

石材の搬送について

1. 石材搬送の安全性確保

高松塚古墳石室の解体により取り出された石材はそれぞれ壁画面を上向きにして梱包された後、国営飛鳥歴史公園事務所に隣接した修理施設に搬送される。搬送にあたっては、石室石材および壁面に損傷を与えないように搬送時の振動を軽減するとともに、壁画面への結露を防ぐために搬送車荷物室内の温度をコントロールできる特別仕様の搬送車両を用いて、安全性を確保する必要がある。

しかしながら、搬送車両の性能がいかに高くとも、搬送に使用する路面の状況如何によっては衝撃などの突発的な振動を十分除去できるわけではない。したがって、特殊搬送車両を使用して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う必要がある。また、走行試験を通して、走行速度などの搬送条件を設定することも必要となる。

走行試験においては、

- (1) 石材の状態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ー
- (4) 車輛の走行位置を特定する全方位位置記録システム (GPS)
- (5) 搬送中の微細な破壊の音波 (可聴音とアコースティックエミッション)

による監視システムを特殊搬送車両に搭載し、データを収集・解析する。

実際の石室石材の搬送においても、上述のシステムを用いてモニタリングをおこない、搬送時の石材の状況を監視する。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検証するための情報としても重要なものとなる。

2. 特殊搬送車両の開発

高松塚古墳石室石材を搬送するための特殊搬送車両に要求される項目としては、以下の通りである。

- (1) 石室石材を安全な方法で車輛に積み込むこと。
- (2) 石室石材および壁面に損傷をおよぼすような搬送中の振動を軽減すること。
- (3) 搬送中の温度差による壁画面への結露を防止すること。
- (4) モニタリングシステムを搭載できるようにすること。

これらの要求項目それぞれに対してとられた方法を以下に述べる。



図1 特殊搬送車輛外観



図2 石材の積み込み

(1) 石室石材を安全な方法で車輻に積み込むこと。

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いことから、積み込みは荷物室後方からに制限される。このため、石室石材の特殊搬送車両への積み込みには、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、石材を積載する方法を採用した。荷物室と補助台の連結は、連結部で屈曲することのないように車輻に付属している油圧ジャッキとエアサスペンションで調整する。設置台の移動は補助台に取り付けられているウインチを用いておこなう。また、設置台には積載の際の衝撃を吸収するとともに、梱包された石材がすべることのないように厚さ 10mm のゴムが敷かれている。

(2) 石室石材および壁面に損傷をおよぼすような搬送中の振動を軽減すること。

一般に美術品輸送専用車両にはエアサスペンションが装備されており、このエアサスペンションによって振動はかなりの程度軽減されている。しかしながら、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となること、および石材には崩落の危険性を有する漆喰壁画が存在することから、さらに振動を軽減する必要がある。搬送中の振動のさらなる除去に対しては、設置台を4つのエアサスペンション上に配置することでおこなう方法を採用した。すなわち、車輻本体のエアサスペンションに加え、設置台のエアサスペンションを装備したいわゆる二重のエアサスペンションにより振動を軽減することになる。設置台のエアサスペンション圧は、車輻本体のエアサスペンション調整用コンプレッサーとは別に装備したコンプレッサーにより、梱包された石材の重量に応じて調整する。

