

# **強震動予測レシピ（長大断層を含む）**

## **Strong ground motion prediction method**

### **‘Recipe’**

**2016年9月23-25日**  
**電力中央研究所 7階会議室**

**森川 信之 （防災科学技術研究所）**  
**Nobuyuki Morikawa (NIED)**

## 目 的

断層モデルのパラメータ設定の根拠となる強震動予測手法「レシピ」について確認するとともに、中央構造線断層帯（MTL）のような長大な断層への適用についても確認する。

## 内 容

1. 地震調査委員会（地震調査研究推進本部）の震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）
2. 活断層の地震のモデル化に必要な震源パラメータ
3. 長大な活断層の地震の震源パラメータ設定
4. 高角な断層への適用に関する課題  
ー平成28年熊本地震を受けて
5. 海溝型地震（プレート境界地震・スラブ内地震）のモデル化に必要な震源パラメータ

# 1. 地震調査委員会による強震動予測手法「レシピ」

## The 'Recipe' for strong ground motion prediction by HERP

地震調査研究推進本部地震調査委員会（地震本部）において実施してきた強震動評価に関する検討結果から、震源特性（震源モデル）、地下構造モデル、強震動計算、予測結果の検証、の現状における手法を取りまとめたもの。

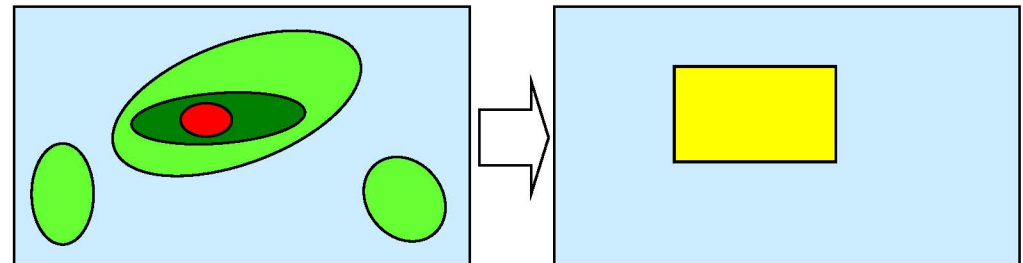
最新版：2016年6月10日改訂（地震調査委員会、2016）

### 1. 特性化震源モデルの設定（Characterized source model）

強震動を再現するために震源断層面上のすべり分布を単純化した震源モデル

- ・活断層で発生する地震 ← 入倉・三宅（2001）
- ・プレート境界地震（海溝型地震）
- ・スラブ内地震（海溝型地震） ← 新井・他（2015）

巨視的震源特性  
微視的震源特性  
その他の震源特性



2. 地下構造モデルの作成
3. 強震動計算
4. 予測結果の検証

# 1. 地震調査委員会による強震動予測手法「レシピ」

The 'Recipe' for strong ground motion prediction by HERP

○震源モデル設定に関する「レシピ」の経緯

地震本部による長期評価を踏まえた強震動評価の実施にあたり、**活断層調査、過去の地震記録、地震活動などの詳細な検討に基づき、震源断層パラメータを設定する手法**を取りまとめ

→ それぞれの「強震動評価」の付録として公表  
(2009年版以後においては(ア)の手法)



全国の主要活断層帯(110断層帯)の「震源断層を特定した地震の地震動予測地図」を一括して作成するにあたり、長期評価による**活断層の地表長さから**、従来の「レシピ」に基づきながらも一部の震源断層パラメータを**簡便に設定する手法**((イ)の手法)を追加

