

### 3. 地震動特性の検討と評価

鳥取県西部地震で観測された地震動の特性を調べるために、収集した強震記録の最大加速度、継続時間、振幅波形の面積（パルスの大きさ）、スペクトル強度  $SI$  値、減衰定数 5% の弾性加速度応答スペクトル、減衰定数 5% の所要降伏水平震度スペクトルに着目する。

#### 3-1 最大加速度

最大加速度は、地震動の強さを表す尺度として従来からよく用いられており、最大加速度に質量を乗じることにより力が得られることから、工学の分野で多用されてきた。最大加速度は、地震動に含まれる周波数成分のうち、短周期成分の影響が大きいため、周期が短い構造物（剛性が非常に大きい構造物）にとっては地震動が構造物に与える影響を表す指標となる。最大加速度は次式によって与えられる。

$$\ddot{z}_{gmax} = \left\{ \max |\ddot{z}_g(t)|, 0 \leq t \leq T_0 \right\} \quad (3-1)$$

ここに、 $\ddot{z}_{gmax}$  : 最大加速度、 $\ddot{z}_g(t)$  : 観測された加速度記録の時刻  $t$  における値、 $T_0$  : 観測記録の観測時間である。

表 3-1 は、各観測地点の地盤種別と震央距離、および、そこで観測された強震記録の最大加速度とその発生時刻を示したものである。表には、後述する地震動の継続時間、ゼロクロス間の面積比、 $SI$  値もあわせて示してある。また、本業務で対象とした強震記録の波形は、“3-5 弾性加速度応答スペクトル（図 3-13 と図 3-14 参照）”に示してある。

表 3-1(1)より、鳥取県西部地震で観測された最大加速度は、最も震央から近い日野において NS 成分 0.95g、EW 成分 0.77g、UD 成分 0.79g とどの方向にも大きな値が観測されていることがわかる。この他に、震央距離が 38km と遠いにも関わらず新見で 0.83g(EW 成分)、震央距離が 15km 以内の江府、伯太、日南で、それぞれ 0.74g(NS 成分)、0.73g(NS 成分)、0.64g(NS 成分)が観測されている。過去の地震では、釧路沖地震の釧路気象台で 0.94g(EW 成分)、ノースリッジ地震の Sylmar 駐車場で 0.84g(EW 成分)、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台で 0.83g(NS 成分)、JR 鷹取駅で 0.68g(EW 成分)が観測されており、鳥取県西部地震はこれらの過去の地震と同等あるいはそれ以上の最大加速度が観測されたことがわかる。

表3-1(1) 地震動特性一覧

地震		2000.10.6 鳥取県西部地震																				
観測地点	地盤種別	震央距離(km)	最大加速度(g)			最大値発生時刻(sec)			継続時間[累積エネルギー-5~95%](sec)			ゼロクロス間の面積比(%)						SI値(cm/sec)				
			NS成分	EW成分	UD成分	NS成分	EW成分	UD成分	NS成分	EW成分	UD成分	成分	繰り返し回数					1~5回累積	NS成分	EW成分	UD成分	
													1回	2回	3回	4回	5回					
K-NET による 観測記録	HRS001 高野	I	48.7	-0.42	-0.41	-0.25	24.17	25.44	25.46	15.03	13.61	16.33	NS	1.5	1.4	1.2	1.1	1.0	6.2	12.87	10.98	4.07
	HRS002 東城	I	43.0	0.49	-0.42	0.14	22.57	22.84	26.08	14.47	15.19	16.49	EW	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	2.5	9.15	7.07	3.56
	HRS021 西城	I	41.7	0.27	-0.27	0.21	28.71	23.89	20.21	20.62	20.88	21.09	NS	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	2.4	5.62	6.06	3.13
	OKY004 新見	I	38.3	0.54	0.83	-0.17	23.25	25.79	26.75	16.00	10.76	19.15	EW	1.8	1.6	1.5	1.4	1.3	7.7	16.60	33.48	5.48
	OKY005 落合	II	46.1	0.29	-0.34	-0.21	21.65	21.71	21.79	24.20	19.76	22.55	EW	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	7.0	19.72	21.20	5.98
	SMN001 美保関	II	33.3	0.23	0.25	-0.08	24.42	23.24	20.76	12.55	12.04	13.65	EW	3.1	2.2	1.9	1.9	1.7	10.8	16.01	19.37	4.22
	SMN003 横田	I	25.5	0.51	-0.32	0.16	22.37	23.91	18.64	11.34	15.52	13.51	NS	1.9	1.5	1.2	1.1	1.0	6.8	13.79	7.65	3.26
	SMN007 邑智	I	72.1	0.23	-0.18	0.08	26.62	27.29	25.81	22.47	22.53	22.08	NS	1.4	0.8	0.8	0.8	0.8	4.7	6.75	5.89	1.60
	SMN015 広瀬	I	18.6	-0.15	0.27	0.16	21.98	23.36	20.40	9.96	9.39	10.33	NS	4.6	3.9	3.4	2.1	2.1	16.1	24.51	17.31	6.87
	TTR006 赤碕	I	36.5	-0.32	-0.26	0.08	24.70	24.15	23.73	15.28	16.82	18.89	NS	1.2	1.0	1.0	0.9	0.8	4.8	11.25	8.73	3.88
	TTR007 江府	I	12.9	-0.74	0.58	0.41	21.18	22.43	21.84	9.48	12.91	9.57	NS	3.4	2.6	2.4	2.0	1.7	12.1	47.81	27.84	9.22
	TTR008 米子	II	16.4	0.32	0.39	0.31	22.24	22.18	21.78	18.72	18.13	10.28	EW	6.3	4.5	4.3	3.6	2.1	20.8	47.12	65.44	11.75
TTR009 日南	I	13.3	-0.64	0.61	0.30	20.87	21.12	18.55	11.03	11.15	11.44	NS	2.7	2.5	2.1	1.6	1.6	10.5	30.85	29.92	10.73	
KiK-net による 観測記録	HRS03 御調	I	86.4	0.23	0.35	-0.24	34.85	32.64	33.66	25.62	25.37	20.62	NS	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	2.8	6.89	9.40	4.99
	HRS06 口和	II	56.6	-0.19	0.25	0.08	25.50	25.50	18.40	15.80	18.82	19.34	EW	1.6	1.4	1.3	1.2	1.2	6.7	9.12	9.45	2.87
	OKY08 哲多	I	41.2	0.23	0.24	-0.21	22.56	22.48	22.77	25.56	22.16	20.26	EW	1.1	0.9	0.9	0.7	0.7	4.2	8.38	9.81	4.78
	OKY09 湯原	II	32.2	-0.19	0.29	0.26	21.98	18.18	18.42	25.10	24.98	18.62	EW	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6	3.5	10.42	9.93	7.61
	OKY10 上斎原	I	52.8	-0.29	0.13	-0.09	25.20	28.27	25.15	14.36	22.18	22.48	NS	1.6	1.5	1.4	1.4	1.4	7.3	11.33	4.47	2.78
	OKY14 北房	-	45.5	0.27	0.45	-0.17	21.76	21.42	21.78	17.40	13.41	16.45	EW	2.1	1.6	1.5	1.4	1.3	7.9	8.61	20.00	3.35
	SMNH01 伯太	I	8.0	0.73	-0.62	-0.64	23.48	22.69	20.93	13.23	31.61	16.89	NS	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7	9.6	41.14	34.23	18.37
	SMNH02 仁多	I	24.4	0.58	-0.32	0.37	23.77	24.22	23.84	18.48	22.55	13.03	NS	1.7	1.6	1.2	0.9	0.8	6.1	24.93	11.96	9.85
	SMNH10 美保関	-	31.3	-0.16	0.23	-0.14	23.53	23.81	23.41	12.87	9.18	12.27	EW	3.4	3.4	3.2	3.1	3.1	16.4	9.48	21.08	5.96
	SMNH12 吉田	-	46.4	0.23	-0.26	-0.13	25.33	25.78	25.14	18.42	24.56	18.57	NS	1.0	0.9	0.8	0.7	0.7	4.1	6.98	6.32	2.32
	TTRH02 日野	II	6.6	-0.95	-0.77	0.79	19.23	20.17	19.11	8.32	36.02	14.85	NS	4.7	4.5	3.9	3.9	3.9	20.9	112.85	94.87	71.68
	TTRH04 赤碕	-	33.3	-0.19	0.21	-0.22	24.64	24.51	23.48	15.23	21.94	14.24	NS	1.8	1.7	1.7	1.6	1.4	8.2	14.80	12.24	5.39

表3-1(2) 地震動特性一覧

地震および観測地点	地盤種別	震央距離(km)	最大加速度(g)			最大値発生時刻(sec)			継続時間[累積エネルギー-5~95%](sec)			成分	ゼロクロス間の面積比(%)					SI値(cm/sec)			
			NS成分	EW成分	UD成分	NS成分	EW成分	UD成分	NS成分	EW成分	UD成分		繰り返し回数					1~5回累積	NS成分	EW成分	UD成分
													1回	2回	3回	4回	5回				
1968.5.16 十勝沖地震 八戸港	I~II	—	0.27	0.21	—	33.34	35.36	—	42.90	35.16	—	EW	3.7	3.2	3.1	3.0	2.5	15.4	30.33	39.64	—
1993.1.15 釧路沖地震 釧路気象台	I	7	0.83	-0.94	0.48	22.96	23.38	23.38	24.38	19.02	23.16	EW	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	6.7	73.81	76.21	23.58
1994.1.17 ノースリッジ地震 Sylmar駐車場	I~II	—	0.60	0.84	0.54	4.08	4.20	3.96	7.10	5.36	8.56	EW	10.1	9.0	7.0	4.7	4.7	35.6	70.58	113.30	19.50
1995.1.17 兵庫県南部地震 神戸海洋気象台	I	15	-0.83	0.63	0.34	33.52	33.44	32.72	8.40	9.56	9.78	NS	7.1	5.2	4.8	4.7	4.5	26.3	112.65	85.64	46.43
1995.1.17 兵庫県南部地震 JR鷹取駅	II	11	-0.65	-0.68	0.30	4.63	1.64	3.76	11.35	9.95	13.52	NS	9.3	5.8	5.6	4.4	4.0	29.0	142.09	125.95	20.05
1995.1.17 兵庫県南部地震 東神戸大橋周辺地盤上	III	30	-0.33 (N12W成分)	0.29 (N78E成分)	-0.40	16.22 (N12W成分)	18.81 (N78E成分)	16.96	8.08 (N12W成分)	25.37 (N78E成分)	13.28	N12W	10.3	7.5	7.3	7.3	4.6	37.1	75.80 (N12W成分)	57.21 (N78E成分)	41.43
1995.1.17 兵庫県南部地震 神戸ポートアイランド	III	16	-0.35	0.29	-0.57	15.20	14.06	13.28	7.93	14.26	14.26	NS	10.8	8.9	5.6	5.3	5.2	35.8	71.34	51.45	58.84

図 3-2 は、鳥取県西部地震の震源と各観測地点の位置に、地震動の最大加速度を示したものである。ばらつきはあるが、震源から遠くなるほど、最大加速度が小さくなる傾向が表れている。

一般に、地震による振動の大きさは震源からの距離の増加にともない減衰していく傾向がある。このような震源からの距離と地震動の大きさの関係を表す式を距離減衰式といい、数多くの地震観測記録の統計分析に基づいた様々な経験式が提案されている。ここでは、鳥取県西部地震と過去の地震観測記録の距離減衰特性を比較するために、距離減衰式と鳥取県西部地震で得られた強震記録の最大加速度を比較する。距離減衰式は、式(3-2)～式(3-5)および式(3-6)で示される土木研究所の提案式<sup>1)</sup>と福島<sup>2)</sup>の式を対象とした。

土木研究所の提案式

$$\text{水平方向： } A = 987.4 \times 10^{0.216M_J} \times (\Delta + 30)^{-1.218} \quad (\text{I 種地盤}) \quad (3-2)$$

$$A = 232.5 \times 10^{0.313M_J} \times (\Delta + 30)^{-1.218} \quad (\text{II 種地盤}) \quad (3-3)$$

$$\text{鉛直方向： } A = 117.0 \times 10^{0.268M_J} \times (\Delta + 30)^{-1.190} \quad (\text{I 種地盤}) \quad (3-4)$$

$$A = 88.2 \times 10^{0.297M_J} \times (\Delta + 30)^{-1.190} \quad (\text{II 種地盤}) \quad (3-5)$$

福島<sup>2)</sup>の式

$$\text{水平方向： } \log A = 0.51M_J - \log(\Delta + 0.006 \times 10^{0.51M_J}) - 0.0033\Delta + 0.59 \quad (3-6)$$

ここで、 $A$ ：最大加速度( $\text{cm/sec}^2$ )、 $M_J$ ：気象庁マグニチュード、 $\Delta$ ：震央距離(km)である。

土木研究所の提案式は、日本の地盤で得られた数多くの強震記録（水平方向 88 地震 394 データ、鉛直方向 57 地震 119 データ）から求めた距離減衰式であり<sup>1)</sup>、道路橋示方書 V 耐震設計編に規定される設計地震動のベースとなっている。福島<sup>2)</sup>の式は、日本の強震記録（32 地震 555 データ）に加え、海外の断層近傍の記録（20 地震 278 データ）を含めて求めた距離減衰式で、兵庫県南部地震で観測された断層近傍の強震記録への適合性が高いことが確認されている<sup>2)</sup>。

図 3-3 は地盤種別ごとに、距離減衰式と、各観測地点の震央距離と最大加速度の関係をあわせて示したものである。地盤種別が不明な観測地点の最大加速度は、I 種地盤の図と II 種地盤の図の両方に示した。同図(1)より、鳥取県西部地震において I 種地盤上で観測された水平方向の最大加速度の距離減衰特性は、震央距離 30km～70km の範囲では、バラつきは大きいものの土木研究所の提案式や福島<sup>2)</sup>の式と同じような傾向を示している。しかし、震央距離が 20km 以内では、鳥取県西部地震の最大加速度は、土木研究所の提案式や福島<sup>2)</sup>の式で表される値よりも大きくなっている。鉛直成分の最大加速度と震央距離の関係も、鳥取県西部地震で観測された最大加速度の方が土木研究所の提案式や福島<sup>2)</sup>の式よりも大きくなる傾向にある。図 3-3(2)に示す II 種地盤上で観測された水平成分の最大加速度は、土木研究所の提案式や福島<sup>2)</sup>の式と良く一致していることがわかる。鉛直成分は、I 種地盤上で観測された地震動と同様に、鳥取県西部地震で観測された最大加速度の方が土木研究所の提案式よりも大きくなっている。



