

# 論文 地震観測記録を用いた長周期成分による鉄筋コンクリート造建物と地表面の応答に関する検討

森西 亨太<sup>\*1</sup>・塩原 等<sup>\*2</sup>・楠原 文雄<sup>\*3</sup>

**要旨：**鉄筋コンクリート造 9 層の建物で記録された東日本大震災本震の記録について、長周期成分を中心に検討を行う。加速度記録から速度および変位を求める際は、周波数領域での積分を用いる。得られた変位と加速度の関係を図示することで、通常の建物の変形に加えて、地盤の回転による変位が表面波の長周期成分によってもたらされていることを確認し、どの程度の大きさなのかを計算する。さらに、本震記録に含まれる長周期成分が具体的にどのような波で構成され、どの程度の振幅になっているかについても検討する。  
**キーワード：**RC 建物、地震観測記録、地震応答、長周期成分、表面波

## 1. はじめに

2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分頃に発生した東日本大震災本震は、特に規模が大きい海溝型地震であったことから、非常に広い範囲で長周期成分を多く含む加速度の大きい地震観測記録が得られた。日本国内でそのような地震観測記録が多数得られた例はこれまでにないため、東日本大震災の地震観測記録に含まれる長周期成分を中心に検討を行うことは、今後の発生が予測されている海溝型の巨大地震への対策として有用である。本稿では、東京都文京区にある鉄筋コンクリート造建築物に設置された地震計の加速度記録の分析を行い、地震発生時の応答性状や記録に含まれる長周期成分について検討する。

## 2. 記録概要

### 2.1 観測建物

東京都文京区本郷にある、地下 2 階、地上 9 階の、直接基礎を持つ鉄筋コンクリート造建物である。本建物の断面図と基準階平面図<sup>1)</sup>を図—1 に示す。本建物は 1968 年に竣工した。2005 年には高層部分の耐震補強工事が行われ、鉄骨枠付ブレースの増設や柱の炭素繊維シート巻きによるせん断補強などが施された。本震発生時は構造部材および非構造部材に被害は見られなかったが、室内で物品の散乱が起こった。

### 2.2 地震計

地震計の概要を表—1 に、設置場所を図—1 の断面図内に示す。建物内の 3 箇所他に、建物の約 60m 南の地点にも設置し、地表面の加速度を観測している。

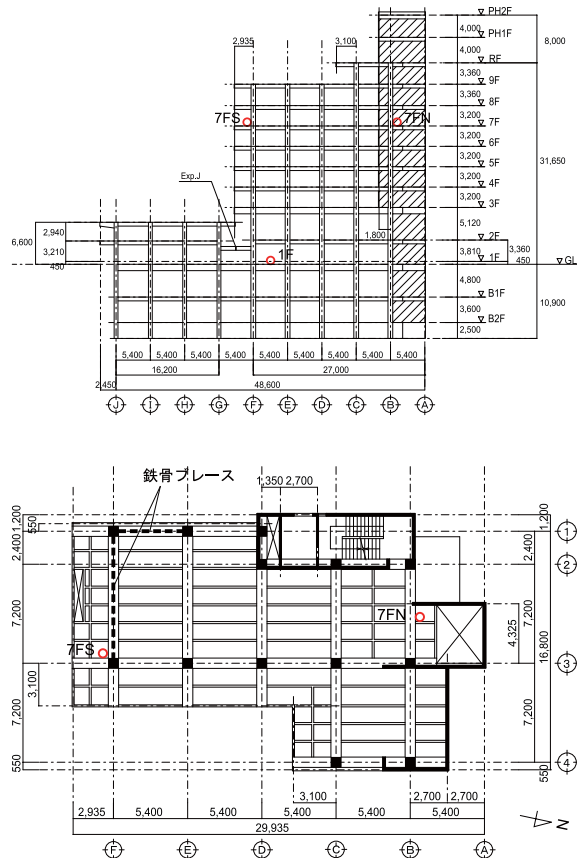
### 2.3 地盤

建物付近のボーリング柱状図<sup>2)</sup>を図—2 に示す。表層付近はローム層などで N 値が小さい一方、深さ 30m 付近

には N 値が 50 を超える硬い砂地盤がある。

## 2.4 観測記録

本稿で使用した地震動記録の概要を表—2 に示す。



図—1 観測建物図面（上：断面図 下：基準階平面図）

\*1 東京大学 工学系研究科建築学専攻 (学生会員)  
 \*2 東京大学 工学系研究科建築学専攻教授 工博 (正会員)  
 \*3 東京大学 工学系研究科建築学専攻助教 修(工) (正会員)

