



## 地震波に関するウェブレットF-Kスペクトル解析

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-12-10 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 宮脇, 幸治郎 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24729/00007747">https://doi.org/10.24729/00007747</a>

# 地震波に関するウェレット F-K スペクトル解析

宮脇幸治郎\*

## Wavelet F-K Spectral Analysis on Seismic Waves

Kojiro MIYAWAKI

### ABSTRACT

This paper deals with the wavelet analysis for the records of horizontal arrays on the Southern Hyogo-ken Earthquake. The analysis is to calculate the wavelet cross correlation function (WCC) 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.

**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)</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>2)</sup>が発表されてきている。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>3),4)</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>5)</sup>や末富・松原・山口・稲童・吉田<sup>6)</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。玉井・堀家・竹内・鈴木・植竹<sup>7)</sup>は、鉛直アレー観測記録を用いて強震時の表層地盤の

液状化に伴うものは考慮しないで非線形性を確認している。盛川・亀田<sup>8)</sup>は、確率論的に一様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論的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。岡本・沢田・平尾・辻原<sup>9)</sup>は、鉛直アレー観測記録から地盤のS波速度およびQ値の部分同定を行い、S波速度の同定は良い結果を得ているが、Q値については、ばらつきをもつことを示している。安中・都築・増田・嶋田・岡留<sup>10)</sup>は、鉛直アレー記録を用いてベイズ的インバージョン手法で表層地盤の剛性率と減衰定数のひずみ依存性を検討している。中村・山崎<sup>11)</sup>は、地震動の空間変動に着目し、地中での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、コヒー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>12)</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>13)</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。石川・家村・五十嵐・高橋・中西<sup>14)</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。

ウェレット解析に関する地震波に対する適用には、佐々木・前田・山田<sup>15)</sup>は、1985年のメキシコ地震を例に採り、記録された地震波のピーク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。

1997年4月9日受理

\*建設工学科(Department of Civil Engineering)

また、彼らは、ウエブレットスペクトルとパワースペクトルの高次成分の勾配との関係を調べている。次にYomogida<sup>16)</sup>は、同じメキシコ地震のLa Unionのデータを用いて、ウエブレット解析している。ここでは、ウエブ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。著者ら<sup>17),18)</sup>は、十勝沖地震の地震波記録のデータを採り、これを従来のフーリエ解析と対比しながら離散ウエブレット解析を行い、その基本的特性を調べている。さらに、曾根・山本・増田・中岡・芦野<sup>19),20)</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>21)</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、まず、ウエブレット相互相関関数およびウエブレットF-Kスペクトルを定義する。次に、実際の地震波に対して適用する水平アレーに関するデータは、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でいる。本研究は、このような地震波に対して周波数-波数 (F-K) スペクトルの解析を行い、その特性を調べる。さらに、3次元有限要素法 (3DFEM)において、入倉<sup>22)</sup>が推定している3箇所の断層位置を簡略化した断層モデルを設定し、長周期成分の波動特性をみるための断層破壊モデルを震源要素から水平と鉛直上方に伝播させて比較している。

## 2. ウエブレット変換による基礎式

### 2. 1 ウエブレット相互相関関数

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

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

と定義<sup>23)</sup>されている。このとき、

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi_{j,m}(u) \overline{\psi_{j',m'}(u)} du = \delta_{jj'} \delta_{mm'} \quad (2)$$

なる関係になっている。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。

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= \sum_j \sum_m D_{jm}^x \psi_{jm}(t) \\ y(t) &= \sum_j \sum_m D_{jm}^y \psi_{jm}(t) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

これらの2つの関数の相関関数は、次式のように定義できる。

$$R(\tau) = \langle x(t), \bar{y}(t+\tau) \rangle \quad (4)$$

ここに、 $\langle \quad \rangle$ は内積を意味する。

式(4)は、式(2)の関係を用いると、

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \sum_j \sum_m \sum_{j'} \sum_{m'} D_{jm}^x \bar{D}_{j'm'}^y \delta_{jj'} \delta_{m,m'+2^{-j}\tau} \\ &= \sum_j \sum_m D_{j,m-2^{-j-1}\tau}^x \bar{D}_{j,m+2^{-j-1}\tau}^y \\ &= \sum_j W_{xy}(\tau) \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、

$$W_{xy}(\tau) = \sum_m D_{j,m-2^{-j-1}\tau}^x \bar{D}_{j,m+2^{-j-1}\tau}^y \quad (6)$$

