

震動方向に着目した1979年 Imperial Valley 地震の強震記録の解析

奈良岡 浩二
(大崎研究室)
松下 裕
(大崎研究室)
渡辺 孝英
(大崎研究室)
田中 貞二
(大崎研究室)

§ 1. はじめに

建築物の耐震設計に際しては、建設地点で想定される地震動をできるだけ適切に予測する必要がある。しかし、地震は不規則な破壊現象であり、個々が独特の性質をもち、再現性はほとんど見られない。このため、耐震設計は、地震動の平均的な性質に基づいて行なわれている。すなわち、観測記録に基づいた地震動特性として、応答スペクトルおよび震動継続時間等と、マグニチュードや震央距離との関係が調べられている。このとき、地震動は震源の発震機構、伝播特性、観測点の地盤条件などから影響を受けるため、上記の関係を調べるには同一地震を複数個の観測点で記録するアレー観測が特に有効である。最近では、水平および鉛直アレー観測により多くの記録が得られてきている。

強震計アレー観測が実施されているアメリカのカリフォルニア州インペリアルバレーにおいて、1979年10月15日ローカルマグニチュード(M_L)6.6の地震が発生した。観測点は、インペリアル断層に直交するエルセントロ・アレーをはじめ断層の比較的近傍に配置されており、多数の記録が得られた^{1)~3)}。

震源域近傍においては、断層面のずれにより地震動の振幅が方位に依存する特性(ラディエーションパターン)や、破壊の伝播により破壊の進行方向で振幅が大きくなる移動震源効果が現われることが理論的に知られている。地震学の分野では、長周期領域で上記の現象が幾つかの観測記録について確認されている。

最近では工学的関心から、短周期領域におけるラディエーションパターンを調べる試みが1979年 Imperial Valley 地震の記録を用いて行なわれている。これらには、本震記録を用いて二次元速度応答スペクトルが大きくなる方向に着目して震動方向を調べた研究⁴⁾、同様の手法で余震記録について調べた研究⁵⁾、余震記録の加速度波形から速度波形を求め、その最大値の方位特性と点震源による理論地震動のそれと比較した例⁶⁾などがある。余震記

録は、長周期領域で点震源によるラディエーションパターンと対応することが報告⁵⁾⁶⁾されている。本震記録については、断層近傍では断層線に直交あるいは平行方向に卓越することが指摘されている⁴⁾⁵⁾が、観測記録の全体としての傾向は明らかになっていない。

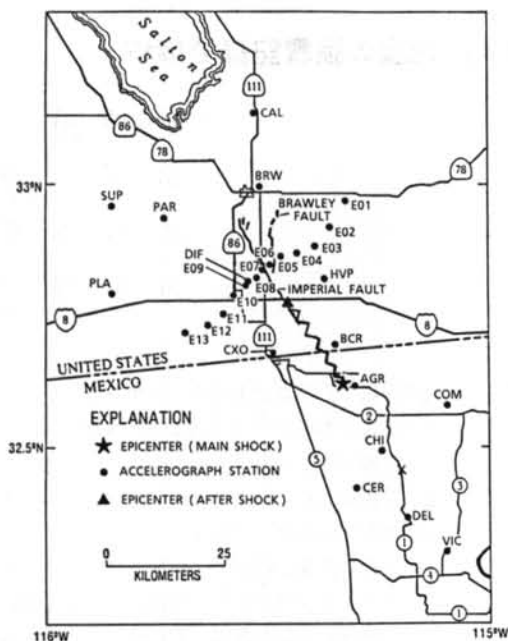
本報告は、上記の研究と同様に短周期領域における地震波のラディエーションパターンと移動震源効果に着目し、本震($M_L=6.6$)と最大余震($M_L=5.2$)の広範囲の観測記録を用いて、水平2成分の地震動の主軸方向と最大加速度の方位依存性を調べたものである。解析に使用した本震と最大余震の諸元を表-1に、観測点位置を図-1⁷⁾に示す。

ラディエーションパターンを調べるとき震動方向を主軸により評価した理由は、主軸を求めるとき用いる加速度振幅の二乗の累積値(以下、エネルギーと呼ぶ)により水平面内のエネルギー分布を明瞭に把握できること、および以下で述べるように地震動の破壊力とエネルギーが関係しているためである。

地震動の破壊力と関係するパラメータとしては、上記のエネルギーの他に最大加速度、最大速度、スペクトル強度(SI)などがある。2方向入力 of 動的応答解析から、単一の強度指標としては地震動のエネルギーが最も有効であるという結果が得られている⁷⁾。また、地震入力をエネルギー入力として捉える立場からもエネルギーは有効な指標である。すなわち、水平2成分の地震動が作用したときの構造物の損傷や倒壊過程にあつては、2方向

