



東北日本の異常震域に対応するための距離減衰式の補正係数

森川信之¹⁾、神野達夫²⁾、成田章³⁾、藤原広行⁴⁾、福島美光⁵⁾

1) 正会員 防災科学技術研究所、特別研究員 博士 (理学)

e-mail : morikawa@bosai.go.jp

2) 正会員 防災科学技術研究所、特別研究員 博士 (工学) (現在、広島大学大学院工学研究科、助手)

e-mail : tkanno@hiroshima-u.ac.jp

3) 三菱スペース・ソフトウェア

e-mail : anarita@mi.mss.co.jp

4) 正会員 防災科学技術研究所、主任研究員 理博

e-mail : fujiwara@bosai.go.jp

5) 清水建設和泉研究室、主任研究員 博士 (工学)

e-mail : yf@ori.shimz.co.jp

要 約

異常震域が現れる、やや深発地震を対象とした地震動の最大振幅の予測を経験的手法によって行う上で、距離減衰式に対して補正係数を導入することを提案する。ここでは、東北日本（東北及び北海道地方）を対象として、司・翠川（1999）による最大加速度、最大速度の距離減衰式を基準に、(1) 太平洋側と日本海側の地震動強さの違いに対応する係数、

(2) 遠方の地域まで地震波があまり減衰せずに伝わることに対応する係数、の二種類の補正係数を求めた。これらは、いずれもプレート沈み込み帯における特異な減衰 (Q) 構造に起因する伝播経路特性の地域性を補正するものである。ここで求めた新たな補正係数を適用することにより、やや深発地震を対象とした経験的手法による地震動予測において、非常に広域にわたって最大加速度及び最大速度の予測値の精度が大幅に向上する。

キーワード： 異常震域、距離減衰式、やや深発地震

1. はじめに

1993 年釧路沖地震 (Mw=7.6、震源の深さ 101km) の発生によって、地震防災対策において浅い地震のみではなく、震源の深さが 100km 程度までのやや深発地震 (スラブ内地震) も考慮する必要性が高まってきている。やや深発地震は浅い地震と比べて震源から高周波数地震波が強く放出されるという震源特性の違いが示されており^{例えば、1), 2)}、また、異常震域が現れることが知られている^{例えば、3)}。特に東北日本ではやや深発地震が比較的多く発生しており、それらによって日本海側よりも太平洋側の地域で地震動が大きくなる異常震域が顕著に現れる。異常震域の要因は、定性的にはプレートの沈み込み帯におけ

る上部マントルの特異な減衰 (Q) 構造によって説明されている^{例えば、3)}。すなわち、相対的に Low-Q (地震波が減衰しやすい) 領域である上部マントルに対して、沈み込む海洋プレート (スラブ) が High-Q (地震波が減衰しにくい) 領域であり、スラブ内を伝播する距離が長くなる太平洋側の地域と比べて、日本海側の地域に伝播する地震波エネルギーが Low-Q 領域を通ることで大幅に減衰するために観測される地震動が小さくなるという、伝播経路特性の違いによって異常震域が現れる (図 1)。

現在、地震調査研究推進本部地震調査委員会において、日本全国を概観する地震動予測地図の作成が進められている。地震動予測地図には「確率論的手法による地震動予測地図」と「シナリオ地震による地震動予測地図」の二種類があり、これらを融合して「全国を概観した地震動予測地図」として公開される予定である。このうち、「確率論的手法による地震動予測地図」では、距離減衰式を用いた経験的手法によって地震動強さの予測が行われており、予測の対象としてやや深発地震も含まれている。現時点において、震源特性に関する浅い地震との相違点が考慮されているなどの理由により、司・翠川⁴⁾による距離減衰式が地震動強さの予測に用いられているが、これには異常震域については考慮されていない。他の距離減衰式^{例えば 5)、6)}でも同様であるが、既存の式では、Q が一様である構造 (伝播経路特性) が仮定されているため、地震動の最大振幅分布は地盤条件による増幅を考慮しない限り震央を中心とした同心円状になり、異常震域は現れない。したがって、現状のやや深発地震に対する経験的手法による地震動予測では、太平洋側地域での地震動の過小評価、あるいは日本海側地域での過大評価が生じていると考えられる。近年、防災科学技術研究所の K-NET⁷⁾ 及び KiK-net⁸⁾ によって高密度の強震動観測網が展開され、異常震域が現れる地震に関しても地震動分布が詳細に分かるようになってきている。しかしながら、後述するように Q による減衰の違いを式の形で表現することが現時点においてまだ難しく、異常震域を表すための距離減衰式を直接導出することは困難である。そこで、本稿では異常震域が顕著である東北及び北海道地方を対象として、これらの強震動記録をもとに、司・翠川⁴⁾による距離減衰式において異常震域に対応するための補正係数を導出し、それを用いることによって、経験的手法によるやや深発地震の地震動予測の精度が広域にわたって大きく向上することを示す。

2. データ

ここでは、最大加速度、最大速度の両者について、司・翠川⁴⁾による断層最短距離を用いた式 (以後、基準式と呼ぶ) に対する補正係数を求める。本検討では、K-NET 及び KiK-net の東北地方及び北海道地方の観測点で得られた強震動記録を用いる。なお、基準式では一部 K-NET の記録も用いられているが、異常震域が現れる地震に関しては観測網の展開される以前のもののみである。ここで関東地方を対象外

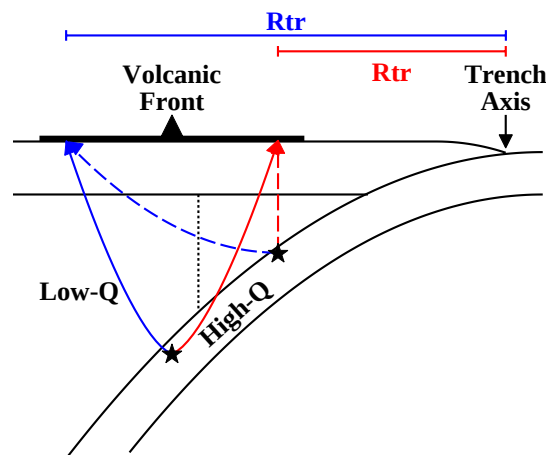


図 1 プレート沈み込み帯における減衰 (Q) 構造の概略図 (海溝軸に垂直な断面)。★は震源を、色付きの矢印は震源から観測点までの模式的な波線を表す。この図は、宇津³⁾に基づいている。

