総合報告

2011年東北地方太平洋沖地震による津波解析結果から 再検討する巨大津波の発生様式

北海道大学理学研究院地震火山研究観測センター* 谷岡勇市郎・Aditya R. GUSMAN

Reexamination of Occurrence of Large Tsunamis after the Analysis of the 2011 Great Tohoku-oki Earthquake

Yuichiro TANIOKA and Aditya R. GUSMAN

Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University, N10W8, Kita-ku, Sapporo 060-0810, Japan

(Received December 27, 2011; Accepted March 14, 2012)

Review of the previous tsunami analyses for the 2011 Tohoku-oki earthquake indicates that the large slip of more than 40m was estimated on the plate interface near the Japan Trench. The plate interface near the Japan Trench was previously ruptured by the tsunami earthquakes such as 1896 or 1611 Sanriku tsunami earthquakes. Along the subduction zone off Sumatra, the 2004 great Sumatra earthquake ruptured the plate interface near the trench with a large slip amount of 29m. There were also tsunami earthquakes such as the 1907 Sumatra earthquake or 2010 Mentawai earthquake which ruptured the plate interface close to the trench. These evidences suggest that occurrence of the large earthquakes which rupture the plate interface near trench such as tsunami earthquakes is more common than that we thought previously. Variability of the great earthquakes along the plate interface makes us difficult to evaluate future great interplate earthquakes along subduction zones.

Key words: The 2011 great Tohoku-oki earthquakes, Tsunami earthquakes, Tsunamis along the Sanriku coast, Tsunamis along the Sumatra coast, Tsunami observations

§1. はじめに

2011年3月11日に東北地方太平洋沖巨大地震($M9.0$)が発生し、その地震による巨大津波が東北地方太平洋沿岸を襲い、死者・行方不明者1万9千人を含む大災害をもたらした。この津波は近年沖合に展開されてきた様々な津波計(Fig. 1)により観測され(Fig. 2)、津波の発生過程の理解が深まった。沖合で観測された津波波形は沿岸での非線形効果を受けず、地震時地殻変動を直接反映するもので津波励起過程を知る上で非常に有用であることが示されていた[例えば、谷岡(2009)]。今回の津波は最初に釜石沖の2点の海底ケーブル式圧力計(東京大学と東北大学の共同プロジェクトとして設置されたTM1

とTM2)で波形が観測され、長周期の津波に短周期の津波が乗った非常に特徴的な津波波形を示した[Maeda *et al.*, (2011)]。さらに釧路沖の海底ケーブル式圧力計(JAMSTEC)の2点(KPG1, KPG2)でも津波波形が観測されている。また、岩手県・宮城県・福島県の沿岸から数10km沖合に設置された4台のGPS波浪計(GPSB 802, 803, 804, 806, 港湾空港技術研究所)でも津波波形が観測され、その中には釜石沖で観測された津波波形と同じように長周期の津波に短周期の津波が乗った形の津波を観測している箇所もある。さらにはNOAA-PMELが日本近海に設置した5台のブイ式海底圧力計(D21401, 21413, D21418, D21419, D52402, DART)でも有用な津波波形が観測された。最初に本論文ではそれらのデータを利用して津波の励起過程を推定した論文をレビューし、

* 〒060-0810 札幌市北区北10条西8丁目

Fig. 1. Stations which observed the 2011 tsunami waveforms off shore. Two stations (TM1, TM2) are operated by University of Tokyo and Tohoku University off Kamaishi. Two stations (KPG1 and KPG2) are operated by JAMSTEC off Kushiro. Four GPS buoys (GPSB802, 803, 804, and 806) are operated by NOWPHAS. Five DART buoys (D21401, 21413, 21418, 21419, 52402) are operated by NOAA-PMEL. A star shows the epicenter of the 2011 Tohoku-oki earthquake. A solid-line oval shows the source area of the earthquake estimated by Hayashi *et al.* (2011).

Fig. 2. The 2011 Tsunami waveforms observed at the stations shown in Fig. 1. The origin time of the Tohoku-oki earthquake is set to be zero in horizontal axis.

