

# 平成28年度建築基準整備促進事業

## S23. 相模トラフ沿いの巨大地震等による 設計用長周期地震動の作成手法に関する検討

(株)大崎総合研究所

共同研究：国立研究開発法人 建築研究所

# はじめに

## 背景

- ・平成20年度～24年度の建築基準整備促進事業で南海トラフ沿いの巨大地震に対する設計用長周期地震動の作成手法を検討(旧検討)
- ・作成手法を元に、国土交通省は南海トラフ沿いの巨大地震に対する設計用長周期地震動を策定し、平成29年4月1日から超高層建物等の大臣認定が強化
- ・作成手法は、相模トラフ沿いの地震は適用範囲外

## 目的

- ・上記手法と地震観測記録を元に、**相模トラフ沿いの地震及び震源近傍に適用範囲を拡張するための検討を行う。**

# 検討フロー

地震観測記録に基づき  
データセット作成

応答スペクトル  
の回帰式作成

群遅延時間の平均  
値・標準偏差の回  
帰式作成

破壊伝播効果  
モデルの検討

波形の計算

既往の震源モデ  
ルの収集

手法の検証

観測波、既往の  
計算波形の収集

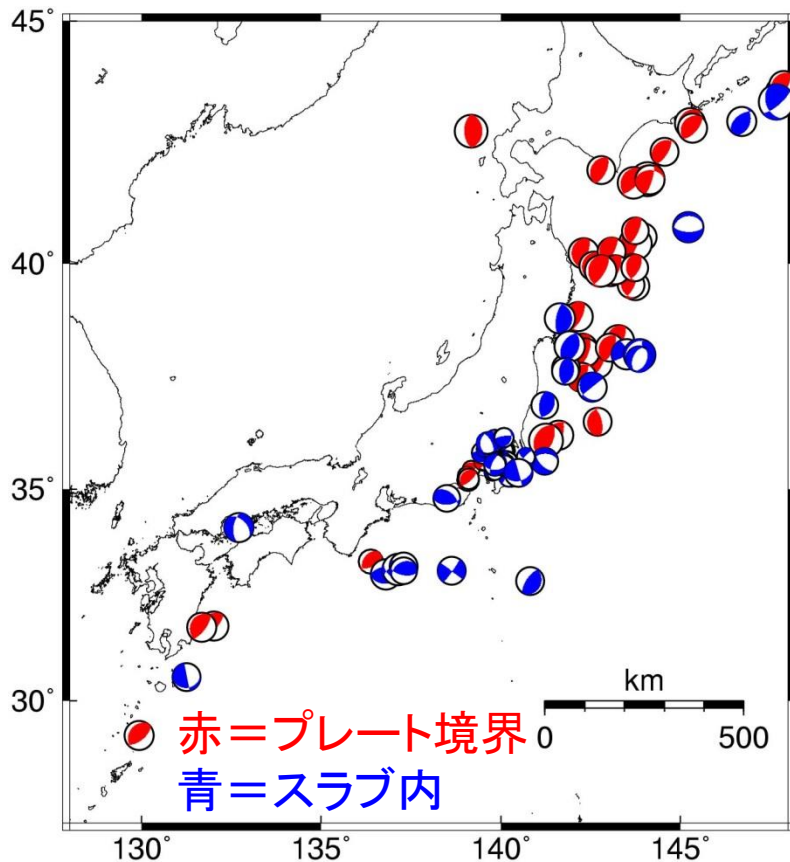
# データセットの作成方針

M8クラスの相模トラフ沿いの地震とM7クラスの首都直下のスラブ内地震に適用可能な回帰式(対象周期0.1~10秒)を作成する。

- 規模の大きな相模トラフ沿いの地震の記録は少ない
  - >相模トラフ沿いの $M_J \geq 4.0$ の地震を用いる  
相模トラフ沿いの地震のサイト特性、伝播経路特性を反映
- M8クラスの規模の大きな地震まで適用可能とする
  - >全国の $M_J \geq 6.5$ の海溝型地震も用いる
- 震源近傍まで適用可能とする
  - >全国の地殻内地震の記録も補助的に用いる
- 内閣府(2013)の首都直下の想定スラブ内地震の最も深い断層下端69km
  - >スラブ内地震の深さ $< 75\text{km}$

# 回帰式作成に用いた地震

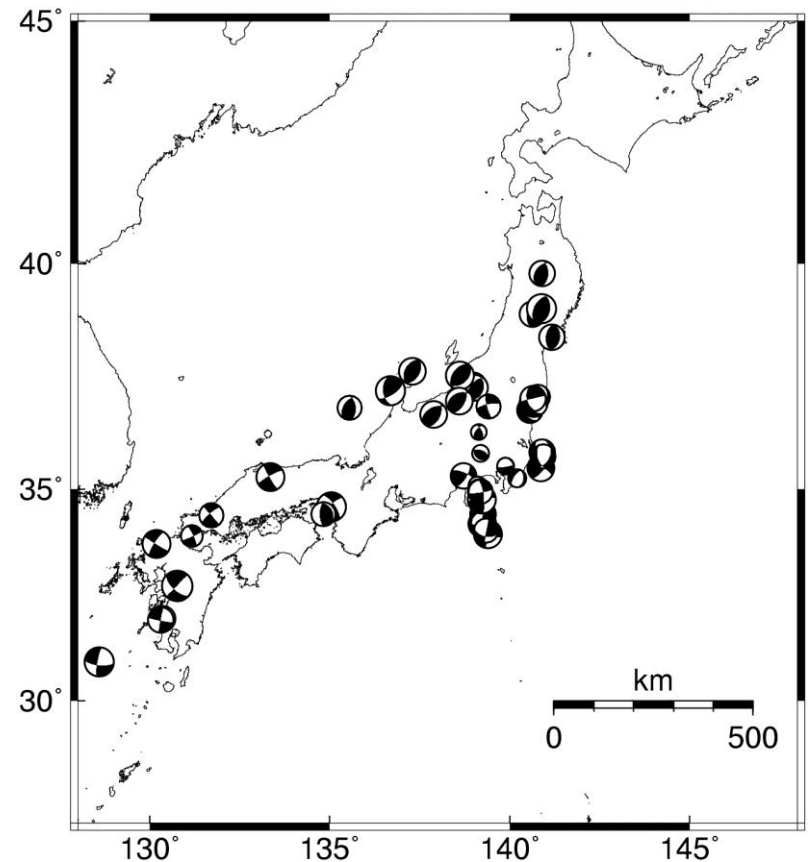
1987年～2016年4月(震央位置＝気象庁、CMT解＝F-net & Global CMT)



## 海溝型地震

(プレート境界55個、スラブ内52個)

