

断層モデルのパラメータの相関と 結果のばらつき

Correlation between fault model parameters and
its influence on ground-motion variability

岩城 麻子(防災科学技術研究所)

Asako Iwaki (NIED)

Introduction

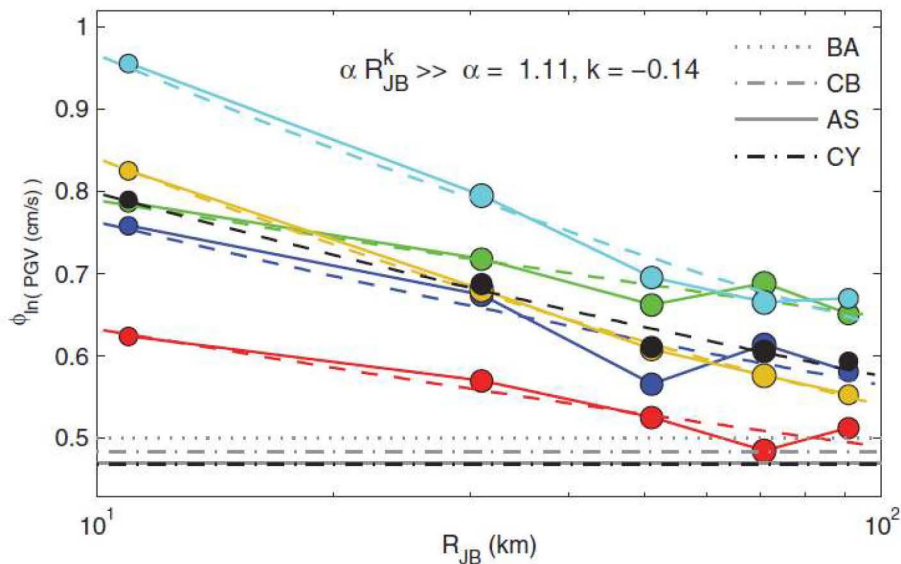
- 断層モデルによる地震動評価手法は、特に断層近傍や地下構造の特徴的な地域において時刻歴波形や周期特性を含めた地震動評価のために重要である。
- 地震動評価においては、モデルの不確定性(断層パラメータのばらつき)とそれに伴う地震動予測結果のばらつきをそれぞれ評価する必要がある。
- 本研究では、横ずれ断層である2000年鳥取県西部地震を対象として断層モデルを用いた広帯域地震シミュレーションを「レシピ」に準拠して行い、断層パラメータのばらつきが地震動予測結果に及ぼす影響を評価することを目指す。

Previous studies (1)

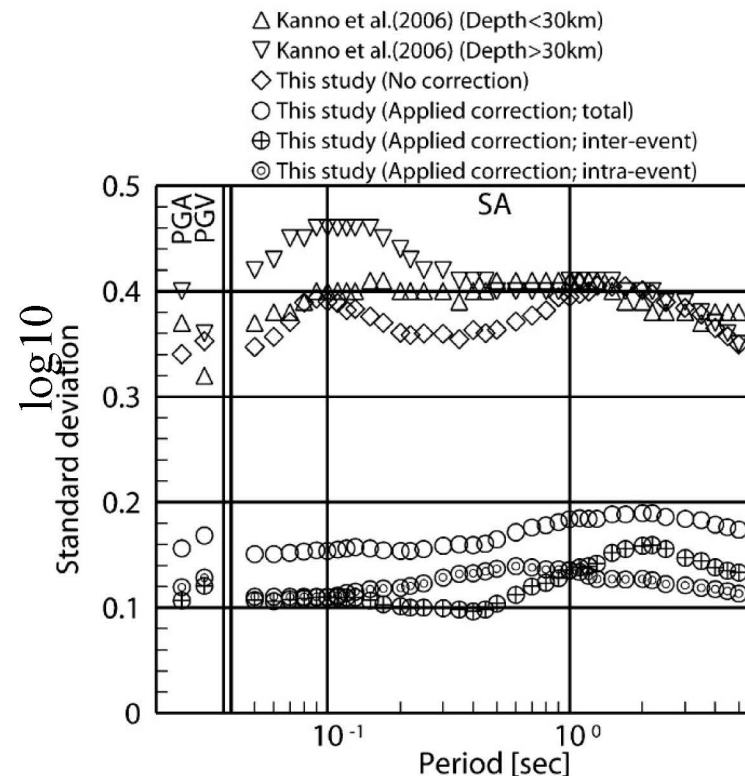
- 断層モデルの偶然的ばらつき
 - 地震そのもののランダムさを表現したものと捉えることができる
 - intra-event and inter-event variability (e.g. Al Atik et al. 2010)
- シミュレーションによるばらつき評価
 - シナリオ内の空間変動的なばらつき(intra-event variability)
 - ✓ 距離・方位依存 (e.g. Imtiaz et al. 2015; Vyas et al. 2016)
 - シナリオ間のばらつき(scenario-to-scenario, inter-event variability)
 - ✓ 断層パラメータのバラツキとその影響、方位依存 (e.g. 山田・他 2007; Yamada et al. 2011; 香川 2015; 引田・他 2015)
 - バラツキの大きさ intra-event > inter-event (香川2015)

Previous studies (2)

- 観測記録による地震動ばらつき評価
 - 地震動予測式のsigma (e.g. NGA GMPE models; 司・翠川 1999)
 - Single-station sigma (e.g. Atkinson 2006)
 - Single-path sigma (e.g. Morikawa et al. 2008; Anderson & Uchiyama 2011; Lin et al. 2011)



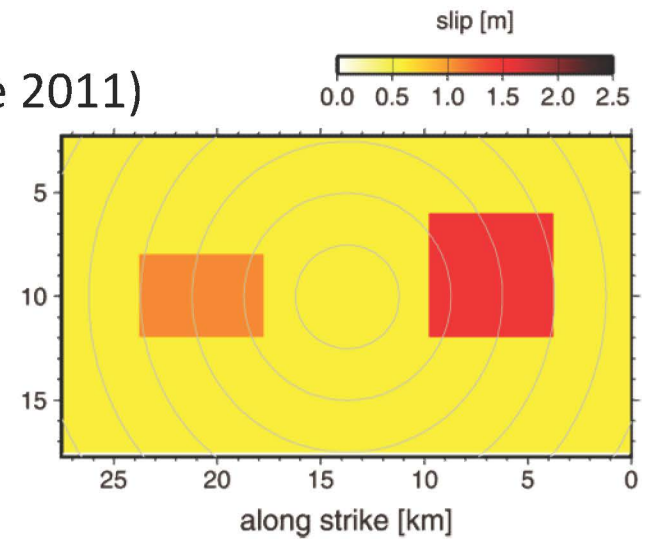
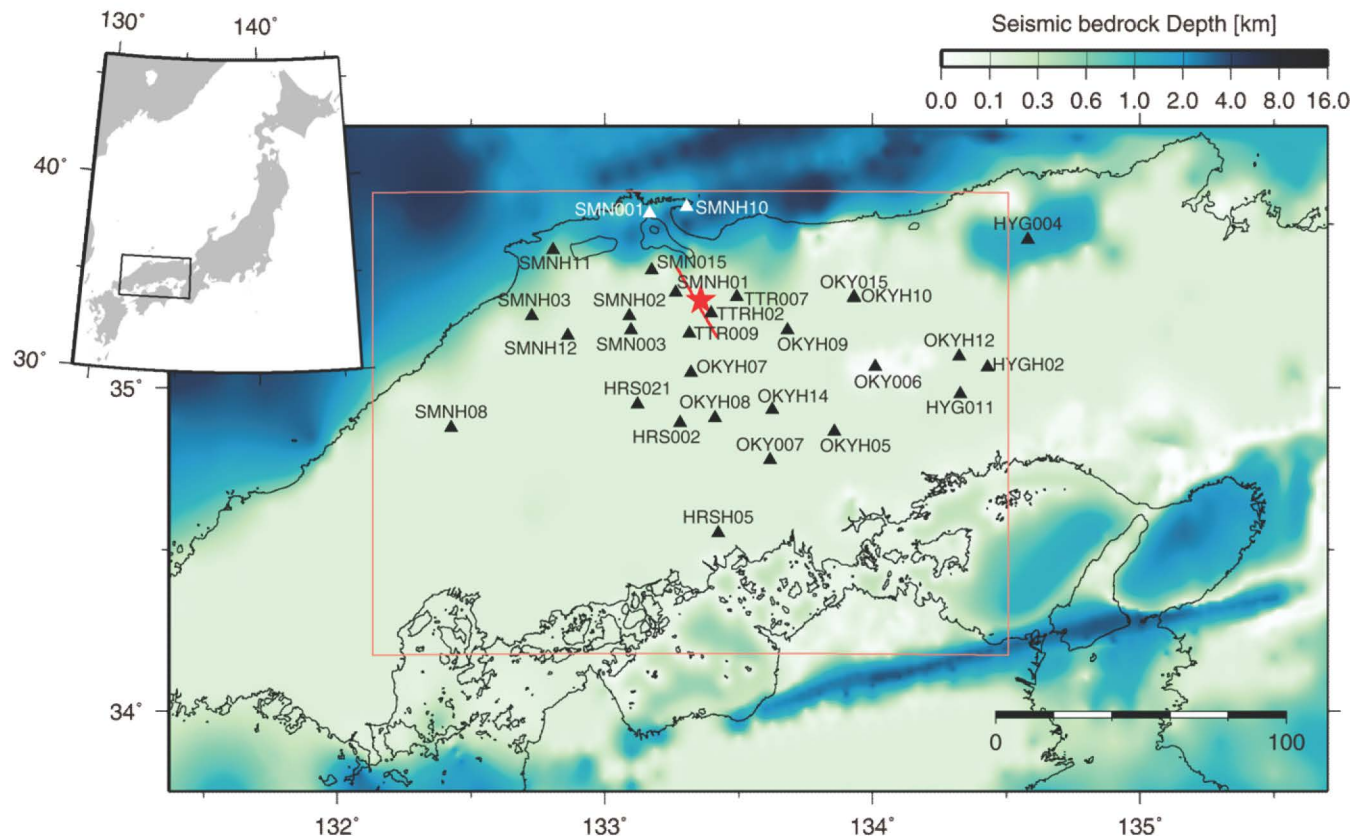
Intra-event variability compared with empirical sigma (Vyas et al. 2016)



