

群発地震の偶発性について*

田 中 康 裕**

550.341

Contingency of the Occurrence of Earthquakes in Earthquake Swarms

Y. Tanaka

(*Seismological Section, J. M. A.*)

Earthquake swarms are divided into 5 types named A, B, C, D and E according to the distribution of the time of occurrence of earthquakes as is shown in Fig. 1.

A-type: Many earthquakes occur during a long period of time without remarkable change in frequency.

B-type: Frequency of earthquakes increase suddenly, but it decays rapidly after a short time.

C-type: Type of the aftershock sequence of a great earthquake. Great many earthquakes occur at early stages, but the frequency of earthquakes tends to decrease gradually.

D-type: Very irregular variation with remarkable rise and fall in earthquake frequency is observed.

E-type: Mixed type of some of the A-, B-, C-, and D-types. Sudden increase in frequency is sometimes observed.

In this paper, the frequency distribution of the time interval τ between two consecutive earthquakes has been studied statistically. The distribution of τ is empirically expressed by the following equations:

$$f(\tau)d\tau = ae^{-\lambda\tau}d\tau, \quad (a, \lambda : \text{constants}) \quad (1)$$

$$\text{or} \quad f(\tau)d\tau = b\tau^{-p}d\tau. \quad (b, p : \text{constants}) \quad (2)$$

Equation (1) means the random occurrence of earthquakes with respect to time, and it is applied to A-type swarms and in some case other types of swarms. Equation (2) denies the randomness of the occurrence, and it is usually applied to the case of B-, C-, D-, and E-type swarms with increased activity. λ and p in equations (1) and (2) are constants showing the activity of consecutive shocks in an earthquake swarm. And in the case of volcanic earthquake swarms to which equation (1) is applicable, λ increases at the time when the volcano becomes active. When λ increases, equation (1) is related to equation (2).

In the case of C-type swarms, λ decreases with the passage of time. A-type swarms in later stages of volcanic eruptions have the same tendency.

In this paper, marks \circ and \bullet in the figures of the frequency distribution of the time interval between two consecutive shocks indicate the applications of equations (1) and (2) respectively.

§ 1. 序 論

群発地震にはいろいろな起こり方があるが、一つの地

震群について、時間の経過に伴う地震のひん度の変化

* Received Oct. 23, 1961

** 気象庁地震課

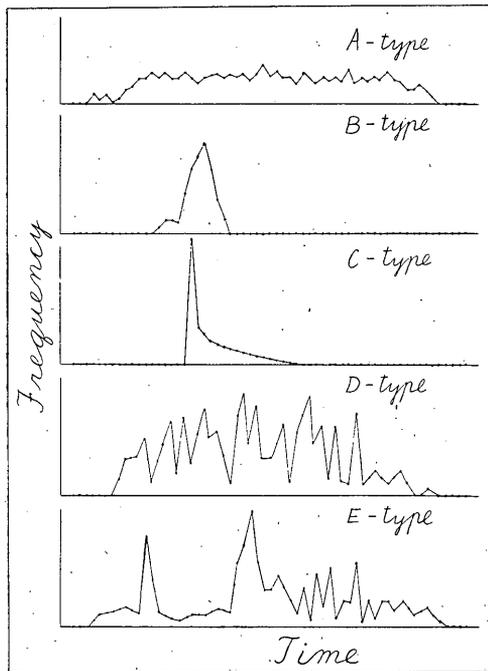


Fig. 1. Types of earthquake swarms.

の有様をみると、すべての群発地震は次の5つの型のいずれかに分類されよう。便宜上、ここでは、それぞれの型をA, B, C, D, E型とよぶことにする (Fig. 1)。

A型：地震のひん度が増加し、その状態が割合長期にわたって続く。群発期間中に地震のひん度が急激に増減することはない。しかし、徐々に変化することはある。

B型：地震のひん度が急激に増加し、短時間後に急激に衰える。

C型：大地震の余震などに現われる型で、始めは地震のひん度が多いが、次第に減衰して行く。

D型：地震のひん度が急激に変動し、それが長期間続く。A型とD型とは地震のひん度の変動量の大小によって、区別される。

E型：上記A, B, C, D型のうちのいくつかが混合したもので、ときに顕著な地震群が含まれることがある。

さて、時間的にみた地震の起こり方は、第一近似として偶発的である。すなわち、一つの地震が起こってから次の地震が起こるまでの時間々隔 τ の分布曲線は、地震のひん度を $f(\tau)$ として

$$f(\tau)d\tau = ae^{-\lambda\tau}d\tau \quad (a, \lambda \text{ は定数}) \quad (1)$$

