

21. 震源決定の精度について (第3報)

地震研究所 浅野 周三

(昭和34年2月24日発表——昭和34年3月31日受理)

§1. 序

著者は前報¹⁾において、震源決定の精度に対する目安を得る一方法として、実際の震源の位置及び発震時が判つている火薬爆発による地震動の観測資料を用い、それらを未知として実際既知の爆発時刻、震源の位置を定め比較する事を行なつた。その結果によると、震央の位置及び速度は比較的よく決定されるが、発震時と深さは精確に定め得ない事などが判つた。しかし、今まで用いた資料は特別にその地震動を観測する準備をされた非常に精度のよいものであり、これは自然地震の常時観測、特に気象庁によりなされているものに比してかなりの相違があり、直ちに気象庁の資料を用いたものに対する目安を得ることは出来ない。この意味において、大量の火薬を爆発させてその地震動が気象庁の観測網により記録されれば、その結果より、常時観測の精度の見当をつけ得、従つて従来の資料の利用価値に対する目安が得られる筈である。偶々1958年6月15日正午、岐阜県大野郡白川村御母衣ダム建設工事において、156 屯の火薬の大爆発が実施され、その地震動が約10ヶ所の測候所で記録されたものの報告が気象庁地震課へ集まつた。地震課の御好意により、その資料を使わせていただき、震源決定を試みたので報告する。

§2. 資料の性質

先ず資料の性質について考えてみる。Pの報告があつたのが、次の13ヶ所である。

高山、富山、松本、岐阜、伊吹山、飯田、名古屋、福井、彦根、松代、長野、亀山、甲府

これらの位置は Fig. 1 に示されている。このうち、underline された7ヶ所には Wiechert 地震計が据付けてあり、他の5ヶ所には普通地震計がある。松代のみは特別で Benioff の地震計を始め、種々の地震計がある。

156 屯のダイナマイトによる energy は $1g \sim 1000 \text{ cal.}$ として概算すると $0.7 \times 10^{19} \text{ erg.}$ であるが、この何%が地震波になるか知るのには、発破の種々の条件によるので、むずかしい。従つて如何程の energy の地震に相当するかは、はつきりしないが、爆破点付近で有感であつた事から、局発地震程度と考えてよいであろう。

実際にとれた記録の例として、岐阜 ($\Delta = 81.50 \text{ km}$)、名古屋 ($\Delta = 106.30 \text{ km}$)、松代

1) S. ASANO, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **32** (1954), 371; **33** (1955), 199.

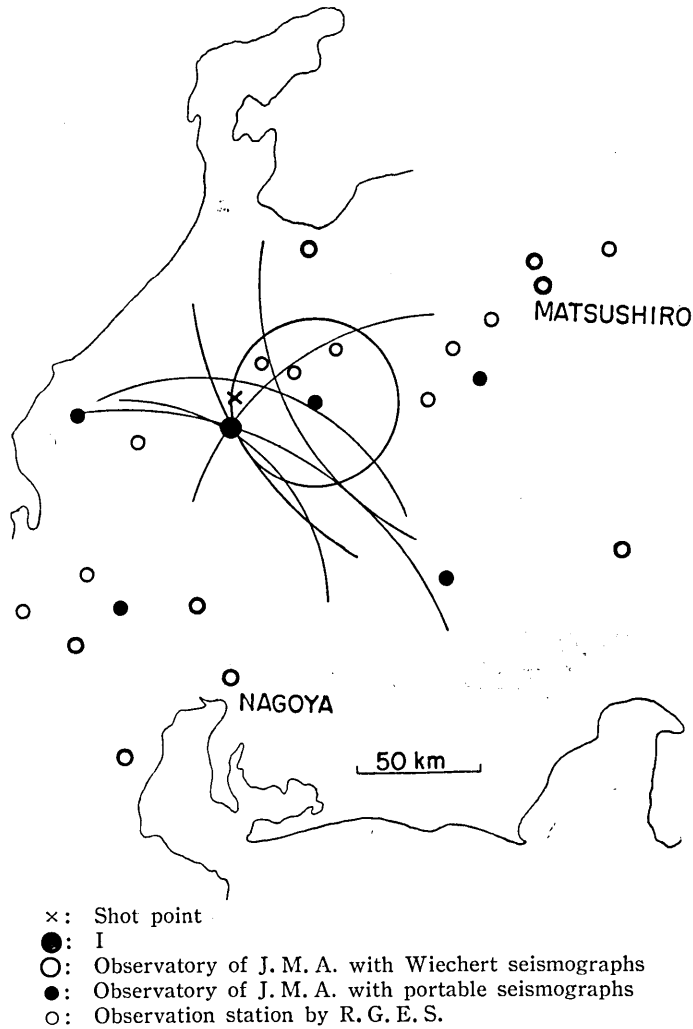


Fig. 1. Shot point, epicenter of first approximation and observing stations.

