

遠地地震の震央決定の一助法*

浜松音蔵**・市川政治**

550.431

Sur une Méthode Assistante de Détermination Rapide des Epicentres des Séismes Eloignés

I

O. Hamamatsu

(Section de Séismologie, J. M. A.)

Pour déterminer des épicentres des séismes éloignés par la combinaison de la direction de propagation d'onde P et des cercles tracant au moyen de temps $P\sim S$, l'auteur calcula par les formules de trigonométrie sphérique des cercles grands passant à latitude $36^{\circ}N$ (voir Tab. et Fig. 2).

II

M. Ichikawa

(Section de Séismologie, J. M. A.)

L'auteur propose une méthode assistante de détermination rapide des épicentres des séismes éloignés basée sur la connaissance de l'heure d'arrivée de l'onde P en différentes stations.

La méthode consiste à calculer la direction de la propagation de l'onde P en une station par la formule de la méthode de tri-partite (eq. (2)), et à tracer le cercle grand de rayon R sur la carte stéréographique: le rayon R et le centre de cercle sont fonction de la direction de propagation d'onde et de la latitude de la station (voir eq. (1), Tab. 2 et Fig. 4).

Le cercle ainsi obtenu se coupe des cercles tracant sur la carte au moyen de temps $P\sim S$, et la intersection marque l'emplacement de l'épicentre.

Dans des régions ayant un réseau serré mais non pas vaste tel que le Japon, la méthode proposée ici sera utilisante.

I***

まゝがき

外国に起った地震の震央決定法は、現在のところ北極を中心にしたステレオ地図と $P\sim S$ 時間

* Reçu le 13 Fev., 1956.

** 気象庁地震課

*** 浜松音蔵

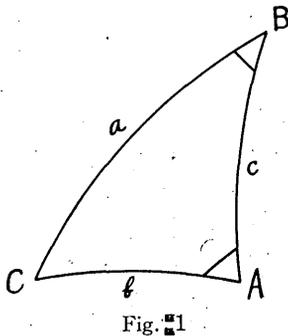
(初期微動時間)に相当する距離をあらかじめ算出したノモグラフを用いて、近地地震と同様の方法で求めている。この場合、日本のデータだけで震央を求めると、限られた狭い範囲に観測所があるために、ある方向においては同心円状になったり、点として交わらず相当の幅をもった帯となって容易に定め難い。外国のデータが2, 3か所あれば事は簡単であるが、それには2, 3ヵ月待たなければならないのが現状である。

しかしながら、たとえ狭い日本でも、 $P\sim S$ 時間だけによらず、等 P 線 (等発震時線) あるいは初動方向などを併用して震央を決定するならば、現在の方法よりもはるかに精度を上げる。

方 法

地震波は地球の大円に沿って順次遅れて到達するから、等 P 線の法線は一つの大円であって、また、震央の方向を示している。また、初動方向を延長したのも大円であり震央の方向に一致するはずである。したがって、あらかじめある地点における大円が、地図上いかなる点を通るか求めておけば、それを用いることによって等 P 線、初動などがわかれば震央をより正確に求める。

大円を求める方法は種々あるが、ここではある地点を通る子午線と大円とのなす角、すなわち、その点における方位角で大円を表わす。Fig. 1 において A を仮定した地点、 B を北極とし、方位角 (A) おいび経度差 (B) を与えれば、 c は既知であるから球面三角法により



$$\tan \frac{a+b}{2} = \frac{\cos \frac{1}{2}(A-B)}{\cos \frac{1}{2}(A+B)} \tan \frac{c}{2}$$

$$\tan \frac{a-b}{2} = \frac{\sin \frac{1}{2}(A-B)}{\sin \frac{1}{2}(A+B)} \tan \frac{c}{2}$$