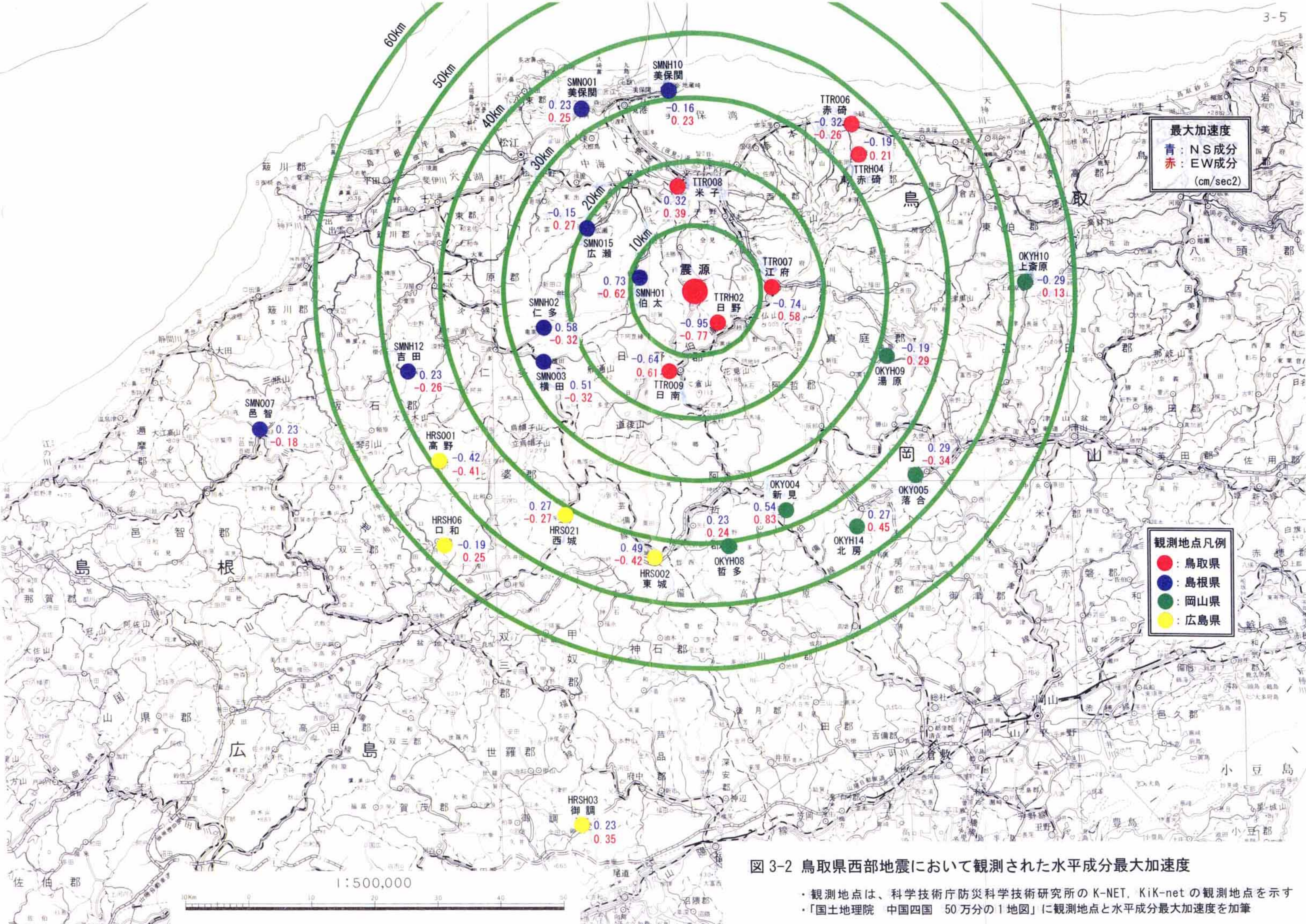
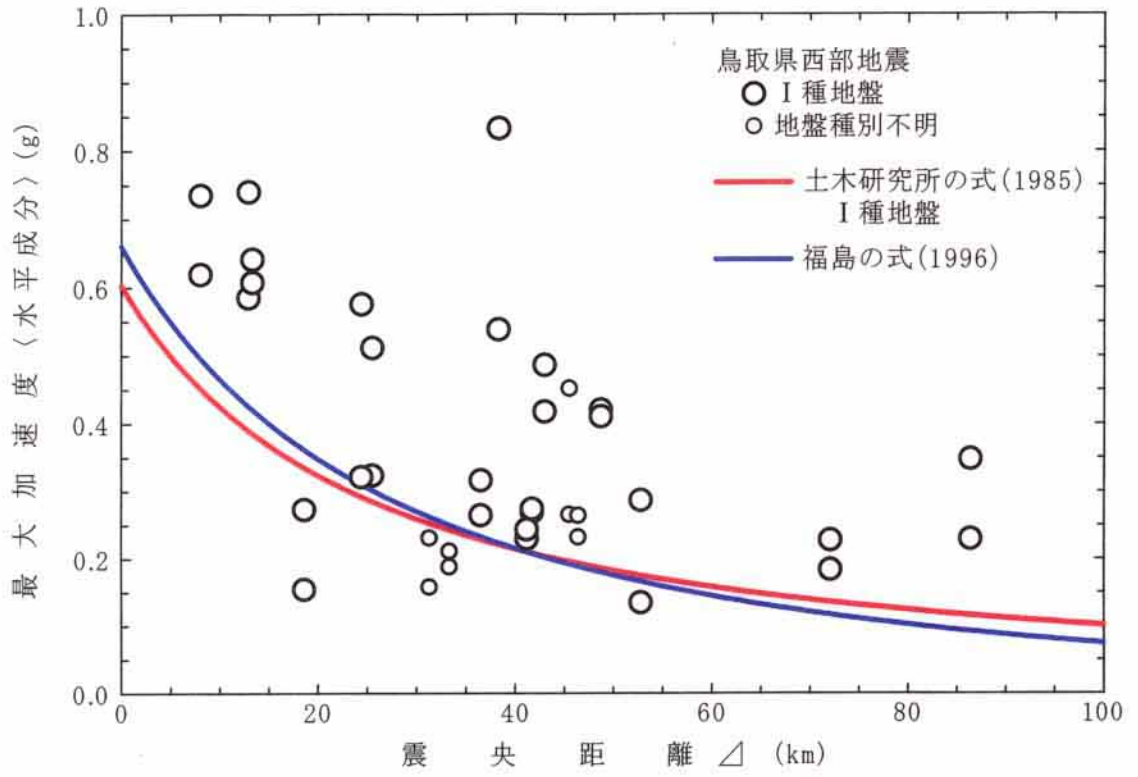


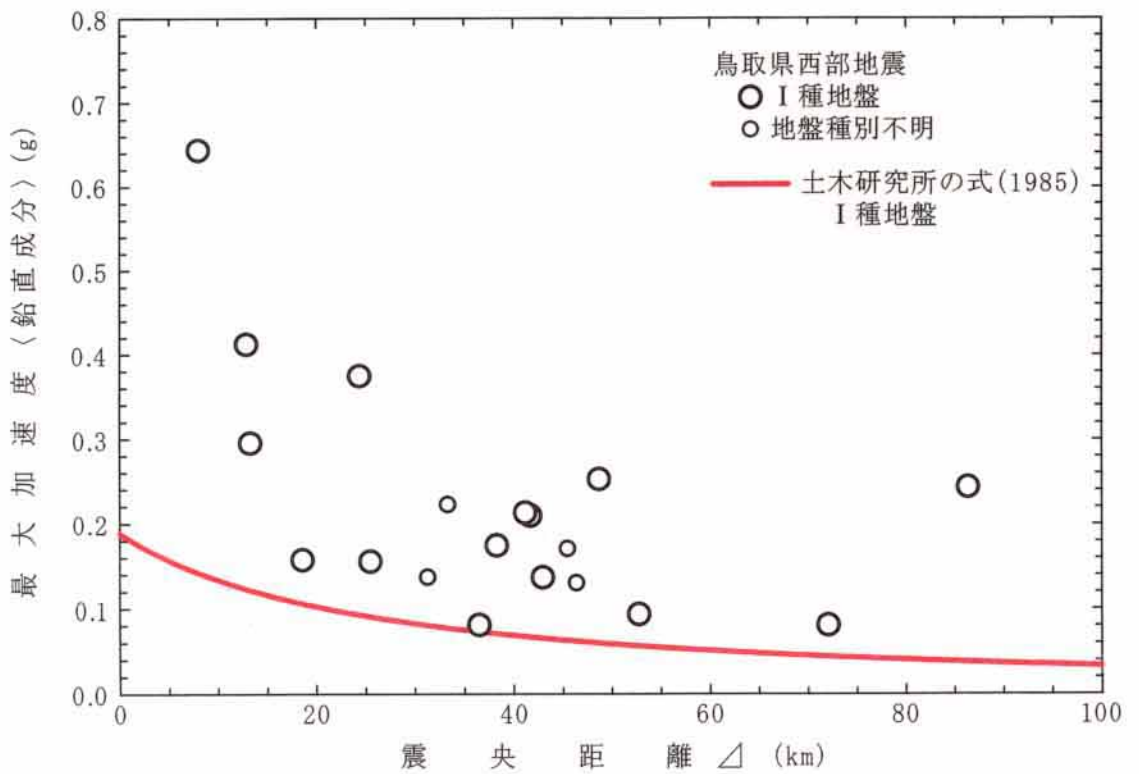
図 3-2 鳥取県西部地震において観測された水平成分最大加速度

・観測地点は、科学技術庁防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net の観測地点を示す  
 ・「国土地理院 中国四国 50 万分の 1 地図」に観測地点と水平成分最大加速度を加筆





(1) 水 平 成 分



(2) 鉛 直 成 分

図3-3 (1) 距離減衰式と最大加速度の関係 (I種地盤)

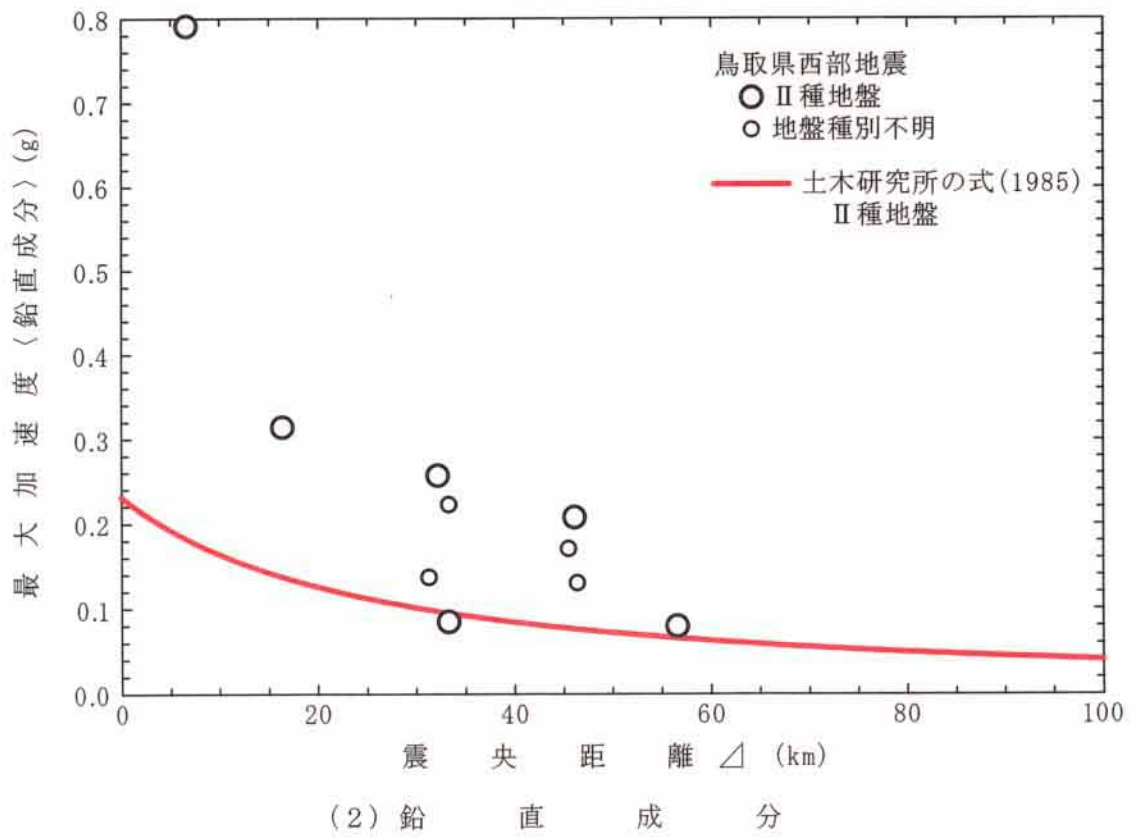
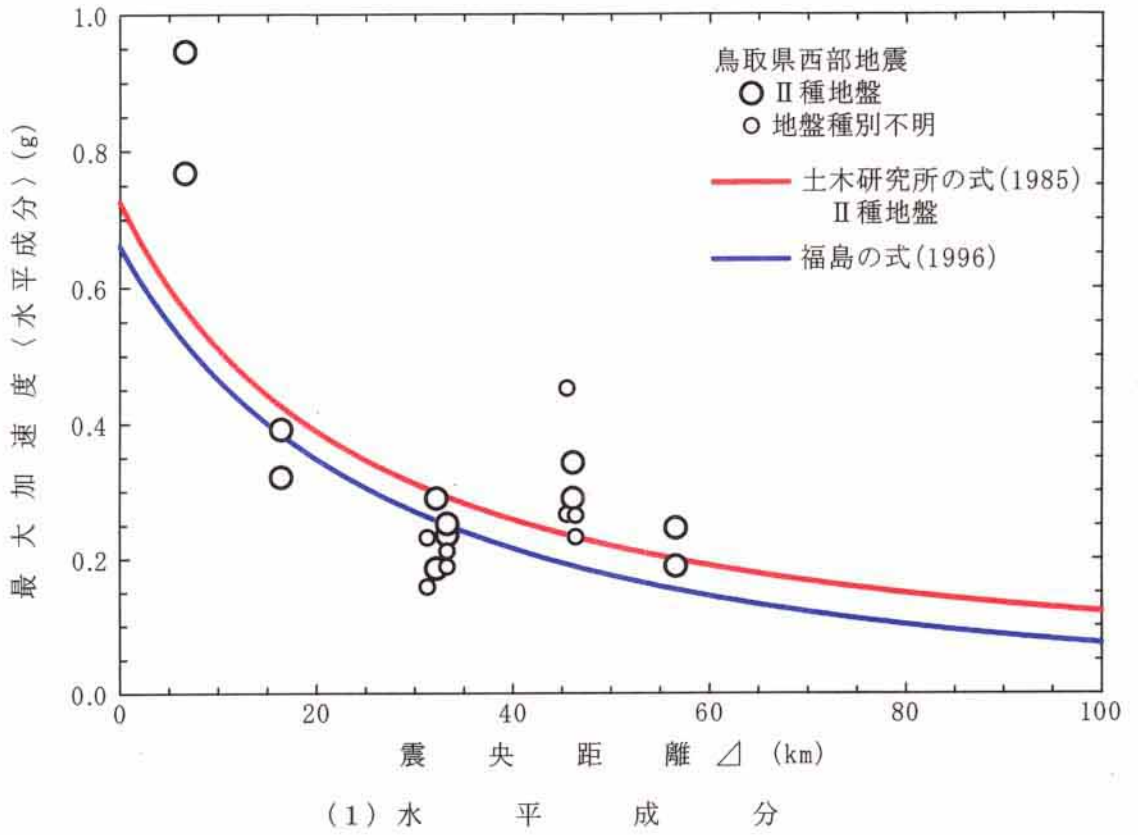


図3-3 (2) 距離減衰式と最大加速度の関係 (II種地盤)

### 3-2 地震動の向き

地震計で観測される地震動は、地震計の感震方向である、南北方向、東西方向、上下方向のそれぞれの加速度波形である。しかし、震源から生じた実際の地震動は、 $360^\circ$  方向から各観測地点に到達するため、地震計で観測された地震動が、その観測地点の最大地震動を表しているわけではない。ここでは特に水平方向に着目し、別々に観測された南北方向（NS 成分）と東西方向（EW 成分）のデータを合成することで、地震動が最も大きくなる方向を検討する。

