



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

翠川 三郎¹⁾, 大竹 雄²⁾

- 1) 正会員 東京工業大学 大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻 教授 工博
e-mail: smidorik@enveng.titech.ac.jp
- 2) 東京工業大学 大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻 大学院生 (現 建設技術研究所)
e-mail: ootake@ctie.co.jp

要 約

地震動強さの距離減衰式にみられるバラツキの特性について検討した。水平最大加速度および速度の距離減衰式に対する元データのバラツキとマグニチュード(M)、震源距離、振幅レベルとの関係を整理した。その結果、M が大きくなる程、距離が小さくなる程、振幅が大きくなる程、バラツキが小さくなる傾向がみられ、これらのうちで振幅レベルとの相関が最も強いことを示した。距離依存性は伝播経路での地震波の散乱や減衰の影響で、振幅依存性は距離依存性や M 依存性などの相乗効果の結果で、説明が可能であることを指摘した。

キーワード：距離減衰式、バラツキ、M 依存性、距離依存性、振幅依存性

1. はじめに

地域の地震防災対策や構造物の耐震設計の基礎的データとして、将来発生する地震による地震動強さを予測しておくことは重要である。その予測手法のひとつとして、地震動強さの距離減衰式を用いた経験的手法が提案されてきた^{例えば 1)~4)}。距離減衰式は簡便に地震動強さを予測できるが、既往の式の標準偏差は常用対数で 0.2~0.3(自然対数で 0.4~0.7)程度の値をとる場合が多く^{例えば 5)}、距離減衰式からの予測値と観測値の間にはかなりの大きさのバラツキがある。そこで、距離減衰式の精度向上の手がかりとして、このバラツキの特徴や要因を検討することが必要となろう。また、確率論に基づく地震ハザード解析から求まる発生確率の小さな地震動の強さは、解析で用いた距離減衰式のバラツキの大きさに大きく支配されることから、このバラツキについて検討することは重要な課題である。

距離減衰式のバラツキに関する研究として、バラツキの大きさが地震動強さの振幅レベルに依存し、大振幅の記録でバラツキが小さくなることを示したもの^{6),7)}がある。また、地震規模が大きくなるにつれてバラツキが小さくなるという指摘もある^{7)~10)}。この説明として、前者については、地盤応答の非線形性、すなわち大振幅時には地盤が非線形な挙動をして地震の揺れを伝えにくくなり、振幅が非常に大きな値とはなりにくくなるためとの推測も示されている⁹⁾。後者については、地盤応答の非線形性の影響の他に、地震規模による卓越周期や継続時間の変化による影響や地震の応力降下量のバラツキが地震規模に依存するためとの説明も示されている⁹⁾が、いずれにせよ十分な考察はみあたらない。

本研究では、日本の強震記録のデータセットを用いて導出された距離減衰式に対する元データのバ

ラツキと地震規模や振幅レベル、震源距離などとの関係を検討し、バラツキの特徴を明らかにし、バラツキの主な要因について考察する。

2. 用いた距離減衰式

本研究では、1968年から2001年までに日本で発生した33地震の強震記録に基づいて得られた距離減衰式¹¹⁾を用いて、距離減衰式のバラツキについて検討する。用いられた地震のリストを表1に示す。地震規模(M_w)は5.5から8.3のものまで、震源深さは数kmのものから100kmを越えるものまで幅広く分布している。図1に用いられた地震記録の距離と M_w の関係を示す。最大加速度で3335記録、最大速度で1980記録が用いられている。なお、ここでは、SN比が比較的低いアナログ強震計記録も用いているので、ノイズ除去のために、司・翠川³⁾にならって、アナログ強震計記録については0.2ないし0.33~10Hzの、デジタル強震計記録については0.15ないし0.2~10Hzのバンドパスフィルターを掛けた後に計器の特性補正を行っている。

得られた水平2成分の値の中で大きい方の値が用いられている。最大加速度については、深さ30mまでの地盤の平均S波速度を用いて略算的に硬質地盤上のものに変換された値¹²⁾が用いられている。震源からの距離の定義としては断層面最短距離が採用されている。

回帰モデルとしては、震源深さ(D)が30kmより浅い地震の場合には通常よく用いられる(1)式が用い

表1 用いた地震およびデータ数

No.	Earthquake	Date	M_w	Focal Depth (km)	Number of recordings		Fault Type
					P.G.A.	P.G.V.	
1	Off Tokachi	1968.5.16	8.2	15	10	10	Inter-plate
2	Off Nemuro Pen.	1973.6.17	7.8	25	5	4	Inter-plate
3	Near Izu Oshima	1978.1.14	6.8	7	8	8	Crustal
4	Off Miyagi Pref.	1978.8.12	7.6	37	13	10	Inter-plate
5	East off Izu Pen.	1980.6.29	6.5	7	15	15	Crustal
6	Off Ibrakawa	1982.2.21	6.9	25	10	8	Crustal
7	Nhonkai-Chubu	1983.5.26	7.8	8	17	17	Inter-plate
8	Off Hyuganada	1984.8.7	6.9	30	9	7	Inter-plate
9	Central Iwate Pref.	1987.1.9	6.6	73	9	5	Intra-plate
10	Northern Hidaka Mt.	1987.1.14	6.8	120	13	8	Intra-plate
11	East off Chiba Pref.	1987.12.17	6.7	30	173	47	Crustal
12	Off Kushiro	1993.1.15	7.6	105	35	17	Inter-plate
13	Off Noto Pen.	1993.2.7	6.3	15	12	7	Crustal
14	Southwest off Hokkaido	1993.7.12	7.7	10	24	15	Inter-plate
15	East off Hokkaido	1994.10.4	8.3	35	41	17	Intra-plate
16	Far off Sanou	1994.12.28	7.7	35	57	21	Inter-plate
17	Hyogo-kan Nanbu	1995.1.17	6.9	10	74	43	Crustal
18	Off Hyuganada	1995.10.18	6.7	25	169	98	Inter-plate
19	Northwestern Kagoshima Pref.	1997.3.26	6.1	6	121	65	Crustal
20	Northwestern Kagoshima Pref.	1997.5.13	6.0	7	133	71	Crustal
21	Northern Yamaguchi Pref.	1997.8.25	5.8	10	186	92	Crustal
22	Off Shizuoka Pref.	1998.5.3	5.5	3	77	46	Crustal
23	Northern Iwate Pref.	1998.9.3	5.8	10	66	26	Crustal
24	Off Hyuganada	1998.12.18	5.8	32	44	30	Inter-plate
25	Southeastern Hokkaido	1999.5.13	6.4	104	96	45	Intra-plate
26	Northern Wakayama Pref.	1999.8.21	5.8	70	249	172	Intra-plate
27	Off Nemuro Pen.	2000.1.28	6.7	56	46	21	Inter-plate
28	Northeastern Chiba Pref.	2000.6.3	5.9	48	135	90	Inter-plate
29	Off Ibaraki Pref.	2000.7.21	6.1	49	178	108	Inter-plate
30	Tottori-kan Seibu	2000.10.6	6.8	11	370	207	Crustal
31	Central Mie Pref.	2000.10.31	5.5	43	278	188	Intra-plate
32	Galyo	2001.3.24	6.7	51	411	263	Intra-plate
33	Off Hyuganada	2001.4.25	5.6	42	253	201	Intra-plate

