



東北日本の異常震域に対応するための最大振幅および

応答スペクトルの新たな距離減衰式補正係数

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 博士(理学)

e-mail : morikawa@bosai.go.jp

2) 正会員 広島大学大学院工学研究科 博士(工学)

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 理博

e-mail : fujiwara@bosai.go.jp

5) 清水建設技術研究所 博士(工学)

e-mail : yoshimitsu.fukushima@shimz.co.jp

要約

異常震域を表現するための距離減衰式に対する補正係数の改良を行った。基準の式を Kanno et al. (2005) によるものに変更し、応答スペクトルにも対応するようにしている。海溝軸に替えて、火山フロントまでの距離を導入することにより、一部地域に対して過大評価となっていた問題点を解決するとともに、対象地域を関東・甲信越地方まで拡大した。さらに、基準式では考慮されていない震源特性に関する検討を行った。地震動強さに関して震源の深さ依存性は見られなかったが、プレート間地震とスラブ内地震では明瞭な違いがあることが確認された。そのため、両タイプの地震に対する補正係数も新たに求めた。

キーワード： 強震動予測、距離減衰式、異常震域、応答スペクトル

1. はじめに

実際の強震動記録から求められた距離減衰式は、その簡便さから多くの強震動予測で用いられている。1995年の兵庫県南部地震以後、多数の強震観測点が設置され、強震動記録の数が飛躍的に増加した。これに伴い、新たな距離減衰式の導出のみではなく、強震動予測における精度向上のための検討が行われるようになってきている^(例えば、1)~5)。森川・他(2003)⁵⁾(以後、前論文と記す)では、司・翠川(1999)⁶⁾による最大加速度(PGA)および最大速度(PGV)の距離減衰式に対して、少数の単純なパラメータから成る補正係数を導入することによって、異常震域現象が表現できるようになることを示した。これによ

り、異常震域が顕著に現れる東北日本のやや深発地震に対する強震動予測の精度を広域にわたって大幅に改善することが可能となった。

一方で、地震工学的には強震動予測の対象として最大加速度、最大速度のみではなく、応答スペクトルも含まれることが望ましい。最近、Kanno et al. (2005)⁷⁾ によって、これら全ての地震動指標を含む距離減衰式が提案されている。その中で、前論文と同様の手法によって異常震域に対する補正係数が求められているが、北海道東部の震源が 100km よりも深い地震に関して、特に短周期地震動の予測値が過大評価となることが述べられている。この問題点を解決するため、本論文では異常震域のための補正係数を改良する。応答スペクトルを含む Kanno et al. (2005)⁷⁾ による距離減衰式を基準とし、前論文では検討を行わなかった関東・甲信越地方まで対象地域を拡大する。なお、本論文中で表される対数はすべて常用対数である。

2. データ

ここでは、基準式の導出のために作成されたデータセットのモーメントマグニチュード (M_w)、震源距離、観測値をそのまま用いることにする。本検討では、異常震域が顕著に見られる地震として、太平洋プレートで発生した、震源の深さが 30km よりも深いプレート間地震およびスラブ内地震を対象とする。ただし、以下で述べる条件すべてに合致する観測点で得られている記録が 5 つ未満の地震は対象外とした。解析対象となった地震と観測点の分布を図 1 に、震源パラメータを表 1 に示す。最も深い地震の震源の深さは 155km である。観測点については、太平洋プレートの地震において異常震域の影響が明らかに現れる東経 138° 以東の点における記録を用いる。さらに、Kanno et al. (2005)⁷⁾ の方法による地盤増幅特性の評価が可能な観測点のみに対象を限定する。具体的には、地表から深さ 20m までの S 波速度構造が公開されている、防災科学技術研究所の K-NET⁸⁾、KiK-net⁹⁾ および港湾空港技術研究所の港湾

