

23. 近地地震初動の到来方向とみかけの速度

地震研究所 {宮村 攝三
辻 浦 賢

(昭和33年9月16日, 12月23日発表——昭和34年3月31日受理)

辺長数百米の3点観測により、筑波山支所附近に到達する近地地震波動の解析をこころみ、50あまりの地震について、初動の到来方向とみかけの速度(表面速度)とを決定した。これにより推定される筑波を中心とする関東地方の震央分布は長期の通常の観測網によりえられた地震活動状況と大体一致している。また解析された地震の震源距離の代用としてとつた初期微動時間と初動のみかけの速度との関係は、爆破地震学によりえられたこの地方の地下速度分布とほぼ矛盾しない。なお、この3点観測による到来方向とみかけの速度決定の誤差を吟味し、あわせてこの方法の将来の発展についても論じた。

1. 序 言

かぎられた範囲内の地点におかれた多数の地震計の記録を処理して地震波動の性質についての各種の情報をひきだす方法は、ひろい地域に分布する独立した観測所からの計測資料にもとづく方法にくらべて、比較的小区域の地下の状態をよりくわしくしらべることができ、あるいはまた記録処理の迅速化を發展させる可能性がおおきいなどの点に特徴がある。さらにまた独立した多数の観測所を高度に精密化した水準に整備するのにくらべれば多点集中観測をおこなうる高水準の観測所の小数を維持することは種々の点でより容易である。独立観測所において最初の験測報告をだすのに、たとえ成分、感度、周波数特性等のちがういくつかの地震計の記録を対比しつつ位相の同定をおこなうにしても、その観測所附近の多点観測があつて、局所的伝播の性質が決定できているならば、震央からつたわつてきたただしい位相と、散乱的な妨害波とを区別することができ、その験測はより信頼性をますことはいうまでもない。

このような見地から、すでに地震学においても地下探査法における発展にならつて、このような多点観測法が次第に採用されてきている。ソビエトでおこなわれている対比法地震観測 КМИЗ¹⁾はそのもつともよい例であろう。

しかし、このような方法の原型はすでにふるく震災予防調査会の事業のなかで「電線を

1) Г. А. Гамбургев, ДАН. 87, No. 1, 1952. ДАН. 92, No. 4, 1953.
Г. А. Гамбургев и Е. И. Гальперин, Изв. АН СССР, сер. геофиз., No. 1, No. 2, 1954.
(КМИЗ は Корреляционные Методы Изучения Землетрясений の略)

使用して地震波伝達速度を測定するの件」²⁾として関谷清景、大森房吉により立案され、今村明恒³⁾により、本郷、一ツ橋、麻布、小松川の4点観測として実施されたものにはじまっている。

そのうち、この3点観測法は土地の脈動の研究において岸上冬彦⁴⁾により採用され、以後その方面ではかなりさかんにもちいられていたが、自然地震の観測では、有効な観測のための、観測点距離の増大の困難などによりあまり発展しなかつた。1948年にいたり浅田敏、鈴木次郎⁵⁾は電磁地震計による微小地震の研究においてこの方法を取りあげ、有意義な観測をおこなつた。これ以後、わがくには爆破地震学のさかんになるのにつれて発達した電氣的地震計の普及にともない、この3点観測法がいろいろの機会にこころみられるようになった⁶⁾。

これら自然地震における3点観測法は記録装置として普通電磁オッシュロググラフの長時間記録カメラをもちいたので、10~30 cm/minの記録紙速度で1~4時間の記録ができる程度であつたから、一般に地震活動がかなり活潑なばあいのみおこなわれたし、そのばあいにも位相時間差の決定精度が1/500秒に達することは困難であつたから、200m前後の点間距離では精度の点であり充分なものとはいへなかつた。

われわれの開発した超短波多重遠隔記録地震計 RTS-II⁷⁾においては、周波数変調された3回線の副搬送波が1軌道の磁気テープに記録できるので、2軌道の磁気録音機で2台の RTS-II をもちい6回線の記録が可能であり、磁気録音機に無終端まきわくをもちいるならば、自然地震の観測において、磁気テープによる高速度の多点観測をおこなうことができ、その再生によつてきわめて精度のたかい験測をなしうるのである。

この方法により、三浦半島においてえられた記録を相関計算機で処理した結果は安芸敬一、その他⁷⁾により発表されており、ひきつづいて同種の研究をおこなう目的をもつて、筑波山支所附近において6点観測をおこない、RTS-IIによる近地地震波動の磁気テープ記録をえた。相関的処理については安芸敬一、辻浦賢⁸⁾により別に報告されるので、ここでは初動の時間差による普通の3点観測法的処理による結果だけをまとめ、若干の議論をつけくわえて報告する。

2) 大森房吉 震災予防調査会報告 **21** (1898), 21-30.

今村明恒 震災予防調査会報告 **21** (1898), 31-43. 同前, **32** (1900), 121-126.

3) F. KISHINOUE, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **13** (1935), 146-154.

4) H. TSUYA, *The Fukui Earthquake of June 28, 1948*. Chapter III, Section 4, 58-64, 1950. (Studies of T. ASADA and Z. SUZUKI compiled by S. OMOTE)

5) T. ASADA and Z. SUZUKI, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **28** (1950), 415-420.

S. MIYAMURA and M. TSUJIURA, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **37** (1959), 347-358.

松本利松・田望・浅田 敏 「高倍率電磁式微動計による十勝沖地震の余震観測結果について」地震研究所第 290 回談話会 (1952, VI, 17).

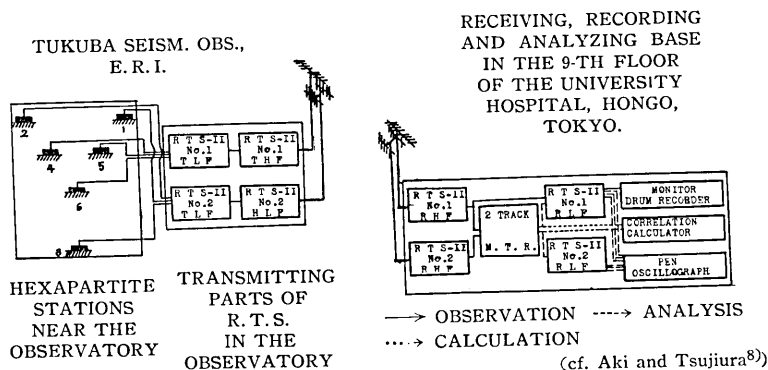
6) S. MIYAMURA and M. TSUJIURA, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **35** (1957) 381-394. *ibid.*, **37** (1959), 193-206.

7) K. AKI, M. TSUJIURA, M. HORI and K. GOTO, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **36** (1958), 71-98.

8) K. AKI and M. TSUJIURA, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **37** (1959), 207-232.

