

直交水平 2 成分を用いて定義される 強震動指標の相互関係の定量的評価

横山 太郎¹・能島 暢呂²

¹学生会員 岐阜大学大学院 自然科学技術研究科修士課程 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)
E-mail: z4523027@edu.gifu-u.ac.jp

²正会員 岐阜大学 工学部 教授 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)
E-mail: nojima@gifu-u.ac.jp

地震動波形の直交水平 2 成分を用いた強震動指標の扱いについては、2 成分を統合した扱い((NS, EW)), 幾何平均(GM), 大きい方の値(Larger), 軸回転により得られる最大値(rot100)や中央値(rot50)などがある。本研究では、上記の 5 つの指標相互の関係を定量的に評価して確率的な考察を加えたものである。K-NET により得られた加速度記録を用いて各指標を求め、rot50 に対する比率の分布をカーネル密度曲線で表現した。比率分布の序列は(NS, EW), GM < Larger < rot100 となった。指標 GM と Larger に関しては分布形状を確率的に導出し、指標 rot100 に関してはガンマ分布でフィッティングした。さらに応答波形を用いて各比率の周期特性について考察した。また rot100 に関しては折れ線状の確率モデルを提案した。

Key Words: *strong motion waveforms, two orthogonal horizontal components, rotation of axis, strong motion index, orientation-independent index, probability density function*

1. はじめに

K-NET¹⁾による強震観測では通常、直交水平 2 成分(NS, EW)と鉛直成分(UD)が記録される。地震動予測式に使われる強震動指標を構築する際、直交水平 2 成分の従来の処理方法として、2 成分を別個に両方扱う方法、2 成分のうち大きい値を扱う方法や幾何平均をとる方法などがある。しかし、これらの手法で算出される値はセンサーの設置方向に依存するため、強震動指標として用いるには不十分である可能性がある。これに対して、Boore et al.²⁾は、1971 年サンフェルナンド地震の加速度波形を用い、幾何平均の 90°の周期性を利用して、 $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ の範囲で軸回転を行い、水平方向における加速度応答スペクトルの幾何平均の 0, 50, 100 パーセンタイル値 (最小値, 中央値, 最大値) を定義した。さらに Boore³⁾は、 $0^\circ \leq \theta < 180^\circ$ の範囲で 2 成分を定める軸を回転させて、全方位を考慮した強震動指標を定義した。これより、幾何平均をとらずに上記パーセンタイル値を求める方法に発展させ、方位に依存しない指標とすることを提案した。2 成分の扱いについて、全方位中の中央値を中心とした検討が主流になりつつある。

地震動予測式を構築するにあたり、日本では幾何平均や全方位中の最大値などを強震動指標として用いるケー

スが多い⁴⁾。こうした指標と全方位中の中央値との関係を明確にする必要がある。

直交水平 2 成分を用いて算出される指標間の相互関係について、Huang et al.⁷⁾は、NGA 強震データベースから選出された 147 の強震記録を用いて、全方位中の最大値、MMgm (全方位中の最大値と最小値の幾何平均)、SN (走向方向の値)、SP (走向に直交する方向の値)、幾何平均、そして GMRot50²⁾ (幾何平均の一種) 間の比率を周期 0~4s において算出し、その傾向を考察した。

Shahi and Baker⁸⁾は、強震記録より得られた SaRotD50 と SaRotD100 (加速度応答スペクトルの中央値, 最大値) の比率 SaRotD100/SaRotD50 を係数として利用することで、SaGM や SaRotD50 を用いる地震ハザード評価と SaRotD100 を用いる設計実務との間のギャップを埋めることに貢献した。

Bradley and Baker⁹⁾は 2010-2011 年に発生したカンタベリ一地震で観測された強震記録を用いて、強震動指標を算出した結果、比率 SaRotD100/SaGMRotD50 は、Shahi and Baker⁸⁾の先行研究と類似したものとなった。

能島ら¹⁰⁾は、2011 年東北地方太平洋沖地震の加速度波形から得られた最大加速度の 0, 50, 100 パーセンタイル値(rot0, rot50, rot100)を算出し、rot100/rot50 および rot0/rot50 の頻度分布を求めることで、相互関係を考察した。

元木ら¹⁾は、幾何平均および2成分ベクトル合成の最大値を指標とした地震動予測式について、処理方法の差異を考慮した補正方法を提案し、予測式間のばらつきを小さくできる可能性を示した。

本研究では、K-NETによる観測記録を用いて、各指標を算出して rot50 に対する比率を求め、その分布特性を確率論的に明らかにする。さらに、それらの指標間の相互関係を定量的に評価する。また、加速度・速度・変位応答波形を用いて、指標間の相互関係の周期特性について検討する。

2. 評価対象とする強震動指標と算出事例

(1) 評価する強震動指標

K-NETにより得られた強震動記録のうち直交水平2成分である NS 成分と EW 成分を用いて、本研究で比較する強震動指標を算出する。真北を基準として時計回りに回転角 θ [$0^\circ \leq \theta < 180^\circ$] を定義する。入力加速度 NS 成分と EW 成分をそれぞれ $X_{NS}(t)$, $X_{EW}(t)$ とすると、それぞれ回転角 $\theta=0^\circ$, 90° に対する成分となる。回転角 θ の新たな軸に対する成分 $X_{rot}(\theta, t)$ は、式(1)を用いて算出される。

$$X_{rot}(\theta, t) = X_{NS}(t) \cos \theta + X_{EW}(t) \sin \theta \quad (1)$$

回転角 1° ごとに時刻歴波形を作成してその最大値を取り出し、全回転角 $0^\circ \leq \theta < 180^\circ$ における 0, 50, 100 パーセント値を求め、それぞれ rot0, rot50, rot100 と表記する。