($\Delta = 125.74$ km) の記録を Fig. 2~5 に示す。この程度でも、各測候所ではよみとりが行われるとの事であるが、地震としては小さすぎ、初動の判定は極めてむつかしく（特に岐阜の場合）、気象庁の資料としては、わるい方であろう。但し、松代のみは極めてよい記録である。本報告では、Table 1 に示された各測候所よりの報告値をそのまま用い、議論してみる。この報告値の精度をみる意味で、実際の走時図をかいてみると、Fig. 6 の如くなる。Fig. 6 には、比較のために、爆破地震動研究グループ（以下 R. G. E. S. と略

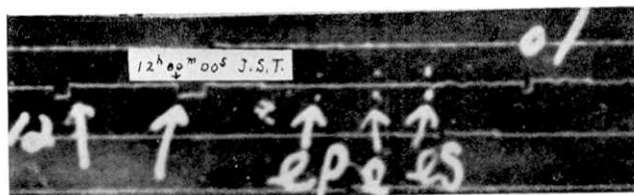


Fig. 2. Seismogram of NS component at Gifu

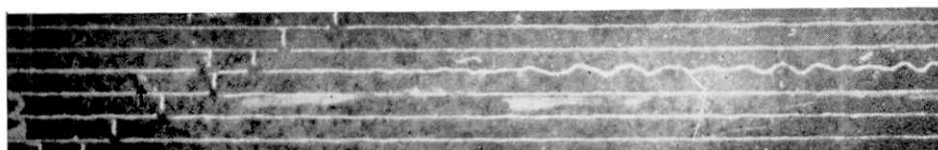


Fig. 3. Seismogram of NS component at Nagoya

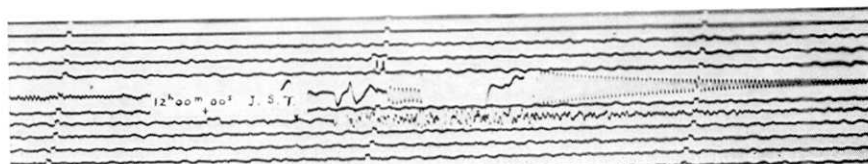


Fig. 4. Seismogram of Vertical component by Short Period Electromagnetic Seismograph at Matsushiro.

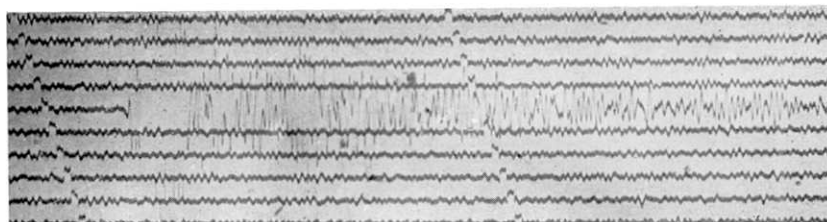


Fig. 5. Seismogram of EW-component by Benioff Seismograph with Short Period at Matsushiro.

記する)の好意により、同グループが同じ爆破地震動を Fig. 1 に示した観測点で観測した値²⁾が記入してあり、常時観測網による観測が大体において1~2秒近くおこなわれている。また、Fig. 6 には、気象庁で使用されている和達、益田のP波の走時曲線及び、鷺坂、竹花のS波走時曲線が記入されている。Fig. 6 をみると、大体の発破点の位置は新聞で報道されたので、大体の震央距離が判り、走時表を基にして読みとりを行なった所が、2, 3ヶ所あるのではないかと恐ろがある。併し、一応、報告値を信用して話を進める。

2) 爆破地震動研究グループ 日本地震学会秋季講演会 (昭和 33 年 10 月)

Table 1.

