

1968年十勝沖地震の余震, 発震機構および津波の波源*

渡 辺. 偉 夫**

550. 342

Aftershocks, Earthquake Mechanism and Tsunami Sources on the Tokachi-oki Earthquake of 1968

Hideo Watanabe

The Seimological Section. J. M. A.

A destructive earthquake occurred off the Tokachi on May 16, 1968. The origin time was 09h 48m 53.0s \pm 0.5s J. S. T., the epicenter at 40°44' \pm 1'N and 143°35' \pm 0.3'E, the depth 0 km and the magnitude 7.5. Two great aftershocks occurred and accompanied both tsunamis.

First, the author has discussed theoretically that the accuracy of determination of tsunami source is mainly dependent on the scale of accepted bathymetric charts and the sea depth. In the case of this tsunami, the area of tsunami source calculated by above-mentioned consideration is about twice without consideration.

Next, relationships between aftershocks, earthquake mechanism and tsunami sources have been investigated by comparing with the Sanriku-oki Earthquake of 1960, from a statistical point of view. Some obtained conclusions are as follows:

1). There is fairly a good relationship between tsunami source and the area of aftershocks. It is noticeable that many aftershocks had occurred within the tsunami source of the second great aftershock before the occurrence of this aftershock. This may be closely related with the development area by Mogi (1968).

2). The fault type of great aftershocks accompanied tsunami differs from that of the mainshock. In another author's paper (Watanabe, 1970), the same examples had been found in and near Japan. This is inconsistent with the conventional opinion that the mechanism of the aftershock must depend on that of mainshock. The crustal deformation accompanied tsunami may be related with the occurrence of aftershock.

3). Tsunami generation is closely related with the mechanism of earthquake and tectonic structure of occurrence region. This earthquake occurred in the intersected region of the Japan Trench and the Kurie Trench, and accompanied the tsunami which formed an elliptic shape elongated to the northwest direction. The pressure direction of the mainshock coincides to the long axis of tsunami source and approaches to the direction of the Japan Trench, though the pressure direction of the earthquake occurred off the Sanriku on 1960 is perpendicular to the direction of the Japan Trench (Fig. 4). One of two nodal planes, slipped plane, dips at oblique angle from the Pacific Ocean side to the island-arc side and many aftershocks seem to have occurred on this plane. These facts suggest an interesting relation with the tectonic movement of the crust on the Pacific Ocean side.

1. まえがき

1968年5月16日十勝沖で津波を伴った大地震が発生し

た。この地震の発震時は 9h48m53.0s \pm 0.5s (以下すべて日本時間), 震央は 40°44' \pm 1'N, 143°35' \pm 0.3'E で, 震源の深さは 0 km, 地震の規模 (M) は 7.9 で, 2つの津波を伴った大きな余震が, 5月16日 19h39m ($M=7.5$) と 6月12日 22h41m ($M=7.2$) に発生した。

* Received August 8, 1970

** 気象庁地震課

この報告は、まずこの地震による津波の波源域（以下単に波源域という）についての量的検討をおこない、つぎに波源域が、余震および発震機構とどんな関係にあるかを調査したものである。また、海溝構造との関係についても若干ふれてみた。これら3者の関係をまとめて研究したものはほとんどなく、筆者(Watanabe, 1970)のものがあるに過ぎない。

今回の地震の南縁の三陸沖で、1960年3月21日に津波を伴った地震が発生した。この地震の発震時は2h7m、震央は39.8°N, 143.5°Eで、震源の深さは20km、地震の規模(M)は7.5となっている。1698年の地震と同様2つの津波を伴った余震が3月23日9h23m (M=6.7)と7月30日2h31m (M=6.7)に発生した。この地震について、1968年の地震と比較検討をおこなった。

この調査で用いたデータは次のものである。余震については、気象庁地震月報(1966, 1968)、津波の波源については気象庁技術報告(1969)、梶浦・羽鳥・相田・小山(1968)の報告、羽鳥(Hatori, 1969)の論文および筆者の再計算、また発震機構については市川(Ichikawa, 1970)の論文にある資料を用いた。

