

精密機器用除振・免震床の開発

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

超LSIやレーザ応用製品などの製造設備は、生産性向上のために、清浄度とともに微振動の除去に努力が払われてきた。最近では、製品の微細化が進むにつれて、ますます高度な防・除振技術が要求されている。同時に、地震時の対策も重要な課題となってきている。そこで、クリーンルーム内で使用される精密機器を対象に振動吸収方法を種々検討し、多段積層ゴムを応用した、微振動の除去(除振)から地震動の吸収(免震)まで対応可能な床システムを開発した。その性能を評価した結果、除振性能は一般的な空気ばね除振台よりも優れており、また、免震性能はコイルばね・ベアリング方式に比べ同等以上であることが分かった。これにより、微振動から強地震動までの振動吸収がほぼできるようになった。

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

1 緒 言

超LSI工場やレーザ応用製品などの精密製品を加工する工場では、工場内設備からの微振動や近隣の交通機関などから伝わってくる振動によって製品の歩留まりは影響される。また、ときおり発生する震度V、VIあるいはそれ以上の地震動によって設備や製品が大きな損害を受けることが考えられる。このような製造設備では、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・免震対策が要求されている^{1),2)}。現状では比較的小さい振動については、空気ばね方式による機器単体での除振、あるいはコンクリートの大形独立基礎との併用によって除振を行っている。しかし、これらの方法では、低周波の振動(10 Hz以下)の除振が難しい、あるいはコストが高いという欠点がある。更に、地震などの大きな振動を対象とする免震については十分な効果が期待できない。

最近、クリーンルーム内で使用する精密機器を対象とした、より実用的な防・除振対策のニーズが高まってきたので、微振動から強地震動まで3次元的に振動吸収が可能な除振・免震床の開発に着手した。なお、性能の目標値として入力値を $\frac{1}{3}$ 以下に低減することを目安とした。本稿は、床の除振、免震システムの基本構造及びその性能試験結果についてまとめたものである。

2 システムの基本構造

本システム^{3),4)}の基本構造及び主要部材である多段積層ゴムを図1に、その仕様を表1に示す。システムは微振動から地震動までの振動吸収を可能にするため、主要部材として多段積層ゴムとコイルばね、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粘性せん断形ダンパ(水平ダンパ)の組合せで、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・免震床からつづいているコイルばねとオイルダンパ(鉛直ダンパ)の組合せで振動を吸収する。更に、このままでは浮床が浮いた状態で横揺れが生じるため、浮床と隣接する支柱の部分にローラを付けその揺れを防いでいる。また、ローラを通して浮床に支柱から鉛直方向の微振動が伝わらないように、ローラが接する支柱に軟質ゴムシートをてん(貼)着した。このシステムの最大の特徴は全体の質量を支え、かつ水平方向の振動を吸収

表1 除振・免震床仕様 搭載質量、大きさは任意に設計可能である。

項 目	仕 様
m ² 当たりの搭載質量	~500 kg
ユ ニ ッ ト 寸 法	幅1.8×長さ3.6×高さ1.8 (m)
固 有 振 動 数	微振動除振 { 0.4 Hz (水平方向) 2.0 Hz (鉛直方向)
	免 震 { 0.4 Hz (水平方向) 1.0 Hz (鉛直方向)
最 大 許 容 変 位	±0.2 m (水平方向) ±0.05 m (鉛直方向)

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

する多段積層ゴムを採用した点にある。一般に、免震用の積層ゴムは定格搭載質量下で0.5 Hz程度の低い固有振動数となる水平剛性と、0.2 m程度の水平吸収能力とを併せ持つことが要求される。これまでに実用化された免震用の積層ゴム構造では、定格搭載質量が3,000 kg以下になると、水平剛性の条件を満たすと形状が細長くなり、0.2 m以下の水平変位で座屈して荷重支持ができなくなる。この不具合を解決したのが、今回用いた多段積層ゴムである。多段積層ゴムは図1に示すように小形の積層ゴム(要素積層ゴム)を四隅に配置し、安定板を介して多段に積み重ねた構造である。この多段に積み重ねた結果、水平剛性の等しい通常の構造の積層ゴムに比べて、変位吸収能力を相対的に大きくすることができる。本実験には定格質量が1,500 kg用と3,000 kg用の2種類の多段積層ゴムを用いた。

3 3次元振動実験

3.1 実験モデル

除振・免震床の実験モデルを図2に示す。本モデルは実規模レベルで実際のクリーンルーム内に設置することを想定して設計したもので、床面は1.8 m×3.6 mの床はり(梁)区画で2区画(3.6 m×3.6 m)の面積を持ち、高さは1.8 mである。片方の区画は浮床のある3次元除振・免震床である。このモデルでは、前述したように多段積層ゴムを合計6個使用した。供試体の四隅の柱に用いた多段積層ゴム及び2本の中間の柱に用いた多段積層ゴムは、共に要素積層ゴムを8段に積み重ねた構造である。これら6個の多段積層ゴムが支持する総質量は、定格質量1,200 kgに対し9,550 kgであり、この質量に対する全体の固有振動数は水平に0.48 Hz、鉛直に14 Hzである。また、水平用粘性せん断形ダンパは2個使用したが、これによる減衰は減衰比で設計値20%程度に対し、測定値は約18%であった。浮床は14本のコイルばねでつられ、その質量は搭

