

9. 環境総合館の観測体制と立体振動性状の可視化

9.1 はじめに

この章で対象とする名古屋大学環境総合館は、プレキャストの上部構造や30mをこえるPHC杭などの特徴があり、一方、上部構造の形状は長方形平面で桁行方向にほぼ対称構造となっている。このような建物の立体振動特性を目的とし、建物と周辺地盤で高密度の強震観測を継続している。強震計の性能向上とネットワークを利用したデータ転送技術などにより、強震時のトリガ記録と並行して常時微動レベルの応答をほぼリアルタイムでモニタリングすることができる。

本章では、多点同時記録による立体振動状況に加えて、気象センサやエネルギー消費センサも加えた、建物のリアルタイムモニタリング観測体制の開発について述べる。多点同時記録から、立体的な建物形状が変形する様子を見ることができる表示により、立体振動性状を視覚的に理解できる。また、得られた常時微動・地震記録から、特徴的な立体振動特性に関する考察と観測システムの確認を行った。なお、本章の結果を含む防災システム開発について11章で述べられている。

9.2 環境総合館の建物概要と強震観測概要

9.2.1 建物概要

環境総合館は、名古屋大学東山キャンパス内に立地する地上7階、地下1階の建物である(図9.1)。上部建屋は、プレキャストプレストレストコンクリート(PCaPC)構造が採用されており、PC柱の建て方、PC梁の架設、PC鋼線の緊張、ハーフPC床版の架設、ハーフPC床版へのRC打設の工程を繰り返すことで建設された。平面形状は、長辺方向5スパン(49.5m)×短辺方向2スパン(16.0m)の偏心の少ない整形な長方形で、短辺方向には耐震壁が設けられている。基礎には、杭長が32mと36mの高強度プレストレストコンクリート(PHC)杭が採用されており、セメントミルク工法により施工された。表9.1に建物概要を示す。



図 9.1 外観写真

表 9.1 建物概要

| | | | |
|------|-----------------------|------|--|
| 階数 | 地上 7階 地下 1階 | 構造種別 | (地上) PCaPC造 (地下) RC造 |
| 高さ | 33.4m | 骨組形式 | (桁行) ラーメン構造 (張間) 耐震壁付きラーメン構造 |
| 軒高 | 29.7m | 基礎種別 | 杭基礎 (PHC杭) |
| 延床面積 | 5956.08m ² | | セメントミルク工法 |
| 用途 | 教室, 実験室 | | 杭径 800φ 92本 杭長 36m, 32m 根入れ深さ GL-4.0m, GL-7.2m |

9.2.2 強震観測概要

(i) 強震計

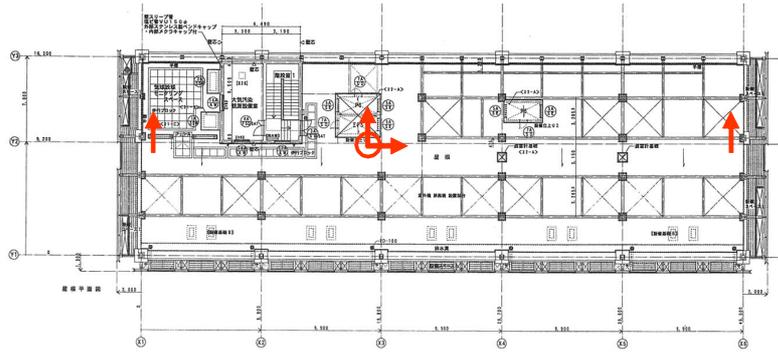
強震観測は、建物内 8 地点、地盤地表 2 地点、地盤地中 1 地点、及び杭中 4 地点の計 15 地点 36 成分での高密度強震観測を行っている。使用機器には、建物及び杭中は応用強震計測(株)製フォースバランス型加速度計、地盤観測点はアカシ(株)製(当時)のフォースバランス型加速度計を採用した。観測点は、図 9.2 に示すように建物の 1 階、5 階、屋上の中央には 3 成分、同階西端には水平 1 成分、屋上東端に水平 1 成分、1 階北端と西端に上下 1 成分、及び地盤に水平上下 9 成分を配置した。これは、以下の点を考慮して設定している。

- ・ 建屋のモード形状：1 階、5 階、屋上の中央水平成分
- ・ 建物と地盤との動的相互作用
 - スウェイ振動：地表、1 階の水平成分
 - ロッキング振動：1 階端部の上下成分、1 階と屋上中央の水平成分
 - 入力損失効果：地表、1 階の各成分
- ・ ねじれ振動：1 階、5 階、屋上の中央と端部の水平成分
- ・ 表層地盤増幅：地中、地表の各成分
- ・ 位相差入力：地表 2 地点の各成分

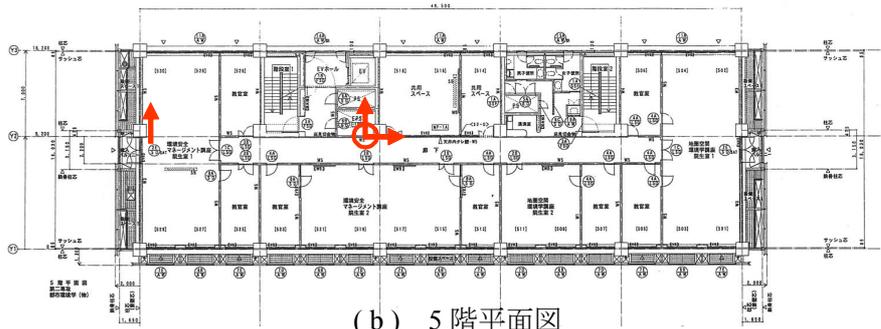
これらに加えて、杭の地震時挙動を把握するために、PHC 杭の中に鋼管を埋設し、その鋼管内に強震計を設置した。