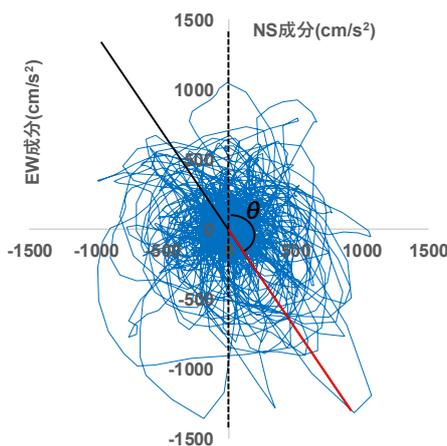


図-1 加速度のオービットと回転角 θ の軸

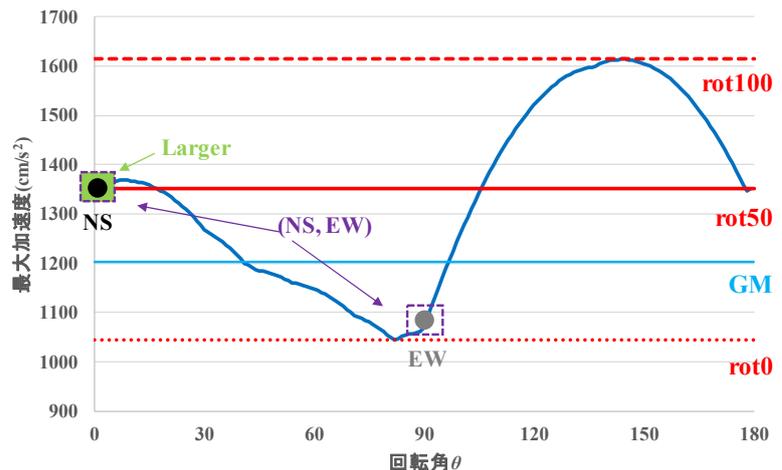


図-2 回転角の最大値とそれに値する各指標

る。以下に本研究で用いる各強震動指標を記す。

- (NS, EW) : NS成分とEW成分それぞれの最大値を NS, EW として統合して扱うもの
- GM : NS, EW の幾何平均
- Larger : NS, EW のうち大きい方の値
- rot100 : 軸回転による全方位中の最大値
- rot50 : 軸回転による全方位中の中央値

本研究では、rot50に対する上記の指標の比率を算出して、rot50を基準としたそれぞれの指標の関係について考察する。なお、比率 rot100/rot50 に関しては下限値 1, 上限値 $\sqrt{2}$ となる³⁾。その他の指標に関しては非負の値をとり、上限値は $\sqrt{2}$ である。

(2) 算出事例

事例として、2011年東北地方太平洋沖地震における強震動を観測した地点の中から、震源断層の南側に位置する K-NET 鉾田 (茨城県) を対象として各指標を求める。図-1 は K-NET 鉾田で得られた加速度波形の EW 成分と NS 成分のオービットである。黒破線の NS 方向から時計回りに軸回転を行い、新たな軸 (黒実線) に対して得られる成分を算出する。回転角 θ における最大値は図-1 の赤実線に相当する。図-2 は回転角 θ とその最大加速度 X_{rot} [cm/s²] との関係を表す。rot0 については $\theta=82^\circ$ で $X_{rot0}=1045$ cm/s², rot100 については $\theta=144^\circ$ で $X_{rot100}=1614$ cm/s² となった。また、指標を比較するための基準とする rot50 については $X_{rot50}=1351$ cm/s² となった。これらを用いた各強震動指標の比率は表-1 となる。

表-1 K-NET 鉾田における rot50 に対する各指標の比率

評価指標	(NS, EW)	GM	Larger	rot100	rot50
最大加速度 (cm/s ²)	1355, 1070	1204	1355	1614	1351
比率 (/rot50)	1.003, 0.792	0.891	1.003	1.195	1

3. 加速度波形を用いた指標間の相互関係

(1) 対象とする 52 地震と強震記録

対象地震は、豊富な強震記録が得られるようになった近年の地震のうち、基本的に震度 6 弱以上の揺れを観測したものとする。

震度継続時間の予測式構築¹²⁾においては、震度の器械計測化以降の 1996 年 4 月～2013 年 12 月に震度 6 弱以上を観測した 39 地震のうち、新島や三宅島などの島しょ部で起きた 6 地震を除外した 33 地震が選定された。南海トラフ沿いで発生する地震を含めるために、2004 年 9 月 5 日に発生した紀伊半島沖の地震(Mw7.3)および東海道沖の地震(Mw7.5)が追加され、全 35 地震が対象とされた。

本研究では、2014 年 1 月～2019 年 6 月に震度 6 弱以上を観測した 17 地震を追加した全 52 地震を対象とし、(独)防災科学技術研究所の K-NET による加速度記録 (計 13,886 記録×2 成分) を使用した。

(2) rot50 と各指標の関係

a) rot50 に対する各指標の比率

rot50 と各指標の関係を調べる。横軸に rot50、縦軸に rot50 に対する各指標の比率を取り、プロットしたものを図-3 に示す。指標(NS,EW)および指標 GM は、いずれも 1 の周りにばらついている。指標 Larger は 1 以上に偏った分布を示しており、指標 rot100 ではさらに下限値 1 の制約が加わる。大振幅の加速度記録は相対的に少ないため、いずれの指標の比率においてもプロットが疎になるものの、全体的な分布傾向と指標 rot50 との間に明確な関連性は見られないことから、振幅依存性は小さいと考えられる。

b) rot50 に対する各指標の比率の平均・標準偏差とカーネル密度曲線

各指標の比率の平均値±標準偏差を図-4(a)に示す。まず平均値に着目する。指標(NS,EW)および NS, EW をそれぞれ単独に扱った場合については、いずれも平均値は 1.001～1.006 となっており、差はみられない。指標 GM についても 0.995 とほぼ 1 となった一方、指標 Larger, rot100 においてはそれぞれ 1.103, 1.183 である。

次に標準偏差に着目すると、指標(NS, EW)および NS と EW を単独に扱った場合は、いずれも 0.137～0.138 となり差はみられない。指標 Larger と rot100 ではそれぞれ 0.098, 0.095 となり、指標 GM では最小の 0.056 となった。

