

SCEC広帯域地震動プラットフォーム における地震動評価（後半） Ground Motion Validation on the SCEC Broadband Platform

防災科学技術研究所 岩城麻子
Asako Iwaki (NIED)

Contents:

1. Validation of the recipe by SCEC BBP criteria

SCEC BBPにおける地震動予測手法の妥当性評価
(validation)手法について、レシピの検証を例として紹介する。

2. Implementation of recipe to SCEC BBP

SCEC BBP上へのレシピの実装作業状況、およびレシピと他の手法の震源パラメータの違いについて紹介する。

1. Validation of the recipe by SCEC BBP criteria

Background & Objectives

- SCEC BBPでは、米国を中心とした複数の研究グループによる地震動予測手法の妥当性評価として、同条件下で同じ指標を用いて観測記録をどの程度予測できるか検証し、各手法の成績を判定している (Goulet et al. 2015; Dreger et al. 2015)
- 現在レシピのSCEC BBPへの実装作業が進行中である
- それに先駆けて、レシピがSCEC BBPのcriteriaを満たすことを確認する「自己検証」を行った (Iwaki et al. 2016) ので、その内容を紹介

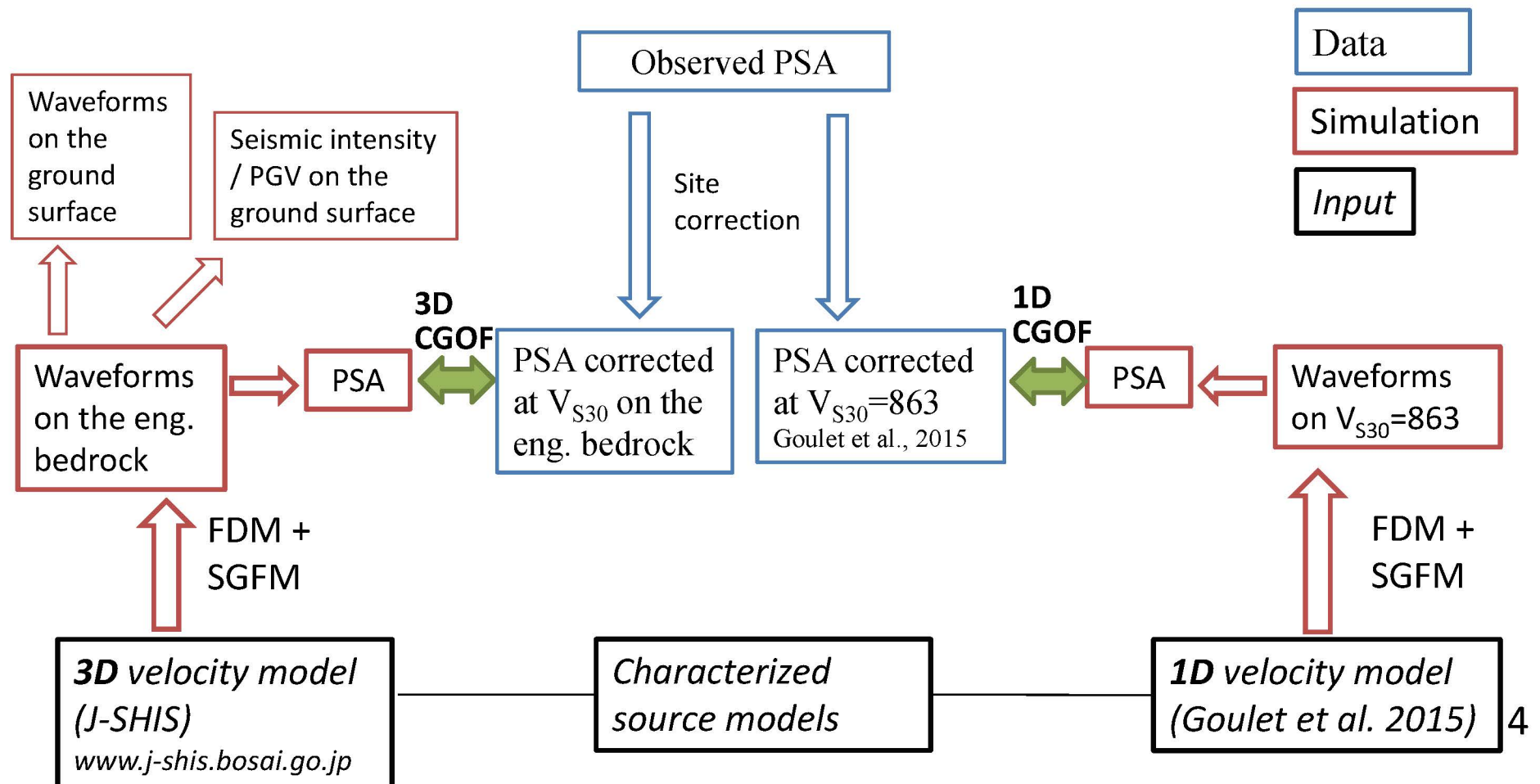
※ここでのレシピは、「地震本部レシピ」(地震調査委員会, 2016)とは切り離され、BBP上で他の手法と比較できる柔軟性を持ったものとしての“Irikura recipe”(e.g. 入倉・三宅, 2001; Irikura and Miyake, 2011)として実装される

1. Validation of the recipe

Work flow: 3D & 1D simulations

レシピに基づく地震動予測手法(藤原・他, 2012)を基本とした
解放工学的基盤相当上の地震動計算:

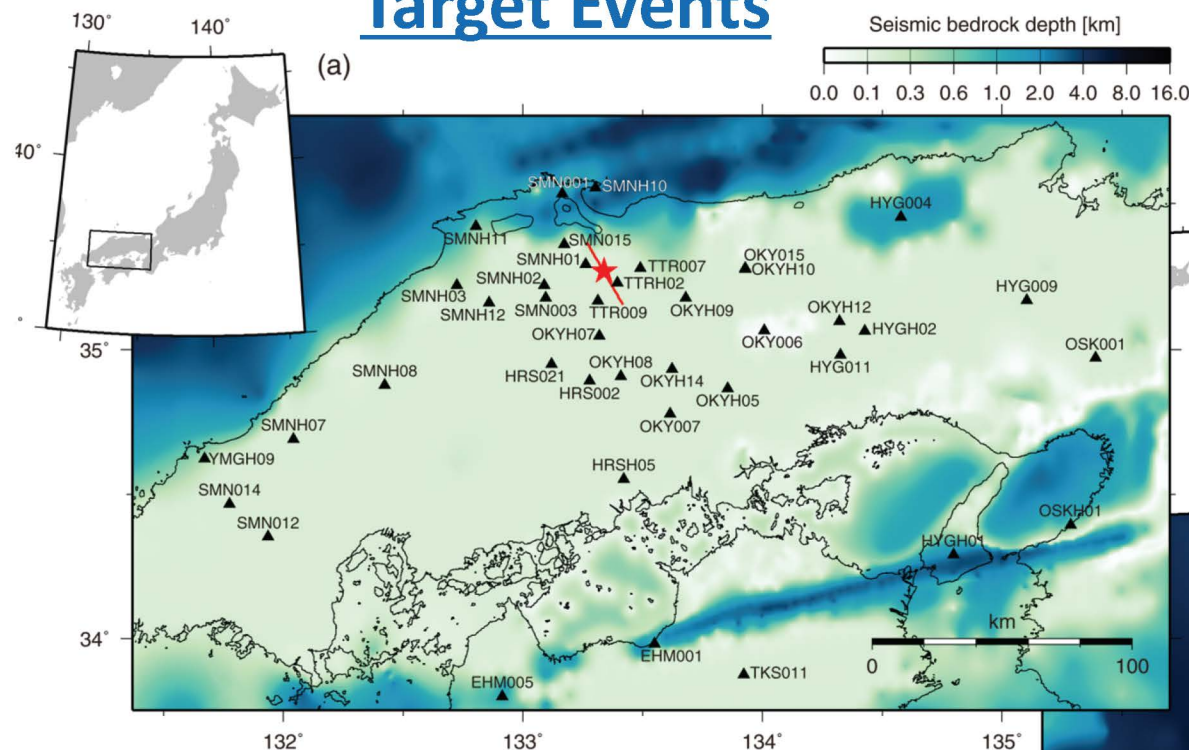
- J-SHIS 3次元地下構造モデル (3D simulation)
- SCEC BBPで用いられる1次元地下構造モデル(1D simulation)



