

# 1960年5月22日のChile地震による長周期表面波の位相速度\*

長 宗 留 男\*\*

550.340

## Phase Velocity of Mantle Waves in the Period Range 120 to 440 Seconds

T. Nagamune

(Seismological, Section, J. M. A.)

Phase Velocities as a function of period have been determined by use of a method given by Brune, Nafe, and Oliver (1960), for mantle Rayleigh and Love waves.

The data recorded at Matsushiro Seismological Observatory from the great Chilean earthquake of May 22, 1960 are used.

The final results derived from  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_5$ ,  $R_7$ , and  $R_9$  for the Rayleigh waves, and from  $Q_4$ ,  $Q_6$ , and  $Q_8$  for the Love waves, are shown in Fig. 12, 15 and Table 6.

### § 1. ま え が き

前報告で1960年5月22日19時11分(Z)ごろのChile地震(38°S, 73° $\frac{1}{2}$ W, 0=19h 11m 22sZ)によって起こされた周期約120秒~450秒の長周期表面波について、松代で観測された記録から、mantle Rayleigh waveについては $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_5$ ,  $R_6$ ,  $R_7$ および $R_9$ , mantle Love waveでは $Q_3$ ,  $Q_4$ ,  $Q_6$ および $Q_8$ について群速度を求め、理論的に計算で求められた分散曲線、あるいは実測の分散曲線と比較した。また mantle Rayleigh wave の減衰から内部摩擦の係数“Q”の値を求めた(長宗, 1963)。(mantle Love wave は普通 $G_3$ ,  $G_4$ , ……等の記号が使用されているが、前報告では $Q_n$ の記号で表わしておいた。本文でも前報にならつて $Q_n$ で表わすことにする)。この地震の震央から松代までの最小の震央距離は154°48', 松代の方はN82.8°Wであり、波は松代からみて東微南(西微北)から西微北(東微南)に進む。

観測された分散性表面波を解析することは、分散曲線を求め、これによつてその波の径路の媒質構造に関する情報を得ることが大きな目的である。そのために、仮定したある構造に対する理論的位相速度から群速度曲線を求め観測値と比較する方法が使用されてきた。過去数年

来、観測された表面波から群速度のみでなく、直接位相速度を求めることが研究され、また、表面波から震源における情報を推測することが試みられている。

観測された分散波から波の位相速度を求める場合には、たがいに震央距離の異なつた少くとも2つ以上のwave train が使用できることが必要である。一樣な速度で伝わる周期 $T$ の波の、距離 $x_1$ および $x_2$ における発現時刻をそれぞれ $t_1$ および $t_2$ とすれば位相速度 $C$ は、 $C = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$ によつて与えられる。

Press (1957, 1960) は、Crustal Rayleigh wave の同時多点観測から位相速度を求め、これによつてアメリカ西部地域の地殻構造を推測した。また同様な方法で、Aki (1961), 神沼, 安芸 (1962), Aki and Kaminuma (1963) 等は、日本の各地域について位相速度分散曲線を求め、地殻構造の地域的差異について調査した。

これらの方法では、ある距離において、それぞれの観測点における位相(山, 谷等)をたがいに直接対応させ、対応する位相の伝搬速度を求めるものであり、この場合には観測点間の距離が、一般に対象とする波の波長程度、あるいはそれ以下であることが要求される。(佐藤(良), 1958)。

Sato, Y. (1955, 1956) は、Fourier 変換によつて、観測された wave train から分散性の波の位相速度を計算し、また任意の点における観測から震源における運動を推測する公式を求め、この方法によつてG波の解析を

\* Received July 27, 1963

\*\* 気象庁地震課

Table 1. Arrival times and periods of peaks for Rayleigh Waves.

Phase	Uncorrected Arrival time $\Delta t : 6 \text{ sec}$			Period sec
$R_3$ , Galitzin Z, $\Delta=57, 240\text{km}$				
U	23	17	00	320
U		22	20	320
U		27	40	293
U		32	33	279
U		37	12	224
U		40	56	204
$R_3$ , Berrioff E~W				
E	23	28	46	154
W		30	03	158
E		31	22	164
W		32	44	172
E		34	10	200
W		35	50	220
E		37	40	236
$R_5$ , Galitzin Z, $\Delta=97, 270\text{km}$				
U	02	04	44	328
U		10	12	336
U		15	48	312
U		21	00	298
U		25	58	297
U		30	55	295
U		35	50	285
U		40	35	240
U		44	35	217
$R_7$ , Galitzin Z, $\Delta=137, 300\text{km}$				
U	05	03	42	324
U		09	06	308
U		14	14	318
U		19	32	306
U		24	38	296
U		29	34	296
U		34	30	278
U		39	08	268
U		43	36	266
U		48	02	240
$R_9$ , Galitzin Z, $\Delta=177, 330\text{km}$				
U	08	02	10	342
U		07	52	330
U		13	22	326
U		18	48	292
U		23	40	290
U		28	30	297
U		33	27	293
U		38	20	250
U		42	10	264
U		46	54	256
U		51	10	270
$R_4$ , Benioff E—W, $\Delta=62, 850\text{km}$				
E	23	49	26	126
E		51	32	162
E		54	14	136
E		56	30	160
E		59	10	186
E	00	02	16	170
E		05	06	194
$R_6$ , Galitzin Z				
U	23	54	47	153
U		57	20	157
U		59	57	185
U	00	03	02	175
U		05	57	203

行なつた。(Sato, Y. 1958).

その他, Brune, Nafe および Oliver (1960) は, stationary phase の方法により分散性の波の位相速度を求める方法について述べ, いくつかの実例も報告されている. この方法の概略は次のとおりである.

地点  $x$  における分散性の波は, 時刻を  $t$  とすれば,

$$u = \int_0^{\infty} A(k) \cos(\omega t - kx + \varphi(k)) dk \quad (1)$$

で表わされる. ここで,  $k$ : wave number,  $\omega$ : angular frequency,  $\varphi(k)$ : initial phase,  $A(k)$ : 振幅関数である.

Table 2. Arrival times and periods of peaks for Love Waves.

Phase	Uncorrected Arrival time Δt : +6 sec			Period sec
Q <sub>4</sub> , Benioff N-S, Δ=62,850km				
S	23	00	23	416
S		07	00	240
S		11	00	246
S		14	52	196
S		17	44	118
S		19	37	120
Q <sub>6</sub> , Benioff N-SΔ=102,80km				
S	01	24	43	358
S		30	00	392
S		36	40	340
S		42	06	228
Q <sub>8</sub> , Galitzin N-S, Δ=142,910km				
S	03	45	15	440
S		52	30	410
S		59	43	410
S		06	30	334
S		12	02	300

いま、波の peak だけに着目するとすれば、(1)式の各成分波の peak は次の式によつて表わされる。すなわち、

$$Ct - x = (N - \varphi_0(k)/2\pi)\lambda = n\lambda \quad (2)$$

ただし、 $C$ ,  $t$ ,  $x$  はそれぞれ位相速度、走時、震央距離、 $\lambda$  は波長、 $N$  は整数、 $n$  は peak の order number で  $t=0$  において  $x < 0$  にある peak に正の番号を付ける。一般に frequency  $\omega$  の成分波の peak は  $t=0$  において  $x=0$  から  $n\lambda$  の距離のところにあつたと見なされる。

(1)式の代りに球面波を考え、地球を何回か回つた表面波の peak を考えると、位相速度  $C$  は次式から求められる。

$$C = \frac{x}{t + \varphi(T) - \frac{T}{8} + \frac{T}{8} - nT - m\frac{T}{4}} \quad (3)$$

ただし、 $T$  は周期であり、右辺分母の  $t$  は記録紙上の peak の発現時刻から求めた走時(刻時計の補正をしたもの)、 $\varphi(T)$  は地震計による位相のずれ、第3項の  $-T/8$

Table 3. Constants of instruments.

