

海溝性地震を対象とした地震動強さの 距離減衰特性の地域性に関する検討

片岡正次郎¹・佐藤智美²

¹正会員 博（工） 国土技術政策総合研究所地震防災研究室（〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地）

²正会員 博（工） 大崎総合研究所地震動部（〒100-0011 東京都千代田区内幸町2-2-2富国生命ビル）

1. はじめに

同じマグニチュードの地震でも、発生地域によって地震動強さが異なることが指摘されている。その原因としては、伝播経路の違いのほか、震源特性、特に断層面から放射される短周期波動エネルギーの違いが挙げられる。後者について、著者らはスペクトルインバージョンにより加速度震源スペクトルの短周期レベル（以下、単に短周期レベルとよぶ）を推定し、それをパラメータとした地震動強さ（最大加速度、最大速度、SI値、計測震度、加速度応答スペクトル）の距離減衰式を作成することにより、短周期レベルが地域や地震のタイプによりどう異なるか、また短周期レベルの違いにより地震動強さがどのように影響を受けるかを明らかにした¹⁾。しかし、この研究では全国で得られた強震記録をまとめて回帰分析を行っており、短周期レベル以外の震源特性や伝播経路の地域性が地震動強さの距離減衰特性に与える影響については検討されていない。

本稿では、海溝性地震を東日本、西日本、日本海東縁の3地域に分類し、地域ごとの距離減衰式を作成することにより、上記の検討を行った結果を示す。距離減衰式としては、文献1)と同様、震源深さをパラメータとする式と、加速度震源スペクトルの短周期レベルをパラメータとする式の2種類を作成した。

2. データ

(1) 強震記録

距離減衰式の作成には、日本周辺で発生した1978年6月～2003年9月の海溝性地震で得られた強震記録

から、文献1)と同様の条件に従って選択したデータを用いた。これらの強震記録が得られた全地震の震央位置（気象庁による）とメカニズム解（Harvard大学、防災科学技術研究所による）を図-1に示す。表-1に地震タイプと地域別の地震数と波形数を、図-2に強震記録が得られた地震のモーメントマグニチュード M_w と断層面最短距離 X [km]との関係を示す。ここで、 X は断層モデルが提案されている地震（文献1）表-2）はその断層面からの最短距離、他の地震は気象庁発表の震源からの距離である。

(2) 地盤の分類

文献1)と同様、距離減衰式の地盤補正係数を算出するため、地盤条件に応じて観測点を分類した。各観測点でのPS検層データから地盤の特性値（基本固有周期）を計算し、I種、II種、III種の地盤種別に分類した。また、深さ20[m]までのPS検層データにS波速度 V_s が600～800[m/s]の範囲にある層があり、その最上層上面から地表までの地盤の特性値が0.05[s]以下となるような観測点を工学的基盤の観測点とした。

3. 距離減衰式の作成

(1) 地震動強さの指標

2. で記述したデータセットの最大加速度 PGA [cm/s²]、最大速度 PGV [cm/s]、SI値 SI [cm/s]、計測震度 I 、減衰定数5%の加速度応答スペクトル $S_d(T)$ [cm/s²]を計算し、それらを地震動強さの指標とする距離減衰式を作成した。 PGA と PGV は水平2成分合成の最大値、SI値は水平2成分それぞれの観測記

