

# ウェレット変換による兵庫県南部地震動特性に関する基礎的研究

宮脇幸治郎<sup>1</sup>・土岐憲三<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 大阪府立工業高等専門学校教授 建設工学科 (〒572 寝屋川市幸町26-12)

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 京都大学教授 大学院工学研究科 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

本研究は、兵庫県南部地震の鉛直および水平アレーの地震観測記録に対して数値解析を行っている。解析は、対象地震に対してウェレット相互相関関数およびウェレットF-Kスペクトルを求め、その結果に対して波動伝播の基本特性がどのようになっていたか検討しようとしたものである。さらに、水平アレーの考察には、大阪湾地域の3次元FEM解析を行い、断層域を含めた単純化破壊伝播による数値シミュレーションを行い、その波動伝播特性との比較検討も行っている。

**Key Words:** wavelet transform, wavelet cross correlation function, wavelet F-K spectrum, 3D-FEM

## 1. 緒言

1995. 1. 17に発生したM7. 2の兵庫県南部地震は、震源に近い淡路島北西部や神戸市、芦屋市、西宮市等を中心とした大地震災害を起こした。特に気象庁震度階7と指定された地域でのライフライン関係の電気・ガス・水道・道路・鉄道や建築物の被害は激しかった。これらの被害状況は、官・民・研究機関より、報告書類<sup>1),2),3)</sup>が公表され、さらに、工学上の問題となる各対象物ごとの被害メカニズムについて各研究分野ですでに数多く研究成果<sup>4),5),6)</sup>が発表されてきている。

また本地震については、各研究および公共機関の他に民間において貴重な地震記録が観測されている。そして、これらの被害をもたらした入力地震動の特性も地震の発震機構ならびに六甲山系南側に広がる神戸市街の地層を考慮したモデルによる強震動の評価<sup>7),8)</sup>も行われるなど、理学面での考察も行われてきている。

ところで、地震波記録に対する最近のアレー観測の研究には、時松・新井・酒井・仲條<sup>9)</sup>や末富・松原・山口・稲童・吉田<sup>10)</sup>は、微動のアレー観測により、レイリー波分散曲線を求め、逆解析により表層地盤のS波速度構造を推定している。盛川・亀田<sup>11)</sup>は、確率的に一樣とみなされる地中で観測される波形をもとに、未観測点におけるパワースペクトルを確率的に推定する手法の妥当性を検討するためアレー観測記録を用

いている。中村・山崎<sup>12)</sup>は、地震動の空間変動に着目し、地中で地震動の空間変動パラメータについてアレー観測データを用いて、コヒレンス関数および空間相関係数を推定して考察している。川上・西・茂木<sup>13)</sup>は、最大加速度の空間分布をアレー観測データを用いて、調べている。泉谷・杉村<sup>14)</sup>は、アレーサイトの地盤によるS波増幅の震動方向依存性について調べている。

さらに本研究と関係するアレー観測データの処理には、各観測データのアンサンブル平均をビーム波として扱われ、周波数-波数(F-K)スペクトルの処理が行われる。堀家<sup>15)</sup>は、京都盆地南部での観測された微動から位相速度と伝達関数を求め、地下構造を推定するためビーム波による処理を行っている。石川・家村・五十嵐・高橋・中西<sup>16)</sup>は、明石海峡大橋近傍におけるアレー観測データをビームフォーミング手法によって処理し、入射地震波の時系列上での伝播速度および入射角の推定を行っている。

本地震における鉛直アレー観測データに対する考察には、田中<sup>17)</sup>が、埋め立て地盤の間隙水圧の上昇、地盤の剛性低下を余震記録も含めた時系列で考察している。液状化現象の面から岡・八嶋・田口・立石・古川・福島<sup>18)</sup>、Sugito・Sekiguchi・Yashima・Oka・Taguchi・Kato<sup>19)</sup>は、連成3次元液状化解析により検討している。Cubrinovsk・Ishihara<sup>20)</sup>、仙頭・鈴木<sup>21)</sup>、鄭・大保<sup>22)</sup>は、1次元有効応力解析を行って、考察している。

次に、ウェレット解析による地震波への適用例として、佐々木・前田・山田<sup>23)</sup>は、地震波のビート状の後続波の成分をウェレット変換により分離している。Yomogida<sup>24)</sup>は、ウェレット変換の時間と振動数の両方の局在化の特性を用いて主要エネルギーの到達状況を考察し、さらに、地震動の軌跡の結果との総合的な評価より、地震断層内での破壊状況を考察している。曾根・山本・増田・中岡・芦野<sup>25),26)</sup>らによる強震動記録を含めた波動への解析例がある。

関西地震観測研究協議会 (CERKA) より公表されている地震記録は、鉛直アレーおよび水平アレーの観測データの基本的な波動特性がすでに報告<sup>27)</sup>されている。著者らは、これらの波動特性を解析するため、ウェレット相互相関関数およびウェレットF-Kスペクトルを定義し、検討を行う。ここで定義された関数は、ウェレット変換の特徴であるが、分解係数によって定まる抽出される周波数帯域での波形特性を表している。さらに、ウェレット相互相関関数は、基準とする位置で各時刻に対する時間遅れの関係を抽出している。また、ウェレットF-Kスペクトルは、分解係数による中心周波数近傍の波数スペクトルを抽出している。このことは、連続的な周波数との関係が得られないが、原波形の有する全周波数域での概略的な特性が把握できる。

具体的な適用例として鉛直アレーのデータに対しては、ウェレット相互相関関数の結果より軟弱な埋め立て地盤での液状化現象に伴う平均的な伝播速度の低下現象を調べる。一方、水平アレーに関するデータに対しては、地震波の見かけ上の位相速度およびその入射方向について調べる。考察には、アレー観測点間の距離が大きく、アレー観測点に波源を含んだ広域的な地形特性を考慮して行う必要がある。そのため本研究では、3次元有限要素で簡略化した断層モデルを設定し、震源要素から断層破壊を伝播させて数値シミュレーションによる特性を求める。この簡単なモデルによる波動特性とF-Kスペクトルによって抽出される長周期成分の特性とが比較されている。その結果、アンサンブル平均される観測地と波源との影響が調べられている。

## 2. ウェレット変換による基礎式

### (1) ウェレット相互相関関数

いま、ウェレット関数 $\psi(\xi)$ を用いて、直交ウェレット基底関数は、

$$\psi_{j,m}(u) = 2^{-j/2} \psi_j(u - 2^{-j}m) \quad (1)$$

ここに、

$$\psi_j(u) = 2^j \psi(2^j u) \quad (2)$$

と定義<sup>28)</sup>されている。このとき、

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi_{j,m}(u) \overline{\psi_{j',m'}(u)} du = \delta_{jj'} \delta_{mm'} \quad (3)$$

なる関係になっている。ここに、式中の $\overline{\phantom{x}}$ は、共役複素数を意味する。一方、任意の2つの関数 $x(t), y(t)$ は、式(1)の基底で次式のように展開表示が可能である。

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= \sum_j \sum_m D_{jm}^x \psi_{jm}(t) \\ y(t) &= \sum_{j'} \sum_{m'} D_{j'm'}^y \psi_{j'm'}(t) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

これらの2つの関数の相互相関関数(CCF)は、次式のように定義できる。

$$R_{xy}(\tau) = \langle x(t), \bar{y}(t + \tau) \rangle \quad (5)$$

ここに、 $\langle \phantom{x}, \phantom{y} \rangle$ は内積を意味する。

式(5)は、式(1)~(3)の関係をを用いると、

$$\begin{aligned} R_{xy}(\tau) &= \sum_j \sum_m \sum_{j'} \sum_{m'} D_{jm}^x \overline{D_{j'm'}^y} \delta_{j,j'} \delta_{m,m'-2^j\tau} \\ &= \sum_j \sum_m D_{j,m+2^{j-1}\tau}^x \overline{D_{j,m-2^{j-1}\tau}^y} \\ &= \sum_j W_{xy,j}(\tau) \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、

$$W_{xy,j}(\tau) = \sum_m D_{j,m+2^{j-1}\tau}^x \overline{D_{j,m-2^{j-1}\tau}^y} \quad (7)$$