上式から a, b が求められる。 a から C 点の緯度が求められる。 b は AC 間の距離である。

Table 1 は上式から求めた緯度および距離で、仮定した地点は計算のつごう上 $36^{\circ}.0\text{N}$, $140^{\circ}.0\text{E}$ とした。Fig. 2 は Table 1 を基にして、現在使っているステレオ地図上の大円を描いたものである。Table 1 および Fig. 2 の中で、方位角 90° は $36^{\circ}.0\text{N}$, $140^{\circ}.0\text{E}$ における東西方向にあたる大円で、 0° および 180° は北、南の方向の大円を表わす。地球を球として計算しているので、一象限だけ計算すれば全象限が求められる。また、Table 1 と Fig. 2 は原点が同緯度ならば、傾向お

Table 1

Azim. Long.	10°		20°		30°		40°		50°		60°		70°		80°		90°		Azim. Long.	
	Lat.	Dist.																		
130° E	62° 39' N	27° 21'	52° 33' N	17° 59'	47° 24' N	13° 36'	44° 10' N	11° 10'	41° 51' N	09° 43'	40° 00' N	08° 50'	38° 26' N	08° 20'	37° 00' N	08° 06'	35° 35' N	08° 07'	30° W	
150° E																				50 W
120° E	72 01 N	37 27	61 32 N	28 28	54 45 N	23 15	49 53 N	20 03	46 03 N	18 03	42 50 N	16 50	39 55 N	16 13	37 08 N	16 04	34 19 N	16 25	20 W	
160° E																				60 W
110° E	76 24 N	42 36	66 45 N	35 15	59 32 N	30 28	53 47 N	27 21	48 56 N	25 24	44 36 N	24 16	40 30 N	23 52	36 26 N	24 06	32 10 N	25 02	10 W	
170° E																				70 W
100° E	78 50 N	45 50	69 57 N	40 07	62 39 N	36 13	56 22 N	33 38	50 44 N	32 04	45 26 N	31 24	40 13 N	31 29	34 51 N	32 23	29 06 N	34 10	0	
180° E																				80 W
90° E	80 17 N	48 09	71 57 N	43 57	64 36 N	41 04	57 56 N	39 16	51 36 N	38 24	45 24 N	38 24	39 04 N	39 16	32 22 N	41 04	25 02 N	43 58	10 E	
170° W																				90 W
80° E	81 10 N	50 00	73 10 N	47 10	65 44 N	45 24	58 36 N	44 34	51 36 N	44 36	44 28 N	45 32	36 59 N	47 25	28 54 N	50 20	19 58 N	54 30	20 E	
160° W																				100 W
70° E	81 40 N	51 34	73 47 N	50 05	66 08 N	49 30	58 31 N	49 47	50 44 N	50 56	42 35 N	53 01	33 52 N	56 08	24 23 N	60 21	13 57 N	65 47	30 E	
150° W																				110 W
60° E	81 54 N	53 00	73 56 N	52 52	65 54 N	53 34	57 37 N	55 09	48 56 N	57 38	39 40 N	61 06	29 39 N	65 37	18 49 N	71 11	07 12 N	77 42	40 E	
140° W																				120 W
50° E	81 53 N	54 25	73 35 N	55 41	64 58 N	57 50	55 50 N	60 54	46 02 N	64 58	35 31 N	70 03	24 13 N	76 03	12 18 N	82 48	00 00	90 00	50 E	
130° W																				130 W
40° E	81 36 N	55 52	72 44 N	58 42	63 13 N	62 31	52 57 N	67 23	41 50 N	73 18	29 58 N	80 06	17 36 N	87 30	05 03 N	95 03	07 12 S	102 18	60 E	
120° W																				140 W
30° E	81 02 N	57 30	71 14 N	62 08	60 27 N	67 59	48 38 N	75 02	35 59 N	83 01	22 53 N	91 31	09 53 N	99 53	02 30 S	107 36	13 57 S	114 13	70 E	
110° W																				150 W
20° E	80 04 N	59 24	68 47 N	66 19	56 09 N	74 45	42 23 N	84 25	28 09 N	94 33	14 18 N	104 18	01 31 N	112 53	09 54 S	119 58	19 58 S	125 30	80 E	
100° W																				160 W
10° E	78 28 N	61 50	64 54 N	71 50	49 33 N	83 41	33 29 N	96 17	18 08 N	108 08	04 33 N	118 09	06 59 S	125 59	16 42 S	131 50	25 02 S	136 02	90 E	
90° W																				170 W
0	75 47 N	65 19	58 25 N	79 51	39 20 N	96 08	21 19 N	111 19	06 17 N	123 29	05 35 S	132 23	14 58 S	138 38	22 37 S	142 57	29 06 S	145 50	100 E	
80° W																				180
10° W	70 50 N	71 02	46 54 N	92 50	23 49 N	113 49	06 08 N	129 20	06 19 S	139 33	15 15 S	146 09	22 01 S	150 27	27 29 S	153 13	32 10 S	154 58	110 E	
70° W																				170 E
20° W	59 46 N	82 50	25 35 N	115 35	02 50 N	136 54	10 09 S	148 25	18 10 S	154 54	23 41 S	158 47	27 52 S	161 14	31 18 S	162 44	34 19 S	163 35	120 E	
60° W																				160 E
30° W	26 39 N	116 39	07 10 S	149 46	18 58 S	160 50	24 41 S	165 47	28 10 S	168 28	30 36 S	170 04	32 30 S	171 02	34 08 S	171 36	35 35 S	171 53	130 E	
50° W																				150 E
40° W	36 00 S	180 00	140 E																	
		170°		160°		150°		140°		130°		120°		110°		100°		90°		

