

水平応答加速度と上下方向加速度が ともに最大値に近い値を同時に生じる確率

Probability of Simultaneous Occurrence of
Peak Horizontal Response Accelerations and Vertical Ground Accelerations

武村浩志*, 川島一彦**

Hiroshi TAKEMURA and Kazuhiko KAWASHIMA

* 東京工業大学研究生 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

** 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

This paper discusses how frequently vertical and horizontal accelerations take their near-peak values. For this purpose, n -sets of horizontal and vertical accelerations at time t were assumed to be independent, and the probability that the horizontal and vertical accelerations simultaneously take values larger than βH and βV times the respective peak value was defined as $P_{\beta H-\beta V}$. Five strong motion accelerations recorded in the 1995 Hanshin/Awaji Earthquake, 1993 Kushiro-oki Earthquake and in the 1994 Northridge, USA, Earthquake were analyzed. From the analyses, it was found that in spite of the short duration, the records at JMA Kobe Observatory and Higashi Kobe Bridge had larger $P_{3/4-3/4}$ than other records.

Key Words: Seismic Design, Ground Motion, Hanshin/Awaji Earthquake

1. まえがき

平成7年1月17日の兵庫県南部地震では、各種の土木、建築構造物に未曾有の大被害が生じた。被害原因については、地震動の特性や構造物の地震応答、構造部材の動的耐力～変形性能等の広い観点から、各種の検討が行われている。今回の被害を大きくした原因の一つとして、耐震設計には上下方向加速度が考慮されていない[1]にもかかわらず、水平方向地震動と同時に大きな上下方向地震動が作用したことが指摘されている。同様な指摘は、1994年1月の米国 Northridge 地震の際にも行われたことがある。

著者らは、RC橋脚等の構造部材の動的耐力に関する実験等[2]から、基本的に上下方向地震動が橋の被害には大きな影響を与えたとは考えられないと考えているが、どのような確率で構造物に生じる水平方向の応答加速度と同じ瞬間に大きな上下方向地震動加速度が作用することがあり得るかを検討しておくことは有意義なことと考えられる。従来、上下方向地震動や加速度応答スペクトルに関する検討[3]は行われているが、水平方向加速度と上下方向加速度がともに最大値に近い値をもつ確率については検討されていない。

本文は、1995年兵庫県南部地震や1993年釧路沖地震、1994年米国 Northridge 地震による強震記録をもとに、上述した点を解析した結果を報告するものである。

2. 生起確率の定義

いま、ある地震により同一箇所で記録され、等時間間隔 Δt (秒) で数値化されている水平方向地震動加速度 $\ddot{u}_g^H(t)$ と上下方向地震動加速度 $\ddot{u}_g^V(t)$ を取り上げる。水平方向加速度と上下方向加速度にはそれぞれ n 個の数値化加速度が地震動の継続時間内にあるので、同一時刻における n 組の水平方向加速度と上下方向加速度の組み合わせをそれぞれ独立事象とみなし、水平方向加速度が最大値に近い値をとる瞬間に上下方向加速度も最大値に近い値をとる確率を検討することとする。

構造物の耐震性には、地震動加速度よりも構造物に生じる応答加速度の方が重要である。このため、構造物を1自由度の線形ばね～質点系にモデル化し、いろいろな固有周期 T および減衰定数 h に対する応答加速度を求めることとした。ただし、一般に上下方向振動に対しては構造物内の増幅は著しいものではないため、地震動加速度そのものを構造物の応答と考えることにした。なお、ここでは減衰定数 h は一般の土木構造物を想定して0.05とした。

いま、1自由度系の水平応答加速度を $ra^H(t)$ とし、これをその最大値で正規化する。

$$r_a^H(t) = |ra^H(t)| / ra_{\max}^H \quad (1)$$

また、上下方向地震動加速度についてもこの値 $a^V(t)$ をその最大値で次のように正規化する。

$$r_a^V(t) = |a^V(t)| / a_{\max}^V \quad (2)$$

以上のようにして、式（１）および式（２）で与えられる加速度比 $r_a^H(t)$ 、 $r_a^V(t)$ をもとに、構造物に作用する水平応答加速度が最大値に近い値をとるときに上下方向加速度がどのような値をとるかを検討することにする。この際、以下の２点に注目することとした。

最初は、“同一時刻”における水平動と上下動の値を比較するといっても、どの程度の範囲の“同一”の値を比較するかという点である。数値化加速度は一般に1/500秒～1/2000秒という短い間隔で離散化されており、これは構造物の固有周期と比較すると極めて短い時間である。したがって、水平応答加速度と上下方向加速度が1/500～1/2000秒という短い時間内に最大値に近い値をとらなくても、水平方向応答加速度が最大値に近い値をとった瞬間から前後に±0.1秒くらいの時間差の中で上下方向加速度も最大値に近い値をとれば、構造部材の動的耐力、変形性能という観点からは、“同時”に作用したとみなせるかもしれない。このような点を解析に考慮するため、式（２）による上下方向加速度を次式で与えることにした。

$$r_a^V(t, \tau) = a^V(t, \tau) / a_{\max}^V \quad (3)$$

ここで、

$$a^V(t, \tau) = \max \{ |a^V(t - \tau)|, |a^V(t - \tau + \Delta t)|, \dots, |a^V(t)|, \dots, |a^V(t + \tau - \Delta t)|, |a^V(t + \tau)| \} \quad (4)$$

ここで、 τ は時刻 t の前後に考慮する時間差（秒）である。時間差 τ としてどの程度の値を考えるべきかは、構造物の動的応答や構造部材の動的耐力の観点から検討していく必要があるが、ここでは、最初の試みとして $\tau=0.1$ 秒とすることとした。なお、 $\tau=0$ の場合は、式（３）は式（２）と同じである。

２番目は、どれだけの継続時間を解析に考慮すべきかという点である。水平応答加速度と上下方向加速度が最大値をとる回数は時間間隔 Δt の単位でそれぞれ各１回だけであるが、その前後にはこれよりも少しずつ小さい水平応答加速度と上下方向加速度が多数ある。前述したように、同一時刻の水平応答加速度と上下方向加速度を１つの独立したデータとみなし、合計 n 組のデータから水平応答加速度と上下方向加速度が同時に最大値に近い値をとる確率を以下のように定義する。

$$p_{\beta H - \beta V} = n_{\beta H - \beta V} / n \quad (5)$$

ここで、 $n_{\beta H - \beta V}$ は $\beta H \leq r_a^H \leq 1.0$ で、かつ $\beta V \leq r_a^V(t, \tau) \leq 1.0$ となるデータ数である。このように、水平応答の加速度比 r_a^H が βH を超え、同時に上下方向の加速度比 $r_a^V(t, \tau)$ が βV を超える確率 $p_{\beta H - \beta V}$ を定義すると、この値は n が大きいほど小さく、また常に最大値を含むように継続時間が定義されていれば、 n が１に近づくほど限りなく1.0に近づくことになる。

このためここでは、図-1に示すように、水平応答加速度 $r_a^H(t)$ の最大加速度 $ra_{\max}^H$ の α 倍（0～1）の加速度を最初に越す時間 $t_{\alpha 1}$ 秒から、最後にこれを下まわる時間 $t_{\alpha 2}$ 秒までの間の時間を正規化継続時間 T_α と定義することとした。すなわち、

