

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

震源断層モデル等の構築のため、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21年度業務目的

平成20年度までに実施したすべり分布の不均質性の特性化に基づく成果を反映させた震源モデル構築手法に従って、既存のスラブ内地震の強震動評価を行い、その妥当性や適用性を検討するとともに、強震動予測の高度化に向けたパラメータの整理を行う。対象とする地震としては、2003年宮城沖、2001年芸予地震等とする。いくつかの破壊シナリオを設定し、経験的グリーン関数法、及び統計的グリーン関数法による強震動シミュレーションを行い、観測強震記録と比較して、モデル構築手法の適用性を検討する。

(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21年度の成果

(a) 業務の要約

- ・平成20年度までに実施したすべり分布の不均質性の特性化に基づく成果を反映させた震源モデル構築手法に従って、2001年芸予地震と2003年宮城沖地震を想定した震源モデルを構築した。
- ・フィリピン海スラブ内の地震である2001年芸予地震に対しては、破壊シナリオを想定し、経験的グリーン関数法によって強震動シミュレーションを行い、観測強震記録の計測震度等による再現性を調べ、震源モデル構築手法の妥当性を検討した。標準的な震源モデルパラメータによってほぼ適切な観測の再現ができることを確認し、震源モデル構築手法が適切であることを確認した。
- ・太平洋スラブ内の地震である2003年宮城沖地震に対しては、本地震の震源モデルを参照して、複数の破壊シナリオでスラブ内地震のための震源モデルを構築するとともに強震動シミュレーションのための経験的グリーン関数の選択を行った。

(b) 業務の成果

1) はじめに

平成 20 年度において、スラブ内地震の震源断層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)の方法¹⁾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、震源断層モデルの特性化に利用できる地震モーメント(M_0)に対する以下の 3 つの経験式を提案した。

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

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

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

ここで M_0 の単位は Nm である。

また、2008 年 7 月岩手県沿岸北部の地震の広帯域強震動シミュレーションを行い、強震動生成領域を見積もり、強震波形インバージョンによる震源モデルとの比較を行って特性化震源モデル構築方法を検討した。その結果、強震動生成領域は波形インバージョンによるすべりの大きい部分に対応していることがわかった。この検討から、既往のスラブ内地震のアスペリティと強震動生成領域の位置の対応があることがわかった。今年度はこれらの検討結果を踏まえて、強震動予測のためのスラブ内地震の特性化震源モデル構築方法のプロトタイプを示すとともに、既往のスラブ内地震に対する強震動シミュレーションを行い観測強震記録と比較することで、スラブ内地震の特性化震源モデル構築手法の妥当性や適用性の検証を行った。

2) スラブ内地震の特性化震源モデルの構築

図 1 でスラブ内地震についてのアスペリティの面積の経験式 (2 式) と広帯域強震動シミュレーションから求められた強震動生成領域の面積との比較を行っている。スラブ内地震の強震動生成領域はアスペリティサイズとほぼ同じか、やや小さいことがわかる。ここでは強震動生成領域とアスペリティサイズは位置とサイズが同じであると仮定する。よって、スラブ内地震の特性化震源モデルとしては、既往の研究による地殻内地震のそれ (入倉・他, 2003)²⁾と同様なモデル化が可能である。すなわち、アスペリティモデルに基づき、アスペリティと背景領域で構成されるモデルを作成することができる。Boatwright (1988)のアスペリティモデル³⁾に、(1)と(2)によって与えられる、ある規模の地震に対する断層面積とアスペリティ面積の値をあてはめて、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。一方、内陸地殻内地震のそれらは、Somerville et al. (1999)¹⁾の式からそれぞれ 2.3 MPa、10.5 MPa であり、アスペリティにおいて、平均的な地殻内地震とスラブ内地震では約 3 倍の応力降下量の違いがある。

震源モデルの構築の手順は、日本建築学会(2009)⁴⁾のスラブ内地震の震源の設定を参考にして、震源断層が特定できる場合 (歴史的にスラブ内地震の発生場所や規模が特定されており、類似の地震が想定震源域で再び発生する) とし、強震動評価のための震源断層パラメータの設定は以下の手続きで、いくつかの仮定をおきながら行うこととする。

