多層構造モデルのもとで多点の S - P 時間を もちいた古い地震の震源再計算

東京大学理学部地球物理学教室 石 橋 克 彦

(昭和 50 年 8 月 2 日受理)

Precise Relocation of Semi-historical Earthquakes using S - P times under a Multi-layered Structure Model

Katsuhiko ISHIBASHI

Geophysical Institute, Faculty of Science, University of Tokyo

(Received August 2, 1975)

For the purpose of precise relocation of earthquakes which had occurred in Japan around the first quarter of this century, a computer program was written which calculates hypocenter parameters by the method of least squares using S - P times at more than three stations and employing an arbitrary multi-layered crustal structure.

As examples of relocation, about five semi-destructive earthquakes in the Kanto district: the Ryugasaki earthquake of 1921, the Yatabe earthquake of 1922, the Mitsukaido earthquake of 1923, the Uraga Channel earthquake of 1922 and the Haneda earthquake of 1926, all near-field S - P time data were carefully examined and hypocenters were redetermined. The epicenters and the focal depths obtained are expected to be uncertain by less than ± 10 km except the Uraga Channel earthquake. The former three, which has been suspected to be precursory activities of the Great Kanto earthquake of 1923, were ascertained to have their origins in the upper mantle beneath the SW part of the Ibaraki Prefecture where is even now a remarkable swarm area.

§ 1. は じ め に

サイスミンティ調査という立場からは、最近 10 数年来の精密な地震観測も現在の一瞬を見ているにすぎないから、古い時代の地震活動を明らかにすることがきわめて重要である。我国ではこのような努力は、歴史時代の地震の古文書による調査やそれ以前の巨大地震の地学的調査の面で以前から意識的に行なわれてきたわけだが、もつと手近な明治・大正・昭和初期に関して、案外再検討すべき余地が多いように思われる。

この期間は曲がりなりにも近代的な地震観測が始められ震央が一応系統的に求められているために、何かにつけてそれらの結果が安易に引用されがちだが、実際は疑わしいものも多く、

また震源の深さがあいまいであつて、かえつて議論が混乱するものになつている。一方、(明治期は歴史時代というべきかもしれないが) 明治も末期になると各地でいわゆる微動計による連続観測が行なわれるようになったから、その観測データを注意深く吟味した上で現代的手法で処理すれば、主な地震についてはかなり信頼度の高い震源位置を推定することが可能と考えられる。

特に関東地方では、この時期の終り近くに、100 年のオーダーでしか繰り返さないと考えられる関東大地震が起こつてしまつたから、この種の大事件前後の地震活動の様子を知るために、是非とも明治末期から昭和初期にかけての地震を(出来ればメカニズム等も含めて) 再調査すべきである^{注1)}。

本論文では、地震活動調査の基礎となる震源計算について、まず上述の時期に適した一般的な方法を述べ、次にその適用例として、関東地方に発生した5個の地震(1921年12月8日電ヶ崎地震・1922年4月26日浦賀水道地震・1922年5月9日谷田部強震・1923年1月14日北海道強震・1926年8月3日羽田強震)の震源再計算結果を紹介する。これらの地震は、関東大地震の前兆的活動として注目されているものや、首都圏の被害地震発生予測の議論によく引用されるものなので、今回の結果が広く納得されて将来の議論の基礎になることを願い、かかわりのあるデータをすべて掲げて批判的検討の便宜を図つた。なお、本論文で問題にするのは地震波が最初に出た地点という意味の「震源」だけであつて、震源域の拡がり方については考えていない。

§ 2. 計 算 法

いま問題にしている時期は刻時精度が悪くて P 波着震時は信用出来ないので、 $S-P$ 時間だけをを用いる。また最近の震源計算の傾向に従つて、走時表を使わずに構造を任意に与えることにする。

さて、適当な座標系における震源の座標を (x, y, z) とすると、 i 番目の観測点では

$$(S-P)_i = TS_i(x, y, z) - TP_i(x, y, z) \quad (1)$$

なる観測方程式が成り立つ。ここに $(S-P)_i$ は観測された $S-P$ 時間、 $TP_i(x, y, z)$ ($TS_i(x, y, z)$) はこの点での $P(S)$ 波理論走時で $P(S)$ 波の速度構造が与えられていれば x, y, z だけの関数

注1) 幸い関東地方は、大正時代からすでにかなりの数の地震観測点が存在してデータに恵まれており、地震活動の点でも、被害地震の数は最近より多いほどで材料豊富といえる。このような事情と、浅い微小地震活動がきわめて少ないという状況のために、関東地方における狭義のサイスミシティ研究は、古い地震の再調査にかなりの比重が置かれるべきであろう。この点、近畿地方が稠密な観測網による微小地震研究を主体として成果をあげてきたのと対照的といえよう。

である。従つて、 P 波と S 波の速度構造がともにわかつていれば、(1) 式を 3 点以上について解くことによつて (x, y, z) が求まるわけだが、現在のところもつともらしい S 波の速度構造を独立に与えることは非常にむずかしい。そこで以下のような便宜的な方法をとる。

いま震源と観測網を含む領域で次の 2 つの条件が成り立っているものとする。(1) 震源から各観測点に至る P 波と S 波の伝播距離は互いにほぼ等しく、(2) i 番目の観測点に至る P 波と S 波の平均的な速度を α_i, β_i とすると α_i/β_i が i によらず一定 (震源の深さには依存する)、つまり $\alpha_i/\beta_i = \gamma(z)$ 。このとき

$$\alpha_i TP_i(x, y, z) \simeq \beta_i TS_i(x, y, z) \quad (2)$$

だから、

$$\begin{aligned} TS_i(x, y, z) &\simeq (\alpha_i/\beta_i) TP_i(x, y, z) \\ &= \gamma(z) TP_i(x, y, z) \end{aligned} \quad (3)$$

