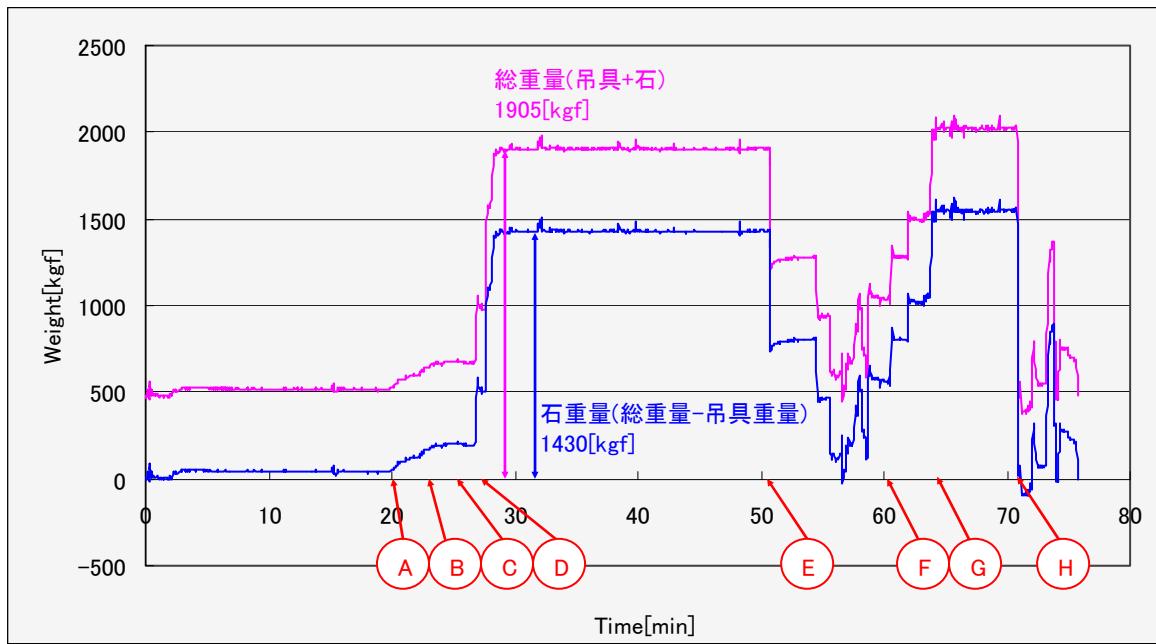
図③-12 回転操作により壁画面を上に向ける



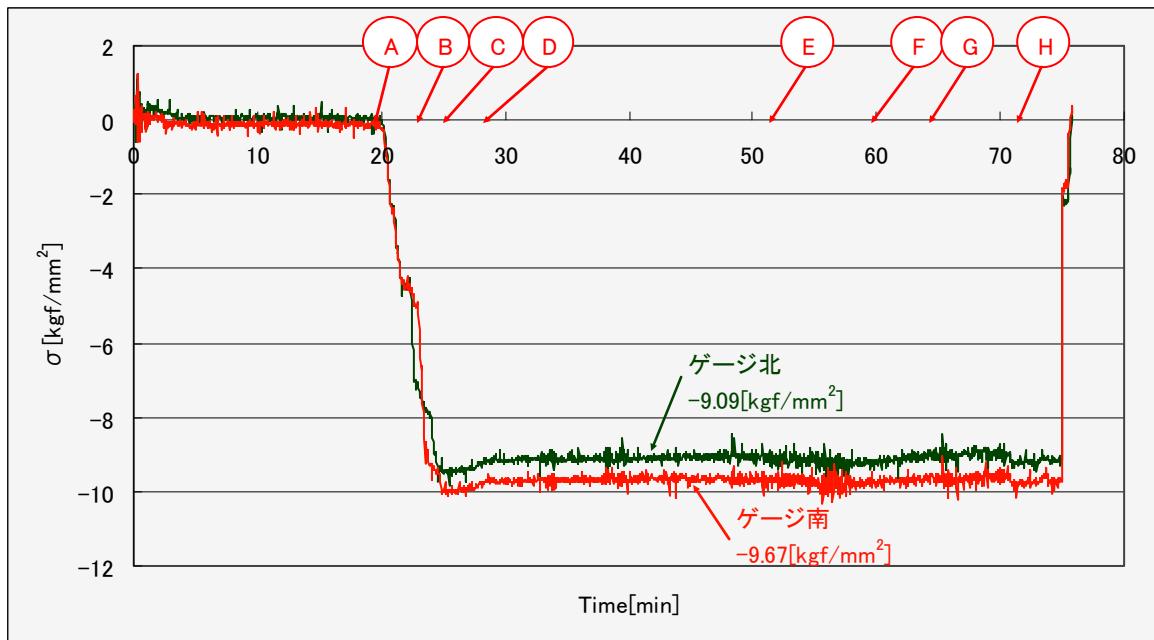
図③-13 倒壊防止用のフレームを A ゾーンへ



図③-14 天井石 3 を取り上げた直後に倒壊防止対策をおこなう。東西の土留め鋼材を利用して、東西壁石 3 を支えられるように、それぞれの石材を挟み込むような方法によった。壁画面について 5 cm 壁面から距離をとっている。



図③-15 総重量と石材重量測定結果



図③-16 治具の治具応力測定結果

A:一次圧上昇開始、B:油圧ユニット3 MPa 到達、C:ボルト締め付けほぼ完了、D:地切り開始、垂直ベルト設置完了、アクリル板挿入、梱包枠挿入・設置、E:梱包枠に設置、F:ワイヤー等の調整、取り付け、G:梱包フレーム下台ごと移動開始、上昇、水平移動の繰り返し、H:Bゾーンへ設置完了。(注) OVHD クレーンからのノイズを含む。

④ 西壁石3；東西壁石の取り上げについては、当初計画していたΓ型治具を用いた取り上げ方法、つまり壁石底部と床石の隙間にスペーサを挿入して、石材底部に5mm前後の隙間を設けて、その部分にΓ型治具の先端刃先を挿入して取り上げる方法を予定していた。しかし、予想していた以上に石材が密着していること、石材底部は予想以上に保存状態が悪く、スペーサを挿入した段階で石材に損傷を与える危険があること、壁石の底部がすべて床石に載っておらず不安定であること、相欠き部分の密着のされ方が不均一であることや石材上部に損傷や損傷を起す危険があることなどから、当初計画を断念してジャッキアップ法を取り入れた新たな実験をおこなって計画を立て直した。

西壁石3の地切り・取り上げにあたっては、石材をジャッキアップしてコロによる移動後、作業スペースを確保して治具を用いた取り上げと移動を行なう方針を立てた。

西壁石3は床石よりほぼ17cm前後西側に、はみ出しており、床石と側壁石は密着して床石の立ち上がり部分においてもほとんど隙間はなかった。いっぽう、この石材は上部と下部、特に四隅の部分の劣化が進んでおり、石室内部からの観察によると、西壁石2と西壁石3の東側と床石が接する下部では三角形を呈する状態で数mm幅の亀裂が生じていた（図④-1）。この亀裂は大きく、すでに遊離した状態にあると推定した。また、損傷状態から判断すると、この部分は床石に固着しており西壁石3を動かせた状態では、西壁石2に固着した状態で残ると予想され、現時点で取り除くと、軟弱なため崩壊することが予想されたので、石材を移動した後に、取り外すことを計画した。

上部から見た西壁石2と西壁石3の相欠きの隙間は数cmに達するが、下方へ向かつてはほとんど密着状態にあった。また、取り上げに際しては、石材が外側（西）に傾斜すると壁石2と壁石3の相欠き部分が破壊して壁画面に重大な影響を与えることが推定された。また、内側（東）に傾斜すると軟弱な床石立ち上がり部分のエッジを損傷する危険が生じてくることも予想された。つまり石材を傾斜させないで、地切りして少しづつ移動しながら相欠きを解除して取り上げることが必要であった。

ジャッキを用いて石材を持ち上げるのは、地切りをスムースに実施すると同時に、床石と壁石の間に隙間をつくり、石材を移動させるためのステンレス板とその間にコロを入れるためである。まず、西側の版築土を掘り下げてジャッキを設置して、石材を下から持ち上げることになるが、石材には片側一方だけに偏った応力が集中する事になり、上昇とともに石材には回転力が生じることになる。この回転力によって石材はさまざまな危険な状態になることは言うまでもない。この回転モーメントを調整



図④-1 西壁石2と西壁石3の境界に見られる三角形を呈する亀裂



図④-2 石材上部に上方のジャッキを取り付け



図④-3 石材底部に下方のジャッキを取り付け

するため、石材の上方から下向きの力を作用させてバランスを取りながら石材をジャッキアップする方法を計画した。

実施作業にあたっては、まず、考古班の協力により西壁石3の床石よりはみ出している底部版築土を溝状に掘り下げて(5cm土)、ジャッキを挿入する場所を確保した。一方、壁面については養生班により、オーバラップする壁面漆喰の切り取り作業、ポリエステル紙を用いた絵画部分の養生とさらに壁面全面にわたってレーヨン紙(HPC利用)を用いたフェーシングが実施され、最後に床石と壁石の縁切り作業がおこなわれた。

地切り・取り上げ作業は、まず、上部ジャッキを設置するため、石材上部に直行する2本の平行したH鋼を土留めフレームに固定し、このH鋼にジャッキ設置のための構造材を組み込んで2機の上部ジャッキを取り付けた(図④-2)。次いで、下部ジャッキを石材の北端西側から石材に平行するように南方向に挿入して、下方ジャッキを設置した(図④-3)。機材の設置状態を点検した後、少しジャッキアップしながら上方2点のジャッキにかける応力とバランス調整をおこない、さらに下方ジャッキを少し上昇させても石材が傾かないことを確認しながら少し上昇させて、北北西方向にわずかずつ動くように調整して床石から壁石が逃げるようにした。その結果、石材を1-2mm上昇させることができた。この時点では床石と壁石との間に隙間が開いて、北側で1-2mmの隙間が確認された。さらに状態の監視を続けながら、ジャッキアップを続けた結果、壁石南東下部の床石に接する亀裂部が明確になり、遊離した破片であることが確認され、同時に現状で破壊することなく残存していることも確認された。さらに少し上昇させて、床石と壁石底部にほぼ3-4mmの隙間が生じた時点で、コロの下敷きとなるステンレス板(厚さ:3mm)を壁石底部の東側に挿入することができた。次いで、上部ジャッキを緩めて少し余裕を作り、さらに下部ジャッキを少し上昇させて、北方向に石材を数mm動かせることができた。この操作を繰り返して、ステンレス板を東側と西側に各1セット(1セットとは上下の2枚)、合計2セットが挿入できた(7-8mm前後上昇した状態)。さらに上下のジャッキ操作により床石と壁石の間には北側で10数mmの隙間を作ることができた(底部からムカデが出現)。この時点で壁石の西側面から2枚のステンレス板の間にステンレス丸棒(コロ)を挿入した(図④-4①)。石材底部には6本のコロが挿入できた状態で、下部ジャッキを取り外した。さらに北端の底部に7本目のコロを挿入し、さらに壁石外に2本のコロを挿入した後、上部ジャッキを撤



図④-4 ステンレス板の間にコロを挿入して
コロレール上を石材がゆっくり移動

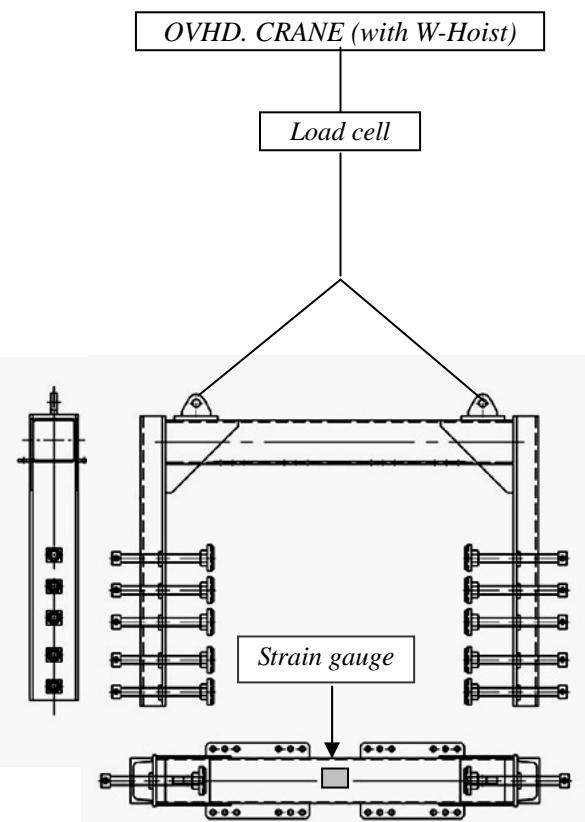
去した（図④-4②）。また、側壁石の通路となる床石横（西）の版築土部分には強化のため、鉄板を敷いた。この時点では、壁石は床石から浮いた状態にあり地切りは終了したことになるが、不安定な状態にあり、さらに壁石間の相欠きが解除された状態ではないので、連続して小規模な移動作業に取りかかった。

壁石を北側へ少し動かすため、相欠きの隙間にテコを入れて（テコの当たる部分は保護材を設置）、5 mm 前後動かせた。しかし、東よりに動いたため再度コロの調整をおこない、再びテコによる移動を試みた。約 10mm 動いて、南側で床石に接する隙間は 3 mm であった。さらに、コロの位置調整をおこない、テコを用いた移動を再開した。南側で床石との隙間はほぼ 10mm 開けることができたが、壁石北側がやや東よりにわずかに回転したので動きを止めて、安定させるためコロの位置調整と数を追加して合計 12 本のコロを用いた。状態を確認した後、テコを用いた移動を再開して、ほぼ平行に移動させることができ、さらに 10mm の移動が可能となり、石材をやや西寄り方向に修正して安全を確保した。この時点で南の相欠き部分にほぼ 5 cm 程度の空間を生じさせることができて、完全に相欠きの解除に成功した。さらにコロ上をすべらせて順調に移動を始めた。途中でコロの位置調整を行ないながら慎重に移動を続けた。この間において AE の発生などの異常は検知していないし、目視観察においても異常がないことを確認した。途中で少し方向調整を行なって移動を続けた結果、さらに南面相欠き部分の隙間が大きくなつたので、壁石 2 の北面にジャッキを取り付けて、ジャッキによる移動とテコによる方向調整を行ないながら作業を続行した（図④-4③）。ほぼ 42cm 移動したところでコロによる移動作業を終了した（図④-4④）。その後、考古班の協力を得て、南側の相欠き部分に残存する目地止め漆喰の除去作業を実施した。

これらの作業が終了した後、石材の移動にあたっては II I B-B 型治具（図④-5、④-6）を用いて移動した。なお、OVHD クレーンへの接続は、No.1（西）のホイスト、ロードセル、治具、の順で取り付けた。クレーンに取り付けた治具は石材の上部から静かに降下させて、石材に設置した。石材の拘束にあたっては、ボルトによる仮止めをおこない、状態を点検した後、トルクレンチを用いた把持を実施（片側 5 個のパッドが設置されている）した。石材を吊り上げて、重量測定をおこなった後、移動してあらかじめ A ゾーンで準備していた梱包用フレーム枠の下台に設置して、順次梱包フレーム枠を組み立てて石材の梱包を終了した。梱包後は、A ゾーンから B ゾーンへ移動しなが

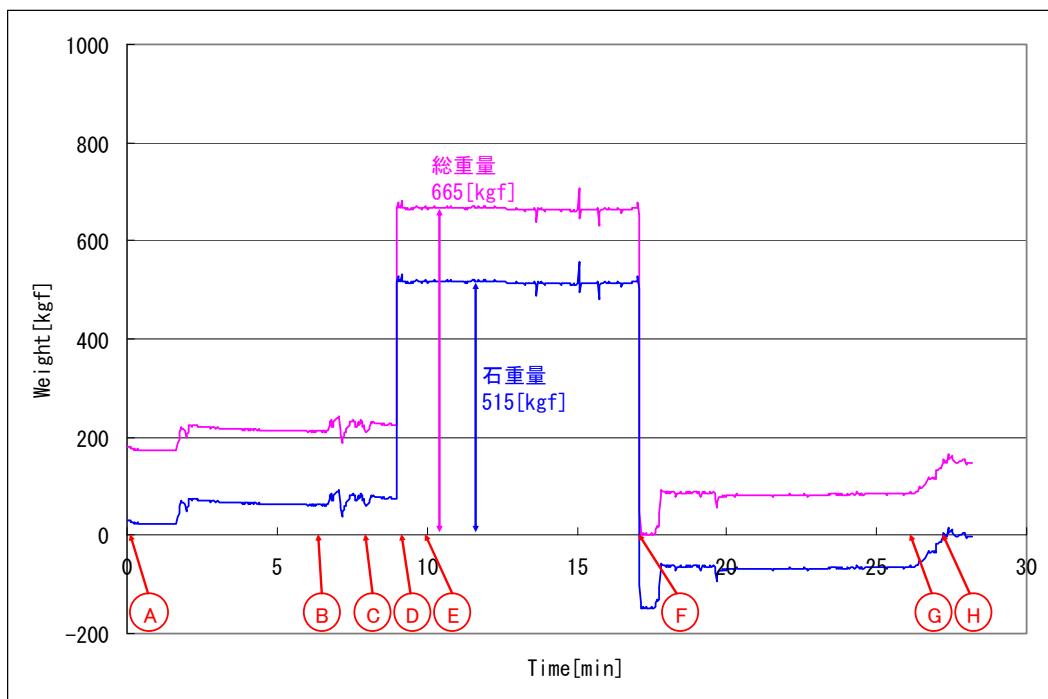


図④-5 西壁石 3 の取り上げと移動

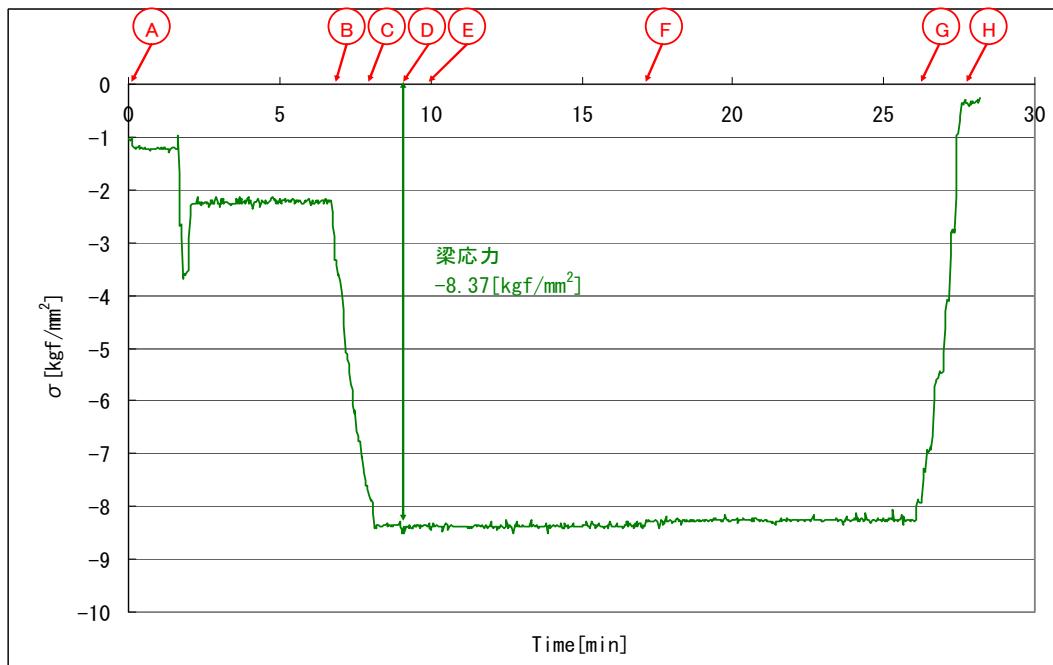


図④-6 西壁石 3 の移動に用いた II I B-B 型治具と機材の配置

ら回転操作を実施した、なお、この状態で起こったトラブルについては、II- (5) ③を参照されたい。なお、治具を設置した後の重量測定およびその変化と歪データについては図④-7、④-8に示した。



