

9. 1965年アリュージャン余震のP波走時残差について

地震研究所 牧 正

(昭和48年12月28日受理)

I. 序 言

P波走時残差についての研究には地球内部構造と震源決定精度についての研究がある。前者には地殻構造、地域的走時表、低速度層、上部マントル構造などの問題があり、後者には station correction, 震源位置の信頼限界についての研究が行われてきた。これらの研究を進展させるためには残差の基本的性質を明らかにすることが必要と思われる。

爆破地震の観測資料によって震源を求める場合真の震源位置とどれだけずれるかは興味のあるところである。Longshot の場合にはそれが 25 km と報告されている (Douglas and Lilwall (1968))。この大きさは走時に換算して数秒に相当するものと思われる。又震源決定に用いる観測点の配置の影響は、とくに観測点が少ない場合には著しいのであるが、震源位置のずれの大きな要因となっている (Flin (1965))。これらの問題を明らかにするためには残差の統計的な基本性質をしらべる必要がある。

一般に走時残差は次のような構成が考えられている。

1. 観測点誤差：測定誤差と観測点附近の地殻構造の影響、
2. 震源誤差：震源決定方法に附随する誤差と震源附近の地殻構造の影響、
3. 走時表誤差：走時表の精度と上部マントル構造の水平的変化。

走時残差についてのこれまでの研究ではいろいろな地域の地震の資料を用いていたため上の3つの要因が同時に影響しあっていることになる。このため資料のバラツキが極めて大きい場合があった (例えば残差と方位との関係などにみられる)。余震の資料を用いた場合には第2, 3の要因の影響は相対的に打消され観測点に関する要因が強調されることになると考えられる。

余震の走時残差については Gibowicz (1970)によってしらべられている。彼は Clearly and Hales (1970)の方法によってアラスカ余震(1964年)の90個について183個の観測点について平均残差を求めその地域性を論じている。震央距離・方位の影響をとり除いた平均値を求めているが、各観測点の残差の分布については言及していない。震央距離・方位の影響をとり除く方法をとったこと、それらの影響の大きさから各観測点の残差の分布をしらべることは必要であると考えられる。

本研究では各観測点の残差の統計的な基本的性質(平均値と分散)についてしらべる。これらの平均値や分散が、P波初動の判別度(iP又はeP)によって異なっているかどうか、地域的な特徴があるかどうかについてしらべる。又本研究は震源決定の精度をたかめる

研究の予備的調査と考えている。

II. 資 料

今回の調査には1965年 Rat Islands 余震を用いた。その震源事項については第1表に示した。P波走時残差の資料には Bulletin of International Seismological Center の O-C (P波) の値を用いた。この値は Jeffreys-Bullen の走時表によるものである。震源位置には ISC がコンパイルしたものをを用いた。CGS (現 NOS) だけで震源決定されたもの, "by inspection" と付されているものは除外してある。

Table 1. 1965 Rat Islands, Aleutian earthquake.

Origin time	February 4, 1965, 05 : 01 : 21.6
Epicenter	51.29° N, 178.55° E
Focal depth	36 km
Magnitude m_b	6.1

対象とした期間は2月28日迄の25日間であり、もちいた地震の規模別頻度分布を第1図に示す。統計的調査を主な目的としているため観測点資料の少ない地震も含んでいる。

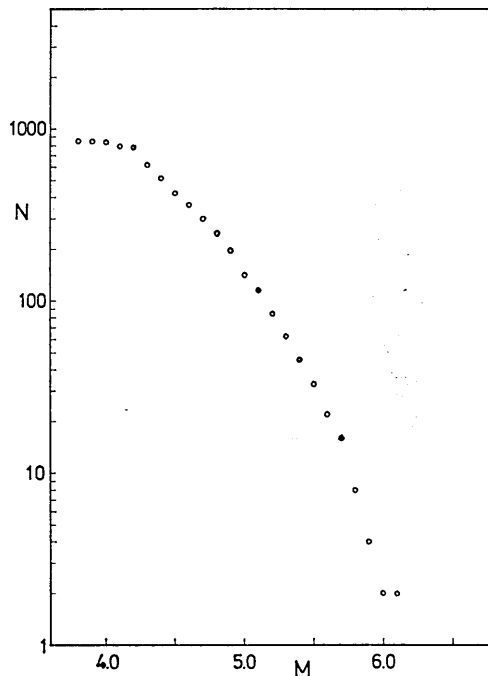


Fig. 1. Frequency distribution of the earthquake magnitudes used in the analysis.