[1] 想定すべき地震規模を設定する。

[2] スケーリング経験式(1)及び(2)から断層面積、アスペリティ総面積を決める。

- [3] 震源断層の形状に関する詳しい情報がない限り、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、すべり角は想定地域の地震の震源メカニズムを用いる。
- [5] アスぺリティは 1 つもしくは 2 つを仮定する。アスぺリティが 2 つの場合の応力降下量は同じと仮定する。
- [6] 破壊開始点、破壊様式の選択をする。

以上をスラブ内地震の特性化震源モデル構築手続きのプロトタイプとする。本方法に基づいて、次項では強震動シミュレーションを行う。また比較のために、地殻内地震の特性化震源モデルパラメータを用いた場合の強震動シミュレーション結果も示して、議論を行う。

3) 想定震源モデルの構築と強震動シミュレーション

a) 2001 年芸予地震の場合

2001 年 3 月 24 日に発生した 2001 年芸予地震は、 $M_j6.7$ 、震源深さ 46 km の正断層型のスラブ内地震であり、最大で震度 6 弱の揺れが観測された。この地震は 1995 年兵庫県南部地震後に整備された強震観測網において本震及び余震記録が良好に観測され、また震源域を囲むように記録が得られていることから、本方法の検証として用いることとした。各パラメータの設定は以下になる。

- [1] 想定地震規模を $M_w6.8$ と仮定する。
- [2] 経験式(1)及び(2)から断層面積 484 km^2 、アスぺリティ総面積 77 km^2 を与える。
- [3] 震源断層は正方形を仮定する。
- [4] 震源断層の走向、傾斜角は 2001 年芸予地震の余震分布から 1 枚断層モデルを与える。すなわち走向は $N180^\circ E$ 、傾斜角は 59° である。
- [5] アスぺリティは 1 つもしくは 2 つを仮定する。
- [6] 破壊開始点は北から破壊する場合と南から破壊する場合の 2 通りを行う。破壊開始点からは円形に破壊が広がると仮定する。

上記[5]及び[6]により、ここでは 4 通りの想定地震シナリオを仮定した。図 2 に、地震モーメントと断層面積、アスぺリティ総面積との関係式に[2]の結果を示す。図 3 には設定した震源断層モデルの模式図を示す。比較のために Kakehi (2004)によって、強震記録を用いた震源インバージョン解析により求められた 2001 年芸予地震の震源モデル⁵⁾(地震モーメント分布)を示している。Kakehi (2004)は余震分布から、走向方向と傾斜角方向の異なる 4 枚の断層面を仮定した震源断層面モデルを仮定し、3~4 つの複雑なアスぺリティ分布を求めている。それに比して特性化震源モデルは単純なモデル化になっている。

強震動シミュレーションは 2001 年芸予地震の余震記録を使った経験的グリーン関数法 (Irikura, 1986)⁶⁾により行った。経験的グリーン関数に用いた余震記録は、震源メカニズムの類似した 3 月 26 日 5 時 41 分に発生した $M_w5.1$ の地震のものを用いている。この震源パラメータ(断層サイズ)は Asano et al. (2003)⁷⁾の結果を参照した。震源域周辺の K-NET および KiK-net の強震観測点において広帯域強震動シミュレーションを行い、シミュレーシ

ョン波形から計測震度を計算して観測のそれと比較した。比較のために、内陸地殻内地震の特性化震源モデルの設定方法（入倉、2004）⁸⁾を行った場合に予測値がどのようなになるかを調べた。図4に余震分布と震源近傍の強震観測点分布を示した。図5には例として、シミュレーション波形（アスペリティ2個，北震源モデル）を観測波形と比較している。波形は水平2成分を示していて、加速度、速度、変位波形をそれぞれ示した。波形は、余震記録の低周波数側のSN比を考慮して、0.5 - 10Hzとし、波形の比較では本震にも同じフィルターをかけている。4方向の観測点での合成波形は観測波形の特徴をよく表しているといえる。これらの観測点のうち、YMG012の合成波形が、観測波形に比べて過大評価になっている。このような特徴は、震源の西の方向の観測点に顕著であり、これらのサイトの特徴ではなく、例えば小地震の震源特性（ディレクティビティの方向など）によるものと考えている。図6には内陸地殻内地震の震源パラメータによって計算された合成波形と比較している。合成波形は全体に過小評価となっていることがわかる。

