

土 木 研 究 所 資 料

最大地震動および地震応答スペクトルの推定法

——(その1)水平2成分合成の影響——

昭和57年3月

建設省土木研究所
地震防災部・振動研究室

Copyright © 56年度 by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはいない。

ま え が き

強震観測では、一般に1地点につき水平2成分、上下1成分、計3成分の加速度を測定する。ここで、水平2成分の向きは、構造物の動的挙動観測に重点を置く場合には、構造物の主軸方向とこれに直角方向にとる場合が多い。このようにして特定の地震により地盤上で観測された水平2成分の加速度記録を相互に比較すると、両者は同一地点で観測されたにもかかわらず非常に異なる場合が少なくない。我国では一般に、水平2方向の地震力を独立に構造物に作用させて耐震計算を行っているため、動的解析等で加速度記録を構造物に作用させる際に、強震計の記録方向とは異なった方向の水平成分が構造物に大きな応答を与える可能性があるとするれば、その程度を把握しておくことが必要とされる。

本報告は、このような観点から、強震計で観測された水平2成分の加速度記録を水平面内で合成した場合に、加速度およびこれから求めた速度、変位、さらに加速度応答スペクトルが方向別にどの程度のバラツキで変化するかを我国の地盤上で得られた多数の強震記録をもとに検討したものである。検討の主眼は、水平2成分の合成による最大加速度、最大速度、最大変位の増加率および加速度応答スペクトルの増加率とした。

昭和 57 年 3 月

建設省土木研究所地震防災部振動研究室

室 長 荒 川 直 士

主任研究員 川 島 一 彦

相 沢 興

高 橋 和 之

目 次

ま え が き

1. 概 要	1
2. 水平 2 成分の合成と合成の影響度の定義	2
3. 解析に用いた強震記録	4
4. 板島橋記録に対する試算例	11
5. 最大地震動に対する水平 2 成分合成の影響	15
6. 加速度応答スペクトルに対する水平 2 成分合成の影響	20
7. 結 論	28
参考文献	29

1. 概 要

強震観測では、一般に1地点につき水平2成分、上下1成分、計3成分の加速度を測定する。ここで、水平2成分の向きは、構造物の動的挙動観測に重点を置く場合には、構造物の主軸方向とこれに直角方向にとる場合が多い。このようにして特定の地震により地盤上で観測された水平2成分の加速度記録を相互に比較すると、両者は同一地点で観測されたにもかかわらず非常に異なる場合が少なくない。我国では一般に、水平2方向の地震力を独立に構造物に作用させて耐震計算を行っているため、強度計の記録方向とは異なった方向の水平成分が構造物に大きな応答を与える可能性があるとするれば、その程度を把握しておくことが必要とされる。

1地点における地震動の方向性に関しては、Penzien,⁸⁾ 渡部,⁹⁾ Kubo,¹⁰⁾ 星谷ら¹¹⁾の研究がある。これらは地震動を主軸に対するベクトルととらえ主軸にそった地震動は統計的に独立であるとして、主軸方向の3方向入力を独立に与えようとするものである。しかし、地震動の特性は、震源域における地震動の特性、震源から観測地点に至る伝播特性、観測地点周辺の局所的な地形・地盤条件等に支配されるとされ、^{2) 3)} これらの因子を定量的に分析するためには高密度強震観測結果を待たなければならない。

これに対して、1地点の水平加速度の応答スペクトルが方向別にどのように異なるかを扱ったものに片山の研究¹²⁾がある。片山は1968年十勝沖地震の本震と余震による各3箇所、合計6個の強震記録を用いて方向別の応答レベルの検討をし、方向による応答値の最大・最小は平均値を基準として $\pm 20\%$ 程度バラツキを指摘している。また、土岐¹³⁾はカリフォルニアで観測された最大加速度が60~70gal以上の強震記録をもとに、水平1成分の最大加速度Xとその値を示す時刻における直交成分の加速度振幅Yから、両成分の合成を近似的に $\sqrt{X^2 + Y^2}$ で与えた場合に、合成の影響を $\sqrt{X^2 + Y^2}/X$ により検討している。この結果、 $\sqrt{X^2 + Y^2}/X$ は $1.0 \sim \sqrt{2}$ の範囲におさまリ、平均値は1.06であると報告している。これらの研究は、方向別の最大加速度および応答スペクトルを知る上で貴重なものであるが、比較的少数の観測点で少数の地震により得られた記録に基づいているため、一般的な指標と見なしうるかどうかに関しては検討の余地を残している。

本報告は、以上の観点から、強震計で観測された水平2成分の加速度記録を水平面内で合成した場合に、加速度およびこれから求めた速度、変位、さらに加速度応答スペクトルが方向別にどの程度のバラツキで変化するかを我国の地盤上で得られた多数の強震記録をもとに検討したものである。検討の主眼は、水平2成分の合成による最大加速度、最大速度、最大変位の増加率および加速度応答スペクトルの増加率とした。

2. 水平 2 成分の合成と合成の影響度の定義

強震計の感振方向に相当する水平 2 成分の直交座標軸を X , Y とし, これを水平面内で図 1 のように任意の角度 θ だけ回転した座標軸を x , y とすれば, 両者の関係は次式で与えられる。

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ Y \end{Bmatrix} \quad (1)$$

いま, X および Y 軸に沿う加速度をそれぞれ $a^X(t)$, $a^Y(t)$ とし, $a^X(t)$, $a^Y(t)$ の最大値をそれぞれ $a_{\max}^X$, $a_{\max}^Y$ とする。 $a^X(t)$, $a^Y(t)$ を式(1)により座標変換すると x および y 軸に沿う加速度 $a^x(\theta, t)$, $a^y(\theta, t)$ が得られる。ここで, $a^x(\theta, t)$ と $a^X(t)$, $a^Y(t)$ の間には,

$$a^X(t) = a^x(0, t), \quad a^Y(t) = a^x\left(\frac{\pi}{2}, t\right) \quad (2)$$

の関係があるから, θ の範囲を $0 \sim 2\pi$ とすれば $a^x(\theta, t)$ のみで座標変換後の加速度を表わすことができる。 $a^x(\theta, t)$ の時間軸における最大加速度を $\tilde{a}_{\max}^{\theta}$ (絶対値をとる), これを種々の θ に対して計算した場合に最大となる加速度を $\tilde{a}_{\max}$ とする。すなわち

$$\tilde{a}_{\max} = \max \{ \tilde{a}_{\max}^{\theta}(\theta) \} \text{ for } \theta \quad (3)$$

ここで

$$\tilde{a}_{\max}^{\theta}(\theta) = \max \{ |a^x(\theta, t)| \} \text{ for } t \quad (4)$$

ここで, $\max \{ f(Z_1, Z_2) \} \text{ for } Z_1$ は Z_1 を変化させた場合の関数 $f(Z_1, Z_2)$ の最大値を示す。また, 強震計により記録された水平 2 成分の最大加速度 (絶対値) $a_{\max}^X$, $a_{\max}^Y$ のうち, いずれか大きい方を $a_{\max}$ とし, 次式により座標変換に伴う最大加速度の増加率 r_a を定義する。

$$r_a \equiv \tilde{a}_{\max} / a_{\max} \quad (5)$$

速度および変位についても同様に, 最大速度, 最大変位の増加率 r_v , r_d を定義することができる。

$$r_v \equiv \tilde{v}_{\max} / v_{\max} \quad (6)$$

$$r_d \equiv \tilde{d}_{\max} / d_{\max} \quad (7)$$

ここで, $\tilde{v}_{\max}$, $\tilde{d}_{\max}$ はそれぞれ速度 $v^x(\theta, t)$ および変位 $d^x(\theta, t)$ において θ および t を種々変化した場合の最大値 (絶対値) であり, $v_{\max}$, $d_{\max}$ は X , Y 水平 2 成分に沿う速度および変位の最大値 (絶対値) のうち, いずれか大きい方である。

また, 応答スペクトルレベルの変化を検討するために, $a^x(\theta, t)$ に対する減衰定数 5 % の加速度応答スペクトル $\tilde{S}_A(\theta, t)$ および加速度応答スペクトル倍率 $\tilde{\beta}(\theta, t)$ を求めた。ここで, T は固有周期であり, $\tilde{S}_A(\theta, t)$ と $\tilde{\beta}(\theta, t)$ の間には次の関係がある。

$$\tilde{S}_A(\theta, T) = \tilde{\beta}(\theta, T) \times \tilde{a}_{\max}^{\theta}(\theta) \quad (8)$$

いま, $\tilde{S}_A(\theta, T)$ および $\tilde{\beta}(\theta, T)$ を種々の θ に対して計算し, 各固有周期ごとに求めた最大値をそれぞれ $\tilde{S}_A(T)$, $\tilde{\beta}(T)$, 最小値をそれぞれ $\tilde{S}_{A\min}(T)$, $\tilde{\beta}_{\min}(T)$ とする。一方, 強震計により観測した $a^X(t)$ および $a^Y(t)$ の加速度応答スペクトルをそれぞれ $S_A^X(T)$, $S_A^Y(T)$, また, 加速度応答スペクトル倍率をそれぞれ $\beta^X(T)$, $\beta^Y(T)$ とし, 次式により加速度応答スペクトルおよび加速度応答スペクトル倍率の増加率 $r_{SA}(T)$ および $r_{\beta}(T)$ を定義する。

$$r_{SA}(T) \equiv \tilde{S}_A(T) / S_A(T) \quad (9)$$

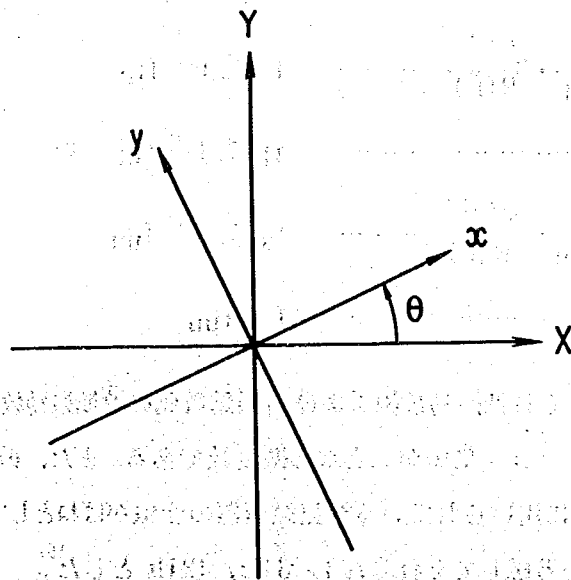
$$r_{\beta}(T) \equiv \tilde{\beta}(T) / \beta(T) \quad (10)$$

ここで,

$S_A(T) : \int_0^2 S_A^X(T) dT$ および $\int_0^2 S_A^Y(T) dT$ のうち, いずれか大きい方の成分の加速度応答スペクトル

$\beta(T) : \int_0^2 \beta^X(T) dT$ および $\int_0^2 \beta^Y(T) dT$ のうち, いずれか大きい方の成分の加速度応答スペクトル倍率

ここで, スペクトル強度の大きい成分のスペクトルを用いて応答スペクトルの増加率を求めたのは, 一般に地震応答解析等では水平2成分のうちスペクトル強度の大きい成分が入力地震動として利用される場合が多いことを考慮したためである。また, 固有周期の範囲を 0.1 ~ 2 秒としたのは大部分の構造物の固有周期がこの範囲に入ることを考慮したものである。



X, Y ----- AXES OF OBSERVATION

x, y ----- TRANSFORMED AXES

θ ----- ANGLE OF ROTATION

図1 水平面内における座標軸の回転

3. 解析に用いた強震記録

解析対象としたのは表1および表2に示す43地点（地盤上）において建設省土木研究所により観測、数値化された103記録（2@103成分）である¹⁾。これらは合計49回の地震によりSMAC型強震計（SMAC-B₂, Q, D, E2）により得られたものであり、数値化精度¹⁴⁾を考慮して次式により短周期の計器補正を加えるとともに、速度および変位を計算した^{14) 15)}。すなわち、いま、強震計による加速度記録を $a_0(t)$ とすれば、このフーリエ変換 $F(f)$ は

$$F_0(f) = \int_{-\infty}^{\infty} a_0(t) e^{-2\pi i f t} dt \quad (11)$$

と求められる。これに強震計の特性によるフィルタ $F_c(f)$ を見込み、補正した加速度 $a(t)$ 、速度 $v(t)$ 、変位 $d(t)$ を次式で求める¹⁹⁾。

$$a(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f) e^{2\pi i f t} df \quad (12)$$

$$v(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{F(f)}{2\pi i f} e^{2\pi i f t} df \quad (13)$$

$$d(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{F(f)}{-4\pi^2 f^2} e^{2\pi i f t} df \quad (14)$$

ここで、

$$F(f) = F_0(f) \cdot F_c(f) \quad (15)$$

$$F_c(f) = \begin{cases} 0 & 0 \leq f < f_{ll} \\ \frac{f - f_{ll}}{f_{lu} - f_{ll}} \cdot \frac{e^{i\phi(f)}}{R(f)} & f_{ll} \leq f \leq f_{lu} \\ \frac{e^{i\phi(f)}}{R(f)} & f_{lu} \leq f \leq f_{ul} \\ \frac{f_{uu} - f}{f_{uu} - f_{ul}} \cdot \frac{e^{i\phi(f)}}{R(f)} & f_{ul} \leq f \leq f_{uu} \\ 0 & f < f_{uu} \end{cases} \quad (16)$$

ここで、 f_{lu} および f_{ul} はそれぞれ低振動数側および高振動数側の遮断振動数であり、 f_{ll} および f_{uu} はそれぞれ f_{lu} および f_{ul} に対応する補正フィルタ倍率が0となる振動数である。また、振幅および位相の補正係数 $R(f)$ および $\phi(f)$ はSMAC型強震計に用いられている空気減衰器の空気がばねとして作用する効果を考慮した^{17) 18)}。
 f_{lu} および f_{ul} は数値化の精度を考慮してそれぞれ1/3 Hz、12 Hzとした¹⁵⁾。

