

強震動卓越方向の震源依存性と観測点依存性

—千葉アレーにおける8~10 Hz地震動の主軸解析—

信州大学工学部* 泉谷 恭男・寺田 彰

Source Effect and Site Effect on Predominant Direction of Strong Ground Motion

—Principal Axis Analysis of 8~10 Hz Ground Motion
at Chiba Array—

Yasuo IZUTANI and Akira TERADA

Faculty of Engineering, Shinshu University, 500 Wakasato, Nagano, 380, Japan

(Received February 25, 1993; Accepted April 19, 1993)

The predominant directions of 8~10 Hz strong ground motions due to 17 earthquakes are examined through the principal axis analysis of S-wave records by a dense accelerometer array. It is found that each of the observation points belonging to the array has its own preferred direction of strong amplification, that is to say, the directional site resonance. The predominant directions of 8~10 Hz strong ground motions due to S-waves appear to reflect both the directional site resonances and the polarization characteristics of incident waves. For the events with $M_{JMA} \geq 5.0$, since the degree of polarization of incident waves is low probably because of their large fault dimensions, the predominant directions of strong ground motions tend to reflect the directional site resonances. On the other hand, the predominant directions of strong ground motions due to the events with $M_{JMA} < 5.0$ are dominated by the characteristics of highly polarized incident waves.

Key words: Strong ground motion, Principal axis, Directional site resonance, Chiba Array database.

§1. はじめに

近距離で得られた強震動記録中の比較的振幅の大きい部分は一般にS波と考えられている。このS波による地震動の卓越方向が地震の発震機構に基づく地震波の放射特性をどの程度反映しているかという問題は、地震学的にも地震工学的にも非常に興味深い。たとえば、佐藤・他(1979)は1976年7月5日の鬼首地震($M_{JMA} = 4.9$)の際の墓石の転倒方向から地震動の卓越方向を推定した。更に、推定した震動卓越方向と地震の発震機構から期待されるS波の震動方向との比較から、地震の際の断層破壊過程について詳しく検討している。

一方、大地震の際の強震動はあまり極端な卓越方向を示さず、かなり等方化されてしまっているという見方もある。経験的グリーン関数法による強震動予測手法に関

して入倉(1990)は、経験的グリーン関数としてその記録を用いる小地震と、強震動を予測しようとする大地震の発震機構の違いについてどの様に考慮すべきかについて検討している。その結果、観測される強震動はかなり等方化してしまっていて震源の放射特性をあまり強く反映していないことを指摘し、高周波数領域の放射特性は決定論的には取り扱えず、統計的に取り扱う必要があると述べている。強震動の等方化の原因は層境界における反射波や変換波の混入 [例えば、HERRMANN (1976), NUTTLI (1961)] の他に、伝播経路の媒質の不均質による地震波の散乱の影響も大きいであろう [例えば、MATSUMURA (1981), 佐藤 (1991), Toksöz *et al.* (1991)]. 特に短周期地震波に対しては、観測点近傍の地表地形やごく表層の速度構造のゆらぎなども、大きな影響を及ぼしているであろう [例えば、AKI and LARNER (1970), KAWASE and AKI (1990), 堀家・他(1991)].

* 〒380 長野市若里 500

BONAMASSA and VIDALE (1991) は 1989 年 10 月 18 日の Loma Prieta 地震の余震の震動卓越方向について検討した。その結果、強震動のごく最初の部分は直達 S 波と考えられ、震源での放射特性を反映しているが、後続の散乱波混入部分は発震機構に無関係に観測点毎に独自の震動卓越方向を示すことを見出した。また、VIDALE *et al.* (1991) は 1987 年 10 月 1 日の Whittier Narrows 地震の本震と、10 月 4 日の余震の記録を解析し、強震動の卓越方向について調べた。本震の発震機構は低角の逆断層であり、余震は横ずれ断層である。発震機構の違いから、2 つの地震については S 波の震動方向が異なることが期待される。それにも拘らず、強震記録が得られた 13 観測点中 8 観測点において、2 つの地震時の強震動の卓越方向は非常に似ていた。これに基づいて VIDALE *et al.* (1991) は、入射してきた地震波をある特別な方向にのみ強く増幅するような性質を各観測点の地盤が有していると結論づけ、これを Directional Site Resonance と名付けた。

「ごく普通の」堆積地盤上で実際に観測される強震動の卓越方向は、震源での放射特性をどの程度反映しているものであろう。散乱等の影響で等方化されてしまって卓越方向を示さないのであろうか。それとも VIDALE *et al.* (1991) の指摘しているように、地震動の卓越方向は地震の違いには関係なく、観測点毎に決まっているのであろうか。この問題に対する波動理論的な研究が重要であることは言うまでもないが、それに並行して、出来るだけ多くのデータを解析して実際に生じている事柄を検証することも必要である。実際に観測される強震動卓越方向特性に、何の影響がどの程度含まれているかを調べることによって、経験的な強震動予測のための資料を得ることも出来るであろう。本論文は、非常に密に設置された強震計アレー記録の解析によって、この問題について検討した結果を報告するものである。

§2. 千葉アレーデータベース

東京大学生産技術研究所千葉実験所構内においては、非常に密に加速度計を配置したアレー方式によって強震観測が行われている [KATAYAMA *et al.* (1990a, b)]. 半径約 200 m の円内に含まれる 15 地点の地下 1 m の深さに加速度計が設置されている。このうちの 9 地点は半径 15 m の円内に集中している。また、これらの地点のうちには地下 5 m, 10 m, 20 m, 40 m にも加速度計が設置されている箇所もあり、3 次元アレーを構成している。1982 年から 1989 年までに記録された計 27 個の地震の加速度記録がデータベース化され、公開されている。計器設置の方位誤差はアレー記録の解析結果に重大

な誤りを生むであろうことが考えられ、補正の方法も検討されている [佐藤・片山(1983), 植竹・他(1991)]. 千葉アレーにおいても計器の方位誤差については慎重に検討され、データベース構築時に補正が施されている [YAMAZAKI *et al.* (1992)]. このデータベースを用いた研究は既に種々行われており、本研究で解析しようとしている短周期成分の地震動に関しては、同一地震の記録でありながら観測点間のコヒーレンスが非常に小さいことや、地震動主軸が観測点によってまちまちの方向を示すことが指摘されている [例えば, KATAYAMA *et al.* (1990a, b)].

