

P波初動と観測網*

市川政治**

Sur Premier Impétus et Réseau d'Observatoires Séismologiques

M. Ichikawa

(Section de Séismologie, C.M.O.)

Pour une des préparations de l'investigation des lignes de noeud de P , l'auteur évaluait l'amplitude de premier impétus de séisme peu profond en fonction de distance épacentrale, et en déduisait la sensibilité de différents types de séismographes pour l'onde P . Et puis, l'auteur aussi étudait la relation entre un réseau d'observatoires et la sensibilité de séismographes.

Les résultats que l'auteur trouva indiquent :

- (1) Prenant pour l'unité la sensibilité de pendule Mainka, le séismographe Milne-Show est trois~cinq fois plus sensible que Mainka, Galitzin, Wood-Anderson ou Sprengnether sont dix~vingt fois et Benioff ou Grenet sont environ cent fois, respectivement.
- (2) Pour étudier les lignes de noeud de P sur la surface du globe, il est préférable de choisir le séisme de la magnitude supérieur à 7.
- (3) Pour déterminer exactement des épacentres, l'agrandissement de sensibilité de pendule est plus efficace que l'augmentation du nombre d'observatoires.
- (4) La fonctionnement par cent séismographes, aussi sensibles que Galitzin, distribués aléatoirement sur la surface du monde, permet de déterminer à peu près exactement des épacentres de séismes de la magnitude supérieur à 6.

§1. 序論

最近、わが国爆破地震学の急速な発展に伴い、自然地震観測（とくに P 波初動）の精度の向上の必要性が叫ばれるようになってきた。しかし、観測精度と一口に言っても、これには記録装置、時刻補正值、地震計の感度と noise など多くの問題が含まれていて単純なものではない。ここでは Hodgson などによる発震機構の研究などとも関連しながら、この問題を時間の概念から離れて、単に P 波初動の振幅の面にかぎり、現用各種地震計が P 波初動に対し、それぞれの程度の感度を持つか当たってみた。また、さらにこの結果を利用して観測網と地震計の感度との関係をもしらべてみた。

* Received July 23, 1955

** 中央気象台地震課

§2: 調査方法

いま、規模 M (Gutenberg-Richter) の地震が起つたとする。このとき、地表上の各点の P 波初動 (以下 P 波と呼ぶ) の振幅は詳しくは発震機構と関係するが、ここでは簡単にエネルギーは四方に一樣に放出されるとし、ある距離 Δ での振幅 A を

$$A = k f T \sqrt{E_1} \quad (1)$$

で近似する。

ここで、 k は考えている実体波 (P 波) に関係する量、 T はその波の周期、 E_1 は地震に際し放出されたエネルギー E のうち、 P 波に与えられたエネルギー、また、 f は ρ_1, ρ_0 および v, v_0 を任意の深さおよび地表での密度と P 波の速度、 e_0 を地表での P 波波線の射出角、 Θ を震源での波線と鉛直線とのなす角および Δ を震央距離とすると、

$$f = \sqrt{\frac{\rho v}{\rho_0 v_0}} \sqrt{\frac{\sin \Theta}{\Delta \sin e_0} \frac{d\Theta}{d\Delta}}$$

で表わされる量である。

そこで、 k, f および c (ただし、 $E_1 = cE$) が与えられれば、(1) 式からある地点の振幅は求められることになる。

上記の常数のうち、0~1500 km 間の f の値は Hirono-Iwai⁽²⁾、Ito⁽³⁾ などによりすでに計算されている。しかし、 c および k の値はわかっていない。

いま、(1) 式を、

$$A = k f T \sqrt{cE} = f K T \sqrt{E}, \quad \text{ただし } k \sqrt{c} = K \quad (1')$$

と書きなおし、 c, k を求めるかわりに K をなんらかの方法で求めれば、任意の T に対し A の値が決まるわけである。そこで、筆者は K を実際の観測結果から求めようとしたが、あいにく、調査対象の地震の P 波に対する周期が資料中に明記されていなかった。しかし、 P 波の周期はほかの波のように各地震について極端に違うことがみられず、長くても 5 sec 前後である点から、あらゆる地震に対して $K T$ がほぼ一定であると仮定しても、大した間違いは起らないと思われるので、 $K T$ を一つの定数として求めることにした。

