超巨大地震発生前後の顕著な地震活動

北海道大学大学院理学研究院自然史科学部門* 小山 順二・都 筑基 博

Activity of Significant Earthquakes before and after Megathrust Earthquakes in the World

Junji KOYAMA and Motohiro TSUZUKI

Division of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University
North 10, West 8, Kita-ku Sapporo, 060-0810, Japan
E-mail: koyama@mail.sci.hokudai.ac.jp

(Received November 15, 2012; Accepted December 29, 2013)

After the 2011 Tohoku-oki megathrust earthquake of M_w 9.0, we observed tens of thousands of inland and volcanic earthquakes all over the Japan Islands, which are not confined within the aftershock area of off the Pacific coast of Tohoku region. This reminds us to evaluate the earthquake activity in a much wider sense, discarding an ordinary idea of the foreshock-mainshock-aftershock activity within a limited aftershock area of a particular earthquake. There occurred several megathrust earthquakes worldwide in the last one hundred years. We have studied their significant events before and after the earthquakes based on our new hypothesis on the earthquake generating zone with the distinct difference between Along-dip Double Segmentation (ADDS) and Along-strike Single Segmentation (ASSS). In summary, some of significant aftershocks (larger than M_w 7.5) of ADDS megathrusts are those (Type I) in and near outer-rises, where some are dip-slip normal faultings and some are strike-slip faultings within subducting oceanic plates with component of normal fault. These outer-rise earthquakes are considered to be controlled by the slab-pull of descending slabs of oceanic plates induced by the reduction of plate couplings by megathrusts. In addition, some are also significant (Type II) along the plate interfaces within aftershock areas and those extending aftershock areas similarly to the corresponding megathrusts. On the other hand, aftershocks of ASSS occurred in and near corresponding aftershock areas and significant and or disastrous outer-rise events are rare. Some large (not significant) inland earthquakes are also known for both ADDS and ASSS megathrusts. All these results are not dependent on whether the subduction geometry is oblique or orthogonal.

Key words: Megathrust earthquake, Along-dip Double Segmentation, Along-strike Single Segmentation, Significant aftershock, Outer-rise earthquake

§1. はじめに

科学の進歩はその根底にある考えや仮説が検証されることにある [ポアンカレ (1959)]. 将来の地震観測研究計画も同じである。我々は超巨大地震が発生する場に、Along-dip Double Segmentation (ADDS) と Along-strike Single Segmentation (ASSS) という2つの異なる性質があると考えている [Yomogida *et al.* (2011), Koyama *et al.* (2012), 小山・都筑 (2013)].

従来、大きな地震活動は、個々の地震セグメントや隣り合う地震セグメントを含む領域で前震・本震・余震の

活動として評価されてきた [例えば、宇津 (2001)]. また、地震観測網の整備・地震発生過程の研究の進歩により、余震活動は、本震時の断層破壊による局所的な応力集中を緩和するように、断層面上や断層周辺部に発生する [例えば、Yagi *et al.* (2004)] と考えてきた。特に、Gutenberg-Richter 則や大森の式 [宇津 (2001)] などにより、大きな地震後に起こる顕著な余震の発生は、このような緩和過程の考えのもとに、確率的な予測が可能になった、とまで考えられてきた [地震調査研究推進本部 (1988)].

しかし、2011年3月11日東北沖超巨大地震は、東北沖太平洋側のほとんどすべての地震セグメントを破壊

* 〒060-0810 札幌市北区北10条西8丁目

し、日本全国で内陸や火山性の地震活動をいたるところで活性化させた [国土地理院 (2012)]. このような広域での地震活動は確率的にも、経験的にも評価できなかったことである。2011 年東北沖超巨大地震が示していることは、従来の個々の狭い地震セグメント内の地震活動で前震・本震・余震といった時系列を考えるのではなく、超巨大地震を時間基点として、それ以前・以後にどのような顕著な広域の地震活動が発生したかを考慮しなければならないこと、また震源域から遠く離れた広域な場で多くの誘発地震を励起することである。

さて、Fig. 1 を見ればわかるように、今回の東北沖超巨大地震では、太平洋プレートが沈み込む方向に 2 重の帯状の地震セグメント (ADDS) が島弧沿いと海溝沿いの間に 2 重の帯状に並んで存在している地域に発生した。それと比べて、南海トラフ沿いの南海道・東南海道・東海地域では、海溝から島弧に至る地域が地震空白域 (Seismic gap) として沈み込み帯に沿い地震セグメントが一系列の帯状に隣り合って並んでいる (ASSS)。我々が唱えている超巨大地震の発生場の ADDS と ASSS と

は、このような地震活動の地域性をさす。

このような海溝沿いに沈み込む方向に向かい 1 重、2 重の帯状の地震活動帯が存在するのは日本付近にかぎった現象ではなく、1952 年カムチャッカ地震・1964 年アラスカ地震は ADDS 型、1960 年や 2010 年チリ地震は ASSS 型の地震であることが指摘されている [Koyama *et al.* (2012)]. まとめて、ASSS 型の超巨大地震活動では、地震活動域は海溝からの沈み込み帯の幅が狭く、地震セグメントは幅が長さに対して小さな細長い領域となる。また、沈み込み帯の固着は海溝沿いから沈み込み方向全体に拡がり、プレート境界全体に地震空白域を形成する。地震発生時のアスペリティはこの空白域にある固着域全体にわたる [Moreno *et al.* (2010)]. 他方、ADDS 型の超巨大地震活動では、地震活動域の幅と長さの比が 1:2 程度で幅広く、真に強い固着を示すのは海溝沿いの地震セグメント帯である。超巨大地震前の地震活動は島弧や大陸沿いの地震セグメント帯での固着域の破壊が活発化することによる。しかし、海溝沿いの真に強い固着の地震セグメント帯が不活発であるから全体的な地震活

Fig. 1. Seismic activity in Japan and its vicinity. Seismic segmentation is quoted from <http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka02_kaiko.htm> by the Headquarters for Earthquake Research Promotion. Epicenters of earthquakes are plotted by yellow symbols from 1950 to 2010 with magnitudes determined by Japan Meteorological Agency larger than 5.9 and their focal depths shallower than 61 km. Trench and trough near Japan are illustrated by red curves. Areas surrounded by pinkish curves are the segments where next large earthquakes have been expected. The 2011 Tohoku-oki megathrust earthquake ruptured the area circled by a solid ellipse, where Along-dip Double Segmentation (ADDS, see text) is obvious. Along-strike Single Segmentation (ASSS) can be found in the Nankai Trough, where little recent seismic activity has been observed. Such regions are often called seismic gaps. This figure is reproduced from Figure 1 by Koyama *et al.* (2012).