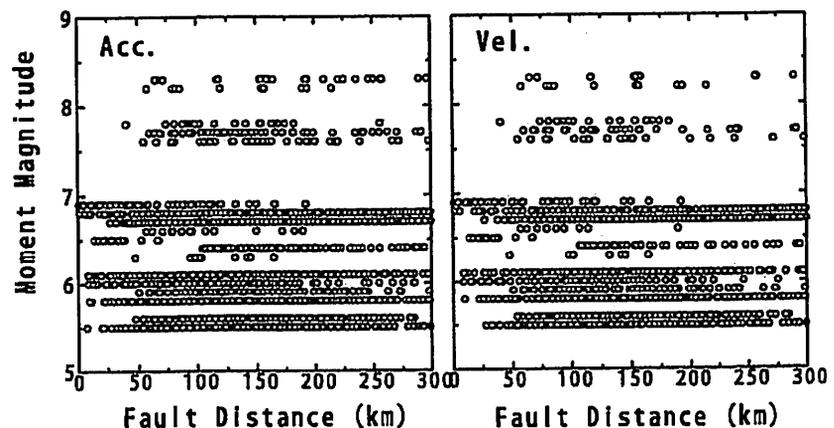


図1 用いたデータのMと距離の関係

られている。震源深さが 30km より深い地震の場合には距離減衰の傾きが大きくなることから(2)式が用いられている。詳細については文献¹⁾を参照されたい。ここで、 A は最大加速度(cm/s^2)ないし最大速度(cm/s)を、 X は震源からの距離(km)を表す。 b は震源依存の係数で、 C は断層近傍での地震動強さの飽和現象を表す係数である。 k は粘性減衰を表す係数である。

$$\log A = b - \log(X + C) - kX \quad (D \leq 30\text{km}) \quad \dots (1)$$

$$\log A = b + 0.6 \log(1.7D + C) - 1.6 \log(X + C) - kX \quad (D > 30\text{km}) \quad \dots (2)$$

粘性減衰を表す係数 k は、司・翠川⁴⁾にならい、最大加速度で 0.003、最大速度で 0.002 とされている。係数 C は震源の大きさ(M_w)と関係する量であり、(3)および(4)式が得られている。

$$C = 0.0060 10^{0.5M_w} \quad (\text{for PGA}) \quad \dots (3)$$

$$C = 0.0028 10^{0.5M_w} \quad (\text{for PGV}) \quad \dots (4)$$

震源依存の係数 b についても司・翠川⁴⁾にならい、地震規模(M_w)、震源深さ(D)および地震タイプ i のダミー変数(S_i)の関数式でモデル化されている。ダミー変数には、地殻内地震、プレート間地震、プレート内地震の 3 つのカテゴリーが与えられている。

$$b = aM_w + hD + d_i S_i + e \quad \dots (5)$$

表 2 得られた距離減衰式の各係数の値

a	h	d			e	Intra-event Standard deviation	Inter-event Standard deviation	Total Standard deviation
		Crustal	Inter-plate	Intra-plate				
Peak ground acceleration								
0.59	0.0023	0.00	0.08	0.30	0.02	0.27	0.16	0.30
Peak ground velocity								
0.65	0.0024	0.00	0.05	0.15	-1.77	0.24	0.16	0.28

ここで、 a , h , d_i , e は、回帰係数である。回帰分析により得られた各係数の値および標準偏差を表 2 に示す。振幅の地震規模依存を表す係数 a については、最大加速度に対する値よりも最大速度に対する値の方がやや大きい。震源深さ依存を表す係数 h については、両者ともほぼ同じである。地震タイプ別の係数は、地殻内地震に比べて、プレート間地震ではやや大きく、プレート内地震ではかなり大きい。

図 2 の上段は $M_w=7.0$ 、地震タイプをプレート内地震に固定して震源深さが 30、50、100km の場合の距離減衰曲線を示している。図の左側が最大加速度に対する結果を、右側が最大速度に対する結果をそれぞれ示す。震源から近いところでは、震源が深いほど地震動強さが大きい。一方、震源から離れると、深い地震では振幅は大きく減衰し、浅い地震の方が地震動強さは大きくなっていく。

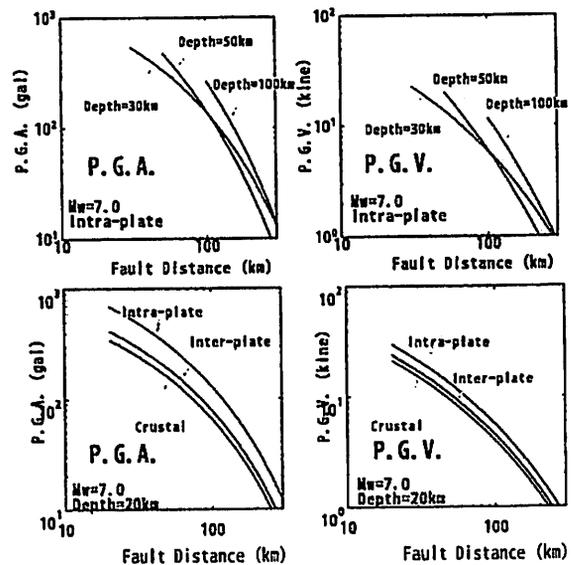


図 2 距離減衰式から得られる距離減衰曲線

図2の下段は $M_w=7.0$ 、震源深さを 20km に固定し、地震タイプを変化させた場合を示している。最大加速度の場合、地殻内地震を基準とするとプレート間地震では 1.2 倍大きく、プレート内地震では 2.0 倍大きい値を示す。また、最大速度の場合には、プレート間地震で 1.1 倍大きく、プレート内地震では 1.4 倍大きい値を与える。

