

# 1930 年代に発生した $M7$ クラスの宮城県沖地震 の震源再決定

——1978 年宮城県沖地震のアスペリティでのすべりだったのか?——

東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター\* 海野徳仁・河野俊夫・岡田知己  
中島淳一・松澤 暢・内田直希  
長谷川 昭  
国立天文台水沢 VERA 観測所\*\* 田村良明  
仙台管区気象台\*\*\* 青木 元†

Relocation of the  $M\sim 7$  Miyagi-oki Earthquakes in the 1930s:  
Seismic Slips of Asperities that Were Re-ruptured during  
the 1978  $M7.4$  Miyagi-oki Earthquake ?

Norihito UMINO, Toshio KONO, Tomomi OKADA, Junichi NAKAJIMA,  
Toru MATSUZAWA, Naoki UCHIDA, and Akira HASEGAWA  
Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions,  
Graduate School of Science, Tohoku University,  
Aramaki-Aza-Aoba 6-6, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan

Yoshiaki TAMURA  
National Astronomical Observatory of Japan, Mizusawa VERA Observatory,  
Hoshigaoka 2-12, Mizusawa-ku, Oshu 023-0861, Japan

Gen AOKI  
Sendai District Meteorological Observatory,  
Gorin 1-3-15, Miyagino-ku, Sendai 983-0842, Japan  
(Received July 27, 2006; Accepted November 28, 2006)

Hypocenters of the main shocks and aftershocks of the 1933  $M_{jma} 7.1$ , 1936  $M_{jma} 7.4$ , 1937  $M_{jma} 7.1$ , 1939  $M_{jma} 6.9$ , 1978  $M_{jma} 7.4$ , and 1981  $M_{jma} 7.0$  Miyagi-oki, NE Japan, earthquakes are relocated by using S-P times reported in the Seismological Bulletin of the Japan Meteorological Agency (JMA) and those re-read from original smoked-paper seismograms observed at Mizusawa station of National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ) and at Mukaiyama station of Tohoku University. In order to avoid large errors caused by inaccuracies in the arrival times of P- and S-waves and the limited number of observation stations, we determined hypocenters by using a grid search method based on the assumption that these events occurred at the boundary between the subducting Pacific plate and the overriding plate. The main shock epicenters of the 1933, 1936, 1937, and 1978 earthquakes are determined close to each other, and distributions of their aftershocks show that aftershock areas of

\* 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6  
\*\* 〒023-0861 奥州市水沢区星ヶ丘町 2-12  
\*\*\* 〒983-0842 仙台市宮城野区五輪 1-3-15

† 現所属: 〒100-8122 東京都千代田区大手町 1-3-4 気象庁地震火山部

1933, 1936, and 1937 events partly overlap with that of the 1978 event and occupy its easternmost, central, and westernmost portions, respectively. It is likely that the 1933, 1936, and 1937 events possibly ruptured a part of the source area of the 1978 event, that is the eastern, central, and western portions, respectively. Locations of the main shock and aftershock area of the 1939 event are adjacent to the eastern edge of the source area of 1978 event. After the 1978 event, the 1981 earthquake had occurred there following the slip on the asperities in the presumed Miyagi-oki earthquake source area.

Key words: Miyagi-oki earthquake, Asperity, Interplate earthquake, Smoked-paper seismogram, Subduction zone

## §1. はじめに

地震調査委員会の長期評価によると、宮城県沖では過去にマグニチュード ( $M$ ) 7.5 前後の地震が繰り返し発生しており、今後 20 年以内に 90% の確率で  $M$  7.5 前後の地震の発生が予測されている [地震調査委員会 (2000)]. 繰り返し発生している地震の中の最新のもの、1978 年宮城県沖地震 ( $M_{jma}$  7.4) であり、宮城県を中心として、死者 28 名を含む甚大な被害が生じた。その宮城県沖で、2005 年 8 月 16 日 11 時 46 分に  $M_{jma}$  7.2 の地震が発生した。

地震調査委員会によれば、1978 年宮城県沖地震の前に発生した地震は、1936 年の宮城県沖地震 ( $M$  7.4) である。Yamanaka and Kikuchi (2004) は、近地強震記録波形を用いて 1936 年宮城県沖地震のすべり量分布を求め、アスペリティの位置を 1978 年の地震のアスペリティの南東に隣接した領域に推定している。一方、谷岡・長谷川 (2005) は、1936 年の地震の津波波形記録を用いて断層面上のすべり量分布を推定した結果、すべり量の大きい領域は 1978 年宮城県沖地震のアスペリティのうちの西側のアスペリティにほぼ一致しており、その大きさは  $M_w$  7.2 としている。ただし、当時の津波波形記録には刻時精度の問題があり、その誤差を考慮すると Yamanaka and Kikuchi (2004) の推定したすべり域でも観測記録を説明できないことはない。その場合でも地震の規模は  $M_w$  7.2 であるとした。さらに、1931 年 ( $M$  7.1)、1937 年 ( $M$  7.1) および 1939 年 ( $M$  6.9) には、想定宮城県沖地震の震源域の周辺で、 $M$  7 クラスの地震が発生している。

東北地方太平洋側のプレート境界に存在する多くのアスペリティが繰り返しすべることによるプレート間地震の発生 [永井・他 (2001), Okada *et al.* (2003), Yamanaka and Kikuchi (2003, 2004), Matsuzawa *et al.* (2004), Hasegawa *et al.* (2005)] と同様に、宮城県沖地震はこの地域に存在するアスペリティが平均 37 年間隔で繰り返しすべることによると推定される。したがって、1930 年代の  $M$  7 クラスの 4 つの地震と 1978 年宮城県沖地震のアスペリティの位置関係は、この地域のプレート境界地震の発生機構を理解して、想定宮城県沖地

震の位置および規模の予測精度を向上させるための最重要課題であると考えられる。しかしながら、1930 年代の地震のアスペリティの位置を精度良く決定できるだけの十分な地震波形記録は残されていない。そこで、余震分布はおおよそ震源域の広がりに対応すると仮定して、本研究では過去の観測データを用いて、1930 年代の地震の本震および余震の震源位置を精度良く決定して、1978 年宮城県沖地震のそれらと比較検討することとする。

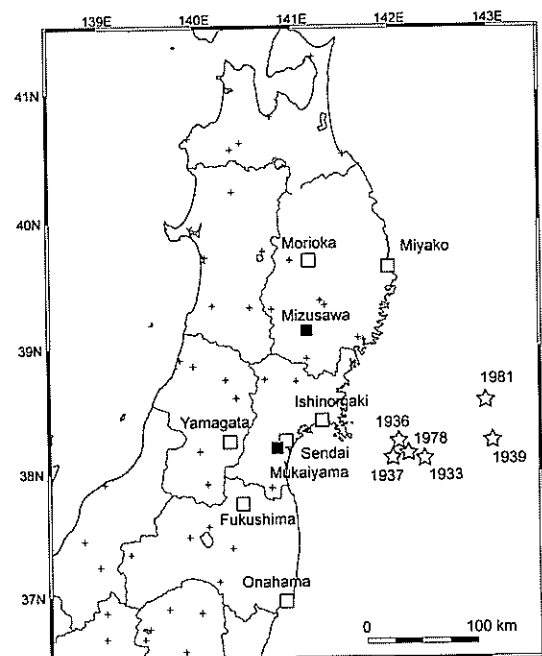


Fig. 1. Map showing observation stations used in the present study. Stations of Japan Meteorological Agency (JMA) are shown by open squares. Solid squares denote Mukaiyama station (Tohoku University) and Mizusawa station (National Astronomical Observatory), whose original smoked-paper seismograms are re-read in this study. Crosses show JMA stations, whose data are not used in the present study. Stars denote the epicenters of the 1930s, 1978, and 1981 Miyagi-oki earthquakes.