以上のようにして求めた103記録の $\tilde{a}_{max}$ 、 $\tilde{v}_{max}$ 、 $\tilde{d}_{max}$ の頻度を示すと図2のようになる。ここで、対象記録を地震のマグニチュードおよび震央距離別に分類すると表3、図3の通りである。

表 1(1) 解析に用いた強震記録の諸元

地震No	地震名	年月日時分	M	Δ	震源距離	記録名	観測所名
66005	松代付近	1966, 1.23, 20:15	5.1	0.0	11.6	905-B-4	落合橋
					11.6	905-C-2	"
66010	"	1966, 4.5, 17:51	5.4	0.0	7.6	905-B-18	"
					7.6	905-C-7	"
66016	"	1966, 5.6, 19:08	5.0	0.0	11.3	905-C-30	"
					11.3	905-B-49	"
66019	"	1966, 5.28, 14:21	5.3	0.0	13.5	605-GR-1	堀花ダム
66047	"	1966, 10.26, 3:04	5.3	0.0	13.3	905-B-186	落合橋
67004	金華山沖	1967, 1.17, 20:59	6.3	30.0	70.6	302-GR-3	開北橋
67033	北海道中部	1967, 7.5, 8:42	6.3	170.0	66.3	1302-GR-3	千代田橋
67054	千葉県中部	1967, 11.10, 3:19	5.3	80.0	41.6	101-GR-4	新葛飾橋
68012	宮崎県南西部	1968, 2.21, 10:45	6.1	0.0	40.6	205-GR-2	石瀬戸橋
68022	和歌山付近	1968, 3.30, 4:04	5.0	0.0	5.4	112-GR-8	紀ノ川大橋
68026	日向灘	1968, 4.1, 9:42	7.5	30.0	103.3	308-GR-2	板島橋
					136.0	205-GR-6	石瀬戸橋
					341.3	306-GR-1	妙見橋
68027	日向灘	1968, 4.1, 16:13	6.3	0.0	102.8	308-GR-3	板島橋
68036	北本州東方沖	1968, 5.16, 9:46	7.9	0.0	243.1	1302-GR-5	千代田橋
68036	北本州東方沖	1968, 5.16, 9:46	7.9	0.0	316.3	1303-GR-1	新石狩大橋
					259.3	1304-GR-1	大楽毛橋
					155.1	1305-GR-1	幌満橋
68038	青森県東方沖	1968, 5.16, 19:39	7.5	40.0	172.5	1302-GR-7	千代田橋
					219.6	1303-GR-2	新石狩大橋
					74.0	1305-GR-3	幌満橋
68057	埼玉県中部	1968, 7.1, 19:45	6.1	50.0	47.7	101-GR-9	新葛飾橋
					29.9	104-GR-9	新利根川橋
					38.4	106-GR-9	草加高架橋
					48.7	310-GR-15	平井大橋
					82.3	501-GR-29	東京湾(富津岬)
					72.3	901-GR-33	
					41.6	902-GR-25	西新井橋
					48.8	1004-GR-1	境川橋
					34.1	1005-GR-1	姥久保橋
					46.0	1108-GR-5	一ノ橋高架橋
68059	大島東部	1968, 7.4, 9:34	5.2	100.0	46.6	503-GR-9	東京湾(観音崎)
68066	愛媛県西沿岸	1968, 8.6, 1:47	6.6	40.0	19.2	308-GR-4	板島橋
68070	"	1968, 8.6, 13:21	5.3	40.0	18.4	308-GR-8	"
68090	千葉県中部	1968, 10.8, 9:50	5.3	70.0	45.1	106-GR-15	草加高架橋
					13.7	901-GR-37	
					47.0	503-GR-11	東京湾(観音崎)
					41.3	902-GR-26	西新井橋
69013	栃木県中部	1969, 4.9, 21:57	5.6	100.0	40.0	1108-GR-7	一ノ橋高架橋
69032	岐阜県中部	1969, 9.9, 14:15	6.6	0.0	71.7	104-GR-12	新利根川橋
					89.1	204-GR-3	新八幡橋
					85.5	319-GR-4	四徳大橋
70004	北海道南部	1970, 1.21, 2:33	6.7	50.0	132.3	1001-GR-2	浜名大橋
					62.8	1302-GR-10	千代田橋
					35.9	1305-GR-11	幌満橋

表1(2) 解析に用いた強震記録の諸元

地震No	地震名	年月日時分	M	Δ	震源距離	記録名	観測所名
70011	松代付近	1970, 4. 9, 1:44	5.0	0.0	24.3	905-B-286	落合橋
70021	宮崎県沖	1970, 7. 26, 7:41	6.7	10.0	84.9	205-GR-8	石瀬戸橋
					136.6	308-GR-11	板島橋
70031	秋田県南東部	1970, 10. 16, 14:26	6.2	0.0	23.2	301-GR-7	雄平橋
					154.9	304-GR-23	伊達橋
71002	愛知県沿岸沖	1971, 1. 5, 6:09	6.1	40.0	43.6	311-GR-6	豊浜大橋
					67.7	904-GR-4	新天竜川橋
71012	新潟県南西	1971, 2. 26, 4:27	5.5	0.0	26.2	102-GR-16	米山大橋
					42.2	202-GR-15	魚沼橋
					25.5	203-GR-27	横倉沢橋
71038	福島県沖	1971, 9. 8, 16:25	5.5	40.0	59.9	907-GR-60	平大橋
71040	千葉県北部	1971, 10. 11, 19:16	5.2	40.0	9.5	906-GR-12	
					16.0	1401-GR-1	利根川河口堰
73009	根室半島南東沖	1973, 6. 17, 12:55	7.4	40.0	208.4	1302-GR-11	千代田橋
73024	銚子付近	1973, 9. 30, 15:18	5.9	50.0	26.9	906-GR-17	
73025	銚子付近	1973, 10. 1, 23:16	5.8	60.0	33.3	906-GR-18	
73029	和歌山県西部	1973, 11. 25, 13:25	5.9	60.0	46.7	112-GR-25	紀ノ川大橋
73030	和歌山県中央部	1973, 11. 25, 18:19	5.8	60.0	42.0	112-GR-26	〃
					41.3	206-GR-2	小見川大橋
74006	千葉県東部	1974, 3. 3, 13:50	6.1	60.0	41.6	906-GR-19	
					33.3	1401-GR-4	利根川河口堰
					115.0	503-GR-19	東京湾(観音崎)
74012	伊豆半島沖	1974, 5. 9, 8:33	6.9	10.0	81.2	206-GR-3	小見川大橋
					79.0	1401-GR-5	利根川河口堰
74015	栃木・茨城県境	1974, 8. 4, 3:16	5.8	50.0	28.3	101-GR-24	新葛飾橋
					23.6	104-GR-27	新利根川橋
					25.6	106-GR-27	草加高架橋
					64.5	206-GR-4	小見川大橋
					34.0	310-GR-26	平井大橋
					31.4	902-GR-38	西新井橋
					145.4	907-GR-83	平大橋
					73.9	1401-GR-6	利根川河口堰
74016	岩手県北部	1974, 9. 4, 18:20	5.6	40.0	46.2	105-GR-8	真崎大橋
74022	銚子付近	1974, 11. 16, 8:32	6.1	40.0	59.2	206-GR-6	小見川大橋
					55.9	906-GR-22	
75002	千葉県北部	1975, 2. 8, 1:41	5.4	60.0	49.9	1401-GR-8	利根川河口堰
					44.6	206-GR-8	小見川大橋
75003	愛知・岐阜県境	1975, 3. 14, 22:56	5.3	50.0	20.2	901-GR-5	
					52.8	109-GR-1	大平橋
75015	福島沿岸	1975, 8. 15, 3:09	5.5	50.0	33.8	204-GR-28	新八幡橋
					19.7	907-GR-94	平大橋
76004	山梨県東部	1976, 6. 16, 7:36	5.5	20.0	11.3	609-GR-1	三保ダム
					17.7	1004-GR-4	境川橋
					40.5	1005-GR-2	姥久保橋
					16.9	1006-GR-5	鶴川橋
76010	福島県沖	1976, 10. 6, 22:38	5.9	70.0	15.2	1009-GR-2	東名・酒匂川橋
					44.8	907-GR-98	平大橋
78001	伊豆・大島近海	1978, 1. 14, 12:24	7.0	0.0	70.3	503-GR-21	東京湾(観音崎)
78002	宮城県沖	1978, 2. 20, 13:36	6.7	50.0	84.2	302-GR-34	開北橋
78008	島根県中部	1978, 6. 4, 5:04	6.1	0.0	29.8	306-GR-7	妙見橋
					312.2	104-GR-36	新利根川橋
78012	宮城県沖	1978, 6. 12, 17:14	7.4	40.0	188.1	301-GR-13	雄平橋
					81.4	302-GR-35	開北橋
					164.6	907-GR-108	平大橋

表2 (1) 解析に用いた強震記録の特性

No	記録名	最大加速度 (gal)			最大速度 (cm/sec)			最大変位 (cm)		
		$\tilde{a}_{max}$	a_{max}	r_a	$\tilde{v}_{max}$	v_{max}	r_v	$\tilde{d}_{max}$	d_{max}	r_d
1	905-B-4	72.794	68.159	1.068	2.755	2.752	1.001	0.294	0.271	1.085
2	905-C-2	32.317	27.066	1.194	1.997	1.983	1.007	0.416	0.346	1.201
3	905-B-18	298.220	298.220	1.000	15.646	13.761	1.137	1.351	1.244	1.086
4	905-C-7	269.646	269.646	1.000	25.193	24.919	1.011	3.384	3.384	1.000
5	905-C-30	49.404	47.826	1.033	4.059	3.914	1.037	0.447	0.444	1.006
6	905-B-49	118.171	100.657	1.174	5.176	5.166	1.002	0.883	0.873	1.011
7	605-GR-1	51.427	49.072	1.048	3.276	3.056	1.072	0.323	0.302	1.071
8	905-B-186	124.130	122.416	1.014	5.875	5.644	1.041	1.091	1.070	1.020
9	302-GR-3	35.825	33.797	1.060	1.212	0.996	1.217	0.190	0.177	1.071
10	1302-GR-3	59.657	59.657	1.000	2.388	2.136	1.118	0.248	0.234	1.061
11	101-GR-4	30.165	24.645	1.224	1.530	1.463	1.046	0.148	0.145	1.022
12	205-GR-2	35.550	31.769	1.119	1.364	1.298	1.051	0.180	0.173	1.042
13	112-GR-8	127.436	109.200	1.167	6.381	6.375	1.001	0.552	0.468	1.179
14	308-GR-2	236.291	216.582	1.091	22.727	19.082	1.191	2.510	2.286	1.098
15	205-GR-6	36.164	32.817	1.102	3.422	3.137	1.091	0.478	0.457	1.045
16	306-GR-1	54.188	50.081	1.082	10.136	9.420	1.076	2.174	2.159	1.007
17	308-GR-3	52.828	50.747	1.041	3.295	3.246	1.015	0.545	0.541	1.008
18	1302-GR-5	102.852	102.647	1.002	17.111	17.026	1.005	4.032	3.692	1.092
19	1303-GR-1	215.924	188.745	1.144	31.775	25.833	1.230	5.669	4.829	1.174
20	1304-GR-1	49.269	49.269	1.000	6.106	6.106	1.000	2.234	2.223	1.005
21	1305-GR-1	126.774	112.889	1.123	5.478	5.139	1.066	1.145	1.085	1.055
22	1302-GR-7	51.251	47.587	1.077	5.935	5.842	1.016	1.324	1.104	1.199
23	1303-GR-2	189.950	189.950	1.000	19.442	18.748	1.037	2.693	2.505	1.075
24	1305-GR-3	95.054	94.487	1.006	3.944	3.454	1.142	0.663	0.649	1.022
25	101-GR-9	56.121	54.539	1.029	6.735	6.603	1.020	1.126	1.119	1.006
26	104-GR-9	95.313	84.723	1.125	10.204	9.802	1.041	2.063	1.919	1.075
27	106-GR-9	68.099	66.698	1.021	6.012	5.556	1.082	1.014	1.010	1.004
28	310-GR-15	73.308	66.887	1.096	7.393	6.619	1.117	1.322	1.225	1.079
29	501-GR-29	26.211	25.722	1.019	2.552	2.470	1.033	0.482	0.457	1.054
30	901-GR-33	84.692	83.195	1.108	9.894	9.884	1.001	1.405	1.399	1.004
31	902-GR-25	85.454	83.126	1.028	9.522	8.216	1.159	1.871	1.777	1.053
32	1004-GR-1	72.331	68.756	1.052	2.602	2.524	1.031	0.488	0.451	1.082
33	1005-GR-1	62.803	61.511	1.021	4.276	4.276	1.000	0.759	0.730	1.040
34	1108-GR-5	60.204	52.857	1.139	5.391	4.523	1.192	0.922	0.919	1.003
35	1109-GR-3	77.425	77.348	1.001	7.328	7.060	1.038	1.256	1.161	1.082
36	503-GR-9	75.492	62.597	1.206	3.109	3.075	1.011	0.261	0.261	1.000
37	308-GR-4	664.291	616.225	1.078	33.607	33.274	1.010	3.729	3.459	1.078
38	308-GR-8	315.425	289.913	1.088	11.565	10.983	1.053	1.170	1.083	1.080
39	106-GR-15	57.469	48.172	1.193	5.510	4.863	1.133	0.857	0.796	1.077
40	901-GR-37	82.664	81.043	1.020	4.128	4.067	1.015	0.515	0.477	1.080
41	503-GR-11	71.698	61.862	1.159	2.103	1.634	1.287	0.177	0.177	1.000
42	902-GR-26	56.857	56.687	1.003	6.856	6.233	1.100	0.669	0.574	1.166
43	1108-GR-7	87.048	66.449	1.310	5.675	4.379	1.296	0.448	0.379	1.182
44	104-GR-12	87.960	81.294	1.082	5.703	4.394	1.298	0.856	0.742	1.153
45	204-GR-3	72.965	63.228	1.154	2.920	2.868	1.018	0.462	0.422	1.095
46	319-GR-4	55.868	55.097	1.014	1.693	1.457	1.162	0.183	0.166	1.105
47	1001-GR-2	18.922	15.995	1.183	2.773	2.604	1.065	0.503	0.437	1.151
48	1302-GR-10	124.626	121.350	1.027	8.235	6.541	1.259	1.393	1.254	1.111
49	1305-GR-11	224.529	174.459	1.287	10.244	9.204	1.113	1.315	1.119	1.175
50	905-B-266	76.582	76.505	1.001	2.978	2.978	1.000	0.326	0.324	1.006
51	205-GR-8	46.348	36.990	1.253	3.116	3.008	1.036	0.604	0.541	1.116
52	308-GR-11	120.232	119.753	1.004	2.992	2.703	1.107	0.244	0.193	1.264