としているのは、この地域が太平洋プレートとフィリピン海プレートの二つのプレートが沈み込む複雑な構造の上に位置しており、図1に示されているような二次元構造を仮定することが妥当ではないと考えられるためである。1997年1月1日から2002年6月30日の間に茨城県沖以北で発生した太平洋プレートの沈み込みに伴う地震（プレート間地震及びスラブ内地震）のうち、 M_{JMA} （気象庁マグニチュード）が5.0以上、震源の深さが30kmから153kmである50地震の記録について解析を行った。なお、震源がやや浅い地震（30kmから60km）も対象に含めているのは、図1のようなQ構造を考えた場合に、太平洋側と日本海側で伝播経路特性が異なる可能性があるためである。震源が浅い地震に関してはプレート間地震とスラブ内地震の両者が存在すると考えられるが、震源の深さや断層面解からどちらのタイプかを断定するのが困難なものもあったため、ここではすべてスラブ内地震として扱っている。ただし、後述するように地震のタイプによる違いが本稿で示す補正係数に影響を及ぼさないように解析を行っている。震央分布を図2に、地震に関する情報を表1にそれぞれ示す。図2には、単純な形でモデル化した海溝軸も示されているが、これは、地震調査研究推進本部地震調査委員会⁹⁾を参考に設定したものであり、後の解析で用いる。最大振幅は水平二成分のうちの大きな値を採用する。最大加速度は地表の観測値を用い、最大速度は加速度記録にカットオフ周波数0.2Hzのローカットフィルターを施した後に積分し、基準式と同様の手法によって評価された地盤増幅率をもとに、工学的基盤上の値に変換したものをを用いる。ここで地盤増幅率(G)は、地表から深さ30mまでの平均S波速度(AVS_{30})をもとに Midorikawa et al.¹⁰⁾による

$$\log G = 1.83 - 0.66 \log AVS_{30} \quad (1)$$

から求められる。ただし、K-NETのように得られている地盤情報が深さ30m未満の観測点に関しては、最下層が岩盤であるか、あるいは表2に示すS波速度を満たす場合には30mの深さまで最下層のS波速度が続くものとして AVS_{30} を求め、この条件を満たさない場合には解析から除外している。その結果、速度記録の数は加速度記録よりも少なくなっている（表1参照）。全ての地震について、震源距離は気象庁によって推定された震源位置での点震源を仮定して求めた。基準式では M_w （モーメントマグニチュード）が用いられているが、解析を行った、 M_{JMA} が5から7の海域で発生する地震に関してほぼ $M_w = M_{JMA}$ が成り立つことが示されていることもあり^{例えば、11), 12)}、ここでは $M_w = M_{JMA}$ とした。

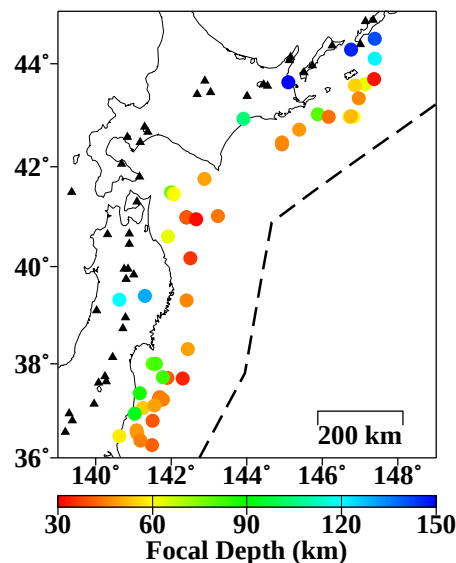


図2 解析に用いた地震の震源分布。破線は設定した海溝軸を、▲は火山を表す。

表 1 解析を行った地震。震源情報は気象庁による。

	発生日時	緯度 (° N)	経度 (° E)	深さ (km)	M _{JMA}	加速度記録 #		速度記録 #	
						係数 1	係数 2	係数 1	係数 2
1	1997/02/20 05:22	37.38	141.16	88	5.3	74	-	54	-
2	1997/02/20 16:55	41.76	142.88	49	5.7	119	-	84	-
3	1997/05/12 07:59	37.06	141.25	54	5.5	66	-	48	-
4	1997/10/27 04:07	39.32	140.62	120	5.1	40	-	27	-
5	1997/11/15 16:05	43.65	145.09	153	6.1	45	47	33	35
6	1997/11/20 10:56	40.96	142.65	31	5.0	22	-	16	-
7	1997/12/07 12:50	37.71	141.78	83	5.3	79	-	58	-
8	1997/12/23 01:32	40.17	142.50	36	5.1	59	-	42	-
9	1998/01/21 00:21	43.59	146.85	55	5.2	25	-	17	-
10	1998/01/31 00:50	41.47	142.07	60	5.1	84	-	61	-
11	1998/03/12 04:27	37.69	142.30	34	5.0	40	-	30	-
12	1998/03/23 18:37	36.37	141.18	45	5.3	26	-	21	-
13	1998/04/09 17:45	36.94	141.03	93	5.4	58	13	42	9
14	1998/08/16 23:05	37.24	141.78	45	5.2	38	-	29	-
15	1998/11/24 04:48	38.00	141.59	82	5.1	78	-	54	-
16	1999/01/09 12:06	44.10	147.39	121	5.6	18	-	12	-
17	1999/02/01 01:52	37.12	141.55	49	5.1	60	-	45	-
18	1999/02/01 04:29	43.34	146.96	46	5.3	23	-	15	-
19	1999/03/19 02:55	41.03	143.24	44	5.7	51	-	35	-
20	1999/04/25 21:27	36.46	140.63	58	5.1	42	-	32	-
21	1999/05/13 02:59	42.94	143.91	104	6.4	96	85	71	62
22	1999/06/15 16:47	42.98	146.17	43	5.1	23	-	15	-
23	1999/11/15 10:35	38.31	142.44	49	5.5	76	-	54	-
24	2000/01/09 13:02	37.27	141.70	46	5.0	46	-	37	-
25	2000/01/28 23:21	42.98	146.72	56	7.0	46	109	34	77
26	2000/03/20 06:26	37.99	141.51	78	5.0	72	-	51	-
27	2000/07/01 05:34	37.30	141.69	46	5.1	41	-	33	-
28	2000/07/21 03:39	36.52	141.10	49	6.4	106	67	93	60
29	2000/08/16 05:21	42.98	146.82	60	5.7	57	71	46	67
30	2000/08/19 21:41	36.28	141.49	41	5.4	53	-	49	-
31	2000/08/20 02:26	43.61	147.13	62	5.7	52	64	41	61
32	2000/09/03 20:01	42.99	146.76	52	5.2	47	22	40	22
33	2000/11/14 00:57	42.45	144.93	45	5.9	101	-	87	-
34	2000/11/14 12:53	42.48	144.92	46	5.2	78	-	67	-
35	2000/12/22 19:13	44.48	147.38	141	6.5	30	202	24	180
36	2001/04/03 04:54	40.61	141.92	63	5.4	194	-	169	-
37	2001/04/12 16:02	37.27	141.68	44	5.0	103	-	92	-
38	2001/04/14 08:16	42.73	145.38	48	5.4	86	-	76	-
39	2001/04/27 02:49	43.03	145.88	80	5.9	106	172	92	149
40	2001/08/14 05:11	41.00	142.40	30	6.2	281	-	239	-
41	2001/08/24 18:48	41.00	142.40	40	5.5	158	-	136	-
42	2001/09/04 23:54	36.80	141.50	40	5.4	103	-	90	-
43	2001/10/02 17:20	37.70	141.90	40	5.6	153	-	132	-
44	2001/12/02 22:02	39.40	141.30	130	6.3	232	195	195	167
45	2002/01/19 18:06	43.71	147.36	32	5.6	41	23	34	23
46	2002/01/27 16:09	39.31	142.41	46	5.3	165	-	144	-
47	2002/02/12 22:44	36.59	141.09	48	5.5	107	-	92	-
48	2002/02/14 10:12	41.46	142.06	64	5.0	171	-	148	-
49	2002/04/04 08:42	41.50	142.00	80	5.4	190	-	165	-
50	2002/05/22 05:04	44.27	146.75	146	5.8	39	71	32	64

