

精密機器用除振・免震床の開発

Development of Earthquake and Micro-Vibration Isolation Floors for Precision Mechanical Equipment

超LSIやレーザ応用製品などの加工はきわめて微細になりつつあり、地震などの強地震動はもちろんのこと、わずかな振動によっても製品の損傷が避けられない状況にある。その対策として、微振動から強地震動までの広範囲の振動を除く機能を兼ね備えた除振・免震床を先に開発した。しかし、この装置は高さが1.8 mあり、用途が限られていた。そこで装置の改良を図り適用範囲を拡大するために、装置高さを低くすることと、同時に鉛直方向の微振動除振性能をいっそう向上させることを目的とした。

今回の開発では、水平方向の除振・免震機構は従来と同様であるが、床高さの $\frac{2}{3}$ を占める鉛直方向の除振・免震機構を抜本的に改良し、実験モデルによる微振動実験および地震波加振実験とその応答解析を通して、性能を明らかにした。その結果、装置の高さ0.6 mを実現でき、鉛直除振性能も加速度で応答が入力の $\frac{1}{8}$ に、また変位で8割に低減し良好な結果を得た。すでに、本装置を実機に応用して効果を発揮している。

鶴田 顕*	Ken Tsuruta
西山 国雄**	Kunio Nishiyama
福井伊津志*	Itsushi Fukui
藤田 隆史***	Takafumi Fujita
竹下 章治****	Akiharu Takeshita

1 緒 言

超LSIやレーザ応用製品などの精密製品を加工する工場では、工場内設備からの振動や付近の交通振動によって製品の加工、検査の精度に大きな影響を受ける¹⁾。また、地震動により大きな損害²⁾を受けることがあり、最近の関東地方の中小地震によっても損害が発生している。そこで、このような設備には、微振動から強地震動までのすべての外来振動を吸収する除振・免震床の開発が望まれる。日立プラント建設株式会社では、東京大学生産技術研究所および株式会社日立建設設計と共同で多段積層ゴム、引張コイルばねを用いた既存製品とまったく異なる方式の除振・免震床を国内で初めて開発し、先に報告³⁾した。しかし本装置は、引張コイルばねを用いて鉛直方向の振動を吸収するために、装置の高さが1.8 m程度となる。一般に免震効果を発揮するには、装置の固有振動数をできるだけ小さくすることが望ましいが、固有振動数を小さくすると静的に大きなたわみ(1 Hzで250 mm程度)が生じる。従来装置はこの固有振動数を低くすることと、安定性を保つため、引張コイルばね(固有振動数:0.8 Hz)を用いたが、高さが高くなった。

一方、本装置では鉛直方向の微振動の変位が低い周波数で

増幅し、性能がまだ十分でない。そこで、低床化(目標0.6 m)とともに微振動除振性能向上を目標に、装置の改良を試みた。

2 除振・免震床の基本構造

先に開発した従来の除振・免震床の基本構造⁴⁾を図1に、本開発の低床形除振・免震床の基本構造を図2に示す。また、従来方式の除振・免震床の仕様、本開発の低床形の仕様目標を表1に示す。従来方式は、主要部材として多段積層ゴムと引張コイルばねおよびダンパから構成されている。水平方向の振動は多段積層ゴムと水平用ダンパの組み合わせで、微振動から強地震動までの振動を連続的に吸収する。鉛直方向の振動は浮床を2次元除振・免震床(水平2方向の振動を吸収する床)から吊(つ)っている引張コイルばねと鉛直用ダンパの組み合わせで振動を吸収する。このような構造で、水平方向の固有振動数は微振動除振、免震とも0.4 Hz、鉛直は微振動除振で2.0 Hz、免震で1.0 Hzを持つ。この方式は、引張コイルばねを用いるため、前述したように装置の高さが1.8 mと高くなり、適用範囲が限られる。また、鉛直方向の微振動除振に最適なダンパがないため、低い周波数で変位が増幅する性能

* 日立プラント建設株式会社松戸研究所 ** 日立プラント建設株式会社空調事業本部 *** 東京大学生産技術研究所 工学博士
**** 株式会社日立建設設計建築本部建築設計部

