

# ひずみ地震動の観測と地震マグニチュードとの関係

小 沢 泉 夫

## OBSERVATIONS OF THE VIBRATIONAL STRAINS IN THE EARTHQUAKES, AND THE RELATION OF THE MAXIMUM AMPLITUDES TO THE SEISMIC MAGNITUDE

By *Izuo OZAWA*

### Synopsis

The observations of vibrational strains in the earthquakes by means of these strain seismographs have been operated at Ōtsu Observatory and Kishu Mime.

The relations between these maximum amplitude of these vibrational strains, and these seismic magnitudes and these epicentral distances have been calculated from these observations.

Now, assuming these azimuths of these epicenters and of these nodal lines are distributed uniformly, a compensating factor for the constant term has been obtained as +0.20.

According to these relations, these coefficients respect to these attenuations of these strain amplitudes for these epicentral distances are almost equal to 1.0 except few events of the near shock.

### 1. 序

1966年頃から大津観測所でひずみ地震動の観測を始めた。現在は S38°W-方向, S52°E-方向, 垂直方向のひずみ地震動の観測をしている。今迄, 観測した資料についてまずひずみ地震動の最大振幅と地震のマグニチュード, 震央距離との関係の整理をした。

この観測を始める当時は地球の自由振動に対する関心が高かった。また変位地震動とひずみ地震動との相違について期待する所があった。また, ストレインステップの追究などが考えられた。

変位地震動と地震のマグニチュードとの関係は C. F. Richter, 和達清夫, 坪井忠二, 河角広, V. Kárník, A. Zatópék et J. Vanék その他数多くの人々が地震記象の最大振幅とマグニチュード, 震央距離の関係を求めており, 例えば坪井忠二<sup>1)</sup>はこれらを要領よく説明している。これらによると和達(1936)は地震動の最大振幅の距離による減衰の度合はマグニチュードと震央距離によって少し異なることを示している。また, 河角(1956)は振幅の距離による減衰は  $0.5 \log \Delta + 0.00133\Delta$ , ( $\Delta \leq 750$  km), と  $0.5 \log \Delta + 0.000795\Delta$ , ( $\Delta \geq 750$  km) としているなどの特色がある。C. J. Wiedeman, M. W. Major<sup>2)</sup>と竹本修三, 高田理夫<sup>3)</sup>はストレインステップとマグニチュード, 震央距離との関係などを求めている。

一般に変位の地震計の計測から求められたものからは最大振幅は距離の  $-1.5 \sim -2.0$  乗に比例して減衰するという結果が求められている。これらの値は光学挺子を拡大装置に使った, 周期 0.8 秒のウッドアンダーソンの地震計で決めるマグニチュードに合やすように求められているので観測器の特性に大きく左右されるものでもあろう。もし, 地面の変位振幅が距離の  $-1.7$  乗に比例して減衰すれば, また変位の最大振幅とひずみの最大振幅が同じ位相に現われているとすれば, ひずみの最大振幅は震央距離の  $-(1.7+1.0)$  乗に比例して減衰すると考えられる。しかし, ここで著者の得た結果ははるかに小さい値で, 約  $-1.0$  であ

た。これは Wiedeman et. al. の求めたストレインステップの距離による減衰  $-1.7$  乗とほぼ一致しているといえるかもしれない。

## 2. 観 測

観測に使用したひずみ地震計は H-59 型<sup>4)</sup> あるいは V-59 型伸縮計<sup>4)</sup> (前者は水平成分, 後者は垂直成分) の振動部分に制振器を取り付け, その他, 振動に対して不安定な箇所を除き, 記録はひずみ振動の主要な位相が読み取れるように 1 分 2 mm の速度の記録計を使用している。この装置の定尺は水平成分は 1.0 cm のインヴァール製の丸棒で全長は 4.6~22 m である。垂直成分は外径 3.0 cm, 内径 2.4 cm のインヴァール製のパイプで, 長さは 6 m である。定尺の自由端の相対変位は挺子で角度変化に変換され, Zöllner 吊りの水平振子型傾斜計で, 振子の回転角に変えられ, 光学挺子で拡大して記録される。振子には磁気ダンパーまたは油ダンパーが取り付けられており制振係数 ( $\epsilon/n$ ) は 0.3~0.7 としてある。定尺は 1.5 m より狭い間隔でローラーで受けられており所々油ダンパーが取り付けられたりしている。垂直成分の定尺の大部分は水中に浸っており上部は水の上に浮いている粘性の大きい機械油の中に浸っている。また定尺には約 1 m おきにストッパーを兼ねたダンパーが取り付けられている。

振子の周期は短いものは 5 秒, 長いもので 12 秒程度で動作させてある。定尺の周期はどの場合も 0.5 秒以下である。従って装置のすべての振動部分の周期はひずみ振動の最大振巾の周期より, 大抵の場合充分短い。

例えば村松郁栄<sup>5)</sup> によれば最大地震動の周期  $T_c$  として

$$\log T_c(\text{sec}) = 0.239M - 1.20$$

松本利松<sup>6)</sup> は S 波の最大動の周期  $T_{s1}$  として

$$\log T_{s1}(\text{sec}) = 0.33M - 1.36$$

と求めている。松本の関係を使うと  $M=6.0$  で 4.2 秒,  $M=7$  で 15.2 秒と  $M$  とともに急速に周期は伸びる。実際われわれの観測では 20 秒を越えるものが多かった。ひずみ振動の周期と振子の固有振動周期との比を  $u$  とすればひずみ地震計の倍率は基本倍率に  $u^2/\sqrt{(u^2-1)^2+4h^2u^2}$  で与えられ  $h=0.3\sim0.7$  であるので  $u \geq 1$

Table 1 Seismic amplitude observed with strain seismographs at Ōtsu and with seismograph at Kyoto.