本研究においては、前節で述べたような観点から、このアレー内の複数の観測点で観測された複数の地震の際の震動卓越方向について総合的に解釈することを試みる。解析するデータは千葉アレー内 9 地点の地下 1 m で観測された 17 地震の加速度記録である。Table 1 に示したように地震のマグニチュードは 4.0 から 6.7 であり、震央距離が 70 km 以内の地震の記録のみを用いる。千葉アレーの位置と地震の震央を Fig. 1 に示す。地震番号は KATAYAMA *et al.* (1990a, b) に従い、本論文では地震番号の前に EQ という文字を付けて地震名称とする。EQ16 は 1987 年 12 月 17 日の千葉県東方沖地震であり、EQ17~EQ21 はその余震である。9 観測点は半径 15 m の円内に集中しており、C0~C4, P1~P4 と呼ばれている (Fig. 3 参照)。C0 地点においては深さ約 40 m までの地盤調査が行われており、地表から約 5 m の深さまではローム層 (S 波速度 140 m/s)、それ以深は粘土やシルトを含んだ砂層 (S 波速度 320~420 m/s) となっている。3 次元の震動性状についての検討が最終目的であるが、本論文においてはその第一段階として、地下 1 m の記録のみを用いた 2 次元の震動卓越方向についての検討を行った。

§3. 強震動の卓越方向特性

観測された地震動の卓越方向特性を調べるために、地震動の主軸解析は有用である [例えば, 星谷・石橋 (1977), MATSUMURA (1981), MONTALBETTI and KANASEWICH (1970)]. 本研究で用いる主軸は星谷・石橋 (1977) の定義による主軸 II に相当する。共分散マトリクス

$$V = \begin{pmatrix} \text{Var}[x_1] & \text{Cov}[x_1x_2] & \text{Cov}[x_1x_3] \\ \text{Cov}[x_2x_1] & \text{Var}[x_2] & \text{Cov}[x_2x_3] \\ \text{Cov}[x_3x_1] & \text{Cov}[x_3x_2] & \text{Var}[x_3] \end{pmatrix} \quad (1)$$

が各観測点の 3 成分の加速度記録から計算される。 x_1, x_2, x_3 は 3 成分の加速度時刻歴であり、 $\text{Var}[\]$ と $\text{Cov}[\]$ はそれぞれ分散、共分散を示している。この共分散

Table 1. List of Earthquakes.

No.	Date	Time	Epicenter		Depth (km)	M_{JMA}
			Lat. (N)	Long. (E)		
7	1984. 12. 17	23:49:47	35°35.8'	140°03.5'	78	4.9
8	1985. 6. 8	01:29:01	35°32.3'	140°14.9'	64	4.8
9	1985. 10. 4	21:25:51	35°52.1'	140°09.5'	78	6.1
10	1985. 11. 6	00:30:50	35°21.3'	140°14.4'	63	5.0
15	1987. 6. 30	18:17:07	36°11.0'	140°05.3'	57	4.9
16	1987. 12. 17	11:08:16	35°22.3'	140°29.8'	58	6.7
17	1987. 12. 17	11:15:11	35°21.7'	140°30.7'	52	4.6
18	1987. 12. 17	14:07:06	35°23.6'	140°29.1'	58	4.4
19	1987. 12. 17	15:29:56	35°19.5'	140°33.5'	42	4.0
20	1988. 1. 5	10:09:02	35°24.7'	140°26.0'	42	4.2
21	1988. 1. 16	20:42:11	35°23.2'	140°24.8'	48	5.2
22	1988. 1. 18	19:37:14	35°33.2'	139°56.6'	32	4.1
23	1988. 3. 18	05:34:29	35°39.7'	139°38.8'	96	6.0
24	1988. 8. 12	14:14:53	35°05.7'	139°52.0'	69	5.3
25	1989. 2. 19	21:27:17	36°01.1'	139°54.5'	55	5.6
26	1989. 3. 6	23:39:44	35°41.6'	140°42.8'	56	6.0
27	1989. 3. 11	16:12:17	35°54.5'	140°33.8'	45	4.9

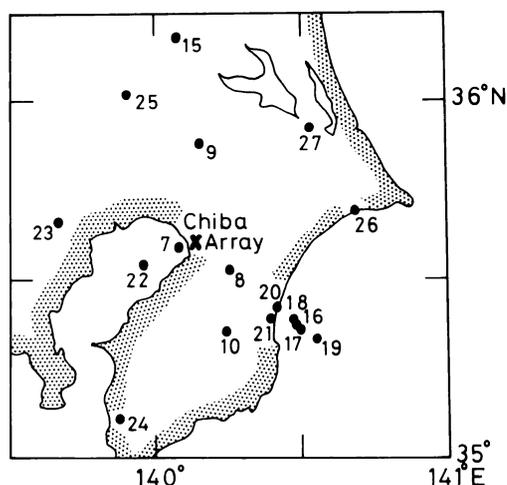


Fig. 1. Epicenters of earthquakes (solid circles) and the location of Chiba Array (cross).