となる。

式(7)は、分解係数 $j$ におけるウェレット相関関数(WCCF)であり、時刻 $m$ に対する時間遅れ $\tau$ との関係を示している。ここで、式(7)の下添字部を次のようにおく。

$$\left. \begin{aligned} t_x &= m + 2^{j-1}\tau \\ t_y &= m - 2^{j-1}\tau \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(8)の変数 $m$ は時刻を意味するが、具体的な解釈に

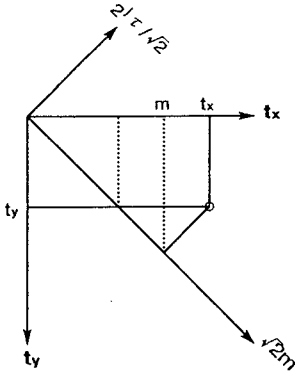


Fig.1 Coordinates for the WCCF

際しては、分解係数  $j$  での時刻は式(1)からもわかるように  $2^{-j}m$  が実際の時刻に対応している。さらに  $2^{-j}m$  の  $\sqrt{2}$  倍ごとの  $t_x, t_y$  を用いて式(7)を算定し、 $t_x-t_y$  面上にその値の等高線表示すると Fig.1 のような関係図が得られる。すなわち、 $t_x, t_y$  軸に対する対角な方向が時刻  $t$  を意味し、この軸と直角方向の距離が時間遅れ  $\tau$  でその等高線の値が  $W_{xy,j}(\tau)$  を示している。

## (2) ウエブレット F-K スペクトル

地震動は、定常な確率過程ではないが、記録された継続時間のもが繰り返される不規則波として取り扱うならば、従来の F-K スペクトルに対応するウエブレット変換によるウエブレット F-K スペクトルが形式的に得られる。

いま、2次元空間の任意な地点  $k$  での波動  $\alpha_k(t)$  が式(4)と同様の展開表示ができる。

$$\alpha_k(t+\tau_k) = \sum_j \sum_m D_{jm}^k \psi_{jm}(t+\tau_k) \quad (9)$$

ここに、 $\tau_k$ : 地点  $k$  での時間遅れ

さらに空間的に観測地点が  $n$  箇所ある場合、その平均としてのビーム波は、次式のように評価できる。

$$G(t) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \alpha_k(t+\tau_k) \quad (10)$$

式(10)の波動の自己相関関数は、次式ようになる。

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \langle G(t), \bar{G}(t+\tau) \rangle \\ &= \frac{1}{n^2} \left\{ \left\{ \sum_{k=1}^n \alpha_k(t+\tau_k) \right\}, \left\{ \sum_{l=1}^n \bar{\alpha}_l(t+\tau_l+\tau) \right\} \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、式(11)のフーリエ逆変換の演算を行えば、ビーム波のスペクトルが得られる。すなわち、

$$\begin{aligned} S(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{i\omega\tau} d\tau \\ &= \frac{1}{2\pi n^2} \sum_k \sum_l \sum_j \sum_m \sum_{j'} \sum_{m'} D_{jm}^k D_{j'm'}^l \\ &\quad \cdot \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega\tau} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{jm}(t+\tau_k) \bar{\psi}_{j'm'}(t+\tau_l+\tau) dt d\tau \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)における積分部分の演算は、次式のように評価できる。

$$\begin{aligned} &\int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega\tau} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{jm}(t+\tau_k) \bar{\psi}_{j'm'}(t+\tau_l+\tau) dt d\tau \\ &= e^{i\omega(\tau_k-\tau_l)} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega\tau} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{jm}(t) \bar{\psi}_{j'm'}(t+\tau) dt d\tau \\ &= e^{i\omega(\tau_k-\tau_l)} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega\tau} \delta_{j,j'} \delta_{m,m'-2^j\tau} d\tau \\ &= e^{i\omega(\tau_k-\tau_l)} \delta_{j,j'} e^{i(m-m')2^{-j}\omega} \end{aligned} \quad (13)$$

さらに、地点  $k$  での位置ベクトル  $X_k$ 、波数ベクトル  $k$  を用いるとその時間遅れ  $\tau_k = X_k \cdot k / \omega$  と表されるので、式(12)は、次式のように表現できる。

$$\begin{aligned} S(\omega) &= \sum_j \sum_m \left[ \frac{1}{2\pi n^2} \sum_k \sum_l \hat{D}_{jm}^k \hat{D}_{j'm'}^l e^{i(X_k - X_l) \cdot k} \right] \\ &= \sum_j S_j(\omega) \end{aligned} \quad (14)$$

ここに、

$$S_j(\omega) = \sum_m \left[ \frac{1}{2\pi n^2} \sum_k \sum_l \hat{D}_{jm}^k \hat{D}_{j'm'}^l e^{i(X_k - X_l) \cdot k} \right] \quad (15)$$

上式中の  $\hat{D}_{jm}^k$  は  $D_{jm}^k$  のフーリエ変換されたものである。また、 $\hat{D}_{jm}^k \hat{D}_{j'm'}^l$  は、分解係数  $j$  における相互スペクトルを意味し、 $S_j(\omega)$  は、ウエブレット F-K スペクトルを意味している。なお、実際の推定においては有限長の記録を用いるので周波数ウィンドウにより平滑化して評価する。また、ウエブレット変換によるウエブレット F-K スペクトルの周波数は、分解係数  $j$  によってそのバンドパスの中心周波数が決まる。そして、その中心周波数近傍において相互スペクトルの最大値が現れるので分解係数ごとに  $S_j(\omega)$  が推定されることになる。

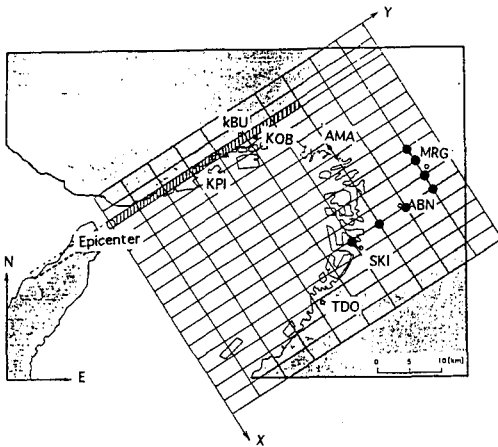


Fig.2 Object area and observed sites

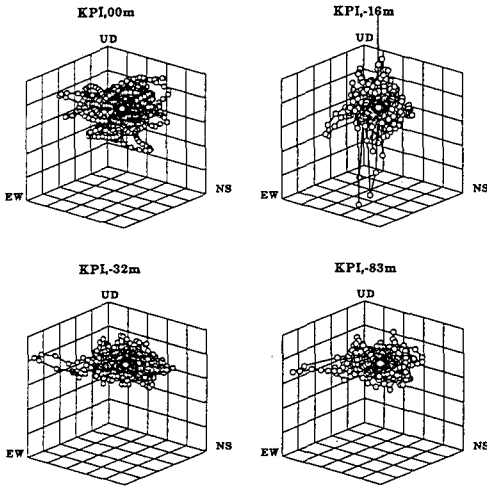


Fig.3 3D-acceleration traces by vertical array records

### 3. 解析結果

#### (1) 観測地域および諸元

地震の記録は、CERKAより配布されたデータを用いることとした。観測地点は、Fig.2に示す場所にある。まず神戸ポートアイランド (KPI) での鉛直アレーの地震波記録は、ポートアイランドにおいて多発した液状化に伴う周波数変化に注目して解析してみる。鉛直アレーに関するものは、深さが-83mから-32,-16,0mの4カ所の加速度記録である。これらの記録の3次元の軌跡を描いたものがFig.3である。この図より-83m付近のEW成分の卓越した波動が地表面0mでその卓越性が明瞭に認め難くなっている。ただし、-83mでの水平方向成分に対するSugitoら<sup>29)</sup>の指摘した補正は、行っていない。また、-16m

Table 1 Observed sites

Location	Latitude Longitude	Coordinate (at MRG)		Ground Condition
		EW(km)	NS(km)	
KBU	N34.725E135.240	-30.4	5.0	Bedrock
KOB	N34.725E135.281	-26.7	5.0	sedimentary layer
AMA	N34.718E135.408	-15.0	4.2	Alluvial layer
MRG	N34.680E135.572	0.0	0.0	Alluvial layer
ABN	N34.636E135.519	-4.9	-4.9	Alluvial layer
SKI	N34.564E135.469	-9.5	-12.9	Alluvial layer
TDO	N34.480E135.408	-15.1	-22.2	Diluvial layer