結果を総合的に議論する。

東北地方太平洋沿岸は過去にも多くの津波によって被害を受けてきた。1896年明治三陸津波地震では津波の最大遡上高は38mに達し三陸沿岸で2万2千人が犠牲となった。1933年昭和三陸地震では死者・行方不明者3千人を超えた。それ以前にも1611年慶長三陸津波地震や869年貞観地震津波などがある。本研究ではそれら過去の巨大津波を伴った地震の震源過程と2011年東北地方太平洋沖地震による震源過程を比較し、東北沖で発生する巨大津波を伴う地震を総合的に議論する。さらにM9クラスの巨大地震による巨大津波と津波地震による巨大津波が東北沖と同じように発生させてきたスマトラ沖の地震発生様式と比較を行い、その発生様式を議論する。

§2. 津波波形から見る2011年東地方太平洋沖巨大地震震源過程

地震発生直後から現在まで、様々な研究者により2011年東北地方太平洋沖巨大地震の津波発生過程が解析されてきた。Hayashi *et al.* (2011)は上記津波観測波形や気象庁が房総沖に設置した海底ケーブル式圧力計で観測された津波波形などをデータとして、各観測点への津波到達時刻から逆伝播手法により津波波源域を推定し、波源域が長さ500km、幅200kmに及んでいることを明らかにした。さらに、大きな津波は震源近くの海溝よりで発生した可能性も指摘した。Tsushima *et al.* (2011)は近地津波予測高度化のために今まで利用されていなかった沖合の津波波形記録から津波波源を即時的に推定し津波予報を出す可能性を示した。その中で地震時の海面初期変動を津波波形から推定し、震源近傍と海溝近傍で大きな海面変動があったことを示した。Maeda *et al.* (2011)は特に釜石沖海底圧力計で観測された津波波形に着目し、長周期の津波に短周期の津波が重なる波形を説明するためには震源近くの海溝よりのプレート境界で57mのすべりが必要であることを示した。Fujii *et al.* (2011)は上記津波波形に検潮記録を加えて津波波形インバージョンを実施しこの地震のすべり量分布を推定した。その結果、津波波形を説明するためには震源近くの海溝近傍のプレート境界で40mを超えるすべりが必要であると結論づけた。さらに、釜石沖やGPS津波計で観測された短周期の津波を説明するためには海溝近傍の大きなすべりが必要であると示した。Saito *et al.* (2011)は上記津波波形の中でDART21418で観測された津波波形が分散性を示していることを指摘し、津波の分散性を考慮した線形Boussinesq式を用いた津波数値計算を行うことで、それらの観測波形を説明できることを示した。さらに上

Fig. 3. The slip distribution of the 2011 Tohoku-oki earthquake estimated from tsunami waveforms and coseismic deformation by Gusman *et al.* (2011).

記津波観測波形を用いて地震時海面変動（津波初期変動）を逆解析により推定した。その結果、この地震は海溝近傍に短波長の大きな地殻変動が発生していたことを示した。最後に Gusman *et al.* (2011) は上記津波波形に加え、陸上 GPS 観測網（国土地理院）で得られた地震時地殻変動や海底地殻変動結果 [Sato *et al.* (2011)] を加えて解析を行い、最大すべり 48m、海溝軸近傍でも 40m を超えるすべりを推定した (Fig. 3)。以上の研究成果より、沖合で観測された津波波形を説明するためには海溝近傍での短波長の津波励起が必要なことは明らかである。

§3. 東北沖で大津波を発生させたプレート境界型大地震

三陸沿岸は過去に大きな津波に幾度も襲われてきた (Fig. 4)。1896 年明治三陸地震は最大震度 3 程度であったにもかかわらず巨大津波（最大遡上高 38m）が三陸沿岸を襲い 2 万 2 千人にも達する死者を出した津波地震であった。Tanioka and Satake (1996) はこの地震に対して 3 検潮所で観測された津波波形や宮古での目撃証言を用いて断層モデルを推定し、日本海溝軸から 50km までの非常に海溝に近いプレート境界だけが破壊したプレート境界型地震であったことを明らかにした (Fig. 4)。Tanioka and Seno (2001a) はさらに海溝近傍まですべりが達した場合、海溝軸近傍の付加体が地震による大きな水平変動により変形するため、その変形が津波を励起する可能性があることを示した。海溝側までプレート境界が破壊すると様々な原因で津波が大きくなり、津波地震となる可能性が高いことが分かっていた [Kanamori