マトリクスを対角化する座標変換行列として、3つの主軸が求められる。最大固有値に対応する主軸を最大主軸、中間固有値に対応するものを中間主軸、最小固有値に対応するものを最小主軸と呼ぶ。各々の主軸の向きは鉛直上方からの角度 θ と東から反時計回りに測った角度 ϕ とによって表現できる。最大主軸方向は地震時の強震動の卓越方向に相当する。また、中間固有値の最大固有値に対する比を γ として、地震動の偏向性の程度を表わすパラメータとして用いる。

Fig. 2 に例示したように、S波が卓越している付近に

5秒間のウィンドウをかけて取り出した記録に0~2 Hz, 2~4 Hz, 4~6 Hz, 6~8 Hz, 8~10 Hzの5種類の帯域通過フィルターをかけ、主軸解析を行った。地震動の主軸方向は、刻々到達する地震波の性質に従って時間的に変化する。一般に、ウィンドウ幅を広げると散乱波が多く混入して γ の値は大きくなり、 ϕ の値は不安定になる。本研究では、直達S波から構成されている地震動を主に抽出するため、ウィンドウ幅を5秒とした。得られた最小主軸はほぼ鉛直であり、S波卓越部分では地面はほぼ水平に震動している。これ以後は簡単のために、水平面内における2次元の震動として現象を取扱い、震動卓越方向特性を最大主軸の方向 ϕ 、および、中間固有値と最大固有値の比 γ という2つのパラメータで表現する。

例として、EQ16 ($M_{JMA}=6.7$)、EQ20 ($M_{JMA}=4.2$)、EQ23 ($M_{JMA}=6.0$)の3地震の震動卓越方向特性をFig. 3に示した。図中の楕円の長軸方向が ϕ を、短径と長径の比が γ を表現している。どの地震の場合をとっても、0~2 Hzの震動卓越方向特性は9観測点間でよく揃っている。このことは9観測点が地震時に揃って震動していたことを示す。やばらつきが見られるものの、4~6 Hzの周波数帯の結果も同様の傾向を示している。ただし、震動卓越方向は0~2 Hzの場合と異なっている。一方、EQ16とEQ23の8~10 Hzの周波数帯における震動卓越方向は、9観測点でだいぶばらついている。9観測点は非常に近接しているため、地震の震源の影響や震源から千葉アレーに達する経路における地震波の散乱の影響などは9観測点で同じと考えて良いだろう。した

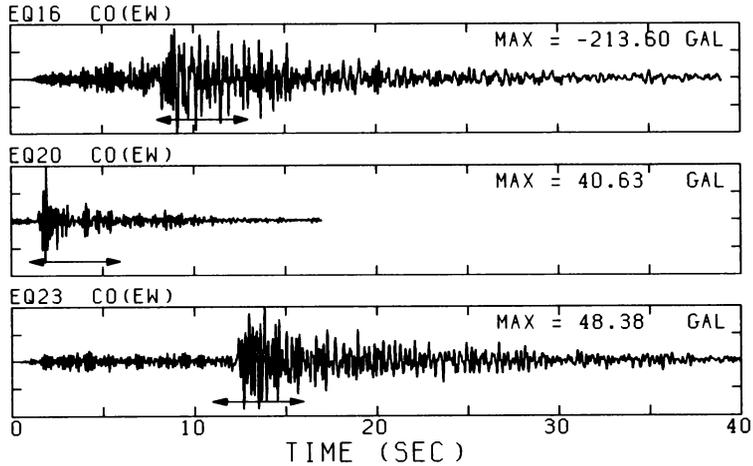


Fig. 2. Examples of accelerograms for EQ16 (upper), EQ20 (middle), and EQ23 (lower). The arrows indicate the width of data windows used in this study.

