



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	経験的グリーン関数法による2009年8月11日駿河湾の地震 (MJMA 6.5) の震源モデルの推定と強震動シミュレーション
Author(s)	浅野, 公之; ASANO, Kimiyuki; 岩田, 知孝 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 73, 137-147
Issue Date	2010-03-19
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.73.137">https://doi.org/10.14943/gbhu.73.137</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/44469">https://hdl.handle.net/2115/44469</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	73_13_p137-147.pdf



## 経験的グリーン関数法による2009年8月11日駿河湾の地震 ( $M_{JMA}$ 6.5) の震源モデルの推定と強震動シミュレーション

浅野 公之・岩田 知孝

京都大学防災研究所

(2010年1月6日受理)

### Source modeling and strong motion simulation of the 2009 Suruga Bay earthquake ( $M_{JMA}$ 6.5) using the empirical Green's function method

Kimiyuki ASANO and Tomotaka IWATA

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

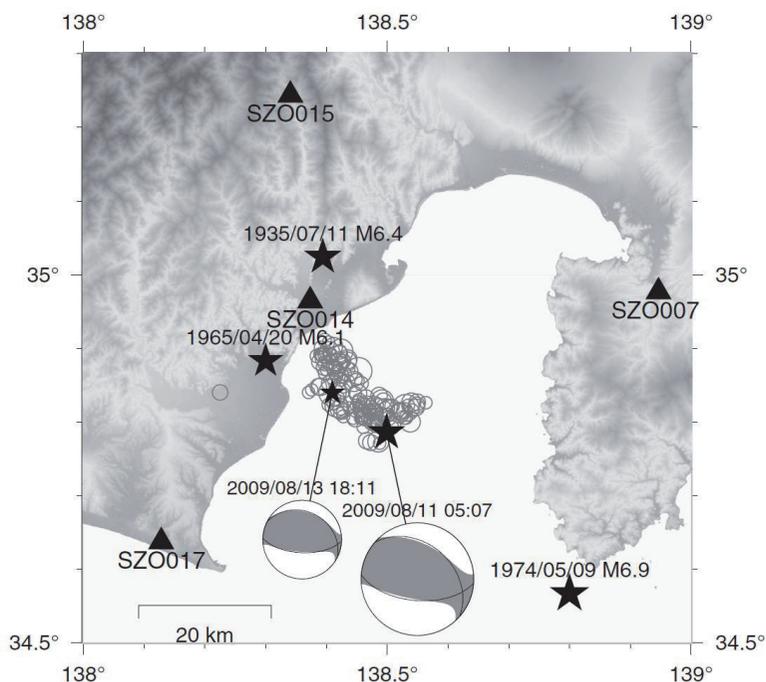
(Received January 6, 2010)

On August 11, 2009, an intraplate earthquake ( $M_{JMA}$  6.5) occurred within the subducting Philippine Sea slab beneath Suruga Bay at a depth of 23 km. The source model composed of two strong motion generation areas (SMGA) has been estimated by the broadband strong motion simulation using the empirical Green's function method in the frequency range between 0.3 Hz and 10 Hz. The stress drop of each SMGA is estimated to be 35.7 MPa and 27.5 MPa. The rupture of SMGA 1 on the southeast dipping fault plane mainly propagated southwestward, and that of SMGA 2 on the northeast dipping fault plane propagated northwestward. The obtained source model explains the observed acceleration, velocity, and displacement waveforms of this event in the broadband frequency range fairly well. Then, the size of SMGA for the 2009 Suruga Bay earthquake is compared with the scaling relationship by previous studies on other intraslab and inland crustal earthquakes. The size of SMGA for intraslab earthquakes in the previous studies is generally smaller than that for inland crustal earthquakes. In contrast, the SMGA of the 2009 Suruga Bay earthquake is almost comparable to the empirical scaling relationship for inland crustal earthquakes. That difference is mainly because the relatively shallower source depth of this event compared to other intraslab earthquakes. For advanced strong motion prediction for intraslab earthquakes, it could be necessary to adopt depth-dependency and regional differences in stress drop on SMGA or asperity in the source modeling.

