

# チリ津波の伝搬波面を作図すること\*

久本 壯一\*\*・村山 チエ子\*\*

550. 34

## Drawing the Wave Fronts of the CHILEAN TSUNAMI of May 23, 1960

S. Hisamoto and C. Murayama

(Seismological Section, J. M. A.)

We constructed a new map of stereographic projection, whose centre was (0°, 150°W).

On the map, we drew the wave fronts of the CHILEAN TSUNAMI of May 23, 1960, based on Huygens' principle.

### § 1. ま え が き

このたび「チリ地震津波調査報告」書が刊行されることになり、それに掲載すべく、津波伝搬図の作成を命ぜられた。

津波の伝搬については、これを長波と考へ、速度 $\sqrt{gh}$  ( $g$ : 重力の加速度,  $h$ : 海深) で進行するものとすればよく事実と一致することが、すでに知られている。実際には Huygens の原理によって地図上に波面を作図することにより伝搬状況を知り、走時をはかる。また津波エネルギーの各沿岸における分布については伝搬図上で波面に垂直な曲線、すなわち波線をかき、その収束、発散の様様によって知ることができる。

球面もその微小部分をとれば平面とみなし得るが、チリから日本に至る伝搬図というように太平洋全域にわたって作図せんとするときはもちろん平面とみなし得ないし、球面は展開面をもたないから地図を選ばねばならない。たとえばメルカトル・マツプでは球面上の円が地図上で円となってあらわれない、すなわち円が円に対応しないから、Huygens の原理を適用するに非常に困難である。したがって地図を選ぶには、円が円に対応し、かつ等角の保存される projection が望ましい。

このことについて、かつて、stereographic projection の有効なることを示した\*\*\*が、そのとき用いたのは、投

影面は北極において接し、視点を南極に置いて北半球地図を得、また、逆に、南極に接する投影面上に北極から投影して得た南半球地図を用いた。すなわち

- (1) 太平洋全域の様相を見るためには、南北に分かれた別々の2枚の図を必要とし、全体を見おろすに不便である。
- (2) 作図作業としては赤道付近で転写しなおさねばならない。

これらの欠点を補うために、次のような方法を試みたので報告する。

### § 2. 投 影 法

投影法は同じく stereographic projection である。一般に stereographic projection とは、地球面上任意の点 S に視点を置き、これを極とする大円面上に、視点と反対側の半球面を投影するものをいうのである (岩波数学辞典) が、Fig. 1 で、T において接する接平面上に S から投影するものと考えてもよい。

この projection では、投影された経緯線上の各点の座標 (座標の原点は投影の中心) は

$$x = \frac{R \sin \lambda \cos \varphi}{1 + \sin \beta \sin \varphi + \cos \beta \cos \varphi \cos \lambda}$$
$$y = \frac{R (\cos \beta \sin \varphi - \sin \beta \cos \varphi \cos \lambda)}{1 + \sin \beta \sin \varphi + \cos \beta \cos \varphi \cos \lambda}$$

で与えられる。ただし、 $\varphi$  は緯度、 $\lambda$  は投影の中心からの経度差、 $\beta$  は投影の中心 (座標の原点) の緯度、 $R$  は地球の半径 (Fig. 1 で接平面を考える場合は直径) である。

太平洋全域を見おろすことができる投影図を得るため

\* Received May 15, 1961.

\*\* 気象庁地震課

\*\*\* T. Hirono and S. Hisamoto: A Method of Drawing the Wave Fronts of Tsunami on a Chart. Geophysical Magazine 23 (1952), No. 4, 399~406.