となる。

式(6)は、分解次数 $j$ における相関関数であり、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(6)の下添字部を次のようにおく。

$$\left. \begin{aligned} t_x &= m - 2^{-j-1}\tau \\ t_y &= m + 2^{-j-1}\tau \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(7)の変数 $m$ は時刻を意味するが、具体的な解釈に際しては、分解次数 $j$ 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(6)を算定し、 $W_{xy}(\tau) - t_x - t_y$ の等高線表示すると図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 $\tau$ での値 $W_{xy}(\tau)$ を示している。

### 2. 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の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。

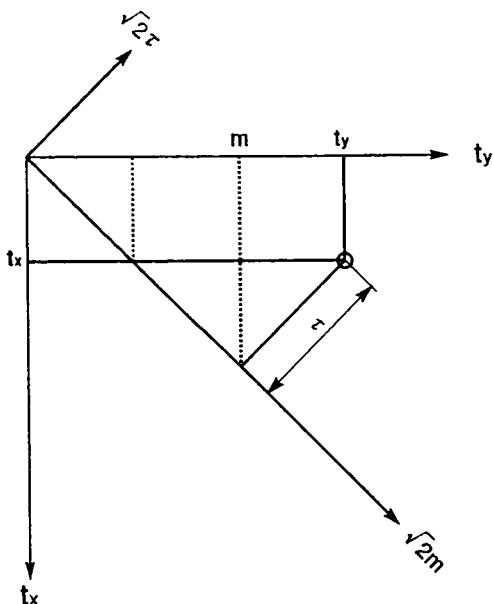


図1 ウェブレット相互相関関数に対する表示座標系

いま、任意な地点kでの水平2成分の波動  $\alpha_k(t)$  が式(3)と同様の展開表示ができる。

$$\alpha_k(t + \tau_k) = \sum_j \sum_m D_{jm}^k(t + \tau_k) \quad (8)$$

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。

$$G(t) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \alpha_k(t + \tau_k) \quad (9)$$

式(9)の波動の自己相関関数は、次式のようになる。

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \langle G(t), \bar{G}(t - \tau) \rangle \\ &= \frac{1}{n^2} \left\langle \left\{ \sum_{k=1}^n \alpha_k(t + \tau_k) \right\}, \left\{ \sum_{l=1}^n \bar{\alpha}_k(t + \tau_l - \tau) \right\} \right\rangle \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、式(10)のフーリエ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、

$$\begin{aligned} S(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{i\omega\tau} d\tau \\ &= \frac{1}{n^2} \sum_k \sum_l \sum_j \sum_m \sum_{j'} \sum_{m'} D_{jm}^k \bar{D}_{j'm'}^l \\ &\quad \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{jm}(t + \tau_k) \bar{\psi}_{j'm'}(t + \tau_l - \tau) dt d\tau \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)における積分部分の演算は、次式のように評価できる。

$$\begin{aligned} &\int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega\tau} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{jm}(t + \tau_k) \bar{\psi}_{j'm'}(t + \tau_l - \tau) dt d\tau \\ &= e^{i\omega(\tau_k - \tau_l)} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega\tau} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{jm}(t) \bar{\psi}_{j'm'}(t - \tau) dt d\tau \\ &= e^{i\omega(\tau_k - \tau_l)} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega\tau} \delta_{j,j'} \delta_{m,m'+2-j} \tau d\tau \\ &= e^{i\omega(\tau_k - \tau_l)} \delta_{j,j'} e^{i(m-m')2^j \omega} \end{aligned} \quad (12)$$

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(11)は、次式のように表現できる。

$$\begin{aligned} S(\omega) &= \sum_j \sum_m \left[ \frac{1}{n^2} \sum_k \sum_l \hat{D}_{jm}^k \hat{D}_{j'm'}^l e^{i(X_k - X_l) \cdot k} \right] \\ &= \sum_j S_j(\omega) \end{aligned} \quad (13)$$

ここに、

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

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、分解次数jにおける相互スペクトルを意味し、 $S_j(\omega)$  は、ウェブレット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インドウにより平滑化して評価する。また、ウェブレット変換によるウェブレットF-Kスペクトルの周波数は、分解次数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次数ごとに  $S_j(\omega)$  が推定されることになる。

### 3. 解析結果

#### 3.1 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、図2に示す場所にある。ここに、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