表-1 地震計概要

機構	フォースバランス型サーボ式加速度計
測定加速度範囲	±2G
分解能	5×10 <sup>-6</sup> G 以下
測定周波数範囲	DC～400Hz(±3dB)

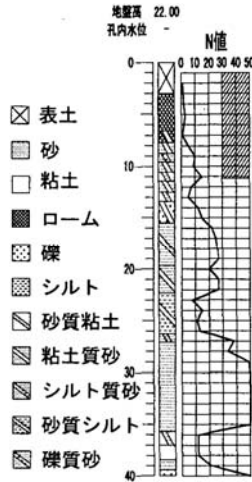


図-2 地盤のボーリング柱状図

表-2 地震動記録概要

地震発生日時	3月11日14時46分
震央	三陸沖
震央北緯	38.10
震央東経	142.86
震源深さ(km)	24
マグニチュードM	9.0

### 2.5 固有周期の変化

2004年10月から2011年4月までに観測された計51波における、1階の加速度記録に対する7階南側の加速度記録のフーリエ振幅比スペクトルから推定した一次固有周期を図-3に示す<sup>1)</sup>。耐震補強によって、南北・東西両方向の周期が0.05秒程度縮んだが、3月11日の本震によって再び0.05秒程度伸びたこと、本震以前に建物の応答性状に影響を与える大きな地震がなかったことが分かる。

## 3. 速度及び変位の計算

### 3.1 計算方法

前処理として、加速度記録を有限フーリエ変換し、得られたフーリエ振幅に周波数0.05Hz以下(周期20秒以上)の成分を取り除いてから逆フーリエ変換で戻すことで、加速度の時刻歴とした。速度及び変位は周波数領域で積分して求める。

本稿では、表-1の測定周波数範囲より、長周期成分の計測には問題がないと考えた。一方、速度や変位の計算への影響が軽微であることから高周期成分のカットは行っていない。

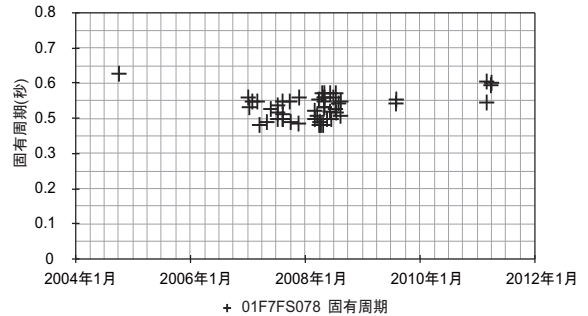
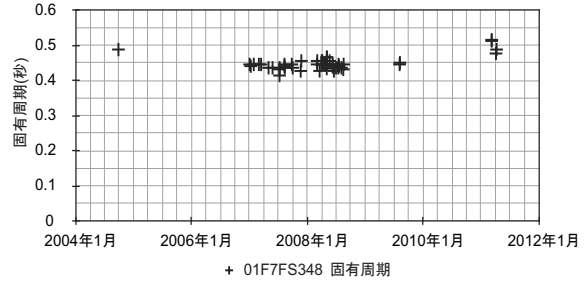


図-3 建物の一次固有周期の変化

(上：南北(長手)方向 下：東西(短手)方向)