(ii) データ収録器

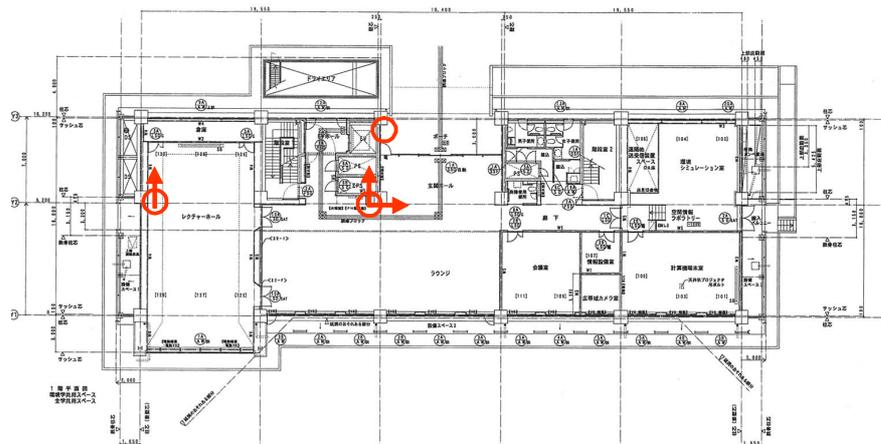
環境総合館での強震観測は、多チャンネルの記録を同期して得る必要があるため、相応の収録システムが必要である。ここでは地震動をイベントトリガによって収録するシステムとして、応用強震計測(株)製 FlexSysALTUS を使用し、24 チャンネルおよび 12 チャンネルの機器を組み合わせ使用した。FlexSysALTUS は A/D 分解能 19bit (114dB)、サンプル周波数は 20, 40, 50, 100, 200, 250Hz の中から選択することができる。起動および停止のトリガレベルをフルスケールの 0.002 - 100% の間のいずれかに設定可能である。地震検出方式は、全成分から任意の組み合わせの OR もしくは AND を選択することができ、検出アルゴリズムは STA/LTA 方式である。プレトリガの時間は 1 - 60 秒の間で設定することができ、ポストイベント時間は 1 - 65000 秒に設定することができる。デジタル化されたデータは PCMCIA のメモ리카ードに保存され、標準で 256MB を搭載する。また、避雷機能と自己診断機能を備える。刻時は GPS 時計に同期することによって自動的に修正され、スペック上は 0.5 μ s 以内の精度である。本システムではサンプル周波数 100Hz を採用し、収録周波数範囲は DC-40Hz である。



