

# 余震を考慮した場合の地震の規模別度数分布\*

宇 津 徳 治\*\*

550.341

## Magnitude Distribution of Earthquakes with Special Consideration for Aftershock Activities

T. Utsu

(Seismological Section, J. M. A.)

When shallow earthquakes are classified into two groups: A (aftershocks or foreshocks of other earthquakes) and B (principal shocks), the ratio of frequency of A to B per unit magnitude interval increases with decreasing magnitude. The magnitude-frequency relation for B-earthquakes is somewhat different from that for general earthquakes (*i. e.* A+B), and resembles that for deep-focus earthquakes which are usually followed by no aftershocks (see Fig. 8). It seems possible that the magnitude-frequency relation for general earthquakes occurring in a certain region is affected by the magnitude-frequency relations for both A- and B-earthquakes and the degree of the average aftershock activity for a principal earthquake of a given magnitude in that region.

### § 1. 余震の規模の分布について

筆者 (Utsu, 1961) は日本付近の浅発地震の資料を用いて、規模  $M_0$  の地震が起きたとき、どの程度の大きさの余震を伴うものかを調べた。その結果、およびそれに若干の考察を加えたものを記せば次のとおりである。

(1) 余震の規模別度数  $n(M) dM$  が Gutenberg-Richter の式

$$\log n(M) = a - bM \quad (1)$$

に従うものとして、いくつかの地震の余震群について係数  $b$  を求めると Fig. 1 のように  $b=0.85$  くらいを中間値とする分布が得られる。余震の現地観測から得られ

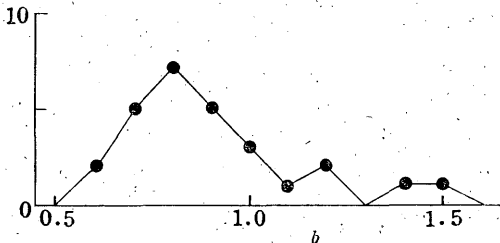


Fig. 1 Frequency distribution of  $b$  in equation  $\log N = a - bM$  for 28 aftershock sequences

\* Received Sept. 20, 1963

\*\* 気象庁地震課

た石本—飯田の式の指数  $b+1$  の値も 1.8~1.9 程度であることが多いことが知られている。

なお、余震の規模別度数の統計をとるとき、本震を含めると、たいていの場合、本震の規模だけとびはなれて大きくなり、本震を含めないほうが(1)式への適合がよいことは注目すべきことである。

(2) 最大の余震の規模を  $M_1$  とすると、 $M_0 - M_1$  は地震ごとにかなり大幅に異なるが、ある  $M_0$  の区間についてのその中間値  $\overline{M_0 - M_1}$  は  $M_0$  が大きくなるほど小さくなる傾向があり、 $M_0: 8\frac{1}{2} \sim 6$  の範囲では実験式

$$\overline{M_0 - M_1} = 4.7 - 0.45M_0 \quad (2)$$

で表わされる。

(3) 規模別度数分布が(1)式で表わされる場合、その地震群のうち最大のもののもっとも確からしい規模  $M_1^*$  は

$$M_1^* = \frac{a - \log(b \ln 10)}{b} \quad (3)$$

であるが、確率的な考えから予想される  $M_1$  の変動は  $M_1^* - 0.9b$  から  $M_1^* + 2b$  くらいまで及ぶので (Utsu 1961, Fig. 187), 余震の  $M_0 - M_1$  が  $\overline{M_0 - M_1}$  の前後にかなり広くちらばっているのも当然のこととも考えられる。もしこのちらばりが、そのような理由によるものであるとすれば、 $n$  番目の大きさの余震の規模を  $M_n$  とするとき、大きな  $n$  に対しては  $M_0 - M_n$  のちらばりは、前記の  $M_0 - M_1$  のちらばりより小さくなることも考え

られる。

すなわち、ある  $M_0$  に対する各余震群の規模別度数分布はすべて(1)式で表わされ、 $a, b$  の値もみな同じであるとしても、累積度数分布図を書くとき、Fig. 2 のようにすべてが傾斜  $-b$  の A 直線のようになるものとは限らず、度数の小さい範囲では、データのばらつきのため B