図④-7 総重量と石材重量測定結果



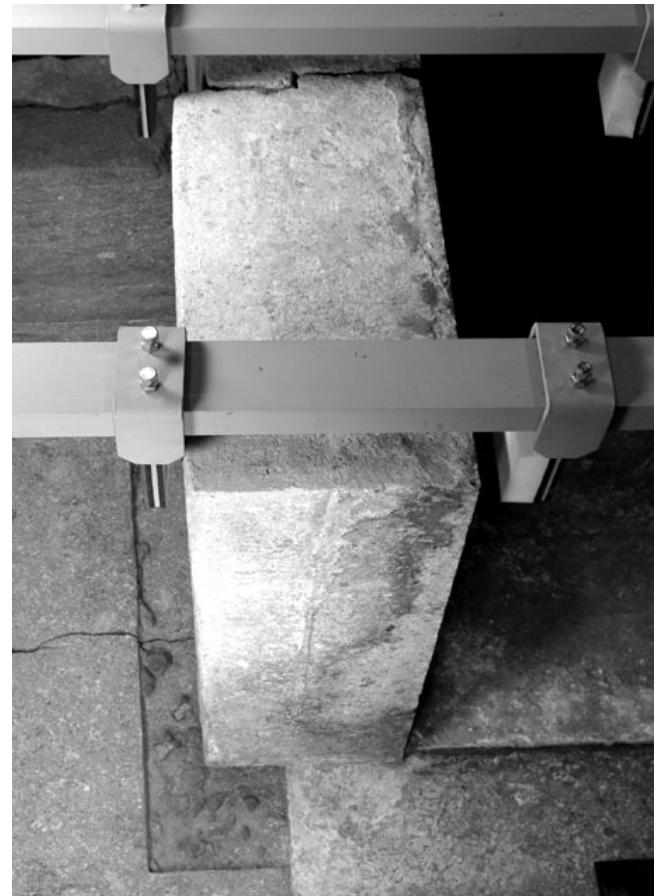
図④-8 治具の応力測定結果

A:治具をAゾーンに下ろして、石材に設置開始。 B:石材の仮止めから把持を開始。 C:把持終了。 D:石材の吊り上げ開始。 E:方向変換操作。 F:フレーム枠下台に設置操作開始。→フレーム枠前面、後面の設置 → G:把持の開放操作開始。 H:把持開放の完了

⑤ 東壁石3：東壁石3については、その底部が床石からはみ出している部分が大きい(17.5cm前後)ことから(図⑤-1)、ジャッキを用いた地切り後、Γ型治具を用いて取り上げる方法によった。この東壁石3については、石材のコーナ部分の劣化が著しく、内部の南西上部の角部分の壁石2に接する遊離石材は、天井石を取り上げる際にすでに外してある。いっぽう、床石に接する北西コーナ、および南西コーナに見られる亀裂石材片については、ジャッキアップ時に取り除くことを計画した。いずれにしても目視観察において、床石に接する底部は石材表面は荒れた状態を呈し、軟弱な状態にあると判断された。

準備段階では、最初に石材と石材にまたがる漆喰の剥ぎ取り転写がおこなわれ、平行して壁画の画像面のフェーシング(図⑤-2)、次いで壁画面の全面にわたるフェーシングによる養生処置が実施された。つまり、画像部分については2回にわたる養生処置が実施された。これは、すべての壁画面に共通する養生方法である(画像部分については $2 \times 5\text{cm}$ 長方形のポリエステル紙を、あらかじめ筆につけたHPC1%溶液を塗布するようにして5mm前後の重ね張りが実施され、さらに全面のフェーシングには5cm角程度のレーヨン紙が同様にして重ね張りされた)。いっぽう、床石と壁石が接する下部については、取り上げ時に漆喰についてこないように、ステンレス製の小型パレットナイフなどを用いて、床石に突き刺すようにして縁を切った。以上の作業については養生班により実施され、その詳細については養生班の作業報告を参照されたい。養生班による作業と平行して、A、Bゾーンにおいて様々な調査と準備をおこなった。

石材を取り上げる前の目視観察、打診検査による劣化状態の再確認と取り上げ法に関する危険箇所の確認、どの部分が遊離していくいつの段階で取り外すのかなど、具体的にジャッキをどの位置に取り付けるのかなどの取り上げ手法の再検討を実施して、準備段階でジャッキアップを実施して、遊離石材を取り除くことを決定した。石材の強度分布調査、表面温度、含水比などに関する測定を実施し、取り上げ時における注意点などについて整理した。石材の強度は、天井石などでも見られたように、石材が白色を帯びている部分(漆喰が関与している)は強度が大きく、黄色を帯びている下部は強度が小さい傾向を示した。強度の小さい部分では 40Kgf/cm^2 前後の数値を示すが、これより小さな値を示すと推定された部分については、石材を損壊する危険があるので測定できない。Aゾーンでの作業と同時にBゾーンでは、Γ型治具の石材をすくい上げる先端刃先の交換作業が実施された。当初の計画では中央付近に設置する予定であったが、石材が床石より大きくなっていること、相欠き位置などから設置方法を変えざるを得ない状況になった。つまり、把持する位置が偏るので先端刃先については、より安全性を高める必要上から平板状を箱型構造に変えて強化して重心線上よりずれた部



図⑤-1. 取り上げる前の東壁石3. 相欠きは、石材を東に移動できない状態にあり、石材は大きく版築土にはみ出していた。



図⑤-2. 石材取り上げのための壁画面の養生処置

分に適用しても変形しない構造に変えた。また、奥行きも長くして刃先にかかる荷重を分散させた。いっぽう、養生作業、測定作業が終了した時点で、Aゾーンにてジャッキアップによる遊離石材を取り上げる作業にかかった。

ジャッキの設置位置は、壁石の底部の床石からはみ出した東側の北隅部分に潜り込ませ、石材と平行にした(図⑤-3)。遊離石材を取り外すには数mmのジャッキアップで事足りるので、状態を観察しながら壁石全体をわずかに持ち上げた。北西隅の遊離石材は床石にくついた状態になっていたので、本体とはうまく分離できて比較的簡単に取り出すことが出来た(図⑤-4)。その破断面は褐色になっており、鉄分の多い粘土がしみ込んでいる様子が観察できた。いっぽう、南西隅の遊離石材片も同時に取り出した。この石材片は軟弱で、表面が剥離したかの様相を呈していた。遊離石材を取り出した後、ジャッキを取り去った。ジャッキアップした際、わずかに石材を東側に動かせることによって床石と壁石の間にわずかな隙間を確保できた。これで当日の準備作業をすべて終了した。

翌、5月17日の朝から取り上げ作業の準備とその実施をした。Bゾーンにおいて、使用機材の点検と治具、梱包用フレームの重量測定を実施し、次いで、Aゾーンにおいて東壁石3に取り付けられていた転倒防止用機材を取り除いた。また、Bゾーンにおいて、治具のバランサーの位置調整をおこない、チェーンブロックを装着してAゾーンへ移動した(図⑤-5)。

Aゾーンへ持ち込まれた治具は、東側から石材へ取り付ける準備をおこなった。まず、下部先端刃を石材下部に潜り込ませ、全体の設置位置調整をおこなった。石材は北面とその上面が直角にはなっておらず、石材上面は治具と完全に密着しているのではなく、相欠き部分にゆくにつれて少し浮いた状態になっていた。この状態で上部先端刃を少しづつ下げて東側の相欠き部分へ挿入した。壁石上部に治具に取り付けてあるウレタンゴムパッドを下げて治具が密着するようにセットした(北面はすでに密着した状態にしてある)。この状態でさらに先端刃先を最大に石材にあたるようにセットして調整した。この状態で1.5MPaの一次出力で保持して状態観察をおこなった。なお、西側相欠き部分の隙間には安全対策として万一の衝撃にそなえてゴムシートを取り付けた木製キャンパを設置している。

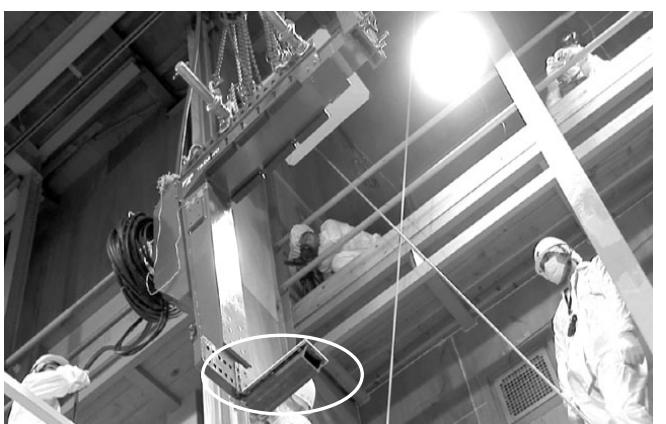
状態観察をおこなった後、治具の両先端刃据付位置、重心位置、バランサーの位置調整の点検を



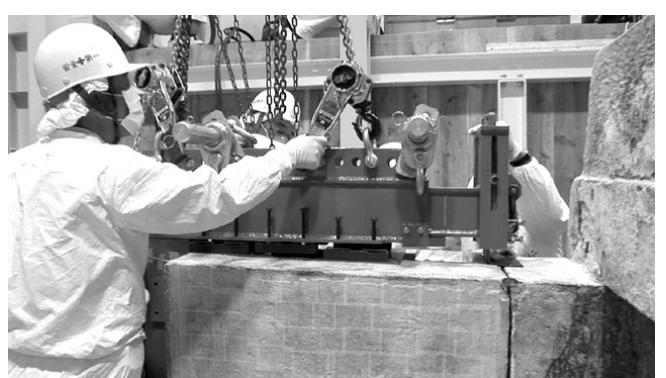
図⑤-3. 地切りの前段階の操作として、ジャッキアップによる遊離石材の取り出し。



図⑤-4 地切り時に損傷が予想される遊離した石材片を取り除く



図⑤-5. Γ型治具の移動。下部先端刃は強度を上げるため、ボックス型構造に改造した。



図⑤-6. 治具を設置した後、チェーンブロック操作により地切りを開始

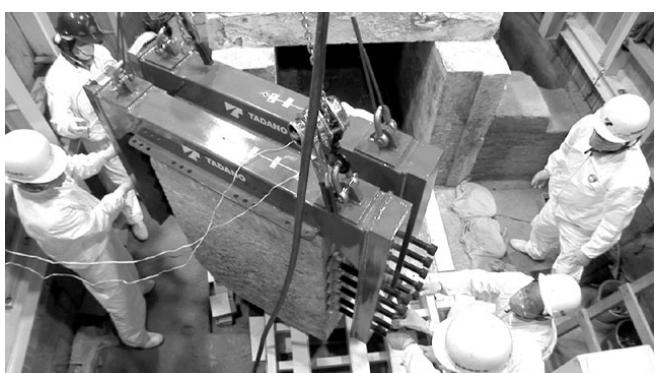
おこない、上端面のウレタンゴムの再調整などを実施した。Γ型治具の設置・点検が終了した段階で、石材の重量は体積計算から当初予想していたより軽いこと、取り外した遊離石材の劣化がより進んでおり、石材底部の強度が予想より小さい可能性があることなどから、把持圧を当初予定していた3.0MPaから2.0MPaに変更することが検討された。実際、把持圧を小さくしても、この石材の取り上げに大きな影響を及ぼすものではないと考えた。実際の把持にあたっては監視を続けながら1.6MPaから2.0MPaまで段階的に圧を上昇した。石材の地切りにあたっては、南側、中央、北側の各チェーンブロックの操作により実施した（図⑤-6）。初期の段階で、北側へわずかに移動し、床石との隙間が1mm前後生じた。北側、南側をわずかに吊り上げて、さらに全体を吊り上げるようにした。北側へ移動、平行移動させようとするが、相欠き部分が外れずに静止状態が続く（漆喰が一部接着していたのかもしれない）が、相欠きが外れて北側へ数cm移動することができ（図⑤-7）、さらに相欠きが外れたので、さらに東側への移動も可能となつた。相欠き部分は5cm以上となつた。さらに北側へ5cm程度の移動を試みた。さらに東に1.5cm移動できた。次に安全が確保できたので、ホイスト操作により1cm前後上昇させ、さらに東側へ5cm前後の移動をおこなつた。北側へ移動（合計23cm）、さらに移動して45cmの移動が可能となつた。合計の北側への移動距離は、ほぼ48cmである（図⑤-8）。移動後、底部にシリコーンゴムを敷いて、さらに角材を準備して東壁石3を仮設置した。移動後において点検をおこなつたが、異常はなかつた。Γ型治具の取り外しにあたつては、上部先端刃先を収納し、さらにウレタンパッドを上に収納した後、治具を東側に抜いて下の先端刃先を外して、治具全体を吊り上げて、Bゾーンへ移動した。Aゾーンにおいては、移動した東壁石3.2に残存する端面の漆喰等に関する緊急調査が発掘班によって実施された。これらの作業が終了した後に、II型治具をBゾーンからAゾーンへ移動して、東壁石3を持ち、拘束してあらかじめ準備した梱包用フレームの下台に設置した。石材の把持はボルト方式で、1チャンネルの片側に5個のパッドが取り付けられてあり、合計20個のパッドを利用して拘束した。石材の重量を測定した後、石材を吊り上げて、90度回転して壁画面を南に向けてさらに全体を北に少し移動してフレーム台へ設置した。石材が安定していることを確認した後、治具を取り付けた状態で、まず、北側のフレームを取り付け、治具を取り外してBゾーンへ移動、さらに東側、西側、南側のフレームを取り付けて、最終



図⑤-7. 相欠きが外れて北、東へと石材が離れる



図⑤-8. Γ型治具による移動終了

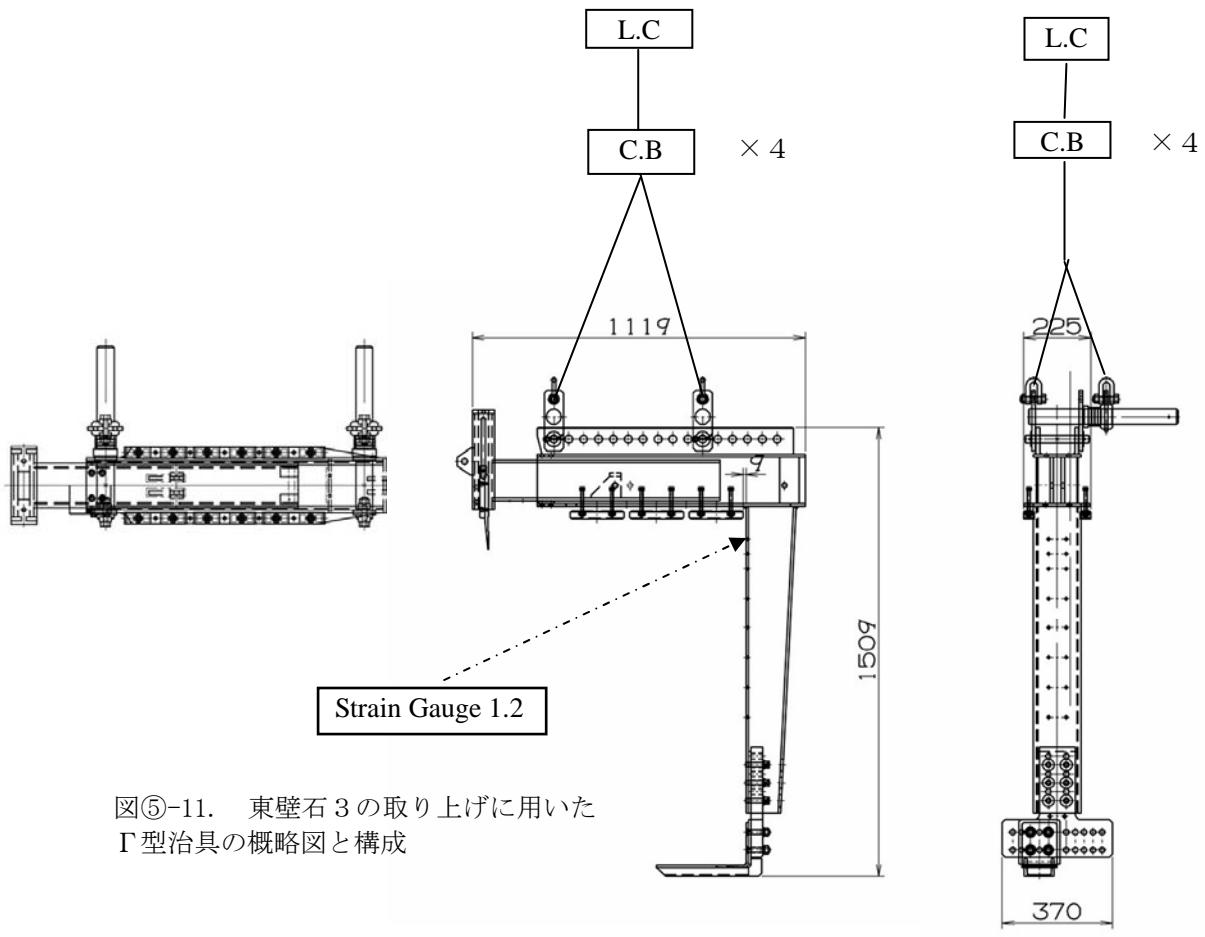


図⑤-9. II型治具に付け替えて移動して、フレーム台に設置

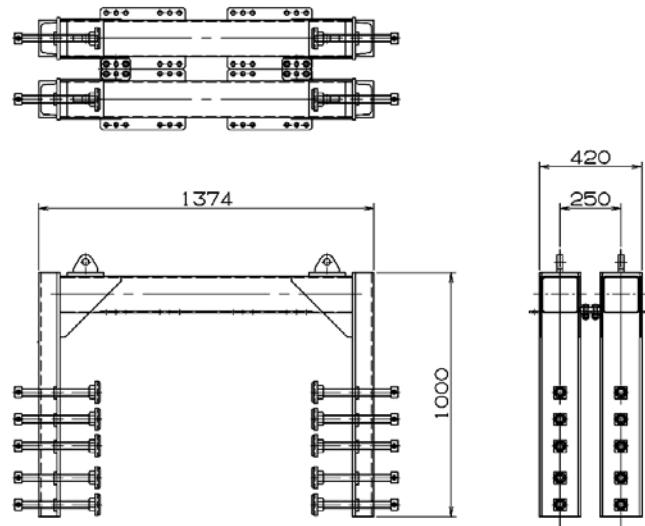


図⑤-10. Aゾーンで梱包した石材をBゾーンへ移動した。

的に上面のフレームを設置して f_y レーム枠全体の組み立てを終了した。フレーム枠の点検をおこない、No. 2 (東側) のホイストにフレーム枠を取り付けた。取り付けにあたっては、北側ノ2点についてはチェーンブロックを取り付けて水平状態の調整をおこない、南側については直接ワイヤーに接続した。接続状態を確認した後、吊り上げと移動を開始して、回転操作をしないでBゾーンへ移動した。Bゾーンへ到着した後、点検し、さらにチェーンブロック側を少しづつ下げて、壁画面が上に向いた状態に設置し、東壁石3の取り上げ・移動が完了した。その後、Cゾーンで石材を輸送車に積み込み、保存修理施設へ無事搬入した。