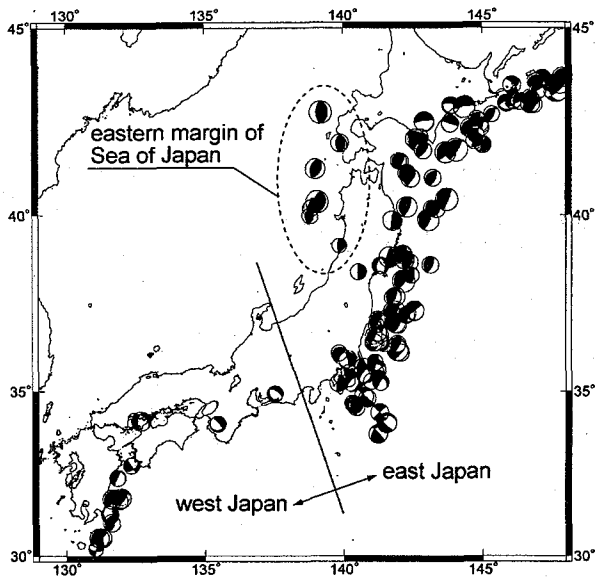


図-1 距離減衰式の作成に用いた地震（1978年6月～2003年9月）の震央位置とメカニズム解

表-1 距離減衰式の作成に用いた地震、観測点、波形の数

	東日本	西日本	日本海東縁
地震数	114	14	8
観測点数	476	456	43
波形数	3842	1710	118

録に対する一自由度系の速度応答波形(減衰定数20%)を計算し、この応答波形の水平2成分合成の最大値を取ったものを $S_V(T)$ [cm/s] として次式で計算した。

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} S_V(T) dT \quad (1)$$

ここで T は一自由度系の非減衰固有周期[s]である。

計測震度は水平2成分のみから計算した値を用いる。また、加速度応答スペクトルは水平2成分それぞれの観測記録に対する一自由度系の加速度応答波形(減衰定数5%)を計算し、この応答波形の水平2成分合成の最大値を取ったものを $S_A(T)$ [cm/s²] として $T=0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0$ [s] の18ポイントで計算した。

(2) 回帰モデル

これらの指標を、文献1)で推定した短周期レベル A をパラメータとした場合と、震源深さ D [km] をパラメータとした場合について、それぞれ式(2)、式(3)でモデル化し、ダミー係数を用いた二段階回帰分析手法^{1), 3)}で回帰分析を行った。これらの式で

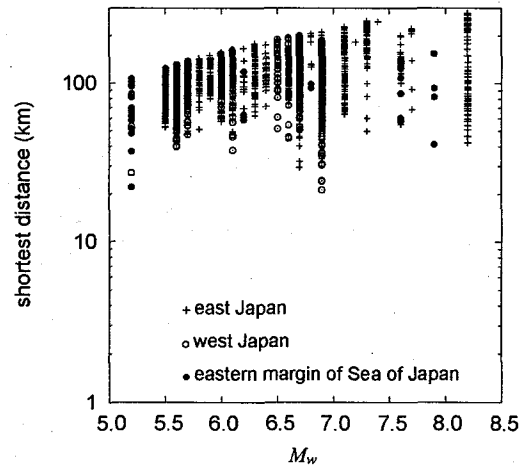


図-2 強震記録が得られた地震のモーメントマグニチュード M_w と断層面最短距離との関係（文献1) 図-2(b) と同一）

は地震動強さの指標を Y で代表させるが、計測震度 I については $I = \log_{10} Y$ である。

$$\log_{10} Y_{ij} = a_1 M_w + a_2 \log_{10} A - bX + c_0 \quad (2)$$

$$- \log_{10}(X + d \cdot 10^{0.5M_w}) + c_j \pm e$$

$$\log_{10} Y_{ij} = a_1 M_w + a_2 D - bX + c_0 \quad (3)$$

$$- \log_{10}(X + d \cdot 10^{0.5M_w}) + c_j \pm e$$

ここで、 X は断層面最短距離[km]、 Y_{ij} は i 番目の地震の j 番目の観測点における地震動強さ、 c_j は j 番目の観測点の地点補正值、 e は標準偏差である。回帰係数 a_1, a_2, b, c_0, c_k, d は、加速度応答スペクトルを対象とする場合は固有周期 T ごとに求められるものである。係数 d としては、グリッドサーチで求めた最適値¹⁾をモデルにかかわらず全地域で採用した。また、ここで得られる地点補正值 c_j から I 種、II 種、III 種地盤と工学的基盤の地盤補正係数を算出した¹⁾。

4. 作成した距離減衰式の特徴

(1) 回帰係数

上記の手順で作成した距離減衰式の回帰係数と回帰誤差を、 $S_A(T)$ 以外の4つの指標について表-2に示す。また、 $S_A(T)$ の回帰係数を図-3と図-4に示す。マグニチュード依存性を示す係数 a_1 についてみると、全国を対象とした場合¹⁾と同様に、短周期レベル A をパラメータとした場合はそうでない場合と比較してかなり小さい値となっており、特に短周期成分の

