

地震の規模と最大有感距離*

市川 政治**

550.341

On the Relation between Earthquake Magnitude and Maximum Value of Epicentral Distance at Limit of Perceptibility

M. Ichikawa

(Seismological Section, J. M. A.)

The following formulae are useful for estimating the magnitude of an shallow earthquake occurring in or near Japan from the distance between epicenter and limit point of perceptibility;

$$M=2.7 \log \Delta - 1.0,$$

or

$$M=2.7 \log \Delta + 0.000063 \Delta - 0.96.$$

Dividing Japan into two parts, i. e., northeastern Japan and central and southwestern Japan, we may estimate more accurately the magnitude of an earthquake occurring in each region using the following formulae than using the above ones;

$$M=2.47 \log \Delta - 0.38 \text{ (for northeastern Japan),}$$

and

$$M=2.97 \log \Delta - 1.70 \text{ (for central and southwestern Japan).}$$

§ 1. まえがき

地震の規模とそれに対応する最大有感距離(半径)との関係は、アメリカの地震に対しては Gutenberg と Richter により調査されており、3, 4の実験式が導入されている。筆者は昭和2(1927)年から同25(1950)年までのあいだに日本付近に起った深さ60 km 以浅、小区域以上の地震と同期間外に起った若干の被害地震とをあわせた合計1780の地震について、規模と最大有感距離との関係を調べた。

その結果、Gutenberg と Richter の式はこれら観測結果からはるかにはずれていることがわかったので、これらの結果を満足するような式を作ってみた。

§ 2. 観測結果と関係式

よく知られているように、震度分布は単純なものではなく、浅発地震といえどもその分布は震央に関して必ずしも対称とはならない。そればかりでなく、非常に飛びは

なれた地点で異常的に有感であることがしばしばある。そこで、有感距離からその地震の規模を推定するには、平均最大有感半径を用いるほうが、いわゆる最大有感距離を用いる場合よりも結果はよくなるかも知れない。しかし、その算出に多少のわずらわしさを伴うので、そのようなことはせず極端に飛びはなれた地点で異常的に有感であったときは、その点は無視しての最大有感限界をもって最大有感距離 Δ とし、これと M との関係を調べることにした。

日本付近の主要地震の表⁽¹⁾中の昭和2(1927)年から昭和25(1950)年までのあいだに起った小区域以上、60 km 以浅の各地震と、この期間外に起った若干の被害地震をあわせた1780の地震に対し、上の定義による Δ をはかりその関係を図示すると Fig. 1 のようになる。

(1) The Seismological Bulletin of J. M. A., Supplementary Volume, Catalogue of Major Earthquakes which occurred in and near Japan (1926—1956), 1958.

* Received Feb. 16, 1960.

** 気象庁地震課

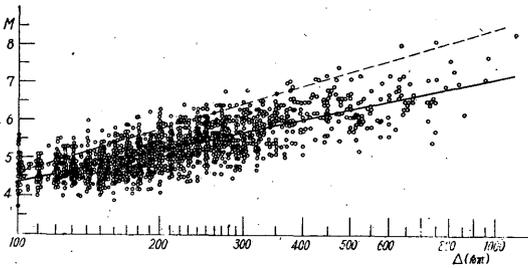


Fig. 1. Relation between maximum value of epicentral distance at limit of perceptibility (Δ) and magnitude (M) of earthquakes which occurred in and near Japan from 1927 to 1950.
 : $M=3.8 \log \Delta - 3.0$, — : $M=2.7 \log \Delta - 1.0$

Gutenberg と Richter の関係式⁽²⁾

$$M = -3.0 + 3.8 \log r \quad (1)$$

が日本の場合にも通用するか否か調べるため、この式による曲線を同図中に描くと(図中の点線), 明らかに観測結果を満たさないことがわかる。したがって、この式から最大有感距離を用いて M を求めると、過大となるおそれが多分にある。