### 3.2 計算結果

4つの地震計における最大値の一覧を表-3に、加速度・速度・変位の時刻歴を図-4に、建物1階のSd-Saスペクトルを図-5に示す。

表-3 各地震計における最大値一覧

位置	方向	加速度(gal)	速度(cm/sec)	変位(mm)
7階北	南北	180.6	9.61	83.4
	東西	211.8	12.62	107.9
	上下	57.5	4.67	70.5
7階南	南北	201.3	11.86	129.9
	東西	358.4	22.40	124.4
	上下	159.3	6.38	70.6
1階	南北	73.0	8.51	117.1
	東西	152.5	8.80	121.9
	上下	48.7	4.66	67.9
地表	南北	196.5	9.32	117.3
	東西	218.6	8.62	117.4
	上下	77.9	4.80	65.9

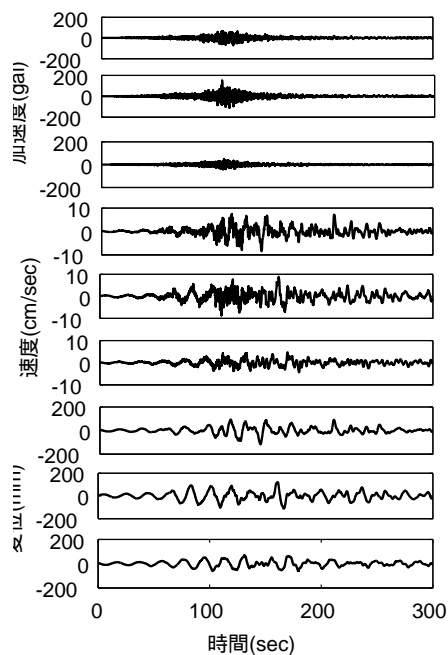


図-4 1階の時刻歴  
(それぞれ上から南北, 東西, 上下方向)

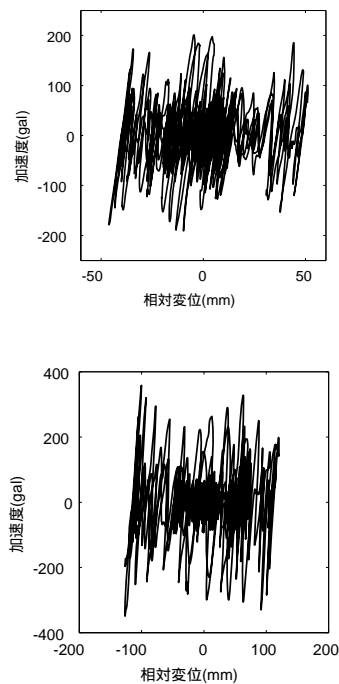


図-6 周期 20 秒以下の成分による履歴曲線  
(上: 南北方向 下: 東西方向)

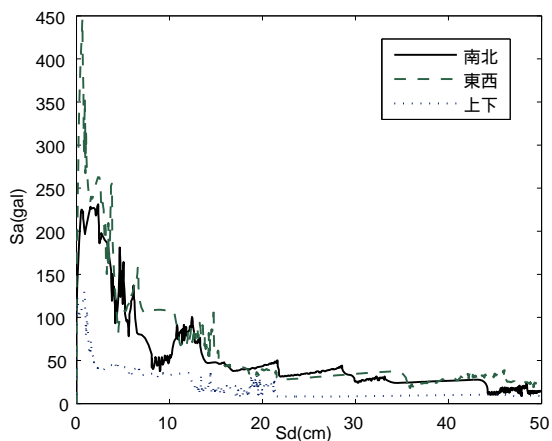


図-5 1階の Sd-Sa スペクトル (h=0.05)

#### 4. 建物に加わる力と変形の関係

##### 4.1 加速度—変位履歴曲線

前章で得られた加速度と変位の関係を図示して、建物の復元力特性を見る。7階南側の1階に対する相対変位を横軸に、絶対加速度を縦軸にとって描かれる南北(長手)方向と東西(短手)方向の履歴曲線を図-6に示す。周期20秒以下の成分で描くと、左右に激しく振れた曲線となっている。そこで、長周期成分をさらに取り除き、直線で近似できる弾性範囲内になるようなカットオフ周波数を求めた。その結果、図-7のように周期6秒以下の成分に絞ると、描いた履歴曲線が直線で近似できる範囲内に留まり、実際の被害状況に一致する。

