



強震動予測レシピ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～

山田雅行¹⁾、先名重樹²⁾、藤原広行³⁾

1)株式会社 ニュージェック 技術開発グループ防災チーム、チームマネジャー 工修
e-mail : yamadams@newjec.co.jp

2)独立行政法人 防災科学技術研究所 防災システム研究センター、研究員 理修
e-mail : senna@bosai.go.jp

3)独立行政法人 防災科学技術研究所 防災システム研究センター、プロジェクトディレクター 理博
e-mail : fujiwara@bosai.go.jp

要約

強震動予測の標準化の試みとして「強震動予測レシピ」が提案されている。こうしたレシピに基づいて強震動予測を行う場合に、震源パラメータの“バラツキ”によって生じる予測結果のバラツキを評価する手法について、森本・富樫断層帯を例に提案を行った。本研究では、強震動予測において重要となる震源パラメータ、伝播経路特性、サイト特性のうち、震源パラメータの偶発的バラツキによる影響について検討を行った。正規分布によって表現するパラメータはLHSを用いて合理的なサンプリングが可能であることを示した。特定サイトのバラツキ評価は強震動予測結果のPGA、PGV、応答スペクトルに対する分布形状(正規分布)の特性値、面的な予測結果のバラツキ評価は地震動評価指標の対数標準偏差の空間分布図によって把握できることを示した。距離減衰式との比較によって、予測結果のバラツキと実際の地震記録が持つバラツキが調和的な結果となることが期待できるということを示した。

キーワード：強震動予測レシピ、強震動予測、統計的グリーン関数法、差分法、バラツキ、距離減衰式

1 はじめに

経験的グリーン関数法、統計的グリーン関数法、ハイブリッド法といった、震源・伝播経路・サイトの影響を物理的に考慮して、将来発生する地震の強震動を予測する(「断層モデルを用いた強震動予測」と呼ばれる場合もあるが、以下では簡単のため「強震動予測」と略す)方法は、平成7年兵庫県南部地震を契機として、急速に研究が進められてきた。今日では、このような強震動予測は土木・建築構造物に対する設計入力地震動の評価^{1),2)}、国や自治体の被害想定^{3),4)}など、広く利用される傾向にある。

この強震動予測を精度よく行うには、震源・伝播経路・サイトの影響を精度よくモデル化しなければならない。伝播経路⁵⁾、サイト⁶⁾および既往地震の震源⁷⁾については、地震観測データに基づいて、その特性が詳細に求められているものも見られる。しかし、人類の歴史において経験したことのない地震の震源につい

ては、その地表近くでの位置、大きさ、変位量が明らかにされている程度で、強震動予測を行うための詳細な震源パラメータの設定には多くの不明確な要素が残存している。こうした状況下で、強震動予測手法の標準化を目指し、「強震動予測レシピ」⁸⁾⁹⁾(以下、「レシピ」と略す)が提案されている。「レシピ」では、震源の面積と地震モーメントの関係や短周期レベルと地震モーメントの関係など、主要な部分に経験式が用いられており、その経験式は過去の観測データの回帰により求められていることが多い。このため、「レシピ」にしたがって設定した震源パラメータは「平均的な」値となり、その値に対するバラツキを有していることになる。すなわち、設定した震源パラメータによって予測された地震動も「平均的な」値となり、その値に対するバラツキを有しているということになる。このように強震動予測では、設定する震源パラメータが一意的に決定できるものではないため、そのバラツキのために予測された地震動もバラツキを生じることがわかる。

一方、確率論的地震動予測は、地震動の予測結果には元来バラツキが含まれるものと考え、予測された地震動強度とその可能性(確率)をセットとして求めるものである。この手法では、上述のような強震動予測が用いられることは少なく、対象領域内のある特定の断層からの地震動の予測は従来から用いられている地動最大加速度(以下、PGAと記す)、地動最大速度(以下、PGVと記す)、応答スペクトルの距離減衰式(最大振幅と地震規模、震源からの距離の関係式)を用いた強震動予測(以下、上述の「強震動予測」と区別するために「距離減衰式による強震動予測」と略す)が主流である。これは、確率論的地震動予測を行うためには上述の強震動予測手法の計算量が膨大となることに加えて、距離減衰式による強震動予測の精度の研究¹⁰⁾が進められているにもかかわらず、強震動予測における予測結果の精度(バラツキの度合い)について十分に議論されていないことが大きな要因の1つであると考えられる。

そこで、著者らはレシピに基づいて強震動予測を行う場合、予測結果が震源パラメータのバラツキによってどの程度のバラツキを有するかを評価することを目的として検討を行った。本稿では、レシピに基づいた強震動予測におけるバラツキの評価手法について検討を行った結果を述べる。また、実際に森本・富樫断層帯を例に提案するバラツキ評価を行うことによって、その有用性等について議論を行った。

2 バラツキ評価の流れと問題点

強震動予測におけるバラツキ評価の流れを図1に示す。まず、通常**の強震動予測と同様に、対象断層、対象地点の選定を行い、平均値となる震源パラメータ、伝播経路特性、サイト特性を設定する。次に、震源パ**

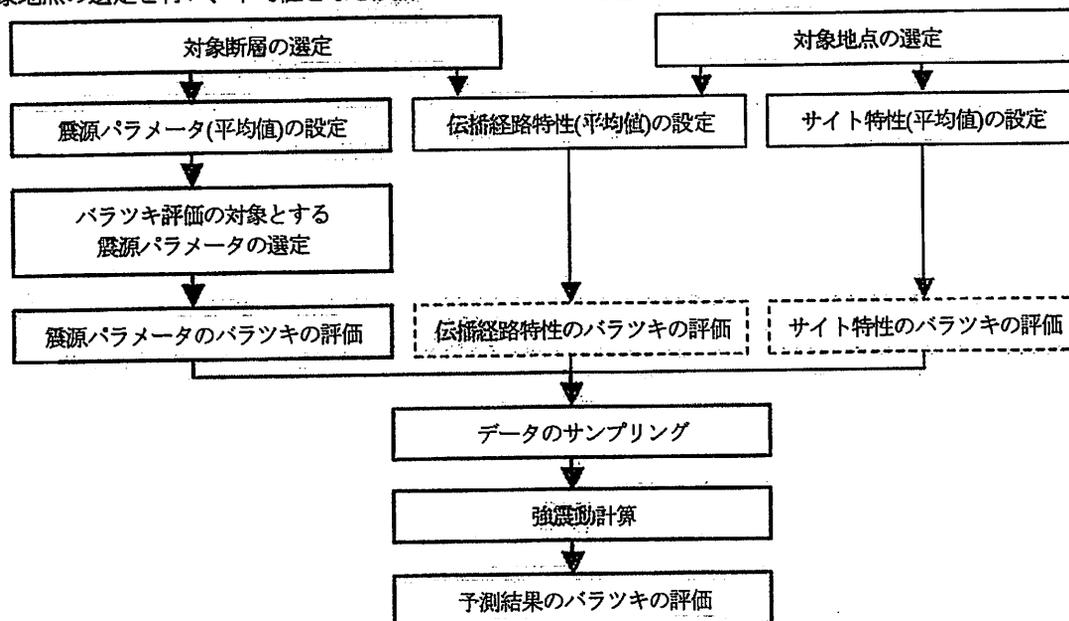


図1 強震動予測におけるバラツキ評価の流れ

ラメータ、伝播経路特性、サイト特性、それぞれの入力データが持つバラツキ量を評価し、入力データのサンプリングを行うことが基本となる。震源パラメータにおいては、バラツキ評価の対象とする(または、できる)震源パラメータの選定が重要な問題である。また、データのサンプリングについても、その方法やサンプル数について示された資料があるわけではない。なお、本稿では、レシピによって設定される震源パラメータに内在するバラツキがその予測結果にどの程度の影響を与えるかを評価することに主眼をおくため、破線で示した伝播経路特性およびサイト特性のバラツキについては考慮しないものとした。

さらに、サンプリングされた各入力データに対して、強震動計算を実施し、サンプル数だけ得られた予測結果についてバラツキの評価を行うことになる。予測結果は時刻歴波形として得られており、時刻歴波形を含め、PGA、PGV、応答スペクトル、フーリエスペクトルなどさまざまな指標が考えられる。どの指標に対して、どのような整理を行うのがよいかについても議論をする必要があると考えられる。これに加えて、対象地点が面的に分布している場合は、面的な予測結果のバラツキを評価することも重要となる。

3 震源パラメータのバラツキ評価

3.1 “バラツキ”の分類

強震動予測における“バラツキ”は既往の研究¹¹⁾によって偶発的バラツキと認識論的不確定性に分類されている。さらに、それぞれをモデル化とパラメータ設定に分類し、表1に示すように4種類に分類されている。

