

電卓による現業用震源決定*

望月英志**・細居善一**

550.34.06

Rapid Determination of Earthquake Parameters Using a Table Calculator

E. Mochizuki and Y. Hosoi

(Osaka District Meteorological Observatory)

At the local tsunami warning center of each District Meteorological Observatory belonging to the Japan Meteorological Agency is manually done the rapid determination of hypocenter for the tsunami warning service.

In order to determine earthquake parameters such as hypocenter and origin time more rapidly and accurately using *P* arrival times obtained from telemetered seismograms at the Osaka District Meteorological Observatory from 8 stations shown in Fig. 5, programs for a table calculator are coded on the basis of two methods developed for the calculator.

The program test proves successful, and this suggests that the time for the parameter determination will be remarkably shortened.

The low depth resolution of the present method due to limitation of the number of memory is the weak point, however.

§ 1. まえがき

現在、大阪管区気象台には、中部・西部広域地震監視システムおよび速報受信装置によって、合計8ヶ所の地点の地震記録が地震・津波判定室に送られてきている。大阪の地震計を加えれば計9ヶ所になる。地震・津波判定作業では、まず震源決定が最も重要であり、できるだけ迅速に、正確に震源決定する必要がある。

このために、上述の速報受信装置、中部・西部広域地震監視システムが震源決定の補助手段として設置された。これらの装置によれば簡単な操作により、ごく短時間におよその震央位置が表示されるようになり、現業緊急作業に威力を発揮している。

しかしながら、1)表示される震央が大まかすぎる、2)使用できる地域が限定され、必要な地域をカバーしていない、3)震源の深さはわからない、4)装置の全地点が作動する地震でなければ使用できない、などいくつかの問題点があげられる。これらの点を補うものとして、電卓による現業用震源決定プログラムを開発し、テストした。

§ 2. 震源計算の概要

電卓はテキサス インスツルメンツ社のプログラム電卓TI-59で120メモリー・レジスター=960ステップの記憶容量がある。震源計算では、この記憶域を640ステップのプログラム・メモリと40のデータ・レジスターに分割して使用している。今回の震源計算は任意の4地点の*P*の時刻から、走時表によって震源計算するものである。

震央計算式

$$(x_i - x_E)^2 + (y_i - y_E)^2 = \Delta_i^2 \dots \dots \dots (1)$$

$$t_i = T(\Delta_i) + t_0 \dots \dots \dots (2)$$

T(Δ_i): 走時表

震央の座標 (x_E, y_E), 震源時 t_0

観測点の座標 (x_i, y_i), 観測値 (*P*の時刻) t_i , 震央距離 $\Delta_i, i = 1, \dots, 4$

走時表は各深さごと(10 km ごと)にあるが、これを関数近似してプログラムに組込むとき、容量の制限から2種類の走時表(深さ10 kmと80 km)を組込んだだけで、震源の深さは2種類に限定された。計算終了時間を3分以内と制限するならば、その方面からもこれ以上震源の深さの種類をふやすのは難しい。

*Received June 15, 1979

**大阪管区気象台

走時表 $t = T(D)$ の近似式

t : 時間(sec), D : 震央距離(km), h : 震源の深さ(km)
 $h=10$ のとき

- $t = 0.7 + 0.16 D \dots\dots\dots 0 \leq D \leq 100$
- $t = 1.8 + 0.15 D \dots\dots\dots 100 < D \leq 180$
- $t = 5.9 + 0.127 D \dots\dots\dots 180 < D$

$h=80$ のとき

- $t = \sqrt{D^2 + 80^2} / 7.08 \dots\dots\dots 0 \leq D \leq 130$
- $t = 5 + 0.124 D \dots\dots\dots 130 < D$