2. 観 測

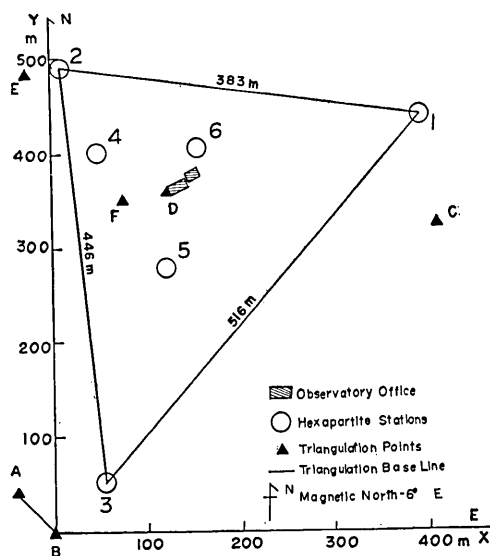
第1図にしめすような構成で、6台の上下動地震計の出力を、RTS-IIの超短波伝送路を通じて筑波より本郷におくり、受信端において、2軌道の無終端磁気テープにおさめ、別に説明する時間装置により、適当地震動が記録されたとき停止させ、適宜テープをとりかえ、解析のために保存する。テープの停止時刻は時計によつてしめされるが、モニー



第1図 観測方法概要
Scheme of observation.

ターとして1成分はインクがき電流計で大型記録円筒に分刻時とともに連続記録される。

観測点 は筑波山支所ののる花崗岩の新鮮な露出をえらび、第2図に示すような1~5の5点に、第3図にみるようなコンクリートの小箱を固定設置した。第2図にしめた位置は技術部岡田惇教官により三角測量でもとめられたものである。坐標数値は Table 1のごとくであり、第2図に記入した辺長は斜面上のながさである。第6点は支所の地震計室である。各観測点より送信端局のある支所事務室までは遮蔽ビニール線を架設した。



第2図 観測点位置
Map of seismometer location.



第3図 地震計収容箱外観

Small concrete seismometer house, firmly built on a fresh granite base. No. 3 station of the hexapartite stations near the Tukuba Seismological Observatory, E. R. I.

Table 1. Relative coordinates of the hexapartite stations near the Tukuba Seismological Observatory, E.R.I. (Triangulation survey was executed by A. OKADA, Techn. Div., E.R.I.)

Station No.	$X(+E)$	$Y(+N)$	h (above sea level)
1	392.58 ^m	439.59 ^m	301.33 ^m
2	12.79	492.03	299.11
3	57.30	50.97	250.25
4	51.92	402.82	287.37
5	125.98	281.77	274.04
6	155.10	403.60	292.50

地震計 は RTS-II 用に製作した上下成分動線輪型動電換振器であり、自己周期 3.0 c/s, 制振分枝抵抗 60 kilo-ohms としてもちい、出力は約 3 volts/kine である。

地震波送受信装置 RTS-II は F9 電波, 周波数 417.7 Mc/s, 送信出力 20 watts, 端局として副搬送波 3 回線 800, 2670, 8900 c/s をふくみ, 超低周波地震動入力これを周波数変調する FM-FM 方式である。この装置を 2 台 (ただし電波の偏波面は水平垂直たがい直交する) を利用し, 6 成分の観測をおこなう。装置の詳細についてはすでに発表した報告を参照されたい⁶⁾。

記録方法 は受信端で検波出力 (副搬送波混合) を商用の 2 軌道テープ・レコーダー (Stereocorder, Sony Co., Type ST-1) に, 無終端まきわくを附加して運転し, 常時これに記録しては, 数分後に消去する。テープ速度は 7.5 inches/sec. (19 cm/sec.) である。停止用時間装置は安芸敬一の製作したもので, 0.5 volt 以上の振動入力 が 6 sec 以上つづく と動作して, テープレコーダーのまきわくを停止する。このとき電気時計の電源がきかれて, 時計はその時刻をしめして停止する。モニターとして普通の観測を 2~5 mm/sec. の記録紙速度で大型円筒によりインクがきでおこなう。

解析 は無終端磁気テープにおさめた地震記録を RTS-II 受信低周波部の沓波回路検波回路を利用して再生し随時おこないうる。スペクトク的研究のための相関計算もここで相関器に導入しておこなうが, 位相比対法のためには, インキがきオッシュログラフに種々の記録紙速度 (30 mm/sec., 50 mm/sec.) で再生記録をつくり, 秒刻時を併記せしめ, ペンさきのずれを補正したうえで, 対応位相の時刻差をよみとる。

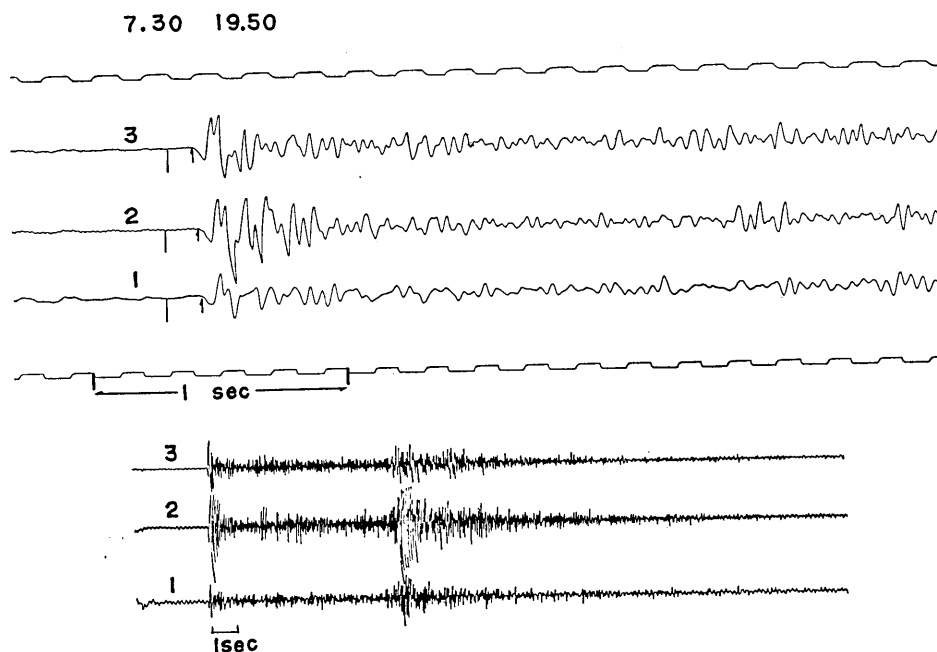
観測 準備 としてまず 1958 年 4 月筑波山支所附近を踏査して, 上記観測点を選定し, 5 月に観測台を設置した。7 月に RTS-II 2 台の調整をおえて, 送信部を筑波山支所廊下に設置, 観測点までの架線工事をおこなった。受信室は本郷の東大附属病院新館 9 階の一部を借用し, その塔上を利用して地上 35m, 海拔約 50m ちかい空中線をえたので, きわ

めて良好な受信状況を保持しえた。

観測実施 は第1期—Ⅶ月22日～Ⅷ月30日，第2期—Ⅹ月1日～Ⅹ月21日，第3期—Ⅺ月10日～Ⅺ月17日で，期間中主として昼間は受信を中止して，解析のために装置をもちい，夜間のみ観測した。ときには昼間観測したばあいもあり，そのとき，タイマーによらず，手でまきわくを停止し，テープのとりかえをしたこともある。

各期間中とも筑波からは連続に送信していたので，本観測のために特に支所員をわざわざすることはなかつた。第2期以後は1, 2, 3の3点のみの記録をおこなつた。

観測結果 第4図に磁気記録の大小の記録紙速度での再生記録の一例をしめす。1, 2, 3点の初動(矢印)を，ペンさきのずれをしめす位置線からはかつて，時刻差をもとめることになる。



第4図 地震記象の实例(記録紙速度 10cm/sec., 1cm/sec.) No. 5.
Example of seismogram (with paper speed of 10cm/sec. and 1cm/sec.)
(Earthquake No. 5)

このようにした磁気テープ記録の再生による1, 2, 3の3点の初動またはそれにつづく対応波動の到達時刻差 t' , t'' ，そのよみとりの良否，それからもとめられた波動到来方向の方位 θ ，およびみかけの速度 v の数値は Table 2 にしめす。Table 2 には次節の議論にもとづく到来方向とみかけの速度の誤差も記入してある。

第5～9図には，再生記録とそれからえられた初動部対応波動の到来方向およびみかけの速度(矢印の方向とながさ)をならべたものを若干の地震についてかかげた。

Table 2. Results of Observations.