#：それぞれの補正係数（第 3 章を参照のこと）の導出に用いた観測記録の数。- は解析の対象外を表す。

表 2 平均 S 波速度の推定を行う基準 (司・翠川, 1999⁴⁾ より引用)。

地盤情報の深さ (m)	15.0	17.5	20.0	22.5	25.0	27.5
最深層の S 波速度 (m/s)	500	400	350	250	200	100

3. 補正係数の導出

3.1 補正係数 1：太平洋側と日本海側との伝播経路特性の違いを補正

まず、地震動の最大振幅について観測値と基準式による予測値の比較を行う。図 3 は、2001 年 12 月 2 日の岩手県南部地震 (表 1 参照) を例として、最大加速度 (PGA) 及び最大速度 (PGV) の観測記録の距離減衰と基準式を合わせて示したものである。震源距離 (R) が 300km 付近を境界として観測値の減衰の傾向が明らかに変化している。そこでまず、震源距離が 300km 以内の観測点記録について検討を行う。同一の震源距離に対して PGA では約 2 桁、PGV でも約 1 桁のばらつきが観測値に見られる。これは、主に異常震域による太平洋側と日本海側の振幅の違いによると考えられる。ここで、観測点から海溝軸までの最短距離 (Rtr) を導入すると、Rtr が小さい (太平洋側である) ほど High-Q であるスラブ内を伝播する距離が長くなるため、減衰が小さくなり、最大振幅が大きくなっていくことが予想される (図 1 参照)。実際に最大振幅の観測値と基準式による予測値の比 obs/pre と Rtr の関係を見ると、Rtr が小さくなるほど比が大きくなっていく傾向が認められる (図 4)。そこで、このデータの分布から obs/pre と Rtr の関係を

$$\log (\text{obs/pre}) = a_1 \times \text{Rtr} + b_1 \quad (2)$$

の近似式として表す。なお、本稿では、対数はすべて常用対数を用いている。表 1 に示した 50 地震の最大加速度及び最大速度のそれぞれについて、最小二乗法によって係数 a_1 及び b_1 を求めた。ただし、このとき、各地震の最大加速度、最大速度のデータそれぞれにおいて、 $\log (\text{obs/pre})$ の平均値がゼロとなるような処理を行った。これは、震源パラメータ (マグニチュード、地震のタイプ等) の推定誤差によって $\log (\text{obs/pre})$ の分布にオフセットが生じ、係数 b_1 の値が変動することを防ぐためである。なお、図 4 も上記の処理を行った結果を示してある。求められた係数に関して、震源パラメータ (深さおよびマグニチュード) への依存性について調べたところ (図 5)、震源の深さ (H) に関する依存性が見られた。すなわち、震源が深くなるほど係数 a_1 は小さくなり、 b_1 は大きくなる。一方、震源の深さが 30km 付近の地震では係数がゼロ付近に集まっており、 obs/pre の Rtr に関する依存性がほとんど見られない。そこ

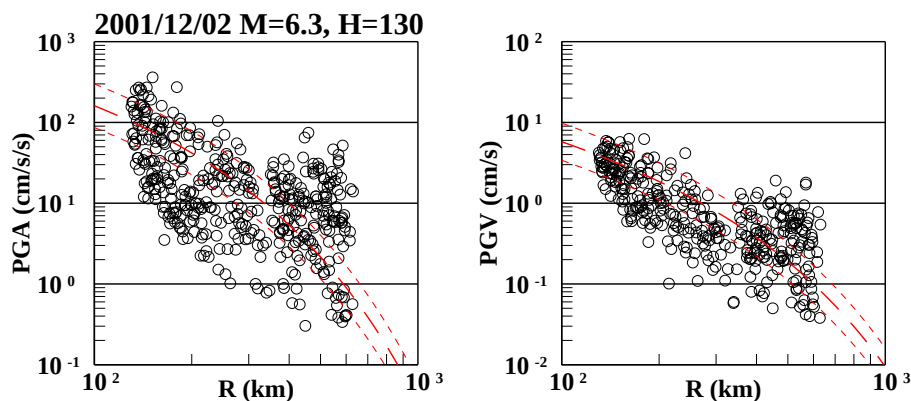


図 3 最大振幅の観測値 (白丸) と距離減衰式 (司・翠川式⁴⁾; 赤の破線) の比較の例。赤の点線は距離減衰式の標準偏差を表す。左が最大加速度 (PGA)、右が最大速度 (PGV) である。