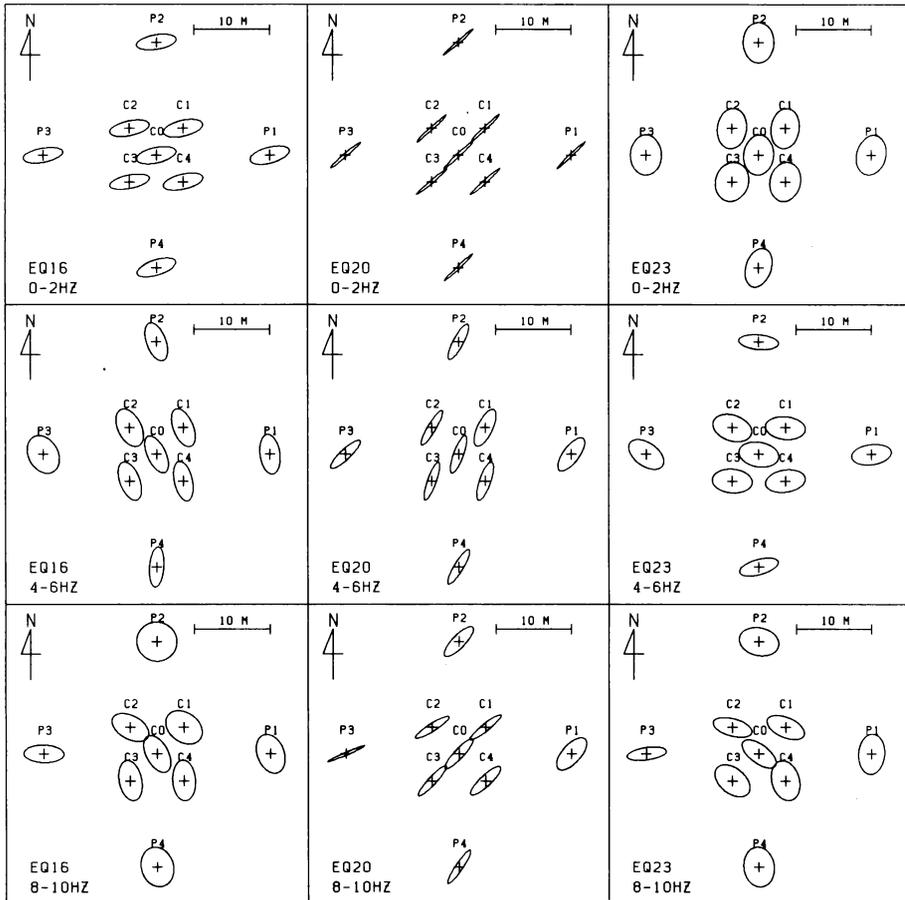


Fig. 3. Observed polarization characteristics of strong ground motions for EQ16, EQ20 and EQ23. The directions of the longer axes of the ellipses indicate the directions of the major principal axes of strong ground motions. The aspect ratios of the ellipses indicate the ratios of the second largest eigenvalue to the largest eigenvalue.

が、この違いを生ずる原因は各観測点のごく近傍の地盤状態等にあると考えざるをえない。EQ16とEQ23の震動卓越方向の空間分布に注目すると、8~10 Hzの周波数帯では、2つの地震でよく似ていることに気づく。このことは、VIDALE *et al.* (1991) が指摘しているように、各観測点が地震の際に揺れ易い方向を持っていることを暗示する。しかしながら、EQ20の8~10 Hz帯の震動卓越方向特性を見ても、9観測点間であまり差がなく、EQ16やEQ23の場合とは明らかに異なる。

各観測点における8~10 Hz帯の ϕ の値が、異なる地震に対してどの程度ばらついているかを Fig. 4 に示し

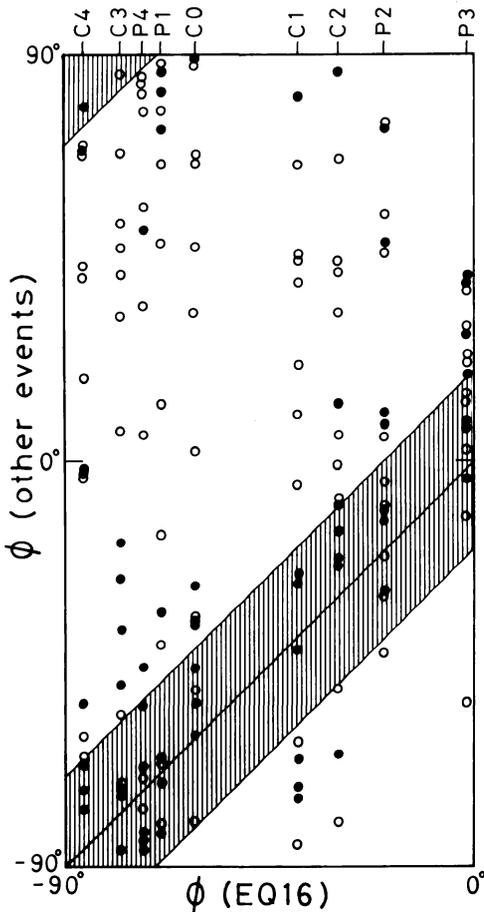


Fig. 4. Correlation between predominant directions (ϕ) of 8-10 Hz ground motions for EQ16 and those for the other events at the observation points, C0-C4 and P1-P4. The solid circles indicate the predominant directions for the events with $M_{JMA} \geq 5$ and the open circles are for the events with $M_{JMA} < 5$. The difference between ϕ 's for EQ16 and for the other events is less than 20° in the shadowed zones.

た。17地震中最大の地震であるEQ16の8~10 Hz帯の ϕ の値を横座標にとった。Fig. 4 上端に示されたC0~C4, P1~P4の記号の位置は、各観測点におけるEQ16の ϕ の値を示している。EQ16以外の地震の8~10 Hz帯の ϕ の値を縦座標にとり、対応する観測点毎にプロットした。図中の黒丸は相対的に大きな地震($M_{JMA} \geq 5$)についての結果、白丸は相対的に小さな地震($M_{JMA} < 5$)についての結果を示している。もしも Directional Site Resonance が非常に支配的ならば、すべてのプロットが影をつけた領域内もしくはその周辺に集中することが期待される。Fig. 4は、相対的に大きな地震についてはこの傾向があることを示している。また、P3地点に関しては、地震の大小にかかわらずこの傾向が認められる。しかし、P3以外の観測点における相対的に小さい地震についての結果は、たとえ Directional Site Resonance があつたとしてもその影響は非常に小さいことを示している。従って、実際に観測された震動卓越方向特性を、観測点固有の性質である Directional Site Resonance だけで説明することには無理があると言えよう。

§4. 強震動卓越方向の解釈

観測された強震動の最大主軸と中間主軸は殆ど水平面内にあるので、前節でも述べたように、強震動の卓越方向特性を2つのパラメータ(ϕ_{jk}, γ_{jk})で表現する。ここで、 j は地震、 k は観測点を表現するための添え字である。 ϕ_{jk} は最大主軸の方向、 γ_{jk} は中間固有値と最大固有値の比を表している。

さて、観測された強震動の卓越方向特性(ϕ_{jk}, γ_{jk})は、各地震に固有でかつ9観測点に共通する要素(ϕ_j, γ_j)と、地震に無関係で各観測点に固有の要素(ϕ_k, γ_k)の合成された結果であると仮定する。震源での放射特性や震源から千葉アレーに至る伝播経路での地震波の散乱の影響等は共通要素(ϕ_j, γ_j)に含まれ、(ϕ_j, γ_j)はアレー全体の平均的な震動卓越方向特性を表していると言い換えることも出来よう。これに対して(ϕ_k, γ_k)は各観測点のごく近傍の地盤状態等の影響を表しており、アレー全体の平均的な震動場である(ϕ_j, γ_j)からの変動分に相当する。この変動分は、地震波の到来方向の違いなどに伴って、地震毎に変化するものかもしれない。しかしここでは第一近似として、(ϕ_k, γ_k)は地震に依存せず、観測点に固有の性質であると考えられる。即ち、(ϕ_k, γ_k)はVIDALE *et al.* (1991)の言う Directional Site Resonance の非常に小規模なものに相当する。