Earthquake			Arrival order of stations	Difference of onset		Quality of onset	Direction of approach		Apparent velocity		<i>S-P</i> at Tukuba	Published Data by J. M. A.
No.	Date	Time		<i>t'</i>	<i>t''</i>		$\Theta \pm \delta\Theta$	$v \pm \delta v$				
1	VII 22	15.43 ^{h m}	3-1-2	ms 58	ms 58	a	184 ± 7°	7.6 ± 0.7	7.6	(Kakioka)**		
2	VII 29	02.30	2-1-3	32	63	b	334 ± 7	6.7 ± 1.6	6.7			
3	VII 29	13.53	2-1-3	58 48	58 58	a a	313 ± 3 319 ± 4	5.4 ± 0.4 6.1 ± 0.5	9.7	(On the border of Gumma and Totigi		
4	VII 30	00.05	3-2-1	55	65	a	198 ± 7	7.2 ± 0.5	8.6	Near (Tokyo)		
5	VII 30	19.50	3-2-1	26	39	a	206 ± 1	12.7 ± 2.1	7.2			
6	VIII 6	23.22	3-2-1	13	36	a	249 ± 4	25.8 ± 3.1	9.0	(Kakioka)		
7	VIII 7	14.43	1-3-2	46	50	a	89 ± 5	7.6 ± 0.9	23.0	Off E. of Kwanto		
8	VIII 8	04.35	3-2-1	43	60	b	210 ± 7	8.4 ± 1.0	7.9	Kwanto Region		
9	VIII 9	10.37	3-2-1	35	54	a	217 ± 8	9.5 ± 1.5	6.2	(Utunomiya)		
10	VIII 9	13.02	3-2-1	63 63	63 69	b b	188 ± 6 193 ± 5	6.8 ± 1.8 6.7 ± 0.5	16.3	Near Tomisaki		
11	VIII 15	18.49	3-2-1	56	64	b	197 ± 11	7.4 ± 0.9	22.5	Off Bôso Peninsula		
12	VIII 15	21.35	3-2-1	46 48 44	66 66 70	b b b	211 ± 12 210 ± 11 218 ± 11	7.8 ± 1.5 7.7 ± 1.7 7.5 ± 1.6	16.5	(Matusiro)		
13	VIII 18	15.34	3-1-2	52	59	a	181 ± 6	7.5 ± 0.3		{Central Part of Tiba Pref. 35.5N, 140.3E, <i>h</i> =80 KM		
14	VIII 18	19.15	1-2-3	53	72	b	69 ± 9	6.3 ± 0.8	9.0			
15	VIII 22	07.09	1-3-2	27	39	b	100 ± 11	9.8 ± 3.6	9.8	Ibaraki Pref.		
16	VIII 24	04.55	3-2-1	27	63	b	236 ± 10	7.9 ± 1.8	9.2	Kwanto Region		
17	VIII 24	14.40	3-2-1	20	23	a	197 ± 22	20.0 ± 43.	7.9			
18	VIII 25	19.38	1-2-3	19	56	b	35 ± 12	9.2 ± 4.5	13.1			
19	VIII 26	14.00	1-3-2	40	53	a	97 ± 5	7.2 ± 1.1	16.6	{Off E. of Ibaraki Pref. 36.3N, 142.1E, <i>h</i> =30 KM		
20	VIII 28	13.06	3-2-1	30	54	a	223 ± 9	9.8 ± 2.0	5.3	{SW Part of Ibaraki Pref. 36.05N, 139.95E, <i>h</i> =50 KM		
21	VIII 29	04.35	1-2-3	13	16	a	75 ± 22	27.0 ± 7.6	8.7			
22	VIII 29	22.03	3-1-2	53	70	a	172 ± 5	6.4 ± 0.7	5.3	S. Part of Kwanto		
23	X 1	13.40	2-3-1	49 51 51 47 36	50 45 51 43 38	a a a a a	310 ± 4 313 ± 5 310 ± 4 313 ± 5 309 ± 4	6.5 ± 1.6 6.9 ± 0.6 6.4 ± 0.5 7.2 ± 0.7 8.8 ± 2.2	6.2			
24	X 2	19.57	1-2-3	22 21 21	48 45 49	a a a	46 ± 9 45 ± 8 42 ± 8	10.7 ± 2.6 11.4 ± 2.7 10.7 ± 2.7	13.5	{SE. Part of Hukushima Pref. 37.1N, 140.7E, <i>h</i> =90 KM		
25	X 3	10.50	1-3-2	35	38	a	88 ± 7	10.1 ± 1.7	9.0			
26	X 4	23.17	3-1-2	44	48	b	189 ± 16	9.3 ± 1.9	36.0	{NE. Off Hatizyo Is. 33.4N, 140.5E, <i>h</i> =160 KM		
27	X 6	08.29	3-1-2	27	30	a	185 ± 10	15.0 ± 1.9	7.3	Kwanto Region		
28	X 7	20.00	3-1-2	52	55	b	189 ± 5	8.0 ± 0.9	8.4	{SW. Part of Ibaraki Pref.		

(to be continued)

(continued)