追 加

	150°	160°	170°		
135° E	—	—	—	06° 26' N	29° 56'
145° E					
125° E	08° 24' N	30° 48'	10° 02' S	48° 10'	—
155° E					
115° E	13 51 S	55 09	—	—	—
165° E					

表の見方：i) 方位角 10°~90° の経度は表の左側，その経度に交わる緯度とその交点までの距離は

表そのままの数値である。

ii) 方位角 100°~170° の経度は表の右側，その経度に交わる緯度は表中のNはSに，SはNに変え数値はそのまま良く，その交点までの距離は 180° から該当距離をさしひいた度分。たとえば，方位角 130° の線が100° Eに交わる緯度は 06° 17' S で距離は 56° 31' である。ただし，方位角 150°~170° の追加の分はそのまま用いればよい。

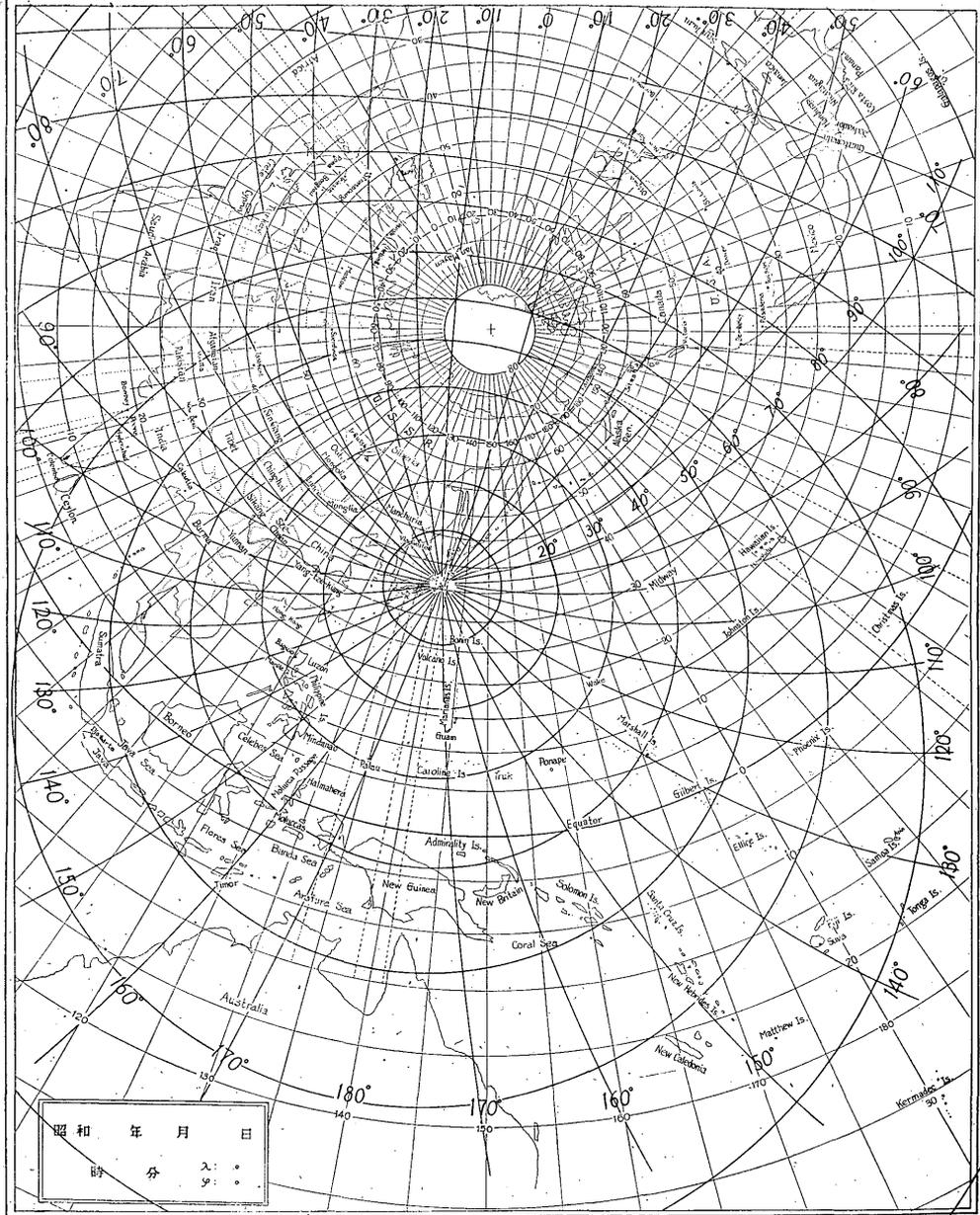


Fig. 2

よび数値は同じであるから，経度の差だけずらせば他の経度の大半も簡単に求められる。¹⁾

Fig. 2 中，同心円状の円は，原点から 10° ごとの等距離線である．この線は方位角の線と直交する．したがって，1位の端数のつく方位角のときはこの線上から見当²⁾をつければ良い．

等 P 線を補正する方法

