

JAERI-Tech
2000-045



JP0050685



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
の特性試験および地震応答解析

2000年7月

堤 英明・山田 博幸・蛇沢 勝三・柴田 勝之

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.

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特性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・蛯沢 勝三・柴田 勝之

(2000 年 5 月 22 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、これまでに、いくつかの地震動により顕著な免震効果が確認されている。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、振動台試験により種々の大規模地震動に対する 3 次元的連成挙動と免震効果を確認した後、テストベッドに設置して地震応答を観測する予定である。

本報告書は、多段積層ゴムおよびコイルばねを用いた機器免震システムの仕様、静的および動的特性、それらに基づいて作成した解析モデル、振動台試験の加振条件や加振性能を確認するために実施した予備振動台試験および地震応答解析についてまとめたものである。

Characteristics 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 and Katsuyuki SHIBATA

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

(Received May 22 ,2000)

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 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 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, i.e., 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 kinds of base isolation test systems with different characteristic 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. Another system which consists of multi-layer-rubber-bearings and coil springs has been investigated three-dimensional dynamic behavior and effect of base isolation against various large earthquake motions by shaking table test.

This report describes the design specification of the base isolation system which consists of multi-layer-rubber-bearings and coil springs, static and dynamic characteristics, analysis model based on the characteristics, results of shaking table test and the dynamic response analysis.

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

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 設計仕様および全体構成	2
2.2 構成機器の仕様	3
3. 特性試験および振動モデル	9
3.1 特性試験の概要	9
3.2 特性試験結果	13
3.3 振動モデルおよび固有値解析	21
4. 予備振動台試験	24
4.1 予備振動台試験概要	24
4.2 予備振動台試験結果	24
4.3 予備振動台試験の模擬地震応答解析	34
5. 種々の特性を有する地震動に対する応答解析	44
5.1 解析ケースおよび解析条件	44
5.2 地震応答解析結果	55
5.3 解析結果まとめ	105
6. まとめ	106
謝辞	107
参考文献	107

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 and Analysis Model -----	9
3.1 Procedure of Static Loading and Free vibration test -----	9
3.2 Test Results -----	13
3.3 Analysis Model and Eigenvalue -----	21
4. Shaking Table Test -----	24
4.1 Test Method -----	24
4.2 Test Results -----	24
4.3 Simulation of Shaking Table Test -----	34
5. Dynamic Response Analysis of Various Earthquake Motion -----	44
5.1 Analysis Cases and Conditions -----	44
5.2 Results of Analysis and Discussion -----	55
5.3 Summary -----	105
6. Conclusion -----	106
Acknowledgements -----	107
References -----	107

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「ボ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、前者のシステム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、振動台試験により、種々の特性を持つ地震動に対する免震効果および3次元連成挙動を確認した後、大洗研究所テストベッドに設置して自然地震動下での観測を行う計画である。

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、特性試験結果、予備振動台試験結果および地震応答解析結果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、振動台による正弦波掃引試験等の特性試験の概要とそれらの結果に基づいて作成した振動モデルについて述べる。第4章では、免震システムのおおよその応答性状と振動台の加振条件・加振精度を確認するために実施した予備振動台試験結果とそれらを模擬した地震応答解析について述べる。また、第5章では、種々の特性を有する地震動に対する地震応答解析結果について述べる。なお、この解析は、本免震システムの免震効果や3次元連成挙動等の把握を目的とする振動台試験を模擬したもので、振動台試験の計画や実施に活用するために行った。

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製試験体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 設計仕様および全体構成

本3次元機器免震試験システムの設計仕様は、水平固有振動数0.5Hz、鉛直固有振動数2.0Hz、水平方向減衰比0.2、鉛直方向減衰比0.35とし、これらの条件を得るのに適した特性が得られる水平および鉛直免震装置を選定した。

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鉛直固有振動数を小さくすると、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、有効な鉛直固有振動数の設定範囲は1Hz～4Hzと考えられる。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」では、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、本免震システムでは、免震効果や挙動を比較検討するために設定範囲の中間値である2Hzとした。

免震システムの全体概要を図2.1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=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) 模擬機器(機器を想定したコンクリートブロック)

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オイルダンパを、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を装着する仕組みになっている。地震動に対する加速度低減効果は、免震装置と減衰装置を併せて得られるように設計されているが、本システムは、最終的に中小地震動の発生頻度が高い大洗研究所内に設置したテストベッド上で、自然地震動に対する免震システムの挙動を観測することを目的としていることから、減衰装置を着脱できる構造とした。

2.2 構成機器の仕様

各構成機器の詳細を図-2.2に示す。主な仕様は以下の通りである。

(1) 多段積層ゴム

水平免震装置は、市販されている多段積層ゴムの中から設計仕様に最も条件が近いものを選定した。選定した多段積層ゴムは、推奨荷重5tf用(MS055F20:ブリヂストン製)のもので、5tfの積載重量に対して約0.5Hzの固有振動数が得られる。水平免震装置の積載重量は、コンクリートブロック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、固有振動数は0.45Hzとなる。

また、多段積層ゴムの段数は5段で、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。ゴム材は、天然ゴム系の低減衰材とした。

(2) 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2重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 が設けられている。

(3) 水平方向オイルダンパ

水平方向のオイルダンパは、固有振動数0.45Hzに対して減衰比0.2になるものとし、以下のように仕様を設定した。

○減衰係数(オイルダンパ1台当たり): 13.2kgfsec/cm

○許容変位 : ±15cm

(4) 鉛直方向オイルダンパ

鉛直方向のオイルダンパは、固有振動数2.0Hzに対して減衰比0.35になるものとし、以下のように仕様を設定した。

○減衰係数(オイルダンパ1台当たり): 23.1kgfsec/cm

○許容変位 : ±5cm

(5) 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。多段積層ゴムと水平免震架台の間には、多段積層ゴムに曲げモーメントが伝達されない(多段積層ゴム設計条件)ように球面座が挿入されている。鉛直免震には、コンクリートブロック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、水平免震架台からコンクリートブロック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、ロッキングに対する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。

水平免震架台の最大変位(撓み)は、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し、2.8mm程度である。

(6) 模擬機器

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-2.3 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重要な選定条件となる。重量 100t 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。一方、40t 以下の中小規模の機器については、支持荷重と水平剛性のバランスから積層ゴムの適用が難しく、免震システムを検討する上での課題が多い。

そこで、本研究では、中規模クラスの機器を対象として模擬試験体の重量を 20 t 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、重量の調整が可能であること、製作および組立・解体が容易であること等を考慮し、幅 160cm × 奥行 160cm × 厚さ 32cm (重量 2.0t/体) のコンクリート製ブロックを 10 体重ね (高さ 3.2m)、それらを PC 鋼棒で締め付けて模擬試験体とした。

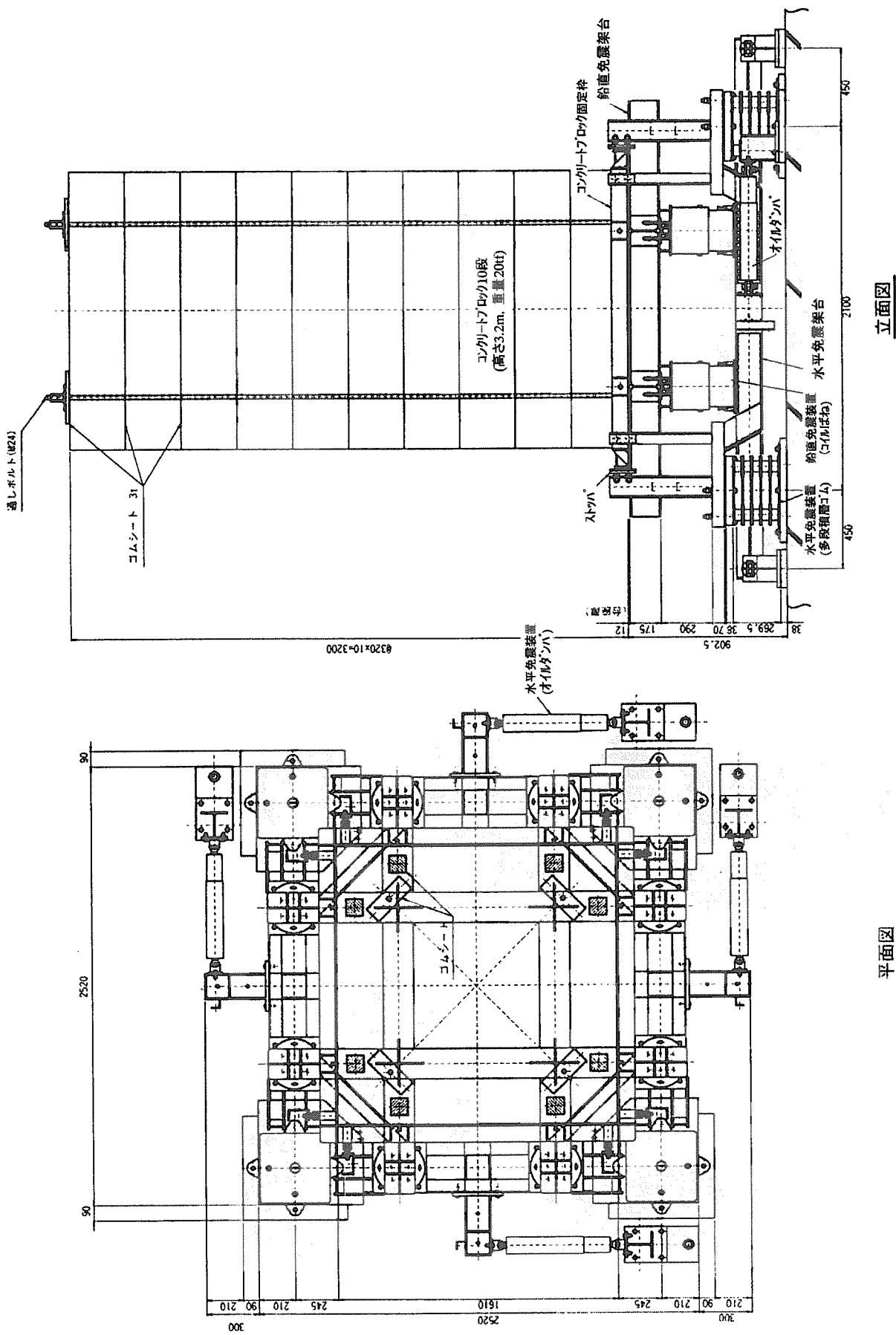
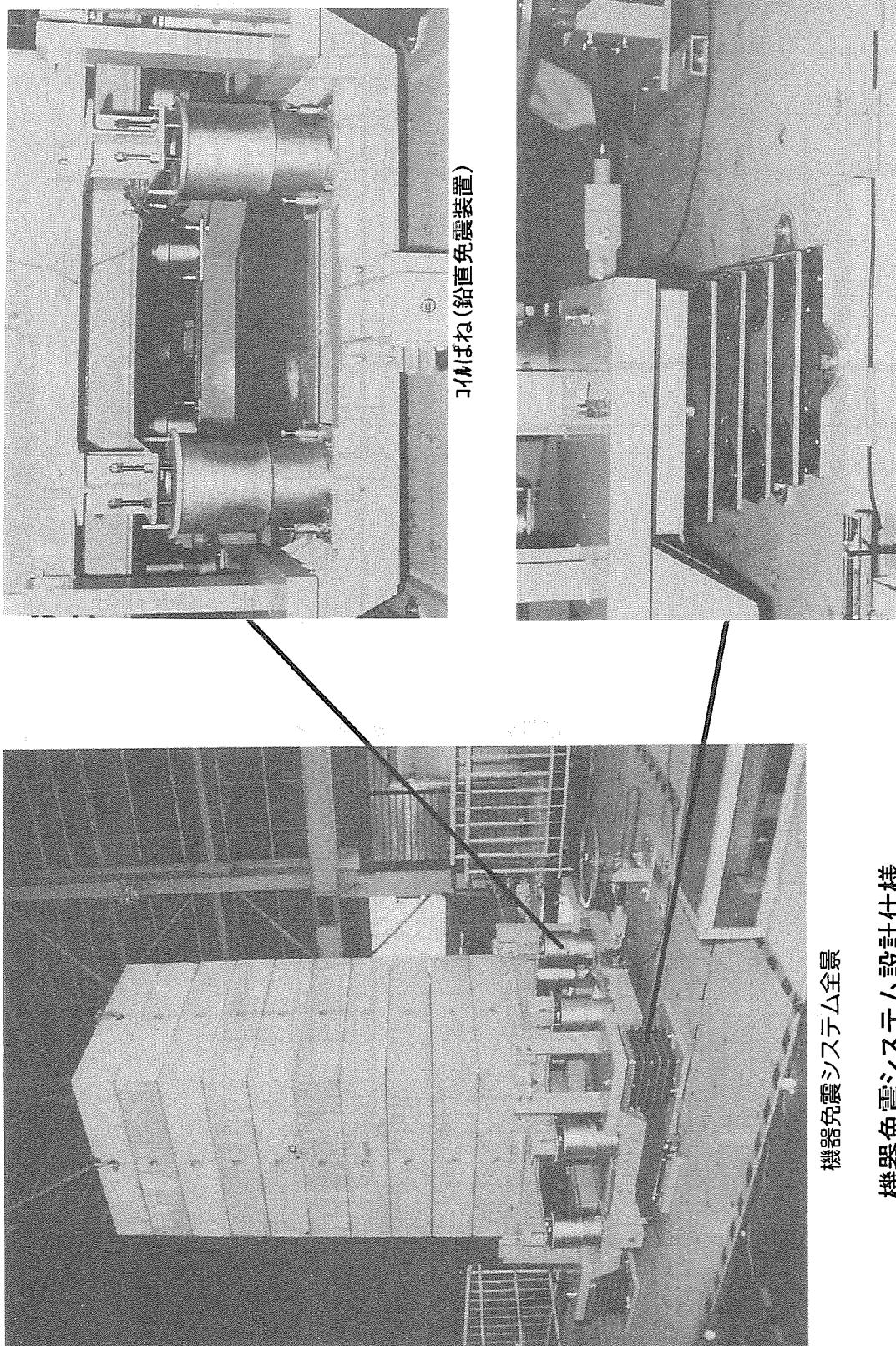
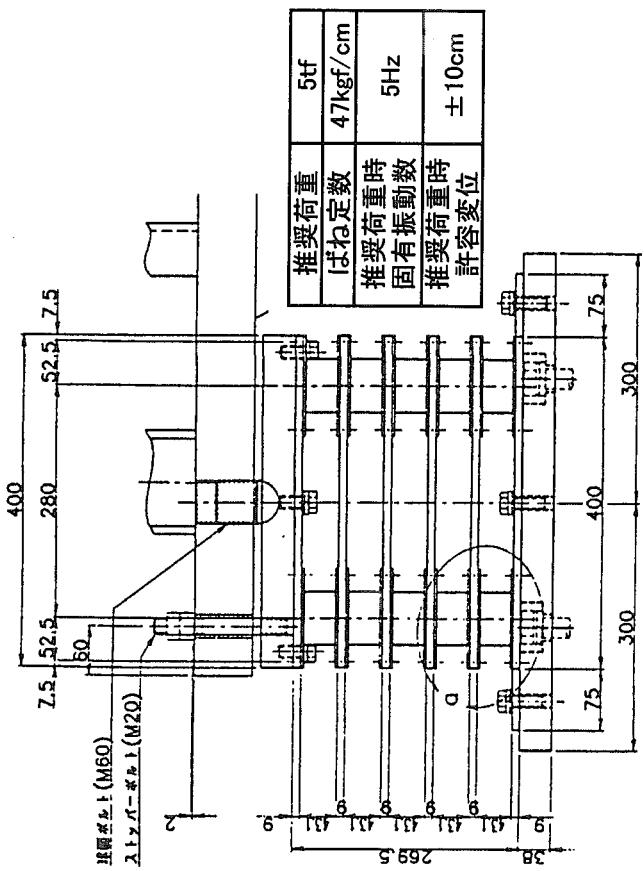


図-2.1 多段積層ゴム・コイルばねタイプ3次元機器免震システム

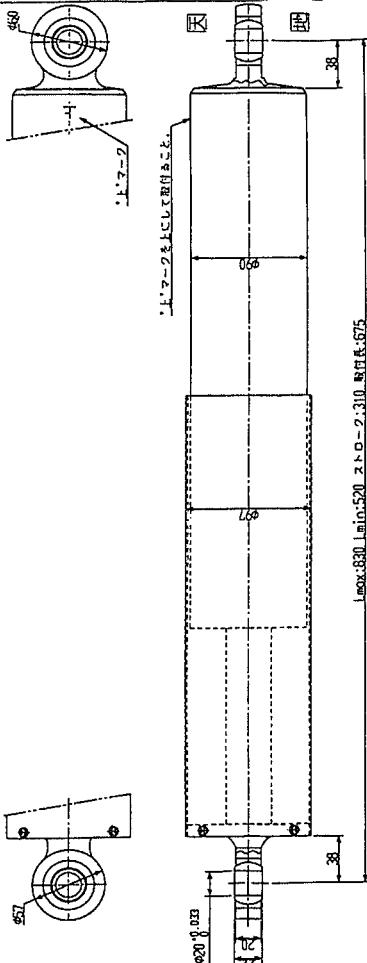


機器免震システム設計仕様		
	水平免震	鉛直免震
固有振動数	0.5Hz	2.0Hz
減衰比	0.2	0.35

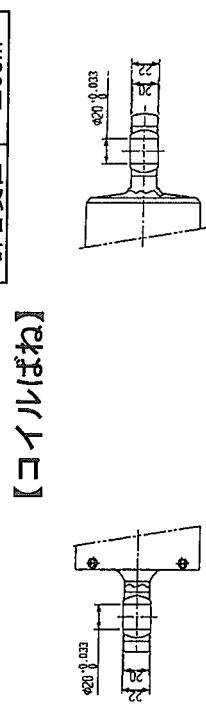
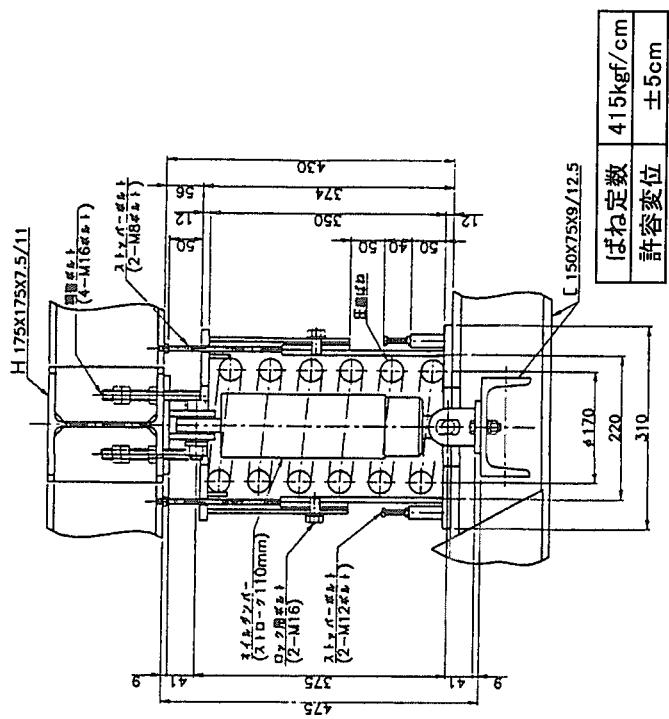
写真-2.1 多段積層ゴム・コイルばねタイプ3次元機器免震システム



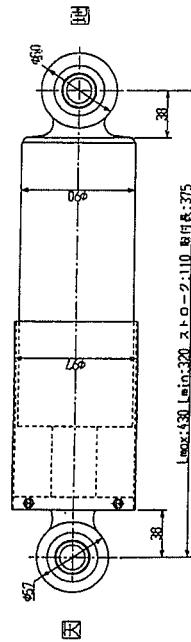
【多段積層ゴム】



【水平オイルダンパー】

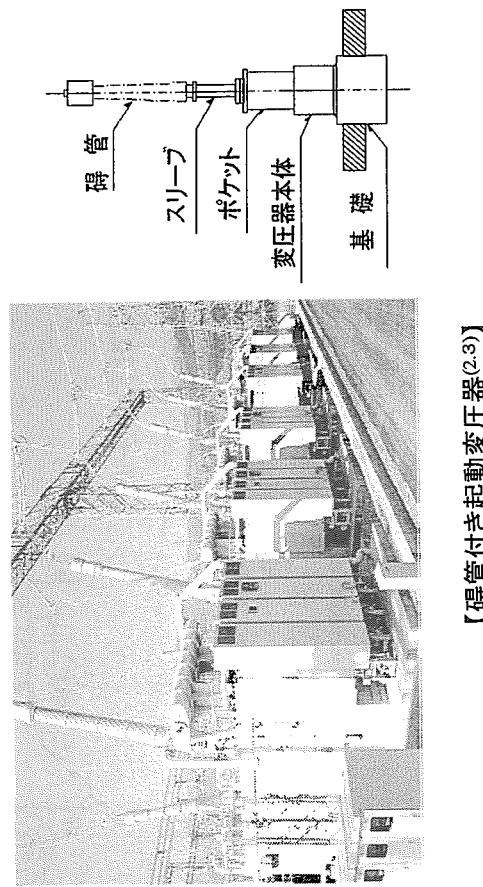
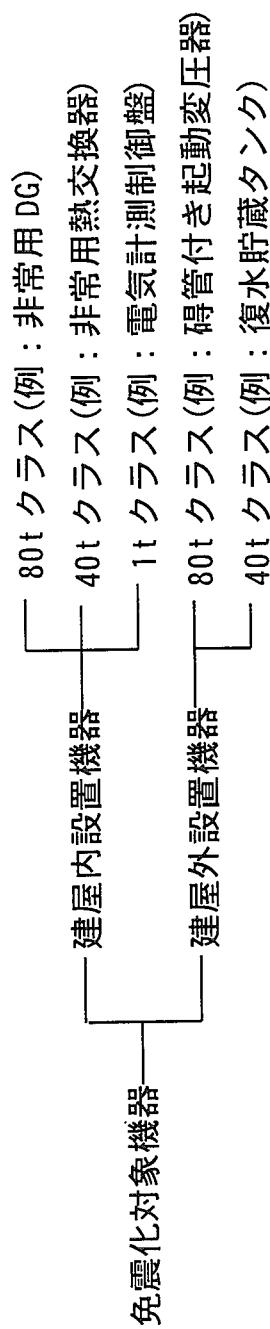


【コイルばね】

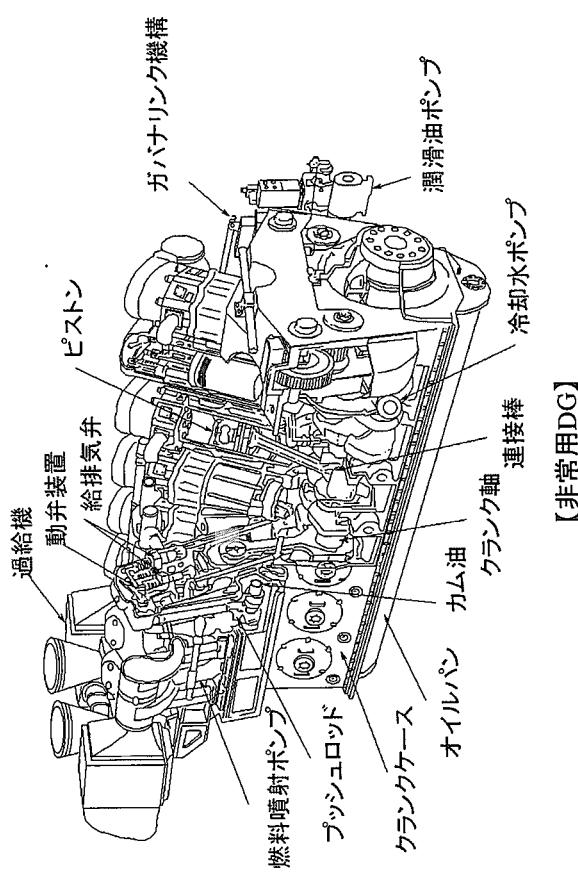


【鉛直オイルダンパー】

図-2.2 機器免震システム構成機器詳細



【碍管付き起動変圧器(2.3)】



【非常用DG】

図-2.3 免震化対象機器の分類

3. 特性試験および振動モデル

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、水平2方向(NS, EW)について静加力試験と自由振動試験を、また、それらの試験の実施が難しい鉛直方向については、振動台による正弦波掃引加振を行った。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に示すようにスクリュージャッキ(許容荷重 5t ϕ)で NS 方向と EW 方向に水平免震架台を押し引きして荷重・変形関係を計測し、多段積層ゴムの復元力特性を求めた。最大変位で±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・変形関係は、多段積層ゴム4台の復元力特性を示す。

なお、鉛直方向については、コイルばねの復元力特性がほとんど線形で、ばらつきが少ないと、鉛直方向に精度良く加力することが難しいことなどの理由により省略した。

(2) 水平方向自由振動試験

自由振動試験では、水平2方向に静加力試験で使用したスクリュージャッキで、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、図-3.2に示す位置で免震システム各部の加速度および水平変位を計測し、得られた変位時刻歴波形から固有振動数と減衰比を求めた。

なお、鉛直方向については、自由振動を発生させることが技術的に難しく、次に述べる正弦波掃引加振により精度良く固有振動数および減衰定数を同定できることから、自由振動試験を省略した。

(3) 鉛直方向正弦波掃引加振試験

鉛直方向正弦波掃引加振では、振動台により振動数を変化(0.8Hz～30Hz／0.1Hz ステップ)させながら、一定加速度振幅(10Gal～30Gal)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て鉛直方向の固有振動数や振動モードを同定した。

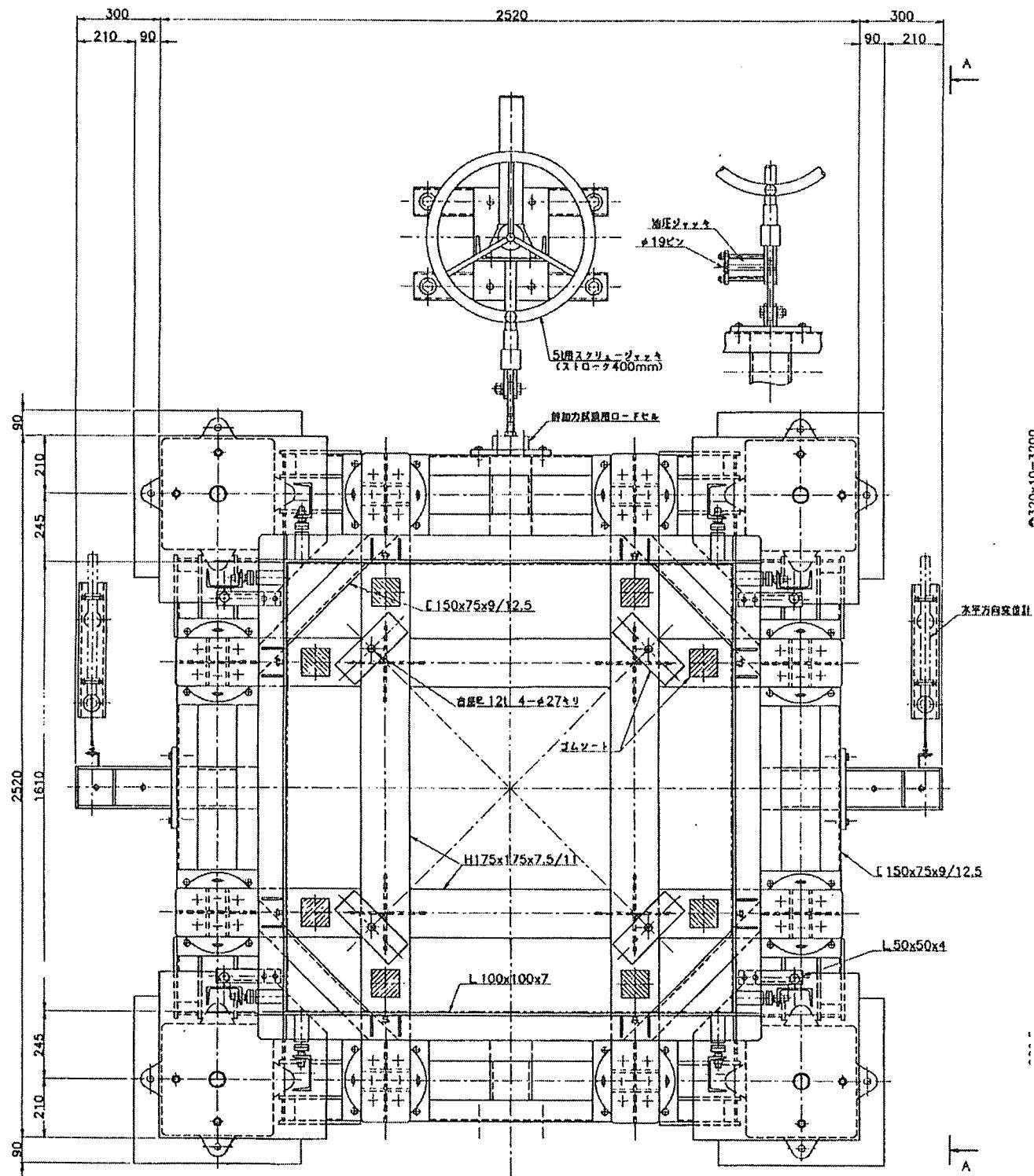


図-3.1(a) 静加力試験方法(平面図)

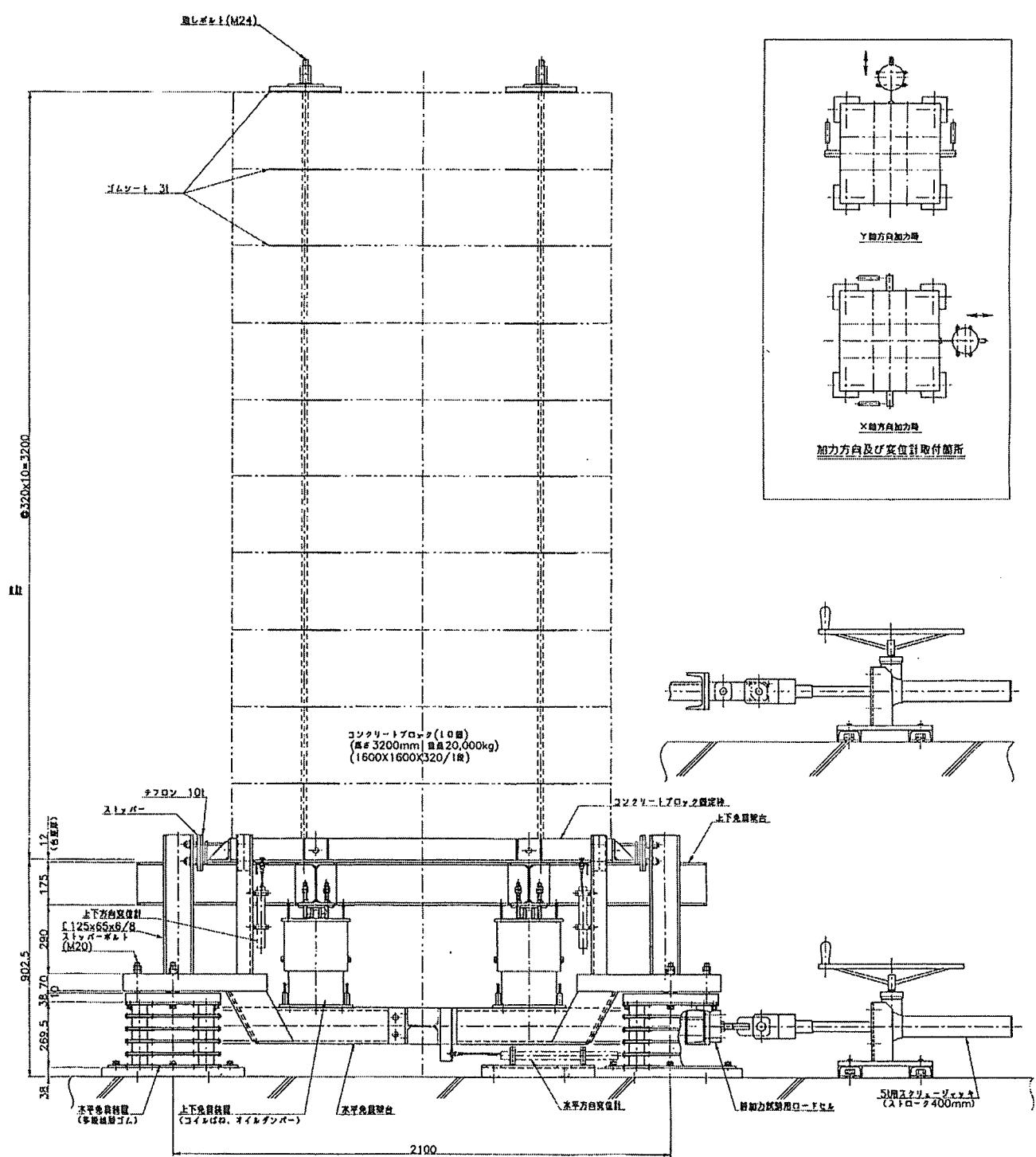


図-3.1(b) 静加力試験方法(立面図)

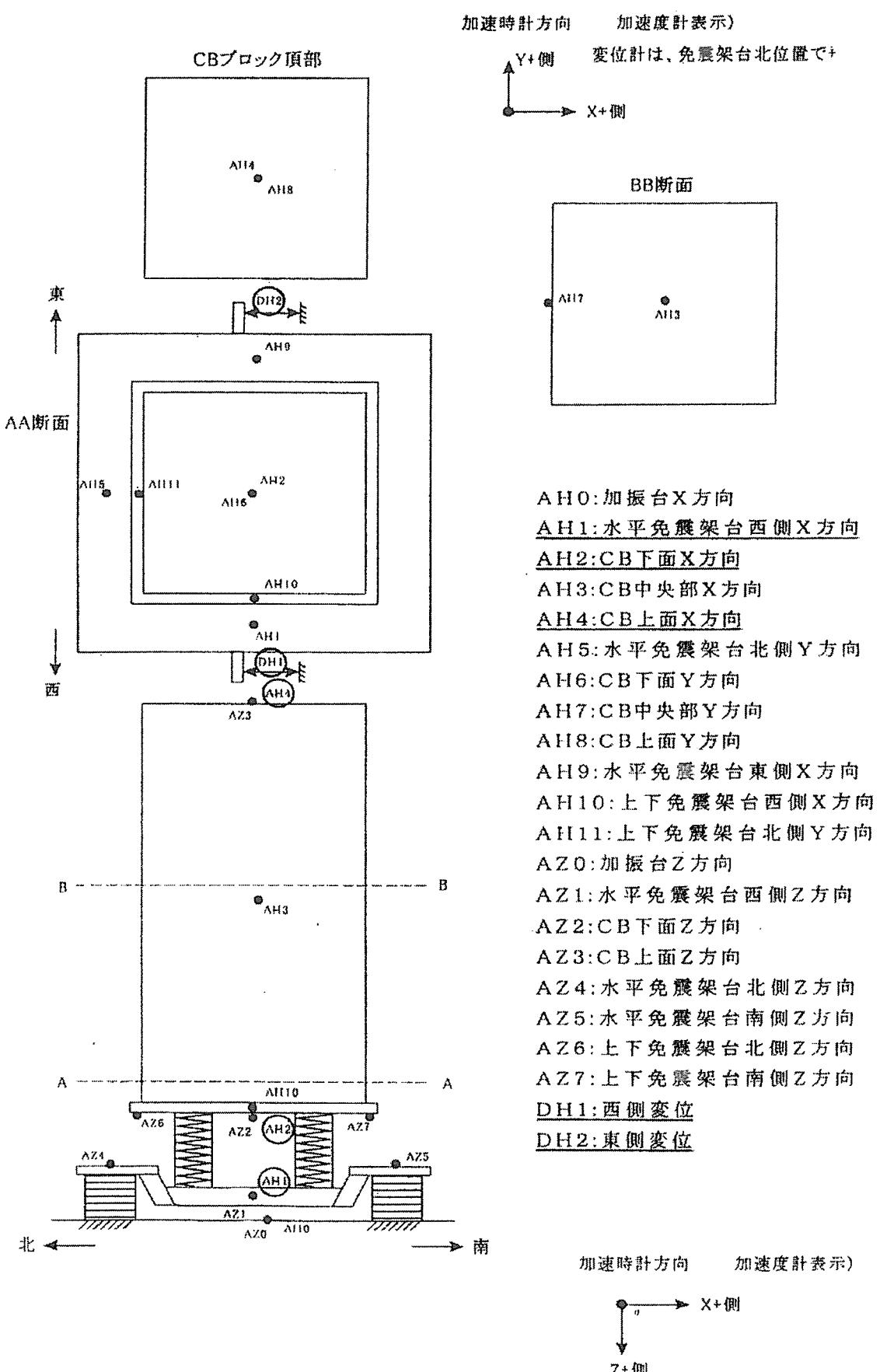


図-3.2 自由振動試験および振動台試験計測位置

3.2 特性試験結果

水平および鉛直方向の復元力および振動特性をまとめると以下の通りである。

(1) 水平方向復元力特性

静加力試験で得られた NS および EW 方向のはね定数を表-3.1 に、復元力特性を図-3.3 に示す。各図は、最大変位 $\pm 25\text{mm}$, $\pm 50\text{mm}$, $\pm 100\text{mm}$ 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) NS 方向と EW 方向は、ほぼ同一の復元力特性を有している。
- 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傾向にあり、ソフニングタイプの復元力特性を有している。また、若干の履歴を描いている。しかし、地震時の主要振動領域と考えられる変位 $10\text{mm} \sim 50\text{mm}$ 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。

(2) 水平方向振動特性

初期変位約 50mm の NS 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比および固有振動数(1 次固有振動モード)を図-3.4 に、コンクリートブロック上面、中央、下面の加速度時刻歴を図-3.5 に示す。また、EW 方向について同様の結果を図-3.6～図-3.7 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、波形データに 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、約 1.5Hz 前後の 2 次固有振動モード(ロッキング)の影響を除去した。

これらの結果から、水平方向の振動特性(固有振動数および減衰特性)について以下のようない見が得られた。

- 1) 変位時刻歴から水平方向 1 次モードの固有振動数は約 $0.39 \sim 0.4\text{Hz}$ である。固有振動数は、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。これは、静加力試験結果から得られた復元力特性の傾向と一致している。
- 2) 水平方向 1 次固有振動モードに対する減衰比は約 0.05 である。減衰比は、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剤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。
- 3) 固有振動数および減衰比は、NS 方向と EW 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。

4)コンクリートブロック頂部、中央部、底部の加速度時刻歴を比較すると、中央部では1次固有振動数で応答しているのに対して、頂部と底部では初期の応答において1.4～1.5Hzの逆位相の振動が発生している。したがって、中央付近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)が発生しており、その固有振動数は1.4～1.5Hzと推定される。

(3) 鉛直方向振動特性

正弦波掃引加振によるコンクリートブロック上面と下面の鉛直方向加速度応答倍率と位相関係を図-3.8に示す。これらの結果から、鉛直方向の振動特性について以下のような知見が得られた。

- 1)振動数2Hzにおいて顕著な共振が認められる。従って、鉛直方向の1次固有振動数は2Hzと同定される。また、2Hz以外の振動数では応答の増幅は見られない。
- 2)共振振動数2Hzにおける応答倍率は約30倍となっている。この結果から、鉛直方向の減衰定数は約0.017程度と推定される。
- 3)コンクリートブロックの下端と上端の応答倍率の差は2Hz付近では小さく、コンクリートブロックはほぼ剛体として運動している。

表-3.1 水平免震装置ばね定数(最大変形時:単位kgf/mm)

加力方向	水平免震装置最大変位				
	10mm	25mm	50mm	75mm	100mm
NS方向	19.4	18.2	17.0	16.0	14.7
EW方向	19.7	18.5	17.4	16.3	14.9

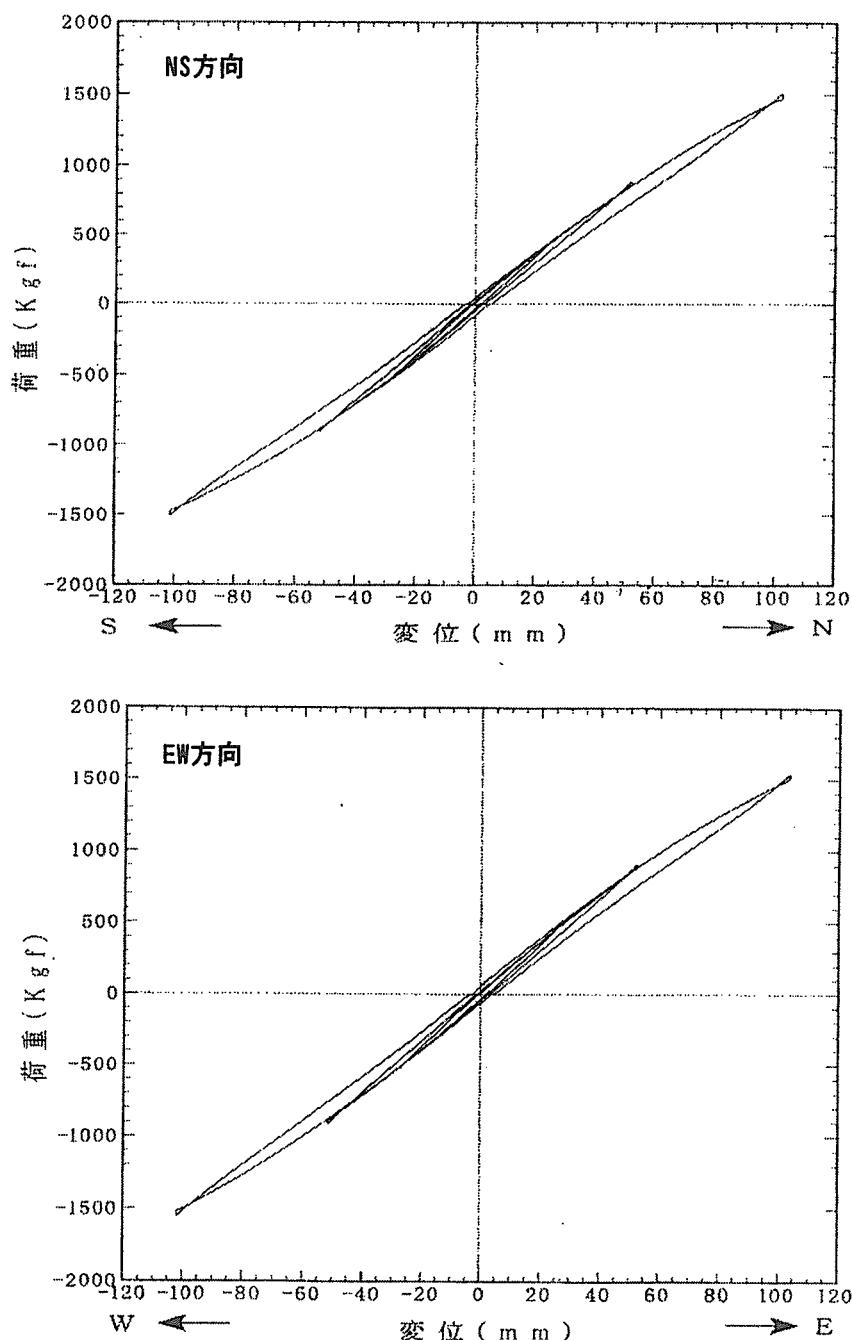


図-3.3 水平免震装置復元力特性(±25mm・±50mm・±100mm合成)

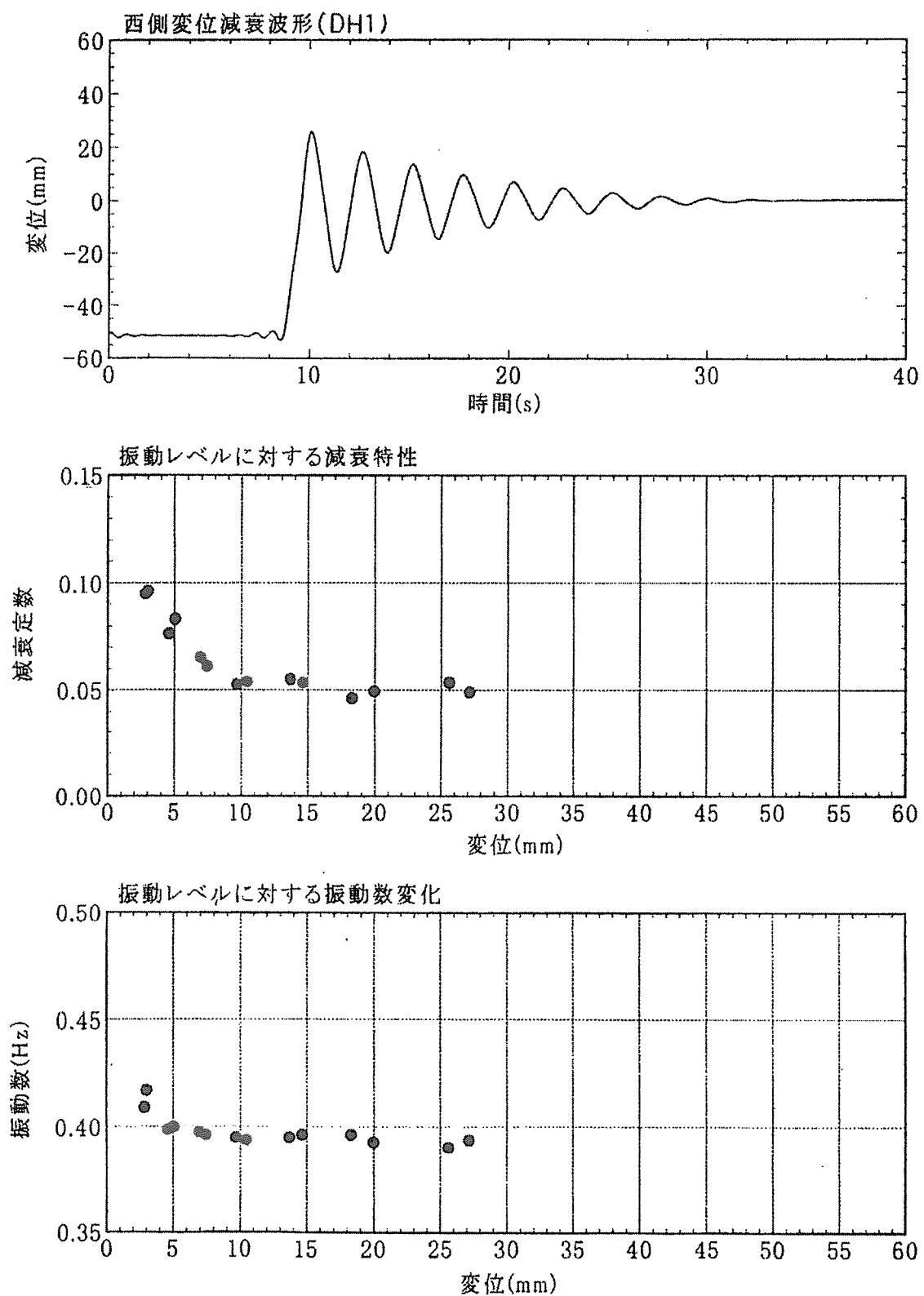


図-3.4 N S 方向減衰比および固有振動数(初期変位50mm)

