



1 観測点における地震動の水平 / 鉛直スペクトル比の位相を用いたレイリー波卓越方向の推定と検証

畠一樹¹⁾、澤田勉²⁾、三神厚³⁾、岡本輝正⁴⁾

- 1) 学生会員 徳島大学大学院工学研究科、博士後期課程 工修
e-mail:hata@ce.tokushima-u.ac.jp
- 2) 正会員 徳島大学工学部、教授 工博
e-mail:sawada@ce.tokushima-u.ac.jp
- 3) 正会員 徳島大学工学部、助手 博士(工学)
e-mail:amikami@ce.tokushima-u.ac.jp
- 4) 徳島大学大学院工学研究科、博士前期課程
e-mail:h12b07k@yahoo.co.jp

要 約

本研究は、地震動のコーダ部にレイリー波が多く含まれているという前提のもとに、1観測点で抽出された地震動の水平成分と鉛直成分のスペクトル比(H/V スペクトル比)の位相特性からレイリー波卓越方向を推定するとともに、レイリー波の抽出を試みたものである。一般に、減衰のない理想的な地盤では、レイリー波の水平動と鉛直動の間には $\pm 90^\circ$ の位相差があり、H/V スペクトル比は虚数になることが知られている。本研究では、このことを利用して、地震動の水平2成分の方位補正より作成した水平成分と鉛直成分とのスペクトル比において、虚数部が含まれる割合を表す指標¹⁾を用いてレイリー波卓越方向を推定し、その方向のH/V スペクトル比の位相、すなわち水平動と鉛直動の位相差が $\pm 90^\circ$ に集中することを利用して、地震動に含まれるレイリー波を抽出した。

キーワード：地震動、水平 / 鉛直スペクトル比、位相、レイリー波、卓越方向の推定

1. 緒言

構造物の耐震安全性の評価では、当該地点における局所的な地盤条件を適切に把握することが重要である。地盤条件の推定には種々の方法が用いられるが、そのうち微動による方法は手軽に測定できるという利点があるため、多くの研究が行われ^{2)~5)}、その成果は多方面で盛んに利用されている。短周期微動に関する従来の研究より、微動にはレイリー波が多く含まれること、微動の水平成分と鉛直成分のスペクトル振幅比(以後、これをH/V スペクトル振幅比と呼ぶ)のピーク振動数が地盤卓越振動数とほぼ一致すること等が明らかになった。また、深層地盤構造の推定に関する研究として、岡田、松島⁶⁾は、1秒以上の長周期微動のアレー観測から、その中に含まれる表面波の位相速度を求める方法を提案した。山中、元木、福元、高橋⁷⁾は、微動のアレー観測記録を用いて地震基盤までのS波速度構造を推定した。以上のように、微動による方法はPS検層等の物理探査法に比べ精度面で劣るという欠点はあるが、簡便かつ経済的であるという利点もある。微動による地盤探査法のうちアレー観測によ

る方法は、多点観測に伴う機材の調達や調整に要する労力を考えると簡便性にやや難があり、解析自体も若干複雑である。これに対して、1地点での微動の H/V スペクトル振幅比に基づく地盤推定法は、必要となるデータが地表1点での観測記録でよいため、より簡便であるという特徴が生かされている。

わが国では、近年、防災科学研究所の K-NET⁸⁾ に代表される強震観測網が整備され、多数の強震記録が得られている。地震は、地盤の深い層まで揺らせるので、微動に比べると深層の地盤構造の影響をより多く含んでいる。このような強震記録を用いると、地盤深層部の特性が手軽に推定できると考えられるが、地震記録を用いて地盤深層の速度構造を推定した研究は少ない。小林、植竹、真下、小林⁹⁾ は千葉県下の K-NET 観測記録を用いて、地震動初期微動部の H/V スペクトル振幅比を遺伝的アルゴリズムにより逆解析し、深部地盤構造を推定する手法を提案した。また、小林喜、小林啓¹⁰⁾ は、逆解析の過程で PS-P 時間および速度構造の拘束条件を導入するとともに、先験的情報ではない地震基盤深さも拘束条件として組み込むことによって、逆解析の精度改善を図り、長周期成分が堆積地盤構造の影響を強く受けた表面波から構成されていることを確認した。

ところで、レイリー波の H/V スペクトル比は本来複素数であり、振幅以外に位相の情報をも有している。したがって、地震動や微動の H/V スペクトル比を論ずる場合には、その位相特性をも考慮することが必要である。しかし、上述の研究は、主に H/V スペクトル比の振幅に注目したもので、位相についてはほとんど考慮していない。また、微動から得られる地盤情報は主に比較的浅い層の地盤特性を含むのに対し、地震記録には比較的深い地盤特性も反映されている。特に、地表での地震記録のコーダ部には表面波が多く含まれていることから、地震記録から表面波が抽出できれば、深層の地盤構造を知る手がかりが得られると思われる。大町、年縄、塚田¹¹⁾ は、地震記録に含まれる表面波(レイリー波)を抽出する方法を提案した。この方法は、位相を 90° ずらせた鉛直成分と水平成分との相関を用いてレイリー波の卓越方向を推定したものである。不可三、澤田、辻原、砂田、三神¹⁾ は、微動記録を対象として、H/V スペクトル比に含まれる虚数部の割合を示す指標を用いて、レイリー波を多く含む時間帯とその卓越方向を推定する手法を提示し、その妥当性を検証した。

