

# 地震動シミュレーションにより評価した地震動強さのバラツキ

— 地震危険度解析技術の高度化に向けて —

糸井 達哉\*<sup>1</sup>・内山 泰生\*<sup>1</sup>・坂本 成弘\*<sup>1</sup>

Keywords : peak ground acceleration, variability, crustal earthquake, fault characteristics, stochastic Green's function

最大加速度, バラツキ, 地殻内地震, 震源特性, 統計的グリーン関数法

## 1. はじめに

確率論的地震ハザード解析では、地震動強さのバラツキとして距離減衰式の回帰誤差を用いることが一般的である。しかし、多様な地震における様々な地盤条件で観測された記録の回帰分析から得られる距離減衰式の回帰誤差には、様々な要因の影響が混在している。

現状の地震ハザード解析では、このような距離減衰式の回帰誤差を用いるために、低超過確率での地震動強さが過大評価となる。そこで、予測精度向上のために、地震動強さのバラツキがどのような要因の影響を受けているかを評価する研究が行われている。これらの研究は、大きくわけて観測記録の分析<sup>1)</sup>と地震動シミュレーションを用いた検討<sup>2)</sup>に分けられるが、観測記録の分析では大地震時の震源近傍での記録が十分には含まれていないなど課題が残されている。観測記録を補うことを目的とし、地震動シミュレーションを用いた検討が行われている。これらの検討では、断層の壊れ方の違いによる地震動強さのバラツキが評価され、影響が大きい断層パラメータの抽出が試みられているが、過去の地震の壊れ方との対応は十分に考慮されていない。

本研究では、確率論的地震ハザード解析で用いる地震動強さのバラツキに関する議論に資することを目的として、まず日本国内で発生した内陸地殻内地震の断層すべり分布を用いて断層パラメータの統計的特性を評価し、この結果に基づいて断層パラメータ(破壊パターンなど)のモデル化を行う。次に、モデル化した断層に対する地震動シミュレーション結果から、断層パラメータが地震動強さのバラツキ特性に与える影響について評価を行う。

## 2. 日本で発生した地殻内地震の断層パラメータの整理

### 2.1 特性化震源モデルによる強震動評価

断層の破壊による地震動のシミュレーション手法として、いわゆる「レシピ」<sup>4)</sup>が提案されている。「レシピ」による強震動評価では、図-1に示すような断層面内の不均質なすべり量分布を、すべり量が周囲より大きい「アスペリティ」とそれ以外の「背景領域」とに分ける特性化震源モデルが用いられる。また、特性化震源モデルに用いる断層パラメータの標準的な設定が示されている。本研究においても「レシピ」に基づき強震動評価を行うことを前提とした。

### 2.2 過去に発生した地震の断層すべり分布の収集

「レシピ」には断層パラメータの標準的な設定は示されているが、それぞれのパラメータがどの程度のバラツキを有するかについては明確ではない。そこで、日本で発生した地殻内地震のうち、既往研究によりすべり分布が推定されている地震を対象として、断層パラメータの統計的特性を評価した。対象地震は表-1に示すMw(モーメントマグニチュード)5.8から6.9の18地震である。このうち、12地震が横ずれ断層、6地震が逆断層であり、横ずれ断層の数が多くなった。

図-1に示すようにSomerville et al.<sup>5)</sup>の方法に基づき、

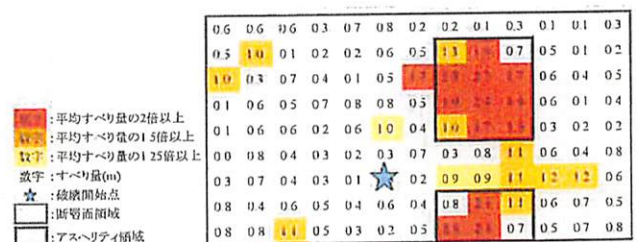


図-1 断層の特性化の例(2005年福岡県西方沖地震)<sup>3)</sup>  
Fig. 1 Characterization of fault (2005 Fukuoka Seiho Oki EQ)<sup>3)</sup>