表-2 距離減衰式の回帰係数と地震内誤差(e_{INTRA}), 地震間誤差(e_{INTER}), 全体誤差(e_{TOTAL})

(a) 東日本の海溝性地震 (M_w, X, A をパラメータとした場合)

	a_1	a_2	b	c_0	d	e_{INTRA}	e_{INTER}	e_{TOTAL}
PGA	-0.086	0.935	0.00502	-13.10	0.0065	0.157	0.112	0.193
PGV	0.041	0.864	0.00431	-13.77	0.0053	0.154	0.087	0.177
SI	0.022	0.866	0.00411	-13.65	0.0050	0.152	0.086	0.175
I	-0.092	1.75	0.0111	-26.26	0.0024	0.293	0.169	0.339

(b) 東日本の海溝性地震 (M_w, X, D をパラメータとした場合)

	a_1	a_2	b	c_0	d	e_{INTRA}	e_{INTER}	e_{TOTAL}
PGA	0.548	0.00735	0.00502	0.35	0.0065	0.157	0.175	0.235
PGV	0.626	0.00623	0.00431	-1.31	0.0053	0.154	0.156	0.219
SI	0.608	0.00605	0.00411	-1.14	0.0050	0.152	0.158	0.219
I	1.092	0.0128	0.0111	-1.03	0.0024	0.293	0.311	0.428

(c) 西日本の海溝性地震 (M_w, X, A をパラメータとした場合)

	a_1	a_2	b	c_0	d	e_{INTRA}	e_{INTER}	e_{TOTAL}
PGA	-0.094	1.04	0.00648	-15.21	0.0065	0.125	0.042	0.132
PGV	0.142	0.784	0.00436	-13.21	0.0053	0.129	0.060	0.142
SI	0.158	0.749	0.00432	-12.57	0.0050	0.127	0.057	0.139
I	0.098	1.70	0.0131	-26.94	0.0024	0.265	0.018	0.266

(d) 西日本の海溝性地震 (M_w, X, D をパラメータとした場合)

	a_1	a_2	b	c_0	d	e_{INTRA}	e_{INTER}	e_{TOTAL}
PGA	0.534	0.00532	0.00648	0.73	0.0065	0.125	0.110	0.166
PGV	0.628	-0.00044	0.00436	-1.11	0.0053	0.129	0.098	0.162
SI	0.624	-0.00102	0.00432	-0.98	0.0050	0.127	0.094	0.158
I	1.148	-0.0004	0.0131	-0.63	0.0024	0.265	0.198	0.331

(e) 日本海東縁の海溝性地震 (M_w, X, A をパラメータとした場合)

	a_1	a_2	b	c_0	d	e_{INTRA}	e_{INTER}	e_{TOTAL}
PGA	-0.053	0.588	0.00167	-7.32	0.0065	0.035	0.092	0.098
PGV	-0.012	0.557	0.00196	-8.21	0.0053	0.041	0.106	0.114
SI	-0.146	0.722	0.00214	-10.47	0.0050	0.045	0.103	0.112
I	0.024	0.979	0.00608	-13.43	0.0024	0.083	0.183	0.201

(f) 日本海東縁の海溝性地震 (M_w, X, D をパラメータとした場合)

	a_1	a_2	b	c_0	d	e_{INTRA}	e_{INTER}	e_{TOTAL}
PGA	0.469	-0.00014	0.00167	0.86	0.0065	0.035	0.106	0.112
PGV	0.485	-0.00157	0.00196	-0.44	0.0053	0.041	0.117	0.124
SI	0.494	0.00131	0.00214	-0.45	0.0050	0.045	0.122	0.130
I	1.077	-0.0053	0.00608	-0.83	0.0024	0.083	0.294	0.306

影響が大きい PGA や I についてはその傾向が顕著である。これらの指標については a_2 の値が大きく、短周期レベルに依存する度合いが強い。ただし、日本海東縁の地震については、他と比較して短周期レベル依存性は小さい。図-3で日本海東縁の地震の a_1 と a_2 をみると、固有周期1~4秒で a_1 が小さく、 a_2 が大きくなっており、他の地域や理論的に推測される傾向とは異なっている。図には示していないが、距離減衰式のばらつきをみると、この周期帯のみ地震内誤差、地震間誤差とも他の周期の倍程度となっている。日本海東縁と分類した地震、地域の中でも震