表1 “バラツキ”の分類

	Aleatory variability (偶発的バラツキ)	Epistemic uncertainty (認識論的不確定性)
Modeling (モデル化)	①モデル化しない(できない)ことよ て生じる偶発的バラツキ	③モデル化の違いによる認識論的不 確定性
Parametric (パラメータ設定)	②真値が存在しない(地震発生までわか らない)ことによる偶発的バラツキ	④知識やデータが不足していること に起因する認識論的不確定性

これは、距離減衰式を基本とする確率論的ハザード解析を念頭に分類されたものであるが、震源・伝播経路・サイトの影響を物理的に考慮した強震動予測に対しても適用することができる。そこで、強震動予測を念頭において、表1の分類の具体化を行った。

分類①:「モデル化における偶発的バラツキ」は、震源特性、伝播経路特性、サイト特性のモデル化がどれだけ適切かということになる。距離減衰式による強震動予測に対して、その影響は比較的少ないものと考えられる。

分類②:「パラメータ設定における偶発的バラツキ」が、強震動予測における入力パラメータ値の“バラツキ”であり、一般に言われる“バラツキ”はこれを指すことが多い。通常、予測モデルにおいては確率変数により表現され、確率論的地震動評価におけるハザードカーブの計算に用いられる。

分類③:判断の違い、用いる手法、用いる経験式の違いなどを意味し、確率論的な地震動評価ではロジックツリーとして表現されることが多い。

分類④:例えば、震源パラメータでは断層の位置、走向、傾斜で、地質調査・地質解析データの多少によって、その精度は異なったものとなる。また、本論文では検討対象としていないが、地下構造に関する不確定性もここに含まれる。

3.2 バラツキ評価の対象とする震源パラメータの選定

強震動予測を行う場合に設定しなければならない震源パラメータを、「地震調査研究推進本部地震調査委員会:森本・富樫断層帯の地震を想定した強震動評価について¹²⁾」に倣って整理した結果を表2に示す(カッコは他のパラメータに連動して変化するパラメータを示す)。

表2の震源パラメータには、表1によって分類された“バラツキ”のすべてが複雑に関与している。言い換えると、強震動予測において、表1の①～④の“バラツキ”を理想的に考慮できれば、自然現象としての地震の“バラツキ”を表現できることになる。

ここでは、レシピに基づいた強震動予測について検討を行うことから、モデル化に関しては「レシピ⁹⁾に従う」という前提条件を設けることができる。これより、分類①の偶発的バラツキと微視的パラメータおよびその他のパラメータの分類④の認識論的不確定性については無視するものとした。一方、巨視的震源パラメータに関しては、活断層の長期評価¹³⁾に従って設定しているため、これも前提条件と考えることができる。すなわち、巨視的震源パラメータに対して支配的と考えられる分類④の認識論的不確定性を無視するという判断を行い、巨視的震源パラメータに関しては、“バラツキ”を考慮しないものとした。これらの前提条件に基づいて、各震源パラメータを表1の分類に従って分類した結果(①～④)を表2に併記した。なお、レシピにおいて他のパラメータに連動して変化するパラメータは分類をしなかった。

表2 震源パラメータ一覧

巨視的震源パラメータ	微視的震源パラメータ	その他のパラメータ
基準点位置(緯度・経度)	アスペリティの数 ②③	破壊伝播速度 ②③
走向・傾斜	アスペリティの位置 ②③	破壊開始点 ②③
長さ・幅(面積)	アスペリティの面積 ②③	破壊形態 ②③
断層上端深さ	アスペリティの地震モーメント ②③	
(地震モーメント)	(アスペリティの 平均すべり量)	
(平均すべり量)	(アスペリティの 平均応力降下量)	
(平均応力降下量)	(背景領域の 地震モーメント)	
	(背景領域の 平均すべり量)	
	(背景領域の 平均応力降下量)	
	f_{max} ②③	
	(ライズタイム)	

※ ②：パラメータ設定における偶発的バラツキ、③：モデル化における認識論的不確定性

※※0：レシピにおいて他のパラメータに連動して変化するパラメータ

さらに、表2の微視的震源パラメータのうち、アスペリティの数、アスペリティの面積は、本来自然現象としては分類②の偶発的バラツキとして分類される“バラツキ”を含んでいると考えられるが、レシピに従ったパラメータ設定においては、分類③の認識論的不確定性が支配的であるものと考えた。また、その他のパラメータのうち、破壊形態についても同様であると考えられる。本論文ではレシピに基づく強震動予測を用いて確率論的評価を行うことを念頭におき、そのハザードカーブの計算に用いる「パラメータ設定における偶発的バラツキ」に主眼をおいている。したがって、分類③に位置付けられたアスペリティの数、アスペリティの面積、破壊形態といった本来ロジックツリーとして取り扱うパラメータについては、本論文で扱うバラツキ評価の対象とせず、アスペリティの位置、アスペリティの強度(アスペリティの地震モーメントなど)、破壊伝播速度、破壊開始点を対象として選定するものとした。

なお、 f_{max} については、“バラツキ”の分類は②が支配的であると考えられるが、その値自体が研究途上であることから、ここではその取り扱いについて言及しないこととした。また、アスペリティの数は1個、アスペリティの面積は短周期レベルより求まる値、破壊形態は同心円状に設定して検討を行うこととした。

3.3 震源パラメータのバラツキの評価

3.2節で選定した震源パラメータのバラツキの評価は、大きく2種類のパラメータ群に分けて行った。1つ目は、震源パラメータの設定値に明確な根拠が与えられず、かつ設定値がある範囲に限定されるアスペリティの位置と破壊開始点で、震源断層内に一様な確率で存在するものと考えた。ただし、破壊開始点はアスペリティの下端に存在するという既往の研究結果^{16),17)}に基づいて、ここでは破壊開始点はアスペリティ下端に固定し、アスペリティの位置と連動するものとした。2つ目は、震源パラメータの設定値がレシピの経験式によって与えられるアスペリティの強度と破壊伝播速度で、これらは経験式が求められた際のバラツキを震源パラメータのバラツキとして与えることとした。

レシピによると、短周期レベルからアスペリティの面積、断層全体とアスペリティの平均すべり量の比からアスペリティの地震モーメントを設定し、その結果、アスペリティの応力降下量が決定される。アスペリティ強度は地震モーメント、応力降下量の2つのパラメータで規定されるが、前節で述べたとおりアスペリティの面積に関しては対象外と考えているため、本研究では、アスペリティ強度を地震モーメントすなわち平均すべり量の比として与えるものとし、この平均値(2.0)および標準偏差(0.6)は石井ほか¹⁴⁾に記載されている値を用いることとした。一方、破壊伝播速度(V_r)に関して、S波速度(V_s)との比 V_r/V_s は、表3に示すように標準偏差を求め、 V_r/V_s の分布が図2に示すように正規分布とみなしうるものとして、その標準偏差を V_r/V_s のバラツキを表す値とした。表4に各震源パラメータのバラツキ評価結果の一覧を示す。

表3 既往地震の破壊伝播速度(宮腰ほか¹⁵⁾に加筆

No.	Earthquake	V_s [km/s]	V_r (All) [km/s]	V_r (All)/ V_s
1	Landers	3.6	2.41	0.67
2	Tabas	3.52	2.5	0.71
3	Kobe sekiguchi	3.5	2.31	0.65
4	Kobe wald	3.5	2.47	0.71
5	Tottori	3.5	1.8	0.52
6	Nahanni(12/23)	3.57	2.52	0.71
7	Northridge	3.6	2.46	0.68
8	Nahanni(10/05)	3.57	2.52	0.71
9	Imperial Valley	3	2.37	0.79
10	Superstition Hills 3	3.2	2.36	0.74
11	Kagoshima(3/26)	3.41	2.11	0.62
12	Whitter Narrows	3.13	2.56	0.82
		平均値		0.694
		標準偏差		0.078

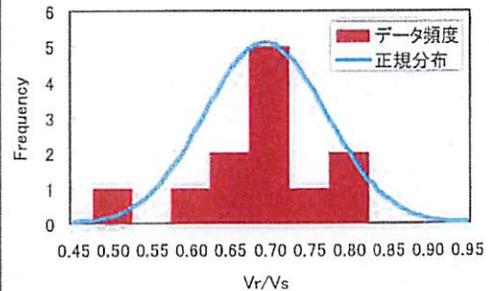


図2 破壊伝播速度のヒストグラム

表4 バラツキを与える震源パラメータ

パラメータ	記号	平均値の設定方法	バラツキの設定方法
アスペリティの位置	—	活断層で発生する地震の場合、活断層の変位量の分布をもとに「推定」または「仮定」	一様分布
アスペリティの強度 (平均すべり量の比)	D_a/D	$D_a/D=2.0$ (石井ほか, 2000) ¹⁴⁾	正規分布、標準偏差 0.6 (石井ほか, 2000) ¹⁴⁾
破壊伝播速度 (V_r と V_s の比)	V_r/V_s	$V_r/V_s=0.694$ (宮腰ほか, 2005) ¹⁵⁾	正規分布、標準偏差 0.078 (宮腰ほか, 2005) ¹⁵⁾
破壊開始点	—	アスペリティ下端とすることが多い	アスペリティの位置と連動 ^{16), 17)} (アスペリティ下端に固定)