動は海溝沿いの地震活動を欠くドーナツパターン [Mogi (1969)] のようになる。そして、真に強い破壊を示す地震発生時のアスペリティは海溝沿いのセグメントで限られた範囲である [Ruff and Kanamori (1983), Koketsu *et al.* (2011)]. この考えは、最近指摘されている地震活動における沈み込み帯に沿う水平方向の変化 (Along-strike Variability) [Freymueller *et al.* (2008), Hariri *et al.* (2013)] ばかりではなく、プレートが沈み込む方向にも多様な変化を示すことを示唆している。同様の主張が、最近 Kopp (2013) によって、プレート境界に発達する堆積層の性質から議論されている。

本研究では比較的近年世界中で発生した超巨大地震発生前後の顕著な地震 ($M_w > 7.5$) や被害地震を調べ、我々の ADDS/ASSS 仮説を特徴づける地震活動の性質を述べる。本研究は、上に述べた空間的特徴ばかりではなく、地震前後での顕著な地震活動にどのような違いがあり、そしてその地震活動の違いが ADDS/ASSS の何に起因するものであるかを考える基礎とすることにある。将来発生するかもしれない 2011 年東北沖超巨大地震の大きな余震がどのような性質を示すのかを知り、世界の超巨大地震がどのような場で発生するかを理解するのは、地震防災上意義のあることであると考えられる。

2 重構造となる ADDS 型の地震活動は、例えば、Heki *et al.* (1997) が明らかにした東北沖太平洋岸に発生した地震が引き続き日本海溝の方向へ半年にもわたって断層すべりが拡大していった事実や、Tanioka *et al.* (1997) が海溝沿いの限られた領域で aseismic な振る舞いや津波地震を励起するのに対して、より深い陸よりの領域で普通の地震活動が見られる、などとする考えに似てはいる。数値計算でも、Wang and Hu (2006) は海溝近くの Outer Wedge (aseismic) とより深い領域の Inner Wedge (seismic) で応力場が異なるふるまいを示すと指摘している。しかし、東北沖超巨大地震が意味していることは、従来 aseismic であると考えられ、非地震的なすべりでひずみを解放していると考えられてきた海溝沿いの領域でも、大きなひずみの蓄積が存在可能で、時として超巨大地震を引き起こす引き金になることである [Tsunami and Koyama (2013)]. このように aseismic で安全弁と考えられてきた海溝に近い領域が大きな歪を蓄積して超巨大地震に発展するのは、1964 年アラスカ地震でも同様である [Yomogida *et al.* (2011), Koyama *et al.* (2012)]. またさらに、東北沖日本海溝と南海トラフの前弧ウェッジの構造的な違いも地質学的に指摘されている [岡村 (2012)]. これも我々が提唱している沈み込み帯の ADDS/ASSS の違いを反映しているもので、新たな視点で地震活動を注視しなければならない問題である。

Fig. 2. Variability of megathrust earthquake in the world in terms of seismic segmentations (Along-strike Single Segmentation, ASSS or Along-dip Double Segmentation, ADDS), subduction zone geometry (orthogonal or oblique collisions) and collisions with continental plate or continental margin (island arc). Typical end-members of great earthquakes are plotted by solid circles with their year of occurrences. Possible future large earthquakes in Hokkaido, Nankai Trough (Fig. 1) and the Cascade subduction zone, Canada are also plotted by stars. This is reproduced from Figure 7 by Koyama *et al.* (2012).

このような知見は、具体的には Fig. 2 の星印で示す今後発生するかもしれない北海道 (ADDS)、南海道やカスケード・カナダ (ASSS) の地震活動を今後注意深く見守り、沈み込み帯の固着の有り様や地震活動の変化を観察することが急務であることを指し示している。

ここで、顕著な地震 ($M_w > 7.5$) に限った理由は、 $M_w \sim 8$ を超えるような巨大地震を歴史地震も含めてもれなく評価するために掛けた保険である。巨大地震は、単一のあるいは隣合う地震セグメント内の破壊に複数の小規模な不均質領域の破壊が伴った複雑な断層破壊と考えられてきた [Koyama (1997)]. しかし、ここで言う超巨大地震とは、 M_w が 9 程度をこえるような巨大地震を言い、従来の $M_w \sim 8$ クラスの不均質な地震セグメントの断層面を複数連動して破壊するような超巨大な地震である。超巨大地震の震源過程は巨大地震のそれとは不均質領域の規模が階層構造的に違うものであることを示している。超巨大地震では、小規模な断層面不均質構造ばかりではなく、断層破壊域が隣り合う複数の数多くの地震セグメントに及び、それぞれの地震セグメント ($M_w \sim 8$ クラスの地震断層) が個性的な断層破壊を示し、時として地震発生時に長周期の破壊過程を伴ったりすることもある。

るからである [Lay *et al.* (2005), Stein and Okal (2007)].

§ 2. ADDS (Along-dip Double Segmentation) 型超巨大地震前後の広域で顕著な地震

超巨大地震後に発生する顕著な ($M_w > 7.5$) 地震がどのような性質かを考えた端緒は Kanamori (1972) の指摘からである。1896 年明治三陸津波地震 ($M_t^{(1)}$ 8.6) が東北地方三陸沖プレート境界で発生し、それによりプレート間の固着が弱まり、日本海溝近傍のアウトターライズで沈み込む太平洋プレートを断ち切るように 1933 年三陸はるか沖の正断層地震 (M_w 8.4) が誘発された、とする仮説である。本研究では、このような発生順、発生場所とメカニズムを持つ地震活動を I 型の地震活動と呼ぶことにする。これらの両地震は共に大きな津波を発生させ、三陸海岸に大規模な被害をもたらした。2011 年東北沖超巨大地震の最大余震も、同様に、そのようなアウトターライズでの正断層型地震が心配されている [Lay *et al.* (2011)]. アウターライズの地震は発生数も少なく、今はその前兆を観測したり、東北沖アウトターライズ地震の発生を予測する手段がないので、世界の超巨大地震前後の大きな地震はどのような性質を持った地震だったのかを先ず調べてみる。

2.1 1964 年アラスカ地震

1964 年 3 月 28 日に発生したアラスカ地震 M_w 9.2 は太平洋プレートがアラスカ半島にほぼ垂直に沈み込む地震帯で発生した ADDS 型地震である [Yomogida *et al.* (2011), Koyama *et al.* (2012)]. 地震断層は幅 300 km, 長さ 500 km [Lay *et al.* (1982)] にもおよんだ。ここでいうプレートが海溝軸に垂直な方向に沈み込むとは、斜め沈み込み (oblique subduction) の対句として用いている。プレート同士が交差する角度が厳密に 90 度であることを意味している訳ではない。1964 年アラスカ地震の震源域近くでは、 M_w 7.0 をこえる前震活動は USGS の記録を遡る限りない。後に述べる 1957 年アンドレアノフ、1965 年ラット島地震の震源域をのぞくと、アラスカ地震以後に周辺で発生した大きな地震 (M_w 7.0 以上) は、5 個存在する。その内最大と思われるのは 1987 年 11 月 30 日に発生した M_w 7.8 の地震である (Fig. 3)。この地震はアラスカ海溝のアウトターライズというより、海溝より少し離れた海側の太平洋プレート内で発生し、メカニズム解は正断層成分を持つ横ずれ型である。2002 年 11 月 3 日にアラスカ半島内部のデナリ断層沿いに発生したデナリ地震 M_w 7.9 も発生している。したがって、この二つが 1964 年アラスカ地震後に発生した広域に考える震源域周辺での顕著に大きな地震と考える。

