



Title	日本付近の一重と二重の地震セグメント帯で発生した地震が励起した津波
Author(s)	小山, 順二; 都筑, 基博
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 76, 87-96
Issue Date	2013-03-19
DOI	10.14943/gbhu.76.87
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/52303
Type	bulletin (article)
File Information	76-P87-96.pdf



[Instructions for use](#)

日本付近の一重と二重の地震セグメント帯で発生した地震が励起した津波

小山 順二・都筑 基博
北海道大学理学研究院自然史科学部門

(2012年11月14日受理)

Tsunami generation near Japan by earthquakes in Along-strike Single Segmentation and Along-dip Double Segmentation

Junji KOYAMA and Motohiro TSUZUKI

Division of Natural History Sciences, Graduate School of Science
Hokkaido University

(Received November 14, 2012)

After the 2011 Tohoku-oki megathrust earthquake, we have proposed a hypothesis on the earthquake activity characterizing the distribution of earthquakes into Along-dip Double Segmentation (ADDS) and Along-strike Single Segmentation (ASSS): The apparent absence of earthquakes in the trench-ward segments as opposed to the Japan Island-ward segments that generate repeated smaller earthquakes (ADDS), where the 2011 Tohoku-oki megathrust occurred. In the mean time, a young and buoyant plate is subducting rapidly under the overriding plate where there is weak seismic activity before the main event all over the plate interface of the subduction zone (ASSS). The 1960 and 2010 Chile megathrusts occurred in ASSS. In and near Japan, ADDS earthquake activity is restrictively found along the Pacific side of Hokkaido and Tohoku regions and the Hyuganada, Kyushu. The rest of seismic activity near Japan is classified into ASSS. We found a distinct difference in tsunami excitations between earthquakes in ADDS and ASSS, comparing tsunami magnitude m from local tsunami heights and seismic moment Mo from long-period surface-waves. Tsunami wave heights of ASSS earthquakes are almost two times larger than those of ADDS's. This is also confirmed by studying tsunami magnitude Mt calculated from teleseismic tsunami wave heights. The reason of this different excitation of tsunamis is also considered.

I. はじめに

2011年3月11日東北地方太平洋沖に発生した超巨大地震はあらゆる面で地震発生の本質を考え直す機会を与えている(例えば, 小山・都筑, 2012). それは従来信じられてきた沈み込み帯の進化論(Kanamori, 1977)では, 説明できない超巨大地震が2004年スマトラ地震, 2011年東

北沖地震と立て続けに発生しているからである (Koyama et al., 2012). さらに, 一般に M_w 8 以上の地震は巨大地震と呼ばれているが, M_w 9 程度をこえるような超巨大地震はいわゆる巨大地震とは異なる震源過程を示すことが明らかになってきた (Stein and Okal, 2007).

このような新たな展開を必要とする地震発生場の理解に, 我々は ADDS: Along-dip Double Segmentation と ASSS: Along-strike Single Segmentation という新しい考えを導入し, 地震現象の理解をさらに深めようとしている (Yomogida et al., 2011; Koyama et al., 2012). Fig. 1 を見ると, 今回の東北沖の超巨大地震の震源域では, 太平洋プレートが沈み込む方向に帯状の 2 重に並んだ地震セグメント帯が島弧沿いと海溝沿いの間に存在 (ADDS) している. それに比べて, 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震活動域が地震空白域 (Seismic gap) として沈み込み帯に沿い地震セグメントが隣り合って並んでいる (ASSS). 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

