

JAERI-Tech
2001-033



JP0150703



多段積層ゴム・コイルばねタイプ
3次元機器免震システムの
振動台試験および地震応答解析

2001年6月

堤 英明・山田 博幸・姥沢 勝三・柴田 勝之・藤本 滋*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

多段積層ゴム・コイルばねタイプ3次元機器免震システムの振動台試験および地震応答解析

日本原子力研究所東海研究所地震情報伝達研究特別チーム
堤 英明・山田 博幸・姥沢 勝三・柴田 勝之・藤本 滋*

(2001年3月6日受理)

免震技術は一般構造物と同様に原子炉機器の耐震設計においても、機器に作用する地震力を低減する有効な手段として期待されている。原研では、1991年より原子力機器の免震化に関する研究に着手し、機器免震の地震時における損傷頻度の評価手法および評価コード（EBISA：Equipment Base Isolation System Analysis）を開発した。さらに、上記評価コードを高度化するために、1996年より機器免震システムの動的挙動を把握するとともに、有効性を検証するための確証試験を実施している。

有効性確証試験では、特性の異なる2種類の3次元機器免震試験システムを製作し、それぞれの静的および動的特性を静加力試験および自由振動試験等で確認した。それらのうちの1台は、免震装置としてボールベアリング支承と空気ばねを用いたもので、現在大洗研究所内のテストベッドに設置し、自然地震動下で応答を観測しており、いくつかの地震動により顕著な免震効果を確認している。

また、他の1台は、免震装置として多段積層ゴムとコイルばねを用いたもので、3次元的連成挙動と免震効果を確認するために種々の周波数特性の地震動による振動台試験を実施した。本報告書は、多段積層ゴム・コイルばねタイプ3次元免震システムの振動台試験および地震応答解析結果についてまとめたものである。

Shaking Table Test and Dynamic Response Analysis of 3-D Component
Base Isolation System Using Multi-Layer Rubber Bearings and Coil Springs

Hideaki TSUTSUMI, Hiroyuki YAMADA,
Katsumi EBISAWA, Katsuyuki SHIBATA and Shigeru FUJIMOTO*

Seismic Emergency Information System Research Team
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura,Naka-gun,Ibaraki-ken

(Received March 6, 2001)

Introduction of the base isolation technique into the seismic design of nuclear power plant components as well as buildings has been expected as one of the effective countermeasure to reduce the seismic force applied to components. A research program on the base isolation of nuclear components has been carried out at the Japan Atomic Energy Research Institute(JAERI) since 1991. A methodology and a computer code (EBISA: Equipment Base Isolation System Analysis) for evaluating the failure frequency of the nuclear component with the base isolation were developed. In addition, a test program, which is concerned with the above development, aiming at improvement of failure frequency analysis models in the code has been conducted since 1996 to investigate the dynamic behavior and to verify the effectiveness of component base isolation systems.

Two base isolation test systems with different characteristics were fabricated and static and dynamic characteristics were measured by static loading and free vibration tests. One which consists of ball bearings and air springs was installed on the test bed to observe the dynamic response under natural earthquake motion. The effect of base isolation system has been observed under several earthquakes.

Three-dimensional response and effect of base isolation of another system using multi-layer-rubber-bearings and coil springs has been investigated under various large earthquake motions by shaking table test. This report describes the results of the shaking table tests and dynamic response analysis.

Keywords: Horizontal and Vertical Base Isolation, Nuclear Component, Shaking Table Test,
Dynamic Response Analysis

*TOSHIBA CORPORATION

目 次

1. まえがき	1
2. 多段積層ゴム・コイルばねタイプ3次元機器免震システムの概要	2
2.1 設計仕様および免震システムの全体構成	2
2.2 構成機器の仕様	3
3. 振動特性試験	10
3.1 特性試験の概要	10
3.2 特性試験結果	11
3.3 振動特性まとめ	14
4. 正弦波パラメトリック加振試験	25
4.1 加振試験の概要	25
4.2 加振結果および連成振動の影響に関する考察	26
4.3 正弦波加振結果まとめ	28
5. 地震波加振試験	59
5.1 加振試験の概要および入力地震波	59
5.2 加振試験結果および免震効果・応答性状に関する考察	59
5.3 地震波加振まとめ	62
6. 振動モデルおよび地震応答解析	104
6.1 振動モデルおよび固有値解析結果	104
6.2 地震波加振試験結果シミュレーション	105
6.3 鉛直固有振動数および減衰定数に関するパラメトリック解析	106
6.4 地震応答解析まとめ	107
7. まとめ	122
参考文献	124

Contents

1.	Introduction -----	1
2.	Description of Base Isolation System -----	2
2.1	Design Specification and Structure -----	2
2.2	Specifications of Components -----	3
3.	Static and Dynamic Characteristics -----	10
3.1	Description of Static and Dynamic Tests -----	10
3.2	Test Results -----	11
3.3	Summary -----	14
4.	Shaking Table Test by Sine Wave Excitation -----	25
4.1	Description of Shaking Table Test -----	25
4.2	Test Results and Effect of Coupled Vibration -----	26
4.3	Summary -----	28
5.	Shaking Table Test by Seismic Motions -----	59
5.1	Description of Shaking Table Test and Input Seismic Motions -----	59
5.2	Test Results and Effects of Base Isolation System -----	59
5.3	Summary -----	62
6.	Analysis Model and Dynamic Response Analysis -----	104
6.1	Analysis Model and Eigenvalue -----	104
6.2	Simulation of Shaking Table Tests -----	105
6.3	Prametric Study on Vertical Natural Frequency and Damping Coefficient --	106
6.4	Summary -----	107
7.	Conclusion -----	122
	References -----	124

1. まえがき

免震構造を採用した一般建築物の強震動に対する有効性が、1994年1月のノースリッジ地震並びに1995年1月の兵庫県南部地震で実証されたことにより、免震構造に対する関心が高まっている。こうした事例も反映し、近年原子炉施設に対する免震構造の有効性が注目され、研究開発が活発化している。原子力施設を対象とした免震構造は、適用対象別に、(1)建屋免震、(2)床免震、(3)機器免震に分類することができる。建屋免震は、新規プラントに適用されるのに対し、床免震および機器免震は、新規と既存プラントの双方に適用可能であり、今後の技術の発展が期待されている。

このような背景を踏まえて、原研では、設計自由度が高く、重量や構造的に施工が容易で、低廉な機器免震技術に着目して研究を進めている。機器免震研究は、平成3年から平成7年までのPhase I研究と、平成8年から平成12年までのPhase IIに分かれる。Phase I研究では、(1)機器を免震化した場合の有効性を確率論的に評価する手法の提案^(1.1)、(2)機器免震有効性評価コードEBISA(Equipment Base Isolation System Analysis)のプロトタイプ作成^(1.2)、(3)碍管付き起動変圧器を免震構造化した場合の有効性^(1.3)および経済性評価^(1.4)等を行った。さらに、Phase II研究では、(1)自然地震動あるいは振動台試験を利用した機器免震有効性確認試験、(2)試験結果に基づくEBISAコードの高度化、(3)機器免震化による地震リスク低減効果の評価等を実施している。

有効性確認試験については、平成10年度に原子力機器を模擬した特性の異なる「ポールベアリング支承・空気ばねタイプ」および「多段積層ゴム・コイルばねタイプ」の3次元機器免震試験システムを設計製作し、静加力試験および自由振動試験等の特性試験を実施した。さらに、前者については大洗研究所内のテストベッド上に設置し、自然地震動下において地震応答観測を実施中で、既に数回の地震で免震効果を確認できる有効なデータを得ている^(1.5)。後者については、種々の周波数特性を持つ地震動により振動台試験を行い、免震効果および3次元連成挙動を確認した。

本報告書は、多段積層ゴム・コイルばねタイプ3次元機器免震システムの概要、特性試験、正弦波加振試験、地震波加振試験および地震応答解析についてまとめたものである。次章以降の内容は以下の通りである。第2章では、機器免震システムの概要について述べる。第3章では、静加力試験、自由振動試験、振動台正弦波加振等の特性試験により求めた免震装置の振動特性について述べる。第4章では、3次元連成振動効果を確認するために行った正弦波パラメトリック加振試験の概要と結果について、また、第5章では、種々の周波数特性の地震波による加振試験の概要と結果について述べる。第6章では、振動モデル、地震波加振のシミュレーション解析結果および鉛直固有振動数と減衰定数による加速度低減効果への影響を検討した同振動モデルを用いたパラメトリック解析について述べる。

2. 多段積層ゴム・コイルばねタイプ3次元機器免震システムの概要

本3次元機器免震試験システムは、建屋内外に設置される機器の重量を模擬したコンクリートブロックと免震装置により構成されている。本章では、免震システムの全体概要および構成機器の仕様について述べる。

2.1 設計仕様および免震システムの全体構成

(1) 設計仕様

本3次元機器免震試験システムの設計振動特性を表-2.1に示す。水平固有振動数0.5Hz、鉛直固有振動数2.0Hz、水平方向減衰定数0.2、鉛直方向減衰定数0.3とし、これらの振動特性が得られる水平および鉛直免震装置を選定した。

特に鉛直固有振動数は、免震効果と鉛直荷重の支持力およびロッキング等の条件を考慮して設定する必要がある。すなわち、免震効果を大きくするために固有振動数を低減すると、鉛直荷重に対する支持力が減少し、ロッキングも増大する。地盤の卓越周波数や建屋および機器の固有振動数等を合わせて考慮すると、鉛直固有振動数の設定範囲は1Hz～4Hzと考えられる(図2.1参照)。既に自然地震動下で地震応答観測を行っているポールベアリング・空気ばねタイプ3次元機器免震システム^(1,5)は、鉛直固有振動数を下限値の1.0Hzに設定していることから、本システムでは、免震効果や動的挙動を比較検討するために鉛直固有振動数を2Hzとした。

(2) 免震システムの全体構成

3次元免震システムの全体概要を図2.2および写真2.1に示す。同図に示すように免震システムは、以下の装置より構成されている。

- (1) 水平免震装置 (多段積層ゴム=4台)
- (2) 鉛直免震装置 (コイルばね=8台)
- (3) 減衰装置 (オイルダンパー=NS方向・EW方向各2台、鉛直方向8台)
- (4) 水平および鉛直免震架台
- (5) コンクリートブロック (機器を想定、以下C.Bと略称する)

本免震システムは、多段積層ゴムを4隅に設置して水平免震架台を支持し、さらに水平免震架台上に、ケースに収納したコイルばねを正八角形状に配置・固定して鉛直免震架台を支持し、これに機器を搭載して水平および鉛直方向に免震化する構造となっている。また、減衰装置として、水平方向は床と水平免震架台の間に、鉛直方向は各コイルばねケースの中心部にオイルダンパーを装着(着脱可能)する構造になっている。

なお、本研究では、コイルばねを固定部材に交換した(2次元)水平免震システム(写真2.2参照)についても同様の各種試験を実施し、3次元免震システムと動的挙動や免震効果を比較検討した。

2.2 構成機器の仕様

各構成機器の詳細を図2.3に示す。主な仕様は以下の通りである。

(1) 免震対象機器

原子力発電所は、約200万個の機器で構成される複合構造体である。これらの機器は、運転関連の常用系機器と事故発生時に事故の進展を緩和するための安全系機器に大別される。原子力発電所を対象とした地震P.S.A.(Probabilistic Safety Assessment)では、安全上重要な事故シーケンス、システムおよび機器が同定^(2.1)されるが、機器免震ではそれら重要機器を対象としている^(2.2)。主な免震化対象機器を設置場所と重量で分類すると 図2.4に示す通りである。また、機器の形状や寸法は様々であるが、それらの水平固有振動数は10Hz～20Hzで、鉛直固有振動数はそれよりもさらに高い帯域にあるものと推定される。

機器の重量は、免震システムの固有振動数や支持方法を考慮して免震装置を選定する際に特に重要な条件となる。重量100tfクラスの機器に対しては、水平免震装置として最も一般的な積層ゴムの適用が可能であるが、40t以下の中小規模の機器については、免震系として必要な固有振動数(0.5Hz以下)に対して積層ゴムの適用が難しいことから、免震装置の選定等設計上の課題が多い。

そこで、本免震システムでは、中規模クラスの機器を想定して、重量20tfのC.Bを搭載するものとし、さらに、3次元免震で問題となるロッキングが発生しやすいように、幅と高さの比を1:2に設定した。また、重量の調整や製作および組立・解体が容易であること等を考慮し、幅1.6m×奥行1.6m×厚さ32cm(重量2.0t/体)のコンクリート版を10体重ね(高さ3.2m)、それらをPC鋼棒で締め付けて鉛直免震架台に固定した。

(2) 多段積層ゴム

水平免震装置として、多段積層ゴム^(2.2)を用いた。多段積層ゴムは、小型の積層ゴム(要素積層ゴム)4個を安定板で固定したものを1段のユニットとして、設計固有振動数に合わせて必要段数積み重ねたものである。単体の積層ゴムと比べると、鉛直荷重に対する安定性が高く、同じ支持荷重に対して、より小さな水平固有振動数が得られるのが特長である。また、要素積層ゴムのサイズと段数を選定することで、支持荷重と必要水平固有振動数に対して自由度の高い設計が可能である。

本システムでは、5tfの積載重量に対して約0.5Hzの固有振動数が得られる市販の多段積層ゴム(MS055F20:ブリヂストン製)を使用した。多段積層ゴムの段数は5段で、要素積層ゴムは天然ゴム系の低減衰材とした。水平免震装置の支持荷重は、C.Bや免震架台等を含めて約22.7t(多段積層ゴム1台当たり5.7tf)であることから、多段積層ゴムにより得られる固有振動数は0.45Hzとなる。また、設計上の許容変位(各要素積層ゴムの許容変形×段数×推奨荷重/使用荷重)は約9cmである。

(3) コイルばね

コイルばねは、積載重量約20.6tfを8台のコイルばねで支持するものとし、設計固有振動数2.0Hzに対して以下の仕様とした。

○ばね定数(コイルばね1本当たり): 415kgf/cm

○許容変位 : ±5cm

コイルばねは、ばねが鉛直方向のみに変位するように鞘管構造の鋼製ケースに装着した。コイルケースにはコイルの過大な変形を防止するストッパー bolt が取り付けられている。

(4) 水平方向オイルダンパー

水平方向のオイルダンパーは、固有振動数 0.45Hz に対して減衰定数が 0.2 程度になるものとし、以下のように仕様を設定した。オイルダンパーは、ほぼ速度比例した減衰力を持つ。

○減衰係数(オイルダンパー 1 台当たり) : 13.2kgfsec/cm

○許容変位 : ±15cm

(5) 鉛直方向オイルダンパー

鉛直方向のオイルダンパーは、固有振動数 2.0Hz に対して減衰定数が 0.3 程度になるものとし、以下のように仕様を設定した。オイルダンパーは、ほぼ速度比例した減衰力を持つ。

○減衰係数(オイルダンパー 1 台当たり) : 23.1kgfsec/cm

○許容変位 : ±5cm

(6) 水平および鉛直免震架台

水平および鉛直免震架台は、鋼製フレームとした。水平免震架台と多段積層ゴムの間には各要素積層ゴムに均等に荷重が伝達されるように球面座が挿入されている。鉛直免震には、C. B を設置する鋼製枠が固定されている。また、鉛直免震架台が過大な水平変形やロッキングを生じないように、水平免震架台から C. B 鋼製枠のコーナー部を抑えるストッパーが設置されている。ストッパーには、摩擦抵抗を低減するためにテフロン材を貼り付けてある。なお、水平免震架台の最大変位(撓み)は 2.8mm 程度で、2 台のコイルばねケースを固定している梁中央部で発生する。

表2.1 3次元免震システム設計振動特性

	水平免震装置	鉛直免震装置
支持荷重	22tf	20tf
固有振動数	0.5Hz	2.0Hz
減衰定数	0.2	0.3

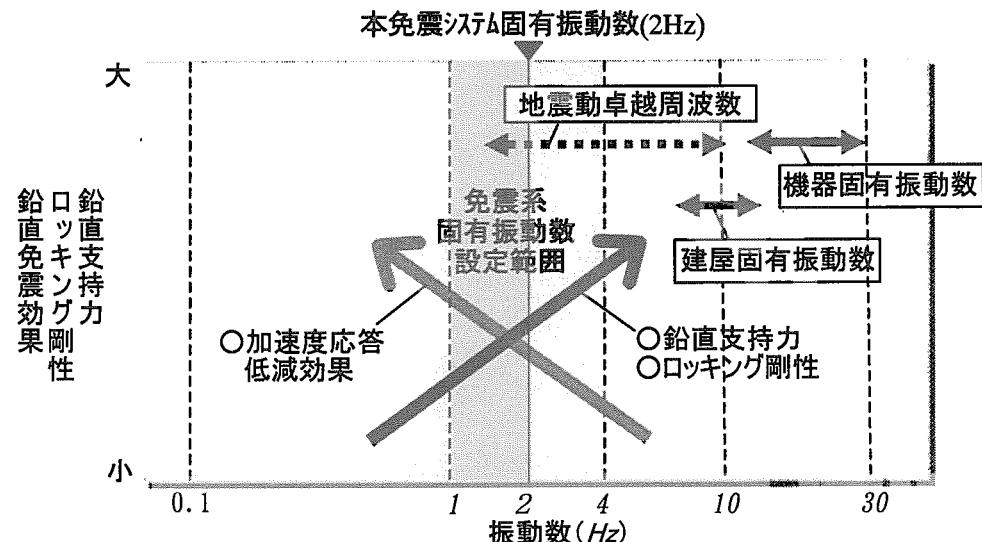


図2.1 鉛直免震固有振動数設定に関して考慮すべき条件

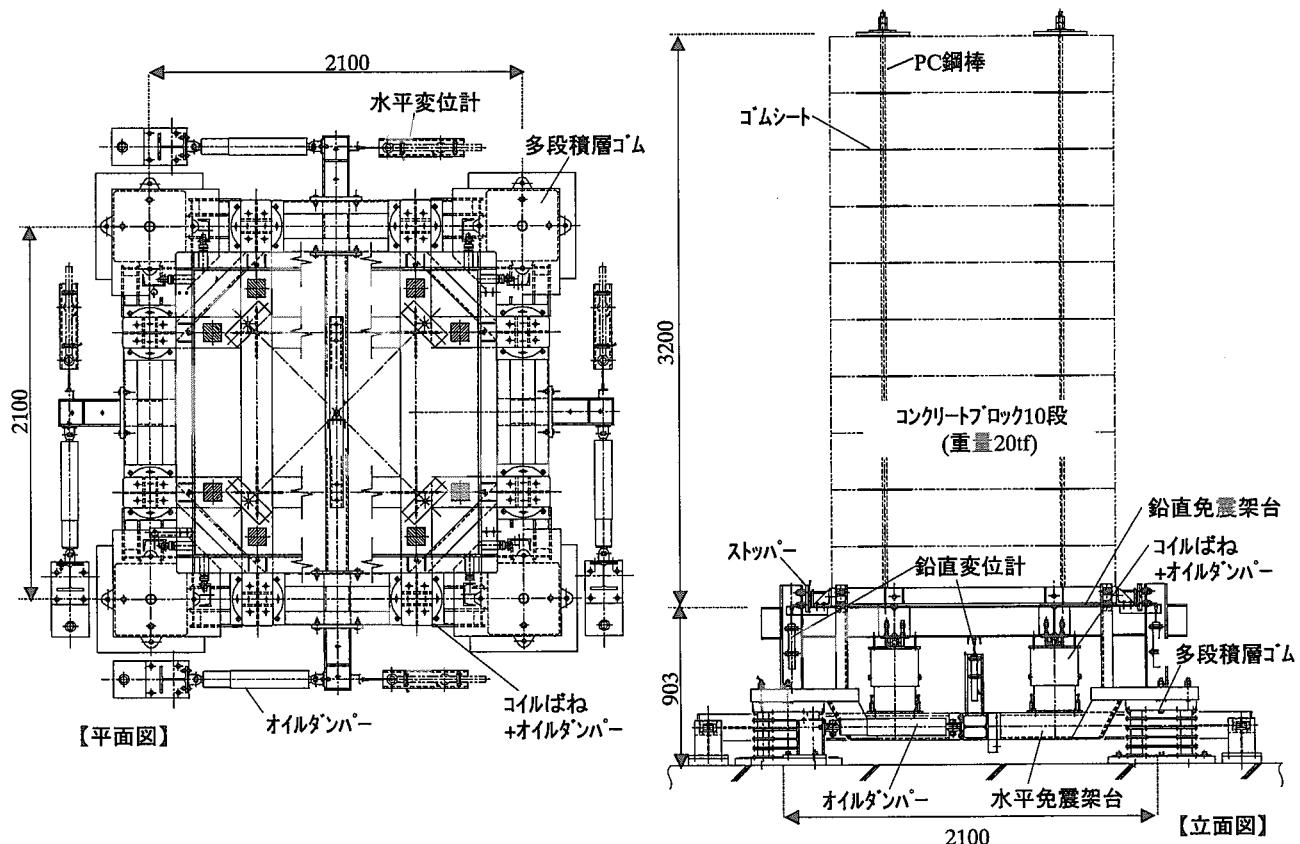


図2.2 3次元免震試験システム概要

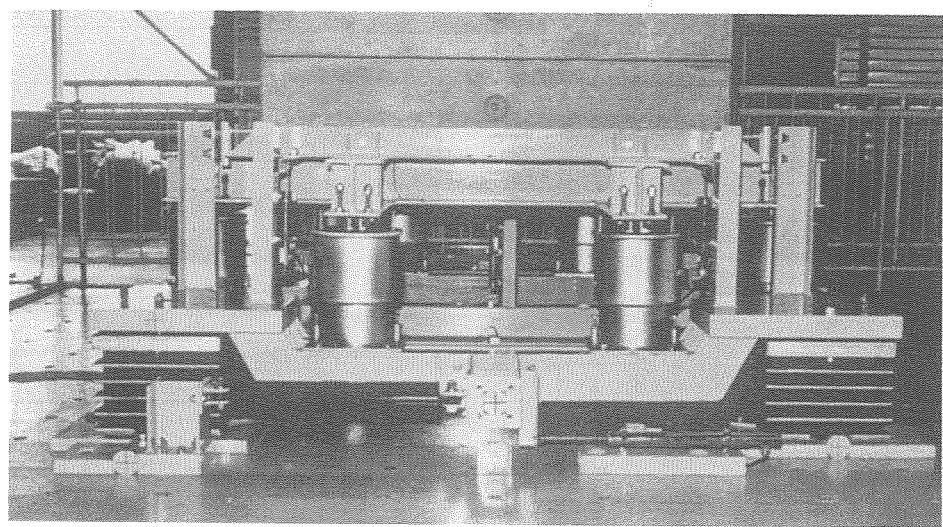
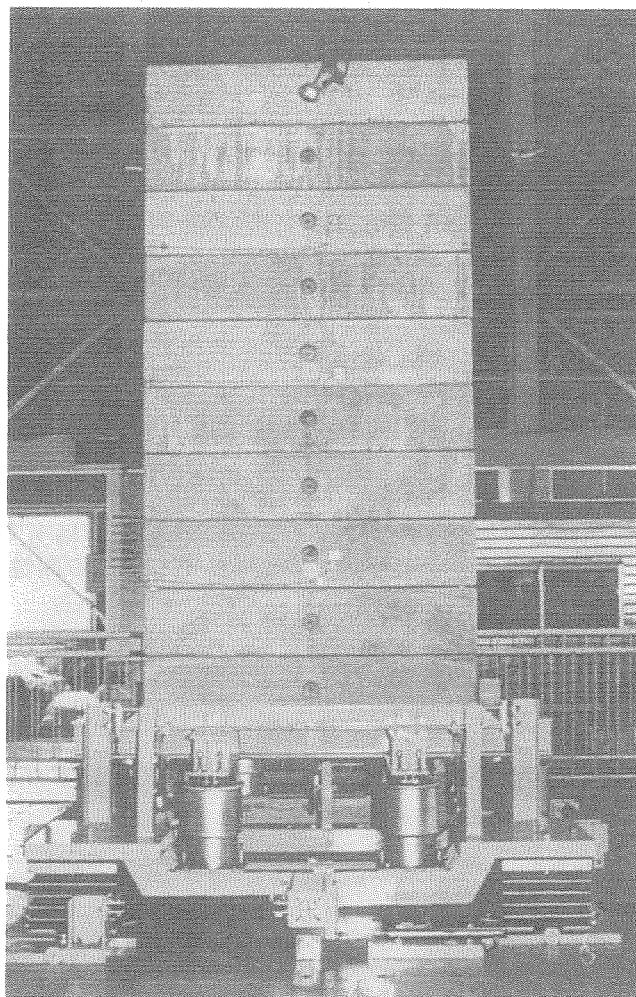


写真 2.1 3次元免震試験システム全景

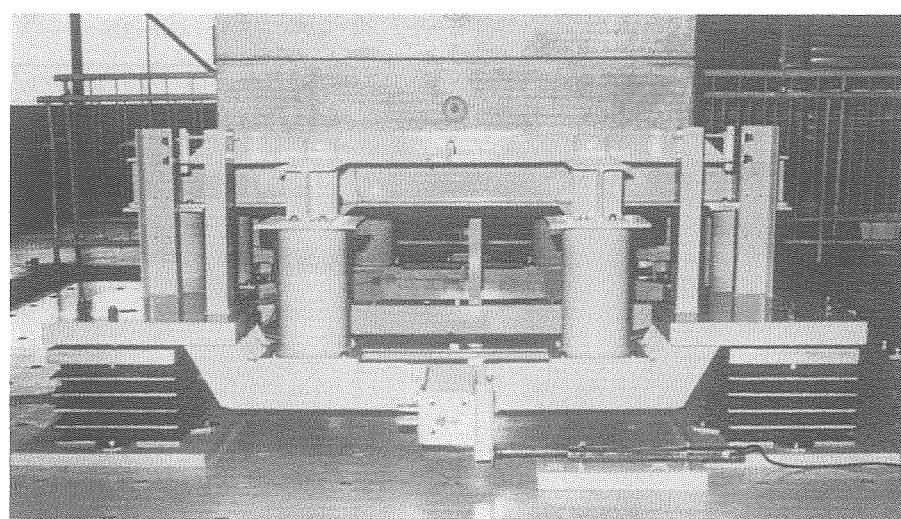
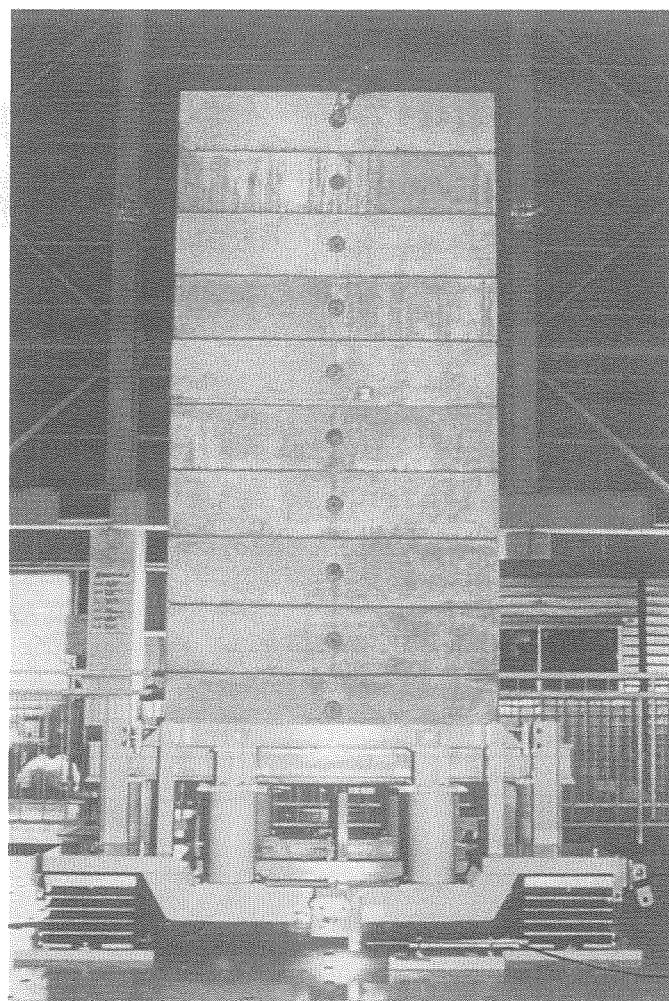


写真 2.2 水平免震試験システム全景

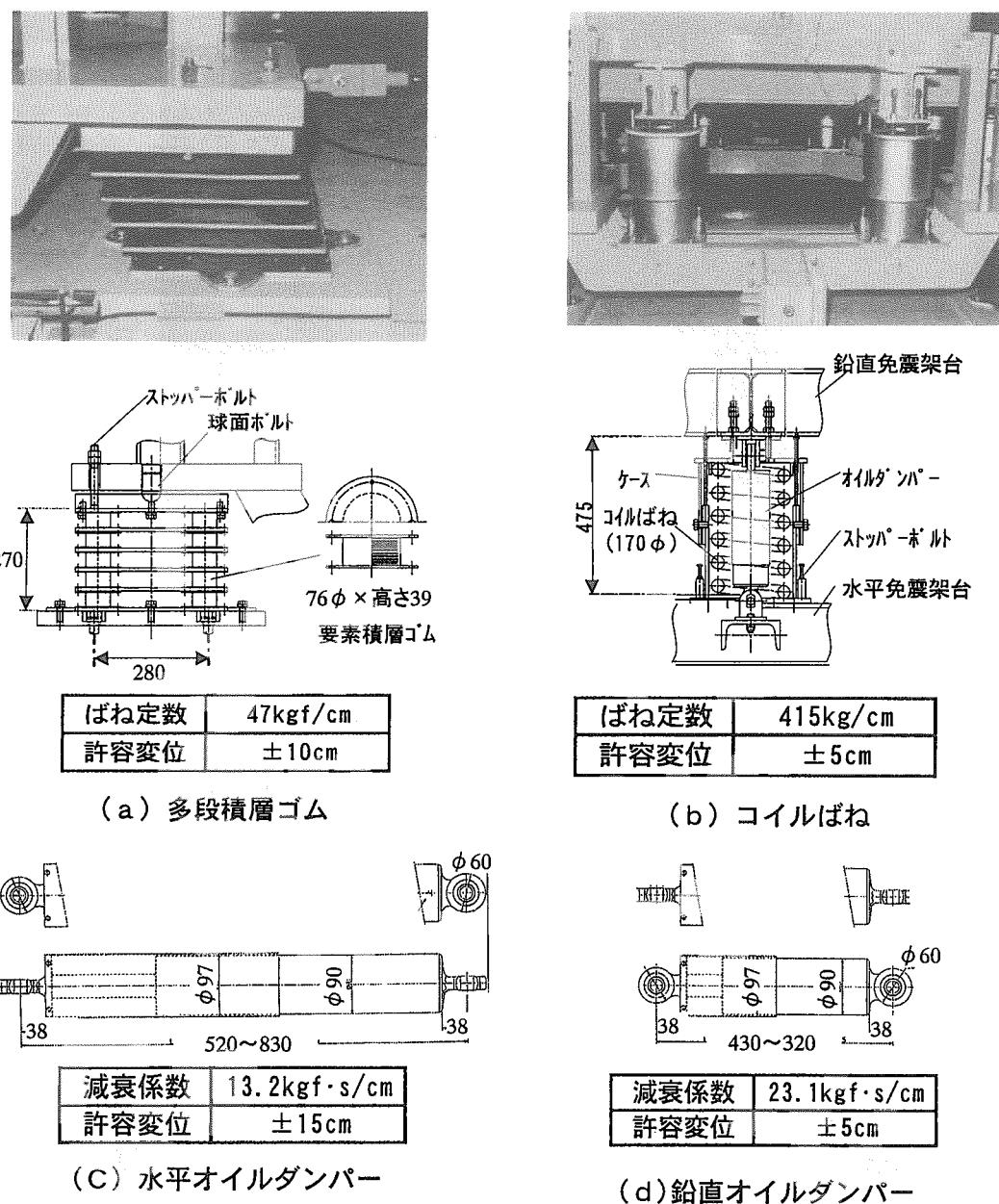
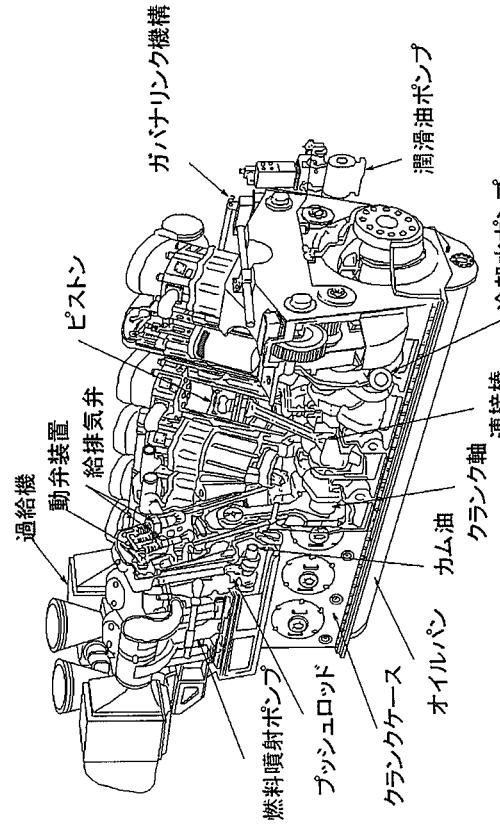
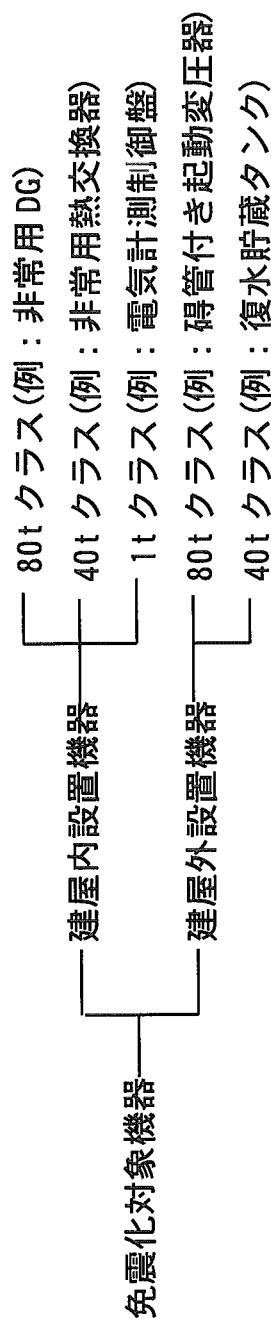
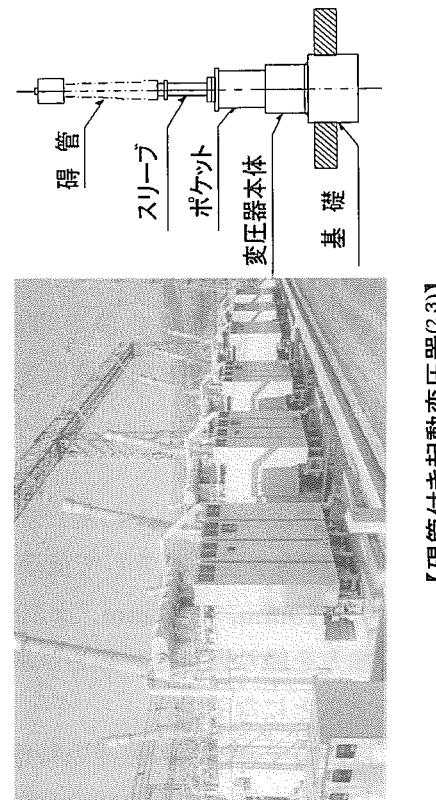


図2.3 3次元免震装置詳細



【非常用DG】



【碍管付き起動変圧器(2.3)】

図2.4 免震化対象機器の分類

3. 振動特性試験

3.1 特性試験の概要

3次元免震システムの復元力特性および振動特性を把握するために、ダンパーがない場合とある場合について、水平2方向の静加力試験と自由振動試験、水平1方向および鉛直方向について、振動台による正弦波掃引加振を行った。なお、比較のために水平免震システムについても同様の特性試験を実施した。

試験方法および計測方法を図3.1、写真3.1および図3.2に、計測機器および振動台の仕様を表3.1および表3.2に示す。以下に各特性試験の概要を示す。

(1) 水平方向静加力試験

水平静加力試験では、図3.1および写真3.1に示したようにスクリュージャッキ(許容荷重5tf)でX方向とY方向に水平免震架台を押し引きして荷重・水平変位関係を計測し、多段積層ゴムの復元力特性を求めた。最大で±10mm, ±25mm, ±50mm, ±75mm, ±100mmの強制変位を与え、それぞれ2サイクル加力を繰り返した。加力試験で得られた荷重・変位関係は、多段積層ゴム4台の復元力特性を示すことになる。

なお、鉛直方向については、コイルばねの復元力特性が線形で、ばらつきが少ないと、装置が大掛かりになり、加力が難しいこと等の理由で加力試験を省略した。

(2) 水平方向自由振動試験

自由振動試験では、図3.1および写真3.1に示したように水平方向に静加力試験用ジャッキで、初期変位(25mm, 50mm, 100mm)を与えた後、ジャッキ先端と免震架台を連結しているピンを油圧ジャッキで引き抜いて自由振動を発生させた。自由振動の間に、免震システム各部の加速度および免震架台の水平変位を計測した(図3.2参照)。得られた変位時刻歴波形から水平方向の固有振動数と減衰定数を求めた。

なお、鉛直方向は、自由振動を発生させることが技術的に難しいことから、正弦波掃引加振により固有振動数および減衰定数を同定した。

(3) 水平および鉛直方向正弦波掃引加振試験

正弦波掃引加振では、表3.1に示した仕様の振動台を用いて、振動数を変化させながら(水平方向0.3~30Hz, 鉛直方向0.8Hz~30Hz, 刻み0.02~0.1Hz)、一定加速度振幅(5Gal~40Gal)の正弦波を入力し、自由振動試験と同様に免震システム各部の加速度および変位を測定した(図3.2参照)。加振により得られた免震システム各部の共振応答特性から水平および鉛直方向の固有振動数、振動モード、減衰定数を同定した。

3.2 特性試験結果

水平および鉛直方向の復元力特性および振動特性をまとめると以下の通りである。

3.2.1 水平方向復元力特性

3次元免震および水平免震システムの静加力試験で得られた水平剛性を表3.3に、3次元免震システムの復元力特性を図3.3に示す。同図は、最大変位±25mm, ±50mm, ±100mmの復元力特性を重ね合わせて示している。これらの結果から、復元力特性について以下の知見が得られた。

- 1) 各試験の最大変位における等価剛性は良く一致している。また、X方向とY方向はほとんど同一の復元力特性を有している。ただし、ダンパーがある場合は、ない場合と比べ大きな履歴ループを描いている。これは、オイルダンパーのシールの摩擦抵抗による影響と考えられる。
- 2) 各加力サイクルの最大変位における等価剛性は、変位量が大きくなるに従い徐々に減少するソフニングタイプの履歴特性を有している。しかし、地震時の主要振動領域と考えられる変位10mm～50mmの範囲における剛性の変化は10%程度で、振動数の変化に対する影響は小さく、ほぼ線形系と見なすことができる。
- 3) 小変位における復元力特性は、大変位の履歴に包絡され、再現性がある一定性状の復元力特性を有している。

3.2.2 振動特性

自由振動試験および正弦波掃引試験から、3次元免震および水平免震システムの固有振動数、振動モード形および減衰特性について以下の結果が得られた。

(1) 3次元免震システム・ダンパーなしの場合

初期変位約100mmの水平方向自由振動試験における水平方向変位時刻歴と各サイクルの極大点を初期振幅として、1サイクル毎に算出した減衰定数および1次固有振動数を図3.4に示す。正弦波掃引加振結果として、水平1次モード近傍の加速度共振曲線(水平加振振動数0.3Hz～0.5Hz, 刻み0.02Hz, 加速度振幅4Gal), 水平2次モード近傍の同曲線(水平加振振動数1.2Hz～1.6Hz, 刻み0.1Hz, 加速度振幅25Gal)、鉛直1次モード近傍の同曲線(鉛直振動数範囲0.8～3.0Hz, 刻み0.1Hz, 加速度振幅5Gal)を図3.5に示す。また、免震システム各部の加速度分布から求めた振動モード形を図3.6に示す。なお、水平方向変位時刻歴は、1次固有振動モードの振動波形を抽出するために、1.1Hzのローパスフィルターによるフィルタリング処理を行い、2次固有振動モード(約1.5Hz)の影響を除去した。

これらの結果から、振動特性を纏めると以下の通りである。

- 1) 各加速度共振曲線から、水平1次モードの固有振動数は0.4Hz、水平2次モードは1.45Hz、鉛直1次モードは2Hzと同定することができる。また、自由振動試験の変位時刻歴から求められる1次固有振動数は0.39～0.4Hzで、大変位において若干減少傾向にあるが、ほぼ一定値を示している。この傾向は、剛性のソフニングによる影響と考えられる。なお、水平方向に関しては1Hz～30Hz、鉛直方向では2.2Hz～30Hzまでの振動数領域において、0.1Hz刻みで正弦波加振を行った結果では、共振振動数は見られないことから、上記の3モードが3

次元免震系の主要な振動モードと考えられる。

- 2) 各点の加速度分布から、水平1次モードは、水平免震架台の並進モードに、鉛直免震架台を回転中心とするロッキングが加わった振動モードである。水平2次モードは、C.Bの頂部と底部が逆位相でほぼ同レベルの応答倍率を示し、C.B中央では微少な値を示している。したがって、C.B中央近傍を回転中心とする剛体ロッキングモードである。また、鉛直1次モードは、C.Bの頂部と底部が同位相でほぼ同レベルの加速度応答倍率を示していることから、C.Bの剛体的な並進モードである。
- 3) 自由振動試験の変位時刻歴から、水平1次モードに対する減衰定数は0.045～0.047である。減衰定数は、大振幅領域では一定値を示し、小振幅領域で増加傾向にある。これは、静加力試験による履歴特性から、積層ゴムの材料である天然ゴムと添加材による材料内部の摩擦の影響と推定される。このような履歴減衰は一般的に、変位に反比例する特性を持っている。また、加速度応答倍率から、鉛直1次モードに対する減衰定数は0.02程度と推定される。
- 4) 自由振動試験結果から、固有振動数および減衰定数は、X方向とY方向で同様の値を示しており、水平方向の振動特性について異方性は見られない。

(2) 3次元免震システム・ダンパーがある場合

ダンパーなしの場合と同様、自由振動試験および正弦波掃引加振試験結果を図3.7～図3.8に示す。なお、正弦波掃引加振では、水平1次モード近傍では加速度振幅15Gal、水平2次モード近傍では50Gal、鉛直1次モード近傍では40Galとした。

これらの結果から、振動特性を纏めると以下の通りである。

- 1) 加速度共振曲線から、ダンパーなしの場合と同様、水平1次モードの固有振動数は0.4Hz、水平2次モードは1.45Hz、鉛直1次モードは2Hzで、これらが主要振動モードと考えられる。ただし、オイルダンパーの効果により、各共振振動数の加速度応答倍率は、ダンパーがない場合と比べ大幅に低減している。特に、水平2次モードの応答倍率は非常に小さく(0.5程度)、明確なピークは見られない。
- 2) 自由振動試験の変位時刻歴から、水平1次モードに対する減衰定数は振幅が大きな領域では0.23である。ダンパーの効果により、ダンパーなしの場合と比べ振動の減衰は極めて早い。
- 3) 加速度応答倍率から、鉛直1次モードに対する減衰定数は0.3程度と推定される。
- 4) 自由振動試験結果から、固有振動数および減衰定数は、X方向とY方向で同様の値を示しており、水平方向の振動特性について異方性は見られない。

(3) 水平免震システム・ダンパーがない場合

3次元免震と同様、自由振動試験および正弦波掃引加振試験結果を図3.9～図3.10に示す。また、免震システム各部の加速度分布から求めた振動モード形を図3.11に示す。なお、正弦波掃引加振では、水平1次モード近傍では水平加振振動数0.4～0.6Hz, 0.02Hz刻み、加速度振幅6Gal、水平2次モード近傍では水平加振振動数3.5Hz～6.5Hz, 0.1Hz刻み、加速度振幅40Gal、鉛直方向については、鉛直加振振動数1Hz～30Hz, 刻み0.1Hz、加速度振幅10Galとした。

これらの結果から、振動特性を纏めると以下の通りである。

- 1) 加速度共振曲線から、水平1次モードの固有振動数は0.45Hz、水平2次モードは5.2Hz、鉛直1次モードは9.9Hzで、これらが主要振動モードと考えられる。ただし、水平2次モードの応答倍率は0.25程度で非常に小さい。また、自由振動試験による変位時刻歴から求められる1次固有振動数は10mm以上の振幅領域で0.46～0.48 Hzとなり、剛性のソフニング傾向により、振動振幅の増加に対して若干減少する傾向がある。
- 2) 各点の加速度分布から、水平1次モードは、水平免震架台の並進モード、水平2次モードは、C. B底部(固定架台)を固定点とするC. B全体のロッキングモードである。また、鉛直1次モードは、多段積層ゴムと水平免震架台の鉛直ばね上に支持されたC. B全体の鉛直振動モードである。この場合、構造的に減衰が非常に小さいため、鉛直1次モードの加速度応答倍率は非常に大きくなり、このモードの共振応答振動数領域では、水平方向の応答に影響を与え、みかけの共振ピークをもたらしている。また、水平方向のみに加振した場合でも、振動台の振動ノイズにより鉛直方向に敏感に応答する。
- 3) 自由振動試験の変位時刻歴から、水平1次モードに対する減衰定数は振動振幅に対してほぼ一定であり、0.045～0.047である。また、鉛直1次モードに対する減衰定数は、加速度応答倍率から約0.02と推定される。
- 4) 減衰定数および固有振動数においては、X方向およびY方向の特性はほぼ一致しており、これら特性に関しては、異方性はないと見なせる。

(4) 水平免震システム・ダンパーがある場合

ダンパーがない場合と同様、自由振動試験および正弦波掃引加振試験結果を図3.12～図3.13に示す。なお、正弦波掃引加振では、水平1次モード近傍では水平加振振動数 0.35～0.7 Hz, 0.05 Hz刻み、加速度振幅 20Gal、水平2次モード近傍では水平加振振動数 3.5～6.5 Hz を0.1 Hz, 加速度振幅 40Gal、鉛直方向については、鉛直加振振動数 1 Hz～30Hz, 刻み 0.1Hz, 加速度振幅 10Galとした。

これらの結果から、振動特性を纏めると以下の通りである。

- 1) 加速度共振曲線から、ダンパーがない場合と同様に水平1次モードの固有振動数は0.46Hz、水平2次モードは5.2Hz、鉛直1次モードは9.9Hzで、これらが主要振動モードと考えられる。水平1次モードの応答倍率はダンパーの効果で大幅に減少している。自由振動試験による変位時刻歴から求められる1次固有振動数はダンパーがない場合と同様10mm以上の振幅領域で0.46～0.48 Hzとなっている。
- 2) 自由振動試験の変位時刻歴から、減衰定数は、20mm以上の比較的大きい振幅領域では、0.25～0.26であるが、10mmより小さい振幅領域では、0.30以上に増加している。これは、減衰装置であるオイルダンパーの軸シールの摩擦が原因と思われる。
- 3) 減衰定数および固有振動数においては、X方向およびY方向の特性はほぼ一致しており、これら特性に関しては、異方性はないと見なせる。

3.3 振動特性まとめ

特性試験から得られた各免震システムの振動特性を表3.4に纏める。3次元および水平免震システムの振動特性をまとめると以下の通りである。

- (1) 3次元免震および水平免震システムともに水平方向の復元力特性は、変位量が大きくなるに従い徐々に減少するソフニングタイプの履歴特性を有しているが、地震時の主要振動領域(変位10mm～50mm)の剛性の変化は10%程度で、ほぼ線形系と見なすことができる。
- (2) X方向とY方向はほとんど同一の復元力特性を有している。ダンパーがある場合は、オイルダンパーのシールの摩擦抵抗による影響で、ダンパーない場合と比べ大きな履歴ループを描いている。
- (3) 3次元免震システムの主要な振動モードは、水平1次モード(0.4Hz)、水平2次モード(1.45Hz)、鉛直1次モード(2Hz)と考えられる。水平1次モードは、水平免震架台の並進モードに、鉛直免震架台を回転中心とするロッキングが加わったモード、水平2次モードは、C.B中央近傍を回転中心とする剛体ロッキングモード、鉛直1次モードは、C.Bの剛体的な並進モードである。
- (4) 3次元免震システムの水平1次モードに対する減衰定数は、ダンパーがない場合は約0.045、ダンパーがある場合は0.23である。また、鉛直1次モードに対する減衰定数はそれぞれ約0.02および0.3である。
- (5) 水平免震システムの主要振動モードは、水平1次モード(0.45Hz)、水平2次モード(5.2Hz)、鉛直1次モード(9.9Hz)と考えられる。水平1次モードは、水平免震架台の並進モード、水平2次モードは、C.B底部(固定架台)を固定点とするC.B全体のロッキングモード、鉛直1次モードは、多段積層ゴムと水平免震架台の鉛直ばね上に支持されたC.B全体の鉛直振動モードである。
- (6) 水平免震システムの水平1次モードに対する減衰定数は、ダンパーがない場合は約0.045、ダンパーがある場合は0.25程度である。また、鉛直1次モードに対する減衰定数は約0.02である。
- (7) 各免震システムとも、固有振動数および減衰定数において、X方向およびY方向の特性はほぼ一致しており、異方性はないものと見なせる。

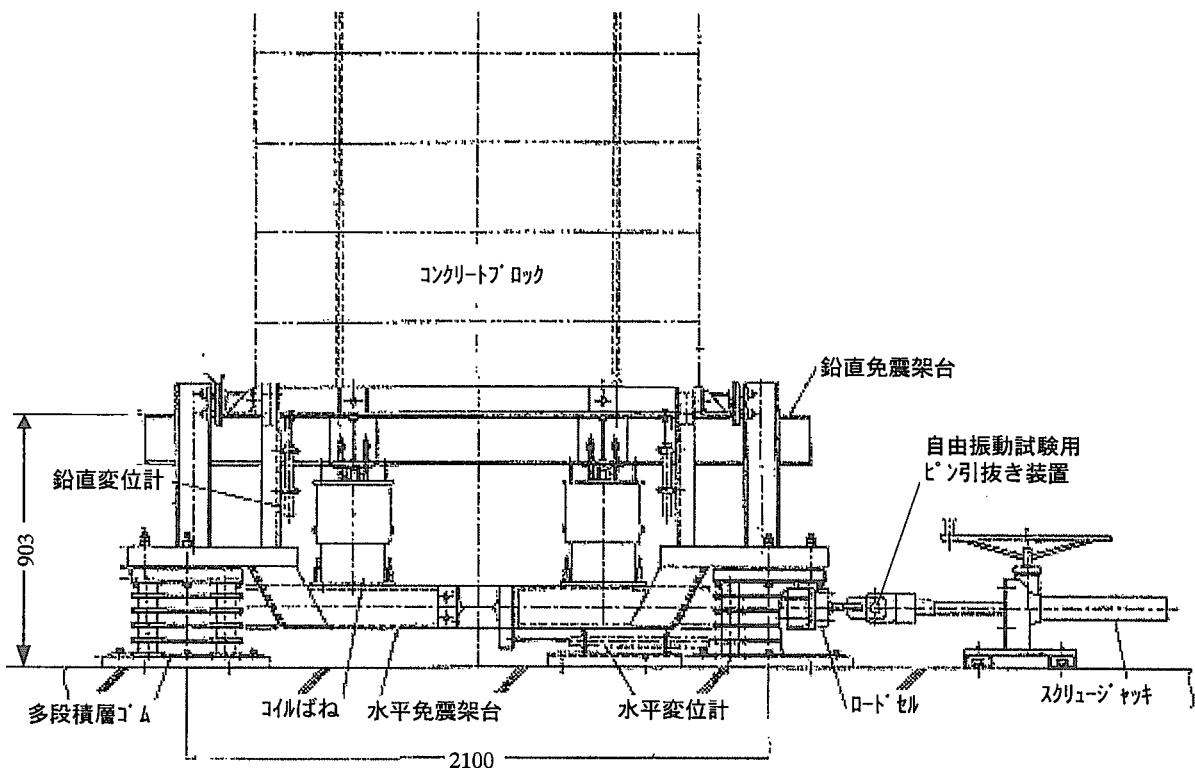
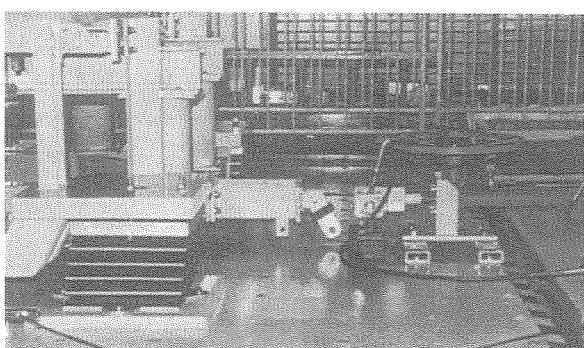
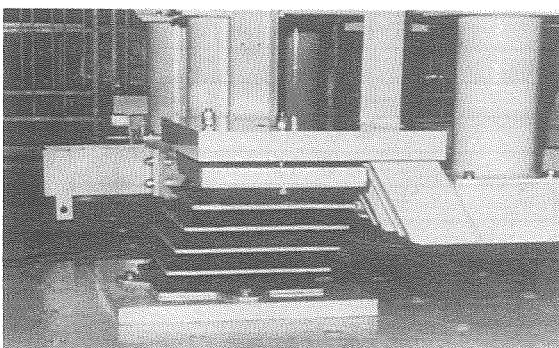
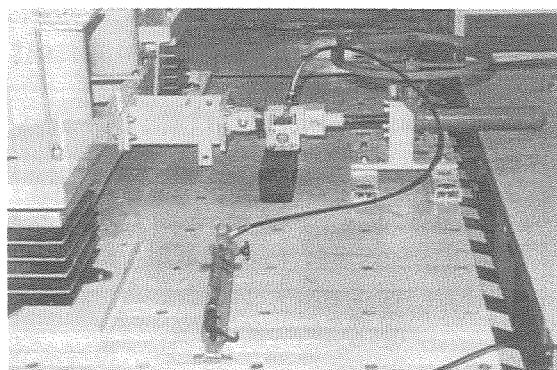
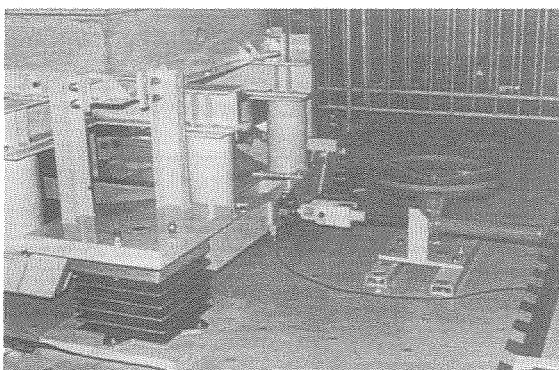


図3.1 静加力試験および自由振動試験方法



【静加力試験状況】

【自由振動試験状況】

写真3.1 静加力試験および自由振動試験状況

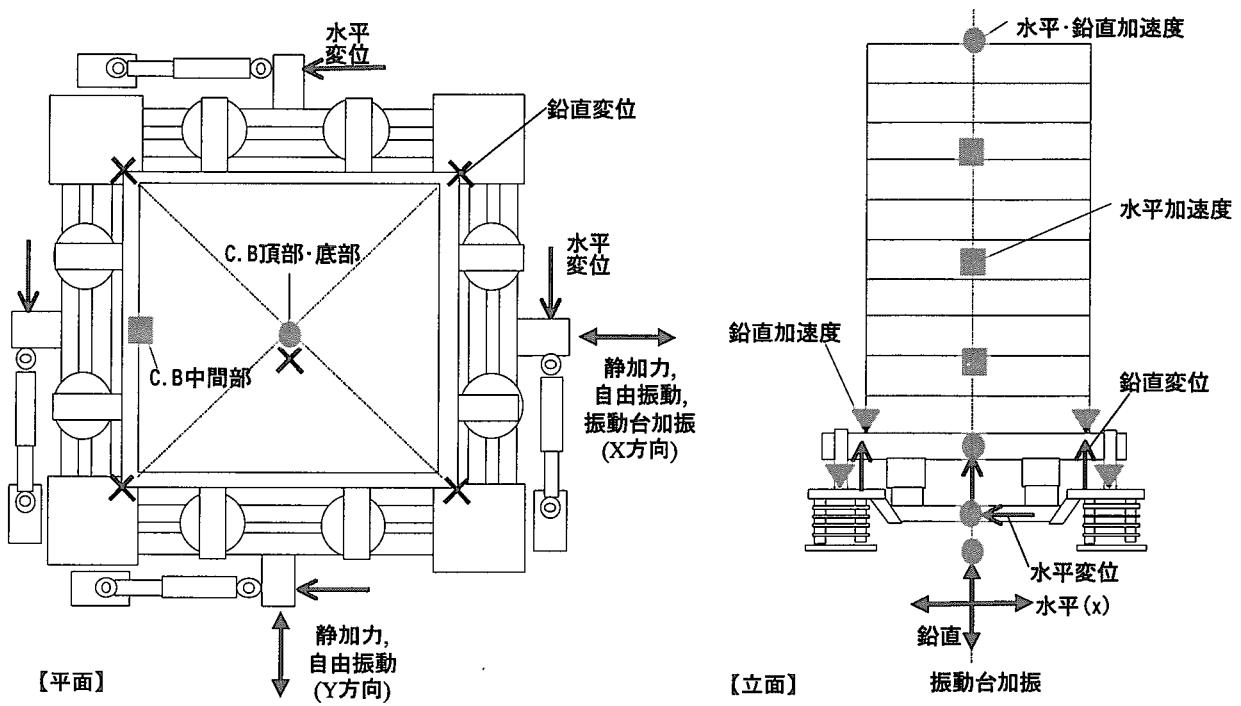


図3.2 特性試験・変位および加速度計測位置

表3.1 計測機器仕様一覧

計測機器名	メーカー・型式	仕 様
ロードセル	共和電業：LUK-5TBS	定格容量： $\pm 5\text{tf}$, 定格出力 $2\text{mv/v}(4000\mu\text{s}) \pm 1\%$
水平方向変位計	共和電業：DLT-150AS	定格容量： $\pm 150\text{mm}$, 定格出力 $2\text{mv/v}(4000\mu\text{s})$, 応答周波数：DC～10Hz
鉛直方向変位計	共和電業：DLT-50AS	定格容量： $\pm 50\text{mm}$, 定格出力 $2\text{mv/v}(4000\mu\text{s})$, 応答周波数：DC～20Hz
水平方向加速度計	共和電業：AS-2GB	定格容量： $\pm 2\text{G}$, 定格出力 $0.5\text{mv/v}(1000\mu\text{s})$, 応答周波数：DC～60Hz
鉛直方向加速度計	共和電業：AS-5GB	定格容量： $\pm 5\text{G}$, 定格出力 $0.5\text{mv/v}(1000\mu\text{s})$, 応答周波数：DC～100Hz
A/D変換器	—	サンプリング 周波数 256Hz , $20\text{Hz}\text{デシタルローバスフィルター}$

表3.2 振動台仕様一覧

振動台	寸法	$5\text{m} \times 5\text{m}$
	重量	20tf
最大積載重量		20tf
最大加振力	水平	40tf
	鉛直	60tf
最大振幅	水平	$\pm 75.0\text{mm}$
	鉛直	$\pm 37.5\text{mm}$
最大加速度（最大積載時）	水平	10m/sec^2
	鉛直	15m/sec^2
加振方向		水平・鉛直同時
加振振動数範囲		DC～30Hz
駆動方式		電気油圧式
制御方式		アナログおよびデジタル制