1964 年アラスカ地震の断層すべりからわかる Ten-

sion 軸 (T 軸) の方向は N24° W [Kanamori (1970)] である。当時は観測点の数も少なく、メカニズム解に現在ほどの決定精度は期待できないが、T 軸は海溝軸にほぼ直交する向きに近い。1987 年の地震メカニズム解 (Fig. 3) は T 軸が N50° W であり、アラスカ地震のすべり方向と調和的で、正断層成分をもつ横ずれ型の地震であることがわかる。

この地震が発生した太平洋プレートでは、南北方向に並んだ地磁気の縞模様が南東・北西方向に断ち切られるような破碎帯構造が見られる地域であり [Fowler (2005)], USGS が示す周辺の大きな地震も南北の帯状に分布している²⁾。このような正断層型の横ずれ地震は、プレート境界での巨大地震の発生でプレート間の固着が弱くなり、沈み込んでいるプレートのスラブプル [Kanamori (1972), Christensen and Ruff (1988)] がアウトターライズ、その海側に地震を引き起こしたと考えられる。しかし、アウトターライズに発生する正断層型の地震は、沈み込むプレートの曲げによるとする考えもある [例えば, Stauder (1968)]。この点は後に再び議論しよう。

また、このような地震については、超巨大地震の直接の余震や誘発地震ではなく、沈み込むプレート内部が分裂するとする考えもある。この考えは、次の 2004 年スマトラ地震の項でもう一度議論する。ここでは、アウトターライズ周辺の地震メカニズム解はサブダクションブルが主たる原因で、横ずれ型 (Strike-slip) になるか、正断層型 (Dip-slip) になるかは、沈み込む海洋プレートが持つ構造的な性質によるものと考ええる。結論として、地震の規模から判断して、アラスカ地震後の最大余震として挙げられるのは 1987 年のアウトターライズの海側の地震 (I 型) で正断層成分を持つ横ずれ型の地震である。2002 年デナリ地震は、この地震と同規模の地震で、アラスカ半島内陸のデナリ大断層沿いで発生した右横ずれ型の地震である。デナリ断層は、カナダ西端からアラスカ半島内部にかけ北西方向から西南西方向へ大きく曲がっている。この断層は、東端をカナダ西海岸のクイーンシャーロット右横ずれ断層に画された太平洋プレート西端部の角の一部がアラスカ半島に沈み込み、生じたと考えられている³⁾。デナリ地震が、1964 年アラスカ地震に誘発された地震か、周辺のひずみ蓄積によるものか否か

¹⁾ M : USGS/気象庁による表面波マグニチュード,
 M_w : USGS によるモーメントマグニチュード
 M_t : 津波マグニチュード
http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/historical_country.php

²⁾ <http://pubs.usgs.gov/of/2010/1083/b/>

³⁾ http://www.aic.alaska.edu/html_docs/faq.html

Fig. 3. Epicenters are plotted by stars of the 1964 Alaska megathrust earthquake of M_w 9.2 and the 1987 outer-rise earthquake of M_w 7.8 off shore Alaska and the 2002 Denali earthquake of M_w 7.9 by open circle. Global CMT solution of the 1987 event is illustrated on the lower hemisphere. The solution is from http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/historical_country.php. Dark and white portions of the focal mechanism beachball indicate tensional (T) and compressional (P) regions of P-wave initial motions. Thick broken curve indicates the aftershock area of the 1964 event. Arrow indicates the motion direction of the Pacific plate along the longitude of 150° W, where the direction varies from due NNW at the Queen-Charlotte portion of Western Canada to almost due West at the Aleutian Arc³⁾.

は、この地震が1964年アラスカ地震から離れた広域で発生し周辺の地殻構造が複雑に入り組んでいる大陸内の地震であるから、断定することはできない。

2.2 2004年スマトラ地震

2004年12月26日スマトラ海溝沿いに、スマトラ半島沖からニコバル・アンダマン諸島にかけて M_w 9.3の超巨大地震が発生した。この地震による破壊域は震央付近のスマトラ島沖の地震セグメントでは幅240 km、長さ420 km程度の幅広い断層であったが、破壊が進展したニコバル・アンダマン諸島付近の地震セグメントでは、幅160 km、長さが570 kmであり、全体の断層破壊は1300 kmにも及んだ [Lay *et al.* (2005)]。2012年4月11日 M_w 8.6の巨大地震がスマトラ島沖のアウトライズの海側に発生した。1987年アラスカ沖地震の場合と同様に、こ

Fig. 4. Large earthquakes from January 1, 1976 to April 12, 2012 along the Sumatra trench are indicated by solid circles, whose moment magnitude M_w is larger than 6.9 and focal depth shallower than 61 km. Significant earthquakes of the 2004 Sumatra earthquake of M_w 9.3, the 2005 Nias earthquake of M_w 8.6, the 2007 Bengkulu earthquake of M_w 8.5 and the latest outer-rise earthquake off shore Sumatra of M_w 8.6 of April 11, 2012 are indicated by color. Global CMT solutions are the same as those in Fig. 3.

Fig. 5. Large earthquakes after the 2011 Tohoku megathrust earthquake are plotted. Two largest aftershocks up to now are indicated. Others are the same as those in Fig. 3.

の地震も正断層成分を持つアウターライズから少し離れたインド・オーストラリアプレート内での横ずれ型の地震である。現在まで、この地震が2004年の震源域南東に本震破壊方向とは逆方向に震源域を拡大するように発生した2005年3月28日ニース島付近で発生した M_w 8.6の地震と共に、2004年スマトラ・アンダマン地震後に震源域周辺で発生した最大規模の地震である (Fig. 4)。

2004年スマトラ・アンダマン地震の震源域における前震活動は、 M^1 7.0をこえるような地震にかざれば、1941年 M 7.5と2002年 M_w 7.3の地震が知られているだけである。本震以前の小さな地震を含む活動を見れば、初期破壊のスマトラ島沖の本震震源域近くでは地震活動は活発で、断層破壊が進行し最終的に非常に細長い断層を形成したニコバル・アンダマン諸島周辺では本震以前に地震活動はほとんどない [Lay *et al.* (2005)]。上に述べたが、本震震源域では断層の幅と長さの比はおおよそ1:2であるが、ニコバル・アンダマン諸島付近になるとその比は1:3.5である。後者はASSS型の地震活動の特徴を示している。さらに、本震震源域の南東側で発生した2005年ニース島付近の最大余震は M_w 8.6にしては津波の励起が小さい。これは同地震の余震活動域を見ればわかるが、この地震の断層破壊は沈み込み帯の深い部分に拡がっており、地震による海底地殻変動が小さかったから津波の励起が小さかったと考えられる。谷岡・Gusman (2012) の Fig. 5 によれば、1907年スマトラ地震 [Kanamori *et al.* (2010)] は2005年ニース島付近の地震の海溝側に発生した津波地震である。さらにその南東、2007年9月12日ブンクル地震 (M_w 8.4) とその後近くの海溝沿いに発生した2010年10月25日メンタワイ津波地震 (M_w 7.8) は沈み込みのDip方向に隣り合って並んでいる。これらはすべてこの地域が2重セグメントのADDS型の地震活動であることを示している。このように、2004年スマトラ地震の震源付近のスマトラ島沖の地震セグメントでは、ADDS型の地震活動の特徴を示していると考えられ、断層破壊が進行したニコバル・アンダマン諸島付近ではASSS型の地震活動と理解される。ニコバル・アンダマン諸島周辺では2004年スマトラ地震の大きな余震が2009年8月10日と2010年6月12日 (共に M_w 7.5) に発生しているだけで M_w 7.6以上の顕著な地震は発生していない。

