

## 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と検証

VALIDATION OF CHARACTERIZED SOURCE MODEL FOR  
INTRASLAB EARTHQUAKES FOR STRONG MOTION PREDICTION岩田知孝<sup>1)</sup>、浅野公之<sup>2)</sup>Tomotaka IWATA<sup>1</sup>, Kimiyuki ASANO<sup>2</sup>

1) 京都大学防災研究所、教授 理博

<sup>1</sup> Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Dr. Sc.

e-mail : iwata@egmdpri01.dpri.kyoto-u.ac.jp

2) 京都大学防災研究所、助教 博士(理学)

<sup>2</sup> Assistant Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Dr. Sc.

e-mail : k-asano@egmdpri01.dpri.kyoto-u.ac.jp

**ABSTRACT:** We proposed a prototype of procedure for strong ground motion prediction of intraslab earthquakes. It is based on the characterized source model of intraslab earthquakes constructed by the slip characterization of heterogeneous source models and the relationships between SMGA and asperity (Iwata and Asano, 2010). We are validating this procedure by simulating strong ground motions for observed recent destructive events by the empirical Green's function method. Effects of the rupture scenarios on estimated ground motions are discussed.

**キーワード：** 強震動予測、特性化震源モデル、スラブ内地震

## 1. はじめに

日本列島は沈み込み帯に位置しており、近年では、1993年釧路沖地震や2001年芸予地震、2003年宮城県沖の地震など、日本列島直下に沈み込む海洋プレート（スラブ）内部で発生するスラブ内地震による地震被害が繰り返し起きている。そのようなスラブ内地震の強震動予測を目的として、内陸地殻内地震やプレート境界地震と同様に、震源のモデル化に必要な地震学的知見を過去の地震の記録に基づいて整理し、強震動予測のための震源のモデル化手法を構築検討することを試みている。

内陸地殻内地震や海溝型プレート境界地震に対しては Somerville *et al.*<sup>1)</sup>、Mai and Beroza<sup>2)</sup>や Murotani *et al.*<sup>3)</sup>などによって、運動学的震源インバージョンによって得られた不均質すべりモデルがコンパイルされ、断層面積とアスペリティ総面積の地震モーメントに対する経験式が提案されている。一方、Miyake *et al.*<sup>4)</sup>は経験的グリーン関数法（例えば Irikura<sup>5)</sup>）による広帯域強震動シミュレーションから、強震動生成領域(Strong Motion Generation Area)を推定し、内陸地殻内地震のアスペリティ領域と SMGA が位置及びサイズの観点で対応していることを示した。これらのことから、強震動予測のための震源モデルとして、アスペリティ領域と背景領域からなる特性化震源モデルが提案され、広く利用されている（例えば 文部科学省地震調査研究推進本部<sup>6)</sup>）。

このような枠組みでの特性化震源モデルに関して、Iwata and Asano<sup>7)</sup>、岩田・浅野<sup>8)</sup>では、スラブ内地震の不均質震源断層すべりモデルの特性化を行うと同時に、アスペリティと強震動生成領域の関係から、

内陸地殻内地震に対する特性化震源モデルの枠組みが利用できることを示し、スラブ内地震の強震動予測の手続きを示した。本研究では、その手法を要約するとともに、既往地震の強震動シミュレーションを行い、提案手法の妥当性の検討を行った。

## 2. スラブ内地震の不均質すべりの特性化と強震動生成領域

Iwata and Asano<sup>7)</sup>では国内外の11個のスラブ内地震 ( $M_w$  6.6-8.3、深さは約120kmまで)の不均質震源モデルを収集し、既往の研究と同様な方法で破壊領域、アスペリティ領域を求め、断層面積、アスペリティ総面積の、地震モーメントに対する関係式を求めた。断層面積( $S$ )、アスペリティ総面積( $S_a$ )が地震モーメント( $M_0$ )と相関があることを確認した上で、面積に関しては地震モーメントの2/3乗の比例関係にあることを仮定し、以下の経験式を導いた。