\*1 技術センター建築技術研究所防災研究室

表-1 地震リスト  
Table 1 Earthquake list

No.	発生年月日	地震名	Mw	メカニズム	文献	アスペリテイ数
1	1945/1/13	三河	6.6	逆断層	Kikuchi et al. (2005)	1
2	1948/6/28	福井	6.7	横ずれ断層	Ichinose et al. (2005)	3
3	1961/8/19	北秀濃	6.5	逆断層	Takco & Mikami (1990)	1
4	1969/9/9	岐阜県中部	6.4	横ずれ断層	Takco & Mikami (1990)	2
5	1974/5/9	伊豆半島沖	6.6	横ずれ断層	武元(1989)	1
6	1975/4/21	大分県中部	6.4	横ずれ断層	Takco & Mikami (1990)	1
7	1980/6/29	伊豆半島東方沖	6.6	横ずれ断層	Takco (1988)	2
8	1984/9/14	長野県西部	6.3	横ずれ断層	Yoshida & Koketsu (1990)	1
9	1995/1/17	兵庫県南部	6.9	横ずれ断層	Koketsu et al. (1998)	2
10	1997/7/26	鹿児島県北西部	6.1	横ずれ断層	Miyakoshi et al. (2000)	1
11	1997/5/13	鹿児島県北西部	6.0	横ずれ断層	Honkava et al. (2001)	2
12	1997/6/25	山口県北部	5.8	横ずれ断層	Miyakoshi et al. (2000)	1
13	1998/9/3	岩手県内陸北部	5.9	逆断層	Miyakoshi et al. (2000)	1
14	2000/10/6	兵庫県西部	6.8	横ずれ断層	岩田・関口(2002)	2
15	2003/7/26	宮城県北部	6.1	逆断層	Hikima & Koketsu (2004)	1
16	2004/10/23	新潟県中越	6.6	逆断層	Hikima & Koketsu (2005)	1
17	2004/10/23	新潟県中越(余震)	6.3	逆断層	Hikima & Koketsu (2005)	2
18	2005/3/20	福岡県西方沖	6.6	横ずれ断層	Asano & Iwata (2006)	2
平均						1.5

断層のすべり変位量の分布を矩形のアスペリテイ領域と背景領域に分ける特性化を行い、この結果に基づいて断層パラメータの整理を行った。

### 2.3 断層パラメータの整理

図-2と図-3には地震モーメント $M_0$ と断層面積 $S$ 、アスペリテイ面積 $S_a$ の関係を整理した結果を示す。横ずれ断層と逆断層による差は見られず、 $M_0-S$ 、 $M_0-S_a$ 関係ともSomerville et al.や「レシピ」の関係とおおむね一致した。以上の結果をもとに、次章では断層面積とアスペリテイ面積などの断層パラメータは「レシピ」に基づき設定する。

### 2.4 アスペリテイ分布と破壊開始点位置

上述のように、逆断層の地震のデータが限られていることから、以下では横ずれ断層の地震について整理を行った。図-4は断層面のうちアスペリテイが占める面積の割合(アスペリテイ面積比)を断層走向方向と断層傾斜角方向で整理した結果である。ここでは、断層面を断層長さ $L$ と断層幅 $W$ で正規化し、 $0.05L$ と

$0.05W$ 刻みの帯状領域でアスペリテイ面積比を求め、全地震で平均した結果を示している。ただし、走向方向は左右対称として折り返して平均した。図-4中に破線で示すように、正方形の断層面内に正方形のアスペリテイが一樣に分布すると仮定した場合、アスペリテイの大きさが有限のため端部では割合が小さくなる。断層走向方向の分布はこの一樣に分布する場合とおおむね一致したのに対して、断層傾斜角方向の分布は中央部が小さく下端の分布が大きくなる傾向が見られた。次章では以上の結果に基づき断層の左右端と上端でアスペリテイ分布が小さくなるようにモデル化を行った。