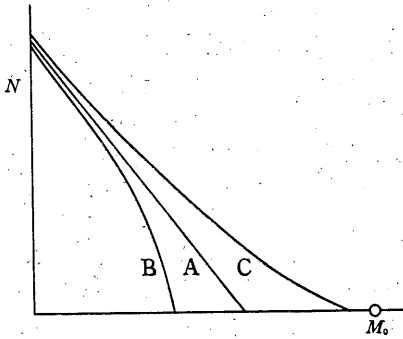


Fig. 2

やCのようになるものもあり、これを一つの直線とみてその傾斜から  $b$  の値を決めると、本来の  $b$  の値とはかなり違ったものとなる (宇津, 1964). しかし、このとき、Fig. 2 の B のように傾斜が急な (みかけの  $b$  の値大) 余震群は  $M_0 - M_1$  が大きく、C のように傾斜が緩やかな (みかけの  $b$  の値小) 余震群は  $M_0 - M_1$  が小さくなる傾向が生じるはずである。

Figs. 3, 4, 5 は規模別度数分布が調べられた 26 の地震 (Utsu 1961, Figs. 104—131, ただし, Fig. 117 と 129 は同規模の二つの地震のいずれを本震とするか問題があるので除いた) について  $M_0 - M_1, M_0 - M_{10}, M_0 - M_{100}$  を  $M_0$  に対しプロットした図である。この三つの図を比べると  $M_0 - M_{10}, M_0 - M_{100}$  のちらばりは  $M_0 - M_1$  のちらばりよりも多少小さくなっている。また、Fig. 6 は  $b$  と  $M_0 - M_1$  の関係を前記地震についてプロットしたもので  $b$  と  $M_0 - M_1$  の間に多少の相関が認められる。

ここで扱った地震は余震が比較的多数観測された地震

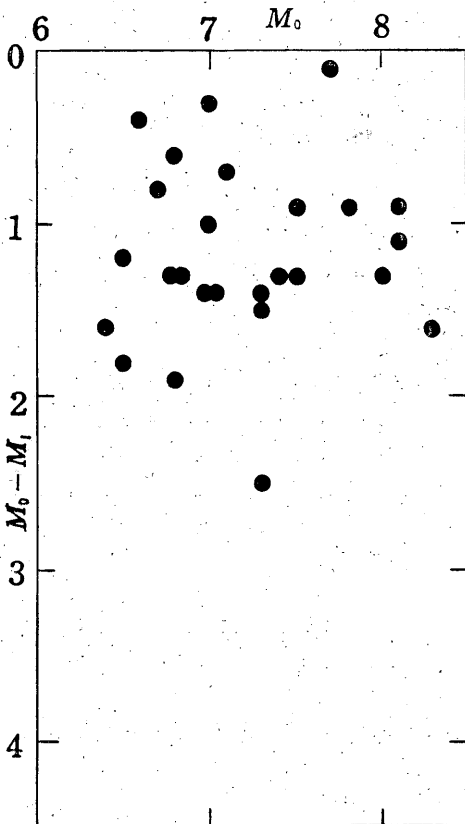


Fig. 3

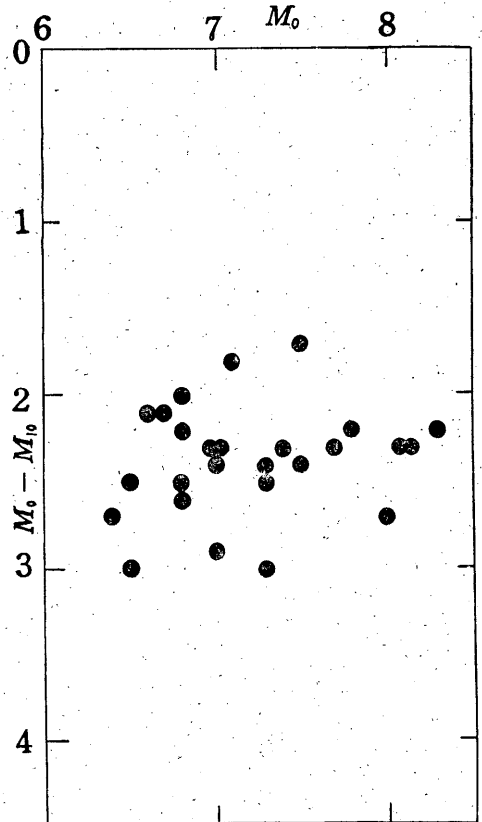


Fig. 4

であるから、すべての地震の余震群について規模別度数分布が Fig. 2 のようなものに近いかどうかはいえないが、少なくともここで扱った地震に関する限り、規模別度数分布が Fig. 7 のようにまったくまちまちなものではなさそうに見える。