等 P 線から方位角を求めるにあたって，その等 P 線が正しいかどうかを調べる必要が起る．それには，いくつか求められる等 P 線相互間の距離から検討するのが便利である．Fig. 3はこの目的のために，10sec または 20sec おきに等 P 線を描いたとき，それら相互間の距離がどのくらいの値になるかを示すもので，震源の深さ surface, $0.01 R$, $0.04 R$, $0.09 R$ について Jeffreys-Bullen

の表から求めた．震央距離は使用に便利なように $P \sim S$ 時間で表わした．この図は，等 P 線が信頼できる場合，震源の深さを検討するのにも役立つ．

注意事項

さて，Fig. 2 を使用するにあたっては，原点を $36.^\circ 0'N$, $140.^\circ 0'E$ にとっているから，等 P 線の法線や，ある観測所における初動方向は，厳密には，すべてこの点における方位角にひきもどさなければならない．また，等 P 線の法線を併用して震央を求める場合は問題ないが，1か所の初動方向を併用して求める場合は，観測所が九州とか北海道のように原点から離れている場合は，原点付近にある関東地方の観測所に比べて，多少の誤差がはいることを考慮しなければならない．

以上の事項を考慮して震央を求めるならば，日本を中心としたステレオ地図で震央を求めるのと同程度の効果が期待できる．また，Fig. 2 は，日本に起った地震が，外国の観測所でいかなる初動を示すかを見るのにも便利である．