## I. はじめに

2009年8月11日5時7分に駿河湾の深さ23 kmで $M_{JMA}$  6.5の地震が発生し、静岡県御前崎市、牧之原市、焼津市及び伊豆市で震度6弱の揺れが観測された。この地震は、駿河トラフから陸側

のプレートの下へ沈み込むフィリピン海プレートの内部で発生し、北北西-南南東方向に圧縮軸をもつ逆断層型のスラブ内地震である。日本列島は、複数のプレート境界域に位置しており、被害をもたらすようなスラブ内地震が繰り返し発生しており（例えば、1987年千葉県東方沖地震、1993年釧路沖地震、2001年芸予地震、2003年宮城県沖の地震）、そのようなスラブ内地震の震源特性の研究も進んできている（例えば、Asano et al., 2003; 笹谷・他, 2006）。スラブ内地震を対象とした強震動予測手法の開発と提案も行われ始めている（壇・他, 2006; 笹谷・他, 2006; 岩田・浅野, 2010）。また、静岡県中部では、静岡地震とよばれるM6クラスのスラブ内地震が約30年に1回程度の頻度で発生している（1935年、1965年）。ただし、震央位置はFig. 1に示されているようにそれぞれ異なっている。1935年静岡地震については、武尾・他（1979）が断層モデルを求めており、逆断層成分をもつ左横ずれ型の震源メカニズムが求められている。このような繰り返すスラブ内地震に対する強震動予測を高精度化し、信頼性を高めるためには、実際にこの地域で発生したスラブ内地震の震源特性を強震記録の解析に基づいて調べるのが重要である。本研究では、経験的グリーン関数法（Irikura, 1986）を用いた広帯域強震動シミュレーションにより、2009年駿河湾の地震の震源モデルを推定し、本震の震源過程がもたらす駿河湾周辺



**Fig. 1.** Map showing the study area with the epicenter of the 2009 Suruga Bay earthquake ( $M_{JMA}$  6.5). The focal mechanisms from seismic moment tensor of the mainshock and the EGF event (2009/08/13 18:11,  $M_{JMA}$  4.5) are shown on the lower hemisphere by the equal area projection. Open circles indicate the epicenters of aftershocks ( $M_{JMA} > 2$ ) within one week after the mainshock. Epicenters of the other remarkable past earthquakes in this region are also shown. The solid triangles represent the strong motion stations used in the source modeling of this study.

の強震動について考察した。また、既往のスラブ内地震の震源モデルとの強震動生成領域の面積および応力降下量の比較を行った。

## II. 経験的グリーン関数法による震源モデルの推定

Irikura (1986) は小地震記録  $u(t)$  を経験的グリーン関数として、震源スペクトルの  $\omega^{-2}$  相似則をもとに重ね合わせることで、大地震による地震動  $U(t)$  を短周期から長周期域まで精度よく合成する以下の手法を提案した。Miyake et al. (2003) は経験的グリーン関数法を用いた強震動シミュレーション結果に基づき、強震動生成領域によって構成される震源モデルを提案した。強震動生成領域とは、不均質な震源断層モデルを表現する上で、強震動生成を支配する断層面内のすべり速度や応力降下量の大きい特徴的な領域を矩形領域としてモデル化したものであり、既往の研究においてすべりの大きなアスペリティと空間的にも対応関係があることが示されている (Miyake et al., 2003)。ここでは、震源断層面内の強震動生成領域以外の領域 (背景領域) での応力降下量は 0 であるとし、広帯域強震動は強震動生成領域のみから放射されるモデルとなっている。近年発生した他のスラブ内地震においても、このような強震動生成領域により観測された広帯域強震動が良好に説明できることが示されている (例えば、浅野・他, 2004; Morikawa and Sasatani, 2004)。

ここでは、一次元速度構造を考慮できるように改良した以下の式を用い、合成波形  $U(t)$  を計算する。

$$U(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{r_e}{r_{ij}} \{F(t) * (C \cdot u(t))\} \quad (1)$$

ここで、 $N$  は小地震の重ね合わせ数、 $C$  は大地震と小地震の応力降下量の比、 $r_e$  は小地震の震源から観測点までの波線に沿った距離、 $r_{ij}$  は強震動生成領域を長さ方向 ( $i$ ) と幅方向 ( $j$ ) にそれぞれ  $N$  個に分割したときの  $ij$  番目の小断層の中心から観測点までの波線に沿った距離、 $*$  はたたみ込み積分である。小地震と大地震のすべり速度関数の補正関数  $F(t)$  は、入倉・他 (1997) による式(2)を用いた。

$$F(t) = \delta(t - t_{ij}) + \frac{1}{n(1 - \exp(-1))} \sum_{k=1}^{(N-1)n'} \left[ \exp\left(-\frac{k-1}{(N-1)n'}\right) \delta\left(t - t_{ij} - \frac{(k-1)\tau}{(N-1)n'}\right) \right] \quad (2)$$

$$t_{ij} = (T_{ij} - T_0) + \frac{\xi_{ij}}{V_R} \quad (3)$$

$\tau$  は大地震のライズタイム、 $\xi_{ij}$  は強震動生成領域の破壊開始点から  $ij$  番目の小断層の中心までの距離、 $V_R$  は破壊伝播速度、 $T_0$  は震源 (破壊開始点) から観測点までの走時、 $T_{ij}$  は  $ij$  番目の小断層の中心から観測点までの走時、 $n'$  は重ね合わせの際に生じる人為的な周期性を対象周期範囲外の短周期に移動させるための任意の自然数である。走時  $T_0$ 、 $T_{ij}$  と波線距離  $r_e$ 、 $r_{ij}$  は水平成層