(4) 余震の余震は特別な例をのぞけば少い。これは本震と余震の発生機構の相異に関係しているのかも知れない。

§ 2. 地震の規模別度数のうち余震の占める割合について

ある地域にある期間に起った地震についての規模別度数はほぼ(1)式によつて表わされるが、この統計は「他の地震の余震であるとみなされる地震」をも含めて一定の規模以上の地震全部について行なうのがふつうである。ところが、一つの地震に対して、前節で述べたように、ある規模別度数分布をもった一つの余震群が付随しているわけであるから、規模の小さい地震については「他の

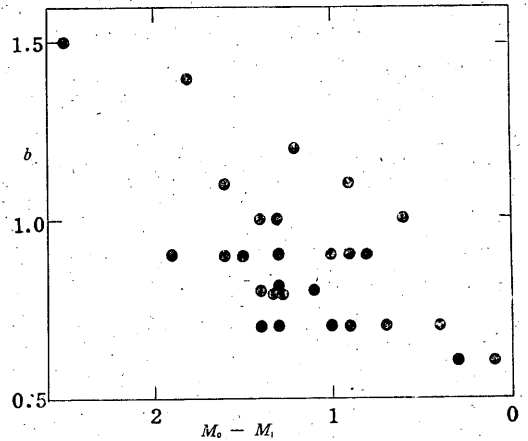


Fig. 6 Values of  $b$  in equation  $\log N = a - bN$  for 28 aftershock sequences plotted against  $M_0 - M_1$  (difference in magnitude between a main shock and the largest aftershock).

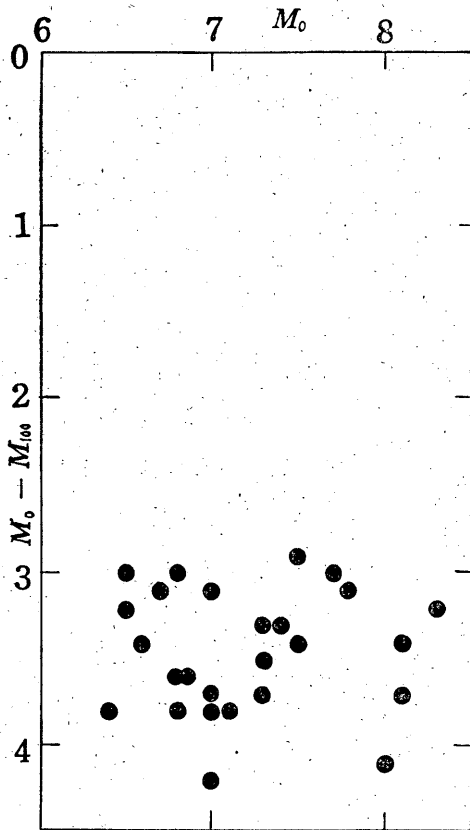


Fig. 5

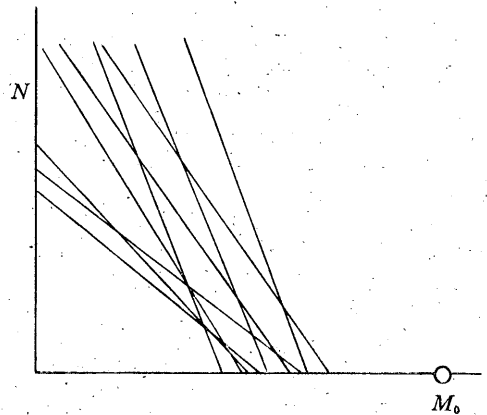


Fig. 7

地震の余震である地震」の割合はかなり大きくなるのではないかとと思われる。したがつて「他の地震の余震(または前震)でない地震」(「主震」と呼ぶことにする)\* だけを対象として規模別度数分布を調べると、地震全部についての規模別度数分布とはかなり違ったものになるのではないかと予想される。

Table 1 は日本付近(Utsu 1961, Fig. 3 に示す範囲)に1926年から1961年までの36年間(ただし  $M: 5.5$

\* 群発地震のような場合にも、最大のもの一つを「主震」とみなし、他は前震または余震とみなすことにする。

—5.9 については 1952 年から 1961 年までの 10 年間\*) に起った浅い地震について、「他の地震の余震または前震である地震」の数  $A$  とそれ以外の地震すなわち「主震」の数  $B$  を調べ、前者 ( $A$ ) が全体 ( $A+B$ ) に対して占める割合をいくつかの規模階級ごとに示したもので、 $M:6.5$  以下から  $A$  の割合がかなりふえてくることがみられる。

Table 1.