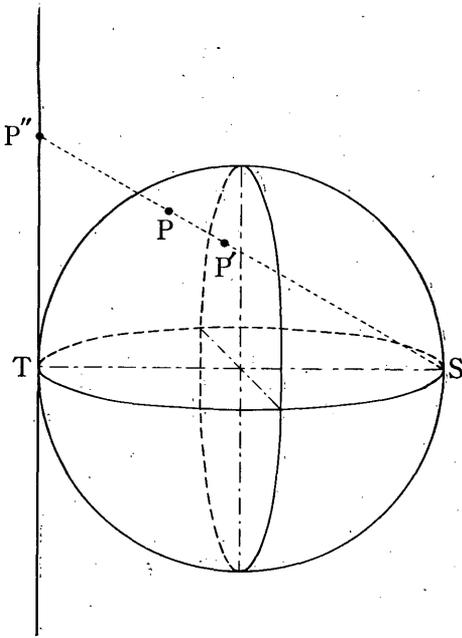


Fig. 1 Stereographic projection

には、視点を  $0^\circ$  (赤道上),  $30^\circ\text{E}$  付近に置くのが適當のようである。

Fig. 2 は  $(0^\circ, 30^\circ\text{E})$  に視点を置いたときのものである。

Stereographic projection は等角写像であつて、経緯線の形状は円弧であらわされる。

こうして作られた地図上に Huygens の原理を適用し

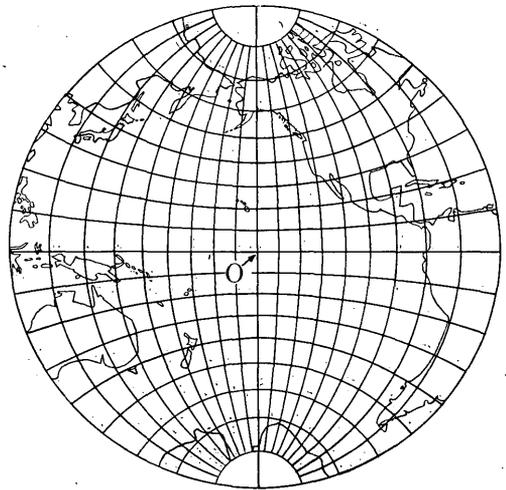


Fig. 2 Stereographic map, whose centre is  $(0^\circ, 150^\circ\text{W})$

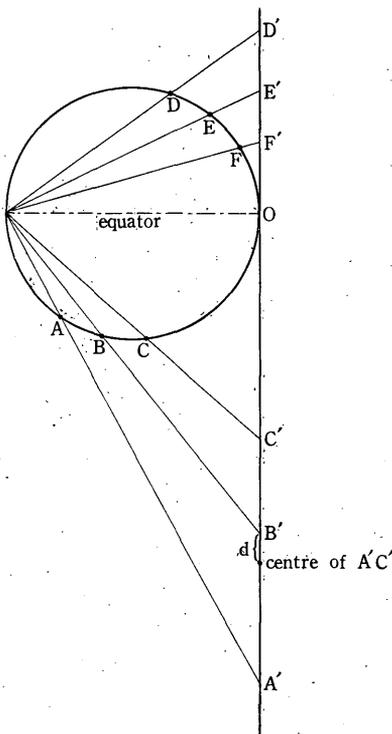


Fig. 3 Stereographic projection

て円をかいてゆくとき、その円 (elementary circle) の中心はすべて球面上の円の中心 B (Fig. 3) の投影点  $B'$  から  $d$  だけ座標の原点 O に対して外方へズレる。Fig. 3 において  $ABC$  は球面上の円 (中心 B),  $A'B'C'$  はその投影円である。

また、elementary circle の半径は、たとえ球面上で等しい半径であっても、地図上では等しくない。Fig. 3 において、球面上では  $AC = DF$  であっても、地図上では  $A'C' \neq D'F'$ 。そして球面上での半径が等しいときこの地図上の半径  $r$  は O からの距離だけによる。したがって、球面上の一定半径の円は、地図上では、O を中心とする同一円周上において等しい半径となり、O からの

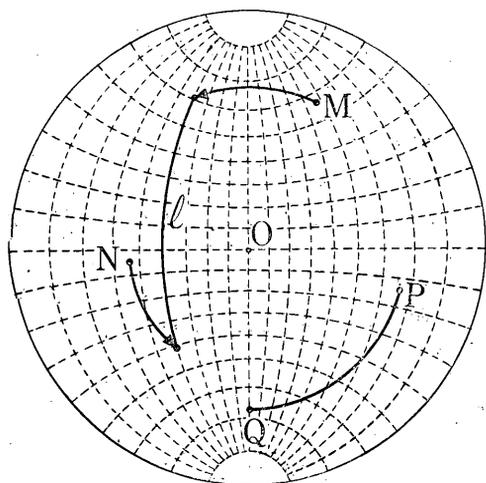


Fig. 4 On the stereographic map, distance from the centre to one point, and distance from one point to another can be measured by rotating the map.  $\overline{OP} = \overline{OQ}$ .  $MN = l$ ,  $l$  being on one of the meridian.