で、図 5 のデータの分布をもとに係数 a_1 、 b_1 をさらに

$$a_1 = c_1 \times (H-30), b_1 = c_2 \times (H-30) \quad (3)$$

の近似式として表し、最小二乗法によって係数 c_1 、 c_2 を求めた。その結果、最大加速度で $c_1 = -8.1 \times 10^{-5}$ 、 $c_2 = 2.0 \times 10^{-2}$ 、最大速度で $c_1 = -4.0 \times 10^{-5}$ 、 $c_2 = 9.9 \times 10^{-3}$ が得られた。結果として、

$$\log(\text{obs/pre}) = (-8.1 \times 10^{-5} \times \text{Rtr} + 2.0 \times 10^{-2}) \times (H-30) : \text{最大加速度} \quad (4)$$

$$\log(\text{obs/pre}) = (-4.0 \times 10^{-5} \times \text{Rtr} + 9.9 \times 10^{-3}) \times (H-30) : \text{最大速度} \quad (5)$$

となる。したがって、

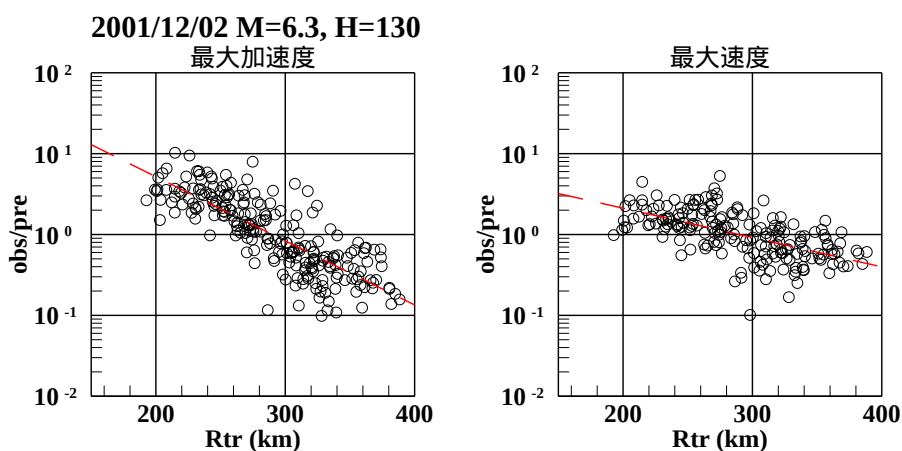


図 4 観測値と距離減衰式による予測値の比 (obs/pre) と観測点から海溝軸までの距離 (Rtr) の関係の例。赤の破線は、回帰による係数 a_1 、 b_1 の推定結果を表す (式 (2) 参照)。

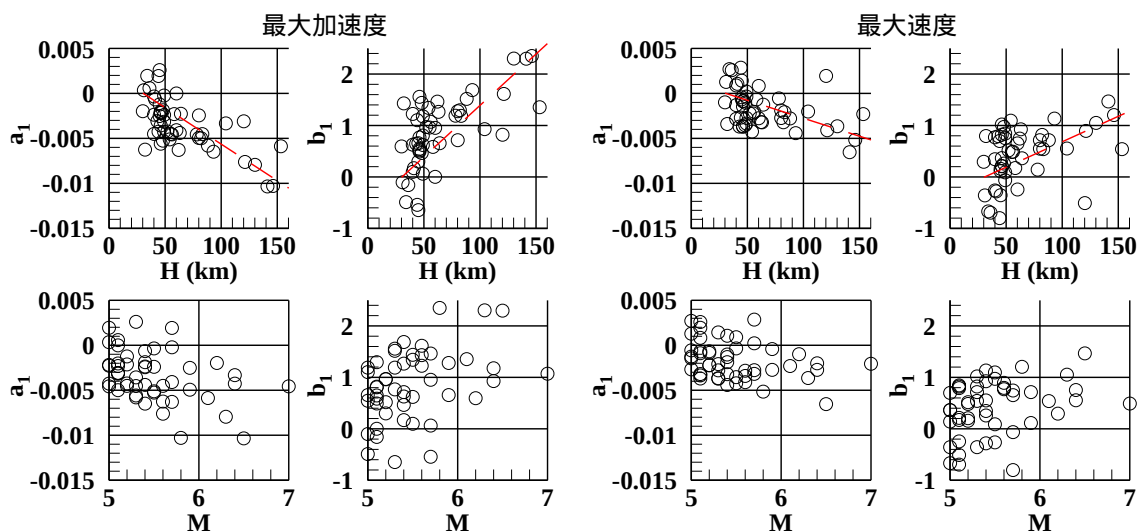


図 5 回帰係数 a_1 、 b_1 と震源の深さ (H) 及びマグニチュード (M) の関係。赤の破線は、回帰による係数 c_1 、 c_2 の推定結果を表す (式 (3) 参照)。

$$\log A_1 = (\text{式 4 の 右 辺}) \quad (6)$$

$$\log V_1 = (\text{式 5 の 右 辺}) \quad (7)$$

と表される A_1 及び V_1 を補正係数（ここでは補正係数 1 と呼ぶ）として、最大加速度を $\text{PGA}=A_1 \times \text{Apre}$ 、最大速度を $\text{PGV}=V_1 \times \text{Vpre}$ より求めることで、予測値が改善されることが期待される。ここで、観測点から海溝軸までの距離 R_{tr} 及び震源の深さ H の単位は km で、 Apre 、 Vpre はそれぞれ基準式により求められる最大加速度及び最大速度である。また、震源の深さが 30km よりも浅い地震については、この係数は適用外となる。

上記の補正係数 1 では、震源が深くなるほど太平洋側と日本海側の振幅の差が大きくなり、深い地震ほど異常震域が顕著になることを表している。これは、太平洋側の地域に伝播する地震波は、震源が深くなるほど High-Q であるスラブ内を通る距離が長くなるために減衰が小さくなる一方で、日本海側の地域に伝播する地震波は、震源が深くなるほど Low-Q 領域を通る距離が長くなるために減衰が大きくなることによって、両地域間での振幅の差が大きくなることと解釈できる。なお、図 5 において係数 a_1 、 b_1 がマグニチュード (M) にも依存しているように見えるが、これは M の大きな地震のほとんどが深い地震であることから、震源の深さの影響が現れているものと考えられる。