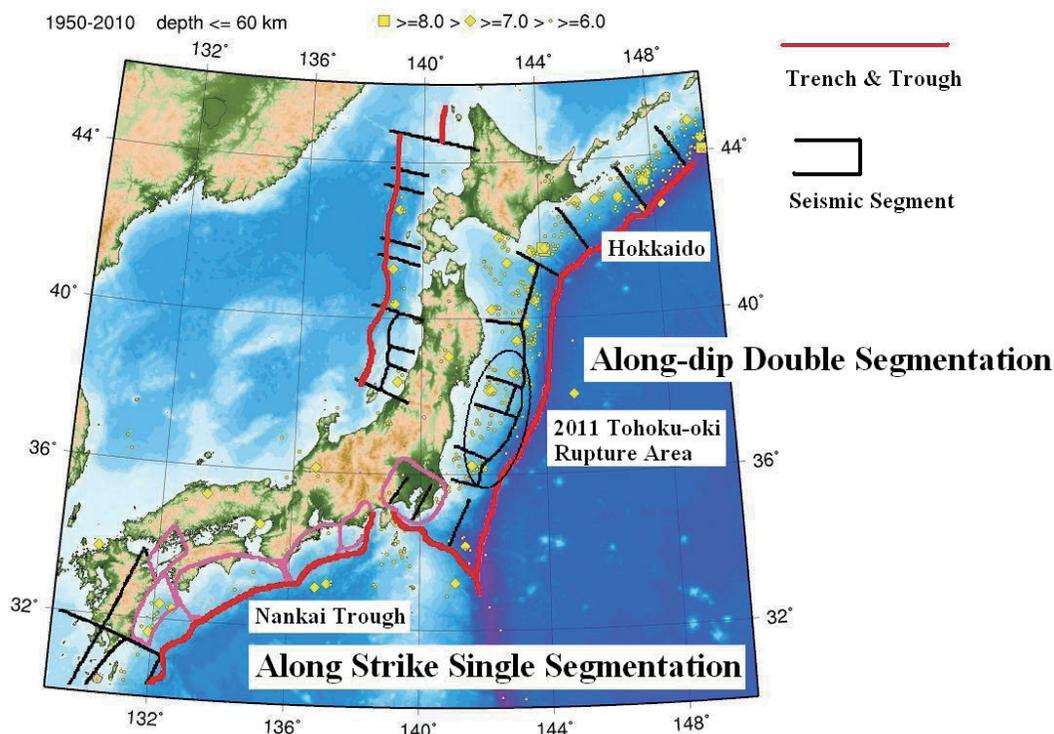


Fig. 1. Seismic activity in Japan and its vicinity. Seismic segmentation used in the official earthquake forecasting¹⁾ of Evaluation of Major Subduction Zone Earthquakes by the Headquarters for Earthquake Research Promotion. Epicenters of earthquakes are plotted by yellow symbols from 1950 to 2010 with magnitudes larger than 5.9 determined by Japan Meteorological Agency and their focal depths shallower than 61km. Trench and trough near the Japan Islands are illustrated by red curves. 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 gap. This figure is reproduced from Figure 1 by Koyama et al. (2012).

¹⁾ <http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/?lang=en> (2010)

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年チリ地震では ASSS 型の地震であることが指摘されている (Yomogida et al., 2011; Koyama et al., 2012)。ASSS 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比べて狭く細長い領域となる。沈み込み帯の固着は海溝沿いから沈み込む方向に拡がり、沈み込み帯全体に地震空白域 (Seismic gap) を形成する。地震発生時のアスペリティーはこの地震空白域にある固着域が担う (Moreno et al., 2010)。それとは違い、ADDS 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域だけである。本震前の地震活動は島弧側や大陸沿いの地震セグメント帯で活発化し、海溝沿いのセグメント帯は地震活動が不活発であるからドーナツパターン (Doughnut pattern; Mogi, 1981) のようになる。そして、Ruff and Kanamori (1983) や Koketsu et al. (2011) が指摘しているように、強い破壊を示す地震発生時のアスペリティーは海溝沿いの限られた範囲である。

さて、このような地震発生場の違いをよりよく理解するには、多方面から、ADDS と ASSS の地震活動を研究することが必要である。注目すべきは、ASSS の地震活動ではプレート間固着域が海溝近くまで拡がっていること、そして地震時のアスペリティーが沈み込み帯全体、海溝近くまで存在していること (Moreno et al., 2010) である。それに反して、ADDS の活動は、2011年東北沖超巨大地震のような場合を除き、海溝沿いのアスペリティーは破壊せずに沈み込み帯の島弧側、沈み込み帯のより深い場所での地震活動が支配的である。

我々は、沈み込み帯の地震による海底での断層変形を直接観察することはできない。しかし、上に述べたような ADDS と ASSS の地震活動の違いが真に存在するものなら、それぞれの地震で海底地殻変動にもその違いがあらわれるだろう。そして、それは例えば、津波の励起にもその違いが反映されるはずである。本研究では、日本付近で発生した津波を ADDS/ASSS の地震活動の考えのもとに調べ、津波励起の特性を明らかにし、ADDS/ASSS の地震活動について議論する。

