

### 3. 4. 2 震源断層モデル化手法の高度化に関する調査研究

#### (1) 業務の内容

##### (a) 業務の目的

「震源モデル等の構築」に関連する。広帯域強震動生成に関係するすべり分布や応力降下量、破壊様式といった震源断層のパラメータの把握とその地域性・深さ依存性についての分析を行う。そのため、既往のプレート境界地震、スラブ内地震を中心とした震源断層モデルの収集及び広帯域地震波を用いた震源過程の解析による結果の分析を行い、首都直下で発生する地震に対する震源断層モデルの高度化に寄与する。

##### (b) 平成23年度業務目的

- 1) スラブ内地震の強震動予測のために、これまでの調査研究で得られた震源断層パラメータ、地域性・深さ依存性の分析結果を分析結果保存用記憶装置に保管、管理を行うとともに、特性化震源モデルを改良・検証し、スラブ内地震の強震動予測のためのモデル構築手法を提案する。
- 2) 海外で開催される会議や学会において、スラブ内地震の強震動予測のための特性化震源モデルの構築・改良・検証の成果を発表する。また、各国から参加する研究者との議論を通じて、本プロジェクトの目標達成に有益な情報を収集するため、「表層地質が地震動に与える影響」第4回国際シンポジウム（8月、米国）、米国地球物理学連合秋季大会（12月、米国）などに出席する。
- 3) 「震源モデル等の構築」にこれまでの研究成果のうち強震動予測のためのスラブ内地震の震源モデル構築手法を提供し、震源断層モデルのモデル化の研究成果取りまとめに協力する。

##### (c) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
京都大学防災研究所	教授	岩田知孝	
京都大学防災研究所	准教授	関口春子	
京都大学防災研究所	助教	浅野公之	

#### (2) 平成23年度の成果

##### (a) 業務の概要

- 1) スラブ内地震の強震動予測のために、これまでの調査研究で得られた震源断層パラメータ、地域性・深さ依存性の分析結果を分析結果保存用記憶装置に保管、管理を行うとともに、特性化震源モデルを改良・検証し、スラブ内地震の強震動予測のためのモデル構築手法を提案した。

具体的には、平成22年度までの震源パラメータの分析結果をもとに提案しているスラブ内地震の強震動予測のための特性化震源モデルに基づき、2011年4月7日に起きた宮城県沖スラブ内地震の強震動評価を行った。平均－標準偏差モデル（応力降下量が多い）

によって観測強震動の特徴が説明できることがわかった。この改良・検証結果およびこれまでの調査研究による震源パラメータの地域性や深さ依存性の分析結果をとりまとめ、スラブ内地震の強震動予測のための特性化震源モデル構築手法を提案した。

2) 海外で開催される会議や学会において、スラブ内地震の強震動予測のための特性化震源モデルの構築・改良・検証の成果を発表した。また、各国から参加する研究者との議論を通じて、本プロジェクトの目標達成に有益な情報を収集するため、「表層地質が地震動に与える影響」第4回国際シンポジウム（8月、米国）、米国地球物理学連合秋季大会（12月、米国）などに出席した。

3) 「震源モデル等の構築」にこれまでの研究成果のうち強震動予測のためのスラブ内地震の震源モデル構築手法を提供し、震源断層モデルのモデル化の研究成果取りまとめに協力した。

## (b) 業務の成果

### 1) スラブ内地震の強震動予測のための特性化震源モデル構築手法の提案と検証

#### a) はじめに

平成 20 年度までにスラブ内地震震源モデルの不均質すべりモデルのデータを収集し、Somerville et al. (1999)<sup>1)</sup>の方法に従って、断層面積( $S$ )、アスペリティ総面積( $S_a$ )、平均すべり量( $D$ )を求め、特性化に利用できる地震モーメントに対する経験式を提案した (Iwata and Asano, 2011<sup>2)</sup>)。