(Morikawa et al. 2008)

Broadband Ground-motion simulations

- Characterized source model (e.g. Irikura & Miyake 2011)
- Hybrid simulation method:
 - 3D FDM ($T > 1$ s) (Aoi & Fujiwara 1999)
 - Stochastic Green's function method ($T < 1$ s) (Dan & Sato 1998)



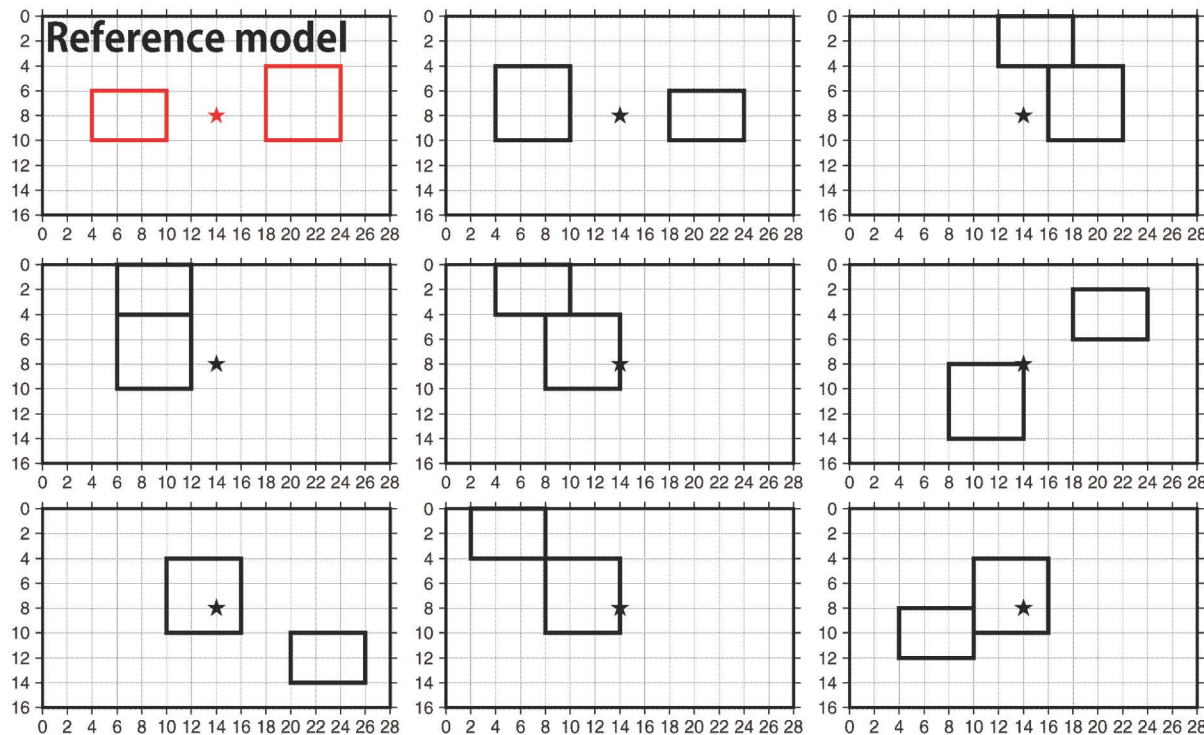
- 2000 Tottori earthquake, Mw6.6
- 3D velocity model: J-SHIS V2 (Fujiwara et al. 2012)

▲ K-NET & KiK-net stations

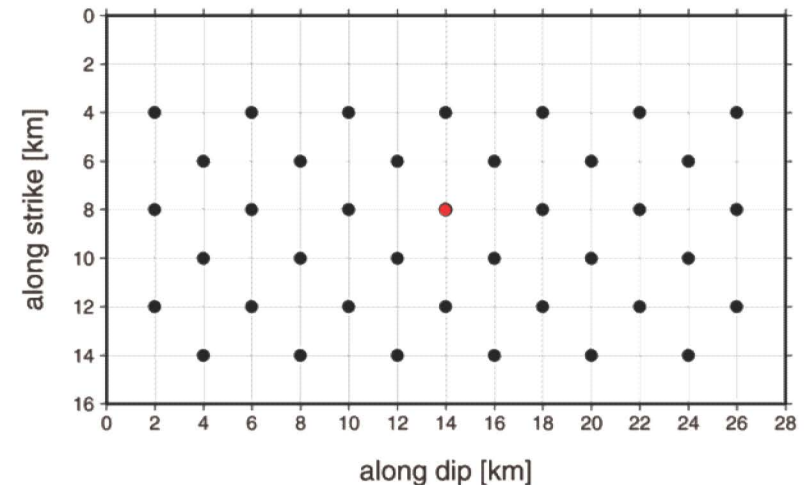
Variability of source parameters

特性化震源モデルにおいて、**アスペリティ位置**、**破壊開始点**、**地震モーメント**のばらつきを考慮

- 面積 : $S = L \times W$ 固定
- **アスペリティ位置** : 2km間隔格子上にランダムに配置
- **破壊開始点** : 2km間隔格子からランダムに配置



39 rupture starting points



Examples of asperity locations⁶

Variability of source parameters

➤ 地震モーメント

- 平均値: $M_{0_{\text{mean}}} = (S/4.24)^2 \times 10^{15}$ (入倉・三宅, 2001)
- ばらつき: $\text{mean} \pm 2\sigma$ で倍半分(自然対数)となる正規分布を仮定
 - 仮定したばらつきは、様々なテクトニック環境・断層タイプの地震のデータをコンパイルした入倉・三宅(2001)から推定されるSに対するM0のばらつきよりも小さい。
 - ばらつきの妥当性は要検討だが感度解析にはなる
- 短周期レベル A
 - > A-M₀ 関係を固定: $A = 2.46 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$ (壇・他 2001 経験式)
- アスぺリティ総面積 $S_a = \pi r^2$ アスぺリティ応力降下量 $\Delta\sigma_a$
 - > $M_0 = (16/7)r^2 R \Delta\sigma_a$ 、 $A = 4\pi r^2 \Delta\sigma_a \beta^2$

	Asperity location	Hypocenter location	Seismic moment
Case1a	50 realizations	fixed	fixed
Case1b	fixed	39 realizations	fixed
Case2	50 realizations		fixed
Case3	50 realizations		