$$S \text{ (km}^2\text{)} = 6.57 \times 10^{-11} M_0^{2/3} \quad (1)$$

$$S_a \text{ (km}^2\text{)} = 1.04 \times 10^{-11} M_0^{2/3} \quad (2)$$

ここに  $M_0$  の単位は Nm である。

地震規模を与えた場合、スラブ内地震の断層面積、アスペリティ総面積は、内陸地殻内地震のそれらに比べ、平均で67%、50%となる。Boatwright<sup>9)</sup>のアスペリティモデルに、(1)及び(2)式を用いて、断層全体及びアスペリティの応力降下量を見積もると、それぞれ4.6 MPa、28.9 MPaとなる。内陸地殻内地震のそれらは、Somerville *et al.*<sup>1)</sup>の式からそれぞれ2.3 MPa、10.5 MPaと見積もられる。図1に地震モーメントに対する断層面積及びアスペリティ総面積の関係を示す。

Iwata and Asano<sup>7)</sup>は経験的グリーン関数法<sup>5)</sup>など広帯域の強震動シミュレーションが可能な方法によって求められているスラブ内地震の強震動生成領域のサイズを、上記の波形インバージョンによるアスペリティと比較している。それによると、位置は一致しているが、強震動生成領域サイズはアスペリティサイズと同等かもしくはやや小さめであることが多いことがわかった。図2には地震モーメントと強震動生成領域の関係を示した。アスペリティサイズと強震動生成領域のサイズ及び位置の対応から、強震動生成領域がやや小さい特徴があるものの、スラブ内地震の強震動予測のための特性化震源モデルは、内陸地殻内地震などのそれ<sup>10),11)</sup>に準じた形、即ちアスペリティと背景領域で構成されるモデルを考えた<sup>7)</sup>。このモデル化に基づいたスラブ内地震のための震源モデル構築手法及びその適用を次章で行う。

なお、スラブ内地震の強震動予測のための震源モデルは、強震動生成領域や短周期レベルの観点から整理された笹谷・他<sup>12)</sup>や壇・他<sup>13)</sup>によっても提案されている。

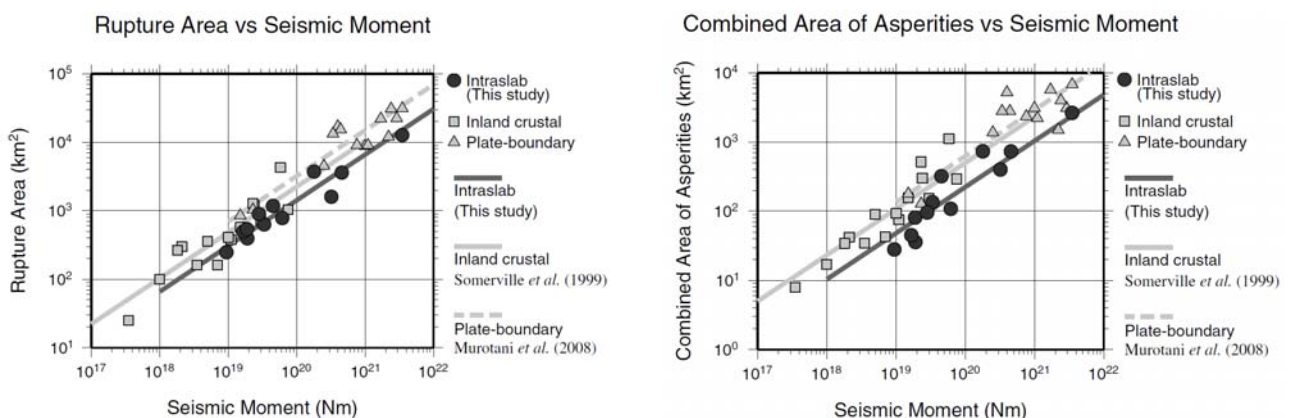


図1 地震モーメントに対する断層面積（左）及びアスペリティ総面積（右）の関係。断層及びアスペリティはSomerville *et al.*<sup>1)</sup>に従う。黒丸がスラブ内地震のデータで、黒実線が経験式。内陸地殻内地震（□）とプレート境界地震（△）も示している<sup>7)</sup>。