となり、(1) 式は近似的に

$$(S-P)_i = \{\gamma(z) - 1\} TP_i(x, y, z) \quad (4)$$

と書き直せる。

ここで仮定した条件は、ある地震に対する P 波着震時対 S - P 時間のプロットに直線を当てはめてその傾きから地震と観測網を含む領域の平均的な V_P/V_S の値を求める時に仮定する条件と全く同じで、実際いつもよく直線が当てはまることから適当に地域を限つた場合にはほぼ成り立っていると考えられていることである。 $\gamma(z)$ は、震源の深さが z の地震を使つてこの方法で求めたその地域の平均的な V_P/V_S に他ならない。

結局、当該地域の P 波速度構造と平均的な (見掛けの) V_P/V_S の深さ分布が与えられれば、(4) 式によつて、多点の S - P 時間のデータから構造に即した震源 (x, y, z) が計算出来るわけである。実際には、 γ をパラメータとして (4) 式を解き、得られた震源の深さを γ の深さ分布と比べて一番良さそうな解を探す。 V_P/V_S の深さ分布がわからない場合は γ の値を適当に仮定して計算することになるが、 γ の値に応じて結果は後の例で見る程度に変化するから誤差は大きくなる。 γ の値によつて走時残差も変化し、一般にあるところで極小となるが、もともとデータに誤差があるのだからこの時の γ が一番良いわけではない。

実際問題としてはデータの吟味がきわめて重要である。あまり遠方のデータは、振幅が小さく波形が複雑になるから当時の地震計の性能を考えると S 波の判定に誤りが生じやすいと考えられ、原記録を読み直せる場合以外は使うべきではない。震源の深さや観測点の分布との兼合いがあるが、一般的には震央距離 100 km 程度以内のデータだけを使うのがよいだろう。近い観測点でも、報告値はよく注意する必要がある。昔は、主に遠地地震に対する第一初期微動

($P \sim S$)・第二初期微動 ($S \sim L$) といった概念を局地地震にもあてはめて、本来の S を表面波の始め (L) とみなした場合が少なくないようである。また地殻内の地震の場合は、反射波などで記象が複雑になつて S 波の判定を誤ることが多いと考えられる。ダンパーのない地震計が多かつたことも問題である。気象要覧などの記載値だけから判断するのは困難だが、多少とも不

Table 1. Seismological stations in work during 1921~1926 and used in this study.

Station	Abbr.*	Lat. (N)	Long. (E)	Alt. (m)	Organization**	Seismographs***
Mito	MT	36°22.7'	140°28.3'	30	CMO	OH, IS
Kakioka	KK	36°13.9'	140°11.6'	27	CMO	OH, W (both Feb. 1926~), CP, CS (both around 1926~)
Tsukuba	T1	36°13'	140°06'	869	CMO	OH
Tsukuba	T3	36°12.7'	140°06.6'	286	IEIC	GM, OT
Utsunomiya	UT	36°32.6'	139°52.3'	120	CMO	GM, OP (Feb. 1925~)
Ashio	AS	36°39'	139°27'	637	private	OT
Maebashi	MB	36°24.1'	139°03.9'	112	CMO	GM, OP (~around 1922), NP (around 1922~)
Kumagaya	KM	36°08.8'	139°23.1'	30	CMO	GM, NP (March 1922~), W (Sept. 1924~)
Choshi	CH	35°43.5'	140°50.6'	27	CMO	GM, OH, OV, OT, OP, IS (1923~), W (Feb. 1926~)
Katsuura	KU	35°09'	140°19'	12	CMO	OP (June 1926~)
Kiyosumi	K3	35°09.4'	140°09.0'	—	TIU	OP? (July 1925~)
Mera	MR	34°55.2'	139°49.7'	12	CMO	NP (Apr. 1923~)
Tokyo	TK	35°41.2'	139°45.4'	21	CMO	GM (~Sept. 1923), OH, OT, W and others
Hongo	HG	35°42.6'	139°46.0'	—	TIU	GM, OH, OV, OT, OP, OS, IS and others
Hitotsubashi	HI	35°41.3'	139°45.7'	—	TIU	GM, OH, OT, OS and others (all ~Sept. 1923?)
Yokohama	YK	35°26.2'	139°39.3'	38	CMO	GM (~Sept. 1923), NP (July 1922~ Sept. 1923), OP (July 1924~), IS (Feb. 1926~)
Yokosuka	YS	35°17'	139°40'	44	Navy	CP (around 1922~)
Misaki	MS	35°09.4'	139°37.1'	—	TIU	? (1925~)
Kamakura	KA	35°18.5'	139°32.7'	—	TIU	OP?, OV? (both 1924~)
Numazu	NM	35°06'	138°51'	7	CMO	OH, OP, OS, W (all May 1926~), GM, CP

* valid in this paper only.

** CMO, Central Meteorological Observatory; IEIC, Imperial Earthquake Investigation Committee; TIU, Tokyo Imperial University.

*** GM, Gray-Milne-Ewing type seismograph (inadequate to measure $S-P$ time as recording being triggered by seismic waves); OH, Omori's horizontal seismograph; OV, Omori's vertical seismograph; OT, Omori's horizontal tromometer; OP, Omori's portable seismograph; NP, Nakamura's portable seismograph; CP, CMO type portable seismograph; OS, Omori's strong motion seismograph; IS, Imamura's strong motion seismograph; CS, CMO type strong motion seismograph; W, Wiechert's seismograph.

