

## 震源の深さの信頼度について\*

市川 政治\*\*

550.34.06

### Focal Depths Determined by JMA and Some Related Problems

M. Ichikawa

(Seismological Division, J. M. A)

Parameters of earthquakes occurring in Japan and its vicinity are routinely determined by the Japan Meteorological Agency (JMA). The JMA's focal depth is given in unit of 10km.

Needless to say, the focal depth given in 10km is not satisfactory to conduct detailed studies on the spatial distribution of earthquakes, and relevant seismologists in Japan are desirous of the focal depth determination in 1km as other organizations have been doing.

In our experience, the trade-off phenomenon in the focal depth and origin time occurs frequently in the determination of earthquake parameters, and a slight alternation of  $P$  arrival time at some station shift considerably the focal depth in some case.

Comparison of focal depths given by JMA and ISC elucidates that the determination of focal depth in unit of 10 km by JMA is reasonable. And,  $P$  arrival time residuals for Japanese stations calculated from ISC's earthquake parameters show systematic discrepancies in the Jeffreys-Bullen's travel times in short distances for shallow events.

A computer simulation is conducted in order to study the relationship between the accuracies of the determination of focal depths and of observations of  $P$  arrival times. The result indicates the necessity of  $P$  arrival times with accuracy as high as  $1/4$  seconds and use of an appropriate local travel time table or station corrections to a conventional travel time table in the determination of earthquake parameters with high accuracy.

The accuracy of observation for  $P$  arrival time will be as high as  $1/4$  seconds in the case of impulsive  $P$  onset recorded by high magnification seismographs in the JMA seismological network. In view of the evidence, the determination of focal depth with accuracy as high as a few kilometers is possible, if a local travel time table or station corrections to a conventional travel time table were applied in the parameter computation.

#### § 1. ま え が き

日本付近に発生した地震について、多くの機関でその震源パラメータを求めている。この震源要素の決定には、ある場合は local な、また、ある場合には regional な、さらにまた global なデータが使用されている。

これら各機関から発表されている震源パラメータのうち、震央の位置は分または 0.1 分単位か、度の百分の 1 又は千分の 1 の単位で表わされている。しかし、これら各機関発表の震央位置には平均して 10~20 km の相対的

相違があり、地域によっては系統的に 100 km 以上もずれていることもある (Ichikawa : 1978, 市川 : 1979)。

震源の深さは気象庁が 10 km 単位であるのに対し、他機関では km、あるいは 0.1 km 単位でその位置を表わしている。この気象庁の 10 km 単位の震源の深さ決定が、利用者に問題にされることもある。

気象庁の地震観測精度は、以前に比べ格段と向上していることは事実であるが、観測点の分布やその密度、あるいは震源要素計算に使用している基準走時表などを考慮するとき、他機関なみに 1 km あるいは 0.1 km 単位で、はたして、信頼性のある震源の深さが求められるか問題であり、事実、2、3 のデータの追加あるいは削

\* Received June 30, 1980

\*\* 気象庁地震課

除により、震央はあまり変化しないが、震源の深さと origin time が極端に変わってしまう、いわゆる trade off の現象を、われわれはしばしば経験する。

そこで、km 単位で震源の深さが求められている ISC (International Seismological Center) や USGS (United States, Geological Survey) 発表の震源要素を用いて、気象庁のそれとの相違を調べると同時に、震央付近の観測点の P 波の残差についても調べてみた。また、P-S 波の観測精度と震源要素計算結果との関係についての simulation を行った。

§ 2. 気象庁, ISC, USGS 決定の震源位置の比較

観測点の分布や密度、震源の深さ分布を考慮して、関東地方と中部地方の東部に1974年中に発生した地震を対象に ISC, USGS, 気象庁決定の震源の相違を調べた。

Fig. 1 に3機関決定の震央の相違を示す(黒丸は気象庁, 白小丸は ISC, 白大丸は USGS の震央)。また, Fig. 2 は気象庁, あるいは, ISC の震央と ISC, USGS の震央の相対的相違を示す図である(左図は気象庁と ISC, 中央の図は気象庁と USGS, 右図は ISC と USGS とについてのもの)。