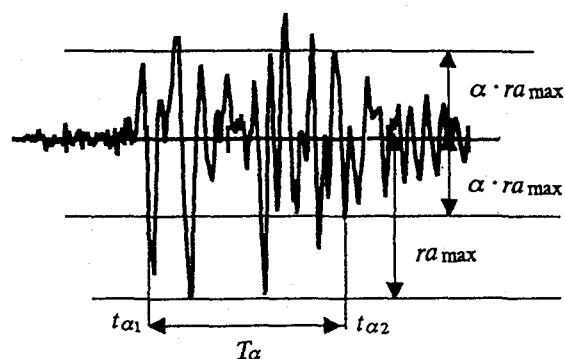


図-1 継続時間定義

$$T_\alpha = t_{\alpha 2} - t_{\alpha 1} \quad (0 \leq \alpha \leq 1) \quad (6)$$

上下方向加速度についても、式（６）で与えられる水平応答加速度と同じ継続時間を考えることにした。なお、このように水平応答加速度を基準に正規化加速度を定義して、 α を順次大きくしていくと、上下方向加速度の最大値が生じる時間がこの正規化加速度の範囲からはずれることがあることに注意しなければならない。しかし、耐震設計という観点からは、水平方向地震力が重要であり、あくまでも水平応答加速度が最大値に近い値をとるときに上下方向加速度の値を検討するという点から、上記のように水平応答加速度を基準に正規化継続時間を定義したものである。正規化継続時間を表す係数 α としては、0.1、0.5、0.75を基本に考えた。 $\alpha=0.1$ の場合は事実上、水平応答加速度のほぼ全体に近い継続時間を見込むことになる。

3. 解析に用いた地震動加速度

解析には表-1に示す５種類の地震動加速度を用いた。これらは、1993年1月の釧路沖地震（ $M=7.8$ ）、1994年1月の米国Northridge地震（ $M=6.8$ ）、1995年1月の兵庫県南部地震（ $M=7.2$ ）により得られた代表的な強震記録である。時間間隔 Δt はいずれの記録も0.01秒とした。図-2～6はこれらの水平及び上下方向加速度を、また図-7は減衰定数0.05の加速度応答スペクトル S_A および速度応答スペクトル S_V を示したものである。マグニチュードの違いを反映して、兵庫県南

表-1 解析に用いた地震波一覧

NO.	記録名	水平成分	地震	マグニチュード
1	神戸海洋気象台	N-S	1995.1. 兵庫県南部地震	7.2
2	J R 鷹取駅	N-S	1995.1. 兵庫県南部地震	7.2
3	東神戸大橋	N-S	1995.1. 兵庫県南部地震	7.2
4	釧路気象台	N-S	1993.1. 釧路沖地震	7.8
5	County Hosp.	90 Deg.	1994.1. Northridge地震	6.8

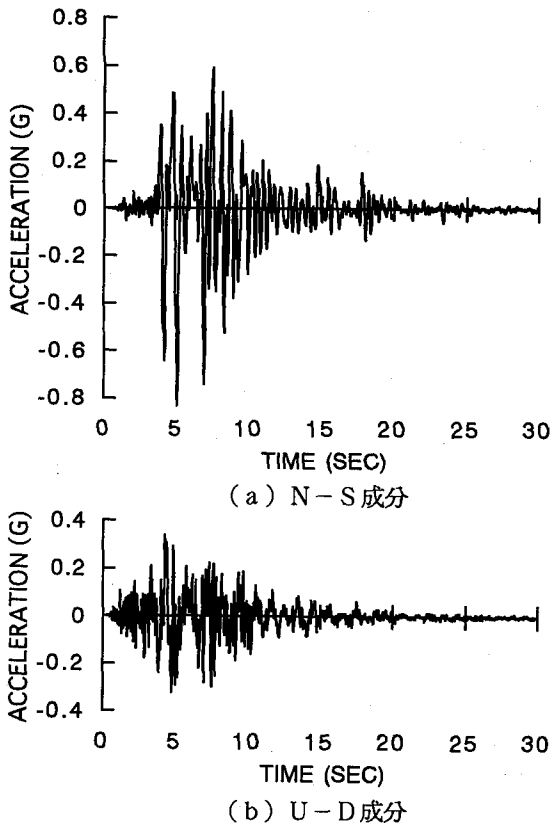


図-2 神戸海洋気象台記録

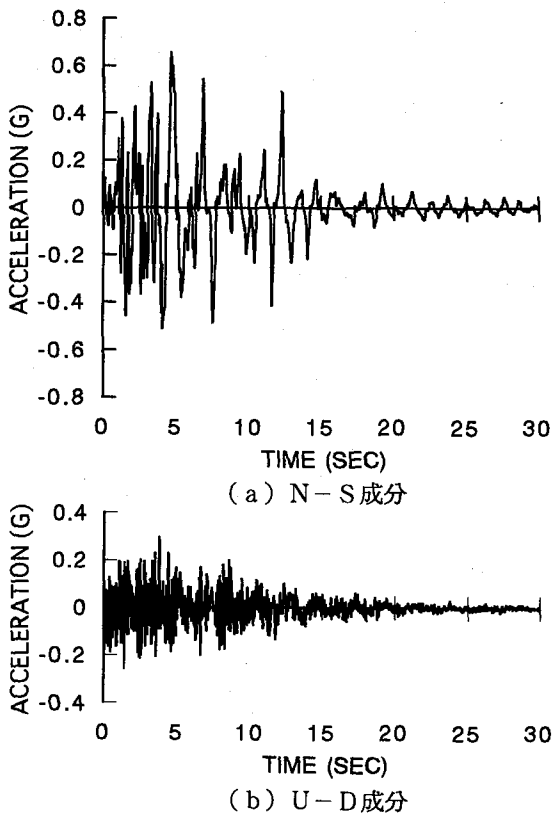


図-3 JR鷹取駅記録

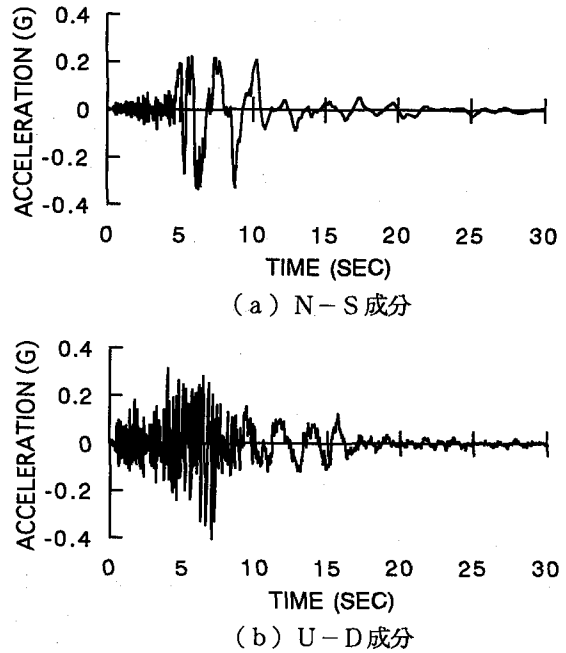
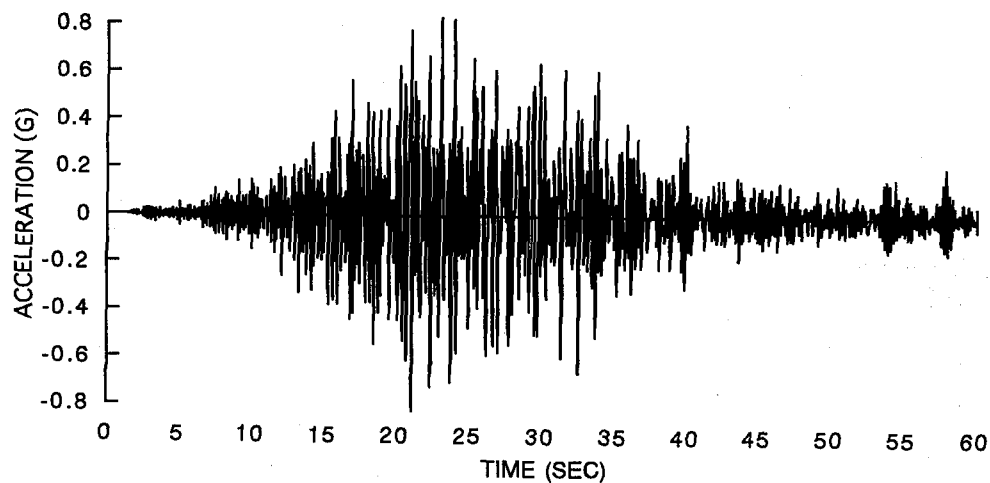