Instrument	Constant	$T_1$	$T_2$	$h_1$	$h_2$	$\sigma$
		sec	sec			
Galitzin type	N (GN)	15	70	1	1.63	0.15
"	Z (GZ)	7.5	58	0.69	1.32	0.03
Benioff type	N (BN)	1.0	78	0.56	1.0	0.35
"	E (BE)	1.0	60	0.64	1.5	0.28

は球面波の場合に(2)式に補正すべき値、第4項の  $-T/8$  は分散波の peak と(1)式の各成分波の peak との間の位相のずれであり、正常分散 ( $\frac{dU}{dT} > 0$ )、ただし  $U$  は群速度) に対しては複号は“-”をとり、逆分散 ( $\frac{dU}{dT} < 0$ ) に対しては“+”符号はをとる。 $n$  は peak の order number、最後の項の  $m\frac{T}{4}$  は polar phase shift (Brune, Nafe, Alsop, 1961) に対する補正項で、 $m$  は震央または対震央を通過した回数を表わす。すなわち、 $R_3$  では  $m=2$ ,  $R_4$  では  $m=3$ ,  $R_5$  では  $m=4$ , ……となる。この方法で求めた位相速度と、Fourier 分析によつて求めたものとはよく一致することが報告されている (Nafe, Brune, 1960)。この場合でも、 $n$  は任意の値をとりうるので1つの wave train から一義的に位相速度を求めることはできない。

今回は、上述の Brune その他の方法によつて、前の報告で群速度を求めたものと同じ記録から Chile—松代を通る大圏径路に対する mantle Rayleigh wave および

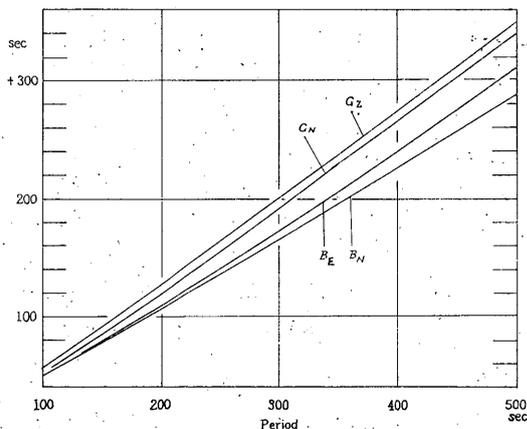


Fig. 1. Phase shift correction in seconds for the instruments used in the present study. Constants are shown in Table 3.

mantle Love wave の位相速度を, mantle Reyleigh wave では  $R_3, R_4, R_5, R_7$  および  $R_9$ , mantle Love wave では  $Q_4, Q_6$  および  $Q_8$  から求めた.

第1表および第2表に今回使用した観測資料を掲げてある. これらの資料はすべて前の報文で群速度を求めるために使用した値そのままである. 第1表および第2表の時刻は,  $R_3$  の水平成分を除きそれぞれ記象紙上の山 (Z成分およびE-W成分) および谷 (N-S成分) の発現時刻だけを示してあり, 刻時時計の補正はしてない.

使用した地震計は Galitzin 式地震計および Benioff 式地震計長周期成分で常数は第3表に示してある. これらの地震計による波の位相のずれは, 宇津 (1957) の式によつて求め第1図に示してある.

§ 2. mantle Rayleigh wave の位相速度

mantle Reyleigh wave では周期約 210~220 秒付近に群速度の極小値がある (長宗, 1963 参照). 第1表において, この極小群速度よりも短周期の部分, すなわち逆分散の部分の観測があるのは  $R_3$  および  $R_4$  だけである. また資料のうち  $R_4$  以外は, すべて松代からみて東

微南方から西微北方に伝わる波である.  $R_4$  については一応別に取り扱かうこととして, まず  $R_5, R_7$  および  $R_9$  から, 各 wave train について共通の観測値のある周期約 230~250 秒以上の波について考える.

(2)あるいは(3)式における  $n$  の値はもし震源における運動がたとえば up (または down) である場合には, 観測点における上下成分の山 (up) について考えると, 整数 (または半整数) になる. 実際の地震の場合では  $n$  は必ずしも整数または半整数または半整数になるとは限らないが, 一般的に  $n$  を整数または半整数と仮定しても大きな間違いではない (Brüne, Nafe, Oliver, 1960). また, たとえば  $R_5$  における peak の order number が整数 (半整数) であれば,  $R_3, R_7, R_9$  等, 同じ方向に伝わる波の peak の order number はすべて整数 (半整数) になる.

前に述べたように,  $n$  はたとえば整数であつても多くの値をとりうるわけで, 最初の peak の order number

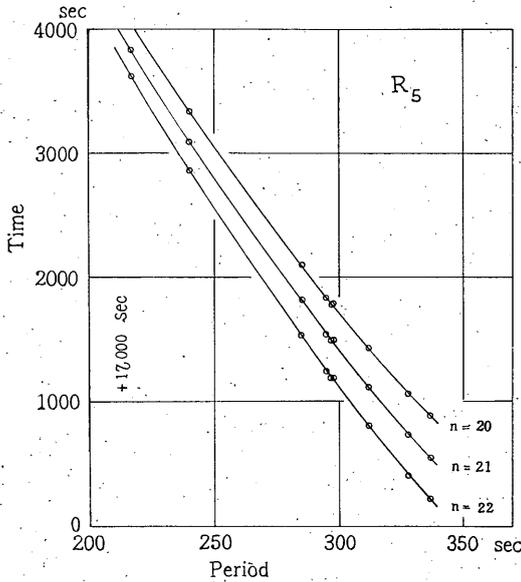


Fig. 2 Corrected time  $t' = t + \varphi(T) - \frac{T}{8} \mp \frac{T}{8} - nT - m\frac{T}{4}$  for different orderings of peaks of  $R_5$ . The order numbers of the first observed crests are 20, 21, and 22 respectively.

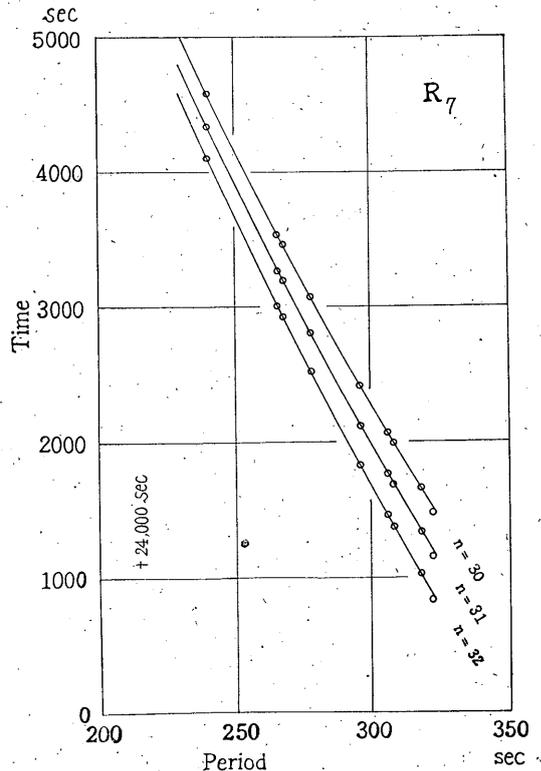


Fig. 3 Corrected time  $t'$  for different orderings of peaks of  $R_7$ . The order numbers of the first crests are 30, 31, and 32 respectively.

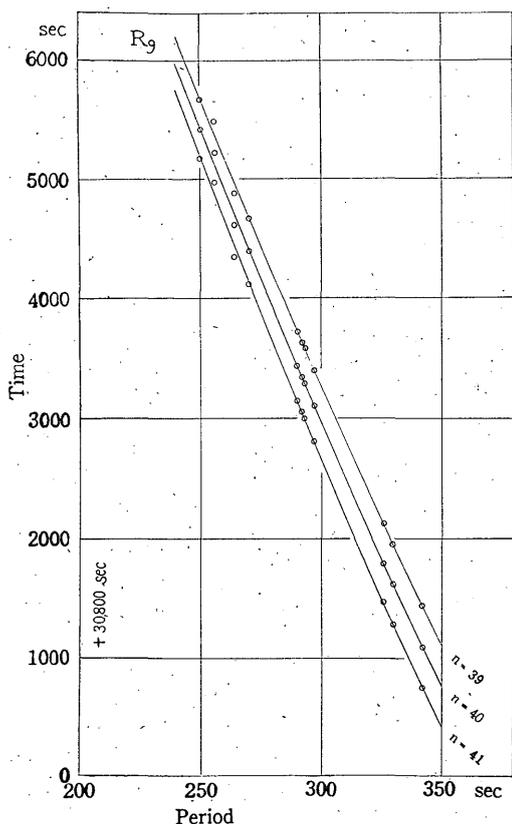


Fig. 4 Corrected time  $t'$  for different orderings of peaks of  $R_9$ . The order numbers of the first observed crests are 39, 40, and 41 respectively.

