



統計的グリーン関数法で評価した地殻内地震の応答スペクトルのバラツキ

系井達哉¹⁾、翠川三郎²⁾、鬼頭順三³⁾、三浦弘之⁴⁾、内山泰生⁵⁾、坂本成弘⁶⁾

- 1) 正会員 大成建設技術センター、博士（工学）
e-mail : ititty00@pub.taisei.co.jp
- 2) 正会員 東京工業大学総合理工学研究科、教授 工博
e-mail : smidorik@enveng.titech.ac.jp
- 3) 東京工業大学総合理工学研究科（現 中部国際空港）、修士（工学）
e-mail : Junzo_Kito@cjiac.co.jp
- 4) 正会員 東京工業大学総合理工学研究科、助教 博士（工学）
e-mail : hmiura@enveng.titech.ac.jp
- 5) 大成建設技術センター、博士（工学）
e-mail : yasuo.uchiyama@sakura.taisei.co.jp
- 6) 正会員 大成建設技術センター、博士（工学）
e-mail : shigehiro.sakamoto@sakura.taisei.co.jp

要 約

断層パラメータのバラツキが地震動の応答スペクトルのバラツキの特性に与える影響を評価するために、過去に日本で発生した内陸地殻内地震のすべり分布を用いて特性化震源モデルの統計的特性を評価し、この結果に基づき統計的グリーン関数法を用いた地震動シミュレーションを行った。まず、アスペリティ分布と破壊開始点位置が応答スペクトルのバラツキに与える影響を中心に評価した。バラツキの大きさは短周期では小さく、長周期になるにつれて増加した。さらに、他の断層パラメータのバラツキの影響についても簡易的に評価し、距離減衰式の回帰誤差との比較を行い、距離減衰式の地震間誤差が主に断層パラメータの影響で説明可能であることを示した。

キーワード：応答スペクトル、バラツキ、地殻内地震、震源特性、アスペリティ、破壊開始点、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。多様な地震における様々な地盤条件の観測点で得られたデータの回帰分析から得られる距離減衰式の回帰誤差には、偶然的バラツキと認識論的不確実性が混在している。偶然的バラツキは予測不可能な現象によるバラツキであり、そもそも低減することができないものであるのに対して、認識論的不確実性はより正確なモデル化、新たな知識やデータの活用により低減可能である^{1), 2)}。

現状の地震ハザード解析では両者が混在している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っているものと推測される。そこで、認識論的不確実性をできるだけ排除

し、偶然的バラツキのみを考慮することで地震ハザード解析結果が実現象をより説明する可能性があることが指摘されている³⁾。

したがって、確率論的地震ハザード解析の予測精度向上のためには地震動強さのバラツキに与える要因を評価することが重要な課題であると考えられ、距離減衰式の回帰誤差に与える要因の分析^{4)、5)}や、観測記録の分析⁶⁾⁻⁹⁾からバラツキを評価する研究が行われている。しかし、分析に用いられたデータには大地震時の震源近傍での観測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。観測記録の代用として、地震動シミュレーションを用いて地震動強さのバラツキに与える要因が検討されている¹⁰⁾⁻¹⁹⁾。これらの研究は震源特性の影響に着目し、アスペリティ分布やすべり分布の影響^{10)、12)-19)}は短周期から長周期まで全ての周期に及ぶこと、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)^{11)、14)、19)}は周期1秒程度より短周期で影響が大きいこと、破壊伝播速度^{10)、13)、17)-19)}は、周期1秒程度より長周期でその影響が大きいことが指摘されている。ただし、これらの研究ではアスペリティ分布や破壊開始点位置の設定が比較的単純で、過去の地震のすべり分布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横ずれ断層タイプの地殻内地震の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アスペリティ分布や破壊開始点位置のモデル化を行う。次に、モデル化した断層による地震動シミュレーション結果から、これらの断層パラメータが応答スペクトルのバラツキ特性に与える影響について評価を行う。また、アスペリティ面積比と破壊伝播速度が応答スペクトルのバラツキの大きさに与える影響についても併せて簡易的に評価し、距離減衰式の回帰誤差との比較を行う。以上の検討により、距離減衰式の回帰誤差に占める断層パラメータの影響を把握することを試みる。

2. 日本で発生した地殻内地震の断層パラメータの整理

日本で発生した地殻内地震のうち、既往の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検討する。対象とする地震は表 1 に示す Mw5.8 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い。

各地震の断層すべり分布の文献調査²⁰⁾⁻³²⁾を行い、複数のモデルがある場合には比較の上でモデルの選択を行う。その後、図 1 に示すように、Somerville et al.³⁴⁾の方法に基づき、断層のすべり分布を矩形のアスペリティ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地震モーメント M_0 と断層面積 S 、アスペリティ面積 S_a の関係を整理する。図 2 および図 3 に示すように、横ずれ断層と逆断層による差は見られず、 $M_0 - S$ と $M_0 - S_a$ 関係とも Somerville et al.とおおむね一致する。表 1 下段に示すアスペリティ面積比 S_a / S の平均値 (0.19) も Somerville et al.や「レシビ」³⁵⁾とおおむね一致する。

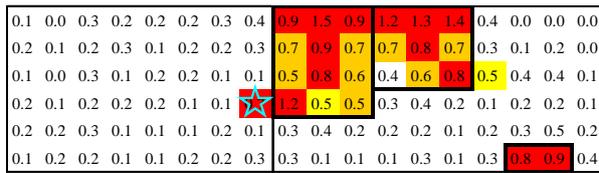
表 1 下段に示すように、アスペリティ個数の平均値は 1.5 個となり、Somerville et al.の 2.6 個より少ない結果となる。これは、本研究で対象としている地震規模がやや小さいことによると考えられる。破壊伝播速度 V_r は、横ずれ断層と逆断層による差は見られず 2.5km/s 程度であり、「レシビ」とおおむね一致する。なお、 V_r の記載がある地震数が限られるため、Somerville et al.のデータと併せた評価結果もカッコ付きで示してある。以上の結果をもとに、次章では断層面積 S とアスペリティ面積 S_a 、破壊伝播速度 V_r などの断層パラメータは「レシビ」に基づき設定する。

次に、アスペリティ分布について検討を行う。横ずれ断層と逆断層とではメカニズムも異なり、また観測記録の分析から地震動強さに違いが見られること³⁶⁾などから、アスペリティ分布について横ずれ断層と逆断層でそれぞれ検討することが望ましいと考えられるが、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う。図 4 は、断層面のうちアスペリティが占める面積の割合(アスペリティ面積比)を断層走向方向と断層傾斜角方向の分布として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、 $0.05L$ (または $0.05W$) 刻みの帯状領域でアスペリティ面積比を求め、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ている。図 4 中の破線に示すように、正方形の断層面内に正方形のアスペリティが一樣に分布すると仮定した場合、アスペリティ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するのに対して、断層傾斜角方向の分布は中央