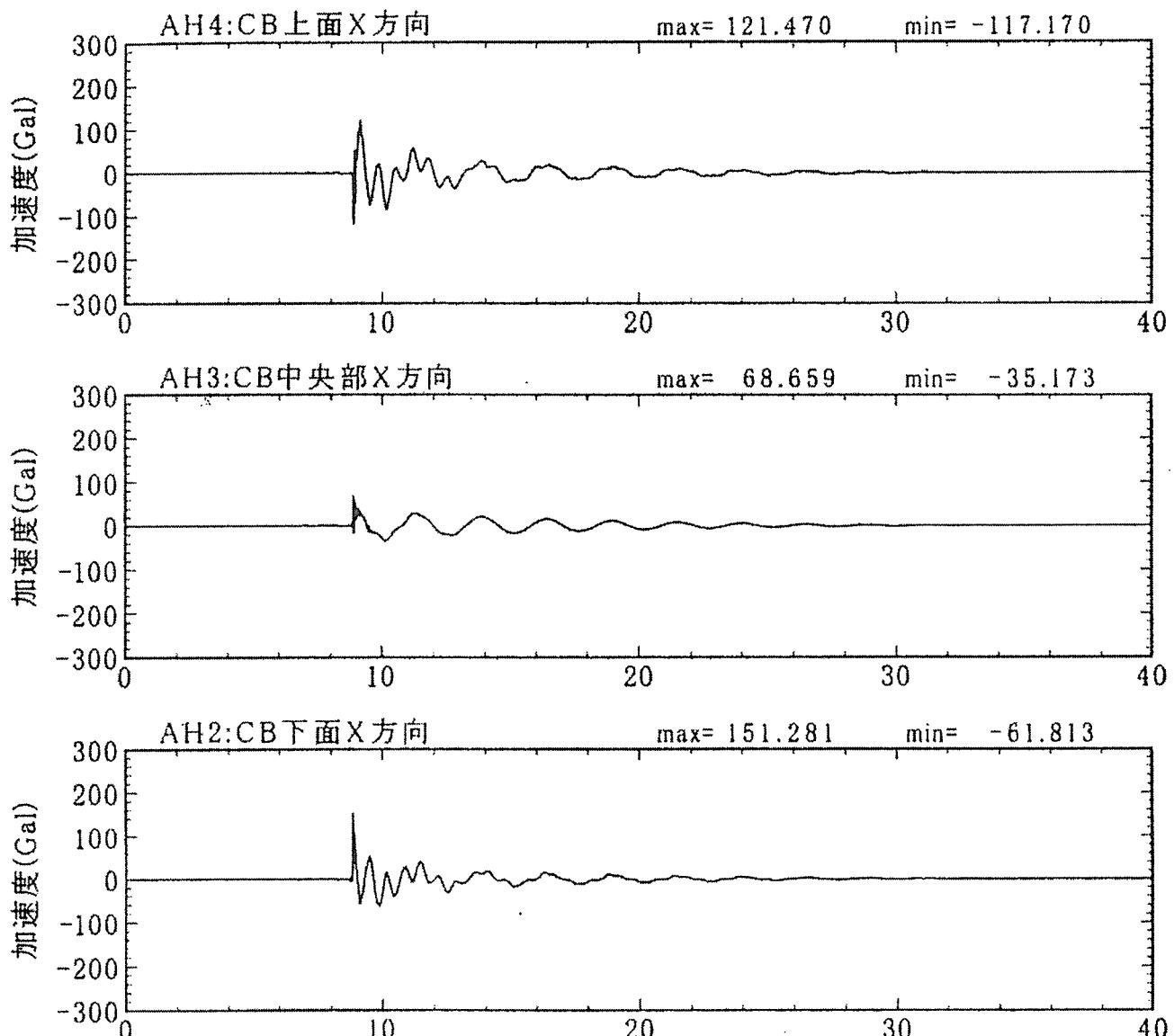


図-3.5 N S 方向水平自由振動加速度時刻歴(初期変位50mm)

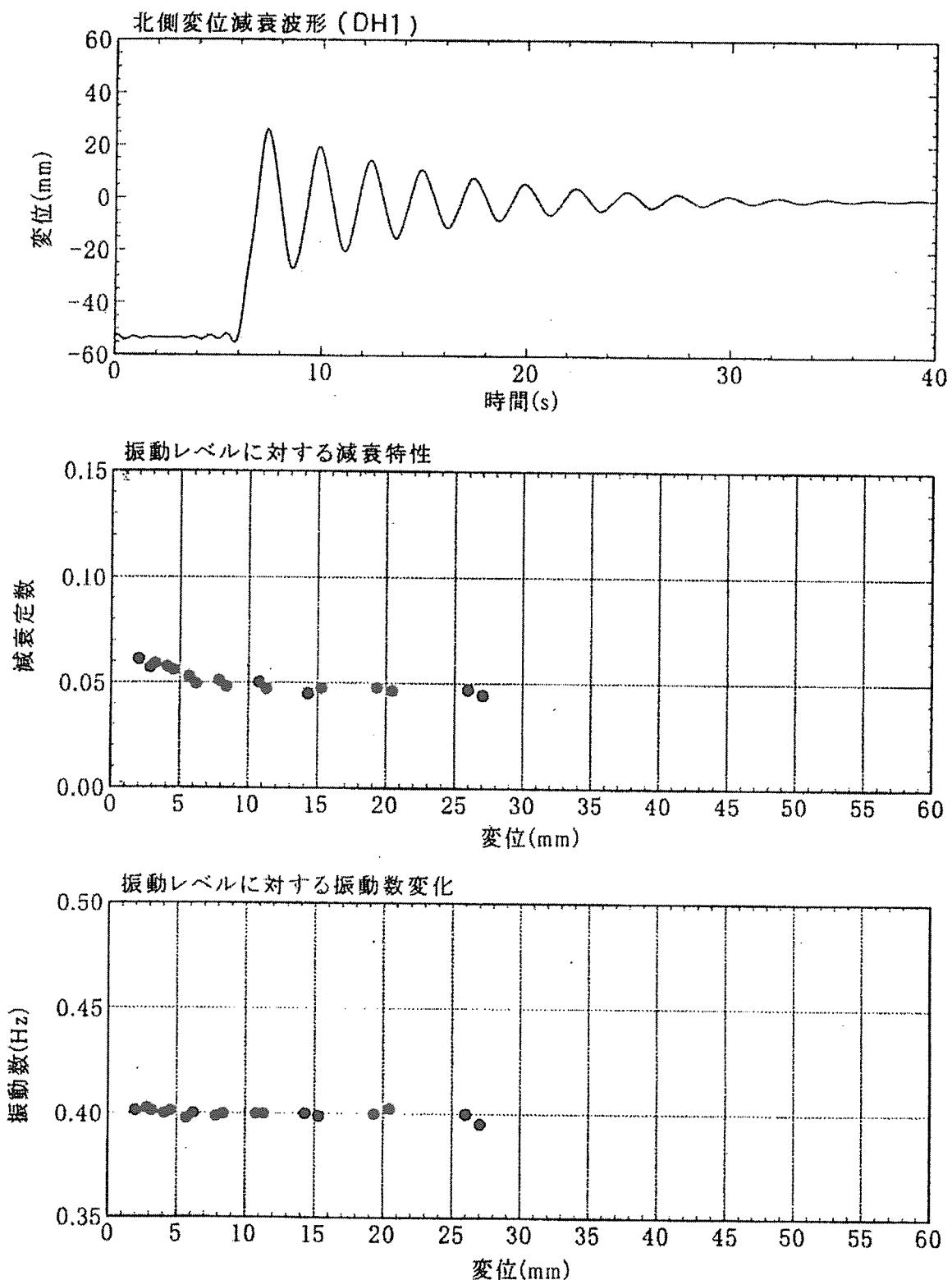


図-3.6 EW方向減衰比および固有振動数(初期変位50mm)

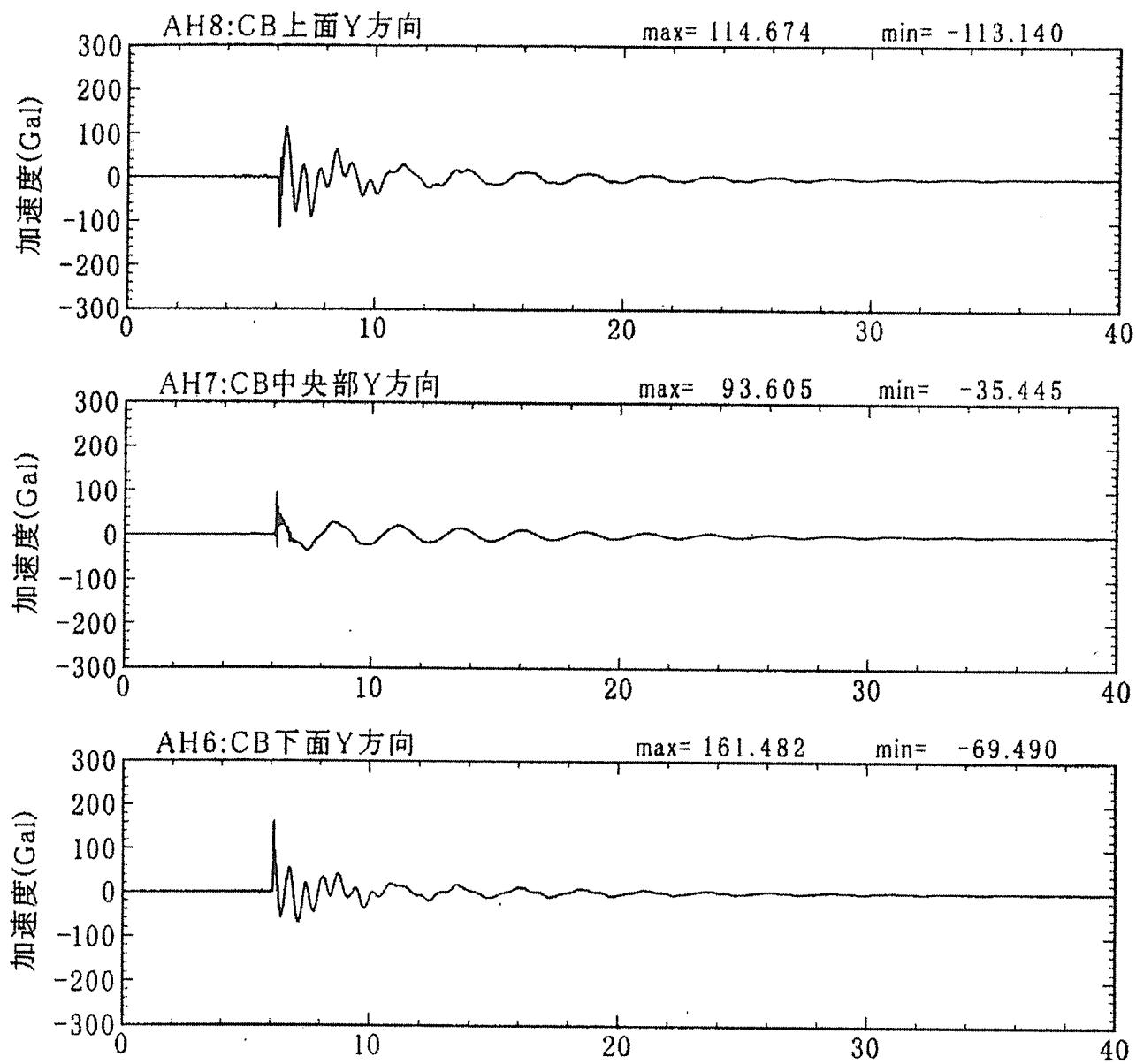


図-3.7 EW方向水平自由振動加速度時刻歴(初期変位50mm)

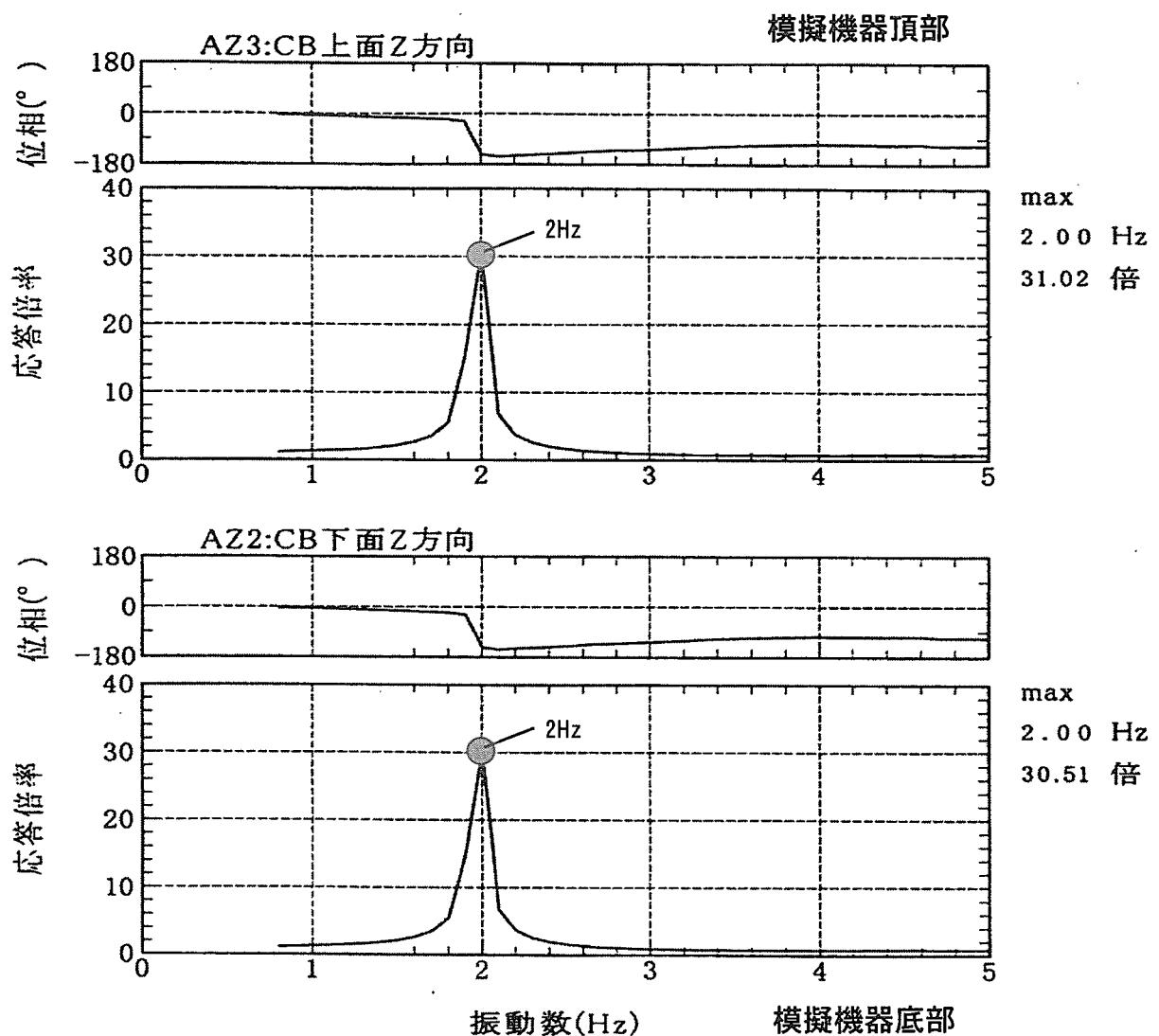


図-3.8 鉛直方向応答加速度伝達関数(正弦波掃引試験:10Gal)

3.3 振動モデルおよび固有値解析

本節では、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およびその固有値解析結果について述べる。

(1) 振動モデルの概要

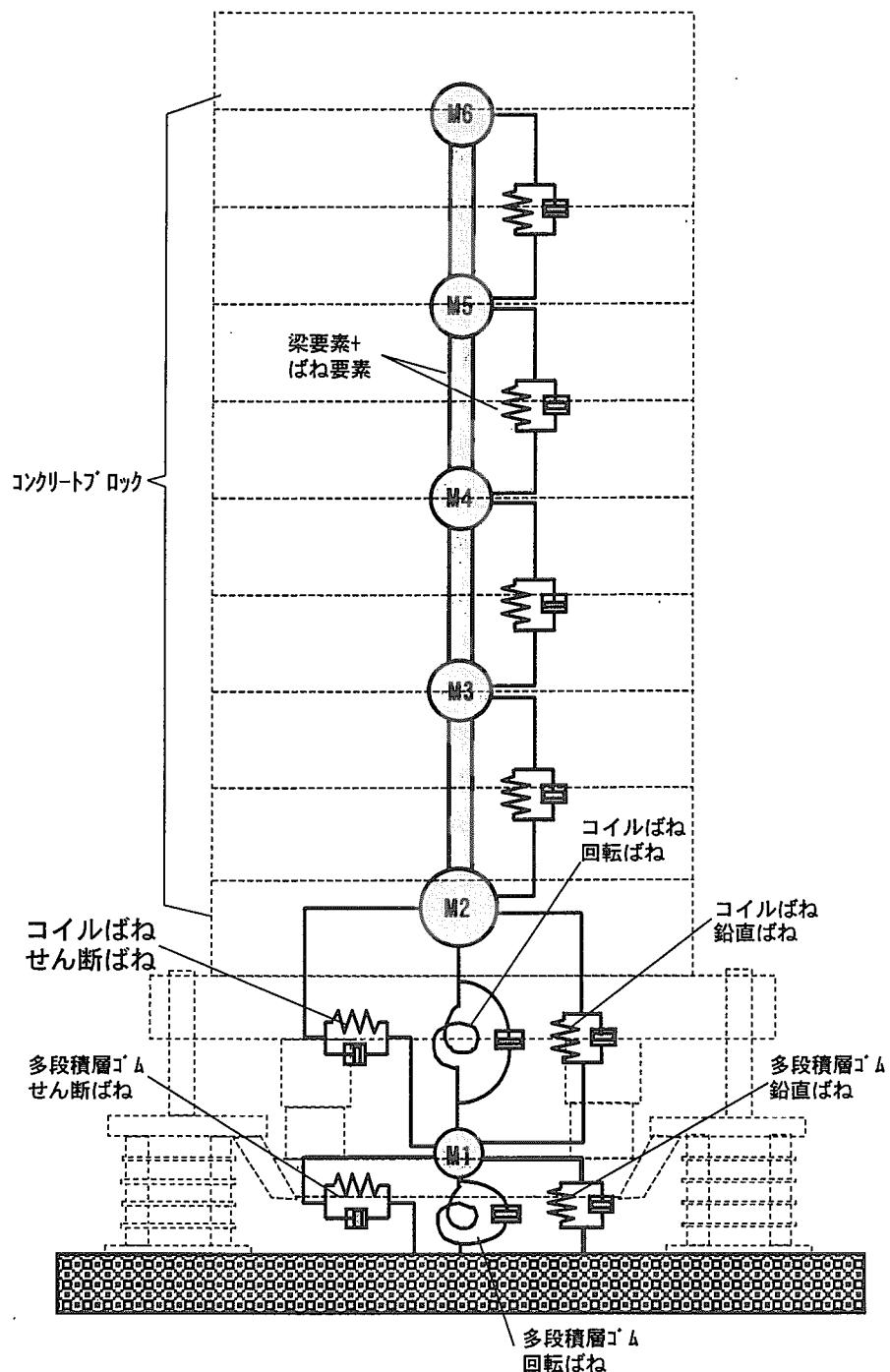
設計仕様および特性試験で得られた復元力特性および振動特性に基づき作成した振動モデルを図-3.9に示す。振動モデルの主な特徴は以下の通りである。

- 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)と考えられる。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、水平ばね、鉛直ばねおよび回転ばねを組み合わせた2次元SRモデルを用いた。また、減衰特性はダッシュポット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、高さ方向に細長く、薄いブロックを段状に重ねて緊結した構造であることから、若干のせん断変形や曲げ変形を生じる可能性ある。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。
- 3) 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。

(2) 固有値解析結果

上記振動モデルに対する固有値解析結果を表-3.2に、固有振動モード形を図-3.10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、1次固有振動モード(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)、3次固有振動モード(鉛直方向並進モード: 2.0Hz)、2次モード(1.43Hz; 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、免震システムに対して妥当な振動モデルが得られているものと考えられる。
- 2) 刺激係数の大きさから、1次固有振動モードと3次固有振動モードが支配的なモードである。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、入力地震動の卓越周波数によるが、応答に及ぼす影響は比較的小さいものと考えられる。



振動モデル諸元一覧

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	合計
質点重量(tf) ^{*1}	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 (tfsec/m)	鉛直 (tfsec/m)	回転 (tfmsec/rad)
水平(tf/m)	18.2 ^{*2}	8299	剛梁				
鉛直(tf/m)	20580	337.4	剛梁+ばね	減衰係数	2.64	18.49	12.56
回転(tfm/rad)	22670	223.7	剛梁	減衰比(h)	0.2	0.35	-

*1)各質点重量は、実測値から算出した。

*2)水平ばね定数は、静加力試験の変位±25mmにおける値。

*3)CBは、水平・鉛直とも十分剛となるように梁要素とばね要素の材料定数およびばね定数を設定した。

図-3.9 振動モデル（SRモデル）

表-3.2 固有値解析結果

固有振動モード	固有値解析結果		備 考
	固有値振動数(Hz)	刺激係数	
1次	0.41	1.176	水平方向並進+鉛直免震架台ロッキングモード
2次	1.42	-0.176	コンクリートブロックロッキングモード
3次	2.01	1.002	鉛直並進モード
4次	33.57	0.001	
5次	46.11	0.938	
6次	72.00	0.000	
7次	138.17	0.000	

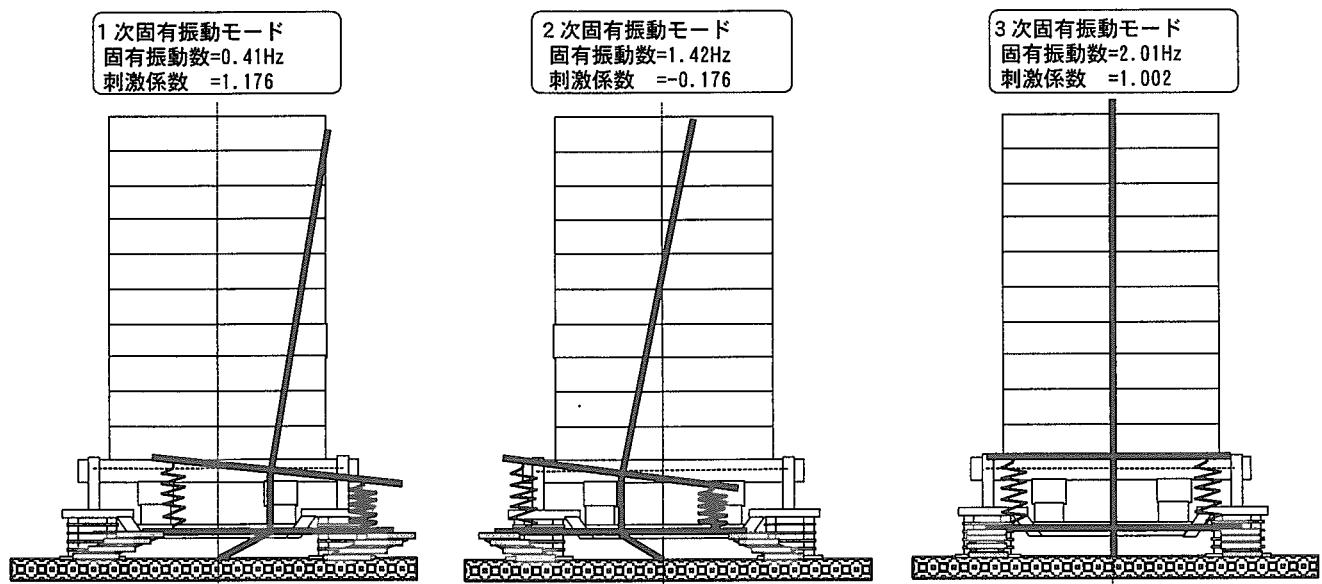


図-3.10 主要振動モード形

4. 予備振動台試験

4.1 予備振動台試験概要

予備振動台試験は、振動台本試験の計画に際して、振動台の加振条件および加振性能の確認と、3次元免震システムの挙動とおおよその免震効果を把握するために実施したものである。入力地震波は、El-Centro 波、Taft 波、十勝沖地震八戸波、兵庫県南部地震神戸海洋気象台観測波(神戸波)等、代表的な観測地震波4波とし、免震システムに損傷を与えないように、加速度レベルを原波の1/2～1/4に縮小して入力した。神戸波については、振動台の許容変位の制約からフィルタリング処理により長周期成分をカットした。加振方向は、水平(1方向)鉛直同時加振とした。

また、多段積層ゴムとコイルばねによる免震効果と最大応答値を把握するためにオイルダンパを取り外し、免震系の振動特性が敏感に現れる状態で加振した。免震システム各部の加速度は、正弦波掃引加振と同様に計測した(図-2.2 参照)。

4.2 予備振動台試験結果

振動台試験結果として、最大加速度一覧を表-4.1に、免震システム各部の加速度時刻歴および正規化したフーリエスペクトルを図-4.1～図-4.4に示す。各図において、水平方向加速度は、振動台上(AH0)、水平免震架台上(AH1)、コンクリートブロック下面(AH2)、中央(AH3)、上面(AH4)で計測した結果を、鉛直方向加速度は、振動台上(AZ0)、水平免震架台上(AZ1)、コンクリートブロック下面(AZ2)、上面(AZ3)で計測した結果を示している。

各方向毎に応答性状を纏めると以下の通りである。

(1) 水平方向応答性状

水平方向の加速度応答倍率は表-4.1より0.74～1.48倍となっており、全体的に免震装置による加速度低減効果は小さく、八戸波では加速度が増幅する結果となっている。振動台上の加速度時刻歴およびフーリエスペクトルを見ると(図-4.1(a)～図-4.4(a)参照)、八戸波は免震システムの1次固有振動数である0.4Hz付近にも極大点があることから、他の地震動よりも水平加速度が励起されているものと考えられる。

免震システム各部の加速度時刻歴およびフーリエスペクトルを見ると、水平免震架台上、コンクリートブロック下面および上面では、1次固有振動数(0.4Hz)と2次固有振動数(1.45Hz)に卓越した極大点がある一方で、コンクリートブロック中央では1次固有振動数にのみ極大点が見られる。したがって、1次固有振動モードと2次固有振動モードが疊重して応答していることがわかる。神戸波では、特に2次固有振動モードが励起され、コンクリートブロックの剛体ロッキング振動が支配的な応答となっている。

(2) 鉛直方向応答性状

鉛直方向の加速度応答倍率は表-4.1より 0.88~2.2 倍となっており、 El-Centro 波以外はいずれも加速度が増幅する結果となっている。免震システム各部の加速度時刻歴およびフーリエスペクトル(図-4.1(b)~図-4.4(b)参照)を見ると、いずれのケースもコンクリートブロック下面と上面で同様の周波数特性を示し、3次固有振動数(鉛直方向並進モード)である 2Hz に卓越した極大点がある。

振動台上で計測された入力加速度時刻歴およびフーリエスペクトルを見ると、いずれの入力地震波も 3Hz 以下の周波数領域が卓越する傾向があり、特に Taft 波、八戸波、神戸波で顕著である。したがって、これらの入力地震波では 3 次固有振動モードが大きく励起され、オイルダンパなしでは十分な免震効果を得ることが難しいものと考えられる。

表-4.1 予備振動台試験最大応答値一覧

入力地震波	方向	原波に対する 加速度圧縮比	最大入力 加速度 (Gal)	最大応答加速度 ^{*1)}		最大水平変位 (cm)
				加速度 (Gal)	応答倍率	
El-centro	水平	1/2	206.9	177.6	0.859	7.30
	鉛直	1/2	98.88	86.56	0.875	—
Taft	水平	1/2	107.7	79.25	0.736	2.16
	鉛直	1/2	52.65	113.49	2.156	—
八戸	水平	1/3	63.87	94.29	1.476	5.95
	鉛直	1/3	33.69	74.42	2.209	—
神戸	水平	1/4	199.2	176.1	0.884	5.60
	鉛直	1/4	88.30	170.7	1.933	—

*1) コンクリートブロック頂部加速度

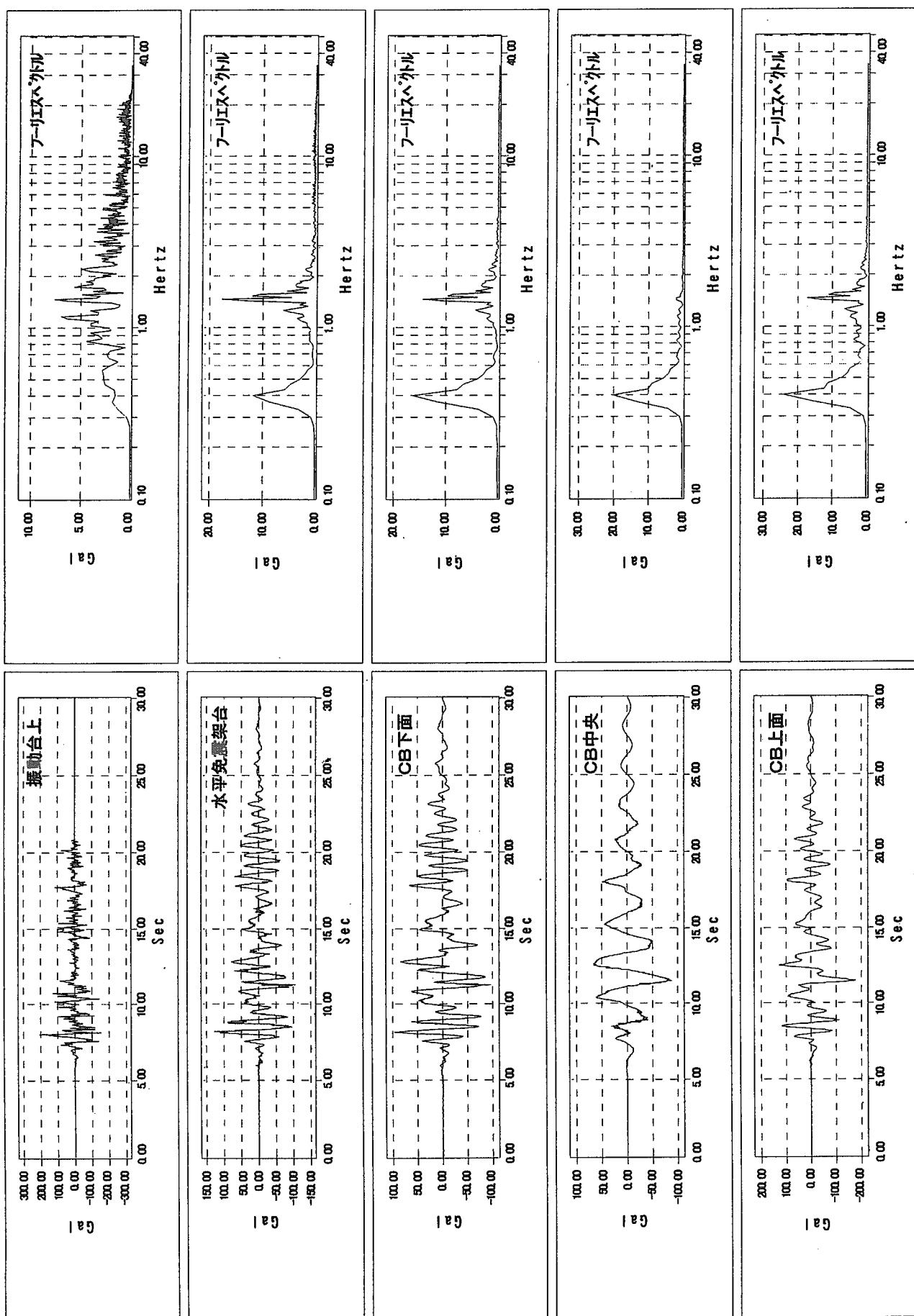


図4.1(a) 予備振動台試験結果(El-Centro波水平鉛直同時加振・水平応答加速度時刻歴)

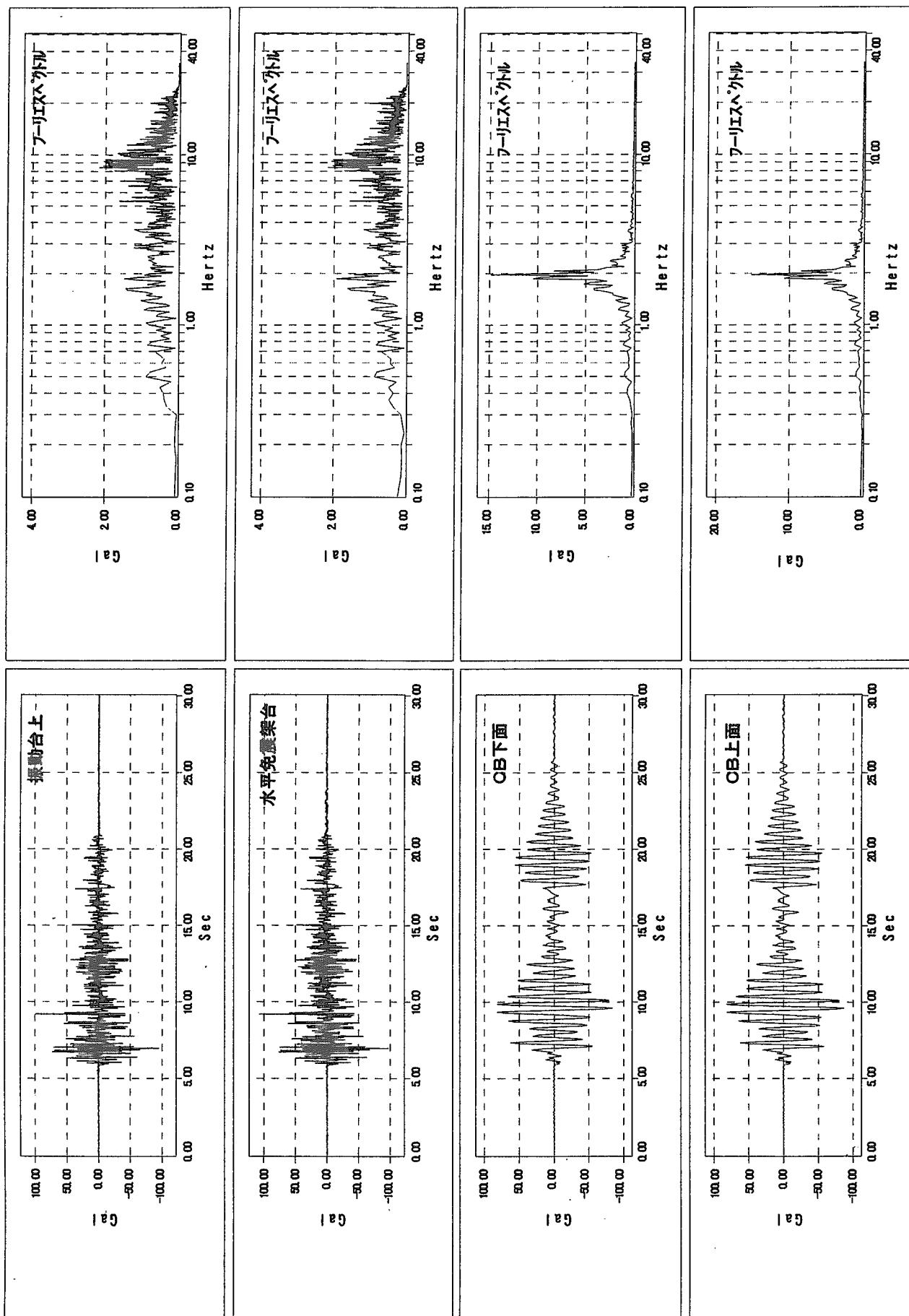


図-4-10) 予備運動台試験結果(E1-Centro波水平鉛直同時加振・鉛直応答加速度時刻歴)

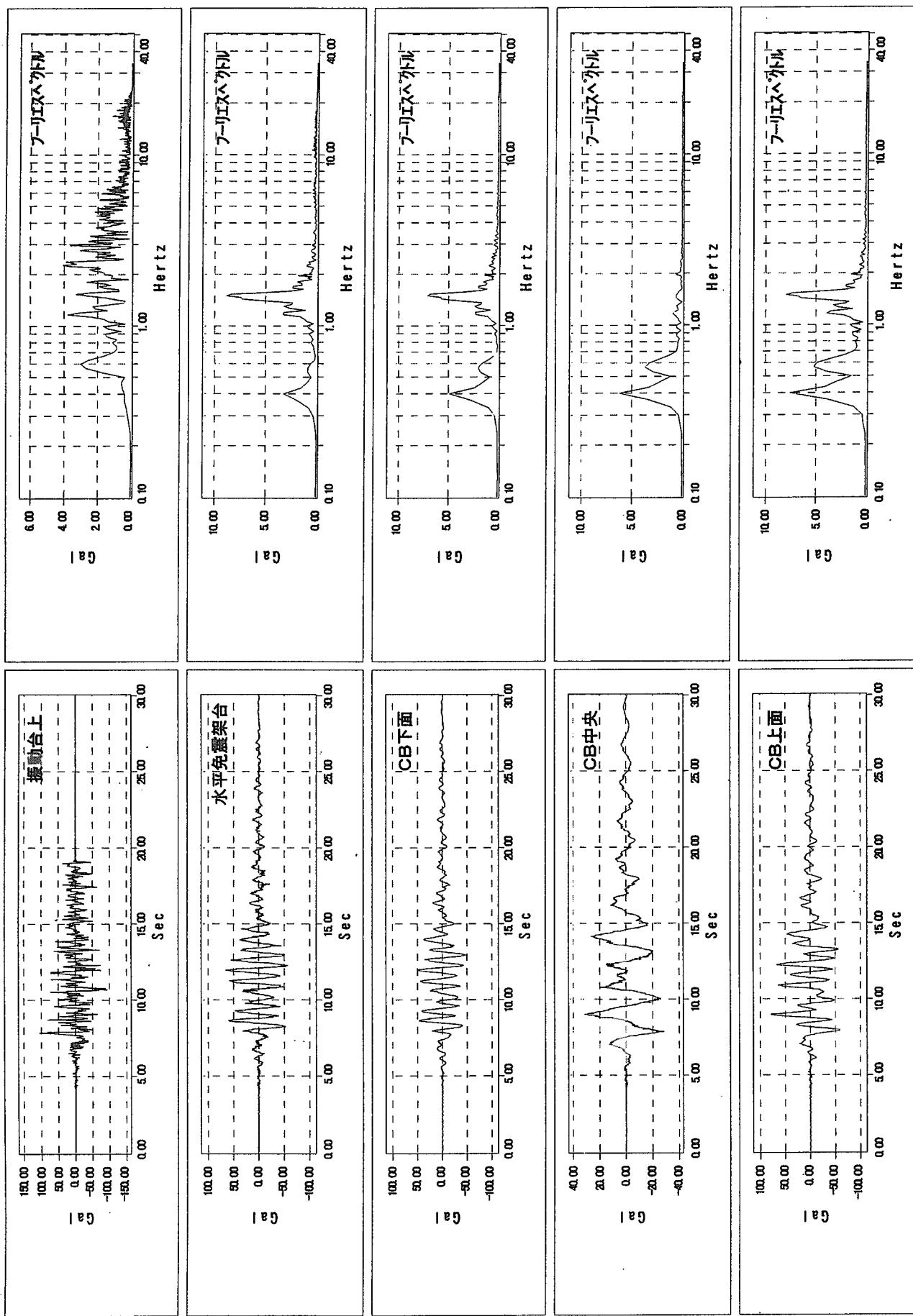


図 4.2(a) 予備振動台試験結果(Taft 波水平鉛直同時加振・水平応答加速度時刻歴)

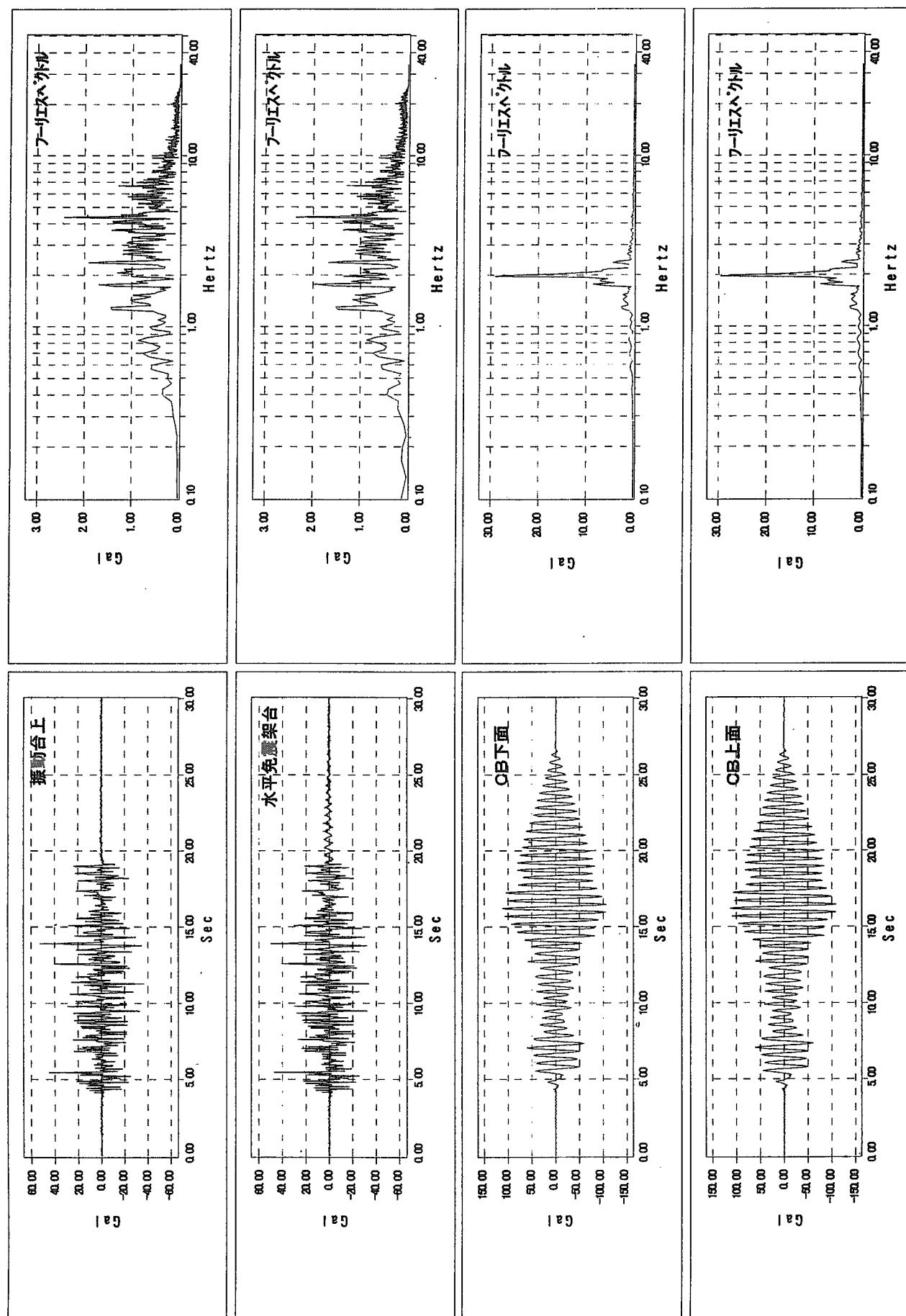


図 4.2(b) 予備振動台試験結果(Taft波水平鉛直同時加振・鉛直応答加速度時刻歴)