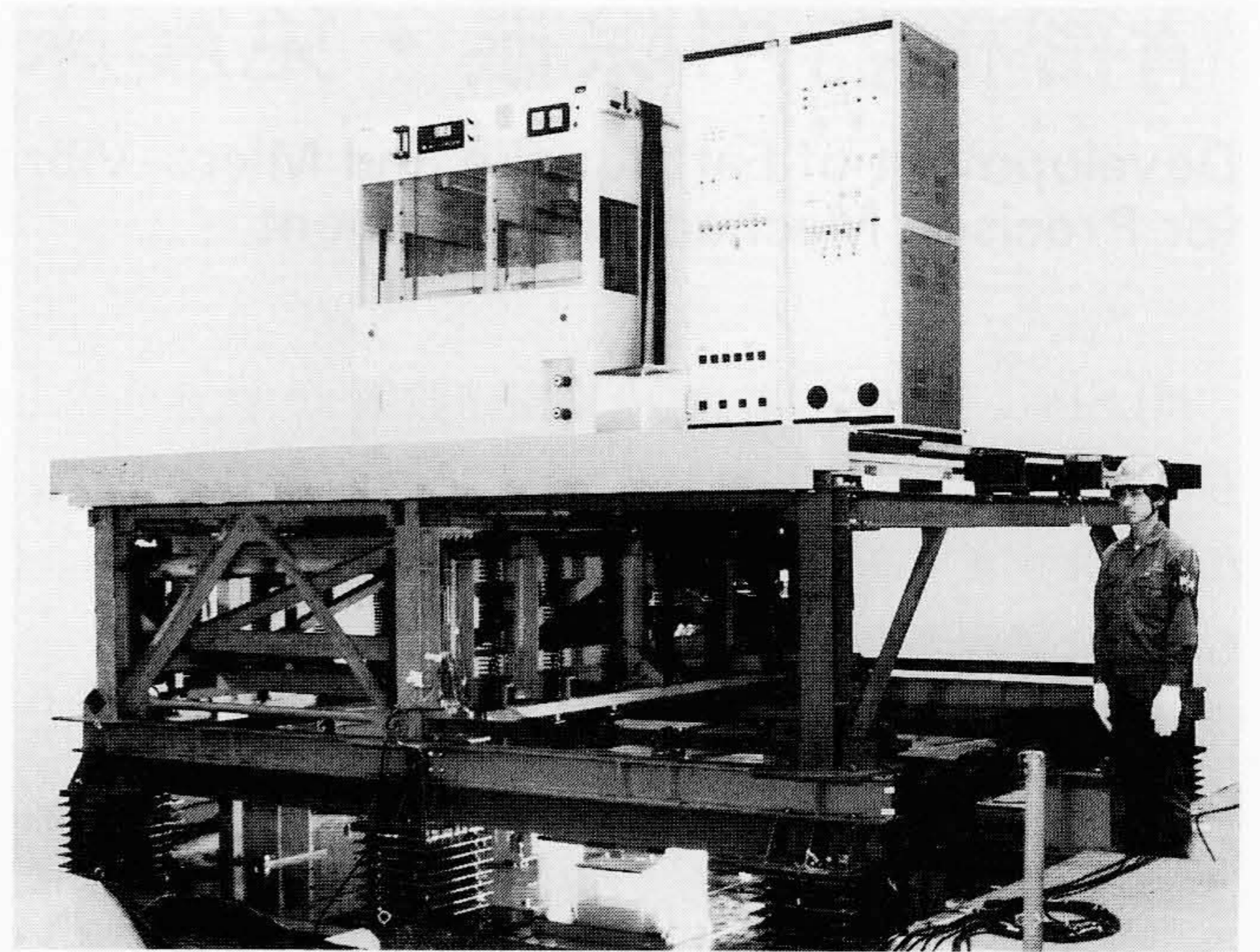
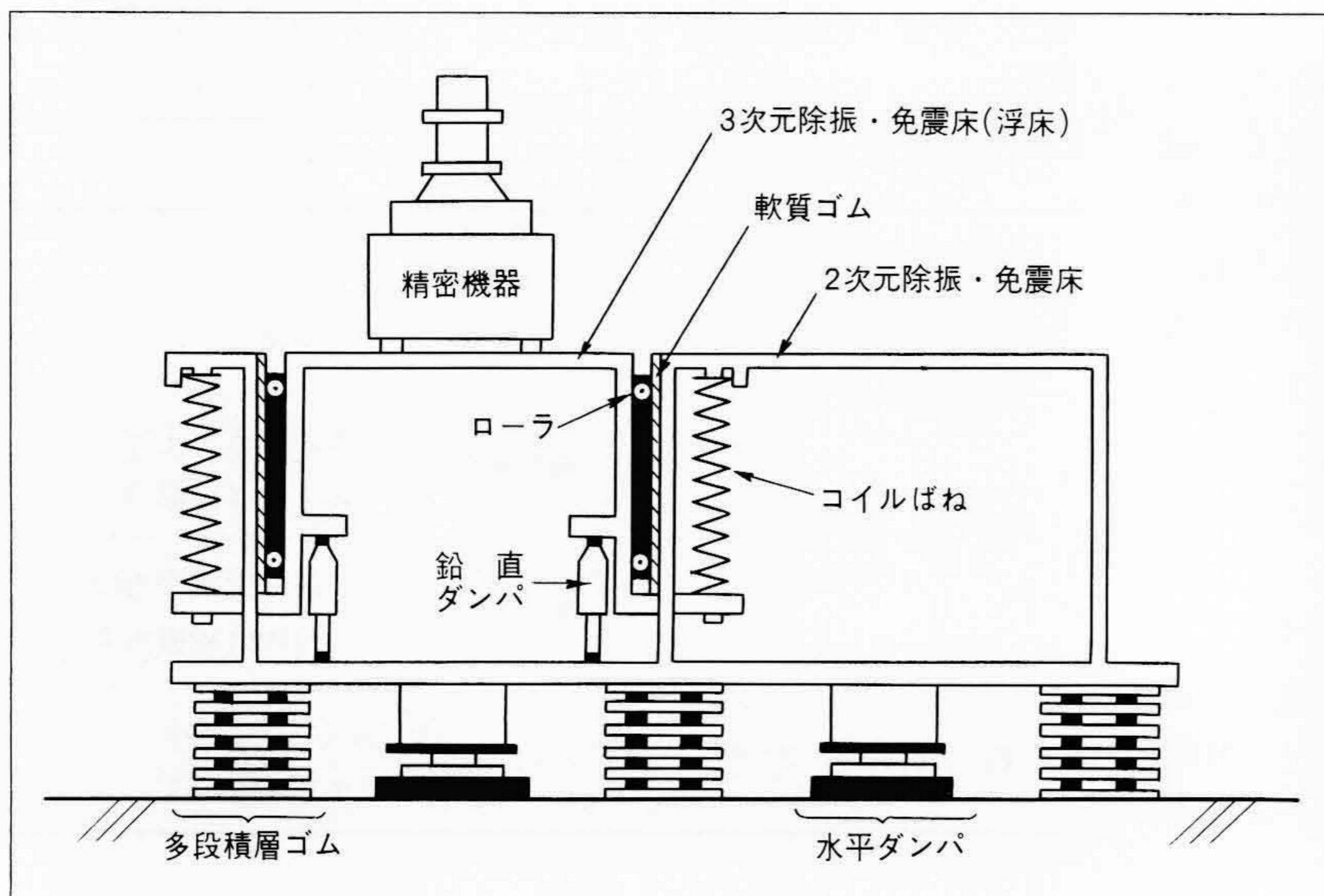