審なデータは使わないほうがよい。もともとデータの数に限られているから、1個か2個の誤ったデータのために結果が大きく狂う恐れがある。1点でも原記録に基づく信頼度の高いデータがあれば非常に有効である。データの質に応じた重みをつけることは不可欠であろう。

実際の計算機プログラムは10層までの水平成層構造を与えることが可能で、データは99個まで処理出来る。

今回は、大正関東大地震前後の5個の関東地方の地震にこの方法を適用した。いずれもモホ面より下の地震で直達 S 波が主と考えられるから扱いやすい。それらの再決定された位置を Fig. 1 に示す。Table 1 は、浜松 (1966) と宇佐美・浜松 (1967) および関係論文に基づいて、当該地震当時震央距離約 100 km 以内 (浦賀水道地震は約 150 km 以内) にあつた全地震観測点を列挙したものである^{注2)}。これらの分布も Fig. 1 に示した。構造モデルは津村 (1973) が関東地方に適用しているもの (Fig. 1 の MODEL A) を用いた。このモデルが関東地方に妥当かどうかはまだ問題だが比較の便利のためである。関東地方の平均的 V_P/V_S の深さ分布

Fig. 1. Index map showing five relocated earthquakes and seismicological stations listed in Table 1. The crustal model (V_P structure) used in hypocentral calculations is also shown.

Fig. 2. Apparent V_P/V_S distribution with depth in the Kanto district obtained by SHIBUYA (1974). Apparent V_P/V_S values averaged every ten kilometers are plotted. Numbers of earthquakes used for averaging and standard deviations are also shown.

注2) 所属を CMO とした観測点の多くは、厳密には各地方自治体に属していたようである。

は渋谷 (1974) によつて調べられているので、それを活用した (Fig. 2). 座標系は x 軸を東向き y 軸を北向き z 軸を下向きにとつてある.

S 波の判定が正しくても、ドラムの回転むらや刻時不整などのために、 S - P 時間には $0.5 \sim 1$ sec 程度の誤差はあると思われる. そこで各地震について、各観測点にデータの質に応じた読み取り誤差を想定した場合の震源の存在範囲も調べた. これは、震源の深さを何通りかに固定して MODEL A に対する走時表から図式解法で求めたもので、細かい形状は無意味だがだいたいの様子はつかめるであろう.

Table 2. Seismological stations within about 100 km from the epicenter of the so-called Ryugasaki earthquake of Dec. 8, 1921 and their S - P time data.

Station	S - P time (sec)	Data source*	Weight in calculation	Assumed error in S - P time (sec)
MT	8.0 8	(1) (3) (4) (5) (6) (2) (7)	} 0.25	± 1.0
T1	6.0 6 uncertain	(3) (5) (2) (1)	} 0.25	± 1.0
T3	no datum			
UT	no datum			
AS	no datum			
MB	9.8 10.0 10 uncertain (scale out)	(1) (4) (3) (5) (2) (8)	} unused	
KM	3.9 5.5	(3) (5) (4)	} unused	
CH	9.8 10 9.4 9.8 (EW) 9.6 (UD)	(1) (3) (4) (5) (2) (6) (9)	} 0.5 } unused	± 0.7
TK	6.3 6.2 6	(1) (3) (5) (2)	} unused	
HG	8.8 8.3 (EW) 8.7 (NS) 8.5 (mean)	(6) reread**	unused 1.0	± 0.5
HI	8.8 8.3~9.5	(6) reread**	} unused	
YK	no datum			

* (1), Kisho Yoran [Chuo Kisyō-dai (1921)]; (2), Seism. Bull. CMO [CMO (1922a)]; (3), USHIYAMA (1922a); (4), USHIYAMA (1922b); (5), USHIYAMA (1922c); (6), OMORI (1922a); (7), Seism. Rep. Mito Meteor. Obs.; (8), Seism. Rep. Maebashi Meteor. Obs.; (9), Seism. Rep. Choshi Meteor. Obs.

** see ISHIBASHI (1973).

§ 3. 1921 (大正 10) 年 12 月 8 日 21 時 31 分「竜ヶ崎」地震^{注3)}, $M=7.1$ (6.7~7.1)^{注4)}

地震当時震央距離約 100 km 以内に存在した全地震観測点とそこでの S - P 時間を Table 2 に掲げる. UT と YK は GME 普通地震計だけだから S - P 時間は観測出来なかつたのであろう. T3 と AS については不明である. MB のデータは, 測候所報告によれば描針が振り飛んだ記録から無理に読み取つたものなので, 計算には用いながつた. KM も, 普通地震計から無理に読み取つた値で信用出来ないから用いながつた. TK は, 当時の新聞記事によると観測がうまくゆかなかつたようであるが, とにかく信頼度の高い HG・HI と大幅に異なるので用いながつた. HG と HI は, OMORI (1922a) の論文に記録の写真が掲載されているのでそれ

Fig. 3. The epicenter and the focal depth of the so-called Ryugasaki earthquake and the root-mean-square of O - C residuals of P travel-times as functions of γ (apparent V_P/V_S). Bars indicate standard deviations of focal depths. The line A represents the same distribution of γ that in Fig. 2.

Fig. 4. Extent of the epicenter of the so-called Ryugasaki earthquake for several focal depths in case S - P time errors listed in Table 2 are assumed. The hypocenter cannot exist deeper than 61 km nor shallower than 43 km. The cross represents the most probable point for epicenter ($36^{\circ}04'N$, $140^{\circ}10'E$; focal depth, 53 km). $\otimes$'s show epicenters determined by other investigators with focal depths in parentheses: C, Chuo Kisho-dai (1921) ($35.8^{\circ}N$, $140.1^{\circ}E$); O, OMORI (1922a) ($35^{\circ}55'48''N$, $140^{\circ}20'38''E$); K, KATSUMATA (1975) ($36^{\circ}09'N$, $140^{\circ}03'E$).