図7には合成波形と観測波形の計測震度を比較している。スラブ内地震に対するパラメータを用いた4シナリオについての場合が左図に、地殻内地震のパラメータを用いた場合のものを右に示している。スラブ内地震の震源モデル構築手法に基づくシミュレーションの震度は観測震度とよい対応を示しており、本項で提案している震源モデル構築手法が妥当であることが指摘できる。シナリオ毎の違いは比較的小さい。一方、地殻内地震の場合のパラメータを用いた場合は、系統的に評価が小さくなっていることがわかる。

b) 2003年5月宮城県沖の地震を想定したケース

前述の2001年芸予地震の例にならい、2003年5月26日18時24分に発生した $M_J7.1$ の宮城県沖の逆断層型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 kmで、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ている（ g は重力加速度）。本研究で提案しているスラブ内地震の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] 想定地震規模を $M_W7.0$ と仮定する。
- [2] 経験式(1)及び(2)から断層面積702 km²、アスペリティ総面積111 km²を与える。
- [3] 震源断層は正方形を仮定する。
- [4] 震源断層の走向、傾斜角は浅野・他(2004)⁹⁾を参照し、余震分布から1枚断層モデルとして、走向N190°E、傾斜角69°をそれぞれ与える。
- [5] アスペリティは1つもしくは2つを仮定する。
- [6] 破壊開始点は北から破壊する場合と南から破壊する場合の2通りを行う。破壊開始点からは円形に破壊が進むと仮定する。

強震動シミュレーションは、2001年芸予地震と同じく、経験的グリーン関数法で行う。メカニズムが比較的近い、2003年5月27日0時44分に発生した $M_J4.9$ の余震記録を用いる。この例においてもスラブ内地震の震源パラメータに加えて、地殻内地震のそれによるシミュレーションを行い、比較議論する。

(c) 結論ならびに今後の課題

平成20年度までに実施したすべり分布の不均質性の特性化に基づく成果を反映させた震源モデル構築手法(Iwata and Asano, 2010¹⁰⁾)に従って、既存のスラブ内地震の強震動評価を行い、その妥当性及適用性を検討した。対象とする地震としては、2003年宮城県沖、2001年芸予地震とする。芸予地震については、いくつかの破壊シナリオを設定し、経験的グリーン関数法、及び統計的グリーン関数法による強震動シミュレーションを行った。また既往の内陸地殻内地震についての震源パラメータを設定した場合の予測地震動の違いについても議論した。観測強震記録と比較し、本提案手法が妥当であることを示した(岩田・浅野、2010¹¹⁾)。2003年宮城県沖の地震については、本提案手法に従って震源モデルの設定を行った。また、壇・他(2006)¹²⁾や笹谷・他(2006)¹³⁾が、強震動生成領域と短周期レベルのスケールリングを用いた強震動生成領域のみからなるスラブ内地震の震源モデルの提案を行っており、これらとの比較を今後検討する。

(d) 引用文献

- 1) Somerville, P., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N., and Kowada, A.: Characterizing Crustal Earthquake Slip Models for the Prediction of Strong Ground Motion, *Seism. Res. Lett.*, Vol.70, pp.59-80, 1999.
- 2) 入倉孝次郎, 三宅弘恵, 岩田知孝, 釜江克宏, 川辺秀憲, Dalguer, L.A.: 将来の大地震による強震動を予測するためのレシピ, *京都大学防災研究所年報*, Vol.46B, pp.105-120, 2003.
- 3) Boatwright, J.: The seismic radiation from composite models of faulting, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 78, 489-508, 1988.
- 4) 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.
- 5) 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.*, Vol.109, B08306, doi:10.1029/2004JB002980, 2004.
- 6) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, *Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp.*, pp.151-156, 1986.
- 7) Asano, K., Iwata, T., and Irikura, K.: Source characteristics of shallow intraslab earthquakes derived from strong-motion simulations, *Earth Planets Space*, Vol.55, pp.e5-e8, 2003.
- 8) 入倉孝次郎: 強震動予測レシピ—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*, Vol.47A, pp.25-46, 2004.
- 9) 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*, Vol.57, pp.171-185, 2004.
- 10) Iwata, T. and Asano, K.: Characterization of Heterogeneous Source Model of Intraslab Earthquakes toward Strong Ground Motion Prediction, *Pure Appl. Geophys.*, 2010, in press.
- 11) 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*, No.73, pp.129-135, 2010.
- 12) 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, No.600, 35-42, 2006.