→ 「全国地震動予測地図」2009年版 付録



最新版：2016年6月10日改訂

- ・長さが約80kmを超える長大な活断層に関する手法の一部見直し
- ・スラブ内地震のための手法を新たに追加

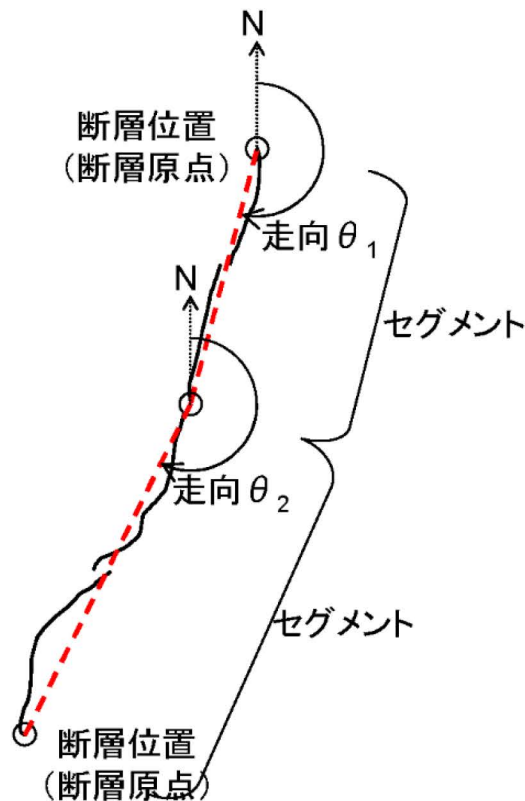
## 2. 活断層の地震のモデル化に必要な震源パラメータ

Source parameters for earthquakes occurring on active faults

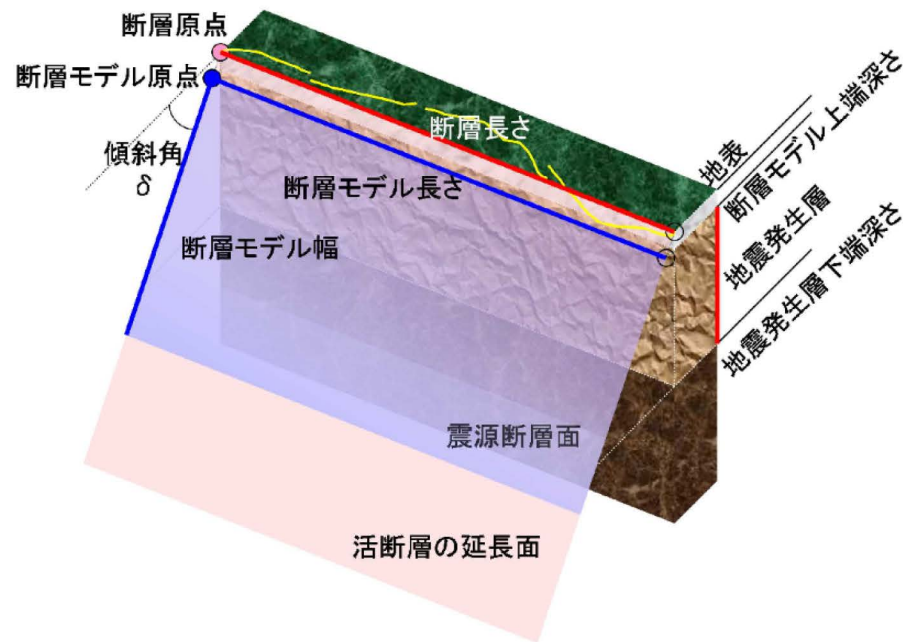
### 2-1: 巨視的震源パラメータ (Outer source parameters) 【(ア) の手法】

- ・ 震源断層モデルの位置と構造 (位置、走向、セグメント)
- ・ 震源断層モデルの大きさ (長さ $L$ ・幅 $W$ ) ・ 深さ・傾斜角

活断層調査、地震観測等のデータに基づいて設定



位置、走向、セグメント



断層モデル長さ、幅、深さ、傾斜角

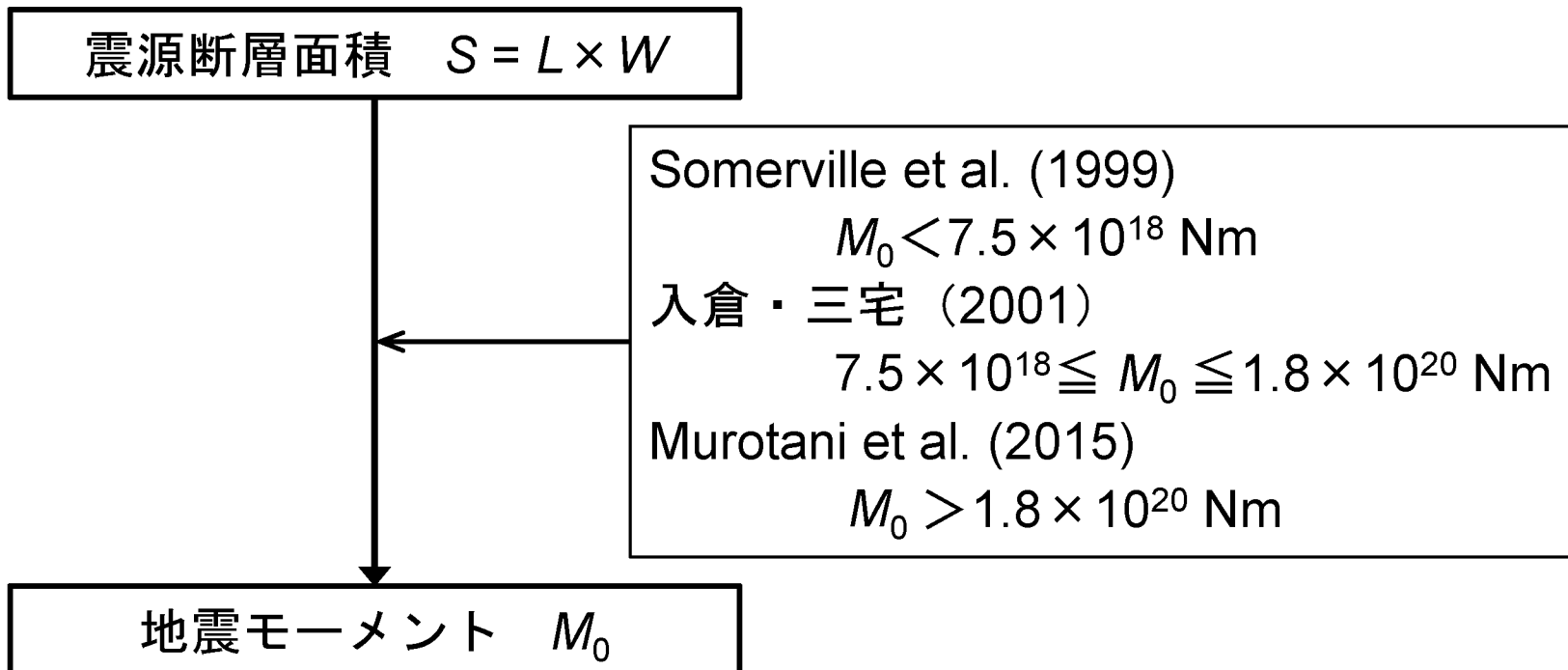
地震調査委員会 (2016)

## 2. 活断層の地震のモデル化に必要な震源パラメータ

Source parameters for earthquakes occurring on active faults

### 2-1: 巨視的震源パラメータ (Outer source parameters)

- ・ 地震規模 (地震モーメント  $M_0$ )