Variability of source parameters

	レシポ	本検討	ばらつきをどのように評価するか
断層長さ・幅 L, W	活断層調査、 地震活動等	固定	活断層調査、地震活動等
地震モーメント M_0	$S \rightarrow M_0$ $L \rightarrow M \rightarrow M_0$	$S - M_0$ 関係に ばらつきを仮定	観測(経験式、断層タイプ別)
短周期レベル A	$M_0 \rightarrow A$	同左	観測(経験式、断層タイプ別)
アスペリティ面積 S_a	$M_0, S, A \rightarrow S_a$	同左	観測(震源過程解析)
実効応力 σ_a	$M_0, S, S_a \rightarrow \sigma_a$	同左	観測(震源過程解析) 動力学シミュレーション
破壊伝播速度 V_R	$V_R = 0.72\beta$	同左(固定)	観測(震源過程解析) 動力学シミュレーション
震源時間関数	中村・宮武2000 $V_R, f_{\max}, \Delta\sigma$	同左	観測(震源過程解析) 動力学シミュレーション
アスペリティ配置	数パターン	ランダム	ランダム、固有地震なら観測? 動力学シミュレーション
破壊開始点	数パターン	ランダム	ランダム、固有地震なら観測? 動力学シミュレーション

連動

Performance of ground-motion simulations

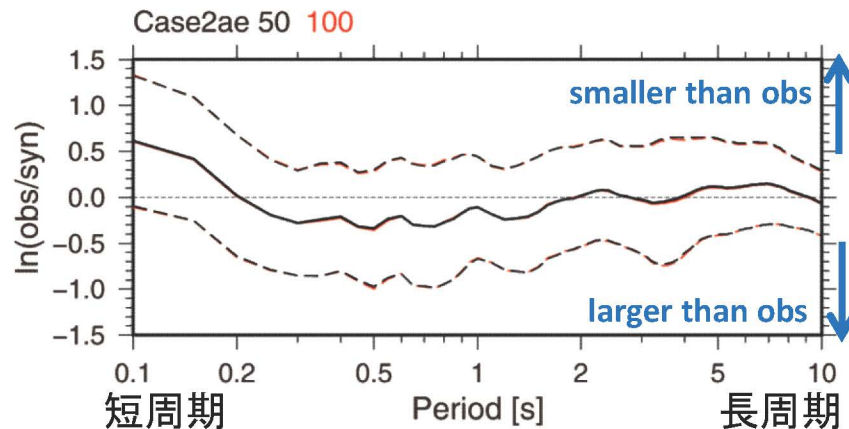
Variability in asperity and hypocenter; Seismic moment fixed (Case2)