距たりが大きくなるにつれて地図上の半径も大きくなる。すなわち、Fig. 4において、地図上の任意の点Pにおける  $r$  の値は  $Q$  における値に等しい。故にOを通る子午線上における  $r$  の値を算出しておけばよい。地球の直径を1 (Fig. 1で、接平面ではなく大円面を考えるときは地球の半径を1)、球面上の elementary circleの半径を  $\Delta$ 、Oからの距たり(すなわちOを通る子午線上の緯度)を  $\varphi$  とすれば、 $r$ 、 $d$  は次式で与へられる。

$$r = \frac{\sin \Delta}{\cos \varphi + \cos \Delta},$$

$$d = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi + \cos \Delta} - \frac{\sin \varphi}{1 + \cos \varphi}.$$

30分ごとの波面を作図するときの  $r$ 、 $d$  の値を Table 1に示す。(地球の直径を1としたときの値である)。

なお、この地図を用いるときは、任意の2点間の震央距離を、次のようにしてただちに求めることができる。

すなわち、この地図上に透明な紙(または板)を置いてその上に2点をプロットし、座標の原点を軸としてこの

Table 1

		$r$									
$\varphi$	$h$	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
m	200	0.00626	0.00630	0.00645	0.00670	0.00708	0.00762	0.00834	0.00932	0.01066	0.01251
	1000	0.01396	0.01407	0.01440	0.01497	0.01581	0.01700	0.01862	0.02081	0.02380	0.02793
	2000	0.01978	0.01993	0.02040	0.02120	0.02240	0.02409	0.02638	0.02949	0.03372	0.03958
	3000	0.02430	0.02448	0.02505	0.02604	0.02751	0.02958	0.03240	0.03622	0.04142	0.04862
	4000	0.02793	0.02815	0.02880	0.02994	0.03164	0.03401	0.03725	0.04164	0.04762	0.05591
	5000	0.03128	0.03152	0.03225	0.03353	0.03543	0.03809	0.04172	0.04664	0.05334	0.06262
	6000	0.03434	0.03460	0.03541	0.03681	0.03890	0.04182	0.04581	0.05121	0.05857	0.06876
	7000	0.03696	0.03724	0.03811	0.03962	0.04186	0.04501	0.04930	0.05511	0.06304	0.07402
	8000	0.03958	0.03989	0.04081	0.04243	0.04483	0.04821	0.05280	0.05903	0.06753	0.07929
	9000	0.04206	0.04238	0.04337	0.04508	0.04764	0.05122	0.05611	0.06273	0.07176	0.08427
	10000	0.04424	0.04458	0.04562	0.04742	0.05012	0.05388	0.05903	0.06600	0.07550	0.08866
		$d$									
$\varphi$	$h$	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
m	200	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001	0.00002	0.00003	0.00003	0.00004	0.00006	0.00008
	1000	0.00000	0.00002	0.00003	0.00005	0.00008	0.00012	0.00015	0.00020	0.00028	0.00039
	2000	0.00000	0.00003	0.00007	0.00011	0.00016	0.00023	0.00030	0.00040	0.00056	0.00078
	3000	0.00000	0.00005	0.00010	0.00017	0.00025	0.00034	0.00045	0.00061	0.00084	0.00118
	4000	0.00000	0.00007	0.00014	0.00022	0.00032	0.00045	0.00060	0.00081	0.00112	0.00156
	5000	0.00000	0.00009	0.00017	0.00028	0.00040	0.00056	0.00075	0.00101	0.00140	0.00195
	6000	0.00000	0.00010	0.00021	0.00034	0.00049	0.00068	0.00091	0.00123	0.00169	0.00237
	7000	0.00000	0.00012	0.00025	0.00039	0.00057	0.00078	0.00105	0.00142	0.00196	0.00274
	8000	0.00000	0.00014	0.00028	0.00045	0.00065	0.00089	0.00120	0.00163	0.00224	0.00314
	9000	0.00000	0.00016	0.00032	0.00051	0.00073	0.00101	0.00136	0.00184	0.00253	0.00354
	10000	0.00000	0.00017	0.00035	0.00056	0.00081	0.00112	0.00151	0.00204	0.00281	0.00393

