

福井地震の震央について

(震央の精密な求め方の一例)

戸松喜一*

震央を精密に決定する方法として福井地震の震央を最小自乗法により求める計算方法を紹介する。

資料は気象要覧による。まづ福井地震の震央を近似的に $136^{\circ}12'$, $36^{\circ}06'$ と仮定し横軸に震央距離、縦軸に初期微動継続時間をグラフに書くと第1図のようになり震央距離 200km 以下の 17 ケ所の中 1 ケ所 (神戸) は棄却検定するまでもなく非常にはずれているので除くと 16 ケ所は大体直

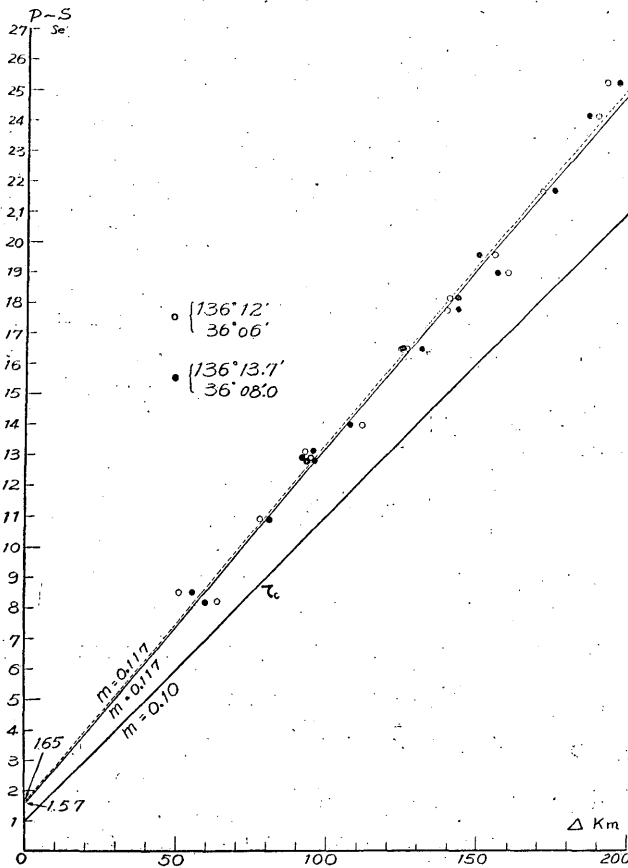


Fig. 1

* 中央気象台地震課

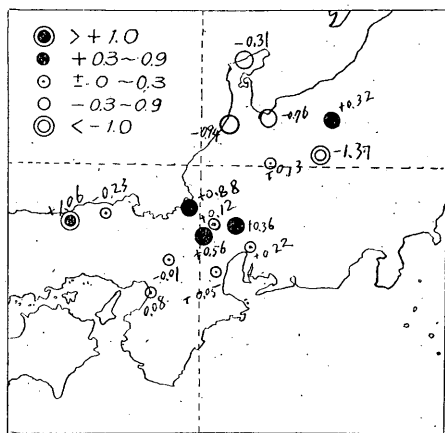


Fig. 2

線上に並んでいる。最も近い観測所敦賀の震央距離 Δ は 51km である。深さにより Δ と ($P \sim S$) との関係は直線をなすとは限らないが驚坂・竹花両技官の近地地震の $P \sim S$ の表から深さが 0~20km では Δ が 50~200km でほとんど直線をなしている。深さが 40km では直線部分は 130~200km である。そこで一応深さは極浅とし観測値 16 ケの Δ と $P \sim S$ を最小自乗法により直線をあてはめてみる。初期微動継続時間を τ とおくと

$$\tau = 1.654 + 0.117\Delta$$

(驚坂・竹花両技官の $P \sim S$ 表では深さ 0 では 0.118 Δ , 深さ 20km では 0.119 Δ である。)

この直線からの偏差の値を第 2 図に示す。図から震央は更に東へ、北へ移さねばならぬ事が大体推定できる。

次に 16 ケの偏差の中最大値 1.45 である松本の資料を棄却すべきかどうかについて Smirnov の棄却検定⁽¹⁾を適用した。

すなわち標本 $x_1 < x_2 < \dots < x_{n-1} < x_n$ において x_n が異常に大きな値とし、 x_n をも入れて標本分散を計算すると

$$S^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (x_i - \bar{x})^2 = 0.1705$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} x_i = 0.4625$$

$$\text{統計量 } T = \frac{x_n - \bar{x}}{S} = \frac{1.4 - 0.4625}{0.41} = 2.287$$

表より⁽¹⁾ $N=16$, $\alpha=0.01$ とすれば 2.837 となり、この資料は 1% の危険率で棄却し得ないことになる、

そこで 16 ヶ所全部の資料を用い Hodgson の第 2 の方法⁽²⁾を応用してみる。最小自乗法を用いるとき厳密には震央距離・ $P \sim S$ の両方に誤差がある場合の Deming の方法⁽³⁾は有効だが、ここでは震央距離は正しく、($P \sim S$) にのみ誤差があるとした今迄の方法によつた。