- 13) 笹谷 努, 森川信之, 前田宜浩: 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, No.69, 123-134, 2006.

(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
強震動予測のためのスラブ内地震の不均質震源モデルの特性化(2)（口頭）	岩田知孝・浅野公之	日本地球惑星科学連合2009年大会	平成21年5月	国内
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（口頭）	浅野公之・岩田知孝	日本地球惑星科学連合2009年大会	平成21年5月	国内
強震動予測のためのスラブ内地震の不均質震源モデルの特性化(3)（口頭）	岩田知孝・浅野公之	日本地震学会2009年秋季大会	平成21年10月	国内
強震動予測のためのスラブ内地震の不均質震源モデルの特性化（口頭）	岩田知孝・浅野公之	平成21年度自然災害研究協議会北海道地区フォーラム「強震動研究シンポジウム」	平成21年11月	国内
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（口頭）	浅野公之・岩田知孝	平成21年度自然災害研究協議会北海道地区フォーラム「強震動研究シンポジウム」	平成21年11月	国内
Characterized Source Model of Intralab Earthquakes for Strong Ground Motion Prediction（口頭）	T. Iwata and K. Asano	アメリカ地球物理学連合2009年秋季大会	平成21年12月	国際
強震動予測のためのスラブ内地震の不均質震源モデルの特性化（口頭）	岩田知孝・浅野公之	平成21年度京都大学防災研究所研究発表講演会	平成22年2月	国内

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
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	岩田知孝・浅野公之	北海道大学地球物理学研究報告，第73号，pp.129-135	平成22年3月	国内
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	北海道大学地球物理学研究報告，第73号，pp. 137-147	平成22年3月	国内

マスコミ等における報道・掲載
なし

(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

(3) 平成22年度業務計画案

平成21年度に検証をはじめた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する。対象とする地震としては、太平洋プレート内で起きているスラブ内地震とする。いくつかの破壊シナリオを設定し、経験的グリーン関数や統計的グリーン関数法による強震動シミュレーションを行い、観測記録と比較して、モデル構築手法の適用性を検討する。