図⑤-11. 東壁石3の取り上げに用いた
Γ型治具の概略図と構成



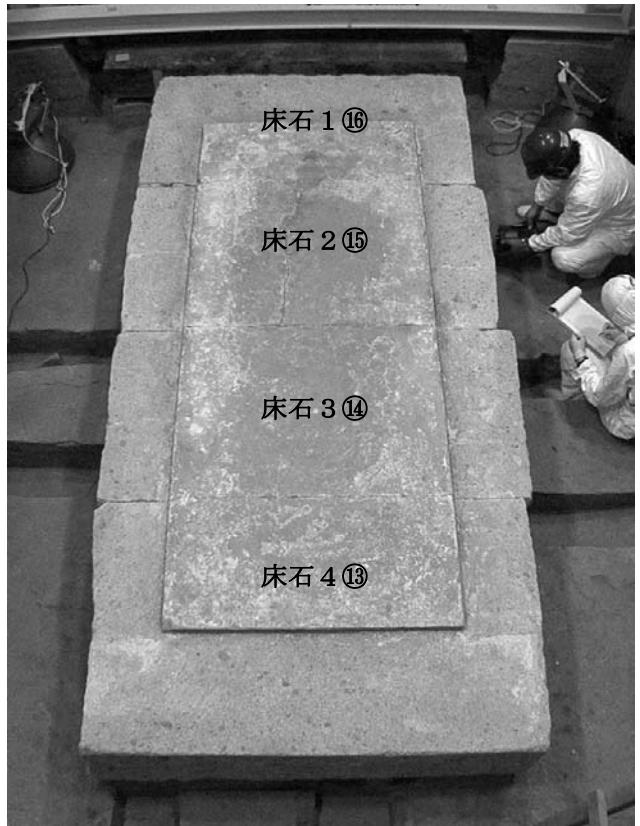
図⑤-12. 東壁石3の取り上げに用いた
IIIB-B型治具の概略図

⑬ 床石 4：床石の取り上げは、東壁石 1 の取り上げが完了した後、発掘調査が再開されてほぼ 2 ヶ月経過して、すべての床石が検出された（図⑬-1）段階で開始された。床石については、その厚さはバラバラで、階段状に北側の床石 4 が最も薄く（ほぼ 30-38cm）南側へ厚さが増して、床石 1 はほぼ 53cm であった。床石 2 については、天井石 1、2 のように南北に走る亀裂が当初から明らかにされていたが、床石 4 については亀裂の存在は全く確認されていなかった。発掘調査が進んで、東西の側面に亀裂が発見されたことから、延長する底面に東西に走る亀裂が存在することが推定された（図⑬-1）。

床石の取り上げにあたっては、その寸法と形状から天井石に用いたⅡⅢ型の治具が適用可能と判断して、油圧計シリンダーを利用した把持をすべて、自由度の高いボルト方式による石材の把持と拘束を計画した。そのため、ⅡⅢ型治具の油圧系をすべて取り外して、ボルト方式に付け替えた。

事前調査では、A ゾーンにおいて、従来から実施している目視観察および打診棒による石材の状態調査、軟岩ペネトロメータを用いた石材強度測定、赤外吸光度計を用いた含水比測定、赤外放射温度計とサーモグラフィによる温度分布調査などを実施した（図⑬-3）。今回の床石は従来とは異なり、直接版築土に接しているため、含水比は上面に比べて土に接する部分では高い値を示し、ほぼ 10 数 % を示した。石材強度についても同様な傾向を示し、下部の土に接する部分の測定が出来ないこともあり、強度の弱い劣化の進んだ表層については、部分的ではあるがわずかに土に残存することも予想された。また、発掘班から出来るだけ石材が接する土の表面状態を変えずに取り上げてほしいとの要望も出されており、石材を遙動させないで、静かに取り上げる対策を考慮した。

B ゾーンにおいては、治具の各梁中央部分の 3 箇所に合計 3 個の歪センサーを取り付けて動作確認をおこなった。また、オーバーヘッドクレーンからの 2 機のホイストにそれぞれロードセルを設置し、それにチェーンブロックを取り付けて、1 チャンネルと 3 チャンネルの梁両端にワイヤーを接続し、さらに梁の北側面の安全ベルト用の固定部分にチェーンブロックを取り付けて、南北方向の水平調整を可能とした。東西方向の水平調整に関しては、No. 1 および No. 2 のホイストにより可能とした。これら、治具の水平状態を B ゾーンで調整し、治具重量測定をおこなった（図⑬-4）。また、石材の底部に取り付けるフレームの重量についても、測定した。すべての準備が完了した後、B ゾーンから A ゾーンへ治具を移動し、石材の上部に位置した。



図⑬-1 床石の検出状態



図⑬-2 床石 4 の側面に見られる亀裂



図⑬-3 石材の温度分布測定

治具をゆっくり石材へ降下させて、パッドの仮の位置決めをおこなって、さらに治具を降下させて、東西、南北の位置調整をおこなって、パッドの位置を確定した。このII III型治具には1チャンネル片側に4個のパッドが装備されているが、床石4はその厚さから中央の2個のパッドのみ使用した。つまり、合計12個のパッドで石材を把持して拘束した。治具を石材に合わせて、仮止めする前段階で、もう一度治具の東西南北の水平調整をおこなった。

ボルトによる把持の前にAE、CMセンサーを設置してデータロガーに接続し、信号の出力を確認し、歪データと同期して記録を開始した。これらの準備が整ってからボルトによるパッドの把持をトルクレンチを用いて開始した。トルクレンチの設定は3MPaとしたが、石材の状態にあわせて調整した。なお、東西と各チャンネルの締め付け度合いについては、治具の梁に取り付けた歪データを参考にしながら($\delta = 6.5$)、両端にかかる応力を調整した。

治具の取り付けが終了した段階で、石材の状態を観察して亀裂等に異常の無いことを確認して、地切りの準備をおこなった。地切りにあたっては、ワイヤー、チェーンのたるみが無いようにした状態で、No.1とNo.2のホイストを同期させて、数mm垂直に吊り上げた。ちょうど周辺の土に切り目が僅かに入ったことが確認できた。南側の床石が少し上がったので、相欠き部分も断面から観察すると少し持ち上がり、水平距離にして数mmから5mm程度の隙間が生じた。この段階で地切りがほぼ完了したと考えられた(図13-5)。さらに、チェーンプロックを調整して南側をわずかに(3チェーンほど)吊り上げて、ホイストの操作により2cm程度上昇した。この状態で、土と石材は完全に縁が切れていることを目視で確認した。さらに連続して北側に3cm水平移動し、異常がないので、さらに連続して数cm移動を続けた。一旦停止した後、5cm上昇させて、さらに北へ30-40cm前後移動して停止した。この間において、AE、CMセンサーから異常を示す信号はなかった。この状態では、石材の直下に石材が設置していた土があるので、さらに北へ移動を考えたが、北側には作業スペースがないので、石材の移動を取りやめて、石材の両端部にベルトを巻きつけるように固定して、亀裂が広がらないように処置した。

ベルトの巻きつけにあたっては、石材のコーナ部が損傷しないように、シリコーンゴムで養生した上にコーナ金具を取り付けた。また、床土にベルトが接して土を搅乱しないように注意しながら作業を進めた。いっぽう、石材への拘束点が少ないとから、より安全性を確保するため、落下防止用のベルトの装着をおこなった。ベルト装着作業が終了して点検をおこない、石材の吊り上げが再開された。ホイストの巻き上げにより石材を吊り上げ、第一ステージ付近に達した時点

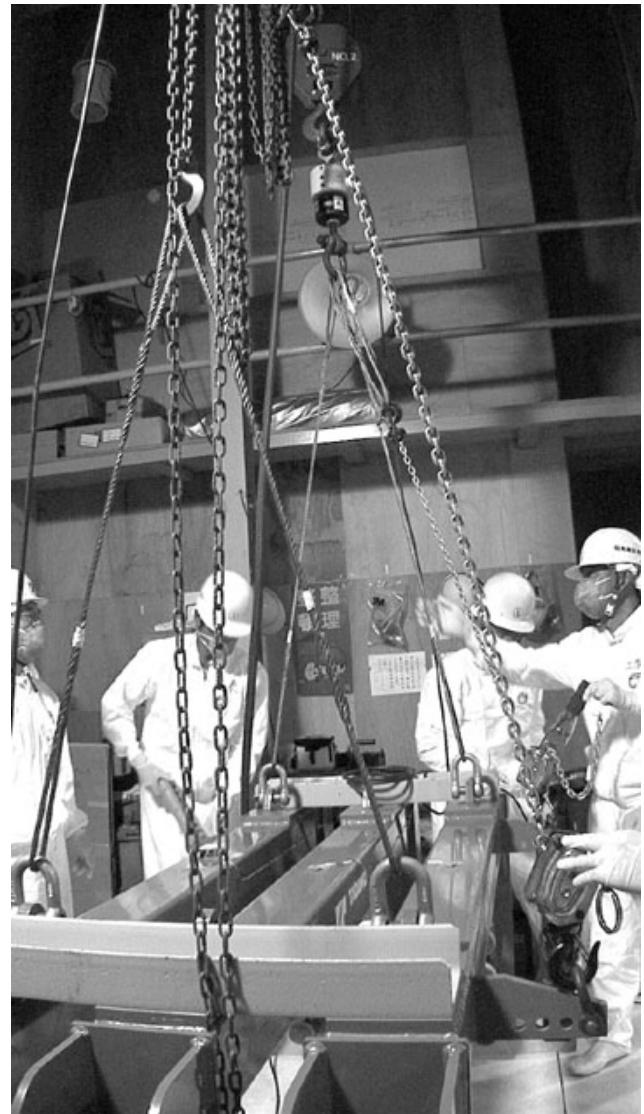


図13-4 治具にすべての器具を装着して、重量測定をおこなった。



図13-5 最初の地切り直後の状態(床石4)

で、北への水平移動を実施し、さらに上昇と水平移動により、断熱カーテンを越えてBゾーンへ移動の移動が完了した。

Bゾーンで石材を設置して、すぐに生物班によるカビ等のサンプリングが実施された。その後、石材はBゾーンからCゾーンへ移動され、石材表面に付着する土や黒色物（黴や樹木の根など）の除去、クリーニング作業を実施した。

クリーニング作業にあたっては、床石の底部および側面を対象に実施されたが、側面についてはあらかじめ発掘班によるクリーニングが終了していたので、底部の土砂の除去を主として進めた。まず、高圧空気の吹付けによる土砂の除去、さらに高圧シャワー方式（図⑬-6）、ブラッシングによる付着する土砂や汚染物の除去、水洗後の乾燥には高圧空気の吹付けを実施して、CゾーンからBゾーンへ移動して、最終的に、アルコールによる殺菌・洗浄（スプレー法）をおこなった。なお、洗浄により底部の亀裂の状態が鮮明になり、数mm幅の亀裂が生じていることが確認され（図⑬-7）、今後、この亀裂の進行を止める強化処置等が必要となる。

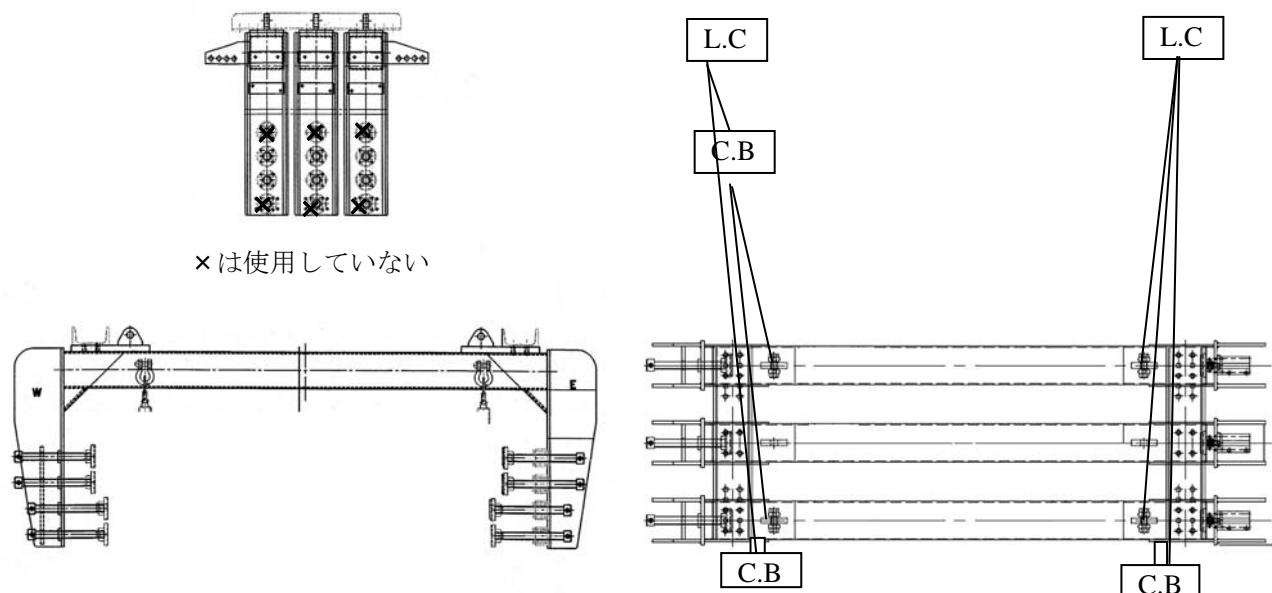
Bゾーンにおいては、フレーム下台を準備して、石材を治具ごとこの下台に設置した。石材の底部は傾斜や凹凸があるので、設置にあたってはシリコーンゴムの詰め物で応急的に安定させたが（床石を取り上げるまで、底の状態がわからないので形状に合わせたフレームを作ることは不可能）、長期的には石材の保存修理の後、石材に合わせた恒久的な台に置き換える必要がある。