$h$ =depth of the ocean

紙(または板)を回転させ、2点がともにいずれかの経線上(同一子午線上)にのるようにする。2点間の弧を stereograph の目盛でよみとれば、それが2点間の震央距離を与える。Fig. 4において、任意の2点 M, N 間の震央距離は  $l$  で与えられる。(後述の、波源からの等距離線作図にはこの方法をも併用した)。

§ 3. 作 図

- (イ)上記の方法で、地球の直径を 60 cm としたときの地図を作り、30分ごとの波面を作図した。(Fig. 5 の太実線)
- (ロ)水深は水路部海図 No. 806, 808, 813, 814, 830, 838 および 6080 によった。
- (ハ)波源は  $41^{\circ}\text{S}$ .  $73\frac{1}{2}^{\circ}\text{W}$ \* の point source と仮定、この点を中心とし、平均海深を2500mとみなしたときの幾何学的円をもって最初の30分目の波面と仮定した。全太平洋の水をゆり動かす源は point source

ではないだろうから、これはかなり大たんな仮定である。

- (ニ)波源における 36 方位線 ( $10^{\circ}$  ごと)を波面に垂直に延長、波線を引いてみた。(Fig. 5 の太点線)
- (ホ)チリ地震の対震央はゴビ砂漠付近である。波線と対比するために、震央と対震央を結ぶ  $10^{\circ}$  ごとの大円を記入した。(Fig. 5 の細鎖線)
- (ヘ)また、波面の進行状態と対比するため、波源からの 1000 km ごと等距離線を記入した (Fig. 5 の細点線)

§ 4. 走 時

実測走時と作図走時との比較を Table 2 および Fig. 6 に示す。これはさきに書いた「チリ地震津波調査報告書」に掲載したのと同じものである(実測値は脚注および上記「報告」書による)。Fig. 6 の記号の意味は次のとおりである。