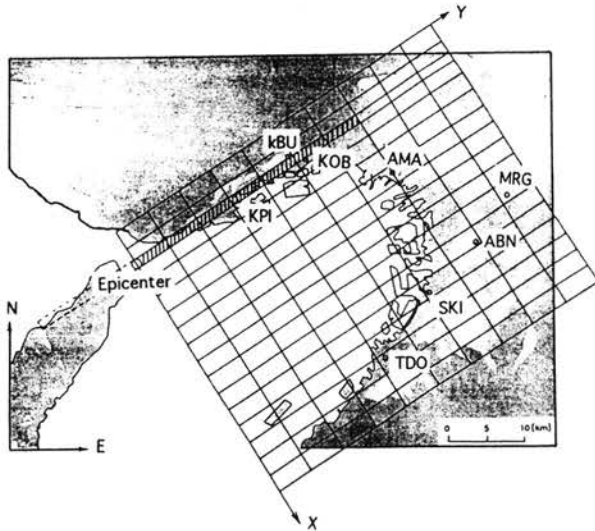


図2 対象地域および観測記録位置

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, 表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>24)</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>25)</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(表2).

### 3. 2 水平アレーに対する解析結果

#### (1) 相関関数

ウェレット相互相関の結果に対しては, 分解次数  $j=3$  の EW 成分の東西方向のアレー結果例が, 図3である. 図は, KBUとのウェレット相関をとっている. 負の分解次数が小さく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とりが難しいので, 実際の値の読みとりには, カラーの濃淡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, 表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  $\Delta t_p$  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  $\Delta t_{pwc}$

表1 観測位置に対する関係

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

表2 復元速度および加速度

		NS	EW	UD
KOB	CERKA	40.0	40.0	40.0
		421.0	774.9	379.3
	Matushima-Kawase	57.9	51.9	37.9
		426.6	583.3	613.3
This study	61			
	474			
AMA	CERKA	56.9	74.6	49.4
		407.5	762.4	363.3
	This study	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]

表3 水平アレーにおける2観測点間の相互時間差

	Time History			OCF	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 first peak point of the wavelet-CCF

とよく一致している. これは, P波に関する時刻の情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, 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.

#### (2) 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, 図4および5に示す. 図4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

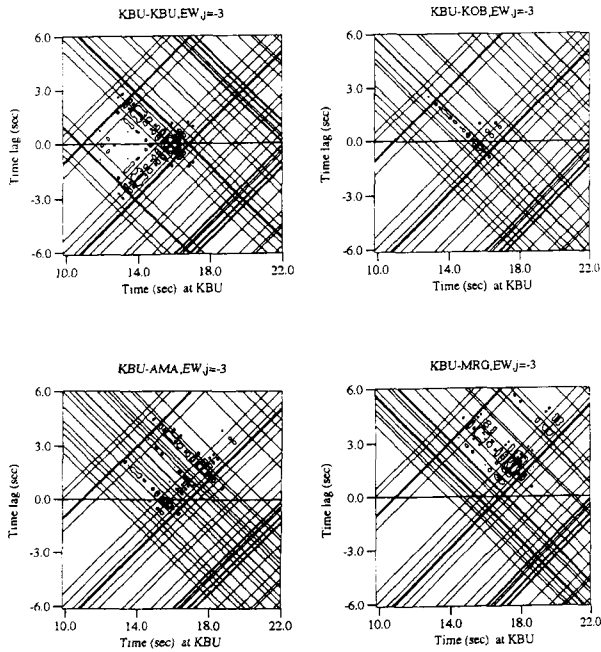


図3 水平アレー記録に対するKBUとのウェレット相互相関関数 (j=3)