Date of Earthquake	Location of Earthquake	Epicentral Distance	Strain Seismograph			Seismograph Maximum Movement		
			$L_s$	$C_1$	$V_5$	U-D	E-W	N-S
		km	mm	mm	mm	$\mu$ (sec)	$\mu$ (sec)	$\mu$ (sec)
1970: 1: 5	China Yunnan Province	3419	51.4	115.0	32.0	68 (11.0)	54 (13.5)	65 (13.0)
1970: 1: 21	S part of Hokkaido	1046	52.0	91.6	27.0	97 (11.9)	83 (11.0)	65 (13.0)
1970: 5: 27	Bonin Island H=440 km	971	88.0	79.0		156 (6.0)	109 (6.0)	111 (2.6)
1971: 7: 14	New Ireland	4823	56.8			Osaka 33 (3.8)	79 (4.2)	120 (4.2)
1971: 9: 6	off SW Coast of Sakhalin	1378	33.8			15 (5.8)	19 (12.7)	16 (10.0)
1972: 1: 4	Taiwan Region	1909	22.6		8.6	19 (15.0)	17 (14.8)	25 (4.0)

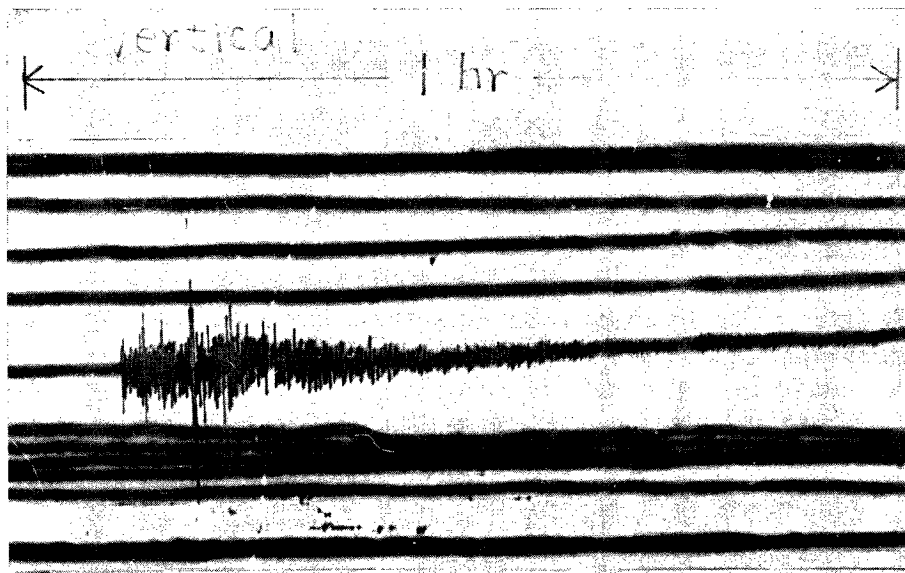


Photo. 1-(a) Photographic record of the vertical component of the strain seismograph at Ōtsu in the earthquake of Celebes Sea (June 12<sup>th</sup> 01<sup>hr.</sup> 45<sup>m</sup>, 1972).

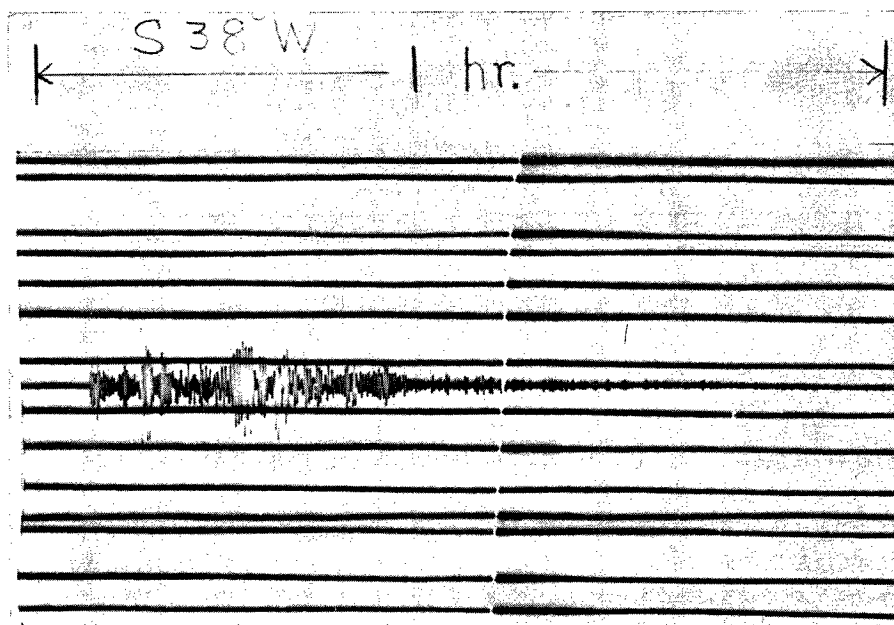


Photo. 1-(b) Photographic record of the S38°W-component of the strain seismograph at Ōtsu in the earthquake of Philippine Island (January 8<sup>th</sup> 14<sup>hr.</sup> 29<sup>m</sup>, 1972).

