

手取川ダム砕石発破記録を利用した, V_P の時間変化について

平野 憲雄・渡辺 邦彦・竹内 文朗

ON THE TEMPORAL VARIATION OF V_P BY USING THE SEISMIC DATA OF QUARRY BLASTS AT TEDORI-GAWA DAM SITE

By Norio HIRANO, Kunihiko WATANABE and Fumiaki TAKEUCHI

Synopsis

A series of quarry blasts were fired at Tedori-gawa dam site in Ishikawa prefecture, and their seismic waves were recorded by the telemeter network of Hokuriku Microearthquake Observatory from May 1976 to December 1978. The number of the blasts is 309, whose P-times were accurately read at the 5 stations of epicentral distances less than 60km.

On these blasts, the epicenters are relatively located by the Master event method using the three P-times of near stations, KMJ, FKJ and KAJ. Two pairs of the differences of P-times, namely IMJ-FKJ and HKJ-KAJ, are calculated after the correction of locations for the 309 events, and the variation is within a possible error of 0.03 sec for almost all periods. This shows us that the time variation of V_P was at most 0.7% of it, if we assume that V_P changes simultaneously all over the region from Tedori-gawa to HKJ and KAJ.

On April 3, 1978, an earthquake of magnitude 4.7 occurred near Eihei-ji-Temple, Fukui prefecture, and the location is very near the ray path of the blasts to HKJ. But, unfortunately, for about three months before the events, the blasts had not been carried out, so we have no conclusion on the change of V_P before the event.

1. 序

北陸微小地震観測所の、7つの衛星点よりなる微小地震観測網は、1976年にテレメータ化され、鯖江市にある本所にて on-line 記録がとられるに至った¹⁾。このネットに依ると、近地地震の P-time は、ほとんどが 0.1 sec. 以内の誤差でルーチ的に読みとられ²⁾、記録方式によっては、0.01 sec. 程度の精度も期待できる状態である。一方、石川県尾口村に於いては、手取川総合開発の一環として、手取川ダムの建設が1975年より進められており³⁾、これに伴う砕石発破が、冬期をのぞき連日に行なわれてきた⁴⁾。この発破による波動は、テレメータ網によっても特徴ある波形として記録され、1976年から1978年の約2年半に、その数およそ1,000個にのぼった。発破の規模は、F-P 時間から推察して、だいたい $M=2$ 程度で、時に $M=3$ 程度の大きなものも混じっている。我々のネットでは、浅井 (AZJ)、美浜 (MHJ) は、遠方にあるため、初動の読みとれるものはごく少数であるが、発破点に近い小松 (KMJ)、福井 (FKJ)、勝山 (KAJ) では、立上りがするどく、 $\Delta \approx 55\text{km}$ の北陸本所 (HKJ)、今庄 (IMJ) においても、比較的精度の良い読取が可能である。発破は主として、約600メートル離れた2つの山をくずす形で行なわれており、一つの山についても、日によって shot-point は百メートル程度移動している。しかし、shot の時刻が、毎日だいたい一定していることや、エネルギーが大きいことなど、計測上有利な要素もあり、これを利用した2、3の解析が可能である。そのうち、地下構造を求める試みは、他の文献^{5), 6), 7)}にゆずることとし、本稿では、P 破速度 V_P が、時間的に変化したかどうかを、発破点に近い5つの衛星点の P-time の差から推察してみた。

2. データの作成

観測網と発破点を Fig. 1 に示す。また、それらの座標と、発破点から観測点への距離を、Table 1 と Table 2 に示す。発破点は、日によって移動するが、ここでは二つの山の各々の中心とみられる点で代表させた。北方の山を第一山、南方を第二山と称することにする。記録は、我々のネットのトリガー条件を満た