II. 津波マグニチュード

日本近海で発生した津波は、波源に近い沿岸の津波波高と被害の範囲から、津波マグニチュードが -1 から 4 の範囲で定義された (今村, 1949; Iida, 1958)。これは今村・飯田スケールと呼ばれ、現在でも津波カタログに掲載されている (例えば、Historical Tsunami Data Base for the world Ocean, <http://tsun.sscc.ru/nh/tsunami.php>; NOAA National Geophysical Data Center, <http://www.ngdc.noaa.gov/mndc/struts/form?t=101650&s=70&d=7>)。羽鳥 (1986) はより広域の検潮器で得られた津波記録を用いて、今村・飯田スケールの定義を拡張して津波の伝播距離を考慮した津波マグニチュード m を決定している。ここでは、羽鳥 (1986, 1996) による比較的近地の津波波高から求めた津波マグニチュード m と遠地の長周期地震波から求めた地震モーメント M_0 を比較することで、同じ規模の地震でも ADDS と ASSS の地震活動にどれほどの津波励起の違いが存在するのかを調べる。

Mt は Abe (1979) の定義による津波マグニチュードである。このスケールは、羽鳥 (1986)

が解析している近地の津波よりはるかに遠地での津波波高を用いて決められる津波マグニチュードであり、その定義は地震モーメントから求められるモーメントマグニチュード M_w に準拠している。ここでは M_t を用いて同様の解析を行い、震源に比較的近い津波波高から得られた結果を、遠地の津波波高の解析から追試することにしよう。

1. 日本近海で発生した津波とその地震規模

最近 89 年間に日本近海で発生した 61 個の津波について、羽鳥 (1986, 1996) により津波マグニチュード m が決められ、励起源の地震モーメント M_o が求められている地震について検討した。Table 1 にそれらの地震情報、 m , M_t , M_o を出典とともにまとめて示す。

日本付近ではいろいろなタイプの地震が発生していて、ADDS・ASSS のカテゴリーに分類されない地震が励起した津波も存在する。それは、アウターライズや沈み込むプレート内で発生した正断層型 (Normal fault; NF) 地震 (小山・都筑, 2012) と海岸近くで発生した横ずれ型 (Strike slip; SS) 地震である。したがって、それぞれの地震は ADDS/ASSS/NF・SS の 3 つのカテゴリーのいずれかに分類した。

Fig. 2 に津波マグニチュード m と地震モーメント M_o をそれぞれのカテゴリー別に示す。図中の回帰直線は、羽鳥 (1996) が求めた M_t と m の関係式 $M_t = 0.4 m + 7.25$ の傾きを仮定し、 M_t が M_w と等価で、地震モーメントの対数が $\log M_o = 1.5 M_w + 9.1$ (Hanks and Kanamori, 1979) によるものとして、 m と地震モーメントの対数の係数を 1.67 と求めた。その係数を仮定して、それぞれのカテゴリーで m と M_o の関係を求めた：

$$\begin{aligned} m_D &= 1.67 \log M_o - 33.0 \pm 0.26 \quad (\text{for ADDS}) \\ m_S &= 1.67 \log M_o - 32.2 \pm 0.20 \quad (\text{for ASSS}) \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、Table 1 で津波マグニチュード m が 0 より小さいデータは上の回帰直線の計算には用いなかった。それは、 $m = -0.5$ 程度の津波は伝播距離 100 km で 30 cm より低い波高となるから津波波高の不確実性が大きいと考えたからである。正断層型地震 (NF) や横ずれ型地震 (SS) については、あえて回帰式を求めなかった。本論の主旨に必ずしも必要ではないからであるが、Fig. 2 を見ればそれは ADDS 型の地震に近い特徴を持っているようだ。

上の ADDS と ASSS 型の地震では同じ M_o の地震で津波マグニチュード m が 0.8 だけ異なる。これは、津波マグニチュード m が 1 大きくなると津波波高は 2.24 倍大きくなると定義されているから (羽鳥, 1986)、津波波高にして約 2 倍ほど ASSS 型の地震が ADDS 型に比べて大きな津波を励起していることを示している。