であれば振動倍率は基本倍率の最大 1.7 倍, 最小 0.7 倍で, ここで取扱う統計の結果にはほとんど影響がない。

振子部分に及ぼす変位振動の影響は振子の変位振動に対する基本倍率は, 振子の相等振子長は 5 cm, 光学挺子の長さは平均 200 cm であるので, 80 倍にすぎない。一方ひずみに対する感度は  $10^{-8}/\text{mm} \sim 10^{-9}/\text{mm}$  の桁であるので変位の影響は無視して差支えない。参考までに第 1 表に観測されたひずみ地震計の記象の最大振巾と地震月報に発表されている京都気象台での最大地震動の振巾の数例を比較して示す。(Table 1)。

Table 1 の第 4~6 列はひずみ地震計  $L_3, C_1, V_5$  で観測した最大振巾, 記録紙上の振巾, 第 7~9 列は気象台の地震計で観測されたものを地動になおしたもので ( ) 内は最大振巾の地動の周期 (秒), Osaka とあるのは大阪気象台のもの他は京都気象台のもの。

例えば Table 2 の Yunnan Province の地震は京都では最大動は水平成分は東西  $54 \mu$ , 南北  $65 \mu$  で最大  $85 \mu$  であるのでひずみ地震計には変位成分の影響は高々  $85 \times 80 \mu$  程度にししか現われず, ひずみ振動の  $51.4 \text{ mm}$ , や  $115 \text{ mm}$  に対しては無視して差支えない。

Table 2 は観測地の緯度, 経度, 標高, ひずみ地震計の規格を示す。 $L_3$  と  $V_5$  は記録速度は  $2 \text{ mm/分}$  であるので主要な位相は充分判別できた。 $C_1$  は記録速度は  $16 \text{ mm/時}$  で中距離以上の地震では  $P, S, L$  の区別はできた。Kishu-B は  $40 \text{ mm/日}$  であるので最大振巾だけが判別できた。

Table 2 Constants of the observatories and instruments.

Ôtsu: Location,  $34^{\circ}59'N.$ ,  $135^{\circ}51'E.$ , Height, 60m.

Direction	Length	Type	Sensitivity	Damping Constant	Speed of Record	Symbol
S38°W —	22 <sup>m</sup>	H-59-B	$0.46 \sim 2.85 \times 10^{-9}$	Magnetic 0.4~0.5	2 mm/min.	$L_3$
S52°E —	10	H-59-B	2.72~3.12	Oil 0.3~0.6	16 mm/hr.	$C_1$
Vertical	6	H-59-D	5.3~10.1	Oil 0.4~0.6	2 mm/min.	$V_5$

Kishu: Location,  $33^{\circ}52'N.$ ,  $135^{\circ}53'E.$ , Height, 60 m

Direction	Length	Type	Sersitivity	Damping Constant	Speed of Record	Symbol
N —	4.9 <sup>m</sup>	H-59-C	7.7~9.4	Oil 0.3~0.4	1.67 mm/hr.	B

### 3. 理論と解析

任意の地点の地震波の振巾は地震動が象限型の分布をするときは, ある一つの節線から測った震央に対する方位角  $\varphi$  との関数である (Fig. 1) と考えられ,  $P$  波は大體  $\sin 2\varphi$  に,  $S$  波は  $\cos 2\varphi$  に, 表面波は  $\sin 2\varphi$  によって表わされる<sup>7)</sup>。また松沢武雄<sup>8)</sup> は Fig. 2 のような球座標  $r, \theta, \varphi$  の半無限弾性体境界面  $XY$  平面上で互に直交する Double couple あるいは Double dipole の震源を考えその一つの couple の方向を  $X$  軸としたとき観測点  $(r, \theta, \varphi)$  における地震波の変位成分として

$$\begin{aligned}
 p \vartheta_r &= -i A \frac{h}{\lambda + 2\mu} \frac{e^{i(p t - h r)}}{r} \sin^2 \theta \sin 2\varphi, & h^2 &= \frac{\rho P^2}{\lambda + 2\mu}, \\
 s \vartheta_\theta &= -i A \frac{k}{\mu} \frac{e^{i(p t - k r)}}{r} \sin \theta \cos \theta \sin 2\varphi, & k^2 &= \frac{\rho P^2}{\mu}.
 \end{aligned}$$

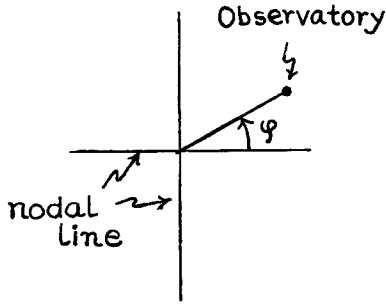


Fig. 1

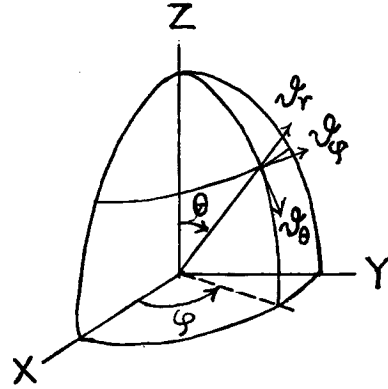


Fig. 2

$${}_s\vartheta_\varphi = -iA \frac{k}{\mu} \frac{e^{i(p t - k r)}}{r} \sin \theta \cos 2\varphi,$$

ここに  $\rho$  は密度,  $p$  は地震波の振動数,  $\lambda, \mu$  は Lamé の弾性常数,  $t$  は時間,  $A$  は常数である。また,  ${}_p\vartheta_r$  は  $p$  波の変位の  $r$  成分,  ${}_s\vartheta_\theta, {}_s\vartheta_\varphi$  はそれぞれ  $S$  波の  $\theta, \varphi$  成分である。その他の成分,  ${}_p\vartheta_\theta, {}_p\vartheta_\varphi, {}_s\vartheta_r$  はすべて 0 である。これから求められるひずみの  $S$  波成分は

$$\begin{aligned} {}_s e_{\theta\theta} &= -iA \frac{k}{\mu} \frac{e^{i(p t - k r)}}{r^2} \sin 2\theta \sin 2\varphi, \\ {}_s \vartheta_{\theta\theta} &= iA \frac{k}{\mu} \frac{e^{i(p t - k r)}}{r^2} (1 + \sin^2 \theta) \sin 2\varphi, \\ {}_s \vartheta_{\theta\varphi} &= -2iA \frac{k}{\mu} \frac{e^{i(p t - k r)}}{r^2} \cos \theta \cos 2\varphi, \end{aligned}$$