(1) 増山元三郎：科学測器 4 (1944) 228 予報研究ノート 1 巻 12 号 39 頁

(2) 本誌広野氏紹介参照

(3) Deming 著森口訳「推計学によるデータのまとめ方」

第 1 表

観測所	[d]	[E]							[ac]	[bc]	[cc]	[cs]	[EE]	$\lambda: 136^{\circ}13.'7$ $\varphi: 36^{\circ}08.'0$ Δ		
	$\left\{ \begin{array}{l} \lambda: 136^{\circ}12' \\ \varphi: 36^{\circ}06' \end{array} \right.$	τ_0	τ_c	$\tau_0 - \tau_c = E$	東へ10km $\Delta_{s\lambda}$	北へ10km $\Delta_{s\varphi}$	$\frac{\partial \Delta_s}{\partial \lambda_e}$	$\frac{\partial \Delta_s}{\partial \varphi_e}$	m $\frac{\partial T}{\partial \Delta_s}$	$a = \frac{\partial T}{\partial \lambda}$ $\frac{\partial T}{\partial \Delta_s} \cdot \frac{\partial \Delta_s}{\partial \lambda}$	$b = \frac{\partial T}{\partial \varphi}$ $\frac{\partial T}{\partial \Delta_s} \cdot \frac{\partial \Delta_s}{\partial \varphi}$					
	Δ															
金沢	64	8.2	7.4	+	0.8	58	57	- 0.6	- 0.7	0.10	- 0.06	- 0.07	1	64.87	0.64	60
敦賀	51	8.5	6.1	+	2.4	54	61	+ 0.3	+ 1.0	"	+ 0.03	+ 0.10	"	52.13	5.76	56
岐阜	93	12.9	10.3	+	2.6	88	101	- 0.5	+ 0.8	"	- 0.05	+ 0.08	"	94.13	6.76	95
富山	112	14.0	12.2	+	1.8	104	106	- 0.8	- 0.6	"	- 0.08	- 0.06	"	112.86	3.24	108
山根	93	13.1	10.3	+	2.8	93	103	0	+ 1.0	"	0	+ 0.10	"	94.10	7.84	96
伊吹山	78	10.9	8.8	+	2.1	76	88	- 0.2	+ 1.0	"	- 0.02	+ 0.10	"	79.08	4.41	81
高山	95	12.9	10.5	+	2.4	85	95	- 1.0	0	"	- 0.10	0	"	95.90	5.76	92
名古屋	125	16.5	13.5	+	3.0	120	133	- 0.5	+ 0.8	"	- 0.05	+ 0.08	"	126.03	9.00	126
豊岡	140	17.8	15.0	+	2.8	149	145	+ 0.9	+ 0.5	"	+ 0.09	+ 0.05	"	141.14	7.84	144
京都	127	16.5	13.7	+	2.8	131	137	+ 0.4	+ 1.0	"	+ 0.04	+ 0.10	"	128.14	7.84	131
龜山	141	18.2	15.1	+	3.1	140	151	- 0.1	+ 1.0	"	- 0.01	+ 0.10	"	142.09	9.61	144
輪島	156	19.6	16.6	+	3.0	152	147	- 0.4	- 0.9	"	- 0.04	- 0.09	"	156.87	9.00	151
本松	160	19.0	17.0	+	2.0	150	159	- 1.0	- 0.1	"	- 0.10	- 0.01	"	160.89	4.00	157
長野	190	24.2	20.0	+	4.2	180	187	- 1.0	- 0.3	"	- 0.10	- 0.03	"	190.87	17.64	187
大阪	172	21.7	18.2	+	3.5	176	181	+ 0.4	+ 0.9	"	+ 0.04	+ 0.09	"	173.13	12.25	176
大取	193	25.3	20.3	+	5.0	202	196	+ 0.9	+ 0.3	"	+ 0.09	+ 0.03	"	194.12	25.00	197
計	1990	259.3	215.0	+	44.3						- 0.32	+ 0.57	16	2006.25	136.59	

