津波波形解析から推定される 1971 年 8 月 2 日 十勝沖地震（スラブ内地震）の 断層モデルとその解釈

北海道大学大学院理学研究科地震火山研究観測センター* 谷岡勇市郎

Fault Parameters of the 1971 Tokachi-oki Earthquake, the Intra-plate Event, Estimated from the Tsunami Waveform Analysis and the Tectonic Interpretation of the Event

Yuichiro TANIOKA

Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University,
Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan

(Received October 15, 2003; Accepted January, 7, 2004)

The location and dimension of the fault of the 1971 Tokachi-oki earthquake are estimated using tsunami waveforms observed at four tide gauge stations. The earthquake is the intra-plate one with the normal fault type mechanism. The center of the fault is located about 25 km north of the epicenter. The dimension of the fault can be from 20 km×20 km to 40 km×40 km size. The slip amount of the fault is 0.73 m for the 30 km×30 km fault model. The seismic moment is estimated to be 4.6×10^{19} Nm (M_w 7.1). The direction of the T-axis from the focal mechanism of the earthquake is not parallel to the direction of the subduction, but the direction is perpendicular to it. The Pacific slab bends along the arc-parallel direction beneath Hokkaido. The source region of the earthquake is close to the region where the Pacific slab bends. Therefore, the direction of T-axis of the focal mechanism becomes parallel to the direction of the above bending.

Key words: tsunami simulation, 1971 Tokachi-oki earthquake, intra-plate earthquake, source process

§ 1. はじめに

1972 年 8 月 2 日 16 時 24 分 55.1 秒（日本時間）、十勝沖で M_{JMA} （気象庁マグニチュード）7.0 の地震が発生し、浦河で震度 V を記録した。気象庁によると震源は北緯 $41^{\circ}14'$ 東経 $143^{\circ}42'$ 、深さ 60 km であった。この地震の震源は 1968 年十勝沖巨大地震の震源域と 1952 年および 2003 年の十勝沖巨大地震の震源域の境界に位置している (Fig. 1)。Miyamura and Sasatani (1986) はこの地震を含めたこの地域の地震のメカニズムを遠地実体波波形解析から推定している。彼らの推定によると、この地震のメカニズムは正断層（走向 108° 、傾斜角 41° 、

すべり角 -81° ）で、震源の深さは 56 km、地震モーメントは 5.3×10^{19} Nm であった。彼らはさらに、震源の深さがこの地域でのプレート境界より深いとし、地震はスラブ内地震であると結論づけた。しかしメカニズムから推定される T 軸は海溝軸に直交するというよりは海溝軸に平行であり、単純に slab pull や bending では説明できない。

この地震は小さいながらも津波を発生させ、北海道沿岸および三陸沿岸の検潮所で観測されている。羽鳥 (1972) はこれらの津波記録の初動から津波の波源域を Fig. 1 のように推定した。本研究では、羽鳥 (1972) が津波波源域解析に用いた 7 つの津波記録からノイズレベルを超えて有意に津波が観測されていると見られる 4

* 〒060-0810 札幌市北区北 10 条西 8 丁目

Fig. 1. The tsunami source area of the 1971 Tokachi-oki earthquake estimated by Hatori (1972) and those of the 1952, 1968, 2003 great Tokachi-oki earthquakes estimated by Hatori (1973), Hatori (1969), and Hirata *et al.* (2004), respectively. The focal mechanism of the 1971 Tokachi-oki earthquake is also shown. The solid circles are the tide gauge stations with station names. The star shows the epicenter of the 1971 earthquake.

つの津波波形（広尾、浦河、八戸、宮古）を用いて津波波形解析を行い、この地震の断層モデルを推定する。さらにこのようなスラブ内地震が発生する原因を議論する。

§2. 津波波形データ

広尾、浦河、宮古の検潮記録データは日本沿岸津波記録紙（財団法人日本海事財団の補助により財団法人日本気象協会提供）からデジタイズした。八戸の検潮記録は

気象庁八戸測候所に保管された原記録をデジタイズした。広尾の検潮記録には地震当時検潮所の時計が10分ずんでいたことが記録されており、それに基づき時刻を補正した。浦河の検潮記録には地震による振動が記録されており、それに基づき時刻を補正した。八戸および宮古の記録には時計遅れなどの記載がないため時刻は合っているとした。日本沿岸津波記録紙にはノイズレベルを有意を超える津波が記録された様子の検潮記録も含まれているが、時刻補正不明と記されており今回の解析