Station	Δ (km)	t_P (sec)	t_S (sec)	t_S-t_P (sec)	t_P-t_0 (sec)	t_S-t_0 (sec)	$(O-C)_S$ sec
1. Takayama	32.48	12 h 00 m 1.9	12 h 00 m 12.3	4.4	6.1	10.5	-0.9
2. Toyama	70.15	14.0	—	—	12.2	—	—
3. Matsumoto	96.80	14.7	—	—	12.9	—	—
4. Gifu	81.50	18.3	30.2	11.9	16.5	28.4	2.3
5. Mt. Ibuki	90.22	19.2	30.1	10.9	17.4	28.3	-0.4
6. I-ida	107.96	21.4	35.5	14.1	19.6	33.7	-0.3
7. Nagoya	106.30	21.4	—	—	19.6	—	—
8. Fukui	61.88	21.9	—	—	20.1	—	-0.1
9. Hikone	111.58	22.4	—	—	20.6	—	—
10. Matsushiro	125.74	23.3	38.3	15.0	21.5	36.5	-2.8
11. Nagano	130.24	27.0	45.3	18.3	25.2	43.5	2.9
12. Kameyama	146.19	28.1	46.5	18.4	26.3	44.7	-0.7
13. Kōfu	157.45	28.3	—	—	26.5	—	—

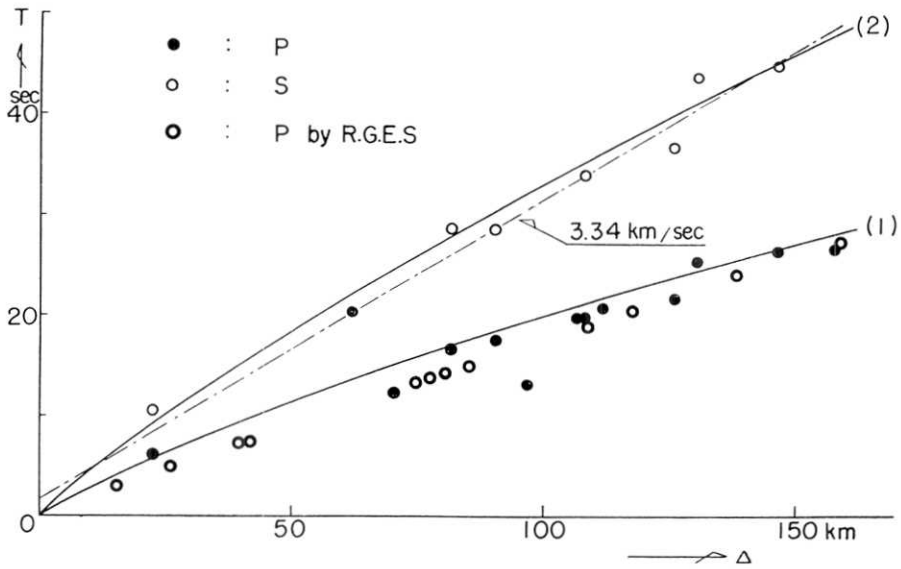


Fig. 6. Travel time graph for actual epicenter

§3. 震源決定

震源を定めるために、先ず、第一近似の量を求める。震央を定めるために、Sの報告があつた7ヶ所を用い、大森係数を7.5と仮定して 7.5τ km (τ はP-S時間)の円をかくとFig. 1に示される如く、高山、伊吹山、長野、亀山、飯田の円が比較的良好に交るので、大体の交点をとると、 $\lambda = 136^{\circ}54.2'E$, $\varphi = 36^{\circ}2.5'N$ となり、実際のShot pointを原点にとつた直角座標で $x = -0.44$ km, $y = -8.90$ kmとなる(この計算及び震央距離の計算はRichterの表³⁾を用いて行なつた)。実際の震央との距離は8.91 kmである。円が殆んど一点で交わるので、深さは殆んど0 kmと考えてよく、深さの考察は行なわない⁴⁾。

次に、発震時を求めるために、よくやるように、縦軸にP-S時間、横軸にPの発震時をとつて、P-Sの観測のある7ヶ所の値を用いて図をかくと、Fig. 7の如くなり、よく直線にのり origin time は $12^h 00^m 1.6^s$ となる。

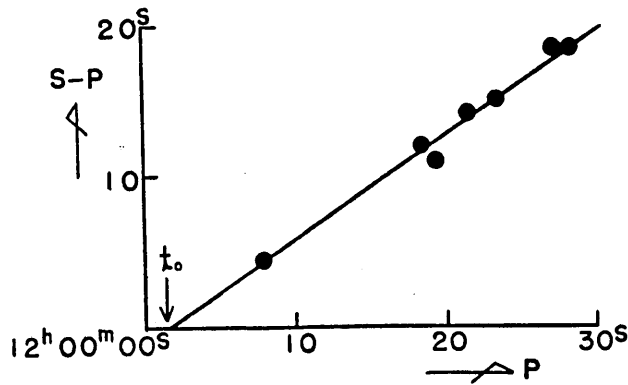


Fig. 7.