インド・オーストラリアプレートが斜めに沈み込んでいるこの地域では、斜め沈み込みの島弧帯でも海溝軸にほぼ垂直方向に変位する低角の逆断層地震が起る [Lay *et al.* (2005), Stein and Okal (2007), 小山・他 (2012)]。2012年4月の地震はT軸がこの2004年スマトラ地震のすべりの方向 (北西方向) を向く正断層成分

を持つ横ずれ型のメカニズムである。この周辺は、インド・オーストラリアプレート内にはほぼ南北に伸びる古い海嶺が数多く発達している地域であり、1987年アラスカ沖地震と同様に、そこに2004年の超巨大地震によりプレート間の固着が解放され、沈み込んでいるプレートのスラブプルがこのようなメカニズムの地震を発生させたと考えられる。したがって、2004年スマトラ地震の2012年にアウターライズ周辺に発生した巨大地震は、1987年アラスカ沖地震の場合と同様にI型の地震活動で、正断層成分を持つ横ずれ型の地震である。

最近Yue *et al.* (2012) やRoyer (2012) は2012年4月のスマトラ半島沖の地震活動はインドプレートとオーストラリアプレートが持つそれぞれの拡大速度の違いにより、インド・オーストラリアプレートが分裂を始めた証拠ではないかと考えている。しかし、1964年アラスカ地震後の地震もこの地震も古い海嶺や破碎帯からなる複雑な海洋プレート内部での地震活動である。その複雑なプレート構造がプレートの分裂を示すのか、複雑な構造が弱面として地震をその場所に誘発したのかの当否は今後の議論によるものである。いずれにしても、超巨大地震によりスラブプルが沈み込む海洋プレート内の構造に依存した横ずれ型の地震を発生させたと考ええる。

2005年ニース島地震は、2004年スマトラ地震の南東方向に震源域を直接拡大した最大余震である。このような震源域を拡張するような余震活動は従来から知られており、ここではII型の地震活動と呼ぶことにする。

2.3 2011年東北沖地震

太平洋プレートの沈み込みがほぼ垂直に近い沈み込み帯で発生した2011年3月11日東北沖超巨大地震 M_w 9.0は、東北地方太平洋沖のほとんどの地震セグメントを連動して破壊し、200km×500km程度の震源域を形成した。Fig. 1にも示したが、この地震は典型的なADDS型の地震活動である。現在まで (2012年11月13日) のところ大きな余震は、本震当日3月11日に発生した茨城県沖の M_w 7.7と宮城県沖のアウターライズに発生した M_w 7.5の余震である。茨城県沖の余震は余震域を拡大したようなII型の地震活動である。 M_w 7.5の余震のメカニズム解は正断層型である (Fig. 5)。後者の地震は、メカニズム解、震源位置共に1933年三陸津波地震と地震発生パターンはよく似ており、地震規模ははるかに小さいが、I型の地震活動である。もちろん1896年明治三陸津波地震は時定数の長いゆっくり地震で [Kanamori (1972)], 今回の2011年東北沖地震は断層破壊にゆっくり成分も伴う地震であったかもしれないが [例えば、Koper *et al.* (2012)], 断層破壊の主要部は海溝沿いの巨大なアスベリティーである [例えば、Koketsu *et al.*

Fig. 6. Rough sketches of tsunami source areas are reproduced with ocean bottom bathymetry in the Tohoku-oki region, Japan. The 2011 Tohoku-oki megathrust earthquake is from Hayashi *et al.* (2011), the 869 Jyogan tsunami earthquake of $M_{8.3}$ from Namegaya *et al.* (2010), the 1611 Keicho earthquake of $M \sim 8.1$, the 1793 Kansei earthquake of $M_{8.0 \sim 8.4}$, the 1896 Meiji Sanriku tsunami earthquake of $M_{8.6}$ and the 1933 Showa Sanriku earthquake of $M_w 8.4$ are from Hatori (2000).

(2011)]. このように 1896 年明治三陸津波地震とは発生様式が異なるように見えるが、1896 年明治三陸津波地震よりはるかに地震規模が大きな 2011 年東北沖超巨大地震の余震としてさらに巨大なアウターライズの正断層型の地震が発生することを否定することはできない。Kanamori (1972) の指摘が正しいものなら、1964 年アラスカ地震後の 1987 年アラスカ沖地震を考えると、今後さらに 30 年以上にわたり大きな余震を警戒することが必要である。

三陸沖では 1896 年の津波地震だけではなく、1793 年寛政の地震 ($M_{8.0 \sim 8.4}$)、1611 年慶長の津波地震 ($M \sim 8.1$)、869 年貞観地震 ($M_{8.3}$) が発生し (Fig. 6)、甚大な津波被害を発生している。しかし、これらの地震では、顕著な被害をもたらした大きな余震、アウターライズの余震、またその余震による津波は今のところ発見されてい

ない。より小さな地震、付近での小規模な津波は、歴史地震でも記載されており [宇佐美・他 (2013), 渡辺 (1998)], 大きな被害を伴った地震や津波は網羅されていると考えられる。したがって、1896 年明治三陸地震後の 1933 年昭和三陸地震はこの地域では特異なアウターライズの地震かもしれないが、2011 年東北沖超巨大地震は、それらすべてを凌駕するような (Fig. 6) 大きな地震であるから、その最大余震も十分大きなものであることが考えられる [Lay *et al.* (2011)]. アウターライズの詳細な地震活動調査や地殻変動観測で何とかその変動をとらえたいものであるが、残念なことに、2011 年地震直後の余震観測 [Obana *et al.* (2012)] をのぞき、地震直後から計画されていた定常的な海域観測網の整備には、アウターライズの観測は含まれておらず [日野 (2012)], 重要性が認識されてなかった。最近の新しい観測計画 [防災科学技術研究所 (2013)] ではこの点も盛り込まれている。

補足だが、1896 年明治三陸地震では、2 か月後に陸羽地震 $M_{7.2}$ が内陸に発生している。また、II 型の余震活動として、1897 年 8 月 5 日 $M_{7.7}$ の地震が釜石沖に発生している。2011 年東北沖超巨大地震の一連の地震活動を見れば、2008 年岩手・宮城内陸地震 $M_w 7.2$ が震源域近くの内陸に発生している。しかし、Fig. 6 にあげた過去の顕著な地震前後では、1804 年象潟地震 ($M_{7.0}$) のように被害地震ではあるが規模はあまり大きくない地震活動をのぞけば、顕著な内陸での地震活動は記録されていない。