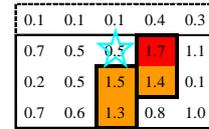
表 1 特性化を行った地殻内地震

No.	発生年月日	地震名	Mw	メカニズム	文献	アスペリティ数	S(km ²)	S _a (km ²)	S _a /S	Vr(km/s)
1	1945/1/13	三河	6.6	逆断層	Kikuchi et al. ²⁰⁾	1	375	50	0.13	2.5
2	1948/6/28	福井	6.7	横ずれ断層	Ichinose et al. ²¹⁾	3	972	207	0.21	2.5
3	1961/8/19	北美濃	6.5	逆断層	Takeo & Mikami ²²⁾	1	192	32	0.17	-
4	1969/9/9	岐阜県中部	6.4	横ずれ断層	Takeo & Mikami ²²⁾	2	168	45	0.27	-
5	1974/5/9	伊豆半島沖	6.6	横ずれ断層	武尾 ²³⁾	1	225	45	0.20	-
6	1975/4/21	大分県中部	6.4	横ずれ断層	Takeo & Mikami ²²⁾	1	100	22	0.22	-
7	1980/6/29	伊豆半島東方沖	6.6	横ずれ断層	Takeo ²⁴⁾	2	240	48	0.20	-
8	1984/9/14	長野県西部	6.3	横ずれ断層	Yoshida & Koketsu ²⁵⁾	1	126	24	0.19	2.5
9	1995/1/17	兵庫県南部	6.9	横ずれ断層	Koketsu et al. ²⁶⁾	2	1152	192	0.17	2.5
10	1997/3/26	鹿児島県北西部	6.1	横ずれ断層	Miyakoshi et al. ²⁷⁾	1	120	32	0.27	-
11	1997/5/13	鹿児島県北西部	6.0	横ずれ断層	Horikawa et al. ²⁸⁾	2	170	19	0.11	2.3
12	1997/6/25	山口県北部	5.8	横ずれ断層	Miyakoshi et al. ²⁷⁾	1	112	24	0.21	2.5
13	1998/9/3	岩手県内陸北部	5.9	逆断層	Miyakoshi et al. ²⁷⁾	1	96	16	0.17	2.5
14	2000/10/6	鳥取県西部	6.8	横ずれ断層	岩田・関口 ²⁹⁾	2	384	72	0.19	1.9
15	2003/7/26	宮城県北部	6.1	逆断層	Hikima & Koketsu ³⁰⁾	1	144	24	0.18	3.0
16	2004/10/23	新潟県中越	6.6	逆断層	Hikima & Koketsu ³¹⁾	1	384	72	0.19	-
17	2004/10/23	新潟県中越(余震)	6.3	逆断層	Hikima & Koketsu ³¹⁾	2	240	32	0.13	-
18	2005/3/20	福岡県西方沖	6.6	横ずれ断層	Asano & Iwata ³²⁾	2	468	72	0.15	2.1
平均						1.5	-	-	0.19	2.43 (2.61)
標準偏差						-	-	-	0.04	0.28 (0.20)

鳥取県西部地震では分岐した断層は考慮していない
 一部データは文献 33)による
 破壊伝播速度の()は文献 34)のデータとあわせて評価した値

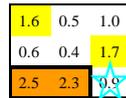


(a) 1948 年福井地震

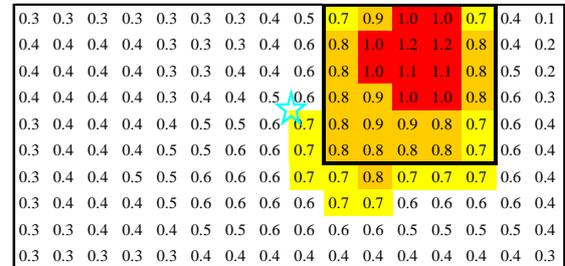


(b) 1969 年岐阜県中部の地震

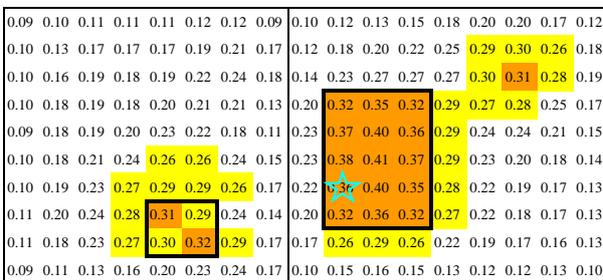
数字 : 平均すべり量の2倍以上
 数字 : 平均すべり量の1.5倍以上
 数字 : 平均すべり量の1.25倍以上
 数字 : すべり量(m)
 ☆ : 破壊開始点
 □ : 断層面領域
 □ : アスペリティ領域



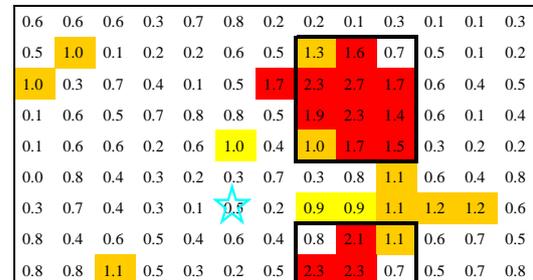
(c) 1975 年大分県中部の地震



(d) 1984 年長野県西部地震



(e) 1997 年 5 月鹿児島県北西部の地震



(f) 2005 年福岡県西方沖地震

図 1 断層の特性化の例

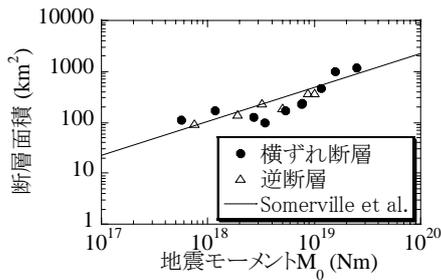


図 2 地震モーメントと断層面積

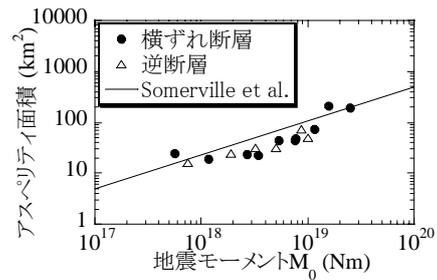


図 3 地震モーメントとアスペリティ面積

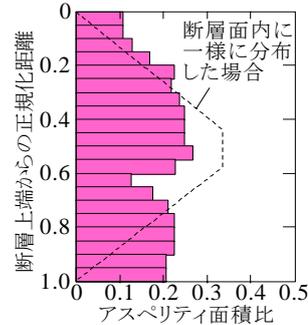
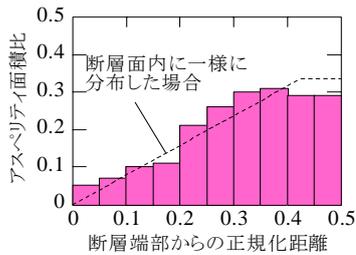


図 4 断層面内におけるアスペリティ面積比の分布 (左: 断層走向方向、右: 断層傾斜角方向)

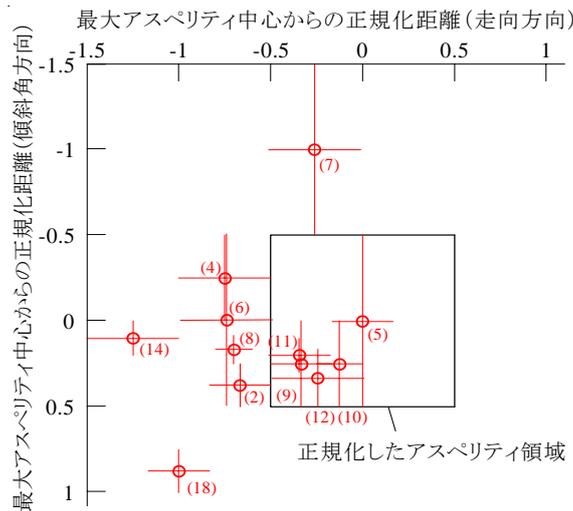


図 5 破壊開始点の最大アスペリティに対する相対位置

部がやや小さく下端の分布が大きくなる。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ィ分布が小さくなるようにモデル化を行う。