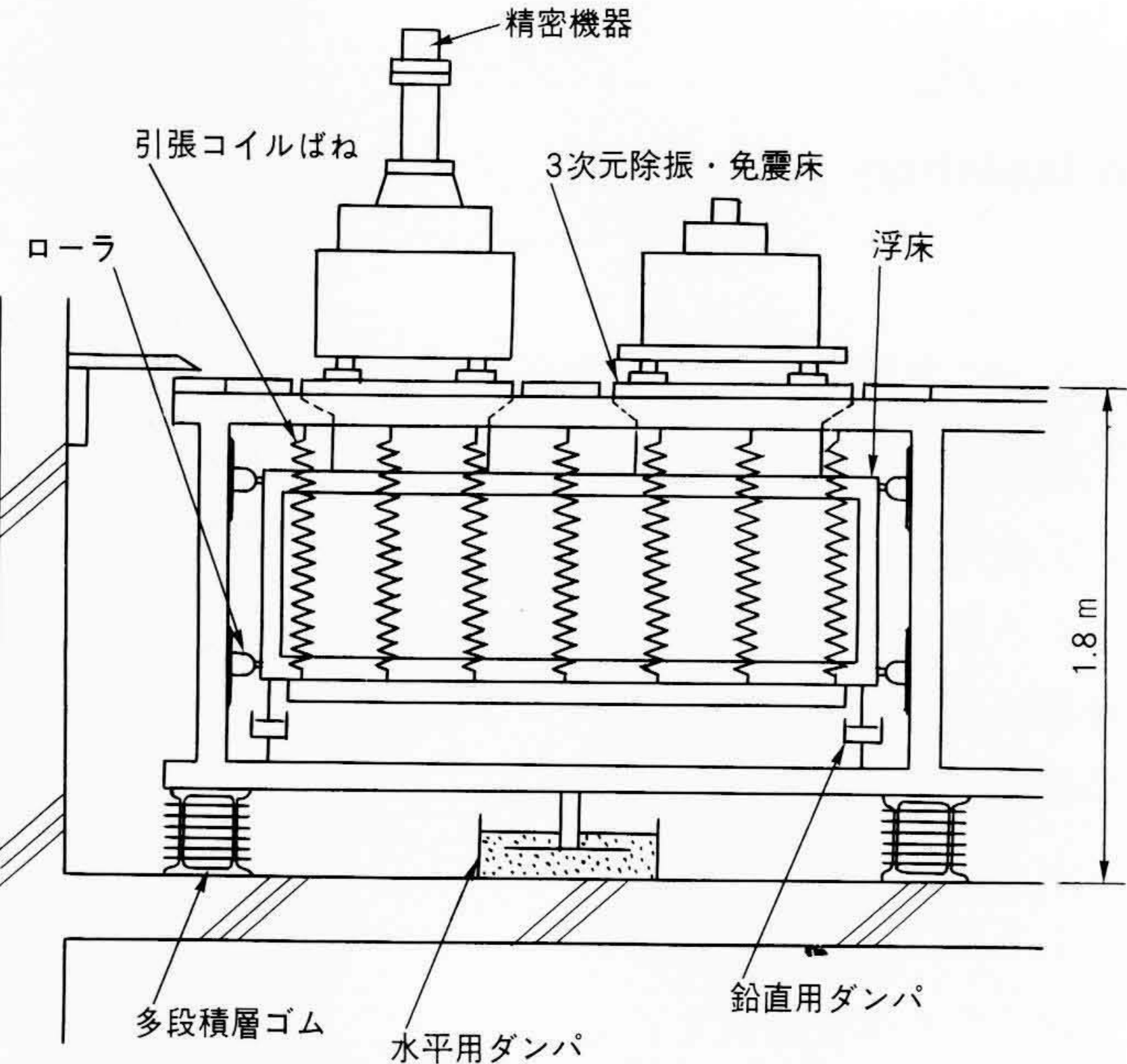


図1 従来の除振・免震床の基本構造 多段積層ゴム，引張コイルばねおよびダンパで，微振動から地震動までの除振・免震を可能にする。

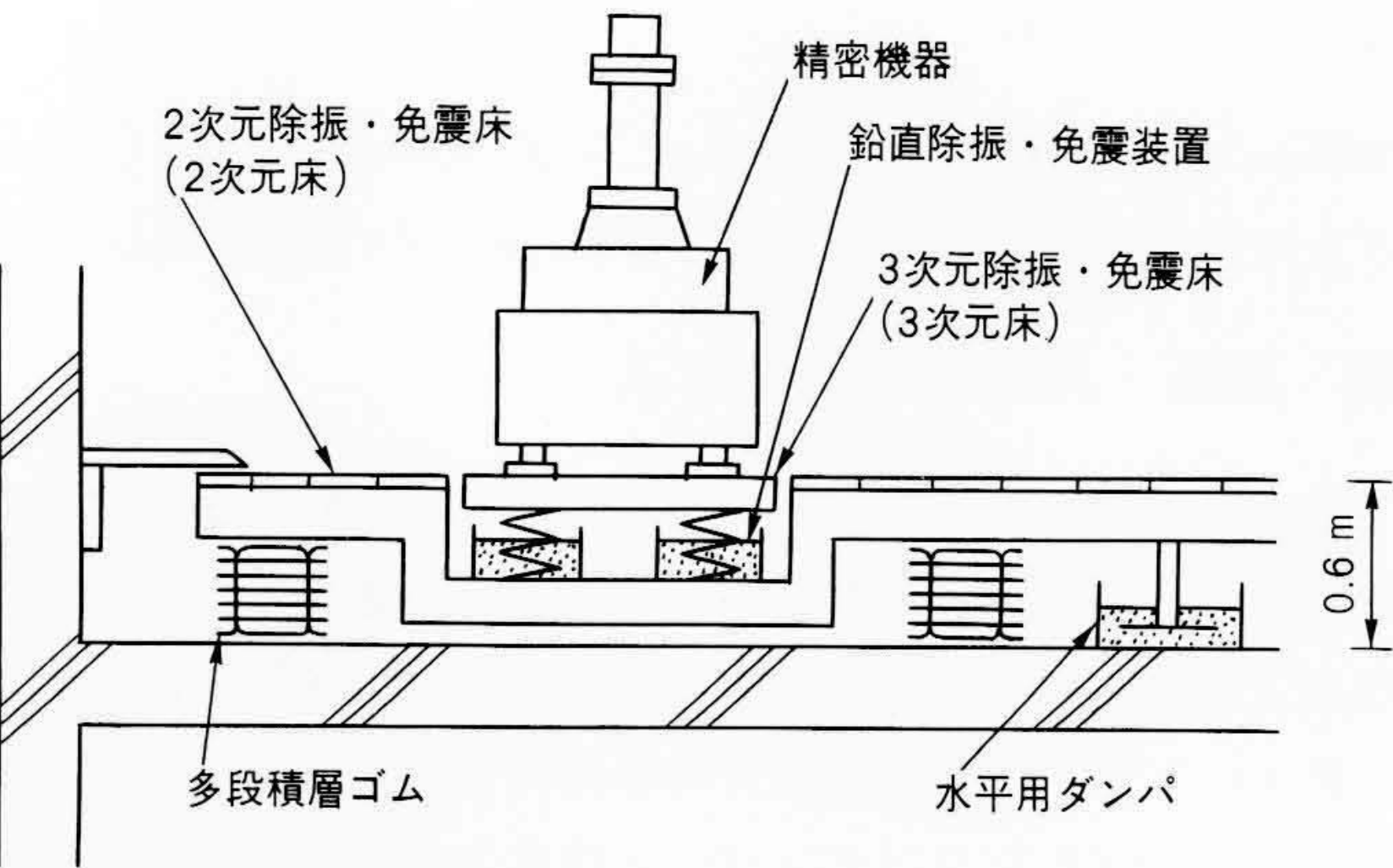


図2 本開発の低床形除振・免震床の基本構造 多段積層ゴム，鉛直除振・免震装置および水平用ダンパで構成され，システムの高さは0.6 mである。

劣化がある。これらの点を考慮して，装置の高さが0.6 m以下を目標に装置の改良を図った。改良装置(低床形)は，主要部材として多段積層ゴムと鉛直除振・免震装置，水平用ダンパから構成されている。水平方向の振動は，従来同様，多段積層ゴムと水平用ダンパの組み合わせで，鉛直方向の振動はまったく新しい方式の鉛直除振・免震装置で連続的に振動を吸収する。本装置の特徴は，高さを0.6 mにできることである。それを可能にしたのが図3に示す鉛直除振・免震装置である。機器搭載台と直接に接触する部材はコイルばねで支持され，

表1 除振・免震床の従来方式の仕様と低床形の仕様目標 低床式は高さ0.6 mで従来の1/3になっている。

仕様	従来方式	低床形(目標)
項目		
m ² 当たりの搭載質量	～500 kg	～500 kg
ユニット寸法	幅1.8×奥行3.6×高さ1.8(m)	幅2.8×奥行2.8×高さ0.6(m)
固有振動数	微振動 { 0.4 Hz(水平方向) 除振 { 2.0 Hz(鉛直方向)	微振動 { 0.4 Hz(水平方向) 除振 { 1～2 Hz(鉛直方向)
	免震 { 0.4 Hz(水平方向) 免震 { 1.0 Hz(鉛直方向)	免震 { 0.4 Hz(水平方向) 免震 { 1～2 Hz(鉛直方向)