図-4 東神戸大橋記録

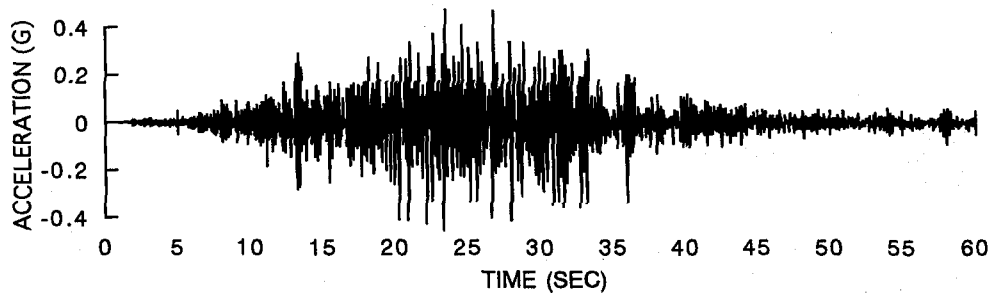
部地震および Northridge 地震による加速度は継続時間が短いのに対して、釧路沖地震は継続時間が長い。いずれの記録も、上下方向加速度は水平方向加速度の1/2程度の値となっている。固有周期0.5～1.5秒あたりでは、神戸海洋気象台記録は Sylmar 記録や釧路気象台記録よりもかなり大きな加速度スペクトル S_A を与えている。このような違いは、速度応答スペクトル S_V を見ても顕著に現れている。

4. 水平応答加速度と上下方向加速度の関係

図-8は、図-2に示した神戸海洋気象台の水平地震動加速度を作用させた場合の1自由度系に生じる弾性応答加速度を、固有周期0.3、1.0、2.0秒の場合について示したものである。これと図-2に示した上下方向加速度を用いて、式(1)および(3)により加速度比 $r_a^H(t)$ 、 $r_a^V(t, \tau)$ を求めた結果が図-9 ($\tau=0$ の場合) および図-10 ($\tau=0.1$ 秒の場合) である。固有周期1.0秒の場合を例にとれば、神戸海洋気象台記録を作用させた場合の最大水平応答加速度は1503galであり、式(4)の係数 α を0.1、0.5、0.75とすることは、水平応答加速度がそれぞれ150gal、752gal、1128galに最初に達した時間から最後にこの値をとる時間との間の正規化継続時間を考えることに相当する。神戸海洋気象台記録を入力して固有周期1秒とした場合には、このようにして求めた正規化継続時間は、 $\alpha=0.1$ 、0.5、0.75に対して16.1秒、5.56秒、0.65秒となる。したがって、いま時間間隔 Δt を0.01秒としているため、 $\alpha=0.1$ 、0.5、0.75の場合には水平応答加速度と上下方向加速度には1610組、556組、65組のデータがあること

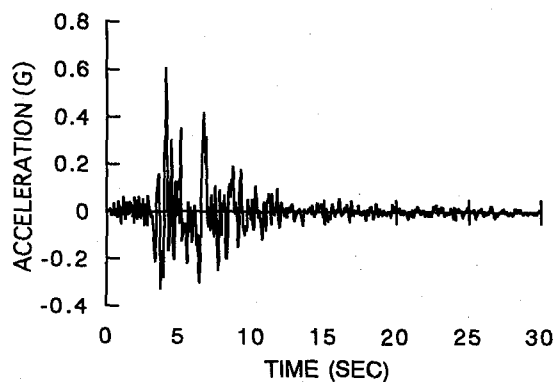


(a) N-S成分

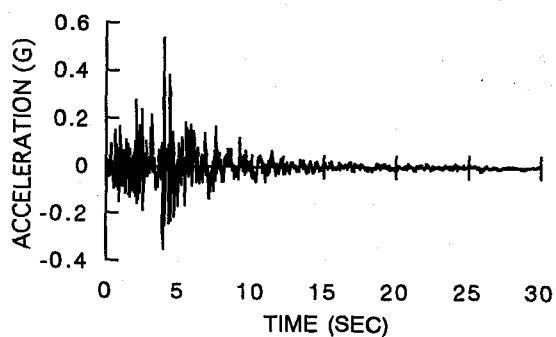


(b) U-D成分

図-5 釧路気象台記録

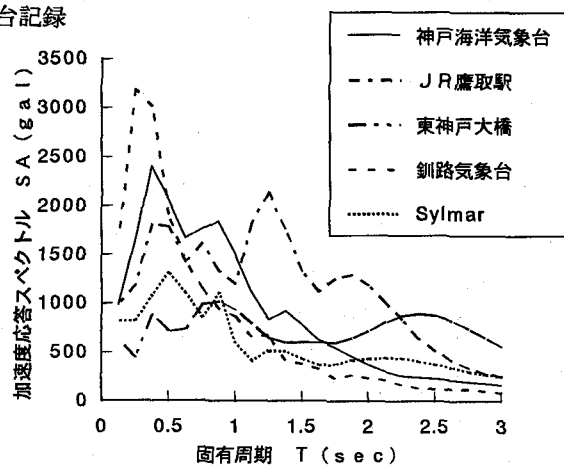


(a) 90deg成分

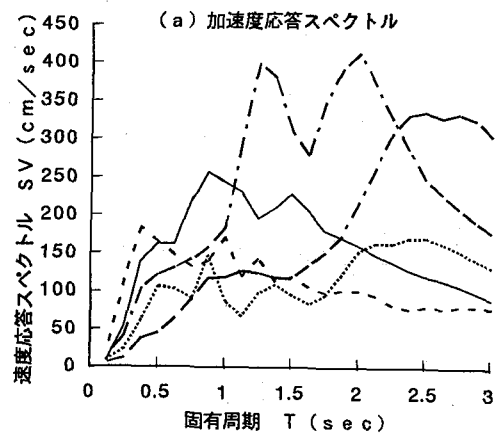


(b) U-D成分

図-6 Sylmar記録



固有周期 T (sec)