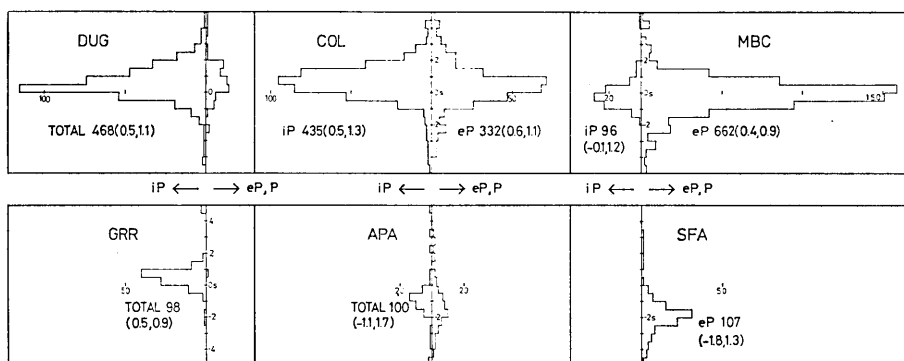


Fig. 2. Examples of the distributions of the P wave travel time residuals, distinguished by the types of the P wave onset.

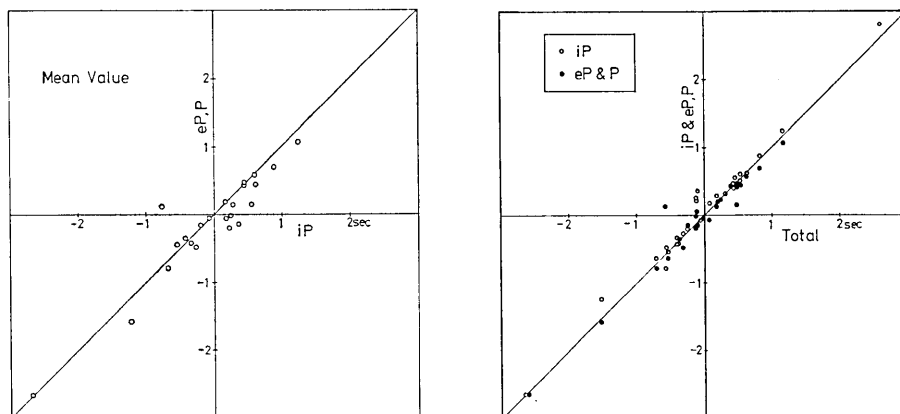


Fig. 3. Comparison of the mean values of the P wave travel time residuals. (1) iP versus eP, P . (2) total versus iP and eP, P .