図 3-4 は、江府で観測された加速度波形の NS 成分と EW 成分である。図 3-5 の左の図は、図 3-4 で示した加速度波形の NS 成分を縦軸にとり、EW 成分を横軸にとって加速度波形を合成したリサージュ（粒子軌跡）図である。図中の●印は、合成した加速度の最大値であり、NS 成分の最大加速度  $0.74g$ 、EW 成分の最大加速度  $0.58g$  より大きく、 $0.82g$  となっており、南西方向に生じていることがわかる。中央の図は、加速度波形を積分して求めた速度波形のリサージュ図、右の図は変位波形のリサージュ図である。このように、地震波形の NS 成分と EW 成分を合成することで、地震動水平成分がどの方向に卓越していたかがわかる。当然、地震動の卓越方向に位置する構造物には、他の方向に位置する構造物よりも、大きな地震力が作用することになる。そこで、対象とする全ての地震動に対してリサージュ図を作成した（参考資料参照）。図 3-6 は、鳥取県西部地震の震源と各観測地点の位置に、地震動のリサージュ図を示したものである。リサージュ図は、後述する地震によって生じる被害の程度と地震動の強さの関係を良く表しているといわれるスペクトル強度 SI 値が大きい地震動に対して示してある。伯太と日南を除く観測地点では、加速度の卓越方向は概ね断層の直交方向に一致していることがわかる。また、伯太や日南では、断層の走行方向で地震動が卓越していることがわかる。断層の直交する方向の地震動が卓越するという現象は兵庫県南部地震でもみられたものである。

リサージュ図に表れる地震動の卓越方向における最大加速度の大きさに着目すると、震源の北西側よりも南東側の観測記録の方が、大きな加速度が生じる傾向があることがわかる。これは、1-2 で述べた「震源から南東の方向に破壊が進み、大きなすべりは南東側で生じている」ことと整合している。



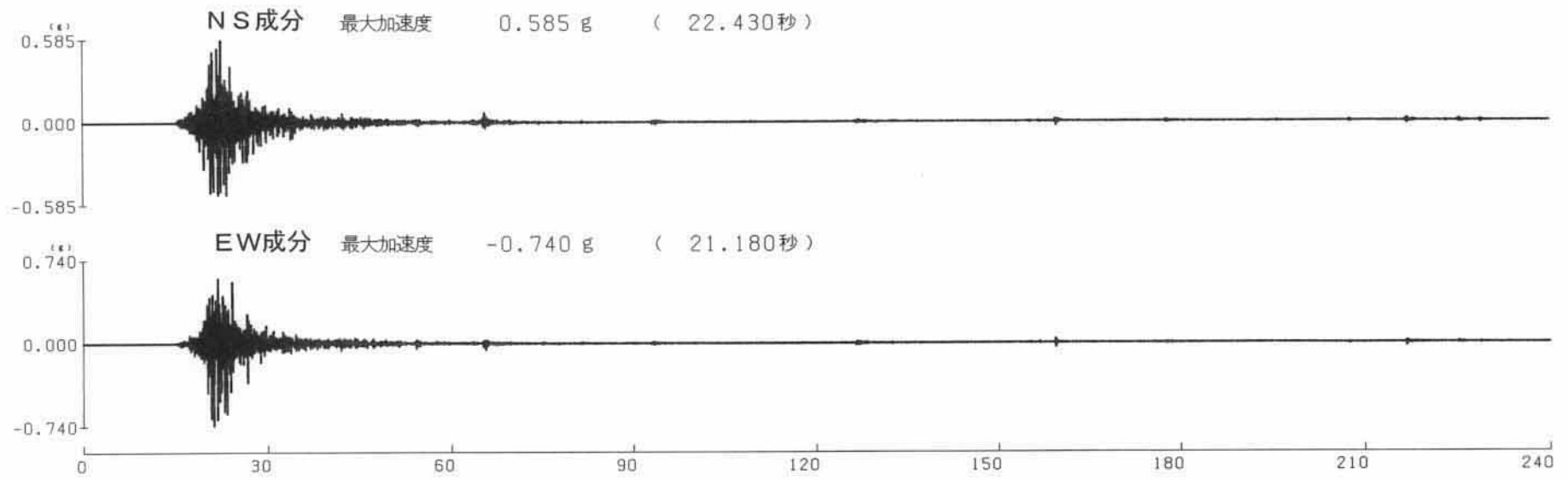
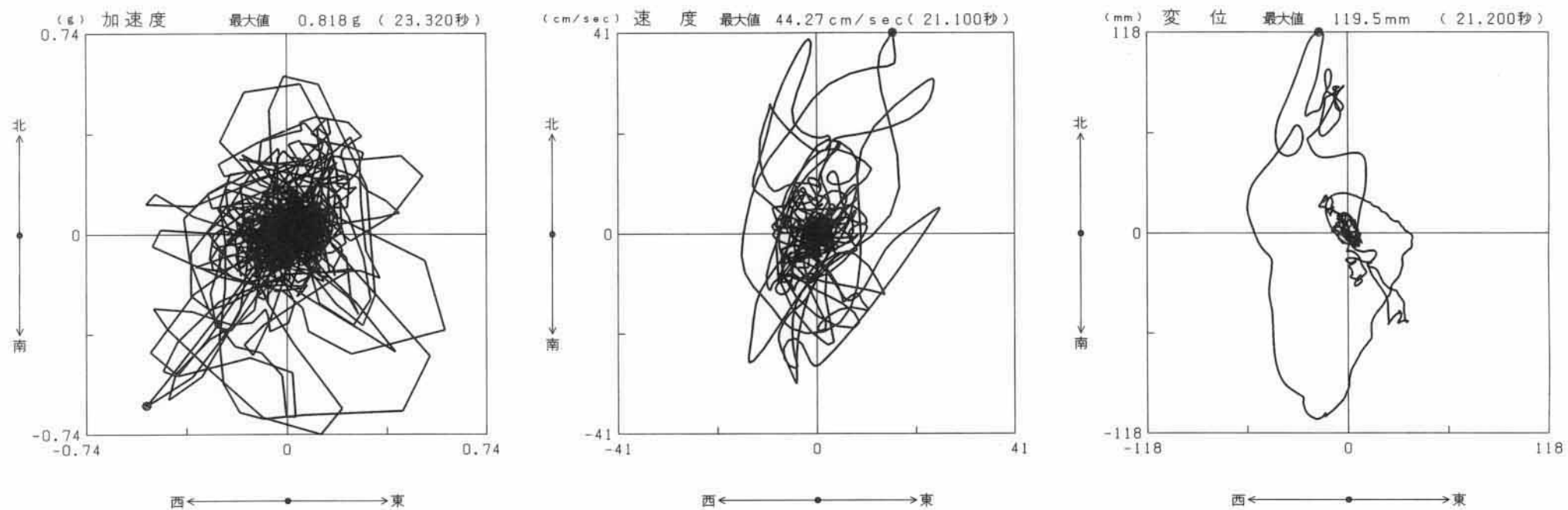


図 3-4 2000 年 10 月 6 日鳥取県西部地震 江府記録 (TTR007)



入力地震動：2000年10月6日 鳥取県西部地震 TTR007 江府

図 3 - 5 加速度・速度・変位の合成図



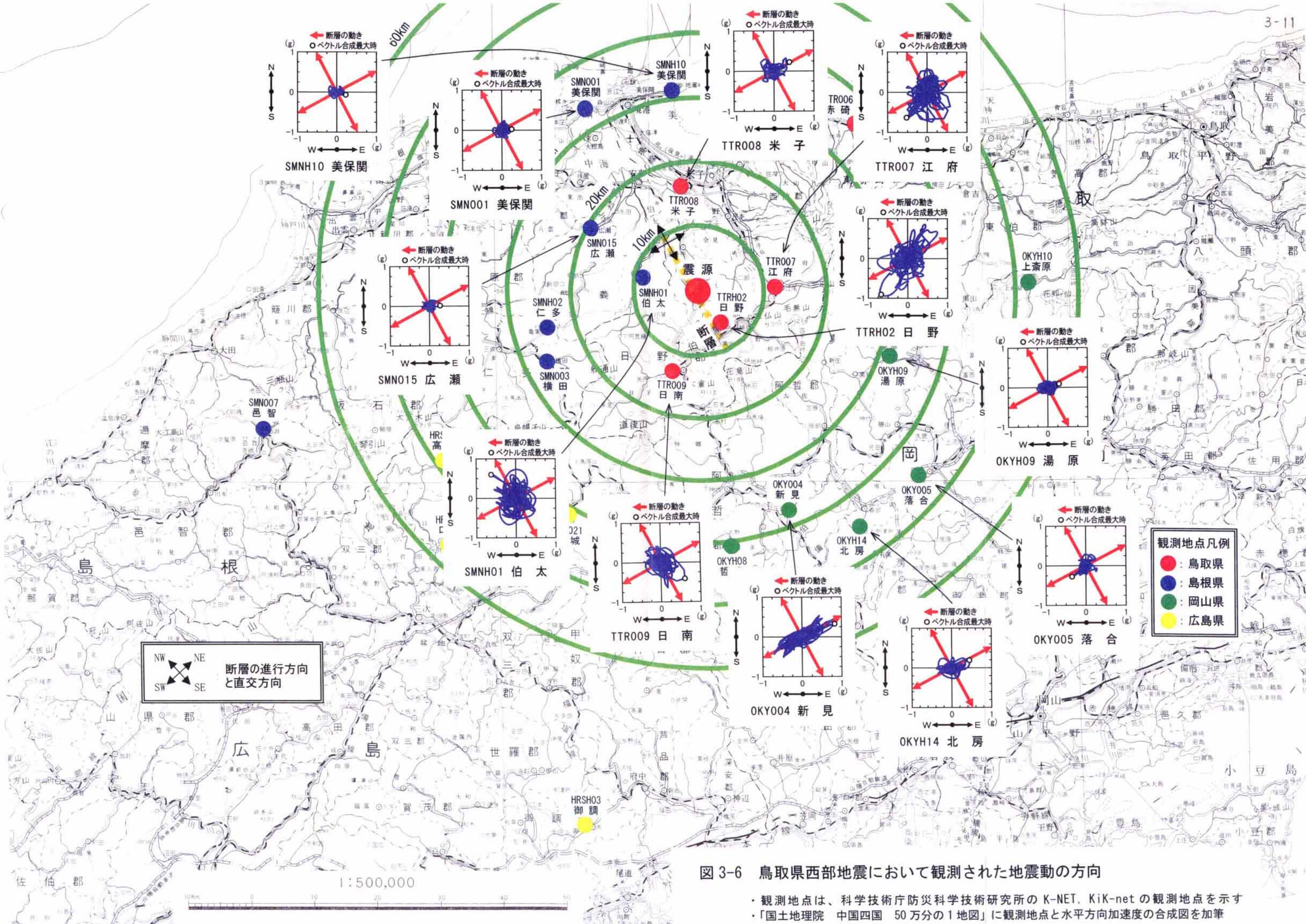


図 3-6 鳥取県西部地震において観測された地震動の方向

・観測地点は、科学技術庁防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net の観測地点を示す  
 ・「国土地理院 中国四国 50 万分の 1 地図」に観測地点と水平方向加速度の合成図を加筆



### 3-3 地震動の継続時間

弾性応答では構造物の最大応答値のみが着目されることが多く、地震動の継続時間に着目されることは少なかったが、地震動の継続時間は、非線形応答では重要な意味を有している。地震動の継続時間が長くなれば当然、地震動によって構造物に入力されるエネルギーは増加する。構造物が吸収できる塑性ひずみ（履歴吸収）エネルギーには限度があるので、地震動強度が大きく、継続時間が長くなるほど、構造物に生じる損傷は大きくなる。ここでは、図 3-7 に示すように、地震動の継続時間  $T_d$  を、次式によって与えられる累積エネルギーが 5%～95%に達する時間とする。

$$\begin{aligned} P_0 &= \int_0^{T_0} \ddot{z}_g^2(t) dt \\ P_{0.05} &= \int_0^{t_5} \ddot{z}_g^2(t) dt \\ P_{0.95} &= \int_0^{t_{95}} \ddot{z}_g^2(t) dt \\ T_d &= t_{95} - t_5 \end{aligned} \quad (3-7)$$

ここに、 $P_0$ 、 $P_{0.05}$ 、 $P_{0.95}$ ：加速度の 2 乗振幅の全観測時間  $T_0$  における累積値、全観測時間  $T_0$  における累積値の 5%に相当する累積値、全観測時間  $T_0$  における累積値の 95%に相当する累積値、 $t_5$ 、 $t_{95}$ ：地震開始から加速度の 2 乗振幅値の累積値が 5%に達する時刻、95%に達する時刻である。

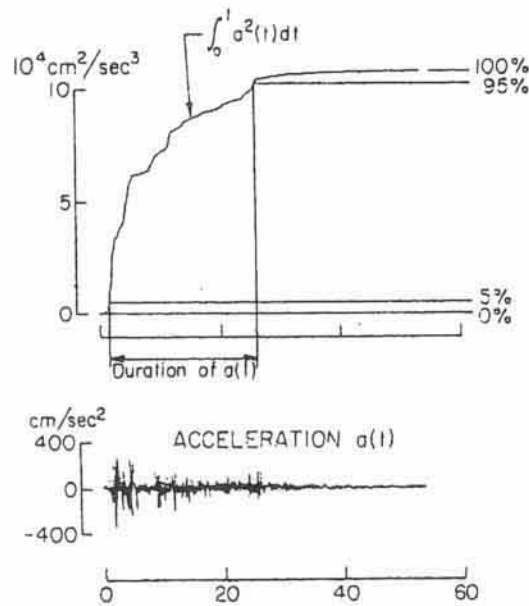


図 3-7 地震動の継続時間の定義<sup>3)</sup>

表 3-1 の地震動の継続時間より、鳥取県西部地震における地震動の継続時間は、日野で最も長く 36.02 秒、続いて伯太で 31.61 秒となっている。過去の地震動と比較すると、十勝沖地震の八戸港記録の 42.90 秒よりは短い、釧路沖地震釧路気象台記録の 24.38 秒、ノースリッジ地震 Sylmar 駐車場記録の 8.56 秒、兵庫県南部地震神戸海洋



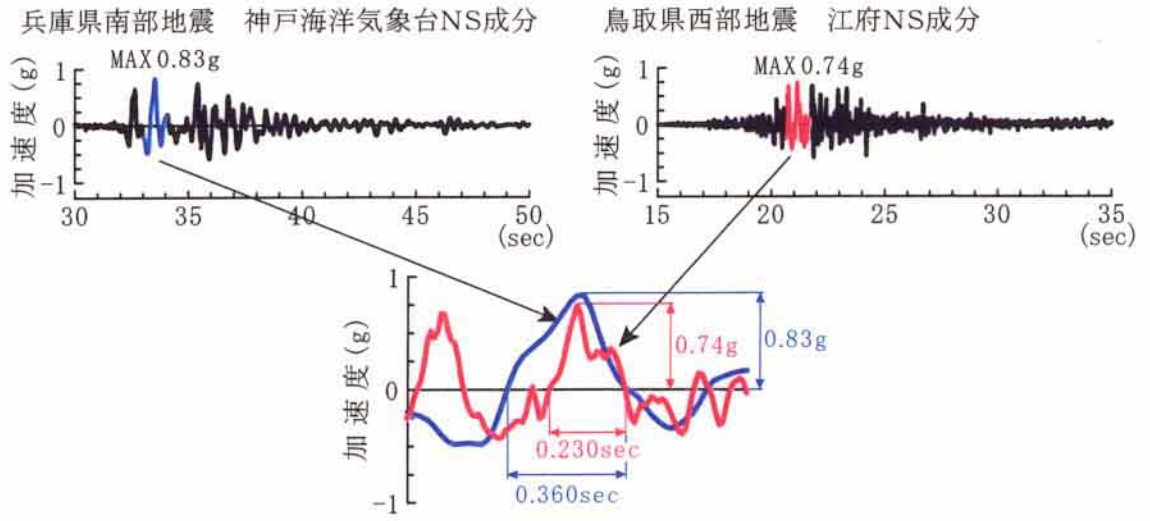
気象台記録の 9.78 秒，JR 鷹取駅記録の 13.52 秒，東神戸大橋周辺地盤上記録の 25.37 秒，神戸ポートアイランド記録の 14.26 秒よりも長い。ノースリッジ地震や兵庫県南部地震のような内陸直下型地震の震源域で観測される地震動は，後述するように，大きな加速度振幅が 1~2 回程度作用し，その他の振幅は小さいため，式(3-7)に基づいて算出される地震動の継続時間は，観測時間に比べて極端に小さくなる。このような観点から，表 3-1 に示した鳥取県西部地震の地震動の継続時間を眺めると，同じ内陸直下型地震であるノースリッジ地震や兵庫県南部地震のように，短時間で地震動のエネルギーが供給されるような地震動でないことがわかる。