Table 2 Restorations of the velocities and accelerations

		NS	EW	UD
KOB	CERKA	40.0	40.0	40.0
		421.0	774.9	379.3
	Matsushima-Kawase	57.9	51.9	37.9
		426.6	583.3	613.3
	This study	61	---	---
474		---	---	
AMA	CERKA	40.0	40.0	26.1
		271.4	321.5	327.9
This study	56.5	44.1	26.1	
	270.1	317.9	327.9	

upper:velocity [kine]  
lower:acceleration [gal]

での上下動成分にパルス状の大きな値のものが認められる。これは、観測上のノイズと思われるが、これらのノイズ除去も、行っていない。このように生データを用いたのは、データの解析手法としてウェブレット解析の特性からフィルター処理されると考えたからである。

次に神戸大学 (KBU)、神戸本山 (KOB)、尼崎 (AMA)、森河内 (MRG)、阿倍野 (ABN)、堺 (SKI) および忠岡 (TDO) での水平アレー地震波記録特性は、比較的周期の長い波動の水平アレー伝播特性に注目して解析してみる。水平アレー観測点間の関係は、Table 1のようになっている。なお、観測点KOB、AMAの記録は、一部飽和状態で記録が振り切れた状態になっている。この部分の復元には、松島・川瀬<sup>30)</sup>がKOBの記録に対してKBUの記録とKOBの余震等を用いて復元している。また山下・土岐・澤田<sup>31)</sup>が、KOBの記録に対してカット・アンド・ペースト法で復元している。本解析においては、復元された波形の位相のことを考えて、3次スプライン関数近似で行っている (Table 2)。

#### (2) 鉛直アレーに対する解析結果

まず、相互相関関数に対応する量をウェブレット相互相関数により求めてみる。例えば、分解係数  $j=5$  において-83mを基準としたEW成分に対する結果がFig.4である。なお、これらの図は、横軸は、基準とした-83mでのデータの時間を意味し、縦軸は相関

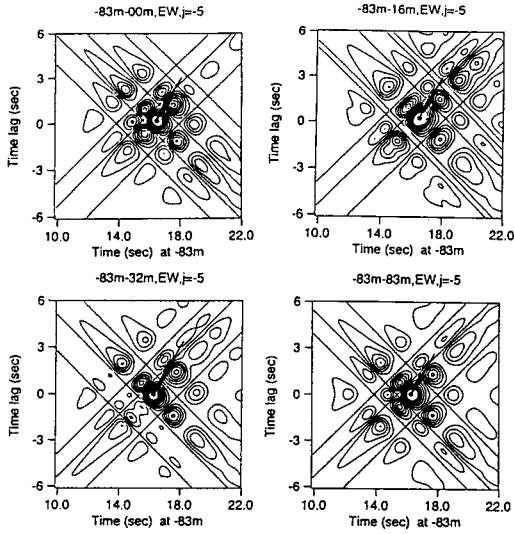


Fig.4 WCCF at KPI for EW component

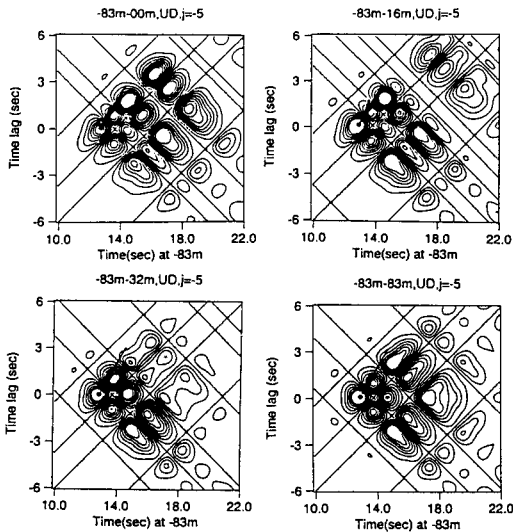


Fig.5 WCCF at KPI for UD component

を採るデータとの遅延時間を採っている。さらに、これらの図において、縦軸の正の遅延時間は、相関をとられるものの方が、その事象が遅れて生起している領域であり、負の遅延時間は、逆に、先に生起している領域である。-83mでのウエブレット自己相関を表しているEW成分は、右上がりの斜めの3本の線が左下がりの同じく3本の線と交わっている。これらの線は等高線の節にあたっている。また、図の結果よ

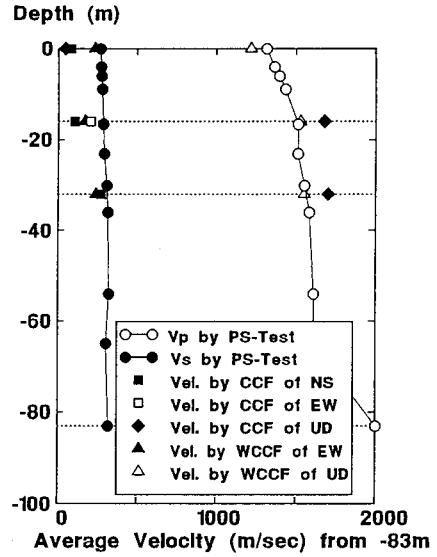


Fig.6 Estimate velocities from CCF

り、時間の進行にしたがい正の遅延時間に等高線が移動しているのがわかる。同様に、UD成分に対する結果は、Fig.5である。これらの結果は、EW成分において相関の強くなる時刻(約15.4秒)より早い時刻(約13.7秒)に相関の強くなっているのが認められる。このことは、UD成分がEW成分より早く到着した波動成分を現しており、この時間領域では、水平成分が、S波的成分を意味し、上下成分が、P波的成分の波動を意味している。このようにウエブレット相互相関関数は、従来の相互相関関数と異なり、基準となる波形データの時刻に対する時間遅れでの相関の強さを図上で把握できる。Fig.4とFig.5の比較により、基準となる位置での相関の強い時刻が、異なれば、種類の異なる波動が伝播してきている可能性を示唆し、元となる時刻歴波形の結果と対応がとれる。

以上の相関関係の中で代表的な時間に関するデータの処理した結果が、Fig.6である。図中●印はPS検層でのS波伝播速度を用いて-83mからの平均速度であり、○印はP波伝播速度による平均速度である。また相互相関関数の遅延時間による平均速度で、水平成分に関するものは、■、□印により示している。これらの結果は、S波速度より若干小さい値を示しているが、近い値を示している。さらに、上下成分に関するものは、◆印により示している。これらの結果は、-16mまではP波速度に近い値を示しているが、若干大きい値を与えている。

一方、ウエブレット相互相関関数による平均速度の中でEW成分に関するものは、▲印により示し、上下

Table3 Time difference between the KBU site and the other sites

	Time History			CCF	WCCF
	$t_d$	$\Delta t_p$	$\Delta t_s$	$\Delta t_{pcc}$	$\Delta t_{pwc}$
KBU	3.4	0.00	0.00	0.00	0.00
KOB	3.6	0.83	1.42	1.10	1.22
AMA	5.4	2.25	5.31	1.30	2.30
MRG	7.0	4.42	8.13	7.60	4.44

$t_d$ : Initial minute duration time  
 $\Delta t_p$ : Time difference of starting points on a part of minute waves  
 $\Delta t_s$ : Time difference of main peaks  
 $\Delta t_{pcc}$ : Delay time on the first peak point of the CCF  
 $\Delta t_{pwc}$ : Delay time on the maximum peak point of the WCCF

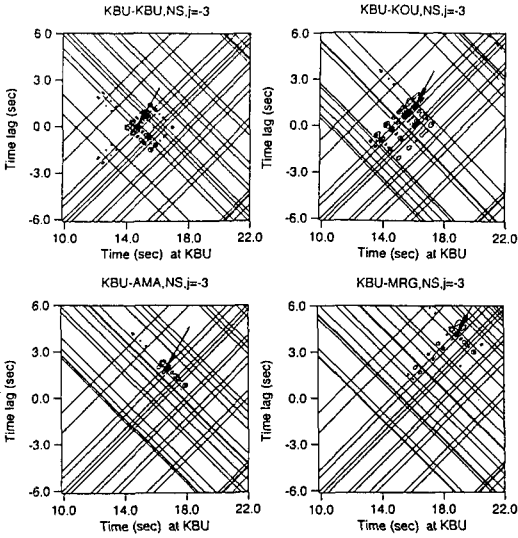


Fig. 7 WCCF to KBU for the horizontal array ( $j=3$ )