(b) 速度応答スペクトル

図-7 加速度応答スペクトルおよび速度応答スペクトル

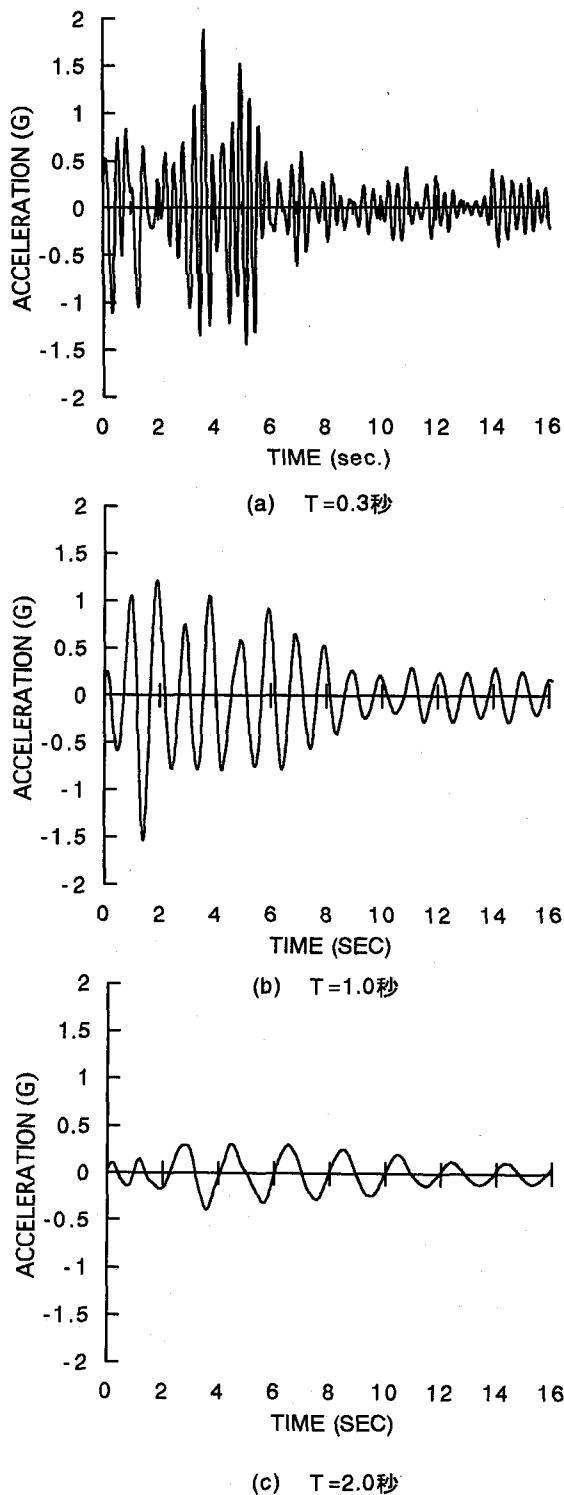


図-8 神戸海洋気象台記録を作用させた
1自由度系に生じる弾性応答加速度

になる。

まず、図-9に示した $\tau=0$ の場合を見ると、まず、大部分のデータは $r_d^H(t)$ と $r_d^V(t,0)$ がともに値が小さい箇所に固まっている。しかし $r_d^H(t)$ と $r_d^V(t,0)$ がともに1.0に近い場合、すなわち、水平応答加速度と上下方向加速度がともに最大値に近い値をとる瞬間がわずかなが

らあることがわかる。 α が大きくなるほど全体のデータ個数は少なくなるが、 $r_d^H(t)$ が1.0に近い値をとるデータは当然ながら α が大きくなってもほとんど変化しないため、 α が大きくなるにつれて次第にこうしたデータの占める割合が大きくなっていく。

次に同じような解析を、JR鷹取駅、東神戸大橋、釧路気象台およびSylmarの各記録に対して行った結果が図-11～14である。ここでは紙面の都合で $\tau=0$ の場合だけを示している。これより以下の特徴があることがわかる。

(1) Sylmar記録では、 $r_d^H(t)$ が1.0に近い値をとる際の $r_d^V(t,0)$ は、 $T=0.3$ 秒では0.4、 $T=1$ 秒および2秒では0.3程度と、他の記録に比較して顕著に小さい。また、東神戸大橋記録の場合も固有周期が2秒と長い場合には、同様の特徴を示す。

(2) 反対に、釧路気象台記録および神戸海洋気象台記録では、 $r_d^H(t)$ が1.0に近い値をとる際の $r_d^V(t,0)$ は0.6～0.8と比較的大きい。

(3) JR鷹取駅記録〔6〕および東神戸大橋記録では、 $r_d^H(t)$ が1.0に近い値をとる際の $r_d^V(t,0)$ は固有周期 $T=1$ 秒では比較的大きく、 $T=0.3$ 秒、 $T=2$ 秒では小さい。固有周期に応じて上記(1)および(2)のいずれかの特徴を示す。

次に、図-10に示した $\tau=0.1$ 秒の場合を見てみると、 $r_d^H(t)$ と $r_d^V(t,0.1)$ がともに1.0に近づく回数は、 $\tau=0$ の場合よりも顕著に多くなることがわかる。図-10で同一の $r_d^V(t,0.1)$ の値に対して複数のデータが横に並んでいるのは、式(4)に示したように、ある $r_d^H(t)$ に対してこれより ± 0.1 秒の範囲で $r_d^V(t,0.1)$ を求めているため、ある範囲で $r_d^H(t)$ が変化しても $r_d^V(t,0.1)$ が変化しないためである。

5. 水平応答加速度と上下方向加速度の最大値に近い値が同時に発生する確率

水平応答加速度と上下方向加速度がともに最大値に近い値をとる確率を検討するため、式(5)による定義で $\beta H = \beta V = 3/4$ とした確率 $p_{3/4-3/4}$ をまとめた結果が表-2である。

$\alpha=0.1$ と小さい場合には、確率 $p_{3/4-3/4}$ はいずれの条件でも19/1000もしくはそれ以下と小さく、あまりはっきりした傾向は認められない。これは、前述したように式(5)の母数 n が大きいため、確率 $p_{3/4-3/4}$ が小さく求められたためである。 α が0.5、0.75と大きくなるにつれて次第に母数 n が減少し、最大加速度の大きい範囲だけの特徴を表すようになっていく。 $\alpha=0.75$ の場合を例にとれば、 $\tau=0$ の場合には神戸海洋気象台記録では $T=0.3$ 秒で $p_{3/4-3/4}$ は13/1000となり、他の記録よりも顕著に大きな値となっている。また、 $T=2$ 秒でも $p_{3/4-3/4}$ は8/1000となっている。