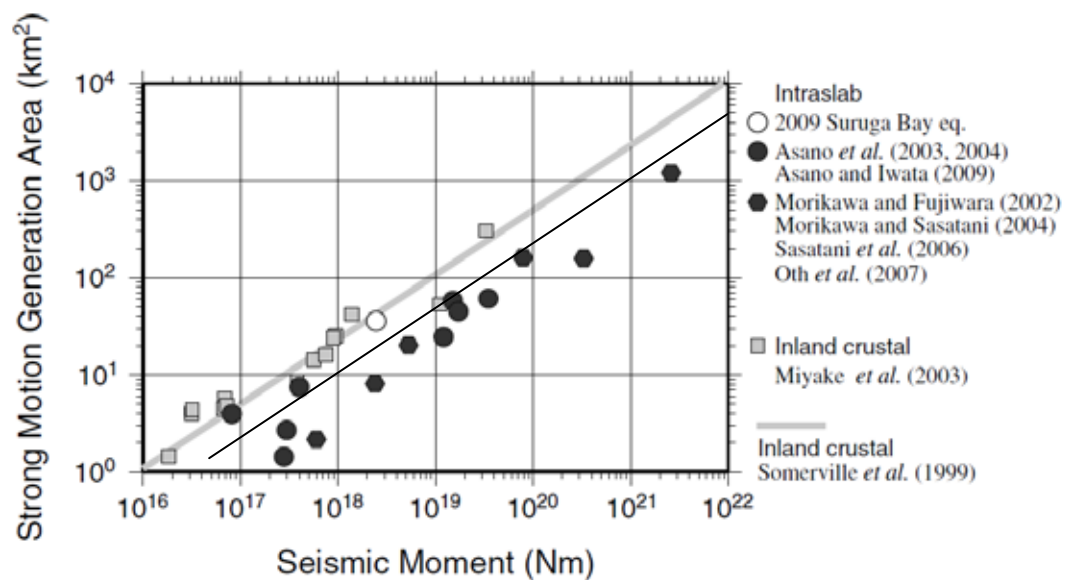


図 1 . 強震動生成領域と地震モーメントの関係の比較。黒丸はスラブ内地震の強震動生成領域の面積。黒実線はスラブ内地震のアスペリティ領域 (式 2) の面積。

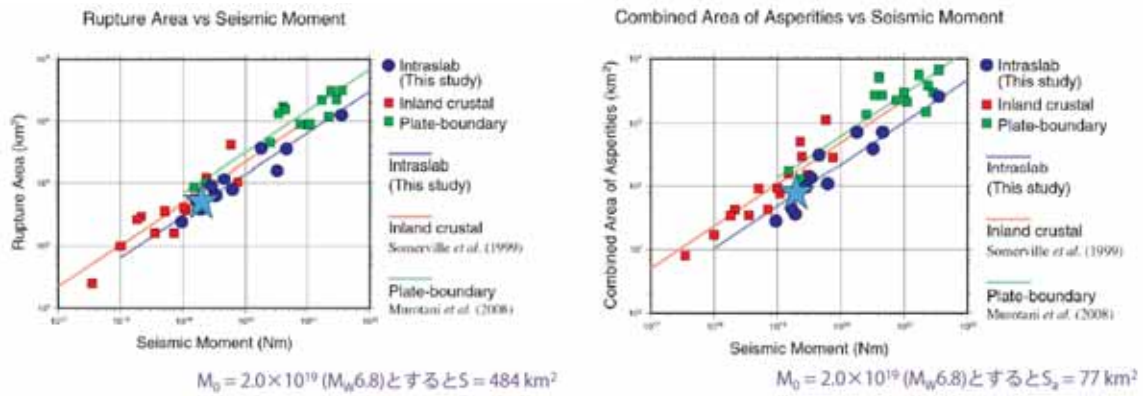


図 2 . 地震モーメントに対する破壊領域 (左) アスぺリティ領域 (右) の経験式と、2001 年芸予地震を想定したスラブ内地震の震源モデルで設定したモデルパラメータ (印) 。

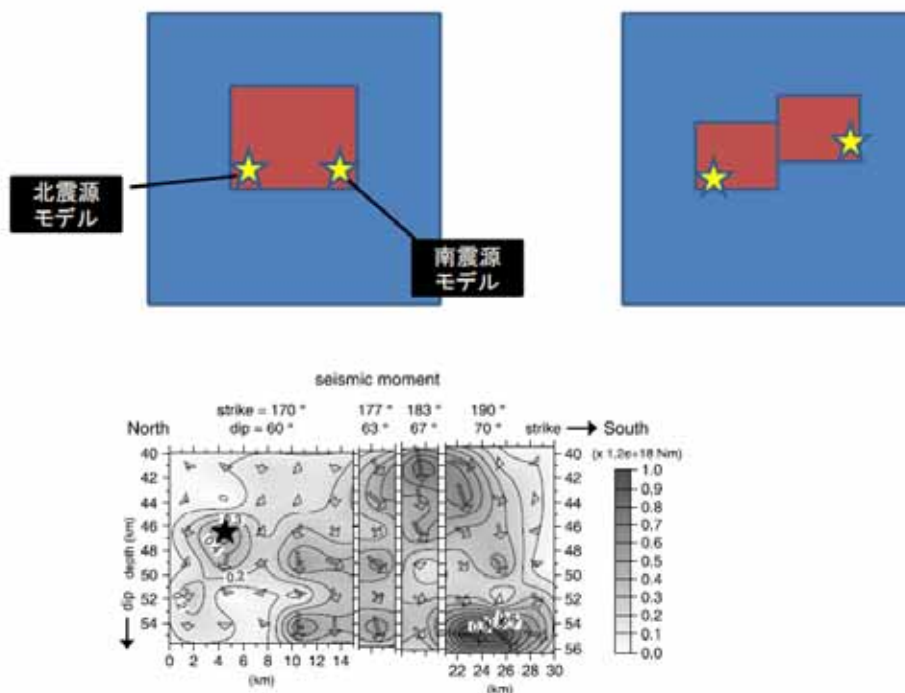


図 3 . 2001 年芸予地震を想定したスラブ内地震の特性化震源モデル。上の 2 つが本項で仮定する断層モデル。下は Kakehi(2004)の波形インバージョンによるモーメント解放量分布。