Fig. 3 に津波マグニチュード M_t と地震モーメント M_o の関係をそれぞれのカテゴリーで示す。回帰直線を求めるにはすべてのデータを用いた。関係式の係数は上の仮定を用い、

$$\begin{aligned} M_{tD} &= 1/1.5 \log M_o - 6.01 \pm 0.17 \quad (\text{for ADDS}) \\ M_{tS} &= 1/1.5 \log M_o - 5.81 \pm 0.20 \quad (\text{for ASSS}) \end{aligned} \quad (2)$$

と求めた。 M_w の定義式は、 $M_w = 1/1.5 \log M_o - 6.06$ であるから (Hanks and Kanamori, 1979), 式 (2) は誤差の範囲で上の式に一致し、日本近海の局地的な地震でも、 M_t が M_w に準拠していることは確かめられる。 Fig. 3 のプロットを見れば、見かけ上は明らかに ADDS と ASSS とに差があるように見えるが、(2) 式の誤差の範囲を考えるとその差は微妙である。因みに、その M_t の違いは約 0.2 で、それは遠地の津波波高にして ASSS 型の地震津波が $10^{0.2} \approx 1.6$ 倍程度大きいことを示唆している。 ADDS と ASSS の地震活動で津波励起の違いは、近地津波の m と遠地津波の M_t とともに、多少の不確定性はあるものの、2 倍程度であることを示している。

Table 1. Tsunami in the vicinity of Japan since 1923

Year	Month	Day	Location	M_w	M_t	m	Seismic Moment M_o ($N \cdot m$)	Remarks	Ref
1923	9	1	Kanto	7.9	8.0	2.0	7.60E+20	ADDS	A
1933	3	3	Sanriku	8.4	8.3	3.0	4.30E+21	NF	B
1938	11	5	Fukushima	7.8	7.6	1.0	7.00E+20	NF	C
1940	8	2	W. Hokkaido	7.5	7.7	2.0	2.10E+20	ASSS	D
1944	12	7	Tonankai	8.1	8.1	2.5	1.50E+21	ASSS	EZ
1946	12	21	Nankaido	8.1	8.1	3.0	1.50E+21	ASSS	EZ
1952	3	4	Tokachi-oki	8.1	8.2	2.5	1.70E+21	ADDS	F
1963	10	13	Kurile	8.5	8.4	3.0	7.50E+21	ADDS	G
1964	5	7	Oga-oki	7.0	7.1	-0.5	4.30E+19	ASSS	D
1964	6	16	Niigata	7.6	7.9	2.0	3.00E+20	ASSS	H
1968	4	1	Hyuganada	7.4	7.7	1.5	1.80E+20	ADDS	I
1968	5	16	Tokachi-oki	8.2	8.2	2.5	2.80E+21	ADDS	J
1968	6	12	Iwate-oki	7.1	7.4	1.0	5.10E+19	ADDS	K
1969	8	12	Kurile	8.2	8.2	2.5	2.20E+21	ADDS	M
1970	7	26	Hyuganada	7.0	7.1	-0.5	4.10E+19	ADDS	I
1971	9	6	Sakhalin	7.3	7.5	0.5	9.50E+19	ASSS	D
1973	6	17	Nemuro-oki	7.8	8.1	2.0	6.70E+20	ADDS	N
1975	6	10	Kurile	7.0	7.9	1.5	3.00E+20	ADDS	P
1978	1	14	Oshima	6.6	6.7	-2.0	1.10E+19	SS	Q
1978	6	12	Miyagi-oki	7.6	7.4	0.5	3.10E+20	ADDS	R
1980	6	29	E. Izu	6.4	6.3	-2.0	7.00E+18	SS	S
1982	3	21	Urakawa	6.9	7.1	0.0	2.60E+19	ADDS	T
1982	7	23	Ibaraki-oki	7.0	7.0	-0.5	2.80E+19	ADDS	U
1983	5	26	C. Nihonkai	7.9	8.1	3.0	7.60E+20	ASSS	V
1983	6	21	W. Aomori	7.0	7.3	0.5	1.90E+19	ASSS	V
1984	3	24	Etorof-oki	7.1	7.1	0.0	6.40E+19	ADDS	W
1984	8	7	Hyuganada	6.9	6.9	-1.0	2.90E+19	ADDS	W
1984	9	19	Boso-oki	6.8	7.3	0.0	2.00E+19	ASSS	W
1986	11	15	Taiwan-oki	7.3	7.6	1.0	1.30E+20	ASSS	W
1989	10	29	Sanriku-oki	6.9	6.8	-1.0	5.80E+18	ADDS	W