**Table 1.** S-wave velocity structure model used in this study.

Thickness (km)	$V_S$ (km/s)
5	3.12
9	3.57
$\infty$	3.80

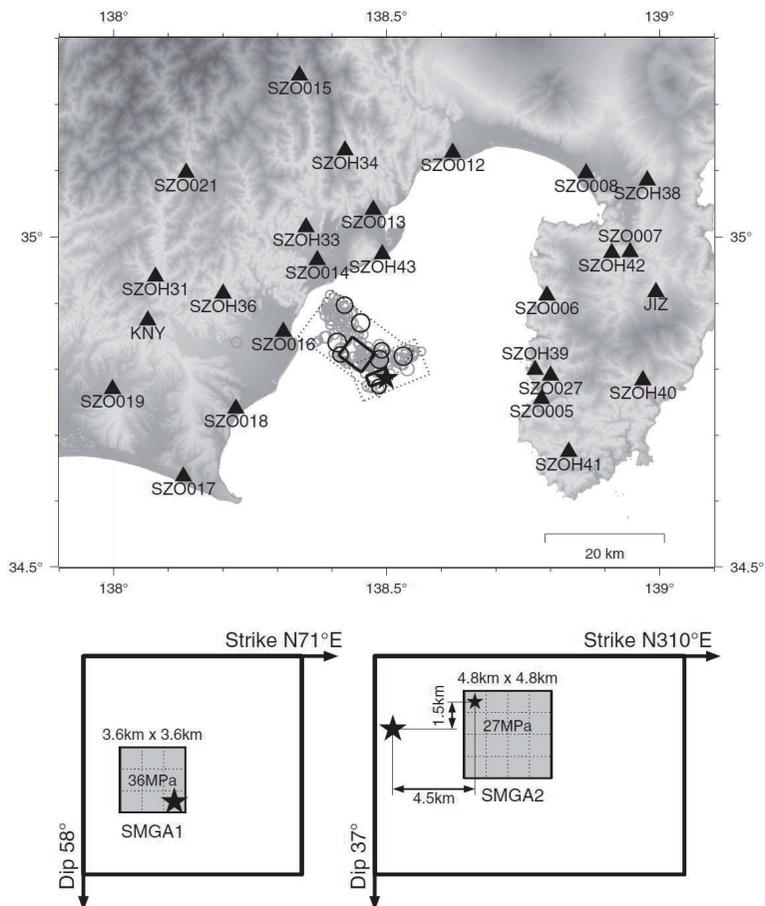
構造を仮定した波線追跡によって計算した。使用した一次元 S 波速度構造を Table 1 に示す。

本研究では経験的グリーン関数として 8 月 13 日 18 時 11 分に発生した余震 ( $M_{JMA}$  4.5) の記録を使用した。この余震の震央位置は Fig. 1 に示されている。震源位置は本震の西北西に約 10 km 離れているが、メカニズム解は右ずれ成分を少し含む逆断層型であり、本震とほぼ同じである。観測された強震波形の特徴から、震源モデルは 2 つの強震動生成領域から構成されると仮定し、各強震動生成領域について式(1)により合成した波形を足しあわせることで本震の合成波形とした。

次に、断層面の設定について説明する。気象庁や防災科学技術研究所などの機関によって詳細に決定された余震分布からは、本震の断層面が走向・傾斜の異なる 2 枚の断層面からなることが報告されている (例えば, 小原・他, 2009)。また、近地強震記録を用いた震源インバージョン解析でも 2 枚の断層面を仮定して解析されている例が多い (例えば, 鈴木・他, 2009; 横田・他, 2009)。そこで本研究では、北東傾斜の 1 枚断層モデルの場合と、2 枚断層モデルの 2 通りを解析した。本報告では、2 枚断層モデルの結果を主に示す。このモデルでは、1 番目の強震動生成領域 (SMGA 1) が南側の南東傾斜の面 (走向 71 度, 傾斜 58 度) にあり、2 番目の強震動生成領域 (SMGA 2) が北西部の北東傾斜の面 (走向 310 度, 傾斜 37 度) に位置すると仮定した。この南東傾斜の面の走向および傾斜は気象庁による P 波初動の押し引きを用いた発震機構解をもとに、北東傾斜の面の走向および傾斜は F-net による CMT 解をもとに設定した。小地震の重ね合わせ数  $N$  は、SMGA 1 に対しては  $N_1 = 3$ 、SMGA 2 に対しては  $N_2 = 4$  とした。