	本 震	最大余震
発生時間	1979年10月15日 23時16分	1979年10月15日 23時19分
震 源	32°28.61'N 115°18.53'W	32°45.94'N 115.26.45'W
深 さ	10km	10.5km
ローカルマグニチュード	6.6	5.2

表-1 本震と最大余震の諸元



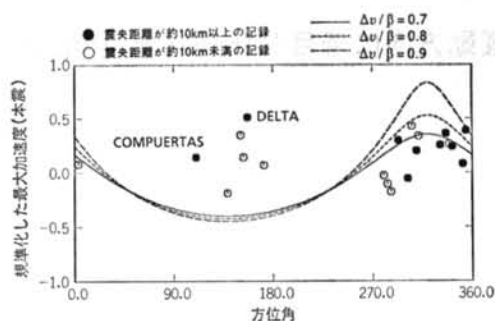
図一 解析に用いた強震記録の観測地点 (Porcella 1984 年に加筆)

入力の影響が特に短周期構造物で大きくなり、地震動の直交成分の寄与は、全入力エネルギーの増大として捉えられる⁷⁾という結果が得られている。このため、水平2成分の全エネルギーおよびその水平面内における分布を調べることは有意義なことと考えられる。

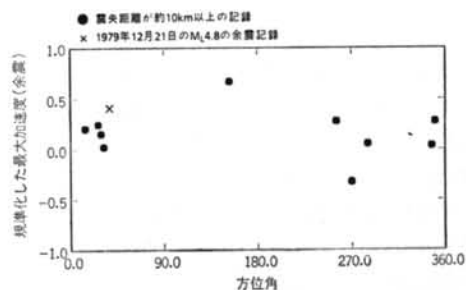
§ 2. 移動震源効果

本震では、破壊が北西方向に約30数km進んだと報告されている¹⁾。このように破壊が一方向に進む場合、ドップラー効果により破壊進行方向では振幅が大きくなり、反対に遠ざかる方向では小さくなる。このような移動震源の効果を調べる一つの手法として、Boatwright & Boore⁸⁾が1980年 Livermore Valley 地震で検討した手法がある。観測された最大加速度を最大加速度の平均値を与える経験式で規準化すれば、経験式は方位依存性をもたない量であるから、観測値と経験式との比によって方位依存性を調べることができる。しかし、観測値は伝播経路や近傍地盤の影響を受けているので、ほぼ同じ地点で発生した2つの地震の振幅比をとることによりそれらの影響を除いている。

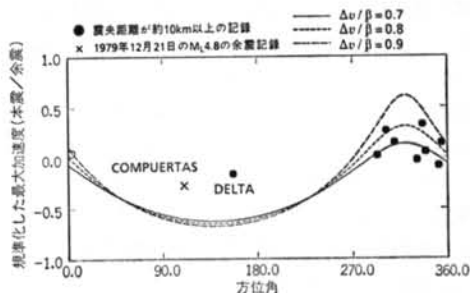
最大加速度の平均値を与える経験式として、短周期領域に着目することから式(1)の Joyner & Boore のアテナニュエーション式を用いた。



図二 距離減衰の影響を補正した最大加速度値と方位角の関係 (本震記録)



図三 距離減衰の影響を補正した最大加速度値と方位角の関係 (余震記録)



図四 本震と余震の規準化最大加速度の比と方位角の関係
 $\log A_{\max} = -1.02 + 0.249 M - \log r - 0.00255 r$ (1)
 $r = (d^2 + 7.3^2)^{1/2}$

ここに、 d は断層線からの最短距離、 M はモーメントマグニチュードである。

経験式を用いるとき、断層線の長さは震源から20kmとした。これは、震源から北西方向に20数kmのところ短周期成分が多く発生したとされている⁹⁾ことと、余震記録の波形を合成して本震記録を求めたとき、断層長さを20kmとすると波形形状や応答スペクトルがよく合うと報告されている¹⁰⁾ためである。

本震と余震についての、距離減衰の影響を補正した最大加速度と各観測点の方位角の関係を、それぞれ図二および図三に示す。黒丸は、断層線からの最短距離が

約10km以上のものを示している。本震記録および余震記録ともに、方位角との明確な関係は見られない。

次に、距離減衰の影響を補正した最大加速度について本震と余震の比をとったときの結果を図-4に示す。比をとるとき、断層線からの最短距離が約10km未満の記録は、アテニュエーション式の適用範囲外のため除外している。また、COMPUERTASの地点は $M_L=5.2$ の余震が記録されなかったため、同じ断層線上で起こったと考えられる1979年12月21日の $M_L=4.8$ の余震記録を用いている。