2.4 1952 年カムチャッカ地震

1952 年 11 月 4 日カムチャッカ地震 $M_w 8.8$ は周辺で発生した大きな地震の余震域や、630 km × 200 km にも及ぶ津波の波源域 [Johnson and Satake (1999)] からほぼ垂直に沈み込む地震帯の ADDS 型の地震と考えられる。1959 年 5 月 4 日に発生した $M_w 8.2$ の地震が本震の震源域を北東方向に拡大した II 型の最大余震である (Fig. 7)。アウターライズの正断層型地震 (更に小さな地震は除く) は 1989 年 4 月 11 日 $M_w 6.7$ だけのようであり、顕著なアウターライズ地震 ($M_w > 7.5$) は発生していない。また、カムチャッカ半島内陸にも顕著な地震は発生していない。ただ、1904 年に $M_{8.3}$ と 8.1 の 2 つの地震が本震震源域陸側に発生しているだけである。

もし、Stauder (1968) が主張するように、アウターライズの正断層型地震が沈み込むプレートの曲げによるものであるなら、ここでも、アラスカ沖や東北沖と同様に、アウターライズに大きな正断層型地震が期待される。しかし、1952 年の地震後ここに顕著な正断層型地震は見出せていない。また、アラスカ地震やスマトラ・アンダマン地震の最大余震は、正断層成分を持つ横ずれ型の地震

Fig. 7. Activity of large earthquakes near the Kamchatka Peninsula. Surface-wave magnitude M and moment magnitude M_w are indicated. Modified from Fig. 1 of Johnson and Satake (1999).

で、海洋プレートの曲げではそのようなメカニズムの地震は発生しない。したがって、小さな地震は別として、Stauder (1968) の主張がアウターライズの正断層型地震の観測事実のすべてを説明することはできない。

§ 3. ASSS (Along-strike Single Segmentation) 型超巨大地震前後の広域で顕著な地震

3.1 1960 年・2010 年チリ地震

2004 年スマトラ地震のニコバル・アンダマン諸島に伸展した地震と 1960 年 5 月 22 日・2010 年 2 月 27 日チリ地震 (それぞれ, M_w 9.3, M_w 8.8) は、前者は沈み込み帯が斜め沈み込み、後者はほぼ垂直なプレート沈み込みの地震帯に発生した。1960 年チリ地震は約 200 km×800 km の断層破壊 [Kanamori and Ciper (1974)], 2010 年は約 200 km×500 km [Hayes (2010)] である。ニコバル・アンダマン諸島周辺・チリ沖共に沈み込み帯の幅が狭く、海溝から陸までの距離が 100 km にも満たない。Fig. 8 に示すように、2 つのチリ地震発生前は地震空白域を形成していて、顕著な地震活動は見当たらない [Kanamori (1981), Moreno *et al.* (2010)]. これらはすべて ASSS 型の

地震活動であることを示している [Koyama *et al.* (2012)] と考えられる。

1960 年チリ地震の余震に 1967 年 M 7.3 の地震 (これは震源位置・メカニズム解からアウターライズ正断層型地震) がプロットされている。しかし、これは Engdahl and Villaseñor (2002) によるマグニチュードの値で、その出典は不明と分類されている。Christensen and Ruff (1988) は、この地震を M_b 5.9 としている。いずれにしてもこの余震は M_w 7.5 を超えるような顕著な地震ではない。1975 年 5 月 10 日 M_w 7.7 は 1960 年の震源付近に発生した II 型の余震である。2010 年マウレ地震では、本震発生当日 2 月 27 日に M_w 7.4 の地震が発生した。これはアウターライズの正断層型地震、I 型の余震である。しかしこれが最大余震か否かは、地震発生からまだ時間がたっていないから不明である。次に大きいのは、同年 3 月 11 日に発生した M_w 7.0、これもアウターライズの正断層型の地震である [USGS (2012)].

いずれにしても、ニコバル・アンダマン諸島、チリ海溝沿いの ASSS 型の巨大地震では、地震観測史上最大規模と言われる 1960 年チリ地震でさえも、1975 年 5 月 10 日 M_w 7.7 (II 型) をのぞき、 M_w 7.5 をこえるような顕著な余震は震源域付近でも、アウターライズでも発生していない。これは ASSS 型の沈み込み帯で発生する超巨大地震の最大余震では M_w 8 をこえるような巨大地震が発生していないことを示している。

3.2 アリューシャン列島の地震

アリューシャン列島はニコバル・アンダマン諸島と同様に、海洋プレートの沈み込みが場所場所により変化する斜め沈み込みの地震帯である。1957 年 3 月 9 日アンドレアノフ島地震 M_w 8.6 (古くは M_w 9.1) は余震域の拡がりに不確定な要素が多いが、Lay *et al.* (1982) には断層破壊が 100 km×900 km に及んだとある。いずれ細長い断層であったことに違いはない。アリューシャン列島の沈み込み帯も海溝から島弧までの距離が 100 km 程度でその幅が狭い。Koyama *et al.* (2012) はこの 1957 年と 1965 年のアリューシャン列島ラット島での地震活動を ASSS 型と分類している。1957 年の地震の目立った地震活動は、1964 年のアラスカ地震以前に発生した M 7.0 ~ 7.1 の地震が 3 回である。これらの地震は本震の余震域内で発生した。アウターライズに顕著な地震は発生していない。ただここでは、1986 年 5 月 7 日に M_w 7.9、1996 年 6 月 10 日に M_w 7.9 の地震が発生している。これら二つの地震は、低角の逆断層型の地震である [USGS (2012)]. これらは 1957 年の地震と同様のメカニズムであり、1957 年の余震域内で発生した部分的な断層面上での繰り返し地震、あるいは II 型の地震活動と考えられ

Fig. 8. Seismic activity along the Andean subduction zone. Sparse seismicity prior to the 1960 and 2010 great earthquakes (seismic gap) and the narrow subduction zone along the Chile trench are found, all of which are characteristic to the seismic activity in ASSS. Epicenters relocated by Engdahl *et al.* (1998) are used from 1900 to 1972. From 1973 to July, 2011 USGS NEIC database of <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/epic_global.php> is analyzed>.

る。

ASSS 型巨大地震の 1965 年 2 月 4 日ラット島地震 M_w 8.7 では、同年 3 月 30 日にアウターライズに正断層型の地震 M_w 7.6 が発生した [Abe (1972)]. USGS ではこの地震を M_w 7.3 としているが、I 型の地震活動と考えられる。この地震は顕著な地震とする基準の M_w 7.5 を超えているようではあるが、津波は小さく [Gusiakov (2001)], 大きな被害を発生しなかった。そのほか、ラット島地震後の顕著な地震は、1965 年の本震の震源域付近で 2003 年 11 月 17 日に M_w 7.8 の地震が発生している。これは、低角逆断層のメカニズムを示し、その震源位置からして、1965 年の余震域内で発生した部分的な繰り返し地震、あるいは II 型の地震活動と考えられる。

このように見てくると、ASSS 型のアリュウシアン列島の超巨大地震では、 M_w 8 クラスの大きな余震は震源域を拡大する領域でも、アウターライズ領域でも発生していないことがわかる。それは、チリ周辺の沈み込み帯でも同様であるが、ASSS 型の地震活動では海溝から陸までの沈み込み帯にあるプレート境界の固着域が

ADDS のそれに比べて一様で、地震発生時のアスベリティーとしてすべて破壊するからであろう [Hayes (2010), Moreno *et al.* (2010)]. ASSS 型の地震活動で顕著なアウターライズの正断層型地震が少ないのは、プレートの沈み込みが若く、プレート境界での固着を全体的に断ち切るような大地震が発生しても、サブダクションブルが有効に働かないからなのだろう。もちろんこの地域でも小さな規模の正断層地震は発生しており、その原因はプレートの曲げが有効なのかもしれない [Stauder (1968), Christensen and Ruff (1988)].