Comparison with observed data

5% damped S_a (RotD50) model bias

— 50 realizations $\times$ 29 stations

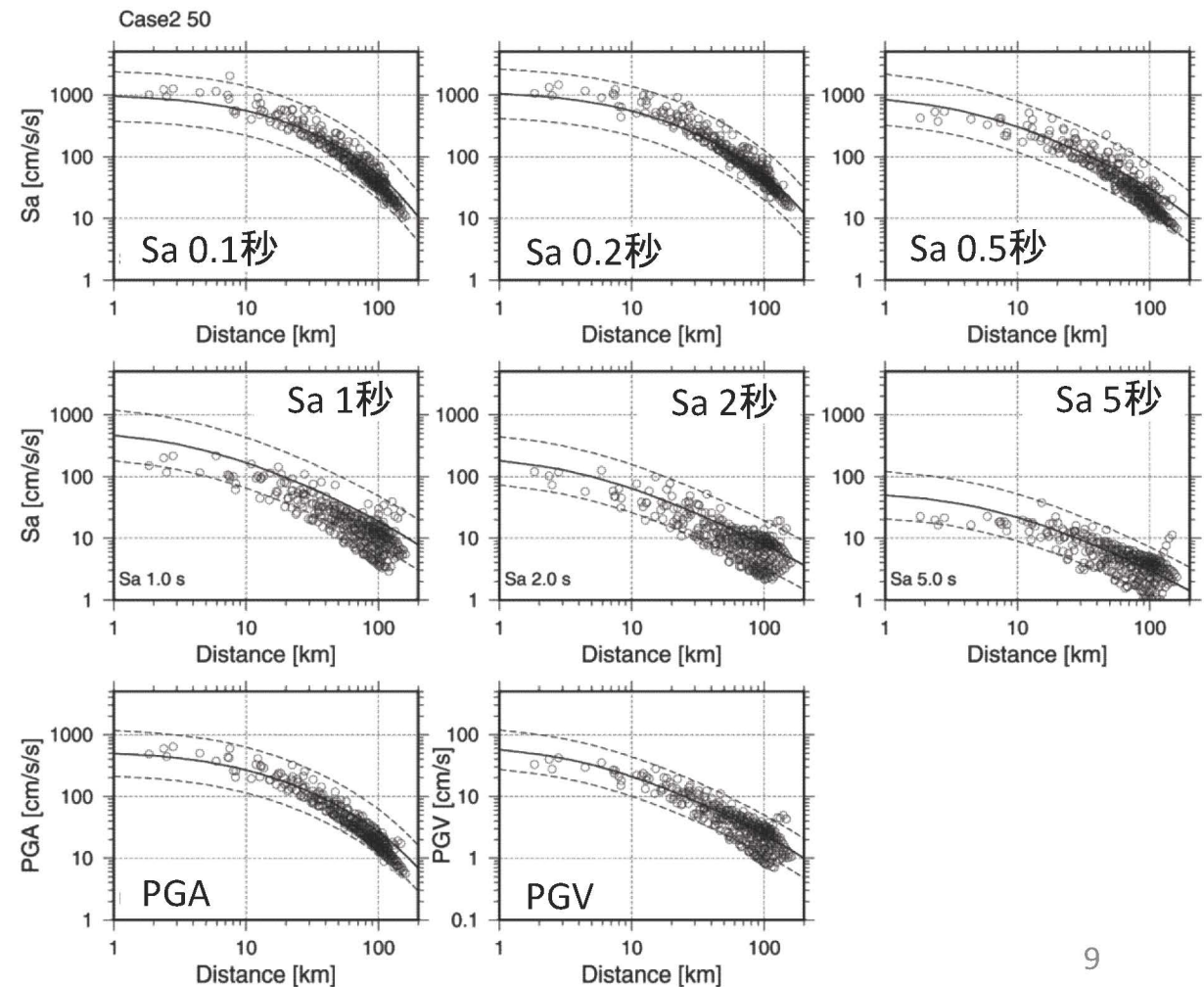
— 100 realizations $\times$ 29 stations



おおむね観測記録の再現性は良く、距離減衰式ともよく合っている

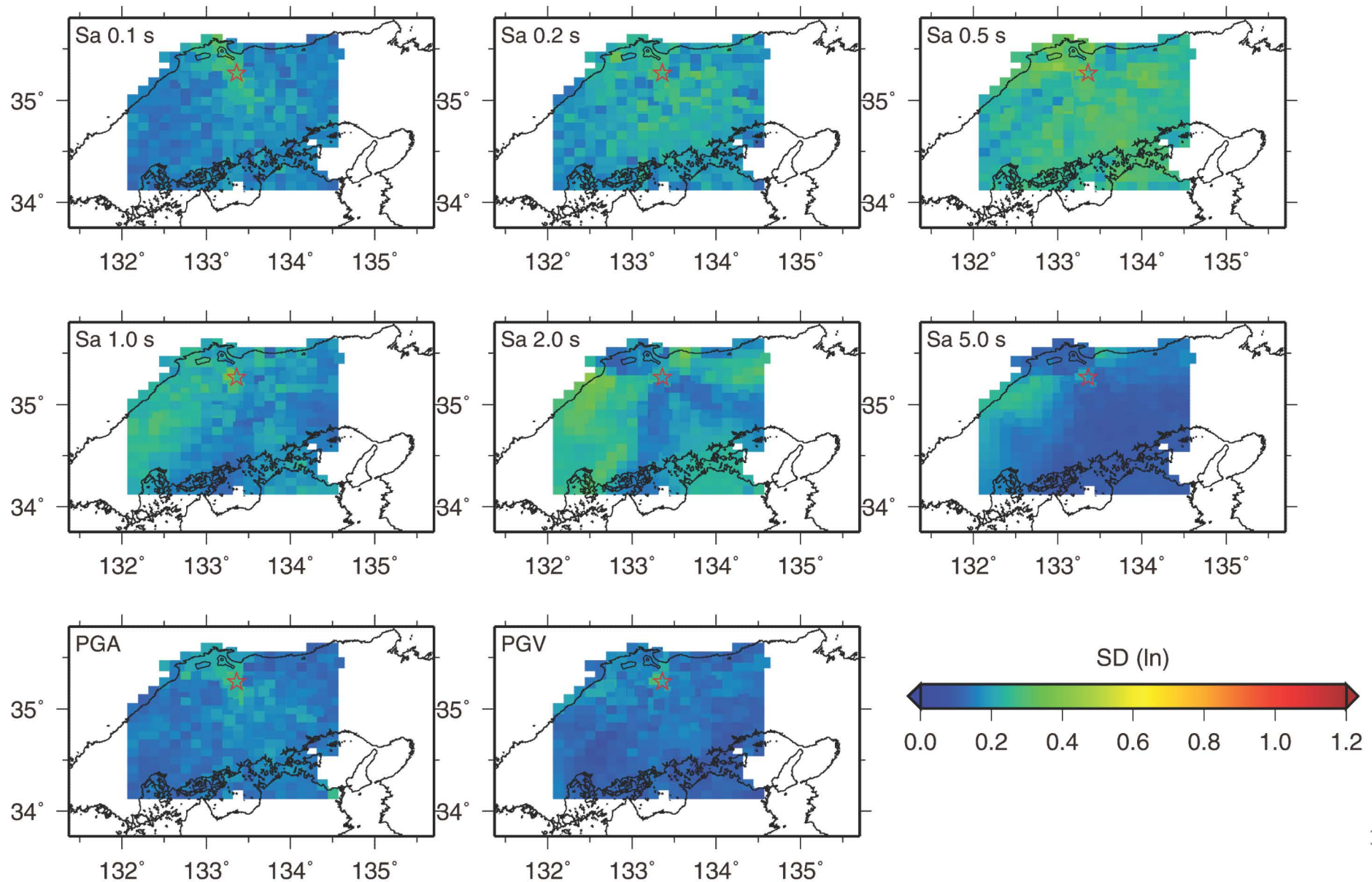
Comparison with GMPE(Kanno et al. 2006) at

$VS=600\text{m/s}$ Mean of 50 realizations



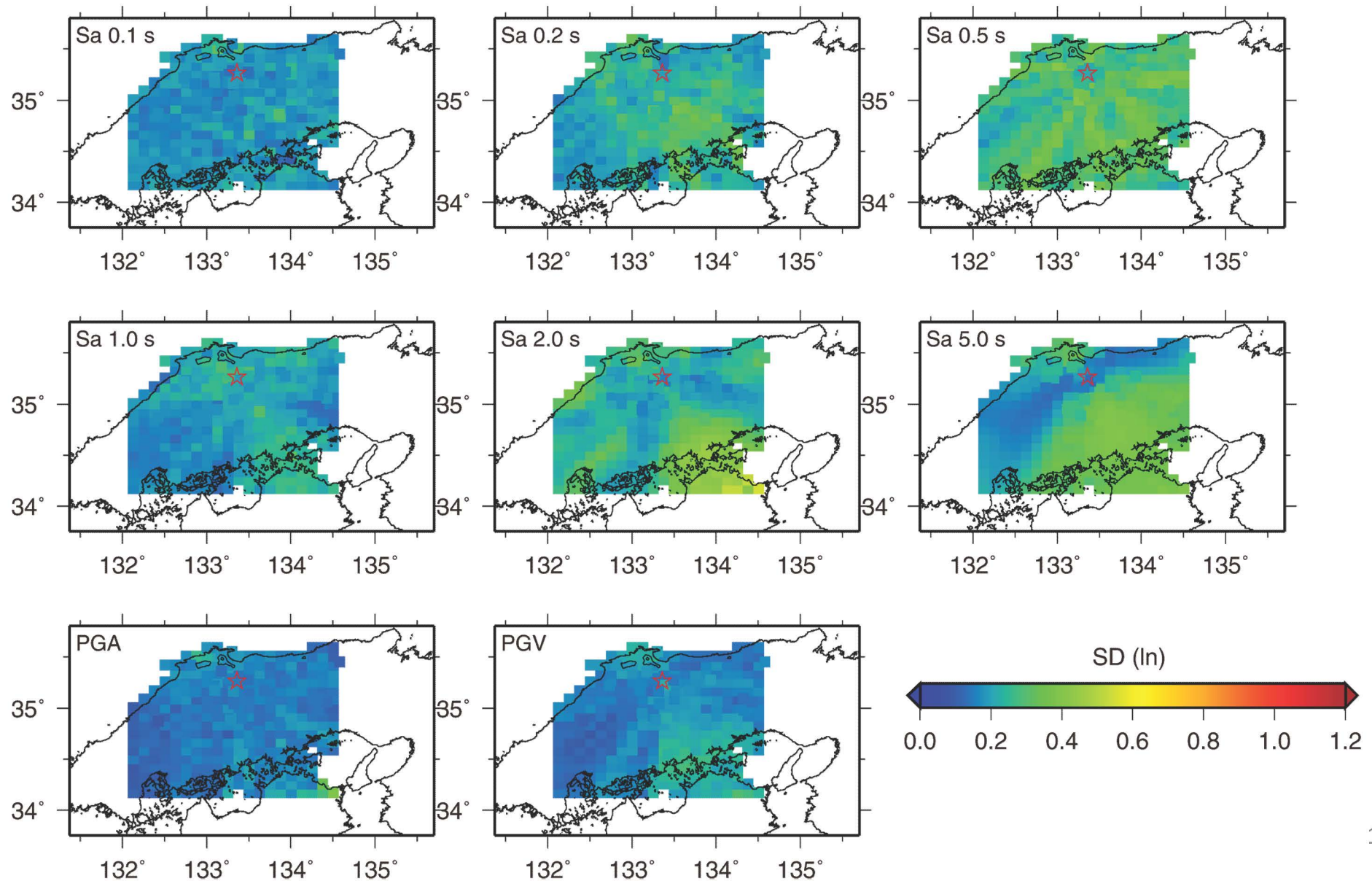
Scenario-to-scenario ground-motion variability

Ground-motion variability (SD) due to variability of asperity location (Case1a)