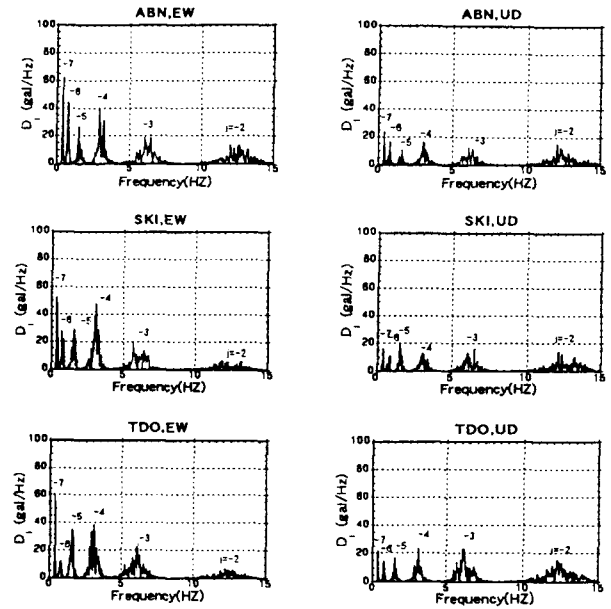


図5 水平南北方向アレーに対するウェレットフーリエスペクトル

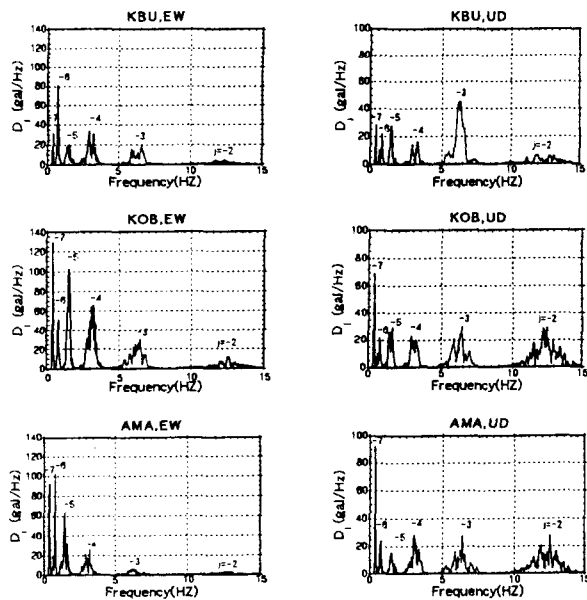


図4 水平東西方向アレーに対するウェレットフーリエスペクトル

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、図5の結果より、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一様な強さを示している。これらの

傾向は、図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、式(14)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るが、表面波のうちレイリー波を検出するためには、UD成分が用いられる。そこでUD成分の分解係数 $-5 \sim -10$ に対して、MRGを座標原点とし、東西・南北方向の座標軸に対する結果は、図6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。図6は、等高線の頂部までの距離が、見かけ上の伝播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。また、NS、EW成分に対するウェレットF-Kスペクトルの結果に対してもUD成分とほぼ同じ傾向を示していた。これらを、分解係数との関係で図示したのが、図7および8である。図8は、見かけ上の伝播速度を示し、図中一点鎖線は、見かけの伝播速度が $5.4km/sec$ に引いている。

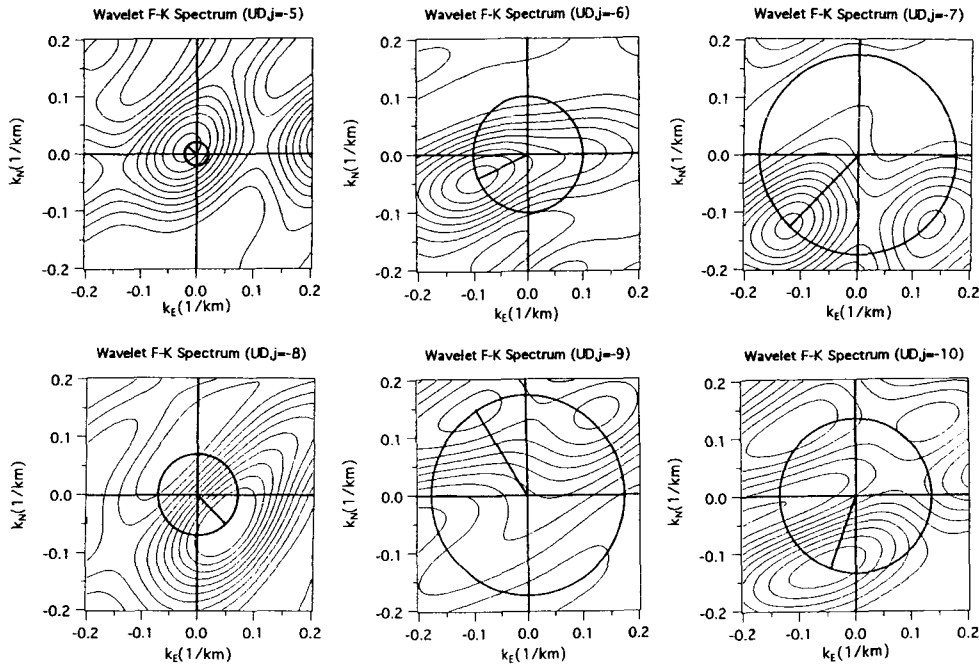


図6 水平アレーに対するウェレットF-Kスペクトル

ウェレットF-Kスペクトルから得られた見かけ上の伝播速度は、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>26)</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を参考に一点鎖線を引いている。