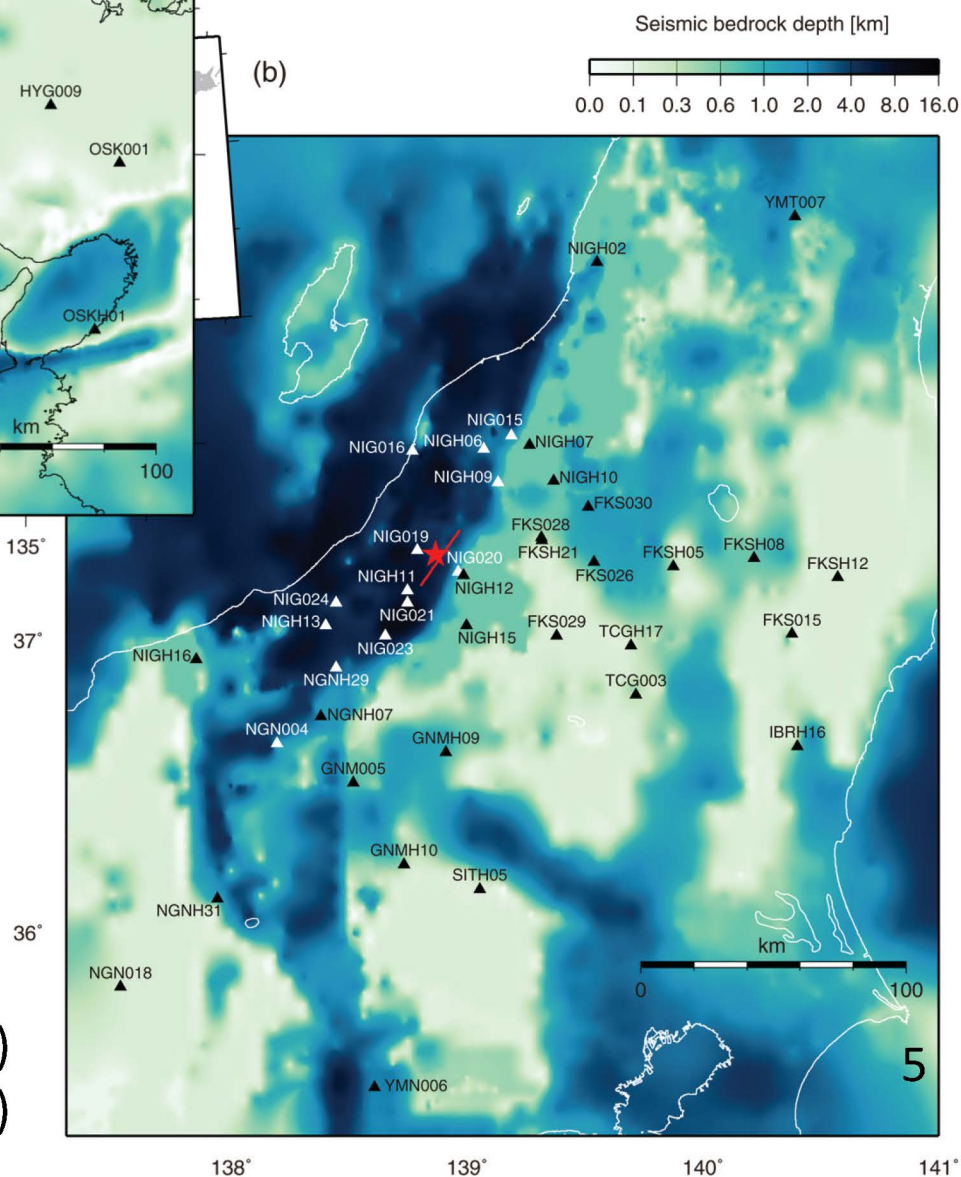
Target Events

1. Validation of the recipe

Seismic bedrock depth distribution
of J-SHIS 3D velocity model

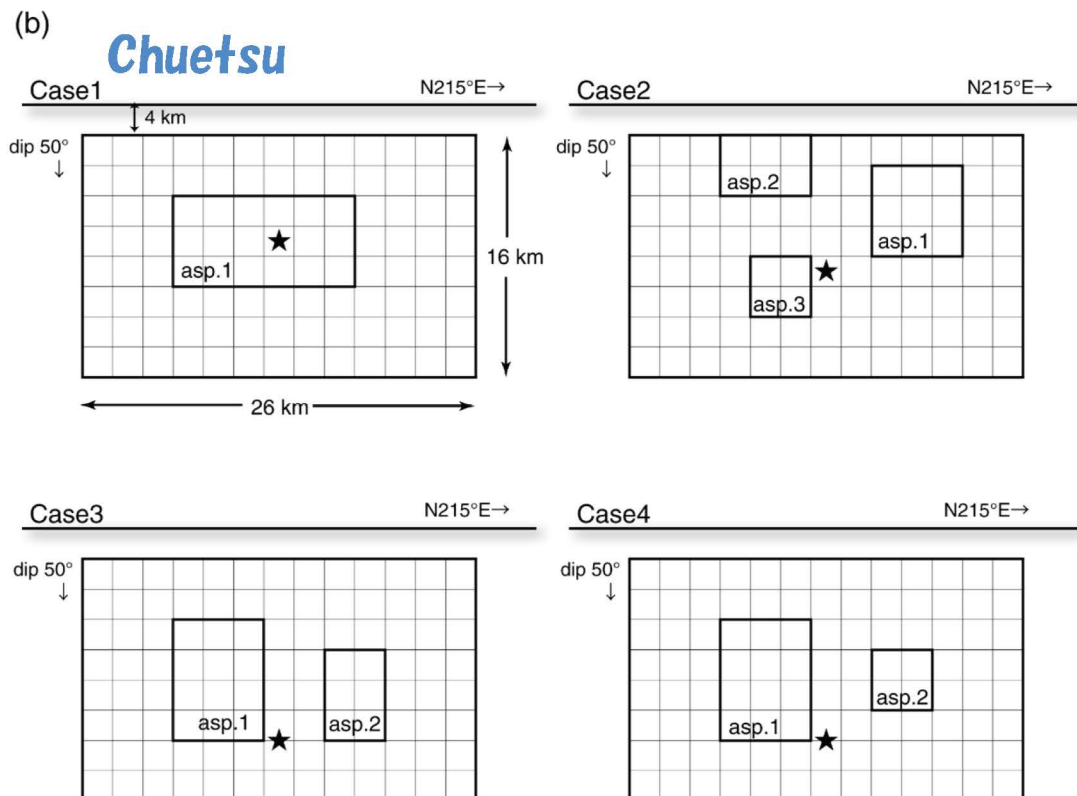
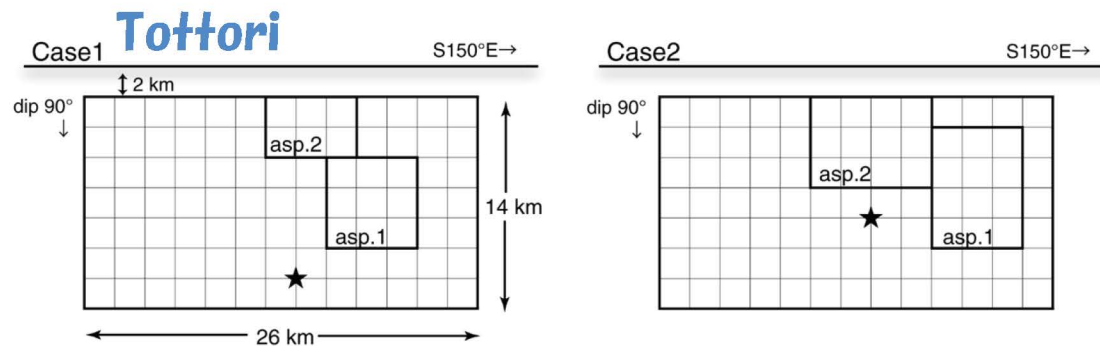