成分に関するものは、 $\Delta$ 印により示している。具体的な値の読み取りは、相関の最も強い時間遅れの位置を認識 (Fig. 4 および 5 中の矢印で示した●印の位置の値を採用) して求めている。この結果によると、地表面までの平均速度の低下が、非常に大きくなっている。これらの結果は、相互相関関数での結果と似た傾向を示している。

### (3) 水平アレーに対する解析結果

#### a) 相関関数

ウェレット相互相関の結果に対しては、分解係数  $j=3$  の EW 成分の東西方向のアレー結果例が、Fig.7 である。図は、KBU とのウェレット相関をとっている。分解係数が  $j=5$  から  $j=3$  になると対象とする周波数帯域が高くなり時間領域の窓が小さくなるため等高線表示によるピーク値の読み取りが難しくなる。実際の値の読み取りには、矢印で示した●印の位置の値を採用するが、カラー表示により確認している。図の結果によれば、KBU との相関の領域は、正の遅延時間に現れており、波動が遅れて到達してきているのがわかる。

これらの2点間の相互関係は、Table 3 に示す (ただし、KBU を基準とする)。この表の微動継続時間  $t_d$  は、震源までの距離に比例した量であり、微動開始時間差  $\Delta t_p$  は、P 波の到着時間に相当し、その時間差がウェレット相互相関関数から求めた遅延時間  $\Delta t_{pwc}$  と比較的合っている。これは、P 波に関する時刻の情

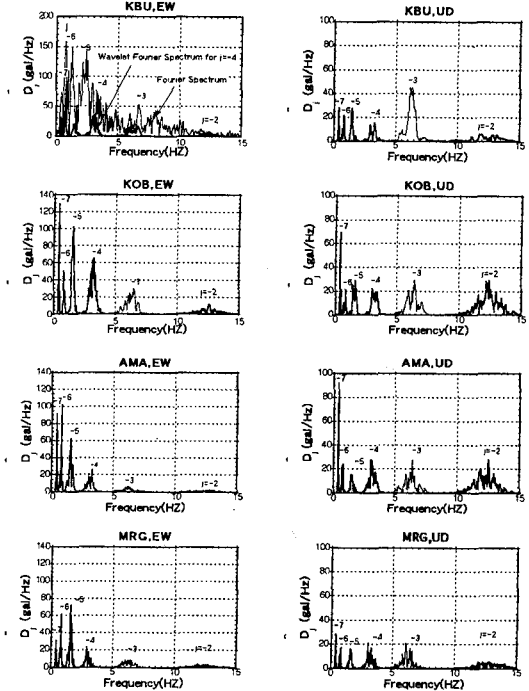


Fig. 8 Wavelet Fourier spectra for the EW horizontal array

報をウェレット相互相関が抽出していることを意味していると思われる。また、この表のピーク時間差  $\Delta t_s$  は、時刻歴の最大値に相当する時間差であり、S 波または表面波の到着時間差に相当した量と考えられる。

#### b) スペクトル

次に各観測地での周波数特性を意味するウェレットフーリエスペクトル結果は、Fig.8 に示す。なお、一般のフーリエスペクトルとウェレットフーリエスペクトルとの関係は、Fig.8 の KBU に対して示しているように、フーリエスペクトルの周波数特性に対して分解係数により定まる周波数帯域ごとに抽出された周波数特性に相当するものとなっている。

Fig.8 の結果より、東西方向のアレー特性は、 $j=5 \sim 7$  において EW 成分の方が UD 成分より低周波数

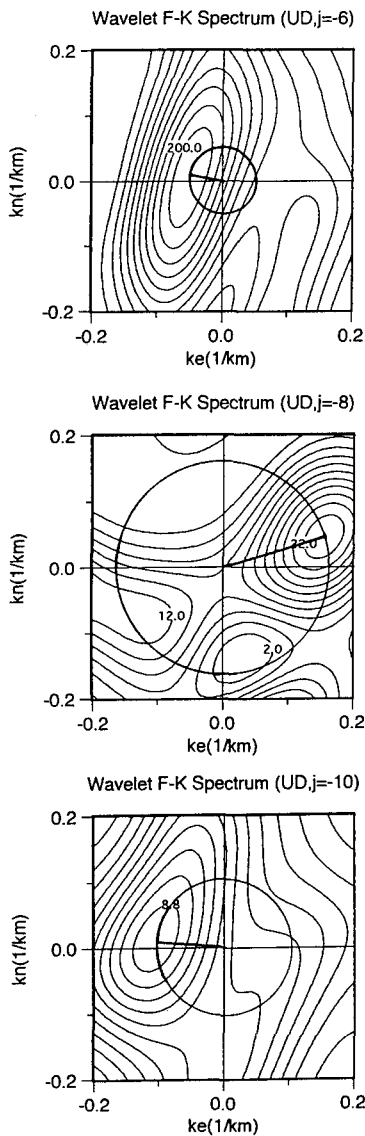


Fig. 9 Wavelet F-K spectra for the horizontal array

域のスペクトルがやや強い傾向を持っている。ただし、もう少しUD成分を詳細に見るとKBUの場合は、 $j=3$ の分解係数においてEW成分に較べUD成分が卓越している。そして、KOB, AMAの場合は、低周波数域の $j=7$ において、UD成分も、卓越している。一方、南北方向のアレー特性は、EW成分が、同じ傾向を示し、UD成分が、全周波数域に渡って様な強さを示していた。これらの傾向は、Fig. 2に示した各観測位置と断層への方向および距離とが関係する。

さらに、これらの水平方向に配置された観測点によるウェーブレットF-Kスペクトルの結果について示す。まず、対象とする観測網は、観測点間距離が、比

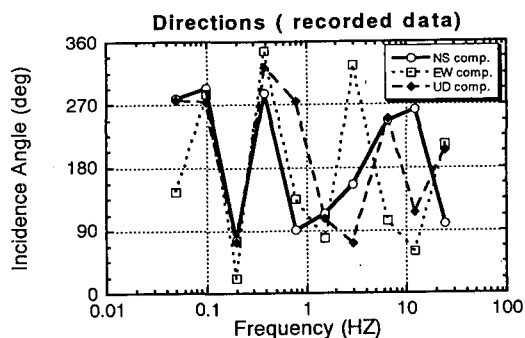


Fig.10 Propagating directions obtained from wavelet F-K spectra

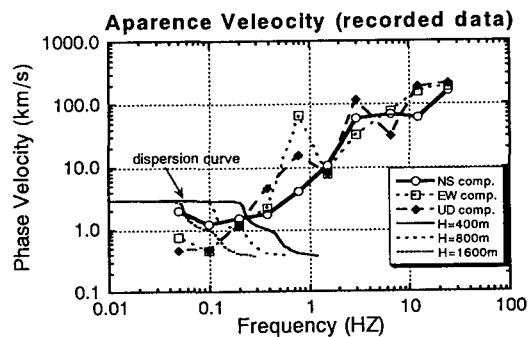


Fig.11 Apparent velocities obtained from wavelet F-K spectra

較的長く、最小のものでも約4kmになっているため波数の分解能は、 $0.125(1/km)$ までとなりそれ以上は、空間的エイリアジングを生じる可能性を含む。したがって、ここでは式(15)の平滑化のためのウィンドウ間隔は、 $[-0.2, 0.2](1/km)$ として計算する。ところで水平アレー観測での地質構造等の同定に表面波を用いられ、表面波のうちレイリー波を検出するためには、UD成分が一般に用いられる。そこでMRGを座標原点とし、UD成分の分解係数 $j=6, -8, -10$ に対して、東西・南北方向の座標軸に対する結果は、Fig. 9のようになる。ただし、各分解係数に対する周波数は、各分解係数の中心振動数を用いず、各分解係数での相互スペクトルが最大を示す周波数を用いている。Fig. 9は、等高線の頂部までの距離が、見かけ上の位相速度の逆数に比例した量を与えることになり、原点から頂部の方向が、その波の伝播方向を意味している。これらを、分解係数(周波数)との関係で図示したのが、Fig.10および11である。各観測位置は、断層域を一部含んだアレーを構成している。このことは、Fig.10に示されたウェーブレットF-Kスペクトルによる観測波の入射方向が周波数(分解係数)により大きく支配されることに対応しているものと考えられ