2. 津波の波源

一般に波源域は逆伝搬図を作成し、走時の最終波線の平均包絡線を描いて決定する。この波源域の決定精度は使用した海図の縮尺と伝搬経路の海深に主として左右される。いま、これらの要素による誤差を考えてみよう。

津波の伝搬速度Vは次式で与えられるものとする。

$$V = \sqrt{gh} \tag{1}$$

ここで、gは重力の加速度、hは海深である。t₀を津波の走時の一定間隔とし、pを海図の縮尺とすると、t₀だけ津波が伝搬する距離Lは次式で表される。

$$pL = t_0 \sqrt{gh} = K \sqrt{h} \tag{2}$$

ここで、K=t₀√g=一定である。この式は

$$L = K \sqrt{h/p} \tag{2}'$$

となる。

(2)の両辺のΔを取ると

$$\begin{aligned} \Delta L &= K \Delta(\sqrt{h/p}) \\ &= K \sqrt{h/p} (1/2h \cdot \Delta h - 1/p \cdot \Delta p) \end{aligned} \tag{3}$$

となる。この式に(2)′を代入すると

$$\Delta L/L = (1/2h \cdot \Delta h - 1/p \cdot \Delta p) \tag{4}$$

いま逆伝搬図を描くとき、Lの誤差をΔL/Lと見做してよいであろう。もし、p=一定とすると、海深hが浅ければ浅いほど、誤差は大きくなる。また、h=一定で

p>2h(Δh=Δp)のとき、海図の縮尺pが大きければ大きいほど、誤差は大きくなる。このことから、たとえば海深の深いところから浅いところまで誤差を均一にするためには、海深の深いところでは海図の縮尺の大きいものを使用し、海深の浅いところでは海図の縮尺の小さいものを使用する必要がある。

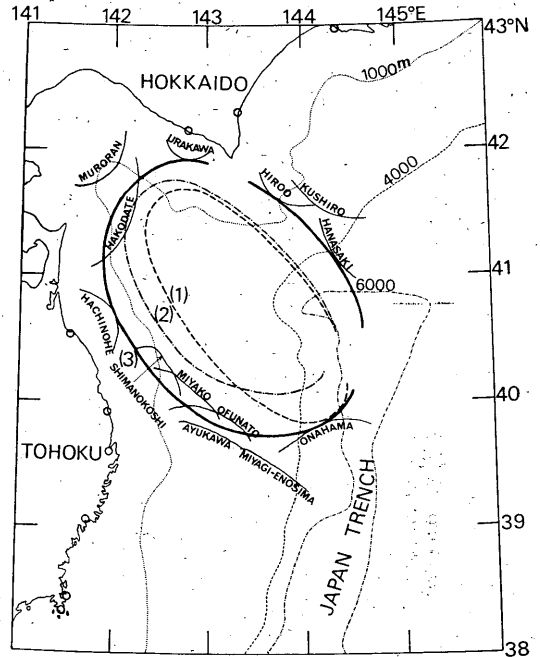


Fig. 1. Geographic distribution of tsunami sources of the Tokachi-oki Earthquake of 1968 calculated by several authors, (1) Kajiura, Hatori, Aita and Koyama (1968) (broken line), (2) the Japan Meteorological Agency (1968) (chained line), (3) the author (bold solid line).

Fine solid lines show the last wave fronts from tide gages.

Fig. 1の(1)はさきに述べた梶浦・羽鳥・相田・小山(1968)による波源域で、(2)は気象庁技術報告(1969)によるものである。(2)の場合、海図保安庁発行の120万分の1(No. 1070)のもの1枚だけを使用したものである。(3)は筆者が再計算したもので、特に湾や浅い海岸を伝搬する波線を計算する場合、誤差を小さくするため3万分の1から20万分の1のいくつかの海図を用いて計算したものである。また、湾については湾奥から湾口までの伝搬時間は、湾の第1次の固有周期の4分の1であるから、既にこの値の分っている湾については、参考にした。