破壊開始点位置はアスペリテイ外縁部やその近傍に多く分布する傾向が認められた。そこで、破壊開始点位置を最大アスペリテイからの相対位置で整理した。

図-5には、破壊開始点位置の最大アスペリテイ中心からの相対位置を○で示す。括弧の数字は表-1の地震番号に対応する。ここで、走向方向と傾斜角方向の距離はアスペリテイの長さと同幅で正規化し、走向方

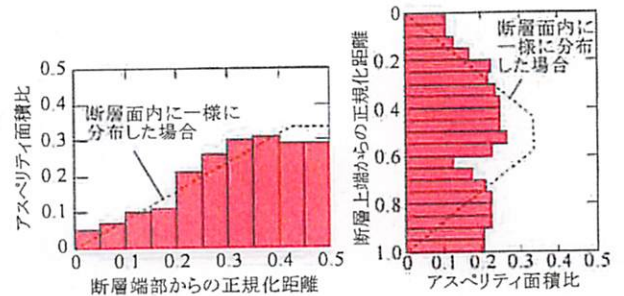


図-4 断層面内におけるアスペリテイ面積比の分布  
(左:断層走向方向, 右:断層傾斜角方向)  
Fig. 4 Spatial distribution of asperity area ratio  
(Left: strike direction, right: dip direction)

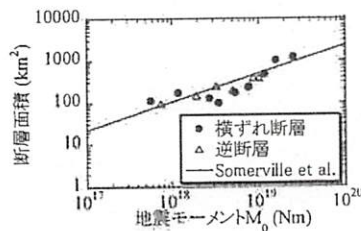


図-2 地震モーメントと断層面積  
Fig. 2 Seismic moment and fault area

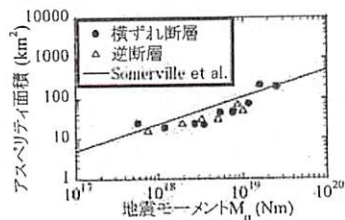


図-3 地震モーメントとアスペリテイ面積  
Fig. 3 Seismic moment and asperity area

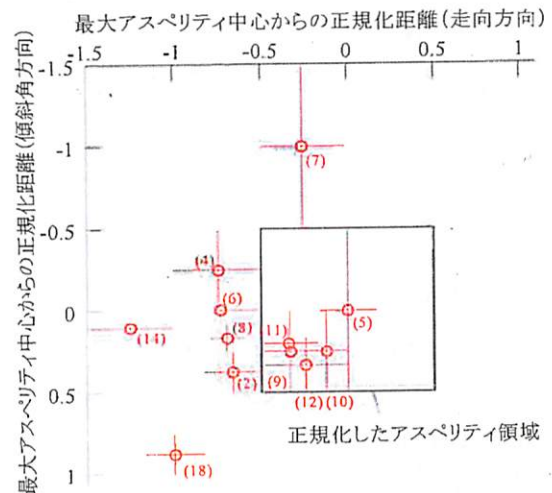


図-5 破壊開始点の最大アスペリテイに対する相対位置  
Fig. 5 Relative position of hypocenter to largest asperity

向は左右対称と考えて折り返している。また、参考として震源インバージョンの際に設定されているメッシュの大きさを十字で示した。メッシュの大きさの大小開始点は最大アスペリティの下半分に多く分布した。は解析結果の精度と対応していると考えられる。破壊そこで次章では破壊開始点位置が最大アスペリティの下半分に一様に分布するようにモデル化した。