- ・相模トラフ沿いの地震  $M_J 4.0 \sim 6.7$
- ・その他の地域  $M_J 6.5 \sim 8.2$

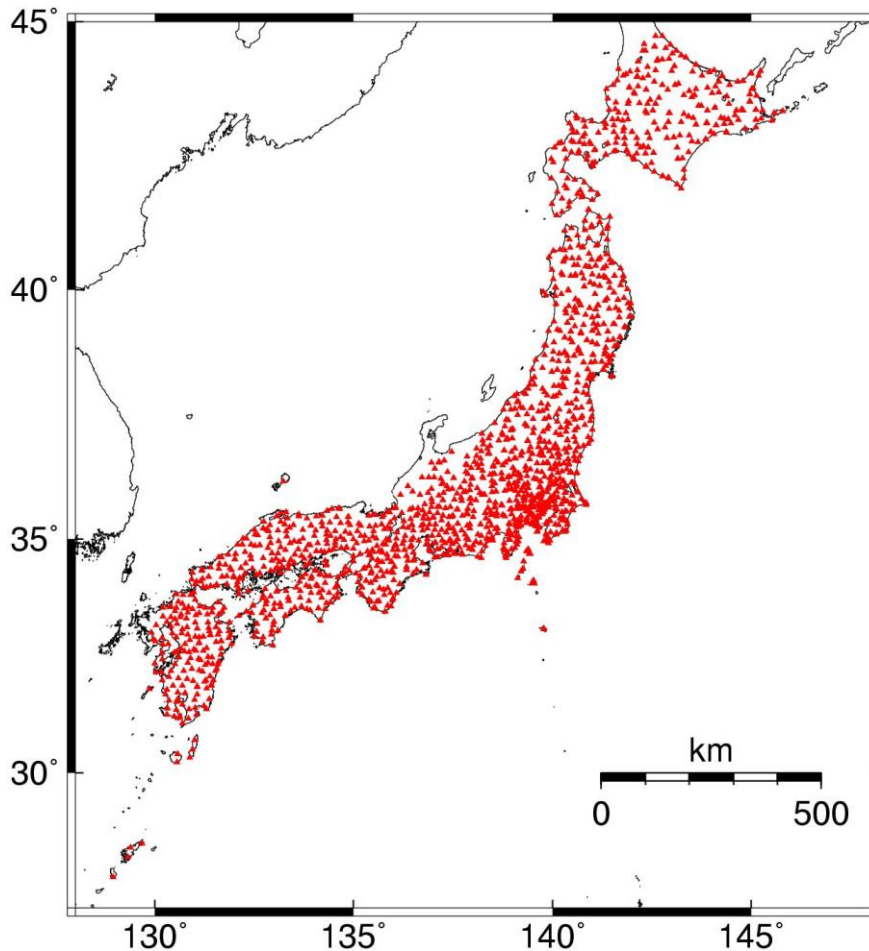


## 地殻内地震(53個)

- ・関東地方  $M_J 4.0 \sim 5.9$
- ・その他の地域  $M_J 6.0 \sim 7.3$

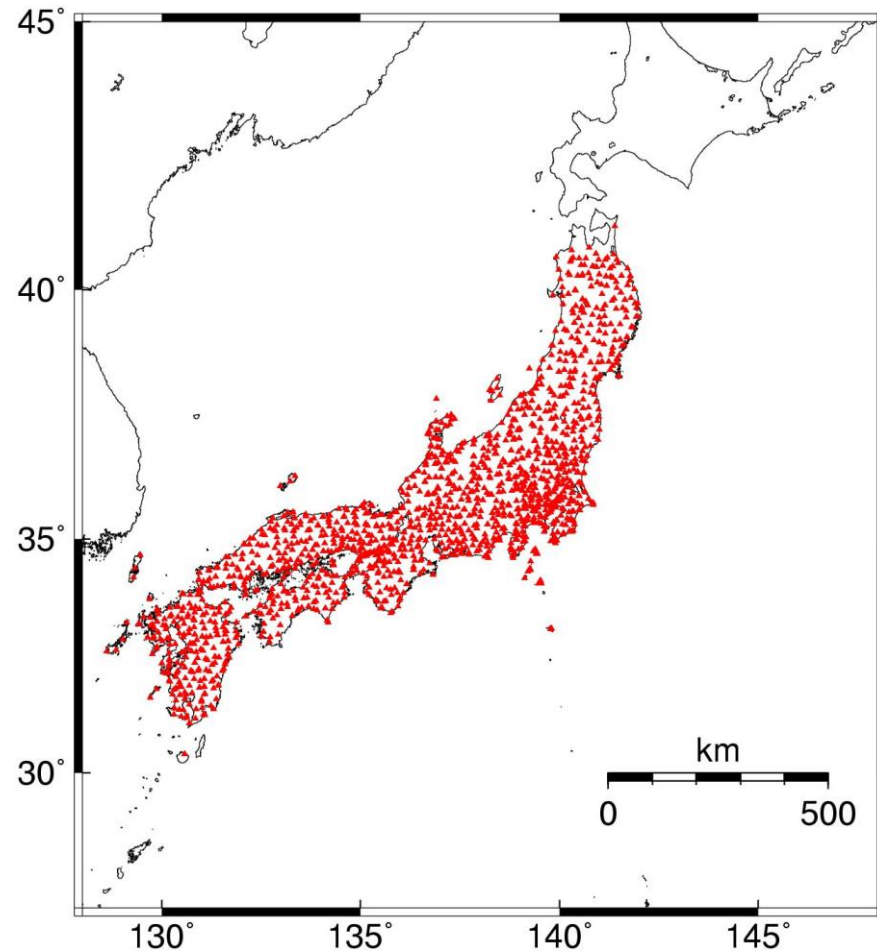
※震源近傍での地震動の飽和に関する回帰係数の推定にのみ使用<sup>4</sup>

# 回帰式作成に用いた観測点



海溝型地震(2130地点)

断層最短距離 $R_{rup} < 250\text{km}$



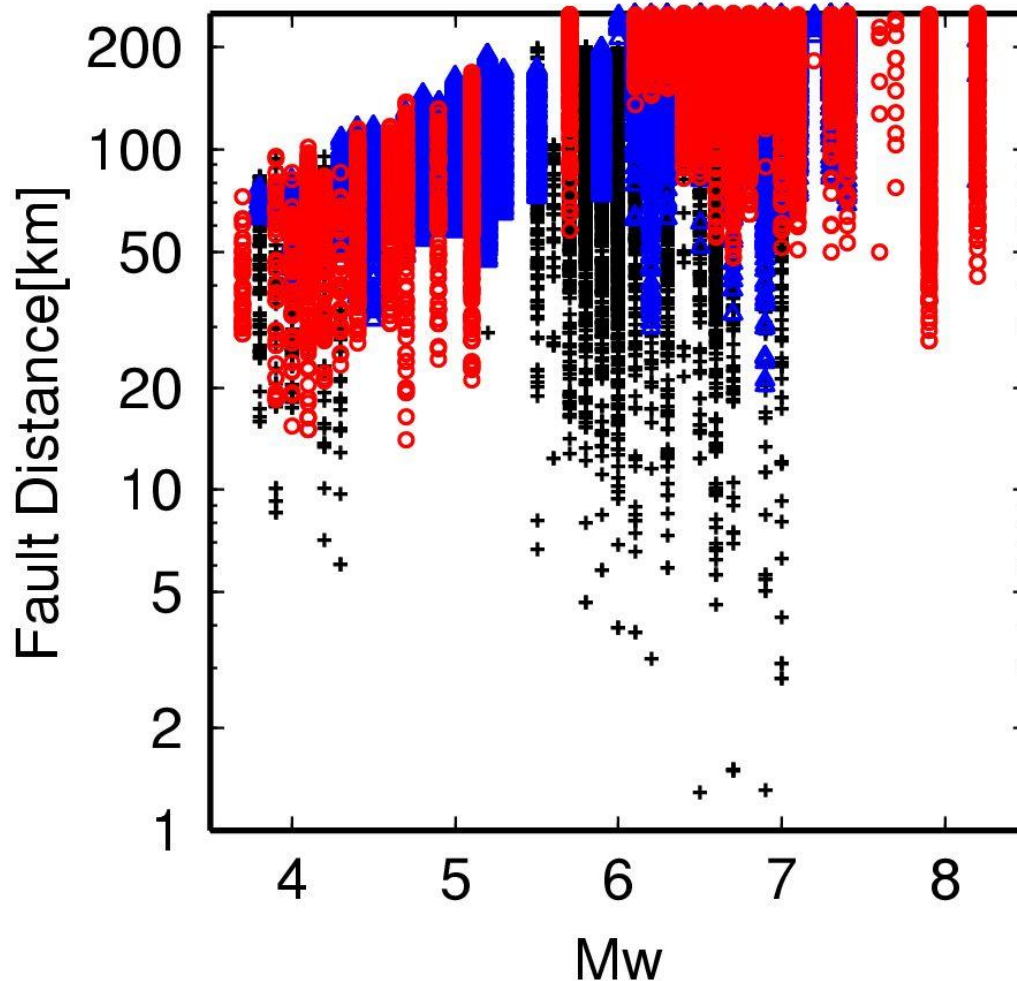
地殻内地震(2151地点)

断層最短距離 $R_{rup} < 200\text{km}$

K-NET、KiK-net(地表+地中)、気象庁87型、気象庁95型、工学院大学(新宿)、  
日本建築学会(1992)の1987年千葉県東方沖地震( $M_J 6.7$ )の観測点

# M<sub>w</sub>と断層最短距離R<sub>rup</sub>の関係

- + 地殻内地震
- プレート境界地震
- △ スラブ内地震



M<sub>w</sub> 3.7 ~ 8.2  
R<sub>rup</sub> 1.2 ~ 250 km

# 加速度応答スペクトルの回帰式作成の主なポイント

- ・ $M_w$ の範囲が広い( $M_w 3.7 \sim 8.2$ )
  - > 震源のスケーリング則を表現するため、ヒンジマグニチュード  $M_h$ 、 $M_{h2}$  をパラメータとして導入 (Boore et al., 2013, 2014; Campbell and Bozorgnia1, 2014)
- ・スラブ内地震も対象とするため震源深さの範囲も広い
  - > 表面波の励起は震源深さに依存するため、深さもパラメータ
- ・プレート境界地震とスラブ内地震では、震源での地震波の励起特性(短周期レベル)が異なる
  - > プレート境界地震とスラブ内地震をダミー変数で区別
- ・震源近傍への適用性を高める
  - > 震源近傍での飽和に関する回帰係数 $d$ の推定に、地殻内地震のデータ含める
  - > Atkinson and Silva(2000)等に基づくモデル化



# 加速度応答スペクトル(周期0.1~10秒)の回帰式

固有周期Tでの減衰定数5%の加速度応答スペクトル $S_A(T)$

$$\log_{10} S_A(T) = \text{Sou}(T) + b(T)R_{\text{rup}} - \log_{10} (R_{\text{rup}}^2 + (d(T)10^{0.25M_w})^2)^{0.5} \\ + c_0(T) + c_j(T)$$

ここで、震源項 $\text{Sou}(T)$ は、

$$\begin{aligned} \text{Sou}(T) &= a_1(T)M_w + a_4(T)P \log_{10} H + a_5(T)S \log_{10} H && M_w \leq M_h(T) \\ &= a_1(T)M_w + a_2(T)(M_w - M_h(T)) + a_4(T)P \log_{10} H + a_5(T)S \log_{10} H \\ &&& M_h(T) \leq M_w \leq M_{h2}(T) \\ &= a_1(T)M_w + a_2(T)(M_w - M_h(T)) + a_3(T)(M_w - M_{h2}(T)) \\ &\quad + a_4(T)P \log_{10} H + a_5(T)S \log_{10} H && M_w \geq M_{h2}(T) \end{aligned}$$