- ・ 震源断層モデルの平均すべり量  $D$

$$D = M_0 / (\mu \cdot S), \quad \mu = \rho \cdot \beta^2$$

$\rho$ : 地震発生層の密度

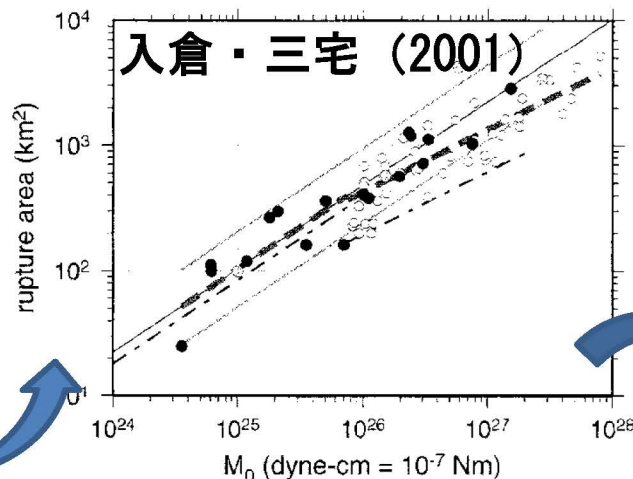
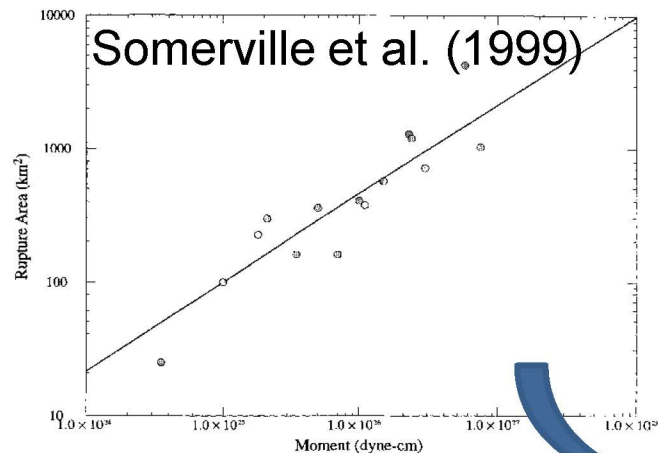
$\beta$ : 地震発生層のS波速度



## 2. 活断層の地震のモデル化に必要な震源パラメータ

### Source parameters for earthquakes occurring on active faults

#### 震源断層面積 (S) と地震モーメント ( $M_0$ ) との関係 — 経験式

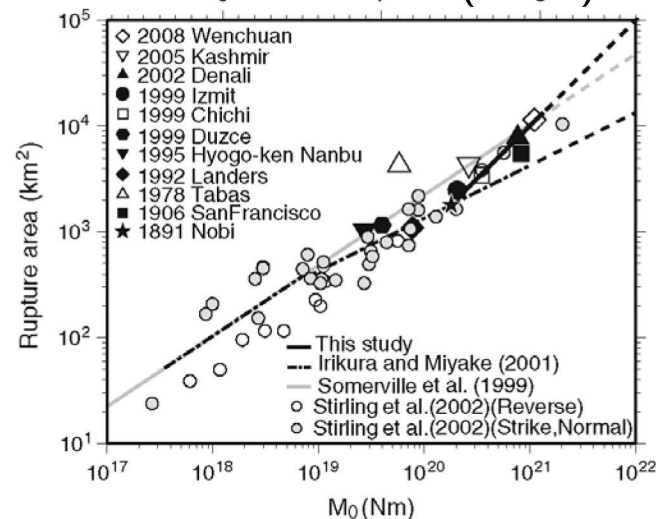


- Somerville et al. (1999)
- - - Takemura (1998)
- · - · - This study
- Wells and Coppersmith (1994)
- $M_0 > 7.5 \times 10^{25}$  dyne-cm :  $M_w > 6.52$
- Somerville et al. (1999)
- Miyakoshi (2001)
- low angle dip-slip fault

断層幅の飽和

すべり量の飽和

Murotani et al. (2015)



$$M_0 = \begin{cases} \left( \frac{S}{2.23} \times 10^{15} \right)^{3/2} \times 10^{-7} & M_0 < 7.5 \times 10^{18} \text{ Nm} \\ \left( \frac{S}{4.24} \times 10^{11} \right)^2 \times 10^{-7} & 7.5 \times 10^{18} \leq M_0 \leq 1.8 \times 10^{20} \text{ Nm} \\ S \times 10^{17} & M_0 > 1.0 \times 10^{20} \text{ Nm} \end{cases}$$

※回帰データのばらつきは現時点では震源のモデル化において考慮されていない

## 2. 活断層の地震のモデル化に必要な震源パラメータ

Source parameters for earthquakes occurring on active faults

### 2-2: 微視的震源パラメータ (Inner source parameters)

- ・アスペリティの位置

活断層調査から得られた1回の地震イベントによる変位量分布、もしくは平均変位速度の分布より設定。**複数のケースを設定**しておくことが望ましい。

- ・アスペリティの個数

1セグメントあたり1個か2個

※円形破壊面を仮定した式が適用できる場合

- ・加速度震源スペクトルの短周期レベル  $A$

$$A = 2.46 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3} \quad (\text{壇・他、2001}) \quad \text{— 経験式}$$