本研究は、深層の地盤構造を推定するための基礎的研究として、1観測点で得られた地震記録の H/V スペクトル比の位相特性から、レイリー波卓越方向の推定を試みたものである。数値解析では、筆者らが微動記録に対して提案した手法¹⁾を適用して地震記録に含まれるレイリー波の卓越方向を推定する。この方法は、地震動の水平 2 成分の方位補正より作成した水平成分と鉛直成分とのスペクトル比(H/V スペクトル比)に含まれる虚数部に着目し、H/V スペクトル比に占める虚数部の割合を表す指標 $IQ(\theta)$ を用いてレイリー波を抽出するものである。本研究は、手法的には新しくないが、興味ある結果が得られたのでここに報告する。

2. 解析方法¹⁾

地震動のコーダ部にレイリー波が卓越するという前提のもとに、地震動の H/V スペクトル比の位相特性を抽出する方法について説明する。いま、水平面内の直交座標系(x, y)において、x 軸が EW 方向(東西方向、東を正方向とする)に、y 軸が NS 方向(南北方向、北を正方向とする)に一致する場合を考えると、x 軸から角度 θ をなす任意方向の水平動 $x'(t)$ は次式より求められる。

$$x'(t) = x(t) \cos \theta + y(t) \sin \theta \quad (1)$$

ここで、 $x(t)$ 、 $y(t)$ は地震動の EW 成分、NS 成分である。このとき、水平成分 $x'(t)$ と鉛直成分 $z(t)$ のスペクトル比(H/V スペクトル比)は次式で定義される。

$$R_{x'z}(f) = F_{x'}(f) / F_z(f) \quad (2)$$

ここで、 $R_{x'z}(f)$ は H/V スペクトル比、 $F_{x'}(f)$ および $F_z(f)$ は、それぞれ水平成分 $x'(t)$ および鉛直成分 $z(t)$ の複素フーリエスペクトルである。以下では、地震動に含まれるレイリー波を対象として議論を進める。 x' 軸がレイリー波の進行方向と一致し、表層のインピーダンスが基盤のそれより小さく、また、地盤に減衰がない場合には、式(2) の H/V スペクトル比は虚数になることが知られている¹²⁾。このことは、水平動と鉛直動の間に $\pm 90^\circ$ の位相差が生じ、レイリー波の粒子軌跡が楕円になることを意味する。H/V スペクトル比の位相特性を考えるため、式(2)を次のように変形する。

$$R_{x'z}(f) = S_{x'z}(f) / S_z(f) \quad (3)$$

ここで、 $S_{x'z}(f)$ は $x'(t)$ と $z(t)$ の相互パワースペクトル、 $S_z(f)$ は $z(t)$ のパワースペクトルであり、それぞれ次のように与えられる。

$$S_{x'z}(f) = F_{x'}(f) F_z^*(f) / T \quad (4)$$

$$S_z(f) = F_z(f) F_z^*(f) / T \quad (5)$$

ここで、 $*$ は共役複素数を意味し、 T は継続時間である。一般に、式(4) および式(5) から計算した $S_{x'z}(f)$ および $S_z(f)$ は凹凸が激しいので、何らかの平滑化を行うことが必要となる¹³⁾。平滑化操作を $E\{\cdot\}$ で表すと、式(4) および式(5) は次のようになる。

$$S_{x'z}(f) = E\{F_{x'}(f) F_z^*(f)\} / T \quad (6)$$

$$S_z(f) = E\{F_z(f) F_z^*(f)\} / T \quad (7)$$

式(7)のパワースペクトル $S_z(f)$ は実数であるので、式(3)の H/V スペクトル比 $R_{x'z}(f)$ の位相は、 $S_{x'z}(f)$ すなわち水平動と鉛直動の相互パワースペクトルの位相と一致する。ここで、相互パワースペクトル $S_{x'z}(f)$ をその実数部(co-spectrum) $C_{x'z}(f)$ と虚数部(quad-spectrum) $Q_{x'z}(f)$ を用いて表すと次のようになる¹⁴⁾。