表3.3 3次元免震および水平免震システム水平剛性

免震システム種別	加力方向	最大変位振幅(mm)				
		10	25	50	75	100
3次元免震ダンパーなし	X	19.7	18.9	17.8	16.9	15.7
3次元免震ダンパーあり	X	20.2	19.1	18	17	15.9
水平免震ダンパーなし	X	20	19.1	18	16.8	15.7
	Y	20.2	19.3	18.1	17	15.7
水平免震ダンパーなし	X	19.7	19	18	16.9	15.7

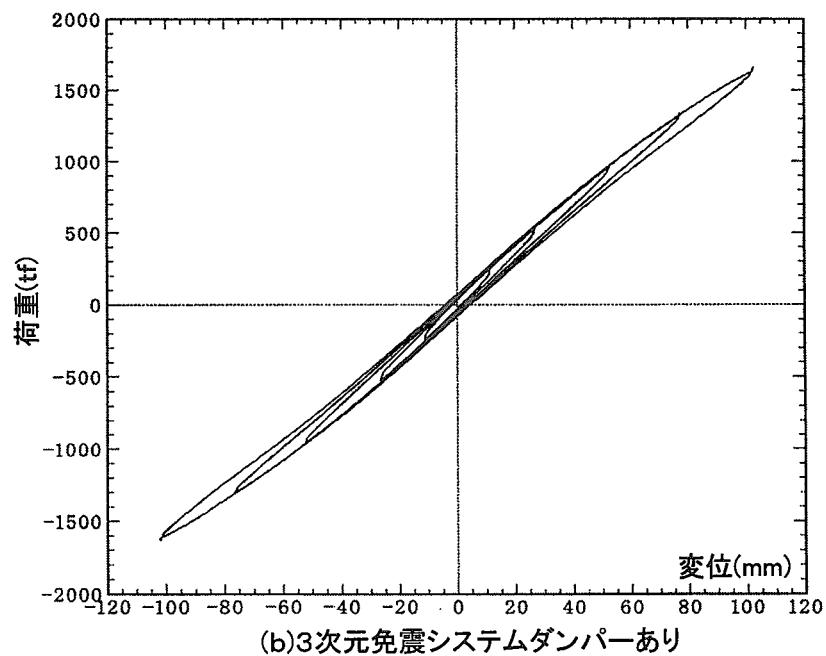
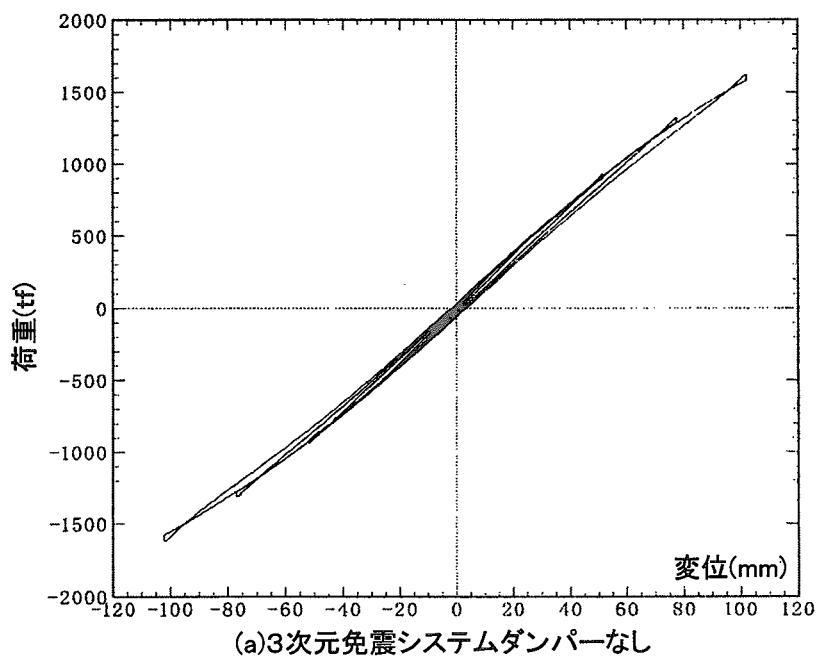


図3.3 3次元免震システム復元力特性

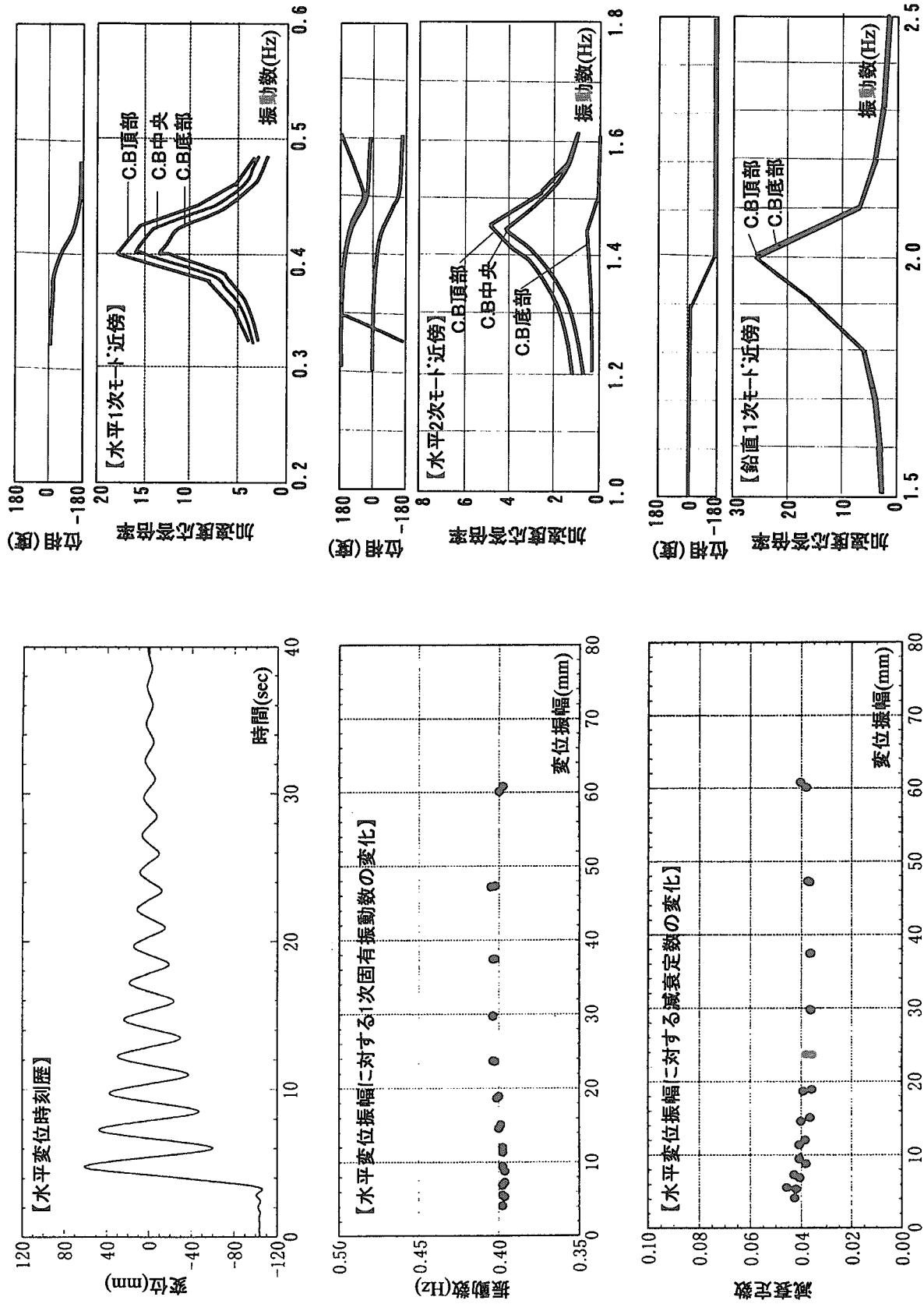


図 3.4 3次元免震システムダンパーなし自由振動試験結果

図 3.5 3次元免震システムダンパーなし・加速度共振曲線

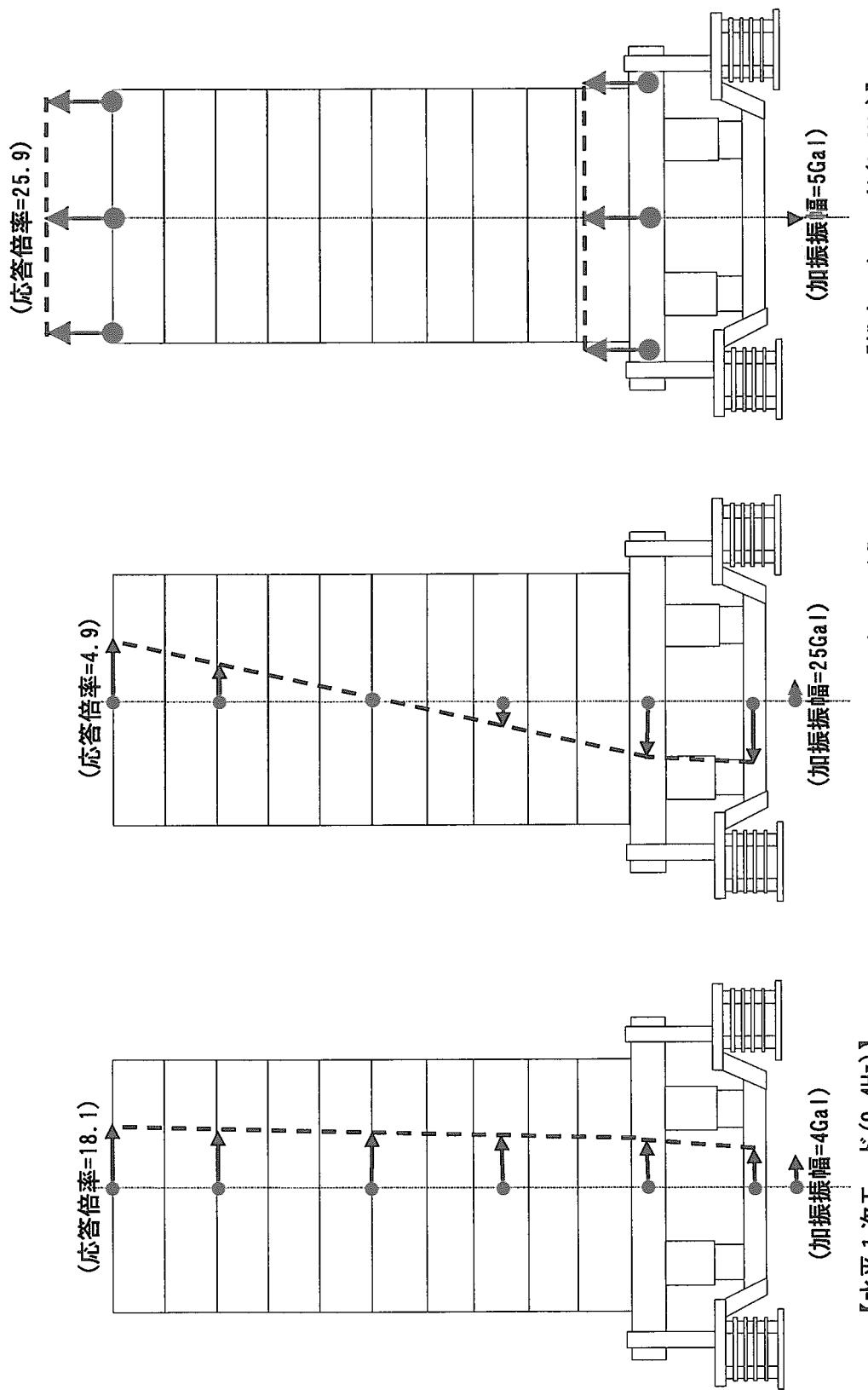


図 3.6 3次元免震システムダンパーなし・振動モード形

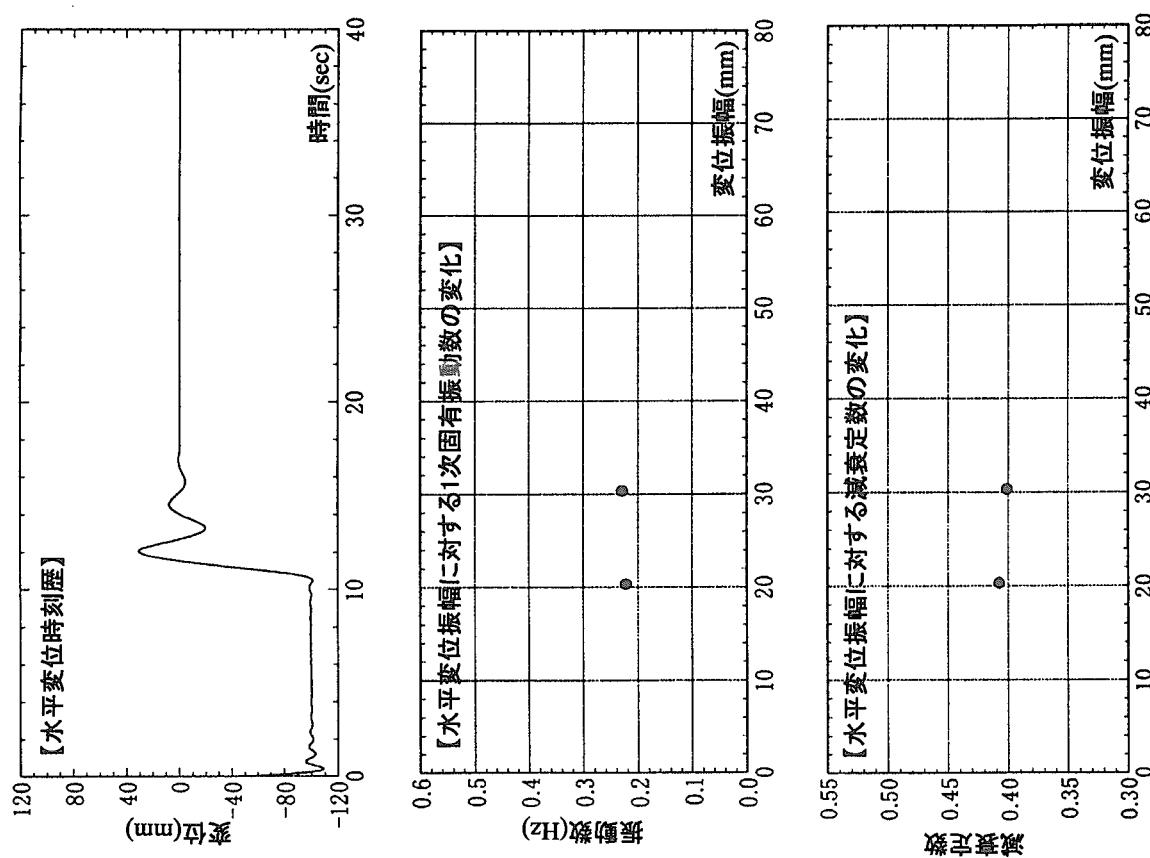


図 3.7 3次元免震システムダンパーあり・自由振動試験結果

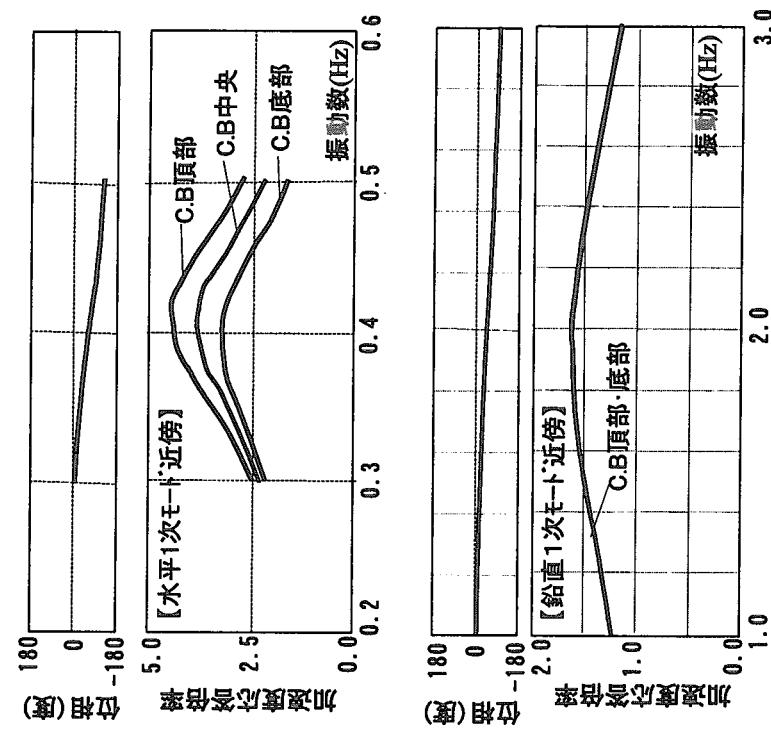


図 3.8 3次元免震システムダンパーあり・加速度共振曲線

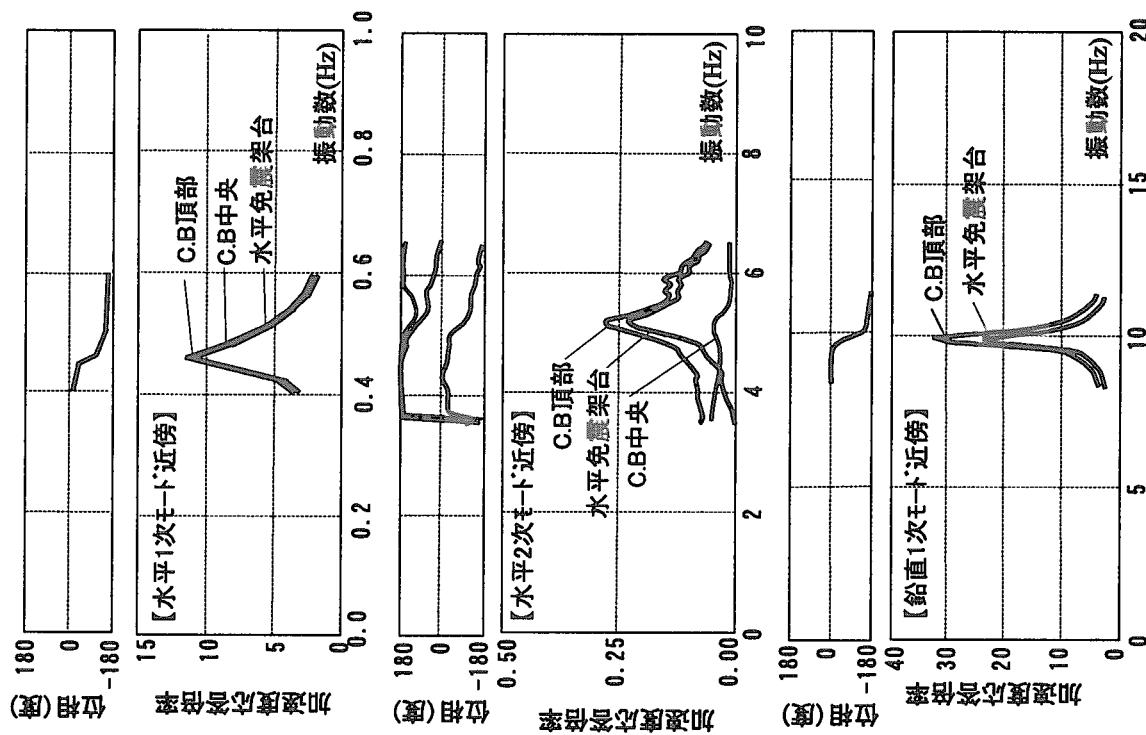
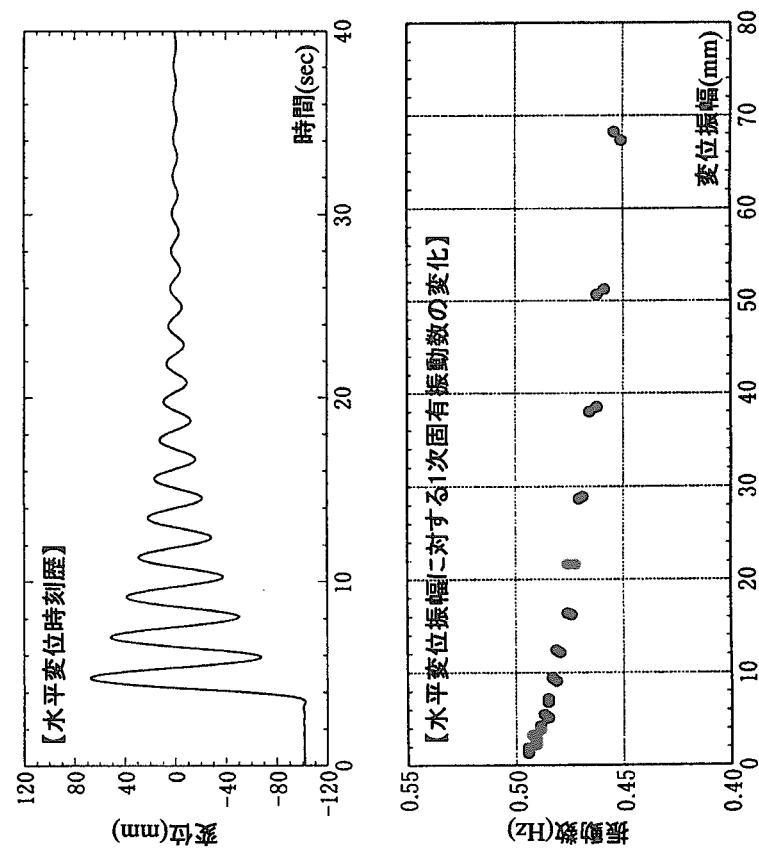


図 3.9 水平免震システムダンパーなし・自由振動試験結果

図 3.10 水平免震システムダンパーなし・加速度共振曲線

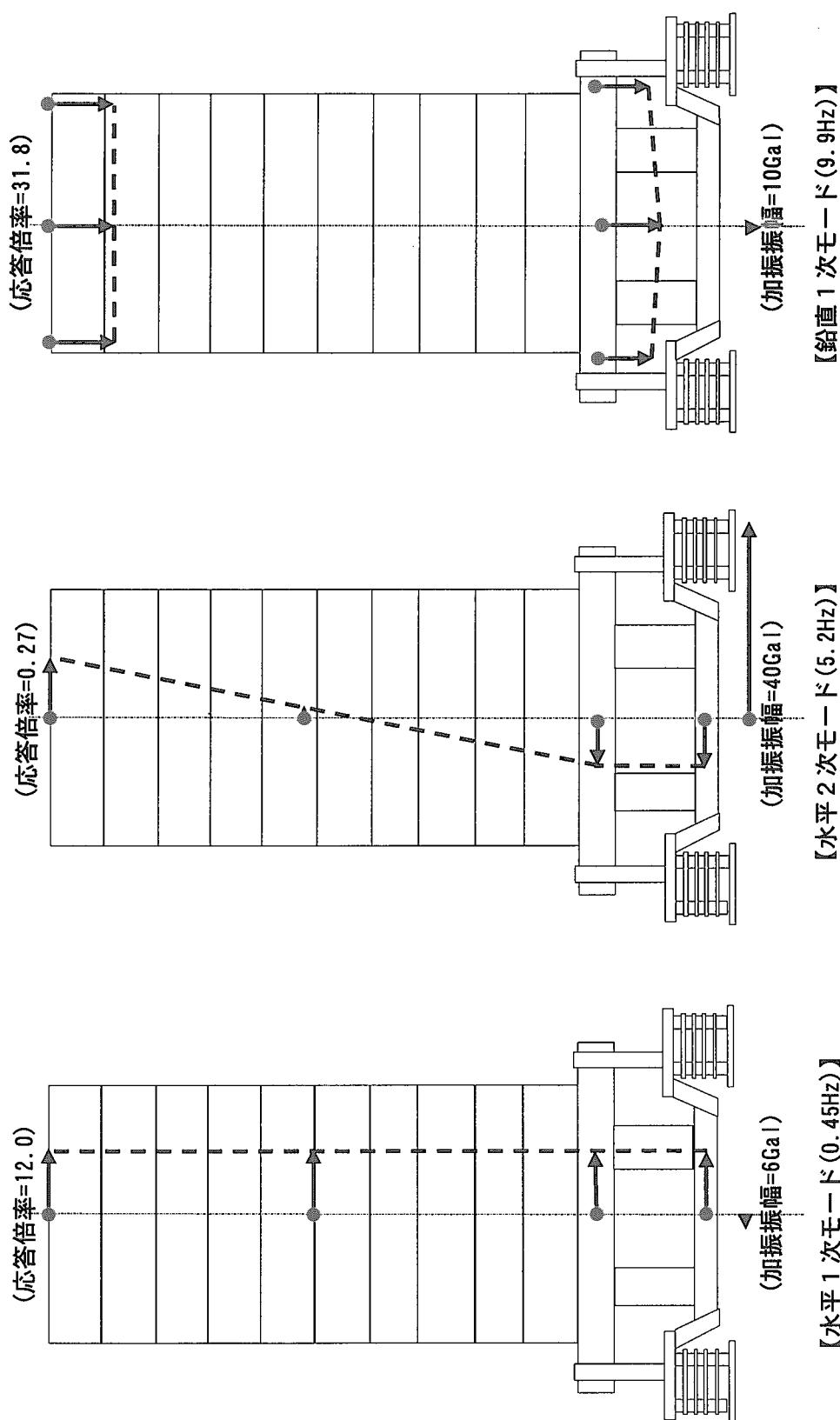


図 3.11 水平免震システムダンパーなし・振動モード形

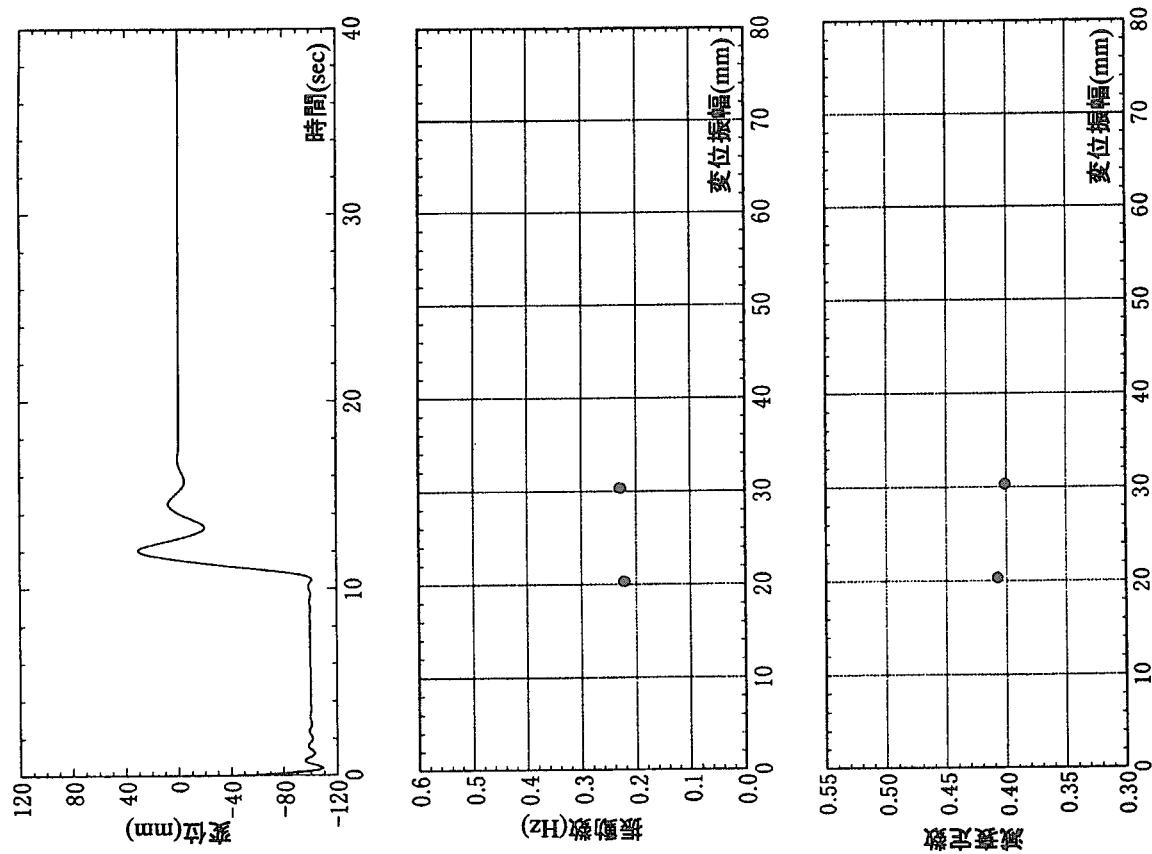


図 3.12 水平盤システムダンパーあり・自由振動試験結果

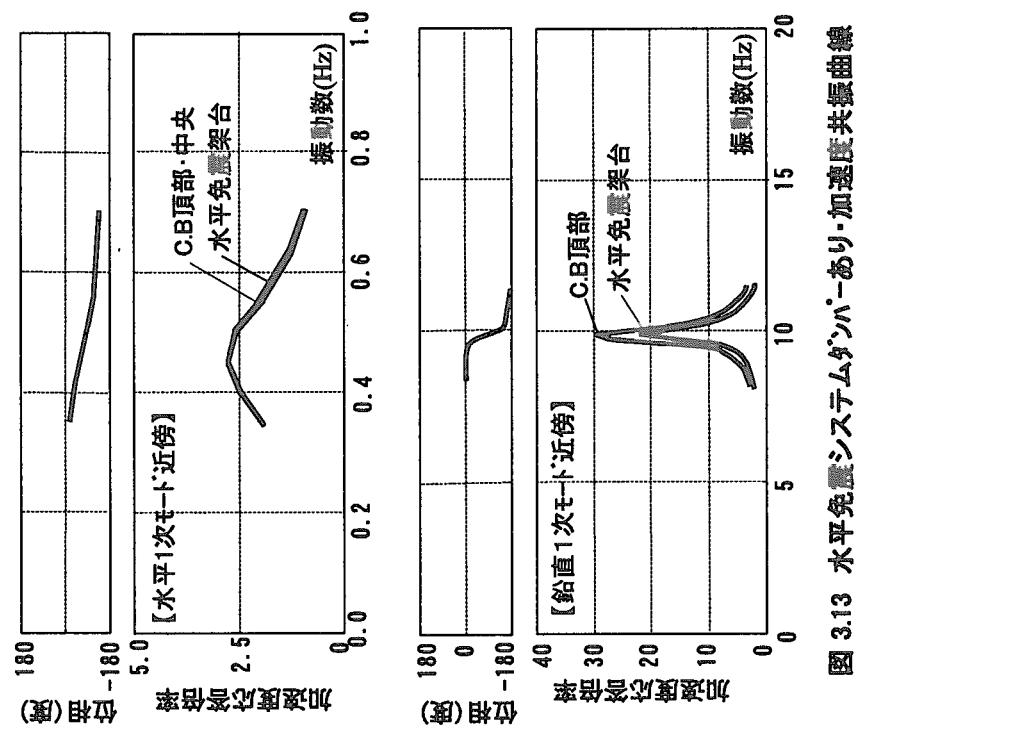


図 3.13 水平盤システムダンパーあり・加速度共振曲線

表 3.4 機器免震システム振動特性一覧

	固有振動数 (Hz)	加速度応答倍率		振動モード	減衰定数
		ダ'ンパ'-なし	ダ'ンパ'-あり		
3次元免震	0.40	18.1*	4.40	水平1次(並進+ロッキング)	水平 : 0.045
	1.45	4.9	0.50	水平2次(C.剛体ロッキング)	鉛直 : 0.02
	2.00	25.9	1.64	鉛直1次(並進)	鉛直 : 0.3
水平免震	0.46	12.0	2.8	水平1次(並進)	水平 : 0.045
	5.2	0.27	0.85	水平2次(C.剛体ロッキング)	鉛直 : 0.02
	9.9	31.8	30.1	鉛直1次(並進)	鉛直 : 0.02
	14.8	0.30	0.35	水平3次	

*1---正弦波擗引試験結果

4. 正弦波パラメトリック加振試験

本章では、3次元免震システムの水平および鉛直方向の連成振動の影響を検討するために実施した正弦波水平鉛直同時加振結果について述べる。本3次元免震システムは、水平・鉛直同時に地震力を受け、免震装置の大変形やロッキングに伴い支持点や重心位置、剛性等が不規則に変動する。そのような振動系では、3次元的な連成振動の効果により、水平と鉛直方向の特定の固有振動数比や減衰定数において応答が共振的に増幅することが知られている^{(4.1)(4.2)}。ここでは主にそのようなパラメトリック不規則振動の影響について検討した。

4.1 加振試験の概要

(1) 加振ケース

正弦波加振では、免震システムの応答が卓越する特定の振動数(1次, 2次固有振動数)の正弦波30波を水平および鉛直方向に同時加振し、共振応答特性を検討した。その際、表4.1に示すように水平および鉛直方向の入力波の振動数比、振幅比、位相差等をパラメトリックに組み合わせて加振し、各パラメータの組み合わせが免震システムの3次元連成振動に及ぼす影響を評価した。また、加振試験はダンパーがない場合とある場合について実施し、両者の応答性状の差を比較検討した。主な加振パラメータの組み合わせを以下に示す。

a) 水平1次モードに対する鉛直振動振幅の影響

- ・振動数: $f_H = f_V$ ($f_H = 0.4\text{Hz}$: 1次固有振動数)
- ・振幅: $A_H = \text{約 } 4\text{ Gal}$ $A_V = \alpha A_H$ ($\alpha = 1, 2, 3, 5$)

b) 水平1次モードに対する鉛直振動の振動数の影響

- ・振動数: $f_V = \alpha f_H$ ($\alpha = 1, 2, 3, 4, 5$)
- ・振幅: $A_H = \text{約 } 4\text{ Gal}$ $A_V = \beta A_H$ ($\beta = 1, 2, 3, 4, 5$)

c) 水平1次モードに対する鉛直振動位相差の影響

- ・振動数: $f_H = f_V$
- ・位相差: $\phi_V - \phi_H = 0^\circ, -90^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 180^\circ$
- ・振幅: $A_H = \text{約 } 4\text{ Gal}$ $A_V = \alpha A_H$ ($\alpha : 3 \sim 4$ ケース)

d) 水平2次モードに対する鉛直振動の影響

- ・振動数: $f_H = f_{H2}$ ($f_{H2} = 1.45\text{Hz}$: 2次固有振動数)
 $f_V = \alpha f_{H2}$ ($\alpha : 2$ ケース程度)
- ・振幅: $A_H = \text{約 } 10\text{Gal}$ $A_V = \beta A_H$ ($\beta : 2$ ケース程度)

なお、上記パラメータの数値は振動台の制御目標値であり、実際の加振試験では若干異なる入力値となっている。

(2) 加振方法

水平方向正弦波入力 u_H および鉛直方向正弦波入力 u_V は、つぎのように定義した。

$$\begin{aligned} u_H &= A_H \sin ((f_H/2\pi)t - (\phi_H/180)\pi) & (0 \leq t \leq 30/f_{H_1}) \\ &= 0 & (30/f_{H_1} < t) \\ u_V &= A_V \sin ((f_V/2\pi)t - (\phi_V/180)\pi) & (0 \leq t \leq 30/f_{V_1}) \\ &= 0 & (30/f_{V_1} < t) \end{aligned}$$

振幅は、スムーズな加振立上げと加振終了を図るため、水平方向正弦波の加振開始 5 波および加振終了 5 波の間に振幅 0 から設定振幅、あるいはその逆の振幅テーパを施した。鉛直方向正弦波については、水平方向の振幅テーパ時間と同じ時間の振幅テーパを施した。

なお、試験体各部の加速度および変位の計測は、正弦波掃引加振と同様とした。

4.2 加振結果および連成振動の影響に関する考察

正弦波加振試験結果および 3 次元免震システムの連成振動の影響について以下に考察する。

4.2.1 ダンパーがない場合

各試験ケースについて、水平および鉛直入力加速度、C. B 頂部の水平および鉛直最大加速度応答、水平免震架台の水平最大変位応答および鉛直免震架台の鉛直最大変位応答を表 4.2 に示す。また、試験結果の比較例として試験ケース M1- $\alpha_0\beta_0\phi_0$, M1- $\alpha_1\beta_1\phi_0$ および M1- $\alpha_1\beta_5\phi_0$ の加速度応答および変位応答時刻歴を図 4.1～図 4.3 に示す。これらの時刻歴波形において、振動台のノイズによる高次モードの振動や計測ノイズが認められることから、各最大応答値を求める際に、それらの影響を軽減するために 7.5 Hz のローパスフィルターによるフィルタリング処理を行った。

これらの結果から、水平鉛直同時加振による連成振動への影響について以下の知見が得られた。

(1) 水平および鉛直正弦波入力の振動数比および振幅比の影響

$f_H = 0.4\text{Hz}$ (1 次固有振動モード) における水平正弦波入力と鉛直正弦波入力の振動数比および振幅比と免震システム各部の加速度および変位応答倍率の関係を図 4.4 に示す。これらの図から、振動数比 ($\alpha = f_V/f_H$) が 3～5 の領域で、振動数比と入力振幅が大きくなるに従い、水平免震架台と C. B 頂部の双方で水平加速度応答が若干増加する傾向が見られるが、パラメトリック共振で発生する急激な応答の増幅は見られない。振動数比 3～5 の領域は、鉛直方向の入力加速度が水平 2 次モードおよび鉛直 1 次モードの共振応答の範囲にあり、特にダンパーがない場合は免震システム各部で応答が増幅する。したがって、水平 1 次モードの応答に、これらの高次振動モードの影響による応答が加わり加速度が増幅しているものと考えられる。高次モードの影響が少ない振動数比 2 以下の範囲では、振幅比や振動数比による影響は見られない。M1- $\alpha_0\beta_0\phi_0$ および M1- $\alpha_1\beta_1\phi_0$ と M1- $\alpha_1\beta_5\phi_0$ の水平方向加速度応答時刻歴(図 4.1(a)～図 4.3(a) 参照)を比較すると、やはり M1- $\alpha_1\beta_5\phi_0$ において高次モードの影響がやや顕著に現れている。水平変位応答については大きな差は見とめられない。

$f_H = 1.45\text{Hz}$ (2次固有振動モード)における水平正弦波入力と鉛直正弦波入力の振動数比および振幅比と免震システム各部の加速度および変位応答倍率の関係を図4.5に示す。この場合、各振動数比および振幅比に対して加速度応答倍率と最大変位応答はほぼ一定値を示しており、振動数比および振幅比の有意な影響は見られない。

(2) 水平および鉛直入力波の位相差の影響

水平正弦波入力と鉛直正弦波入力の位相差および振幅比と免震システム各部の加速度および変位応答倍率の関係を図4.6に示す。位相差, -90° , 0° , 45° , 90° , 180° において、加速度応答倍率と最大変位応答はほぼ一定値を示しており、位相および振幅比による連成振動の影響はほとんど見られない。

4.2.2 ダンパーがある場合

ダンパーがない場合と同様に、振動台上の水平および鉛直加速度(入力加速度)、C.B頂部の水平および鉛直最大加速度応答、水平免震架台の水平最大変位応答および鉛直免震架台の鉛直最大変位応答を表4.3に示す。また、試験結果の比較例として試験ケース $M1-\alpha 0 \beta 0 \phi 0$, $M1-\alpha 1 \beta 1 \phi 0$ および $M1-\alpha 1 \beta 5 \phi 0$ の加速度応答および変位応答時刻歴を図4.7～図4.9に示す。これらの試験結果から、各入力パラメータの連成振動への影響について以下の知見が得られた。

(1) 水平および鉛直正弦波入力の振動数比および振幅比の影響

$f_H = 0.4\text{Hz}$ (1次モード相当振動数)における水平正弦波入力と鉛直正弦波入力の振動数比および振幅比と免震システム各部の加速度および変位応答倍率の関係を図4.10に示す。各加振試験における免震システム各部の応答は、全体的にダンパーにより大幅に低減され、特に水平方向および鉛直方向の卓越振動モードの応答は十分抑制されている。したがって、振動数比および振幅比による連成振動の影響はほとんど見られない。また、 $M1-\alpha 0 \beta 0 \phi 0$, $M1-\alpha 1 \beta 1 \phi 0$ および $M1-\alpha 1 \beta 5 \phi 0$ の水平方向加速度応答時刻歴も差は認められない。

$f_H = 1.45\text{Hz}$ (2次モード相当振動数)における水平正弦波入力と鉛直正弦波入力の振動数比および振幅比と免震システム各部の加速度および変位応答倍率の関係を図4.11に示す。ダンパーがない場合と同様、各振動数比および振幅比に対して加速度応答倍率と最大変位応答はほぼ一定値を示しており、振動数比および振幅比による影響はほとんど見られない。

(2) 水平および鉛直正弦波入力の位相差の影響

水平正弦波入力と鉛直正弦波入力の位相差および振幅比と免震システム各部の加速度および変位応答倍率の関係を図4.12に示す。各位相差において、加速度応答倍率と最大変位応答はほぼ一定値を示し、位相および振幅比による連成振動の影響はほとんど見られない。

4.3 正弦波加振結果まとめ

正弦波による水平鉛直同時加振試験において、振動数比、振幅比、位相差等をパラメトリックに組み合わせて加振した結果、3次元連成振動の影響について得られた知見を以下に纏める。

- (1) ダンパーがない場合、3次元免震系の卓越振動数領域の加振において、水平2次モードおよび鉛直1次モードの共振領域で、ロッキングや鉛直方向の加速度応答が急激に増幅する影響で、水平加速度応答が若干増幅する傾向が見られるが、パラメトリック共振のような不安定な振動現象は発生しなかった。
- (2) ダンパーがある場合は、免震系の高次モードによる応答の増幅が十分抑制され、連成振動の影響は見られなかった。

表4.1(a) 正弦波パラメトリック加振ケース一覧(ダンパーがない場合)

水平入力		鉛直入力		(α=Ay/AH0)		振動比		位相差		備考	
振動数(Hz)	加速度:AH0(Gal)	振動数(Hz)	加速度:Av(Gal)	0.0	(0.00)	0.0	(0.00)	0.0	(φ)	0.0	比較基準
0.4	4.0 (3.53)	0.000	0.0 (0.00)	0.0	(0.00)	0.0	(0.00)	0.0	(0.0)	0.0	0.0
0.4	4.0 (3.52)	0.400	4.0 (3.51)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	0.0	0.0
0.4	4.0 (3.57)	0.800	4.0 (3.10)	1.0	(1.0)	2.0	(2.0)	2.0	(2.0)	0.0	0.0
0.4	4.0 (3.59)	1.200	4.0 (2.99)	1.0	(1.0)	3.0	(3.0)	3.0	(3.0)	0.0	0.0
0.4	4.0 (3.76)	1.600	4.0 (3.36)	1.0	(1.0)	4.0	(4.0)	4.0	(4.0)	0.0	0.0
0.4	4.0 (3.53)	2.000	4.0 (3.26)	1.0	(1.0)	5.0	(5.0)	5.0	(5.0)	0.0	0.0
0.4	4.0 (3.90)	0.400	8.0 (8.79)	2.0	(2.0)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	0.0	0.0
0.4	4.0 (3.65)	0.800	8.0 (8.23)	2.0	(2.0)	2.0	(2.0)	2.0	(2.0)	0.0	0.0
0.4	4.0 (3.52)	1.200	8.0 (8.16)	2.0	(2.0)	3.0	(3.0)	3.0	(3.0)	0.0	0.0
0.4	4.0 (3.69)	1.600	8.0 (8.02)	2.0	(2.0)	4.0	(4.0)	4.0	(4.0)	0.0	0.0
0.4	4.0 (3.72)	2.000	8.0 (6.50)	2.0	(2.0)	5.0	(5.0)	5.0	(5.0)	0.0	0.0
0.4	4.0 (4.01)	0.400	12.0 (13.13)	3.0	(3.0)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	0.0	0.0
0.4	4.0 (3.55)	0.800	12.0 (12.45)	3.0	(3.0)	2.0	(2.0)	2.0	(2.0)	0.0	0.0
0.4	4.0 (3.59)	1.200	12.0 (12.26)	3.0	(3.0)	3.0	(3.0)	3.0	(3.0)	0.0	0.0
0.4	4.0 (3.67)	1.600	12.0 (12.24)	3.0	(3.0)	4.0	(4.0)	4.0	(4.0)	0.0	0.0
0.4	4.0 (4.11)	0.400	20.0 (20.30)	5.0	(5.0)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	0.0	0.0
0.4	4.0 (3.58)	0.800	20.0 (19.25)	5.0	(5.0)	2.0	(2.0)	2.0	(2.0)	0.0	0.0
0.4	4.0 (3.55)	1.200	20.0 (19.27)	5.0	(5.0)	3.0	(3.0)	3.0	(3.0)	0.0	0.0
0.4	4.0 (3.71)	1.600	20.0 (18.97)	5.0	(5.0)	4.0	(4.0)	4.0	(4.0)	0.0	0.0
0.4	4.0 (3.47)	0.400	4.0 (3.85)	1.0	(1.0)	0.0	(0.0)	0.0	(0.0)	0.0	0.0
0.4	4.0 (3.78)	0.400	4.0 (4.14)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	45.0	45.0
0.4	4.0 (3.68)	0.400	4.0 (3.76)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	90.0	90.0
0.4	4.0 (3.43)	0.400	4.0 (4.30)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	180.0	180.0
0.4	4.0 (3.56)	0.400	8.0 (8.65)	2.0	(2.0)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	-90.0	-90.0
0.4	4.0 (3.81)	0.400	8.0 (8.80)	2.0	(2.0)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	45.0	45.0
0.4	4.0 (3.79)	0.400	8.0 (8.82)	2.0	(2.0)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	90.0	90.0
0.4	4.0 (3.01)	0.400	8.0 (9.10)	2.0	(2.0)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	180.0	180.0
0.4	4.0 (3.67)	0.400	12.0 (13.00)	3.0	(3.0)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	-90.0	-90.0
0.4	4.0 (4.00)	0.400	12.0 (13.28)	3.0	(3.0)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	45.0	45.0
0.4	4.0 (3.62)	0.400	12.0 (13.39)	3.0	(3.0)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	90.0	90.0
0.4	4.0 (3.70)	0.400	20.0 (20.02)	5.0	(5.0)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	-90.0	-90.0
0.4	4.0 (4.11)	0.400	20.0 (20.40)	5.0	(5.0)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	45.0	45.0
0.4	4.0 (3.68)	0.400	20.0 (20.32)	5.0	(5.0)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	90.0	90.0
1.45	10.0 (10.14)	0.000	0.0 (0.00)	0.0	(0.00)	0.0	(0.00)	0.0	(0.0)	0.0	0.0
1.45	10.0 (10.32)	0.725	10.0 (10.50)	1.0	(1.0)	0.5	(0.5)	0.5	(0.5)	0.0	0.0
1.45	10.0 (10.49)	1.450	10.0 (10.22)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	0.0	0.0
1.45	10.0 (10.14)	2.900	10.0 (10.55)	1.0	(1.0)	2.0	(2.0)	2.0	(2.0)	0.0	0.0
1.45	10.0 (10.12)	0.725	20.0 (19.41)	2.0	(2.0)	0.5	(0.5)	0.5	(0.5)	0.0	0.0
1.45	10.0 (10.67)	1.450	20.0 (19.17)	2.0	(2.0)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	0.0	0.0
1.45	10.0 (10.08)	2.900	20.0 (19.40)	2.0	(2.0)	2.0	(2.0)	2.0	(2.0)	0.0	0.0

入力()内---振動台上で計測された入力加速度

表4.1(b) 正弦波パラメトリック加振ケース一覧(ダンパーがある場合)

試験ケース	水平入力		鉛直入力		振幅比 ($\alpha = A_v/A_{H0}$)	振動数比 ($\beta = f_v/f_{H0}$)	位相差 (ϕ)	備考
	振動数(Hz)	加速度:A(H0)(Gal)	振動数(Hz)	加速度:A(Gal)				
M1- $\alpha 0\beta 0\phi 0$	0.4	6.0 (5.28)	0.000	0.0 (0.00)	0.0	0.0	0.0	比較基準
M1- $\alpha 1\beta 1\phi 0$	0.4	6.0 (5.62)	0.400	6.0 (7.35)	1.0	1.0	0.0	
M1- $\alpha 1\beta 2\phi 0$	0.4	6.0 (5.37)	0.800	6.0 (4.76)	1.0	2.0	0.0	
M1- $\alpha 1\beta 3\phi 0$	0.4	6.0 (5.27)	1.200	6.0 (4.90)	1.0	3.0	0.0	
M1- $\alpha 1\beta 4\phi 0$	0.4	6.0 (5.17)	1.600	6.0 (4.66)	1.0	4.0	0.0	
M1- $\alpha 1\beta 5\phi 0$	0.4	6.0 (5.33)	2.000	6.0 (6.69)	1.0	5.0	0.0	
M1- $\alpha 2\beta 1\phi 0$	0.4	6.0 (5.61)	0.400	12.0 (12.67)	2.0	1.0	0.0	水平1次モードにおける振幅比と振動数比の影響
M1- $\alpha 2\beta 2\phi 0$	0.4	6.0 (5.24)	0.800	12.0 (11.55)	2.0	2.0	0.0	
M1- $\alpha 2\beta 3\phi 0$	0.4	6.0 (5.35)	1.200	12.0 (11.63)	2.0	3.0	0.0	
M1- $\alpha 2\beta 4\phi 0$	0.4	6.0 (5.28)	1.600	12.0 (11.43)	2.0	4.0	0.0	
M1- $\alpha 3\beta 1\phi 0$	0.4	6.0 (5.92)	0.400	18.0 (18.08)	3.0	1.0	0.0	
M1- $\alpha 3\beta 2\phi 0$	0.4	6.0 (5.25)	0.800	18.0 (16.68)	3.0	2.0	0.0	
M1- $\alpha 3\beta 3\phi 0$	0.4	6.0 (5.28)	1.200	18.0 (16.76)	3.0	3.0	0.0	
M1- $\alpha 3\beta 4\phi 0$	0.4	6.0 (5.31)	1.600	18.0 (16.31)	3.0	4.0	0.0	
M1- $\alpha 1\beta 1\phi -90$	0.4	6.0 (5.03)	0.400	6.0 (5.35)	1.0	-90.0		
M1- $\alpha 1\beta 1\phi 45$	0.4	6.0 (5.59)	0.400	6.0 (5.66)	1.0	45.0		
M1- $\alpha 1\beta 1\phi 90$	0.4	6.0 (5.44)	0.400	6.0 (5.55)	1.0	90.0		
M1- $\alpha 1\beta 1\phi 180$	0.4	6.0 (4.80)	0.400	6.0 (5.82)	1.0	180.0		
M1- $\alpha 2\beta 1\phi -90$	0.4	6.0 (4.95)	0.400	12.0 (10.98)	2.0	1.0	-90.0	水平1次モードにおける位相差の影響
M1- $\alpha 2\beta 1\phi 45$	0.4	6.0 (5.76)	0.400	12.0 (11.60)	2.0	1.0	45.0	
M1- $\alpha 2\beta 1\phi 90$	0.4	6.0 (5.38)	0.400	12.0 (11.42)	2.0	1.0	90.0	
M1- $\alpha 2\beta 1\phi 180$	0.4	6.0 (4.)	0.400	12.0 (11.33)	2.0	1.0	180.0	
M1- $\alpha 3\beta 1\phi -90$	0.4	6.0 (4.85)	0.400	18.0 (17.51)	3.0	1.0	-90.0	
M1- $\alpha 3\beta 1\phi 45$	0.4	6.0 (5.81)	0.400	18.0 (17.97)	3.0	1.0	45.0	
M1- $\alpha 3\beta 1\phi 90$	0.4	6.0 (5.49)	0.400	18.0 (17.89)	3.0	1.0	90.0	
M1- $\alpha 3\beta 1\phi 180$	0.4	6.0 (4.51)	0.400	18.0 (17.87)	3.0	1.0	180.0	
M2- $\alpha 0\beta 0$	1.45	10.0 (10.18)	0.000	0.0 (0.00)	0.0	0.0	0.0	比較基準
M2- $\alpha 1\beta 0.5$	1.45	10.0 (9.97)	0.725	10.0 (10.45)	1.0	0.5	0.0	
M2- $\alpha 1\beta 1$	1.45	10.0 (10.49)	1.450	10.0 (10.28)	1.0	1.0	0.0	
M2- $\alpha 1\beta 2$	1.45	10.0 (10.29)	2.900	10.0 (10.45)	1.0	2.0	0.0	水平2次モードにおける振幅比と振動数比の影響
M2- $\alpha 2\beta 0.5$	1.45	10.0 (10.15)	0.725	20.0 (19.61)	2.0	0.5	0.0	
M2- $\alpha 2\beta 1$	1.45	10.0 (10.83)	1.450	20.0 (19.30)	2.0	1.0	0.0	
M2- $\alpha 2\beta 2$	1.45	10.0 (10.17)	2.900	20.0 (19.39)	2.0	2.0	0.0	

* 水平および鉛直入力()内---振動台上で計測された入力加速度

表4.2 正弦波パラメトリック加振結果一覧(ダンパーがない場合)

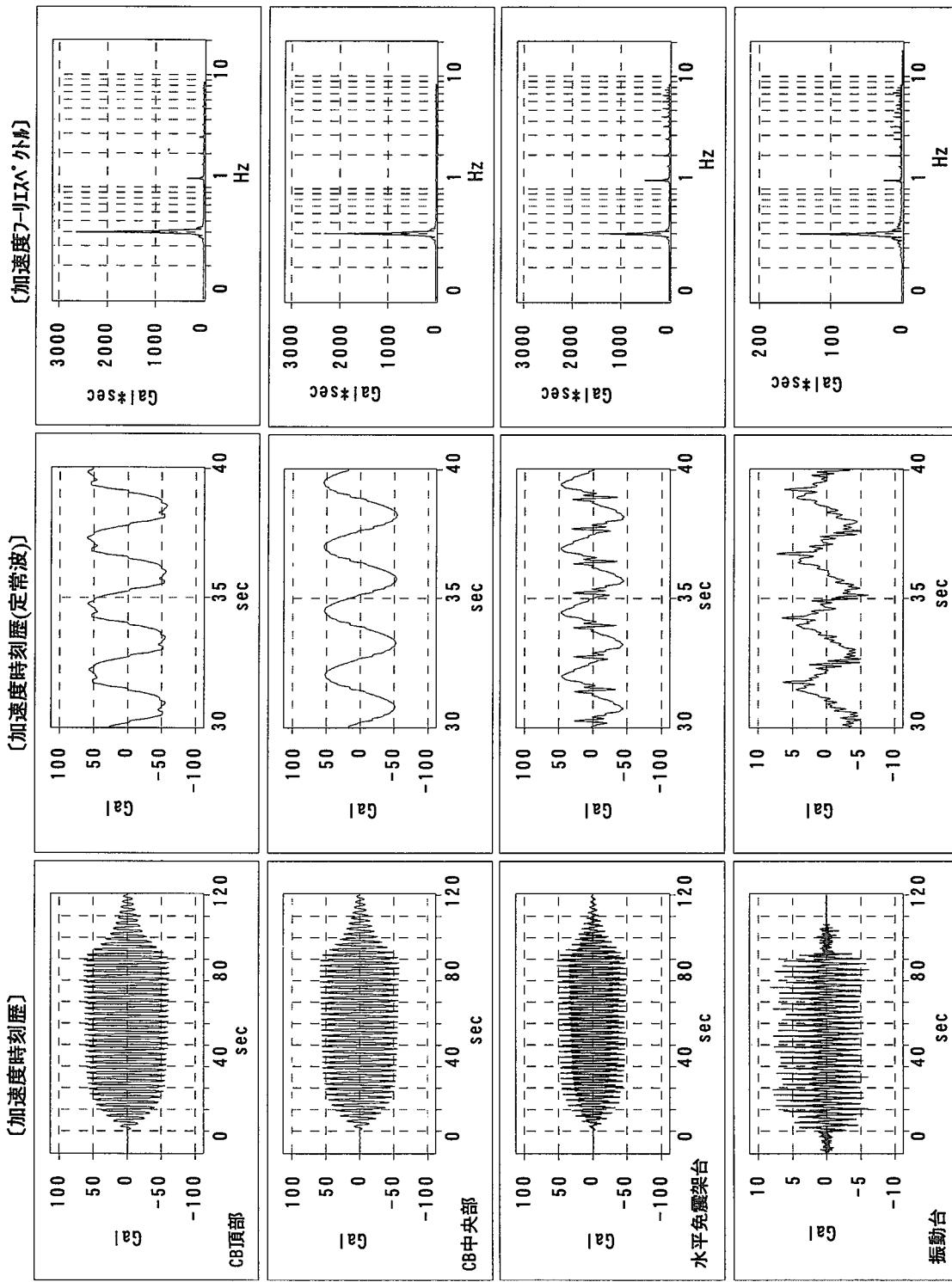
	水平方向				鉛直方向			
	入力 加速度 (Gal)	C.B頂部 加速度 (Gal)	応答倍率	水平免震 架台変位* (mm)	入力 加速度 (Gal)	C.B底部 加速度 (Gal)	応答倍率	C.B底部 変位 (mm)
M1- $\alpha 0\beta 0\phi 0$	3.53	64.25	18.20	57.48	0.00	8.43	—	0.92
M1- $\alpha 1\beta 1\phi 0$	3.52	61.23	17.39	54.76	3.51	14.00	3.99	0.87
M1- $\alpha 1\beta 2\phi 0$	3.57	63.74	17.85	56.63	3.10	12.14	3.92	1.10
M1- $\alpha 1\beta 3\phi 0$	3.59	63.76	17.76	57.38	2.99	12.71	4.25	1.20
M1- $\alpha 1\beta 4\phi 0$	3.76	74.19	19.73	63.88	3.36	20.53	6.11	1.50
M1- $\alpha 1\beta 5\phi 0$	3.53	83.01	23.52	62.25	3.26	68.88	21.13	4.48
M1- $\alpha 2\beta 1\phi 0$	3.90	67.14	17.22	58.90	8.79	18.72	2.13	1.15
M1- $\alpha 2\beta 2\phi 0$	3.65	65.49	17.94	58.75	8.23	20.12	2.44	1.55
M1- $\alpha 2\beta 3\phi 0$	3.52	66.82	18.98	57.60	8.16	22.22	2.72	1.75
M1- $\alpha 2\beta 4\phi 0$	3.69	84.29	22.84	67.20	8.02	39.60	4.94	2.48
M1- $\alpha 2\beta 5\phi 0$	3.72	103.48	27.82	68.27	6.50	205.42	31.60	12.97
M1- $\alpha 3\beta 1\phi 0$	4.01	67.64	16.87	59.37	13.13	24.50	1.87	1.41
M1- $\alpha 3\beta 2\phi 0$	3.55	61.94	17.45	55.35	12.45	24.26	1.95	1.81
M1- $\alpha 3\beta 3\phi 0$	3.59	76.17	21.22	61.92	12.26	30.84	2.52	2.31
M1- $\alpha 3\beta 4\phi 0$	3.67	88.81	24.20	66.80	12.24	56.39	4.61	3.55
M1- $\alpha 5\beta 1\phi 0$	4.11	72.81	17.72	64.94	20.30	32.87	1.62	1.91
M1- $\alpha 5\beta 2\phi 0$	3.58	65.78	18.37	56.68	19.25	33.65	1.75	2.36
M1- $\alpha 5\beta 3\phi 0$	3.55	82.62	23.27	63.16	19.27	43.07	2.24	3.02
M1- $\alpha 5\beta 4\phi 0$	3.71	92.57	24.95	67.62	18.97	90.66	4.78	5.73
M1- $\alpha 1\beta 1\phi -90$	3.47	64.57	18.61	57.26	3.85	10.46	2.72	0.87
M1- $\alpha 1\beta 1\phi 45$	3.78	68.31	18.07	63.32	4.14	12.91	3.12	1.33
M1- $\alpha 1\beta 1\phi 90$	3.68	70.81	19.24	62.67	3.76	9.86	2.62	1.15
M1- $\alpha 1\beta 1\phi 180$	3.43	67.26	19.61	60.06	4.30	11.50	2.67	1.06
M1- $\alpha 2\beta 1\phi -90$	3.56	63.25	17.77	57.24	8.65	15.17	1.75	0.90
M1- $\alpha 2\beta 1\phi 45$	3.81	71.59	18.79	65.32	8.80	18.59	2.11	1.72
M1- $\alpha 2\beta 1\phi 90$	3.79	71.78	18.94	64.10	8.82	14.39	1.63	1.48
M1- $\alpha 2\beta 1\phi 180$	3.01	65.53	21.77	57.16	9.10	15.72	1.	1.37
M1- $\alpha 3\beta 1\phi -90$	3.67	66.72	18.18	59.30	13.00	23.67	1.82	1.03
M1- $\alpha 3\beta 1\phi 45$	4.00	72.08	18.02	67.90	13.28	24.96	1.88	2.08
M1- $\alpha 3\beta 1\phi 90$	3.62	68.55	18.94	62.45	13.39	21.16	1.58	1.68
M1- $\alpha 5\beta 1\phi -90$	3.70	66.19	17.89	59.47	20.02	31.63	1.58	1.20
M1- $\alpha 5\beta 1\phi 45$	4.11	77.22	18.79	71.27	20.40	33.43	1.64	2.58
M1- $\alpha 5\beta 1\phi 90$	3.68	68.97	18.74	62.76	20.32	29.41	1.45	2.06
M2- $\alpha 0\beta 0$	10.14	52.97	5.22	8.75	0.00	4.34	—	0.19
M2- $\alpha 1\beta 0.5$	10.32	55.46	5.37	9.61	10.50	15.10	1.44	1.01
M2- $\alpha 1\beta 1$	10.49	58.60	5.59	9.34	10.22	32.28	3.16	1.94
M2- $\alpha 1\beta 2$	10.14	57.20	5.64	9.14	10.55	12.45	1.18	0.83
M2- $\alpha 2\beta 0.5$	10.12	55.40	5.47	8.74	19.41	25.36	1.31	1.66
M2- $\alpha 2\beta 1$	10.67	61.27	5.74	9.61	19.17	60.80	3.17	3.73
M2- $\alpha 2\beta 2$	10.08	59.62	5.91	9.77	19.40	20.78	1.07	1.32