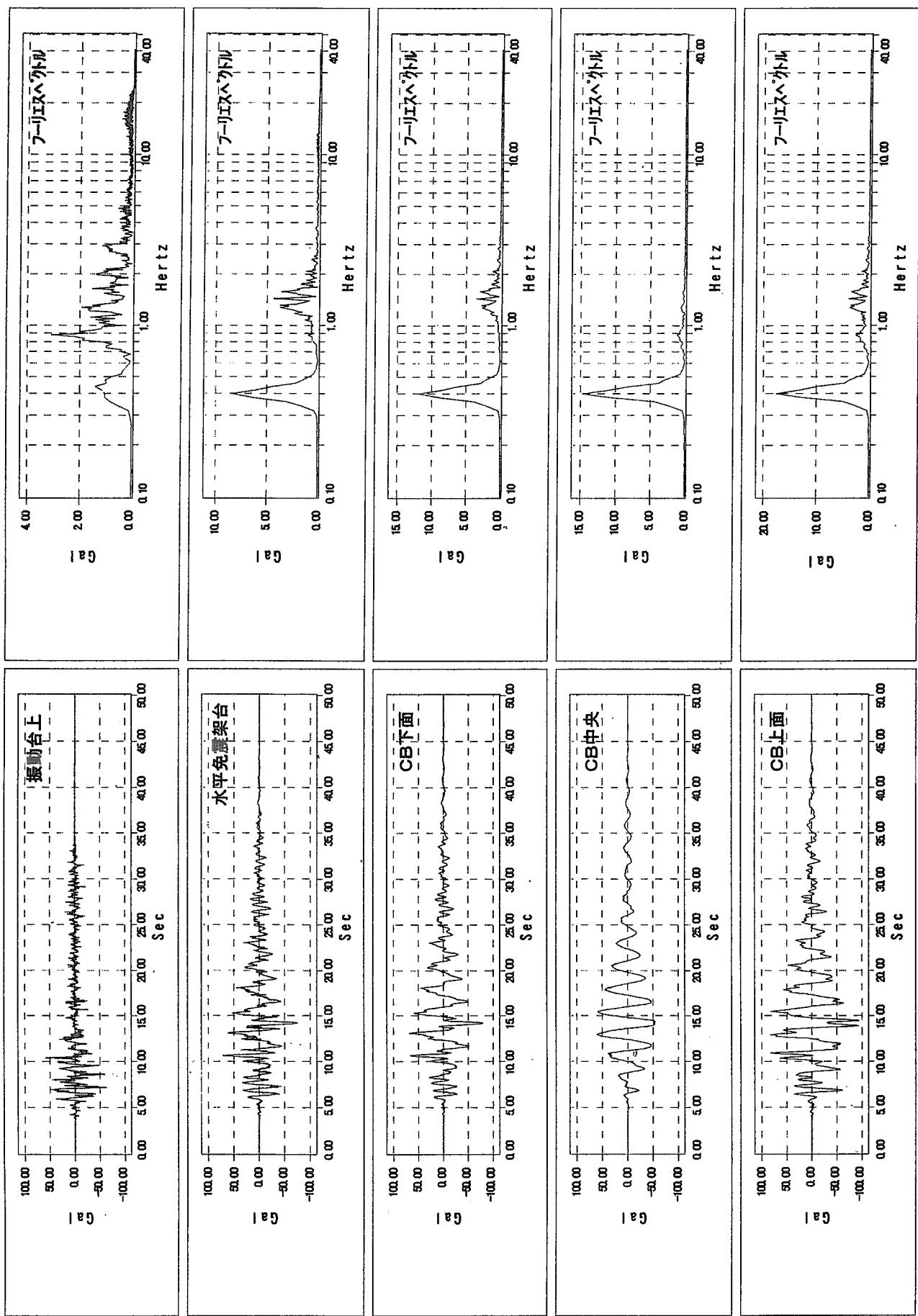


図4.3(a) 予備振動台試験結果(八戸波水平鉛直同時加振・水平応答加速度時刻歴)

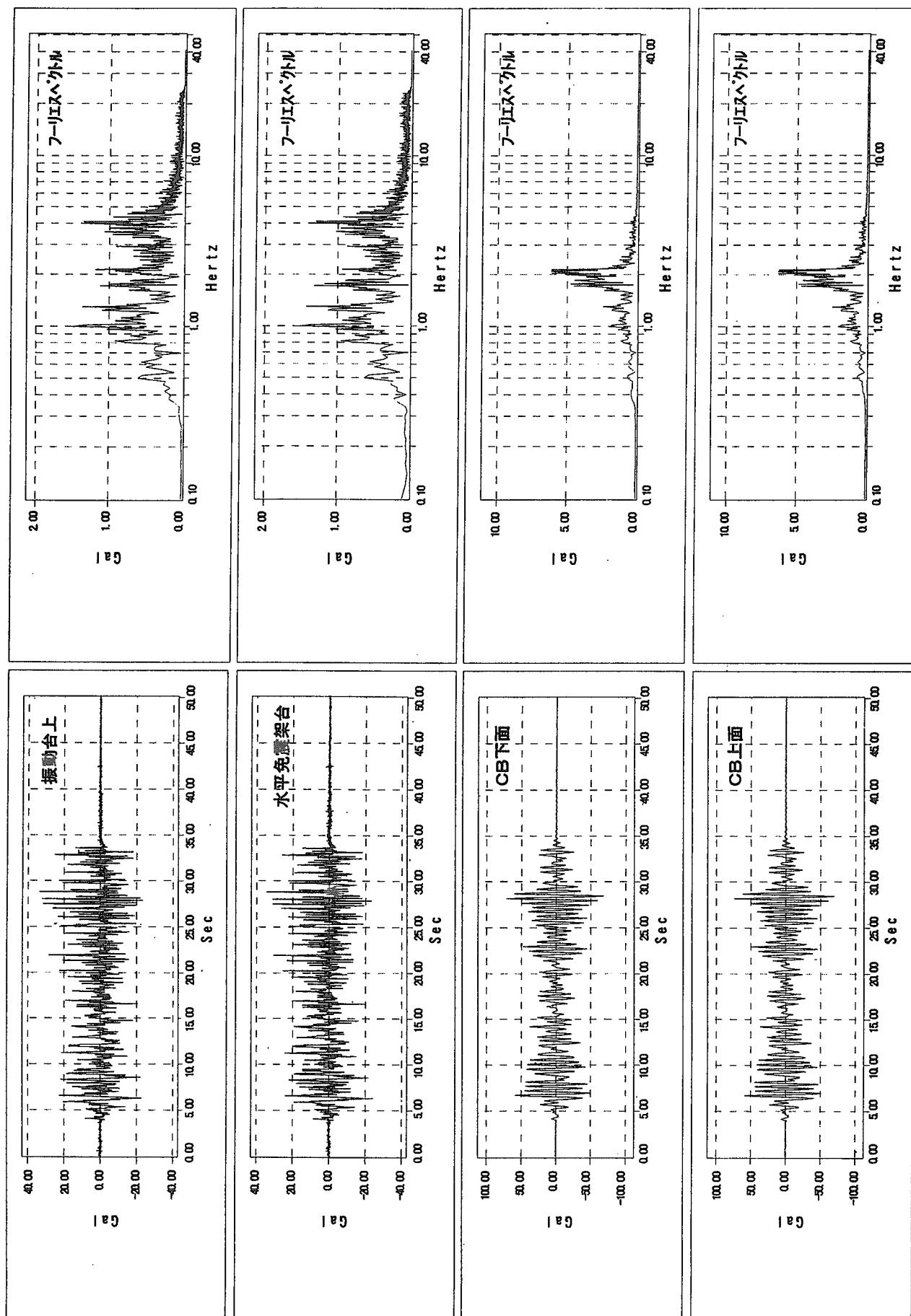


図-4-3(b) 予備長動台試験結果(八戸波水平鉛直同時加振・鉛直応答加速度時刻歴)

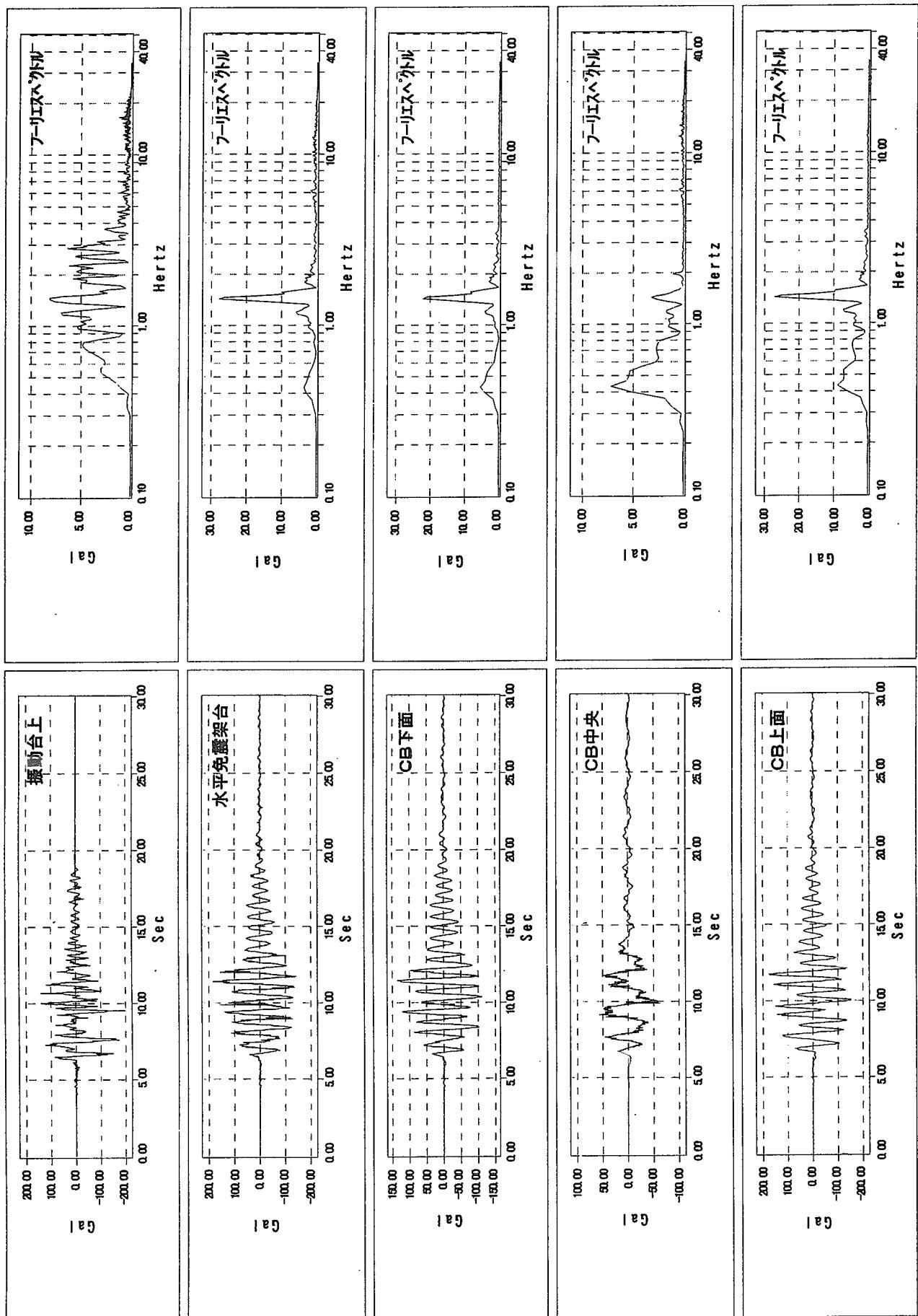


図-4-4(a) 予備振動台試験結果(神戸波水平鉛直同時加振・水平応答加速度時刻歴)

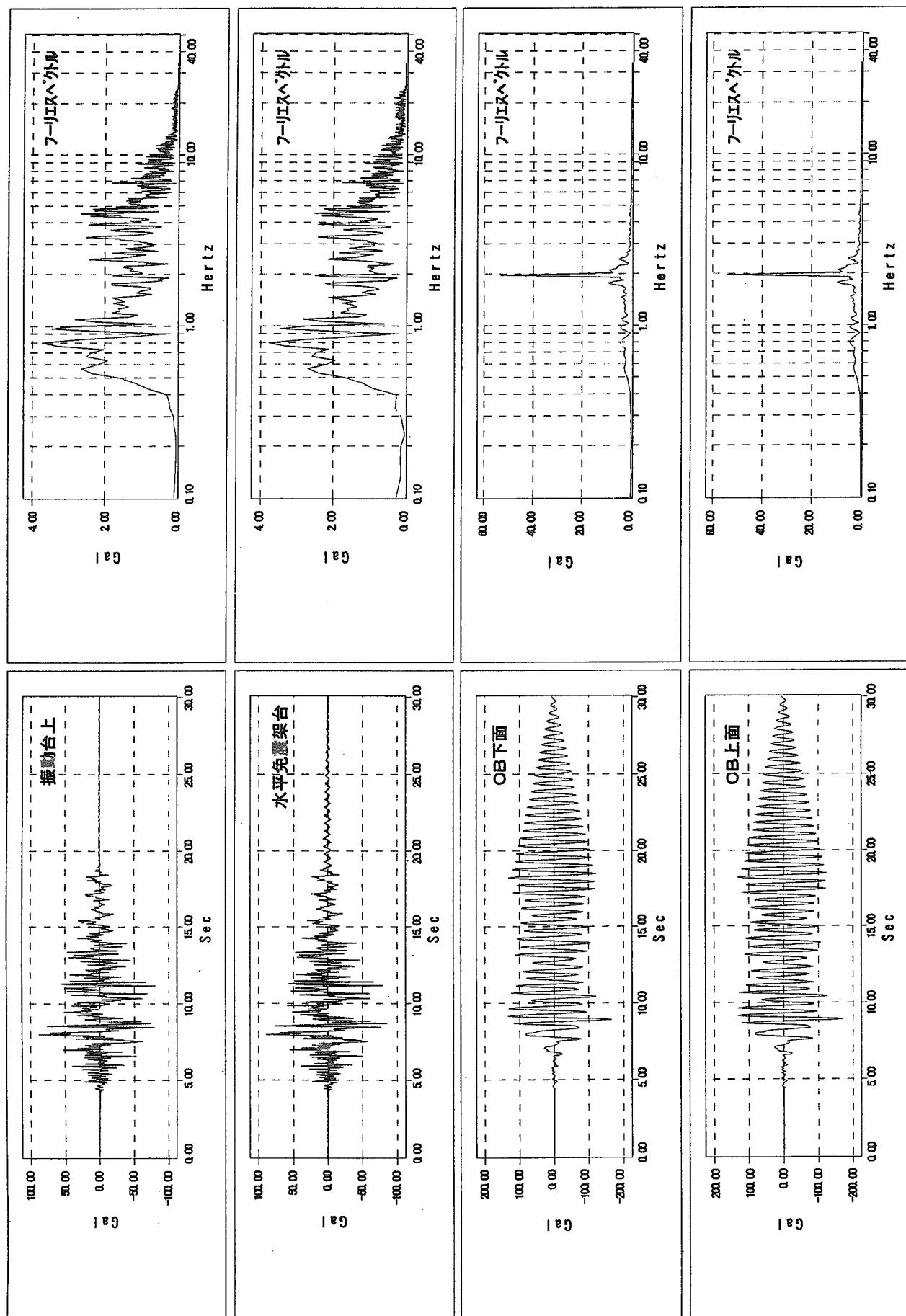


図 4.4(b) 予備振動台試験結果(神戸波水平鉛直同時加振・鉛直応答加速度時刻歴)

4.3 予備振動台試験の模擬地震応答解析

3章で示した振動モデルの妥当性を検証するために、予備振動試験台試験を模擬した地震応答解析を行った。入力地震波は、予備振動台試験で用いた地震波とした。解析には EBISA コード^(4.1)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。

(1) 解析条件

入力地震波は、予備振動台試験で使用した EL-Centro 波、Taft 波、八戸波(十勝沖地震)、神戸波(兵庫県南部地震)の 4 波とし、水平 1 方向(NS 方向)と鉛直方向同時入力とした。各入力波は、振動台上で計測された加速度時刻歴を用い、積分時間刻みは 0.01 秒とした。

減衰比は、特性試験結果に基づいて、水平方向(多段積層ゴム)については 5%、コイルばねについては 2% とし、ひずみエネルギー比例型減衰で与えた。

(2) 地震応答解析結果

解析により求めたコンクリートブロック下面および上面に位置する質点の水平および鉛直方向加速度時刻歴とフーリエスペクトル(計測時間で正規化)を振動台試験結果と合わせて図-4.5～図-4.8 に示す。

これらの結果から、各解析結果と試験結果の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、応答性状は全体的に適切に表現されている。しかし、時刻歴波形の包絡形状や最大加速度は試験結果と差が認められる。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、試験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、より大きな減衰力が作用しているものと考えられる。特に、この場合、オイルダンパがない状態で試験を行っていることから、わずかな減衰の違いが応答全体に敏感に影響するものと考えられる。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の影響が考えられる。

2) 3 次元連成挙動の影響

解析モデルでは、運動方程式の定式化において、水平振動あるいはロッキングと鉛直振動との連成が考慮されていないため、水平および鉛直方向の入力に対して、それらが独立に振動する。しかし、3 次元免震システムでは、水平免震装置の変位量が大きく、また、鉛直固有振動数の減少に伴いロッキングが増大することから、3 次元的な連成挙動が顕著に現れる可能性がある。連成挙動の発生要因として、以下の項目が挙げられる。

① 鉛直地震動によるロッキングの発生

② 振動中に剛性、慣性力、減衰あるいは外力等が不規則且つ大きく変動することによって生じるパラメトリック振動

連成挙動の影響については、今後振動台試験等により解明して行く予定である。

3) 加速度の計測位置による誤差

振動台試験では、試験上の制約から、重心位置からオフセットしたコンクリートブロック側面に加速度計が設置されている。解析では、質点中心について加速度が求められることから、オフセット分の加速度誤差が含まれる可能性がある。予備振動試験では、免震システム全体の挙動を計測していないため定量化は難しいが、特にロッキングや捩れ振動等3次元的な振動が大きくなると誤差も増加する。

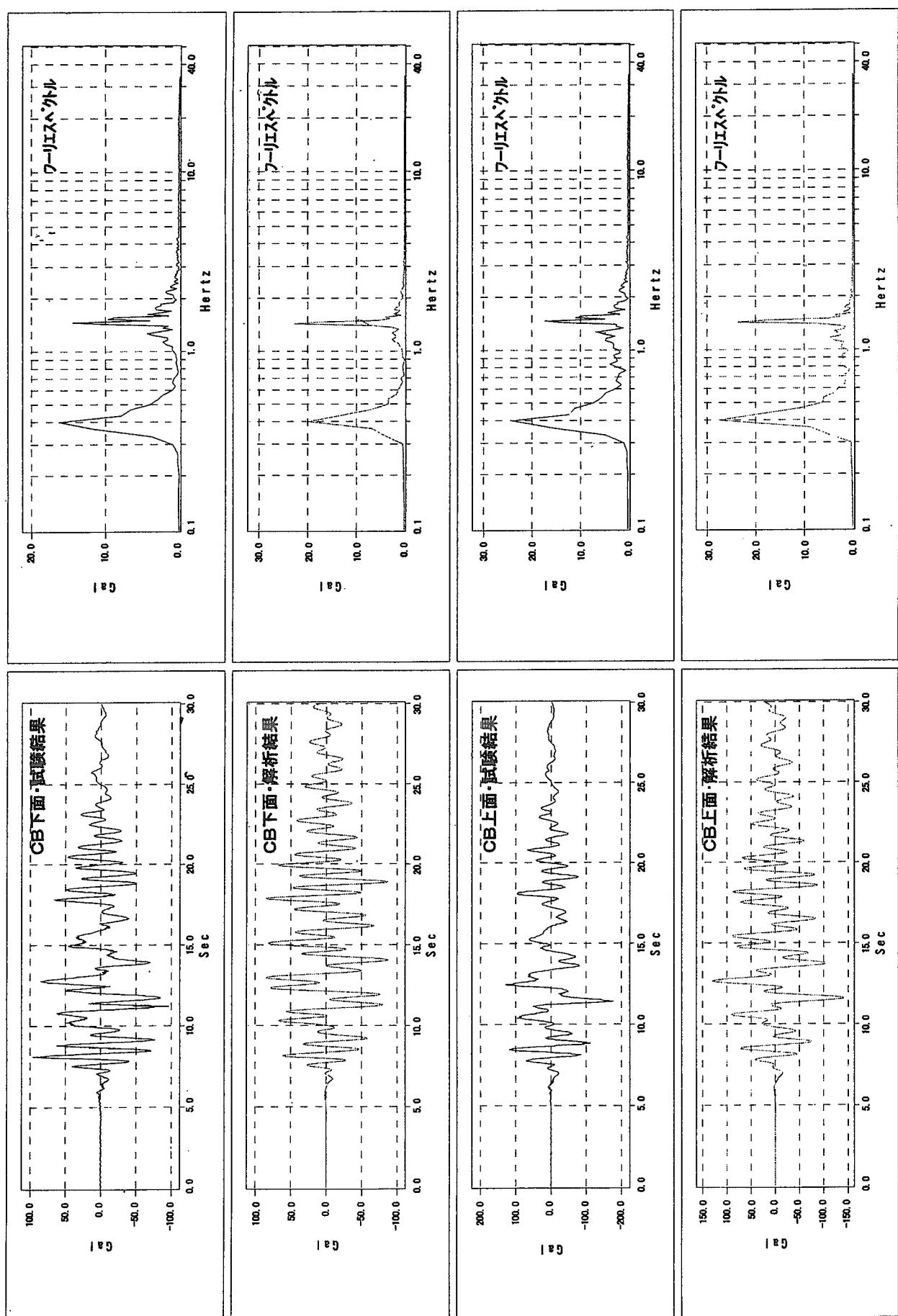


図 4.5(a) 予備振動台試験解析結果 (El-Centro波水平応答加速度時刻歴)

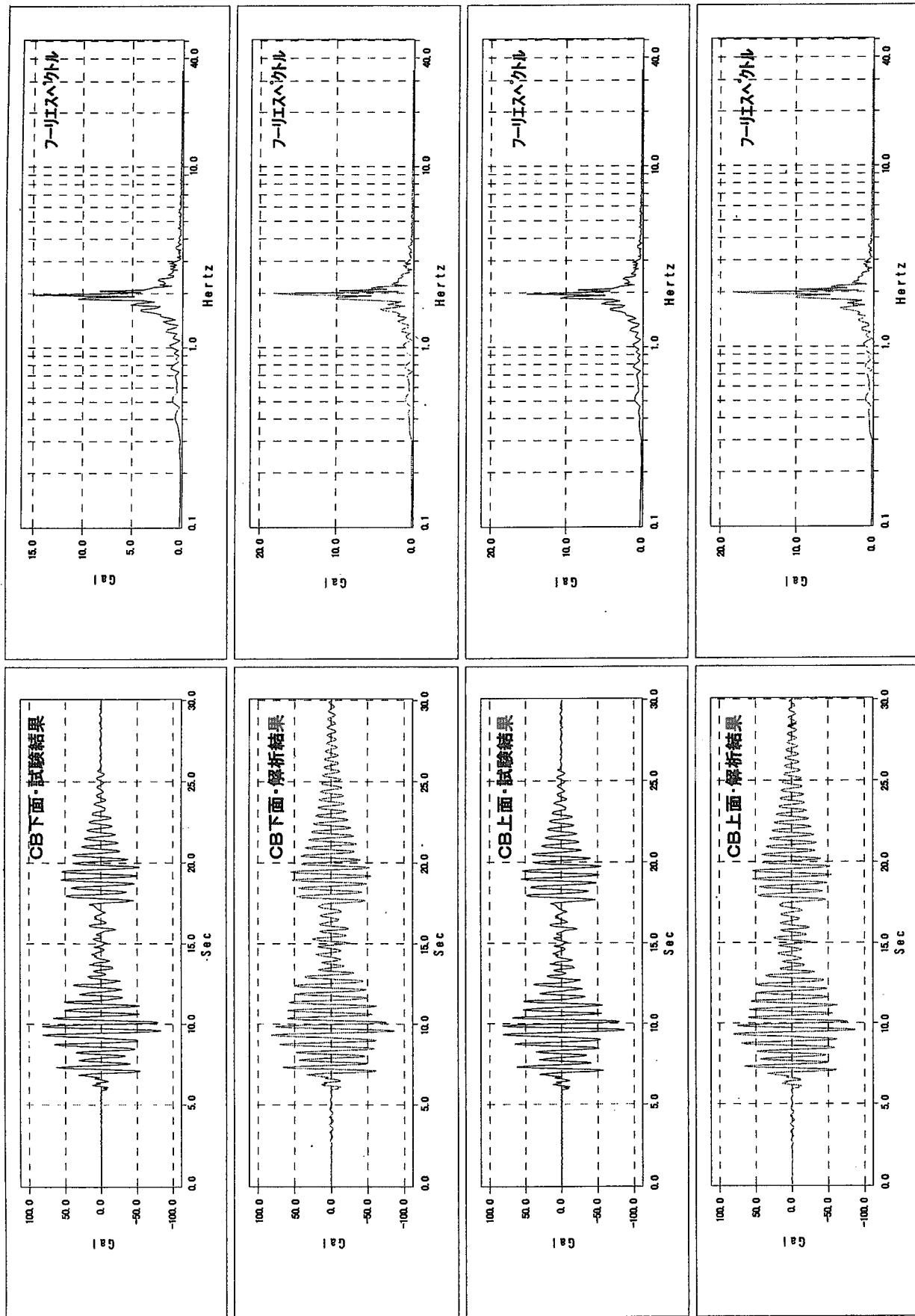


図4.5(b) 予備運動台試験解析結果(El-Centro波鉛直応答加速度時刻歴)

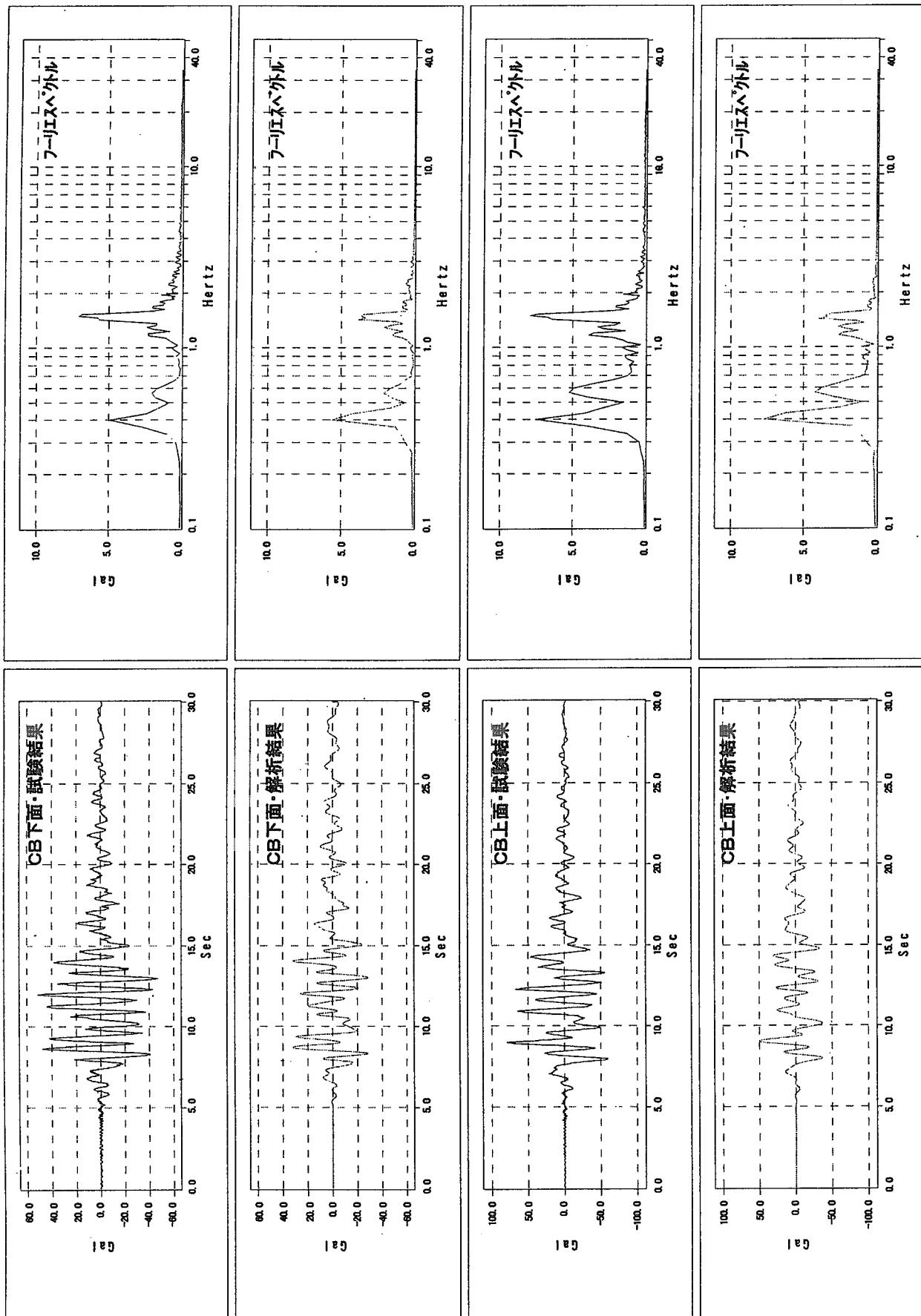


図4-6(a) 予備振動台試験解分析結果 (Taft波水平応答加速度時刻歴)

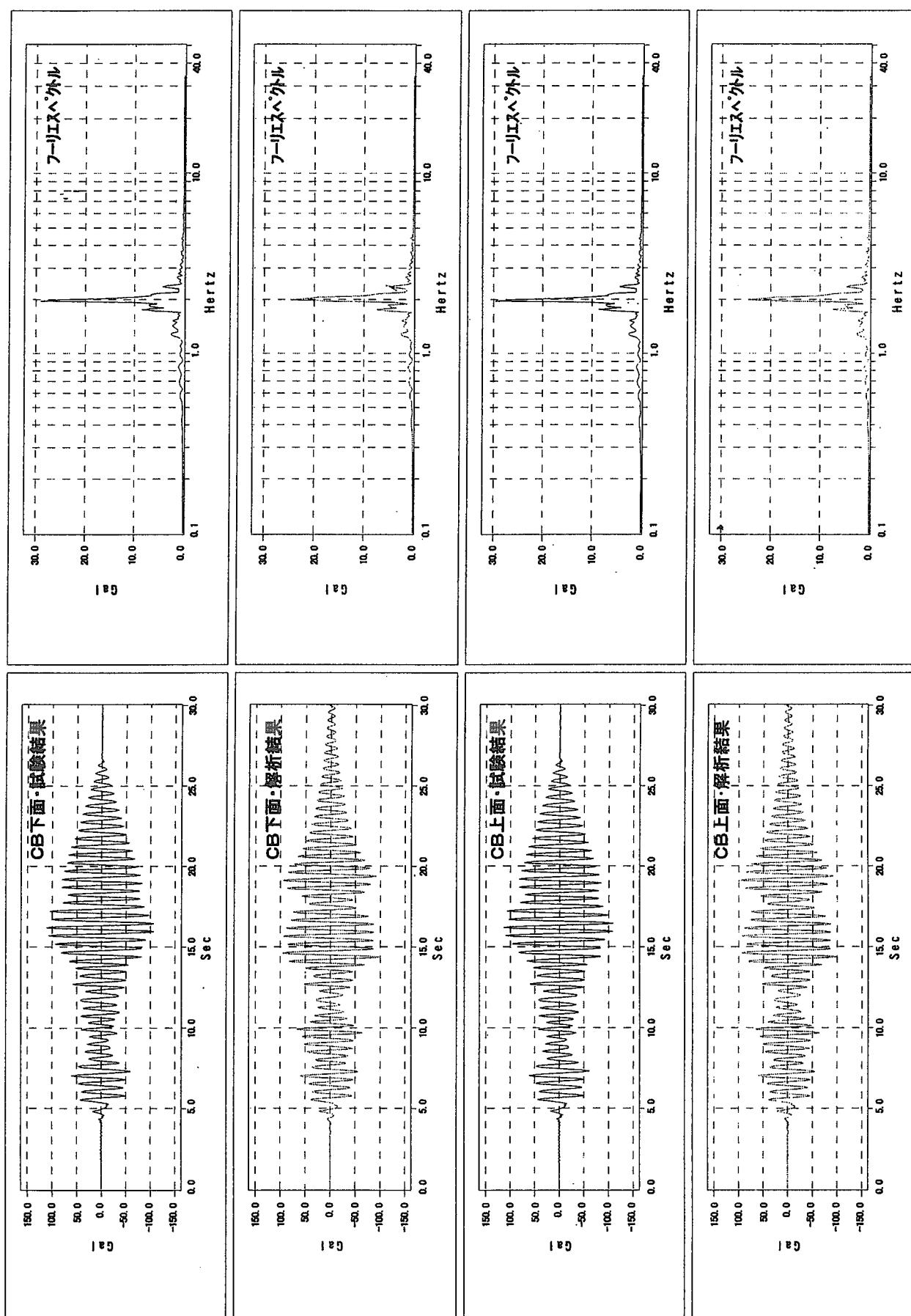


図4.6(b) 予備振動台試験解分析結果(Taft波鉛直応答加速度時刻歴)

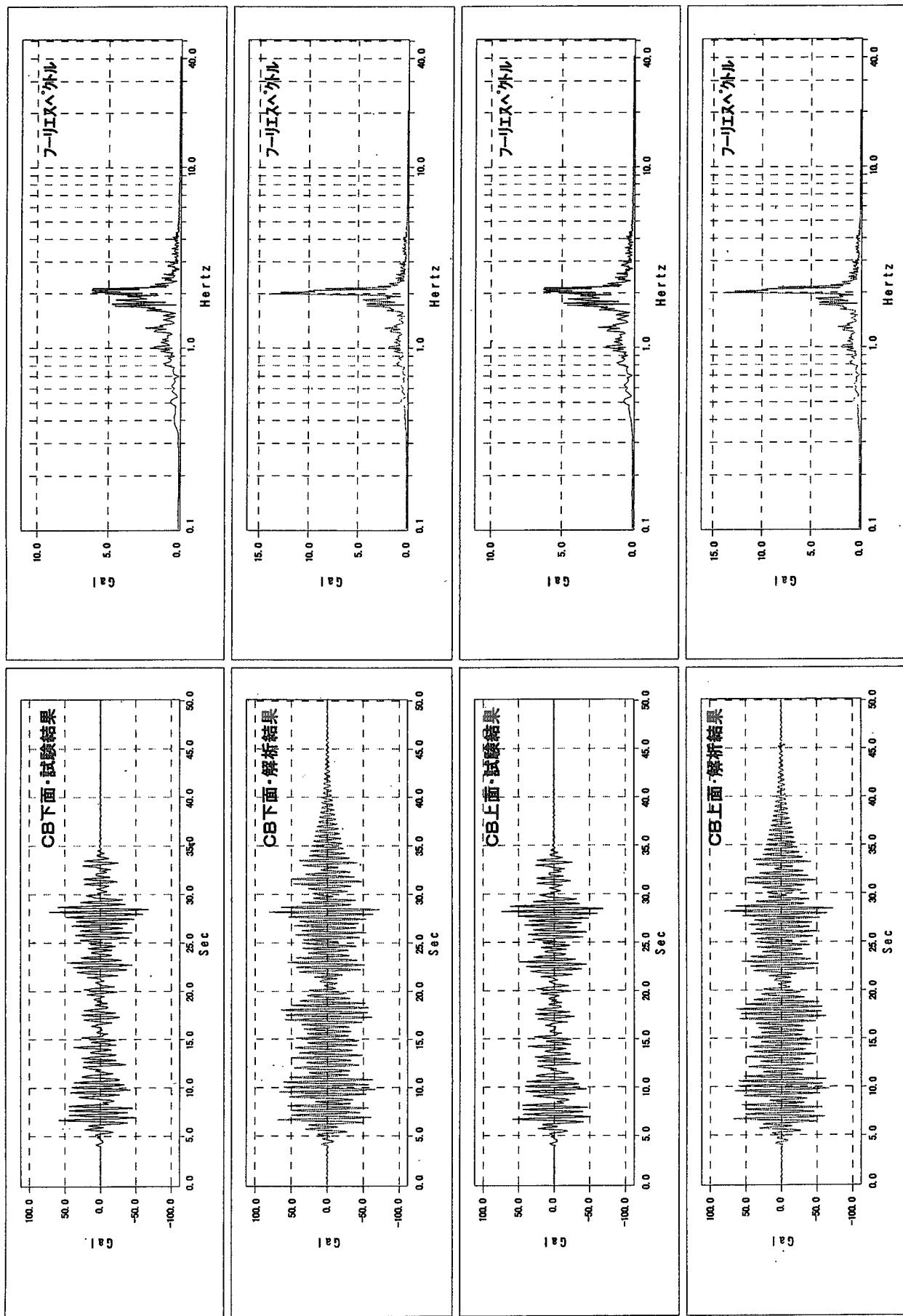


図-4.7(a) 予備振動台試験解分析結果(八戸波水平応答加速度時刻歴)

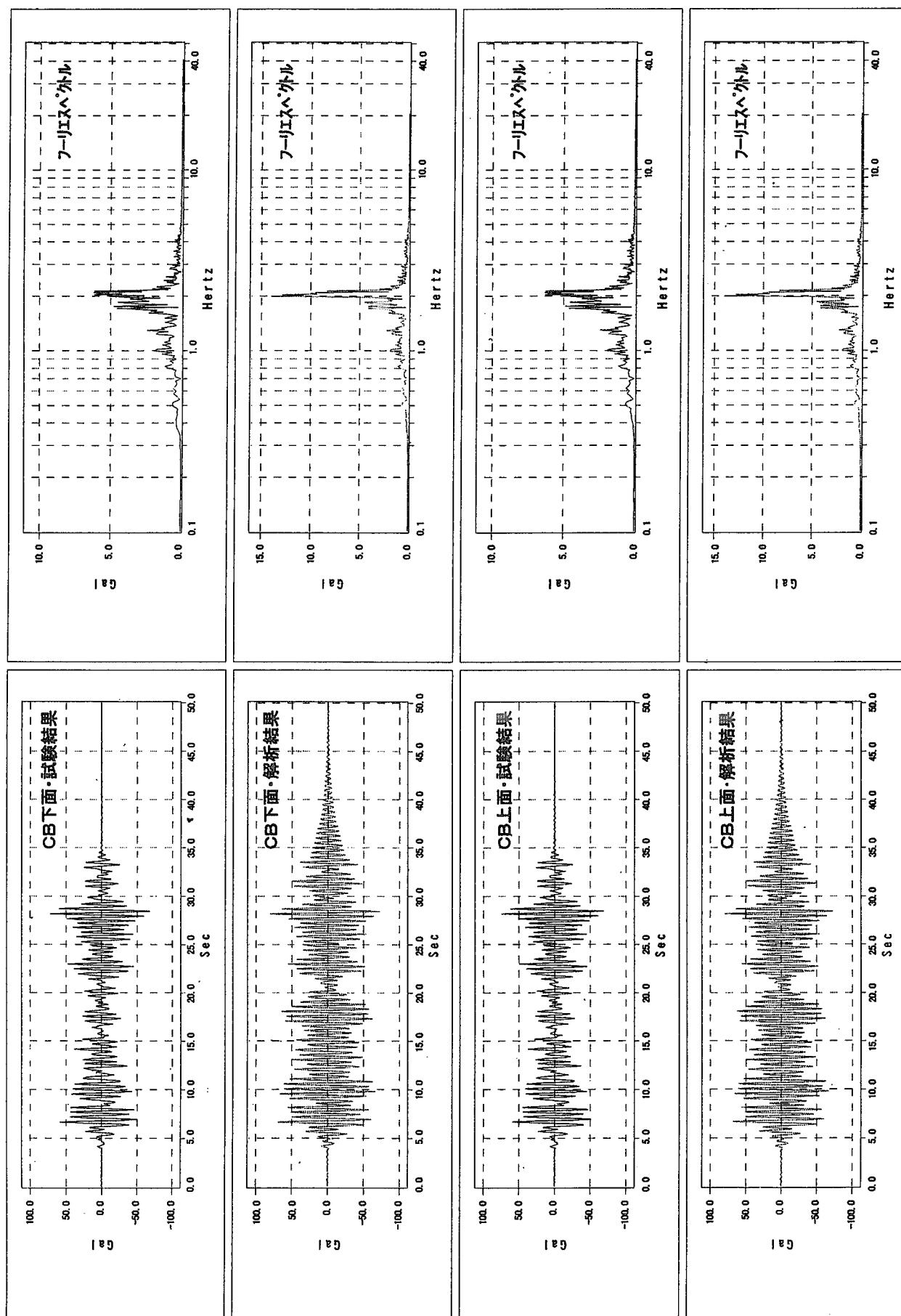


図-4-7(b) 予備振動台試験解析結果(八戸波鉛直応答加速度時刻歴)

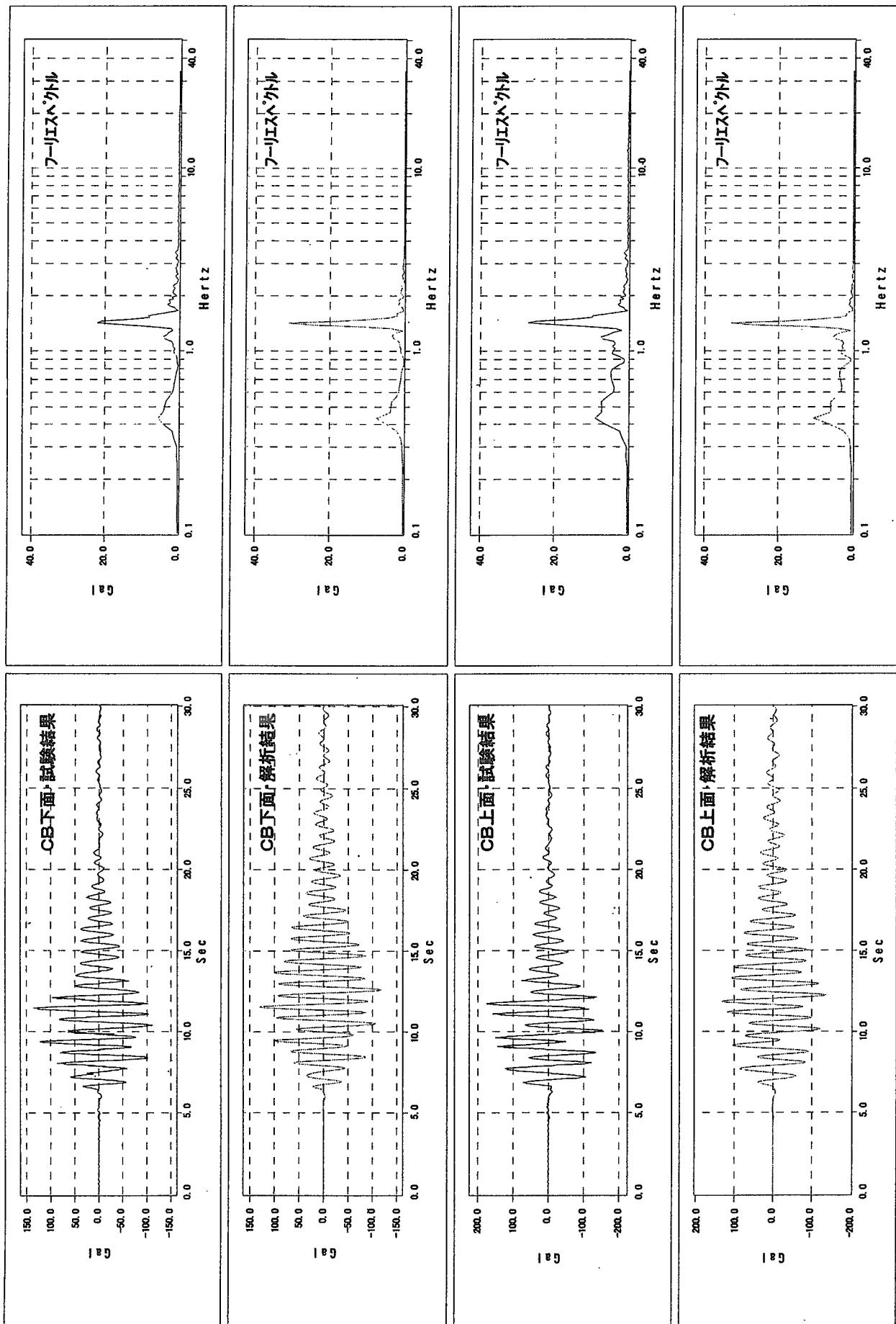


図4.8(a) 予備振動台試験解析結果(神戸波水平加速度応答時刻歴)

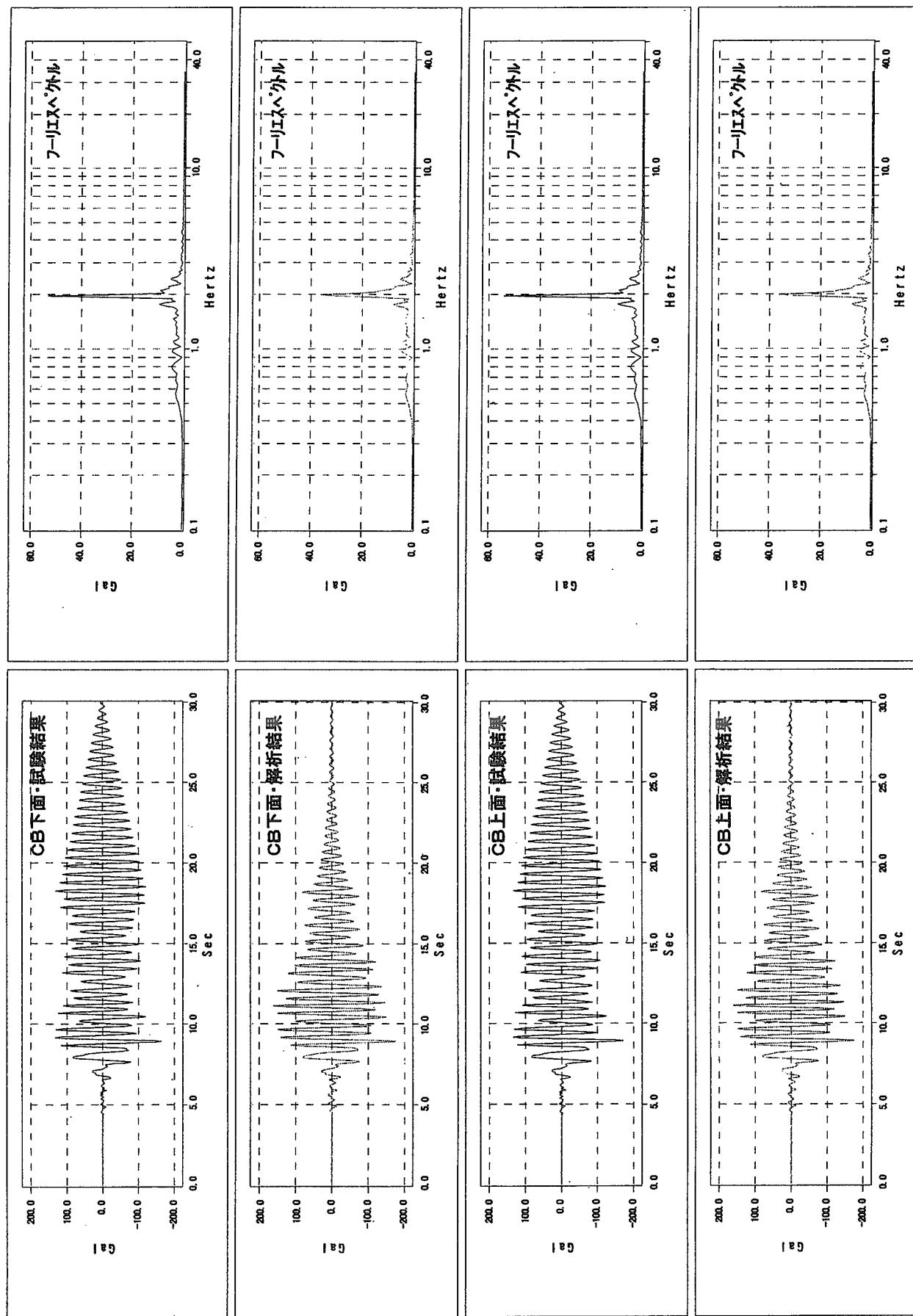


図-4.8(b) 予備振動台試験台試験結果(神戸波鉛直応答加速度時刻歴)