図-2および図-4に示した曲線は、Madariaga (1977), Boatwright (1982) による Directivity Function で、 $\Delta v/\beta$ をパラメータとしている。

$$D(\Psi) = \left[1 - \frac{\Delta v}{\beta} \cos \Psi \right]^{-1} \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 Δv は破壊速度の変化、 β はせん断波速度、 Ψ は破壊進行方向と観測点の方位のなす角である。

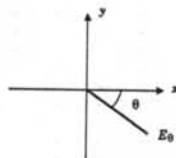
Boatwright & Boore は移動震源効果により最大加速度は方位によって10倍程度の差が生じ、 $\Delta v/\beta$ の下限は0.7程度であると結論づけているが、今回の解析ではメキシコ側のデータが不足ではっきりしたことはいえない。

本震記録だけでみた場合、メキシコ側の最大値が式(2)の理論曲線とうまく一致しないが、比をとった場合破壊進行方向の方位で最大値が大きく、ばらつきも減る傾向が認められる。

§ 3. 観測記録の震動方向

3.1 震動方向の捉え方

観測記録の震動方向を捉えるため、水平2成分の地震動の主軸方向と加速度振幅の二乗値の累積値として定義されるエネルギーの水平内分布を調べた。



周波数帯域 $[\omega_1, \omega_2]$ における図-5 座標系地震動の主軸は、式(3)に示すようにフーリエスペクトルで定義される量を、区間 $[\omega_1, \omega_2]$ で積分して得られる $[E(\omega_1, \omega_2)]$ の非対角成分をゼロにすることにより求められる⁷⁾。

$$[E(\omega_1, \omega_2)] = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \text{Re} \begin{bmatrix} F_x(\Omega) \cdot \bar{F}_x(\Omega) & F_x(\Omega) \cdot \bar{F}_y(\Omega) \\ \bar{F}_x(\Omega) \cdot F_y(\Omega) & F_y(\Omega) \cdot \bar{F}_y(\Omega) \end{bmatrix} d\Omega \quad (3)$$

$$F_x(\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} a_x(t) e^{-j\Omega t} dt \quad \dots\dots(4)$$

$a_x(t)$: x 方向の加速度波形

また、図-5に示すように、 x 軸から時計回りに θ 方向の波形のエネルギー値は次式から求められる。

$$E_\theta = [\cos \theta, \sin \theta] [E(\omega_1, \omega_2)] \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad \dots(5)$$

一つの観測波形に対して、時間軸で各時刻を中心としてコサインフィルターを乗じた波形をフーリエ変換し、そのフーリエスペクトルから定義される $[E(\omega_1, \omega_2)]$ を用いて求めた地震動の主軸および E_θ の平方根の分布⁷⁾ をエルセントロ・アレーNo.3とNo.7について、図-6および図-7に示す。アレー観測点No.3では、強軸方向は周期約1秒以上では断層線に平行方向、No.7では周期約0.5秒以上では断層線に直交方向となっている。この解析手法によって、各時刻で各周期成分がどの方向に震動しているか定量的に知ることができる。

しかし、観測記録の絶対時刻が不明である観測点が多いため、各時刻ごとの震動方向を観測点間で比較することは残念ながらできない。このため、全継続時間を対象とし、三つの周期帯域に分けて比較した。

考慮する周期領域は、表面波による影響が比較的少ないと考えられる3秒までとし、0.1~0.4秒、0.4~1秒および1~3秒の三つの周期帯域について検討した。

3.2 余震記録の震動方向

余震記録の水平2成分を用いて各周期帯域について求めた、主軸方向とエネルギー分布 (E_θ) の平方根を図-8~10に示す。これから、周期帯域1~3秒の観測記録の強軸方向はE05, E06, E07, BCR では断層線にほぼ直交方向、HVP, E09では断層線とほぼ平行方向である。また、断層線に対して45°方向のE04, E10は平行あるいは直交方向に比べエネルギーが小さい。この傾向は、図-11に示すように点震源にダブルカップルの力が作用したときのSH波のラディエーションパターンと類似していることが分かる。周期帯域0.1~0.4秒においては、1~3秒の場合に比べ E_θ の平方根の水平内分布の方向性はみられなくなり、震動方向がランダムとなる傾向がある。また、0.4~1秒では、1~3秒と0.1~0.4秒の中間的な傾向を示している。