なお，近地地震の震央決定に用いている $1/10,000,000$, $1/5,000,000$, $1/2,000,000$ の地図の方

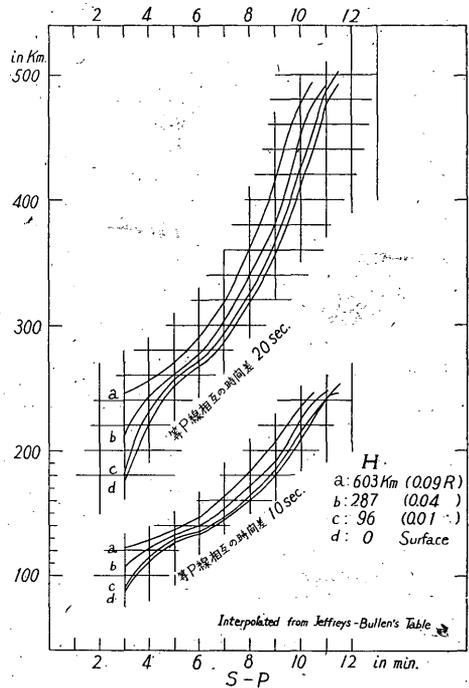


Fig. 3

1) たとえば，原点を $36.^\circ 0'N$, $142.^\circ 0'E$ にとれば，各点では経度を 2° だけ東にずらせば良い．

2) この線上の相隣の間隔は厳密には等間隔にならないから，そのことを考慮して見当をつけるほかはない．

位角は、分度器で追跡したものと計算から描いたものとは、使用している地図の範囲内では一致しているから、そのまま用いてさしつかえはない。

方位角の計算にあたって、地震課小野崎技官の御助力をいただきました。ここにお礼を述べる次第です。

II*

まえがき

現状では遠地地震の初動方向やその発現時を正確にとらえるのはむずかしいことであるが、観測網内の各点で記録した多くの発震時から到着した波の平均的な伝ば方向(震央方向)を知り、これを従来の遠地地震の震央決定方法に加味することにより、震央の決定をより確実にすることができよう。しかし、遠地地震の場合は特別な地図を用いないかぎり、地図上で初動方向を直線的に延長した方向に震央はない。すなわち、大圏コースを考えねばならない。そこで、地図上に大円をいかにして描くかが問題となる。ここではステレオ地図上に大円を描く方法を紹介すると同時に、*P*波の進行してきた方向を推定する一手段として、いわゆる *tri-partite* 法が利用できることを述べる。また、現業上の便を考えて必要な図表を作ったのであわせ載せておいた。

ステレオ地図上に大円を描く一方法

なんらかの方法で地球上のある点に到着した波の、伝ばしてきた方向(初動方向)がわかったとする。この方向の延長は必ずその点の *antipode* を通る。一方、ステレオ地図では球上の円は地図上でも円となるから、いま Fig. 4 を北極中心のステレオ地図とするならば、この円は地図上の観測点 *S* とその *antipode* *A* を通り、その中心は *S*, *A* を結ぶ直線の垂直二等分線上にあることになる。また、この円と *S* 点を通る経線とのなす角 δ は、考えている波の伝ばしてきた方向(初動方向)である。さらに、その円の半径 $R=CS$ は観測点 *S* の緯度を φ とするならば、上の δ とから

$$R = 2r / \cos \varphi \sin \delta \quad (1)$$

(*r*: 地球の半径)

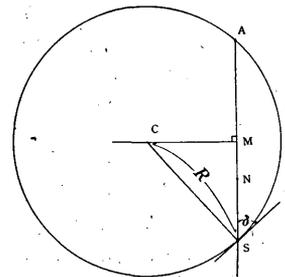


Fig. 4. δ : direction de propagation d'onde
N : pôle nord
S : station
A : antipode

で与えられ、その点の経度とは無関係であることがわかる (Fig. 4 参照)。

* 市川政治

そこで、S点における初動方向ないしは波の伝ばしてきた方向がわかった場合、その方向に対応する大円をステレオ地図上に描くには、その方位と直角方向に直線を引き、その線上でS点から距離 $2r/\cos\varphi \sin\delta$ の点Cを中心とし、CSを半径とする円を描いてやればよいことになる。Table 2は地球の半径を10cmとしたときの北極中心のステレオ地図用の日本付近の緯度 φ に対する $\delta \sim R$ の関係を示すもので、この表から上に述べた要領により、任意の点を通る任意の大円を描くことができる。

