

第13回日本地震工学シンポジューム 筑波  
2010年11月25日

# 長大な活断層に発生する地震に対する強震動予測 のためのレシピの高度化

Upgrading of Recipe for Predicting Strong Ground  
Motions from Inland Mega-Fault Earthquakes

入倉孝次郎、倉橋 獨

愛知工業大学地域防災研究センター

Kojiro IRIKURA and Susumu KURAHASHI

Disaster Prevention Research Center, Aichi Institute of Technology

# 強震動予測レシピの高度化とその検証

## 1. 巨視的断層パラメータの関係式

地表の断層変位と震源断層の平均変位の関係

地表断層変位の飽和

新たな巨視的断層パラメータのスケーリング

(室谷・他, 2010; Matsushima et al., 2010)

## 2. 震源断層の平均応力降下量の評価

解析解: 円形クラック(Eshelby , 1957)

無限長矩形断層 横ずれStarr (1928)

縦ずれKnopoff (1958)

その間をつなぐ関係式 入江・他(2010)

$$\text{アスペリティの応力降下量 } \Delta\sigma_a = \Delta\bar{\sigma}_c \cdot \frac{S}{S_a}$$

## 強震動予測レシピの高度化とその検証(続)

### 3. 微視的断層パラメータの関係式

最近の被害地震の観測記録から推定された  
特性化震源モデルとその断層パラメーター  
(入倉・松元・司 (2010)によるまとめ)

### 4. 特性化震源モデルに基づく加速度震源スペクトルの フラット・レベルと

観測記録から推定される加速度震源スペクトルの  
フラット・レベルの関係  
(入倉・松元・司 (2010)によるまとめ)

# Recipe for Strong Motion Prediction

## Outer Fault Parameters

- **Rupture area  $S$**  is given.
- **Seismic moment  $Mo$**  from the empirical relation of **Mo-S**.
- **Average static stress-drop  $\Delta\sigma_c$**  from appropriate physical model  
(e.g., circular crack model, tectonic loading model, etc.)

## Inner Fault Parameters

- **Combined area of asperities  $Sa$**  from the empirical relations of **S-Sa** or **Mo-Ao**.
- **Stress drop** on asperities  $\Delta\sigma_a$  based on the multiple asperity model.
- **Number** of asperities from fault segments.
- **Average slip** of asperities  $Da$  from **dynamic simulations**.
- **Effective stress** for asperities  $\sigma_a$  and background area  $\sigma_b$  are given.
- **Slip velocity time function** given as Kostrov-like function.

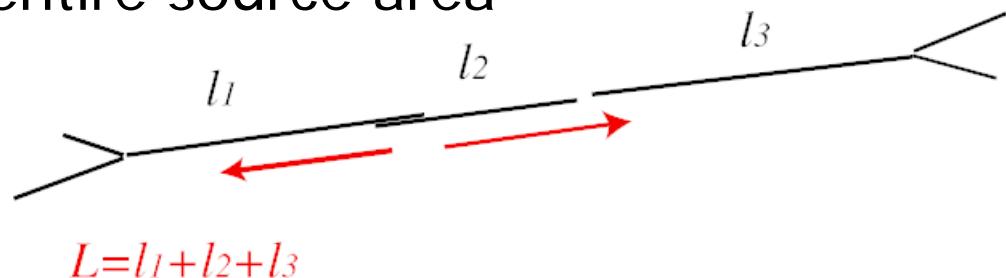
## Extra Fault Parameters

- Rupture nucleation and termination are related to **fault geometry**.

# Outer Fault Parameters

Parameters characterizing entire source area

Inland crustal earthquake



## ■ Step 1: Give total rupture area ( $S=LW$ )

- Fault length ( $L$ ) is related to grouping of active faults from geological and geomorphological survey.
- Fault width ( $W$ ) is related to thickness of seismogenic zones ( $H_s$ ) and dip ( $\theta$ ), *i.e.*  $W=H_s/\sin \theta$ .