H:震源深さ(断層重心深さ)

$M_h$ 、 $M_{h2}$ :ヒンジマグニチュード

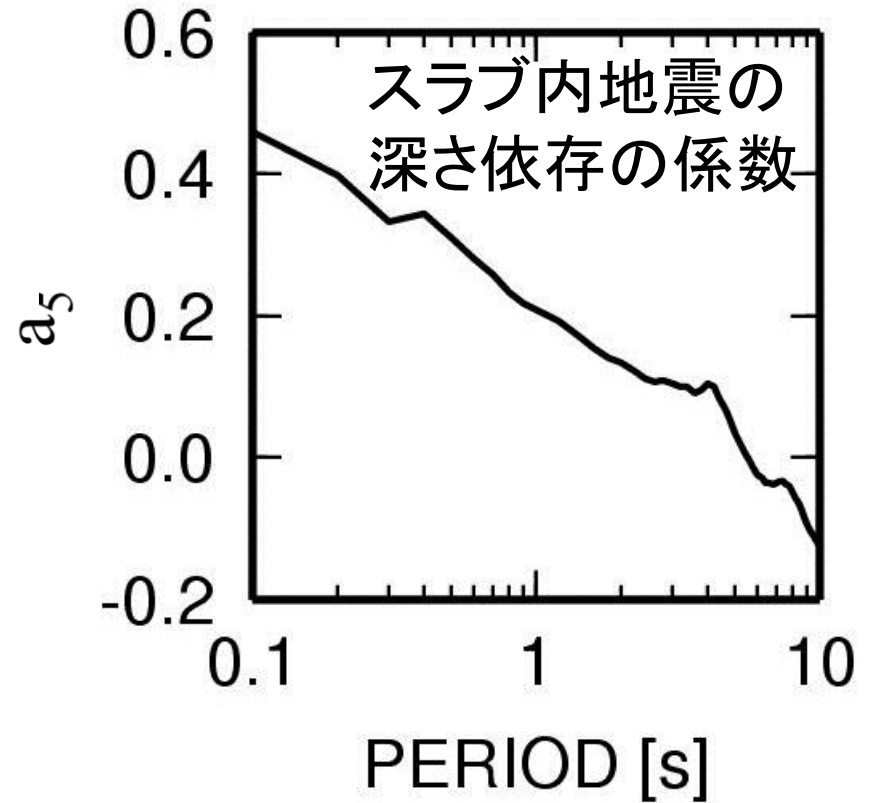
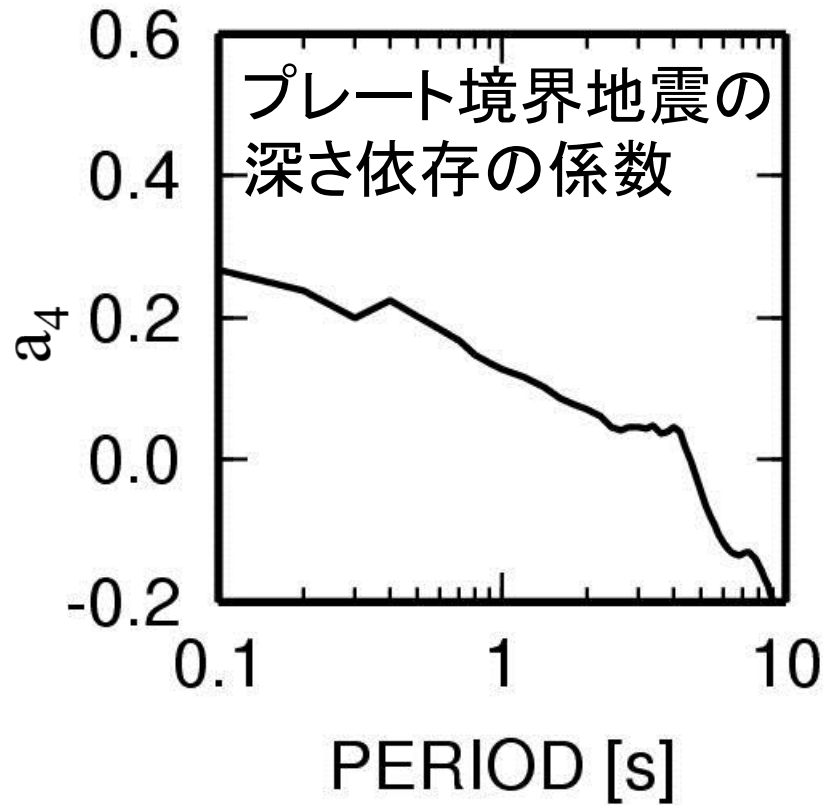
P、S:ダミー変数(プレート境界地震で $P=1$ 、 $S=0$ 、スラブ内地震で $P=0$ 、 $S=1$ )