Period	Magnitude Range	A	B	$A/(A+B)$
1926—1961	8.0 and over	0	4	0.00
	7.5 — 7.9	2	6	0.25
	7.0 — 7.4	3	23	0.12
	6.5 — 6.9	28	67	0.30
	6.0 — 6.4	108	139	0.44
1952—1961	5.5 — 5.9	81	87	0.48

$A$ : Number of aftershocks and foreshocks,  
 $B$ : Number of principal shocks.

この表のデータを図に示すと Fig. 8 (J 印) のようになる。ただし  $M:5.5-5.9$  については表の数の 3.6 倍したものが 1926 年—1961 年の数になるものと仮定してプロットしてある。図中の白丸は「主震」のみの累積度数で、黒丸は全地震の累積度数である。この図をみると、 $M:6.5$  くらいから下では白丸を連ねる線の傾斜  $-b$  がゆるやかになり  $b=0.75$  くらいである。 $M>6.5$  の白丸、および黒丸全部を連ねる線の傾斜は  $b=0.95$  である。

深発地震には余震があまり観測されないという事実がある。深発地震の規模別度数分布は、ここでいう「主震」の規模別分布と共通点があるかも知れない。深発地震の規模別分布は  $M \geq 6$  の範囲については Gutenberg & Richter (1949) および勝又 (1958) の調べたものがあり、前者は全世界、後者は日本付近の地震を対象としているが、いずれも (1) 式の  $b$  が 1.2 となっている。これは浅い地震の平均的な値 0.8~1.0 よりやや大きい。ところが Suyehiro (1960, 1962) によれば  $M < 6$  範囲になると、 $M$  の減小による数の増し方が著しく小さくなるようで、日本付近では  $M:5\frac{1}{2} \sim 6\frac{1}{2}$  の深発地震

\* 上記範囲内の  $M:5.5-5.9$  程度の地震の中には無感であるため気象庁の地震のカタログに記載されていないものも少なくない。この程度の地震を網羅するためには、膨大な観測原簿を全部調べてみなければならぬので、この 10 年間だけに限った。

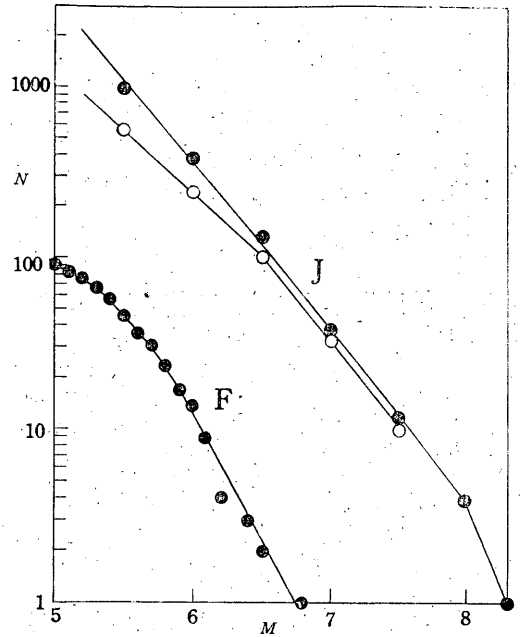


Fig. 8 J: Magnitude-cumulative frequency relation for Japanese shallow earthquakes. Open circles indicate frequencies of principal shocks only.  
 F: Magnitude-cumulative frequency relation for Fiji deep-focus earthquakes (Data from Suyehiro, 1962).