によって何組もの値を与えることになるが、震央距離のちがった2つ（またはそれ以上）の Wave train があれば  $n$  を消去することができる。今まで理論的に、あるいは観測から知られている位相速度と比較して大体の  $n$  の値は決められる。したがって2, 3の  $n$  について速度を計算し、異なつた震央距離をもつ Wave train の間で同じ値を与えるものを求めれば、これが求める位相速度になる。

第2～第4図は、 $R_5$ ,  $R_7$  および  $R_9$  について最初の peak の order number ( $n$ ) に2, 3の値を仮定した場合の「見掛けの走時」を示したものである\*。ここで、「見掛けの走時」とは、(3)式の右辺の分母  $t' = t + \varphi(T) - \frac{T}{8} - \frac{T}{4} - m\frac{T}{4} - nT$  の値である。たとえば、第2図の  $n=21$  の曲線は、 $R_5$  の Wave train について第1, 第

2, ……番目の peak の  $n$  を 21, 22, ……として(3)式の右辺の分母の値を計算してそれぞれの周期に対してプロットしたものである。これらの資料からある周期に対する位相速度は、 $C(T) = x/t'(T)$  によつて、各  $n$  について求められる。ここで  $x$  は各 Wave train の震央距離である。第5図は3つの Wave train から求められたものを重ね合わせたもので、 $R_5$ ,  $R_7$  および  $R_9$  について最初の peak の order number を、それぞれ 21, 31 および 41 としたものが  $T: 230 \sim 350$  秒の範囲で一致しており、この order number のものが求める位相速度を与える。図中の曲線は、周期約 230～350 秒の位相速度の分散曲線になる。同様に  $R_3$  の長周期部分（第1表の  $R_3$  のうち、上下成分によつて観測されたもの）については、最初の peak の order number を 13 とすれば第5図の曲線とほとんど一致する。 $R_3$  については短周期の部分（第2表で E-W 成分の資料）がある。

今までの計算に使用した波はすべて上下成分による観測値であつたが、 $R_3$  のうち周期約 200 秒以下ものは上下成分からは読取れなかつた。Rayleigh 波の上下成分と水平成分の間には理論的に  $\frac{\pi}{2}$  の位相差があり、実際の場合にもこのことが示されている（長宗, 1963）。したがつて peak の運動を考える場合には、E-W 成分の peak の order number は上下成分のそれに較べて  $\pm \frac{1}{4}$  の差を考慮しなければならない。ここでは E-W 成分の走時を上下成分の走時に換算して上下成分にそろえることにする。第6図は、地震計による位相のずれを補正した各山 (E) および谷 (W) の発現時刻をプロットして結んだもので、上下成分との関係は、 $E \rightarrow D \rightarrow W \rightarrow U \dots$  となるような運動をする。この図から上下成分の山、谷として期待される時刻を読みとつて各山、谷の発現時刻とし、 $R_5 \sim R_9$  におけると同様な計算を行なつた。操作の手順および結果は第4表に示してある。ただし、この Wave train については山および谷を使用した。この結果は  $R_3$  の長周期部分、または  $R_5 \sim R_9$  と同様に取扱つかつてよい。 $R_5 \sim R_9$  では peak order number のは整数であつたから、この Wave train に対しても peak (山) の  $n$  は整数にならなければならない。2, 3の  $n$  に対して求めた値を第7図に示してある。 $T > 230$  秒の曲線は第5図で求められたものであり、これからみて  $R_3$  の短周期部分の  $n=14$  としたものが位相速度を与えることがわかる。 $R_3$  の長周期部分に対しては  $n=13$  であるから、 $R_3$  では長周期部分で  $n=13$ 、短周期部分で  $n=14$  となる。

第8図に両者を一緒にしたものの「見掛けの走時」を

\* 第2および第8図では、周期約 210～220 秒に Airy phase があるものとして計算してある。

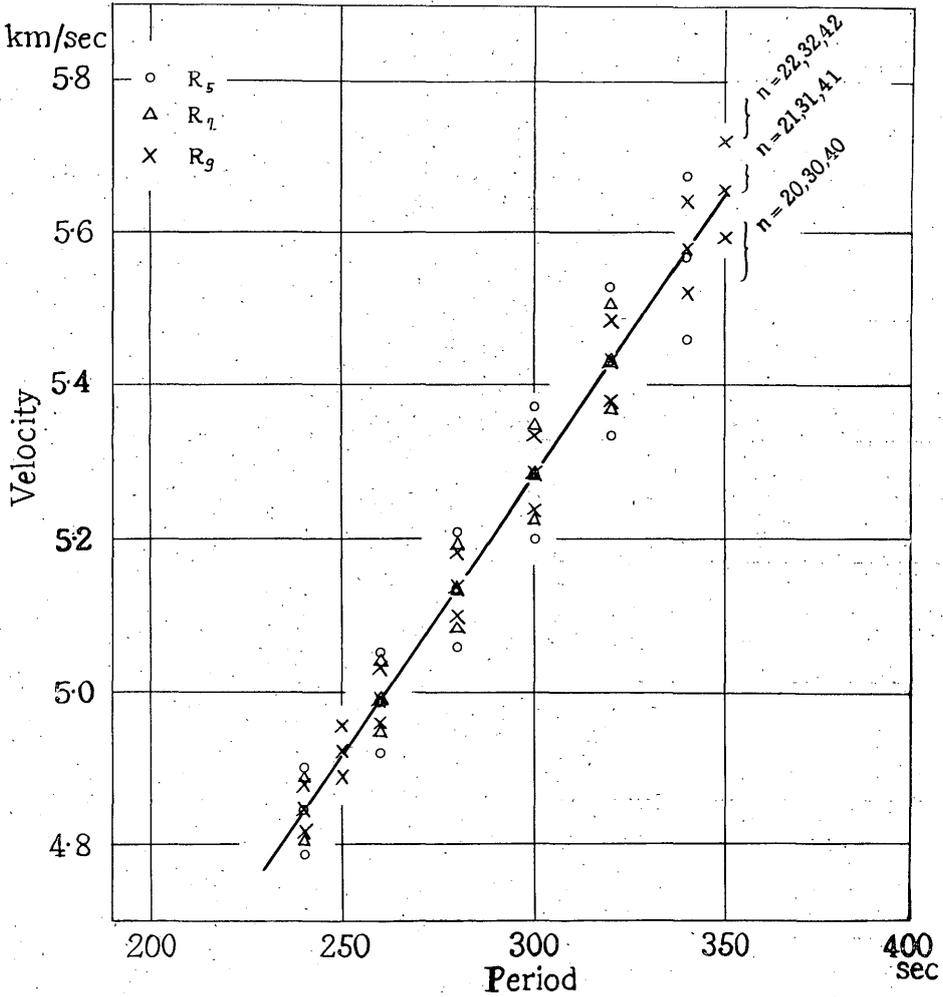


Fig. 5. Possible phase velocity determined from  $R_5$ ,  $R_7$ , and  $R_9$ . The curve is the correct phase velocity curve in the period range about 230 to 350 seconds, on the basis of coincidence with each other.

Table 4. Travel times of crests and troughs of the vertical component for  $R_3$  estimated from the data of the horizontal component.

Phase	arrival time			Imst. phase shift	Corrected arrival time		Phase	arrival time ( $t$ )		Period	Travel time* ( $t + \Delta t$ ) - 0	Polar phase shift	Corrected travel time	
	h	m	s		sec	m		s	m					s
E	23	28	46	154	+81	30	07	U	29	32	146	15496	-73	15423
W	30	03		158	84	31	27	D	30	45	166	15569	-83	15486
E	31	22		164	88	32	50	U	32	08	168	15652	-84	15568
W	32	44		172	93	34	17	D	33	32	180	15736	-90	15646
E	34	10		200	111	36	01	U	35	02	216	15826	-108	15718
W	35	50		220	123	37	53	D	36	50	240	15934	-122	15812
E	37	40		236	132	39	52							

\* Reading Correction ( $\Delta t$ ) = +6 sec, 0 = 19h11m22s,

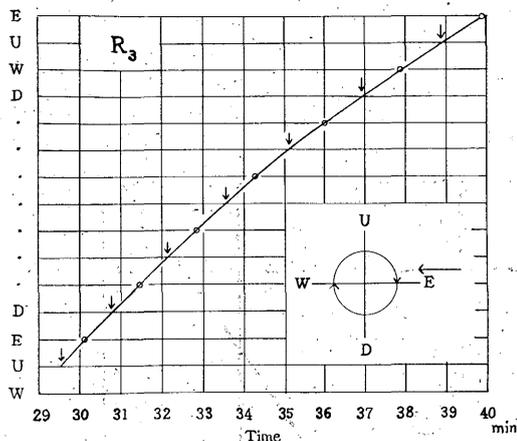


Fig. 6 Relation between arrival times of the vertical and the horizontal (E-W) components. Open circles indicate the corrected arrival times (see Table 4) of crests and troughs of the E-W component and the arrows give the arrival times expected to peaks of the vertical component.