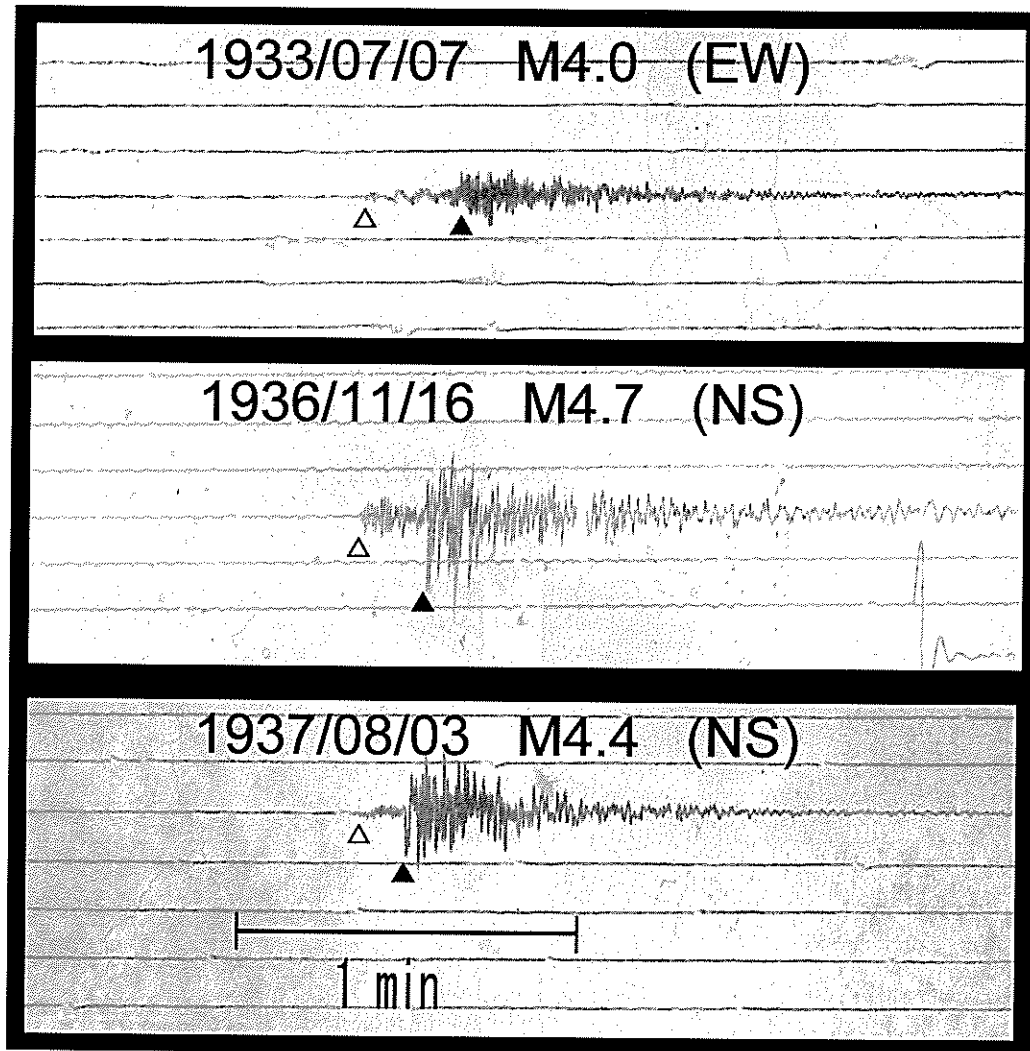


Fig. 2. Examples of horizontal component smoked-paper seismograms. Aftershocks of the 1933, 1936, and 1937 Miyagi-oki earthquakes are shown. Open and solid triangles denote P- and S-wave arrivals detected in this study. Note that S-P times of these aftershocks are consistent with locations of relocated aftershocks shown in Fig. 7.

## §2. データおよび震源決定法

気象庁地震月報の観測データを用いて、1930年代のいくつかの地震の本震および余震の震源位置を決定することを試みた。この当時の地震観測システムで使用していた時計の刻時精度は現在と比較すると問題点があり、観測データの時刻のずれが観測点ごとに異なっていると考えられるため、本研究では地震月報に記載されているS-P時間を用いて震源決定を行うこととした。本研究で使った気象庁観測点の位置をFig. 1に□印で示す。4つの地震のすべてを観測できていない遠方の観測点(図中の○印)は本研究では使用しなかった。これらの気象庁データに、Umino *et al.* (2006)による水沢緯度観測所(現国立天文台水沢センター)と東北大学向山観象所のすず書き記録紙を用いて再観測したS-P時間を加えた。水沢緯度観測所では日常業務として、すず書き記録に記

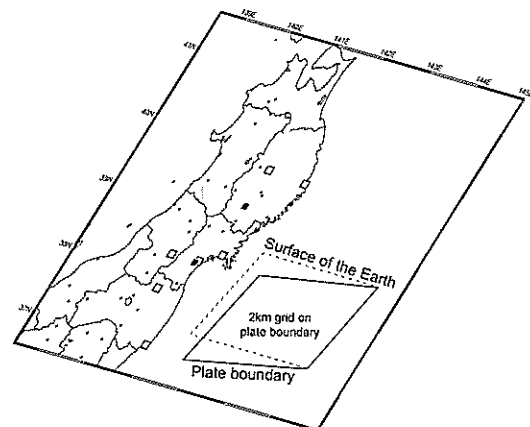


Fig. 3. Schematic map showing the location of the assumed upper surface of the Pacific plate off Miyagi Prefecture. Grids with 2 km intervals are set on the plate interface.