$$S_{x'z}(f) = C_{x'z}(f) + iQ_{x'z}(f) \quad (8)$$

上式を極座標表示すると

$$S_{x'z}(f) = |S_{x'z}(f)| \exp\{i\phi_{x'z}(f)\} \quad (9)$$

$$|S_{x'z}(f)| = \{C_{x'z}^2(f) + Q_{x'z}^2(f)\}^{1/2} \quad (10)$$

$$\phi_{x'z}(f) = \tan^{-1}\{Q_{x'z}(f)/C_{x'z}(f)\} \quad (11)$$

ここで、 $|S_{x'z}(f)|$ および $\phi_{x'z}(f)$ は、それぞれ相互パワースペクトル $S_{x'z}(f)$ の絶対値(振幅)と位相角である。 $\phi_{x'z}(f)$ は、式(3)の H/V スペクトル比の位相角であるが、これはまた水平動 $x'(t)$ と鉛直動 $z(t)$ の間の位相差になる。このことは、式(4)から明らかである。すなわち、相互パワースペクトル $S_{x'z}(f)$ は、水平動のフーリエスペクトル $F_{x'}(f)$ と鉛直動のフーリエスペクトルの共役複素数 $F_z^*(f)$ の積になるから、その位相は水平動と鉛直動の位相差に等しい。前述のように、レイリー波の水平動と鉛直動の間には $\pm 90^\circ$ の位相差があり、H/V スペクトル比は虚数になることが知られている。このことより、地震動の水平 2 成分を座標変換して作成したある方向の水平動 $x'(t)$ と鉛直動 $z(t)$ の相互パワースペクトル $S_{x'z}(f)$ において、その虚数部が卓越する方向はレイリー波の進行方向とほぼ等しいと考えられる。そこで、相互パワースペクトル全体に占める虚数部の割合を表す指標として次の $IQ(\theta)$ が定義される。

$$IQ(\theta) = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} |Q_{x'z}(f)| df / \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} |S_{x'z}(f)| df \quad (12)$$

ここで、 θ は水平 2 成分の座標変換に用いる方位角、 f_{\min} および f_{\max} は対象とする振動数領域の下限および上限振動数である。第 4 章の解析では、表層から地震基盤までの深層地盤構造の影響を受けると考えられるやや長周期地震動を対象とし、下限および上限振動数として $f_{\min}=0.1\text{Hz}$, $f_{\max}=2.0\text{Hz}$ を用いた。上式の指標 $IQ(\theta)$ は 0~1 の値をとり、 $IQ(\theta)$ が最大になる方向では、相互パワースペクトルに占める虚数部の割合が大きくなり、地震動の水平成分と鉛直成分との位相差は $\pm 90^\circ$ に集中することが予想される。

3. 解析に用いた地震記録

前述の手法を東京大学生産技術研究所の片山・山崎研究室で収録された高密度千葉アレーの鉛直アレー観測記録^{15)~17)}に適用した。本観測アレーでは、44 個の加速度計が 15 本のボーリング孔に埋設されているが、本研究では中心点 C0 で観測された鉛直アレー観測記録を用いる。この地点には、地表 (GL-1m) , GL-5m, GL-10m, GL-20m および GL-40m の 5 点に地震計が埋設され、地震動が同時観測されている。この観測地区の地盤条件は比較的単純でほぼ成層構造を成しており、不整形性の影響は小さい。表 1 に地点 C0 における地盤特性(地盤各層の P 波速度および S 波速度)を示す。

解析に用いる地震記録の選定では、地点 C0 で得られた記録のうち、マグニチュード、震源深さ、震央距離および地表最大加速度を指標とし、比較的表面波が卓越していると思われる記録を用いることにした。表 2 には、解析に用いた 5 つの地震記録の諸元を示す。また、図 1 には表 2 の 5 つの地震より得られた地点 C0 での鉛直アレー観測記録のうち、地表 (GL-1m) での記録 (EW 成分) を示す。

表1 地点C0における地盤特性

Depth (m)	Velocity	
	P-wave(m/s)	S-wave(m/s)
0 - 5	320	140
5 - 15	550	320
15 - 24	1670	320
24 - 40	1670	420

表2 解析に用いた地震の諸元

No.	地震名 発生年月日時	震源位置	M	震源深さ (km)	震央距離 (km)	地表最大加速度 (gal)	ファイル名
	千葉県北部地震 1989.03.06 23:39	35.693N 140.713E	6.0	55.7	55.2	34.126	A0300047
	千葉県東方沖地震 1987.12.17 11:08	35.372N 140.497E	6.7	57.9	44.7	399.959	A0300037
	鳥島付近地震 1985.04.11 01:28	29.963N 139.286E	6.8	415.1	632.2	11.496	A0200126
	茨城県南西部地震 1989.02.19 21:27	36.018N 139.908E	5.6	55.3	47.7	70.929	A0300046
	伊豆大島付近地震 1990.02.20 15:54	34.760N 139.233E	6.5	6.0	124.5	9.293	A0500083