注：搭載質量，大きさは任意に設計変更が可能である。

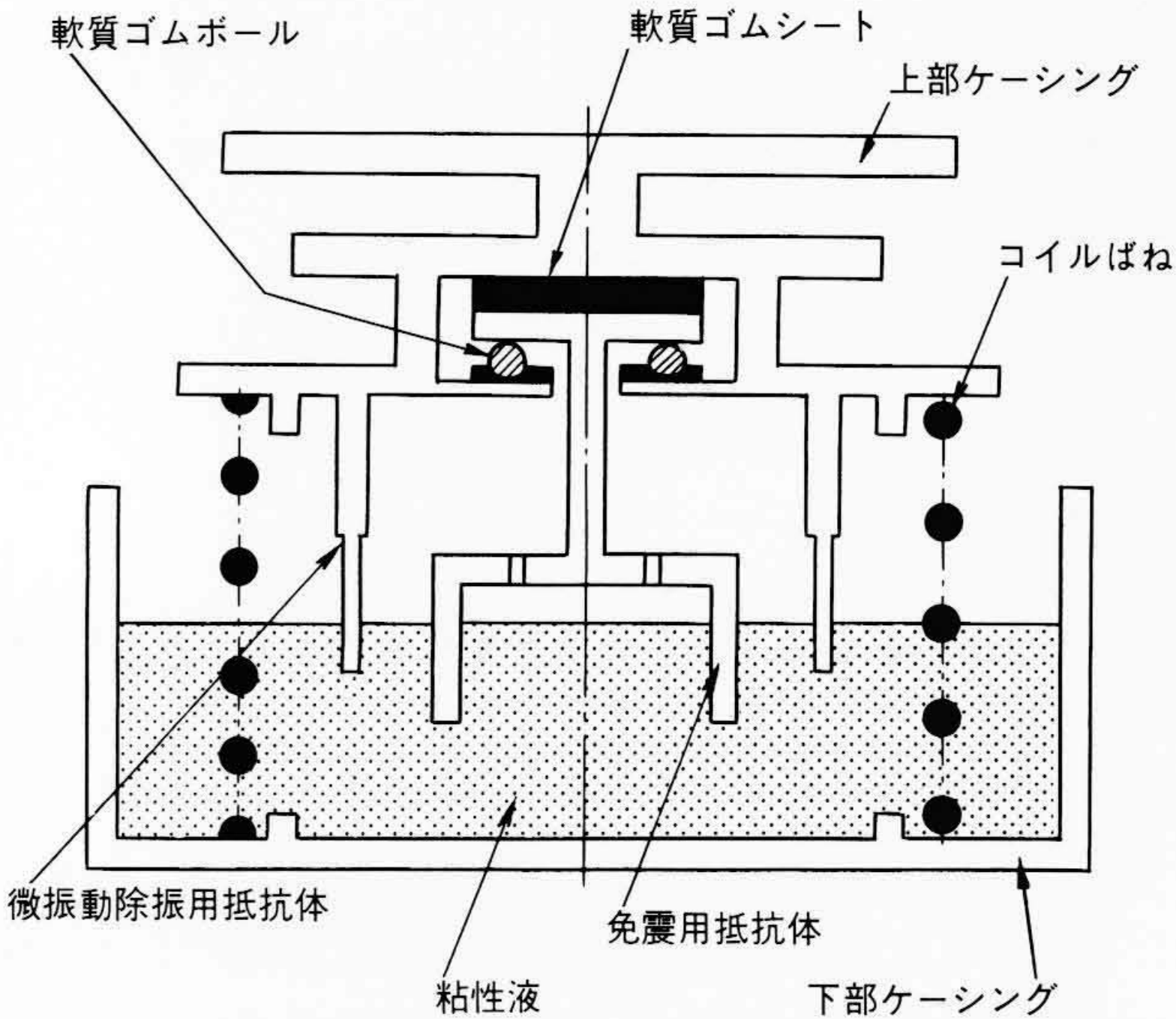


図3 鉛直除振・免震装置 圧縮コイルばねと粘性液を一体化したまったく新しい構造で，鉛直振動を吸収する。

そのコイルばねは粘性液を入れた容器内にセットされている。上記の部材には，微振動除振用の小さな減衰力を発生する抵抗体(数本の丸棒)が取り付けられており，また，軟質のゴムシートとゴムボールを介して，鉛直地震動免震用の大きな減衰力を発生する抵抗体(粘性液と接触する部分は円筒状のもの)が吊り下げられている。このような構造により，本装置では，微振動に対しては，免震用の抵抗体が粘性液中に固定されていても，コイルばねと軟質ゴムの弾性変形によって，除振に必要な相対変形が許される。また，地震動に対しては，免震用抵抗体も粘性液中で相対変位し，大きな減衰力を発生する。なお，免震用の抵抗体は地震時のロッキング(水平方向軸周りの回転運動)を防止する重要な機能も持つ。

3 実規模モデルによる性能評価

3.1 実験モデル

低床形除振・免震床の実験モデルを図4に示す。この実験モデルの外形寸法は幅2.8×奥行2.8×高さ0.6(m)で、3次元除振・免震床(水平2方向、鉛直方向の振動を吸収する床)の寸法は幅2.7×奥行1.2×高さ0.18(m)とした。また、全質量は

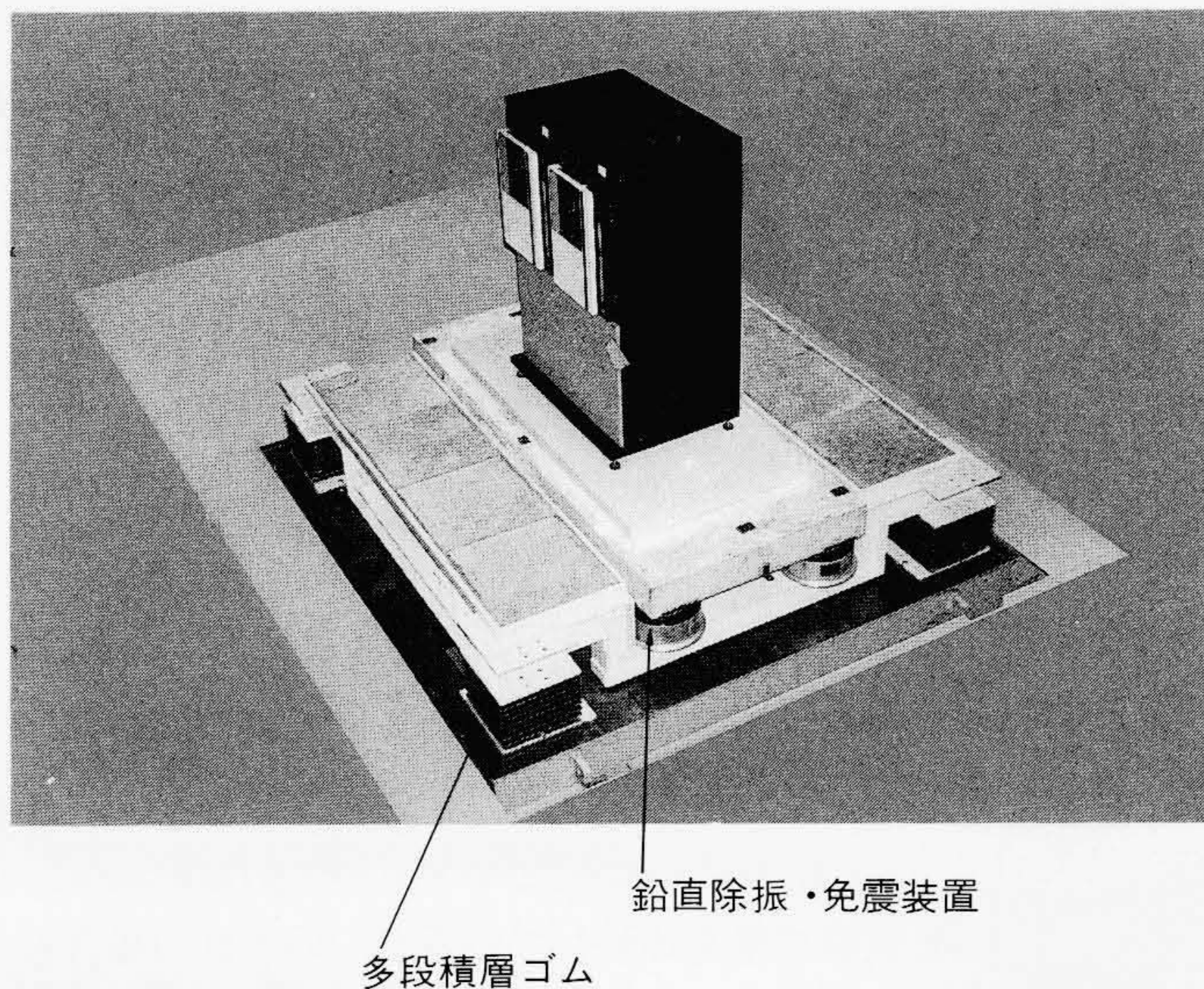


図4 低床形除振・免震床実験モデル システムの大きさは2.8 m×2.8 mで、多段積層ゴムを8個、鉛直除振・免震装置を8個それぞれ使用している。

4,280 kgであった。

水平除振・免震用の多段積層ゴムは四隅に1個ずつ計4個使用した。この多段積層ゴムは、各段4個の要素積層ゴムを8段に積み重ね、スパンは280 mm、安定板として5 mm厚の鋼板を用いたものであり、その要素積層ゴムは、直径30 mm、厚さ0.5 mmのゴム板(31層)を、厚さ0.3 mmの黄銅板と交互に積層したものをを用いた。また、水平用ダンパは中央に1個だけ使用したが、この減衰は速度の0.59乗に比例する非線形減衰であった。

鉛直除振・免震装置は、3次元床の各長辺に4個ずつ計8個使用した。

3.2 実験方法

微振動実験は、建屋1階床に実験モデルを設置して常時微動(さまざまな原因によって常に生じている微振動)を入力源として、3次元床上面での応答を測定した。この測定には、ムービングコイル式微動計を使用した。

地震波加振実験は2次元振動台を用いて、水平・鉛直の2次元同時加振を行った。加振波には、実地震の地動波としてエルセントロ波(Imperial Valley地震, 1940年), 八戸波(十勝沖地震, 1968年), および東北大学波(宮城県沖地震, 1978年)の記録波と、それらから作成した床応答模擬波を用いた。