3. 距離減衰式における地震動強さのバラツキの特徴

上述の距離減衰式のバラツキを図3に示す。この図は、距離減衰式からの予測値と元データの値との比をとり、その常用対数の頻度分布を示したものである。この全バラツキ(Total Error)の分布は対数正規分布とみなせ、従来の指摘(例えば¹⁰⁾と一致する。その標準偏差は最大加速度の場合で 0.30、最大速度の場合で 0.28 である。この全バラツキは地震内のバラツキと地震間のバラツキに分離できる⁹⁾。図4に、 M_w (5.8)や震源深さ、地震タイプが同一の山口県北部の地震および岩手県北部の地震で観測された最大加速度の距離減衰を示す。点線および一点鎖線はそれぞれの地震で得られた距離減衰式で、実線が $M_w=5.8$ の平均的な距離減衰式である。ここで、各々の地震で得られた距離減衰式と元データの差を地震内のバラツキ(Intra-event Error)と呼び、各地震で得られた式と平均的な式の差を地震間のバラツキ(Inter-event Error)と呼ぶ。

表2の右側の欄に、地震内のバラツキ、地震間のバラツキ、全バラツキの値が示されている。本研究で、バラツキの値とは距離減衰式からの予測値と元データの値との比の常用対数の標準偏差を意味する。地震内のバラツキ(最大加速度の場合で 0.27)は地震間のバラツキ(最大加速度の場合で 0.16)に比べて大きく支配的であることがわかる。同様の傾向は既往の研究^{2),7),9)}でも指摘されている。

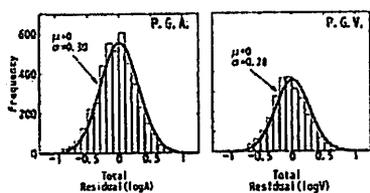


図3 距離減衰式的全バラツキ

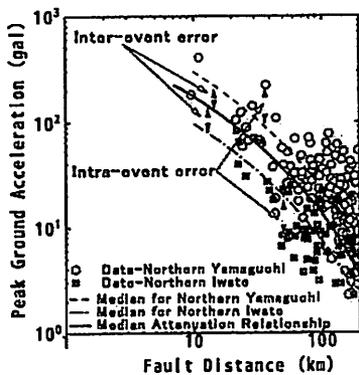


図4 地震内と地震間のバラツキ

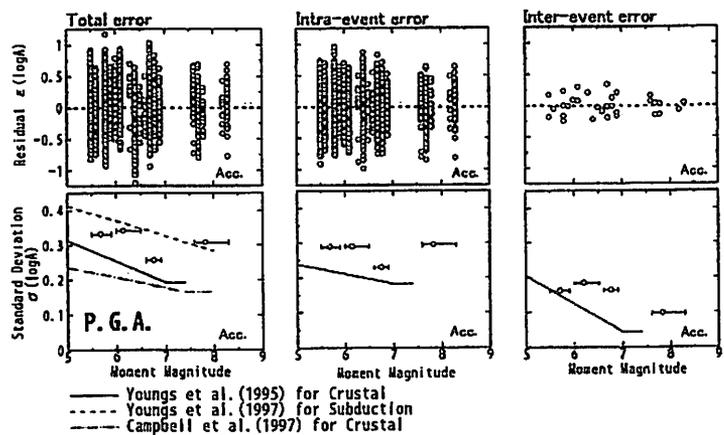


図5 地震規模とバラツキの関係

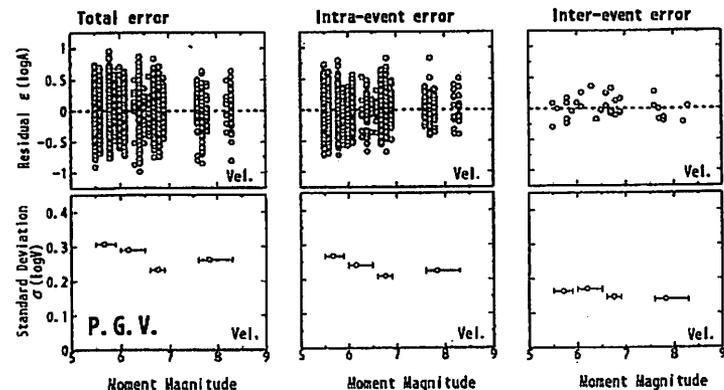


図5に、地震規模(M_w)と全バラツキ、地震内のバラツキ、地震間のバラツキとの関係を示す。図の上段は個々のデータのバラツキを示し、下段は M を5.5~5.9、6.0~6.5、6.6~6.9、7.6~8.3の4つの範囲に分類し、それぞれの M の範囲でのバラツキの値を示したものである。図には米国の記録等に基づく既往の結果^{9),13),14)}も示してある。バラツキは M が増大するにつれて小さくなる傾向がみえるが、 M 依存性は既往の結果に比べてあまり明瞭ではない。

図5と同様な形で、図6に、震源からの距離と全バラツキとの関係を示す。なお、震源からの距離毎や後述の振幅レベル毎の地震間のバラツキは意味をなさないので、ここでは地震内と地震間のバラツキにわけずに全バラツキだけを示した。震源からの距離が50km程度以上の場合にはバラツキの大きさは距離が近づくにつれてやや小さくなる傾向がみられる。例えば、最大加速度の場合、バラツキは距離が200kmで0.3強、距離が50kmで0.3弱である。距離が50km程度以下になると距離が小さくなるにつれてバラツキはかなり小さくなり、最大加速度の場合距離が10kmで0.2程度となる。既往の研究で距離との関係について議論されている例はみあたらないが、例えば、カリフォルニアでの地殻内地震による記録の解析結果¹⁵⁾をみると、本研究と同様に距離が近づくにつれてバラツキが小さくなる傾向が読みとれる。