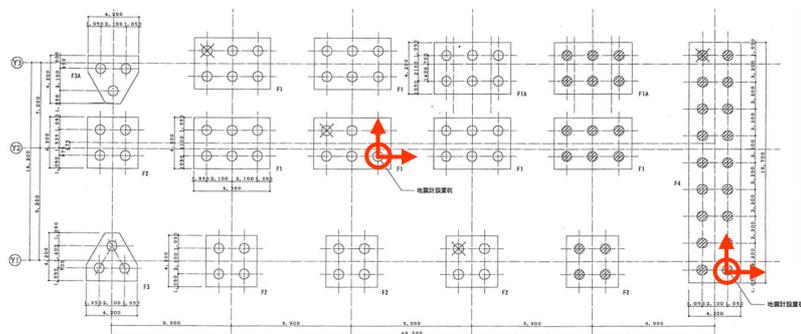
(a) 屋階平面図



(b) 5階平面図



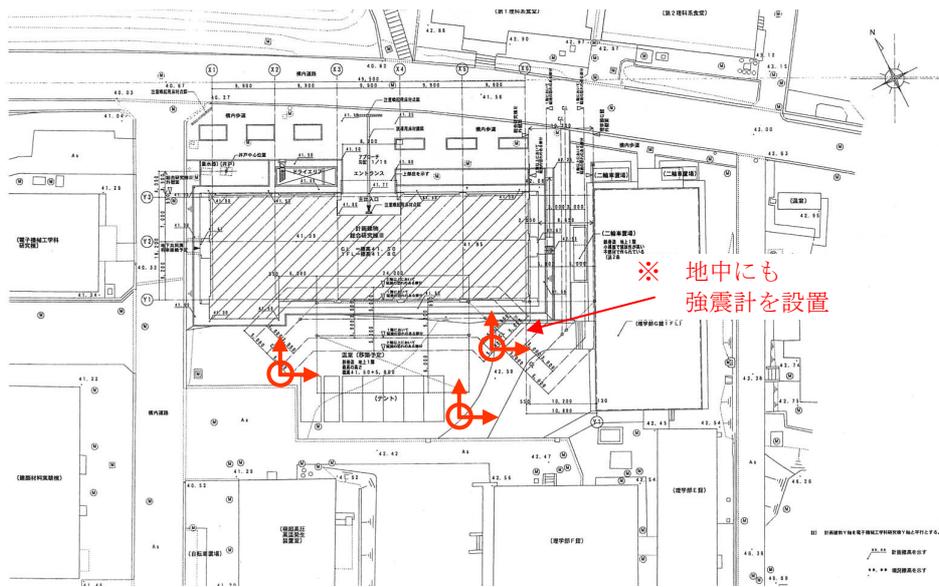
(c) 1階平面図



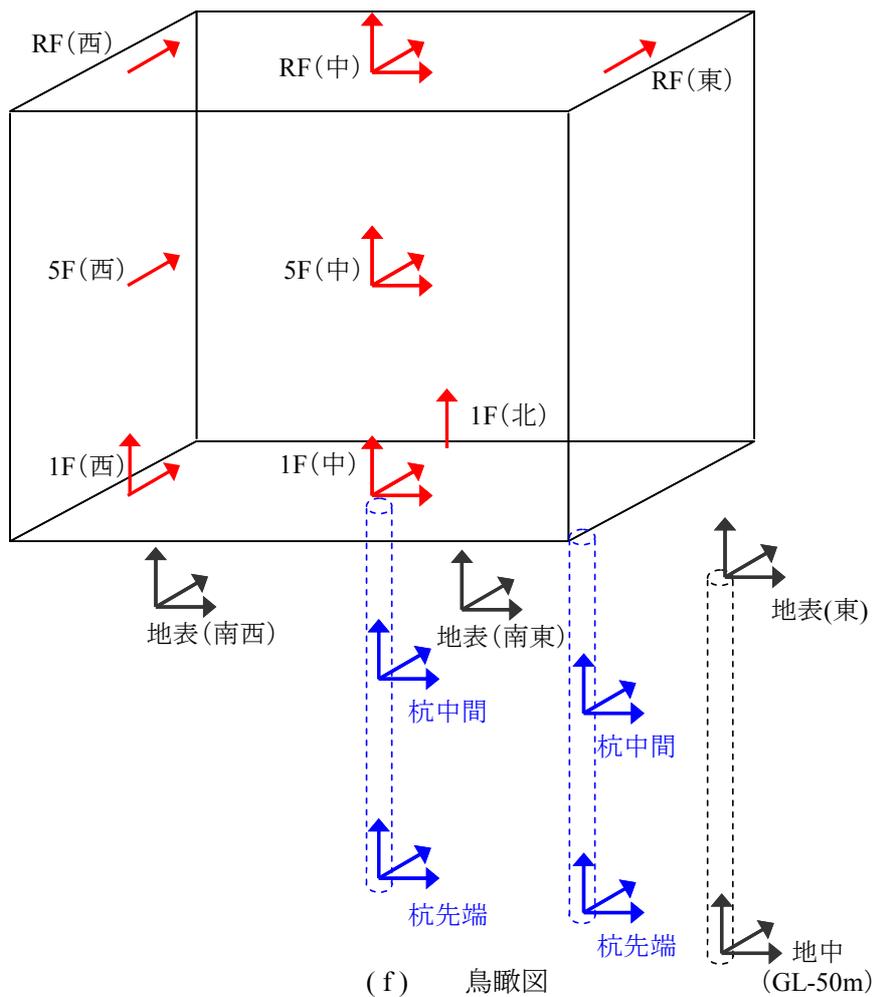
※ 杭には、それぞれ先端と中間の2カ所に強震計を設置

(d) 杭伏図

図 9.2 強震計配置図



(e) 配置図



(f) 鳥瞰図

図 9.2 強震計配置図

9.3 環境総合館地震動モニタリングシステム

9.3.1 システムの概要

本システムは以下のサブシステムより構成される。

- ・ 強震計
- ・ データ収録器
- ・ リアルタイム処理装置
- ・ リアルタイム表示装置

環境総合館の強震計で観測した地震動データは、データ収録器に保存され、収録処理装置で変換処理をした後、LAN 経由で既設の大都市圏強震動総合観測ネットワークのデータサーバに転送され、建物・地盤・杭の地震時挙動の総合的な精査に活用する。また、上記のうち 12 成分は、リアルタイム処理装置で常時収録し、LAN 経由でリアルタイムモニタリング装置にデータを転送し、振動性状を常時表示しモニタする。なお、このシステムには建物の環境モニタシステムも組み込まれており、表示装置には環境データも同時に表示される。このシステムの詳細を以下に記す。

9.3.2 リアルタイム処理装置

9.2.2 節で述べた FlexSysALTUS はイベントトリガによる波形の収録には適しているが、リアルタイム処理には適していない。そこで、強震計からの信号を分岐し、リアルタイム処理装置に入力することにより次節で述べるリアルタイム処理とイベントトリガ収録の共存を実現している。

リアルタイム処理装置には、応用強震計測（株）製インターネットサイスミックレコーダ Model2374 を用いた。この装置は、4 チャンネル入力のアナログ信号を 24bit A/D 変換機によって 400Hz でサンプルし、これを FIR フィルタでアンチエイリアス処理を施した後、100Hz にリサンプルし、WIN フォーマットのデータを LAN に UDP パケットとして送信する機能を持つ。インターネットサイスミックレコーダ Model2374 の特徴は、オンボード PC を内蔵して処理をしているため処理内容に関する自由度が高いことにある。リアルタイム処理装置と他の機器とのデータの流れを図 9.3 に示す。

9.3.3 リアルタイム表示装置

リアルタイム処理されたデータを可視化するための装置として、リアルタイム表示装置を設置した。これは Windows を搭載した汎用 PC に、Java C を用いたアプリレットを搭載することによって実現している。表示についての詳細は語述する。リアルタイム表示装置と他の機器とのデータの流れを図 9.3 に示す。

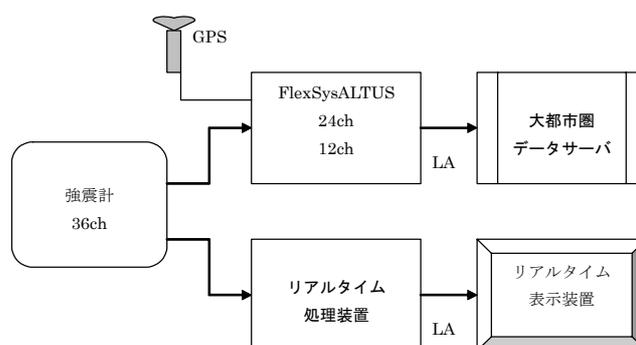


図 9.3 各処理装置のデータの流れ

9.4 リアルタイム表示装置

本表示装置は、環境総合館の振動のリアルタイム表示のほかに、環境総合館の各種環境をモニタし、表示する機能を併せ持つ（図 9.4）。

9.4.1 建物振動のリアルタイム表示

環境総合館に高密度に設置された強震計のデータを用いて、建物の振動を常時リアルタイムで表示する。サーボ型強震計によって収録される地震動は加速度成分であるが、表示には変位を用いた方が理解し易い。このため本システム内では、加速度データを数値積分によって変位成分に変換し、表示している。建物の固有振動数はおよそ 2Hz であるが、変位に変換する際には、これより低振動数の振動の振幅が非常に大きくなる。したがって FIR フィルタにより長周期成分をカットして振動を表示している。

リアルタイム表示画面では建物のフレームをピンク色の線で表示し、それに対する実際の振動を赤い線で表示している。また、強震計の設置位置を青い丸で表示している。実際に得られるデータは強震計が設置された青丸の点の変位成分のみであるが、ここでは建物の振動を容易に理解できるように建物の枠を縁取ったような赤線のフレームで表示している。赤線で表示されるフレームはこの青い丸の場所で得られたデータを用いて作成される。なお、描画は 1F 中央の強震計のデータを規準とした変位を表示している。また、変位は常時微動が見え易いように変位を建物のスケールに対して 106 倍に拡大して表示している。

赤い線のフレームは、建物の実際の振動として認知しやすいように、以下の工夫をしている。

- 床面の水平面内での変形：

水平面内の変形は、そのフロアの水平動強震計のデータによって描画される。即ち、1F と 4F では中央と西端、RF では東西端と中央の振動に基づいている。したがって 1F と 4F では一枚の板としての変形が描画され、RF では二枚の板として東西で別々に変形が描画される。これによって各フロアでの変形角の違い、RF での東西での変形の違いなどが観察できる。なお、四隅の描画には回転も考慮し、変形が大きくなっても平行四辺形にならず、空間データ上は長方形を保ったまま描画しているために描画は自然な変形に見えるようにしてある。

- 建物の傾き

ロッキング、弾性変形などを見るためには建物の傾きが重要である。傾斜の描画には、1F での長短辺に設置された上下動と、4F および RF に設置された水平動（中央の三成分を含む）のデータを用いている。ここでも変形の描画が不自然な平行四辺形にならないよう、回転を考慮して四隅を描画している。傾斜は 1F-4F の間と 4F-RF の間の両方で独立に求めることができ、また同じ階でも東西端でそれぞれ求めることができるので、それぞれ独立に描画している。

