

# 強震動の観測記録に基づく 周期特性を考慮した2方向地震動の方向性分析

井上 和真<sup>1</sup>・齋藤 溪太<sup>2</sup>・梅山 雄多<sup>3</sup>・五十嵐 晃<sup>4</sup>・池田 隆明<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 群馬工業高等専門学校助教 環境都市工学科 (〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町 580)

E-mail: inoue@cvtl.gunma-ct.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 群馬工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町 580)

E-mail: c15518@ipc.gunma-ct.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 東日本高速道路株式会社 関東支社三郷管理事務所 (〒341-0056 埼玉県三郷市番匠 2-101-1)

E-mail: y.umeyama.aa@e-nexco.co.jp

<sup>4</sup>正会員 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: igarashi.akira.7m@kyoto-u.ac.jp

<sup>5</sup>正会員 長岡技術科学大学教授 大学院工学研究科原子力システム安全工学専攻

(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

E-mail: ikeda@vos.nagaokaut.ac.jp

本研究は、強震動の観測記録を対象に地震動が持つ周期特性を考慮した2方向地震動の方向性について検討したものである。検討にあたり、評価指標として2方向地震動の応答方向によって異なる最大値、中央値、最小値をとったRotD100, RotD50, RotD00に着目する他、地震応答の強度、方向性、固有周期の関係を極座標表示とカラーマップにより可視化した応答スペクトルの全方位表示を提案した。続いて、国内における代表的な強震動の観測記録を対象に、RotD100, RotD50, RotD00及び応答スペクトルの全方位表示の結果を地震タイプごとに平均化し、内陸直下型地震と海溝型地震における地震動の方向性の特徴を確認した。その結果、分析対象の内陸直下型地震と海溝型地震に共通して、短周期側の方が長周期側に比べ、方向による応答の変動が大きい傾向が確認された。

**Key Words :** directionality, bi-directional ground motion, periodic characteristic, response spectrum

## 1. はじめに

従来の構造物や地盤の耐震設計において、水平方向については1方向入力地震動による地震応答解析が採用されている。構造物や地盤に水平1方向入力地震動が作用した場合、加震方向に卓越した震動が生じることは言うまでもない。

近年の解析環境の発達により、3次元地震応答解析による構造物の耐震設計が行われるようになりつつあるが、水平2方向入力地震動の設定については言及されていない。例えば、原子力分野の設計指針である屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル・照査例<sup>1)</sup>では、3次元解析による地震安全評価の導入が進められているが、照査用の3方向入力地震動の具体的な設定法については規定されるまでに至っていない。この理由として、耐震設計用の水平2方向入力地震動の設定において、水

平2方向地震動そのものの分析が不足していることが要因のひとつとして推察される。

このような背景から、著者らは強震動の水平2方向成分の観測記録の分析結果に基づき、耐震設計用の直交2成分の応答スペクトルと2方向応答スペクトルの設定法に関する研究<sup>2)</sup>を実施した。しかし、既往研究における水平2方向地震動の分析は、水平2方向地震動を構成する加速度データのデジタルデータの分散が最大となる方向<sup>3)</sup>の地震動と、その直交方向の地震動の応答スペクトル比の平均値に基づいており、地震動が持つ周期特性を考慮できず一定倍率の関係となっている。

他の地震動の方向性に関する既往研究として、境・熊本<sup>4)</sup>は、地震動の方向性について、過去に観測された強震記録から地震動を合成して、様々な周期帯の弾性加速度応答スペクトルや地震動強さ指標について、その大きさが方向によってどの程度変動するかについて検討した。

その結果、変動係数にして平均 20%程度、方向性の強い地震動は、40%以上変動することを示している。川島ら<sup>9)</sup>は水平 2 成分の加速度記録を合成した場合に、最大加速度、最大速度、最大変位の増加率および加速度応答スペクトルが方向別にどの程度変動するか調査している。青戸・吉川<sup>9)</sup>は、強震記録から求めた加速度応答スペクトルを用いて、地震動の水平成分に関して強度が最大となる主軸成分を明らかにし、それと直交する副軸成分の強度を算定し、2方向地震動の強度比を考案した。

本研究は、構造物や地盤の水平 2 方向入力による耐震性能評価における水平 2 方向地震動の設定に向けて、強震動の観測記録を対象に、地震動が有する周期特性を考慮した 2 方向地震動の方向性について検討したものである。検討にあたり、評価指標として Boore<sup>7)</sup>によって考案された RotD100, RotD50, RotD00 に着目した。これは、地震動の入力方向により異なる応答値の最大値、中央値、最小値を固有周期ごとにとった指標である。また、地震応答の強度、方向性、固有周期の関係を極座標表示とカラーマップにより可視化した応答スペクトルの全方位表示を提案した。続いて、国内における代表的な強震動の観測記録を対象に、RotD100, RotD50, RotD00 及び応答スペクトルの全方位表示の結果を地震タイプごとの平均を算出し、内陸直下型地震と海溝型地震における地震動の方向性について分析を行った。

## 2. 2 方向地震動の評価法

### (1) 2 方向応答スペクトル

時間を $t$ 、水平面を $x-y$ 座標系で定義した場合に、与えられた 2 方向入力に対する固有周期 $T$ を変数にした等方な 2 次元線形弾性 1 質点振動子 (図-1) の水平 2 次元応答値の $x$ 方向成分、 $y$ 方向成分の応答値を $d_x(T, t)$ 、 $d_y(T, t)$ とする。水平 2 次元応答の動径方向の最大値 $S_{Rd}(T)$ と、固有周期 $T$ の関係を 2 方向応答スペクトル<sup>8)</sup>と呼び、この定義を式(1)に示す。この計算例として、1995 年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台における観測記録 (JMA 神戸波) および 2011 年東北地方太平洋沖地震による気象庁涌谷町観測地点の観測記録 (JMA 涌谷波) の NS 成分、EW 成分の 1 方向の応答スペクトルと 2 方向応答スペクトルを図-2 (a), (b)にそれぞれ示す。