破壊開始点位置についても検討を行う。図 1 から読み取れるように破壊開始点はアスペリティ外縁部やその近傍に多く分布する傾向が認められる。そこで、破壊開始点位置を最大アスペリティからの相対位置で整理する。

図 5 に、破壊開始点位置の最大アスペリティ中心からの相対位置を示す。カッコの数字は表 1 の地震番号に対応する。参考までに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ている。ここで、走向方向と傾斜角方向の距離はアスペリティの長さと同幅で正規化し、走向方向は左右対称と考えて折り返している。大きさが等しいアスペリティが複数存在する場合には破壊開始点に近い方のアスペリティを最大アスペリティとし、大きさと距離が等しいアスペリティが存在する場合にはアスペリティのすべり量が大きい方を最大アスペリティとしている。破壊開始点は最大アスペリティの下半分に多く分布する。既往研究^{34)、37)}においてはアスペリティ内部には破壊開始点はほとんど存在しないことが指摘されているが、本研究で対象とした 12 地震のうち 5 地震ではアスペリティ内部にも

破壊開始点が分布する傾向が見られる。アスペリティ端部に分布するケースも認められるが、メッシュサイズが大きい場合もあり明確に判断できない。そこで、次章では破壊開始点が最大アスペリティの下半分周辺にアスペリティ内部も含めてほぼ一様に分布するようにモデル化する。

3. アスペリティ分布と破壊開始点位置の影響による応答スペクトルのバラツキ

3.1 解析手法と解析条件の設定

統計的グリーン関数法³⁸⁾を用いて岩盤相当での地震動シミュレーションを行う。要素断層での小地震波形を(1)式に示す加速度スペクトル $S_A(f)$ を満たすように生成する。

$$S_A(f) = \frac{R_{\theta\theta} F_S P_{RTTN} M_0 (2\pi f)^2}{4\pi\rho\beta^3} \frac{1}{1+(f/f_c)^2 \sqrt{1+(f/f_{max})^m}} \quad (1)$$

ここに、 M_0 は地震モーメント、 ρ と β は地震発生層の密度とS波速度、 $R_{\theta\theta}$ は放射特性係数、 F_S と P_{RTTN} は自由地表面を表す係数とエネルギー分配の係数、 f_c はコーナー振動数である。経時特性は震源距離が大きいほど散乱の影響により継続時間が長くなる影響を考慮した村上・他³⁹⁾でモデル化し、スペクトル振幅と経時特性の両方を満たすように収束計算する。各要素断層の小地震波形は香川⁴⁰⁾と同様に長周期帯域の位相がそろった小地震波形を選択する。高周波遮断特性(f_{max} , m)は鶴来・他⁴¹⁾、伝播経路のQ値は佐藤・他⁴²⁾(1Hz以下は一定値)とする。放射特性係数 $R_{\theta\theta}$ は振動数依存性を考慮し、釜江・他⁴³⁾の方法をモデル化したもの⁴⁰⁾を用い、0.5Hzから5Hzを遷移領域とする。小地震の位相特性はSH波とSV波を別々に与え、放射特性(SV波の低振動数側は理論値を水平投影)を施した後に座標変換し、水平2成分(断層直交(FN)、断層走向(FP)成分)の小地震波形とする。小地震から大地震への合成は入倉・他⁴⁵⁾の方法を用いるとする。なお、本解析結果が観測記録の特徴をおおむね再現していることを別途確認している⁴⁶⁾。

Mw6.5の横ずれ断層を想定し、図6に示す12地点で地震動波形の合成を行う。断層の地表投影面から評価地点までの距離は8kmから50kmとする。断層面積とアスペリティ面積、破壊伝播速度については、2章の結果から平均値が「レシビ」と同傾向であったので、「レシビ」に基づき設定する。その他の断層パラメータについても同様に「レシビ」に基づき設定する。表2に設定した断層パラメータを示す。

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する。図4に示したように断層面上端と左右端で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断層の上端(0.1W程度)と左右端(0.1L程度)にはアスペリティを配置しないようにする。破壊開始点は、図5に基づき最大アスペリティの下半分周辺に一様に配置させる。図7に設定したモデルを

表2 設定した断層パラメータ

	アスペリティ個数	
	1個の場合	2個の場合
Mw	6.5	
地震モーメント(N・m)	7.2×10^{18}	
断層長さ(km)	24	
断層幅(km)	15	
断層面積(km ²)	360	
断層上端深さ(km)	1	
傾斜角(°)	90	
地震発生層のS波速度(km/s)	3.5	
地震発生層の密度(kg/m ³)	2800	
破壊伝播速度(km/s)	2.52	
アスペリティ面積(km ²)	81	83
アスペリティ面積比	0.23	
アスペリティの地震モーメント(N・m)	3.2×10^{18}	3.3×10^{18}
アスペリティの平均応力降下量(MPa)	11.4	11.7
背景領域の面積(km ²)	279	277
背景領域の地震モーメント(N・m)	4.0×10^{18}	3.9×10^{18}
背景領域の応力降下量(MPa)	2.43	1.75

示す。アスペリティ分布 20 ケース（アスペリティ 1 個が 6 ケース、アスペリティ 2 個が 14 ケース）に対して破壊開始点位置をそれぞれ 6 ケースとした合計 120 ケースとする。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 に示す傾向をおおむね再現している。さらに、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 波の地震動、合計 2400 ケースの地震動を合成する。サンプル数は 3.2.2 の各式の評価精度が十分になるように定めている。

3.2 評価結果

3.2.1 地震動シミュレーション結果の概要

図 9 に地震動シミュレーション結果の加速度波形と応答スペクトルの例を示す。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が左下の場合に対する、A1、B1、C1、A4 の 4 点における合成結果の FN 成分と FP 成分である。断層からの距離が等しい 3 地点間（A1、B1、C1）の応答スペクトルを比較すると、0.5 秒程度より短周期では、FN、FP 成分とも C1 が他の 2 地点よりやや大きくなる。これは断層からの方位、つまり評価地点と断層およびアスペリティの位置関係が応答スペクトル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応答スペクトルにバラツキが生じることが示唆される。1 秒程度より長周期では、A1、B1 の FN 成分と C1 の FP 成分で放射特性と破壊伝播の影響（いわゆる Directivity 効果）により、同一地点の 2 成分間で大きな違いが見られるとともに、同一距離における応答スペクトルのバラツキは短周期よりも大きくなる。

図 10 に、アスペリティ分布と破壊開始点位置、要素断層の小地震位相を変化させた 2400 ケースのシミュレーション結果から求めた A1 における FN 成分の 0.1 秒と 3 秒の応答スペクトルの頻度分布と超過確率分布を示す。超過確率分布は、2400 個のシミュレーション結果の中で i 番目に小さい値を超過確率が $1 - i/2401$ の位置にプロットしたものである。図には、シミュレーション結果の平均値と標準偏差から求めた対数正規分布と正規分布も示してある。頻度分布をみると、周期 0.1 秒では、対数正規分布に近い形状で変動係数は 0.22 である。一方、周期 3 秒では、分布形は単純ではなく変動係数も 0.69 と大きい。