図-4(a)に示した各指標の rot50 に対する比率の分布形状について考察するため、カーネル密度推定を適用した。これは、確率密度関数をノンパラメトリックに推定する手法の一つであり、頻度分布を連続的に表示したものに相当し、分布の概形を可視化するのに適している。本研究では R 言語の関数 density を用い、カーネル関数を正規分布とした。そのバンド幅はデフォルト値 (標準偏差を標本数の 1/5 乗の 1.34 倍で割った値と四分偏差のうちの小さい方の 0.9 倍の値) とした。

カーネル密度推定を適用した結果を図-4(b)に示す。rot50 に対する各指標の比率分布の序列は、それぞれの平均値を反映して、GM, (NS, EW) < Larger < rot100 となっている。指標(NS, EW)については、比率の平均値がほぼ 1 でばらつきが最も大きい。また NS と EW の単独のカーネル密度曲線もこれとほぼ一致している。指標 GM については、(NS, EW)と同様に平均値はほぼ 1 となるが、ばらつきは最小で、比率 1 付近に集中している。指標 Larger は、NS と EW の大きい方の値であるため、分布は右方向にシフトし、かつ、正の歪みを示している。指標 rot100 については、指標の中で最も大きい比率をとり、正の歪みを示すとともに、上限値の $\sqrt{2}$ 付近の密度がケースが他の指標より高いことが分かる。

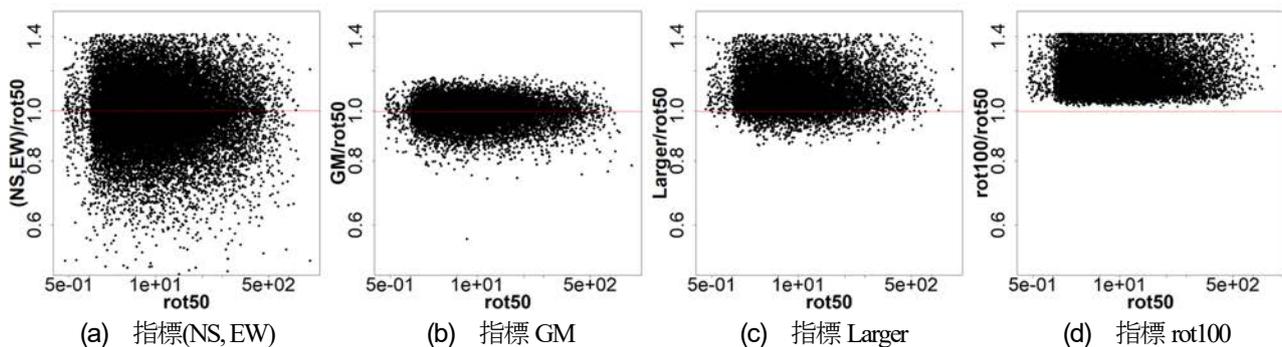
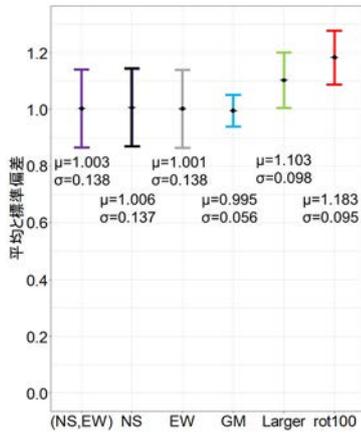
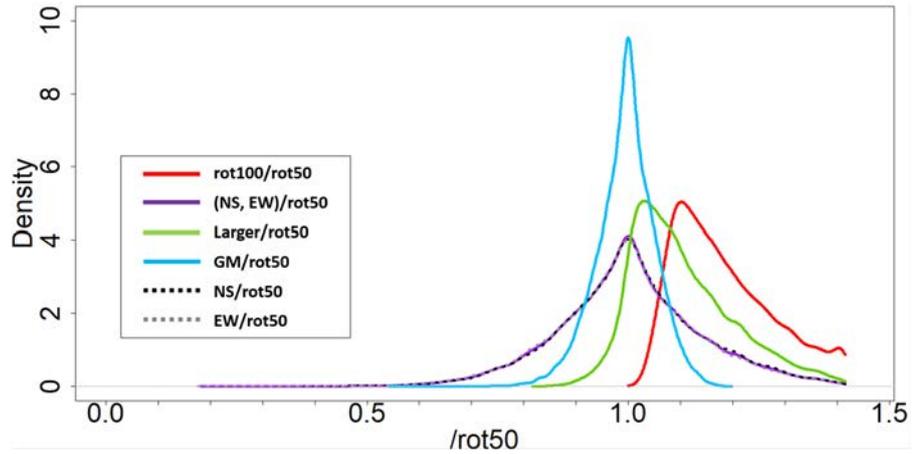


図-3 rot50 と他の指標の rot50 に対する比率の関係



(a) 平均値±標準偏差



(b) カーネル密度曲線

図-4 rot50に対する各指標の比率の分布

4. rot50に対する各指標の比率の分布形状に関する確率論的考察

(1) 比率(NS, EW)/rot50の分布

図-4(b)に示したように、EW/rot50とNS/rot50はほぼ同じ分布に従う。その分布はやや鋭いピーク形状を持つ。平均値 $\mu=1.000$ を中心にほぼ左右対称となっている。図-3からも明らかなように、上限値があるため厳密には非対称であるが、近似的には対称とみなすことができる。一方、図-5に示した散布図からわかるように、両者は負相関を示し、相関係数は-0.722となっている。これは、両者が同時に大きな値もしくは小さな値を取ることについては制約があることを意味する。この傾向について考察する。

図-5のプロットの上端および右端を規定しているのは、それぞれ、NS方向およびEW方向に極性を持つ波形であり、比率 $\text{rot100}/\text{rot50}$ の上限値の $\sqrt{2}$ となっている。一方、両比率がともに1以上となる領域に、四分円状のプロットの空白域が存在する。その円弧上でx座標とy座標が一致するのは(1.082, 1.082)である。この値は $1/\cos(22.5^\circ)$ であり、NSおよびEWの2方向で振幅比1:1(同振幅)の極性を持つ波形の場合に相当する。この振幅比を $1:a$ ($1/\sqrt{2} \leq a \leq 1$)のように連続的に変化させると、上述の四分円の円弧の左半分が形成される。右半分に関しては、 $a:1$ とすることで形成される。任意の方位の震動の成分が加わった場合には、rot50が大きくなる側に作用するため、これらの四分円の円弧が上限値となる。