一方に方向余弦  $l, m$  の観測方向の直線ひずみは

$$\epsilon(l, m) = iA \frac{k}{\mu} \frac{e^{i(p t - k r)}}{r^2} [-l^2 \sin 2\theta + m^2 (1 + \sin^2 \theta)] \sin 2\varphi - 2lm \cos \theta \cos 2\varphi$$

となり, 特に浅発性地表の場合,  $\theta = \frac{\pi}{2}$  のときは

$$\epsilon(l, m) = iA \frac{k}{\mu} \frac{e^{i(p t - k r)}}{r^2} [2m^2 \sin 2\varphi]$$

である。この場合  $m = \cos \alpha$  の  $\alpha$  のすべての値の平均値は

$$\frac{1}{\pi} \left\{ iA \frac{k}{\mu} \frac{e^{i(p t - k r)}}{r^2} 2 \sin 2\varphi \right\} \int_0^\pi \cos^2 \alpha d\alpha = iA \frac{k}{\mu} \frac{e^{i(p t - k r)}}{r^2} \sin 2\varphi$$

である。また, これの  $\varphi$  のすべての値の平均値は

$$\frac{2}{\pi} \left\{ iA \frac{k}{\mu} \frac{e^{i(p t - k r)}}{r^2} \right\} \int_0^{\pi/2} \sin 2\varphi \cdot d\varphi = \left\{ iA \frac{k}{\mu} \frac{e^{i(p t - k r)}}{r^2} \right\} \frac{2}{\pi}$$

と求められるので, ある方向でひずみの観測をしていたとき, すべての方向あるいは 2 つの象限に一樣に数多くの震央が分散しており, またこれらの地震の節線の方が一樣に様々であったとき, これらの地震のとき観測される  $S$  波の最大振巾の統計的平均値に対する補正係数は  $2/\pi$  である。H. Honda<sup>9)</sup> は別の振巾分布の表現をしているけれども補正係数は同じように求められる。

このことから一つ一つの成分ごとに観測結果をまとめても充分沢山の資料があれば第一段階の値としては大きな不合理はないと判断した。そこでひずみ地震計の一つ一つの成分ごとにそれぞれの最大振巾  $e_{\max}$  を読み, 地震月報に報告されているマグニチュード  $M$  と近似値として京都気象台迄の震央距離  $\Delta$  km, 特に近距離地震では大津迄の震央距離を用いて

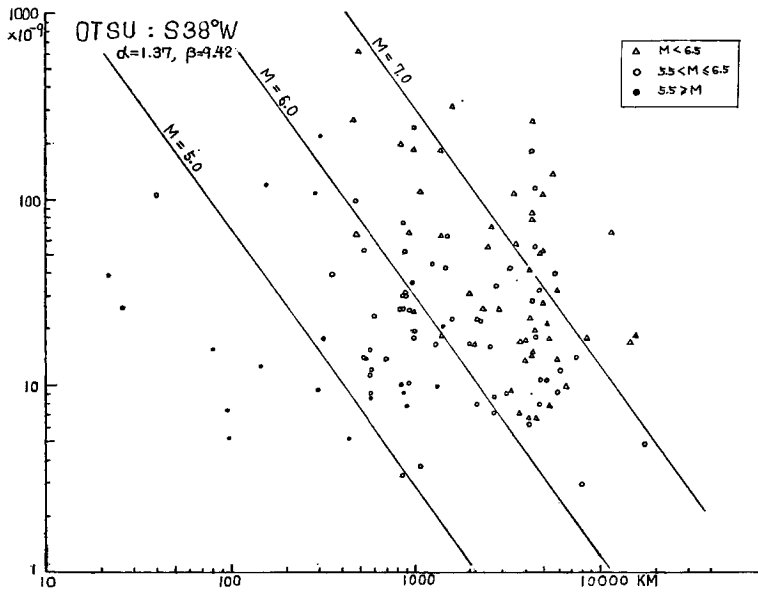


Fig. 3-(a) Relation between the maximum amplitude of the vibrational strain of the S38°W-component at Ōtsu, and the epicentral distance and seismic magnitude.

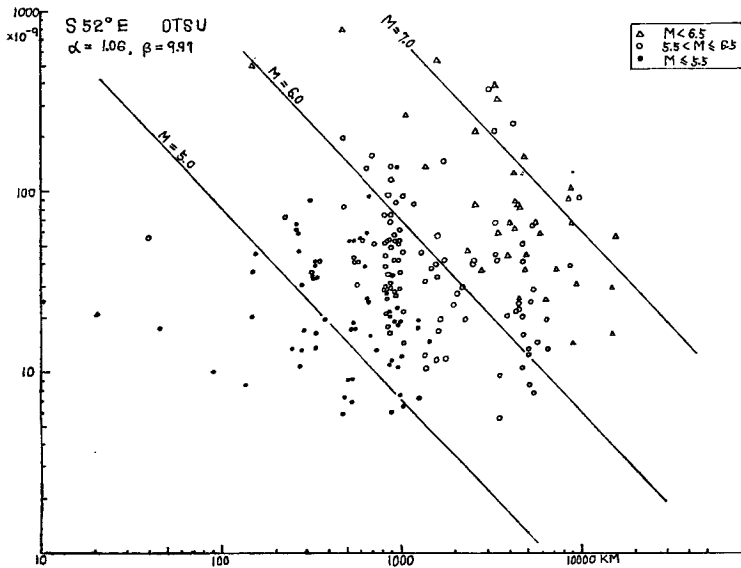


Fig. 3-(b) Relation between the maximum amplitude of the vibrational strain of the S52°E-component at Ōtsu, and the epicentral distance and the seismic magnitude.

