いろいろな地震群における地震規模・ 地震数・活動域の関係

気象研究所 清 野 政 明

(昭和 58 年 11 月 9 日受理)

Statistical Relations among Magnitude, Number and Area of Epicentral Region, for Earthquake Clusters

Masaaki SEINO

Meteorological Research Institute

(Received November 9, 1983)

For shallow earthquake clusters in and around Japan in 1926-1980 which had main shocks with magnitude M_1 of 6.0 or larger, relations among aftershock magnitude, aftershock number and area of aftershock region are statistically investigated. The clusters are classified into three types according to the magnitude sequence as follows: i) the fundamental type in which magnitude gap between the main shock and the largest aftershock exceeds 1.0, ii) the complex type having two or more major events, i.e. the main shock and the aftershocks of which magnitudes are comparable to one of the main shock, and iii) the swarm type.

On the basis of the observed data for the earthquake clusters belonging to the fundamental type, an empirical relation among magnitude M , the number $N(M)$ of aftershocks with M or larger (including the main shock and foreshocks) and the area A (km²) is obtained as follows:

$$\log A = \alpha \log N(M) + \beta M + \gamma, \quad (\text{a})$$

where $N(M) \geq 2$, and α , β and γ are constant. Using multiple regression analysis, α and β values are nearly 1, and γ $-2.2 \sim -2.4$. This is transformed into the equation, $\log N(M) = (1/\alpha)(\log A - \gamma) - (\beta/\alpha)M$, which corresponds to the cumulative frequency-magnitude formula of Gutenberg-Richter's with a constant term dependent on A . When α and β values are approximated by 1, the equation (a) is changed into the form, $N(M)/A = 10^{-M+2.6}$. This form means that the clusters have the same apparent density of aftershocks with M or larger in the epicentral regions.

The above relations are also applicable to the earthquake clusters belonging to the complex and swarm types. However, in many cases these clusters have wider epicentral regions compared to one of fundamental type with equal M_1 . The following model on the formation of epicentral region is statistically examined: the complex or swarm type is consisted of the superposition of two or more fundamental types; the major events in the complex or swarm type individually take part in the formation of the region; the area of the region of complex or swarm type is constructed on the sum of those associated with the events. The results suggest that this model is suitable for the many clusters in the sea region but not always for the inland clusters.

§1. はじめに

時・空間的に集中して発生する地震群の型には、Mogi (1963) や Utsu (1970) により分類されるように、単純な本震・余震型から群発型まである。これら地震群における本震の規模と活動域（余震域）の面積との関係は、宇津・関 (1955), Utsu (1969) により詳しく研究されており、両方の間には比較的良好な相関関係が認められる。一方、余震数については、本震の規模が同一であつても桁違いに相違する場合も少なくない。果して、地震群中の余震数には規則性はあまり認められないものであろうか。本研究の第一の目的は、単純な本震・余震型を基本型として、余震規模・余震数・余震域面積の関係を調べることに、第二の目的は、群発型を含む各型地震群の余震数・余震域が基本型の複合から成ると考えることによつて、説明可能かどうかを検討することにある。

§2. 資 料

対象となる地震群は、1926～80 年に日本及びその周辺で発生し、本震の規模が 6.0 以上、深さ 80 km 以浅のものであり、又、余震域を決めるに足る数の余震が観測されたものである。使用された地震の震源要素は、気象庁地震月報別冊 2～6 号によつたが、補足的に調査原簿も使用された。

余震活動の期間には、本震の規模 M_1 により次の基準が用いられた： M_1 6.0～6.4, 2 カ月；6.5～6.9, 3 カ月；7.0～7.4, 4 カ月；7.5～7.9, 6 カ月；8.0 以上, 1～2 年。但し、余震が更に続く場合は延長し、3 カ月間発生しない時期をもつて打ち切つた。