Table 1. The areas of tsunami sources calculated by several authors

No. of Fig. 1	Area of tsunami source × 10 ³ km ²	Ratio devid- ed by (1)
(1)	2.05	1.00
(2)	2.28	1.11
(3)	3.98	1.94

Table 1 は Fig. 1 で述べた各著者による波源面積を計算したものである。これを見ると、(1)と(2)はほとんど変わらないが、(3)は(1)の約2倍となっている。したがって、既に計算された波源域の精度は、この程度のことを充分考慮する必要がある。

3. 1968年十勝沖地震の余震，発震機構および津波の波源

Fig. 2a は本震の発震時5月16日9h48m から津波を伴った最初の大きな余震の直前の同日19h38m までの余震分布，発震機構および波源域の水平および垂直分布である。垂直断面は波源域の長軸方向A Bに切ったもので、海深分布および波源域も明示してある。図の右上のメカニズムダイアグラムは本震の発震機構で、その方向は水平分布図のそれと一致させてあり、また、矢印は主圧力と主張力を表わす。

この図から、この期間の余震は長だ円を形成する波源

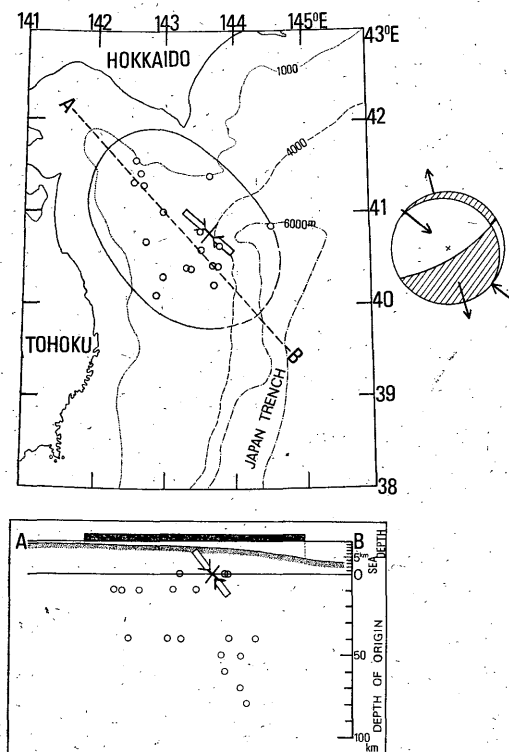


Fig. 2a. Geographic and vertical distributions of aftershocks, earthquake mechanism and tsunami sources on the Tokachi Earthquake of 1968, from the origin time of the mainshock, May. 16, 09h 48m J. S. T. to May 16, 19h 38m J. S. T.

The figure of right side shows the mechanism diagram of earthquake.

- × : mainshock
- ⊙ : great aftershock accompanied with tsunami
- : aftershocks of $6 \leq M < 7$
- : aftershocks of $M < 6$.

The solid curve in geographic map shows the tsunami source of the mainshock.

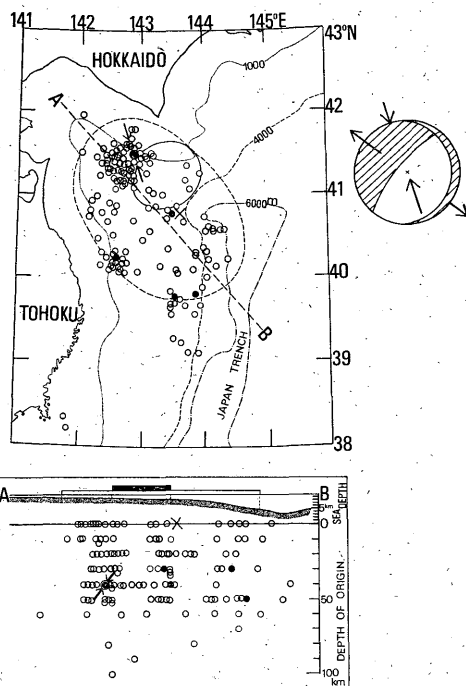


Fig. 2b. The same distributions as Fig. 2a from the occurrence time of the first great aftershock, May 16, 19h 39m J. S. T. to June 12.