D_a : アスペリティの平均すべり量 (cm), D : (震源全体の) 平均すべり量 (cm), V_s : S波速度 (km/s), V_r : 破壊伝播速度 (km/s)

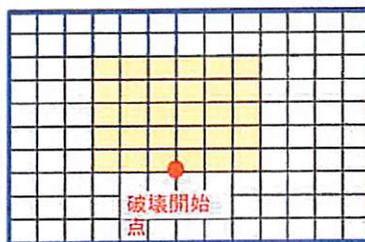


図3 アスペリティの位置と破壊開始点

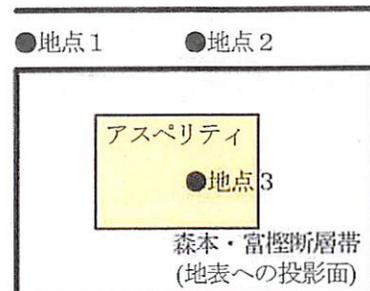


図4 パイロットポイント

3.4 サンプルング方法

まず、アスペリティの位置と破壊開始点であるが、前節に示すように震源断層内に一様な確率で存在するものと考えたこととした。これには、一様乱数を用いてランダムサンプルングを行うのではなく、アスペリティの位置の考え得るケースを可能な限り均等にサンプルと考えるものとする。

前述の森本・富樫断層帯の震源モデルを例に取ると、森本・富樫断層帯は13×10分割の離散化したモデル化がなされている。アスペリティを1個と考えると、アスペリティの大きさは6×5分割分となり、図3に示した位置を基本ケースとし、黄色で示したアスペリティを走向方向に8、傾斜方向に6通り移動させて、48通りのサンプルが可能となる。

次に、アスペリティの強度(平均すべり量の比)および破壊伝播速度について検討を行った。これらはそのバラツキが正規分布に従うと仮定し、分布形状は平均値と標準偏差によって表されている。したがって、サンプルングは、それぞれのパラメータの分布に従う正規乱数によって行うこととなる。しかしながら、必要なサンプル数を合理的に判断することはきわめて難しい。

そこで、以下に示す3通りのサンプルング方法について、サンプルング方法とサンプルング数の比較検討を行った。図4にサンプルング方法の検討に用いるパイロットポイントを示す。まず、図5に3通りのサンプルング方法による入力値のサンプルング結果のヒストグラムを示す。これを見ると、アスペリティ強度における入力値のサンプルング(b)の分布に若干乱れがあるものの、どのサンプルングも概ね良好であることがわかる。なお、ここでは平均値まわりのパラツキ評価に主眼をおいているため、アスペリティの強度が1.0を下回るような特異値について、十分低頻度であることから特別な取り扱いをしないこととしている。

- (a) 正規乱数(RSと略す)による10000個のサンプルング(RS10000)
- (b) LHS(Latin Hypercube Sampling)¹⁸⁾による50個のサンプルング(LHS50)
- (c) LHS(Latin Hypercube Sampling)¹⁸⁾による100個のサンプルング(LHS100)

さらに、それぞれのサンプルング方法において、前述の森本・富樫断層帯の例に対して震源パラメータのサンプルングを行い、統計的グリーン関数法を用いて図4に示すパイロットポイントにおける強震動予測を行った。その結果(PGV)の平均値および標準偏差とサンプルング数の関係を図6に示す。図6を見ると、いずれのケース、地点でもRS1000を超えると予測値は安定し、(a)のRS10000は十分収束値とみなすことがで

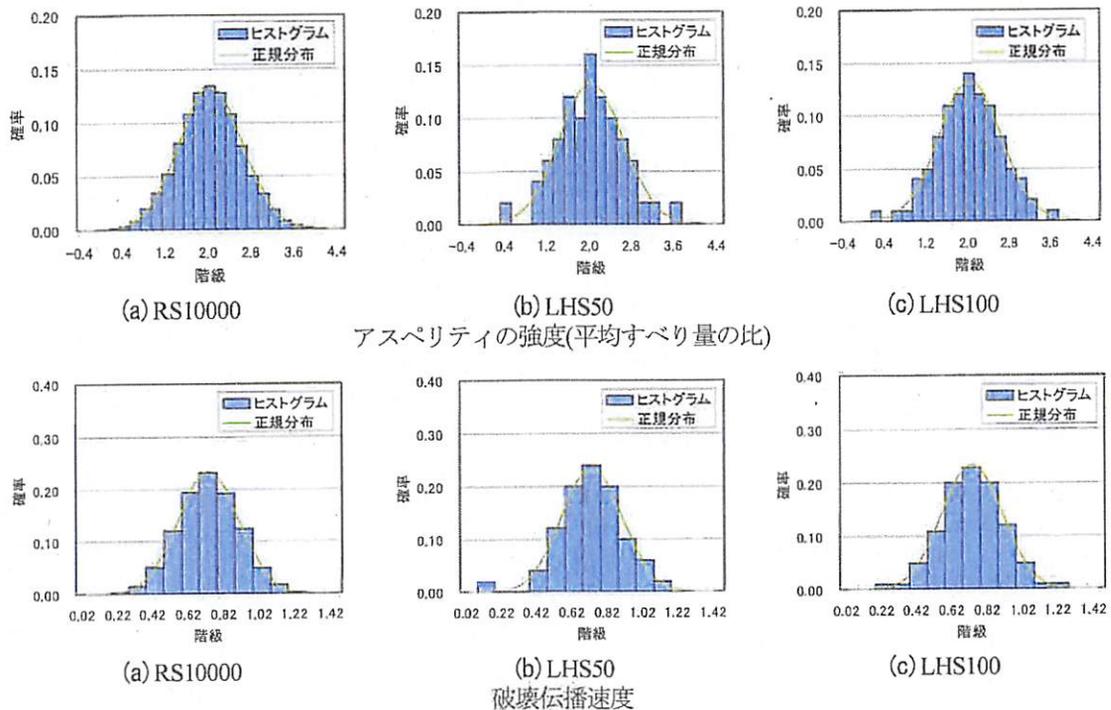
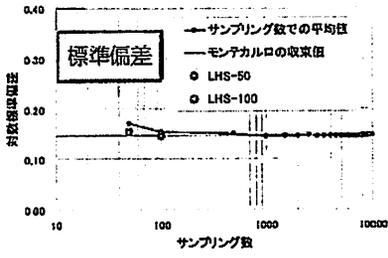
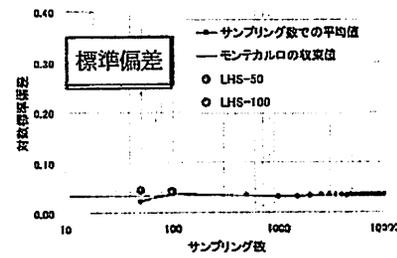
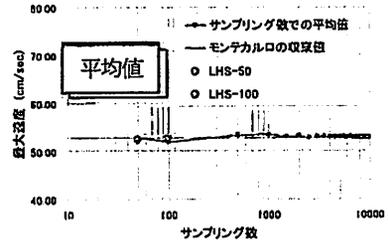
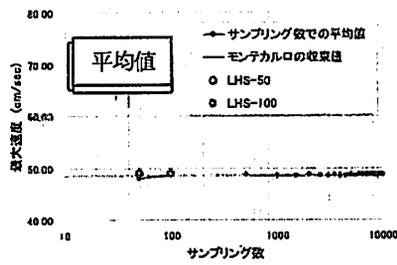
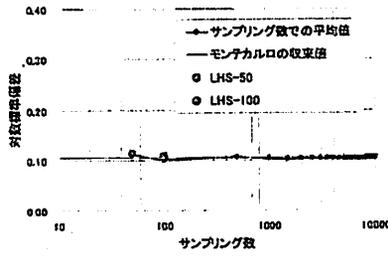
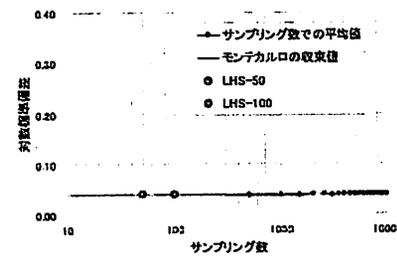
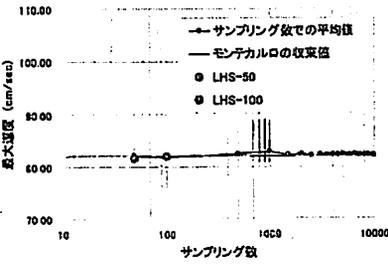
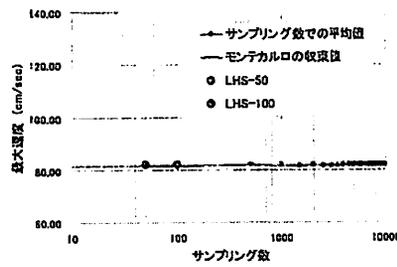