$K T$ を求める際の資料としては 1954 年 1 月から 12 月まで、わが国で観測された小区域以上の地震 (深発地震はのぞいた) 95 個の最大有感距離 R 、 iP と記録された最大距離 r とその振幅を用いた。

また、地震のエネルギー E は Gutenberg と Richter の規模、震度、エネルギーおよび加速度に

- (1) 広野卓蔵・岩井保彦：深発地震の規模 (マグニチュード) を決める一方法、験震時報 16, No. 3~4 (1952), 14~22.
- (2) (1) と同じ。
- (3) 伊藤博：深発地震波動の振幅計算表、験震時報 12, No. 2, p. 229.

関する論文⁽⁴⁾中の (34), (40) 式,

$$\log E = 8.8 + 2 \log h + 1.8M \quad (2)$$

$$\log E = 11.1 + 6.4 \log R - 3.2 \log h \quad (3)$$

を用い, 有感半径から求めた. その結果, KT の平均値として,

$$KT = 10^{-6.4 \pm 0.42} \quad (\text{C.G.S.})$$

なる結果が得られた. また, 参考までに E, h 別の KT の値を示すと Fig. 1 および 2 のようになる. これから KT は誤差の範囲内で, E, h に無関係にほぼ一定であるとみなしうることがわかる. そこで, 今後の計算には $KT = 10^{-6}$ なる値を採用することにした.