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

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

$$D(\text{cm}) = 2.25 \times 10^{-5} M_0^{1/3} \quad (3)$$

( $M_0$ の単位は Nm)。

この経験式に基づいて、これまで 1987 年千葉県東方沖地震、2001 年芸予地震及び 2003 年宮城県沖のスラブ内地震の震源のモデル化を行い、経験的グリーン関数法や統計的グリーン関数法を用いて合成波形を求め、観測波形と PGA、PGV、計測震度といった指標で比較を行った。1987 年千葉県東方沖地震については、統計的グリーン関数法によって面的な地震動評価を行い、震度分布との比較を行った。1987 年千葉県東方沖地震、2001 年芸予地震に対してはよい再現が行われたが、2003 年宮城県沖地震については、上記の経験式(平均値)では過小評価となっていたため、標準偏差分、断層面積及びアスペリティ面積を小さく設定したモデルに基づいて合成波形を推定すると、観測値をほぼ説明することがわかった (岩田・浅野、2010<sup>3)</sup> など)。

本検討では、新たに使用できるデータとして、2011 年 4 月 7 日に起きた宮城県沖のスラブ内地震を対象として強震動評価を行い、本特性化震源モデルの適用性を検討し、それらの結果から、スラブ内地震の強震動予測のための特性化震源モデルの提案を行った。

#### b) 2011 年 4 月 7 日の宮城県沖の地震の概要

2011 年 4 月 7 日 23 時 32 分頃に宮城県沖、牡鹿半島の東方でマグニチュード 7.4 の地震が発生し、最大震度 6 強を観測した。この地震の震源深さは 66km (気象庁、2011<sup>4)</sup>)

で、太平洋プレート内で生じ、メカニズムは西北西—東南東に圧縮軸を持つ逆断層タイプの地震であった。ここでは DD 法による余震位置の再決定を行い、東下がりの断層面であることが指摘されている(気象庁, 2011<sup>4)</sup>)。同様の結果は東北大学大学院理学研究科地震・火山噴火予知研究センター(2011)<sup>5)</sup>によっても得られている。これからは、地震活動から推定される4月7日の地震の破壊域は、Kita et al.(2010)<sup>6)</sup>により推定された太平洋プレート内における応力中立面(太平洋プレート上面より約22kmの深さ)を超えておらず、Downdip compression 場内にとどまっていることが指摘されている。図1には東北大学地震・火山噴火予知研究センターによる余震分布を示す。

### c) 震源モデルの設定とシミュレーション結果

本イベントの K-NET や KiK-net による観測強震動記録をターゲットとして、震源モデル化手法によってモデル設定を行い、強震動評価を行った。評価手法は、経験的グリーン関数法を用いた。4月9日18時42分に発生した Mw5.4 の余震記録を経験的グリーン関数とし、余震分布を参考にして、断層面設定を行った。断層面は東落ちの面を採用し、走向20度、傾斜角40度(F-net)とした。

震源モデルの構築の手順は、本業務で行ってきた方法に加えて、日本建築学会(2009)<sup>7)</sup>のスラブ内地震の震源の設定法も参考に、起きた地震の断層パラメータを参考にして以下の手続きで行う。

- [1] 地震規模を設定する。Mw7.1 を与える。
- [2] 経験式(1)及び(2)から断層面積、アスペリティ総面積を決める。それぞれ、861km<sup>2</sup>、136km<sup>2</sup>となる。
- [3] 震源断層は正方形(長さと同幅が等しい)と仮定する。
- [4] 震源断層の走向、傾斜角は4月7日の本震のメカニズムを用いる。走向20度、伏角40度を与える。
- [5] アスペリティは1つもしくは2つを仮定する。ここでは1つを破壊開始点あたりに与えた。
- [6] 破壊開始点、破壊様式を選択をする。破壊開始点と破壊領域(全体領域)の関係は4月7日の本震の余震分布を参考としている。

この平均値パラメータを用いた地震動シミュレーションを行うと、最大加速度、最大速度、計測震度が過小評価になることがわかった。これは2003年宮城県沖地震の例でも経験したことである。そこで、断層面積全体及びアスペリティ面積全体のサイズをデータセットの標準偏差分だけ小さくし、これによって応力降下量を大きくする「平均—標準偏差」モデルを設定した。上記のプロセスにおいて[2]の値が異なる。

断層面積の標準偏差が1.4、アスペリティ面積のそれが1.64であるので<sup>2)</sup>、それらから「平均—標準偏差」モデルは、断層面積とアスペリティ面積はそれぞれ615km<sup>2</sup>、83km<sup>2</sup>となる。ここから、25×25km<sup>2</sup>、9×9km<sup>2</sup>と設定した。図2に「平均—標準偏差」パラメータを用いた震源断層モデルである。