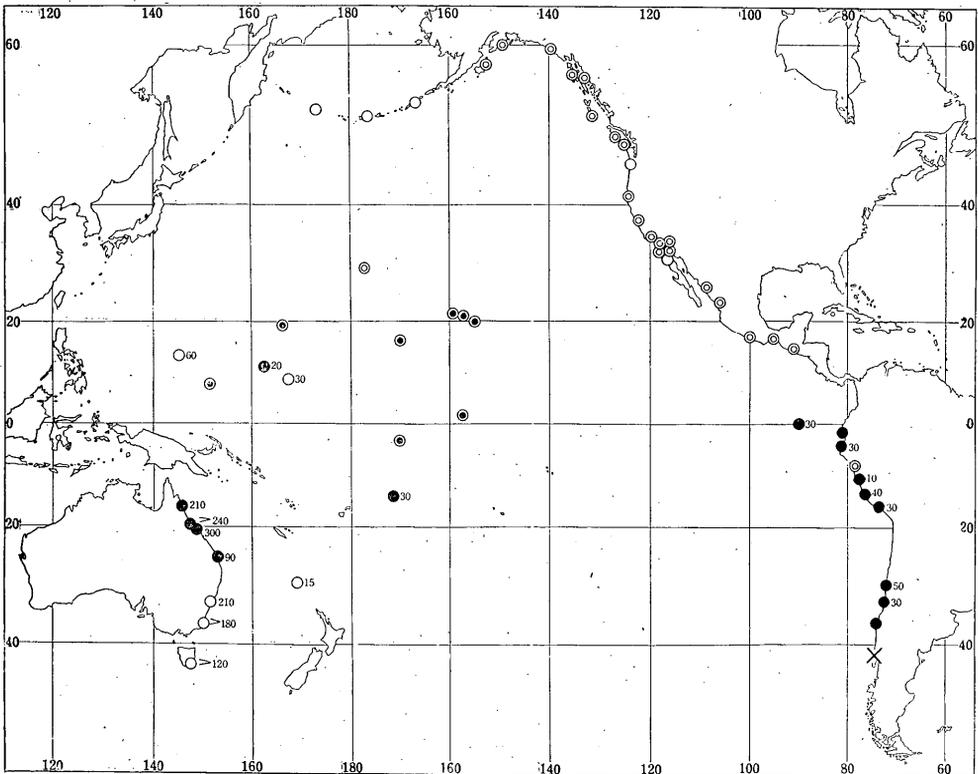


Fig. 6 Comparison between the travel times obtained from observations and by the present method.

