

## 49. 1968年6月のGalapagos諸島の 群発地震について

地震研究所 岩田孝行

(昭和44年11月25日発表—昭和45年7月22日受理)

### 1. はじめに

1968年6月のはじめから約2カ月間にわたって、東太平洋のGalapagos諸島に地震が頻発した。USCGSのEDR (Earthquake Data Report)によると、地震群の規模は比較的小さく、 $3.8 < m < 5.4$  ( $m$ はUSCGSマグニチュード)の地震が260個報告されている。周知のようにGalapagos諸島は、現在顕著な噴火活動のみられる火山がある。例えば、Wolf火山、La Cumbre火山およびDarwin火山等である。但し、Darwin火山については噴火の記録はないが、活火山と考えられている。また、Smithsonian institutionによる報告では、今回の群発地震活動の直前にFernandina島の火山が噴火した。即ち、5月21日の15h~23h (GMT)の噴火は小規模な活動で終わっているが、6月11日の10h 18m頃の噴火では地震活動を伴ない、また、calderaが約300m崩壊し、その量は1~2Km<sup>3</sup>であるという。群発地震の発生域は、主にFernandina島およびIsabela島を中心とした地域が活発であった。地震群全体をとらして $5.0 < m < 5.4$ の地震が合計16個発生している。活動域から約125Kmの巨離にあるSanta Cruz島のAcademy bayでは、Mercalli scaleで3~4程度の震度であった。この種の調査には、Galapagos諸島地域の地物理学的諸現象との関連した考察が必要であるが、過去における当諸島に関する地震資料の乏しい現在では困難である。従って、今回の報告はUSCGSの地震資料とGalapagos地震観測所の世界標準地震計(LP型)の記録について、S-P頻度、押し、引き分布の調査資料を基にして、主に群発地震の活動を中心にして述べる。

### 2. 地球物理学的背景の概略

Galapagos諸島の成因についてはG. Baur (1891)<sup>1)</sup> およびK. W. Vinton (1951)<sup>2)</sup> のCocos半島説、A. F. Banfield (1956)<sup>3)</sup> らの火山島説を唱えたものがあるが、これらの見解には海底地形や諸島の地形、地質が十分に検討されていないため、なお多くの難点があるとされている。1955年以降の音響測深技術の進歩により、主に米国などによって数

1) G. BAUR, "On the origin of the Galapagos Islands," *American Naturalist*, **24**(1891), 217-229.

2) K. W. VINTON, "Origin of life on the Galapagos Islands," *Amer. Jour. Sci.*, **249** (1951), 356-376.

3) A. F. BANFIELD et al., "Geology of Isabela Island," *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **67** (1956), 215-234.

多く行なわれた東太平洋海域での海底地形調査の結果、次第にこの海域における海底地形が明確になってきた。最近になり G. Shumway<sup>4)</sup> は多数の資料を基にして Galapagos 諸島と中南米大陸間の詳しい海底地形図をつくりあげた (Fig. 1)。Galapagos 諸島は、

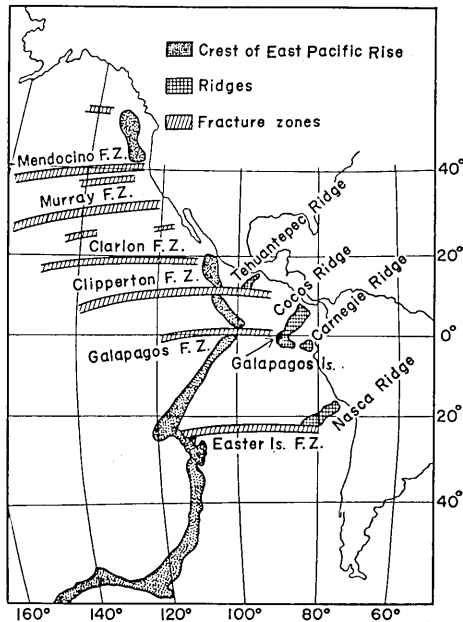


Fig. 1. Crest of East Pacific Rise and location of the East Pacific fracture zone (after G. SHUMWAY).

Galapagos fracture zone に斜交する Cocos ridge との交点に位置する、Galapagos 海台に点在する約 16 の群島から成り立っており、すべての島々は楕状火山で灰色の古い熔岩の上が、新しい熔岩によって覆われている。島の地質学的年代を推定することは困難であるが、San Cristobal 島の山腹では海産の貝殻が発見されている。この事実は比較的新しい時代に小規模な島の隆起現象のあったことを示している。また、Isabela 島の Villamil 部落附近には、第 4 紀洪積世に海岸につくられたとみられる貝殻の丘が、現在海拔 100 m の位置にあり、さらに 1954 年には Isabela 島の西海岸の一部では隆起現象のあったことが認められており、それまで海底であった地域は、現在海拔 5 m の台地となっている<sup>5)</sup>。

1535 年に Galapagos 諸島が発見されて以来、現在に至る火山活動については記録

により知ることができるが、最近の 160 年間では、Fernandina, Isabela, Pinta, San Salvador, Santa Maria および Espanola の各島々における噴火の記録があり、今回の群発地震の発生域と関係のある Fernandina 島および Isabela 島における噴火活動については、Catalogue of the active volcanoes of the world に詳しく記載されているので、ここでは省略する。

### 3. 東太平洋の地震活動

Fig. 2 は Gutenberg-Richter<sup>6)</sup> によって示されている index map の region 44 (Eastern pacific) の区域内に発生した地震を調査し、過去における地震活動の資料とする。地震の資料は、1927 年～1951 年に至る 25 年間については Gutenberg-Richter<sup>7)</sup> から、1956 年～1967 年の 12 年間は USCGS<sup>8)</sup> によった。なお、地震の規模は前者が 5.5<

4) SHUMWAY and T. E. CHASE, "Bathymetry in the Galapagos Region," *Occ. Papers Calif. Acad. Sci.*, 44(1963), 11-19.

5) S. ITO, "Galapagos Islands", *Chuōkoronsha*, (1969), 110-132, (in Japanese).

6) B. GUTENBERG and C. F. RICHTER, "Seismicity of the Earth" (1954), 12.

7) *loc. cit.*, (6), 133-234.

8) Earthquake Data Report of USCGS.

$M < 7.0$ , 後者は  $4.0 < m < 6.5$  程度の地震が含まれる。Galapagos 諸島周辺を含めた Eastern Pacific region の地震活動を知る資料としては、現在この程度のものしかない。図から、1927年～1963年(1952年～1955年は資料なし)に至る期間は、年平均4回程度に震央が決められているが、1964年～1967年では、年平均22回程度と大巾に増加している。このことは、1964年以降世界の地震観測網が整備され、検知能力の向上したことによる。但し、USCGSにおいて決められる地震のマグニチュードは  $m = 4.5$  前後が多く、 $m = 4.0$  以下になると、ほとんど震源の決定は困難となる。従って、Eastern Pacific region に発生する地震の場合には、現状の観測網で検知され、しかも、震央の決定される地震は  $m = 4.5$  前後が限界であらう。震央分布の特徴は大部分が East Pacific rise または Galapagos fracture zone に沿った地域に分布し、Galapagos 諸島に震央のある地震は、今回の調査期間では年平均0.3回という結果となり、この限りでは seismicity は、かなり低い地域であると思われるが、現に群発地震活動の発生した事実や、火山活動の活発な地域であること、また、 $m = 4.0$  以下の地震については、現在検知能力が低い点を考慮すると、単に seismicity の低い地域であるとは考え難い。この点については今後の調査が必要である。

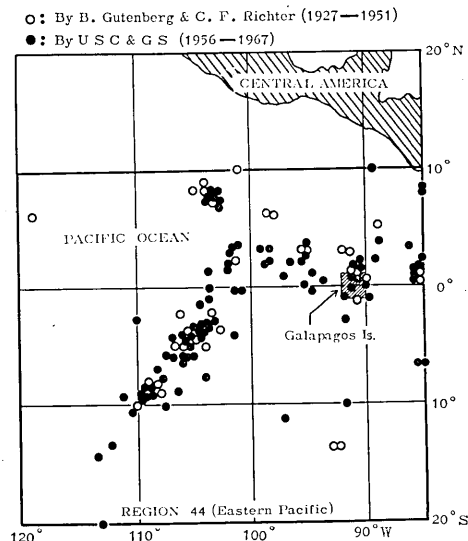


Fig. 2. Seismicity of the Eastern Pacific region.