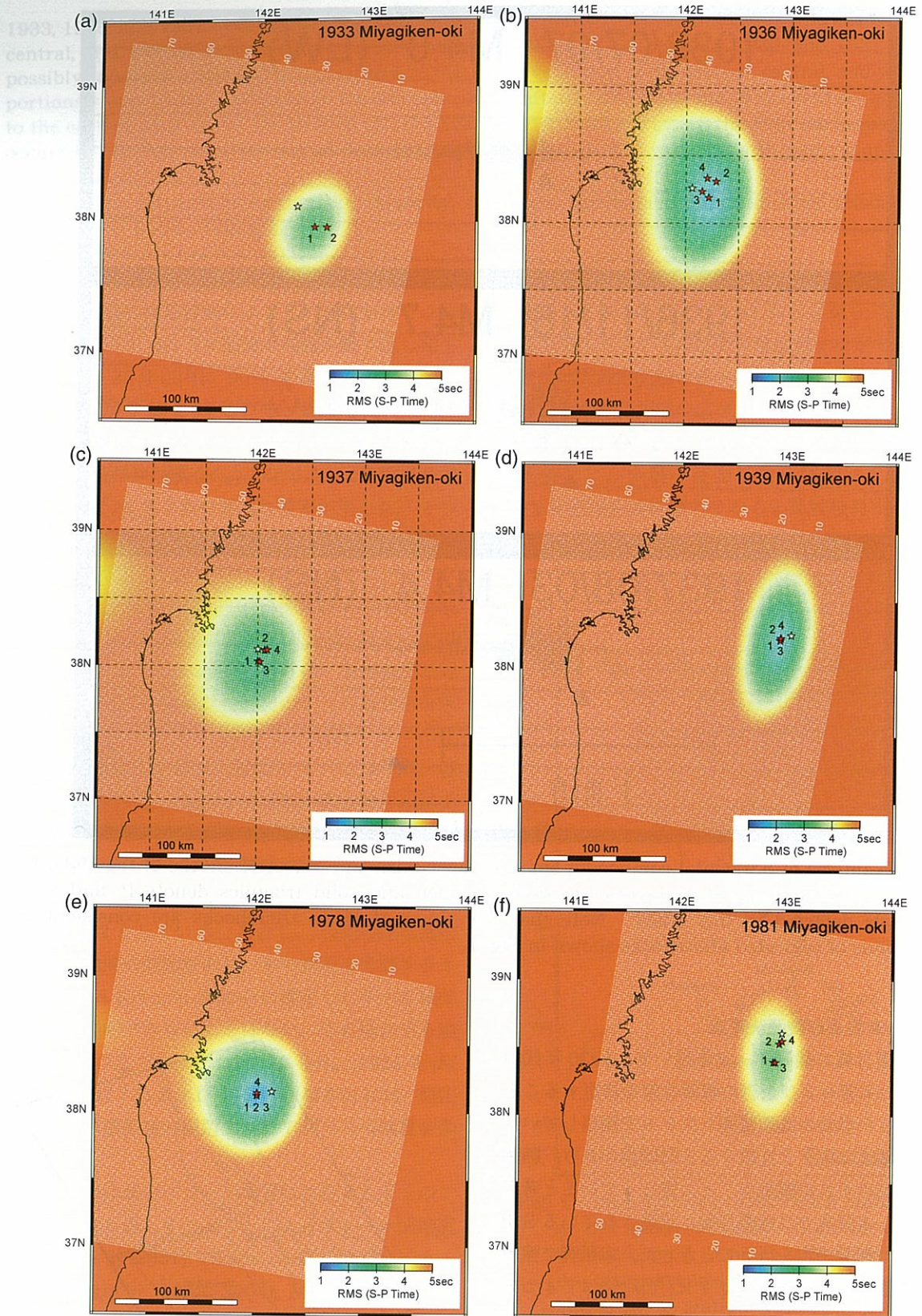


Fig. 4. Distribution of RMS residuals of S-P times estimated by a 2-D grid search method. (a) 1933  $M_{jma}$  7.1 earthquake, (b) 1936  $M_{jma}$  7.4 earthquake, (c) 1937  $M_{jma}$  7.1 earthquake, (d) 1939  $M_{jma}$  6.9 earthquake, (e) 1978  $M_{jma}$  7.4 earthquake, (f) 1981  $M_{jma}$  7.0 earthquake. White crosses and numerals denote locations of grids on the upper surface of the Pacific plate and depths of those grids, respectively. Color scale shows RMS residuals of S-P times estimated by 2-D grid search method. Red stars denote the epicenters determined by S-P data listed in Table 1. White star shows the epicenter determined by Hamada *et al.* (2004).

Table 1. List of seismic stations used for relocations of Miyagi-oki earthquakes. Mukaiyama is a seismic station of Tohoku University, and the other stations belong to Japan Meteorological Agency (JMA).

Year Mag	Case	Seismic station used in a grid search method
1933 M 7.1	1	Miyako, Morioka, Sendai, Yamagata, Onahama
	2	Miyako, Morioka, Yamagata, Onahama
1936 M 7.4	1	Miyako, Morioka, Ishinomaki, Sendai, Yamagata, Fukushima, Onahama, Mukaiyama
	2	Miyako, Morioka, Ishinomaki, Sendai, Yamagata, Fukushima, Mukaiyama
	3	Miyako, Morioka, Sendai, Yamagata, Fukushima, Onahama, Mukaiyama
	4	Miyako, Morioka, Sendai, Yamagata, Fukushima, Mukaiyama
1937 M 7.1	1	Miyako, Morioka, Ishinomaki, Sendai, Yamagata, Fukushima, Onahama, Mukaiyama
	2	Miyako, Morioka, Ishinomaki, Sendai, Yamagata, Fukushima, Mukaiyama
	3	Miyako, Morioka, Sendai, Yamagata, Fukushima, Onahama, Mukaiyama
	4	Miyako, Morioka, Sendai, Yamagata, Fukushima, Mukaiyama
1939 M 6.9	1	Miyako, Morioka, Sendai, Yamagata, Fukushima, Onahama, Mukaiyama
	2	Miyako, Morioka, Sendai, Yamagata, Fukushima, Mukaiyama
	3	Miyako, Morioka, Yamagata, Fukushima, Onahama, Mukaiyama
	4	Miyako, Morioka, Yamagata, Fukushima, Mukaiyama
1978 M 7.4	1	Miyako, Morioka, Ishinomaki, Sendai, Yamagata, Fukushima, Onahama
	2	Miyako, Morioka, Ishinomaki, Sendai, Yamagata, Fukushima
	3	Miyako, Morioka, Sendai, Yamagata, Fukushima, Onahama
	4	Miyako, Morioka, Sendai, Yamagata, Fukushima
1981 M 7.0	1	Miyako, Morioka, Ishinomaki, Sendai, Yamagata, Fukushima, Onahama
	2	Miyako, Morioka, Ishinomaki, Sendai, Yamagata, Fukushima
	3	Miyako, Morioka, Sendai, Yamagata, Fukushima, Onahama
	4	Miyako, Morioka, Sendai, Yamagata, Fukushima

録された地震のPおよびS波の着震時刻を験測し、それらのデータを報告している [The International Latitude Observatory (1984)]. Umino *et al.* (2006) によれば、水沢緯度観測所により報告されているS-P時間は、気象庁データを用いて再決定された震源位置および発震時刻 [浜田・他(2004)] に対してやや不正確なデータが多いが、すす書き記録紙から新たに読み取ったS-P時間はより正確な値になっていることが示されている。気象庁データに再験測した水沢緯度観測所および向山観象所のデータを加えることにより、震源決定精度は向上することが期待される。すす書き記録の例を Fig. 2 に示す。

1978年宮城県沖地震はプレート間地震 [例えば、

Seno *et al.* (1980)] である。本研究では、その近傍で発生した1930年代の地震も宮城県沖のプレート境界で繰り返し発生したプレート間地震であると仮定して、それぞれの地震の震央を推定することとした。プレート境界の位置は、海底地震計の観測による2005年8月16日の宮城県沖の地震(M7.2)の余震の深さ分布 [Hino *et al.* (2006)] を基にして、西北西に約20度で傾き下がる平面を仮定した。仮定したプレート境界の位置を Fig. 3 に模式的に示す。観測されたS-P時間のデータ数が少ないので、震央位置の推定にはグリッドサーチ法を用いる。仮定したプレート境界面上に2 km間隔のグリッドを設定して、それぞれのグリッドに震源を仮定した場合の各観測点でのS-P時間を、東北大学微小地震観測網の地

Table 2. List of hypocenters of the main shocks of  $M \sim 7$  Miyagi-oki earthquakes. Hypocenters determined by Hamada *et al.* (2004) is shown by LAT<sub>j</sub>, LON<sub>j</sub>, and DEP<sub>j</sub>. Relocated hypocenters are shown by LAT<sub>r</sub>, LON<sub>r</sub>, and DEP<sub>r</sub> for each data set from case 1 to case 4 (see Table 1). RMS denotes RMS residuals of S-P times.

Date	Origin time	LAT <sub>j</sub>	LON <sub>j</sub>	DEP <sub>j</sub>	$M_j$	LAT <sub>r</sub>	LON <sub>r</sub>	DEP <sub>r</sub>	RMS	Case
1933/06/19 06:37:34.1		38.108	142.323	12.0	7.1	37.9504	142.4914	24.9	2.130	1
						37.9484	142.5772	18.9	1.822	2
1936/11/03 05:45:57.1		38.262	142.062	61.0	7.4	38.1906	142.2215	33.7	1.858	1
						38.3085	142.2948	32.4	1.565	2
						38.2356	142.1620	35.6	1.269	3
						38.3390	142.2087	35.0	0.513	4
1937/07/27 04:56:32.2		38.122	142.000	56.0	7.1	38.0382	142.0017	38.7	2.735	1
						38.1207	142.0665	37.5	2.816	2
						38.0350	142.0242	38.1	2.922	3
						38.1176	142.0890	36.8	3.055	4
1939/10/11 03:31:50.7		38.255	143.028	17.0	6.9	38.2175	142.9251	14.8	0.952	1
						38.2353	142.9293	14.8	0.994	2
						38.2175	142.9251	14.8	1.020	3
						38.2353	142.9293	14.8	1.078	4
1978/06/12 17:14:25.4		38.150	142.167	40.0	7.4	38.1270	142.0215	38.7	0.492	1
						38.1270	142.0215	38.7	0.539	2
						38.1270	142.0215	38.7	0.490	3
						38.1448	142.0255	38.7	0.545	4
1981/01/19 03:17:23.9		38.600	142.967	0.0	7.0	38.3981	142.8933	9.1	2.320	1
						38.5370	142.9481	8.8	2.117	2
						38.3949	142.9159	8.8	2.500	3
						38.5516	142.9748	8.4	2.221	4