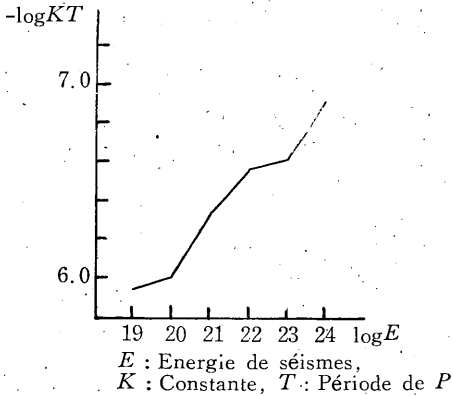


Fig. 1

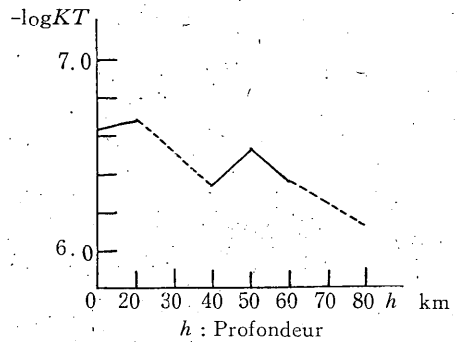


Fig. 2

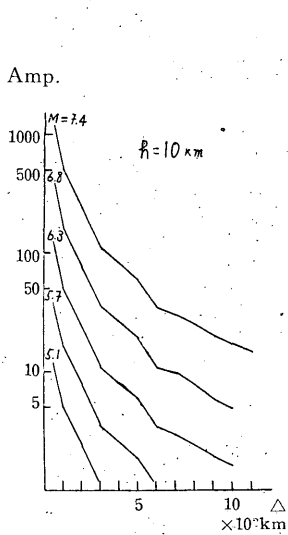


Fig. 3. a

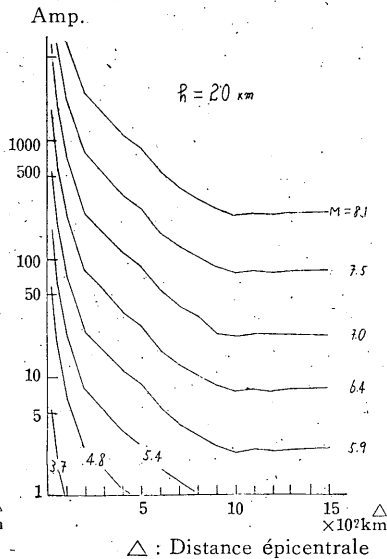


Fig. 3. b

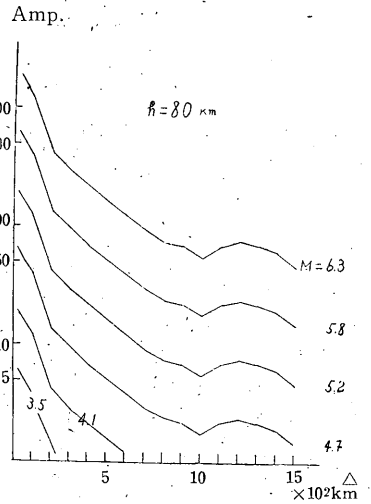
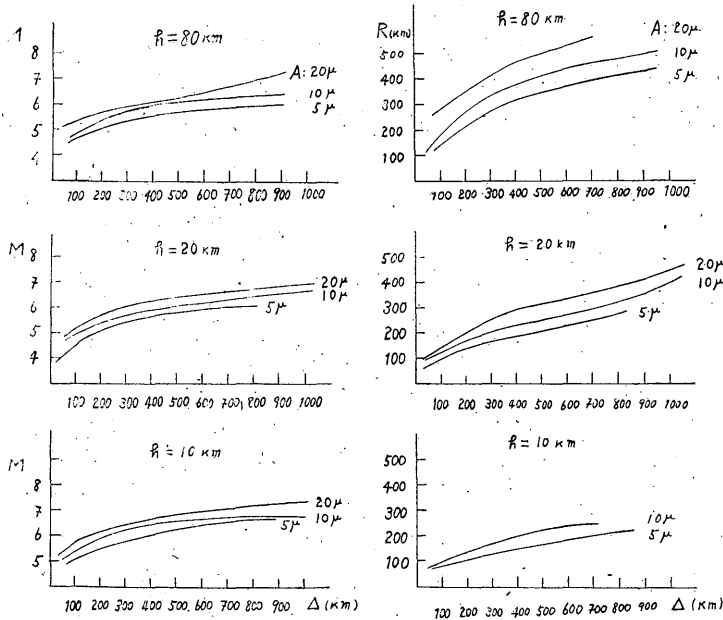


Fig. 3. c

(4) B. Gutenberg and C.F. Richter : Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration, Bull. Seis. Soc. Amer. 32, No. 3 (1942), 163~191.

§3. 各震央距離における P 波の振幅

(i) $h=10, 20, 80$ km に対する $\text{amp.} \sim \Delta$ の関係を規模別に, $\Delta=0 \sim 1500$ km の範囲について計算した. その結果を Fig. 3 に示す. 次に脈動などのしょう乱のない場合, Wiechert 地震計は地動振幅が $5 \mu, 10 \mu$ もしくは 20μ 以上になれば確実に iP として記録しようとし Fig. 3 から規模もしくは最大有感距離 R と最大記録距離 Δ との関係を求めると Fig. 4. に示すような結果が得られる.



h : Profondeur, M : Magnitude, R : Distance maxima (ressenti)
 A : Amplitude de mouvement du sol de P, Δ : Distance épiscopentrale

Fig. 4.

(ii) 遠地震の場合も上と同じ要領で, $h=0, 80$ km について規模と最大記録距離との関係を, $\Delta=20^\circ \sim 100^\circ$ の範囲にわたって計算した結果が Fig. 5 である.

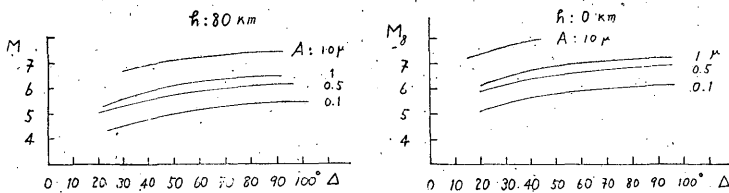


Fig. 5.