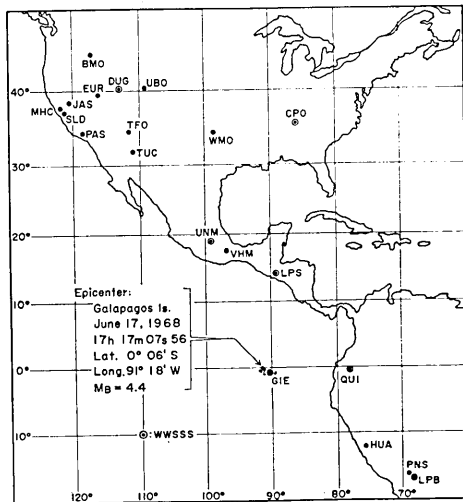


Fig. 3. An example of identification of Galapagos earthquake swarm at each station.

#### 4. 群発地震の検知能力

今回の群発地震発生域に最も近い地震観測所は、発生域から約130Kmの巨離のSanta Cruz島にあるGIE (Galapagos Is., Ecuador)で、ここは世界標準地震観測網(WWSSS)の一点である。次に近い観測所はQUI (Quito, Ecuador)で、発生域から約1400Kmの巨離にあり、その他の観測所は大部分が北米、その他にある。従って、検知能力の上からいえば、かなり小規模の地震になるとGIEのみで検知され、他の観測点では検知されないことが予

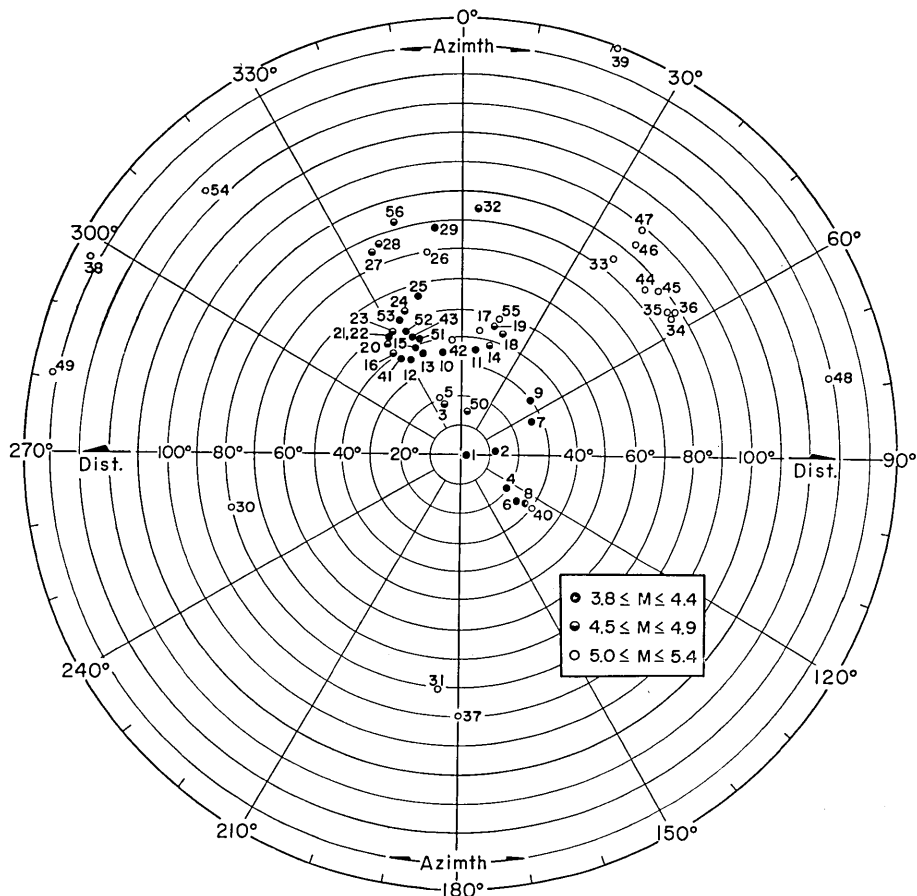


Fig. 4. Relative location of stations detected the Galapagos earthquake swarm, according to the lower limit of magnitude. The center of circle is the epicenter of each shock. The station number is given in Table 1.

想される。Fig. 3 は 6 月 17 日の地震を検知し  $iP$ , または,  $eP$  と報告している観測所の分布である。Fig. 4 は群発地震群 ( $3.8 < m < 5.4$ ) の中から, 主な地震を検知した観測所の位置を, 震央域を中心に極座標で示した。図中の番号は Table 1 のリストと対応する。図から  $3.8 < m < 4.4$  の地震は  $\Delta = 30^\circ$  以内にある観測所では大部分検知されている。特に北米の観測所では,  $\Delta = 40^\circ \sim 60^\circ$  にあるにも拘らず, よい検知能力を示した。  $4.5 < m < 4.9$  の地震では,  $\Delta = 80^\circ$  位まで検知能力がのびており, さらに,  $5.0 < m < 5.4$  の地震では,  $\Delta = 150^\circ$  付近にある観測所まで検知されていることを示しているが, その観測所の数は少ない。地震群の中で最大と思われる 6 月 15 日 04h 20h ( $m = 5.4$ ) の地震は, 広島県白木微小地震観測所において検知されているのが, 日本における唯一の報告である。現在世界全域に分布する地震観測所は約 1200 点 (1970 年 USCGS の資料による) 余りであるが, 群発地震 (例えば, 長野県松代地震および Galapagos 諸島の地震等) のような

Table 1. List of Seismograph Stations.

No.	Code	Station	Region	No.	Code	Station	Region
1	GIE	GALAPAGOS	ECUADOR*	29	MBC	MOULD BAY	SENEGAL
2	QUI	QUITO	ECUADOR*	30	AFI	AFIAMALU	SAMOA*
3	VHM	VISTA HERMOSA	MEXICO	31	BYR	BYRD	ANTARCTICA
4	UNM	UNIV. OF MEXICO	MEXICO*	32	ALE	ALERT	CANADA
5	ARE	AREQUIPA	PERU*	33	VAL	VALENTIA	IRELAND*
6	CAR	CARACAS	VENEZUELA*	34	AVE	AVERROES	MOROCCO
7	PNS	PENAS	BOLIVIA*	35	RBA	RABAT	MOROCCO
8	LPB	LA PAZ	BOLIVIA*	36	IFR	IFRANE	MOROCCO
9	SJG	SAN JUAN	PUERTORICO*	37	SPA	SOUTH POLE	ANTARCTICA
10	WMO	WICHITA MOUNTAINS	OKLAHOMA	38	BAG	BAGUIO CITY	PHILIPPINES
11	CPO	CUMBERLAND	TENNESSEE	39	NDI	NEW DELHI	INDIA
12	TUC	TUCSON	ARIZONA*	40	HUA	HUANCAYO	PERU
13	ALQ	ALBUQUERQUE	NEW MEXICO*	41	GLA	GLAMIS	SSR
14	BLA	BLACKSBURG	VIRGINIA	42	MHT	MANHATTAN	KANSAS
15	TFO	TONTO FOREST	ARIZONA	43	DUG	DUGWAY	UTAH
16	PAS	PASADENA	CALIFORNIA	44	PTO	PORTO	PORTUGAL*
17	AAM	ANN ARBOR	MICHIGAN*	45	TOL	TOLEDO	SPAIN*
18	PAL	PALISADES	NEW YORK	46	DOU	DOURBES	BELGIUM
19	ROC	ROCHESTER	NEW YORK	47	MOX	MOXA	GERMANY
20	PRI	PRIEST	CALIFORNIA	48	AAE	ADDIS ABABA	ETHIOPIA*
21	SLD	SAN LUIS DAM	CALIFORNIA	49	DAV	DAVAO	PHILIPPINES
22	JAS	JAMES TOWN	CALIFORNIA	50	LPS	LA PALMA	EL SALVADOR*
23	BKS	BYERLY	CALIFORNIA*	51	UBO	UINTA BASIN	UTAH
24	NEW	NEW TORT	WASHINGTON	52	EUR	EUREKA	NEVADA
25	EDM	EDMONTON	CANADA	53	BMO	BLUE MOUNTAINS	OREGON
26	CMC	COPPER MINE	CANADA*	54	SHK	SHIRAKI	JAPAN
27	PMR	PALMER	ALASKA*	55	OTT	OTTAWA	CANADA
28	COL	COLLEGE OUTPOST	ALASKA	56	BRW	BARROW	ALASKA

\* World-Wide Standard Seismograph Station Network.