4 解析モデル

本システムの地震動入力に対する挙動を解析するため、各要素を解析モデル化した。応答解析モデルを図5に示す。3

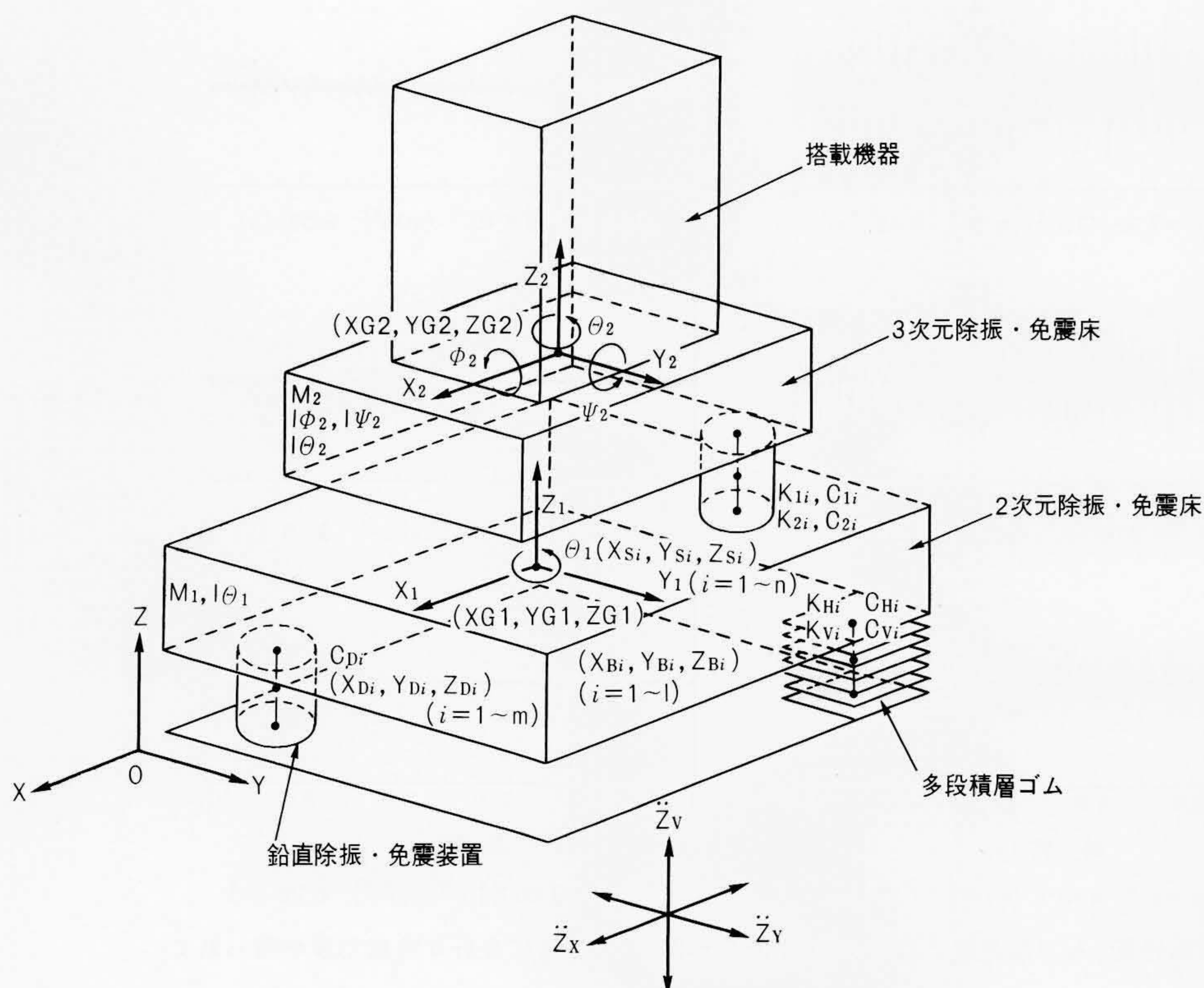


図5 低床形除振・免震床解析モデル 2次元免震床部が並進(X_1, Y_1, Z_1), 回転(θ_1)の4自由度, 3次元免震床部が並進(X_2, Y_2, Z_2), 回転(ϕ_2, ψ_2, θ_2)の6自由度, 計10自由度となる。

軸すべての回りのロッキングを考慮する必要があるので、3次元立体モデルとした。また、これまでの実験から、多段積層ゴム上とフレームの鉛直面内回転運動は、ほかの運動に比べてきわめて小さいことがわかっているため、同フレームは水平面内および鉛直の並進の自由度だけを持つとした。この仮定により、同図のように計10自由度のモデルとなる。

5 実験および解析結果

5.1 微振動除振性能

微振動実験で測定された除振性能結果の入力加速度と応答加速度の波形例を図6に、入力絶対変位と応答絶対変位の波形例を図7に示す。加速度については、 10^{-3} m/s^2 オーダあるいはそれ以下の最大加速度を持つ微振動が、水平方向では約 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{7}$ に、鉛直方向では約 $\frac{1}{8}$ に低減しており、非常に良好な除振効果が得られている。また、変位については、 $10^{-1} \mu\text{m}$ オーダの最大変位を持つ微振動が、水平方向では約 $\frac{1}{3}$ に、鉛直方向では約8割に低減している。これは、水平方向は従来方式と同等で、鉛直方向は低床形のほうが従来方式に比べて応答の変位が入力より低減している点で、相当の性能向上が達成されていることが確認された。

なお、本モデルの微振動レベルでの固有振動数は水平に0.5～0.8 Hz、鉛直に約2 Hzであった。

5.2 免震性能

地震波として床応答模擬波を用いて地震波加振を行った実験結果を、棒グラフ(図8)にまとめた。地震波はエルセントロ波、八戸波および東北大学波の3種類を用い、それぞれの応答加速度、応答変位を免震した状態で表示した。また同時に、前述の解析モデルを用いて計算した結果を表示した。地震波入力に対して、応答加速度は水平方向で約 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ 、鉛直方向ではエルセントロ波の場合を除いて顕著な免震効果はなく、増幅を抑制するだけにとどまっている。しかし、エルセントロ波の場合には、ほぼ満足できる免震効果が得られており、本研究で開発した鉛直除振・免震装置は、エルセントロ波のように、比較的高振動数成分の多い鉛直地震動の場合は、ある程度の免震効果が期待できる。

長手方向(X方向)加振の場合の、水平方向、鉛直方向の代表的な応答波形を図9に示す。同図は実験と解析の両結果を示している。最下端の波形は3次元床の加振方向両側端での鉛直変位を、一方は実線で、他方は破線で示したものであるが、図面上でその差異が確認できないほど両者は一致している(短手方向の結果も同様な結果が得られた)。このことは、鉛直除振・免震装置により、搭載機器も含めた3次元床のロッキングが効果的に防止されていたことを示すものである。図8、9に解析結果と実験結果を比較しているが、いずれの場合も