表2 (2) 解析に用いた強震記録の特性

No.	記 録 名	最 大 加 速 度 (gal)			最 大 速 度 (cm/sec)			最 大 変 位 (cm)		
		$\tilde{a}_{\max}$	$a_{\max}$	r_a	$\tilde{v}_{\max}$	$v_{\max}$	r_v	$\tilde{d}_{\max}$	$d_{\max}$	r_d
53	301-GR-7	264.934	263.092	1.007	13.473	12.955	1.040	1.571	1.378	1.140
54	304-GR-23	46.855	45.891	1.021	1.327	1.301	1.020	0.121	0.121	1.000
55	311-GR-6	217.725	215.569	1.010	8.464	8.084	1.047	1.041	1.026	1.015
56	904-GR-4	45.131	40.549	1.113	2.986	2.804	1.065	0.434	0.393	1.105
57	102-GR-16	185.289	179.544	1.032	7.615	7.444	1.023	0.887	0.884	1.003
58	202-GR-15	118.925	111.353	1.068	5.162	5.152	1.002	0.623	0.616	1.011
59	203-GR-27	47.101	42.703	1.103	4.579	4.454	1.028	0.698	0.613	1.138
60	907-GR-60	59.008	57.625	1.024	3.074	3.035	1.013	0.417	0.417	1.000
61	906-GR-12	221.162	217.252	1.018	13.116	13.116	1.000	1.020	1.001	1.019
62	1401-GR-1	137.622	111.706	1.232	11.971	8.600	1.392	1.225	1.003	1.221
63	1302-GR-11	96.548	90.997	1.061	7.842	7.504	1.045	1.798	1.493	1.204
64	906-GR-17	116.567	107.139	1.088	13.861	13.806	1.004	2.356	2.321	1.015
65	906-GR-18	116.672	100.320	1.163	8.671	7.633	1.136	0.678	0.616	1.101
66	112-GR-25	64.101	64.101	1.000	4.534	4.179	1.085	0.537	0.534	1.005
67	112-GR-26	81.386	79.712	1.021	3.649	3.495	1.044	0.435	0.433	1.005
68	206-GR-2	144.245	136.985	1.053	11.750	11.727	1.002	1.322	1.189	1.112
69	906-GR-19	92.804	85.376	1.087	7.511	7.474	1.005	1.084	1.079	1.005
70	1401-GR-4	100.156	97.333	1.029	14.734	12.735	1.157	2.815	2.241	1.256
71	503-GR-19	61.264	59.480	1.030	3.836	3.152	1.217	0.727	0.591	1.230
72	206-GR-3	42.879	37.712	1.137	2.705	2.670	1.013	0.408	0.345	1.182
73	1401-GR-5	54.183	51.116	1.060	3.163	3.132	1.010	0.440	0.391	1.125
74	101-GR-24	69.332	65.284	1.062	2.820	2.356	1.197	0.315	0.315	1.000
75	104-GR-27	125.705	119.265	1.054	7.321	6.986	1.048	1.043	0.989	1.055
76	106-GR-27	117.678	114.029	1.032	5.275	5.019	1.051	0.597	0.564	1.058
77	206-GR-4	48.352	47.637	1.015	6.147	5.761	1.067	1.320	1.252	1.054
78	310-GR-26	64.105	52.288	1.226	3.100	2.908	1.066	0.392	0.319	1.230
79	902-GR-38	65.858	60.923	1.081	4.481	4.402	1.018	0.370	0.358	1.033
80	907-GR-83	33.783	32.959	1.025	2.977	2.729	1.091	0.342	0.332	1.031
81	1401-GR-6	26.332	24.114	1.092	1.668	1.643	1.015	0.252	0.229	1.102
82	105-GR-8	98.251	89.563	1.097	3.966	3.145	1.261	0.354	0.341	1.038
83	206-GR-6	134.080	112.672	1.190	14.569	10.451	1.394	1.274	1.260	1.011
84	906-GR-22	188.265	172.720	1.090	13.887	12.432	1.117	1.760	1.678	1.049
85	1401-GR-8	203.384	163.887	1.241	18.358	15.908	1.154	2.829	2.127	1.330
86	206-GR-8	133.977	132.782	1.009	8.840	8.492	1.041	0.599	0.593	1.010
87	901-GR-5	123.907	120.532	1.028	5.355	4.673	1.146	0.647	0.620	1.044
88	109-GR-1	78.843	74.240	1.062	4.364	4.113	1.061	1.046	0.910	1.150
89	204-GR-28	278.577	275.819	1.010	6.152	5.859	1.050	1.019	1.011	1.008
90	907-GR-94	107.467	85.737	1.239	5.325	5.262	1.012	0.631	0.608	1.038
91	609-GR-1	163.246	125.574	1.300	6.203	4.970	1.248	0.635	0.534	1.189
92	1004-GR-4	144.136	127.216	1.133	5.122	4.673	1.096	0.405	0.370	1.094
93	1005-GR-2	115.908	112.097	1.034	5.369	5.084	1.056	0.540	0.460	1.174
94	1006-GR-5	326.260	303.780	1.074	10.612	9.754	1.088	0.829	0.754	1.100
95	1009-GR-2	83.736	73.582	1.138	2.490	2.475	1.006	0.236	0.235	1.003
96	907-GR-98	77.228	71.244	1.084	4.316	3.833	1.126	0.516	0.491	1.050
97	503-GR-21	119.515	117.981	1.013	4.687	4.226	1.109	0.447	0.440	1.017
98	302-GR-34	176.226	161.379	1.092	8.384	8.054	1.041	0.575	0.572	1.006
99	306-GR-7	68.182	53.101	1.284	7.432	6.525	1.139	1.317	1.284	1.026
100	104-GR-36	41.848	41.027	1.020	6.166	6.141	1.004	1.252	1.006	1.245
101	301-GR-13	39.943	37.330	1.070	3.835	3.670	1.045	0.747	0.747	1.000
102	302-GR-35	455.742	413.559	1.102	26.179	25.971	1.008	4.040	4.028	1.003
103	907-GR-108	106.750	97.045	1.100	11.160	11.039	1.011	2.523	2.421	1.042

表3 $\tilde{a}_{\max}$, $\tilde{v}_{\max}$, $\tilde{d}_{\max}$ と M , λ の関係 (クロス集計表)

		マグニチュード M								震 央 距 離 Δ (km)								最大加速度 $\tilde{a}_{\max}$ (gal)										最大速度 $\tilde{v}_{\max}$ (kine)										最大変位 $\tilde{d}_{\max}$ (cm)									
		5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	0	50	100	150	200	250	300	350	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	
		5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	50	100	150	200	250	300	350	50	100	150	200	250	300	350	400	450	4	8	12	16	20	24	28	32	36	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5						
マグニチュード M	5.0 ~ 5.5	24						23	1							3	10	6		1	3	1				7	11	4	1			1				9	7	7				1					
	5.5 ~ 6.0		25					20	4	1						4	10	8	2			1			7	15	2	1						10	12	2		1									
	6.0 ~ 6.5			28				16	10	1	1					6	15	3	1	2	1				10	8	5	4	1					9	3	10	3	1	2								
	6.5 ~ 7.0				10			2	5	3						2	3	2	1	1					1	6		3					1	3	4	2					1						
	7.0 ~ 7.5					6			2			2	1		1	2	1	2						1	1	3	1				1			1	1	1	1		1			1					
	7.5 ~ 8.0						10		1	3	1	2	1	2		2	3	2	1	2					2	3	1		2	1		1			1	1	2		2	2			1	1			
震 央 距 離 Δ (km)	0 ~ 50							61								5	27	16	2	4	4	2			1	14	29	11	4	1		1		1		18	20	15	2	2	2	1	1				
	50 ~ 100							23								7	10	3	2						1	11	6	3	2			1			11	4	6	1					1				
	100 ~ 150								8							3	3	1		1					6	1					1			3	3	1			1								
	150 ~ 200									4						2		2							2	1	1							1	1	1			1								
	200 ~ 250										3									1	1	1					1			2							1		1				1				
	250 ~ 300											1				1																					1										
	300 ~ 350												3			1	1			1						1	1					1				1		1					1				
350 ~													0																																		
最大加速度 $\tilde{a}_{\max}$ (gal)	0 ~ 50														19										14	5								12	4	2		1									
	50 ~ 100														42										18	20	4							18	11	9	2	2									
	100 ~ 150															23									1	12	6	3	1					3	9	7	1	2				1					
	150 ~ 200																5								2	1	1	1						3		1		1					1				
	200 ~ 250																	6								3		1	1	1					3			2					1				
	250 ~ 300																				4						1		2		1					2	1										
	300 ~ 350																					2					2								1	1											
	350 ~ 400																							0																							
400 ~ 450																								0																							
450 ~																							2						1		1										1	1					
最大速度 $\tilde{v}_{\max}$ (kine)	0 ~ 4																								33									27	6												
	4 ~ 8																									40								6	18	14	1	1									
	8 ~ 12																											16						3	8	1	2	1									
	12 ~ 16																													6					2	2	1	1									
	16 ~ 20																																					2				1					
	20 ~ 24																																						1								
	24 ~ 28																																														
	28 ~ 32																																														

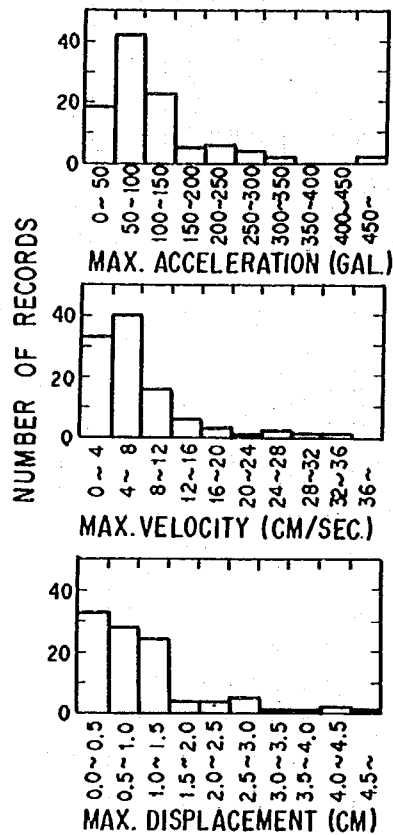


図2 最大加速度, 最大速度, 最大変位の分布

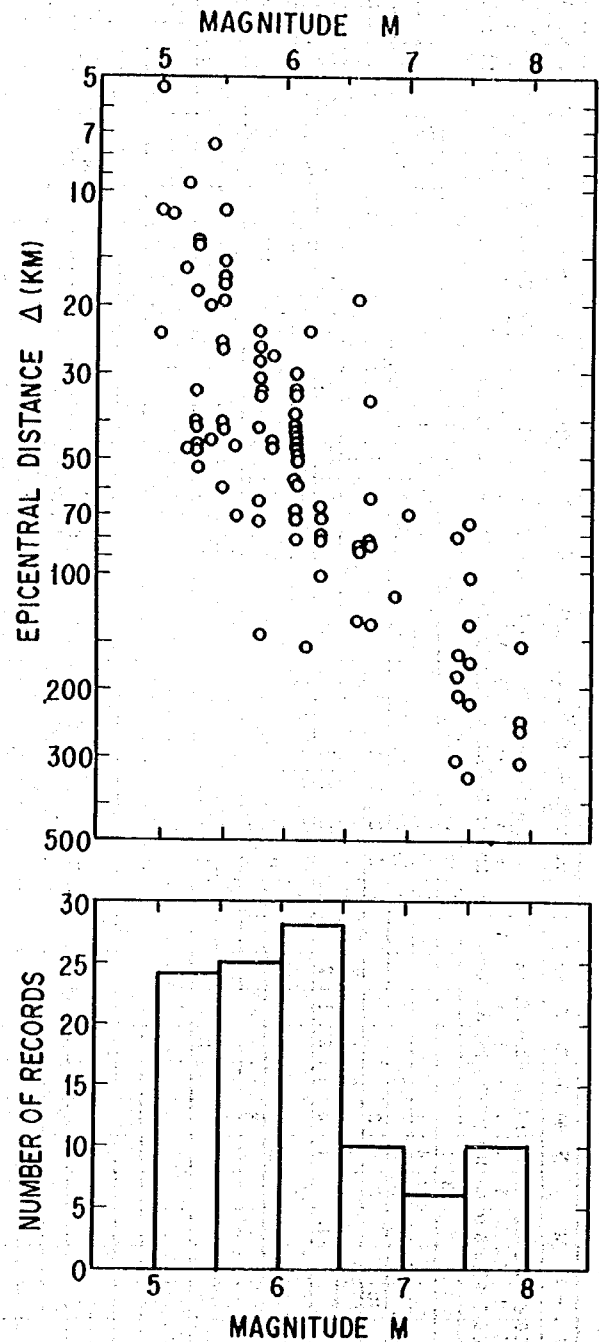


図3 解析対象記録のマグニチュードおよび震央距離別分類

4. 板島橋記録に対する試算例

上述した水平2成分の合成効果を具体的に検討するため、103記録のうちから任意に1記録を選び、 r_a , r_v , r_d , r_{SA} , r_β 等を計算した。対象としたのは、1968年4月1日の日向灘沖地震 ($M=7.5$) により愛媛県宇和島市の板島橋近傍地盤上で観測された記録である²⁰⁾。この場合には本橋までの震央距離は約100kmであった。