また、2 方向応答スペクトル $S_{Rd}(T)$ は、図-3 に示すような方位角を回転させて得られる軸方向成分 (式(2)) に対する最大応答値で作成された応答スペクトルと等価な意味を持つことが示されている<sup>9)</sup>(図-4)。

$$S_{Rd}(T) = \max_t \sqrt{d_x(T, t)^2 + d_y(T, t)^2} \quad (1)$$

$$a_\theta(t) = a_x(t) \cos \theta + a_y(t) \sin \theta \quad (2)$$

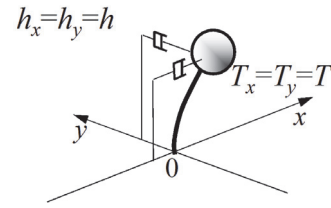
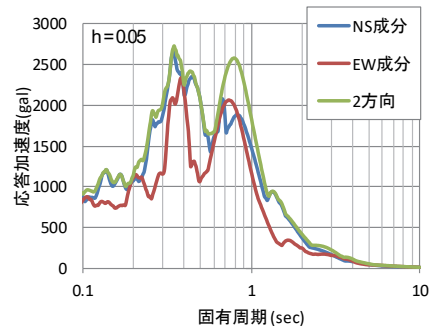
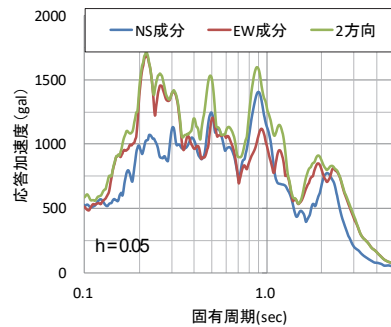


図-1 2次元線形弾性1質点振動子



(a) JMA 神戸波



(b) JMA 涌谷波

図-2 応答加速度スペクトル

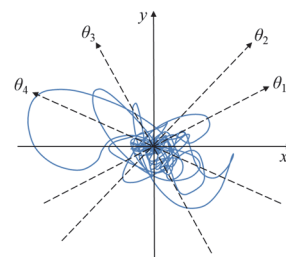


図-3 2方向地震動の加速度軌跡と様々な軸方向 $\theta$

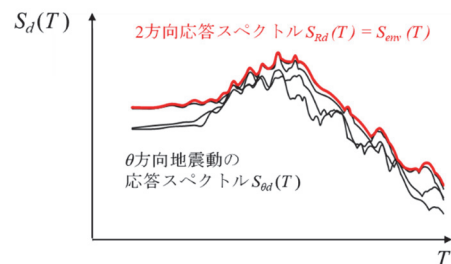


図-4 様々な軸方向 $\theta$ の応答スペクトルとその包絡線の関係

## (2) RotD100, RotD50, RotD00

Boore は, RotD100, RotD50, RotD00 という 2 方向地震動の評価指標を提案している. RotD100 とは地震動の入力方向により異なる応答値の最大値をとった指標であり, 前節で示した 2 方向応答スペクトルと同じ値となる. RotD50 は地震動の入力方向により異なる応答値の中央値をとったものであり, RotD00 は地震動の入力方向により異なる応答値の最小値をとった値である. 式(3), 式(4), 式(5)に RotD100, RotD50, RotD00 の算出式を示す. RotD100 の算出式(3)に示すように, 2 方向応答スペクトルの定義と同様であることがわかる.

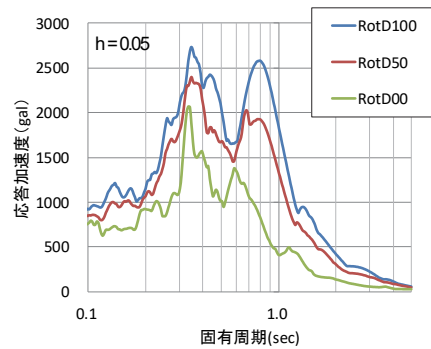
$$\text{RotD100}(T) = \max_{\theta} |S_{\theta d}(T, \theta)| \quad (3)$$

$$\text{RotD50}(T) = \text{med}_{\theta} |S_{\theta d}(T, \theta)| \quad (4)$$

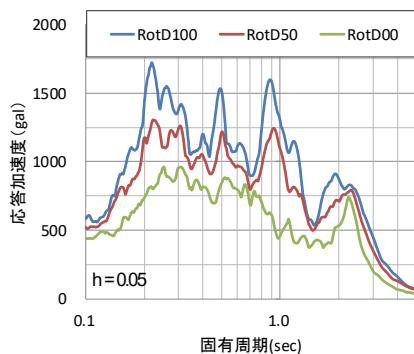
※med : medium (中間値) の省略形として表記

$$\text{RotD00}(T) = \min_{\theta} |S_{\theta d}(T, \theta)| \quad (5)$$

図-5 (a), (b)に JMA 神戸波と JMA 涌谷波の RotD100, RotD50, RotD00 を示す. 図-2 (a), (b)における 2 方向応答スペクトルと図-5 (a), (b)における RotD100 は, 同じ形状をしていることが確認できる. また, RotD100, RotD50, RotD00 は, 最大値, 中央値, 最小値をそれぞれ並べていることから固有周期によって大小関係が入れ替わることは無い.