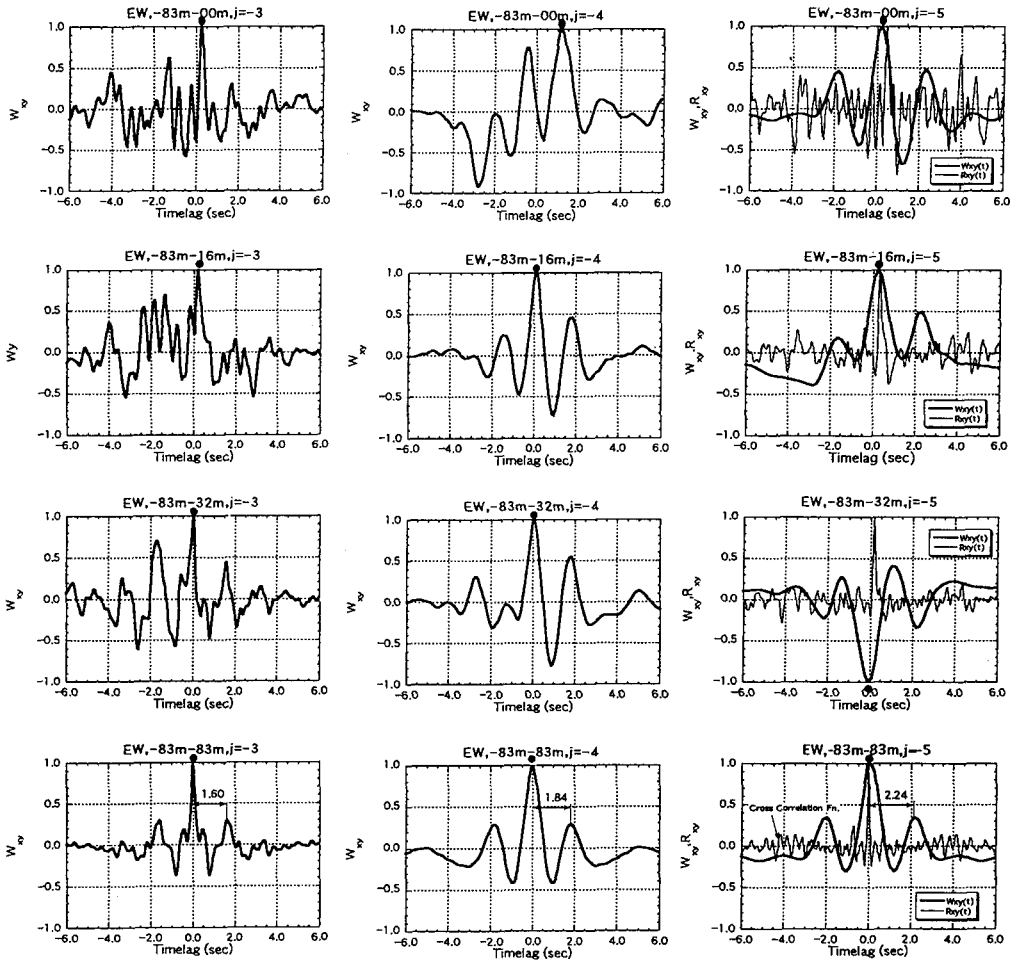


Fig. 12 Properties of the WCCF to the EW component for each wavelet coefficient

る。

Fig.11は、見かけ上の位相速度を示している。見かけ上の位相速度は、その波が、一般に、震源から離れているならば表面波であると期待できるが、対象地域は、50km以内であり、表面波か、実体波かは未定である。一方、表面波の位相速度は、基盤と考える最下層のS波速度と最上層の地表面層のS波速度の間にある。そして、実体波の見かけ速度は、基盤層の速度より必ず大きくなるので、香川ら<sup>32)</sup>が与えている大阪湾岸での基盤層のP波速度5.4km/sec、S波速度3.2km/secの値が参考値となる。

各観測位置での基盤までの表層厚さは、KBUでは、ほぼ0mであるが、他の観測点においては、400m～1600mの厚さをもっている。さらに、ウェレットF-Kスペクトルは、断層近傍のKBU、KOB、AMAのスペクトルを強く受けていると考えられる。この

ような条件にあつてFig.11の結果を見れば、周波数軸に対して右上がりとなり、逆分散の特性となっている。ここで図中には表層厚を変化させた場合のレイリー波の基本分散曲線を示しているが、この結果をみると分解係数j=-7～-10(約0.4～0.05Hz)において、表面波の伝播特性の可能性を示している。

#### 4. 考察

##### (1) 鉛直アレー特性

前節での波形処理は、加速度に対して時刻歴波形、相互相関関数、ウェレット相互相関関数の処理を行った。これらの処理による時間遅れ量は伝播速度の大小に関係するが、これが媒体としての土要素の剛性の非線形挙動(液状化)の結果として現れたものかどうか考察して見る。土要素が液状化したかどうかは、



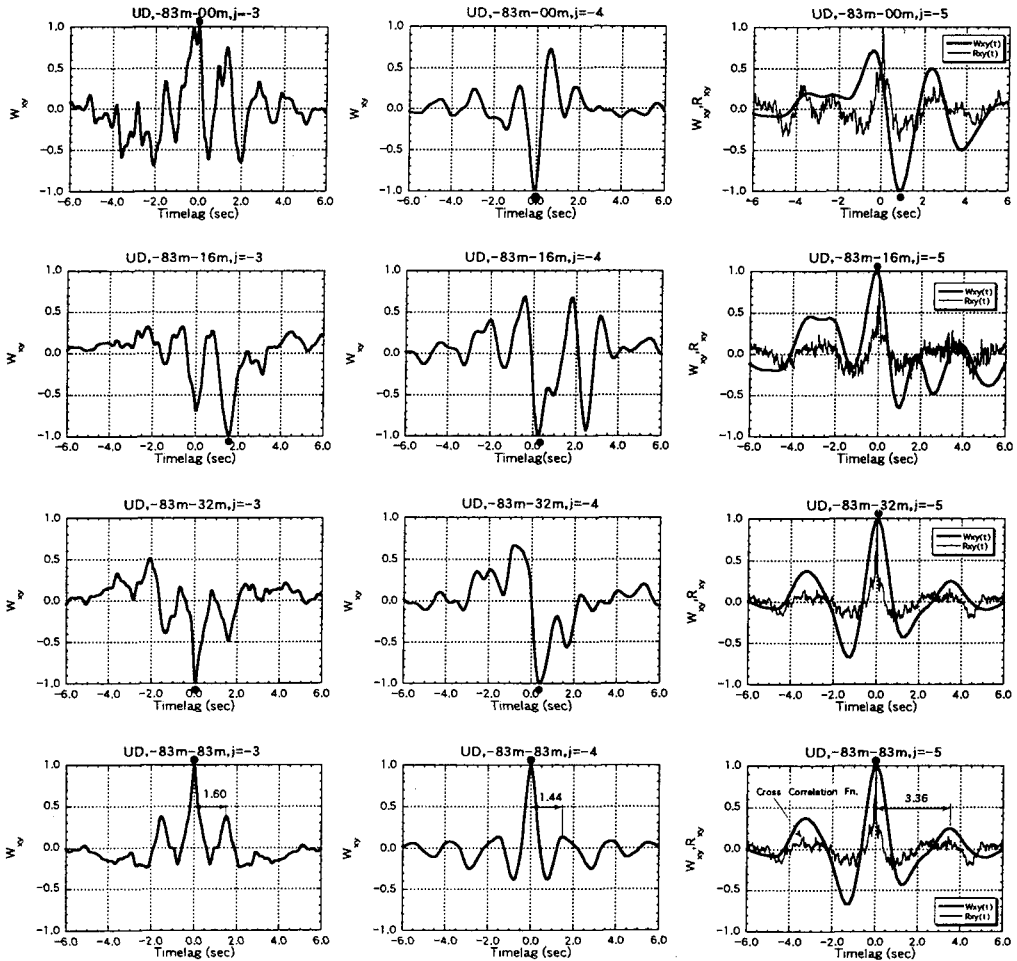


Fig. 13 Properties of the WCCF to the EW component for each wavelet coefficient

要素内の過剰間隙水圧の挙動がどのようになっているという情報が必要になる。KPI地域での液状化が生じたという証拠は、地面上に大規模な墳砂の跡があり、また、KPI内の第2期埋め立て坑内での間隙水圧の急激な上昇記録などの間接的な情報がある。さらに、仙頭ら<sup>33)</sup>による改良SLP法による同定解析の結果によると-60m~-80mの深さまで大きな剛性の低下が現れている。一方、余震による観測データとの比較は、液状化に伴う土要素の再構成が生じている可能性があるため、土要素の非線形性の具体的な検証には、観測位置において、本地震の前に微小地震波による観測データが必要となる。現在のところ公表されているこのようなデータはない。このような条件のもとで本震の波形データに現れている液状化の痕跡を考察することになる。