Year	Month	Day	Location	M_w	M_t	m	Seismic Moment Mo ($N \cdot m$)	Remarks	Ref
1989	11	2	Sanriku-oki	7.2	7.5	1.0	1.40E+20	ADDS	W
1990	2	20	N. Oshima	6.2	6.5	-2.0	4.30E+18	SS	W
1990	9	24	Tokai-oki	6.5	6.8	-1.0	7.10E+18	SS	W
1991	12	22	Uruppu Isl	7.5	7.5	1.0	2.80E+20	ADDS	W
1992	7	18	Sanriku-oki	6.8	7.2	0.0	2.70E+19	ADDS	W
1993	2	7	Noto Pen.	6.6	6.7	-0.5	3.40E+18	ASSS	W
1993	7	12	SW Hokkaido	7.7	8.1	3.0	4.70E+20	ASSS	W
1994	10	4	E. Hokkaido	8.1	8.2	3.0	3.00E+21	ADDS	W
1994	12	28	Sanriku-oki	7.7	7.7	1.5	4.90E+20	ADDS	W
1995	1	17	S. Hyougo	6.8	6.4	-1.5	2.40E+19	SS	W
1995	10	18	Kikaijima	6.9	7.6	1.0	5.90E+19	ASSS	W
1995	10	19	Kikaijima	6.7	7.3	0.0	1.50E+19	ASSS	W
1995	12	4	Etorof-oki	7.6	7.6	1.0	8.20E+20	ADDS	W
1996	10	19	Hyuganada	6.6	6.9	-1.0	1.40E+19	ADDS	W
1996	12	3	Hyuganada	6.7	6.7	-1.0	1.20E+19	ADDS	W
2001	12	18	Yonagunijima	6.8	6.8	-1.0	2.10E+19	NF	WX
2002	3	26	Ishigakijima	6.5	6.7	-1.5	4.90E+18	ASSS	X
2002	3	31	E. Taiwan	7.1	7.2	-1.0	5.40E+19	ASSS	WX
2003	9	26	Tokachi-oki	8.1	8.1	2.5	3.10E+21	ADDS	W
2003	10	31	Fukushima-oki	6.8	7.0	-0.5	3.50E+19	ADDS	W
2005	8	16	Miyagi-oki	7.1	7.0	-1.0	7.60E+19	ADDS	W
2005	11	15	Sanriku-oki	6.9	7.3	0.0	3.90E+19	NF	W
2006	11	15	Kurile	7.9	8.2	3.0	3.50E+21	ADDS	W
2007	1	13	Kurile	8.2		2.0	1.80E+21	NF	W
2007	3	25	Noto Pen.	6.9		-1.0	1.30E+19	ASSS	W
2007	8	2	Sakhalin	6.2		0.0	2.40E+18	ASSS	W
2008	7	19	Fukushima-oki	6.9		0.0	2.90E+19	ADDS	W
2008	9	11	Tokachi-oki	7.1		-0.5	1.80E+19	ADDS	W
2009	8	11	Suruga Bay	6.5		-2.0	7.90E+18	ASSS	X
2009	10	30	Amamioshima	6.8		-1.0	1.80E+19	ASSS	W
2011	3	11	Miyagi-oki	9.0	9.1	4.0	5.31E+22	ADDS	W

M_w : Moment magnitude by USGS

http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/historical_country.php

M_t : Tsunami magnitude by Abe (1998, 2011). m : Tsunami magnitude by Hatori (1986, 1996)

A : Kanamori (1971a), B : Kanamori (1971b), C : Abe (1977), D : Fukao and Furumoto (1975),

E : Kanamori (1972), F : Kanamori and Anderson (1975), G : Kanamori (1970),

H : Aki (1966), I : Shiono et al. (1980), J : Kanamori (1971c), K : Yoshioka and Abe (1976),

M : Abe (1973), N : Shimazaki (1974), P : Takemura et al. (1977), Q : Shimazaki and Sommerville (1978),

R : Seno et al. (1980), S : Takeo (1988), T : Takeo et al. (1983), U : Kikuchi and Sudo (1985),

V : Dziewonski et al. (1983),

W : USGS (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/sopar/>)

X : Yamanaka (http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/)

Z : Reference events to define M_t (Abe, 1979).

