1964年3月28日 アラスカ地震余震観測概報

東京大学地震研究所 堀 実・松本英照・安芸敬一
(昭和 41 年 6 月 28 日受理)

Observation of Micro-aftershocks of the Alaska Earthquake of March 28, 1964

Minoru HORI, Hideteru MATUMOTO and Keiichi AKI
Earthquake Research Institute, The University of Tokyo
(Received June 28, 1966)

After the Alaska Earthquake of March 28, 1964, we set up a temporary array station near Lawing, Kenai Peninsula, Alaska, about 125 km south-west of the epicenter of main shock. The observation was carried out from May 19 to June 7, 1964.

Using the tripartite method, we determined the epicenters and focal depths for 797 shocks in the 20 days.

This paper described briefly the method and result obtained by the observation. A complete list of epicenters, and detailed discussions on the result will be published in a publication of the U. S. Coast and Geodetic Survey.

§1. はしがき

現地時間1964年3月27日午後5時36分頃(日本時間28日12時36分)北米合衆国アラスカ州南部に有感半径約 500 km におよぶ大地震が発生した。この地域は環太平洋地震帯の一環をなし 1899 年以来現在まで $M=8$ 以上のもの実に 5 を数え、全アラスカでは世界の地震のエネルギーの 4% を放出しているといわれる。またアラスカ南部は過去において造山運動がかなり活発におこなわれ、Alaska Range, Aleution Range, Chugach Mountains の 3 山脈が連互し、地質的にもこれらの山脈はほぼ平行する 2 つの地向斜帯と 3 つの地背斜帯からなり、これらの構造線が大きくここで彎曲している。この構造線の曲率のもつとも大きい Prince William Sound の北岸近くにこの度の大地震がおこつたと河角 (1964) は述べている。この地震によりアラスカ第 1 の都市 Anchorage は大被害をうけ、同時に津浪による各地の被害もかなり大きかつた。

U. S. C. G. S. から発表されたところによると発震時は 1964 年 3 月 28 日 03 時 36 分 12.7 秒

昭和 39 年 10 月 9 日地震学会で発表

(G. M. T.), 震央位置は北緯 61.05° , 西経 147.6° , 震源の深さ約 20 km, $M = 8.5$ である.

この地震の余震観測は, 世界の常時観測点の他 U. S. C. G. S. らによる臨時観測も行なわれたが, 特に微小地震の観測第 1 陣は Columbia 大学 Lamont Geological Observatory の松本利松らにより地震発生後 17 日へた 4 月 13 日から本震々央より南西約 125 km はなれた Lawing に約 10 日間辺長約 250 m の 3 点観測による余震観測が実施された. それに引き続き日米科学協力計画の 1 つとして, Alaska 大学と東京大学地震研究所合同による観測班を編成することになり, 日本側は 5 月 9 日, われわれがさきに開発した磁気テープによる多成分観測装置総重量約 1.5 屯を現地空輸し, さきに松本利松らのおこなった同一地点附近に観測点を設置し, 約 1 カ月にわたる余震観測を実施した. 本論文ではその概要について報告する. なお詳細なる報告 (安芸外 (in press)) については U. S. C. G. S. のアラスカ地震特別刊行物に発表される. Alaska 大学は諸種の事情により一部器材の提供をするにとどまり実質的な参加はしなかった. Columbia 大学の松本利松らはわれわれの観測終了後さらに第 2 回余震観測をわれわれが設営した辺長約 1 km の 4 観測点を利用し約 2 週間観測をおこなった.

§ 2. 観測点

観測場所の決定は波動相関法観測においては特に重要視されなければならない. その点についてはさきに宮村他 (1961) の“北美濃余震観測報告”にくわしく述べている. 今回のような余震域の広大な場合観測点を余震域外に設置することは, われわれの方法による震源決定能力から

Fig. 1. Felt area of the Alaska earthquake of March 28, 1964.

Fig. 2. Map of the array station at Lawing, Alaska.

○: Stations.

V: Vertical Seismograph.

H: Horizontal Seismograph.