図7に、振幅レベルと全バラツキとの関係を示す。図の横軸は距離減衰式からの予測値を示す。バラツキの大きさは明らかに振幅レベルに依存しており、 M に対する依存性よりも強く、既往の指摘⁷⁾とも一致している。最大加速度の場合、全バラツキは振幅レベルが 50cm/s^2 以下の場合には0.32であるが、振幅レベルとともに減少し、 600cm/s^2 以上の場合にはその半分弱の0.14となる。前述したように全データに対する全バラツキは0.30であり、この値がデータ数の多い振幅レベルの小さな記録に対するバラツキでほぼ決まっていることを示している。最大速度の場合も同様の傾向である。

以上の検討から、距離減衰式における地震動強さのバラツキの特徴として、1)地震間のバラツキに比べて地震内のバラツキが大きいこと、2)あまり明瞭ではないがバラツキの M 依存性がみられること、3)距離が50km程度以下でバラツキの距離依存性が強くみられること、4)バラツキの振幅依存性が最も明瞭にみられること、がわかった。

4. 距離減衰式における地震動強さのバラツキの要因

4.1 震源特性の影響

距離減衰式におけるバラツキの原因について、地震動特性を支配する3つの要素（震源特性、伝播

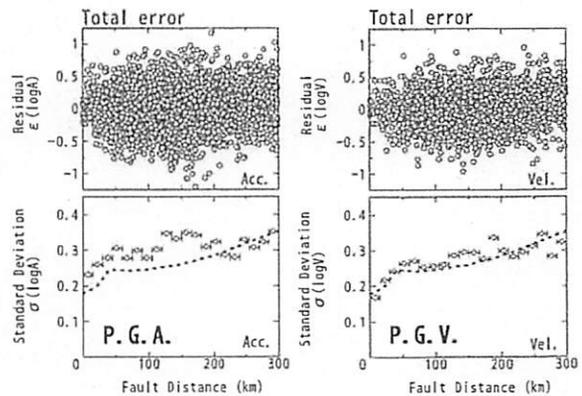


図6 距離とバラツキの関係

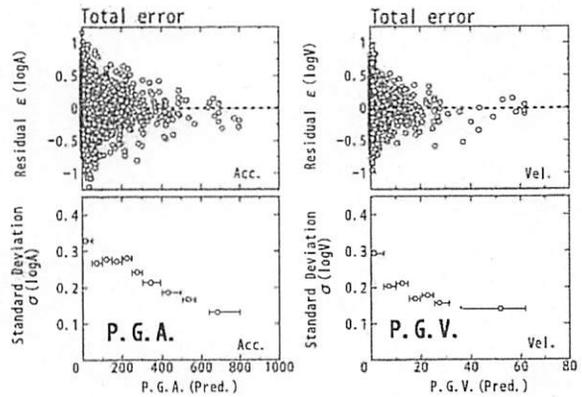


図7 振幅レベルとバラツキの関係

特性、地盤特性)の面から考える。震源特性による影響としては、a1)地震規模だけでは震源から励起される地震動の強さを十分には表現できないこと、a2)震源から放射される地震波の振幅が方向によって異なること、が考えられる。前者については、地震毎の平均的な地震動強さを変化させるであろうから、地震内のバラツキよりは地震間のバラツキに大きく影響するであろう。後者については、観測点毎に地震動強さを変化させるであろうから、地震間のバラツキよりは地震内のバラツキに大きく影響するであろう。

a1)については、応力降下量の違いの影響などが考えられる。例えば、壇・ほか¹⁶⁾は震源での実効応力により短周期での振幅レベルが支配されるために短周期での振幅レベルとMの関係にバラツキが生ずると説明している。また、応力降下量のバラツキにはM依存性があり、Mの小さな地震ほどバラツキが大きいと指摘⁹⁾もある。このことは、図5に示した地震間のバラツキのM依存性を説明するものかもしれない。

a2)については、破壊伝播による方位依存性や地震波の放射特性の影響が考えられる。破壊伝播による方位依存性の影響に関して、小山¹⁷⁾は短周期地震波の方位依存性の理論式を提案している。この式に、地震波の伝播速度 3.5km/s、破壊伝播速度 2.8km/s を代入すると、方位による変化はユニラテラルおよびバイラテラル破壊伝播の場合で最大と最小でそれぞれ3倍程度および1.7倍程度の違いとなる。平均値に対する各方位でのバラツキの標準偏差を求めると、ユニラテラルおよびバイラテラル破壊伝播の場合で、常用対数でそれぞれ0.16および0.08となる。この式は断層運動が断層面上で均一と仮定しているが、断層運動のゆらぎを考慮した地震動シミュレーション結果^{18),19)}からは、断層運動の不均一性によって破壊伝播の影響が小さくなることが示されている。

観測記録に基づく検討として、Somerville et al.²⁰⁾はM6.5以上の地震で断層距離が50km以内で得られた強震記録を用いて検討し、周期0.6秒を越えると方位依存性が現れ、方位による変化は、例えば周期2秒の成分では、横ずれ断層および縦ずれ断層の場合には最大と最小でそれぞれ3倍および1.5倍程度の違いが生ずることを示している。この結果は前述の小山の式によるものと調和的である。大野・ほか²¹⁾も同様の結果を示しており、方位依存性の影響は断層から断層長さの1/4程度以内の範囲でみられることを指摘している。これらのことから、本研究で対象とする比較的短い周期成分での破壊伝播による方位依存性については、地震規模がある程度大きく距離が近い地点で、その影響がみられるものと考えられる。