には用いなかった。

§ 3. 津波数値計算

3.1 断層パラメータ

1971 年十勝沖地震のメカニズムは Miyamura and Sasatani (1986) により正断層タイプ（走向 108° ，傾斜角 41° ，すべり角 -81° ）と推定されている。しかしこの地震の断層面の傾斜が南落ち（走向 108° ，傾斜角 41° ）なのか北落ち（走向 276° ，傾斜角 50° ）なのかは不明である。地震の深さは 56 km と深いため，津波の初期波形となる海底地殻変動に南落ち断層と北落ち断層による違

いはほとんどみられず，津波波形から断層の傾斜方向を判断することはできない。本研究では南落ちの断層メカニズム（走向 108° ，傾斜角 41° ）を使用した。断層の深さは断層の中心で 55 km に固定した。

3.2 津波数値計算手法

津波の数値計算は海底地形を考慮し差分法で行った。支配方程式として線形長波の式を用いた。格子間隔は検潮所近傍を除いて，緯度・経度とも 20 秒（約 600 m）とした。検潮所近傍ではさらに細かく緯度・経度とも 4 秒（約 120 m）とした。差分法の安定条件を満たすため，計算時間間隔を 1 秒とした。計算方法は Satake (2002)

Fig. 2. a) Contour map of the root mean square (RMS) variance reductions. The star shows the epicenter of the 1971 Tokachi-oki earthquake. The dots show the locations of the center of the 16 faults. A large open dot shows the best location which has a largest RMS variance reduction. b) Slip amounts estimated separately for each fault.

1971 Tokachioki

— observed
- - - computed

Hiroo

11- 93

Urakawa

16-105

Hachinohe

16-135

Miyako

6- 70

10 cm
0 20 40 60 80 100 120
time, min

Fig. 3. Comparison between the observed and computed tsunami waveforms for the best location of the fault. Numbers below the station name indicate the time (in minutes) after the earthquake origin time.

に詳しく述べられている。20 秒メッシュ海底地形は海上保安庁 500 m メッシュデータ [浅田・沖野 (1998)] と海上保安庁刊行沿岸の海の基本図を用いて作成した。検潮所近傍の 4 秒メッシュデータは、1971 年当時の湾の地形を港湾建設史 [八戸港工事事務所 (1990), 北海道開発協会 (1978)] から収集し、海上保安庁刊行の海図をもとに湾の地形を修正する形で作成した。

§ 4. 津波波形から断層位置の推定

断層パラメータは上記に示した正断層とし、断層の長さ・幅とも 30 km と仮定する。断層の位置を推定した後、断層のサイズを議論する。Fig. 2a に示すように中心の位置を緯度・経度方向に 10' 間隔にずらして配置した合計 16 の断層モデルに対して津波波形を計算した。Fig. 2a で星印は震央 (気象庁) を示す。どの断層モデルが観測波形を最も説明できるかを判断するために、計算波形が観測波形に最も合うように各々の断層モデルに対するすべり量を求め、その時の variance reduction を Hirata *et al.* (2003) の方法により求めた。Fig. 2a に 16 点に対して得られた variance reduction の分布を示す。断層の中心位置を気象庁震源の北約 25 km (北緯 41°27' 東経 143°41') に置いた場合に観測波形を最も良く説明できた。Fig. 2b にはそれぞれの断層に対して

推定したすべり量を示す。観測波形を最も良く説明できた断層のすべり量は 0.73 m であり、剛性率を 7×10^{10} N/m² とすると地震モーメントは 4.6×10^{19} Nm と推定され、Miyamura and Sasatani (1986) が地震波から推定した地震モーメント (5.3×10^{19} Nm) とほぼ同じである。Fig. 3 に観測波形と計算波形の比較を示す。まだ少し位相がずれている波があるため計算波形の振幅が観測波形の振幅に比べて少し小さめではあるが、比較的良好一致が得られている。