まず、本解析において用いたウェレット相互相関

のFig. 4およびFig. 5の結果は、基準としている-83mの波動の時刻歴に対する時間遅れとの関係を表している。これらの結果は、対象とする分解係数において各時刻の相関の強さを表しているが、分解係数jが大きくなると時間軸上の分解能が上がることによる全体的な相関が見つけ難くなる。そこで、各分解係数に対して時間軸上の和をとることにより平均的な遅延時間の特性を表示してみる。分解係数j=-3~-5でのEW成分の結果が、Fig. 12である。ここで、正の遅延時間の関係は、波動の上昇波の特性を抽出し、負の遅延時間は、下降波の特性を抽出している。水平動の下方からの波動特性においては、中心周波数がそれぞれ6.25, 3.125, 1.5625Hzの波動に対する相関を抽出した結果を表したものである。

このような波動での-83mにおいて自己相関のピーク間の時間遅れ量を分解係数j=-3~-5でみると、EW

成分では、1.60,1.84,2.24 秒である。

次に図中の●の結果から、大体-83mから上方に向かって波動が伝播している様子がよみとれるが、分解係数 $j=5$ の結果では、-32mの波動が逆位相の伝播特性となっている。この状態は、2点間での上昇・下降波の相関が $j=5$ の対応する周波数で逆位相となっていることを示している。また、分解係数 $j=4$ の結果においては、地表面との波動が、他の分解係数での時間遅れの値に較べ非常に大きな値となっている。ここで分解係数 $j=4$ および-3の場合、0m、-16m、-32mの結果をみれば、-83mの結果と負の遅延時間の相関が大きく異なっている。すなわち、上昇してきた波動成分が反射して下降する波動成分となることにより、その特性が変化したことを意味する。換言すれば、 $j=4$ 、-3では、上昇波の最初の部分は弾性的な領域にあり、下降波の波頭は非線形状態の媒質中を伝播している様子を-32mぐらいまで示していると考えられる。

一方、 $j=5$ 、すなわち、1.6Hz近傍に中心周波数をもつバンドパスフィルターを通過した波の特性の場合は、上昇波の波形特性と下降波の波形特性がほぼ同じ形となっていることを示している。換言すれば、周波数の高い(波長の短い)領域の波動成分は対象とする地盤内に液化化による土要素の非線形挙動の波動が現れる。しかし、周波数が少し低い(波長の長い)領域の波動では非線形応答の影響をあまり受けていない特性が現れていると推察される。

分解係数の中で $j=3\sim 5$ のUD成分の結果が、Fig. 13である。UD成分の波動で-83m位置での自己相関のピーク間の時間遅れ量を分解係数 $j=3\sim 5$ でみると、1.60, 1.44, 3.36秒という結果になっている。同じようなバンドパスフィルター処理された波形であるが、 $j=4, 5$ においてEW成分とUD成分での相関の強い時間遅れ量が異なっている。

UD成分の結果では、分解係数 $j=5$ でのピークの時間遅れは、下方から-16mまで最大のピーク値の位相の変化がほとんど無いが、地表面において逆位相で約1秒の時間遅れを生じている。一方、 $j=4$ では、-32m、-16m、0mに対しては、逆位相の状態下方に伝播しながら正の時間遅れ量が少し大きくなっている。この状態は、地表から下方に向かうほど波が遅れて伝播している様子を示しており、表面波の影響の可能性も考えられるが確定できない。さらに、負の時間遅れと正の時間遅れの特性が大きく異なっており、液化化の影響を受けているようにみえる。次に、 $j=3$ の結果は、表層の中間部-16m、-32mにおいて逆位相の相関を示し、 $j=4$ と同じように正負の時間遅れの特性を示している。このように逆位相の相関が周波数の高い

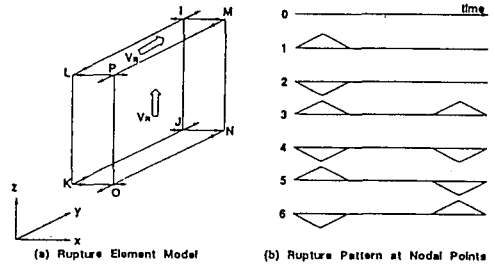


Fig. 14 Fault model of the 3D-FEM in this study

Table 4 Assumed ground material constants

	P-velocity [km/sec]	S-velocity [km/sec]	Specific Gravity
Surface Layer	1.6	0.35	1.7
Bedrock	5.4	3.20	2.7

各分解係数において生じているのは、EW成分の結果と大きく異なり、水平動と上下動において波の種類が異なる可能性を示している。

以上のFig. 12およびFig. 13における挙動をまとめて説明すると次のようになる。ウエブレット分解処理された波形の相互相関関数をみれば、下方から上方に伝播した波動が、地表面で反射し、逆に下降波となって伝播する様子をよく現している。液化化による下降波の波形の乱れは、分解係数の小さい方、すなわち、中心周波数の高い方において比較的明瞭に現れていた。その深さ方向の影響は、-32mにまで達していたと推察される。

## (2) 水平アレー特性

得られた水平アレー観測の結果を考察するため、簡単な3次元有限要素法(3D-FEM)を用いた数値シミュレーションを実施した。ここで3D-FEMによる数値シミュレーションを用いたのは、水平アレー観測データが少なく、また、観測位置が断層のごく近傍のものもあり、これらの影響の概略的な把握に有効であると考えたからである。ところで、Fig. 10~11に示した結果は、分解係数 $j=7\sim 10$ での中心周波数(約0.4Hz~0.05Hz)に対して有意な値を与えている。さらにこのような周期の長い地震動の特性は、タンク構造物のスロッシング現象において重要な意味をもっている。

まず、対象とする3D-FEMは、深さ方向には、

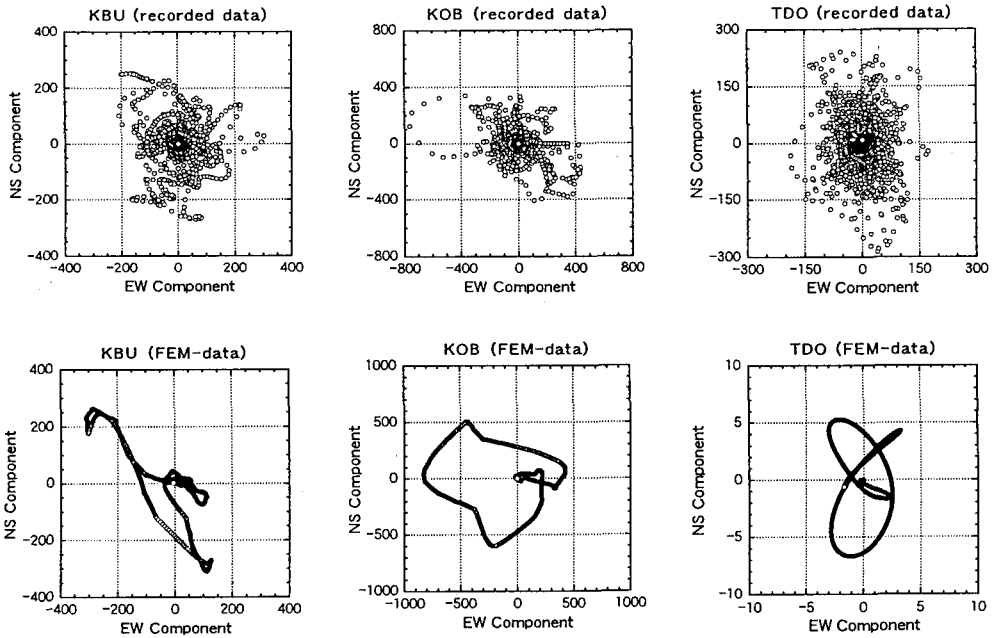


Fig. 1 5 Acceleration traces to the horizontal array sites by the numerical results