注3) 著者は以前【石橋 (1973)】, 別の構造モデルに対して水戸・銚子・本郷3点の S - P 時間から作図法でこの地震の震源再決定を行ない, $36^{\circ}03'N$ ・ $140^{\circ}11'E$ ・深さ 63 km の結果を得たが, 前節の方法によって再論する.

注4) () 内は勝又 (1975) による M .

を再検測し（詳細は石橋（1973）を参照），OMORI 自身の値は使わなかつた。ただし HI は再検測値に 1.2 sec の幅があるので用いながかつた。結局，計算に用いた観測点は MT・T1・CH・HG の 4 点である。それぞれに Table 2 のような読み取り誤差を想定し，それに応じた重みをつけた。

Fig. 3 に γ の値に応じた震央・震源の深さ・ P 波走時残差の変化の様子を示す。震源の深さの変化と折れ線 A との比較から， $\gamma=1.77$ のときが最も妥当な震源位置を与えるものと思われる。結果は $36^{\circ}04'N \cdot 140^{\circ}10'E$ ・深さ 53 km (Fig. 4 の×印) であつて，震央の標準偏差は x, y とともに ± 4 km，深さの標準偏差は ± 3 km， P 波走時残差の二乗平均平方根は 0.34 sec である。いまの場合は γ の値が多少変わつても震源はそれほど動かず，1.74 から 1.80 まで変わつた場合，上の結果に対して深さが ± 4.5 km 程度，震央が ± 2.5 km 程度移動するだけである。

4 点の $S-P$ 時間に前述の読み取り誤差があつた場合の震源の存在範囲を Fig. 4 に示す。震源の誤差は古い地震の割には小さく，深さは 40~60 km におさまる。なお，従来求められた震源も Fig. 4 に示した。

以上の結果から，この地震はほぼ間違いなく，現在も活発な茨城県南西部の深さ数 10 km の地震の単に属するものと考えられる。余震が多かつた【例えば石橋（1973）】ことから，浅い地震と考える説もあるが，むしろ，ほぼ確実に深いのに多くの余震を伴つたことに注目すべきであらう。

§ 4. 1922 (大正 11) 年 4 月 26 日 10 時 11 分「浦賀水道」地震， $M=6.9$ (6.8~6.9)

観測点の分布と震央の位置関係から，この地震に限つて，用いる観測点を震央距離 150 km 付近まで拡げた。その範囲の全観測点と $S-P$ 時間を Table 3 に掲げる。この地震は東京湾沿岸一帯に 2 名の死者を含むかなりの被害を与え当時から重大視された地震であつて調査報告もいくつか出されているにかかわらず，観測と記載に不備が多いためデータが非常に悪い。従来求められた震源 (Fig. 6) が大きくばらついているのもこのような事情によるものであらう。

Table 3 のうち，T3・UT・YK は GME 普通地震計から推定した値なので用いながかつた。MB の 17.6 sec も，測候所報告によると，微動計の針が飛んだため普通地震計記録から読んだ値らしいので用いながかつた。CH は，OMORI (1922b) の値と中村 (1922a, b)・測候所の値とがあまりに違いすぎるので両方用いながかつた (OMORI も自身で記象紙を験測したらしい)。TK は前節同様，信頼度の高い HG・HI と誤差の範囲を越えて違つているので用いながかつた。T1 は P 波着震時の記載はあるが $S-P$ 時間は「不明」となつている。結局，計算に用いたのは

Table 3. Seismological stations within about 150 km from the epicenter of the so-called Uraga Channel earthquake of April 26, 1922 and their S - P time data.

Station	S - P time (sec)	Data source*	Weight in calculation	Assumed error in S - P time (sec)
MT	16.0 16	(1) (4) (5)	0.06	± 2.0
T1	uncertain	(1)		
T3	>15	(3)	unused	
UT	13.0	(4)	unused	
MB	17.6 uncertain (scale out)	(4) (6)	unused	
KM	14.0	(4)	0.06	± 2.0
CH	about 17 10.4 10.6	(3) (4) (7)	} unused	
TK	9.6 10 9.2	(1) (2) (4)		
HG	11.1 10.4	(3) reread	unused 0.5	± 0.7
HI	11.2 10.8	(3) reread	unused 1.0	± 0.5
YK	6.3	(4)	unused	
YS	6.3	(4)	0.06	± 2.0
NM	11.0 11.2 11.1	(1) (4) mean	0.06	± 2.0

* (1), Kisho Yoran [Chuo Kisho-dai (1922a)]; (2), Seism. Bull. CMO [CMO (1922b)]; (3), OMORI (1922b); (4), NAKAMURA (1922a, b); (5), Seism. Rep. Mito Meteor. Obs.; (6), Seism. Rep. Maebashi Meteor. Obs.; (7), Seism. Rep. Choshi Meteor. Obs.