また、河角の式⁽³⁾

$$e^I = \left(\frac{100}{\Delta}\right)^2 e^{Mk - 0.000183(\Delta - 100)}, \quad (2)$$

$$M = 4.85 + 0.5 M_k \quad (3)$$

から

$$M = 2.31 \log \Delta + 0.00092 \Delta + 0.155 + \frac{I}{2} \quad (4)$$

なる関係式が求められるが、これから観測結果になるだけ近い曲線を引くためには $I < 0$ でなければならない。これはおかしい。そこで $M(ch)$ と M_k との関係を調べなおしてみると

$$M_k = 1.61 M - 6.57 \quad (5)$$

としたほうがよいらしいことがわかった。

そこで (2) と (5) から

$$M = 2.86 \log \Delta + 0.00113 \Delta - 1.75 + \frac{I}{1.61} \quad (6)$$

なる式が導ける。(6) 式において $I = 0.2$ すなわち、

$$M = 2.86 \log \Delta + 0.00113 \Delta - 1.63 \quad (7)$$

とすると、かなりよく観測結果をみたすことができる。しかし Δ による系統的なずれが出るようである。

次に、これまでの関係式に拘でせず、今回の観測結果を満たす一応もっともらしい線を、目のこで引いてみると

(2) B. Gutenberg and C. F. Richter, Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration (second paper), B. S. S. A., 46 (1956), 105 ~ 145.

(3) H. Kawasumi; Bull. Earthq. Res. Inst. 30 (1952).

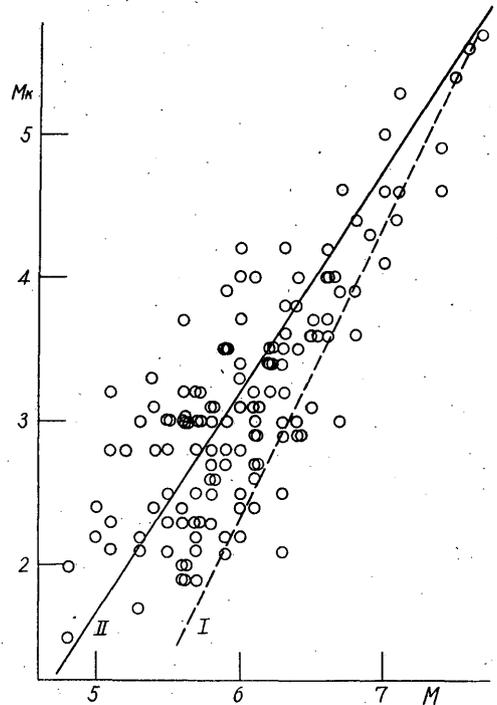


Fig. 2. Relation between M_k and M
 : $M_k = 2M - 9.70$ — : $M_k = 1.61M - 6.57$

$$M = 2.7 \log \Delta - 1.0 \quad (8)$$

なる結果が得られる。この式による残差 $\delta M (=O-C)$ の平均は 0.02 であったが、 Δ 別にこの残差を整理してみると、多少、系統的なものがみられた。そこでこれを最小自乗法で計算し、(8) 式に補正すると

$$M = 2.7 \log \Delta + 0.000063 \Delta - 0.96 \quad (9)$$

となる。しかし、実際には (8) と (9) の差は小さい Fig. 1 中の実線は (8) 式によるものである。この図からわかるように M と Δ のあいだには相当のばらつきがある。このばらつきには偶然的誤差ばかりでなく、系統的原因によるものが存在しないだろうか。この種の調査には分散分析法が用いられよう。いま、考えられる系統的原因として、震央の位置や震源の深さの影響が存在するか否かこの方法で調べることにした。日本付近を Fig. 3 に示すように 8 地区に、また深さを 0 ~ 19km, 20 ~ 39 km, 40 ~ 60 km の 3 つに、それぞれ分け、各区分内の δM を (8), (9) 式から求めてみた。それらの平均を Tabs. 1, 2 に示す。

分散分析法では δM_{ij} の平均 a_{ij} は第 i 行 (ここでは地域) に起因する影響 R_i , 第 j 列 (ここでは深さ) に起因する C_j と、これらとは無関係な常数 a からの

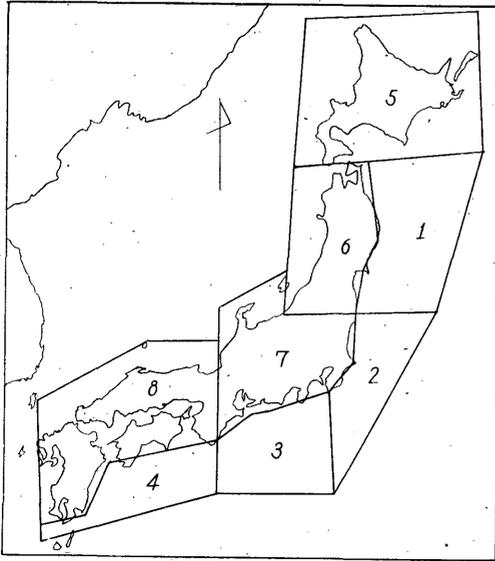


Fig. 3. Map showing the regions provisionally divided by the present author.