みて十分な成果を期し難いので、観測点は、C. G. S. の速報によつて知られた余震域にできるだけ近く、かつ雑音の小さそうな所が望まれた。松本らの選んだ所、Alaska 鉄道起点の Seward から北約 40 km, Kenai 湖畔の Lawing はこの条件をよく満していたので、1 民家の Cabin を借受けここを観測室として利用することにした。次に地震計を設置する各観測点の関係位置は Fig. 2 に示す。(No. 4 の位置は北緯 $60^{\circ}24'15''$ 、西経 $149^{\circ}21'26''$) 辺長各約 1 km の No. 1~4 の 4 点をえらび、新鮮な岩盤をほり出しコンクリートをうち地震計台をつくつた。各地震計台は大体同一水平面上に位置するように地点を選んだ。基礎岩盤は各点とも、このあたりに一様に広く分布している中世代の greywacke で、かなりかたいものである。観測点の相互位置は測量により ± 5 m 程度の精度でもとめた。

§ 3. 観測装置の概要

観測装置はすでに数回にわたりその系統図、綜合特性、換振器、データ処理方式などについてくわしく報告されたもの(宮村外 (1961, 1962, 1963); 安芸 (1961, 1962))を使用した。今回の観測については特に次の点に考慮をはらい観測に万全を期した。

1. 地震計 (換振器) は、No. 1~3 の各観測点には上下動 1 台ずつ、No. 4 には上下動の外水平動 2 成分を併置し、地震計の固有周期は上下水平動とも 1 秒、 $h = 2$ とした。
2. 遅延トリガー記録に用いる無終端磁気テープのながさは録音再生間の遅延時間が約 30 秒になるようにえらび、トリガー装置は 1 日の解析可能な地震数を一応 50~55 個と考え引き

Fig. 3. Magnification curve of the seismograph system used at Lawing, during May-June 1964.

がね装置感度レベルをそれに合せ、テープのとりかえは1日3回とした。

3. モニター記録は No. 4 の上下動1成分を大型円筒記録器 A, B 2 台にインクがき検流計により連続記録し、記録紙送り速度は 4 mm/sec, 行送りは 2 mm で1日2回とりかえをおこなった。A の記録器には最高倍率 160 万倍のものを、B の記録器にはその 1/10 の倍率のものを記録した。Fig. 3 はその倍率特性を示す。

A の記録は余震の消長の監視用に、B のものは A 記録上の地震記録のうち検流計のふれが飽和した場合に使われる。

4. 刻時は水晶時計からみちびかれた秒分時が磁気テープ、モニター記録にいれられ、時計の補正は J. J. Y. または W. W. V. により行なつた。

§ 4. 観測実施

観測点設営は5月12日現地に到着と同時に空輸された28個の観測器材の開梱にはじまり、翌13日からまず観測点 No. 1~4 の選定、それに引続き地震計台の仮設工事、ケーブル敷設作業、測量、観測装置の展開調整など、その完成までに約1週間を要した。本震後約50日を

Fig. 4. An example of the record of micro-aftershock. The traces are reproduced from magnetic tape at the paper speed of 160 mm/sec.

へた5月19日より本格的観測に入り6月7日まで20日間同一条件のもとで連続観測をおこなった。解析の結果 Kodiak 島附近の地震が比較的観測されていないことが判明したので8日から感度特性を比較的長い方(変位倍率 peak を1秒附近)にもたせ5日間観測をおこなった。録音された磁気テープはすべて翌日にはインクがきオッシログラフで 6.5 mm/sec と 160 mm/sec の記録紙速度で可視記録に再生した。初動の到来方向, みかけの速度, 震源の決定などを毎日前日の記録について全部おこなった。解析用再生記録の1例を Fig. 4 に, モニター記録の A, B についての例を Fig. 5 に示す。Fig. 4 の 5-24-10 の記号は5月24日地震番号 No. 10であることを示し, 同様にモニター記録のBにも同一要領で記入しモニター記録と再生記録の地震の対応を容易にした。