## ■ Step 2: Estimate total seismic moment ( $M_0$ )

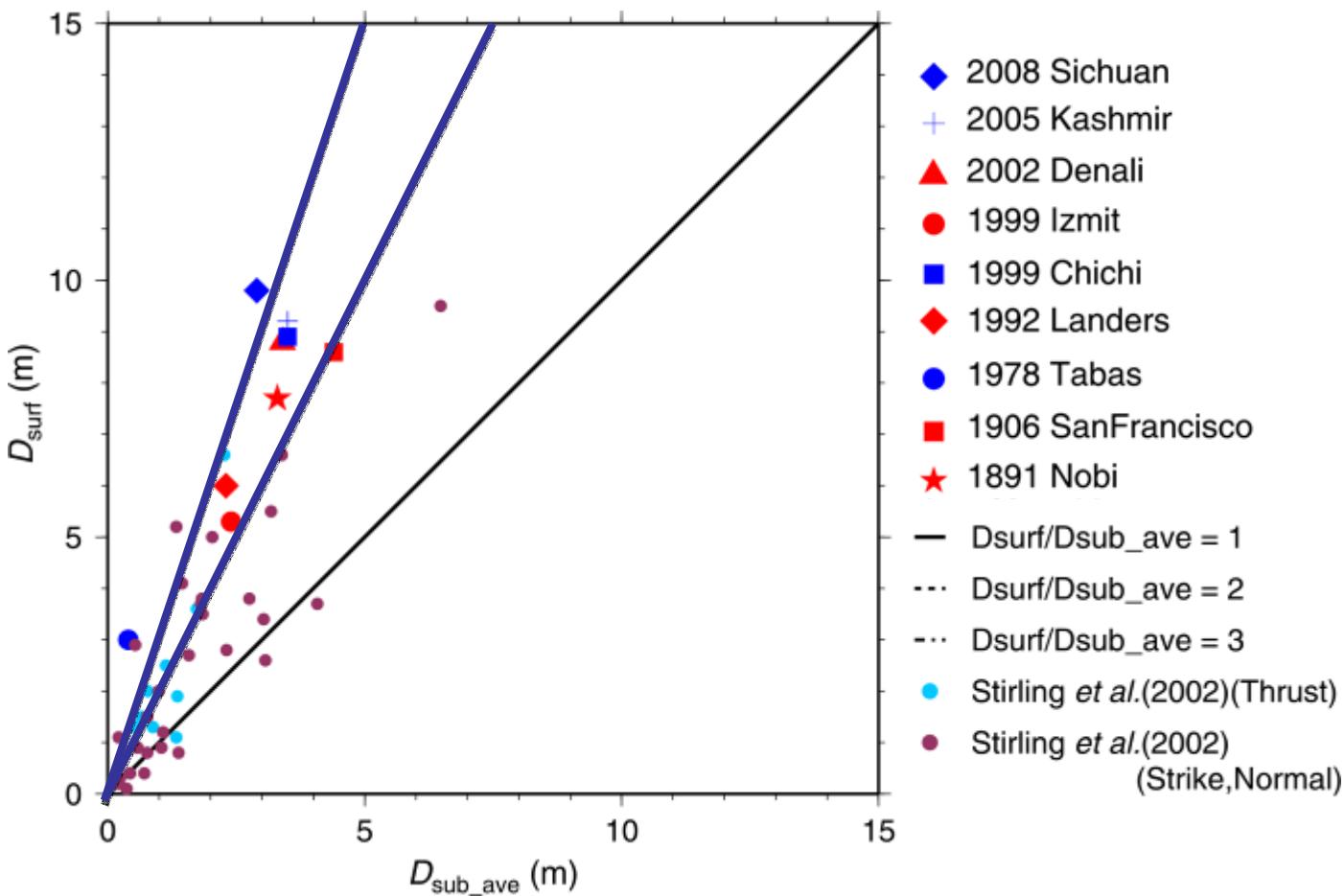
empirical relationships

## ■ Step 3: Estimate average static stress-drop ( $\Delta\sigma_c$ ) on the fault

a circular-crack model (Eshelby, 1957) for  $L/W$  less than 2

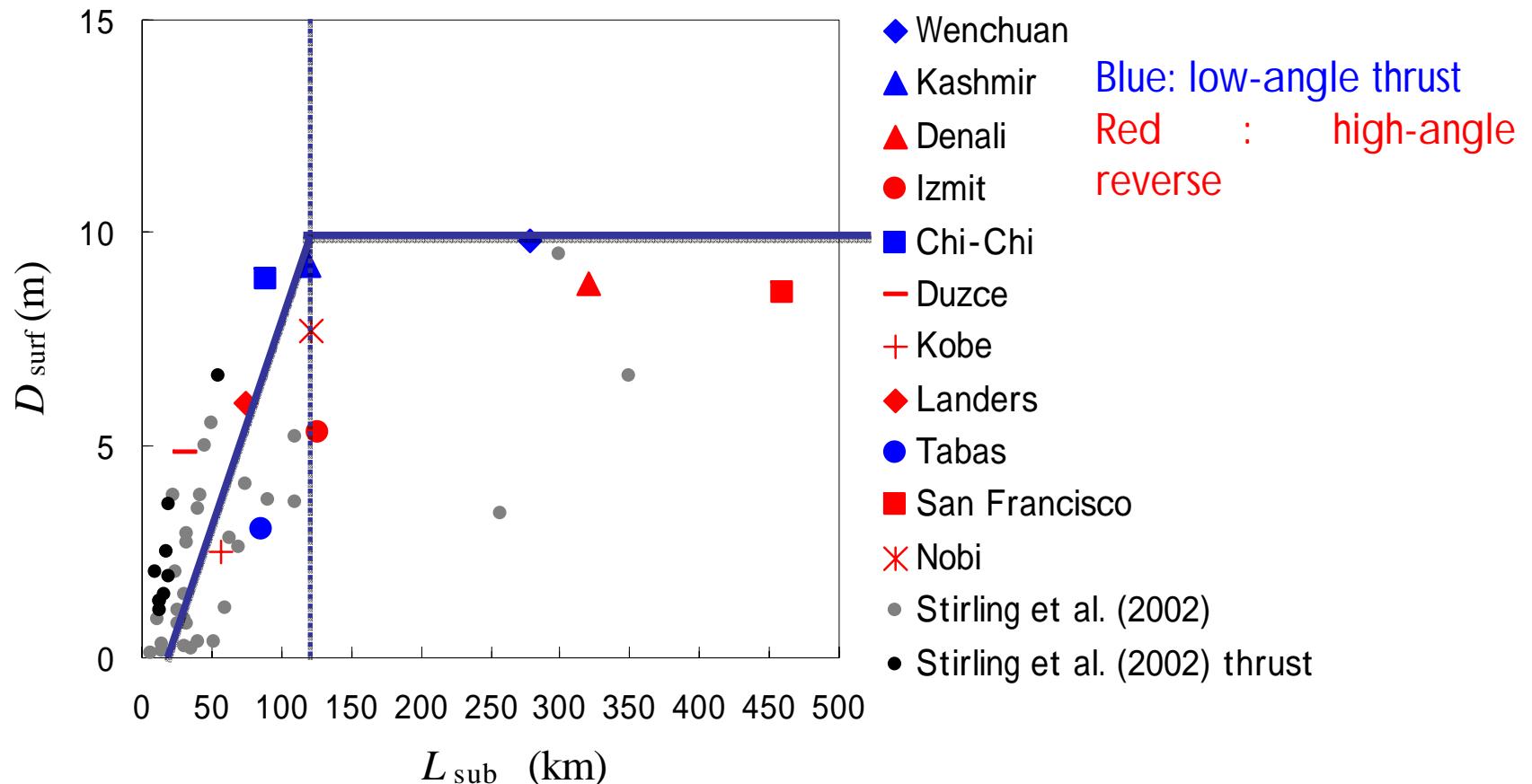
or a loading model (Fujii and Matsu'ura, 2000) for  $L/W$  more than 2.

## Dsurf versus Dsub\_ave



Dsurf is Maximum Surface Displacement and Dsub\_ave is Average Displacement on Source Fault estimated from the waveform inversion.

# Max. Surface Disp. Dsurf versus Source Fault Length Lsub

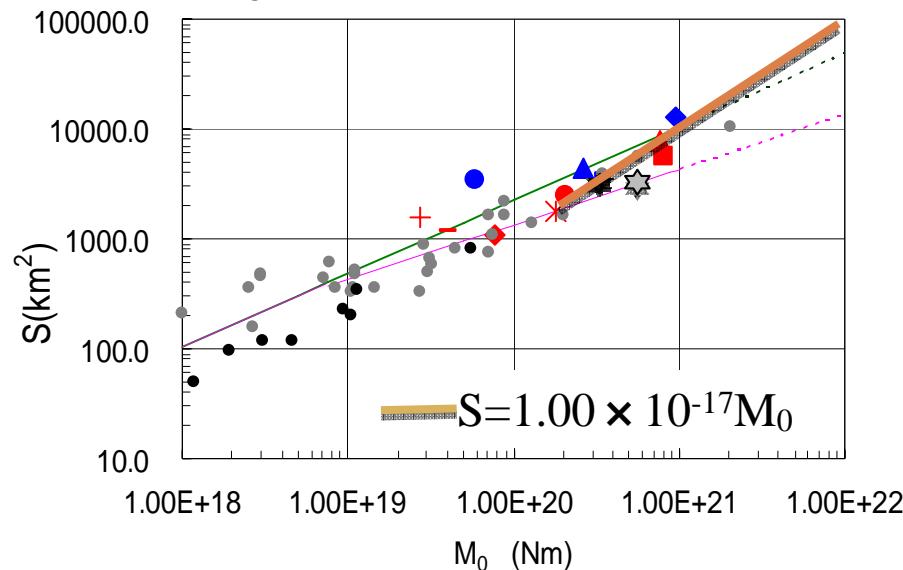


Dsurf (Max. Surface Displacement) is proportional to Lsub (Length of Source Fault) until  $L=100\text{km}$  and saturates at 10m. After Matsushima et. Al. (2010)

# New scaling relations (1)

8

- Scaling relations for mega-fault systems
  - ▣ Slip saturates at D=10m when L=100km
    - Assuming W=18km
    - $S = 1800 \text{ km}^2, M_0 = 1.8 \times 10^{20} [\text{Nm}]$



# New scaling relations (2)

9

- $S \propto M_0^{2/3}$  ( $M_0 < 7.5 \times 10^{18} \text{Nm}$ )    L, W, D
  - $S = 2.23 \times 10^{-15} \times M_0^{2/3}$  (Somerville et al., 1999)
- $S \propto M_0^{1/2}$  ( $M_0 > 7.5 \times 10^{18} \text{Nm}$ )    L, D (W fixed)
  - $S = 4.24 \times 10^{-11} \times M_0^{1/2}$  (Irikura and Miyake, 2001)
- $S \propto M_0^{1/1}$  ( $M_0 > 1.8 \times 10^{20} \text{Nm}$ )    L (D&W fixed)
  - $S = 1.00 \times 10^{-17} \times M_0^{1/1}$  (This study)

## Estimation of Average Stress

- Asperity stress drop for circular crack model is given by Eshelby (1957) as

$$\Delta\sigma_c = \frac{7}{16} \frac{Mo}{R^3}$$

*Mo*: seismic moment, *R*: radius of crack

$$\Delta\sigma_c = \frac{7\pi^{3/2}}{16} \frac{Mo}{(LW)^{3/2}} \quad L: \text{fault length}, \quad W: \text{fault width}$$