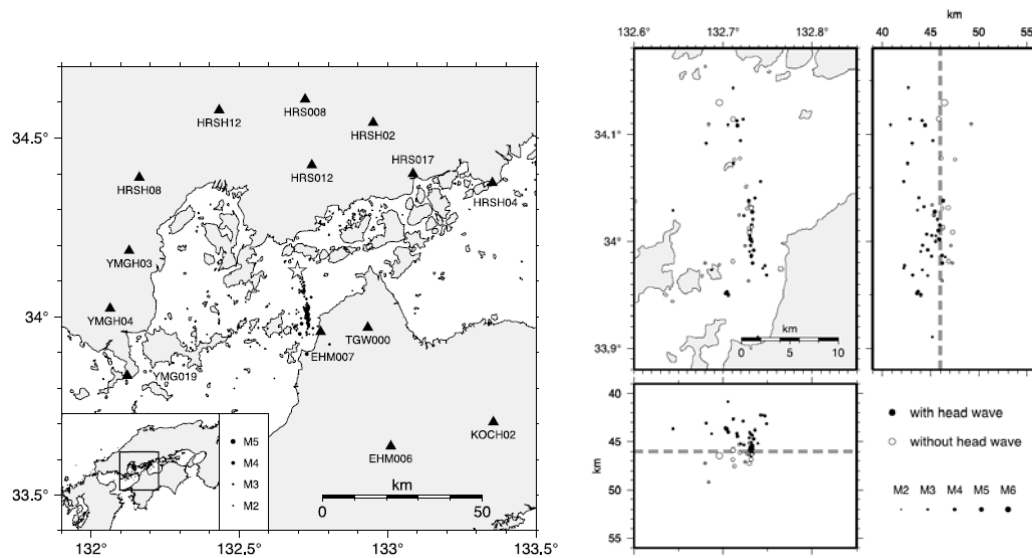


図 4 . 2001 年 芸 予 地 震 の 強 震 観 測 点 と 余 震 分 布 (Kakehi, 2004 から 引用)。

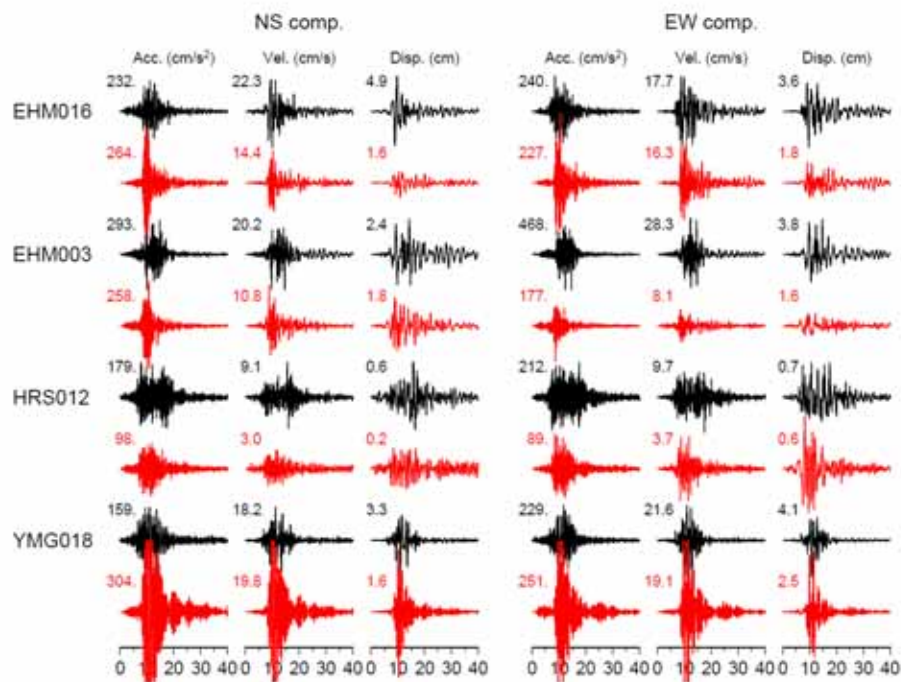


図 5 . 観 測 波 形 (黒) と 合 成 波 形 (赤) の 比 較 例 。 ア ス ペ リ テ ィ 2 つ で 北 震 源 の 想 定 の 場 合 。

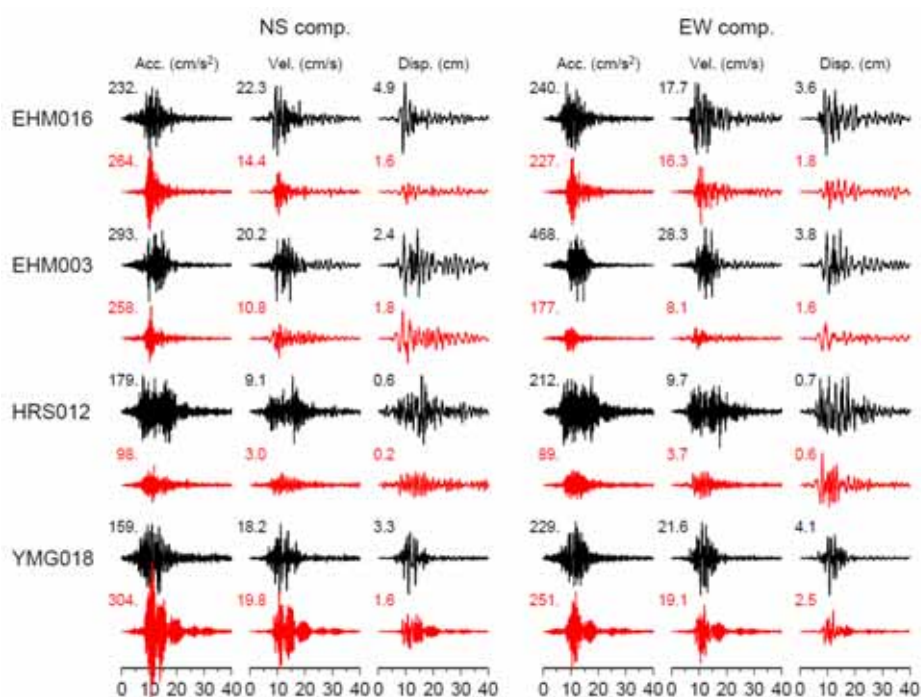