(a) JMA 神戸波



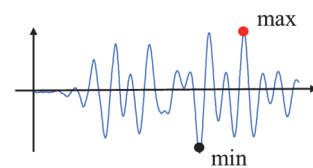
(b) JMA 涌谷波

図-5 RotD100, RotD50, RotD00 の例

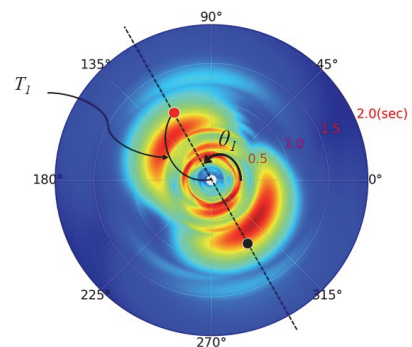
## (3) 応答スペクトルの全方位表示の考案

2 方向応答スペクトルや RotD100, RotD50, RotD00 は, 2 方向地震動の特性を, 従来の 1 方向地震動の応答スペクトルと同様に 1 本の線 (最大応答値-固有周期関係) で表現することが出来る. しかし, 2 方向応答スペクトル (RotD100) は, 2 方向地震動の全方向成分に対する最大応答値を算出することはできるが, その最大応答値をとる方向は固有周期ごとに異なり, 地震動の卓越方向などの方向性を評価するためには他の表現が必要となる. そこで, 2 方向入力地震動に対する方向性を明示する方法として, 応答スペクトルを全方位で表示する方法を考案した. 具体的な作成手順は以下の通りである.

- 1) 反時計回りに方位角  $\theta$  をなす方位軸を設定し, 与えられた 2 方向地震動の方位軸の成分  $a_{\theta}(t)$  を式(2)にて算出する. 方位軸方向の方位角  $\theta$  の範囲は,  $0^{\circ}$  から  $180^{\circ}$  までとし, 概ね  $1^{\circ}$  刻み程度で, 2 方向地震動の方位軸の成分  $a_{\theta}(t)$  を算出する.
- 2) 2 方向地震動の方位軸  $\theta$  方向の加速度時刻歴  $a_{\theta}(t)$  を入力とし, 固有周期  $T$  の 1 質点系振動子に対して時刻歴応答解析を実施する.
- 3) 時刻歴応答解析結果として, 正側の最大応答値と負側の最大応答値 (最小値) を保存する. この際, 負側の最大応答値に対応する方位軸方向を  $\theta+180^{\circ}$  と更新する. 更に, 負側の最大応答値を絶対値でとることで, 正の値で応答値を表現する (図-6).
- 4) 固有周期  $T$  を半径, 方位角  $\theta$  を平面極座標で表現する. また, 最大 (最小) 応答値は平面座標系において, カラーマップで応答値の大きさを表現する. なお, 本研究で示す応答スペクトルの全方位表示は, Python3 の matplotlib<sup>10)</sup>を用いて描画している.



(a) 方位角  $\theta$  方向の 1 質点系振動子の地震応答解析結果



(b) 地震応答解析結果の極座標系へのプロット

図-6 応答スペクトルの全方位表示の作成法の概念図

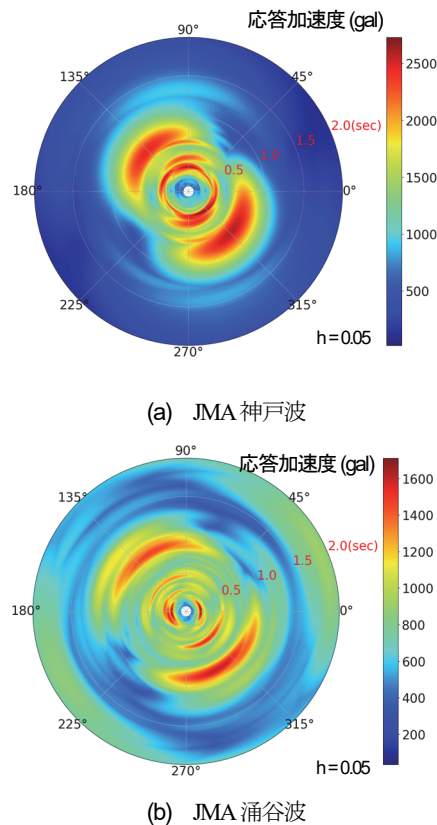


図-7 応答スペクトルの全方位表示の例

応答スペクトルの全方位表示は、従来の応答スペクトルとは異なり、正の応答と負の応答を区別している。そのため点対象とはならず、地震動の片振れに伴う質点系の非対称応答を考慮できる表示となる。応答スペクトルの全方位表示の例として、図-7 (a)に JMA 神戸波、(b)に JMA 涌谷波の応答スペクトルの全方位表示を示す。JMA 神戸波の応答スペクトルの全方位表示より、固有周期 0.5 秒から 1.0 秒において、北西－南東方向(135° - 315°)に大きな応答が生じていることがわかる。先の図-5 に示した RotD と対応するように、JMA 神戸波では固有周期 0.8 秒付近、JMA 涌谷波では 0.9 秒付近で最も同一の固有周期に対する応答加速度の方向による応答の変動が大きいことが確認できる。なお、今回は応答スペクトルの全方位表示において方位角を黒色、固有周期を赤色で示したが、配色や構成などを含め、図の可視性の向上について更なる検討の余地がある。

### 3. 2 方向地震動の方向性の分析条件

#### (1) 対象とする強震動の観測記録

前節で示した通り、RotD と応答スペクトルの全方位表示を用いることで地震動の周期特性を考慮した方向性の特徴が確認できた。これらの指標を用いて、発生メカニズムの異なる地震動の平均的な方向性の検討を行う。

表-1 分析対象地震動 (内陸直下型地震)