5. 種々の特性を有する地震動に対する応答解析

本章では、3章で示した振動モデルを用いて、種々の特性の地震動に対する地震応答解析を行い、免震システムの応答性状および免震効果について検討した。本解析は、免震効果および3次元連成挙動の把握、損傷モードの推定等を目的とする振動台試験の計画および実施に活用するためを行ったもので、解析方法は、前章の予備振動台試験の応答解析と同様とした。

以下に解析条件および解析結果について示す。

5.1 解析ケースおよび解析条件

振動台試験に関する解析ケースを表-5.1に示す。解析パラメータは、振動台試験に合わせて免震化の方法(水平免震・3次元免震)、減衰特性(オイルダンパーの有無)、および入力地震波とした。

各設定条件は以下の通りである。

(1) 免震化の方法

鉛直ばねを剛とした水平免震のみの場合(Bシリーズ)と、3次元免震(Aシリーズ)の2ケースとした。水平免震のみの解析ケースは、3次元免震と免震効果や挙動を比較するために行った。なお、水平免震のみとした場合、水平振動に伴うロッキング(コイルばねの変形)が発生しないため、1次固有振動数が若干高くなり 0.45Hz となっている。

(2) 減衰特性

水平免震と3次元免震について、オイルダンパーを取り外した場合(B1,A1)と取り付けた場合(B2,A2)について解析した。減衰比は、設計仕様および特性試験結果から、前者が水平方向 0.05、鉛直方向 0.02 で、後者が水平方向 0.2、鉛直方向 0.35 とした。

(3) 入力地震波

各入力地震波の諸元を表-5.2に、断層モデルによる模擬地震波の作成条件を表-5.3に示す。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に示す。各入力地震波は、作成方法や周波数特性によって以下のように分類することができる。

1) 原研大洗研究所内の鉛直アレー・テストベッド・原子炉建屋(HTTR)等の観測地震波

本免震システムは、振動台試験後、大洗研究所内テストベッドに設置して、自然地震動下で応答観測を行う予定であることから、同所の地盤および原子炉建屋で観測された代表的な地震波を用いることとした。これらの観測地震波は、水平方向は 4Hz～10Hz、鉛直方向は 5Hz 以上の高い周波数領域に卓越周波数があることから、各方向ともに免震効果が得られやすい地震波と考えられる。

2) 断層モデルによる模擬地震波

1) の観測地震波は、中小規模の地震動であることから、大洗サイトで発生する強震動を断層モデルを用いて模擬的に作成した。模擬地震動の作成方法として、入倉の経験的グリーン関数法^(5.1)の拡張法を用いた。すなわち、Boore の方法^(5.2)により P 波および S 波による小地震の基盤震源波形を生成し、観測点までの地震動の伝播経路特性および表層地盤增幅特性を

与えて模擬小地震波を作成する。小断層毎に作成した模擬小地震波を入倉等^(5.3) の方法に従って重ね合わせて、想定する規模の模擬地震動を作成する。表-5.3 に示したように、ここでは、想定サイトを大洗とし、震源を霞ヶ浦地震、地震の規模は M7.2 および M8.0 とした。作成した模擬地震波の加速度応答スペクトルを見ると、水平方向で 1 Hz～2Hz の間に卓越した極大点があり、特に免震システムの 2 次固有振動モードが励起される可能性がある。また、鉛直方向は、鉛直免震系の固有振動数に近い 2.5Hz 付近に極大点があり、応答が増幅する可能性がある。

3) 改良標準波(S1F, S1N)

これらの設計用模擬地震波は、1) や 2) の地震波と比べて卓越周波数の領域が広く、変化の度合いもなだらかである。加速度応答スペクトルは、いずれも 3Hz～10Hz をピークとして、1Hz～20Hz の間で加速度が増幅する傾向がある。鉛直免震には不利な入力波である。なお、この場合、鉛直地震波は水平方向の 1/2 に加速度振幅を圧縮して入力した。

表-5.1 解析ケース一覧

番号	解析ケース	水平免震特性		鉛直免震特性		入力波	備考
		固有振動数(Hz)	減衰比	固有振動数(Hz)	減衰比		
1	B1-EQ326-TB	0.4	0.05	>>20Hz	0.02	EQ326-TB	大洗観測波
2	B1-EQ326-FL	↑	↑	↑	↑	EQ326-FL	改良標準波
3	B1-S1F	↑	↑	↑	↑	S1F	↑
4	B2-EQ326-TB	0.4	0.2	>>20Hz	0.35	EQ326-TB	大洗観測波
5	B2-EQ326-FL	↑	↑	↑	↑	EQ326-FL	改良標準波
6	B2-S1F	↑	↑	↑	↑	S1F	改良標準波
7	A1-EQ326-TB	0.4	0.05	2.0	0.02	EQ326-TB	大洗観測波
8	A1-EQ326-FL	↑	↑	↑	↑	EQ326-FL	↑
9	A1-FM72	↑	↑	↑	↑	FM72	断層モデル
10	A1-FM80	↑	↑	↑	↑	FM80	↑
11	A1-S1F	↑	↑	↑	↑	S1F	改良標準波
12	A2-EQ326-TB	0.4	0.2	2.0	0.35	EQ326-TB	大洗観測波
13	A2-EQ326-FL	↑	↑	↑	↑	EQ326-FL	↑
14	A2-EQ326-GL	↑	↑	↑	↑	EQ326-GL	↑
15	A2-EQ82	↑	↑	↑	↑	EQ82	↑
16	A2-FM72	↑	↑	↑	↑	FM72	断層モデル
17	A2-FM80	↑	↑	↑	↑	FM80	↑
18	A2-S1F	↑	↑	↑	↑	S1F	改良標準波
19	A2-S1N	↑	↑	↑	↑	S1N	↑

○改良標準波は鉛直方向加速度を水平方向加速度の1/2に振幅調整して入力

表-5.2 解析用入力地震波一覧

地 震 波 種 別	地 震 波 名	記 号	成 分	最大加速度 (Gal)			最大速度 (Kine)			備 考
				NS	EW	UD	NS	EW	UD	
大洗研究所観測波	1999/3/26観測波(テストベッド)	EQ326-TB	NS,EW,UD	86.1	58.4	25.1	2.99	3.23	0.84	震源:茨城県北部, M5.1
	1999/3/26観測波(建屋1階)	EQ326-FL	NS,EW,UD	57.3	32.1	23.3	2.09	2.57	0.72	↑
	1999/3/26観測波(建屋近接地盤)	EQ326-GL	NS,EW,UD	111	102	61.4	3.58	3.31	1.51	↑
	1990/5/3観測波(GL-1.2m)	EQ82	NS,EW,UD	187	116	69.3	5.53	5.57	1.31	震源:茨城県北部, M5.2
	霞ヶ浦断層 M7.2 想定地震	FM72	NS,EW,UD	96.8	78.3	19.5	10.0	11.0	2.13	
	霞ヶ浦断層 M8.0 想定地震	FM80	NS,EW,UD	204	243	57.7	19.2	39.3	9.18	
	改良標準波 S ₁ F	S1F	水平	286	←	—	16.2	←	—	
設計用模擬地震波	改良標準波 S ₁ N	S1N	水平	267	←	—	16.9	←	—	
設計用模擬地震波	改良標準波 S ₁ N	S1N	水平	267	←	—	16.9	←	—	

表 - 5.3 断層モデルによる模擬地震波作成条件

	M=7.2	M=8.0
1) 想定サイト	大洗	←
2) 想定地震	霞ヶ浦地震	←
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 × 10 ¹⁹ 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 ^{*1)}	100Gal	180Gal

*1)震源距離およびマグニチュードから福島式により算定

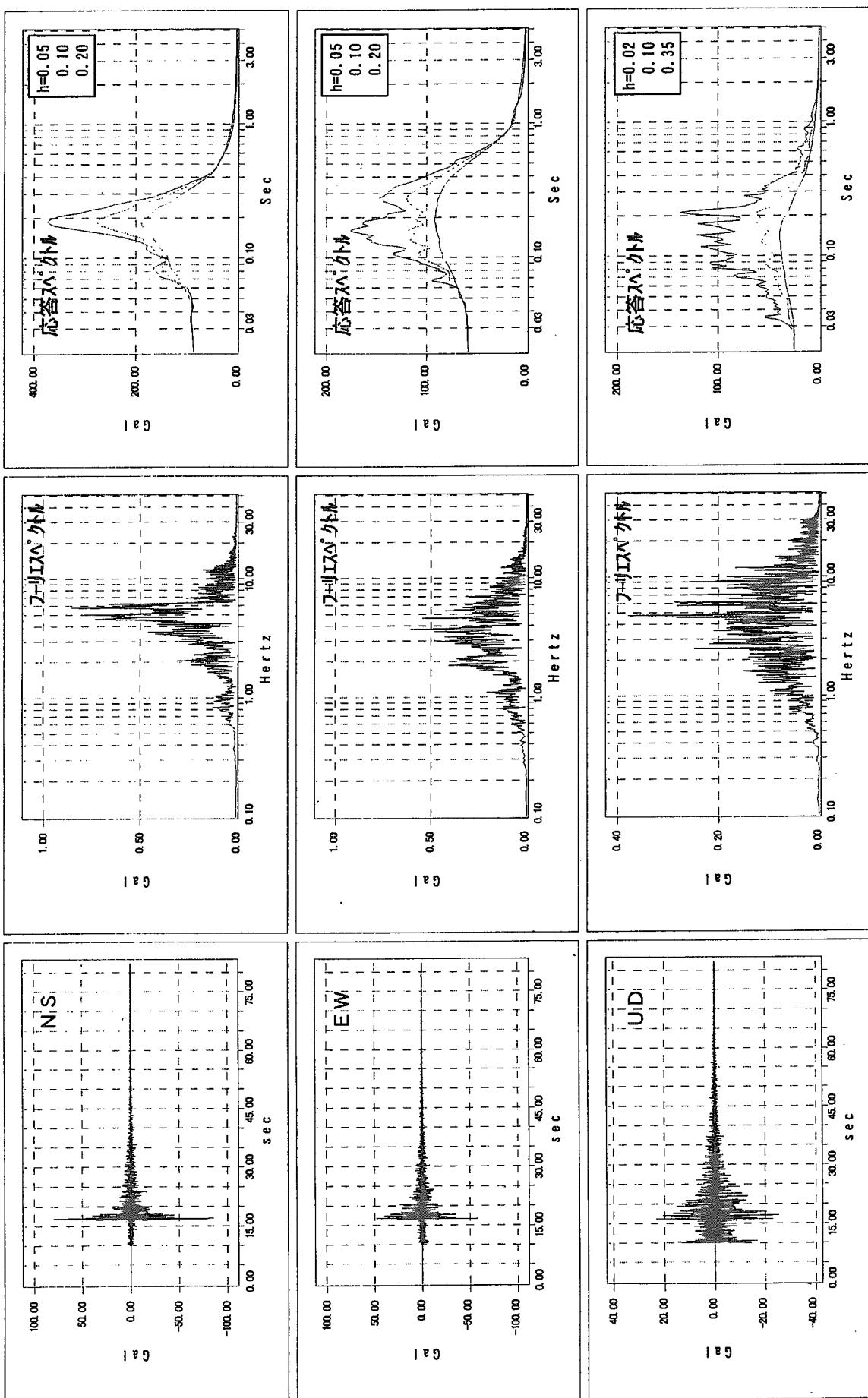


図-5.1 (a) テストベッド観測地震波 (EQ326-TB)

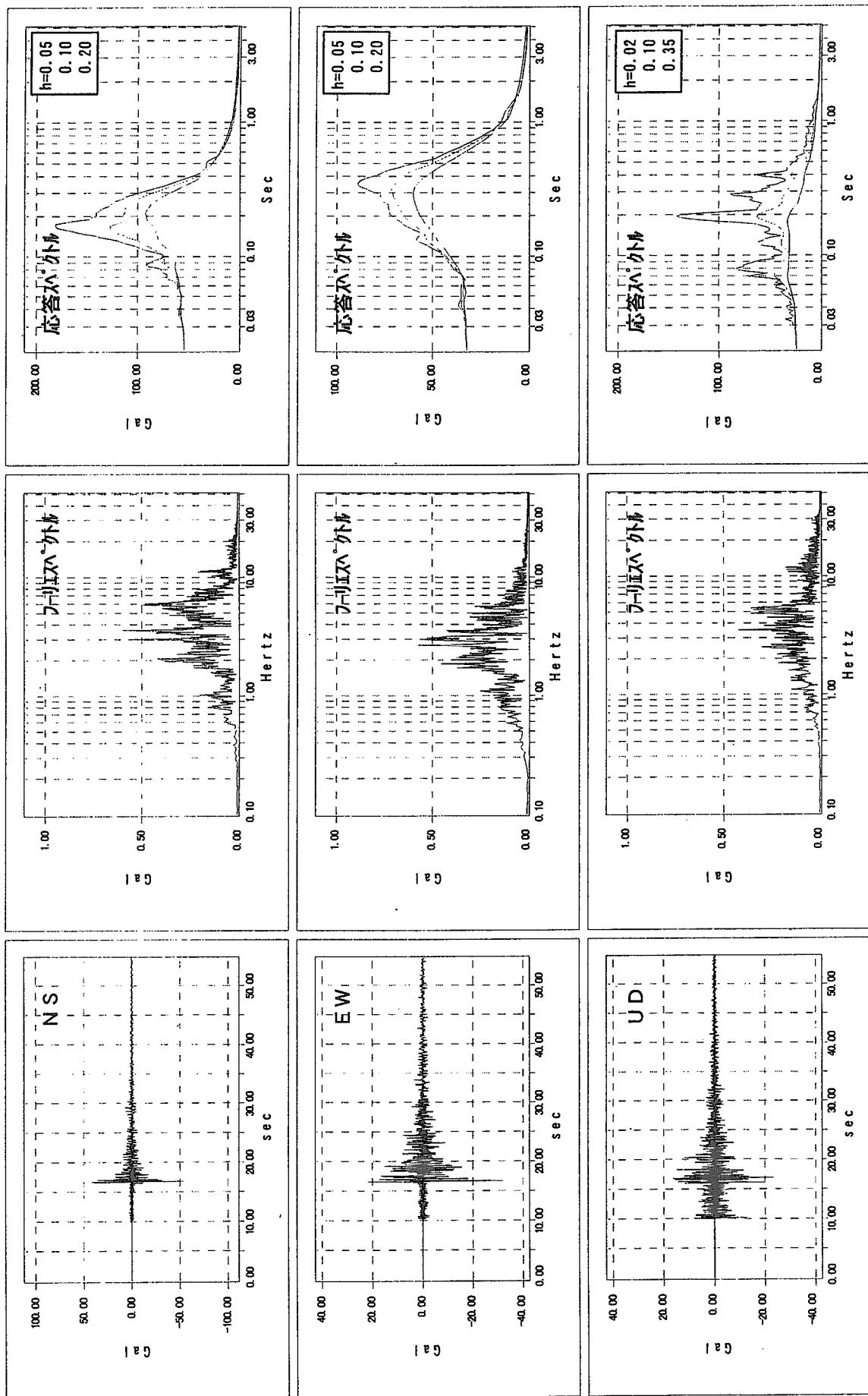


図-5.1(b) 建屋1階観測地震波 (EQ326-FL)

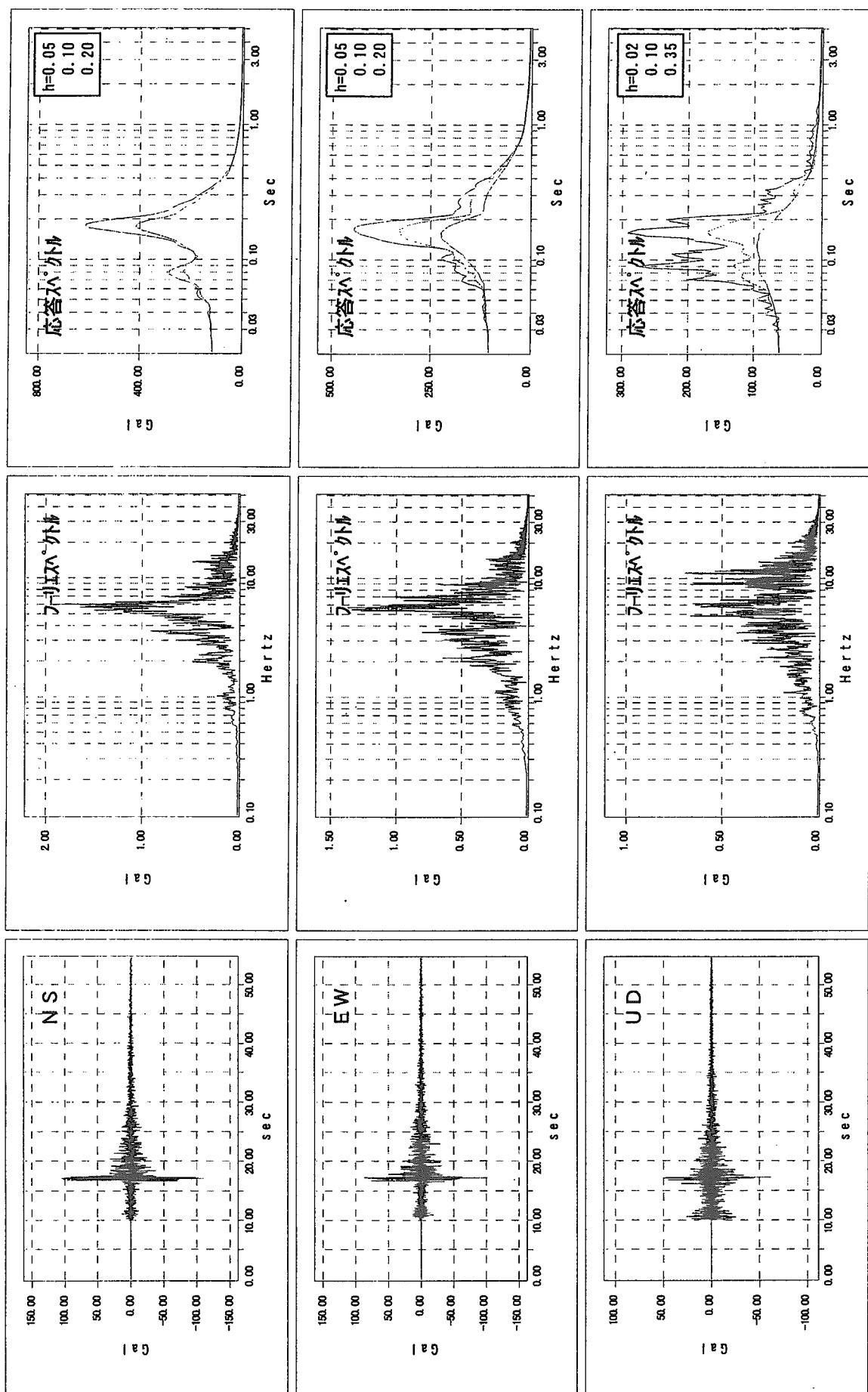


図-5.1 (c) 建屋近接地盤観測地震波 (EQ326-GL)

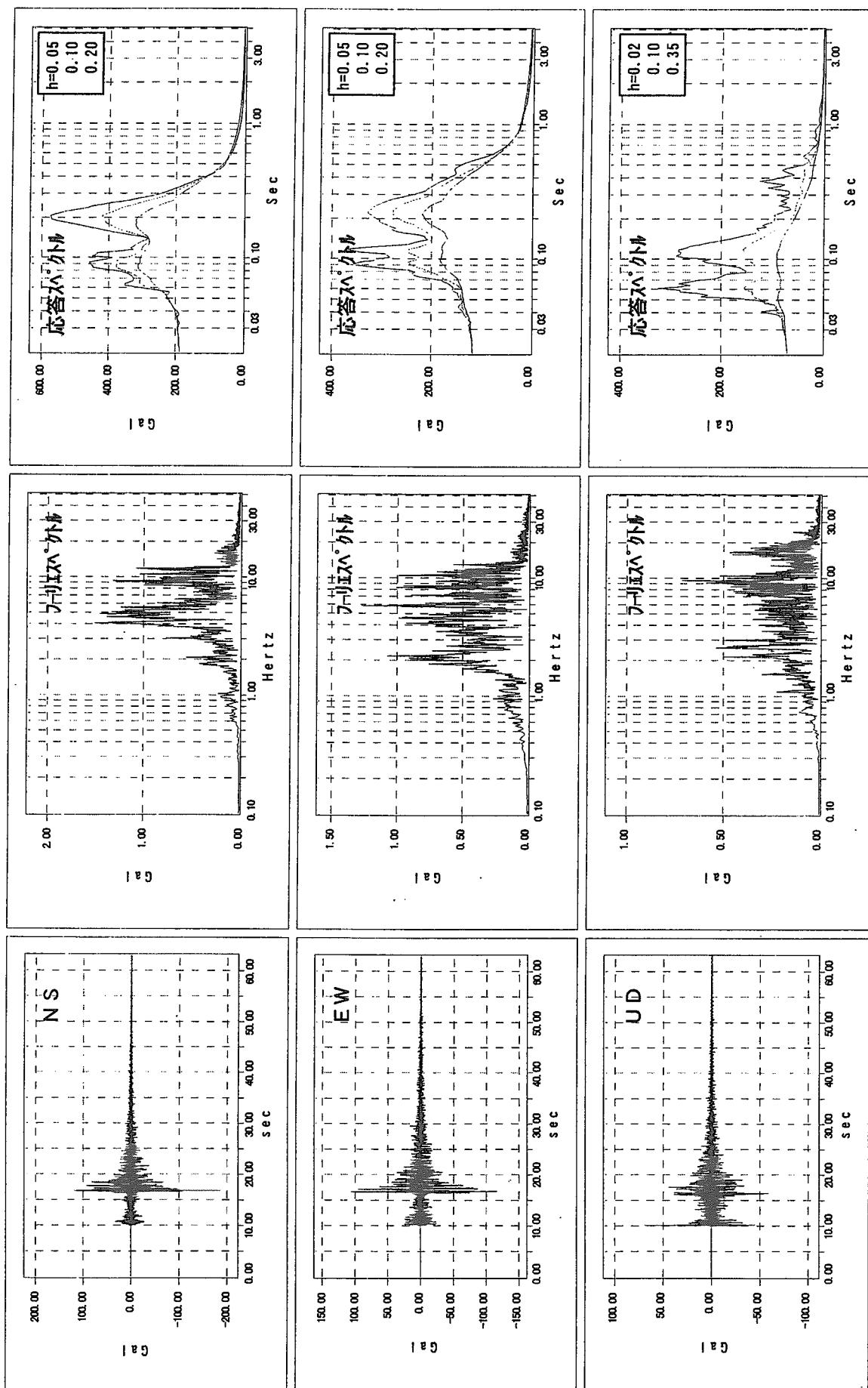


図-5.1 (d) 鉛直アレー観測地震波 (EQ82)

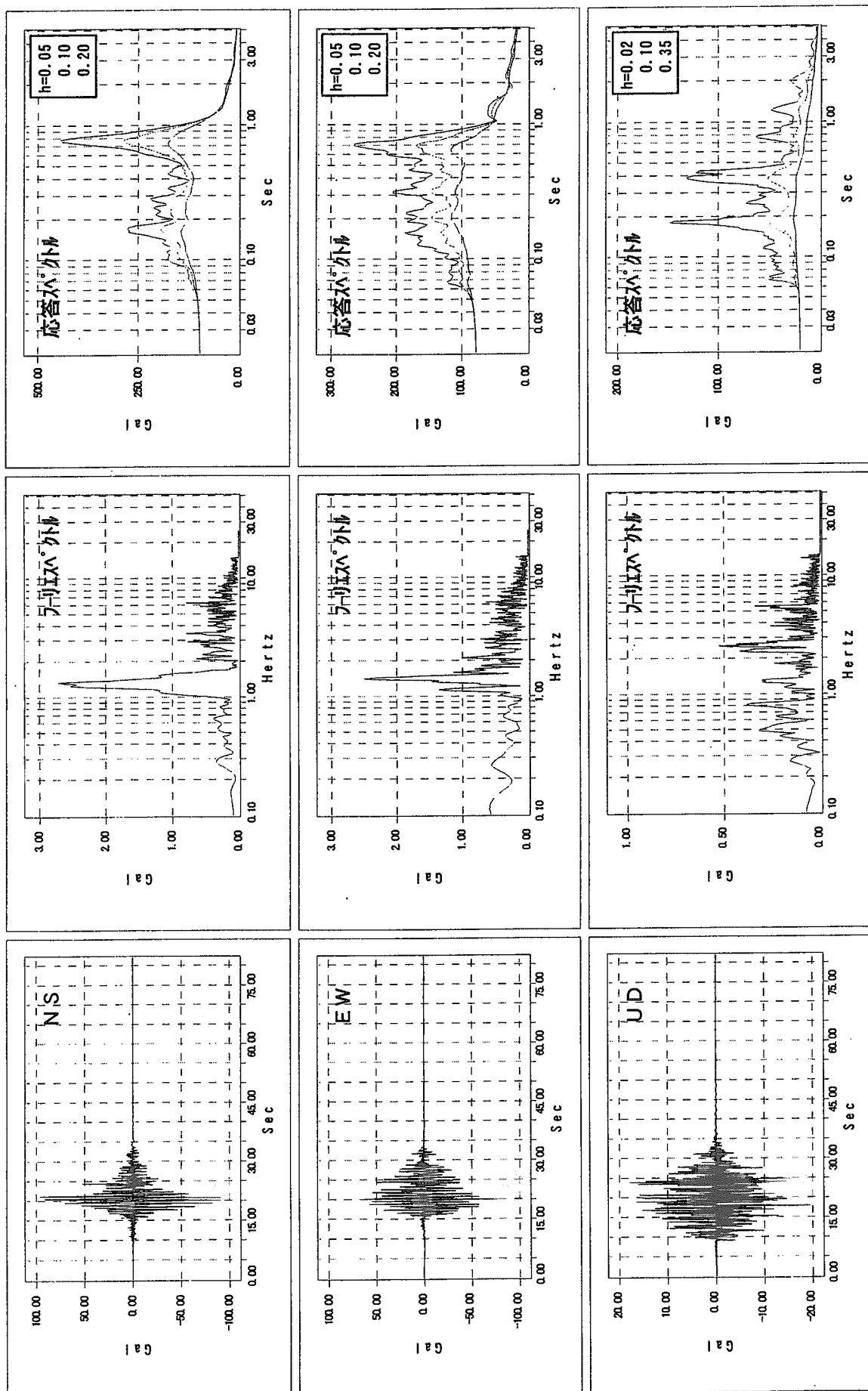


図-5.1(e) 断層モデルによる地震波（大洗サイト・體ヶ浦地震・W7.2想定）

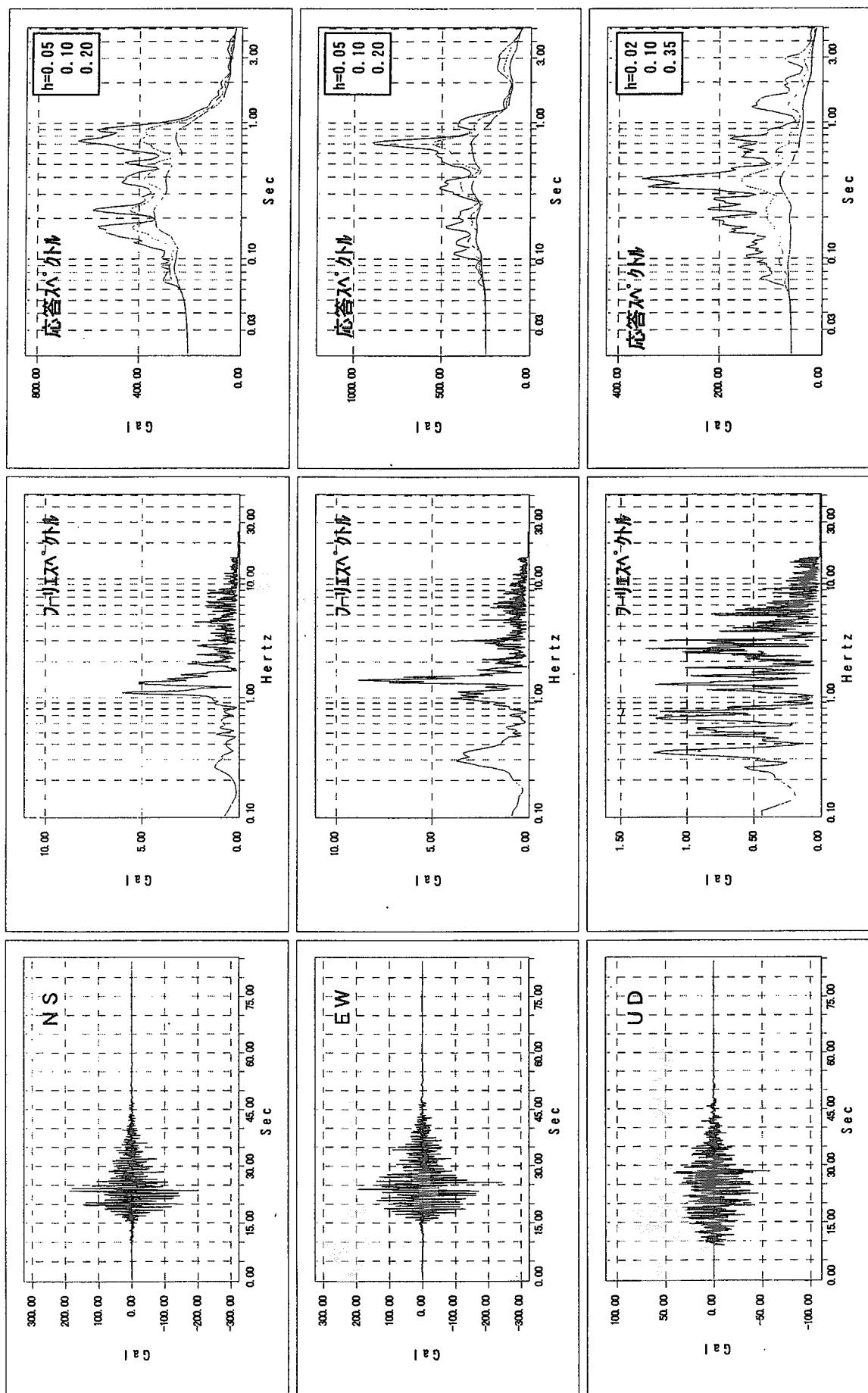


図-5.1(f) 断層モデルによる地震波（大洗サイト・震ヶ浦地震・M8.0想定）

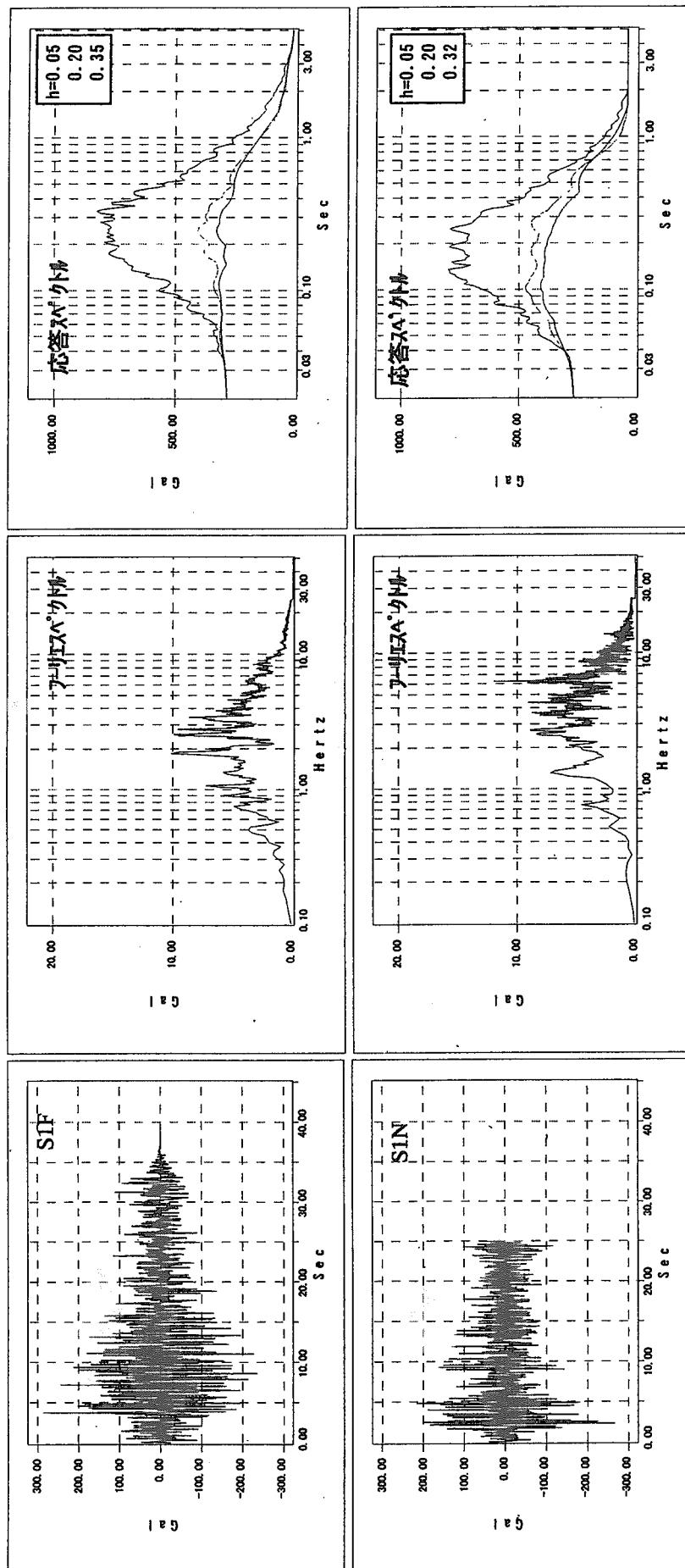


図-5.1(g) 改良標準波 (S1F-S1N)

5.2 地震応答解析結果

解析結果の一覧を表・5.4 に、水平方向および鉛直方向加速度応答倍率を図-5.2 に示す。また、B 1～A2 までの全 20 ケースの加速度および変位時刻歴とそれらのフーリエスペクトルを図-5.3～図-5.21 に示す。

各方向について応答性状を纏めると以下の通りである。

(1) 水平方向応答性状

1) 応答倍率

加速度応答倍率を見ると、水平免震および 3 次元免震ともに大洗研究所の観測地震波に対しては免震効果が極めて大きく、応答倍率が 0.1 以下となっている。また、オイルダンパがある場合(B 2, A 2)の方が若干応答が増加する傾向がある。

断層モデルによる模擬地震波については、3 次元免震でダンパがない場合は、応答倍率が 0.8 程度となり、他の地震波と比べて加速度低減効果が小さい。これは、同入力地震波の卓越周波数が 1.0～2.0Hz にあり、免震システムの 2 次固有振動モードが励起されることによるものと考えられる。しかし、ダンパがある場合は、いずれのケースも応答倍率が 0.4 以下に低減しており、良好な加速度低減効果が得られている。ダンパの制振効果により、入力地震波の周波数特性に影響されずに加速度を低減できることがわかる。

2) 時刻歴波形およびフーリエスペクトルの性状

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見ると、全体的な傾向として、2 次元免震でダンパがない場合、いずれも 0.45Hz(1 次固有振動数)で大きな極大点が発生しているのに対し、ダンパがある場合は、1 次固有振動数のスペクトル値が減少して、幅広い振動数領域でスペクトル値が増加している。また、大洗研究所観測地震波は、全体的に加速度低減効果は大きいものの、ダンパがない場合よりもダンパがある場合の方が応答加速度が増加する傾向にある。これらの性状の変化は、応答曲線(入力波と系の固有振動数の振動数比に対する応答倍率の関係)で通常見られるように、減衰が大きくなると共振振動数の応答倍率が急激に減少し、共振点周辺の振動数領域の応答倍率が相対的に大きくなることによるものと考えられる。特に、大洗研究所観測波は、4 Hz～5 Hz よりも高い領域に卓越周波数を持つ(図-5.1(a)～(d)参照)ことから、高い振動数の応答成分が増幅し、結果的に最大応答加速度が増加したものと考えられる。

また、3 次元免震では、ダンパがない場合は、いずれも 0.4Hz(1 次固有振動数)と 1.45Hz(2 次固有振動数)に極大点が発生しているが、概して 2 次固有振動モードの影響が顕著に現れており、入力地震波により 2 次固有振動モードが励起される傾向がある。ダンパがある場合は、水平免震と同様に固有振動数におけるスペクトル値が減少し、フラットな特性を示している。また、大洗研究所観測波では、やはりダンパがない場合よりもダンパがある場合の方が応答加速度が増加している。

3) 最大応答変位

解析ケース全体の最大応答変位は、2次元免震でダンパがない場合で12.5cm(S1F)、ダンパがある場合で4.7cm(S1F)、3次元免震ではダンパがない場合で10.9cm(S1F)、ダンパがある場合で4.7cm(S1D)となっている。ダンパがない場合は、多段積層ゴムの許容変位(±100mm)程度をやや上回る変位量となっていることから、振動台試験において入力レベルの制限が必要と考えられる。

(2) 鉛直方向応答性状

1) 応答倍率

加速度応答倍率を見ると、ダンパがない場合は、一部の大洗研究所観測地震波を除いて、入力加速度よりも応答加速度が増幅する傾向があり、特に改良標準波(S1F)では、約3倍に応答が増幅している。

一方、ダンパがある場合は、ダンパがない場合と比べて1/2～1/3程度に加速度が低減し、長周期成分が卓越する断層モデルや改良標準波で、入力加速度とほぼ同等の応答加速度となっている。ダンパの効果により、一様に加速度の増幅が抑制される結果となっている。したがって、鉛直免震系の固有振動数が2Hz程度の場合、特に長周期成分が卓越する地震動に対しては、コイルばねの免震効果で加速度を低減することは難しものと考えられ、免震系で発生する変位や速度を利用して、ダンパの制振効果で応答を抑制する必要があるものと考えられる。

2) 時刻歴波形およびフーリエスペクトルの性状

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見ると、水平方向と同様にダンパがない場合は、いずれも2Hz(3次固有振動数)に極大点が発生しているが、ダンパがある場合は3次固有振動数におけるスペクトル値が減少して、幅広い振動数領域でスペクトル値が増加している。

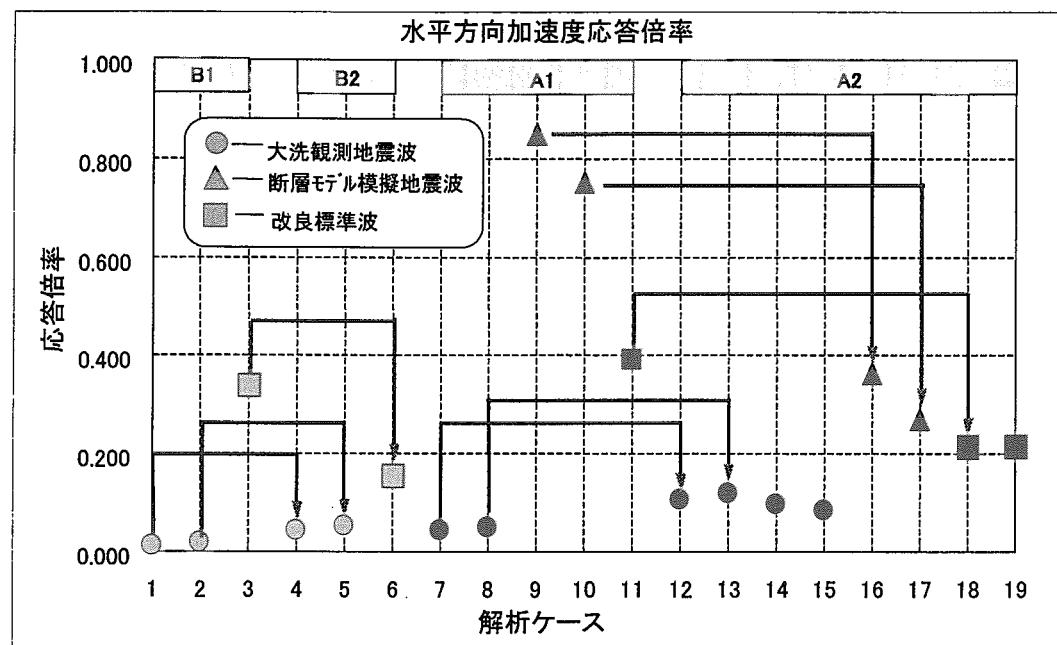
3) 最大応答変位

解析ケース全体の最大応答変位は、ダンパがない場合に2.7cm(S1F)、ダンパがある場合に0.65cm(S1F)となっている。いずれも、コイルばねの許容変位(±50mm)以内の値となっている。

表-5.4 地震応答解析結果一覧

番号	解析ケース	最大入力加速度(Gal)				M1免震最大加速度(Gal)				M2最大加速度(Gal)				M6最大加速度(Gal)				最大水平変位(cm)			
		水平	鉛直	水平	応答倍率	水平	応答倍率	鉛直	応答倍率	水平	応答倍率	鉛直	応答倍率	M1	M6	M1	M6	最大鉛直変位(cm)			
1	B1-EQ326-TB	86.1	25.1	1.11	0.013	—	—	—	—	1.36	0.016	0.147	0.148	—	—	—	—	—			
2	B1-EQ326-FL	53.7	23.3	1.08	0.020	—	—	—	—	1.10	0.020	0.138	0.139	—	—	—	—	—			
3	B1-S1F	286.0	143.0	97.8	0.342	—	—	—	—	98.6	0.345	12.54	12.59	—	—	—	—	—			
4	B2-EQ326-TB	86.1	25.1	3.71	0.043	—	—	—	—	5.23	0.061	0.159	0.160	—	—	—	—	—			
5	B2-EQ326-FL	53.7	23.3	2.91	0.054	—	—	—	—	3.22	0.060	0.111	0.112	—	—	—	—	—			
6	B2-S1F	286.0	143.0	44.5	0.156	—	—	—	—	47.2	0.165	4.74	4.76	—	—	—	—	—			
7	A1-EQ326-TB	86.1	25.1	3.78	0.044	3.894	0.045	18.64	0.743	2.407	0.028	0.167	0.167	0.117	0.117	—	—	—			
8	A1-EQ326-FL	53.7	23.3	2.75	0.051	2.83	0.053	25.99	1.115	2.53	0.047	0.126	0.126	0.163	0.163	—	—	—			
9	A1-FM72	96.8	19.5	82.2	0.849	82.2	0.849	36.18	1.855	91.6	0.946	3.04	4.28	0.226	0.226	—	—	—			
10	A1-FM80	204.0	57.7	153.5	0.752	153.3	0.751	97.8	1.695	180.9	0.887	7.16	10.4	0.611	0.611	—	—	—			
11	A1-S1F	286.0	143.0	111.9	0.391	112.1	0.392	432.3	3.023	138.7	0.485	10.9	15.0	2.71	2.71	—	—	—			
12	A2-EQ326-TB	86.1	25.1	9.237	0.107	9.642	0.112	11.35	0.452	4.093	0.048	0.158	0.165	0.048	0.048	—	—	—			
13	A2-EQ326-FL	53.7	23.3	6.437	0.120	6.654	0.124	11.38	0.488	2.509	0.047	0.111	0.116	0.052	0.052	—	—	—			
14	A2-EQ326-GL	111.0	61.4	10.77	0.097	11.41	0.103	15.99	0.260	4.777	0.043	0.180	0.180	0.049	0.049	—	—	—			
15	A2-EQ82	187.0	69.3	15.90	0.085	18.85	0.101	18.44	0.266	7.202	0.039	0.176	0.215	0.088	0.088	—	—	—			
16	A2-FM72	96.8	19.5	35.17	0.363	35.27	0.364	18.95	0.972	41.02	0.424	1.52	2.54	0.092	0.092	—	—	—			
17	A2-FM80	204.0	57.7	54.84	0.269	54.84	0.269	60.45	1.048	76.33	0.374	3.95	6.41	0.295	0.295	—	—	—			
18	A2-S1F	286.0	143.0	61.79	0.216	62.75	0.219	129.0	0.902	67.15	0.235	4.61	6.83	0.650	0.650	—	—	—			
19	A2-S1N	267.0	133.5	58.03	0.217	60.54	0.227	120.8	0.905	40.02	0.150	2.16	3.43	0.603	0.603	—	—	—			