なお、浜松氏の報文中の Fig. 2は上表中 $\varphi=36^\circ$ のらんの各 R から描くことができる。

Tab.2. Rayons de cercle grand R sur la carte stéréographique correspondant aux directions de propagation d'onde δ et latitude φ au voisinage du Japon

$\delta \backslash \varphi$	30°	31	32	33	34	35	36	37	38
0°	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
5	265.05	267.80	270.56	273.54	276.75	280.20	283.64	287.31	291.21
10	133.03	134.42	135.80	137.29	138.91	140.63	142.36	144.21	146.16
15	89.25	90.19	91.10	92.17	93.19	94.36	95.51	96.75	98.06
20	67.54	68.25	68.95	69.71	70.53	71.40	72.28	73.22	74.21
30	46.20	46.68	47.16	47.68	48.24	48.84	49.44	50.08	50.76
40	35.94	36.32	36.69	37.10	37.53	38.00	38.46	38.96	39.49
50	30.15	30.46	30.77	31.11	31.48	31.87	32.26	32.68	33.12
60	26.68	26.96	27.23	27.54	27.86	28.21	28.55	28.92	29.31
70	24.58	24.83	25.09	25.37	25.66	25.98	26.30	26.64	27.00
80	23.45	23.69	23.93	24.20	24.48	24.79	25.09	25.42	25.76
90	23.10	23.34	23.58	23.84	24.12	24.42	24.72	25.04	25.38

$\delta \backslash \varphi$	39	40	41	42	43	44	45	46
0°	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
5	295.34	299.47	303.80	308.88	313.70	318.98	324.48	330.45
10	148.24	150.30	152.61	155.03	157.45	160.10	162.86	165.86
15	99.46	100.84	102.40	104.05	105.64	107.41	109.28	111.27
20	75.26	76.32	77.49	78.71	79.94	81.29	82.69	84.21
30	51.48	52.20	53.00	53.84	54.68	55.60	56.56	57.60
40	40.05	40.61	41.23	41.89	42.54	43.26	44.00	44.81
50	33.59	34.06	34.58	35.13	35.68	36.28	36.91	37.58
60	29.73	30.15	30.61	31.09	31.58	32.11	32.66	33.26
70	27.39	27.78	28.20	28.64	29.09	29.58	30.09	30.64
80	26.13	26.49	26.90	27.32	27.75	28.22	28.70	29.23
90	25.74	26.10	26.50	26.92	27.34	27.80	28.28	28.80

伝ばしてきた方向（初動方向）の決め方

等発震時線から波の伝ばしてきた方向を推定するのも一方法であるが、等発震時線は目のこで引くため、なにぶんにも、個人的主観のはいるおそれが多分にある。波の伝ばしてきた方向を求めるのに、従来、脈動による台風中心の追跡に用いている tri-partite 法がP波の伝ばしてきた方向の推定にも応用しうるので*、この方法を用いて客観的に上記の方向を求めたほうがよいのではないだろうか。

* これは井上地震課長の発案されたものである。

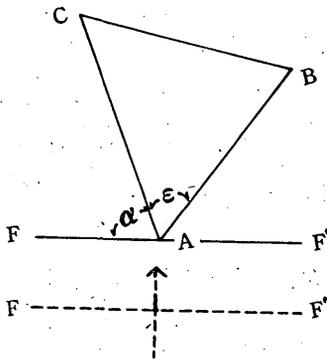


Fig. 5

direction au trait : direction de propagation d'onde
FF' : front d'onde

時に適当な組合せにより波の伝ばしてきた方向が求められる。ただし、上式は波面 FF' は平面で、波の伝ば速度は一定であるとして導入されたものであるから、この仮定を満足するよう三点は選ばるべきである。実際には三点のあいだの間隔が、P 波走時曲線上の見掛けの速度がほぼ一定とみなせる範囲のなかにはいつているならば、上の仮定は大体満足されると考えてよからう。Fig. 6 に ϵ , α および K の関係を示す。この図から任意に与えられた K および ϵ から波の伝ばしてきた方向を知ることが簡単にできる。