- ・アスペリティ面積  $S_a$

$$r = (7\pi/4) \cdot \{M_0 / (A \cdot R)\} \cdot \beta^2 \quad (\text{Boatwright, 1988; 壇・他、2001})$$

$$S_a = \pi \cdot r^2 \quad (R = (S/\pi)^{1/2})$$

- ・震源断層全体の静的平均応力降下量  $\Delta\sigma$

$$\Delta\sigma = (7/16) \cdot M_0 / R^3 \quad (\text{Eshelby, 1957})$$



## 2. 活断層の地震のモデル化に必要な震源パラメータ

Source parameters for earthquakes occurring on active faults

### 2-2: 微視的震源パラメータ (Inner source parameters)

※円形破壊面を仮定した式が適用できない場合 (暫定的な措置)

- ・ 震源断層全体の静的平均応力降下量  $\Delta\sigma$

$$\Delta\sigma = 3.1 \text{ MPa} \quad (\text{Fujii and Matsu'ura, 2000})$$

- ・ アスぺリティ面積  $S_a$

$$S_a = 0.22 \cdot S \quad (\text{Somerville et al., 1999})$$

以下、円形破壊面を仮定した式が適用できる／できないを問わず同じ

- ・ アスぺリティ・背景領域のすべり量  $D_a, D_b$

$$D_a = \xi \cdot D, \xi = 2 \quad (\text{Somerville et al., 1999 ; 石井・他、2000}) \quad \text{— 経験式}$$

$$D_b = M_{0b} / (\mu \cdot S_b)$$

$$M_{0b} = M_0 - \mu \cdot D_a \cdot S_a, S_b = S - S_a$$

- ・ アスぺリティの静的応力降下量、実効応力  $\Delta\sigma_a, \sigma_a$

$$\Delta\sigma_a = (S/S_a) \cdot \Delta\sigma \quad (\text{Madariaga, 1977})$$

$$\sigma_a = \Delta\sigma_a \text{ と仮定}$$

## 2. 活断層の地震のモデル化に必要な震源パラメータ

Source parameters for earthquakes occurring on active faults

### 2-2: 微視的震源パラメータ (Inner source parameters)

- ・ 背景領域の実効応力  $\sigma_b$

$$\sigma_b = (D_b/W_b) / (D_a/W_a) \cdot \sigma_a \quad (\text{アスペリティが1個の場合})$$

$$\sigma_b = (D_b/W_b) \cdot (\pi^{1/2}/D_a) \cdot r \cdot \sum \gamma_i^3 \cdot \sigma_a \quad (\text{アスペリティが複数の場合})$$

$$\gamma_i = r_i / r$$

$W_a$  : アスペリティの幅

$W_b$  : 背景領域の幅 (震源断層の幅とする)

$r_i$  : アスペリティ  $i$  を円形としたときの半径

- ・  $f_{\max}$

$$f_{\max} = 6 \text{ Hz} \quad (\text{鶴来・他、1994}) \text{ — 経験式}$$

- ・ 破壊伝播速度  $V_r$

$$V_r = 0.72 \cdot \beta \quad (\text{Geller, 1972}) \text{ — 経験式}$$

- ・ すべり速度時間関数

中村・宮武 (2000) の近似式を用いる

## 2. 活断層の地震のモデル化に必要な震源パラメータ

Source parameters for earthquakes occurring on active faults

### 2-3: その他の震源パラメータ (Other source parameters)

- 破壊開始点

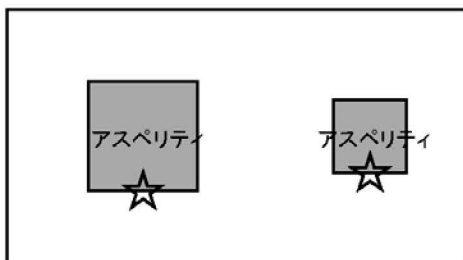
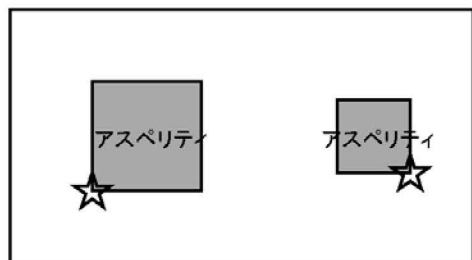
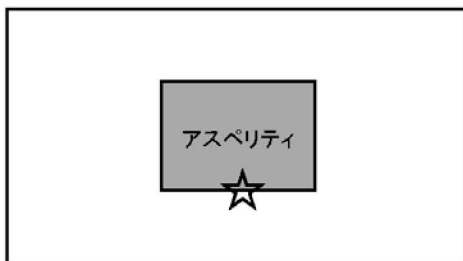
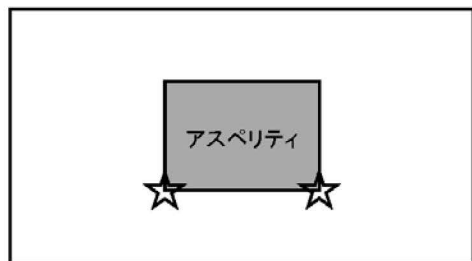
活断層の分岐形態を基に推定 (中田・他、1998)

分岐形態が不明な場合はアスペリティの下端部に設定 (下図)

いずれの場合も**複数ケース設定**することが望ましい

- 破壊形態

破壊開始点から放射状に進行 (現状では一様な破壊を仮定)



横ずれ成分が卓越

縦ずれ成分が卓越

破壊開始点(☆)とアスペリティの位置の一例

地震調査委員会 (2016)

### 3. 長大な活断層の地震の震源パラメータ設定

Source parameters for earthquakes occurring on long active faults

#### ○巨視的震源パラメータ (Outer source parameters)

震源断層面積が $1800\text{km}^2$ を超える場合は、Murotani et al. (2015) の  $S$ - $M_0$  関係を用いて震源断層面積より地震モーメントを設定 (ただし、Murotani et al. のデータが  $M_0 \leq 1.1 \times 10^{21} \text{ Nm}$  であることに留意)