余震域は、震央分布から求められたが、1961～68 年に発生した地震群の余震域面積には Utsu (1969) によりまとめられた値が採用された。一般に、余震域は余震の震央決定誤差が大きいほど広く定められる傾向がある。その影響をできるだけ排除するために、余震域の面積の誤差 ΔA を

$$\Delta A = (\pi/2)(l_1 + l_2)\Delta l + \pi(\Delta l)^2 \quad (2.1)$$

と置き、かつ、

$$\Delta A/A < 0.6 \quad (2.2)$$

の基準が採用される。ここで、 A は余震域の面積、 l_1 及び l_2 は楕円形とした余震域の長軸と短軸、 Δl は各地震群中の大きい方から約 10 個の震央決定誤差の平均値とする。地図上の余震分布から決めた余震域の面積誤差と統計上の震央決定誤差との関係が (2.1) 式で表現できるとは限らない。しかし、地震群の発生場所が異なり、時期とともに地震の検知力などの観測条件が変化することから、余震域の相対面積誤差を導入して資料の均質化を計つた。なお、(2.2) 式の限界値に 0.5 を採用すると内陸の地震群の大部分が不適当となるため、ここでは 0.6 が採用された。その結果、余震域の面積が 100 km² 未満の地震群は相対誤差が大きく、ほとんど除外された。その中には 1968 年えびの地震も含まれる。又、面積が広い場合でも、観測網から離れた海域で発生した 1971 年サハリン沖地震などは除外された。

以上の手続きを経て選択された地震群は、Table 1 に示される 57 例である。なお、同表には、参考資料として、本震の規模は 6.0 未満であるが、群発地震として著名な 3 例の地震群も、番号にカッコを付して入れてある。

Table 1. List of earthquake clusters in and around Japan in 1926-1980 ($M_1 \geq 6.0$ and depth $h \leq 80$ km).