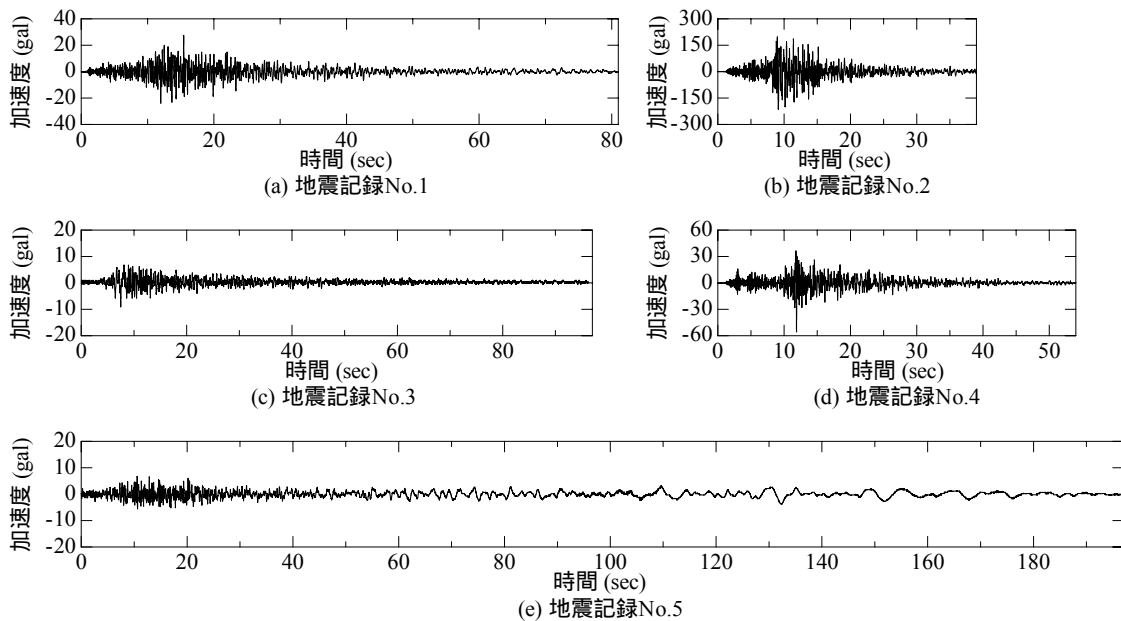


図1 加速度波形 (EW成分)

4. 数値解析および考察

前章で述べた5種類の鉛直アレー観測記録を用いて、第2章で定義した指標 $IQ(\theta)$ が最大になる時間帯と方位角を探索し、その方向における H/V スペクトル比の位相角よりレイリー波の存在を検証する。指標 $IQ(\theta)$ の計算では、各々のアレー観測記録から $T=20.48$ 秒の記録を部分的に抽出し、その抽出区間に対して方位角を $0^\circ \sim 360^\circ$ の間で 1° づつ変化させて $IQ(\theta)$ を求め、それらの中で最大の $IQ(\theta)$ を与える方向を探索した。なお、式(6)および(7)における平滑化操作では、バンド幅 0.4Hz の Parzen ウィンドウを用いた¹³⁾。

4.1 地震記録 No.1 の解析結果

地震記録 No.1 を対象として、指標 $IQ(\theta)$ が最大になる時間帯とそのときの方位角よりレイリー波卓越方向を推定する。この卓越方向の推定に影響する要因として、地震記録全体からどの部分の記録を抽出するのか、また、部分的に抽出した記録(以後、これを部分記録と呼ぶ)に含まれるデータ数をいくりにするのが挙げられる。そこで、この地震記録に1秒毎の開始点を設け、部分記録の継続時間を $T=10.24$ 秒, 20.48 秒, 40.96 秒の3通りに変化させて予備解析を行った。その結果、対象とするレイリー波の周期等を勘案して $T=20.48$ 秒を用いることとした。

以後の解析では、5種類それぞれの鉛直アレー観測記録において、地表(GL-1m)の記録を基準とし、1秒毎の開始点を設けて抽出した継続時間 $T=20.48$ 秒の部分記録について、方位角 θ を $0^\circ \sim 360^\circ$ の間で 1° づつ変化させて前述の指標 $IQ(\theta)$ を計算した。次に、各部分記録の指標 $IQ(\theta)$ のうち、最大の $IQ(\theta)$ を与える区間を決定した。そして、地表(GL-1m)以外の4点(GL-5m, -10m, -20m, -40m)の記録に対しては、上と同じ区間の部分記録について方位角を $\theta=0^\circ \sim 360^\circ$ に変化させて $IQ(\theta)$ を求めた。

図2は、指標 $IQ(\theta)$ が最大になる部分記録(抽出区間の中央時刻: $T_{\text{center}}=69$ 秒)を用いた場合について、水平成分のフーリエスペクトル(図(a)および(e))、鉛直成分のフーリエスペクトル(図(b)および(f))、H/V スペクトル比の振幅(図(c)および(g))、および位相角(図(d)および(h))を示したものである。各図の横軸は振動数、縦軸はそれぞれに対応する値である。図(d)および(h)の位相角は地表(GL-1m)に対するもので、その範囲は $-180^\circ \sim +180^\circ$ とした。また、上図は方位角を補正しない場合、すなわち水平成分としてEW成分 $(x(t))$ を用いたとき、下図は方位角を補正した場合、すなわち $IQ(\theta)$ が最大になる方向の水平成分 $(x'(t))$ を用いた場合である。図(a)~(g)の中の5つの線は、それぞれGL-1m, -5m, -10m, -20m, -40mの記録に対応する。

図3は、地表(GL-1m)におけるH/Vスペクトル比の位相角(図2(d)および(h))の頻度分布を示したものである。図の横軸は位相角、縦軸は相対頻度であり、左図は方位角を補正しない場合、右図は方位角を補正した場合である。

図4は、指標 $IQ(\theta)$ が最大になる部分記録について、 $IQ(\theta)$ と方位角 θ との関係のプロットしたものである。図中の白丸は $IQ(\theta)$ が最大になる方向すなわちレイリー波の卓越方向、線の長さは指標 $IQ(\theta)$ の大きさ、黒丸は震源方向を示す。なお、図中の外円は半径1の円である。