震央 (x_E, y_E), 震源時 t_0 は (1), (2) から求められるが, この解法として, 普通の最小2乗法による解法と, 松本 (徳島地方気象台, 元大阪管区気象台観測課) の方法 (分離法) の2つをプログラム化して比較・テストした。ただし, 後者の場合プログラムを簡単にするため, (1) 式を変形 ((1) 式で, $i=1$ の式を $i=2, 3, 4$ の式からそれぞれ両辺を引けば, x_E^2, y_E^2 の項が消去される) した(1)' 式

$$(x_i - x_1) x_E + (y_i - y_1) y_E =$$

$$\frac{1}{2} \{ x_i^2 + y_i^2 - D_i^2 - (x_1^2 + y_1^2 - D_1^2) \} \dots\dots (1)'$$

ただし $i=2, 3, 4$

を用いているので, 厳密には松本の分離法と一致しない。

普通の最小2乗法による方法は, オンドックスな方法であるが, 1) 第1近似震央を必要とする, 2) 正規式は3元1次式である, などによりプログラムステップ数が多く, そのために観測地点の座標を記憶させられない, 入力操作の不便なプログラムになる。

分離法は, 1) 第1近似震源時を必要とするが, これは簡単に与えられる, 2) 2元1次式を解く, などによりステップ数が少なく, 12ヶ所の観測地点の座標を記憶させられる。

後述のテスト結果では, 2つのプログラムによって計算された震源はほとんど相違がなく, それゆえ入力操作の便利な分離法のプログラムが採用された。以下では分離法の概要, およびそのプログラムフローチャートを記載する。

分離法では, (1) (または (1)') と (2) を分離して解く。すなわち, 震央 (x_E, y_E) と震源時 (t_0) を分離して最小2乗法で求める。

1) t_0 の近似値があれば, (2) より D_i ($i=1, \dots, 4$) が定まるので, (1)' を最小2乗法で解き x_E, y_E を求める。(1)' は3直線を表わすので, その最小2乗解 x_E, y_E は

3直線に至る距離の2乗の和が最小の点として求められる (Fig. 1 参照)。

2) x_E, y_E の近似値があれば, (1) より D_i が定まるので, (2) を最小2乗法で解き t_0 を求める。これは図的

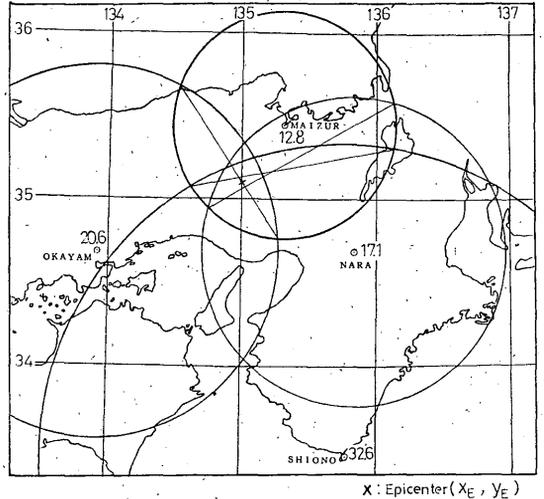


Fig. 1. Epicenter determined by eq(1).

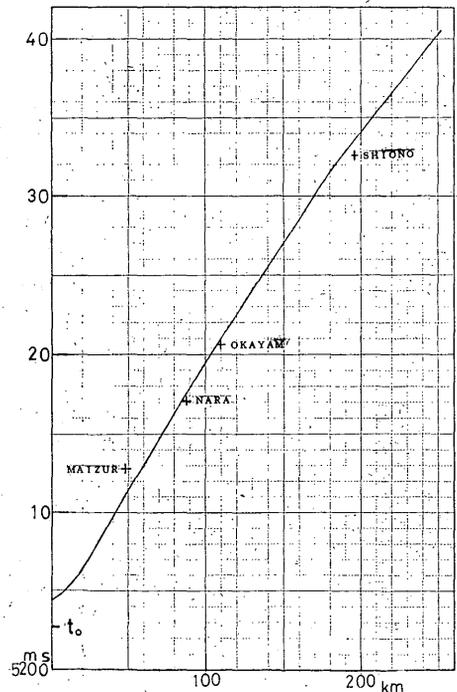


Fig. 2. Travel times at four stations calculated from the earthquake parameters obtained and the corresponding travel time curve.