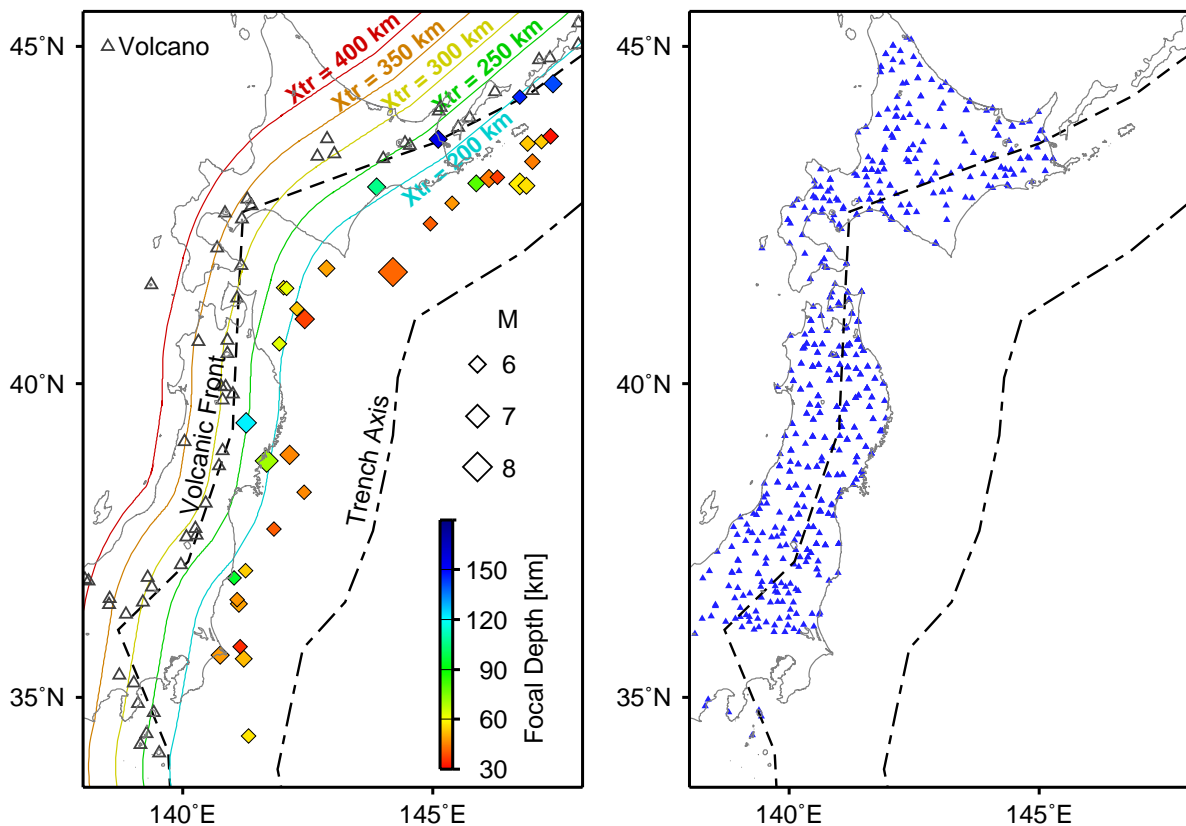


図 1 解析に用いた地震の震源分布(左) 観測点分布(右)と設定した海溝軸および火山フロント位置。

地域強震観測¹⁰⁾の観測点である。基準式とそのデータセット、地盤増幅特性の評価法については、付録に概略を記してあるのでそちらの参照をお願いしたい。なお、強震動記録において、ある周期以上の

表1 解析に用いた地震。震源位置は気象庁による。「地震種別」のISとPBはそれぞれスラブ内地震とプレート間地震を、データ数の「-」は本検討では用いなかったことを表す。

	発震時 (日本標準時)	緯度 [°N]	経度 [°E]	深さ [km]	Mw	地震 種別	データ数		
							PGA*	5秒**	PGV
1	1996/09/11 11:37	35.6355	141.2200	52.0	6.0	IS	45	45	42
2	1996/11/20 11:27	34.3588	141.3140	57.0	5.7	IS	9	9	-
3	1997/02/20 16:55	41.7568	142.8780	49.0	6.0	PB	65	65	39
4	1997/05/12 07:59	37.0575	141.2500	54.1	5.5	PB	48	48	36
5	1997/07/15 01:09	43.1163	146.2920	36.9	5.6	PB	14	14	13
6	1997/11/15 16:05	43.6632	145.1180	155.0	6.1	IS	22	22	22
7	1998/01/21 00:21	43.6012	146.9020	53.4	5.7	PB	13	13	-
8	1998/01/31 00:50	41.4602	142.0810	61.2	5.6	PB	42	37	24
9	1998/04/09 17:45	36.9420	141.0210	94.9	5.5	IS	51	51	46
10	1999/02/01 04:29	43.3430	147.0040	44.7	5.7	IS	13	13	-
11	1999/05/13 02:59	42.9650	143.8570	106.0	6.1	IS	50	50	50
12	1999/11/15 10:35	38.3170	142.4310	46.1	5.6	IS	23	23	11
13	2000/01/28 23:21	43.0100	146.7500	58.0	6.7	IS	22	22	22
14	2000/06/03 17:54	35.6865	140.7500	48.1	6.1	PB	43	43	38
15	2000/07/21 03:39	36.5300	141.1200	49.0	6.0	PB	135	135	98
16	2000/08/16 05:21	42.9820	146.8760	56.4	5.9	IS	39	39	13
17	2000/08/20 02:26	43.6350	147.1760	53.8	5.6	IS	28	28	9
18	2000/11/14 00:57	42.4300	144.9500	41.0	5.6	PB	65	65	54
19	2000/12/05 01:47	35.8307	141.1460	34.9	5.6	PB	66	66	20
20	2000/12/22 19:13	44.4700	147.4100	141.4	6.1	IS	29	29	-
21	2001/04/03 04:54	40.6103	141.9250	63.4	5.5	IS	113	113	72
22	2001/04/14 08:16	42.7287	145.3850	47.6	5.5	PB	56	56	37
23	2001/04/27 02:49	43.0253	145.8800	80.0	6.0	IS	68	68	53
24	2001/08/14 05:11	40.9928	142.4400	37.7	6.4	PB	197	197	121
25	2001/10/02 17:20	37.7258	141.8180	40.8	5.5	PB	127	127	46
26	2001/12/02 22:02	39.3955	141.2670	121.5	6.5	IS	163	163	163
27	2002/01/19 18:06	43.7117	147.3620	32.0	5.7	IS	26	26	-
28	2002/02/12 22:44	36.5865	141.0860	47.8	5.5	PB	126	126	75
29	2002/04/04 08:42	41.4710	142.0120	58.7	5.6	PB	132	132	65
30	2002/05/22 05:04	44.2765	146.7450	145.9	5.5	IS	17	17	17
31	2002/08/25 03:41	43.0873	146.1240	44.4	6.1	PB	66	66	37
32	2002/10/14 23:13	41.1488	142.2800	53.2	5.6	PB	153	153	109
33	2002/11/03 12:37	38.8935	142.1420	45.8	6.4	PB	154	154	106
34	2003/05/26 18:24	38.8000	141.6830	71.0	7.0	IS	183	183	183
35	2003/09/26 04:50	41.7000	141.2000	42.0	8.0	PB	235	235	235

* 周期5秒を除く加速度応答スペクトルを含む

** 周期5秒の加速度応答スペクトル

長周期帯域でノイズレベルが高いと判断された場合には、それ以上の周期成分の加速度応答スペクトルがデータセットから除外されている。また、最大速度については、付録に記されているようにデータセットに組み込まれるための条件が他の指標と若干異なっている。そのため、解析対象となる記録数が他の指標と比べて少なくなっている場合がある（表1を参照）。

前論文においては、1) 特にやや深発地震において太平洋側地域で観測される地震動が日本海側地域よりも大きい現象に対する補正、2) 遠方の観測点まで減衰せずに比較的大きな地震動が観測される現象に対する補正、の二つの現象にそれぞれ対応するための係数を提案した。しかしながら、今回用いたデータセットにおいては、震源距離が最大でも約450kmまでと限定されている。したがって、本論文では後者の補正係数については求めないこととする。以後、本論文における異常震域は1)の現象を示すこととする。一方で、1)の補正係数を求めるにあたっては2)の現象の影響を極力除いたデータセットを用いることが必要となる。前論文において、震源距離が300kmよりも遠い観測点において2)の現象が顕著に見られることを確認している。そこで、本検討における解析対象から震源距離が300kmよりも遠い観測点記録を除外した。また、北緯35°から36°の間にある観測点においては4章で述べるように1)の現象が見られなかったため解析対象から除外した。最終的に解析に用いた記録の震源距離と地震のマグニチュードの関係を図2に示す。