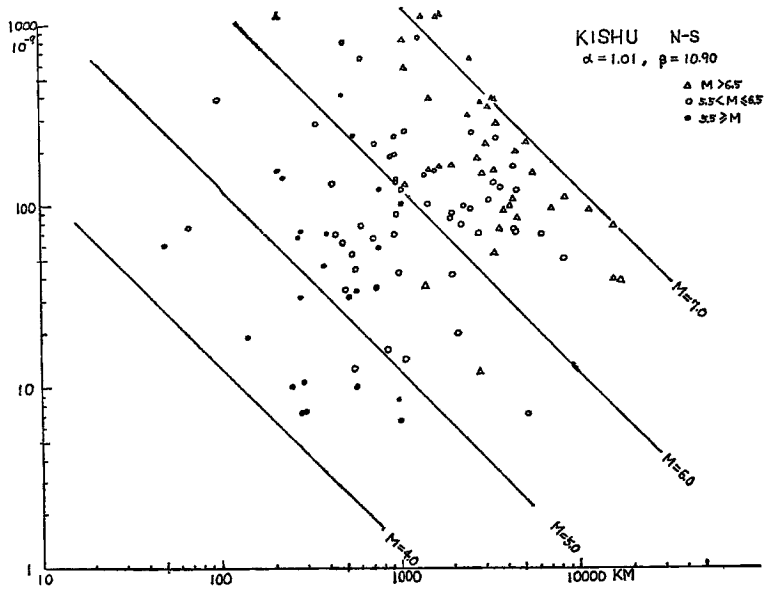


Fig. 3-(c) Relation between the maximum amplitude of the vibrational strain of the vertical component at Ōtsu, and the epicentral distance and the seismic magnitude.

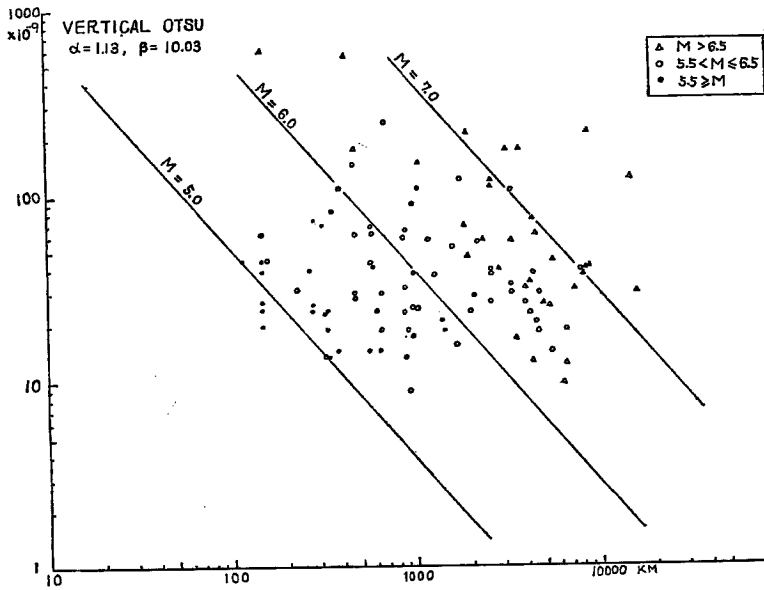


Fig. 3-(d) Relation between the maximum amplitude of the vibrational strain of the N-S component at Kishu Mine, and the epicentral distance and the seismic magnitude.