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、図7に示されたウェレット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）により大きく変わっていることに対応しているものと考えられる。

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、800m～1400mにひろがっており、また、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。図8の結果は、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が、分解係数 $j=7\sim 10$ （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

ここで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（3DFEM）を用いて数値シミュレーションを実施した。ところで、図6～8に示した結果は、分解係数 $j=7\sim 10$ での中心周波数が約0.4Hz～0.05Hzに対して有為な値を与えている。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。したがって、対象とする3DFEMは、深さ方向には、20kmまでとし、図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>27)</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、表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、12kmx12km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>28)</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、要素に作用させる断層モデルについても、図9(a)に示すような比較的簡単なものを作成している。そして、断層要素での作用させる強制加速度は、図9(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。三角波の継続時間は、対象要素が比較的大寸法であるため5秒としている。

このような簡単なモデルによる数値シミュレーション

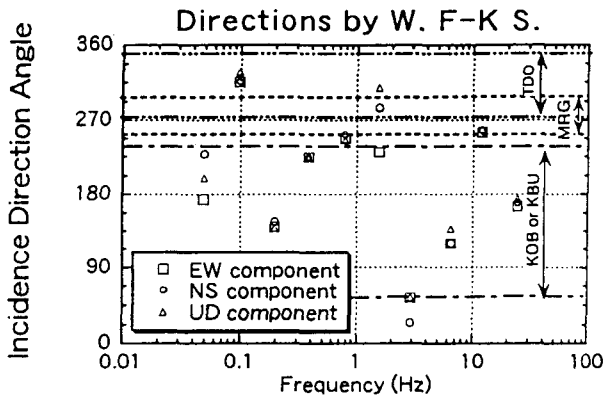


図7 ウェブレットF-Kスペクトルから求めた伝播方向

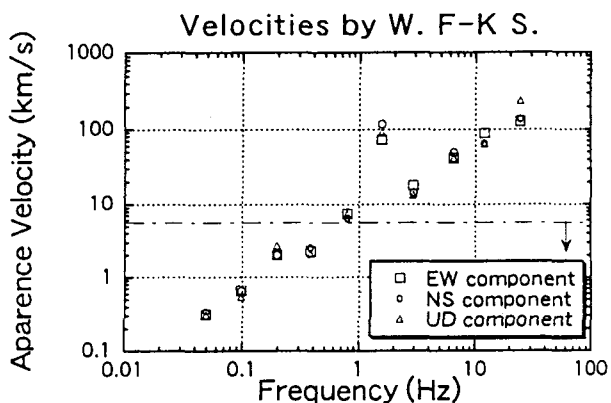


図8 ウェブレットF-Kスペクトルから求めた見かけ上の伝播速度

ンを実施することにより、水平アレーにより求められた波動特性を考察してみる。

まず図10は、対象地域でのX方向波動成分を左の列に、y方向波動成分を右の列に示している。震源において最初に破壊が始まってから10,20,30秒後の様子である。濃淡は、[-1000,1000],[ -2000,2000],[ -500,500] galの範囲で表示している。シミュレーションの結果、断層上を破壊が進むにつれて、XおよびY方向の成分は、ともに、東の方向に波動が伝播している様子がわかる。そして、30秒後のY方向の成分は、大阪湾の堆積層の深い領域の揺れの様子も示している。

次に、各観測位置での時刻歴応答結果は、図11に示すようになる。KOBの最大値の結果が、大きく、KBUの結果の2倍以上の値を示しているが、位相のずれは、ほぼ180°となっている。MRG等の南北方向の値がかなり小さな値となっている。

次に、KBU、KOB、AMA、TDOにおける平面方向の加速度軌跡の結果は、図12のようになる。数値シミュレーションの結果表示は、3DFEMモデルの領域を図2のように設定しているため、NS-EW方向と異なり、少し見難くなっている。また、非常に周期の長