放射特性に関連する検討として、M4~5の地震による記録の解析から1~5Hz程度を境として、それより低周波数側では放射特性がみられ、高周波数側ではみられないことが指摘されている^{22)~24)}。そこで、放射特性の影響は、本研究で対象とする比較的短い周期成分に対しては大きなものとは考えにくい。Mの大きな地震の記録での検討例はみあたらないが、Mが大きくなれば震源の破壊過程がより複雑になり、特に距離が近い観測点で放射特性が現れにくくなるために、破壊伝播の影響とは逆で、地震規模が比較的小さく距離が離れた地点で、その影響がより強く現れるものとも考えられる。結局、前述の破壊伝播の影響と放射特性の影響を足し合わせると、それによるバラツキはMや距離にあまり依存せずに、前述の観測記録にみられた地震内のバラツキ(最大加速度の場合で0.27)に比べ大きなものとはならないとの解釈も可能である。

4.2 伝播特性の影響

伝播経路による影響としては、b)地震波が減衰したり変形する割合が狭い地域でも異なること、が考えられる。これは観測点毎の地震動強さを変化させるであろうから、地震内のバラツキに大きな影響を与えるであろう。地震波の減衰する割合は伝播経路の速度構造や減衰(Q)構造により変化する。大局的な速度構造による影響としては、モホ面での反射波の影響や地殻内での多重反射による L_g 波の影響が指摘されている²⁵⁾が、前者については日本国内で顕著な事例は見あたらないし、後者については震源距離が100~200km以上の場合にはその影響が顕著にみられる場合もあるが、距離の近いところでの影響は小さい。速度構造の小さな揺らぎによる散乱の影響としては、干場²⁶⁾は3次元ランダム媒体

での平面波の波動伝播を計算し、速度構造にある揺らぎを与えると、振幅のバラツキが伝播距離とともに増大するが、20~40kmの距離でピークとなり、それ以上の距離では徐々に小さくなる計算結果を示している。

伝播経路の減衰(Qs)構造については、中村・植竹²⁷⁾は、日本およびその周辺を50km程度の大きさのブロックに分割して、気象庁やK-netにより観測された各地の強震記録を説明するようなQs値を各ブロックに対して求めている。例えば、深さ0~30kmの部分に対して3HzでのQs値は100~1000程度と求められている。また、田居・ほか²⁸⁾は気象庁87型記録を用いて日本の各地域でのQs値を求め、3HzでのQs値が200~400程度であることを示している。これらの値を参考にして、仮に、震源からの方位を4つに分けて各方向での伝播経路のQsが200、300、300、400である場合を考えると、4方向で計算される地震動強さのバラツキは対数標準偏差で距離が100kmの場合で約0.1、距離が200kmの場合で約0.2となる。

前述の地震波の散乱によるバラツキと減衰構造の違いによるバラツキの影響を足し合わせて考えると、伝播経路の影響によるバラツキは、ある距離までは散乱と減衰構造の違いによるバラツキが足し合わされて距離とともに急増するが、ある距離より大きくなると散乱によるバラツキは徐々に小さくなるために足し合わせたものは距離とともに微増する傾向となるとの解釈も可能である。この傾向は図6に示した距離減衰式のバラツキと距離の関係を説明するものである。

4.3 地盤特性の影響

地盤特性による影響としては、観測点毎に地盤の揺れやすさが異なること、が考えられる。これは観測点毎に地震動強さを変化させるであろうから、地震間のバラツキよりは地震内のバラツキに大きく影響する。地盤条件の差が小さい場合の検討例として、1971年サンフェルナンド地震の際に1km四方以内の地域で比較的類似の地盤条件で得られた記録の最大加速度のバラツキは対数標準偏差で0.10と求められている²⁹⁾。同様に、地盤構造に大きな変化がないSMART-1アレイ(アレイ半径は最大で2km)で得られた最大加速度のバラツキにはM依存性がみられMが大きくなるにつれて減少し、Mが4~5の地震では0.14程度、M6.5以上の地震では0.08と求められている³⁰⁾。このバラツキの原因としてはアレイ内や周辺での地震波の散乱によるもので、地震動が持つ本質的なバラツキであると推測されている³⁰⁾。また、M依存性の説明として、Mの大きい地震による記録は卓越周期が長く散乱の影響を受けにくいことが示されている³⁰⁾。

地盤条件の差が大きい場合の研究例はみあたらないので、横浜市の高密度強震計網の記録を用いて検討する。横浜市では約25km×20kmの地域に約2km間隔で合計150台の地震計が設置されている³¹⁾。ひとつの地震における各観測点での地震動強さの違いは、震源特性と伝播特性の影響がほぼ等しいと考えられることから、主に地盤特性の影響によるものと考えられる。最も硬い観測点ではVsで600m/s程度の堆積岩がほぼ露頭に現れており、最も軟らかい観測点ではVsで100m/s程度の軟弱層が30m程度堆積しており、それぞれ全体の約10%がこのような観測点である³¹⁾。その他には、表層のVsが100~200m/sで層厚が10m前後の地盤が50%程度を、層厚が20m前後の地盤が10%程度を占め、表層のVsが300m/s程度の硬質地盤が15%程度を占める³¹⁾。

M4.2~5.2の12地震の記録を用いて検討を行った。市の中心部までの震源距離は50~150kmで、100km前後のものが多い。観測点により震源距離が多少変化することから距離減衰式を用いて距離の影響を補正した。その結果、最大加速度および最大速度のバラツキは、常用対数の標準偏差でそれぞれ0.21および0.20と求まった。岩盤と地盤に地盤分類して、それぞれのバラツキを計算すると、バラツキは0.02程度小さくなり、0.2弱となる。このことは、粗い地盤分類ではバラツキをあまり改善することはできないことを示唆しており、既往の結果¹⁰⁾とも一致している。

この検討結果(対数標準偏差で0.2弱)は、観測点付近での散乱による影響と各観測点での地盤特性の違いの影響の両者が含まれたものと考えられる。この結果はMが4~5の小さな地震による記録の検討であるので、前述のSMART-1アレイの結果³⁰⁾から散乱による影響は0.14程度となり、地盤特性の

違いの影響は 0.12 程度ということになる。これらのことから、地盤特性によるバラツキは、M が大きい地震の場合には観測点付近の散乱による影響で 0.08 程度、各観測点の地盤特性の違いで 0.12 程度の値をとり、両者を合計して 0.15 程度の値をとるものと概算される。