No.	Time	Location	E	N	h km	M_1	A_2 $\times 10^{-2}$ km ²	Type	Sampling Period
1	1927.3.7.1827	Tango	135°09'	35°32'	0	7.3	33	11	Mar.7-Sept.7
2	28.5.27.1850	Off Sanriku	143 15	39 57	40	7.0	80	sss	May 27-Dec.31
3	30.11.26.0403	Kita-Izu**	139 03	35 06	5	7.3	25	111	Feb.14,'30-Apr.2,'31
4	31.9.21.0743	Saitama	139 14	36 09	0	6.9	6.0	1	Sept.21-Dec.21
5	31.11.2.1903	Hyuganada	132 38	32 15	40	7.1	43	ss	Nov.1,'31-Jun.30,'32
6	33.3.3.0231	Off Sanriku	144 31	39 14	10	8.1	320	s	Mar.3,'33-Sept.24,'34
7	37.1.6.0638	Hyuganada	132 48	30 58	60	6.2	28	ss	Jan.6-Mar.31
8	38.5.23.1618	Off Ibaraki	141 35	36 39	0	7.0	32	ss	May 23-Nov.4
9	38.11.5.1743	Off Fukushima	142 11	37 20	30	7.5	140	ss	Nov.5,'38-Nov.5,'40
10	39.5.1.1458	Off Oga Pen.	139 31	40 08	0	6.8	22	ss	May 1-Nov.30
11	43.4.11.2346	Kashimanada	141 27	36 21	10	6.7	65	sss	Nov.16,'42-Jul.11,'43
12	43.9.10.1737	Tottori	134 05	35 31	0	7.2	21	11	Mar.4,'43-Jun.11,'44
13	44.12.7.1335	Tonankai	136 37	33 48	30	7.9	210	s	Dec.7,'44-Dec.20,'46
14	45.1.13.0338	Mikawa	137 04	34 41	0	6.8	18	11	Jan.11,'45-Dec.20,'46
15	46.12.21.0419	Nankaido***	135 37	33 02	20	8.0	250	ss	Dec.21,'46-Dec.21,'48
16	48.6.15.2044	Hidaka River	135 24	33 45	10	6.7	11	1	Jun.15-Dec.20
17	48.6.28.1613	Fukui	136 12	36 10	0	7.1	11	1	Jun.28-Nov.30
18	52.3.4.1023	Off Tokachi	144 08	41 48	0	8.2	220	s	Mar.4,'52-Mar.4,'54
19	52.3.7.1632	Off Daishoji	136 12	36 29	0	6.5	4.3	1	Mar.7-Dec.30
20	52.10.27.0419	Off Sanriku	143 18	39 22	20	6.5	55	sss	Oct.26,'52-May 31,'53
21	53.11.26.0249	Off Boso Pen.	141 43	33 59	60	7.4	88	ss	Nov.26,'53-Nov.26,'54
22	58.11.7.0758	Off Etorofu	148 30	44 18	80	8.1	200	s	Nov.7,'58-Nov.7,'59
23	60.3.21.0207	Off Sanriku	143 26	39 50	0	7.2	81	ss	Mar.21-Dec.21
24	61.1.16.1620	Off Ibaraki	142 16	36 02	40	6.8	84*	ss	Jan.16-Apr.16
25	61.8.12.0051	Off SE of Hokk.	145 34	42 51	80	7.2	45*	ss	Aug.12,'61-Feb.28,'62
26	61.8.19.1433	Fukui-Gifu Bor.	136 46	36 01	0	7.0	9.7*	1	Aug.19-Dec.19
27	62.4.12.0952	Off Miyagi	142 49	37 58	40	6.8	75*	ss	Apr.12-Jul.31
28	62.4.30.1126	North. Miyagi	141 08	38 44	0	6.5	3.3*	1	Apr.30-Aug.30
29	63.10.13.1417	Off Etorofu	149 58	43 45	20	8.1	230	s	Oct.13,'63-Nov.30,'64
30	64.5.7.1658	Off Oga Pen.	139 00	40 20	0	6.9	19*	ss	May 7-Aug.7
31	64.6.16.1301	Off Niigata	139 11	38 21	40	7.5	59*	s	Jun.16-Dec.16
32	68.1.29.1919	E off Hokk.	147 00	43 11	30	6.9	58*	s	Jan.29-Apr.29
33	68.5.16.0948	E off N Honshu	143 35	40 44	0	7.9	450*	ss	May 16,'68-Aug.31,'69
34	68.8.6.0117	W Coast, Ehime	132 32	33 18	40	6.6	3.8*	1	Aug.5-Nov.5
35	69.8.12.0627	E off Hokk.	147 37	42 42	30	7.8	180	s	Aug.12,'69-Jun.30,'70
36	69.9.9.1415	Mid. of Gifu Pr	137 04	35 47	0	6.6	5.1	1	Sept.9,'69-Feb.9,'70
37	70.1.21.0233	South. Hokk.	143 08	42 23	50	6.7	2.2	1	Jan.21-Apr.21
38	70.7.26.0741	Off Miyazaki	132 02	32 04	10	6.7	15	ss	Jul.26-Oct.26
39	70.10.16.1426	SE Akita Pr.	140 45	39 12	0	6.2	1.9	1	Oct.16-Dec.31
40	71.9.15.2355	Off E Co.Tohoku	143 52	39 05	50	6.3	24	ss	Sept.15-Dec.31
41	72.2.29.1822	E off Hachijo	141 16	33 11	70	7.1	28	s	Feb.29-Nov.30
42	72.12.4.1916	E off Hachijo	141 05	33 12	50	7.2	49	s	Dec.4,'72-Jun.30,'73
43	73.6.17.1335	Off Nemuro Pen.	145 57	42 58	40	7.4	160	ss	Jun.17-Oct.31
44	74.5.9.0833	S Coast, Izu	138 48	34 34	10	6.9	2.4	1	May 9-Aug.9
45	74.10.10.1556	E off Tohoku	143 23	40 53	30	6.4	26	sss	Oct.10-Dec.10
46	75.1.23.2319	Near Aso	131 08	33 00	0	6.1	1.0	111	Jan.22-Mar.22
47	75.4.21.0235	Central Oita	131 20	33 08	0	6.4	1.8	1	Apr.21-Jun.21
48	75.6.10.2247	E off Hokk.	148 13	42 46	0 (7.0)	7.7		ss	Jun.10-Oct.10
49	78.1.14.1224	Near Oshima	139 15	34 46	0	7.0	10	111	Jan.1-Apr.14
50	78.2.20.1336	Off Miyagi	142 12	38 45	50	6.7	5.7	s	Feb.1-Apr.20
51	78.3.25.0447	Near Etorofu	149 49	44 20	40	7.3	99	sss	Mar.22-Jul.22
52	78.6.4.0503	Centr. Shimane	132 42	35 05	0	6.1	0.96	111	Jun.4-Jul.31
53	78.6.12.1714	Off Miyagi	142 10	38 09	40	7.4	41	s	Jun.12-Oct.30
54	80.2.23.1451	SE off Hokk.	146 33	43 27	30	6.8	18	ss	Feb.23-May 23
55	80.3.3.0829	Near Okinawa	126 37	27 00	20	6.7	8.3	111	Feb.9-Jun.3
56	80.6.29.1620	E Coast of Izu	139 14	34 55	10	6.7	2.7	111	Jun.25-Oct.31
57	80.9.25.0254	SE Coast, Kanto	140 13	35 31	80	6.1	1.4	11	Sept.25-Nov.25
(58)	62.8.26.1548	Near Miyake Is.	139 27	34 07	40	5.9	46*	sss	Aug.25-Dec.31
(59)	64.12.9.0248	Near Izu-Oshima	139 19	34 35	0	5.8	19*	sss	Nov.18,'64-Apr.1,'65
(60)	66.4.5.1751	Matsushiro	138 19	36 35	0	5.4	3.5	111	Oct.1,'65-Dec.31,'67