次に下限値に関して考察する。rot50が生じる回転角におけるNS成分とEW成分のrot50に対する比率は、図-5において原点を中心とする半径1の四分円を形成する。それらの成分よりも必ず大きな値を取るEW/rot50とNS/rot50はこの円内には入り得ないので、この四分円が下

限値となる。

以上の上限値と下限値との間に挟まれた領域が、図-5に見られる負相関の要因と考えられる。

(2) 比率GM/rot50の分布

比率 $\text{GM}/\text{rot50}$ の分布形状について考察する。EWとNSをそれぞれ x, y と置いて、rot50に対する比率を $r_x = x/\text{rot50}$, $r_y = y/\text{rot50}$, $r_{\text{GM}} = \text{GM}/\text{rot50}$ と置くと、これらの比率も次式のように幾何平均の関係になる。

$$r_{\text{GM}} = \frac{\sqrt{xy}}{\text{rot50}} = \sqrt{\frac{x}{\text{rot50}}} \sqrt{\frac{y}{\text{rot50}}} = \sqrt{r_x r_y} \quad (2)$$

対数変換すると、幾何平均は算術平均に変換される。

$$\log r_{\text{GM}} = \frac{1}{2} (\log r_x + \log r_y) \quad (3)$$

各項のカーネル密度曲線を図-6に示す。さらに、 $\log r_x = x_L$, $\log r_y = y_L$, $\log r_{\text{GM}} = z_L$ と置き換え、それぞれの標準偏差を σ_{x_L} , σ_{y_L} , σ_{z_L} (図-6の枠内に表示) とすると次式が成り立つ。

$$\sigma_{z_L}^2 = \frac{1}{4} \sigma_{x_L}^2 + \frac{1}{2} \text{Cov}[x_L, y_L] + \frac{1}{4} \sigma_{y_L}^2 \quad (4)$$

ここに $\text{Cov}[\]$ は共分散を表す。図-4より x_L と y_L は同一の確率分布に従うと見なせることから、等分散 $\sigma_{x_L}^2 = \sigma_{y_L}^2 = \sigma^2$ を仮定でき、式(4)の共分散は次のように書ける。

$$\text{Cov}[x_L, y_L] = \rho_{x_L, y_L} \sigma_{x_L} \sigma_{y_L} = \rho_{x_L, y_L} \sigma^2 \quad (5)$$

ここに ρ_{x_L, y_L} は x_L と y_L の相関係数である。これより、式(4)を整理すると次式となる。

$$\sigma_{z_L} = \sqrt{\frac{(1 + \rho_{x_L, y_L})}{2}} \sigma \quad (6)$$

x_L と y_L が完全正相関の場合 ($\rho_{x_L, y_L} = 1$) は $\sigma_{z_L} = \sigma$, 無相関の場合 ($\rho_{x_L, y_L} = 0$) は $\sigma_{z_L} = \sqrt{\frac{1}{2}} \sigma$, 完全負相関の場

合は($\rho_{x_L, y_L} = -1$)は $\sigma_{z_L} = 0$ となる。図-5を両対数軸で表して、相関係数を改めて評価すると、算術軸での評価値と同じく $\rho_{x_L, y_L} = -0.722$ となった。これを式(7)に代入すると $\sigma_{z_L} = 0.373\sigma$ となり、図-6に見られるように指標GMの標準偏差が小さな値をとることが説明できる。

ここで、図-6より平均0、標準偏差 $\sigma_{x_L} = \sigma_{y_L} = \sigma = 0.140$ であることから、これを式(6)に適用して、正規分布を仮定して分布形状を比較したものを図-7に示す。正相関から負相関になるにつれて、ばらつきが小さくなることが確認できる。また図-6の実データを重ね書きすると、元の分布が正規分布ではないことに起因するずれはあるものの、上記の考察の妥当性が確認できる。

(3) 比率 Larger/rot50 の分布

比率 Larger/rot50 の分布形状について考察する。比率 NS/rot50 と EW/rot50 は同一の確率分布に従うと見なせるので、その確率密度関数を $f(x)$ 、累積分布関数を $F(x)$ と置く。以下では、比率 Larger/rot50 の確率密度関数を、NS/rot50 と EW/rot50 の相関係数により分類して考察する。

a) 無相関の場合

比率 Larger/rot50 は NS/rot50 と EW/rot50 の極値分布に従う。累積分布関数は式(7)で表され、確率密度関数はその導関数として式(8)で表され、右方向にシフトする。

$$F_{\rho=0}(x) = \{F(x)\}^2 \quad (7)$$

$$f_{\rho=0}(x) = 2F(x)f(x) \quad (8)$$

b) 完全正相関の場合

NS/rot50 と EW/rot50 が必ず同一の値となるため確率密度関数は変化しない。

$$f_{\rho=1}(x) = f(x) \quad (9)$$

c) 完全負相関の場合

前述のように、NS/rot50 と EW/rot50 が従う確率密度関数 $f(x)$ は平均値に関して近似的に対称とみなせる。そのため、大きい方の値の確率密度関数は、元の確率密度関数を右側に折り畳んだ形状となり、次式で表され、

右方向にシフトする。

$$f_{\rho=-1}(x) = 2f(x) \quad (x \geq \mu) \quad (10)$$

d) 一般の相関係数の場合

Larger/rot50 の確率密度関数は厳密な定式化はできないが、図-5より NS/rot50 と EW/rot50 は負相関の関係にあることから、式(8)と式(10)の中間的傾向を示すと考えられる。そこで相関係数($-1 \leq \rho \leq 0$)をパラメータとした線形補間式を考える。

$$f_{\rho}(x) = (1 + \rho)2F_{\rho=0}(x)f_{\rho=0}(x) - 2\rho f_{\rho=-1}(x) \quad (11)$$