には、Fig. 2のように、観測値の分散が最小になるように走時曲線をあてはめ t_0 を求めることである。

分離法は、1) で求めた x_E, y_E を2)の近似値とし、2)で求めた t_0 を1)の近似値とする、というように1), 2)を何度かくり返して x_E, y_E, t_0 を求める。

プログラムでは、 t_0 の第1近似値として最小の $h=2$ を用いている。1), 2)のくり返しは、 $h=10$ とき3回、 $h=80$ のとき2回である。2)では t_0 と分散も計算する。また、 t_0 の第1近似値は、上とは別に、入力操作で与えることができる。(プログラムフローチャート(Fig. 3)参照)。

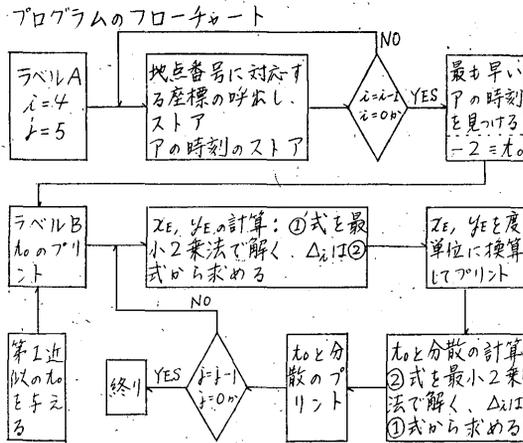


Fig. 3. Flow chart of the program.

§ 3. 計算結果のプリントと震源の採用基準

計算結果は x_E, y_E, t_0 , 分散をプリントしてあり、これらは $h=10$ について3回、 $h=80$ について2回プリントされる。(計算例 Fig. 4(上)参照)。 t_0 , 分散は計算結果採否の目やすにする。検測は、通常秒単位でされるので、検測値の誤差を0.5秒以内とすれば、分散は約0.3以下となり、これは収束の目やすになる。速報受信装置の4地点は水平・上下3成分の記録が送られてきているので $P\sim S$ を検測しやすい。どこか1ヶ所の $P\sim S$ があれば簡単に t_0 がわかる。この t_0 と計算された t_0 が同じならば、震源は正しい。なお、 $P\sim S$ から得られた t_0 を入力操作で与えて、震源計算させることもできる(計算例 Fig. 4(下)参照)。

計算結果の採用判定は、1) 最小分散の震源を採用する、2) 計算された t_0 が真の t_0 に最も近い震源を採用する、の2種類がある。2)の「真の t_0 」とは具体的には、 $P\sim S$ から得られた t_0 である。1)の採用判定は簡単に緊急用に適している。

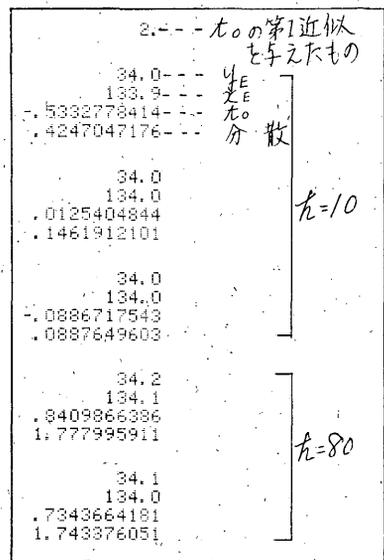
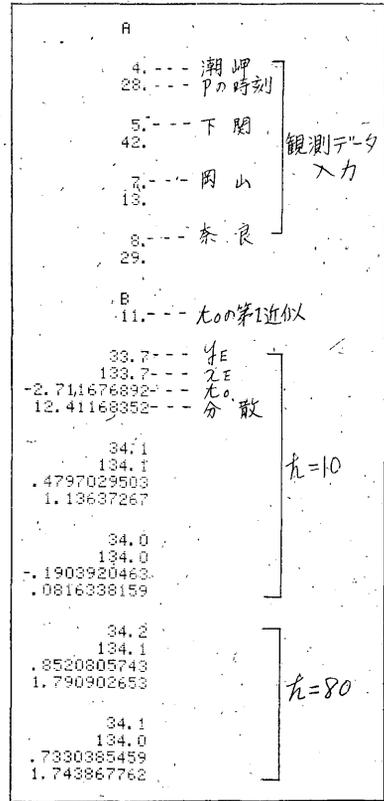