図2 除振・免震床の実験モデル 写真の左側の部分が3次元除振・免震床、右側の部分が2次元除振・免震床となっている。

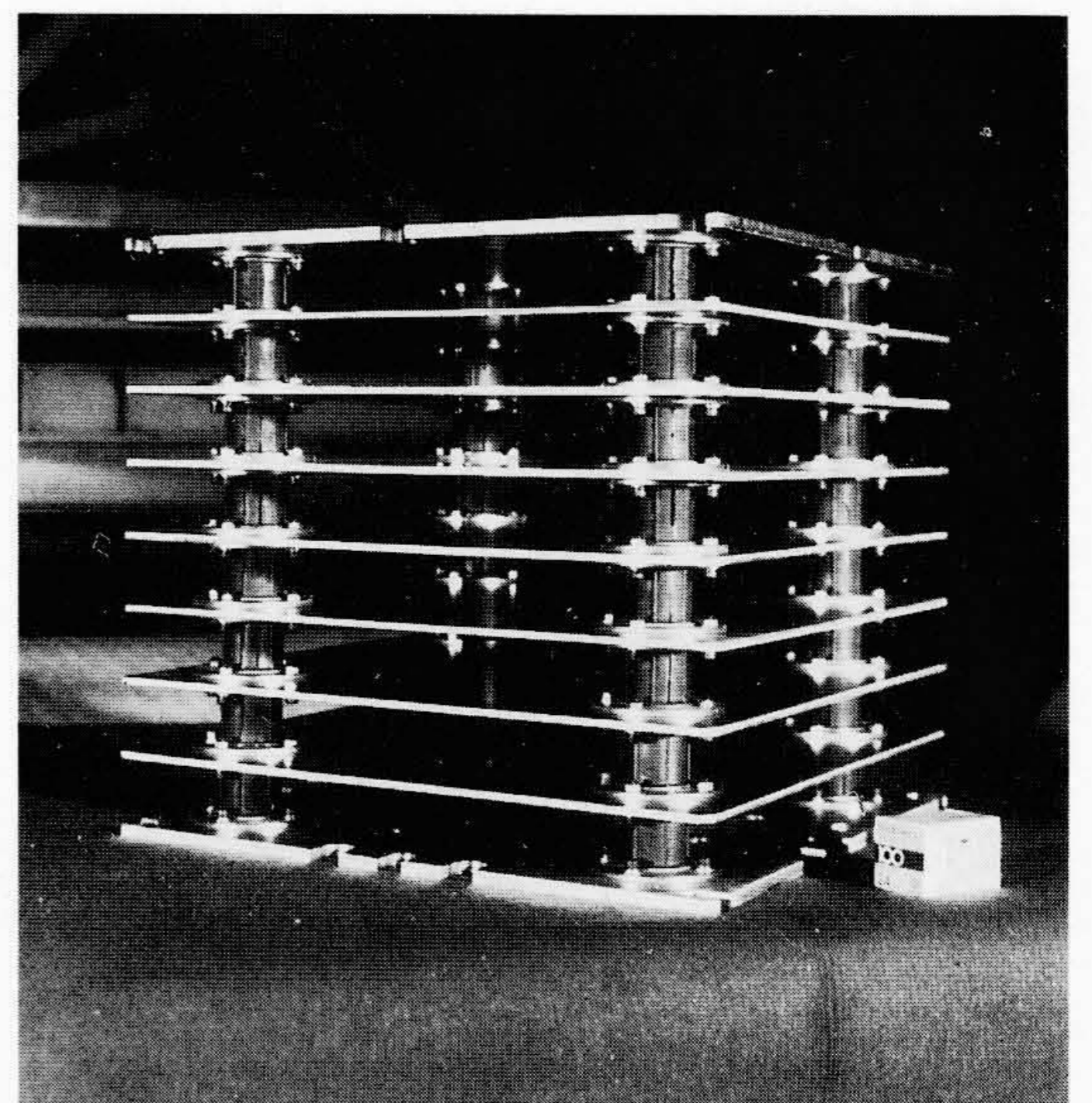
載機器の質量も含めて3,640 kgに設定した。そのときの鉛直固有振動数は0.9 Hz(定格荷重下で設計値0.8 Hz)であった。ただし、この値はローラが転がる振幅での固有振動数であり、微振動に対しては軟質ゴムシートの剛性が加わるため、鉛直固有振動数は約2 Hzとなった。また、浮床には4本のオイルダンパを使用した。その減衰は減衰比で設計値20~40%に対し、測定値は上向き側38%、下向き側17%であった。

3.2 実験方法

除振・免震性能評価実験は日立製作所機械研究所の20 t 3次元振動台を用いて、微振動実験と正弦波加振及び地震波加振実験を行った。微振動実験では、振動台を着座させ、地盤振動と油圧ポンプの運転とによって生じる微振動を入力として、実験モデルの床面の応答を測定した。正弦波加振実験では3