比較的小規模のものが、2000~3000 Km も離れた観測所によって数多く検知されるようになったことは、近年観測計器、観測技術の向上によるところが多いが、何よりも、各国における地震観測に対する国際協力が大きく寄与しているからであろう。特に北米における各観測所については、一般的に検知能力が優れていることは、今回の群発地震のみならず、筆者<sup>9)</sup>らがすでに調査、指摘している一例がある。

## 5. 群発地震活動

Fig. 5 は USCGS の資料から決めた群発地震の震央分布である。地震活動の状態を知るために (A) から (F) に分けて示した。それぞれの期間について概略すると、(A) 地震活動の初期では、地震の発生回数は少ないが、比較的大きな地震が頻発し、 $5.0 < m < 5.4$  が 6 回発生した。発生域の中心は Fernandina 島と考えられる。(B) 発生域は若干拡大している傾向があり、その分布は Fernandina 島を中心に楕円型になった。(C) 前期に比較して大巾に拡大し、その傾向は (B) と同様で、 $5.0 < m < 5.1$  の地震は 4 回の発生を含めて、地震回数も最盛期を示し、周辺の海域にまで新しい分布がみられる。(D) やや減少を示しているが、周辺の海域には若干の活動がみられる。(E)~(F) は減少期である。(A)~(F) は全体をまとめた図である。この図から求められる最終的な地震発生域の大きさは、NE~SW の長軸方向が約 150 Km, NW~SE の短軸方向に約 100 Km の楕円型を示している。この発生域の大きさは、あくまでも USCGS による資料から考慮されたものであるが、震源資料の精度に関して若干の問題があると思われるので、この点についての検討は 6. で述べる。

GIE 観測所の長周期地震計 ( $T_0=15$  sec,  $T_G=100$  sec,  $MAG=750$ ) の記録から、筆者の読み取った S-P の値は、約 13~16 sec のものが最も多い。この結果から発生域の巾を知る一つの資料ともなる。次に、初動方向の読みについては、94 例中の 70% がすべて down 方向を明瞭に示しており、up 方向と思われる不明瞭なものは 4% にすぎない。初動分布の問題は、今のところ GIE 観測所の 6 月 15 日以降の記録について調査したものであり、他の観測所の記録についても調査する必要がある。また、6 月 1 日~6 月 8 日の噴火前に発生している地震群の初動分布が、どのようなものであったのか現在判明していないが、caldera の崩壊現象の事実と、GIE における down 方向の分布が多いことから、一応 single negative source が推定されるが、重要な問題でもあるので、今後の調査結果をまって再考することにしたい。Fig. 6 は GIE における群発地震の一例を示した。矢印のついている地震は、いずれも明瞭に down を示している。なお、Table 2 に USCGS によって報告された群発地震のリストを示す。

Fig. 7 は日別地震回数および日別の放出エネルギーである。この地震回数は震央の決定した地震のみであるが、実際には多数の地震があったものと思われる。詳しい回数についての情報は無いが、例えば、Smithsonian Institution<sup>10)</sup> の資料によると、6 月 10 日に

9) T. HAGIWARA and T. IWATA, "Earthquake Detection Capability of Tsukuba Seismological Station", *Zisin* 18(1965), 113-122, (in Japanese).

10) SMITHSONIAN INSTITUTION, "The 1968 Collapse of Fernandina Caldera, Galapagos Islands", (1968).

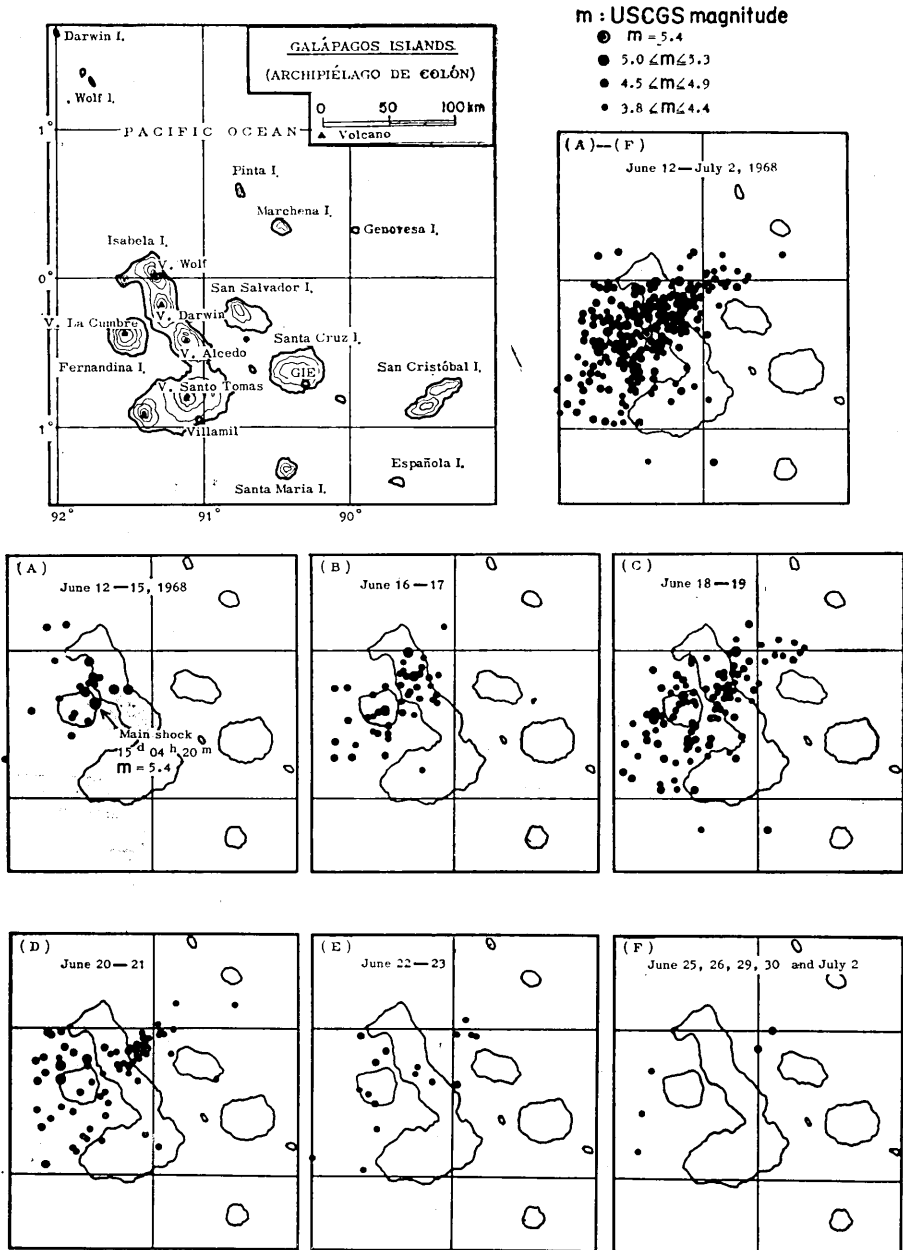


Fig. 5. Location map of the Galapagos Island and distribution of epicenters of the Galapagos earthquake swarm.