Fig. 4. Examples of output.

§ 4. テスト結果

テストは、 $1^\circ \times 1^\circ$ メッシュの震央について走時表から計算した観測値および実際の地震 (1975~1977) の観測値と、2種類のデータについてテストした。任意の4地点としては、震央から近い順に4地点を選んだ。計算された震央と真の震央とのずれを δ とし、 δ は緯・経度のずれのうち大きいほうとする。 $\delta \leq 0.1^\circ$ ならば A, $0.1^\circ < \delta \leq 0.2^\circ$ ならば B, $0.2^\circ < \delta \leq 0.3^\circ$ ならば C, $0.3^\circ < \delta \leq 0.4^\circ$ ならば D, $\delta \geq 0.5^\circ$ ならば E とした。以下はテスト結果である。

(1) 普通の最小2乗法と分離法の2つのプログラムにより、計算された震源は両者でほとんど相違がない。それゆえ、入力操作が便利な分離法のプログラムが採用される。

(2) t_0 の第1近似値として、最小の $t_i - 12, -9, -5, -2$ の4種類についてテストしたが、 $1^\circ \times 1^\circ$ メッシュの震央について、計算結果はほとんど相違がない。一方、震央が観測点のごく近傍の場合は $t_i - 2$ が最もよい、これにより、 t_0 の第1近似値は $t_i - 2$ とした。

(3) 観測点の配置の影響

観測点が震央を囲ってれば計算結果はよいが、震央にたいして1象限にかたよった場合、計算結果は悪い。Fig. 5~Fig. 10で(A), (B)のようにカッコをつけたのは、震央に近い4地点が1象限にかたよって結果を悪

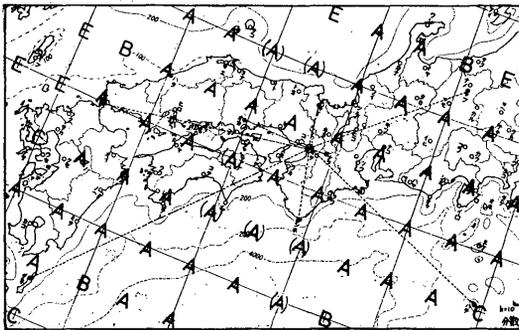


Fig. 5. Result of program test. The least square solution having the minimum variance is adopted as the final solution. The travel time for $h=10$ km is used in the computation. A, B, C, D and E indicate reliability of the solution. A: $\delta \leq 0.1^\circ$, B: $0.1^\circ < \delta \leq 0.2^\circ$, C: $0.2^\circ < \delta \leq 0.3^\circ$, D: $0.3^\circ < \delta \leq 0.4^\circ$, E: $\delta > 0.4^\circ$, (δ is the bigger discrepancy between true and determined longitude and latitude of epicenter).