図5は、1秒毎に抽出した部分記録の指標 $IQ(\theta)$ が最大となるときの方位角 θ の時間的变化を示したものである。各図の横軸は時間、縦軸はレイリー波の卓越方向、矢印は $IQ(\theta)$ が最大となる時刻(抽出区間の中央時刻: T_{center})を示す。

図6は、各部分記録の指標 $IQ(\theta)$ の最大値の時間的变化を示したものである。各図の横軸は時間、縦軸は部分記録の $IQ(\theta)$ の最大値、矢印は $IQ(\theta)$ が最大となる時刻(抽出区間の中央時刻: T_{center})を示す。これらの図より、以下のことがわかる。

- (1) 図2(c)および(g)より、地震動のH/Vスペクトル振幅比は、方位角の補正前、補正後ともほぼ等しい。一般に、地震動にはレイリー波以外にラブ波や実体波も含まれるが、それらと地盤増幅特性との関係には類似性のあることが知られている。このことより、地震動のH/Vスペクトル振幅比は、方位角の補正前後であまり変わらなかったと考えられる。

- (2) 図 2(d)および(h)より、H/V スペクトル比の位相角は、方位角補正前は一部 $\pm 90^\circ$ 付近に分布しているものもあるが、方位角補正後はより一層、 $\pm 90^\circ$ 付近に集中するようになる。このことは、図 3 の頻度分布からも確認できる。このことより、指標 $IQ(\theta)$ が最大になる方向の地震動には、レイリー波が多く含まれることがわかる。
- (3) 図 4 より、レイリー波の卓越方向は、地震計埋設深さによらずほぼ同一の方向に集約されている。このことは、地表付近の地震記録からレイリー波の卓越方向が推定できることを示している。
- (4) 図 5 および 6 より、レイリー波の卓越方向および指標 $IQ(\theta)$ の時間的変化が地震計埋設深さによらずほぼ類似の傾向を示すことがわかる。このことより、特定の記録、たとえば地表(GL -1m)の記録からレイリー波の卓越方向が推定できることがわかる。
- (5) 図 5 より、レイリー波の卓越方向が、時間的に一定方向に固定されず広範囲に変化することがわかる。この主な原因は、表面波が地球表面の不均質性によって散乱され、その到来方向が広い範囲で変化したためであると考えられる¹⁸⁾。
- (6) 図 6 の指標 $IQ(\theta)$ の推移と図 1 の加速度波形を比較すれば、地震動のコーダ部で $IQ(\theta)$ の値が大きくなっている。このことより、地震動のコーダ部にレイリー波が多く含まれることがわかる。

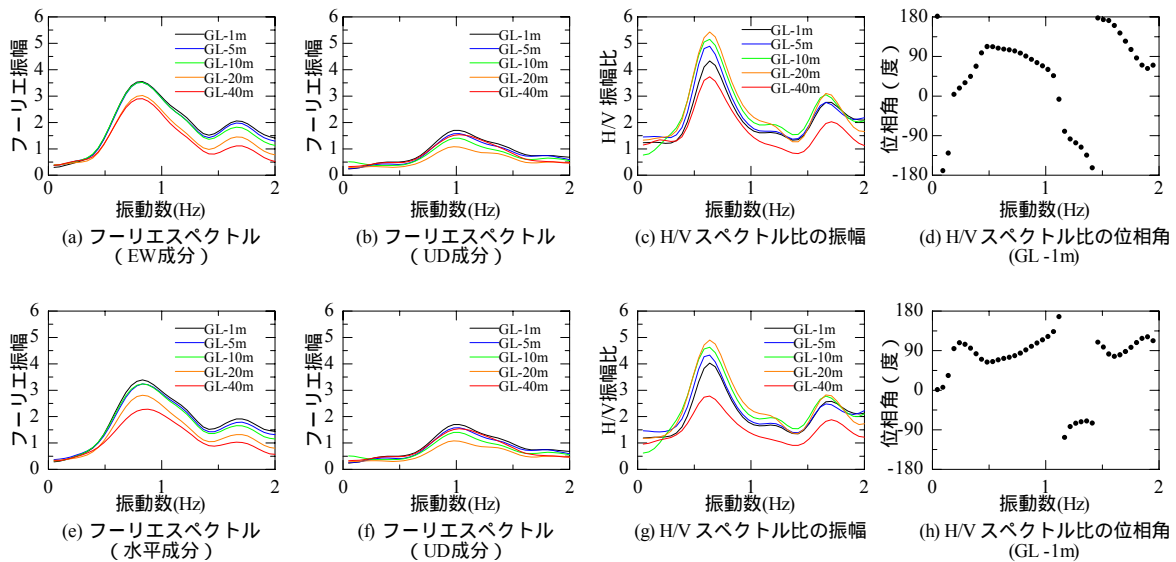


図 2 地震動のフーリエスペクトルとH/Vスペクトル比の振幅および位相角
(上図：方位角補正前，下図：方位角補正後， $T_{center}=69$ 秒)