福井地震の震央について——戸松

第 2 表

観測所	[aa]	[bb]	[ab]	[aE]	[bE]	[ad]	[bd]	[dd]	[dE]	[as]	[bs]	[Es]	[ds]
1	0.0036	0.0049	+ 0.0042	- 0.048	- 0.056	- 3.84	- 4.48	4096	+ 51.2	- 3.8922	- 4.5409	51.896	4151.68
2	9	100	+ 0.0030	+ 0.072	+ 0.240	+ 1.53	+ 5.10	2601	122.4	+ 1.5639	+ 5.2130	125.112	2658.63
3	25	64	- 40	- 0.130	+ 0.208	- 4.65	+ 7.44	8649	241.8	- 4.7015	+ 7.5224	244.478	8744.79
4	64	36	+ 48	- 0.144	- 0.108	- 8.96	- 6.72	12544	201.6	- 9.0288	- 6.7716	203.148	12640.32
5	0	100	0	0	+ 0.280	0	+ 9.30	8649	260.4	0	+ 9.4100	263.480	8751.30
計	0.0674	0.0919	+ 0.0234	- 0.499	+ 1.793	- 33.95	+ 62.17	275752	5981.9	- 34.1792	+ 62.8553	6027.494	27770.22

験 震 時 報

第1表の手続きを説明すると

$\Delta (= [d])$: 最初仮定した近似的震央 ($\lambda : 136^{\circ}12'$, $\varphi : 36^{\circ}06'$) による震央距離

τ_0 : $P \sim S$ の観測値

τ_c : 計算を簡単にし四捨五入による誤差をふせぐため直線の方向係数 $m=0.10$ とし, $\Delta=0$ (震央) における $P \sim S$ すなわち $1=1.0$ として求めた $P \sim S$ の計算値 (第1図参照)

$$E = \tau_0 - \tau_c$$

次にこの方法の技術的に問題となる点であるが

$\Delta_{s\lambda}$: 近似的震央から東へ 10 軒震央を移した地点からの震央距離

$\Delta_{s\varphi}$: 近似的震央から北へ 10 軒 " " "

$$\frac{\partial \Delta_s}{\partial \lambda e} = \frac{\Delta_{s\lambda} - \Delta}{10}, \quad \frac{\partial \Delta_s}{\partial \varphi e} = \frac{\Delta_{s\varphi} - \Delta}{10}$$

$$m = \frac{\partial T}{\partial \Delta} (= 0.10 \text{ とした。})$$

後は今迄の最小自乗法と同様に $[aa]$ $[ab]$ …… $[dE]$ 等 (第2表) を計算し, 驗算は (第3表)

第 3 表

x	y	z	w	s	E
$[aa]$ 0.0674	$[ab]$ 0.0234	$[ac]$ - 0.32	$[ad]$ - 33.95	$[as]$ -34.1792	$[aE]$ - 0.499
$[ab]$ 0.0234	$[bb]$ 0.0919	$[bc]$ + 0.57	$[bd]$ + 62.17	$[bs]$ +62.8553	$[bE]$ + 1.793
$[ca]$ - 0.32	$[cb]$ + 0.57	$[cc]$ 16	$[cd]$ 1990.	$[cs]$ 2006.25	$[cE]$ +44.3
$[da]$ -33.95	$[db]$ +62.17	$[dc]$ 1990.	$[dd]$ 275752	$[ds]$ 277770.22	$[dE]$ 5981.9
$[Ea]$ - 0.499	$[Eb]$ + 1.793	$[Ec]$ + 44.3	$[Ed]$ 5981.9	$[Es]$ 6027.494	$[EE]$ 136.59

$$[a] + [b] + [c] + [d] = [s]$$

$$[aa] + [ab] + [ac] + [ad] = [as]$$

$$[ab] + [bb] + [bc] + [bd] = [bs]$$

$$[aE] + [bE] + [Ec] + [Ed] = [Es]$$

により, 正規方程式をたてる。正規方程式の解き方に残差平方和 s の最小値, 及び逆行列の計算を一緒に行うと⁽³⁾便利である。(第4表参照)