くしているのを、別な観測点をとって、もっと囲む形にした地域である。

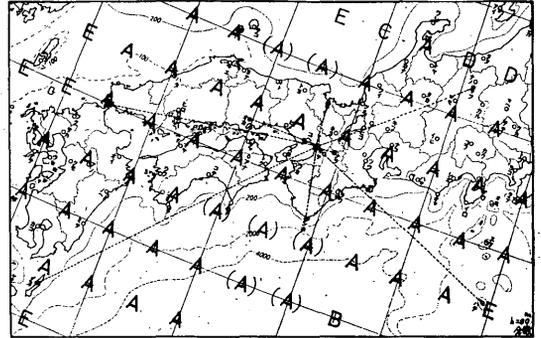


Fig. 6. Result of program test. Determination is made using the travel times for $h=80$ km.

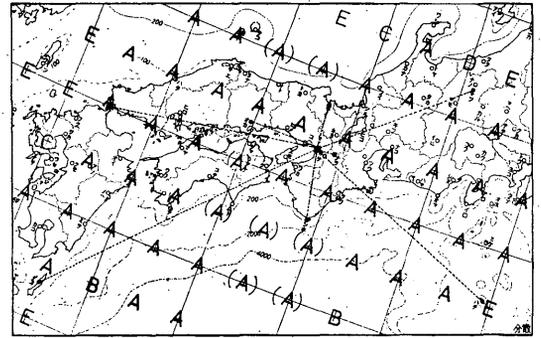


Fig. 7. Distribution of index showing reliability of solution drawn from Figs. 5 and 6. The index having lower rank in Figs. 5 and 6 is adopted in the plot.

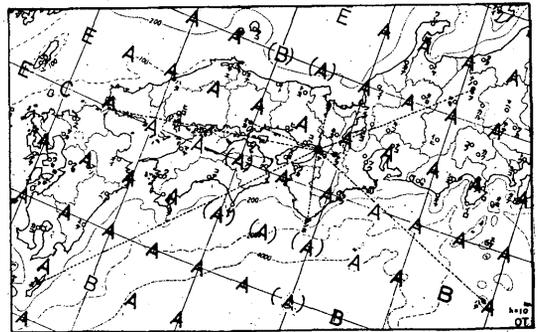


Fig. 8. Result of program test. The solution having the minimum discrepancy between true and determined origin times is adopted as the final solution. The travel times for $h=10$ km is used in this case.

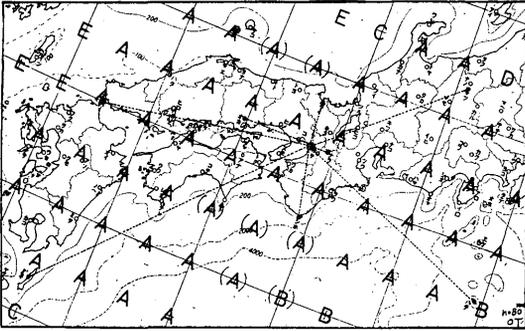


Fig. 9. Result of program test. The travel times for $h=80\text{km}$ is used in this case.

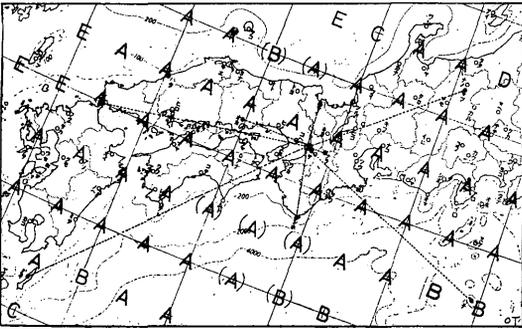


Fig. 10. Distribution of index showing reliability of solution drawn from Figs. 8 and 9.

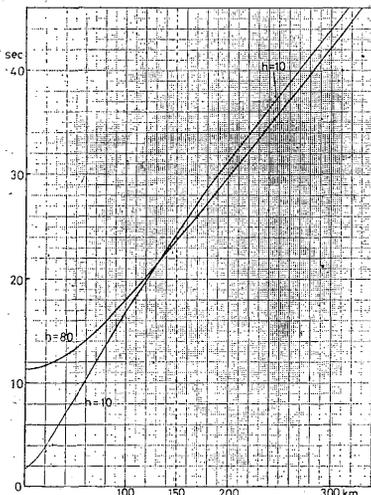


Fig. 11. Travel time curves used in the earthquake parameter determination. Note that difference between travel times for $\Delta \geq 150\text{ km}$ is nearly same.