- Asperity stress drop for a rectangular fault considering tectonic loading is given by Fijii and Matsuura (2000) as

$$\Delta\overline{\sigma}_c = \frac{\alpha L + \beta}{L^2 W} M_0$$

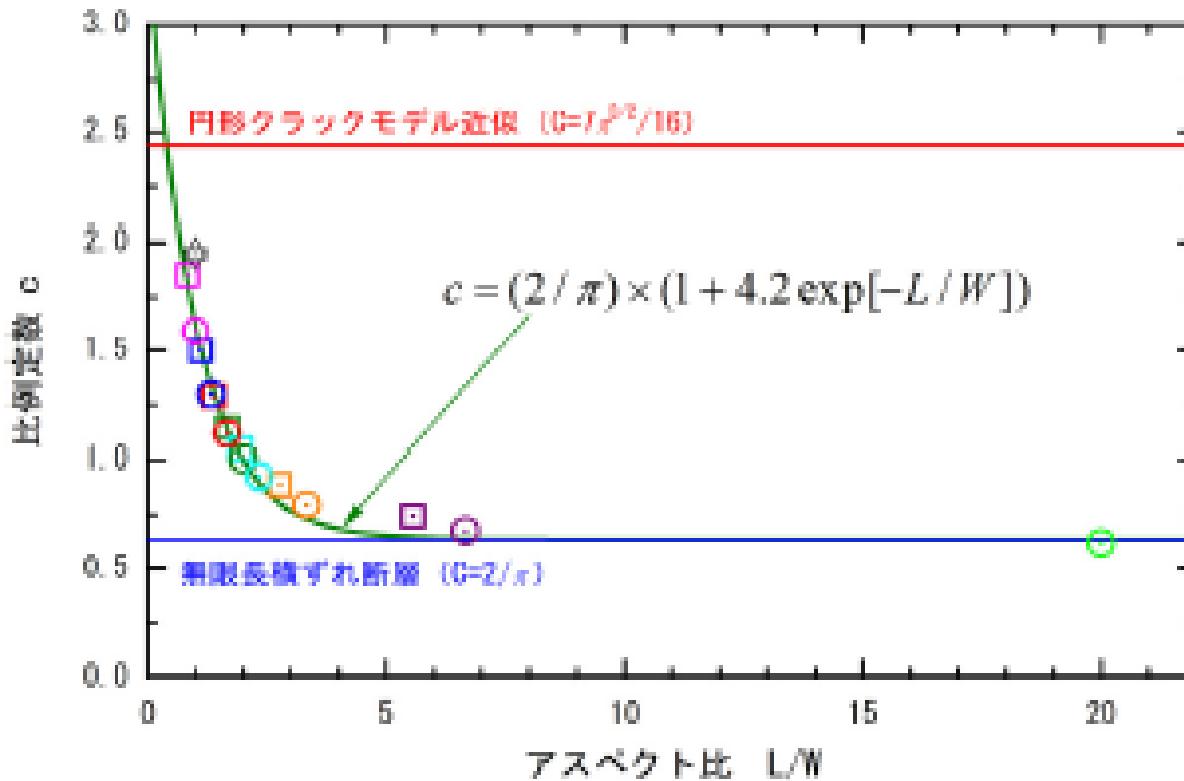
- Average stress drop for infinite-length strike-slip fault is estimated for strike-slip fault by Starr (1928) as

$$\Delta\sigma = \frac{2}{\pi} 4(\lambda + \mu)\pi(\lambda + 2\mu) \frac{M_0}{LW^2}$$

and for dip-slip fault by Knopoff (1958).

$$\Delta\sigma = \frac{2}{\pi} \frac{M_0}{LW^2}$$

# 震源断層の平均応力降下量評価のための比例定数 $c$ とアスペクト比 $L/W$ の関係 入江・他 (2010)



震源断層の平均応力降下量  
 $c$  は断層の形状で決まる比例定数

$$\Delta\sigma = c \frac{M_0}{LW^2}$$

入江・他<sup>13)</sup>は、横づれ断層について、動力学断層破壊のシミュレーションにより、 $c = (2/p)(1+4.2\exp(-L/W))$ .

# New scaling relations (2)

□  $S \propto M_0^{2/3}$  ( $M_0 = 7.5 \times 10^{18} \text{Nm}$ )   L, W, D

■  $S = 2.23 \times 10^{-15} \times M_0^{2/3}$  (Somerville et al., 1999)

□  $S \propto M_0^{1/2}$  ( $M_0 > 7.5 \times 10^{18} \text{Nm}$ )   L, D (W fixed)

■  $S = 4.24 \times 10^{-11} \times M_0^{1/2}$  (Irikura and Miyake, 2001)

□  $S \propto M_0^{1/1}$  ( $M_0 = 1.8 \times 10^{20} \text{Nm}$ )   L (D&W fixed)

■  $S = 1.00 \times 10^{-17} \times M_0^{1/1}$  (This study)

# Inner Fault Parameters

Slip heterogeneity or roughness of faulting

## Inland crustal earthquake

- Step 4: Estimate combined area of asperities (Sa) from empirical relation Sa-S  
(Somerville et al., 1999; Irikura and Miyake, 2001 →)

$$Sa/S = 0.22$$

Sa: combined area of asperities (inner)

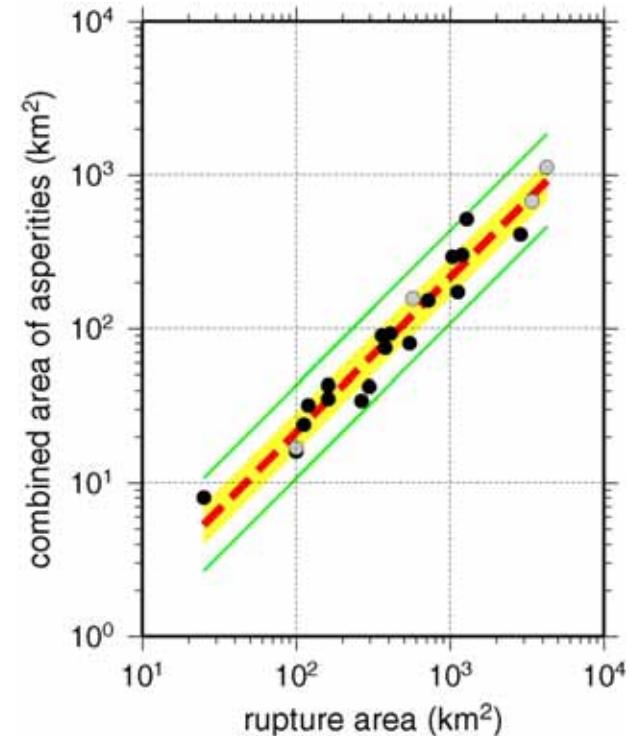
S : total rupture area (outer)

- Step 5: Estimate Stress Drop on Asperities ( $\Delta\sigma_a$ ) from multi-asperity model (Madariaga, 1979)

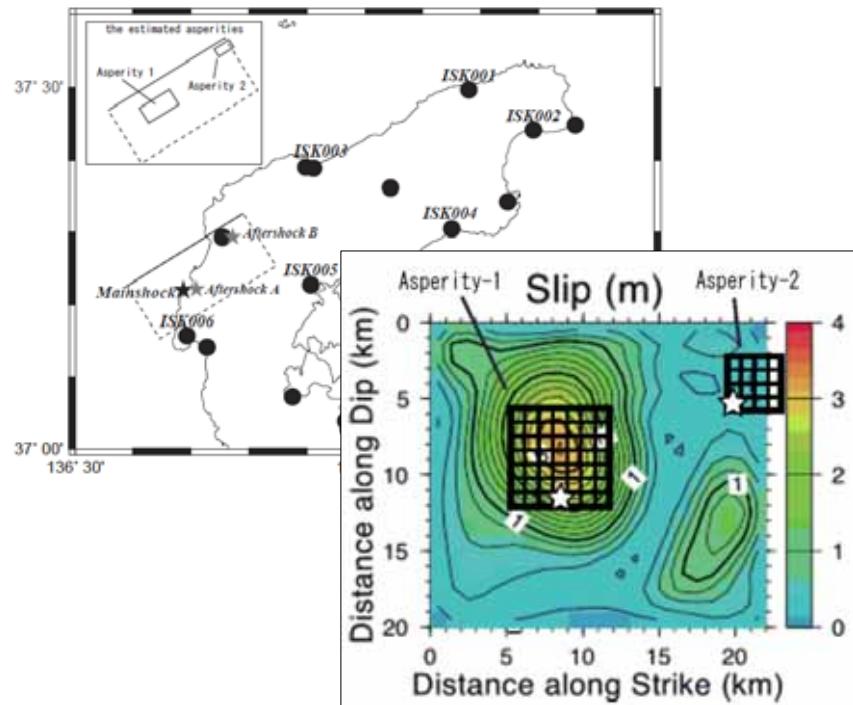
$$\Delta\sigma_a = \bar{\Delta\sigma_c} \cdot \frac{S}{S_a}$$