震源を取り囲む K-NET の 4 観測点 (SZO 007 修善寺, SZO 014 静岡, SZO 015 梅ヶ島, SZO 017 浜岡) での水平動 2 成分の S 波部分 (周波数 0.3–10 Hz) について、加速度エンベロープと変位波形のそれぞれの観測波形と合成波形の残差の総和が最小となるように、最適な震源モデルをグリッドサーチにより探索した (三宅・他, 1999)。未知パラメータの数を減らすため、強震動生成領域の形状は正方形とし、長さ  $L$  は幅  $W$  と等しいと仮定した。したがって、モデリングにより推定するパラメータは、各強震動生成領域の位置と破壊時刻、長さ  $L$ 、ライズタイム  $\tau$ 、応力降下量比  $C$ 、強震動生成領域内部での破壊開始点及び破壊伝播速度  $V_R$  である。

Fig. 2 に本研究で得られた震源モデルを示す。主として北西に向かって水平に破壊が伝播する破壊様式で、破壊伝播速度は 3.4 km/s である。ここで求められた震源パラメータを Table 2 に示す。強震動生成領域の応力降下量は、SMGA 1 が 35.7 MPa、SMGA 2 が 27.5 MPa と推定された。



**Fig. 2.** The source model of the 2009 Suruga Bay earthquake estimated in this study. (top) Map view of the source model with strong motion stations (solid triangles) and aftershock distribution within one week (gray circles for  $M_{JMA} > 2$ , and black circles for  $M_{JMA} > 3.5$ ). The epicenter of the mainshock is indicated by the solid star. (bottom) The source model composed of two strong motion generation areas (SMGA). The large star indicates the hypocenter, and the small star indicates the rupture starting point of SMGA 2.

**Table 2.** Source parameters of the 2009 Suruga Bay earthquake.

	SMGA 1	SMGA 2
Length (km)	3.6	4.8
Width (km)	3.6	4.8
Area (km <sup>2</sup> )	13.0	23.0
Rise time (s)	0.33	0.44
$M_0$ (Nm)	$6.8 \times 10^{17}$	$1.2 \times 10^{18}$
Stress drop (MPa)	35.7	27.5
Rupture time (s)	0.0	1.8

地震モーメントは SMGA 2 が SMGA 1 の約 1.8 倍となった。震源モデルの拘束に使用した 4 観測点での合成波形と観測波形の比較を加速度，速度，変位波形の水平 2 成分について Fig. 3 に示す。また，Fig. 4 には駿河湾周辺の強震観測点での速度波形の観測波形と合成波形の水平 2 成分の比較をまとめて示す。SMGA 1 の破壊は御前崎のある南西方向へ主として進み，SMGA 2 の破壊は北西の静岡市や焼津市の方向へ進むモデルとなっている。しかし，震源から北東の伊豆半島の観測点（例えば，SZO 007）にみられる周期約 0.5 秒の短いパルス波は現在の震源モデルでは十分には説明されていない。これを説明するためには，伊豆半島へ向かって指向性を持つような小さな強震動生成領域がもう 1 つ必要である可能性が考えられる。震源の北西側に位置する清水から御前崎にかけては，SMGA 1 と SMGA 2 の両方が波形に寄与している。特に，清水～焼津にかけては，S 波の最大振幅は SMGA 2 の寄与によって実現されている。御前崎・浜岡周辺（例えば，SZO 017）でみられるパルス波は SMGA 1 の指向性によって説明できる。

Fig. 2 の上図では，推定された強震動生成領域の位置と本震後 1 週間以内の余震の震央分布を比較している。本震の強震動生成領域の位置と主要な余震の震源位置は空間的に相補的な分布を