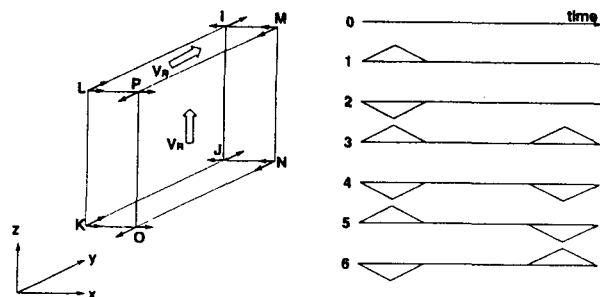


図9 水平アレーによる波動伝播特性検討のための断層モデル

表4 3DFEM で用いられた地盤定数

	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

い波動軌跡を示しているが、シミュレーションの結果は、主要動の波動方向を比較的是っきり示し、実際の記録による軌跡と異なって見える。ただし、実際の軌跡は、すべての波動特性を記録しているの、最大値を示す軌跡部分をみれば、大体の傾向を示している。

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図7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。そして、これらの図は、数値シミュレーション結果の図7に対応することになる。すなわち、図7の約0.1Hz(j=9)に対応する観測位置は、断層からの伝播方向より、TDOの特性であり、これに対応する推定された位相速度は、0.55km/secとなつてなる。一方、数値シミュレーションによる周波数は約0.125Hzであり、図12による卓越している方向は、約320°となつており、ほぼ対応がとれている。同様に、図7の約0.05Hz、0.20Hz、0.38Hzに対応する観測位置は、KOBまたは、KBUであり、対応する位相速度は、0.36km/sec、2.77km/sec、2.11km/secとなつている。また、伝播してくる方向は、それぞれ224°、139°、200°となつている。図12の軌