*; summarized by UTSU (1969). **; containing the Ito earthquake swarm in February 1930.

***; containing No. 16 earthquakes. (); typical earthquake swarms with M_1 less than 6.0.

1, 11 & 111; fundamental, complex & swarm types of inland. s, ss & sss; ditto of sea region.

§3. 余震域の面積と i 番目の余震規模との関係

地震群は、余震の規模系列と発生場所により、単純な本震・余震型（基本型とし、陸域のものは l 、海域のものは s とする）、本震・続発地震・余震型（ ll , ss ）、群発型（ lll , sss ）に大別される（Table 1 参照）。ここで用いられる“基本型地震群”とは、本震と最大余震との間に 1.0 を超えるマグニチュード・ギャップを有するということで定義され、“本震・続発地震・余震型”地震群とは、本震との規模の差 1.0 以内の余震を含むものとする。“群発型”地震群は、Utsu (1969) による分類に準じて区分される。この分類は、余震の規模系列の複雑さに対応した定性的なものと考えて良い。

以上の分類を用いて余震域の面積 A (km^2) と本震の規模 M_1 との関係を示したものが Fig. 1 である。図中、 $M_1 < 6.0$ の典型的群発地震もカッコ付きでプロットされている。図示された結果は、全体として宇津・関 (1955)、Utsu (1969) によるものと同様であるが、基本型は直線状に配列し、 ss 及び sss 型の余震面積は同程度の M_1 をもつ基本型と比較して大きいという特徴が明らかとなる。この結果によると、全地震群の資料から機械的に近似される直線は、各型地震群のサンプル数の相対的増減により変るものと考えて良い。Utsu (1969) は、陸域の地震群 ($5.5 \leq M_1 \leq 7.5$) に対して、勾配を 1 と置いた

$$\log A = M_1 - 4.1 \quad (3.1)$$

という関係を示した。この式は、 $M_1 = 4.3$ の 1977 年有珠山噴火に伴った群発地震にも適合し [SEINO, (1983)], M_1 が 5.5 より小さい場合にも成立するようである。(3.1) 式は、 l , ll 及び

Fig. 1. Relation between M_1 and A (km^2). $\odot$, l ; $\blacktriangle$, ll ; $\triangle$, lll ; $\odot$, s ; $\bullet$, ss ; $\circ$, sss (refer to in Table 2). Broken lines are regression lines calculated from the data for the fundamental type (l and s). Thick lines represent the lines separated into the inland (l) and the sea (s) region, in the case of gradient $\beta=1$.

III 型に適用されるが, s 型には合うといえない. l 及び s 型という基本型のみについて, 勾配を 1 と置き, 改めて平均的關係を求めると,

$$\log A = M_1 - 3.85 \quad (3.2)$$

となる. 又, l 型 (12 例) と s 型 (12 例) とに分離した場合, その關係は Fig. 1 の実線 l, s で示され, それぞれ

$$\log A = M_1 - 4.05 \quad (3.3)$$

$$\log A = M_1 - 3.66 \quad (3.4)$$

と表現できる. 当然のことながら, (3.1) 式と (3.3) 式とはほとんど一致する. 図中の実線 l と s とのくい違いは, A 又は M_1 を決める過程での統計的誤差では説明できない.