震波速度構造モデル [Hasegawa *et al.* (1978)] を用いて計算し、観測値との残差が最小となるグリッドを求めらる。

### § 3. 1930年代の地震と1978年宮城県沖地震の本震と余震の震央分布

#### 3.1 本震の震央位置

気象庁地震月報のデータと東北大学向山観象所のすず書き記録から験測したS-P時間を用いて、それぞれの本震の震央位置を決定した。水沢緯度観測所の本震の記録波形は、S波振幅が飽和していたために、S-P時間を験測できなかった。データ数が少ないので、観測点の組み合わせによっては震央位置が大きく変化することも考えられるため、Table 1に示した観測点の組み合わせにより、震央を決定した。Case 1から4までの観測点の組み合わせによる震央位置をFig. 4に赤星印で示してある。図中の白+印はグリッドの位置を、カラスケールはCase 1の観測点組み合わせにおけるS-P時間の残差のRMSを表す。図からわかるように、震央位置は観測点の組み合わせの違いにより最大20 km程度変化して

いるが、1978年の地震の場合には観測点の組み合わせを変えても、震央位置はほとんど変化しないことがわかる。白星印は浜田・他(2004)による気象庁再決定震源

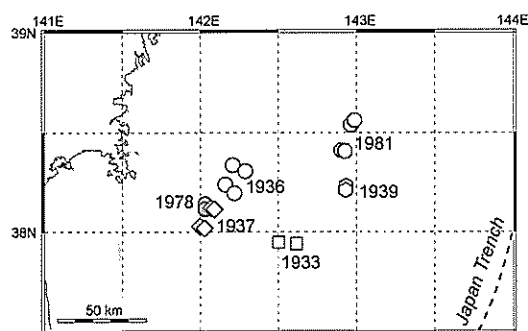


Fig. 5. Epicenter distribution of 1930s, 1978, and 1981 Miyagi-oki earthquakes estimated from S-P times. Squares, circles, diamonds, hexagons and octagons show the epicenters of the 1933, 1936, 1937, 1939, and 1981 event, respectively. Gray circles denote the epicenters of the 1978 event. All locations of those events are listed in Table 2.

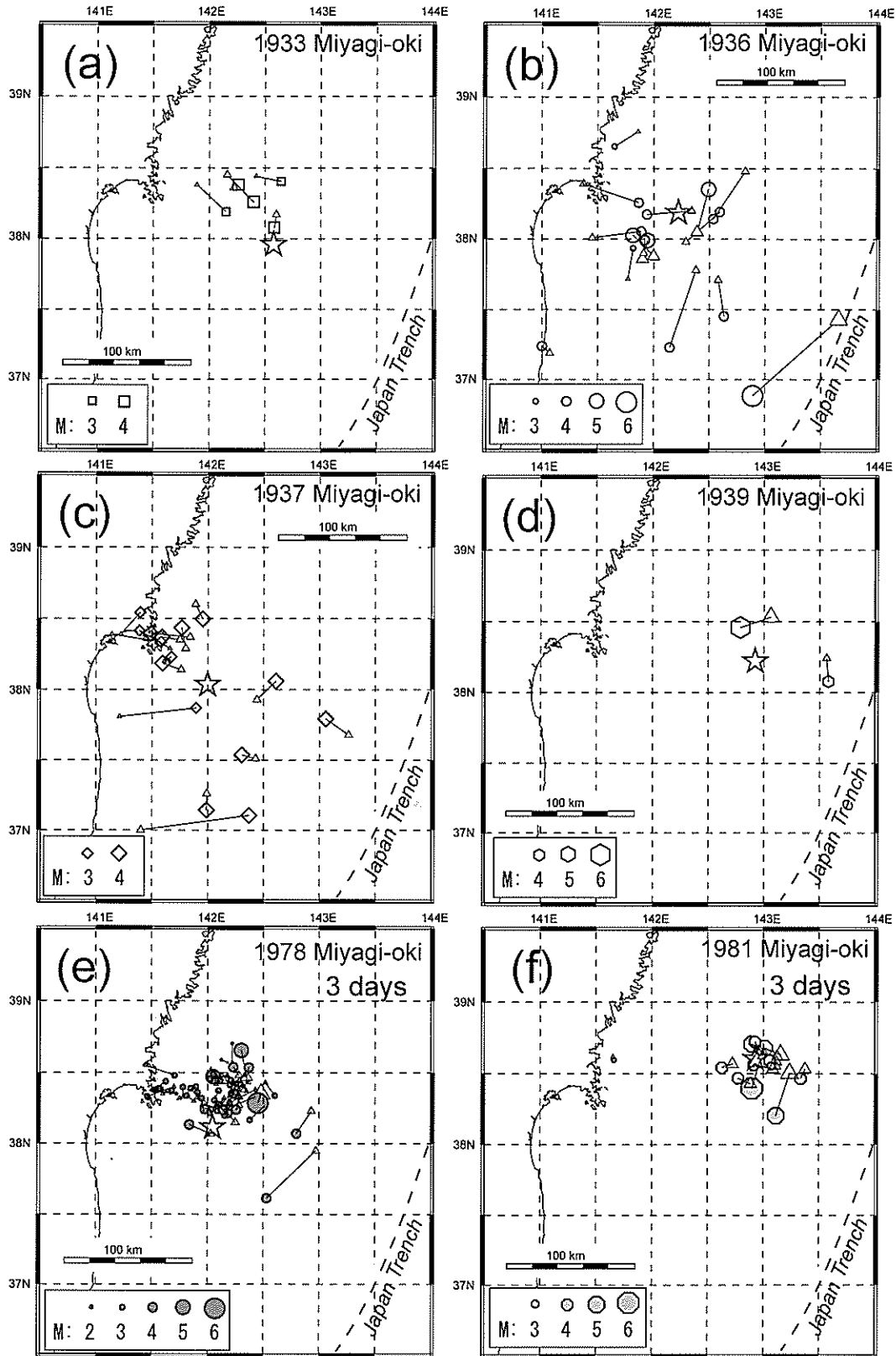


Fig. 6. Epicenter distribution of the main shocks and aftershocks. Stars denote locations of the main shocks estimated from S-P times. Triangles show locations of aftershocks estimated by Hamada *et al.* (2004). (a) Distribution of aftershocks of the 1933 event within one month (squares). (b) Distribution of aftershocks of the 1936 event within one month (circles). (c) Distribution of aftershocks of the 1937 event within one month (diamonds). (d) Distribution of aftershocks of the 1939 event within one month (hexagons). (e) Distribution of aftershocks of the 1978 event within three days (solid circles). (f) Distribution of foreshocks and aftershocks of the 1981 event within three days (octagons).

Table 3. List of hypocenters of aftershocks of the  $M\sim 7$  Miyagi-oki earthquakes. LATj, LONj, and DEPj show hypocenters of aftershocks determined by Hamada *et al.* (2004). Relocated hypocenters are shown by LATr, LONr, and DEPr. Ns denotes the number of stations for relocation of earthquakes.