No	地震名	日時	観測地点	震央距離 (km)
01	山形県沖の地震	2019/6/18, 22:22	村上市府屋	11.5
02	胆振地方中東部の地震	2019/2/21, 21:22	厚真町京町	11.3
03	熊本県熊本地方の地震	2019/1/3, 18:10	玉名市築地	7.0
04	胆振地方中東部の地震	2018/9/6, 03:07	厚真町鹿沼	10.4
05	大阪府北部の地震	2018/6/18, 07:58	高槻市桃園町	0.3
06	茨城県北部の地震	2016/12/28, 21:38	常陸太田市町屋町	12.2
07	鳥取県中部の地震	2016/10/21, 14:07	倉吉市岩倉長峯	3.3
08	熊本地震(前震)	2016/4/14, 21:26	熊本西区春日	12.0
09	熊本地震(本震)	2016/4/16, 01:25	熊本西区春日	7.5
10	長野県北部の地震	2014/11/22, 22:08	長野市箱清水	27.4
11	淡路島付近の地震	2013/4/13, 5:33	洲本市小路谷	12.3
12	福島県中通りの地震	2011/4/12, 14:07	いわき市三和町	15.1
13	福島県浜通りの地震	2011/4/11, 17:16	棚倉町棚倉中居野	27.2
14	静岡県東部の地震	2011/3/15, 22:31	富士宮市弓沢町	12.9
15	長野県北部の地震	2011/3/12, 3:59	出雲崎町米田	61.4
16	岩手・宮城内陸地震	2008/6/14, 8:43	栗原市栗駒	24.9
17	新潟県中越沖地震	2007/7/16, 10:13	出雲崎町米田	11.0
18	能登半島地震	2007/3/25, 9:42	輪島市鳳至町	26.6
19	福岡県北西沖の地震	2005/3/20, 10:53	福岡中央区舞鶴	26.1
20	新潟県中越地震	2004/10/23, 17:56	川口町川口	2.8
21	十勝沖地震(最大余震)	2003/9/26, 6:08	浦河町潮	90.7
22	宮城県北部の地震	2003/7/26, 7:13	涌谷町新町	284.7
23	鳥取県西部地震	2000/10/6, 13:30	境港市東本町	31.4
24	兵庫県南部地震	1995/1/17, 5:46	神戸中央区中山手	16.5

表-2 分析対象地震動 (海溝型地震)

No	地震名	日時	観測地点	震央距離 (km)
01	宮城県沖の地震	2011/4/7, 23:32	大船渡市大船渡町	97.0
02	茨城県沖の地震	2011/3/11, 15:15	鉾田市鉾田	67.2
03	東北地方太平洋沖地震	2011/3/11, 14:46	涌谷町新町	158.5
04	駿河湾の地震	2009/8/11, 5:07	御前崎市御前崎	33.0
05	岩手県沿岸北部の地震	2008/7/24, 0:26	五戸町古館	92.8
06	宮城県沖の地震	2005/8/16, 11:46	涌谷町新町	108.9
07	十勝沖地震(本震)	2003/9/26, 4:50	幕別町本町	138.8
08	宮城県沖の地震	2003/5/26, 18:24	大船渡市大船渡町	29.2
09	芸予地震	2001/3/24, 15:27	北広島町有田	61.6
10	三陸はるか沖地震	1994/12/28, 21:19	八戸市湊町	187.6
11	北海道東方沖地震	1994/10/4, 22:22	釧路市幣舞町	270.8
12	北海道南西沖地震	1993/7/12, 22:17	寿都町新栄	85.7
13	釧路沖地震	1993/1/15, 20:06	釧路市幣舞町	7.0

観測記録の水平 2 方向特性の傾向を、レベル 2 地震動に対する耐震設計に反映することを想定し、国内で観測された強震動のうち、代表的なものを分析対象に選んだ。具体的には、気象庁 web ページの『強震観測データ』<sup>11)</sup>に公開されている 37 地震動を分析対象とした。対象地震動のうち、内陸直下型地震は 24 波、海溝型地震は 13 波を対象とする。現在の構造物の耐震設計用地震動は、内陸直下型地震と海溝型地震に分類し設定されることが多いため、このような 2 種類の地震タイプを分析対象とした。なお、内陸直下型地震の定義は道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編に関する参考資料<sup>12)</sup>に倣い、陸域の浅い地震とする。分析対象地震動のうち、内陸直下型地震を表-1、海溝型地震を表-2 にそれぞれ示す。



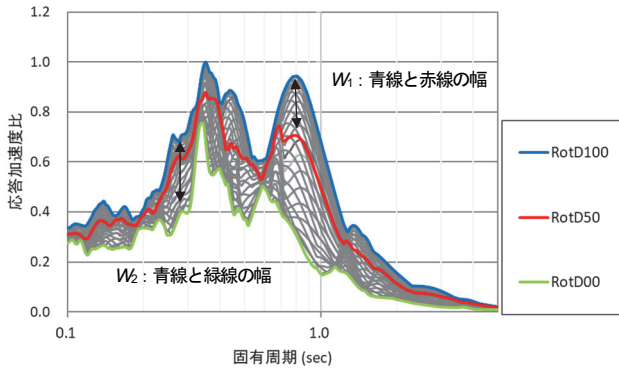


図-8 正規化した RotD100, RotD50, RotD00 における  $W_1, W_2$  の概念図

## (2) 2方向地震動の方向性の分析条件

2方向地震動の方向性の分析にあたり, RotD と応答スペクトルの全方位表示に着目する. ただし, 前節で示した RotD と応答スペクトルの全方位表示を算出するにあたり, 対象とする観測記録はそれぞれ振幅レベルが異なっていることを考慮する必要がある. そのため, 正規化を行う. 次項以降に, 方向性の分析にあたり, 正規化の方法を示す.

### a) RotD100, RotD50, RotD00

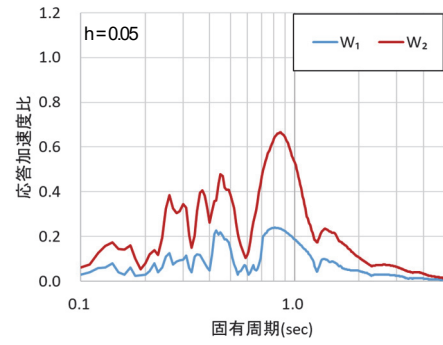
地震動の方向別の強さの変動を分析する方法のひとつとして, 同一固有周期における RotD100, RotD50, RotD00 の幅に着目する. 計算手順は以下に示す.