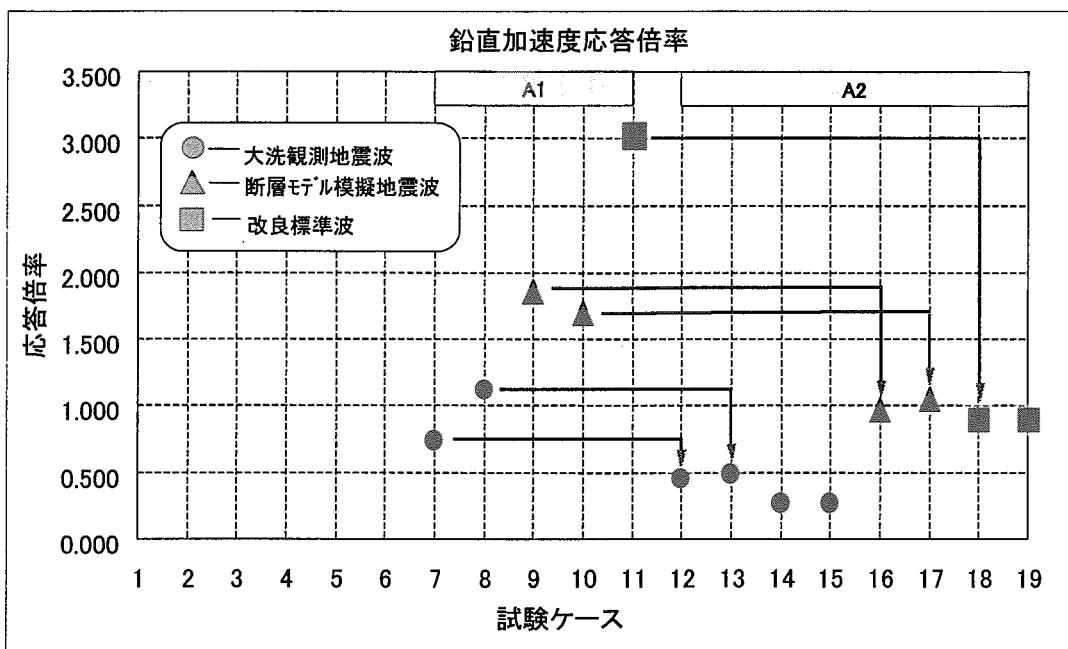
M1——水平免震架台, M2——コンクリートブロック下面, M6——コンクリートブロック上面



番号	解析ケース	最大入力加速度(Gal)		Grid-1最大加速度(Gal)		Grid-2最大加速度(Gal)			
		水平	鉛直	水平	応答倍率	水平	応答倍率	鉛直	応答倍率
1	B1-EQ326-TB	86.1	25.1	1.11	0.013	—	—	—	—
2	B1-EQ326-FL	53.7	23.3	1.08	0.020	—	—	—	—
3	B1-S1F	286.0	143.0	97.8	0.342	—	—	—	—
4	B2-EQ326-TB	86.1	25.1	3.71	0.043	—	—	—	—
5	B2-EQ326-FL	53.7	23.3	2.91	0.054	—	—	—	—
6	B2-S1F	286.0	143.0	44.5	0.156	—	—	—	—
7	A1-EQ326-TB	86.1	25.1	3.78	0.044	3.894	0.045	18.64	0.743
8	A1-EQ326-FL	53.7	23.3	2.75	0.051	2.83	0.053	25.99	1.115
9	A1-FM72	96.8	19.5	82.2	0.849	82.2	0.849	36.18	1.855
10	A1-FM80	204.0	57.7	153.5	0.752	153.3	0.751	97.8	1.695
11	A1-S1F	286.0	143.0	111.9	0.391	112.1	0.392	432.3	3.023
12	A2-EQ326-TB	86.1	25.1	9.237	0.107	9.642	0.112	11.35	0.452
13	A2-EQ326-FL	53.7	23.3	6.437	0.120	6.654	0.124	11.38	0.488
14	A2-EQ326-GL	111.0	61.4	10.77	0.097	11.41	0.103	15.99	0.260
15	A2-EQ82	187.0	69.3	15.90	0.085	18.85	0.101	18.44	0.266
16	A2-FM72	96.8	19.5	35.17	0.363	35.27	0.364	18.95	0.972
17	A2-FM80	204.0	57.7	54.84	0.269	54.84	0.269	60.45	1.048
18	A2-S1F	286.0	143.0	61.79	0.216	62.75	0.219	129.0	0.902
19	A2-S1N	267.0	133.5	58.03	0.217	60.54	0.227	120.8	0.905

Grid-1---多段積層ゴム上面, Grid-2---コイルばね上面, Grid-6---コンクリートブロック上部

図-5.2(a) 解析結果一覧および加速度応答倍率(水平方向)



番号	解析ケース	最大入力加速度 (Gal)	最大応答加速度*		最大変位 (cm)
			加速度(Gal)	応答倍率	
7	A1-EQ326-TB	25.1	18.64	0.743	0.117
8	A1-EQ326-FL	23.3	25.99	1.115	0.163
9	A1-FM72	19.5	36.18	1.855	0.226
10	A1-FM80	57.7	97.8	1.695	0.611
11	A1-S1F	143.0	432.3	3.023	2.71
12	A2-EQ326-TB	25.1	11.35	0.452	0.048
13	A2-EQ326-FL	23.3	11.38	0.488	0.052
14	A2-EQ326-GL	61.4	15.99	0.260	0.049
15	A2-EQ82	69.3	18.44	0.266	0.088
16	A2-FM72	19.5	18.95	0.972	0.092
17	A2-FM80	57.7	60.45	1.048	0.295
18	A2-S1F	143.0	129.0	0.902	0.650
19	A2-S1N	133.5	120.8	0.905	0.603

* --- 鉛直免震架台応答加速度

図-5.2 (b) 解析結果一覧および加速度応答倍率(鉛直方向)

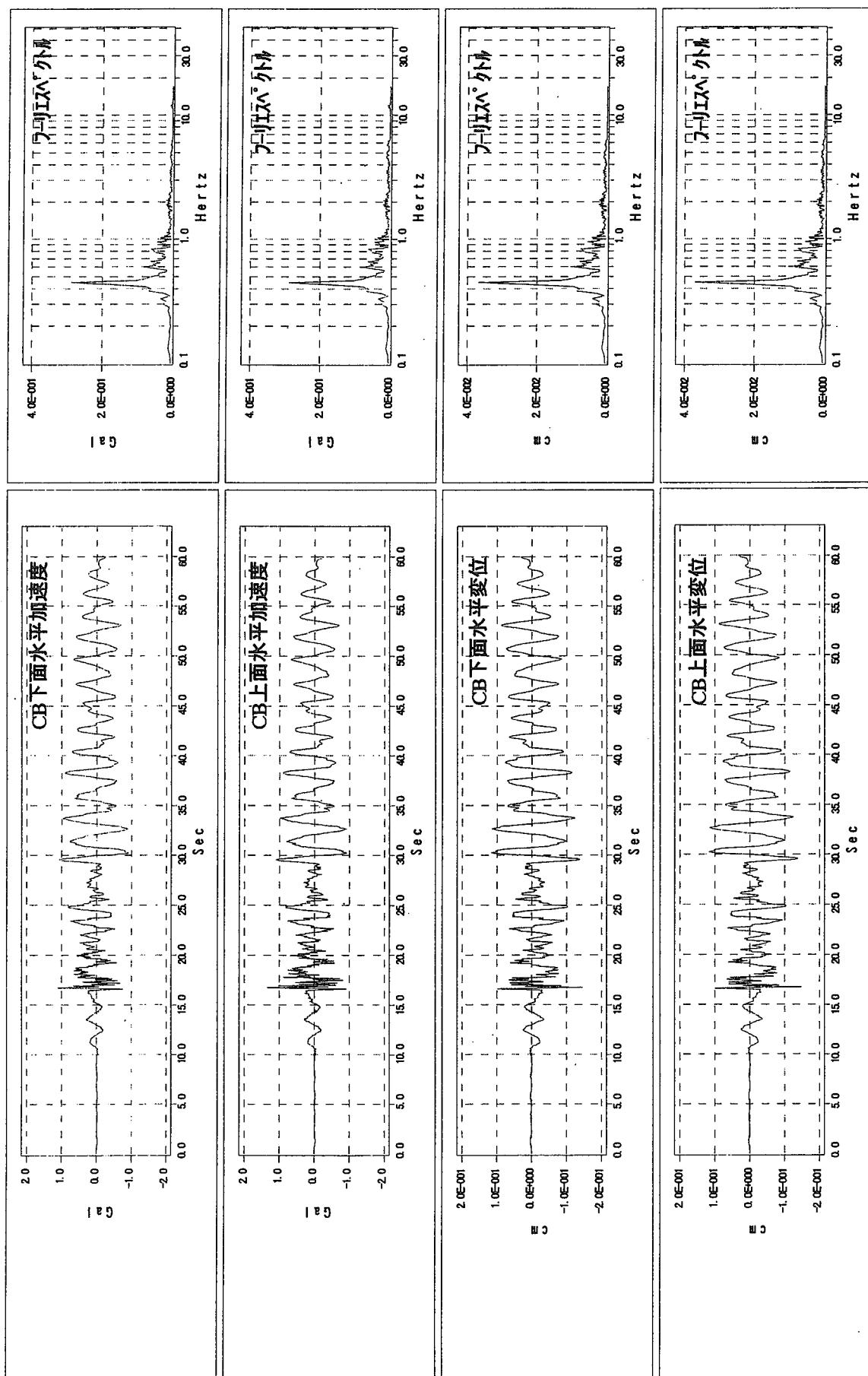


図-5.3 B1-EQ326-TB解析結果

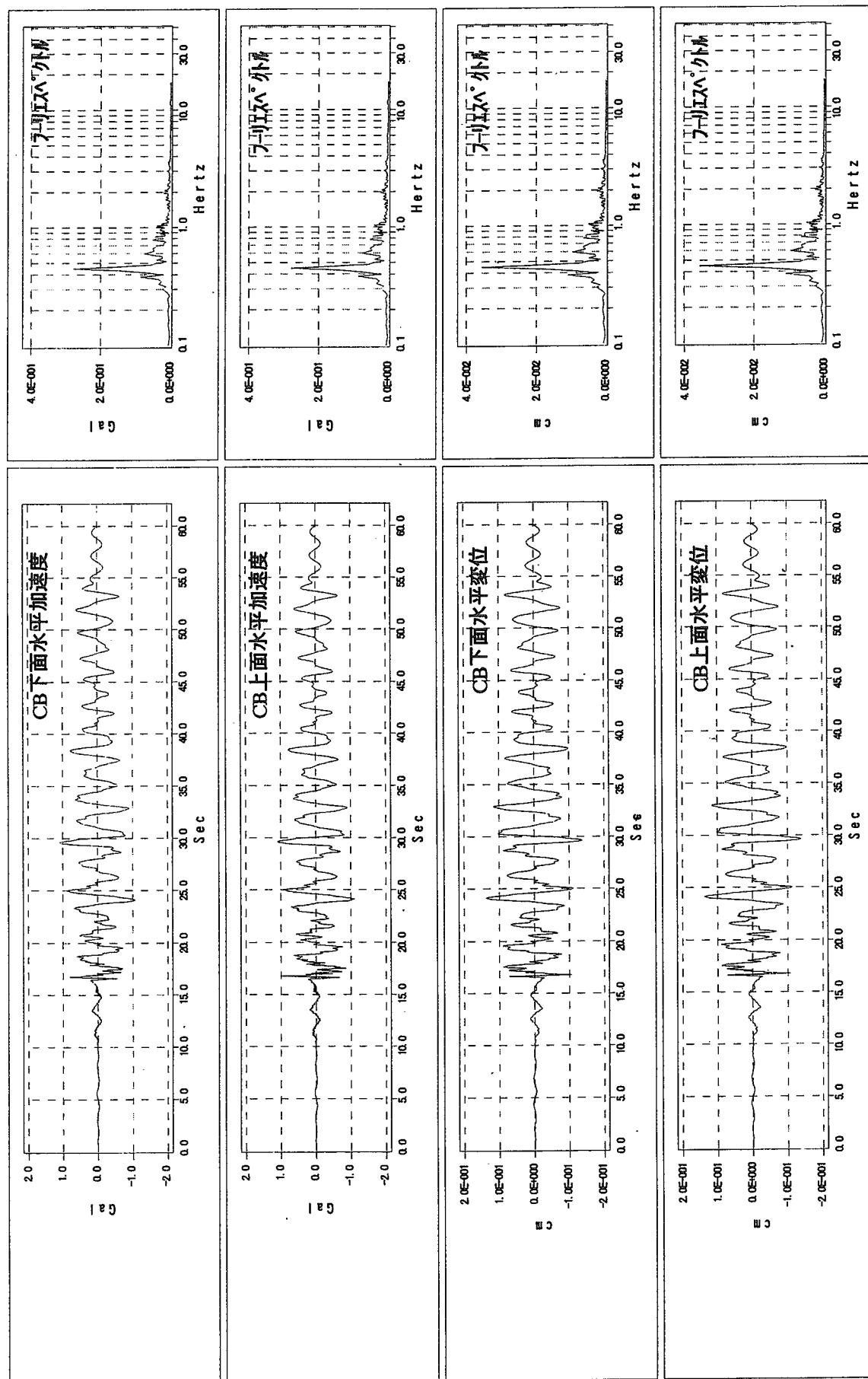


図-5.4 B1-EQ326-FL解析結果

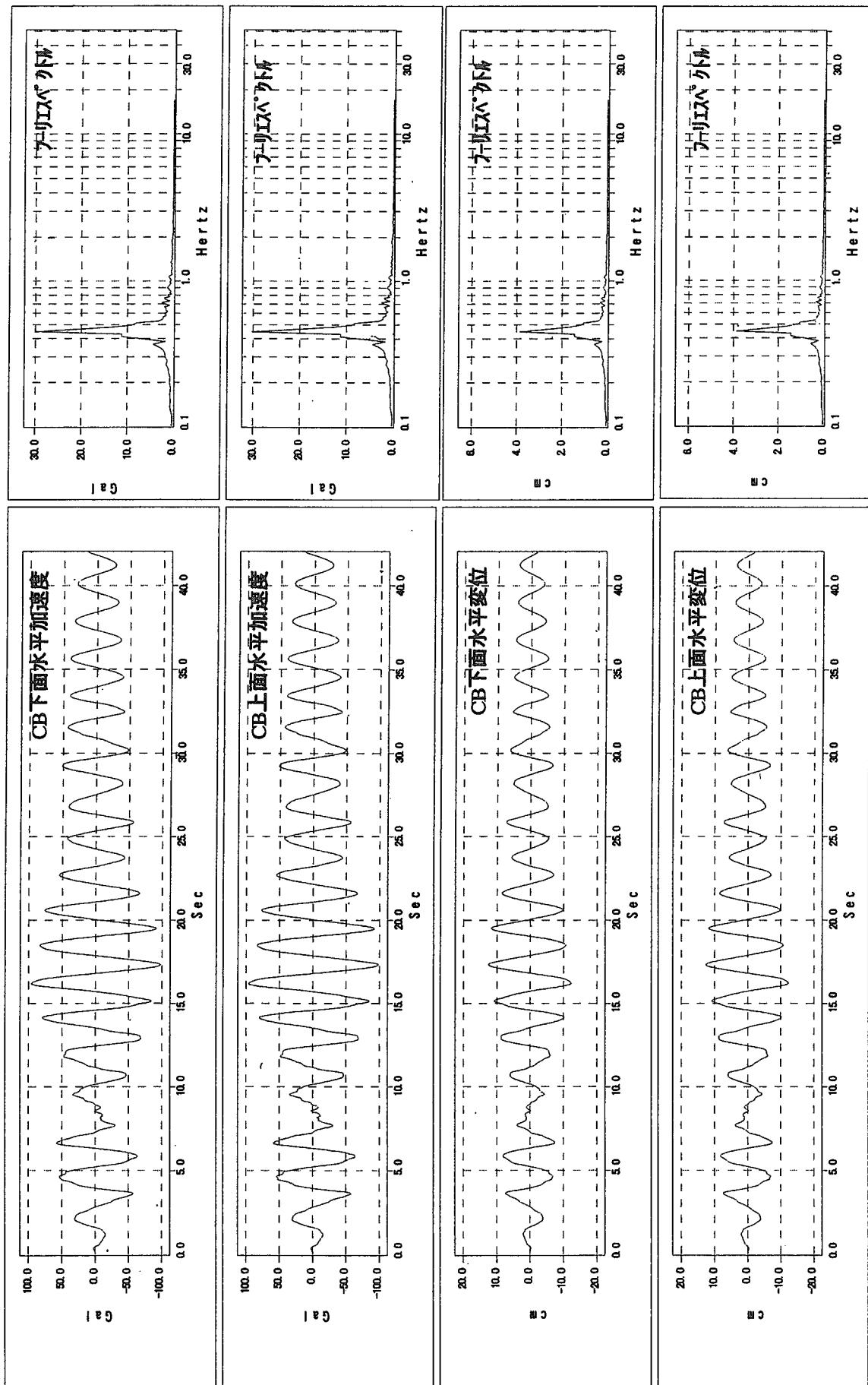


図-5.5 B1-S1F解析結果

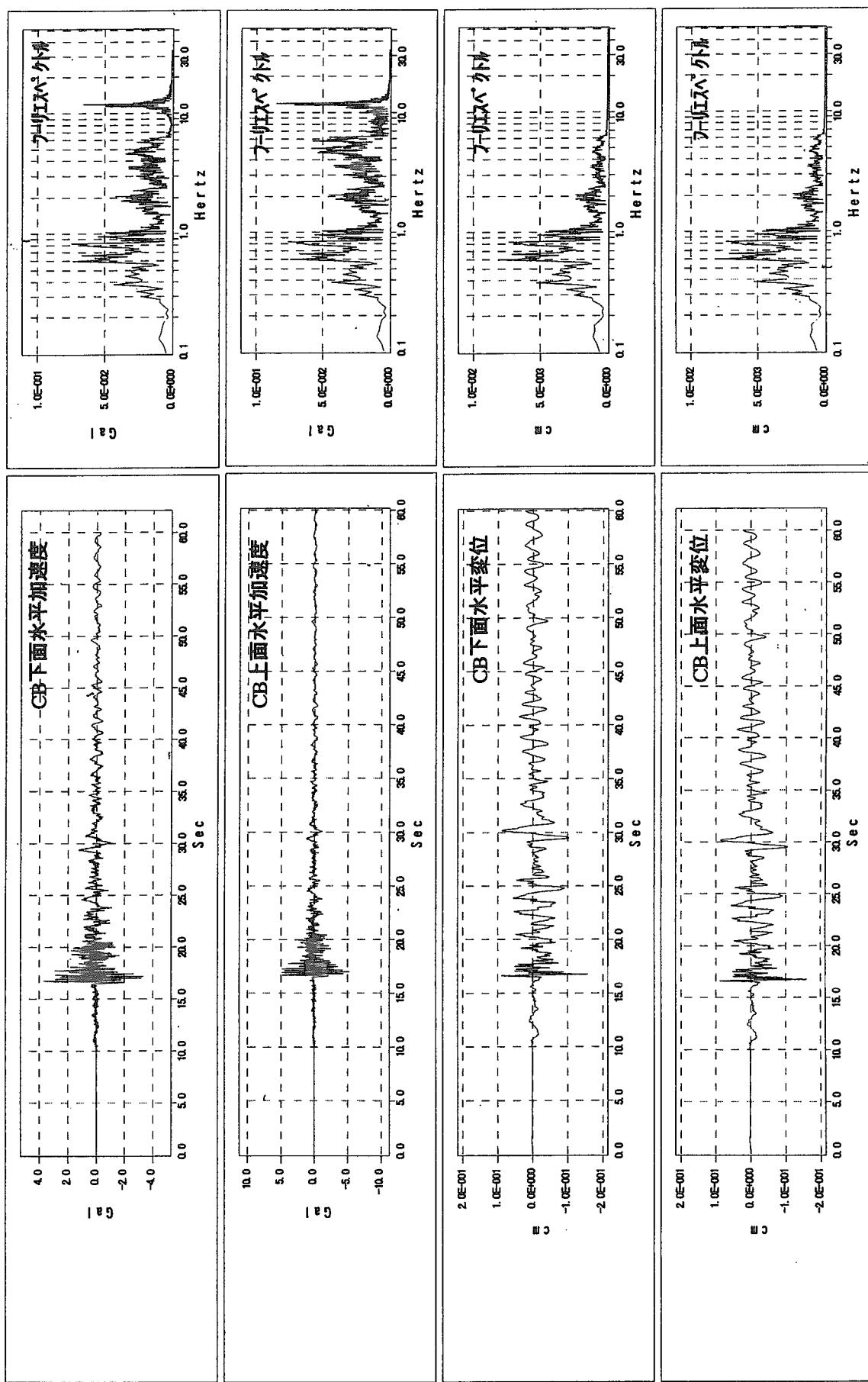


図-5.6 B2-EQ326-TB解析結果

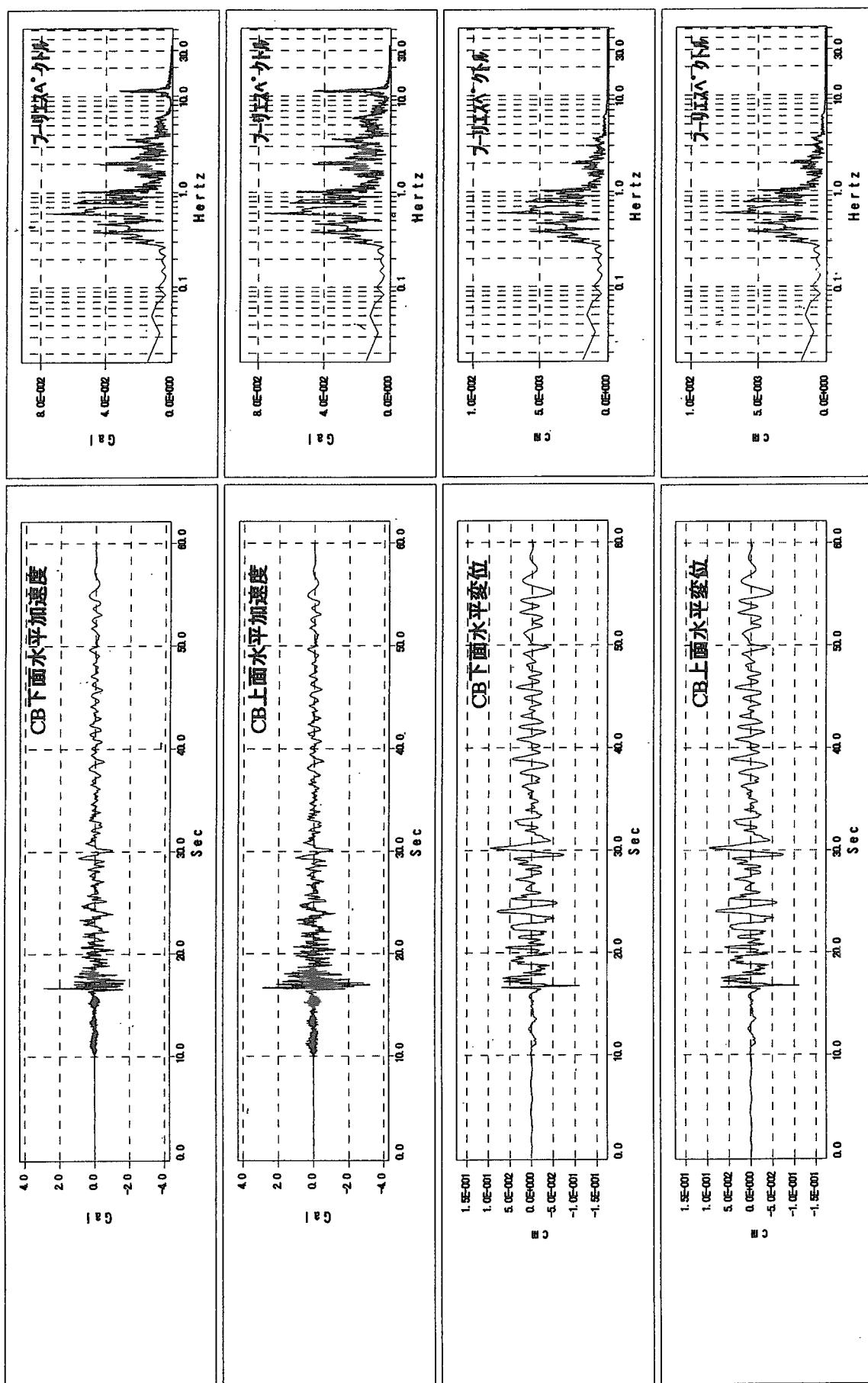


図-5.7 B2-EQ326-FL解析結果

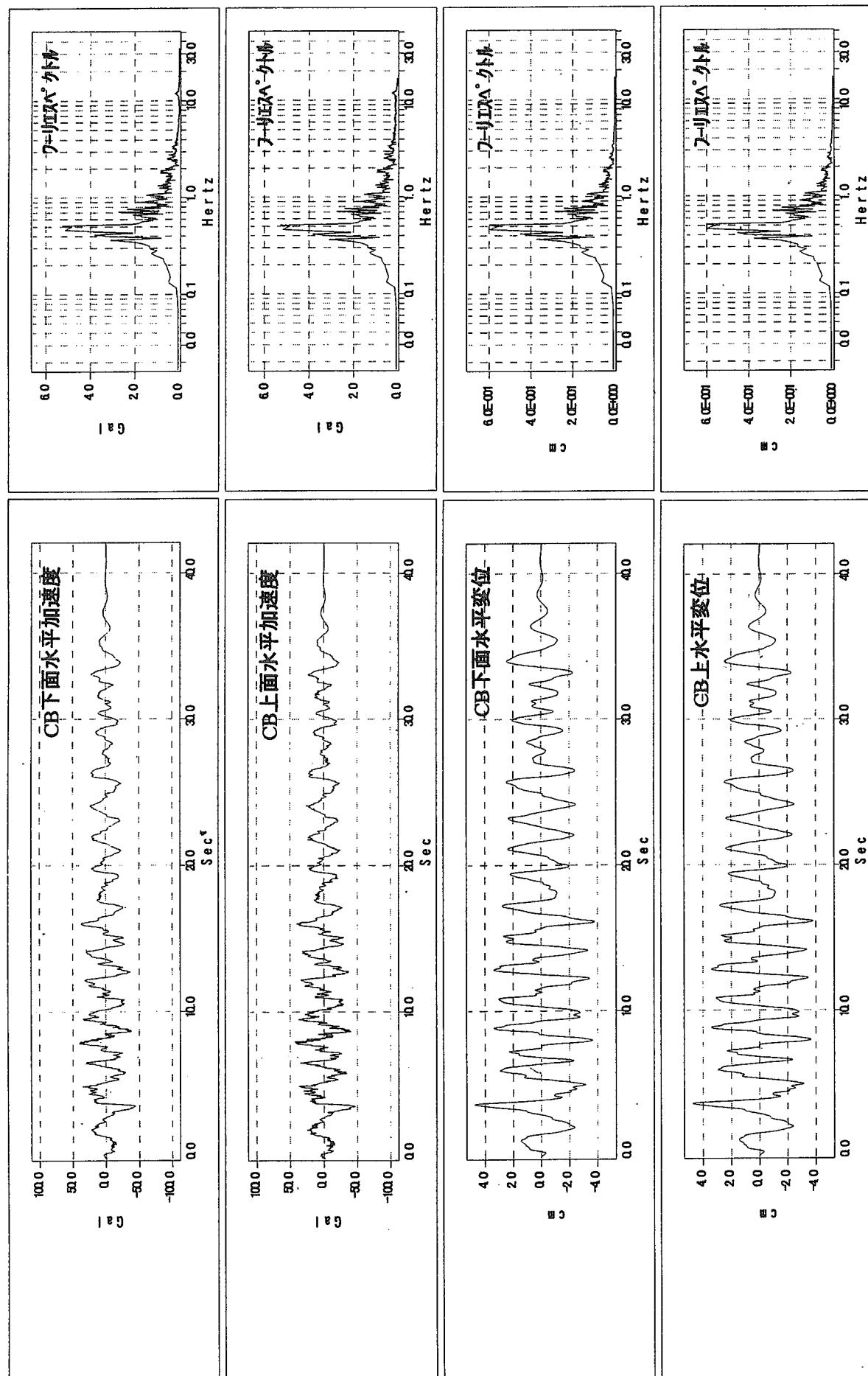


図-5.8 B2-S1F解析結果

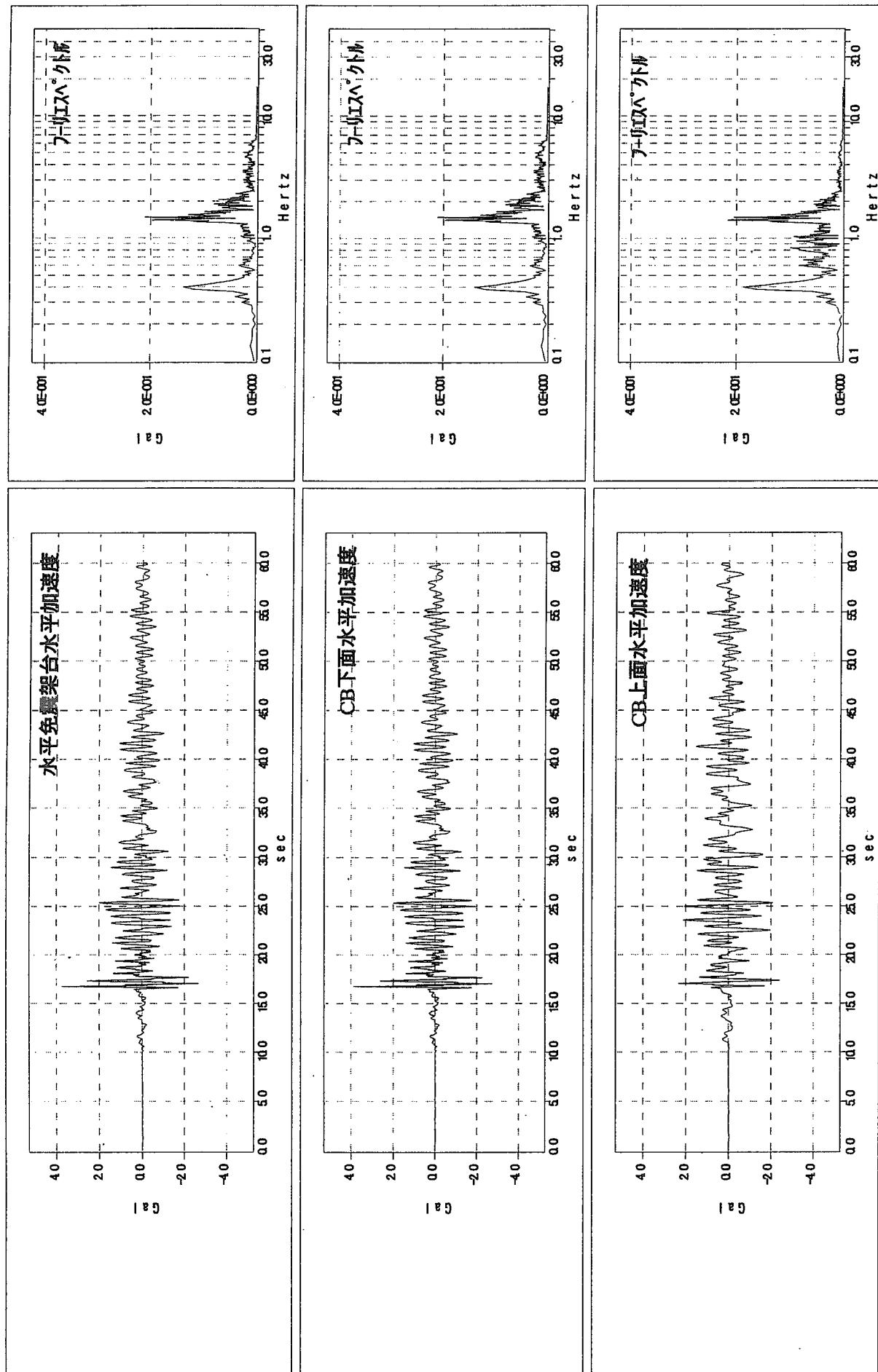


図-5.9(a) A1-EQ326-TB解析結果(1)

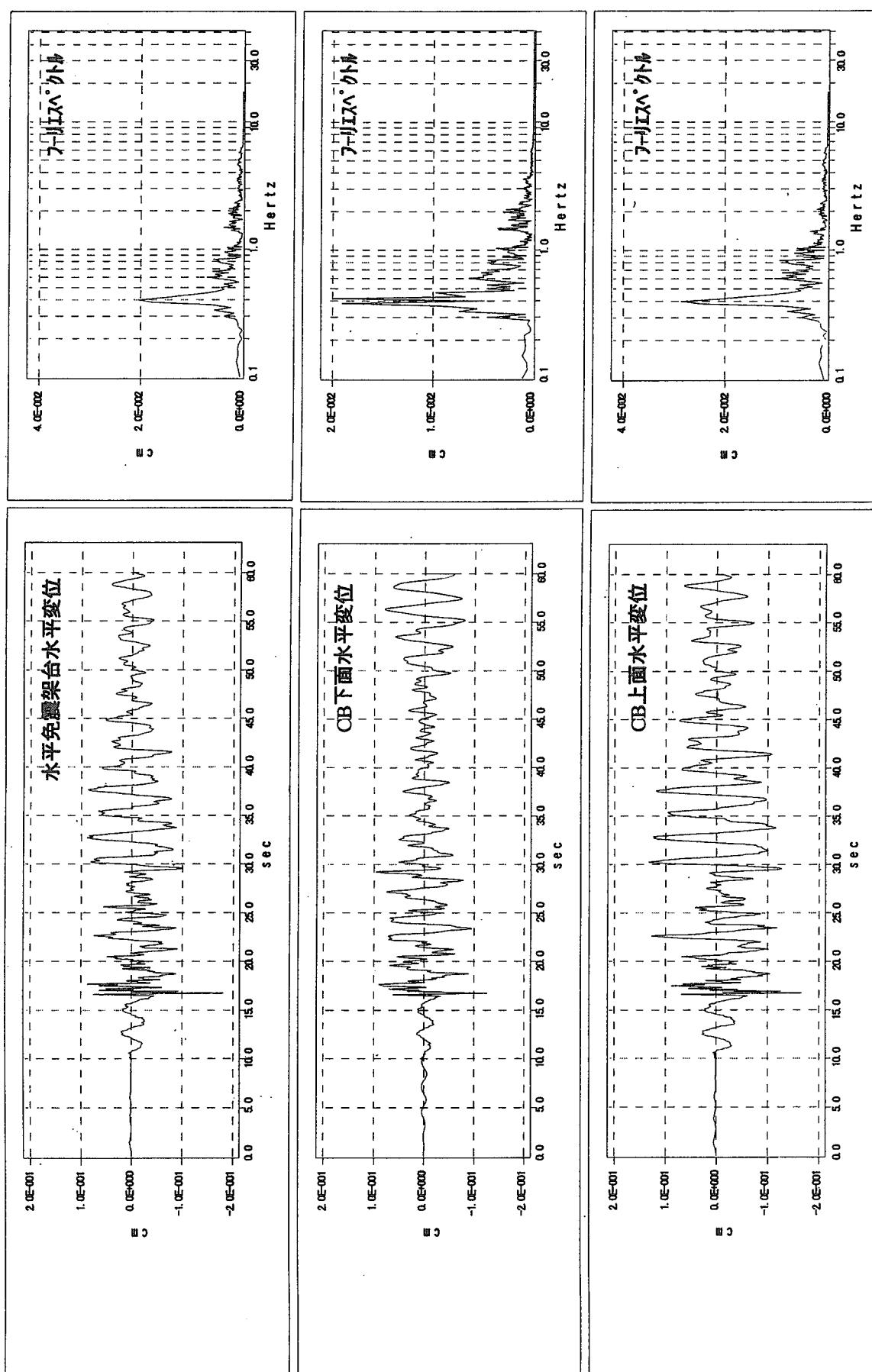


図-5.9 (b) A1-EQ326-TB解析結果(2)

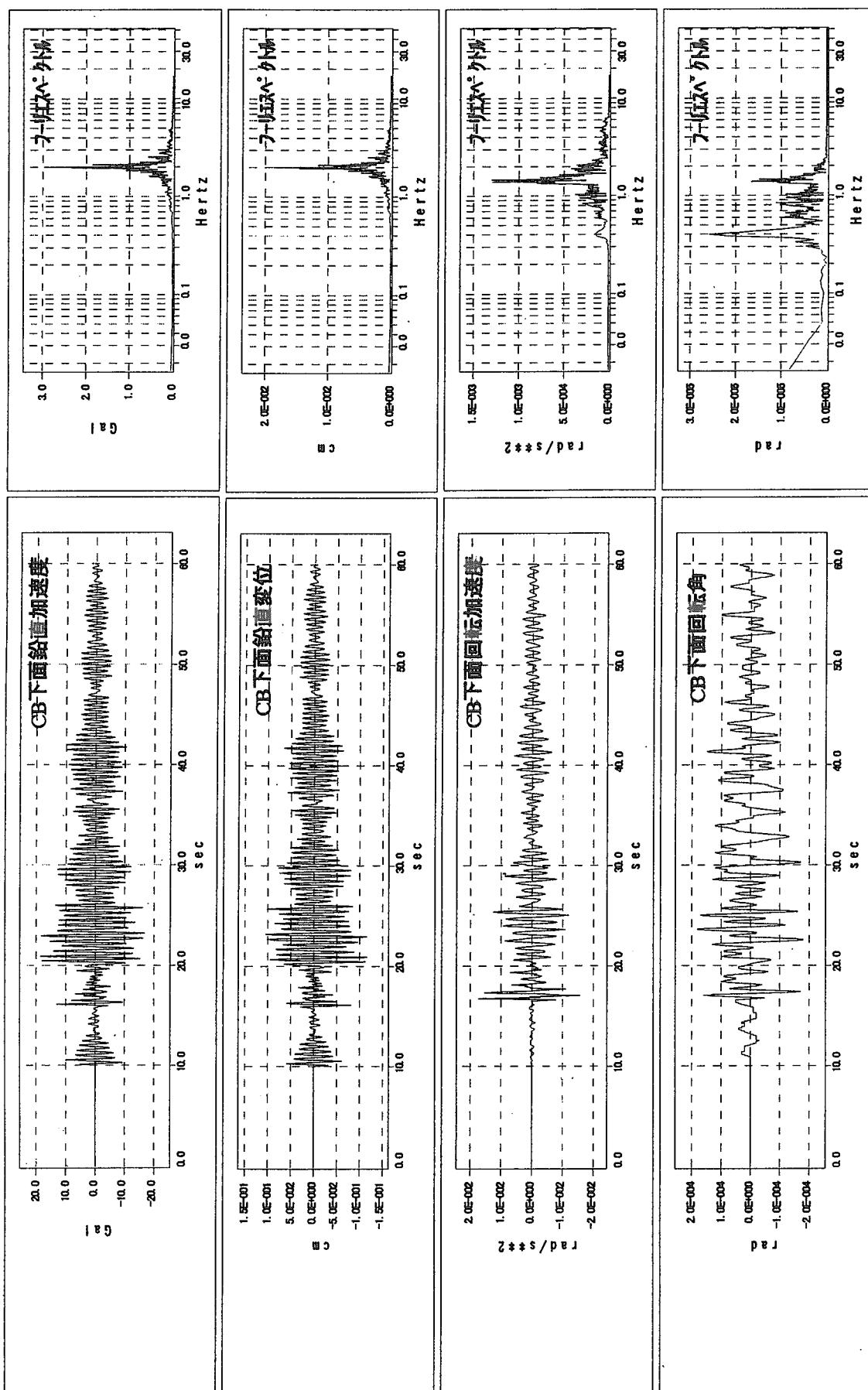


図-5.9(c) A1-EQ326-TB解析結果(3)

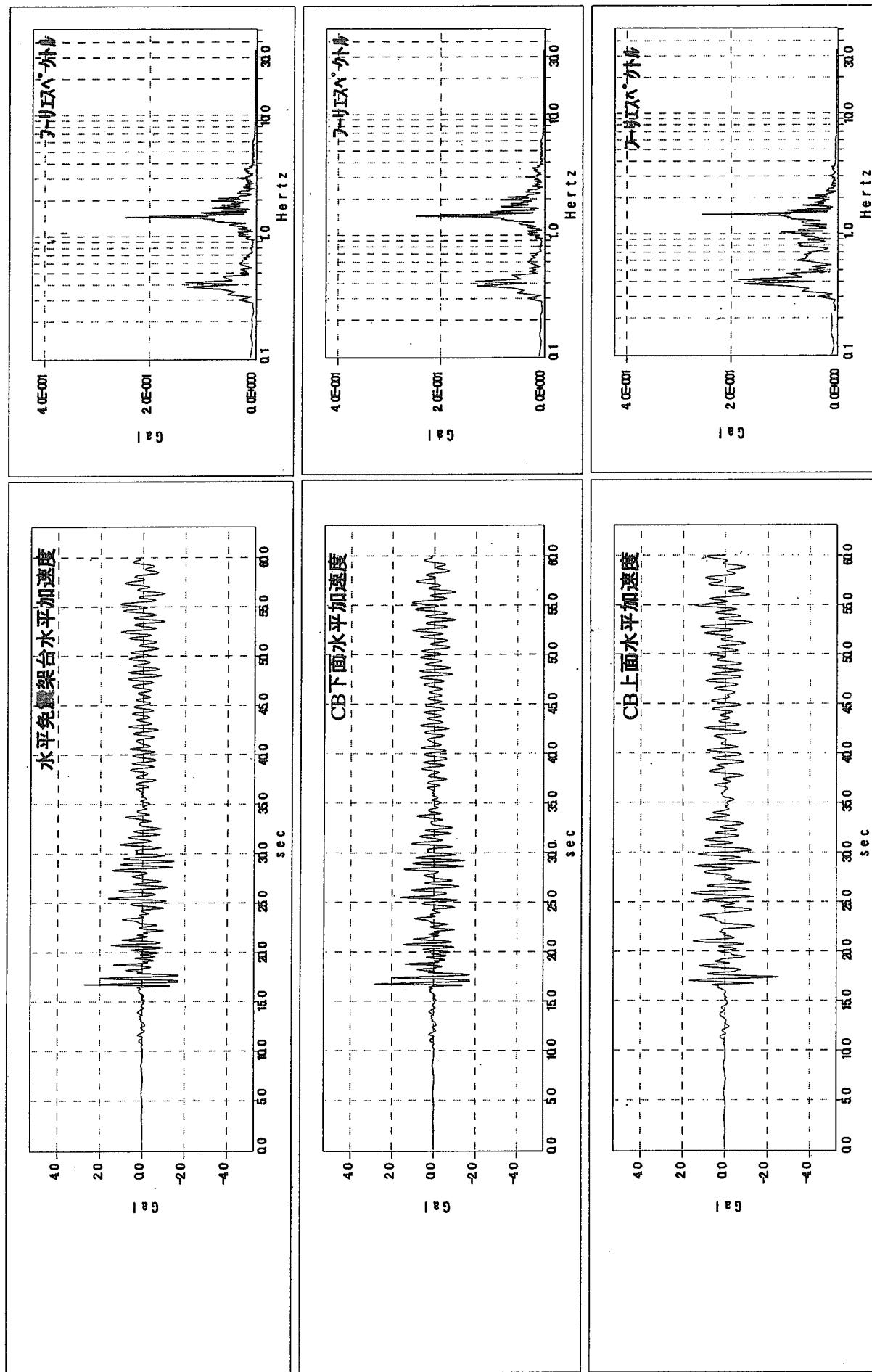


図-5.10(a) A1-EQ326-FL解析結果(1)

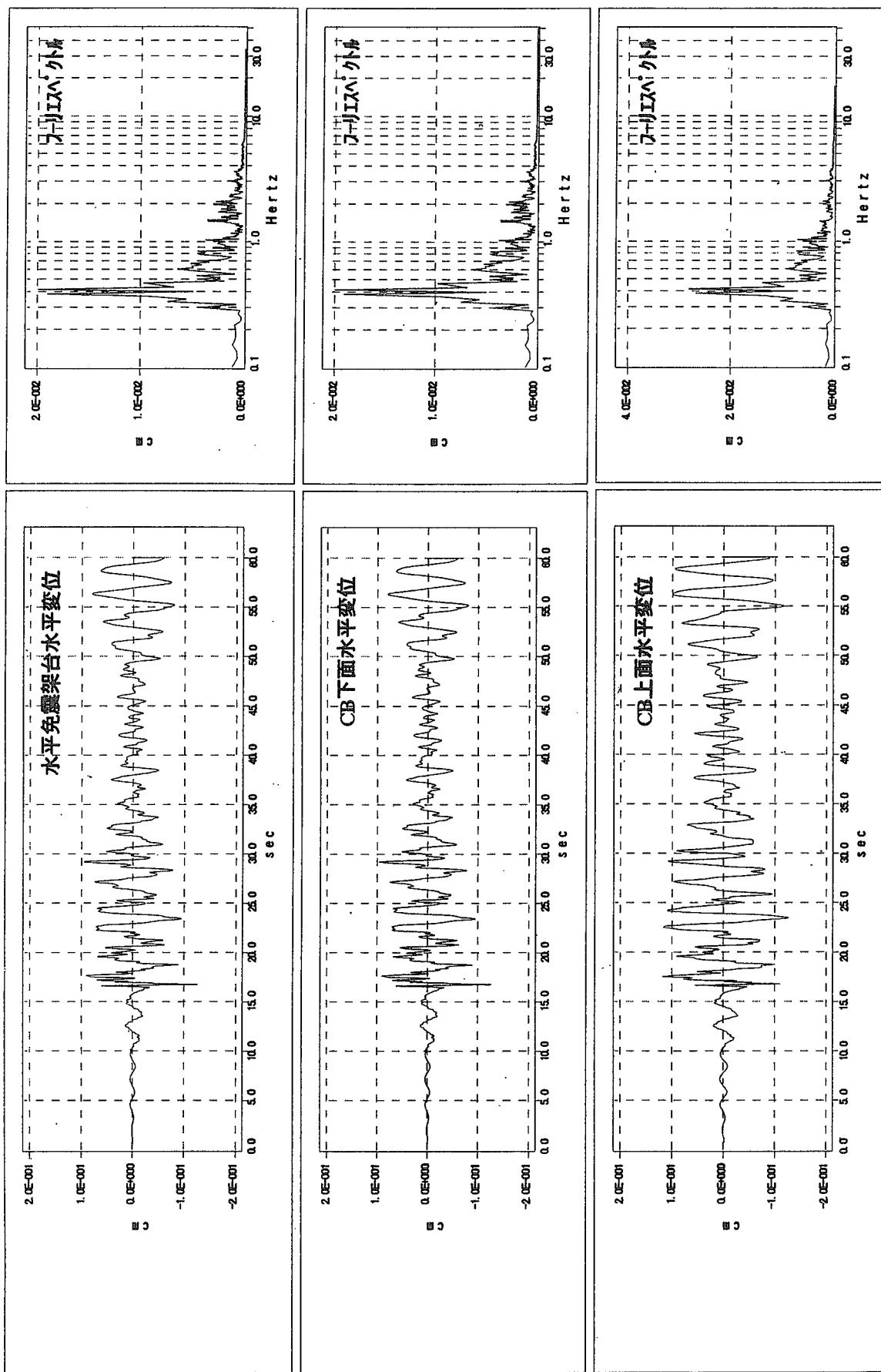


図-5.10(b) AI-EQ326-FL解析結果(2)

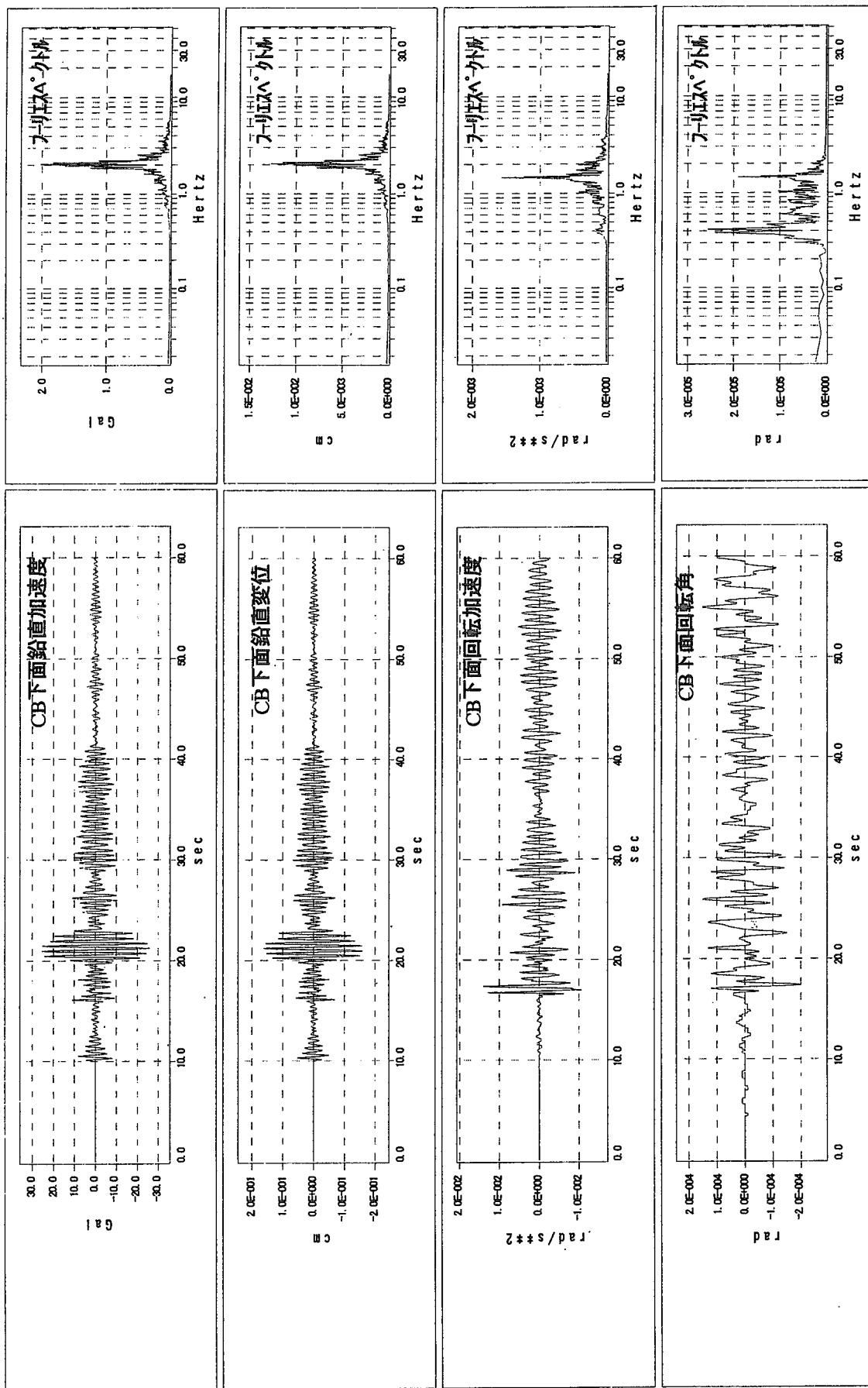


図-5.10(c) A1-EQ326-FL解析結果(3).