小文字の係数が回帰係数

$c_j$ はj観測点でのサイト係数,  $10^{c_j}$ を地盤増幅率と定義。

$c_0$ はTKYH13(檜原南)での地盤同定結果に基づく、地震基盤相当でのサイト係数

# 深さ依存性、プレート境界地震とスラブ内地震の違い



長周期ほど係数が小さい

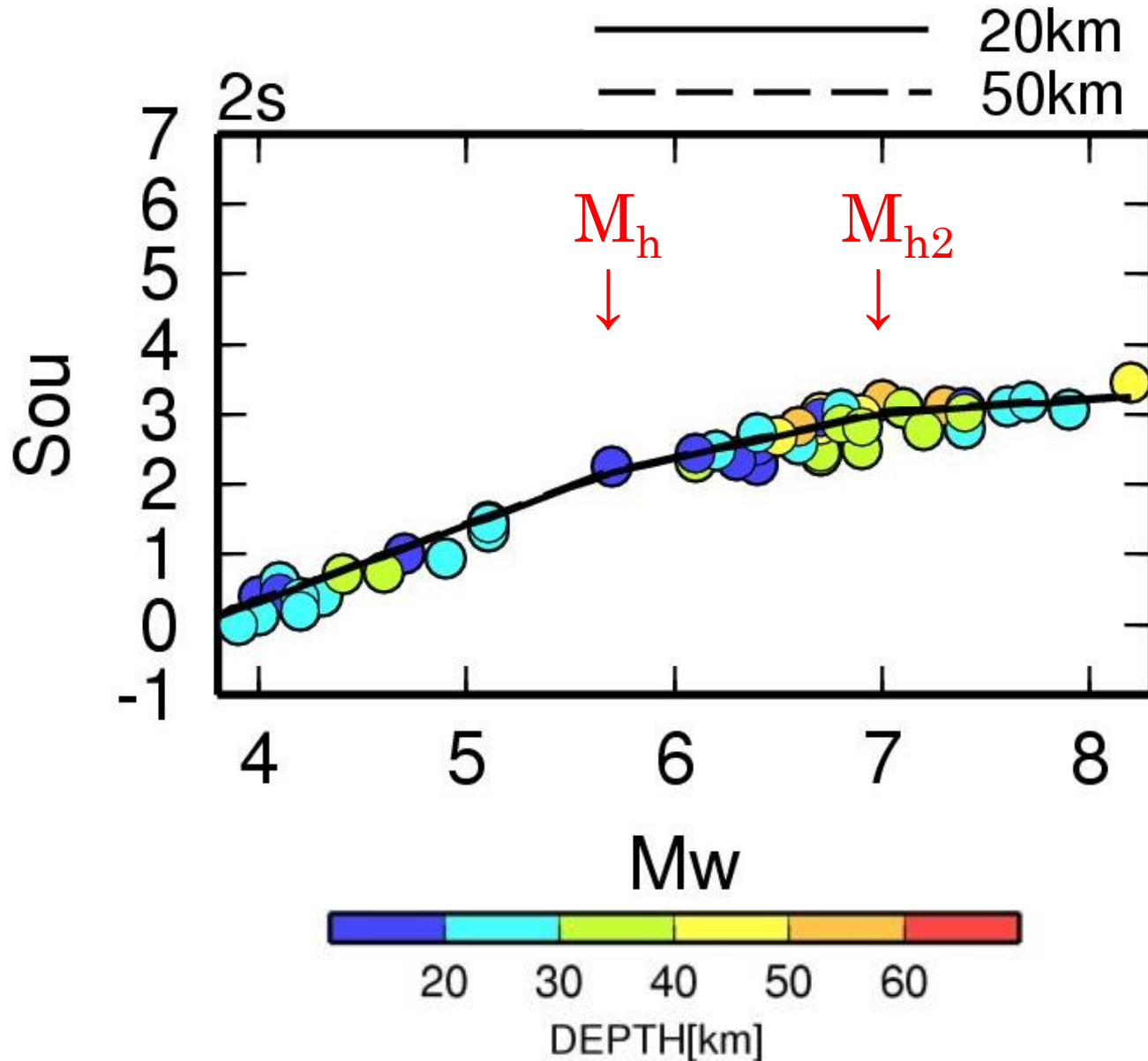
——> 長周期で表面波が卓越し、表面波は浅いほど励起が大きい

$$a_5 > a_4$$

——> スラブ内地震の方がプレート境界地震より震源での地震波の励起特性が大きい

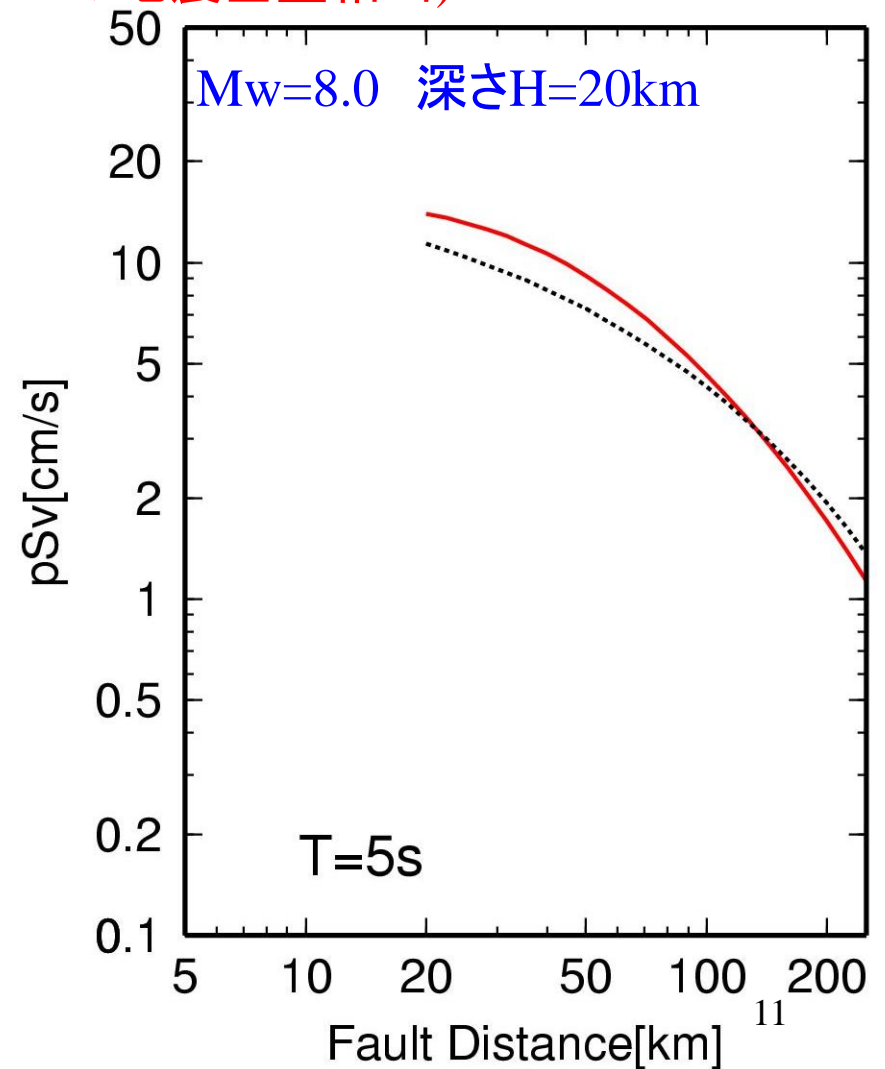
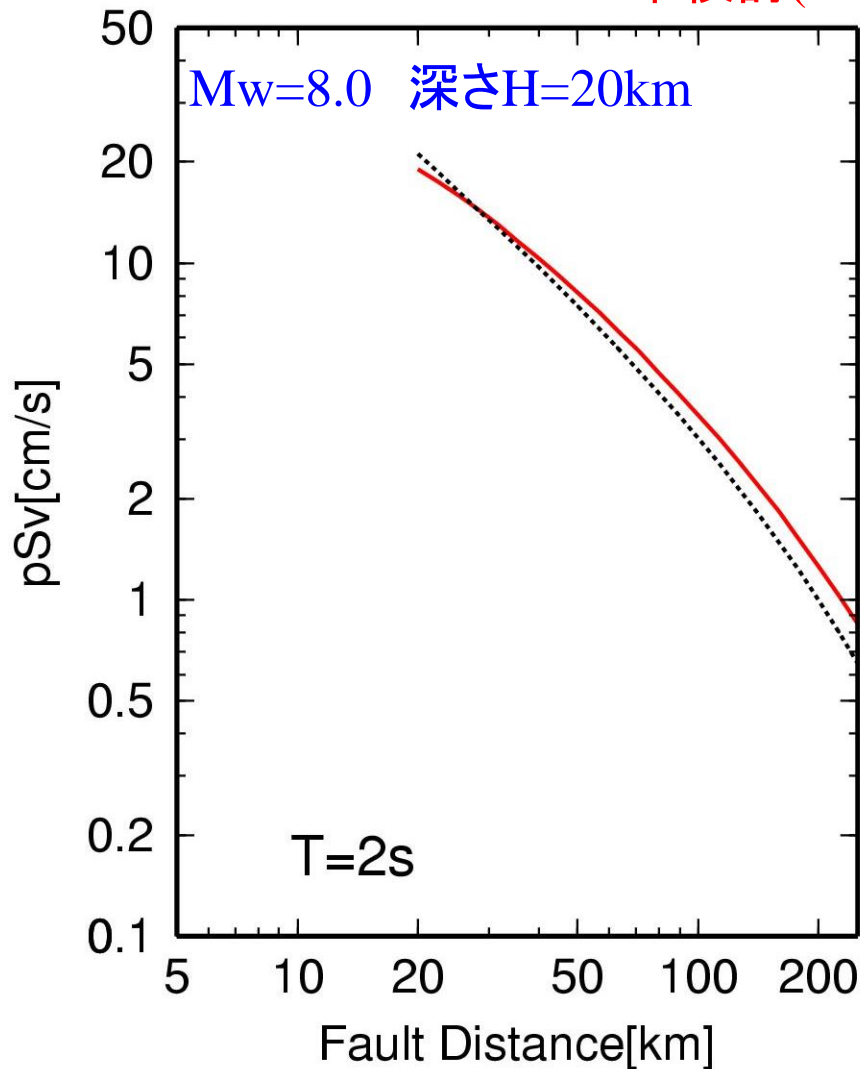
# 観測とモデルの震源項Sou