#### ○微視的震源パラメータ (Inner source parameters)

「円形破壊面を仮定した式が適用できない場合」により設定

( $\Delta\sigma = 3.1 \text{ MPa}$ ,  $S_a = 0.22 \cdot S$ )

※【参考】地震調査委員会 (2009)、藤原・他 (2009) での設定手順

- ① (イ) の方法により震源断層の長さ $L$ と断層幅 $W$ を設定
- ② ①の震源断層面積から入倉・三宅 (2001) の関係式により  $M_0$  を設定
- ③ 長期評価による 1 回の活動による変位量  $D_{\text{surf}}$  が①②による平均すべり量  $D_{\text{sub\_ave}}$  の2~3倍となっていない場合、地震モーメントを調整する。
- ④ ③において、 $D_{\text{surf}} \ll D_{\text{sub\_ave}}$  の場合は、地震調査委員会長期評価部会 (2010) #で採用された手法による設定も行う。

#当時、地震本部の活断層評価手法検討分科会においてまとめられている途中であった手法を先取りして採用。

### 3. 長大な活断層の地震の震源パラメータ設定

Source parameters for earthquakes occurring on long active faults

地震調査委員会長期評価部会（2010）では、断層長さが断層幅の4倍を超える場合には以下により地震規模を評価している。

- ①単一の長さが断層幅の4倍を超えない「地震規模想定区間」の組み合わせを設定し、それぞれから発生する地震の規模を個別に評価したうえで、それらの地震モーメント量の和をもって当該「活動区間」の地震の規模とする。
- ②「地震規模想定区間」で発生する地震の規模は、「地震規模想定区間」の長さ、断層幅及び1回のずれの量に基づき算出する。
- ③複数の「地震規模想定区間」の組み合わせが想定される場合には、地震モーメント量の和が最大となるケースを採用する。

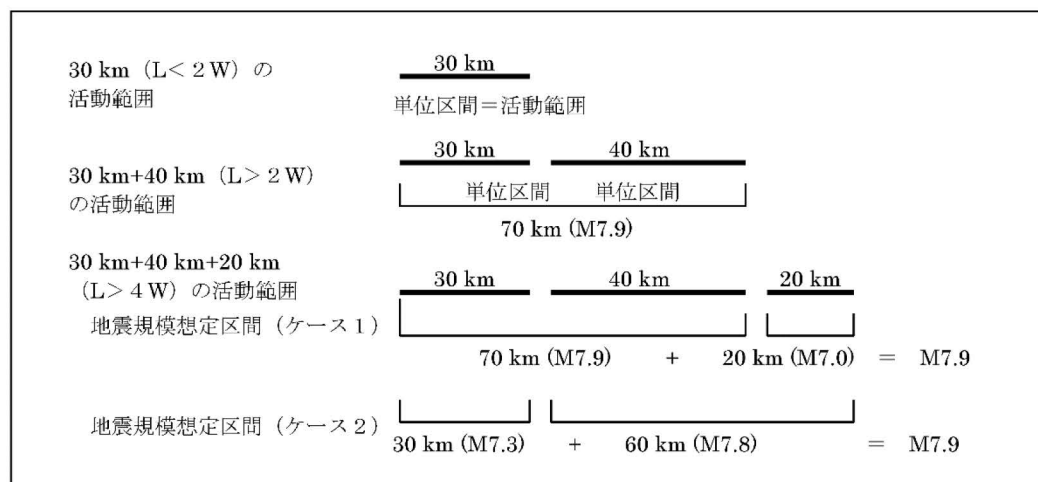


図3-6 長大な活動範囲の地震規模算出について（断層幅(W)が20 kmの場合）

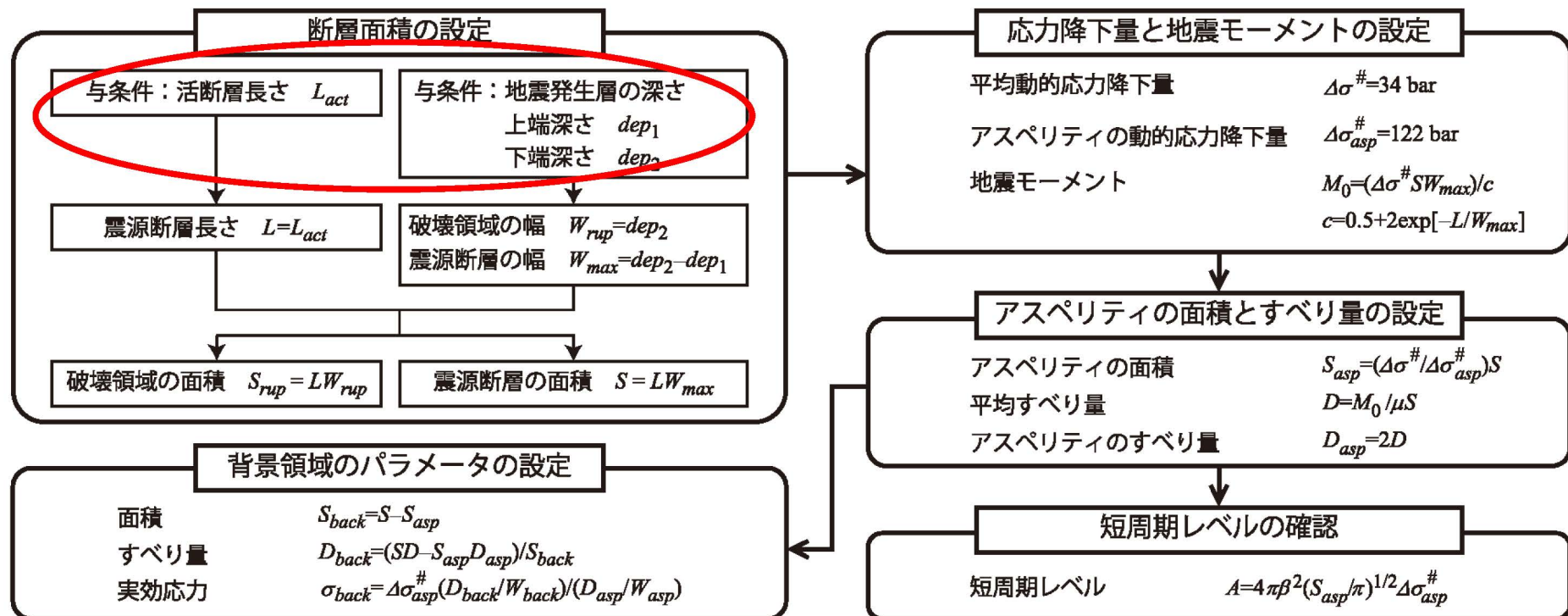
地震調査委員会  
長期評価部会(2010)