§ 4. 他のアウターライズ地震前後の地震活動

視点を、アウターライズの正断層型地震 (M 8 程度より大きい) に限ってみると、1929 年アリュウシアン諸島地震 M_w 7.8, 1933 年三陸はるか沖地震 M_w 8.4, 1977 年スンバ島沖 (インドネシア) 地震 M_w 8.3, 2007 年千島列島東方沖地震 M_w 8.1 と 2009 年サモア島沖地震 M_w 8.1 が知られている。これらの地震の詳しい議論は別の機会に譲るが、I 型と分類した 1896-1933 年の地震活動は既に議

Table 1. Megathrust earthquakes and accompanied significant earthquakes (larger than magnitude 7.5) with magnitude

Year	Megathrust	Mw	Segment	Outer-rise (Type I) ^a	Aftershock (Type II) ^b	Subduction ^d	Remarks ^e
1952	Kamchatka	8.8	ADDS	---	1959 8.2	Orthogonal	
1964	Alaska	9.2	ADDS	1987 7.9		Orthogonal	Strike slip/Normal
					2002 7.9	Orthogonal	Denali /Strike slip
2004	Sumatra	9.3	ADDS -	2012 8.6		Oblique	Strike slip/Normal
					2005 8.6		
2011	Tohoku	9.0	ADDS	(2011 7.5)		Orthogonal	Normal fault
					2011 7.7		
1957	Andreanof	8.6	ASSS	---	1986 7.9	Oblique	
1960	Chile	9.5	ASSS	---	1975 7.7	Orthogonal	
1965	Rat Island	8.7	ASSS	1965 7.6		Oblique	Normal fault
					2003 7.8		
2004	Andaman ^c	9.3	ASSS	(2009 7.5)	---	Oblique	Normal fault
2010	Chile	8.8	ASSS	(2010 7.4)	---	Orthogonal	Normal fault

^a: Type I indicates aftershocks occurred in the outer-rise or within subducting oceanic plate.

^b: Type II indicates aftershocks events within aftershock area or in extending nearby area.

^c: Seismic activity along the Sumatra trench and the Nicobar/Andaman islands shows distinct difference to be characterized as ADDS and ASSS.

^d: This indicates subduction type of oblique or orthogonal collision.

^e: Remarks describe normal faulting, strike-slip with normal component, and Denali fault.

論した [Kanamori (1972)]. 2007 年千島列島東方沖地震は、沈み込み帯の逆断層型地震である 2006 年 11 月 15 日千島列島地震 M_w 8.3 の余震と考えられ、これらは I 型の地震活動と考えられる。特異なのは、1929 年アリューシャン地震、1977 年スンバ島沖地震と 2009 年サモア地震である。

Kanamori (1972) は 1896–1933 年の I 型の地震活動とは異なり、1929 年アウターライズの正断層地震と 1946 年沈み込み帯の津波地震の関連を指摘している。ここでは地震発生の順番が I 型とは逆なので便宜上 III 型の地震活動と分類する。2009 年サモアの正断層型地震もこの地震に引き続き発生したプレート境界での地震を一連の活動 [Lay *et al.* (2010)] として見れば III 型の活動である。1977 年スンバ島沖地震は、孤立したアウターライズの正断層型地震である [Spence (1986), Gusman *et al.* (2010)]. これもプレート境界の地震が発生し、1929 年の地震と同様に将来 III 型の地震活動となるのかもしれない。しかし、スンダ海溝沿いでは、オーストラリアプ

レートのプレート間固着が弱く、沈み込み帯に特有のプレート間地震は少ない。したがって、スラブプルがこのアウターライズの正断層型地震の原動力と考えるとしても、スラブプルが働き固着が弱い沈み込むプレートの曲げに大きく寄与していると考えられる [Spence (1986)].

§5. まとめと議論

ここでは、超巨大地震前後の地震活動を、個々の地震セグメントや隣接する地震セグメント内での前震・本震・余震としてや、震源域の応力集中の緩和として、狭く考えるのではなく、時間的・空間的に広域な場で誘発された地震活動と考えて議論した。これは、特段新しい考えではなく、例えば、Linde *et al.* (1994) は 1992 年 Landers 地震により 400 km も離れた地点での誘発されたマグマ活動を報告している。また、Mogi (1973) は日本付近の大きな地震に先立ち顕著な深発地震が発生していることを指摘している。本論では多くの地震活動の羅

列になっているように見えるが、我々が目指しているのはどの余震が最大であるかを判定することではなく、どのような地震活動が ADDS/ASSS で特徴的に発生しているかを知ることである。そのような知識の蓄積が超巨大地震のメカニズムを知り、これからの地震活動を理解するうえで重要と考えている。

Table 1 にここで取り扱った超巨大地震前後の顕著な地震について ADDS/ASSS に分けてまとめた。まず気が付くことは、被害の大きかった地震は存在するが、顕著な大地震 ($M_w > 7.5$) は超巨大地震に先だって起きてはいないことである。さらに、ASSS 型の超巨大地震では $M_w 8$ をこえるような巨大な余震は、震源域でもアウターライズでも起こっていないことである。それに引きかえ、ADDS 型の地震では、 $M_w 8$ をこえる巨大余震が震源域+その周辺で発生している。アウターライズの正断層成分を持つ地震に限っても、ADDS 型の超巨大地震では、1933 年型の沈み込むプレートが断ち切られるような断層破壊と 2012 年型の沈み込むプレート内部での横ずれ断層があり、その規模も $M_w 8$ を優に超える地震が発生している。ただ、1952 年カムチャッカ地震のように、顕著なアウターライズの地震が存在しない ADDS の領域もあり、単純に ADDS 型の地震活動の特徴としてとか、サブダクションプレートの働きとしてすべてを割り切れない点も残る。これは ADDS/ASSS 地震活動の本質から発生する問題点かも知れない。今後の問題点として重要であると考えから、あらためて指摘しておく。

プレート境界に発生する大きな地震の最大余震は、余震域内や余震域を拡張するような領域で発生する [宇津 (2001)] と考えられてきた。しかし、ここで考えた超巨大地震では、プレート境界に沿って大きな地震が発生している場合 (Type II) と、沈み込むプレートのアウターライズに正断層型の地震 (Type I) を誘発する場合があることを指摘した。これは、沈み込み帯がほぼ垂直か斜め沈み込みであるかにはかわからない傾向である。

さらに、歴史上日本付近で発生した最大の地震である 1707 年宝永の地震では、地震前に周辺地域での地震活動は活発化したが、顕著な被害地震はない。さらに、その記録されている余震は、本震の翌日の強い揺れと、1708 年 2 月 13 日津波マグニチュード $m=1$ 程度の地震だけである。歴史記録には、1710 年 9 月 15 日いわき周辺で発生した $M6.5$ 、 $m=0$ 程度の地震が記録されている [渡辺 (1998)] から、それを上回る大きな余震は発生しなかったと考えられる。これは Fig. 1 で明らかなように、南海トラフは ASSS 型の地震活動を示している地域で、今まで述べてきた結論と整合的である。内陸の地震活動に限っても、 $M7$ 前後の三河地震が 2 度 (1686 年 $M7.5$