### 3-4 パルスの大きさ

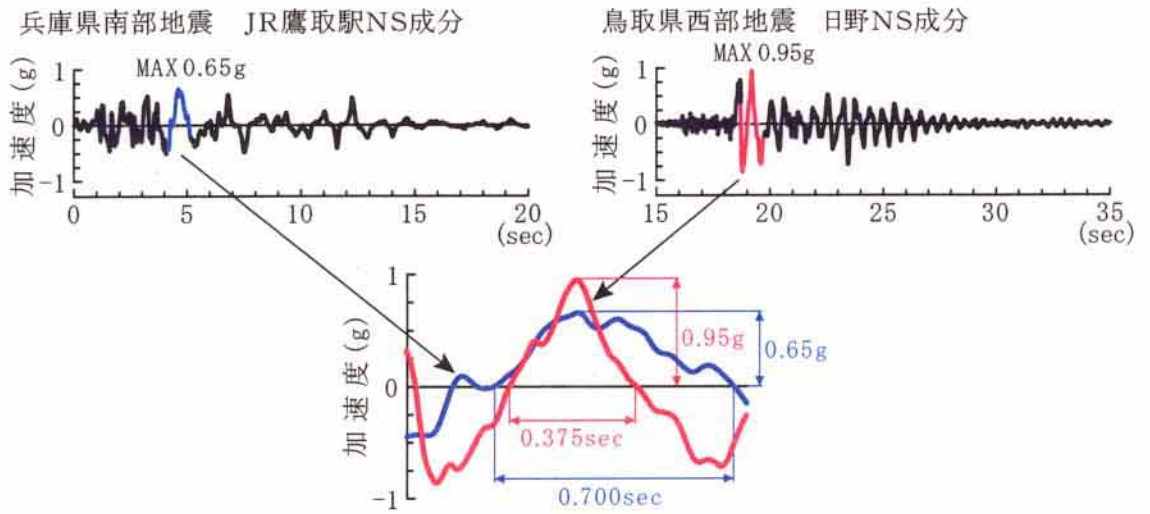
ノースリッジ地震や兵庫県南部地震のように内陸直下型地震の断層近傍で観測される地震動には、加速度が大きく、かつ、周期が1~2秒程度と長いパルス的な波形（長周期パルス）が含まれており、これが大きなエネルギーを有しているため構造物に与える影響が大きいことが明らかにされている。

図3-8(1),(2)は、それぞれI種地盤、II種地盤ごとに、橋梁構造物に甚大な被害を与えた兵庫県南部地震と鳥取県西部地震のパルス波を比較したものである。ここでは、観測された地震動波形の中から最大加速度が生じている波を取り出し、その波と零基線で囲まれる範囲を、パルスと定義している。同図(1)の兵庫県南部地震の神戸海洋気象台記録NS成分のパルスは、最大加速度0.83g、継続時間0.36秒である。一方、鳥取県西部地震の江府記録NS成分のパルスは、最大加速度0.74g、継続時間0.23秒となっており、最大加速度は、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台記録NS成分に匹敵する大きさとなっているが、その継続時間は2/3と短いことがわかる。同図(2)の兵庫県南部地震のJR鷹取駅記録NS成分のパルスは、最大加速度0.65g、継続時間0.7秒であり、鳥取県西部地震の日野記録NS成分のパルスは最大加速度0.95g、継続時間0.375秒となっている。最大加速度は、鳥取県西部地震の日野記録NS成分の方が約1.5倍も大きいですが、継続時間は兵庫県南部地震のJR鷹取駅記録NS成分の約半分と短い。構造物に大きな影響を与える要因として、パルスの加速度振幅の大きさとともに、パルスの継続時間の長さに関係していることから、その加速度振幅のゼロクロス間の面積について着目すると、図(1),(2)ともに、兵庫県南部地震で観測された地震動のパルスの方が、大きな面積を有していることがわかる。同図(3)は、大きな加速度が観測されたわりには構造物の被害が大きくなかった釧路沖地震と鳥取県西部地震を比較したものである。ともにI種地盤の釧路気象台記録EW成分と、江府記録NS成分のパルスを比較している。釧路沖地震釧路気象台記録EW成分のパルスは、最大加速度0.94g、継続時間0.14秒であり、鳥取県西部地震江府記録NS成分のパルスは、最大加速度0.74g、継続時間0.23秒である。最大加速度は釧路気象台記録EW成分の方が大きいですが、継続時間は江府記録NS成分の方が大きいため、パルスのゼロクロス間の面積は同程度となっており、どちらの地震においてもパルスが構造物に与える影響は同程度であったといえる。

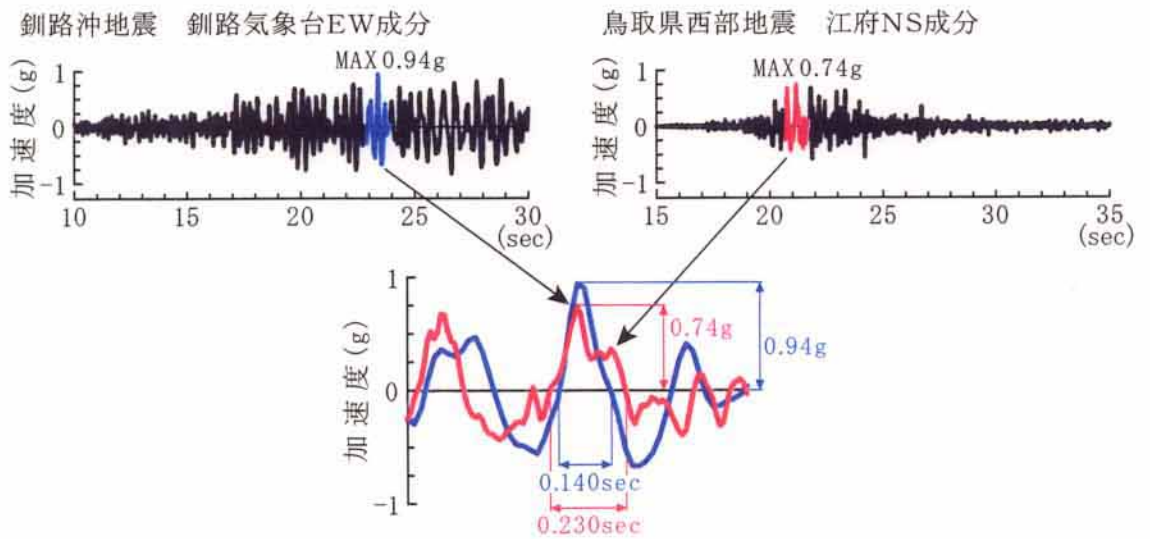




(1) 兵庫県南部地震と鳥取県西部地震の比較 I種地盤



(2) 兵庫県南部地震と鳥取県西部地震の比較 II種地盤



(3) 釧路沖地震と鳥取県西部地震の比較 I種地盤

図3-8 構造物に与える影響が大きいパルス波の大きさの比較

対象とする地震動全てに対して、地震動中に含まれるパルスの大小を評価するために、加速度振幅のゼロクロス間の面積に着目する。あるパルス*i*の面積*S<sub>i</sub>*は次式で与えられる。

$$S_i = \sum_{t_i=t_{i1}}^{t_{i2}} \ddot{z}_g(t_i) \cdot \Delta t \quad (3-8)$$

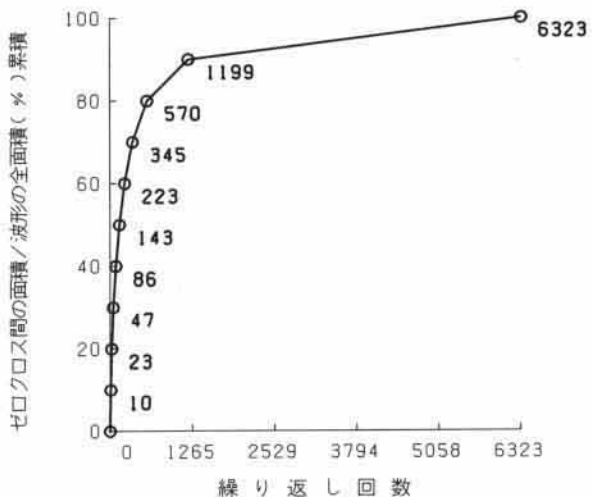
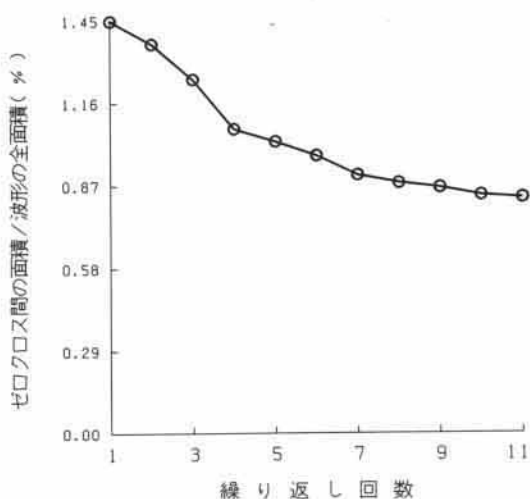
ここに、*S<sub>i</sub>*：零基線と加速度振幅によって囲まれるパルスの面積、*t<sub>i1</sub>*、*t<sub>i2</sub>*：対象とする振幅が零基線を横切る時刻である。観測時間（継続時間）が異なる各地震動間のパルスの大小関係を比較するために、次式によって正規化する。

$$\beta_i = S_i / \sum_{i=1}^N S_i \quad (3-9)$$

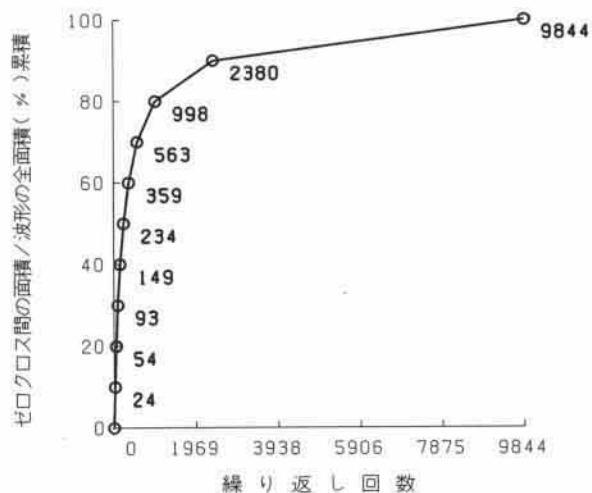
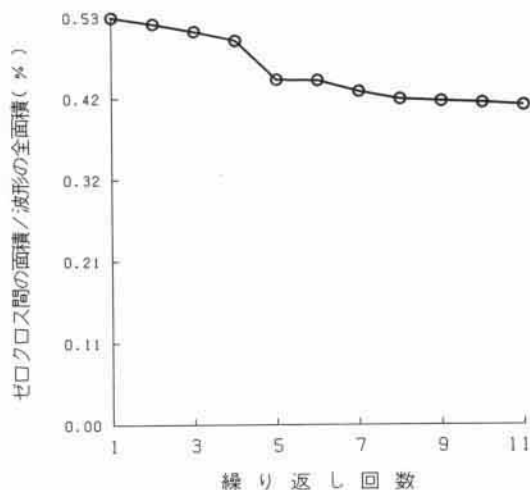
ここに、*N*：零基線で囲まれるパルスの総数である。*β<sub>i</sub>*を大きい順に並べて繰返し回数との関係を求める。

図 3-9 は、鳥取県西部地震において観測された地震動ごとに、加速度振幅のゼロクロス間の面積比と繰返し回数の関係、ゼロクロス間の面積比の累積値と繰返し回数の関係を示したものである。累積値のグラフに示してある数値は、累積値が 10%増加するごとに、そのときの地震動の繰返し回数を示したものである。図 3-9(1)の東城記録 EW 成分や西城記録 NS 成分に表されるように、左図に示す最も大きいゼロクロス間の面積比が全体の 1%にも満たないような強震記録の場合には、繰返し回数の増加にともなうゼロクロス間の面積の減少傾向は緩やかであり、右図においてゼロクロス間の面積の累積値が 80%に達するのに、約 1000 回の地震動の繰返しを受ける必要があることがわかる。これに対して、図 3-9(4)の米子記録 EW 成分や図 3-9(9)の日野記録 NS 成分では、左図に示すゼロクロス間の面積比は、最も大きいもので 5%近くあるとともに、繰返し回数が増えるにともない減少していく傾向が明確に表れており、地震動中に大きなパルス波が含まれていることがわかる。このような強震記録では、右図に示すゼロクロス間の面積の累積値が 80%に達するまでに 200 回程度しか繰返し回数を要していない。同じ鳥取県西部地震でも、観測地点により、地震動の特性が異なることがわかる。図 3-10 は、図 3-9 と同様な図を既往の強震記録について作成したものである。同図(1)に示す十勝沖地震、ノースリッジ地震、同図(2),(3)に示す兵庫県南部地震のどの記録の場合にも、繰返し回数の増加にともなうゼロクロス間の面積の低下は顕著であり、地震動中に大きなパルス波が含まれていることがわかる。一方、同図(1)の橋梁構造物に生じた被害が小さかった釧路沖地震の記録では、ゼロクロス間の面積比の減少傾向が緩やかであり、鳥取県西部地震の東城記録 EW 成分や西城記録 NS 成分で代表される傾向と類似していることがわかる。

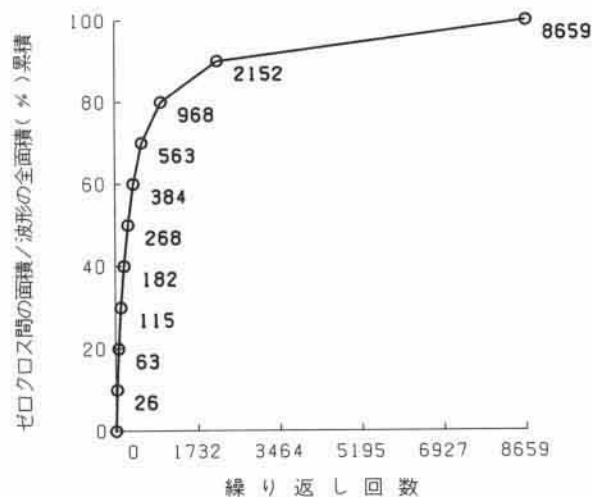
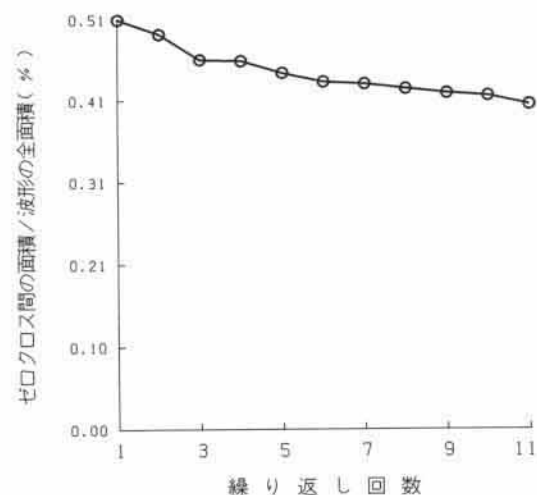