* ---2台の水平変位計の平均変位

表4.3 正弦波パラメトリック加振結果一覧(ダンパーがある場合)

	水平方向				鉛直方向			
	入力 加速度 (Gal)	C.B頂部 加速度 (Gal)	応答倍率	水平免震 架台変位* (mm)	入力 加速度 (Gal)	C.B底部 加速度 (Gal)	応答倍率	C.B底部 変位 (mm)
M1- $\alpha 0\beta 0\phi 0$	5.28	25.92	4.91	2.54	0.00	2.02	—	0.18
M1- $\alpha 1\beta 1\phi 0$	5.62	26.35	4.69	11.25	7.35	10.49	1.43	0.76
M1- $\alpha 1\beta 2\phi 0$	5.37	26.60	4.95	7.50	4.76	7.47	1.57	0.41
M1- $\alpha 1\beta 3\phi 0$	5.27	26.27	4.98	8.82	4.90	7.29	1.49	0.52
M1- $\alpha 1\beta 4\phi 0$	5.17	26.51	5.13	9.82	4.66	7.95	1.71	0.55
M1- $\alpha 1\beta 5\phi 0$	5.33	28.50	5.35	13.57	6.69	9.68	1.45	0.65
M1- $\alpha 2\beta 1\phi 0$	5.61	26.83	4.78	16.96	12.67	16.58	1.31	1.10
M1- $\alpha 2\beta 2\phi 0$	5.24	26.82	5.12	16.02	11.55	14.63	1.27	0.83
M1- $\alpha 2\beta 3\phi 0$	5.35	27.76	5.19	18.09	11.63	14.29	1.23	0.94
M1- $\alpha 2\beta 4\phi 0$	5.28	30.00	5.68	20.12	11.43	14.46	1.27	1.02
M1- $\alpha 3\beta 1\phi 0$	5.92	27.79	4.69	22.88	18.08	21.87	1.21	1.44
M1- $\alpha 3\beta 2\phi 0$	5.25	28.07	5.35	22.05	16.68	19.38	1.16	1.13
M1- $\alpha 3\beta 3\phi 0$	5.28	30.34	5.75	24.45	16.76	19.72	1.18	1.25
M1- $\alpha 3\beta 4\phi 0$	5.31	30.98	5.83	27.10	16.31	19.26	1.18	1.33
M1- $\alpha 1\beta 1\phi -90$	5.03	25.08	4.99	10.21	5.35	7.57	1.41	0.48
M1- $\alpha 1\beta 1\phi 45$	5.59	28.02	5.01	9.67	5.66	8.37	1.48	0.48
M1- $\alpha 1\beta 1\phi 90$	5.44	27.47	5.05	9.28	5.55	8.21	1.48	0.43
M1- $\alpha 1\beta 1\phi 180$	4.80	24.61	5.13	9.28	5.82	8.57	1.47	0.56
M1- $\alpha 2\beta 1\phi -90$	4.95	24.24	4.90	15.32	10.98	12.72	1.16	0.84
M1- $\alpha 2\beta 1\phi 45$	5.76	28.41	4.93	15.12	11.60	14.00	1.21	0.78
M1- $\alpha 2\beta 1\phi 90$	5.38	28.08	5.22	14.17	11.42	13.49	1.18	0.77
M1- $\alpha 2\beta 1\phi 180$	4.67	24.88	5.33	14.91	11.33	13.81	1.22	0.92
M1- $\alpha 3\beta 1\phi -90$	4.85	23.99	4.95	23.32	17.51	21.31	1.22	1.18
M1- $\alpha 3\beta 1\phi 45$	5.81	28.68	4.94	23.56	17.97	21.83	1.21	1.24
M1- $\alpha 3\beta 1\phi 90$	5.49	28.57	5.20	21.76	17.89	21.37	1.19	1.13
M1- $\alpha 3\beta 1\phi 180$	4.51	25.95	5.75	23.52	17.87	21.38	1.20	1.31
M2- $\alpha 0\beta 0$	10.18	8.80	0.86	3.14	0.00	1.86	—	0.09
M2- $\alpha 1\beta 0.5$	9.97	10	1.01	13.30	10.45	12.48	1.19	0.56
M2- $\alpha 1\beta 1$	10.49	7.65	0.73	14.86	10.28	11.65	1.13	0.56
M2- $\alpha 1\beta 2$	10.29	9.18	0.89	19.94	10.45	12.77	1.22	0.55
M2- $\alpha 2\beta 0.5$	10.15	9.67	0.95	23.25	19.61	21.01	1.07	1.08
M2- $\alpha 2\beta 1$	10.83	7.89	0.73	27.90	19.30	21.77	1.13	1.23
M2- $\alpha 2\beta 2$	10.17	9.64	0.95	29.46	19.39	21.42	1.10	0.91

* ---2台の水平変位計の平均変位

図4.1(a) 正弦波パラメトリック加振結果(ダンパーなし:M1- $\alpha\beta0\phi0$ 水平方向加速度時刻歴)

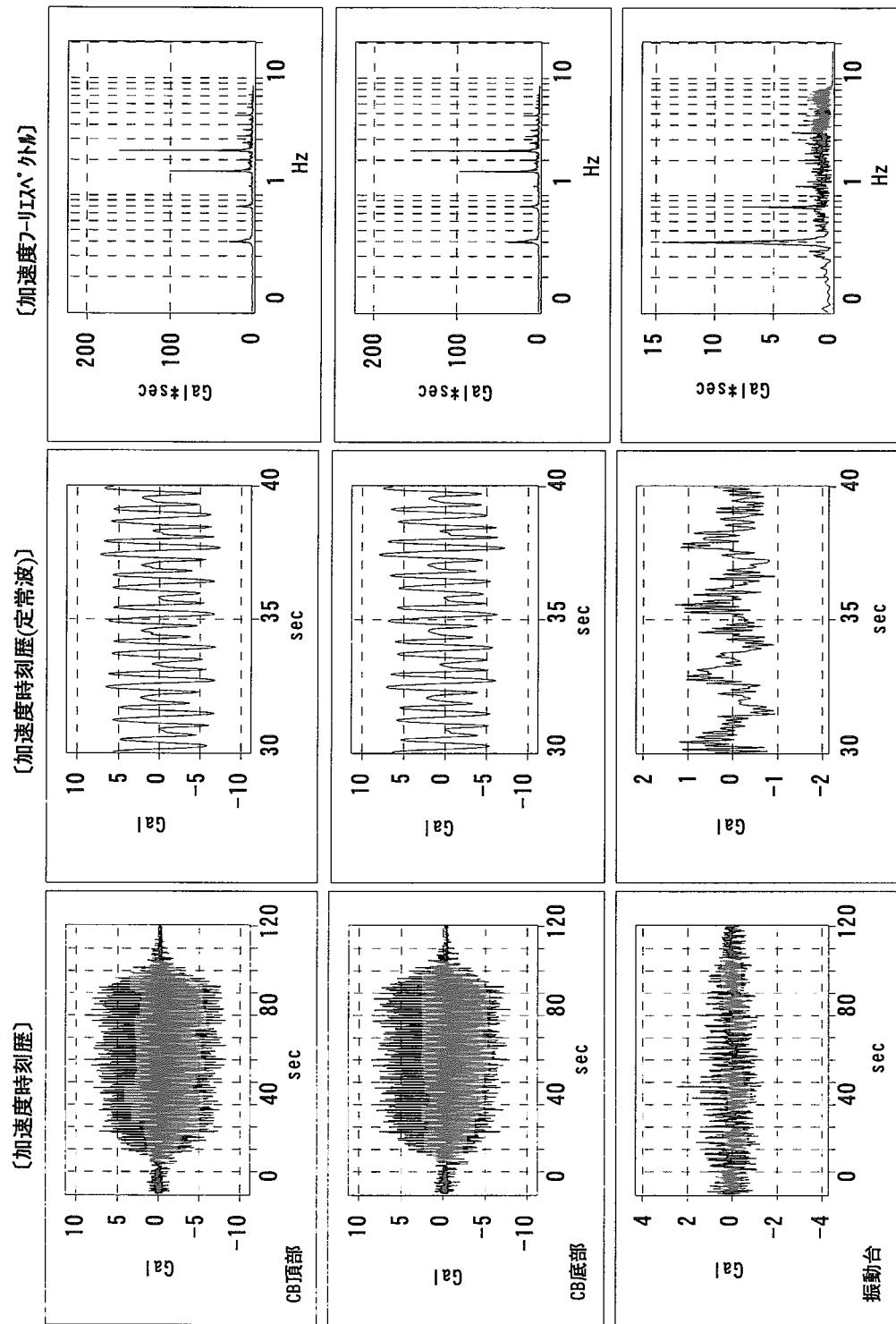
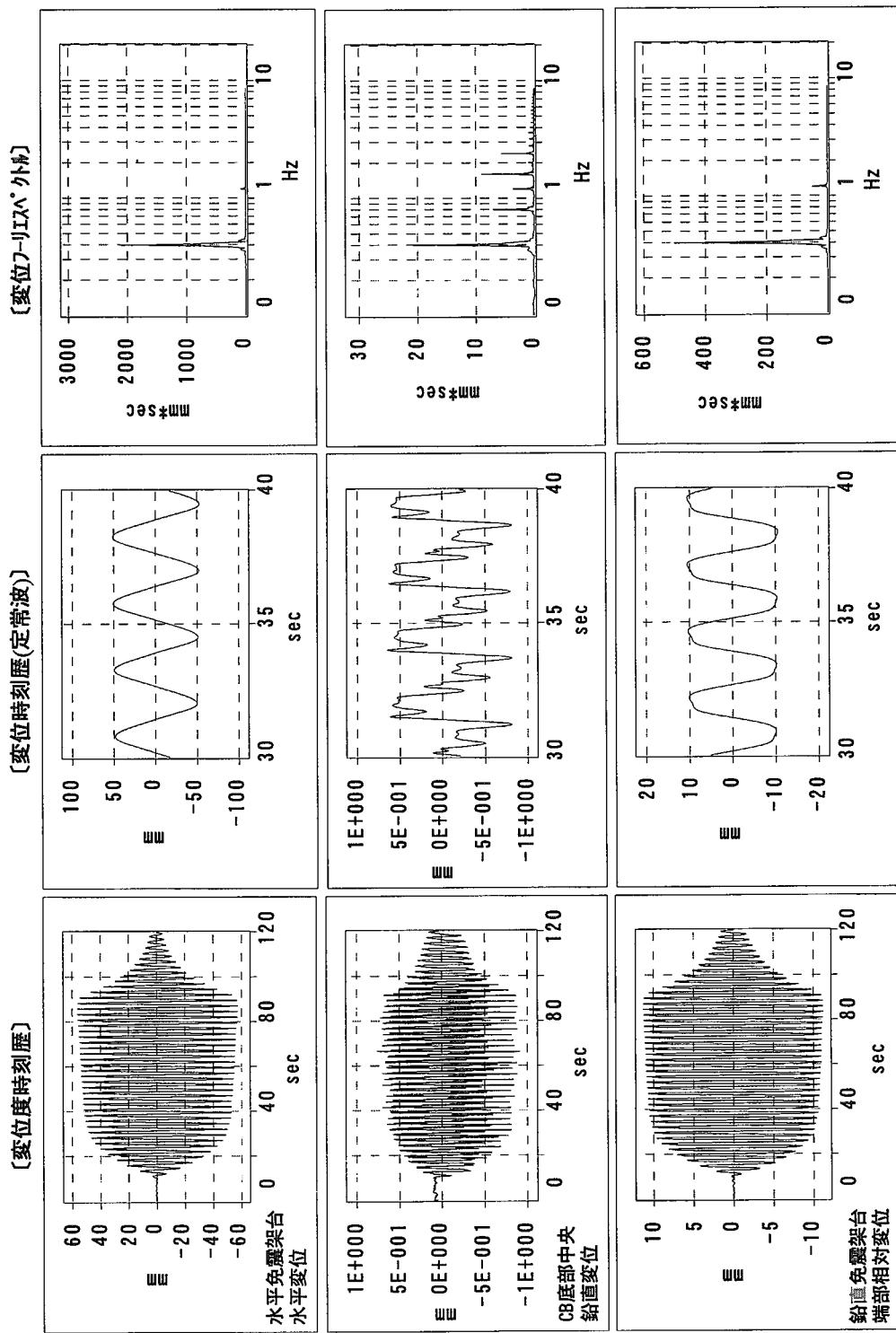
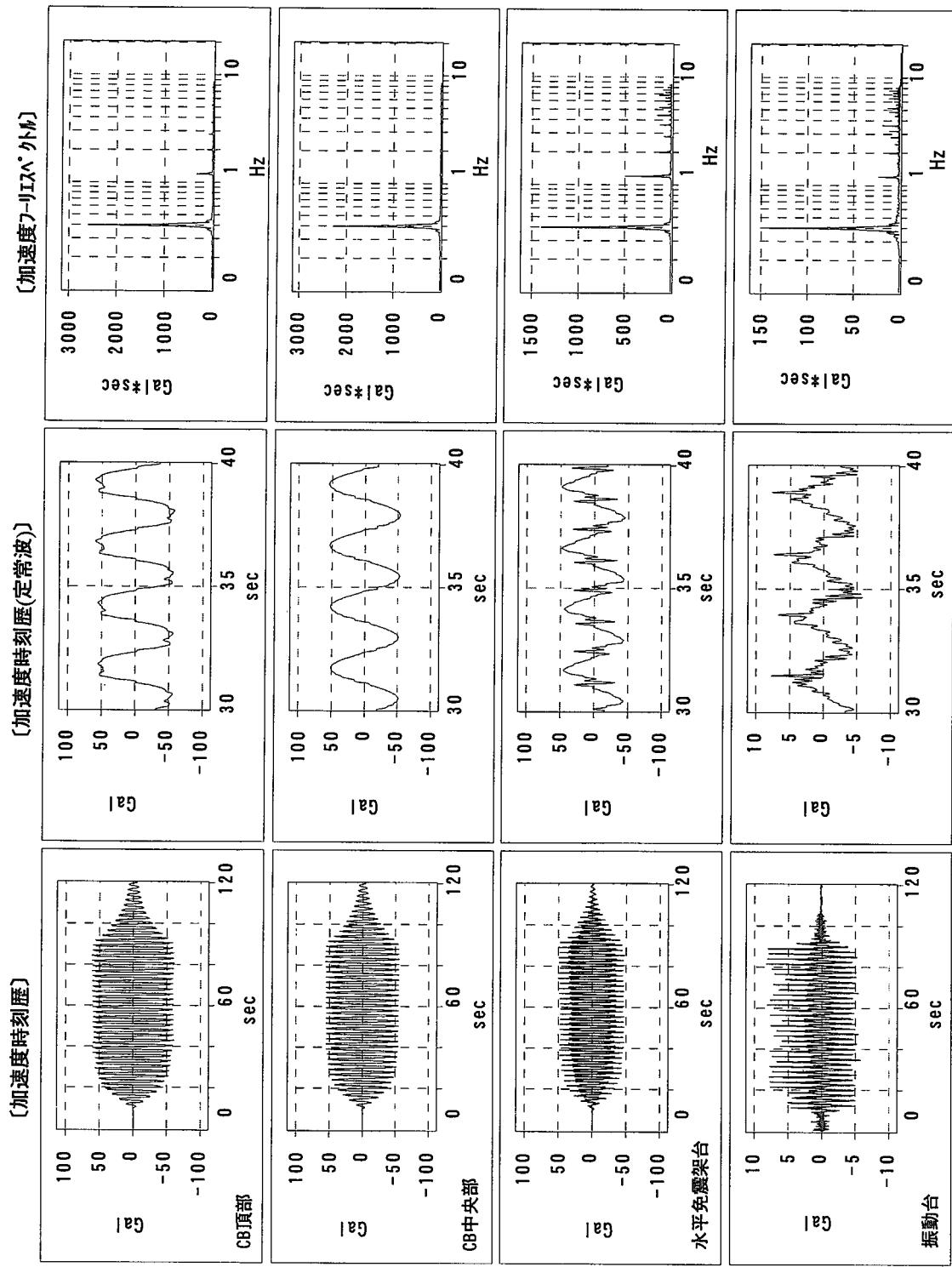


図4.1(b) 正弦波パラメトリック加振結果(ダンパーなし:M1- $\alpha\beta\phi$ 鉛直方向加速度時刻歴)

図4.1(c) 正弦波/パラメトリック加振結果(ダンパーなし:M1- $\alpha\beta0\phi0$ 変位時刻歴)

図4.2(a) 正弦波パラメトリック加振結果(サンバーなし:M1- α 1 β 1 ϕ 0 水平方向加速度時刻歴)

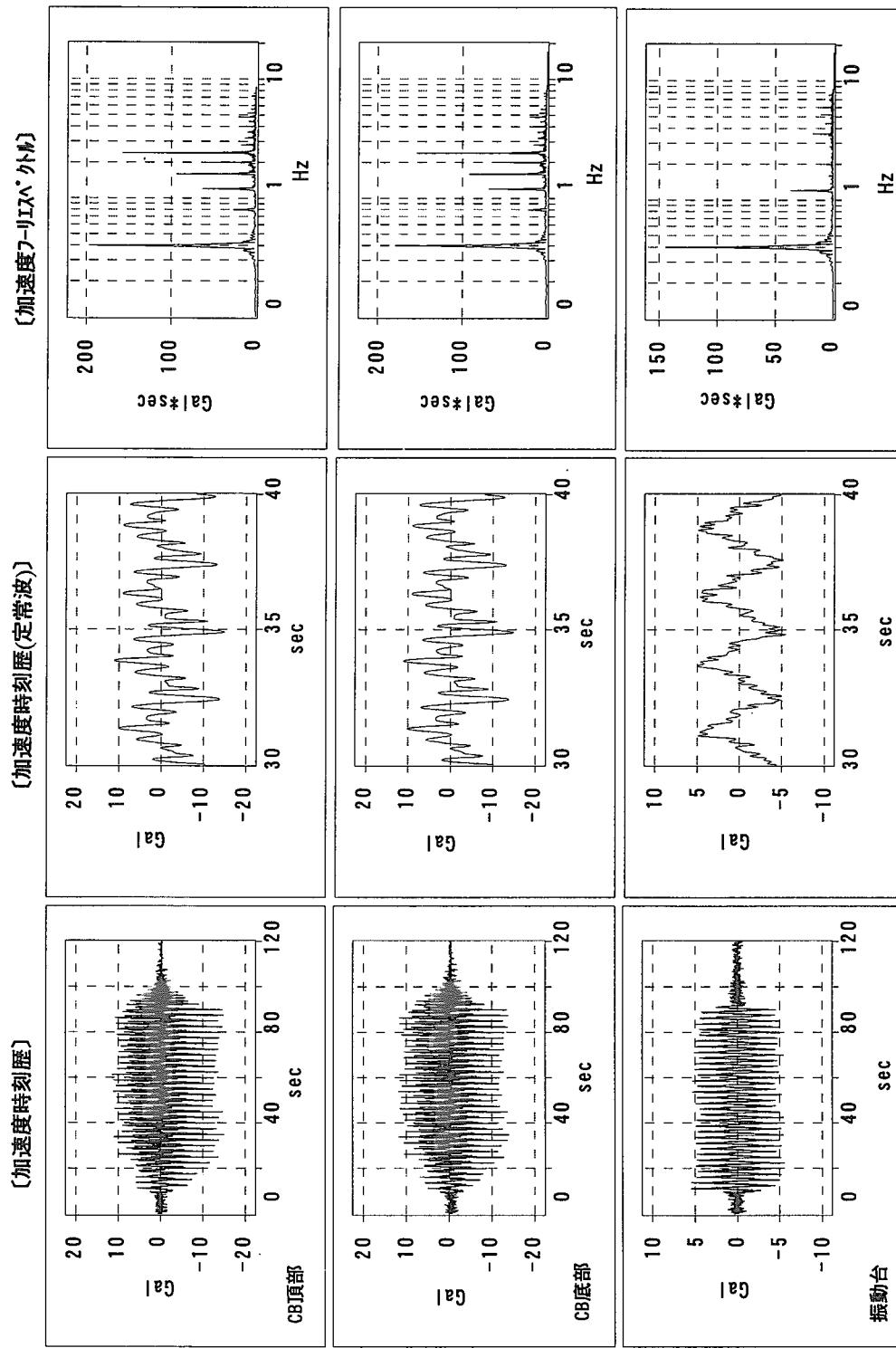
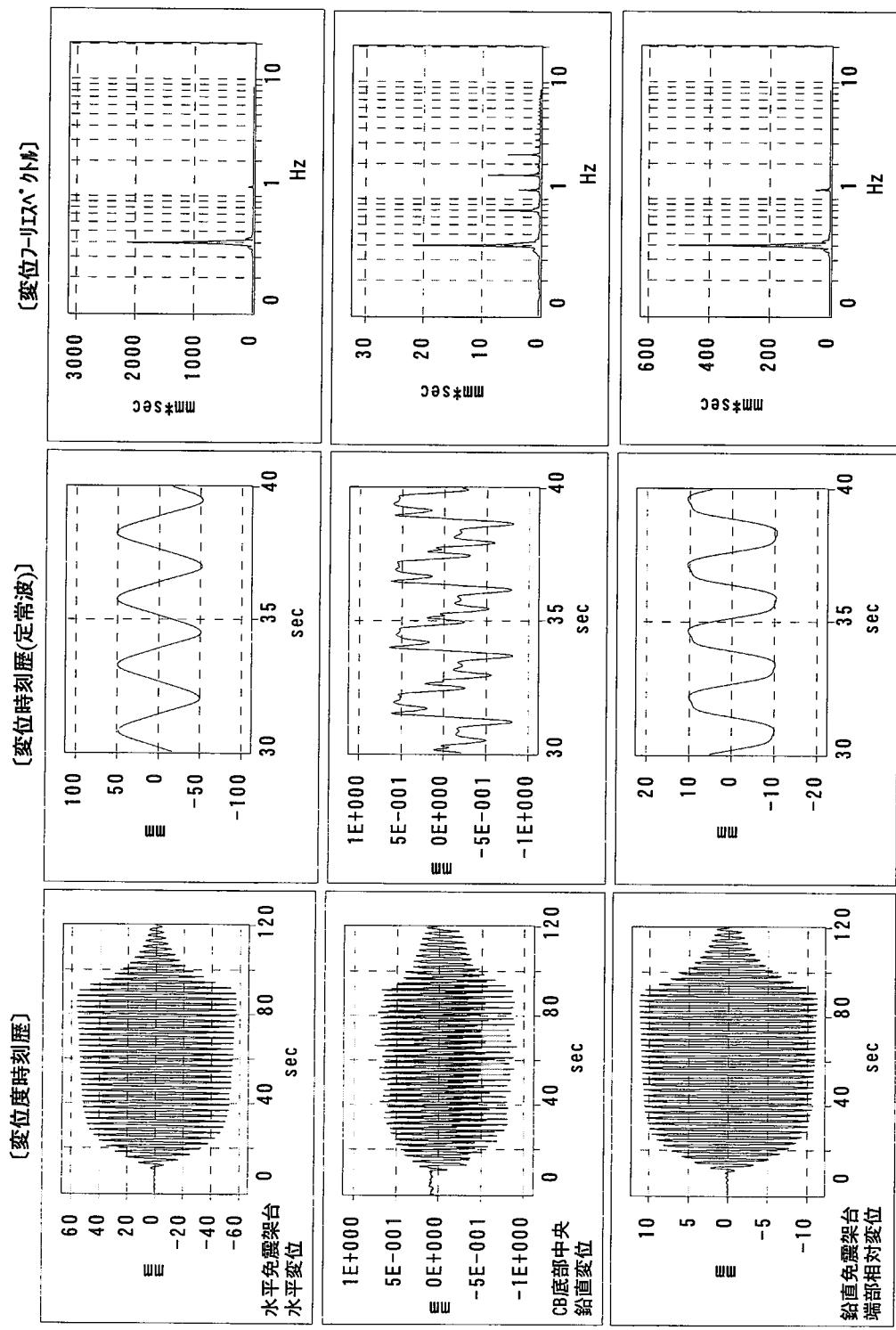
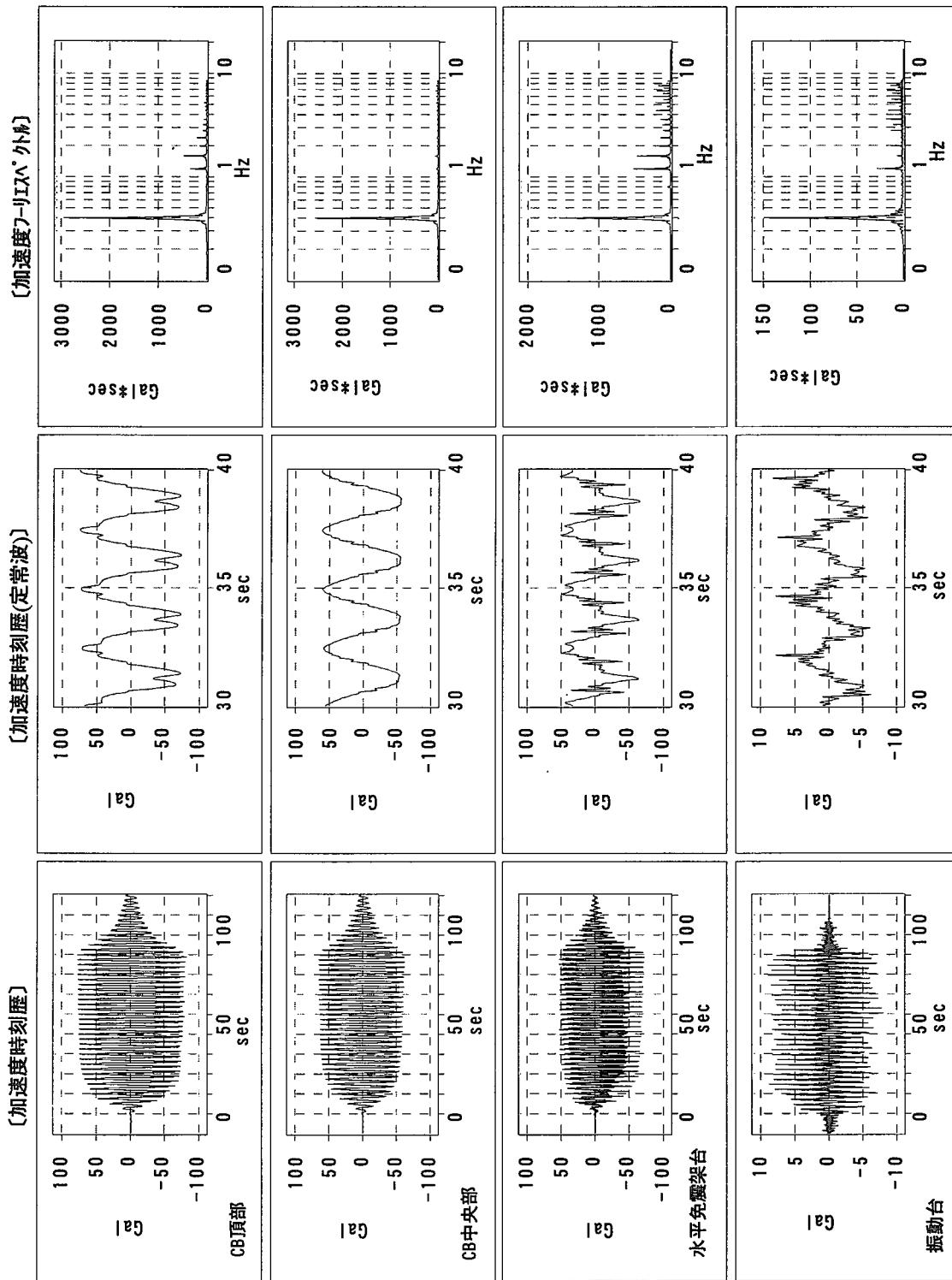


図4.2(b) 正弦波/パラメトリック加振結果(タンバーなし:M1- $\alpha 1\beta 1\phi 0$ 鉛直方向加速度時刻歴)

図4.2(c) 正弦波パラメトリック加振結果(ダンパーなし:M1- α 1 β 1 ϕ 0 変位時刻歴)

図4.3(a) 正弦波パラメトリック加振結果(ダンパーなし:M1- α 1 β 5 ϕ 0 水平方向加速度時刻歴)

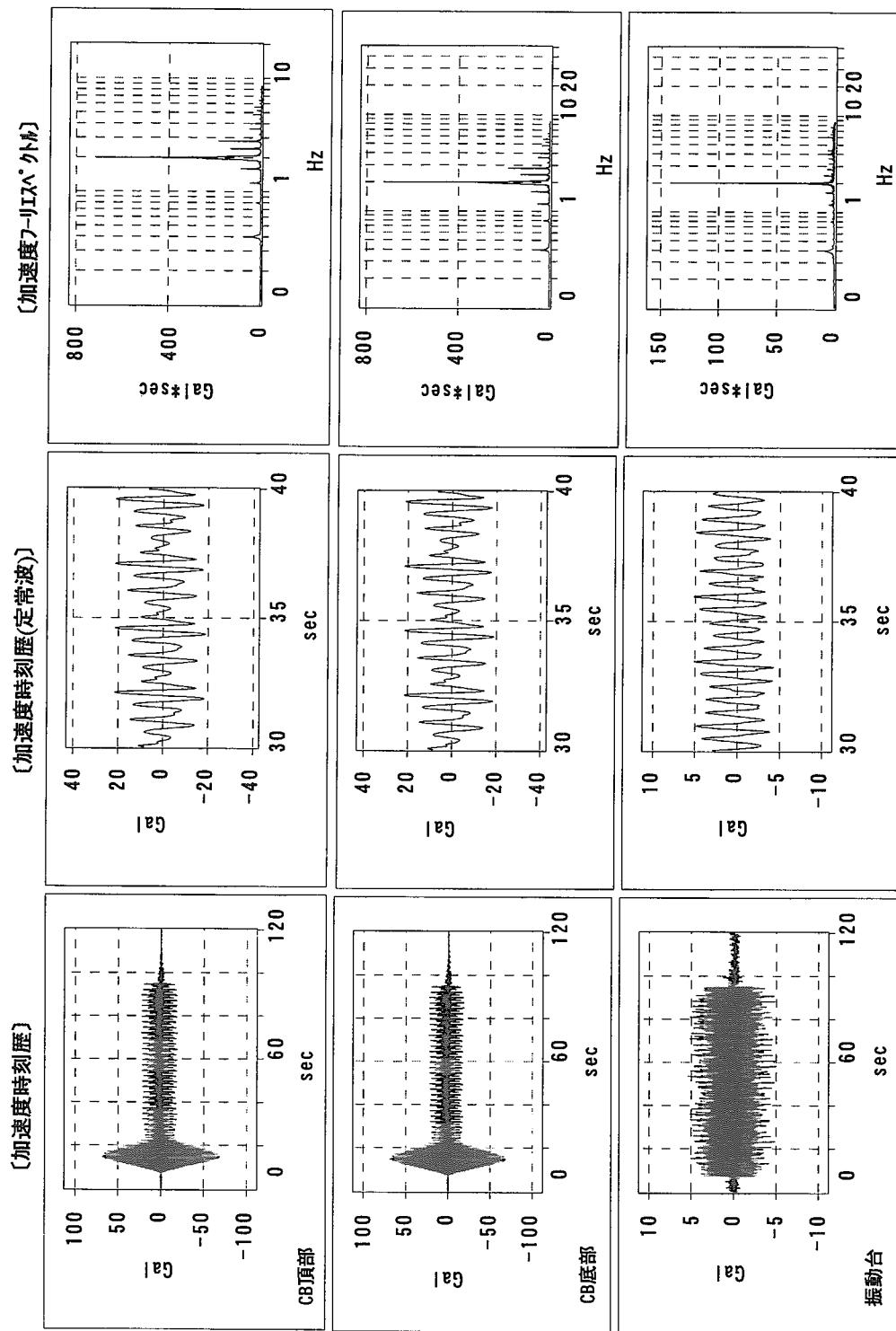


図4.3(b) 正弦波パラメトリック加振結果(ダンパーなし:M1- α 1 β 5 ϕ 0 鉛直方向加速度時刻歴)

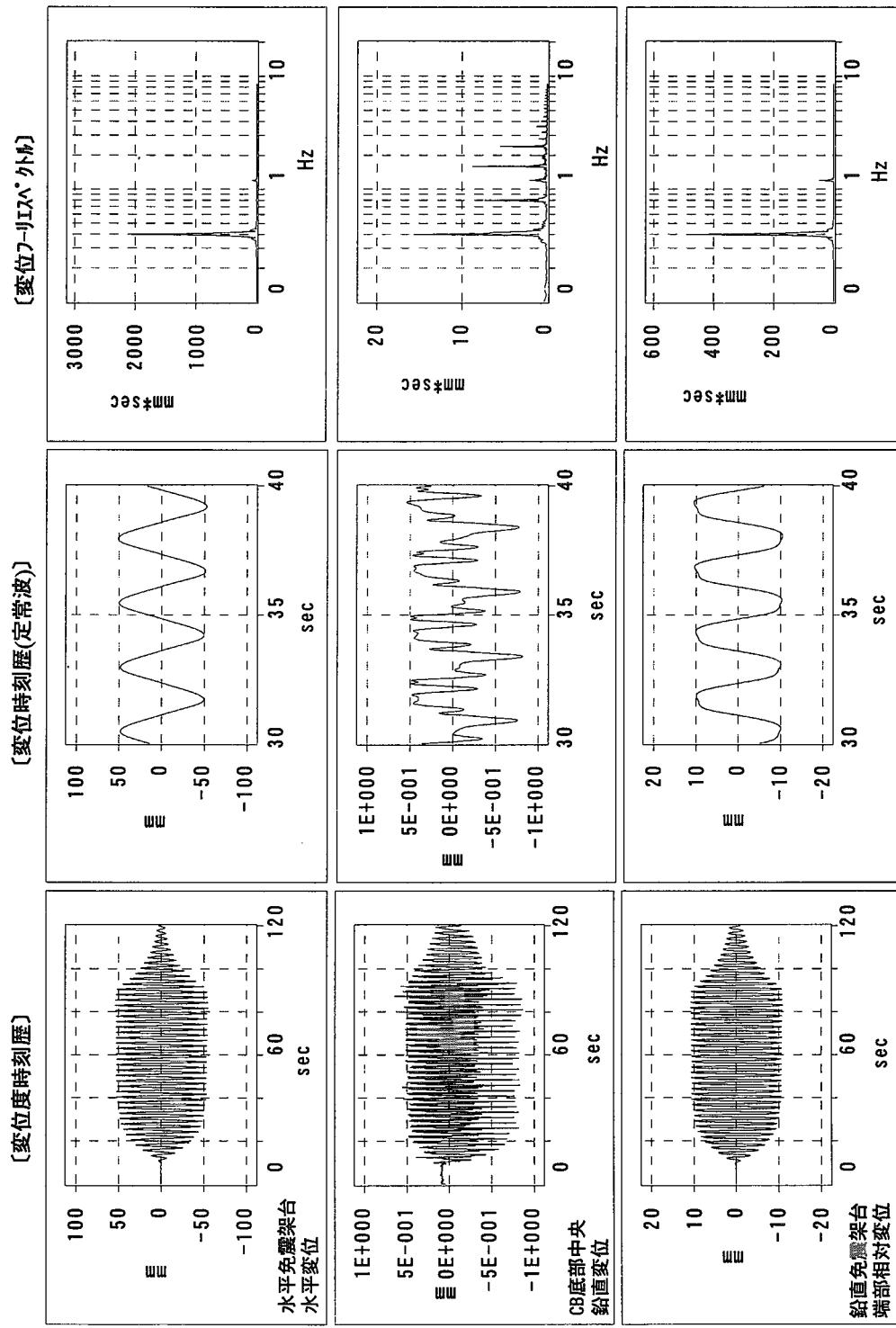
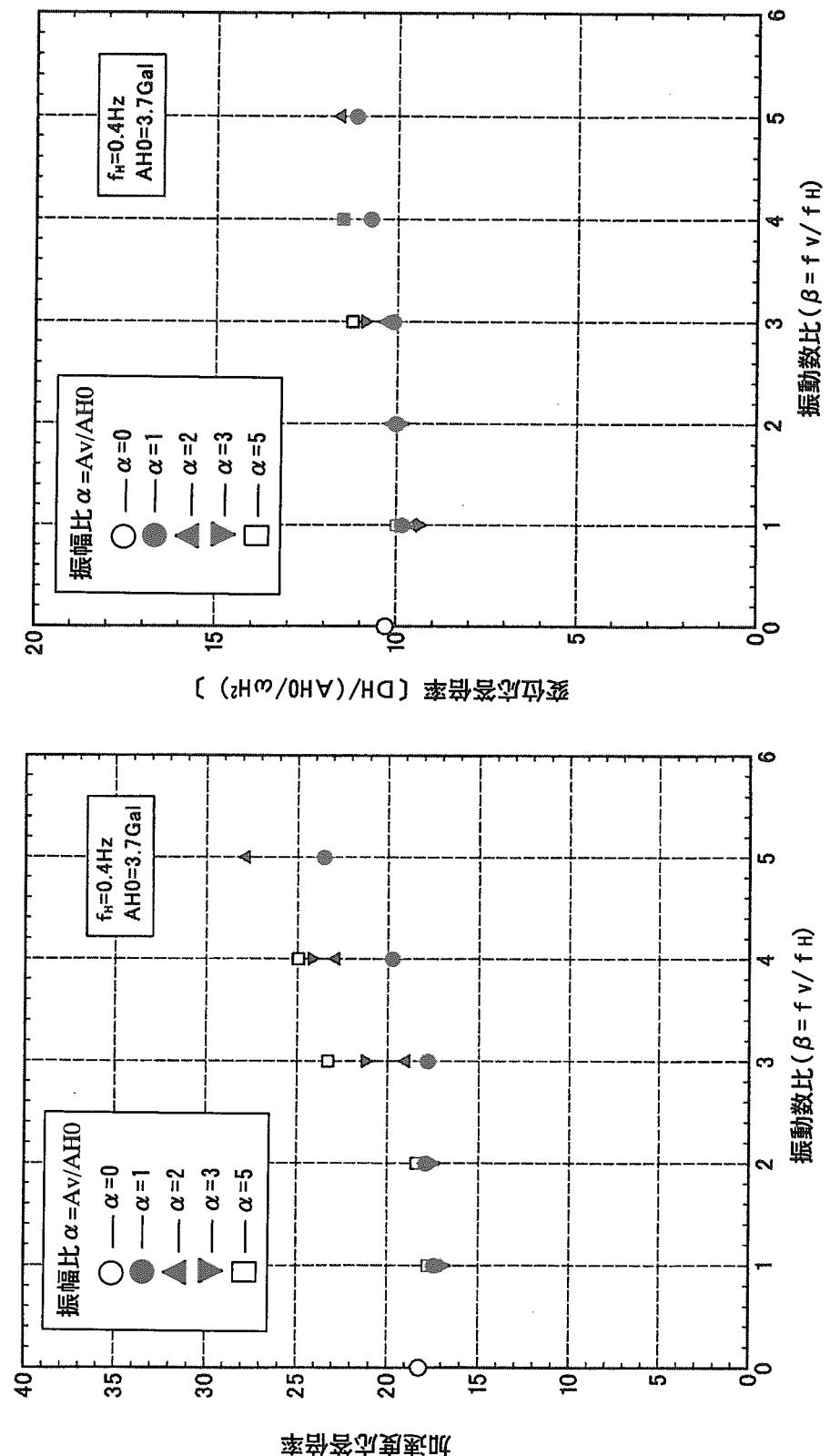


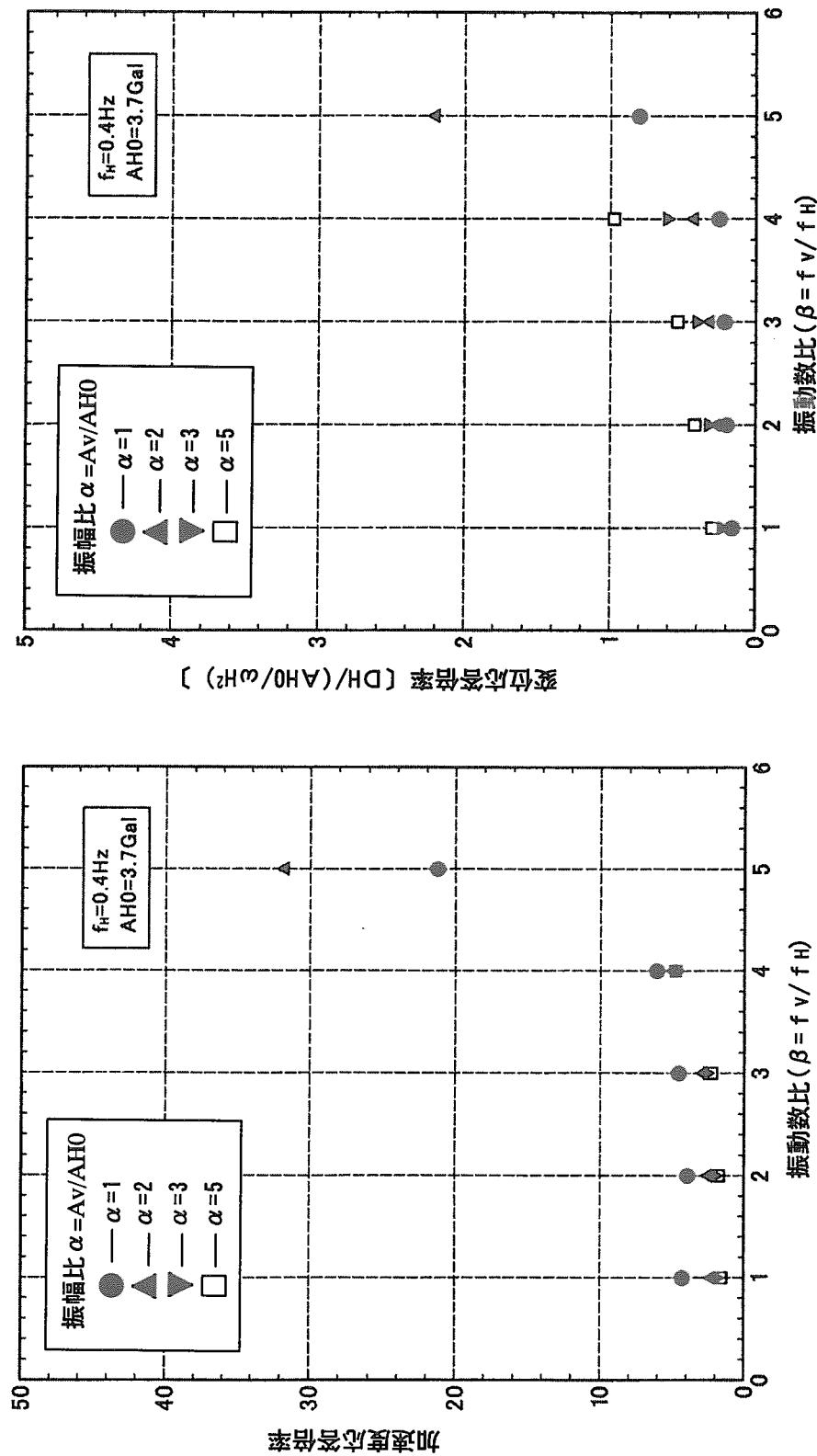
図4.3(c) 正弦波パラメトリック加振結果(タンパーなし:M1- α 1 β 5 ϕ 0 変位時刻歴)



(a) 水平加速度応答倍率と振動数比および振幅比の関係

(b) 水平変位応答倍率と振動数比および振幅比の関係

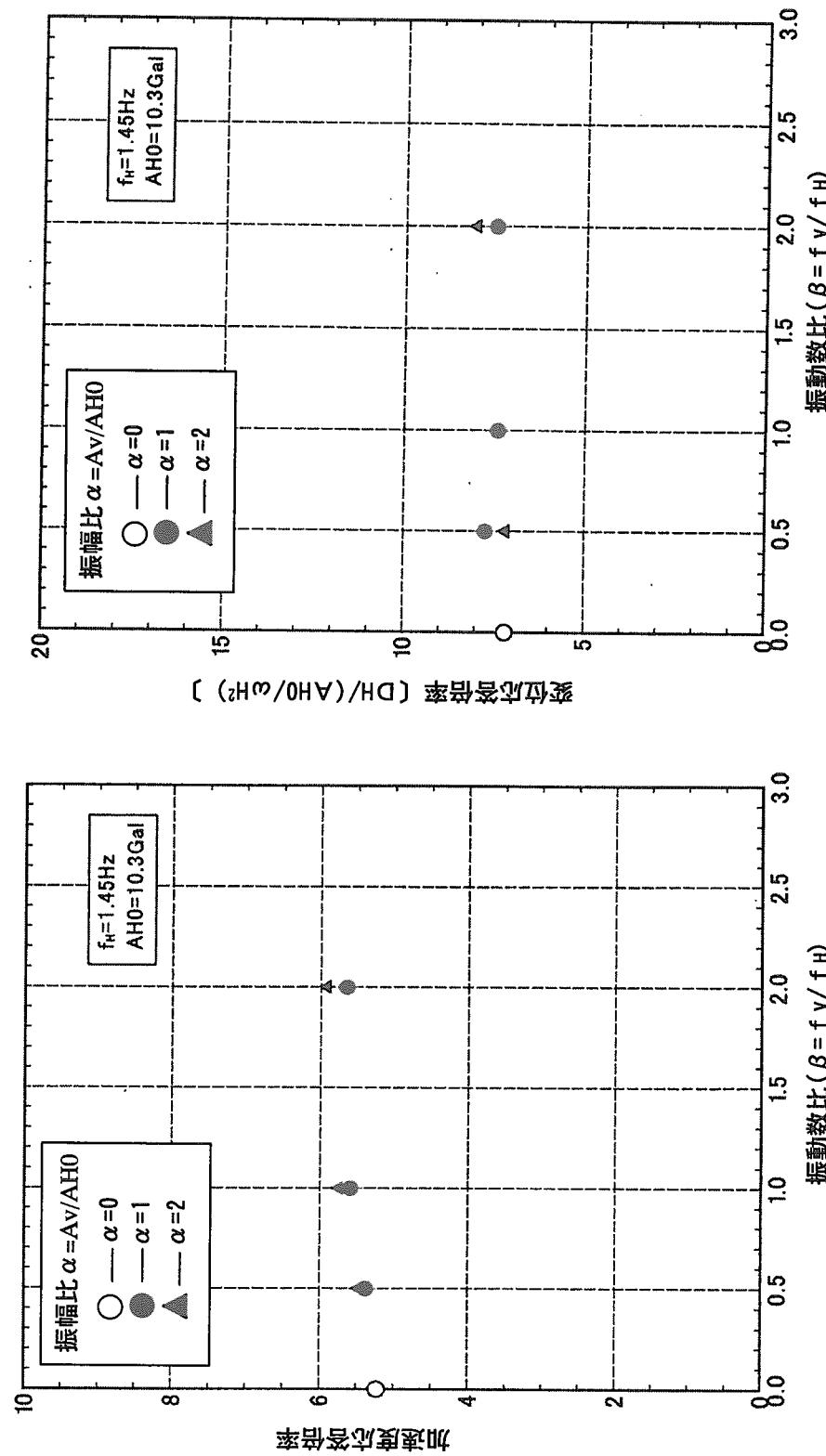
図4.4(a) 正弦波パラメトリック加振・振動数比および振幅比の影響(ダンパーなし・fH=0.4Hz)



(a) 鉛直加速度応答倍率と振動数比および振幅比の関係

(b) 鉛直変位応答倍率と振動数比および振幅比の影響 (ダンパーなし・f_H=0.4Hz)

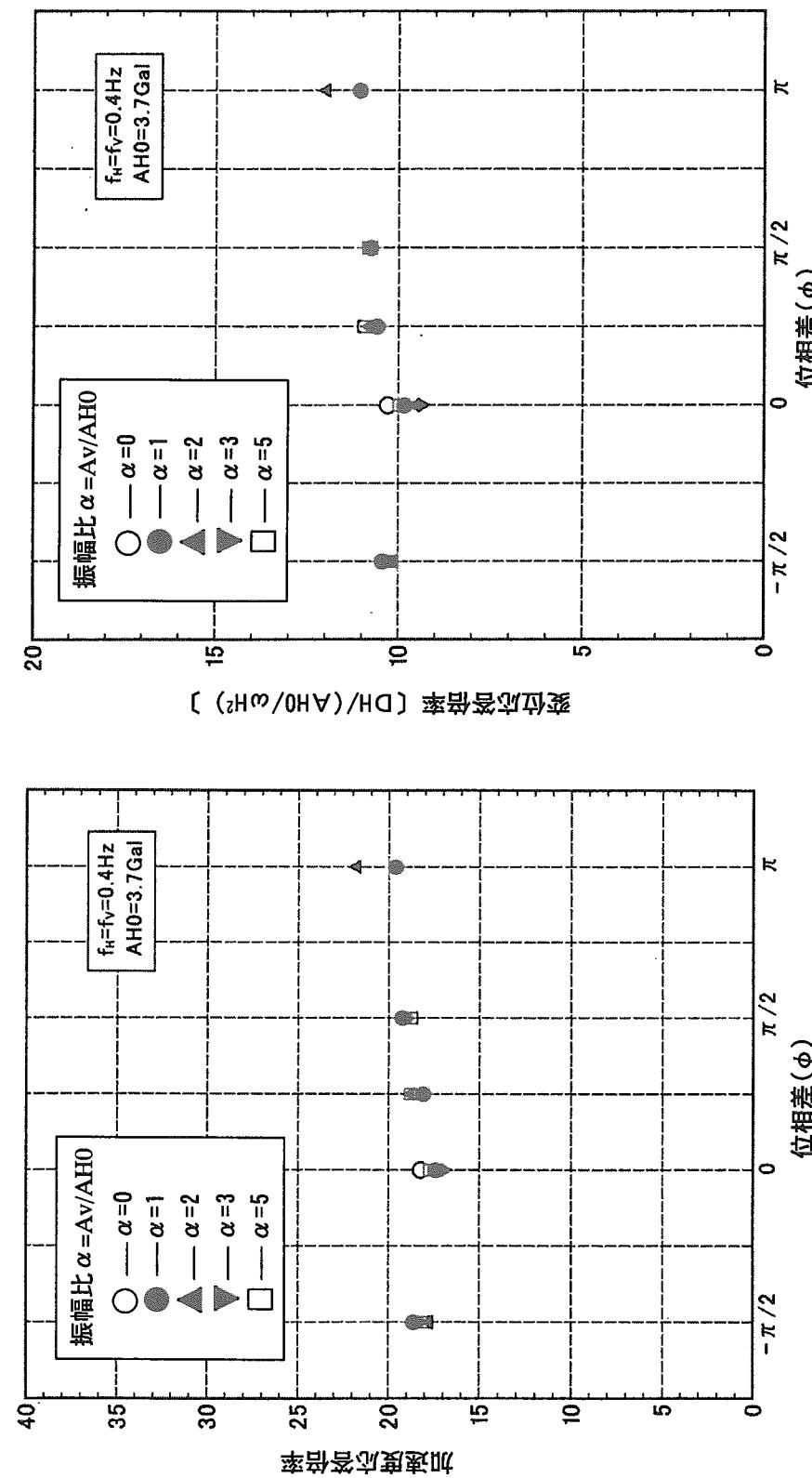
図4.4(b) 正弦波パラメトリック加振・振動数比および振幅比の影響 (ダンバーなし・f_H=0.4Hz)



(a) 水平加速度応答倍率と振動数比および振幅比の関係

(b) 水平位応答倍率と振動数比および振幅比の関係

図4.5 正弦波パラメトリック加振・振動数比と振幅比の影響(ダンパーなし・ $f_H=1.45 \text{ Hz}$)



(a) 水平加速度応答倍率と位相差および振幅比の関係
(b) 正弦波パラメトリック加振・位相差の影響(タンバーなし)

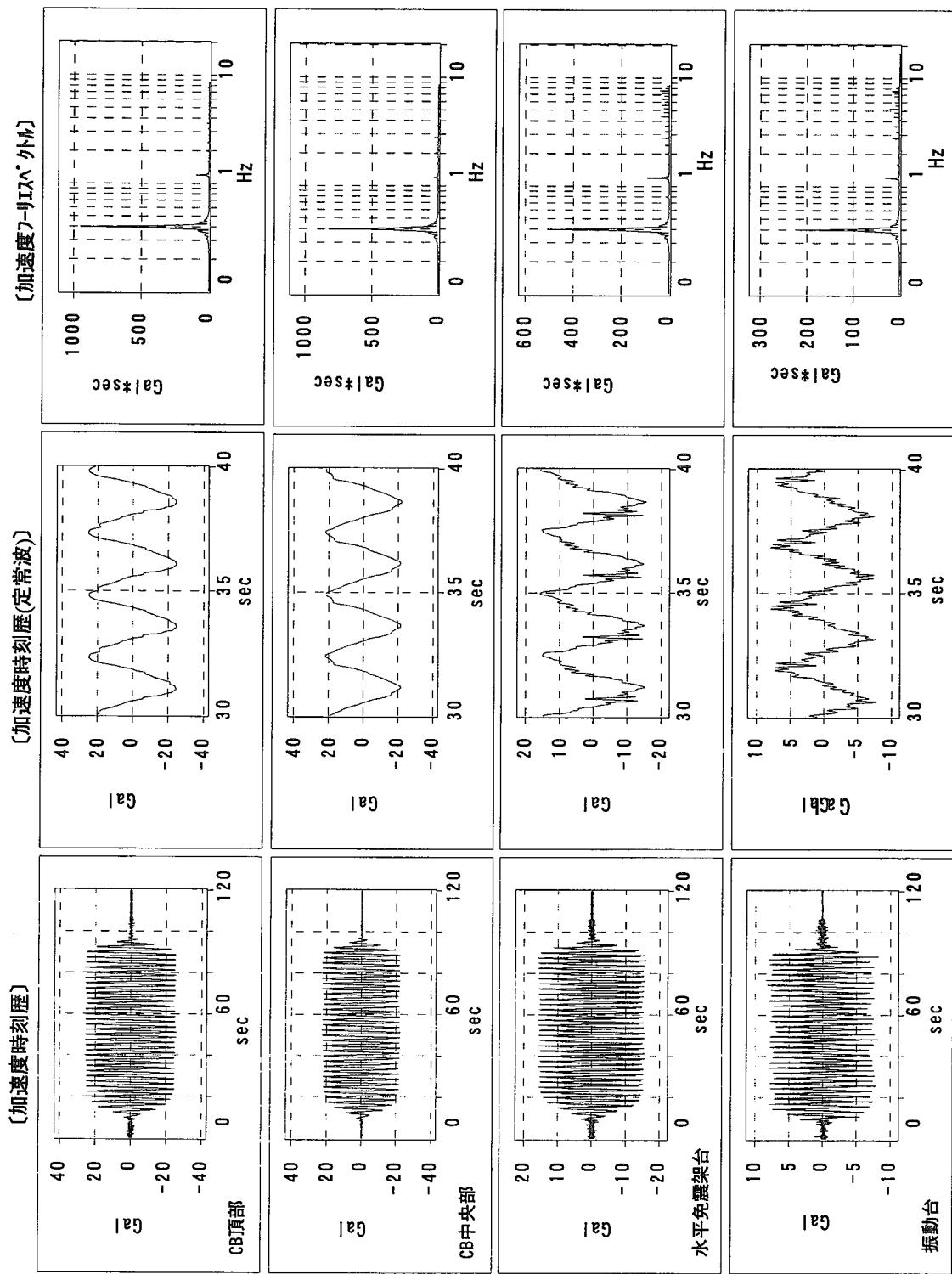


図4.7(a) 正弦波/パラメトリック加振結果(ダンパーあり:M1- $\alpha\beta\theta\phi=0$ 水平方向加速度時刻歴)