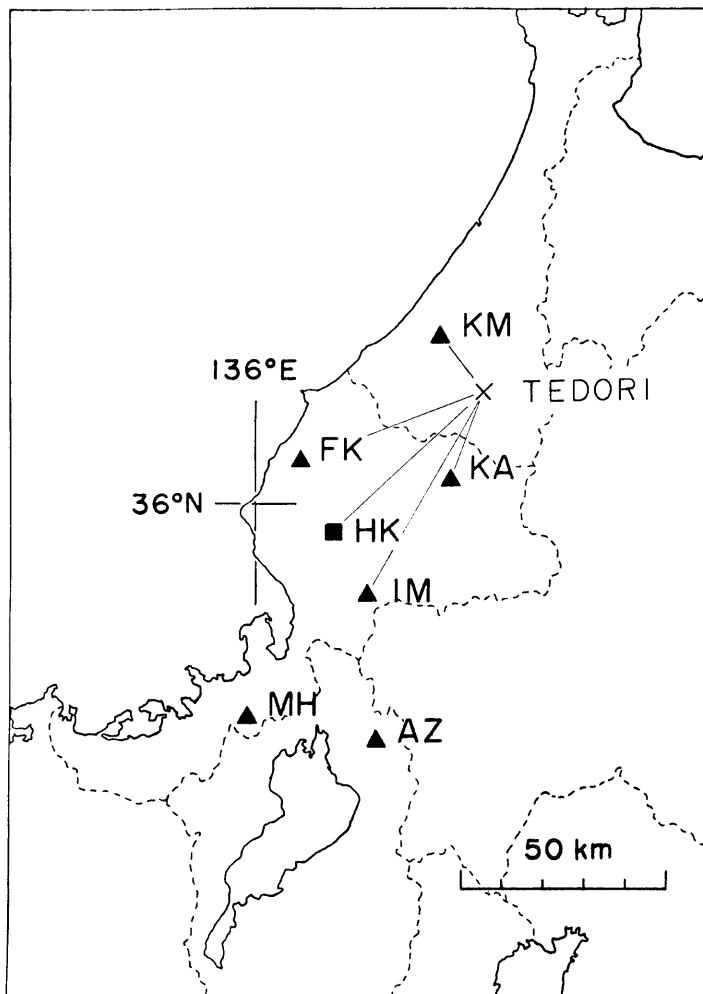


Fig. 1. Locations of the shot point (×) and observation stations (▲). ■ indicates Hokuriku Microearthquake Observatory where all the data of other stations are sent by the telemeter system.

Table 1. List of shot points. Tedori 1 and Tedori 2 denote the northern mountain of quarry blasts and the southern one, respectively.

Shot point	Longitude			Latitude			Alt. (m)
TEDORI 1	136	38	47.5	36°	15'	25.2''	350
TEDORI 2	136	38	46.5	36	15	5.8	400

Table 2. List of observation stations with their distances from two shot mountains.

Station	Code	Longitude	Latitude	Alt. (m)	d^{-1} (km)	d^{-2} (km)
KOMATSU	KMJ	136° 30' 20.6''	36° 21' 52.3''	70	17.3861	17.7844
FUKUI	FKJ	136 7 24.0	36 5 38.9	90	50.4183	50.1851
KATSUYAMA	KAJ	136 31 41.3	36 2 55.2	300	25.4539	24.9015
IMAJO	IMJ	136 18 10.0	35 47 53.4	240	59.5983	59.0757
AZAI	AZJ	136 19 26.0	35 28 38.0	370	91.2963	90.7221
MIHAMA	MHJ	135 58 44.2	35 31 50.2	260	100.6412	100.1491
HOKURIKU OBS.	HKJ	136 12 45.0	35 65 15.0	20	52.7684	52.3509

し、14ch. のデータレコーダー (625 Hz までフラット) に収録されたものを用い、ペンレコーダーに 60mm/sec. で再生して読みとった。衛星点と本所の間は電電公社の専用回線を用いてテレメータされており、60 Hz までフラットな特性を持っている¹⁾。また、本所におけるため込み時に使用される遅延メモリーは、サンプリング周波数が 195 Hz である。トリガー条件は、尾口村付近の地震に対しては、 $M=1.5$ が十分にキャッチされる程度にセットされている。記録の一例を Fig. 2 に示す。

再生記録は、0.1mm の分解能を持つ X-Y リーダーを用い、ミニコンと結んで、半自動的に読みとった。なお KMJ の記録は、ほとんど初動でサチているため、読取の任意性は少ないが、 d が大きくなるにつれ