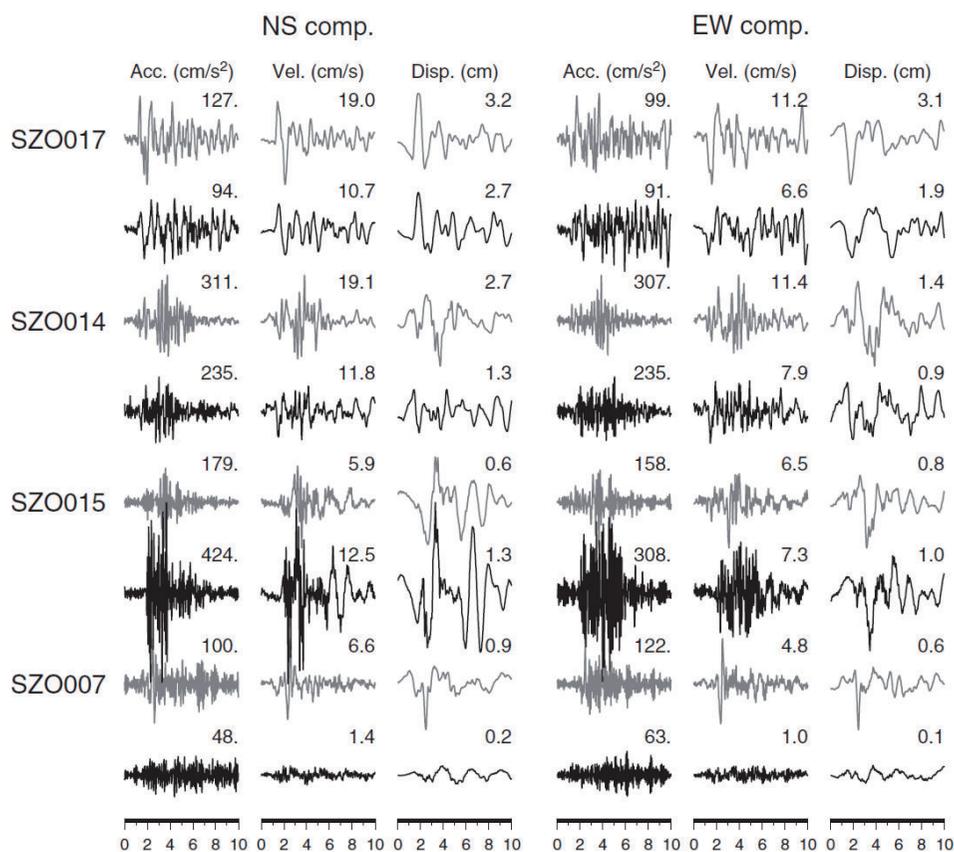


Fig. 3. Comparison between observed waveforms (gray) and synthetic waveforms (black) in 0.3–10 Hz. The two horizontal components of acceleration, velocity, and displacement at SZO 007, SZO 014, SZO 015, and SZO 017 are shown. Numbers indicate the maximum amplitude of the waveforms.