MT・KM・HG・HI・YS・NM の 6 点であるが、観測網の形状として望ましい形ではない。このうち HG・HI については、OMORI (1922b) の論文中的地震記象を再実験したので信頼度が高い。試みの計算で全般に残差がかなり大きかったので、他の 4 点のデータの想定誤差を大きくとり、HG と HI に圧倒的な重みをつけた。HG と HI の重みの違いは記録の質によるものである。

Fig. 5 に γ の値に応じた震央・震源の深さ・ P 波走時残差の変化の様子を示す。この図から、 $\gamma=1.81$ に対応する結果 ($35^{\circ}10'N \cdot 139^{\circ}41'E$ ・深さ 71 km, Fig. 6 の×印) を最終的な震源位置として採用したが、震央の標準偏差が $x \pm 28$ km, $y \pm 23$ km, 深さの標準偏差が ± 21 km, P 波走時残差の二乗平均平方根が 1.73 sec もあり、精度は極めて悪い。Fig. 6 で实际的な震源の誤差をみると、MT を除く 5 点の S - P 時間に Table 3 のような誤差があつた場合、震源の深さは 71 km より深くはならないが震央が南東に動くにつれて相当浅くなり

Fig. 5. The epicenter and the focal depth of the so-called Uruga Channel earthquake and the root-mean-square of $O-C$ residuals of P travel-times as functions of γ (apparent V_P/V_S). The line A is the same that in Fig. 3.

得、震源が存在し得る範囲はずいぶん広い。ただし被害状況【例えば中央気象台(1922a)】を参考にすると、房総半島南端付近より南にはいかないであろう。また

MT を除いたために(除いた理由は $S-P$ 時間の残差が 2 sec を越えているため), Fig. 6 の推定範囲は西へ拡がりすぎていると思われる。結局, HG と HI のデータが確かなので, 震源位置は三浦半島先端部から浦賀水道を経て房総半島南部に至る一帯のどこかで深さは 40~70 km という程度までは押えられる。約 16 カ月後に起こった関東大地震の断層モデル【例えば ANDO (1974)】との関係で言えば, 断層の下盤つまりフィリピン海プレートの内部に発生したと考えられる。

§ 5. 1922 (大正 11) 年 5 月 9 日 12 時 28 分「谷田部」強震, $M=6.4$ (6.1)

震央距離約 100 km 以内にあつた全地震観測点とそこでの $S-P$ 時間を Table 4 に掲げる。

UT・YK は GME 普通地震計だけの点である。T3・AS・KM・HI・YS は連続観測をして

Fig. 6. Extent of the epicenter of the so-called Uruga Channel earthquake for several focal depths in case $S-P$ time errors listed in Table 3 are assumed (MT is excluded owing to its very large $O-C$ residual of $S-P$ time). The hypocenter cannot exist deeper than 71 km. The cross represents the most probable point for epicenter ($35^{\circ}10'N$, $139^{\circ}41'E$; focal depth, 71 km). $\otimes$'s show epicenters determined by other investigators with focal depths in parentheses: C, Chuo Kisho-dai (1922a) ($35.4^{\circ}N$, $139.9^{\circ}E$); N, NAKAMURA (1922a, b); O, OMORI (1922b); R, Rika Nenpyo (1974) ($35.2^{\circ}N$, $139.7^{\circ}E$); U, USAMI (1975) ($35.4^{\circ}N$, $139.75^{\circ}E$); K, KATSUMATA (1975) ($35^{\circ}13'N$, $139^{\circ}59'E$).

Table 4. Seismological stations within about 100 km from the epicenter of the so-called Yatabe earthquake of May 9, 1922 and their S - P time data.

Station	S - P time (sec)	Data source*	Weight in calculation	Assumed error in S - P time (sec)
MT	9.0 9	(1) (3)	0.25	+1.0
T1	uncertain	(1)		
T3	no datum			
UT	no datum			
AS	no datum			
MB	10.9	(1) (4)	0.25	± 1.0
KM	no datum			
CH	10.6	(5)	0.25	± 1.0
TK	7.9	(1)	0.5	± 0.7
HG	7.8	(2)	1.0	± 0.5
HI	no datum			
YK	no datum			
YS	no datum			

* (1), Kisho Yoran [Chuo Kisho-dai (1922b)]; (2), YASUDA and KODAIRA (1938); (3), Seism. Rep. Mito Meteor. Obs.; (4), Seism. Rep. Maebashi Meteor. Obs.; (5), Seism. Rep. Choshi Meteor. Obs.

いたはずだがデータ不明である。T1 は S - P 時間が読まれていない。従つて計算に用いた観測点は MT・MB・CH・TK・HG の 5 点である。どれも原記録を読むことは出来なかつたが、TK と HG は互いに一致が良いので重みを大きくした。

Fig. 7 に γ の値に応じた震央・震源の深さ・ P 波走時残差の変化の様子を示す。この図から、 $\gamma=1.77$ のときを最終結果とする。それは $36^{\circ}04'N \cdot 139^{\circ}58'E$ ・深さ 54 km (Fig. 8 の $\times$ 印) で、震央の標準偏差が x, y とともに約 ± 5 km, 深さの標準偏差が ± 5 km, P 波走時残差の二乗平均平方根が 0.53 sec である。 γ の値が 1.74 から 1.80 まで変わつても、上の結果に対して深さが ± 6 km, 震央が ± 1.5 km 程度しか移動しない。

5 点の S - P 時間に Table 4 の読み取り誤差があつた場合の震源の存在範囲を Fig. 8 に示す。深さは 40~60 km 以内におさまリ、この地震も「竜ヶ崎」地震同様、茨城県南西部地震群のひとつであつたことはほぼ確実である。

§ 6. 1923 (大正 12) 年 1 月 14 日 14 時 51 分「水海道」強震, $M=6.3$ (6.0)

震央距離約 100 km 以内にあつた全地震観測点とそこでの S - P 時間を Table 5 に掲げる。UT は GME 普通地震計だけである。AS・YK・YS は連続観測をしていたはずだがデータ不明である。T3 はデータが不確かなので用いながつた。T1 は S - P 時間が読まれていない。

Fig. 7. The epicenter and the focal depth of the so-called Yatabe earthquake and the root-mean-square of $O-C$ residuals of P travel-times as functions of γ (apparent V_P/V_S). Bars indicate standard deviations of focal depths. The line A is the same that in Fig. 3.