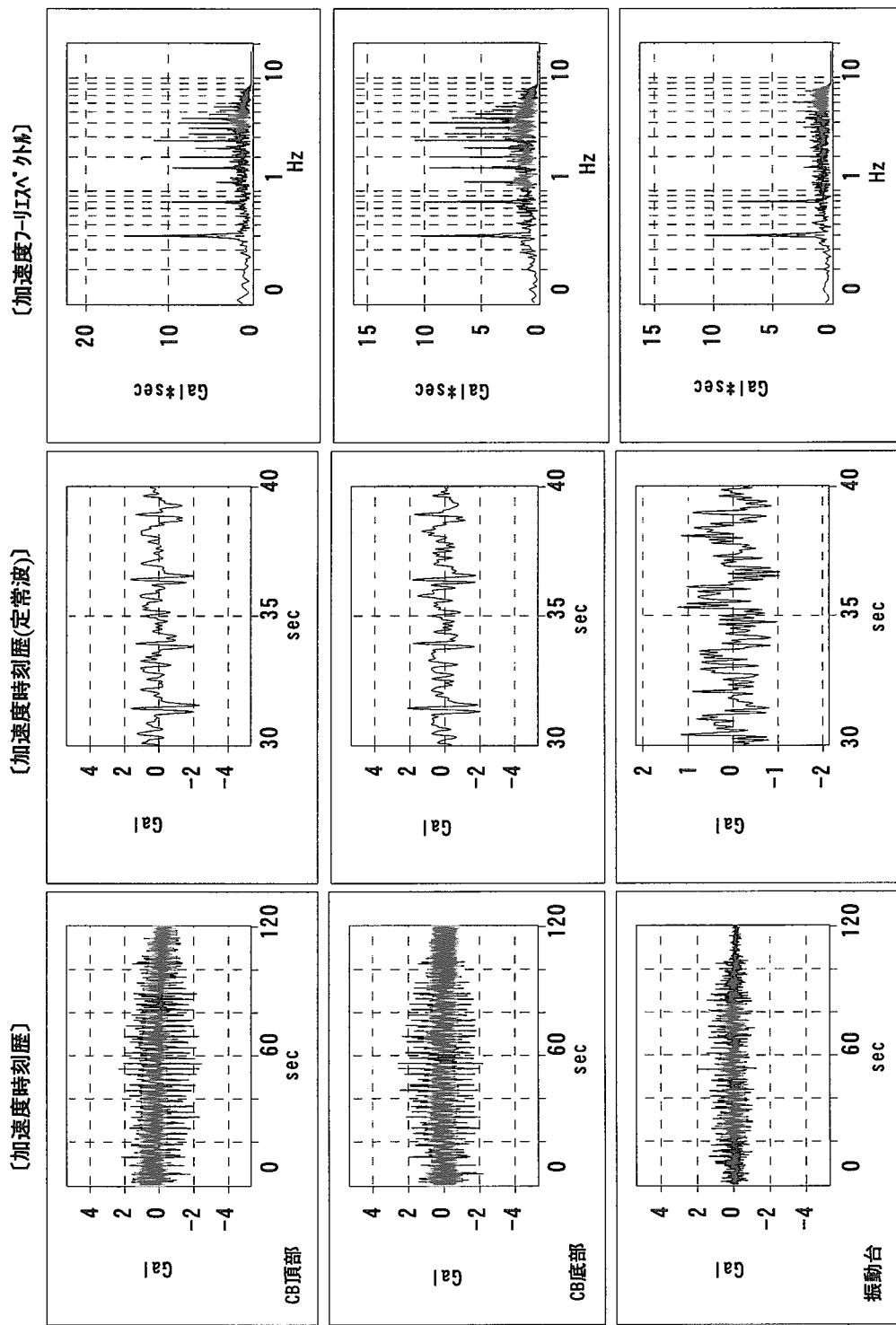
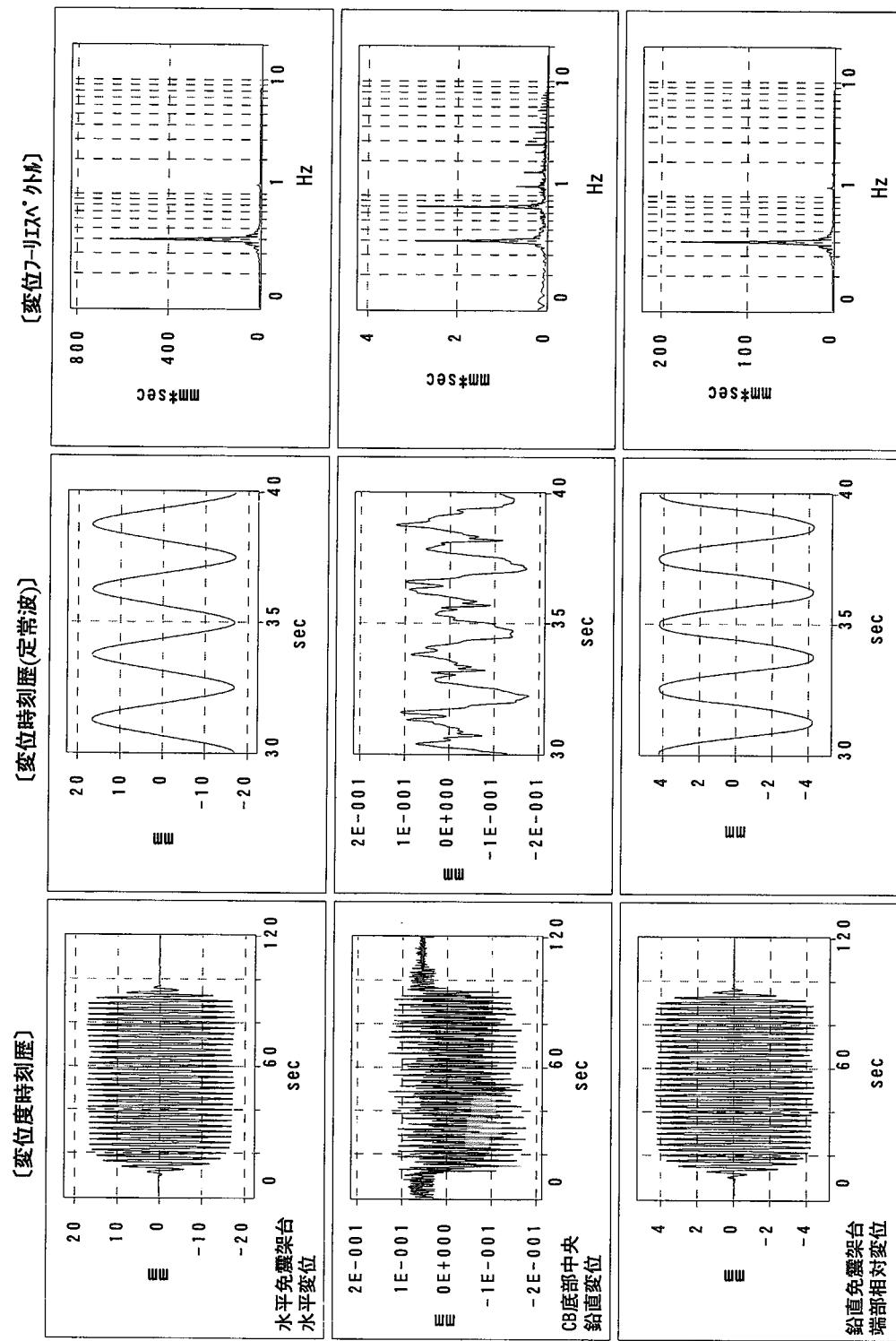


図4.7(b) 正弦波パラメトリック加振結果(ダンパー: M1- α 0 β 0 ϕ 0 鉛直方向加速度時刻歴)

図4.7(c) 正弦波パラメトリック加振結果(ダンパーあり:M1- α 0 β 0 ϕ 0 変位時刻歴)

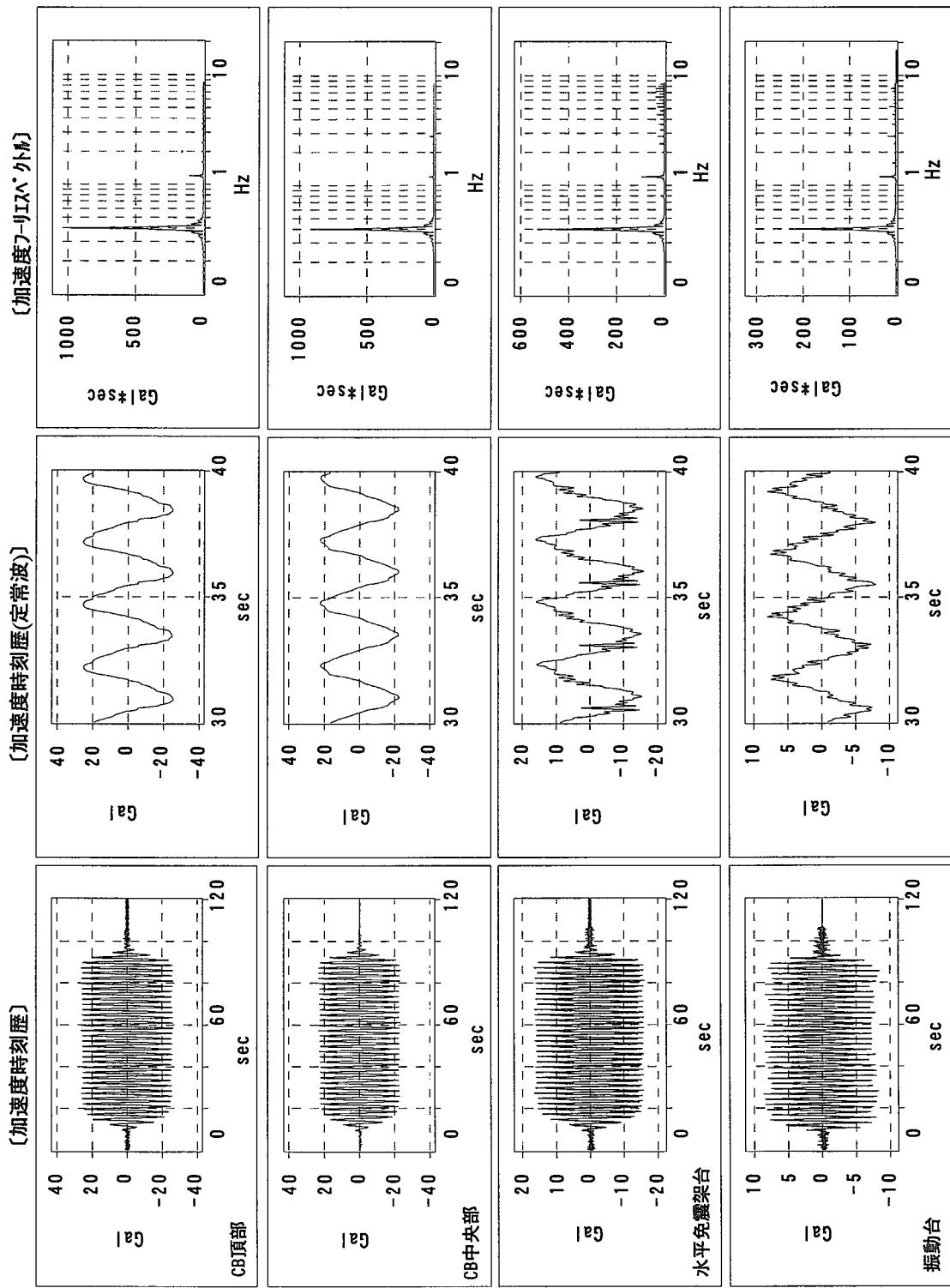


図4.8(a) 正弦波パラメトリック加振結果(ダンパーあり:M1- α 1 β 1 ϕ 0 水平方向加速度時刻歴)

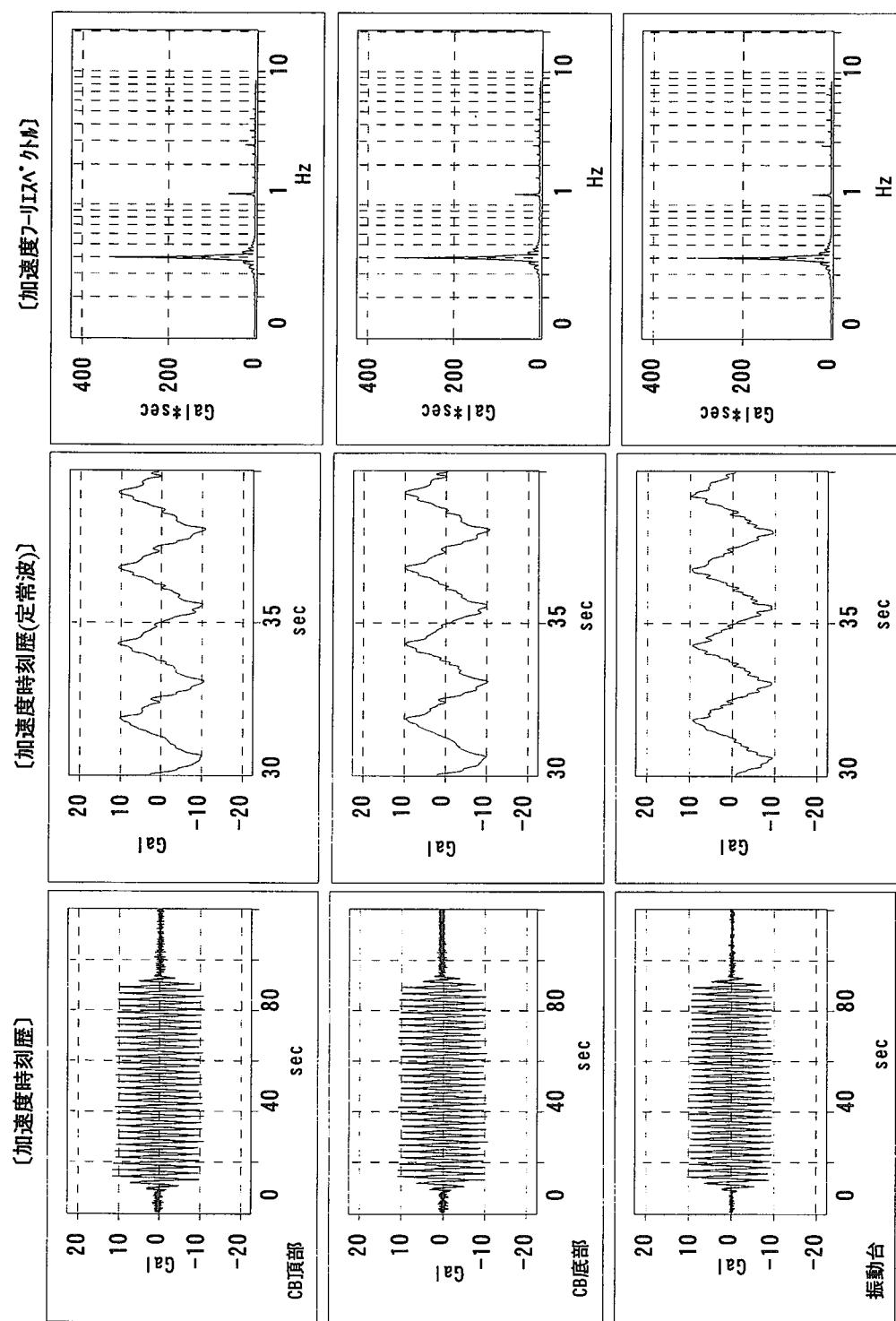
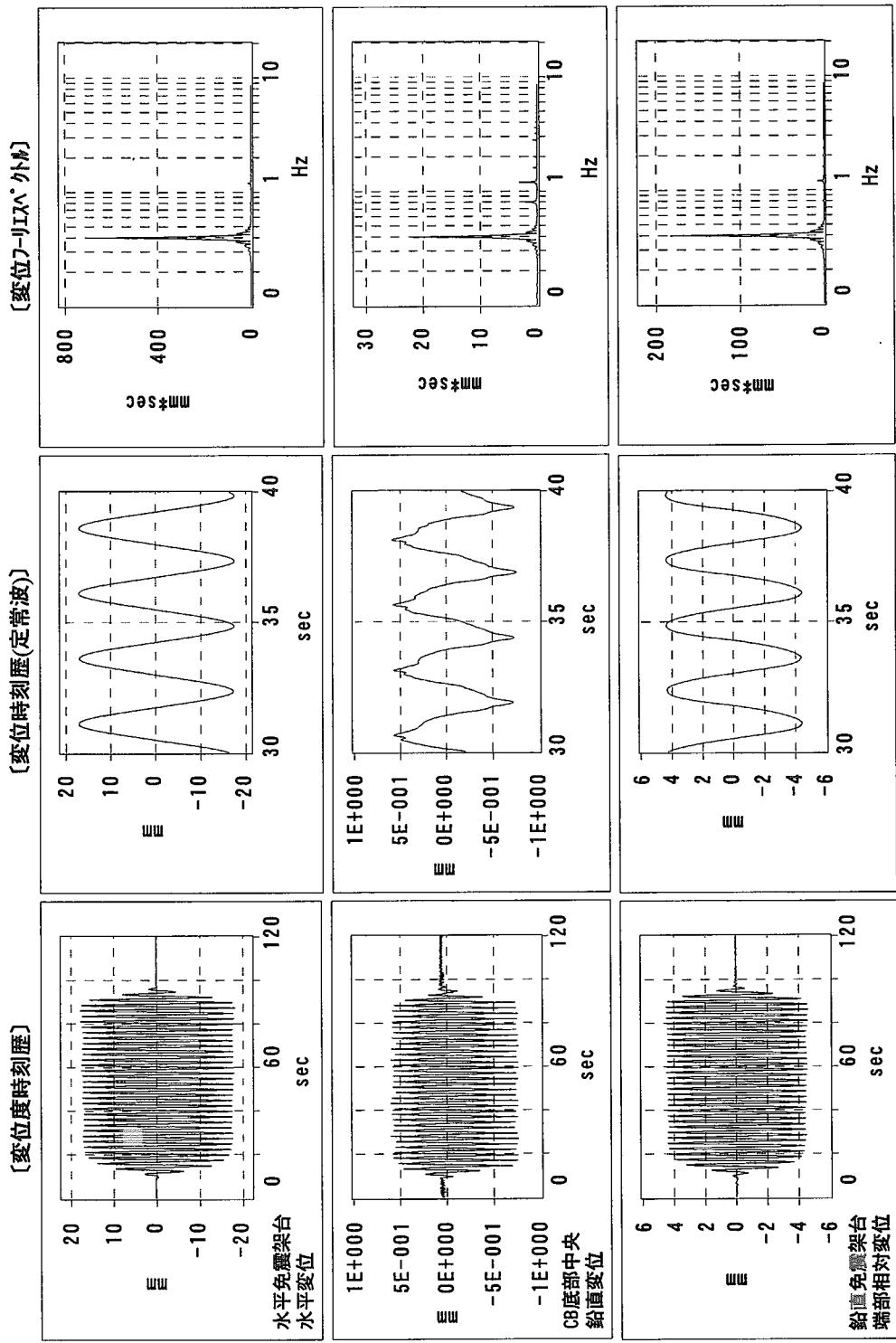


図4.8(b) 正弦波/パラメトリック加振結果(ダンパーあり:M1- α 1 β 5 ϕ 0 鉛直方向加速度時刻歴)

図4.8(c) 正弦波パラメトリック加振結果(ダンパーあり: M1- α 1 β 1 ϕ 0 変位時刻歴)

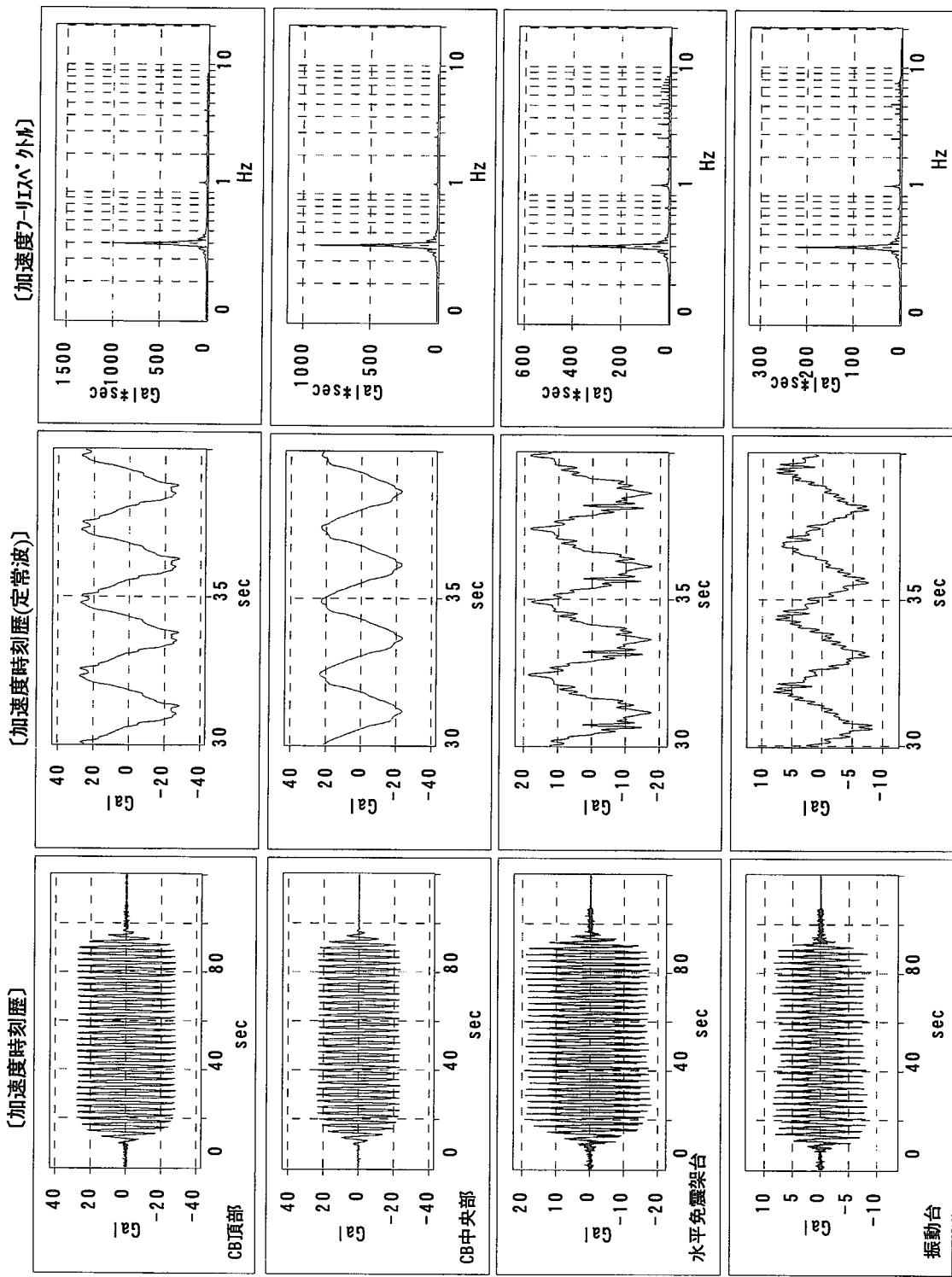


図4.9(a) 正弦波パラメトリック加振結果(ダンパーあり: M1- α 1 β 5 ϕ 0 水平方向加速度時刻歴)

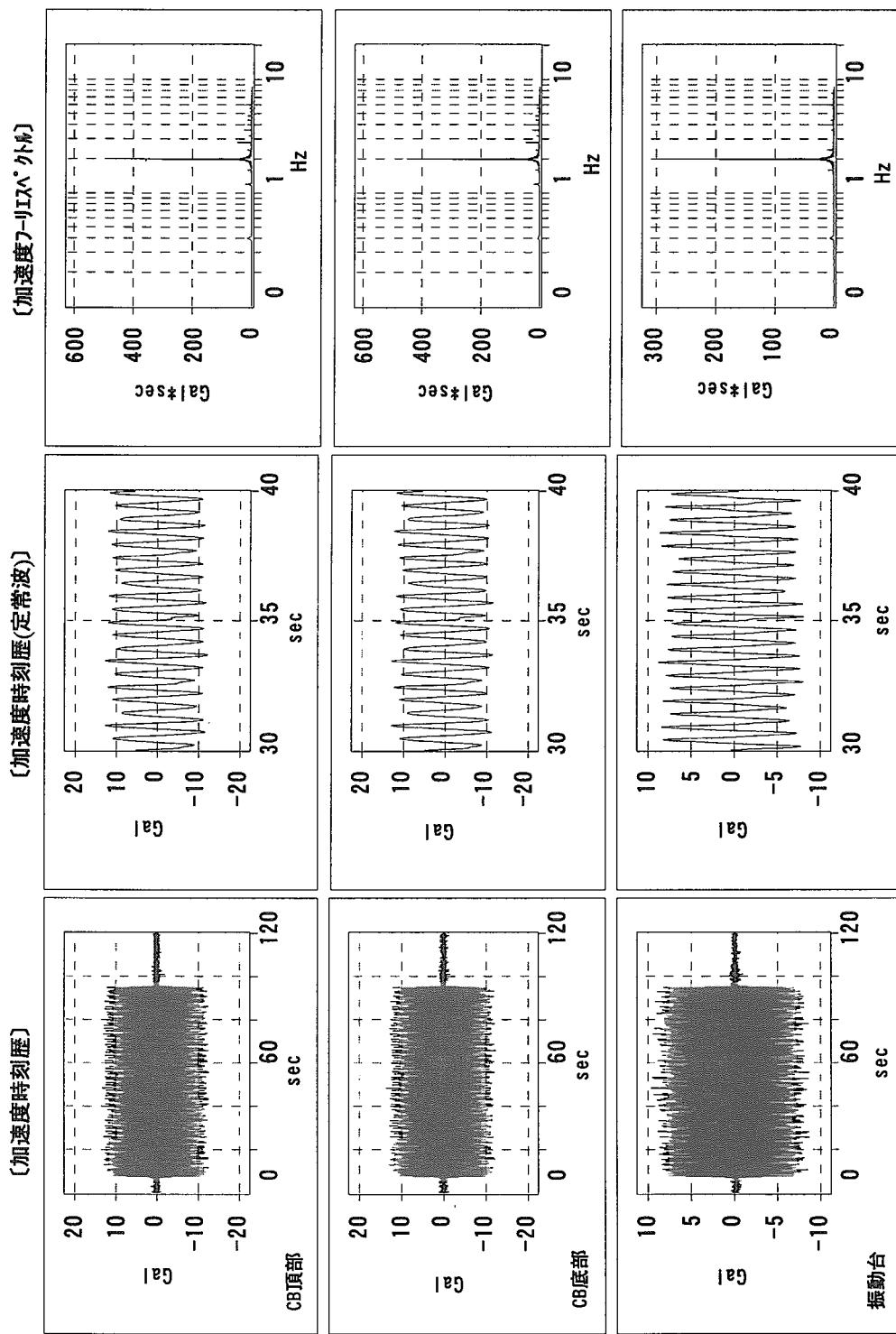
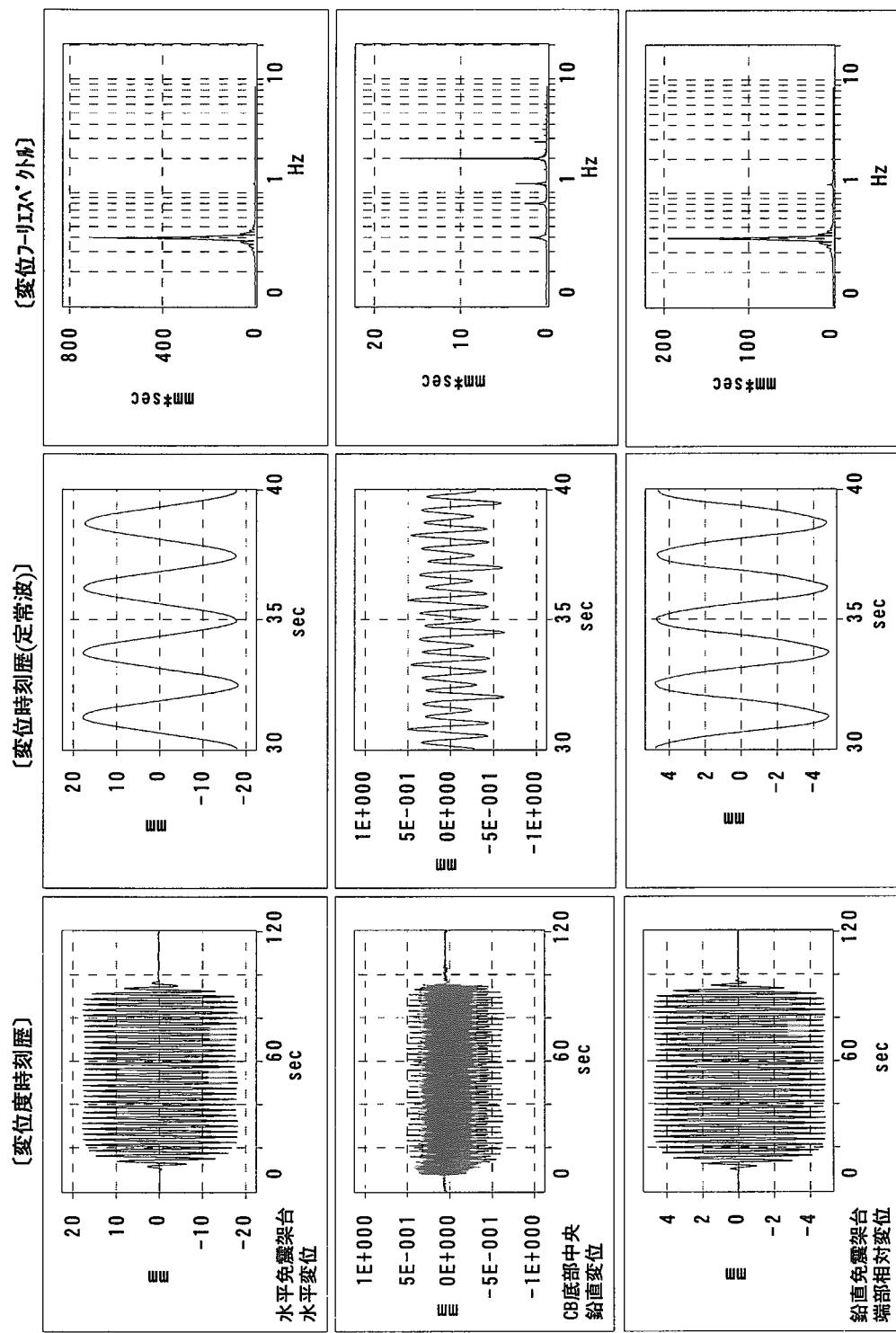
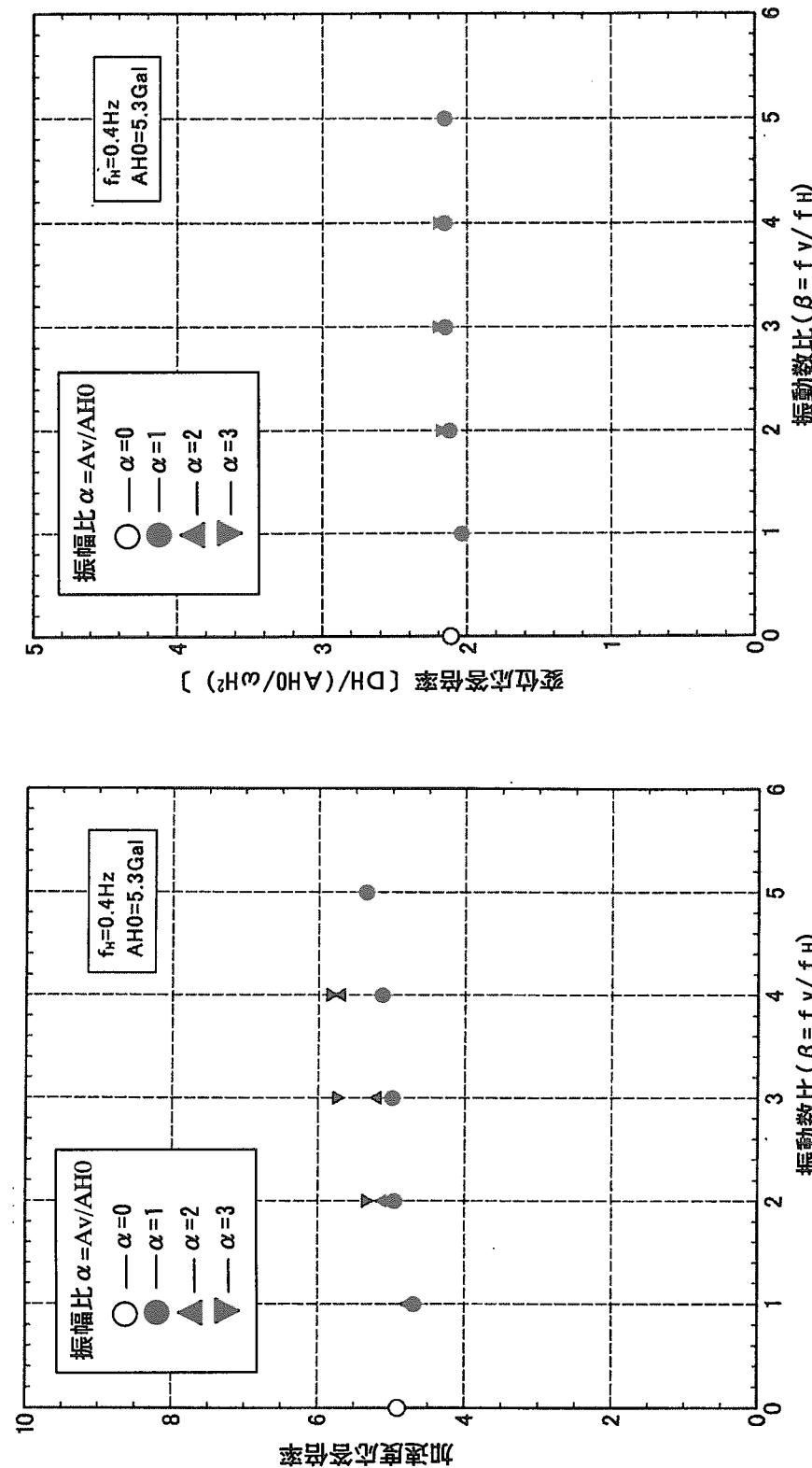


図4.9(b) 正弦波パラメトリック加振結果(ダンパーあり:M1- $\alpha 1\beta 5\phi 0$ 鉛直方向加速度時刻歴)

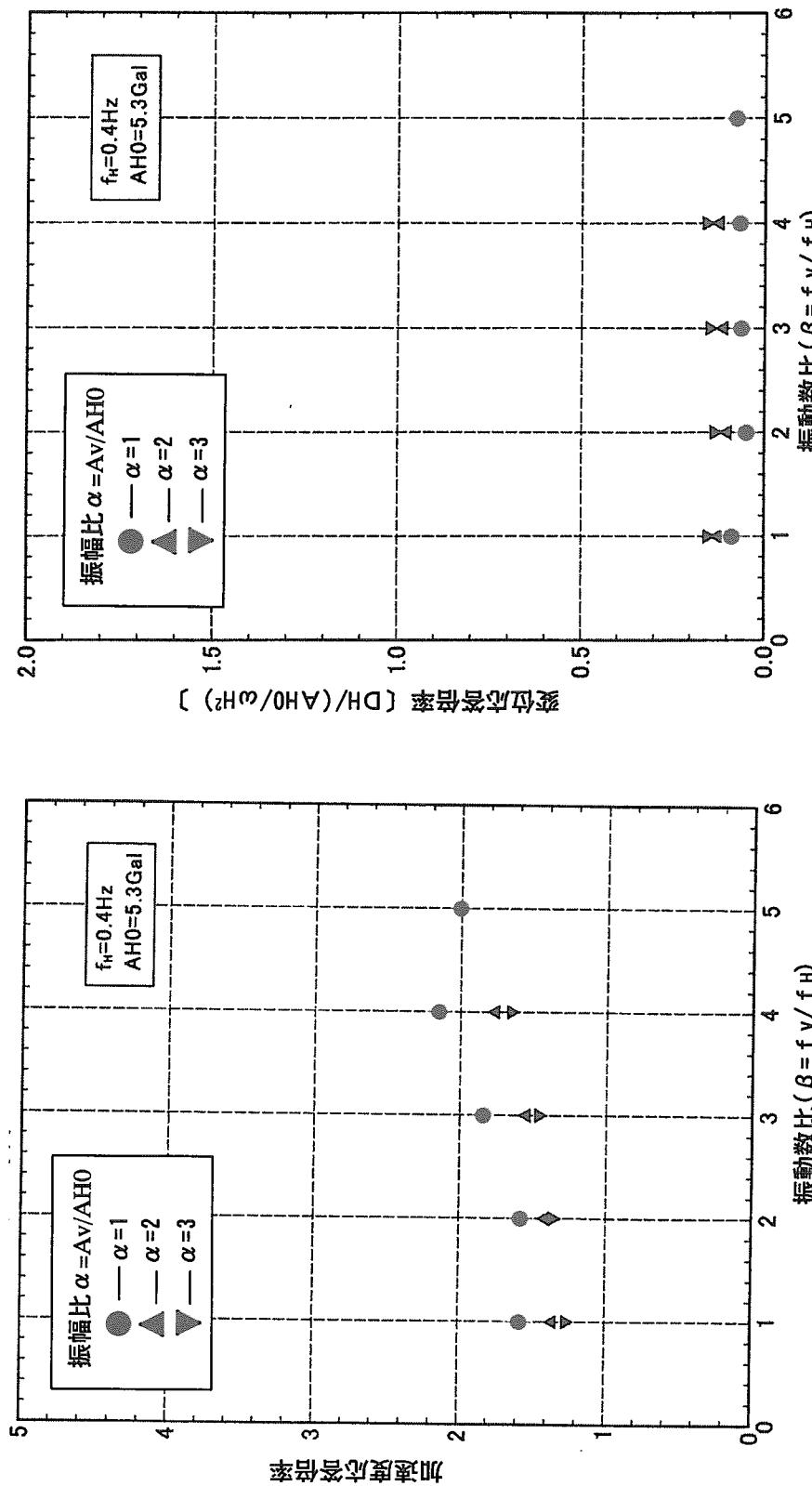
図4.9(c) 正弦波パラメトリック加振結果(ダンパーあり: M1- α 1 β 5 ϕ 0 変位時刻歴)



(a) 水平加速度応答倍率と振幅比の関係

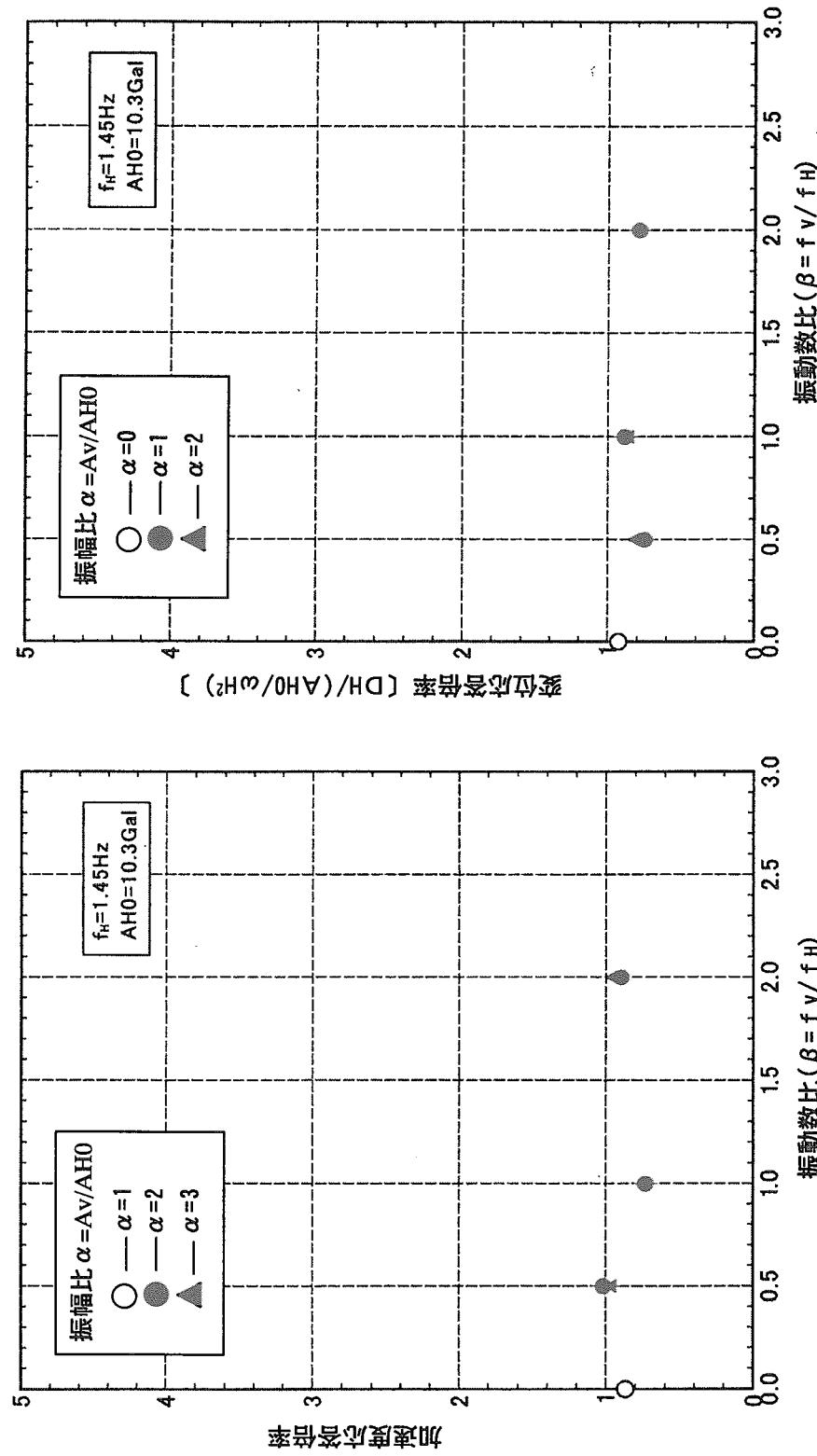
(b) 水平変位応答倍率と振動数比および振幅比の関係

図4.10(a) 正弦波パラメトリック加振・振動数比および振幅比の影響(ダンパーあり・ $fH=0.4\text{Hz}$)



(a) 鉛直加速度応答倍率と振動数比および振幅比の関係
 (b) 鉛直位変応答倍率と振動数比および振幅比の関係

図4.10(b) 正弦波パラメトリック加振・振動数比および振幅比の影響(ダンパーあり・ $f_H=0.4\text{Hz}$)



(a) 水平加速度応答倍率と振動数比および振幅比の関係

(b) 水平変位応答倍率と振動数比および振幅比の関係

図4.11 正弦波パラメトリック加振・振動数比および振幅比の影響 (タンバーあり・ $f_H=1.45 \text{ Hz}$)

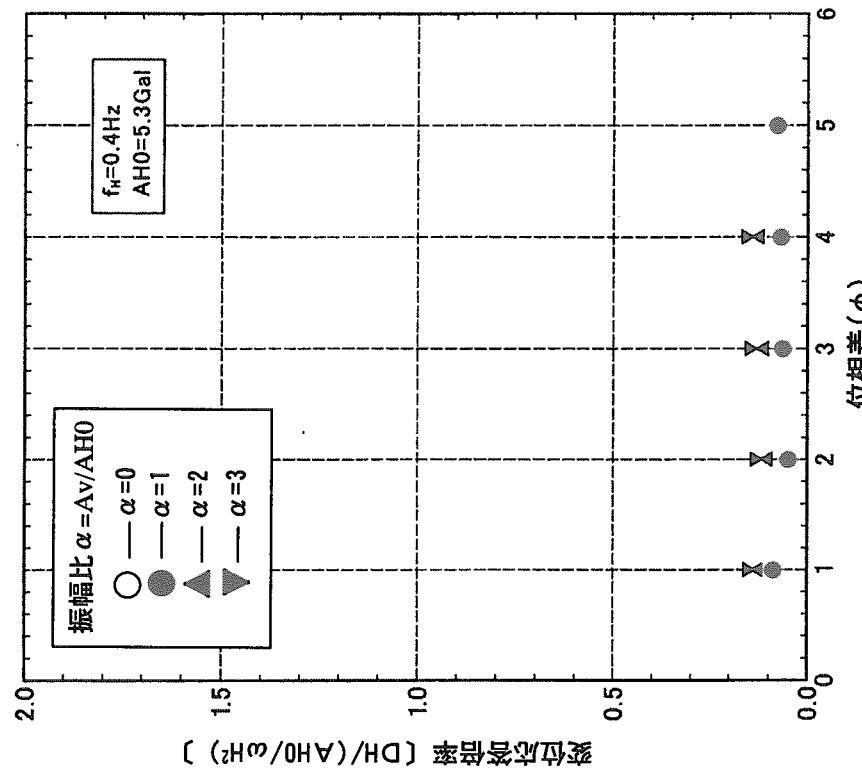
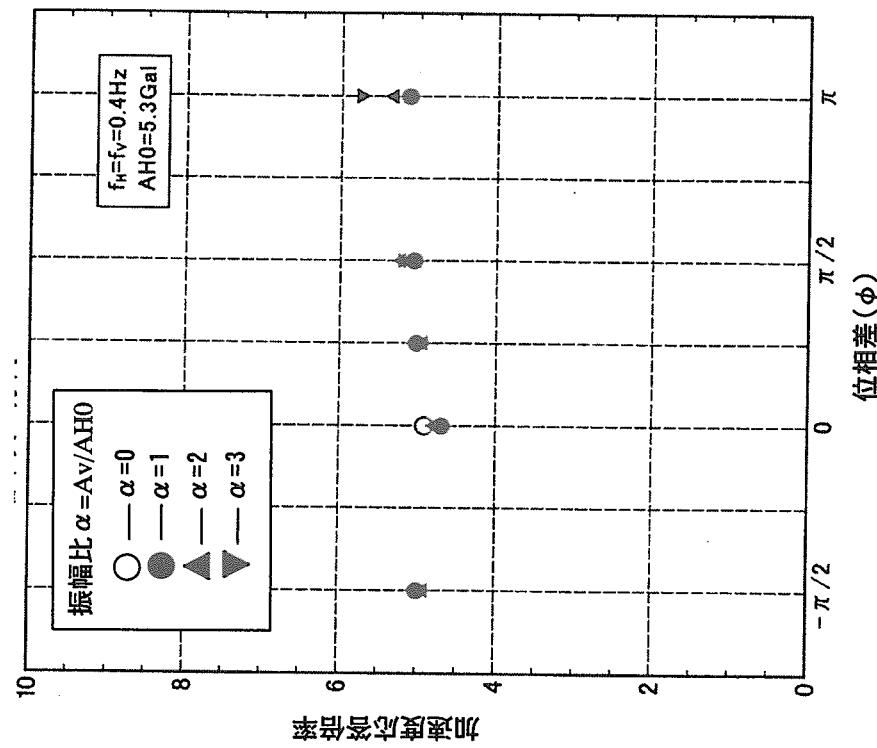


図4.12 正弦波パラメトリック加振・位相差(ダンパーあり)

(a) 水平加速度応答倍率と位相差の関係

(b) 水平変位応答倍率と位相差および振幅比の関係

5. 地震波加振試験

本章では、3次元免震システムの免震効果および動的挙動を検証するために実施した、種々の周波数特性の地震波を入力したランダム加振結果について述べる。

5.1 加振試験の概要および入力地震波

本試験では、3次元免震システムの免震効果と動的挙動を把握するために、次節で述べるような種々の周波数特性を有する地震波を用いて加振試験を実施した。加振試験は、3次元免震システムと水平免震システム(比較用)のそれぞれダンパーがない場合とある場合について実施し、加振方向は、水平1方向と鉛直方向の2方向同時加振、水平1方向加振、鉛直1方向加振の3パターンとした。振動台の仕様および加速度・変位の計測方法は、正弦波掃引試験と同様とした。

本試験の入力地震波の特性一覧を表5.1(振動台上で計測した加速度)に、また、各地震波の加速度時刻歴、フーリエスペクトルおよび加速度応答スペクトルを図5.1に、全入力地震波の加速度応答スペクトル(最大入力加速度に対する応答倍率で表示)を図5.2に示す。表5.1には加速度および加速度応答スペクトルの最大値、免震系1次および2次固有振動数の加速度応答スペクトル値および最大入力加速度に対する応答倍率を記した。

入力地震波は、原研大洗研究所における観測地震波、設計用摸擬地震波、断層モデルによる摸擬地震波に、代表的な強震動記録に大別される。これらのうち、EQ326-TBおよびEQ-326-FLは、原研大洗研究所内のテストフィールドおよび研究用原子炉建屋1階で観測された地震波で、S1D波は大洗サイトを対象とした設計用摸擬地震波、S1Fは改良標準波である。また、FM72およびFM80は、同サイトを対象として、霞ヶ浦断層内にマグニチュード7.2と8.0の震源を想定し、入倉・香川の手法^{(5.1)(5.2)}により表5.2に示すような条件で作成した摸擬地震波である。なお、各地震波は、免震システムに損傷を与えない範囲に加速度振幅を調整して入力した。また、S1F波では、鉛直方向入力加速度を水平方向の1/2倍として入力した。

表5.1および図5.1～図5.2より、各入力地震波の加速度応答スペクトルは、水平方向では1.3Hz～16Hz、鉛直方向では2.6Hz～9.9Hzの幅広い周波数領域で最大値を示している。水平方向の免震系1次固有振動数(0.4Hz)近傍の加速度応答倍率を見ると、HACHINOHE波を除いて0.3以下となっており、各波に対して概ね良好な免震効果が得られるものと推定される。一方、鉛直方向では、免震系3次固有振動数(2.0Hz)近傍において、大洗観測波等一部の入力地震波を除き、最大で3倍程度まで加速度応答倍率が増幅する傾向があり、免震効果の点では極めて厳しい入力条件となっている。

5.2 加振試験結果および免震効果・応答性状に関する考察

加振結果として、3次元および水平免震システムの各加振ケースにおける水平および鉛直最大加速度応答、加速度応答倍率および最大変位応答を表5.3に、各加振ケースの加速度応答倍率および最大応答変位の比較を図5.3～図5.6に、水平鉛直同時加振の最大加速度応答値と水平1方向および鉛直1方向加振の応答値の比を図5.7～図5.8に示す。また、S1F, FM80,

KOBE, EL CENTRO波による加速度および変位応答時刻歴、フーリエスペクトル、免震システム各部の伝達関数等を図5.9～図5.24に示す。なお、免震システム各部の最大応答値を求める際、加振台の高周波ノイズや計測器ノイズの影響を軽減するために時刻歴データに20Hzのデジタルローパスフィルターによるフィルタリング処理を行った。伝達関数は、バンド幅0.3Hzのハニングウィンドウで平滑化した振動台上と免震システム各部の加速度フーリエスペクトル比として求めた。

これらの結果から、各免震システムの免震効果および応答性状について以下に考察する。

5.2.1 加速度応答倍率

(1) 水平方向

水平免震システムでは、図5.3に示すように0.4Hz近傍の周波数が卓越するHACHINOHE波を除き、ダンパーがない場合とある場合の双方でほぼ0.3～0.5程度に最大加速度が低減している。これらの結果は、入力地震波の加速度応答スペクトルの傾向とほぼ対応しており、免震効果が顕著に現れている。また、全体的にダンパーがある場合の応答が、ダンパーがない場合と比べて減少する傾向が見られ、特に応答倍率が大きなHACHINOHE波では、ダンパーによる応答の低減が顕著である。

一方、3次元免震システムでは、ダンパーがない場合、加速度応答が水平免震の最大2倍程度に増幅し、入力地震波による応答倍率のばらつきも大きい。これは、鉛直免震装置のロッキングによる影響と考えられる。特に、FM72、KOBE、HACHINOHE波等では、応答倍率の増加が顕著であるが、これらの入力地震波では、免震系2次固有振動数1.45Hz近傍に加速度応答スペクトルのピーク点が見られることから、1次モードに2次モードによるロッキング応答が加わっているものと考えられる。しかし、ダンパーがある場合は、各入力地震波に対して水平免震と同レベルに加速度応答倍率が低減しており、ダンパーによりロッキングが抑制されていることがわかる。

(2) 鉛直方向

図5.4に示すように鉛直方向の加速度応答倍率は、水平免震システムでは、3倍から7倍程度に増幅し、3次元免震システムにおいてもダンパーがない場合は、高周波成分が卓越する大洗観測波を除いて、いずれも加速度応答が増幅している。また、入力地震動による加速度応答のばらつきも大きい。水平免震では、約10Hzに鉛直方向の固有振動モードがあることから、これが励起されて応答が増幅している。また、3次元免震では、特に、2Hz近傍の周波数成分が大きな設計用模擬地震波や、KOBE、TAFT、HACHINOHE波等で加速度応答倍率が大きくなっている。

一方、ダンパーがある場合は、各入力地震波に対してほぼ1倍以下に応答が低減し、応答のばらつきも小さい。ダンパーによる制振効果が顕著に現れている。

設計上、鉛直免震は、固有振動数の設定範囲に制限があり、また、ロッキング応答が発生するため、鉛直応答とロッキングの双方を抑制する上でダンパーの役割は重要と考えられる。上記の結果から、2Hz程度の鉛直免震系では、種々の周波数特性を持つ地震動に対して水平免震のような大きな加速度低減効果を得ることは難しいものと考えられるが、免震系で生じる一定の振動数の変位や速度応答にダンパーを作用させることで、加速度応答の増幅を抑制することは十分可能と考えられる。

5.2.2 最大変位応答

図 5.6 は、各加振ケースにおける 3 次元免震システムの水平方向の最大変位応答を示している。最大応答変位は、入力地震波のレベルや周波数特性の違いにより、全体的にばらつきが見られるが、ダンパーがある場合はない場合と比較して最大で 1/2 程度に変位応答が低減している。

また、図 5.7 は、C. B 底面中央と鉛直免震架台端部における鉛直方向の最大変位を示している。両者の変位の差は、免震架台上部のロッキング応答に対応している。これらの結果から、鉛直方向の最大変位応答は、水平方向と同様にダンパーにより最大で 1/3 程度に低減し、同時にロッキングも減少していることがわかる。

5.2.3 応答性状

(1) 水平応答

図 5.9～図 5.24 の(a)および(c)図より、各免震システムの加速度応答の性状を比較すると、3 次元免震では、ダンパーがない場合は、フーリエスペクトルおよび伝達関数から水平 1 次モード(0.4Hz)および 2 次モード(1.45Hz)の応答が卓越し、特に 2 次モードが加速度応答の増幅やロッキング増大の原因となっていることがわかる。ダンパーがある場合は、1 次および 2 次モードの応答成分が大幅に減少し、水平および鉛直ダンパーによる加速度、変位およびロッキング応答の低減効果が顕著に現れている。また、伝達関数から、CB 頂部と水平免震架台において 2 次モードによるピークがなくなり、0.5Hz～0.6Hz 以上の周波数成分に対して顕著な遮断効果が見られる。

一方、2 次元免震システムでは、ダンパーがない場合は、水平 1 次モード(0.46Hz)の応答が支配的であるが、水平 2 次モード(5.2Hz)および鉛直 1 次モード(9.9Hz, 鉛直地震動による増幅が非常に大きい)の影響が若干見られる。ダンパーがある場合は、1 次モードの応答が減少し、その分相対的に高次モードの応答が顕著に現れているが、ダンパーがない場合と比較して応答の収束が早く、変位応答の低減が顕著である。

(2) 鉛直応答

図 5.9～図 5.16 の(b)および(c)図より、3 次元免震では、ダンパーがない場合は、加速度、変位応答とともに、鉛直 1 次モード(2.0Hz)の応答が支配的で、このモードによる応答の増幅が非常に大きい。これに対して、ダンパーがある場合は、1 次モードの応答成分が大幅に減少し、その分入力地震動の周波数特性の影響が応答に現れているが、ダンパーによる加速度および変位応答の低減効果が顕著で、応答の収束も早い。また、伝達関数から、3 Hz 以上の周波数成分に対して遮断効果が見られる。しかし、3 次元免震では、ロッキングにより鉛直免震架台両端の相対変位が CB 底部中央の鉛直変位の最大 2 倍程度に達しており、特に機器免震装置周辺の取合い部での変位の増大に注意が必要である。

一方、2 次元免震システムでは、鉛直方向は減衰機構を持たないため、いずれも鉛直 1 次モード(9.9Hz)の応答が支配的で、このモードによる加速度の増幅が極めて大きい。

5.2.4 3次元免震システムにおける水平鉛直同時入力による応答への影響

表 5.3(b)は、3次元免震システムのダンパーがない場合およびダンパーある場合について、水平1方向加振における水平および鉛直応答結果と、水平鉛直同時加振と水平1方向加振の水平方向最大応答値の比率を示している。また、図 5.7 は各入力地震波について加速度応答値の比率をプロットした結果を示している。これらの結果から、水平鉛直同時加振と水平1方向加振の応答値の比は、各入力地震波ともにほぼ1前後の値を示しており、鉛直入力による水平応答への影響(連成効果)は見られない。なお、鉛直方向は、振動台稼動時のホワイトノイズ状のノイズにより最大 5Gal 程度の加速度入力が発生しており、ダンパーがない場合は加速度応答が大幅に増幅している。

また、同様に表 5.3(c)は、3次元免震システムのダンパーある場合について、鉛直1方向加振における水平および鉛直応答結果と、水平鉛直同時加振と鉛直1方向加振の鉛直方向最大加速度応答および変位応答値の比率を示し、図 5.8 は加速度応答の比率をプロットした結果である。この場合も、各入力地震波ともにほぼ1前後の値を示しており、水平入力による鉛直応答への影響は見られない。ただし、鉛直免震架台端部の変位は、ロッキング応答の影響により、同時加振の倍率が大きくなっている。

5.3 地震波加振まとめ

種々の地震波加振により、3次元免震システムの免震効果および動的挙動に関してえられた知見を以下に纏める。

- (1) 3次元免震システムは、ダンパーがない場合、ロッキング応答により水平免震よりも水平加速度応答が増幅する傾向が見られた。特に、水平2次固有振動モード近傍に卓越周波数がある入力地震動では大幅に応答が増幅した。鉛直方向の応答は、水平免震システムよりも加速度応答は低減するものの、鉛直1次固有振動モードが卓越し、低周波数領域が卓越する設計用模擬地震波や KOBE 波等では加速度の増幅が大幅に増幅した。また、入力地震波による加速度や変位応答のばらつきも顕著であった。
- (2) ダンパーがある場合は、鉛直ダンパーによりロッキング応答が抑制され、各地震波に対して水平方向の加速度応答倍率は概ね 0.5 以下となり、十分な加速度低減効果が得られた。同様に鉛直方向は、1次固有振動モードの応答が大幅に低減し、加速度応答倍率は概ね 1 以下となった。また、ダンパーにより変位およびロッキング応答も大幅に低減した。免震装置にダンパーを適切に配置することで、種々の周波数特性の地震波に対して加速度応答の増幅を抑制することが可能であるとの見通しが得られた。
- (3) 水平鉛直同時加振と水平1方向および鉛直1方向加振結果を比較した結果、各加振ケースについて水平方向および鉛直方向の加速度応答に大きな差はなく、同時加振による影響(水平方向と鉛直方向の連成効果)はほとんど見られないことがわかった。

表5.1 振動台入力地震波特性一覧

入力波名	方向	入力地震波名・方向・倍率		水平方向最大入力加速度 〔Gal〕		水平方向加速度応答7ヘルツ ^{*1} 〔周波数(ヘルツ)〕		鉛直方向最大入力加速度 〔Gal〕		鉛直方向加速度応答スペクトル ^{*1} 〔周波数(ヘルツ)〕		備考
		原波に対する倍率	原波にに対する倍率	最大値(Gal)	0.4ヘルツ値(Gal)	応答倍率	〔周波数(ヘルツ)〕	最大値(Gal)	2.0ヘルツ値(Gal)	応答倍率		
EQ326-TB	NS/UD	3.00	274~298	1547 [5.31]	2.64 [0.01]	71~84	390 [4.79]	55.0 [0.65]	大洗テストベッド観測波			
EQ326-FL	NS/UD	3.00	182~210	705 [5.89]	2.44 [0.01]	60~74	405 [5.13]	71.9 [0.97]	大洗建屋1F観測波			
S1D	H/V	1.00	168~220	879 [6.76]	48.8 [0.29]	104~129	557 [6.76]	320 [3.04]	大洗サイト設計波			
S1F	H/0.5H	0.50	154~156	607 [3.51]	37.5 [0.24]	66~68	282 [3.51]	194 [2.91]	改良標準波			
FM72	NS/UD	1.00	105~116	602 [1.29]	18.7 [0.16]	19~31	113 [5.5]	26.1 [1.32]	断層モード(震ヶ浦断層M7.2)			
F80	NS/UD	1.00	252~263	1032 [1.33]	53.3 [0.20]	60~65	318 [2.57]	82.1 [1.38]	断層モード(震ヶ浦断層M8.0)			
KOBE	EW/UD	0.33	216~221	1127 [2.57]	46.8 [0.22]	103~116	1127 [2.57]	225 [1.97]				
EL CENTRO	NS/UD	0.33~0.5	131~190	478 [16.6]	43.4 [0.31]	65~105	441 [9.89]	58.8 [0.90]	強震動観測波			
TAFT	EW/UD	1.00	170~192	908 [2.24]	39.0 [0.22]	95~108	518 [4.32]	231 [2.13]				
HACHINOHE	EW/UD	0.33	71~74	347 [2.85]	74.1 [1.00]	33~48	231 [4.03]	82.5 [2.48]				