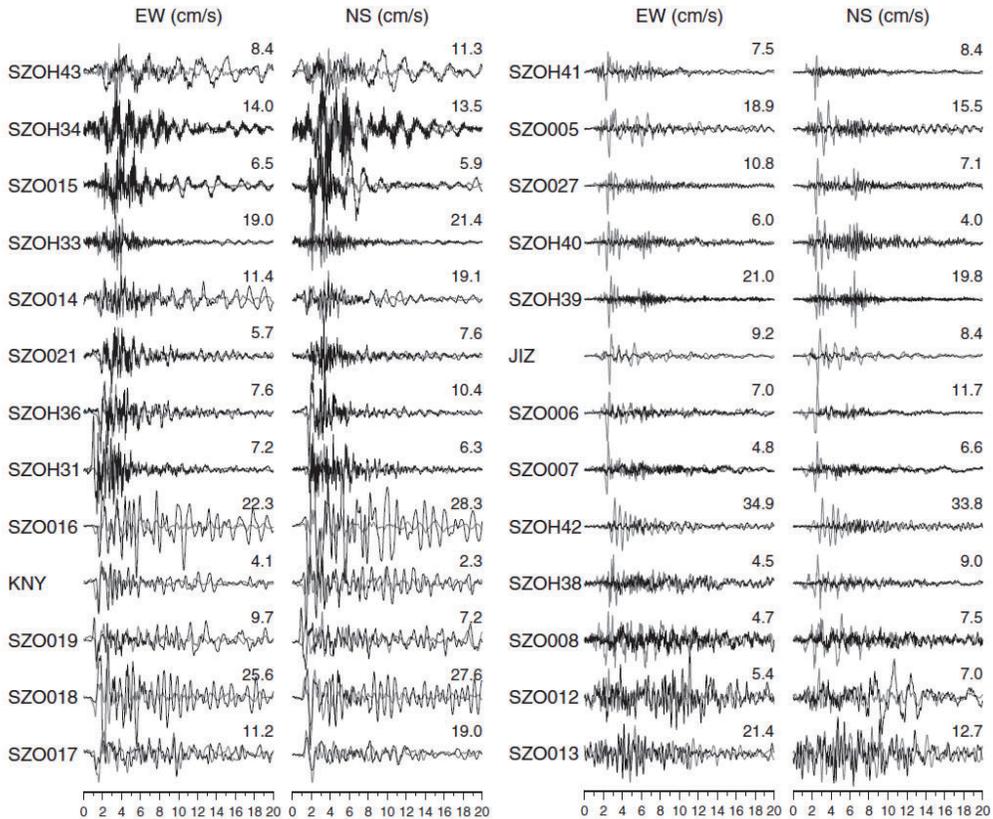


Fig. 4. Comparison between observed velocity waveforms (gray) and synthetic waveforms (black) in 0.3-10 Hz. The two horizontal components are shown. Numbers indicate the maximum amplitude of the observed velocity waveforms in cm/s.

していることがわかる。また、鈴木・他 (2009) による強震波形 (1 Hz 以下) を用いた震源インバージョンで得られた最終すべり量分布と比較すると、断層面の設定の詳細が本研究とは異なるものの、すべりの大きな領域の位置や破壊伝播の方向などの特徴は本研究の震源モデルと似た結果が得られた。

### III. スラブ内地震の強震動生成領域

我々は、スラブ内地震の強震動生成領域と地震モーメントの関係について調べてきており、スラブ内地震の強震動生成領域の面積は同規模の内陸地殻内地震に比べ小さいこと、それらスラブ内地震の強震動生成領域の面積や応力降下量は震源深さに依存する傾向が見られることを示してきた (Asano et al., 2003; 2004; 浅野・他, 2004)。Fig. 5 は Asano et al. (2004) によるスラブ内地震の強震動生成領域の面積と地震モーメントの関係を表した図に、2009 年駿河湾の地震 ( $M_{JMA}$  6.5, 本研究) 及び 2008 年岩手県沿岸北部の地震 ( $M_{JMA}$  6.8, 浅野・岩田, 2009) を新たに

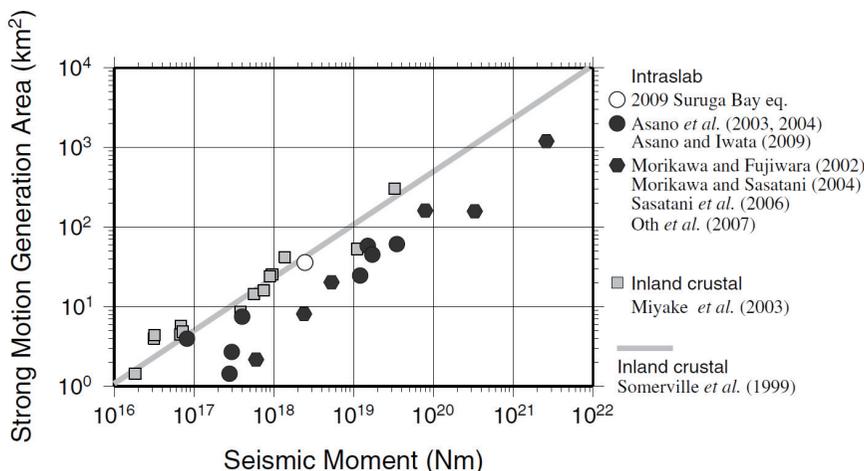


Fig. 5. Relationship between strong motion generation area and seismic moment for intraslab earthquakes. The scaling relationship for inland crustal earthquakes (Miyake et al., 2003) is also shown.

プロットした。著者ら以外によって同様な手法で解析された日本国内のスラブ内地震（森川・藤原, 2002; Morikawa and Sasatani, 2004; 笹谷・他, 2006）およびブルーマニアのスラブ内地震（Oth et al., 2007）も併せて示した。Fig. 5 から分かるように、これまでの多くのスラブ内地震の強震動生成領域の面積は、同規模の内陸地殻内地震に比べ半分程度かそれ以下のものが多い。それに対し、本研究で得られた 2009 年駿河湾の地震の強震動生成領域の面積は、これまでの既往のスラブ内地震の震源モデルのそれらと傾向が異なり、内陸地殻内地震のスケーリングから期待される面積とほぼ同程度であることがわかった。