Date	Origin time	LATj	LONj	DEPj	$M_j$	Ns	LATr	LONr	DEPr
1933/06/19	09:24:07.0	38.377	141.892	0.0	3.5	4	38.1932	42.1461	34.2
1933/06/19	15:18:00.6	38.355	142.220	45.0	4.5	4	38.3791	142.2579	32.0
1933/06/23	12:26:42.6	38.172	142.603	12.0	4.7	5	38.0759	142.5835	19.6
1933/07/07	12:47:48.4	38.442	142.415	2.0	3.6	4	38.4054	142.6432	23.6
1933/07/07	13:16:17.0	38.445	142.163	4.0	4.0	4	38.2570	142.3993	29.3
1936/11/03	07:43:31.9	38.047	142.38	28.0	5.1	6	38.3539	142.4914	27.4
1936/11/03	21:02:22.3	37.980	142.288	91.0	4.1	4	38.1925	142.5937	23.6
1936/11/07	08:55:53.1	37.580	142.492	14.0	4.6	4	37.0747	140.3060	79.7
1936/11/07	14:27:17.5	38.480	142.820	8.0	4.8	5	38.1457	142.5364	24.9
1936/11/11	00:17:08.0	37.855	141.897	35.0	5.1	7	37.9911	141.9449	40.0
1936/11/11	18:48:20.7	37.708	142.575	1.0	4.6	5	37.4533	142.6311	17.9
1936/11/14	09:57:48.8	37.427	143.658	0.0	6.0	6	36.8831	142.8894	7.2
1936/11/16	12:22:35.4	38.202	142.342	48.0	4.7	7	38.1751	141.9395	41.3
1936/11/17	00:50:44.2	37.895	141.913	70.0	4.6	4	37.9942	141.9225	40.6
1936/11/18	04:53:50.9	38.385	141.368	86.0	4.9	7	38.2586	141.8651	43.8
1936/11/22	06:48:00.2	37.878	141.998	48.0	5.6	7	38.0276	141.8141	43.8
1936/11/27	00:18:36.7	38.005	141.452	44.0	4.6	6	38.0538	141.8894	41.9
1936/11/28	02:04:04.9	38.757	141.855	0.0	3.5	4	38.6543	41.6497	52.0
1936/11/30	11:34:24.0	37.780	142.383	0.0	4.8	4	37.2302	142.1443	29.9
1936/12/03	16:15:31.1	37.717	141.768	54.0	3.8	4	37.9356	141.8170	43.2
1937/07/27	11:21:50.0	38.392	141.223	32.0	3.0	4	38.4079	141.5019	50.0
1937/07/27	11:53:02.7	38.387	141.137	72.0	3.5	6	38.2128	141.5926	58.0
1937/07/27	16:35:10.6	37.805	141.210	90.0	3.4	4	37.8403	142.0681	20.0
1937/07/28	11:15:32.0	38.368	141.843	28.0	4.2	5	38.3015	141.6832	14.0
1937/07/28	18:25:01.4	38.202	141.610	54.0	3.0	5	38.1241	141.8418	32.0
1937/07/29	06:51:24.3	37.682	143.262	56.0	4.3	4	37.7150	143.2005	10.0
1937/07/30	02:29:02.7	37.515	142.430	49.0	4.9	4	37.3602	142.4776	58.0
1937/08/03	22:21:59.3	38.353	141.750	49.0	4.4	8	38.2495	141.7323	50.0
1937/08/09	06:39:41.5	37.263	141.985	12.0	4.9	6	37.1084	142.0309	10.0
1937/08/11	09:40:08.3	38.293	141.655	51.0	3.7	5	38.2672	141.4821	60.0
1937/08/11	23:37:33.8	38.603	141.890	64.0	4.0	4	38.5865	141.5276	84.0
1937/08/16	04:41:32.8	37.930	142.437	71.0	4.1	5	37.9279	142.4550	108.0
1937/08/18	15:25:45.2	38.285	141.803	30.0	4.0	6	38.3382	141.9142	40.0
1937/08/21	17:07:19.9	37.002	141.403	61.0	4.4	5	37.1084	142.4104	10.0
1937/08/22	02:39:18.6	38.138	141.758	36.0	4.8	6	38.0899	141.6414	64.0
1939/10/11	03:50:49.0	38.527	143.073	30.0	6.3	6	38.4568	142.7952	19.8
1939/10/11	19:20:22.7	38.238	143.568	0.0	4.9	6	38.0786	143.5869	0.8
1978/06/12	17:46:51.3	38.300	141.883	50.0	3.9	4	38.3621	141.9114	43.2
1978/06/12	17:49:40.1	38.333	141.783	50.0	3.8	4	38.3985	141.7799	46.9
1978/06/12	18:07:52.4	38.317	141.750	50.0	3.9	5	38.4008	141.8967	43.8
1978/06/12	18:11:53.2	38.367	141.550	60.0	2.7	4	38.3514	141.7229	48.2
1978/06/12	18:12:56.0	38.462	142.350	40.0	5.7	8	38.6555	142.3042	34.3
1978/06/12	18:19:22.6	38.550	141.450	60.0	3.5	5	38.4820	141.7051	49.5
1978/06/12	18:40:30.2	38.450	142.133	40.0	5.2	8	38.4709	142.0522	40.0
1978/06/12	18:52:35.7	38.400	141.700	60.0	3.2	5	38.3316	141.4630	55.1
1978/06/12	18:56:36.1	38.267	142.383	40.0	4.0	6	38.2407	142.2561	33.1
1978/06/12	20:09:37.9	38.417	142.083	40.0	3.6	5	38.4886	142.0562	40.0
1978/06/12	20:14:19.2	38.283	141.967	60.0	4.7	7	38.2451	142.0945	37.5



Table 3. Continued.