これらの工夫により建物は自然な形状で振動し、変形するため、常時変形を観察するために分かりやすく、また変形状態を詳しく観察することができるシステムとなっている。

9.4.2 環境モニタリング

本装置では建物の振動の表示のほかに、各種環境状態をモニタし、表示している。以下のような項目を観測している。

- ・ 気温：建物屋上に気温センサを設置し、外気温を観測
- ・ 湿度：建物屋上に湿度計を設置し、館外の湿度を観測
- ・ 日射量：建物屋上に日射量センサを設置し、日射量を観測
- ・ 雨量：建物屋上に雨量計を設置し、降水量を観測
- ・ 風速：建物屋上に風速計を設置し、風速を観測
- ・ 気圧：建物屋上に気圧計を設置し、気圧を観測
- ・ 電気消費量：建物の各配電盤に設置された消費電力計測ユニットからデータを収集し、建物全体での消費電力を観測
- ・ ガス消費量：建物のガス量計からデータを収集し、ガスの消費量を観測。なお、この建物のエアコンの大半はガスヒートポンプによって運用している
- ・ 最大加速度：建物に設置された強震計による、5分ごとの最大加速度を表示。地震があれば一目でわかる
- ・ CO2 排出量：電気およびガスの消費量に対して次の式により、二酸化炭素に換算した消費量を表示

$$\text{CO2 排出量(kg)} = \text{総ガス消費量 (m3)} \times 2.537 + \text{総電気消費量(kWh)} \times 0.509$$

なお、これらのデータは時々刻々と更新され、また一日前のデータが点線で表示される。また、画面左下にはこの建物で観測した最も新しい有感地震の震度を表示している。

表示装置は環境総合館 1F エントランスからエレベータに向かう経路上に設置されており、建物に来た人なら誰でも容易に認識することができる。

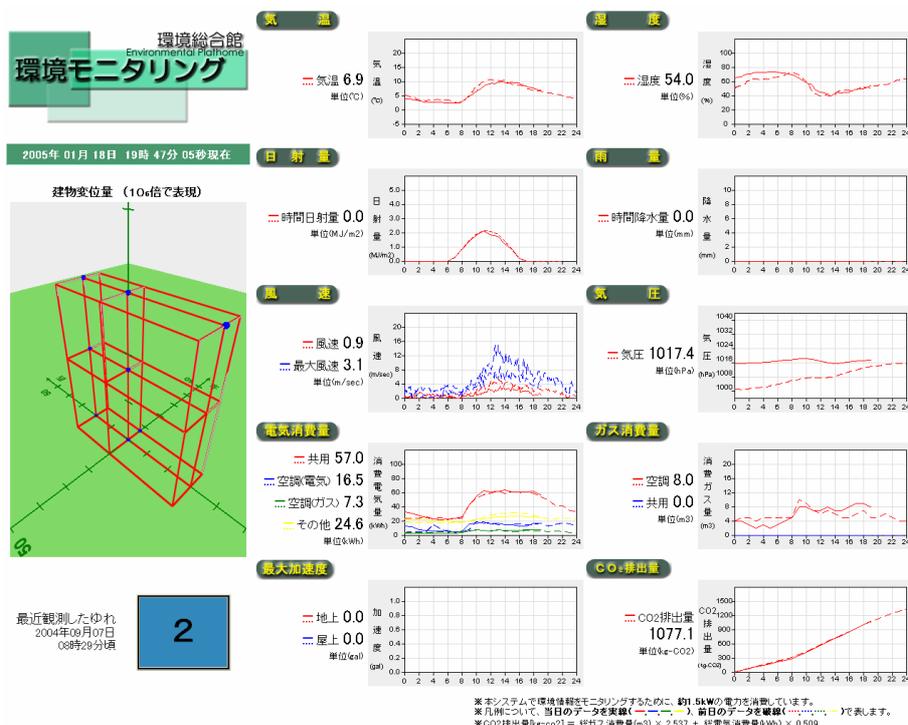


図 9.4 リアルタイム表示装置の画面

9.5 リアルタイム表示による環境総合館の振動性状の把握

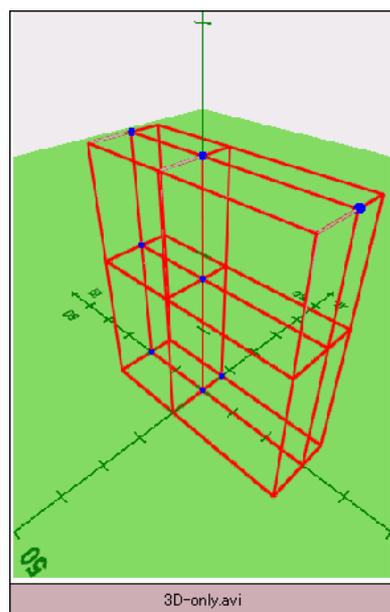
このシステムによって、環境総合館の振動をリアルタイムで観察することができ、その結果様々な新しい知見が得られた。図 9.5 はリアルタイム表示装置による建物の振動表示のスナップショットである。画像を保存したのは図 9.4 に示した時刻の前後数分間である。この時は風速が 1m/s 程度と比較的穏やかな時であったが、以下に示すように様々な振動が観察できる(図 9.5)。

屋上 (RF) がほとんど変位していない状態 (図 9.5 (a)) では、中間階 (4F) にも変位は見られず、建物がほとんど変形していないことが分かる。各フロアの床の形状にも変形は見られず、面内の変形が起きていないことが分かる。なお、フレームが平行六面体でないのは三次元表示において遠近感が出るように距離に応じて手前側を強調しているためである。

図 9.5 (b)のタイミングでは、各フロアが北側にほぼ平行に変位しており、1F~4F の変形角と 4F~RF の変形角がほぼ等しいせん断変形が卓越していると考えられる。ロッキングに関しては、この図からの判定は困難である。

さらに複雑な変形形状も観察できる。図 9.5 (c)では上部構造が弾性的に変形しており、フレームが上下方向に折れ曲がっている様子が見られる。フレームが 1F~4F ではほとんど変形していないのに対し、4F~RF では手前に変形している、即ち、4F で折れ曲がっている様子が見られる。西端が特に分かりやすい。

別のタイミングでは、ねじれ及び床の面内折れ曲がりが見られる (図 9.5 (d))。RF のフレーム (平面方向) に注目すると、西端ではあまり変位が見られないが、東端ではより大きく変形している様子が見られ、建物がねじれ振動していることがわかる。また、中央の変位は西端と同程度であり、単にねじれが生じているのではなく、床が面内で変形しており剛床仮定が成り立たなくなっていることが分かる。ここでも東端では上部構造のフレームに折れ曲がりが見られ、1F~4F よりも 4F~RF で変形角が大きくなっている。



付録：建物振動の動画。この文書が MS Word ファイルの場合再生可能
(文書と同一フォルダに動画ファイル 3D-only.avi が必要)