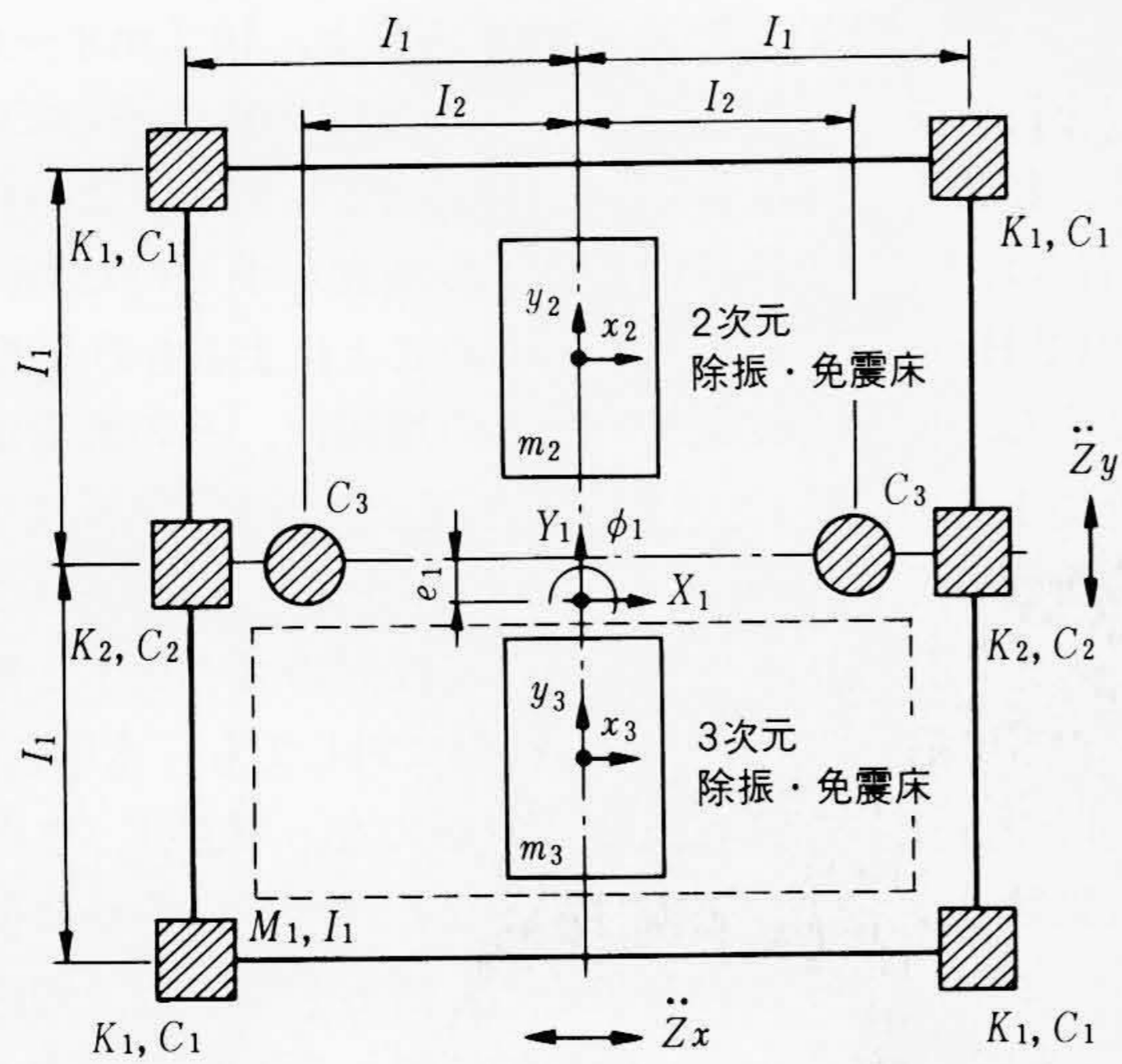


(a) システムの基本構造



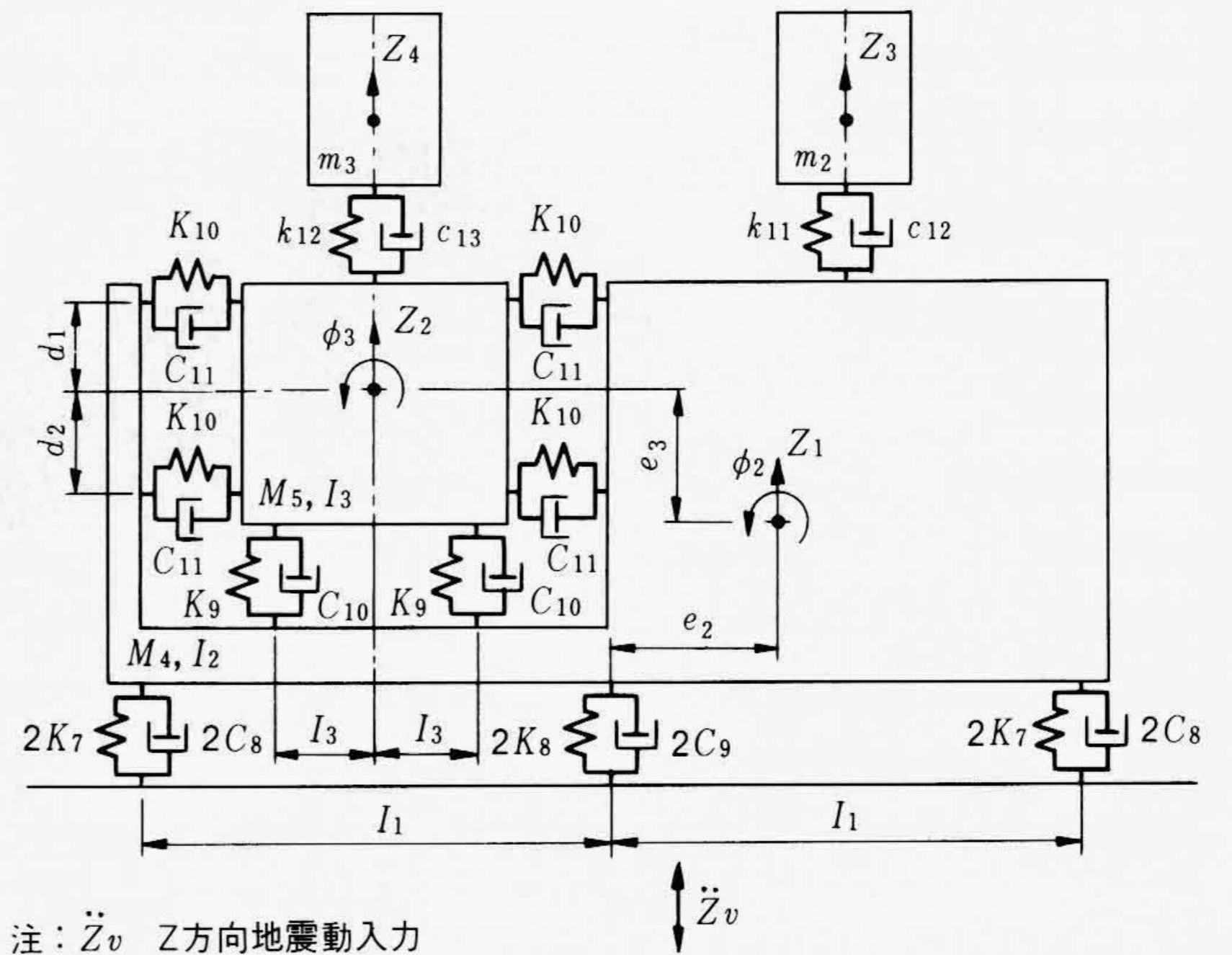
(b) 多段積層ゴム

図1 除振・免震床の基本構造と多段積層ゴム 多段積層ゴム、コイルばねのほかに、鉛直ダンパ、水平方向に対する粘性せん断形ダンパ及びローラと軟質ゴムを使い、除振、免震を可能にする。