(1) 2000.10.6 鳥取県西部地震 高野(HRS001) NS成分

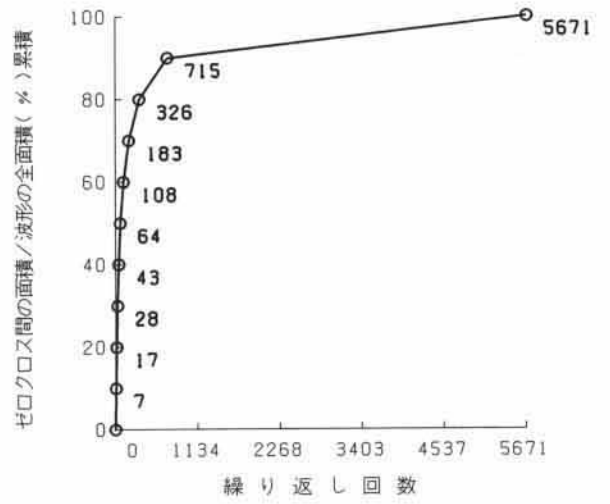
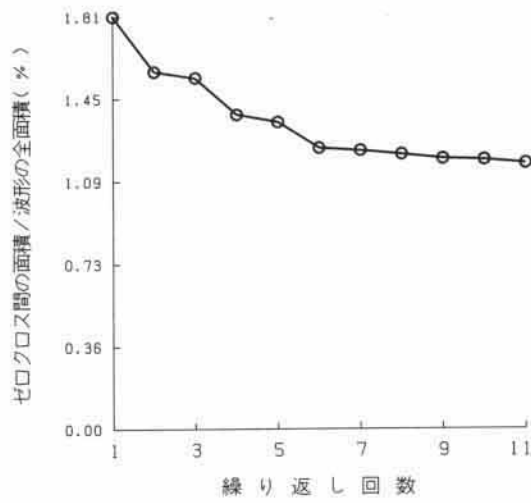


(2) 2000.10.6 鳥取県西部地震 東城(HRS002) EW成分

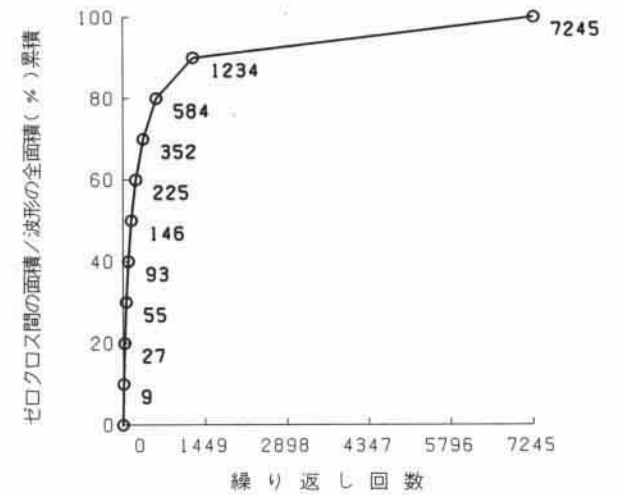
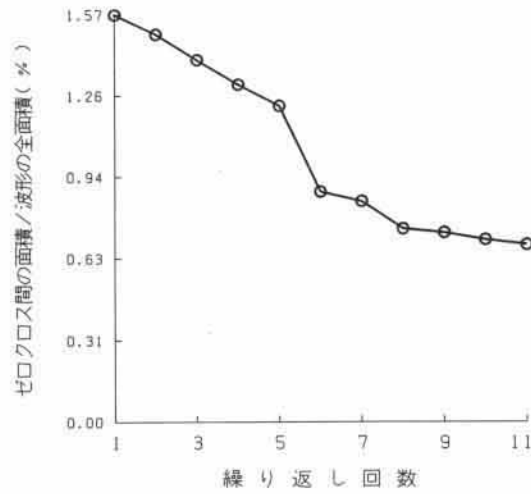


(3) 2000.10.6 鳥取県西部地震 西城(HRS021) NS成分

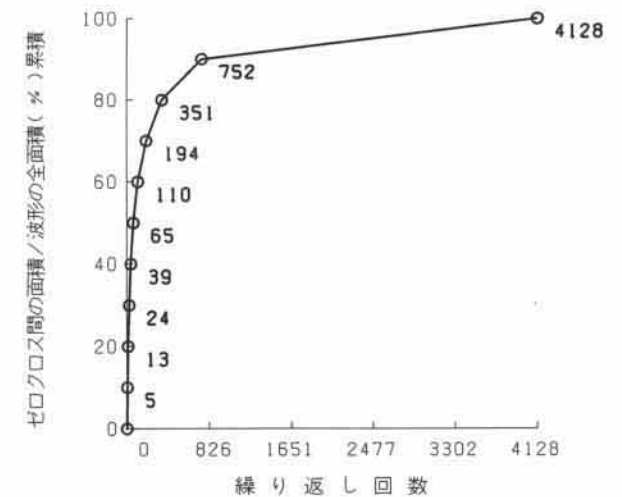
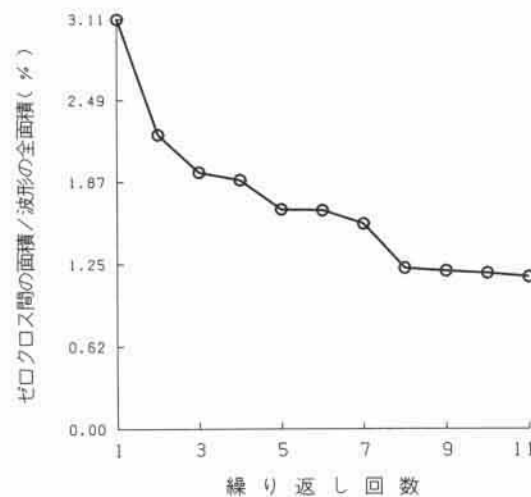
図3-9 (1) ゼロクロス間の面積と繰り返し回数との関係(鳥取県西部地震)



(1) 2000.10.6 鳥取県西部地震 新見(OKY004) EW成分

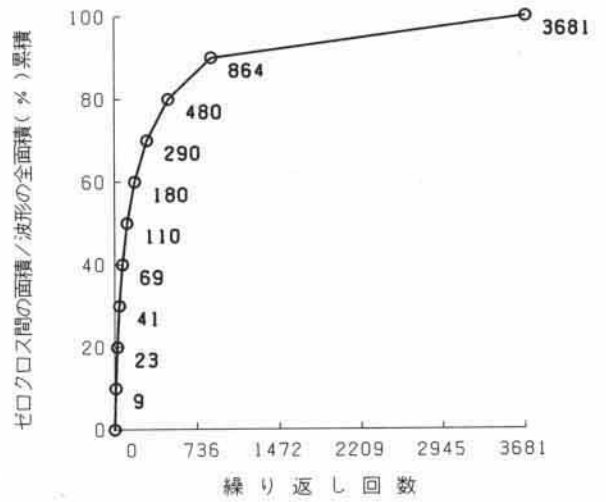
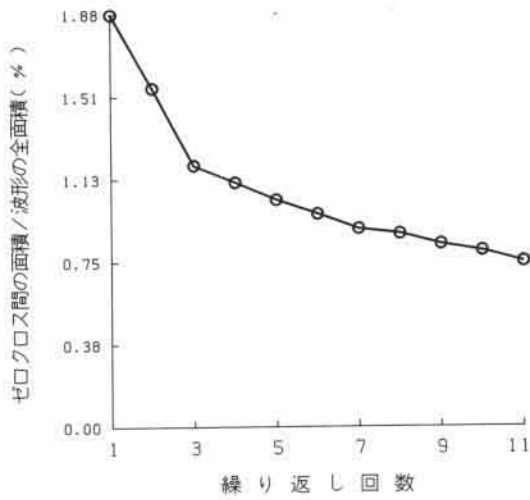


(2) 2000.10.6 鳥取県西部地震 落合(OKY005) EW成分

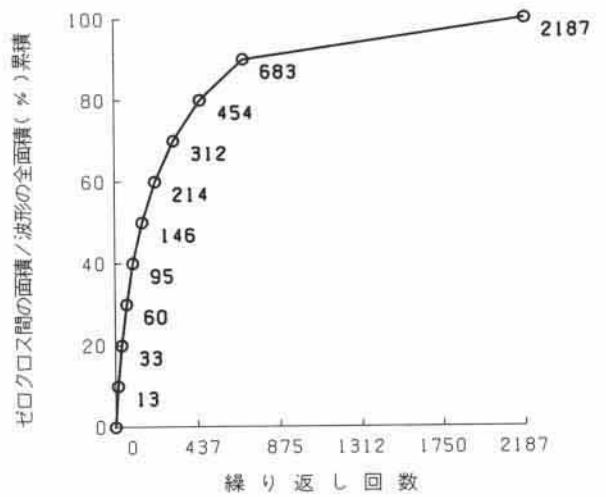
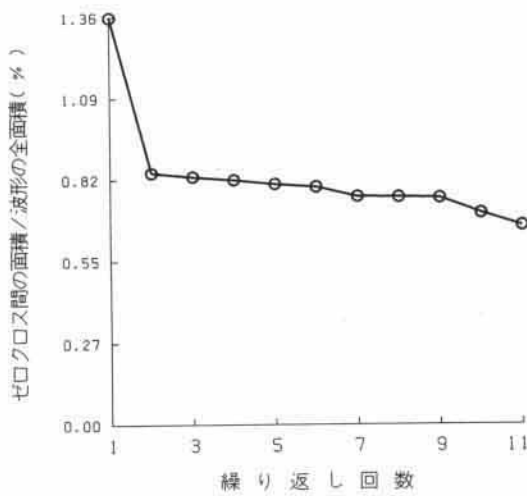


(3) 2000.10.6 鳥取県西部地震 美保関(SMN001) EW成分

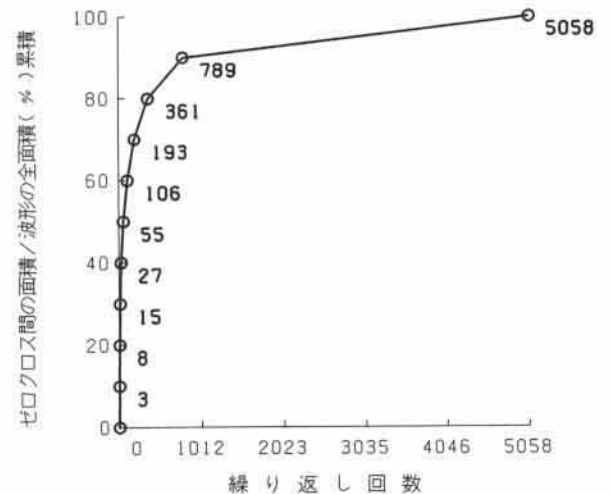
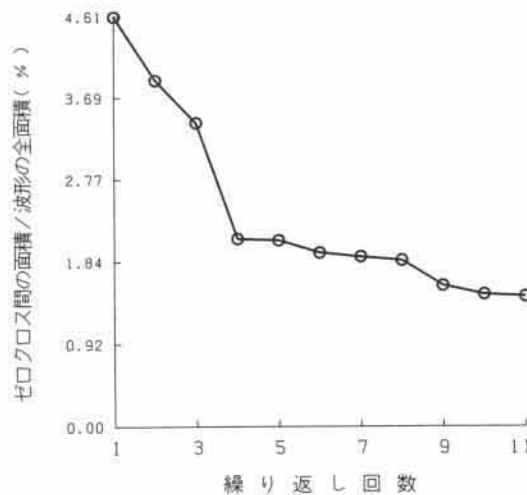
図3-9 (2) ゼロクロス間の面積と繰り返し回数との関係(鳥取県西部地震)



(1) 2000.10.6 鳥取県西部地震 横田(SMN003) NS成分



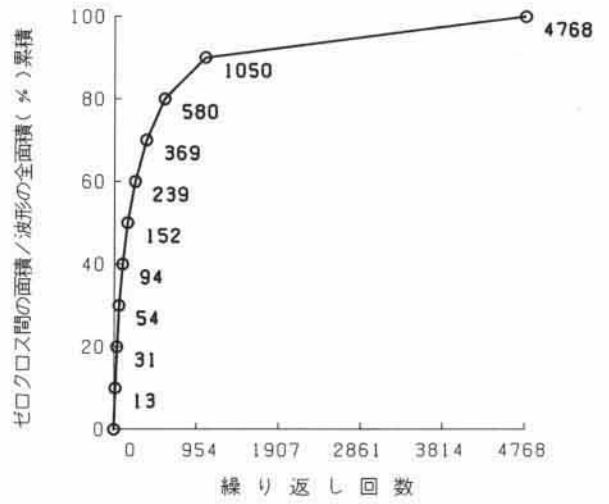
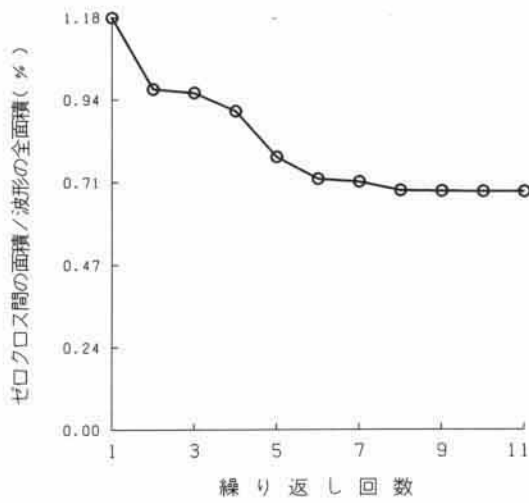
(2) 2000.10.6 鳥取県西部地震 邑智(SMN007) NS成分



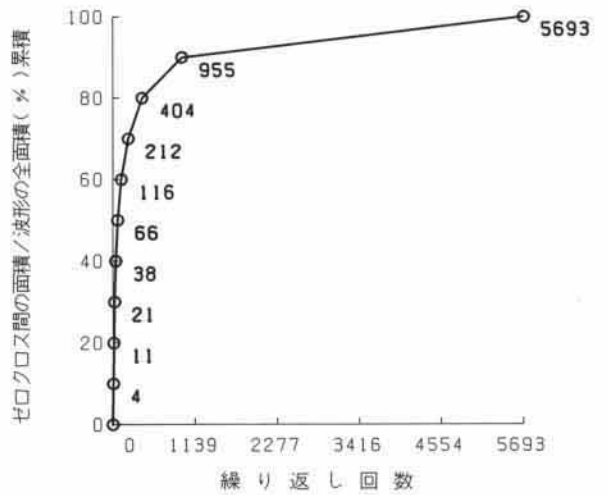
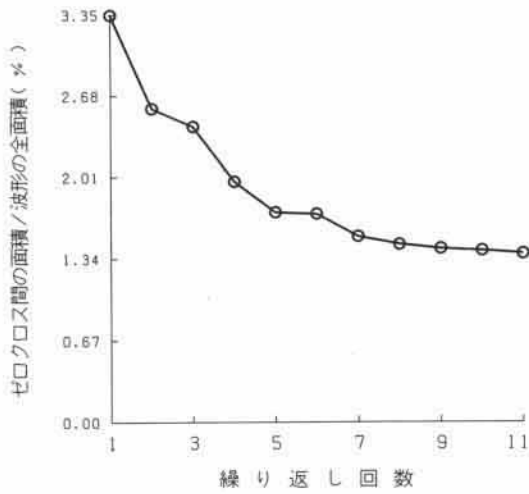
(3) 2000.10.6 鳥取県西部地震 広瀬(SMN015) NS成分