図5 サンプルング結果のヒストグラム

地点
1



地点
2



地点
3

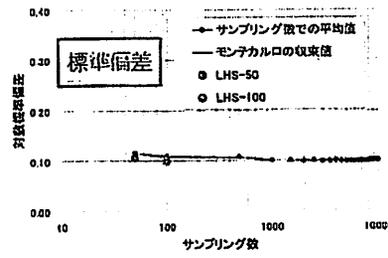
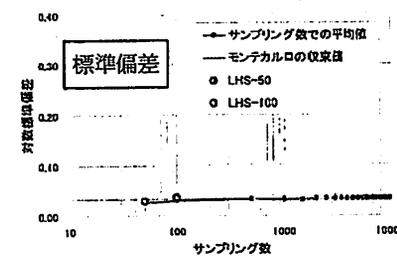
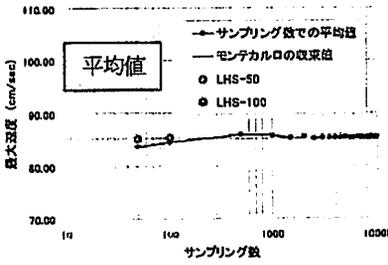
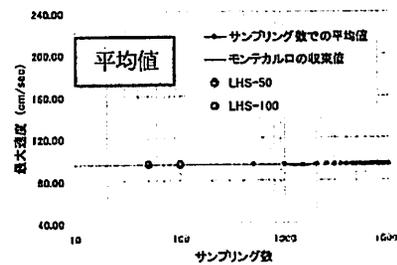


図6 強震動予測を行った結果(PGV)の平均値と標準偏差
(左:アスペリティの強度(平均すべり量の比)、右:破壊伝播速度)

きることがわかる。しかし、10000回のサンプリング、すなわち10000回の強震動予測は現実的ではないと考えられる。アスペリティの強度については、図6のPGVの平均値と標準偏差とサンプリング数の関係において、地点3における(b)の標準偏差が収束値に対して若干小さい値となっているものの、(b)および(c)の値が概ね(a)の収束値に一致しているとみなすことができる。また、破壊伝播速度については、PGVの平均値と標準偏差とサンプリング数の関係において、地点2における(b)(c)の標準偏差が収束値に対して少し差があるが、こちらも(b)および(c)の値は(a)の収束値に概ね調和的であるとみなしうる。これより、アスペリティの強度、破壊伝播速度ともに入力値のサンプリングの乱れや収束値との一致度の点から(c)のLHSによる100個のサンプリングが合理的であると判断した。

4 強震動予測結果のバラツキ評価

強震動予測結果のバラツキ評価の検討を行った。ここでは、地震調査研究推進本部地震調査委員会から強震動評価が公開されている森本・富樫断層帯を対象に、3章に示したように震源パラメータのバラツキを与え、地震調査委員会の詳細法^{12),19)}と同様に短周期帯域(~1.0s)は統計的グリーン関数法、長周期帯域(1.0s~)は差分法を用いて $V_s=700\text{m/s}$ の工学的基礎における強震動予測を行い、それぞれの結果のバラツキの評価を行うことによって、バラツキ評価手法およびその妥当性について検討を行った。

4.1 森本・富樫断層帯の基本震源パラメータ

地震調査委員会¹²⁾に倣って、森本・富樫断層帯の基本震源パラメータの設定を行った。ただし、ここで用いた震源パラメータは、2005年7月に公表されたレシビ⁹⁾に基づいて再設定を行ったものである。基本震源パラメータの一覧を表5に示す。

表5 森本・富樫断層帯の基本震源パラメータ¹²⁾

	パラメータ	設定値	単位
巨視的震源特性	断層総面積	514.77	[km ²]
	地震モーメント	1.474E+19	[Nm]
	地震規模	6.71	
	短周期レベル	1.299E+19	[Nm/s ²]
	基準点の位置	(北端) ~ (南端)	
	基準点の北緯	36° 40' ~ 36° 28'	
	基準点の東経	136° 44' ~ 136° 37'	
	走向	N25.7° W	
	傾斜角	45° E	
	平均滑り量	88.59	[cm]
	滑り方向	東側隆起の逆断層	
	地震発生層深さ	4~18	[km]
	断層面の長さ	地震約26	[km]
	断層面の幅	20	[km]
断層面積	514.77	[km ²]	
アスペリティ	地震モーメント	6.120E+18	[Nm]
	面積	106.86	[km ²]
	平均滑り量	177.17	[cm]
	静的応力降下量	14.81	[MPa]
	短周期レベル	1.299E+19	[Nm/s ²]
背景領域	地震モーメント	8.620E+18	[Nm]
	面積	407.91	[km ²]
	平均滑り量	65.38	[cm]
	実効応力	2.825	[MPa]
その他の震源特性	アスペリティ位置	中央	
	アスペリティ深さ	上端	
	破壊開始点の深さ	アスペリティ下端中央	[km]
	破壊様式	同心円上	
	破壊伝播速度	2.5 ($\beta=3.46$ の72%)	[km/s]
	Fmax	6	[Hz]
	震源時間関数	中村・宮武(2000)	

4.2 特定サイトにおける強震動予測結果のバラツキ評価

通常、バラツキを有するデータの整理は、ヒストグラムを作成し、そのヒストグラムに例えば正規分布などの適当な分布形状を近似的にあてはめ、その分布形状を規定する値(正規分布の場合は平均値と標準偏差)によって行われる。選定したサイト(特定サイト)における強震動予測結果のバラツキ評価についても、強震動予測結果のヒストグラムを求め、それを近似する分布形状をあてはめ、その分布の特性値によって整理することを基本と考える。

しかしながら、強震動予測結果は時刻歴波形として得られており、ヒストグラムを作成する指標は、時刻歴波形を含め、PGA、PGV、加速度応答スペクトル、フーリエスペクトルなどさまざまな指標が考えられる。ここでは、①時刻歴波形の代表値として一般に用いられており、②周波数別の特徴を表現することができ、③物理的意味の明確さ、という観点から、PGA、PGV、加速度応答スペクトルを、ヒストグラムを作成する指標として選定した。