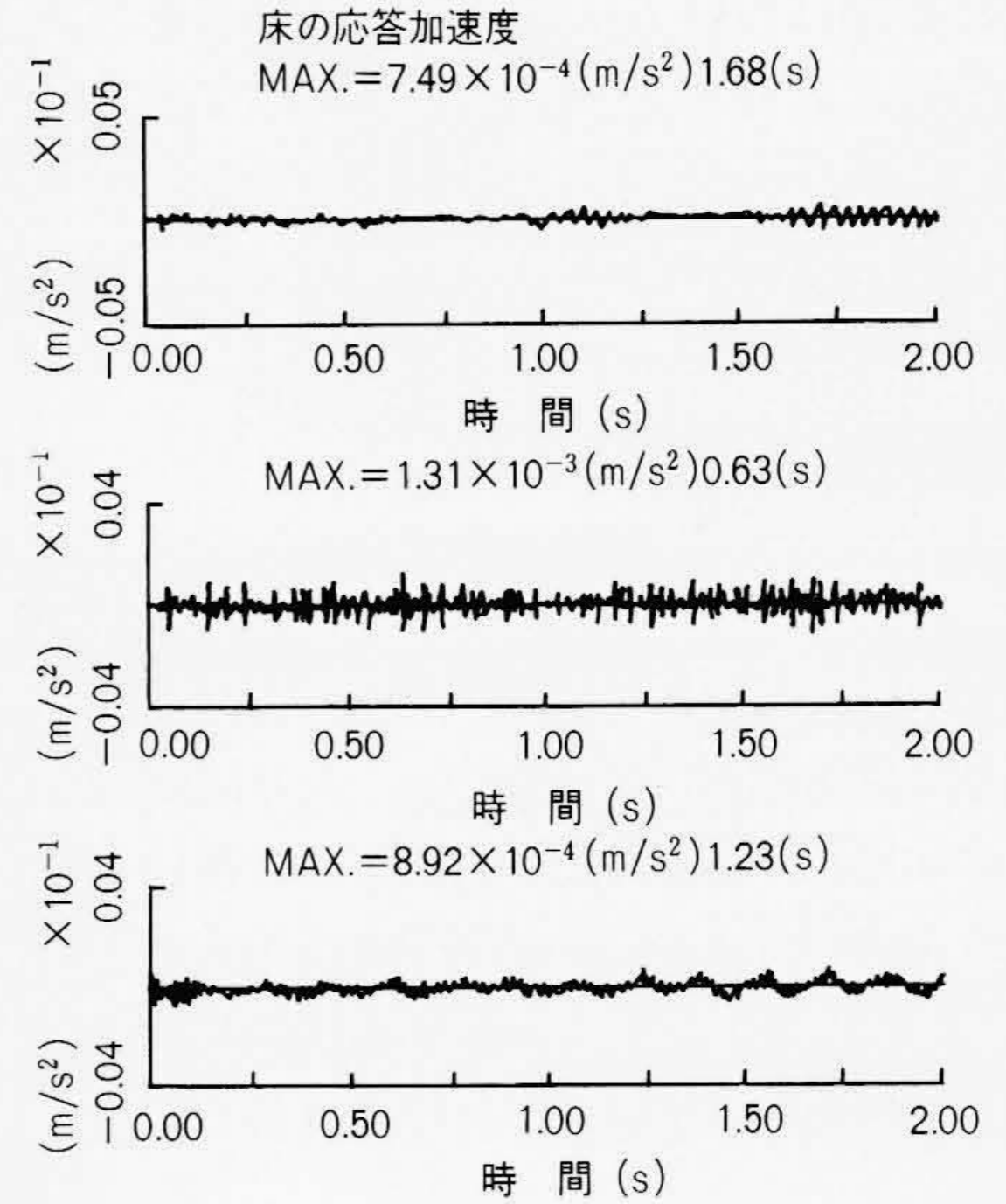
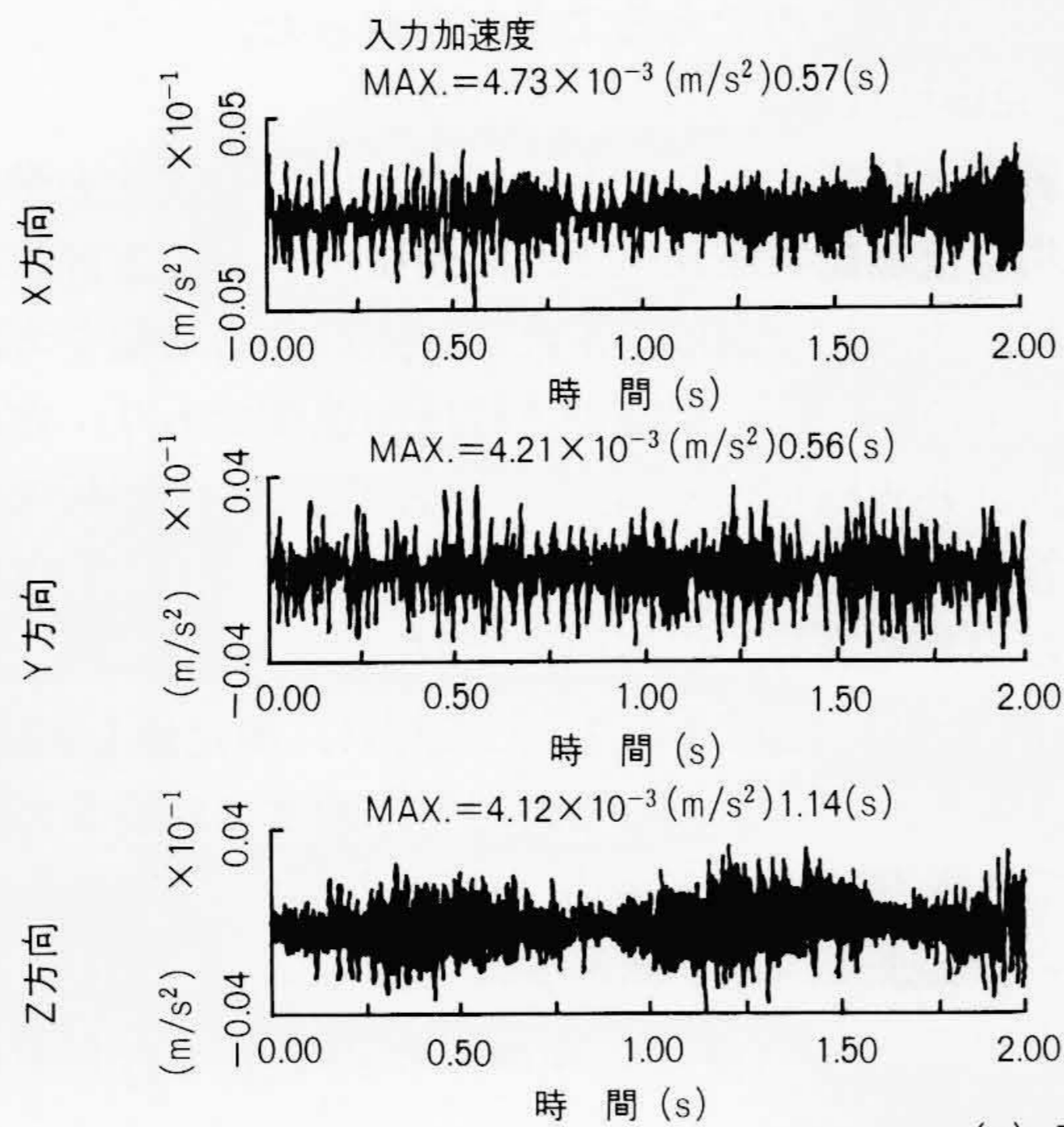
注: \ddot{Z}_x X方向地震動入力, \ddot{Z}_y Y方向地震動入力