3.3 本震記録の震動方向

本震記録について、各周期帯域について求めた主軸およびエネルギー分布 (E_θ) の平方根を図-12~14に実線で示す。破線は3.4で述べるが、近似的な理論地震動について求めた主軸である。まず、観測記録の周期帯域1~3秒における強軸方向についてみると、E04, E05,

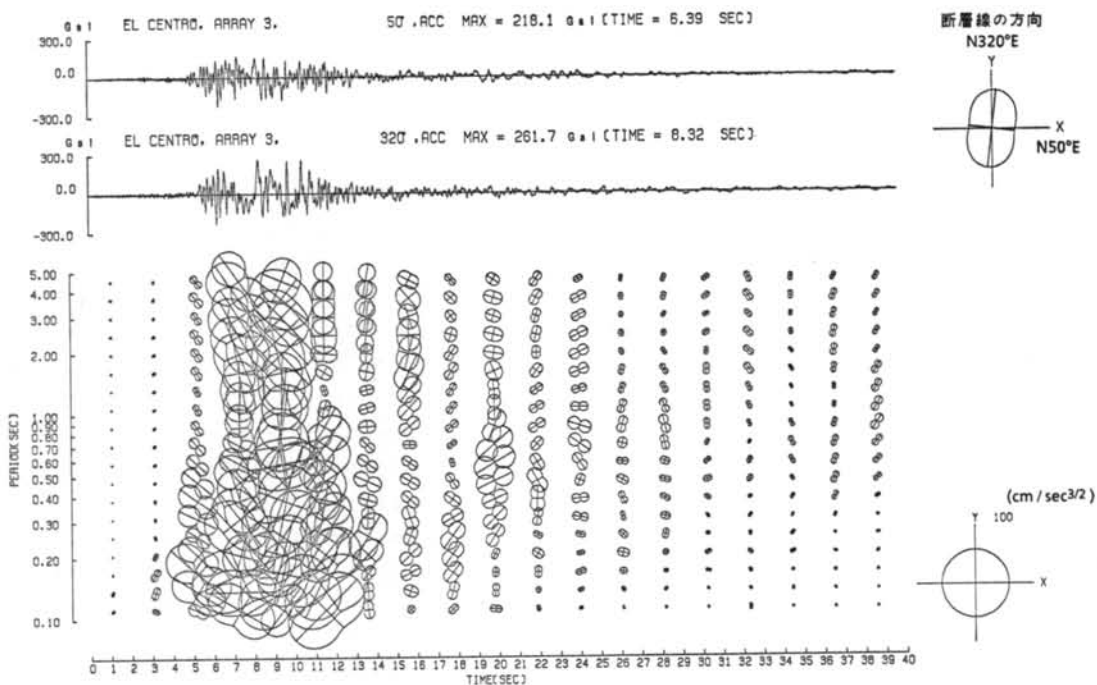


図-6 二次元非定常スペクトル (本震, エルセントロ・アレーNo 3)