で表わされる。これは、一つの地震が発生し、それ以後次の地震がいつ発生するかは、前の地震からの経過時間

に無関係なことを示している。いいかえれば、地震の起こり方は、少なくとも時間的には前の地震の影響を受けず、偶発していることになる。

この式は一般の地震についてよくあてはまる。しかし、群発地震では、短い時間々隔をもって発生する地震回数が、指数分布から期待される発生回数より著しく多いので、(1)式があてはまらないことが多い。こうした地震群の分布曲線は近似的に

$$f(\tau)d\tau = b\tau^{-p}d\tau \quad (b, p \text{ は定数}) \quad (2)$$

で表わされるのが普通である。この式はもはや偶発的現象としては説明できない。

ここで、(1)式の λ および (2)式の p は、いずれも地震の活動力を現わしているもので、ある定められた地震群について、一定の観測所による、定常的な観測に対して与えられる定数である。短時間に多数の地震が発生するような起震力の大きい地震群では、この定数は大きく現われる。また、 a, b は地震回数に關係する定数である。

以下は、とくに群発性の地震について、上述の発生型と対象しながら、(1)および(2)式を適用させた分布を考え、これに関連したいろいろなことがらを述べる。

本文の中に出てくる分布曲線の図において、横軸は相次ぐ地震の時間々隔、縦軸は時間々隔 τ が τ と $\tau+d\tau$ との間に落ちるひん度であり、○印は(1)式(片対数尺度)、●印は(2)式(両対数尺度)を適用して表わしてある。

また、本文で用いた地震資料は、すべて気象庁発行の地震月報、気象要覧および気象庁に保管してある地震原簿によった。

§ 2. 群発地震の発生型と偶発性

1) 浅間山の火山性地震 (A, E型の例)

Fig. 2 は 1958年9月~1959年3月の浅間山の火山性地震の日別回数である(追分で観測、3,000倍光学式地震計)。この期間は火山活動が活発で、たくさんの地震が発生し、噴火もひんぱんに起こった。そして、1958年10月中旬以前および1959年1月以後の地震の起こり方は、A型とみなされ、1958年10月下旬から12月末までの地震はE型の起こり方をしているともみなし得る。地震の起こり方を偶発的とみて、各月ごとの地震を(1)式の分布曲線(この地震群全体からみて、地震の時間々隔分布を統計するためには、 τ の単位を1時間にとるのが適当であった)にあてはめてみると、火山活動の活発な時期には λ の値が増大していることがわかる。そして、

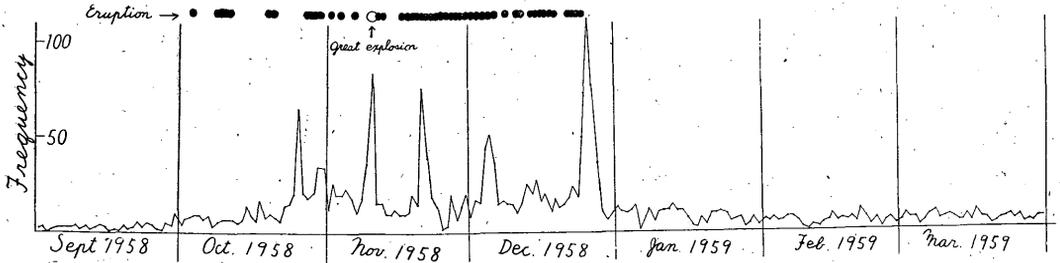


Fig. 2. Frequency of volcanic earthquakes of Asamayama, observed at Oiwake, 8 km SSE of the crater. Before the middle of Oct. 1958, and after Jan. 1959, variation in frequency was A-type. During the period from the middle of Oct. 1958 through Dec. 1958, it was E-type.

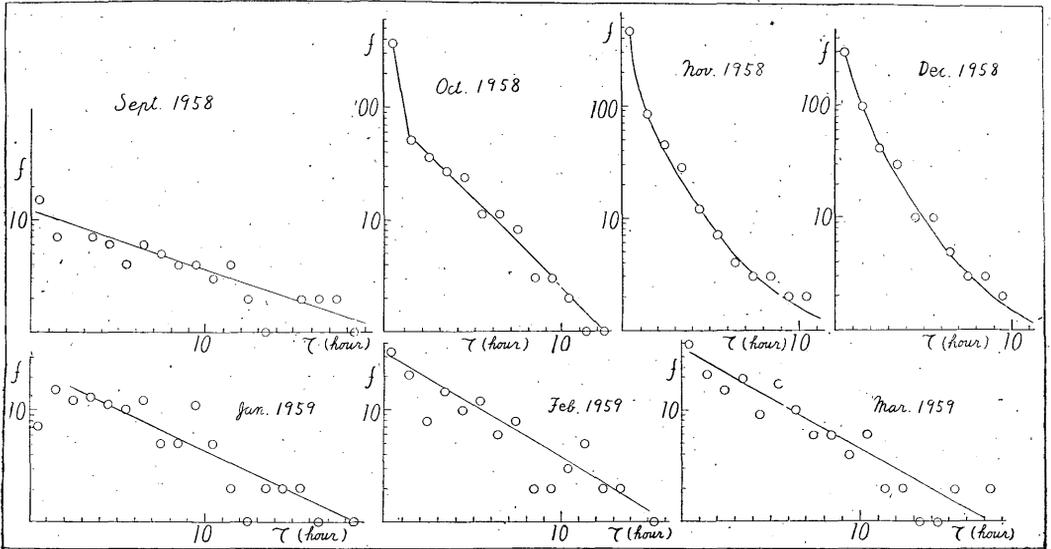


Fig. 3. Time interval τ distribution of two consecutive earthquakes at volcano Asamayama. These graphs show that the time interval distribution for A-type earthquake swarms can be expressed by equation (1), but for E-type earthquake swarms (Oct.~Dec. 1958) it cannot be expressed by the same equation.