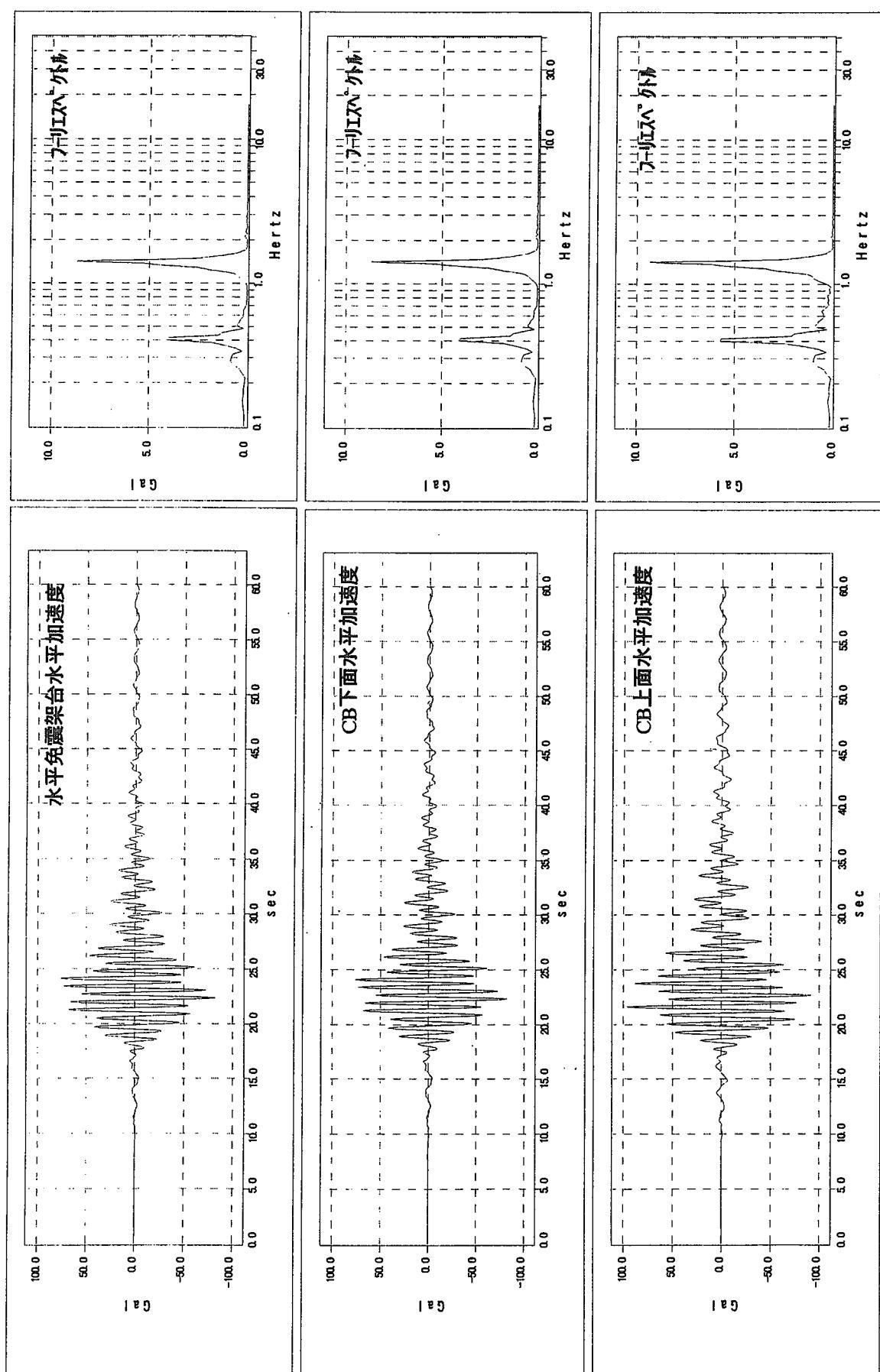


図-5.11(a) A1-FM72解析結果(1)

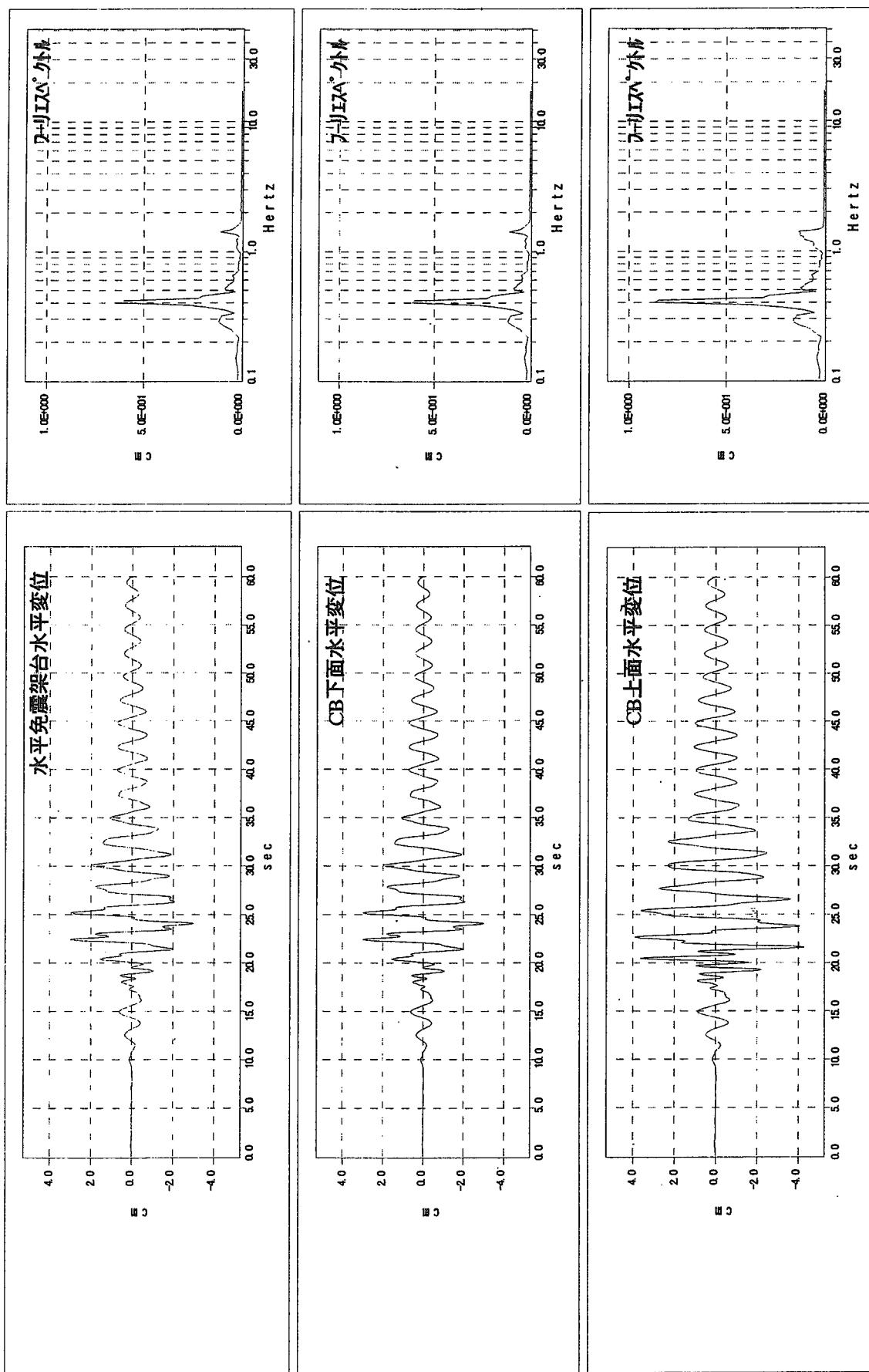


図-5.11(b) A1-FW72解析結果(2)

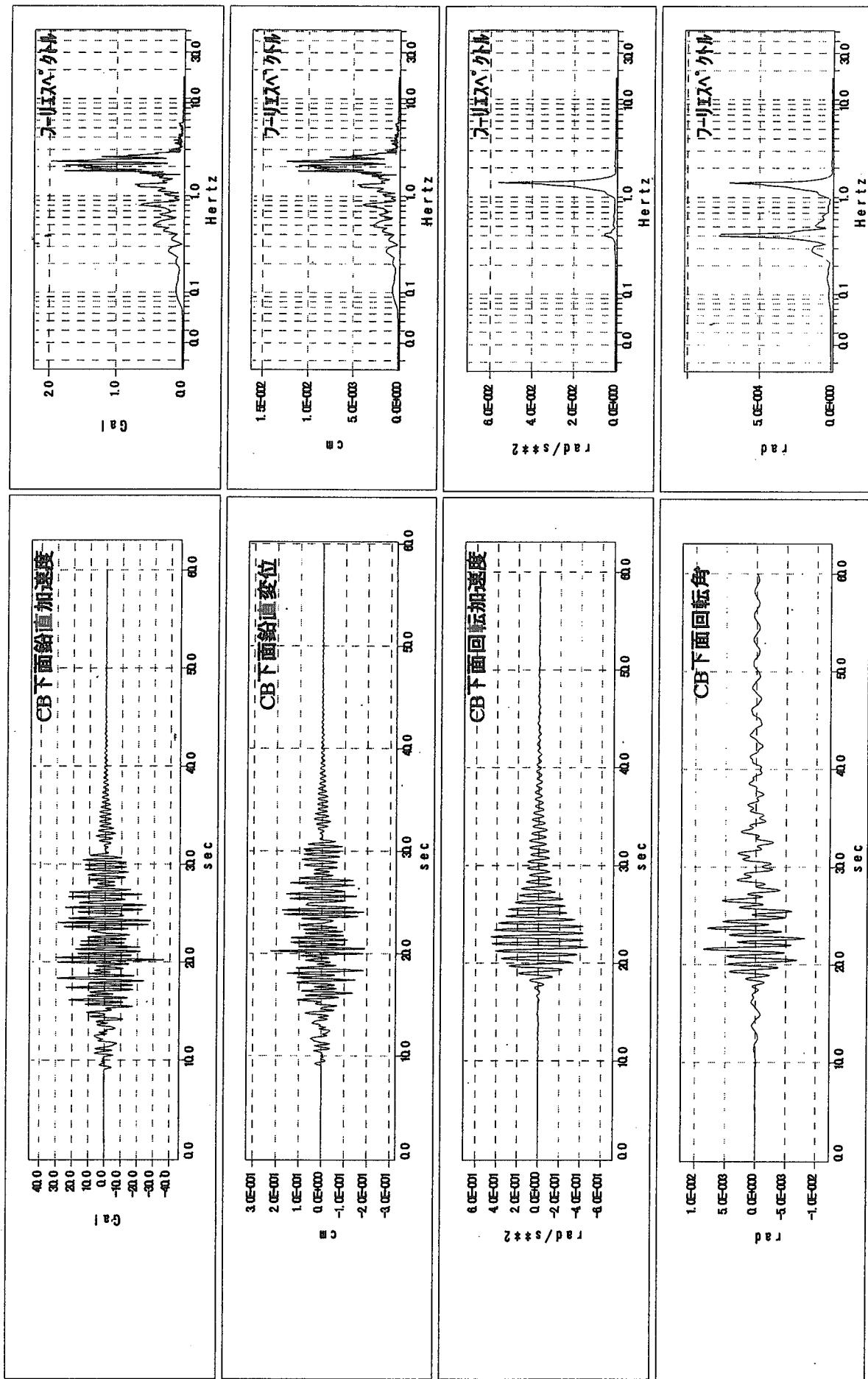


図-5.11(c) A1-FM72解析結果(3)

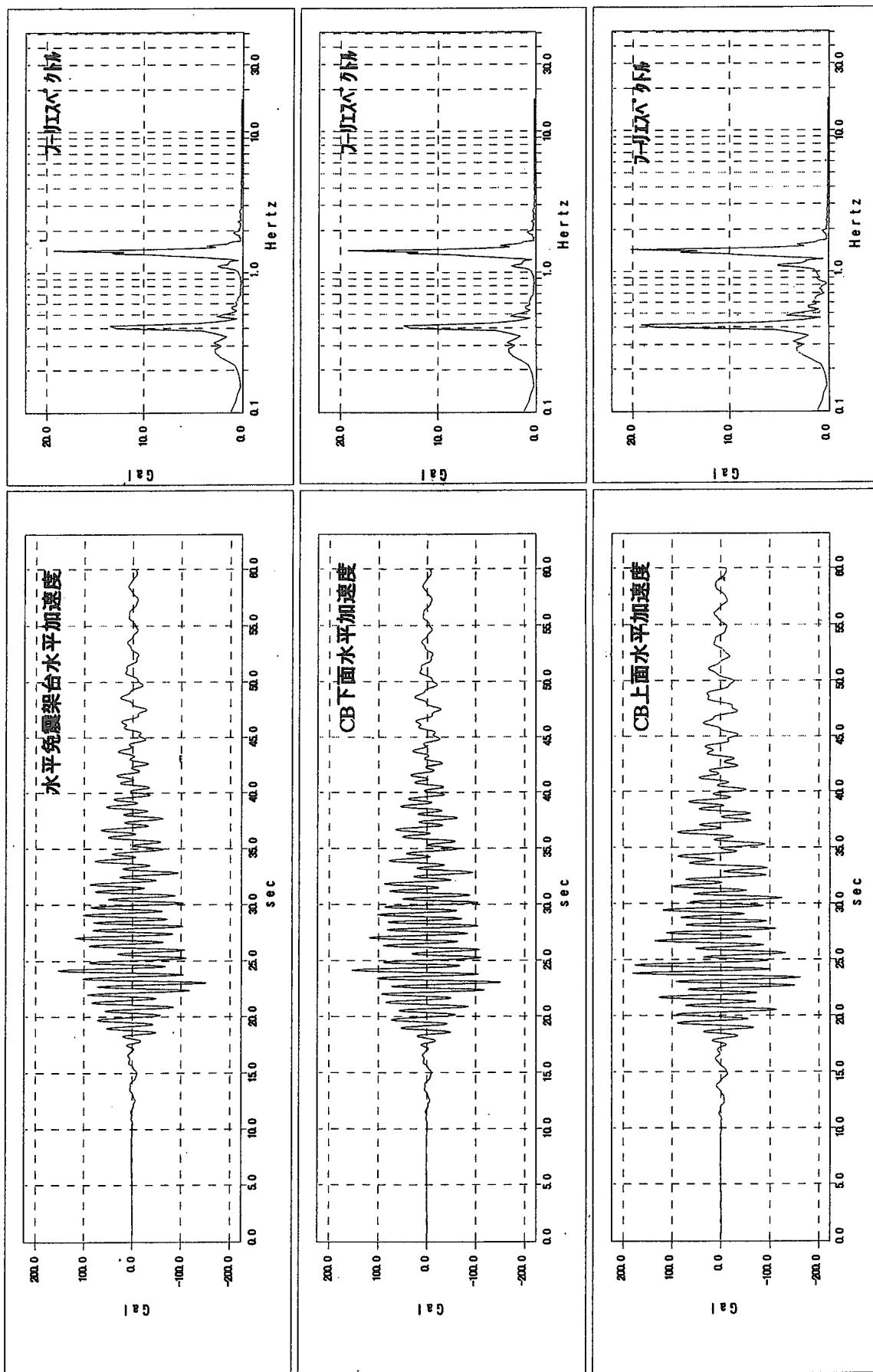


図-5.12(a) A1-FM80解析結果(1)

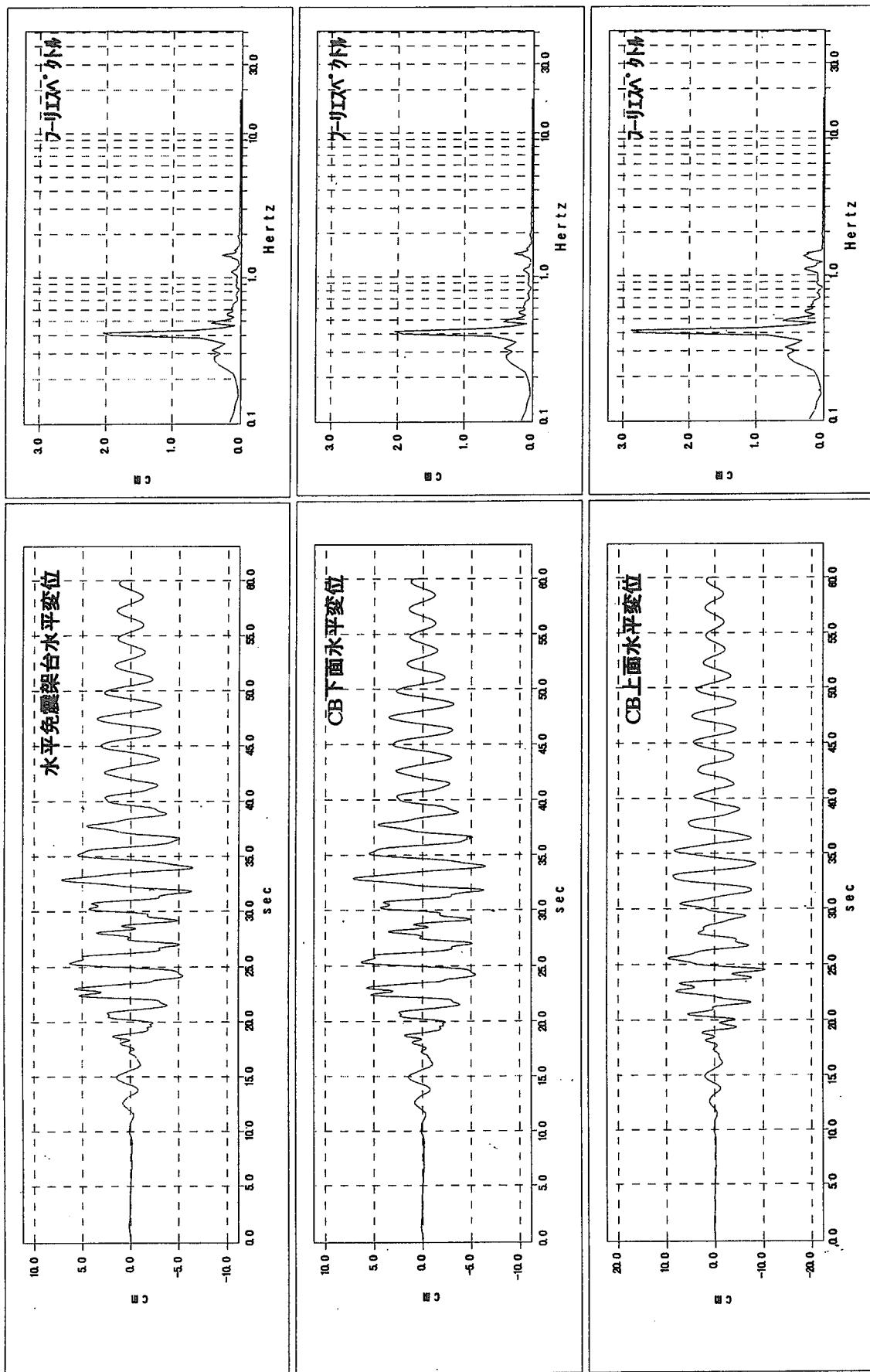


図-5.12(b) AI-FM80解析結果(2)

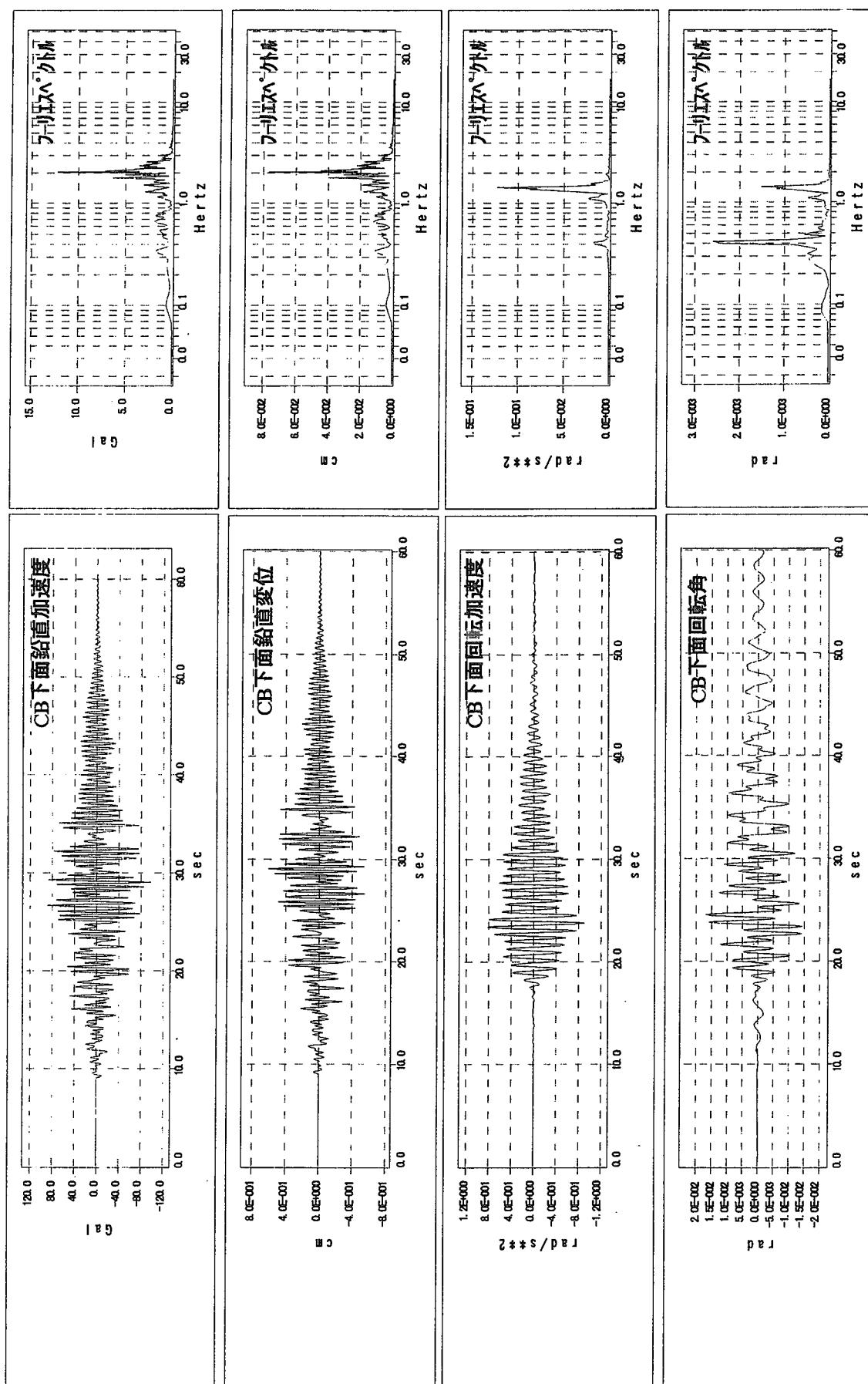


図-5. 12(c) A1-FM80解析結果(3)

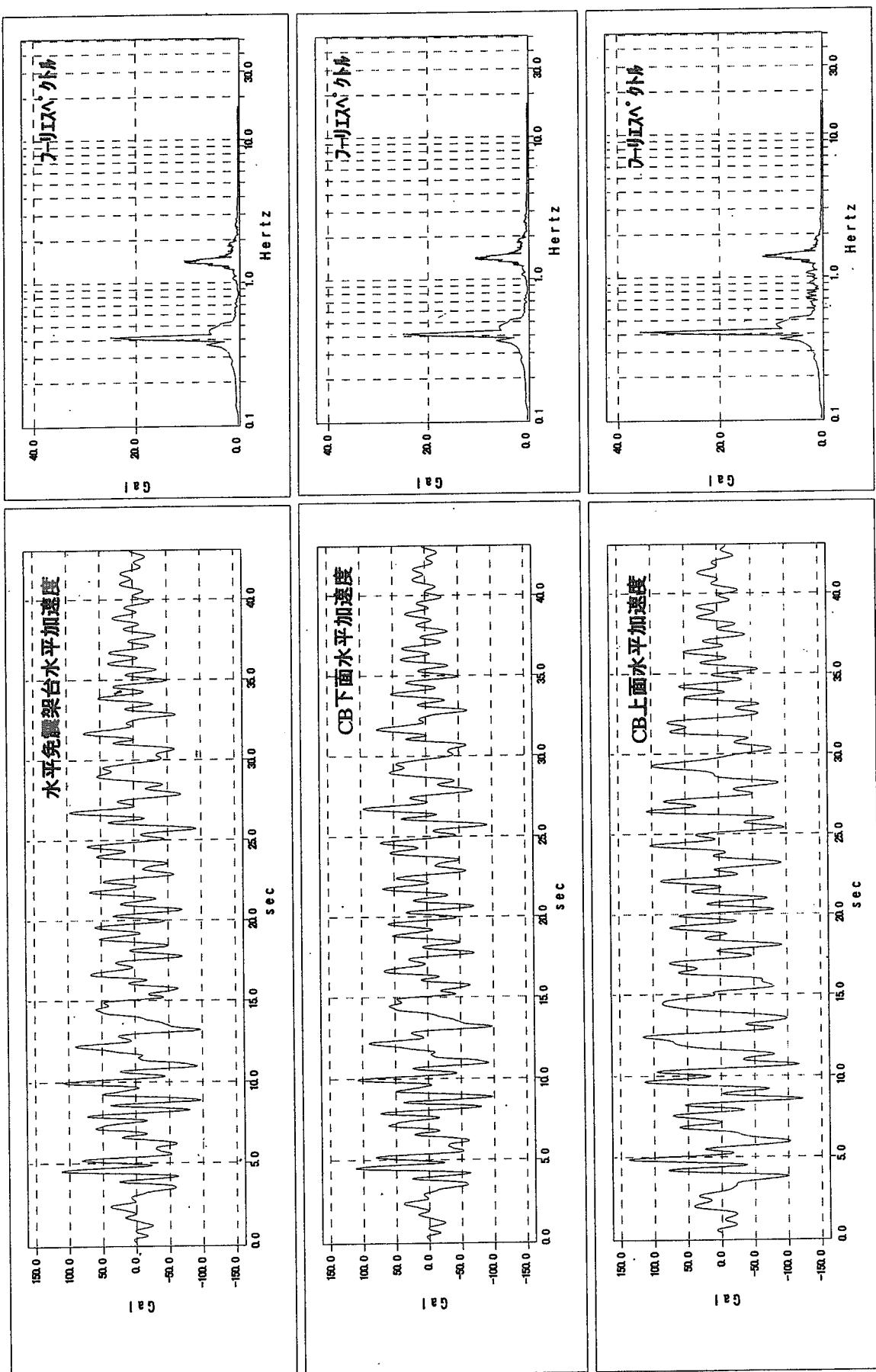


図-5.13(a) A1-S1F解析結果(1)

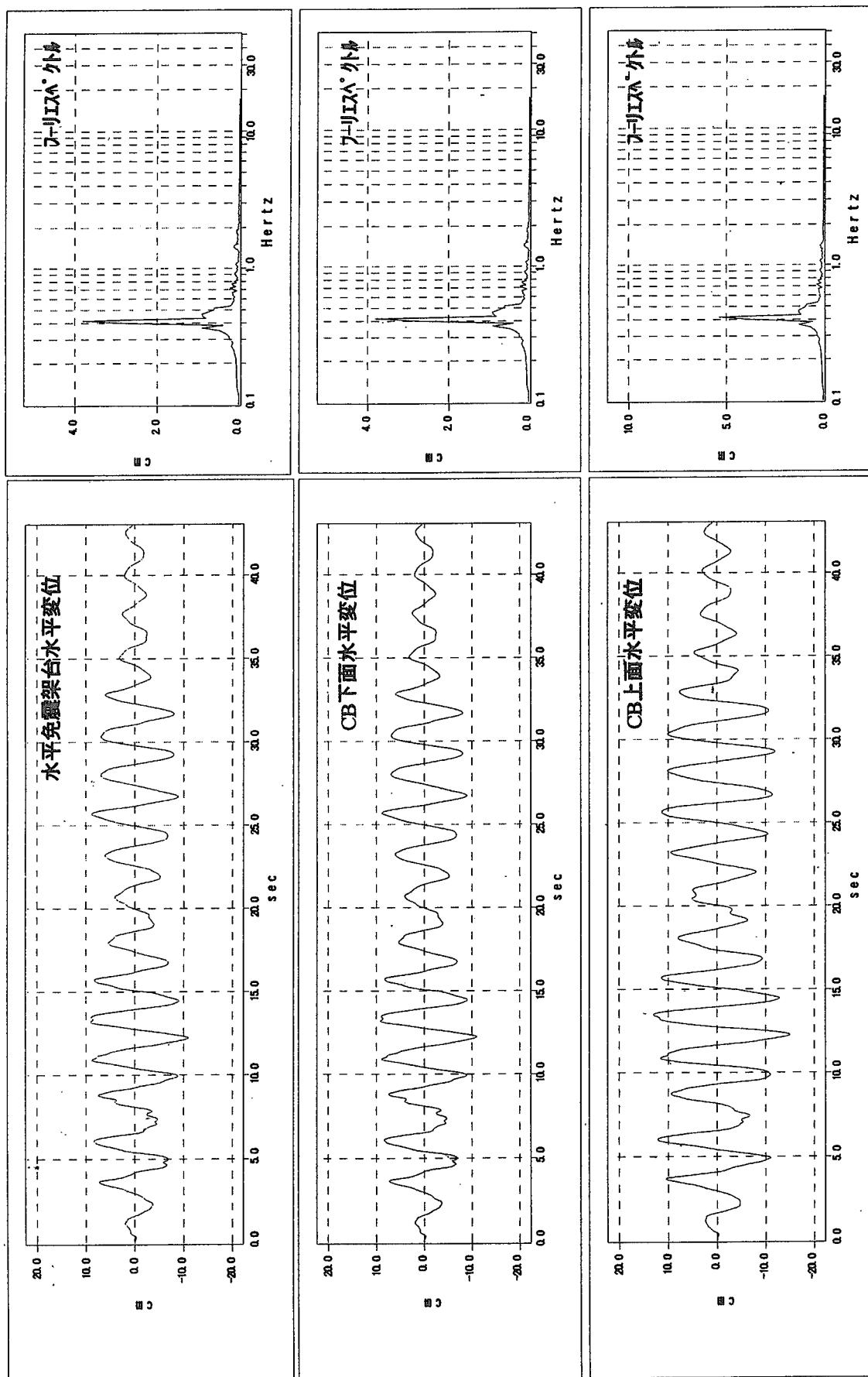


図-5.13(b) A1-S1F解析結果(2)

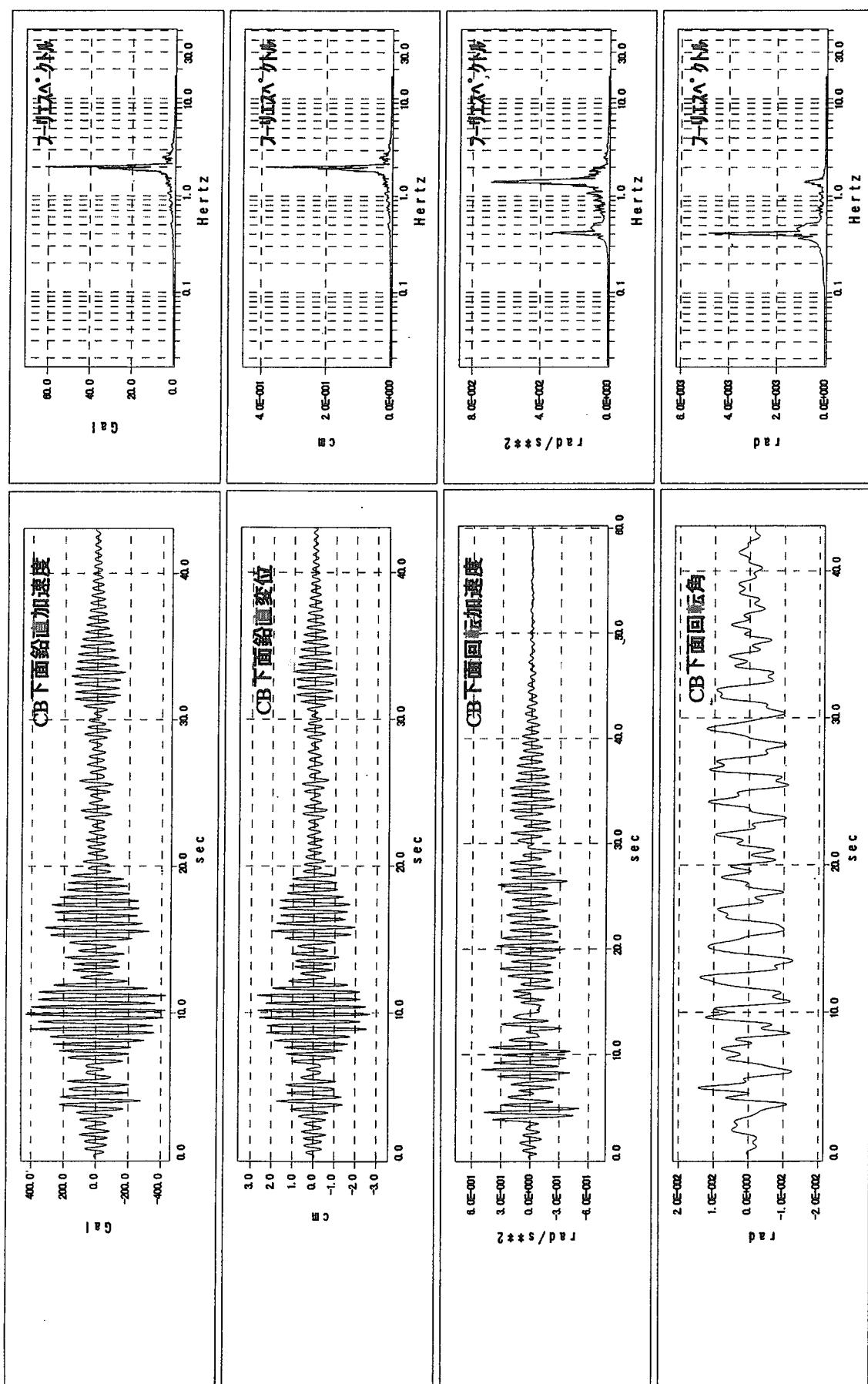


図-5.13(c) A1-S1F解析結果(3)

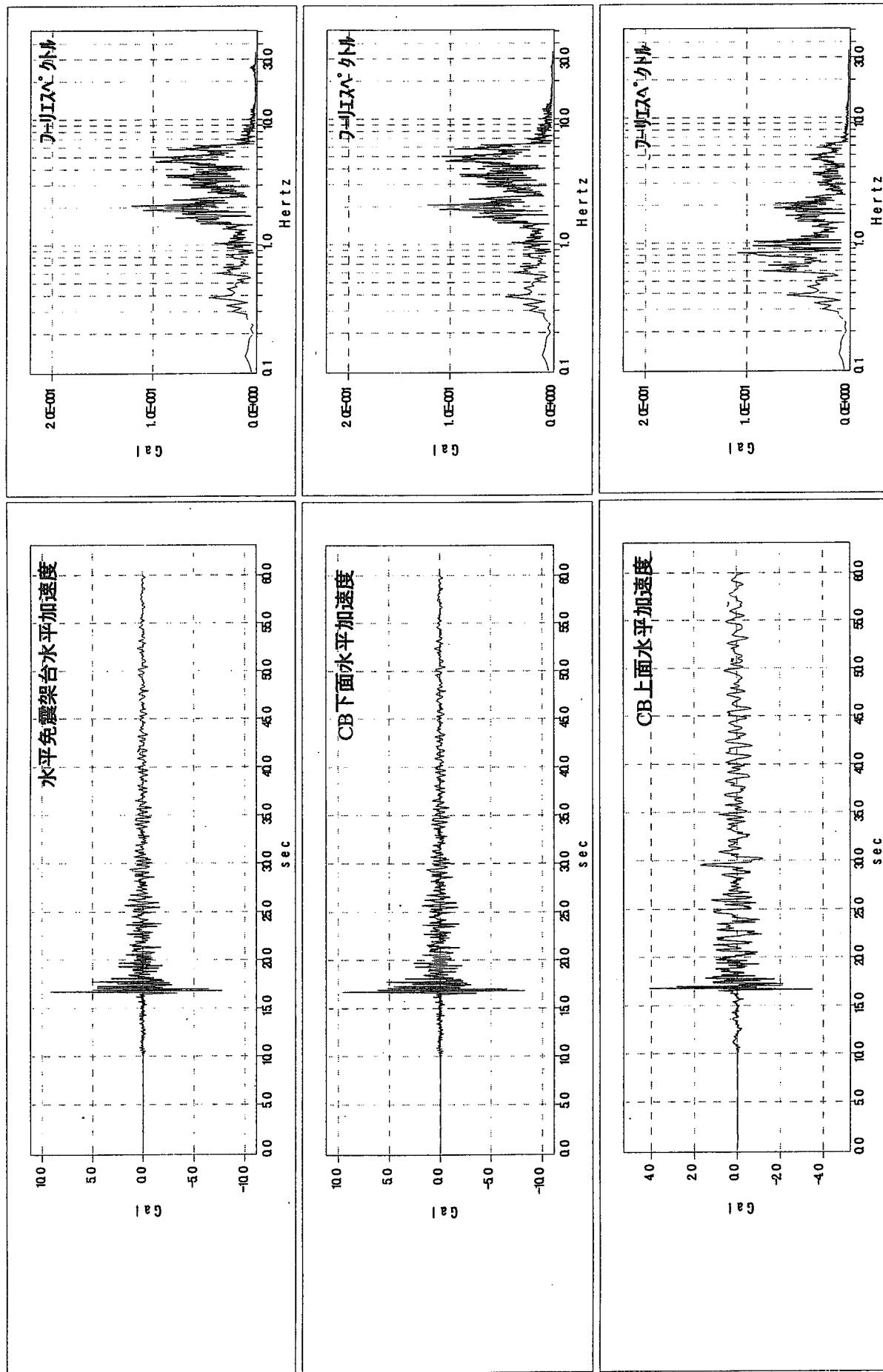


図-5.14(a) A2-EQ326-TB解析結果(1)

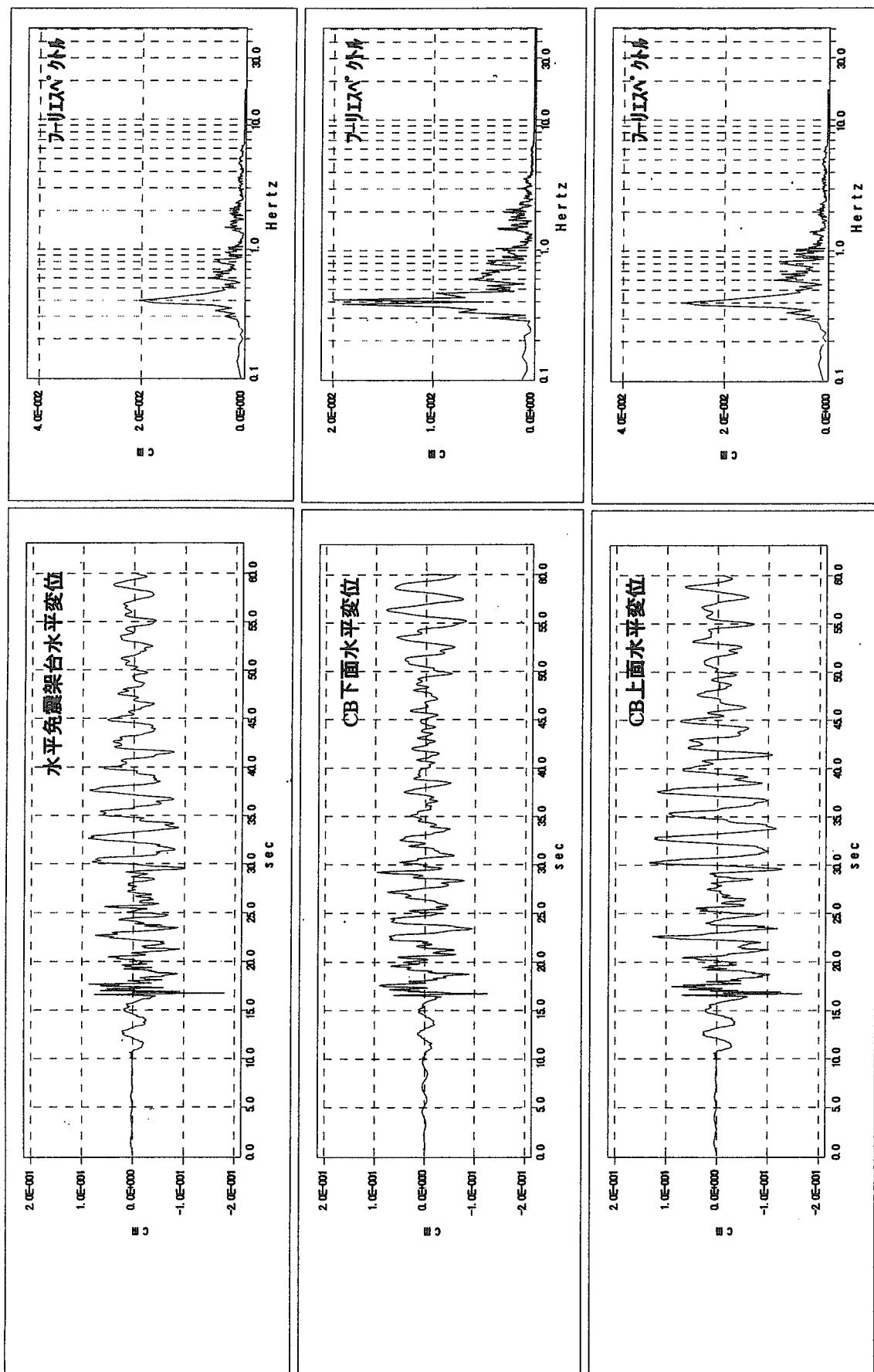


図-5.14(b) A2-EQ326-TB解析結果(2)