さて、このようにして求めた α が正当かいなか見当を付ける必要がある。これには

$$\frac{b}{T_{AC}} \sin \alpha \quad (3)$$

から求めた値が、その観測点までの震央距離に対応する走時曲線上の見掛けの速度と一致、ないしは、近い値となれば大体正当なものと考えてよい。

また、各点における発震時の観測誤差のために生ずるであろう α の誤差 $\Delta\alpha$ は

$$\Delta\alpha = \frac{K \sin \epsilon}{(K - \cos \epsilon)^2 + \sin^2 \epsilon} \left(-\frac{\Delta T_{AB}}{T_{AB}} + \frac{\Delta T_{AC}}{T_{AC}} \right) \quad (4)$$

で与えられ、大体の見当はつく。

ここで、 ΔT_{AB} , ΔT_{AC} は T_{AB} , T_{AC} の誤差で K , ϵ は前に与えたとおりでである。

上式をみると、 $\Delta\alpha$ は、観測誤差ばかりでなく K , ϵ に関係することがわかる。

観測誤差がどのくらいかは走時曲線を引いてみないかぎり見当は付かないが、 $\frac{K \sin \epsilon}{(K - \cos \epsilon)^2 + \sin^2 \epsilon}$ を小ならしめるような K , ϵ を選ぶことにより、 $\Delta\alpha$ を最小にいくとめることができることがわかる。この観点から $\frac{K \sin \epsilon}{(K - \cos \epsilon)^2 + \sin^2 \epsilon}$ の図を載せておく。

次にこの方法を説明しよう。

いま、波面 FF' の波が矢印の方向に伝ばしていくとする (Fig. 5 参照)。この波の A, B, C の各点における到着時刻をそれぞれ T_A , T_B , T_C とする。また、 $\angle BAC$ を ϵ , $\angle FAC$ を α とするとき、 α は

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \epsilon}{K - \cos \epsilon} \quad (2)$$

で与えられる。

ここで、 $K = \frac{T_{AB}}{T_{AC}} \frac{b}{c}$, $T_{AB} = T_B - T_A$, $T_{AC} = T_C - T_A$,