*1---3次元免震ダム^a-なし加振時入力地震波による加速度応答スペクトル

表5.2 断層モード構造地盤波作成条件

	M=7.2	M=8.0
1)想定サイト	大洗	←
2)想定地震	震ヶ浦地震	←
3)基準点	北緯=36.27・東経=140.67・深さ=40km	←
4)断層形状	走行=N180E・傾斜=15度・すべり=90度	←
5)断層規模	長さ48km×幅40km	長さ80km×幅72km
6)地震モーメント	$8.0 \times 10^{19} \text{Nm}$	←
7)破壊開始点位置	走行方向=南端・深さ方向=やや深部	←
8)アスペリティ	考慮	←
9)平均応力降下量	100bar	200bar
10)立上り時間	1.9秒	4.2秒
11)目標最大加速度	100Gα	180Gα

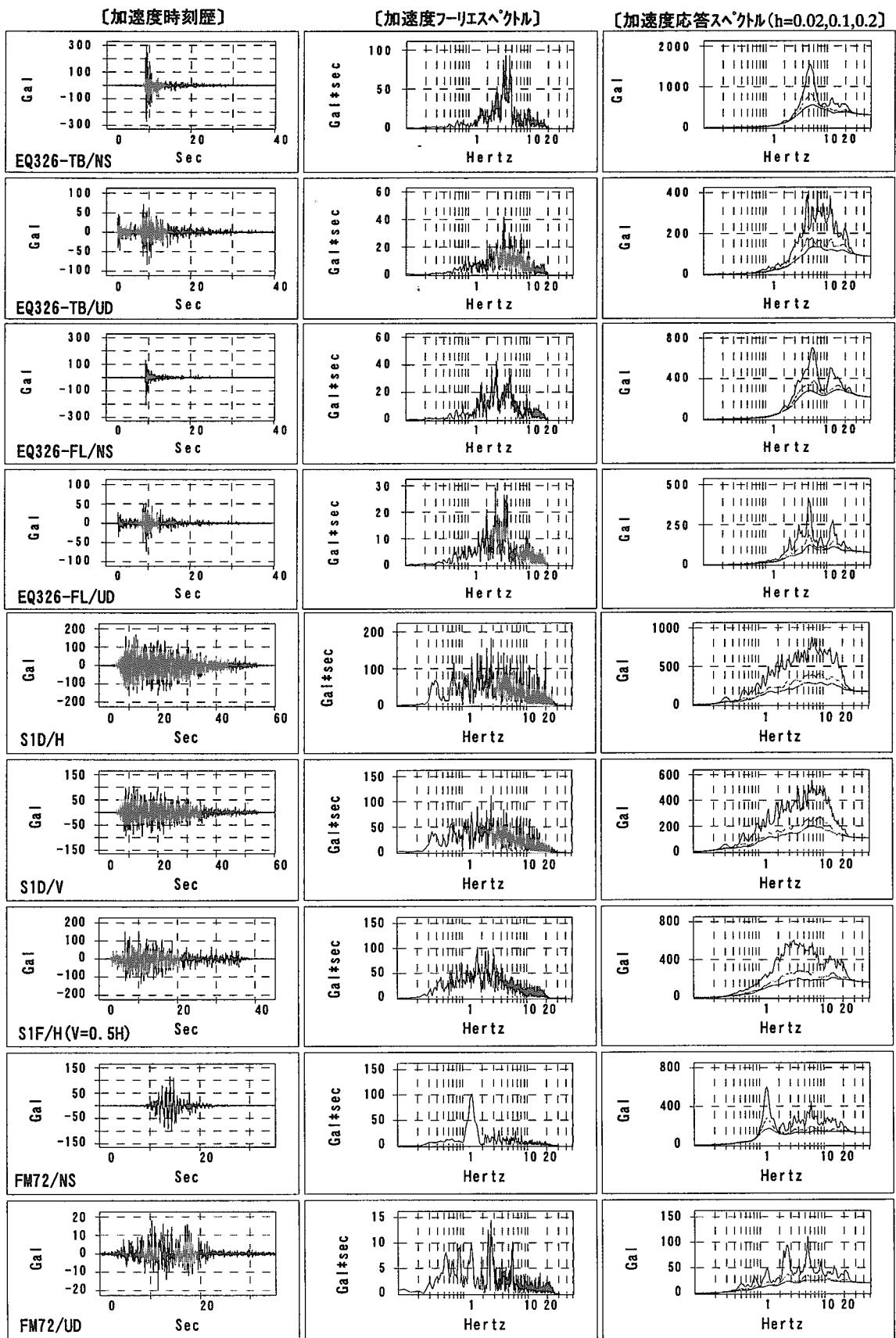


図5.1(a) 振動台入力地震波

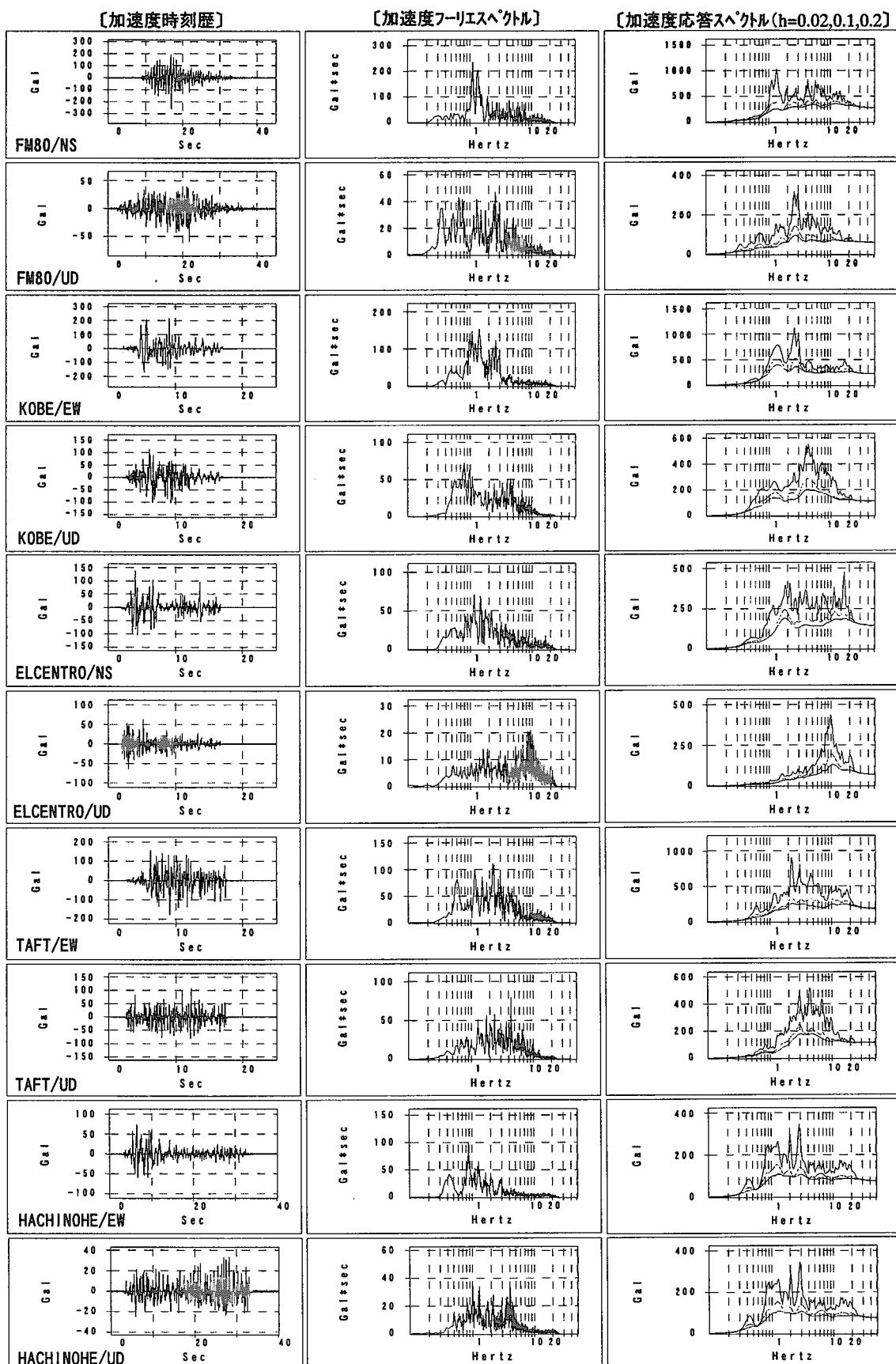


図5.1(b) 振動台入力地震波(続き)

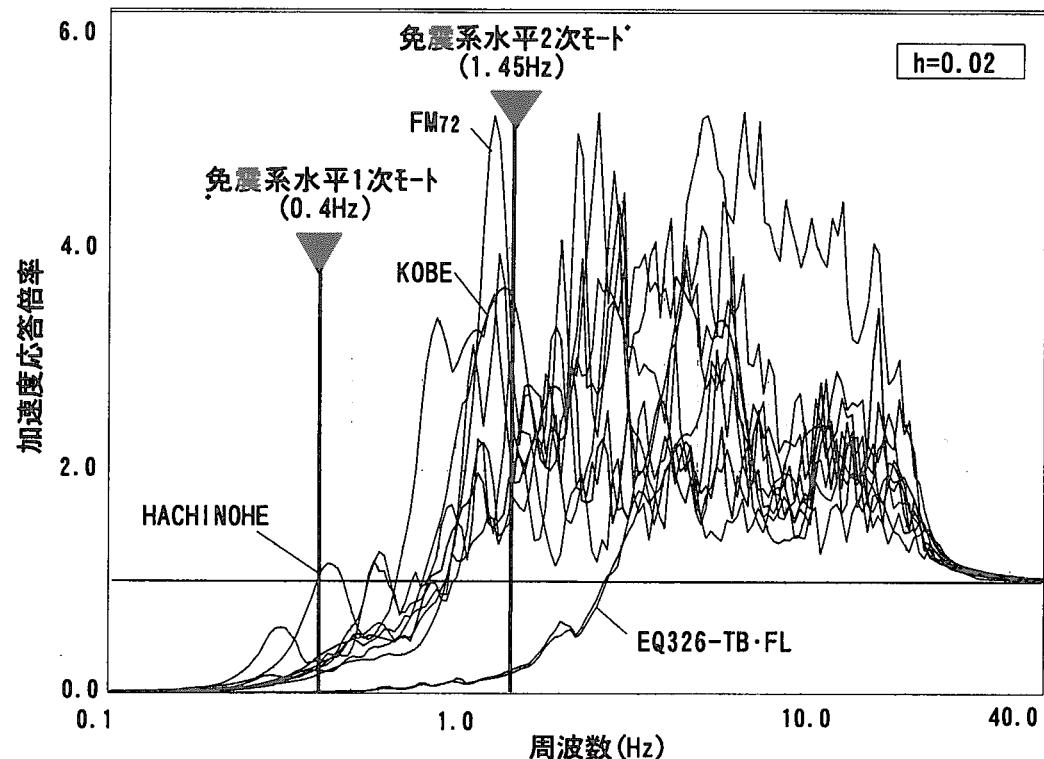


図5.2(a) 水平方向入力地震波・加速度応答スペクトル

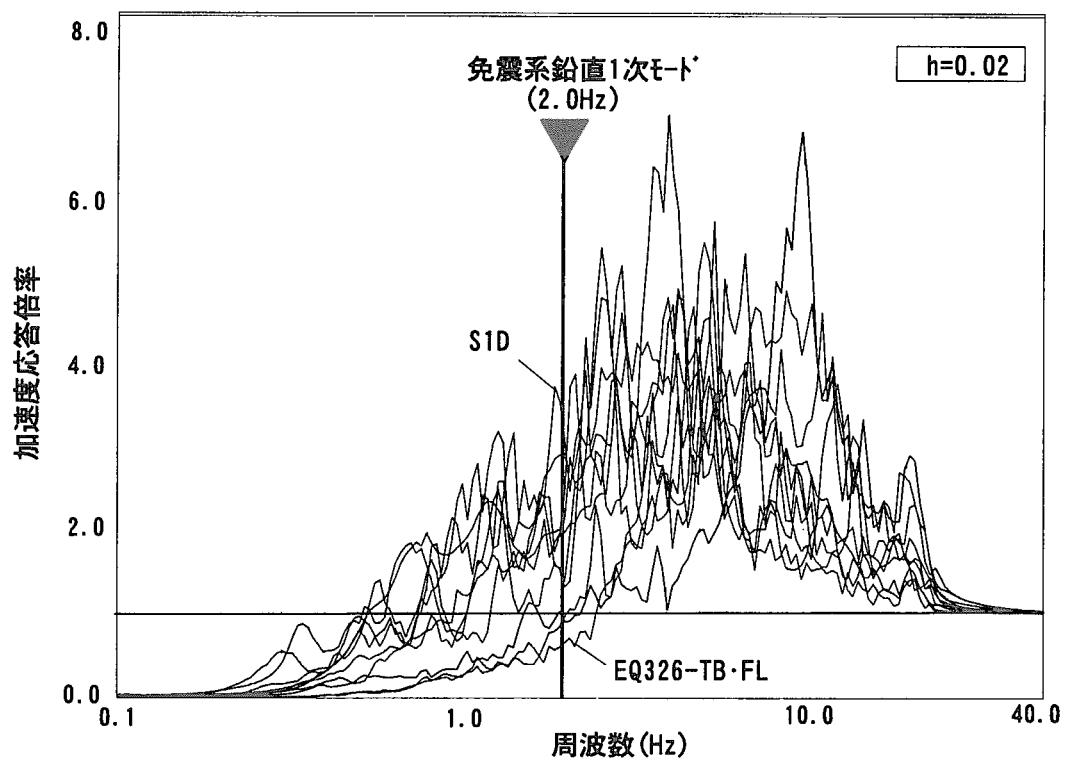


図5.2(b) 鉛直方向入力地震波・加速度応答スペクトル

表5.3(a) ランダム加振結果一覧(水平鉛直同時加振)

入力地震波名	水平方向応答結果						鉛直方向応答結果						
	ダンバーなし			ダンバーあり			ダンバーなし			ダンバーあり			
	C. BT頂部最大加速度 (Gal)	応答倍率 (mm)	C. BT頂部最大変位 (mm)										
水平免震	EQ326-TB	63.1	0.23	4.1	87.8	0.31	3.9	347.7	4.74	-	-	343.3	4.86
	EQ326-FL	51.0	0.24	3.3	48.8	0.27	2.8	261.6	3.91	-	-	203.7	3.39
	S1D	95.6	0.53	63.8	100.8	0.51	38.4	698.4	5.40	-	-	632.8	5.79
	S1F	88.8	0.57	50.6	55.6	0.36	20.6	367.6	5.61	-	-	492.4	7.27
	FM72	46.4	0.43	30.7	37.1	0.34	18.7	186.9	6.03	-	-	169.2	6.66
	FM80	71.2	0.27	71.0	70.6	0.28	38.4	235.9	3.79	-	-	244.7	3.75
	KOBE	102.1	0.47	78.8	85.9	0.39	40.5	309.1	3.01	-	-	422.2	3.66
	EL CENTRO	111.5	0.59	93.9	104.4	0.55	53.8	675.5	6.45	-	-	638.2	6.98
	TAFT	97.1	0.51	81.8	82.6	0.44	46.0	472.9	5.00	-	-	415.5	4.24
	HACHINOHE	65.4	0.93	69.9	40.7	0.57	33.5	181.3	4.10	-	-	247.2	5.17
3次元免震	EQ326-TB	27.3	0.09	5.7	47.2	0.16	4.1	57.2	0.72	3.5	4.1	44.7	0.53
	EQ326-FL	18.2	0.10	4.2	24.0	0.11	3.4	72.1	1.03	4.5	5.4	38.2	0.51
	S1D	150.0	0.68	52.3	66.5	0.39	36.5	424.2	4.08	26.4	31.6	93.3	0.89
	S1F	123.9	0.80	38.9	46.2	0.30	18.4	242.5	3.60	15.0	20.4	59.1	0.89
	FM72	151.4	1.44	24.5	52.3	0.45	15.5	34.1	1.81	2.4	7.6	19.4	0.98
	FM80	209.3	0.82	50.3	94.1	0.36	31.0	80.1	1.32	5.0	11.4	58.5	0.98
	KOBE	307.9	1.41	73.7	106.4	0.49	27.8	234.2	2.08	14.6	25.3	94.4	0.83
	EL CENTRO	114.2	0.87	46.8	61.0	0.44	28.8	62.6	0.95	13.4	19.7	38.3	0.59
	TAFT	184.8	1.09	46.7	86.5	0.48	30.0	256.7	2.46	15.8	18.8	97.7	0.90
	HACHINOHE	138.3	1.95	84.8	57.3	0.78	33.4	71.5	2.13	4.4	10.2	42.0	1.26

表5.3(b) ランダム加振結果一覧(3次元免震水平一向方向加振)

	水平方向応答結果				鉛直方向応答結果			
	最大入力 加速度(Gal) (Gal)	C.B頂部最大加速度 (Gal) 応答倍率	最大変位 (mm)	同時加振/水平加振比率	最大入力 加速度(Gal) (Gal)	C.B頂部最大 加速度(Gal) 応答倍率	最大変位 (mm)	最大変位 C.B中央 梁台端
EQ326-TB	299.8	25.1	0.08	5.15	1.1	1.125	3.8	3.3
EQ326-FL	179.6	18.1	0.10	3.9	0.97	1.035	3	2.3
S1D	184.1	138.3	0.75	48.6	0.91	0.9	5.3	27.7
S1F	158.5	109.3	0.69	42	1.15	0.94	3.5	17.7
FM72	103.1	157.1	1.52	24.2	0.95	0.995	3.3	17.9
FM80	252.7	203.1	0.80	50.8	1.01	0.975	4.8	37.9
KOBE	214.3	302.1	1.41	88.45	1	1.08	5.2	54.3
EL CENTRO	131.7	130.6	0.99	48.6	0.91	0.965	4.1	30.9
TAFT	159.4	148.7	0.93	46.05	1.18	0.95	5.5	32.3
HACHINOHE	74.7	130.5	1.75	84.3	1.12	1.06	4	14.4
EQ326-TB	298.7	38.9	0.13	4.2	1.27	0.96	3.2	6.2
EQ326-FL	218.8	23.5	0.11	3	1.06	1.185	2.5	5.2
S1D	180.4	65.1	0.36	38.1	1.09	1.025	6	8.8
S1F	151.3	45.3	0.30	18.2	1.01	0.995	3.7	5.4
FM72	113.7	51.8	0.46	15.05	1.01	1.005	2.5	4.3
FM80	281.3	92.7	0.33	30.6	1.01	1.01	4.9	8.4
KOBE	217.9	111.1	0.51	27.6	0.97	1.02	4.4	9.7
EL CENTRO	135.6	60.6	0.45	28.55	0.98	0.985	2.9	7.2
TAFT	170.5	80.5	0.47	30.45	1.01	0.93	5.8	9.7
HACHINOHE	74.3	57.2	0.77	33.35	1.01	1.005	3.1	5.9

表5.3(c) ランダム加振結果一覧(3次元免震ダンパーあり鉛直一向方向加振)

	水平方向応答結果				鉛直方向応答結果				同時加震/鉛直加振比率			
	最大入力 加速度(Gal) (Gal)	C.B頂部 最大強度 加速度(Gal) (Gal)	最大変位 (mm)	最大入力 加速度(Gal) (Gal)	C.B頂部 最大強度 加速度(Gal) (Gal)	最大変位 (mm)	C.B頂部 最大速度 (mm/s)	最大変位 (mm)	C.B中央 梁台端	C.B頂部 最大速度 (mm/s)	最大変位 (mm)	C.B中央 梁台端
EQ326-TB	3.9	4.4	0.15	77.1	47.3	0.61	1.4	1.3	1.03	1.09	1.09	1.09
EQ326-FL	3.9	4.5	0.1	71.9	40.7	0.57	1.2	1.1	0.97	1.13	1.30	1.30
S1D	9.5	8.7	0.5	105.8	93.9	0.89	4.4	4.3	0.99	1.02	1.85	1.85
S1F	3.3	4.5	0.1	67.5	58.9	0.87	2.6	2.3	0.99	0.99	1.71	1.71
FM72	3.4	3.7	0.1	18.8	22.7	1.21	0.8	0.8	0.90	1.32	4.34	4.34
FM80	4.1	4.5	0.1	59	58.2	0.99	2.4	2.4	1.02	0.97	2.45	2.45
KOBE	5.5	8	0.2	109.4	98.9	0.90	5.3	5.1	0.99	1.02	1.77	1.77
EL CENTRO	5.3	5.4	0.1	62.8	37	0.59	1.3	1.3	1.09	0.96	3.93	3.93
TAFT	3.1	4.8	0.1	108.4	97.7	0.90	3.9	3.9	1.00	0.97	1.64	1.64
HACHINOHE	3.3	4	0.1	36.2	35.7	0.99	1.1	1.1	1.08	0.84	4.35	4.35

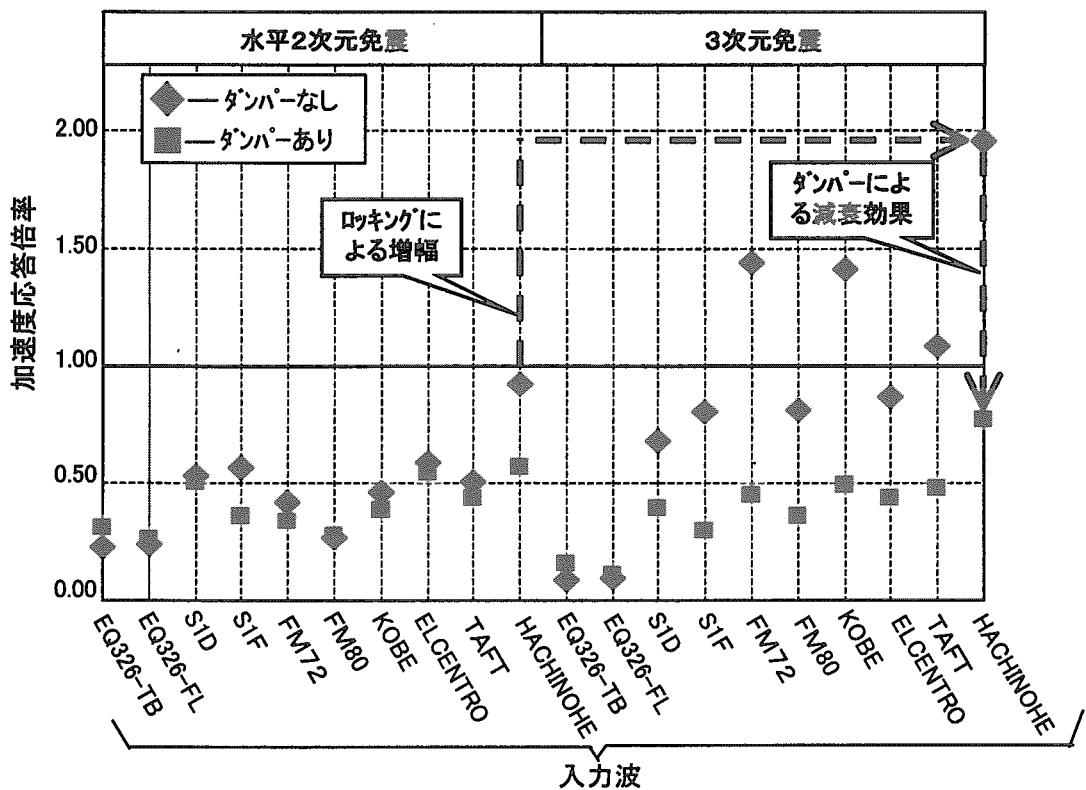


図5.3 各入力地震波に対する水平方向加速度応答倍率

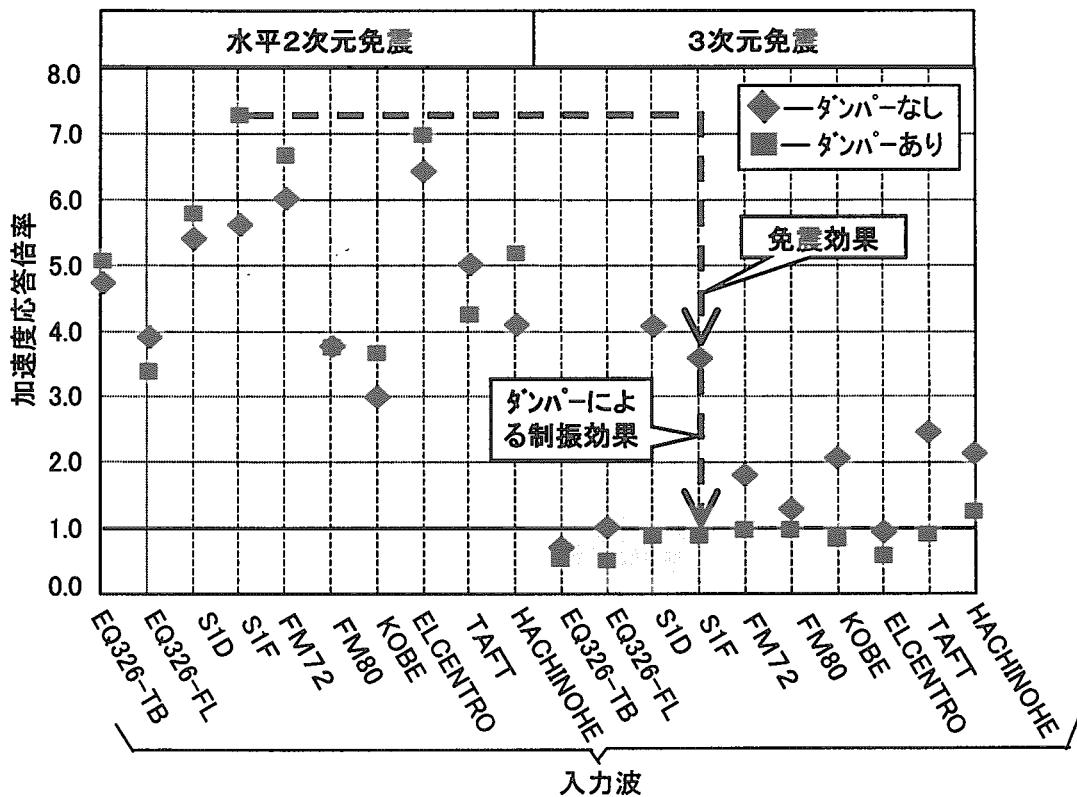


図5.4 各入力地震波に対する鉛直方向加速度応答倍率

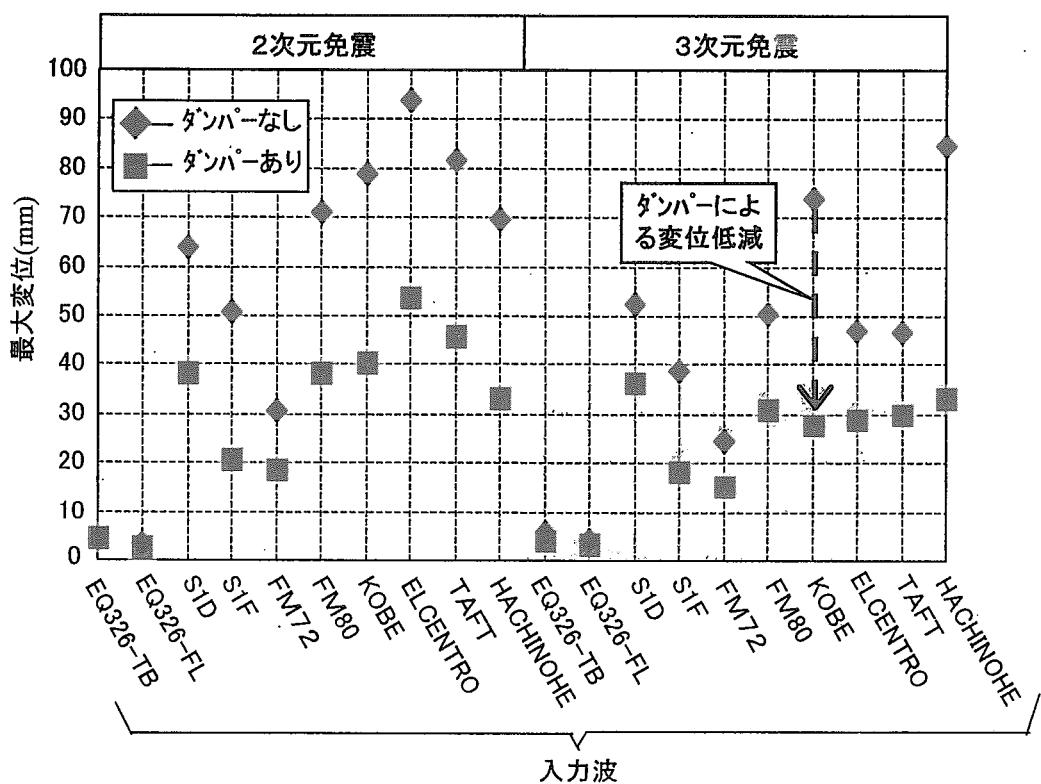


図5.5 各入力地震波に対する水平方向最大変位応答

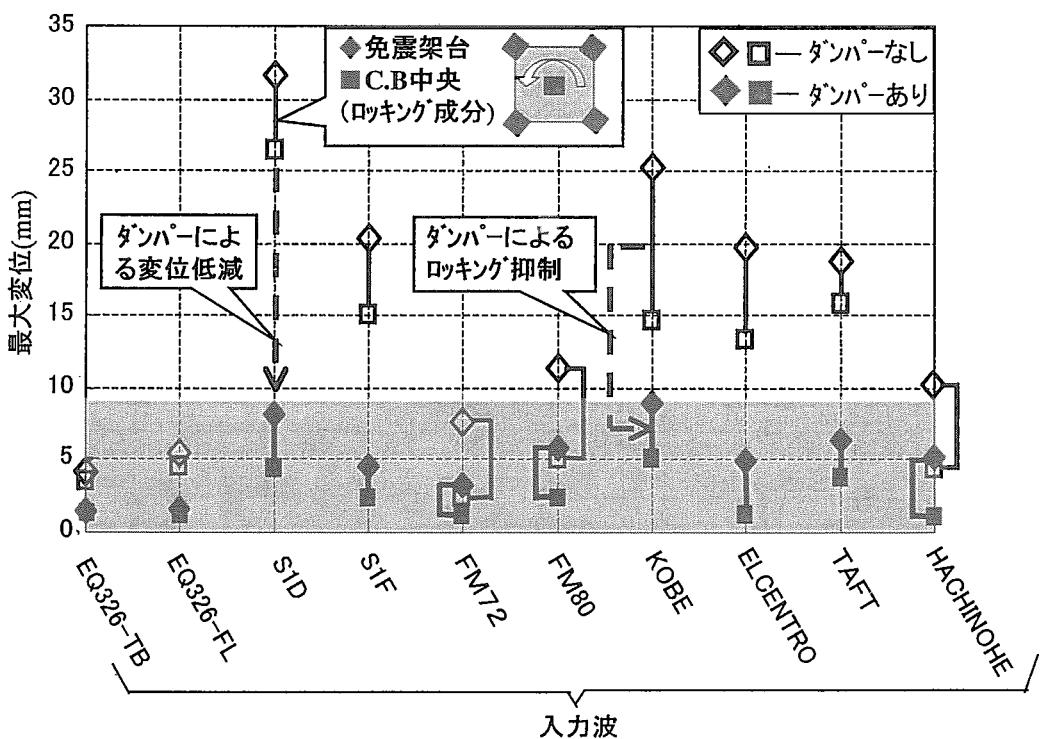


図5.6 各入力地震波に対する鉛直方向最大変位

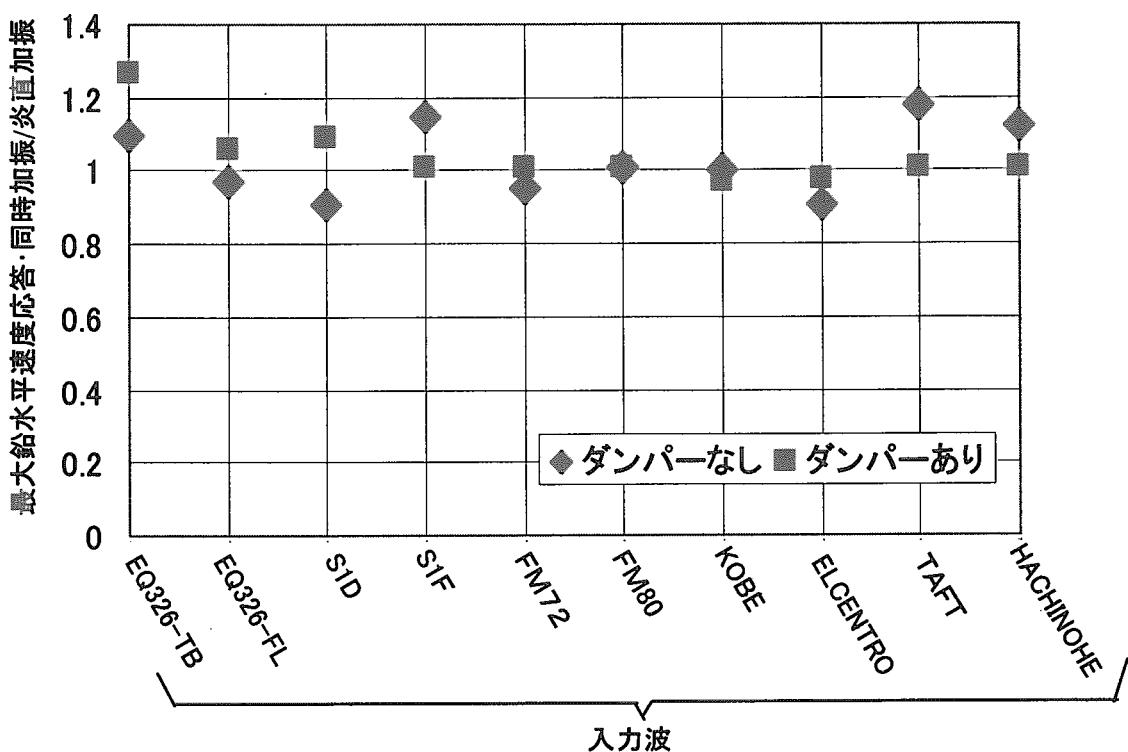


図5.7 3次元免震システム・同時加振に対する水平一方向加振の加速度応答比

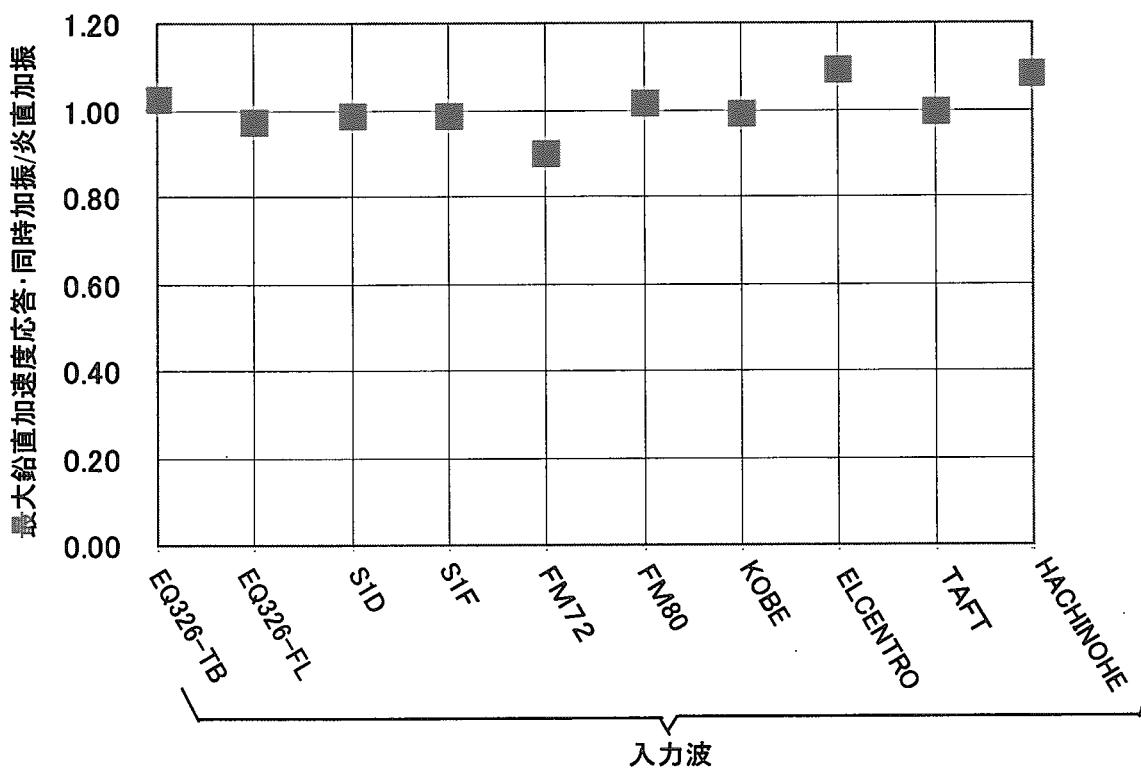


図5.8 3次元免震システム(ダンパーあり)・同時加振に対する鉛直一方向加振の加速度応答比

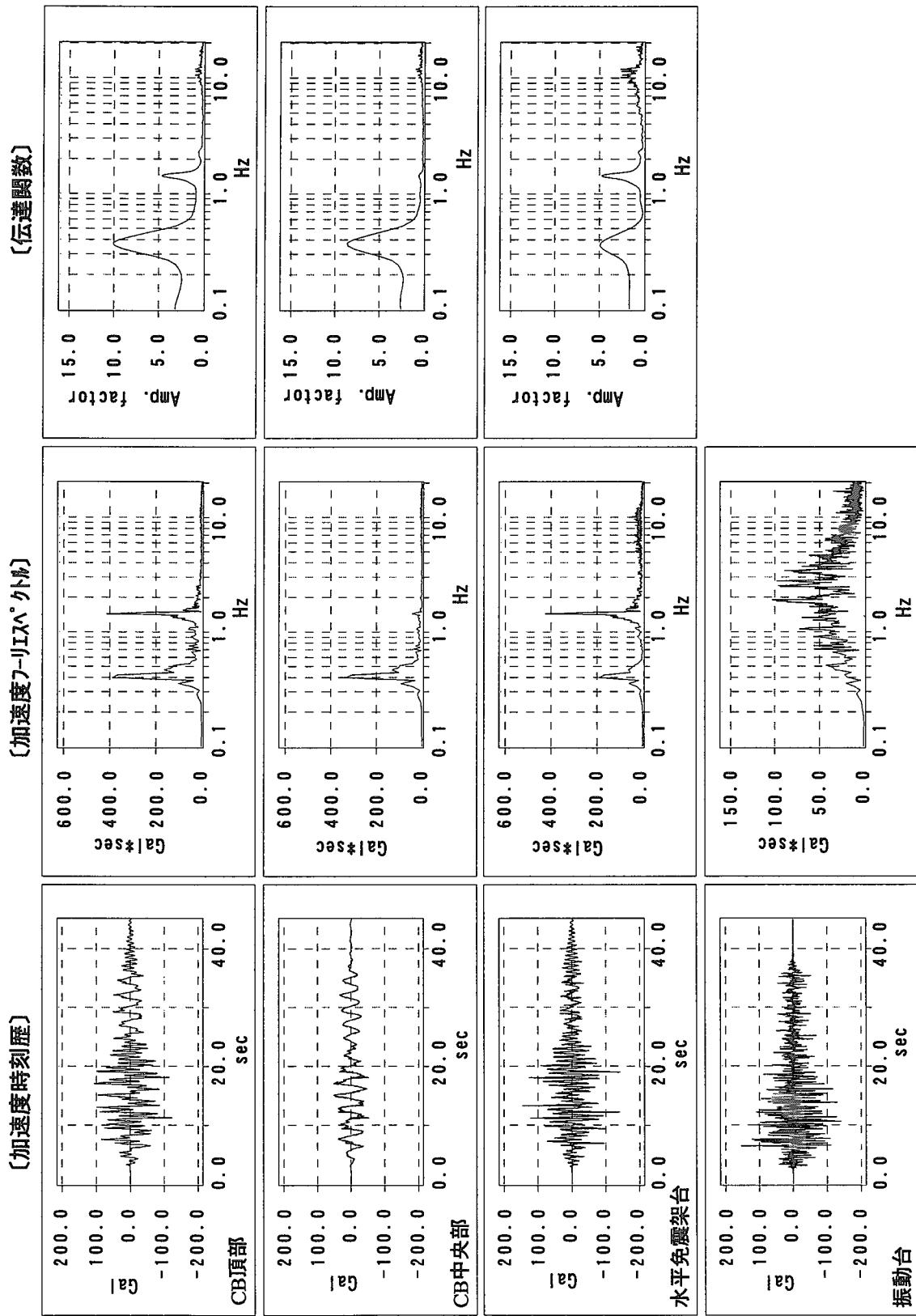
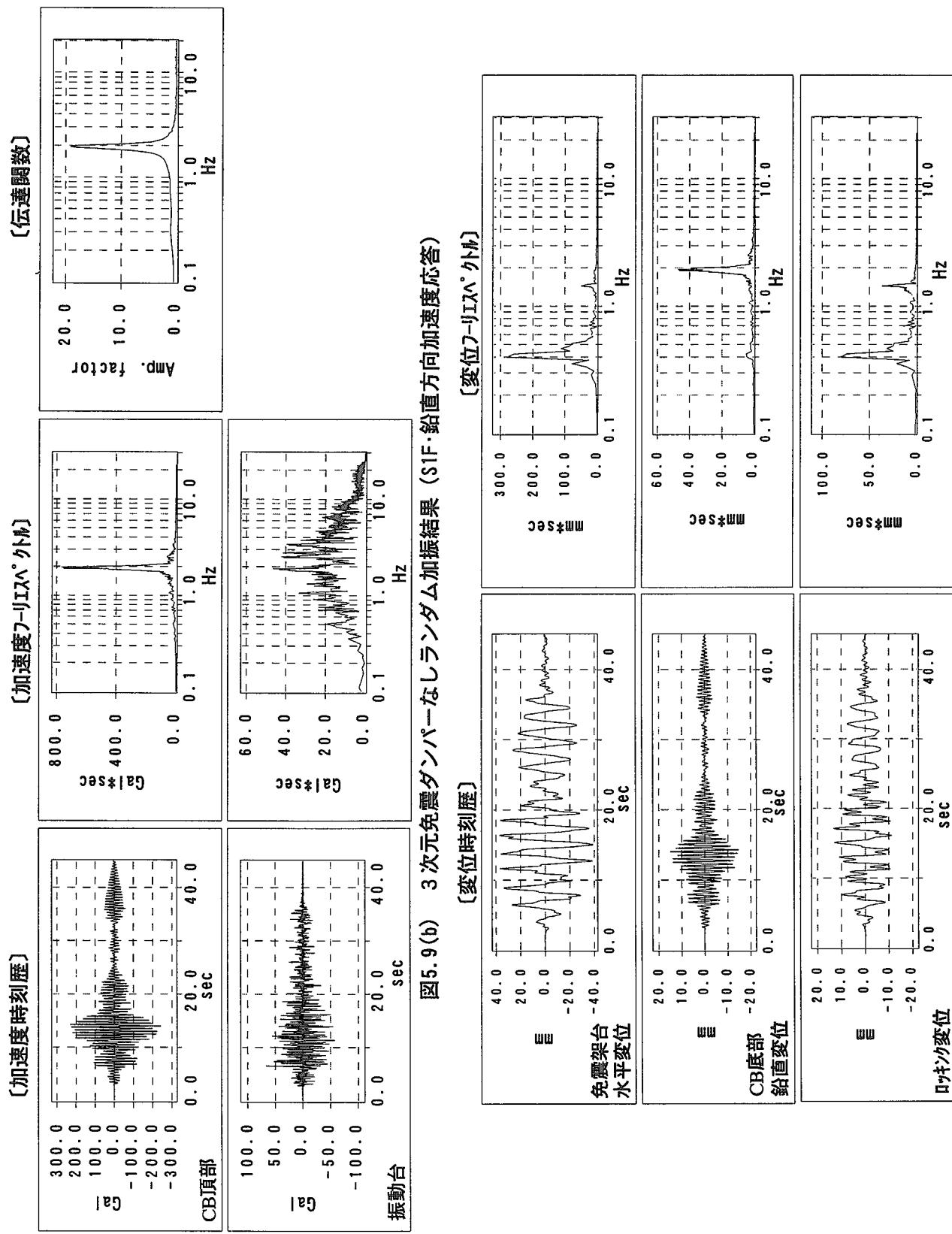


図 9 (a) 3 次元免震ダンパーなしランダム加振結果 (S1F・水平方向加速度応答)



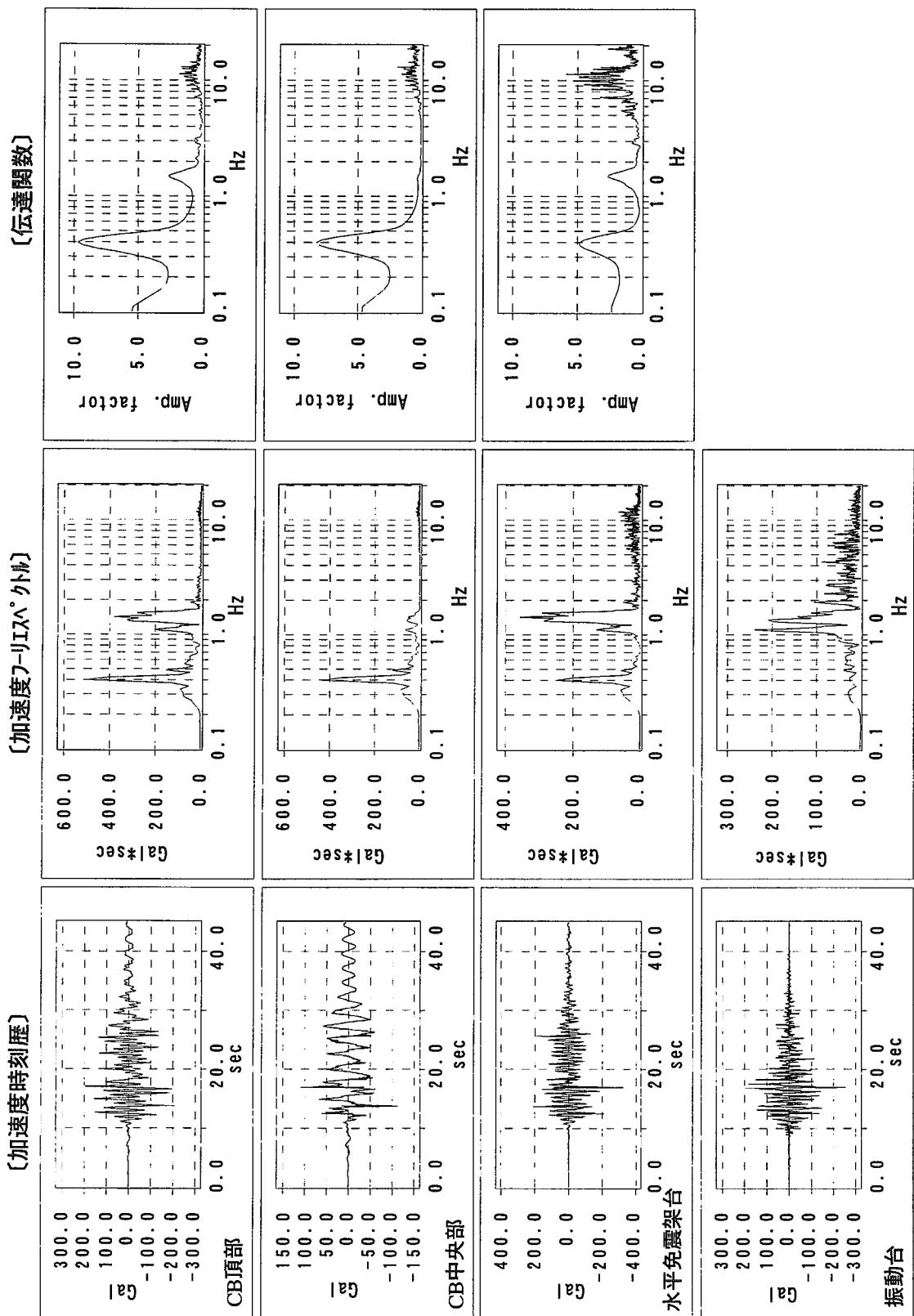


図5.10(a) 3次元免震ダンパーなしランダム加振結果 (FM80・水平方向加速度応答)

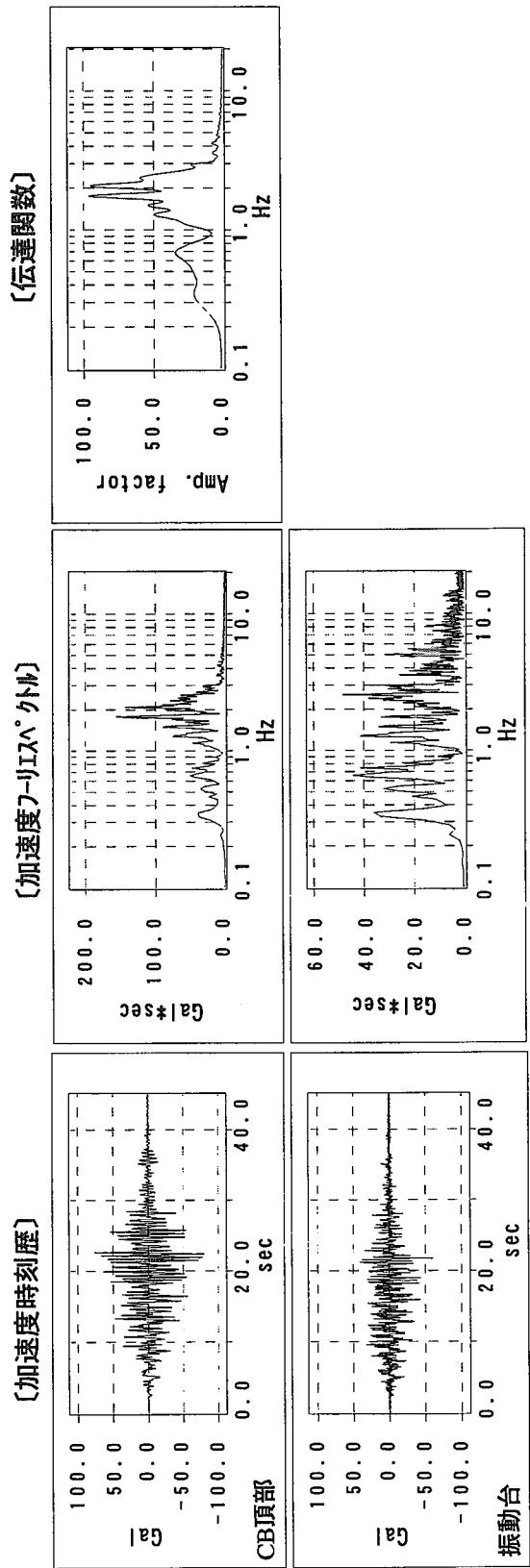


図5.10(b) 3次元免震ダンパーなしランダム加振結果 (FM80・鉛直方向加速度応答)

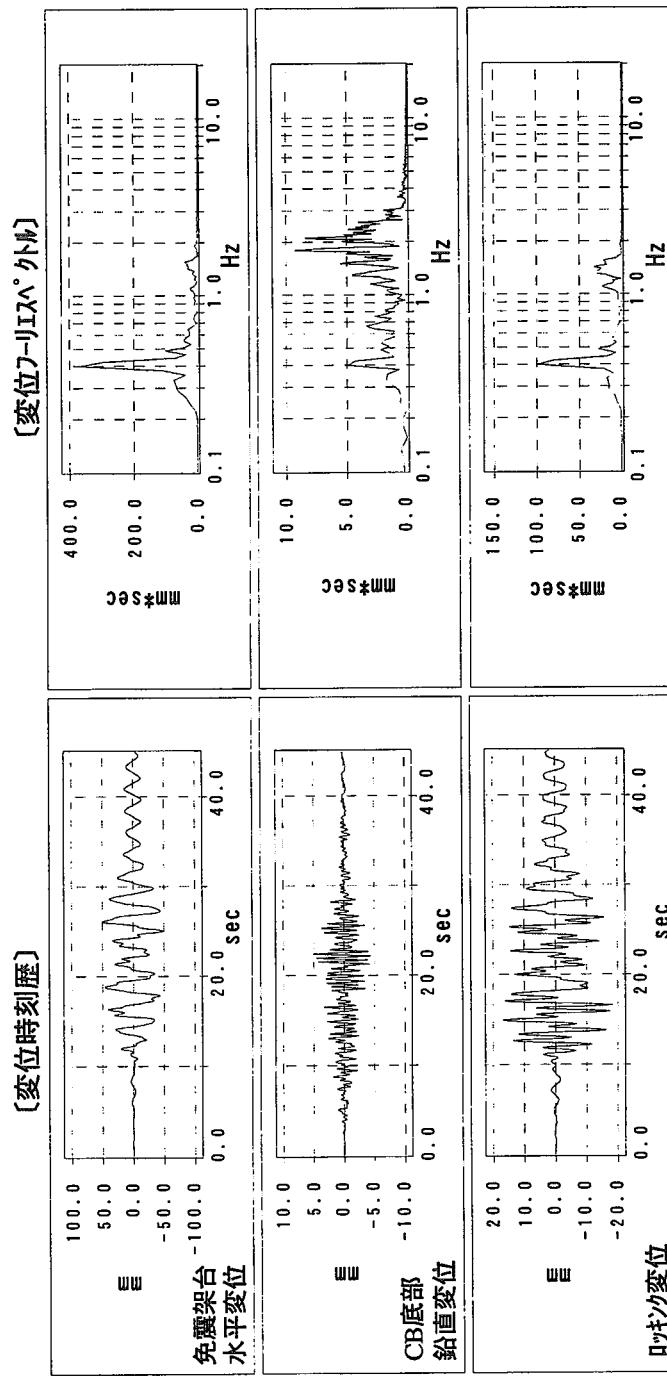
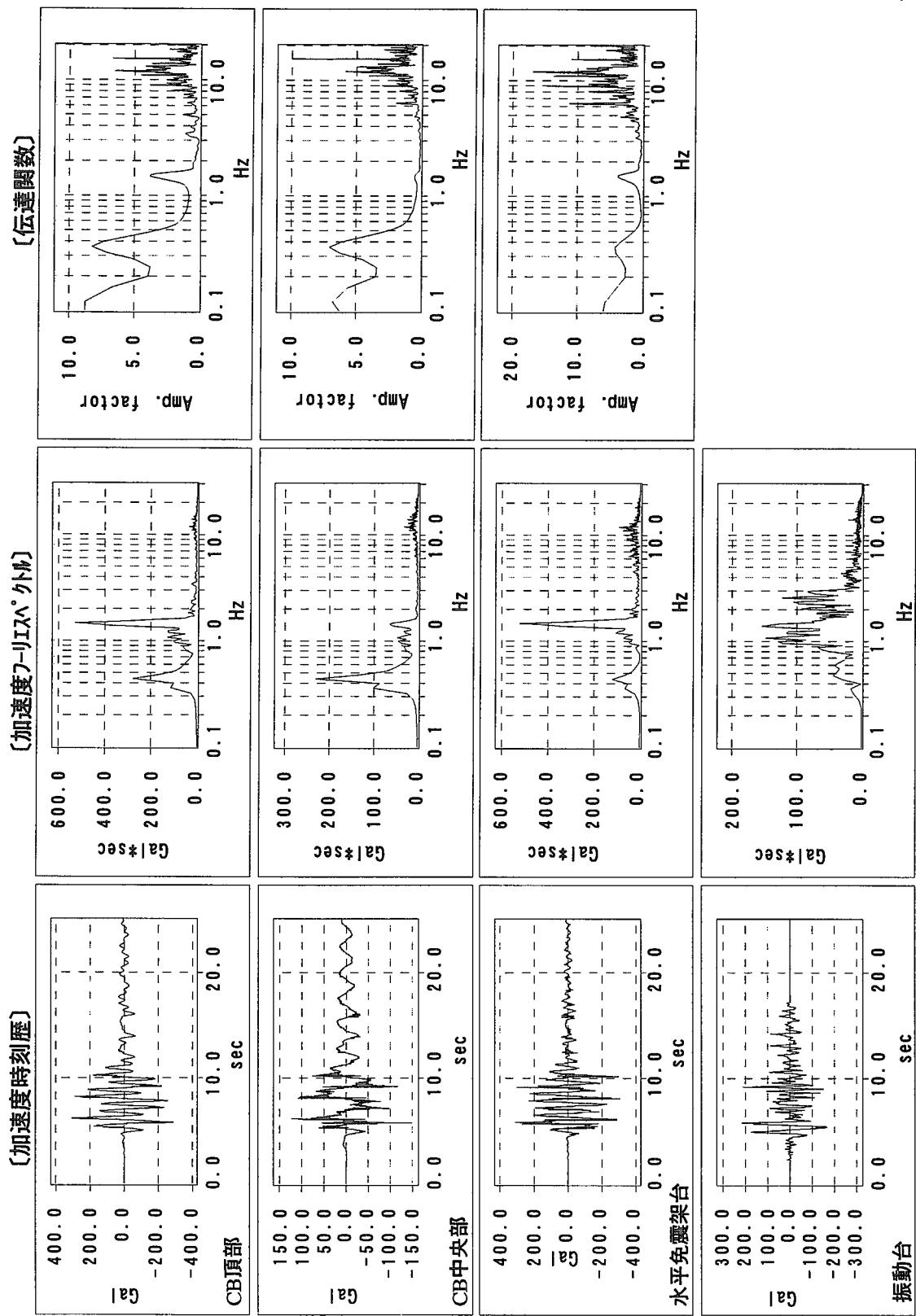


図5.10(c) 3次元免震ダンパーなしランダム加振結果 (FM80・変位応答)



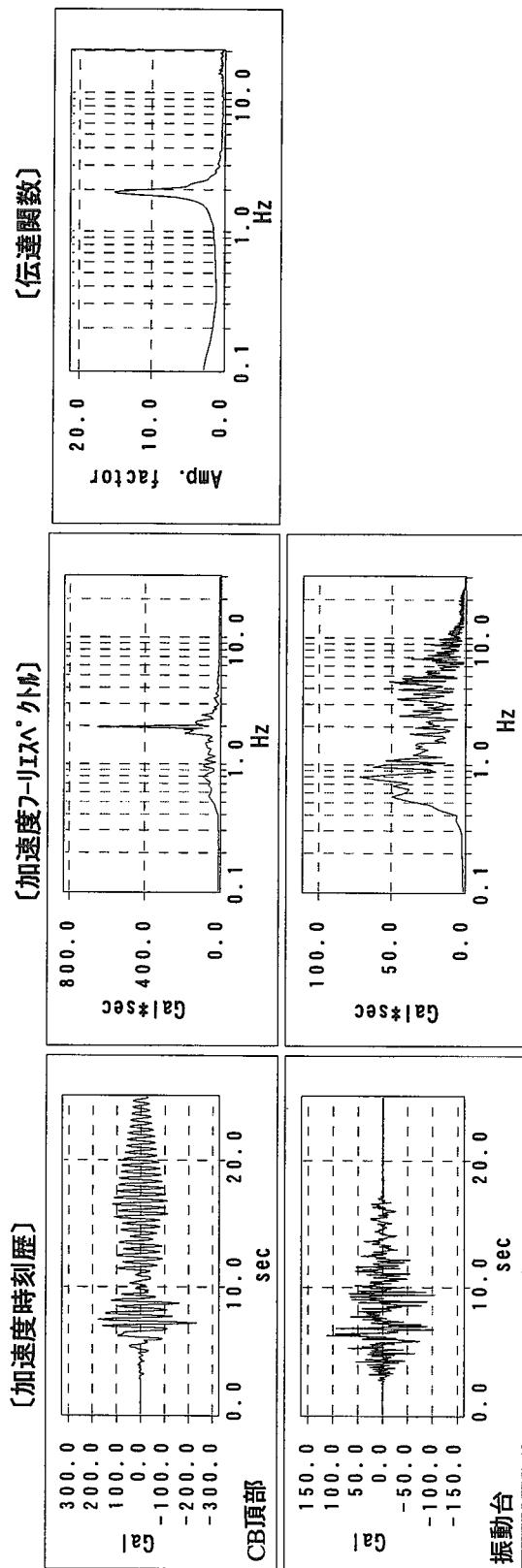


図5.11(b) 3次元免震ダンパーなしランダム加振結果 (Kobe・鉛直方向加速度応答)