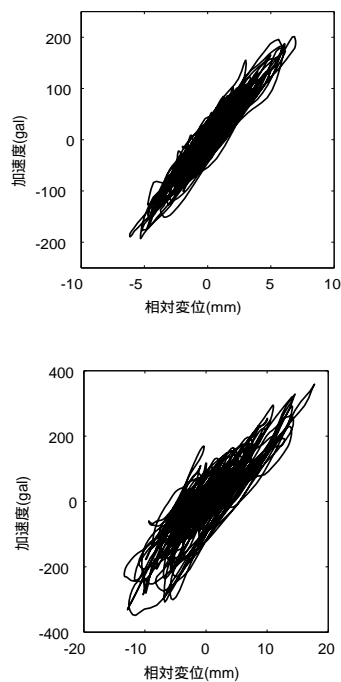
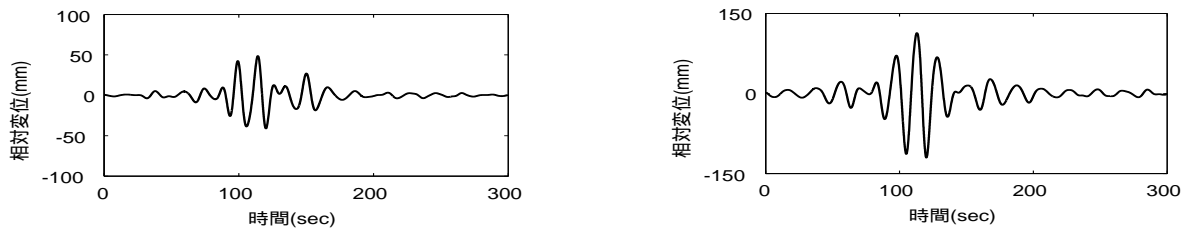


図-7 周期 6 秒以下の成分による履歴曲線  
(上: 南北方向 下: 東西方向)

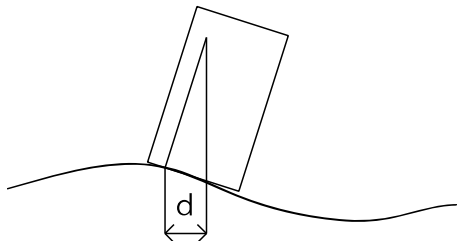
ここで、周期6~20秒の成分による変位の時刻歴を図-8に示す。周期6~20秒の成分による相対変位が南北方向で最大50mm程度、東西方向で最大120mm程度となっている。つまり東西方向では、7階と1階の相対変位を7階の床の高さで除して求めた相対変形角が最大1/200程度であったということになる。



図—8 周期 6~20 秒の成分による変位の時刻歴 (左：南北方向 右：東西方向)

#### 4.2 地盤の回転による変形

大きな相対変位が記録された原因として、地盤が傾いたことが考えられる。地表を表面波が伝播したとき、図—9 のように地盤の回転によって建物が傾き、通常の建物変形とは異なる挙動で加速度が記録され、大きな相対変位が生じる。図—10 に周期 6~20 秒の成分による 7 階南側と 1 階の東西方向の絶対変位を示す。時刻歴の 100