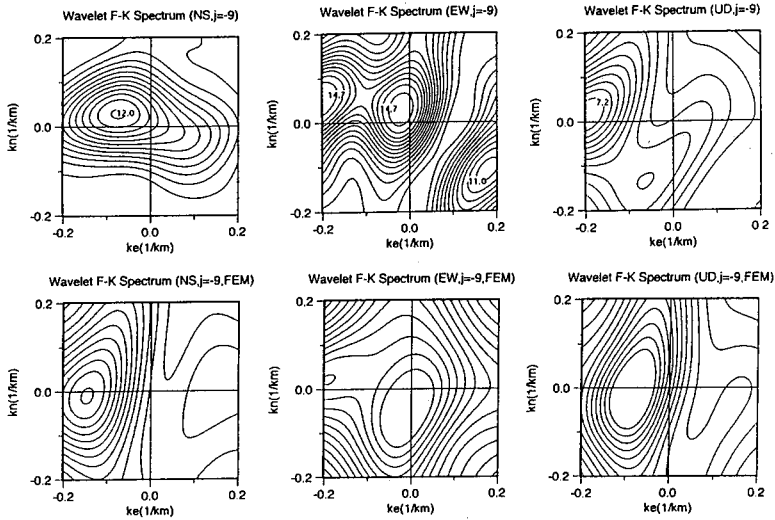


Fig. 1 6 Wavelet F-K spectra to each direction by the numerical results ( $j=9$ )

20kmまでとし、Fig. 2に示した領域に対して行う。対象地域の基盤は、香川ら<sup>34)</sup>の2次元3次Bスプライン曲線により評価されたものを用いた。表層は、単層のものでモデル化し、材料定数は、Table 4のような値に設定している。平面での要素のメッシュ間隔は、用いた基盤が、12km x 12kmのデータから曲線近似されており、また、大阪湾の基盤形状からx方向には2.5km間隔で、y方向には、5km間隔にしている。ただし、断層域の部分は、1.25kmに採っている。断層域の設

定は、いくつかの提案があるが、ここでは、入倉<sup>35)</sup>が提案しているモデルを少し簡略化した領域を設定している。次に、断層モデルは、Fig. 1 4 (a)に示す矩形要素に矢印方向の双モーメントを作用している。さらに、断層要素での作用させる強制加速度は、Fig.1 4 (b)に示すような三角波とし、最大変位は、2.0mに設定している。破壊伝播速度は、3.0km/secとして、震源の要素から水平と鉛直上方に向かって伝播させている。ここで、三角波の継続時間は、対象要素が比較的大寸法である

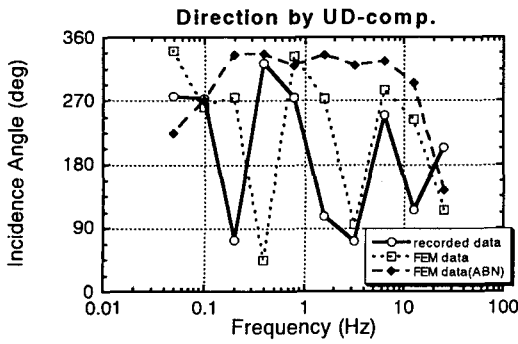


Fig. 17 Apparence phase velocities due to UD component

ため5秒としている。なお、Fig. 1 4 (b)は、断層要素に相当する節点での強制加速度パターンを示している。

次に、各観測位置での時刻歴応答を観測データ (FEM-data) としてウェブレット F-K スペクトルを求める。この結果は、断層を含んだ水平アレーのモデルであり、実測データと対比できる。一方、断層の東側の ABN 近傍に 7 点の水平アレー (Fig. 2 中●) を組んだ時刻歴応答のデータ (FEM, ABN-data) は、アレー観測データに断層による分断の影響を除いたものとして用いる。

まず Fig. 1 5 は、観測位置 KBU, KOB, TDO での水平加速度軌跡を観測値と対比させたものである。FEMモデルの断層破壊パターンは、簡単な三角波であり、長周期を対象にした数値シミュレーションであるが、大きく揺れている方向は比較的似た傾向を示している。

Fig. 1 6 は、分解係数  $j=9$  での数値シミュレーションによるウェブレット F-K スペクトル例を観測値と対比させたものである。この場合についても概略的には似た特性が得られている。

ここで Fig. 1 0 および 1 1 の結果を考察するためこれに対応した UD 成分の Fig. 1 7 および Fig. 1 8 を数値シミュレーションより求めた。

ウェブレット F-K スペクトルから求められた観測位置への入射方向の Fig. 1 0 は、観測位置が波源となる断層域を含んでいるので、断層域の破壊によりその伝播してくる方向が変化する。また、式(10)によって評価されるビーム波は、MRGを座標原点とした重み付けのあるアンサンプル平均でスムージング処理されるが、断層近傍における観測位置のスペクトル特性の影響がビーム波の特性として支配的になると推測される。

いま Fig. 1 7 の結果をみるとビーム波動の入射角度

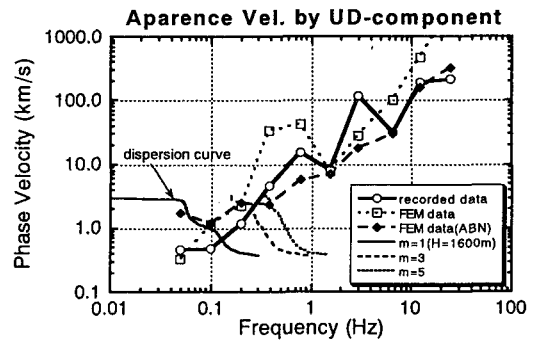


Fig. 1 8 Apparence propagating directions due to UD component

は約  $90^{\circ} \sim 330^{\circ}$  に変動している。観測位置 KBU や KBO が断層での波源からの入射角は約  $50^{\circ} \sim 240^{\circ}$  であるが、SKI や TDO では約  $260^{\circ} \sim 355^{\circ}$  となる。一方、ABN-dataによるビーム波の入射角は  $j=-1$  に相当する周波数を除いて約  $225^{\circ} \sim 335^{\circ}$  となっている。この場合の各観測位置での入射角度は、約  $240^{\circ} \sim 340^{\circ}$  となる。このようにビーム波のアンサンプル平均される観測データが断層域を含む場合、入射角度はその影響を強く受ける。また、入射角度は大断層での波源と観測位置との位置関係からその範囲を推定できるが、断層でのラディエーションパターンの影響と思われる差が認められる。

次に Fig. 1 8 には、表層厚 1600m におけるモード  $m=1,3,5$  でのレイリー波の分散曲線を見かけ上の位相速度と重ねて図示している。図中の ABN-data による  $j=-10 \sim -7$  に相当する周波数においてこのレイリー波の分散曲線とよく合っており、表面波に相当する特性結果とみなせる。したがって、記録されたデータによる見かけ上のこの部分の位相速度は、表面波による特性を表していると推測される。なお、それ以外の周波数の高い領域で見かけ上の位相速度が基盤での P 波速度  $5.4 \text{ km/s}$  より大きくなるのは、地震波が各観測位置へ下方からほとんど同時に入射することにより位相遅れをほとんど生じないためである。

## 5. 結言

本研究においては、兵庫県南部地震において観測された鉛直アレーおよび水平アレーの記録を用いて、その波動特性を調べてみた。解析手法は、ウェブレット解析による波動解析であり、具体的には、ウェブレット相互相関関数およびウェブレット F-K スペクトルによる特性抽出を行った。本解析法は、分解係数に