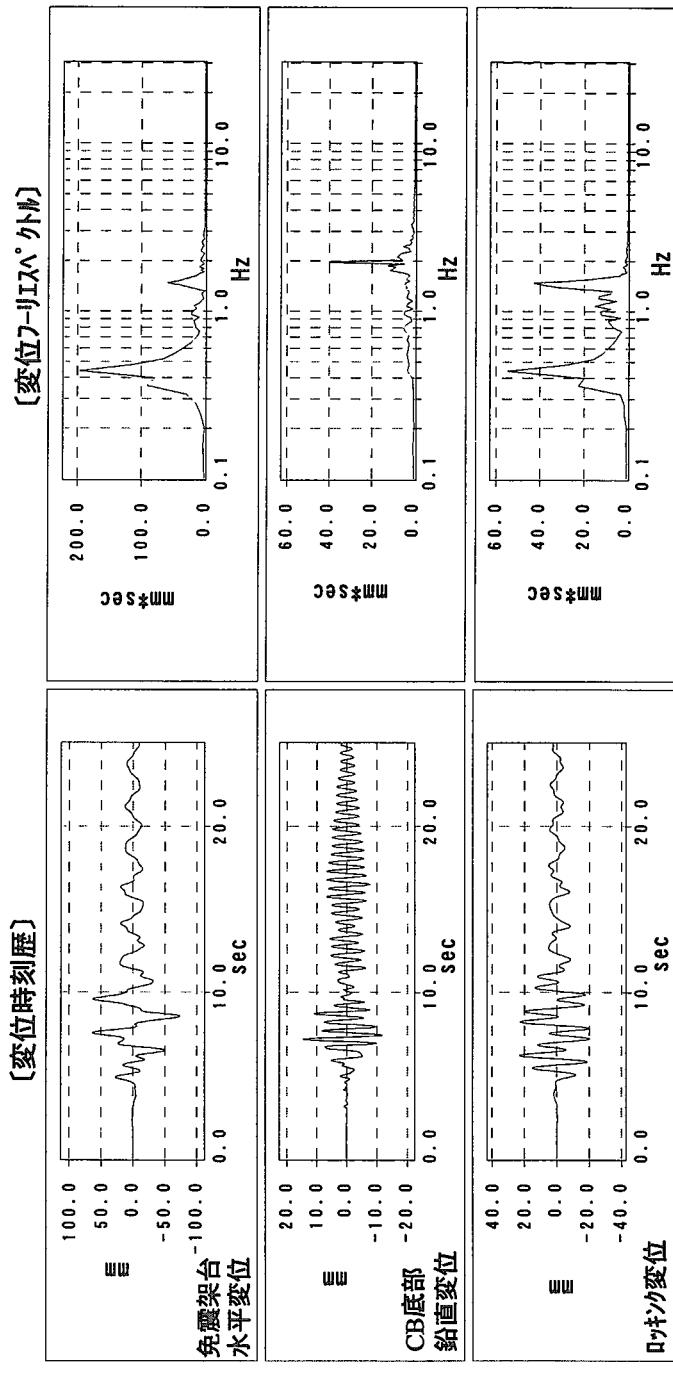


図5.11(C) 3次元免震ダンパーなしランダム加振結果 (Kobe・変位応答)

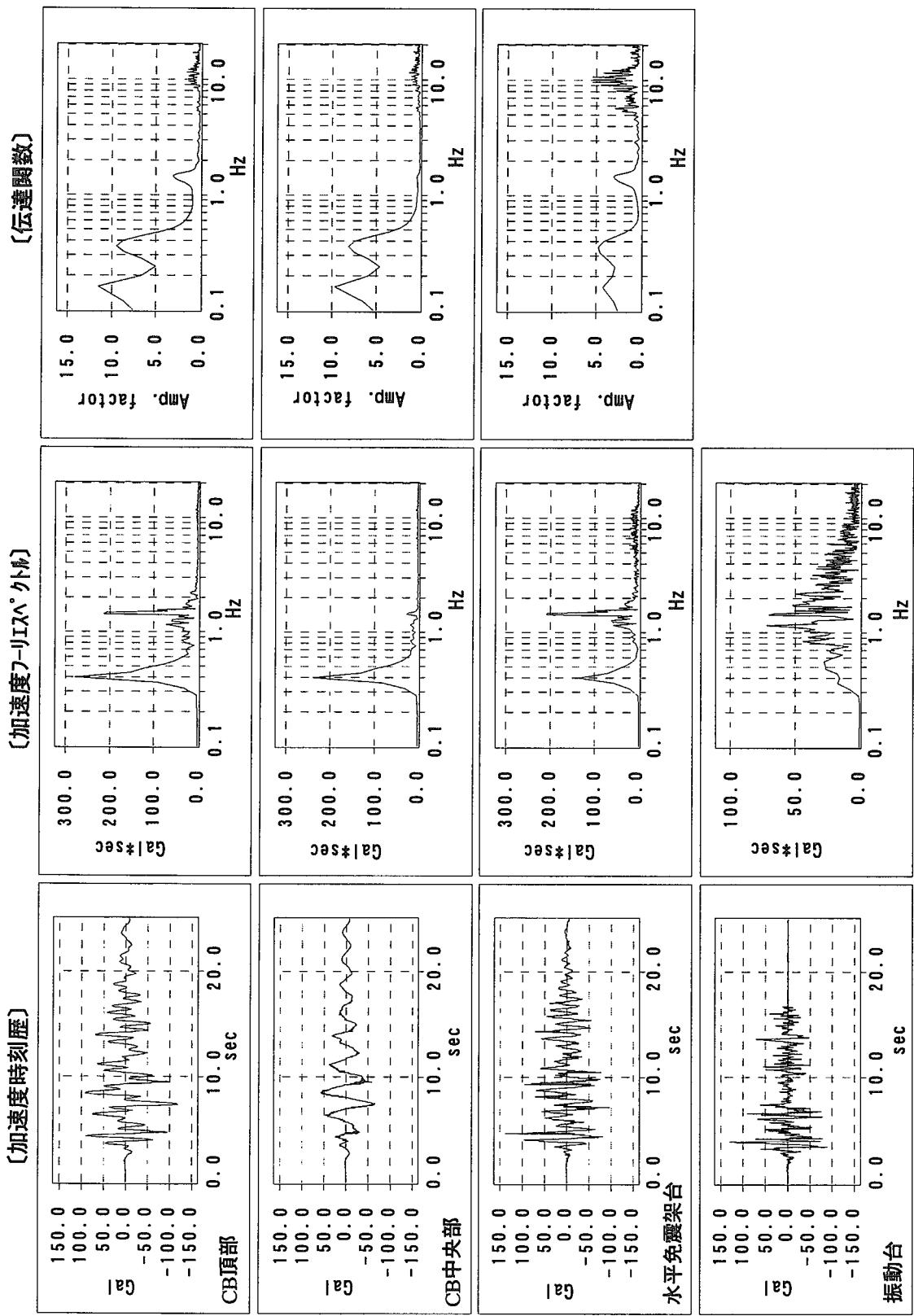


図5.12(a) 3次元免震ダンパーなしランダム加振結果 (ELCENTRO・水平方向加速度応答)

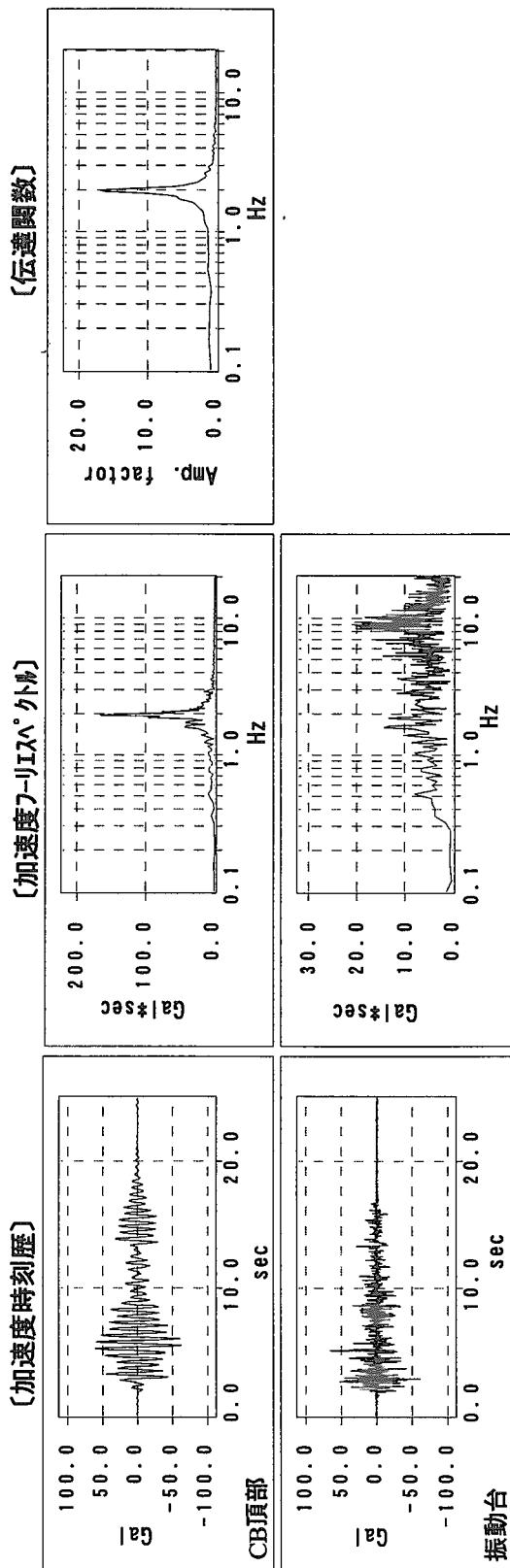


図5.12(b) 3次元免震ダンパーなしランダム加振結果 (ELCENTRO・鉛直方向加速度応答)

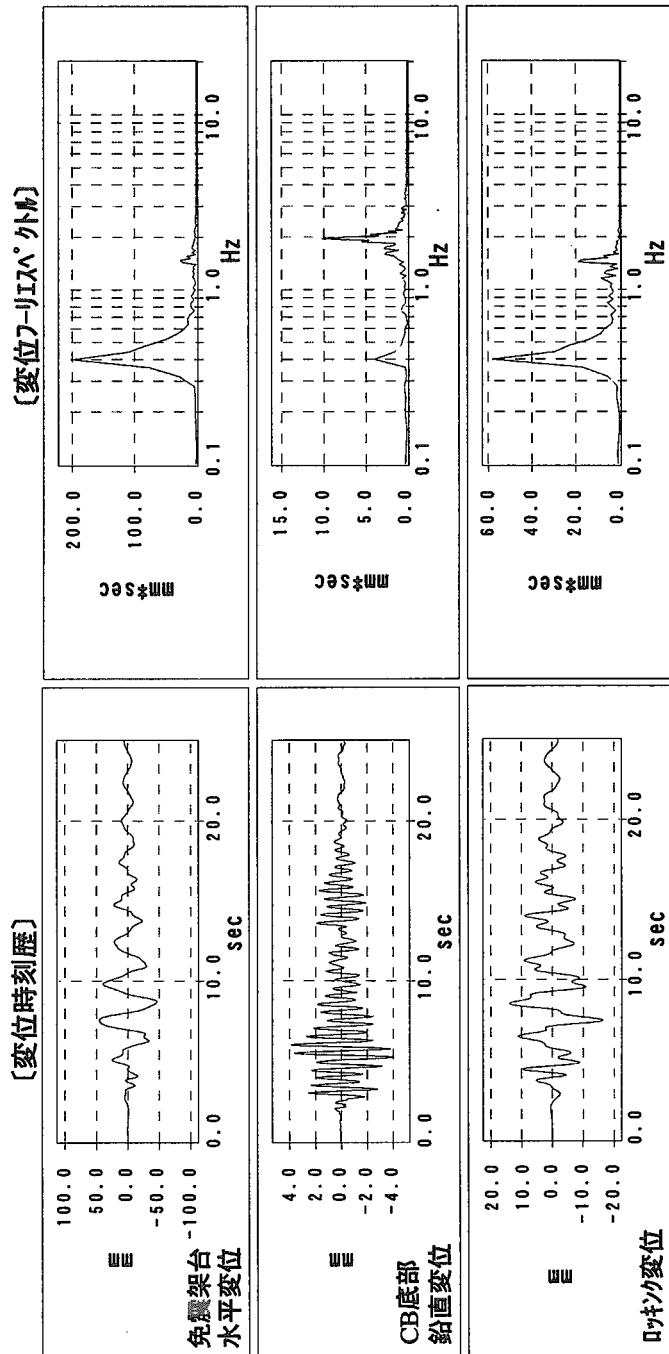


図5.12(c) 3次元免震ダンパーなしランダム加振結果 (ELCENTRO・変位応答)

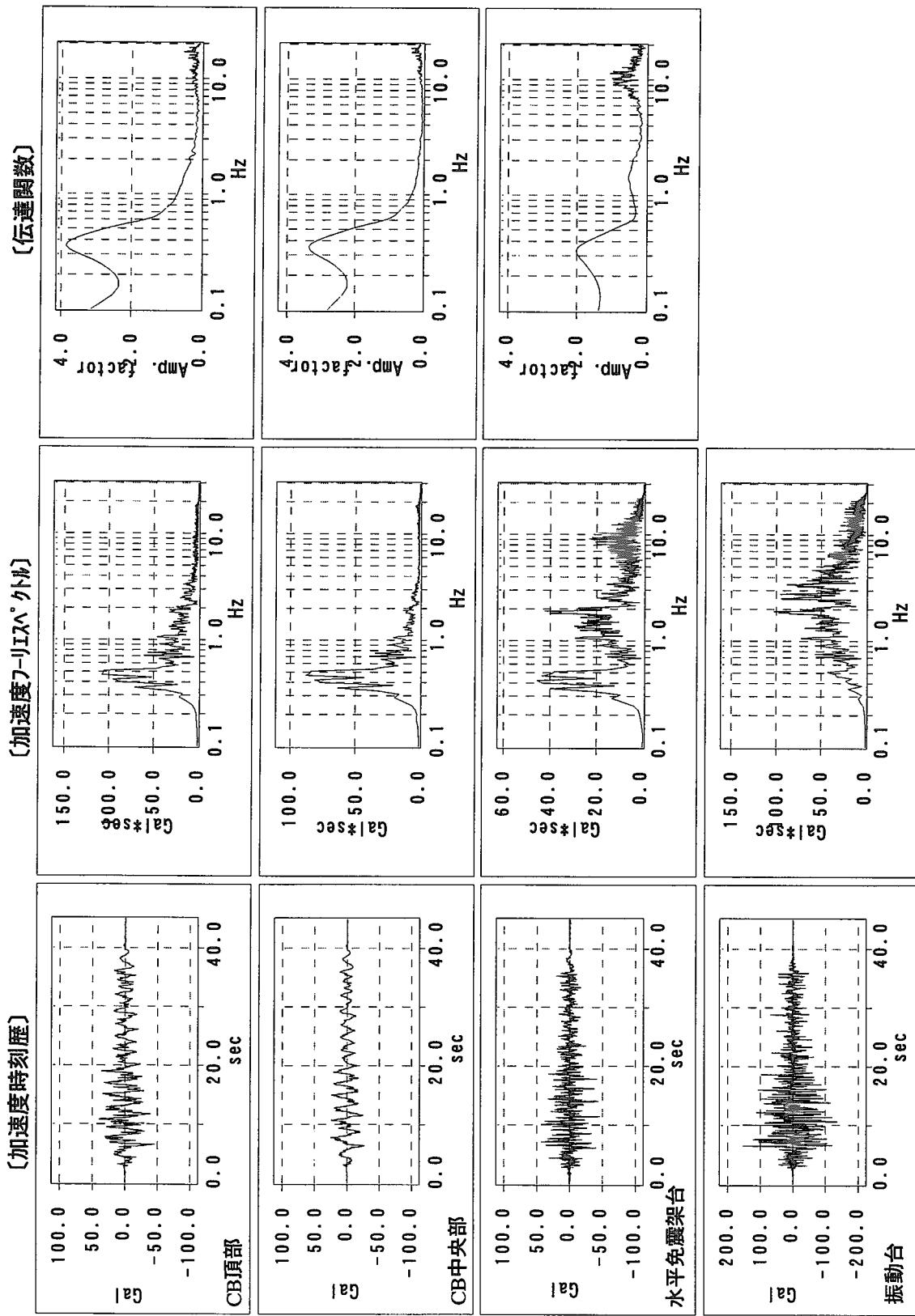


図5.13(a) 3次元免震ダンパーありランダム加振結果 (S1F・水平方向加速度応答)

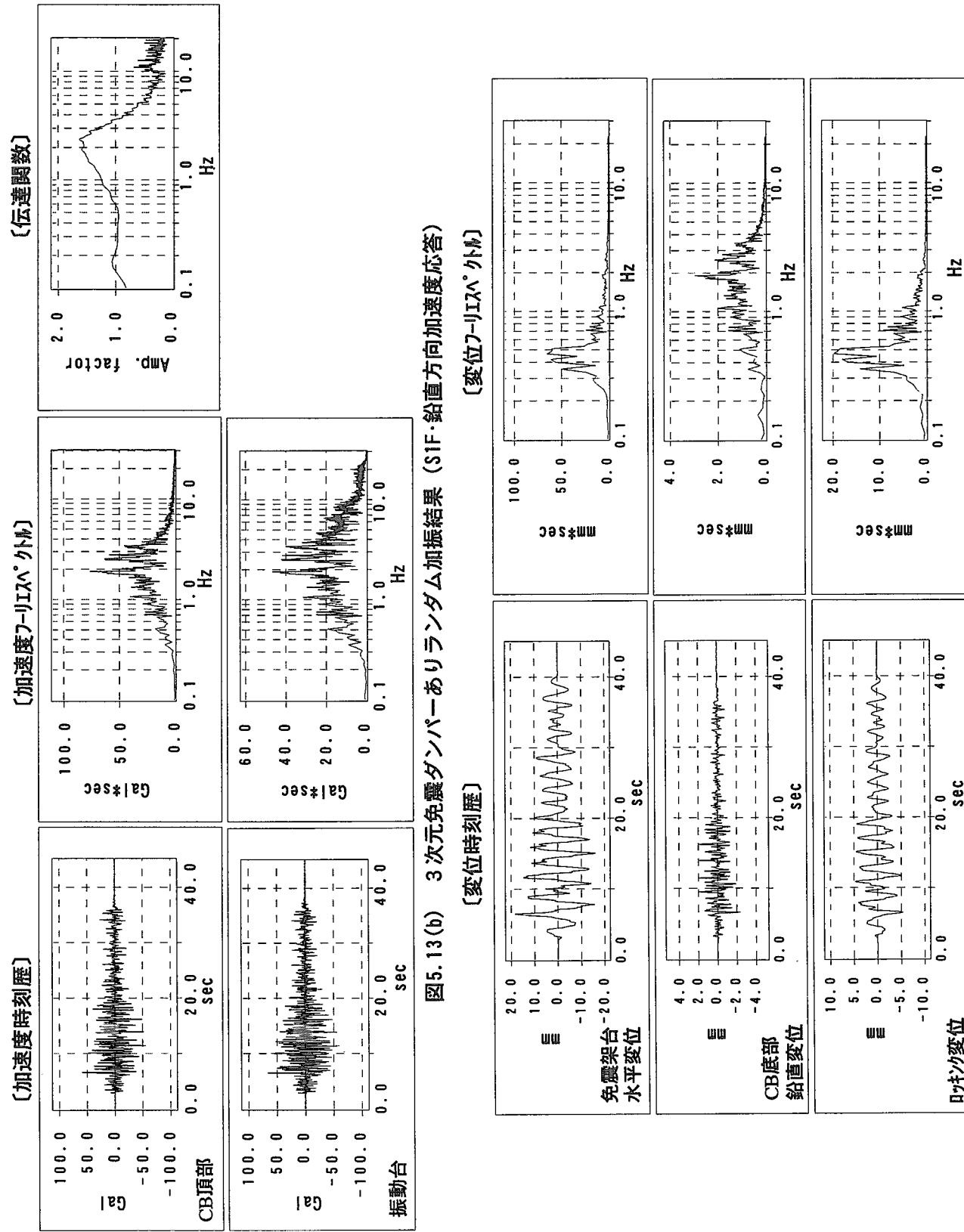


図5.13(C) 3次元免震ダンパーありランダム加振結果 (S1F・変位応答)

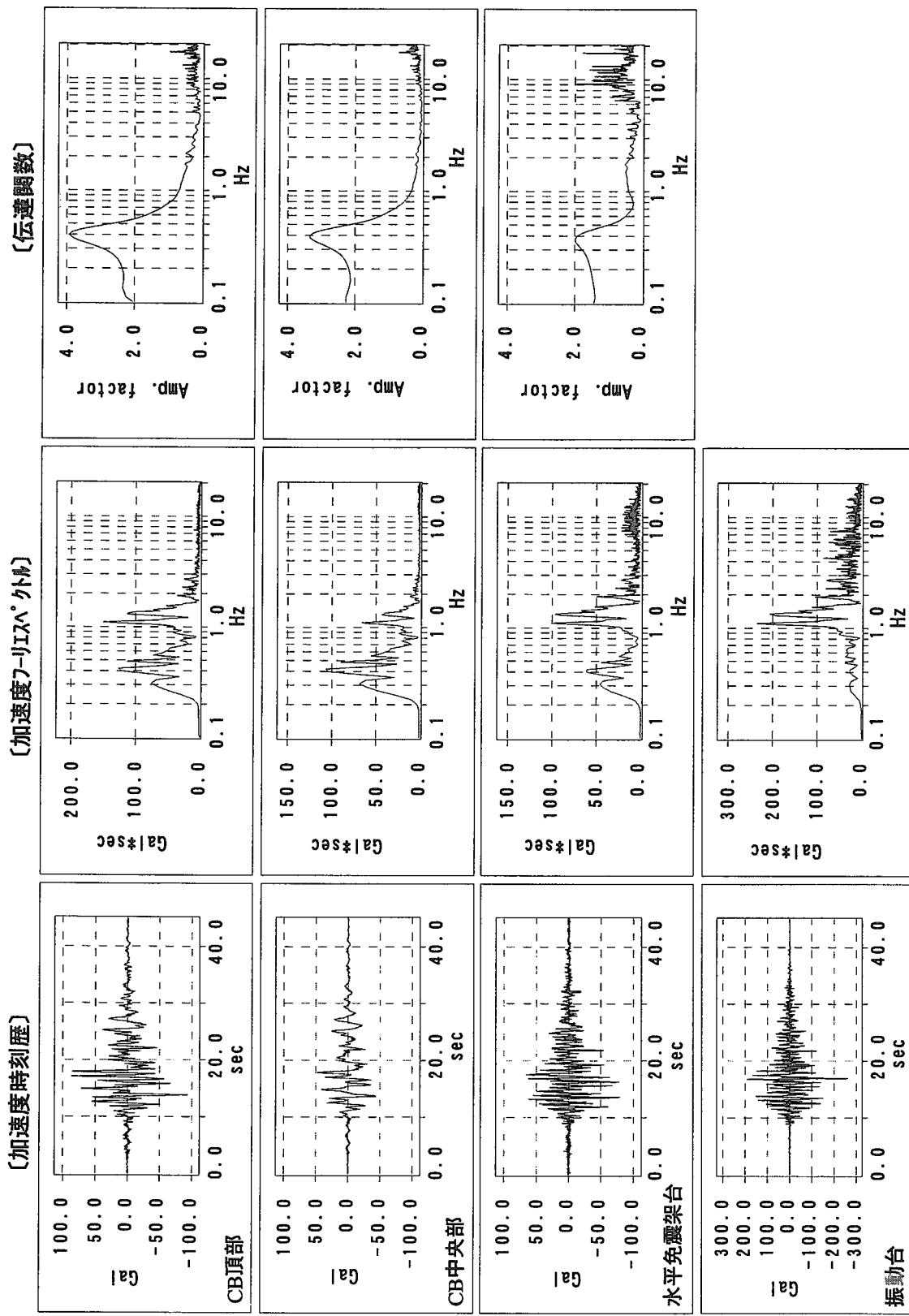


図5.14(a) 3次元免震ダンパーありランダム加振結果 (FM80・水平方向加速度応答)

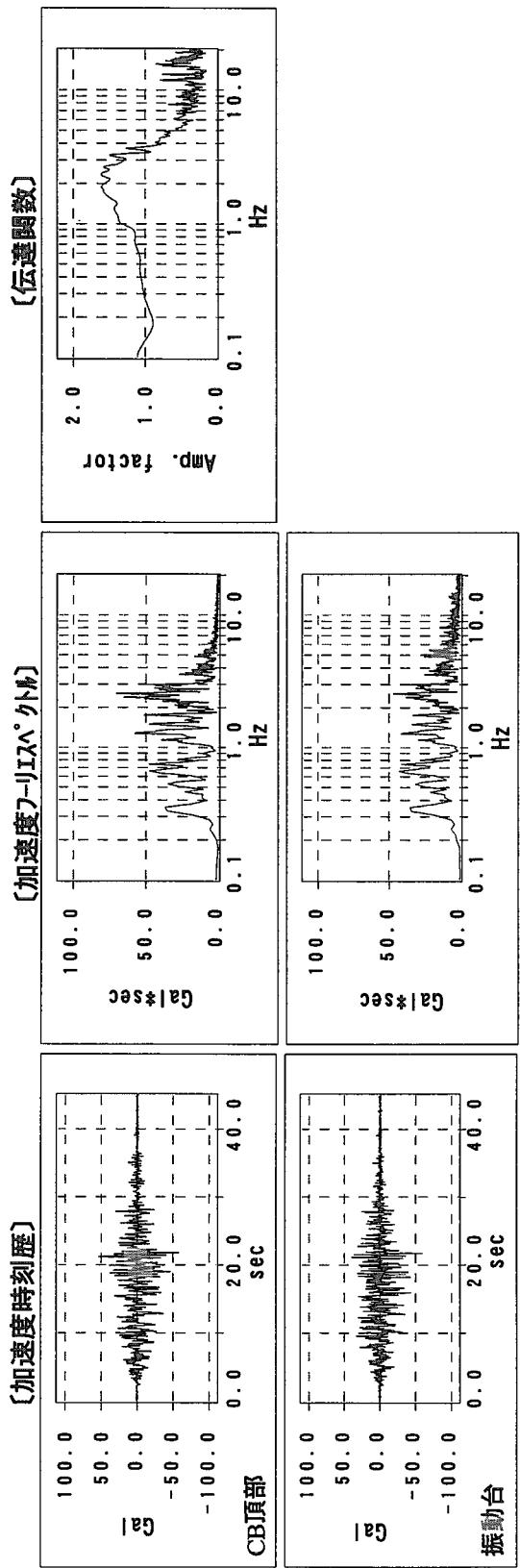


図5.14(b) 3次元免震ダンパーありランダム加振結果 (FM80・鉛直方向加速度応答)

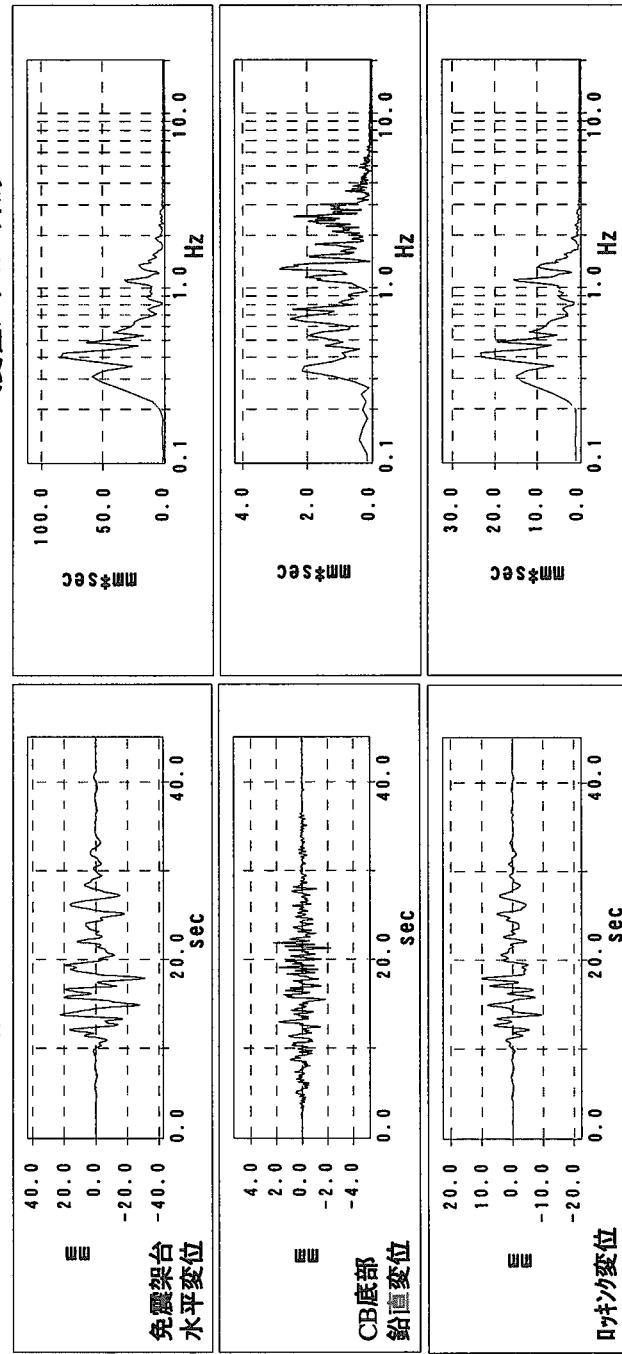


図5.14(c) 3次元免震ダンパーありランダム加振結果 (FM80・変位応答)

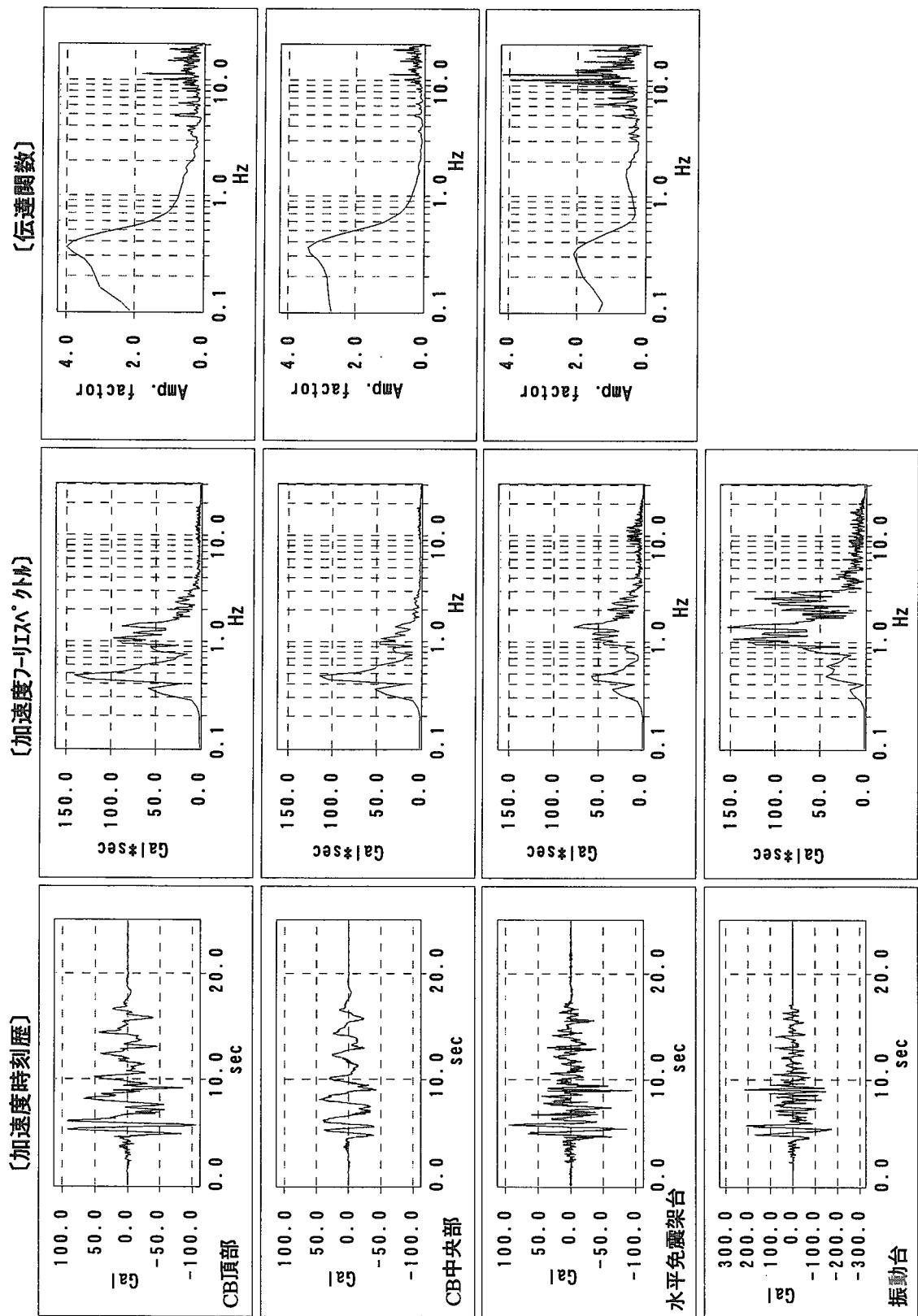


図5.15(a) 3次元免震ダンパーありランダム加振結果 (KOBE・水平方向加速度応答)

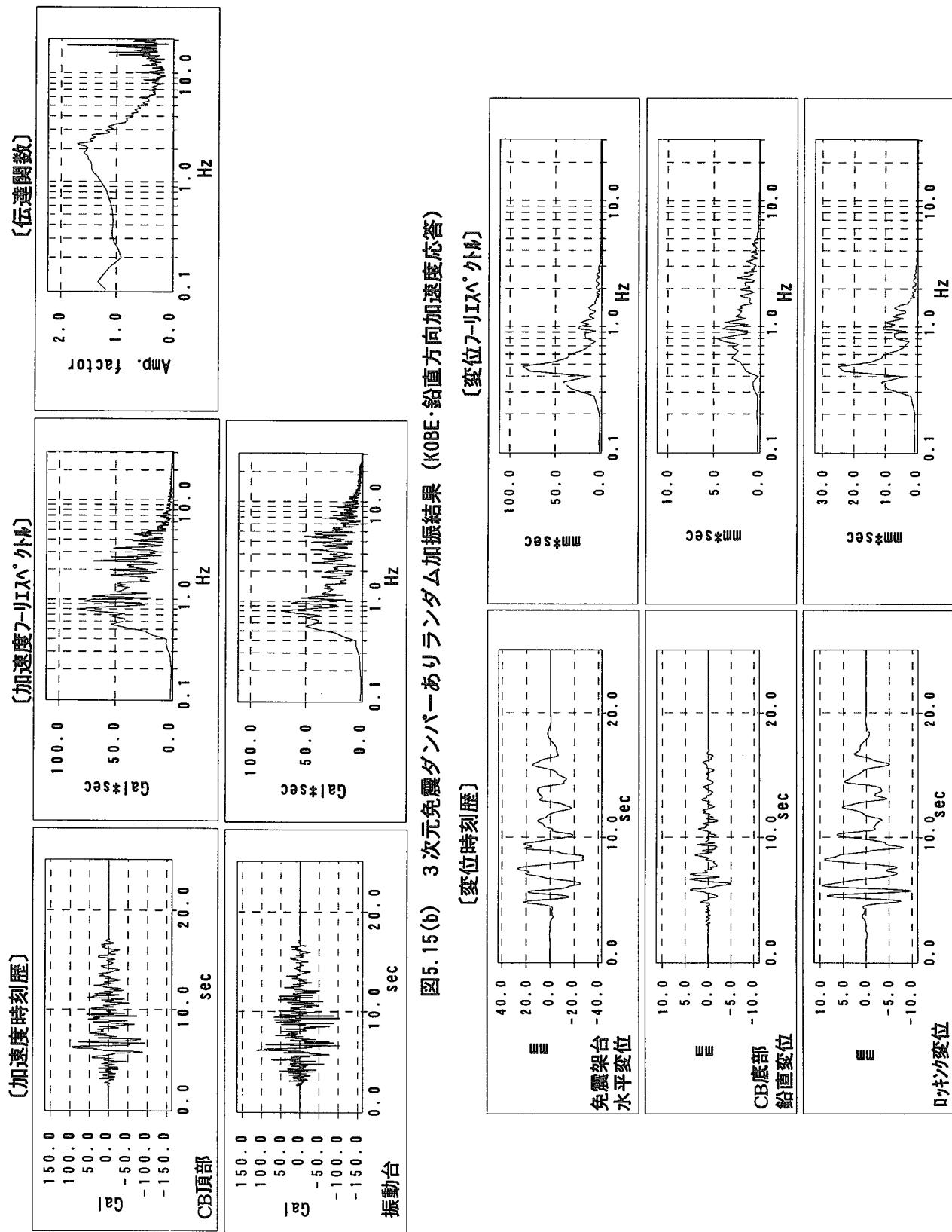


図5.15(C) 3次元免震ダンパーありランダム加振結果 (KOBE・変位応答)

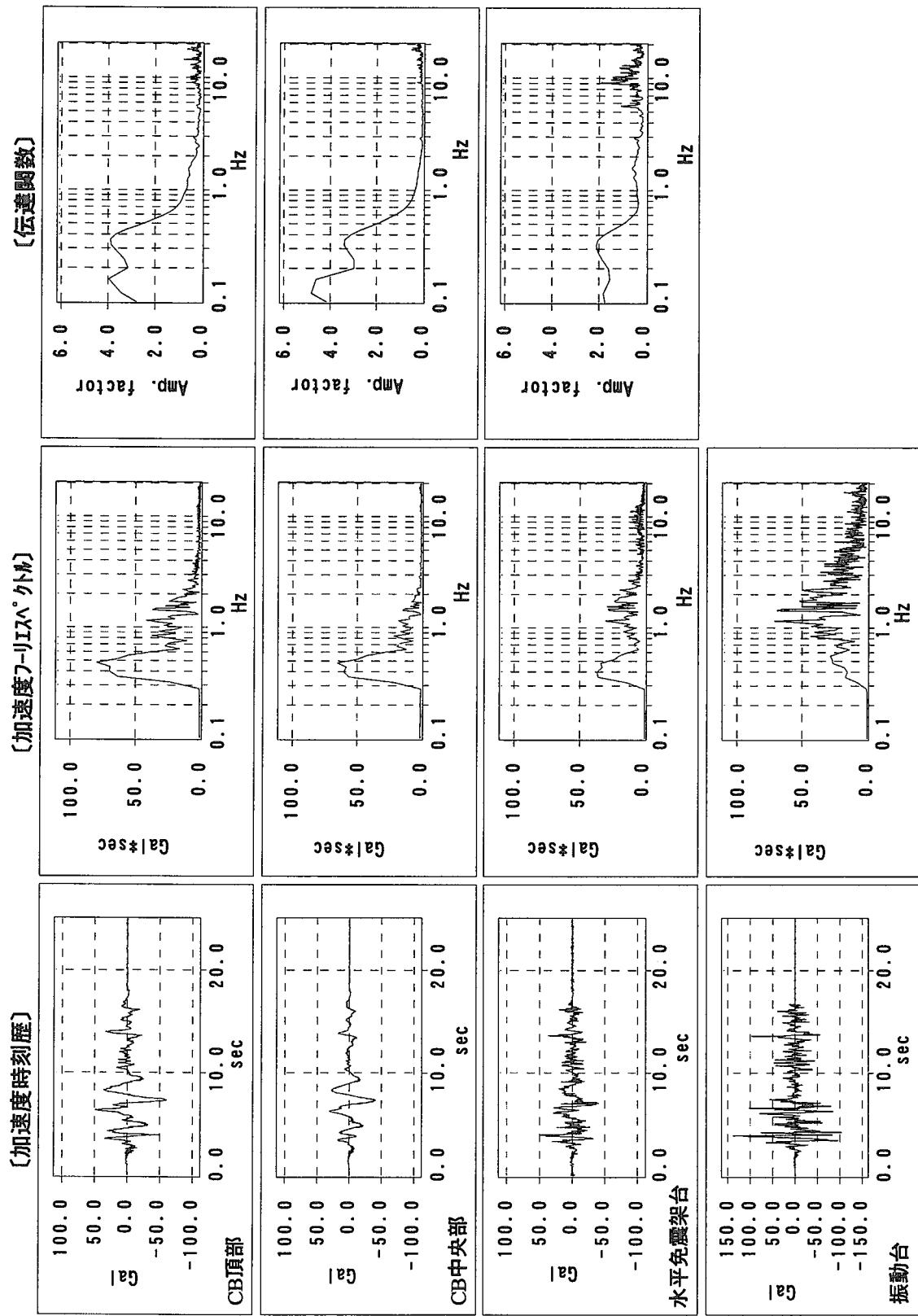
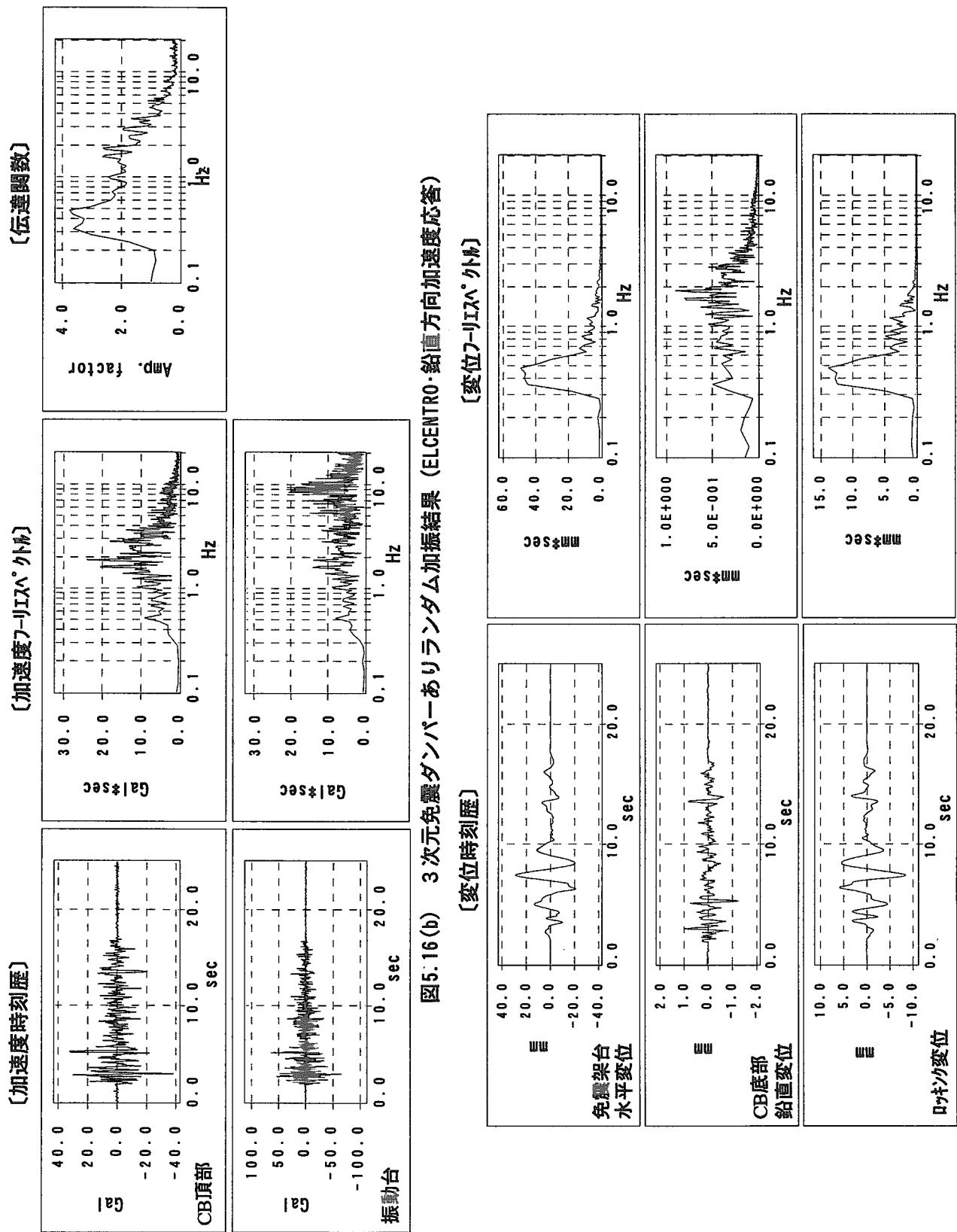


図5.16(a) 3次元免震ダンパーありランダム加振結果 (ELCENTRO・水平方向加速度応答)



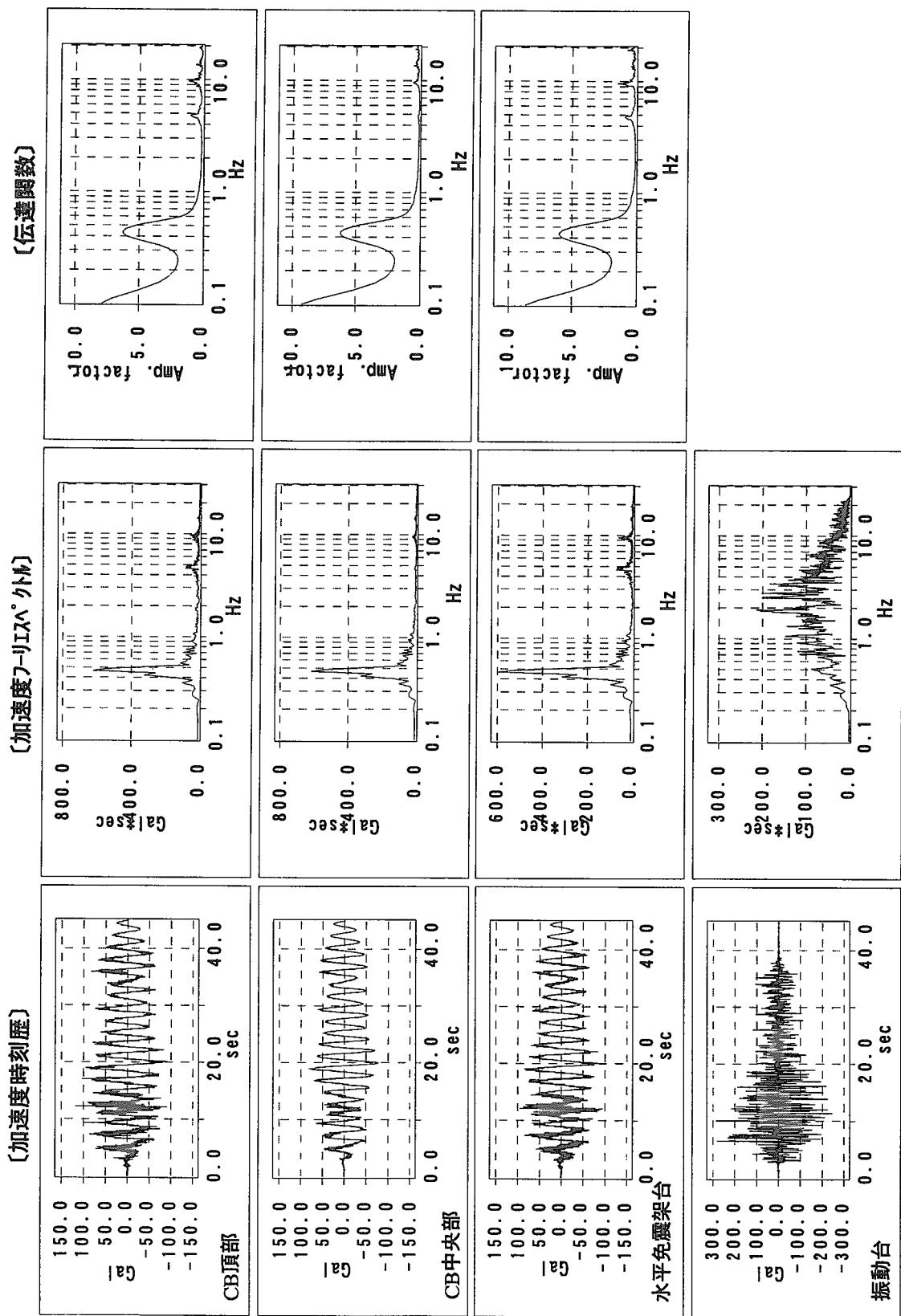


図5.17(a) 水平免震ダンパーなしランダム加振結果 (S1F・水平方向加速度応答)

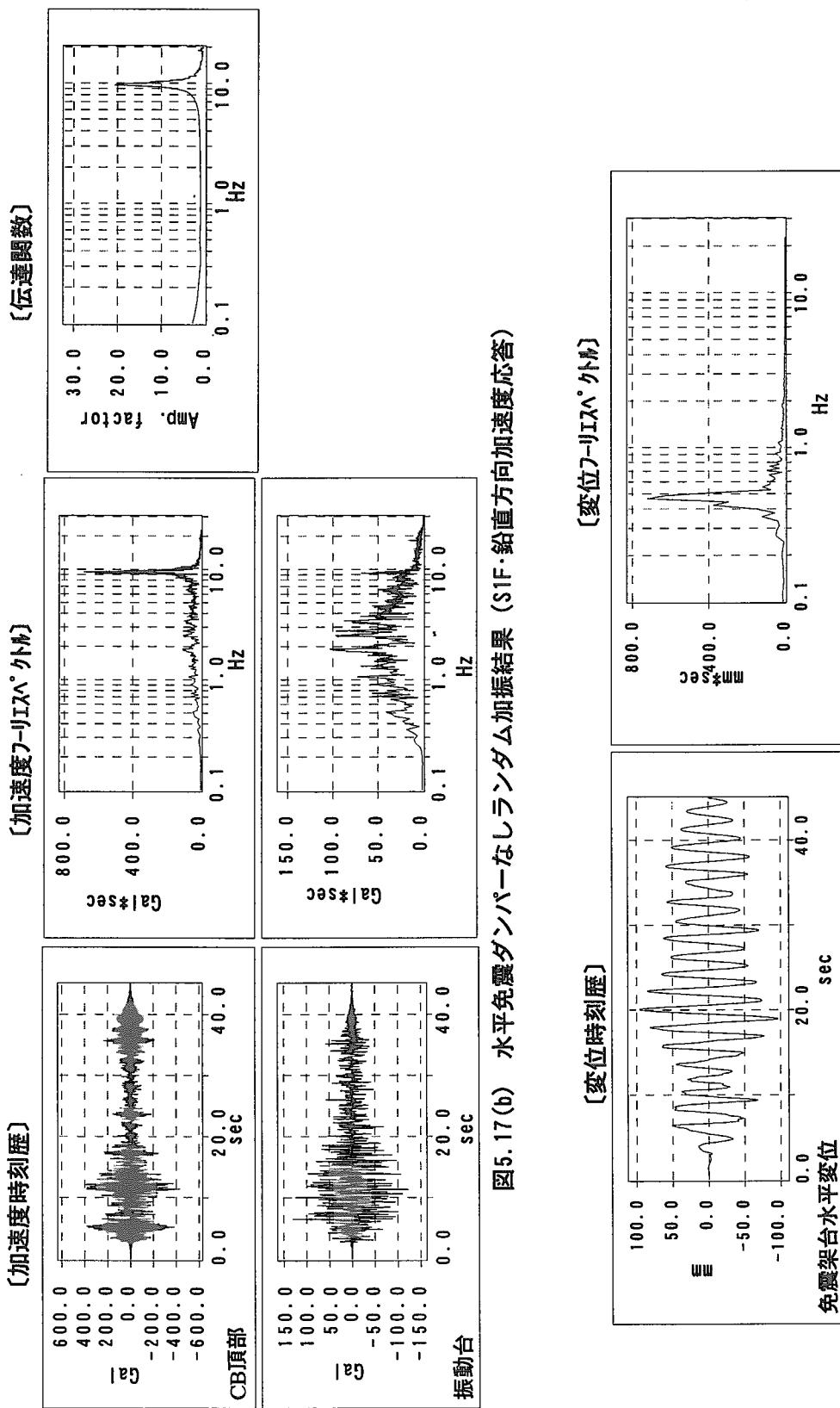


図5.17(b) 水平免震ダンパーなしランダム加振結果 (S1F・鉛直方向加速度応答)

図5.17(c) 水平免震ダンパーなしランダム加振結果 (S1F・変位応答)

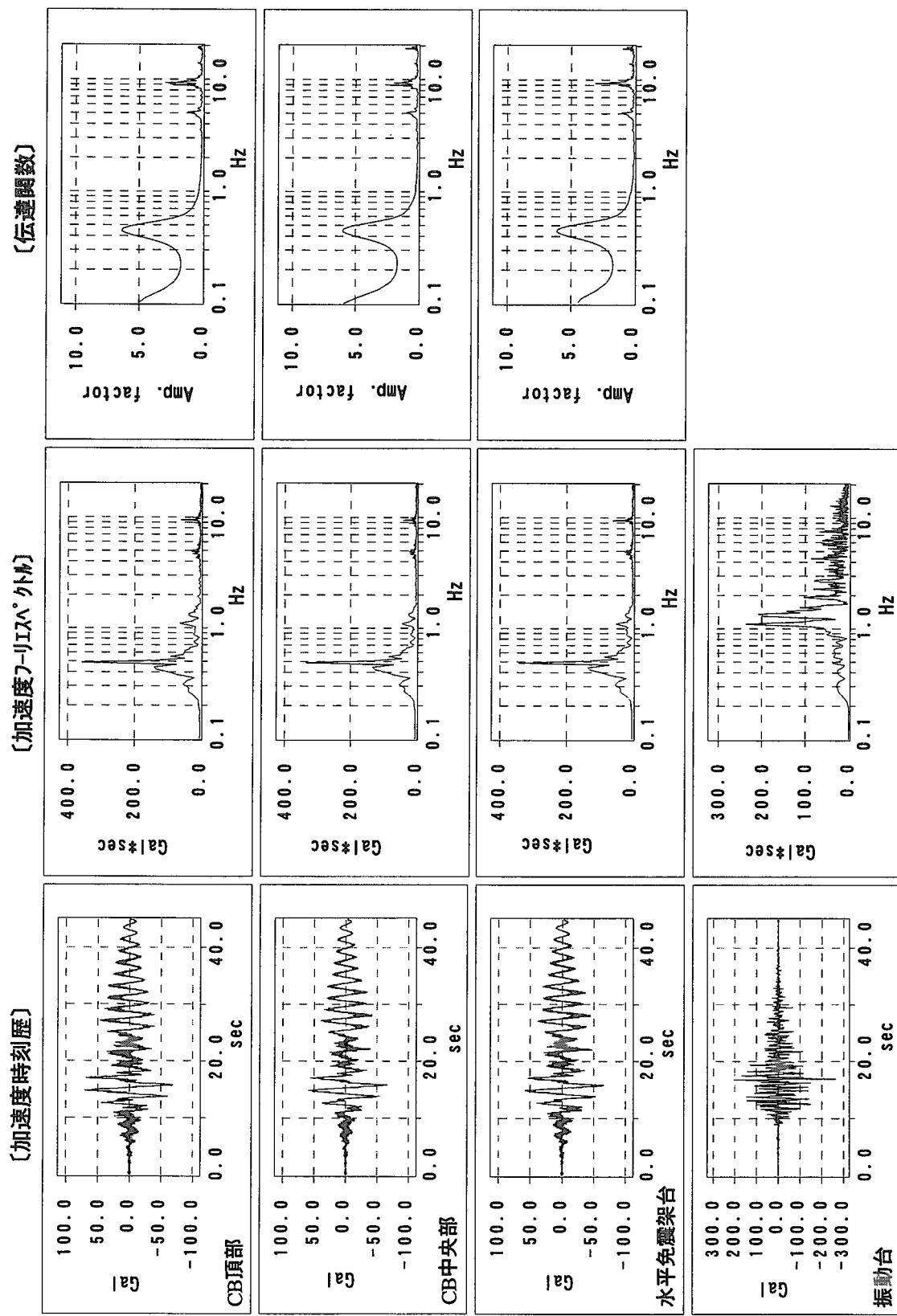


図5.18(a) 水平免震ダンパーなしランダム加振結果 (FM80・水平方向加速度応答)

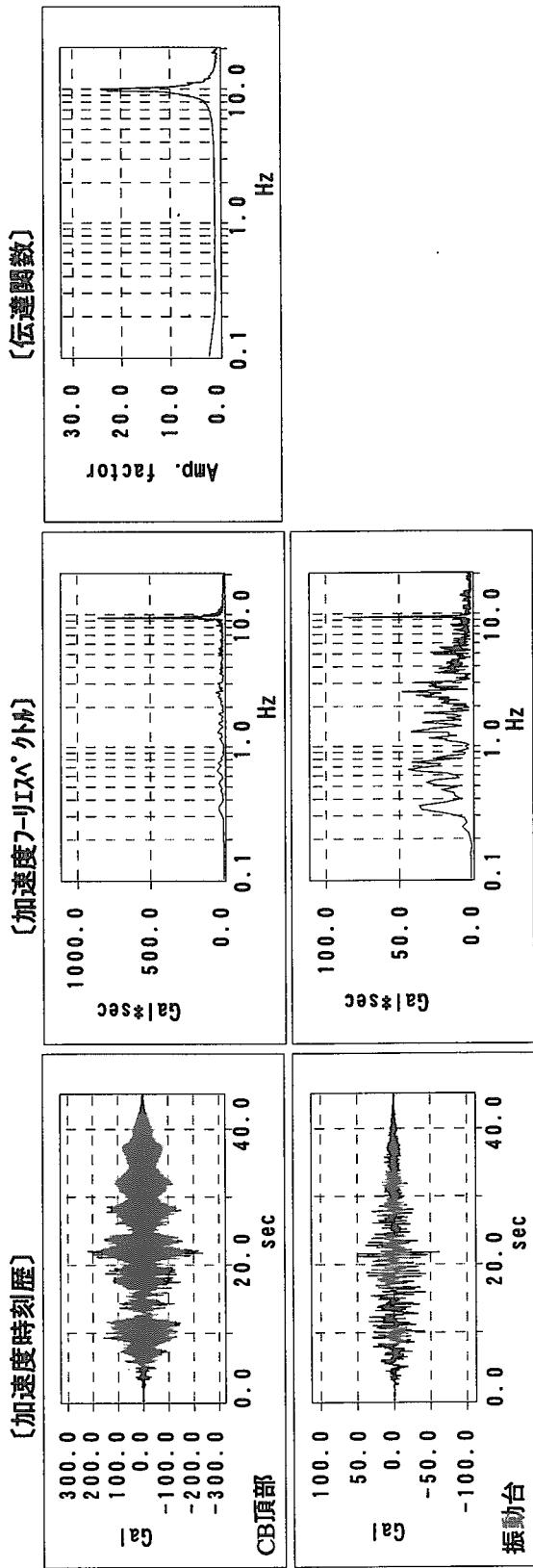


図5.18(b) 水平免震ダンパーなしランダム加振結果 (FM80・鉛直方向加速度応答)