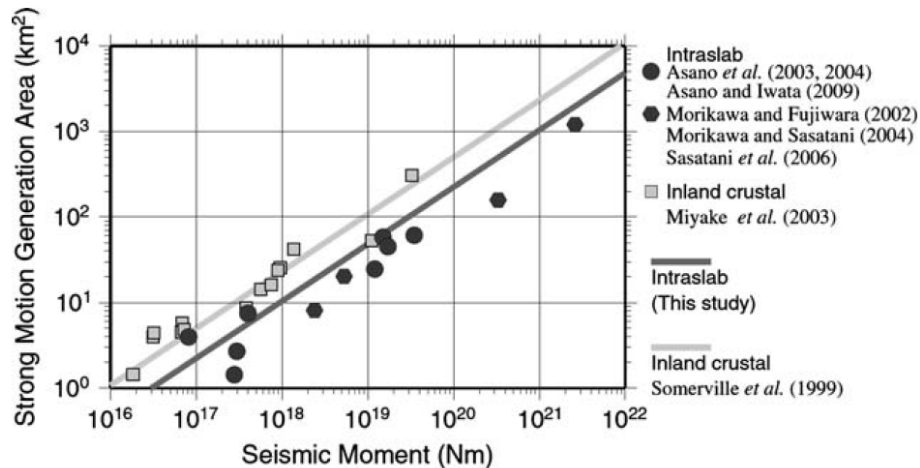


図2 スラブ内地震の強震動生成領域の地震規模依存性。●はスラブ内地震で、黒線が(2)式のアスペリティ面積の関係式<sup>7)</sup>。

### 3. スラブ内地震の特性化震源モデルとモデル設定手法

震源モデルの構築の手順は、日本建築学会<sup>14)</sup>のスラブ内地震の震源の設定を参考に、震源断層が特定できる場合(歴史的にスラブ内地震の経験がある)とし、断層パラメータの設定は以下の手続きで行う。

- [1] 地震規模を設定する
- [2] 経験式(1)及び(2)から断層面積、アスペリティ総面積を設定する
- [3] 震源断層は正方形(長さと同幅)と仮定する
- [4] 震源断層の走向、傾斜角、すべり角は想定地域のメカニズムを用いる
- [5] アスペリティは1つもしくは2つを仮定する。アスペリティが2つの場合の応力降下量は同じと仮定する
- [6] いくつかの破壊様式を設定する

この手続きによって、2001年芸予地震及び2003年宮城沖の地震についての強震動シミュレーションを行う。双方とも、余震記録を経験的グリーン関数として用いた経験的グリーン関数法によってシミュレーションを行った。

#### 3.1 2001年芸予地震

地震規模及び震源断層のメカニズムは、2001年芸予地震( $M_j 6.7$  震源深さ51km)の震源モデル<sup>15)</sup>と余震分布を参照した。経験的グリーン関数としては、メカニズムの似通った2001年3月26日5時41分の $M_w 5.1$ のイベントの記録を用いている。この余震の震源パラメータは、Asano et al.<sup>16)</sup>によって求められている断層サイズやライズタイムを用いる。断層面は単純化して1枚とした。アスペリティは1個の場合と2個の場合、また破壊開始は北からと南からの計4通りのモデルを構築した。震央に近い周囲の強震観測点において波形シミュレーションを行い、計測震度を求めて観測値と比較した。図3には余震分布と震源近傍の強震観測点分布を示した。図4にはシミュレーション波形(アスペリティ2個、北震源破壊モデル)を観測波形と比較している。やや過大評価になっている点もあるが、全体の傾向は再現していると考えている。シミュレーション波形は水平2成分を示しており、加速度、速度、変位波形を示すことによって広帯域での一致度を見ることが出来る。図5には4ケースによるシミュレーション波形から求めた計測震度を観測のそれと比較した。ケース毎に異なった予測値が出ているが、平均的には予測値は2001年芸予地震の観測値とよい相関を示していると考えられる。このイベントにおいては、本手法で提案された特性化震源モデルによって観測値を再現することがわかった。