3.2 補正係数 2：遠地の観測点まで減衰せずに伝播する現象を補正

次に、震源距離が 300km よりも遠い観測点記録について検討を行う。前節で述べたように、図 3 において震源距離が 300km 付近を境界として最大振幅の減衰の傾向が変化しており、遠地の観測点で震源距離が遠くなるほど基準式から観測値が離れていく様子が見られる。ただし、同一震源距離に対するばらつきは遠地と近地でほとんど変わっていないことから、太平洋側と日本海側の Q による減衰の違いは遠地においても現れていると考えられる。そこで、遠地の観測点記録の減衰が変化している点のみを見るために、最大振幅の観測値と基準式に対して前節で求めた補正係数 1 を適用して求められる予測値との比 (obs/pre1) をとり、それと震源距離との関係を調べる（図 6）。ただし、基準式は震源距離 300km 以内の記録のみから求められており、その適用範囲からは外れているため、ここでは外挿して用いている。図 6 において、震源距離が大きくなるにしたがって obs/pre1 が増加していく傾向が明らかである。そこで、このデータの分布をもとに obs/pre1 と震源距離 (R) の関係を

$$\log (\text{obs/pre1}) = a_2 \times \log (R/300) + b_2 \quad (8)$$

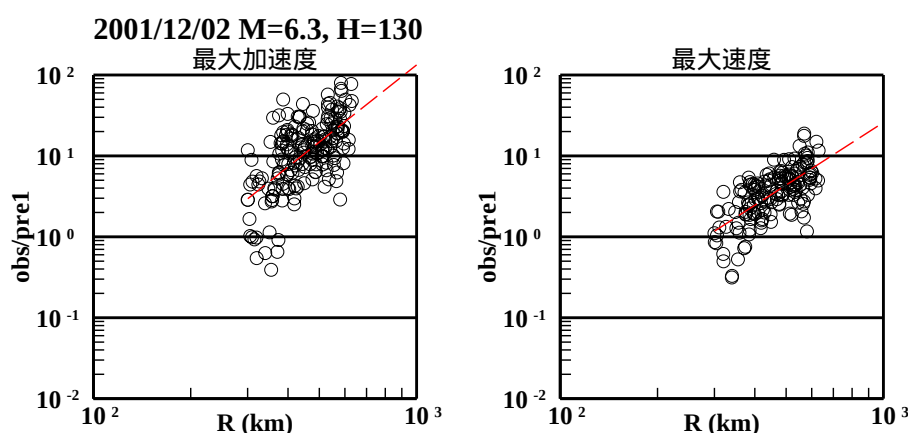


図 6 最大振幅の観測値と補正係数 1 を適用した予測値の比 (obs/pre1) と震源距離 (R) の関係の例。赤の破線は、回帰による係数 a_2 、 b_2 の推定結果を表す（式 (8) 参照）。

の近似式として表し、前節と同様に各地震の最大加速度、最大速度のそれぞれについて最小二乗法により係数 a_2 および b_2 を求めた。ただし、ここでは震源距離が 300km よりも遠い観測点記録が 5 点以上あり、かつ震源距離が 500km 以上の観測点記録（最大約 1200km）が 2 点以上あるという条件を満たす 13 地震についてのみ解析を行った（表 1 参照）。係数 a_2 、 b_2 については、震源深さとマグニチュードに関する依存性は認められなかった（図 7）。そのため、地震ごとのばらつきはあるが、ここでは 13 地震で求められた係数 a_2 、 b_2 の平均値を採用する。その結果、

$$\log (\text{obs/pre1}) = 3.2 \times \log (R/300) + 0.13 : \text{最大加速度} \quad (9)$$

$$\log (\text{obs/pre1}) = 2.1 \times \log (R/300) - 0.01 : \text{最大速度} \quad (10)$$

となる。したがって、

$$\log A_2 = \max\{0, 3.2 \times \log (R/300) + 0.13\} \quad (11)$$

$$\log V_2 = \max\{0, 2.1 \times \log (R/300) - 0.01\} \quad (12)$$

と表される A_2 及び V_2 を補正係数（ここでは補正係数 2 と呼ぶ）として、最大加速度及び最大速度を

$$\text{PGA} = A_1 \times A_2 \times \text{Apr} \quad (13)$$

$$\text{PGV} = V_1 \times V_2 \times \text{Vpre} \quad (14)$$

より求めることで予測値が改善されることが期待される。ここで、震源距離 R の単位は km である。なお、式 (11) 及び (12) において二つの数の最大値をとっているのは、補正係数 2 が 1 よりも小さくなる、震源距離が近い観測点に対して補正を行わないようにするための措置である。

補正係数 2 は、震源距離が大きくなるほど値が大きくなっていることから、基準式による減衰が遠地の観測点に対しては過大評価になっていると考えられる。これは、遠地の観測点に対して、震源からの射出角が水平近く、あるいは水平より下向きになることにより、High-Q であるスラブ内を伝播する距離が長くなり、近地の観測点と比べて Q による減衰の効果が小さくなるためであると解釈できる。他の要因として地殻内での多重反射や表面波の影響が現れることなども挙げられるが、内陸の地殻内地震であ

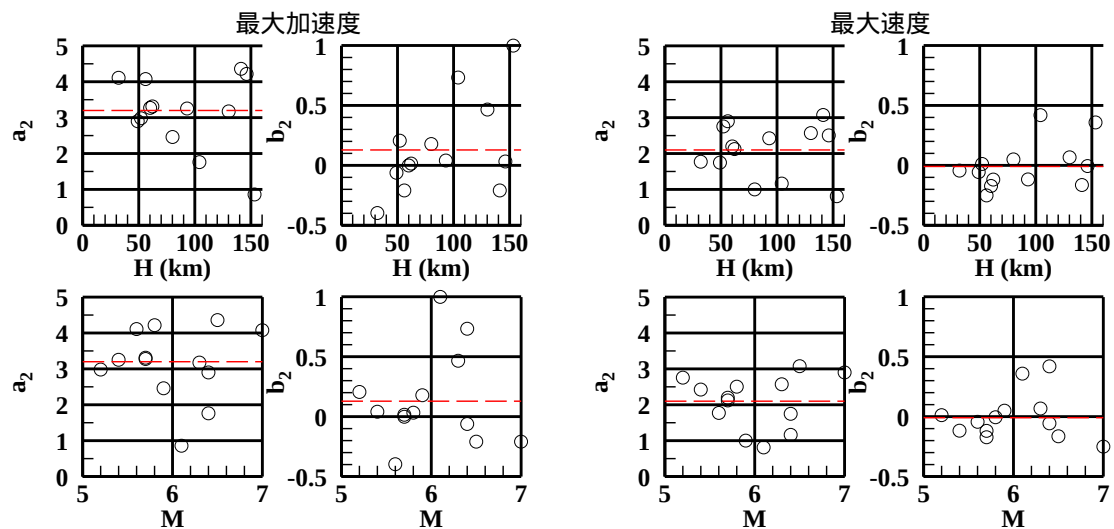


図 7 回帰係数 a_2 、 b_2 と震源の深さ (H) 及びマグニチュード (M) の関係。赤の破線は、それぞれの平均値を表す。

る 2000 年鳥取県西部地震 ($M_{JMA}=7.1$ 、深さ 11km) やフィリピン海プレート内で発生した 2001 年芸予地震 ($M_{JMA}=6.4$ 、深さ 47km) では、観測記録がほぼ基準式の外挿で説明できることから (図 8)、異常の要因としてこれらの影響は小さいと考えられる。