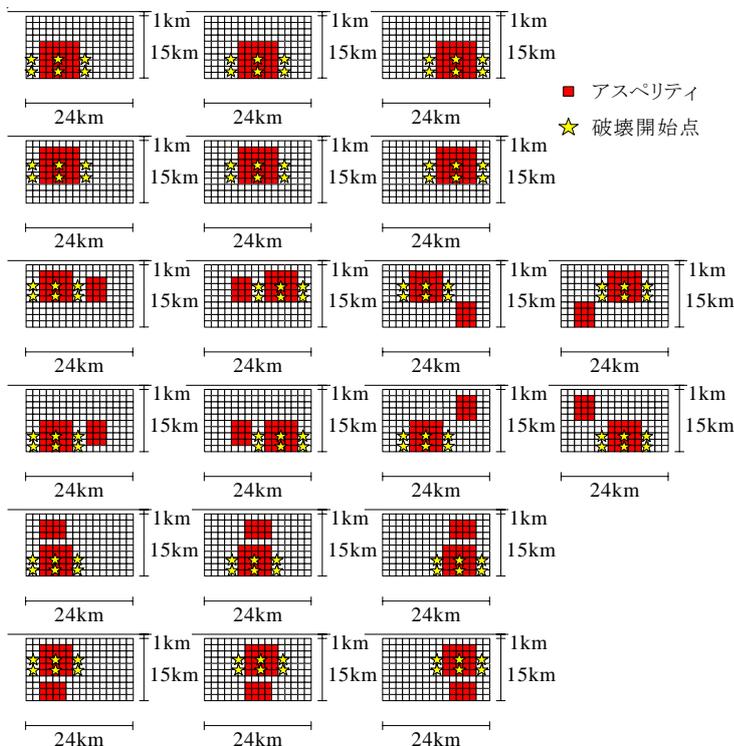


図 7 アスペリティと破壊開始点位置のモデル化

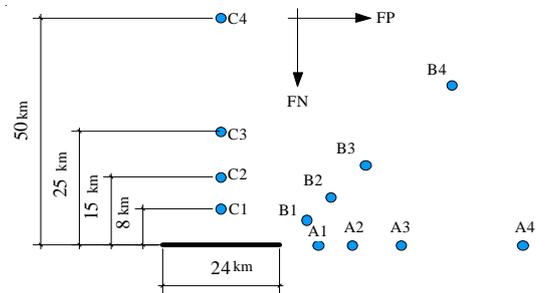


図 6 断層と地震動評価地点との位置関係

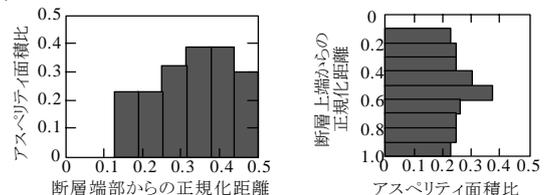


図 8 設定モデルのアスペリティ面積比分布（左：走向方向、右：傾斜角方向）

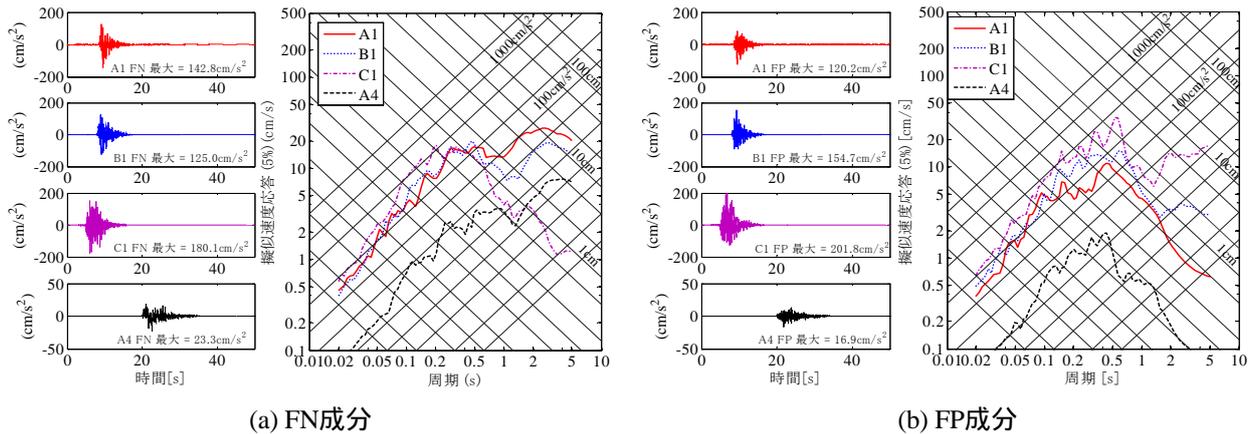


図 9 A1、B1、C1、A4での加速度波形と擬似速度応答スペクトル (h=5%) の例

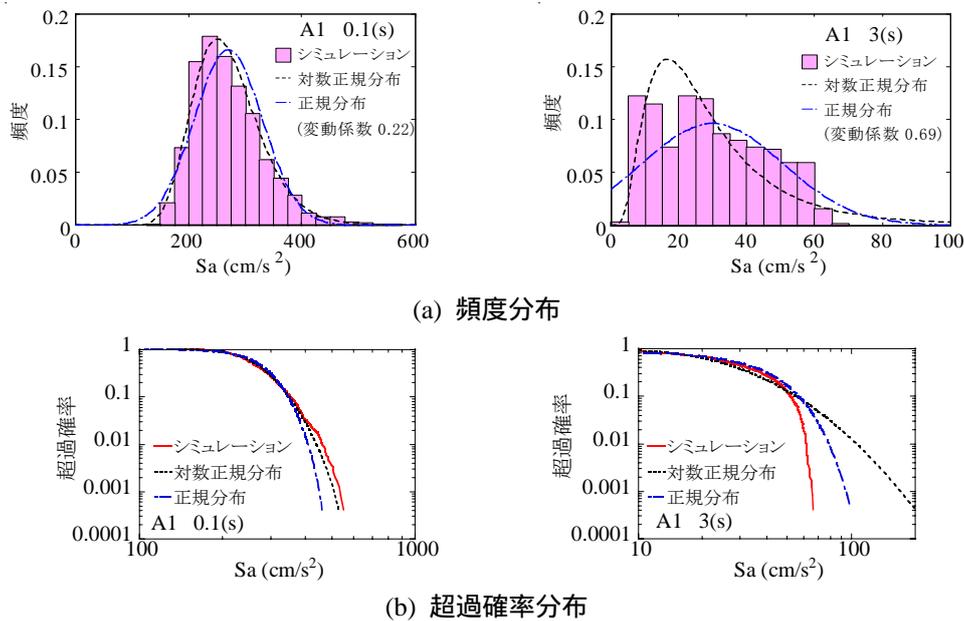


図 10 全解析結果の応答スペクトルのバラツキの確率分布 (A1、FN成分 ; 0.1秒、3秒)

超過確率分布をみると、周期 0.1 秒では、シミュレーション結果が対数正規分布とほぼ一致するのに対して、周期 3 秒では、超過確率 0.1 より低超過確率側においてシミュレーション結果が対数正規分布と一致せず、上限値が存在するようにも見え、この傾向は周期 1 秒程度より長周期側で見られる。このようにシミュレーション結果のバラツキの分布形は単純ではない場合もある。この分布形については今後の課題ではあるが、周期 1 秒程度より短周期では対数正規分布とほぼ一致することから、ここではバラツキの大きさを対数標準偏差で評価し、その大きさと要因について分析を行うこととする。

3.2.2 距離ごとのバラツキの評価手順

シミュレーション結果のバラツキを距離減衰式の回帰誤差と最終的に比較するため、以下では距離ごとのバラツキを評価する。しかし、距離ごとのバラツキに与える要因を分析するためには、まず地点ごとにバラツキの評価を行う必要がある。地点ごと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を受けている。距離ごとのバラツキにはこれら2つの影響に加えて、図 9の応答スペクトルからも読み取ることができるよう断層からの方位による変動の影響が考えられ、バラツキは以上3つの要因別のバラツキに大別できるであろう。それぞれの要因別のバラツキは、以下のように概略的に評価する。