源特性や伝播特性がそれぞれ異なっていることが原因と考えられるが、今後さらに詳細な検討が必要である。

震源深さ依存性は東日本の地震では全ての指標、西日本の地震ではPGAについて見られるものの、その他では顕著ではない。

二段階回帰分析の一段階目で計算される b は、前述のように係数 d をモデルで共通にしているため、 A をパラメータとするか否かでは変わらない。一方、地域によってはかなり異なり、特に日本海東縁の地震で全体的に小さいほか、西日本のPGAでは大きい。

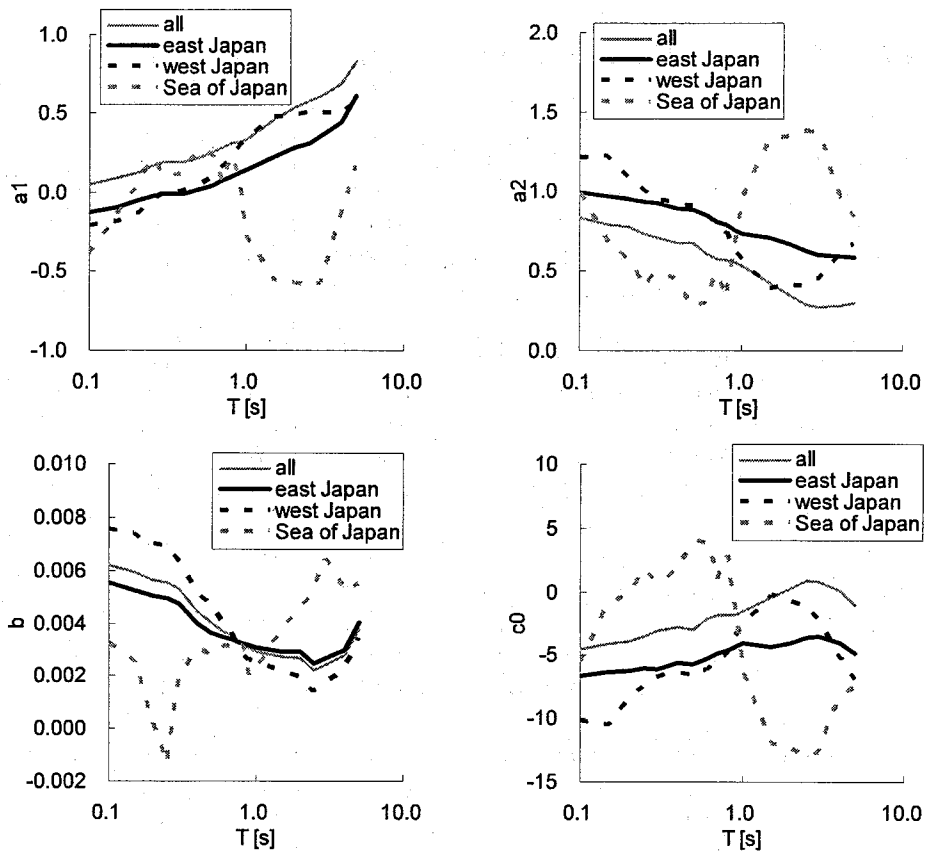


図-3 加速度応答スペクトルの距離減衰式の回帰係数 (M_w, X, A をパラメータとした場合)