周期2秒でのプレート境界地震

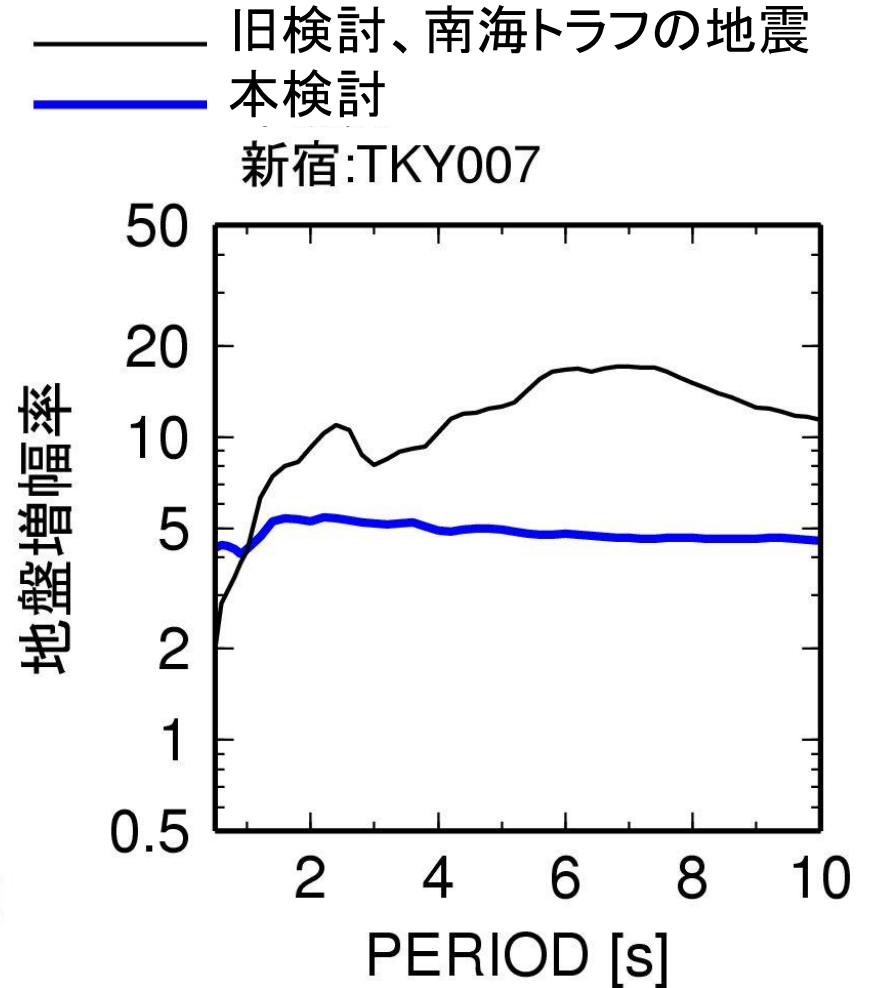
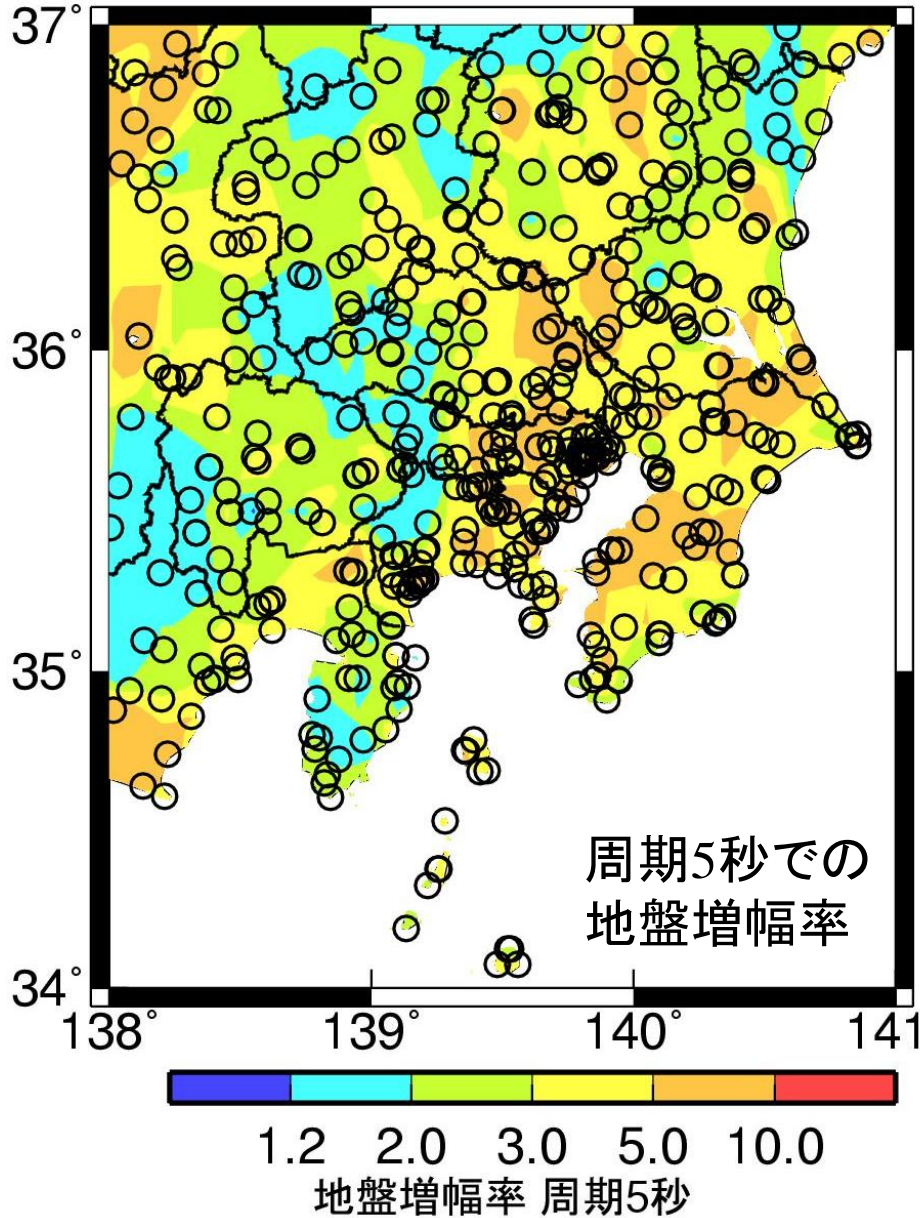


# 南海トラフ沿いの地震に適用した回帰式と 本検討の回帰式の距離減衰特性の比較

..... 旧検討、南海トラフの地震(FKSH19の地震基盤相当)  
—— 本検討(FKSH19の地震基盤相当)



# 地盤増幅率



# 群遅延時間の平均値 $\mu_{\text{tgr}}$ と分散 $\sigma_{\text{tgr}}^2$ の回帰式

Z (f): 周波数fの群遅延時間の平均値 $\mu_{\text{tgr}}$ と分散 $\sigma_{\text{tgr}}^2$

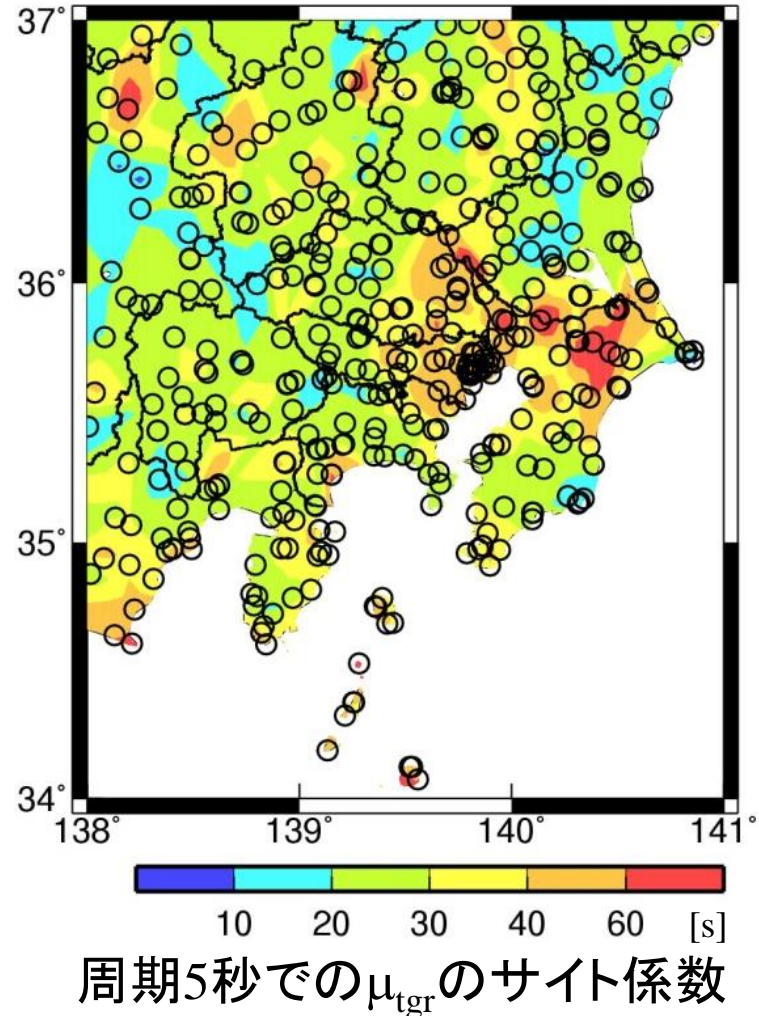
$$Z(f) = A_1(f)M_0^{1/3} - A_2(f) + B(f)X + C_j(f)$$

ここで、

$M_0$ : 地震モーメント、 $X$ : 震源距離

$A_2(f)$ : プレート境界地震で0  
(スラブ内地震用の回帰係数)

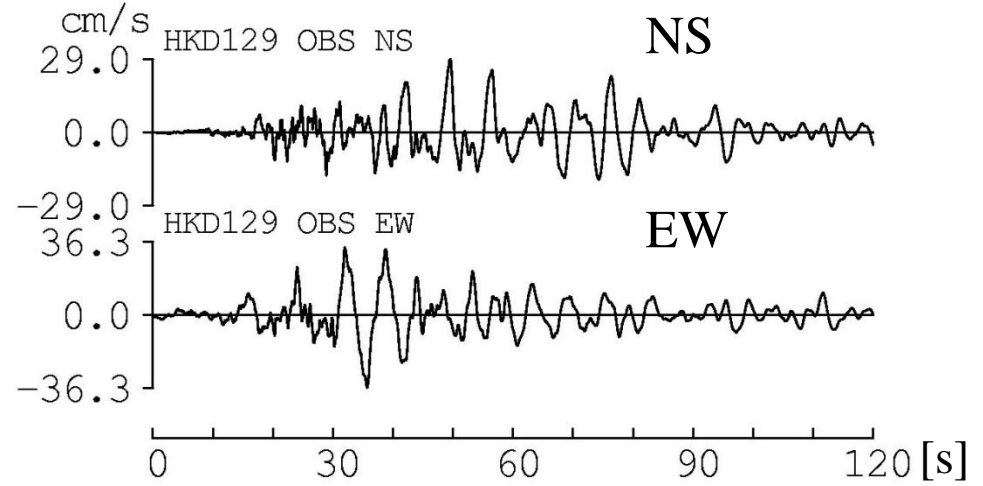
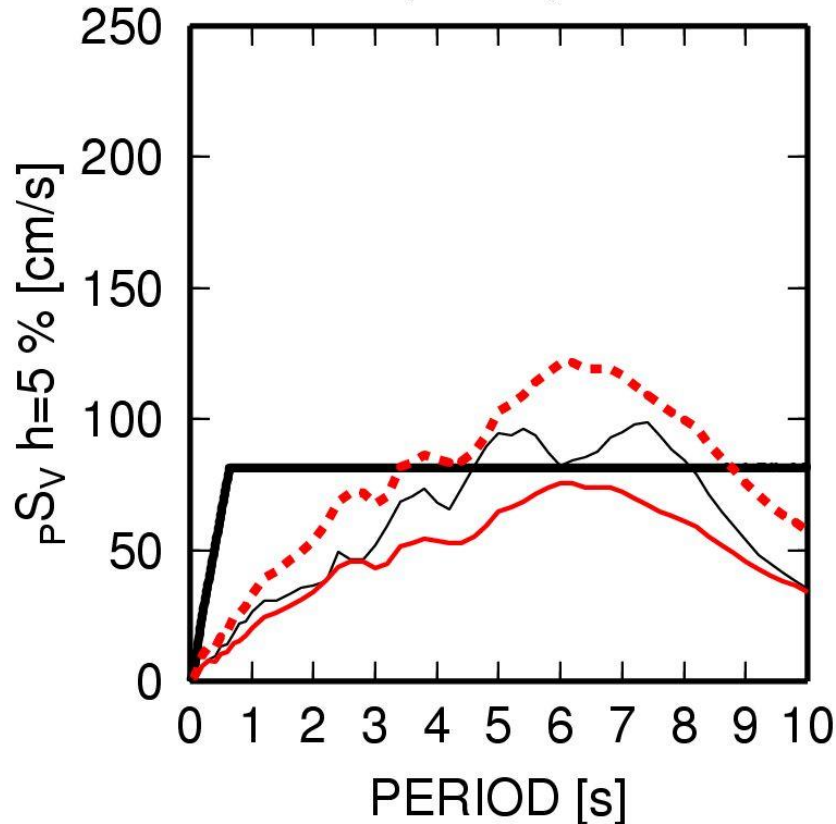
$C_j$ : j観測点でのサイト係数