図4は式(1)による x 軸に沿う加速度 $a^x(\theta, t)$ を $\theta=0, \pi/6, \pi/3, \pi/2$ に対して示したものである。ここで式(2)に示したように、 $a(0, t)$ および $a(\pi/2, t)$ が実際に強震計で観測されたそれぞれ、橋軸方向および橋軸直角方向成分である。

$a^x(\theta, t)$ および $d^x(\theta, t)$ を $\theta=0 \sim 2\pi$ の範囲で5度間隔に計算し、これらの方向別の最大値を示すと図5のようになる。これより、式(5)および(6)で定義した r_a , r_d を求めるとそれぞれ1.09, 1.10となる。ここでは $v^x(\theta, t)$ は示していないが、同様にして、 r_v は1.19と求められる。

次に、 $a^x(\theta, t)$ に対する加速度応答スペクトルおよび加速度応答スペクトル倍率を求めた。図6は $\tilde{S}_A(T)$, $\tilde{S}_{Amin}$, $\tilde{\beta}(T)$, $\tilde{\beta}_{min}(T)$ と $SA^X(T)$, $SA^Y(T)$, $\beta^X(T)$, $\beta^Y(T)$ の関係を示したものである。板島橋記録の場合には式(9), (10)で定義した $SA(T)$ および $\beta(T)$ はそれぞれ $SA^Y(T)$ および $\beta^Y(T)$ (ともに、橋軸直角方向成分)となり、これをもとに $r_{SA}(T)$ および $r_\beta(T)$ を求めると図7のようになる。これによれば、 $r_{SA}(T)$ と $r_\beta(T)$ は全体として似かよっており、両者は固有周期が0.2秒, 0.7秒, 3秒付近で大きく、最大1.2~1.4程度の値となっている。