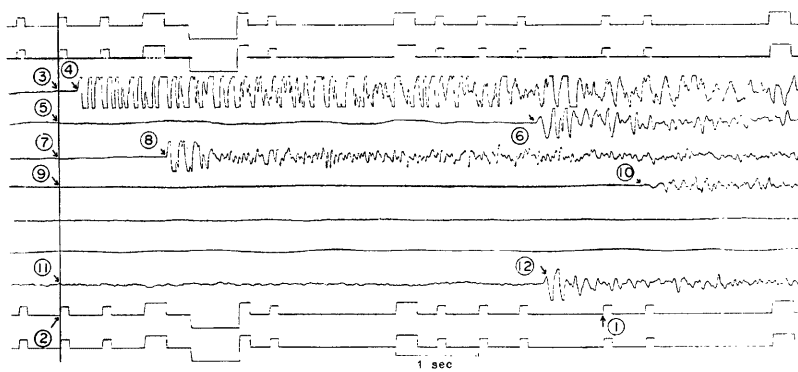


Fig. 2. An example of reproduced record. Seven traces in the middle of the paper are the vertical components of each station, KMJ, FKJ, KAJ, IMJ, AZJ, MHJ and HKJ from the top. Other four traces are serial time codes. Numerals show the reading points to make up data. ① and ② are read to calculate paper feed speed. ③ and ④, ⑤ and ⑥, ⑦ and ⑧, ⑨ and ⑩, and ⑪ and ⑫ are used to calculate the arrival times of P-wave. One P-time difference needs six points of reading. ④ ⑥ and ⑧ are the first arrival times, whereas ⑩ and ⑫ are remarkable phases.

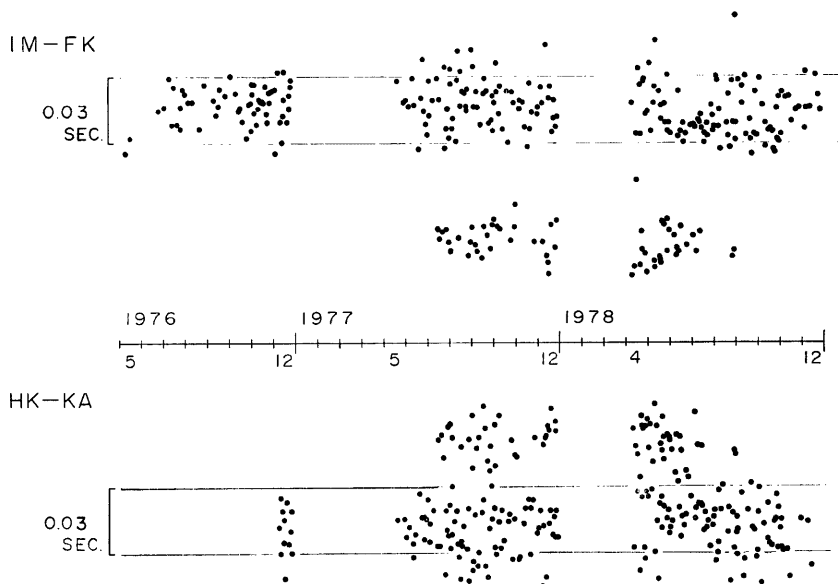


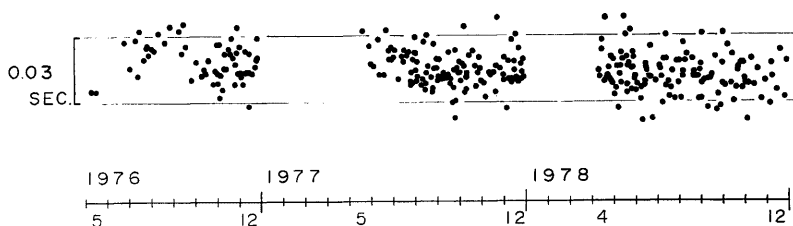
Fig. 3. Temporal variations of the P-time differences. Upper; IMJ-FKJ and Lower; HKJ-KAJ. The plots of upper figure are clearly divided into two groups, corresponding to the blasts at Mount. 1 and Mount. 2.