### 3. アスペリティ分布と破壊開始点位置の影響による地震動強さのバラツキ

#### 3.1 解析手法と解析条件

統計的グリーン関数法<sup>6), 7)</sup>を用いて岩盤相当での地震動シミュレーションを行い、水平2成分(断層直交FN, 断層走向FP成分)の地震動波形の計算を行った。Mw6.5の横ずれ断層を想定し、図-6に示す12地点を評価地点とした。断層面積とアスペリティ面積につ

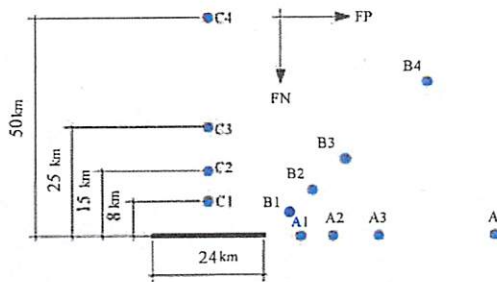


図-6 断層と地震動評価地点の位置関係  
Fig. 6 Relation between fault geometry and calculation point

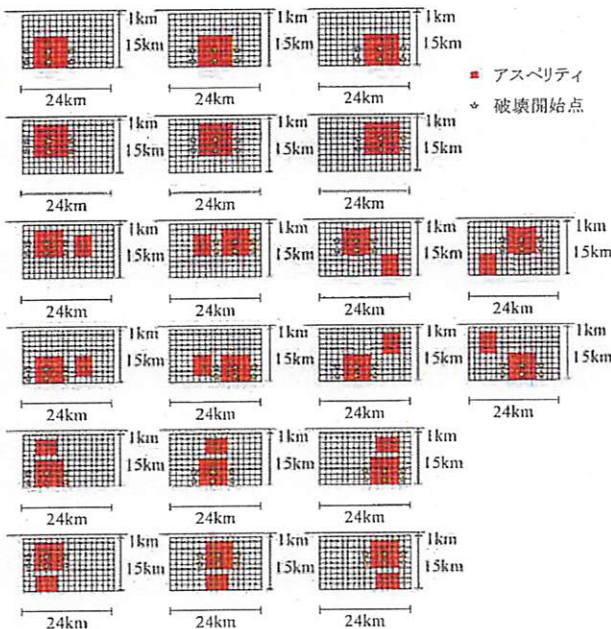


図-7 アスペリティ分布と破壊開始点位置のモデル化  
Fig. 7 Model for asperity distribution and hypocenter location

いては2章の結果から平均値が「レシピ」と同傾向であったので、「レシピ」に基づき設定した。その他の断層パラメータについても同様に「レシピ」に基づいた。

アスペリティ分布と破壊開始点位置は2章の結果に基づき以下のように設定した。断層面上端と左右端ではアスペリティの割合が徐々に減少する傾向が見られたため、これを模擬するために上端(0.1W程度)と左右端(0.1L程度)はアスペリティを配置しないようにした。破壊開始点位置は最大アスペリティの下半分周辺に一様に配した。図-7に設定したモデルを示す。アスペリティ分布20ケースに対して破壊開始点位置を6ケースとした計120ケースとした。図-8に示すように設定したモデルの走向方向と傾斜角方向に対するアスペリティ面積比の分布は、図-4に示した傾向をおおむね再現している。さらに、地震動の短周期成分のランダム性の影響を考慮するためそれぞれの解析ケースに対して要素断層の小地震に与える位相を変えた20波、合計2400ケースの地震動波形の計算を行った。

尚、シミュレーションでは震源特性の影響のみを考慮し伝播特性やサイト特性は考慮していない。

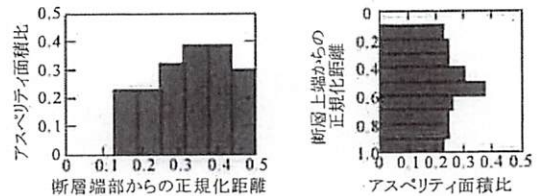


図-8 設定したモデルのアスペリティ面積比の分布  
(左: 走向方向, 右: 傾斜角方向)