図3 水平応答の解析モデル モデルはX-Z平面内の回転がないという実験結果から, Y-Z平面内についてだけ考える。

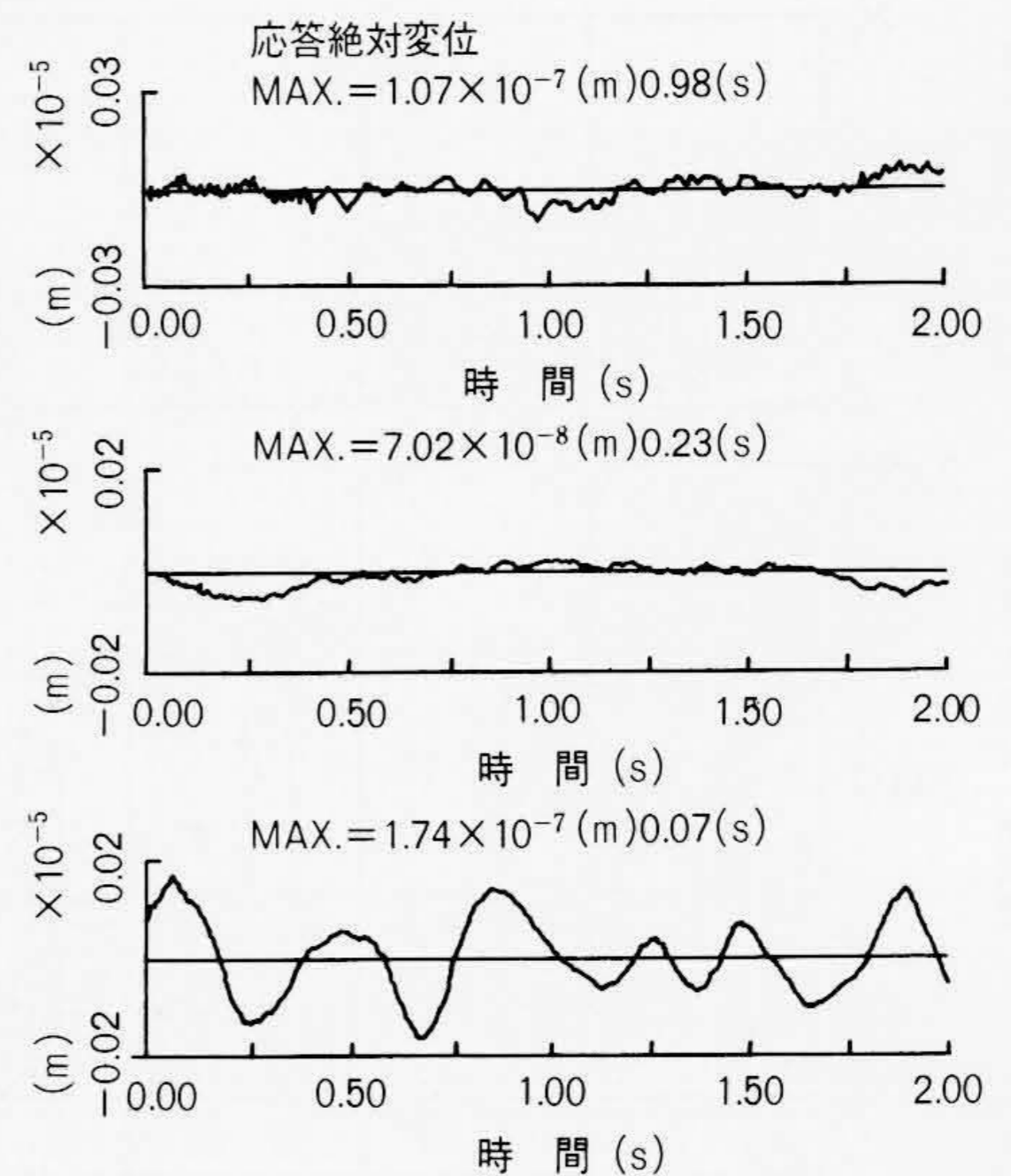
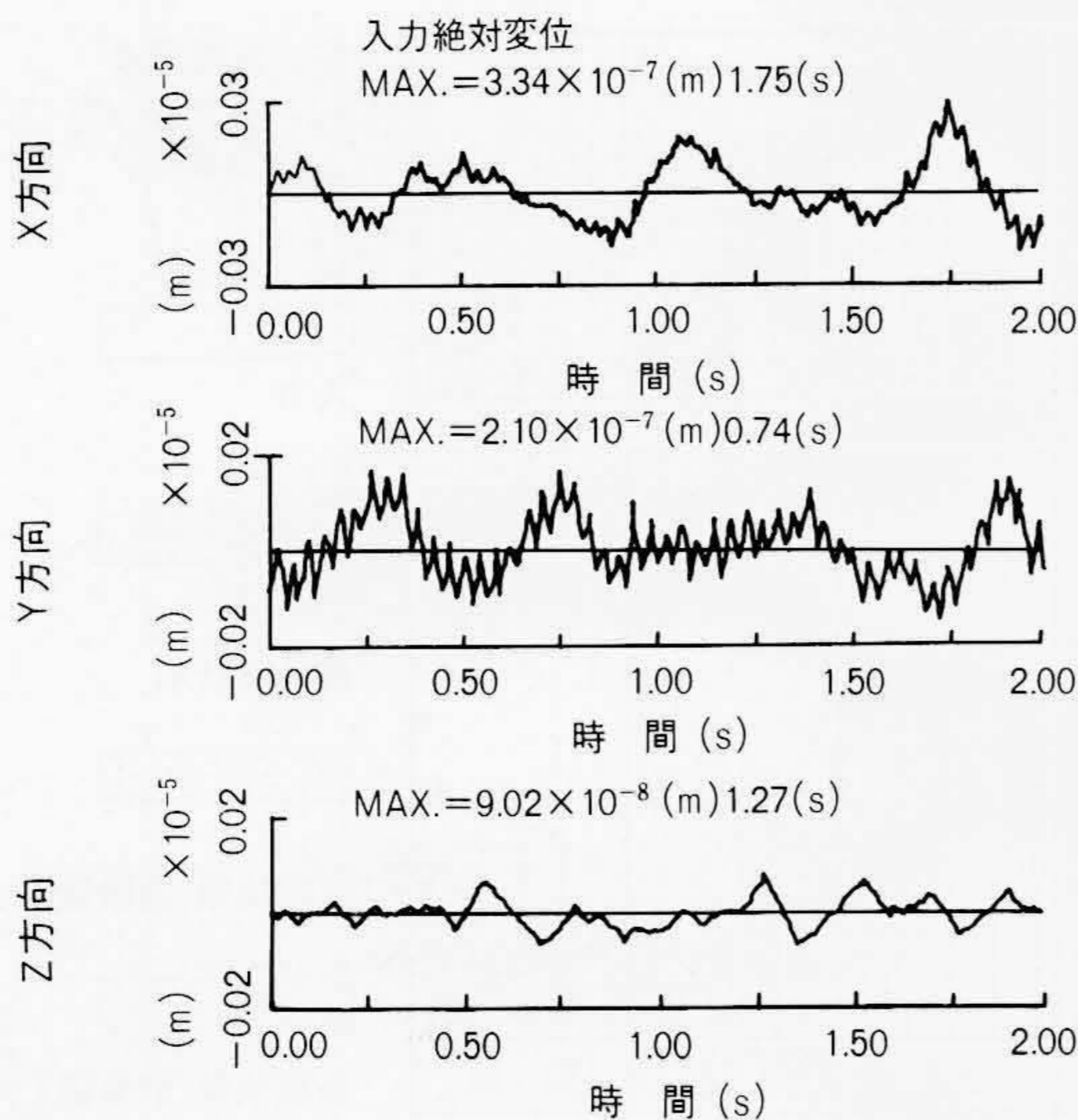


注: \ddot{Z}_v Z方向地震動入力

図4 鉛直応答の解析モデル モデルは床全体を一つの剛体とみなし, X方向の並進(X), Y方向の並進(Y), 水平面内の回転(ϕ)の3自由度が考慮されている。



(a) 入力加速度と応答加速度の波形例



(b) 入力絶対変位と応答絶対変位の波形例

図5 微振動除振性能(入力絶対変位と応答絶対変位の波形例) 鉛直方向での増幅は, 浮床の微振動に対する減衰が小さいため, 固有振動数(2 Hz)での振動が励起されたことによる。