て、初動がなまるので、典型的な記録のコピーを下敷きにして、波形の山谷を対応させつつ初動を読みとる、「波形合わせ」を行なった。IMJ と HKJ の場合には、初動そのものが、不明瞭なので、波形合わせによって、初動に近い顕著な phase に着目し、これを系統的に読みとった。発破によっては、1 秒以内に複数個が連発するものもあり、初動が不明瞭な場合は使用していない。AZJ, MHJ は、波形合わせによっても、phase の同定が困難であったので省いた。IMJ, HKJ の記録もノイズレベルが高い時など、数個については、読みとっていない。結局 309 個の shot について、5 つの観測点の P-time (または、それに近い顕著な phase, 以下 P-time と称する。) が読みとられた。shot time は、我々が現地で測定した 2, 3 の発破以外については、不明であるので、ここでは、shot time を用いない方法、すなわち、P-time の観測点間での差を計算してデータとする方法を用いた。5 つの P-time から、 $C_2=10$ 通りの P-time の差を作り得るが、そのうちの独立な組み合わせは 4 通りである。ここでは、IMJ-FKJ, HKJ-KAJ の 2 通りを Fig. 3 に示す。IMJ-FKJ の図は、大きく 2 つのグループに分けられるが、これは、発破が第一、第二のいずれの山で行なわれたかに対応するものである。

3. 発破点位置の補正

第一山と第二山は、ほぼ南北に 600m 程度離れており、両山での発破は、KMJ と FKJ の P-time の差に、0.1 秒程度の違いを与えている。また同じ山で行なわれた発破についても、発破点の移動に伴ない、P-time の差に有意な差が生じている。この補正として、次のような操作を行なった。一連の地震群の震源の相対位置を精度よく求める方法として、Master Event 法がある。この方法によって、精度の良い、KMJ, FKJ, KAJ の 3 点の P-time から、2 組の P-time 差を作り、発破点の相対位置を推定した。なお、Master Event としては、1978 年 7 月 20 日の第一山における発破を採用した。この発破は、現場で Shot-time を観測しており⁷⁾、後の便宜を考えて、場所も明らかなこの shot を Master Event に選んだ。本稿

IM-FK



HK-KA

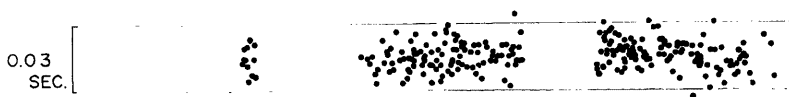


Fig. 4. Temporal variations of the P-time differences after correction of shot locations. Almost all plots are in the deviation of 0.03 sec, which value arises inevitably from our method of observation and analysis.

の解析には、Shot-time は必要ではないので、他の Shot を Master-Event とすることも可能であるが、他の Shot を用いても、発破点の相対位置関係は変らなかった。

発破点の相対的な位置が求まれば、観測された P-time の差に、位置のズレの分だけ補正を施すことができる。(shot 位置の求め方、および、補正については、Appendix に詳述する。)

補正後の P-time の差のうち、KMJ-KAJ, KAJ-FKJ, FKJ-KMJ の3つは、当然ながら、すべての shot について一定値をとる。従って5つのP-time から、2つをとり出して作った P-time の差4通りのうち、代表として補正後の HKJ-KAJ, IMJ-FKJ だけを Fig. 4 に示す。

補正後の P-time の差は第一山と第二山の発破を含めて、互いに非常に近い値をとっており、補正の妥当性をうかがうことができる。全期間を通じて、P-time 差は $\frac{3}{100}$ 秒程度の巾に納まっている。

4. 誤差の検討

解析手順は、上に明らかにされたが、これらの処理に際して生ずると思われる誤差を、以下のように見積った。Fig. 5 に解析の流れと、各段階での誤差の大きさを示した。P-time 差に着目した上記の方法によれば、相対時刻だけが用いられるので、回線の特性や時計の遅れ進みはキャンセルされる。また、波形合わせによって、あるいは、記録紙の送り速度を記録ごとに読みとることによって、A/D 変換器、データレコーダ、ペンレコーダなどによる誤差は著しく軽減される。X-Y リーダーの分解能は 0.1mm であり、これに読み手の目の分解能を 0.1mm と仮定して加えると、1つの読みとりにつき、最大 0.2mm の誤差が生じ得る。Fig. 2 に示された通り、1つの P-time の差を数値化するのには、6ヶ所の読みとりが必要であり、誤差の単純和は 1.2mm に及ぶ。その他、波形合わせの際の 0.2mm と、観測、再生に伴う誤差などを合計すると、誤差の最大値は、 $\frac{3}{100}$ 秒程度と見積られる。