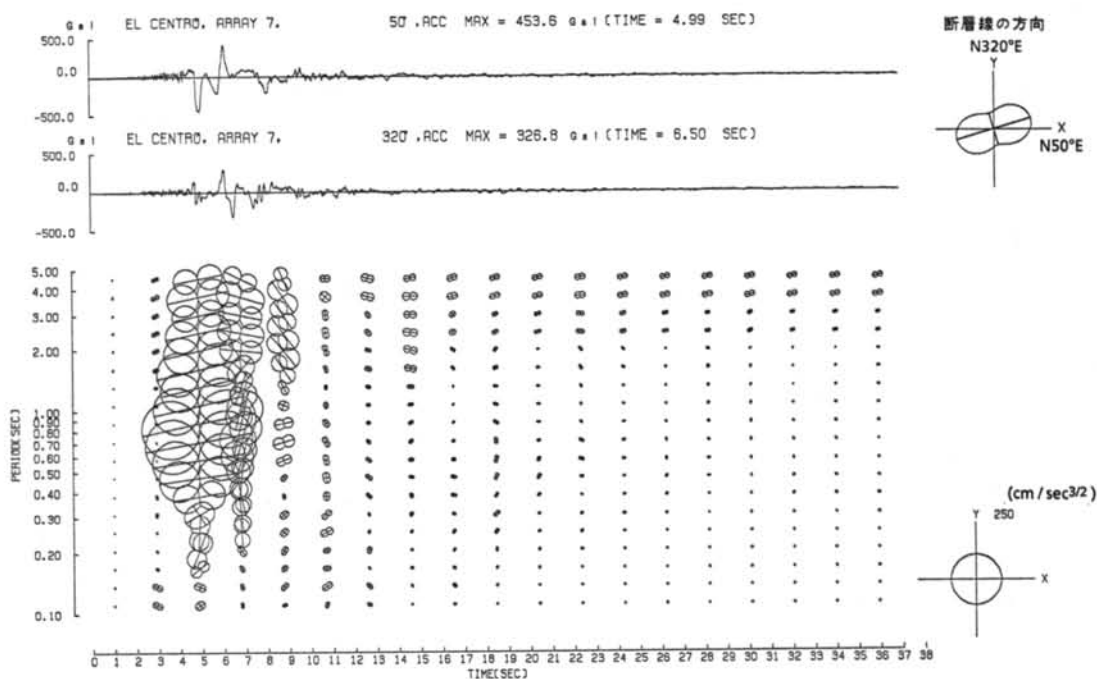


図-7 二次元非定常スペクトル (本震, エルセントロ・アレーNo 7)

E06, E07, BCR, AGR などの断層線近くでは断層線にほぼ直した方向, E02, E03, E08, E11, E12, E13などの断層線から少し離れた点では断層線にほぼ平

行方向, より離れた点の CAL, BRW, PAR, COM, CHI では破壊開始点付近と観測点を結ぶ線に直した方向となっている。

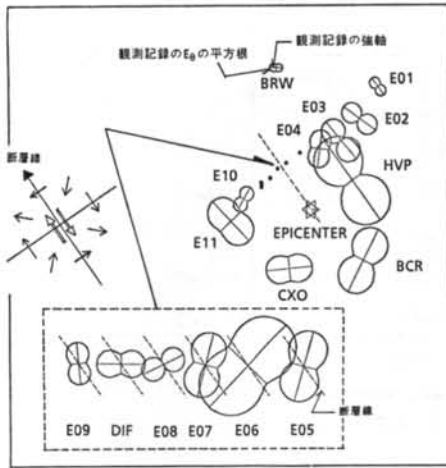


図-8 余震記録の主軸方向とエネルギー分布(周期1~3秒)

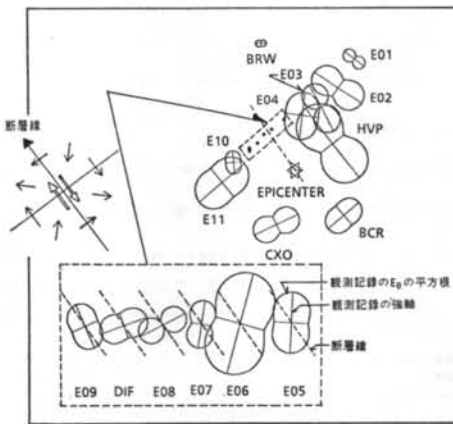


図-9 余震記録の主軸方向とエネルギー分布(周期0.4~1秒)

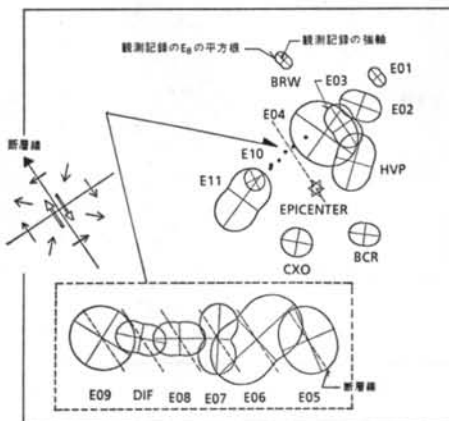


図-10 余震記録の主軸方向とエネルギー分布(周期0.1~0.4秒)

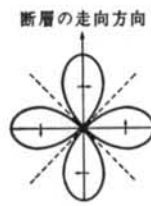


図-11 SH波のラディエーションパターン

周期帯域0.1~0.4秒においては、BCR, E11では1~3秒の帯域と同じ方向性を示しているが、他の多くの観測点ではエネルギーの分布が円形に近くなり、方向性があまり見られず、ランダムである。また、周期帯域0.4~1秒においても方向性が見られない観測点もあるが、だいたい0.1~0.4秒と1~3秒の中間的