Earthquake			Arrival order of stations	Difference of onset		Quality of onset	Direction of approach		Apparent velocity		S-P at Tukuba	Published Data by J. M. A.
No.	Date	Time		t'	t''		$\Theta \pm \delta\Theta$	$v \pm \delta v$				
29	X 11	04.49 ^{h m}	3-1-2	41 ^{ms}	57 ^{ms}	a	170° ± 8°	8.0 ± 1.4 ^{km/s}	9.2 ^s	S. Part of Kwanto		
30	X 11	16.17	1-2-3	15	43	b	36 ± 15	12.0 ± 0.6	51.0	{E. off Aomori Pref. 40.7N, 142.4E, h=60 KM		
31	X 11	20.56	3-2-1	46	58	b	204 ± 21	8.4 ± 1.8	55.0	{SE. Part of Saitama Pref. 35.9N, 139.7E, h=80 KM		
32	X 13	05.37	3-1-2	21	41	a	156 ± 5	10.4 ± 2.5	5.4	{Off E. of Ibaraki Pref. (Kakioka)		
33	X 13	17.29	1-3-2	26	54	a	111 ± 28	6.9 ± 1.2	8.5	Ibaraki Pref. (felt)		
34	X 13	17.40	1-3-2	18	29	a	105 ± 10	13.4 ± 5.4	6.5	(Tokyo)		
35	X 13	18.15	1-2-3	31	43	a	69 ± 12	11.0 ± 1.3	9.6	{Off SE Kinkazan 37N, 142E		
36	X 15	01.45	3-1-2	38	68	b	161 ± 5	6.7 ± 1.4	29.0	Kwanto District		
37	X 16	04.02	1-2-3	29	49	b	57 ± 18	10.1 ± 3.2	9.2	{SW. Ibraki Pref. (felt)		
38	X 20	17.38	1-2-3	36	44	b	75 ± 14	9.8 ± 1.7	5.6			
39	X 21	17.15	3-2-1	36	53	a	213 ± 6	9.7 ± 1.2	30.0			
40	XI 10	21.18	1-3-2	{ ② 45 51 ③ 34 48 ④ 31 48	b b b	91 ± 9 98 ± 10 102 ± 9	7.5 ± 1.7 8.2 ± 2.4 8.0 ± 2.6					
41	XI 10	20.47	2-1-3	{ ① 41 58 ② 38 38 ③ 45 72 ④ 55 68	b b b b	323 ± 7 316 ± 8 328 ± 6 319 ± 6	6.7 ± 1.2 8.0 ± 1.4 5.7 ± 1.0 5.5 ± 0.7	8.7				
42	XI 12	10.44	3-1-2	{ ① 31 43 ① 41 50 ① 39 50	a a a	168 ± 8 176 ± 7 174 ± 8	10.1 ± 2.1 9.0 ± 1.3 9.0 ± 1.5	6.3	Kwanto District			
43	XI 12	17.01	2-1-3	{ ① 24 65 ① 28 69 ② 31 72	b b b	343 ± 9 340 ± 6 338 ± 7	6.7 ± 2.5 6.4 ± 1.7 6.1 ± 1.7	13.3	(Matusiro)			
44	XI 13	02.01	3-2-1	{ ① 38 51 ② 30 49 ③ 36 43 ④ 27 53	b b b b	209 ± 14 220 ± 14 218 ± 10 200 ± 30	9.9 ± 2.1 9.1 ± 2.8 10.6 ± 2.3 11.2 ± 3.5	5.5				
45	XI 13	11.09	3-2-1	14	39	a	242 ± 9	12.2 ± 2.9	6.3			
46	XI 13	13.07	1-2-3	{ ② 38 62 ③ 39 63 ④ 36 56	b b b	59 ± 11 61 ± 10 62 ± 12	7.9 ± 1.6 7.7 ± 1.4 8.6 ± 1.8	105.0	{After Shock from Etorof Is. 43.6N, 145.2E h=80 KM			
47	XI 13	17.03	3-2-1	{ ① 10 38 ① 16 43	a a	243 ± 14 250 ± 5	12.2 ± 1.4 10.7 ± 2.0	5.6	Central Kwanto			
48	XI 13	23.19	3-2-1	{ ① 41 48 ① 41 51 ② 48 51 ③ 48 51 ④ 45 48	a a a a a	199 ± 10 203 ± 14 194 ± 8 194 ± 8 193 ± 8	10.0 ± 1.1 9.6 ± 1.5 8.9 ± 0.7 8.9 ± 0.7 9.6 ± 0.8	9.4	Southern Kwanto			
49	XI 14	16.09	3-2-1	{ ① 26 34 ① 26 35 ② 30 35 ③ 30 35 ④ 28 40	a a a a a	207 ± 13 209 ± 13 198 ± 13 198 ± 13 209 ± 12	14.4 ± 2.6 14.1 ± 2.7 13.5 ± 1.9 13.5 ± 1.9 12.9 ± 3.1	5.7				

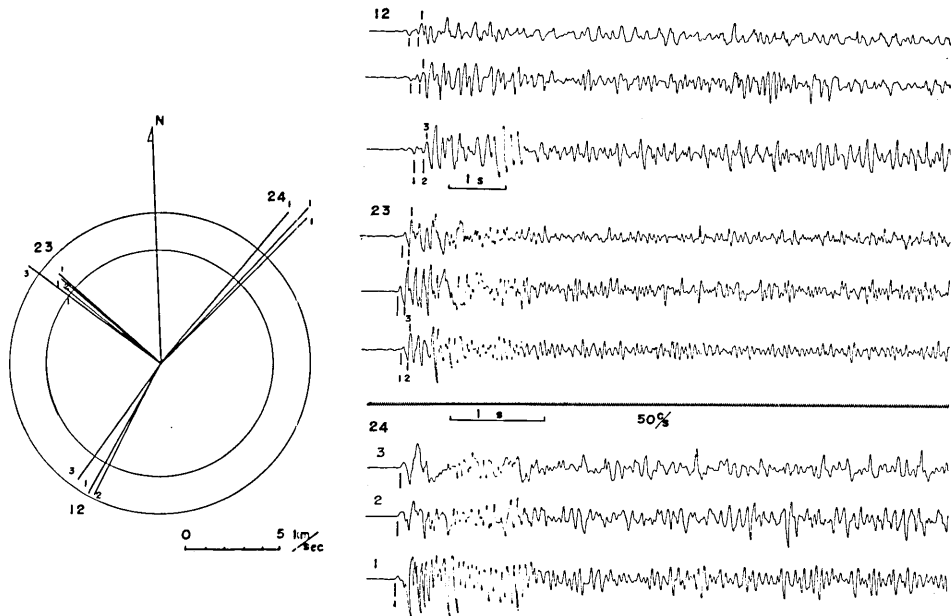
(to be continued)

(continued)