Fig. 8. Extent of the epicenter of the so-called Yatabe earthquake for several focal depths in case $S-P$ time errors listed in Table 4 are assumed. The hypocenter cannot exist deeper than 60 km nor shallower than 41 km. The cross represents the most probable point for epicenter ($36^{\circ}04'N$, $139^{\circ}58'E$; focal depth, 54 km). $\otimes$'s show epicenters determined by other investigators with focal depths in parentheses: C, Chuo Kisho-dai (1922b) ($36.1^{\circ}N$, $140.1^{\circ}E$); Y, YASUDA and KODAIRA (1938) ($36.0^{\circ}N$, $140.1^{\circ}E$); K, KATSUMATA (1975) ($36^{\circ}02'N$, $139^{\circ}51'E$).

KM は、気象要覧の値（「中央気象台ニ於テ調査センモノ」の注あり）と OMORI (1924) の値（測候所報告の引用）とが大きく異なり、どちらが良いかの決め手がないので両方用いながつた。結局、計算に用いたのは、MT・MB・CH・TK・HG・HI の 6 観測点である。MT と CH は、一番信用出来そうな OMORI (1924) の値を採用した。HG と HI は、OMORI (1924) の論文中の記録写真を再検測した値を用いた。ただし記録があまりきれいでないので、誤差を大きく見込んである。

Fig. 9 に γ の値に応じた震央・震源の深さ・ P 波走時残差の変化の様子を示す。この図から、 $\gamma=1.80$ のときを最終結果とする。それは $36^{\circ}00'N$ ・ $139^{\circ}58'E$ ・深さ 63 km (Fig. 10 の $\times$ 印) で、震央の標準偏差が $x \pm 5$ km, $y \pm 7$ km, 深さの標準偏差が ± 5 km, P 波走時残差の二乗平均平方根が 0.64 sec である。 γ の値が 1.77 から 1.83 まで変わつても、上の結果に対して深さが ± 6 km, 震央が ± 2.5 km 弱しか移動しない。

Table 5. Seismological stations within about 100 km from the epicenter of the so-called Mitsukaido earthquake of Jan. 14, 1923 and their S - P time data.

Station	S - P time (sec)	Data source*	Weight in calculation	Assumed error in S - P time (sec)
MT	10.3	(1)	unused	± 1.0
	9.4 (NS) 9.4 (EW)	(2)	1.0	
	9	(3)	unused	
T 1	uncertain	(1)	unused	
T 3	about 6	(2)		
UT	no datum			
AS	no datum			
MB	13.0	(1)	unused	± 1.0
	13.4	(4)	unused	
	13.2	mean	1.0	
KM	5.5	(1)	unused	
	6.8	(2)	unused	
CH	12.3	(1)	unused	± 1.0
	12.7	(2)	1.0	
	12.9	(5)	unused	
TK	8.2	(1)	1.0	± 1.0
HG	9.0	(2)	unused	± 1.0
	8.1	reread	1.0	
HI	8.3	reread	1.0	± 1.0
YK	no datum			
YS	no datum			

* (1), Kisho Yoran [Chuo Kisho-dai (1923)]; (2), OMORI (1924); (3), Seism. Rep. Mito Meteor. Obs.; (4), Seism. Rep. Maebashi Meteor. Obs.; (5), Seism. Rep. Choshi Meteor. Obs.

6 点の S - P 時間に Table 5 の読み取り誤差があつた場合の震源の存在範囲を Fig. 10 に示す. 深さは 60~70 km の狭い範囲におさまつており, これもほぼ確実に茨城県南西部の地震である.

§ 7. 1926 (大正 15) 年 8 月 3 日 18 時 26 分「羽田」強震, $M=6.2$ (6.1)

震央距離約 100 km 以内に存在した全地震観測点とそこでの S - P 時間を Table 6 に掲げる. この地震については, 最近東京大学地震研究所で整理された CH・HG・KA の原記録を再検測することが出来たので, それらを中心に特にデータを厳選した. 各測候所のデータは, 鷺坂・佐藤 (1926a, b) の再検測値があるから気象要覧等の値は一切用いなかつた. 彼等の値も, CH は著者が再検測したので, TK は HG と大きく異なるので, 使わなかつた. YK は最初計算に加えたが走時残差が特別大きくなるので最終的には除いた. K3 も原記録が残っているが, S 波の識別が出来なかつた (10.4 sec は長すぎる) ので使えなかつた. 結局, 最終的に計算に用いたのは KM・CH・HG・KA・NM の 5 点である.

Fig. 9. The epicenter and the focal depth of the so-called Mitsukaido earthquake and the root-mean-square of $O-C$ residuals of P travel-times as functions of γ (apparent V_P/V_S). Bars indicate standard deviations of focal depths. The line A is the same that in Fig. 3.

Fig. 10. Extent of the epicenter of the so-called Mitsukaido earthquake for several focal depths in case $S-P$ time errors listed in Table 5 are assumed. The hypocenter cannot exist deeper than 70 km nor shallower than 60 km. The cross represents the most probable point for epicenter ($36^{\circ}00'N$, $139^{\circ}58'E$; focal depth, 63 km). $\otimes$'s show epicenters determined by other investigators with focal depths in parentheses: C, Chuo Kisho-dai (1923) ($36.0^{\circ}N$, $140.0^{\circ}E$); O, OMORI (1924) ($36^{\circ}04'N$, $140^{\circ}03'E$); K, KATSUMATA (1975) ($35^{\circ}51'N$, $140^{\circ}05'E$).