The solid curve in geographic map shows the tsunami source of the first great aftershock and the broken curve the tsunami source of the mainshock.

域内にあり、主圧力の方向は波源域の長軸の方向と一致している。また、メカニズムダイアグラムから、ある傾きをもった正断層となっており、これは津波発生と余震分布とも無関係ではないようである。

Fig. 2b は津波と伴った最初の大きな余震（以下第1の津波余震という）の発震時5月16日19h39m から、津波を伴った次の大きな余震（以下第2の津波余震という）の直前の6月12日までの Fig. 2a と同じ分布である。

この図から、第1の津波余震による波源域は、主震による波源域内に含まれている。この期間の余震分布にはいくつかの特徴がある。すなわち、第1の津波余震による波源域内には、余震はあまり発生せず、主震による波源域全域に広がっており、さらに主震の波源域からはみ出し、南の方向に伸びていることである。後者は第2の津波余震の波源域内になっていることを考えると、きわめて興味ある現象である。

次に、第1の津波余震の主圧力および主張力は本震の

それとそれぞれ逆になっているが、断層型は本震と同じ正断層である。この時発生した津波が地震の規模 ($M=7.5$) に比較して極めて小さかったことは、以上のような発震機構（本震との時間間隔が僅か9時間余りであった）と、先に述べたこの沉源域内に余震が少なかったことと関係があるかも知れない。ということは、津波を起こした海底変動は本震により大部分完了し、同じメカニズムで同じ地域で起こった第1の津波余震は、地震の規模に比例したエネルギーを海底変動に費すことが出来なかったと考えらるからである。

Fig 2c は第2の津波余震の発震時6月12日22h41mから、つまり本震の発震時から丁度6か月目の11月16日までの Fig. 2a と同じ分布である。

この図から、第2の津波余震による波源域は、主震による波源域の南側を若干重なって南方に伸びていることが分る。この波源域内に余震が数多く集中し、津波の高さも地震の規模に比べて決して小さくなかった。この津波余震の主圧力と主張力の方向は本震のそれらとほぼ同

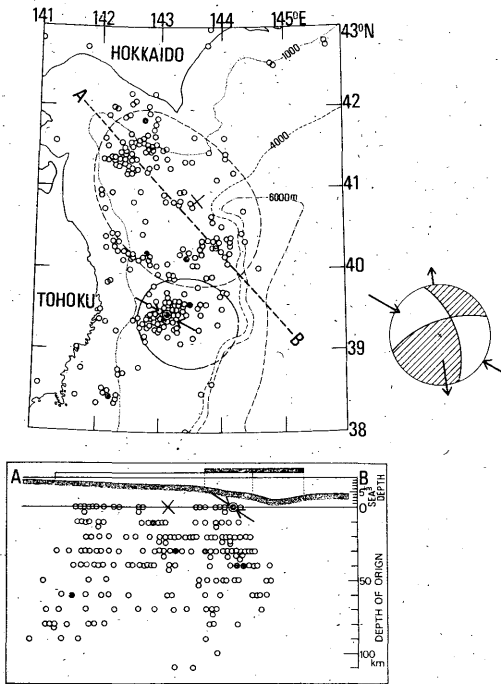


Fig. 2c. The same distributions as Fig. 2a from the occurrence time of the second great aftershock, June 12, 22h 41m J. S. T. to Nov. 16.

The solid curve in geographic map shows the tsunami source of the second great aftershock and the broken curve the tsunami source of the mainshock.