3. 補正係数の改良

太平洋側の地域で日本海側の地域よりも地震動が強くなる異常震域の要因は、図3のような島弧地域

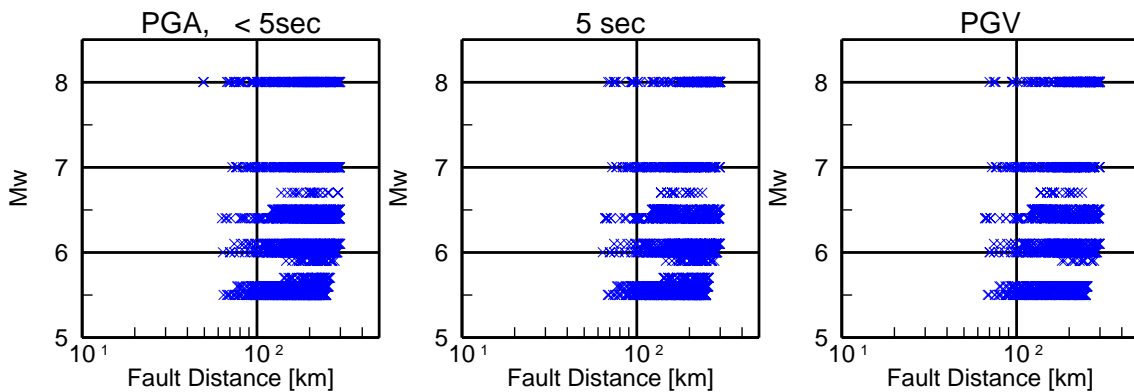


図2 解析に用いた記録の震源距離とマグニチュードの分布。

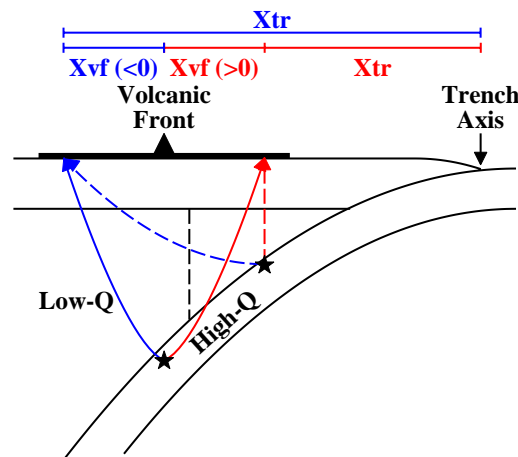


図3 東北日本におけるQ値構造の模式図とXvfの定義（森川・他、2003⁵⁾に加筆）。

における特異な地震波減衰（Q 値）構造によって定性的に説明されている¹¹⁾。その後、三次元 Q 値構造が求められるようになり¹²⁾⁻¹⁷⁾、図 3 のような大局的な構造のみではなく、局所的に存在する Low-Q や High-Q の領域が定量的に示されるようになってきている。

異常震域現象が見られる地震における地震動振幅の距離減衰に関して、火山フロントを挟んで太平洋側と日本海側の観測点で距離減衰の勾配が異なることが指摘されており^{12)、18)-20)}、それぞれの地域ごとに振幅特性を評価する試みも行われている^{12)、18)、19)}。しかしながら、図 3 の Q 値構造を考えた場合、日本海側になるほど Low-Q の領域を、太平洋側になるほど High-Q の領域を通る距離がそれぞれ長くなるため、単純に太平洋側と日本海側の二地域のみで分類して距離減衰式を導出するだけでは異常震域を表現する方法として不十分であると考えられる。一方、高井・岡田（2002）²¹⁾ では、火山フロントを境界として太平洋側を High-Q、日本海側を Low-Q の領域と設定し、それぞれの領域を通る区間について Q 値による減衰の項を与えた距離減衰式が提案されている。ただし、三次元 Q 値構造において地殻内では火山フロントよりも日本海側の地域であっても必ずしも Low-Q の領域とはなっていないことや、Low-Q と High-Q の中間的な Q 値の領域が存在していることが示唆されていること²²⁾ から、領域の設定に関して検討の余地がまだ残されているとされている。前論文では、高井・岡田（2002）²¹⁾ のような距離減衰式の定式化が望ましいとしながらも、現在得られている三次元 Q 値構造から Low-Q、High-Q などの領域を正確に設定することが困難であること、および距離減衰式という簡便な地震動予測手法に適用する上で、できるだけ単純かつ少ないパラメータによって表現をするという考えから、以下のような形で表される補正係数（A）を提案した。

$$\log A = (a \times X_{tr} + b) \times (D-30) \quad (1)$$

ここで、 X_{tr} は観測点から海溝軸までの距離で単位は km、 D は震源の深さで単位は km、 a および b は回帰係数である。得られた A を司・翠川（1999）⁶⁾ の距離減衰式より求められる値に掛け合わせることで、異常震域に対応した最大加速度、最大速度の予測値が求められる。この式は、実際の観測記録の分布に基づいて決められたものであり、Q 値構造そのものと直接結びつかないという難点がある。しかし、海溝軸から遠くなるほど Low-Q の領域を通る距離が長くなり地震動振幅が小さくなる、震源が深い地震であるほど太平洋側と日本海側で Low-Q の領域を通る距離の差が大きくなり異常震域がより顕著に見られる、という現象を定性的にはよく説明できている（ a として負の値が求められている）。ところで、この Low-Q の領域は図 3 のように火山フロント付近を境界として存在していると考えられている¹¹⁾。したがって、前論文では海溝軸と火山フロントが東北日本全域で平行であることを暗に仮定している。しかし、実際には北海道東部から千島列島にかけて、海溝軸から火山フロントまでの距離が次第に短くなっており、少なくともこの地域に関して両者は平行ではない（図 1）。前論文の結果において、 X_{tr} が約 250km に位置する地域では補正係数 A の値が震源によらず 1 となる。この位置は北海道東部では火山フロントよりも日本海側となっていて、明らかに Low-Q の領域の影響を受ける地域に含まれるが、他の地域ではその影響がないと考えられる火山フロントよりも太平洋側となっている（図 1）。したがって、北海道東部では（1）式の形式による補正係数によって地震動の予測値が他の地域と比べて過大評価となる傾向が生じる。この問題に対処するため、 X_{tr} に替えて観測点から火山フロントまでの最短距離 X_{vf} （単位は km）を導入する。火山フロントの位置は表 2 に示す 9 個の基準点を直線で結ぶことにより設定し、それよりも太平洋側の地域で正、日本海側の地域で負の値をとるように X_{vf} を定める。