Date	Origin time	LATj	LONj	DEPj	$M_j$	Ns	LATr	LONr	DEPr
1978/06/12	20:45:39.7	38.467	142.183	30.0	2.8	4	38.4677	142.0748	39.4
1978/06/12	22:04:52.5	38.150	142.250	40.0	4.1	7	38.2147	142.1805	35.0
1978/06/12	22:29:50.8	38.483	142.283	30.0	4.2	7	38.5376	142.2305	35.6
1978/06/12	23:43:18.7	38.317	141.917	50.0	3.2	5	38.3892	141.8476	45.0
1978/06/13	00:51:20.7	38.417	142.250	30.0	3.2	5	38.2857	142.1966	35.0
1978/06/13	02:34:21.4	38.317	142.067	40.0	3.8	5	38.3726	142.0999	38.1
1978/06/13	03:43:09.5	38.533	142.033	50.0	2.8	4	38.4646	142.0974	38.7
1978/06/13	04:12:31.8	38.283	142.133	40.0	3.2	4	38.4215	142.2740	33.7
1978/06/13	06:03:05.7	38.200	142.183	40.0	3.7	5	38.3047	142.0614	38.7
1978/06/13	06:14:47.9	38.433	142.300	30.0	3.6	5	38.4488	142.2103	35.6
1978/06/13	07:16:53.3	38.567	142.183	30.0	2.9	4	38.5889	142.1255	38.7
1978/06/13	11:12:35.3	38.300	141.833	50.0	3.6	6	38.3390	141.8132	45.7
1978/06/13	13:41:55.6	38.317	142.150	30.0	3.0	5	38.2806	142.1024	37.5
1978/06/13	14:07:52.8	38.483	142.333	30.0	3.4	5	38.4132	142.2022	35.6
1978/06/13	16:15:27.7	38.367	141.517	60.0	3.2	6	38.3906	141.5687	52.6
1978/06/14	00:00:13.8	38.350	141.667	60.0	2.7	4	38.3876	141.5913	52.0
1978/06/14	04:43:30.4	38.350	141.600	60.0	3.0	5	38.3753	141.6817	49.5
1978/06/14	05:45:18.6	38.067	142.033	40.0	4.8	8	38.1342	141.8376	43.8
1978/06/14	06:23:07.5	38.383	141.533	60.0	3.2	6	38.4378	141.6256	51.4
1978/06/14	09:22:24.0	38.233	142.933	30.0	4.3	5	38.0711	142.7976	17.3
1978/06/14	12:35:48.4	38.283	142.200	40.0	4.2	6	38.2430	141.9778	40.6
1978/06/14	13:39:29.8	38.383	142.283	30.0	3.8	5	38.3295	142.2763	33.1
1978/06/14	14:33:56.4	37.950	142.967	10.0	4.3	4	37.6148	142.5300	21.7
1978/06/14	16:55:53.3	38.583	142.217	30.0	2.8	4	38.7038	142.2217	6.8
1978/06/14	20:34:18.9	38.350	142.483	40.0	6.3	8	38.2861	142.4525	28.0
1978/06/14	21:03:46.1	38.367	142.350	30.0	3.7	5	38.4183	142.2966	33.1
1978/06/14	21:07:51.9	38.433	142.367	20.0	3.3	5	38.3568	142.2127	35.0
1978/06/14	22:44:03.9	38.433	142.517	30.0	3.6	4	38.3377	142.6041	24.2
1978/06/15	03:55:02.2	38.417	142.217	30.0	3.5	4	38.2001	142.1540	35.6
1978/06/15	05:46:40.5	38.383	142.333	40.0	4.1	6	38.5362	142.3702	31.8
1978/06/15	08:57:58.1	38.267	142.517	30.0	3.7	4	38.1683	142.3790	29.3
1978/06/15	09:45:32.1	38.217	141.967	50.0	3.8	6	38.3204	141.9486	41.9
1978/06/15	10:30:05.5	38.383	142.433	10.0	3.8	5	38.2190	142.0189	39.4
1978/06/15	13:01:44.4	38.433	142.067	50.0	3.3	5	38.4437	142.1159	38.1
1978/06/15	14:09:53.6	38.483	142.183	40.0	3.6	5	38.4563	142.0256	40.6
1978/06/15	14:58:45.8	38.333	142.433	40.0	4.0	4	38.2388	142.1395	36.2
<hr/>									
1981/01/18	18:43:34.0	38.500	143.233	0.0	6.1	6	38.2033	143.1049	5.3
1981/01/19	20:46:51.3	38.533	143.667	0.0	5.9	4	38.4647	143.3281	2.8
1981/01/19	02:10:29.1	38.533	143.083	0.0	5.5	4	38.5611	142.9069	9.5
1981/01/19	03:11:27.0	38.633	143.150	0.0	6.1	5	38.6759	143.0032	8.4
1981/01/19	05:35:51.4	38.567	142.717	0.0	5.2	4	38.5455	142.6234	13.7
1981/01/19	09:30:50.9	38.367	143.583	0.0	5.0	4	38.6454	143.3469	3.1
1981/01/19	10:14:04.4	38.600	143.083	0.0	6.0	4	38.7095	142.8939	10.2
1981/01/19	11:42:01.5	38.617	143.117	0.0	5.1	5	38.5953	143.0548	7.4
1981/01/19	23:02:35.4	38.433	142.883	0.0	5.2	7	38.4703	142.7698	11.3
1981/01/20	06:28:32.7	38.617	141.650	10.0	3.1	4	38.6010	141.6564	28.5
1981/01/20	16:27:49.7	38.550	143.117	0.0	4.5	5	38.5566	143.0693	7.0

の位置を示しており、いずれの地震においてもS-Pデータにより再決定した震央位置とのずれは小さいことがわかる。本研究では、浜田・他(2004)による気象庁再決定震源を「気象庁震源」と呼ぶことにする。気象庁震

源と再決定した各Caseの震源をTable 2に示す。

観測点の組み合わせによる震央位置の変化をまとめてFig. 5に示す。1930年代の地震の震央のばらつきが大きいのは、当時の地震観測システムのダイナミックレン

ジが狭いために、大きな地震の S-P 時間の読み取り精度が相対的に悪いことが原因と考えられる。1933 年の地震の震央が南東方向にずれているのは、使用できた観測点数がそのほかの地震に比べて少ないためかもしれない (Table 1)。Fig. 4(a) に示すように、1933 年の地震の気象庁震源は北西方向に約 30 km ずれていることを考慮すると、1933 年、1936 年、1937 年、1978 年の地震の破壊の開始点は互いに近かった可能性が高いと考えられる。一方、1939 年の地震の震央は、気象庁震源および再決定震源とも、1978 年宮城県沖地震の震源域から東にずれていることがわかる。

### 3.2 余震の震源分布

水沢緯度観測所と向山観象所のすず書き記録から験測した S-P 時間を気象庁地震月報のデータに加えることにより、1930 年代の 4 つの地震と 1978 年の地震の余震の震央位置をグリッドサーチ法で求めた。

1933 年、1936 年および 1978 年の地震の余震については、本震の震央位置の推定方法と同様に、プレート境界に設定した 2 次元グリッドを用いることとした。余震の  $M$  が小さい場合には S-P 時間が験測された観測点数が少なくなるが、ここでは Fig. 1 に示した観測点のうち 4 点以上の観測点で S-P 時間データが得られた余震について再決定を行った。

Kanamori *et al.* (2005) は、1933 年、1936 年、1937 年、1978 年、2005 年の宮城県沖の地震の遠地波形記録を比較して、1937 年の地震は表面波振幅が他の地震のそれよりも小さいことを見いだした。また、彼らは、1937 年の Pasadena の Benioff 型短周期地震計の波形記録に pP 波が記録されている、との Gutenberg の記述を引用して、1937 年の地震は、1978 年 2 月 20 日の宮城県沖の地震 ( $M$  6.7) や 2003 年 5 月 26 日の宮城県沖の地震 ( $M$  7.1) と同様に、プレート内地震であるとしている。そこで、我々は 1937 年の地震の余震については震源の深さをプレート境界に固定しないで、2 km 間隔の 3 次元グリッドに震源を仮定して、S-P 時間の残差が最小となるグリッドを求めることとした。その結果、震源の深さが精度良く決定できた余震はすべてプレート境界およびその近傍に発生していたことが確認できた [Umino *et al.* (2006)]. さらに、Umino *et al.* (2006) は、本震の震源の深さを変化させても、メカニズム解は低角逆断層型となることを示している。これらのことから、1937 年の地震もプレート境界地震であったと考えられる。

本震発生後 1 カ月間に発生した余震の再決定震源の分布を Fig. 6 に示す。ただし、1978 年の地震については本震後 3 日間の余震分布を示す。参考のために気象庁

震源の位置を三角印で、Fig. 4 に示した本震 (Case 1) の位置を星印で示す。これらの余震の再決定震源の位置を Table 3 に示す。1978 年宮城県沖地震の震源域内およびその近傍で発生した余震に限ってみると、それらの再決定震源と気象庁震源とのずれは、それほど大きくはない。しかし、震源域より離れた領域で発生した余震の中には、気象庁震源から大きくずれているものもある。これらの余震については、再決定に使用した観測点の配置 [Fig. 1 参照] があまり適切ではないために、このような結果になった可能性がある。

### § 4. 議 論

1930 年代の地震と 1978 年宮城県沖地震の本震および余震の震源分布を、S-P 時間を用いてグリッドサーチ法で推定した。余震の震央分布と本震の震源域とはおよそ一致すると仮定して、再決定した余震の震央分布から本震の震源域を推定してみる。Fig. 7(a) は 1930 年代と 1978 年の地震の本震 (Case 1) および余震の震央分布である。それぞれの地震の余震分布をおおよそ取り囲むような楕円を示してある。楕円の大きさは、余震域の大きさと  $M$  の関係式 [例えば、宇津・関 (1955)] をほぼ満足するサイズである。Fig. 5 から明らかなように、1930 年代の観測データを用いて決定した震源位置には 20 km 程度のばらつきが含まれていると考えられるが、プレート境界に発生した 1933 年、1936 年、1937 年のそれぞれの余震域は、1978 年宮城県沖地震の余震域の東側、中央部、西側の一部と重なっており、これら 3 つの地震の余震域を足し合わせたものが 1978 年の地震の余震域とほぼ一致しているようにみえる。