平均1.000、標準偏差0.138の正規分布を仮定した場合の式(8)~(11)の比較を図-8に示す。図-4(b)に示された実際の分布は、式(11)に近い傾向を示すことが確認できる。

(4) 比率 rot100/rot50 の分布

指標 rot100 は全方位中の最大値であり、NS と EW の関係から規定される指標 GM や Larger のような確率論的な考察ができない。そこで、図-4(b)の比率 rot100/rot50 のカーネル密度曲線を、確率分布モデルでフィッティングして近似的に表現する。フィッティング方法としては、2次までのモーメント(平均値と標準偏差)を適合させるモーメント法を採用した。

まず、比率 rot100/rot50 が下限値1、上限値 $\sqrt{2}$ を有することから、これらの上下限値を有するベータ分布の適用を試みた。パラメータ推定により、パラメータである α および β は、それぞれ1.644、2.075である。図-9に示すように分布形状は表現できていない。そこで、正の歪みを有する確率分布の中から、対数正規分布とガンマ分布の適用を試みた。ただし、これらの分布の下限値は0であり、上限値は存在しないため、下限値を1にするシフト処理と、上限値を $\sqrt{2}$ とする切断処理を行うこととした。対数正規分布およびガンマ分布のパラメータはそれぞれ1.816、0.490および3.738、0.049である。その結果を図-9に示す。両者を比較すると、対数正規分布よりもガンマ分布の方が、全体的な形状を捉えることができている。ただし、上限値である $\sqrt{2}$ 付近については、過小評価する傾向にある。

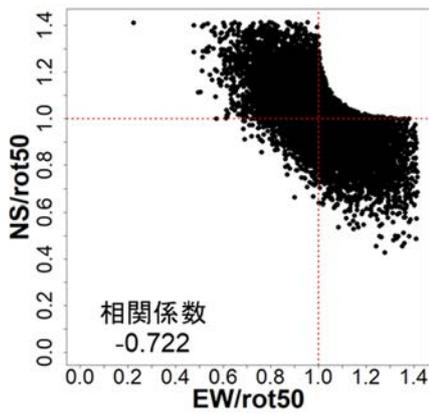


図-5 EW/rot50 と NS/rot50 の散布図

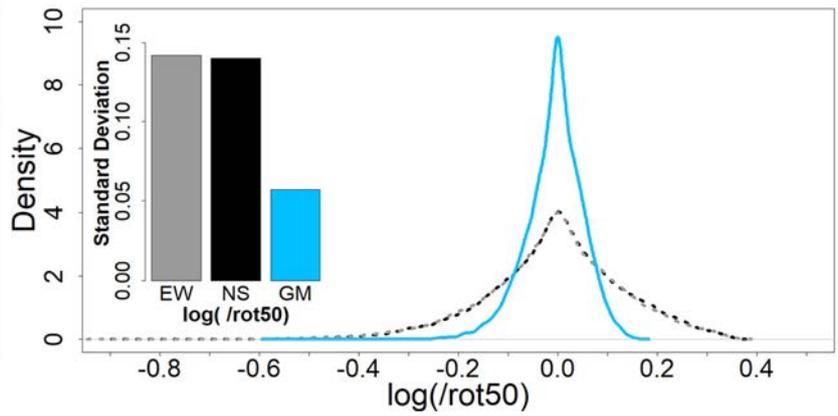


図-6 $\log(\text{GM}/\text{rot50})$, $\log(\text{NS}/\text{rot50})$, $\log(\text{EW}/\text{rot50})$ の分布と標準偏差

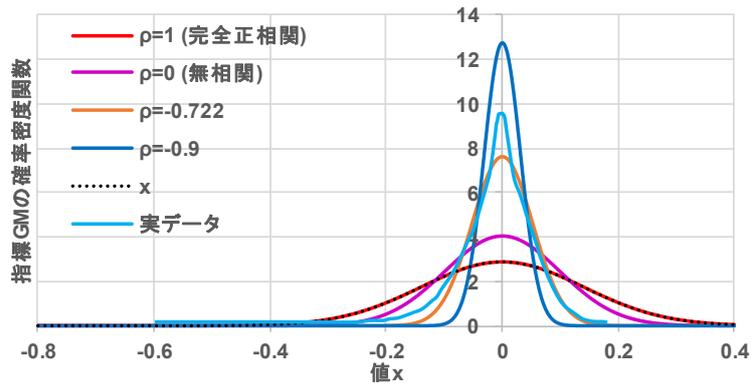


図-7 比率 $\log(\text{GM}/\text{rot50})$ の確率密度関数の定式化 (正規分布を適用)

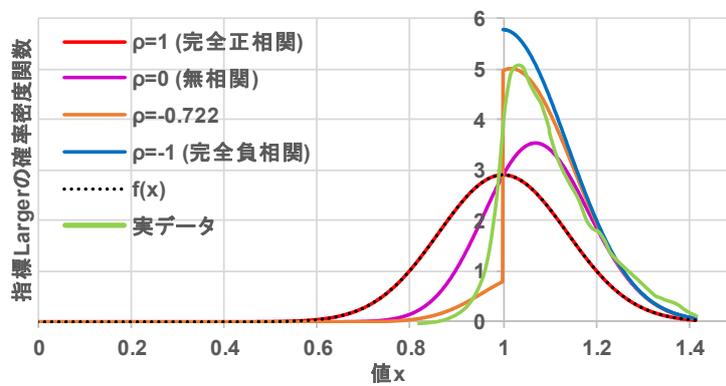


図-8 比率 $\text{Larger}/\text{rot50}$ の確率密度関数の定式化 (正規分布を適用)