Table 5. Phase velocity of the Rayleigh wave derived from respective wave trains.

Wave	$R_3$	$R_5$	$R_7$	$R_9$	$R_4$
Period	( $n=13$ )	( $n=21$ )	( $n=31$ )	( $n=4$ )	( $n=15.5$ )
	km/sec	km/sec	km/sec	km/sec	km/sec
350				5.652	
340		5.565		5.578	
320	5.420	5.428	5.436	5.430	
300	5.276	5.284	5.285	5.282	
280	5.134	5.133	5.136	5.139	
260	4.986	4.983	4.991	4.994	
240	4.839	4.842	4.845	4.845	
220	4.698				
200	4.572				4.570
180	4.454				4.443
160	4.346				4.334
150	4.297				
140					4.244
120					4.173

示してある。第9図はこれから求めた速度であり、 $T > 230$ 秒に対する曲線は第5図の曲線である。

以上の計算の対象とした波はすべて震央から N82.8°W の方向に射出されたもので、これらと反対方向に伝

Table 6. The final phase velocity obtained in the present study.

(1) Rayleigh wave

Period	Wave length	Phase velocity		
sec	km	km/sec		
350	1978	5.652	(derived from $R_4$ )	
340	1896	5.576		
320	1737	5.428		
300	1584	5.280		
280	1438	5.136		
260	1297	4.989		
240	1162	4.843		
220	1034	4.698		
200	914	4.572		4.570
180	802	4.454		4.443
160	695	4.346		4.334
150	645	4.297		4.287
140				4.244
130				4.206
120			4.173	

(2) Love wave

Period	Wave length	Phase velocity
sec	km	km/sec
440	(2496)	(5.672)
420	(2356)	(5.609)
400	2218	5.545
380	2082	5.480
360	1959	5.414
340	1818	5.347
320	1690	5.282
300	1565	5.218
280	1444	5.158
260	1325	5.097
240	1208	5.033
220	1093	4.967
200	980	4.899
180	870	4.831
160	762	4.762
140	657	4.692
120	555	4.623

搬したものとしては、 $R_4$  および  $R_6$  が読取れたが、 $R_4$  については短周期の部分だけ、 $R_6$  については周期約 200 ~ 220 秒の値だけであつたので、 $R_4$  について位相速度

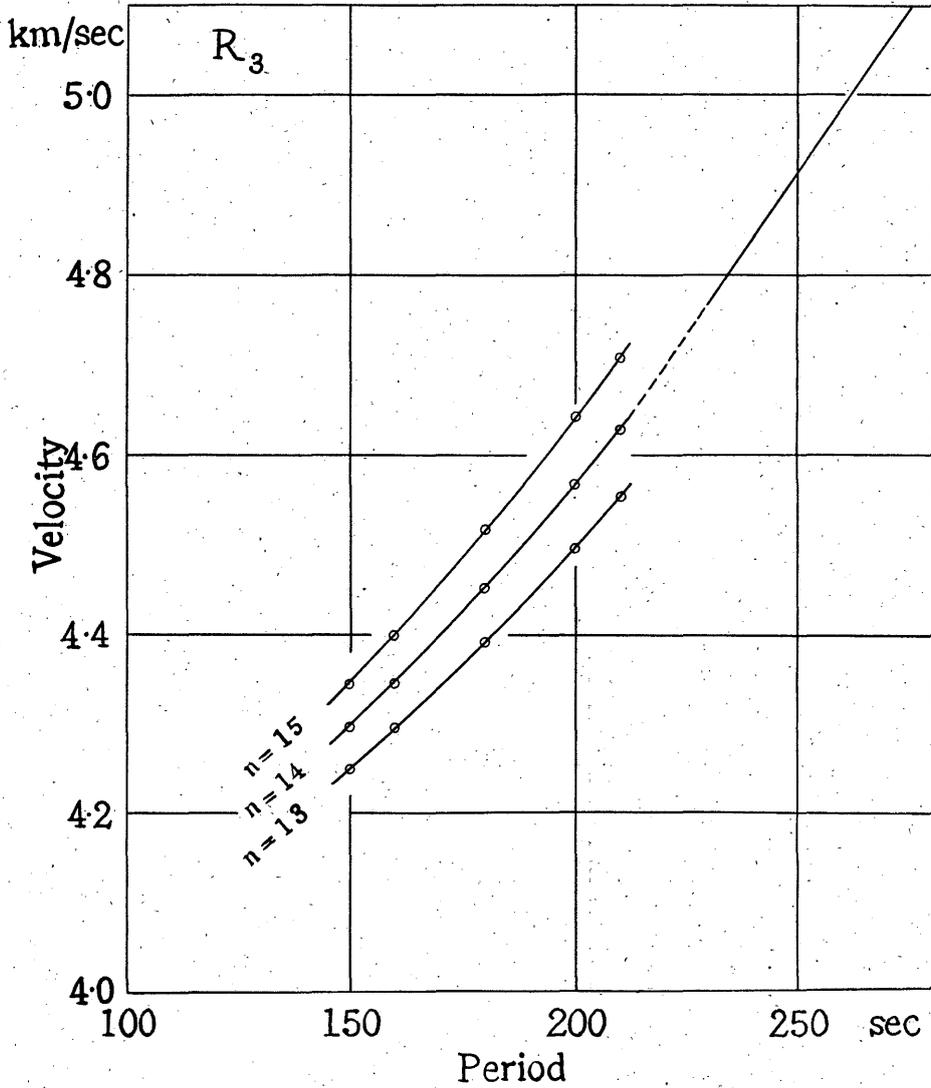


Fig. 7 Possible phase velocity curves for the short period branch of  $R_3$ . The curve corresponding to the period range 230—280 seconds indicates the dispersion curve shown in Fig. 5.