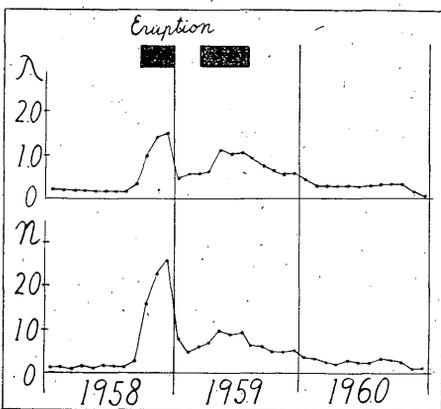


Fig. 4. Monthly values of λ and n for volcanic earthquakes of Asamayama. λ is given in equation (1), and n is the mean daily number of volcanic earthquakes calculated from the monthly number.

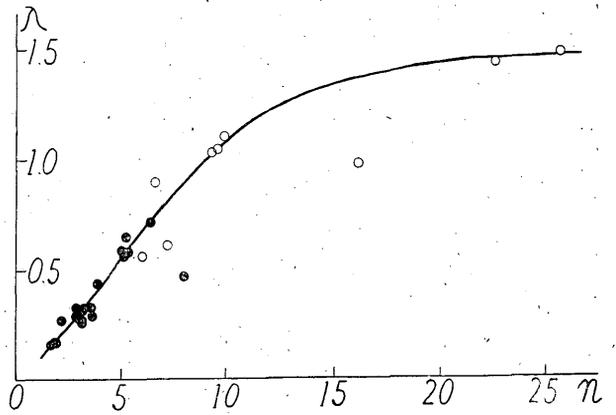


Fig. 5. Relation between λ and n shown in Fig. 4.
 ○ : Eruption reported.
 ● : No eruption reported.

火山活動が最も盛んな時期にあった 1958 年 10~12 月の地震 (E 型の発生ひん度をしている) の分布曲線は (1) 式よりもむしろ (2) 式の方が適用される形であった (Fig. 3).

1958~60 年の地震について, 月ごとに求めた λ の値と日平均地震回数 (1 か月間の地震回数÷月日数= n) とを比較すると, λ がよく地震の活動度を現わしている (Fig. 4). しかし, λ と n とに完全な比例関係が成り立つものではないことが, Fig. 5 が曲線になっていることからわかる. そして, この資料によれば, λ が 0.6, n が 6 以上くらいになったときには, 火山に爆発が起きているのである.

2) 硫黄島 (鹿児島県) 付近の火山性地震 (B 型の例)

1934 年 9 月 19 日, 薩摩硫黄島付近で海底噴火があり, 火山島を生成した. この噴火に関連した顕著な群発地震は, 同月 10 日すぎから始まり噴火後には急速に衰えた. 震央地域は非常に狭く, 地震は噴火地点付近 (130°21' E, 30°49' N) で密集して起こったものと推定される (この地震群の中で最大地震は, 9 月 16 日 22 時 15 分のもので, magnitude 5.4; 1,035 km 離れた東京でも記録された).

この地震群について, Wiechert 地震計を備えた観測精度のほぼ同じ測候所の資料により, 観測点別に地震の時間々隔の分布曲線を作ると, どの測候所でも (2) 式がよくあてはまった. そして, (2) 式の p は震央距離 Δ の増加に伴って減少する傾向が認められ (Fig. 6), p と Δ との関係はほぼ次式で現わされる.

$$p = c\Delta + d \quad (c, d \text{ は定数}) \quad (3)$$

3) 雲仙岳の火山性地震 (C 型の例)

1951 年 2 月 15 日, 雲仙岳のふもとで小区域地震が起こり, これに続いて余震が群発した (Fig. 7, 温泉岳測候所で観測, Wiechert 上下動地震計). この地震はいずれも雲仙岳の近くで発生しているので, 火山性地震とも考えられる. 各地震の時間々隔の分布は $\lambda < 26$ 時間の範囲において (1) 式が適用された (Fig. 7).

4) 栃木地震の余震 (C 型の例)

1949 年 12 月 26 日の栃木県今市付近の地震では, たくさんの余震があった (Fig. 8). 余震群全体についてみると, 各地震の時間々隔の分布は (2) 式が適用されるが (Fig. 8), さらに細い部分について検討してみることにする.