Fig. 4. Ruptured areas of large interplate earthquakes which generated large tsunamis and caused huge tsunami disasters along the Sanriku coast. The fault model for the 869 Jyogan and 1896 Sanriku tsunami earthquake is taken from Namegaya *et al.* (2010) and Tanioka and Seno (2001a), respectively. The source area of the 1611 Keicho earthquake is not well known but taken from Hatori (1975). Ruptured area of the 2011 Tohoku-oki earthquake is defined by the area where the slip amount more than 5m is estimated in Fig. 3.

(1972), Okal (1988), Pelayo and Wiens (1992), 等]。さらに、1611 年慶長三陸地震も津波地震であったと考えられている。古文書調査結果より、三陸沿岸で 20m を超える大きな津波であっただけでなく、仙台平野でも大きな津波があったとされている [都司 (2003), 蛭名 (2011)]。さらに北海道でも津波による大きな被害があったとされている [都司 (2003)]。1896 年明治三陸津波地震による津波は仙台平野に被害を及ぼしていないことから、1611 年慶長三陸地震の単純な繰り返し地震ではない。つまり震源域は少なくとも 1611 年慶長三陸地震の方が 1896 年明治三陸地震より広い可能性が高い (Fig. 4)。さらに古くなると 869 年貞観地震による大津波がある。この地震については古文書記録の解説や津波堆積物調査結果 [Minoura *et al.* (2001), 菅原・他 (2001), 佐竹・他 (2008), 行谷・他 (2010) 等] を津波数値計算によって再現することにより $M8.4$ 程度のプレート境界型巨大地震であり、

プレートの海溝近傍付近だけを破壊する津波地震タイプではなかったとされている (Fig. 4). ただ、この地震がプレート境界の深い側から海溝近傍まで全てを破壊したかどうか、もしくは深い側のみを破壊したかどうかは津波堆積物調査結果から明らかになっていない. 2011 年東北地方太平洋沖巨大地震は上記に述べたように、プレート境界型巨大地震で深い部分から海溝近傍のプレート境界まで全てを破壊した巨大地震であったと考えられる. 以上を総合的に見ると、東北地方沖に津波による大被害をもたらしてきたプレート境界型巨大地震は、海溝軸近傍のプレート境界だけが破壊する場合 (津波地震となる) や破壊が海溝近傍にまで達しない場合、東北地方太平洋沖地震のように全てを破壊してしまう場合が考えられる. さらに上記 4 つの巨大地震はいずれも三陸地方に巨大津波を発生させているが、震源域は各々違うと考えられ、巨大地震が単純に繰り返している訳ではなく非常に複雑であることがわかる.

§ 4. スマトラ沖で大津波を発生させたプレート境界型大地震

東北沖では、海溝軸近傍のプレート境界のみを破壊する津波地震タイプの巨大地震、破壊が海溝近傍まで達しない巨大地震、深い側から海溝近傍まで一挙に破壊し $M9$ クラスになる超巨大地震が発生してきたことが考えられるが、これは東北沖に限ったものではなく、スマトラ沖のプレート境界でも同様の発生様式が見られることが分かってきた. 2004 年スマトラ・アンダマン沖巨大地震 ($M_w 9.2$) は Fig. 5 に示すように約 1200 km にもわたるプレート境界が破壊した超巨大地震であった. この地震に対しては様々なデータの解析により震源過程が推定されているが、津波波形解析の結果によるとスマトラ北部では海溝軸近傍まで大きくすべったと考えられる [Fujii and Satake (2007), Seno and Hirata (2007) 等]. 谷岡・岩崎 (2006) が津波波形を用いて推定したすべり量分布 (Fig. 6) を見ると、スマトラ北部沖では海溝軸近傍で 29 m ものすべりがあったと推定されている. さらに 2004 年の超巨大地震の震源域に隣接する南側のプレート境界で発生した 2005 年ニース巨大地震 ($M_w 8.8$) の破壊域は海溝軸近傍のプレート境界には達していないとされた [Hsu *et al.* (2006)]. しかし、その地震による余効変動は海溝軸近傍のプレート境界で大きかったことも明らかになっている. 破壊域の北端は 2004 年スマトラ巨大地震の震源域の南端であり、両者の破壊域に重なりがないことも確かである (Fig. 5). つまり、2005 年ニース巨大地震は 2004 年スマトラ超巨大地震の破壊の影響を受けてその南隣りのプレート境界を破壊したが、その破