(4) 計算された震央と真の震央とのずれ分布

1) 最小分散の震源を採用した場合: Fig. 5 は深さ 10 km の震源について震央のずれを示す. Fig. 6 は深さ 80 km の震源について同様の図である. Fig. 7 は, Fig. 5 と Fig. 6 を合わせて, $1^\circ \times 1^\circ$ メッシュの同一地点でランクの低い方を採用した図 (合成図) である.

2) 計算された t_0 が真の t_0 に最も近い震源を採用した場合: Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10 は, それぞれ 1) の Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 に相当する図である.

(5) 震源の深さの判定

$h=10\text{ km}$ と $h=80\text{ km}$ の走時曲線は, 震央距離約 150 km 以上で平行になっている (Fig. 11 参照) ので, 4 地点全部が震央から約 150 km 以上の地域は, 深さの判別ができない. Fig. 12, Fig. 13 の円は各観測地点から 150

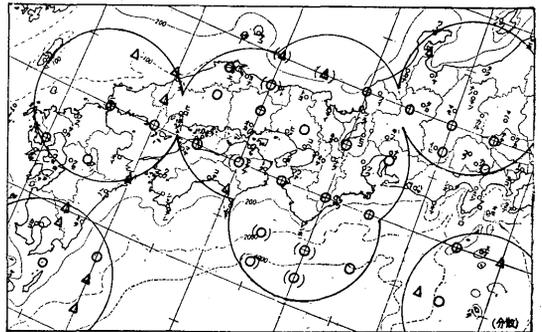


Fig. 12. Map showing focal depth resolution. O in the plot shows that the determined focal depth agrees with the assumed one in the both cases ($h=10\text{ km}$ and 80 km) and Δ indicates that the determined depth does not always agree with the assumed one. Focal depth determination for events occurring in the area outside large circles is quite difficult. (Solution having the minimum variance is adopted as the final solution).

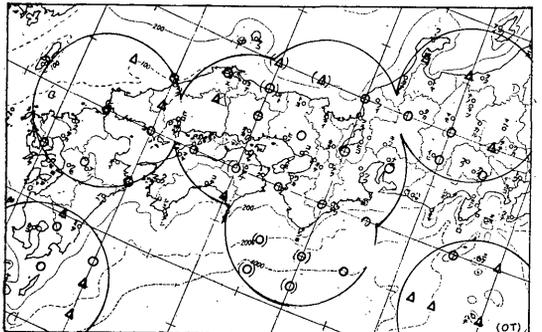


Fig. 13. Map showing focal depth resolution for the least square solutions having minimum origin time discrepancy.

km の円で、これらの円の外側の地域は深さの判別ができない。これらの円の内側の地域について、震源の深さ 10 km と 80 km の両方で結果が正しい場合を ○、片方についてのみ正しい場合 △ をとする。ただし、震央のずれが A または B の地点に限定した。1) 最小分散の震源を採用した場合は Fig. 12, 2) 計算された t_0 が真の t_0 に最も近い震源を採用した場合は Fig. 13 である。

(6) 実際の地震 (1975~1977) についてのテスト

1975年~1977年の期間、地震月報に掲載されている地震のうち、大阪へ地震記録が送られてきている観測地点 4ヶ所以上で、P の時刻が観測されている地震についてテストした。

観測地点は P の時刻が早い方から 4 地点をとった。この 4 地点の観測値に誤りがあれば、計算結果が悪くなるので、走時残差の絶対値が 2 秒以上のデータを補正した。なお、比較的結果が悪い 13 ヶの地震については、走