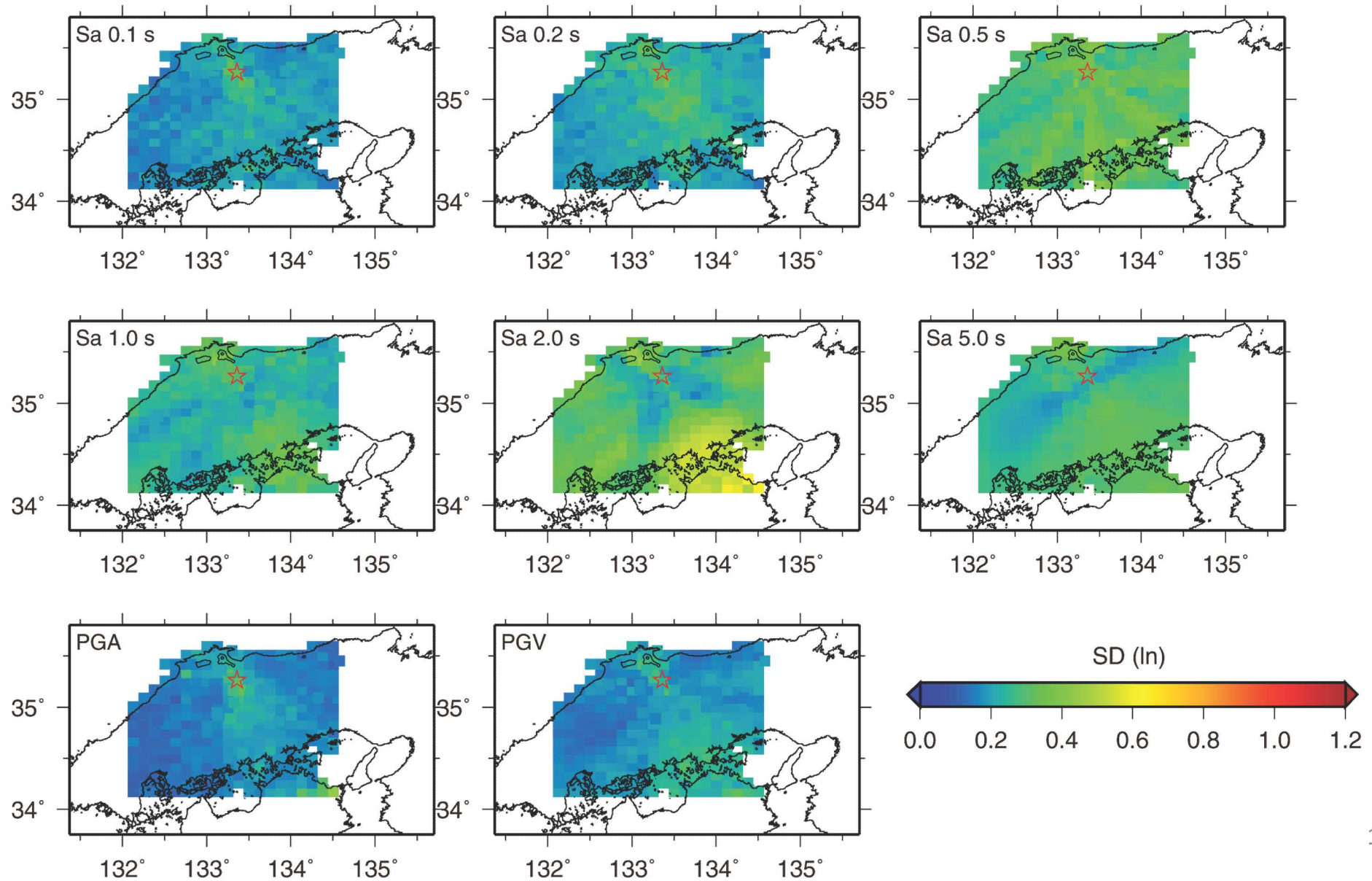
Scenario-to-scenario ground-motion variability

Ground-motion variability (SD) due to variability of hypocenter (Case1b)



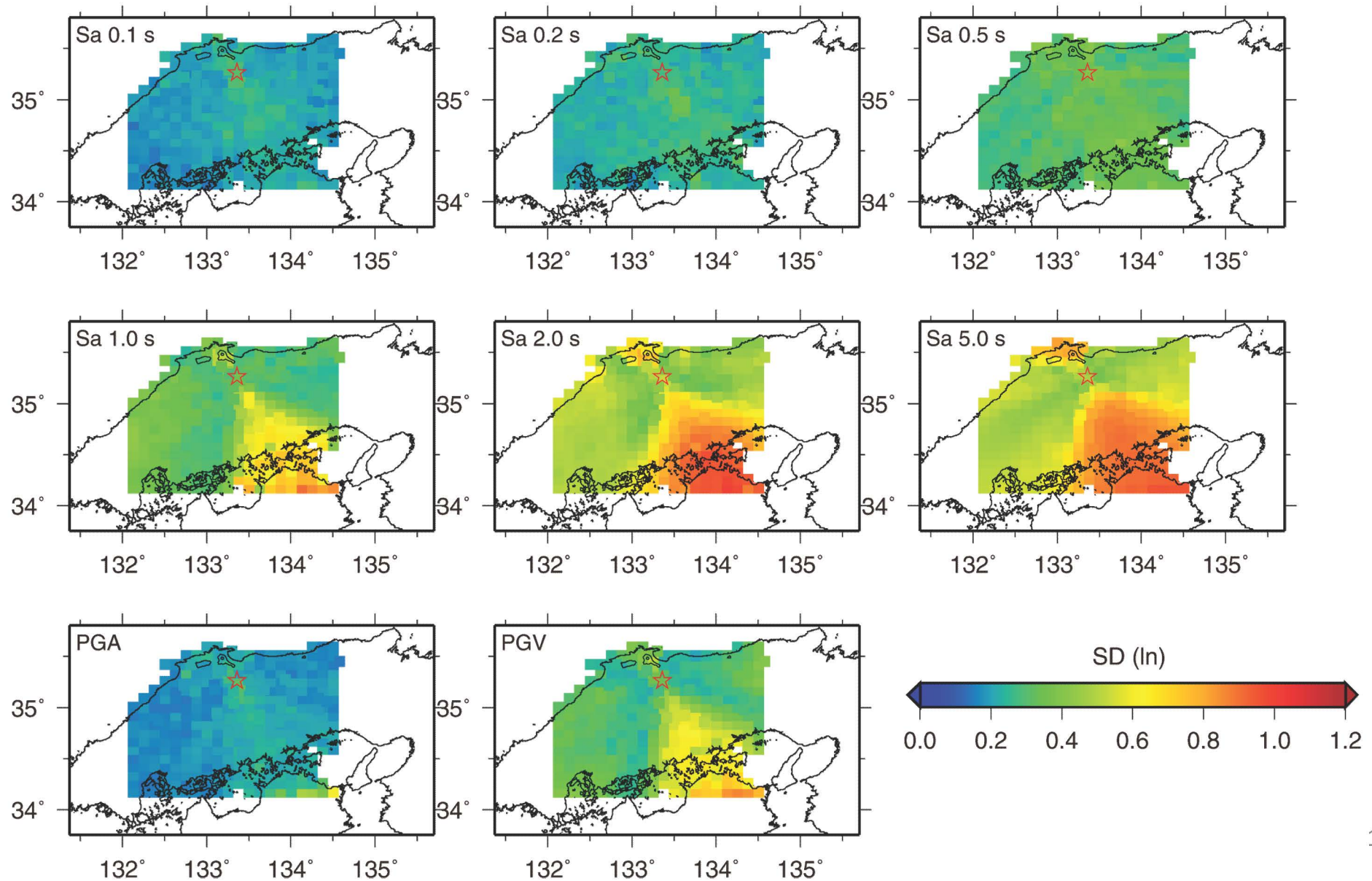
Scenario-to-scenario ground-motion variability

SD due to variability of asperity & hypocenter locations (Case2)
(seismic moment fixed)



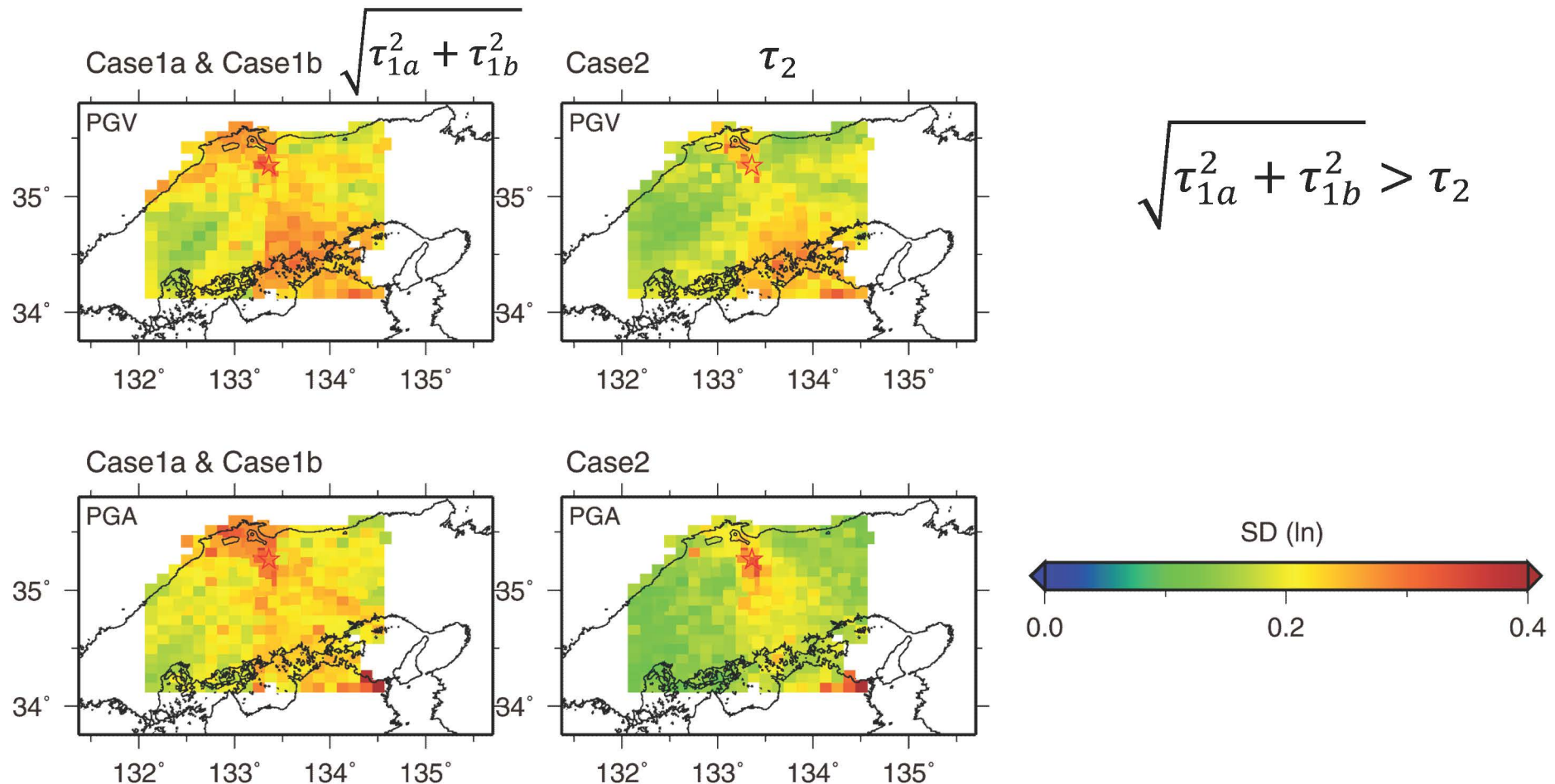
Scenario-to-scenario ground-motion variability