この origin time 及び震央を用いて走時図をかくと、Fig. 8の如くなる。適当に線をひくと、Fig. 8の白丸によつて示される如く、5.2 km/secの速度が得られる。Fig. 8には

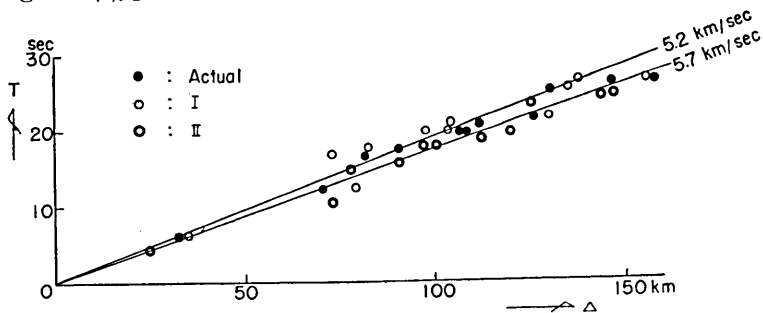


Fig. 8. Travel time curves of the first and the second approximations.

3) C. F. RICHTER, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **33** (1943), 243.

4) 震源の深さも未知として、第一近似の量は深さ0 km 以外は以下で用いたのと同じ値を用いてやつてみたが、よく定められなかつた。

又、比較のために、Fig. 6 に示された実際の走時（黒丸）を重ねて示してある。
以上の第一近似の量を用い

$$(x_0 - x_i) \delta x_0 + (y_0 - y_i) \delta y_0 + v_0^2 (t_i - t_0) \delta t_0 - v_0 (t_i - t_0)^2 \delta v_0 = v_0^2 (t_i - t_0) \delta t_i$$

なる式により、最小 2 乗法で補正量を求めると、

$$\begin{aligned} \delta x_0 &= (9.8 \pm 6.0) \text{ km} & \delta y_0 &= (2.7 \pm 4.4) \text{ km} \\ \delta t_0 &= (2.0 \pm 1.8) \text{ sec} & \delta v_0 &= (0.49 \pm 0.43) \text{ km/sec} \end{aligned}$$

になる。但し、松本は deviation が大きいため、又福井は恐らく、 S を P と混同しているため、計算からは除いた。補正をほどこした結果は、Table 2 に実際の量及び第一近似の量 I と共に II の行に与えられている。第 2 近似の諸量を用いた走時表は Table 3

Table 2.

	x_0 (km)	y_0 (km)	R (km)	t_0	v_0 km/sec
Actual	0	0	0	12h00m 1.75 s	5.9
I	-0.44	-8.90	8.9	" " 1.6 s	5.20
II	9.3 ± 6.0	-6.0 ± 4.4	11.1 ± 7.5	" " (3.6 ± 1.8) s	5.69 ± 0.43
II'	9.9 ± 4.0	-3.9 ± 3.4	10.7 ± 5.2	" " (3.2 ± 1.7) s	5.68 ± 0.45
II''	10.1 ± 4.0	-3.2 ± 3.6	10.6 ± 5.4	" " (3.0 ± 1.9) s	5.67 ± 0.46
J. M. A.	-0.75	8.69	8.72	11h59m 59.5 s	

Table 3.

Station	d_1 (km)	$t_P - t_{01}$ (sec)	d_2 (km)	$t_P - t_{02}$ (sec)	$(O-C)_P$ sec
1. Takayama	34.99	6.3	24.82	4.3	-0.06
2. Toyama	78.60	12.4	72.96	10.4	-2.42
4. Gifu	72.65	16.7	77.74	14.7	1.04
5. Mt. Ibuki	82.39	17.6	90.36	15.6	-0.28
6. I-ida	102.96	19.8	96.94	17.8	0.77
7. Nagoya	97.45	19.8	100.25	17.8	0.19
9. Hikone	103.94	20.8	112.10	18.8	-0.90
10. Matsushiro	129.69	21.7	119.62	19.7	-1.32
11. Nagano	134.93	25.4	125.05	23.4	1.43
12. Kameyama	137.54	26.5	143.41	24.5	-0.70
13. Kōfu	155.24	26.7	146.70	24.7	-1.08