4. 補正係数の適用による予測値の改善

図 9a は、解析を行った 50 地震の全記録に関して、二つの補正係数を適用して求められる最大振幅の予測値及び基準式のみから求められる予測値の対数標準偏差 (いずれも常用対数) を比較したものである。個々の地震に関しては、最大加速度、最大速度のいずれについても、基準式のみでは標準偏差が 0.3 を大幅に超えている地震であっても、補正係数を適用することによって 0.3 程度まで下がっている。一方、基準式のみでも標準偏差が 0.3 以下と比較的小さい地震については、ほとんど変化していない。補

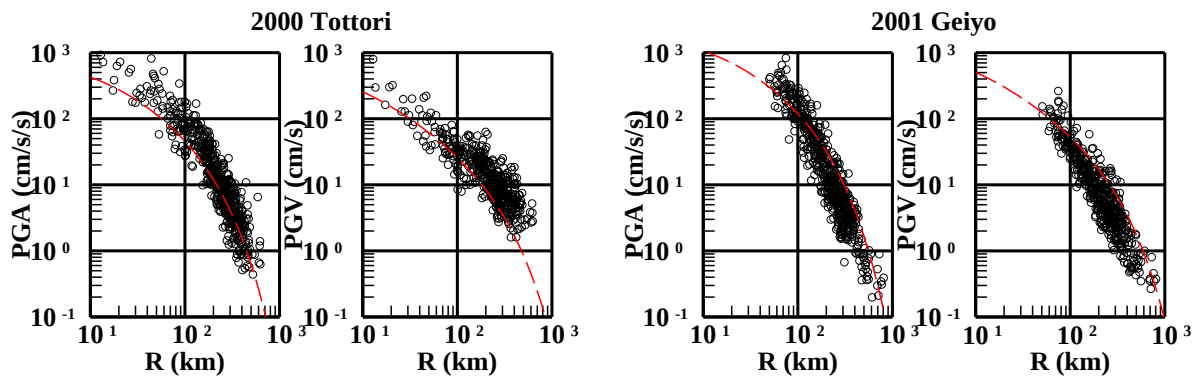


図 8 2000 年鳥取県西部地震 (左) 及び 2001 年芸予地震 (右) における最大加速度 (PGA) と最大速度 (PGV) の観測値の距離減衰と基準式との比較。

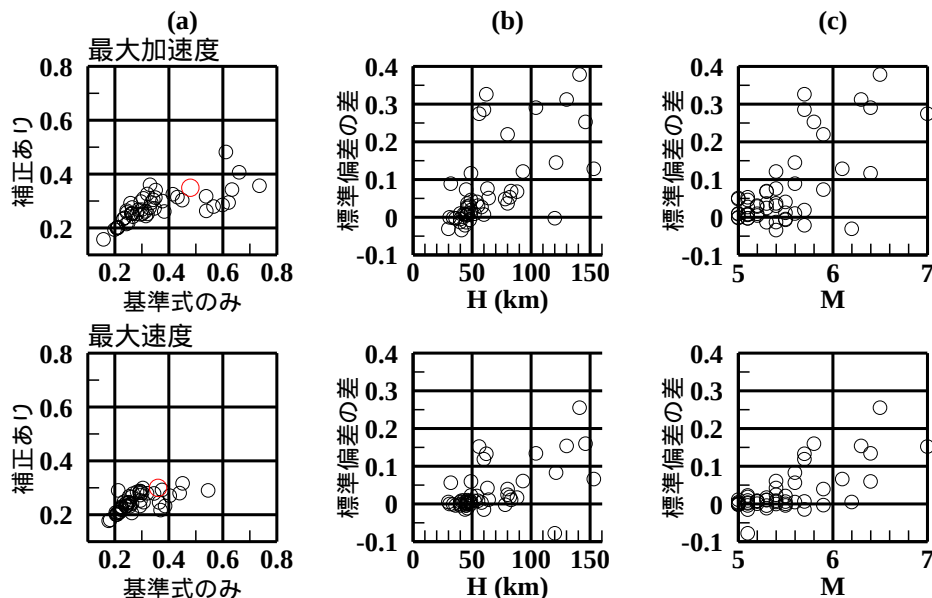


図 9 (a) 補正係数を適用した場合と基準式のみの場合による最大振幅の予測値の標準偏差。白丸は各地震、赤丸は解析を行った全記録についての結果を表す。(b) 補正係数の適用による予測値の改善度 (標準偏差の差) と震源の深さ (H) の関係。(c) 予測値の改善度とマグニチュード (M) の関係。

正係数を適用することによる最大振幅の予測値の改善度として、基準式のみによる予測値との標準偏差の差を用いると、震源が深い地震ほど、また、マグニチュードが大きな地震ほど改善度が大きくなっている（図 9b、c）。すなわち、震源が深くなるほど太平洋側と日本海側との最大振幅の差が大きくなっていくために補正係数 1 による補正の効果が強く現れ、マグニチュードが大きくなるほど遠地の観測点記録が増えるために補正係数 2 による補正の効果が現れる。一方で、異常震域が顕著ではない、震源が浅く、かつ比較的規模が小さな地震では、二つの補正係数が共にほぼ 1 となるために補正の効果がほとんど現れない。もう一つの特徴として、最大速度よりも最大加速度で大幅に改善されている点が挙げられる。これは、異常震域が最大速度よりも最大加速度で顕著であることから、Q の周波数依存性と関係していると考えられ、前田・笹谷¹³⁾によって指摘されているように、Low-Q 領域と High-Q 領域との Q の違いが低周波数成分と比べて高周波数成分で大きくなっていることが示唆される。なお、全記録に対する標準偏差については次章で考察する。

さらに補正係数の適用による効果を見るために、最大振幅分布を比較する（図 10）。基準式のみによる予測値は震央を中心とした同心円となっており、震央付近における日本海側の地域で明らかに過大評価されている一方で、遠地の太平洋側の地域では反対に予測値が過小評価となっている。これに対して、補正係数を適用した予測値の振幅分布は、近地のみではなく、遠地の観測点を含めて異常震域が再現されており、観測値の分布とよく整合していることが分かる。