よって定まる周波数帯域ごとの波動特性の抽出であり、従来の相互相関関数やF-Kスペクトルによる解析法に対してその優位性をもった解析法としての位置づけでなく、これらの解析法の補完的な特性抽出法である。ただし、一般にウエブレット解析においては、解析されるデータの不連続の生じる時刻の抽出などに周波数の高い分解係数での有用性が示されている。一方、本研究においては、表面波と推測される抽出には、周波数の低い分解係数での有用性を示している。

本研究で得られた結果には、次のようなことが挙げられる。

- (1)鉛直アレー記録においてウエブレット相互相関関数の結果より、波動は、上下方向の実体波の上昇および下降波の存在が認められた。
- (2)鉛直アレー記録のウエブレット相互相関関数の結果より、下降波の波形の乱れが認められ、液状化による非線形挙動と推察できた。液状化の深さ方向の拡がり、周波数帯域が高いところで-32mの深さまで影響していた。
- (3)水平アレー記録のウエブレットF-Kスペクトルによる位相速度の結果より、周波数の低いところで表面波によると推測される波動特性が抽出された。
- (4)水平アレー記録のウエブレットF-Kスペクトルにより入射角度の結果より、断層からの距離および断層の破壊する走向が、入射角度に影響していた。

謝辞：最後に、ここで使用した地震記録は、関西地震観測研究協議会の好意により配布されたものを用いた。ここに、謝意を表す次第である。

#### 参考文献

- 1) 東京都：阪神・淡路大震災調査報告書、1995。
- 2) (社)建設コンサルタンツ協会：阪神・淡路大震災被害調査報告書、1995。
- 3) 神戸大学工学部建設学科土木系教室兵庫県南部地震学術調査団：神戸大学兵庫県南部地震緊急被害調査調査報告書(第1報)、1995。
- 4) 日本建築学会：1995年兵庫県南部地震災害調査速報、1995。
- 5) 土木学会：阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、1996。
- 6) 土木学会関西支部：阪神・淡路大震災調査研究委員会中間報告書講演集、1996。
- 7) Iwata, T., Hatayama, K., Kawase, H., Irikura, K. and Masunami, K.: Array observation of aftershocks of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake at Higashinada Ward, Kobe city, Journal of Natral Disaster

Science, Vol.16, No.2, pp.41-48, 1995.

- 8) Ide, S., Takeo, M. and Yoshida, Y.: Source Process of the 1995 Kobe Earthquake: Determination of Spatio-Temporal Slip Distribution by Bayesian Modeling, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.8, No.3, pp.547-566, 1996.
- 9) 時松孝次, 新井洋, 酒井潤也, 仲條有二: 微動アレー観測から推定した釧路気象台と釧路港湾の地震特性と地震動特性, 第9回日本地震工学シンポジウム, pp.163-168, 1994.
- 10) 末富岩雄, 松原智樹, 山口勝弘, 稲童丸征巳, 吉田望: 釧路市緑ヶ丘～三原地区における常時微動アレー観測により求めた浅層地盤構造, 第9回日本地震工学シンポジウム, pp.151-156, 1994.
- 11) 盛川仁, 亀田弘行: 地震動場におけるパワースペクトルの確率論的挿入, 第9回日本地震工学シンポジウム, pp.259-264, 1994.
- 12) 中村博一, 山崎文雄: アレー観測記録に基づく表層地盤内の水平空間変数パラメータ, 第23回地震工学研究発表会講演概要, pp.21-124, 1995.
- 13) 川上英二, 西一彦, 茂木秀則: アレー観測記録を用いた最大加速度の空間分布に関する研究, 第23回地震工学研究発表会講演概要, pp.125-128, 1995.
- 14) 泉谷恭男: 千葉アレーにおけるS波の震動卓越方向とその空間的変動, 土木学会論文集, No.531/I-32, pp.87-92, 1996.
- 15) 堀家正則: 微動の位相速度及び伝達関数の推定, 地震, 第2, 第33巻, pp.425-442, 1980.
- 16) 石川滝二, 家村浩和, 五十嵐風, 高橋卓也, 中西伸二: 明石海峡大橋近傍におけるアレー地震観測記録のビームフォーミングに基づく地震動伝播解析と地震動波形の推定, 第23回地震工学研究発表会講演概要, pp.129-132, 1995.
- 17) 田中泰雄: 埋め立て地盤の地震時の挙動についての一考察, 建設工学研究所報告, 阪神・淡路大震災特集号, pp.19-28, 1995.
- 18) 岡二三生, 八嶋厚, 田口洋輔, 立石章, 古川浩司, 福嶋研一: 鉛直アレー観測記録を用いたポートアイランドの連成3次元液状化解析, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 土木学会, pp.137-144, 1996.
- 19) Sugito, M., Sekiguchi, K., Yashima, A., Oka, Y., Taguchi, F. and Kato, Y.: Correction of orientation error of borehole strong motion array records during the South Hyogo Earthquake of Jan. 17, 1995, 土木学会論文集, No.531/I-34 pp.41-63, 1996.
- 20) Cubrinovski, M. and Ishihara, K.: Assessment of the Kobe Port Island Liquefaction Through

- Analytical Simulation of the Vertical Array Records, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 土木学会, pp.157-164,1996.
- 21) 仙頭紀明, 鈴木猛康: ポートアイランドの鉛直アレー観測記録を用いた1次元有効応力解析, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 土木学会, pp.165-168,1996.
- 22) 鄭京哲, 大保直人: 兵庫県南部地震におけるポートアイランド地震応答の有効応力解析, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 土木学会, pp.169-174,1996.
- 23) 佐々木文夫, 前田達哉, 山田道夫: "ウエーブレット変換を用いた時系列データの解析", 構造工学論文集, Vol.38B, pp.9-20,1992.
- 24) Yomogida, K.: Detection of anomalous seismic phases by the wavelet transform, *Geophysical Journal International*, Vol.116, pp.119-130,1994.
- 25) 曾根彰, 山本鎮男, 増田新, 中岡明, 芦野隆一: 出力のウエーブレット変換と印加入力および物理系間の正則性 (Daubechies の正規直交ウエーブレットについて), 日本機械学会論文集 (C編), 61巻, 589号, pp.108-114,1995.
- 26) 曾根彰, 山本鎮男, 増田新, 中岡明, 芦野隆一: 強震記録のウエーブレット解析による履歴復元力特性を有する建築物の累積損傷の推定, 日本建築学会構造系論文集, 第76号, pp.67-74,1995.
- 27) 土岐憲三, 入倉孝次郎, 岩崎好規, 香川敬生: 平成7年度兵庫県南部地震による関西地震観測協議会の観測記録, 第30回土質工学研究発表会, pp.97-98,1996.
- 28) 宮脇幸治郎, 土岐憲三: ウエーブレット解析による地震波動特性に関する一考察, 土木学会論文集, No.525/I-33, pp.261-274,1995.
- 29) 前出19).
- 30) 松島信一, 川瀬博: 兵庫県南部地震の関西地震観測競技会の阪神観測点の飽和記録の復元に関する検討, 清水建設和泉研究室, 1995.
- 31) 山下典彦, 土岐憲三, 澤田純男: 兵庫県南部地震の神戸本山における振り切れ記録再現に関する基礎的検討, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第I部 (B), I-613, 1995.
- 32) 香川敬生, 澤田純男, 岩崎好規, 南荘淳: 大阪堆積盆地における深部地盤構造のモデル化, 第22回地震工学研究発表会講演概要, pp.199-202,1993.
- 33) 前出21).
- 34) 前出32).
- 35) 入倉孝次郎: 強震動生成メカニズム, 阪神・淡路大震災調査研究委員会中間報告会講演集, pp.15-22,1996.

(1996.12.26 受付)

## BASIC STUDIES ON WAVE PROPERTIES OF THE SOUTHERN HYOGO-KEN EARTHQUAKE BY THE WAVELET TRANSFORM

Kojiro MIYAWAKI and Kenzo TOKI

This paper deals with the wavelet analysis for the records of vertical and horizontal arraies on the Southern Hyogo-ken Earthquake .The analysis is to calculate the wavelet cross correlation function (WCCF) and wavelet frequency-wave number spectrum (WFKS) for the object earthquake waves and is to investigate the fundamental properties of the wave propagations.In addition,we carry out the numerical simulation by the rupture propagation of the fault having the earthquake source on the 3DFEM of the Osaka bay area and compare the properties of the wave propagation.