表 2 設定した火山フロントの基準点位置。

緯度 [° N]	45.9	44.3	43.6	42.6	39.3	37.2	36.1	34.1	31.0
経度 [° E]	150.0	146.9	145.0	141.2	141.0	140.1	138.7	139.7	139.9

4. 関東・甲信越地域に対する適用性の検討

前論文では、図3のような二次元的なQ値構造を仮定できる領域として、北海道および東北地方のみを対象としていた。ここでは、関東甲信越地域について、実際の観測記録をもとに異常震域現象が見られるかどうかについて検討を行った。図4は関東・甲信越地域で強震動記録が得られた地震の観測値と距離減衰式に地盤増幅特性を考慮した予測値の比（図中の「obs/(pre × G)」）の例を示している。観測点が太平洋側になる（Xvfが大きい）ほどこの値が大きくなるのが異常震域現象に対応する。その結果、北関東や新潟県内においては異常震域現象が見られることが確認できた。一方で、図4の下段に赤丸で示している南関東を含む北緯35°から36°の間に位置する地域では、観測値と予測値の比が火山フロントからの距離によらずほぼ一定の値となっており、異常震域現象が見られないことが分かった。このことは、三次元Q値構造^{例えば、16)、17)}において、この地域が明瞭にHigh-QとLow-Qの領域に分かれていないこととも対応している。そこで、北緯35°から36°の間に位置する観測点は異常震域に関する補正係数を適用しない範囲とし、解析に用いる記録からも除外した。