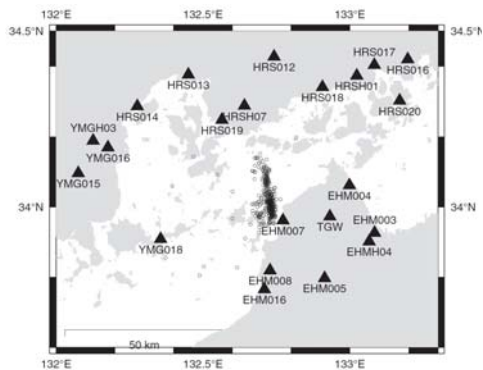


図3 2001年芸予地震の余震分布と強震動シミュレーションを行った観測点。

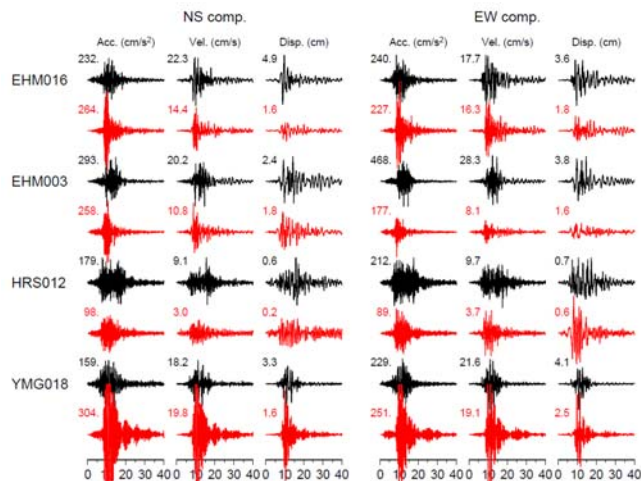


図4 観測（各上段、黒）波形と合成波形（下段、赤）の比較。

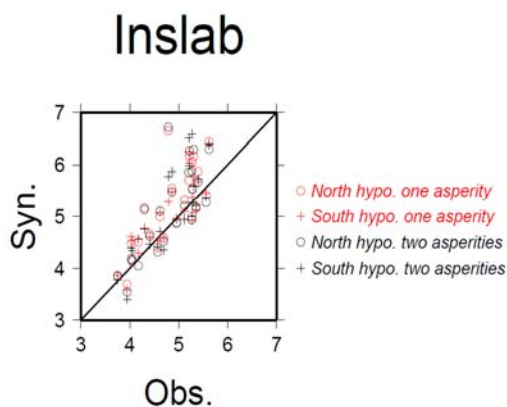


図5 4つの地震シナリオに基づく予測震度値と観測値の比較。

### 3.2 2003年宮城沖の地震

2003年5月26日18時24分に発生した $M_j7.1$ の宮城県沖のスラブ内地震をターゲットにしたモデリングを考える。震源深さは72.03kmで、前述の2001年芸予地震より深いイベントであり、いくつかの強震観測点では最大加速度で1gを超えるような強震動が観測された。特性化震源モデル構築手法に従って、以下のような想定震源モデルを構築する。

- [1] 地震規模 $M_w7.0$ を仮定する。
- [2] 経験式(1)及び(2)から断層面積702km<sup>2</sup>、アスペリティ総面積111km<sup>2</sup>を与える。
- [3] 震源断層は正方形を仮定。
- [4] 震源断層の走向、傾斜角は浅野・他<sup>17)</sup>を参照して、余震分布から1枚断層モデルで、N190度E, 69度をそれぞれ与える。