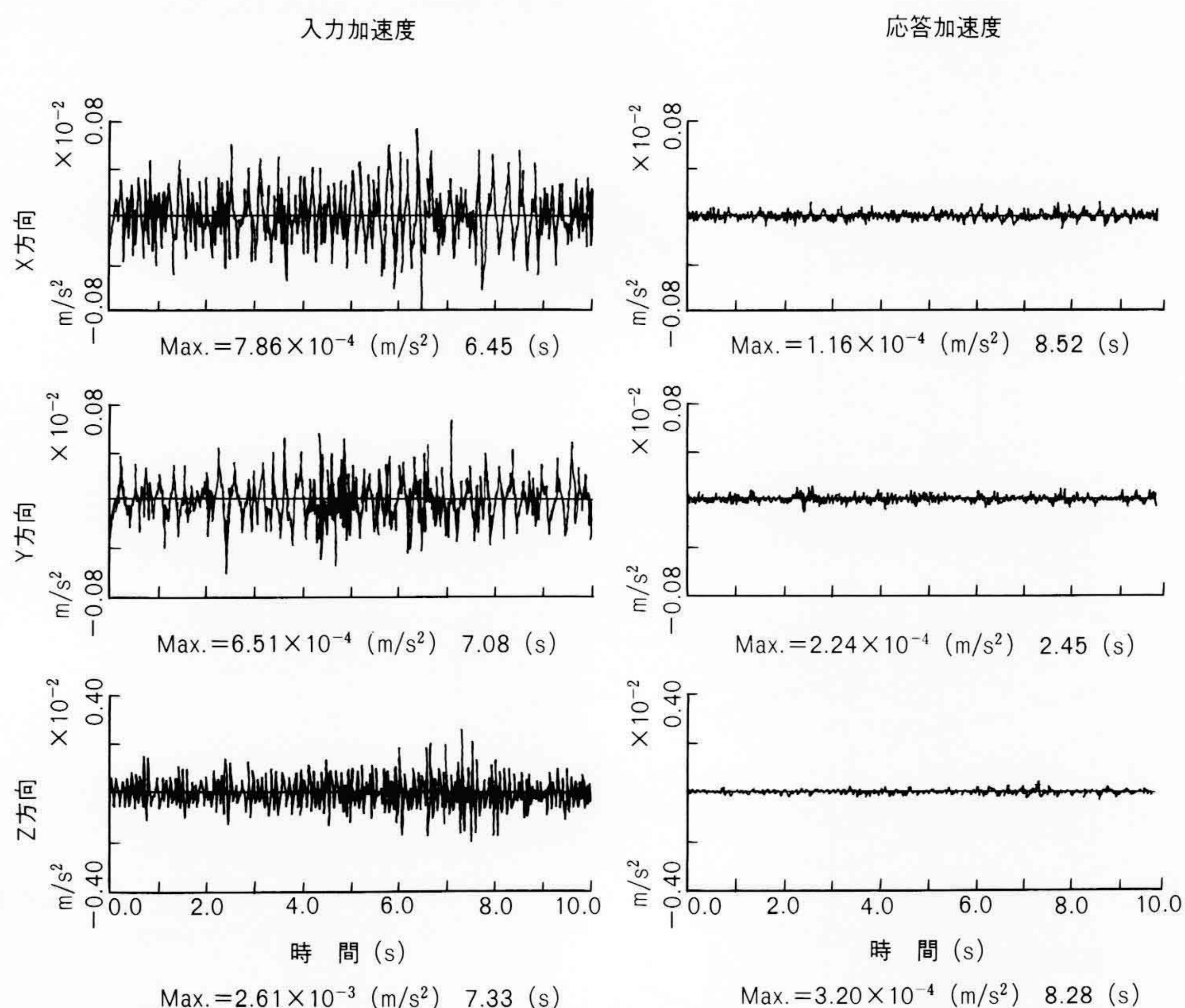
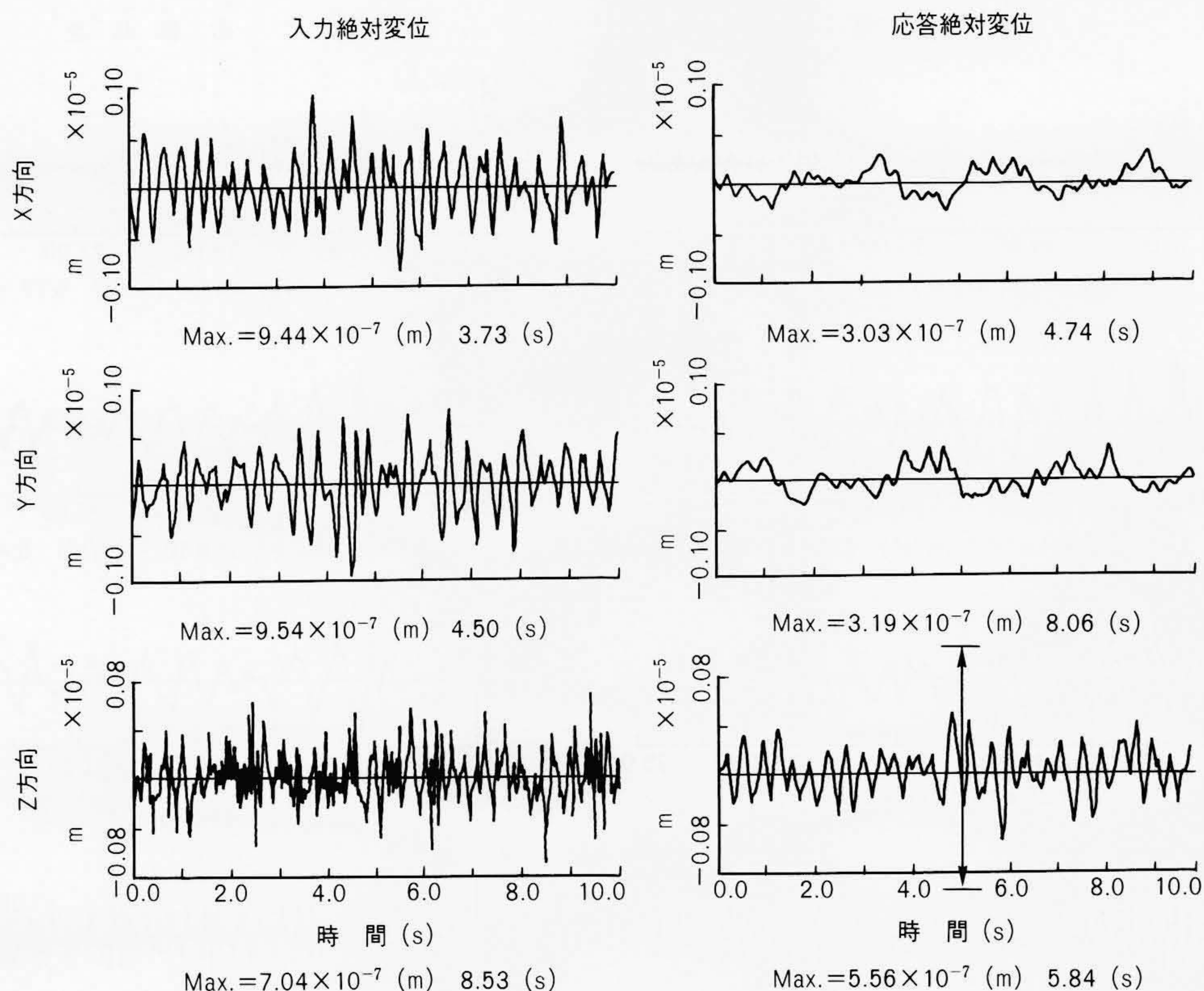