SD due to variability of asperity & hypocenter locations
and seismic moment (Case3)



Scenario-to-scenario ground-motion variability

- SD due to variability of asperity location (Case1a) τ_{1a}
- SD due to variability of hypocenter location (Case1b) τ_{1b}
- SD due to variability of asperity & hypocenter locations (Case2) τ_2



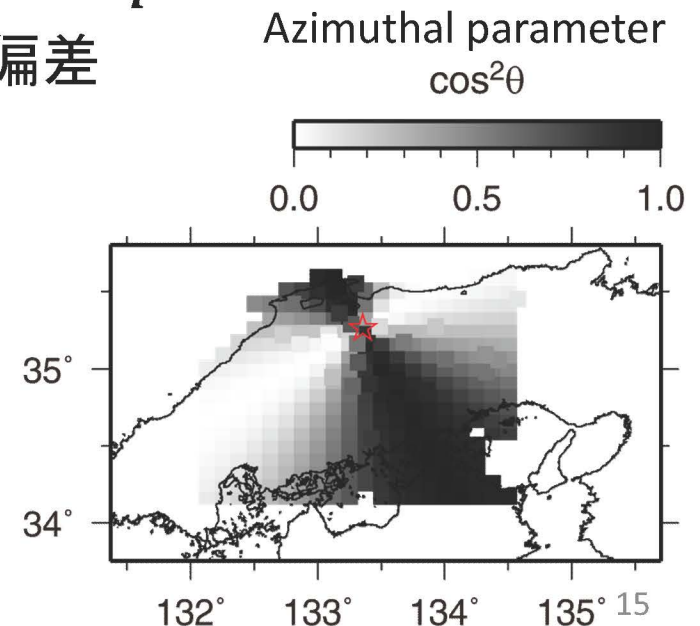
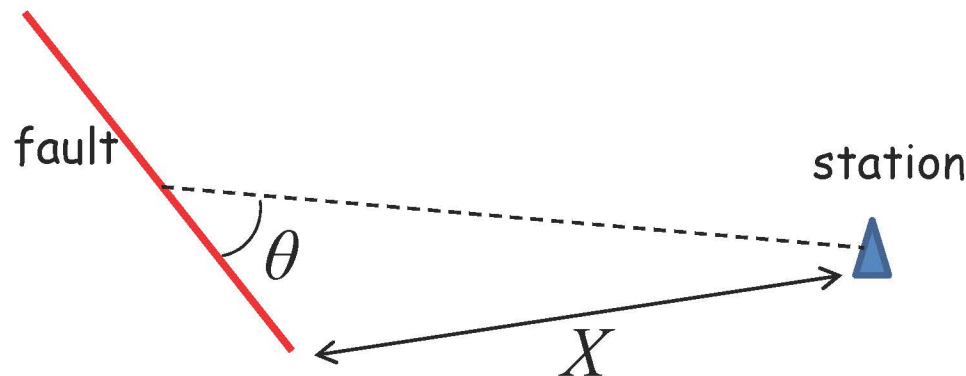
Distance and azimuthal dependence of ground-motion variability

- 距離依存：
 - 主に短周期(< 1 s)とPGAについては、震源距離とともにばらつきが小さくなる傾向
- 方位依存：
 - 主に長周期(> 1 s)とPGVについては、破壊伝播のforwardとbackward方向でばらつきが大きくなる傾向

- 回帰モデル: $SD_{\text{model}} = aX^b + p \cos^2 \theta + q$

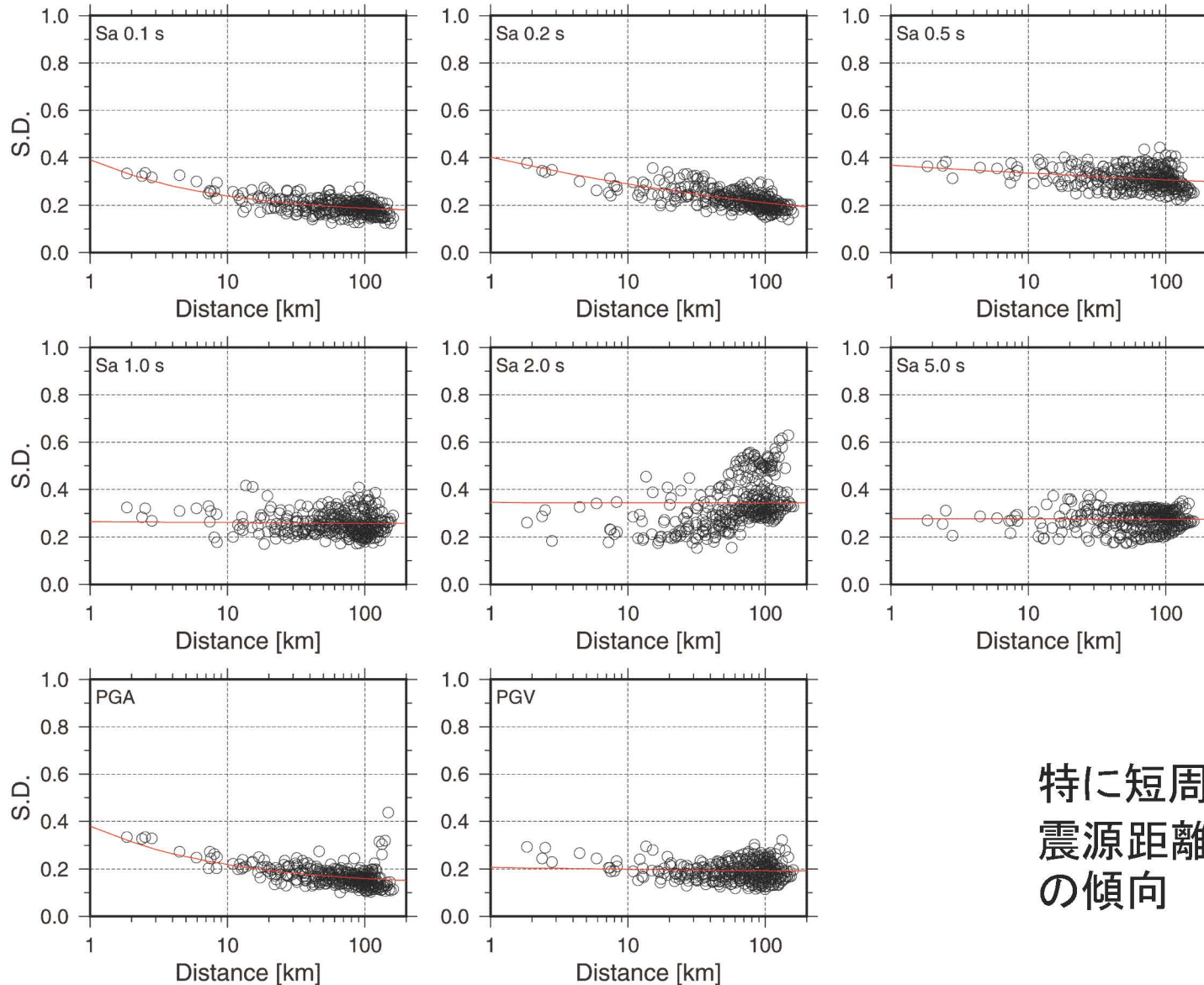
SD : 地震動 (S_a , PGA, PGV; 自然対数) の標準偏差

X : 断層最短距離 θ : 断層走行方向との角度



Distance dependence of SD

SD due to variability of asperity & hypocenter locations (Case2)