図 2 の震源モデルに基づいて強震動シミュレーションを行い、最大加速度、最大速度、計測震度値を観測値と比較したものを図 3 に示す。この図から系統的な過小、過大評価もなく、観測された強震動を適切に評価できていると考えられる。

本業務においてはスラブ内地震の強震動予測のための特性化震源モデルの構築に関して、断層面積、アスペリティ面積の地震規模との関係式を提案して、それをもとにモデル構築手法のプロトタイプを提案した。その方法に従い、1987 年千葉県東方沖地震、2001 年芸予地震、2003 年及び 2011 年の宮城県沖地震の強震動評価を行った。宮城県沖の地震については、平均モデルでは地震動が過小評価されたため、面積で拘束しているパラメータ設定手法であることから、断層面積とアスペリティ面積を標準偏差分だけ小さくした高応力降下量モデルを設定し、それによるシミュレーションを行った。宮城県沖の 2 つのイベントの震度分布等はよく再現され、「平均－標準偏差」モデルによる評価が妥当であることを示した。なお、モデルの応力降下量は、平均モデルの場合、全体及びアスペリティにおいて 4.6MPa、28.9MPa、「平均－標準偏差」モデルではそれぞれ、7.6MPa、56MPa である。

表 1 には各イベントの適切な評価モデルの一覧を示した。

表 1 各イベントの評価モデル

イベント	プレート	震源深さ	適切なモデル
1987 年千葉県東方沖地震	太平洋プレート	58km	平均
2001 年芸予地震	フィリピン海プレート	51km	平均
2003 年 5 月宮城県沖地震	太平洋プレート	71km	平均－標準偏差 (高応力降下量)
2011 年 4 月宮城県沖地震	太平洋プレート	66km	平均－標準偏差 (高応力降下量)

この表に見られるように、2 つの宮城県沖地震は他の 2 イベントに比較して、震源深さが若干深いことを指摘できる。2001 年芸予地震及び 2003 年宮城県沖地震の震源パラメータはもともとのアスペリティサイズ、断層面積予測式 (Iwata and Asano, 2010) <sup>2)</sup> に用いられている。Iwata and Asano (2010)<sup>2)</sup> の不均質すべりモデルのデータベースを用いて、震源深さに各アスペリティの応力降下量をプロットしたものが図 4 である。深さ 30－70km のデータ量が多い部分を見ると、アスペリティの応力降下量の深さ依存性が見てとれる。

しかしながらそれより深いイベントが、ことさら応力降下量が大きい、というわけでもなく、またスラブ内地震のデータセットを見ると、同じような発生領域において、地震被害を引き起こすようなイベントが異なる深さで起きているわけではないので、現時点においては、地震想定を行う場合には、スラブ内地震の設定については、平均モデル及び平均－標準偏差モデルのシミュレーションを行い、どの程度の震動の割り増しがあるか、といったことを検討しておくのがよいと考える。

## 2) スラブ内地震の強震動予測のための特性化震源モデル構築等の成果発表

平成 23 年 8 月に米国サンタバーバラ市で開催された「表層地質が地震動に与える影響」第 4 回国際シンポジウムに出席し、「Construction of procedure of strong ground motion prediction for intraslab earthquakes based on characterized source model」という題目で、スラブ内地震の特性化震源モデルの構築と検証に関するこれまでの成果を発表した。また、12 月に米国サンフランシスコ市で開催される米国地球物理学会秋季大会に出席し、今年度の宮城県沖のスラブ内地震に対する特性化震源モデル構築手法の検証・改良の結果も踏まえて「A prototype of the procedure of strong ground motion prediction for intraslab earthquake based on characterized source model」という題目で、スラブ内地震の特性化震源モデル構築手法の提案に関する本業務の成果を発表する。上記の成果発表の場で強震動予測などの研究を行っている米国等の研究者と意見交換することで、本プロジェクトの目標達成と成果とりまとめのための有益な情報が得られた。