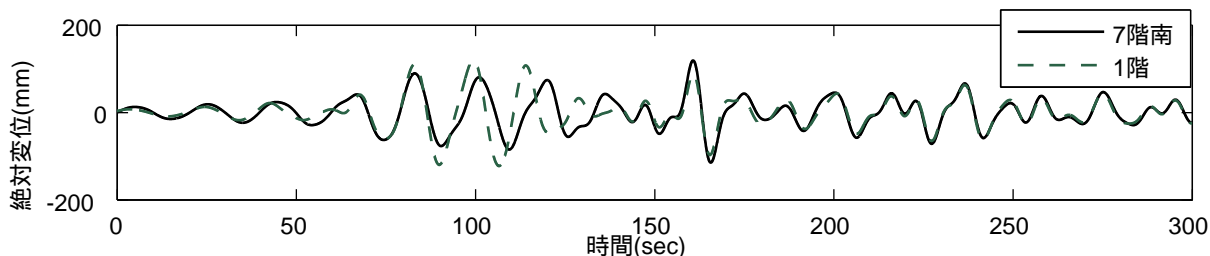


図—9 表面波による地盤の回転と相対変位の発生

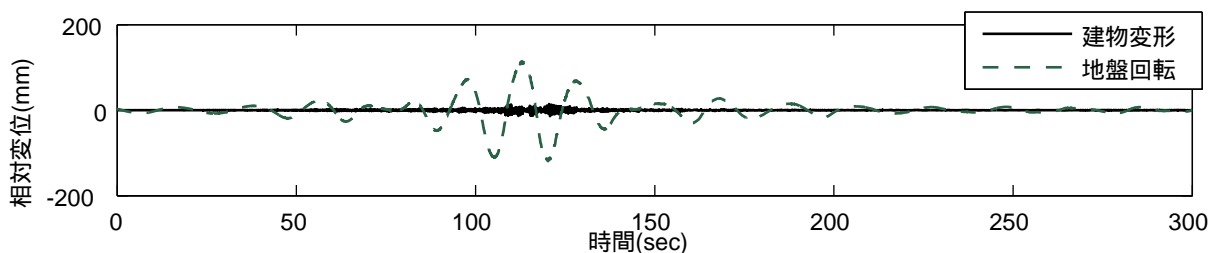
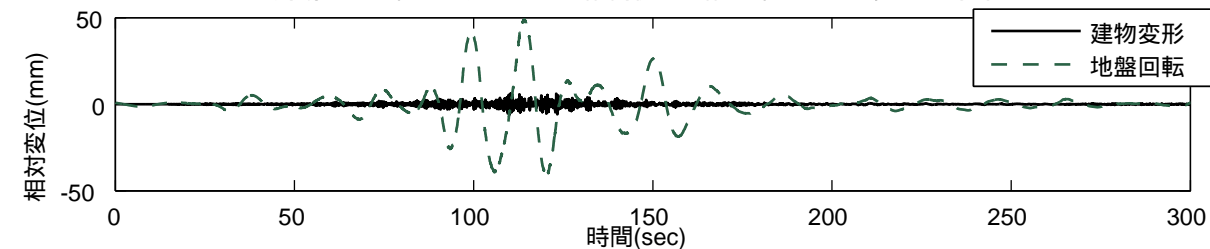
~150 秒付近のみで波形が大きく異なっていること及び、ロッキング動の固有周期とは離れた成分によるものであることから、主要動に含まれる長周期成分による、地盤の回転で生じた差異だと見ることが出来る。

地盤の回転によって生じた相対変位の大きさについて検討する。図—7 より、加速度と相対変位の関係から原点を通る直線に近似し、その傾きを建物の剛性とする。この剛性で周期 20 秒以下の成分による加速度を除いて、求めた変位を建物変形による変位とする。一方、これを周期 20 秒以下の成分による変位から除いて得られるものを地盤の回転による変位とする。

南北方向と東西方向で得られた、建物変形および地盤回転による変位を図—11 に示す。南北方向で、地盤の回転による変位が建物変形による変位の 10 倍、東西方向で 6 倍程度となっており、影響を無視できない。しかし、地盤の回転によって記録される加速度を正確に計算出来ていない点について、今後検討していく必要がある。



図—10 周期 6~20 秒の成分による 7 階南側と 1 階の東西方向の変位の時刻歴



図—11 建物変形と地盤回転に分離した変位の時刻歴 (上：南北方向 下：東西方向)