1/4 と 1945 年 $M6.8$) 発生し地震被害を及ぼしているが、顕著な内陸地震と言えるのは 1891 年濃尾地震 $M8.0$ だけである。超巨大地震の前後を問わず、この濃尾地震と 2002 年デナリ地震だけが歴史的に見て沈み込み帯の近傍で発生した上盤の陸側プレート内で発生した $M=8$ クラスの地震である。

我々は地震活動の様子から、ADDS/ASSS 型の地震セグメントで異なるタイプのプレート間超巨大地震が発生していると考えている。その考えに従い、超巨大地震発生前後での顕著な地震、被害地震を見てきた。起こるかもしれない次の地震の大きさの推定は地震セグメント、地震空白域やドーナツパターン、GPS 観測などによるプレート間固着域、歴史的な地震活動域などの拡がりに依存して判断される。しかし、超巨大地震の発生には、大地震規模の地震セグメントが連動して複数破壊することが必要で、破壊域が連動するメカニズムは理解が至っていない。また、東北沖アウターライズでより大きな正断層型の地震が今後発生するかもしれないが、それを知る観測手段は現在にもない。プレート間の巨大地震はプレート間の強い固着が GPS 観測などから見い出されるのに対し、アウターライズの正断層型地震は、プレート間の固着が弱く、スラブプルが働く場で発生するから、普通のプレート間巨大地震の周辺域での地殻変動とはまったく逆の現象が観測されるはずであることが予想される。

もちろん、ここで述べた超巨大地震の発生場が唯一の考え方であるとは限らない。また、Tanioka *et al.* (1997) が指摘しているように、三陸沖でも海溝軸に沿って多様性に富んだ沈み込み帯が存在している。このような多様性はアラスカ・アリューシャンでも同様に指摘され [Freymueller *et al.* (2008)], 沈み込み帯に普遍的に存在することかもしれない [Kopp (2013)]。

超巨大地震・連動型の断層破壊の発生メカニズムには、明確な理解はいまだ存在しない。東北沖プレート境界に 1000 年にも及ぶひずみ蓄積が同地域で繰り返された津波地震の研究から指摘されている [Tsuzuki and Koyama (2013)]。しかし、それだけでは説明しきれない超巨大地震が世界中で発生しているのも事実である。今我々は、プレートが沈み込む方向の ADDS/ASSS といった地震活動を強調したが、そのような単純な二元論ばかりではなく、横方向にも変化に富む沈み込み帯の理解 [Hariri *et al.* (2013), Freymueller *et al.* (2008)] でも同様に求められている。東北地方沖のアウターライズ地震に限って言えば、スラブプルがその原動力となるのであるから、プレート間の固着・非固着を陸上や海底の GPS 観測から監視することが重要であるし、北海道沖の

ADDSや南海トラフのASSSを注視するのであれば、それに見合った観測の強化が必要とされる。それは我々の仮説の検証という点からも、明確な視点であるが、地震・津波防災上から、地震学が十分に考えなければいけないことである。

謝 辞

北海道大学谷岡勇市郎氏に論文原稿を読んでいただきました。また匿名の査読者のご意見は原稿を修正するうえで、大変参考になりました。編集委員の杉岡裕子氏には原稿の不備、いたらぬ表現に多くのご助言をいただきました。記して感謝いたします。この再々再校を投稿するに当たり、その機会と時間を可能にくださった札幌恵佑会病院長の医師・看護師の皆様は心から感謝いたします。図面の作成にGMT [Wessel and Smith (1998)]とTSEIS [鶴岡弘, 東京大学地震研究所]を使用しました。

文 献

- Abe, K., 1972, Lithospheric normal faulting beneath the Aleutian trench, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **5**, 190-198.
- 防災技術研究所, 2013, 地震調査研究推進本部政策委員会第57回調査観測計画部会資料 計57-(3) 日本海溝海底地震津波観測網の整備—進捗状況—<http://www.jishin.go.jp/main/seisaku/hokoku12h/k57-3.pdf>.
- Christensen, D.H. and L.J. Ruff, 1988, Seismic coupling and outer rise earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **93**, 13421-13444.
- Engdahl, E.R. and A. Villaseñor, 2002, Global seismicity: 1900-1999, *International Handbook of Earthquake Engineering Seismology*, eds. W.H.K. Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings and C. Kisslinger, 665-690.
- Engdahl, E.R., R. van der Hilst, and R. Buland, 1998, Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 722-743.
- Fowler, C.M.R., 2005, *The Solid Earth*, Second Edition, Cambridge University Press, New York, 77-88.
- Frey Mueller, J.T., H. Woodard, S.C. Cohen, R. Cross, J. Elliot, C.F. Larson, S. Hreinsdóttir, and C. Zweck, 2008, Active deformation process in Alaska, based on 15 years of GPS measurements, in *Active Tectonics and Seismic Potential in Alaska*, eds. J.T. Frey Mueller, P.T. Haeussler, R.L. Wesson, and G. Ekstrom, *Geophysical Monograph Series*, **179**, AGU, Washington, D.C., 1-41.
- Gusiakov, V.K., 2001, *Proceedings, International Tsunami Symposium 2001*, <http://tsun.sscc.ru/htdbpac/>.
- 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.
- Hariri, M.E., S.L. Bilek, H.R. DeShon, E.R. Engdahl, and S. Bisrat, 2013, Along-strike variability of rupture duration in subduction zone earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **118**, 1-19, doi:10.1029/2012JB 009548.
- 羽島徳太郎, 2000, 三陸沖歴史津波の規模の再検討, 津波工学研究報告, **17**, 39-48.
- 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.
- Hayes, G., 2010, Updated result of the Feb. 27, 2010 M_w 8.8 Maule, Chile earthquake, http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2010/us2010tfan/finite_fault.php.
- Heki, K., S. Miyazaki, and Y. Tamura, 1997, Silent fault slip following an interplate thrust earthquake at the Japan trench, *Nature*, **386**, 595-597.
- 日野亮太, 2012, 海陸統合観測網の時代～青写真と現実～, 日本地震学会講演予稿集 2012 年度, S-05.
- 地震調査研究推進本部, 1988, 余震の確率評価手法について, <http://www.jishin.go.jp/main/yoshin2/yoshin2.htm>.
- Johnson, J.M. and K. Satake, 1999, Asperity distribution of the 1952 great Kamchatka earthquake and its relation to future earthquake potential in Kamchatka, *Pure Appl. Geophys.*, **154**, 541-553.
- Kanamori, H., 1970, The Alaska earthquake of 1964: Radiation of long-period surface waves and source mechanism, *J. Geophys. Res.*, **75**, 5029-5040.
- Kanamori, H., 1972, Mechanism of tsunami earthquakes, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **6**, 346-359.
- Kanamori, H., 1981, The nature of seismicity patterns before major earthquakes, *Earthquake Prediction, an International Review*, Maurice Ewing Series IV, eds. D.W. Simpson and P.G. Richards, AGU, Washington, D.C., 1-19.
- Kanamori, H. and J.J. Cipar, 1974, Focal process of the great Chilean earthquake May 22, 1960, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **9**, 128-136.
- Kanamori, H., L. Rivera, and W.H.K. Lee, 2010, Historical seismograms for unraveling a mysterious earthquake: The 1907 Sumatra Earthquake, *Geophys. J. Int.*, **183**, 358-374, doi:10.1111/j.1365-246X.2010.0473.x.
- Koketsu, K., Y. Yokota, N. Nishimura, Y. Yagi, S. Miyazaki, K. Satake, Y. Fujii, H. Miyake, S. Sakai, Y. Yamanaka, and T. Okada, 2011, A unified source model for the 2011 Tohoku earthquake, *Earth Planet Sci. Lett.*, **310**, 480-487.
- 国土地理院, 2012, 地震予知連絡会会報, **87**, 国土地理院, 580pp.
- Koper, K.D., A.R. Hutko, T. Lay, C.J. Ammon, and H. Kanamori, 2012, Frequency-dependent rupture process of the 2011 M_w 9.0 Tohoku earthquake: Comparison of short-period P wave backprojection images and broadband seismic rupture models, *Earth Planets Space*, **63**, 599-602.
- Kopp, H., 2013, The control of subduction zone structural complexity and geometry on margin segmentation and