## 3) 震源断層モデル構築等の研究成果取りまとめへの協力

本業務での検証及び改良の成果に基づいて提案しているスラブ内地震の強震動予測のための震源断層モデル構築手法を、「震源断層モデル構築等」へ提供し、首都直下地震の震源断層モデル構築等の研究成果取りまとめに協力した。

### (c) 結論ならびに今後の課題

スラブ内地震の強震動予測のための特性化震源モデル構築手法の適用性検証を継続した。ここで行われた 4 つのイベントの例のもとで、モデル化手法の提案を行った。平均的な応力降下量モデルを用いるか、高応力降下量モデルを用いるかについての区別は現在までにはついていないが、ここでは地域特性として宮城県沖地震に関しては高応力降下量モデルの設定を強震動予測には用いることを指摘するとともに、強震動予測の枠組みとして、平均像に加えて、平均－標準偏差（高応力降下量モデル）の設定による予測を一般に考慮する必要性を指摘しておく。

本解析には防災科学技術研究所 K-NET、KiK-net データ、F-net モーメント解、気象庁震源情報を用いた。記して感謝いたします。

### (d) 引用文献

- 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., Vol.70, pp.59-80, 1999.
- 2) Iwata, T. and K. Asano: Characterization of Heterogeneous Source Model of Intraslab Earthquakes toward Strong Ground Motion Prediction, Pure Appl. Geophys., Vol.168, pp.117-124, 2011
- 3) 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と検証, 第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1893-1898, 2010.

- 4) 気象庁、平成 23 年 4 月地震・火山月報（防災編），338pp., 2011.
- 5) 東北大学大学院理学研究科地震・火山予知研究センター：  
[http://www.aob.geophys.tohoku.ac.jp/info/topics/20110311\\_news/seika.html](http://www.aob.geophys.tohoku.ac.jp/info/topics/20110311_news/seika.html), 2011.
- 6) Kita, S., T. Okada, A. Hasegawa, J. Nakajima, and T. Matsuzawa: Existence of interplane earthquakes and neutral stress boundary between the upper and lower planes of the double seismic zone beneath Tohoku and Hokkaido, northeastern Japan, *Tectonophysics*, Vol.496, pp.68-82, 2010.
- 7) 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, 164pp, 2009.

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表場所（学会等名）	発表時期	国際・国内の別
Validation of Characterized Source Model of Intraslab Earthquakes for Strong Ground Motion Prediction (Poster)	Iwata, T., K. Asano, and H. Sekiguchi	Seismological Society of America Annual Meeting	2011年4月	国際
Construction of procedure of strong ground motion prediction for intraslab earthquakes based on characterized source model (Poster)	Iwata, T., K. Asano, and H. Sekiguchi	4th International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion	2011年8月	国際
A prototype of the procedure of strong ground motion prediction for intraslab earthquake based on characterized source model (Poster)	Iwata, T., K. Asano, and H. Sekiguchi	American Geophysical Union, Fall meeting	2011年12月	国際

学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載論文（論文題目）	発表者氏名	発表場所（雑誌等名）	発表時期	国際・国内の別
Construction of procedure of strong ground motion prediction for intraslab earthquakes based on	Iwata, T., K. Asano, and H. Sekiguchi	Proceedings of the 4th International Symposium on the Effect of Surface	2011年8月	国際

characterized source model		Geology on Seismic Motion		
-------------------------------	--	------------------------------	--	--