## 5. 長周期成分による地表面の挙動

### 5.1 主な成分

前章で考察した表面波によって、地表でどのような挙動が起きたかを見る。表面波は地表付近の境界面を伝播する波である。その中でもレイリー波・ラブ波が多くを占め、周期 10 秒程度の成分が多いと言われる。レイリー波は、波の進行方向に平行な P 波と、進行方向に直交な S 波のうち、地盤の境界面とも直交する成分の SV 波からなる一方、ラブ波は S 波の中で地盤境界面と平行な成分の SH 波による<sup>3)</sup>。境界面は地盤に平行であると考えられる場合が多いため、SV 波は鉛直成分、SH 波は水平かつ波の進行方向に直交となる成分とすることが出来る。また、レイリー波の軌道を描くと図-12 のようになり、波の進行方向に対して車輪の回転とは逆向きに動く（逆転の方向）ことが分かっている。<sup>3)</sup>ここでは、前章と同じ周期 6~20 秒の成分について検討を行う。

### 5.2 計算方法

本節ではまず、地震動記録の平面 2 成分を震央方向と震央方向に対して直交となる方向の 2 成分に座標変換を行う。そして、鉛直方向との計 3 成分に対してそれぞれ加速度と変位を計算し、各方向の相関を見る。

### 5.3 計算結果

1 階記録と地表記録の震央方向と上下方向の変位の関係を図-13 に、震央方向と直交方向の変位の関係を図-14 に示す。ともに、300 秒の記録を 50 秒ずつに区切って表示している。1 階記録と地表記録は、表-3 のように最大加速度が大きく異なるなど差異が大きいのに見えるが、長周期成分に関しては両者でほとんど差が見られない。建物の固有周期と離れているため、入力の際に増幅が起きなかったからと考えられる。

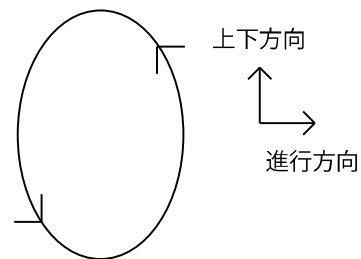


図-12 レイリー波の逆転の方向の軌道  
(図-13 の方向に対応)