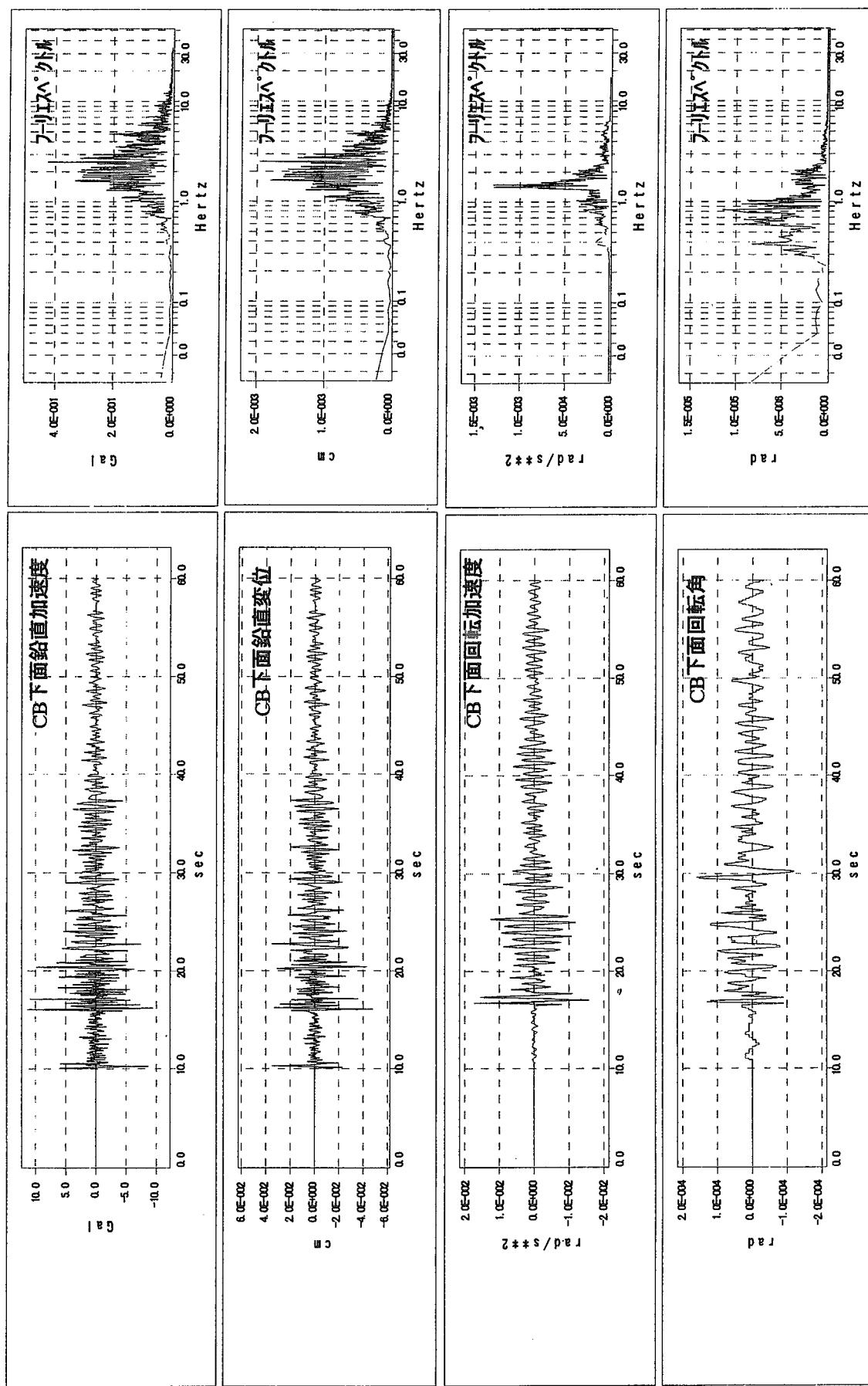


図-5.14(c) A2-EQ326-TB解析結果(3)

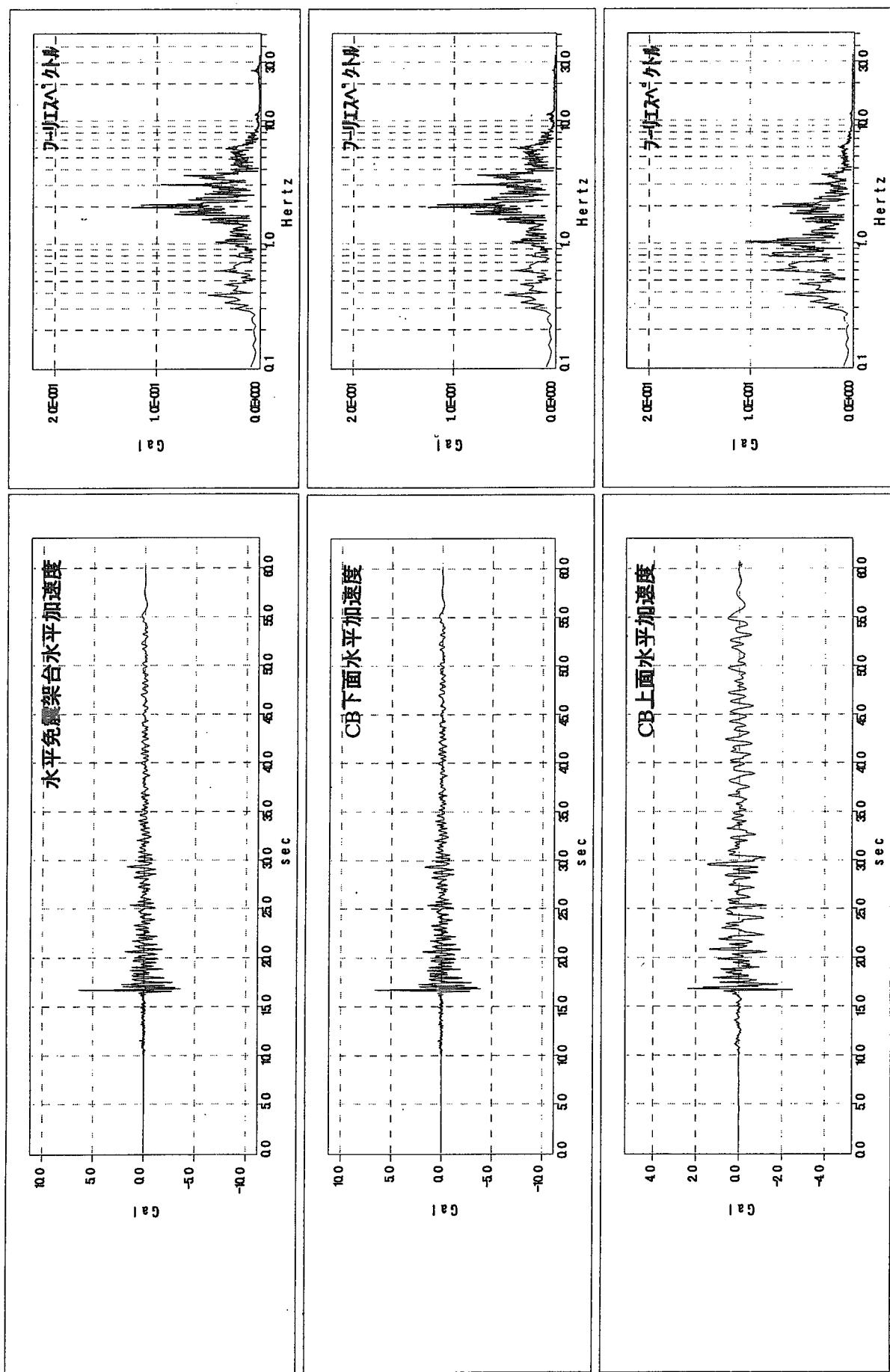


図-5.15(a) A2-EQ326-FL解析結果(1)

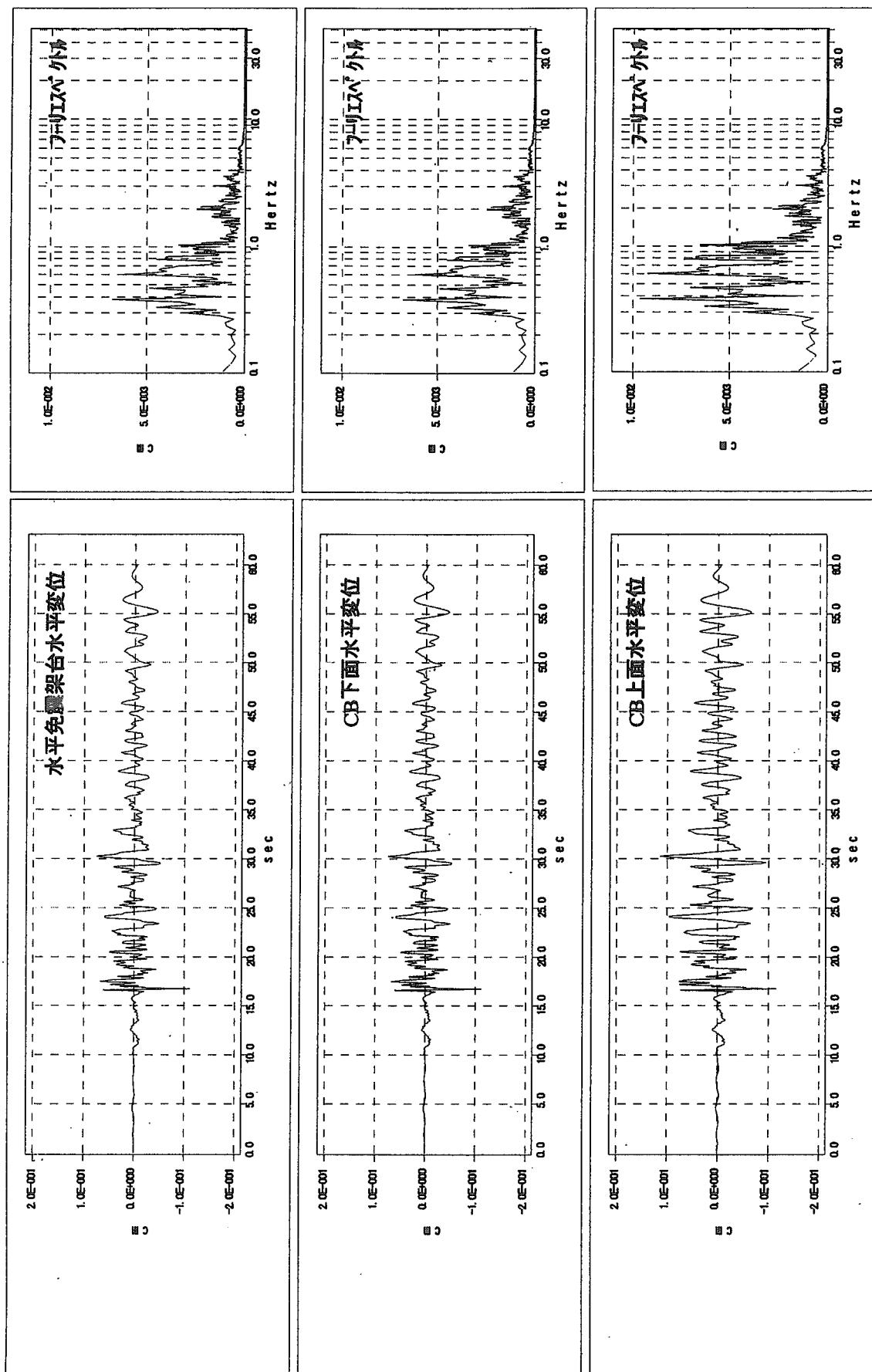


図-5.15(b) A2-EQ326-FL解析結果(2)

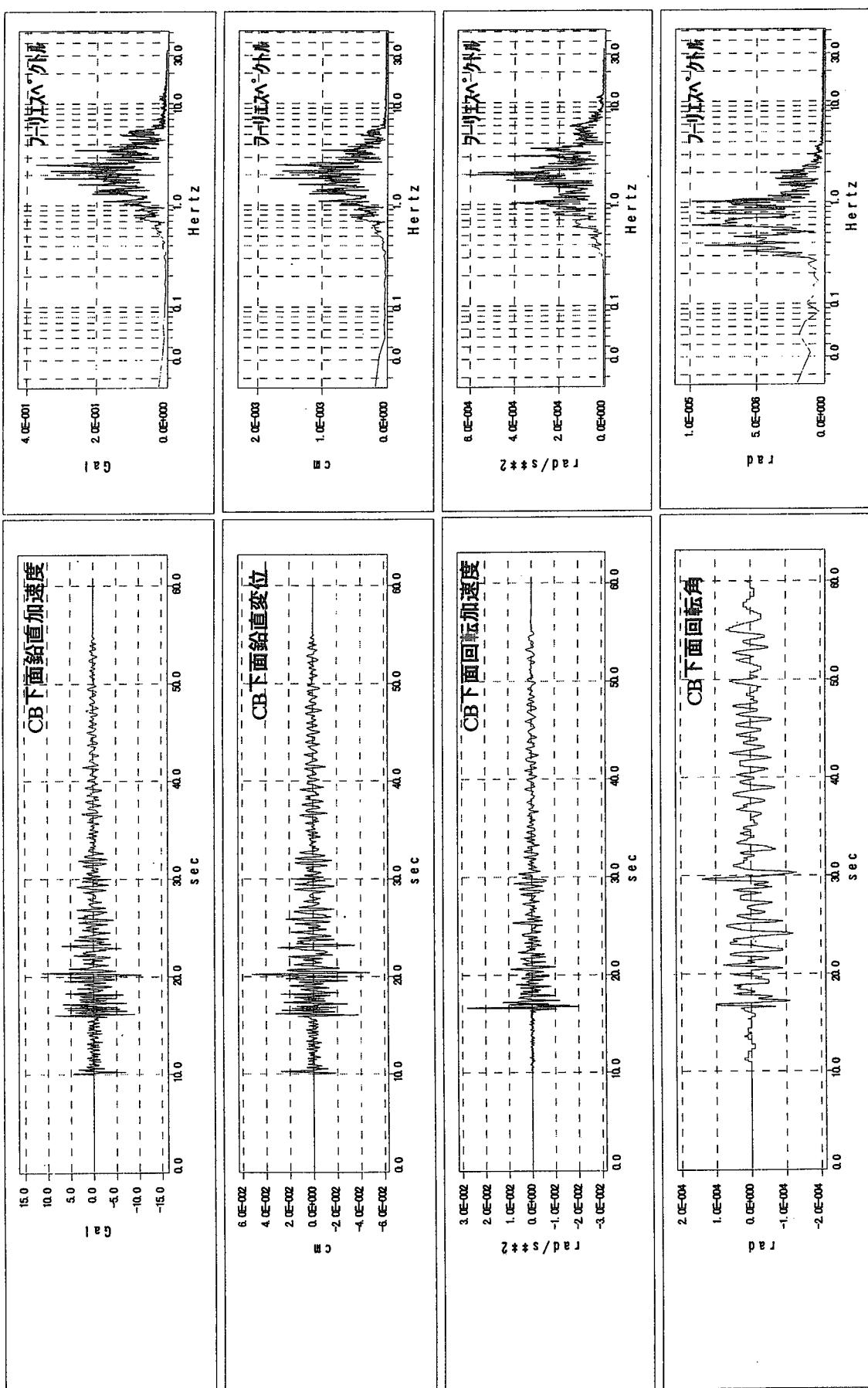


図-5.15(c) A2-EQ326-FL解析結果(3)

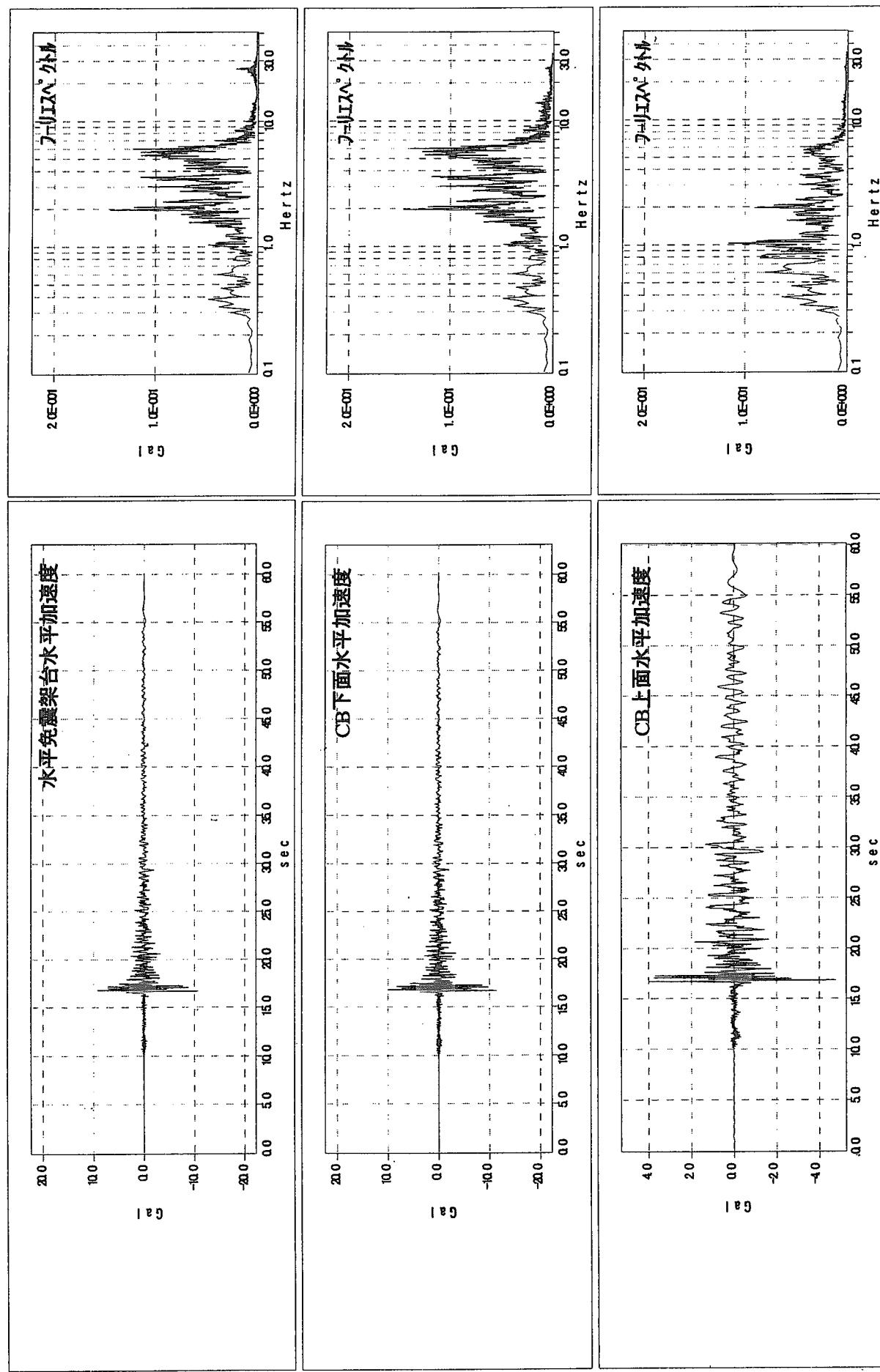


図-5.16(a) A2-EQ326-GL解析結果(1)

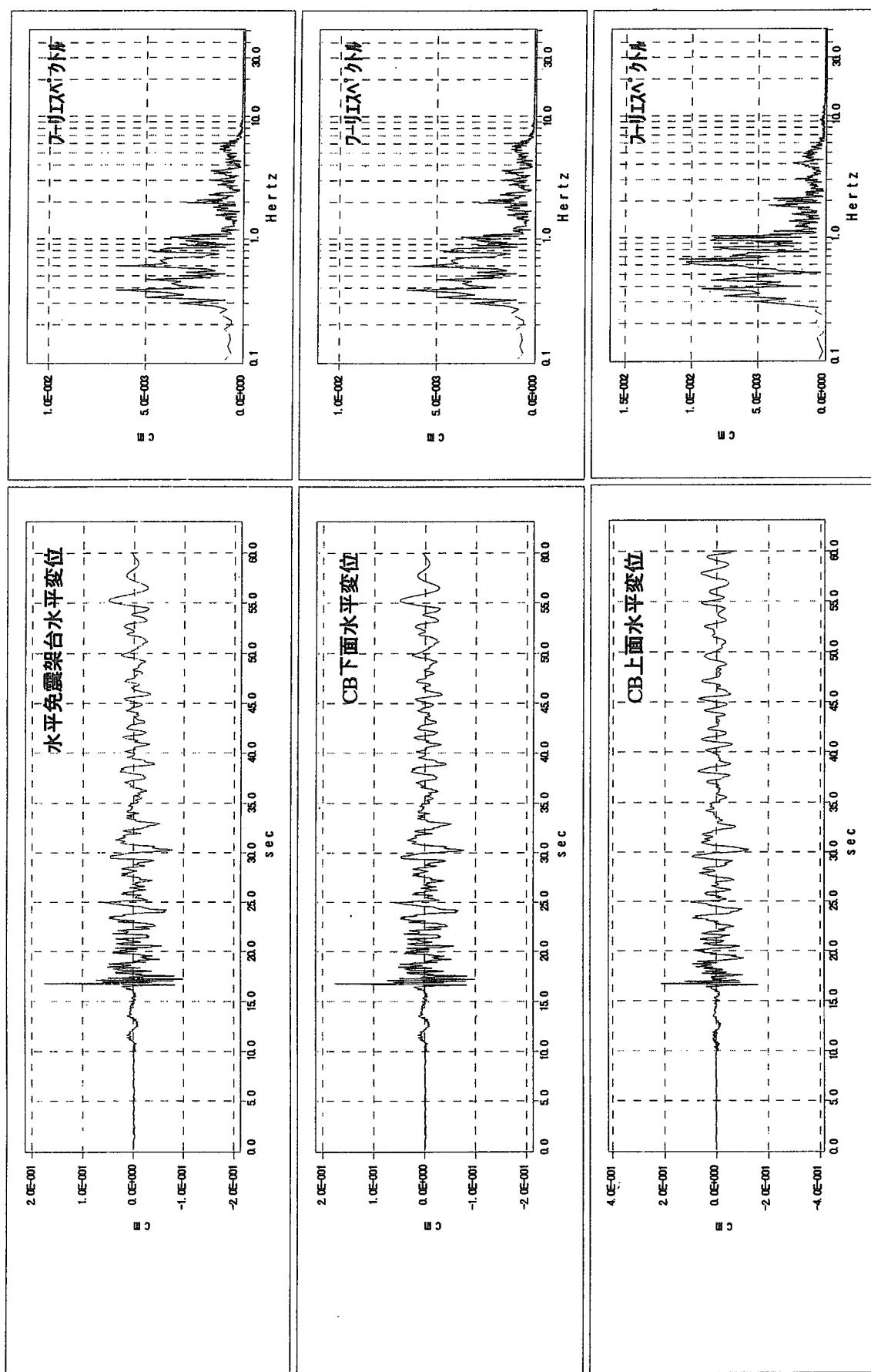


図-5.16(b) A2-EQ326-GL解析結果(2)

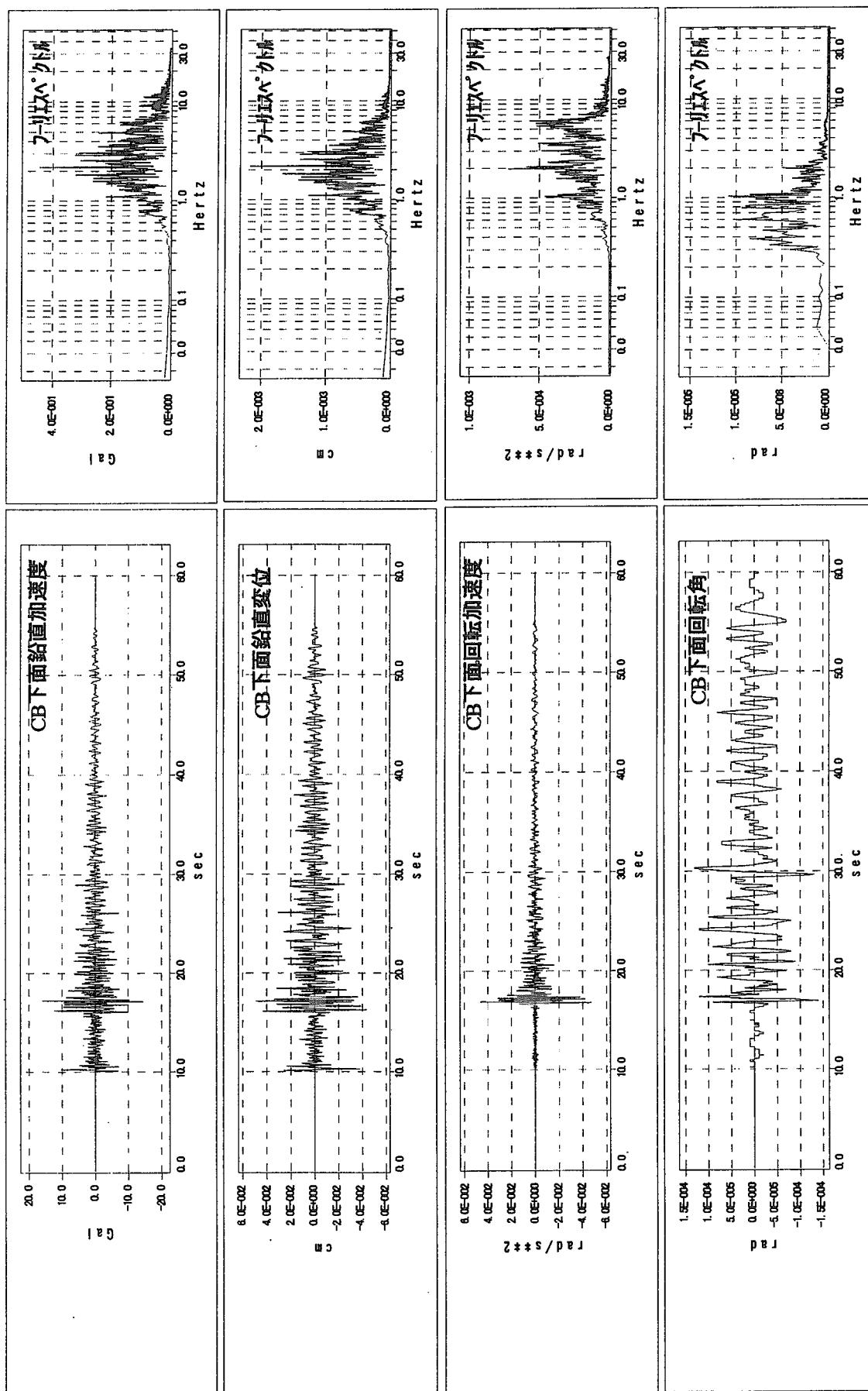


図-5.16(c) A2-EQ326-GL解析結果(3)

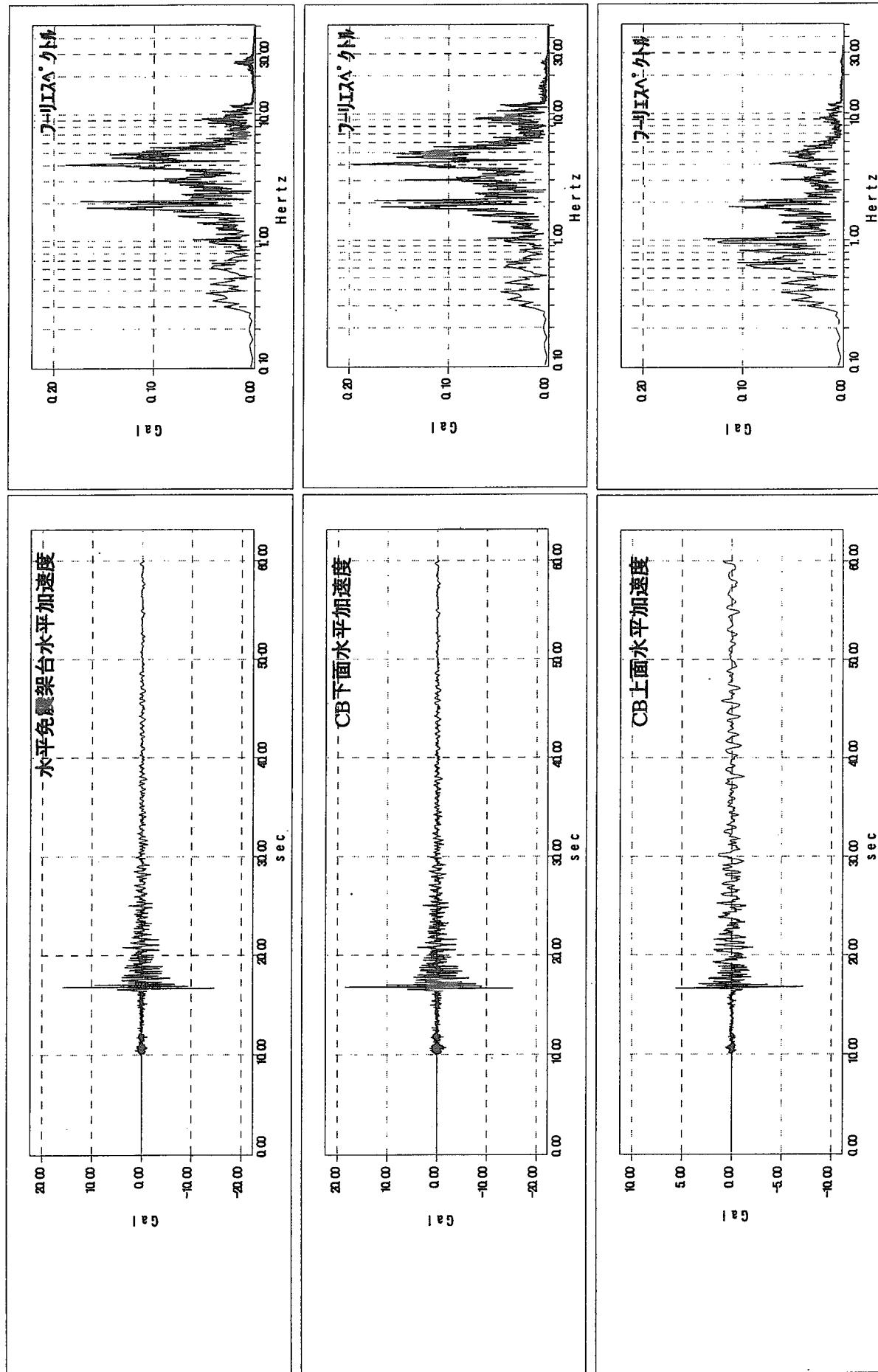


図-5.17(a) A2-EQ82解析結果(1)

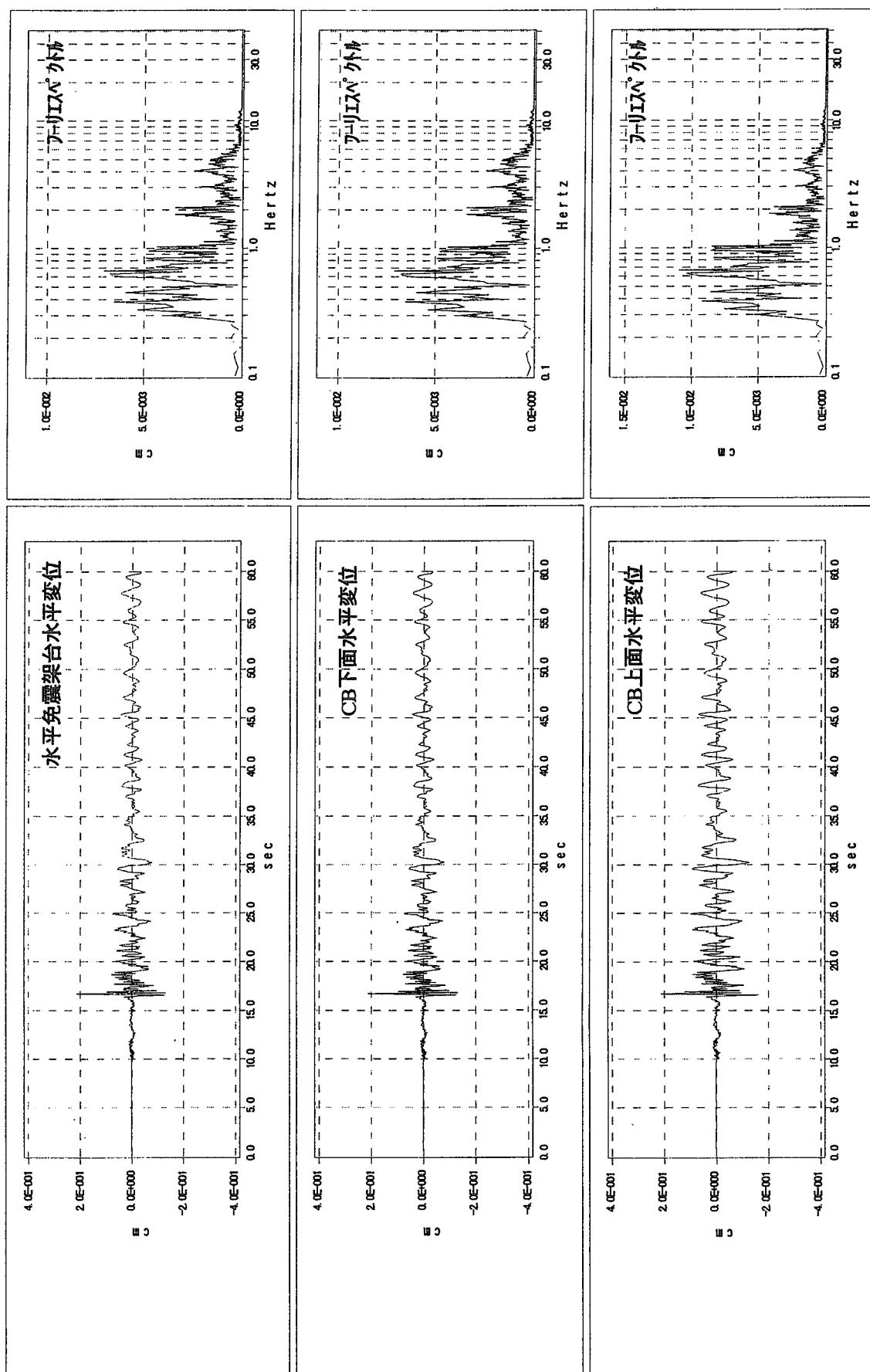


図-5.17(b) A2-EQ82解析結果(2)

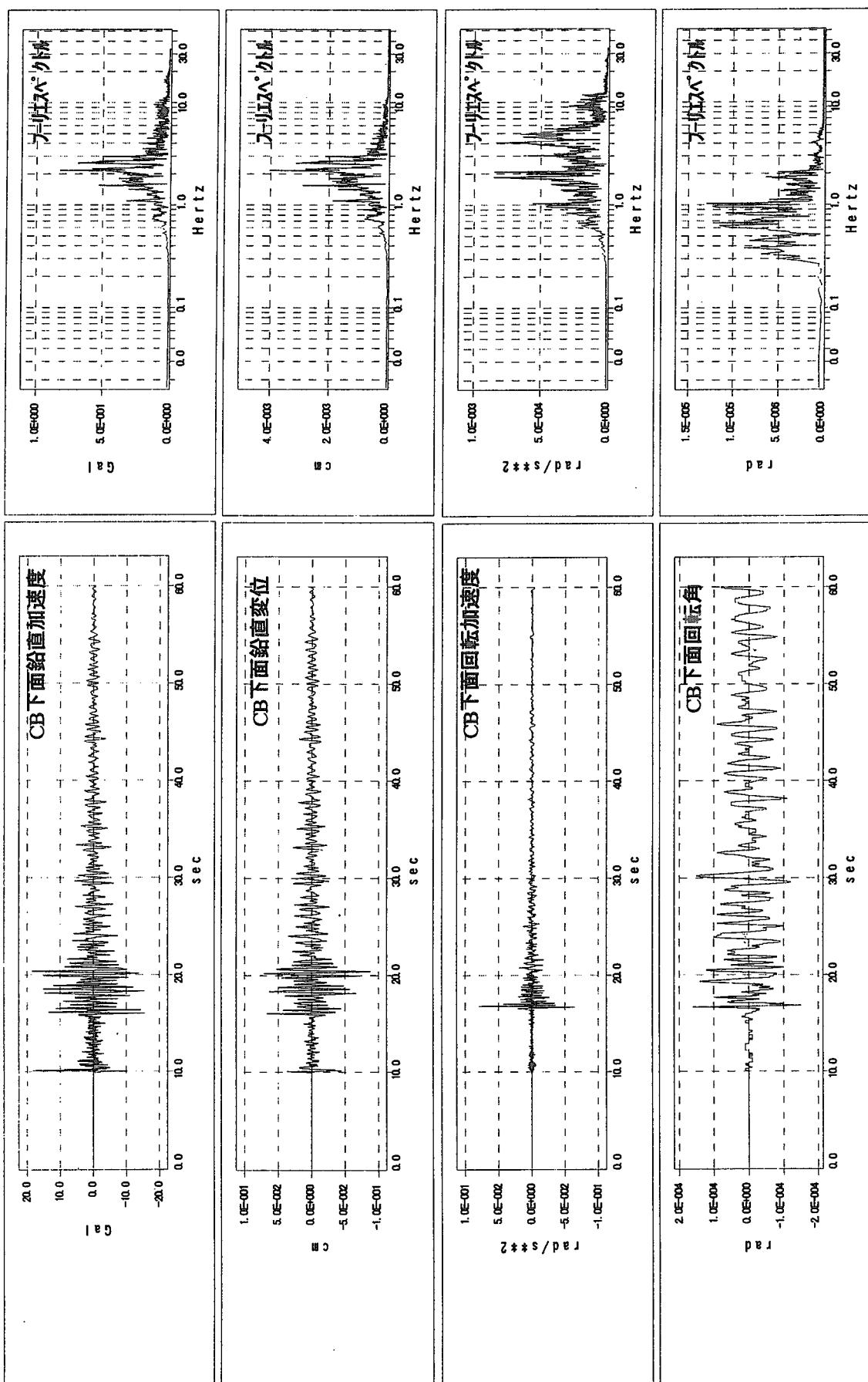


図-5.17(c) A2-EQ82解析結果(3)

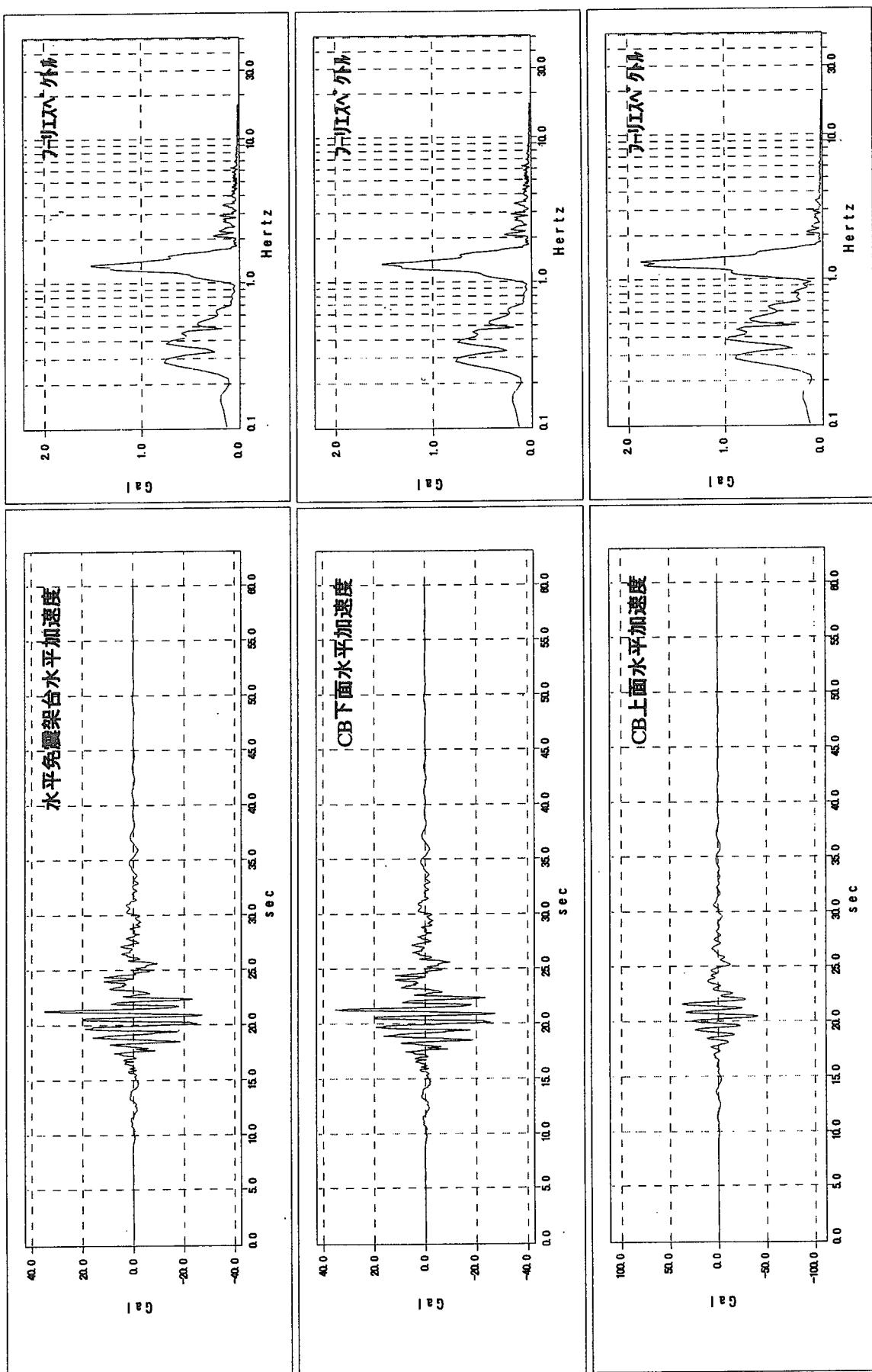


図-5.18(a) A2-FW72解析結果(1)

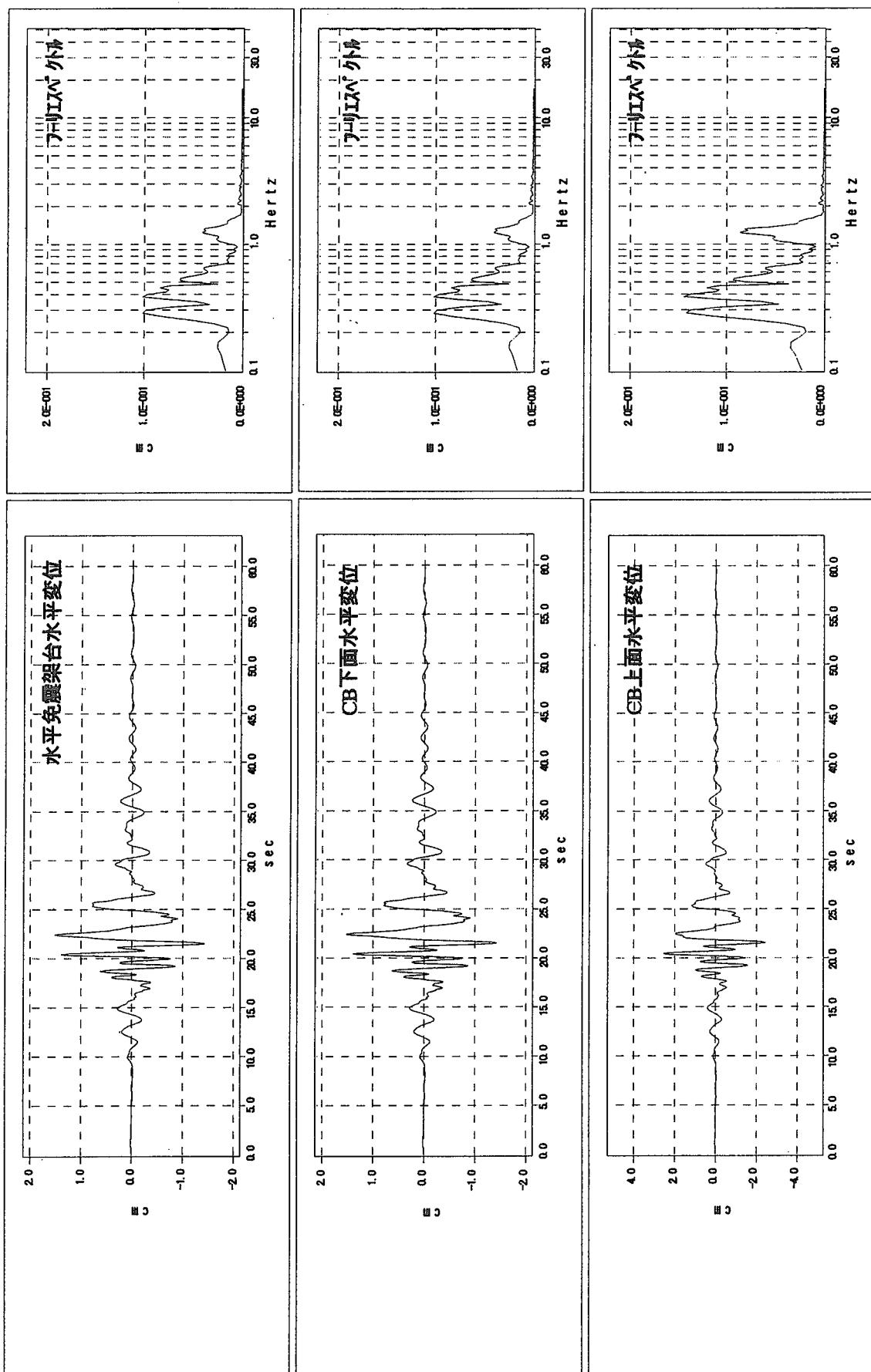


図-5.18(b) A2-FM72解析結果(2)