アレー全体の平均的な震動場と観測点毎の変動分の合成は、(ϕ_j, γ_j)で表される楕円の径と、(ϕ_k, γ_k)で表される楕

円の径とを、各方向毎に積算することによって行われると仮定する。ただし、そのように合成すると、結果が必ずしも楕円とはならない。そこで、実際には次に示す関係式 (2) と (3) を用いて合成し、合成結果を楕円で表現出来るように、即ち、2つのパラメーター (ϕ_{jk}, γ_{jk}) のみで表現出来るようにした。

$$\phi_{jk} = \begin{cases} \phi_j & ; \phi_j = \phi_k \pm 90^\circ \text{ and } \gamma_j < \gamma_k \\ \phi_k & ; \phi_j = \phi_k \pm 90^\circ \text{ and } \gamma_j > \gamma_k \\ \frac{\{\gamma_k(1-\gamma_j)\}\phi_j + \{\gamma_j(1-\gamma_k)\}\phi_k}{\gamma_k(1-\gamma_j) + \gamma_j(1-\gamma_k)} & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$\gamma_{jk} = \begin{cases} (\gamma_j/\gamma_k)\sin^2(\phi_j - \phi_k) + \gamma_j\gamma_k \cos^2(\phi_j - \phi_k) & ; \gamma_j < \gamma_k \\ (\gamma_k/\gamma_j)\sin^2(\phi_j - \phi_k) + \gamma_j\gamma_k \cos^2(\phi_j - \phi_k) & ; \gamma_j \geq \gamma_k \end{cases} \quad (3)$$

式 (2), (3) を用いて (ϕ_j, γ_j) と (ϕ_k, γ_k) とを合成した例を Fig. 5 に示す。Fig. 5(a) は、地震 j の際にアレー全体としては等方的に震動していたが、観測点 k が Directional Site Resonance を生じたため、観測された地震動は卓越方向特性 $(\phi_{jk}, \gamma_{jk}) = (\phi_k, \gamma_k)$ を有するに至ったことを示している。また Fig. 5(b) は、地震 j の際にアレー全体が震動卓越方向特性 (ϕ_j, γ_j) を有しており観測点 k では Directional Site Resonance を生じなかったとすると、観測された地震動は卓越方向特性 $(\phi_{jk}, \gamma_{jk}) = (\phi_j, \gamma_j)$ を有することを示している。Fig. 5(c) はアレー全体がある震動卓越方向特性を示し、観測点も Directional Site Resonance を示すというような一般的な場合を示している。もちろん、式 (2), (3) に変えてもっと複雑な関数を考えることも可能であろう。しかし、今回のよう

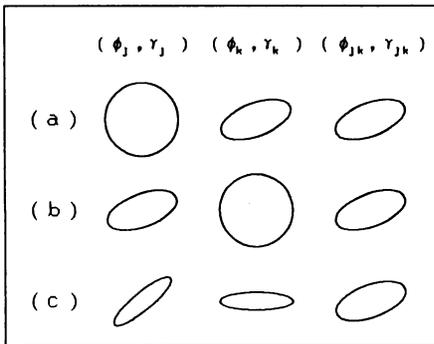


Fig. 5. Schematic illustration of relations among polarization characteristics of strong ground motions averaged over the observation points (ϕ_j, γ_j) , directional site resonance (ϕ_k, γ_k) , and observed polarization characteristics of strong ground motions (ϕ_{jk}, γ_{jk}) .

な定性的な議論において、あまり複雑な関数を導入することは意味がない。

ところで、Fig. 3 に示された 0~2 Hz の周波数帯の場合のように 9 観測点が揃って震動していたら、それが Fig. 5 のどの場合の結果であるのか識別不可能である。以下においては 9 観測点間で震動卓越方向が最もばらついていた 8~10 Hz の周波数帯について、観測された (ϕ_{jk}, γ_{jk}) を (ϕ_j, γ_j) と (ϕ_k, γ_k) とに分離することを試みる。ここで行おうとする手法で低周波数帯の震動卓越方向特性を扱うためには、もっと大規模なアレーの記録を解析する必要がある。

まず、 γ_k の初期値を全ての観測点で 1.0 とした。そして、 ϕ_j を 1 度ずつ、 γ_j を 0.05 ずつ変化させながら

$$\epsilon = \sum_{j=1}^{17} \sum_{k=1}^9 \{(\phi_{jk}^{(o)} - \phi_{jk}^{(c)})^2 + (\gamma_{jk}^{(o)} - \gamma_{jk}^{(c)})^2 w^2\} \rightarrow \text{minimum} \quad (4)$$

という条件の下で ϕ_j と γ_j の第 1 近似値を求めた。ここで、 w は ϕ_{jk} の一致程度と γ_{jk} の一致程度とのどちらにどの程度の重きを置くかについての係数であり、試行錯誤の結果 100.0 とした。添え字 (o) と (c) はそれぞれ観測値および式 (2), (3) による計算値であることを示している。次に、 (ϕ_j, γ_j) を第 1 次近似値に固定し、 (ϕ_k, γ_k) の第 1 近似値を求めた。この操作を、 (ϕ_j, γ_j) と (ϕ_k, γ_k) が前回の近似値から変化しなくなるまで繰り返した。