一方、釧路気象台記録の場合には、 $T=0.3$ 秒、1秒、2秒に対する $p_{3/4-3/4}$ ($\alpha=0.75$)は6/1000、1

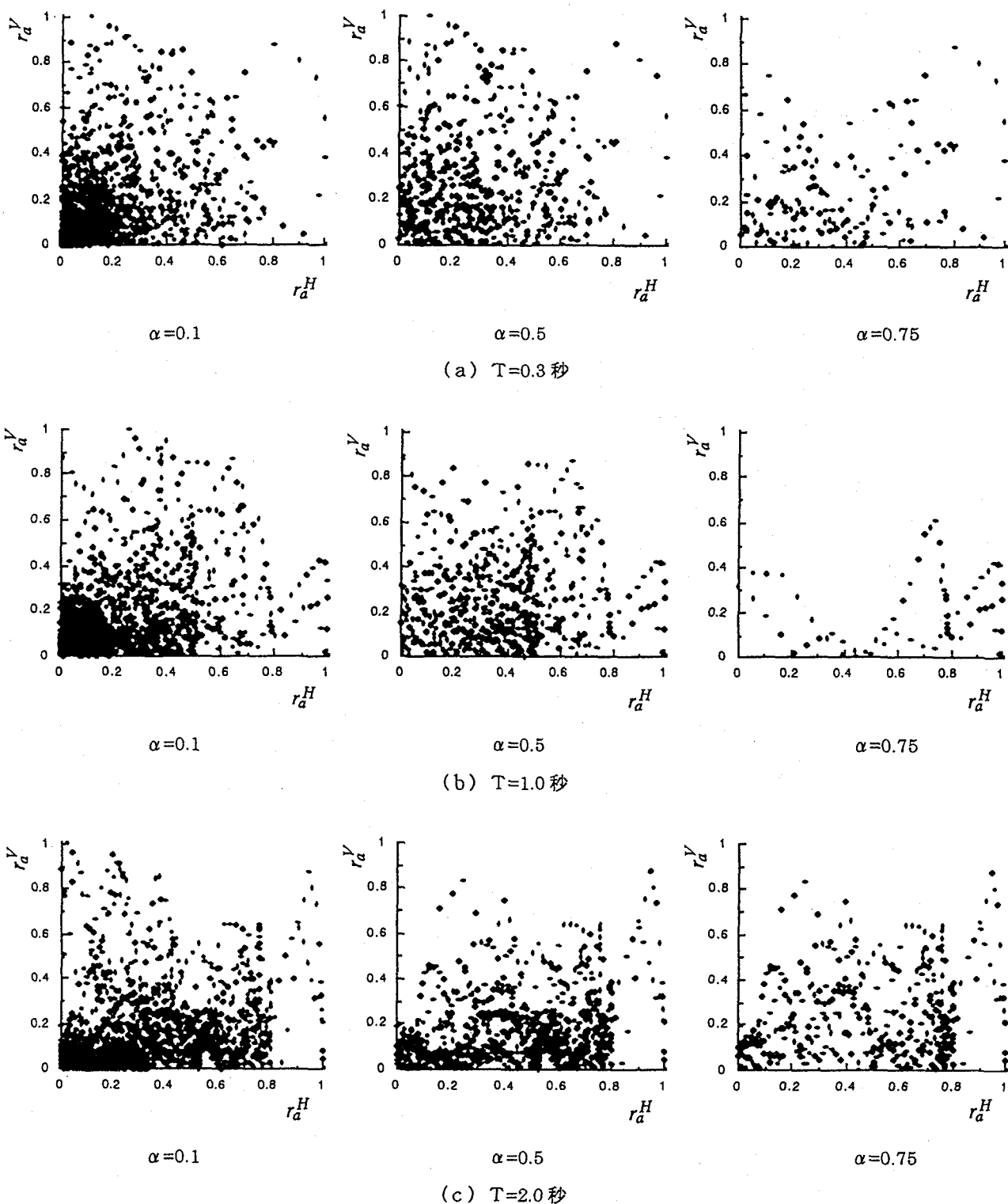


図-9 神戸海洋気象台記録による加速度比 ($\tau=0$)

9/1000、47/1000であり、全体として今回解析した5地震動の中では最も大きな値となっている。これは、もともと継続時間が長く、水平応答加速度と上下方向加速度がともに大きな値をとる確率が高いと見る

ことができる。

興味深いのは、兵庫県南部地震と同じように直下型地震で、かつ継続時間も短い Sylmar 記録である。この場合には、 $p_{3/4-3/4}$ ($\alpha=0.75$) はいずれの固有周期に

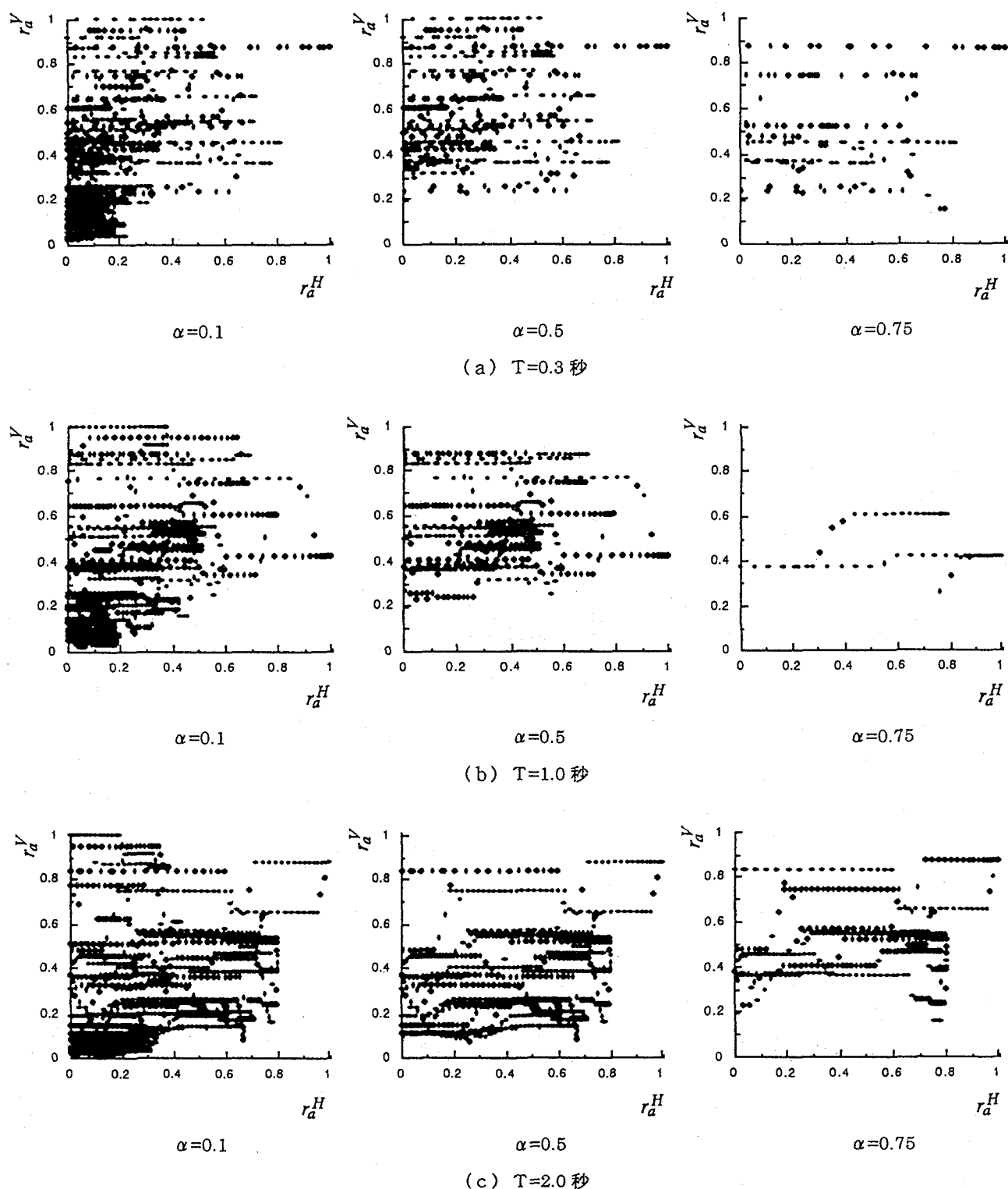


図-10 神戸海洋気象台記録による加速度比 ($\tau=0.1$ 秒)