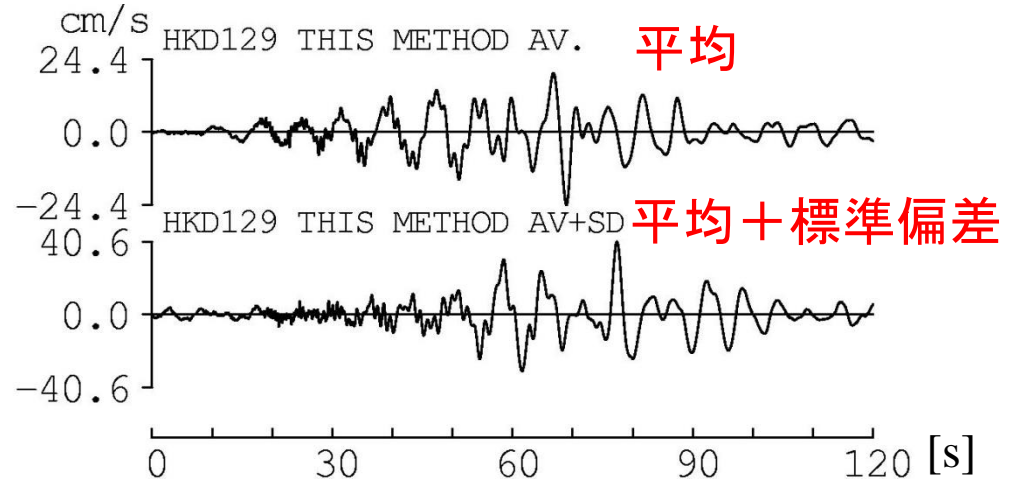
# 2003年十勝沖地震の苫小牧(HKD129)での 観測波と計算波の比較

- 告示スペクトル
- ⋯ 本検討:HKD129:平均+標準偏差
- 本検討:HKD129:平均
- 観測:HKD129(苫小牧)

2003年十勝沖地震(Mw8.2)



観測速度波形



計算速度波形

# 破壊伝播効果について

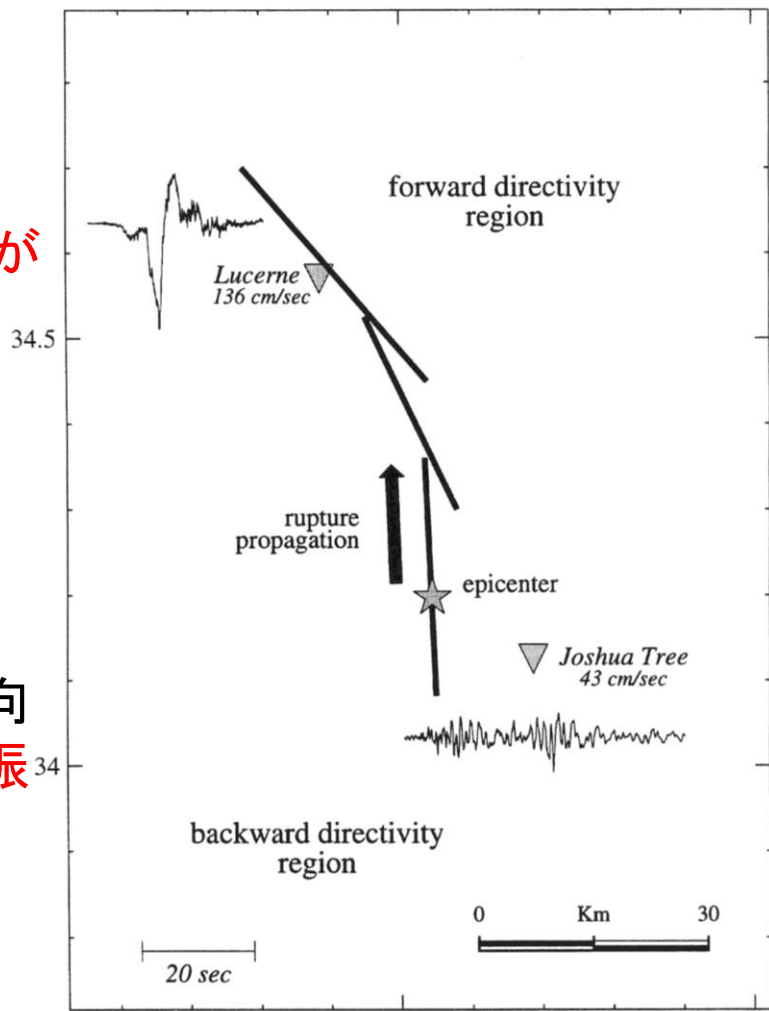
1992年M7.3Landers地震(横ずれタイプの地殻内地震)の例(Somerville et al., 1997)

破壊伝播方向

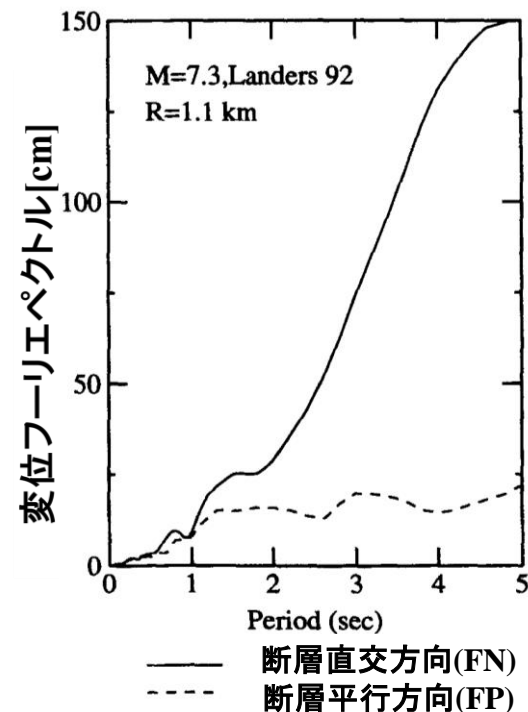
波が重なって、振幅が大きくなる。

破壊伝播方向と逆方向

波がばらけるため、振幅は大きくなる。



断層直交方向(FN)の速度波形



- ・破壊伝播方向の観測点では、断層直交方向(FN)が平行方向(FP)より大きくなる。
- ・周期1秒程度以上の長周期で顕著

☆1995年兵庫県南部地震等の地殻内地震では破壊伝播効果が見られることが指摘されている



# 破壊伝播効果モデルの文献調査と検討方針

## 既往の応答スペクトルの破壊伝播効果モデル

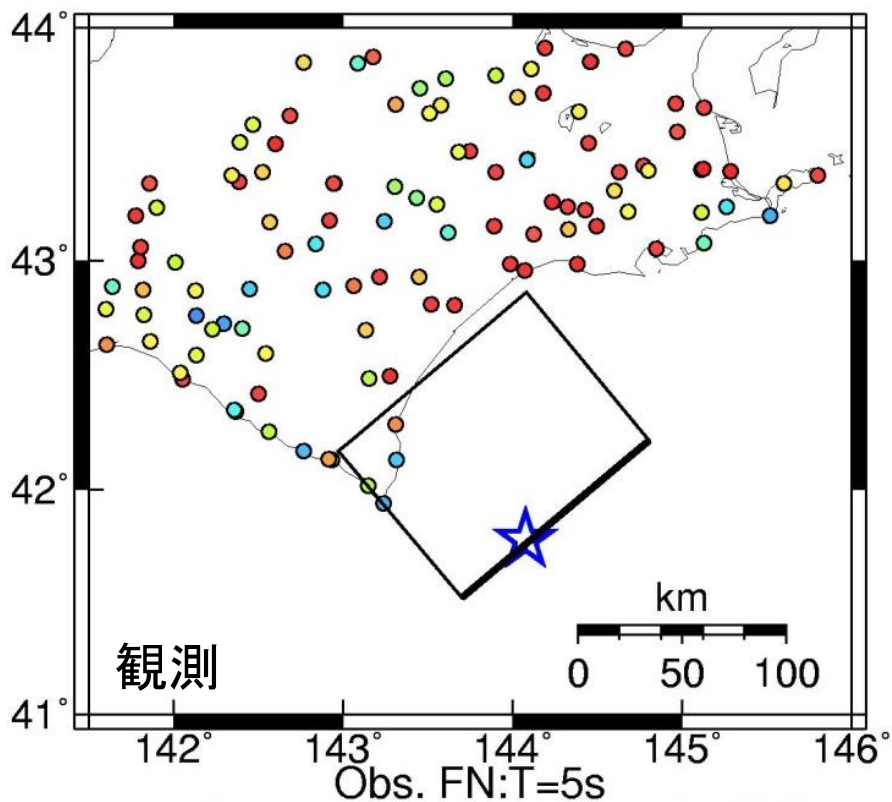
- 海溝型地震用(なし)
- 地殻内地震用
  - ・佐藤(2010)  
日本の地震を用い、 $M_w 6.9$ 以下が適用範囲
  - ・NGA-WEST2(2014)の5つのモデル  
世界の地震を用い、 $M_w 7.9$  or  $8.0$ 以下が適用範囲