観測された (ϕ_{jk}, γ_{jk}) から (ϕ_j, γ_j) と (ϕ_k, γ_k) とを一意的に得ることは不可能であり、異なる初期値から出発すれば異なる解に収束するであろう。本論文において初期値

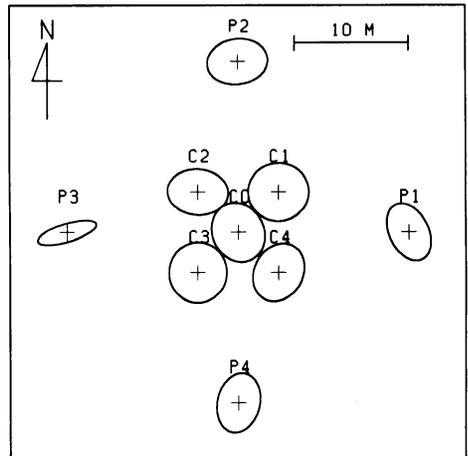


Fig. 6. Directional site resonance characteristics. The directions of the longer axes of the ellipses indicate the preferred directions of strong amplification at the observation points. The aspect ratios indicate the degree of the directional site resonance.

を $\gamma_k=1.0$ としたことは、 (ϕ_j, γ_j) をアレー全体の平均的な震動場に関するもの、 (ϕ_k, γ_k) を平均的震動場からの変動分を表すものとして取り扱っていることに基づいている。したがって、入射して来た地震波を強く変形するような特性を観測点を持っていたとしても、それが9観測点に共通するものであれば、その影響は (ϕ_k, γ_k) ではなく (ϕ_j, γ_j) に含まれることになる。

以上の操作によって得られた観測点の特性 (ϕ_k, γ_k) を Fig. 6 に示した。P3 地点は、非常に強い東西方向の Directional Site Resonance を示している。このことは、Fig. 4 の P3 地点に関するプロットが、他の地点に比べて狭い範囲にまとまっていたことから予想されたことである。概してそれほど強くはないが、他の観測点も Directional Site Resonance を示していることが分かる。地盤が水平方向に均質でないこと、例えば、地震波速度に異方性やゆらぎがあることなどが Directional Site Resonance を生ずる原因かもしれない。そのメカ

ニズムを解明するためには、更なる検討が必要である。

Fig. 7, Fig. 8 には各地震の際の (ϕ_j, γ_j) 及び震動卓越方向特性の観測値 (ϕ_k, γ_k) と計算値 (ϕ_k^*, γ_k^*) とが示されている。EQ18 の場合、および、P1 地点と P4 地点において幾らか不満足な点が見られるが、計算結果は観測結果を概してうまく説明している。これらの図をみると、比較的大きな地震の際に観測された震動卓越方向特性は概して Fig. 6 の観測点特性 (ϕ_k, γ_k) に似ていることに気づく。一方、比較的小地震については、各図左上隅に示されたアレー全体の震動卓越方向特性 (ϕ_j, γ_j) がほとんどそのまま観測された震動卓越方向特性に反映されている場合が多い。この現象を、小地震の場合には入射してきた地震波が非常に強く偏向していたため、入射波の偏向特性が観測された強震動の震動卓越方向特性にそのまま反映された結果である、と解釈することも出来るだろう。

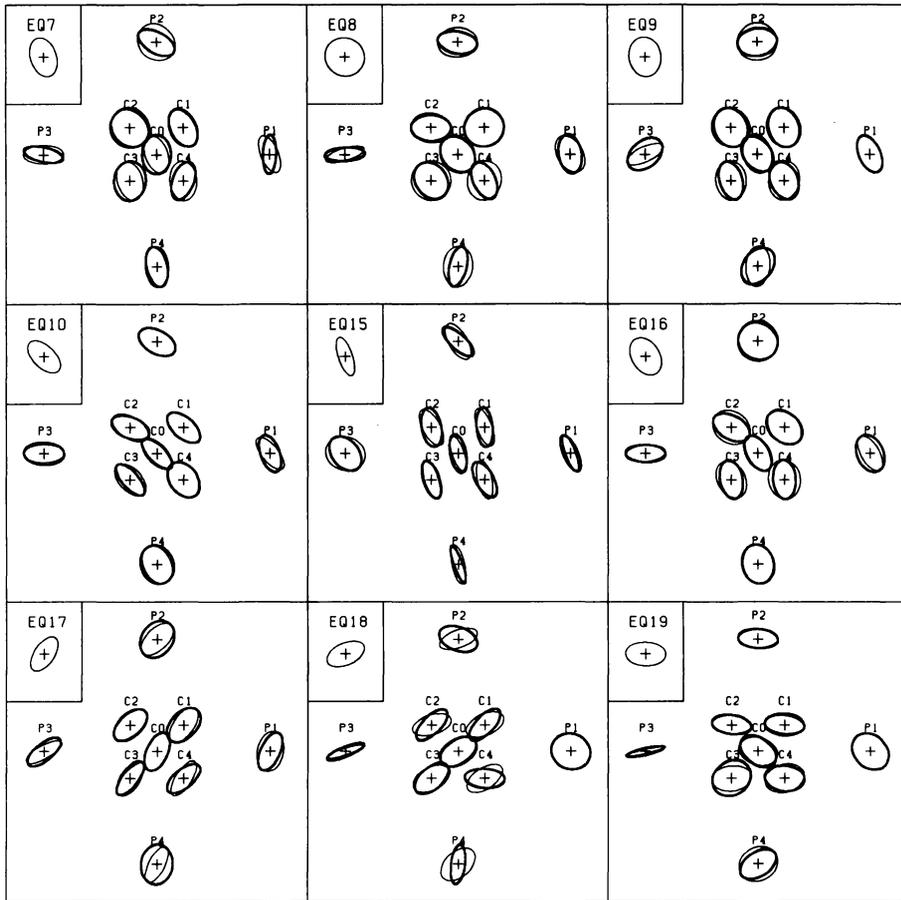


Fig. 7. Polarization characteristics of strong ground motion averaged over the observation points for each event (left-hand corner), fitted polarization characteristics of strong ground motions (thin ellipses), and observed ones (thick ellipses) for EQ7-EQ19.