るものとするが、一応、 R_i, C_j は存在しないと仮定し、次のようにおく。

$$\left. \begin{aligned} R_1=R_2=\dots=R_m=0, \\ C_1=C_2=\dots=C_n=0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

そして次の各式により F を求め、この値を F 分布表に与えられた限界値と比較し、上の仮定の検定をすればよい。

$$\left. \begin{aligned} F_{(m-1)(n-1)}^{(m-1)} &= (S_1/(m-1))/(S_3/(m-1)(n-1)), \\ F_{(m-1)(n-1)}^{(n-1)} &= (S_2/(n-1))/(S_3/(m-1)(n-1)). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= n \sum_{i=1}^m (\delta M_{i.} - \overline{\delta M.})^2, \\ S_2 &= m \sum_{j=1}^n (\delta M_{.j} - \overline{\delta M.})^2, \\ S_3 &= \sum \sum (\delta M_{ij} - \overline{\delta M_{i.}} - \overline{\delta M_{.j}} + \overline{\delta M.})^2. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$\overline{\delta M.}$ は全体の平均、 $\overline{\delta M_{i.}}$ 、 $\overline{\delta M_{.j}}$ はそれぞれ第 i 行、第 j 列ごとの平均を示す。Tab. 1 からは

$$F_{12}^6 = 4.60, F_{12}^2 = 1.79, *$$

Tab. 2 からは

$$F_{12}^6 = 5.26, F_{12}^2 = 1.66$$

が得られ、いずれの場合も危険率 5% で深さの影響なしとする仮説は認められるが、地域による影響なしとする

* 第 6 区 (東北地方) 内の資料は非常に少なかったの
で、計算から省略した。

Table 1. Mean of δM obtained from formula(8) according to the regions and focal depths.

region	depth		
	0~19km	20~39km	40~60km
1	+0.082	-0.020	-0.071
2	-0.059	-0.156	-0.173
3	+0.027	+0.000	-0.069
4	+0.215	+0.109	+0.110
5	-0.052	-0.044	-0.090
7	-0.001	-0.073	-0.100
8	-0.039	-0.004	+0.100

Table 2. Mean of δM obtained from formula(9) according to the regions and focal depths.

region	depth		
	0~19km	20~39km	40~60km
1	+0.008	-0.080	-0.109
2	-0.107	-0.232	-0.238
3	+0.021	-0.075	-0.131
4	+0.167	+0.119	+0.080
5	-0.091	-0.150	-0.090
7	-0.051	-0.125	-0.155
8	-0.093	-0.075	+0.100

仮説は棄却される。そこで、地域別の式を作るとそれぞれ次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} M &= 2.7 \log \Delta - 1.00, \dots \text{第 1 区} \\ M &= 2.7 \log \Delta - 1.13, \dots \text{第 2 区} \\ M &= 2.7 \log \Delta - 1.00, \dots \text{第 3 区} \\ M &= 2.7 \log \Delta - 0.79, \dots \text{第 4 区} \\ M &= 2.7 \log \Delta - 1.06, \dots \text{第 5 区} \\ M &= 2.7 \log \Delta - 0.89, \dots \text{第 6 区} \\ M &= 2.7 \log \Delta - 1.04, \dots \text{第 7 区} \\ M &= 2.7 \log \Delta - 1.05, \dots \text{第 8 区} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

または、

$$\left. \begin{aligned} M &= 2.7 \log \Delta + 0.000063 \Delta - 1.02, \dots \text{第 1 区} \\ M &= 2.7 \log \Delta + 0.000063 \Delta - 1.16, \dots \text{第 2 区} \\ M &= 2.7 \log \Delta + 0.000063 \Delta - 0.96, \dots \text{第 3 区} \\ M &= 2.7 \log \Delta + 0.000063 \Delta - 0.75, \dots \text{第 4 区} \\ M &= 2.7 \log \Delta + 0.000063 \Delta - 1.02, \dots \text{第 5 区} \\ M &= 2.7 \log \Delta + 0.000063 \Delta - 0.85, \dots \text{第 6 区} \\ M &= 2.7 \log \Delta + 0.000063 \Delta - 1.00, \dots \text{第 7 区} \\ M &= 2.7 \log \Delta + 0.000063 \Delta - 1.01, \dots \text{第 8 区} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

また、上の各地域ごとに観測された M と Δ の関係を図示すると Fig. 4 のようになる (図中の曲線は (13) の各式を対応する図中に描いたものである)。