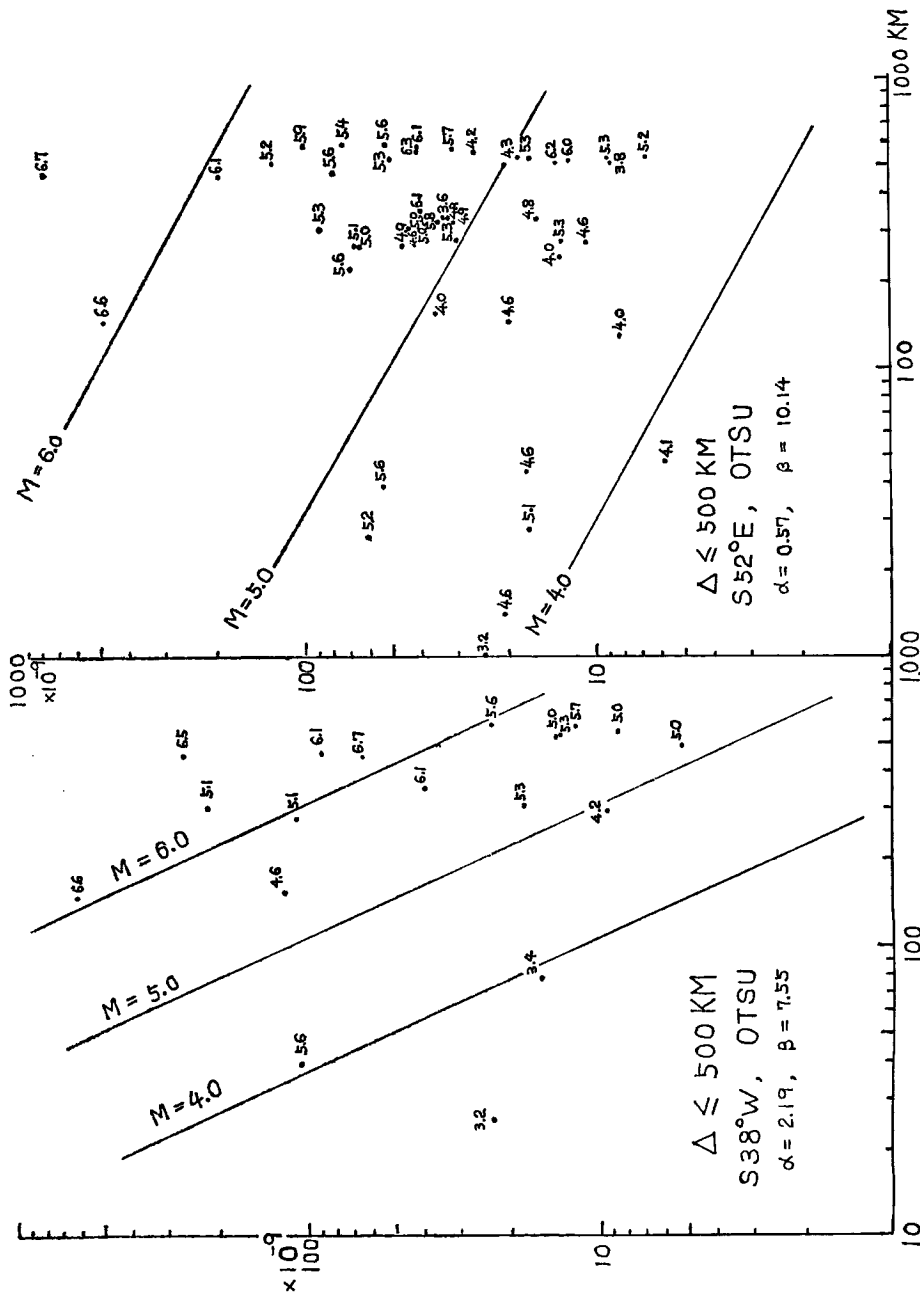


Fig. 3-(c) Relations between the maximum amplitude of the vibrational strains of the S38°W — and the S52°E — components at Otsu, and the epicentral distance which is smaller than 500 km, and the seismic magnitude.



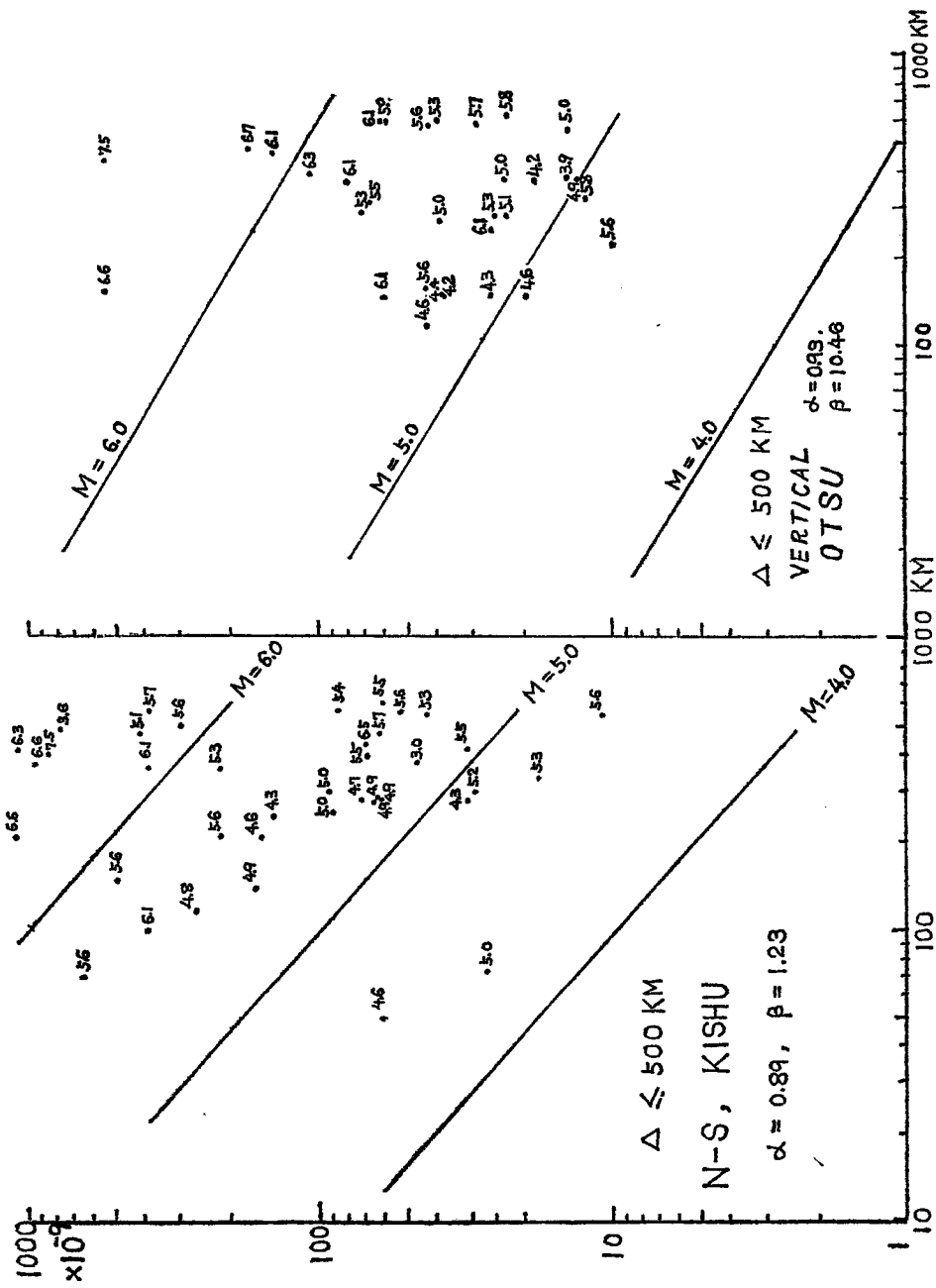


Fig. 3-(f) Relations between the maximum amplitude of the vibrational strains of the vertical component at Ōtsu, and of the N-S component at Kishu, and the epicentral distance which is smaller than 500 km, and the seismic magnitude.