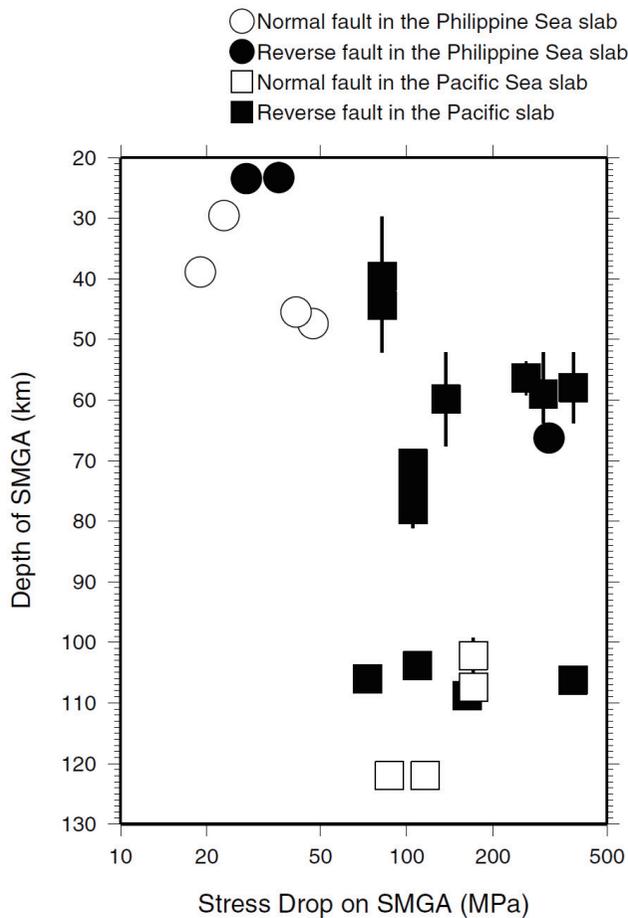
Fig. 6 にはこれまでに求められた日本国内のスラブ内地震の強震動生成領域の応力降下量と深さの関係を、断層タイプ別およびプレート別にプロットした。正断層型の地震よりも逆断層型のスラブ内地震の方が応力降下量の大きなものが多いという傾向はあるものの、震源メカニズムによる違いははっきりとは見られない。また、フィリピン海スラブと太平洋スラブでは、プレートの年代や厚さなど地震発生に関係があると考えられるテクトニクス的な特徴が異なっているが、フィリピン海スラブのスラブ内地震と太平洋スラブのスラブ内地震は発生する深さが相補的であるため、深さの影響とプレートの違いによる地域性の影響を区別することは現在のデータセットの範囲内では難しい。第一義的には、深さの浅いスラブ内地震は相対的に強震動生成領域の応力降下量が小さく、深いものは強震動生成領域の応力降下量が大きいものでは 100 MPa を超える事例もあるなど、応力降下量が震源深さに依存する傾向があることがいえる。

以上のことから、2009 年駿河湾の地震の震源特性は、平均的な内陸地殻内地震よりは大きな応力降下量を持っているといえるものの、これまでに我々が収集分析してきたスラブ内地震のデータセットの中では決して大きな部類ではないといえる。これはこの地震がスラブ内地震としては震源が浅く、地震発生環境が内陸地殻内地震やプレート境界地震に比較的近いことによるものと

考えられる。このように、スラブ内地震は他のタイプの地震に比べ、広い深さ範囲（20 km 付近～100 km 以上）で発生することから、スラブ内地震を想定した強震動予測の高度化のためには、Fig. 6 でみられているような深さや地域性の違いによる震源特性の違いを考慮したモデル化を行う必要がある。

#### IV. ま と め

経験的グリーン関数法を用いた強震動シミュレーションに基づいて、2009 年駿河湾の地震の震源モデルを推定した。余震分布から想定される 2 枚の断層面にそれぞれ 1 つずつ強震動生成領域をおいたモデルによって、駿河湾周辺で観測された強震波形の特徴を説明することができた。



**Fig. 6.** Relationship between the stress drop of SMGA and its depth for intraslab earthquakes. Open symbols and filled symbols indicate normal fault events and reverse fault events, respectively. The circle and square indicate the intraslab earthquake in the Philippine Sea slab and the intraslab earthquake in the Pacific slab.