宇津および関によれば, この地震の余震区域はわずか $0.12 \times 10^8 \text{ km}^2$ で, 余震は本震のまわりで密集して起こった. 震源の深さもわずか 10 km 前後で余震域の体

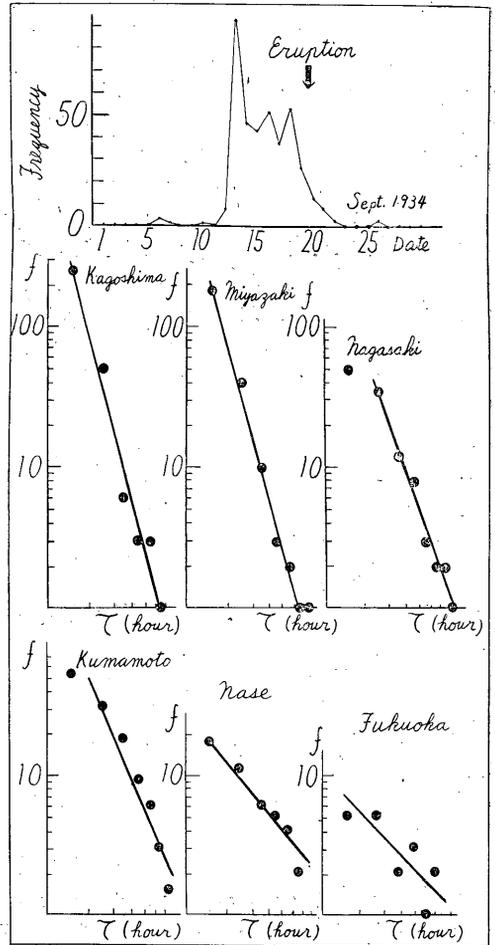


Fig. 6. Example of B-type earthquake swarm. Daily frequency of volcanic earthquakes of Satsuma-Iōjima and time interval distribution of two consecutive earthquakes for each observation station. These stations are equipped with Wiechert's seismographs, which have nearly the same instrumental constants. Relation between epicentral distance Δ and p in equation (2) are as follows:

Station	Δ (km)	p	Station	Δ (km)	p
Kagoshima	90	4.0	Kumamoto	230	2.3
Miyazaki	165	3.7	Nase	280	1.2
Nagasaki	220	2.8	Fukuoka	320	1.0

And these values are closely connected by the equation

$$p = c\Delta + d$$

where c and d are constants.

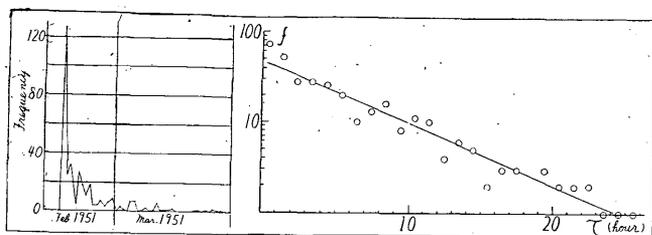


Fig. 7. An example of C-type earthquake swarm.
 Left: Daily frequency of volcanic earthquakes of Unzendake, observed at the Unzendake Weather Station.
 Right: Time interval distribution of two consecutive earthquakes (analysed from Feb. 15 to Mar. 15, 1951).

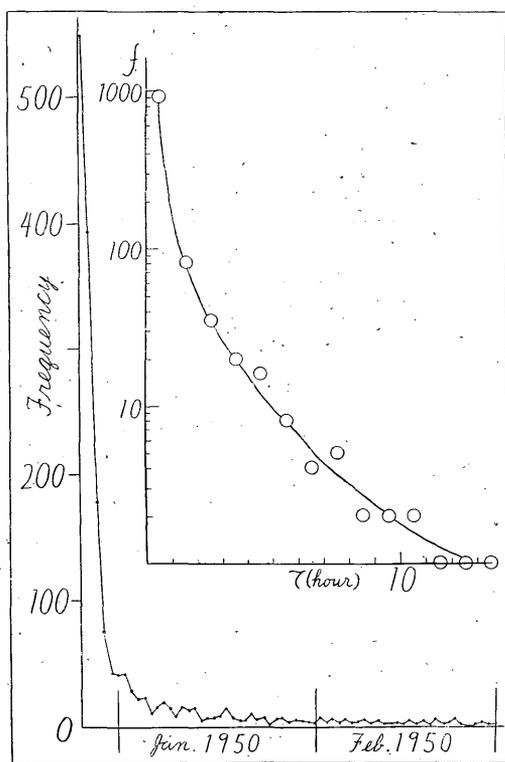


Fig. 8. An example of C-type earthquake swarm. Aftershocks of the Tochigi Earthquake of Dec. 26, 1949. Time interval distribution of two consecutive earthquakes were obtained for the period from Dec. 26, 1949 to Jan. 31, 1950.