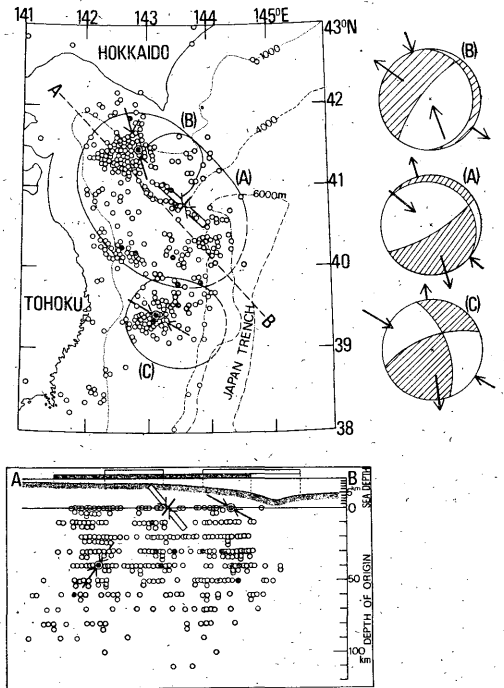


Fig. 2d. The same distributions as Fig. 2a from the origin time of the mainshock to Nov. 16 (the sum of Figs. 2a, 2b and 2c).

The solid curves show the tsunami sources of the mainshock and two great aftershocks.

じであるが，断層型は逆断層で本震と明らかに異なっている。このことは他の例でも見られ，余震による津波の発生と何らかの関係があるかも知れない。

Fig. 2d は Fig. 2a, Fig. 2b および Fig. 2c を合わせたものである。

この図から，一般に波源域は余震域とほぼ一致している。余震の垂直分布を見ると，それぞれ津波の波源に属する3つのグループに分けられるようである。このことは，津波発生と余震発生との間の興味ある関係を示している。さらに，本震および2つの余震の主圧力の方向はほぼ本震の波源域の長軸方向にあるが，詳細に見ると，反時計廻りで測った主圧力の Azimuth angle は，緯度とある関係があるように見える。したがって，ほぼ南北の走向をもつ日本海溝と，ほぼ北東—南西の走向をもつ千島海溝との交わるこの地域一帯の地体構造は，今回の

地震および津波発生とある関係があるようである。このことについては他のデータを加えてさらに議論することにする。

一方，2つの nodal plane の1つは主震の波源域の短軸方向にあり，主震のものは太平洋側から日本列島側へ，2つの余震については日本列島側から太平洋側へ傾いていることは，先に述べた余震の垂直分布が3つのグループになっていることと関係があるようである。ということは，精度を考慮すると，この面が迂り面を形成し，この上に多くの余震が発生したものと考えられるからである。

4. 1960年の三陸沖地震の余震，発震機構および津波の波源

Fig. 3a, 3b, 3c および 3d は Fig. 2a, 2b, 2c および 2d にそれぞれ対応するものである。

Fig. 3a は本震の発震時3月21日2h7mから，第1の津波余震の直前の23日9h22mまでの余震分布，発震機構および波源域の水平および垂直分布である。この期間の余震は波源域内に含まれている。波源域の長軸の方向は北東—南西で，1968年の場合と大体似ている。本震

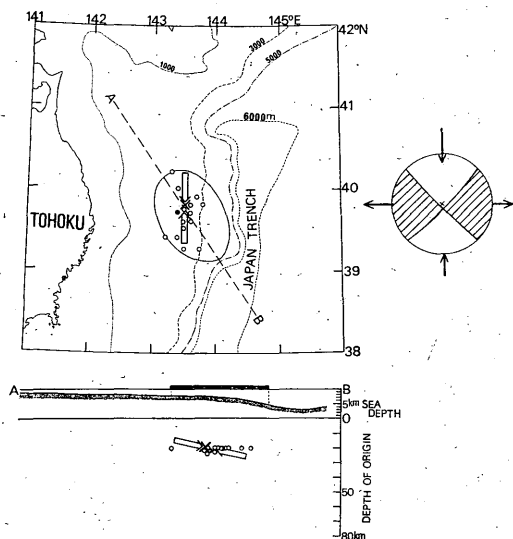


Fig. 3a. Geographic and vertical distributions of tsunami sources, aftershocks and earthquake mechanism on the Sanriku-oki Earthquake of 1960, from the origin time of the mainshock, March 21, 02h 07m J. S. T. to March 23, 09h 22m J. S. T.