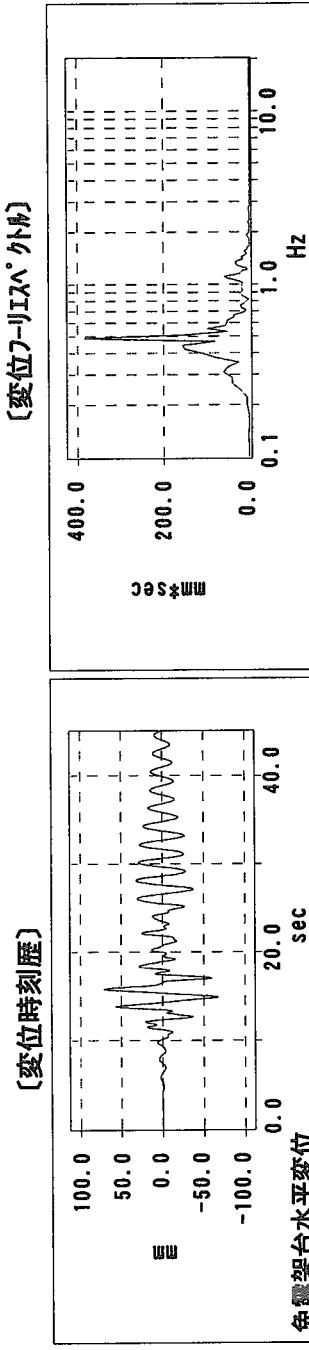


図5.18(c) 水平免震ダンパーなしランダム加振結果 (FM80・変位応答)

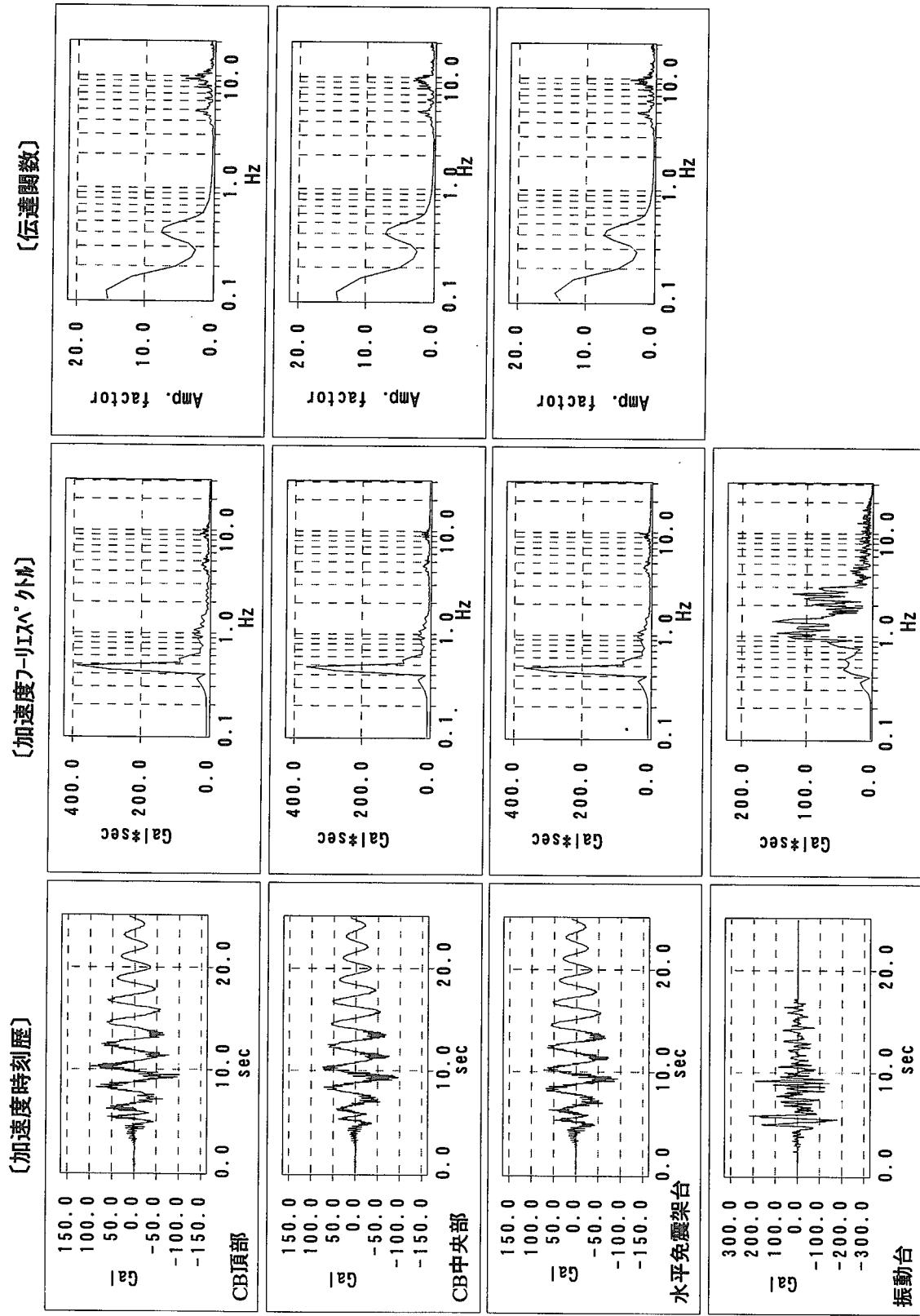
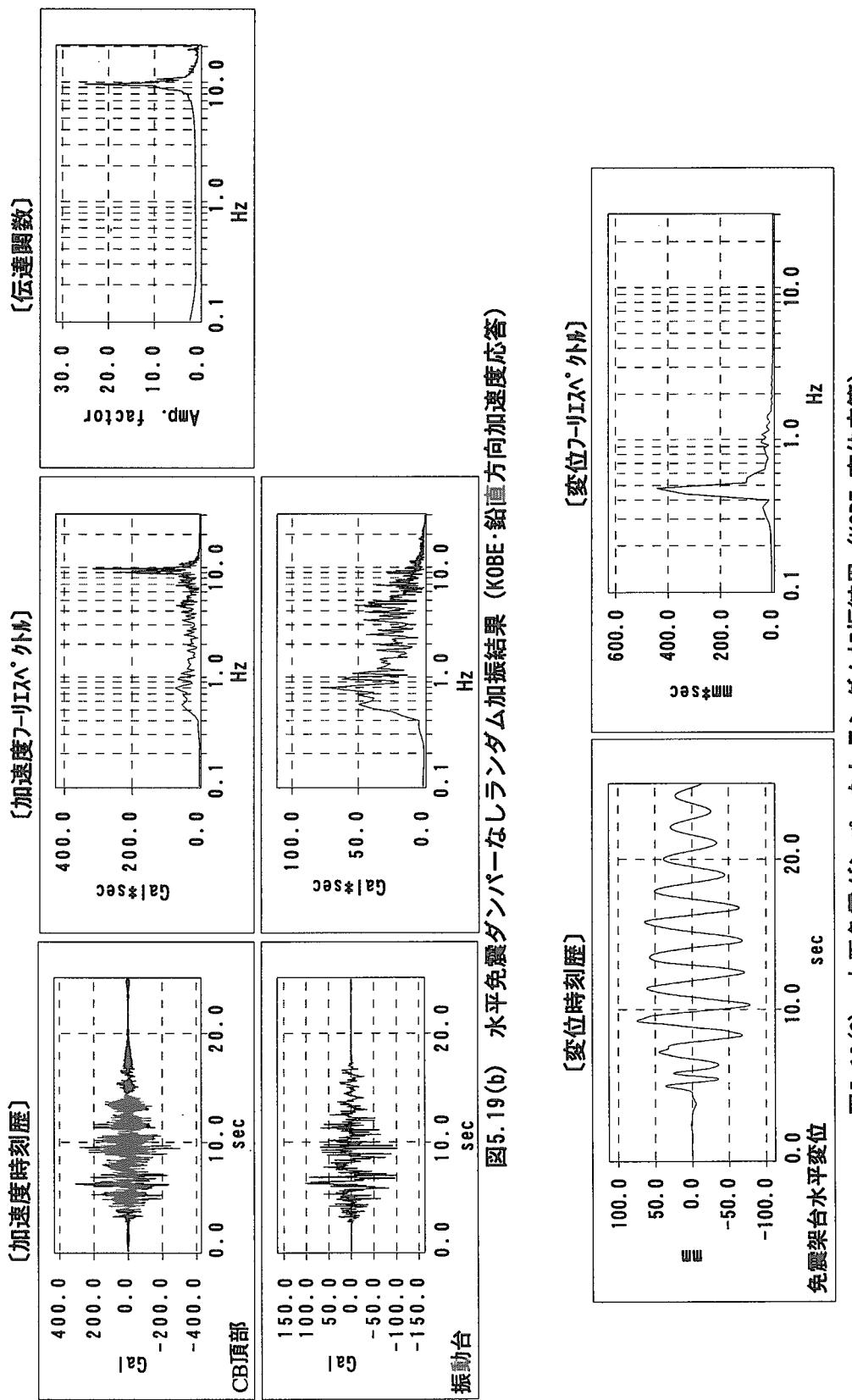


図5.19(a) 水平免震ダンパーなしランダム加振結果 (Kobe・水平方向加速度応答)



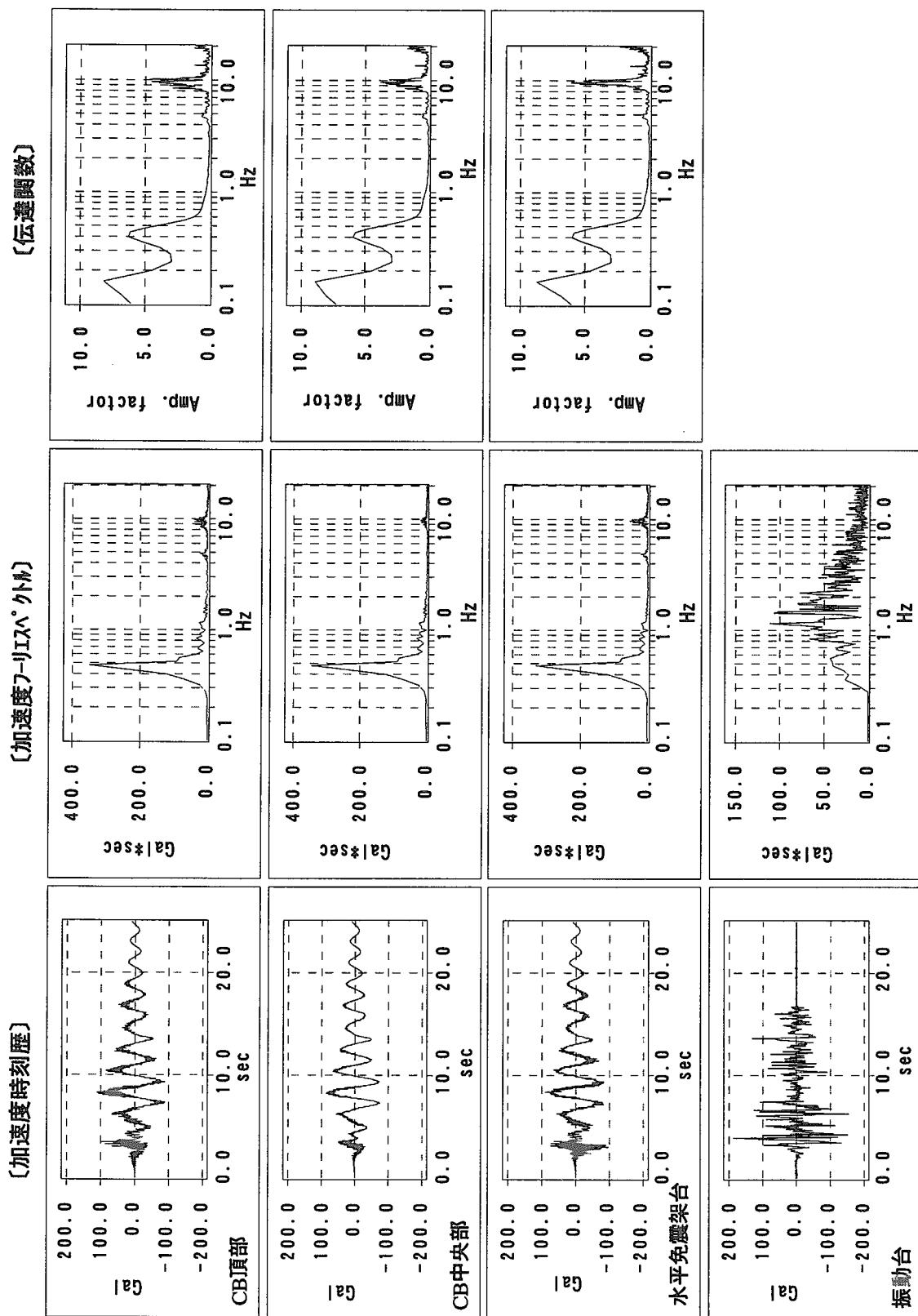


図5.20(a) 水平免震ダンパーなしランダム加振結果 (ELCENTRO・水平方向加速度応答)

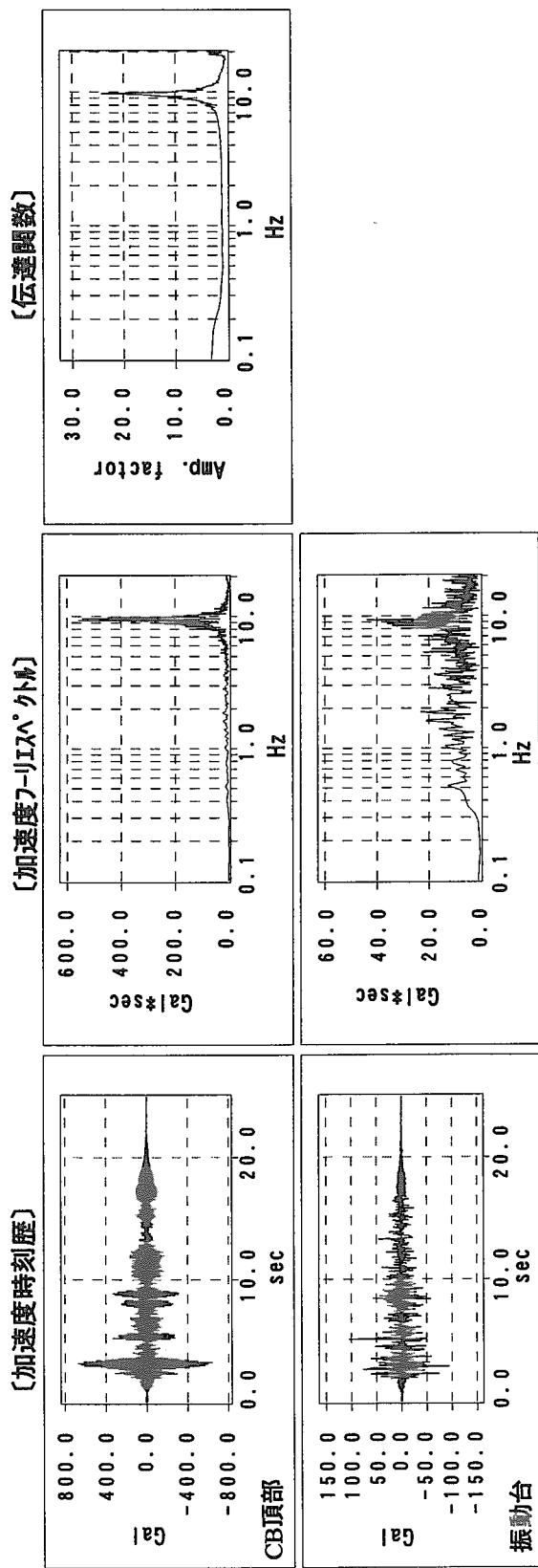


図5.20(b) 水平免震ダンパーなしランダム加振結果 (KOBE・鉛直方向加速度応答)

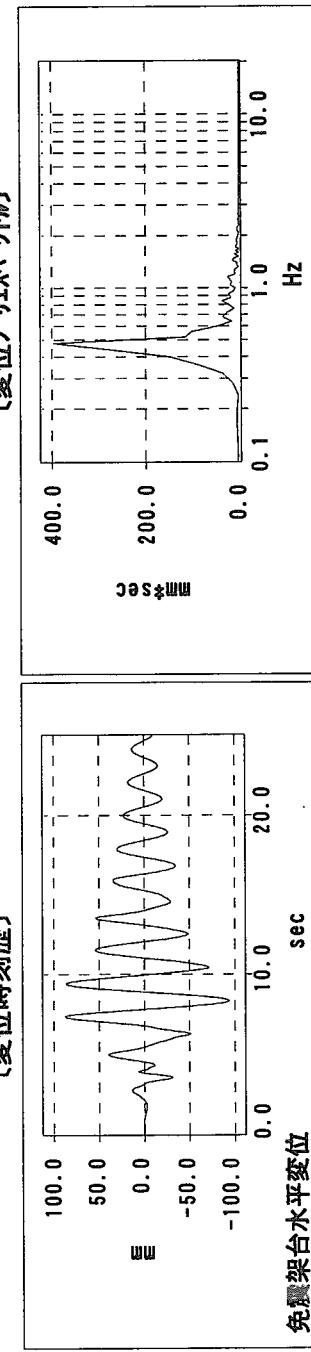


図5.20(c) 水平免震ダンパーなしランダム加振結果 (ELCENTRO・変位応答)

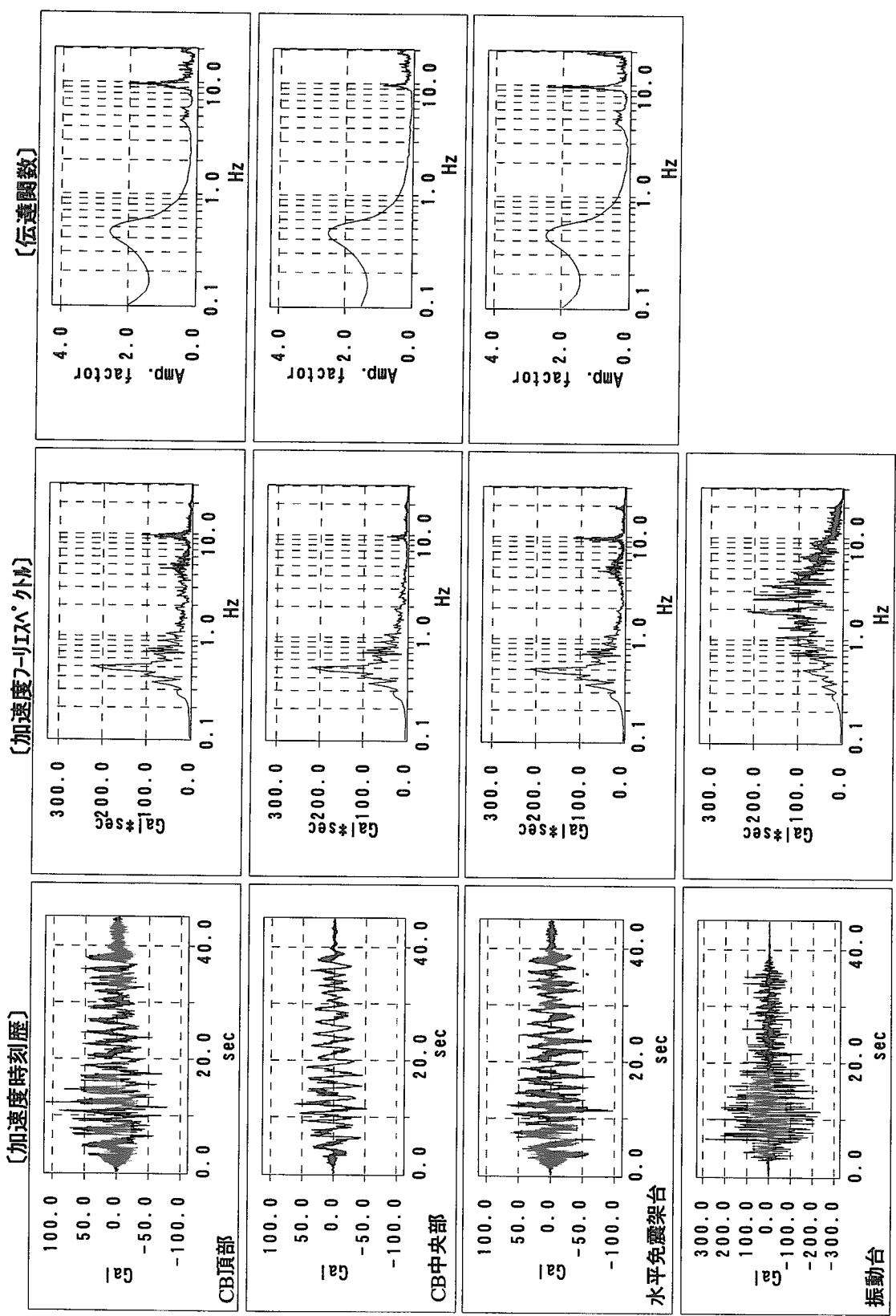
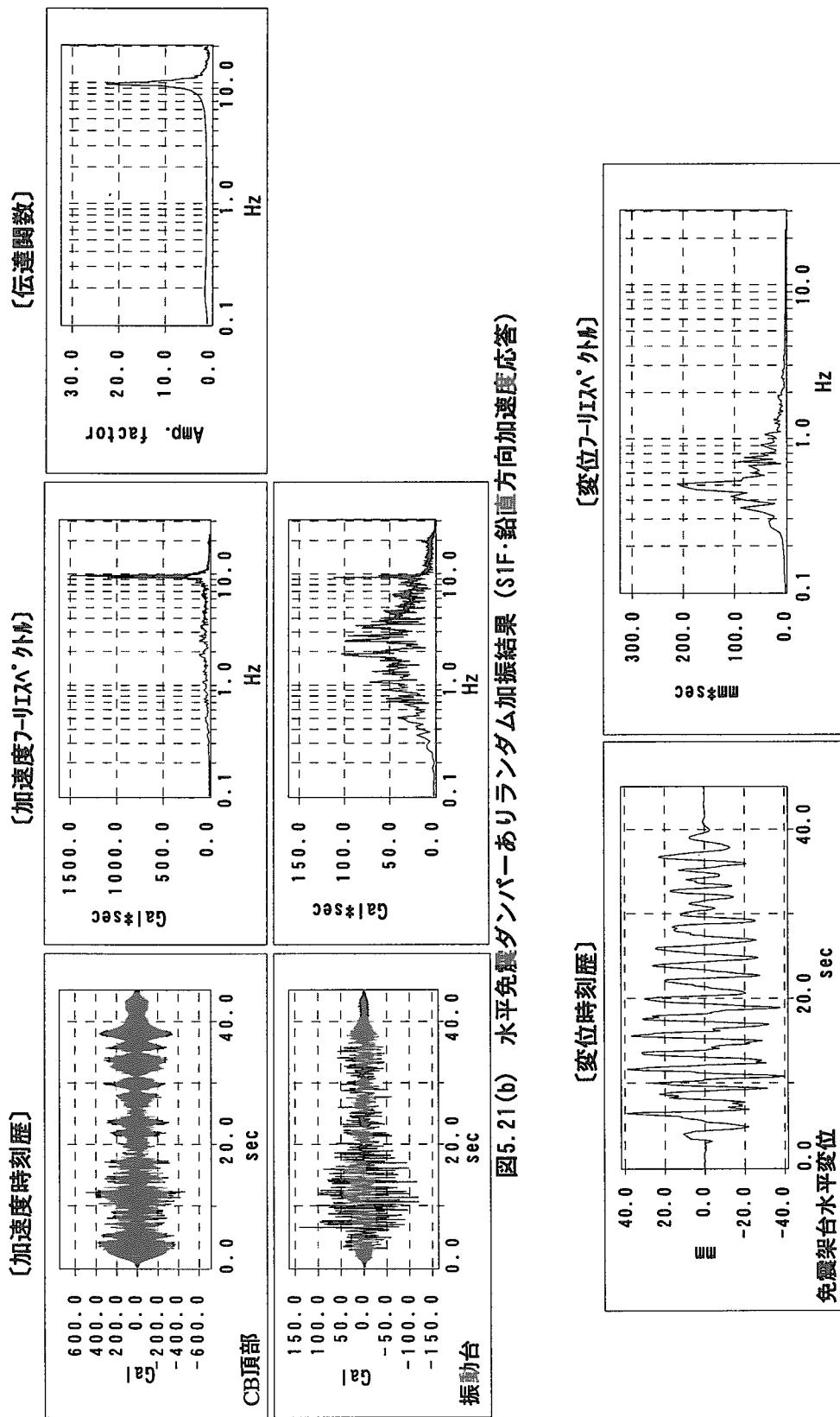


図5.21(a) 水平免震ダンパーありランダムバーありランダムバーなしランダムバー結果 (S1F・水平方向加速度応答)



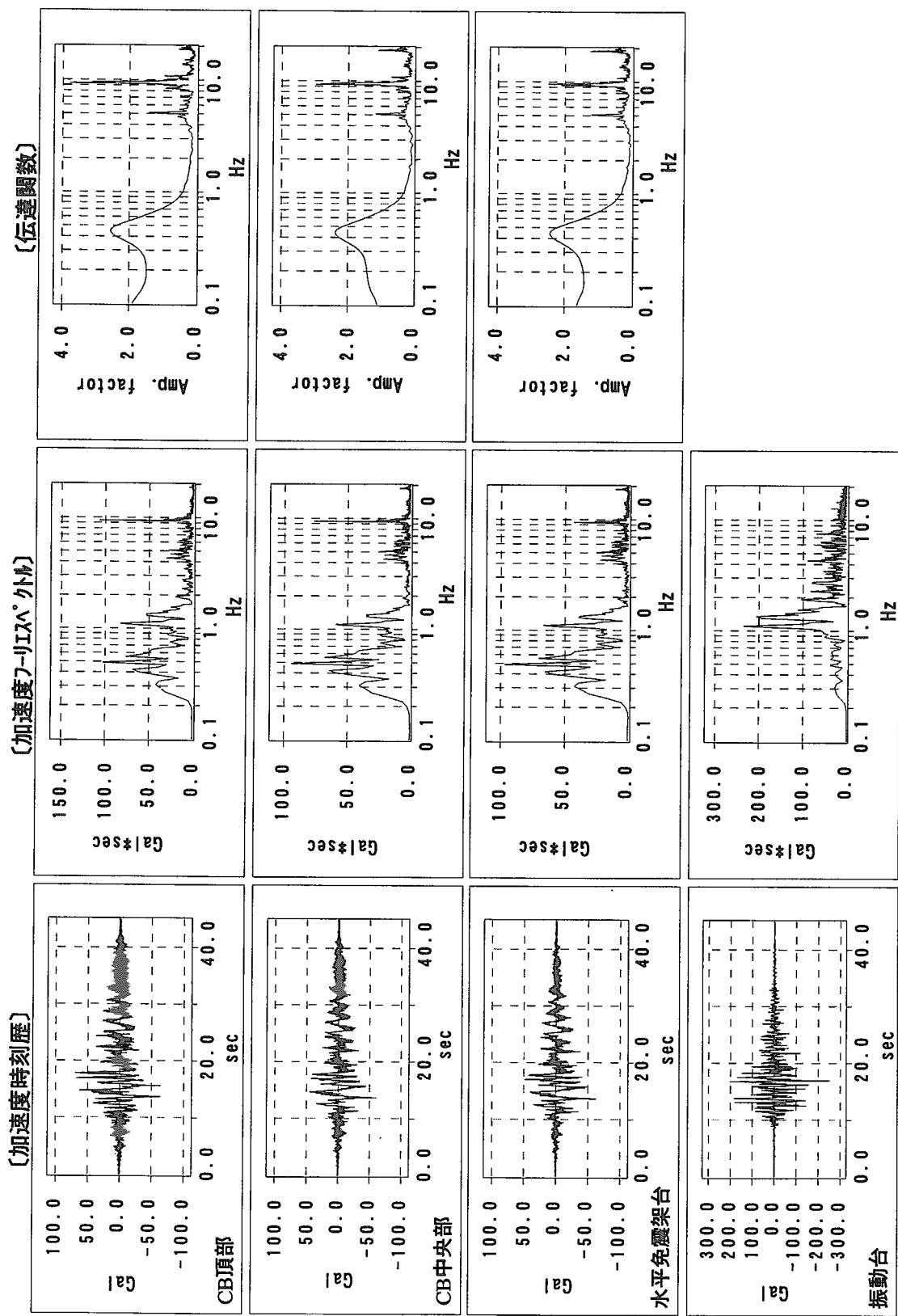


図5.22(a) 水平免震ダンパーありランダム加振結果 (FM80・水平方向加速度応答)

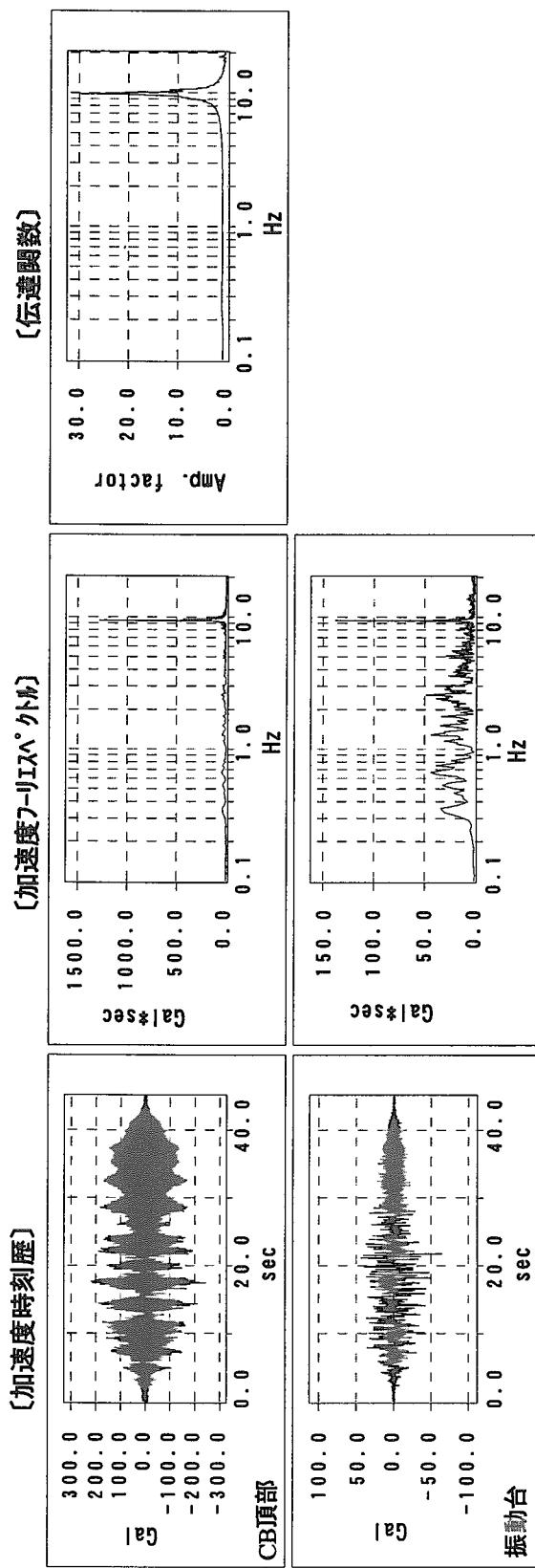


図5.21(b) 水平免震ダンパーありランダム加振結果 (S1F・鉛直方向加速度応答)

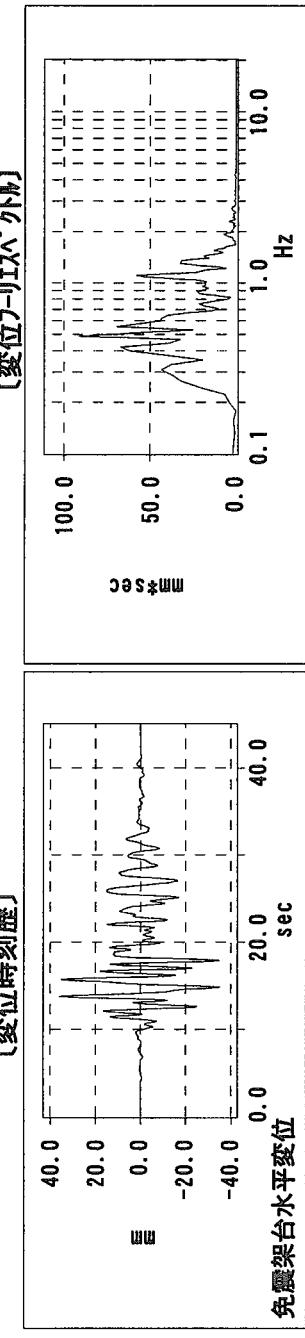


図5.22(C) 水平免震ダンパーありランダム加振結果 (FM80・変位応答)

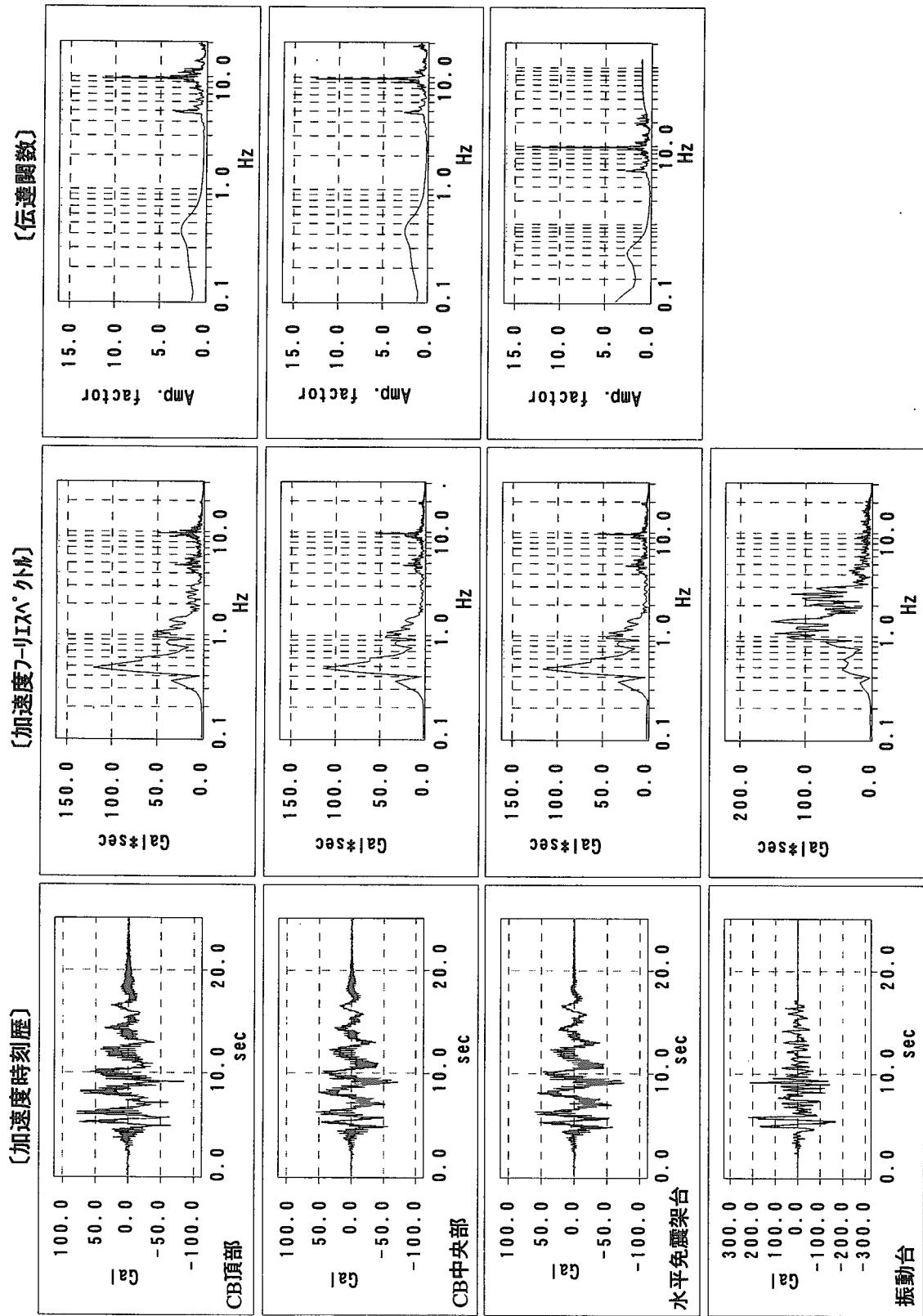


図5.23(a) 水平免震ダンパーありランダム加振結果 (KOBEx水平方向加速度応答)

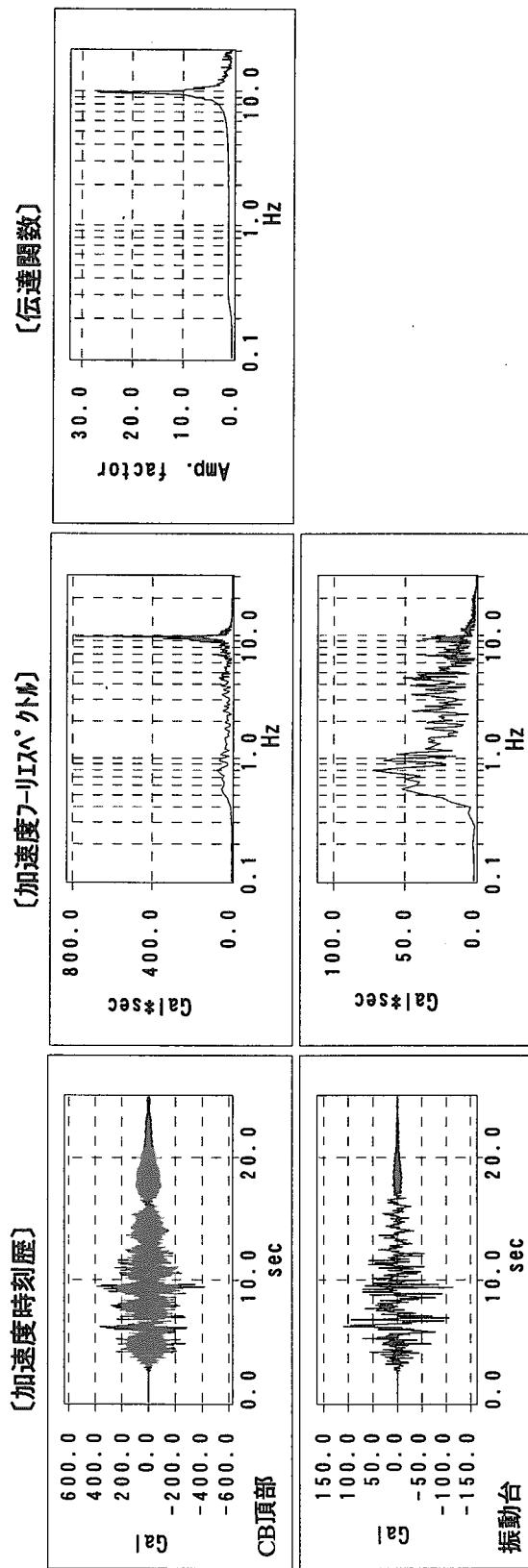


図5.23(b) 水平免震ダンパーありランダム加振結果 (K0BE・鉛直方向加速度応答)

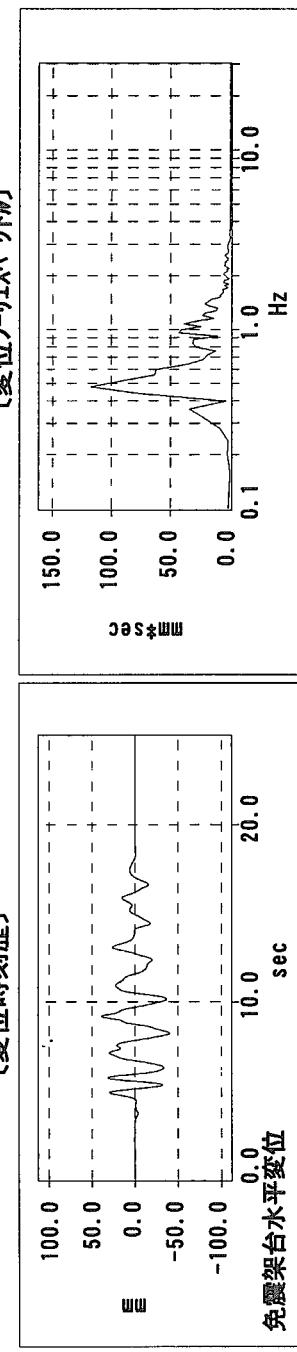


図5.23(c) 水平免震ダンパーありランダム加振結果 (K0BE・位相応答)

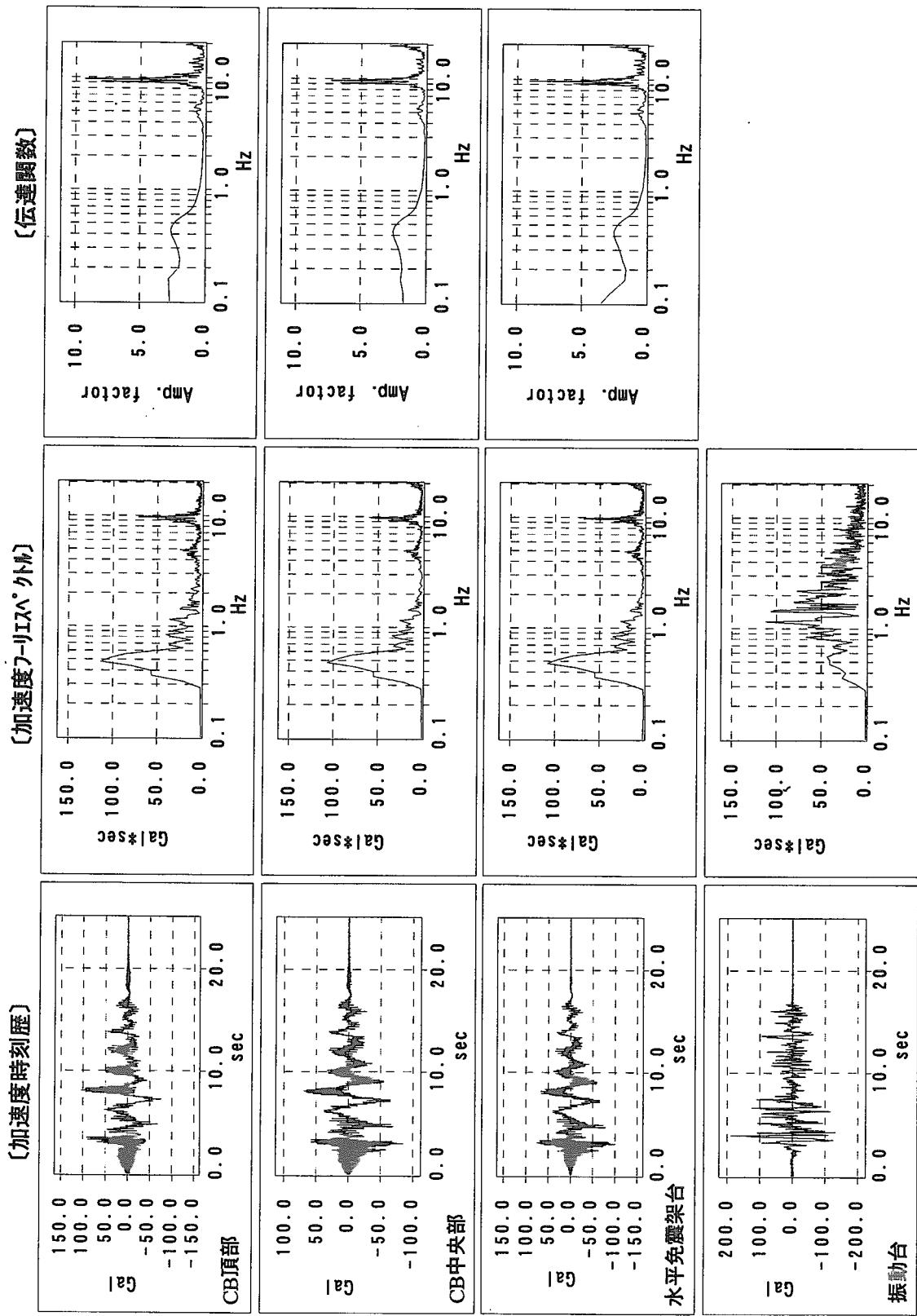


図5.24(a) 水平免震ダンパーありランダム加振結果 (ELCENTRO・水平方向加速度応答)

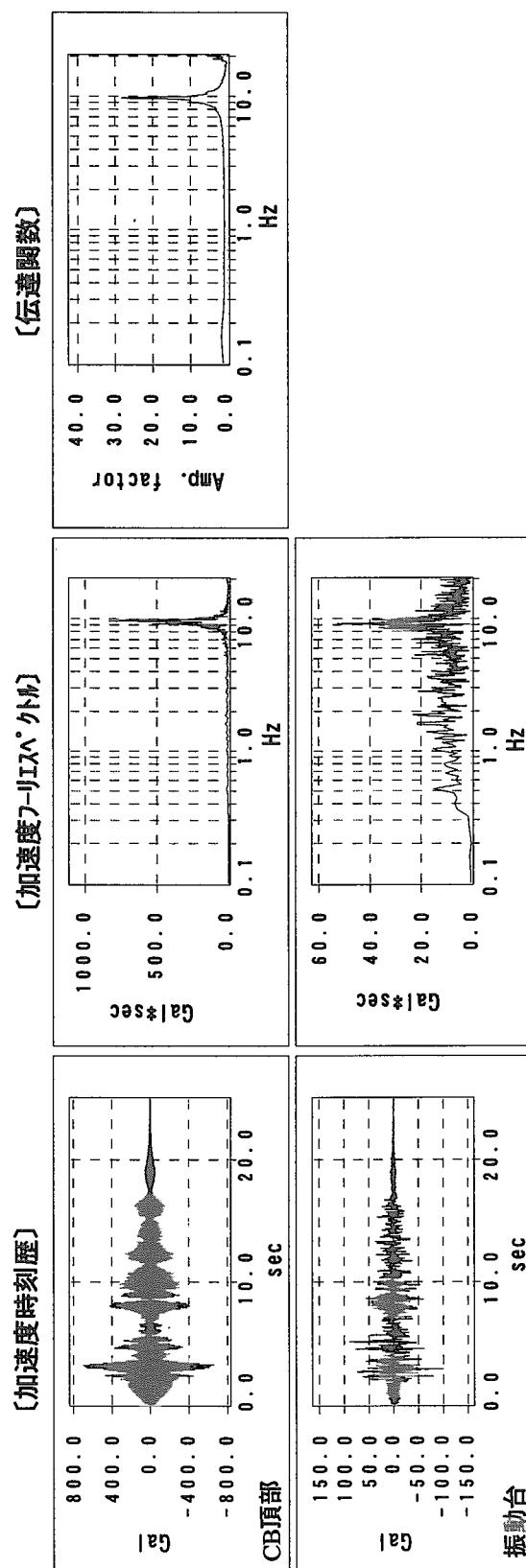


図5.24(b) 水平免震ダンパーありランダム加振結果 (ELCENTRO・鉛直方向加速度応答)

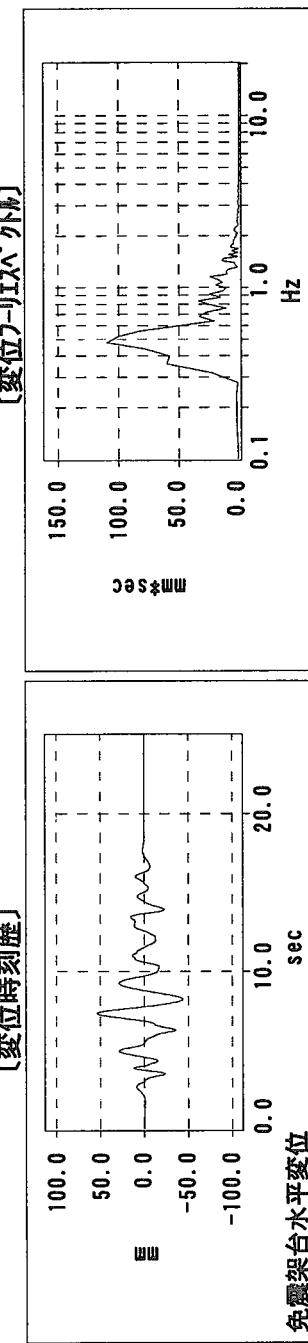


図5.24(c) 水平免震ダンパーありランダム加振結果 (ELCENTRO・変位応答)

6. 振動モデルおよび地震応答解析

本章では、設計仕様および特性試験結果に基づいて作成した振動モデル、振動台試験を模擬した地震応答解析結果および3次元免震システムの鉛直固有振動数と減衰定数をパラメータとして加速度低減効果を検討したパラメトリック解析の結果について述べる。

6.1 振動モデルおよび固有値解析結果

6.1.1 振動モデルの概要

設計仕様および特性試験で得られた復元力特性および振動特性に基づき作成した振動モデルを図6.1に、振動モデルの諸元を表6.1に示す。振動モデルの概要は以下の通りである。

- (1) 主要振動モードは、1次固有振動モード(水平方向並進+鉛直免震架台を回転中心とするロッキングモード)、2次固有振動モード(コンクリートブロック中央を回転中心とするロッキングモード)、3次固有振動モード(鉛直方向並進モード)である。また、NS方向とEW方向は、ほぼ同じ振動特性を有している。これらの振動モードを表わす振動モデルとして、多段積層ゴムおよびコイルばねをそれぞれ水平ばね、鉛直ばねおよび回転ばねに置き換えた2次元SRモデルとした。水平自由度と回転自由度の連成は考慮しているが、鉛直自由度と回転自由度との連成は考慮していない。また、水平および鉛直方向のオイルダンパーはダッシュポット要素によりモデル化した。
- (2) 特性試験の結果、2次固有振動モードの回転中心がコンクリートブロックのほぼ中心にある。また、コンクリートブロックは、薄いブロックを段状に重ねて緊結した構造で、幅に比して高さが大きく、若干のせん断変形や曲げ変形を生じる。これらの振動モードや変形モードを表現するために、本振動モデルではコンクリートブロックを5質点に分割し、梁要素とばね要素で連結した。

6.1.2 固有値解析結果

上記振動モデルに対する固有値解析を表6.2に示す。本解析では固有値解法として、Householder-Bisection法を用いた。固有値解析の結果、以下の知見が得られた。

- (1) 耐震上考慮すべき振動数範囲0~20Hzでは、主要振動モードは、刺激係数が大きい順番に、水平1次モード(0.41Hz; 水平方向並進+鉛直免震架台を回転中心とするロッキングモード)、鉛直1次モード(鉛直方向並進モード: 2.0Hz)、水平2次モード(1.45Hz; コンクリートブロック中央を回転中心とするロッキングモード)となっている。これらの振動モード形と固有振動数は、特性試験の結果と良く一致しており、本振動モデルにより免震システムの振動特性が適切にモデル化できているものと考えられる。
- (2) 刺激係数の大きさから、水平1次固有振動モードと鉛直1次固有振動モードが支配的なモードである。水平2次モードの刺激係数は、他の2つのモードの1/5程度であるが、地震波加振試験結果からもわかるように、入力地震動の周波数は、水平1次モードよりも

2次モード近傍において卓越する傾向があり、地震動の周波数特性により2次モードの影響が大きく現れるケースがある。

6.2 地震波加振試験結果シミュレーション

振動モデルの妥当性を検証するために、地震波加振試験結果を模擬して地震応答解析を行った。解析には EBISA コード^(6.1) の地震応答解析機能(RESP)を使用し、動的応答解析手法として Newmark - β ($\beta=1/4$) を用いた。以下に解析条件と解析結果を示す。

6.2.1 解析条件

本解析では、3次元免震システムのダンパーがない場合とダンパーある場合について、前節の振動モデルを用いて応答解析を行った。入力地震波は、周波数特性が大きく異なる KOBE 波および EL CENTRO 波とし、それぞれの加振試験において振動台上で計測された加速度時刻歴を用い、水平鉛直同時入力とした。また、減衰定数は、特性試験結果に基づいて、ダンパーがない場合は水平方向約 5%、鉛直方向 2% に、ダンパーがある場合は水平方向 23%、鉛直方向 35% とした。積分時間刻みは 0.01 秒とした。

6.2.2 地震応答解析結果

(1) ダンパーがない場合

解析により求めた CB 下面および上面に位置する質点の水平および鉛直加速度時刻歴、変位時刻歴およびそれらのフーリエスペクトルを振動台試験結果と合わせて図 6.2～図 6.3 に示す。

これらの結果から、各解析結果と加振結果の時刻歴波形とフーリエスペクトルの性状は良く一致しており、作成した振動モデルにより、3次元免震システムの固有振動数や振動モード等の振動特性は適切に表現されているものと考えられる。ただし、KOBE 波の加速度時刻歴波形の最大加速度や包絡形状は、加振結果と明らかな差が認められる。これらの差の発生要因として、以下の事項が考えられる。

1) 減衰特性の違い

各加速度時刻歴波形を見ると、水平・鉛直方向共に、加振結果の方が解析結果よりも入力が減少した後の自由振動波形の収束が早く、特性試験から設定した減衰よりも若干大きな減衰力が作用しているものと考えられる。特に、ダンパーがない場合は、わずかな減衰の違いが応答全体に敏感に影響する。減衰特性の違いの要因として、多段積層ゴムの履歴減衰や機器各部で発生する摩擦等による減衰が考えられる。

2) 高次振動モードの影響

時刻歴波形やフーリエスペクトルから、KOBE 波の加振結果には特に時刻歴波形の振幅の大きなピーク近傍に 10Hz～15Hz の高周波数の応答成分が見られるが、解析モデルではこれらの振動モードが表現されていない。特に加速度には、高周波数の振動モードの影響が敏感に現れるため、加振結果の加速度応答が大きくなっているものと考えられる。こうした高次の振動は、大きなロッキングに伴うストッパーの接触、機器の接合部や接触部で発生する摩擦

や衝突等に起因するものと考えられる。

(2) ダンパーがある場合

ダンパーがない場合と同様に、CB 下面および上面に位置する質点の水平および鉛直加速度時刻歴、変位時刻歴およびそれらのフーリエスペクトルを振動台試験結果と合わせて図 6.4～図 6.5 に示す。

これらの結果から、加速度応答、変位応答ともに解析結果と加振結果の時刻歴波形およびフーリエスペクトルは良く一致しており、作成した振動モデルによりダンパーがある場合の免震システムの応答は精度良く予測できるものと考えられる。

6.3 鉛直固有振動数および減衰定数に関するパラメトリック解析

鉛直免震の固有振動数を 2 Hz とした場合、先の地震波加振結果から、入力地震動に対して応答の増幅を抑えることは可能であるが、大きな加速度低減効果を得ることは難しいことがわかった。しかし、固有振動数と減衰定数を適切に組み合わせることで、より大きな加速度低減効果を得ることが可能と考えられる。そこで、本節では、前節の振動モデルを用い、種々の地震動について鉛直固有振動数と減衰定数をパラメータとする地震応答解析を行い、デバイスの選択やロッキングの影響等を考慮した設計可能な範囲で、最大の加速度低減効果が得られる固有振動数と減衰定数について検討した。

6.3.1 解析ケースおよび解析条件

パラメトリック解析の設定条件を表 6.3 に示す。同表に示すように鉛直固有振動数は、1 Hz～4 Hz の範囲の 6 ケース、鉛直方向の減衰定数は 20%～40% の範囲で 4 ケースを設定した。減衰定数は、ダッシュポット要素の減衰係数に換算し、回転剛性と回転方向に作用する減衰係数は、直免震装置のコイルばねやオイルダンパーの配置や台数等の幾何学的な条件が変わらないものとして、鉛直ばねの剛性と減衰係数の変化に対応させて算定した。また、入力地震波は、周波数特性が異なる EQ326-FL, FM80, KOBE, EL CENTRO, HACHINOHE 波の 5 波を用いた。

6.3.2 解析結果および加速度低減効果に関する考察

各ケースの解析結果一覧を表 6.4 に、鉛直固有振動数および減衰定数と加速度応答倍率の関係を図 6.6～図 6.7 に、鉛直固有振動数および減衰定数とロッキングの関係を図 6.8 に示す。

図 6.6 に示すように、KOBE 波を除く各地震波では鉛直固有振動数を 4 Hz から 1 Hz に減少させるに従い加速度低減効果が向上し、1 Hz では 0.2 から 0.6 倍程度の加速度応答倍率となっている。KOBE 波は、1 Hz～2 Hz に卓越周波数があるため、3 Hz 以下の固有振動数では加速度応答倍率はほぼ横ばい状態になっている。

また、図 6.7 に示すように、減衰定数は、全体的な傾向として 2 Hz 以上の固有振動数では減衰定数の増加に伴い加速度応答倍率が若干減少するが、2 Hz 以下の固有振動数については、減衰定数の増加による加速度応答倍率の減少は見られず、高周波数領域に卓越周波数を持つ EQ326-FL 波や EL CENTRO 波ではむしろ応答倍率が増加する傾向がある。

一方、図 6.8 に示すようにロッキング応答(鉛直免震架台の回転角)は、鉛直固有振動数を 4 Hz から 1 Hz に減少させるに従い増加する傾向にあり、全体的に 2 Hz から 3 Hz 以下の固有振動数で增加の度合いが大きくなっている。また、特に 2 Hz 以下の固有振動数では、減衰定数の増加により回転角が減少する傾向が見られ、ロッキングが大きな低固有振動数ほどダンパーによるロッキング低減効果が大きくなることがわかる。

以上、地震動の周波数特性により差はあるが、概して鉛直固有振動数が低いほど加速度低減効果は大きくなり、また、固有振動数が 2 Hz 以下では減衰定数の増加(20%～50%の範囲)による加速度低減効果の向上は見られない。したがって、加速度低減効果を最大にするためには、鉛直免震系の固有振動数を下限値の 1 Hz とし、減衰定数はロッキングの抑制効果を考慮して 30%～40%に設定するのが適当であると考えられる。ただし、固有振動数が 2 Hz 以下になるとロッキングが増大することから、固有振動数を 1 Hz とした場合、何らかのロッキング防止措置を講じる必要があるものと考えられる。

図 6.6 には、各地震動について、固有振動数 1 Hz・減衰定数 40%の場合の加速度低減効果と本 3 次元免震システム(固有振動数 2 Hz・減衰定数 30%)の加振結果およびこれにほぼ対応する解析結果(固有振動数 2 Hz・減衰定数 30%)を示した。固有振動数および減衰定数を 1 Hz および 40% に改善することにより、現行システムに対して 50%程度の加速度応答の低減が見込まれる。また、HACHINOHE 波を除き、加振結果(固有振動数 2Hz, 減衰定数 30%)と同条件の解析結果の応答倍率はほぼ対応しており、パラメトリック解析結果は妥当なものと考えられる。