2000 Tottori earthquake (M_W 6.6)



2004 Chuetsu (Niigata)
earthquake (M_W 6.6)

Characterized Source Models



1. Validation of the recipe

GIVEN:

Location, Mechanism
Length, Width
Approximate locations
of asperities, Hypocenter

Seismic Moment

Short-Period
Level
Asperity Area
Stress Drop
Slip etc.

*from inversion
models*:*
Asperity Area
Stress Drop
Slip etc.

* 参照した震源モデル :

岩田・関口(2002) → 鳥取Case2

Hikima and Koketsu (2005) → 中越Case1

Asano and Iwata (2005, 2009) → 中越Case2

Validation Exercises in SCEC BBP

Goulet et al. (2015)

1. Validation of the recipe

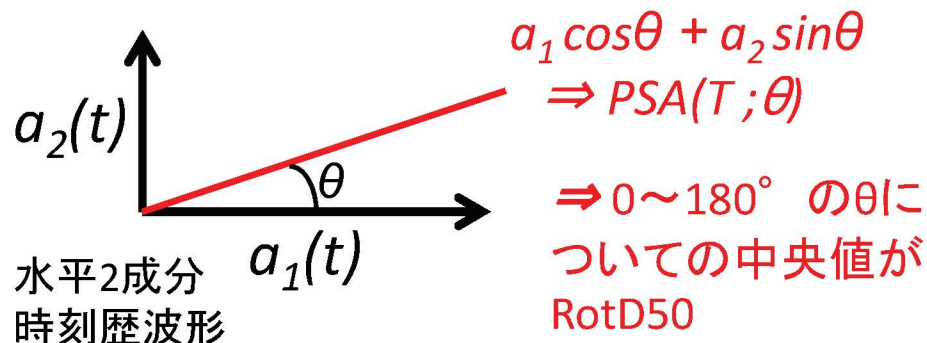
Part A: Validation against recorded ground motions

- 複数の実地震について、記録 ($V_{S30} = 863\text{m/s}$ 相当に補正) とシミュレーション結果を比較することにより手法の妥当性を評価
 - ✓ 各地震について200 km以内で対象とする観測点を選定(最大40点)
 - ✓ Site conditionが良好($V_s > 300\text{ m/s}$)な点、地震動に偏りがないように
 - 客観的な評価基準 goodness-of-fit (GOF)
 - ✓ 5%減衰擬似加速度応答スペクトル(PSA)のRotD50成分で比較
 - ✓ 観測記録は基準となるsite condition : $V_S=863\text{ m/s}$ 相当に補正
- ※日本でレシピに関してはこれまで主に工学的基盤上波形・地表PGV・地表震度

Part B: Validation against ground-motion prediction equations

- 仮想シナリオ地震についてのGMPEとBBPによるシミュレーション結果の比較

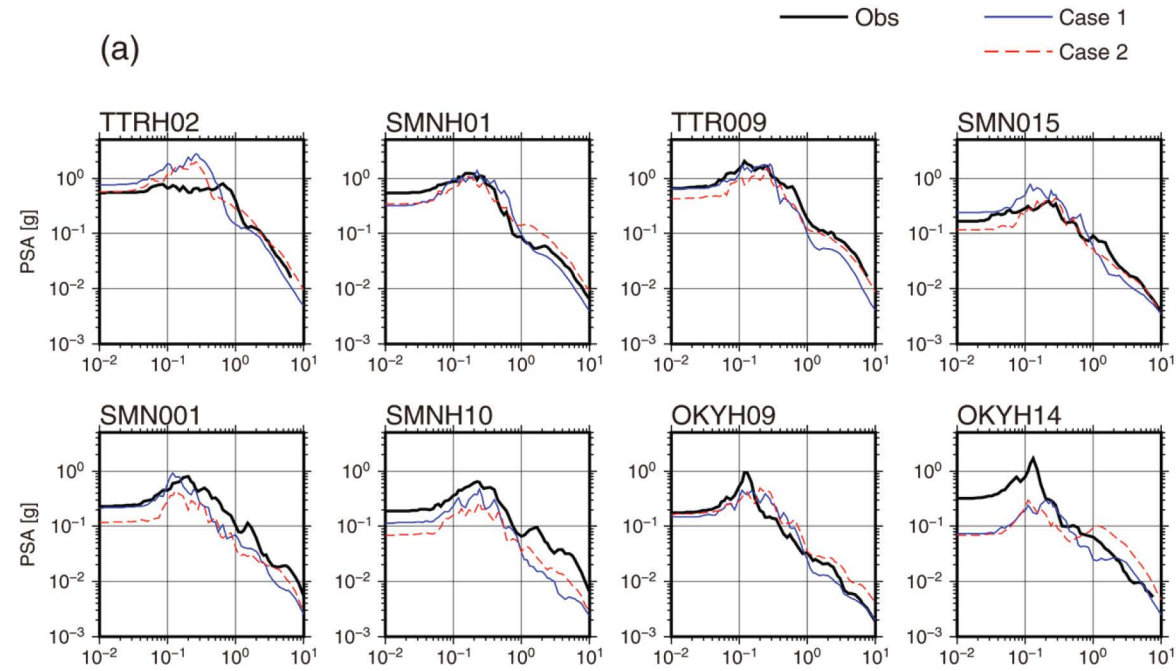
RotD50 (Boore, 2010)