Fig. 5. Ruptured areas of large interplate earthquakes which generated large tsunamis and caused huge tsunami disaster along the Sumatra coast after 1900. The ruptured areas for the 2005 Nias and 2007 Bengkulu earthquakes are defined by the slip distributions estimated by Hsu *et al.* (2006) and Gusman *et al.* (2010), respectively.

Fig. 6. Slip distribution of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake estimated from tsunami waveforms by Tanioka and Iwasaki (2006).

壊は海溝軸近傍にまで達しなかった. Kanamori *et al.* (2010) は 1907 年スマトラ沖巨大地震の歴史地震波形を

解析し、それまでアウトライズ大地震ではないかと考えられていた地震をプレート境界で発生した津波地震であったと結論づけた。その結果、2005 年ニース巨大地震が深い側のプレート境界だけを破壊し、海溝軸近傍のプレート境界を破壊せずに止まったのは 1907 年スマトラ巨大地震によりその境界がすでに破壊されていたためではないかと推測した (Fig. 5)。さらに南側のプレート境界では、2007 年インドネシア（ブングル）巨大地震 (M_w 8.5) が発生し、メンタワイ諸島の地殻変動や津波波形解析からこの地震により海溝よりのプレート境界は破壊せず、深い側のプレート境界のみが破壊したことが明らかになっている [Gusman *et al.* (2010)]。その後 2010 年インドネシア（メンタワイ）津波地震 (M_w 7.7) が発生し、2007 年ブングル巨大地震により破壊されなかった海溝よりのプレート境界を破壊したと考えられる (Fig. 5)。これらの結果より、スマトラ沖でも東北沖のプレート境界と同じく、巨大地震は海溝よりのプレート境界のみを破壊し巨大津波を発生させる津波地震タイプの地震、深い側のプレート境界のみを破壊するが M_w 8.8 にも達する巨大地震、さらには 2004 年スマトラ巨大地震のように深い側から海溝までのプレート境界を破壊する超巨大地震が存在している。さらにそれらの巨大地震発生様式は複雑で予測することが難しいことが分かる。

§5. 議 論

2011 年東北地方太平洋沖超巨大地震は、今まで微小地震が発生せず、地震性の高速すべりを発生させることが難しいと考えられていた海溝よりのプレート境界で 40 m を超えるすべりを発生させたとされている。今まで海溝軸近傍のプレート境界は非常に稀に津波地震により破壊される場合があり、その場合破壊速度は通常の地震よりも遅くなり、震度に比べて異常に大きな津波を発生させるとされてきた [Kanamori (1972)]。さらに、Tanioka *et al.* (1997) によると 1896 年明治三陸津波地震はその太平洋プレート側のアウトライズで発生する巨大正断層地震等で形成される大きなホルスト・グラベン構造が沈み込むことにより発生するとされていた。そのため、津波地震は今まで非常に稀な条件が整った場合にのみ発生すると考えられていた。しかし、東北地方太平洋沖巨大地震を受けて東北沖やスマトラ沖の巨大津波の発生を見直す中で、津波地震は稀に発生するのではなく、海溝軸に達する浅いプレート境界を破壊する津波地震、深いプレート境界のみを破壊する巨大地震（典型的プレート境界地震）、深い部分から海溝軸まで一挙にプレート境界を破壊する超巨大地震が複雑に繰り返して発生してきていると考えられる。さらに 1946 年アリユ