$\Delta\sigma_a$ : stress drop on asperity (inner)

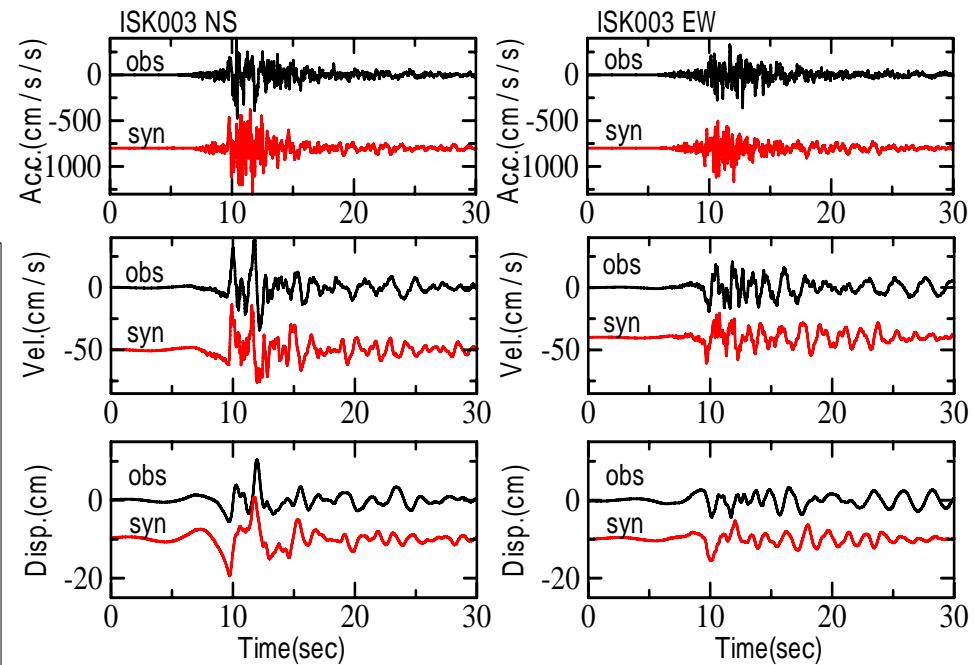
$\Delta\sigma_c$ : average stress drop (outer)