まず、地点 i でのバラツキ $\sigma_{\text{Total}}(i)$ は地点ごとに全解析結果 (2400 ケース) から求める。次に、アス

ペリティ分布と破壊開始点位置の影響を分離して評価する。アスペリティ分布と破壊開始点位置が同一条件 j の 20 波の応答スペクトル $S_a(i, j, k)$ から小地震の位相の条件 k の影響が除去された中央値 $\bar{S}_a(i, j)$ (平均応答スペクトル) を求める。

$$\log \bar{S}_a(i, j) = \frac{1}{20} \sum_{k=1}^{20} \log S_a(i, j, k) \quad (2)$$

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、平均応答スペクトルのケース間のバラツキを(3)式のように求める。これを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 $\sigma_{\text{Asp}}(i)$ とする。

$$\sigma_{\text{Asp}}(i) = \sqrt{\frac{1}{120} \sum_{j=1}^{120} \{ \log \bar{S}_a(i, j) - \log \bar{S}'_a(i) \}^2} \quad (3)$$

ここで、 $\bar{S}'_a(i)$ は地点 i での全応答スペクトルの平均値で(4)式のように求める。

$$\log \bar{S}'_a(i) = \frac{1}{120} \cdot \frac{1}{20} \sum_{j=1}^{120} \left(\sum_{k=1}^{20} \log S_a(i, j, k) \right) \quad (4)$$

要素断層に与える小地震の位相の影響によるバラツキ $\sigma_{\text{Phase}}(i)$ は(5)式のように地点ごとのバラツキ $\sigma_{\text{Total}}(i)$ からアスペリティ分布と破壊開始点位置の影響 $\sigma_{\text{Asp}}(i)$ を取り除いて評価する。

$$\sigma_{\text{Phase}}(i) = \sqrt{\sigma_{\text{Total}}^2(i) - \sigma_{\text{Asp}}^2(i)} \quad (5)$$

一方、距離 r でのバラツキ σ_{Total} は同一距離での全解析結果 (2400 ケース \times 3 地点) から求める。次に、要因ごとのバラツキ $\sigma_{\text{Asp}, r}, \sigma_{\text{Phase}}$ は、地点ごとに求めた要因ごとのバラツキ $\sigma_{\text{Asp}}(i), \sigma_{\text{Phase}}(i)$ を(6)式のように同一距離の 3 地点で平均することで求める。

$${}_r\sigma_{\text{Asp}} = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \sigma_{\text{Asp}}^2(i)} \quad {}_r\sigma_{\text{Phase}} = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \sigma_{\text{Phase}}^2(i)} \quad (6)$$

最後に、断層からの方位による変動の影響 σ_{Dir} は(7)式のように距離ごとのバラツキ σ_{Total} からアスペリティ分布と破壊開始点位置の影響 σ_{Asp} と小地震の位相の影響 σ_{Phase} を取り除いて求める。

$${}_r\sigma_{\text{Dir}} = \sqrt{{}_r\sigma_{\text{Total}}^2 - {}_r\sigma_{\text{Asp}}^2 - {}_r\sigma_{\text{Phase}}^2} \quad (7)$$

厳密に言えば、アスペリティ分布と破壊開始点位置によって断層からの方位による影響は変化するため、アスペリティ分布と破壊開始点位置の影響による変動と断層からの方位による変動とは完全には独立ではない。しかしながら、両者を完全に分離することは困難なので、ここでは、バラツキがどのような要因で生じているかを概略検討するために、(7)式で得られる値を近似的に方位による変動の影響とみなすこととする。なお、次章で比較する距離減衰式が水平2成分の幾何平均値を対象としているため、以下では解析結果のFN、FP成分の幾何平均値について検討を行う。

3.2.3 地点ごとのバラツキ

図 11 に、地点ごとのバラツキ $\sigma_{\text{Total}}(i)$ を測線ごとに整理した結果を示す。周期 0.5 秒以下ではバラツキの大きさは 0.05 ~ 0.10 で、断層に近い地点ほどバラツキがやや大きくなるが、測線による違いはあまり大きくない。一方、周期 1 秒程度より長周期では周期とともにバラツキが大きくなり、周期 2 秒以上ではバラツキの大きさは 0.12 ~ 0.27 となる。また、バラツキの大きさは測線で異なる傾向を示し、B 測線が最大、C 測線が最小となり、A 測線が両者の中間的な値を示す。B 測線と A 測線では、破壊開始点の位置によって Directivity 効果の影響が異なることによりバラツキが大きくなっていると考えられる。

3.2.4 距離ごとのバラツキ

図 12(a)に距離ごとのバラツキ σ_{Total} を表す。バラツキは地点ごとのバラツキよりも大きくなり短周期でその傾向が強く見られる。バラツキの大きさは、距離 8km、15km では周期 1 秒以下で 0.14 程度とな

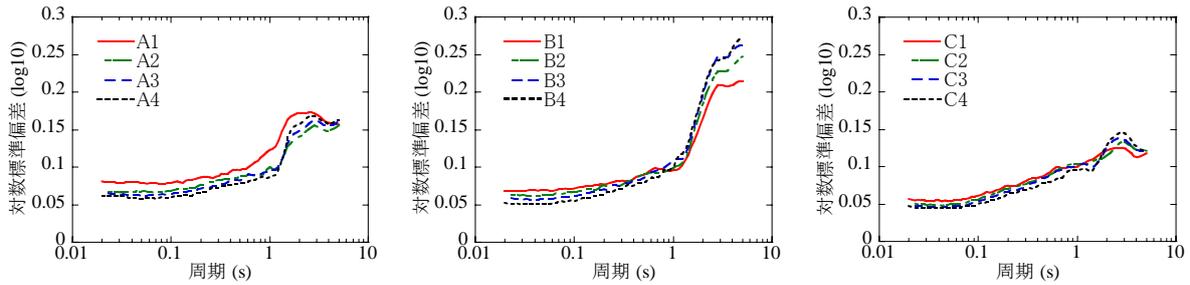
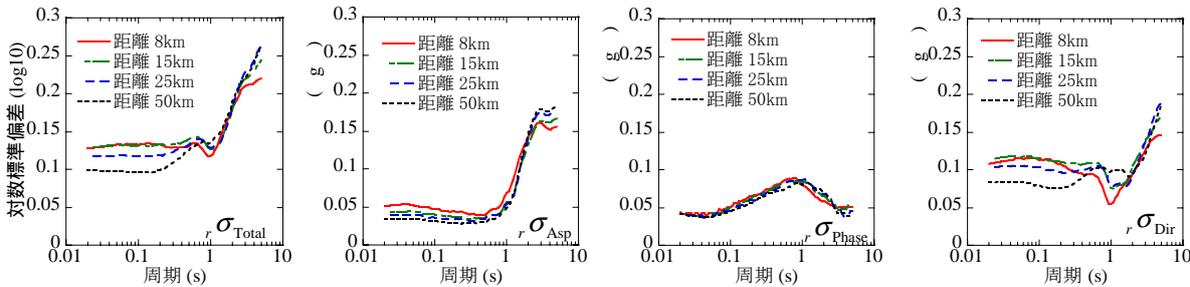