積が非常に狭かったのが特長である。この余震域は余りにも狭いので、測候所の分布距離からみると、ほとんど同一点で起こったとみなすことができる。そこで便宜上、余震の震央が全部本震と同じ所 (139.7° E, 36.7° N) に

あったと仮定して、Wiechert 地震計を設えた観測精度のほぼ同じ測候所を選び、観測点別に地震の時間々隔の分布曲線を作って比較した。まず、本震発生後 10 時間以内に起こった余震について試みると、各測候所とも (1) 式が成り立ち (Fig. 9), しかも、震央距離 Δ と (1) 式の λ , a および各測候所で記録された総地震回数 N との間には

$$\begin{aligned} \lambda &= g\Delta^{-\mu}, \\ a &= h\Delta^{-\eta}, \\ N &= i\Delta^{-\xi}, \end{aligned} \quad (g, \mu, h, \eta, i, \xi \text{ は定数}) \quad (4)$$

の関係式が成り立った (Fig. 10). 上述の栃木地震の余

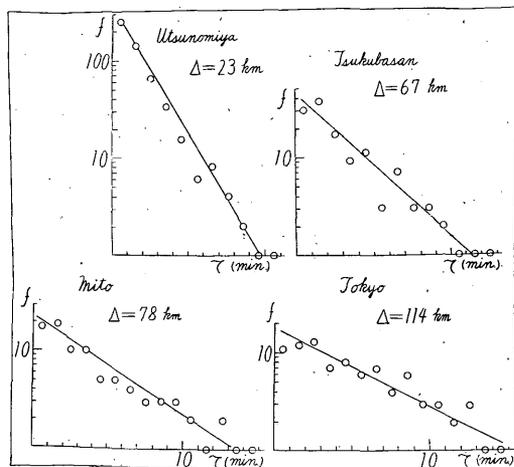


Fig. 9. Time interval distribution of consecutive earthquakes of the aftershocks of Tochigi Earthquake for each observation stations. These stations are equipped with Wiechert's Seismographs, which have nearly the same instrumental constants. The data were analysed for the first 10 hours after the principal earthquake.

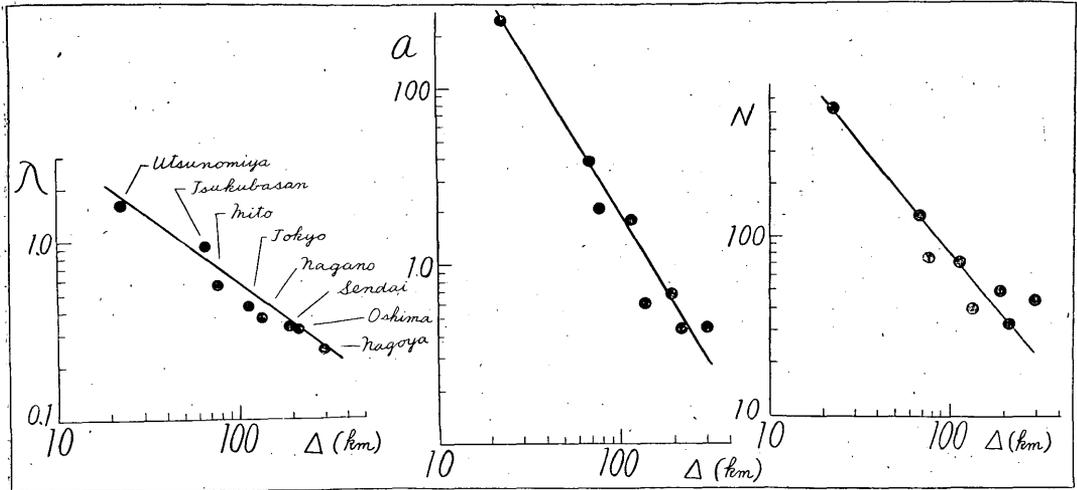


Fig. 10. Left: Relation between λ and Δ shown in Fig. 9.
 Middle: Relation between a and Δ shown in Fig. 9.
 λ and a is given in equation (1) and Δ is the epicentral distance.
 Right: Relation between N and Δ shown in Fig. 9.
 N is the total number of earthquakes recorded at each stations.
 Data of Nagano, Sendai, Oshima and Nagoya are omitted in Fig. 9.

震の場合では $\mu=0.76$, $\eta=17.33$, $\xi=1.24$ であった。

次に、単位時間の余震発生数を $N(t)$ としたとき、余震の減衰曲線が大森の式

$$N(t)dt = Qt^{-\alpha}dt \quad (Q, \alpha \text{ は定数})$$

で与えられるとすると、本震発生からの経過時間 t に対して

$$\tau = Rt^\alpha \quad (R \text{ は定数})$$

となるから²⁾、 t の大小によって τ が変り、したがって λ も変わることが予想される。そこで本震後5時間ごとに区切った地震について、時間々隔の分布曲線を作ると、 t が大きいほど λ は小さくなっていることがわかる (Fig. 11)。すなわち、時間の経過に伴ない、地震活動の勢力は極度に弱まっているのである。

Fig. 8 と Fig. 9, 10 の地震の時間々隔の分布曲線を比較してみると、(2) 式があてはまる地震群でも、地震の発生時期を適当に選べば、(1) 式で説明付けられることに気付く。このことは、余震についてだけでなく、(2) 式が成り立つすべての地震群について言えることである。