The figure of right side shows the mechanism diagram of earthquake.

- × : mainshock
- ⊙ : strong aftershock accompanied with tsunami
- : aftershocks of $6 \leq M$
- : aftershocks of $M < 6$

The solid curve in geographic map shows the tsunami source of the mainshock.

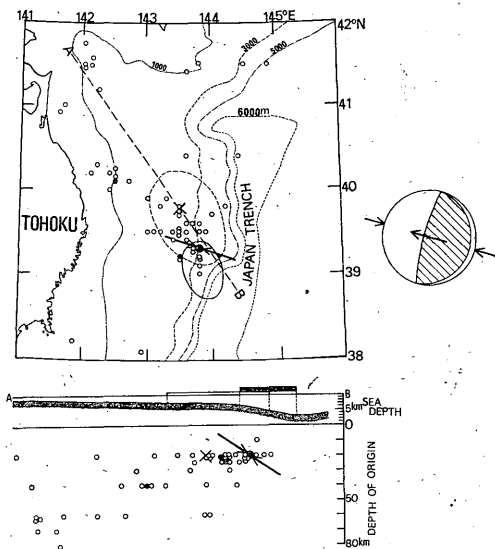


Fig. 3b. The same distribution as Fig. 3a from the occurrence time of the first strong aftershock, March 23, 09h 23m J. S. T. to July 30.

The solid curve in geographic map shows the tsunami source of the first strong aftershock and the broken curve the tsunami source of the mainshock.

の発震機構は1968年の場合と異なり, strike-slip 型の正断層である。

Fig. 3b は第1の津波余震の発震時 3月23日 9h23m から, 第2の津波余震の起こる直前の 7月30日までの Fig. 3a と同じ分布である。この図から注目すべき事実は第2の津波余震が起こる北西方向に余震が伸びていることである。前項で述べたように, 同じことが1968年の場合にも見られた。第1の津波余震の発震機構は本震と異なり, dip-slip 型の逆断層である。

Fig. 3c は第2の津波余震の発震時 7月30日 2h31m から, 本震の発震時から丁度6ヶ月目の 9月21日までの Fig. 3a と同じ分布である。第2の津波余震の発震機構は第1の津波余震と同じ dip-slip 型の逆断層である。

Fig. 3d は Figs 3a, 3b および 3c を合わせたものである。これらの波源域は1968年の十勝沖地震の波源域の南の地域に位置しており, いくつかの似た現象が見られる。すなわち, 波源域の長軸の方向はほぼ北西-南東方向であること, 2つの津波余震が本震の波源域の南および北の部分に発生したこと, 津波余震の発震機構は本震

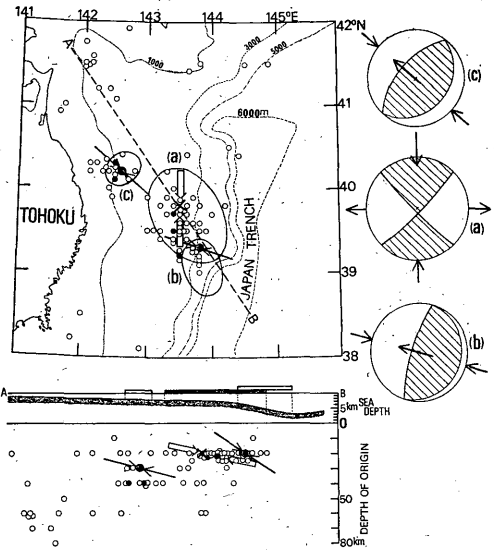


Fig. 3d. The same distribution as Fig. 3a from the origin time of the mainshock to Sep. 21 (the sum of Figs. 3a, 3b and 3c). The solid curves show the tsunami sources of the mainshock and two strong aftershocks.