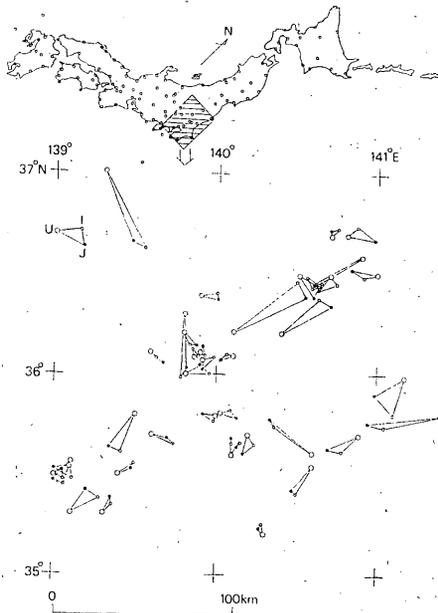


Fig. 1. Comparison of epicenters of earthquakes occurring in the southern part of central Japan in 1974. ., o and O indicate epicenter determined by JMA, ISC and USGS, respectively.

Fig. 3 は3機関決定の震源の深さの差異を示すものであり、また、Fig. 4 は気象庁と ISC の震源の深さを比較したものである。Fig. 4 中の丸印に付いている縦線は ISC 決定の震源の深さに対する標準誤差を示す。また、Tab. 1 に震源要素の差異の平均値を示す。

ISC の震源要素は、主に、気象庁決定の震源要素を第1近似値として、気象庁の観測データのほかに、日本国内の他機関の観測データや、外国のデータも併用して、最終震源要素を求められている。しかし、地震の規模が小さい場合は、気象庁のデータと若干の大学関係のデータだけで震源要素が求められているので、気象庁と ISC の震央は良くあっている。

Fig. 4 からわかるように、深さ 40 km~90 km の範

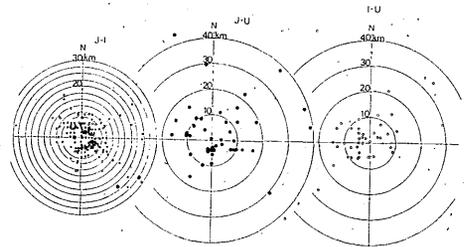


Fig. 2. Discrepancies of epicenters given by JMA and ISC (left), JMA and USGS (middle), and ISC and USGS (right). Centers of concentric circles are each epicenter by JMA (left), JMA (middle), and ISC (right), respectively.

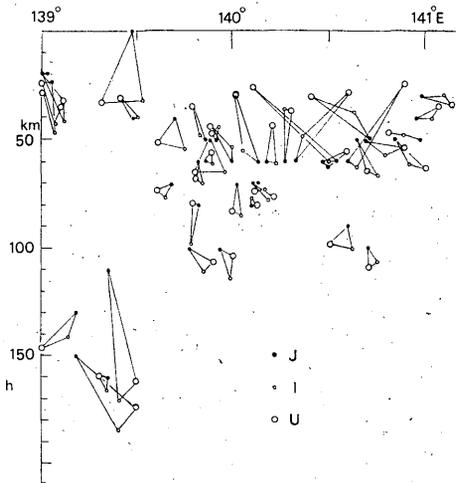


Fig. 3. Comparison of focal depths given by the three organizations, JMA (.), ISC (o), and USGS(O).

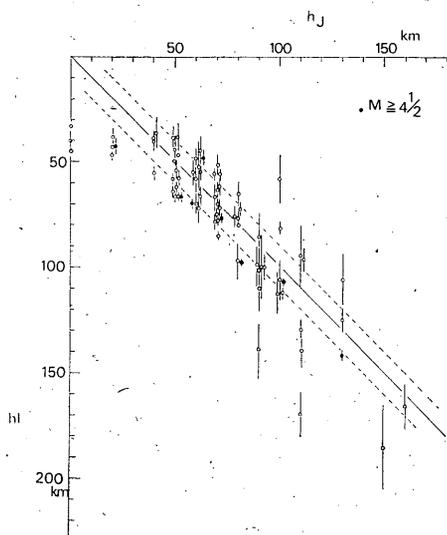


Fig. 4. Comparison of focal depths given by JMA ( $h_j$ ) and ISC ( $h_i$ ). Vertical line passing through a circle shows the standard error to the revised focal depth by ISC.