の数が 1 月平均 1.45 回なのに  $M:3\frac{1}{2} \sim 4\frac{1}{2}$  の数は 11.0 回である (もし  $b=1.0$  とすれば 145 回になるはずである)。また Fiji 諸島方面の探発地震を松代で観測した結果からも  $M:6$  以下では度数の増し方がゆるやかになっている (Fig. 8 F 曲線は Suyehiro, 1962 の与えた  $M$  の資料をプロットしたものである)。

§ 3. 主震と余震の規模別度数分布のいろいろな組合せ

主震の規模別度数分布が Fig. 9 a のような累積度数分布図で示され (この図では  $b_0=0.5$  の場合が示されている)、また、本震の規模が  $M_0$  である余震群の規模別度数が Fig. 9 b のような累積度数分布図で示される (この図では  $m=M_0-M_1^*=1.0$ ,  $b'=1.0$  の場合の例が示されている) とき、主震の  $b_0$ 、および、余震の  $b'$ 、および  $m$  にいろいろな値を与えたとき、主震と余震を合わせた地震全体の規模別度数分布がどうなるかを調べてみた。その結果を Fig. 10 a, b に示す。これらの図では主震の最大のもの  $M$  が 8.0 になるように書いてある

がこれは便宜上のことである。これらの図をみると次のことがわかる。

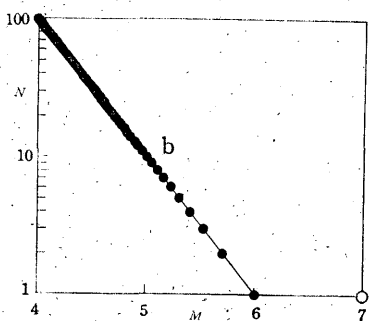
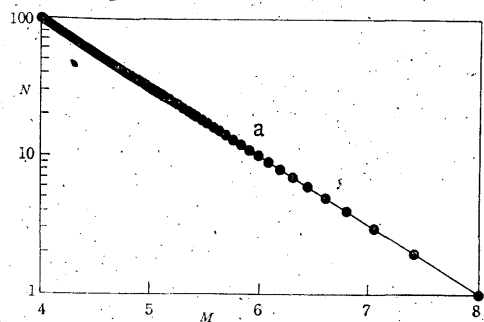


Fig. 9

(1)  $b_0 = b'$  のときは  $m=1$  程度なら地震全体についての  $b$  が  $b_0$  よりわずかに大きくなるが見える。  $m=2$  程度になると図に示した  $M$  と  $N$  の範囲では  $b$  と  $b_0$  はほとんど変わらない。

(2)  $b'$  が  $b_0$  より大きくなると、 $M$  が小さく ( $N$  が大きく) なるにつれて、 $b$  は  $b'$  に近づいてゆく、たとえば、 $b_0=0.5$ ,  $b'=1.0$ ,  $m=1$  のときは、 $N > 100$  の範囲でほとんど  $b=b'=1.0$  になっている。したがって、このような場合、 $M$  の比較的大きな ( $N$  の比較的小きな) 範囲だけに着目すれば、みかけの  $b$  は  $b_0$  に近いが、 $M$  の小さい部分まで含めるとみかけの  $b$  は  $b_0$  から次第に  $b'$  に近くなってゆく。  $m$  が大きいほどみかけの  $b$  が  $b_0$  に近い範囲は広い。

§ 4. 余震の規模の分布の地域差について

地震の規模別度数分布が世界の各地域で異なっていることが指摘されている (Gutenberg & Richter 1948, 宮村 1962)。地震の多い地域をみても、たとえば Pamir-Baikal Region, South America などは (1) 式の  $b$  の値がそれぞれ 0.6, 0.45 とかなり小さく、Tonga-Kermadec Region, Aleutian-Alaska Region などは  $b$  の値が