Fig. 8 Spatial distribution of modelled asperity area ratio  
(Left: strike direction, right: dip direction)

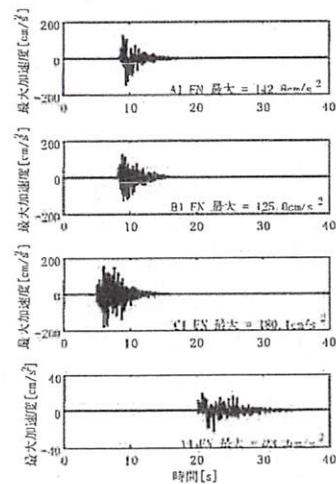


図-9 A1, B1, C1, A4での加速度波形(FN成分)  
Fig. 9 Acceleration time history for A1, B1, C1 and A4 (FN comp.)

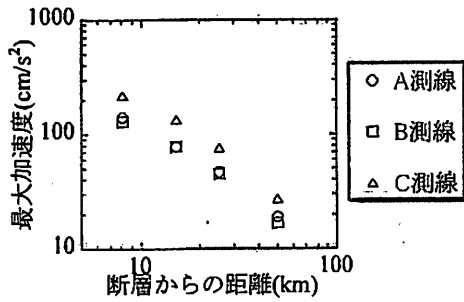


図-10 計算結果の最大加速度の平均値の距離減衰特性  
Fig. 10 Attenuation property for median PGA

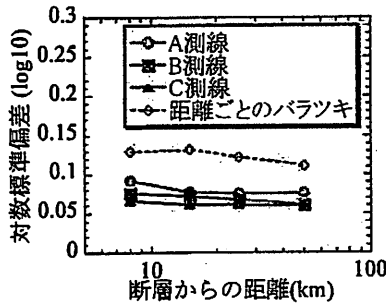


図-11 計算結果の最大加速度のバラツキの対数標準偏差  
Fig. 11 Log standard deviation for calculated PGA

### 3.2 評価結果

#### 3.2.1 地震動波形の計算結果

図-9に計算した時刻歴波形の例を示す。図-7の左から2列目、上から2段目のアスペリティ分布で破壊開始点位置が左下の場合に対する、A1, B1, C1, A4の4点におけるシミュレーション結果のFN成分である。図-10は計算結果の中央値の距離減衰特性を示す。断層からの距離が等しい3地点間の最大加速度値を比較すると、C測線の結果が他の2測線よりやや大きくなった。これは、評価地点と断層及びアスペリティの位置関係が加速度の大きさに影響を与えているためと考えられ、これにより同一距離においても最大加速度値にバラツキが生じることが示唆される。

#### 3.2.2 バラツキの評価結果

シミュレーション結果の最大加速度は、FN, FP成分の時刻歴合成値の最大値から求め、バラツキの大きさ対数標準偏差で評価した。地点*i*における全バラツキ $\sigma_{Total}(i)$ は全解析結果の最大加速度 $A_e(i, j, k)$ (2400ケース)から(1)式のように求めた。

$$\sigma_{Total}(i) = \sqrt{\frac{1}{20} \frac{1}{120} \sum_{j=1}^{120} \left\{ \sum_{k=1}^{20} (\log A_e(i, j, k) - \log \bar{A}_e(i)) \right\}^2} \quad (1)$$

ここに*j*はそれぞれアスペリティ分布と破壊開始点位置

の条件、*k*は小地震の位相の条件を示す。 $\bar{A}_e(i)$ は(2)式に示した全2400ケースの平均値である。

$$\log \bar{A}_e(i) = \frac{1}{20} \frac{1}{120} \sum_{j=1}^{120} \left( \sum_{k=1}^{20} \log A_e(i, j, k) \right) \quad (2)$$