(f) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

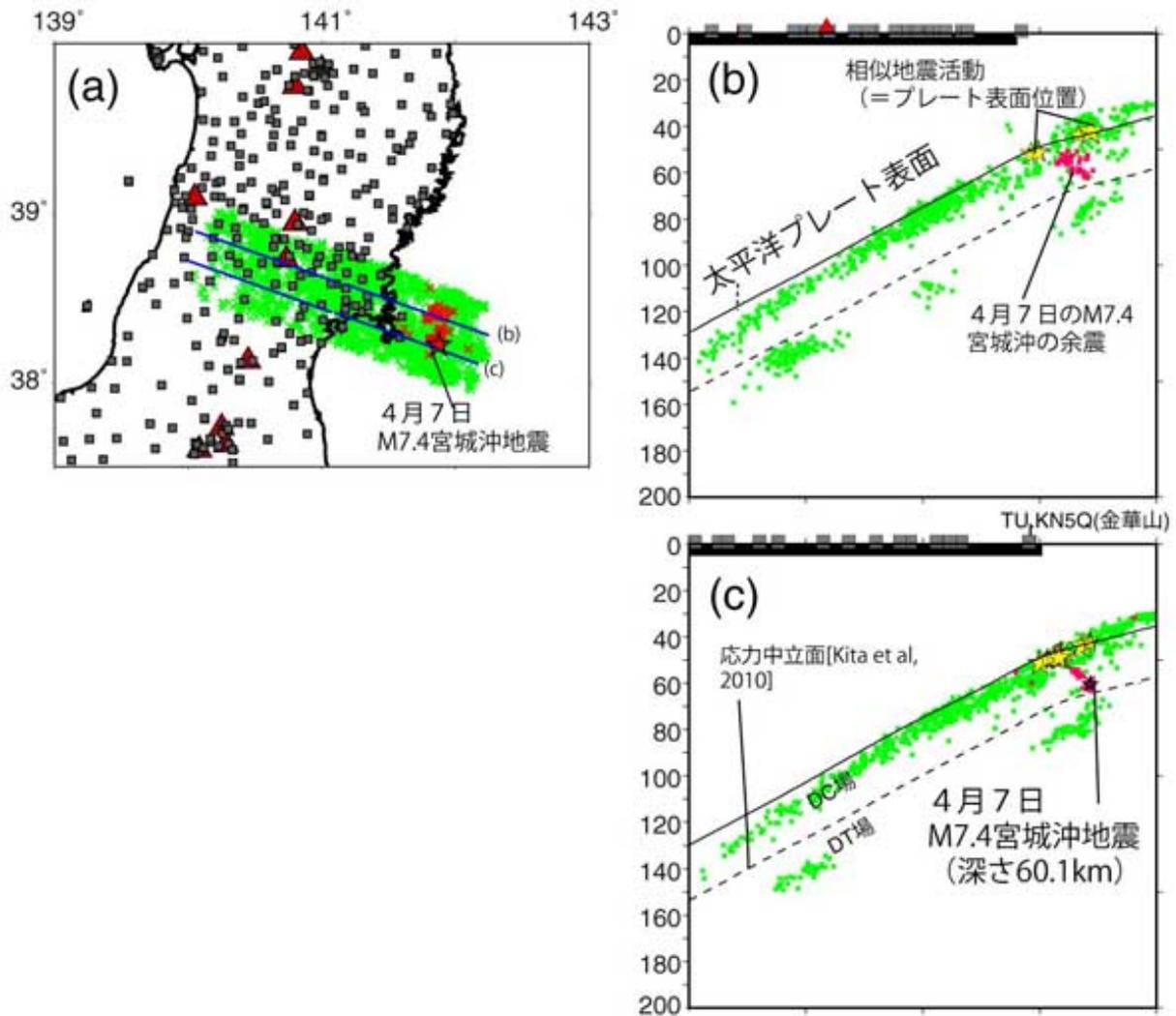


図1 2011年宮城沖地震の余震分布と2重深発面との関係（東北大学大学院理学研究科地震・火山噴火予知研究センター（[http://www.aob.geophys.tohoku.ac.jp/info/topics/20110311\\_news/seika.html](http://www.aob.geophys.tohoku.ac.jp/info/topics/20110311_news/seika.html)）による。