図⑬-6. 高圧シャワーを用いた底面の洗浄処置



図⑬-7. 底面に明確に現れた亀裂の状態



図⑬-8 治具とチェーンブロック (C.B)、ロードセル (L.C) などの接続図

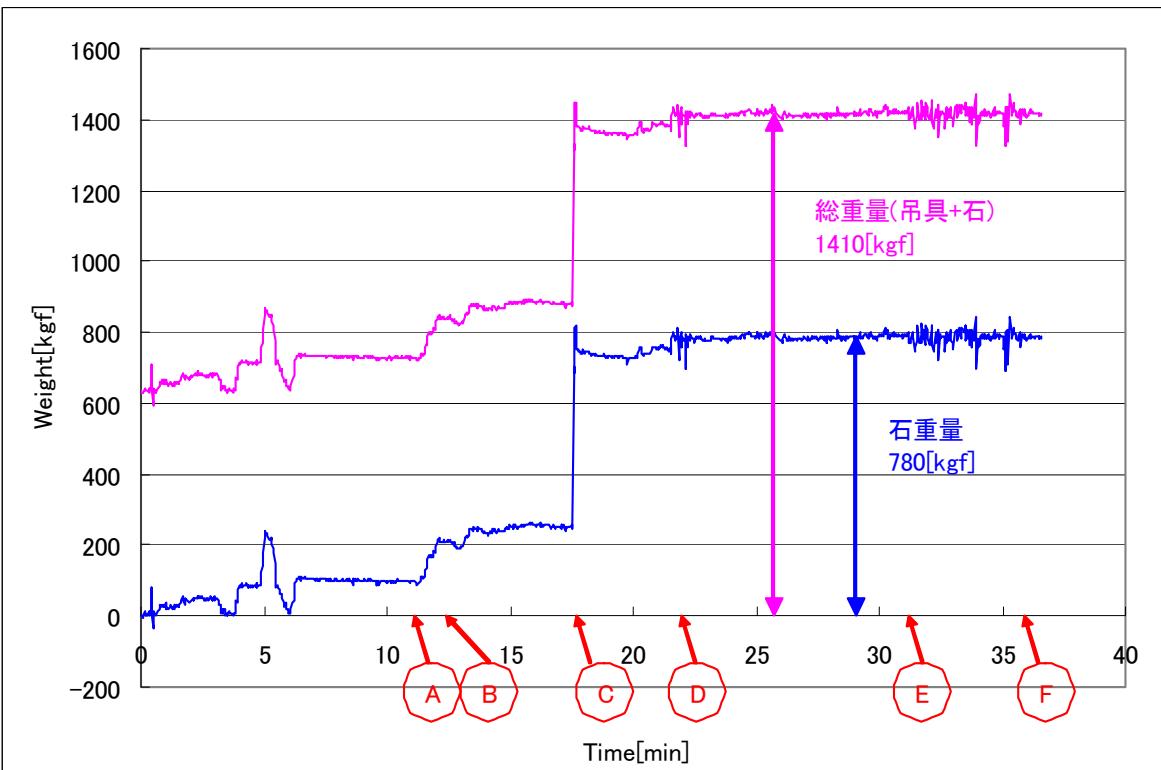


図13-9 重量測定結果

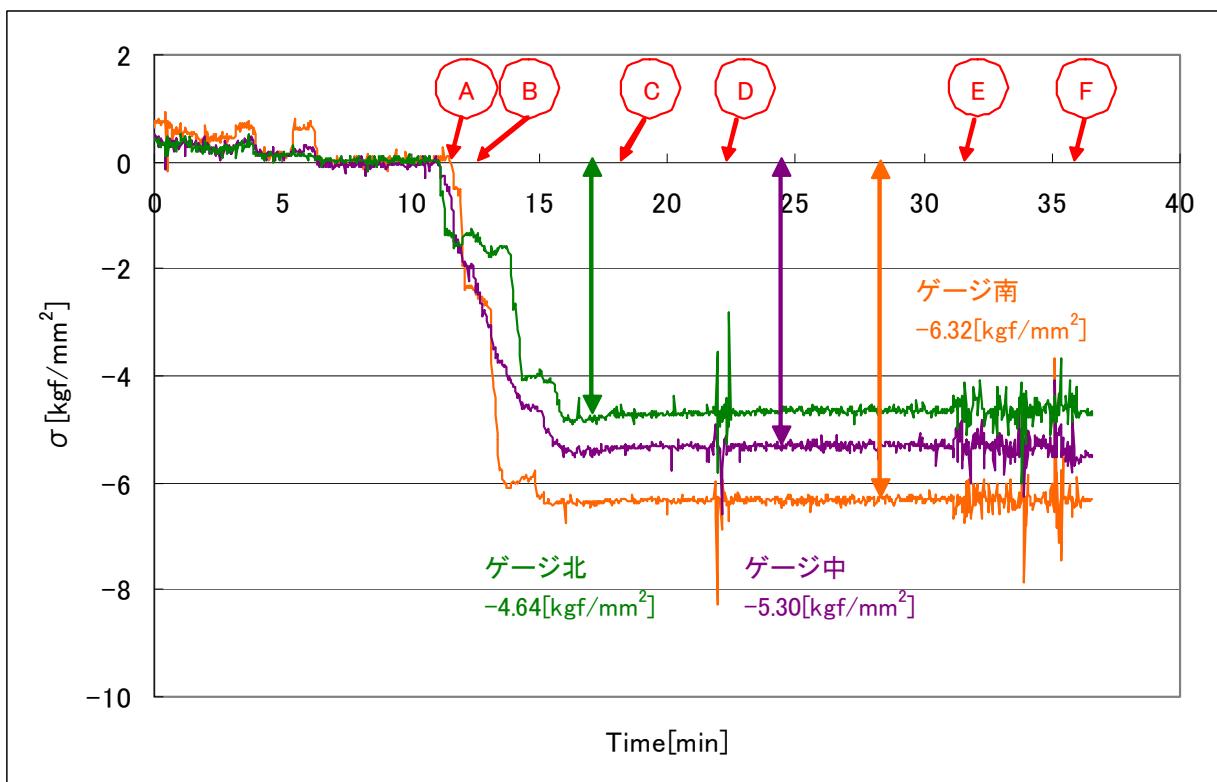


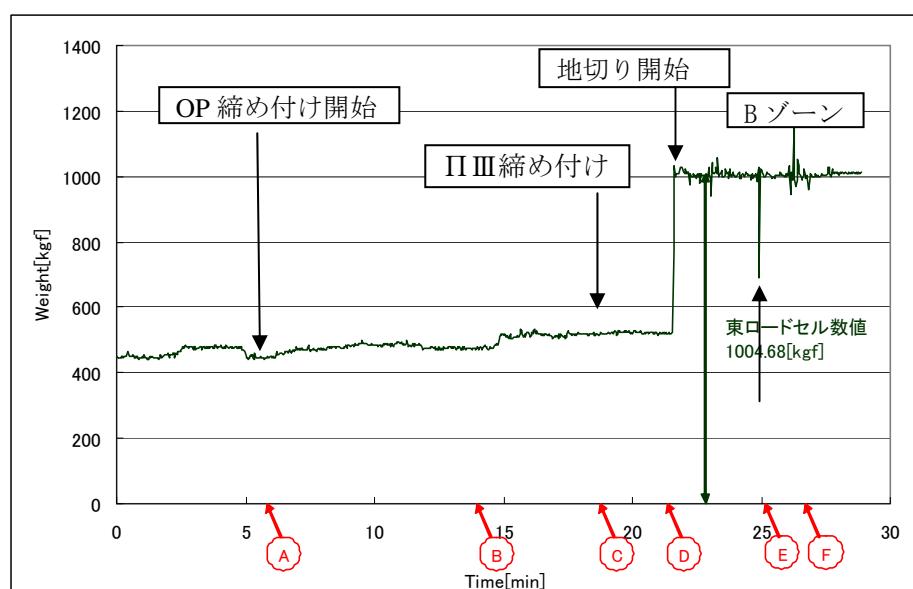
図13-10 治具の応力測定結果

A:ボルト締め開始、B:トルクレンチによる締め付け、C:地切り開始
D:上昇、移動開始→ベルト装着、E;上昇と移動、F:B ゾーン到着

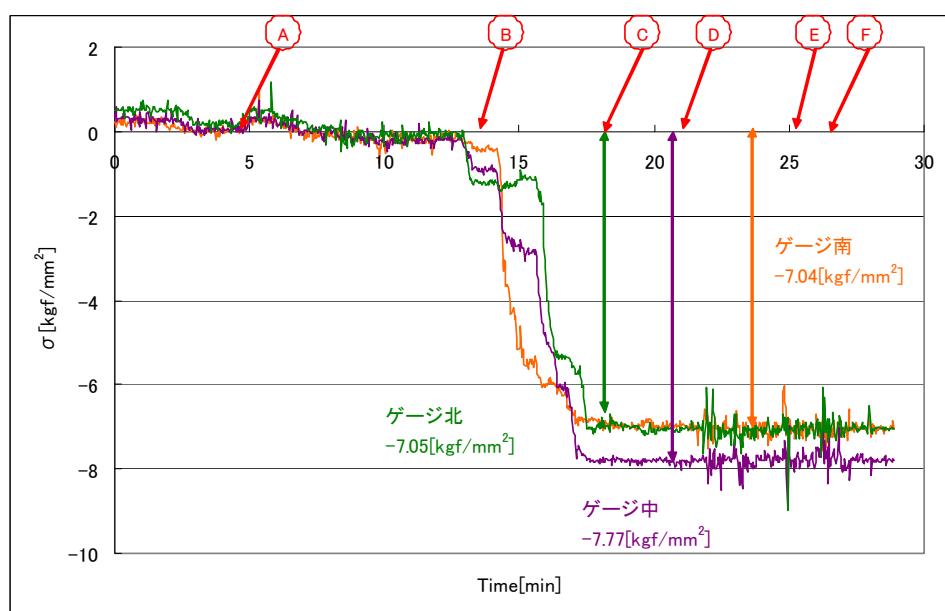
⑯ 床石 2 については、天井石 1, 天井石 2 と同様に、南北方向に走る大きな亀裂が存在していたため、石材の取り上げにあたっては、安全性を考慮して東西方向からの拘束に加えて、南北方向からも石材を拘束する計画を立てた。実施にあたっては、他の床石と同様に II III B-B 型治具に補助装置としてオクトパス型治具を適用して（図⑯-11）石材を拘束した後、地切り、移動をおこない無事完了した。



図⑯-1 床石 2 の取り上げ



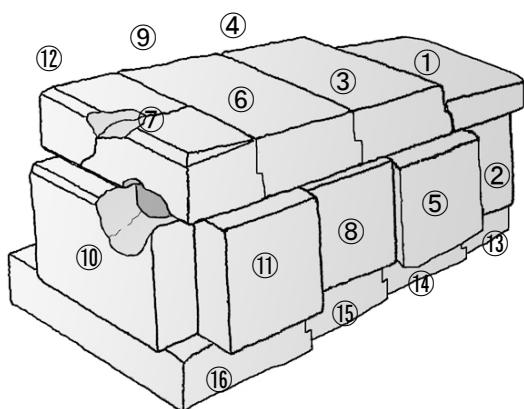
図⑯-2 東側ロードセル計測結果



図⑯-3 治具の応力測定結果

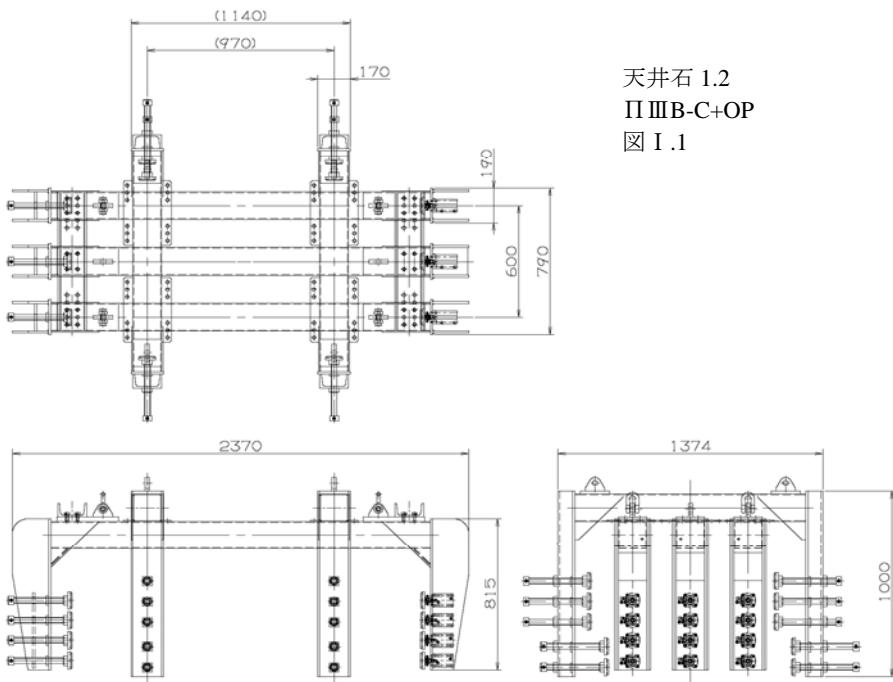
参考資料 I 石室解体準備から実施作業終了日

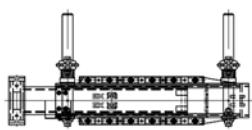
取り上げ石材	Bゾーンにおける準備から保存修理施設への搬入まで、
① 天井石 4	04月03日-04月05日
② 北壁石	04月15日-04月17日
③ 天井石 3	04月24日-04月26日
④ 西壁石 3	05月09日-05月11日
⑤ 東壁石 3	05月16日-05月18日
⑥ 天井石 2	05月27日-05月28日
⑦ 天井石 1	05月29日-05月30日
⑧ 東壁石 2	06月07日-06月08日
⑨ 西壁石 2	06月13日-06月14日
⑩ 南壁石	06月14日-06月15日
⑪ 東壁石 1	06月21日-06月22日
⑫ 西壁石 1	06月25日-06月26日
⑬ 床石 4	08月19日-08月20日
⑭ 床石 3	08月20日
⑮ 床石 1	08月20日-08月21日
⑯ 床石 2	08月21日



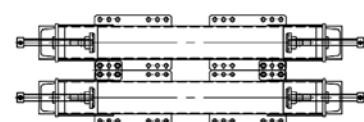
石室解体の順序

参考資料 II 使用治具一覧

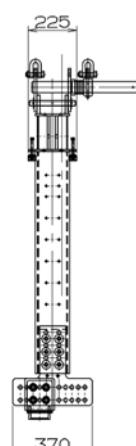
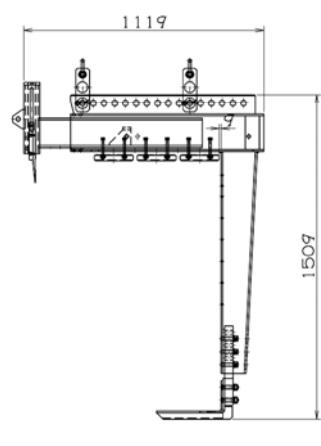




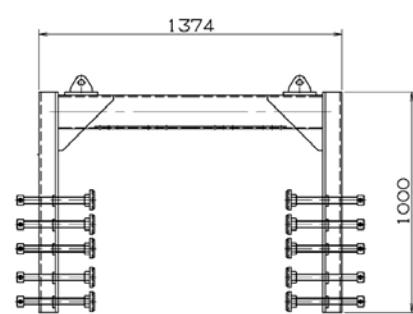
東壁石 3
Γ Ver II
図 I.4



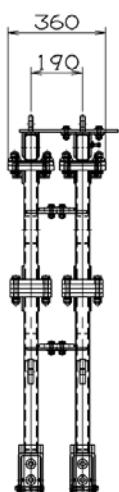
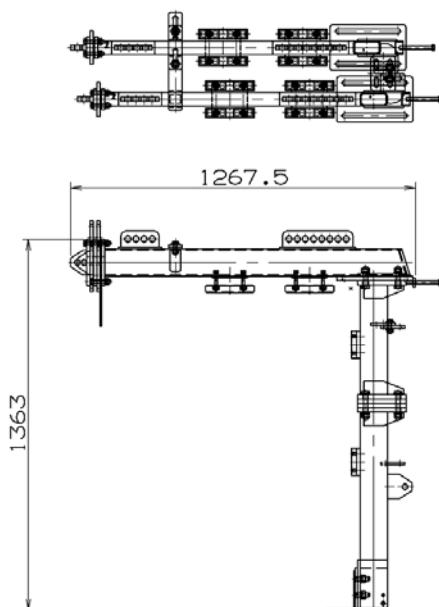
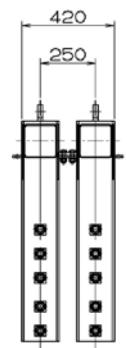
東壁石 3
II II B-B
図 I.5



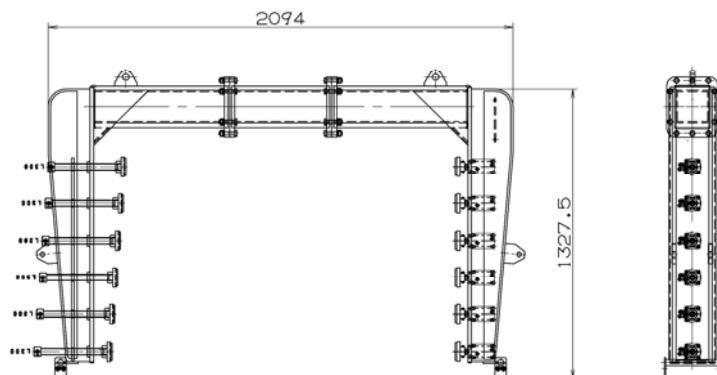
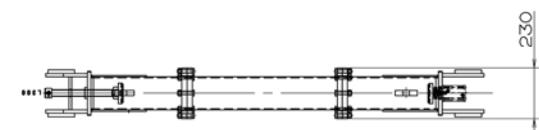
西壁石 2
II Ver3
図 I.6



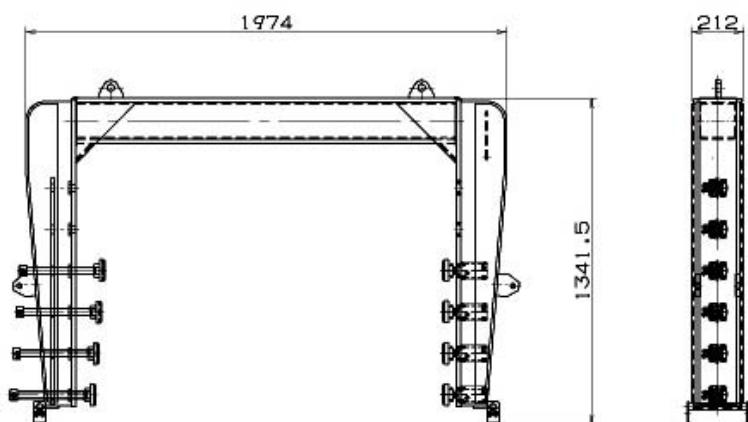
他東西壁石
II I B-B
図 I.7



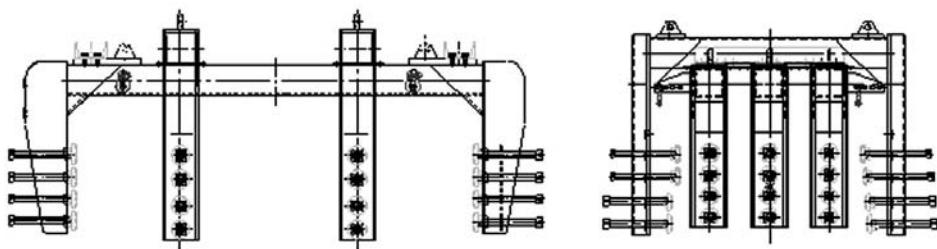
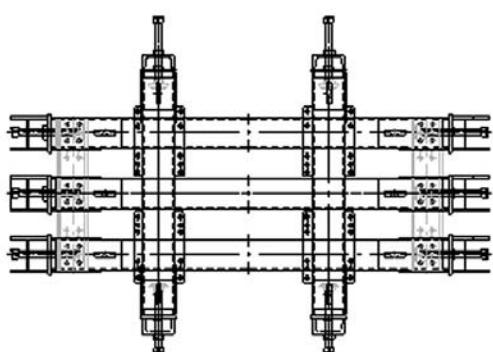
北壁石
II I B-C 改造
図 I . 8



南壁石
II I B-C
図 I . 9



床石
II III B-B、床石 2 : +OP
図 I . 10



参考資料III 石材の取り上げ状態などのデータ

	天井石 1	天井石 2	天井石 3	天井石 4	
地切り法	治具	治具	治具	治具	
取り上げ・移動治具型式	Π III + OP	Π III + OP	Π II + FL	Π II twn	
治具重量 (kg)	900	810	730	656	
フレーム重量 (kg)	410	385	365	345	
石材重量 (kg)	1400	1530	1430	1130	
トルクレンチ設定値 (kgf/m) もしくは一次油圧設定 (MPa)	3.0	3.0	3.1	2.6	
押し付けパッド数	23	16	16	18	
パッド圧 (kgf) /1 パッド	374	374	386	333	

	東壁石 1	東壁石 2	東壁石 3	北壁石	南壁石
地切り法	治具	ジャッキ	ジャッキ	治具	治具
取り上げ・移動治具型式	Π II	Π I	Π II	Π I 改造	Π I
治具重量 (kg)	145	125	220/285	430	400
フレーム重量 (kg)	285	280	260	375	340
石材重量 (kg)	825	655	685	1215	835
トルクレンチ設定値 (kgf/m) もしくは一次油圧設定 (MPa)	3.0	3.0>	3.0	3.0	3.7
押し付けパッド数	10	10	20	12	8
パッド圧 (kgf) /1 パッド	384	384	384	374	461