図-11に地点ごとの全バラツキの評価結果を示す。バラツキの大きさは0.06~0.10程度となった。破壊進行方向の測線(A測線)のバラツキが他の測線よりもやや大きくなる傾向が見られた。また、断層に近い地点の方がバラツキの大きさがやや大きくなる傾向が見られたが、増加量はそれほど大きくなかった。

次に、断層からの距離が等しい地点の結果をまとめて(3)式のようにバラツキの大きさを評価した(距離ごとのバラツキ)。

$$\sigma_{Total} = \sqrt{\frac{1}{20} \frac{1}{120} \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \left\{ \sum_{i=1}^{120} \left\{ \sum_{k=1}^{20} (\log A_e(i, j, k) - \log \bar{A}_e) \right\}^2 \right\}} \quad (3)$$

ここに $\bar{A}_e$ は断層からの距離が等しい地点の全解析結果(2400ケース×3地点)の平均値である。図-11に示すバラツキは0.11~0.13となり、地点ごとのバラツキより大きくなる傾向が見られた。これは図-9、図-10からも読み取れたように、地震動が同じ距離でも方位によって変動しているということを示している。

## 4. 距離減衰式の回帰誤差との比較

### 4.1 距離減衰式の回帰誤差

図-12に示すように地表で観測される地震動は、震源特性、伝播特性、サイト増幅特性の3つの影響を受けている。これらの影響は地震や地点ごとに異なるために、観測記録にバラツキが生じると考えられる。

一方、距離減衰式の回帰誤差は、図-13に示すように地震間誤差と地震内誤差に分けることができる。地震間誤差は、各々の地震が同規模地震の平均特性からどの程度隔たっているかを表すため、主に震源特性の影響を示すのに対して、地震内誤差は各々の観測記録が、それぞれの地震時の平均的な距離減衰特性からどの程度隔たっているかを表すため、サイト増幅特性や伝播特性の影響を示す、と大まかに分類される<sup>8)</sup>。

### 4.2 3章のシミュレーション結果の要因ごとの影響への分離

3章で計算した地震動強さのバラツキは、アスペリティ分布と破壊開始点位置の影響、要素断層に与える小地震の位相の影響の2つの影響を受けている。そこで求めたバラツキの大きさをこれらの要因別のバラツ

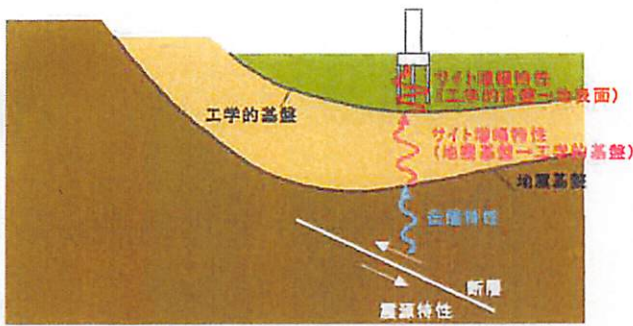


図-12 震源特性・伝播特性・サイト増幅特性の模式図  
Fig. 12 Source, propagation path and site characteristics