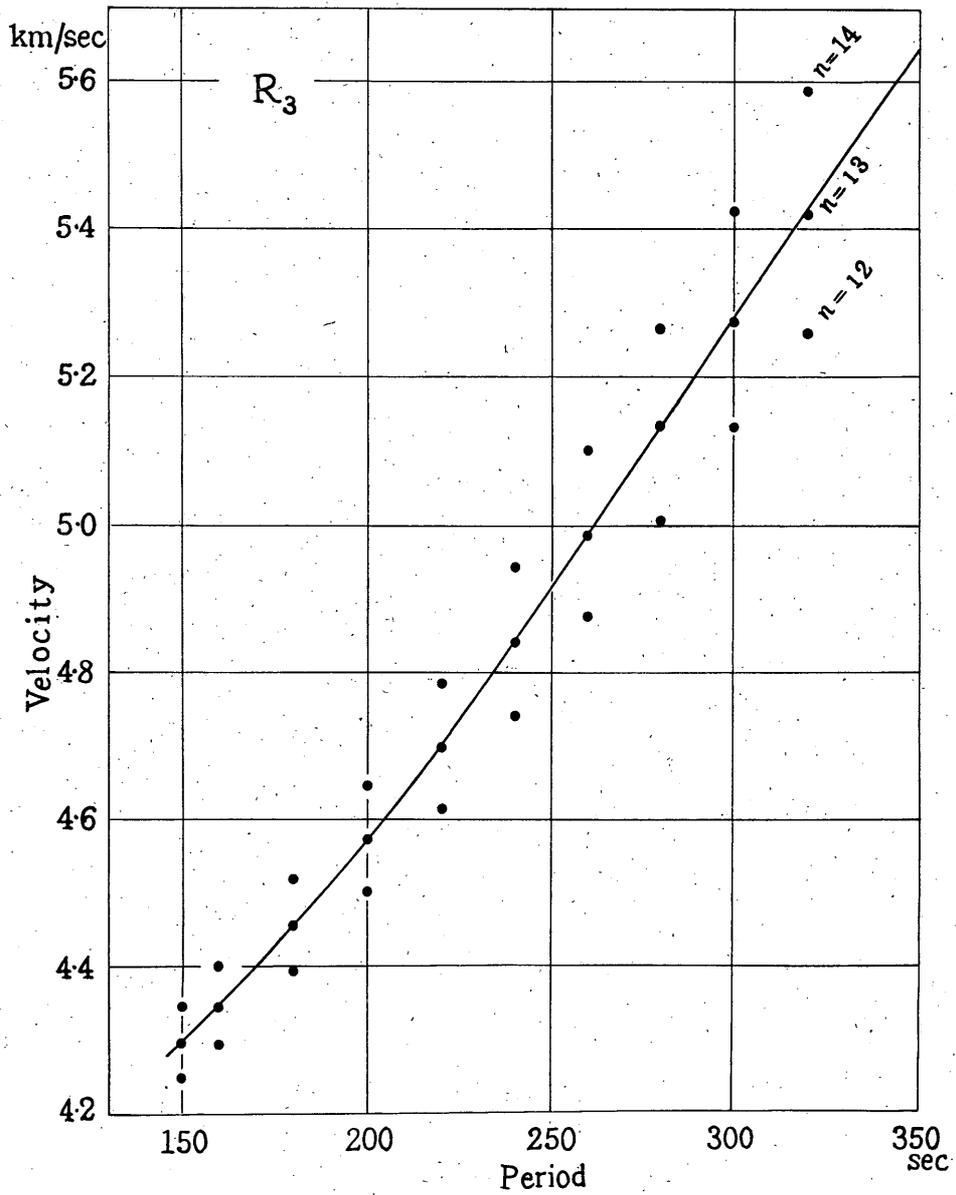


Fig. 9 Possible phase velocity determined from  $R_3$ . The correct phase velocity is indicated by the curve, comparing with Fig. 5 and 7.

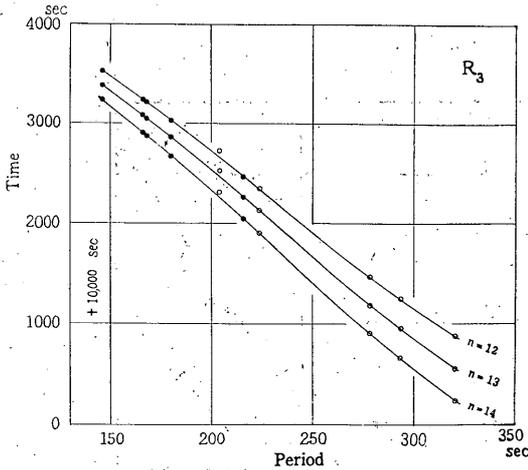


Fig. 8 Corrected time  $t'$  for different orderings of peaks of  $R_3$ .

を求める、第 10 図は第 2, 3, 4, または第 8 図と同様に「見掛けの走時」を示したものであり\*、第 11 図は  $n = 15.0, 15.5$  および  $16.0$  に対する  $C$  の値である。第 11 図中の曲線は第 9 図の曲線の一部であり、これから、 $T = 200$  秒付近ではこの曲線と  $R_4$  の  $n = 15.5$  に対する値とは一致しており、 $T = 150$  秒付近でも約  $0.005 \text{ km/sec}$  の差で両者は一致している。すなわち、 $R_4$  においては  $n = 15.5$  とつたものが  $120 \sim 200$  秒周期の波の位相速度を与えることがわかる。

第 11 図において、 $T < 200$  秒に対する曲線は  $R_3$  から求められたものである。 $T = 150$  秒付近における  $R_4$  から求めた値と曲線との小さい差（速度にして約  $0.005 \text{ km/sec}$ ）は測定の誤差であるか、径路の差によるものであるかわからないが、今回は  $R_4$  から求められた値は参考としておく。また  $R_3, R_5$  等においては peak の order number はすべて整数であつたが、 $R_4$  では半整数になる。このことは、震源において WNW 側と ESE 側とでは位相が逆になっていることを示すもので一般の震源における性質を表わすものである。

第 5 表にこの節で求めた周期約  $120 \sim 350$  秒の Rayleigh 波の位相速度\*\*を各波ごとに示してある。また第 6 表は第 5 表を図上にプロットして各点をスムーズした曲線か

\*  $R_4$  には、上下成分と東西成分の観測がある（第 2 表）。第 10 図では、東西成分の peak の order number に  $\pm 1/4$  の補正をして上下成分に換算して示してある。また  $n$  は上下成分の最初の peak の order number で表わしてある。

\*\* 震央を原点として、与えられた  $n$  に対して (3) 式から求めた値。

ら読取つた値である。（ただし、第 5 および第 6 表では、 $R_4$  から求めたものは別にして示してある。）

第 6 表の値を、2, 3 の理論値および観測値と比較して第 12 図に示してある。図中の太線は今回求めた分散曲線であり、黒丸は Brune, Nafe および Alsop (1961) ら、mantle Rayleigh wave および地球の自由振動から求めたもので、前の報告 (長宗, 1963) で mantle Rayleigh wave の“ $Q$ ”を求めた場合の位相速度として、これらの資料を使用したか、今回求めた速度と極めてよく一致している。点線は、Takeuchi, Saito および Kobayashi (1962) が、Jeffreys, Gutenberg および Lehmann モデルについて計算した値である。（これらのモデルは、群速度を求めた場合の理論曲線として引用したものと同一である。）

§ 3. mantle Love wave の位相速度

mantle Love wave についても前節と同様な方法で位相速度を求めた。第 3 表に読取り値を掲げてある。この表では N-S 成分について記象紙上の谷 (S) の発現時

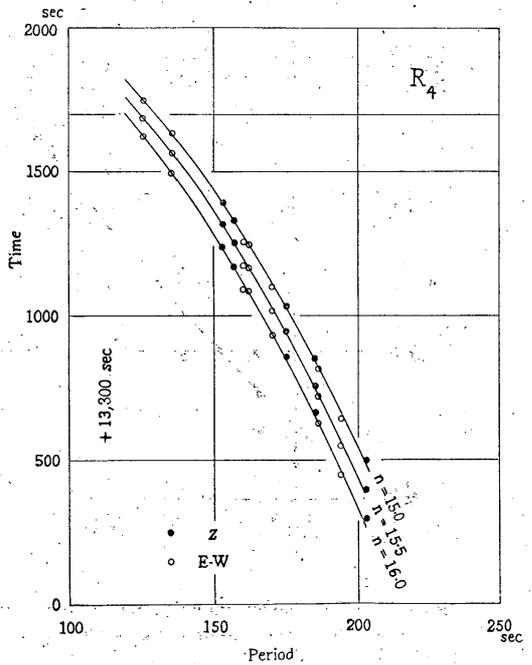


Fig. 10 Corrected time  $t'$  for different orderings of peaks of  $R_4$ . The order number of the first observed crests for the vertical and the horizontal (E-W) components are  $15.0, 15.5, 16.0$  and  $12\frac{3}{4}, 13\frac{3}{4}, 13\frac{3}{4}$  respectively.