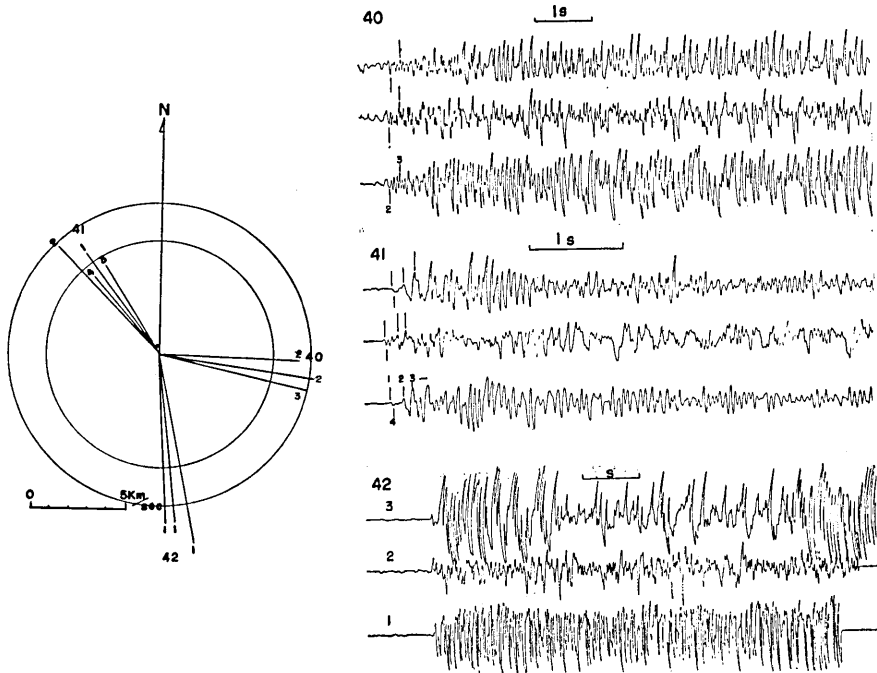
Earthquake			Arrival order of stations	Difference of onset		Quality of onset	Direction of approach $\theta \pm \delta\theta$	Apparent velocity $v \pm \delta v$	S-P at Tukuba	Published Data by J. M. A.
No.	Date	Time		t'	t''					
50	XI16	10.51 ^{h m}	3-1-2	① 0.7	49.5	a	131 ± 15	$76. \pm 68.$	9.8	
				② 0.3	44.5	a	131 ± 201	$172. \pm 258.$		
				③ 0.7	51.0	a	131 ± 182	$76. \pm 91.$		
				④ 0.4	47.6	a	131 ± 38	$129. \pm 1550.$		
51	XI15	18.03	1-2-3	51	68	b	70 ± 9	6.6 ± 6.7	108.0	{44N, 149E h=70 KM
				27	58	b	48 ± 12	8.8 ± 2.8		
				21	58	b	32 ± 7	7.5 ± 3.2		
				41	58	b	66 ± 12	8.0 ± 1.4		
52	XI16	02.40	3-1-2	10	22	a	153 ± 1	18.6 ± 2.0	7.5	Kwanto District
53	XI16	14.30	2-1-3	① 53	63	b	318 ± 6	5.6 ± 0.7	9.0	
				② 45	62	b	323 ± 7	6.1 ± 1.0		
				③ 45	58	b	321 ± 8	6.2 ± 1.0		
				④ 34	55	b	328 ± 7	7.2 ± 1.5		
54	XI16	16.20	3-2-1	58	58	a	188 ± 4	7.5 ± 1.2	9.2	{Central Part of Tiba Pref. 35.3N, 140.2E h=60 KM (felt)
				58	61	a	192 ± 7	7.4 ± 0.8		
55	XI17	02.16	3-2-1	22	34	a	220 ± 13	15.0 ± 3.9	5.8	(Kakioka)
				20	31	a	215 ± 15	16.6 ± 4.4		
				19	27	a	212 ± 17	18.6 ± 5.0		

* Quality a: $\delta t = \pm 3$ ms; b: $\delta t = \pm 5$ ms.

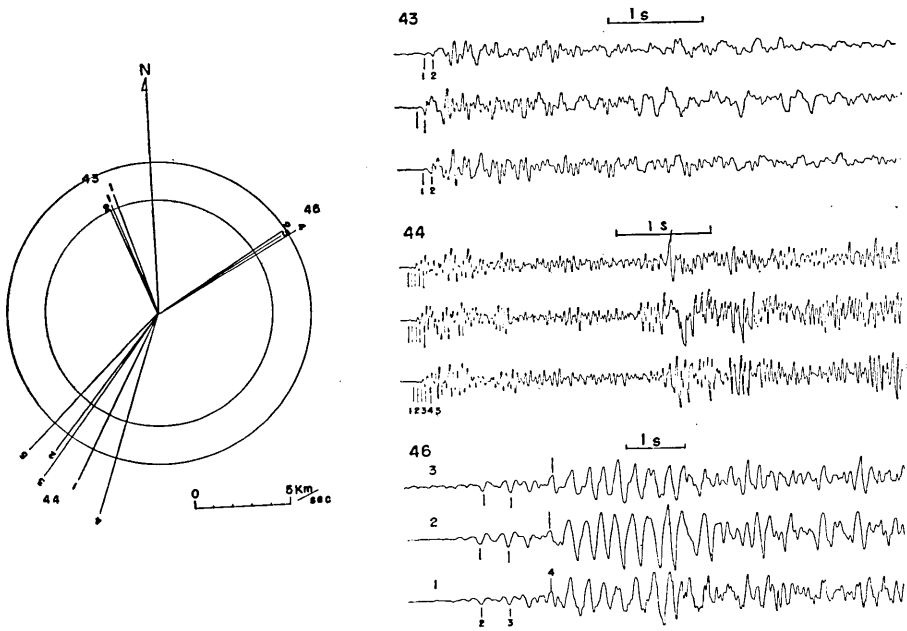
** (Kakioka) means "only recorded at Kakioka".



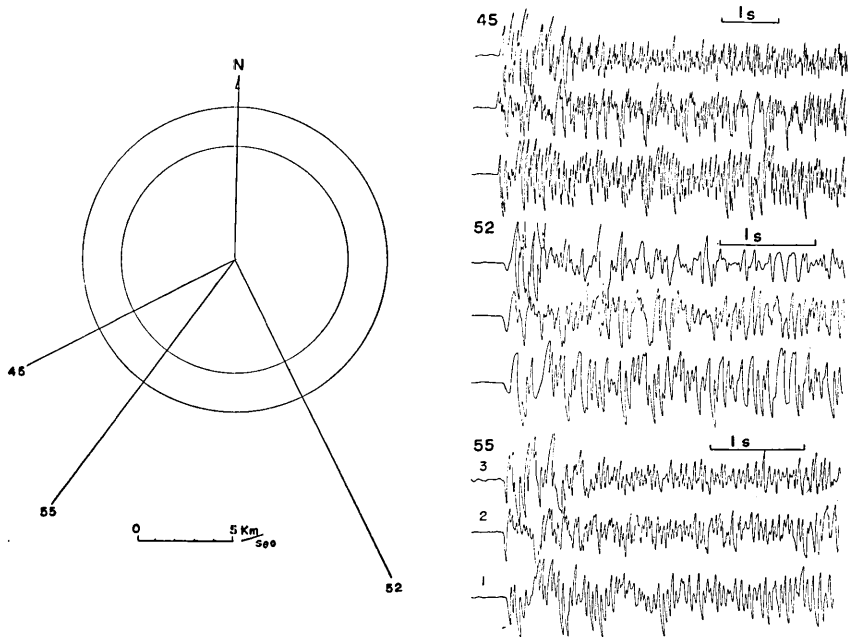
第 5 図 (Original $\times 1/4$)