§ 5. 観測結果

モニター用連続観測の検測の有効時間は461時間で, その間記録された地震回数は高感度記録によるもの 9,012 個におよび1日平均約467個, 本震後約1ヵ月半をへた観測期間約20日間の内, 前半4626に対し後半の16日間には4,386でその減少率はわずか5%にすぎず大森双曲線法則による減少期待値15%に対しかなり低い値を示した。余震の消長および磁気テープに録音された数を日別に示したものが Fig. 6 で, 同じくモニター記録Bで検測された余震のうち S-P があきらかによみとれたもの 1,542 個について S-P 頻度分布をもとめた結果が Fig. 7 である。Fig. 6, 7 でみられるようにわれわれの sampling は適当であつたことがわかる。

磁気テープに記録された地震総数は全部で845個, そのうち初動の到来方向, みかけ速度と S-P 時間とから Hales 他(未発表論文)によるこの附近の地殻構造のモデルをやや修正したもの(第1層 5.5 km/sec 厚さ 5 km, 第2層 6.0 km/sec 厚さ 30 km, 第3層 8.0 km/sec, Poisson's ratio はすべて 0.25)を使つて震央位置を推定した地震が797個である。これらの震央位置を Fig. 8 に示した。地震活動度により観測点を中心に図に示すごとく A, B, C, D の4地区にわけた。A, B, C はわれわれの観測点から太平洋側にあり D は大陸側にある。A 地区は本震震央をふくむ余震域, B 地区は Seward 東方の余震が集中的に起こつた地域, C 地区は Seward 南方の余震の少ない地域, D 地区は今回の本震による隆起, 沈降の境界をなす軸線の北西特にあとにのべるような深発余震をふくむ余震域を示すものである。また $N55^{\circ}W-S55^{\circ}E$ に沿つてみた震源断面図が Fig. 9 である。震源が 5 km と 35 km の深さに集中しているように見えるのは, 仮定した各層の屈折波から震源を求めるとき, その震源を層の下底に仮定したためである。

LAWING, ALASKA, MAY 27, 1964 22h-MAY 28, 10h (AST) (A)

Fig. 5. An example of the monitor drum record for half a day. (A): a are given for the earthquakes recorded by the magnetic tape

Fig. 6. Daily number of aftershocks observed at Lawing, Alaska, during May-June 1964.

LAWING, ARASKA, MAY 27, 1964 22h-MAY 28, 10h (AST) (B)

(B)

record of $V=1,600,000$. (B): a record of $V=160,000$. No. of earthquakes in (B) recorder.

Fig. 7. Frequency distribution of S-P times at Lawing, Alaska.

Fig. 8. Epicenters located by the array method for the period from May 19-June 7, 1964 at the Lawing station.

次に余震観測期間中 U. S. C. G. S. 報告結果と共通に震源のきめられたもの 24 個についてその比較を示したのが Table 1 で、この表からわかるようにわれわれのきめた初動部分の到来方向と C. G. S. のきめた震源えの方向と 10° 以内であうもの 17 ケ (71%), 5° 以内のもの 9 ケ (38%) でかなり精度よくもとめられている。またみかけの速度についても C. G. S. でえられた情報から期待されるみかけの速度と $\pm 10\%$ のちがいでもとめられたもの 15 ケ (63%) であつた。S-P 時間のくいちがいのやや大きいのは C. G. S. の観測網できめた地震は大きすぎてわれわれの記録では多く飽和して波がよみにくいためである。

Table 1. Comparison of hypocenter location by U. S. C. G. S. and our array method.