	西壁石 1	西壁石 2	西壁石 3		
地切り法	治具	ジャッキ	ジャッキ		
取り上げ・移動治具型式	Π I	Π I	Π I		
治具重量 (kg)	145	155	150		
フレーム重量 (kg)	275	270	250		
石材重量 (kg)	870	750	515		
トルクレンチ設定値 (kgf/m) もしくは一次油圧設定 (MPa)	3.0	3.0	3.0		
押し付けパッド数	10	10	10		
パッド圧 (kgf) /1 パッド	384	384	384		

	床石 1	床石 2	床石 3	床石 4	
地切り法	治具	治具	治具	治具	
取り上げ・移動治具型式	Π III	Π III+OP	Π III	Π III	
治具重量 (kg) + チェーンブロック	645	890	660	630	
フレーム重量 (kg)	155	160	150	120	
石材重量 (kg)	1140	1100	1015	780	
トルクレンチ設定値 (kgf/m) もしくは一次油圧設定 (MPa)	3.0	3.0	3.0	3.0	
押し付けパッド数	18	30	18	12	
パッド圧 (kgf) / 1 パッド	384	384	384	384	

V 高松塚古墳石室石材の修理施設への搬送

1. はじめに

石室解体により高松塚古墳から取り出された石材は、国営飛鳥歴史公園内に新設された修理施設まで搬送された。搬送の工程は、B ゾーンから C ゾーンへの移動と搬送車両への積載、搬送車両による修理施設までの搬送、および搬送車両から修理施設への搬入の 3 つの工程からなる。これらの搬送工程においては、石室石材をいかに安全に移動させるかということが課題であった。

ここでは、石室石材の搬送の安全性を確保するためにおこなった対策ならびに実際の石室石材の搬送について報告をおこなう。

2. 搬送の安全性確保

高松塚古墳より取り出された石材を修理施設まで運搬する際には石材及び壁画に損傷を与えないようその安全性を確保する必要があった。ここでいう石材及び壁画への損傷とは、搬送中の衝撃・振動による石材ならびに漆喰層の崩壊、結露による生物被害の拡大である。このような損傷を回避するため、搬送中の振動を軽減するとともに、壁画面への結露を防止できるように特別仕様の搬送車両を開発した。

しかしながら一方で、搬送車両の性能がいかにも高くとも、路面の状況によっては衝撃などの突発的な振動を十分に除去することはできない。そこで、搬送車両に天井石 1 の実物大模型を積載し、あらかじめ搬送経路における走行試験をおこない、路面状況の確認とそこから明らかとなった問題点に対する対応策の検討をおこなった。走行試験では、(1) 搬送中の石材の状態および路面を監視するためのビデオ撮像システム、(2) 石材の振動状態を記録するための変位ならびに加速度計測システム、(3) 荷物室の環境を記録するための温湿度データロガ、(4) 車両の走行位置を特定する全方位位置記録システム (G P S)、(5) 搬送中の石材の微細な破壊音 (アコースティックエミッション) の監視システムを搬送車両に搭載し、データの収集・解析をおこなった。

実際の石室石材の搬送においても、同様のモニタリングをおこない、搬送時の石材の状況を監視した。これにより搬送中に危険な状況が察知された場合、ただちにそれを回避するための措置を講じることも可能となる。また、これらのモニタリング記録は搬送中の石材がどのような状況にあったかを後で検証するための情報としても重要なものとなる。

2. 1 特殊搬送車両の開発

石室石材を搬送するための特殊搬送車両には、(1) 石室石材の車両への安全な積載、(2) 搬送中の振動の軽減、(3) 搬送中の壁画面への結露防止、(4) モニタリングシステムの搭載という四つの項目が要求された。

車両の荷物室の形状は、温度制御の必要性から箱形であることが望ましく、石材の積載は荷物室後方からに制限される。このため、荷物室後方にレールを介して補助台を連結し、この補助台に荷物室から設置台を移動させ、石材を積載するという方法が採用された。

一般に美術品輸送専用車両には、搬送中の振動を軽減するためのエアサスペンション（以後エアサスという）が装備されている。しかし、高松塚古墳石室石材は通常輸送される美術品などに比べてかなり重量物 (1~2 t) となるのに加え、崩落の危険性を有する漆喰壁画を

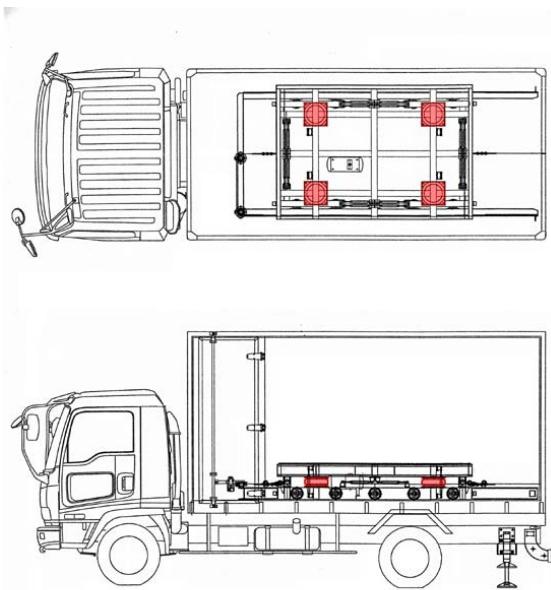


図1 設置台下部へのエアサスの配置

有することから、極力その振動を軽減する必要があった。このさらなる振動軽減対策として、荷物室内において設置台を4つのエアサス上に配置することとした(図1)。これにより、車輛本体のエアサスに加え、設置台のエアサスといういわゆる二重のエアサスで振動を軽減することになる。

一方、搬送中の壁画面への結露を防止するために、荷物室内にクーラーを設置した。石材温度および周囲の環境の温度と湿度を計測し、壁画面が露点に達しないように荷物室内の気温を設定することで、結露を防止することができる。

また、車輛に前述のモニタリングシステムを搭載するために、機器の設置台と車輛に別付けのバッテリーから供給される電源システムが導入された。

2. 2 石室石材の積み卸し方法

搬送車輛へあるいは搬送車輛から石室石材を積み卸す方法としては、以下の方法とした。

- 1) 搬送車輛の荷物室後方扉を開放。
- 2) 積み卸しのための補助台に搬送車輛を接近させて、位置あわせ。
- 3) 車輛本体のエアサス圧を解除し、車輛後方下部の油圧ジャッキで高さを調整。
- 4) 荷物室内のレールと補助台レールをボルトで接続・固定。
- 5) 荷物室内から設置台を補助台へ移動。
- 6) 設置台へあるいは設置台から石室石材を積み卸し。

高松塚古墳現地においては、内部断熱覆屋に設置された天井クレーンのレール走行方向に対して直角に搬送車輛を配置することが不可能であったため、梱包された石室石材はBゾー

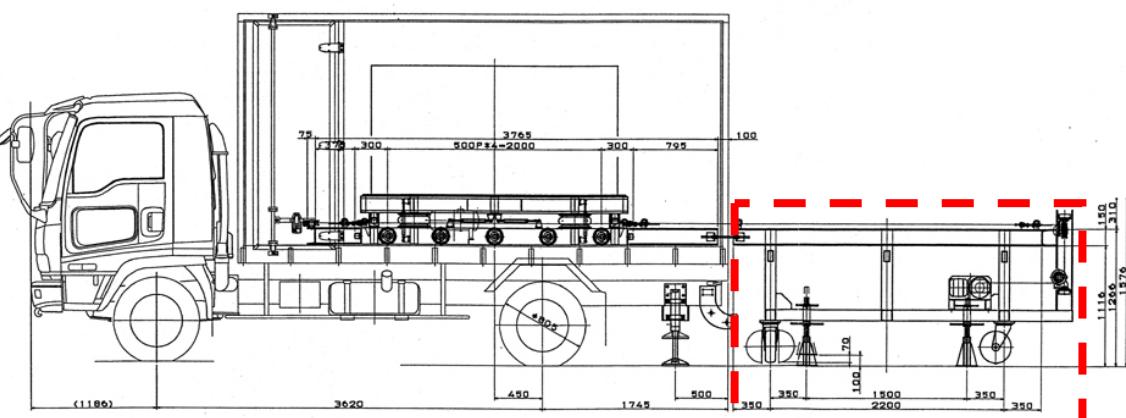


図2 石室石材を積み卸すための補助台の連結

ンから天井クレーン2基を用いて一旦設置台上に仮置きした後、梱包フレームの上部4点からワイヤーを用いて天井クレーン1基で吊り上げ、位置と方向を修正して設置台に正置する方法をとった。

一方、保存修理施設における石材の搬入では、当初は、保存修理施設の搬入口天井部のH形鋼材に取り付けられたチェーンブロックを用いる方法を検討していたが、この方法では吊り上げた石材を修理用の台まで安定して移動させることが困難であることが明らかとなり、より安定した移動方法として門型リフター（図3）を使用する方法を採用することとした。すなわち、設置台を荷物室から補助台へ移動させた後、門型リフターにより梱包された石室石材を吊り上げ、移動用電動リフト上に設置された修理用の台上に移動させる方法をとった。

2. 3 搬送状況のモニタリング

1) 搬送中の石材の状態および路面を監視するためのビデオ撮像システム

搬送中の石材の状態を監視するために、荷物室前方左右の天井から2台のCCDカメラを、また、路面を監視するために、助手席天井に左右の路面を視野にとらえる2台のCCDカメラを設置した。CCDカメラで捉えられた画像は、助手席に設置したモニターで見ることができ、同時に画像記録装置に1秒間隔で保存されるように設定した。この画像記録のインターバルは、当該装置において最も短い間隔である。なお、助手席に設置してあるモニターのアナログ映像端子にデジタルビデオカメラを接続し、リアルタイムでの画像を録画することとした。

2) 石材の振動状態を記録するための変位ならびに加速度計測システム

荷物室自体の振動状態を記録するために、5Gの加速度センサーを設置台が載せられた鋼材に貼り付けた。また、梱包石材を載せた



図3 門型リフター



図4 荷物室内のCCDカメラ



図5 助手席のCCDカメラ



図6 助手席に設置されたモニター



図 7 加速度センサーと変位センサー



図 8 溫湿度センサー

設置台の振動状態は 1G の加速度センサーを用いて計測した。設置台上での梱包石材の動きを把握するため、設置台に対して垂直方向と水平方向の 2 方向について変位センサーを梱包枠に設置した。

データは制御ソフトウェア (EDS400A) で収集し、解析ソフトウェア (DAS-100A) で解析をおこなうこととした。また、データは CSV ファイルに変換することにより、表計算ソフトウェア (Excel) でも解析することが可能である。

3) 温湿度データロガ

荷物室内の温度および湿度を記録するため、温度センサーと湿度センサーを荷物室内に設置した。設置場所はクーラーの下方、梱包石材の前方で、直接冷気があたらない場所である。データはデータロガをパーソナルコンピュータに接続し、制御ソフトウェア (midi LOGGER) で収集することとした。データロガに集積されたデータは、計測後にパーソナルコンピュータに回収し、表計算ソフトウェア (Excel) で解析をおこなうことができる。

4) 車輌の走行位置を特定する全方位位置記録システム (GPS)

GPS の受信機を車輌前方左側のサイドミラーの支柱に取り付けた。GPS により搬送車輌の位置情報は 1 秒間隔で記録される。GPS に収集されたデータは、USB ケーブルを介してパーソナルコンピュータに回収することができる。また、得られたデータは CSV ファイルに変



図 9 GPS の受信機



図 10 GPS の設置場所

換して、表計算ソフト（Excel）を用いて搬送速度の解析をおこなうことができる。

5) 微細な破壊音の監視システム

石材が変形・破壊を生じる際には、「音」が発生する。この発生する音をアコースティックエミッション（AE）とよんでいる。搬送中に石材に変形や破壊が生じていないかを知るために、AEの計測をおこなった。また、同時にコンタクトマイクを取り付け、可聴領域の音も記録した。AEセンサーは、あらかじめシクロドデカン（ $C_{12}H_{24}$ ）で石材に接着された鉄板（一边が5cmの正方形、厚さ1mm）に両面テープを用いて接着した。コンタクトマイクには磁石が取り付けられており、石材に接着された鉄板に接着剤を用いずに固定することが可能であった。

2. 4 走行試験と対策

搬送条件としては、走行速度ならびに設置台のエアサスペンション圧の設定値が大きな条件として挙げられる。これらの課題を検討するため、特殊搬送車両に天井石南第1石の実寸大模型を梱包して積載し、走行試験をおこなった。

1) 走行速度の検討

走行速度として、5km/h、10km/hおよび15km/hの3条件を設定して走行試験をおこなった。設置台のエアサスペンション圧は0.2MPaで統一した。図？は各速度で走行した時の変位計と加速度計の測定データである。上から順に設置台上での石材の垂直方向の動き、設

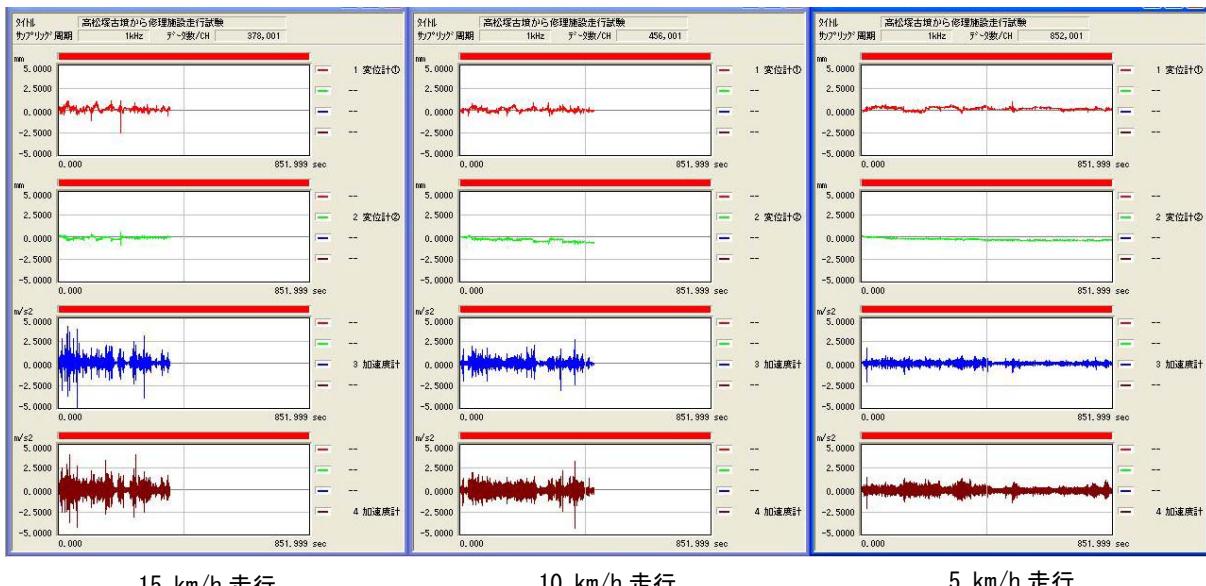


図12 走行速度試験における石材および荷物室の振動状況

置台上での石材の水平方向の動き、設置台の垂直方向の加速度、および荷物室の垂直方向の加速度である。

速度が速くなるほど、設置台上で梱包石材が動くこと、ならびに設置台および荷物室のゆれが大きくなることが明らかとなった。しかし、設置台上での石材の動きは 15 km/h 走行時においても高々瞬間に 1~2 mm 程度であった。この動きは実際には設置台上に敷かれたゴムシートに梱包石材が瞬間にめり込んだことによるものと考えられる。一方、設置台の加速度は 5 km/h 走行においてほぼ 1 m/s² 内に収まっているのに対し、それ以上の速度では 10 km/h 走行で 2 m/s²、15 km/h 走行で 5 m/s² に達しており、かなり大きなゆれを生じていることが明らかとなった。しかしながら、5 km/h 以下を大きく下回る速度での走行は、ノックキングなどを生じやすくかえって安定した走行を確保することが困難となる。以上のことから、特殊搬送車輌による石材の搬送速度を 5 km/h とすることとした。

2) エアサスペンション圧の設定

梱包石材（重量 3.3 t）を設置台に載せ、エアサスペンション圧が設置台および梱包石材にどのような影響を及ぼすのかを検討した。重量 3.3 t の積載物に対して安定した除振効果を得るために推奨されているエアサスペンション圧は 0.20 MPa である。そこで、0.16、0.18、および 0.20 MPa のエアサスペンション圧を設定して走行試験をおこなった。走行速度は 5 km/h とした。

重量 3.3 t の積載物に対して最適とされる 0.20 MPa では、設置台および荷物室ともにほぼ 1 m/s² の加速度内に収まっているのに対し、それよりも低いエアサスペンション圧では 2 m/s² をこえる加速度が検出されている。特にエアサスペンション圧を 0.16 MPa に設定した試験では、5m/s² を超える激しいゆれを観測した。これは、エアサスペンションによるゆれの吸収が十分でなく、しかも設置台下部に瞬間に衝突したときの衝撃によるものである。このことからエアサスペンション圧が高い方がゆれを軽減する効果が大きいことが明らかである。しかしながら、一方、第 2 実験場（加茂町）において、設置台のエアサスペンション圧