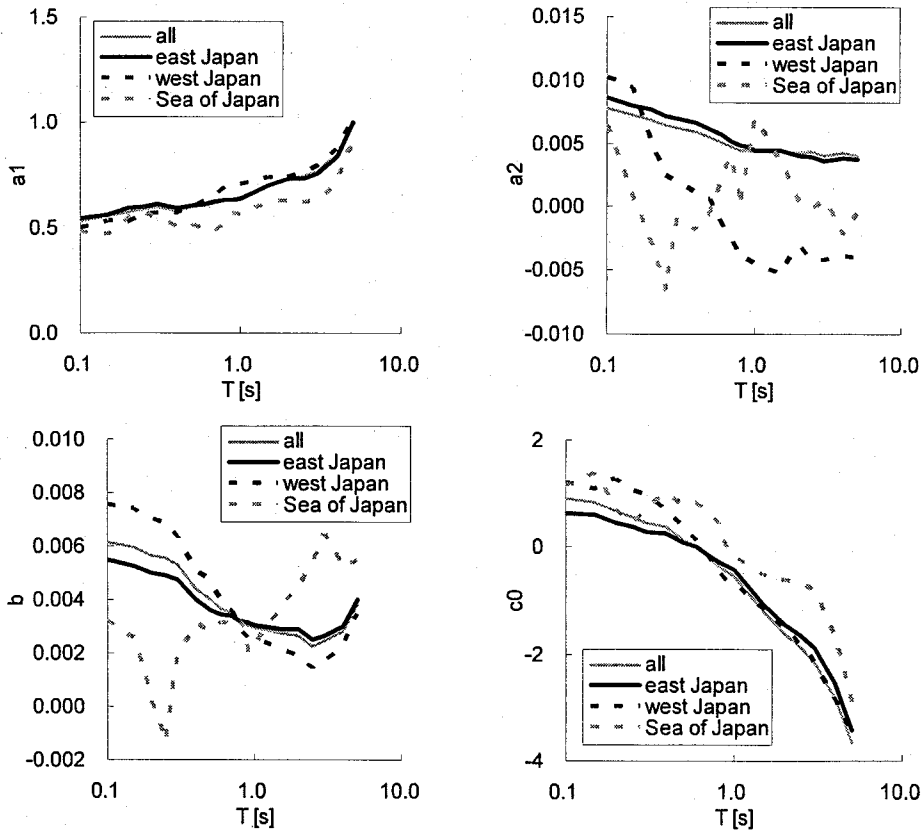


図-4 加速度応答スペクトルの距離減衰式の回帰係数 (M_w, X, D をパラメータとした場合)

表-3 距離減衰式の地盤補正係数 (括弧内は標準偏差)

(a) 東日本の海溝性地震				
	I種地盤	II種地盤	III種地盤	工学的基盤
PGA	1.00 (0.36)	0.94 (0.32)	1.08 (0.31)	0.86 (0.24)
PGV	0.89 (0.23)	1.04 (0.20)	1.59 (0.22)	0.62 (0.21)
SI	0.87 (0.23)	1.05 (0.21)	1.68 (0.22)	0.63 (0.21)
I	-0.10 (0.53)	0.04 (0.48)	0.36 (0.45)	-0.37 (0.39)
(b) 西日本の海溝性地震				
	I種地盤	II種地盤	III種地盤	工学的基盤
PGA	0.97 (0.28)	1.11 (0.33)	1.13 (0.21)	0.62 (0.22)
PGV	0.94 (0.27)	1.22 (0.31)	1.59 (0.23)	0.69 (0.23)
SI	0.94 (0.27)	1.24 (0.32)	1.60 (0.21)	0.70 (0.25)
I	-0.06 (0.54)	0.20 (0.66)	0.33 (0.35)	-0.40 (0.51)
(c) 日本海東縁の海溝性地震				
	I種地盤	II種地盤		工学的基盤
PGA	0.92 (0.31)	1.85 (0.30)		0.99 (0.57)
PGV	0.85 (0.32)	1.88 (0.43)		0.69 (0.44)
SI	0.85 (0.30)	1.84 (0.41)		0.78 (0.42)
I	-0.09 (0.55)	0.73 (0.74)		-0.08 (0.83)

(2) 距離減衰式のばらつき

表-3において回帰誤差を比較すると、二段階回帰分析の一段階目で計算される地震内誤差 e_{INTRA} は、 A をパラメータとしても変わらない。一方、 A をパラメータとした場合には次式で計算される地震間誤差 e_{INTER} が大幅に小さくなっていることが分かる。