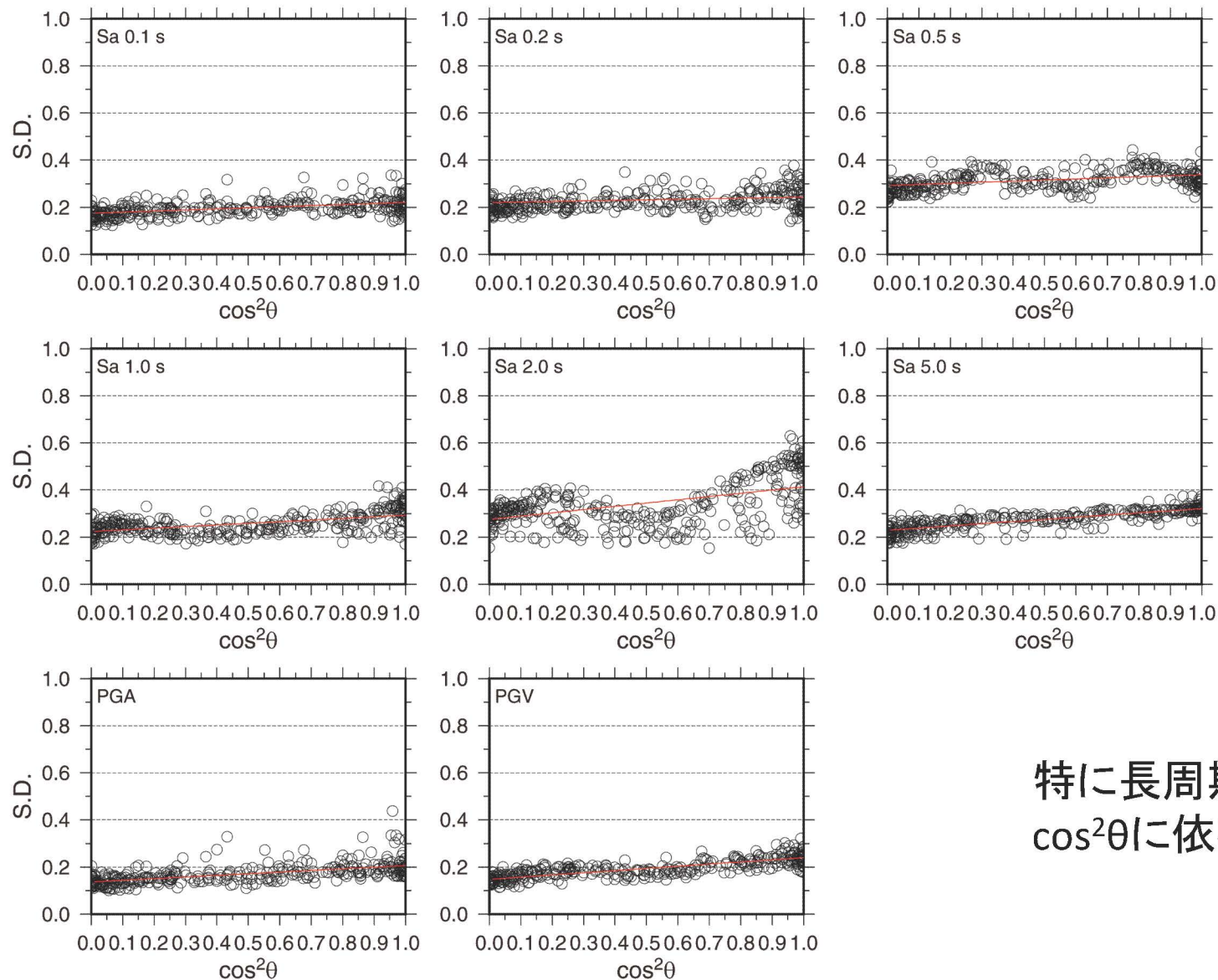


○ SD at 10km-grid points
— Regression line

特に短周期(<1秒)とPGAでは
震源距離のべき乗でばらつき減少
の傾向

Azimuthal dependence of SD

SD due to variability of asperity & hypocenter locations (Case2)

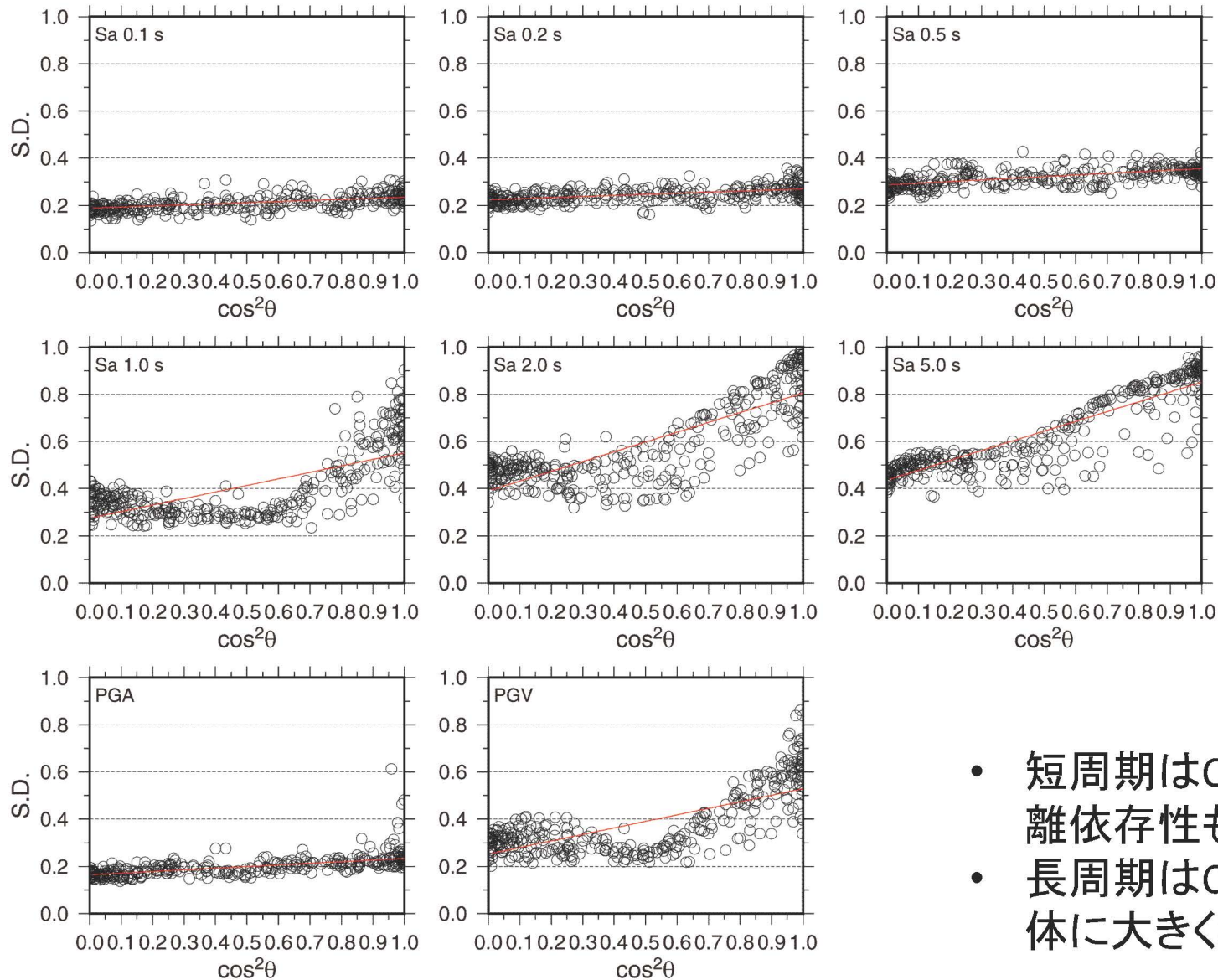


○ SD at 10km-grid points
— Regression line

特に長周期(1秒以上)とPGVで
 $\cos^2\theta$ に依存してバラツキ増加の傾向

Azimuthal dependence of SD

SD due to variability of asperity & hypocenter locations
and seismic moment (Case3)