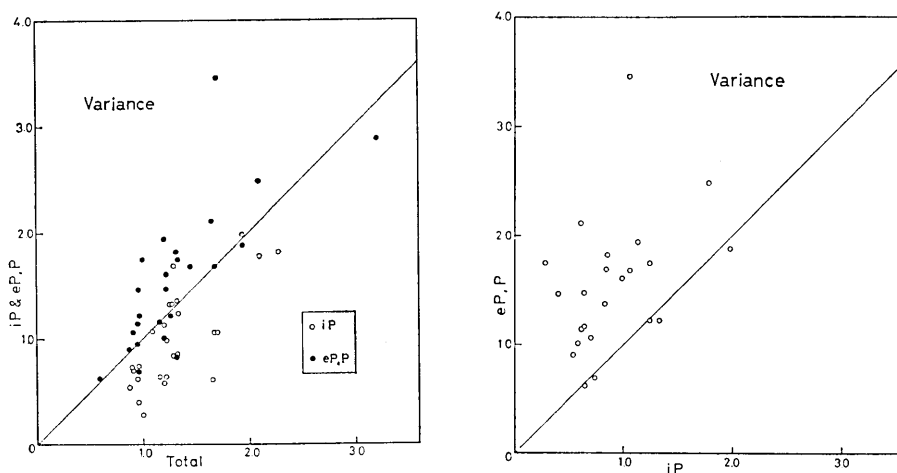


Fig. 4. Comparison of the variances of the P wave travel time residuals. (1) iP versus eP, P . (2) total versus iP and eP, P .

Table 2. Mean values and variances of the P wave travel time residuals. Epicentral distances and azimuths are estimated for the main shock. Statistical parameters are estimated only for stations whose observations are more than 50.

Code	θ	Δ	Observation			Total		iP		eP, P	
			Total	iP	eP, P	m	v	m	v	m	v
AD—	77.0	3.08	58	55	3	0.0	1.5				
ALE	9.7	43.03	312	11	301	0.1	1.2				
ALQ	76.3	54.78	291	252	39	0.1	0.8				
APA	345.1	58.65	100	45	55	-1.1	2.8				
ATL	62.9	68.83	101	57	44	-0.6	1.1	-0.5	1.1		
BAN	63.4	40.03	57	0	57	0.2	1.0				
BCN	81.0	48.95	334	208	126	0.6	1.2	0.6	1.0	0.6	1.6
BMO	72.6	42.15	555	12	543	0.2	1.5				
BOZ	68.1	45.42	486	370	116	-2.7	1.3	-2.6	0.8	-2.7	1.7
BRW	20.3	22.99	186	154	32	0.7	1.9				
CIN	336.9	87.78	144	41	103	0.6	1.5				
CLL	350.7	77.06	168	42	126	0.6	1.3				
CMC	36.9	35.39	299	3	296	0.2	1.5				
CMP	340.4	81.75	95	50	45	2.6	2.3	2.8	1.8		
COL	39.1	22.08	767	435	332	0.5	1.7	0.6	1.1	0.5	1.7
CPO	62.1	66.56	648	3	645	-0.8	1.6				
CTA	211.1	76.50	210	159	51	-0.6	1.7	-0.8	1.1	0.1	3.5
DOU	356.0	78.88	74	26	48	3.7	0.5				
DUG	75.3	47.55	468	402	66	0.5	1.2	0.6	1.1	0.1	1.9
EDM	59.6	40.33	604	112	492	-0.1	0.9	0.2	0.5	-0.2	0.9
EKA	1.0	73.76	308	49	259	0.7	1.9				
ESK	1.0	73.77	132	129	3	0.3	0.5				
EUR	78.1	46.05	265	239	26	0.4	1.2				
FBC	30.4	54.03	606	86	520	-1.5	1.2	-1.2	0.6	-1.6	1.0
GOL	71.2	52.33	151	143	8	0.4	0.6				
GRR	359.6	80.72	98	97	1	0.5	0.9				
GSC	83.1	48.15	324	255	69	-0.5	1.3	-0.5	1.2	-0.7	1.8
HHM	66.4	42.26	130	95	35	0.1	1.1				

(to be continued)

(continued)