### 3. 長大な活断層の地震の震源パラメータ設定

Source parameters for earthquakes occurring on long active faults

長大な活断層を対象とした地震の震源パラメータ設定手法として、壇・他（2011）、壇・他（2015）も提案されている。

長大な横ずれ断層の地震を対象とした震源パラメータ設定手順（壇・他、2011）





## 4. 高角な断層への適用に関する課題ー平成28年熊本地震を受けて

### Problems of the 'Recipe' applying to high-dipping faults

4月16日21時25分頃の地震 ( $M_{7.3}$ )

- ・ 地震記録の解析による  $M_0 = 4 \sim 5 \times 10^{19} \text{ Nm}$  (気象庁、防災科研など)
- ・  $L = 34 \text{ km}$  (=地表断層長さ)、 $W = 14 \text{ km}$  (地震発生前の評価) とすると  
(ア) の手法による設定  $\dots M_0 = 1.3 \times 10^{19} \text{ Nm}$   
(イ) の手法による設定でも  $M_0 = 2.3 \times 10^{19} \text{ Nm}$



- ・ 断層幅が短い高角あるいは鉛直な断層 (=主に横ずれ断層) に対して経験式の平均値を用いて設定すると地震モーメントを過小評価する可能性



- ・ 例えば、入倉・三宅 (2001) の  $S$ - $M_0$  関係において、同一の震源断層面積 ( $S$ ) に対して標準偏差は約2倍と1/2であり、約4倍のデータもある