Tab. 1. Mean discrepancies of earthquake parameters determined by the three organizations.

	JMA-ISC	JMA-USGS	ISC-USGS
Epicenter (km)	$15 \pm 2.8$	$18 \pm 3.0$	$15 \pm 2.8$
Focal depth (km)	$1 \pm 0.5$	$-3 \pm 7.5$	$1 \pm 0.4$
Origin time (s)	$-2.2 \pm 0.92$	$-3.0 \pm 2.84$	$5.9 \pm 1.99$

囲では、気象庁とISCの震源の深さの相違は約10 kmの範囲である。

前記のように、ISCは気象庁決定の震源要素を第1近似値として、最終震源要素を求めているが、場合によっては、求めた震源の深さは、負、すなわち空中に出てしまうという不合理なことが発生する。これは、震源要素計算に使用している基準走時表 (Jeffreys-Bullenの走時表) が、当該地域の走時に不適合であったり、データの精度が悪いことなどに起因すると考えられる。ISCの場合、どの程度の率でこの現象が起っているか調べた結果を Fig. 5 に示す。この図の縦軸は気象庁決定の震源の深さである。また、左図の横軸は震源の深さが負となったため、気象庁決定の震源の深さをそのまま固定して震央と origin time を求めた場合の回数(図中の Fixed)

と、うまく震源要素が求められた場合の回数(図中の Revised)を示す。また、右図の横軸は、うまく震源要素の求められた回数と全体の地震回数との比を示す。

調査対象期間に、山梨県東部に多数の余震を伴った規模6程度の極浅発地震が発生しているが、これらの地震は、その深さが大部分固定されている。すなわち、震源の深さが負の値となっている。いずれにしても、地殻内に発生する地震の半分以上は、震源の深さの修正は困難であったことが、この図からわかる。

また、このほか地殻底下に発生した地震の震源の深さの標準誤差は、数 km 程度であること (Fig. 4) などを考えると、km 単位の震源の深さ決定に疑問を感じる。

Fig. 6. は気象庁 (JMA) と ISC 決定の震源の深さ別度数分布図である。地殻底付近 (20~30 km) とその直下 (50~80 km) を除けば、度数分布の傾向は似ている。地殻底付近の地震に対する深さの相違は、後述のようにISCの基準走時表である Jeffreys-Bullen の走時表が、この地域の極浅発地震に適合していないことによるものであろう。計算からはなるほど km 単位で、震源の深さを求めることは、地表付近に発生する極浅発地震以外は可能であろうが、当該地域に適した走時表を用いない限り、震央における系統的なずれと同様な現象が、震源の

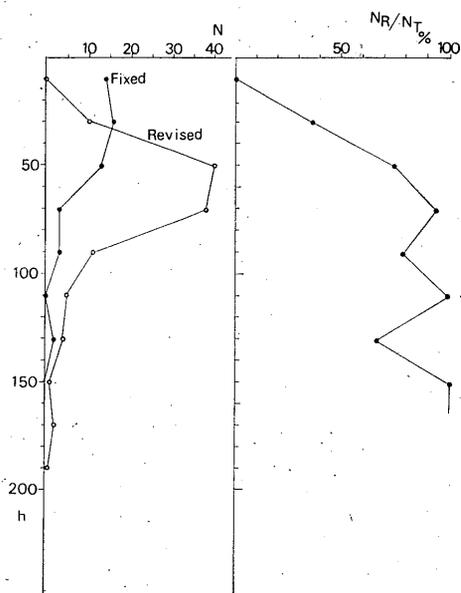


Fig. 5. Relation between numbers of events whose parameters including focal depth were revised and were not revised by an iteration method in ISC.