Code	θ	Δ	Observation			Total		iP		eP, P	
			Total	iP	ep, P	m	v	m	v	m	v
I S O	353.8	84.64	56	54	2	1.6	1.0				
J A S	82.8	44.22	148	145	3	0.8	0.9				
J E N	351.6	77.56	66	21	45	1.9	0.6				
K A S	334.0	82.76	52	33	19	0.3	2.3				
K E V	348.6	57.51	102	22	80	-0.1	3.2				
K H C	350.0	79.16	239	176	63	0.8	1.3	0.9	1.3	0.7	1.2
K I R	350.6	60.09	262	254	8	-0.9	1.3				
K J N	346.1	62.74	311	160	151	-0.7	1.0	-0.6	0.3	-0.8	1.8
K O N	354.0	69.07	219	185	31	0.3	0.9	0.3	0.7		
K R A	346.0	77.42	66	6	60	0.7	2.4				
K R K	347.5	57.15	87	85	2	-0.8	1.4				
K R P	182.4	88.60	118	9	109	0.5	1.7				
L A R	69.7	51.18	65	18	47	0.3	1.7				
L N D	53.7	63.48	85	1	87	0.1	0.6				
L O R	359.3	81.74	121	114	7	0.8	0.4				
L U B	74.4	58.49	109	53	56	-0.1	1.3	0.2	0.9	-0.0	1.8
M A T	258.6	32.13	245	72	173	-0.4	1.2	-0.3	0.6	-0.4	1.5
M B C	22.1	34.33	758	96	662	-0.1	1.3	0.4	0.8	-0.2	1.4
M H C	84.4	43.85	50	22	28	0.3	1.4				
M I N	80.9	42.06	112	96	16	0.5	1.3	0.5	1.3		
M N T	47.5	65.33	71	33	38	-1.1	1.7				
M O S	337.5	68.54	76	6	70	0.5	1.7				
M O X	351.5	77.85	132	44	88	0.4	1.5	0.4	1.7		
N D I	296.7	74.74	76	27	49	-1.1	0.7				
N R R	80.6	43.60	56	26	30	0.8	0.7				
N U R	346.3	66.61	366	200	166	-0.4	1.2	-0.4	0.6	-0.4	1.2
O R V	81.7	42.59	382	291	91	-0.3	1.9	-0.3	2.0	-0.5	1.9
P A L	50.8	68.61	92	21	71	-0.2	2.1				
P A S	85.3	48.05	206	178	28	0.1	1.6				
P E T	285.8	12.34	68	29	39	-2.0	3.1				
P N T	67.9	38.55	328	19	309	0.3	1.7				

(to be continued)

(continued)

Code	θ	Δ	Observation			Total		iP		eP, P	
			Total	iP	eP, P	m	v	m	v	m	v
POO	292.8	84.57	90	68	22	-1.9	0.5				
PRU	349.5	78.19	136	64	72	0.4	1.0	0.4	0.4	0.4	1.5
PUL	343.1	66.37	52	22	30	-0.4	1.7				
QUF	304.9	79.09	345	269	76	0.5	1.0	0.4	1.2	0.5	1.2
RAM	327.2	83.74	60	46	14	2.5	1.0				
RCD	65.5	50.86	220	63	157	-0.1	0.6	-0.1	0.7	-0.1	0.6
RES	24.1	40.54	342	4	338	0.1	0.9				
RSL	354.3	83.17	147	75	72	1.2	2.1	1.2	1.8	1.1	2.5
SCH	36.9	61.15	219	7	212	-0.6	0.6				
SCP	53.4	66.79	62	58	4	-0.5	1.0				
SEA	44.7	65.36	107	0	107	-1.8	1.7				
SHF	46.2	64.93	83	3	80	-1.1	1.4				
SHI	315.1	86.48	163	96	67	0.1	1.0	0.2	0.6	-0.1	1.1
SHL	284.2	68.47	150	148	2	-1.1	0.7				
SIC	40.2	64.74	272	29	243	-1.0	0.9				
SJG	59.3	90.88	64	46	18	1.2	1.2				
SOD	347.8	59.81	279	91	188	0.2	1.7	0.3	0.6	0.1	2.1
SSC	359.1	80.52	97	96	1	0.3	0.9				
SSF	356.6	81.90	120	115	5	1.0	0.4				
STU	352.9	79.92	58	50	8	0.5	1.0				
SVE	326.1	60.79	79	3	76	-0.2	1.54				
TAS	310.4	69.14	59	33	26	-0.5	0.6				
TFO	80.2	52.25	761	323	438	0.2	0.9	0.2	0.7	0.2	1.1
TIK	331.0	29.90	90	60	30	-1.6	1.9				
TRO	351.8	58.50	54	53	1	-0.5	1.7				
TUC	81.7	53.88	306	294	113	-0.3	1.0	-0.2	0.7	-0.2	0.7
TUL	68.5	60.50	68	43	25	-0.3	1.2				
UBO	73.2	49.43	818	37	781	-0.2	1.4				
UME	349.5	64.00	290	285	5	-1.2	1.4				
UPP	349.7	68.16	308	30	4	-0.4	1.2				
VIC	70.9	36.68	56	2	54	0.9	1.8				