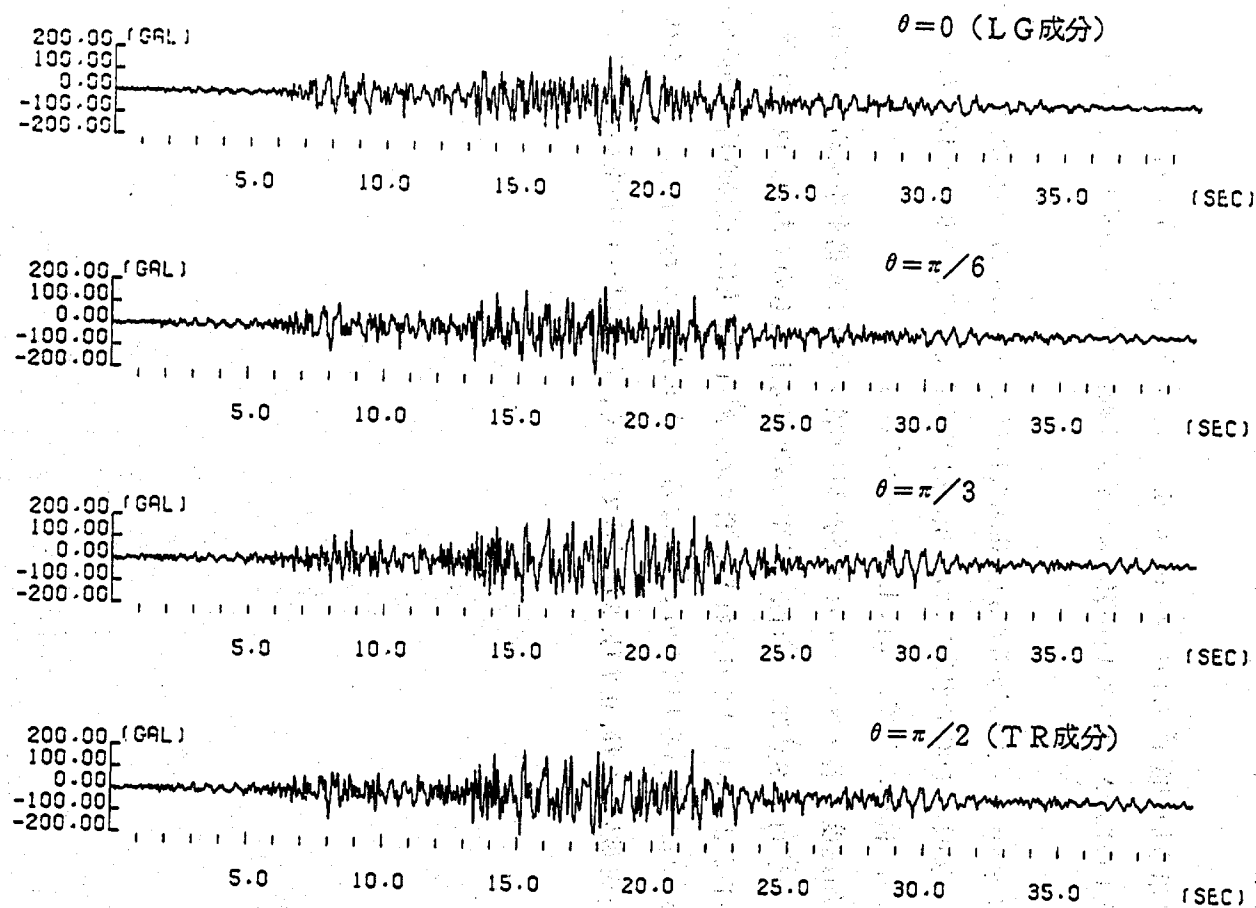


図4 板島橋近傍地盤上の加速度強震記録(1968年4月1日の日向灘沖地震による)
をもとにした $a^z(\theta, t)$ の試算例

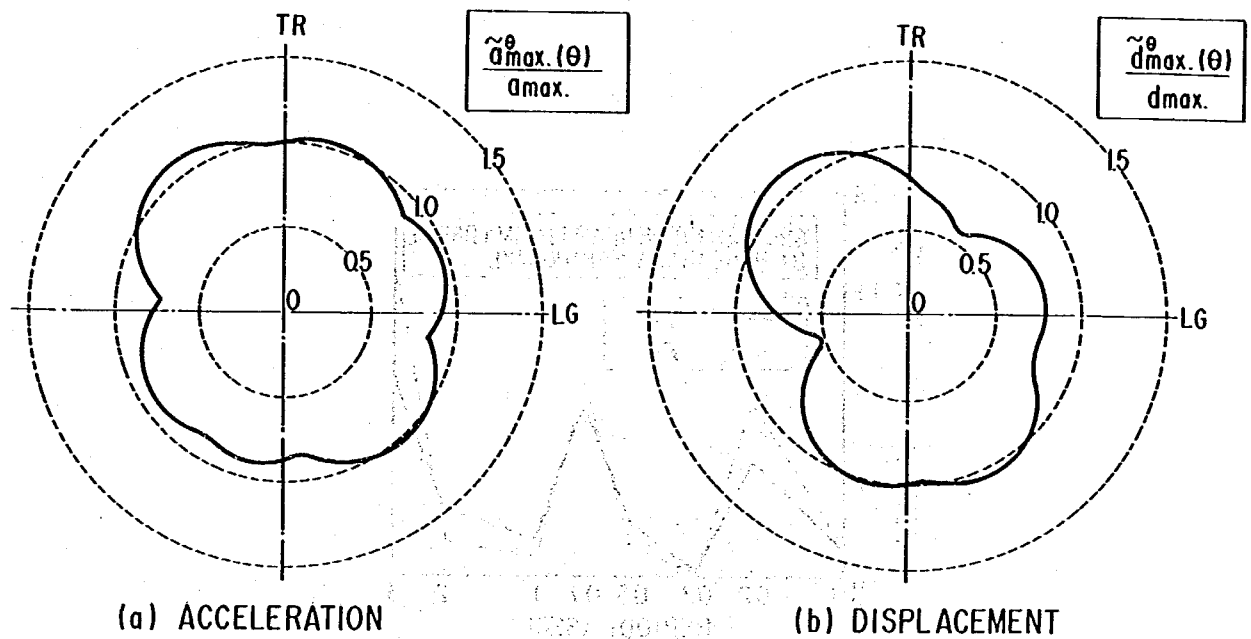


図5 板島橋近傍地盤上の強震記録(1968年4月1日の日向灘沖地震による)
をもとにした方向別の加速度および変位の試算例

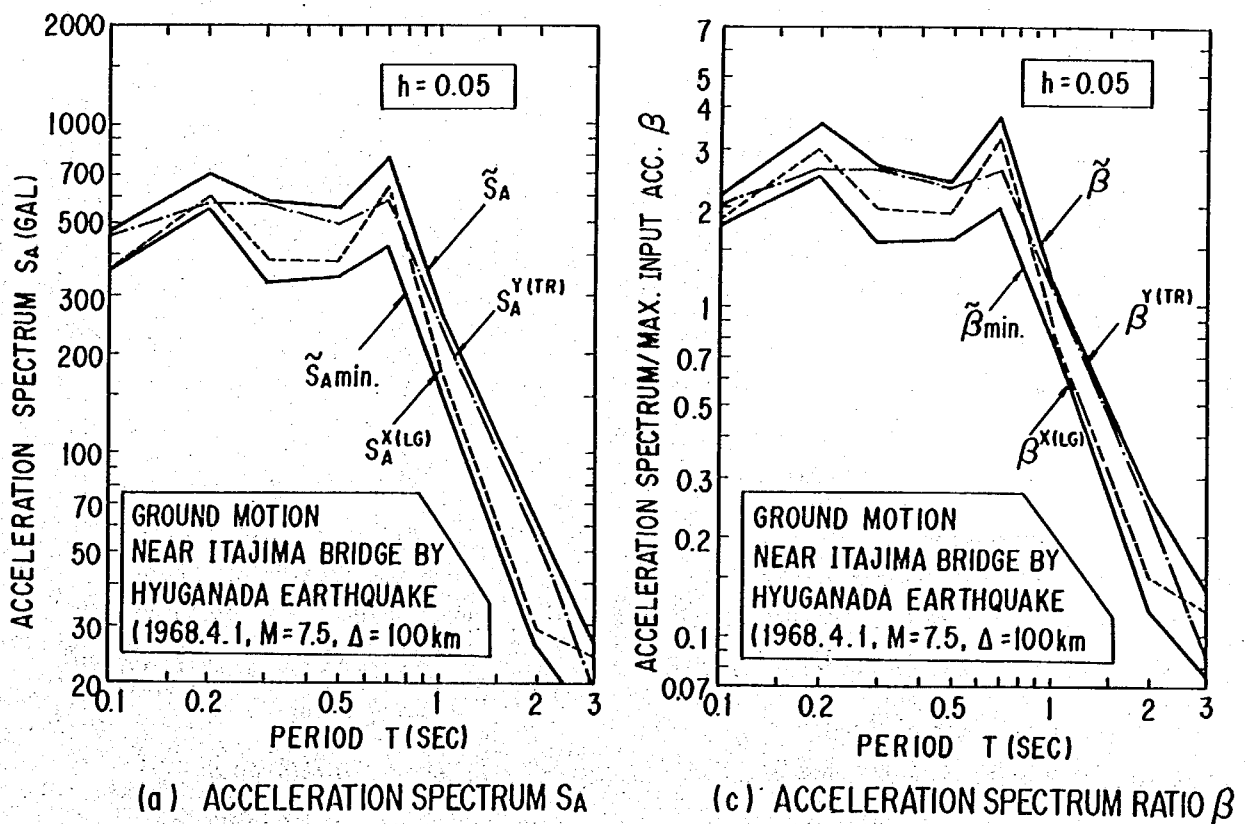


図6 板島橋近傍地盤上の強震記録(1968年4月1日の日向灘沖地震による)
をもとにした S_A スペクトルおよび β スペクトルの試算

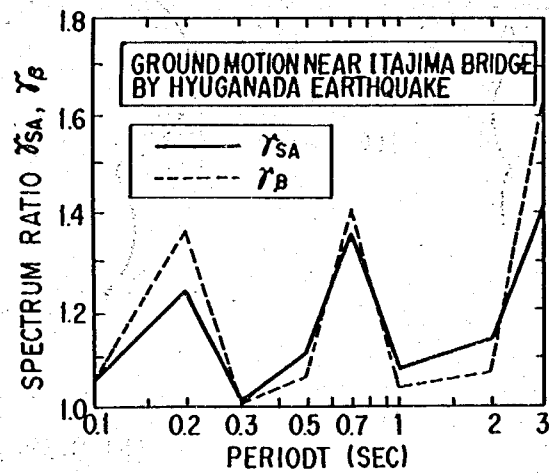
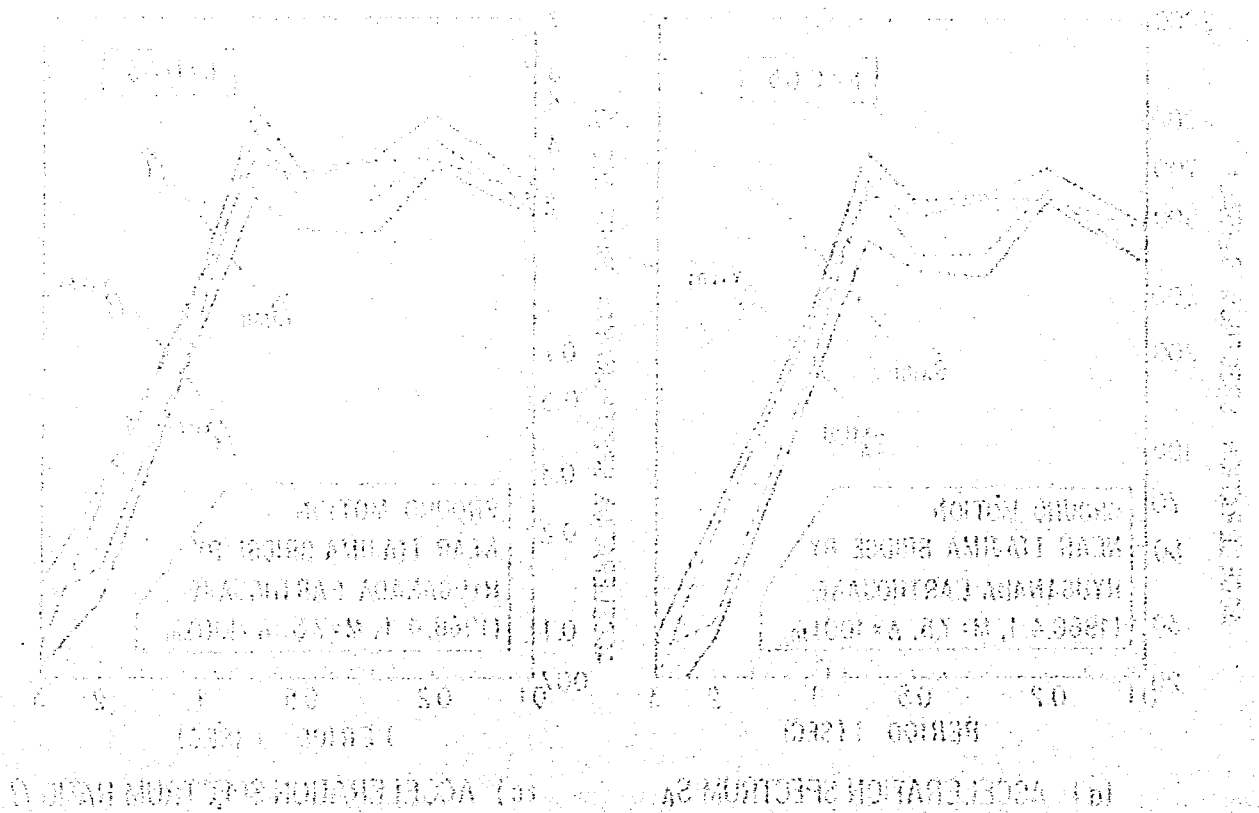


図7 板島橋近傍地盤上の強震記録（1968年4月1日の日向灘沖地震による）をもとにした γ_{SA} および γ_B の試算



5. 最大地震動に対する水平 2 成分合成の影響

前章に示した板島橋記録に対する試算例と同じ手法により 103 記録に対する r_a, r_v, r_d を求め、その頻度分布を示すと図 8 のようになる。X 軸と Y 軸の地震動が同じ時刻に最大となれば、そのベクトル和は $\sqrt{2}$ となるため、 r_a, r_v, r_d の最大値は当然ながらいずれも $\sqrt{2}$ である¹³⁾。図 8 によれば、 r_a, r_v, r_d はともに 1.0 に近いものが一番多く、これらの値が大きくなるに従って頻度は急激に減少する。しかしながらなかには、1.4 に近い値をとるものもあることに注意しなければならない。 r_a, r_v, r_d の平均値および標準偏差は表 4 に示す通りであり、3 者とも平均値は 1.08、標準偏差は 0.08 程度である。

表 4 加速度、速度および変位の増加率 r_a, r_v, r_d の平均と標準偏差

	平均値	標準偏差
r_a	1.086	0.079
r_v	1.083	0.089
r_d	1.077	0.075

図 9 は、 r_a, r_v, r_d と震央距離の関係を地震のマグニチュード別に示したものである。これによれば、 r_a, r_v, r_d とマグニチュードおよび震央距離の間には、今回解析に用いたデータの範囲では特に明瞭な相関関係は認められない。

次に、式(5)~(7)の $a_{\max}, v_{\max}, d_{\max}$ および、 $\tilde{a}_{\max}, \tilde{v}_{\max}, \tilde{d}_{\max}$ の距離減衰を地震のマグニチュード M 別に示すとそれぞれ、図 10, 11 となる。ここで、図中の実線は後述する重回帰分析による理論距離減衰曲線である。これによれば、最大地震動はいずれの場合にも距離の増加とともに減少し、また、 M が大きくなるにつれて大きくなる傾向がある。そこで、図 10 および図 11 の距離減衰を地震の M および震央距離 Δ を変数とした重回帰分析により求めることとし、距離減衰を次式により仮定した⁵⁾⁶⁾。

$$GM = a \times 10^{bM} \times \Delta^c \quad (17)$$

ここで、 GM は $a_{\max}, v_{\max}, d_{\max}, \tilde{a}_{\max}, \tilde{v}_{\max}, \tilde{d}_{\max}$ を表わしている。この結果求められた距離減衰式は表 5 に示すようになる。これにより、 $M = 5, 6, 7, 8$ に対する最大加速度、速度、変位の距離減衰を示すと図 10 および図 11 の実線のようにになる。加速度の距離減衰式を例にとり水平 2 成分合成の影響を検討すると次のようになる。すなわち、表 5 から、 $\tilde{a}_{\max}$ と $a_{\max}$ の比は

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{a}_{\max}}{a_{\max}} &= \frac{27.67 \times 10^{0.267M} \times \Delta^{-0.669}}{24.27 \times 10^{0.268M} \times \Delta^{-0.659}} \\ &= 1.14 \times 10^{-0.001M} \times \Delta^{-0.01} \end{aligned} \quad (18)$$

となり、 $\tilde{a}_{\max}/a_{\max}$ は M にはほとんど影響されず、わずかに Δ に逆比例する。表 2 に示したように実測加速度の増加率 $r_a = \tilde{a}_{\max}/a_{\max}$ (式(5)) は平均 1.08 であり、式(18)の定数項 1.14 よりも小さい。これは、 Δ の項の影響であり、たとえば式(18)で $\Delta = 100\text{km}$ および 300km とした場合の $\tilde{a}_{\max}/a_{\max}$ を求めるとそれぞれ 1.09 および 1.08 となり表 3 の r_a と矛盾しない。

表5 最大地震動の重回帰推定式

	水平2成分のいずれか大きい方		水平面内で合成した最大成分	
	推 定 式	重相関係数	推 定 式	重相関係数
加 速 度	$a_{\max} = 24.3 \times 10^{0.268M} \times d^{-0.659}$	0.52	$\tilde{a}_{\max} = 27.7 \times 10^{0.267M} \times d^{-0.669}$	0.53
速 度	$v_{\max} = 0.49 \times 10^{0.327M} \times d^{-0.576}$	0.48	$\tilde{v}_{\max} = 0.54 \times 10^{0.322M} \times d^{-0.564}$	0.47
変 位	$d_{\max} = 0.022 \times 10^{0.389M} \times d^{-0.512}$	0.52	$\tilde{d}_{\max} = 0.022 \times 10^{0.394M} \times d^{-0.513}$	0.53

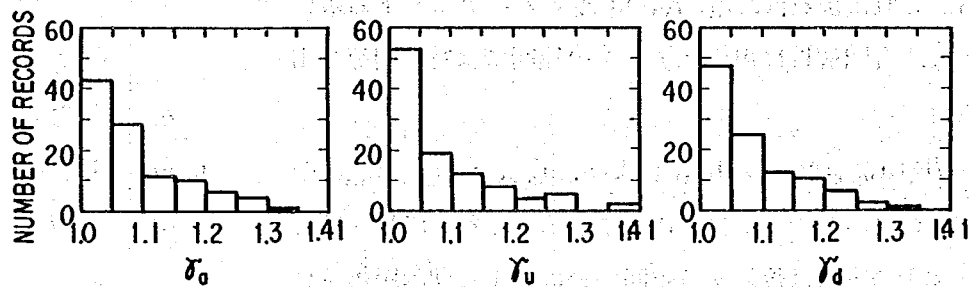


図8 加速度、速度および変位の増加率(r_a , r_v , r_d)の頻度分布

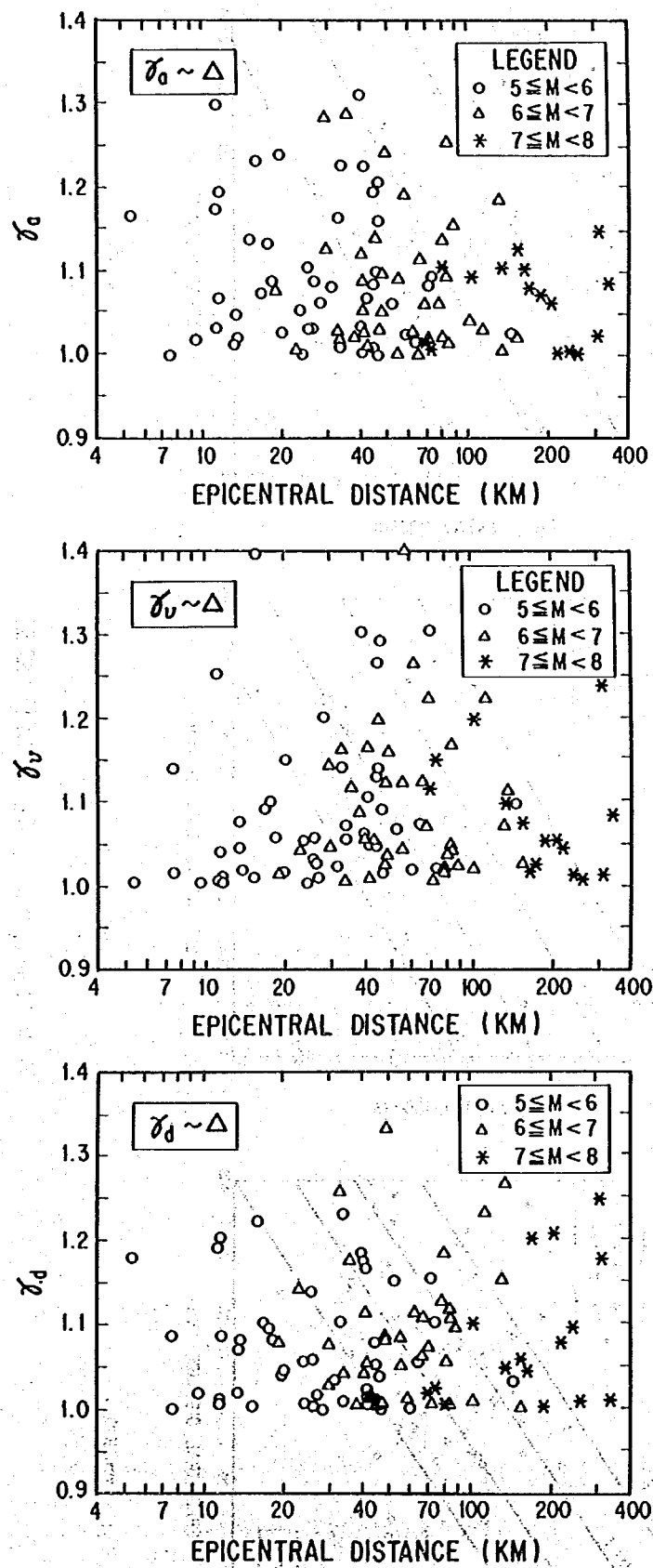
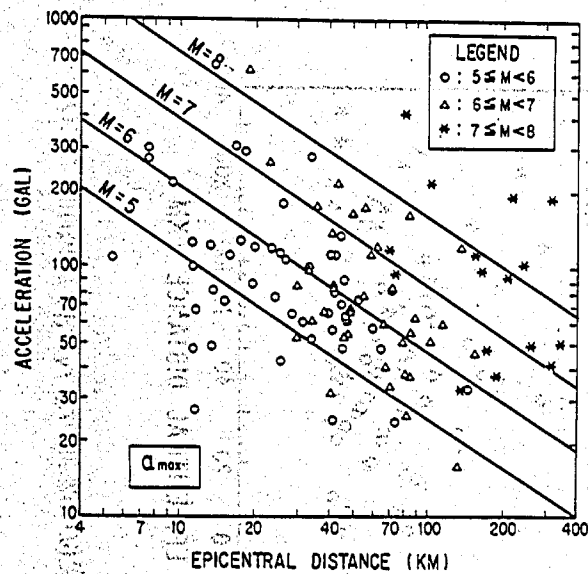
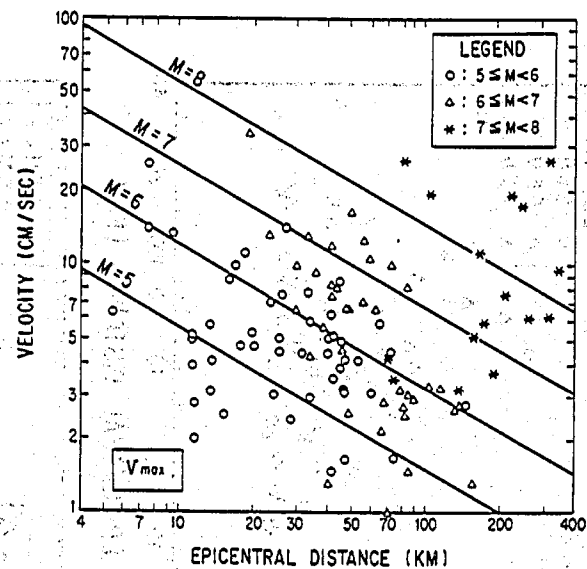