§4. 観測値との比較, 各種地震計の相対感度

§3. で求めた結果を観測値と比較してみよう.

近地地震の場合は KT を求める際に使用した資料を用いた. この結果は Fig. 6. に示すように,

観測値はだいたい、地動の振幅 = $5 \sim 20 \mu$ ($h = 10 \text{ km}$ および 80 km) の計算曲線内にはいる。これは当然の結果である。

遠地地震の場合は、1953 年 7 月～1954 年 3 月末までの適当地震を B. C. I. S. の月報から選び、Main Seismograph として Benioff 地震計を採用している観測所から Ottawa を、Galitzin 地震計を用いている所として松代、Helwan、Kew を、Sprengnether 地震計を用いている所として Manila、Hongkong を、Wood-Anderson 地震計を用いている所として

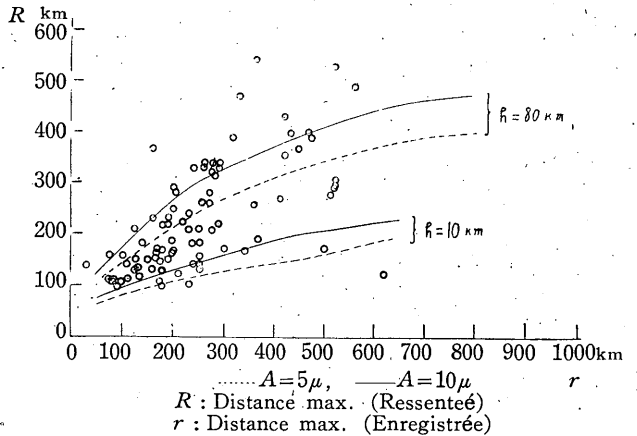


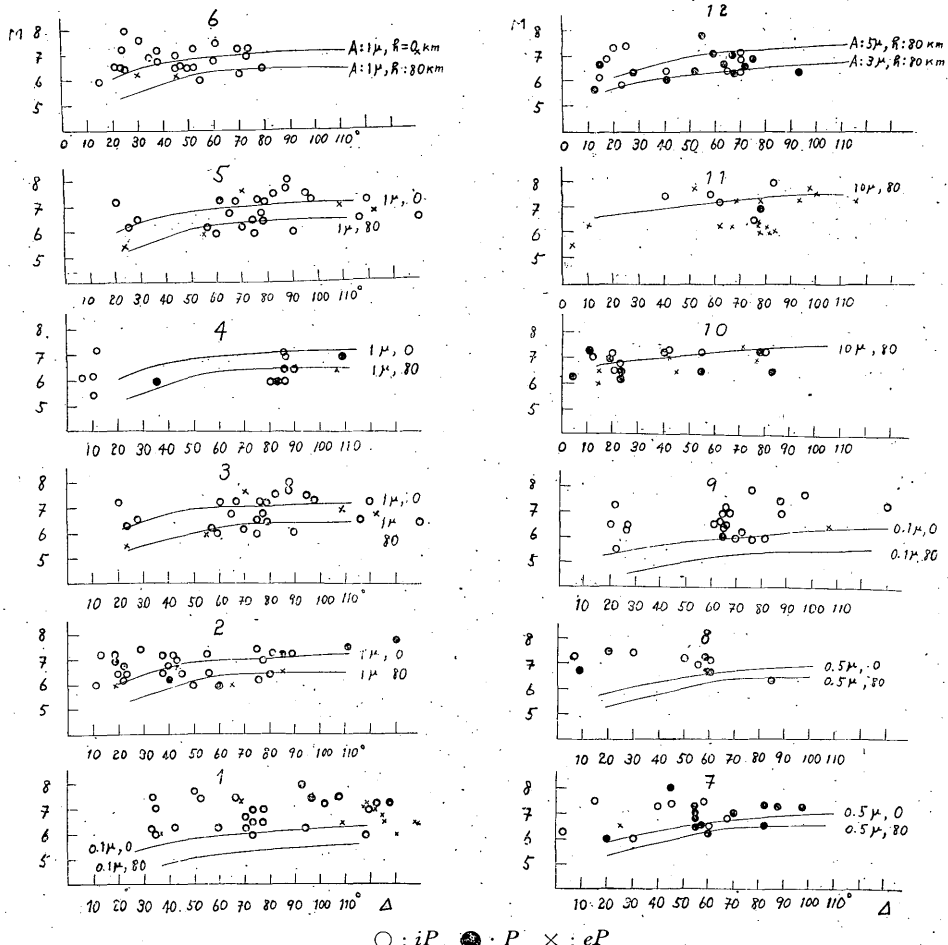
Fig. 6.