次に, 面積 A と本震及び前震を含めて大きい方から i 番目の余震の規模 M_i との關係をみる. Fig. 2(a) に示される A と最大余震の規模 M_2 との關係は, Fig. 1 とは逆に, ss 及び sss 型の面積が同程度の M_2 をもつ s 型と比較して小さいという特徴を示す. しかし, Fig. 2(b) の A と M_{10} との關係にみられるように, 順序が下がるにつれて s 型のグループに近づく一方, II 及び III 型ではかえって l 型のグループと離れるものがあるなど, 複雑な挙動を示す. ここでは, 議論を簡明にするために, まず基本型のみに対して, 最小 2 乗法により

$$\log A = \beta M_i + c \quad (3.5)$$

という式をあてはめる. 結果としての回帰直線は Fig. 1 及び 2 中の破線で, 又, 相関係数 r と回帰係数 β, c は Table 2 に示される. r は 0.93~0.97 と相関は良い. 勾配 β は $i=1$ の場合を除いてほぼ一定の 0.92~0.98 の値を示すが, $i=1$ の場合, 先に述べ

Fig. 2. Relations between the largest aftershock magnitude M_2 or the tenth aftershock magnitude M_{10} and A . Broken lines; regression lines from the data for l and s.

Table 2. Correlation coefficient (r) and regression coefficients (β and c) for the relation between $\log A$ and the i -th aftershock magnitude M_i in the earthquake cluster.

i	$\log A$ vs M_i	r	β	c	c ($\beta=0.95$)
1	$\log A$ vs M_1	0.94	1.19	-5.19	-3.49
2	$\log A$ vs M_2	0.93	0.92	-1.89	-2.07
3	$\log A$ vs M_3	0.95	0.94	-1.81	-1.84
4	$\log A$ vs M_4	0.96	0.93	-1.61	-1.73
5	$\log A$ vs M_5	0.97	0.95	-1.69	-1.67
6	$\log A$ vs M_6	0.97	0.98	-1.71	-1.54
7	$\log A$ vs M_7	0.96	0.97	-1.54	-1.45
8	$\log A$ vs M_8	0.95	0.95	-1.37	-1.39
9	$\log A$ vs M_9	0.96	0.94	-1.29	-1.35
10	$\log A$ vs M_{10}	0.96	0.94	-1.28	-1.31
mean $\beta(2 \leq i \leq 10) = 0.95$					

た Fig. 1 の実線 l と s とのくい違いがみかけの β 値を大きくしていると思われる。ここで、 β 値が i に独立な定数で、 $2 \leq i \leq 10$ における平均値 0.95 となるとすると、 c 値は必然的に i の函数となり、Table 2 に示された値となる。但し、 $i=1$ の場合、 c 値も又、他の場合と飛び離れた値となる。

§4. 余震域の面積と余震数との関係

本震の規模が同じでも、それに伴う余震の数に著しい相違があることはよく知られている。実際、 $M5.0$ 以上の余震数（本震及び前震を含む）と本震の規模との関係をみると、Fig. 3 に示されるように両者に弱い相関（余震数 3 個以上、群発型を除く 34 例に対し、 $r=0.75$ ）は認められるもののバラツキは大きい。

一方、余震数と余震域の面積との関係をみると、Fig. 4 に示されるようにまとまりはかなり良くなる。基本型に対して、

$$\log A = \alpha \log N + d \quad (4.1)$$

と置き、 $M5.0$ 以上の余震数 $N(\geq 3)$ に対して、回帰直線は次のようになる：

$$\log \hat{A} = 1.06 \log N + 2.41 \pm 0.22, \quad (4.2)$$

$$\log \hat{N} = 0.83 \log A - 1.88 \pm 0.19. \quad (4.3)$$

資料数は少ない（14 例）が $r=0.94$ と相関は良く、これらの直線は Fig. 4 中の破線で示される。群発型を除く 34 例について同様な関係をみると、

Fig. 3. Relation between M_1 and the number $N(\geq 3)$ of aftershocks with $M5.0$ or larger (including the main shock and foreshocks).

Fig. 4. Relation between A and $N(\geq 3)$. Broken lines; regression lines from the data for l and s .

$$\log \hat{A} = 0.91 \log N + 2.57 \pm 0.25, \quad (4.4)$$

$$\log \hat{N} = 0.85 \log A - 1.91 \pm 0.24, \quad (4.5)$$

$r=0.88$ となり, 基本型のみの場合とほとんど一致する. 群発型では, sss型は上の関係に一致する反面, III型は適合しない. M の下限が 5.0 より小さい場合の検討も必要であるが, 気象庁観測網の検知力では海域地震群の多くが資料として使えなくなる.