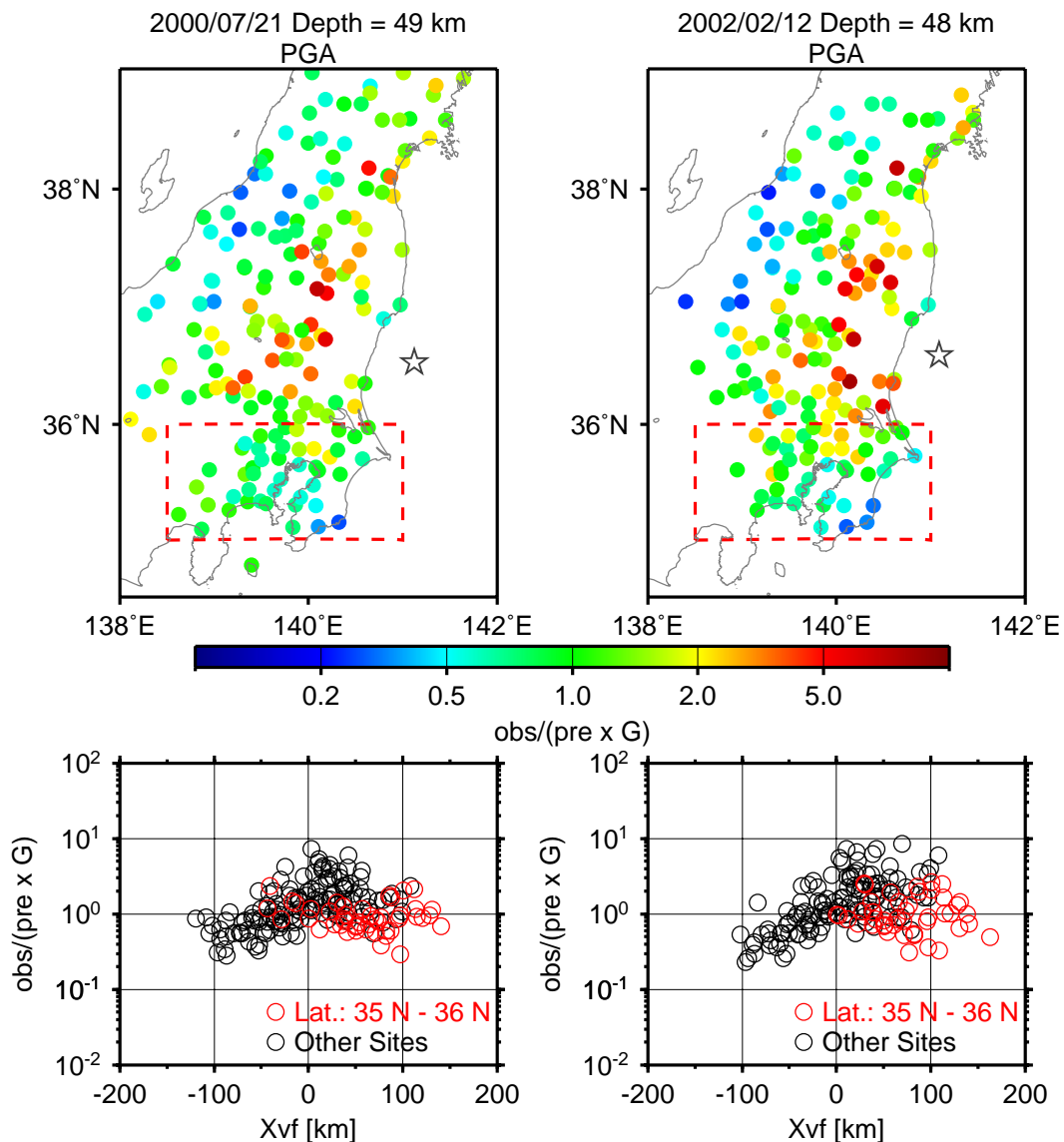


図4 南関東地域における観測値と予測値の比「obs/(pre × G)」と Xvf の関係の例。

5. 震源特性の除去

異常震域のための補正係数は、伝播経路特性の違いを補正することが目的であるため、震源特性および地盤増幅特性による影響を除去したデータを用いて求めることが必要である。地盤増幅特性に関しては、Kanno et al. (2005)⁷⁾ に示されている深さ 30m までの平均 S 波速度を用いた補正（付録を参照）を行う。震源特性に関しては、基準式ではマグニチュードのみで表現されている。しかし、マグニチュード以外にも地震動強さに影響を与える震源特性がある。例えば、実効応力^{23), 24)} が大きくなると、地震動の短周期成分の振幅が大きくなることが知られている。ここでは、以下のようにしてそのような震源特性による影響を見積り、観測記録から除去することにした。まず、地震動強さ指標ごとに、本検討で用いた全記録における X_{vf} の平均値を求める（図 5(a) の \bar{X}_{vf} ）。ここで、 \bar{X}_{vf} を基準式の値を最も反映している位置、すなわち伝播経路特性に関する補正が不要な場所と仮定する。次に、各地震について伝播経路特性の影響、すなわち異常震域を評価するために、(1) 式と同様である

$$\log \{ \text{obs}/(\text{pre} \times G) \} = a \times X_{vf} + b \quad (2)$$

の関係が成り立っているものとして、最小二乗法により地震ごとに係数 a 、 b を求める。ただし、 obs は観測値、 pre は基準式より求められる予測値、 G は地盤増幅率である。先の仮定より \bar{X}_{vf} では伝播経路特性、地盤増幅特性がいずれも平均的に見て適切に評価されている位置とみなせる。したがって、 \bar{X}_{vf} における観測値と予測値の差は震源特性の違いによって生じていると考えられるだろう。そこで、

$$\log S = a \times \bar{X}_{vf} + b \quad (3)$$

と表される S をここでは各地震の震源特性係数と呼ぶ（図 5(b)）。なお、基準式の導出に用いられたデータはフィリピン海プレートの地震や西日本の観測点記録も含まれており、本検討のものとは一致していないため、正確に基準式の値を反映している位置を求めることは非常に困難である。したがって、この震源特性係数はあくまで相対的なものであることを注意しておく。

6. 改良された補正係数

前章において述べたように、 \bar{X}_{vf} では伝播経路特性の補正が不要である位置と仮定していることから、

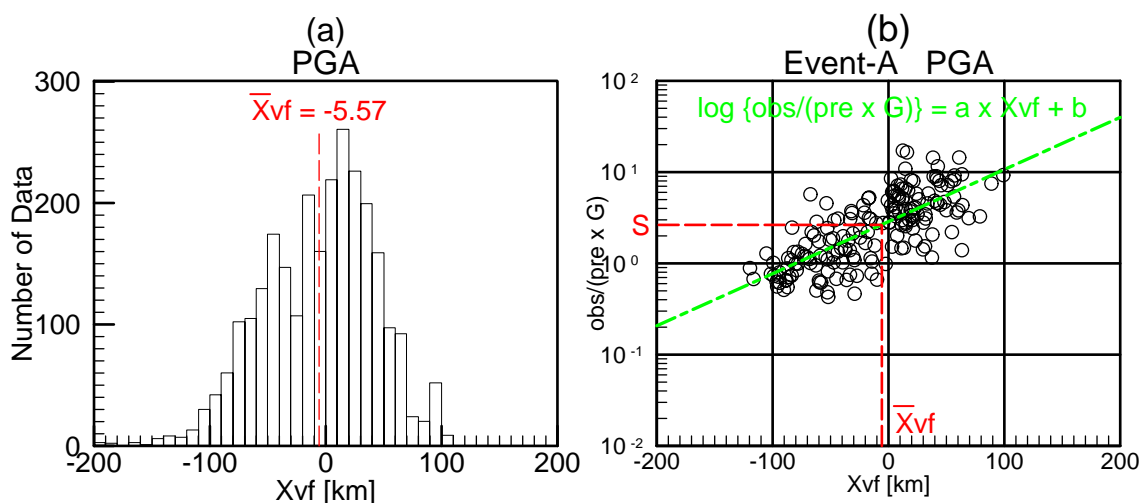


図 5 \bar{X}_{vf} および震源特性係数の求め方。

補正係数の値は 1 となる。そこで、新たな補正係数 (A_{new}) として、

$$\log A_{new} = \log \{ \text{obs}/(\text{pre} \times G \times S) \} = \alpha \times (X_{vf} - \bar{X}_{vf}) \times (D-30) \quad (4)$$

のように (1) 式の形を変更する。ただし、 S は前章で述べた震源特性係数である。回帰係数 α は、各地震動指標に対して最小二乗法により求めた。結果を表 3 に示す。表 3 の \bar{X}_{vf} において周期 5 秒の応答スペクトルおよび最大速度において他の指標と値が異なっているのは、これらの指標のデータ数が他のものと比べて少ないためである (表 1 参照)。

7. 震源特性に関する補正係数の提案

5 章において求めた個々の地震に対する震源特性係数 S と震源の深さの関係を、地震種別ごと (ここではプレート間地震とスラブ内地震) に区別して図 6 に示す。地震種別は、防災科学技術研究所の F-net によって求められている断層面解²⁵⁾ と震源位置に基づいて区別した (表 1)。スラブ内地震の震源特性係数はプレート間地震のものよりも明らかに大きくなっていることが分かる。このことは、プレート間地震よりもスラブ内地震の実効応力が大きいことが示されている他の研究結果^{26)~30)} と整合する。一方で、実効応力の震源深さ依存性が示されている研究もあるが^{26)、27)}、本検討で求められた震源特性係数からは確認できない。このような震源特性係数に関して、本来は実効応力をパラメータとした補正係数