\* U. S. C. G. S. : THE TSUNAMI OF MAY 22, 1960 AS TIDE STATIONS.....PRELIMINARY REPORT による。

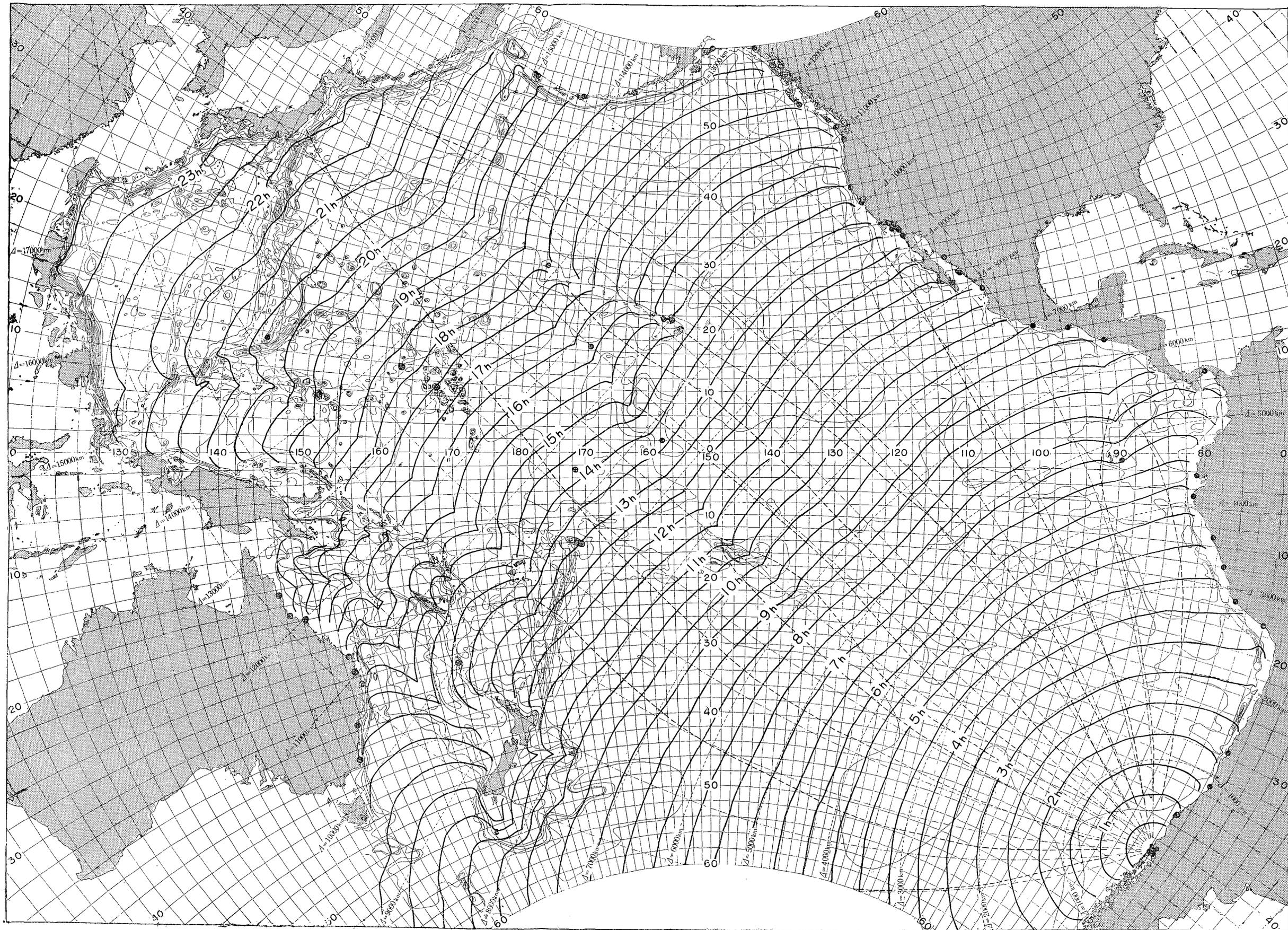


Fig. 5

Table 2

	概 要	観 測 点	実測走時	比 較
太 平 洋 諸 島	太平洋全域を含むやうな地図の縮尺では、大陸沿岸（環太平洋岸）の、陸に極く接近したところまで正確に作図を遂行することは困難である。これに反し、太平洋上（中央部）では、このような問題は少なく、ために太平洋諸島に至る作図走時は実測走時と非常によく一致している。その goodness は見事である	Hilo	h m 14 47	ほとんど完全に一致
		Kahului	15 07	
		Mokuoloe	15 29	
		Honolulu	15 22	
		Nawiliwile	15 29	
		Johnston	16 19	
		Christmas	13 52	
		Canton	14 13	
		Wake	18 22	
		Truk	19 25	
		Midway	18 19	
Kwajalein	18 09	作図の方が30分くらい早い		
Guam	21 29	作図の方が1時間くらい早い		
Pago Pago	12 22	作図の方が30分くらいおそい		
Eniwetok	17 52	作図の方が20分くらいおそい		
南 米 西 岸	実際にはかなりの広がり (area) をもつ波源を point source と仮定したためか、この地区は一般に実測走時に比し、作図走時の方が遅い	Talcahuano	00 49	作図の方が僅かに遅い
		Valpariso	01 07	作図の方が30分くらい遅い
		Coquimbo	01 25	作図の方が50分くらい遅い
		Matarani	03 25	作図の方が30分くらい遅い
		San Juan	03 29	作図の方が40分くらい遅い
		La Punta	04 34	作図の方が10分くらい遅い
		Chimbote	05 27	ほとんど一致
		Talara	05 22	作図の方が30分くらい遅い
		La Libertad	06 09	作図の方が僅かに遅い
San Cristobal	06 29	作図の方が30分くらい遅い		
中 米 西 岸	Panama 湾内、Gulf of California 内における作図は困難である。	Naos Island	09 29	作図困難
		San Jose	09 24	ほとんど一致
		Salina Cruz	09 45	ほとんど一致
		Acapulco	09 49	ほとんど一致
		Mazatlan	11 46	ほとんど一致
		Topolobampo	12 51	作図困難
		Guaymas	13 05	
		La Paz	12 45	ほとんど一致
Ensenada	13 37			
米 国 西 岸 (コ ン セ プ シ ョ ン 岬 以 南)	この地区は沖に S. Cruz 島、S. Rosa 島、S. Catarina 島、S. Clemente 島等が散在し、これらの島の付近には 100 m 以浅のところもあって、沿岸まで正確な作図を遂行することは困難。また、観測点の最も密集した地区で、San Diego と La Jolla は非常に近接した2点であるが、実測に20分の差が報ぜられている。実測走時そのものにこの程度の差異あるものとすれば、だいたい一致しているとみてよい。	San Diego	14 01	作図の方が早い
		La Jolla	13 39	ほとんど一致
		Wilson Cove	13 43	
		Alamitos Bay	14 23	
		Long Beach	14 16	ほとんど一致
		Terminal Island	14 19	
		San Pedro	14 07	
		Los Angeles	14 07	
		Santa Monica	14 11	
		Port Hueneme	14 04	