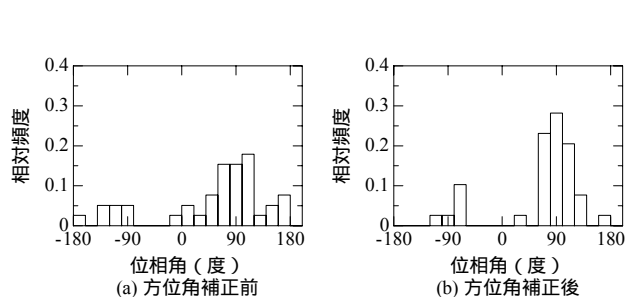


図3 方位角補正前後の位相角の頻度分布
(GL-1m, $T_{center}=69$ 秒)

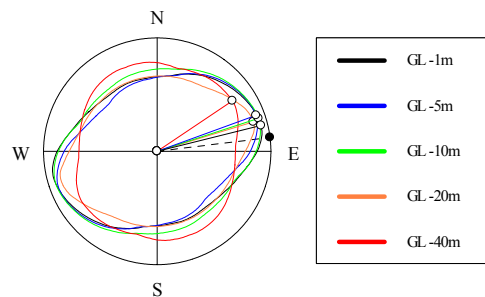


図4 指標 $IQ(\theta)$ から推定したレイリー波の卓越方向($T_{center}=69$ 秒)

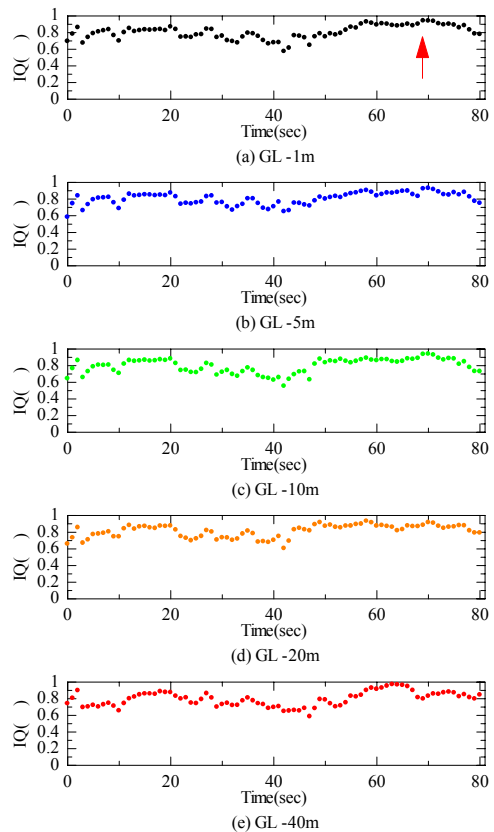
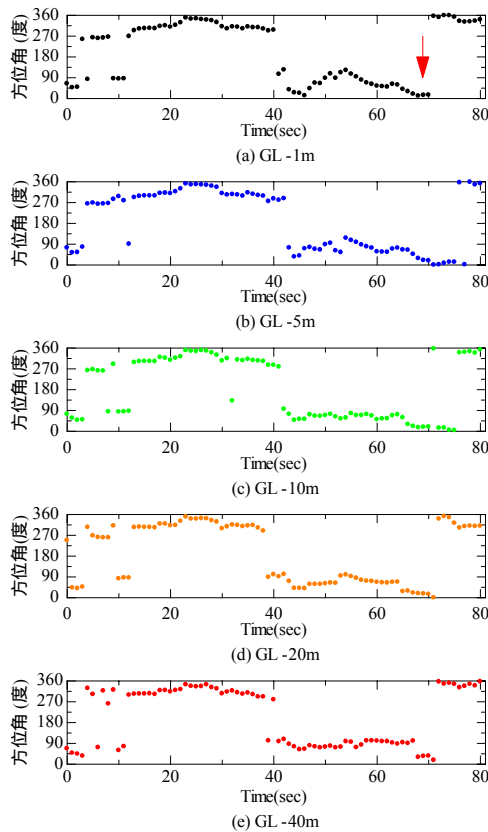


図5 指標IQ()が最大となる方位角 の時間的变化

図6 指標IQ()の時間的变化

4.2 地震記録 No.2~No.5 の解析結果

前節の解析結果の妥当性を確認するために、同様な解析を残り4つの地震記録(No.2~No.5)についても行った。解析では、前節の地震記録 No.1 と同様に1秒毎に開始点を設け、それぞれの開始時刻から継続時間 $T=20.48$ 秒のデータを抽出し、部分記録を作成した。

図7および8には、地震記録 No.2~No.5 の部分記録のうち、指標 $IQ(\theta)$ が最大になる方向での H/V スペクトル比の振幅と位相角をそれぞれ示す。各記録において、解析に用いたデータの部分記録の中央時刻 T_{center} を図中に記入した。

図9は、指標 $IQ(\theta)$ が最大になる部分記録について、 $IQ(\theta)$ と方位角 θ の関係をプロットしたものである。図中の白丸と黒丸は、図4と同様に $IQ(\theta)$ が最大となる方向と震源方向を示す。