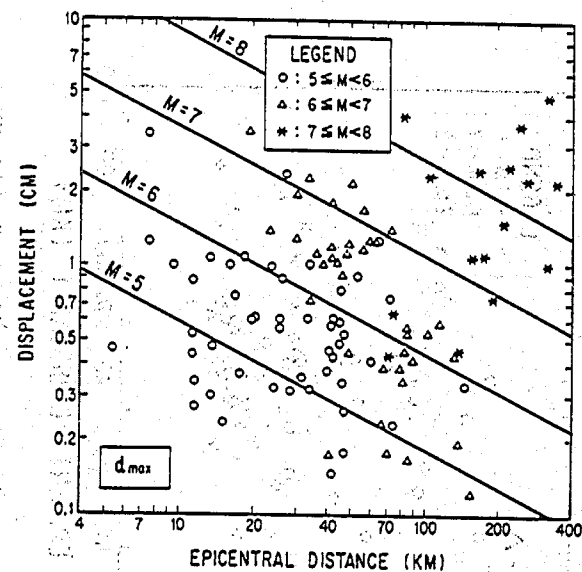
図9 加速度、速度および変位の増加率 γ_a , γ_v , γ_d と震央距離およびマグニチュードの関係



(a) 加速度 a_{max}

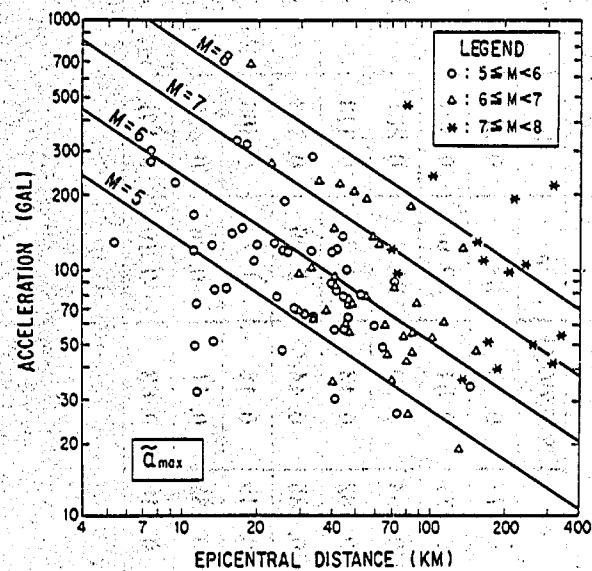


(b) 速度 v_{max}

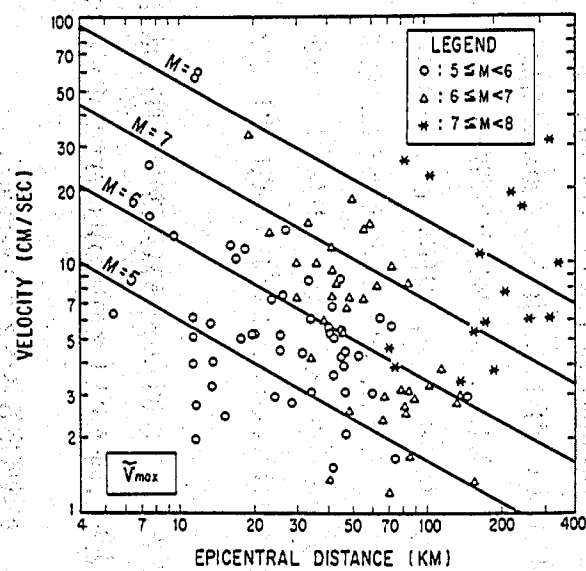


(c) 変位 d_{max}

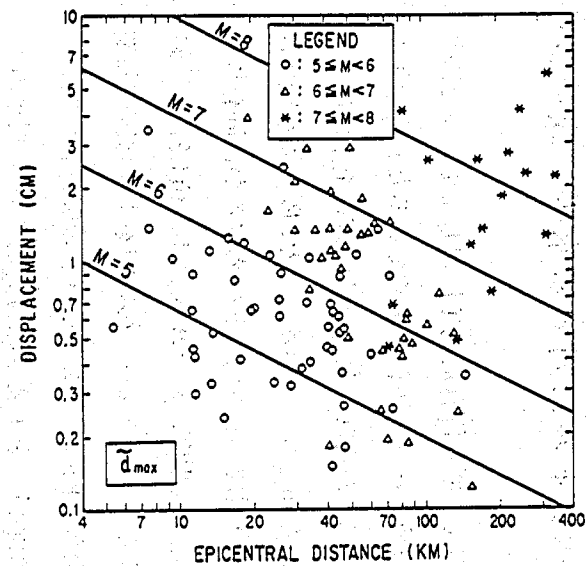
図10 a_{max} , v_{max} , d_{max} の距離減衰



(a) 加速度 $\tilde{a}_{max}$



(b) 速度 $\tilde{v}_{max}$



(c) 変位 $\tilde{d}_{max}$

図11 $\tilde{a}_{max}$, $\tilde{v}_{max}$, $\tilde{d}_{max}$ の距離減衰

6. 加速度応答スペクトルに対する水平2成分合成の影響

103 記録に対する r_{SA} , r_{β} の頻度分布を主要な固有周期 T に対して求めると図12のようになる。 r_a , r_v , r_d の場合には前述したように、水平2成分のベクトル和を求めているため上限値が $\sqrt{2}$ であったが、 r_{SA} , r_{β} の場合にはこの他に地震動の周期成分の違いが反映されるため、理論上上限はない。ただし、図12の結果では、 r_{SA} , r_{β} の最大値はそれぞれ 2.25, 2.75 となっている。また、固有周期別に r_{SA} および r_{β} の平均値と標準偏差を求めると図13のようになる。固有周期により値は多少異なるが、固有周期が 0.1 ~ 3 秒の間を平均すると r_{SA} については平均値 1.17, 標準偏差 0.22 程度、 r_{β} については平均値 1.27, 標準偏差 0.27 程度となる。

また、 r_{SA} , r_{β} に対する震央距離およびマグニチュードの影響を主要な固有周期に対して示すと図14のようになり、図9に示した r_a , r_v , r_d の場合と同様、 M および Δ との間に特に明瞭な関係は認められない。

次に、式(9)、(10)の $\tilde{S}_A(T)$ および $\tilde{\beta}(T)$ の距離減衰を主要な固有周期に対して地震のマグニチュード M 別に示すとそれぞれ図15, 16のようになる。ここで、図15中の実線は後述する重回帰式による理論距離減衰曲線である。これによれば、 $\tilde{S}_A(T)$ はいずれの固有周期の場合にも全体として距離の増加とともに減少し、 M が大きくなるにつれて大きくなる傾向がある。これに対して、 $\tilde{\beta}(T)$ は固有周期が 0.2 秒の場合には、距離および M との間にはっきりした相関を持たないように見える。また、固有周期が 2 秒の場合には、一般に距離が大きくなるにつれて $\tilde{\beta}(T)$ も大きくなる傾向がある。ただし、図3に示したように、解析に用いた地震記録自体が遠距離のものは M の大きな地震による記録である点を考えると、これは M による影響とも考えられる。スペクトル特性そのものは今回の検討の主目的ではないので、このような点に関しては今後さらに詳細な検討を加えたい。

いま、図15に示した $\tilde{S}_A(T)$ とこのもととなった $S_A(T)$ の距離減衰(図17参照)を地震の M および震央距離 Δ を変数とした重回帰分析により求めることとし、回帰式として前述の式(17)を仮定すると、表6のようになる。重

表6 加速度応答スペクトルの推定式

固有周期 T (秒)	$\tilde{S}_A$				S_A			
	a	b	c	重相関係数	a	b	c	重相関係数
0.1	69.3	0.284	-0.777	0.53	58.9	0.291	-0.796	0.53
0.2	46.7	0.318	-0.781	0.54	39.6	0.307	-0.732	0.49
0.3	57.2	0.264	-0.664	0.50	38.6	0.287	-0.687	0.49
0.5	16.3	0.308	-0.582	0.43	15.2	0.313	-0.615	0.44
0.7	5.55	0.334	-0.485	0.44	5.09	0.333	-0.491	0.44
1	2.18	0.358	-0.445	0.45	1.77	0.363	-0.441	0.45
2	0.26	0.450	-0.533	0.61	0.26	0.425	-0.490	0.56
3	0.11	0.461	-0.543	0.63	0.10	0.441	-0.489	0.60

注 a, b, c は式(17)の係数

回帰式による $M = 5, 6, 7, 8$ に対する $\tilde{S}_A(T)$ の値は図15に実線で示した通りである。また、主要な M および λ に対して重回帰式に基づく $\tilde{S}_A(T)$ と $S_A(T)$ の比較の一例を図18に示す。全体としては $\tilde{S}_A(T)$ と $S_A(T)$ の間には図13に示した r_{SA} の平均値程度の違いがあることがわかる。