表 3 Kanno et al. (2005)⁷⁾ の距離減衰式に対する補正のための各係数。

Period	A_{new}		Sc		Period	A_{new}		Sc	
	α	\bar{X}_{vf}	PB	IS		α	\bar{X}_{vf}	PB	IS
PGA	9.91×10^{-5}	-5.57	0.82	1.73	PGV	3.79×10^{-5}	-2.11	0.72	1.69
5% damped acceleration response spectra					0.50	7.07×10^{-5}	-5.57	0.94	1.70
0.05	1.12×10^{-4}	-5.57	0.78	1.76	0.60	5.97×10^{-5}	-5.57	0.84	1.60
0.06	1.16×10^{-4}	-5.57	0.77	1.75	0.70	5.07×10^{-5}	-5.57	0.80	1.47
0.07	1.18×10^{-4}	-5.57	0.78	1.81	0.80	4.53×10^{-5}	-5.57	0.79	1.40
0.08	1.19×10^{-4}	-5.57	0.78	1.84	0.90	3.91×10^{-5}	-5.57	0.80	1.39
0.09	1.19×10^{-4}	-5.57	0.81	1.92	1.00	3.93×10^{-5}	-5.57	0.79	1.39
0.10	1.18×10^{-4}	-5.57	0.81	1.93	1.10	3.76×10^{-5}	-5.57	0.78	1.38
0.11	1.16×10^{-4}	-5.57	0.86	2.03	1.20	3.25×10^{-5}	-5.57	0.81	1.43
0.12	1.14×10^{-4}	-5.57	0.87	2.00	1.30	2.71×10^{-5}	-5.57	0.82	1.45
0.13	1.13×10^{-4}	-5.57	0.88	1.99	1.50	2.45×10^{-5}	-5.57	0.83	1.50
0.15	1.15×10^{-4}	-5.57	0.90	1.90	1.70	2.00×10^{-5}	-5.57	0.82	1.58
0.17	1.10×10^{-4}	-5.57	0.93	1.87	2.00	1.38×10^{-5}	-5.57	0.83	1.68
0.20	1.06×10^{-4}	-5.57	0.94	1.75	2.20	9.52×10^{-6}	-5.57	0.84	1.66
0.22	1.02×10^{-4}	-5.57	0.93	1.75	2.50	4.46×10^{-6}	-5.57	0.87	1.67
0.25	9.53×10^{-5}	-5.57	0.96	1.81	3.00	1.81×10^{-6}	-5.57	0.92	1.64
0.30	8.71×10^{-5}	-5.57	0.94	1.84	3.50	-1.53×10^{-6}	-5.57	0.93	1.62
0.35	8.30×10^{-5}	-5.57	0.93	1.85	4.00	-2.80×10^{-6}	-5.57	0.93	1.61
0.40	7.79×10^{-5}	-5.57	0.91	1.80	4.50	-1.57×10^{-6}	-5.57	0.93	1.58
0.45	7.59×10^{-5}	-5.57	0.90	1.76	5.00	-5.90×10^{-7}	-5.56	0.92	1.57

PB : プレート間地震、IS : スラブ内地震

を提案することが最良の方法であると考えられるが、現在のところ実効応力を精度良く求めることは非常に困難である。そこで本検討では、それぞれの地震種別に対して S の平均値を震源特性に関する補正係数 (S_c) として便宜的に定義することにする。得られた値は表 3 に示してある。なお、フィリピン海プレートで発生する地震に関しては、太平洋プレートで発生する地震と実効応力が異なるという報告²⁷⁾もあるため、ここで求められた震源特性に関する補正係数を適用できない可能性がある。

8. 考察

結果として、北緯 35° から 36° の間を除く東経 138° 以東の地域において、太平洋プレートで発生する震源が 30km よりも深い地震に対する地震動の予測値 (P) は以下の式により求められることになる。

$$P = \text{pre} \times G \times A_{\text{new}} \times S_c \quad (5)$$

図 7 に観測記録と予測値との誤差(対数標準偏差)を、各補正係数の適用について比較したものを示す。最大速度および $0.3 \sim 1$ 秒の周期帯については、地盤増幅特性による補正 (G) によって誤差が小さくなっている。これは、表層 30m の平均 S 波速度とこの周期帯の増幅率との相関が良いことを表していると言える。異常震域に関する補正 (A_{new}) の適用によって最大加速度および短周期成分の誤差が小さくなっており補正の効果が大きく現れている。その一方で、周期 2 秒以上の長周期成分では誤差の変化がほとんど見られない。これは、補正の効果がないことを意味しており、長周期成分については異常震域に