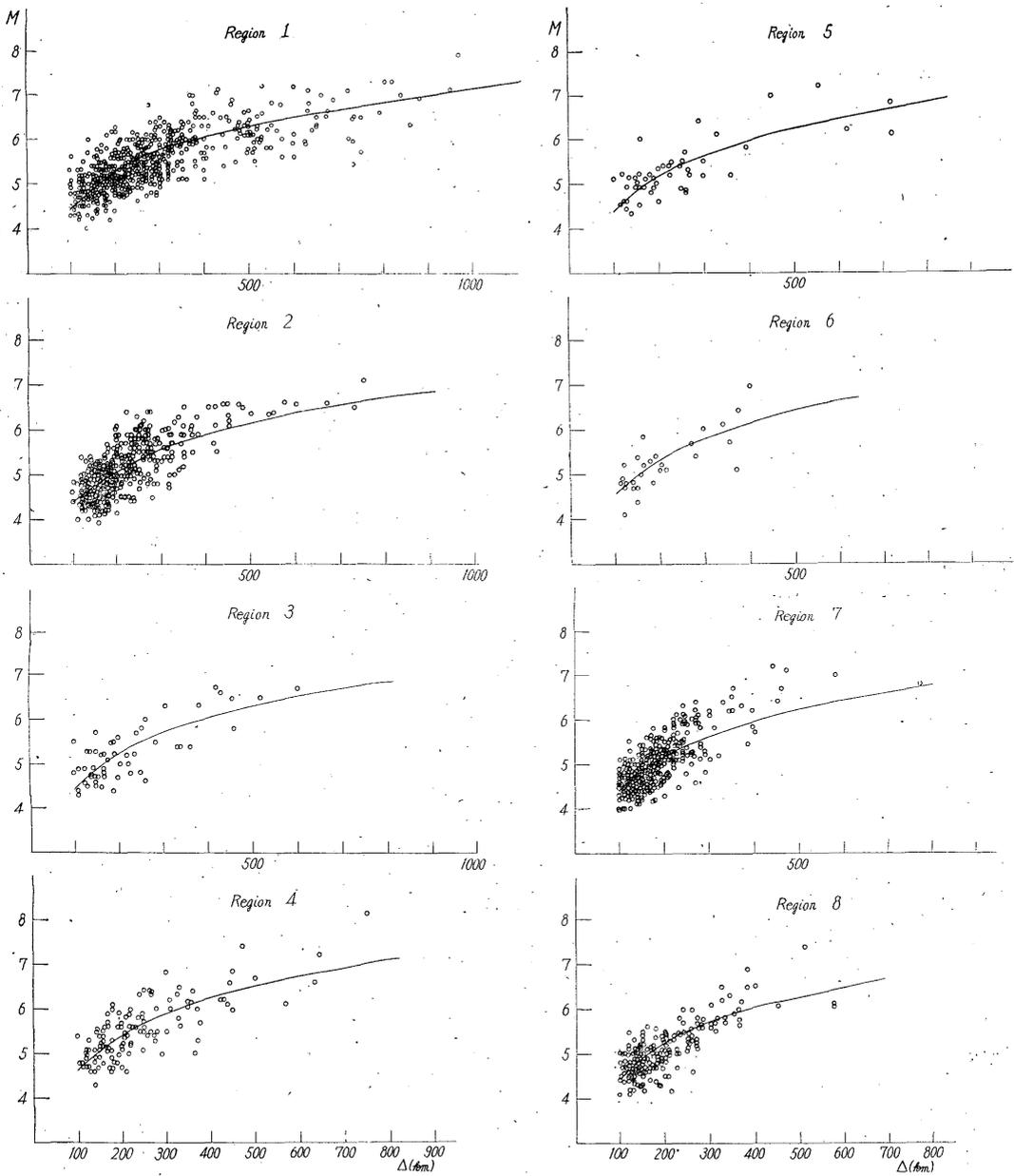


Fig. 4. Relation between M and Δ in various regions.