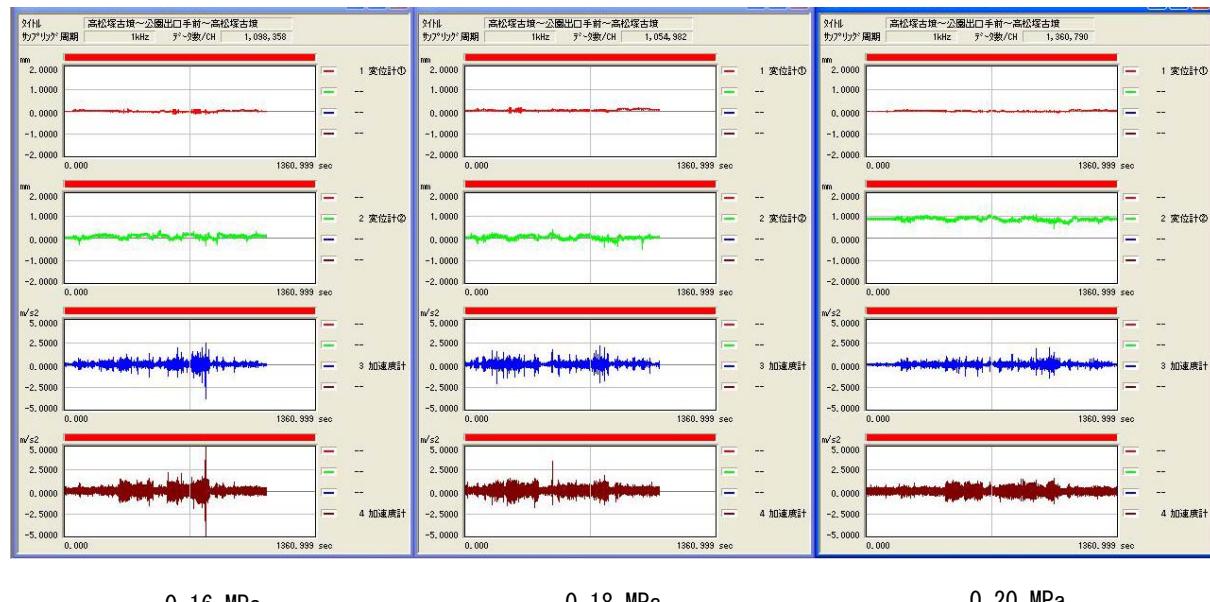


図 12 エアサス圧試験における石材および荷物室の振動状況

を 0.30 MPa に設定し、走行速度 30 km/h で走行した際には、荷物室のゆれがあまり大きくなないのでに対して、設置台の加速度が 1G の加速度計の容量をオーバーするほどの加速度 (10 m/s^2) を検出した。このことから、エアサスペンション圧が高ければ高いほど、振動を軽減することができるのではなく、積載する石材の重量に応じた最適なエアサスペンション圧を設定する必要があることがわかる。

実際の搬送にあたっては、内部断熱覆屋 B ゾーンにおいて梱包石材の重量をロードセルを用いて計測し、その重量に最適なエアサスペンション圧を設定した後に、梱包石材を積載するという手順をとることになる。

3) 路面状況の確認と対策の検討

高松塚古墳のある国営飛鳥歴史公園内における走行試験は、路面状況を確認しながらおこなった。公園内の道路には排水のための溝がいくつか道路を横断している。これらの溝はグレーチングでふさがれているものの、特殊搬送車輌の走行にあたってはその重量のためにグレーチングを破損してしまう危険性もある。そこで、これらのグレーチングのうちで破損が懸念される部分については、厚さ 10–20 mm の鉄板を敷き、端部を常温アスファルト合材で段差を解消した。

5 km/h 走行において、数箇所の大きなゆれを観測しているが、この大きなゆれは上述のグレーチングを保護した鉄板上を通過するときに生じているものである。常温アスファルト合材で段差を解消したとはいえ、この部分を乗り越えるときには必ず傾斜は生じる。この揺れに対しては、走行時に極力減速してグレーチング保護部分を乗り越えることで十分対応できることを確認した。また、念のため、できるかぎり乗り越えるためのギャップを解消するようアスファルト合材による端部処理の距離を長く取り、傾斜を緩やかにすることとした。

2. 5 保存修理施設搬入口の改修

保存修理施設の完成・引渡し後の現地確認において、搬入口のアプローチが斜面となっていることが判明した。搬入口までのアプローチが斜面となっていると、積み卸しに用いる補助台と搬送車輌の接続に屈曲が生じるため、安全な搬入が困難となる。そこで、このアプローチ部分を水平に改修した。しかしながら、この改修によりアプローチ端部には大きな段差が生じてしまうことになる。この段差は、搬送車輌と補助台の接続において大きなギャップとなるが、補助台に取り付けてあった移動用の車輪を取り外すことで解消することができた。

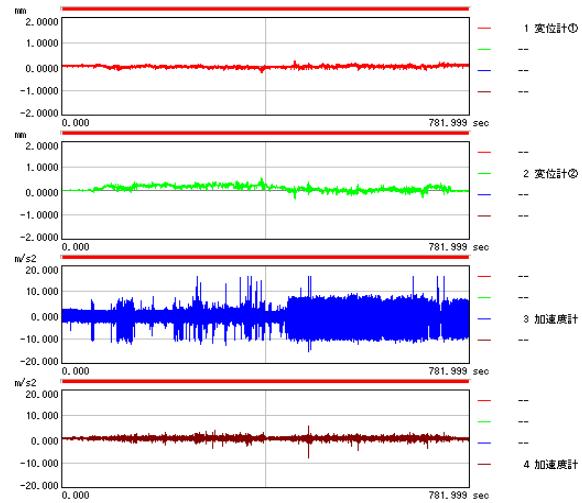


図 13 設置台エアサスペンション圧 0.30 MPa による走行 (30km/h)



図 14 走行経路における段差の解消



図 15 保存修理施設搬入口の斜面



図 16 斜面の改修

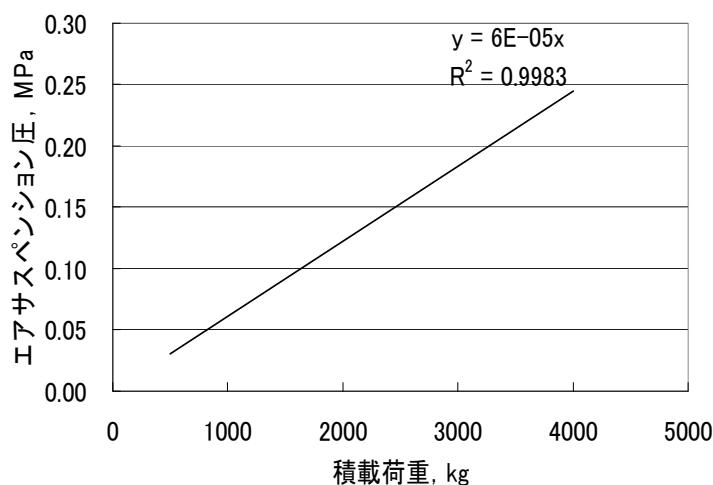


図 17 積載荷重と最適エアサスペンション圧の関係

表 1 積載重量とエアサス圧（重量 : kg, エアサス圧 : MPa）

石 材	石材重量	梱包枠重量	積載総重量	エアサス圧
天井石 1	1400	410	1810	0.109
天井石 2	1530	385	1915	0.115
天井石 3	1430	365	1795	0.108
天井石 4	1130	345	1475	0.089
西壁石 1	840	275	1115	0.067
西壁石 2	750	280	1030	0.062
西壁石 3	515	250	765	0.046
東壁石 1	825	285	1110	0.067
東壁石 2	655	280	935	0.056
東壁石 3	685	260	945	0.057
北壁石	1215	375	1590	0.095
閉塞石	835	340	1175	0.071
底石 1	1140	155	1295	0.078
底石 2	1100	160	1260	0.076
底石 3	1015	150	1165	0.070
底石 4	780	120	900	0.054

3. 石材搬送

解体され B ゾーンまで取り出された石室石材は、C ゾーンを経て搬送車両に積載され、修理施設まで搬送される。修理施設では門形リフターを用いて、修理用の台に積載され搬入が完了することになる。石室石材の搬送工程は、1) 積載重量測定と最適エアサス圧の設定、2) 外環境を考慮した荷物室内温度の設定、3) B ゾーンから C ゾーンへの梱包石材の移動と搬送車両への積載、4) モニタリングシステムのセッティング、5) 搬送、6) 修理施設への搬入の 6 工程となる。ここでは、高松塚古墳石室解体に際して実際に石室石材を搬送した概要を述べることにする。

3. 1 積載重量測定とエアサス圧の設定

搬送中の振動を軽減するため、設置台に取り付けられたエアサスの圧力は積載する梱包石材の重量に応じて調節する必要がある。積載する梱包石材の重量から回帰式を用いてエアサス

圧を計算し、圧力の設定をおこなった。石室石材 16 石の重量、梱包枠重量、積載総重量および設定エアサス圧を表 1 に示す。

3. 2 荷物室内の温度設定

石室解体は 4 月 5 日から 8 月 21 日までにわたっておこなわれた。その間、搬送時の外気温は大きく上昇することとなつたが、石室石材に結露を生じないように露点を考慮して、荷物室内の温度設定をおこなつた。温度設定は環境班の指示によつた。

図 17 に天井石 4 (4 月 5 日搬送)、西壁石 2 (6 月 14 日搬送) および閉塞石 (6 月 15 日搬送) の荷物室内での温湿度変化ならびに露点の変化を示す。天井石 4 を含む東壁石 2 (6 月 8 日搬送) までの 8 石の搬送では、外気温はほぼ石材と同程度であり、相対湿度も比較的低かったため、露点がかなり低く、荷物室内温度を 10 °C から 12 °C で設定することで十分結露を生じない環境とすることが可能であった。

しかしながら、6 月 14 日の西壁石 2 の搬送においては、天候が曇時々雨であり、搬送直前まで降雨があった。このため、外気温が高くかつ高湿度の状況となつた。搬送中の監視では、壁画面ならびに石材には全く結露は認められなかつたが、修理施設に到着後、搬送車両の後方扉を開放して修理施設内に搬入した際に、梱包枠に結露が生じ、石材も湿気を帯びた状態となつた。しかし、生物被害の拡大が懸念される結露は生じなかつた。これは、石材および漆喰層が比較的乾燥した状態にあつたことも結露を生じなかつた理由のひとつとして考えることができる。

さらに高温多湿の季節に入つていくことから、6 月 15 日以降の搬送では修理施設での搬入時に高温高湿の外気にさらされることになるため、搬送車両に積載後、荷物室内において石材表面温度を計測しつつ徐々に室内温度を上げ、搬入時の結露を防止する方法をとつた。その結果、石材および壁画面だけでなく梱包枠への結露も防止することができた。

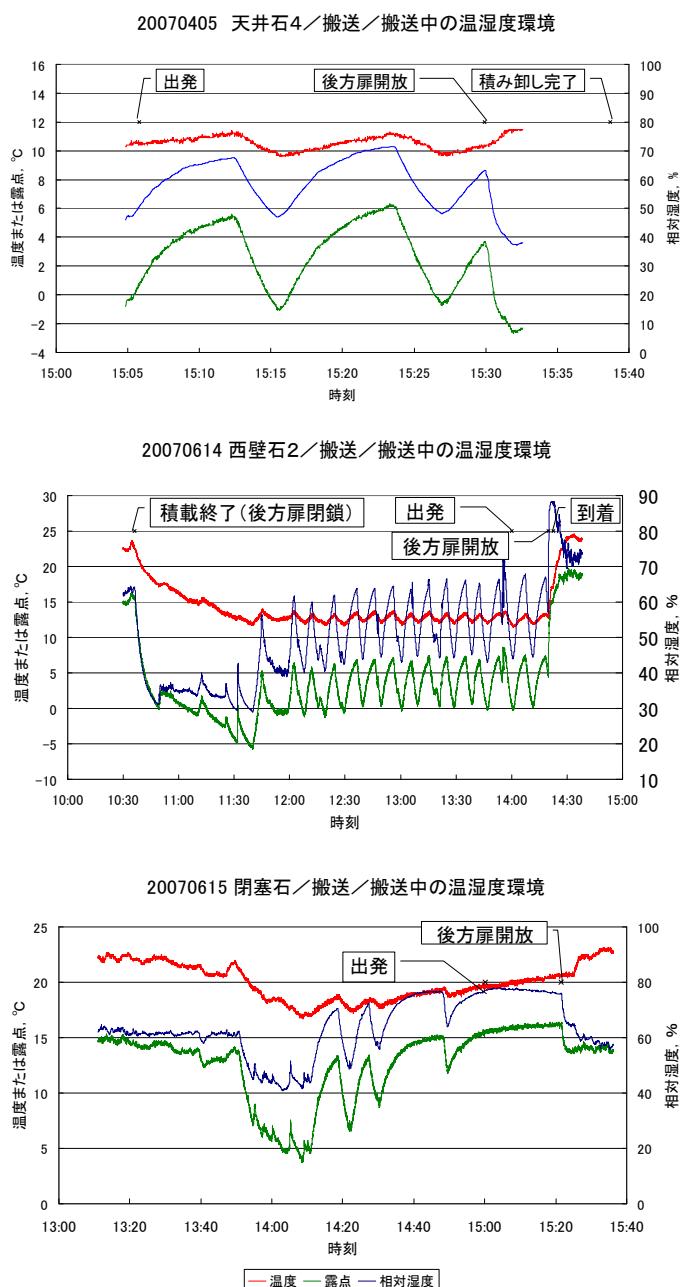


図 17 搬送中の荷物室内の温湿度変化

3. 3 BゾーンからCゾーンへの移動と搬送車輌への積載

解体により取り出された石材はAゾーンおよびBゾーンにおいて梱包・回転をおこなった後、搬送のためにCゾーンにおいて搬送車輌に積載された。まず初めに、Cゾーンに設置された補助台に搬送車輌を近づけ、後方扉を開放して、補助台に接続した。荷物室内のレールと補助台のレールの平滑性を確認後、荷物室内から設置台を補助台に移動させた。

次いで、Bゾーンにおいてワイヤー4本を梱包枠の上部4隅に連結し、梱包枠の短辺の2本を1組としてそれぞれ2基の天井クレーンにロードセルを介して石材を吊り上げ、総重量を測定した。この測定された総重量を基に設置台のエアサス圧を設定した。

第2実験場においては、内部断熱覆屋に設置された天井クレーンのレールに対して直角に補助台を配置し、搬送車輌を接続することが可能であったが、高松塚現地においてはそのスペースを確保することができず、搬送車輌ならびに補助台をレールに対して直角に配置することが不可能であった。そこで、重量測定をおこなった状態で2基の天井クレーンを用いて設置台まで移動させた（図18）。梱包石材を設置台に仮置きした後、ワイヤーを4本ともに1基の天井クレーンに付け替えて吊り上げ、方向と位置を修正して設置台上に正置した。

設置台上に梱包石材を正置後、搬送車輌に設置台ごと搬入した。荷物室内では、設置台の前方下部の両端をワイヤーとシャックルで設置台が載せられた鋼材に固定し、さらに後方下部の両端をレバーブロックにより固定した。

3. 4 モニタリングシステムのセッティング

走行試験において設置したモニタリングシステムと同様に、各種センサーおよび測定機器をセッティングした（2. 3の2）を参照）。

セッティングにあたっては、時系列を統一するために、各計測機器の時刻を日本標準時にあわせた。



図18 BゾーンからCゾーンへの移動



図19 設置台上での位置・方向の修正



図20 搬送車輌への積載

3. 5 警備員の配置と先導車

石室石材は、報道各社に加え、歴史公園利用者など多くの人々がいる中での搬送となる。搬送に際しては、公園利用者などの安全を確保し、搬送車両がスムーズに走行できるようする必要があった。そのため、搬送時には搬送経路上に警備員を配置し、先導車ならびに警備員による先導をおこなった。また、搬送経路に合流する歩道の出入り口などに防護柵を設置した。

また、公園内を貫通する県道を横断する際には、搬送時間帯に一時一般車両の通行を止めた。この一時通行止めに関しては、文化庁より奈良県警察に届出と協力要請がなされた。

3. 6 搬送経路と搬送速度

GPS により記録された搬送経路の一例（天井石 3）を図 22 に示す。図中のポイントは表 2 の通りである。

また、図 23 に搬送中の車両速度を示す。発進直後、25 km/h という大きな速度を記録しているが、これはパラソレックス覆屋内において GPS が衛星をとらえきれず誤差が大きくなつた結果であり、実際にはその前後の速度約 3 km/h での走行であった。

石室石材の搬送に際しては、できる限り振動を軽減するために、5 km/h 以下の走行速度を目標に走行し、段差通過時には最徐行をおこなうことが決定されていた。

この走行では P01 から P11 の段差を通過する際に、最徐行により減速している様子がわかる。また、斜面走行時や最徐行後の加速において若干 5 km/h を超える速度が瞬間に観測されているが、全体を通して、目標とした 5 km/h による走行がおおむねおこなわれたことがわかる。

この走行記録は天井石 3 のものであるが、他の 15 石についても同様の結果を示した。また、走行に要した時間は、梱包石材の軽重に応じて走行速度を考慮したため、15 分から 30 分の範囲となつている。



図 21 先導車と警備員による先導

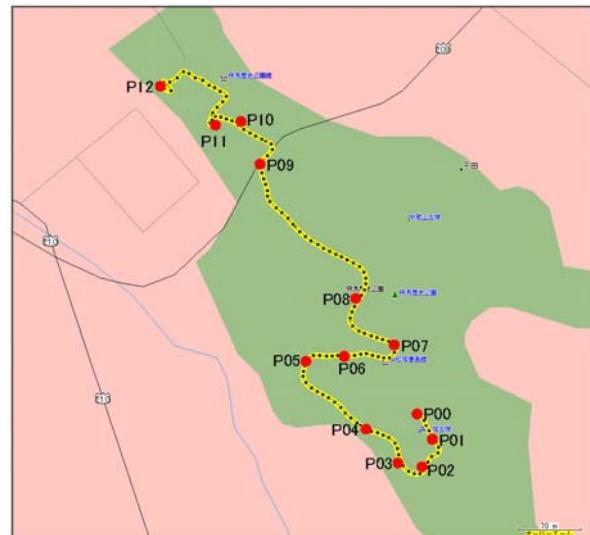


図 22 石室石材の搬送経路（天井石 3）

表 2 搬送経路上のポイント

ポイント	搬送行程
P00	発進
P01	第 1 段差(パラソレックス覆屋前方鉄板養生)
P02	第 2 段差(星宿広場南側横断溝鉄板養生)
P03	第 3 段差(星宿広場西側横断溝鉄板養生)
P04	第 4 段差(壁画館前)
P05	第 5 段差(壁画館西側カーブ上横断溝養生なし)
P06	第 6 段差(休憩所手前の横断溝養生なし)
P07	第 7 段差(休憩所前の横断溝養生なし)
P08	第 8 段差(広場東側の横断溝鉄板養生)
P09	第 9 段差(公園出口から公道へ)
P10	第 10 段差(公園館東側の横断溝養生なし)
P11	公園館入口前にて方向転換
P12	修理施設到着