Shillong、Calcutta を、Milne-Show 地震計を使用している所として Hyderabad を、Mainka 地震計使用している所として東京、Beograd を、また、フランス系観測所でよく用いている Grenet 地震計（電磁式地震計）として Uppsala をそれぞれ選び、これら観測所での上述の地震に対する P 波の記録の模様を、地震の規模を縦軸に、 Δ を横軸にとって観測所別に整理、プロットした結果が Fig. 7 である。これらの図にそれぞれの地震計の公称倍率に大体対応させて、記録しうる最低の等地震振幅曲線を記入してみた。これから、Benioff や Grenet クラスでは P 波初動が地動で、 0.1μ 以上、Galitzin、Sprengnether や Wood-Anderson は $0.5 \sim 1 \mu$ 以上、Milne-Show は $3 \sim 5 \mu$ 以上、また、Wiechert (1 ton クラス) や Mainka では 10μ 以上の振幅ならば、脈動などのしょう乱のいかぎり、確実に *iP* ないし *P* として記録しうることになる。また、これを地震の規模の面からみると、Benioff、Grenet は 6 以上（少々深ければ 5 くらい）、Galitzin、Sprengnether および Wood-Anderson では $6.5 \sim 7$ （深ければ 6 くらいから）以上、Milne-Show は 7 以上、また、Mainka は 7.5 以上ならば、世界中のどこで起った地震も、大体において *iP* (*iP'*) \sim *P* (*P'*) として記録しうる事がわかる。

以上の結果から、Mainka クラスの地震計の P 波初動に関する性能を単位にとると、Milne-Show は $3 \sim 5$ 、Galitzin、Wood-Anderson および Sprengnether は $10 \sim 20$ 、Benioff、Grenet などは 100 の性能をそれぞれ持つことがわかる。

§5. 観測網と地震計

脈動その他の人工的しょう乱とのかね合いも考慮しなくてはいけないが、震央をより正確に決めるためには、地震計の数を増すよりもその性能を高めるほうが有利であることは、後者が面積できてくることから容易に想像されるところである。次にこれを少々理論的に考えてみよう。



○ : *iP*, ● : *P*, × : *eP*
 1 : Ottawa (Benioff) 2 : Matsushiro (Galitzin) 3 : Kew (Galitzin)
 4 : Helwan (Galitzin) 5 : Hongkong (Sprengnether) 6 : Manila (Sprengnether)
 7 : Shillong (Wood-Anderson) 8 : Calcutta (Wood-Anderson)
 9 : Uppsala (Grenet) 10 : Tokyo (Mainka) 11 : Beograd (Mainka, 1 ton Wiechert)
 12 : Hyderabad (Milne-Show)

Fig. 7.

いま、面積 A なる地域に n 個の地震計が at romdom に散在しており、この区域の任意の点に地震計の P 波に対する最大有効記録距離 r の地震が起つたとする。地震のエネルギーが四方に一様に放出されれば震央を中心とし面積 πr^2 の円内にある地震計は、 iP もしくは P と記録すると考える。このとき、面積 A 内にある n 点中、任意の x 点がこの πr^2 に含まれる確率は、面積 A の区域に n 個の点があ romdom に散在するとき、この上に面積 πr^2 の円板を投げ、その内に、ある数の点だけ含まれる確率の問題と同様、その確率は Poisson 分布の式で表わされる。