	概 要	観 測 点	実測走時	比 較
西米 岸国 以シコ 北 ヨ ン セ 岬 )	この地区は海岸線から数10 km 沖まで非常に浅い (200 m 以浅) ところがひろがっている。このため走時は沿岸近くで急に増大するものと思われる。	San Francisco	h m 15 02	右欄 (概要) を考慮に入れればだいたい一致していると見てよい。 右欄を考慮に入れても、なお、作図の方がわずかに早い。
		Crescent City	15 29	
		Neah Bay	17 14	
		Astoria	17 29	
カナ ダ 西 岸	Tofino (Vancouver 島) はかなり沖まで非常に浅く (数10km沖まで200m以浅)、これに反し Queen Charlotte 島南端沖は急に深くなっている。	Tofino	17 26	右欄を考慮に入れればだいたい一致しているとみてよい。 ほとんど一致
		Cape St. James	17 05	
アラ スカ 南 岸	この地区は海岸線から数10 km ~ 200 km ぐらいまで非常に浅いところが広がっており、かなり沖合にまで50m以浅、場所によっては20m以浅のところがある。いま、仮に、この部分の平均海深を50m とみなせば100km進むのに 1 $\frac{1}{4}$ 時間かかるから、これを考慮に入れれば実測とはほぼ一致しているとみてよいのではないか。	Skagway	19 49	作図不能 右欄を考慮に入れれば、ほぼ一致しているとみてよい。すなわち18 h (作図線) + 1 $\frac{1}{4}$ h = 19 $\frac{1}{4}$ h (実測)
		Sitka	18 22	
		Yakutat	19 07	
		Seward	19 29	
		Womens Bay	19 14	
ヤ リ 列 島 )	島の近くはごく浅く、その沖はすぐAleutian 海溝で、この海溝に沿う部分の作図にはむづかしい点もあるが、作図の方が実測よりやや早いと見るべきであろう。	Unalaska	19 39	作図の方がやや早い。
		Sweeper Cove	19 29	
		Massacre Bay(Attu)	20 19	
豪 州 東 岸	この地区は実測値そのものに不信の点があり、大陸からかなり離れた Norfolk 島でだいたい一致しているほか、いずれも著しく違い違っている。 実測値も位置的に早遅が系統づけられていないが北部では作図の方がかなり遅く、南部ではかなり早い。	Cairns	15 29	作図の方が3時間半くらい遅い 作図の方が4時間半以上遅い 作図の方が5時間くらい遅い 作図の方が1時間半くらい遅い } 実測値に疑問あり? 作図の方が15分くらい早い。 作図の方が3時間半くらい早い 作図の方が3時間以上早い。 作図の方が2時間以上早い。
		Townsville	13 59	
		Fort Denison	13 34	
		Urangen	14 14	
		Brisbane	22 29	
		Cairncross Dock	22 19	
		Norfolk Island	14 07	
		New Castle	17 54	
		Eden	17 29	
Hobert	16 04			
日 本	わが国各地に至る実測走時は九州において最もおそく、つづいて四国地方が遅く、渡島半島方面がその次で、最も早いのは伊豆諸島、房総半島、北海道東端部である。 その傾向は作図波面によくあらわれている。 最も早い地方の実測走時は22 h 20 m 台であり、作図走時はほとんど完全に一致していると見てよく、他の各地もだいたいにおいてほとんど一致しているとみてよいのではないだろうか。			

- ◎ : 完全に一致。 ⊙ : ほとんど一致。 ○ : 作図の方がわずかに早い。 ● : 作図の方がわずかに遅い。
- <sub>30</sub> : 作図の方が30分くらい早い。 ●<sub>20</sub> : 作図の方が20分くらい遅い。

§ 5. む す び

チリに発生した津波が地球の反対側の日本にまで多大の影響を及ぼした理由としては、地震の magnitude, その津波の発生機構等いろいろあるであろう。しかし震央から最も遠い地点は対震央であって、波源から広がって

行った津波はまた対震央に向って収束して行くことになる。その対震央 (ゴビ砂漠) の直前に日本が位置したこと、および Hawaii から Midway に至る浅部 (Hawaiian Ridge) がいわゆる “レンズ作用” として極めて強い収束力を発揮したこともその大きな要素と思われる。Fig. 5 はそれを雄弁に物語っている。

終りに、上記ステレオ地図作成に関し、地震課三浦補佐官からいろいろ御懇切なる御指導をいただき、また野口技官に大変御世話になった。厚く感謝の意を表す。