時残差の絶対値が 1 秒以上のデータを補正した。

震央のずれは、1) 最小分散の震源を採用した場合は Fig. 14, 2) 計算された t_0 が真の t_0 に最も近い震源を採用した場合は Fig. 15 である。Fig. 14, Fig. 15 中の数字は、その地点の地震の数を表わす。これらの結果は (4) の結果とよく一致している。

以上のテスト結果から、電卓による震源計算が有効な地域は震央のずれ A, B の地域といえるが、これは大阪管区気象台として必要な地域をほぼカバーしている。ただし、これらの地域内で、震源の深さの判定ができない、または信頼性の少ない地域が多くあり、震源の深さ判定は必要な地域をカバーしていない。

§ 5. 震源決定作業

電卓は電源入、プログラムセットの状態で常時待機させて置く。電卓メーカーの話では、この状態で、電卓本体およびプリンターとも問題ないということである。けれども、電卓の保守および故障対策のために、予備機としてもう一台必要である。2 台の電卓を 1 週間交代くらいで使用するのが望ましい。

電卓による震源決定作業は、1) ビジグラフによって、P が明りょうに現れている 4 地点の P の時刻を測定する。2) 測定値を電卓入力用紙に記入する。3) 電卓入力用紙にしたがって入力する。

測定値の記入を含めて、入力操作に 1 分かかり、計算終了は入力後約 3 分 30 秒である。計算終了まで、かなり時間がかかるので、入力値確認の後、他の作業に移る必要がある。

電卓による震源決定作業は、従来の作業 (中部・西部広域地震監視システムの使用、着順による震央方向区域の決定、ビジグラフ測定値・電報資料のプロット・コンパスによる震源決定) に追加される作業になる。従来の作業の処理だけでも、時間が多くかかりすぎる実情であるが、そのうえ電卓による震源決定作業の追加は、時間的・人力的に難しい問題である。このため、実際の地震の際、電卓が利用されなかった場合が多い。この問題は今後の検討課題である。

謝 辞

プログラムのテストにあたって、大阪管区気象台観測課地震当番者の方々から多大な御協力をいただいた。プログラム作成の際、徳島地方気象台松本久氏から御意見、御助言を得た。山川技術部長、木村観測課長から御指導・御便宜をいただいた。ここに深く感謝いたします。

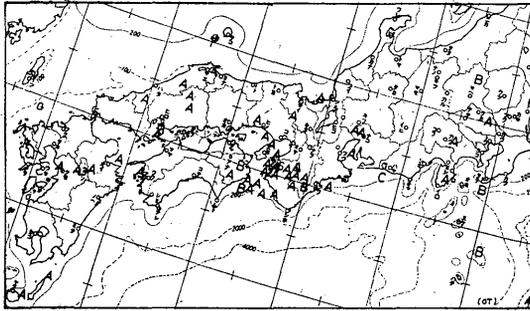


Fig. 14. Result of program test for events occurring from 1975—1977 (minimum origin time discrepancy). A, B, C in the plot are the same as those in Fig. 5.

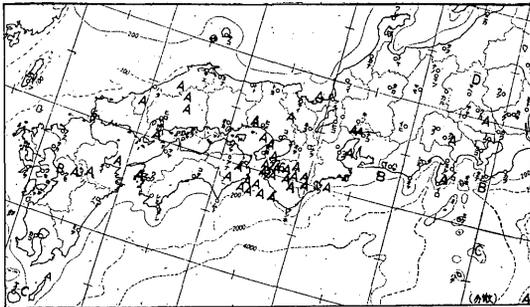


Fig. 15. Result of program test for events occurring from 1975—1977 (minimum variance). A, B, C, D in the plot are the same as those in Fig. 5.

参 考 文 献

気象庁 (1971) : 地震観測指針 (解析編).

気象庁地震課 (1963) : 地震調査業務の機械化について, 気象庁
技術報告, No.22.

松本 久 (1977) : 標準走時曲線を用いた震源の図式解法 (地震
学会講演予稿集, No.2).