4.4 地盤の非線形性の影響

振幅の大きなレベルでは、d)地盤の非線形性により地盤特性のバラツキが小さくなり、これが結果的にバラツキの振幅依存性やM依存性を生み出すとの解釈もある^{6),9)}。そこで、本研究で用いた距離減衰式を導出する際に用いられたデータに基づいて非線形性の影響について検討した。図8は、縦軸にデータとして用いた原記録の最大加速度ないし最大速度を、横軸に震源からの距離をとったものである。

様々な地震規模の地震による記録が含まれているため、データは大きくばらばらしているものの、最大加速度については、距離が数十 km 以内の範囲では、最大加速度 500cm/s² 前後で振幅が飽和している傾向がみられ、これが地盤の非線形性の影響によるものと推測される。一方、最大速度については、距離が近づくにつれて振幅が大きくなり、最大加速度の場合と比べると、振幅がある値で飽和している傾向はみえにくい。なお、距離が 100km 程度のところで、振幅に盛り上がりが見られるが、これらは 1993 年釧路沖地震や 1978 年宮城県沖地震などの記録によるものである。これら 2つの地震では全般に大きな振幅が記録されており、他の地震に比べて震源からより強い地震波が放出されたものと考えられる。

地盤の非線形性の影響があるとすれば、軟弱な地盤でより明瞭にみられるはずである。そこで、観測点を深さ 30m までの地盤の平均 S 波速度(AVS30)の大きさで分類してバラツキの傾向を整理した。図9は、AVS30 が 100~300m/s, 300~600m/s, 600m/s~の3グループに分類して、最大加速度および最大速度のバラツキについて、振幅のレベルとの相関を示したものである。最大加速度の場合、軟弱な地盤のグループ(AVS30=100~300m/s)では他のグループに比べてバラツキが小さくなっている。しかし、最大速度の場合には3グループとも同様の大きさのバラツキを示している。

これらのことから、最大加速度については軟弱な地盤で地盤の非線形性によりバラツキが小さくなった可能性があるが、最大速度についてはその可能性は低いものと考えられる。また、図7に示した最大加速度と最大速度のバラツキの振幅依存性に大きな違いがみられないことから、地盤の非線形性の影響だけでバラツキの振幅依存性を説明することは困難と考えられる。

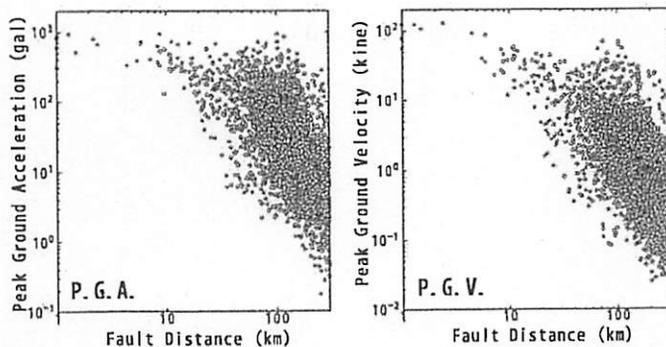


図8 用いたデータの最大振幅と距離の関係

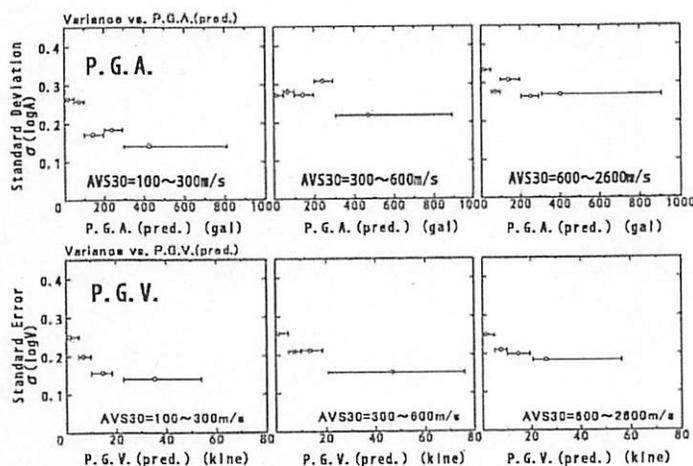


図9 地盤分類毎の振幅レベルとバラツキの関係

4.5 議論

これまでバラツキの要因について列挙してきた。これらで要因のすべてを網羅できている保証はないが、これまでの検討結果を参考にして、全バラツキ(σ)を説明するための簡単なモデルについて考える。震源特性の影響のうち、4.1の a1)についての検討から、地震間のバラツキ(σ_{INTER})を応力降下量のバラツキである程度説明できるものと考えることができる。ただし、本研究では日本各地で発生した地震による記録を用いているため、地震間のバラツキには地域による伝播経路の減衰特性の違いも結果的に含まれているものと推測される。本研究ではバラツキの M 依存性は米国の記録などに基づく既往の結果に比べて明瞭でなかったが、本研究で用いたデータでは M の大きい地震では、距離の小さな記録の割合が少なくなっており、伝播経路の減衰特性の違いが現れやすくなってバラツキが増えて、M 依存性が現れにくくなったという説明も可能であろう。

本研究で用いた記録は距離が 100km 前後のものが多数を占めるので、4.2 の伝播経路についての検討結果を参考にして伝播経路のバラツキの影響は概略 0.1 程度であると判断すると、0.15 程度と得られたみかけ上の地震間のバラツキのうち、応力降下量のバラツキなどの影響($\sigma_{\text{INTER-S}}$)は 0.1 程度とみなせるかもしれない。 $\sigma_{\text{INTER-S}}$ の M 依存性の問題もあるが、ここでは、簡単のため、以下のように与える。

$$\sigma_{\text{INTER-S}} = 0.1 \quad \dots (6)$$

地震内のバラツキ(σ_{INTRA})については、震源特性についての 4.1 の a2)の検討から、震源の破壊伝播の影響と放射特性の影響により地震内のバラツキが生じ、その大きさは比較的小さいものと考えられる。その値($\sigma_{\text{INTRA-S}}$)については、4.1 で示した小山の式¹⁷⁾からの破壊伝播の影響による値は 0.1 前後であるが、距離が離れるとその影響が弱まること²¹⁾を考慮して、やや小さめではあるが、0.05 とする。

$$\sigma_{\text{INTRA-S}} = 0.05 \quad \dots (7)$$

4.2 の伝播特性の影響についての検討から、伝播経路での地震波の散乱による影響と減衰構造の違いによる影響により、地震内のバラツキは距離とともに急増し、ある距離より大きくなると距離とともに微増する傾向になるものと考えることができる。この値($\sigma_{\text{INTRA-P}}$)を以下のように仮定する。

$$\sigma_{\text{INTRA-P}} = \begin{cases} ((\alpha X)^2 + (0.001X)^2)^{0.5} & (X \leq 40\text{km}) \\ ((44\alpha - 0.1\alpha X)^2 + (0.001X)^2)^{0.5} & (X > 40\text{km}) \end{cases} \quad \dots (8)$$