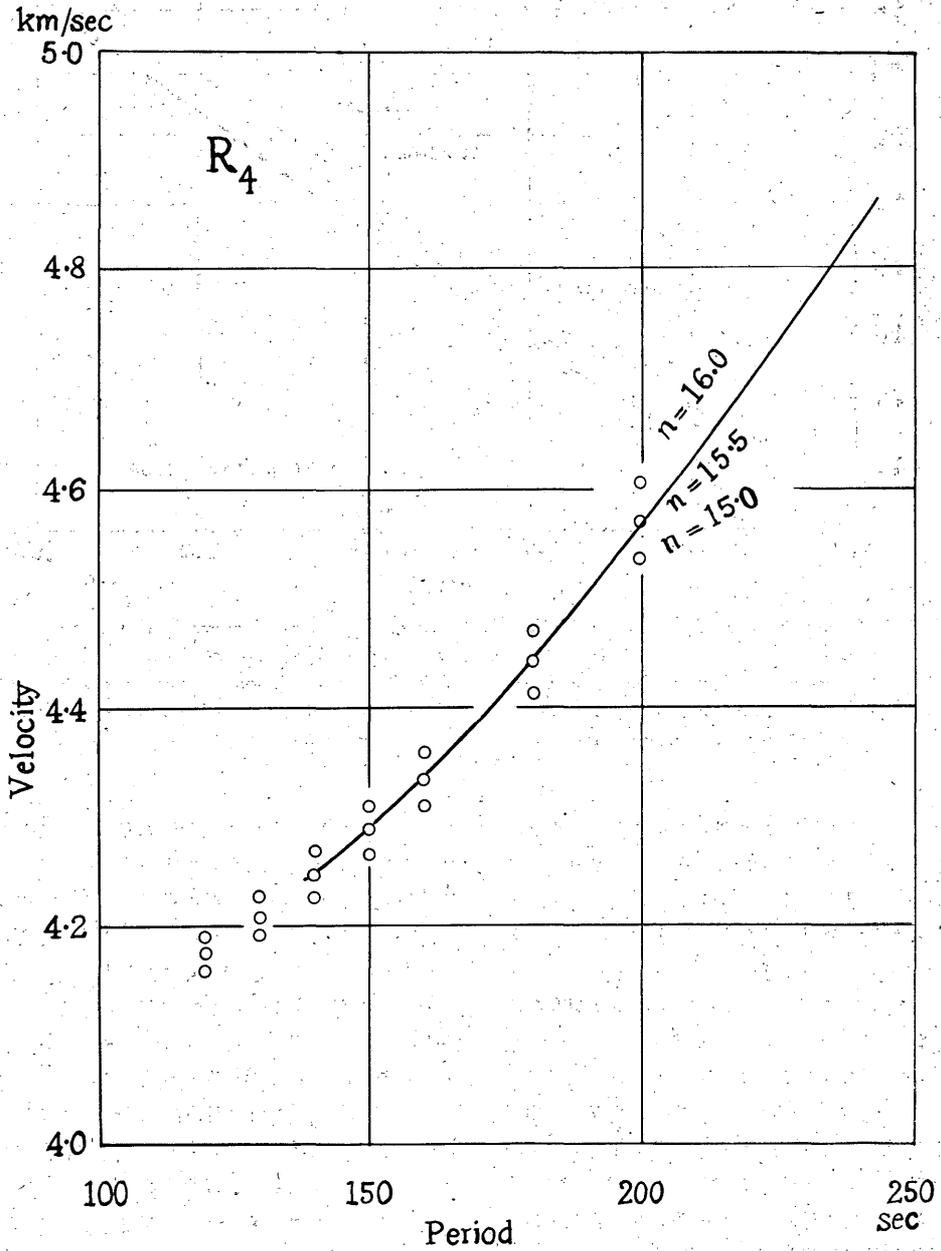


Fig. 11. Possible phase velocity determined from  $R_4$ . The curve indicates the dispersion curve obtained in Fig. 5 and 7.

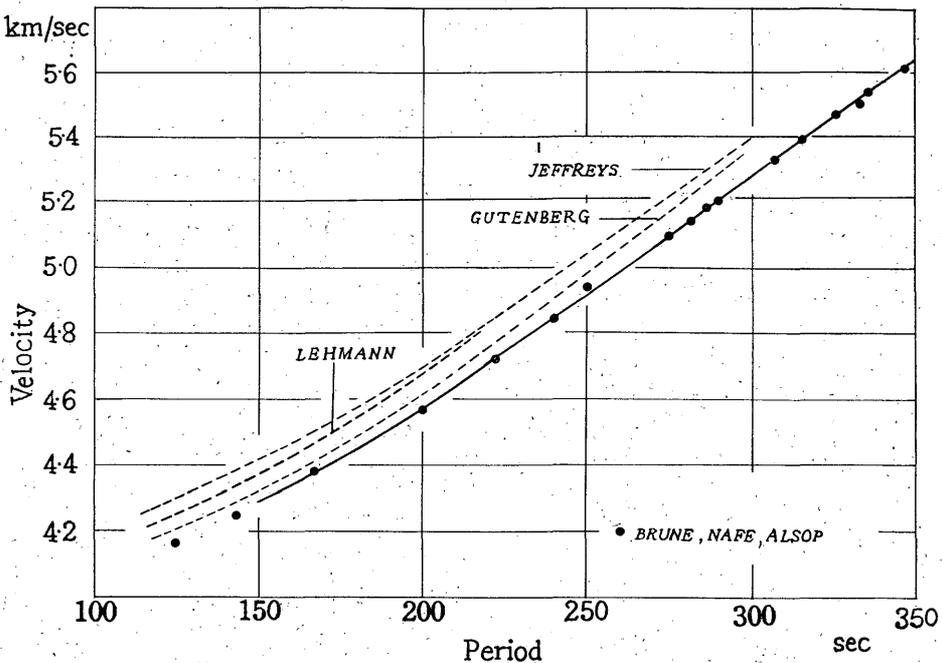


Fig. 12 Phase velocity data for mantle Rayleigh waves. The solid curve is the dispersion curve derived from the present study (Table 6). Solid circles indicate the data observed by Brune, Nafe, and Alsop (1961). And dashed curves indicate the theoretical dispersion curves obtained by Takeuchi, Saito, and Kobayashi (1962) for Jeffreys, Gutenberg, and Lehmann models respectively.

刻と周期を示してあるが、この節では記象紙上の谷だけに着目することにする。第3表の資料から、まず  $Q_6$  および  $Q_8$  について最初の谷の order number として数個の値を与えた場合の速度を計算して第13図に示してあるが、 $Q_6$  では  $n=8.5$ 、 $Q_8$  では  $n=11.5$  としたものが両者一致しており、周期約 230~440 秒の位相速度を与えている。第14図には  $Q_4$  に対する値を、 $Q_6$  ( $n=8.5$ ) および  $Q_8$  ( $n=11.5$ ) に対するものと共に示してあり、 $Q_4$  では  $n=5.5$  となる。第14図の真中の曲線が位相速度の分数曲線になる。この曲線から周期 120~440 秒に対する値を読み取って第6表の(2)に示してある。ただし、上記周期の範囲では、波はすべて正常分散であると考えてある(前報告第13図参照)。

ここで使用した mantle Love wave  $Q_4$ 、 $Q_6$  および  $Q_8$  はすべて震源から  $E7.2^\circ S$  方向に出た波である。そして周期約 200 秒以下のものは  $Q_4$  だけから求めた値である。

前の報告(長宗, 1963)で、 $Q_3$  と  $Q_4$  とでは周期 100~140 秒の波で、その群速度にはかなりの差があり、

これはその径路のうちに太平洋の部分と、その他の部分を含む割合が異なるためであろう。したがって、太平洋径路だけ、およびその他の径路だけについて考えると群速度はかなり大きな差があるであろう、と述べておいた。これに対応して位相速度にも当然  $Q_3$  と  $Q_4$  との間に差がある筈である。今までの観測によると、位相速度曲線にも上記の周期の付近で約 0.1~0.2 km/sec の幅があり、観測によつて差が現われている(例えば Oliver, 1962 参照)。第14図の周期約 200 秒(あるいは 200 数十秒)より短周期の部分の値は、 $Q_4$  の経路にだけ適用されるものと考えなければならない。

第15図は、ここで求めた位相速度と、いろいろなモデルに対する理論値と比較して示したもので、理論曲線はすべて群速度を求めた場合に引用したモデルについて求められたもので、周期 100~500 秒の曲線は Sato, Landisman および Ewing(1960)が Jeffreys—Bullen モデルについて求めたもの(図から読み取った)、100~300 秒に対するものは Takeuchi, Saito および Kobayashi による計算結果のうち Gutenberg, Jeffreys および