強震動シミュレーションは、メカニズムが似通っている2003年5月27日0時44分に起きた $M_j4.9$ の余震記録を用いた。このイベントの震源パラメータは浅野・他<sup>17)</sup>の値を用いた。これによって推定された震度分布や最大速度、最大加速度は、観測のそれらを下回る点が多く見られた。そこでIwata and Asano<sup>7)</sup>に示されている、断層面積やアスペリティ面積を標準偏差分小さくしたモデルを構築し、それによる強震動シミュレーションを行った。断層面積は1/1.4倍、アスペリティ面積は1/1.64倍となり、応力降下量としてはアスペリティ58MPa、背景領域6MPa程度となる。これによってシミュレートされた地震動を図6に

示す。図7には平均的な経験式で求められた合成波形の震度値及び標準偏差分面積を小さくしたモデルによる合成波形の震度値を観測値と比較している。標準偏差分小さくしたモデルによって観測地震動レベルが再現されていることがわかる。

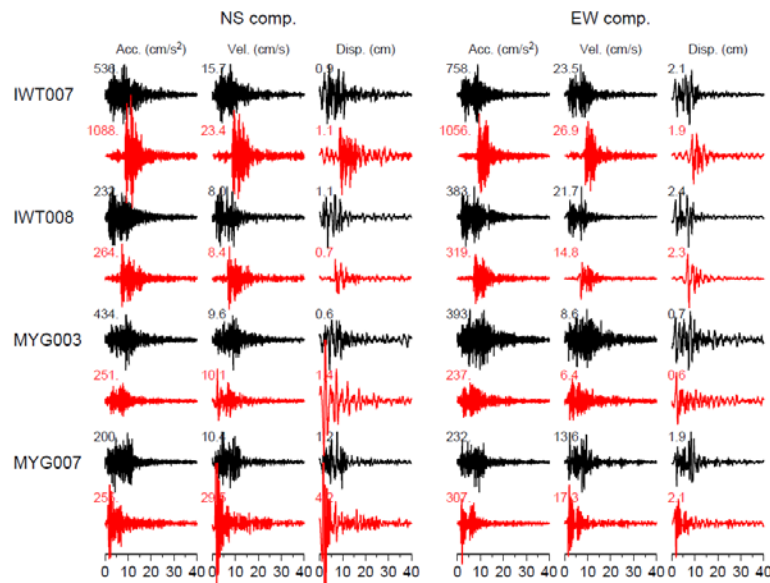


図6 観測（各上段、黒）波形と合成波形（下段、赤）の比較

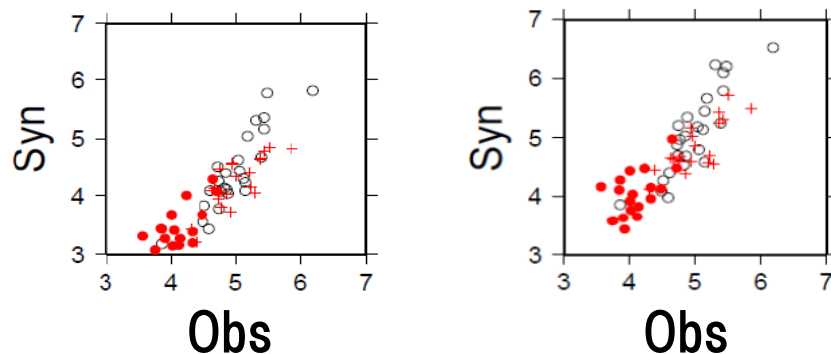


図7 合成波形による計測震度と観測震度の比較。平均モデル(左)と標準偏差分小さくしたモデル(右)。

#### 4. 議論とまとめ

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について、内陸地殻内地震の場合と同様の不均質すべりモデルのコンパイルと強震動生成領域とアスペリティの比較を行った。その結果、内陸地殻内地震の時と同様の特性化震源モデルを提案することができ、そのモデルの妥当性を既往地震のシミュレーションによって検証した。