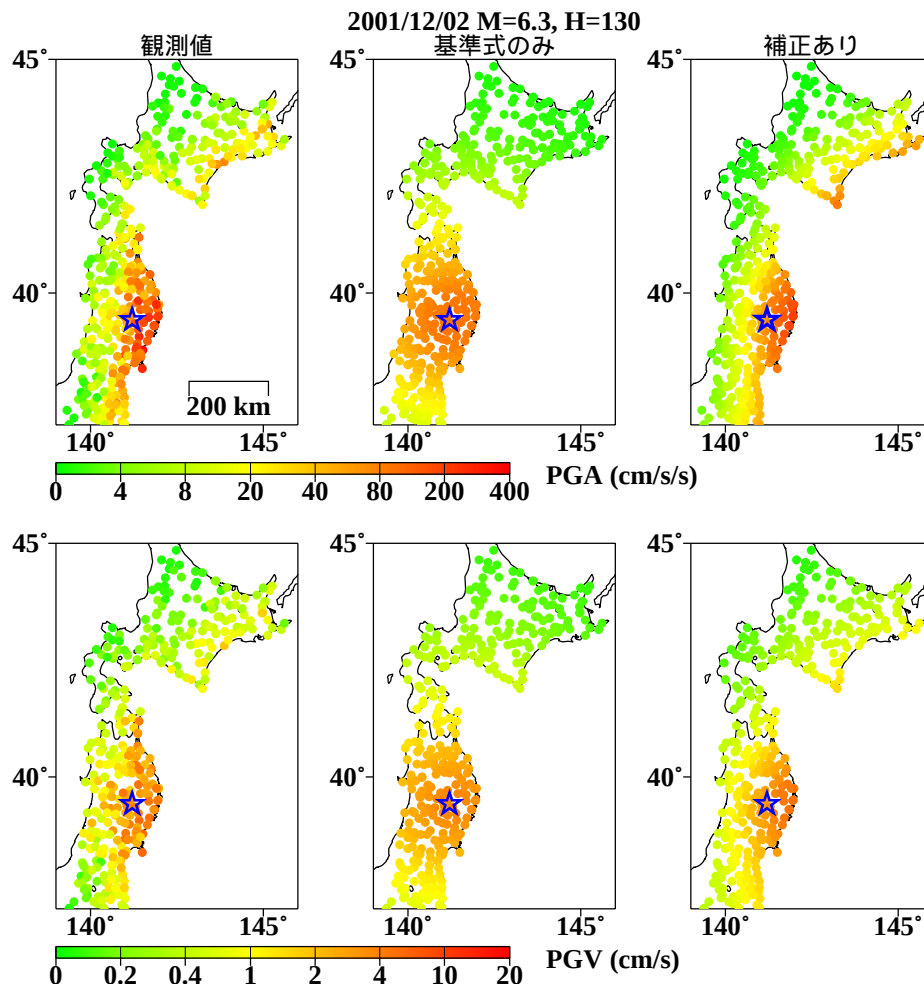


図 10 観測値及び予測値による最大振幅分布の比較の例。上が最大加速度、下が最大速度である。☆は震央位置を表す。

5. 考察

本検討では、観測記録に基づくデータの分布から補正係数の形を決定している。この補正係数は、第3章でも述べたように、プレート沈み込み帯における大局的なQ構造（図1）によって生じる異常震域と現象論的には対応がとれているが、最終的にQによる減衰の影響を定式化する、あるいは、直接距離減衰式に組み込まれることが望ましいであろう。しかしながら、Qによる減衰を評価する上で必要なQ構造や速度構造に関する現在の知見を考慮すると、定式化を行うことは難しいと考えられる。例えば、Q構造に関しては、最近の観測記録の増加によって、日本列島下の三次元Q構造を推定するインバージョン解析が行われ、沈み込むスラブがHigh-Qであることなどが定量的に示されつつある^{例え、14, 15)}。しかし、これらの解析で用いられているグリッドは緯度、経度方向で0.5度間隔、深さ方向で30km程度の間隔とまだ粗い。また、やや深発地震の伝播経路特性を考えるうえで最も重要となる、深さが60kmよりも深いところでは、特にLow-Q領域に関して精度良く求められていない。そのため、Low-Q領域内でQが一定値とみなせるかどうか、また、Low-Q領域がどのような形状であるかを特定することができない。したがって、Q構造をもとに太平洋側から日本海側へかけて最大振幅が変化していく様子を定式化することは現状では困難である。

一方、異常震域を距離減衰式に直接組み込む方法に関して、高井・岡田¹⁶⁾が提案している、次式のような距離減衰式が考えられる。

$$\log A = aM - b_1R_1 - b_2R_2 - \log R + c \quad (15)$$

ここで、Aは地震動の最大振幅、Mは地震のマグニチュード、 R_1 はHigh-Q領域を伝播する距離、 R_2 はLow-Q領域を伝播する距離、 $R (=R_1+R_2)$ は震源距離で、a、 b_1 、 b_2 及びcは回帰によって求められる定数である。この式では、Qの異なる二つの領域の存在が仮定されており、それぞれの領域で伝播経路特性が異なることが表現されているが、 R_1 及び R_2 が、Low-Q（あるいはHigh-Q）領域をどのように設定するかによって変化するという不確定性も含まれている。高井・岡田¹⁶⁾では、火山フロントを境界として、それよりも背弧側（日本海側）全体をLow-Q領域として R_1 と R_2 を算出しているが、Low-QとHigh-Qの間にあたるQの領域の存在が指摘されていることもあり¹³⁾、領域の設定に関してまだ検討の余地があると述べられている。さらに、補正係数2が震源距離の関数となっていることは、無限媒質中のQと幾何減衰を考慮した既存の回帰モデルでは適切な距離減衰式を表現しきれないことを意味しており、直接的に火山フロントを挟んだQの違いだけで減衰を評価することは難しいものと考えられる。しかしながら既存の距離減衰式でも大局的には地震動のレベルを評価できる範囲もあるので、さらに広範囲に適用するために現時点で現実的と考えられる補正係数を提案した。