Fig. 11 に γ の値に応じた震央・震源の深さ・ P 波走時残差の変化の様子を示す。折れ線 A と比べてみると $\gamma=1.79$ 前後のときが一番妥当な震源を与えると考えられるが、ちょうど $\gamma=1.786$ で P 波走時残差の二乗平均平方根が極小 (0.03 sec) となつている。そこでこのときの震源を最終結果とした。それは $35^{\circ}26'N \cdot 139^{\circ}53'E$ ・深さ 61 km (Fig. 12 の $\times$ 印) で、震央の標準偏差が $x \pm 0.3$ km, $y \pm 0.5$ km, 深さの標準偏差が ± 0.3 km である。 γ の値が 1.75 から 1.81 まで変わつても、上の結果に対して震央が 1.0~1.5 km, 深さが $+6.2 \sim -3.9$ km しか移動しない。YK を計算に加えても最終結果はほとんど変わらない。

5 点の $S-P$ 時間に Table 6 の読み取り誤差があつた場合の震源の存在範囲を Fig. 12 に示す。深さは 56~65 km に限られている。従来求められた震源も Fig. 12 に示した。

東京湾付近の地震の素性はまだよくわかっていないが、この地震は羽田沖というよりは木更津沖というべきである。今村 (1931a, b) によれば地震時と地震前に羽田地塊が傾動・沈下した

Table 6. Seismological stations within about 100 km from the epicenter of the so-called Haneda earthquake of Aug. 3, 1926 and their *S-P* time data.

Station	<i>S-P</i> time (sec)	Data source*	Weight in calculation	Assumed error in <i>S-P</i> time (sec)
KK	11.5	(1) (2)	unused	
T1	10.0	(1)	unused	
T3	no datum			
KM	11.1	(1)	} unused	±0.7
	12.1	(2)		
	12.1 (NS, EW)	(3)		
CH	12.5	(1)	} unused	±0.5
	12.6	(2)		
	12.5 (NS) 12.8 (EW) 12.4 (UD)	(3)		
	12.3 (NS, UD) (EW, uncertain)	reread		
KU	no datum			
K3	10.4	(4)	} unused	
	uncertain ($\ll 10.4$)	reread		
MR	uncertain	(1) (2)		
TK	5.7	(1)	} unused	
	5.9	(2)		
	5.9 (EW)	(3)		
HG	7.6	(4)	} unused	±0.5
	8.0 (NS) 7.4 (EW)	} reread		
	7.7 (mean)			
	(UD, uncertain)			
YK	5.0	(1)	} unused	**
	6.0	(2)		
	6.0 (NS, EW)	(3)		
YS	uncertain	(1)		
MS	no datum			
KA	7.8	(4)	} unused	±0.5
	7.5 (NS) 8.1 (EW)	} reread		
	7.8 (mean)			
	(UD, uncertain)			
NM	12.0	(1)	} unused	±0.7
	12.9	(2)		
	13.1 (NS) 12.8 (UD)	} (3)		
	12.9 (mean)			

* (1), Kisho Yoran [Chuo Kisho-dai (1926)]; (2), Seism. Bull. CMO [CMO (1928)]; (3), SAGISAKA and SATO (1926a, b); (4), IMAMURA (1931a, b).

** At first used for calculation with the weight of 0.5; but owing to YK's conspicuously large *O-C* residual, excluded from final computation.

というが、この地震がそのような一次的効果を及ぼすことは考えにくい。

§ 8. お わ り に

以上5個の地震の例によつて、§ 2の方法が古い地震の(古い割には)精密な震源決定に有効であることが確かめられた。震央および深さの誤差は、条件がある程度良ければ±10 km程度、特に良い場合には±数 km程度であつて、最近のサイスミンティから区分される地震の

Fig. 11. The epicenter and the focal depth of the so-called Haneda earthquake and the root-mean-square of $O-C$ residuals of P travel-times as functions of γ (apparent V_p/V_s). Curves Y correspond to the case YK is included in calculation. Bars indicate standard deviations of focal depths. The line A is the same that in Fig. 3.

Fig. 12. Extent of the epicenter of the so-called Haneda earthquake for several focal depths in case $S-P$ time errors listed in Table 6 are assumed. The hypocenter cannot exist deeper than 65 km nor shallower than 56 km. The cross represents the most probable point for epicenter ($35^{\circ}26'N$, $139^{\circ}53'E$; focal depth, 61 km). $\otimes$'s show epicenters determined by other investigators with focal depths in parentheses: C, JMA (1958) ($35.4^{\circ}N$, $139.8^{\circ}E$); S, SAGISAKA and SATO (1926a, b) ($35.5^{\circ}N$, $139.8^{\circ}E$); T, JMA (1971) ($35^{\circ}15'N$, $140^{\circ}00'E$); I, IMAMURA (1931a, b); K, KATSUMATA (1975) ($35^{\circ}44'N$, $140^{\circ}15'E$).

巢（例えば、茨城県南西部、千葉県北部、霞ヶ浦南方など）のどれに属するかを判別するのに充分である。構造モデルの違いによる震源位置のずれは、 P 波着震時を用いた一般の震源決定の場合と本質的に同じで、観測点が地震を囲んでいれば震央はほとんど変わらない。震源の深さは、その深さから上の平均的 P 波速度に応じて変化するわけだが、今回の例のような深さ数 10 km の地震の場合にはよほど特徴的な構造モデルを使わない限り大きな差はない。

5 個とも重要な地震なので結果を Table 7 にまとめておく。

最後に、貴重な原記録を整理され利用の便を図って下さった地震研究所の岩田孝行氏と有益なお話をうかがった気象庁地震課の勝又護氏に謝意を表する。本研究は昭和 49 年度科学研究

Table 7. Hypocentral parameters for five relocated earthquakes.