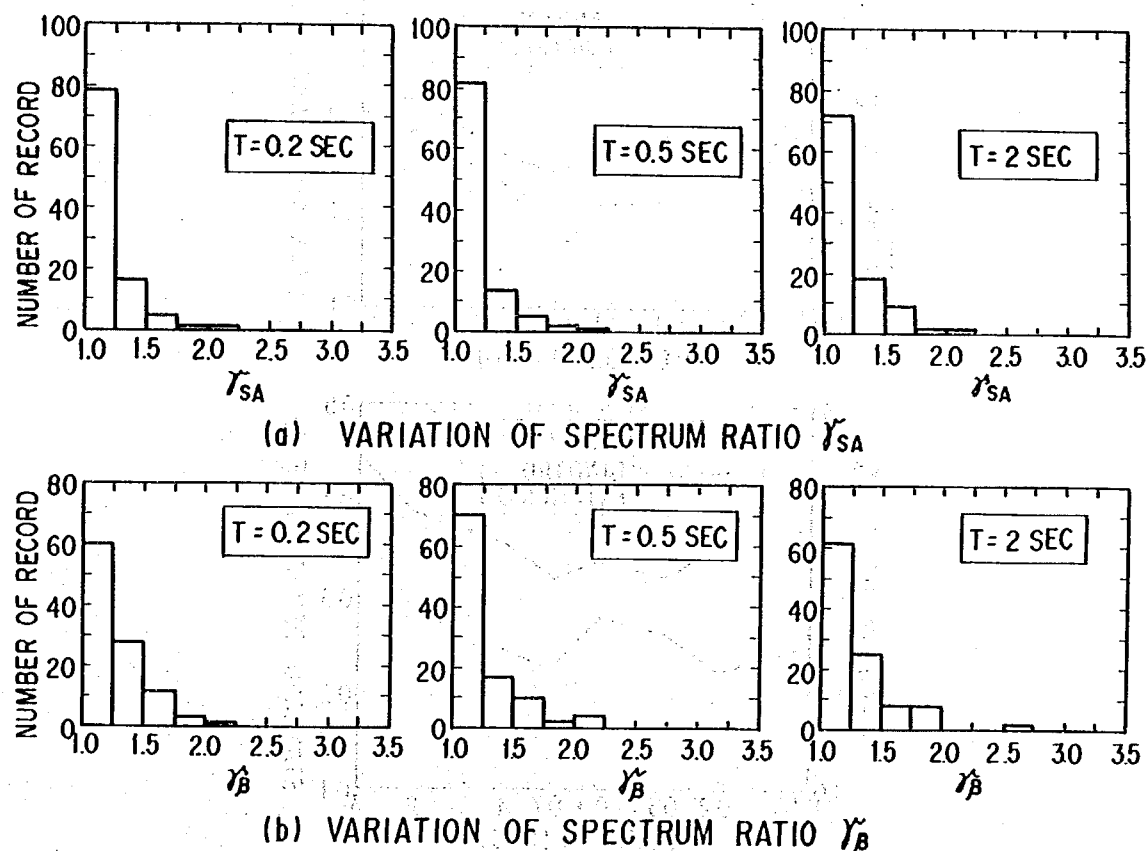


図12 SAスペクトルおよび β スペクトルの増加率 r_{SA} , r_{β} の頻度分布

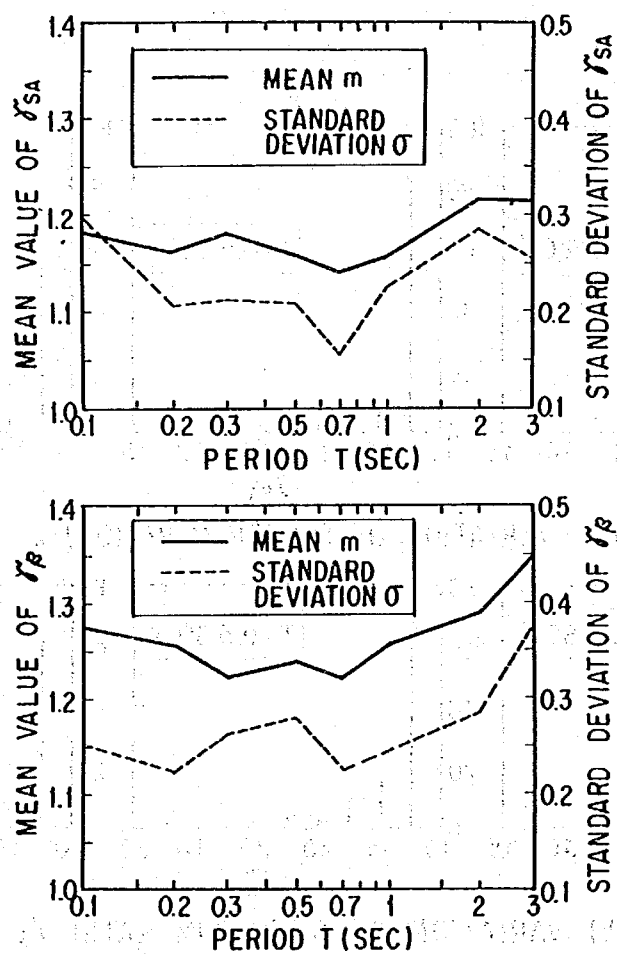
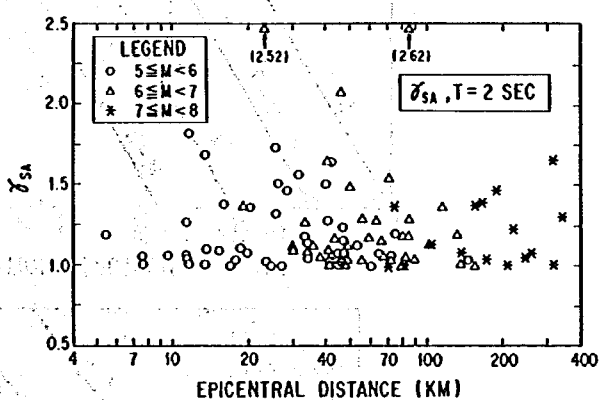
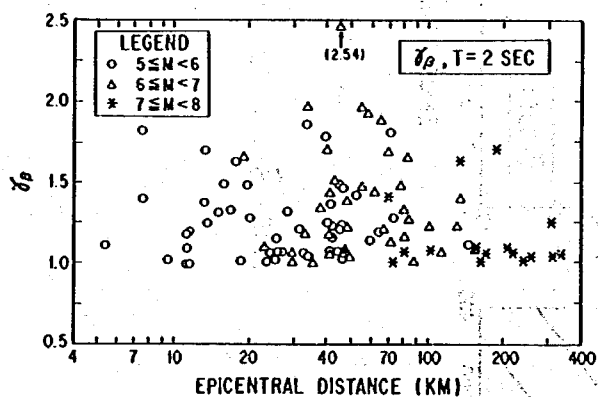
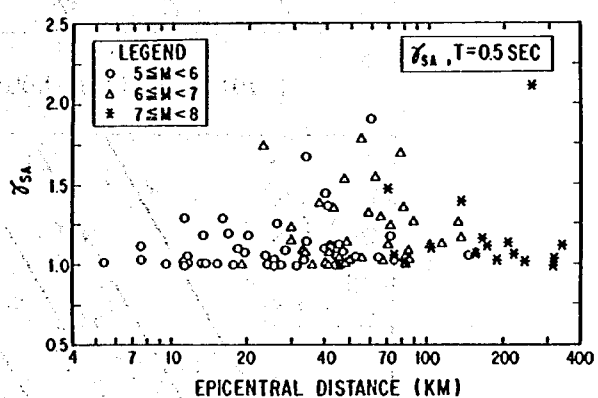
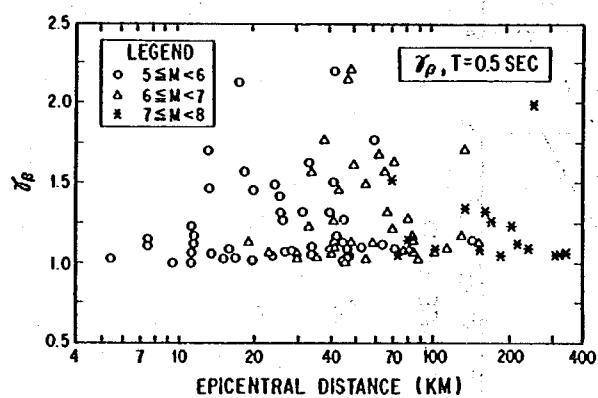
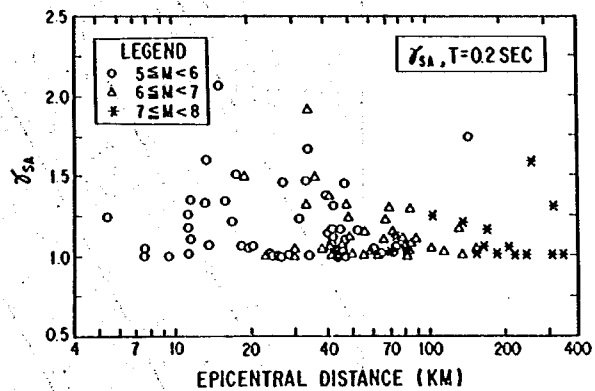
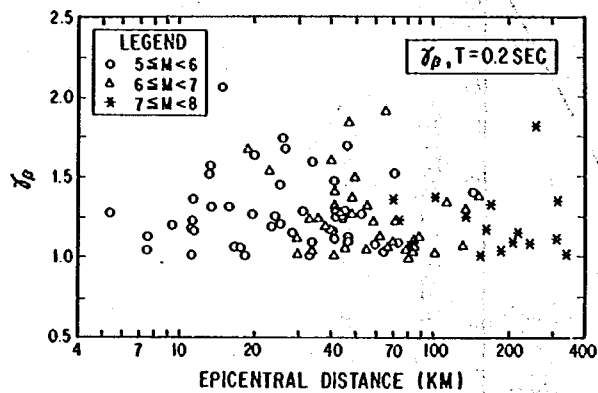


図13 固有周期別のSAスペクトルおよび β スペクトルの増加率 r_{SA} 、 r_{β} の平均値と標準偏差



(a) τ_β

(b) τ_{SA}

図14 γ_{SA} スペクトルおよび β スペクトルの増加率 τ_{SA} , τ_β と震央距離 Δ およびマグニチュード M の関係

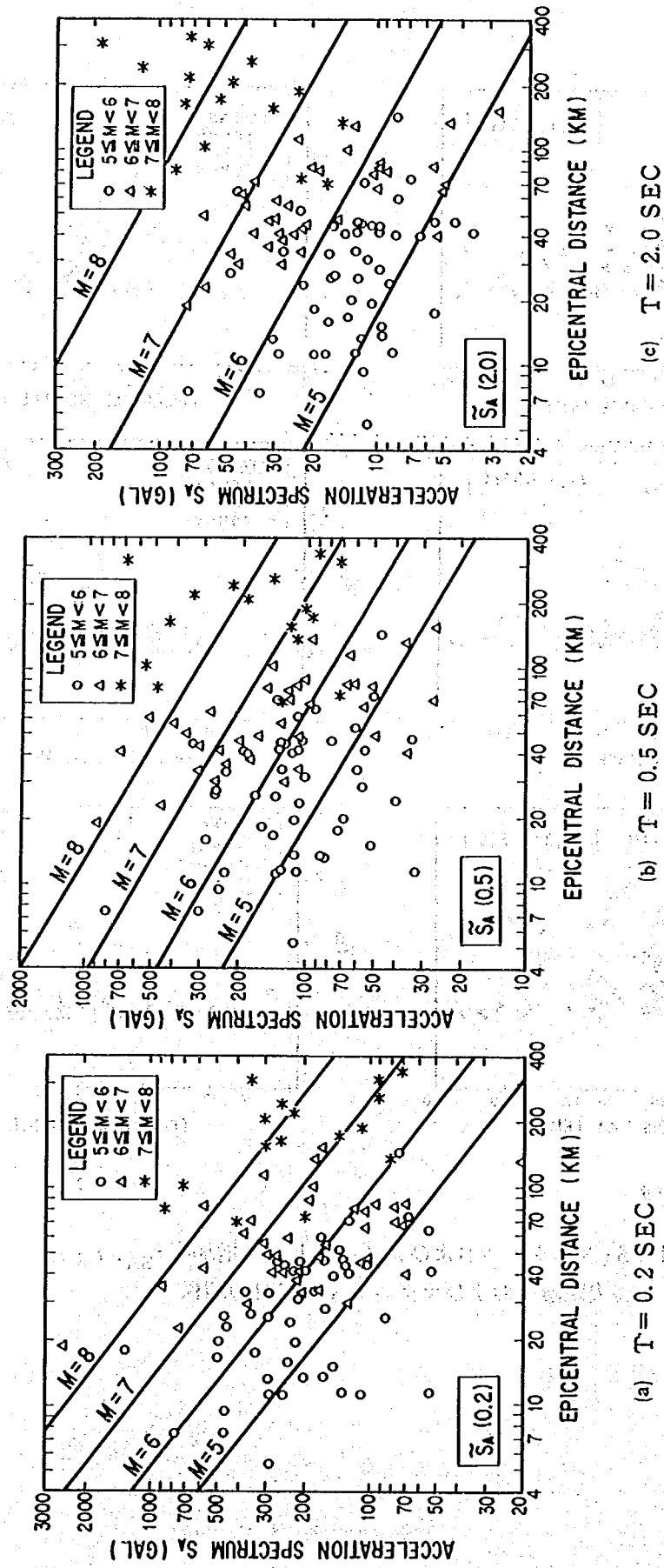
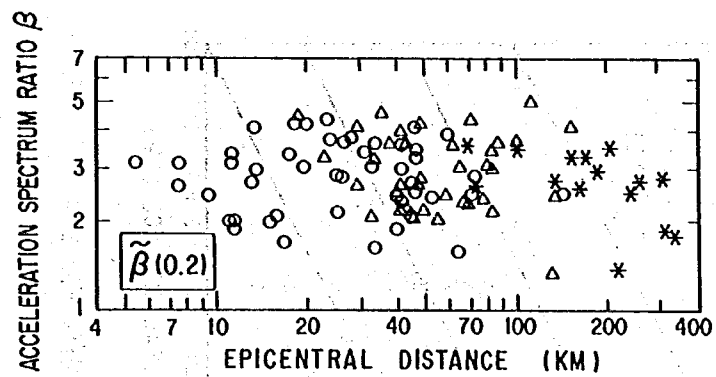
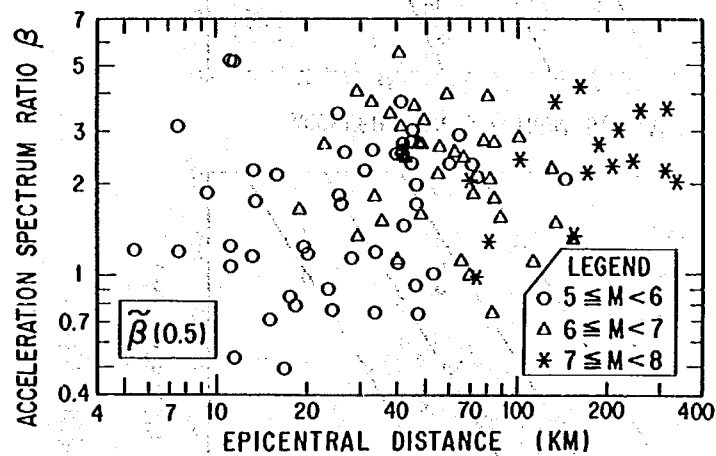


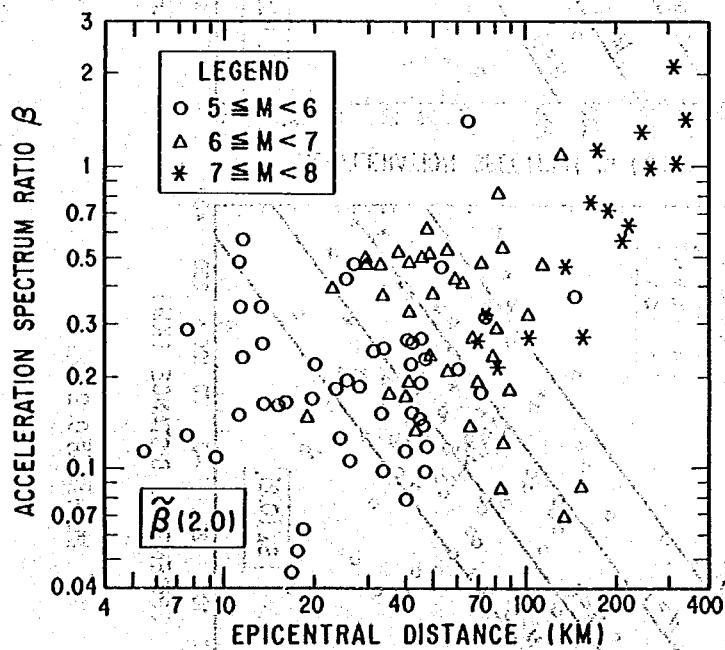
図15 $\tilde{S}_A$ の距離減衰



(a) $T = 0.2$ sec.



(b) $T = 0.5$ sec.



(c) $T = 2.0$ sec.

図16 $\tilde{\beta}$ の距離減衰 (CVI)