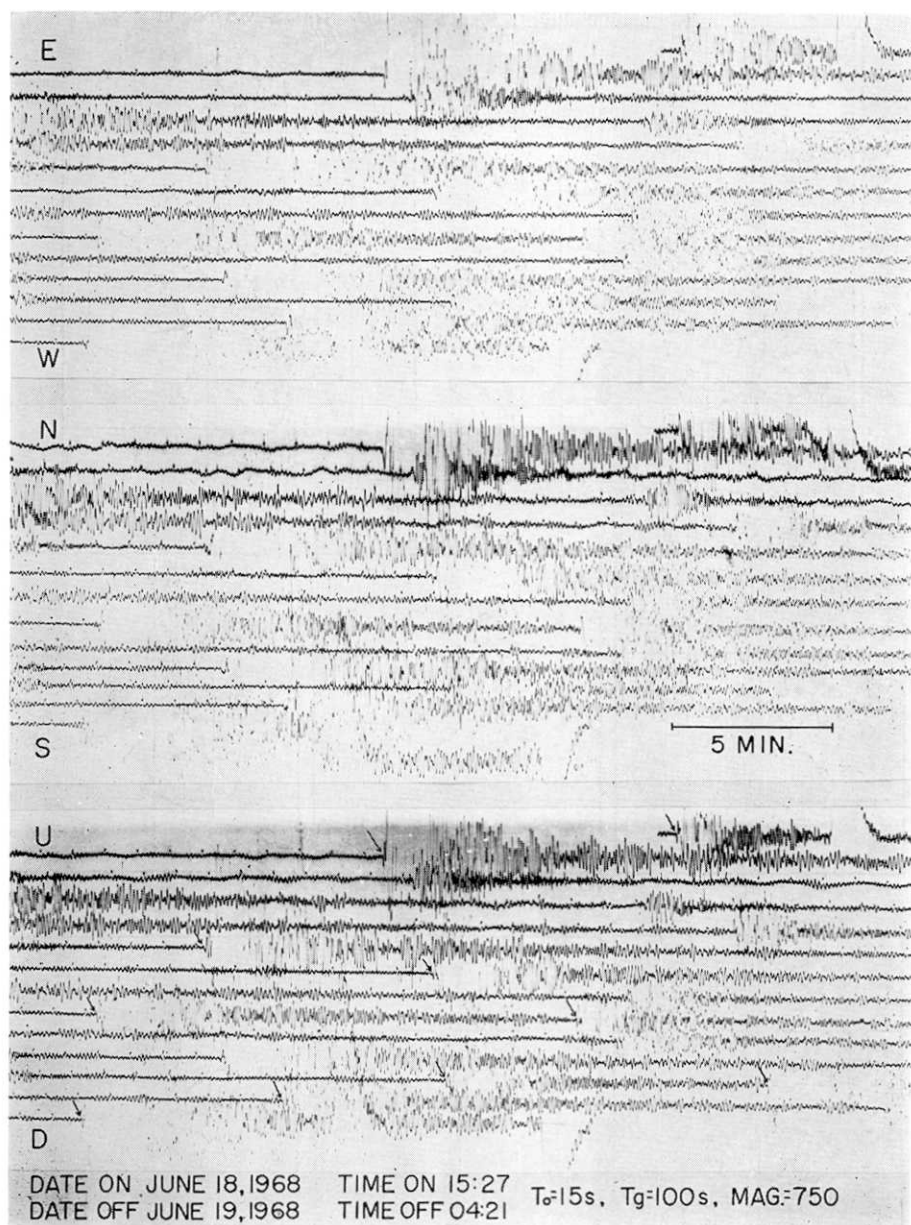


Fig. 6. An example of Long-Period type seismograms obtained at Galapagos Island, Ecuador (GIE).



Table 2. List of the Galapagos Earthquake Swarm Reported by USCGS.

Date	(G M T) Time			Location		m <sub>CGS</sub>	Depth
				Latitude	Longitude		
June 12	h	m	s				
	06	59	42.78	0.062 S	91.662W	4.2	33 km
	18	17	32.94	0.251 S	91.494W	4.7	"
	22	21	14.72	0.234 S	91.409W	4.8	"
13	04	48	15.57	0.444 S	91.531W	4.9	33
	04	56	22.19	0.575 S	91.546W	4.5	"
	07	33	50.51	0.292 S	91.456W	5.3	"
	15	44	52.69	0.486 S	91.405W	4.8	"
	21	39	10.88	0.323 S	91.628W	4.7	"
14	04	09	08.01	0.177 N	91.592W	4.6	33
	10	39	59.11	0.402 S	91.810W	4.7	"
	16	23	44.70	0.185 S	91.365W	4.9	"
	22	27	43.78	0.277 S	91.243W	5.2	"
15	01	42	37.43	0.233 S	91.414W	4.6	33
	04	20	02.63	0.384 S	91.397W	5.4	"
	08	50	43.77	0.421 S	91.515W	4.7	"
	13	14	36.69	0.287 S	91.144W	5.2	"
	16	34	49.86	0.138 N	91.718W	4.6	"
	16	56	18.04	0.742 S	92.020W	4.4	"
	17	40	17.37	0.189 S	91.398W	5.0	"
	21	25	01.35	0.073 S	91.426W	5.2	"
16	00	31	03.23	0.187 S	91.299W	5.0	30
	02	48	12.76	0.189 S	91.337W	4.7	33
	03	47	08.30	0.240 S	91.256W	4.9	"
	06	31	38.27	0.043 S	91.203W	4.2	"
	06	47	14.22	0.151 N	91.080W	4.3	"
	06	57	14.15	0.167 S	91.375W	4.2	"
	07	13	16.65	0.172 S	91.245W	4.9	"
	10	12	14.26	0.301 S	91.314W	4.6	"
	12	17	14.01	0.464 S	91.287W	4.4	"
	12	59	57.57	0.280 S	91.739W	4.7	"
	15	16	53.87	0.584 S	91.475W	4.6	"
	16	20	14.94	0.420 S	91.475W	4.7	"
	18	45	15.61	0.241 S	91.372W	4.7	"
	20	51	43.67	0.503 S	91.464W	4.8	"
22	44	35.43	0.441 S	91.573W	4.4	"	
23	10	39.15	0.622 S	91.821W	4.6	"	
17	01	07	44.74	0.442 S	91.510W	4.7	33
	02	14	48.80	0.737 S	91.827W	4.7	"
	04	28	21.98	0.249 S	91.493W	4.5	"
	05	26	36.05	0.117 S	91.221W	4.6	"
	06	06	44.60	0.135 S	91.358W	4.2	"
	06	45	38.18	0.295 S	91.311W	4.6	"
	08	09	00.67	0.575 S	91.546W	4.8	"
	08	51	13.69	0.070 S	91.311W	5.0	"
	10	34	12.98	0.595 S	91.486W	4.8	"
	12	30	29.12	0.309 S	91.120W	4.6	"
	13	49	39.80	0.482 S	91.747W	4.7	"
	14	16	38.65	0.461 S	91.601W	4.7	"
	14	30	50.45	0.245 S	91.162W	4.3	"
	14	54	40.75	0.341 S	91.246W	4.9	"
16	35	29.11	0.362 S	91.378W	4.5	27	

(to be continued)

Table 2.