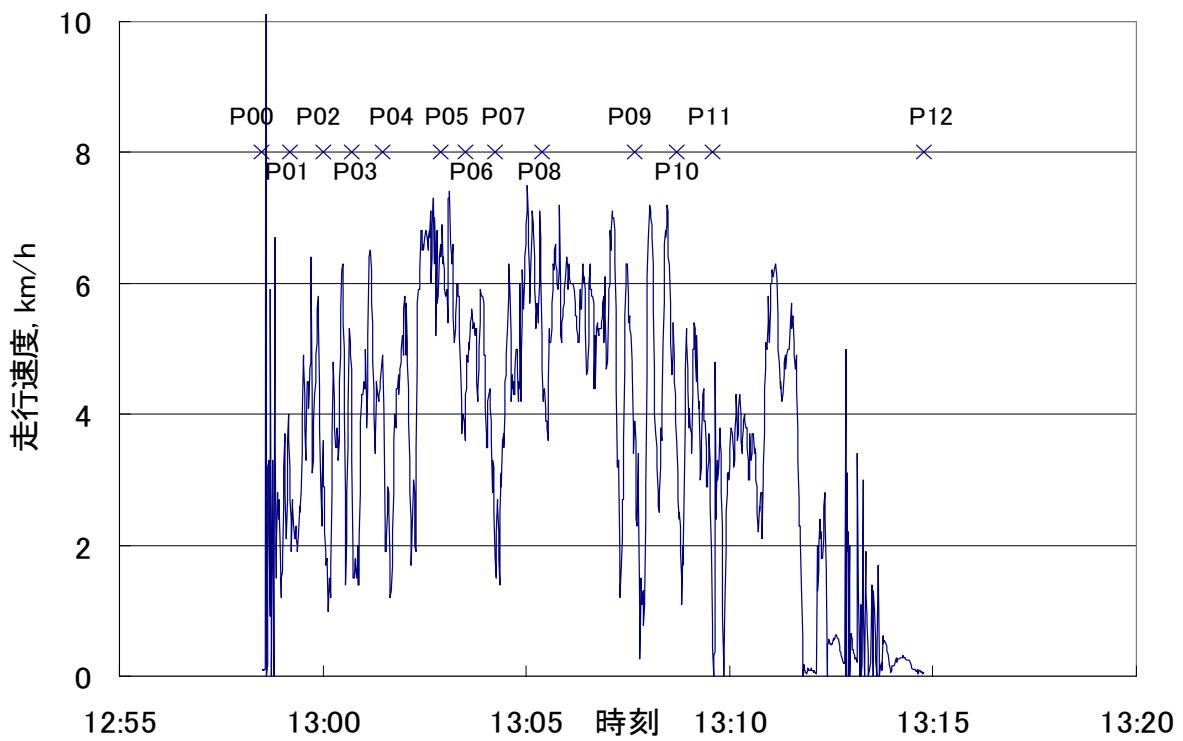


図 23 搬送中の走行速度（天井石 3）

3. 7 搬送中の振動

図 24 から図 27 に、天井石 3 の搬送中の振動状態に関する計測結果を一例として示す。

図 24 は変位計により計測された梱包石材の設置台に対する垂直方向の変位である。すなわち、梱包石材が設置台上で上下方向にどれだけ振動しているかを示すものである。この図から、傾斜した走行経路において、梱包石材が 0.2 mm 程度設置台上のゴムに沈み込んだのみで、大きくバウンドしたりした形跡は全く認められなかった。

図 25 は変位計により計測された梱包石材の設置台に対する水平方向の変位を示すものである。梱包石材が設置台上で横滑りしたりしていないかを示すものである。この図からは、エンジンなどの車両からの表面波が周期的に細かく伝わっているものの、梱包石材自体が大きく横滑りすることはなかったことが明らかである。

図 26 は 5G の加速度計を用いた搬送中の荷物室の振動である。石材に大きく影響を及ぼすのは垂直方向の大きな振動であることから、垂直方向の加速度を計測した。荷物室が走行中に受けた振動の加速度は最大で 1 m/s^2 をわずかに超える程度であった。

図 27 は 1G の加速度計を用いた搬送中の設置台の振動を計測したものである。梱包石材に伝わる垂直方向の振動を計測した。全体を通して 1 m/s^2 以内の加速度に収まっており、梱包石材への振動がかなりの程度軽減されていることがわかる。

計測された加速度は実際には車両のエンジンなどから生じる表面波の影響を大きく受けており、ローパスフィルター処理をすることで、路面から受ける 10Hz 以下の振動はかなりの程度軽減されていることが明らかとなった。

以上の結果から、天井石 3 の搬送において、二重のエアサスの効果により、石室石材への振動は緩和されており、安全な搬送がおこなわれたということができる。

他の 15 石についても同様の結果であった。

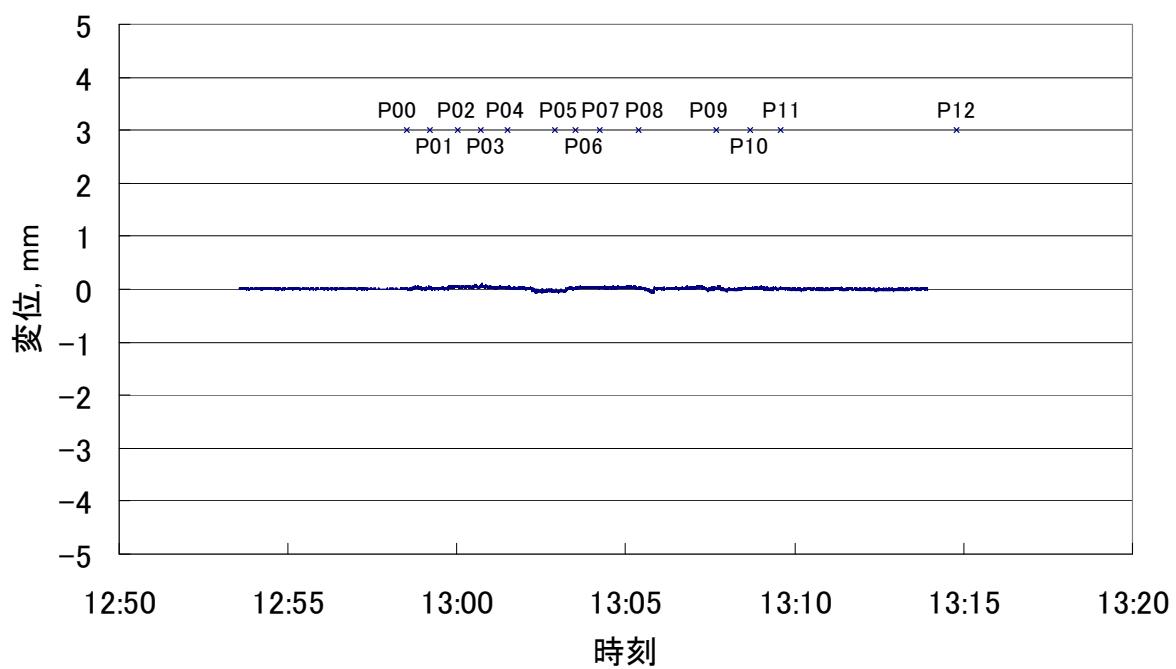


図 24 搬送中の設置台に対する梱包石材の垂直変位

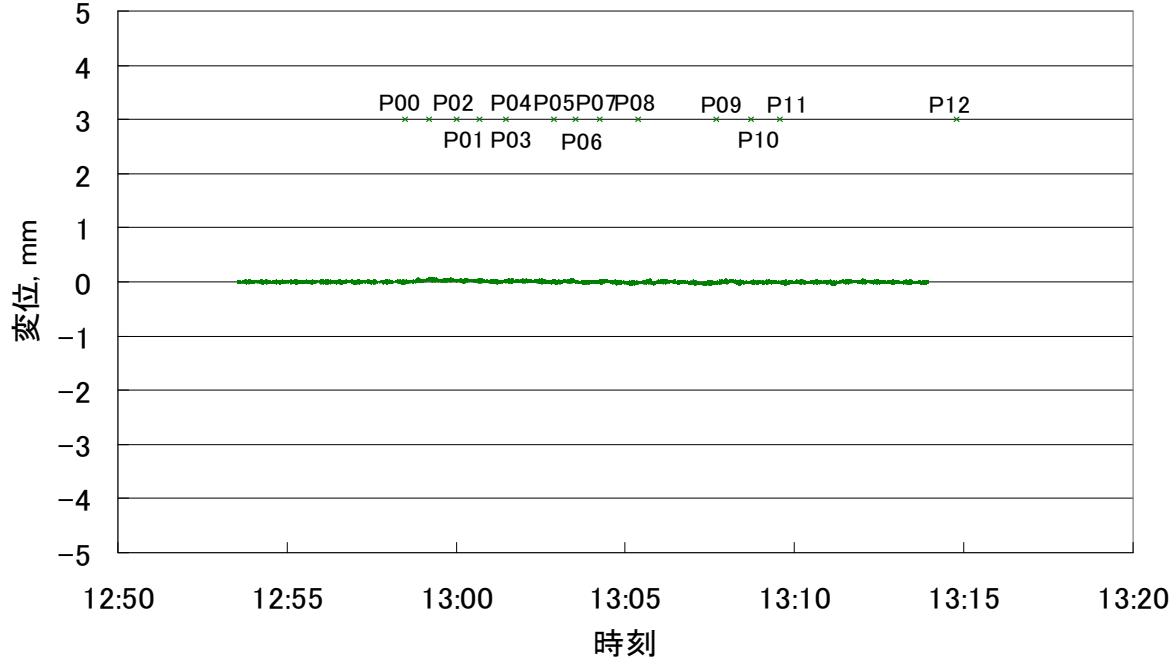


図 25 搬送中の設置台に対する梱包石材の水平変位

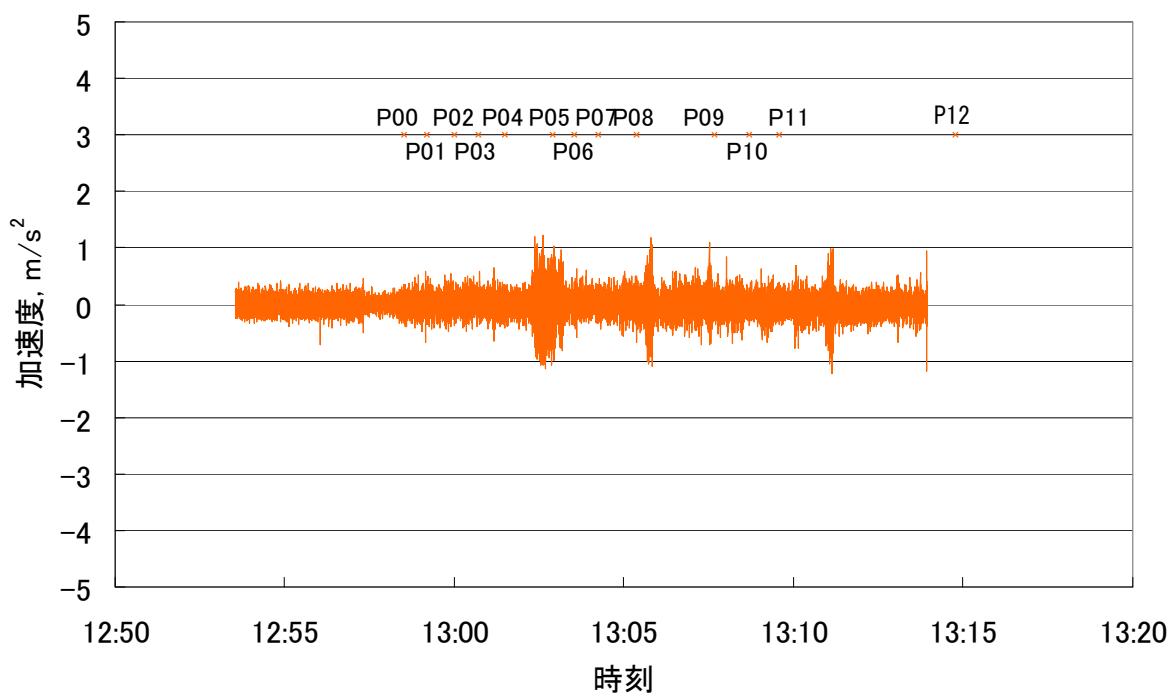


図 26 搬送中の荷物室の垂直方向加速度

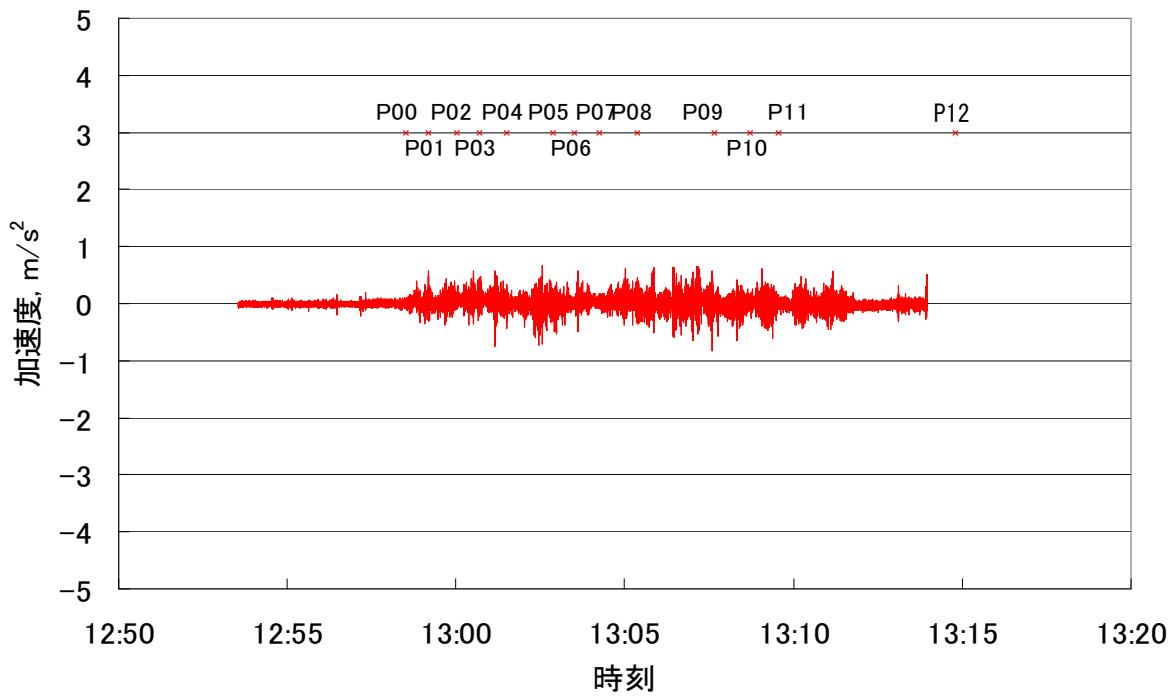


図 27 搬送中の設置台の垂直方向加速度

3. 8 搬送中の石材の状態

図28に天井石3を搬送した際に観測されたAEのカウント数とコンタクトマイクにより収録された音の音響解析の結果を示す。天井石3の搬送中には2回のAEといいくつかの音が検出されている。このうち、坂道での車両からの音、咳の音、後方の扉を開放した時の音、固定金具を操作しているときの音が確認されている。AEが観測された13時10分57秒(赤丸の部分)の前後10秒および前後2秒の音響解析の結果を図29に示す。観測された音自体はあまり大きなものではなく、瞬間的な2つの音であることがわかる。これまで測定した凝灰岩の破壊音とは周波数が異なっていること、AEのカウント数としても5カウントときわめて低いことなどを考え合わせると、石材が破壊した際に発生したものとは考えにくい。