5) 伊豆大島付近の局発地震 (D型の例)

1959年12月~1960年1月に伊豆大島付近で地震が群発した (大島測候所で観測, Wiechert 地震計)。こうち、1959年12月3~23日の地震の起こり方はD型、そ

れ以後の地震ではA型の起こり方をしているとみなされる。D型の起こり方をしている部分について、地震の時間々隔の分布曲線を作ると、近似的には(1)式がなり立つが、(2)式の方法でもよいような起こり方であった。つまり、(1)、(2)式の間中型であったといえる (Fig. 12)。三原山ではこのころ、爆発がときどき起こっていた。

6) 伊東付近の群発地震 (D型の例)

1930年2~5月に、伊東付近で起きた群発地震もその起こり方からみてD型に入る。顕著な地震群が1930年2~3月および5月の2度あり、各々の地震群について地震の時間々隔の分布曲線を調べた。このどちらの地震群についても(2)式が適用されたが、(2)式の p の値は、2~3月の地震群については $p=1.67$ 、5月の地震群については $p=1.66$ とほぼ同じ値であった (Fig. 13)。

群発性地震の性質を知るうえで、石本・飯田の統計式がしばしば使われるが、いまその統計式を

$$\psi(A) dA = kA^{-m} dA$$

$\left[\begin{array}{l} \psi(A) : \text{地震のひん度} \\ A : \text{地震の最大振幅} \\ k, m : \text{定数} \end{array} \right]$

とし、最大振幅の2乗が地震の energy の第一近似であると考えると、その分布は

$$\psi(A^2) dA^2 = k'(A^2)^{-\frac{m+1}{2}} d(A^2)$$

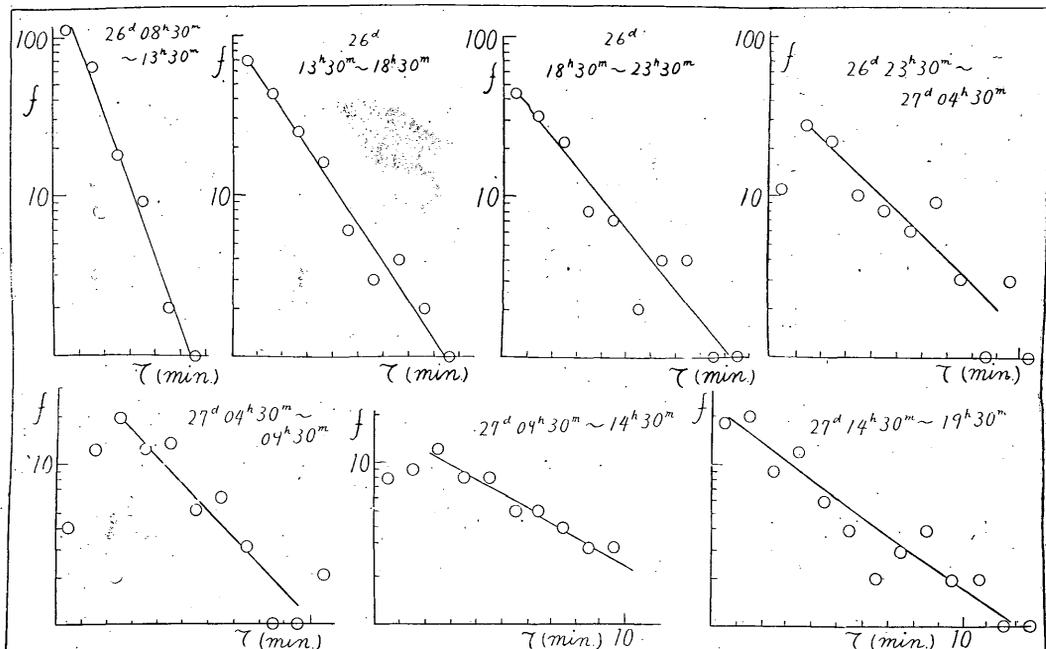


Fig. 11. Time interval distribution of two consecutive earthquakes observed at Utsunomiya, for every 5 hours at the time of the aftershock sequence of the Tochigi Earthquake. λ in equation (1) decreases with the passage of time as follows:

Period			λ	Period			λ
d	h	m		d	h	m	
26	08	30	2.65	27	04	30	1.05
26	13	30	1.51	27	09	30	0.57
26	18	30	1.11	27	14	30	0.72
26	23	30	1.00				

となる。友田⁹⁾が言っているように

$$p = \frac{m+1}{2}$$

が成り立つとすれば、 p は地震群の性質を知るうえで大へん参考になる。伊東の群発地震では、顕著な群発期が2回あったが、 p の値は両地震群とも、ほぼ同じ値を示した。また、木沢⁹⁾によれば、 m の値は両地震群とも1.8~1.9で、この両地震群はほとんど同じ性質を持っていたものと考えられる。

7) 有珠山の火山性地震 (A, B型の例)