(to be continued)

(continued)

Code	θ	A	Observation			Total		iP		eP, P	
			Total	iP	eP, P	m	v	m	v	m	v
V L A	273.9	32.26	60	9	51	-0.1	1.7				
W D Y	84.2	46.62	74	60	14	-0.3	1.1				
W M O	71.3	59.67	702	4	698	-0.1	1.2				
Y K C	45.9	36.59	173	16	157	0.1	0.8				
Y S S	273.8	23.66	67	35	32	1.0	1.9				

m : mean, v : variance

III. 調査方法と結果

各観測点毎にP波走時残差を収集しなおし平均値と分散を求めた。第2図には代表的な観測点について例を示した。分布を求めるに当たって、P波初動の立上りに関する判別のランクによってちがいがあると予想されたので iP と eP, P あるいは合計に分けて示した。この結果306個の観測点について示し、そのうち50個以上の観測のある95個の観測点について平均値と分散を求めた。その結果を第2表に示す。表のなかで観測点名は code で示してあり、方位と震央距離は本震にたいする値を示してある。iP と eP, P の平均値と分散はそれらの観測が50個以上のものだけについて求めた。観測点によって iP あるいは eP, P のどちらかに偏っている場合が多くみられる。これらの観測点ではP波初動の立上りの自然性もあると思われるが、iP, Pとの判断の基準にも問題があると予想される。

第3図にはP波初動の立上りのランクによる影響を示した。3-aには残差の平均値について iP と eP, P の比較を示した。図のなかの実線は1対1の対応を表わす。図では iP と eP, P の平均値は大体等しいことを示している。3-bには全体にたいする iP 及び eP, P の比較を示した。実線は1対1の対応を示すものである。この場合も平均値については大体等しいことを示している。従ってP波走時残差の平均値は iP の場合、eP, P の場合、合計の場合についてもほとんど等しいといえることができる。この結果 station correction を求めるときには全観測について処理をしてもよいといえる。

第4図には分散についてP波初動の立上りのランクによる影響を示した。4-a図には iP と eP, P の比較を示した。実線は1対1の対応を示す。図で明らかのように eP, P の場合には iP の場合に比べ凡そ2倍の大きさとなっている。4-b図には全体に対する iP 及び eP, P の場合の比較を示した。iP の場合の分散は小さく合計の半分となっている。eP, P の場合は大きい分散を示している。この結果分散については初動立上りのグレーディングの影響があらわれており、実際にその影響を考慮する必要性を示している。全体の値は平均的値としてとり扱える可能性は十分あると思われる。

第5図には走時残差の平均値と標準偏差の頻度分布を示した。平均値についていえば、-2.7~3.7の広範囲に亘って分布していることは注目すべきものといえる。この大きさは

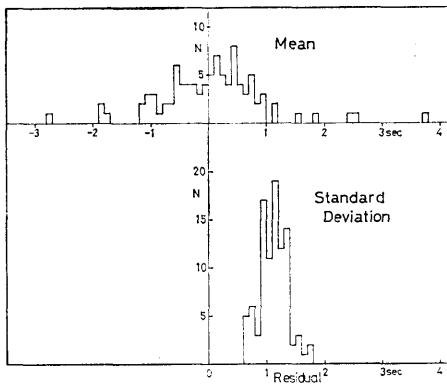


Fig. 5. Frequency distribution of the mean values and standard deviations of the P wave travel time residuals.