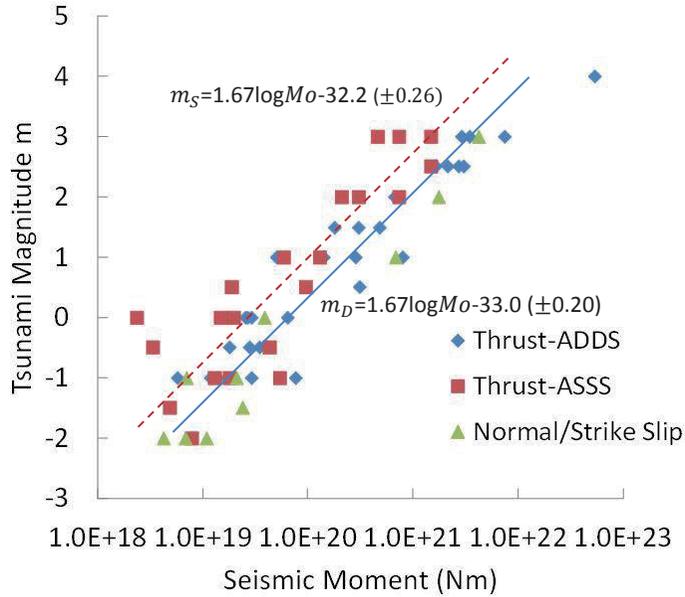


Fig. 2. Tsunami magnitude m of Imamura-Iida scale by Hatori (1986, 1996) in relation to seismic moment M_o of corresponding earthquake in and near Japan. Different symbols represent different category of earthquakes. Least squares regressions between m and M_o for ADDS and ASSS earthquakes are derived. The difference in tsunami excitation between ADDS and ASSS is as much as about 0.8 in tsunami magnitude m , which indicates the difference tsunami wave height as much as by a factor of about 2. See Table 1 for the data.

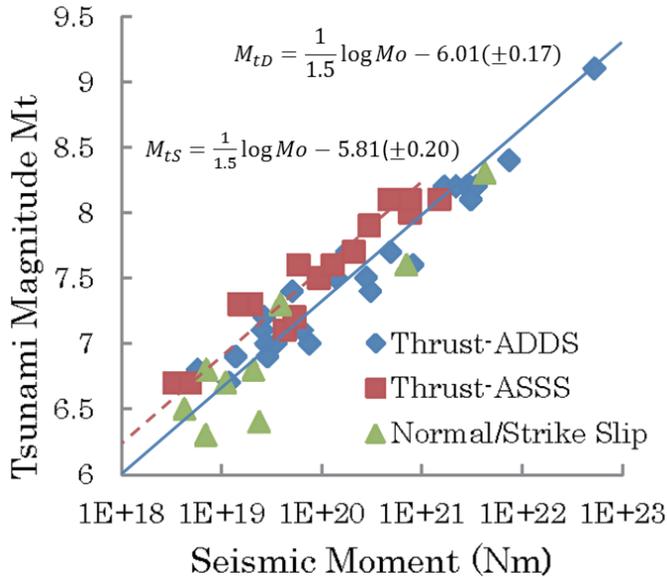


Fig. 3. Tsunami magnitude M_t defined by Abe (1979) in relation to seismic moment M_o of each earthquake in and near Japan. Least squares regressions between M_t and M_o for ADDS and ASSS earthquakes are derived. Others are the same as those in Fig. 2.

III. まとめと議論

前節で、ADDS と ASSS の地震活動による津波の励起には違いがあり、その違いは津波波高にして約 2 倍程度であることが推定された。津波の波高はそれを励起した地震による海底面の変動と等価であるから (Gusman, 2011), この違いは同じ M_0 の ASSS 型の地震が ADDS 型の地震よりより大きな海底地殻変動を起こしていることを示している。このような違いを生じるには、以下のような理由が考えられる:

- 1) 震源が浅く、地震による断層変位がより大きな海底面の変動を生じさせる,
- 2) 断層面の傾斜角が大きく、地震メカニズムの違いにより海底面変動が大きくなる,
- 3) 海溝や大陸棚などの海底の 3 次元的な構造により、津波の励起が大きくなる,
- 4) 周辺の海底地形が津波のフォーカシングを引き起こし、より大きな津波になる。