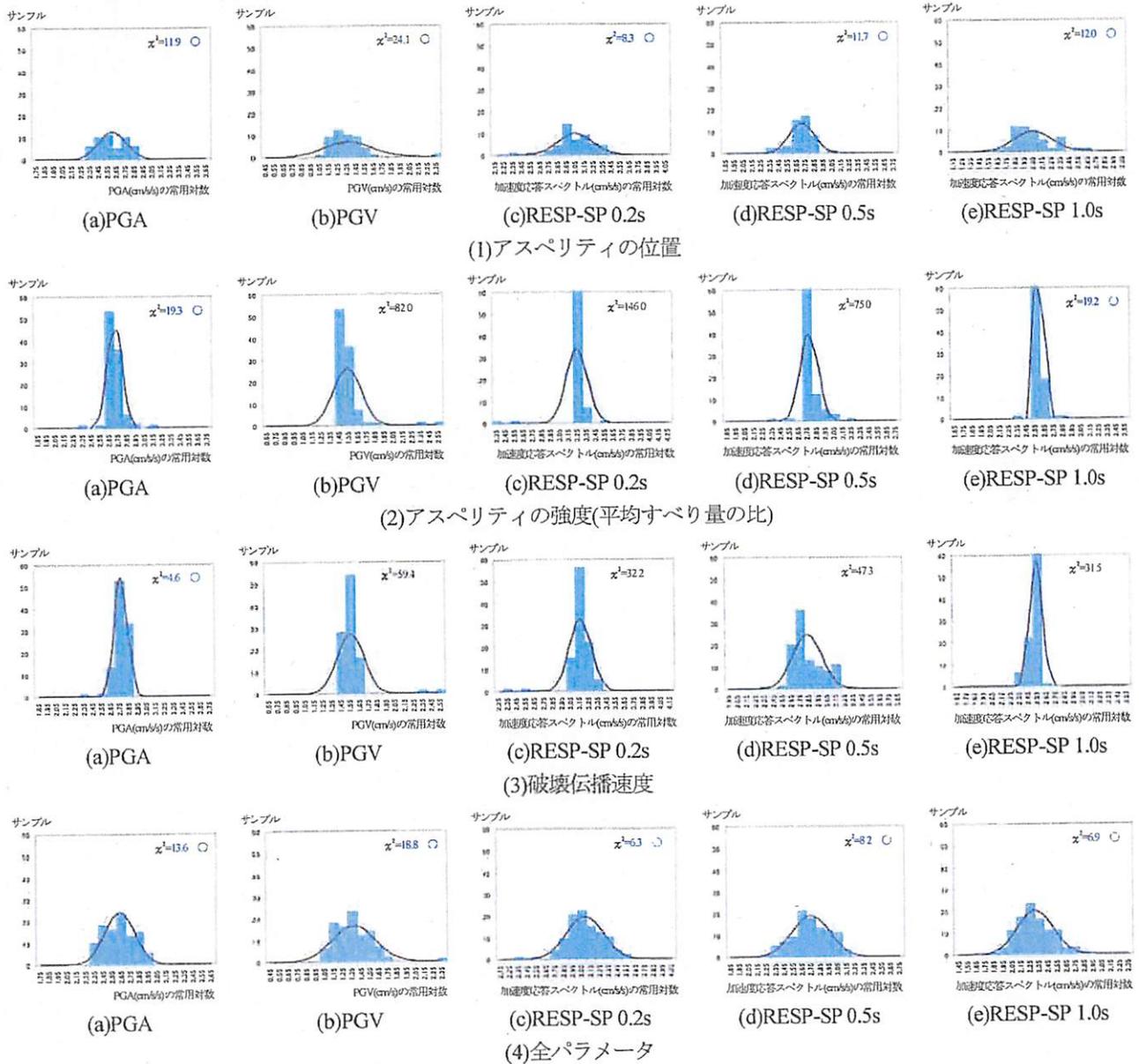


図7 強震動予測結果のヒストグラム(統計的グリーン関数法)

森本・富樫断層帯を対象断層、3.4節で用いたパイロットポイントのうち地点2を対象地点として、ヒストグラムを作成および正規分布による近似を試みた結果を図7、図8に示す。図7、図8の各ヒストグラムの右上には χ^2 の値を併記した。各ヒストグラムの χ^2 値が、データ区間(自由度)19、有意水準5%の χ^2 の基準値30.1を下回れば(青字および○印)、サンプリング(ヒストグラム)が正規分布に一致するという帰無仮説が棄却されず、すなわち両者が一致していると判断できる。

統計的グリーン関数法は、アスペリティの位置および全パラメータのすべての指標において、 χ^2 検定(5%水準)を用いて正規分布で近似できると判断できる。アスペリティ強度、破壊伝播速度に関しても、破壊伝播速度の応答スペクトル0.2s、1.0sの値が基準値をわずかしか上回っていないことを考慮すると、概ね正規分布で近似できると判断できるものと考えられる。差分法は、アスペリティの位置の結果がディレクティビティおよびラディエーションの影響によって少し左に偏った分布となっているが、個々のパラメータのバラツキ評価に関して、 χ^2 検定(5%水準)を用いて半数以上の指標において一致していると判断され、また、全パラメータのバラツキ評価に関しては、すべての指標において一致していると判断されており、十分正規分布で近似できることがわかる。

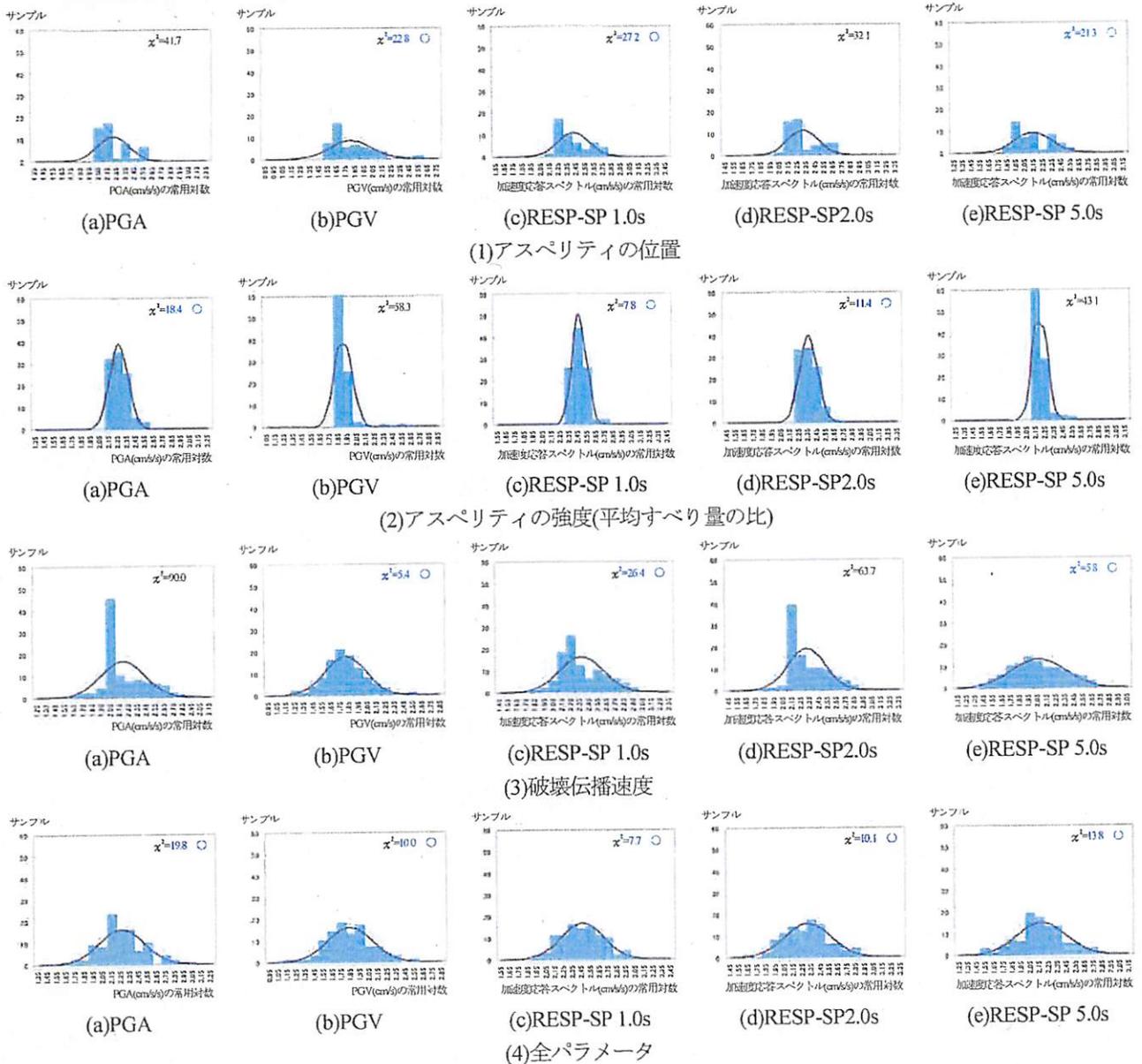


図8 強震動予測結果のヒストグラム(差分法)

4.3 面的な強震動予測結果のバラツキ評価

対象地点が面的に分布している場合は、強震動予測結果のバラツキを地点ごとに詳細に評価するだけでなく、そのバラツキの空間分布の傾向を視覚的に捉えることが重要であると考えられる。そこで、対象領域内における PGA、PGV、加速度応答スペクトル(0.2、0.5、1.0、2.0、5.0s)の対数標準偏差の空間分布図によって、評価することとする。また、バラツキの空間分布に対してヒストグラムを作成し、さらにその平均値と標準偏差を求めることができる。これは、強震動予測対象エリア内を包括したバラツキの評価を行う際に用いることができる。

まず、森本・富樫断層帯を対象断層として、強震動予測を行った結果の PGA、PGV の平均値の空間分布を図 9 に示す。ここでは全パラメータを変化させた場合の平均値を表示した。なお、差分法では長周期領域のみを表しているために、PGA が小さな値となっている。次に、(1)アスペリティの位置と破壊開始点、(2)アスペリティの強度、(3)破壊伝播速度、(4)全パラメータを変化させた場合について、地震動評価指標のバラツキの対数標準偏差(常用対数)の空間分布図を作成した(図 10、図 11)。図 12、図 13 に空間分布から得られた PGV(各指標の中で最も地震動の特徴を代表するものと考えた)のヒストグラムを示す。