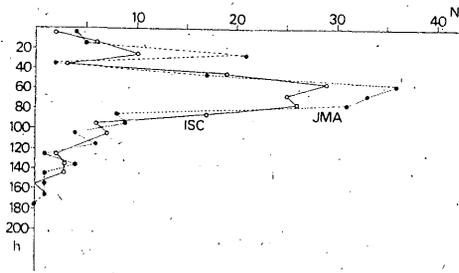


Fig. 6. Frequency of focal depths in every 10 km of depth. ·····: JMA's focal depth, —: ISC's

深さの場合にも現れ、結果は信頼できないものとなる(市川, 1979)。

### § 3. P波走時残差

§ 2 で述べたように、極浅発地震の大部分の震源は、ISC の場合、気象庁決定の深さに押えて求められている。これは深さの補正項を含む一般的な震源要素計算法では、第1近似値に対する深さの補正値が大きすぎて、深さが負となるという、不合理なことが起きてしまうためである。この現象が発生する一つの原因は、基準走時表にあると考えられる。

このことを確かめるために、震源要素決定の際に求められた、各地震に対する各観測点のP波走時残差を調べてみた。Fig. 7 に、気象庁(左側)とISC(右側)に対する深さ別P波走時残差~震央距離図(いわゆるO~C図)を示す。図中の横軸に平行な対の点線は、震央距離100kmごとの残差の平均値に対する標準偏差であり、実線はその平均値を示す。

この図から、気象庁の場合は、基準走時と観測値の差異は、僅かであり系統的なずれは認められないのに対し、ISC の場合は、震央距離100 km 以内では、平均して観測値のほうが早く、逆に100 km より遠くなると観測値のほうがおそくなる傾向があることがわかる。また、平均値に対する標準偏差も、ISC のほうが、気象庁の2~3倍であることもわかる。しかし、これらの傾向は、震源の深さが深くなるに従ってうすれていく。ISC の場合、このようなP波残差の系統的差異をなくそうとすると、震源の深さが負になってしまう。これはとりもなおさず、Jeffreys-Bullen の深さ0 km, 33 km の走時表の震央距離0~200 km の値が、当該地域に不適であることを示唆している。

P波走時残差の平均値に対する標準偏差は、気象庁決

定の震源要素からは、震央距離200 km 程度までは、0.5 秒~1秒程度である(Fig. 7)。これは低倍率の59型地震計記録による験測結果も含めた結果であり、倍率の高い67型あるいは76型磁気テープ記録式地震計記録の験測結果は、これよりもはるかに良いはずである。

### § 4. 震源要素計算に関する Simulation

言うまでもなく、震源要素計算結果は、観測値の精度や基準走時表に大きな影響を受ける。ここでは、観測精度と震源要素計算結果との関係を調べるため、simulation を行った。

すなわち、震源の深さの補正項も入れた最小自乗法による震源要素計算法によって、観測精度を、いろいろ変えて行った場合、震源要素は真の値からどの程度づれていくか調べてみた。

Fig. 8 は、P波観測値の標準偏差が0秒から2秒の場合の真の値(×)と計算結果(○)の差異を示すものである。この図には、第1近似の震央が、繰返し計算の結果どのような経過をたどって、最終値に到着したかも示してある。

たとえ、第1近似の震央が $\frac{1}{2}^{\circ}$ くらいずれていても、1~2回の繰返し計算で、最終結果の近くに到着し、かつ、この傾向は、標準偏差の値には殆んど関係ないことが Fig. 8 からうかがえる。

しかし、震源の深さの計算結果は、標準偏差と密接な関係があり、震央のずれよりも震源の深さの場合のほうがはるかに大きい。標準偏差が0秒の場合、震央は真の位置に戻るものの、震源の深さは真の値にならない。これは、計算中のまるめの誤差の影響と考えられる。

Fig. 9 は観測値の標準偏差(横軸)と決められた震源の深さに対する標準偏差(縦軸)との関係を示すもので、決められた震源の深さは、観測精度に密接な関係があり、km 単位で決められた震源の深さが、統計的に有意な値であるためには、観測の精度は $\frac{1}{4}$ 秒以下でなければならないことを示唆している。