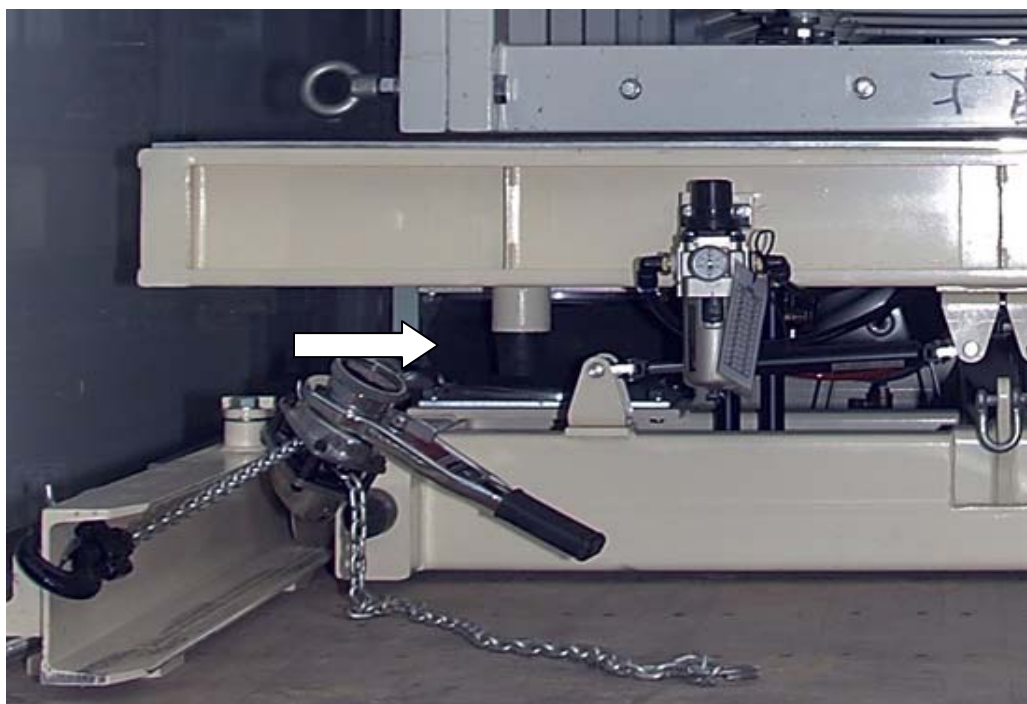


図3 設置台のエアサスペンション（白矢印）と圧力調整バル

(3) 搬送中の温度差による壁画面への結露を防止すること。

搬送中の結露を防止するために、石材温度にあわせて荷物室内の気温を下げるができるように、クーラーを設置した。石材温度、特に漆喰面の温度を計測し、その温度よりも荷物室内の気温を低く設定することで、漆喰面における結露を防止することができる。

(4) モニタリングシステムを搭載できるようにすること。

モニタリングシステムは前述のように、1) 石材の状態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・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ー、4) 車輻の走行位置を特定する全方位位置記録システム (GPS)、5) 搬送中の微細な破壊の音波 (可聴音とアコースティックエミッション) による監視システムである。これらの電源は車輻に別付けのバッテリーから供給される。



図4 取り付けられた変位計と加速度計



図5 データ収録装置

3. 特殊搬送車輻を用いた走行試験

開発された特殊搬送車輻に天井石実寸大模型を積載し、高松塚古墳から修理施設までの経路を走行試験した。

走行試験の目的は、

- (1) 搬送条件の検討
- (2) 路面状況の確認と対策の検討

である。

(1) 搬送条件の検討

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、特殊搬送車輻に天井石南第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。

・ 走行速度の検討

走行速度として、5 km/h、10 km/h および 15 km/h の3つの速度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 6 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。