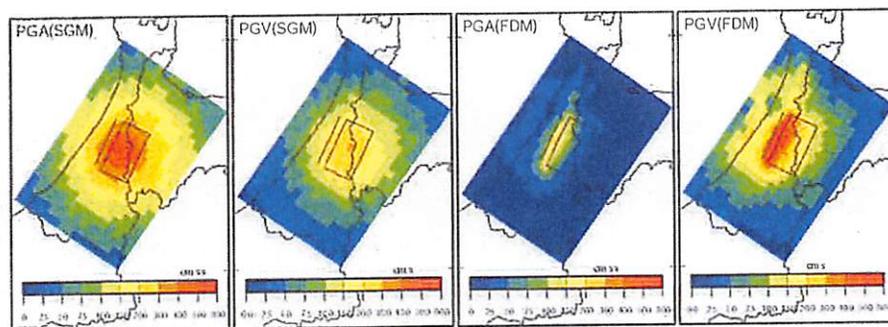
森本・富樫断層帯に対する空間分布図からは、以下の点を読み取ることができる。

- ・統計的グリーン関数法では、アスペリティの位置と破壊開始点によるバラツキの値が一番大きく、破壊伝播速度によるバラツキが次点である。
- ・統計的グリーン関数法における全パラメータによるバラツキ分布は、アスペリティの位置と破壊開始点によるバラツキ分布とよく似ている。
- ・差分法では、アスペリティの位置と破壊開始点よりも、破壊伝播速度によるバラツキの値の方が大きい。
- ・差分法における全パラメータによるバラツキは、破壊伝播速度によるバラツキが値、分布ともに支配的になっている。

差分法において破壊伝播速度によるバラツキが支配的となった要因は、1つは破壊伝播速度の関数となっているすべり速度時間関数⁹⁾自体の振幅が破壊伝播速度の違いによって変化していること、もう1つは、そのすべり速度時間関数を断層面上で積分する際に破壊伝播速度の違いが積分値に大きな影響を与えることにあると考えられる。

一方、ヒストグラムからは、次の点を読み取ることができる。

- ・統計的グリーン関数法(全パラメータ)のバラツキは0.06~0.15の範囲で分布しており、平均値は0.094である。
- ・差分法(全パラメータ)のバラツキは、0.10~0.30の範囲で分布し、平均値は0.189となっている。これは統計的グリーン関数法のバラツキよりも大きく、平均値が2倍程度、バラツキの値がとりうる範囲も2倍程度となっている。



(a) 統計的グリーン関数法(1Hz 以上)

(b) 差分法(1Hz 以下)

図 9 PGA、PGV の平均値の空間分布

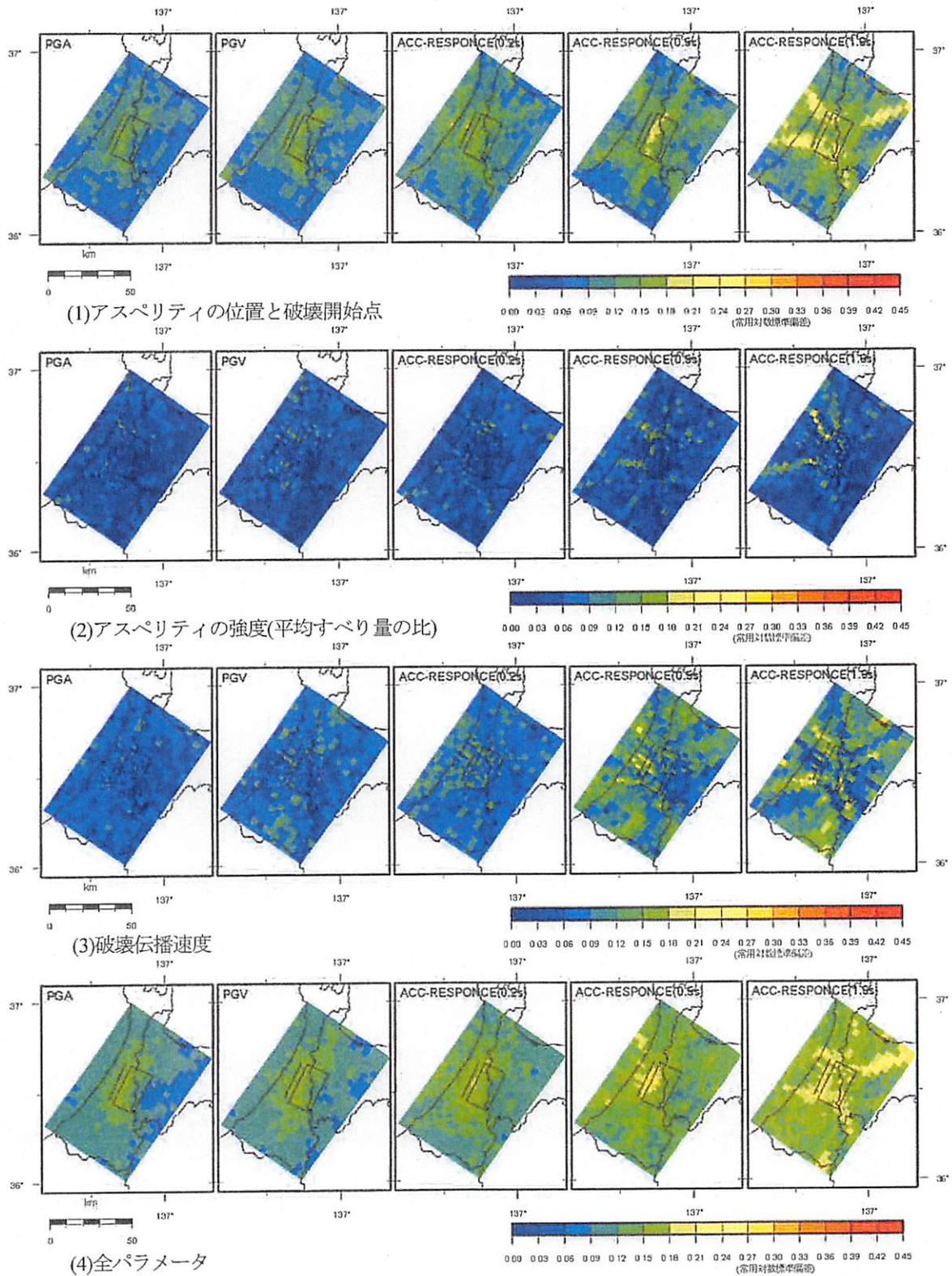


図10 バラツキの対数標準偏差の空間分布(統計的グリーン関数法)

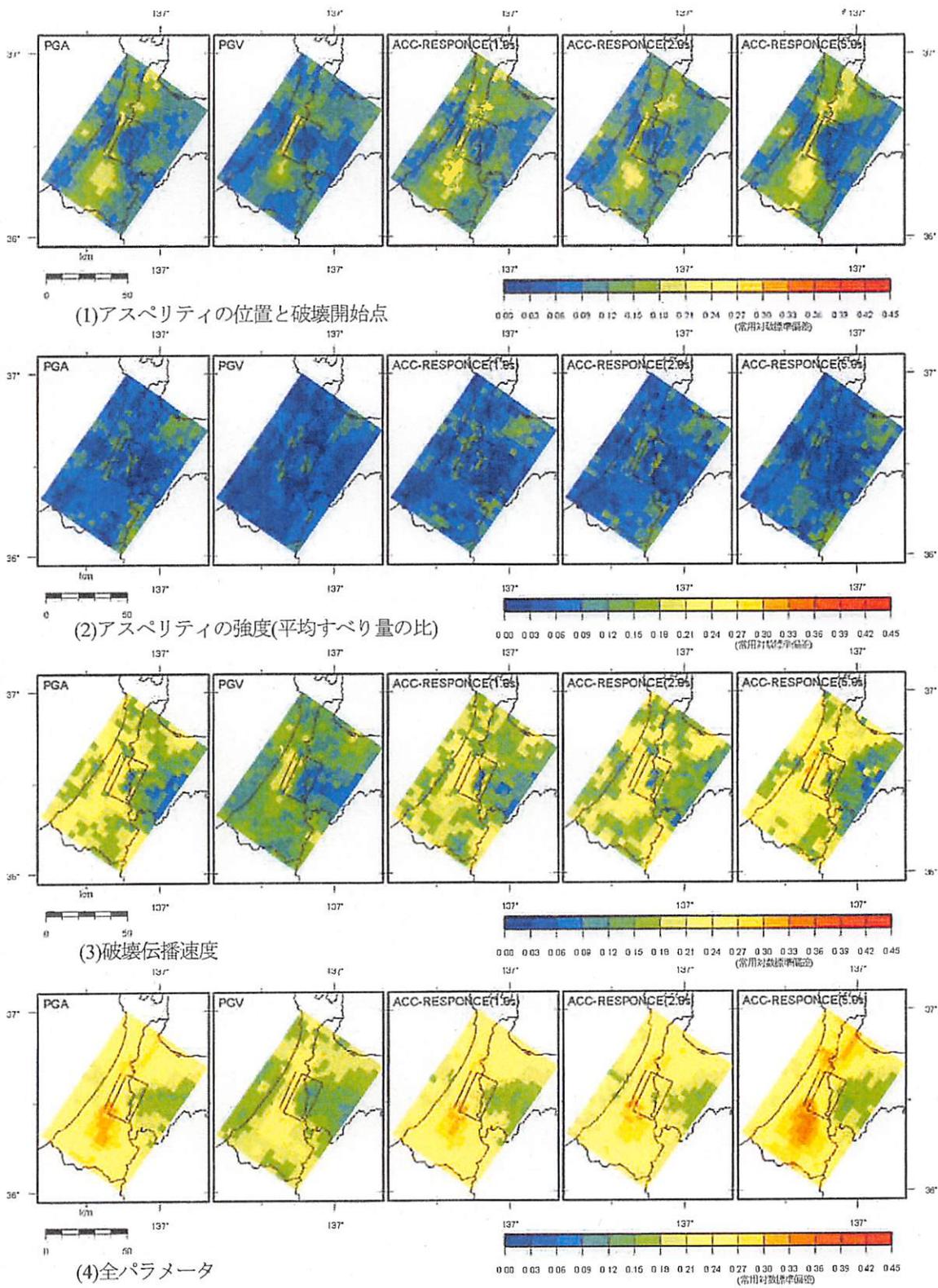
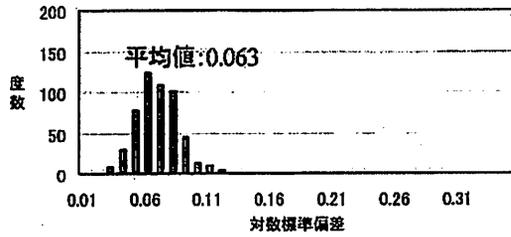
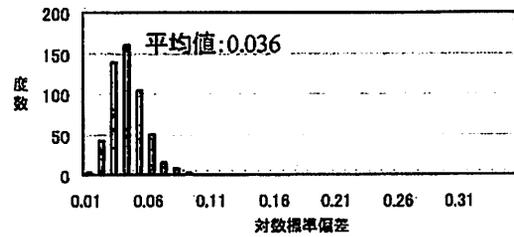