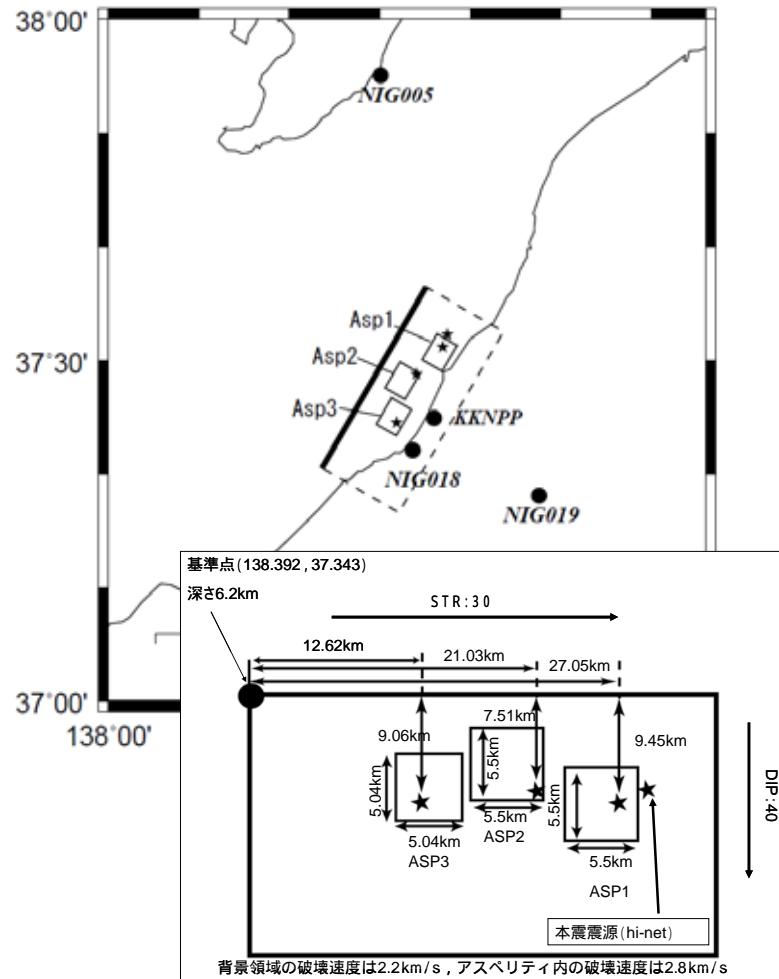
# 2007年能登半島地震の特性化震源モデル



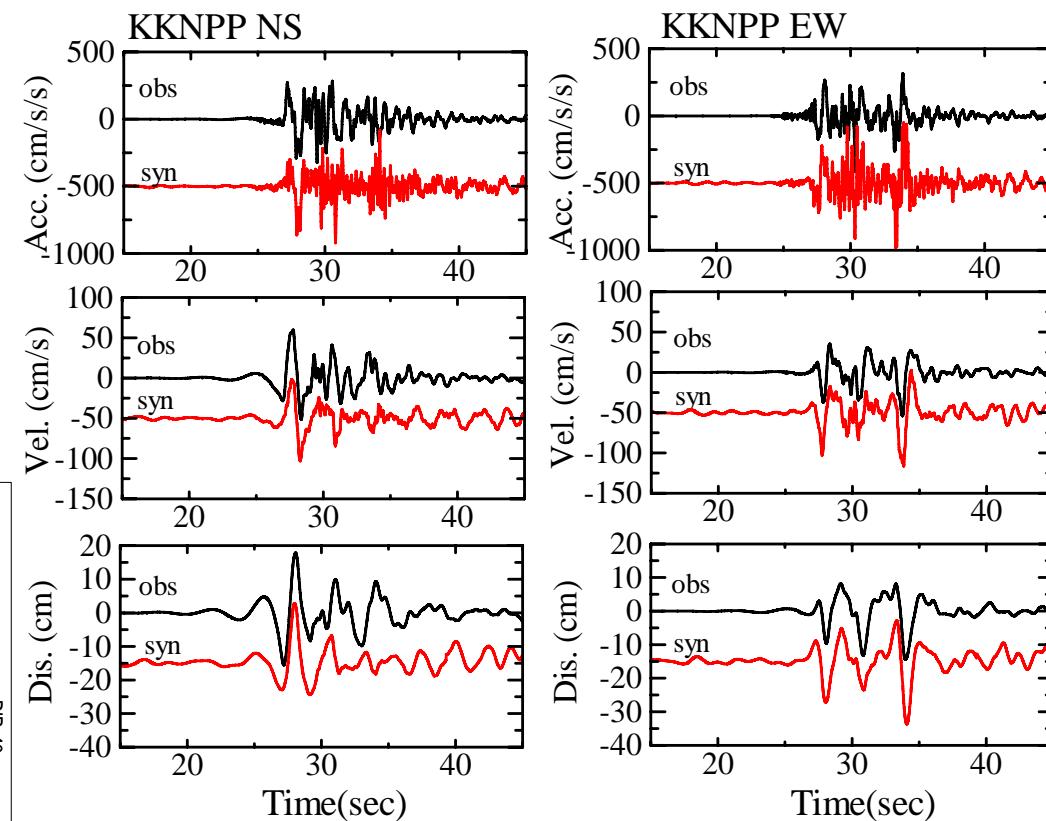
# 観測波形と合成波形の比較



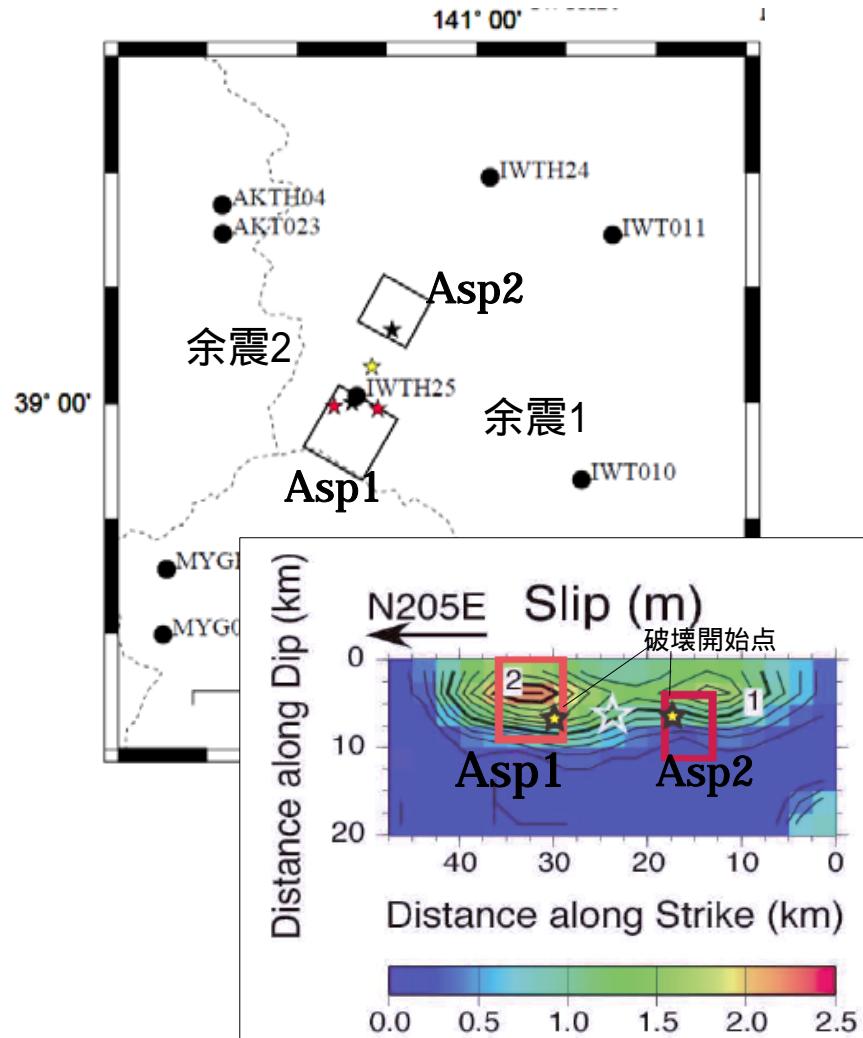