$$e_{TOTAL} = \sqrt{e_{INTRA}^2 + e_{INTER}^2} \quad (4)$$

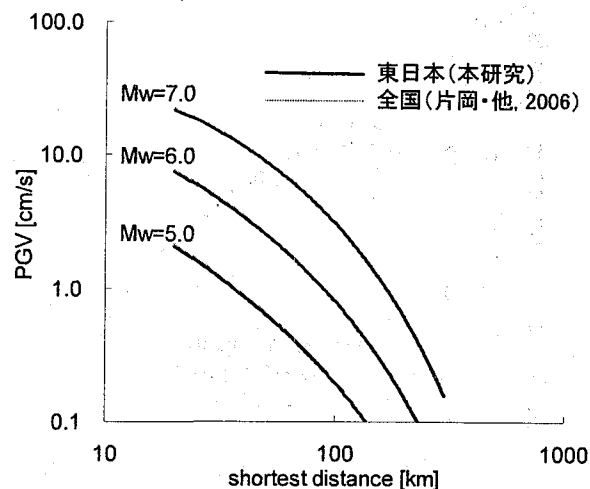
そのため、全体誤差 e_{TOTAL} も A をパラメータとした場合の方が小さい。また、回帰分析に用いた地震、観測点、波形の数が地域によって大きく異なるため単純な比較はできないが、東日本、西日本、日本海東縁の順にばらつきが大きいことが分かる。

(3) 地盤補正係数

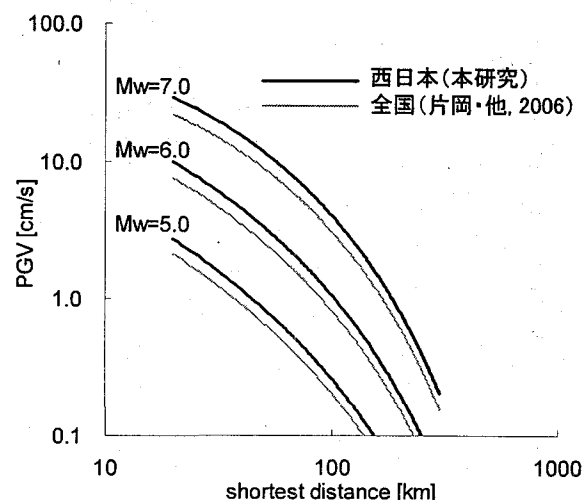
震源深さをパラメータとした場合の地盤補正係数を表-3に示す。日本海東縁の海溝性地震については、用いた強震記録にIII種地盤の観測点で得られたものがないため、地盤補正係数が得られていない。全国を対象にした場合¹⁾と同様、工学的基盤の地盤補正係数はどの指標に対しても他よりかなり小さく、PGAに対する地盤補正係数はあまり地盤種別による違いがないが、それ以外の指標についてはI種、II種、III種の順に地盤補正係数は大きくなっていく傾向がある。

(4) 推定される地震動強さ

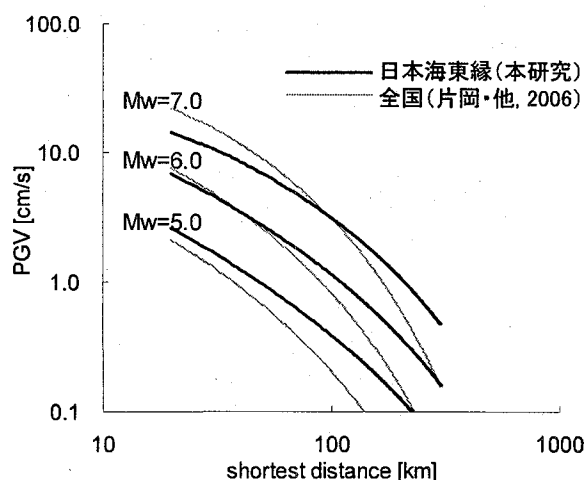
震源深さをパラメータとする距離減衰式 (式(3)) をもとに、表-3の地盤補正係数により、I種地盤に