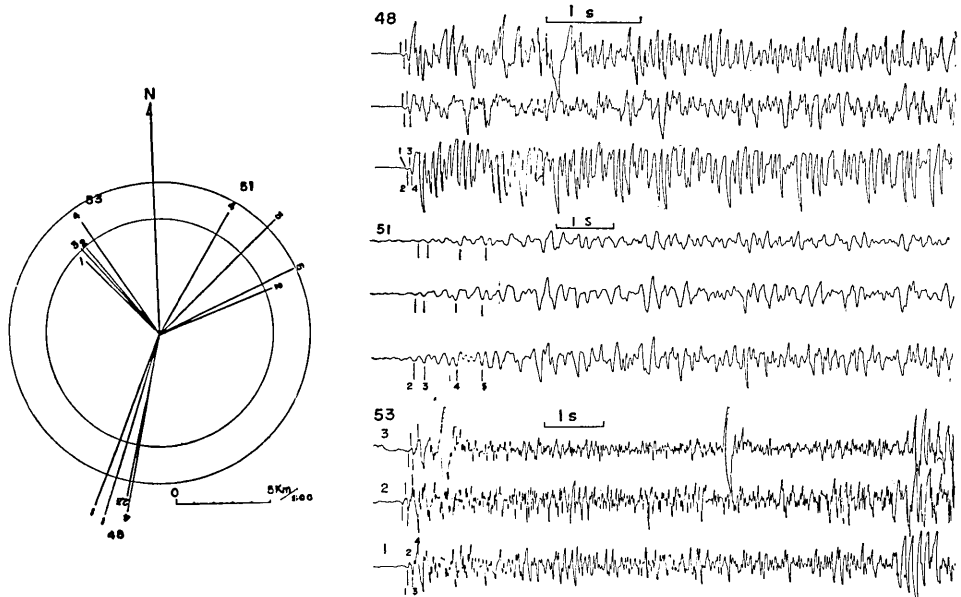
第 6 図 (Original $\times 1/4$)



第 7 図 (Original $\times 1/4$)



第 8 図 (Original $\times 1/4$)

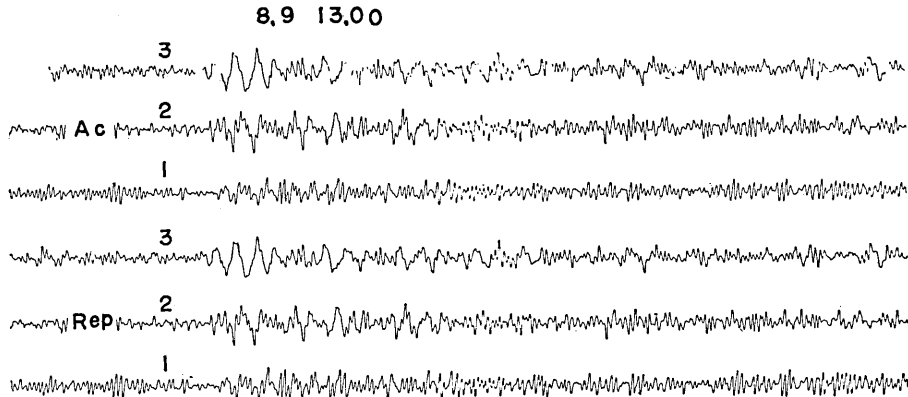


第 9 図 (Original $\times 1/4$)

第 5~9 図 3 点における地震記象とえられた初動およびそれにつづく位相の到来方向とみかけの速度(同一位相につき、記録紙速度、利得等をかえて測定した結果をもふくむ)

Seismograms at the tripartite stations and the measured directions of approach and apparent velocities of initial and a few following phases. (including those of a phase measured with different reproducing paper speeds and/or gains.) Earthquake Nos. should be referred to Table 1.

磁気記録の再生によるひずみは、第 10 図にみるように偶然解析中におこつた地震を直接オッシログラフで記録できたものと、その再生記録とを比較して、ほとんど問題にならないことがわかる。



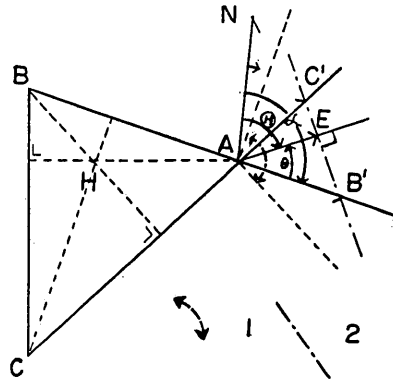
第 10 図 直接 (Ac) および磁気記録装置による再生 (Rep) 記録の比較
Comparison of direct (Ac) and reproduced (Rep) record. (Earthquake No. 10)

3. 結果の精度

3 観測点は水平面と数度のかたむきをもつ平面上にあるので、初動の到来方向およびみかけの速度はすべてこの平面をもとにしてなされる。したがつて、真の水平面を基準とする数値とは当然若干の差がある。しかし、つきにのべる測定精度の点からみて、この相違を問題にすることはいまのところ必要でない。

第 2 図に記入した辺長はこの傾斜平面上の数値である。

前節でしめした到来方向とみかけの速度はつぎのような作図法によつてもとめた。到来方向はいろいろあるが、いま波動が最初に到達した点を A 、第 2 に到達した点を B 、第 3 に到達した点を C としても一般性をうしなわない。そこで A, B, C に波動の達した時刻を t_A, t_B, t_C とすると到達時刻差は $t' = t_B - t_A, t'' = t_C - t_A$ 、 $AB = d', AC = d''$ とすると AB, AC にそつみかけの速度は $v' = d'/t', v'' = d''/t''$ 。そこで第 11 図のように BA, CA の延長上に B', C' をとり、 $AB' = v', AC' = v''$ とし、 A から $B'C'$ に垂線 AE をひき、垂線の足を E とする。こうしてえられたベクトル \vec{AE} はこの平面上でこの波動の速度をしめす。つまり



第 11 図 3 点観測による初動の到来方向 (波面) とみかけの速度の作図法
(1. 到来方向範囲 2. 波面)

Graphical determination of direction of approach and apparent velocity of initial motion by tripartite stations.
(1. Azimuthal range of epicenter, 2. Plane wave front.)

AE の延長上に震央があり, $AE = v$ がこの平面にそうみかけの速度ということになる.

到達時刻差 t', t'' の測定誤差 $\delta t', \delta t''$ はそれぞれ t_A, t_B, t_C の測定誤差 $\delta t_A, \delta t_B, \delta t_C$ に依存する. 後者はすでにのべたように記録紙上で同時刻の点, たとえばペンのずれを記録せしめた点からのながさとしてはかられる. 記録線は約 $0.3 \sim 0.4 \text{ mm}$ のはばをもつが, 縁辺は比較的鮮明なすどいかどをもっており, $1/10 \text{ mm}$ のめもりのあるむしめがねでよめば 0.2 mm までは充分よめる. これは各線とも同様であるから, よむ位置をきめれば $\delta t_A = \delta t_B = \delta t_C = \delta t$ となり, 記録紙速度を $30 \sim 50 \text{ mm/sec.}$ とすれば $\delta t = \pm 1/1500 \sim 1/2500 \text{ sec.}$ ($\approx 0.7 \sim 0.4 \text{ ms}$) となる. そこでむしろ問題となるのはどこをよむべきかという位相の同定になる. 近距離の比較的ふかい地震はすどくたちあがる初動をしめすが, ややとおい地震では初動のたちあがりはあまりすどくない. よわい地震では土地の微動との比 (S/N) がわるくてさらに同定が困難である. おくり速度 50 mm/sec. 以上では, かえつて同定困難のため誤差は大となる傾向にある. 一般に δt は $\pm 3 \text{ ms}$ (a クラス) から $\pm 5 \text{ ms}$ (b クラス) くらいであり, 特にわるいもので $\pm 10 \text{ ms}$ (c クラス) までである. これは数回の再生記録から別々に位相時間差のよみとりをおこない見当をつけることができた.