2009年駿河湾の地震の強震動生成領域の面積は、内陸地殻内地震に対するスケーリングと同程度であることが分かった。これはこの地震の震源深さがスラブ内地震の中では浅い部類に含まれるため、相対的に応力降下量が小さかったことによる。スラブ内地震は他のタイプの地震に比べ、広い深さ範囲（20 km 付近～100 km 以上）で発生するため、スラブ内地震を想定した強震動予測の高度化のためには、震源の深さや地域性の違いによる震源特性の違いを積極的に取り入れていくことが必要である。また、今後もスラブ内地震の震源モデルの解析事例を増やし、これまでの知見を検証していくことが必要であることはいうまでもない。

**謝辞** 独立行政法人防災科学技術研究所 K-NET, KiK-net 及び F-net の強震記録を使用しました。これらの貴重な観測網の維持に関わられる皆様の不断の努力に感謝いたします。図の作成には GMT (Wessel and Smith, 1998) を用いました。著者らが取り組んできましたスラブ内地震の研究においては、笹谷努教授及び森川信之博士との議論や情報交換が大いに役立ちました。記して感謝いたします。

## 文 献

- 浅野公之・岩田知孝, 2009. 経験的グリーン関数法を用いた2008年7月24日岩手県沿岸北部のスラブ内地震の震源モデルの推定, 日本地球惑星科学連合2009年大会予稿集, S152-009 (CD-ROM).
- Asano, K., T. Iwata and K. Irikura, 2003. Source characteristics of shallow intraslab earthquakes derived from strong-motion simulations, *Earth Planets Space*, **55**, e5-e8.
- Asano, K., T. Iwata and K. Irikura, 2004. Characterization of source models of shallow intraslab earthquakes using strong motion data, *Proc. 13th World Conf. Earthq. Eng.*, paper no. 835 (DVD-ROM).
- 浅野公之・岩田知孝・入倉孝次郎, 2004. 2003年5月26日に宮城県沖で発生したスラブ内地震の震源モデルと強震動シミュレーション, *地震II*, **57**, 171-185.
- 壇 一男・武藤尊彦・宮腰淳一・渡辺基史, 2006. スラブ内地震による強震動を予測するための特性化震源モデルの設定方法, 日本建築学会構造系論文集, **600**, 35-42.
- Irikura, K., 1986. Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, *Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp.*, Tokyo, 151-156.
- 入倉孝次郎・関口春子・香川敬生, 1997. 経験的グリーン関数を用いた強震動予測手法の改良, 日本地震学会講演予稿集, B71.
- 岩田知孝・浅野公之, 2010. 強震動予測のためのスラブ内地震の特性化震源モデルの構築, 北海道大学地球物理学研究報告, **73**, 129-135.
- 三宅弘恵・岩田知孝・入倉孝次郎, 1999. 経験的グリーン関数法を用いた1997年3月26日 ( $M_{JA}$  6.5) 及び5月13日 ( $M_{JA}$  6.3) 鹿児島県北西部地震の強震動シミュレーションと震源モデル, *地震II*, **51**, 431-442.
- Miyake, H., T. Iwata and K. Irikura, 2003. Source characterization for broadband ground-motion simulation: Kinematic heterogeneous source model and strong motion generation area, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93**, 2531-2545.
- 森川信之・藤原広行, 2002. スラブ内地震のスケーリング則(2), 2002年地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, S042-013 (CD-ROM).
- Morikawa, N. and T. Sasatani, 2004. Source models of two large intraslab earthquakes from broadband strong ground motions, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **94**, 803-817.
- 小原一成・浅野陽一・木村尚紀・汐見勝彦・松原誠・上野友岳・Bogdan Enescu・木村武志・野口伸一, 2009. 2009年8月11日駿河湾の地震の概要と過去の地震活動, 日本地震学会2009年秋季大会予稿集, P1-03.

- Oth, A., F. Wenzel and M. Radulian, 2007. Source parameters of intermediate-depth Vrancea (Romania) earthquakes from empirical Green's functions modeling, *Tectonophysics*, **438**, 33-56.
- 笹谷 努・森川信之・前田宜浩, 2006. スラブ内地震の震源特性, 北海道大学地球物理学研究報告, **69**, 123-134.
- 鈴木 亘・青井 真・関口春子, 2009. 近地強震記録による 2009 年 8 月 11 日駿河湾の地震の震源過程, 日本地震学会 2009 年秋季大会予稿集, A 11-06.
- 武尾 実・阿部勝征・辻 秀昭, 1979. 1935 年 7 月 11 日静岡地震の発生機構, 地震 II, **32**, 423-434.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1998. New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *Eos Trans. AGU*, **79**, 579.
- 横田裕輔・瀨藤一起・三宅弘恵・塚越 大・石瀬素子・坂上 実, 2009. 2009 年駿河湾の地震の強震動と震源過程, 日本地震学会 2009 年秋季大会予稿集, A 11-08.