# 2007年新潟県中越沖地震 の特性化震源モデル



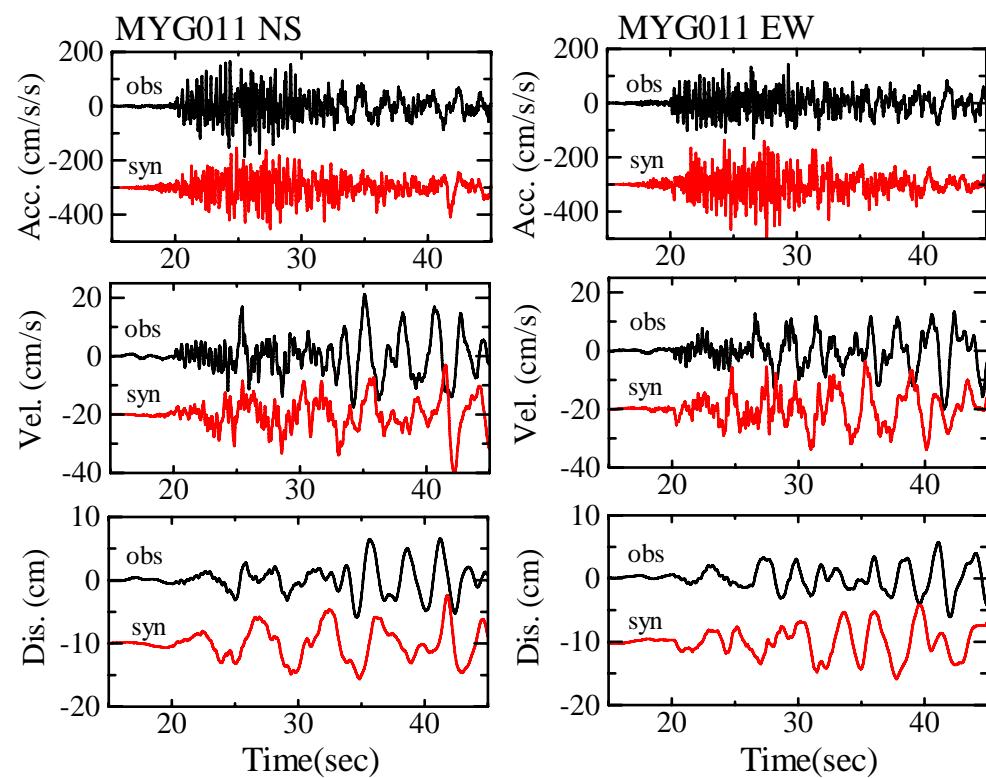
# 観測波形(黒)と合成波形(赤) の比較



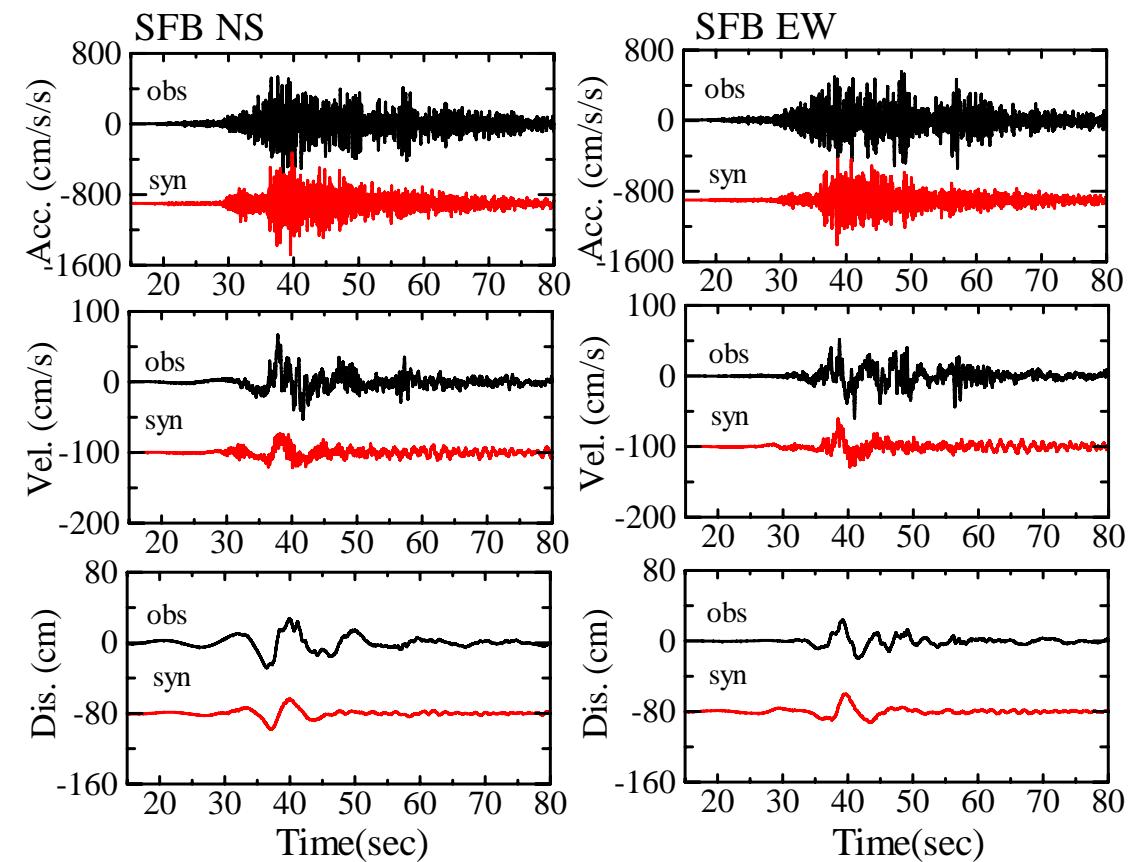
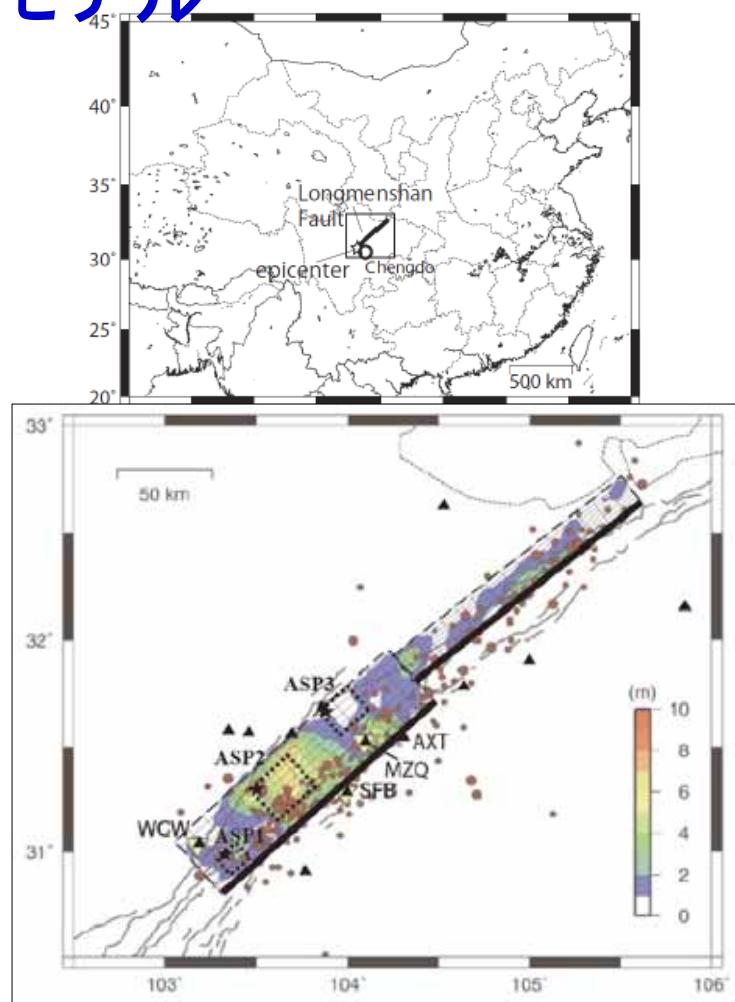
# 2008年岩手宮城内陸地震 の特性化震源モデル