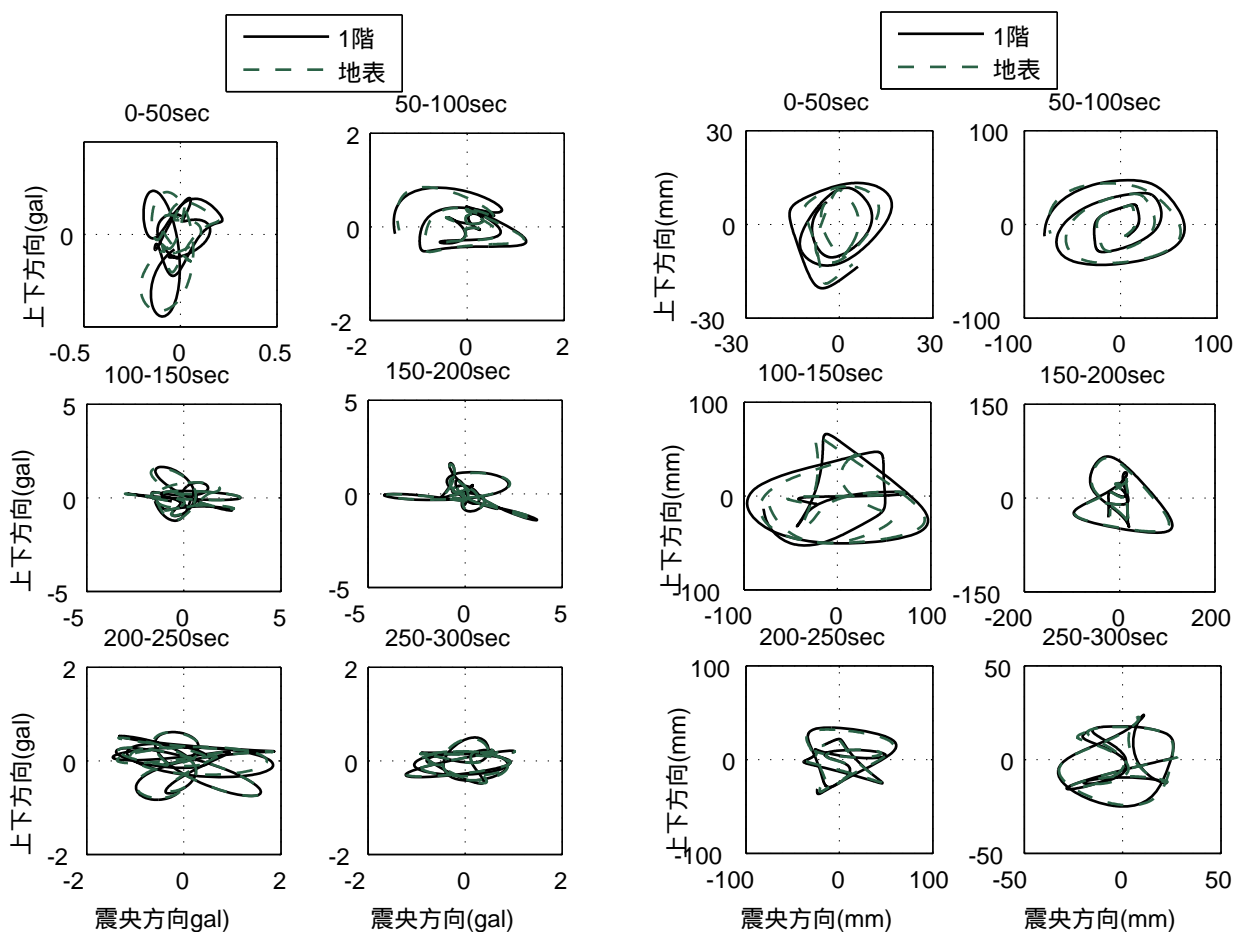


図-13 震央方向と上下方向の周期 6~20 秒の成分による挙動（左：加速度，右：変位）

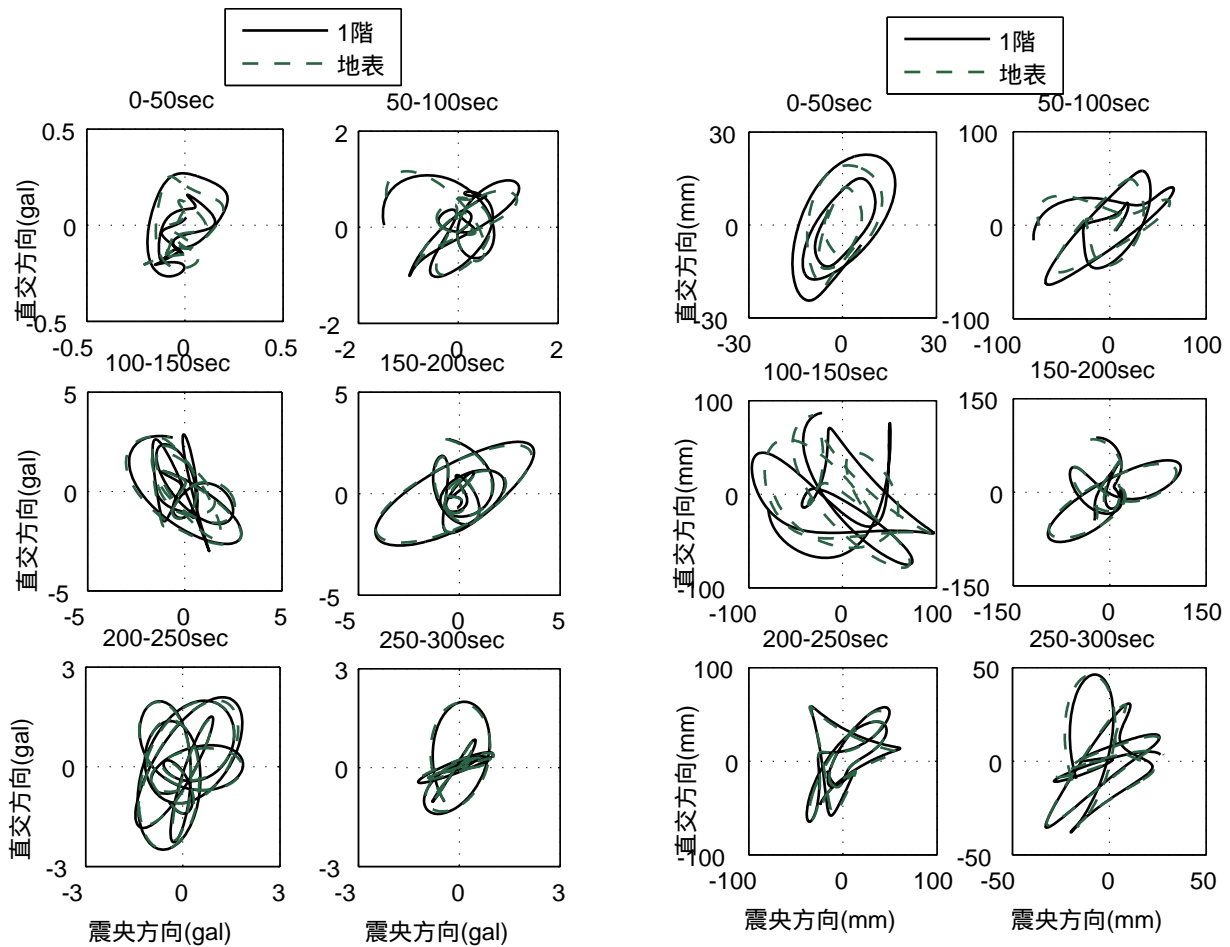


図-14 震央方向と直交方向の周期6~20秒の成分による変位（左：加速度，右：変位）

変位の波形を見ると、100秒までは単純な楕円形を描いている一方、100秒を過ぎると複雑な形を描き、回転方向が反転しているところも見られた。早い時間帯では地震波が単一方向から来ていたが、時間が過ぎるにつれて様々な方向から波が到達したためと考えられる。

図-13を見ると、変位の回転方向が逆転の方向であるため、震央方向と上下方向の挙動からレイリー波に一致する成分が見られ、振幅比は概ね2:1である。また、複数の成分が混ざって方向が入れ替わる時間帯でも、同様の傾向が見られる。加えて、図-14より水平な直交成分が震央方向の成分と同程度の大きさを持っている（最大値比で概ね5:4）ことからラブ波も存在すると言えるが、震央方向と直交となる方向の成分がどの程度含まれるかについて、さらなる検討が必要である。