(4.1) 式のもつ意味を考えるため, $\alpha=1$ と近似する. 基本型に対し,

$$\log \hat{N} = \log A - 2.48 \pm 0.23 \quad (4.6)$$

がえられ, これは

$$N/A = 3.3 \times 10^{-8} \quad (4.7)$$

と表現できる. この式は, 余震域内で, 実際の余震分布が均等でなくても, みかけの余震密度がほぼ一定 ($1,000 \text{ km}^2$ に 3~4 個) であることを意味する. 他の型の地震群を含めて,

Fig. 5. Differences between the observed $\log N$ and the estimated $\log N$ from the observed A .

(4.6) 式に基づき $\log N - \log \hat{N}$ の分布を示すと, Fig. 5 のようになり, 76% の地震群が ± 0.3 の範囲に含まれる. 但し, II 及び III 型は密度が高い方にはずれる傾向を示す.

§5. 余震規模・余震数・余震域の関係

余震の規模 M , M 以上の余震数 $N(M)$ (本論文では, 本震及び前震を含む地震数), 余震域の面積 A の三者をひとつの関係式で統一するために, (4.1) 式の一般形として

$$\log A = \alpha \log N(M) + d(M) \quad (5.1)$$

が成り立つと仮定する. ここで $d(M)$ は M のみの函数である. これを (3.5) 式と合わせて $\log A$, $\log N(M)$, M に関する線形の式でまとめると,

$$\log A = \alpha \log N(M) + \beta M + \gamma \quad (5.2)$$

の形に表現できる. 基本型の場合, (4.2) 式から $\alpha=1.06$, Table 2 から $i \geq 2$ について $\beta=0.95$ と置ける. 又, γ 値は c 及び d の値から $-2.3 \sim -2.4$ となる. 方法を変えて, 重回帰分析を用いて, 基本型地震群から各々 1 組の観測値 [A , M , $N(M)$; 但し $N(M) \geq 2$] を抽出した計算の一例は,

$$\log A = 1.02 \log N(M) + 0.93M - 2.19 \pm 0.24 \quad (5.3)$$

となり, 検定の結果は充分満足できるものである. 但し, α 及び β は抽出される組が変わると 0.1 程度は変りうる.

(5.2) 式は, 基本型地震群の場合, 余震規模・余震数・余震域面積の間に比較的簡単な関係が存在することを示す. 更に, これは

$$\log N(M) = (1/\alpha)(\log A - \gamma) - (\beta/\alpha)M \quad (5.4)$$

と変形できる. この式は, 累積度数を用いた Gutenberg-Richter の式

$$\log N(M) = C - bM \quad (5.5)$$

にはかならない. いいかえると, (5.2) 式は各地震群の b 値を一定とみなせる範囲の近似式で, (5.5) 式の C 値は A の函数であるといえる.

更に, α 又は β は ± 0.1 程度は変りうることから, $\alpha=1$, $\beta=1$ と置いた簡略式

$$\log A = \log N(M) + M - 2.6 \quad (5.6)$$

の方が実用的である. 基本型地震群に対するこの式は, 本震に対しては適当でない ($N(M)=1$ の時の定数値が合わない) が, $N(M) \geq 2$ の場合には ± 0.3 の範囲を許せば 80% をこえる観測値に適合する. 又, ある本震・続発地震・余震型地震群が, A_I で $N_I(M)$ 個, A_{II} で $N_{II}(M)$ 個の余震をそれぞれ伴う 2 つの基本型地震群の複合から成り立ち, 改めて余震域 A が形成されたとすると, (5.6) 式より

$$N_I(M)/A_I = N_{II}(M)/A_{II} = \{N_I(M) + N_{II}(M)\}/(A_I + A_{II}) = 10^{-M+2.6} \quad (5.7)$$

となり

$$A = A_I + A_{II} \quad (5.8)$$

の場合にのみ, Fig. 5 で示されるみかけの余震密度一定という関係が成立する. このことは,

ss 及び sss 型地震群の余震域が複数の s 型地震群の余震域の和の形で拡大複合している可能性を示し、又、余震数が十分な数であれば、(5.6) 式は ss 及び sss 型にも成立して良いことを示す。しかし、 $A < A_I + A_{II}$ の場合、余震密度は高くなり、II 及び III 型はその傾向をもつといえる。