シャン津波地震 [Tanioka and Seno (2001b)], 1963 年千島沖津波地震 [Fukao (1979)], 1992 年ニカラグア津波地震 [Satake (1994)], 1996 年ペルー津波地震 [Satake and Tanioka (1999)], 2006 年西ジャワ沖津波地震 [Fujii and Satake (2006)] のように、海溝軸に達する浅いプレート境界を破壊する津波地震はほとんどの沈み込み帯で発生してきていたことがわかる。このように過去の大地震の歴史を見ると、津波地震は巨大地震を発生させる沈み込み帯では稀ではなく一般的に発生してきたと考えても不思議はない。

大きな津波を発生させる沈み込み帯でのプレート境界巨大地震の発生様式は海溝軸に平行な方向に多様性があるだけでなく、海溝軸に直交する方向にも多様性があることとなり、巨大地震の繰り返しを議論することは今までより難しくなってきた。Kanamori *et al.* (2010) が 1907 年スマトラ地震を再解析したように過去の巨大地震の詳しい震源過程を現存する様々なデータから見直すことが、重要になってきたと言える。

謝 辞

本論文に掲載した 2011 年東北地方太平洋沖津波の観測波形は海洋技術開発機構（釧路沖ケーブル式海底津波計）、東京大学・東北大学（釜石沖ケーブル式海底津波計）、港湾空港技術研究所（GPS 波浪計）、NOAA-PMEL（ブイ式海底津波計 DART）から提供を受けました。ここに感謝いたします。馬場俊孝博士及び匿名査読者から有用なコメントをいただき感謝いたします。

文 献

- 蛭名裕一, 2011, 慶長津波と震災復興, 特集「東北の海—東日本大震災②」季刊東北学, **29**, 124-138.
- Fujii, Y. and K. Satake, 2006, Source of the July 2006 West Java tsunami estimated from tide gauge records, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L24317, doi:10.1029/2006GL028049.
- Fujii, Y. and K. Satake, 2007, Tsunami source of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake inferred from tide gauge and satellite data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **97**, S192-S207.
- Fujii, Y., K. Satake, S. Sakai, M. Shinohara, and T. Kanazawa, 2011, Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, **63**, 815-820.
- Fukao, Y., 1979, Tsunami earthquakes and subduction processes near deep-sea trenches, *J. Geophys. Res.*, **84**, 2303-2314.
- Gusman, A. R., Y. Tanioka, T. Kobayashi, H. Latief, and W. Pandoe, 2010, Slip distribution of the 2007 Bengkulu earthquake inferred from tsunami waveforms and InSAR data, *J. Geophys. Res.*, **115**, B12316, doi:10.