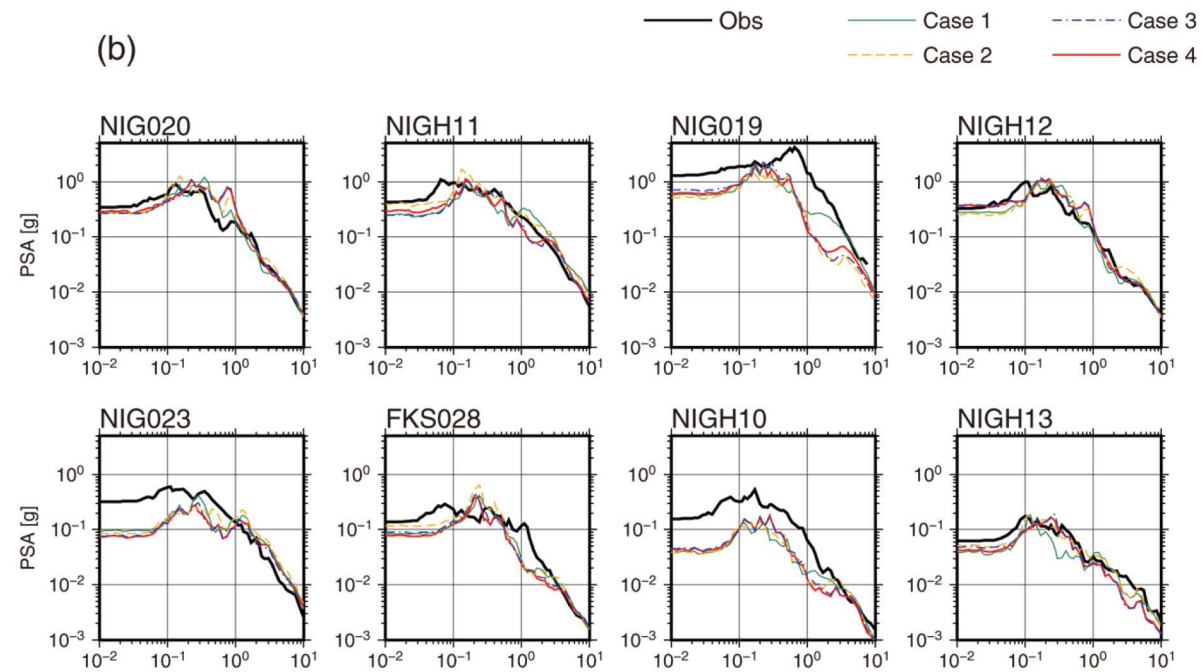
- 方向により異なる最大応答値を大きい順に並べた中央値
- 見る方向に依存しない指標として広く使われている

PSA RotD50

Tottori



Chuetsu



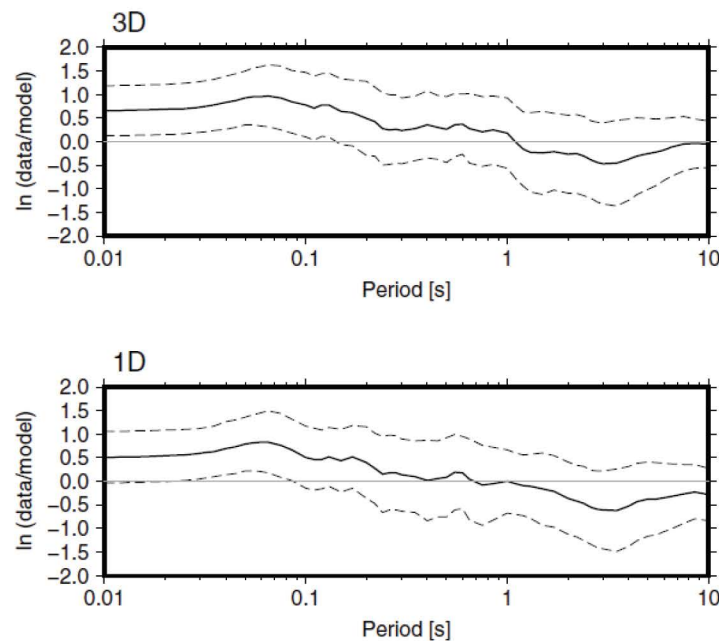
1. Validation of the recipe

Goodness-of-Fit (GOF)

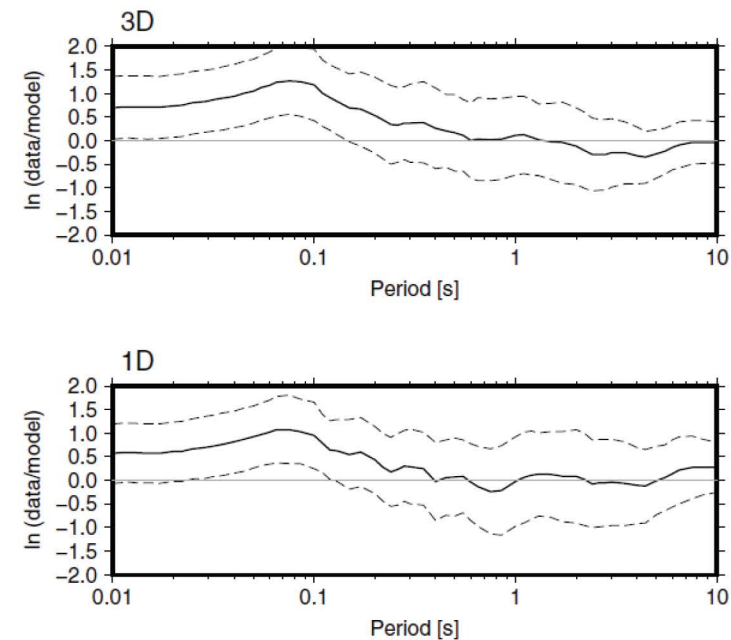
PSA RotD50 についての定量的な評価(Goulet et al., 2015, Dreger et al., 2015)

- 対数残差 $r_{j,k}(T_i) = \ln[O_j(T_i)/S_{j,k}(T_i)]$ O : observation S : simulation
 i : period j : station k : case
- 観測点、ケース数について平均とばらつきを周期ごとにプロット
- 評価するポイント: 値の絶対値と傾きの有無

Tottori



Chuetsu



1. Validation of the recipe

Goodness-of-Fit (GOF)

PSA RotD50 についての定量的な評価(Goulet et al., 2015, Dreger et al., 2015)

- Combined goodness-of-fit factor (CGOF) 距離、周期ごとのスコア
- $CGOF(l, m) = \frac{1}{2} \left| \langle r_{j,k}(T_i) \rangle \right| + \frac{1}{2} \langle |r_{j,k}(T_i)| \rangle$
 $\langle \rangle$ はケース数・観測点数・評価周期の数についての平均、 $| \ |$ は絶対値

➤ スコアの評価: **good** (< 0.35), fair (< 0.7), **poor** (> 0.7)

Tottori

l	m			
	0.01-0.1s	0.1-1s	1-3s	3-10s
3D				
R<5	0.29	0.63	0.17	0.15
5<R<20	0.38	0.29	0.45	0.45
20<R<70	0.97	0.33	0.46	0.39
R>70	1.09	0.71	0.59	0.34

1D

	0.01-0.1s	0.1-1s	1-3s	3-10s
R<5	0.32	0.31	0.38	0.28
5<R<20	0.25	0.26	0.41	0.29
20<R<70	0.70	0.34	0.56	0.57
R>70	0.88	0.65	0.58	0.58