本検討で用いた全記録についての標準偏差は、補正係数を適用した予測値に関して、最大加速度で0.35、最大速度で0.30である（図9a）。基準式のみによる予測値に対する標準偏差は、それぞれ0.48及び0.36であり、補正係数の適用によって予測値の精度は明らかに向上しているが、基準式そのもので与えられている値（それぞれ0.27と0.23）と比べるとかなり大きい。この要因として、対象としている震源距離の範囲がかなり広い（1200km程度までである）ことや、補正係数を単純な形で回帰して求めているためにQによる減衰の地域性を完全に補正できていないことなどが挙げられる。また、これらに加えて、やや深発地震による観測記録の距離減衰が、既存の距離減衰式よりも傾きが急になっているということも影響していると考えられる。これは、予測値の振幅が相対的に震源に近い地域で過小評価、遠い地域で過大評価となることであり、図3においても、300km以内の観測記録について見た場合にその傾向が認められる。しかしながら、この点に関しては、すでに距離減衰式そのものの改善が試みられていることから^{17), 18)}、それらを対象に新たな補正係数を求めるという対応が今後必要となるだろう。

6. まとめ

異常震域が現れる、やや深発地震の地震動予測を経験的手法において精度良く行うために、距離減衰式に補正係数を適用することを提案し、実際に基準式（司・翠川式）に対する係数の導出を行った。これらは、最大加速度については式（6）、（11）、最大速度については式（7）、（12）で表される。海溝軸から観測点までの距離（ R_{tr} ）、震源の深さ（ H ）、及び震源距離（ R ）をパラメータとしたこれらの補正係数を適用することにより、最大振幅分布において異常震域が再現され、震源距離が 300km 以遠の地域も含めて、予測精度が大きく向上する。ただし、現時点で確認されている適用範囲は、地震に関しては茨城県沖以北で深さが 30km から 150km 程度までの太平洋プレートの沈み込みに伴う地震、観測点に関しては東北及び北海道地方のみと限定されている。また、司・翠川式以外の距離減衰式に関しては別途補正係数を求めることが必要となる。今後、プレート沈み込み帯の Q 構造の解明とともに補正係数の形の再評価を行うこと、及び他の地域への適用性について検討を行うこともまた必要である。

謝 辞

本検討に関して、確率論的予測地図作成手法検討委員会（委員長、翠川三郎教授）、及び清水建設和泉研究室の奥村俊彦氏より貴重な御意見をいただきました。査読者のコメントにより内容を大幅に改善することができました。ここに記して感謝いたします。解析には防災科学技術研究所の K-NET、KiK-net 強震記録を使用しました。

参考文献

- 1) 池田孝、武村雅之、加藤研一：強震記録に基づく北海道周辺のやや深発地震の高振動数成分の励起特性、日本建築学会構造系論文集、No.560、2002 年、pp.67-74.
- 2) Morikawa, N., Sasatani, T. : Source spectral characteristics of two large intra-slab earthquakes along the southern Kurile-Hokkaido arc, Phys. Earth Planet. Inter., 2003, 137, pp. 67-80.
- 3) 宇津徳治：地震学第 2 版、共立出版、310pp.
- 4) 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.
- 5) Fukushima, Y. Tanaka, T. : 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.
- 6) 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速度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.
- 7) 木下繁夫、上原正義、斗沢敏雄、和田安司、小久江洋輔：K-NET95 型強震計の記録特性、地震、第 2 輯、第 49 巻、1997 年、pp. 467-481.
- 8) 青井真、小原一成、堀貞喜、笠原敬司、岡田義光：基盤強震観測網（KiK-net）、日本地震学会ニュースレター、Vol. 12、2000 年、pp. 31-33.
- 9) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価について、2002 年 7 月 25 日、62pp.
- 10) Midorikawa, S., Matsuoka, M., Sakugawa, K. : Site effects on strong-motion records during the 1987 Chiba-ken-toho-oki, Japan earthquake, The 9th Japan Earthquake Engineering Symposium, Vol. 3, 1994, pp. 85-90.
- 11) 武村雅之：日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係、地震、第 2 輯、第 43 巻、1990 年、pp. 247-265.
- 12) Fukushima, Y. : Scaling relations for strong ground motion prediction models with M_2 terms, Bull. Seism. Soc. Am., 1996, 329-336.
- 13) 前田宜浩、笹谷努：上部マントルの異常構造が強震動に与える影響、北海道大学地球物理学研究報

告、No. 64、2001 年、pp. 91-113.

14) 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ー、地震、第 2 輯、第 54 巻、2002 年、pp.475-488.

15) 関根秀太郎、松原誠、小原一成、笠原敬司：防災科研 Hi-net のデータを用いた日本列島下の 3 次元減衰構造、日本地震学会 2002 年度秋季大会講演予稿集、2002 年、P174.

16) 高井伸雄、岡田成幸：火山フロントを考慮した地震動の距離減衰式改善の試み、第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集、2002 年、pp.605-608.

17) 西村利光、堀家正則：深い地震の距離減衰式とその特徴の原因、日本建築学会学術講演梗概集、B-2 分冊、2002 年、pp. 151-152.

18) 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、2002 年、pp. 609-614.

(受理：2003 年3 月28日)

(掲載決定：2003 年11月11 日)

Additional Correction Terms for Attenuation Relations Corresponding to the Anomalous Seismic Intensity in Northeast Japan

MORIKAWA Nobuyuki¹⁾, KANNO Tatsuo²⁾, NARITA Akira³⁾,
FUJIWARA Hiroyuki⁴⁾ and FUKUSHIMA Yoshimitsu⁵⁾

1) Member, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Sci.

2) Member, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Eng. (Now at Graduate School of Engineering, Hiroshima University)

3) Mitsubishi Space Software Co., Ltd.

4) Member, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Sci.

5) Izumi Research Institute, Shimizu Corp., Dr. Eng.

ABSTRACT

We introduce additional correction terms into empirical prediction for peak seismic ground motions from intermediate depth earthquakes, which cause anomalous seismic intensity in northeast Japan. Here two terms for the empirical attenuation relations of Si and Midorikawa (1999) were determined by using observed strong motion records of K-NET and KiK-net. First term corresponds to the difference of peak amplitudes between the fore- and back-arc side in the region. Second corresponds to low attenuation of seismic waves propagating long distance in high-Q slab. The regional bias due to abnormal Q structure in the subduction zone can be corrected by the both introduced terms. By applying these new terms to the original empirical attenuation relations, the distribution and accuracy of the predicted peak ground motions from an intermediate depth event are improved remarkably in wide area beyond 300km.

Key Words: Anomalous Seismic Intensity, Empirical Attenuation Relation, Intermediate Depth Earthquake