(continued)

Date	(G M T) Time			Location		mCGS	Depth
				Latitude	Longitude		
June 17	h	m	s				
	16	56	16.62	0.318 S	91.576W	4.6	33 km
	17	17	07.56	0.082 S	91.344W	4.4	"
	17	36	59.81	0.421 S	91.500W	5.1	"
	18	59	39.21	0.365 S	91.124W	4.5	"
	19	23	35.76	0.711 S	91.490W	4.6	"
	19	51	13.71	0.278 S	91.827W	4.8	"
	21	08	03.55	0.186 S	91.175W	4.5	"
	21	16	45.26	0.737 S	91.713W	4.6	"
	21	37	22.52	0.807 S	91.216W	4.4	"
	22	05	41.55	0.354 S	91.138W	4.6	"
	23	07	04.84	0.638 S	91.697W	4.4	"
	23	32	47.23	0.565 S	91.567W	4.4	"
	23	43	23.24	0.177 S	91.104W	4.1	"
18	00	08	46.44	0.247 S	91.222W	4.8	33
	01	10	14.47	0.767 S	91.482W	4.3	11
	01	36	51.57	0.299 S	91.440W	4.7	33
	01	55	17.34	0.069 N	91.162W	4.4	"
	02	22	45.52	0.208 S	91.520W	4.7	"
	03	24	55.46	0.630 S	91.468W	4.2	"
	03	53	00.30	0.505 S	91.449W	4.6	"
	04	42	20.07	1.201 S	91.394W	4.3	"
	05	04	37.7	0.3 S	91.2 W	4.5	"
	05	27	07.91	0.591 S	91.121W	4.5	"
	06	25	59.18	0.956 S	91.445W	4.6	"
	06	59	31.56	0.816 S	91.693W	4.5	"
	07	12	59.12	0.421 S	91.754W	4.8	"
	08	05	07.2	0.3 S	91.6 W	4.3	"
	08	31	15.8	0.5 S	91.5 W	4.2	"
	08	56	10.29	0.161 S	91.292W	4.7	"
	09	36	05.5	0.7 S	91.2 W	4.4	20
	09	59	05.44	0.300 S	91.294W	4.2	33
	10	04	50.09	0.263 S	91.501W	4.4	"
	10	30	14.14	0.416 S	91.693W	4.7	"
	11	34	31.49	0.624 S	91.465W	4.3	"
	11	53	29.42	0.382 S	91.436W	4.4	"
	12	08	01.22	0.409 S	91.282W	4.4	"
	12	08	02.67	0.215 S	91.171W	4.4	"
	12	27	35.48	0.525 S	91.443W	4.7	"
	13	07	42.18	0.747 S	91.163W	4.5	"
	13	33	13.55	0.617 S	91.333W	4.5	"
	13	51	24.78	0.298 S	91.686W	4.7	"
	14	06	16.82	0.382 S	91.443W	4.8	18
	14	42	32.71	0.314 S	91.514W	5.0	33
	15	26	36.19	0.289 S	91.187W	4.4	"
15	43	29.89	0.606 S	91.795W	4.5	"	
16	17	17.63	0.288 S	91.222W	4.9	"	
16	53	47.96	0.962 S	91.570W	4.4	"	
17	36	17.79	0.170 N	91.061W	4.8	18	
18	02	44.54	0.393 S	91.508W	4.8	33	
18	24	49.48	0.199 S	91.091W	4.3	"	
18	44	08.28	0.048 S	90.888W	4.4	"	
18	57	58.59	0.481 S	91.308W	4.9	"	
19	27	29.72	0.186 S	91.558W	4.6	"	
20	03	15.38	0.424 S	91.244W	4.4	"	
20	11	00.09	0.337 S	91.307W	4.7	"	
21	17	50.07	0.276 S	91.291W	4.6	"	
21	48	48.22	0.436 S	91.718W	5.0	"	

(to be continued)

Table 2.

(continued)

Date	(G M T) Time			Location		m <sub>CGS</sub>	Depth
				Latitude	Longitude		
June 18	h	m	s				
	22	23	35.75	0.346 S	91.149W	4.4	33 km
	22	41	06.36	0.364 S	91.027W	4.4	"
	23	07	01.81	0.602 S	91.463W	4.5	20
	23	21	51.24	0.541 S	91.711W	4.4	33
	23	37	29.63	0.615 S	91.487W	4.5	"
19	00	22	53.58	0.703 S	91.840W	4.4	33
	00	39	53.49	0.829 S	91.947W	4.6	"
	00	50	28.89	0.935 S	91.699W	4.2	"
	01	10	27.61	0.482 S	91.163W	4.8	"
	02	17	14.97	0.069 S	90.749W	4.6	"
	02	27	14.40	0.165 S	91.187W	4.7	"
	03	12	02.06	0.086 S	91.067W	4.6	"
	03	30	41.39	0.051 S	91.466W	4.5	"
	03	41	45.65	0.349 S	91.200W	4.5	"
	04	05	40.06	0.178 S	91.242W	4.7	"
	04	38	37.72	0.032 S	90.819W	4.2	"
	05	20	37.01	0.653 S	91.922W	4.5	"
	05	08	11.52	0.289 S	91.034W	4.7	"
	05	28	58.45	0.497 S	91.302W	4.3	"
	05	47	42.71	0.451 S	91.721W	5.1	"
	06	15	26.70	0.282 S	91.378W	4.5	"
	06	46	08.01	0.170 S	91.277W	4.7	"
	06	58	03.46	0.396 S	91.501W	4.4	"
	07	30	26.83	0.504 S	91.670W	4.9	"
	08	11	50.08	0.073 S	91.460W	4.7	"
	09	58	19.32	0.268 S	91.220W	4.4	"
	10	17	54.90	0.056 S	90.851W	4.3	"
	10	26	58.47	0.480 S	91.337W	4.5	"
	10	47	12.55	0.587 S	91.764W	4.6	"
	11	26	24.88	0.725 S	91.353W	4.2	"
	11	48	21.94	0.416 S	91.583W	4.3	"
	12	01	36.24	0.637 S	91.479W	4.2	"
	12	17	15.93	0.032 S	91.366W	4.4	"
	12	36	45.73	0.472 S	91.598W	4.6	"
	13	10	11.12	0.255 S	91.586W	4.2	"
	13	27	47.67	0.885 S	91.580W	4.2	"
	13	44	31.23	0.894 S	91.888W	4.6	"
13	56	13.09	0.780 S	91.568W	4.4	"	
14	22	51.03	0.008 S	90.702W	4.4	"	
14	34	55.31	0.042 N	90.753W	4.3	"	
15	05	47.09	0.002 S	91.150W	5.1	"	
15	35	17.89	0.412 S	91.309W	4.3	"	
15	48	49.25	0.239 S	91.009W	4.3	"	
16	17	03.01	0.347 S	91.233W	4.8	"	
16	28	05.96	0.684 S	91.426W	4.4	"	
16	47	41.71	0.147 S	91.737W	4.7	"	
17	23	47.27	0.640 S	91.342W	4.8	"	
17	56	45.65	0.114 S	91.199W	4.5	"	
18	18	09.37	0.016 N	90.699W	4.4	"	
18	50	09.43	0.667 S	91.702W	4.6	"	
19	07	13.58	1.201 S	90.931W	4.5	"	
19	19	29.74	0.386 S	91.523W	4.8	"	
19	51	17.69	0.011 S	91.183W	4.4	"	
20	16	24.33	0.151 S	91.117W	4.5	"	
20	39	03.93	0.565 S	91.452W	4.6	"	
21	16	34.70	0.738 S	91.649W	4.5	"	
22	01	06.92	0.083 S	90.957W	4.4	"	

(to be continued)

Table 2.