図 11 地点ごとに求めた応答スペクトルのバラツキの大きさ



(a) 距離ごとのバラツキ (b) アスペリティと破壊開始点 (c) 小地震の位相 (d) 断層からの方位による変動

図 12 距離ごとに求めた要因別バラツキ

るが、50km では周期 0.2 秒以下で 0.10 となり、近距離ほどバラツキが大きくなる距離依存が見られ、断層から近い評価地点ほど評価地点からアスペリティまでの距離の違いの影響が大きいと考えることができる。周期 1 秒以上の長周期では周期とともにバラツキが増大し、5 秒付近ではバラツキの大きさは 0.25 程度となる。また、短周期とは逆に遠距離ほどバラツキが大きくなる距離依存が見られる。遠距離ほど放射特性の方位依存性の影響が明瞭になるためと考えられる。

図 12(b)は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 σ_{Asp} を表す。バラツキの大きさは、周期 0.5 秒以下では 0.03 ~ 0.05 程度で距離ごとのバラツキ σ_{Total} に占める割合はそれほど大きくない。一方、周期 1 秒以上で周期とともに増大しはじめ、周期 2 秒以上ではバラツキの大きさは 0.15 程度となり距離ごとのバラツキ σ_{Total} に占める割合が大きくなる。図 12(a)と同様に、周期 2 秒以下では近距離ほどバラツキが大きくなる距離依存が見られ、逆に 2 秒以上では遠距離ほどバラツキが大きくなる距離依存が見られる。この理由は図 12(a)で述べた理由と同様である。

図 12(c)は要素断層の小地震に与える位相の違いの影響によるバラツキ σ_{Phase} を表す。距離による違いは見られず、バラツキの大きさは、周期 0.1 秒以下では 0.05 程度、周期 1 秒付近で最も大きく 0.08 程度となり、長周期では小さくなる。

図 12(d)は断層からの方位による変動の影響 σ_{Dir} の概略的な評価結果を表す。バラツキの大きさは、周期 0.5 秒以下では、距離 25km 以下で 0.1 程度で、周期 1 秒以上では周期とともにバラツキが増大する。図 12(a)や(b)の場合と同様、短周期では距離が大きくなるほどバラツキが小さくなり、長周期では遠距離ほどバラツキが大きくなる距離依存が見られる。

以上の検討結果から、距離ごとのバラツキでは図 12(b)に示すアスペリティ分布と破壊開始点位置の影響の寄与が周期 1 秒以上で大きいことがわかる。また、図 12(d)に示す断層からの方位による変動の影響の寄与は全般に大きく、特に周期 1 秒以下で顕著であり、断層からの距離が小さいほどその影響が大きくなる傾向が見られる。

4. 距離減衰式の回帰誤差との比較

本シミュレーションによるバラツキの評価結果と距離減衰式の回帰誤差との比較を行う。1 章で指摘したように、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と破壊伝播速度の影響が大きいことが既往の研究で指摘されており、距離減衰式の回帰誤差にはこれらの断

表 3 アスペリティ面積比と破壊伝播速度の設定

	平均	標準偏差
アスペリティ面積比 S_a/S	0.23	0.04
破壊伝播速度 V_r (km/s)	2.52	0.20

層パラメータ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応答スペクトルのバラツキに与える影響についても評価する。厳密には3章と同様な計算を行う必要があるが、ここでは以下のように簡易的な評価⁴⁷⁾を行う。表3にアスペリティ面積比と破壊伝播速度の設定を示す。平均値は3章の「レシビ」による設定、標準偏差は2章の統計値に基づいている。地震動の合成はアスペリティ面積比と破壊伝播速度の値をそれぞれ平均値と標準偏差分増減させた3ケースについて行う。なお、ここでは断層全体の地震モーメントを一定として、アスペリティ面積比と連動して、アスペリティの応力降下量を変化させている。このため、アスペリティ面積比を変動させることによって、震源スペクトルの短周期レベルも変動させたことに相当すると考えることができる。また、ライズタイム等の断層パラメータも「レシビ」に従って連動させている。

アスペリティ分布と破壊開始点の位置は、図9に示した計算例と同じ条件に固定して地震動を合成する。ただし、背景領域の影響は小さいものとして考慮しない。また、小地震の位相の影響を取り除くため(2)式に示したように20波の地震動合成結果の応答スペクトルを平均している。

アスペリティ面積比ないし破壊伝播速度の影響による地点ごとのバラツキの大きさ $\sigma_{S_a}(T)$ は、断層パラメータ X が平均値 μ_X での平均応答スペクトル $\bar{S}_a(T)$ と標準偏差 σ_X 分を増減させた際の平均応答スペクトル $\bar{S}_a^\pm(T)$ の差の絶対値から(8)式のように近似的に評価する。

$$\sigma_{S_a}^\pm(T) = \left| \log \left\{ \bar{S}_a^\pm(T) \right\} - \log \left\{ \bar{S}_a(T) \right\} \right| \quad (8)$$

$$\sigma_{S_a}(T) = \left(\sigma_{S_a}^+(T) + \sigma_{S_a}^-(T) \right) / 2$$

距離ごとのバラツキの大きさは、(6)式と同様に地点ごとのバラツキの大きさを平均して求める。

図13は、距離8kmと50kmにおける要因ごとのバラツキの大きさを示す。また、各要因によるバラツキが独立として、これらの二乗平方根から求めたものを全バラツキと定義し図に示してある。アスペリティ面積比の影響では周期による違いはそれほど見られず、バラツキの大きさは全周期帯で0.04~0.08程度である。アスペリティ面積比の影響は、アスペリティ分布と破壊開始点位置の影響 σ_{Asp} と比較すると、1秒程度より短周期では同程度かやや上回る程度である。破壊伝播速度の影響によるバラツキの大きさは、0.2秒以下では0.02程度と非常に小さいが、周期とともにやや大きくなり1秒程度以上では0.04~0.10程度となる。他の影響と比較すると1秒付近を除けばそれほど大きくない。また、アスペリティ面積比の影響、破壊伝播速度の影響とも距離依存性は明確には見られない。

全バラツキの大きさは1秒程度より短周期では、距離8kmで0.15程度、距離50kmで0.11程度となり、近距離ほどバラツキが大きくなる距離依存性が見られる。長周期では、いずれの距離でも周期とともにバラツキが増加し2秒程度より長周期ではバラツキの大きさは0.20~0.26程度となるが、短周期とは逆にバラツキは遠距離ほどやや増加する傾向が見られる。これらは、アスペリティ分布と破壊開始点位置の影響と断層からの方位による変動の影響に距離依存性が見られることによる。

次に、ここで得られたバラツキの大きさを距離減衰式の回帰誤差と比較する。比較に用いた距離減衰式は、Boore & Atkinson式⁴⁸⁾である。ここで、Boore & Atkinson式は米国次世代距離減衰式(NGA)プロジェクトによる米国西海岸の地殻内地震を中心とした観測記録から求めた距離減衰式のうちのひとつで、本研究で対象とした地殻内横ずれ断層による記録の特性が反映されているものと考えられる。NGAプロジェクトでは、他に4つの式が提案されているが、Boore & Atkinson式はそれらの中で平均的なバラツキの大きさを有している⁴⁹⁾ことから比較の対象とした。

距離減衰式の回帰誤差は地震間誤差と地震内誤差に分けて評価され、前者は震源特性の影響、後者はサイト特性や伝播経路特性の影響と大まかに分類される⁴⁾。ここでの検討では、地震イベントごとに断層パラメータの値が異なることによって、応答スペクトルがどの程度の影響を受けるかを検討しており、検討結果の大部分は地震間誤差に相当すると考えられる。しかし、断層からの方位による変動の影響は、同じ地震時における評価地点間の応答スペクトルの差異によるもので、地震内誤差に含まれると考えら