本稿の Master Event 法による発破点位置の推定については、2つの欠点が考えられる。1つは推定に用いた観測点、KMJ, FKJ, KAJ がすべて、shot point の西側に位置することである。このために、通常の震源決定の場合に見られるような系統的な誤差⁸⁾が見込まれる。Fig. 6 に推定された発破点位置を、ダム工事現場の地図に重ねてプロットした。斜線部分は比較的大きな発破が行なわれている場所を示す。大きな黒点が、Master Event として用いた1978年7月20日の shot であり、この位置は、現場の視察により定めた

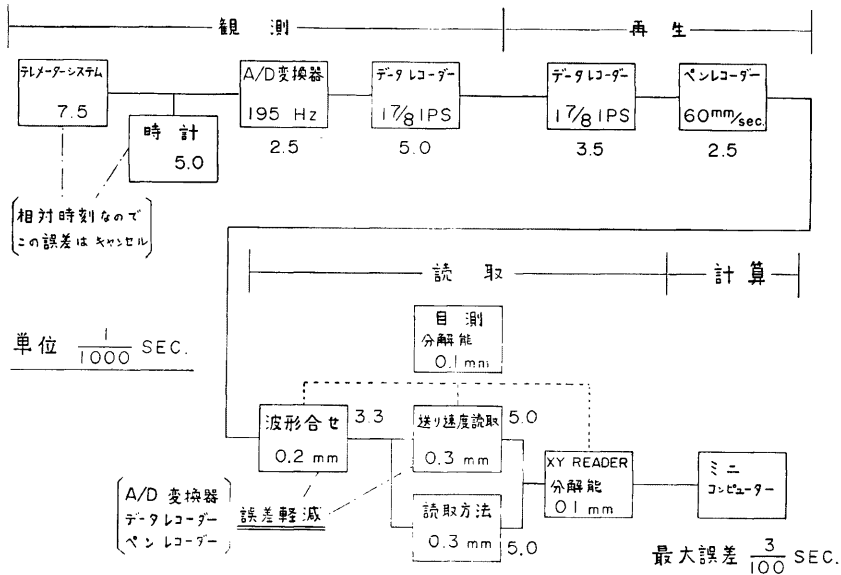


Fig. 5. Flow of our analysis with probable error in each step. Total error to get a P-time difference amounts to 3/100 second.

ものである。小さな黒点が他の shot である。第一山と第二山の shot がよく分離されており、かつ、2つの山の中心間の距離も、ほぼ正確に求まっているようである。しかし、各山での shot の東西方向のひろがり、かなり強調されており、これによる誤差も見込まれるが、ここではこれ以上の補正はさし控え、後日の問題とする。

もう一つの欠点は、ここで行なった Master Event 法が、2次元平面内での方法であって、発破点の高さに対する考慮がなされていないことである。実際の shot は、高さ方向にも 100m 程度の移動が行なわれている。少数個の shot については、その高さが判明したので⁹⁾、高さが、平面内での shot 位置の推定に及ぼす影響をやや詳しく調べてみたが、あまり系統的な影響がみられなかった。高さ方向の shot の移動は、理論的には P-time の差にほとんど影響を与えないはずであり、ここでの結果は、発破現場付近の岩石の P波速度が、3次元的に複雑な構造をもつことを示唆していると思われる。

5. 結論と考察

1978年4月3日、福井県吉田郡の永平寺付近にM=4.7の地震が発生した⁴⁾。この地震は、我々のテレメータ観測開始以来最大の Event でもあり、また手取川の発破現場と本所 (HKJ) とを結ぶ線上に近い、その前後での V_p の変化に興味のあるところであるが、この地震の前には、約3ヶ月間発破が行なわれておらず、この問題は解決できない。

本稿の結論は以下のごとくである。

- 1) 1976年5月から1978年12月までの、北陸微小地震観測所で得られた、手取川ダム工倉発破の記録のうち、309コが、調べられた。
- 2) これらの発破は、F-P 時間から推定して Magnitude が2~3程度のものが主であった。