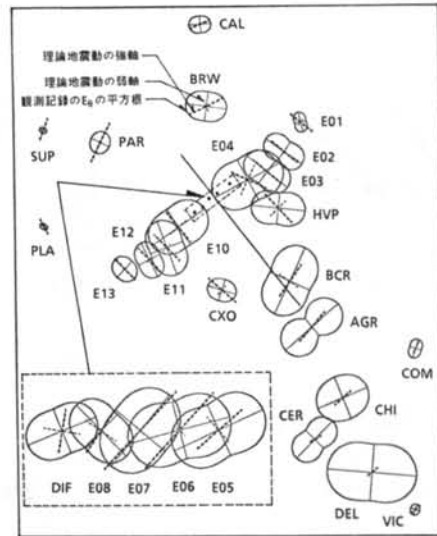


図-12 本震記録と理論地震動の主軸方向とエネルギー分布(周期1~3秒)

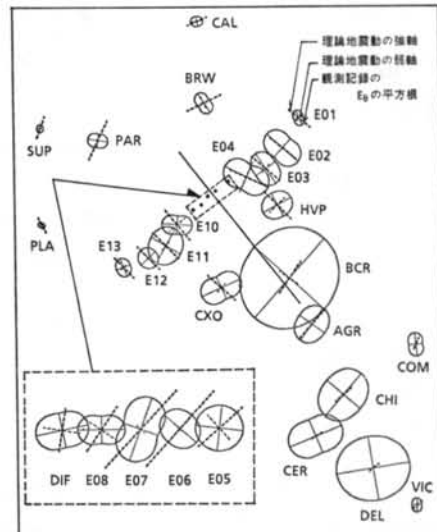


図-13 本震記録と理論地震動の主軸方向とエネルギー分布(周期0.4~1秒)

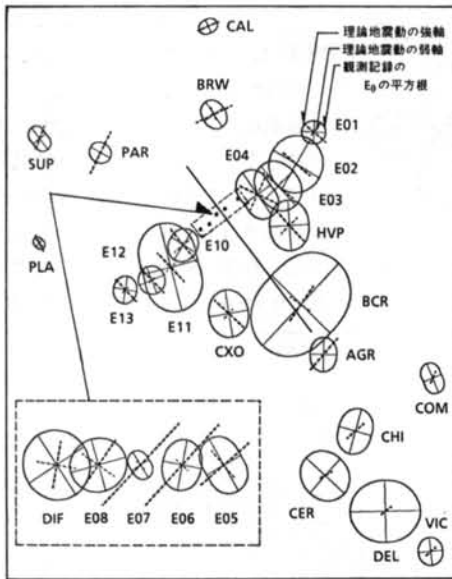


図-14 本震記録と理論地震動の主軸方向とエネルギー分布(周期0.1~0.4秒)な傾向を示している。

3.4 理論地震動による震動方向

次に、震動方向の定性的傾向について考察するため、近似的に理論地震動を求め、観測記録によるものと比較した。

断層モデルとしてハスケルモデルを用い、破壊が一樣に進行する場合の遠方場におけるS波のみを対象とした。このとき、地動変位 $u(t)$ は次のようになる。

$$u(t) = \frac{R}{4\pi\rho\beta^3} \frac{W}{r} \int_0^L \mu \dot{D} \left(t - \frac{r}{\beta} - \frac{x}{V_R} \right) dx \quad \dots(6)$$

R は方位特性、 ρ は単位体積重量、 β はS波速度、 W は断層幅、 L は断層長さ、 r は震源距離、 μ はせん断弾性係数、 D はくい違い時間関数であり、ここでは傾斜関数を用いている。 \dot{D} は D の時間に関する一階微分、 V_R は破壊伝播速度を表わす。用いた断層パラメータを表-2に示す。

ハスケルモデルによる理論地震動の時刻歴波形の例をE02とE07について図-15に示す。同図(b)は式(5)から得られる E_0 の平方根を示している。強軸方向はE02では断層線に平行方向、E07では断層線に直交方向となっている。

各観測点で大きさを規準化した理論地震動の変位軌跡と、全周期帯域を対象とした主軸方向および E_0 の平方根を図-16に示す。本震の理論地震動の強軸方向は、断層近傍では断層の走向方向に直交方向、断層線から少し

項目	値	項目	値
破壊開始点	北緯 32.659°N	くい違い量	61.7(cm)
	西経 115.340°W	立ち上がり時間	1.3(sec)
	深さ 0.0km	破壊伝播速度 (V_R)	2.5(km/sec)
断層長さ(L)	36.0km	破壊形式	uni-lateral
断層幅(W)	10.5km	せん断弾性係数(μ)	3.0×10^{11} (dyne/cm ²)
断層の走向	323°	S波速度(β)	3.35(km/sec)
dip angle	90°	Q値	∞