1) は、ADDS と ASSS の地震活動の違いに求めたい本質だから、あらためて議論する余地はない。2) については、確かに日本海側の地震はフィリピン海プレートの沈み込みに伴う地震に比べて、高角の断層面を持っている。しかし、これらはいずれも ASSS 型の地震活動である。また、松浦・佐藤 (1975) による断層変位がもたらす地表面変動の計算結果を見れば、傾斜角 30 度と 60 度の場合での地表面の最大変位量は 30% 程度の違いで、ここで求めた津波励起の違いを説明するような大きな違いではない。3) も同様で、ASSS 型の地震は、南海トラフの海溝付近であるか、日本海の背弧海盆であるかには、依存しないで、ADDS より大きな津波励起を示している。4) については、遠地の津波データを用いた結果も、近地の津波データから得られた結果を支持しているから、ASSS 型の地震がより大きな津波を励起するのを地形効果によるフォーカシングだけで説明することは難しい。

以上、ASSS 型の地震が ADDS 型の地震比べて 2 倍程度大きな津波を励起するのは、同じ地震モーメントの地震でも、ASSS 型の地震がより大きな海底面変動をもたらすからだと結論できる。これは ASSS 型地震の震源が浅いことによるかもしれないが、ASSS 型の地震はより多くの断層変位がプレート境界で浅い部分に集中しているためであるとも考えられる。

本研究の結果は、ADDS の活動は 2011 年東北地方太平洋沖地震のような場合でだけ海溝沿いのアスペリティーを破壊し、それ以外の場合は沈み込み帯の島弧側のプレート境界で発生している事で理解できる。

アウトライズの地震とは異なり、日本周辺の島弧沿いに発生する地震は数多く、地震空白域や GPS 観測などによるプレート間固着などで、次に発生するやもしれない地震の拡がりが見らかにされている。そのような地震活動域で、地震に伴う津波の励起を考える場合には、ここで議論した、ADDS/ASSS 地震活動の性質の違いを考慮する必要があると考える。

謝辞 論文原稿を査読していただいた、北海道大学谷岡勇市郎氏に深く感謝いたします。この論文を書くことになった真の動機は、岩手県大槌町赤浜地区で、流された家の土台のコンクリー