図6 微振動除振性能(入力加速度と応答加速度の波形例) 非常に良好な除振効果が得られている。



注：図中のベクトルは従来方式での応答値を示す。

図7 微振動除振性能(入力絶対変位と応答絶対変位の波形例) 鉛直方向の変位の除振効果は、従来方式に比べて数段改善されている。

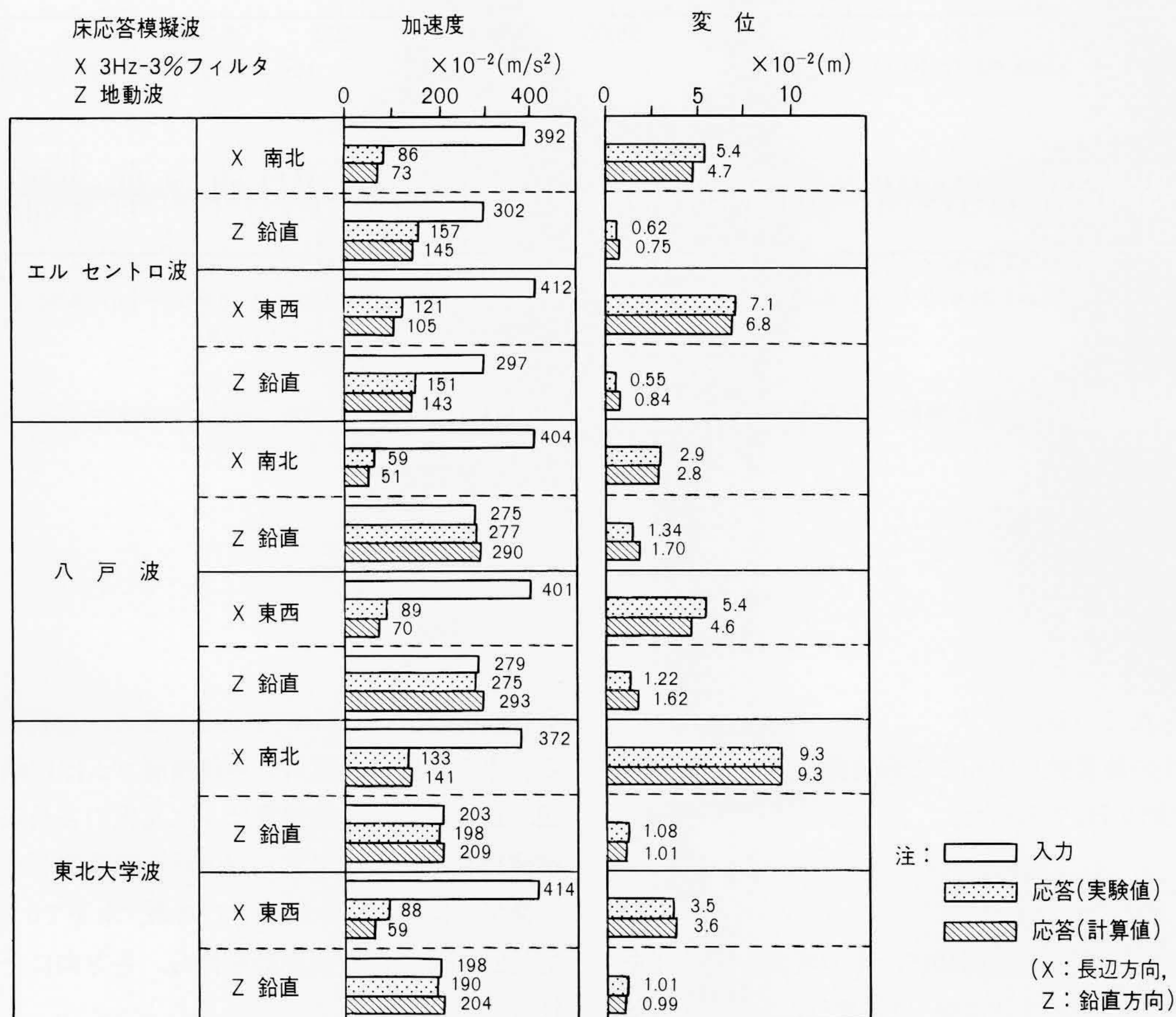


図8 免震性能 良好な免震効果が得られている。

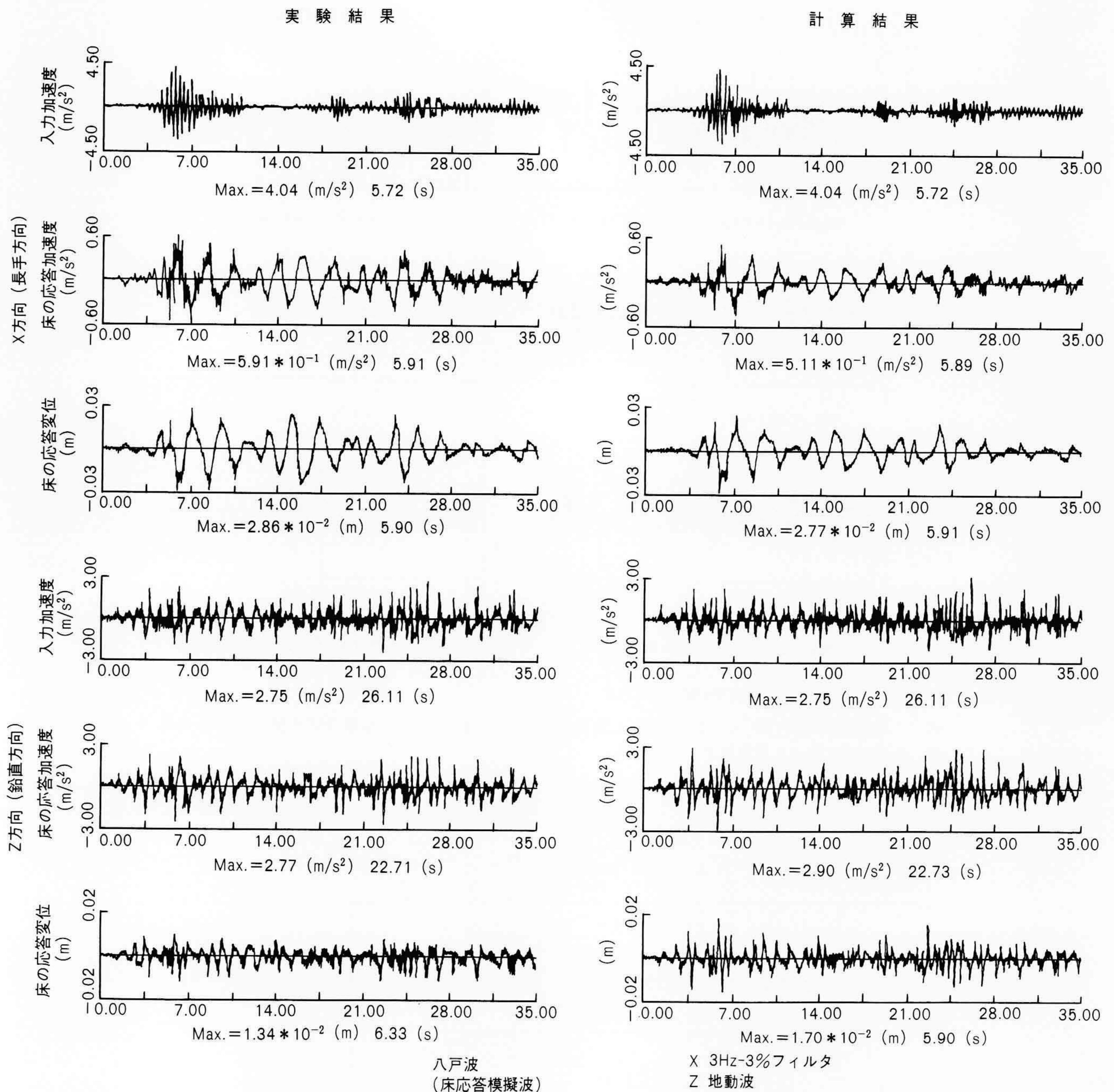


図9 八戸床応答模擬波の実験と解析による応答波形の比較

実験と解析による応答波形は、良好な一致を示している。

良好な一致が得られている。

なお、本モデルの地震動レベルでの固有振動数は、水平に0.58 Hz、鉛直に約2 Hzであった。

6 実 機

試作機として製作した装置を図10に、その実測した性能を図11に示す。試作機の外形寸法は幅2.1×奥行2.3×高さ0.55 (m)で、機器を搭載する3次元除振・免震床の寸法は幅1.0×

奥行2.0×高さ0.16 (m)である。また、全質量は1,806 kgである。水平除振・免震用の多段積層ゴムは四隅に1個ずつ計4個、鉛直除振・免震装置は3次元床の各長辺に各4個、計8個使用した。水平用ダンパは計2個使用した。