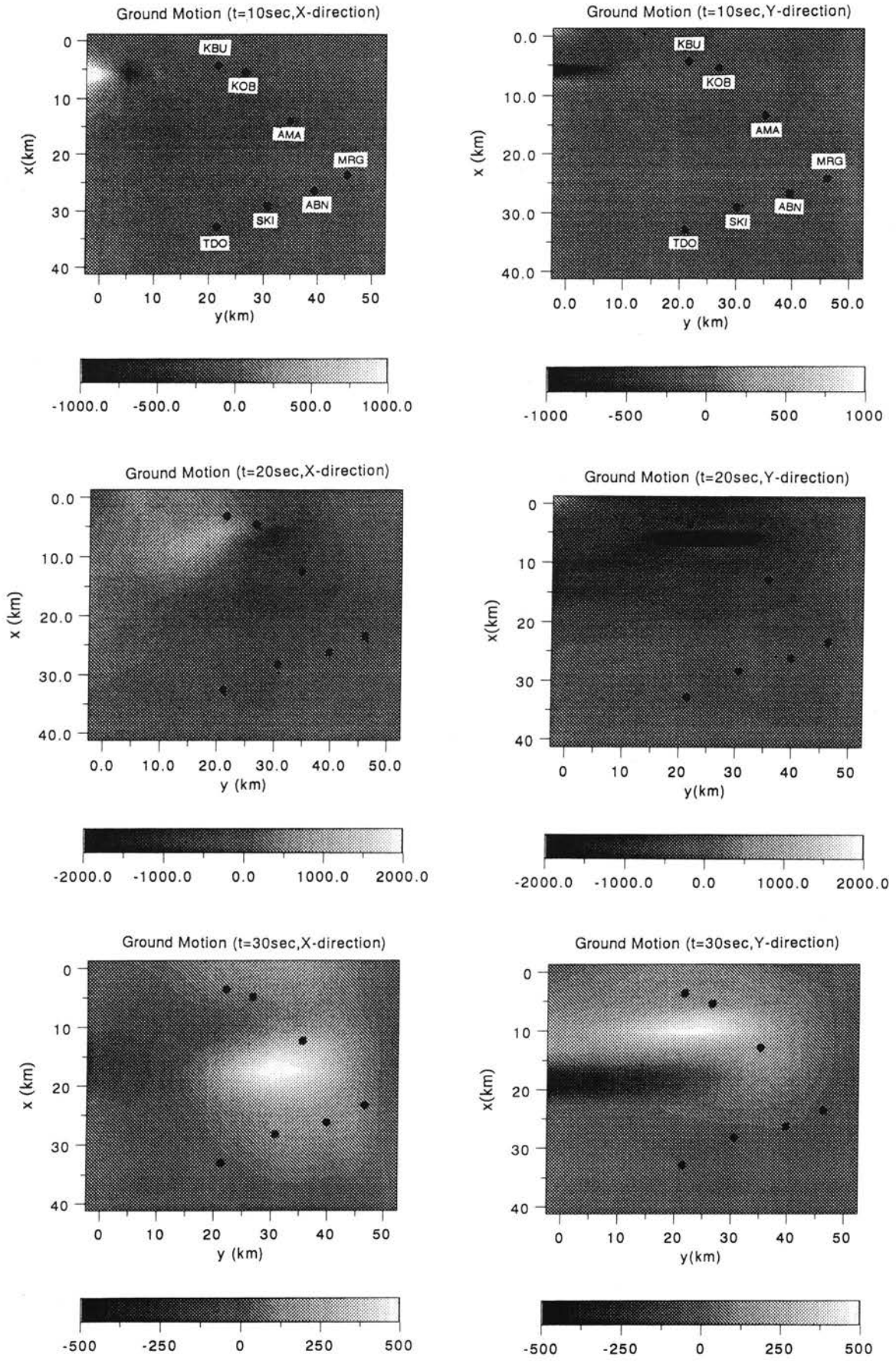


図10 数値シミュレーションによる平面上的波動伝播

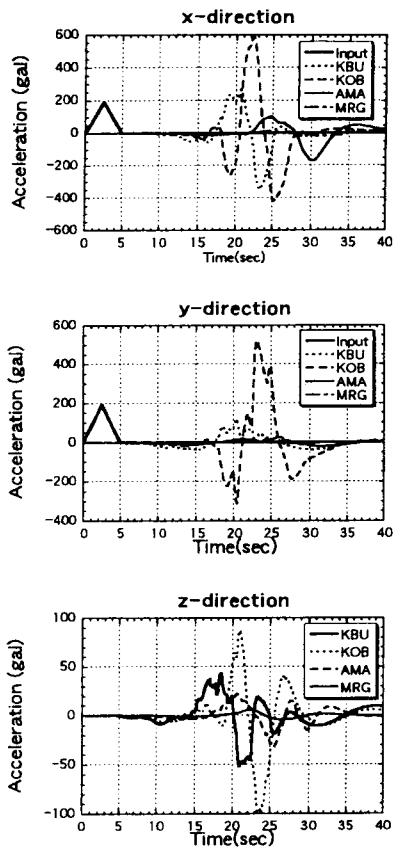


図11 数値シミュレーションによる観測位置での加速度時刻歴

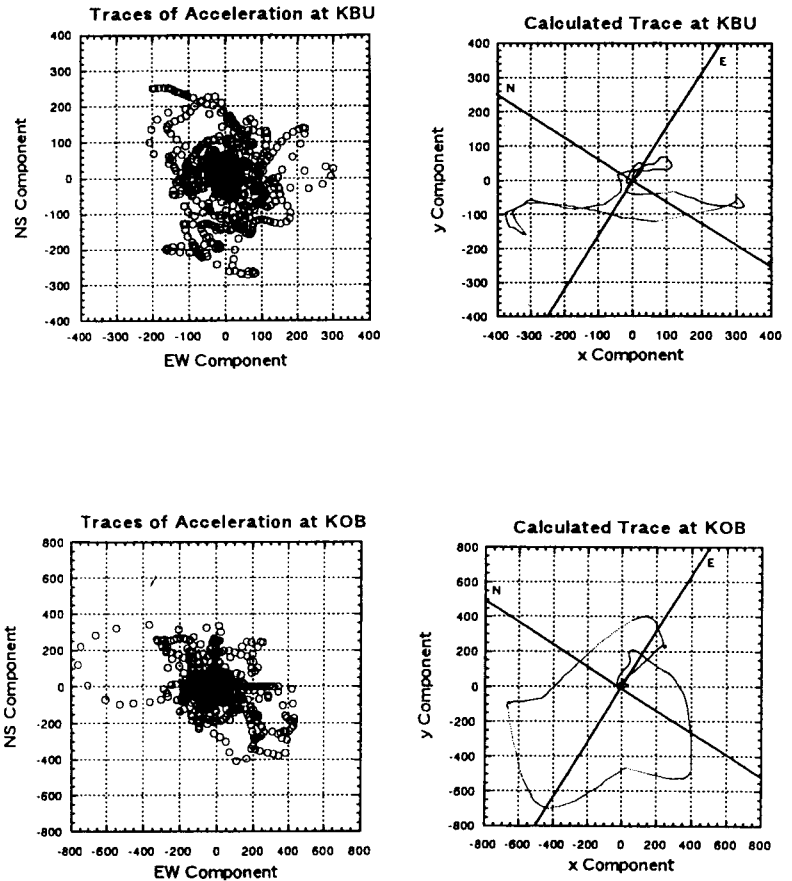


図12 数値シミュレーションによる水平アレー観測位置での加速度軌跡

跡の結果は、 $270^\circ$  を中心に大きく膨らんだ形状をして、若干差がある。しかし、図11の数値シミュレーションによるUD成分の波形結果をみると、最初の1波目から順にその周波数は、0.2, 0.32, 0.065 Hzと変化しているように読みとれ、比較的良好な対応を示している。

ウェブレットF-Kスペクトルは、7観測位置の平均的な特性を示すことになるが、本観測位置での各スペクトルは、断層からの距離および断層の破壊する走向、さらに、分解係数により大きく影響を受けているのがわかる。このようにアレー観測網に対する波源の位置とその入射する波動との関係によりかなり複雑な結果となる。

### 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)水平アレー記録においてウェブレットF-Kスペクトルを検討した結果、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。
- (2)水平アレー記録のウェブレットF-Kスペクトルを検討した結果、断層からの距離および断層の破壊する走向、分解係数が、スペクトルに影響していた。
- (3)周波数の低い部分での水平アレー特性を考察するため、3DFEMの簡単な断層モデルを作成した結果、観測位置での時刻歴および水平方向の波動軌跡が、比較的良好な対応を示していた。

**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) たとえば、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,
- 2) たとえば, 土木学会: 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 1996.
  - 3) Iwata, T., K. Hatayama, H. Kawase, K. Irikura, and K. Masunami: Array observation of aftershocks of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake at Higashi-nada Ward, Kobe city, *Journal of Natral Disaster Science*, Vol.16, No.2, pp.41-48, 1995.
  - 4) Ide, S., M. Takeo, and Y. Yoshida: 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.
  - 5) 時松孝次・新井洋・酒井潤也・仲條有二: 微動アレイ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.
  - 6) 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イ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.