(continued)

Date	(G M T) Time			Location		$m_{CGS}$	Depth
				Latitude	Longitude		
June 19	h	m	s				
	22	11	20.21	0.402 S	91.293W	4.9	33 km
	22	21	16.99	0.663 S	91.495W	4.4	"
	22	40	12.51	0.019N	90.973W	4.3	"
	22	55	51.37	0.510 S	91.860W	4.3	"
	23	31	55.26	0.174 S	91.149W	4.9	"
20	00	08	45.65	0.326 S	91.359W	4.3	33
	00	37	22.15	0.118 S	91.171W	4.6	"
	00	42	40.02	0.738 S	91.500W	4.3	"
	01	01	41.98	0.371 S	91.438W	4.3	"
	01	11	08.88	0.702 S	91.061W	4.4	"
	01	32	43.93	0.484 S	91.508W	4.8	"
	01	48	46.42	0.458 S	91.362W	4.1	"
	02	12	32.28	0.188 S	91.099W	4.5	"
	02	23	30.28	0.377 S	91.111W	4.3	"
	02	59	59.84	0.282 S	91.192W	4.8	"
	03	14	52.53	0.560 S	91.802W	4.4	"
	04	21	35.41	0.470 S	91.366W	4.2	"
	04	55	24.61	0.293 S	91.657W	5.0	"
	05	21	05.93	0.027 S	90.926W	4.4	"
	05	38	20.56	0.020 S	91.080W	4.2	"
	05	48	26.88	0.267 S	91.237W	4.2	20
	06	21	52.94	0.135 S	91.346W	4.6	33
	06	25	58.71	0.178 S	91.288W	4.3	"
	06	39	15.13	0.160 S	91.159W	4.3	"
	06	48	38.47	0.070 S	91.003W	4.2	27
	07	04	27.50	0.177 S	91.101W	4.5	33
	07	14	53.68	0.256 S	91.465W	4.8	"
	07	28	02.14	0.186 S	90.891W	4.3	"
	09	11	30.34	0.310 S	91.752W	4.7	"
	09	41	32.55	0.810 S	90.985W	4.2	"
	10	13	07.22	0.773 S	91.379W	4.4	"
	10	40	00.83	0.935 S	91.769W	4.5	"
	11	08	36.92	0.029 S	91.727W	4.8	"
	11	46	13.97	0.243 S	91.132W	4.2	"
	12	14	26.10	0.022 S	91.632W	4.7	"
	13	20	20.80	0.594 S	91.324W	4.2	"
	13	50	23.57	0.688 S	91.793W	4.5	"
14	12	33.07	0.329 S	91.183W	4.4	"	
14	32	44.25	0.148N	90.446W	4.2	"	
15	04	18.39	0.216 S	91.668W	4.4	"	
15	16	08.63	0.815 S	91.566W	4.3	"	
16	09	07.32	0.355 S	91.633W	5.1	"	
17	16	34.79	0.186 S	91.055W	4.4	"	
20	36	11.70	0.180 S	91.578W	4.9	"	
20	58	05.68	0.029 S	90.877W	4.4	"	
22	04	43.41	0.176 S	91.061W	4.3	"	
22	14	55.12	0.297 S	91.240W	4.3	"	
23	25	28.20	0.057 S	91.707W	4.6	"	
21	01	19	36.93	0.751 S	91.471W	4.2	33
	02	31	49.69	0.169 S	91.116W	4.6	"
	02	31	51.01	0.231 S	91.822W	4.6	"
	03	52	08.53	0.157 S	91.063W	4.6	"
	04	09	20.27	0.109 S	91.048W	4.1	"
	04	29	17.27	0.501 S	91.313W	4.4	"
	04	46	51.51	0.049 S	90.942W	4.3	"

(to be continued)

Table 2.

(continued)

Date	(G M T) Time			Location		$m_{CGS}$	Depth	
				Latitude	Longitude			
June 21	h	m	s					
	05	15	09.41	0.162 S	91.112W	4.1	33 km	
	05	47	22.77	0.375 S	91.802W	4.7	"	
	08	01	01.72	0.547 S	91.642W	4.4	"	
	08	15	35.84	0.252 S	91.215W	4.1	"	
	09	08	40.17	0.196 S	91.114W	3.8	"	
	09	32	30.77	0.206 S	91.771W	4.7	"	
	09	52	47.94	0.161 N	90.849W	4.3	"	
	10	38	08.61	0.058 S	90.978W	4.4	"	
	11	04	38.21	0.139 S	91.616W	4.8	"	
	12	16	39.61	0.570 S	91.554W	4.3	"	
	16	53	59.08	0.071 S	91.086W	4.6	"	
	18	40	34.47	0.196 S	91.319W	4.2	"	
	20	13	21.52	0.022 N	90.980W	4.1	"	
	20	51	08.63	0.226 N	91.469W	5.0	"	
	22	15	33.19	0.610 S	91.718W	4.2	"	
	23	01	00.61	0.843 S	91.546W	4.1	"	
	23	44	14.16	0.698 S	91.466W	4.3	"	
	22	00	22	02.57	0.052 S	91.626W	4.6	33
		00	47	08.64	0.284 S	91.242W	4.3	"
		02	18	26.50	0.023 S	90.886W	4.3	"
03		32	54.96	0.422 S	91.643W	4.2	"	
06		04	37.10	0.880 S	91.973W	4.4	"	
06		44	57.12	0.440 S	91.585W	4.4	"	
07		28	59.86	0.507 S	91.526W	4.5	"	
09		46	50.17	0.149 S	91.455W	4.9	"	
12		06	41.05	0.376 S	91.146W	4.3	"	
14		13	17.20	0.246 S	91.201W	4.2	"	
16		09	27.32	0.379 S	90.976W	4.5	"	
23		10	51.90	0.060 N	90.905W	4.2	"	
23		00	59	25.55	0.042 S	90.848W	4.3	33
	03	43	25.44	0.232 S	91.528W	4.8	"	
	04	49	14.19	0.023 S	90.988W	4.3	"	
	13	58	40.43	0.686 S	91.519W	4.3	"	
	20	02	51.82	0.968 S	91.612W	4.4	"	
25	01	19	08	0.0 S	90.9 W	4.7	33	
26	14	06	54.29	0.125 S	91.001W	4.5	33	
29	01	51	28.27	0.284 S	91.734W	4.3	33	
30	07	42	00.00	0.820 S	91.844W	4.3	33	
July 2	20	31	04.38	0.569 S	91.806W	4.3	33	
	29	11	49 00	1.7 S	90.3 W	4.3	33	

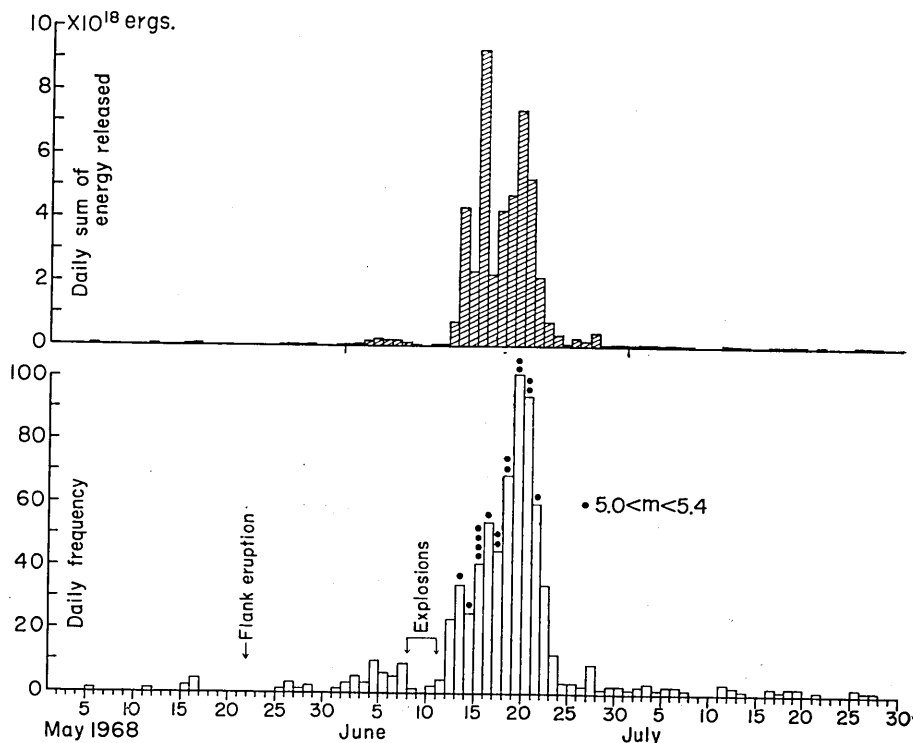


Fig. 7. Daily sum of energy released (above) and daily frequency of earthquakes (below) during the Galapagos earthquake swarm.