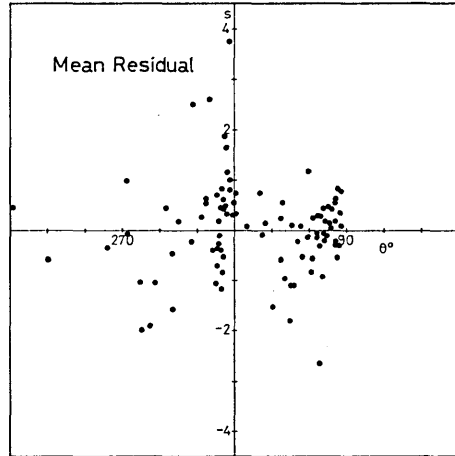


Fig. 6-b

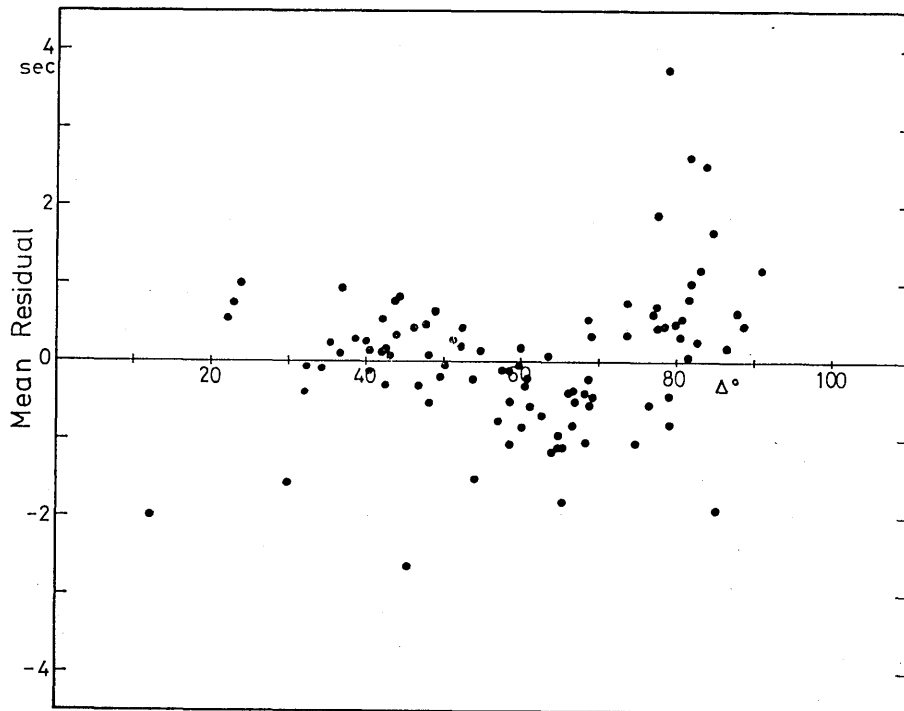


Fig. 6. Relation of the mean values of the P wave travel time residuals as a function of, (a) epicentral distances (Δ°), and (b) azimuths around the epicenters (θ°).

Table 3. Regional division of the P wave travel time residuals.