- 1) 分析対象地震動の RotD100, RotD50, RotD00 を算出する.
- 2) 各地震動の RotD100 の最大値  $\text{Max}(\text{RotD100}(T))$  で除すことで, RotD を 0~1.0 の値となるように正規化する. その上で, RotD の幅を示す  $W_1, W_2$  を式(6), 式(7)で算出する.

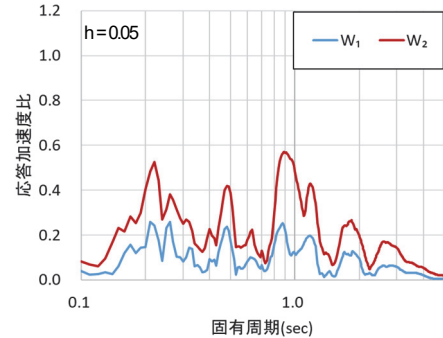
$$W_1 = \frac{\text{RotD100}(T) - \text{RotD50}(T)}{\text{Max}(\text{RotD100}(T))} \quad (6)$$

$$W_2 = \frac{\text{RotD100}(T) - \text{RotD00}(T)}{\text{Max}(\text{RotD100}(T))} \quad (7)$$

図-8に正規化した RotD100, RotD50, RotD00R における  $W_1, W_2$  の概念図を示す. これらの指標  $W_1, W_2$  は, 2方向応答スペクトル (RotD100) の最大値を 1.0 とした時の RotD100 と RotD50, RotD100 と RotD00 の差と RotD100 の最大値の比である. これらは応答加速度同士の比となるため本論文では以降, 応答加速度比と呼ぶ. 図-9(a), (b)に JMA 神戸波および JMA 涌谷波の正規化した RotD の幅  $W_1, W_2$  をそれぞれ示す. 図-5, 図-9の JMA 神戸波, JMA 涌谷波が RotD100 と RotD50, RotD00 の幅と対応していることが確認できる. JMA 神戸波では固有周期 0.8 秒付近で, JMA 涌谷波は固有周期 0.9 秒付近で最も方向による応答の変動が大きいと言える.



(a) JMA 神戸波



(b) JMA 涌谷波

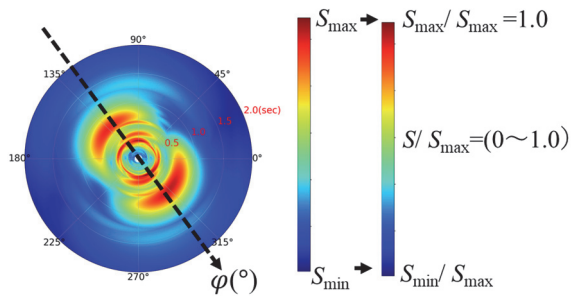
図-9  $W_1, W_2$  の例

### b) 応答スペクトルの全方位表示

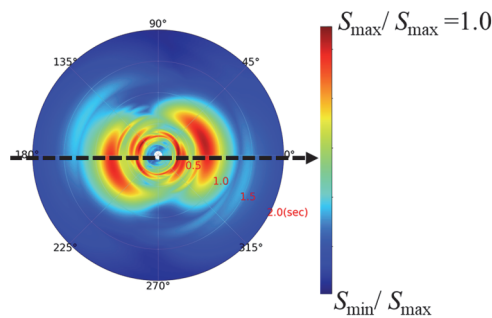
内陸直下型地震と海溝型地震における方向性に関する特徴を把握するために, 応答スペクトルの全方位表示を用い, 分析対象地震動の地震タイプごとの平均を算出する. 算出にあたり, 地震動ごとの最大応答値・最大応答方向が異なることを考慮するため, 正規化を行う必要がある. 具体的には, 最大応答値を 0~1.0, 最大応答方向を 0°方向にするという方法を全ての地震動に適用した. 計算手順は以下に示す通りである.

- 1) 分析対象地震動の応答スペクトルの全方位表示を計算する.
- 2) 2方向応答スペクトルの最大値と同値となる応答スペクトルの全方位表示における最大応答値  $S_{\max}$  を取り出し, その地震動の全ての応答値を  $S_{\max}$  で除す. この操作により, 応答スペクトルの全方位表示は, 0~1.0 の値に変換され, 応答加速度比となる. (図-10(a)).
- 3) 各地震動の全計算固有周期における最大応答値の方位軸方向  $\varphi$  を取り出し, 保存されている全方位軸方向データを  $\varphi$  を減じる (カラーマップを時計周りに  $\varphi^\circ$  回転する). この操作により, 最大応答加速度は, 0°方向に生じることとなる (図-10(b)).
- 4) 1)~3)の操作を対象地震動全てに行う.
- 5) 地震動タイプごとに, 同一方位・同一固有周期における応答値の平均を計算する.