式の第 1 項が散乱による影響で、その関数型は 4.2 で示したランダム媒体での散乱に関する研究結果²⁶⁾を参考にして、距離が 40km までは距離とともに増大し、それ以上の距離では距離とともに徐々に小さくなるものを仮定した。係数 α の大きさは媒体のランダムさによるが、実際の伝播経路での媒体のランダムさについては不明な点が多く、係数 α の大きさを決めるための材料はほとんどない。第 2 項は減衰構造による影響で、既往の研究結果^{27),28)}を参考にして 4.2 で概算した値に基づいて与えた。

4.3 の地盤特性の影響についての検討から、観測点付近の散乱による影響で 0.1 弱、各観測点の地盤特性の違いで 0.1 強の値をとり、両者を合計して 0.15 程度の値をとるものと概算される。前者は地震動固有のバラツキであり、後者は地盤特性の違いを考慮することにより取り除くことが可能なバラツキである。そこで、このバラツキの値($\sigma_{\text{INTRA-G}}$)を以下のように与える。なお、4.4 の地盤の非線形性の影響については、ここでは簡単のため省略する。

$$\sigma_{\text{INTRA-G}} = (0.08^2 + 0.12^2)^{0.5} = 0.14 \quad \dots (9)$$

全バラツキ(σ)は地震間のバラツキ(σ_{INTER})と地震内のバラツキ(σ_{INTRA})の和で表される。地震間の

バラツキ(σ_{INTER})が(6)式で、地震内のバラツキ(σ_{INTRA})が(7)~(9)式の和で近似でき、これらのバラツキが独立だとすれば、全バラツキ(σ)は以下の式で表される。

$$\sigma = (\sigma_{\text{INTER}}^2 + \sigma_{\text{INTRA}}^2)^{0.5} = (\sigma_{\text{INTER-S}}^2 + \sigma_{\text{INTRA-S}}^2 + \sigma_{\text{INTRA-P}}^2 + \sigma_{\text{INTRA-G}}^2)^{0.5} \quad \dots (10)$$

ここで、距離が0では、 $\sigma_{\text{INTRA-P}}$ は0となり、 σ は0.18となる。これは、図6に示した近距離での記録のバラツキの値とほぼ一致し、距離が非常に近い場合のバラツキをここで与えた $\sigma_{\text{INTER-S}}$ や $\sigma_{\text{INTRA-S}}$ 、 $\sigma_{\text{INTRA-G}}$ でおおむね説明できることを示唆している。距離が大きいところでは、図6からバラツキは0.3程度と大きいので、 $\sigma_{\text{INTRA-P}}$ が支配的であることが推察される。 $\sigma_{\text{INTRA-P}}$ については、(8)式の α を決める材料がないので定量的な評価が困難ではあるが、仮に α を0.004とすると、(10)式から得られる値は図6の点線のようになる。この値は、データにみられるバラツキの距離依存性をほぼ説明しており、バラツキの距離依存性が伝播経路での散乱や減衰の影響で説明が可能であることを示している。

いままでの議論には、いくつかの仮定や簡略化が含まれており、定量的には今後さらに検討を加える必要がある。しかしながら、定性的には、バラツキのM依存性については、その要因のひとつとして震源の応力降下量のバラツキのM依存性があげられること、バラツキの距離依存性については、伝播経路での散乱や減衰の影響で説明が可能であること、が指摘できる。最後にバラツキの振幅依存性について簡単に議論する。前述のように、Mが大きくなればバラツキは小さくなる傾向があり、距離が小さくなればバラツキが小さくなる傾向がある。そこで、振幅が大きいということはMが大きく距離が小さいということであるから、両者の相乗効果で、バラツキに強い振幅依存性が生ずることは定性的に説明できる。また、補足的な説明として、地盤の増幅度が高い観測点での記録を振幅が大きい記録として結果的に選択している可能性があり、これにより、振幅が大きい場合には地盤特性のバラツキがより小さくなっている可能性も考えられる。結局、これらの影響が重なり合って、バラツキの振幅依存性が顕著にみられたものと説明できる。

5. 結 論

日本各地で得られた強震記録に基づいて提案された地震動強さの距離減衰式を用いて、水平最大加速度および速度の距離減衰式にみられるバラツキの特性について検討した。距離減衰式に対する元データのバラツキとマグニチュード、震源距離、振幅レベルとの関係を整理した。その結果、マグニチュードが大きくなる程、距離が小さくなる程、振幅が大きくなる程、バラツキが小さくなる傾向がみられ、これらのうちで振幅レベルとの相関が最も強いことを示した。その要因について検討し、距離依存性は伝播経路での地震波の散乱や減衰の影響で、振幅依存性は距離依存性やM依存性などの相乗効果の結果で、説明が可能であることを指摘した。

謝辞

本研究で用いた強震記録は、防災科学技術研究所をはじめとする多数の機関により観測されたものです。また、東京工業大学盛川仁助教授から貴重な助言をいただいた。

参考文献

- 1) Fukushima, Y. and T. Tanaka : A New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.80, 1990, pp.757-783.
- 2) 安中 正・山崎文雄・片平冬樹：気象庁 87 型強震計を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案，第 24 回地震工学研究発表会講演論文集，1997 年，pp.161-164.
- 3) 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，No.523, 1999 年，pp.63-70.