谷岡・長谷川 (2005) は、津波波形のインバージョンにより 1936 年の地震のモーメントマグニチュードを  $M_w$  7.2 としているが、これは  $M_{jma}$  7.4 よりは有意に小さな  $M$  となっている。また、Kanamori *et al.* (2005) は、遠地地震波形記録の大きさから 1936 年の地震は 2005 年の宮城県沖の地震 ( $M$  7.2) とほぼ同じ  $M$  であり、その震源位置をほとんど同じ場所、すなわち、1978 年宮城県沖地震の震源域内の南側の一部であると考えている。

また、1978 年宮城県沖地震では、得られたすべり分布 [Seno *et al.* (1980), 加藤・他 (2003), Yamanaka and Kikuchi (2004)] から 3 つのアスペリティがほぼ同時にすべったとも考えられる。Fig. 7(b) にそれぞれの研究から推定されたアスペリティの位置を示す。推定された 3 つのアスペリティの位置は、それぞれ少しずつ異なっているが、おおむね、東側、中央部 (または南側)、西側と 3 つに分かれている。

これらのことから、前回の 1978 年宮城県沖地震では

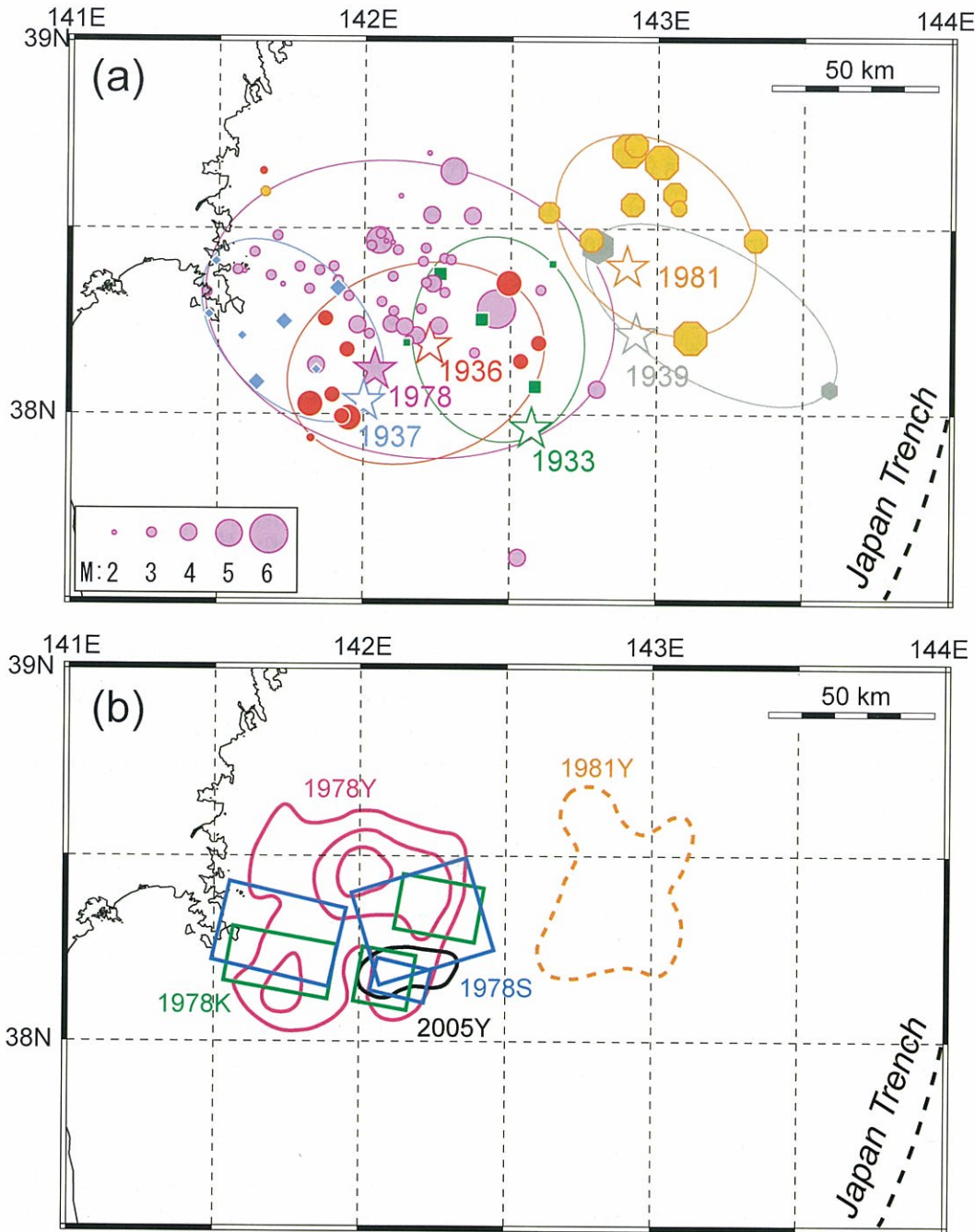


Fig. 7. (a) Epicenter distribution of the main shocks and aftershocks of the previous  $M\sim 7$  Miyagi-oki earthquakes. Green squares, red circles, blue diamonds, gray hexagons, pink circles, and orange octagons denote epicenters of aftershocks of the 1933, 1936, 1937, 1939, 1978, and 1981 earthquakes, respectively. Estimated aftershock areas of these earthquakes are roughly encircled by ellipses. The combined aftershock area of the 1933, 1936, and 1937 earthquakes is in close agreement with that of the 1978 earthquake. Stars denote the epicenters of main shocks. (b) Asperity distribution of Miyagi-oki earthquakes. Blue rectangles, green rectangles, and pink contours denote the asperities of 1978 Miyagi-oki earthquake estimated by Seno *et al.* (1980), Kato *et al.* (2003), and Yamanaka and Kikuchi (2004), respectively. Orange dotted line denotes the asperity of 1981 Miyagi-oki earthquake estimated by Yamanaka and Kikuchi (2004). Black line shows the asperity of 2005 Miyagi-oki earthquake estimated by Yaginuma *et al.* (2007).

隣接した3つのアスペリティが同時に破壊したのに対して、前々回の宮城県沖地震では1936年 ( $M_{jma}$  7.4) の地震のみではなく、1933年 ( $M_{jma}$  7.1), 1936年 ( $M_{jma}$

7.4/ $M_w$  7.2), 1937年 ( $M_{jma}$  7.1) の3つの地震が時間においてそれぞれのアスペリティを破壊したものである、と考えることができる。

Okada *et al.* (2005) は、1978 年宮城県沖地震と 2005 年の宮城県沖の地震の本震および余震を、ダブルディファレンス震源決定法[Waldhauser and Ellsworth (2000)]により震源決定して、2つの地震の本震の破壊の開始点はほぼ同じ場所であり、2005年の余震域は1978年の余震域の南（あるいは南東）部分に一致していることを明らかにした。さらに、柳沼・他(2007)は、2005年の地震の近地および遠地地震波形を用いてすべり量分布を推定した。彼らが推定した2005年の地震のアスペリティの位置を Fig. 7(b) に黒色コンターで示す。図からわかるように、2005年の地震のアスペリティは1978年の地震の3つのアスペリティのうちの南側（あるいは中央部）のアスペリティに一致しているように見える。2005年の地震の  $M_{jma}$  7.2 は1936年の地震の  $M_w$  7.2 [谷岡・長谷川(2005)] とほとんど同じ大きさであると考えられ、震源域もほとんど同じである[Kanamori *et al.* (2005)]ことから、2005年の地震は1936年の地震のアスペリティの繰り返しすべりであると推定される。

Uchida *et al.* (2006) は、プレート境界で発生している小繰り返し地震(相似地震)の解析から、2005年の地震の発生後も1978年宮城県沖地震の震源域およびその周辺ではプレート境界の固着は維持されているが、震源域の東側の日本海溝に近い領域ではプレート間のすべりがやや加速されて、 $M6$  クラスの地震2個(2005年8月24日と31日)を含む地震活動が活発化したことを明らかにした。