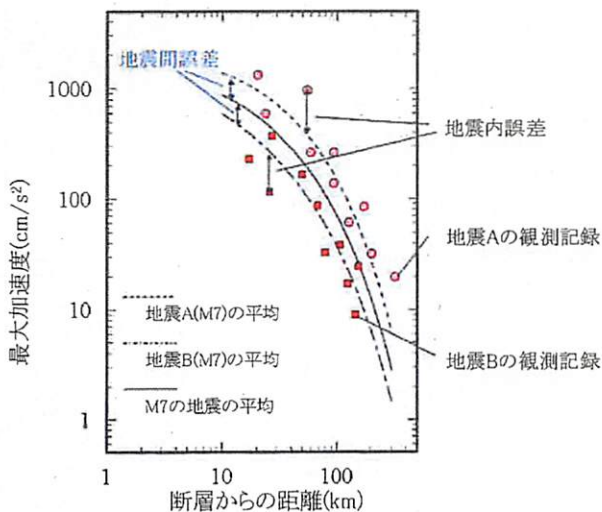


図-13 地震間誤差と地震内誤差の模式図  
Fig. 13 Schematic for inter-event and intra-event errors

きに分離して評価した。まず、地点*i*、アスペリティ分布と破壊開始点位置*j*に対して、小地震の位相*k*を変えた20ケースの平均を(4)式のように求めた。

$$\log \bar{A}_a(i, j) = \frac{1}{20} \sum_{k=1}^{20} \log A_a(i, j, k) \quad (4)$$

これをアスペリティ分布と破壊開始点位置を変えた120ケースそれぞれについて計算し、最大加速度のケース間のバラツキを(5)式のように求めた。これを地点*i*におけるアスペリティ分布と破壊開始点位置の影響によるバラツキの大きさ $\sigma_{\text{Asp}}(i)$ とした。

$$\sigma_{\text{Asp}}(i) = \sqrt{\frac{1}{120} \sum_{j=1}^{120} (\log A_a(i, j, k) - \log \bar{A}_a(i))^2} \quad (5)$$

要素断層に与える位相の影響によるバラツキの大きさ $\sigma_{\text{Phase}}(i)$ は、(6)式のように全バラツキ $\sigma_{\text{Total}}(i)$ からアスペリティ分布と破壊開始点位置の影響 $\sigma_{\text{Asp}}(i)$ を取り除いて評価した。

$$\sigma_{\text{Phase}}(i) = \sqrt{\sigma_{\text{Total}}^2(i) - \sigma_{\text{Asp}}^2(i)} \quad (6)$$

表-2 パラメータのバラツキの設定  
Table 2 Statistics for fault parameters

	平均	標準偏差	分布形
アスペリティ面積比 $S_a/S$	0.23	0.04	正規分布
破壊伝播速度 $V_r$ (km/s)	2.52	0.2	正規分布

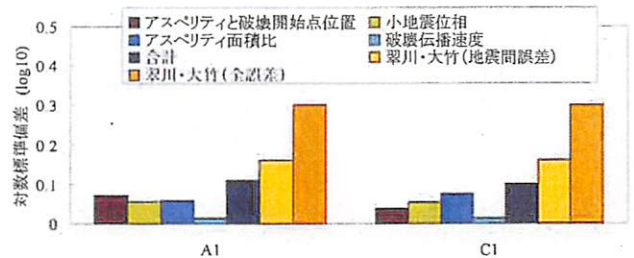


図-14 断層パラメータの影響によるバラツキと距離減衰式の回帰誤差との比較 (A1, C1)

Fig. 14 Comparison between simulated variance due to fault parameters and errors in attenuation relationship (A1, C1)

### 4.3 他の断層パラメータの影響の評価

距離減衰式の回帰誤差との比較のためには、他の断層パラメータの影響についても評価する必要がある。既往の文献では、アスペリティ分布と破壊開始点位置以外の断層パラメータでは、アスペリティ面積比(断層面積に対するアスペリティ面積の比)と破壊伝播速度の影響が大きいことが指摘されており、距離減衰式の回帰誤差にはこれらの影響も含まれている。そこで、これらの断層パラメータが最大加速度のバラツキに与える影響を簡易的に評価した。表-2にこれらのパラメータの設定を示す。評価方法の詳細については文献<sup>9)</sup>を参照されたい。

### 4.4 比較結果

図-14には、A1とC1の2地点について、要因ごとのバラツキとそれぞれのバラツキが独立であるとして計算したバラツキの合計を示す。アスペリティ分布と破壊開始点位置の影響、要素断層に与える小地震の位相の影響、アスペリティ面積比の影響はいずれの地点でも同程度の大きさとなり、破壊伝播速度の影響は非常に小さくなった。