は3回/日の有感地震と6回/日の無感地震があり、6月18日～19日では200回/日以上  
の地震がGIEにおいて観測されたということである。また、Darwinの火山観測パー  
ティは、6時間ごとに56回の地震をカウントしたと述べている。地震による日別放出エネ  
ルギーについては、6月15日の $9.6 \times 10^{18}$  エルグが一日当りの最高を示した。これは $5.0 < m < 5.4$   
の地震が4回発生したことによる。その後、6月17日から再び上昇し、19日には  
 $7.0 \times 10^{18}$  エルグを放出し、21日以降は急激な減少を示した。Fig. 8は放出エネルギーを  
積算したもので、最終的には $4.7 \times 10^{19}$  エルグの量を放出したことになる。この値はTom  
Simkin & K. A. Howard<sup>11)</sup>の求めた $5 \times 10^{19}$  エルグと一致する。なお、USCGSのマ  
グニチュード $m$ から地震の放出エネルギーの計算には、 $\log E = 11.8 + 1.5M$  および  $M =$   
 $1.59m - 3.97$ の式<sup>12)</sup>によった。

Fig. 9は群発地震の規模別度数分布から $b$ の値を推定すると1.28となった。この値  
は宮村撰三<sup>13)</sup>による、東太平洋地域における海洋中の海嶺、海溝および裂線に沿う地帯で

11) T. SIMKIN and K. A. HOWARD, "The 1968 Collapse of Fernandina Caldera, Galapagos Islands," Abstract of the Symposium on Roots of Volcanoes, International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior, (1969).

12) C. F. RICHTER, "Elementary Seismology", (1958), 348 and 366.

13) S. MIYAMURA, "Seismicity and Geotectonics", *Zisin* 15(1962), 23-52, (in Japanese).

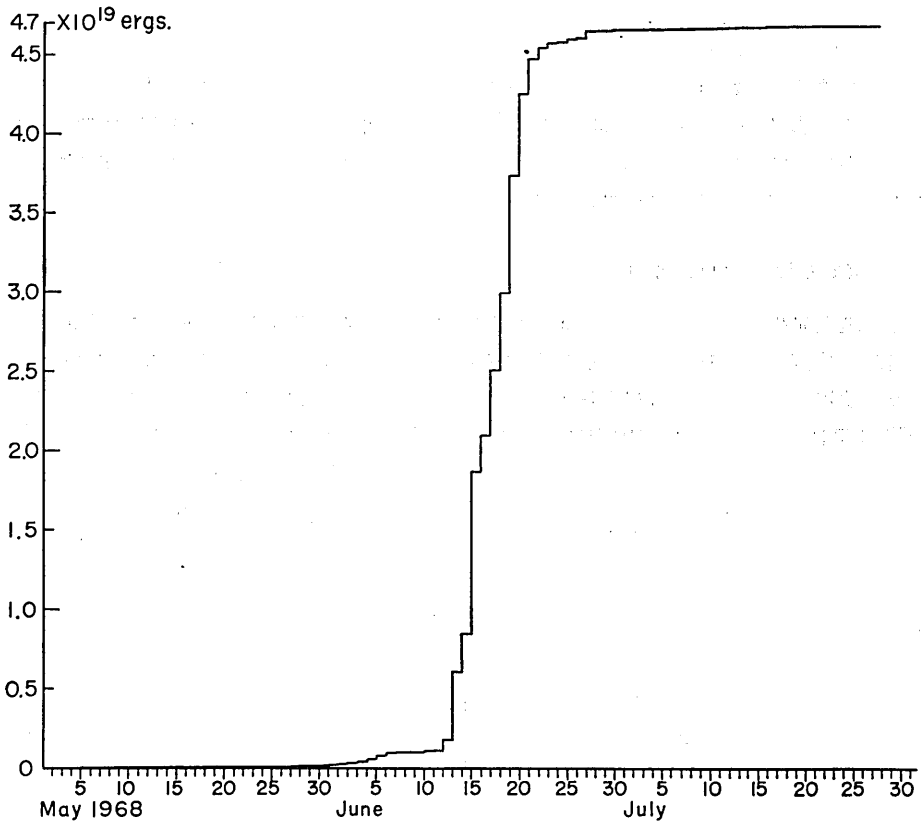


Fig. 8. Cumulative sum of energy released during the Galapagos earthquake swarm.

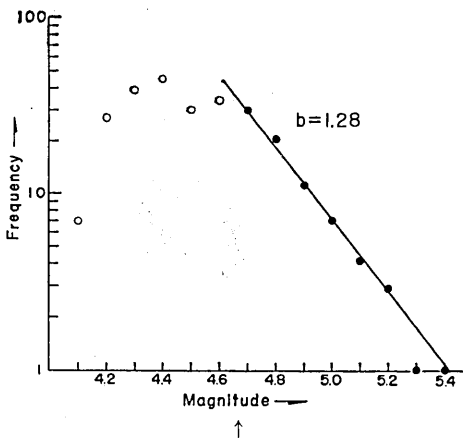


Fig. 9. Frequency distribution of the magnitudes observed during the Galapagos earthquake swarm.

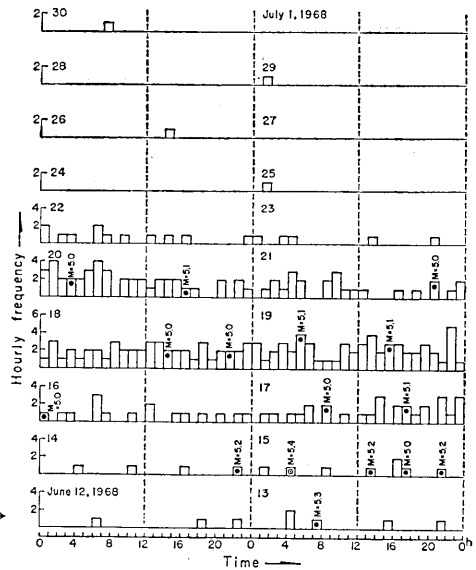


Fig. 10. Hourly frequency of earthquakes reported by USCGS for the Galapagos earthquake swarm.

は  $b$  の値は大きく 1.8~1.0 ということであり、Galapagos 諸島の群発地震の場合にもよく一致する。Fig. 10 は地震発生の時系列を示した。このような不規則な発生は群発型といえる。茂木清夫<sup>14)</sup>による岩石破壊の実験から類推すると、Galapagos 諸島の地質は極めて不均一性の構造か、あるいは破碎状態にあると考えられる。このような地域で応力集中の著しい場合には、群発型の地震が発生しやすい。

## 6. USCGS 地震資料の検討

1) 地震発生域について——USCGS の資料は、大部分が地震発生域から 3000 Km 以上離れた観測所の資料によって震央が決められている。しかも、北米にある観測所の資料が多く使用されており、資料の精度の点について若干の問題があるのではないかと。そこで、1967 年度に起っている松代地震群から主な有感地震を数十個選らび、USCGS, JMA および ERI (震研観測班) による 3 者の資料から、地震発生域の相異を比較したのが Fig. 11 である。なお、参考に 1966 年度は USCGS のみ示してある。この場合には日本の資料が使用されていないために、かなりの相異がみられ、一部の震央は新潟県にも分布した。1967 年度になると日本の資料が若干使用されているために、比較的よい分布を示しているが、未だかなりばらついているとみられる。一方、JMA および ERI の資料では、ほぼ一致を示した。ERI による観測網は発生域を取り囲む地域に約 10 点を設置しており、3 者の中では最も発生域の近傍であり、精度の点からは信頼性

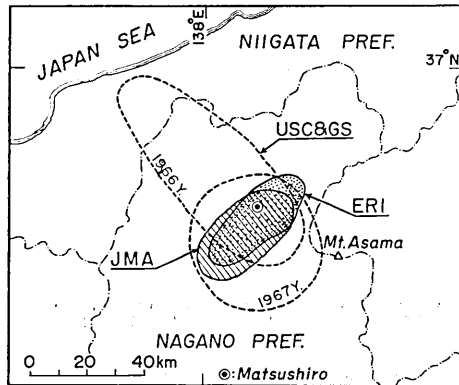


Fig. 11. Comparison of the seismic active area of the Matsushiro swarm, as determined by USCGS, JMA and ERI.