- 4) Joyner, W.B. and D.M. Boore : Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong-Motion Records Including Records from the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.71, 1981, pp.2011-2038.
- 5) Abrahamson, N.A. and K.M. Shedlock : Overview, Seism. Res. Lett., Vol.68, 1997, pp.9-23.
- 6) Donovan, N.C. and A.E. Bornstein : Uncertainties in Seismic Risk Procedures, Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 104, 1978, pp.869-887.
- 7) Campbell, K.W. and Y. Bozorgnia : Near-Source Attenuation of Peak Horizontal Acceleration from Worldwide Accelerograms Recorded from 1957 to 1993, Proc. Fifth U.S. National Conf. on Earthquake Engineering, Vol.3, 1994, pp.283-292.
- 8) Idriss, I.M. : Evaluating seismic risk in engineering practice, Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 1985, pp.255-320.
- 9) Youngs, R.R., N. Abrahamson, F.I. Mkdisi, and K. Sadigh : Magnitude Dependence Variance of Peak Ground Acceleration, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 85, 1995, pp.1161-1176.
- 10) Douglas, J. and P. M. Smit : How Accurate Can Strong Ground Motion Attenuation Relations be ?, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.91, 2001, pp.1917-1923.
- 11) 翠川三郎・大竹 雄 : 震源深さによる距離減衰特性の違いを考慮した地震動最大加速度・最大速度の距離減衰式, 第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集(CD-ROM), 2002 年, 論文番号 117.
- 12) Midorikawa, S., M. Matsuoka and K. Sakugawa : Site Effects on Strong-Motion Records Observed During The 1987 Chiba-ken-toho-oki, Japan Earthquake, 第 9 回日本地震工学シンポジウム論文集, 1994, pp.E085-E090.
- 13) Youngs R.R., S.J. Chiou, W.J. Silva and J.R. Humphrey : Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes, Seism. Res. Lett., Vol.68 , 1997, pp.58-73.
- 14) Campbell, K.W. : Empirical Near-Source Attenuation Relationships for Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity and Pseudo-Absolute Acceleration Response Spectra, Seism. Res. Lett., Vol.68 , 1997, pp.154-179.
- 15) Abrahamson, N.A. and W.J. Silva : Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes, Seism. Res. Lett., Vol.68, 1997, pp.94-127.
- 16) 壇一男・ほか : 断層の非一様すべり破壊モデルから算定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, 第 545 号, 2001 年, pp.51-62.
- 17) 小山順二 : 短周期地震波の方位依存性, 地震, 第 2 輯, 第 40 巻, 1987 年, pp.397-404.
- 18) 司 宏俊・翠川三郎 : 統計的グリーン関数法に基づく地震動最大振幅に対する破壊伝播効果による方位依存性の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 546 号, 2001 年, pp.47-53.
- 19) 内山泰生・欄木龍大 : 経験的震源モデルと統計的グリーン関数法を用いた地震動距離減衰特性, 日本建築学会大会学術講演概要集, 2001 年, pp.59-60.
- 20) Somerville, P. et al.: Modification of Empirical Strong Motion Attenuation Relations to Include the Amplitude and Duration Effects of Rupture Directivity, Seism. Res. Lett., Vol.68, 1997, pp.199-222.
- 21) 大野 晋・武村雅之・小林義尚 : 観測記録から求めた震源近傍における強震動の方向性, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.1, 1998 年, pp.133-138.
- 22) Satoh, T. : Empirical Frequency-Dependent Radiation Pattern of the 1998 Miyagiken-Nanbu Earthquake in Japan, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.92, 2002, pp.1032-1039.
- 23) 松島信一・佐藤俊明 : 強震動のラディエーションパターン特性の周期・時間依存性について, 日本建築学会大会学術講演概要集, 2002 年, pp.141-142.
- 24) 大堀道広・ほか : 高周波数帯域(1Hz 以上)での S 波放射特性の確認, 日本建築学会大会学術講演概要集, 2002 年, pp.143-144.

- 25) 加藤研一：観測記録に基づく伝播経路の減衰評価，第 27 回地盤震動シンポジウム資料集，1999 年，pp.17-28.
- 26) 干場充之：速度構造の小さな揺らぎによる最大振幅の大きな揺らぎ，地球惑星科学関連学会 1997 年合同大会予稿集，1997 年，B41-P02.
- 27) 中村亮一・植竹富一：加速度強震計記録を用いた日本列島下の三次元減衰構造トモグラフィ，地震，Vol.54，2002 年，pp.475-488.
- 28) 田居優・ほか：JMA87 型記録による震源，伝播，サイトの地域特性の検討，第 9 回日本地震工学シンポジウム，1994 年，pp.751-756
- 29) McCann, M.W. and D.M. Boore : Variability in Ground Motions: Root Mean Square Acceleration and Peak Acceleration for the 1971 San Fernando, California, Earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.73, 1983, pp.615-632.
- 30) Abrahamson, N.A. : Statistical Properties of Peak Ground Accelerations Recorded by the SMART 1 Array, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.78, 1988, pp.26-41.
- 31) Rodriguez, V.H.S. and S. Midorikawa: Applicability of the H/V Spectral Ratio of Microtremors in Assessing Site Effects on Seismic Motion, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.31, 2002, pp.261-279.

(受理：2002 年 9 月 7 日)

(掲載決定：2003 年 1 月 7 日)

Empirical Analysis of Variance of Ground Motion Intensity in Attenuation Relationships

MIDORIKAWA Saburoh¹⁾ and OHTAKE Yu²⁾

1) Member, Professor, Department of Built Environment, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

2) Graduate Student, Department of Built Environment, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Ms. Eng. (Currently Engineer, CTI Engineering Co., Ltd.)

ABSTRACT

The variance of peak horizontal accelerations and velocities of the Japanese strong-motion data set is examined. The standard errors of the data from the empirical attenuation relationships are calculated. The standard error decreases with increasing magnitude, with decreasing the distance, and with increasing the amplitude. The amplitude dependence of the error seems much stronger than the magnitude and distance dependences. The distance dependence can be caused by the effects of scattering and absorption of seismic waves in the path. The strong amplitude dependence can be interpreted by multiplying of the effects of the magnitude and distance dependences.

Key Words: Attenuation Relationship, Variance, Magnitude Dependence, Distance Dependence, Amplitude Dependence