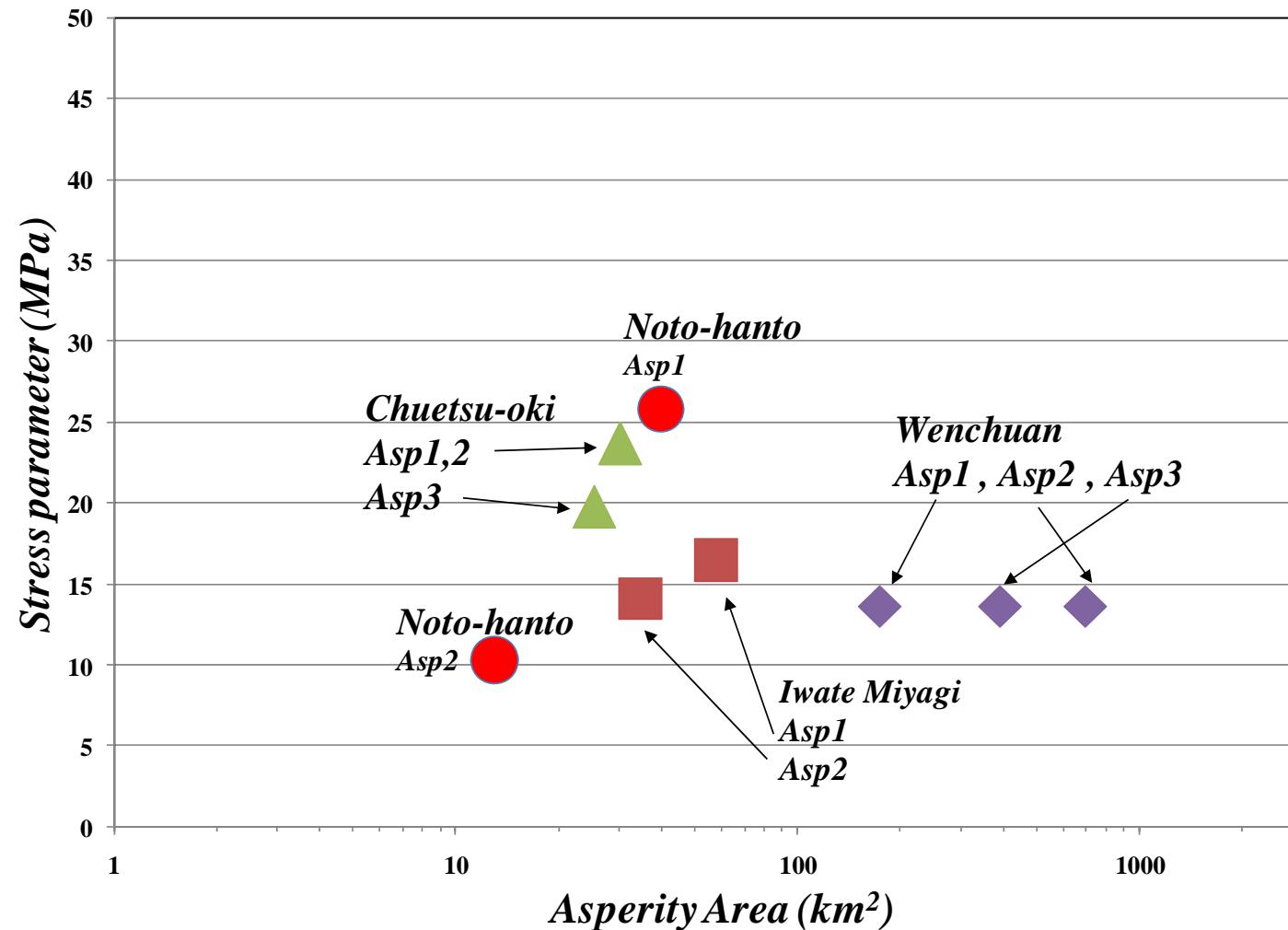
# 観測波形(黒)と合成波形(赤) の比較



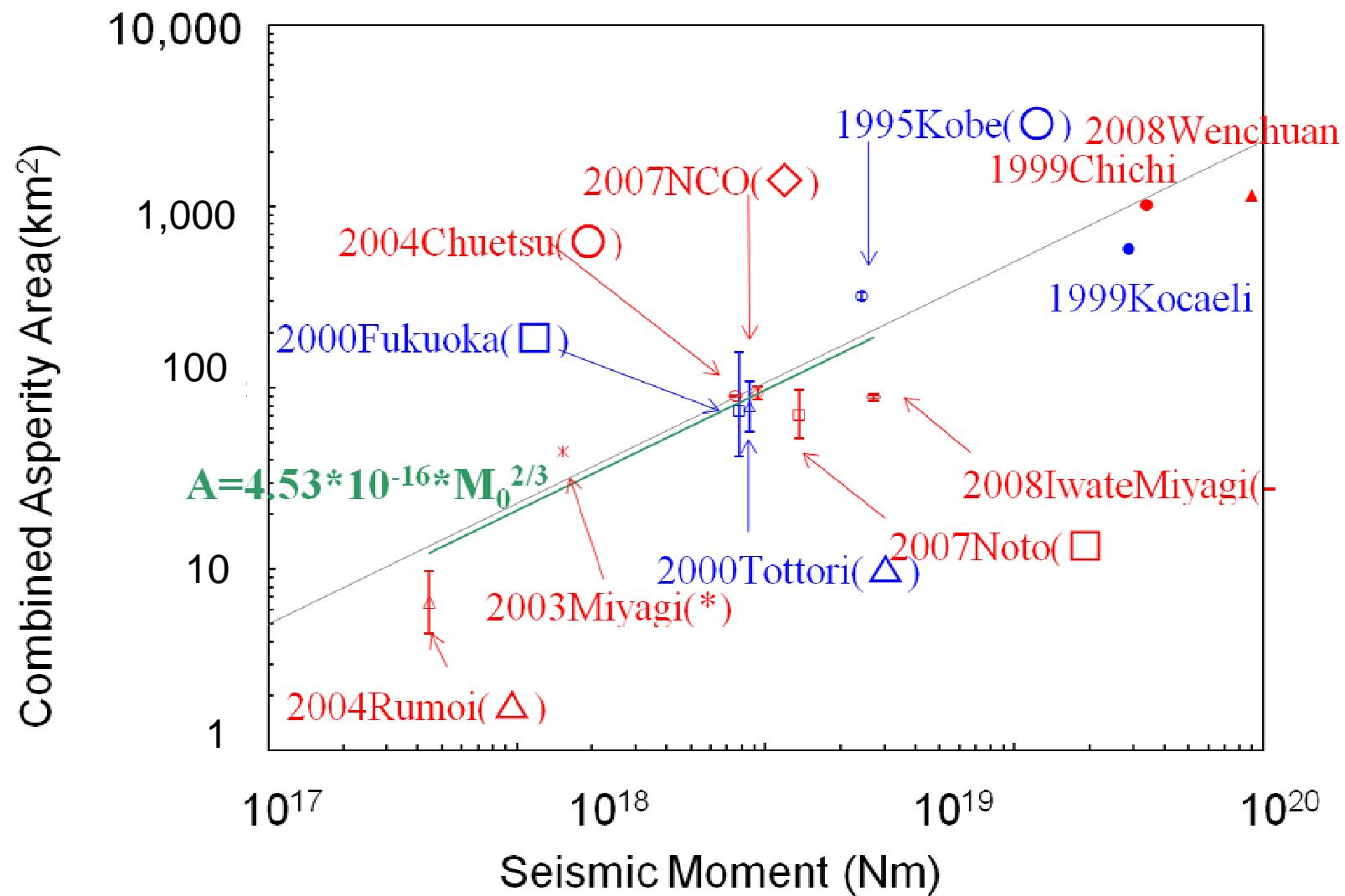
# 2008年四川地震( Mw 7.9)の 観測波形(黒)と合成波形(赤) 南西セグメントの特性化震源 モデル の比較



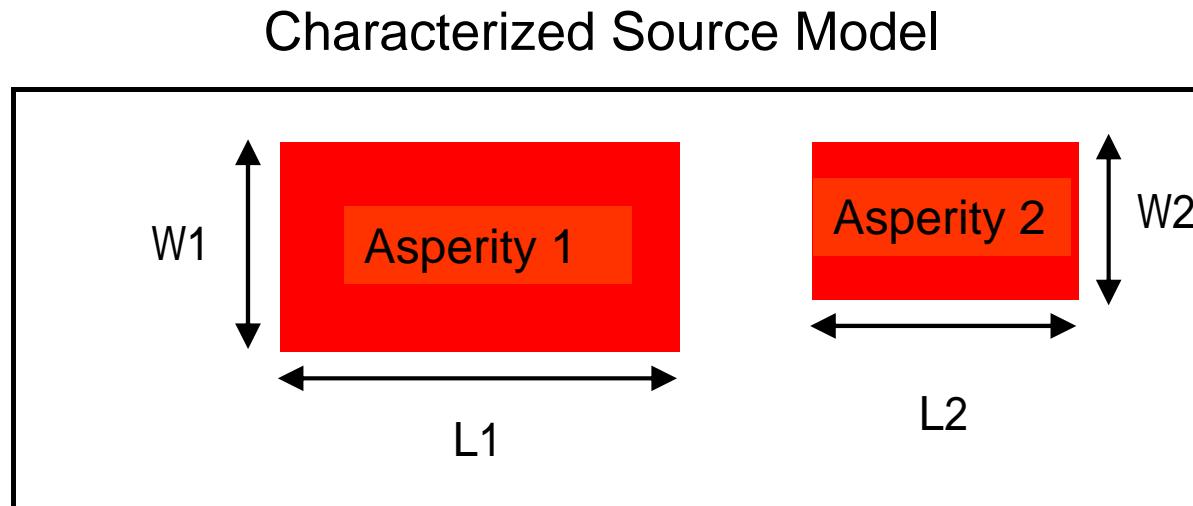
# アスペリティのストレス・パラメーターとアスペリティ面積の関係



Relation between Seismic Moment and Combined Asperity Area  
from the waveform inversion using strong motion data