対しても0であり、神戸海洋気象台記録とは著しく異なっている。これは、Sylmar 記録では水平応答加速度と上下方向加速度が生じる時間が少しずれているためと考えられる。ともに直下型地震による代表的強震記録と

して歴史に残るであろう2つの地震動であるが、その特徴に顕著な違いがある点が興味深い。

同じ兵庫県南部地震でもJR鷹取駅記録および東神戸大橋記録では、 $p_{3/4-3/4}$ ($\alpha=0.75$) は $T=0.3$ 秒

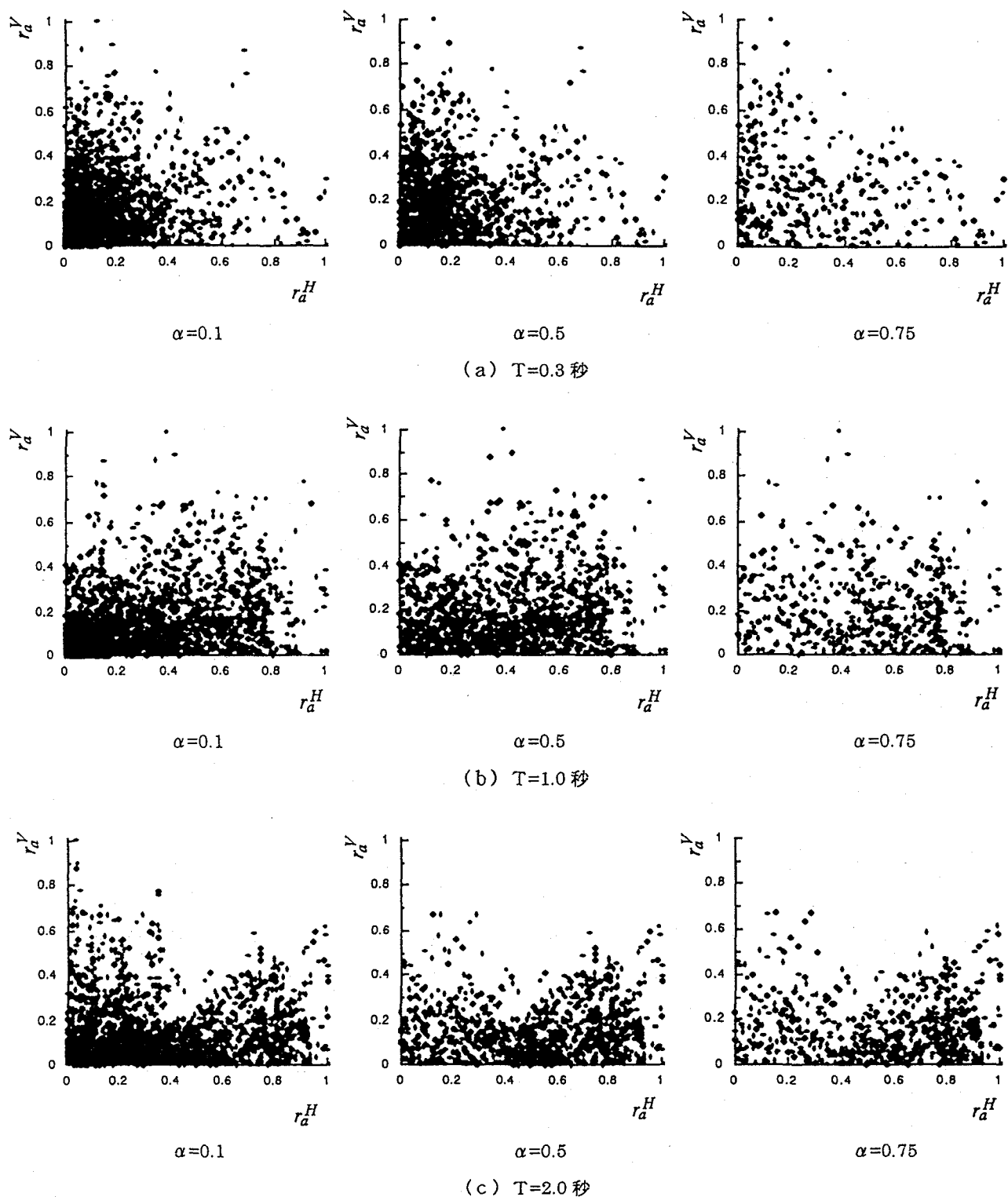


図-11 JR 鷹取駅記録による加速度比 ($\tau=0$)

および $T=2$ 秒では 0 であるが、 $T=1$ 秒ではそれぞれ、 $2/1000$ 、 $42/1000$ となっている。図-7 に示したように、いずれの記録にも固有周期 1 秒付近では地震動はあまり卓越しておらず、こうした点から $T=1$ 秒で

$p_{3/4-3/4}$ が大きくなったのではないかと考えられる。同じ兵庫県南部地震による記録でも、神戸海洋気象台記録は固有周期が 0.3 秒と短い領域において、水平応答加速度と上下方向加速度がともに 1.0 に近い値をもつ確