Chuetsu

	0.01-0.1s	0.1-1s	1-3s	3-10s
3D				
R<5				
5<R<20	0.82	0.45	0.45	0.17
20<R<70	1.03	0.55	0.32	0.25
R>70	1.33	0.68	0.53	0.35

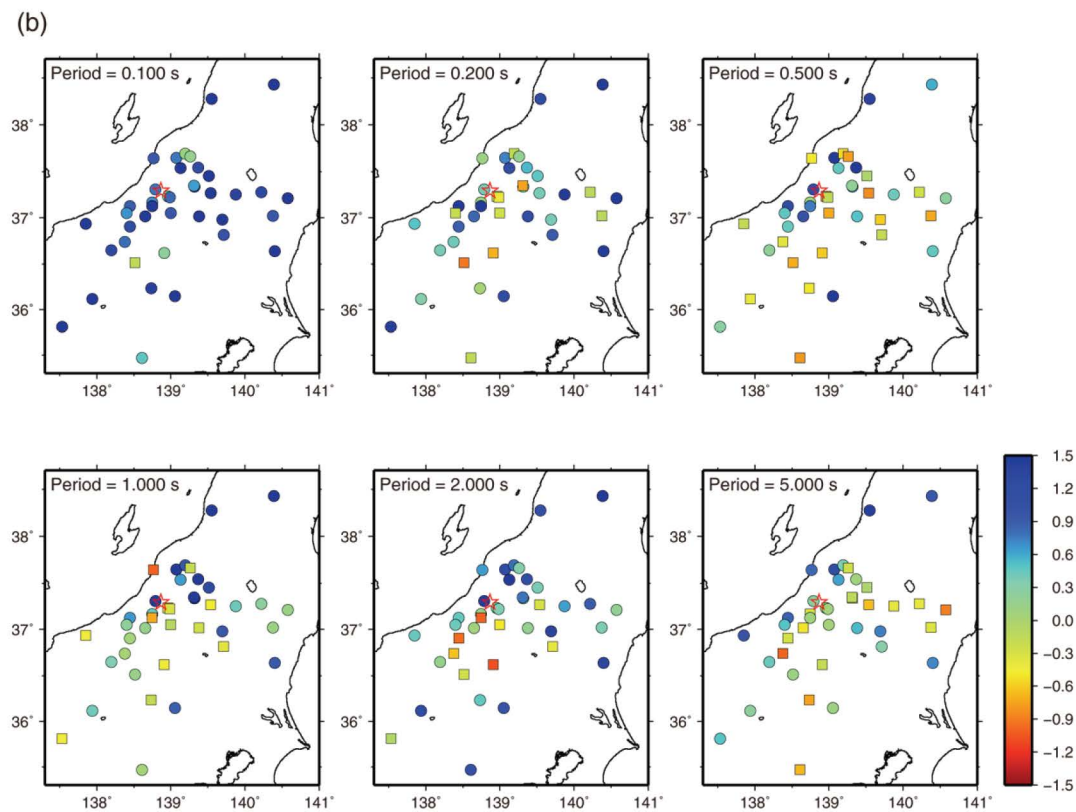
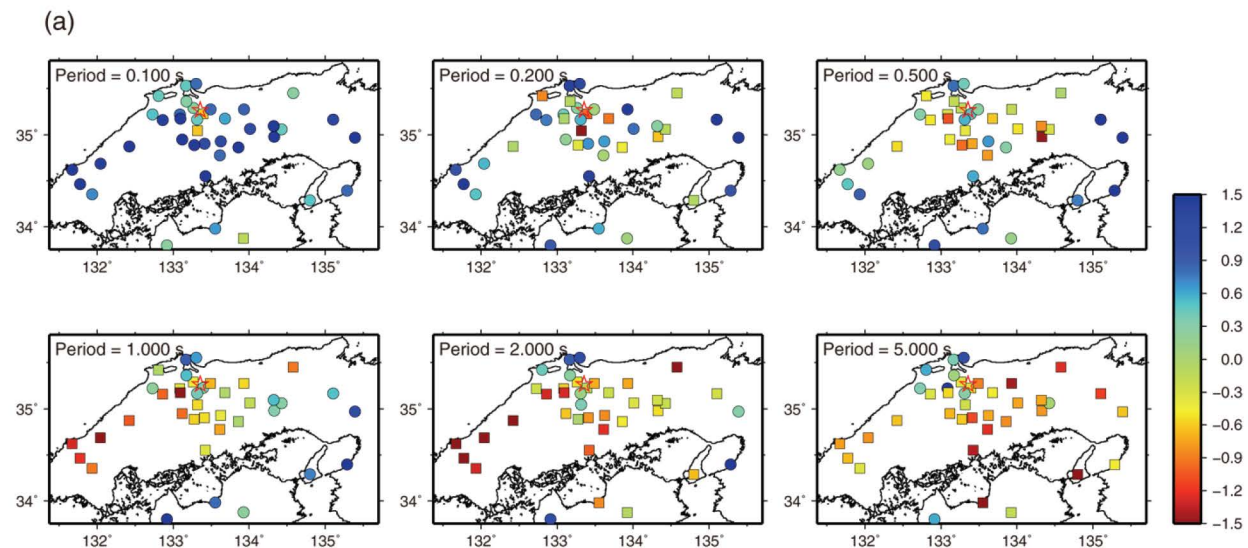
1D

	0.01-0.1s	0.1-1s	1-3s	3-10s
R<5				
5<R<20	0.60	0.41	0.53	0.39
20<R<70	0.72	0.41	0.41	0.35
R>70	1.00	0.53	0.41	0.37

- 0.1-10秒の範囲で概ね基準を満たしている(fair ~ good)
- 短周期(0.01-0.1秒や、0.1-1秒で距離70km以上)では成績は良くない
- 3Dと1Dを比較すると、1秒以上の長周期で3Dの方が成績がやや良い