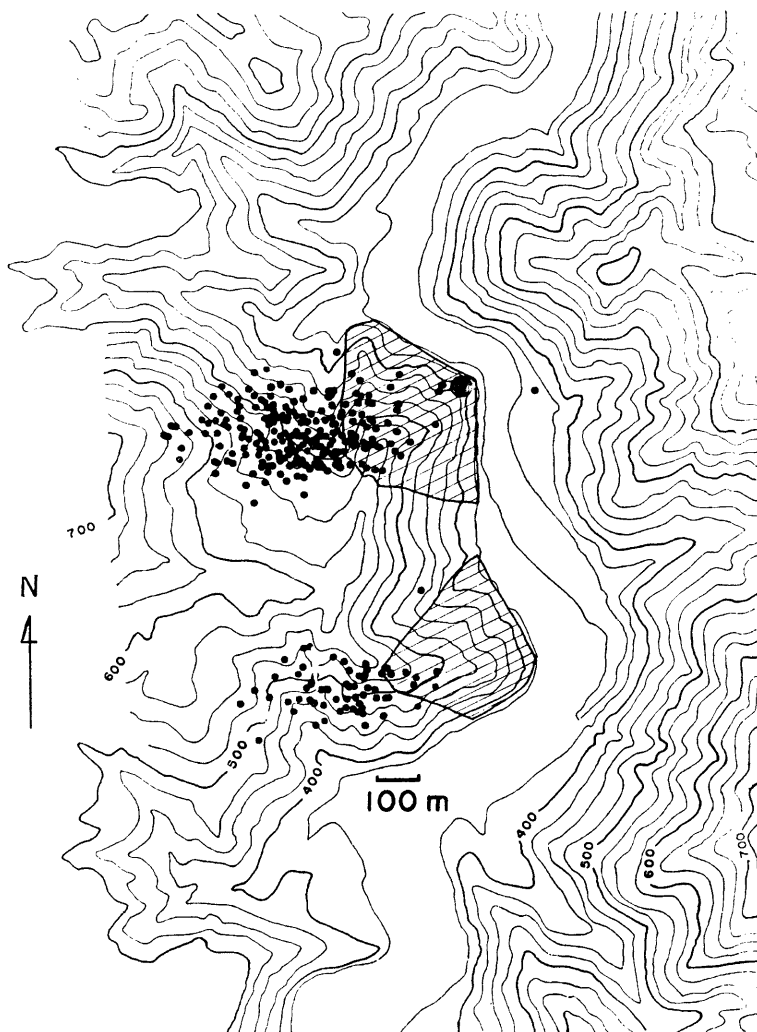


Fig. 6. Actual shot area (hatched) and calculated shot points (small circles). Large circle denotes the Master event on July 20, 1978, whose location is made sure by inspection. Although the blasts located are spreading too much in the east-west direction, their separation in the north-south direction is satisfactory.

- 3) 発破は、日によって場所が異なるため、この場所の移動を、KMJ, FKJ, KAJ の P-time から、Master Event 法で推定した。その結果は、東西方向に、発破点のバラつき具合が大きく出すぎるようであるが、南北方向には妥当な推定ができています。
- 4) 発破点位置の移動を考慮して補正を施すと、KMJ, FKJ, KAJ, IMJ, HKJ の P-time を 2 つずつ組み合わせてつくった P-time の差は、どれもおよそ $\frac{3}{100}$ 秒以内のバラつきに収まった。 $\frac{3}{100}$ 秒は、観測、読みとり、計算などで見込まれる最大誤差に一致するため、約 2 年半の冬期をのぞく期間では、誤差を超える V_p の変化はなかったと結論される。HKJ と shot との距離が約 50km であり、この間の平均的な V_p の値を 6km/s と速い目に見積っても、 $\frac{3}{100}$ 秒は、Travel Time の 0.4% 程度でしかない。HKJ と KAJ の手取川現場からの距離の差、約 25km を採用しても、 $\frac{3}{100}$ 秒は、Travel Time の差の、0.7% 程度である。

しかし、永平寺付近の地震は、その規模から考えて、震源域が 3 ～ 5 km 程度であったと考えれば、この範囲で 5km/s 程度の V_p の値が 3 % 程変化しても、誤差内の P-time 差しか生じないため、我々の結果は、このような可能性を否定することはできない。Ray Path が震源域を横切る率が低ければ、なおさらである。