前記のように、59型地震計記録を含めたP波験測結果の標準偏差の現状は $\frac{1}{2}$ 秒~1秒である。このことと、Fig. 9 の結果から、現状では、10 km 単位の震源の深さ決定は妥当なものであると言えよう。

しかし、観測値と標準走時との差異は、観測の誤差のほかに、標準走時作成に使用した構造、特に地殻およびその直下の構造と、震源から各観測点に到る構造の違いによる系統的なものも含まれている。したがって、実際の観測精度は、上記の値より良いであろう。

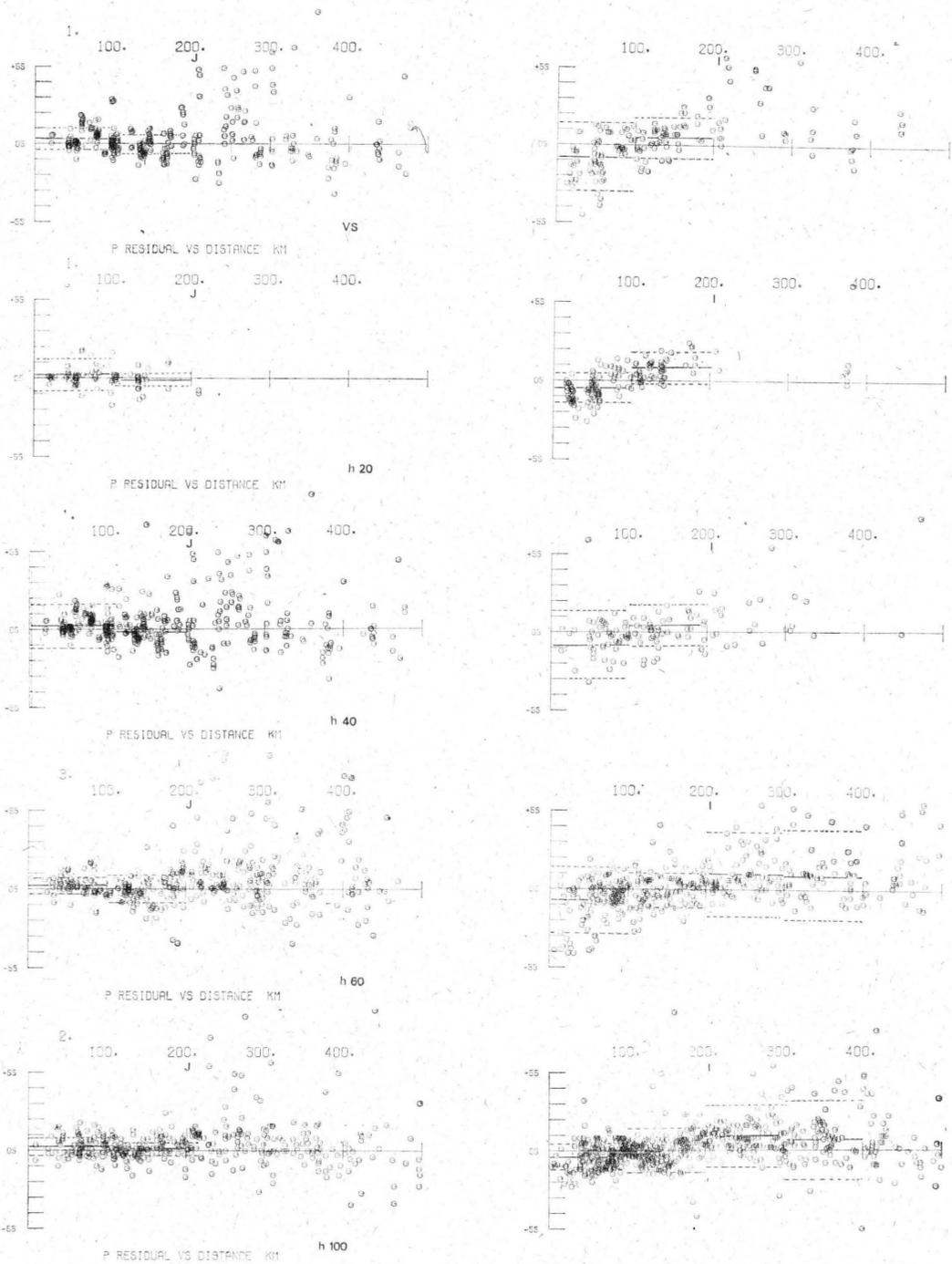


Fig. 7. Plots showing *P* arrival time residuals at various stations for events occurring in the region concerned in 1974 by various focal depth ranges.