第 4 表 正規方程式の解き方, 残差平方和 s の最小値及び逆行例の計算

行		x	y	z	$w = 1$	C_1	C_2	C_3	C_4	計	
I		0.0674	0.0234	-0.32	-34.0	-0.499	1	0	0	0	- 33.7282
2			0.0919	+0.57	+62.2	+1.79	0	1	0	0	+ 65.6753
3				16	1990	44.3	0	0	1	0	- 2051.55
4					276000	5980.	0	0	0	1	+283999.2
5						137	0	0	0	0	+ 6162.591
6	I $\times -0.0234 \div 0.0674$ (-0.3472)		-0.00812	0.1111	11.80	-0.1732	-0.347	0	0	0	+ 11.7104
II	(2)+(6)		0.0838	0.681	74.0	1.96	-0.347	1	0	0	+ 77.38
7	I $\times 0.32 \div 0.0674$ (4.748)			-1.519	-161.4	-2.369	+4.748	0	0	0	- 160.14
8	II $\times -0.681 \div 0.0838$ (-8.126)			-5.533	-601.3	-15.93	+2.819	-8.13	0	0	- 628.79
III	(3)+(7)+(8)			-8.95	+1230.	+26.0	+7.57	-8.13	1	0	+ 1265.
9	I $\times 34.0 \div 0.0674$ (+504.5)				-17150	-251.7	+504.5	0	0	0	- 17015.9
10	II $\times -74.0 \div 0.0838$ (-883.0)				-65340	-1731.	+306.4	-883.	0	0	- 68326.5
11	III $\times -1230 \div 8.95$ (-137.4)				-169000	-3572	-1040.	+1117	-137	0	-173811.
IV	(4)+(9)+(10)+(11)				+24500.	+425.	-229.	+234	-137	1	+ 24794
12	I $\times 0.499 \div 0.0674$ (+7.404)					-3.694	+7.404	0	0	0	- 249.72
13	II $\times -1.96 \div 0.0838$ (-23.39)					-45.84	+8.116	-23.39	0	0	- 1809.92
14	III $\times -26.0 \div 8.95$ (-2.905)					-75.53	-21.99	+23.62	-2.905	0	- 3674.82
15	IV $\times -425 \div 24500$ (-0.0173)					-7.35	+3.961	-4.048	+2.370	-0.0173	- 428.94
V	(5)+(12)+(13)+(14)+(15)						-2.51	-3.82	-0.535	-0.0173	- 2.29
						min $s = +4.59$					(- 0.81)
19	I を x についてとく					$x = 2.58$	+24.8	-13.2	+2.13	-0.00938	
18	II を y //					$y = 3.75$	-13.2	+21.5	-2.21	+0.00956	
17	III を z //					$z = 0.57$	+2.13	-2.22	0.880	-0.00561	
16	IV を w //					$w = 0.017$	-0.00935	+0.00955	-0.00559	0.0000408	

福井地震の震央について——戸松

$136^{\circ}15.6 \pm 1.9$, $36^{\circ}01.2 \pm 3.3$

となつた。

以上の計算では震央距離はすべて Richter の計算方法により求めた。(この計算の終了後あらたに地理調査所発行 200 万分の 1 日本全図に観測所の位置をプロットし直接物指し(縮尺 2 倍)で測つた距離と計算距離との差は Δ が 600 軒以下の観測所 30 ケ所について比較した所最大 1.5 軒以下であるからこんで行うにはこの地図を用いばよい。)

観測値の誤差には偶発的誤差と系統的誤差がある。最小自乗法は前者に対する取扱いで、地震の観測値には系統的誤差と思われる相の異り又は読み取り誤差以外の不良な資料を含めて扱うこと、あるいはごく少数の資料を主観的に選択し最小自乗法にかけてもあまり意味がない。地震学的考察とともに観測値の統計学的棄却をいかに行うかは最も検討すべき点で、最小自乗法に移る前に各種の検定や推定を行つてからなすべきである。なお直線性の検定、直線を適合させた時の信頼帯、Hadjson の第 2 の方法の適用の可否、資料の再吟味など更に考究せねばならないが時間の都合で省略した。

以上の計算には今後時間精度向上と共に震央を精密に決定する上になんらかの参考になればと思ひ念のために実際の計算表をのせた。

最後に御指導をいただいた井上博士、広野博士に厚く御礼申し上げます。

Epicenter of the Fukui Earthquake

K. TOMATSU (*Seismological Section, Cent. Met. Obs.*)

As an example of precise determination of epicenter, the epicenter of the Fukui Earthquake of 1948 has been determined by the method of least square. Using the $P-S$ time of 16 stations within 200 km from the epicenter, the author has determined the epicenter to be $136^{\circ}13.7' \pm 2.1'E$, $36^{\circ}08.7' \pm 1.5'N$, and when the data of 25 stations whose epicentral distances are 200—600 km are used, the epicenter is $136^{\circ}15.6' \pm 1.9'E$, $36^{\circ}01.2' \pm 3.3'N$.