No.	Origin Time		φ (N)	λ (W)	h km	Direction to Laving	Δ km	Expected		Observed		h km	Δ km	S-P sec
		(GMT)						App. Vel. km/sec	S-P sec	App. Vel. km/sec	Direction to Laving			
1	5/19	13h 19m 21s	59.7°	152.3°	33	244°	180	8.0	19.3	7.2	220°	crust	135	15.2
2		14 42 40.7	60.2	146.3	33	100	175	8.0	18.8	8.6	104	114	263	26.9
3	5/20	05 32 13.7	58.0	149.6	20	193	270	8.0	27.4	7.4	172	crust	289	29.2
4		09 28 38.5	60.2	147.4	33	107	120	8.0	13.8	6.6	97	crust	138	15.5
5	5/21	01 11 23.4	60.4	145.9	15	90	195	8.0	20.6	7.7	91	crust	218	22.7
6	5/23	06 29 24.4	57.3	150.7	20	194	353	8.0	35.2	7.7	188	crust	339	33.8
7	5/24	00 40 21.9	60.2	148.0	15	116	83	6.1	10.4	5.8	122	5	60	7.5
8		06 52 44.4	59.7	148.5	20	149	91	6.2	11.5	6.2	145	20	70	9.1
9		10 16 21.5	59.9	145.5	15	104	215	8.0	22.5	6.6	108	crust	275	27.9
10	5/26	21 58 34.1	60.1	147.0	33	104	130	8.0	14.8	7.1	108	crust	165	17.9
11	5/27	17 52 08.4	59.1	146.4	33	130	248	8.0	25.5	7.3	170	crust	245	25.2
12	5/28	14 06 58.2	60.2	147.7	33	103	90	8.0	11.1	7.2	95	crust	174	18.8
13		16 18 04.2	58.3	150.6	25	197	245	8.0	25.2	7.9	197	crust	402	42.5
14	5/29	03 34 51.8	60.1	146.5	15	102	160	8.0	17.5	7.7	115	crust	213	22.3
15		10 17 34.5	60.2	146.3	5	99	168	8.0	18.2	7.1	113	crust	80	10.
16	6/ 2	16 09 23.5	59.7	144.4	15	105	270	8.0	27.5	6.9	112	crust	318	31.8
17		16 29 41.5	59.7	144.2	10	104	295	8.0	29.8	7.4	110	crust	326	32.8
18	6/ 3	11 25 45.5	61.1	151.2	33	310	120	8.0	13.8	7.2	292	crust	136	15.3
19		14 03 42.4	59.9	143.9	20	109	323	8.0	32.3	6.8	108	crust	392	41.5
20	6/ 4	03 27 05.0	59.7	147.3	45	123	138	8.1	15.7	7.2	117	crust	210	22.0
21	6/ 5	09 50 35.0	60.4	146.0	15	89	180	8.0	19.8	6.8	98	crust	184	19.7
22		11 50 25.	63.1	151.1	94	344	320	8.2	32.7	11.4	2	236	232	31.9
23		22 06 53.0	58.1	152.1	15	212	300	8.0	30.3	8.4	205	196	460	49.5
24	6/ 8	05 44 31.0	57.4	146.2	33	178	340	8.0	33.9	7.0	177	crust	359	35.4

Fig. 9. Aftershocks of the Alaska earthquake. Vertical projection on the $N55^{\circ}W-S55^{\circ}E$ section.

Table 2.

Focal depth (km)	N
0 ~ 35	723
36 ~ 70	20
71 ~ 130	40
131 ~ 200	10
201 ~	4
	797

従来よくいわれている本震が余震域の一端に位置すること、また余震の頻発地域が地盤の隆起地帯と一致するということの2つとも、今回の観測結果から確かめられた。しかし大地震の余震活動の震源は従来

おこなわれてきた余震観測結果では一般に地殻内に活動が集中し 30 km 以深の震源は余りみとめられなかった。しかるに今回の結果から Fig. 9 にあきらかなように A, B, C 地区の隆起地帯の震源は多く地殻内に起こっているが沈降を示した D 地域は境界軸を境にはつきりと北西に向ってかなり急激に深さをまして、マントル内部深さ 200 km 位まで起こっている。ただし、この附近の常時的地震活動は、Gutenberg-Richter の Seismicity of the Earth (1954)

Fig. 10. Cumulative frequency of the maximum trace amplitudes.

Fig. 11. Apparent velocity of P waves plotted against the S-P time in each quadrant.