## 検討方針

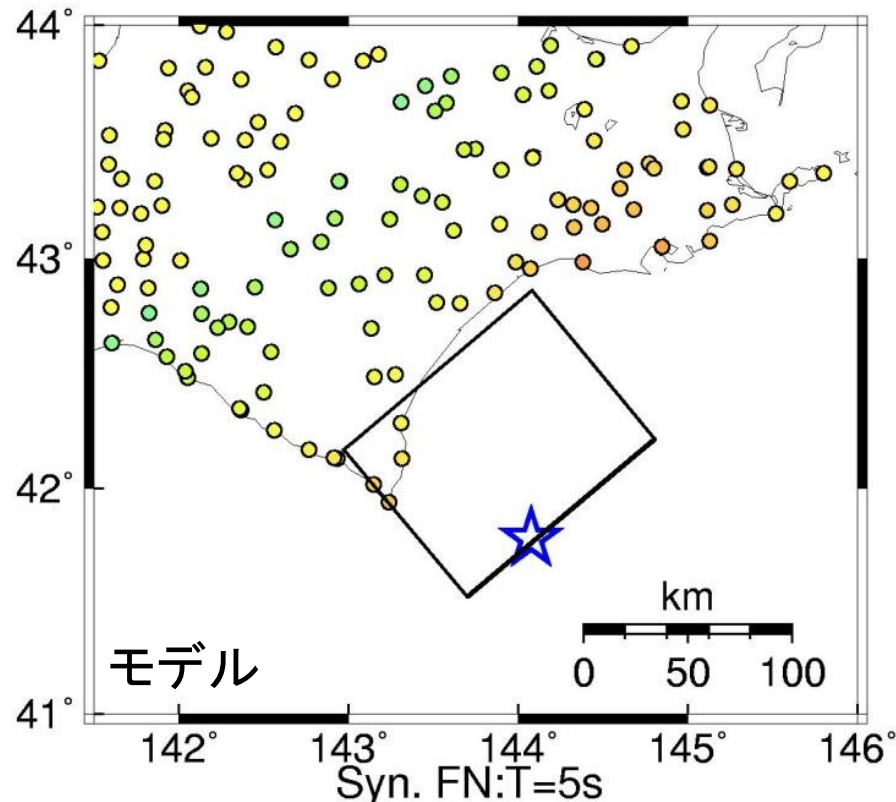
- 海溝型地震の観測記録から破壊伝播効果を抽出し、NGA-WEST2の5つのモデルのうち最も簡便なBayless and Somerville(2014)モデルとそれをスラブ内地震用に修正したモデルとの比較検討
  - ・ $M_w 8$ クラスのプレート境界地震  
2003年十勝沖地震( $M_w 8.2$ ), 2011年茨城県沖の地震( $M_w 7.9$ )
  - ・ $M_w 7$ クラスのスラブ内地震  
2003年宮城県沖の地震( $M_w 7.0$ ), 2011年宮城県沖の地震( $M_w 7.1$ )
- 破壊伝播効果モデルの適用
  - ・1923年関東地震( $M_w 7.9$ のプレート境界地震)
  - ・1855年安政江戸地震( $M_w 7.1$ のスラブ内地震)

# 観測とモデルの破壊伝播効果の比較

2003年十勝沖地震(Mw8.2)の周期5秒での断層直交方向(FN)