§ 5. 津波波形から断層サイズの推定

断層中心位置を上記の最適位置に固定し、断層メカニズムおよび断層の深さは前章と同じ (走向 108°, 傾斜角 41°, すべり角 -81°, 深さ 55 km) とする。ここでは、断層サイズを 20 km × 20 km, 30 km × 30 km, 40 km × 40 km, 50 km × 50 km と変化させて、津波波形を計算した。前章と同じくどの断層モデルが観測波形を最も良く説明できるかを判断するため、計算波形が観測波形に最も合うように各々の断層モデルに対するすべり量を求め、その時の variance reduction を求めた。各々の断層サイズに対する津波の観測波形と計算波形の比較および variance reduction の値を Fig. 4 に示す。断層サイズは 30 km × 30 km が最適ではあるが、サイズが 40 km

1971 Tokachioki

Fig. 4. Comparison between the observed and computed tsunami waveforms for the 4 fault sizes, 20 km × 20 km, 30 km × 30 km, 40 km × 40 km, and 50 km × 50 km. The RMS variance reductions are also shown in the bottom. Numbers below the station name indicate the time (in minutes) after the earthquake origin time.

×40 km 以下であれば variance reduction に大差はなく、津波波形からは最適な断層サイズを決定できない。これは、断層の深さが中心で 55 km と深いため、断層の長さの変化 (20 km~40 km) が海底の地殻変動さらには津波波形の違いとしてとらえられにくいことによる。50 km×50 km になると、短波長の津波（特に広尾）の波形が合わなくなっている。

§ 6. 考 察

Fig. 5 に最適な断層モデルの位置と断層モデルから計

算された海底の上下変動を示す。傾斜角がほぼ 45° に近い正断層であり、深さが 55 km と断層長さ (30 km) や幅 (30 km) に比べて深いことから、断層面上の海底は全面で沈降域となる。これが広尾・八戸・宮古で観測された津波波形が引きで始まっている原因である。浦河で観測された津波波形の初動の方向はノイズに隠されており判別できないが、計算波形を見るとやはり引きで始まっている。以上より、津波の初動は Miyamura and Sasatani (1986) が推定した地震メカニズム（正断層）を支持している。

Fig. 5. The best fault model of the 1971 Tokachi-oki earthquake with the coseismic vertical deformation (thick dashed contours) computed from the best model. The dashed contours represent the subsidence, and the contour interval is 1cm. The focal mechanism of the 1971 Tokachi-oki earthquake is also shown. The solid circles are the tide gauge stations with station names.

Fig. 6. The upper surface of the subducted Pacific slab beneath the Hokkaido after Katsumata *et al.*, (2003) and the best fault model of the 1971 Tokachi-oki earthquake. The thick dashed line shows the boundary where the Pacific slab is bent.

津波波形解析から Fig. 5 に示すような正断層型の地震がこの場所で発生したことが確認されたため、このようなスラブ内地震が発生した原因を考察する。一般にスラブ内の正断層地震はスラブが沈み込む方向に T 軸をもったメカニズムとなる。今回の地震の場合、T 軸はスラブの沈み込みの方向ではなく、むしろスラブの沈み込む方向に対して垂直方向に向いている。Fig. 6 に Katsumata *et al.* (2004) が推定したこの地域のスラブ上面の形状を示す。この地域では点線より北東側では千島海溝沿いにスラブが沈み込む様子が、また、点線より南側では日本海溝沿いにスラブが沈み込む様子がわかる。千島海溝軸と日本海溝軸は斜交しているため、Fig. 6 の点線の部分でスラブが折れ曲がっている様子がわかる。このようにスラブが折れ曲がった境界ではスラブ内で点線の方（折れ曲がりの軸）と垂直方向に張力が働くと考えられ、T 軸をその方向にもつメカニズムの地震が発生する。この論文で扱った 1971 年十勝沖地震はこのようなスラブの折れ曲がりの場所で発生した正断層型の地震であったと考えられる (Fig. 5)。最近の地震では 2001 年芸予地震 (M_w 6.7) もこのタイプの地震で、スラブの折れ曲がりによる正断層型の地震であったと考えられている [佃・三浦 (2002), 額・古村 (2002)]。

さらに、この地震の深さは Miyamura and Sasatani (1986) により 56 km と推定されており、これは明らかに Iwasaki *et al.* (1989) が構造探査により求めたプレー

ト境界よりも 30 km 以上深い。つまりこの地震はスラブの中でもマントル内で発生したと考えられる。Wang *et al.* (2004) によると、大きなスラブ内地震は変成作用を受け小さなクラックが多く存在する上部地殻内よりも局部的に脆性化した下部地殻やその下のマントルで発生しやすい。1971 年十勝沖地震はまさに彼らが主張しているマントル内で発生したスラブ内大地震であったと考えられる。