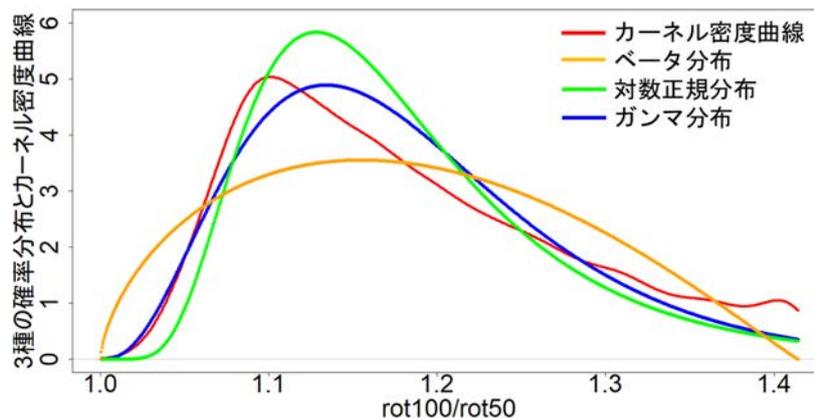


図-9 比率 $\text{rot100}/\text{rot50}$ の3種の確率分布モデルへのフィッティング

5. 応答波形を用いた周期に着目した各指標の変動傾向

加速度波形から算出される 5%減衰の線形一自由度系の各応答波形（加速度応答，速度応答，変位応答）を用いて，各指標の rot50 に対する比率の分布を求め，周期特性が及ぼす影響に関する考察を行う．周期 $T=0.125s, 0.25s, 0.5s, 1s, 2s, 4s, 8s$ に関してまとめた結果を図-10～図-14 に示す．

(1) 比率 (NS, EW)/rot50 の分布 (図-10(a)～(c))

変位応答を用いた場合は，長周期になるほど比率 1.000 付近への集中度合いは弱くなり，ばらつきが大きくなる傾向を示す．加速度応答を用いた場合，変位応答とは逆に，長周期になるほど比率 1.000 付近に集中してばらつきが小さくなる傾向がある．一方，速度応答を用いた場合は，両者の中間的傾向を示し，分布の変化はほとんど見られないことから，周期依存性は低いと考えられる．

(2) 比率 GM/rot50 の分布 (図-11(a)～(c))

一般的に分布形状はかなり安定している．変位応答を用いた場合，周期 $T=8s$ では比率の最頻値は 1 を保ちながらも，比率が小さい側にわずかにシフトする傾向にある．加速度応答および速度応答を用いた場合には，分布はほとんど変化せず，周期依存性は認められない．

(3) 比率 Larger/rot50 の分布 (図-12(a)～(c))

変位応答では，長周期になるほど系統的にばらつきは大きく，正の歪みが強くなり，上限値 $\sqrt{2}$ に近い領域にも密度が見て取れる．加速度応答および速度応答では，周期による系統的な変化は見られない．

(4) 比率 rot100/rot50 の分布 (図-13(a)～(c))

周期による変化は，全指標で最も顕著である．変位応答における分布形状の変化は顕著であり，特に周期 $T=4s$ では区分的な一様分布に近い形状になることが確認できる．さらに周期 $T=8s$ では分布形状が逆転し，最頻値が上限値 $\sqrt{2}$ 付近となる．継続時間が短い入力に対する長周期応答において，一方向が卓越して極性が現

れたケースが含まれる可能性がある．加速度応答では，長周期になるほどピークが高くなり，ばらつきが小さくなる．速度応答を用いた場合においては，わずかながらに周期依存性が見られる．

(5) 応答波形を用いた rot50 に対する各指標の比率の分布形状に関する確率論的考察

指標 GM および Larger の比率の分布形状に関しては，加速度応答・速度応答・変位応答による違い，および，周期による違いは大きくない．従って，加速度波形を用いた場合と同様な確率論的考察が可能であると考えられる．

一方，指標 rot100 の比率の分布形状には大きな相違が見られ，ガンマ分布によるモデル化は困難と考えられる．そこで図-13 において，比率 rot100/rot50 の分布が折れ線状の傾向を示すことに着目し， $(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2)$ の 3 点で定義された区分的な 2 本の直線で構成される三角形モデルを考える．

$$y = \begin{cases} 0 & (0 \leq x < x_0, x > x_2) \\ a_1x + b_1 & (x_0 \leq x < x_1) \\ a_2x + b_2 & (x_1 \leq x \leq x_2) \end{cases} \quad (12)$$

$$a_1 = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}, \quad b_1 = y_0 - a_1x_0$$

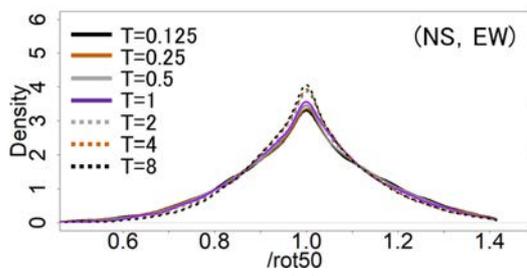
$$a_2 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \quad b_2 = y_1 - a_2x_1$$

ここで $y_0 = 0$ とすると，確率密度関数の面積が 1 となる制約より， y_2 は y_1 を用いて次式で表される．

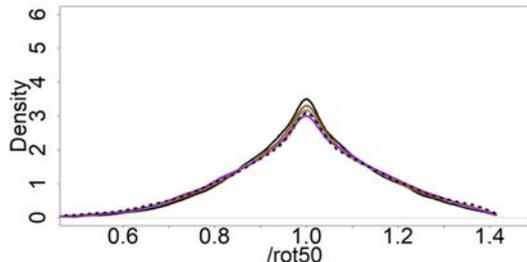
$$y_2 = \frac{2}{x_2 - x_1} - \frac{x_2 - x_0}{x_2 - x_1} y_1 \quad (13)$$

さらに x_0 および x_1 については，図-13 より加速度・速度・変位応答および周期によらず安定的であり，外生的に $x_0 = 1.020$ ， $x_1 = 1.100$ とする．さらに， $x_2 = \sqrt{2}$ は固定値であることを考えると，式(12)のパラメータは y_1 のみとなる．

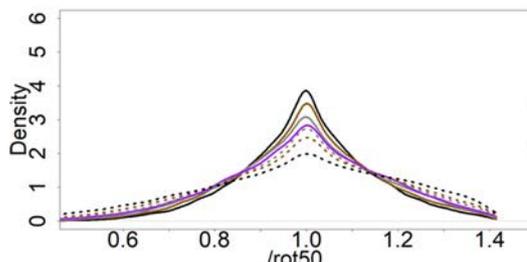
変位応答において，各周期において x_1 に対応する値として y_1 を与えた場合のモデル図を図-14 に示す．図-13(c)と比較すると，比率分布の形状をよく表現できているといえる．