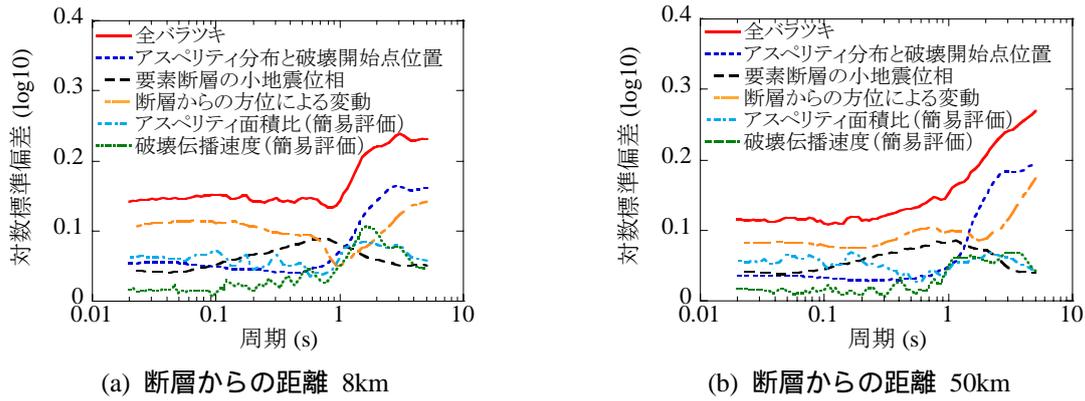


図 13 要因ごとに分離した距離ごとのバラツキ

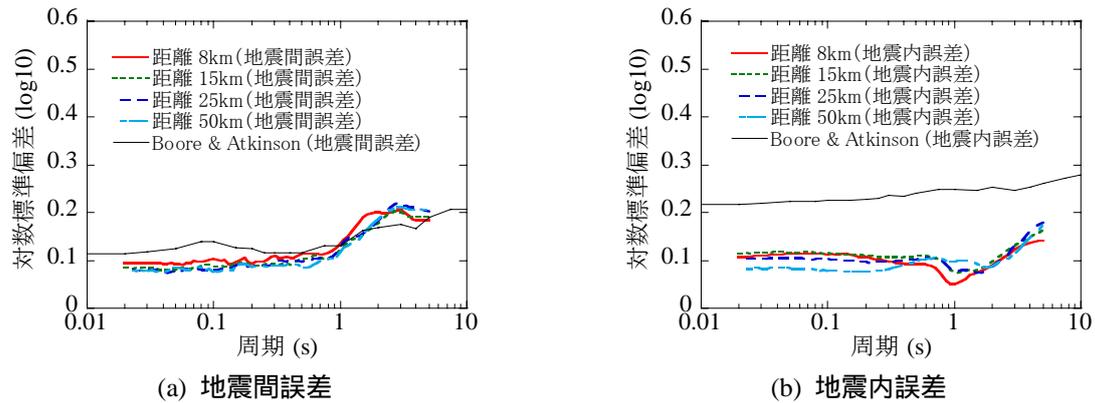


図 14 距離ごとのバラツキと距離減衰式の回帰誤差の比較

れる。そこで、断層からの方位による変動の影響を地震内誤差、全バラツキから断層からの方位による変動の影響を除いたものを地震間誤差とみなし、距離減衰式の回帰誤差と比較する。

図 14(a)に示すように地震間誤差の比較では、計算結果が 1 秒より短周期で距離減衰式よりもやや小さく、逆に長周期ではやや大きくなる傾向が見られる。しかし、両者はよく一致し周期とともにバラツキが大きくなる傾向も共通している。このことは、地震間誤差が主に断層パラメータの影響で説明可能であることを示している。一方、図 14(b)に示すように地震内誤差の比較では、計算結果は全周期帯で距離減衰式の半分程度となる。このことは、地震内誤差には、観測点毎のサイト特性の違いや伝播経路での地震波の減衰・散乱の違いの影響など本研究では考慮されていない要因が大きく寄与していることを示唆している。今後、距離減衰式の地震内誤差に主として影響を与えるサイト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必要がある。

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、この結果に基づき、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。アスペリティは断層面の下端を除き断層面の端部にはあまり分布しない傾向が見られた。破壊開始点は最大アスペリティの下半分付近に多く分布した。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応答スペクトルのバラツキに与える影響を評価した。バラツキの大きさは短周期では小さく、周期とともに増加する傾向が見られた。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についても簡易的に評価した。断層パラメータの影響による応答スペクトルのバラツキの大きさは距離減衰式の地震間誤差とおおむね一致し、地震間誤差が主に断層パラメータの影響で説明可能であることを示した。

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」の成果に基づくものです。

参考文献

- 1) Senior Seismic Hazard Analysis Committee: Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts, NUREG/CR-6372, 1, 1997.
- 2) Toro, G. R., N. A. Abrahamson, J. F. Schneider: Model of Strong Ground Motions from Earthquakes in Central and Eastern North America, Seismological Research Letters, 68 (1), 1997, pp.41-57.
- 3) Anderson, J. G., J. N. Brune: Probabilistic Seismic Hazard Analysis without the Ergodic Assumption, Seismological Research Letters, 70(1), 1999, pp.19-28.
- 4) 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)、2003、pp.59-70.
- 5) Sakamoto, S., Y. Uchiyama, S. Midorikawa: Variance of Response Spectra in Attenuation Relationship, Proceedings of the Eighth National Conference on Earthquake Engineering, 2006, pp.0471.1-0471.10.
- 6) 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)、2005、pp.12-30.
- 7) 奥村俊彦、渡辺基史、藤原広行：2003年十勝沖地震の本震・余震記録に基づく最大速度のばらつきの検討、日本地震学会講演予稿集、No.2、2004、B26.
- 8) 熊谷智之、川里健、湯沢豊、真下貢、中村亮一：新潟県中越地震の本震余震記録を用いた地点ごとの地震動のばらつき評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-II、2006、pp.315-316.
- 9) Wang, M.: New Perspective for Probabilistic Prediction of Seismic Ground Motion, Doctoral Thesis, The University of Tokyo, 2007.
- 10) 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、1998、pp.185-200.
- 11) 岩崎友洋、圓幸史朗、野畑有秀：2003年7月26日宮城県北部の地震の観測記録と解析による地震動評価のばらつき、日本地震工学会・大会 - 2003梗概集、2003、pp.特 112-113.
- 12) 野津厚、盛川仁：特定活断層の影響が卓越する場合の地震ハザード曲線の特徴、JCROSSAR2003 論文集、2003、pp.659-664.
- 13) Takeo, M., H. Kanamori: Simulation of Long-Period Ground Motion near a Large Earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, 87(1), 2005, pp.140-156.
- 14) Motohashi, S., K. Ebisawa, M. Sakagami, K. Dan, Y. Ohtsuka, T. Kagawa: Probabilistic Evaluation of Near-Field Ground Motions due to Buried-Rupture Earthquakes Caused by Undefined Faults, 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, 2005, pp.3728-3742.
- 15) Strasser, F. O., J. J. Bommer: Preliminary Simulations with EXWIM: Calibration and Assessment of Ground-Motion Variability in the Near-Source Region, Research report number 05-022-SM, Imperial College London, 2005.
- 16) 福喜多輝、壇一男、宮腰淳一、岡崎敦：統計的グリーン関数法に用いるランダムパラメータが強震動予測結果に及ぼす影響、第12回地震工学シンポジウム、2006、pp.438-441.
- 17) 山田雅行、先名重樹、藤原広行：強震動予測レシビ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)、2007、pp.43-60.
- 18) 山田雅行、先名重樹、藤原広行：強震動予測レシビに基づく予測結果のバラツキ評価の検討～逆断層と横ずれ断層の比較～、土木学会地震工学論文集、2007、pp.104-113.
- 19) 奥村俊彦、佐藤俊明、石井透、P. Somerville、R. Graves、N. Collins：断層パラメータの変動に伴う地震動のばらつきに関する基礎的研究、土木学会地震工学論文集、2007、pp.1-6.