さて, $t' = t_B - t_A, t'' = t_C - t_A$ であるから $\delta t' = \sqrt{(\delta t_B)^2 + (\delta t_A)^2}, \delta t'' = \sqrt{(\delta t_C)^2 + (\delta t_A)^2}$ であり, $\delta t_A = \delta t_B = \delta t_C = \delta t$ とすると, $\delta t' = \delta t'' = \sqrt{2} \delta t$ となる.

つぎに第 11 図の作図法によると到来方向乃至震央方位を θ とし, $\overrightarrow{AB'}$ の方位を α (常数) とすると, $\angle B'AE = \theta$ とおくと, $\theta = \theta - \alpha$ となるから, θ の誤差は θ の誤差にひとしい. 方位は北から時計まわりにはかり, 角度はすべて時計まわりを正とする. さて, 図からあきらかに

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \overline{AE} / \overline{AB'} = v/v', \\ \cos(A - \theta) &= \overline{AE} / \overline{AC'} = v/v''. \end{aligned}$$

したがって

$$\text{tg } \theta = \{(v'/v'') - \cos A\} / \sin A.$$

ただし $A = \angle B'AC' = \angle BAC$ である.

これから,

$$\delta \theta = \sqrt{\left(\frac{\partial \theta}{\partial t'}\right)^2 (\delta t')^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial t''}\right)^2 (\delta t'')^2} = \sqrt{2} \sqrt{\left(\frac{\partial \theta}{\partial t'}\right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial t''}\right)^2} \delta t.$$

さて, $v' = d'/t', v'' = d''/t''$ から, $\partial v'/\partial t' = -v'/t', \partial v''/\partial t'' = -d''/t'', \partial v'/\partial t'' = \partial v''/\partial t' = 0$ であり, したがって

$$\frac{\partial \theta}{\partial t'} = -\frac{\cos^2 \theta}{\sin A} \cdot \frac{v'}{v''} \cdot \frac{1}{t'}, \quad \frac{\partial \theta}{\partial t''} = \frac{\cos^2 \theta}{\sin A} \cdot \frac{v'}{v''} \cdot \frac{1}{t''}$$

となるから,

$$\delta \theta = \sqrt{2} \frac{\cos^2 \theta}{\sin A} \cdot \frac{v'}{v''} \sqrt{\frac{1}{t'^2} + \frac{1}{t''^2}} \delta t$$

となる。

さらに $v = v' \cos \theta$ から

$$\frac{\delta v}{v} = \sqrt{\frac{1}{l'^2} + (f \cdot \operatorname{tg} \theta)^2} \delta t, \quad f = \sqrt{2} \cdot \frac{\cos^2 \theta}{\sin A} \cdot \frac{v'}{v''} \sqrt{\frac{1}{l'^2} + \frac{1}{l''^2}}$$

がえられる。

これらの式から計算した誤差が Table 1 にしめした $\delta\theta, \delta v$ であり, δt としては a クラスで $\pm 3 \text{ms}$, b クラスで $\pm 5 \text{ms}$ としておいた。(c クラスのものはすてた。)

上式から l', l'' が大であれば精度はよくなるのであるが, 入射角が一定ならこれには点間距離 d', d'' を大にするよりほかない。あとは到来方向と三角形のかたち依存する量であつて, あるばあいには有利にしても他の方向からに対して不利になつて, どの方向にもよい形状というものはいまはきまらない*。

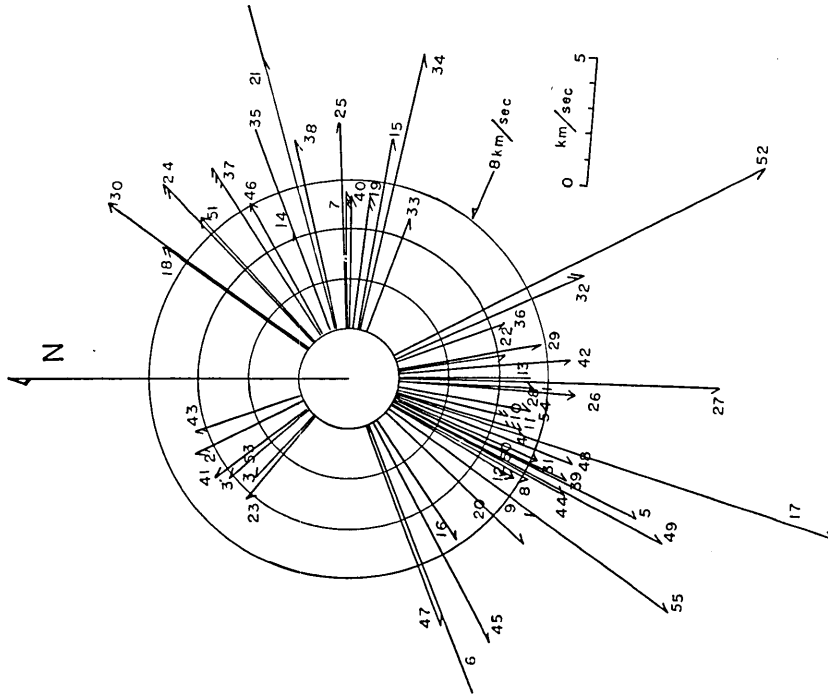
δt 自体を小にするには, よみとり位置の同定の精度をあげるために記録のたちあがりをするどくする必要がある。これを 1ms またはそれ以下にするには, 計器の周波数帯域を $50 \sim 100 \text{ c/s}$ までひろげる必要があろう。しかし, ややとおい近地地震では地震波のかたちがすでにこうした高周波成分をふくまない公算がおおい。こうした高周波観測については浅田敏が研究をすすめているので期待される。しかし, もし初動の波形自体が高周波成分をふくまない, ゆるやかなものであれば, 計器の特性をかえてもしかたないので, 点間距離を増大するほかない。このばあい, わがくには地質, 地形上均一性が保証されないおそれがおおいので, これには地中ふかくに地震計をいれることが必要となる。3点以上の観測点をもうけて B', C' 以外に $D', E', \text{etc.}$ の点をえて, これらの点で決定される, 波面の観測点平面とのきりくちの直線を最小自乗法的に決定することにより, 精度をあげうことは当然である。われわれのばあい D, E, F の3点は ABC 三角形の内部にあり, 辺長が小となり, その時間差から充分よい精度の速度をもとめえられなかつたので, この方法を採用することはできなかつた。