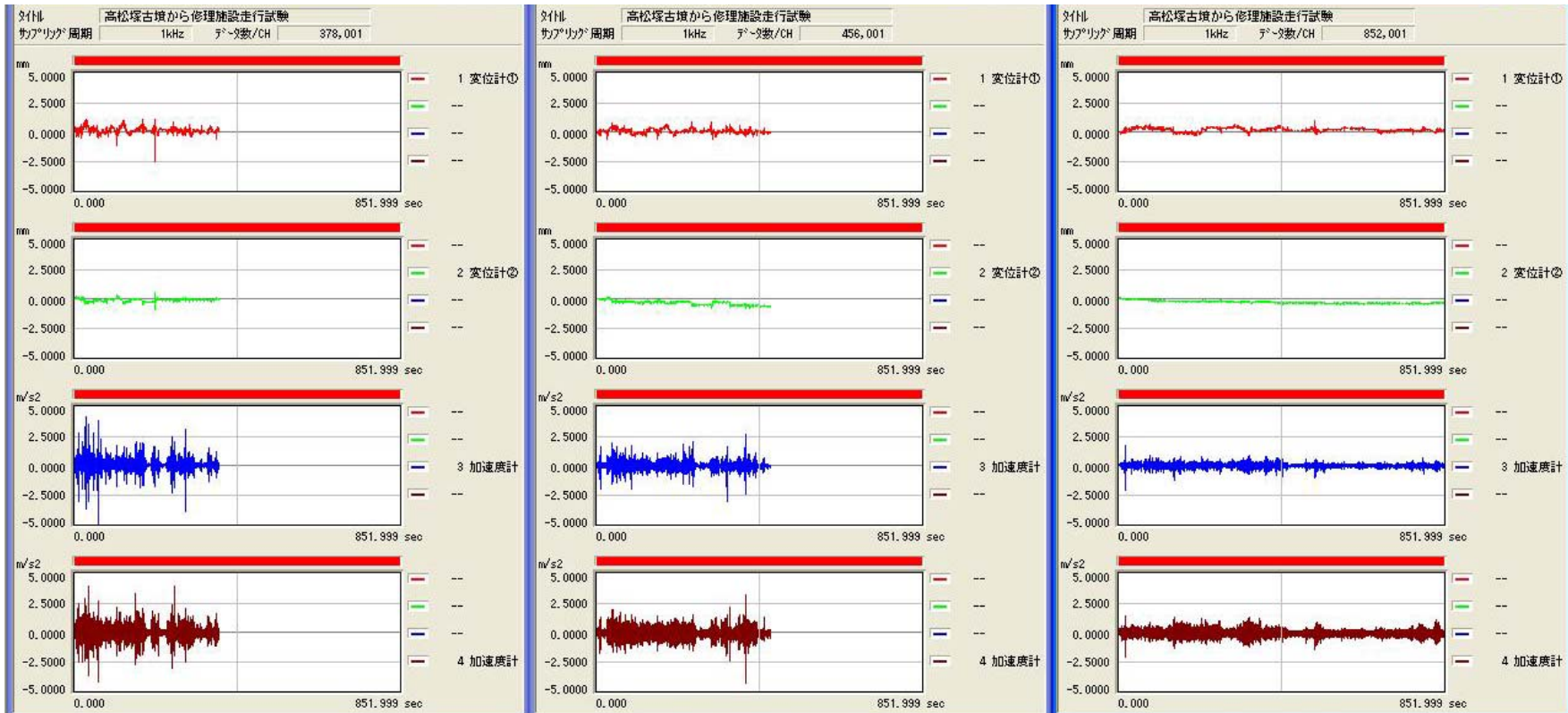
速度が速くなるほど、設置台上で梱包石材が動くこと、および設置台および荷物室のゆれが大きくなることが明らかとなった。しかし、設置台上での石材の動きは 15km/h 走行時においても高々瞬間的に 1～2mm 程度であった。この動きは実際には設置台上に敷かれたゴムシートに梱包石材が瞬間的にめり込んだものと考えられる。一方、設置台の加速度は 5km/h 走行においてほぼ 1m/s²内に収まっているのに対し、それ以上の速度では 10km/h 走行で 2m/s²、15km/h 走行で 5m/s²に達しており、かなり大きなゆれを生じていることが明らかとなった。しかしながら、5km/h 以下での走行は、ノッキ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、特殊搬送車輻による石材の搬送速度を 5km/h とすることとした。

・エアサスペンション圧の設定

梱包石材（重量 3t）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 3t 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 0.20MPa である。そこで、0.16、0.18、および 0.20MPa 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 5km/h とした。

重量 3t の積載物に対して最適とされる 0.20MPa では、設置台および荷物室ともにほぼ 1m/s^2 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 2m/s^2 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 0.16MPa に設定した試験では、 5m/s^2 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的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を 0.30MPa に設定し、走行速度 30km/h で走行した際には、荷物室のゆれがあまり大きくないのに対して、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（ 10m/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、内部断熱覆屋の 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。