に、走時図は Fig. 8 に重ねて示されており、 P 波に対する走時の観測値 O と計算値 C の差 $(O-C)_P$ は、Table 3 に与えられている。更に近似を進めれば、よりよく求められるであろうが、この程度でも実際の震央との距離は 11.1 km で 0.1° 以内に収まっている、震央はよく求められたといつてよい。R. G. E. S. の石淵第 2, 3 回の資料を用いた前報の結果では、2, 3 の試みにより求められた震央と実際の爆破点との距離は 1.5~1.9 km の範囲であつた。地殻構造、地震計の配置などの相違があるので、完全な比較は出来ないが、観測の精度は 10 倍以上、R. G. E. S. の資料の方がよい事を考えると、観測精度の向上による震源決定の精度の向上の目安を、或る程度得る事が出来ると考えられる。また前報に述べた如く、この場合も実際の震央が、第 2 近似の震央を中心とし Probable Error を半径とした円に含まれない。origin time は表土層に敏感であるので、よく求められていない。この付近の地殻構造は R. G. E. S. により求められている⁵⁾が、同グループの観測による走時図上では 5.9 km/s の見掛けの速度が得られる (Fig. 6)。従つて、速度もかなりよく求められたといつてよい。なお Fig. 6 に示された如く、用いた報告値は R. G. E. S. の観測値より 1 秒前後おくれたものであるが、この程度に求められたという事は、概して小さい初動が見落されても、各測候所で対応している大きい波をよみとつている事によるのではないかと考えられる。

次に、松代のみは他の測候所に比し、特別に精度がよい事を考慮して、松代のみ、仮に 10 及び 100 の Weight をつけて震源を決定してみた。time keeping だけでなく、倍率も遥かに大きく、従つて記録もよく、10 位の Weight では小さすぎるかも知れないので、100 の場合も行なつてみたのである。第 1 近似の量は、前に定めた値をそのまま用いた。補正量は

Weight 10 の場合

$$\begin{aligned} \delta x_0 &= (10.4 \pm 4.0) \text{ km} & \delta t_0 &= (1.6 \pm 1.7) \text{ sec} \\ \delta y_0 &= (5.0 \pm 3.4) \text{ km} & \delta v_0 &= (0.48 \pm 0.45) \text{ km/sec} \end{aligned}$$

Weight 100 の場合

$$\begin{aligned} \delta x_0 &= (10.6 \pm 4.0) \text{ km} & \delta t_0 &= (1.4 \pm 1.9) \text{ sec} \\ \delta y_0 &= (5.7 \pm 3.6) \text{ km} & \delta v_0 &= (0.47 \pm 0.46) \text{ km/sec} \end{aligned}$$

と求まる。補正した結果は、Table 2 に他の量と共に、夫々 II', II'' の行に与えられている。この表から、Weight をつけた方がよく求められた事、特に origin time t_0 がよくなつている事、Weight 10 と 100 では大差ないが、 t_0 は 100 の場合の方がよく求まっている事が判る。求められた種々の震央の関係は、Fig. 9 に示されている。

一方、地震課において特に同課で日常行なつている方法で origin に関する量を求めもつた所、Table 2 の J. M. A. の行に示す如くであり、origin time は和達 et al の表にありように求められたので、早くなつている。この震央も、Table 2 に示される

5) 爆破地震動研究グループ loc. cit., 2)

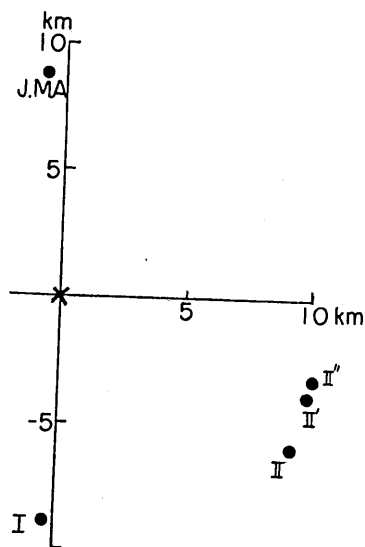


Fig. 9. The relative positions of determined epicenters to the actual one.
 ×: Actual epicenter
 I, II, II', II'' and J.M.A. are given in Table 2.

3.36 km/sec の値が得られている⁷⁾. 自然地震からは, S 波の速度として, この程度の値がしばしば求められている⁸⁾.