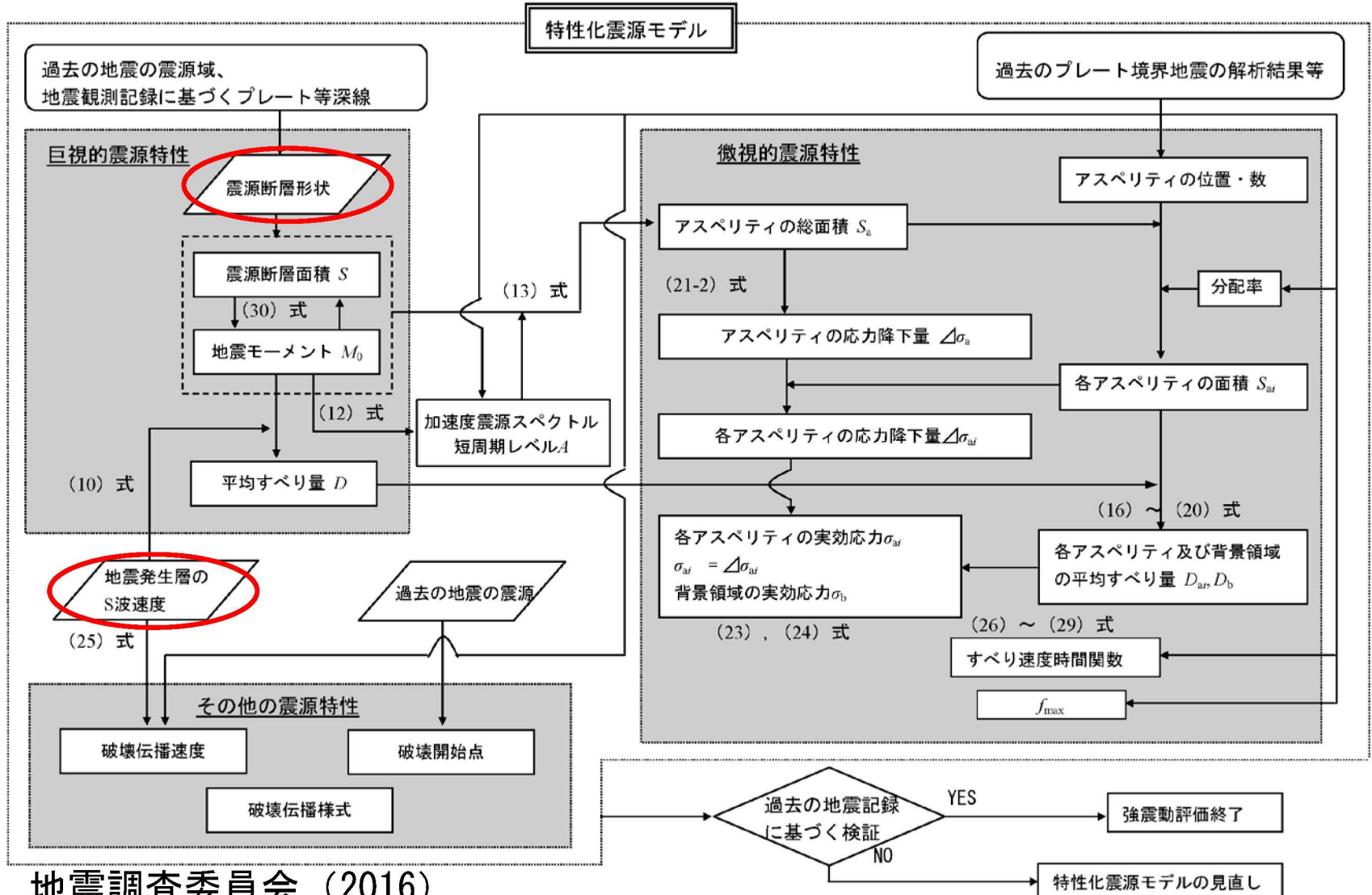


ばらつきを考慮した震源パラメータ設定手法の検討が開始されている

# 5. 海溝型地震のモデル化に必要な震源パラメータ

## Source parameters for subduction earthquakes

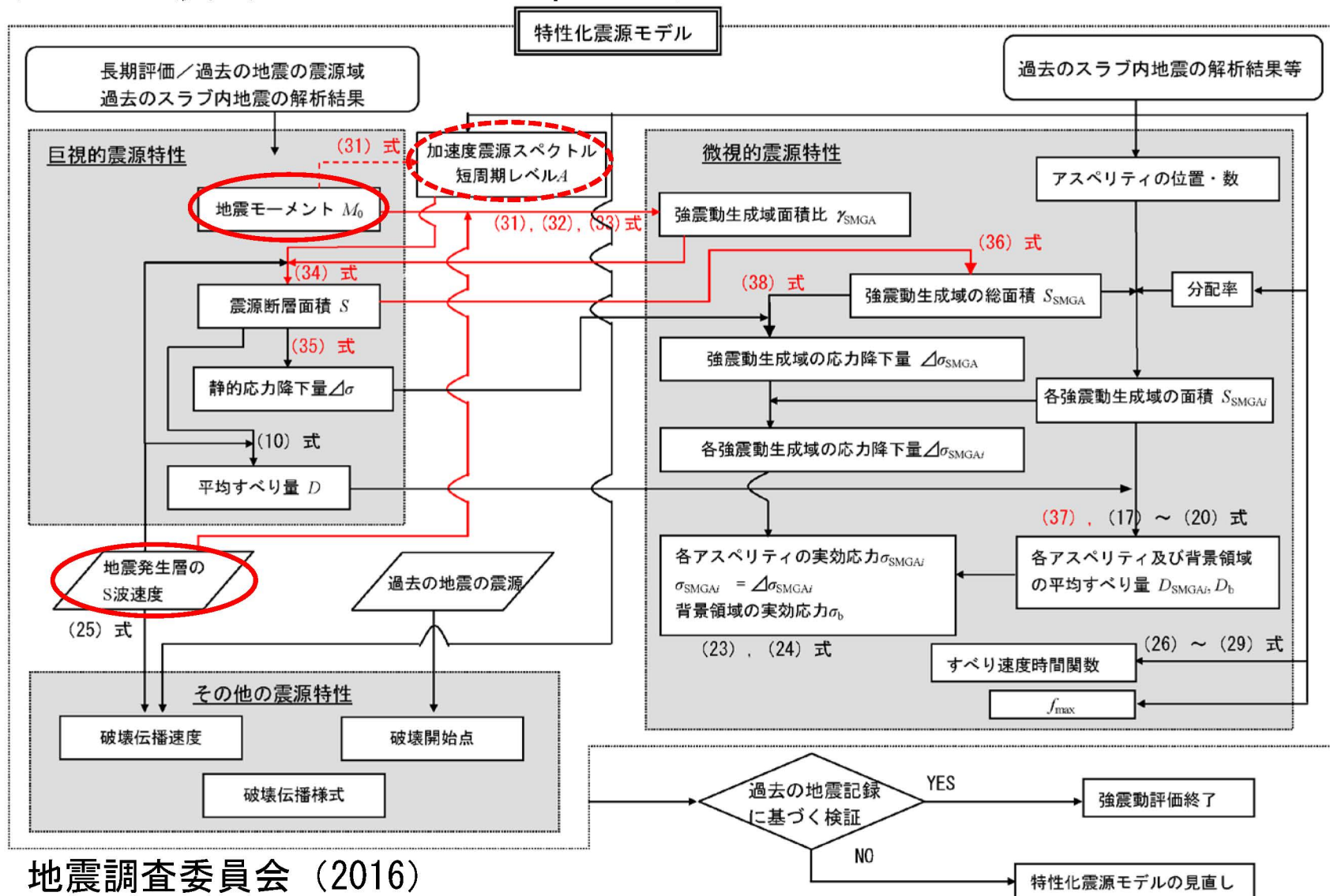
### プレート境界地震 (Inter-plate earthquakes)



# 5. 海溝型地震のモデル化に必要な震源パラメータ

## Source parameters for subduction earthquakes

### スラブ内地震 (Intra-slab earthquakes)



## 当該課題に係る情報・データの多寡・質等

### ■当該課題に係る情報・データの多寡

- ・長大な活断層（特に長さ100km超）については、日本の地震のデータがなく、全体としてもデータ量は圧倒的に不足している。
- ・マグニチュード7.5以上のプレート境界地震およびフィリピン海プレートのスラブ内地震のデータも同様に少ない。