6. お わ り に

発破現場をとり囲むような観測点を選び、本稿のような Master Event 法を適用すれば、もうすこし精度の向上がはかれるであろう。今後の問題としたい。

おわりにあたり、電源開発株式会社および前田青木共同企業体の皆様に、観測の協力を頂いたことを記して感謝します。前田青木共同企業体の佐野千代志氏には、観測の援助、助言を頂いた。防災研究所微小地震部門の皆様には、この観測を終始応援して頂いた。皆様に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 岸本兆方・尾池和夫・渡辺邦彦・佃為成・平野憲雄・中尾節郎：鳥取および北陸微小地震観測所のテレメータ・システムについて、地震、第31巻、第3号、1978、pp. 265-274.
- 2) WATANABE K., N. HIRANO and F. TAKEUCHI: On the Accuracy of Hypocenter Determination of the Hokuriku Microearthquake Observatory, Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 28, Part 3-4, 1978, pp. 95-111.
- 3) 電源開発株式会社：手取川ダム（パンフレット）
- 4) 平野憲雄・渡辺邦彦：北陸地方の地震活動(3), 昭和53年度地震学会春季大会講演予稿集, 1978, p. 42.
- 5) 手取川発破観測グループ：手取川ダム工事砕石発破観測について（その1）—観測の概要及び北陸・上宝両地域の地殻上部構造—, 昭和53年度地震学会秋季大会講演予稿集, 1978, p. 66.
- 6) 手取川発破観測グループ：手取川ダム工事砕石発破観測について（その2）—中部地方の地下構造—, 昭和53年度地震学会講演予稿集, 1978, p. 67.
- 7) 手取川発破観測グループ：手取川ダム工事、琵琶湖両発破観測による北陸・上宝地方の地殻上部構造について、京都大学防災研究所研究発表講演会にて講演, 1979.
- 8) 佃為成・中尾節郎：鳥取微小地震観測所の観測網による震源決定の精度について — 4 観測点の P-time を用いた場合 —, 京都大学防災研究所年報第20号 B-1, 1977, pp. 47-58.
- 9) 佐野千代志：私信。

Appendix

一発破点の Master Event 法による位置の推定と、P-time の差に与える補正量について—
Master Event M の震央を原点にとり、X-Y 平面で考察する。任意の Event S が、 $(a(S), b(S))$ に起こったとする。i 番目の station で S を観測し、 P 波の着震時 $T_i(S)$ を得たとすると、

$$T_i(S) = OT(S) + \int_0^{R_i(S)} (1/V_p(s)) ds \quad (1)$$

である。

ここに、 $OT(S)$ は、Event S の origin time で、 s は、 S と station i を結ぶ線分上の線素、 $V_i(s)$ は、 s における P 波のみかけ速度、 $R_i(S)$ は、Event S と station i を結ぶ線分の長さ、すなわち、

$$R_i(S) = \sqrt{(X_i - a(S))^2 + (Y_i - b(S))^2} \quad (2)$$

である。 (X_i, Y_i) は Station i の座標である。Station j についても同様に、

$$T_j(S) = OT(S) + \int_0^{R_j(S)} (1/V_j(s)) ds \quad (3)$$

$$R_j(S) = \sqrt{(X_j - a(S))^2 + (Y_j - b(S))^2} \quad (4)$$

Master Event について、同様な式をたてると、 $a(M) = b(M) = 0$ と選んだのであるから、

$$T_i(M) = OT(M) + \int_0^{R_i(M)} (1/V_i(s)) ds \quad (5)$$

$$R_i(M) = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} \quad (6)$$

$$T_j(M) = OT(M) + \int_0^{R_j(M)} (1/V_j(s)) ds \quad (7)$$

$$R_j(M) = \sqrt{X_j^2 + Y_j^2} \quad (8)$$

(1)–(3)

$$T_i(S) - T_j(S) = \int_0^{R_i(S)} (1/V_i(s)) ds - \int_0^{R_j(S)} (1/V_j(s)) ds \quad (9)$$

(5)–(7)

$$T_i(M) - T_j(M) = \int_0^{R_i(M)} (1/V_i(s)) ds - \int_0^{R_j(M)} (1/V_j(s)) ds \quad (10)$$