微振動除振性能を評価した結果、水平で0.5~0.8 Hz、鉛直で約2.0 Hzの固有振動数を持ち、各方向に十分な減衰効果を持っていた。

現在、レーザ応用機器を対象に設計、製作中の除振・免震

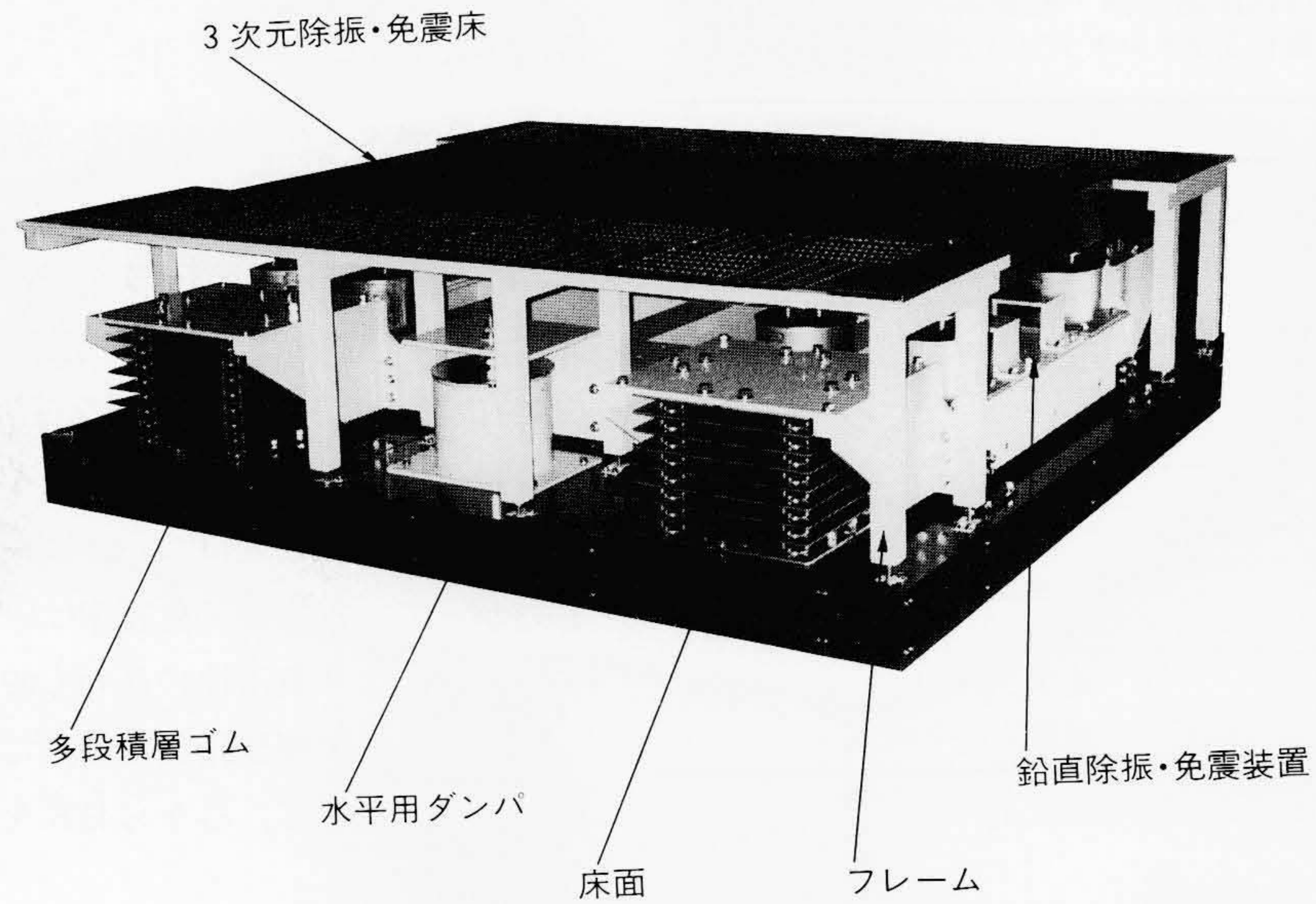
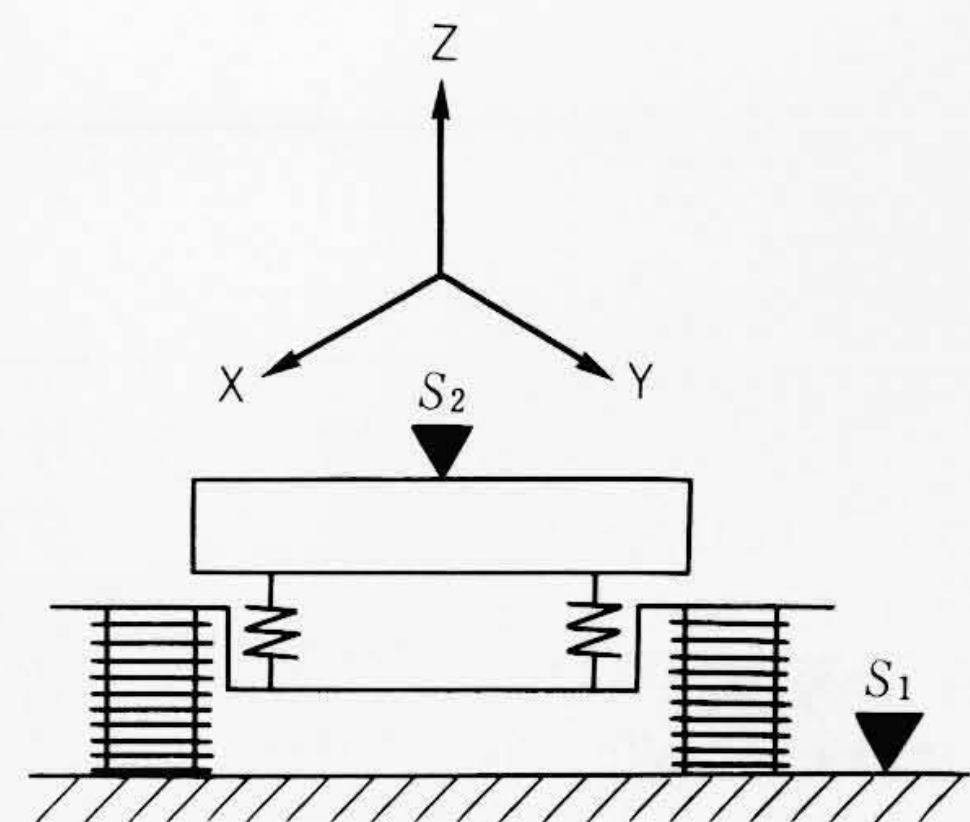
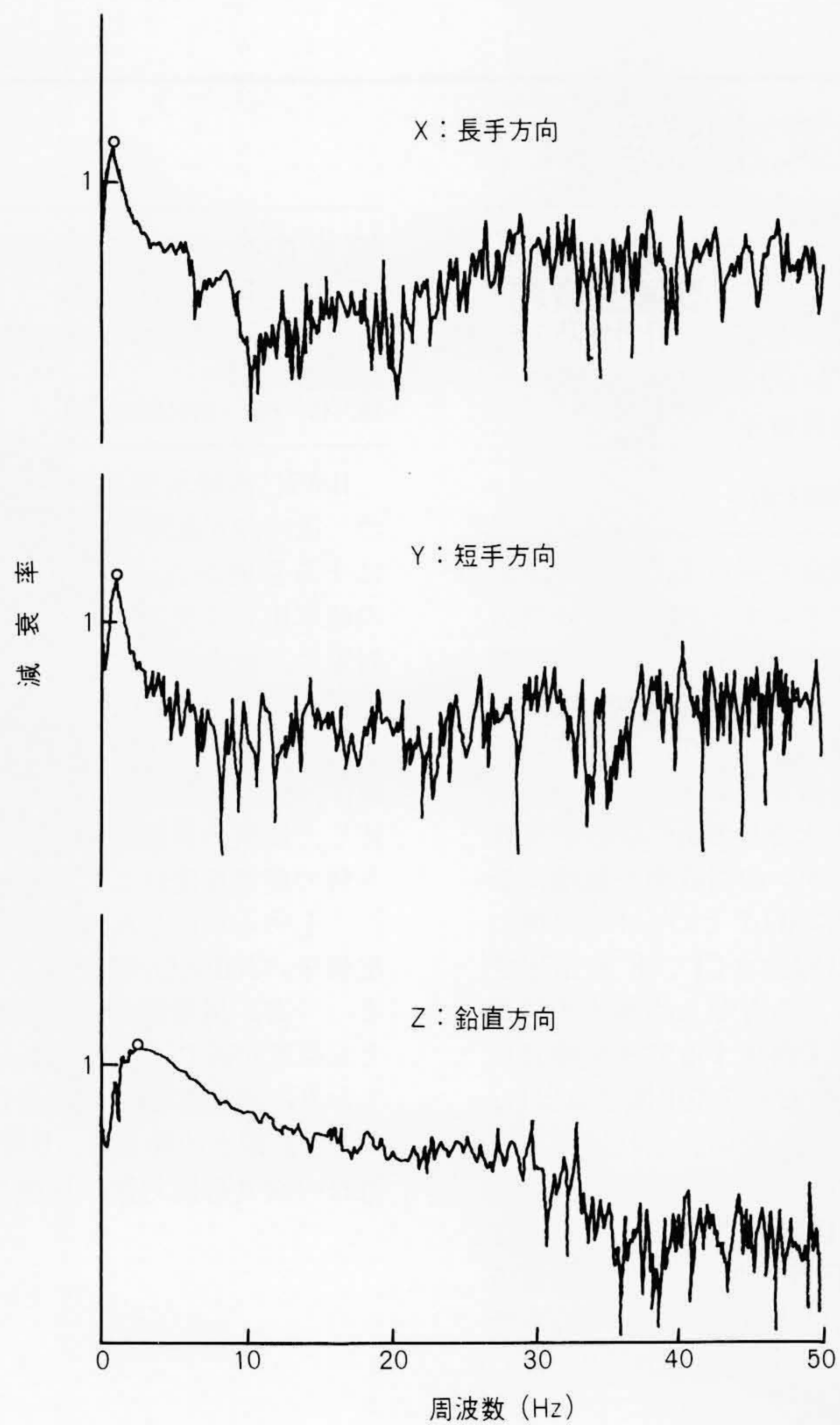