図 6．観測波形（黒）と合成波形（赤）の比較例。アスペリティ 1 つで北震源の想定 の地 殻 内 地 震 の 震 源 パ ラ メ ー タ の 場 合 。

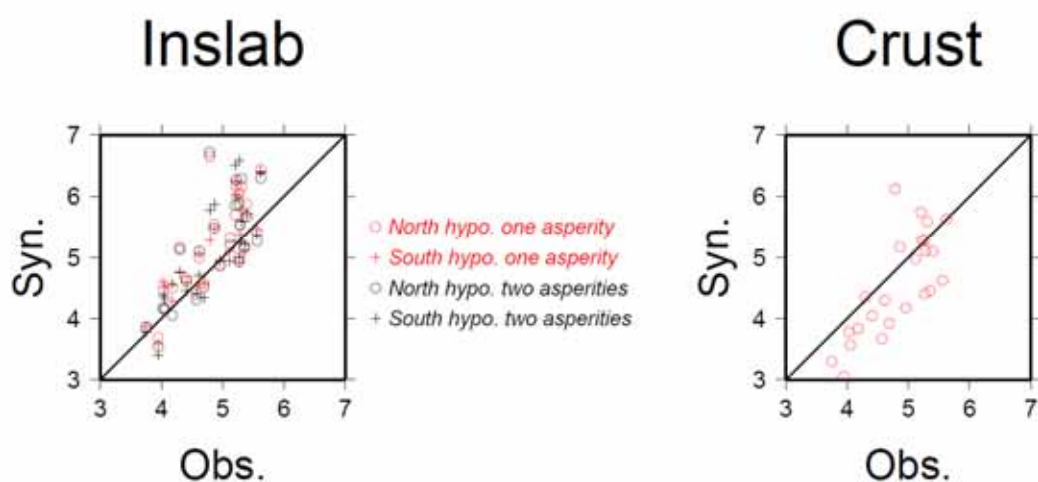


図 7．観測された計測震度とシミュレーションによる計測震度の比較。左図はスラブ内 地 震 の 震 源 パ ラ メ ー タ を 用 いた 場 合 。 右 は 地 殻 内 地 震 の 震 源 パ ラ メ ー タ の 場 合 （ 北 震 源 、 1 ア ス ペ リ テ ィ ）。