§4. 結 語

少くとも局発地震に相当する 156 屯の火薬爆発による地震動が, 気象庁の約 10 ケ所の測候所に記録された. 記象は, 振幅が小さく不十分であるが, 一応, 気象庁のよみとりの俣を使い, 既知の震源に関する諸量を最小 2 乗法で定めてみた. その結果, 震央は 11.1 km 離れた所に求まり, かなりよく定められた. 気象庁地震課で採用されている方法でも 8.7 km 離れた所に求まり, 震央に関しては, 方法によらず, よく決定されるといつてよい. 速度も Table 2 に示される如く, よく定められ, origin time は, 余りよく求められなかつた. 但し, 低速表面層の存在がこれに関係しているかも知れない. この事は, 前報までの結果とよくあい. この程度の資料でも確かめられた. また, 松代のみは, time keeping もよく地震計の倍率も大きく, 実際に得られた記象もよい事を考慮して 10, 100

如く, 実際の震央と 8.72 km 離れ, 最小 2 乗法で求めたものとは 20 km も離れている. 併し, 異なつた方法で求めた震央が, 実際のものと 10 km 程度しかちがわない事は, 注意してよい事である.

最後に本題から離れるが, S と報告のあつた位相は, P の怪しい測候所でも或る程度信頼出来ると推察されるので, この速度を最小 2 乗法で求めてみた. その結果,

$$t = (1.65 \pm 1.35) + 4/(3.34 \pm 0.15)$$

と求められ, この線は Fig. 6 に示されている. また (O-C)_S は Table 1 に与えられている. 但しこの計算においては, P と報告のあつた福井は, 丁度 S の線にのるので, P を見落して S を P とよんだものと考え計算に入れた. $V_P = 5.90$ km/sec を用いると, $V_P/V_S = 1.76$ となり, 妥当な値である. 爆破地震動の観測資料より, この程度の震央距離では, 東北地方で 3.57 km/sec, 関東地方で 3.63 km/sec の値が得られており⁹⁾, 今回の値は少し小さいが, 釜石付近の中発破の観測資料では

6) S. ASANO, N. DEN, T. MIKUMO, E. SHIMA and T. USAMI, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **37** (1959).

7) 同 上.

8) 例えば岸本兆方・神月彰 地震 [ii] **9** (1957), 200.

Y. KOSHIKAWA, *Bull. Utsunomiya Univ.*, No. **6**, Section **2** (1956), 31.

の Weight をかけて定めてみた結果, Weight をかけた場合の方が特に origin time に関して, よく定まる事, 今回の資料では, 10 と 100 の Weight では, その差ははつきりしない事が判つた. なお, 前報において述べた如く, 以上は一定の地震計の配置, 地殻構造等の下に得られたものである.

副産物として, S 波の速度を定めた結果, 3.34 km/sec の値が得られた.

§2 でも断つた如く, 今回の資料は気象庁のものとしても余りよいものとはいえず, 大地震の資料を用いて行う走時曲線等の議論では, 今回の資料に比べれば初動が明瞭であるので, かなり精度が上記のものよりよいものと推測される. 従つて, 本報の結果を以つて, 直ちに全観測の精度の目安とする事は勿論出来ない. 今後, 機会があれば, 更に検討する積りであるが, この程度の観測でも 0.1° 以内に実際の震央との距離が収まる事は 10~50 km の範囲の地震活動の統計に局発地震を用いてもよいことを示すという事が出来よう.

また, 精度のよい R. G. E. S. の資料を用いて震源決定を試みると, 観測精度の向上による震源決定の精度向上の程度の目安が得られる筈であるが, 近い将来試みる予定である.

終りに御指導頂いた河角広教授, 資料をお貸し下さり, いろいろ御協力下さつた気象庁地震課の方々及び, 資料の使用を許可下さつた爆破地震動研究グループに深く感謝する次第である.

21. *On the Accuracy of Hypocentre Determination III.*

By Shūzō ASANO,
Earthquake Research Institute.

At 12h 00m, June 15, 1958, 156 tons of explosives were fired in Gifu Prefecture, central part of Japan, in order to obtain rocks for the construction of Mihoro dam. The seismic waves generated by this blast were recorded at about 10 observatories under the Japan Meteorological Agency. Although the recorded amplitude was rather small and the onset of initial motion was not clear except at Matsushiro, the attempt to determine the quantities concerning hypocentre was done by the method of least squares. The results which are given in Table 2 confirmed my previous conclusions. In the present calculation the position of epicentre was determined within 0.1 degree, the velocity was determined rather well, but the determination of the origin time is not good. Giving weight to the observation at Matsushiro we could obtain better results, especially with respect to the origin time. The velocity of S wave was also obtained as 3.34 km/sec.