図3-9 (3) ゼロクロス間の面積と繰り返し回数との関係(鳥取県西部地震)

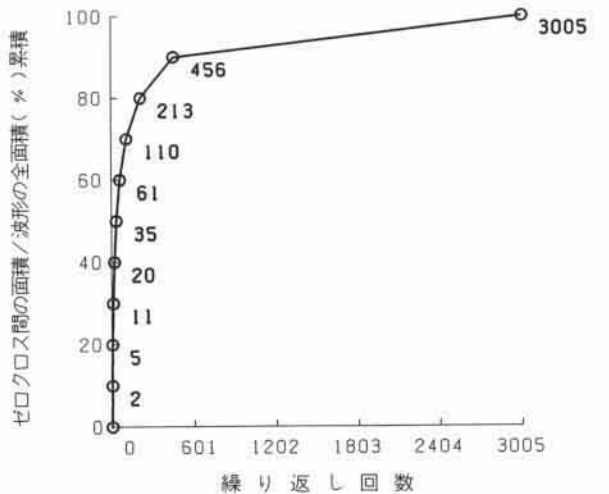
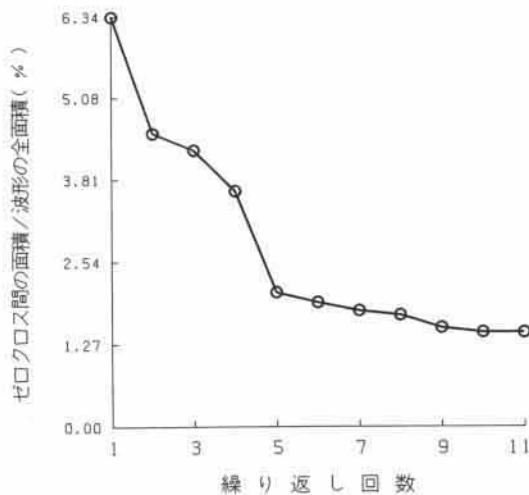




(1) 2000.10.6 鳥取県西部地震 赤碕(TTR006) NS成分

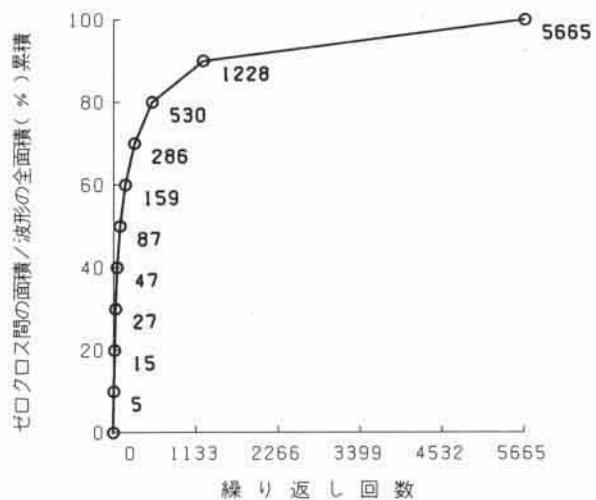
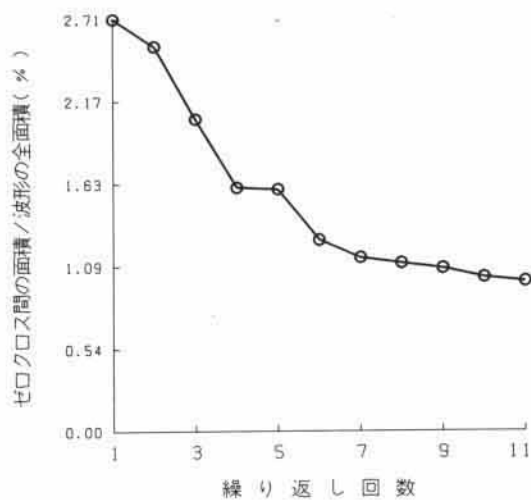


(2) 2000.10.6 鳥取県西部地震 江府(TTR007) NS成分



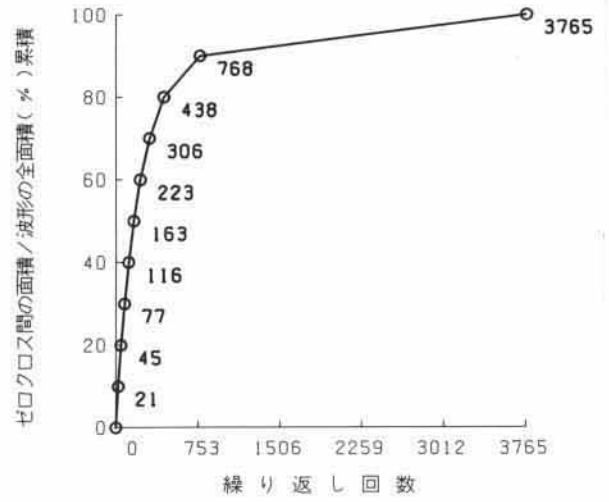
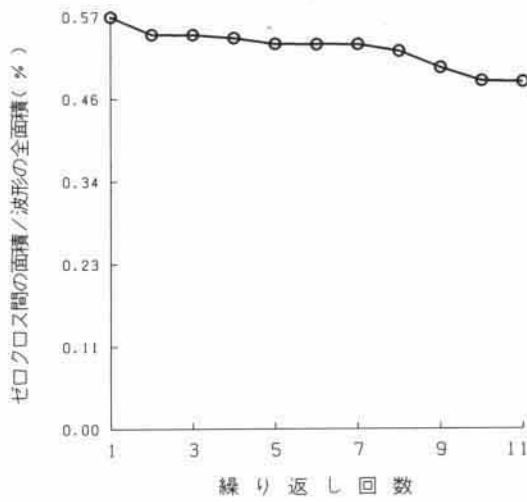
(3) 2000.10.6 鳥取県西部地震 米子(TTR008) EW成分

図3-9 (4) ゼロクロス間の面積と繰り返し回数との関係(鳥取県西部地震)

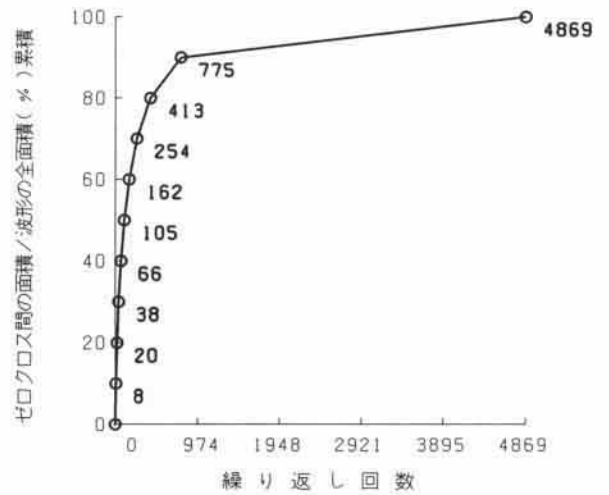
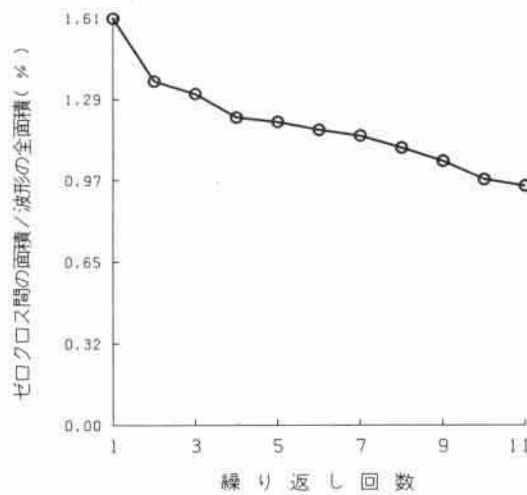


(1) 2000.10.6 鳥取県西部地震 日南(TTR009) EW成分

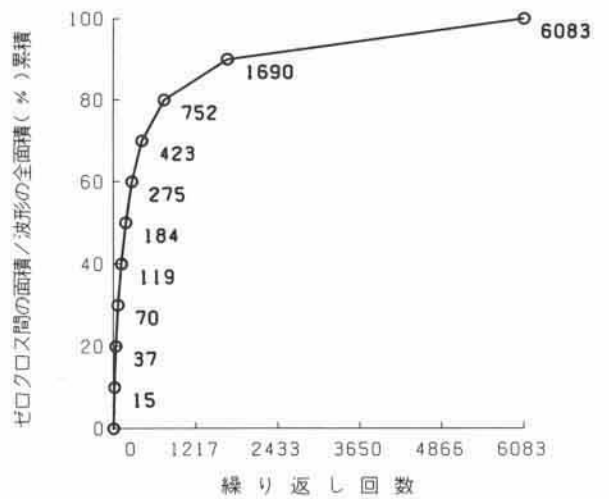
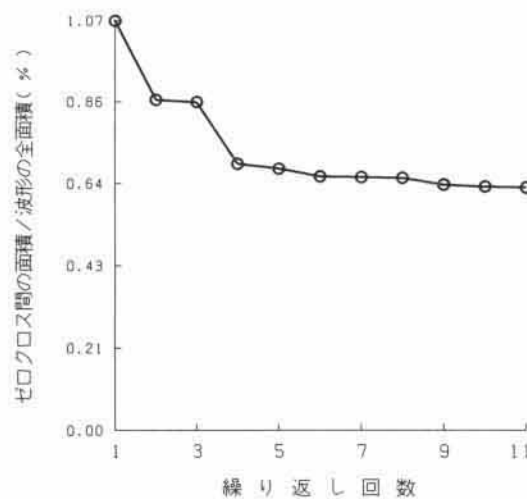
図3-9 (5) ゼロクロス間の面積と繰り返し回数との関係(鳥取県西部地震)



(1) 2000.10.6 鳥取県西部地震 御調(HRS03) NS成分



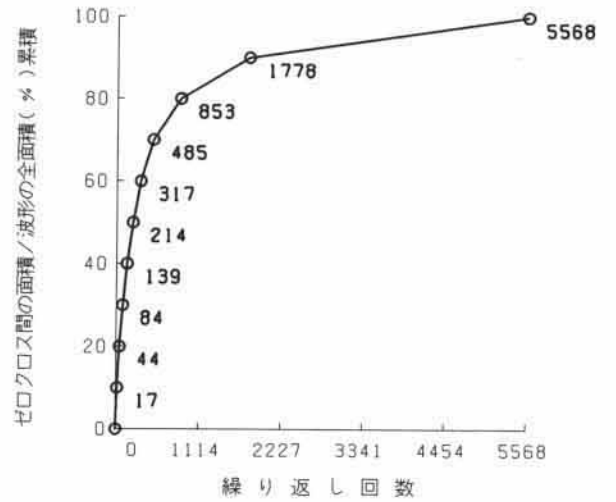
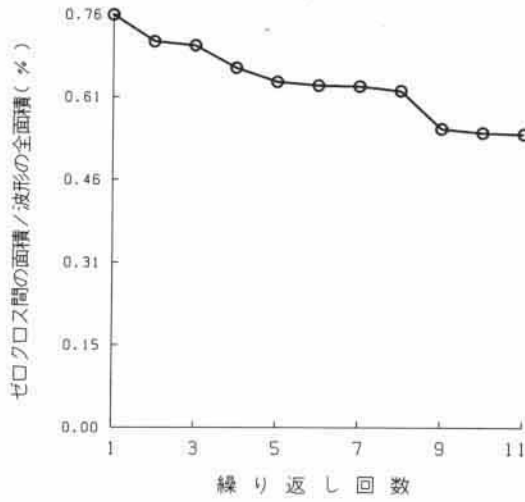
(2) 2000.10.6 鳥取県西部地震 口和(HRS06) EW成分



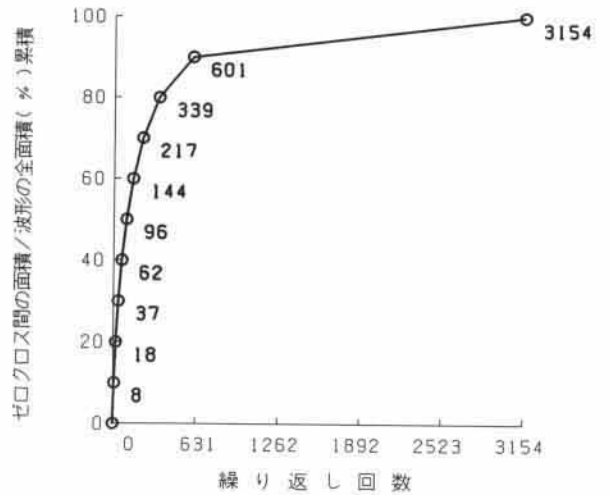
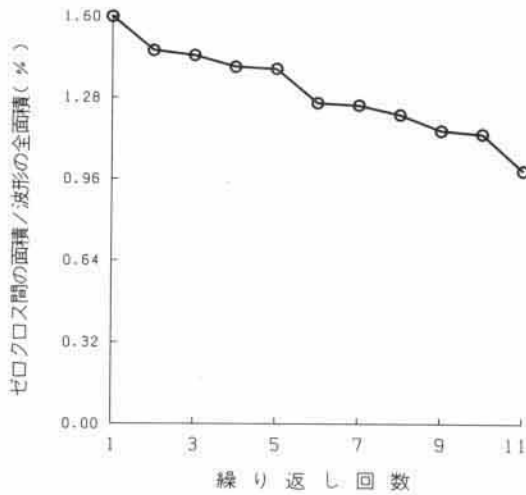
(3) 2000.10.6 鳥取県西部地震 哲多(OKY08) EW成分

図3-9 (6) ゼロクロス間の面積と繰り返し回数との関係(鳥取県西部地震)

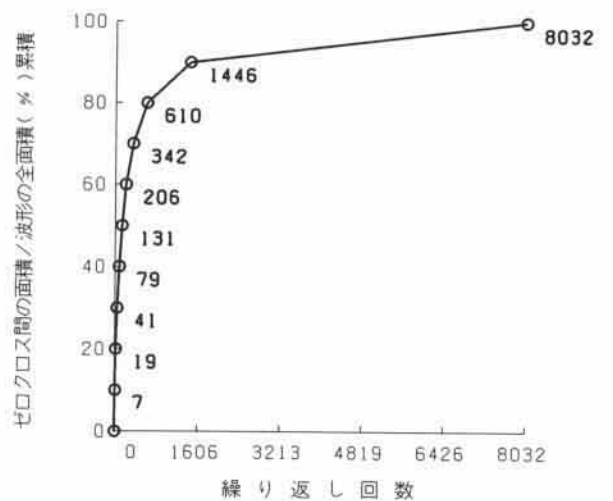
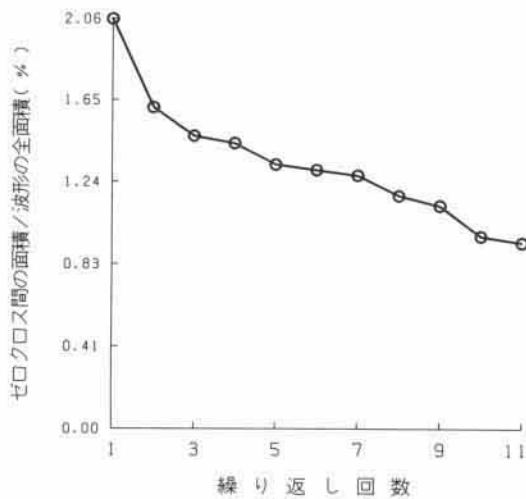