$b = AC$, $c = AB$ とする。

そこで、上式から三点以上の点で観測された P 波の発現

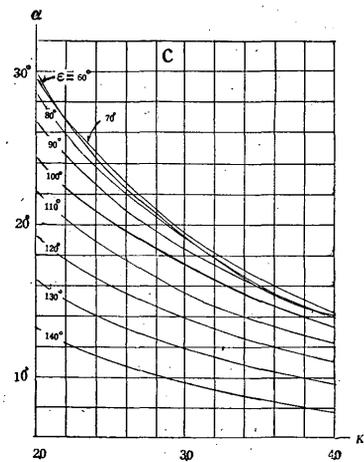
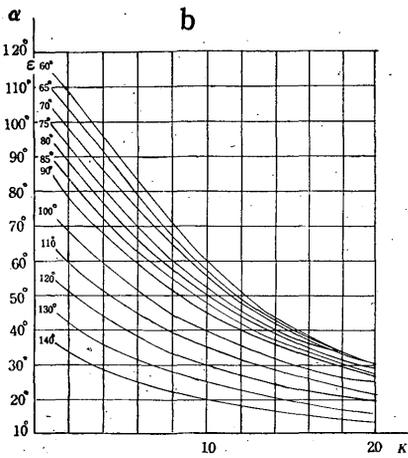
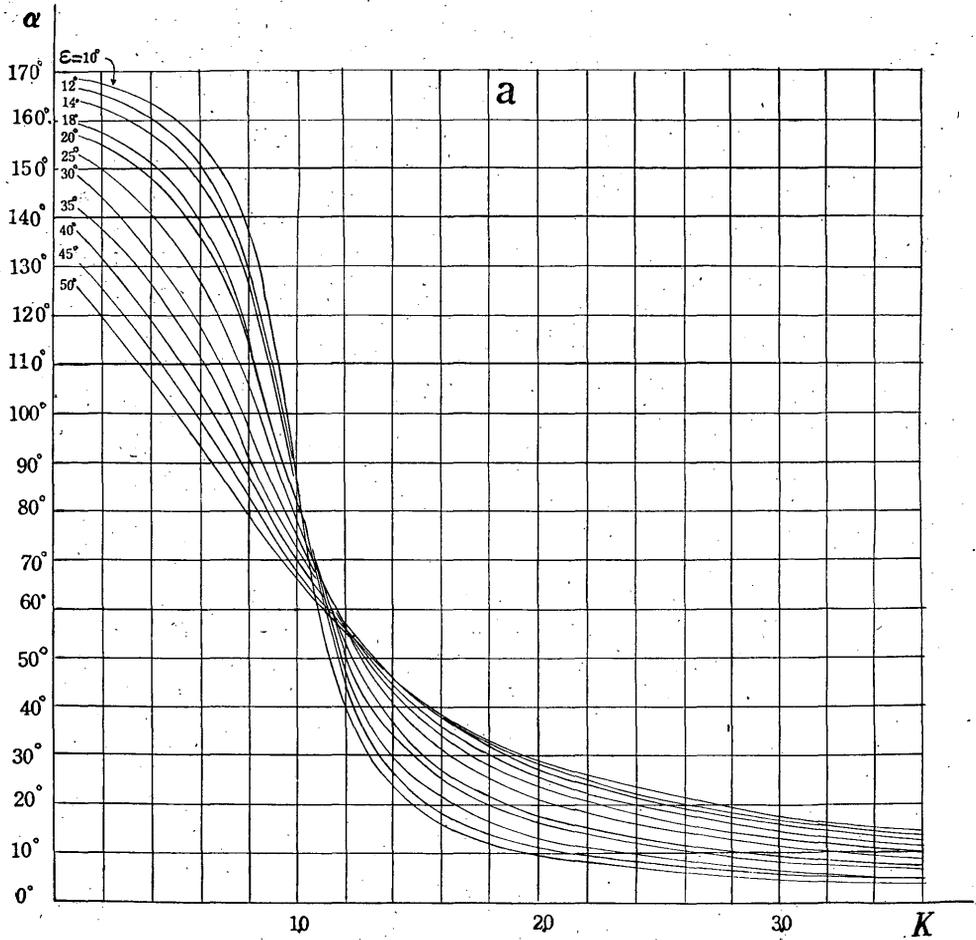


Fig. 6

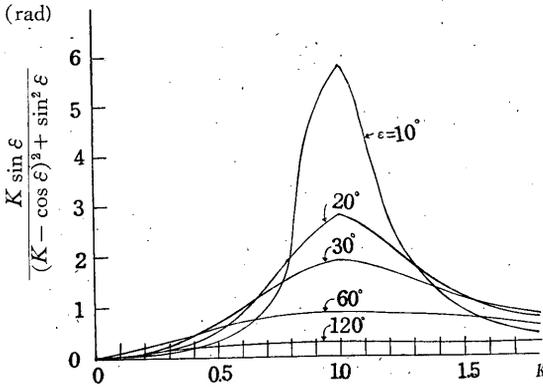


Fig. 7

Fig. 6 から決めると同時に、 α の適否を (4) 式から見当を付け、 α のなかに含まれているであろう誤差を Fig. 7 を用いてあたり、その値が適当であることがわかったならば、波の伝ばしてきた方向を求める。

(iii) この方向に対応する大円を前載の表を利用して描く。

いろいろな組合せが許される場合はこの図を見て、 α の誤差が小となるような三点群を選び出すべきである。

最後に以上の結果から遠地震の震央決定の一助法としての P 波発震時群の利用法をまとめると、次のようになる。

(i) P 波の発震時の観測された各点から、Fig. 7 を参照して、適当な三点群を選び出し、それぞれの K 、 ε を求める。

(ii) それらの K 、 ε に対応する α を