Date and time	Magnitude*	Epicenter	Focal depth	Quality of epicenter**	Quality of focal depth**
Dec. 8, 1921 21h31m	7.1 (6.7~7.1)	36°04'N 140°10'E	53 km	B	B
Apr. 26, 1922 10h11m	6.9 (6.8~6.9)	35°10'N 139°41'E	71 km	D	D
May 9, 1922 12h28m	6.4 (6.1)	36°04'N 139°58'E	54 km	B	B
Jan. 14, 1923 14h51m	6.3 (6.0)	36°00'N 139°58'E	63 km	B	A
Aug. 3, 1926 18h26m	6.2 (6.1)	35°26'N 139°53'E	61 km	B	A

* Values in parentheses are after KATSUMATA (1975).

** A, uncertain by ± 5 km; B, uncertain by ± 10 km; C, uncertain by ± 20 km; D, uncertain by over 20 km.

費補助金奨励研究 (A) 課題番号 974273 によつて補助された。計算は東京大学大型計算機センターにおいて課題番号 4152123001 で行なわれた。

文 献

- ANDO, M., 1974, Seismo-Tectonics of the 1923 Kanto Earthquake, *J. Phys. Earth*, **22**, 263-277.
- Central Meteorological Observatory, 1922a, Some notable earthquakes occurred near Japan and the distant earthquakes observed in Japan in 1921, *Seism. Bull. Centr. Met. Obs., Japan*, **1**, No. 1, 13-35.
- Central Meteorological Observatory, 1922b, Seismological Observations in Tokyo (Jan.—April, 1922), *Seism. Bull. Centr. Met. Obs., Japan*, **1**, No. 1, 1-12.
- Central Meteorological Observatory, 1928, Note on the Principal Earthquakes in the Year 1926, *Seism. Bull. Centr. Met. Obs., Japan*, **2**, No. 2, 27-38.
- 中央气象台, 1921, 気象要覧, 第 265 号.
- 中央气象台, 1922a, 気象要覧, 第 269 号.
- 中央气象台, 1922b, 気象要覧, 第 270 号.
- 中央气象台, 1923, 気象要覧, 第 278 号.
- 中央气象台, 1926, 気象要覧, 第 323 号.
- 浜松音蔵, 1966, 気象官署における地震計観測の履歴表, *地震* **2**, **19**, 286-305.
- 今村明恒, 1931a, 大正十五年八月三日羽田強震当時並に其以前に現はれたる地形變動に就て, *地震* **1**, **3**, 649-659.
- IMAMURA, A., 1931b, On the Crustal Deformations that Preceded and Accompanied the Severe Haneda Earthquake of August 3, 1926, *Proc. Imp. Acad. Japan*, **7**, 271-274.
- 石橋克彦, 1973, 大正 10 年竜ヶ崎地震の震源位置について—アーツ 1 号が発見した「線」との関連—(速報), *地震* **2**, **26**, 362-367.
- 勝又護, 1975, 大正時代の地震資料について 2, 3 のこと, 昭和 50 年度地震学会春季大会講演予稿集, 66.
- 気象庁, 1958, 日本付近の主要地震の表 (1926 年~1956 年), 地震月報別冊 1.
- 気象庁観測部地震課, 1971, 東京有感地震資料.
- 中村左衛門太郎, 1922a, 四月廿六日の東京附近の強震に就て, *気象集誌* **1**, **41**, 139-156.
- NAKAMURA, S., 1922b, On the Destructive Earthquake occurred near Tokyo on the 26th. April 1922, *Seism. Bull. Centr. Met. Obs., Japan*, **1**, No. 1, 39-44.
- OMORI, F., 1922a, On the Severe Earthquake of Dec. 8, 1921, *Seismological Notes*, **2**, 1-21.

- OMORI, F., 1922b, The Semi-Destructive Earthquake of April 26, 1922, *Seismological Notes*, **3**, 1-30.
- OMORI, F., 1924, Tokyo Observation of the Strong Earthquake on Jan. 14, 1923, *Seismological Notes*, **4**, 1-9.
- 理科年表昭和50年, 丸善, 1974.
- 鷺坂清信・佐藤秀雄, 1926a, 大正十五年八月三日の東京湾地震に就て, *験震時報*, **2**, 217-227.
- 鷺坂清信・佐藤秀雄, 1926b, 大正十五年八月三日の東京湾地震に就いて, *気象集誌* **2**, **4**, 301-307.
- 渋谷和雄, 1974, 関東地方の地殻マントル構造について, 東京大学大学院理学系研究科修士論文.
- 津村建四郎, 1973, 関東地方の微小地震活動, 関東大地震50周年論文集, 東京大学地震研究所, 67-87.
- 宇佐美龍夫・浜松音蔵, 1967, 日本の地震および地震学の歴史, *地震* **2**, **20**, No. 4, 1-34.
- 宇佐美龍夫, 1975, 資料日本被害地震総覧, 東京大学出版会, 161.
- 牛山高見, 1922a, 十二月八日夜千葉県印旛沼附近の小破壊的地震に就きて, *気象集誌* **1**, **41**, 4-13.
- 牛山高見, 1922b, 初期微動時の比を用ひて震源を求むる 作図附大正十年十二月八日夜東京強震の震源につきて, *気象集誌* **1**, **41**, 114-119.
- USHIYAMA, T., 1922c, On the Destructive Earthquake near Tokyo on the night of 8th. December 1921, *Seism. Bull. Centr. Met. Obs., Japan*, **1**, No. 1, 36-38.
- 保田柱二・小平孝雄, 1938, 東京地震観測 (明治5年9月—大正12年12月), 93.