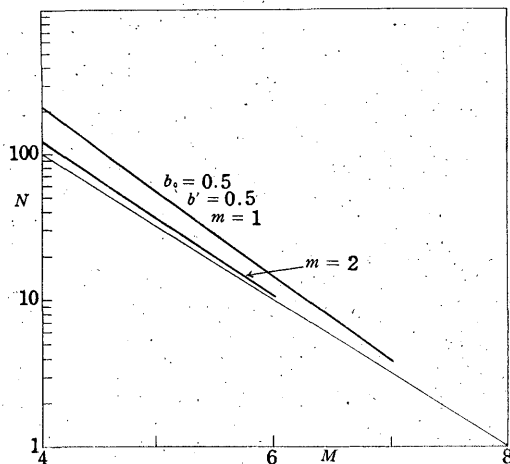


Fig. 10 a

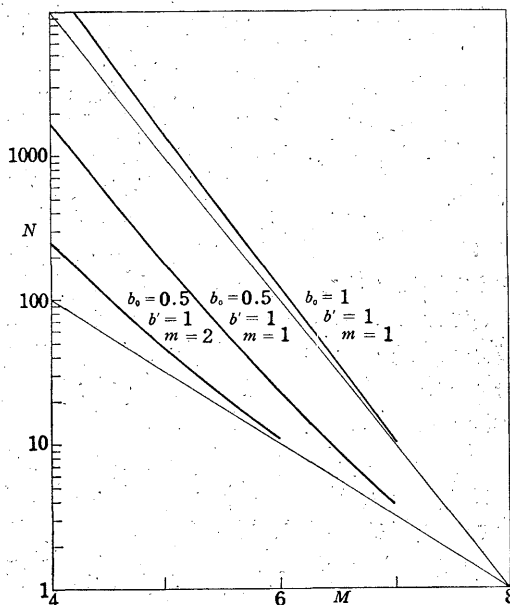


Fig. 10b. Magnitude-cumulative frequency relations for various combinations of  $b_0$ ,  $b'$ , and  $m$ .

それぞれ 1.3, 1.1 と大きく、日本-Kamchatka Region, Southern California などは、世界の平均に近く 0.8~0.9 程度であるという\*。

\* 筆者が Gutenberg-Richter の資料 (1949. Table 7) をそのままプロットしてみたところ、年平均累積度数の分布図は Fig. 11 のようになり、Pamir-Baikal Region で 0.8 弱、South America で 0.7, Tonga-Kermadec Region で 1.1, Aleutian-Alaska Region で 1.1 となった。

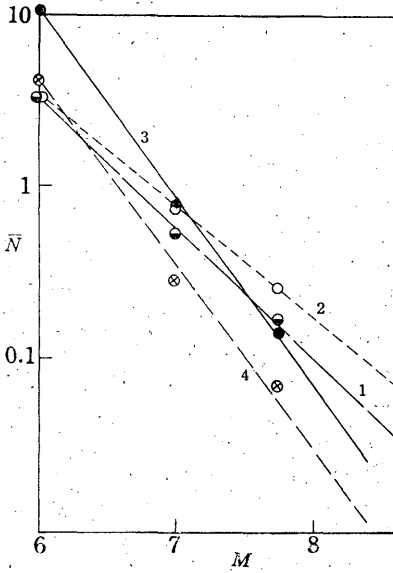


Fig. 11 Cumulative annual-frequency distribution of magnitude for four regions.  
 1: Pamir-Baikal, 2: South America,  
 3: Aleutian-Alaska, 4: Tonga-Kermadec.

それでは、これらの地域に起る大地震の余震についてはどうか。b が大きいといわれる地域は余震群についても b が大きく、b が小さいといわれる地域は余震群についても b が小さいであろうか。これらの地域における余震群の規模別度数分布の資料はあまり得られないが、二三の例を示すと次のとおりである。

(1) 1957~1958 年 Aleutian-Alaska Region の地震  
 1957年3月9日 Aleutian 地震 ( $M_0=8.3$ ), 1958年4月7日 Central Alaska 地震 ( $M_0=7.3$ ), 1958年7月10日 Southeastern Alaska 地震 ( $M_0=7.9$ ) の3地震の余震について規模別度数分布を調べたところそれぞれ  $b=0.70$ ,  $b=0.93$ ,  $b=0.88$  を得た (Utsu 1962)。これはこの地域の地震全般についての値  $b=1.1$  よりやや小さい。

(2) 1957年12月4日 Outer Mongolia 地震  
 この地震は大規模 ( $M_0=8.3$ ) の割に余震活動は小さく、 $M_0-1$  程度の大きな余震はなかった。松代 ( $\Delta=30^\circ$ ) では余震は10数回程度しか観測されなかったが、さらに倍率の高い地震計を有している College (Alaska,  $\Delta=55^\circ$ ), Hungry Horse (Montana,  $\Delta=80^\circ$ ) などでは多数の余震が観測された。余震であることの確認は College と Hungry Horse の記象型、発震時差 (2 m