(a) 加速度応答

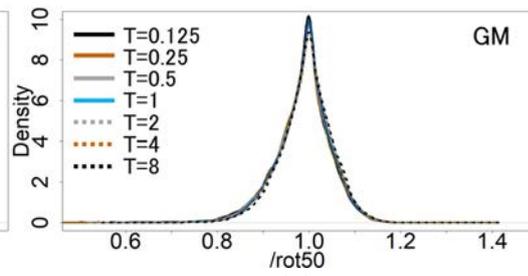


(b) 速度応答

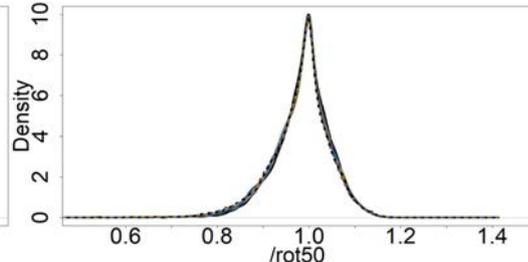


(c) 変位応答

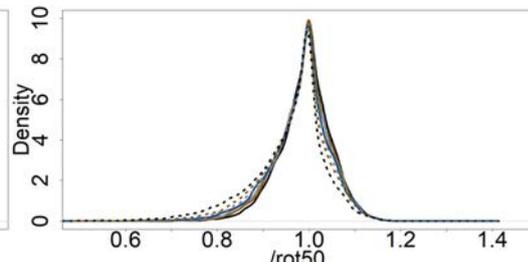
図-10 比率(NS,EW)/rot50の密度曲線



(a) 加速度応答

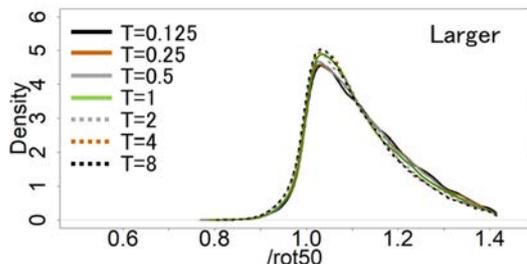


(b) 速度応答

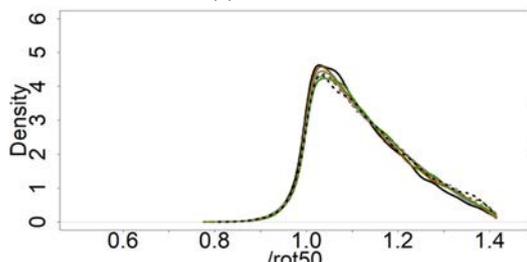


(c) 変位応答

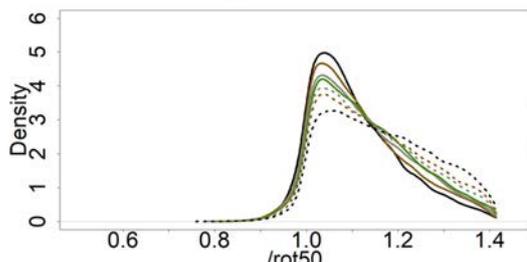
図-11 比率GM/rot50の密度曲線



(a) 加速度応答

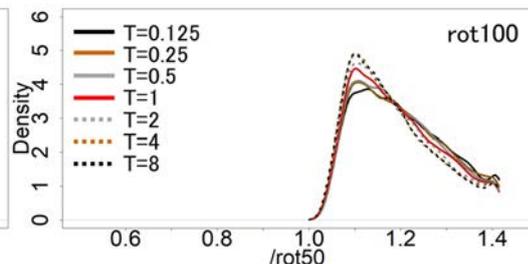


(b) 速度応答

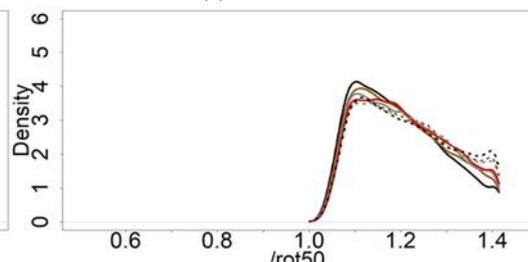


(c) 変位応答

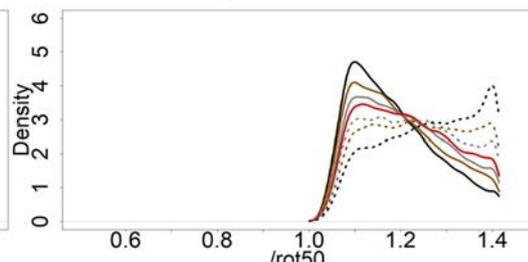
図-12 比率Larger/rot50の密度曲線



(a) 加速度応答



(b) 速度応答



(c) 変位応答

図-13 比率rot100/rot50の密度曲線

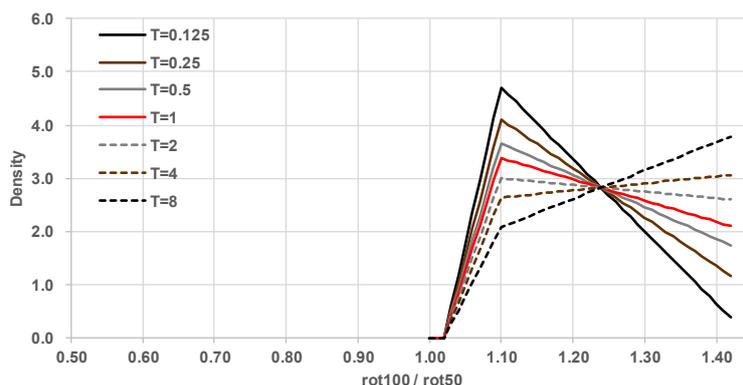


図-14 変位応答における比率 $rot100/rot50$ の分布形状のモデル化

6. まとめ

直交水平2成分の地震動波形より得られる地震動指標として、2つの最大値 NS, EW を統合した扱い (NS, EW), 幾何平均(GM), 大きい方の値(Larger), 軸回転により得られる最大値(rot100)に関して、中央値(rot50)との比率の相互関係を定量的に評価した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 加速度波形を用いて、rot50 に対する各指標の比率を求め、rot50 との関係調べたところ、比率の振幅依存性は認められないことがわかった。そこで比率の分布形状をカーネル密度曲線で表現した。
- (2) 比率の分布形状について確率論的に考察した。比率 (NS, EW)/rot50 については平均 1.003, 標準偏差 0.138 となった。EW/rot50 と NS/rot50 の相関係数は-0.722 となりその散布図にみられる上下限値に確率論的解釈を与えた。比率 GM/rot50 については、平均 0.995, 標準偏差 0.056 となり、ばらつきは 40.1%に減少した。2 変量の幾何平均の標準偏差を確率論的に導くと、ばらつきの減少率は相関係数-0.722 で 37.3%と評価され、上記に近い結果を得た。比率 Larger/rot50 については平均 1.103, 標準偏差 0.098 となり、相関係数をパラメータとしたモデルを示した。比率 rot100/rot50 については平均 1.183, 標準偏差 0.095 となり、ガンマ分布を用いたモデルを示した。
- (3) 5%減衰の線形 1 自由度系 (周期 0.125~8s) の加速度・速度・変位応答波形を用いて、各指標の rot50 に対する比率の分布形状の周期特性を評価した。全般的には加速度波形とほぼ同様の傾向を示す。周期依存性が最も顕著に見られたのは、変位応答波形を用いた場合であり、長周期になるほど(NS, EW)のばらつきが大きくなり、Larger と rot100 では分布が右側にシフトし、GM ではやや左側にシフトする傾向が見られた。加速度応答波形を用いた場合は、これとほ

ぼ逆の傾向が見られたが顕著ではない。速度応答波形を用いた場合は、いずれの指標においても周期依存性は小さい。

- (4) 比率 $rot100/rot50$ の分布形状については、折れ線で構成される確率密度関数によるモデル化の方向性を示し、変位応答波形を用いた場合の試算を行った。

今後、比率 $rot100/rot50$ の分布形状について、加速・速度応答波形を用いた場合も含めて、最小二乗法によってパラメータを同定する方針である。

謝辞: 本研究の実施にあたり、JSPS 科研費 20H02413 の補助を得た。また本研究では、国立研究開発法人 防災科学技術研究所 K-NET の強震記録を使用した。記して謝意を示す次第である。

参考文献

- 1) (独)防災科学技術研究所：強震観測網(K-NET, KiK-net), 2020.9.
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 2) Boore, D.M., Watson-Lamprey, J. and Abrahamson, N.A.: Orientation-Independent Measures of Ground Motion, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.96, No.4, pp.1502-1511, 2006.
- 3) Boore, D.M.: Short Note, Orientation-Independent, Nongeometric-Mean Measures of Seismic Intensity from Two Horizontal Components of Motion, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.100, No.4, pp.1830-1835, 2010.