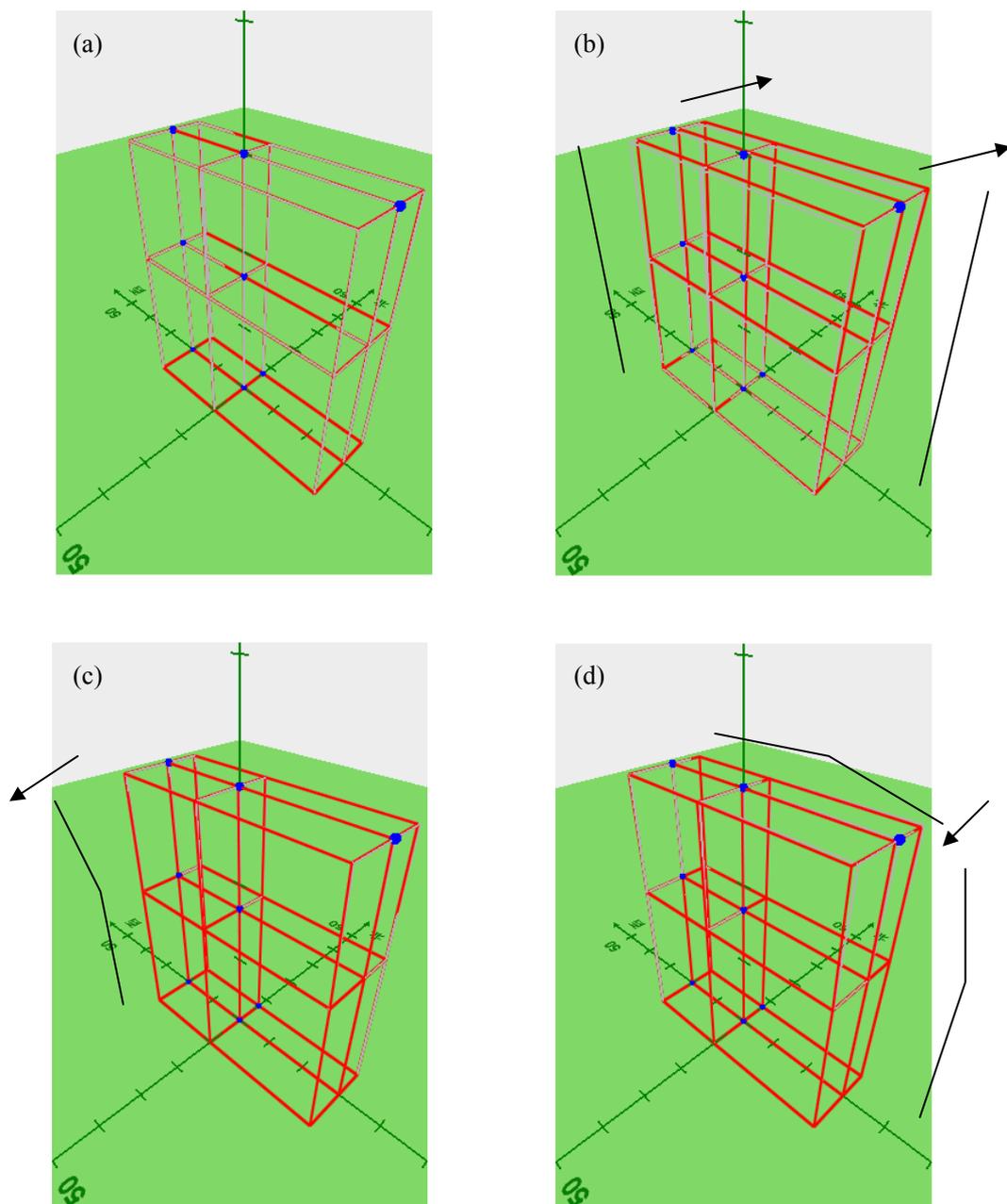


図 9.5 常時モニタ装置による環境総合館の振動の様子。
 (a-d)はそれぞれ異なる時刻におけるスナップショット。
 黒線および矢印は変形の様子を分かりやすく誇張したものである。

9.6 地震観測記録

環境総合館では、強震観測が開始された2004年1月6日から2005年1月9日までの約1年間に26の地震記録が得られている。この内、環境総合館の屋上において90galを越す記録が得られた2004年9月5日23時57分の紀伊半島南東沖を震源とする地震の張間方向の加速度波形と加速度フーリエスペクトルを図9.6、図9.7に示す。

図9.6を見ると、地中に比べ地表面の加速度が大きくなっており、表層地盤による増幅効果が現れている。建物に関しては、1階から屋上へいくにつれて加速度が増幅している様子が顕著に現れている。また、屋上と5階において、中央に比べ端部での加速度が大きくなっており、ねじれ振動が発生していることが分かる。

図9.7を見ると、紀伊半島南東沖の地震が低振動数成分を多く含んでいることが分かる。1階は地表面に比べ、高振動数になるに連れて値が小さくなっており、建物と地盤との動的相互作用による入力損失効果が現れている。建物上部に着目すると、2Hz付近で揺れが増幅している様子が顕著に現れている。また、5階と屋上の中央と端部を比較すると、中央ではピークが1つしかないのに対し、端部ではピークが2つ現れている。このことから建物端部でねじれ振動が励起されていることが分かる。