図-14には併せて翠川・大竹<sup>8)</sup>の距離減衰式の回帰誤差も比較のために示している。上述したように震源特性の影響は、主に地震間誤差に影響を与えていると考えられるため、全誤差とあわせて地震間誤差も示す。求めたバラツキの大きさは全誤差と比較すると1/3~1/2程度であり、本検討結果から判断すると震源特性が距離減衰式の回帰誤差に与える影響はそれほど大きく

ないと考えられる。一方、地震間誤差とは近い結果となっており、地震間誤差が主に断層パラメータの影響によるものと考えられる。

今後、距離減衰式の地震内誤差に主に影響を与えるサイト増幅特性や伝播特性などのパラメータの影響も併せて考慮することで距離減衰式のバラツキについてより詳細な議論が可能になると考えられる。

## 5. まとめ

過去に日本で発生した内陸地殻内地震のすべり分布から特性化震源モデルの統計的特性を評価した。横ずれ断層の地震を対象とし、特にアスペリティ分布と破壊開始点位置を中心に評価した。

Mw6.5の断層面を設定し、以上の特性をモデル化したアスペリティ分布と破壊開始点位置が最大加速度のバラツキに与える影響を評価した。

求めたバラツキと距離減衰式の回帰誤差との比較を行った。距離減衰式には他の震源特性の影響も含まれているため、そのうちアスペリティ面積比と破壊伝播速度の影響を簡易的に評価した。断層パラメータの影響による最大加速度のバラツキの大きさは距離減衰式の地震間誤差よりやや小さくなった。

## 謝辞

本研究は(独)原子力安全基盤機構の原子力安全基盤調査研究「距離減衰式のバラツキの特性評価と地震ハザード解析の高度化研究」(研究代表者:東京工業大学・翠川三郎教授)の成果の一部です。また、本研究の一部は東京工業大学・鬼頭順三氏(東京工業大学翠川三郎修士課程(当時))の成果<sup>10)</sup>によります。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 例えば、池浦友則、野田静男：同一地点における地震動応答スペクトルのばらつき—地震規模と震源距離がそれぞれ等しい強震記録ペアの分析—, 日本地震工学会論文集, 5(3), pp.12-30, 2005.
- 2) 例えば、大塚久哲, P. G. Somerville, 佐藤俊明：断層パラメータの予測誤差を考慮した広帯域地震動の評価, 土木学会論文集 No.584/I-42, pp.185-200, 1998.
- 3) Asano, K., T. Iwata: Source process and near-source ground motions of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture earthquake, Earth Planets and Space, 58, pp.93-98, 2006.
- 4) 例えば、地震調査研究推進本部地震調査委員会：震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシビ」), 平成20年4月11日, 2008.
- 5) Somerville, P., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith, A. Kowada: Characterizing Crustal Earthquake Slip Models for the Prediction of Strong Ground Motion, Seismological Research Letters, 70(1), pp.59-80, 1999.
- 6) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長：地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測：統計的波形合成法による予測, 日本建築学会構造系論文集, 430, pp.1-9, 1991.
- 7) 香川敬生：ハイブリッド合成法に用いる統計的グリーン関数法の長周期帯域へ拡張, 日本地震工学会論文集, 4(2), pp.21-32, 2004.
- 8) 翠川三郎, 大竹雄：地震動強さの距離減衰式にみられるバラツキに関する基礎的分析, 日本地震工学会論文集, 3(1), pp.59-70, 2003.
- 9) 糸井達哉, 内山泰生, 坂本成弘, 翠川三郎, 三浦弘之：統計的グリーン関数法を用いた地震動強さのバラツキの評価, その2 断層パラメータが最大加速度・最大速度のバラツキに与える影響, 日本建築学会学術講演梗概集, B-II, pp. 869-870, 2008.
- 10) 鬼頭順三：統計的グリーン関数法の改良とそれに基づく地震動強さのバラツキの評価, 平成19年度修士論文, 東京工業大学, 2008.