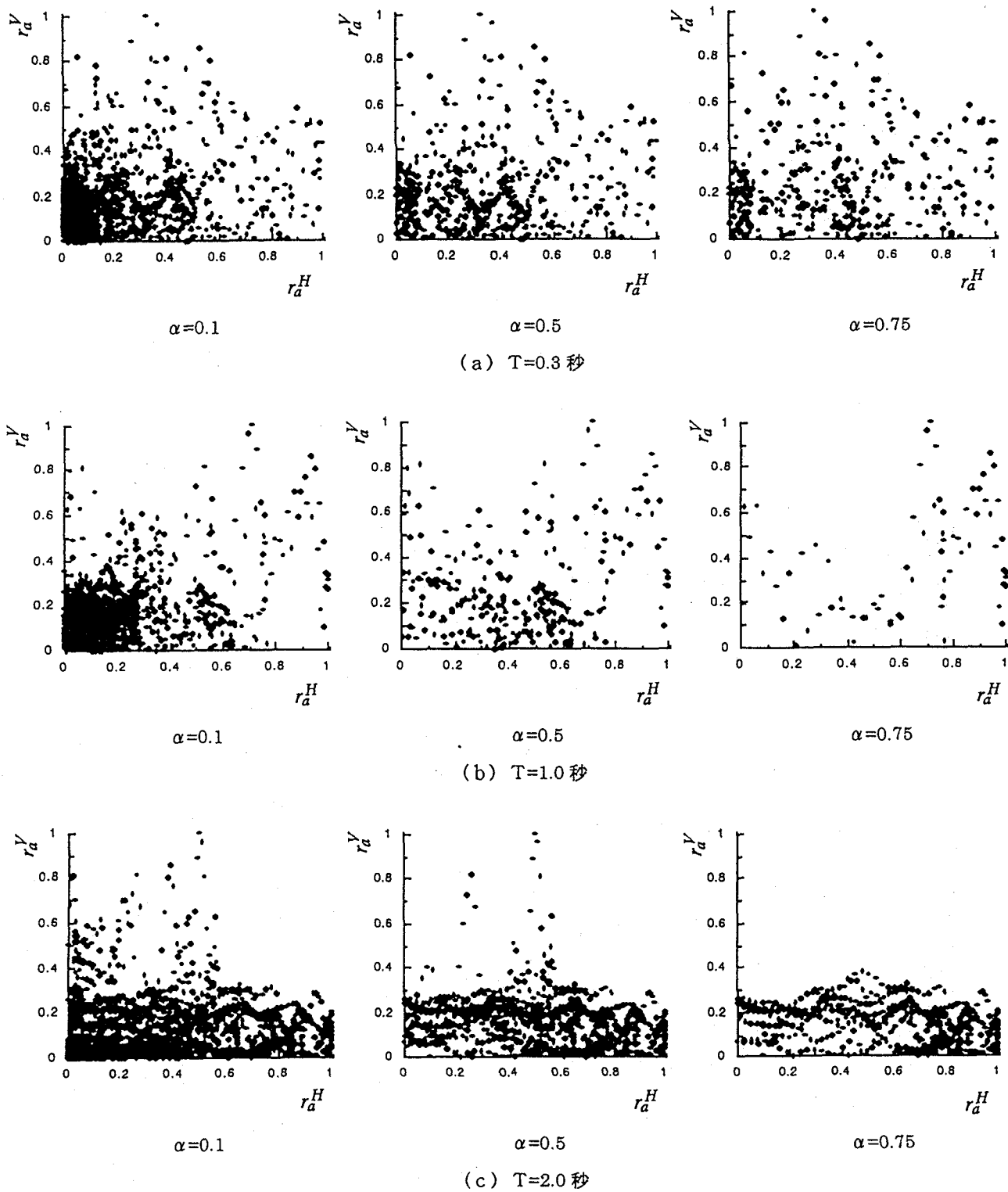


図-12 東神戸大橋記録による加速度比 ($\tau=0$)

率が極めて高い記録であったということが出来る。

以上は $\tau=0$ の場合であるが、 $\tau=0.1$ の場合にも、神戸海洋気象台記録において $T=0.3$ 秒の $p_{3/4-3/4}$ が5/2/1000と他の記録よりも大きい点を含めて、全体的

な特徴は上述した $\tau=0$ の結果と同じである。

6. 結論

1自由度系の応答として評価した水平応答加速度と

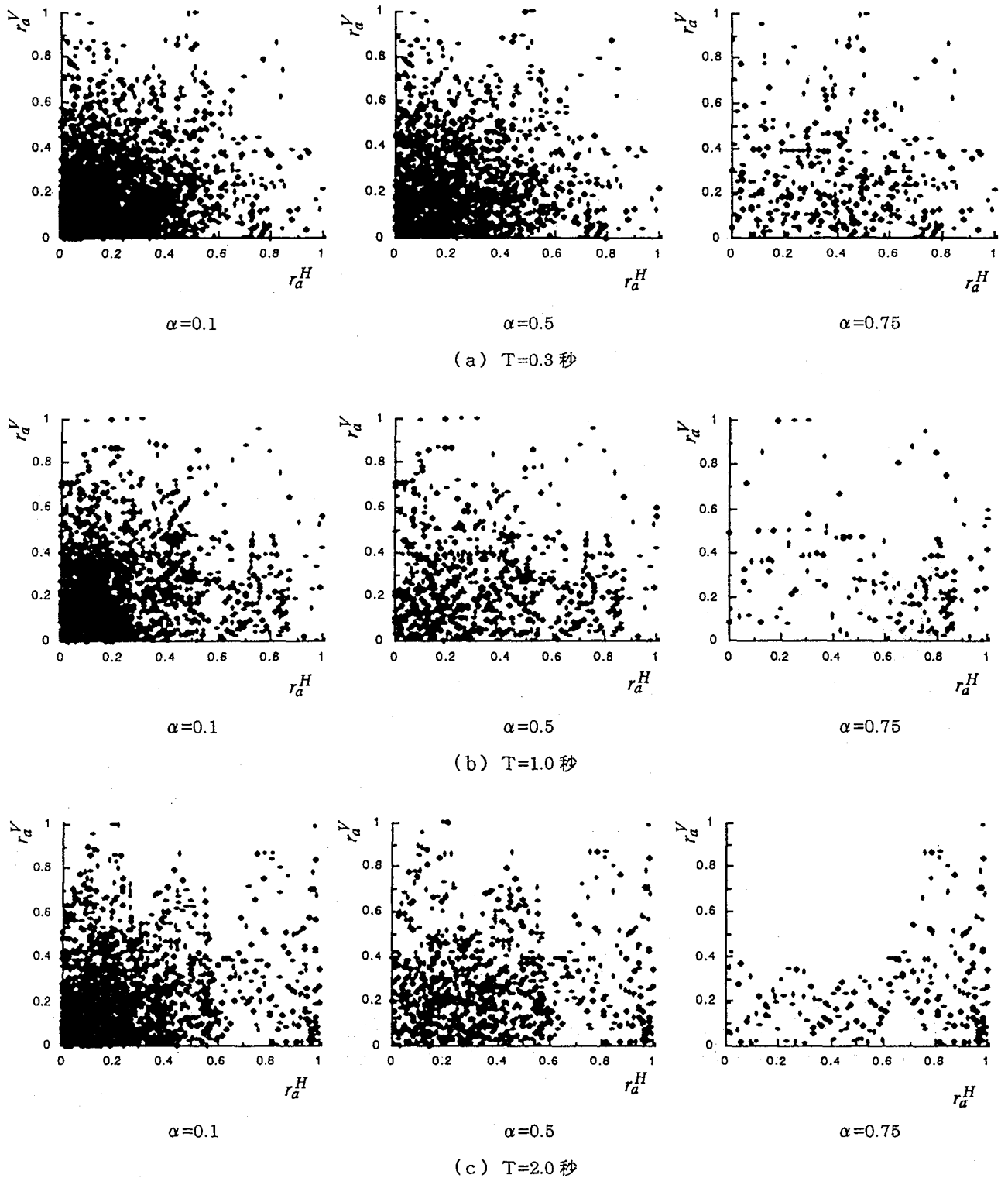


図-13 釧路気象台記録による加速度比 ($\tau=0$)

上下方向の地震動加速度が、それぞれ同じ瞬間に最大値に近い値をとる確率がどの程度あるかという点を解析するため、同一時刻の水平応答加速度と上下方向加速度を1組の独立したデータとみなし、式(6)で定義する