3D simulation PSA RotD50 GOF

- GOFの空間分布
- 評価するポイント：
距離や方位に依存
する変化の傾向が
ないか

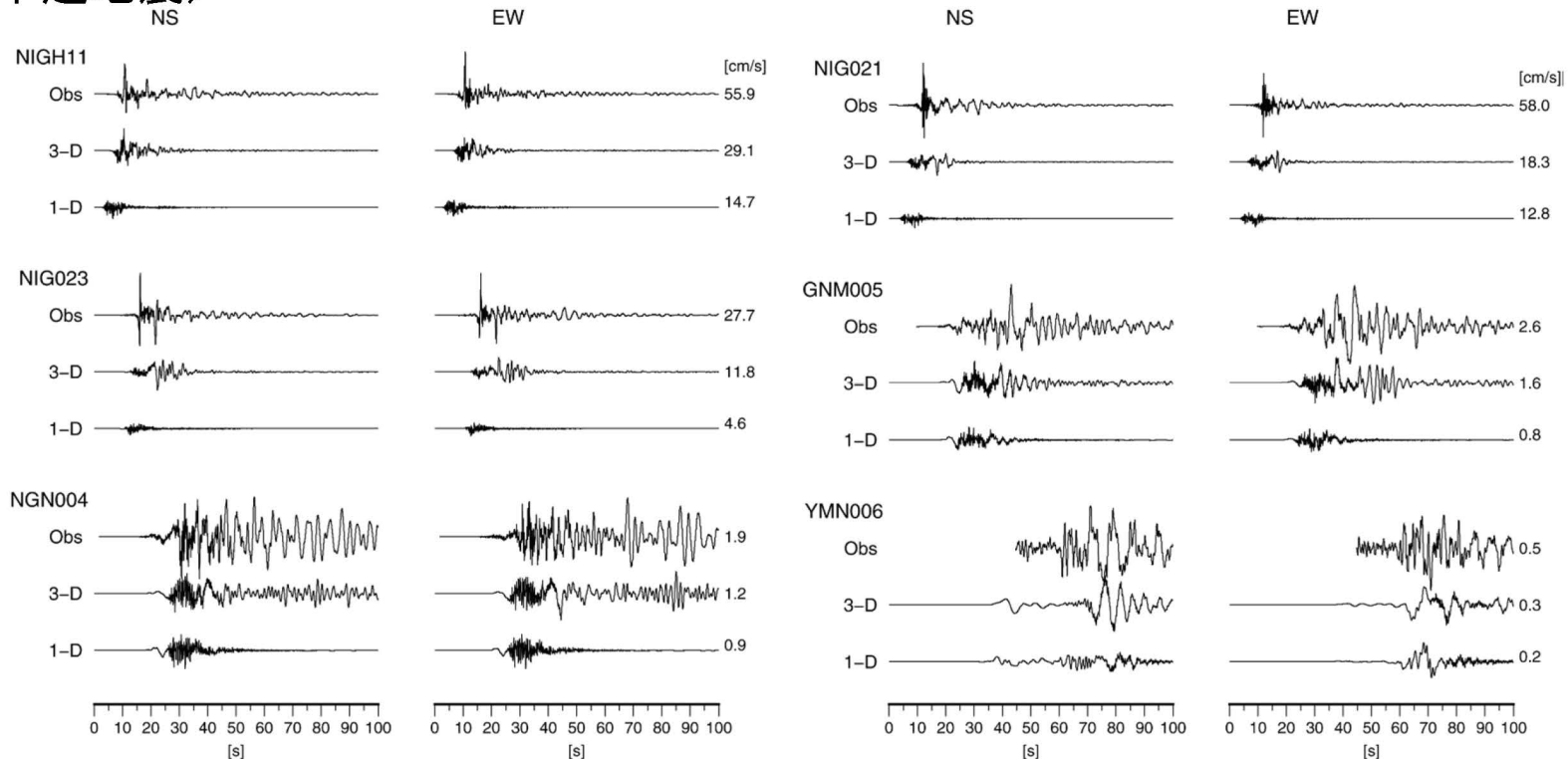
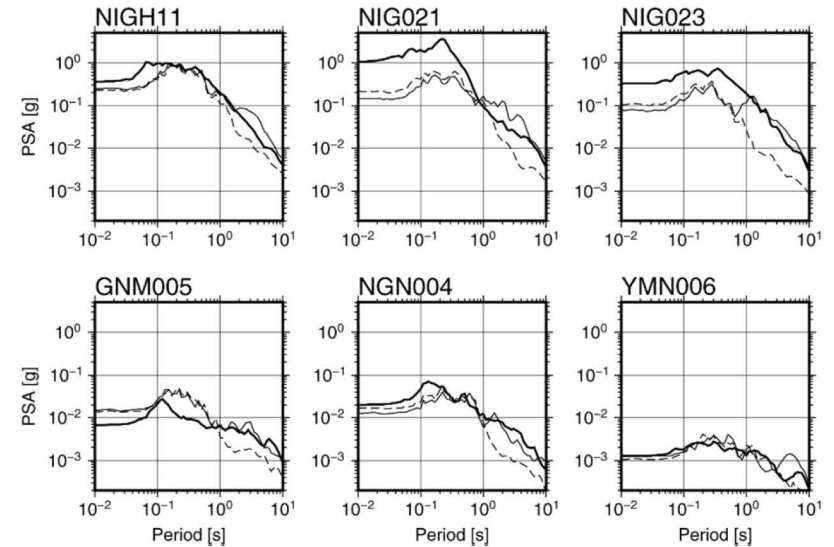


Comparison between 3D and 1D simulations

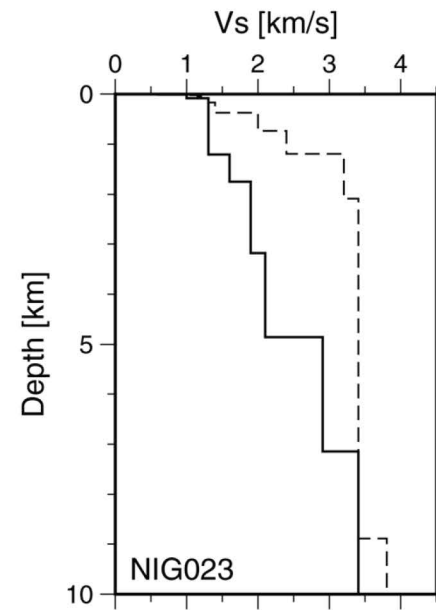
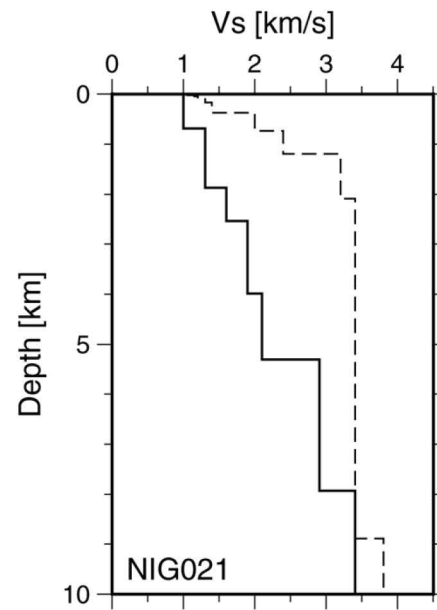
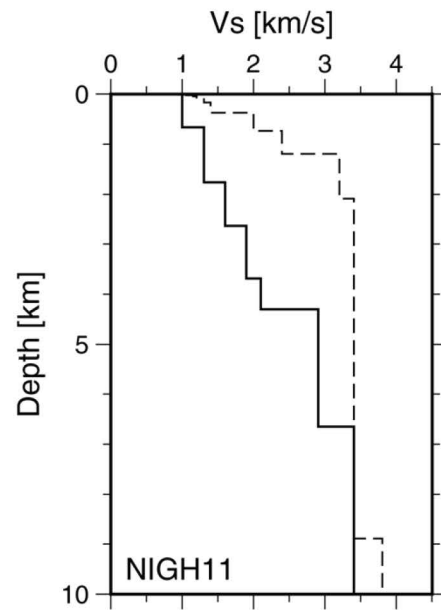
3次元速度構造モデルは
SCEC BBPでは使われていない

- 堆積層上の観測点における速度波形
(中越地震)