も高い。一般的に遠い観測点の資料を用いた場合には、精度に誤差の含まれる割合が大きいは経験的にも周知の事実であり。このような資料から決められる震央分布、特に群発地震の場合については、発生域の拡がりが大きくなる傾向がある。以上による比較の方法が、今回の群発地震の発生域に一応適用されるとして考察すると、USCGS による資料から得られた、先の地震発生域の大きさは、長軸および短軸ともに 1/3 程度縮小して考えられよう。

2) 震源の深さについて——260 個の地震の 97% が normal depth ( $d=33$  Km), 3% が  $d=11\sim 27$  Km と報告されている。USCGS では Jeffreys-Bullen (1940) の P 波, Bolt (1968) の PKP 波の値を標準走時とし、表層の構造は全世界の地域を一樣な model として震央を決定している。Galapagos 諸島のような極めて小地域に、このような model を適用することには問題があろう。そこで、GIE 観測所における travel time residual

14) K. MOGI, "The Fracture of a Semi-infinite Body Caused by an Inner Stress Origin", *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 41(1963), 595-614.



(O-C) の頻度分布を調査したところ, Fig. 12 に示すように, -(minus) 側に 72% の分布を示した. このことから, Jeffreys-Bullen による P 波の標準走時より, GIE における P 波の travel time は一般的に速いことを表わしている. 従って, 表層の model を浅く考慮しないと適合しないことになり, 深さの決定方法および地域的な地殻構造の差異による点を考慮して, 震源の深さは大部分が USCGS の資料によって示されている  $d=33\text{ Km}$  よりも, 浅いと考えられる.

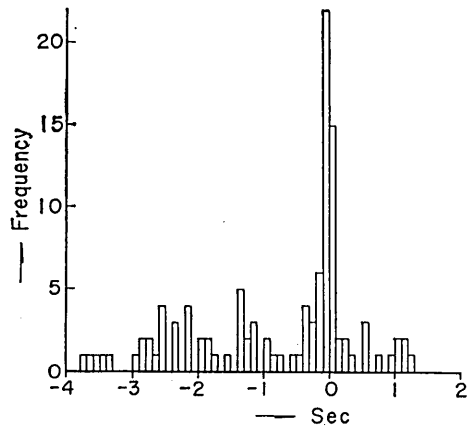


Fig. 12. Frequency distribution of the travel time residual (O-C) at the GIE-station.

3) その他 USCGS の地震資料について, 主な項目の統計結果を記しておく.

震央決定に用いられた観測所数:

最多 47 点, 最小 6 点, 平均 16 点

Standard deviation:

最大 1.9 sec, 最小 0.3 sec, 平均 1.1 sec

マグニチュード決定に用いられた観測所数:

最多 15 点, 最小 3 点, 平均 7 点

## 7. 総 括

1) 群発地震の発生域 (長軸 150 Km, 短軸 100 Km の楕円型) は, 1/3 程度に縮小して考えられる.

2) 震源の深さは全般的に 33 Km より浅い.

3) 地震による全放出エネルギーは,  $4.7 \times 10^{19}$  エルグとなり, 一般の火山爆発のエネルギーと同程度とみられる.

4) 火山活動と地震活動との関係については明らかではないが, GIE における押し, 引き分布が大部分 down を示している点は, cardela の崩壊と関連して single negative source が推定される.

## 謝 辞

本報告をまとめるにあたり, 御指導をいただいた宮村教授, 参考資料の提供および火山学的な立場から多くの御教示いただいた下鶴教授の両氏に対し, 心から感謝の意を表します. また, 堂平微小地震観測所林幸子氏, 東大大学院生阿部勝征氏, 同石田瑞穂氏, 以上の方々にも多大の御助力を受けた. 厚くお礼を申し上げる次第である.

49. *On the Earthquake Swarm in the Galapagos Islands Region in June and July, 1968.*

By Takayuki IWATA,  
Earthquake Reserch Institute.

In the time from June to July 1968 there occurred a swarm of relatively small earthquakes in the Galapagos Island of the Eastern Pacific region. The total number of the events, as reported in the Earthquake Data Report of the U.S. Coast and Geodetic Survey was 260. The Galapagos Islands are one of the volcanically most active regions in the world. For example, there are found: Volcano La Cumbre in Fernandina Island and Volcano Wolf, Volcano Darwin and Volcano Alcedo in Isabela Island in Galapagos Islands. An eruption phenomenon was reported just before the present earthquake activity at Fernandina Island, by the Center for Short Lived Phenomena of the Smithsonian Institution. The activity continued from 15<sup>h</sup>00<sup>m</sup> to 23<sup>h</sup>00<sup>m</sup> (U.T.) on May 21, on a small-scale. But there was an intensive eruption at 10<sup>h</sup>18<sup>m</sup> on June 18. The main visible result of the activity was the collapse of the caldera floor, the southeast part of which dropped 300m. The volume of collapse was 1~2km<sup>3</sup>. The activity area of the earthquakes swarm includes the region of Fernandina Island and Isabela Island. The total number of the larger earthquakes of the swarm with magnitude 5.0 or more, which occurred through the whole period, amounted to 16. We report the results of an investigation, using the data published by the USCGS as well as the seismograms of long-period type obtained at the Galapagos Seismological Station of WWSSS, and discuss in this paper.

(1) The distribution of epicenters which was obtained from USCGS data is shown in Fig. 5. The activity area forms an elliptical region with a major axis about 150 km long lying in the direction from northeast to southwest and with a minor axis about 100 km long lying in the direction from northwest to southeast. However, the accuracy of the location is not necessarily satisfactory in this area. For example, for the felt earthquakes of the Matsushiro earthquakes swarm in 1967 the locations as published by USCGS, JMA and ERI are compared, as shown in Fig. 11, in order to examine the accuracy of epicenter location by distant stations, such as employed by USCGS. As a general tendency, we know that for the network the accuracy of epicenter determinations becomes worse and consequently the area of epicenters is overestimated. Therefore, the activity area determined from USCGS data in Fig. 5, although we cannot definitely conclude by this, can be reduced very probably by one-third both in major axis and the minor axis of the activity area.

(2) Among the 260 reported earthquakes 97% are reported as having normal depths (33 km) and only 3% are given as very shallow, i.e., 11~27 km. However, it is noticeable that the O-C residuals for P arrival times at the Galapagos Seismological Station for 72% of the 260 earthquakes are negative. This suggests that the depths of hypocenters would in most cases be shallower than 33 km.

(3) As the most of initial motion at the Galapagos Seismological Station were shown the downward movement, the source mechanism of these shocks was estimated the single negative source concerning with the collapse of the caldera floor on June 11. However, the investigation was used the data from June 16 to 25 in 1968.

- (4) The cumulative sum of the energy released by the Galapagos earthquake swarm reached  $4.7 \times 10^{19}$  ergs which seems to be comparable with that of the energy released by an ordinary volcanic eruption. In the energy computation we used the formulae  $M=1.59m-3.97$  and  $\log E=11.8+1.5M$ .
- (5) The magnitude-frequency relation for this swarm is shown in Fig. 9, and coincides with the result already confirmed by Dr. S. Miyamura for the seismicity of the oceanic ridge, fracture zone and island arc.
-