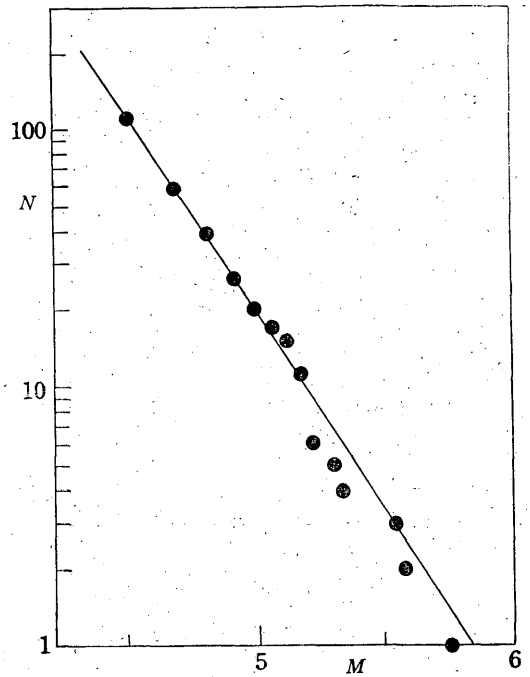


Fig. 12 Frequency  $N$  of aftershocks of the Outer Mongolia earthquake of December 4, 1958 with magnitude  $M$  and larger plotted against  $M$ .

20s~2 m 40s の間に集中している), 振幅比などにより行ない、College-Outpost の Benioff 短周期地震計に記録振幅 2 mm 以上で現われた余震を選び出すと、本震の20日後までに110個あつた。これらについて規模-累積度数図を作ると Fig. 12 のようになる。この図の横軸の  $M$  の絶対値はごくだいたいものである。この図からみると分布の傾斜はかなり急で  $b=1.6$  であり、その誤差を考慮しても (宇津, 1964) この地方の地震全般についての値  $b=0.6$  にくらべて著しく大きい。

次に本震の規模に対する余震活動の程度が地域によって異なるかを知る目安として、本震と最大余震の規模の差  $M_0-M_1$  を Table 2 に示す四つの地域についておもに Gutenberg and Richter (1954) (その他の資料を用いて筆者が  $M_1$  を決めたものもある) によつて調べた。これをみると、b の値が小さいといわれる Pamir-Baikal Region では、 $M_0-M_1$  の平均が Japan-Kamchatka-Aleutian-Alaska にくらべてやや大きくなっており、その差は統計的検定によれば高度に有意である。

Table 2

(1) Japan—Kamchatka—Aleutian—Alaska

Date	Region	$M_0$	$M_1$	$M_0 - M_1$
1918 Sept. 7	Kurile Is.	8¼	7¾	0.5
1923 Feb. 3	Kamchatka	8.3	7.4	0.9
1929 Sept. 1	Japan	8.2	7.7	0.5
1929 Mar. 7	Aleutian	8.1	7.6	0.5
1933 Mar. 2	Japan	8.5	7.3	1.2
1938 Nov. 10	Alaska	8.3	7.1	1.2
1944 Dec. 7	Japan	8.0	6.7	1.3
1946 Dec. 20	Japan	8.2	7.3	0.9
1949 Aug. 22	Alaska	8.1	6.3	1.8
1952 Mar. 4	Japan	8.3	7.1	1.2
1952 Nov. 4	Kamchatka	8.3	7.0	1.3
1953 Nov. 25	Japan	8.3	6.8	1.5
1957 Mar. 9	Aleutian	8.3	7.3	1.0
Mean				1.07

(2) Tonga—Kermadec—Fiji—New Hebrides—Solomon—New Britain

Date	Region	$M_0$	$M_1$	$M_0 - M_1$
1919 Apr. 30	Tonga Is.	8.3	7.2	1.1
1934 July 18	New Hebrides Is.	8.2	7.3	0.9
1938 Apr. 30	New Britain Is.	8.0	*	≥1.1
Mean				≥1.03

(3) South America

Date	Region	$M_0$	$M_1$	$M_0 - M_1$
1922 Nov. 11	Chile	8.3	7.0	1.3
1928 Dec. 1	Chile	8.0	*	≥1.1
1940 May 24	Peru	8	*	≥1.1
1942 Aug. 24	Peru	8.1	*	≥1.2
1960 May 22	Chile	8½-8¼	*	1½~1¼
Mean				>1.19

(4) Pamir—Tibet—China—Mongolia—Bajkel

Date	Region	$M_0$	$M_1$	$M_0 - M_1$
1920 Dec. 16	China	8½	*	≥1.6
1927 May 22	China	8.0	*	≥1.1
1931 Aug. 10	China	8.0	7.2	0.8
1934 Jan. 15	Nepal	8.3	<6	>2.3
1945 Nov. 27	Pakistan	8¼	*	>1.3
1950 Aug. 15	India	8.6	6.5	2.1
1951 Nov. 18	China	8.0	*	≥1.1
1959 Dec. 4	Mongolia	8.3	ca 6	ca 2.3
Mean				>1.58