§ 7. 結 論

1971 年 8 月 2 日に発生した十勝沖地震による津波波形は Miyamura and Sasatani (1986) の震源メカニズム (正断層型) で説明できる。断層の中心位置は気象庁震源の北約 25 km (Fig. 2a) に推定された。この地震の断層サイズを津波波形から推定することは容易ではないが、30 km × 30 km 程度と思われる。推定された地震モーメントは 4.6×10^{19} Nm (M_w 7.1) で Miyamura and Sasatani (1986) が地震波から推定した値とほぼ等しい。この地震は斜交する千島海溝軸と日本海溝軸から沈み込むスラブが折れ曲がる境界 (Fig. 6 点線) で発生したスラブ内大地震であったと考えられる。

謝 辞

Dr. Kelin Wang には印刷中の論文を参照させていただき、また有益なコメントをいただきました。高橋浩晃氏には 1971 年十勝沖地震の情報をいただきました。査読者の今村文彦氏および阿部邦昭氏のご意見は本稿を改善する上で大変有益でした。編集委員会の方にもお世話になりました。以上の方々に深く感謝いたします。

文 献

- 浅田 昭・沖野郷子, 1998, 日本周辺海域の 500 m メッシュ海底地形データファイルの作成, 平成 10 年海洋調査技術学会研究成果発表会講演要旨集, 15-16.
- 八戸港工事事務所, 1990, 八戸港五十年史, 491 p.
- Hatori, T., 1969, and geographic distribution of tsunami sources near Japan, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **47**, 185-214.
- 羽鳥徳太郎, 1972, 1971 年 8 月 2 日襟裳岬沖と 1972 年 2 月 29 日八丈島沖の津波一波源域と津波初動方向の分布一, *地震* **2**, 362-370.
- 羽鳥徳太郎, 1973, 1952 年十勝沖津波の波源の再検討, *地震* **2**, 206-208.
- Hirata, K., H. Takahashi, E. Geist, K. Satake, Y. Tanioka, H. Sugioka and H. Mikata, 2003, Source depth dependence of micro-tsunamis recorded with ocean-bottom pressure gauges: the January 28, 2000 M_w 6.8 earthquake off Nemuro Peninsula, Japan, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **208**, 305-318.

- Hirata, K., Y. Tanioka, K. Satake, S. Yamaki and E. L. Geist, 2004, The tsunami source area of the 2003 Tokachi-oki earthquake estimated from tsunami travel times and its relationship to the 1952 Tokachi-oki earthquake., *Earth, Planet and Space*, in press.
- 北海道開発協会, 1978, 北海道港湾建設史, 867 p.
- Iwasaki, T., H. Shinobara, A. Nishizawa, T. Kanazawa, K. Suyehiro, N. Hirata, T. Urabe and H. Shimamura, 1989, A detailed subduction structure in the Kuril Trench deduced from ocean bottom seismographic refraction studies, *Tectonophysics*, **165**, 315–339.
- Katsumata, K., N. Wada and M. Kasahara, 2003, Newly imaged shape of the deep seismic zone within the subducting Pacific plate beneath the Hokkaido corner, Japan-Kurile arc-arc junction, *J. Geophys. Res.*, **108**(B12), 2565, doi: 10.1029/2002JB002175.
- Wang, K., J. F. Cassidy, I. Wada and A. J. Smith, 2004, Effect of metamorphic crustal densification on earthquake size in warm slabs, *Geophys. Res. Lett.*, in press.
- 額額一起・古村孝志, 2002, 2001 年芸予地震の強震動分布と深部地下構造, *地震* **2**, **55**, 97–106.
- Miyamura, J. and T. Sasatani, 1986, Accurate determination of source depths and focal mechanisms of shallow earthquakes occurring at the junction between the Kurile and the Japan trenches, *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ., Ser. VII*, **8**, 37–63.
- Satake, K., 2002, Tsunamis, in “International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology”, ed. by W. H. Kee, H. Kanamori, P. C. Jennings, and C. Kisslinger, Part A, Academic Press, 437–454.
- 佃 為成・三浦勝美, 2002, 2001 年芸予地震とプレートの曲げモーメント, *地震* **2**, **55**, 91–96.