6.4 地震応答解析まとめ

本解析により得られた知見を以下に纏める。

- (1) 本 3 次元免震システムの振動モデルとして、多段積層ゴムおよびコイルばねをそれぞれ水平ばね、鉛直ばねおよび回転ばねに置換し、CB を 5 質点に分割して梁要素とばね要素でモデル化した 2 次元 SR モデルを作成した。固有値解析の結果、固有振動数および振動モード形は特性試験結果と良く一致し、本振動モデルにより、免震系の振動特性が適切にモデル化できていることが確認された。
- (2) 上記振動モデルを用いて、先の地震波加振結果をシミュレーションした結果、ダンパーがない場合に高次振動モードの影響により、加速度時刻歴の包絡形状に差が生じたが、全体的に解析結果と加振結果の応答性状は良く一致し、振動モデルの妥当性が確認された。
- (3) 周波数特性が異なる地震波 5 波について、鉛直固有振動数(1Hz～4Hz)と減衰定数(20%～50%)をパラメータとする地震応答解析を行った結果、加速度低減効果は固有振動数を 1 Hz とした場合に最大となり、減衰定数はロッキング応答の抑制を考慮すると 30%～40%が適当である。また、その場合、3 次元免震システム(固有振動数 2Hz, 減衰定数 30%)よりも概ね 50% 加速度応答が低減するとの結果が得られた。
- (4) 固有振動数 2 Hz 以下では、ロッキング応答が急激に増大する傾向があり、固有振動数を 1 Hz とした場合、ロッキング抑制措置を講じる必要があるものと考えられる。

表6.2 固有値解析結果一覧

振動モード	固有値解析結果		備考
	固有振動数(Hz)	刺激係数	
1次	0.41	1.176	水平1次モード(並進)
2次	1.45	-0.172	水平1次モード(ロッシング)
3次	2.00	1.002	鉛直1次モード(並進)
4次	33.60	0.001	水平3次モード

[3次元免震及び振動モード形]

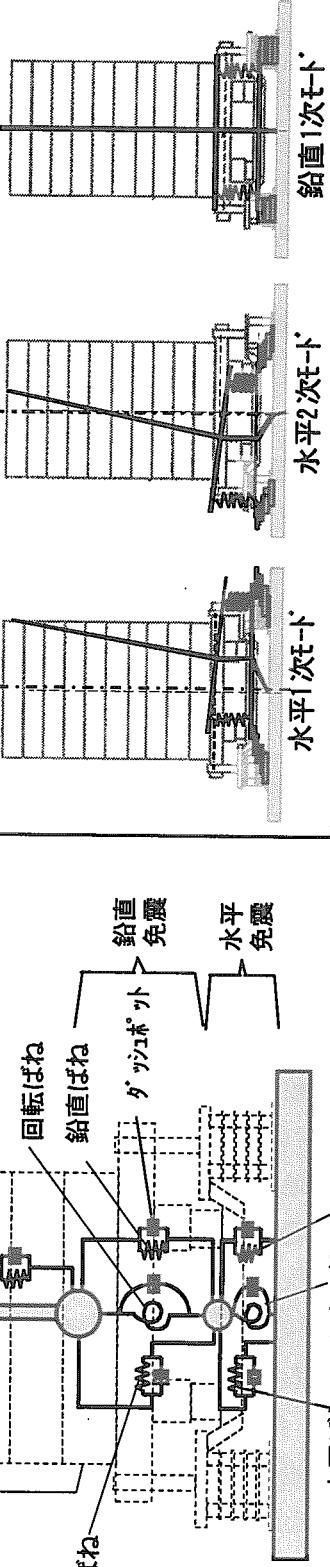


図6.1 振動モデル

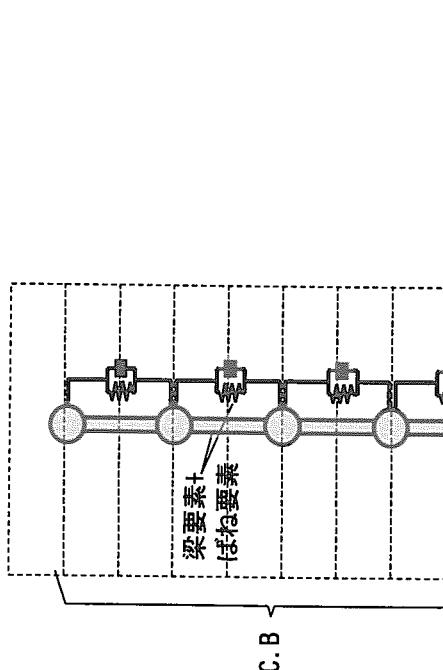
表6.1 振動モデル諸元

質点重量(tf) *1	M1	M2	M3	M4	M5	M6	合計
	2.44	4.46	3.98	3.98	3.98	3.98	22.82
ばね定数	多段積層ゴム	コイルばね	CB *3				
水平(tf/m)	18.9 *2	8299	剛梁				回転
鉛直(tf/m)	20580	337.4	剛梁+ばね	減衰係数	2.64	18.49	(tfsec/m) (tfsec/m) ²
回転(tfm/rad)	22670	223.7	剛梁	減衰定数(h)	0.23	0.35	12.56

*1)各質点重量は、実測値から算出した。

*2)水平・鉛直とも十分剛となるよう剛梁の変位±25mmにおける値。

*3)CBは、水平・鉛直要素の材料定数およびばね要素の材料定数を設定した。



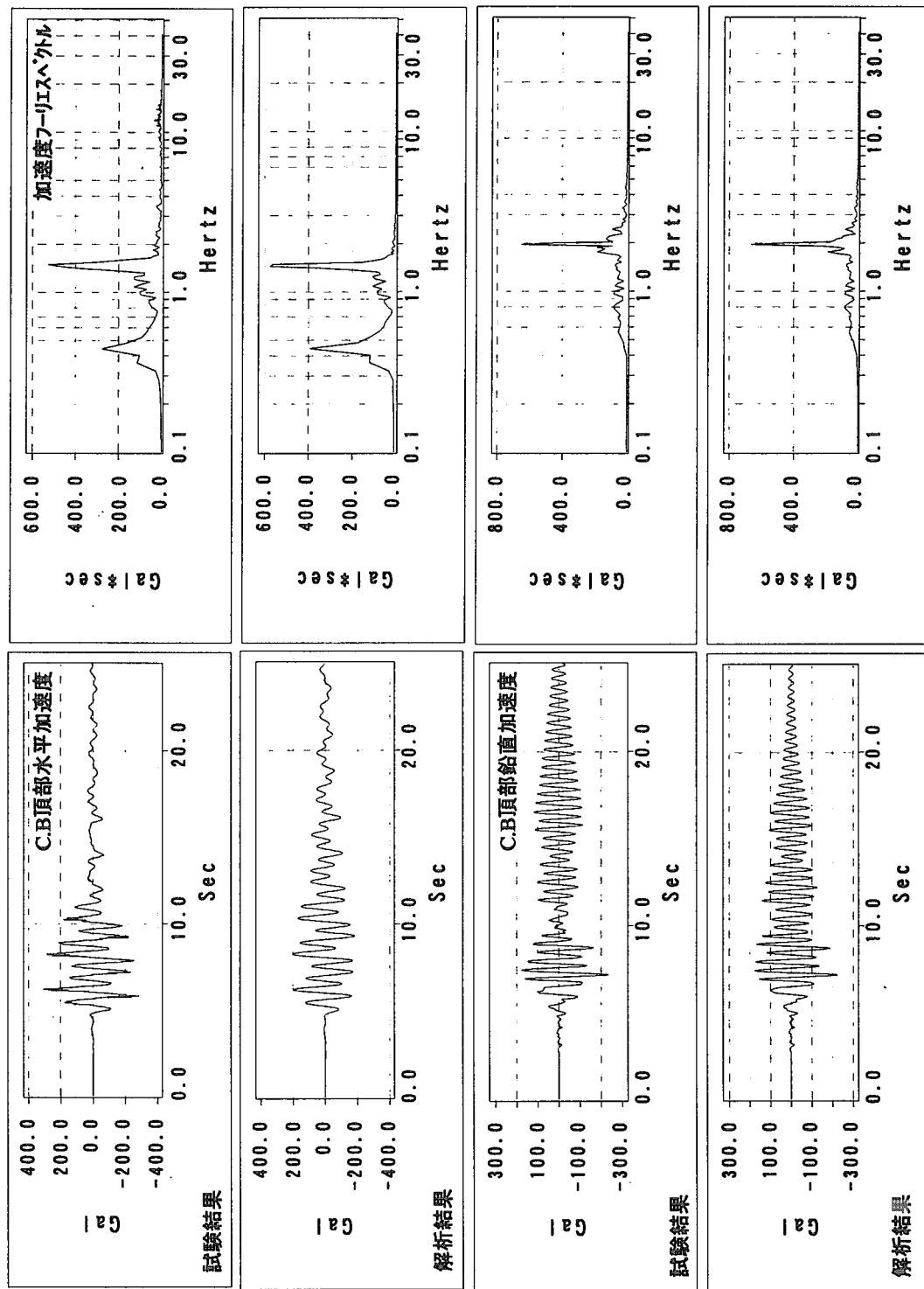


図6.2(a) 3次元免震システム・ダンパーなし振動台試験シミュレーション解析結果(KOBE震・加速度応答)

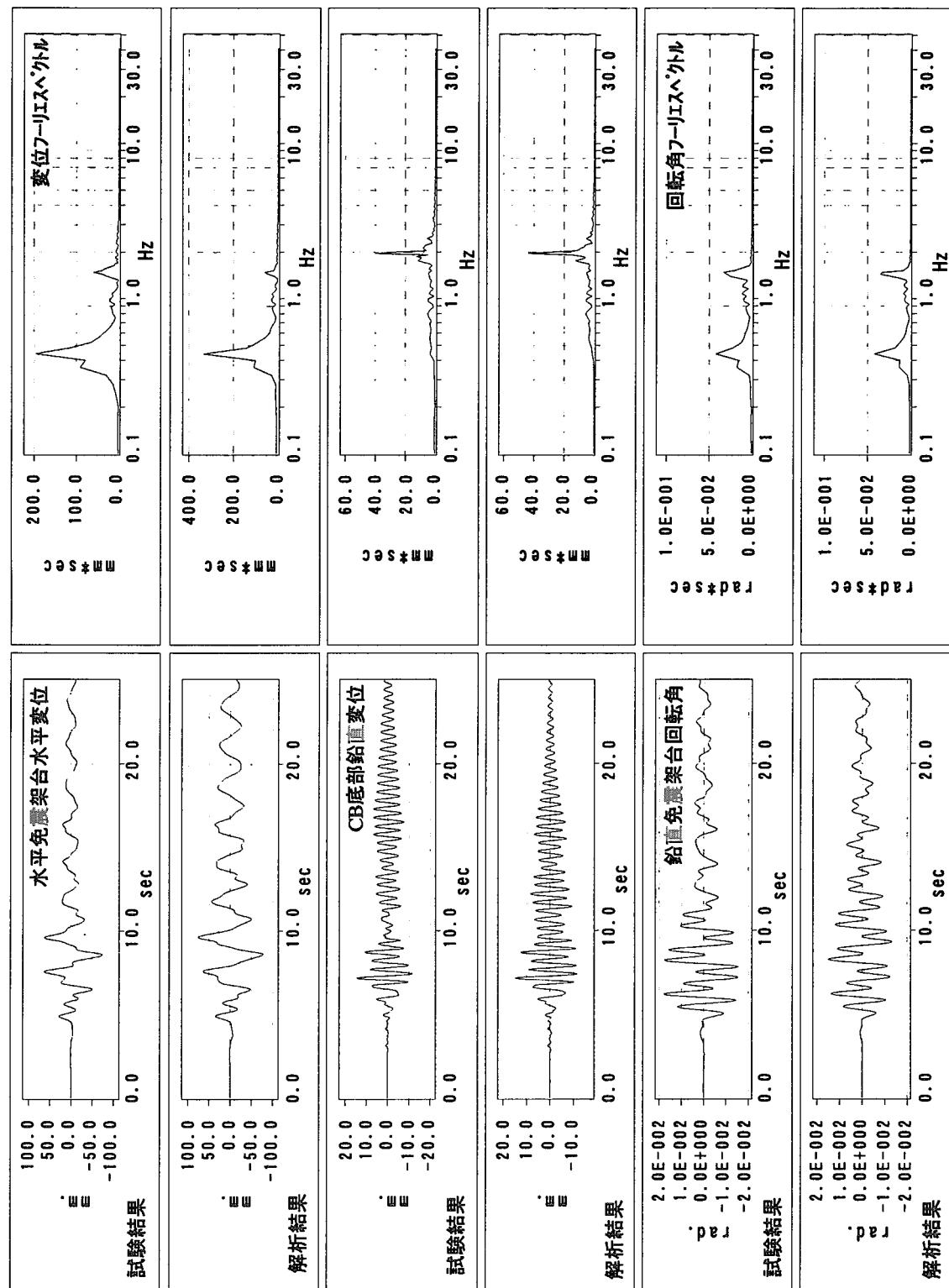


図6.2(b) 3次元免震システム・ダンバーなし振動台試験シミュレーション解析結果(KOBE波・変位応答)

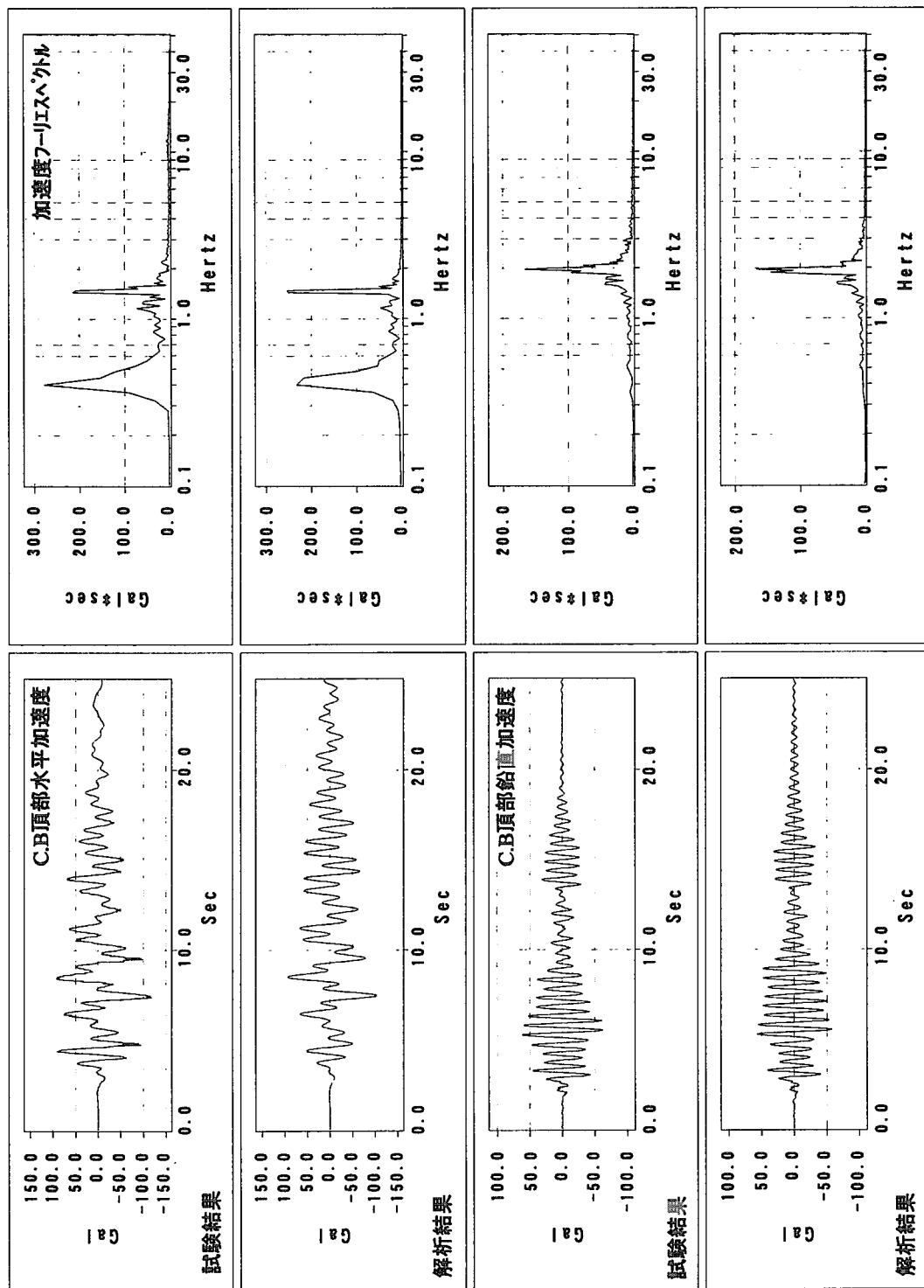


図6.3(a) 3次元免震システム・ダンパーなし振動台試験シミュレーション解析結果(ELCENTRO波加速度応答)

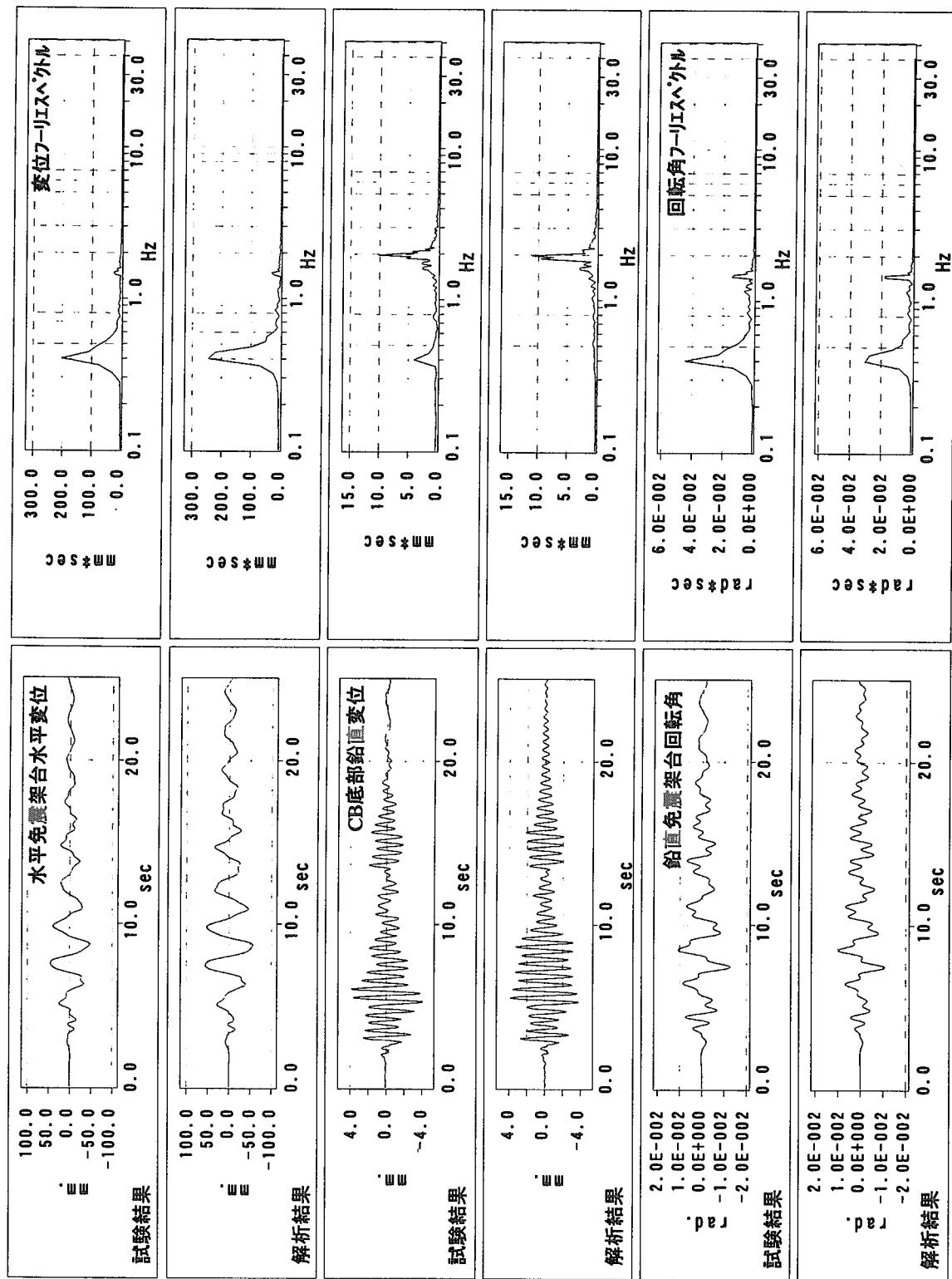


図6.3(b) 3次元免震システム・ダンパーなし振動台試験シミュレーション解釈結果(ELCENTRO波変位応答)

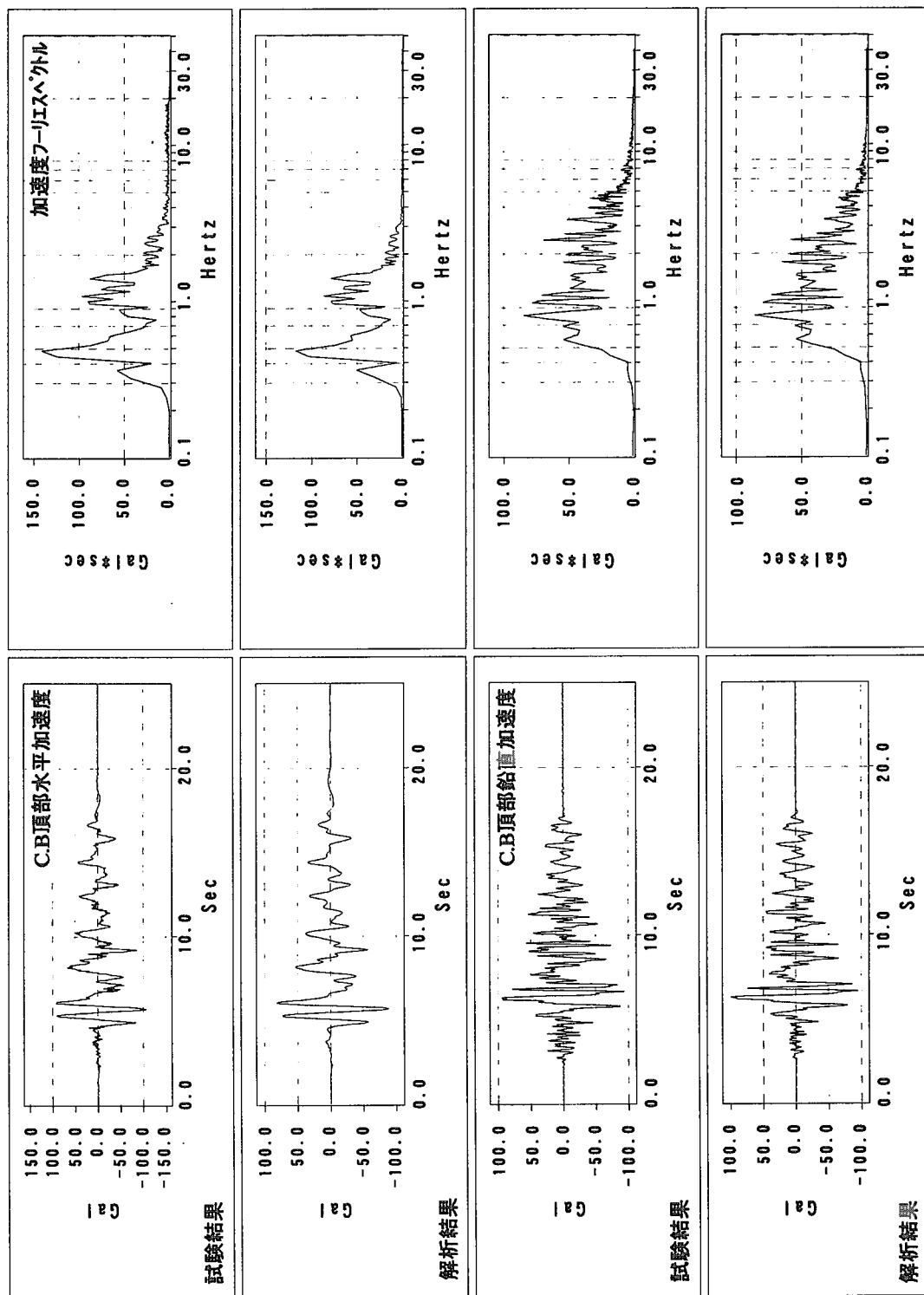


図6.4(a) 3次元免震システム・ダンパーあり振動台試験シミュレーション解析結果(KOBE波加速度応答)

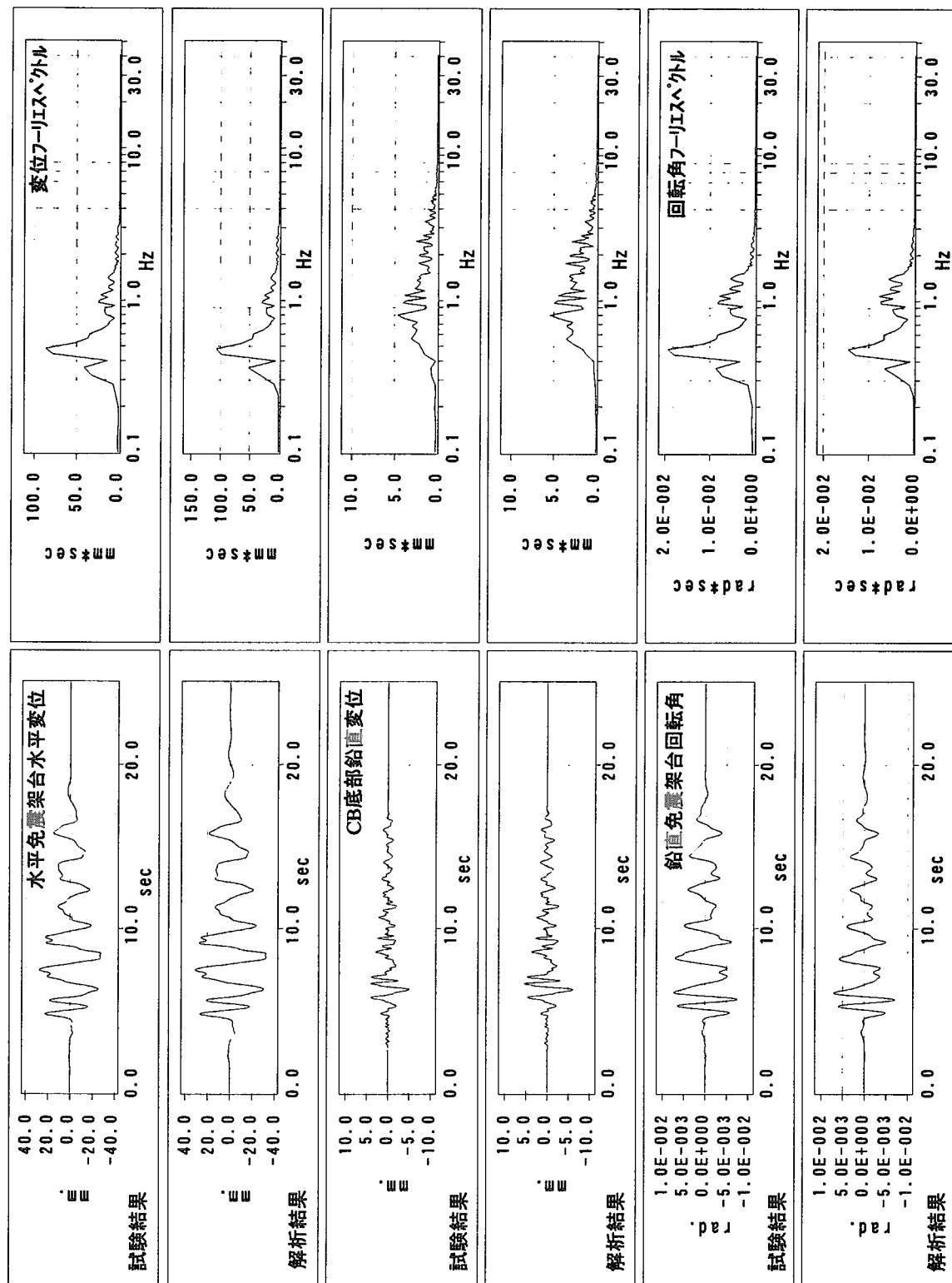


図6.4(b) 3次元免震システム・ダンバーあり振動台試験シミュレーション解析結果(KOBE波変位応答)

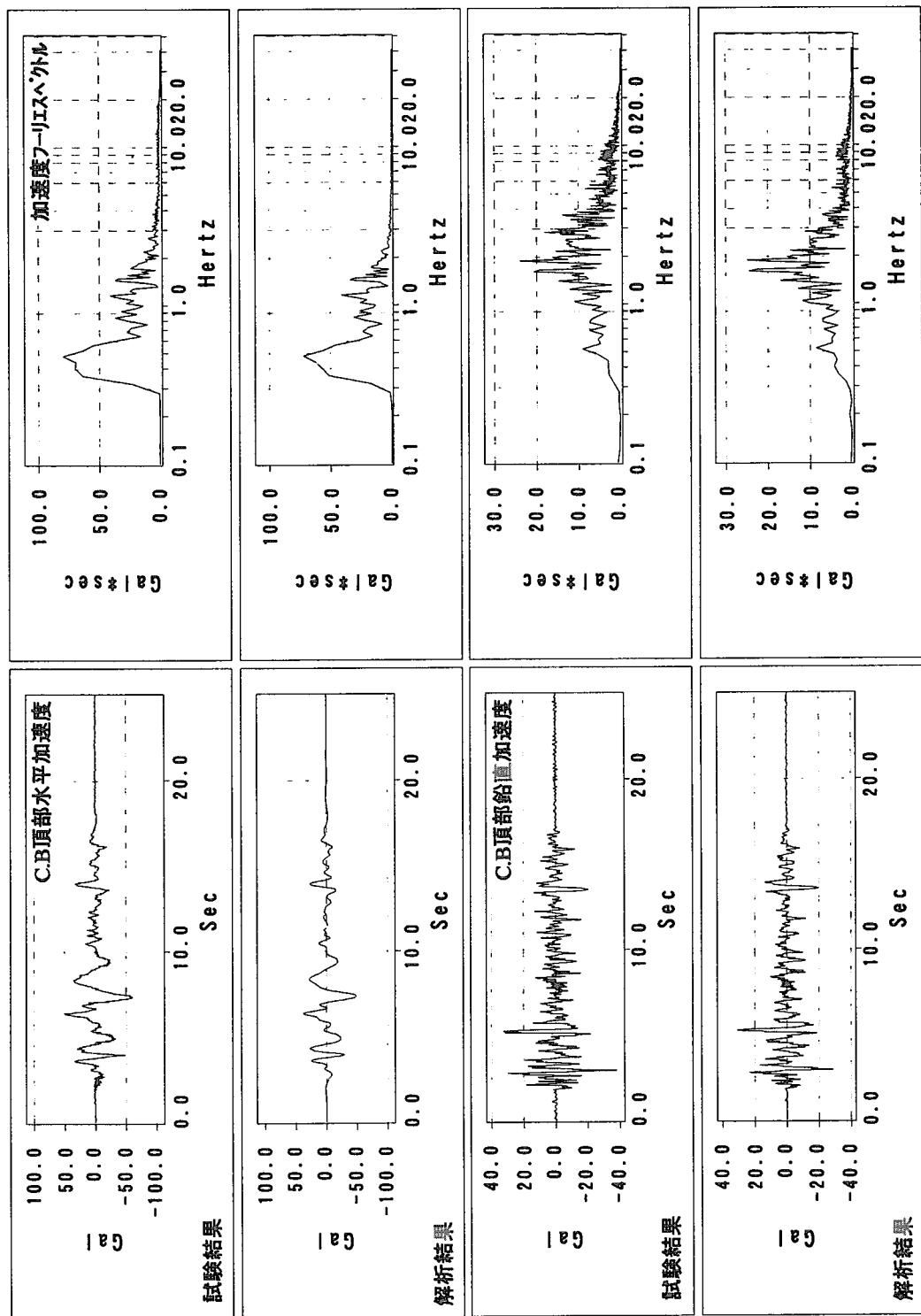


図6.5(a) 3次元免震システム・ダンパーあり振動台試験シミュレーション解析結果(ELCENTRO波加速度応答)

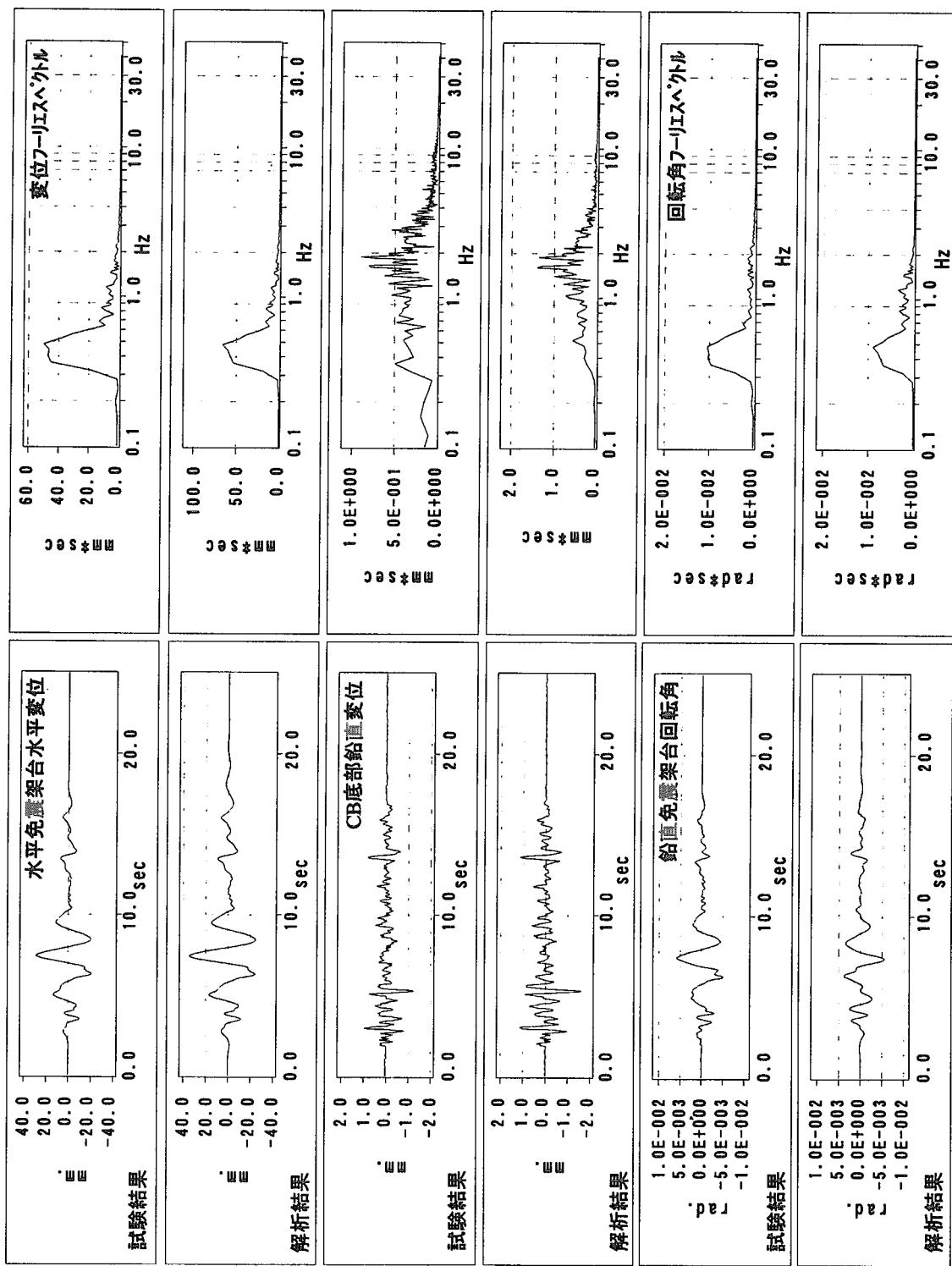


図6.5(b) 三次元免震システム・ダンバーあり振動台試験シミュレーション解析結果(ELCNTR0対応位応答)

表6.3 パラメトリック解析設定条件一覧

	固有振動数(Hz)					
	1.0	1.3	1.5	2.0	3.0	4.0
減衰定数	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

入力地震波: EQ326-FL, FM80, KOBE, EL CENTRO, HACHINOHE

表6.4 (a) パラメトリック解析結果一覧(最大鉛直加速度および応答倍率)

入力地震波	減衰定数	1Hz		1.25Hz		1.5Hz		2Hz		3Hz		4Hz	
		最大加速度(Gal)	応答倍率										
EQ326-FL	0.2	11.30	0.15	14.05	0.19	17.91	0.24	34.26	0.46	57.38	0.77	82.94	1.11
	0.3	11.87	0.16	14.43	0.19	18.81	0.25	29.75	0.40	49.80	0.67	70.66	0.95
	0.4	12.87	0.17	15.87	0.21	19.65	0.26	26.95	0.36	47.40	0.64	68.26	0.92
	0.5	13.89	0.19	16.91	0.23	20.06	0.27	26.28	0.35	47.06	0.63	68.64	0.92
FM80	0.2	35.90	0.61	37.64	0.63	49.59	0.84	60.96	1.03	91.68	1.55	68.37	1.15
	0.3	32.81	0.55	35.65	0.60	42.10	0.71	57.10	0.96	76.47	1.29	60.58	1.02
	0.4	30.78	0.52	36.21	0.61	40.56	0.68	53.50	0.90	68.44	1.15	57.70	0.97
	0.5	31.97	0.54	37.26	0.63	40.55	0.68	50.64	0.85	63.96	1.08	58.99	0.99
KOBE	0.2	127.15	1.12	139.03	1.22	133.59	1.17	122.70	1.08	147.79	1.30	218.69	1.92
	0.3	111.73	0.98	122.19	1.07	116.37	1.02	98.26	0.86	129.82	1.14	177.39	1.56
	0.4	103.22	0.91	111.96	0.98	108.38	0.95	98.74	0.87	118.67	1.04	152.20	1.34
	0.5	98.26	0.86	105.39	0.92	104.08	0.91	98.00	0.86	112.04	0.98	136.11	1.19
EL CENTRO	0.2	11.20	0.17	16.50	0.25	25.90	0.40	35.20	0.54	43.10	0.66	58.30	0.89
	0.3	12.50	0.19	16.70	0.26	23.60	0.36	32.40	0.50	37.30	0.57	54.70	0.84
	0.4	14.00	0.21	17.70	0.27	23.30	0.36	30.40	0.46	35.50	0.54	54.20	0.83
	0.5	15.40	0.24	18.90	0.29	23.20	0.35	29.30	0.45	38.80	0.59	55.20	0.84
HACHINOHE	0.2	25.89	0.78	30.58	0.92	32.00	0.96	34.56	1.04	42.06	1.26	63.40	1.90
	0.3	22.76	0.68	26.38	0.79	26.60	0.80	28.97	0.87	38.89	1.17	50.83	1.53
	0.4	21.07	0.63	24.01	0.72	24.60	0.74	27.13	0.81	37.47	1.13	46.69	1.40
	0.5	19.92	0.60	22.64	0.68	23.36	0.70	27.41	0.82	37.17	1.12	44.35	1.33

入力地震波	減衰定数	最大回転角				最大回転角	最大回転角	最大回転角	(×10 ⁻³ rad)
		1Hz	1.25Hz	1.5Hz	2Hz				
EQ326-FL	0.2	1.090	0.740	0.540	0.451	0.408	0.364	0.324	0.291
	0.3	0.990	0.680	0.500	0.406	0.366	0.324	0.283	0.263
	0.4	0.900	0.630	0.460	0.367	0.331	0.291	0.250	0.230
	0.5	0.820	0.580	0.430	0.334	0.302	0.263	0.220	0.200
	0.2	21.900	18.100	14.500	8.740	3.370	1.680	1.580	1.550
FM80	0.3	20.500	16.600	13.000	7.850	3.200	1.580	1.550	1.530
	0.4	19.100	15.300	11.900	7.170	3.040	1.550	1.520	1.500
	0.5	17.900	14.300	11.000	6.640	2.900	1.530	1.500	1.480
	0.2	19.300	16.900	14.300	9.480	3.390	2.090	2.090	2.090
	0.3	17.400	14.900	12.300	7.990	3.280	1.910	1.910	1.910
KOBE	0.4	15.800	13.300	10.800	6.960	3.130	1.790	1.790	1.790
	0.5	14.400	12.000	9.650	6.180	2.970	1.690	1.690	1.690
	0.2	13.630	12.880	10.450	6.430	2.370	1.380	1.380	1.380
	0.3	12.600	11.960	9.810	6.050	2.400	1.350	1.350	1.350
	0.4	11.720	11.130	9.210	5.740	2.410	1.330	1.330	1.330
EL CENTRO	0.5	10.950	10.370	8.670	5.490	2.390	1.310	1.310	1.310
	0.2	16.710	14.980	11.480	6.100	2.430	1.270	1.270	1.270
	0.3	15.300	13.670	10.660	5.870	2.370	1.260	1.260	1.260
	0.4	14.110	12.580	9.960	5.650	2.330	1.250	1.250	1.250
	0.5	13.110	11.650	9.350	5.450	2.290	1.240	1.240	1.240

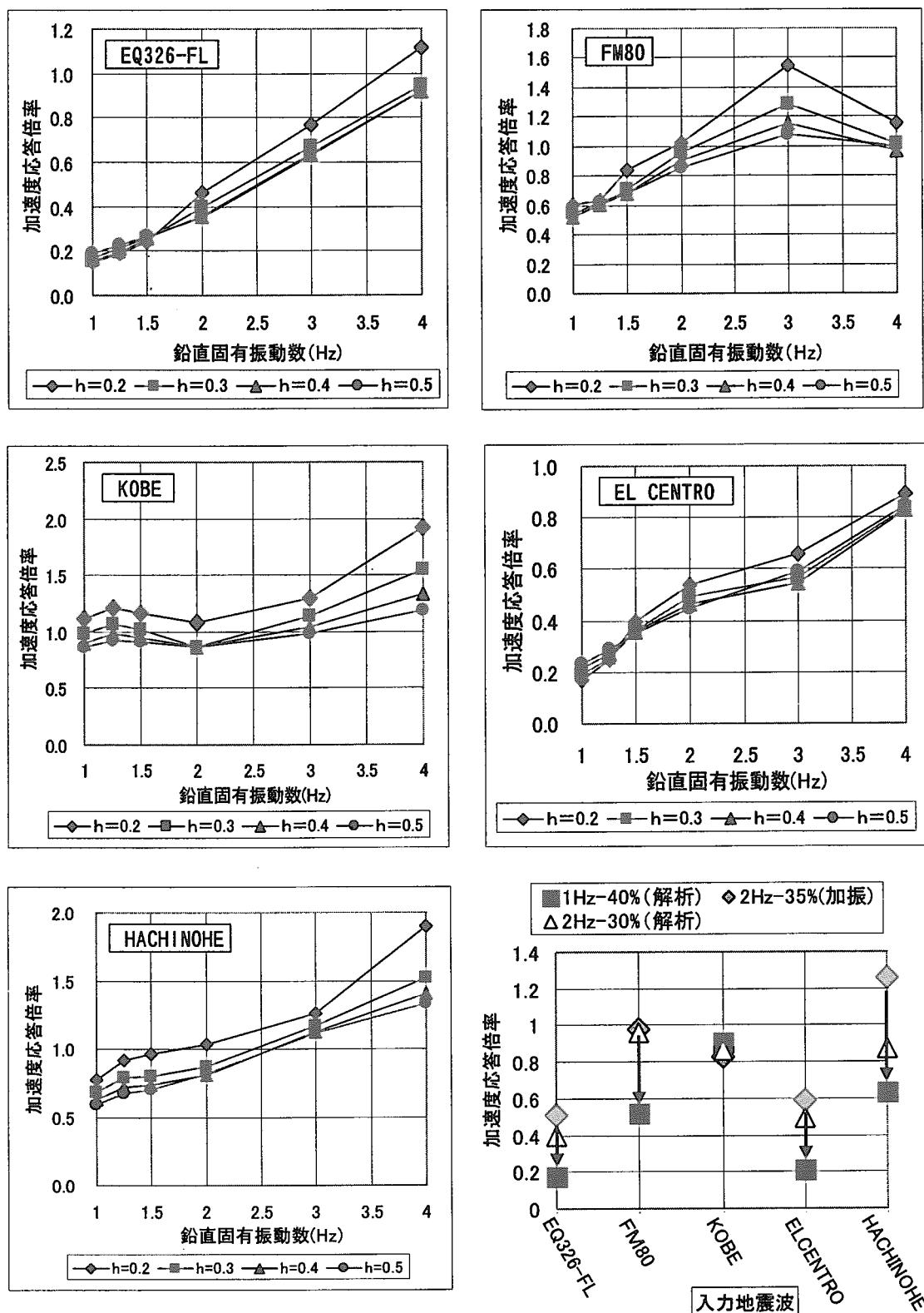


図6.6 鉛直固有振動数と加速度応答倍率

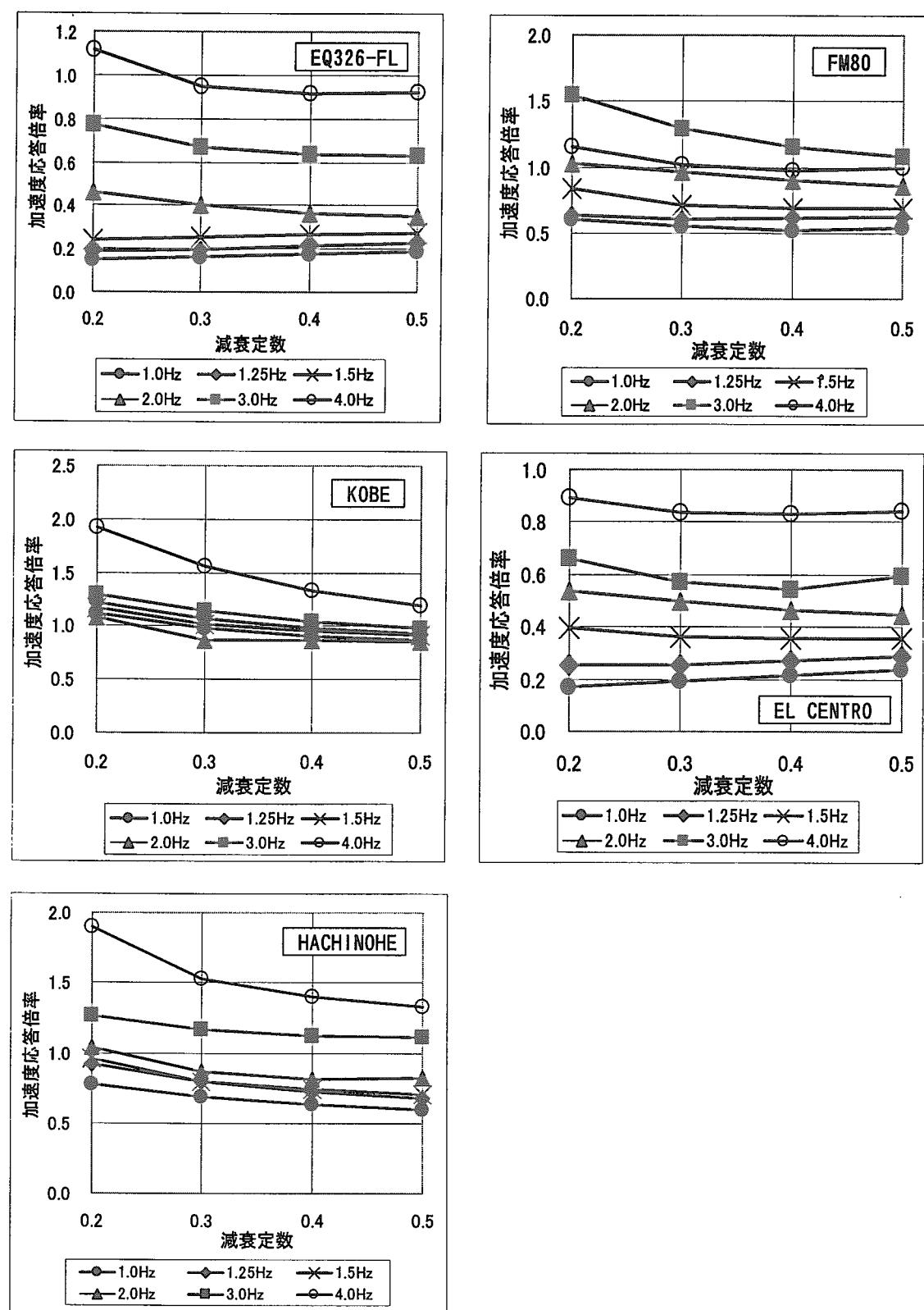


図6.7 減衰定数と加速度応答倍率

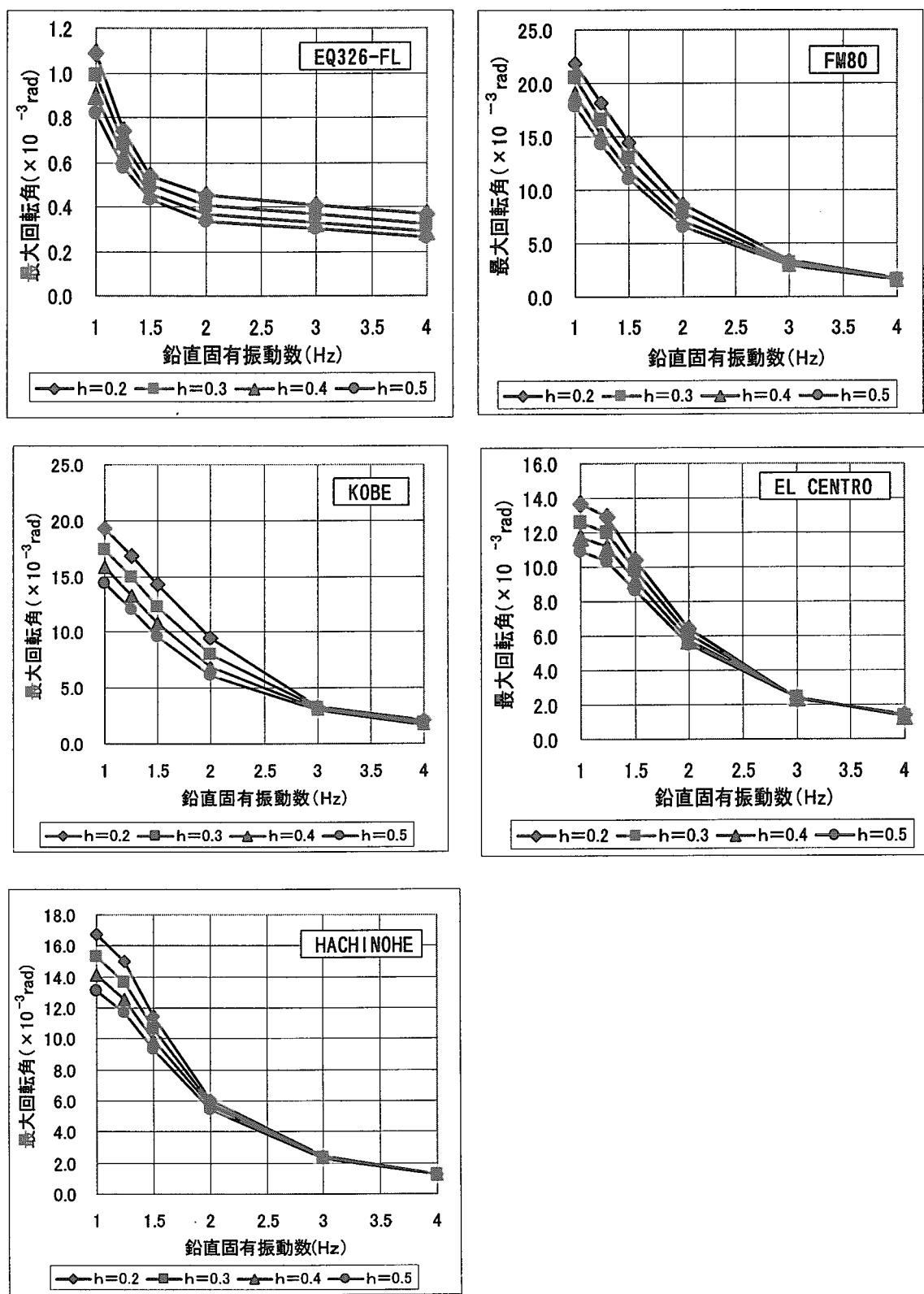


図6.8 固有振動数と最大回転角(ロッキング)

7. まとめ

本研究では、多段積層ゴムおよびコイルばねを用いた3次元機器免震試験システムについて、特性試験、正弦波パラメトリック加振、地震波加振および地震応答解析を実施し、同システムの振動特性、免震効果および地震応答性状について検討した。それらの結果から得られた知見を以下に纏める。

- (1) 特性試験結果から、3次元免震システムの主要な振動モードは、水平1次モード(0.4Hz: 水平免震架台の並進モードに、鉛直免震架台を回転中心とするロッキングが加わったモード)、水平2次モード(1.45Hz: CB中央近傍を回転中心とする剛体ロッキングモード)、鉛直1次モード(2Hz: CBの剛体的な並進モード)であることがわかった。また、3次元免震システムの水平1次モードに対する減衰定数は、ダンパーがない場合は約0.045、ダンパーがある場合は0.23、鉛直1次モードに対する減衰定数はそれぞれ0.02および0.3であった。以上の各振動特性は設計仕様とほぼ一致した。
- (2) 水平方向と鉛直方向の入力波の振動数比、振幅比、位相差の組み合わせをパラメータとする正弦波加振により、ダンパーがない場合、水平2次および鉛直1次モードの共振領域において連成振動の影響により水平加速度応答が若干増幅する傾向が見られたが、パラメトリック共振のような不安定な振動現象は発生しないことを確認した。また、ダンパーがある場合は、免震系の高次モードの応答が十分抑制され、連成振動の影響は発生しなかった。
- (3) 地震波加振結果から、3次元免震システムは、ダンパーがない場合ロッキング応答により水平免震システムよりも水平加速度応答が増幅する傾向が見られた。また、鉛直方向の応答は、水平免震システムよりも加速度応答は低減するものの、鉛直1次モードが卓越し、設計用模擬地震波や KOBE 波等低周波数領域が卓越する地震波では加速度応答が大幅に増幅することがわかった。一方、ダンパーがある場合は、鉛直ダンパーによりロッキング応答が抑制され、各地震波に対して水平方向の加速度応答倍率は概ね0.5以下となり、十分な加速度低減効果が得られた。鉛直方向については、1次モードの応答が大幅に低減し、加速度応答倍率は概ね1以下となった。また、ダンパーにより変位およびロッキング応答も大幅に低減した。免震装置にダンパーを適切に配置することで、種々の周波数特性の地震波に対して加速度応答の増幅を抑制することが可能であるとの見通しが得られた。
- (4) 3次元免震システムの振動モデルとして、多段積層ゴムおよびコイルばねをそれぞれ水平ばね、鉛直ばねおよび回転ばねで、CBを5質点に分割して梁要素とばね要素でモデル化した2次元SRモデルを作成した。固有値解析の結果、固有振動数および振動モード形は特性試験結果と良く対応することを確認した。
- (5) 上記振動モデルを用いて、地震波加振結果をシミュレーションした結果、ダンパーがない場合に高次モードの影響等により、加速度時刻歴の包絡形状に差が生じるケースがあったが、全体的に解析結果と加振結果の応答性状は良く一致し、振動モデルの妥当性が確認された。

(6) 特性が異なる地震波 5 波について、鉛直固有振動数(1Hz～4Hz)と減衰定数(20%～50%)をパラメータとする地震応答解析を行った結果、加速度低減効果は固有振動数は 1 Hz の場合に最大となり、減衰定数はロッキング応答の抑制を考慮すると 30%～40%が適当であるとの結論が得られた。固有振動数 1 Hz、減衰定数 40%とした場合、現行の 3 次元免震システム(固有振動数 2Hz、減衰定数 35%)よりも 50%程度加速度応答が低減するとの結果が得られた。また、固有振動数 2 Hz 以下では、ロッキング応答が増大する傾向があり、固有振動数を 1 Hz とした場合、ロッキング抑制措置を講じる必要があることがわかった。

なお、本 3 次元免震試験システムを改造して、鉛直固有振動数 1.2Hz、減衰定数 30%とし、ロッキング防止装置を付加した試験システムについて、平成 12 年度に同様な振動台試験を実施し、加速度低減効果の向上とロッキング抑制効果を確認した。それらの結果については別途報告する。

参考文献

第1章

- (1.1) K.Ebisawa and T.Uga : Evaluation methodology for seismic base isolation of nuclear equipments ,Nuclear Engineering and Design, Vol.142,1993.
- (1.2) 蛭沢勝三、亀岡裕行、宇賀丈雄：機器免震有効性評価コード EBISA の開発、原子力学
会秋の大会 D76、1994 年
- (1.3) K.Ebisawa et al. : Influence of various parameters on effectiveness of seismic base
isolation of nuclear equipments, SMIRT13 ,KB08, 1995.
- (1.4) 蛭沢勝三：機器免震の経済効性評価法とその応用、JCOSSAR'95、1995 年
- (1.5) 山田博幸他：機器免震試験システムの力学及び震動特性、第 25 回地震工学研究発表会講
演論文集、1999 年

第2章

- (2.1) United States Nuclear Regulatory Commission : NUREG-1150, 1989
- (2.2) 山田博幸他：機器免震化による地震リスクの低減効果の検討・その(2)免震対象機器の
同定、日本原子力学会秋の大会H48、1998 年
- (2.3) 三菱電機(株) : THE AKO WORKS.

第4章

- (4.1) 原文雄：立て形構造物の水平・上下地震動に対する振動応答解析(第 1 報)、日本機械学会
論文集,50 卷,458 号 - C、1984 年
- (4.2) 原文雄：立て形構造物の水平・上下地震動に対する振動応答解析(第 2 報)、日本機械学会
論文集,53 卷,486 号 - C、1987 年

第5章

- (5.1) K Irikura : Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function
Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp. , 1996
- (5.2) D.M.Boore : Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on
seismological models of the radiation spectra, Bull. Seismo. Soc. Am., Vol. 73, No 6,
1983
- (5.3) 入倉孝次郎他：経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良、日本地震学会講演予
稿集、1997 年度秋季大会

第6章

- (6.1) 蛭沢勝三他：機器免震有効性評価法と評価コード EBISA、R I S T ニュース、No.20,
1994 年

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
压力、応力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	N/m^2
工率、放射束	ジュール	J	$N \cdot m$
電気量、電荷	ワット	W	J/s
電位、電圧、起電力	クロン	C	$A \cdot s$
静電容量	ボルト	V	W/A
電気抵抗	ファラード	F	C/V
コンダクタンス	オーム	Ω	V/A
磁束密度	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバー	Wb	$V \cdot s$
インダクタンス	テスラ	T	Wb/m^2
セルシウス温度	ヘンリイ	H	Wb/A
光束度	セルシウス度	$^{\circ}C$	
放熱能	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
吸収線量	ルクス	lx	lm/m^2
線量当量	ベクレル	Bq	s^{-1}
	グレイ	Gy	J/kg
	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力 N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf	圧 MPa(=10 bar)			
			atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)	
1	0.101972	0.224809	1	9.86923	7.50062×10^3	145.038
9.80665	1	2.20462	0.0980665	1	735.559	14.2233
4.44822	0.453592	1	0.101325	1.03323	760	14.6959
			1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1.93368×10^{-2}
			6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa} \cdot \text{s} (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)} (\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
								= 4.184 J(熱化学)	
1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{-18}			
9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{-19}			
3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{26}			
4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{-19}			
1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}			
1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}			
1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1			

放射能	Bq	Ci	Gy	rad	照 射 線 量	
					C/kg	R
1	2.70270×10^{-11}	1	100	1	1	3876
3.7×10^{10}	1	0.01	1		2.58×10^{-4}	1

照 射 線 量	C/kg		R
	1	1	
			1

(86年12月26日現在)