## 6. まとめ

鉄筋コンクリート造9層の建物で記録された東日本大震災本震の地震観測記録について、長周期成分を中心に検討を行った。加速度記録から速度および変位を求める際は、周波数領域での積分を用いた。7階の加速度と7階と1階の相対変位の関係から、周期の長い表面波によ

って地盤が傾いたために、通常の建物変形とは異なる挙動が発生していたことを示した。また、地盤回転による変位が建物の変形による変位に比べて6~10倍程度であることを計算した。そして、本震記録に含まれる長周期成分には、レイリー波の挙動に一致する部分があることも確認した。地震波の長周期成分が建物に及ぼす影響については未だ判明していない部分も多い。本震以外の地震も含めて、様々な角度で検討が必要である。

謝辞：本稿で使用して地震動記録は、建築研究所の首都圏地震動観測網で得られました。ご提供に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 焦博文, 塩原等, 楠原文雄: 偏心のある鉄筋コンクリート造9階建物における強震応答観測 その2, 日本建築学会大会梗概集, C-2, p577-578, 2012
- 2) 竹内信一郎, 塩原等, 小谷俊介: 偏心のある鉄筋コンクリート造9階建物における強震応答観測, 日本建築学会大会梗概集, B-2, p725-726, 1999
- 3) 斉藤正徳: 地震波動論, 東京大学出版会, 2009