0.33 0.71 0.83 1.00 1.20 1.40 3.00  
平均に対する倍率



0.33 0.71 0.83 1.00 1.20 1.40 3.00  
平均に対する倍率

断層モデル(Koketsu et al., 2004) 矩形:巨視的断層面☆:破壊開始点

観測記録の破壊伝播効果は不明瞭であるが、モデルと類似の傾向はある。

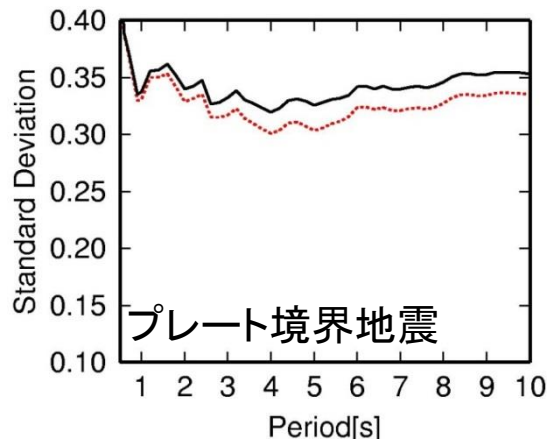
# 破壊伝播効果モデルの導入の効果

モデルと観測の残差の標準偏差(常用対数で表示)による比較

FN: 2003年十勝沖地震 Mw=8.2

— 破壊伝播考慮なし:Rrup<100km

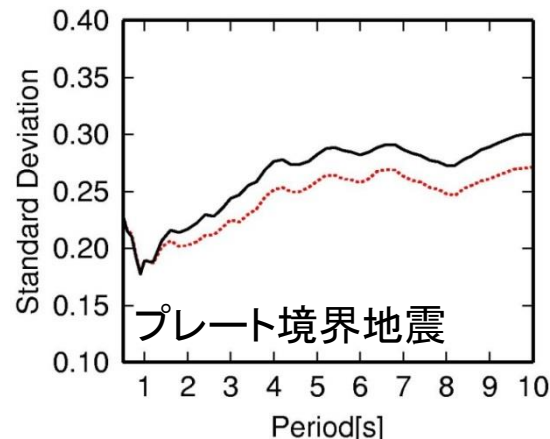
..... 破壊伝播考慮あり:Rrup<100km



FN: 2011年茨城県沖の地震 Mw=7.9

— 破壊伝播考慮なし:Rrup<100km

..... 破壊伝播考慮あり:Rrup<100km

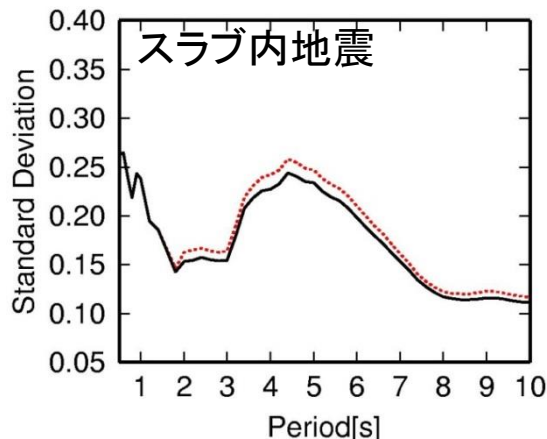


プレート境界地震に対しては破壊伝播効果モデルの導入効果はややある

FN: 2003年宮城県沖の地震 Mw=7.0

— 破壊伝播考慮なし:Rrup<100km

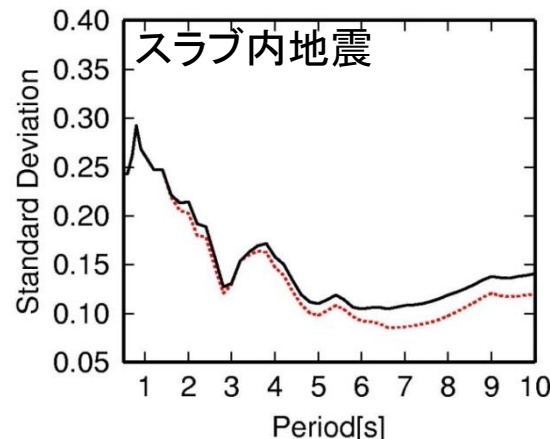
..... 破壊伝播考慮あり:Rrup<100km



FN: 2011年宮城県沖の地震 Mw=7.1

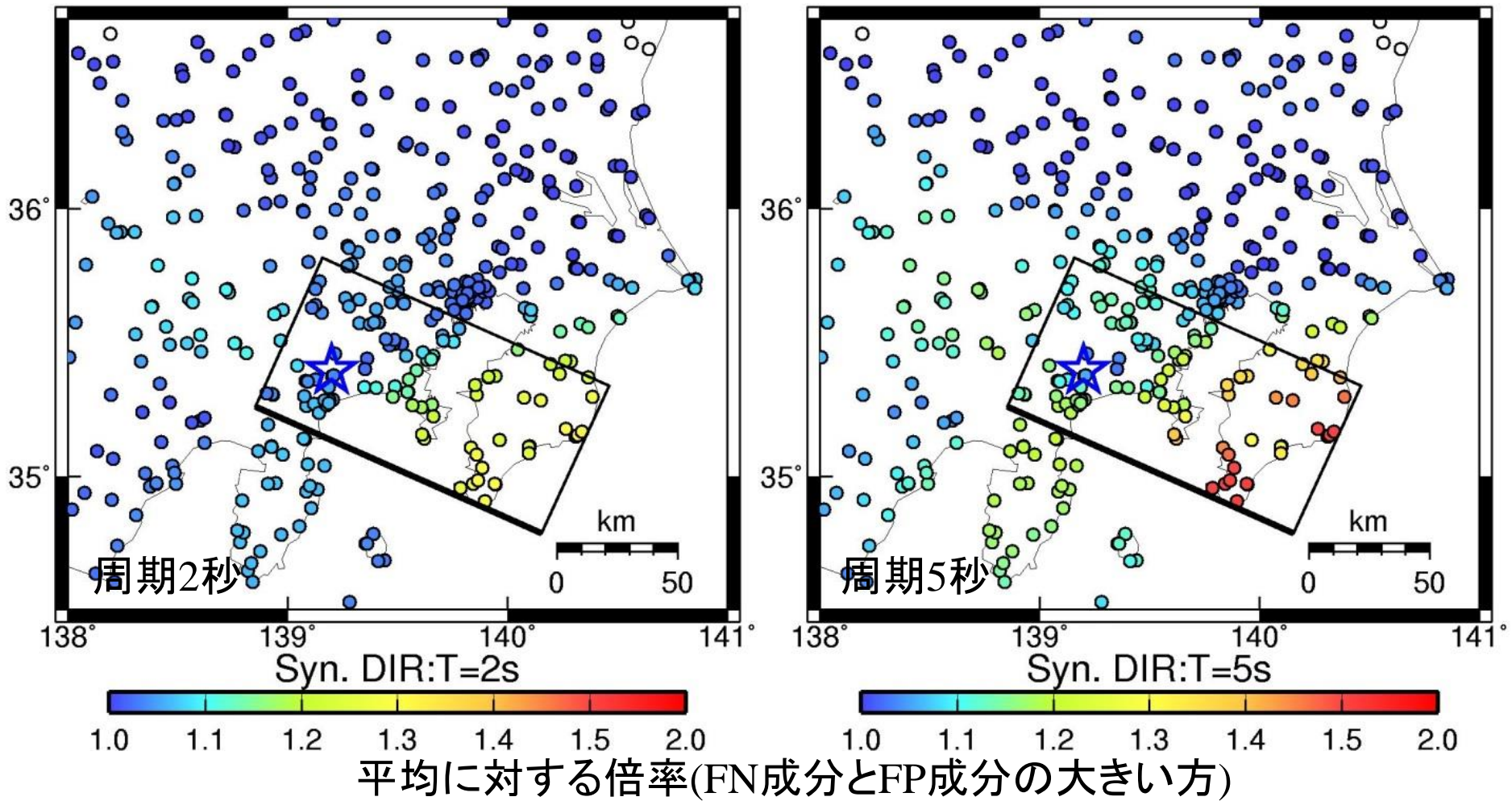
— 破壊伝播考慮なし:Rrup<100km

..... 破壊伝播考慮あり:Rrup<100km



スラブ内地震に対しては破壊伝播効果モデルの導入効果は限定的

# 破壊伝播効果モデルの 1923年関東地震(Mw7.9)への適用



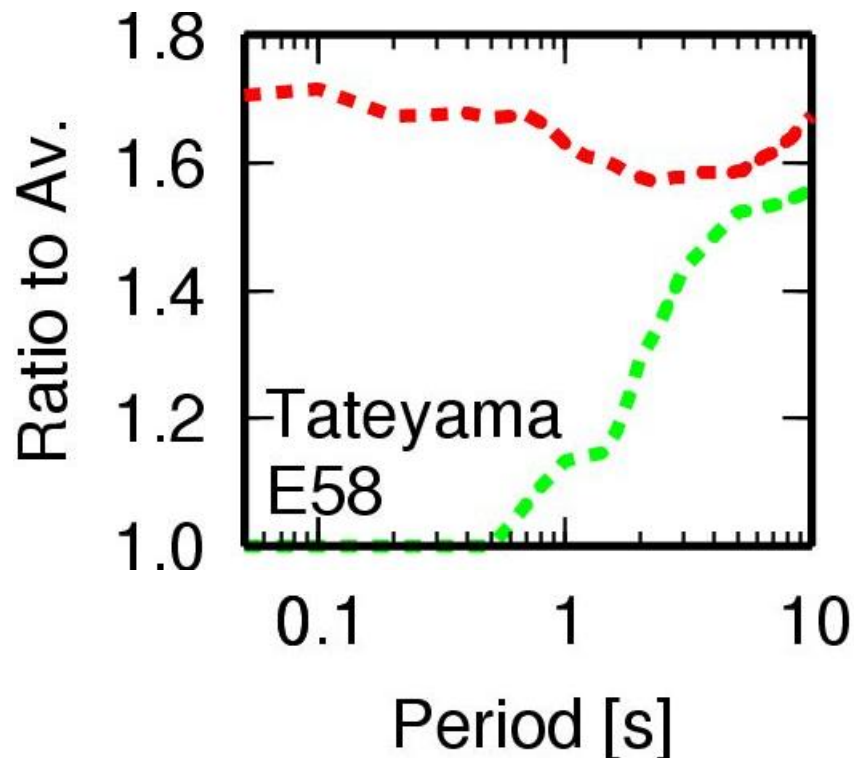
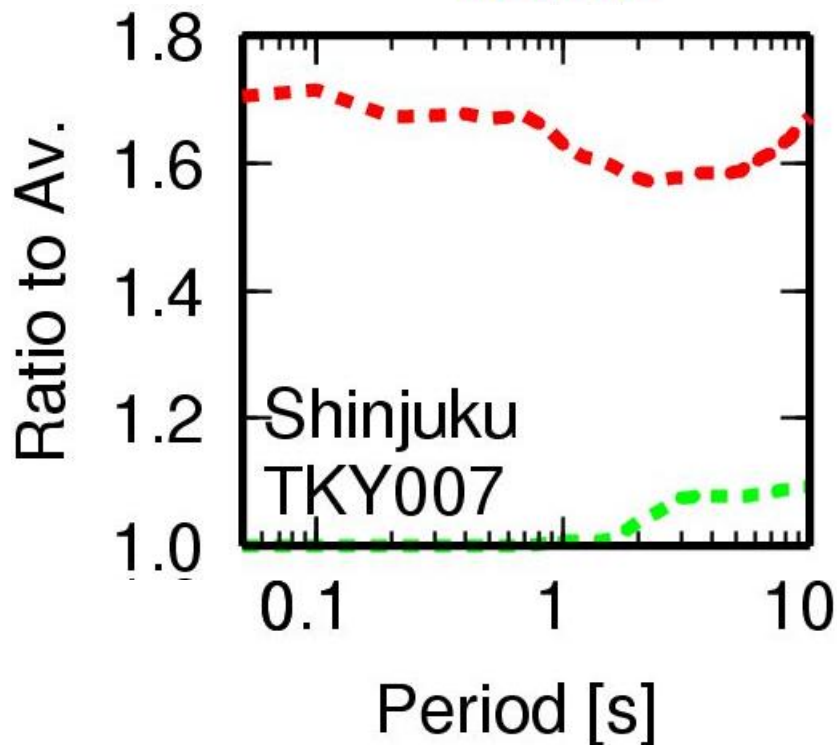
断層モデル(Sato et al. (2005)に基づき設定) 矩形:巨視的断層面 ☆:破壊開始点

・房総半島南部で大きい。長周期ほど大きい

# 1923年関東地震に適用した破壊伝播効果モデルと回帰の標準偏差の比較(平均に対する倍率)

-----標準偏差

-----破壊伝播効果(FN成分とFP成分の大きい方)



破壊伝播効果は回帰の標準偏差の範囲内

# まとめ

平成20年度～24年度の建築基準整備促進事業で検討した南海トラフ沿いの巨大地震に対する設計用長周期地震動の作成手法を元に、相模トラフ沿いの地震や震源近傍に適用可能な長周期地震動の作成手法について検討した。主な検討結果は以下の通り。

## 1. 加速度応答スペクトルの回帰式

広い $M_w$ の範囲への適用、プレート境界地震とスラブ内地震の違い、深さ依存性、震源近傍への適用を考慮した新しい回帰式を作成した

## 2. 群遅延時間の回帰式

プレート境界地震とスラブ内地震の違いを考慮した新しい回帰式を作成した

## 3. 破壊伝播効果

既往の文献を調査し、Bayless and Somerville(2004)モデルの適用性について検討し、1923年関東地震等に対して試算した

地表での長周期地震動について検討を行ったため、今後、表層地盤の増幅特性の影響等を含めて、引続き精査の必要がある。