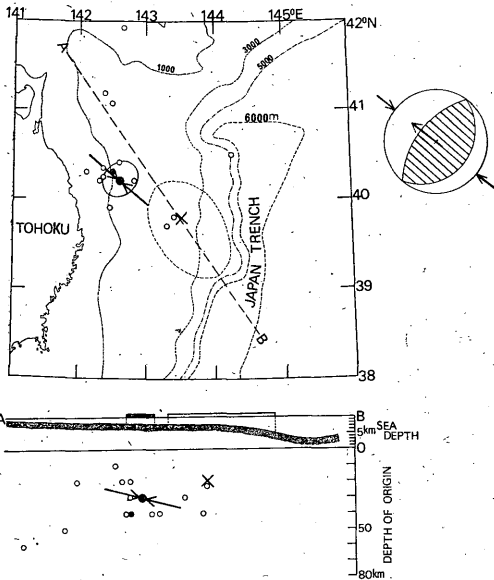


Fig. 3c. The same distribution as Fig. 3a from the occurrence time the second strong aftershock, July 30, 02h 31m J. S. T. to Sep. 21.

The solid curve in geographic map shows the tsunami source of the second strong aftershock and the broken curve the tsunami source of mainshock.

のそれと異なることなどである。

5. 発震機構・津波の波源の形と海溝構造

緯度 (N) と反時計廻りで測った主圧力の azimuth angle (A_2) との間にある関係があるように見えることは, 2項で述べた。Fig. 4 は Fig. 2d, Fig. 3d および南の隣接地域で発生した1933年の三陸沖地震の本震および津波余震のデータを用いて, 上に述べた関係を示したものである。ここで Fig. 3d の本震は除いてあるが, これはその発震機構が strike-slip 型であったためである。この図から, N と A_2 との間にある関係があることを示している。すなわち, 三陸沖の $38^\circ N$ 付近では A_2 は約 75° であるが, これは日本海溝の走向が北から時計廻りに側って約 15° であることを考えると, 日本海溝の走向に直角であることを意味する。しかしながら, 北へ行くにつれて A_2 は小さくなり, $41^\circ N$ では約 20° となっている。このことはこの付近が日本海溝と千島海溝の交わる地域となっており, この構造が大きく左右していると考えられる。すなわち, 1933年の三陸沖地震津波 (Watanabe, 1970) では日本海溝に直角に主圧力に働らき, その波源域の長軸の方向は日本海溝に平行に伸びていたが, 北へ行くにつれて Fig. 4 に示すように日本

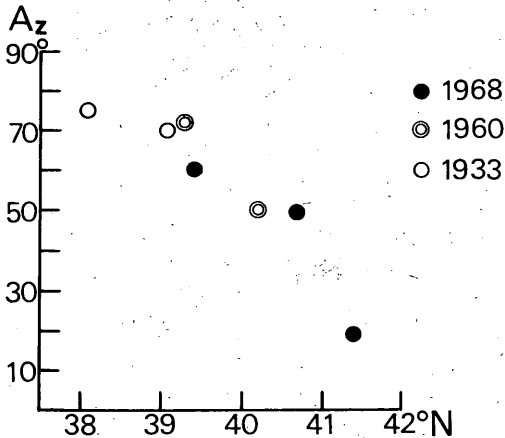


Fig. 4. Relationship between geographic latitude (N) and azimuth angle of maximum pressure direction measured counterclockwise (Az). Accepted date are the great earthquake of Fig. 2d, Fig. 3d and the Sanriku-oki Earthquake of 1933 which accompanied tsunamis.

海溝に直角から大巾にずれ、1968年の十勝沖では主圧力の方向も波源域の長軸の方向も、むしろ日本海溝の走向に近づいていきている。このことは、南の地域では日本海溝だけに影響され、北の地域では日本海溝と千島海溝の交わる地域となっているため、2つの海溝構造に影響されていると考えてよいであろう。