- 20) Kikuchi, M., M. Nakamura, and K. Yoshikawa: Source Rupture Processes of the 1994 Tonankai Earthquake and the 1945 Mikawa Earthquake Derived from Low-Gain Seismograms, *Earth Planets and Space*, 55, 2003, pp.159-172.
- 21) Ichinose, G. A., P. Somerville, H. K. Thio, S. Matsushima, and T. Sato: Rupture Process of the 1948 Fukui Earthquake (M 7.1) from the Joint Inversion of Seismic Waveform and Geodetic Data, *Journal of Geophysical Research*, 110(5), 2005, B05301 doi:10.1029/2004JB003437.
- 22) Takeo, M., N. Mikami: Fault Heterogeneity of Inland Earthquakes in Japan, *Bulletin of the Earthquake Research Institute University of Tokyo*, 65, 1990, pp.541-569.
- 23) 武尾実：1974年伊豆半島沖地震の破壊過程、*地震* 2、42、1989、pp.59-66.
- 24) Takeo, M.: Rupture Process of the 1980 Izu-Hanto-Toho-Oki Earthquake Deduced from Strong Ground Motion Seismograms, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(3), 1988, pp.1074-7091.
- 25) Yoshida S., K. Koketsu: Simultaneous Inversion of Waveform and Geodetic Data for the Rupture Process of the 1984 Naganoken-Seibu, Japan, Earthquake, *Geophysical Journal International*, 103, 1990, pp.355-362.
- 26) Koketsu, K., S. Yoshida, H. Higashihara: A Fault Model of the 1995 Kobe Earthquake Derived from the GPS Data on the Akashi Kaikyo Bridge and Other Datasets, *Earth Planets and Space*, 50, 1998, pp.803-811.
- 27) Miyakoshi, K., T. Kagawa, H. Sekiguchi, T. Iwata, K. Irikura: Source Characterization of Inland Earthquakes in Japan Using Source Inversion Results, *Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering*, 2000, No. 1850.
- 28) Horikawa, H.: Earthquake doublet in Kagoshima, Japan: Rupture of asperities in a stress shadow, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(1), 2001, pp.112-127.
- 29) 岩田知孝、関口春子：2000年鳥取県西部地震の震源過程と震源域強震動、*月刊地球*、号外 38、2002、pp.182-188.
- 30) Hikima, K., K. Koketsu: Source Processes of the Foreshock, Mainshock and Largest Aftershock in the 2003 Miyagi-ken Hokubu, Japan, Earthquake Sequence, *Earth Planets and Space*, 56, 2004, pp.87-93.
- 31) Hikima, K., K. Koketsu: Rupture Processes of the 2004 Chuetsu (Mid-Niigata Prefecture) Earthquake, Japan: A Series of Events in a Complex Fault System, *Geophysical Research Letters*, 32, 2005, doi: 10.1029/2005GL023588.
- 32) Asano, K., T. Iwata: Source process and near-source ground motions of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture earthquake, *Earth Planets and Space*, 58, 2006, pp.93-98.
- 33) Mai, P. M: Finite-Source Rupture Model Database, <http://www.seismo.ethz.ch/srcmod/>, 2007.
- 34) 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), 1999, pp.59-80.
- 35) 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(「レシピ」)、平成20年4月11日、2008.
- 36) Joyner, W. B., D. M. Boore: Measurement, Characterization, and Prediction of Strong Ground Motion, *Earthquake Engineering and Soil Dynamics II*, 1988, pp.43-102.
- 37) Mai, P. M., P. Spudich, J. Boatwright: Hypocenter Locations in Finite-Source Rupture Models, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(3), 2005, pp.965-980.
- 38) 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、1991、pp.1-9.
- 39) 村上洋介、野畑有秀、圓幸史朗：近畿地方の硬質地盤における中小地震の経時特性、*日本建築学会学術講演梗概集*、B-II、2002、pp.113-114.
- 40) 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)、2004、pp.21-32.
- 41) 鶴来雅人、香川敬生、岡崎敦、羽田浩二、入倉孝次郎：強震動予測のための高域遮断フィルターに関する研究 - 1995年兵庫県南部地震の観測記録に基づく検討 - 、*日本地震工学会論文集*、6(4)、2006、pp.94-112.

- 42) 佐藤智美、川瀬博、佐藤俊明：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、1994、pp.79-89.
- 43) 釜江克宏、入倉孝次郎、福知保長：地域的な震源スケーリングを用いた大地震（M7 級）のための
設計用地震動予測、日本建築学会構造系論文集、430、1990、pp.57-70.
- 44) Boore, D. M. and J. Boatwright: Average body-wave radiation coefficient, Bulletin of the Seismological
Society of America, 74 , 1984, pp.1615-1621.
- 45) 入倉孝次郎、香川敬生、関口春子：経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良、日本地震
学会講演予稿集、No.2、1997、B25.
- 46) 鬼頭順三、翠川三郎、三浦弘之、糸井達哉：統計的グリーン関数法に用いる位相特性が地震動評価
結果に与える影響、平成 20 年度土木学会全国大会 第 63 回年次学術講演会、I、2008、pp.353-354.
- 47) 東京工業大学：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、平成 19 年度
原子力安全基盤調査研究報告書、平成 20 年 2 月、2007.
- 48) Boore, D.M. and G. M. Atkinson: Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal
Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10 s, Earthquake
Spectra, 24(1), 2008, pp.99-138.
- 49) Abrahamson, N., G. Atkinson, D. Boore, Y. Bozorgnia, K. Campbell, B. Chiou, I. M. Idriss, W. Silva, R.
Youngs: Comparisons of the NGA Ground-Motion Relations, Earthquake Spectra, 24(1), 2008, pp.45-66.

（受理：2008年8月25日）
（掲載決定：2009年1月16日）

Variability in Response Spectra for Crustal Earthquake using Stochastic Green's Function Approach

ITOI Tatsuya¹⁾, MIDORIKAWA Saburoh²⁾, KITO Junzo³⁾

MIURA Hiroyuki⁴⁾, UCHIYAMA Yasuo⁵⁾ and SAKAMOTO Shigehiro⁶⁾

1) Member, Taisei Corporation, Dr. Eng.

2) Member, Professor, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

3) Former Graduate Student, Tokyo Institute of Technology (Central Japan International Airport), M. Eng.

4) Member, Assistant Professor, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

5) Taisei Corporation, Dr. Eng.

6) Member, Taisei Corporation, Dr. Eng.

ABSTRACT

In this paper, the variability in the acceleration response spectra ($\eta=5\%$) due to the variability of the source parameters for shallow crustal earthquakes is investigated. Firstly, the finite fault models of the past crustal earthquakes in Japan are compiled and statistically investigated. Secondly, ground motions are simulated at several receivers for different events using the stochastic Green's function approach, where events have different asperity distribution and hypocenter location. Then, the variance of the acceleration response spectra is evaluated. The variance increases as the period of the response spectra increases. Finally, effects of other source parameters are also evaluated. The variance of the simulation results is comparable to the inter-event error in an attenuation relationship, suggesting that the inter-event error can be explained by the effects of variability in the source parameters.

Key Words: Response Spectrum, Variability, Crustal Earthquake, Fault Characteristics, Asperity, Hypocenter, Stochastic Green's Function