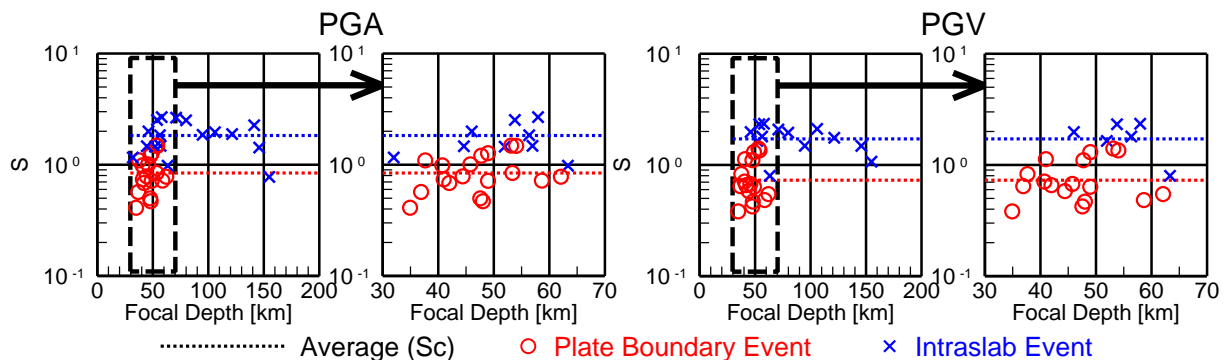


図 6 求められた震源特性係数の例。

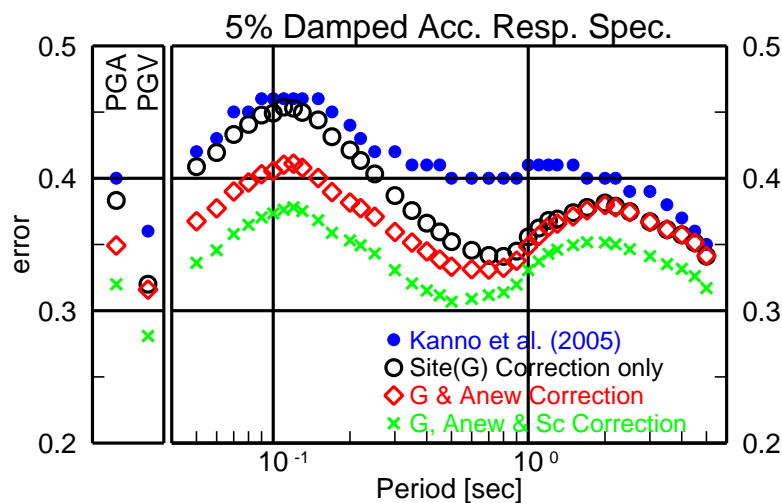


図 7 観測値と予測値の誤差の比較。

関する補正が不要であると考えられる。このことは、求められた係数 α の絶対値が短周期成分ほど大きいことと対応している。前田・笹谷 (2002)²²⁾ は北海道東部の Q 値構造を推定し、周期 0.5 秒以上の長周期帯においては太平洋側と日本海側で Q 値に明瞭な差が見られないこと、それよりも短周期帯では周期が短くなるほど両地域間の Q 値の差が大きくなることを明らかにしており、本検討の結果と矛盾しない。最後に、地震種別に関する補正 (S_c) を適用することによって、最大加速度、最大速度を含め、全周期帯で誤差が小さくなる。このことから、既存の距離減衰式において提案されているプレート間地震

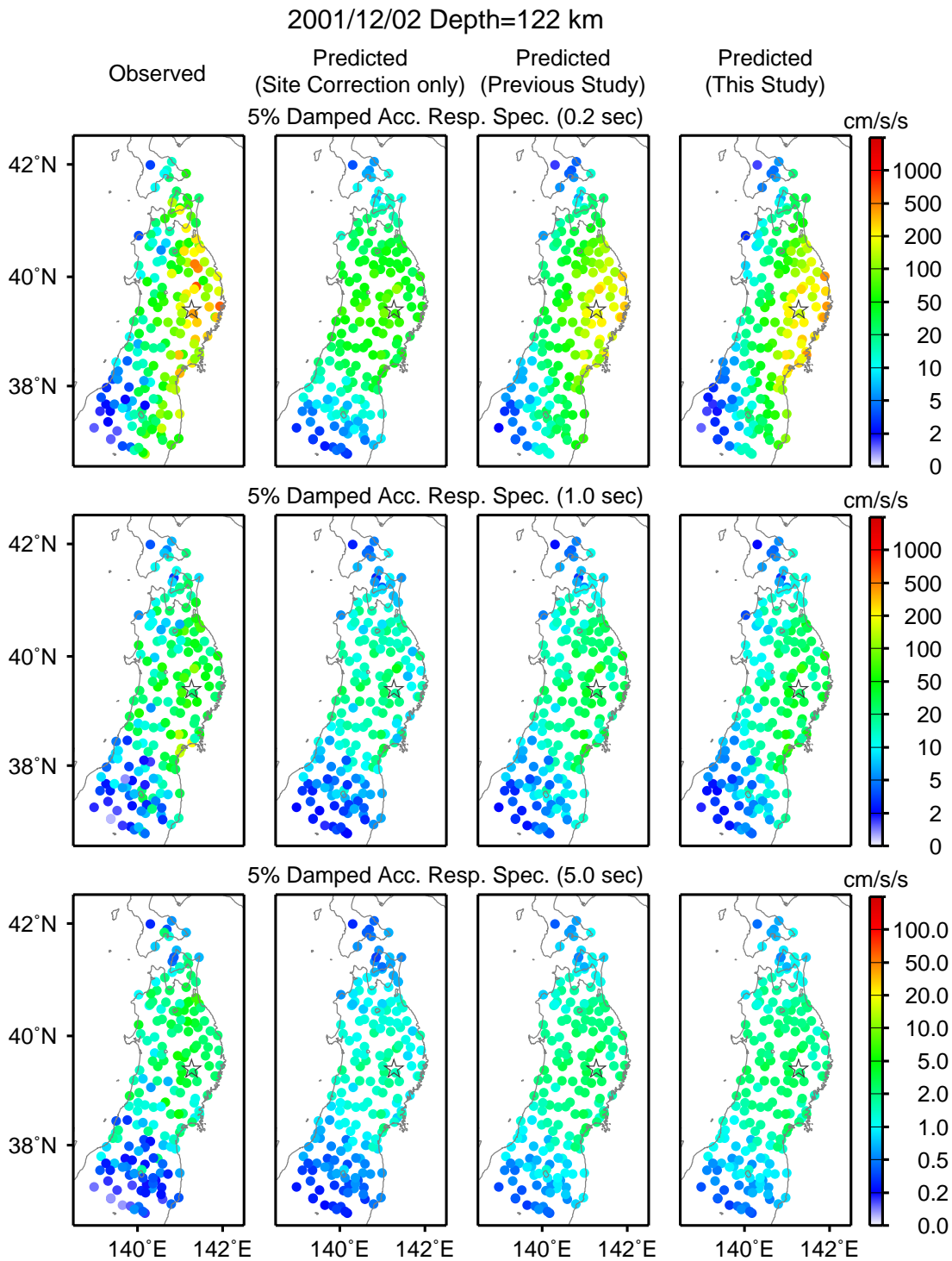


図 8a 観測値と予測値の比較例 (東北地方の地震)

とスラブ内地震というおおまかな分類のみによっても強震動予測の精度が大幅に向上することが確認された。

観測値と予測値の地震動分布を比較した例を図8に示す。実際の観測記録において、異常震域が短周期成分(0.2秒)で顕著に見られるのに対して、長周期成分(5秒)ではほとんど見られない。本検討で求められた補正係数でもこのことが表現されており、長周期成分では予測結果においても太平洋側と日本海側で振幅の差がほとんど見られない。一方、異常震域が顕著である短周期成分に注目すると、図8aの東北地方の地震では海溝軸までの距離をパラメータとした前論文の手法による予測結果と本手法の予測結果に違いは見られないものの、図8bの北海道東部の地震では、海溝軸までの距離を用いた前論文の手法では予測値が過大評価となっていた点が本手法で改善されていることが分かる。