5. まとめおよび若干の考察

1968年十勝沖地震の余震、発震機構および波源域について、1960年のものと比較しながら調査してきた。ここでその結論と若干の考察を述べれば、次のとおりである。

1) 波源域の決定精度は使用した海図の縮尺と伝搬経路の海深に主として左右される。もし海図の縮尺を一定とすると、海深が浅ければ浅いほど、誤差は大きくなり、海深を一定とすると海図の縮尺が大きければ大きいほど、誤差は大きくなる。したがって、海深の深いところから浅いところまで誤差を均一にするためには、海深の深いところでは海図の縮尺の大きなものを使用し、海深の浅いところでは海図の縮尺の小さいものを使用する必要がある。今回の津波の場合、以上の考察を行って計算した波源域の面積は考察を行わない場合の約2倍となった。

2) 波源域と余震域はかなりよい一致を示している。ここで注目すべき現象として、第2の津波余震が起こる

以前に、この波源域内に多くの余震が発生していることである。このことは茂木 (Mogi, 1968) による余震の発達と同じ現象と見做してよいであろう。

3) 津波余震の発震機構のうち、断層型は本震のそれと異なる。筆者の他の論文 (Watanabe, 1970) には、日本付近の他の地域でいくつかの例が述べられている。このことは、余震の断層型が本震のそれと同じであろうという考え方 (また固定したものではないが) と矛盾する。しかし、本震の波源域およびその周辺に、大きな余震が地殻変動を伴って発生したという事実が関係しているのではないであろうか。このことは、津波余震の発生機構に興味あるヒントを示唆しているような気がする。

4) 津波発生は地震の発震機構と発生地域の地体構造に密接に関係している。日本海溝と千島海溝の交わる地域に発生した本震は、北西方向に伸びた長だ円形の波源域を形成した。一方、発震機構との関連を見ると、主圧力はこの長だ円の長軸の方向とほぼ一致している。南の三陸沖で発生した1933年の津波地震がほぼ日本海溝に直角な主圧力となっているのに比べると、日本海溝の走向に近づいている。Fig. 4 で示すように、南から北に、systematic に海溝の走向と関係があることも重要な事実である。また、nodal plane の1つでおそらく迂り面と考えられる面が、太平洋側から島弧側へ傾いており、余震分布とも符号しているように見える。

以上の事実は海溝—島弧を形成する太平洋側の地体構造の動きと密接な関係があるのではなかろうか (Isacks, Oliver and Sykes, 1968)。現在、著者は他の多くの例を加えることによって、これらの現象をさらに研究している。

謝辞

地震の発震機構について、原稿作成中の貴重な資料を利用して頂いた地震課市川政治博士、津波の波源の再計算に協力された地震課岸尾政弘君に心から感謝する。

参考文献

- (1) Watanabe H. (1970): Statistical Studies of Tsunami Sources and Tsunamigenic Earthquakes Occurring in and near Japan. Proceeding of the International Symposium on the Tsunami and Tsunami Research (Tsunamis in the Pacific Ocean), East-west Center Press (U.S.A.), 99~117.
- (2) 気象庁 (1966): 日本付近の主要地震の表 (1957~1962). 地震月報, 別冊 2, 14~17.
- (3) 気象庁 (1968): 地震月報, 1968年 5月~11月.
- (4) 気象庁 (1969): 1969年十勝沖地震調査報告. 気象庁技術

- 報告, 第68号, 11~37.
- (5) 梶浦欣二郎・羽鳥徳太郎・相田勇・小山盛雄 (1968): 1968年十勝沖地震にともなう津波の調査. 震研い報, **46**, 1369~1396.
- (6) Hatori T. (1969): Dimension and Geographic Distribution of Tsunami Sources near Japan. Bull. Earthq. Res. Inst., **47**, 185~214.
- (7) Ichikawa M. (1970): Computer Redetermination of Mechanism of Earthquake Occurring in and near Japan, 1926~1968, and Some Statistical Studies Based on the Solution. Geophys. Mag. (in preparation)
- (8) Mogi K. (1968): Development of Aftershock Area of Great Earthquakes. Bull. Earthq. Res. Inst., **46**, 175~205.
- (9) Isacks, B., J. Oliver and L. R. Sykes (1968): Seismology and the New Gloval Tectonics. J. Geophys. Res., **73**, 5855~5899.