J: *P* residual calculated from the JMA's earthquake parameters.

I: *P* residual calculated from the ISC's earthquake parameters.

VS: events occurring near the earth's surface.

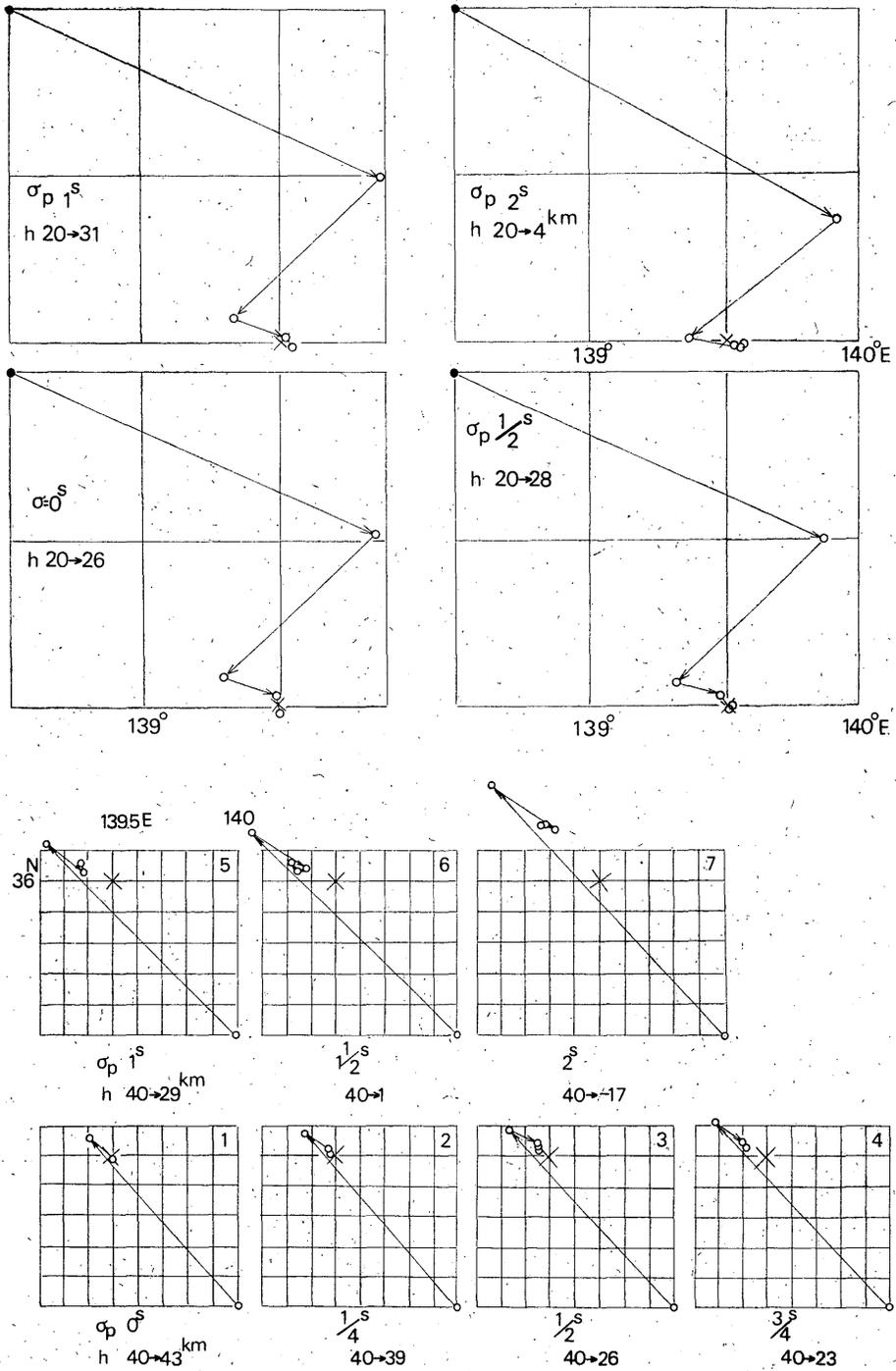


Fig. 8. Shift of epicenter by iterations of the earthquake parameters computation, and the true and determined focal depths. For example,  $h 40 \rightarrow 43$  km indicates that the true depth is 40 km and the final one is 43 km.