正規化継続時間内の総データ数に対する比率として式(5)で定義した当該水平応答加速度と上下方向加速度の組み合わせが生じる確率を求めた。

本解析結果をまとめると以下の通りである。

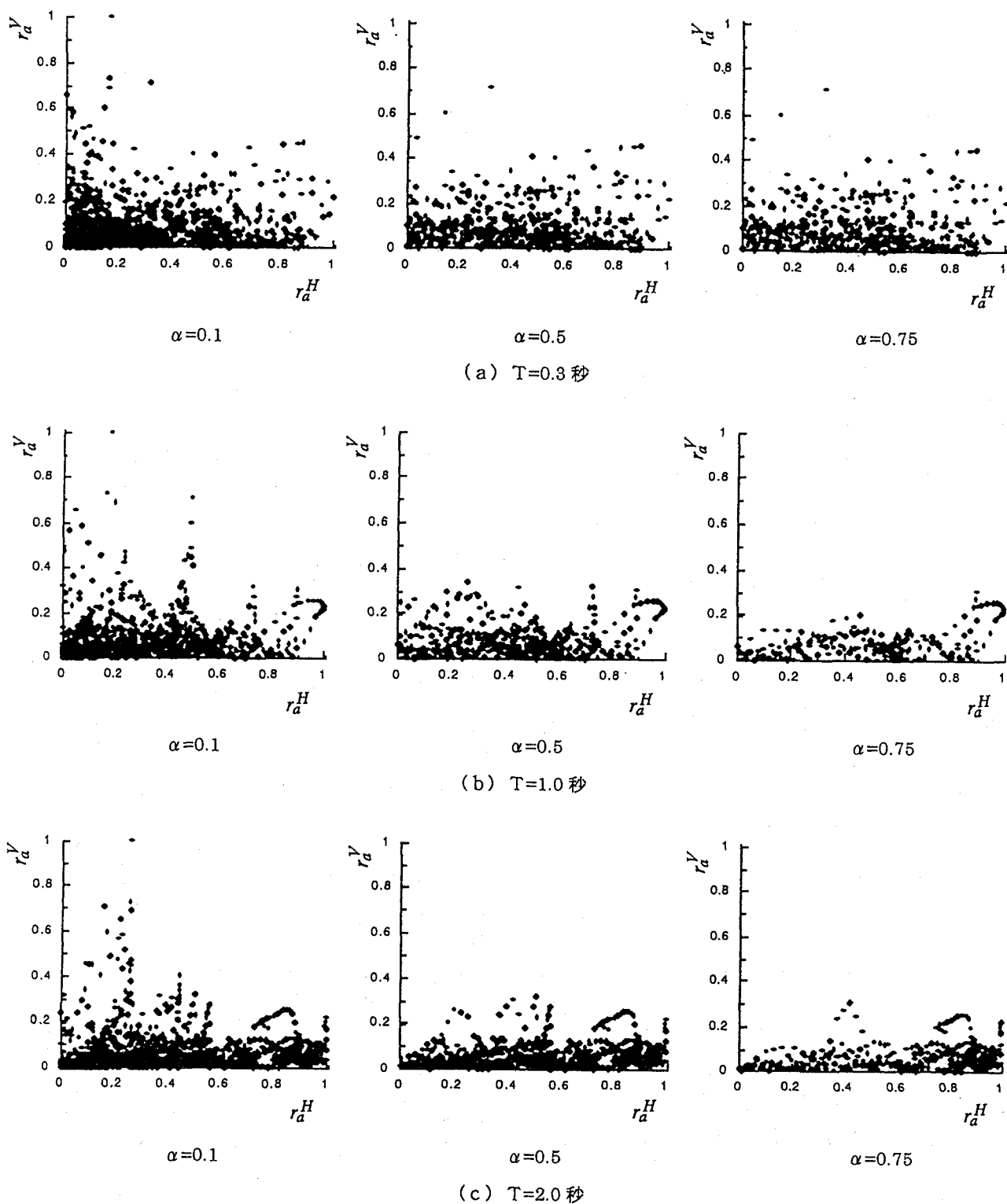


図-14 Sylmar 記録による加速度比 ($\tau=0$)

(1) 正規化加速度係数 α が 0.75 の場合に注目すると、水平応答加速度および上下方向加速度がともにそれぞれの最大値の $3/4 \sim 1$ の範囲をとる確率 $p_{3/4-3/4}$ は、神戸海洋気象台記録では $T=0.3$ 秒と短周期の領域では

13/1000 と他の 4 種類の記録と比較すると顕著に高い。また、 $T=2$ 秒でも $p_{3/4-3/4}$ は 8/1000 となっている。

(2) 同じ兵庫県南部地震でも、JR 鷹取駅記録のよう

表-2 $p_{3/4 \sim 3/4}$ になる確率 ($\times 1/1000$)

$\alpha=0.1$ の場合

地震	観測地点	$\tau=0$			$\tau=0.1$		
		T=0.3秒	T=1.0秒	T=2.0秒	T=0.3秒	T=1.0秒	T=2.0秒
兵庫県 南部地震	神戸海洋気象台	1	0	0	5	0	2
	J R 鷹取駅	0	0	0	0	5	0
	東神戸大橋	0	2	0	1	19	0
釧路沖地震	釧路気象台	0	0	1	1	1	3
Northridge地震	Sylmar	0	0	0	0	0	0

$\alpha=0.5$ の場合

地震	観測地点	$\tau=0$			$\tau=0.1$		
		T=0.3秒	T=1.0秒	T=2.0秒	T=0.3秒	T=1.0秒	T=2.0秒
兵庫県 南部地震	神戸海洋気象台	4	0	4	15	5	25
	J R 鷹取駅	0	1	0	0	13	0
	東神戸大橋	0	11	0	4	91	0
釧路沖地震	釧路気象台	1	4	11	3	20	38
Northridge地震	Sylmar	0	0	0	0	0	0

$\alpha=0.75$ の場合

地震	観測地点	$\tau=0$			$\tau=0.1$		
		T=0.3秒	T=1.0秒	T=2.0秒	T=0.3秒	T=1.0秒	T=2.0秒
兵庫県 南部地震	神戸海洋気象台	13	0	8	52	0	52
	J R 鷹取駅	0	2	0	0	31	0
	東神戸大橋	0	42	0	1	338	0
釧路沖地震	釧路気象台	6	19	47	14	82	160
Northridge地震	Sylmar	0	0	0	0	0	0

に $p_{3/4 \sim 3/4}$ が大きくない記録もあれば、東神戸大橋記録のように $T=1$ 秒で $p_{3/4 \sim 3/4}$ が $42/1000$ と大きい記録もある。

(3) 同じような直下型地震動による記録ではあるが、神戸海洋気象台記録や東神戸大橋記録に比較して Sylmar 記録では $p_{3/4 \sim 3/4}$ は顕著に低い。

(4) 釧路沖地震による釧路気象台記録は継続時間が長い、これを反映して今回解析した5地震動の中では、総合的に見ると $p_{3/4 \sim 3/4}$ ($\alpha=0.75$) は最も高い。

(5) 式(3)、式(4)で定義したように時間差を考慮すると、確率 $p_{\beta H - \beta}$ は大幅に増加する。時間差 τ は構造部材の動的耐力の観点から検討していく必要があるが、例に $\tau=0.1$ 秒とすると、上記(1)に示した $T=0.3$ 秒の場合の神戸海洋気象台記録の $p_{3/4 \sim 3/4}$ ($\alpha=0.75$) は $13/1000$ から $52/1000$ に増加する。

参考文献

- 例えば、日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編、1990年
- 川島一彦他：鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水

平耐力の照査法の開発に関する研究、土木研究所報告、第190号、1993

3) 例えば、Kawashima, K., Aizawa, K., Takahashi, K. : Attenuation of Peak Ground Motions and Absolute Acceleration Response Spectra of Vertical Earthquake Ground Motion, Proc. of JSCE, Structural Eng., /Earthquake Eng., Vol.2, No.2, 1985

4) Kawashima, K., Aizawa, K. : Bracketed and Normalized Durations of Earthquake Ground Acceleration, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.18, pp.1041~1051, 1989

5) California Strong Motion Instrumentation Program California Department of Conservation Division of Mines and Geology Office of Strong Motion Studies : Processed csmip Strong-Motion Records from the Northridge, California Earthquake of January 17 1994: Release No.1, report No.OSMS 94-06B, 1994

6) Nakamura, Y. : Waveform and its Analysis of the 1995 Hyogo-Ken-Nanbu Earthquake, JR Earthquake Information No.23c, 1995, Railway Technical Research Institute

(1995年9月18日受付)