(1) 2000. 10. 6 鳥取県西部地震 湯原(OKYH09) EW成分

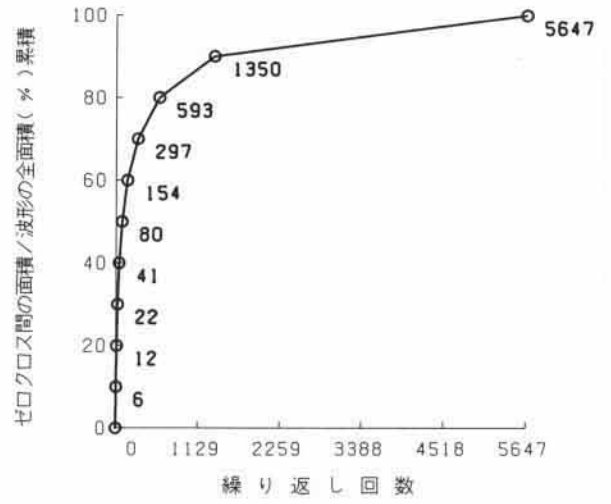
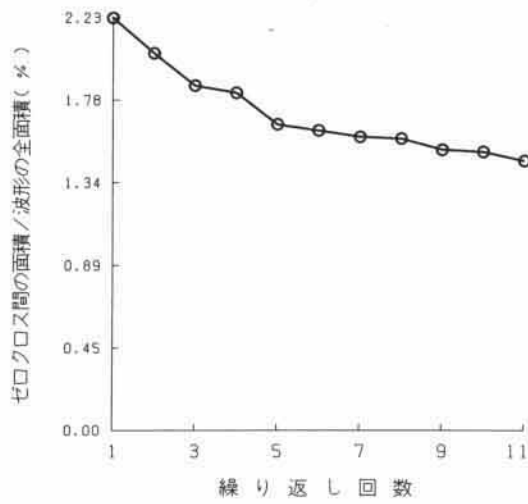


(2) 2000. 10. 6 鳥取県西部地震 上斎原(OKYH10) NS成分

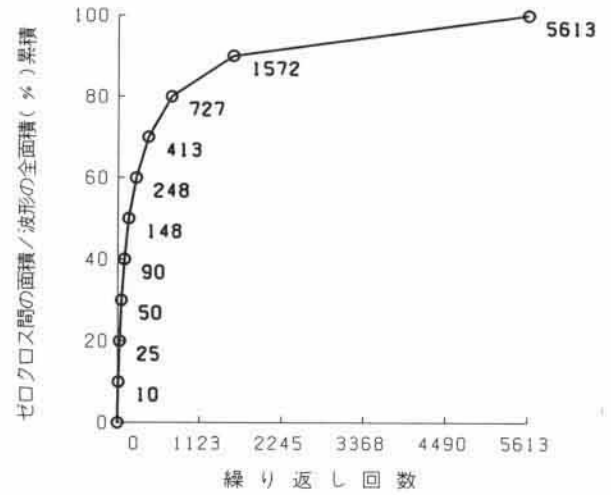
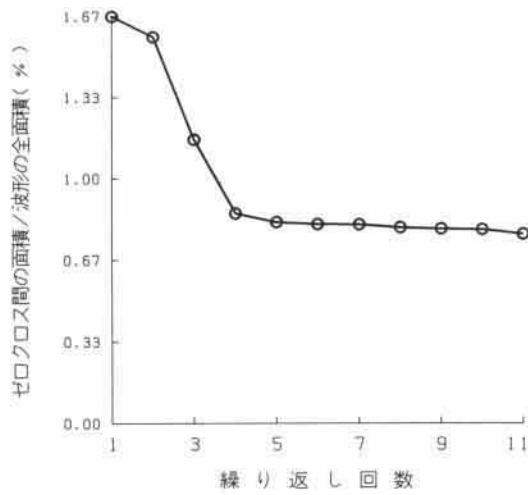


(3) 2000. 10. 6 鳥取県西部地震 北房(OKYH14) EW成分

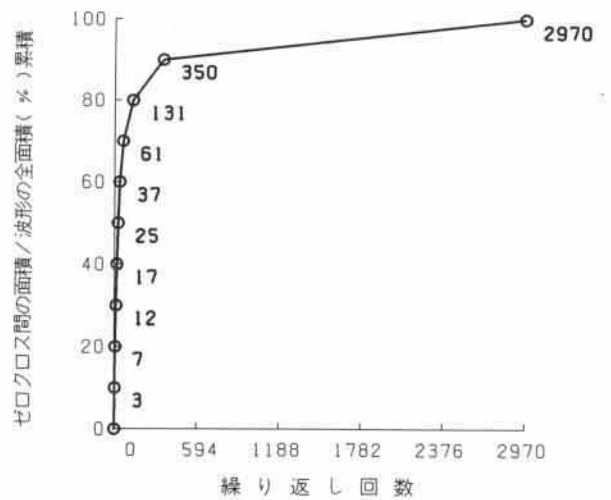
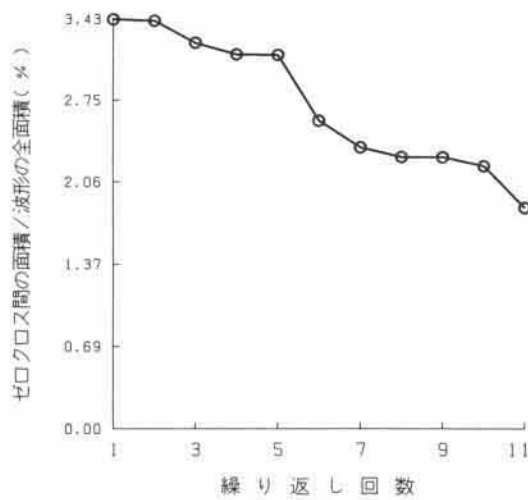
図3-9 (7) ゼロクロス間の面積と繰り返し回数との関係(鳥取県西部地震)



(1) 2000. 10. 6 鳥取県西部地震 伯太(SMNH01) NS成分

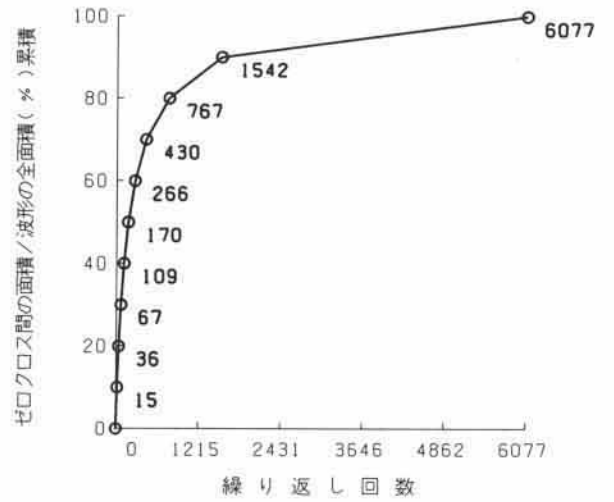
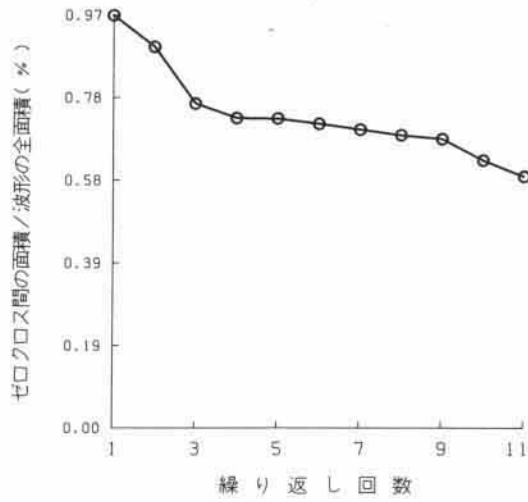


(2) 2000. 10. 6 鳥取県西部地震 仁多(SMNH02) NS成分

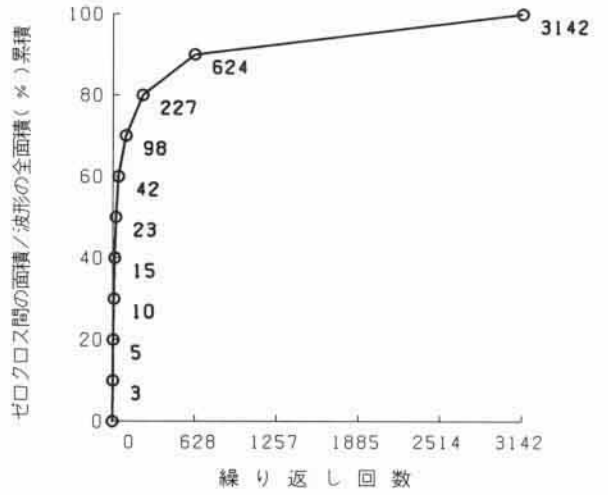
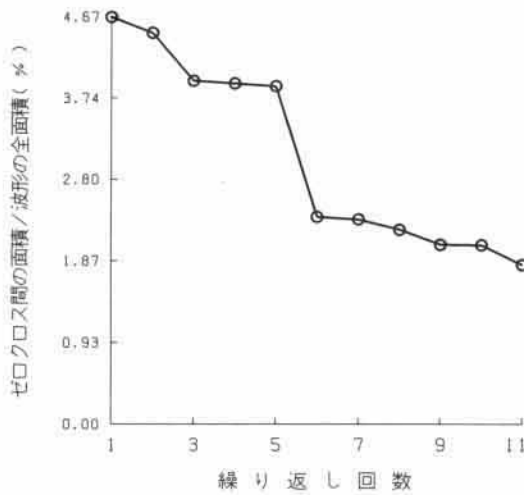


(3) 2000. 10. 6 鳥取県西部地震 美保関(SMNH10) EW成分

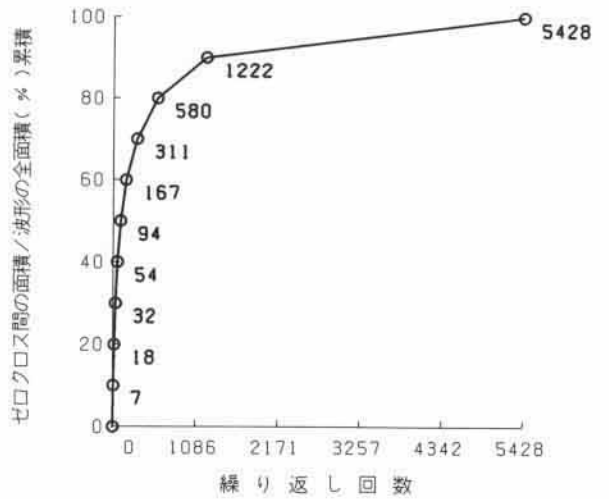
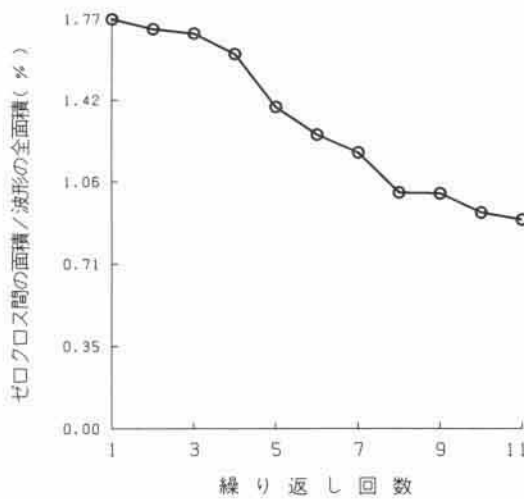
図3-9 (8) ゼロクロス間の面積と繰り返し回数との関係(鳥取県西部地震)



(1) 2000.10.6 鳥取県西部地震 吉田(SMNH12) NS成分



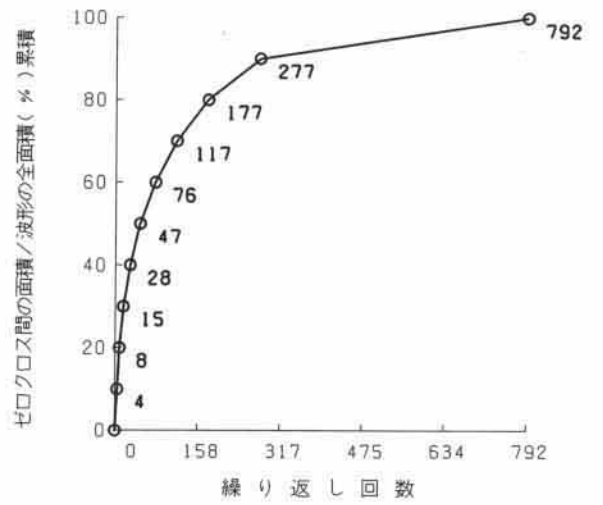
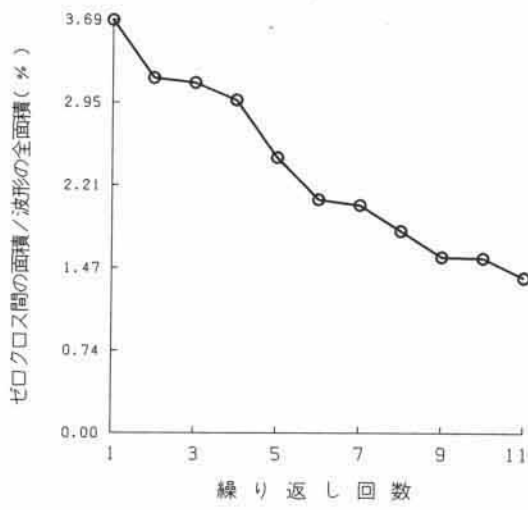
(2) 2000.10.6 鳥取県西部地震 日野(TTRH02) NS成分



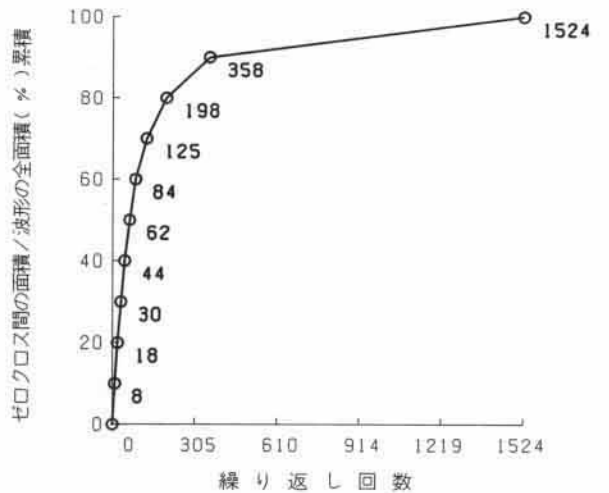
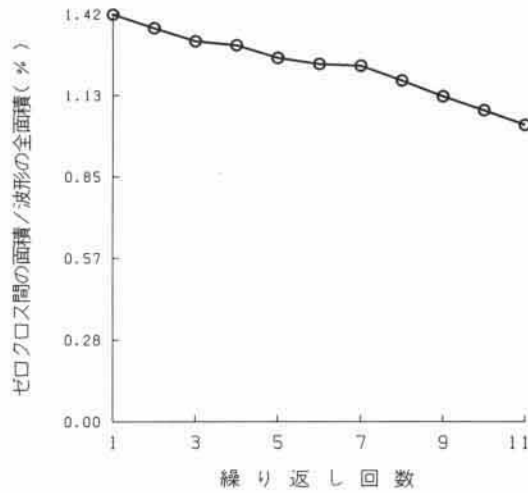
(3) 2000.10.6 鳥取県西部地震 赤碕(TTRH04) NS成分