  - 7) 玉井政人・堀家正則・竹内吉弘・鈴木英世・植竹富一: 鉛直アレイ記録による強震時の表層地盤の非線形性の確認, 第9回日本地震工学シンポジウム, pp.229-234, 1994.
  - 8) 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.
  - 9) 岡本康・澤田勉・平尾潔・辻原治: 鉛直アレイ観測記録による地盤のS波速度とQ値の部分同定, 第9回日本地震工学シンポジウム, pp.289-294, 1994.
  - 10) 安中正・都築富雄・増田民夫・嶋田昌義・岡留孝一: 鉛直アレイ記録から推定した表層地盤の剛性率及び減衰定数のひずみ依存性, 第9回日本地震工学シンポジウム, pp.493-498, 1994.
  - 11) 中村博一・山崎文雄: アレイ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.
  - 12) 川上英二・西一彦・茂木秀則: アレイ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.
  - 13) 泉谷恭男: 千葉アレイにおける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.
  - 14) 石川滝二・家村浩和・五十嵐晃・高橋卓也・中西伸二: 明石海峡大橋近傍におけるアレイ地震観測記録のピーク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.
  - 15) 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.
  - 16) Yomogida, K.: "Detection of anomalous seismic phases by the wavelet transform, *Geophysical Journal International*, Vol.116, pp.119-130, 1994.
  - 17) 宮協幸治郎: "地震波に関するウエーブレット解析", 大阪府立工業高等専門学校研究紀要, Vol.26, pp.53-61, 1992.
  - 18) 宮協幸治郎, 土岐憲三: "ウエーブレット解析による地震波特性に関する一考察", 土木学会論文集, No.525/I, 33, pp.261-274, 1995.
  - 19) 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.
  - 20) 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.
  - 21) 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, Vol. pp.97-98, 1996.
  - 22) 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.
  - 23) 前出18).
  - 24) 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.
  - 25) 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.
  - 26) 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.
  - 27) 前出26).
  - 28) 前出22).