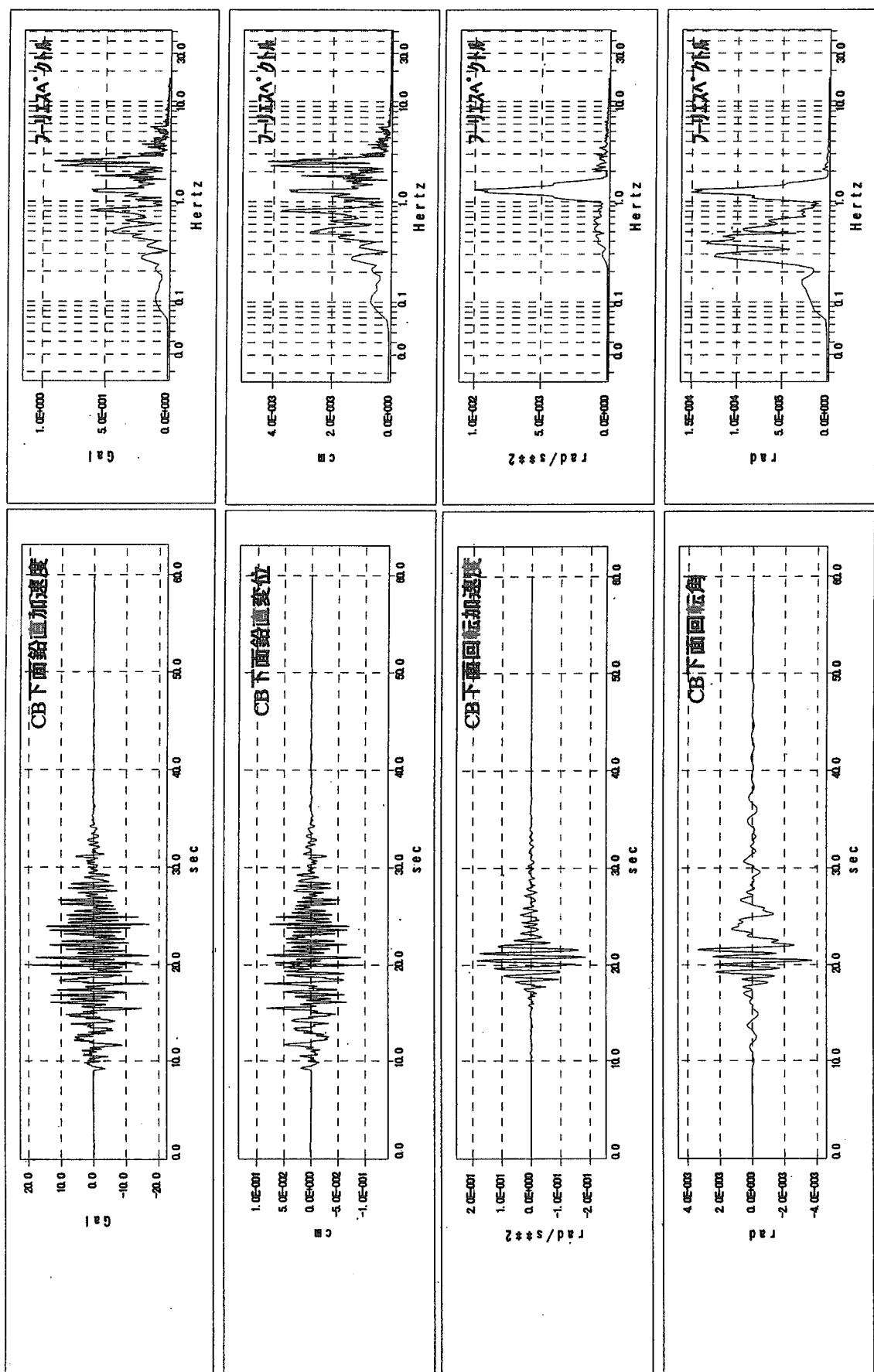


図-5.18(c) A2-FW72解析結果(3)

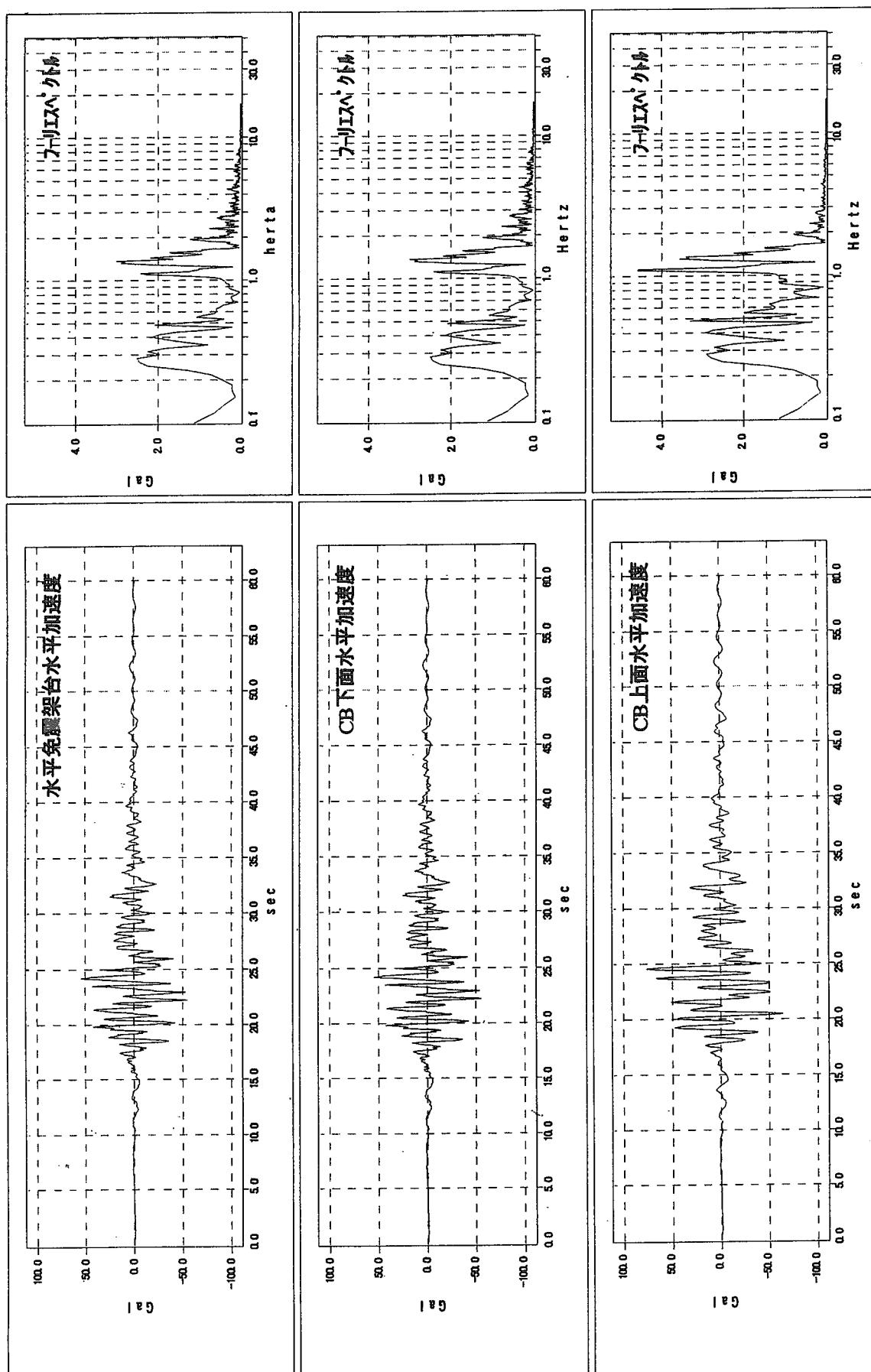


図-5.19(a) A2-FW80解析結果(1)

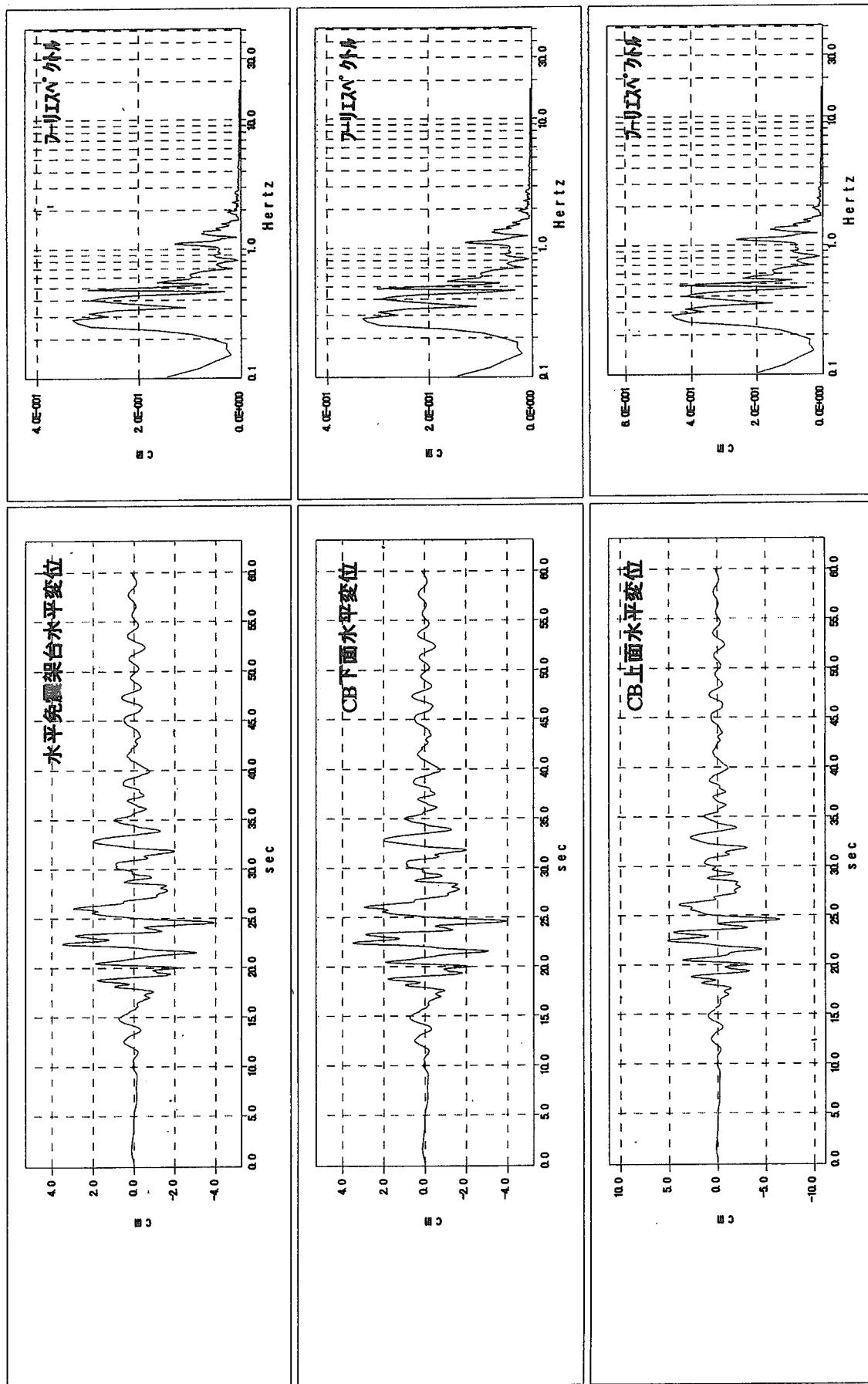


図-5.19(b) A2-FM80解析結果(2)

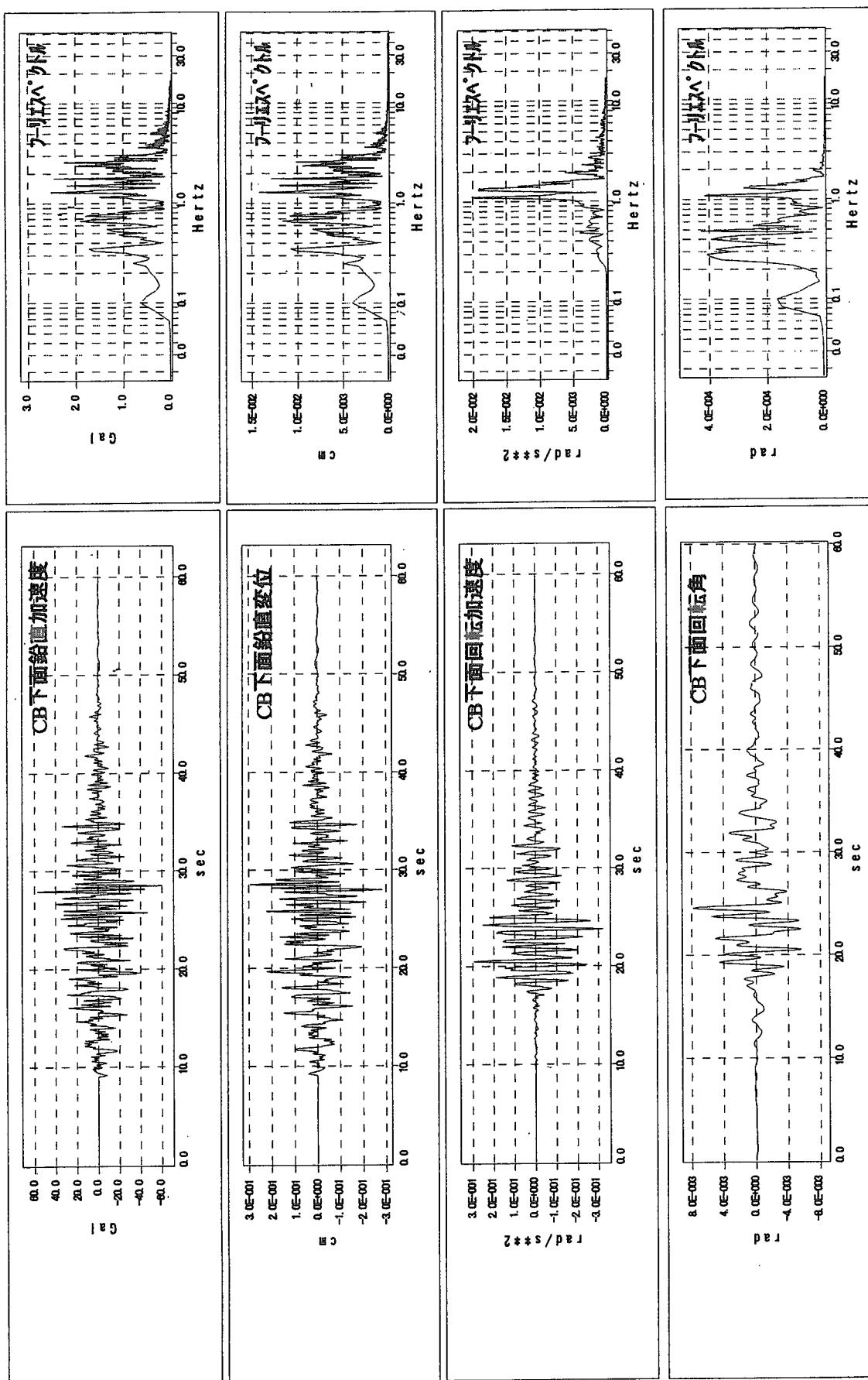


図-5.19(c) A2-FM80解析結果(3)

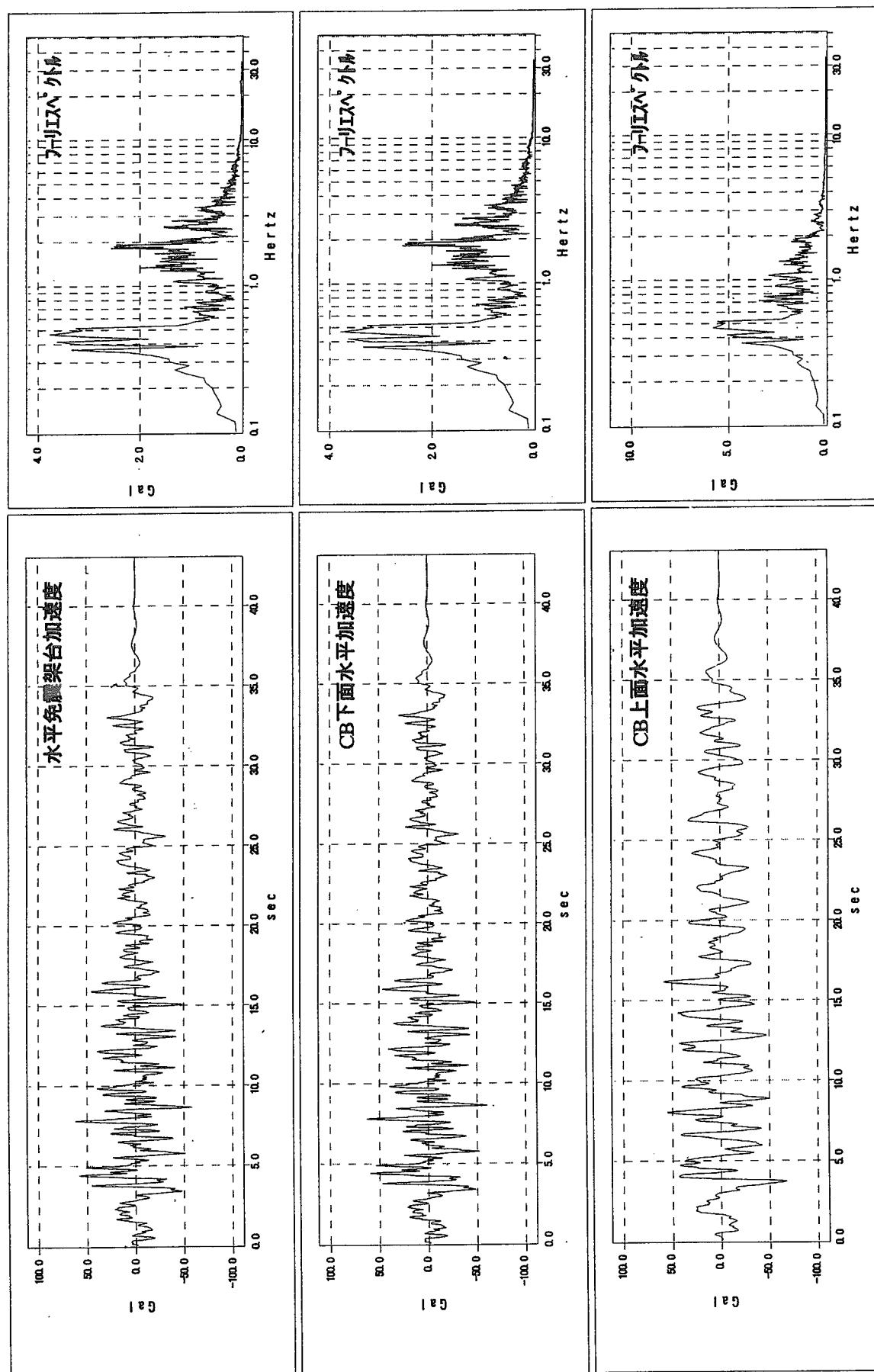


図-5.20(a) A2-S1F解析結果(1)

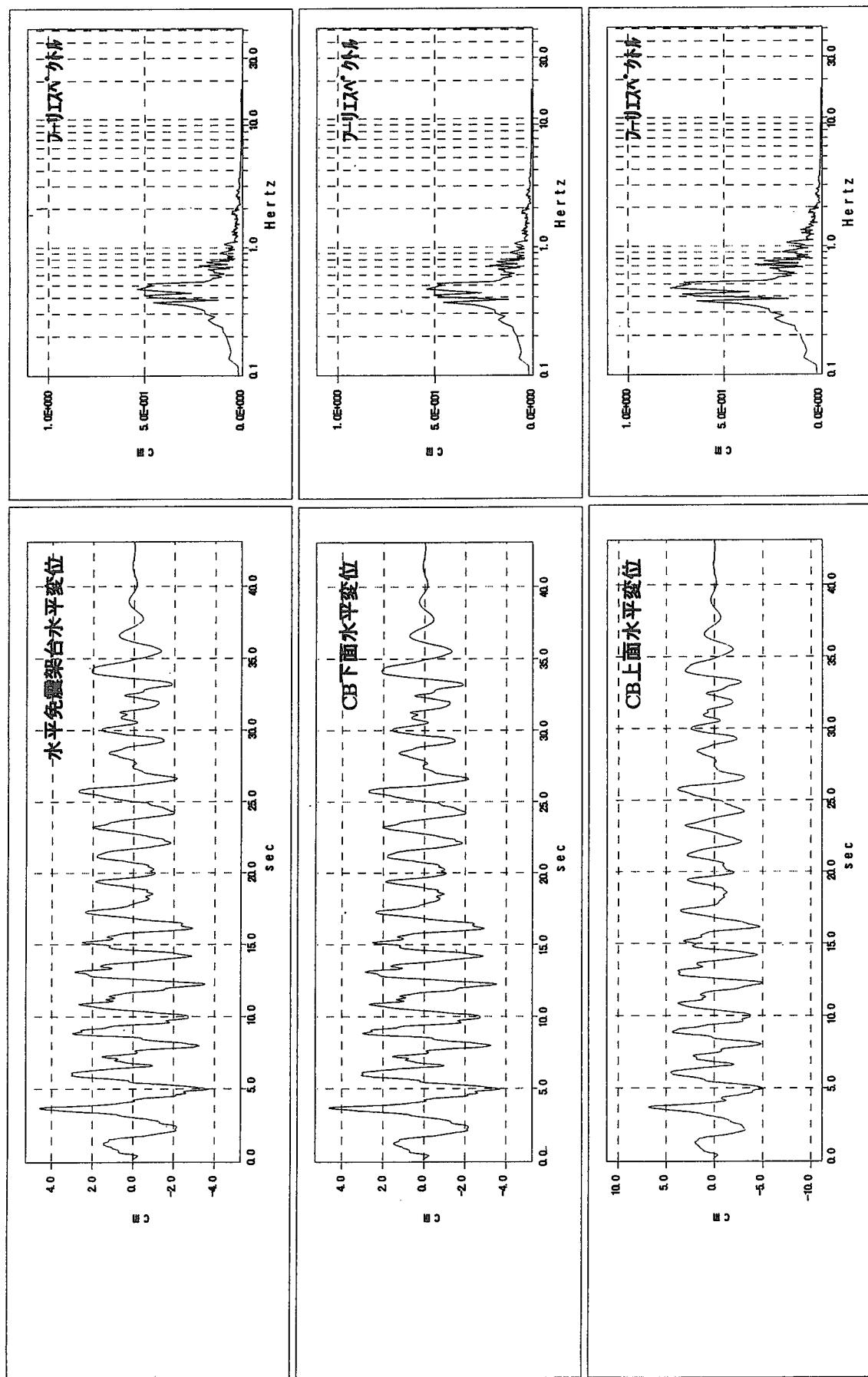


図-5.20(b) A2-S1F解析結果(2)

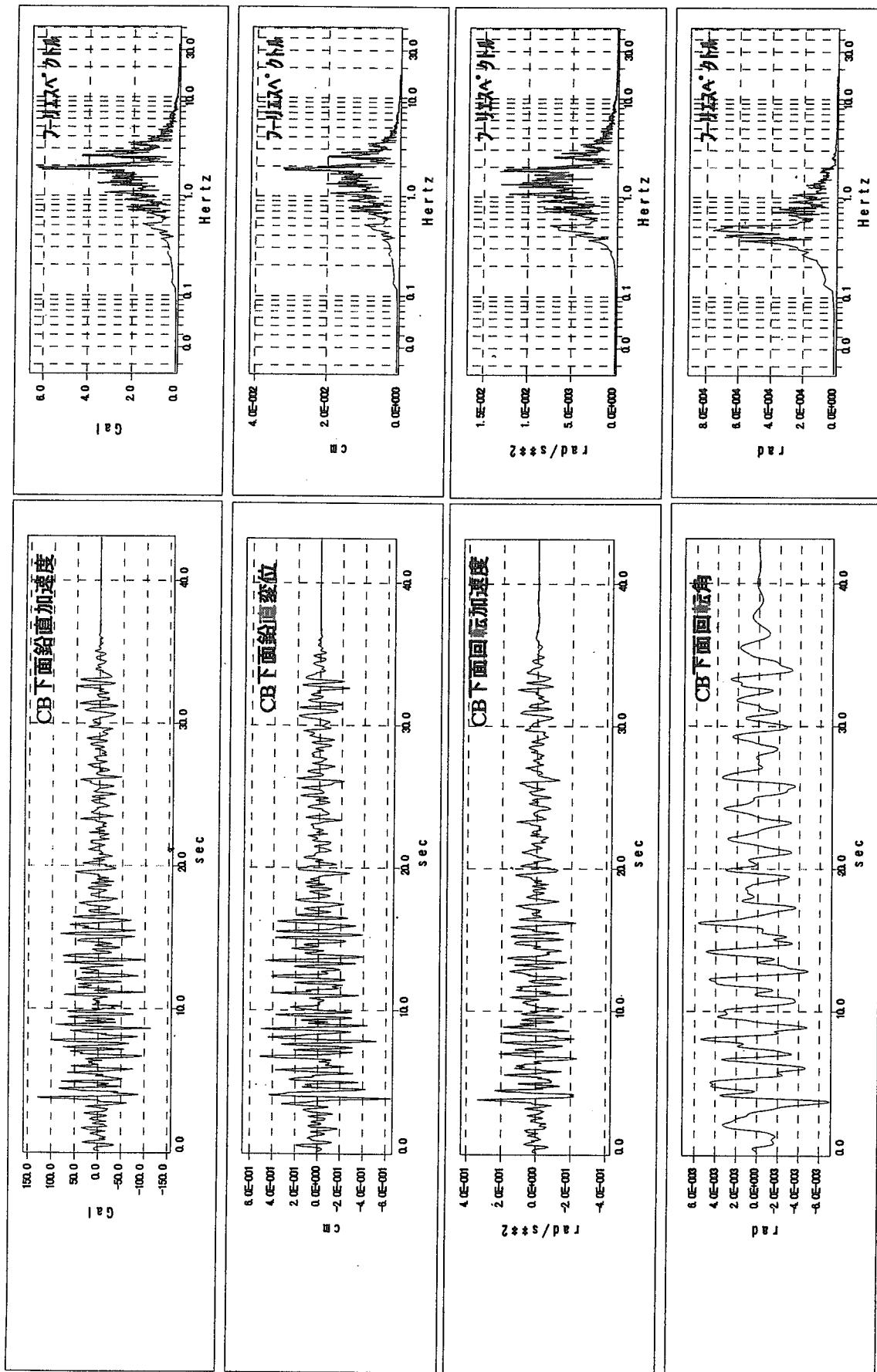


図-5.20(c) A2-S1F解析結果(3)

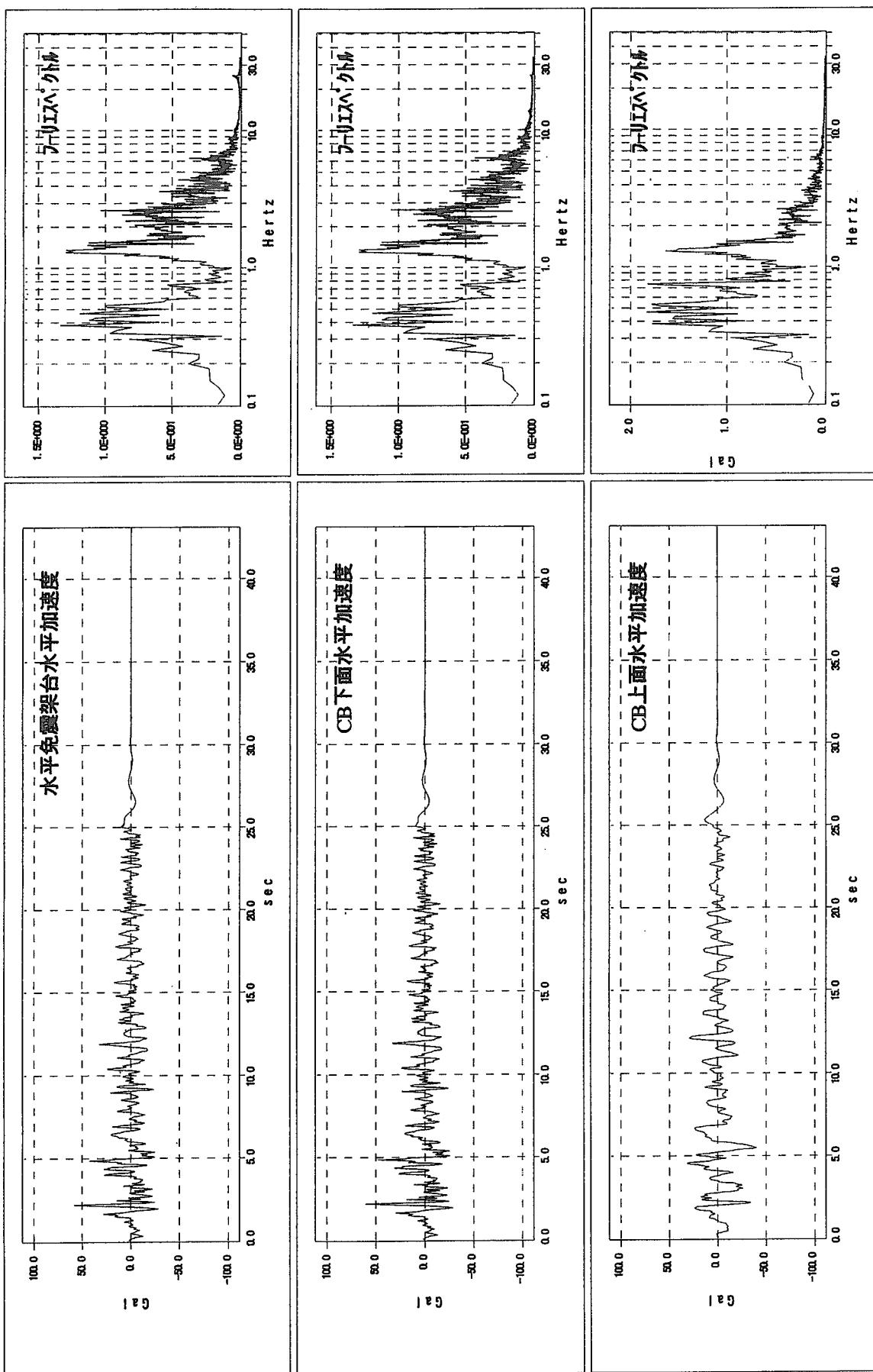


図-5.21(a) A2-S1N解析結果(1)

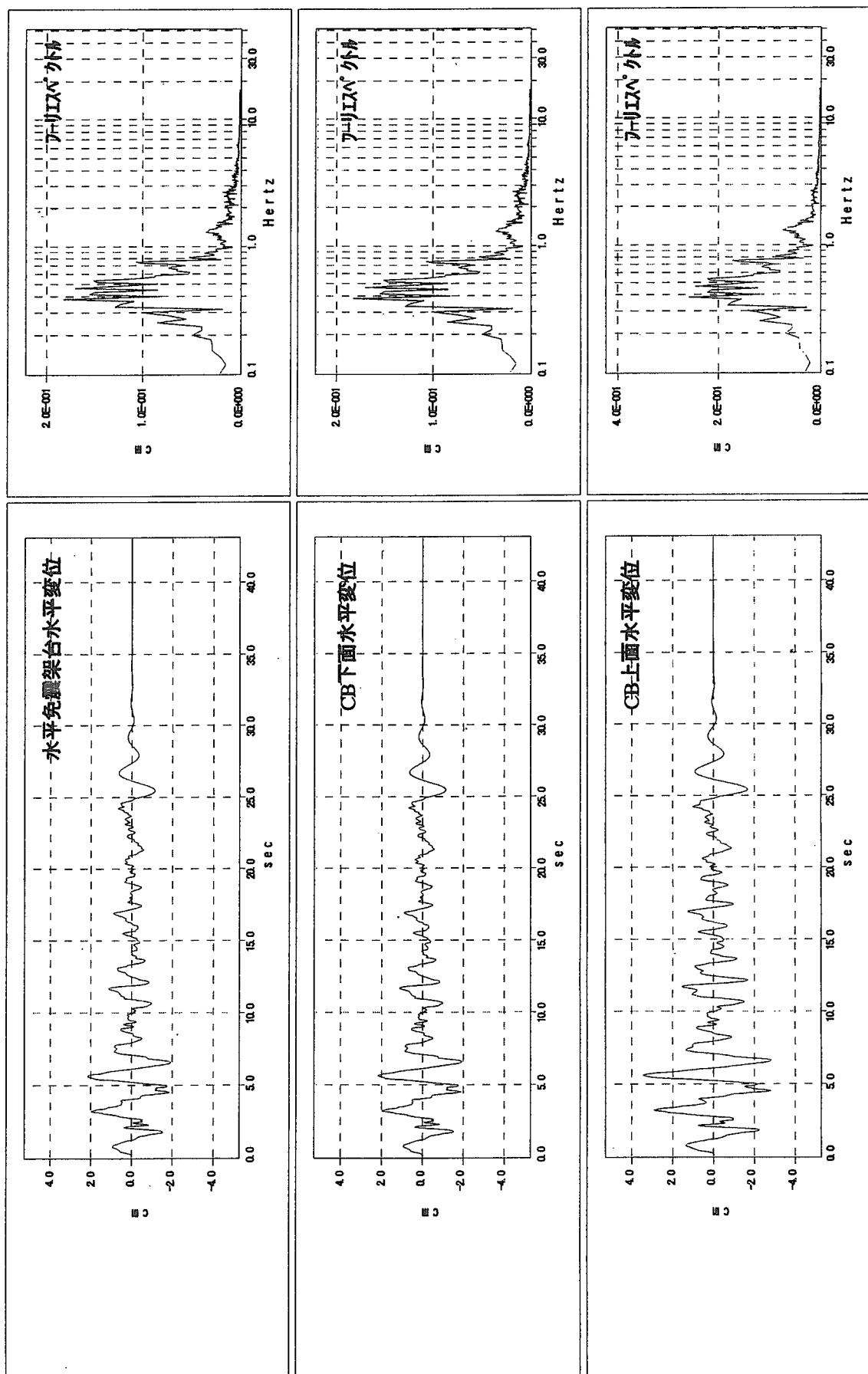


図-5.21(b) A2-S1N解析結果(2)

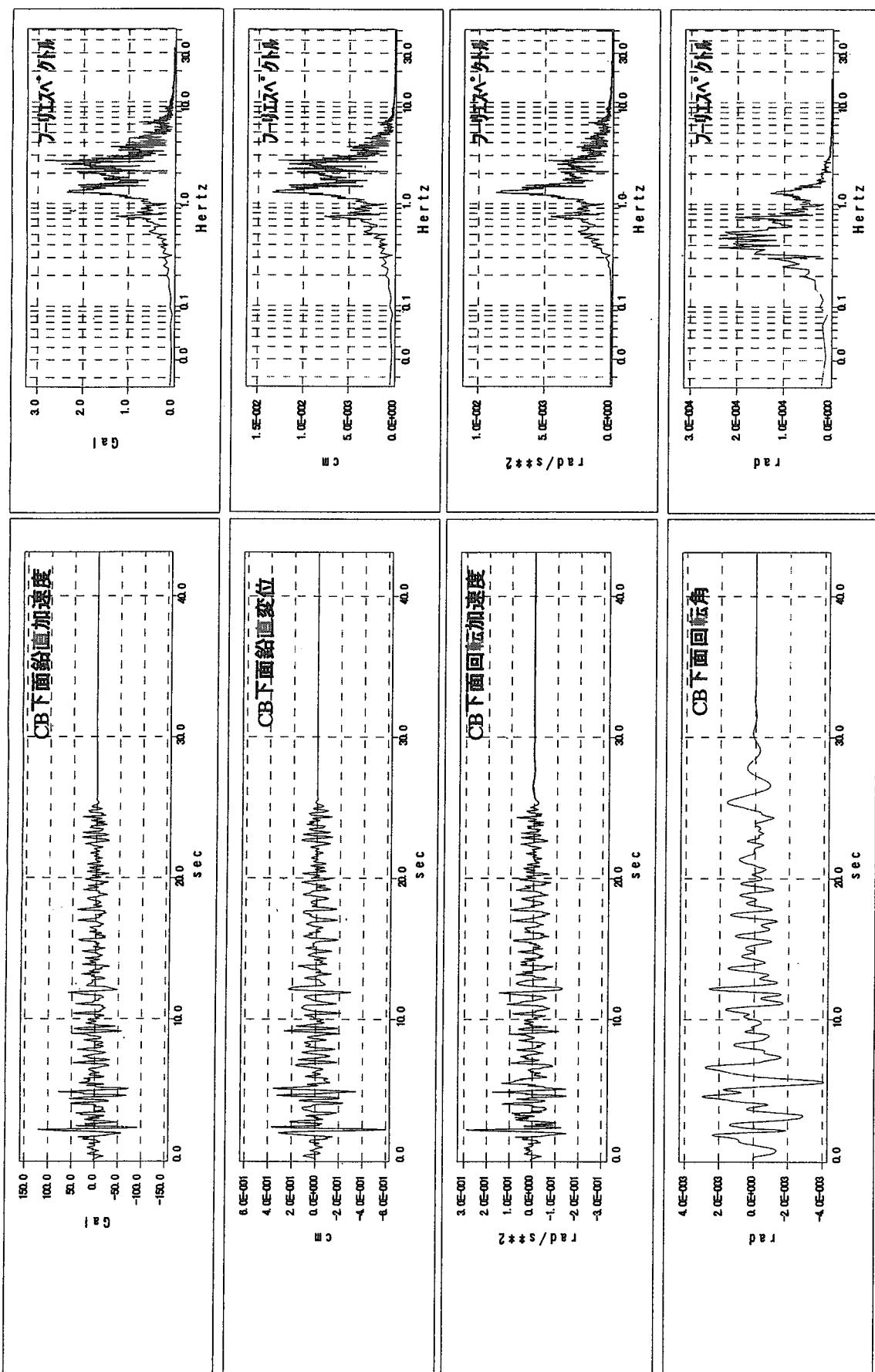


図-5.21(c) A2-S1N解析結果(3)

5.3 解析結果まとめ

振動台試験に関する模擬解析結果をまとめると以下の通りである。

(1) 水平方向

- 1)ダンパがない場合は、入力地震波の周波数特性による影響が大きく、入力地震波により異なる応答性状を示す。すなわち、4Hz～5Hz が卓越する大洗研究所観測地震波に対しては、加速度低減効果が非常に大きく、長周期成分が卓越する断層モデルおよび改良標準波では加速度低減効果が小さくなる傾向にある。特に、断層モデルによる模擬地震波では、2次固有振動モードが励起され、応答倍率(加速度低減率)が 0.85 に留まっている。
- 2)ダンパがある場合は、入力地震波の特性に影響されず、応答倍率が一様に 0.4 以下に低減し、良好な加速度低減効果が得られている。ただし、比較的高い領域に卓越周波数を持つ大洗研究所観測地震波については、減衰の増加により高い振動数の応答成分が増幅し、ダンパがない場合よりも最大加速度が増加する傾向が見られる。
- 3)3 次元免震における応答加速度は、1 次および 2 次固有振動モードが卓越しているが、全体的に 2 次モードの影響が大きく現れている。
- 4)最大応答変位は、ダンパがない場合には、改良標準波に対して 2 次元、3 次元免震とともに多段積層ゴムの許容変位をやや上回る値となっている。この場合、振動台試験では、入力地震波の加速度振幅を調整する必要があるものと考えられる。一方、大洗研究所観測地震波は、応答値が大幅に低減される傾向があることから、入力加速度を 2～3 倍程度増幅させた試験が可能である。

(2) 鉛直方向

- 1)ダンパがない場合は、全体的に入力加速度よりも応答加速度が増幅しており、特に、改良標準波では 3 倍程度まで増幅している。免震系の固有振動数が 2Hz 程度の場合、免震効果が期待できないことがわかる。
- 2)ダンパがある場合は、大洗研究所観測地震波では応答倍率が 0.5 以下に、断層モデルおよび改良標準波では 1.0 程度に低減し、ダンパにより加速度の増幅が抑制されている。
- 3)最大応答変位は、ダンパがない場合に改良標準波で 3 cm 程度と最大になるが、コイルばねの許容変位以下の値に納まっている。

6. まとめ

特性試験、振動モデル作成、予備振動台試験および地震応答解析により得られた主な知見を纏めると以下の通りである。

- (1)多段積層ゴム・コイルばねタイプ3次元免震システムについて特性試験を行った結果、水平2方向1次固有振動数0.4Hz、2次固有振動数1.4Hz、鉛直方向固有振動数2.0Hzが計測され、設計仕様に等しい特性が得られていることが確認された。また、多段積層ゴムの復元力特性は、変位振幅の増加に伴い剛性が若干低下するものの、設計許容変位(±100mm)の範囲ではほぼ線形系と見なせることがわかった。
- (2)特性試験結果を基にSRモデルによる振動モデルを作成し、固有値解析を行った。固有値および刺激係数から、1次固有振動モード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)、2次固有振動モード1.42Hz(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2.01Hz(鉛直並進モード)が主要振動モードとなり、特性試験結果と一致することが確認された。
- (3)作成した振動モデルを用いて、予備振動台試験を模擬した地震応答解析を行った。入力地震波は、EL-Centoro波、Taft波、八戸波、神戸波とした。周波数特性および振動性状は予備振動台試験結果と良く一致したが、加速度時刻歴の包絡形状にやや差が生じた。差が発生した要因としては、減衰特性の違い、3次元連成挙動の影響、加速度の計測位置による誤差等が考えられる。特に、3次元連成挙動の影響については、振動台試験等で解明して行く予定であるが、解析精度を向上させる上で今後の重要な検討課題と考えられる。
- (4)作成した振動モデルを用いて、振動台試験の入力波として用いる種々の地震動に対する応答解析を行った。入力地震波は、原研大洗研究所観測地震波、断層モデルによる模擬地震波、改良標準波とした。解析結果から本3次元免震システムについて以下の知見が得られた。
 - 1)水平方向については、ダンパがない場合に断層モデルによる模擬地震波で加速度応答倍率が0.85とやや大きくなつたが、ダンパがある場合は全ケースで0.4以下となり、良好な免震効果が得られた。
 - 2)鉛直方向については、ダンパがない場合は、全体的に加速度が増幅し、改良標準波で最大3倍程度の応答倍率となつた。ダンパがある場合は、大洗研究所観測波で応答倍率が0.5以下に、断層モデルおよび設計用模擬地震波では0.9~1.0程度に抑制される結果となつた。したがつて、鉛直免震については、固有振動数が2Hz程度の場合、免震効果で加速度を低減することは難しく、免震系で発生する変位や速度を利用してダンパの制振効果で応答を抑制する必要があると考えられる。
 - 3)最大応答変位は、ダンパがない場合、改良標準波(S1F)で水平方向が約11cmとなり、多段積層ゴムの許容変位(±10cm)を上回る結果となつた。この場合、振動台試験では入力加速度の振幅調整が必要と考えられる。また、鉛直方向の最大応答変位は、同ケースで3cm程度となり、コイルばねの許容変位(5cm)以下の値となつた。ダンパーがある場合は、改良標準波(S1F)で最大水平変位が4.6cm、最大鉛直変位0.6cmとなり、強震動に対して変位が十分に抑制されることが確認された。

謝　　辞

本免震システムの設計・製作、特性試験実施および振動モデル作成に関して御尽力頂いた(株)東芝・原子力技術研究所・藤本滋氏、丹羽博志氏に感謝の意を表す。

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) 蟹沢勝三、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) 蟹沢勝三：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) 蟹沢勝三他：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

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

This is a blank page.

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
光强度	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}
圧力、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	クーロン	C	$A \cdot s$
静電容量	ボルト	V	W/A
電気抵抗	フアラド	F	C/V
コンダクタンス	オーム	Ω	V/A
磁束	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	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	ヘンリー	H	Wb/A
光束度	セルシウス度	$^{\circ}C$	
照度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
放射能	ルクス	lx	lm/m^2
吸収線量	ベクレル	Bq	s^{-1}
線量当量	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, 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	$N (=10^5 \text{ dyn})$	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

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

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

圧力	$\text{MPa} (=10 \text{ bar})$	kgf/cm^2	atm	mmHg(Torr)	$\text{lbf/in}^2(\text{psi})$
1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038	
0.980665	1	0.967841	735.559	14.2233	
0.101325	1.03323	1	760	14.6959	
1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}	
6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1	

エネルギー・仕事・熱量	$J (=10^7 \text{ erg})$	$\text{kgf} \cdot \text{m}$	$\text{kW} \cdot \text{h}$	cal(計量法)	Btu	$\text{ft} \cdot \text{lbf}$	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
								= 4.184 J(熱化学)	= 4.1855 J(15 °C)
1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}		= 4.1868 J(国際蒸気表)	
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^{25}			
4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}	仕事率 1 PS(仏馬力)		
1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}	= 75 kgf·m/s		
1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}	= 735.499 W		
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	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
	1	2.70270×10^{-11}		1	100		1	3876		0.01	1
	3.7×10^{10}	1		0.01	1		2.58×10^{-4}	1			

(86年12月26日現在)