# Comparison of Observed Acceleration Source Spectral Levels with Estimated Ones from Characterized Source Model

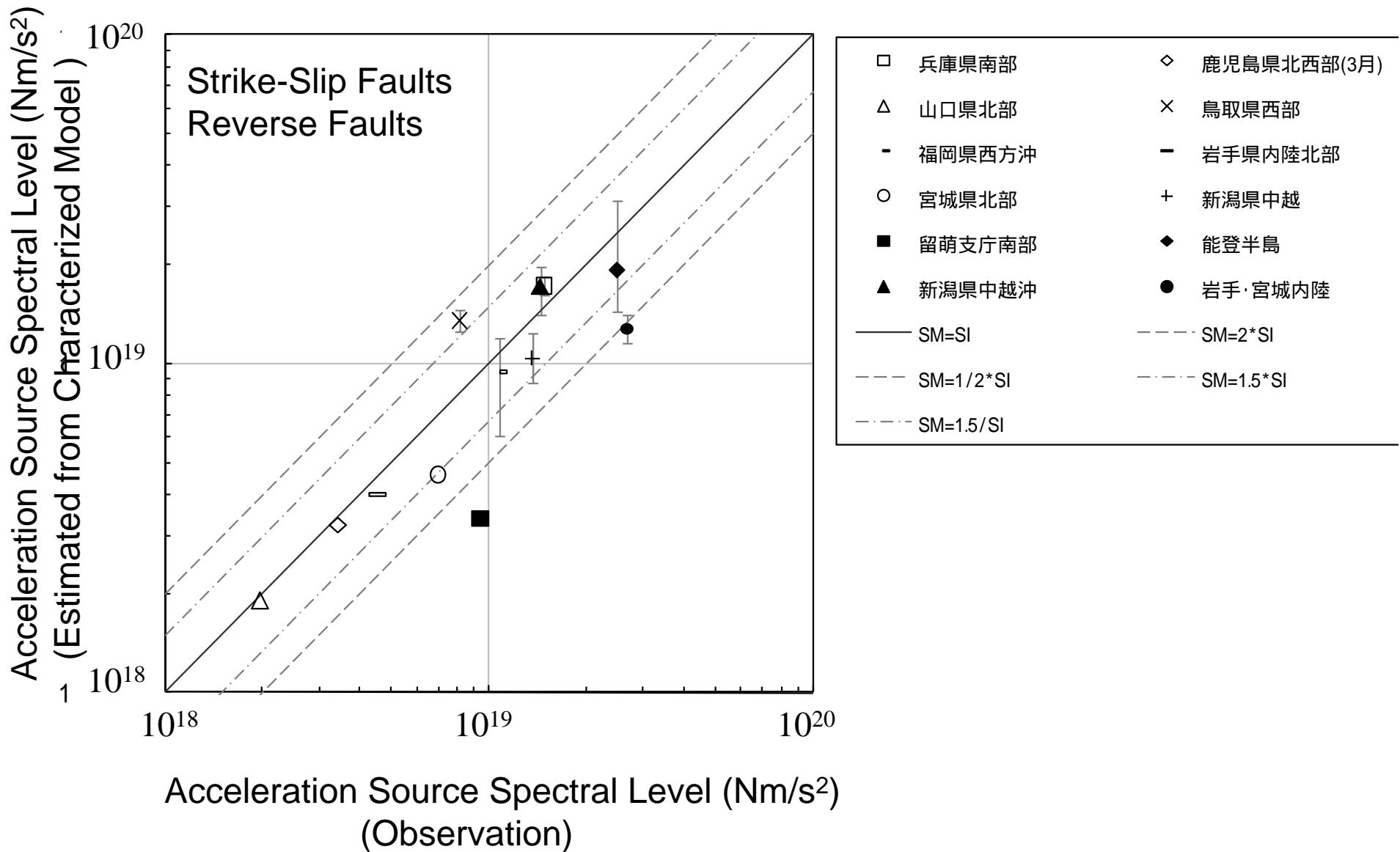


Acceleration Source Spectral Level  $A$

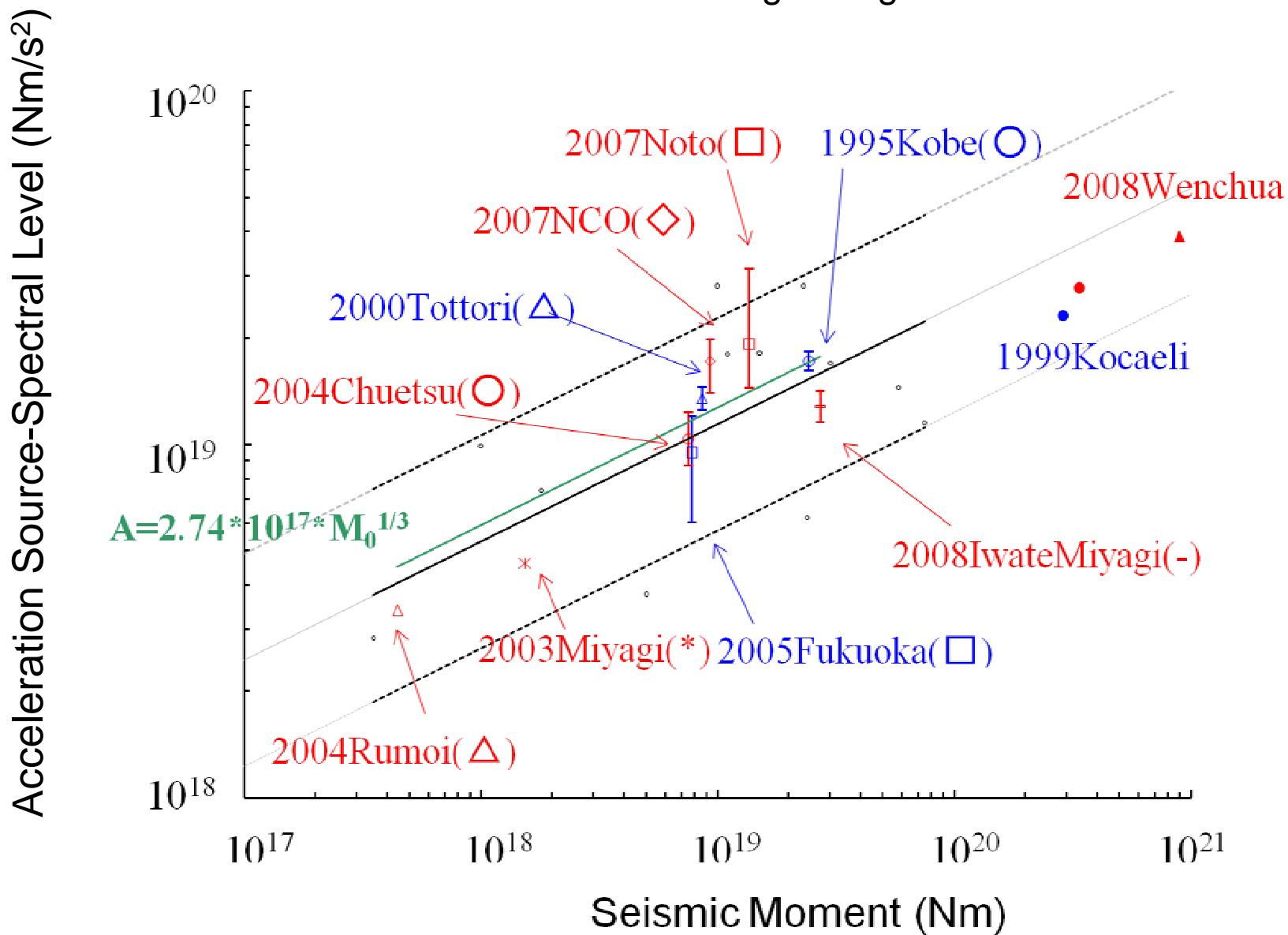
$$A = 4\pi\beta^2 \left[ \sum_{i=1}^N (\Delta\sigma_i r_i)^2 \right]^{1/2}$$

: S wave velocity in source area  
N: Number of asperities  
 $\Delta\sigma_i$ : Stress drop of Asperity  $i$   
 $r_i$ : Equivalent radius of Asperity  $i$   
i.e.  $r^2 = L \times W$ )

# Comparison of Observed Acceleration Source Spectral Levels with Estimated Ones from Characterized Source Model



## Relation between Seismic Moment and Combined Asperity Area from the waveform inversion using strong motion data



## まとめ

- 1) 長大断層を含む内陸活断層について、断層面積と地震モーメントの関係は3段階に分かれることが確かめられた。平均応力降下量を推定するには、形状に依存する比例係数cに関して、アスペクト比を考慮して適切な値を用いる必要がある。
- 2) 微視的パラメータとして重要なアスペリティでの応力降下量はアスペリティの面積には依存しないが、地震タイプ、地域性(深さ)で変化する可能性がある。そのバラツキについて今後の検討が必要とされている。

## 謝辞

本研究は、独立行政法人防災科学技術研究所による強震観測網(K-NETおよびKiK-net)の記録および東京電力株式会社から提供された強震動記録および中国地震工程力学研究所より提供されたものを使用しました。本研究の中で、長大断層のスケーリングについては、地震調査委員会強震動評価部会における議論をまとめたものです。記して感謝いたします。