$$\log e_{\max} = M + \alpha \log \Delta(\text{km}) + \beta \dots \dots \dots (1)$$

の式に対する  $\alpha, \beta$  の値を最小自乗法で求めることとした。まず、読み取ったすべての地震に対する  $\alpha, \beta$  の値を求め、つぎに  $M$  の大きさ別、 $M \leq 5.5, 5.5 \leq M \leq 6.5, 6.5 \leq M$  の 3 つのグループの地震に分けてそれぞれの  $\alpha, \beta$  の値を求めた。ついで特に震央距離  $\Delta \leq 500 \text{ km}$  の地震だけを取り出してそれぞれに対する  $\alpha, \beta$  の値を求めた。Table 3 にこれらの値を示す。また、Fig. 3 (a)~(f) は  $\alpha, \beta$  を求めたいろいろなグループの地震の場合の  $\log e_{\max}$  (縦軸) と  $\log \Delta(\text{km})$  (横軸) との関係を示す。図中の直線は特定のマグニチュードに対する  $e_{\max}$  と  $\Delta$  との関係の計算値を示す。

Table 3 Analysed values of  $\alpha$  and  $\beta$  for formula (1).

Division of Observation		Number of Earthquake	$\alpha$	$\beta$		
Ōtsu	: S38°W	Total	129	1.37±0.07	9.42±0.22	
	"	"	M≤5.5	18	1.72±0.19	7.96±0.49
	"	"	5.5≤M≤6.5	66	0.46±0.08	12.27±0.29
	"	"	6.5≤M	51	1.20±0.10	10.26±0.34
	"	"	Δ≤500 km	18	2.19±0.36	7.55±0.99
"	: S52°E	Total	164	1.06±0.16	9.97±0.49	
	"	"	M≤5.5	65	0.54±0.09	11.08±0.25
	"	"	5.5≤M≤6.5	68	0.48±0.08	11.82±0.26
	"	"	6.5≤M	41	0.91±0.11	10.78±0.40
	"	"	Δ≤500 km	36	0.57±0.13	10.14±0.32
"	: Vertical	Total	107	1.13±0.11	10.03±0.33	
	"	"	M≤5.5	22	0.81±0.10	10.46±0.25
	"	"	5.5≤M≤6.5	56	0.34±0.21	12.38±0.21
	"	"	6.5≤M	35	0.95±0.12	10.94±0.42
	"	"	Δ≤500 km	34	0.89±0.41	10.23±0.99
Kishu	: N-S	Total	183	1.01±0.01	9.90±0.19	
	"	"	M≤5.5	30	0.50±0.25	11.74±0.68
	"	"	5.5≤M≤6.5	102	0.50±0.06	11.34±0.19
	"	"	6.5≤M	51	0.69±0.10	11.77±0.33
"	"	Δ≤500 km	34	0.89±0.41	10.23±0.99	

この表の  $\beta$  の値には補正はほどこしていない。

#### 4. 考 察

変位型地震動の最大振幅とマグニチュード、震央距離との関係式 (1) の震央距離に関する係数  $\alpha$  の値は多くの場合 1.5~2.0 の値となっている。したがって変位型地震計にあらわれる最大振幅とひずみ地震計にあらわれる最大振幅が同位相であれば、ひずみ地震計に関する  $\alpha$  の値は 2.5~3.0 となる筈である。しかし、著者の求めた値は S38°W-成分の  $\Delta \leq 500 \text{ km}$ 、同じく  $M \leq 5.5$  の 1.72 を除いてはどれも 1.37 より小さい値であった。S38°W-成分の  $\Delta \leq 500 \text{ km}, M \leq 5.5$  は資料の数も少なかった。資料の多いものは 1 に近い値を示している。このことは振幅の減衰はほぼ震央距離の 1 乗に反比例している。すなわち波の伝わり方はほとんど平面的に拡がっているように見られる。変位型地震計の場合の  $\alpha$  の値よりも小さいことは明らかに最大振幅の現われる位相が異なっていることによるとと思われる。Photo. 1. (a), (b), (c), (d) にひずみ地震