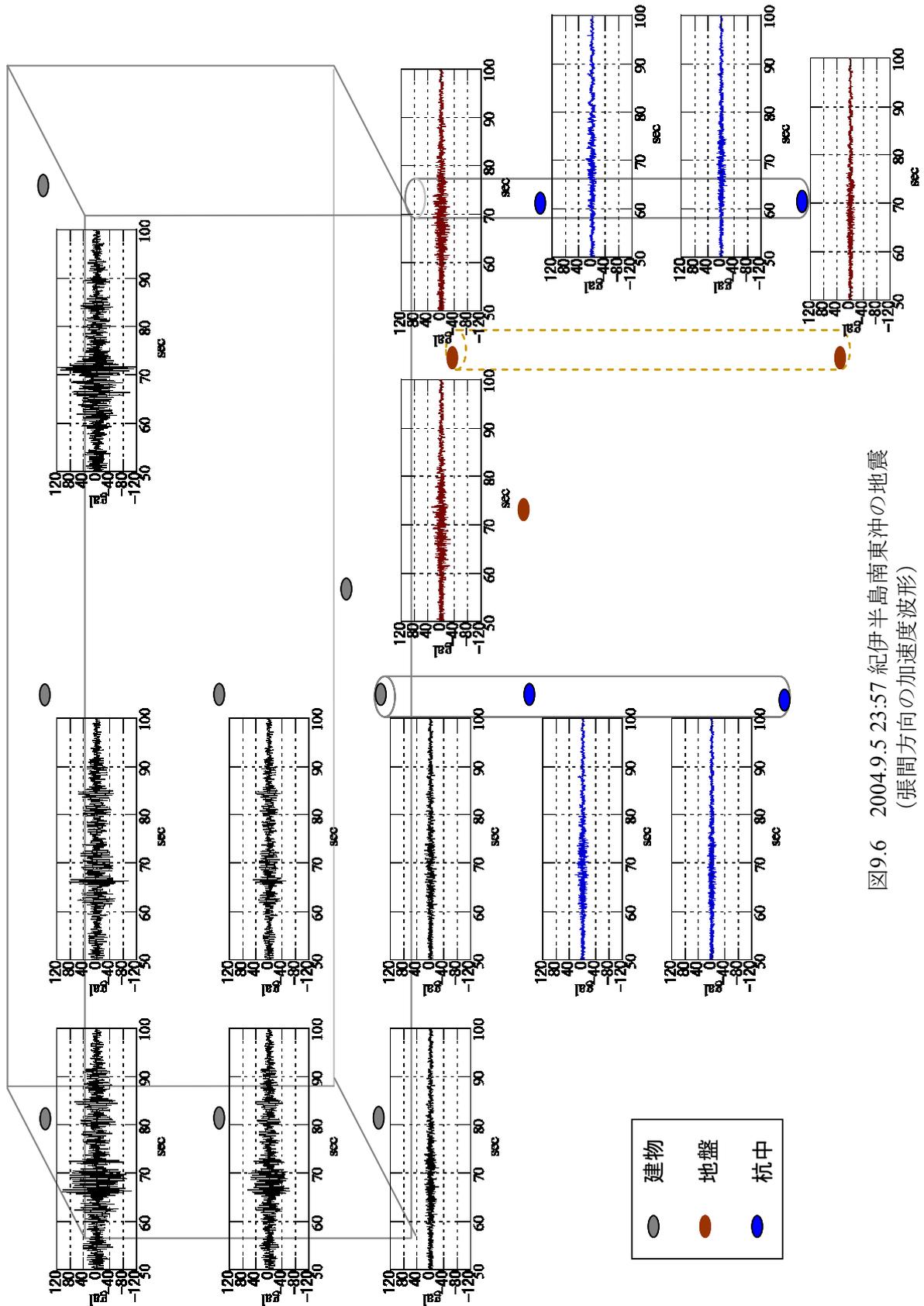


図9.6 2004.9.5 23:57 紀伊半島南東沖の地震
(張間方向の加速度波形)

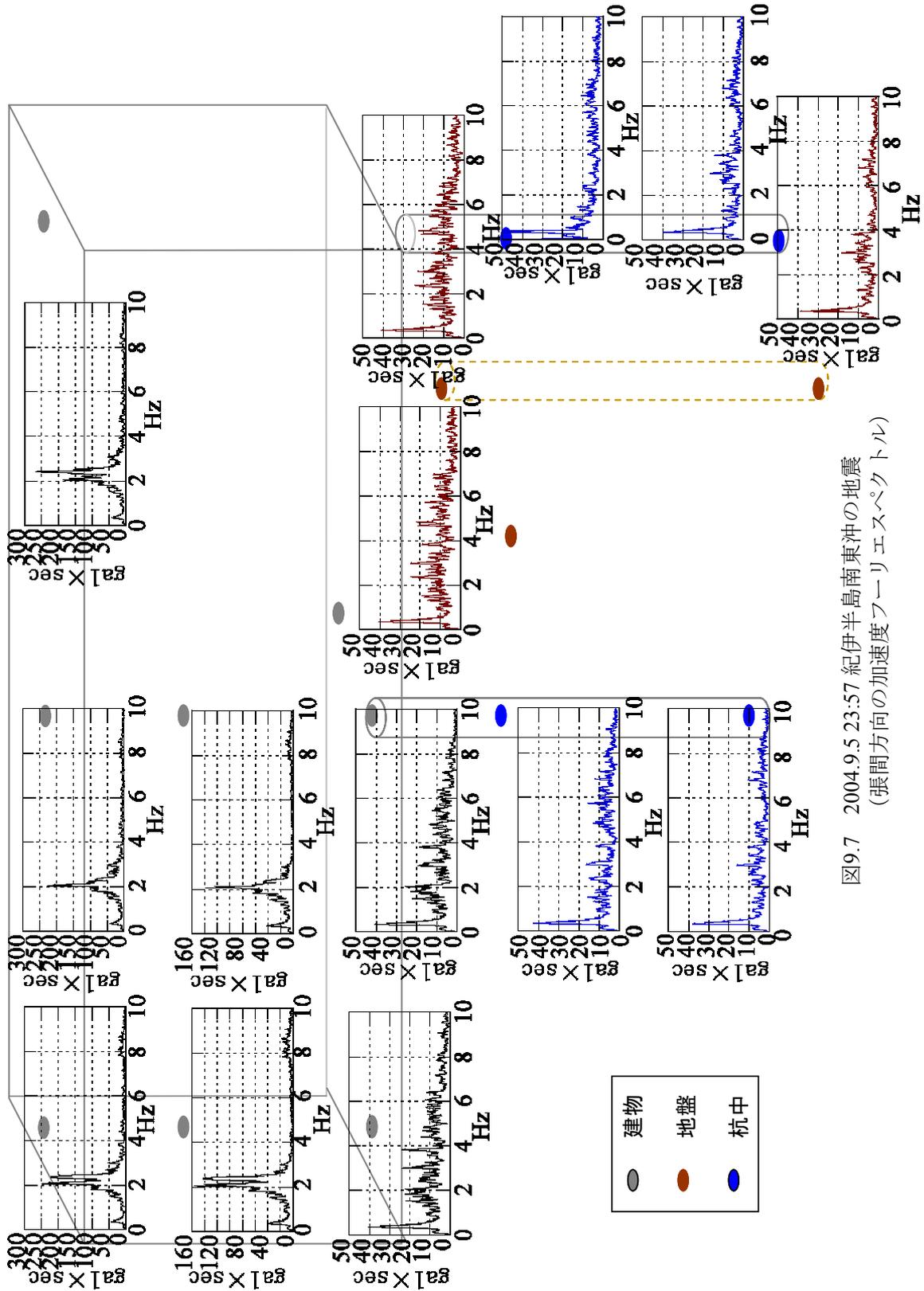


図9.7 2004.9.5 23:57 紀伊半島南東沖の地震
(張間方向の加速度フーリエスペクトル)

9.7 地震計設置状況の検証

地震記録の分析に基づく建物振動性状の把握には、強震計の設置状況の検証が必要不可欠である。設置状況の検証には、建物・地盤とも剛体的に挙動すると考えられる長周期成分を多く含む地震動が適している。そこで、前節で用いた 2004 年 9 月 5 日 23:57 に発生した紀伊半島南東沖の地震記録を用いて検証を行う。