Location	Mean residual	Number of stations	Exception
West and Center of N. America	-0.5~ 0.7	28	BOZ -2.7
East of U. S. A.	-0.8~ 0.5	4	PAL -0.2 LND 0.1
East of Canada	-0.6~-1.1	6	SEA -1.8
Northwest Territory	-0.1~ 0.1	6	FBC -1.5
Scandinavia	-0.1~-1.2	10	KON 0.3 SOD 0.2
USSR	-0.1~-0.5	6	YSS 1.0
Europe	0.3~ 1.9	18	DOU 3.7 CMP 2.5
Far East	-2.0~-1.1	4	MAT -0.4
India	-1.1~-1.9	3	
Pakistan to Turkey	0.1~ 0.6	5	RAM 2.5

震源決定の方法に station correction を施す必要のあることを示している。標準偏差は 0.6~1.9 の範囲に分布しており、震源位置の精度に大きな影響を与えるものと思われる。震源の深さの精度を加味すれば震源位置の確率的誤差は数 Km 以上数十 Km 以内と考えられるがその大半はこれらの標準偏差で説明される可能性はあると思われる。全般的には平均値は 0.0 秒、標準偏差は 1.1 秒という結果がえられた。

第 6—a 図には走時残差の平均値について震央距離と方位（震源のまわり）にたいする関係を示した。震央距離にたいする関係（6—a 図）ではいくつかの特徴がみられる。30~50° ではバラツキも少なくよくあっていること、60~70° では J—B 走時表にたいして早くなっていること、80° 附近では J—B 走時表よりおそくバラツキも大きいことが特徴である。これらの偏差については J—B 走時表の誤差だけでは説明できないと思われる。6—b 図には方位にたいする残差の平均値の関係を示した。バラツキの大きさのため明らかな関係は見出せない。

第 3 表には平均値について地域的分類を示した。いくつかの例外を伴うが大勢的にはその地域の特徴を反映していると思われる。ヨーロッパでは +1, 0, 北米中・西部, アラスカは, 0.0, パキスタンからトルコでは +0.3, ソ連では -0.3, スカンジナビア, 合衆国東部, カナダ東部では -0.7, 極東地域, インドでは -1.5 となっている。

VI. 結 論

各観測点における P 波走時残差の分布をしらべた。全般的には平均値は 0.0 秒、標準偏差は 1.1 秒であるが、観測点によって大きな平均値をもっていること、標準偏差が大きい

ことは注目しなければならない。P波初動の立上りのグレーディングの影響は分散にあらわれているが平均値にはほとんどあらわれていない。

走時残差の分布についての明確な解釈はえられなかったが、地域的な特徴をみることができる。

走時残差の平均値を用いて station correction を求めること、標準偏差を考慮した震源決定精度のみつもりを研究することが必要と思われる。

参 考 文 献

- 1) CLEARIY, J. and A. L. HALES (1966). An analysis of P waves to North American stations, in the distance range 32° , 100° , *BSSA*, **56**, 467-489.
- 2) DOUGLAS, A. and R. C. LILWALL (1968). Does epicenter source bias exist? *Nature*, **220**, 469-470.
- 3) EVERDEN, J. F. (1969). Precision of epicenters obtained by small numbers of world-wide stations, *BSSA*, **59**, 1365-1398.
- 4) FLIN, E. A. (1965). Confidence regions and error determinations for seismic event location, *Reviews of Geophysics*, **3** 157-158.
- 5) GIBOWICZ, S. J. (1970). P-wave travel time residuals from the Alaskan aftershocks of 1964, *Phys. Earth Planet. Interiors*, **2**, 239-258.
- 6) JORDAN, J. N., J. F. LANDER and R. A. BLACK (1965). Aftershocks of the 4 February 1965 Rat Island Earthquake, *Science*, **148**, 1323-1325.

9. *On the P Wave Travel Time Residuals of the 1965 Rat Islands, Aleutian Earthquake.*

By Tadashi MAKI,

Earthquake Research Institute.

Statistical characteristics of the P wave travel time residuals have been studied by using the aftershocks of the 1965 Rat Islands, Aleutian Earthquake. There are not a few stations of which mean residuals are as large as several seconds. It will be necessary to adopt "station corrections" in order to get more precise locations of hypocenters. Variances for residuals noted with eP and P onsets are larger than the ones for iP onsets or total observations. Generally the mean values are 0.0, and the standard deviation are 1.1 seconds.

Relation between the mean values and epicentral distances were studied. Regional distributions of the mean values were studied.