有珠山で昭和新山が生成した時にはたくさんの火山性地震が起こった。有珠山周辺の気象官署の観測によれば、この地震は1943年12月29日から始まり、1944年4月ごろまで続いた噴火の前兆地震群 (B型の起こり方をし

ていた) と、1944年10月ごろから1945年10月ごろまで続いた噴火後の地震群 (日別地震回数 は徐々に増加し、また徐々に減少してA型の起こり方をしていった) との2群に分れる。各地震の時間々隔の分布曲線を作ると、前者では (2) 式が、後者では、(1) 式の方がよいように思われる。(Fig. 14)。ただし、後者では、時間々隔の短い時期では地震のひん度がやや少ないくらいはある。(1) 式および (2) 式の適用によって、両地震群の性質に著しい差があることがわかり、噴火前の地震が噴火後のものにくらべて、非常に大きな起震力を持っていたことが推定される。

なお、このときの噴火の前兆地震群については、室蘭 ($\Delta=25$ km, $p=1.3$)、森 ($\Delta=54$ km, $p=1.2$)、札幌 ($\Delta=69$ km, $p=1.1$) などの各観測所の個々の資料に

ついても (2) 式があてはまることは、すでに木沢⁴⁾によって述べられている。これらの観測所の地震計は札幌と森が Wiechert 地震計、室蘭が簡単微動計であるが、 ρ と Δ との間に (3) 式が適用されようである。

8) 箱根山の火山性地震 (B, E型の例)

1959年9月~1960年3月に箱根山で起こった群発地震はE型の起こり方をしていたとみなされる。この地震の時間々隔の分布曲線は、群発地震の全期間について (2) 式が成り立つ。また、所々で地震がB型の起こり方をしていたが、このB型の部分だけについても (2) 式が成り立った (この部分は、すでに発表してあるので、ここでは詳細を略す)⁵⁾

§ 3. 結 論

群発地震について、個々の地震の時間々隔の分布は指

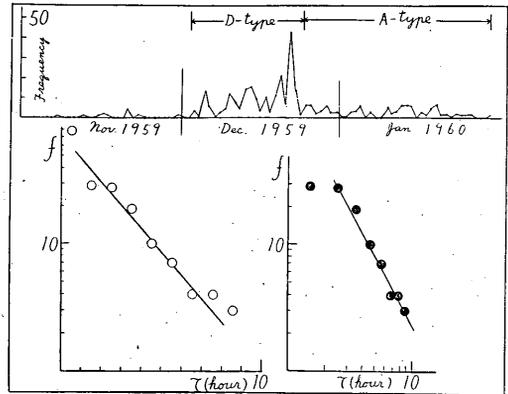


Fig. 12. Daily frequency of earthquakes and time interval distribution of two consecutive earthquakes near volcano Miharayama, observed at the Oshima Weather Station. Graphs of time interval distribution are presented for D-type earthquake swarm using equations (1) and (2).