これらの図より、以下のことが確認できた。

- (1) 図8より、指標 $IQ(\theta)$ が最大となる方向の H/V スペクトル比の位相角は概ね $\pm 90^\circ$ 付近に集中することがわかる。このことより、 $IQ(\theta)$ が最大となる方向の地震動は、レイリー波を多く含むことが確認できた。
- (2) 図9より、レイリー波の卓越方向は、地震計埋設深さによらずほぼ同一の方向に集約されている。このことより、地表付近の地震記録からレイリー波の卓越方向を推定できることが確認できた。また、図中に示す T_{center} と図1の加速度波形を比較してわかるように、指標 $IQ(\theta)$ が最大となる時刻は地震記録のコーダ部に現れている。このことより、地震動のコーダ部にレイリー波が多く含まれることが確認できた。
- (3) 図9より、指標 $IQ(\theta)$ が最大となる方向は、震源方向と概ね一致する場合(図(a),(b),(d))と、一致していない場合(図(c))があることがわかる。このことは、地表面近くの地盤構造の不均質性による散乱のため、レイリー波の到来方向が必ずしも震源方向と一致しないことを示している。

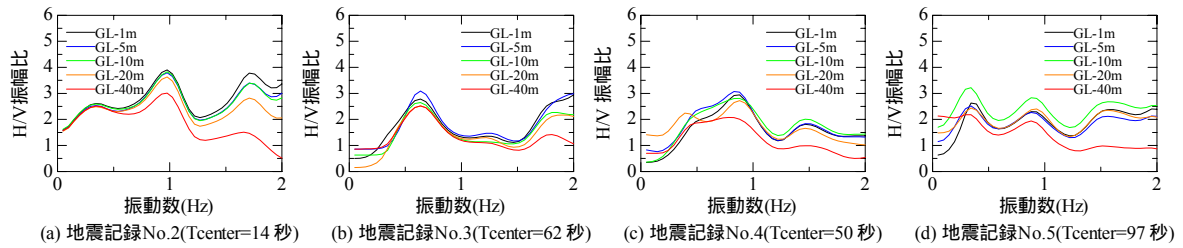


図7 H/Vスペクトル比の振幅

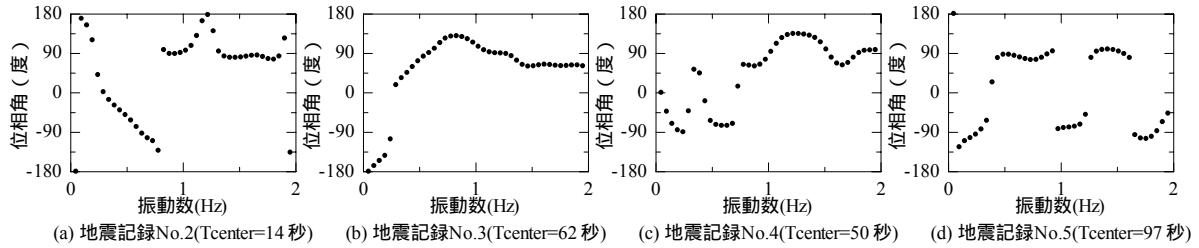


図8 H/Vスペクトル比の位相角 (GL-1m)

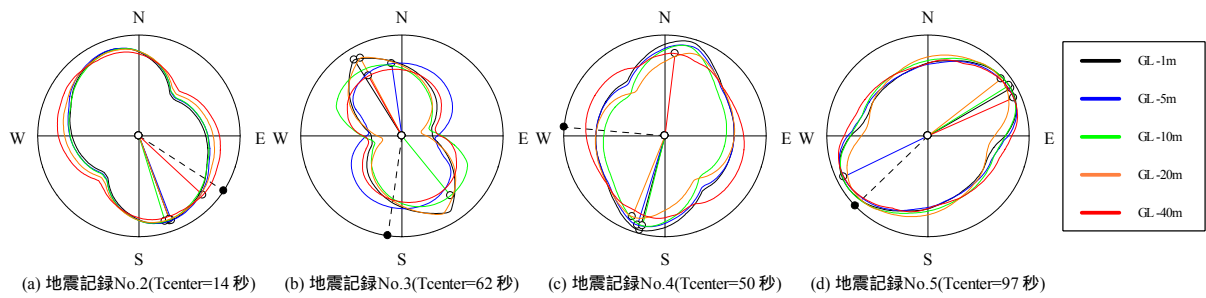


図9 指標 $IQ(\theta)$ から推定したレイリー波の卓越方向

5. 結言

本研究では、深層の地盤構造を推定するための基礎的研究として、地震動の H/V スペクトル比の位相角に着目し、地震動に含まれるレイリー波の抽出を試みた。特に、H/V スペクトル比の虚数部が含まれる割合を示す指標 $IQ(\theta)$ を用いてレイリー波の卓越方向を推定した。

以下に、5 種類の鉛直アレー観測記録を用いた解析より得た結果を示す。

- (1) 地震動の H/V スペクトル比の振幅は、方位角を補正する前と後であまり変化しないことを確認した。
- (2) 地震動の H/V スペクトル比の位相角は、方位角補正前は一部 $\pm 90^\circ$ 付近に分布しているものもあるが、方位角補正後は $\pm 90^\circ$ 付近に集中するようになる。また、指標 $IQ(\theta)$ は、地震動のコーダ部で最大となる。このことより、地震動のコーダ部にレイリー波が多く含まれることが確認できた。
- (3) 指標 $IQ(\theta)$ が最大となる方向より推定したレイリー波の卓越方向が、地震計埋設深さによらずほぼ同一の方向に集約することがわかった。また、指標 $IQ(\theta)$ の値及び $IQ(\theta)$ が最大となる方向の時間的変化は、地震計埋設深さによらずほぼ類似の傾向を示す。このことより、指標 $IQ(\theta)$ を用いると、地表 1 点の地震記録からレイリー波の卓越方向を推定できることがわかった。
- (4) 指標 $IQ(\theta)$ が最大となるレイリー波の卓越方向が、時間的に一定方向に固定されず、その到来方向は、広範囲に変化することが確認できた。