- 4) 片岡正次郎, 佐藤智美, 松本俊輔, 日下部毅明：短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式, 土木学会論文集 A, Vol. 62, No. 4, pp.740-757, 2006.
- 5) 内山泰生, 翠川三郎：震源深さの影響を考慮した工学的基盤における応答スペクトルの距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 第 606 号, pp.81-88, 2006.
- 6) Morikawa, N. and Fujiwara, H.: A New Ground Motion Prediction Equation for Japan Applicable up to M9 Mega-Earthquake, Journal of Disaster Research, Vol.8, No.5, pp.878-888, 2013.
- 7) Huang, Y.-N., Whittaker, A. S. and Luco, N.: Maximum Spectral Demands in the Near-Fault Region, Earthquake Spectra, Vol.24, No.1,

- pp.319–341, February 2008.
- 8) Shahi, S. K. and Baker, J. W.: NGA-West2 Models for Ground-motion Directionality, *Earthquake Spectra*, Vol.30, No. 3, pp.1285-1300, 2014.
- 9) Bradley, B.A. and Baker, J.W.: Ground Motion Directionality in the 2010–2011 Canterbury Earthquakes, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.44, pp.371-384, 2015.
- 10) 能島暢呂, 久世益充: 地震動の水平成分の軸回転が振幅・継続時間特性に及ぼす影響, *日本地震工学会論文集*, pp.1-13, 2019.
- 11) 元木健太郎, 加藤研一, 赤司二郎, 本村一成, 東章
- 吾: 応答スペクトルの水平成分の処理方法が距離減衰式の予測値に与える影響, *日本地震工学会・大会 - 2015 梗概集*, pp.1-8, 2015.
- 12) 能島暢呂: 観測震度または予測震度を与件とする震度継続時間の条件付予測式, *日本地震工学会論文集*, 第14巻, 第5号, pp.50-67, 2014.

(Received ??,?)
(Accepted ??,?)

QUANTITATIVE EVALUATION OF THE RELATIONSHIPS BETWEEN STRONG GROUND MOTION INDEXES DERIVED FROM TWO ORTHOGONAL HORIZONTAL COMPONENTS

Taro YOKOYAMA and Nobuoto NOJIMA

Several kinds of seismic intensity indexes can be defined from two orthogonal horizontal components of seismic waveforms; they are maximum values of each component (NS, EW), geometric mean (GM), larger value (Larger), rotation-independent index such as maximum value (rot100) and median value (rot50) obtained by axial rotation. In this study, mutual relationships among such indexes were probabilistically evaluated. Using more than 13,000 sets of accelerograms recorded by K-NET, indexes above were calculated and the distributions of each index normalized to each corresponding rot50 were represented by kernel density. The general order of distributions was found to be (NS, EW), GM < Larger < rot100. Density functions of the ratio to rot50 were probabilistically derived for GM and Larger, and modeled by gamma distribution for rot100. In addition, period-dependent characteristics of each ratio was examined using acceleration, velocity and displacement response waveforms. The bilinear model of the distribution for rot100 was presented.