地震活動が活発化したこの領域では、1978年宮城県沖地震の発生の約2年半後の1981年1月19日に  $M_{jma}$  7.0の地震が発生している。そこで、比較のために1981年の地震についても同様にS-P時間を用いてグリッドサーチ法により震源再決定を試みた。この地震は2つの  $M6$  クラスの地震を含む活発な前震活動を伴っていたため、本震の前後3日間の地震の再決定を行った。再決定した本震の位置を Fig. 4(f) に、前震および余震の位置を Fig. 6(f) にそれぞれ示す。また、再決定した地震の震央分布から推定した1981年の地震のおおよその震源域を Fig. 7(a) に橙色楕円で示した。また、Yamanaka and Kikuchi (2004) により推定されたアスペリティの位置を Fig. 7(b) に橙色破線で示す。本研究で再決定された地震数が少ないが、1939年の地震( $M_{jma}$  6.9)は1981年の地震の震源域と同じ場所で発生した地震である可能性が高いと考えられる。すなわち、1930年代の一連の宮城県沖の地震活動の際にも、1978年宮城県沖地震の震源域内の3つのアスペリティがすべった後に、その東側のアスペリティが時間をおいて(この場合

には約2年後に)すべったと考えられる。

## §5. おわりに

S-P時間を用いてグリッドサーチ法により、1930年代に発生した一連の宮城県沖の地震と1978年宮城県沖地震の本震および余震の震源再決定を行い、本震・余震分布を比較した結果、

- (1) 1978年宮城県沖地震の震源域には主として3つのアスペリティが存在する、
- (2) それらのアスペリティは、同時にすべる場合[1978年宮城県沖地震]もあるが、別々にすべる場合[1930年代の3つの地震]もある、
- (3) 2005年宮城県沖の地震は、3つのアスペリティのうちの南側(あるいは中央部)のものがすべったためであり、残りの(2つの)アスペリティはまだ固着している、

ことが考えられる。

今後、1930年代の3つの地震の地震時すべりの大きさを定量的に評価して、それぞれの地震のアスペリティと1978年宮城県沖地震のアスペリティの空間分布を詳細に比較できるようになれば、想定宮城県沖地震の発生機構を解明するための重要な手がかりが得られると考えられる。

## 謝 辞

本研究に際して、東北大学地震・噴火予知研究観測センターの皆様、気象庁浜田信生氏からは有益な助言をいただきました。酒井慎一氏、棚田俊收氏と1名の匿名査読者からのコメントは本稿を改善するのに役立ちました。本研究の一部は、科学技術振興費新世紀重点研究創世プラン「東南海・南海地震等海溝型地震に関する調査研究」、文部科学省科学研究費(特別研究促進費)「2005年8月16日に発生した宮城県沖の地震に関する調査研究」、21世紀COEプログラム「先端地球科学技術による地球の未来像創出」の一環として行われました。

## 文 献

- 浜田信生・吉川一光・近藤さや・鎌谷紀子・明田川保・松浦律子・鈴木保典, 2004, 日本の震源カタログの改善—1923年~1925年部分の新規作成と1926年以降の改善—, 験震時報, 68, 1-24.
- Hasegawa, A., N. Umino, and A. Takagi, 1978, Dobleplaned structure of the deep seismic zone in the northeastern Japan arc, *Tectonophysics*, 47, 43-58.
- Hasegawa, A., N. Uchida, T. Igarashi, T. Matsuzawa, T. Okada, S. Miura, and Y. Suwa, 2005, Asperities and quasi-static slip on the subducting plate boundary east off Tohoku, NE Japan, *SEIZE* volume,

- Columbia Univ. Press. (in press).
- Hino, R., Y. Yamamoto, M. Kuwano, M. Nishino, T. Kanazawa, T. Yamada, K. Nakahigashi, K. Mochizuki, M. Shinohara, K. Minato, G. Aoki, N. Okawara, M. Tanaka, M. Abe, E. Araki, S. Kodaira, G. Fujie, and Y. Kaneda, 2006, Hypocenter distribution of the main- and aftershocks of the 2005 Off Miyagi Prefecture Earthquake located by ocean bottom seismographic data, *Earth Planets Space* (in press).
- 地震調査委員会, 2000, 宮城県沖地震の長期評価(平成12年11月27日公表, 平成13年3月14日訂正, 平成15年11月12日変更), <<http://www.jishin.go.jp/main/chousa/00nov4/miyagi.htm>> (参照2006-7-25).
- Kanamori, H., M. Miyazaki and J. Mori, 2005, Comparison of the 1936 and 2005 earthquakes off Shore Miyagi prefecture from seismograms, Programme and Abstracts the Seismological Society of Japan, 2005, Fall meeting, PM09.
- 加藤研一・武村雅之・池浦友則, 2003, 1978年宮城県沖地震のアスペリティー分布と震源近傍の強震動一波形インバージョン結果に基づく検討一, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), p. 135.
- Matsuzawa, T., N. Uchida, T. Igarashi, T. Okada, and A. Hasegawa, 2004, Repeating earthquakes and quasi-static slip on the plate boundary east off northeastern Honshu, Japan, *Earth Planets Space*, **56**, 803-811.
- 永井理子・菊地正幸・山中佳子, 2001, 三陸沖における再来大地震の震源過程の比較研究—1968年十勝沖地震と1994年三陸はるか沖地震の比較—, *地震* **2**, **54**, 267-280.
- Okada, T., T. Matsuzawa, and A. Hasegawa, 2003, Comparison of source areas of  $M 4.8+/-0.1$  repeating earthquakes off Kamaishi, NE Japan—Are asperities persistent features? *Earth Planet. Sci. Lett.*, **213**, 361-374.
- Okada, T., T. Yaginuma, N. Umino, T. Kono, T. Matsuzawa, S. Kita, and A. Hasegawa, 2005, The 2005  $M 7.2$  MIYAGI-OKI earthquake, NE Japan: Possible re-rupturing of one of asperities that caused the previous  $M 7.4$  earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L24302. doi: 10.1029/2005GL024613.
- Seno, T., K. Shimazaki, P. Somerville, K. Sudo, and T. Eguchi, 1980, Rupture process of the Miyagi-Oki, Japan, earthquake of June 12, 1978, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **23**, 39-61.
- 谷岡勇市郎・長谷川洋平, 2005, 津波波形を用いた1936年宮城県沖地震の震源過程の再解析, 日本地震学会講演予稿集2005年秋季大会, p. 128.
- The International Latitude Observatory, 1984, Seismological observations at Mizusawa for the period between 1902~1967, pp. 379.
- Uchida, N., T. Matsuzawa, S. Hirahara, and A. Hasegawa, 2006, Small repeating earthquakes and interplate creep around the 2005 Miyagi-oki earthquake ( $M 7.2$ ), submitted to *Earth Planets Space*.
- Umino, N., T. Kono, T. Okada, J. Nakajima, T. Matsuzawa, N. Uchida, A. Hasegawa, Y. Tamura, and G. Aoki, 2006, Revisiting the three  $M \sim 7$  Miyagi-oki earthquakes in the 1930s: Possible seismogenic slip on asperities that were re-ruptured during the 1978 Miyagi-oki earthquake, *Earth Planets Space* (in press).
- 宇津徳治・関 彰, 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.
- Waldhauser, F. and W. L. Ellsworth, 2000, A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward fault, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**, 1353-1368.
- 柳沼直・岡田知己・長谷川 昭・加藤研一・武村雅之・八木勇治, 2007, 近地・遠地震波形インバージョンによる2005年宮城県沖の地震( $M 7.2$ )の地震時すべり量分布—1978年宮城県沖地震( $M 7.4$ )との関係, 地震 **2**, **60** (印刷中).
- Yamanaka, Y. and M. Kikuchi, 2003, Source process of the recurrent Tokachi-oki earthquake on September 26, 2003, inferred from teleseismic body waves, *Earth Planets Space*, **55**, e21-e24.
- Yamanaka, Y. and M. Kikuchi, 2004, Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data, *J. Geophys. Res.*, **109**, B07307, doi: 10.1029/2003JB002683.