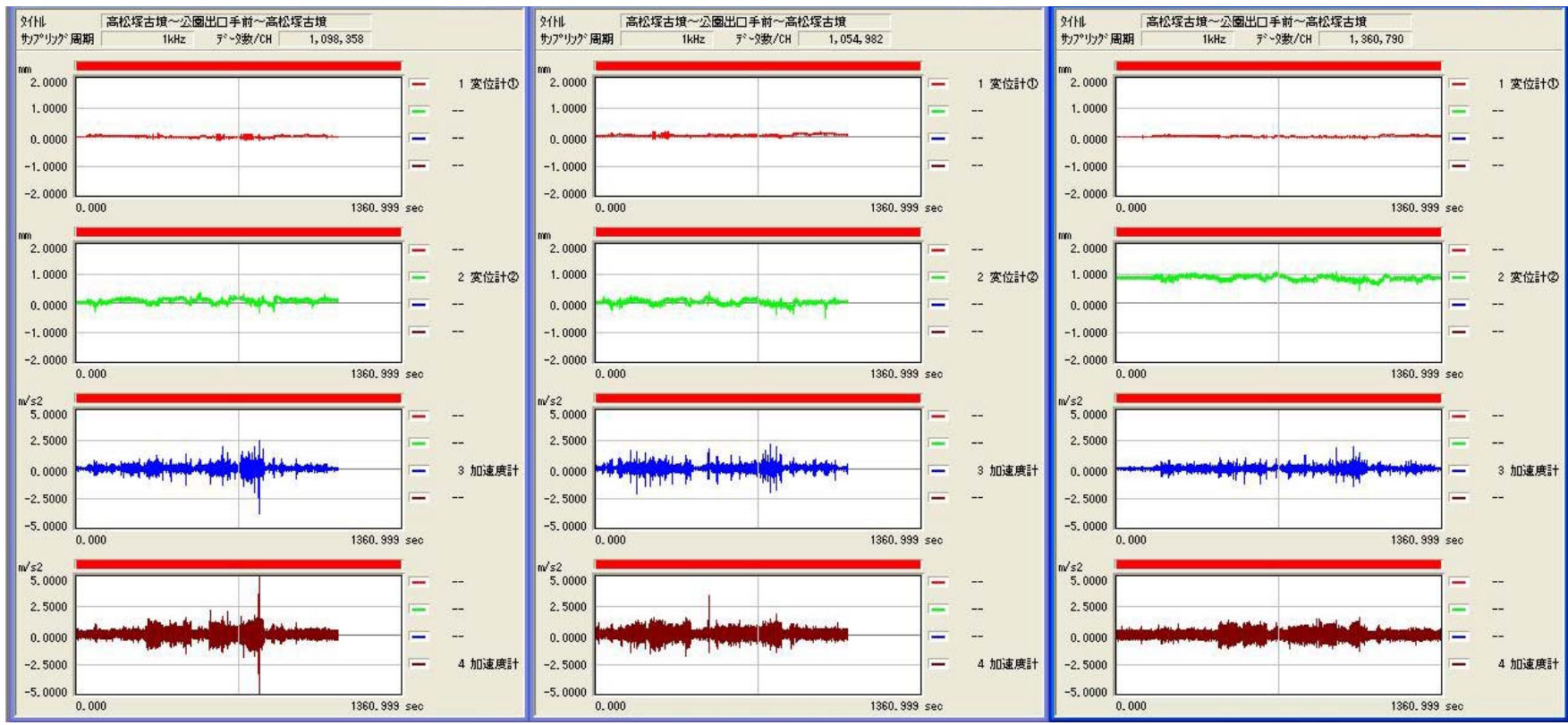
15km/h 走行

10km/h 走行

5km/h 走行

図 6 走行速度の検計

上から設置台上での石材の垂直方向の変位、同水平方向の変位、設置台のゆれ、荷物室のゆれ



0.16MPa

0.18MPa

0.20MPa

図7 設置台のエアサスペンション圧の検討

上から設置台上での石材の垂直方向の変位、同水平方向の変位、設置台のゆれ、荷物室のゆれ

(2) 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、特殊搬送車輛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がある部分については、厚さ 20mm 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。

図6の 5km/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に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。

この他にも大きなゆれを観測する部分については、路面状況の確認とその対策を講じることとしており、今後、さらに走行試験を通して対策を検討していく。

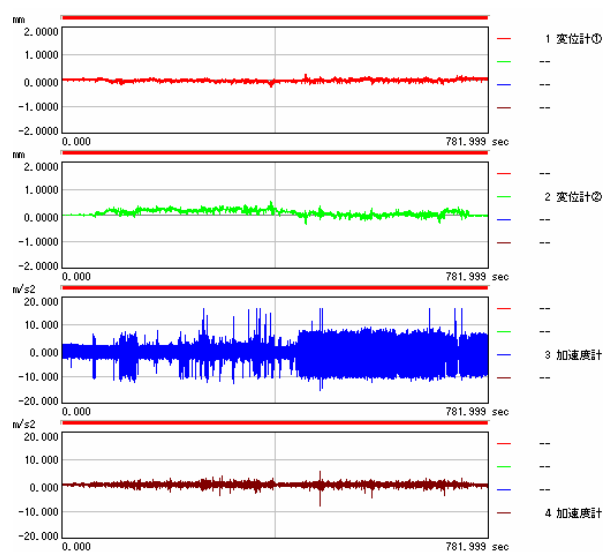


図 8 エアサスペンション圧
0.30MPa による走行 (30km/h)