次元各々の単独方向で加振し、地震波加振実験では3次元同時加振を行った。この地震波には、実地震の地動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。まず、水平入力による水平面内の運動と鉛直入力による鉛直面内の運動とを独立に考え、解析は水平方向解析モデルと鉛直方向解析モデルの二つに分けて行った。なお、微振動用の解析モデルは装置各部のモデル要素が複雑すぎるため、省略した。水平方向解析モデルを図3に、鉛直方向解析モデルを図4に示す。水平方向の振動は床全体を一つの剛体とみなし、X方向の並進、Y方向の並進、水平面内の回転の3自由度を考えた。鉛直方向の運動は、X-Z平面内の回転がないという実験結果からY-Z平面内についてだけ考えた。モデルは床全体を2次元除振・免震床と3次元除振・免震床の二つの剛体に分け、2次元除振・免震床のZ方向の並進、その鉛直平面内の回転の4自由度を考えている。搭載機器の挙動については、床全体の応答を求めた後に、床各部の加速度を入力して、各方向について非連成の1自由度応答解析を行った。各運動方程式の数値計算はルンゲークッタ法によって行い、計算の時間刻みは $\frac{1}{500}$ 秒とした。

5 実験及び解析結果とその検討

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5(a)に、入力絶対変位と応答絶対変位の波形例を同図(b)に示す。ただし、入力は振動台上で、水平応答は2次元除振・免震床上で、鉛直応答は3次元除振・免震床(浮床)上で測定した。加速度については 10^{-3} m/s^2 オーダの最大加速度を持つ微振動が、水平方向で約 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{6}$ に、鉛直方向では約 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{5}$ に低減しており、良好な除振効果が得られて

いる。一方、同図(b)の変位についてみると、 10^{-7} m オーダの最大変位を持つ微振動が、水平方向には $\frac{1}{3}$ 程度に低減している。しかし、鉛直方向には2倍程度に増幅している。この鉛直方向の増幅は、浮床の微振動に対する減衰が小さいため、固有振動数(2 Hz)での振動が励起されたことによるものと考えられる。このような、低い周波数での変位の増幅は、その固有振動数が十分に小さい限り(この場合の2 Hzの固有振動数は空気ばね式除振台のそれと同程度のものである。)問題となることはないと考えられる。水平方向の応答波形のスペクトル解析結果から、本除振・免震床は、微振動に対しても、水平に約0.5 Hzの固有振動数を持つことが明らかになっており、この水平固有振動数は空気ばね式除振台のそれと比べてはるかに低い値である。また、水平方向の粘性せん断形ダンパは、同図(b)の結果から明らかなように、微振動に対しても有効であることが確認された。以上の結果から、本システムは、水平方向で約0.5~0.6 Hzの固有振動数、鉛直方向で2 Hzの固有振動数を持っていることが分かった。本性能は、従来の空気ばね式除振台と比較して、鉛直方向ではほぼ同等であるが、水平方向には優れたものであることが分かった。

5.2 免震性能

地震波としてエルセントロ波、八戸波、東北大学波の3種類を用いた加振実験結果と、解析モデルによる計算結果とを図6に示す。地震波はいずれも建屋による増幅を考慮した床応答模擬波である。同図の下段は加速度であり、左から入力加速度、非免震時と免震時の応答加速度及び解析モデルの計算応答加速度を、上段は変位量の測定値と計算値を示す。

なお、非免震時の応答加速度の測定は、実験の安全性を考慮して、入力加速度を小さくして行い、測定値を線形補正(約2倍)して求めたものである。応答加速度は地震入力加速度に対して水平方向で約 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{10}$ 、鉛直方向で約 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{4}$ に低減されている。また、応答加速度は免震していない状態に比べ、水平方向で約 $\frac{1}{8} \sim \frac{1}{20}$ に、鉛直方向で約 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{14}$ に低減されて