1つの強震動の観測記録に対する応答スペクトルの全方位表示の正規化・回転の計算例として、図-11 (a), (b)に正規化・回転した JMA 神戸波と JMA 涌谷波を対象にした応答スペクトルの全方位表示を示す。

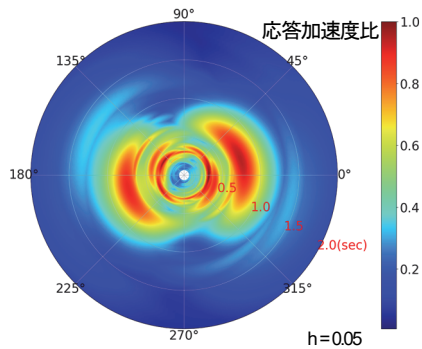


(a) 応答スペクトルの全方位表示の正規化

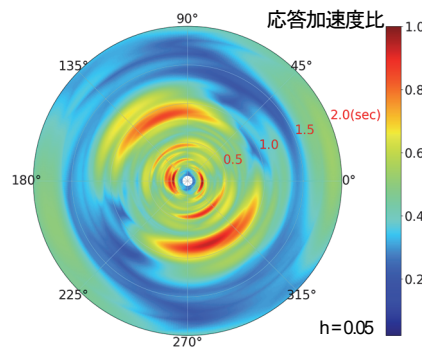


(b) 正規化された応答スペクトルの全方位表示の回転

図-10 応答スペクトルの全方位表示の正規化及び回転



(a) JMA 神戸波



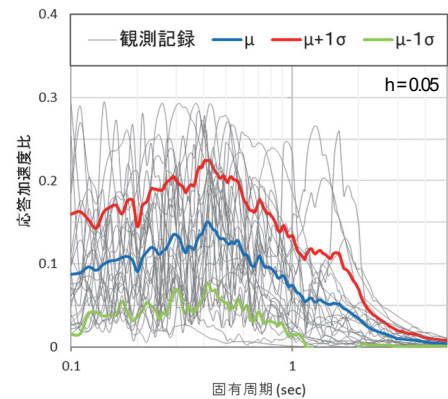
(b) JMA 涌谷波

図-11 正規化した応答スペクトルの全方位表示

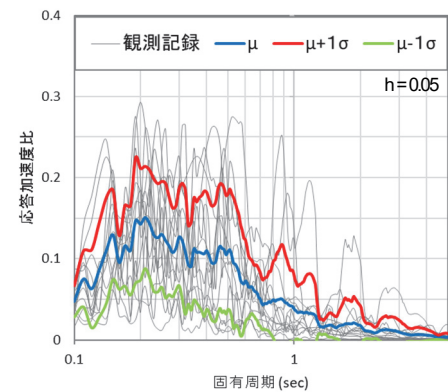
## 4. 分析結果

### (1) RotD100, RotD50, RotD00

3.(1)で示した各分析対象地震動に対して、RotD100, RotD50, RotD00 および  $W_1$ ,  $W_2$  を算出した。続いて、内陸直下型地震と海溝型地震の方向性の特徴を把握するために、地震の種類ごとに  $W_1$ ,  $W_2$  の平均を算出した。図-12 (a), (b)に内陸直下型地震と海溝型地震の対象地震動の  $W_1$  を、図-13 (a), (b)には  $W_2$  の平均を示す。なお、対象地震動の  $W_1$ ,  $W_2$  を灰色の線で示し、各固有周期における  $W_1$ ,  $W_2$  の平均  $\mu$  を青線、標準偏差(+1 $\sigma$ )を赤線、標準偏差(-1 $\sigma$ )を緑線で示す。また、表-3 に代表固有周期帯で平均した内陸直下型地震と海溝型地震の  $W_1$ ,  $W_2$  を示す。RotD の幅  $W_1$ ,  $W_2$  において、内陸直下型地震では、応答加速度比のピークが 0.4 秒、海溝型地震では 0.2 秒で表れており、概ね固有周期 0.25 秒を境にして内陸直下型地震が海溝型地震の応答加速度比(差)を超えるようになった。また、表-3 に示した代表固有周期帯で平均した内陸直下型地震と海溝型地震の  $W_1$ ,  $W_2$  では、両者ともに内陸直下型地震のほうが海溝型地震を上回っている。このことから、海溝型地震に対し内陸直下型地震の方が、方向別の応答の変動は大きいことが確認できる。