### ■同情報・データの質

- ・内陸活断層の地震に関して、気象庁マグニチュードで7程度（Mw6.5～6.9）の地震については、最近20年以内の地震データが比較的多く、震源断層面積、地震モーメント、破壊伝播速度などのパラメータにおいてそれなりの質が期待できる。
- ・上記より規模が大きい、あるいは小さい地震、および20年以上前の地震についてはそれよりも明らかに質は劣る。

### ■同課題に係る情報・データの拡張等に関する現状認識

- ・「レシピ」において、経験的關係式は現状ではすべて平均値のみを用いておりばらつきを考慮していない。そのため、ばらつきを考慮した場合の震源モデル化手法は必ずしも確立されていない。この点に関して、ばらつきを考慮したモデル化手法の検討が開始されている。

## 参考文献 : References

- [1]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」），平成28年6月10日改訂，  
[http://www.jishin.go.jp/main/chousa/16\\_yosokuchizu/recipe.pdf](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/16_yosokuchizu/recipe.pdf).
- [2]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.
- [3]Irikura, K. and H. Miyake (2011):
- [4]新井健介・他（2015）：強震動予測のためのスラブ内地震の断層パラメータ設定方法の提案，日本建築学会構造系論文集，716，1537-1547.
- [5]Somerville, P. G. et al. (1999): Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, Seism. Res. Let., 70, 59-80.
- [6]Murotani, S. et al. (2015): Scaling relations of source parameters of earthquakes occurring on inland crustal mega-fault systems, PAGEOPH, 172, 1371-1381.
- [7]壇一男・他（2001）：断層の非一様すべり破壊モデルから算出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.

## 参考文献（つづき） : References (Continued)

- [8]Boartwright, J. (1988): The seismic radiation from composite models, Bull. Seism. Soc. Am., 78, 489-508.
- [9]Eshelby, J. D. (1957): The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, Proceedings of the Royal Society, A241, 376-396.
- [10]Fujii, Y. and M. Matsu'ura (2000): Regional Difference in Scaling Laws for Large Earthquakes and its Tectonic Implication, PAGEOPH, 157, 2283-2302.
- [11]石井透・他（2000）：強震動評価のための不均質断層モデルの主破壊領域の抽出，日本建築学会構造系論文集，527，61-70.
- [12]Madariaga, R. (1979): On the relation between seismic moment and stress drop in the presence of stress and strength heterogeneity, J. Geophys. Res., 84, 2243-2250.
- [13]鶴来雅人・他（1997）：近畿地方で発生する地震の $f_{max}$ に関する基礎的検討，日本地球惑星科学関連学会合同大会予稿集，103.
- [14]Geller, R. J. (1976): Scaling relation for earthquake source parameters and magnitudes, Bull. Seism. Soc. Am., 66, 1501-1523.



## 参考文献（つづき）：References (Continued)

- [15] 中村洋光・宮武隆（2000）：断層近傍強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式，地震2， 53， 1-9.
- [16] 中田高・他（1998）：活断層はどこから割れ始めるのか？－活断層の分岐形態と破壊伝播方向－，地学雑誌， 107， 512-528.
- [17] 地震調査委員会（2009）：全国地震動予測地図技術報告書，  
[http://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic\\_hazard\\_map/shm\\_report/shm\\_report\\_2009/](http://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/shm_report/shm_report_2009/).
- [18] 藤原広行・他（2009）：「全国地震動予測地図」作成手法の検討，防災科学技術研究所研究資料， 336号.
- [19] 地震調査委員会長期評価部会（2010）：「活断層の長期評価手法」報告書（暫定版），[http://www.jishin.go.jp/main/choukihyouka/katsu\\_hyokashuho/honpen.pdf](http://www.jishin.go.jp/main/choukihyouka/katsu_hyokashuho/honpen.pdf).
- [20] 壇一男・他（2011）：長大横ずれ断層による内陸地震の平均動的応力降下量の推定と強震動予測のためのアスペリティモデルの設定方法への応用，日本建築学会構造系論文集， 670， 2041-2050.
- [21] 壇一男・他（2015）：長大な逆断層による内陸地震の断層モデルパラメータの設定方法の提案，日本建築学会構造系論文集， 707， 47-57.

本講演で直接挙げていないものの関連する文献

○活断層の地震に関する経験式関連

- [22]Stirling, M. et al. (2002): Comparison of Earthquake Scaling Relations Derived from Data of the Instrumental and Preinstrumental Era, Bull. Seism. Soc. Am., 92, 812-830.
- [23]Wells, D. L. and K. J. Coppersmith (1994): New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, Bull. Seism. Soc. Am., 84, 974-1002.
- [24]松田時彦（1975）：活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震2, 28, 269-283.
- [25]武村雅之（1990）：日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係, 地震2, 43, 257-265.

本講演で直接挙げていないものの関連する文献

○海溝型プレート境界地震に関する経験式関連

[26]Kanamori, H. and D. L. Anderson (1975): Theoretical basis of some empirical relations in seismology, Bull. Seism. Soc. Am., 65, 1073-1095.

[27]佐藤智美・他（1994）：表層地盤の影響を取り除いた工学的基盤波の統計的スペクトル特性，仙台地域のボアホールで観測された多数の中小地震記録を用いた解析，日本建築学会構造系論文集，462，79-89.

○スラブ内地震に関する経験式関連

[28]笹谷努・他（2006）：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，69，123-134.

[29]壇一男・他（2006）：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，600，35-42.

[30]Iwata, T. and K. Asano (2011): Characterization of the heterogeneous source model of intraslab earthquakes toward strong ground motion prediction, PAGEOPH, 168, 117-124.

# 別添

## 巨視的震源パラメータ（Outer source parameters）【（イ）の手法】