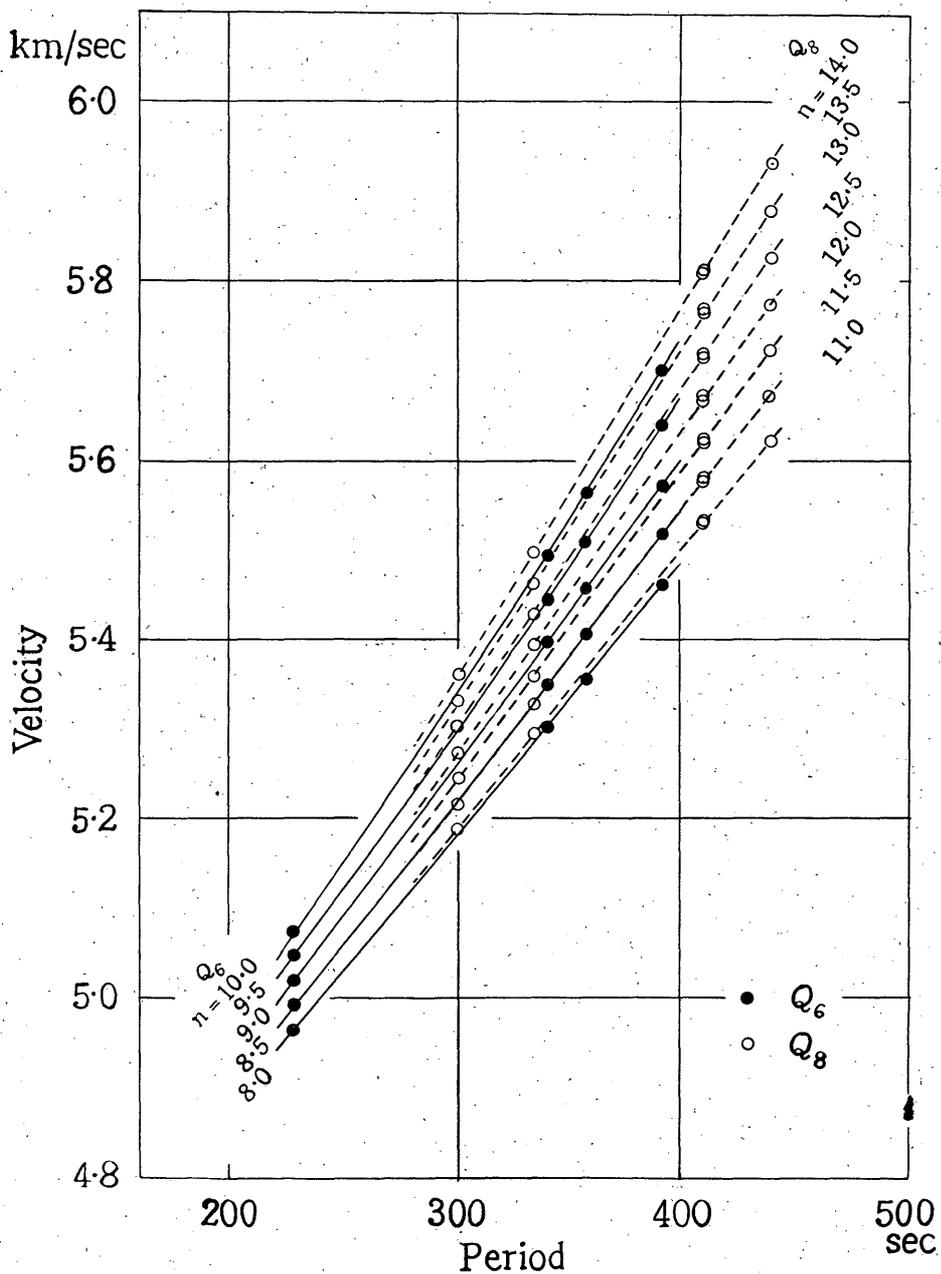


Fig. 13 Possible phase velocity curves determined from the data for  $Q_6$  and  $Q_8$ .  $Q_6$  and  $Q_8$  are presented by solid and dashed curves respectively. The curves, labeled  $n=8.5$  for  $Q_6$  and  $n=11.5$  for  $Q_8$ , coincide with each other.

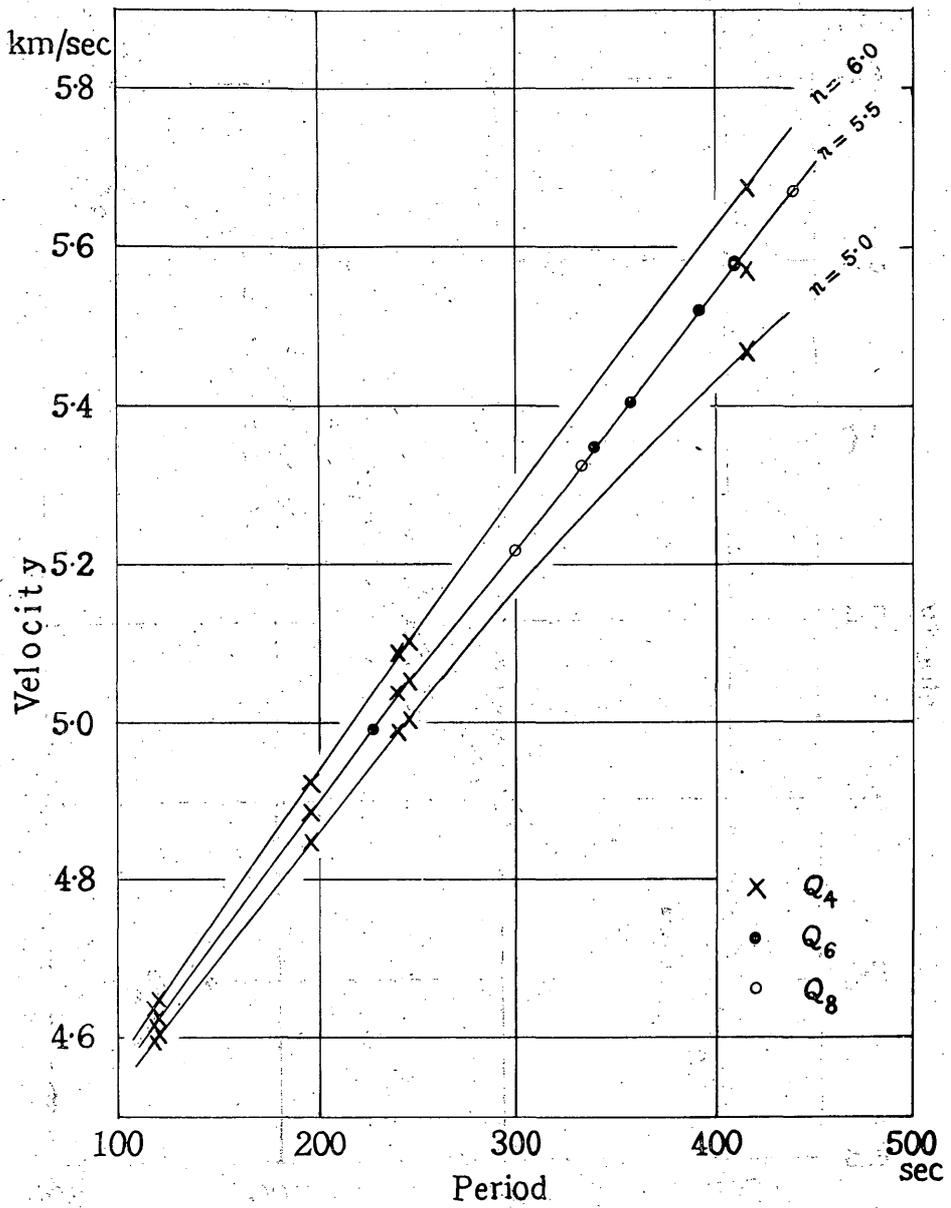


Fig. 14 Possible phase velocity curves for  $Q_4$ . The central curve ( $n=5.5$ ) is the correct phase velocity curve in the period range 120 to 440 seconds.