地震計設置状況の検証として、まず、バンドパスフィルタを施して、長周期成分のみを抽出した加速度波形を比較する（図 9.8）。各図とも建物 1 階中央の観測点を基準として比較しており、水平方向は 0.3Hz~0.5Hz、上下方向は 0.6Hz~0.8Hz のバンドパスフィルタを用いている。建物内の観測点は屋上中央のみしか示していないが、建物内の他の観測点全てにおいて張間、桁行、上下方向の各成分とも、ほぼ同一の波形であることを確認している。地盤地表の 2 地点においても、図 9.8 (b)に示すように 3 成分がほぼ同一の波形である。地盤地中と杭中の観測点は、上下方向はほぼ同じ波形であるが、張間方向には差が生じている。

次に、強震計の水平方向の設置方位を検証するために、x 軸に桁行方向、y 軸に張間方向の振幅を描いたオービットを図 9.9 に示す。1 階中央と地盤地中のオービットを比較すると、軌跡の形状はほぼ同じであるが、角度が異なっていることが分かる。この差異は、強震計設置時に地中の方位がずれてしまったためと考えられる。地盤地中で得られる地震記録を適切に扱うためには、地盤地中の記録を反時計回りに 87 度回転して補正することが必要である。

杭中で得られた記録は、4 つとも全方向の波形について 1 階中央と差異が生じている。杭中の各記録についてオービットを描き、1 階中央と比較すると、軌跡の形状も角度もまちまちである。角度は、中央の杭の BFL-10m の強震計は時計回りに 40 度、杭端は時計回りに 50 度、南東の BFL-10m の強震計は時計回りに 100 度、杭端は時計回りに 160 度回転補正すると、南東の杭中間の記録以外は、1 階中央とほぼ対応することを確認した。

杭中の強震計は建設工事中に埋設し、工事の進展により埋設口をふさがなければならなかったため、廉価な簡易型強震計を採用している。この強震計は分解能が 0.2gal であるため、このレベル以下の地震動では、センサーのノイズが混入している。しかし、本節で示したように、十分な振幅レベルの地震動であれば、杭中の貴重な地震記録を得ることに成功している。

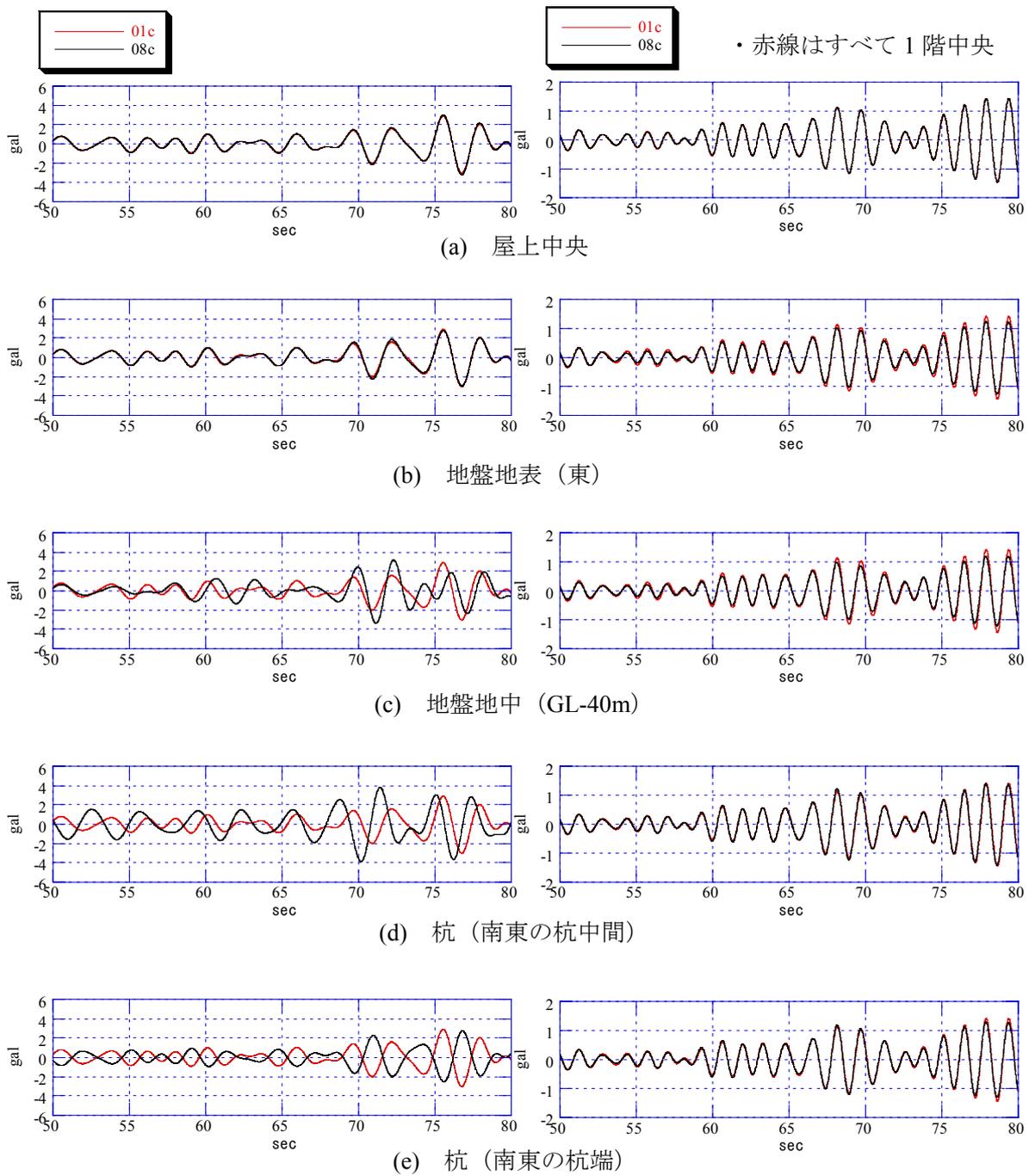


図 9.8 紀伊半島南東沖の地震のフィルタ波形 (左：張間方向，右：上下方向)