2001年芸予地震においては提案経験式を用いて観測値をほぼ再現できたが、2003年宮城沖の地震においては、提案経験式では過小評価となり、標準偏差分、断層面積およびアスペリティを小さくした、つまり応力降下量を大きくしたモデルによって観測値を再現することを確認した。この原因は、2001年芸予地震、及び2003年宮城沖の地震の応力降下量が、前者が平均的なものであるのに比べて、後者がやや大きいことに起因している。Iwata and Asano<sup>7)</sup>でコンパイルされているイベントやAsano *et al.*<sup>18)</sup>の強震動生成領域サイズと地震モーメントから見積もられる応力降下量は深さ依存性を示しており、予測においては震源深さを考慮する必要がある。しかしながら、震源深さを考慮した経験式の提案を行うにはデー

タ量が十分でないため、現時点においては、パラメータのバラツキとして、応力降下量の大きいモデルによるモデルシミュレーションを行うことにより、想定地震動を評価するのがよいと考えられる。今後も別のイベントでの検証や、他のモデル構築手法<sup>12),13)</sup>との関係を調べていく。

## 謝 辞

(独)防災科学技術研究所 K-NET、KiK-net の強震記録を用いました。図の作成には GMT<sup>19)</sup>を使用しました。本研究は首都直下地震防災・減災特別プロジェクトの一環として実施しました。

## 参考文献

- 1) Somerville, P., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith, and A. Kowada : Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seism. Res. Lett.*, 70, 1999, pp.59–80.
- 2) Mai, P. M. and G. C. Beroza : Source-scaling properties from finite-fault rupture models, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 90, 2000, pp.604-615.
- 3) Murotani, S., H. Miyake and K. Koketsu : Scaling of characterized slip models for plate-boundary earthquakes, *Earth Planets Space*, 60, 2008, pp.987–991.
- 4) Miyake, H., T. Iwata and K. Irikura : Source characterization for broadband ground-motion simulation: Kinematic heterogeneous source model and strong motion generation area, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93, 2003, pp.2531–2545.
- 5) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, *Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp., Tokyo*, 1986, pp.151-156.
- 6) 文部科学省地震調査研究推進本部：強震動予測地図、[http://www.jishin.go.jp/main/p\\_hyoka04.htm](http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka04.htm)、2010
- 7) Iwata, T. and K. Asano : Characterization of Heterogeneous Source Model of Intraslab Earthquakes toward Strong Ground Motion Prediction, *Pure Appl. Geophys.*, 2010, in printing.
- 8) 岩田知孝、浅野公之：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、2010年、pp.129-135.
- 9) Boatwright, J. : The seismic radiation from composite model of faulting, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 78, 1988, pp.489–598
- 10) 入倉孝次郎：強震動予測レシピー—大地震による強震動の予測手法—、京都大学防災研究所年報、47A、2004年、pp.25-46.
- 11) Irikura, K. and H. Miyake: Recipe for predicting strong ground motion from crustal earthquake scenarios, *Pure Appl. Geophys.*, 2010, doi:10.1007/s00024-010-0150-9.
- 12) 笹谷 努、森川信之、前田宣浩、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、2006年、pp.123–134.
- 13) 壇一男、武藤尊彦、宮腰淳一、渡辺基史：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、2006年、pp.35-42.
- 14) 日本建築学会：最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成法、2009、163pp.
- 15) Kakehi, Y. : Analysis of the 2001 Geiyo, Japan, earthquake using high-density strong ground motion data: Detailed rupture process of a slab earthquake in a medium with a large velocity contrast, *J. Geophys. Res.*, 109, 2004, B08306, doi:10.1029/2004JB002980.
- 16) Asano, K., T. Iwata and K. Irikura : Source characteristics of shallow intraslab earthquakes derived from strong-motion simulations, *Earth Planets Space*, 55,2003, pp. e5-e8.
- 17) 浅野公之、岩田知孝、入倉孝次郎：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、地震第2輯、57、2004年、pp.171-185.
- 18) Asano, K., T. Iwata and K. Irikura : Characterization of source models of shallow intraslab earthquakes using strong motion data, *Proc. 13th World Conf. Earthq. Eng.*, paper no. 835, 2004.
- 19) Wessel, P. and W. H. F. Smith : New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans AGU*, 79, 1998,679.