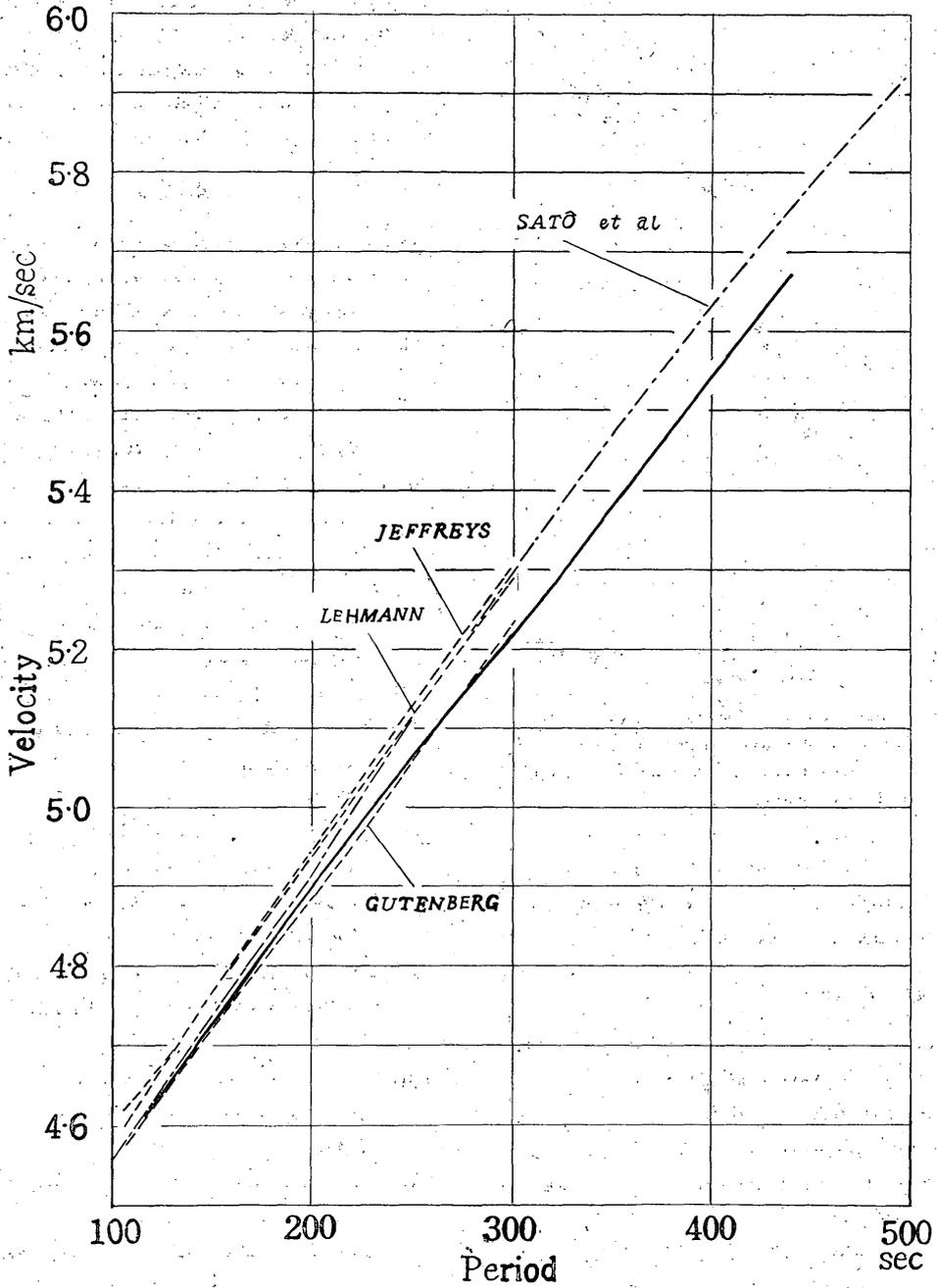


Fig. 15 Phase velocity data for mantle Love waves. The solid curve is the dispersion curve derived from the present study (Table 6). The chain curve indicates the theoretical data obtained by Sato, Landisman, and Ewing (1960), and dashed curves indicate the theoretical curves obtained by Takeuchi, Saito, and Kobayashi (1962).

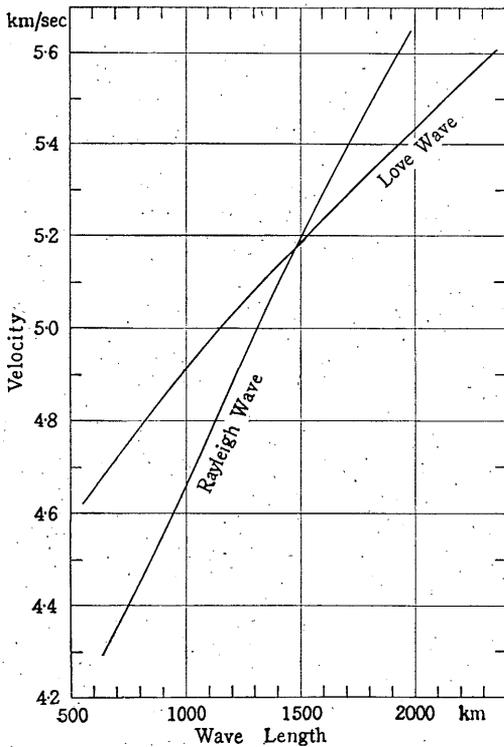


Fig. 16 Phase velocity dispersion curves as a function of wave length derived from the present paper, for mantle Rayleigh and Love waves.

Lehmann モデルに対する値である。これらのモデルのなかでは、Gutenberg モデルに対する値が、他のものに比べて比較的観測値と一致している。

#### § 4. む す び

前報告(長宗, 1963)で、1960年5月の Chile 地震で観測された mantle wave の群速度について述べたが、今回はこれと同じ資料から位相速度を求めた。

mantle Rayleigh wave については、周期約 150 秒から 350 秒までの位相速度が求められたが他の観測値と極めてよく一致している。

mantle Love wave では、周期約 120~440 秒の範囲の観測があつたが、約 200 秒以下の周期のものは、太平洋経路の含まれている割合の少ない、 $Q_4$  から求めたもので、もし  $Q_1$  あるいは  $Q_3$  から求めるとこの範囲では第 6 表の値より大きくなり、 $Q_2$  から求めるともつと小さな値になるであろう。

第 16 図は mantle Rayleigh wave および mantle

Love wave の位相速度分散曲線(ただし横軸は波長がとつてある)であるが、波長約 970~980 km 以上になると Rayleigh 波のほうが速度が大きくなっている。第 12 および 15 図で、他の観測値あるいは理論値と比較した。ただし、理論値は群速度の場合と同じ model について求められたものを引用してある。

#### 参 考 文 献

- Aki, K. : Crustal structure in Japan from the phase velocity of Rayleigh waves, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **39**, (1961), 249-277.
- Aki, K., and K. Kaminuma : Phase velocity of Love waves in Japan. (Part 1) Love waves from the Aleutian shock of March 9, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **41**, (1963), 243-259.
- Brune, J., J. Nafe, and L. Alsop : The polar phase shift of surface waves on a sphere, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **51**, (1961), 247-257.
- Brune, J., J. Nafe, and J. Oliver : A simplified method for the analysis and synthesis of dispersed wave trains, *J. Geophys. Res.*, **65**, (1960), 287-304.
- 神沼克伊, 安芸敬一 : レーレー波位相速度法による日本の地殻構造の研究, *地震*, **15**, (1962), 195-218.
- Nafe, J., and J. Brune : Observations of phase velocity for Rayleigh waves in the period range 100 to 400 seconds, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **50**, (1960), 429-439.
- 長宗留男 : 1960年5月の Chile 地震で観測された周期約 20~450 秒の表面波, *験震時報* **28**, (1963) 1-16
- Oliver, J. : A summary of observed seismic surface wave dispersion, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **52**, (1962), 81-86.
- Press, F. Determination of crustal structure from phase velocity of Rayleigh waves. Part 1, Southern California, *Bull. Geol. Soc. Am.*, **67**, (1956), 1647-1658. Part 2, San Francisco Bay region, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **47**, (1956), 87-88.
- Press, F. : Crustal structure in California-Nevada region, *J. Geophys. Res.*, **65**, (1960), 1039-1051.

- 佐藤良輔：分散曲線による地殻構造の決定について (11), 地震Ⅱ, 15. (1962), 195—218.
- Sato, Y. : Analysis of dispersed surface waves by means of Fourier transform 1, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 33, (1955), 33—48.
- Sato, Y. : Analysis of dispersed surface waves by means of Fourier transform 2, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 34, (1956), 9—18.
- Sato, Y. : Attenuation, dispersion, and the wave guide of the G wave, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 48, (1958), 231—251.
- Sato, Y., M. Landisman, and M. Ewing : Love waves in a heterogeneous spherical earth, 2. Theoretical phase and group velocities, *J. Geophys. Res.*, 65, (1960), 2399—2404.
- Takeuchi, H., T. Saito, and N. Kobayashi : Study of shear velocity distribution in the upper mantle by mantle Rayleigh and Love waves, *J. Geophys. Res.*, 67, (1962) 2831—2839
- 宇津徳治：電磁式地震計の倍率曲線 (1), 験震時報, 22 (1957), 5—18.