これら各図をみると資料の少ない地域もあるが、一般に Δ による系統的なずれのあることがわかる。すなわち、 Δ の大きなところで計算値のほうが小さくなる傾向がみられる。これは資料の沢山ある、 Δ の小さいところに良くあうよう式が決まっているためである。また、このように多くの地域にわかれていたのでは用いにくい。

そこで同じような傾向にあり、かつ、相接している第1、第5および第6の各区と、他の残りの地区をそれぞれ一まとめにした2地区に日本およびその近傍を分けて再び式をたてなおした。この結果は前者(東北地方以北)に対して

$$M = (2.47 \pm 0.11) \log \Delta - (0.38 \pm 0.27), \quad (15)$$

後者(関東地方以南)に対して

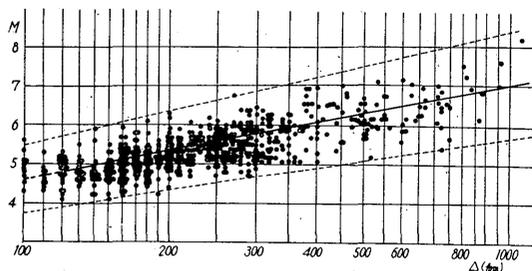


Fig. 5(1). Relation between M and Δ
(in northeastern Japan and Hokkaido and
their vicinity).
.....: confidence limits of coefficient 95%

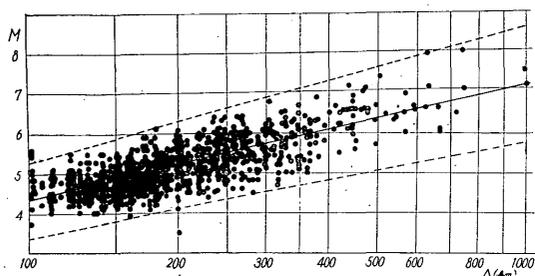


Fig. 5(2). Relation between M and Δ
(in central and southwestern Japan and
their vicinity).
.....; confidence limits of coefficient 95%

$$M = (2.97 \pm 0.12) \log \Delta - (1.70 \pm 0.29) \quad (16)$$

がそれぞれ決まる。

上式と観測結果との関係を Fig. 5 に示す。図中の 2 本の点線は、確定した Δ に対する M の推定値の標準偏差の 1.96 倍の点を結んだいわゆる、信頼度 95% の信頼限界を示したものである。すなわち、ある確定した Δ に対する真の M の値がこの 2 本の線内に含まれる確率は 95% であることを示す線である。これから上の 2 式を用いて M を推定した場合、その精度は 0.4 ~ 0.5 であることがわかる。

ほかに $M = \alpha \Delta^\beta + \gamma$ の型の式を最小自乗法で決めてみたところ

$$M = 0.0060 \Delta^{0.96} + 4.17 \quad (17)$$

という結果が求められたが、 Δ の小さいところ、大きいところで、観測結果からのずれが大きく感心しない。

最後に参考までに (1), (8), (15) および (16) を図示すると Fig. 6 のようになる。

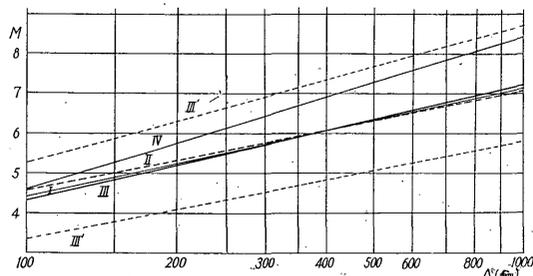


Fig. 6. Comparison of various formulae obtained
by the present author and by Gutenberg-
Richter.
I : $M = 2.7 \log \Delta - 1.0$
II : $M = 2.47 \log \Delta - 0.38$
III : $M = 2.97 \log \Delta - 1.70$
III': Confidence limits of coefficient 95% for III
IV : $M = -3.0 + 3.8 \log \Delta$

§ 3. む す び

坪井の式から求めた日本付近の地震の M とそれに対する最大有感距離との関係には、Gutenberg と Richter がアメリカの地震から決めた式はあてはまらない。これらの結果をみとすためには日本全体を通して考えるときは

$$M = 2.7 \log \Delta - 1.0,$$

または

$$M = 2.7 \log \Delta + 0.000063 \Delta - 0.96$$

の式が導けた。

また、地域的な影響を考慮すると東北地方以北およびその近海の地震に対して

$$M = 2.47 \log \Delta - 0.38.$$

また、関東地方以南およびその近海の地震に対して

$$M = 2.97 \log \Delta - 1.70$$

が導入された。

しかしいずれの式を用いても、推定した M に対する標準偏差は $\pm 0.4 \sim 0.5$ である。坪井の式による場合、その M の精度は ± 0.3 程度であるから、上の値ははるかにわるいが、これは震度分布の複雑さからやむを得まい。しかし、緊急に大きざばな M を知りたいような場合や、最大振幅に関する情報がない有感地震などに対して、結構役に立つものと思う。