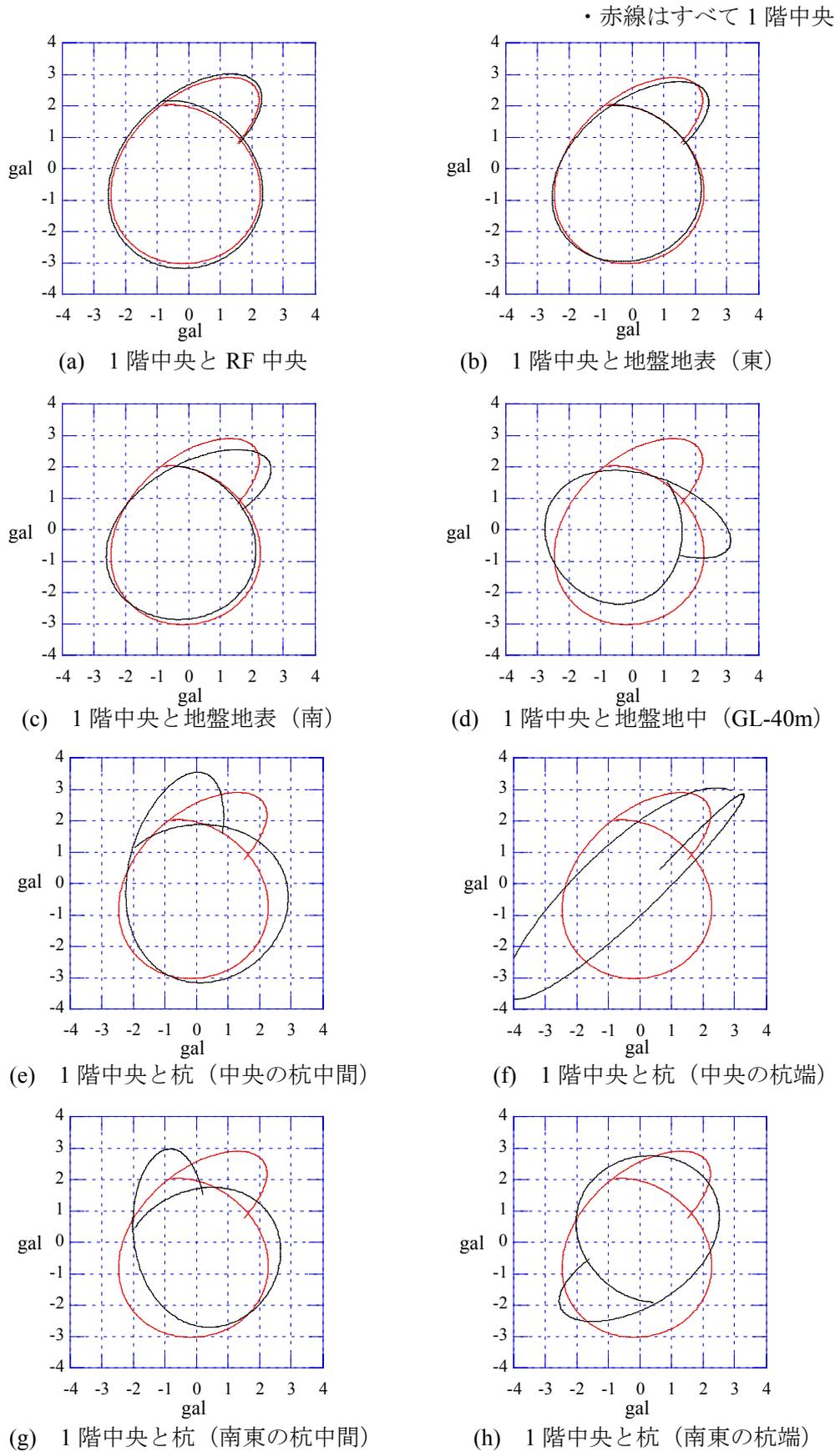
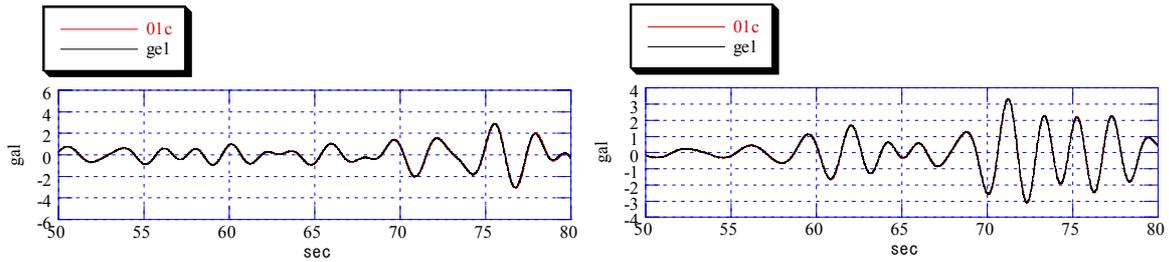
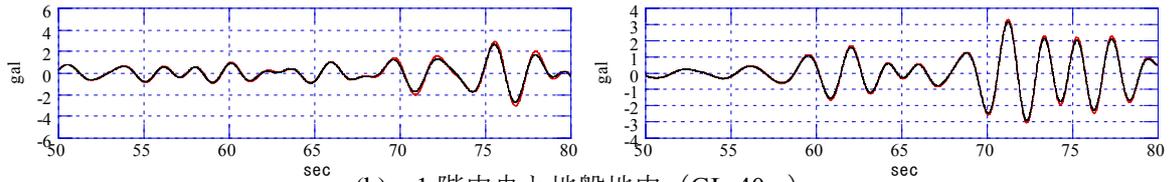


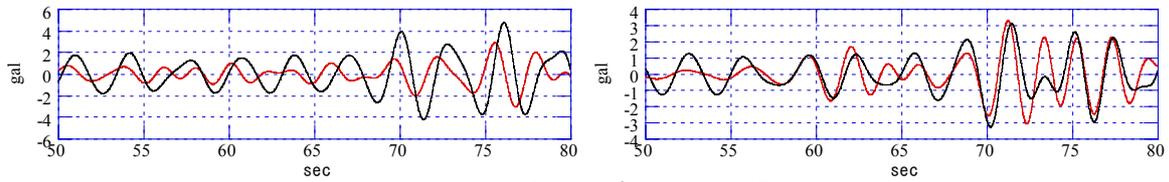
図 9.9 紀伊半島南東沖の地震記録のオービット



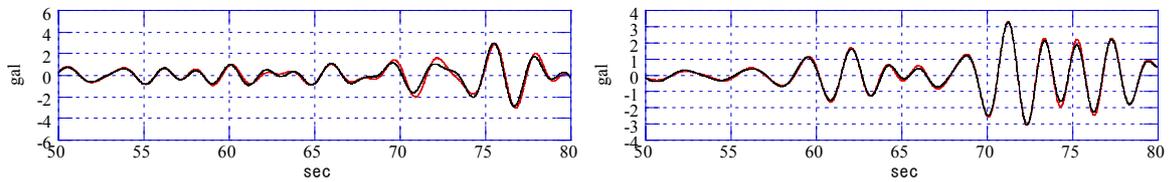
(a) 1階中央と地盤地表（東）



(b) 1階中央と地盤地中（GL-40m）



(c) 1階中央と杭（南東の杭中間）



(d) 1階中央と杭（南東の杭端）

図 9.10 紀伊半島南東沖の地震の角度補正後のフィルタ波形（左：張間方向，右：桁行方向）