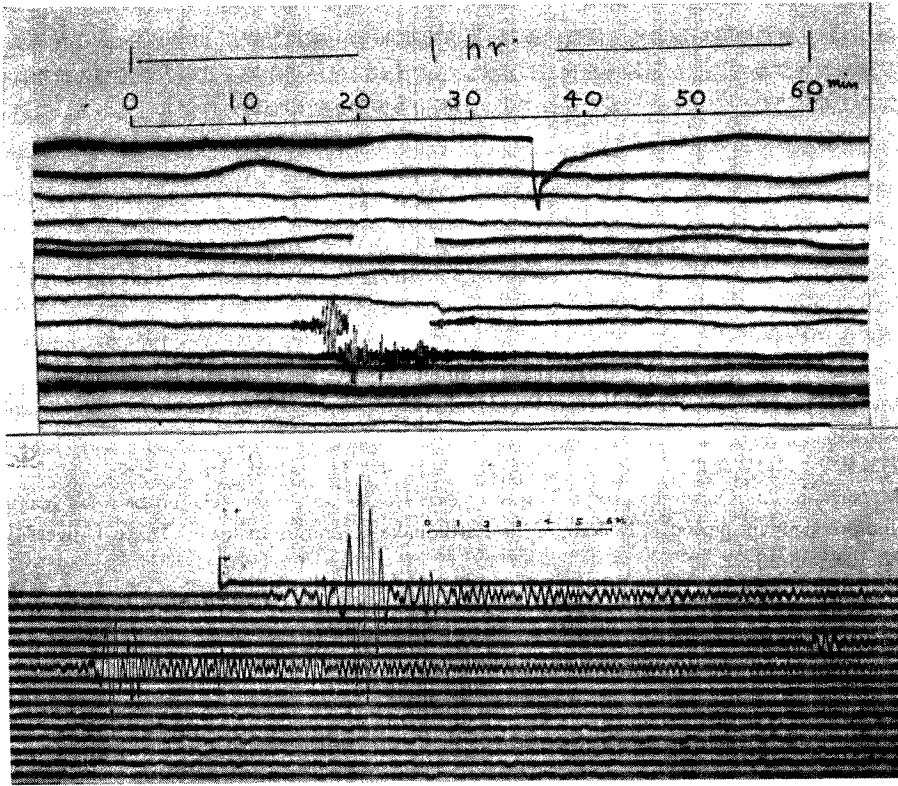


Photo. 1-(c) Photographic record in the earthquakes of E. off N. Honshu (June 17<sup>th</sup> 20<sup>hr.</sup> 53<sup>m</sup> and June 18<sup>th</sup> 03<sup>hr.</sup> 57<sup>m</sup>, 1968). The upper record is of the vertical component of the strain seismograph at Ōtsu. The lower is of the long period's seismograph at Kyoto.

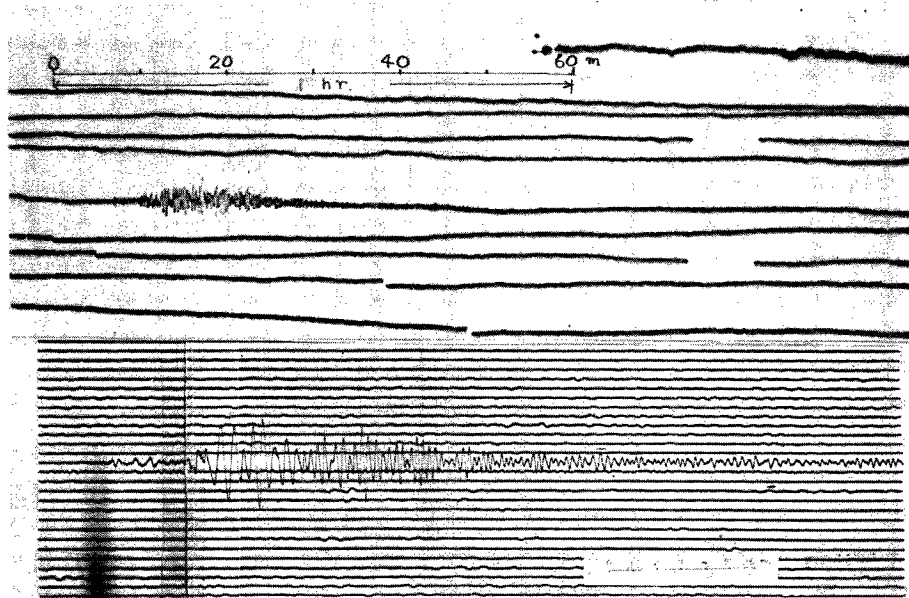


Photo. 1-(d) Photographic record in the earthquake of Taiwan (February 26<sup>th</sup> 19<sup>hr.</sup> 51<sup>m</sup>, 1968). The upper record is of the vertical component of the strain seismograph at Ōtsu. The lower is of the long period's seismograph at Kyoto.

計の記録, これと同じ地震を長周期変位型地震計(振子周期30秒, 電流計周期40秒成分: $N$ -)で観測(場所, 京都大学地球物理学教室)した記録とを比較に示す。この比較ではひずみ地震計の方が優勢な位相は少し後に出ているように思われる。また可成り遅れて大きい振巾の振動が短時間現われたりしている。これらの位相の詳しい比較は後の機会に試みたい。

#### 参 考 文 献

- 1) 坪井忠二: 地震のマグニチュード $M$ について, 地震, 第II輯, 10巻, 1957, pp. 6-23, pp. 46-54.
- 2) Wideman, C. J. and M. W. Major: Strain step associated with earthquakes, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 57, 1967, pp. 1429-1444.
- 4) 竹本修三・高田理夫: 地震に伴う strain step について, 測地学会誌, Vol. 15, 1969, pp. 68-74.
- 4) Ozawa, I.: New types of highly sensitive strainmeters—H-70 type extensometer and R-70 type rotationmeter, Special Contributions of the Geophysical Institute, Kyoto University, No. 10, 1970, pp. 137-148.
- 5) 村松郁栄:  $M$ の定義式についての訂正と注釈, 地震, 第2輯, 第19巻, pp. 282-285.
- 6) Matsumoto, T.: On the spectral structure of earthquake wave—the relation between magnitude and predominant period—, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo University, Vol. 38, 1960, pp. 13-27.
- 7) 本多弘吉: 地震波動, 昭29, 岩波書店.
- 8) Matuzawa, T.: Study of Earthquakes, 1964, Uno-shoten.
- 9) Honda, H.: The mechanism of the earthquakes, The Science Reports of the Tôhoku University fifth series Geophysics Vol. 9, Supplement, 1957, pp. 1-4.