表-2 断層パラメータ

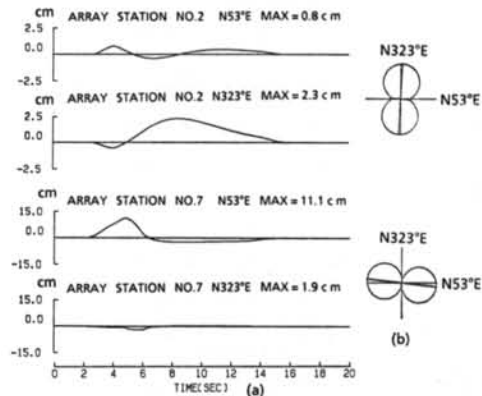


図-15 ハスケルモデルを用いて作成した理論地震動波形の例

図-16 ハスケルモデルを用いて作成した理論地震動波形の例

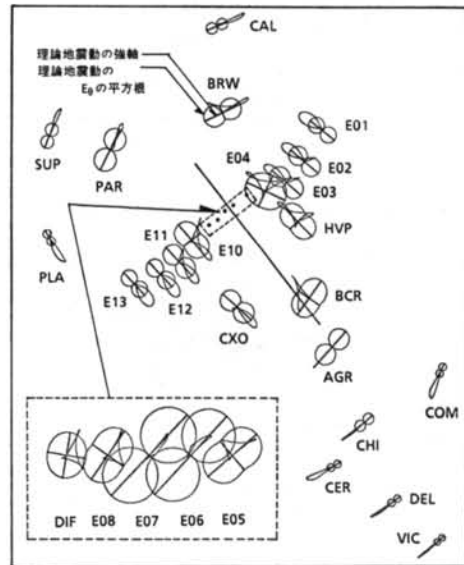
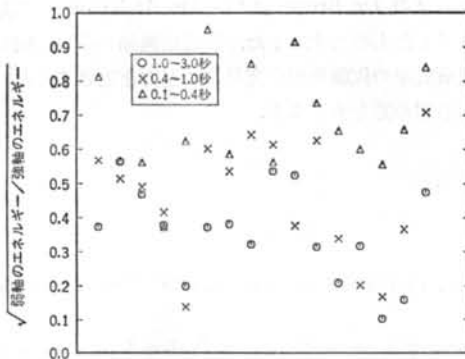
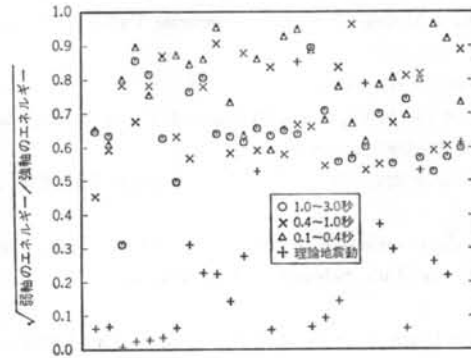


図-16 理論地震動の主軸方向およびエネルギー分布と規準化した変位軌跡

離れた点では平行方向である。観測と理論を比較すると、断層線に近いE04、E06、HVPでは差が見られる



図一七 余震記録の水平面内におけるエネルギー分布のパラメータ値



図一八 本震記録の水平面内におけるエネルギー分布のパラメータ値

が、他の観測点では両者は比較的良好に一致していることが分かる。また、エネルギーの水平面内での分布は理論では破壊が進行した方向に大きく、断層線からの距離に応じて小さくなる傾向にあり、アメリカ側の観測記録のそれと類似した傾向を示している。一方、メキシコ側では DEL が他の観測点に加えて非常に大きく、理論によるそれと傾向が異なっている。このことは、DEL 地点の観測波形をみると地盤の増幅特性の影響が現われているため、観測点の地盤条件と破壊が南東方向にも約10km進んだこと¹²⁾が関係していると思われる。

3.5 エネルギー分布の形状

震動の卓越方向が周期にどのように依存しているかを別の面から捉えるため、水平面内におけるエネルギー分布の丸さの度合を示すパラメータを求めた。これは、強軸方向のエネルギーに対する弱軸方向のその比の平方根である。これにより分布は一義的に決定され、例えば値が1のとき円形となる。

余震記録について、上記のパラメータを各周期帯域ご

とに求めた結果を図一七に示す。縦軸は上記のパラメータ、横軸は震源に対する方位角の小さい順に、等間隔で並べている。周期1~3秒では値は約0.1~0.6、周期0.4~1秒では約0.1~0.7、周期0.1~0.4秒では約0.4~0.95となっており、周期が短くなるにつれ値が大きくなっていることが分かる。このことは、周期が短くなるにつれ分布が円形に近づき、すなわち方向性がなくなることの意味している。