現在、北陸微小地震観測所で用いている走時表²⁾によれば、5つの観測点付近で、手取川発破の P 波のみかけ速度は急変しないで、 $s = R_i(M)$ で $V_i(s)$ は一定値 W_i をとると考えてよい。(9)–(10)の左辺を $T_{i,j}$ とおくと、

$$\begin{aligned} T_{i,j} &= \int_0^{R_i(S)} (1/V_i(s)) ds - \int_0^{R_j(M)} (1/V_j(s)) ds - \left\{ \int_0^{R_j(S)} (1/V_j(s)) ds - \int_0^{R_j(M)} (1/V_j(s)) ds \right\} \\ &= \int_{R_j(M)}^{R_i(S)} (1/V_i(s)) ds - \int_{R_j(M)}^{R_j(S)} (1/V_j(s)) ds \\ &\quad - \frac{1}{W_i} \left\{ R_i(S) - R_i(M) \right\} - \frac{1}{W_j} \left\{ R_j(S) - R_j(M) \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{また,} \quad = R_i(S) - R_i(M) = R_i(M) \left\{ \frac{R_i(S)}{R_i(M)} - 1 \right\} \quad (13)$$

$$\text{で,} \quad \frac{R_i(S)}{R_i(M)} = \sqrt{\frac{(X_i - a(S))^2 + (Y_i - b(S))^2}{X_i^2 + Y_i^2}} = \sqrt{1 - \frac{2\{a(S) \cdot X_i + b(S) \cdot Y_i\}}{X_i^2 + Y_i^2} + \frac{a^2(S) + b^2(S)}{X_i^2 + Y_i^2}}$$

上式最右辺の根号内第3項は無視し、第2項が1次の微小量であることに注意し $\sqrt{1+x} \approx 1 + \frac{1}{2}x$ ($x \ll 1$) に従って

$$\frac{R_i(S)}{R_i(M)} \approx 1 - \frac{a(S)X_i + b(S)Y_i}{X_i^2 + Y_i^2} = 1 - \frac{a(S)X_i + b(S)Y_i}{R_i^2(M)} \quad (14)$$

これを(13)へ代入し、さらに(12)へ代入すると、

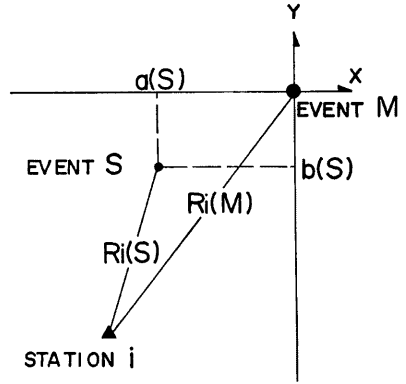


Fig. 7. Notation used in this appendix.

$$T_{i,j} = \frac{a(S)X_i + b(S)Y_i}{W_i \cdot R_i(M)} - \frac{a(S)X_j + b(S)Y_j}{W_j \cdot R_j(M)} = (\alpha_i - \alpha_j)a(S) + (\beta_i - \beta_j)b(S) \quad (15)$$

$$\text{ただし } \alpha_i = X_i / (W_i \cdot R_i(M)), \quad \beta_i = Y_i / (W_i \cdot R_i(M)) \quad (16)$$

で、j についても(16)式と同様の式をつくる。(15)式の左辺 $T_{i,j}$ は、観測された P-time の差から得られるので、2 組以上の独立な P-time の差から(15)式によって $a(S)$ 、 $b(S)$ を求めることができる。ここでは、P-time の差として、KMJ-FKJ と KMJ-KAJ の Data を用いて、一意的に $a(S)$ 、 $b(S)$ を求めた。 $a(S)$ 、 $b(S)$ から逆に、station k に対する M と S の走時差が、

$$\Delta T_k(S) = -\frac{a(S)X_k + b(S)Y_k}{R_k(M) \cdot W_k} \quad (17)$$

として求まるので、Stations k と l での差震時の差 $\Delta T_{k,l}(S)$ は

$$\begin{aligned} \Delta T_{k,l}(S) &= \Delta T_k(S) - \Delta T_l(S) \\ &= (\alpha_i - \alpha_k)a(S) + (\beta_i - \beta_k)b(S) \end{aligned} \quad (18)$$

となる。(17)、(18)式は、上記と全く同様に導かれる。本稿では、 W_i の値として、KMJ, FKJ, KAJ に 5.5km/s を、IMJ, HKJ に 6.0km/s を使用した。