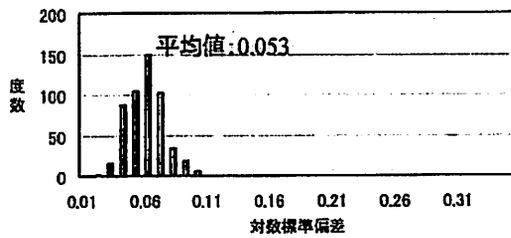
図 11 バラツキの対数標準偏差の空間分布(差分法)



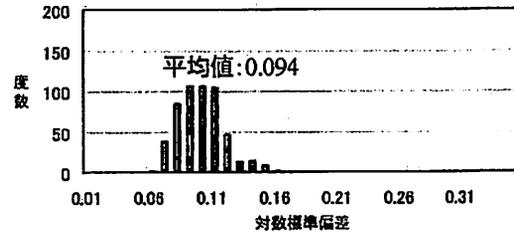
アスペリティの位置



アスペリティの強度(平均すべり量の比)

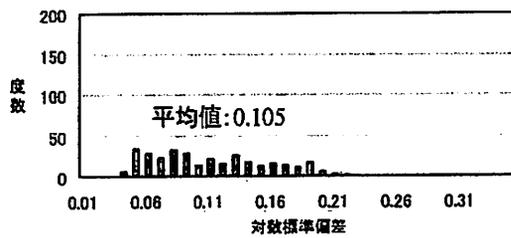


破壊伝播速度

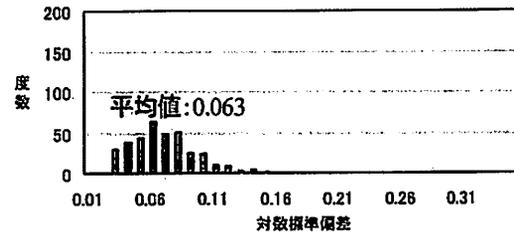


全パラメータ

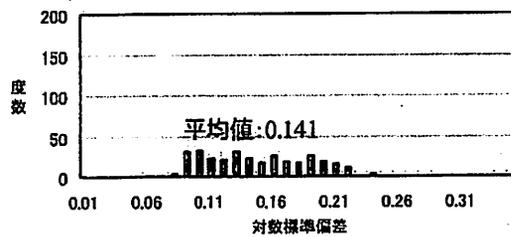
図12 空間分布から得られたPGVのヒストグラム(統計的グリーン関数法)



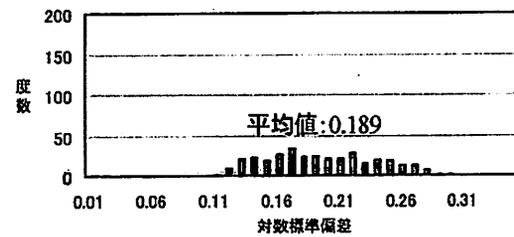
アスペリティの位置



アスペリティの強度(平均すべり量の比)



破壊伝播速度



全パラメータ

図13 空間分布から得られたPGVのヒストグラム(差分法)

4.4 距離減衰式との比較

対象地点が面的に分布している場合は、強震動予測結果のバラツキの空間分布を視覚的に捉えること以外に、強震動予測結果を既往の距離減衰式と比較し、さらに、強震動予測結果を観測記録とみなして、その値から距離減衰式(平均値)を求めることができる。この距離減衰式の推定誤差(バラツキ)を評価することによって、予測結果のバラツキが実際の地震記録が持つバラツキと比べて、大きいのか小さいのかなどを推定することができる。この方法も、強震動予測対象エリア内を包括したバラツキの評価を行う際には非常に有効であると考えられる。

森本・富樫断層帯を対象断層とした各パラメータ、各予測地点の強震動予測結果のPGA、PGVを実際の地震観測記録とみなして、距離減衰式の作成を試みた。距離減衰式は、司・翠川²⁰⁾によって提案されている式(1)を基本と考え、第1段階として幾何減衰を表す c と粘性減衰を表す k を司・翠川²⁰⁾において提案されている値(PGA $c=12.46, k=0.003$, PGV $c=6.34, k=0.002$)に固定して定数項 b を求め、第2段階として逆に b を固定して減衰に関する項の c, k を求める2段階の処理を行った。

$$\log A = b \log(X+c) \cdot k \cdot X \quad (A: \text{地震動の最大振幅値}, X: \text{断層最短距離(km)}) \quad (1)$$

図14にPGAおよびPGVについて、全パラメータをばらつかせた場合に対して作成した距離減衰式(平均値および平均値 $\pm 3\sigma$)を示す。作成した距離減衰式に対するPGA、PGVの推定誤差(バラツキ)として標準偏差(σ)を求めると、それぞれ0.153、0.159となった。なお、距離減衰式に与えるパラメータはMw: 6.63、震源深さ: 4.0kmとした。

前述の司・翠川²⁰⁾では、距離減衰式のバラツキ(標準偏差)はPGA、PGVに対して、それぞれ0.25、0.23(距離100km以内)と記載されている。翠川・大竹²¹⁾は、距離減衰式のバラツキには振幅依存性があるものとし、工学的基盤における最大速度振幅が25cm/s以上の範囲におけるバラツキを0.15としている。また、奥村ほか²²⁾は、地点が異なることに起因するバラツキを除去し、0.2としている。

振幅の範囲を限定した翠川・大竹²¹⁾を除くと、森本・富樫断層帯を対象とした強震動予測結果のバラツキは、最近の知見による実際の地震観測記録のバラツキと比べて、20~40%程度小さいことがわかる。本検討における強震動予測結果のバラツキは、震源パラメータのうち3章で選定した微視的パラメータのバラツキ