(a) 全国と東日本の海溝性地震

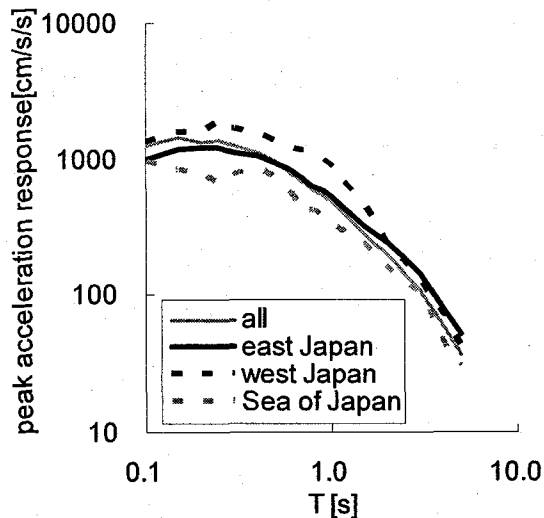


(b) 全国と西日本の海溝性地震

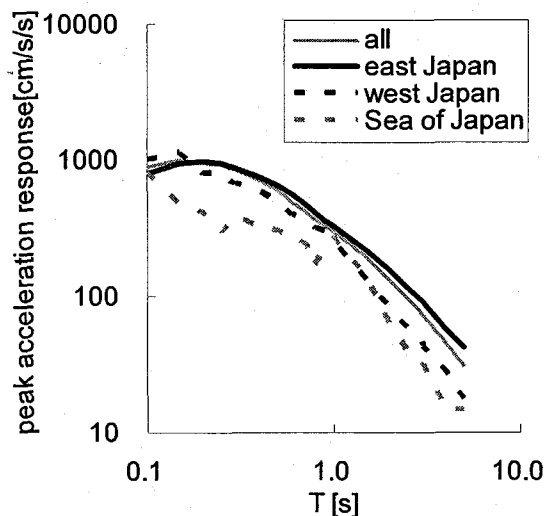


(c) 全国と日本海東縁の海溝性地震

図-5 PGVを指標とする距離減衰曲線の比較 (D=20[km])



(a) $M_w=8.0$, $D=20[\text{km}]$, $X=30[\text{km}]$



(b) $M_w=8.0$, $D=60[\text{km}]$, $X=80[\text{km}]$

図-6 距離減衰式により推定される加速度応答スペクトル (I種地盤) の比較

おける地震動強さに補正したPGVの距離減衰曲線を描いたものが図-5である。震源深さは20[km]としている。

図から、同じマグニチュードと距離でも推定される地震動強さが地域によってかなり異なることが分かる。全国と東日本を対象とした距離減衰曲線はほぼ一致しているが、これは全国の海溝性地震を対象とした距離減衰式を作成する際のデータセットのうち6割以上が東日本の地震によって得られた記録で

あることによる。また、前述のように、日本海東縁の地震は他の地域の地震よりも距離による減衰の程度がかなり小さいことが分かる。

同様に、震源深さをパラメータとする距離減衰式で推定される加速度応答スペクトルを比較したものを図-6に示すが、地域によってかなり異なる結果となっている。

5. まとめ

海溝性地震を地域によって分類し、東日本、西日本、日本海東縁の地震を対象とした距離減衰式を作成することにより、地域による距離減衰特性の違いが明らかとなった。ただし、特に日本海東縁についてはデータが必ずしも十分ではなく、また地震ごとに特性が大きく異なっている可能性もあるため、今後さらに検討が必要である。

謝辞：本研究では、関西地震観測研究協議会、(独) 建築研究所、(財) 電力中央研究所、東京電力・他11社電力共通研究、(社) 日本建築学会、(独) 防災科学技術研究所 (K-NET, KiK-net)、北海道開発局、横浜市 (以上五十音順) 並びに旧建設省土木研究所と国土交通省国土技術政策総合研究所が観測・収集した強震記録を使用した。記して謝意を表する次第である。本研究の一部は、原子力委員会の評価に基づき、文部科学省原子力試験研究費により実施された。

参考文献

- 1) 片岡正次郎, 佐藤智美, 松本俊輔, 日下部毅明: 短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式, 土木学会論文集A, Vol. 62, No. 4, pp. 740-757, 2006.
- 2) 福島美光, 田中貞二: 新しいデータベースを用いた最大加速度の距離減衰式の改訂, 日本地震学会講演予稿集, No. 2, p. 116, 1992.
- 3) 佐藤俊明, 宮腰淳一, 佐藤智美, 渡辺孝英, 植竹富一, 田中英朗: 気象庁87型電磁式強震計記録の応答スペクトルの統計解析による各地気象台のやや長周期帯域(周期1~10秒)の揺れやすさ係数について, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.607-612, 1994.