§6. 余震域の拡大

基本型地震群の場合、本震が余震域の形成に決定的役割を果たすと考えられる。この場合、 M_1 と A との関係は、余震について成立する (5.6) 式の延長上ではなく、(3.2~4) 式に従っていることが認められた。これらの関係を基礎に、他の型の地震群の余震域が複数の基本型の複合によるものと仮定しよう。こうした複合型の存在は、実際の地震群で複数の本震・余震系列に分離できる場合もあり充分考えられるが、多くの場合余震活動が時空間的に重複又は隣接しているため分離できない。Utsu (1970) は、余震規模系列と余震数の時間変化から同様の議論をしているが、ここでは余震域という側面からその拡大が複合型によるものとしてどの程度説明できるか、次の場合を想定して検討した。

- i) 各地震群で最大地震のみが余震域を形成し、 M_1 と A とは (3.2) 式に従う。
- ii) 各地震群で、本震及びこれに匹敵する規模 $M_j (> M_1 - 1.0)$ をもつ続発地震が全て余震域の形成に関与し、陸域で (3.3) 式、海域で (3.4) 式に従い、かつ余震域の場合には (5.8) 式と同様の和の関係が成立する。

これら2つの場合について、 $\log A - \log \hat{A}$ の分布が比較される。ii) のモデルでは、ある地震群に j 個の続発地震 (本震を含めて) があるとすると、余震域面積は次の形となる：

$$\log \hat{A} = \log \sum_j A_j. \quad (6.1)$$

Fig. 6 には、2つの場合の $\log A - \log \hat{A}$ の分布の比較が示される。この結果をみると、ii) のモデルは、i) と比較してかなりまとまりが良く、 ± 0.3 の範囲には 86% の地震群が入る。このことは、余震域という空間的側面からみて、多くの地震群が基本型の組み合わせにより形成されている可能性を

Fig. 6. Differences between the observed $\log A$ and the estimated $\log A$ from the observed M . (a); only the main shock takes part in the formation of epicentral region of aftershocks. (b); major events, which have magnitudes $M_j (\geq M_1 - 1.0)$, take part in the formation.

示す。但し、1962 年三宅島付近、1964 年伊豆大島付近の群発地震は、余震密度に対しては標準的値を示すけれども、ii) のモデルで説明できない性格をもつ。

§7. ま と め

日本及びその周辺に発生する地震群の中で、単純な本震・余震型地震群を基本型地震群として、その余震規模・余震数・余震域の面積の関係を検討した。これら三者間に対し、ひとつの経験式が導びかれ、かつ余震域におけるみかけの余震密度がほぼ一定の値となることがわかった。又、基本型以外の地震群でも、多くの場合、上の関係が成り立ち、更に、この群の余震域が基本型地震群の複合型で拡大している可能性を示した。但し、陸域の群発地震は必ずしも上の関係に適合しない。これらの関係からみた個々の地震群の性格、地震の群発度などについては他の機会に報告する。

余震が観測されない地震については、ここで触れなかつた重要問題のひとつである。この地震が、余震域、余震密度などの側面から、本論文で議論された地震群とどう関連していくのかは、今後の課題である。

謝 辞

気象研究所地震火山研究部の勝又護博士、森俊雄氏、岡田正実氏他には多くの助言と協力をいただいた。気象庁地震課の方々には、資料をまとめる上で厚い協力をいただいた。記して感謝の意を表します。

文 献

- MOGI, K., 1963, Some Discussions of Aftershocks, Foreshocks and Earthquake Swarms, Bull. Earthq. Res. Inst., **41**, 615-658,
SEINO, M., 1983, Seismic Activity Accompanying the 1977-1978 Eruption of Usu Volcano, Japan, Pap. Met. Geophys., **34**, 105-141.
UTSU, T., 1969, Aftershocks and Earthquake Statistics (I) —Some Parameters which Characterize an Aftershock Sequence and Their Interrelations—, J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., VII., 3, 129-195.
UTSU, T., 1970, Aftershocks and Earthquake Statistics (II) —Further Investigation of Aftershocks and Other Earthquake Sequences Based on a New Classification of Earthquake Sequences—, J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., VII., 3, 197-266.
宇津徳治・関彰, 1955, 余震区域の面積と本震のエネルギーとの関係, 地震 **2**, **7**, 233-240.