謝 辞

本研究では、(財)震災予防協会による「強震動アレー観測記録データベース」に収録された東京大学生産技術研究所片山・山崎研究室によるアレー観測記録を用いた。ここに記して厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 不可三広和、澤田勉、辻原治、砂田尚彦、三神厚：微動記録に含まれるレイリー波の H/V スペクトル比の位相特性について、JCROSSAR 2000 論文集、2000 年、pp.261-268 .
- 2) Kanai, K. and Tanaka, T. : On microtremor , Bulletin, Earthquake Institute, 39, 1961, pp.97-114 .
- 3) 中村豊、上野真：地表面震動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤特性推定の試み、第 7 回日本地震工学シンポジウム講演集、1986 年、pp.265-270 .
- 4) 時松孝次、宮寺泰生：短周期地震動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係、日本建築学会構造系論文報告集、第 439 号、1992 年、pp.81-87 .
- 5) 時松孝次、中條有二、田村修次：短周期地震動の水平鉛直振幅比と地盤特性の関係、日本建築学会構造系論文集、第 457 号、1994 年、pp.11-18 .
- 6) 岡田広、松島健：長周期微動による厚い地盤構造の推定について、第 7 回日本地震工学シンポジウム講演集、1986 年、pp.211-215 .
- 7) 山中浩明、元木健太郎、福本俊一、高橋寿幸：2004 年新潟県中越地震の余震および微動の観測、平成 16 年新潟県中越地震被害調査報告会梗概集、2004 年、pp.35-38 .
- 8) 防災科学研究所、<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/> .
- 9) 小林喜久二、植竹富一、真下貢、小林啓美：地震動初期微動部の水平/上下スペクトル振幅比の逆解析による深部地盤構造の推定、日本建築学会大会学術講演梗概集、2000 年、pp.233-234 .
- 10) 小林喜久二、小林啓美：K-NET 苫小牧観測点における 2003 年十勝沖地震の地震動特性と堆積地盤構造との関係、竹中技術研究報告、No.60、2004 年、pp.41-50 .
- 11) 大町達夫、年縄巧、塚田智之：表面波の伝播方向の簡便な推定法、第 8 回日本地震工学シンポジウム講演集、1990 年、pp.547-552 .
- 12) Haskell, N.A. : The dispersion of surface waves on multilayered media , Bulletin of Seismological Society of America, Vol.43, No.1, 1953, pp.17-34 .
- 13) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門、鹿島出版会、1994 年、pp.93-109 .
- 14) 星谷勝：確率論手法による振動解析、鹿島出版会、1974 年、pp.22-28 .
- 15) 震災予防協会：強震動アレー観測、No.1、Volume A02、CD-ROM、1992 年 .
- 16) 震災予防協会：強震動アレー観測、No.2、Volume A03、CD-ROM、1993 年 .
- 17) 震災予防協会：強震動アレー観測、No.3、Volume A05、CD-ROM、1998 年 .
- 18) 木下繁夫、大竹政和：強震動の基礎、防災科学研究所、<http://wwwold.k-net.bosai.go.jp/publication/>、5.1.4 .

(受理 : 2005年5月24日)
(掲載決定 : 2005年11月18日)

ESTIMATION AND VERIFICATION OF THE PROPAGATING DIRECTION OF RAYLEIGH WAVE BY PHASE OF H/V SPECTRAL RATIO OF SEISMIC GROUND MOTIONS AT A SITE

Kazuki HATA ¹⁾, Tsutomu SAWADA ²⁾, Atsushi MIKAMI ³⁾
and Terumasa OKAMOTO ⁴⁾

1) Student Member, Graduate Student, the University of Tokushima, M.Eng

2) Member, Professor, the University of Tokushima, Dr.Eng

3) Member, Assistant, the University of Tokushima, Dr.Eng

4) Graduate Student, the University of Tokushima

ABSTRACT

This study deals with the identification of propagating direction of Rayleigh wave by spectral ratio between horizontal and vertical components of seismic ground motions at a site, which is called as H/V spectral ratio. The H/V spectral ratio of Rayleigh wave is well known to be imaginary, which means a phase difference of 90° between the horizontal and vertical components at the free surface. Using this fact, the index $IQ(\theta)$ is defined, which indicates the ratio of imaginary parts in the H/V spectral ratio of seismic ground motions. The propagating direction of Rayleigh wave is then estimated using the $IQ(\theta)$, in whose direction the $IQ(\theta)$ takes a maximum value. It has been shown from the numerical analysis that phase angles of H/V spectral ratio are concentrated on $\pm 90^\circ$ in the propagating direction of Rayleigh wave.

Key Words: Seismic Ground Motions, H/V Spectral Ratio, Phase Angle, Rayleigh Wave, Estimation of Propagating Direction