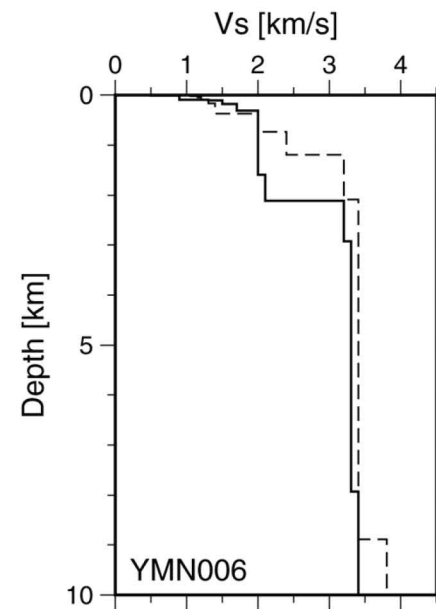
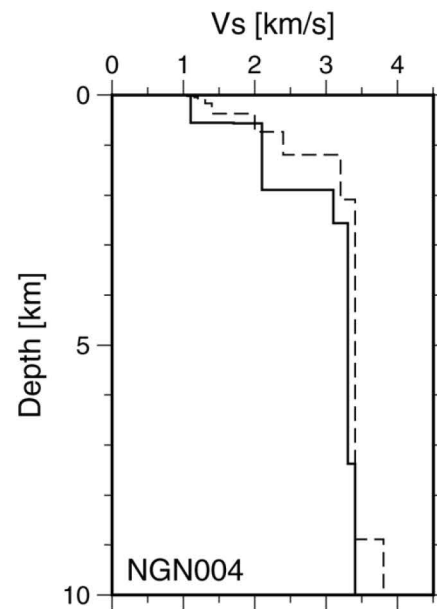
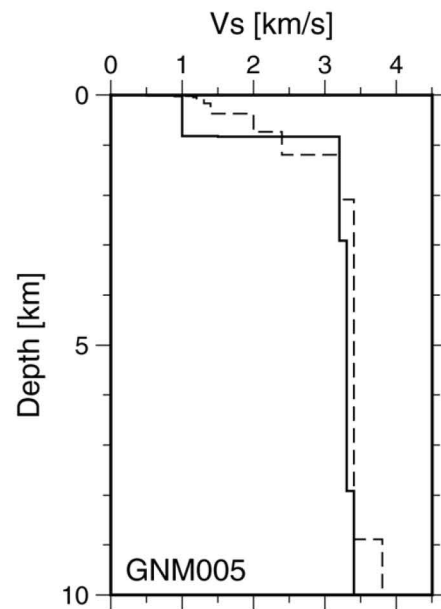
— Obs — Case 3 3-D
- - - Case 3 1-D



3D and 1D velocity models



— 3D (J-SHIS)
--- 1D (Goulet et al. 2015)

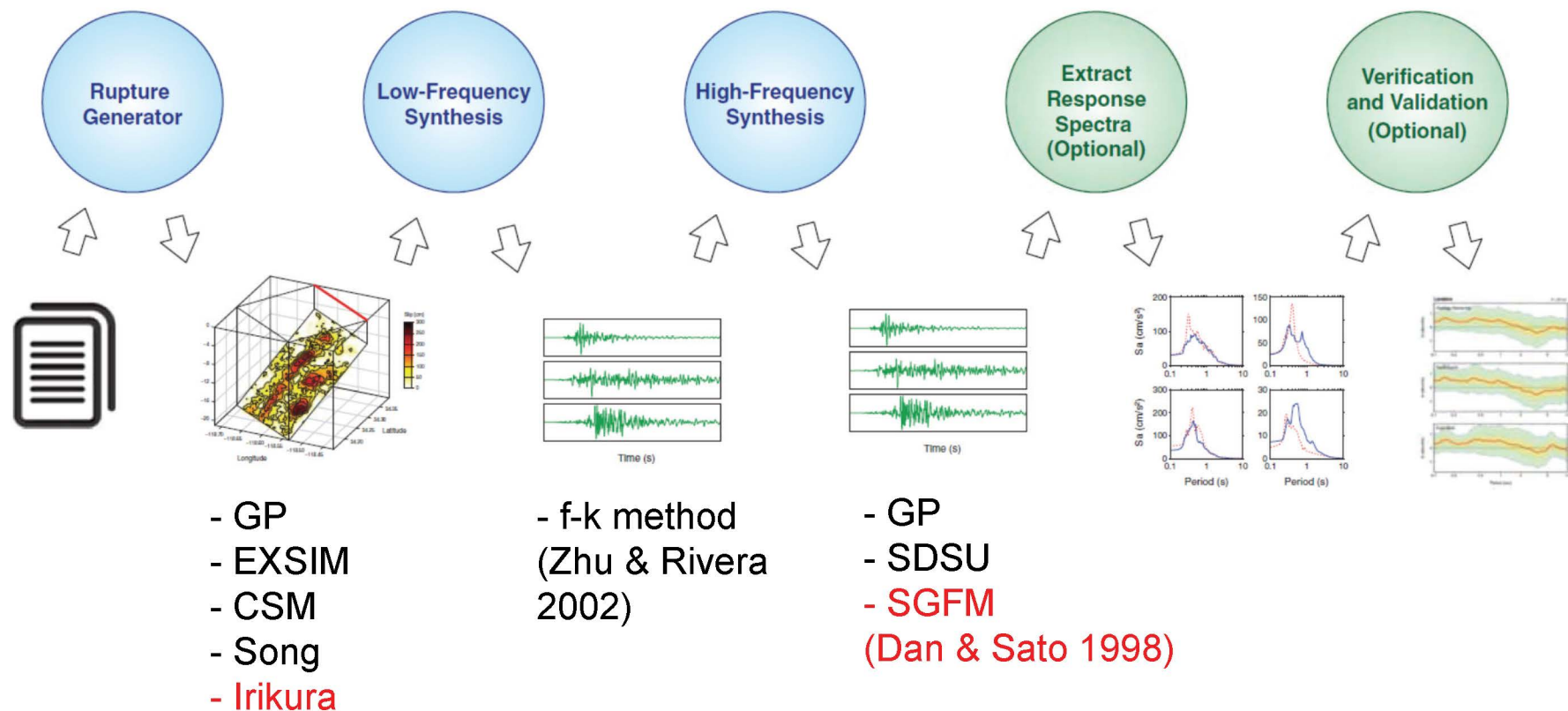


2. Implementation of the recipe to SCEC BBP

Phase 1: レシピの「震源モジュール」を米国側主導で実装作業中

Phase 2: 「統計的グリーン関数法モジュール」を実装予定

※「長周期地震動計算」と「ハイブリッド」はBBPで共通のものを使用



※Validation Part A, Bの結果を見ながらPhase 1→ Phase 2 へと進む。

2. Implementation to SCEC BBP

Input file for rupture generator

Input file

Given: geometry, mechanism, hypocenter

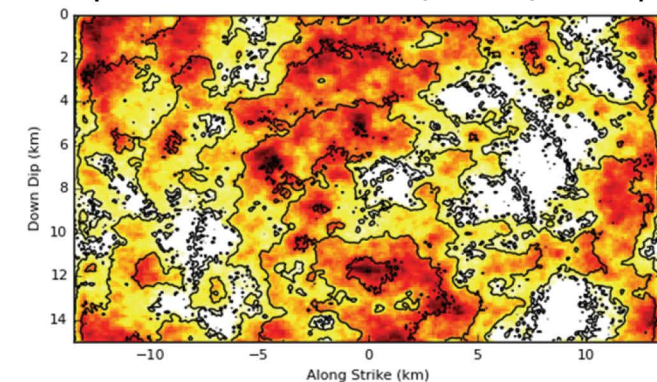
```
MAGNITUDE = 6.6
FAULT_LENGTH = 27.0
FAULT_WIDTH = 15.0
DEPTH_TO_TOP = 2.0
STRIKE = 150
RAKE = 180
DIP = 90
DLEN = 0.1
DWID = 0.1
LAT_TOP_CENTER =
35.269
LON_TOP_CENTER =
133.357
HYPO_ALONG_STK = 0.0
HYPO_DOWN_DIP = 12.0
#CORNER_FREQ = 0.26
SEED = 2379646
```