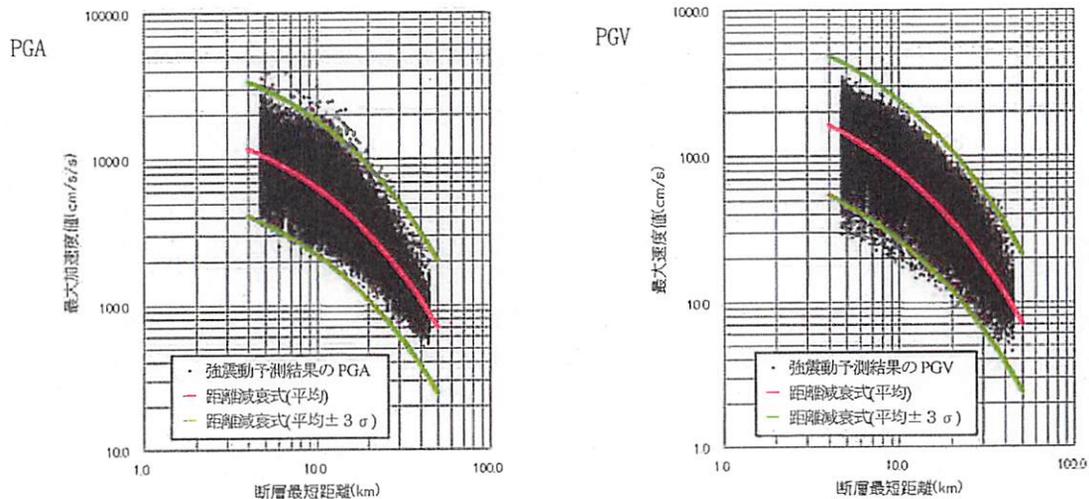


図14 距離減衰式との比較

に限定した結果であり、震源パラメータのうち巨視的パラメータおよび伝播経路特性、サイト特性のバラツキを含んでいないことになる。しかしながら、巨視的パラメータに関しては与条件としている点で距離減衰式による強震動予測と同じ取り扱いとなっていると考えられ、微視的パラメータに関しても、強震動予測結果に比較的大きな影響をあたえるパラメータは考慮できていると考えられる。一方、距離減衰式の元となっているデータは、強震動予測ほど高密度の面的な分布とは異なり、限られた地震観測点におけるサンプル値となるため、地震動のバラツキが全て完全には表現されていない可能性も残されていると考えられる。これらを考慮すると、今回の強震動予測結果のバラツキに伝播経路特性、サイト特性のバラツキを付加した場合、上述の距離減衰式のバラツキと調和的な値となることが推察される。

5 おわりに

レシピに基づいて強震動予測を行う場合、予測結果が震源パラメータのバラツキによってどの程度のバラツキを有するのかを評価する手法について検討を行った。強震動予測において、重要となる震源パラメータ、伝播経路特性、サイト特性のうち、ここでは震源パラメータのバラツキによる影響について検討を行った。その結果を以下にまとめる。

- ①パラメータ設定における偶発的バラツキの評価を対象とする場合、「バラツキ」を考慮するパラメータは、
 - アスペリティの位置と破壊開始点
 - アスペリティの強度(平均すべり量の比)
 - 破壊伝播速度に限定した。
- ②これらのパラメータを、設定値に明確な根拠が与えられず、かつ設定値がある範囲に限定されるものと、設定値がレシピの経験式によって与えられるものの2群に分類し、前者に分類したアスペリティの位置と破壊開始点は考える全ケース、後者に分類したアスペリティの強度(平均すべり量の比)および破壊伝播速度は経験式の平均値と標準偏差に従う正規分布によって表現した。
- ③正規分布によって表現するパラメータに対するサンプリングはLHS(Latin Hypercube Sampling)による100個のサンプリングで、収束値とみなした正規乱数による10000個のサンプリングに十分に近い値を示すことがわかった。
- ④特定サイトにおける強震動予測結果に対して、PGA、PGV、応答スペクトルに対するヒストグラムを求め、それを近似する分布形状(正規分布)をあてはめ、その分布の特性値によってバラツキ評価を行うことができることを、森本・富樫断層帯に対する結果を考察することにより示した。
- ⑤面的な強震動予測結果に対して、地震動評価指標の対数標準偏差の空間分布図を作成すること、及びその空間分布のヒストグラムを作成することによってバラツキ評価を行うことができることを、森本・富樫断層帯に対する結果を考察することにより示した。
- ⑥距離減衰式との比較によって、予測結果のバラツキは実際の地震記録が持つバラツキと調和的な結果が得られる可能性があることを、森本・富樫断層帯に対する結果を考察することにより示した。

今回、伝播経路特性、サイト特性のバラツキ、および、震源パラメータの中で、認識論的不確定性と位置付けた巨視的パラメータやアスペリティの数、面積などは検討の対象としなかった。このため、例示した森本・富樫断層帯のバラツキ評価結果は限られた条件下のものであり、そのまま強震動予測結果の「バラツキ」が評価されたものと考えすることはできない。今後は、認識論的不確定性と位置付けたパラメータについて、「ロジックツリー」や「ケーススタディ」として取り扱うことなどを検討し、強震動予測結果の絶対値としての「バラツキ」を評価していくことが重要である。

謝辞

本稿を纏めるにあたり、(財)地域 地盤 環境 研究所 宮腰研博士には、破壊伝播速度に関する貴重なデータをご提供いただいた。また、(株)ニュージェック 平井俊之氏には、統計的グリーン関数法の計算など多くのご助力をいただいた。ここに記して謝意を表すものである。

参考文献

- 1) 日本建築学会：地盤震動—現象と理論—，2004.
- 2) 長尾毅・山田雅行・野津厚：フーリエ振幅と群遅延時間に着目した確率論的地震ハザード解析，土木学会論文集，No.801/I-73，pp.141-158，2005.
- 3) 中央防災会議，<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/>
- 4) 高知県津波防災アセスメント調査事業，
http://www.pref.kochi.jp/%7Eshoubou/kochi_index/2nd_map/index.html
- 5) 佐藤智美，巽蒼樹：全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性，日本建築学会構造系論文集，第556号，pp.15-24，2002.
- 6) 岩田知孝，入倉孝次郎：観測された地震波から，震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み，地震2，Vol.39，No.4，pp.579-593，1986.
- 7) Wald, D.J. and Somerville, P.G. : Variable-Slip Rupture Model of the Great 1923 Kanto, Japan, Earthquake: Geodetic and Body-Waveform Analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.85, pp. 159-177, 1995.
- 8) 入倉孝次郎，三宅弘恵：予測のための震源のモデル化，月刊地球号外，No.37，pp.62-77，2002.
- 9) 付録 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)，
http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/05jul_chuokozosen/furoku.pdf
- 10) 池浦友則：地震動のばらつき評価，第33回地盤震動シンポジウム 地震動予測地図を考える—地盤震動研究を耐震設計に如何に活かすか(その4)—，pp.57-66，2005
- 11) Lawrence Livermore National Laboratory : Guidance for Performing Probabilistic Seismic Hazard Analysis for a Nuclear Plant Site: Example Application to the Southeastern United States, NUREG/CR-6607, UCRL-ID-133494, 2002.
- 12) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：森本・富樫断層帯の地震を想定した強震動評価について，
http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/03mar_morimoto/index.htm，2003.
- 13) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：森本・富樫断層帯の評価，
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/01dec_morimoto/index.htm，2001.
- 14) 石井透，佐藤俊明，Paul G. Somerville：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，第527号，pp.61-70，2000.
- 15) 宮腰研，A. Petukhin：内陸地震の震源インバージョン結果に基づいた破壊伝播速度の不均質性に関する検討，地球惑星科学関連学会2005年合同大会，CD-ROM，2005.
- 16) Mai, P. M., P. Spudich and J. Boatwright : Hypocenter Locations in Finite-Source Rupture Models, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.95, pp. 965-980, 2005.
- 17) 菊地正幸，山中佳子：『既往大地震の破壊過程=アスペリティの同定』，サイスモ，5(7)，6-7，2001.
- 18) McKay, R. L., W. J. Conover, R. J. Beckman : A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code, *Technometrics*, Vol.21, pp.239-245, 1979.
- 19) 先名重樹，藤原広行，河合伸一，青井真，功刀卓，石井透，早川譲，森川信之，本多亮，小林京子，大

- 井昌弘, 八十島裕, 神野達夫, 奥村直子: 森本・富樫断層帯の地震を想定した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, 第255号, 2004.
- 20) 司宏俊, 翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 第523号, pp.63-70, 1999.
- 21) 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, 第3巻, 第1号, pp.59-70, 2003.
- 22) 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, 2004年度秋季大会, B26, 2004.

(受理: 2006年5月9日)

(掲載決定: 2006年12月25日)

Statistical Analysis of Predicted Ground Motions on the Basis of a Recipe for Strong-motion Prediction

~For Variety of Source Parameters~

YAMADA Masayuki ¹⁾, SENNA Shigeki ²⁾ and FUJIWARA Hiroyuki ³⁾

1) NEWJEC Inc.

2) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

3) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

ABSTRACT

We study variations of predicted ground motions on the basis of a recipe for strong-motion prediction and propose a technique for evaluation of variation in the predicted ground motions. In this article, we consider only aleatory variabilities in source parameters among all possible variabilities, such as, those in the source parameters, the propagation characteristics and the site characteristics. We use a Monte Carlo simulation to estimate variations and adopt the Latin Hypercube Sampling (LHS) method to reduce computations. We estimate the variation of predicted ground motions in PGA, PGV and response spectrum at a specific site and calculate average and standard deviation of normal distribution, and also we evaluate the special variation in the area by using the space distribution maps of standard deviation. It is shown that the variations in the predicted ground motions on the basis of a recipe are comparable with those of attenuation formula.

Key Words: Recipe for Strong-motion Prediction, Predicted Ground Motions, Statistical Green's Function Method, Finite difference methods, Attenuation Relation