によると元来この程度の深さのものが多くのでこれらの深い地震を余震と見做すべきか論議の余地があると思われる。あるいは今回の地震による大隆起（約 6 m）、沈降（約 1 m）を示した直接の地殻運動により地殻下はるかマントル上層部までおよぼす歪に起因する広義の余震活動であるか今後の研究に俟たねばならない。深さ別地震発生状況は Table 2 のようである。

次に検測された地震動の最大振幅の頻度分布、いわゆる石本—飯田の関係を示したのが Fig. 10 で、みごとに直線にのり、 $m = 2.19$ である。観測した余震について P 波初動部分のみかけ速度と S-P 時間の関係を Fig. 11 A, B, C, D に示した。この図からいえる第 1 のことはいずれの地震も 5.5 km/sec 以下の速度

Fig. 12. Frequency distribution of apparent velocity of P waves in each quadrant.

のものが1つもない。これは観測点附近の下では 5.5 km/sec の層が直接地上に出ているものと考えられさきに地下構造モデルで第1層を 5.5 km/sec と仮定したのはこのためである。D地区では 6.1 km/sec 以下のみかけの速度をもつたものがない。これは、あるいは第1層下面の傾斜を示すものかも知れないが、震源の深さの決定には、この可能性は考慮しなかつた。参考のため、みかけ速度の頻度分布を a, b, c, d の4つの象限に分けて Fig. 12 に示す。

Alaska 湾の潮汐運動は Anchorage において最大 10 m にもおよび、Kodiak, Cordova においてもそれぞれ 3 m, 5 m を示す。潮汐負荷による応力と余震活動の関係を見るため、干潮、満潮時と地震発生頻度を比較してみたが、著しい相関はみとめられなかつた。Fig. 13 にその結果を示す。

今回の観測で、このように大規模な余震活動でも、この多点観測方式が、極めて有効であることが確かめられたのは大きな収穫であつた。特に、マントル内部深さ 200 km におよぶも

Fig. 13. The number of aftershocks per 2 hours and the times of high and low tides during May-June 1964.

のが観測されたことは、特筆すべきことである。これが真の余震であるかどうかは、今後再び同じ場所で同じ装置で常時活動を調査すれば明らかになるであろう。

§ 6. 謝 辞

本報告はさきにも述べた通り日米科学協力計画で行なわれた日米合同調査の一部である。先発調査団長河角広博士をはじめ、特に同調査団に参加された気象研究所の未広重二博士にはわれわれの観測点設営のための綿密な計画と指示をあたえられた。御好意に心から謝意を述べる。また坪井忠二博士および宮村摂三博士から終始激励をいただいた。ここに深く感謝を捧げる。一方現地では Alaska 大学の Edward Berg 博士, Anchorage 在住の地質学者 Ruth Schmidt 博士, Seward 市役所当局ならびに Seward 在住の Walter Blue 氏, また観測点設営については近くの Ranger Station の職員の方々に大変世話になった。厚く感謝の意を表したい。

文 献

- AKI, K., HORI, M. and MATUMOTO, H., Observation of Micro-aftershocks at a temporary array station in the Kenai Peninsula, Alaska for the period from May 19 to June 7, 1964., (in press).
- 安芸敬一, 1961, Seismometer Array による地震波動の研究 (第1報), 地震研究所彙報, 第40号, 371~389.
- 安芸敬一, 松本英照, 1962, Seismometer Array による地震波動の研究 (第2報), 地震研究所彙報, 第41号, 279~292.
- 河角 広 (日米合同調査班), 1964, アラスカ地震概報, U. D. C., 511~512.
- Gutenberg and Richter. 1954, Seismicity of the Earth and associated Phenomena, 30~32,
- 宮村摂三, 堀 実, 安芸敬一, 松本英照, 安藤誠一, 1961, 北美濃地震余震観測, 地震研究所彙報, 第39号, 895~908.
- 宮村摂三, 堀 実, 安芸敬一, 辻浦賢, 松本英照, 1962, 筑波, 栃本において同時におこなった多点式観測法による関東および中部地方の微小地震の研究, 地震研究所彙報, 第40号, 885~897.
- 宮村摂三, 堀 実, 松本英照, 辻浦 賢, 1963, 岐阜県八幡町における多点配置式地震計による微小地震の観測, 地震研究所彙報, 第42号, 257~272.