- 1029/2010JB007565.
- Gusman, R.A., Y. Tanioka, S. Sakai, and H. Tsushima, 2011, Source model of the 2011 Tohoku tsunami estimated from tsunami waveforms and crustal deformation data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, submitted.
- 羽鳥徳太郎, 1975, 三陸沖歴史津波の規模と推定波源域, *地震研究所彙報*, **90**, 397-414.
- Hayashi, Y., H. Tsushima, K. Hirata, K. Kimura, and K. Maeda, 2011, Tsunami source area of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake determined from tsunami arrival times at offshore observation stations, *Earth Planets Space*, **63**, 809-813.
- Hsu, Y.-J., M. Simons, J.-P. Avouac, J. Galetzka, K. Sieh, M. Chlieh, D. Natawidjaja, L. Prawirodirdjo, and Y. Bock, 2006, Frictional afterslip following the 2005 Nias-Simeulue earthquake, Sumatra, *Science*, **312**, 1921-1926 doi: 10.1126/science.1126960.
- Kanamori, H., 1972, Mechanism of tsunami earthquakes, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **6**, 246-259.
- Kanamori, H., L. Rivera, and W.H.K. Lee, 2010, Historical seismograms for unravelling a mysterious earthquake: The 1907 Sumatra Earthquake, *Geophys. J. Int.*, **183**, 358-374, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04731.x.
- Maeda, T., T. Furumura, S. Sakai, and M. Shinohara, 2011, Significant tsunami observed at ocean-bottom pressure gauges during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, **63**, 803-808.
- Minoura, K., F. Imamura, D. Sugawara, Y. Kono, and T. Ishikawa, 2001, The 869 Jogan tsunami deposit and recurrence interval of large-scale tsunami on the Pacific coast of northeast Japan, *J. Natural Disaster Sci.*, **23**, 83-88.
- 行谷佑一・佐竹健治・山木 滋, 2010, 宮城県石巻・仙台平野および福島県請戸川河口低地における 869 年貞観津波のシミュレーション, *活断層・古地震研究報告*, **10**, 1-21.
- Okal, E. A., 1988, Seismic parameters controlling far-field tsunami amplitudes: a review, *Natural Hazards*, **1**, 67-96.
- Pelayo, A.M. and D.A. Wiens, 1992, Tsunami earthquakes: slow thrust-faulting events in the accretionary wedge, *J. Geophys. Res.*, **97**, 15321-15337.
- Saito, T., Y. Ito, D. Inazu, and R. Hino, 2011, Tsunami source of the 2011 Tohoku-oki earthquake, Japan: Inversion analysis based on dispersive tsunami simulations, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L00G19, doi:10.1029/2011GL049089.
- Satake, K., 1994, Mechanism of the 1992 Nicaragua tsunami earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 2519-2522.
- Satake, K. and Y. Tanioka, 1999, Source of tsunami and tsunamigenic earthquakes in subduction zones, *Pure Appl. Geophys.*, **154**, 467-483.
- 佐竹健治・行谷佑一・山木 滋, 2008, 石巻・仙台平野における 869 年貞観津波の数値シミュレーション, *活断層・古地震研究報告*, **8**, 71-89.
- Sato, M., T. Ishikawa, N. Ujiyama, S. Yoshida, M. Fujita, M. Mochizuki, and A. Asada, 2011, Displacement above the hypocenter of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Science*, **332**, doi:10.1126/science.1207401.
- Seno, T. and K. Hirata, 2007, Did the 2004 Sumatra-Andaman earthquake involve a component of tsunami earthquakes?, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **97**, S296-S306.
- 菅原大助・箕浦幸治・今村文彦, 2001, 西暦 869 年貞観津波による堆積作用とその数値復元, *津波工学研究報告*, **18**, 1-10.
- 谷岡勇市郎, 2009, 津波データに基づく震源・津波発生過程の研究, *地震*, **2**, S489-S496.
- 谷岡勇市郎・岩崎伸一, 2006, 津波波形インバージョンによる 2004 年スマトラ地震の震源過程解析, *月刊地球*, 号外 **56**, 19-24.
- Tanioka, Y. and K. Satake, 1996, Fault parameters of the 1896 Sanriku tsunami earthquake estimated from tsunami numerical modeling, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 1549-1552.
- Tanioka, Y. and T. Seno, 2001a, Sediment effect on tsunami generation of the 1896 Sanriku tsunami earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3389-3392.
- Tanioka, Y. and T. Seno, 2001b, Detailed analysis of tsunami waveforms generated by the 1946 Aleutian tsunami earthquake, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **1**, 171-175.
- Tanioka, Y., L. Ruff, and K. Satake, 1997, What controls the lateral variation of large earthquake occurrence along the Japan Trench?, *The Island Arc*, **6**, 261-266.
- 都司嘉宣, 2003, 慶長 16 年 (1611) 三陸津波の特異性, *月刊地球*, **287**, 374-381.
- Tsushima, H., K. Hirata, Y. Hayashi, Y. Tanioka, K. Kimura, S. Sakai, M. Shinohara, T. Kanazawa, R. Hino, and K. Maeda, 2011, Near-field tsunami forecasting using offshore tsunami data from the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, **63**, 821-826.