\* indicates magnitude less than 7

§ 5. 考 察

以上に述べたことから地震の規模別度数分布について次のような考えも一つの仮説としてとりあげることができる。現在は資料の不足から詳しいことはいえないが、

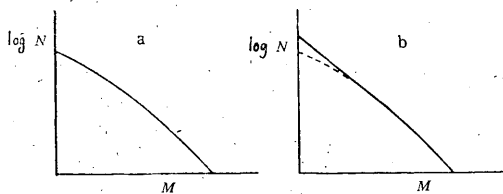


Fig. 13 Magnitude-frequency relation for shallow earthquakes excluding aftershocks or deep-focus earthquakes (a), and for shallow earthquakes including aftershocks (b).

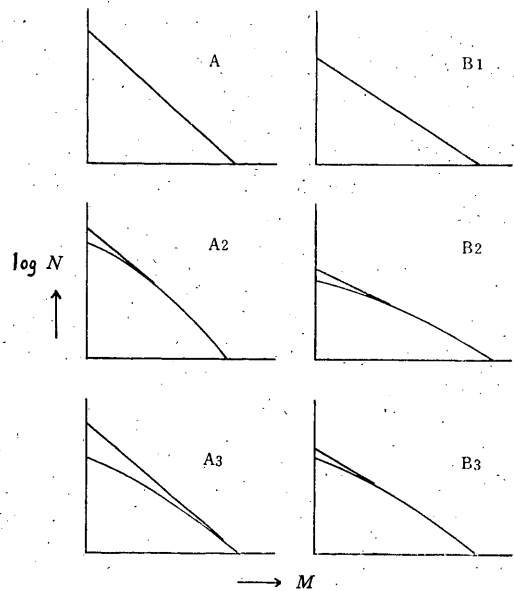


Fig. 14

本震と余震の発生機構の違いにも関連している興味ある問題であるから、将来資料を揃えてさらに検討すべきで

あろう。なおこれに関連して Mogi (1963) の実験は興味深い。

浅発地震のうちから余震を除いた「主震」の規模別度数分布、あるいは余震のほとんどない深発地震の規模別度数分布が Fig. 13 a のようになっていると考える。ふつうの意味での規模別度数分布は深発地震では a そのままであるが、浅発地震では余震も含まれるので b 図のようになる。

地震の規模別度数分布が A, B 兩地域で Fig. 14 A1, B1 のように異っている場合、その理由として、地震を「主震」と「余震」の 2 種に分けて考えたとき Fig. 14 A2, B2 のように「主震」の規模別度数分布そのものが異っているが、一つの「主震」に付随する余震の分布は同じである場合と Fig. 14 A3, B3 のように「主震」の規模別度数分布は同じであるが、一つの「主震」に対する余震の分布が異っている場合考えられる。(実際はこの二つの極端な場合の間である。)

謝辞 Outer Mongolia 地震の余震の資料は筆者が 1961~62 年米国沿岸測地局 (Washington, D. C.) に滞在中得たものの一部である。

#### 文 献

Gutenberg, B. and Richter, C. F.: 1949 : Seismicity of the earth and Related Phenomena, Princeton University Press, Princeton,

N. J. (2nd Ed. : 1954).

勝又 護 1958 : 日本付近の深い地震の表 (1935 年~1957 年), およびそれについての二三のこと, 験震時報 23, 1—14.

宮村撰三 1962 : 地震活動と地体構造, 地震 II, 15, 23—52.

Mogi, K. 1963 : The Fracture of a Semi-infinite Body Caused by a Inner Stress Origin and Its Relation to the Earthquake Phenomena (Second Paper), Bull. Earthq. Res. Inst. 41, 595—614.

Suyehiro, S. 1960 : Deep-focus Earthquakes of Small Magnitude (II), *Papers in Met. & Geophys.* 11, 97—143.

—1962 : Deep Earthquakes in the Fiji Region, *Papers in Met. & Geophys.* 13, 216—238.

Utsu, T. 1961 : A Statistical Study on the Occurrence of Aftershocks, *Geophys. Mag.* 30, 523—605.

—1962 : On the Nature of Three Alaskan Aftershock Sequences of 1957 and 1958, *Bull. Seism. Soc. Amer.* 52, 279—297.

宇津徳治 1964 : 地震の規模別度数の統計式について (序報), 験震時報 28, 79—88.