トわきに花を植えている人々を見て、大いに勇気づけられたからです。

文 献

- Abe, K., 1973. Tsunami and mechanism of great earthquakes, *Phys. Earth Planet. Int.*, **7**, 143-153.
- Abe, K., 1977. Tectonic implications of the large Shioya-oki earthquake of 1938, *Tectonophysics*, **41**, 269-289.
- Abe, K., 1979. Size of great earthquakes of 1837-1974 inferred from tsunami data, *J. Geophys. Res.*, **84**, 1561-1568.
- 阿部勝征 1998. 津波マグニチュードによる日本付近の地震津波の定量化, 地震研究所彙報, 東京大学, **63**, 283-303.
- Abe, K., 2011. <http://wwwweic.eri.u-tokyo.ac.jp/tsunamiMt.html>
- Aki, K., 1966. Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964, Part 1. A statistical analysis, *Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ.*, **44**, 33-72.
- Dziewonski, A.M., J.E. Franzen and J.H. Woodhouse, 1983. Centroid-moment tensor solutions for April-June, 1983, *Phys. Earth Planet. Int.*, **33**, 243-249
- Fukao, Y. and M. Furumoto, 1975. Mechanism of large earthquakes along the eastern margin of the Japan Sea, *Tectonophysics*, **25**, 247-266.
- Gusman, A.R., 2011. Source process determinations of recent and historical earthquakes using tsunami waveforms, tsunami inundations, tsunami deposits, and InSAR data, Doctoral Thesis, Hokkaido University, 113pp.
- Hanks, T. and H. Kanamori, 1979. A moment magnitude scale, *J. Geophys. Res.*, **84**, 2348-2350.
- 羽鳥徳太郎, 1986. 津波の規模階級の区分, 地震研究所彙報, 東京大学, **61**, 503-515.
- 羽鳥徳太郎, 1996. 日本近海における津波マグニチュードの特性, 津波工学研究報告, **13**, 17-26.
- Iida, K., 1958. Magnitude and energy of earthquakes associated by tsunami, and tsunami energy, *J. Earth Sci., Nagoya Univ.*, **6**, 101-112.
- 今村明恒, 1949. 本邦津波年代表, 地震 II, **2**, 23-28.
- Kanamori, H., 1970. Synthesis of long-period surface waves and its application to earthquake source studies - Kurile Islands earthquake of October 13, 1963, *J. Geophys. Res.*, **75**, 5011-5027.
- Kanamori, H., 1971a. Faulting of the great Kanto earthquake of 1923 as revealed by seismological data, *Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ.*, **49**, 13-18.
- Kanamori, H., 1971b. Seismological evidence for a lithospheric normal faulting - the Sanriku earthquake of 1933, *Phys. Earth Planet. Int.*, **4**, 289-300.
- Kanamori, H., 1971c. Focal mechanism of the Tokachi-Oki earthquake of May 16, 1968: Contortion of the lithosphere at a junction of two trenches, *Tectonophysics*, **12**, 1-13.
- Kanamori, H., 1972. Tectonic implications of the 1944 Tonankai and the 1946 Nankaido earthquakes, *Phys. Earth Planet. Int.*, **5**, 129-139.
- Kanamori, H., 1977. Seismic and aseismic slip along subduction zones and their tectonic implications, *Island Arcs, Deep Sea Trenches and Back-arc Basins*, ed. M. Talwani and W.C. Pitman III, AGU, 163-174.
- Kanamori, H. and D.L. Anderson, 1975. Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **65**, 1073-1095.
- 菊地正幸・須藤研, 1985. 1982年2月23日茨城県沖地震の震源過程, 月刊地球, **7**, 72-78.
- 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. Let.*, **310**, 480-487.
- 小山順二・都筑基博, 2012. 超巨大地震とその最大余震, 地震 II, 投稿中.
- Koyama, J., K. Yoshizawa, K. Yomogida and M. Tsuzuki, 2012. Variability of megathrust thquakes in the world revealed by the 2012 Tohoku-oki earthquake, *Earth Planets Space*, **64**, 1189-1198.

- 松浦充宏・佐藤良輔, 1975, 断層モデルと地表変位のパターン, 地震Ⅱ, **28**, 49-434.
- Mogi, K., 1981. Seismicity in western Japan and long-term earthquake forecasting, *Earthquake Prediction, Maurice Ewing Series IV*, ed. D.W. Simpson and P.G. Richards, Am. Geophys. Union, Washington D.C., 43-51.
- 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.
- 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. Int.*, **31**, 202-230.
- Seno, T., K. Shimazaki, P. Sommerville, K. Sudo and T. Eguchi, 1980. Rupture process of the Miyagi-oki, Japan, earthquake of June 12, 1978, *Phys. Earth Planet. Int.*, **23**, 39-61.
- Shimazaki, K., 1974. Nemuro-oki earthquake of June 17, 1973: A lithospheric rebound at the upper half of the interface, *Phys. Earth Planet. Int.*, **9**, 315-327.
- Shimazaki, K. and P. Sommerville, 1979. Static and dynamic parameters of the Izu-Oshima, Japan, earthquake of June 14, 1978, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **69**, 1343-1378.
- Shiono, K., T. Mikumo and Y. Ishikawa, 1980. Tectonics of the Kyushu-Ryukyu arc as Evidenced from seismicity and focal mechanism of shallow to intermediate-depth earthquakes, *J. Phys. Earth*, **28**, 17-43.
- 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.
- Takemura, M., J. Koyama and Z. Suzuki, 1977. Source process of the 1974 and 1975 earthquakes in Kurile Islands in special relation to the difference in excitation of tsunami, *Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser.5, Geophys.*, **24**, 113-132.
- 武尾実・笠原稔・阿部勝征, 1983. 1982年3月21日尾地浦河沖地震の発生機構, 1982年3月21日浦河沖地震調査報告, 酒井良男編, 1-11.
- Takeo, M., 1988. Rupture process of the 1980 Izu-Hanto-Toho-Oki earthquake deduced from strong motion seismograms, *Bull. Seismo. Soc. Am.*, **78**, 1074-1091.
- 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.
- Yoshioka, N. and K. Abe, 1976. Focal mechanism of the Iwate-oki earthquake of June 12, 1968, *J. Phys. Earth*, **24**, 251-262.