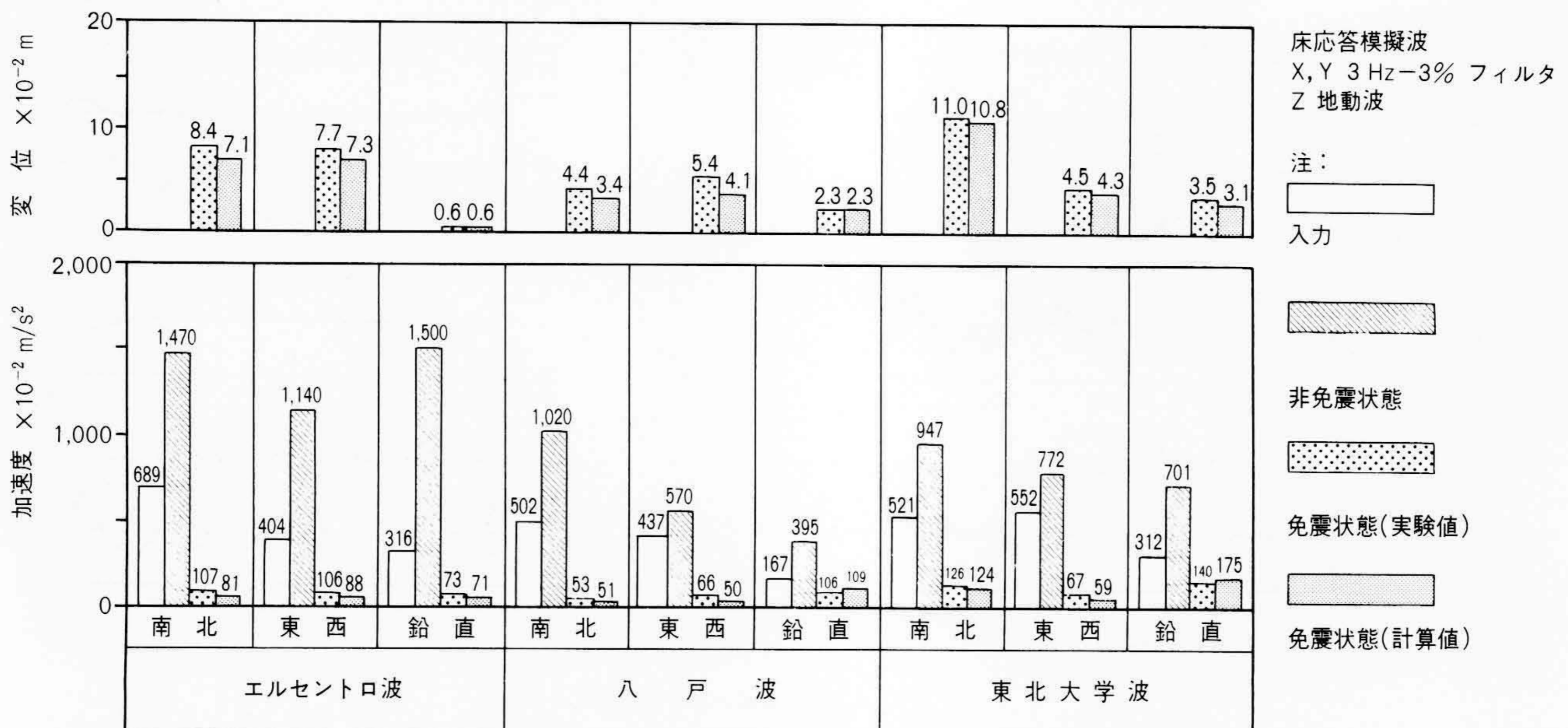
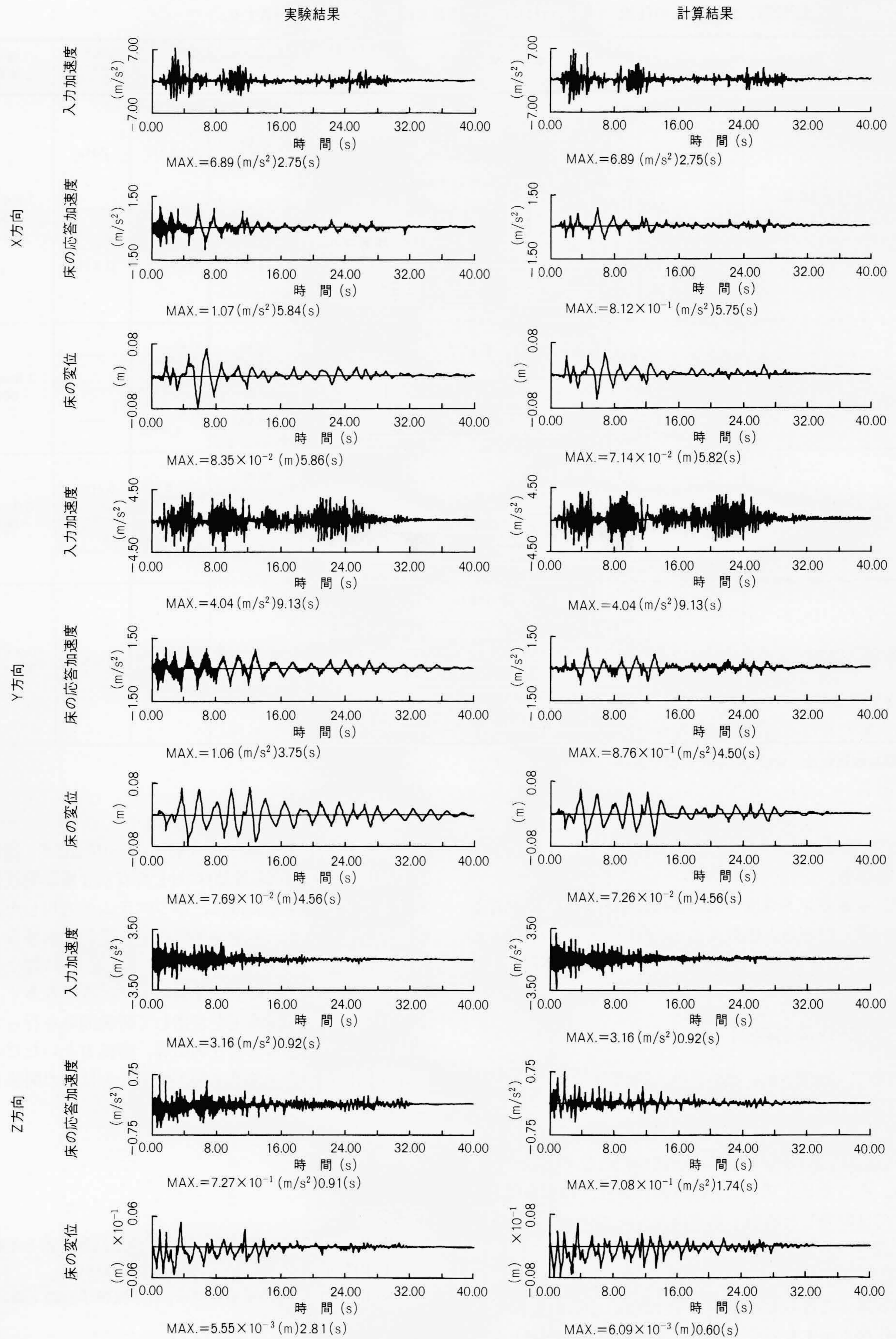


図6 免震性能(床応答模擬波入力の場合) 良好な免震効果が得られている。



エルセントロ波(床応答模擬波)
 水平 3 Hz-3% フィルタ
 鉛直 地動波

図7 エルセントロ波(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。

表2 各種除振・免震装置，システムの仕様 各種仕様に応じて最適な装置，システムを選択する。

方式	基本構造	対象振動	固有振動数*		標準寸法 搭載質量
			水平	鉛直	
3次元除振・免震方式		除振 (微振動)	0.4 Hz	2 Hz	1.8 m × 3.6 m ~ 500 kg/m ²
		免震	0.4 Hz	0.8 Hz	
水平免震方式 水平除振・免震方式		除振 (微振動)	0.4 ~ 1.4 Hz	—	1.8 m × 1.8 m ~ 500 kg/m ²
		免震	0.4 ~ 1.4 Hz	—	
簡易3次元除振・免震方式		除振 (微振動)	1 ~ 5 Hz	5 Hz ~	3.6 m × 3.6 m ~ 500 kg/m ²
		免震	1 Hz	—	
3次元除振方式		除振 (微振動)	0.5 ~ 5 Hz	0.5 ~ 5 Hz	0.9 m × 1.8 m 500 ~ 1,000 kg

注：* 固有振動数は，定格質量下での値である。

いる。本結果から，水平，鉛直ともに免震効果は非常に大きいことが分かる。

図7は，エルセントロ波・床応答模擬波入力の場合の応答波形について，実験値と解析モデルの計算値を比較したものであるが，両者はよく一致している。この結果，本解析モデルは設計に十分適用できる。

6 本システムの応用例

これまでに，微振動から強地震動までの振動を連続的かつ3次元的に吸収可能なシステムの開発結果について述べた。しかし，実際の要求は多種にわたり，コスト，耐久性などを加味した最適な装置や床システムを要求に応じて提供する必要がある。そこで日立プラント建設株式会社，株式会社日立建設設計では開発した除振・免震床をベースに，機器レベルあるいは床レベルでの(1)微振動除振，(2)免震，(3)微振動除振・免震併用の種々の要求に応じた装置，床システムを開発した。表2は，これら開発した種々の除振・免震装置，床システムの仕様を示すもので，既に一部は実設備に適用し，効果を発揮している。

7 結 言

今回開発した除振・免震床によって，微振動から強地震動

までの振動(加速度のオーダーでは $10^{-3} \sim 10^0 \text{ m/s}^2$ ，変位のオーダーでは $10^{-7} \sim 10^{-1} \text{ m}$ の振動)に対して有効な振動吸収技術を実現することができた。既に，本システムを応用したタイプが実際のクリーンルーム内に設置され，微振動除振台として実用化されている。しかし，この除振・免震床は他に類をみない新しいものであるため，今後改良すべき点も多く，現在，よりいっそうの性能向上を目指して研究開発を行っている。最後に，この開発に当たり御指導，御協力をいただいた日立製作所機械研究所の笠井洋昭工学博士をはじめ関係各位に対して，心からお礼を申し上げる。

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) Valter Djordjevic：Testing Sensitive Process Equipment to Determine Reliable Clean Room Vibration Criteria：Solid State Technology/December(1986)
- 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(昭和61-12)