- seismicity, *Tectonophysics*, **589**, 1-16.
- Koyama, J., 1997, The complex faulting process of earthquakes, Kluwer Academic Pub., Amsterdam, 194pp.
- 小山順二・都筑基博, 2013, 日本付近の一重と二重の地震セグメントで発生した地震が励起した津波, 北海道大学地球物理研究報告, **76**, 87-96.
- 小山順二・都筑基博・蓬田 清, 2012, 斜め衝突帯の巨大地震 (1) 相模トラフ, 北海道大学地球物理学研究報告, **75**, 161-174.
- Koyama, J., K. Yoshizawa, K. Yomogida, and M. Tsuzuki, 2012, Variability of megathrust earthquakes in the world revealed by the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Earth Planets Space*, **64**, 1189-1198.
- Lay, T., H. Kanamori, and L. Ruff, 1982, The asperity model and the nature of large subduction zone earthquakes, *Earthq. Pred. Res.*, **1**, 3-71.
- Lay, T., H. Kanamori, C.J. Ammon, M. Nettles, S.N. Ward, R.C. Aster, S.L. Beck, S.L. Bilek, M.R. Brudzinski, R. Butler, H.R. DeShon, G. Ekstrom, K. Satake, and S. Sipkin, 2005, The great Sumatra-Andaman earthquake of 26 December 2004, *Science*, **308**, 1127-1133.
- Lay, T., C.J. Ammon, H. Kanamori, L. Rivera, K.D. Koper, and A.R. Hutko, 2010, The Samoa-Tonga great earthquake triggered doublet, *Nature*, **466**, 964-968.
- Lay, T., C.J. Ammon, H. Kanamori, M.J. Kim, and L. Xue, 2011, Outer trench-slope faulting and the 2011 M_w 9.0 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, *Earth Planets Space*, **63**, 713-718.
- Linde, A.T., I.S. Sacks, M. Johnston, D. Hill, and R. Bilham, 1994, Increased pressure from rising bubbles as a mechanism for remotely triggered seismicity, *Nature*, **371**, 408-410.
- Mogi, K., 1969, Some features of recent seismic activity in and near Japan (2), Activity before and after great earthquakes, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **47**, 395-417.
- Mogi, K., 1973, Relationship between shallow and deep seismicity in the western Pacific Region, *Tectonophysics*, **17**, 1-22.
- Moreno, M., M. Rosenau, and O. Oncken, 2010, 2010 Maule earthquake slip correlates with pre-seismic locking of Andean subduction zone, *Nature*, **467**, 198-202.
- 行谷佑一・佐竹健治・山本 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.
- 岡村行信, 2012, 地質から東北地方太平洋沖地震を考える, *地震ジャーナル*, **54**, 1-12.
- Obana, K., G. Fujie, T. Takahashi, Y. Yamamoto, Y. Nakamura, S. Kodaira, N. Takahashi, Y. Kaneda, and M. Shinohara, 2012, Normal-faulting earthquakes beneath the outer slope of the Japan trench after the 2011 Tohoku earthquake: Implication for the stress regime in the incoming Pacific plate, *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L00G24, doi: 10.1029/2011GL050399.
- ポアンカレ, アンリ, 1959, 科学と仮説, 河野伊三郎訳, 岩波文庫, 288pp.
- Royer, J.Y., 2012, When an oceanic tectonic plate cracks, *Nature*, **490**, 183-185.
- Ruff, L. and H. Kanamori, 1983, The rupture process and asperity distribution of three great earthquakes from long-period diffracted P-waves, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **31**, 202-230.
- Spence, W., 1986, The 1977 Sumba earthquake series: Evidence for slab pull force acting at a subduction zone, *J. Geophys. Res.*, **91**, 7225-7239.
- Stauder, W.S.J., 1968, Tensional character of earthquake foci beneath the Aleutian trench with relation to sea floor spreading, *J. Geophys. Res.*, **73**, 7693-7701.
- Stein, S. and E.A. Okal, 2007, Ultralong period seismic study of the December 2004 Indian ocean earthquake and implication for regional tectonics and the subduction process, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **97**, S279-S295.
- 谷岡勇一郎・A. R. Gusman, 2012, 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, *地震 2*, **64**, 265-270.
- 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**, 261-66.
- Tsuzuki, M. and J. Koyama, 2013, The 2011 Tohoku-oki megathrust earthquake (M_w 9.0) and slip deficit of the past tsunami earthquakes in the region, Fall Meeting, AGU, S43A-2458.
- 宇佐美龍夫・石井 寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子, 2013, 日本被害地震総覧 599-2012, 東京大学出版会, 東京, 694pp.
- United States Geological Survey, 2012, <<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/sopar/>>.
- 宇津徳治, 2001, 地震学, 第 3 版, 共立出版, 390pp.
- Wang, K. and Y. Hu, 2006, Accretionary prisms in subduction earthquake cycles: The theory of dynamic Coulomb wedge, *J. Geophys. Res.*, **111**, B06410, doi:10.1029/2005JB004094.
- 渡辺偉夫, 1998, 日本被害津波総覧第 2 版, 東京大学出版会, 東京, 238pp.
- Wessel, P. and W.H.F. Smith, 1998, New improved version of the Generic Mapping Tools released. *EOS Trans. AGU*, **79**, 579.
- Yagi, Y., T. Mikumo, J. Pacheco, and G. Reyes, 2004, Source rupture process of the Tecoman, Colima, Mexico earthquake of 22 January 2003, determined by joint inversion of teleseismic body-waves and near-source data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **94**, 1795-1807.
- Yomogida, K., K. Yoshizawa, J. Koyama, and M. Tsuzuki, 2011, Along-dip segmentation of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake and comparison with other megathrust earthquakes, *Earth Planets Space*, **63**, 697-701.
- Yue, H., T. Lay, and K.D. Koper, 2012, En echelon and orthogonal fault ruptures of the 11 April 2012 great intraplate earthquakes, *Nature*, **490**, 245-249.