図3-9 (9) ゼロクロス間の面積と繰り返し回数との関係(鳥取県西部地震)

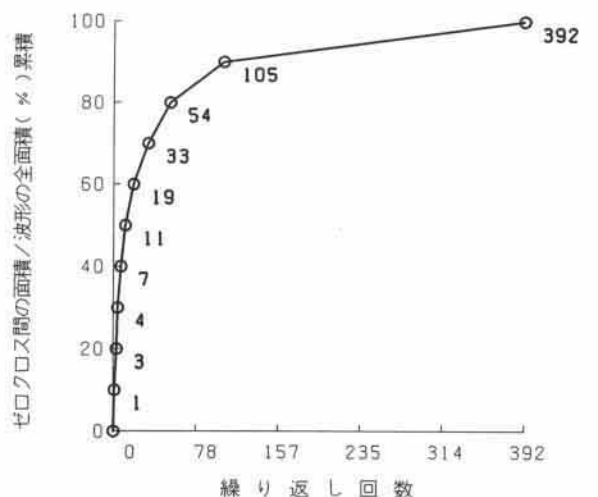
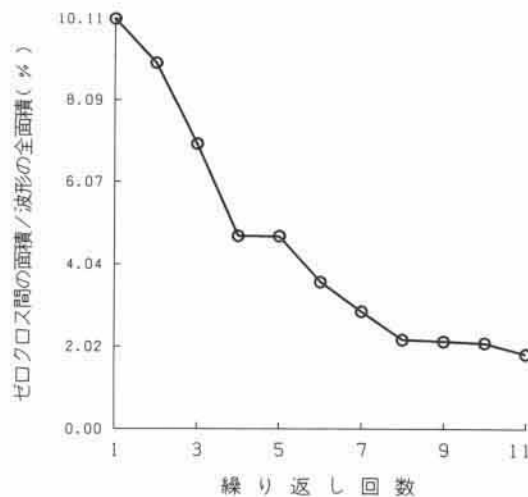




(1) 1968.5.16 十勝沖地震 八戸港 EW成分

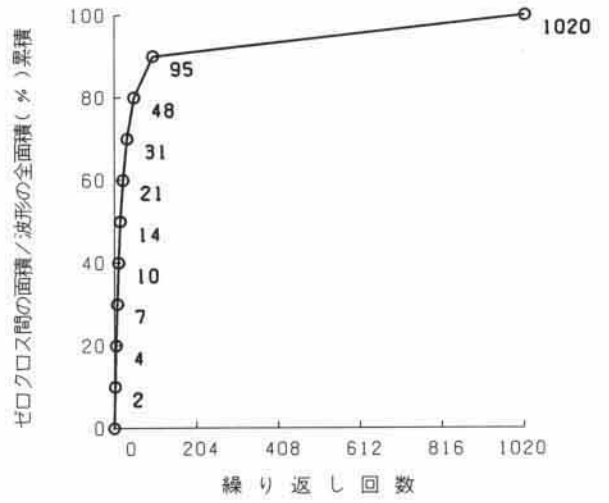
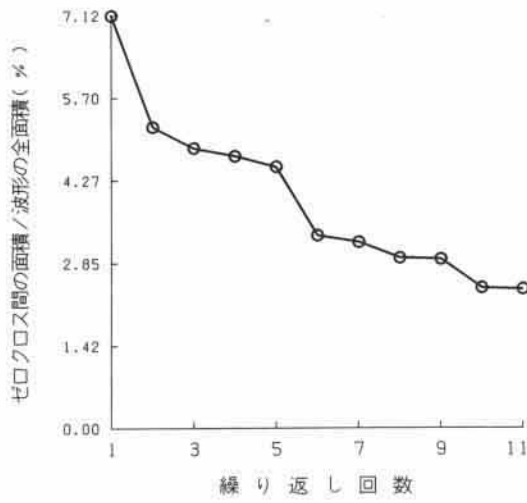


(2) 1993.1.15 釧路沖地震 釧路気象台 EW成分

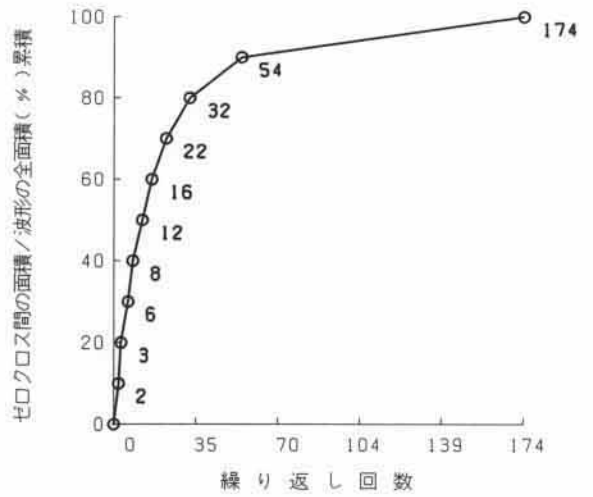
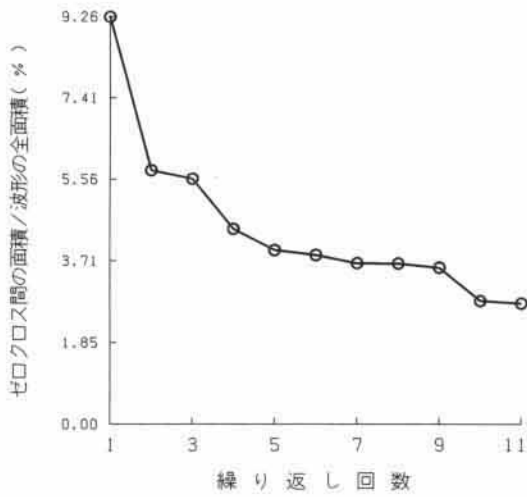


(3) 1994.1.17 ノースリッジ地震 Sylmar 駐車場 EW成分

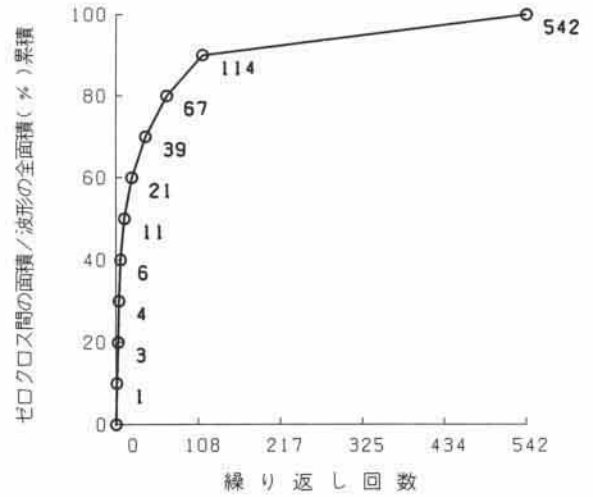
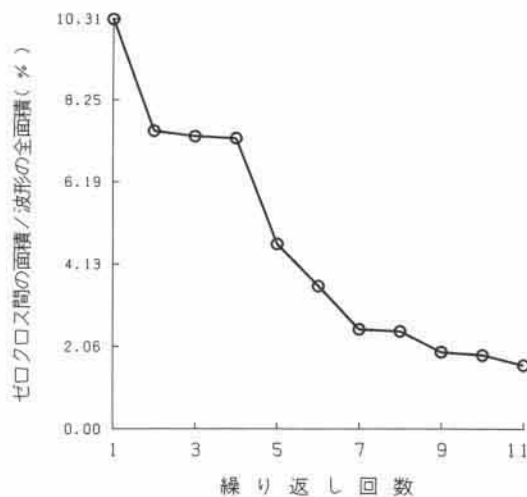
図3-10 (1) ゼロクロス間の面積と繰り返し回数との関係(既往の強震記録)



(1) 1995. 1. 17 兵庫県南部地震 神戸海洋気象台 NS成分

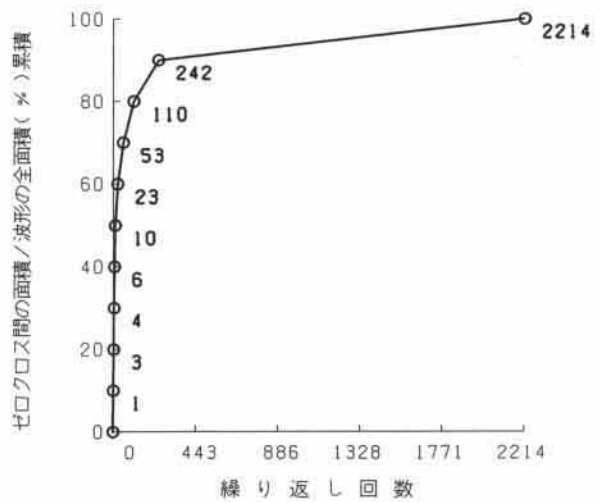
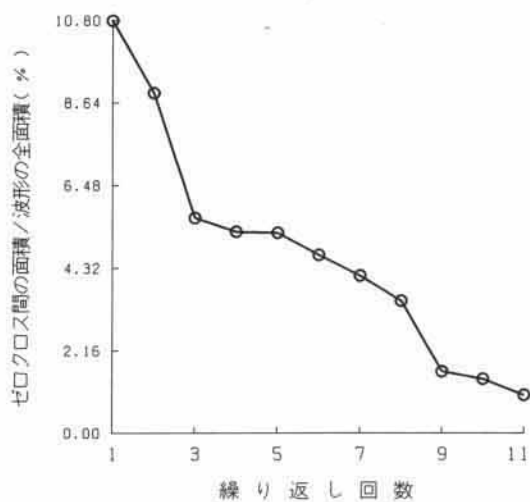


(2) 1995. 1. 17 兵庫県南部地震 JR 鷹取駅 NS成分



(3) 1995. 1. 17 兵庫県南部地震 東神戸大橋周辺地盤上 N12W成分

図3-10 (2) ゼロクロス間の面積と繰り返し回数との関係(既往の強震記録)



(1) 1995. 1. 17 兵庫県南部地震 神戸ポートアイランド地盤上 NS成分

図3-10(3) ゼロクロス間の面積と繰り返し回数との関係(既往の強震記録)

表 3-1 には、ゼロクロス間の面積比の 1 回から 5 回までの値と、その累積値が示してある。鳥取県西部地震において観測された地震動では、1 つのパルスのゼロクロス間の面積比  $\beta_i$  が全体の 5% を超えるのは、米子記録 EW 成分のみであり、1 ~ 5 回までの累積値  $\sum_{i=1}^5 \beta_i$  が、全体の 20% を超えるのは、米子記録 EW 成分と日野記録 NS 成分だけである。このような、ゼロクロス間の面積比が大きい記録や、最大加速度が大きい記録について、過去の強震記録とパルスの大きさの比較を行う。

図 3-11 は、ゼロクロス間の面積比と繰返し回数の関係を、既往の地震動と比較したものである。橋梁構造物に大きな被害が生じた兵庫県南部地震で観測された地震動とノースリッジ地震で観測された地震動は、繰返し回数 1 回のゼロクロス間の面積比が約 10% と大きく、繰返し回数の増加にともなって減少する傾向が明らかである。一方、橋梁構造物に生じた被害が小さかった釧路沖地震のゼロクロス間の面積比は、繰返し回数が 1 回から 10 回まで 2% 程度とほぼ一定の値となっている。鳥取県西部地震における米子記録 EW 成分、日野記録 NS 成分のゼロクロス間の面積比は、ノースリッジ地震や兵庫県南部地震と、釧路沖地震のほぼ中間にあり、新見記録 EW 成分、伯太記録 NS 成分、江府記録 NS 成分、日南記録 NS 成分の値は、釧路沖地震の傾向に近いことがわかった。

以上より、鳥取県西部地震で得られた地震動の特性は、橋梁構造物に甚大な被害を与えた兵庫県南部地震の特性よりも、橋梁構造に生じた被害が小さかった釧路沖地震の特性に近い傾向があり、構造物に大きな影響を与える長周期パルスがあまり含まれていなかったことがわかる。このことが、鳥取県西部地震における被害が兵庫県南部地震に比較して圧倒的に小さかった理由の 1 つであるといえる。



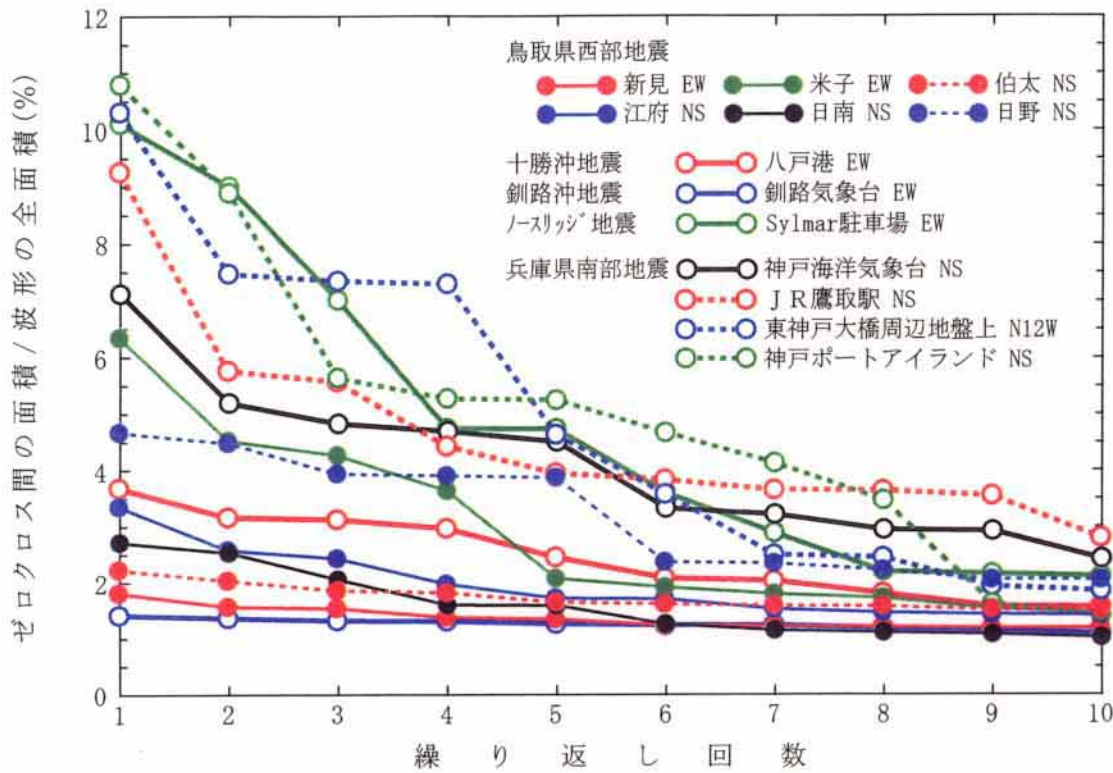


図3-11 ゼロクロス間の面積と繰り返し回数との関係