すなわち、この確率は、

$$p(x) = e^{-m} m^x / x! \tag{4}$$

で表わされる。

ここで、 $m=ks$, $s=\pi r^2$, $k=\frac{n}{A}$ である。

したがって、 x 点以上 n 点まで含まれる確率 $P(x)$ は、

$$P(x) = 1 - \sum_{x=1}^{x=x-1} p(x) \quad (x < n) \quad (5)$$

となる。

r は前節で示したように規模の函数であるから、 A , n および x を与えれば、(5) から M と $P(x)$ の関係がでてくる。

また、上の (5) 式は、

$$m = \pi r^2 n / A \quad (6)$$

が大きいほど大きな値をとる。しかし、 π , A などが一定であるから、 m の大小はもっぱら n と r に関係してくる。そこで、 $P(x)$ を大きくするためには n より r を大きくする、すなわち、地震計の数を増すよりその感度を良くしたほうが、はるかに有効であることがわかる。しかし、上記したように脈動その他のじょう乱との関係から、感度の増大にもおのずと限度があり、爆破地震動観測用地震計のように数十万倍以上というような地震計は、常時観測には用いられないことは言うまでもない。

例として、日本周辺を若干含めて、日本の面積を $4 \times 10^6 \text{ km}^2$ とし、この内に Wiechert クラスの地震計をもつ $n=50, 100, 150, 200$ の観測所を at romdom に配置した場合、この区域内に起った地震の初動を、5 点以上で iP として記録する確率を種々の規模 M について計算した。その結果、 $n=50$ ならば $M \geq 5.4$, $n=100$ で $M \geq 5.2$, $M=150$ で $M \geq 5.0$, $n=200$ で $M \geq 4.8$ の地震は大体 5 点以上で iP と記録されることがわかる。

次に、地球の全表面上に at romdom に、Galitzin 級の地震計を 100 台設置したと仮定する。このクラスの地震計の r としては前節の結果から、 $M \geq 6$ の地震に対して 8000 km であると考えるところにする。この場合、世界のどこかで起った $M \geq 6$ の地震に対し、 P ないしは iP と記録しうる観測所の数 x がそれぞれ 30, 40, 50 以上である確率 $P(x)$ は、

x	30	40	50
$P(x)$	92%	45%	13%

となる、30 点以上で iP ないし P と記録されれば、第 1 近似的な走時曲線を引き、その震源や震源時をきめることは大して困難な仕事でもなからう。I. U. G. G. の News Letter⁽⁵⁾ によると、B. C. I. S. に各国から報告される地震の 90% は、震源および震源時が決められているそうであるが、上

(5) Bulletin D'information de E'UGGI, News-Letter (1952), 248~251.

の計算結果はこれに近い値である。

§6. 結 論

第1近似的計算の結果、次のようなことがわかった。

(1) Mainka 級の地震計の P 波に対する性能を単位にとるならば、 P 波に対し Milne-Show は 3~5 倍、Galitzin, Wood-Anderson や Sprengnether は 10~20 倍、Benioff や Grenet はやく 100 倍の性能をそれぞれ持っている。

(2) Benioff や Grenet は規模 6 以上、Galitzin, Wood-Anderson や Sprengnether は 6.5~7 以上、Milne-Show は 7 以上、また Mainka や 1 ton Wiechert 級では 7.5 以上の地震ならば世界中のどこで起った地震も大体において iP ないし P と記録される。

(3) 震源を正しく決定するという見地からは、むやみと地震計の数を増すよりも、性能の良い地震計を設置するほうが有利である。

(4) 規模 6 以上の地震が地球内のどこかで起った場合、地球上に at random に設置した 100 台の Galitzin 級地震計のうち、30 台以上が iP もしくは P と記録する確率はやく 90% である。したがって、Hodgson などの行っている fault plane の研究には、その対象地震を脈動その他の事故を考慮して、規模 7 以上の地震とするならば、より確実な節線を引くことができよう。

なお、以上の結論はあくまでも脈動その他の disturbance などを、無視した場合のものであることを再び付言しておく。

最後に、種々御教導いただいた井上地震課長に深く感謝いたします。