本震記録について同様に求めた結果を図一八に示す。縦軸の値は、周期1~3秒では約0.3~0.9、周期0.4~1秒では約0.45~1.0、周期0.1~0.4秒では約0.6~1.0である。余震記録の場合と同様に、周期が短くなるにつれ値が大きくなっていることが分かる。

理論地震動の場合、値が約0~0.6となっているが、これは震源深さを0kmとしているためSH波だけが発生し、方位による方向性が強くなるためである。

また、余震と本震記録の値を比較すると、例えば周期1~3秒では余震記録の方が値が小さくなっている。これは、本震が多数の点震源の集まりと考えられるのに対し、余震は一つの点震源と見なせるため、方向性が強く現われたためと理解できる。

§ 4. 結論

1979年 Imperial Valley 地震の本震と最大余震記録を用いて、最大加速度の方位依存性と震動の方向性を調べた。

Boatwright & Boore と同じ手法により最大加速度の距離減衰の影響を補正し、余震と本震との比をとることにより地盤の影響を除去すると、破壊の進行方向で最大値が大きく、またばらつきが減る傾向が認められた。

次に、周期を三つの帯域に分けて、余震の観測記録について強軸方向を求めた結果、周期1秒以上では点震源によるSH波のラディエーションパターンと類似し、一方周期0.4秒以下では方向性がみられないことが分かった。

さらに、本震の観測記録について余震記録と同様に地震動の主軸とエネルギーの水平面内分布を三つの帯域について求め、その傾向を調べるとともにハスケルモデルによる理論地震動のそれと対比した。観測記録は、周期1秒以上では断層近傍を除いて遠方場の理論に近い傾向を示し、方向性が明確に現われている。一方、周期0.4秒以下では方向性は見られず、ランダムな傾向を示すことが分かった。

謝辞 本震記録は、USGS で管理している記録を東京大学地震研究所の大沢胖教授から入手したものです。また、アメリカ側の余震記録は東京工業大学教授（当時）の小林啓美博士から、メキシコ側の余震記録は UCSD

グループの Dr. Brune および Dr. Anderson のご好意で入手したものです。また、理論地震動の作成に関して大崎研究室の佐藤俊明研究員にご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) U. S. Geological Survey: "The Imperial Valley California, Earthquake October 15, 1979" USGS Professional Paper, 1254 (1982)
- 2) R. L. Porcella: "Geotechnical Investigation at Strong-Motion Stations in the Imperial Valley, California" USGS Open-File Report, 84-562 (1984)
- 3) J. G. Anderson, J.N. Brune, J. Prince & F.L. Vernon: "Preliminary Report on the Use of Digital Strong Motion Recorders in the Mexicali Valley, Baja California" Bull. Seism. Soc. Am., Vol.73(1983) pp.1451~1467
- 4) S. Midorikawa et al.: "Characteristics of Near Field Ground Motions during the Imperial Valley Earthquake of 1979" Proc. 8th WCEE, Vol.2 (1984) pp.265~272
- 5) 吉川他: "震源近傍における震動方向" 地震学会講演予稿集 (1986年4月) p.164
- 6) H. L. Liu & D.V. Helmberger: "The 23:19 Aftershock of the 15 October 1979 Imperial Valley Earthquake: More Evidence for an Asperity" Bull. Seism. Soc. Am., Vol.75(1985) pp.689~708
- 7) 滝沢, 関: "建築物造物に対する強震地動の破壊能の多次元的評価と耐震設計法への応用" 昭和59年度科学研究費補助金(一般研究B)研究成果報告書(1985年3月)
- 8) J. Boatwright & D. M. Boore: "Analysis of the Ground Accelerations Radiated by the 1980 Livermore Valley Earthquakes for Directivity and Dynamic Source Characteristics" Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 72(1982) pp.1843~1865
- 9) Y. Fujino, T. Yokota, Y. Hamazaki & R. Inoue: "Multiple Event Analysis of 1979 Imperial Valley Earthquake using Distinct Phases in Near-Field Accelerograms" Proc. JSCE, No.344/I-1 (1984) pp.127s~136s
- 10) K. Dan, T. Tanaka & T. Watanabe: "Simulation and Prediction of Strong Ground Motion Near Earthquake Fault" ORI Report, 86-01(1986)
- 11) R. Madariaga: "High-frequency Radiation from Crack (Stress-drop) Models of Faulting" J. Geophys., Vol. 51 (1977) pp.625~652
- 12) R. J. Archuleta: "A Faulting Model for the 1979 Imperial Valley Earthquake" J. Geophys. Res., Vol.89(1984) pp.4559~4585