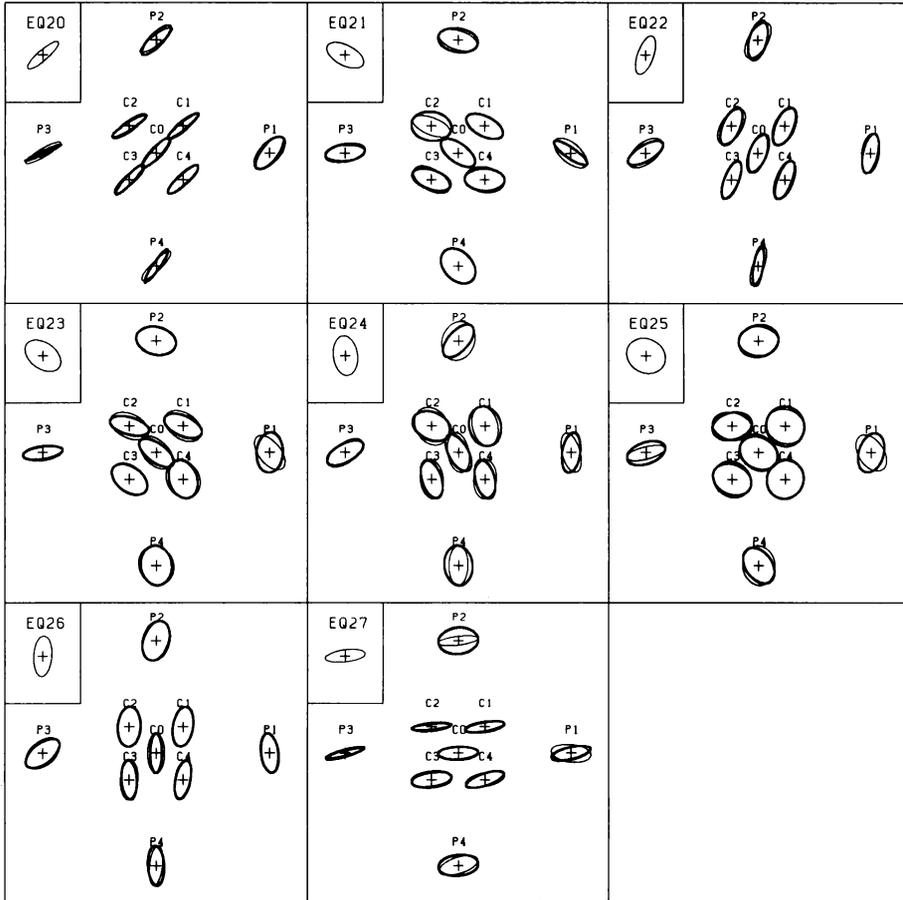


Fig. 8. Polarization characteristics of strong ground motion averaged over the observation points for each event (left-hand corner), fitted polarization characteristics of strong ground motions (thin ellipses), and observed ones (thick ellipses) for EQ20-EQ27.

§5. 震源の影響

本研究で解析した17個の地震のうち、1987年千葉県東方沖地震の本震(EQ16)とその最大余震(EQ21)については、P波初動の分布から発震機構解が求められている[福山・木下(1989), 草野・吉田(1990)]. 半無限弾性体内に点震源を仮定して千葉アレーでのS波の震動方向を計算した. 震源での射出角を鉛直下方から 110° ~ 120° , 表層への入射角を 0° ~ 20° と仮定すると, 千葉アレーでのS波の震動方向は, EQ16では約 $E40^{\circ}S$, EQ21では約 $E10^{\circ}S$ となる. これらの値はFig. 7, Fig. 8に示されたアレー全体の震動卓越方向 ϕ_j として求められた結果と調和的である. このことは, 前節においてアレー全体の平均的震動卓越方向特性(ϕ_j, γ_j)として求められたものが, アレーに入射して来た地震波の偏向特性を表わしているということを暗示する. したがって, 観測された8~10 Hz帯の強震動の震動卓越方向は, 観

測点での Directional Site Resonance の影響を受けつつも, 地震の発震機構を反映しているということも出来るよう.

ところが, Fig. 3のEQ16の0~2 Hzの場合をみると, その震動卓越方向は8~10 Hzについての ϕ_j とは異なっており, ここで計算してみた発震機構から期待されるS波の震動方向とも合わない. その周波数帯域の地震波の波長でスケールされるような大規模な Directional Site Resonance を反映しているのかも知れない. この点を明確にするためには, もっと大規模なアレー記録を解析する必要がある.