BBP rupture
generator

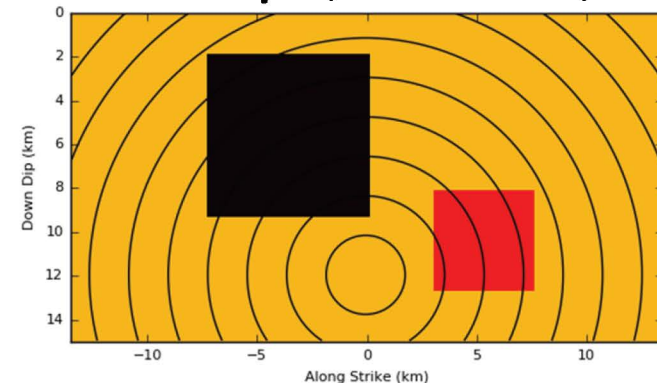
Choose a Method:

- (1) GP
- (2) GP Seis (using
precomp seismograms)
- (3) UCSB
- (4) SDSU
- (5) SDSU Seis (using
precomp seismograms)
- (6) EXSIM
- (7) CSM

GP (Graves and Pitarka, 2010, 2015)



Irikura Recipe (to be released)



ランダム不均質性を決める乱数の種。
Irikura recipe ではアスペリティ位置を決める

異なるSEEDによる50回の試行に
よる評価を基本としている

Comparison of Parameters

2. Implementation to SCEC BBP

BBP上でのGPとレシピの震源パラメータの比較

※rupture generator への入力情報はgiven とした場合。

	GP (Graves and Pitarka, 2010; 2015)	レシピ
すべり量 分布	1. 断層面上に一様なすべりを設定 2. 波数領域で傾きを k^{-2} に調整(相関距離が M_w に依存) 3. 空間領域に戻し、すべり量の標準偏差と地震モーメントを調整	$M_0 \rightarrow A \rightarrow S_a$ $D_a = 2D_{ave}$
破壊伝播 速度	1. 深さに依存する平均破壊伝播速度 $V_r = 0.56V_s$ ($z < 5$ km) $V_r = 0.8V_s$ ($z > 8$ km) 2. 破壊時刻に揺らぎ付与 破壊時刻の揺らぎ量は、 $M_0^{1/3}$ とローカルなすべり量に依存する量に、さらに空間的な揺らぎを与えたもの	$V_r = 0.72V_s$
すべり角	平均値の周りに標準偏差 15° 最大 $\pm 60^\circ$ の揺らぎ	一定
震源時間 関数	・Kostrov-like pulse (Liu et al. 2006) ライズタイムは $M_0^{1/3}$ とローカルなすべり量の平方根に依存 浅部($z < 5$ km)ではライズタイム2倍	ライズタイム $= 0.5W/V_r$
短周期の 震源	1 km x 1 km 小断層 コーナー周波数がローカルな破壊伝播速度と傾斜角に依存 平均応力降下量5MPa	2 km x 2 km 実効応力

※揺らぎは乱数seedで決まる

Summary

- SCEC BBP validation の指標に基づき、レシピによる内陸地殻内地震(2000年鳥取地震と2004年中越地震)の広帯域地震動計算の妥当性評価(validation)を行った。
 - ✓ 周期0.1-10秒での成績は概ねacceptable.
 - ✓ 距離70km以上と周期0.1秒以下では過小評価の傾向。
(ただし、評価の対象周期が0.01秒(100 Hz)までなのは疑問)
 - ✓ 3-D CGOF は長周期(> 1 s)で1-D CGOFよりもやや成績が良い。
 - ✓ 3-D simulationによる速度波形は厚い堆積層上のサイトでの1-D simulationよりも観測の再現性がよい。
- SCEC BBP では3次元速度構造に不対応。
- Validationに時刻歴波形の評価も検討されている(e.g. Anderson, 2004)が、まだ積極的に利用されてはいない。
- レシピの震源・統計的グリーン関数法モジュールをSCEC BBPへ実装する作業が現在進められている。⇒ レシピと他の手法の一元的な比較が可能になる。
- 比較の際には、他の手法との震源モデルの違いを考慮する必要がある。ほかの手法では実効応力が直接パラメータとして入っていない。

References 参考文献

- Anderson, J. G. (2004). Quantitative measure of the goodness-of-fit of synthetic seismograms. Proc. of 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 243.
- Asano, K. and T. Iwata (2009). Source rupture process of the 2004 Chuetsu, mid-Niigata prefecture, Japan, earthquake inferred from waveform inversion with dense strong-motion data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99, 123-140.
- Boore (2010). Orientation-independent, nongeometric-mean measures of seismic intensity from two horizontal components of motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100, 1830-1835.
- 壇一男・佐藤俊明(1998).断層の非一様すべり破壊を考慮した半経験的波形合成法による強震動予測. 日本建築学会構造系論文集, 509, 49-60.
- Dreger, D. S., G. C. Beroza, S. M. Day, C. A. Goulet, T. H. Jordan, P. A. Spudich, and J. P. Stewart (2015). Validation of the SCEC broadband platform V14.3 simulation methods using psudospectral acceleration data, *Seismological Research Letters*, 86, 39-47.
- Goulet, C. A., N. A. Abrahamson, P. G. Somerville, and K. E. Woodbell (2015). The SCEC broadband platform validation exercise: Methodology for code validation in the context of seismic-hazard analyses. *Seismological Research Letters*, 86, 17-26.
- Graves, R. W. and A. Pitarka (2010). Broadband ground-motion simulation using a hybrid approach. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100, 2095-2123.
- Graves, R. W. and A. Pitarka (2015). Refinements to the Graves and Pitarka (2010) broadband ground-motion simulation method. *Seismological Research Letters*, 86, 75-80.
- 入倉孝次郎・三宅弘恵(2001). シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, 110, 849-875.
- Hikima, K. and K. Koketsu (2005). Rupture process of the 2004 Chuetsu (mid-Niigata prefecture) earthquake, Japan: A series of events in a complex fault system. *Geophysical Research Letters*, 32, L18303, doi: 10.1029/2005GL023588.
- Irikura, K. and H. Miyake (2011). Recipe for predicting strong ground motion from crustal earthquake scenarios. *Pure and Applied Geophysics*, 168, 85-104.
- Iwaki, A., T. Maeda, N. Morikawa, H. Miyake, H. Fujiwara (2016). Validation of the recipe for broadband ground-motion simulations of Japanese crustal earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106, doi: 10.1785/0120150304.
- 岩田知孝・関口春子(2002). 2000年鳥取県西部地震の震源過程と震源域強震動. 第11回日本地震工学シンポジウム, CDROM-25.
- Zhu, L. and L. A. Rivera (2002). A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media. *Geophysical Journal International*, 148, 619-627.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2016). 震源断層を特定した地震の強震動予測手法 (「レシピ」). 18
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/16_yosokuchizu/recipe.pdf