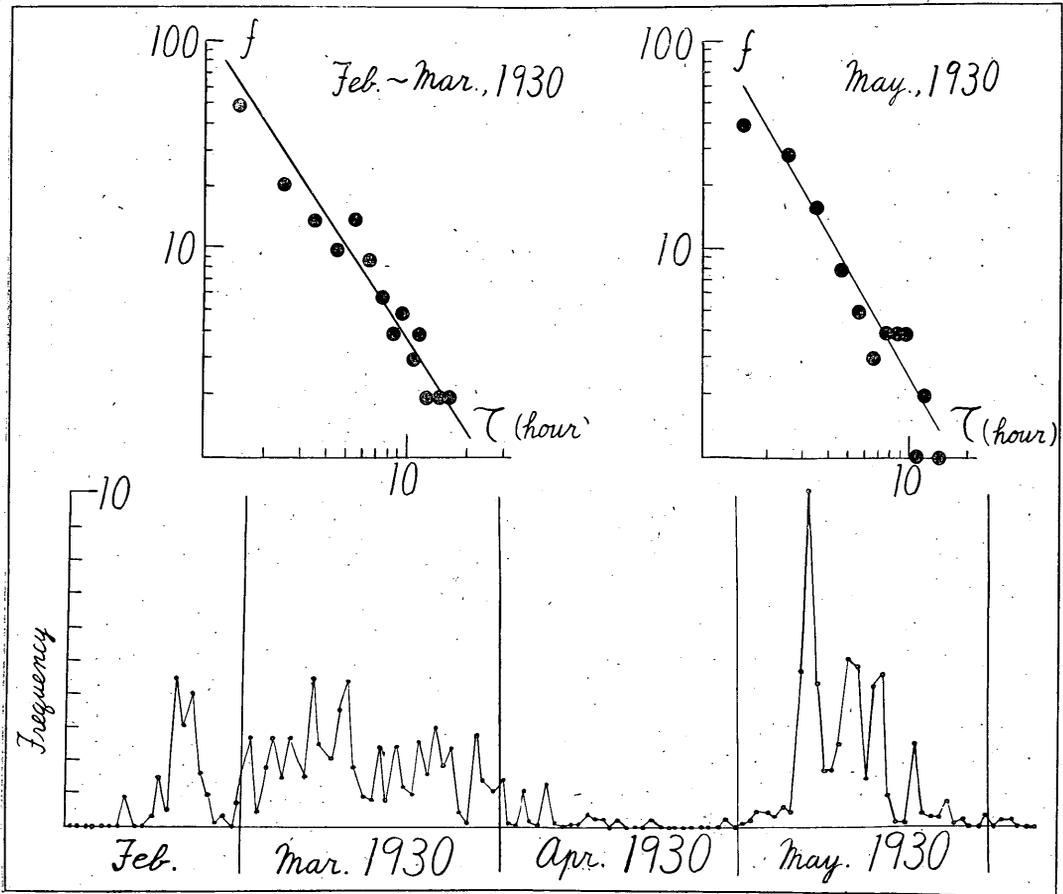


Fig. 13. Example of D-type earthquake swarm. Daily frequency of earthquakes and time interval distribution of two consecutive earthquakes, occurring near Ito in Izu Peninsula. There are two groups of earthquake swarm with the same nature.

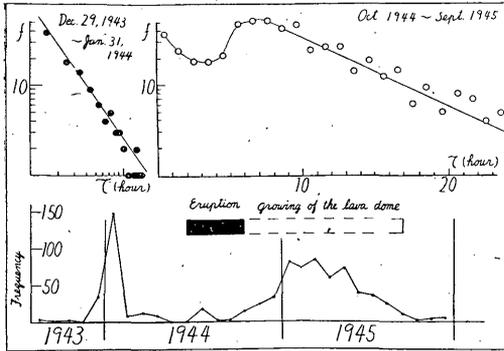


Fig. 14. An Example of A-type and B-type earthquake swarms.

Monthly number of volcanic earthquakes and time interval distribution of two consecutive earthquakes of volcano Ususan. There are two groups of earthquake swarms, and their types are seemed to be B-type, but types by daily frequency are regarded to be B-type in the first earthquake swarm, and A-type in the second earthquake swarm. These two groups of earthquake swarm had a great difference in nature.

数分布と双曲線分布のどちらかで現わされる。そのどちらにあてはまるかは、地震の発生型(A, B, C, D, E型)と関係が深く、§2 で扱ったものを整理すると Table 1 のようになる。すなわち、地震の起こり方は第一近似として偶発的であるが、地震活動が激化してくると、もはや偶発的現象としては説明が付かなくなる。そして、一般に次のようなことがいえる。

1). (2) 式が成り立つ火山性地震群では、噴火を伴なうことが多い。また、噴火を伴わなくても、地震活動がきわめて激しい。

2). (1) 式が成り立つ火山性地震群では、火山活動が活発化すと λ が増大する。 λ が増大すると、(1) 式より (2) 式がよくあてはまるように地震の性質が変わってくる。火山性地震群で λ が増大傾向にあるときは噴火を警戒する必要がある。

3). 時間の経過に伴ない、 λ の値が次第に減少するよう地震群が火山活動の末期や大地震の余震にみられる。とかく群発性の地震では、それが大地震の前震ではな

いかと考えられたり、または、火山の噴火の前兆にもなりかねないので注意をうながされる。こうした場合に、 λ の値の変動は、地震活動のなりゆきを見守るのには都合のよい要素である。 λ はその地震群の起震力を現わしているのであるから、同じ観測点で、同じ精度の地震観測を続けていれば、地震活動の状況を追跡することができる。

また、震央距離と λ または ρ との間に (3), (4) 式が成り立つから、同じ精度を持つ観測点を震央に近付けた場合に観測される地震の様子が推定できる。これは、観測点を地震群の震央に近付けれないような場合、たとえば火山の火口付近で起こっている群発地震の模様をやや遠方の観測によって推定することなどに応用できるものと考えられる。

Table 1. Relation between contingency of occurrence of earthquake swarm and type occurrence of earthquake swarm.

Type of occurrence of earthquake swarm	Applicable equation
A-type	(1)
B-type	(2)
C-type	(1) or (2)
D-type	(1) or (2)
E-type	(2)

参 考 文 献

- 1) 宇津徳治・関 彰：余震区域の面積と本震のエネルギーとの関係，地震 2 輯 7 (1955), 232~240.
- 2) 千秋鋭夫：余震間隔の分布に関する確率論的考察，地震 2 輯 12 (1959), 149~161.
- 3) 友田好文：地震の時間々隔の分布及び之と地震動の最大振幅の分布との関係に関する統計的記述，地震 2 輯 7 (1954), 155~169.
- 4) Takashi Kizawa: A Study of Earthquakes in Relation to Volcanic Activity (III), *Papers in Meteorology and Geophysics* 11 (1960), 30~96.
- 5) 田中康裕・天野 宏：箱根火山の群発地震および箱根周辺の地震，*験震時報* 25 (1961), 109~120.