Fig. 7, Fig. 8に見られるようにアレー全体の平均的震動場の偏向性はそれほど強くない. EQ20の場合が最も強いが, それでも γ_j にして0.25である. 震源から千葉アレーに至る間の経路における地震波の散乱効果が地震動の偏向性を弱めるために主要な動きをしているので

あろう。ところで、その地震波の散乱効果は、EQ16～EQ21に関しては震源位置が近いので、同程度と考えても良いであろう。Fig. 7とFig. 8をみると、EQ16のアレー全体の平均的震動場の偏向性は他の地震の場合に比べて弱い。これを説明するためには地震波の散乱効果以外の要因を考えに入れる必要があろう。EQ16の断層の大きさは $21 \times 24 \text{ km}^2$ と推定されている[福山・木下(1989)]。地震マグニチュードの違いを考えると、EQ16の断層は余震のそれらに比べて格段に大きいことが予想される。大きな断層面上での短周期波の射出パターンが、場所によらず一様であるとは考えにくい。たとえ一様であったとしても、断層の各点から射出されたS波が混じりあって入射波の偏向性を弱める働きをすであろう。したがって、地震断層が大きいことや一様でないことは、入射して来る波の偏向性を弱める働きをすと考えられる。その結果、観測される強震動の卓越方向特性は観測点の持つ性質である Directional Site Resonance をより明確に反映することになったのであろう。

§6. 結 論

密に配置された加速度計アレー記録を解析し、17個の地震の8～10 Hzの周波数帯におけるS波による震動卓越方向特性について検討した。観測された強震動卓越方向特性は、偏向した入射波の性質と観測点固有の Directional Site Resonance の影響の両者が入り混じった結果と解釈できる。ここで取り扱ったような震央距離(70 km以内)については、 $M_{\text{JMA}} \geq 5$ の地震の際に観測された強震動卓越方向特性は観測点固有の Directional Site Resonance を比較的よく反映している。これは断層が大きいことや一様でないために、入射してきた地震波が強い偏向性を有していなかったためと考えられる。これに反して $M_{\text{JMA}} < 5$ の地震の場合には、入射してきた地震波の偏向性が強いので、入射波の偏向特性がそのまま地表の強震動卓越方向特性に反映されている。

1987年千葉県東方沖地震の本震と最大余震の場合については、8～10 Hz帯のアレー全体の平均的震動卓越方向と発震機構から期待されるS波の震動方向とは調和的であった。しかし、周波数帯が違えば状況が異なっている可能性がある。

謝 辞

千葉アレーのデータは東京大学生産技術研究所片山研究室よりお借りした。記して感謝します。本研究は文部省科学研究費の補助(課題番号03201214)を受けて行われた。

文 献

- AKI, K. and K. L. LARNER, 1970, Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane SH waves, *J. Geophys. Res.*, **75**, 933-954.
- BONAMASSA, O. and J. E. VIDALE, 1991, Directional site resonance observed from aftershocks of the 18 October 1989 Loma Prieta earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **81**, 1945-1957.
- 福山英一・木下繁夫, 1989, 1987年千葉県東方沖地震の破壊過程の推定—経験的グリーン関数を用いた解析—, *地震* **2**, **42**, 39-48.
- HERRMANN, R. B., 1976, Some more complexity in S-wave particle motion, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **66**, 625-632.
- 堀家正則・竹内吉弘・桑田和宏, 1991, 地盤のS波の揺らぎの統計的性質, *地震* **2**, **44**, 267-269.
- 星谷 勝・石橋 裕, 1977, 地震動ベクトルの主軸と波形特性, *土木学会論文報告集*, **268**, 33-46.
- 入倉孝次郎, 1990, 経験的グリーン関数法, 文部省科学研究費重点領域研究, 強震動および津波の予測と破壊能評価に関する研究, 11-17.
- KATAYAMA, T., F. YAMAZAKI, S. NAGATA, L. LU and T. TÜRKER, 1990a, Development of strong motion database for the Chiba seismometer array, Report No. 90-1(14), Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 100 pp.
- KATAYAMA, T., F. YAMAZAKI, S. NAGATA, L. LU and T. TÜRKER, 1990b, A strong motion database for the Chiba seismometer array and its engineering analysis, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **19**, 1089-1106.
- KAWASE, H. and K. AKI, 1990, Topography effect at the critical SV-wave incidence: possible explanation of damage pattern by the Whittier Narrows, California, earthquake of 1 October 1987, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **80**, 1-22.
- 草野富士雄・吉田明夫, 1990, 1987年千葉県東方沖地震の余震活動, *地震* **2**, **43**, 459-469.
- MATSUMURA, S., 1981, Three-dimensional expression of seismic particle motions by the trajectory ellipsoid and its application to the seismic data observed in the Kanto district, Japan, *J. Phys. Earth*, **29**, 221-239.
- MONTALBETTI, J. F. and R. KANASEWICH, 1970, Enhancement of teleseismic body phases with a polarization filter, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, **21**, 119-129.
- NUTTLI, O., 1961, The effect of the Earth's surface on the S wave particle motion, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **51**, 237-246.
- 佐藤春夫, 1991, ランダムな不均質による地震波の散乱, *地震* **2**, **44**, 特集号, 85-97.
- 佐藤暢彦・片山恒雄, 1983, 地中地震計の埋設方位の推定, 第17回地震工学研究発表会講演概要, 土木学会, 115-118.
- 佐藤魂夫・中田 高・今泉俊文・大槻憲四郎, 1979, 被

- 害調査から推定される地震動の卓越方向と地震断層モデル—1976年7月5日鬼首地震—, 地震 2, 32, 171-182.
- TOKSÖZ, M. N., A. M. DAINTY and E. E. CHARRETTE, 1991, Coherency of ground motion at regional distances and scattering, *Phys. Earth Planet. Interiors*, 67, 162-179.
- 植竹富一・真下 貢・天池文男, 1991, やや長周期地震動を用いた地中埋設地震計の方位推定, 地震 2, 44, 151-154.
- VIDALE, E., O. BONAMASSA and H. HOUSTON, 1991, Directional site resonance observed from the 1 October 1987 Whittier Narrows, California, Earthquake and the 4 October aftershock, *Earthquake Spectra*, 7, 107-125.
- YAMAZAKI, F., L. LU and T. KATAYAMA, 1992, Orientation error estimation of buried seismographs in array observation, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 21, 679-694.