図10 低床形3次元除振・免震床実機試作外観 床面から搭載台上面まで0.6mの低床形3次元除振・免震床の実機試作機を示す。



注：略語説明など
 S_1 (地盤活動入力)
 S_2 (機器搭載台上の振動)
 減衰率 = $\frac{S_2}{S_1}$

図11 低床形3次元除振・免震床の実機試作による振動減衰特性 実機試作機の3次元方向での振動減衰特性を表している。

表2 レーザ応用機器向け低床形除振・免震床 多段積層ゴム4個、鉛直除振・免震装置8個および水平用ダンパ2個を使用している。

項 目	内 容
対 象 機 器	レーザ応用機器
方 式	微振動除振
方 向	3次元方向
外 形 寸 法	幅2.0×奥行2.9×高さ0.5(m)
数 量	2台
設 置 階	1階
1台当たりの搭載質量 (定盤含む。)	6,000 kg
性 能 (固有振動数)	水平：0.4 Hz 鉛直：1～2 Hz

床の仕様を表2に示す。この種の装置は、適用される装置・機種、設置される建屋の階高、振動の入力状況、許容振動値などがそれぞれ異なり、ケースに応じて設計することが多い。そこで、設計に際しては除振・免震床をベースに機器レベルをも含めた(1)微振動除振、(2)免震、(3)微振動除振・免震など種々の要求に応じ、迅速に顧客の仕様に合うシステムの対応を図っている。

7 結 言

本論文で述べた低床形除振・免震床は、床高さが0.6 m程度と低いため、適用範囲の広いことが大きな特長であり、さらに、水平方向には、微振動から強地震動までの振動(加速度のオーダでは $10^{-4} \sim 10^0 \text{ m/s}^2$ 、変位のオーダでは $10^{-7} \sim 10^{-1} \text{ m}$ の振動)に対して、非常に良好な振動絶縁性能を持っている。また、鉛直方向の免震性能は増幅を抑制する程度の効果であるが、微振動除振性能については良好な振動絶縁効果がある。したがって、本除振・免震床は、先に報告した除振・免震床に比べて、より実用性の高いものであると考えている。

最後に、この開発に当たり、ご指導、ご協力をいただいた関係各位に対して、心からお礼を申し上げる次第である。

参考文献

1) 藤田：超LSI工場の振動問題－微振動防振技術と免震技術－，日本機械学会誌，89，809，99～104(昭61-4)
2) 藤田：免震技術の現状と将来，日本機械学会論文集，51，461，1～7(昭60-1)
3) 鶴田，外：精密機器用除振・免震床の開発，日立評論，70，2，141～146(昭63-2)
4) 藤田：多段積層ゴムを用いた三次元免震・除振床の開発，第7回日本地震工学シンポジウム論文集(昭61-12)

論文抄録

緩やかなキャビテーション強度環境におけるCo含有ステンレス鋼のキャビテーション・エロージョン挙動

日立製作所 尾崎敏範・小沼 勉
防食技術
36, 7, 413～418(昭62-7)

海水用流体機械の大形化や高速化に伴い、耐キャビテーション・エロージョン性、耐海水性および被加工性の優れた材料が望まれ、合金組成と金属組成を調節した18Cr-6Coステンレス鋼を開発した。この材料は、促進試験で材料表面直下の加工硬化層の存在によって優れた特性を示すことが判明した。実機に適用するには、促進試験に比べ緩やかな環境での評価が必要であり、この材料の二、三の性質を実機を模擬した試験装置によって検討した。その結果、実機環境程度のキャビテーション強度下でも促進試験の場合と同様の優れた特性を示す。その理由は、キャビテーション衝撃によって生ずるマルテンサイト変態が加工層を生成するためである。耐海水すきま腐食性は18Cr-8Niステンレス鋼と同程度に優れ、被加工性も良く、高速海水流体機械用材料として広く利用できる。

サプレッサ型イオンクロマトグラフィーにおける再生濃縮カラムを用いたフッ化物及び塩化物イオンの濃縮

日立製作所 竹原裕子
分析化学
36, 8, 457～461(昭62-8)

炭酸塩系溶離液を用いて、濃縮カラムに濃縮した試料アニオンの溶離とカラム分離を連続して行う従来の方法では、濃縮カラム中の陰イオン交換樹脂は CO_3^{2-} と結合した形となっており、選択性の低い Cl^- や F^- は濃縮されにくい。特に、試料中に選択性の大きい SO_4^{2-} などが共存すると、上記イオンの回収率が極端に低下する。濃縮時に SO_4^{2-} とのイオン交換によって溶離した CO_3^{2-} が Cl^- 、 F^- を溶出させるためである。あらかじめ陰イオン交換樹脂をNaOHで再生する方法を確立した。 OH^- は F^- 、 Cl^- ピークの間溶出し、両者の定量を妨害しない。これによって F^- の定量では濃縮カラムイオン交換容量の $\frac{1}{10}$ (従来法の10倍)までの SO_4^{2-} の共存でも100%近く回収できる。 Cl^- の定量の場合も交換容量の $\frac{1}{3}$ (従来法の5倍)までの SO_4^{2-} の共存が可能となった。

純水中における鉄鋼材料に及ぼす温度の影響

日立製作所 本田 卓・樫村栄二・他5名
防食技術
36, 10, 643～649(昭62-10)

BWR(沸騰水型原子炉)の炉水環境での一次冷却系配管材料の耐食性を明らかにする目的から、溶存酸素濃度200 ppbの純水中でステンレス鋼および炭素鋼を対象に、腐食挙動に及ぼす温度の影響を150～300℃の範囲で検討した。その結果、オーステナイト系ステンレス鋼の酸化皮膜は、約250℃を境に化学組成と形態が変化し、皮膜の保護性の変化から長期浸せき時の腐食速度はこの温度に極大を持つことを明らかにした。高温側の耐食性は、皮膜中の NiFe_2O_4 が安定化することによる。一方、炭素鋼では腐食速度が極大をとる温度が低く、皮膜は Fe_3O_4 を主体としており、温度による形態変化はみられなかった。以上の知見は、BWRプラント構造物の腐食抑制対策に反映されている。