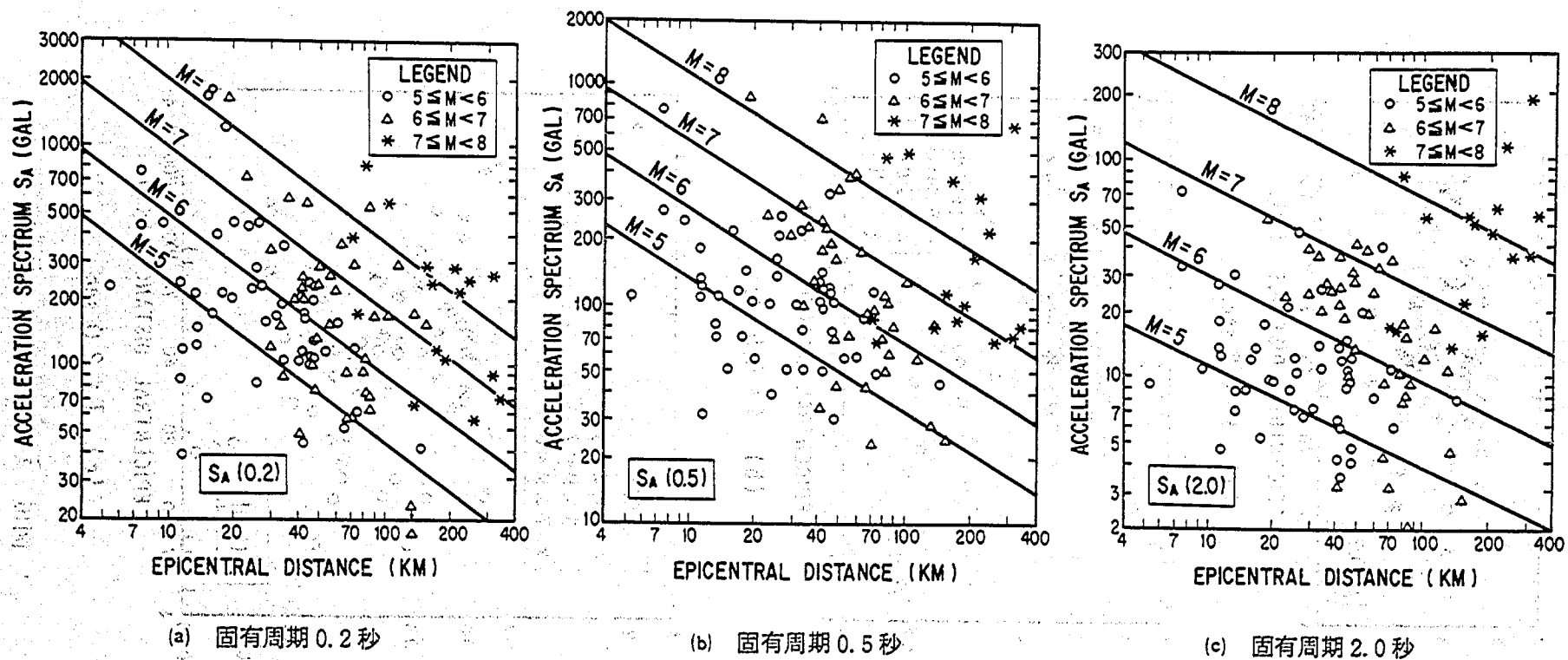
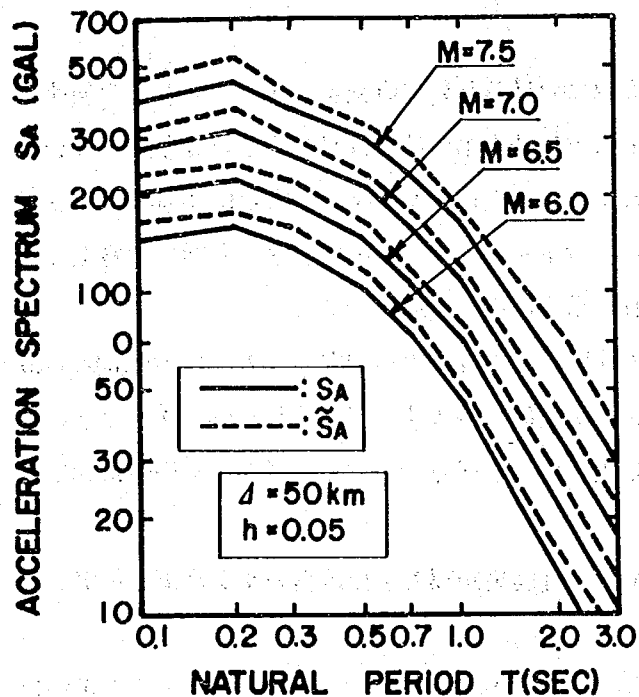
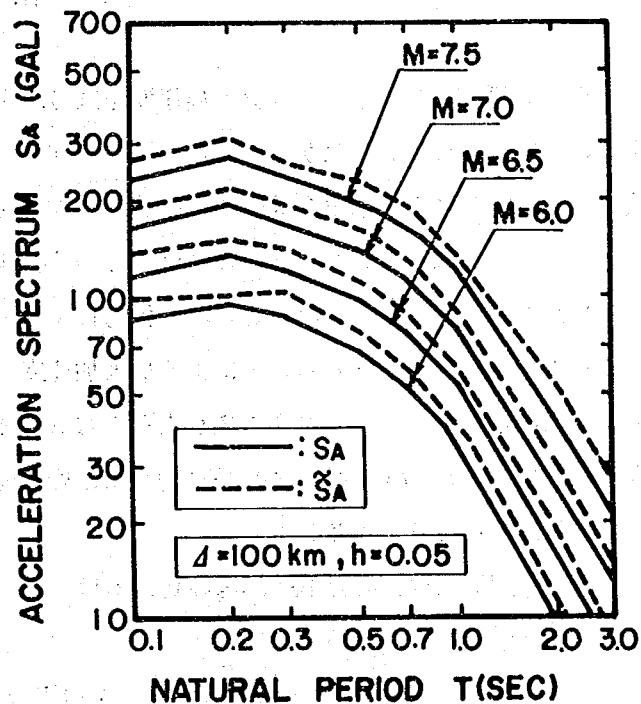


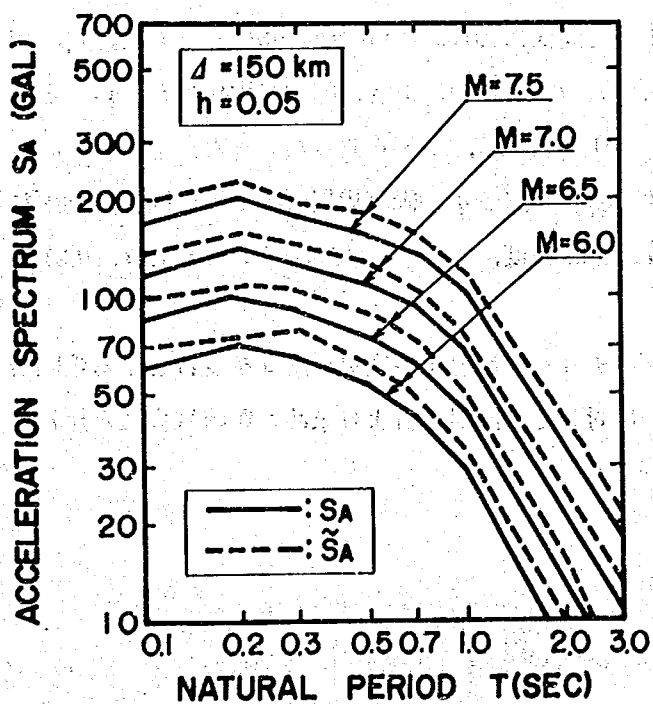
図17 S_A の距離減衰



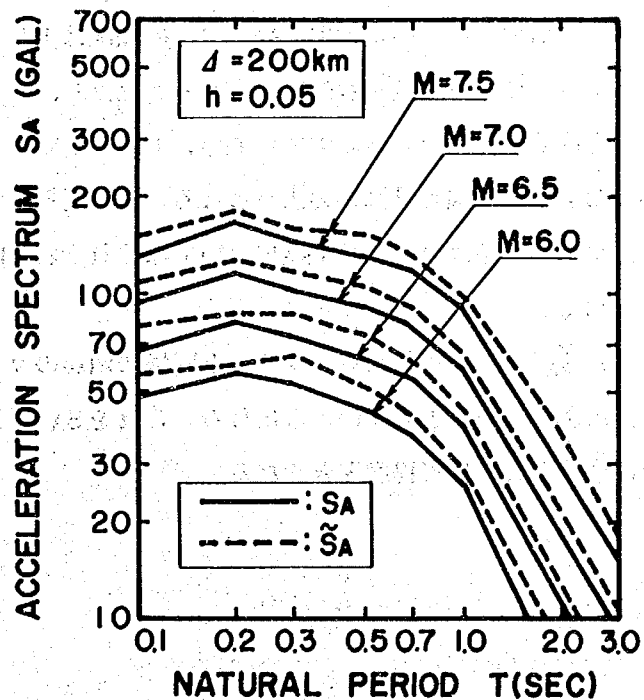
(a) $\Delta = 50 \text{ km}$



(b) $\Delta = 100 \text{ km}$



(c) $\Delta = 150 \text{ km}$



(d) $\Delta = 200 \text{ km}$

図18 重回帰分析結果に基づく $\tilde{S}_A(T)$ と $S_A(T)$ の比較

7. 結 論

強震計で観測された水平2成分の加速度記録は、水平面内における互いに直交する任意の2方向の加速度を表わすに過ぎない。したがって、この他の方向においては当然地震動の特性は異なるという認識のもとに、式(5)~(7), (9), (10)により水平2成分を合成した最大加速度 $\tilde{a}_{\max}$ 、最大速度 $\tilde{v}_{\max}$ 、最大変位 $\tilde{d}_{\max}$ および減衰定数5%の加速度応答スペクトル $\tilde{S}_A(T)$ 、加速度応答スペクトル倍率 $\tilde{\beta}(T)$ の増加率を我国の地盤上で観測された103記録をもとに検討した。本検討により得られた結論は以下の通りである。

1) 水平2成分を合成することによる最大加速度、最大速度、最大変位の増加率 r_a, r_v, r_d の頻度は1.0に近いものが一番多く、これらの値が大きくなるに従い指数関数的に減少する(ただし、 r_a, r_v, r_d の最大は $\sqrt{2}$ である)。 r_a, r_v, r_d の平均および標準偏差は表2に示す通りであり、3者とも平均値は1.08、標準偏差は0.08程度である。

2) 今回解析対象とした103記録の範囲では、 r_a, r_v, r_d は震央距離および地震のマグニチュードとはっきりした相関を持たない。

3) $\tilde{a}_{\max}, \tilde{v}_{\max}, \tilde{d}_{\max}$ の距離減衰式を地震のマグニチュード M および震央距離 d を変数とする重回帰分析により求めると表3のようになる。これらを、それぞれ、 $a_{\max}, v_{\max}, d_{\max}$ に対して重回帰分析より求めた距離減衰式と比較すると、いずれの場合にも全体として8%程度大きくなり、これは上記1)と一致している。

4) 水平2成分を合成することによる減衰定数5%の加速度応答スペクトル $S_A(T)$ および加速度応答スペクトル倍率 $\beta(T)$ の増加率 r_{SA}, r_{β} の頻度は上記1)と同様に1.0に近いものが一番多く、 r_{SA}, r_{β} が大きくなるにつれ指数関数的に減少する。ただし、 r_a, r_v, r_d と違い、 r_{SA}, r_{β} の最大値は $\sqrt{2}$ 以上となり、今回対象とした記録の中では r_{SA}, r_{β} の最大値はそれぞれ2.25, 2.75であった。また、 r_{SA}, r_{β} の平均および標準偏差は図14のようになる。固有周期により多少異なるが、固有周期0.1~3秒の間を平均すれば、平均および標準偏差は r_{SA} についてはそれぞれ1.17, 0.22程度、 r_{β} については、それぞれ1.27, 0.27程度となる。

5) $\tilde{S}_A(T)$ の距離減衰式を3)と同様に地震のマグニチュード M および震央距離 d を変数とする重回帰分析により求めると表4のようになる。これを $S_A(T)$ に対して重回帰分析より求めた距離減衰式と比較すると全体として12%程度大きくなる。

参 考 文 献

- 1) 建設省土木研究所：土木構造物における加速度強震記録，土木研究所彙報No.1～No.7，Vol.32～38。
- 2) Strong-Motion Earthquake Instrument Arrays, Procs. of the International Workshop on Strong-Motion Earthquake Instrument Arrays, May 1978, Honolulu, Hawaii.
- 3) 大久保忠良，岩崎敏男，川島一彦：土木研究所における高密度強震観測計画および記録の解析，日米天然会議耐風耐震部会，UJNR，第13回合同部会，1981。
- 4) 片山恒雄，岩崎敏男，佐伯光昭：地震動加速度応答スペクトルの統計解析，土木学会論文報告集，第275号，1978。
- 5) 岩崎敏男，川島一彦，高木義和：地震応答スペクトルの統計解析，土木技術資料，Vol.21—8，1979。
- 6) 建設省土木研究所：新耐震設計法（案），総合技術開発プロジェクト新耐震設計法の開発研究報告書，土木研究所資料，第1185号，1977。
- 7) 建設省土木研究所：昭和51年度総合技術開発プロジェクト・耐震技術に関する研究開発報告書，土木研究所資料，第1250号，1977。
- 8) Penzien, J. and Watabe, M: Characteristics of 3-Dimensional Earthquake Ground Motions, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 3, 1975。
- 9) Kubo, T. and Penzien, J: Characteristics of 3-Dimensional Ground Motions Along Principal Axes, San Fernando Earthquake, 6th WCEE, New Delhi India, 1977。
- 10) 星谷勝，磯山龍二：多次元非定常確率過程による地震動のシミュレーション，土木学会論文報告集，第269号，1978。
- 11) 北川良和：地震動の方向性と地盤特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，1978。
- 12) 片山恒雄：応答スペクトルによる強震動の方向性の検討，第11回土木学会地震工学研究発表会講演概要，1971。
- 13) 土岐憲三：構造物の耐震解析，土木学会，p37，1981。
- 14) 川島一彦，高木義和，相沢興：ディジタル化によるSMAC型強震計記録の数値化精度，土木学会論文報告集，第324号，1982。
- 15) 川島一彦，高木義和，相沢興：数値化精度を考慮したSMAC—B₂型強震計記録の計器補正法および変位計算法，土木学会論文報告集（投稿中）
- 16) 岩崎敏男，川島一彦，若林進，高木義和：地震応答スペクトルに及ぼすSMAC型強震計特性に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第309号，1981。
- 17) 後藤健一：SMAC型強震計の短周期特性，地震学会講演集，1979。
- 18) 萩原尊礼：振動測定，宝文館，1951。
- 19) 後藤尚男，亀田弘行，杉戸真太，今西直人：ディジタルフィルタによるSMAC—B₂型加速度記録の補正について，土木学会論文報告集，第277号，昭和53年。

20) 川島一彦, 相沢興, 高橋和之: 地震動の最大水平地動に及ぼす方向性の検討, 第9回土木学会関東支部研究発表会概要集, 1982。

最大地震動および地震応答スペクトルの推定法
— (その1) 水平2成分合成の影響 —

ISSN 0386-5878
土研資料第1765号
昭和57年3月(1982年)
荒川直士
川島彦興
相沢和之
高橋

キーワード 強震記録, 最大加速度, 設計地震入メカ

要 旨 本小文は, 強震計で観測された水平2成分の加速度記録を水平面内で合成した場合の, 加速度およびこれから求めた速度, 変位, 加速度応答スペクトルの方向別のバラツキを我国の地盤上で得られた多数の強震記録をもとに検討したものである。



郵便はがき

下を40
さは円
いっ切
て手

3 0 5 - □ □

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地
建設省土木研究所
振動研究室 御中

No. 188

No. 188

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第1765号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印