- 短周期はCase2と大きく変わらず、距離依存性も同じ傾向
- 長周期はCase2よりもばらつきが全体に大きくなり方位依存性も大きい

Summary (1)

- 2000年鳥取県西部地震を対象とした断層モデルを用いた広帯域地震動シミュレーションによって、**震源パラメータの偶然的ばらつきによる予測地震動のばらつきの評価を試みた。**
- 今回ばらつきを与えたのは、①**アスペリティ位置**、②**破壊開始点位置**、③**地震モーメント($S - M_0$ 関係)**
- 観測記録および既往の距離減衰式と比較してシミュレーションの妥当性を確認した
 - 50回の試行でmodel biasの平均、バラツキとも安定している
- 加速度応答スペクトル(周期0.1～5秒)、PGA、PGVについて、予測地震動のイベント間ばらつきを面的に評価した
 - モーメント固定の場合(Case2)、観測記録から推定されるinter-event variability (Morikawa et al. 2008)に近い値
 - モーメントにばらつきを与えた場合(Case3)は、1秒より長周期側のdirectivityの影響の大きい地点ではMorikawa et al. (2008)よりも有意にばらつきが大きい

Summary (2)

- 各パラメータを個々にばらつかせた場合と、複数のパラメータを同時にばらつかせた場合では、後者の方が地震動のばらつきが小さい
 - 互いに相関の無いと考えられるパラメータ同士でも、それぞれのパラメータのばらつきによる地震動のばらつきを別々に評価して足し合わせることは、地震動のばらつきの過大評価につながる可能性
- 地震動のばらつきの**距離依存と方位依存**について簡単な回帰式でモデル化した。
 - 特に**短周期(周期1秒以下)**とPGAでは**震源距離のべき乗でばらつきが減少**した。長周期では距離依存性は明瞭ではない
 - 特に**長周期(周期1秒以上)**とPGVでは**方位依存性が強く**、破壊進展の forward / backward 方向でばらつきが大きくなった
 - 地震モーメントのばらつきを考慮すると、短周期やPGAには影響が少ないが、モーメントのばらつきを考慮していない場合と比べて長周期やPGVのばらつきが大きくなり、方位依存性もより強くなった

Discussion

- 不確実性を考慮すべきパラメータ
 - 応力降下量または短周期レベル ($M_0 - A$ 関係) → 引田・他(2015)
 - 破壊伝播速度 V_R
 - 震源時間関数 (ライズタイム、ピークに到達するまでの時間等)
 - ★各パラメータのばらつき定量的評価が必要。← 震源インバージョンや dynamic シミュレーションを利用できるか
 - 規模の違う地震 / 傾斜のある断層 / 3次元地下構造の影響 etc.
- 観測による地震動のばらつきとの比較・・・シミュレーションによるばらつきの妥当性確認のために必要
 - 断層近傍での地震動ばらつきや断層の有限性による地震動の方位依存性が観測記録に十分反映されていない可能性も
- 断層パラメータのばらつきを適切に設定できれば、シミュレーションによる平均的な地震動と地震動ばらつきを組み合わせることによって、観測データベースを補うとともに確率論的地震動評価へ適用できる可能性がある

References

- Al Atik et al. (2010). The variability of ground-motion prediction models and its components, *Seismological Research Letters*, 81, 794-801.
- Anderson, J. G. and Y. Uchiyama (2011). A methodology to improve ground-motion prediction equations by including path corrections, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101, 1822-1846.
- 壇一男・他(2001). 断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 545, 51-62.
- 引田智樹・他(2015). 断層モデルに基づく地震動応答スペクトル予測法と予測結果のばらつきに関する検討, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80 No.715, 1403-1413.
- Imitiaz A. et al. (2015). Is ground-motion variability distance dependent? Insight from finite-source rupture simulations, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105, 950-962.
- 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.
- Irikura K. and H. Miyake (2011). Recipe for predicting strong ground motion from crustal earthquake scenarios, *Pure and Applied Geophysics*, 168, 85-104.
- 香川敬生(2015). 多数の断層破壊シナリオによる強震動のばらつき分布, 土木学会論文集A1, Vol.71, No.4, I_191-I_197.
- Kanno, T. et al. (2006). A new attenuation relation for strong ground motion in japan based on recorded data, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96, 879-897.
- Lin, P.-S. et al. (2011) Repeatable source, site, and path effects on the standard deviation for empirical ground-motion prediction models, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101, 2281-2295.
- Morikawa, N. et al. (2008). Strong motion uncertainty determined from observed records by dense network in Japan, *Journal of Seismology*, 12, 529-546.
- Vyas, J. C. et al. (2016). Distance and azimuthal dependence of ground-motion variability for unilateral strike-slip ruptures, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106, 1584-1599.
- 山田雅行・他(2007). 強震動予測レシピに基づく予測結果のバラツキ評価の検討～震源パラメータのバラツキについて～, 日本地震工学会論文集, 7(1), 43-60.
- Yamada, M. et al. (2011). Statistical analysis of ground motions estimated on the basis of a recipe for strong-motion prediction: Application to quantitative evaluation of average and standard deviation of ground motion distribution, *Pure and Applied Geophysics*, 168, 141-153.

Summary (1)

- In this stud, we attempted to evaluate the **ground-motion variability due to aleatory variability of source model parameters** by conducting broadband ground motion simulations for the 2000 Tottori earthquake.
- Variability of the ①asperity location, ②hypocenter location, ③seismic moment ($S - M_0$ relation) was considered.
- Performance of the simulations were validated by comparing the simulated ground motion with the observed records and a GMPE.
 - 50 realizations give stable values of the mean and standard deviation of the model bias of acceleration spectra.
- Spatial distribution of the inter-event variability (SD) was investigated for the 5% damped acceleration response spectra (S_a ; period 0.1 – 5 s), PGA, and PGV
 - For Case2 (M_0 fixed), SD is comparable to that estimated by observed records (Morikawa et al. 2008)
 - For Case 3 (M_0 variability considered) SD at sites with large directivity effects is larger than observed sigma, especially at longer periods (> 1 s).

Summary (2)

- SD for the case with combined variability of several parameters (Case2) was smaller than the total SD for the cases with individual variability of each parameter (Case1a, Case1b)
 - If the variability of each parameter are considered individually, it may lead to overestimation of the SD.
- Distance- and azimuthal dependence of SD was modeled by a simple regression equation.
 - Power decay with distance was observed for $S_a (< 1 \text{ s})$ and PGA. Distance dependence was not obvious at long periods.
 - Azimuthal dependence was clearly observed for $S_a (> 1 \text{ s})$ and PGV. Larger SD was observed at forward- / backward-direction of the rupture propagation.
 - Variability in seismic moment (Case3) strongly influenced the SD of $S_a (> 1 \text{ s})$ and PGV. Stronger azimuthal-dependence was observed for Case3 compared to Case2.

Discussion

- **Variability should be further considered for:**
 - Stress drop / Short-period level ($M_0 - A$ relation)
 - Rupture velocity V_R
 - Slip-rate function (rise time, time to reach the peak slip-rate, etc.)

★ **Quantitative evaluation of the variability for the parameters is needed:**
can be possibly derived from source inversion models and/or dynamic simulations

 - M_0 -dependence / dipping faults / effects of 3D velocity model ... etc.
- **Comparison with observed ground-motion variability**
 - ▪ ▪ necessary for validation of the simulated ground-motion variability
 - Recorded data may lack some features of ground-motion variability:
near-fault area and azimuthal dependence, etc.
- Possibility of ground-motion variability from simulations: 1) it may cover the insufficiency of recorded data (to improve GMPEs), and 2) it may be applied to simulation-based probabilistic seismic hazard analysis.