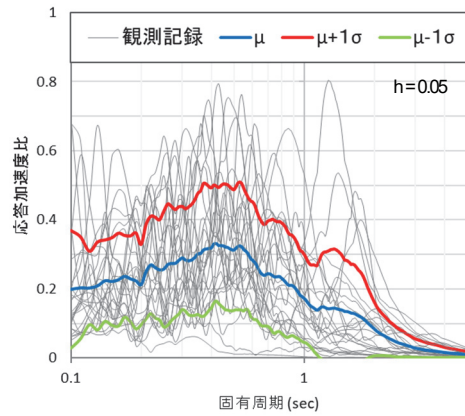


(a) 内陸直下型地震

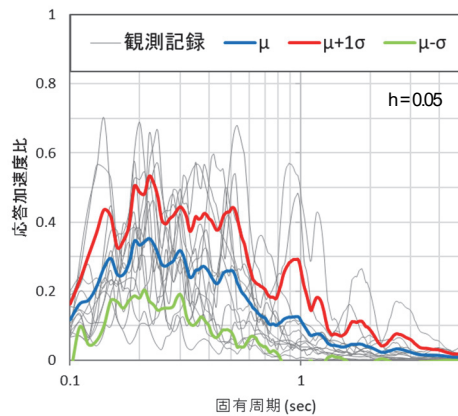


(b) 海溝型地震

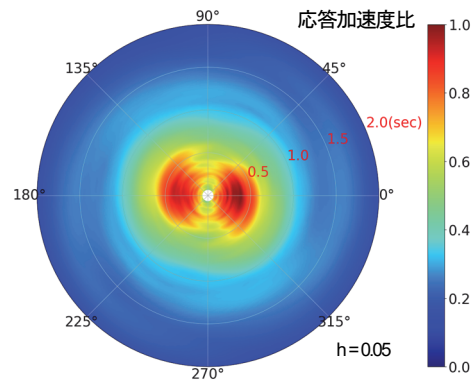
図-12 分析対象地震動の指標  $W_2$  の平均



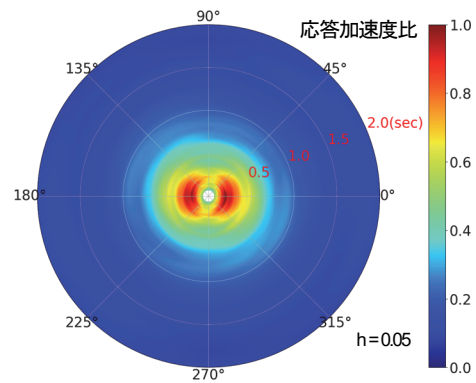
(a) 内陸直下型地震



(b) 海溝型地震

図-13 分析対象地震動の指標 $W_2$ の平均


(a) 内陸直下型地震



(b) 海溝型地震

図-14 正規化・平均化した応答スペクトルの全方位表示の平均

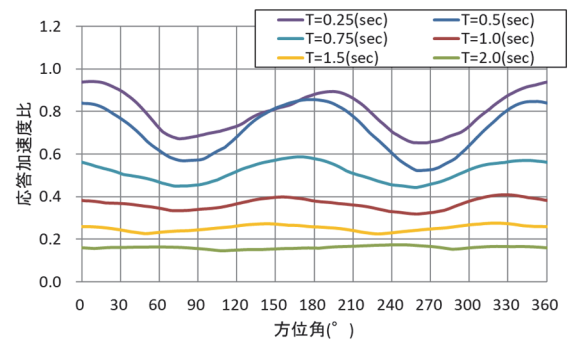
表-3 代表固有周期帯における指標 $W_1$ ,  $W_2$ の平均値

固有周期帯 (sec)	$W_1$ : RotD100-RotD50		$W_2$ : RotD100-RotD00	
	内陸直下型	海溝型	内陸直下型	海溝型
0.1~0.5	0.12	0.11	0.28	0.26
0.5~1.0	0.10	0.06	0.24	0.14
1.0~1.5	0.06	0.03	0.14	0.06
1.5~2.0	0.04	0.02	0.10	0.04
2.0~5.0	0.01	0.01	0.03	0.02

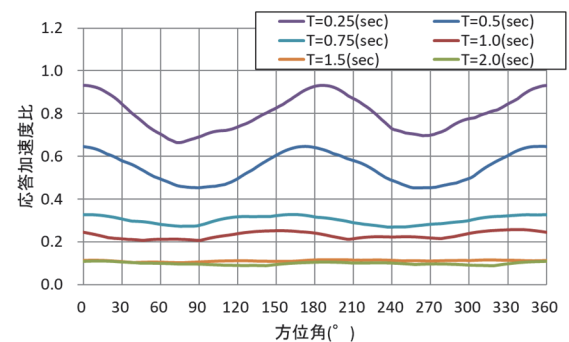
## (2) 応答スペクトルの全方位表示

図-14 (a), (b)に内陸直下型地震と海溝型地震の応答スペクトルの全方位表示の平均を示す。図-14 (a), (b)において、内陸直下型地震と海溝型地震の間で、色の変動を同じ固有周期、つまり同じ半径上で確認すると、内陸直下型地震のほうが海溝型地震のものより、同じ半径でも色の差がみられる。このことから、内陸直下型地震のほうが海溝型地震よりも同一の固有周期に対して、方向による応答の変動が大きいと言える。

ある固有周期における方向による応答加速度比の変動を確認するために、代表固有周期を定め、横軸に方位角、縦軸に応答加速度比をとった応答加速度比-方位角関係を整理した。代表固有周期を 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 1.5,



(a) 内陸直下型地震



(b) 海溝型地震

図-15 代表固有周期における応答加速度比-方位角関係



**表4** 内陸直下型地震の代表固有周期における  
応答加速度比-方位角関係

方位角 (°)	固有周期 $T(\text{sec})$			
	$T=0.25$	$T=0.50$	$T=1.0$	$T=2.0$
0	1.00	1.00	1.00	1.00
45	0.88	0.83	0.94	1.02
90	0.73	0.68	0.89	0.98
135	0.83	0.91	1.01	0.95
180	0.94	1.02	0.99	0.99
225	0.84	0.82	0.91	1.06
270	0.70	0.63	0.85	1.04
315	0.86	0.87	1.05	1.03

**表5** 海溝型地震の代表固有周期における  
応答加速度比-方位角関係

方位角 (°)	固有周期 $T(\text{sec})$			
	$T=0.25$	$T=0.50$	$T=1.0$	$T=2.0$
0	1.00	1.00	1.00	1.00
45	0.82	0.83	0.85	0.93
90	0.74	0.70	0.85	0.88
135	0.84	0.85	1.02	0.83
180	1.00	0.99	0.98	0.96
225	0.87	0.84	0.91	0.94
270	0.75	0.70	0.89	0.89
315	0.86	0.86	1.03	0.82

2.0秒とし、内陸直下型地震を対象にした場合を図-15(a)、海溝型地震を対象とした場合を図(b)にそれぞれ示す。図-15(a)、(b)では、内陸直下型地震、海溝型地震ともに、短周期のほうが応答加速度比の変動が大きい。表4、表5には、各代表固有周期の0°方向の応答加速度比を1.0とした時の代表方位角の応答加速度比を示す。表4、表5から、代表固有周期0.25秒、0.50秒における90°、270°の応答加速度比は0.63~0.75の値を示した。それに対し、代表固有周期1.0秒、2.0秒では90°、270°の応答加速度比は0.85~1.04の値を示した。地震動タイプに着目すると、内陸直下型地震では変動が固有周期0.50秒で最も大きくなっているが、これは $W_1$ 、 $W_2$ の結果と整合している。海溝型地震においても、変動が固有周期0.25秒で最も大きくなっているがこれも表3に示したRotDとの結果に整合する。