4. 議 論

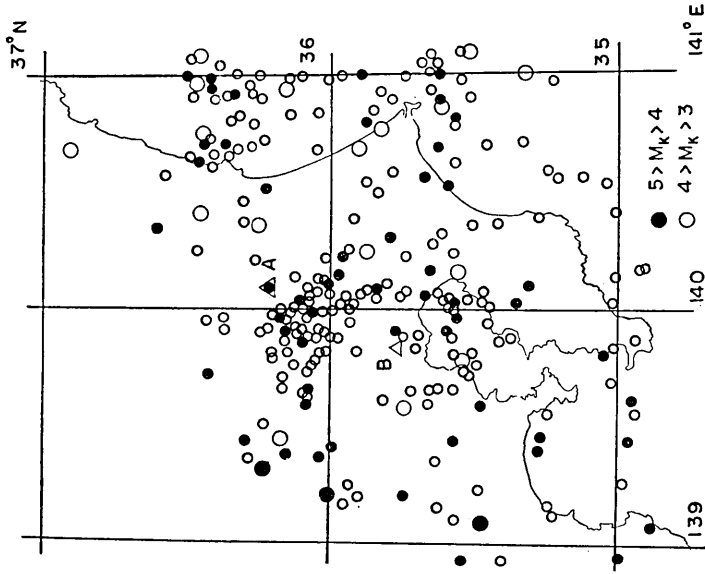
第 12 図に, えられた初動到来方向とみかけの速度とをベクトルとしてまとめてしめした。これを第 13 図にかかげた関東地方の 1914~1940 の $M \geq 5$ の地震の震央分布⁹⁾ とくらべると, 筑波を中心とする地震活動はこの短期間の標本抽出的観測の結果において, 長期間の常設観測網による結果とほぼ一致していることがわかる。初期微動継続時間からみると, 観測された小地震はすべて地殻内地震 (Intra-crustal earthquake) とはみなしえないものである。長期観測による結果は地殻内地震もふくむといえ, やはり大部分は地殻下地震 (Sub-crustal earthquake) とかんがえられるので, この地方の地殻下地震の発生

* 3点観測法の誤差については浅野周三が脈動観測に関連して論じたことがある。(震研談話会, 昭 28. 5 月, 昭 28. 6 月)

9) T. ASADA, *Journ. Phys. of the Earth.*, 5 (1957), 83-113.



第12図 筑波において3点観測で記録された近地地震の初動到来方向とみかけの速度
 Directions of approach and apparent velocities of initial motions of near earthquakes recorded by the tripartite stations at Tukuba, Japan.
 Nos. of earthquakes are referred to those in Table 2.



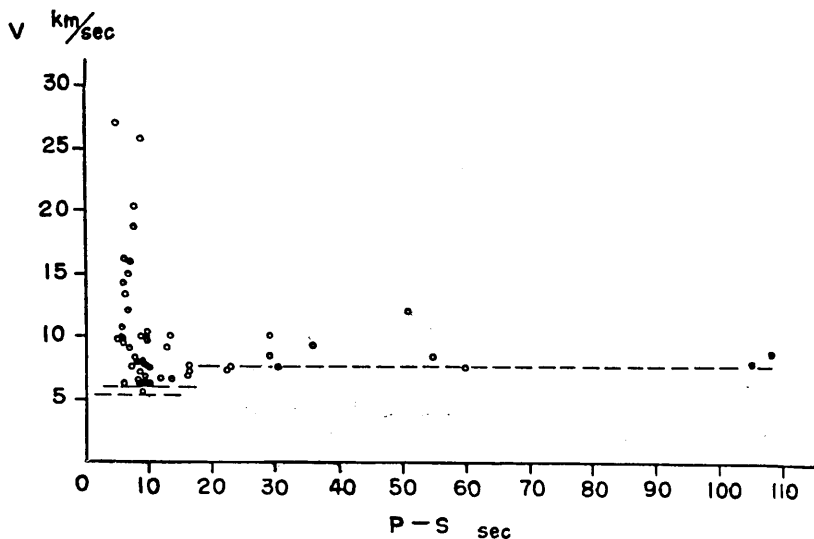
第13図 関東地方の震央分布
 Distribution of epicenters in Kwantō district during 1914~1940. $M = 4.85 + 0.5 M_k$
 A : Tukuba, B : Tokyo. (After T. Asada⁹⁾)

は地震の規模のひろい範囲にわたつて、時間的に定常であるということが推定できる。

到来方向を観測した地震のうち気象庁で震源位置を発表したものはすくないが、それらはほぼ誤差の範囲内でその方向は一致している。しかし、筑波における初動方向のずれがしらべられているのに対応するような到来方向のずれがあるかどうかは残念ながら精度の点からまだはつきりいえなかつた。相関計算法による初動部波群の平均的到來方向等については安芸敬一、辻浦賢¹⁰⁾により別にくわしく論じられているので省略する。

震源未決定のものがおおいので、震源距離の代用として初期微動時間 t_{p-s} をとり、これとみかけの速度の関係を図示したものが第 14 図である。浅田敏、鈴木次郎¹¹⁾がすでにのべているように、各震源距離における最小のみかけの速度が地下の速度をしめす数値として意味がある。Table 2 にみるように、われわれのえた速度はかなりの誤差をもつもので、なおきわめて不十分なものであるが、爆破地震動研究グループ¹²⁾によりえられた関東地方の地下速度をしめす線を図にしめすと、ほぼこれが各距離のみかけの速度の最小値をなしており、筑波において 5.4 km/sec の層が欠除しているということもふくめて、矛盾がないことがわかる。

速度の精度をたかめて、 P_n の速度の精確な数値をもとめることをのぞんだが、これではそこまでは到達できなかつた。



第 14 図 筑波における 3 点観測で記録された近地地震のみかけの速度とその $P-S$ 時間との関係

Apparent velocities of near earthquakes recorded by the tripartite stations at Tukuba and their $P-S$ times.

- 10) K. AKI and M. TSUJIURA, *loc. cit.*, 8)
- 11) T. ASADA and Z. SUZUKI, *loc. cit.*, 4).
- 12) 爆破地震動研究グループ (R. G. E. S.), 地震 (*Zisin*), [ii], 11 (1958), 102-113.

5. 謝 辞

本郷における受信記録室を貸与された東大附属病院、筑波における地震計設置点および架線地域の利用をゆるされた筑波神社にふかく感謝する。観測の準備および実施には堀実、松本英照、安芸敬一、岡田惇、後藤健一、鈴木喜吉、その他技術部、事務部の諸氏、および筑波山支所渡辺正雄氏の御協力をえた。また安芸敬一氏には本研究中種々討議に参加していただいた。特に謝意を表したい。なおこの研究計画の全般について御支援をえた那須所長、萩原観測部主任、実川技術部主任に感謝する。

23. *Direction of Approach and Apparent Velocity of Near Earthquake Initial Motion.*

By Setumi MIYAMURA and Masaru TSUJIURA,
Earthquake Research Institute.

Directions of approach and apparent velocities of the initial motions of more than fifty near earthquakes* arrived at Mt. Tsubuwa were determined by tripartite stations separated by about several hundred meters from each other in the vicinity of the seismological observatory of E.R.I. Among the instruments for observation are included two UHF 3-channel radio telerecording seismographs, RTS-II, and a double track commercial magnetic tape recorder with endless reel.

Azimuthal distribution of epicenters around Tsubuwa thus determined agrees fairly well with the geographical distribution of epicenters in Kwanto district by the secular routine observations, and it suggests that the seismic regime of the region is rather stationary in time.

Relation between the apparent velocity obtained from a near earthquake and its S-P time, taken as a substitute of epicentral distance, shows us clearly no inconsistency with the crustal layering of the region deduced by explosion seismology.

Accuracy in the determination of the direction of approach and the apparent velocity are discussed. Future developments of the method are also referred to in passing.

* About twenty of them observed in the earlier period were treated by AKI, K. and TSUJIURA, M. (1959) from the spectral point of view using a correlation calculator. (cf. *loc. cit.*, 8)