Strike N20E →

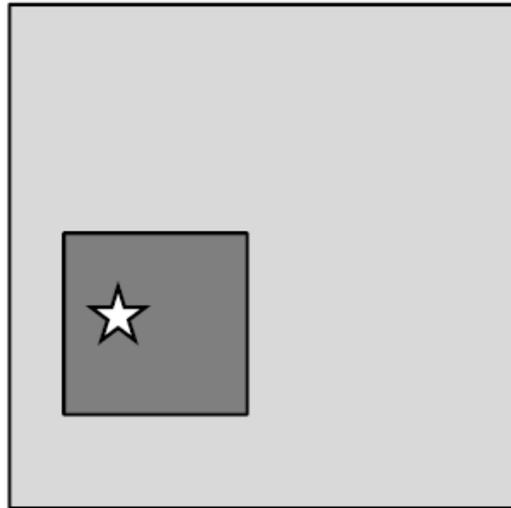


図2 2011年4月宮城沖地震の強震動予測のための特性化震源モデルの模式図。  
濃灰色はアスペリティ、淡灰色は背景領域、星印は破壊開始点。

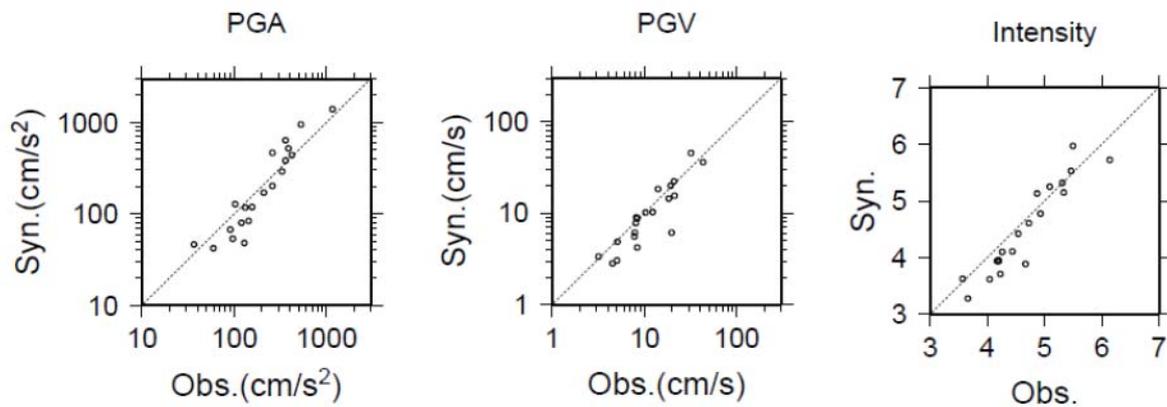


図3 強震観測波形とシミュレーションによる最大加速度、最大速度、計測震度の比較。  
モデルシミュレーションは、「平均-標準偏差」モデルで行われた。

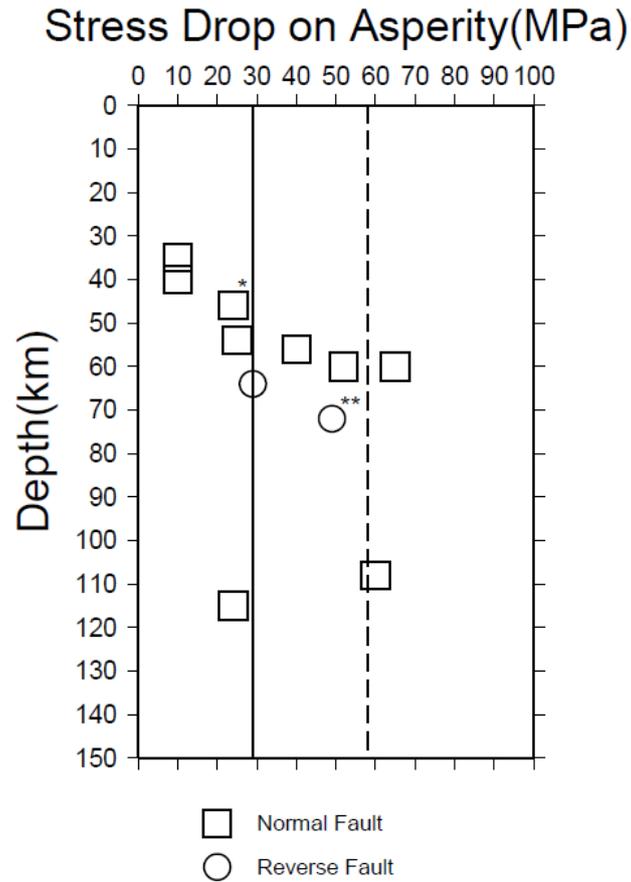


図4 Iwata and Asano (2010)<sup>2)</sup>のデータベースを用いて見積もられたアスペリティでの応力降下量の深さ依存性。実線・波線はそれぞれ「平均」モデル、「平均-標準偏差」モデルのアスペリティでの応力降下量値。