## 5. 結論

本研究では、周期特性を考慮した2方向地震動の方向性に関する検討を行った。評価指標として、RotDに着目する他、応答スペクトルの全方位表示を考案した上で

それらを用いて、内陸型地震、海溝型地震の2タイプの地震動をそれぞれ平均化することにより、地震動タイプ別の水平方向に関する応答の方向性について検討した。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) RotDに関して、地震動タイプ別の結果から、固有周期0.25秒付近を境に内陸直下型地震が海溝型地震よりも方向別の地震動の変動が大きくなることが確認された。
- 2) 各分析対象地震動の正規化した応答スペクトルの全方位表示を地震動タイプごとに平均することによって、地震動タイプによる周期特性を考慮した方位角による地震動応答値を連続的に可視化した。
- 3) ある固有周期における方向による応答加速度比の変動を確認するために、代表固有周期を定め、横軸に方位角、縦軸に応答加速度比をとったグラフを作成した。その結果、内陸直下型地震、海溝型地震に共通して、短周期側の方が長周期側に比べ、応答加速度比が大きくなる、すなわち方向性の変動が大きいという結果が得られた。また、内陸直下型地震のほうが海溝型地震に比べ、同じ固有周期に対して応答加速度比の変動は大きく、内陸直下型地震の方が、方向別の応答加速度の大きさの変動が大きくなることが確認された。

また、今後の課題として、以下が挙げられる。

- 1) 本研究では気象庁webページの『強震観測データ』に公開されている37地震動を分析対象としたが、内陸直下型地震動では24波、海溝型地震動では13波と限定的である。地震動タイプ別の方向性の一般性を検証するために、対象地震動を増やした分析を行う必要がある。
- 2) 本研究は、ひとつの地震に対して1観測点で観測記録を対象にしたため、ひとつの地震に対して多数の観測点での記録による方向性の特徴を詳細に分析することも必要と考えられる。また、震源距離、サイト特性、伝播経路それぞれの影響を切り分け分析する必要もある。

**謝辞：**本研究では、気象庁が公開している地震動の強震観測データを使用させていただきました。また、高専-長岡技術科学大学共同研究助成を受けて、本研究を遂行させていただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 土木学会原子力土木委員会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル・照査例，2018。
- 2) 井上和真，渡辺和明，五十嵐晃，畑明仁：強震動の観測記録の水平2方向特性の分析と水平2方向応答スペクトルに適合する入力地震動の作成法の提案，土



- 木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 74, pp. I\_555-I\_568, 2016.
- 3) 日本建築学会：多次元入力地震動と構造物の応答，丸善出版，1998.
  - 4) 境有紀，熊本匠：地震動の方向性の定量的な検討と地震被害推定手のための平均方向の提案，日本地震工学論文集，第10巻，第5号，pp. 1-20, 2010.
  - 5) 川島一彦，相沢興，高橋和之：最大地震動および応答スペクトルの推定式に及ぼす強震記録の水平2成分合成の影響，土木学会論文報告集，第329号，pp. 49-56, 1983.
  - 6) 青戸拓起，吉川弘道：水平2方向地震動の強度評価と偏心RC橋脚の動的非線形応答特性，土木学会構造工学論文集，55A巻，pp. 691-698, 2009.
  - 7) Boore, D. M.: Orientation-independent, nongeometric-mean measures of seismic intensity from two horizontal components of motion, *Bulletin Seismological of the Society of America*, Vol. 100, No. 4, pp. 1830-1835, 2010.
  - 8) Gavin, H. P. and Dickinson, B. W.: Generation of uniform-hazard earthquake ground motion, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 137, No. 3, pp. 423-432, 2011.
  - 9) 五十嵐晃，井上和真，古川愛子，宇野裕恵，松田宏：標準波-相補直交成分波の組合せによる橋梁の耐震照査用水平2方向入力地震動，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol. 68, pp. I\_458-I\_469, 2012.
  - 10) Hunter, J. D.: Matplotlib : A 2D graphics environment, *Computing in Science & Engineering*, Vol. 9, No. 3, pp. 90-95, 2007.
  - 11) 気象庁 web ページ『強震観測データ』，<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/index.html> (2019年11月9日閲覧)
  - 12) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編に関する参考資料，丸善，2015.
- (2019.11.11 受付, 2020.2.24 修正, 2020.2.25 受理)

## EVALUATION OF DIRECTIONALITY CONSIDERING PERIODIC CHARACTERISTICS FOR STRONG MOTION OBSERVATION RECORDS

Kazuma INOUE, Keita SAITOH, Yuta UMEYAMA, Akira IGARASHI  
and Takaaki IKEDA

In Japan, seismic performance verification for structure, it is common to use horizontal unidirectional ground motion as input. However, since actual ground motion and seismic response of structures behave complex in bi-direction, it is considered seismic performance verification for horizontal bi-directional inputs is desirable in the process of seismic design of structures.

In this study, in order to establish seismic performance evaluation method induced by horizontal bi-directional input, it is necessary to analyze the characteristics of actual bi-directional ground motions in detail. The directionality of bi-directional response considering periodic characteristics of ground motions was examined based on observation records of strong motion in Japan. First, as measure of seismic intensity from two horizontal components of seismic ground motion, focus on RotD100, RotD50 and RotD00 which takes the maximum, median and minimum values which have different response direction due to bi-directional input. In addition, an omnidirectional display of response spectrum was proposed in which the relationship between the intensity, directionality, and natural period of the seismic response was visualized using polar coordinates and a color map. Next, the average of RotD100, RotD50, RotD00 and omnidirectional display based on response spectrum is calculated in order to clarify the characteristics of the directionality considering the periodic characteristics of the bi-directional ground motion for the typical strong inland earthquakes and subduction zone earthquakes in Japan.

As result, it was confirmed that the directionality of the short-period side was stronger than that of the long period side in both the inland type earthquake and the subduction zone earthquake. Comparing inland earthquakes and subduction earthquakes, it was confirmed that subduction earthquakes are more directional on the short-period side and inland-type earthquakes are more directional on the long-period side.