$\sigma_p$ : standard deviation of  $P$  arrival time readings used in each simulation.

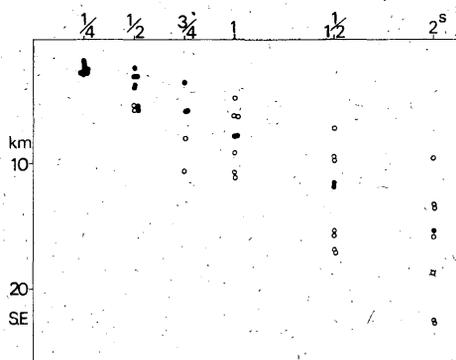


Fig. 9. Relation between the standard deviation of  $P$  arrival time readings and standard error of determined focal depth (SE).

このことから、震源要素計算に観測値補正値を考慮するか、又は局所的走時表を使用することによって、震源の深さの決定精度を向上させることが出来るはずであると考えられる。特に、倍率が高く、かつ、graphic display などを使って入念な験測を行っている67型や76型地震計の験測精度は、立上がりの明瞭な場合、0.2秒より悪いことは無いと考えられる(市川, 1980)。したがって、当該地域に適合した局所的走時表、あるいは、観測所補正値を震源要素計算に使用することにより、2~3kmの精度で震源の深さを決められよう。

### § 5. むすび

気象庁を除く、世界の多くの関係機関では、震源の深さをkmあるいは0.1km単位で発表している。しかし、Engdahl (1980)も述べているように、globalの資料を使って震源要素を決めている機関での震源要素計算結果の精度は、平均して数十kmであり、これらの結果から、いわゆる Benioff zone などは議論できない。今回

の調査では、ISCの震源要素の精度は、それほど悪くないにしても、km単位の震源の深さは気休めに過ぎないと言える。この点から、気象庁の現在の10km単位の震源の深さ決定は妥当であろう。

しかし、気象庁の地震観測網の主体は、67型・76型地震計に移り、その験測精度も*iP*ならば0.2秒、*P*の場合でも0.5秒以内となった現在、これらの験測値からは、1kmとはいかなくとも、2~5kmの精度で震源の深さは決められそうであることが、今回のsimulationからわかった。ただし、この際、lateral heterogeneityの影響を考慮する、すなわち、局所的走時表あるいは、観測所補正値を震源計算に使用する必要がある。

日本付近には、同じ地域でも、地表付近からマントル上部にかけて地震が発生しているところもあるので、観測所補正値よりも、局所的走時表を震源計算に使用したほうが良いのではないだろうか。

いずれにしても、気象庁の地震観測精度が飛躍的に向上した現在、それに適合した資料処理手順の開発が必要であろう。これにより、気象庁決定の震源要素を利用する人達の要望に何がしか答えることができるようになる。

### 参考文献

- Engdahl, E. R. and H. Kanamori. (1980): Determination of Earthquake Parameters, E. O. S., Trans. Am. Geophys. Union, **61**, 62~64.
- Ichikawa, M. (1969):  $P$  Arrival Time Anomaly in Northern Japan, Geophys. Mag., **34**, 345~357.
- Ichikawa, M. (1978): Lateral Heterogeneity under the Southern Kurile Trench and its Vicinity and Systematic Discrepancy in Epicenter Location, Geophys. Mag., **38**, 1~19.
- 市川政治 (1979): 三陸沖の地震の震源分布, 験震時報, **43**, 59~65.
- 市川政治 (1980): 地震記録自動処理装置, 験震時報, **44**, 55~74.