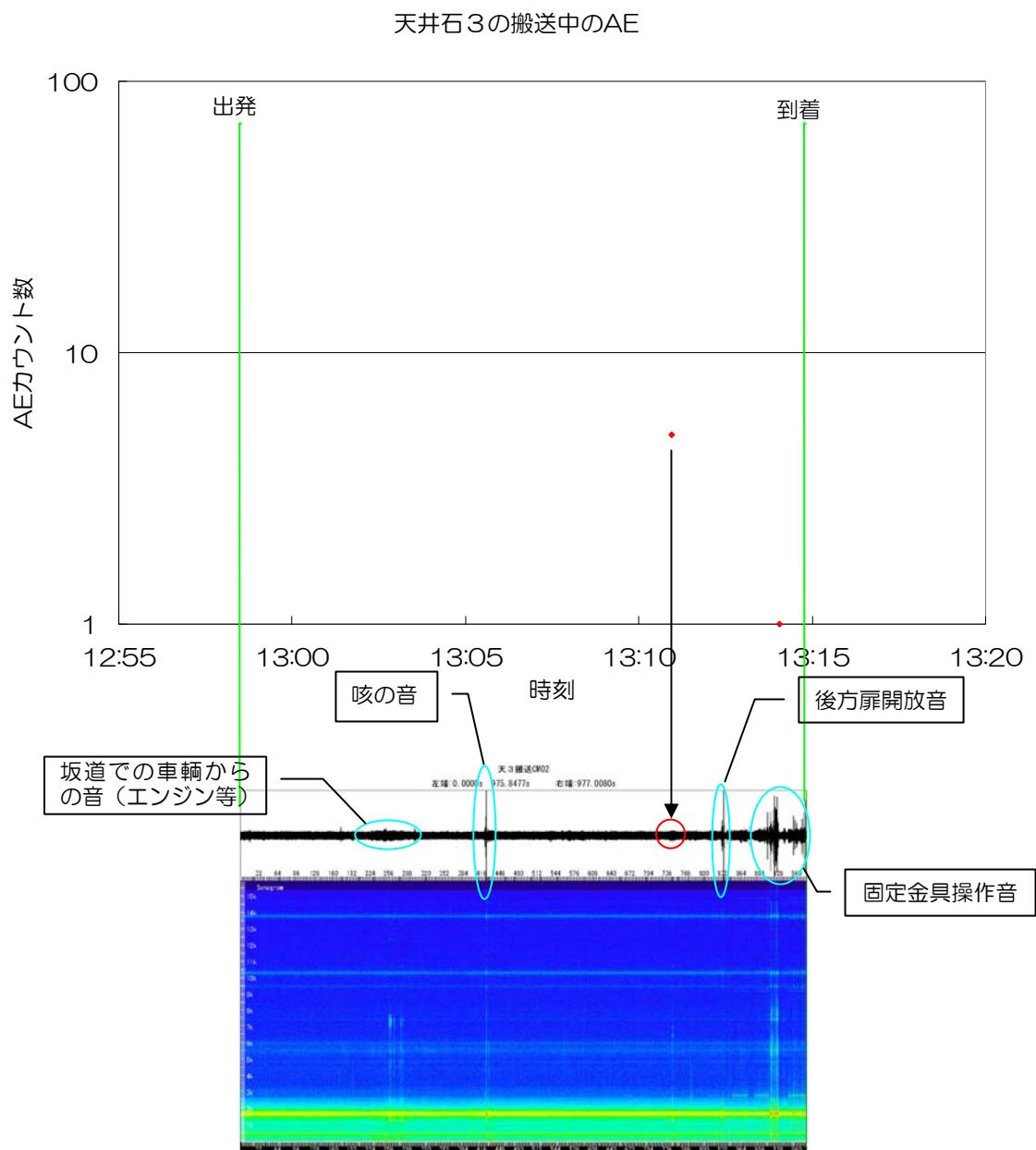


図28 搬送中に計測されたAE（上）とコンタクトマイクにより収録された音の音響解析（下）

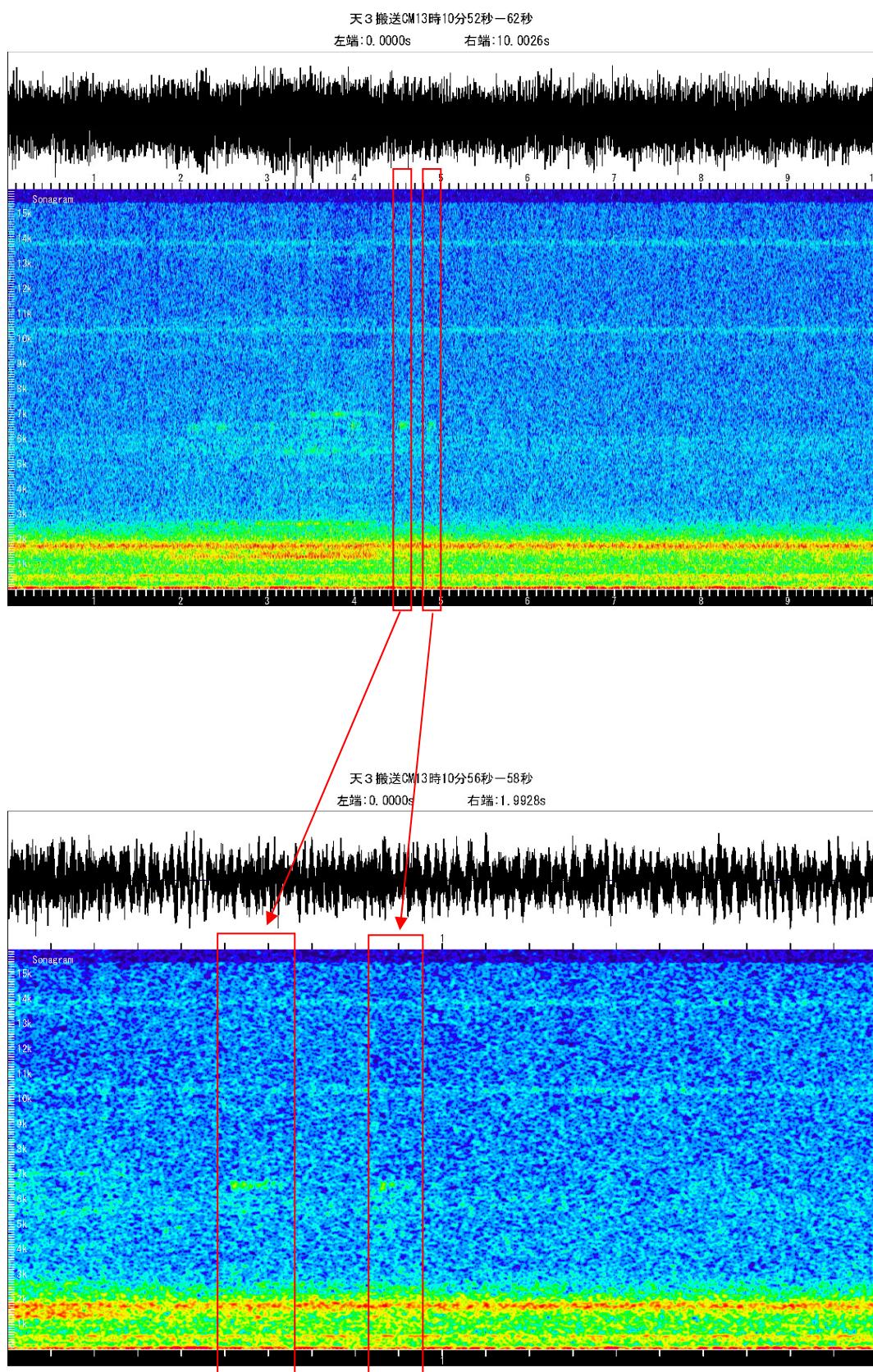


図 29 AE が観測された近傍の音響解析



図 30 門形リフターによる吊り上げ・移動



図 31 修理施設への搬入

3. 9 修理施設への搬入

修理施設に到着後、搬送車輌を後進させて搬入口前に設置した補助台の手前で停止させ、後方扉を開放した。その後、補助台に車輌を接近させ、荷物室内のレールと補助台のレールがまっすぐになるように位置合わせをおこなった。この段階で、設置台を固定していた前方のワイヤーおよび後方のレバーブロックを解除した。次いで、車輌本体のエアサス圧を開放して一旦車輌を下げた後、車輌後方下部の油圧ジャッキで車輌後部を上昇させて補助台のレールとレベルを合わせた。荷物室内のレールと補助台をボルトで固定し、設置台を補助台へと移動させた。

設置台に移動させた梱包石材を門形リフターで吊り上げて、修理用の台の上に積載し、梱包枠を取り外した。次いで、電動リフトにより石材を修理施設の搬入口内に搬入した。

修理施設の搬入口に搬入された石材は、文化庁、東京文化財研究所、奈良文化財研究所ならびに修理技術者により検収がおこなわれ、一連の搬送作業を終了した。

4. まとめ

解体により取り出された高松塚古墳の石室石材を修理施設まで安全に搬送する方法を検討し、十分な準備を整えた上で、搬送を実施した。

搬送にあたっては、石材の状況ならびに搬送の状態を把握するための種々のモニタリングをおこなうとともに、絶えず担当者の目視による監視をおこなった。その結果、順次取り出された石室石材をすべて無事に修理施設まで搬送することができた。

この報告で示したモニタリングなどの結果は一部であるが、16石すべてについてほぼ同様の結果が得られている。このモニタリングは、搬送工程において安全性を確保するという面においてきわめて有効であった。しかし、それのみならず、今後、搬送についてなんらかの検証が必要となった際にも重要な記録として活かすことができるものと思われる。

特殊搬送車両走行記録

搬送石材 : _____ (_____ ton) 総重量 : _____ ton

エアサスペンション圧設定 : _____ MPa 荷物室内温度設定 : _____ °C

走行日時 : 2007 年 _____ 月 _____ 日 運転手 : _____

助手席監視 : _____ 荷物室監視 : _____

先導車乗員 : _____

走行機器セッティング

- 変位計 1
- 変位計 2
- 加速度計 1
- 加速度計 2
- コンタクトマイク
- AE センサー
- 温度センサー
- GPS
- ビデオカメラ (壁面監視)
- ビデオカメラ (助手席)

計測機器初期合わせ

- 制御コンピューター
- GPS
- AE
- ビデオカメラ (壁面調査)
- ビデオカメラ (助手席)

動作テスト

- m-di LOGGER
- EDS400A
- AE win
- コンタクトマイク

計測開始時間

温湿度データ : _____ : _____ 変位・加速度データ : _____ : _____

A E データ : _____ : _____ 壁面観察ビデオ : _____ : _____

G P S データ : _____ : _____ SECOMビデオ : _____ : _____

2007 年 月 日

参考資料IV 取合部の遮蔽施設の設置とPC版の撤去

石室解体・処理班では、石室解体作業に先立ちPC板撤去のための準備作業として、取合部の遮蔽施設の設置作業、そしてPC版の撤去作業について石室解体班が協力したので、その概略について報告する。

I. 取合部の遮蔽施設の設置

PC版の撤去にともない外気が石室内部に流入するのを防ぐため、取合部を隔離できる応急の簡易遮蔽施設を作製した。なお、この施設は断熱覆屋が設置されるまでのほぼ3ヶ月間にわたり使用するものである。長期間にわたって高湿度の環境におかれるので、この工事に先立ち、使用材料すべての防黴処置をおこないカビの発生を抑制した。

1. 取合部工事用材料の防黴処置

防黴処置の対象となった施設建設に使用する材料は、構造としての材木、壁材としての板材、断熱材としてのスタイロフォーム（ポリスチレン製で厚さが10cm、5cm）、そして床部分などに使用する砂と土嚢袋である。防黴処理は、2006年10月23日、奈良文化財研究所・保存修復科学実験室野外作業場で実施した。実施にあたっては、石室解体班（飛鳥建設も参加）と生物班が共同で実施し、その指導にあたっては吉田太郎氏（サラヤ株式会社 研究開発）の協力を得た。なお、処理にあたっては、カチオン 2-D B - 800 E（商品名）の5%水溶液を作製して、木材とスタイロフォームは連続スプレー法と塗布（図2.1）、砂は乾燥させた後、ミキサーを用いて約10分間溶液を混合攪拌して均一になるようにした後、自然乾燥した（図2.2）。土嚢袋はデッピング法により溶液を含浸した後、自然乾燥させて処理した砂を袋詰めした。すべての処理を終了して資材を点検した後、高松塚古墳へ運び込んだ。



図2.1. 取合部に使用する材木の防黴処理

2. 取合部の遮蔽施設の建設

遮蔽施設は、取合部の東西の側面を遮蔽できる断熱構造の壁を作り、さらにPC版鋼材下部（PC版の庇梁の下）に断熱構造の天井を設けて、南壁石など取合部に露出する石材を外気から遮断して保存環境を維持するものである。

工事に先立って取合部の石室側の扉外部付近にあるステンレス製の柱、サポート金具と盗掘孔への足台を撤去して、作業スペースを確保した。まず、露出している南壁石などはすべて保護シートで覆って養生してから、取合部の砂利敷き部分を防黴処理した砂を詰めた土嚢袋（砂袋）を均一に敷き詰めて基礎を作った。次に扉の下部に砂袋に密着するように基礎材を東西方向に水平に設置して、上部からの荷重に耐えられるように取合部内部に骨組構造柱を組み込んだ（図3.1）。いっぽう、PC版の周辺は合成樹脂製の偽土で固められていたので、PC版撤去時に周辺の版築土を崩壊させる危険があったので、丹念に偽土をすべて切り離した。また、PC版の組み込みボルトが偽土で埋められているので、PC版が取り外せなくなるので、ボルト位置を探し出して偽土を取り除く作業をおこなった。もちろん、人が入れるスペースがないので、手探り状態での作業となつた。PC版に詰められた



図2.2. ミキサーを用いた砂の防黴処理

偽土を外したところ、ほぼ5cm厚さの大小さまざまな発泡スチロールがその裏に詰め込まれていたので(遺構とPC版の隙間)、これも取り除いて、周辺を清掃した。工事に取りかかる前にはこれらの情報は知らされていなかったので、スチロールがランダムに入れられている目的等がわからず、取り除いて良いものか判断できないこともあったが、間もなくPC版を撤去するので、不必要的ものと考えて、取り除いた。これらの作業中にPC板や周辺の土の状態を詳細に観察したところ、上部にはクモの巣が確認されたほか、結露によって部分的にPC版の腐食が進んでいること、東側上部の土は亀裂によりブロック状を呈し不安定であることや、樹木の根が垂れ下がっている状態などが観察され、取合部は良好な状態ではなかった。

基礎材を入れて、上記の作業と調査を終了して、天井の庇の構築に取り掛かった。なお、PC版の切断に使用するコアリング装置からの漏水が石室に及ぶことを防止するため、庇上部には防水用ゴムシートを貼り付けて、防水対策を講じた。また、庇先端は天井石から上部10cmに位置する空間を確保しているので、上部からの荷重に耐えられるように、防黴処理した砂袋を充填した(図3.2参照)。断熱対策としては、天井、側面にわたり外部に10cm厚さのスタイロフォームを板材に密着させて設置した。板材のつなぎ目など外気が進入しないように、発泡ウレタン樹脂の吹付けによるフォーム(独立気泡を作るので断熱効果は格段に向上升す)を形成し、完全な密閉空間を作つて作業は無事終了した
(施工は飛鳥建設株式会社、指導協力には石室解体処理班が担当した)。

II PC板の撤去工事

PC版の撤去工事は11月13日より開始され、PC版の撤去時に使用する足場構造の設置から始めた。なお、足場の設置にあたっては、遺構を損傷することができないので土の中に埋めずに保護用木製台の上に設置した。基礎構造の上にはH鋼からなるチェーンブロック用のレール材が2本設置され、南側レールには2機、北側のレールには1機のチェーンブロックが取り付けた。このチェーンブロックで吊り上げられたPC版は、レールを使って移動して、途中でクレーン車のクレーンに中継して搬送車に積み込む計画を立てた。

まず、上部の庇スラブPC版を覆う押さえ石に取り付けられていたフックにワーヤーをとりつけて、レール1本を用いて、チェーンブロック2基を用いて吊り上げた。吊り上げには、東側を少し吊り上げて、次いで西側を上げて、さらに全体を吊り上げるようにした。吊り上がった段階で東西部分に空間孔が生じたが(図4.1)、取合部を密閉しているので問題とはならなかった。また、押さえ石の東側の空間孔部分には、クモの巣がたくさん発見された。取合部からもこの様子は観察されている。また、結露による腐食やさびも顕著に観察された(図4.2)。

押さえ石を撤去して、庇スラブPC版撤去の準備をおこなった。庇スラブは中央で東西に二分しており、埋め込みボルトとナットによって両者を接続する形態をとっていた。また、庇スラブの上には5cm厚さのスタイロフォームが設置されTAE仕上げされていた。これらを取り除いて、セメントで埋められていたナット部分を掘り出して、接続を解除した。

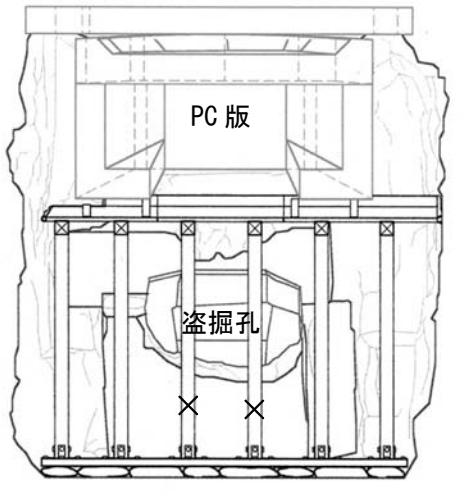


図3.1 取合部に作られた骨組み構造
点検のため、石室内を観察する必要があるので、×の柱は取り外せるようにしてある。

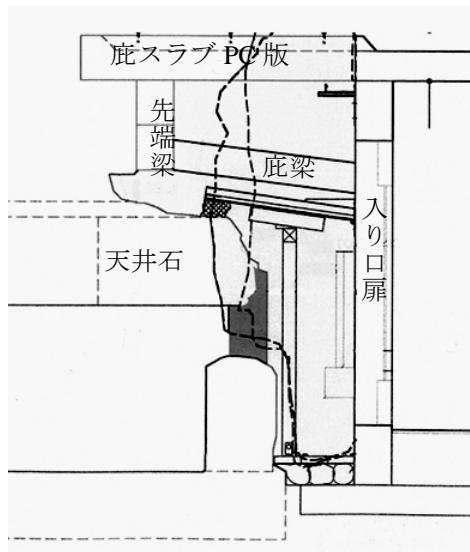


図3.2 取合部の断面構造概略図

庇スラブ PC 版は、西側部から取り外すことにした。取り外し作業については、前室扉の上部境目からボーリングして、順次コアを抜き取る方法によった。コアリング機器の先端には、ダイヤモンドビットを取り付け、コンクリートと鉄筋を連続したコアリング（採取されたコアは直径が 5.5cm）によって切断した。いっぽう、コアリングには冷却水を要するため、冷却水が多量に流れ出して石室に流入しないように、コアを完全に抜かずに、手前 2 cm- 1 cm で止めて、冷却水をこの孔に集めて集中して吸引回収する方法を採用した。なお、採取したコアには 1.5cm ϕ の鉄筋が水平方向に 4 本前後、垂直方向にも数本存在しており、鉄筋の切断には多くの時間を費やした。西側庇スラブ PC 版の切断には 18 本のコアリングが必要であった。切断後は南北 2 機のチェーンブロックを用いて吊り上げ（図 4.3）、東側に移動して回収した。推定重量は約 800kg である。西部分の庇スラブ PC 版が取り外された状態では、取合部に設置した遮蔽施設の天井が観察されたが、取合部、石室内部の温度・湿度変化は全くなかったと報告を受けた（図 4.4）。同様な方法で東側の庇スラブ PC 版を撤去した。さらに、奥（北）に位置する庇先端梁（つなぎ PC 版）（図 4.5）を取り除くため、側面のボルト・ナットを取り外して接続を解除し、それぞれ吊り上げて移動、撤去した。

最後に、東西の両側に残る庇梁の撤去をおこなった。この梁は深さ方向が大きく、垂直方向に約 80cm のコアリングが必要であった。一度に 80cm のコアリングは危険なので、上下深さ方向を 2 段階方式にしてコアリングした。2 段目の採取コアは直径が 4 cm である。西側の庇梁を撤去した後、東側の撤去にとりかかり、予定された PC 版の撤去はすべて完了した（図 4.7）。



図 4.1 押さえ石を吊り上げた状態（東側に開いた空間が見える）

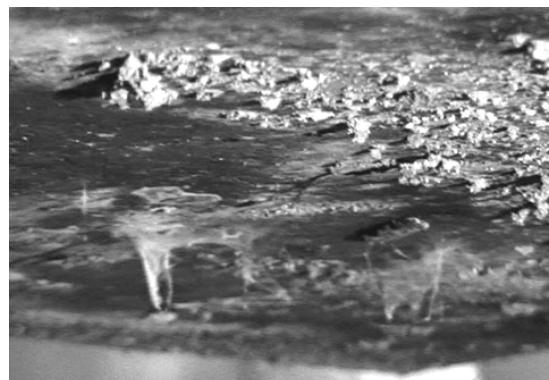


図 4.2 押さえ石の空間部分には垂れ下がクモの巣が観察された



図 4.3 庇スラブ PC 版（西）の吊り上げ



図 4.4 庇スラブ PC 版（西）の取り上げ後

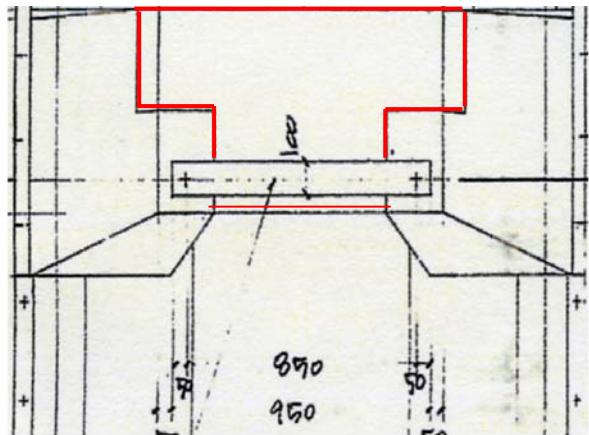


図 4.5 底先端梁の位置と状態



図 4.6 底梁のコアリング



図 4.7 PC版がすべて撤去された状態