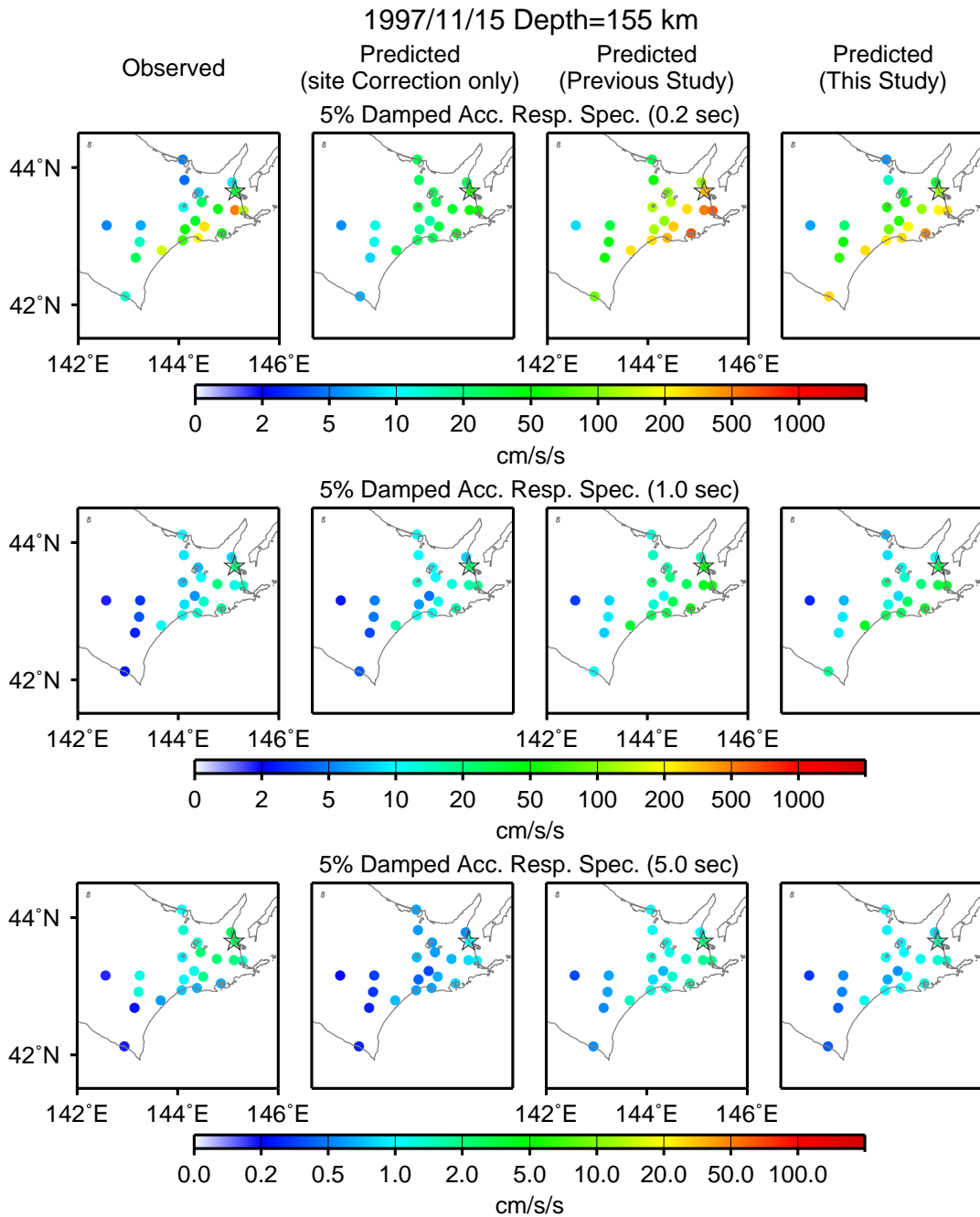


図8b 観測値と予測値の比較例(北海道東部の地震)

Low-Q の領域を地震波がほとんど通っていないと考えられる、北関東以北の太平洋側の地域を対象とした、周波数 (f) に依存する Q 値

$$Q = Q_0 \times f^n \quad (6)$$

の推定結果^{22)、27)、31)~33)}では、2Hz 以上 (周期 0.5 秒以下) の範囲において Q_0 として 50~120、 n として 0.7~1.2 が示されており、5Hz (周期 0.2 秒) で 400 前後、10Hz (周期 0.1 秒) で 800 前後の Q 値となっている。いま、太平洋側の観測点に対する Q 値が $Q_0=80$ 、 $n=1.0$ であるとして、本検討で求められた補正係数 A_{new} から Low-Q 領域における Q 値の推定を試みる。火山フロント直下 (すなわち、 $X_{vf}=0$) の深さ 150km で発生した地震について、震源に対して図 9 のような位置関係にある X_{vf} が +50 および -50 の二つの観測点 A'、B' を考える。本検討で求められた補正係数 A_{new} において、日本海側の観測点 B' での太平洋側の観測点 A' に対する振幅の比は、5Hz で 0.0535 (0.2722/5.0916) となっている。一方、S 波の Q 値による地震動振幅の減衰率 (Z) は、

$$Z = \exp(-\pi \cdot f \cdot T_s/Q) \quad (7)$$

と表される。ただし、 T_s は S 波の走時で、ここでは JMA2001 走時表³⁴⁾より、震源深さ 150km、震央距離 (ここでは X_{vf} と等値である) 50km における 37.36 秒を用いる。太平洋側の観測点 A' に関して設定した Q 値を (7) 式に代入することにより、Z として周波数によらず一定の値 (0.2306) が得られる。日本海側の観測点 B' における 5Hz の振幅を説明するためには、観測点 B' に対する Z の値として 0.0123 (0.0535 × 0.2306) が必要である。したがって、観測点 B' に対する Q 値として約 134 が (7) 式より求

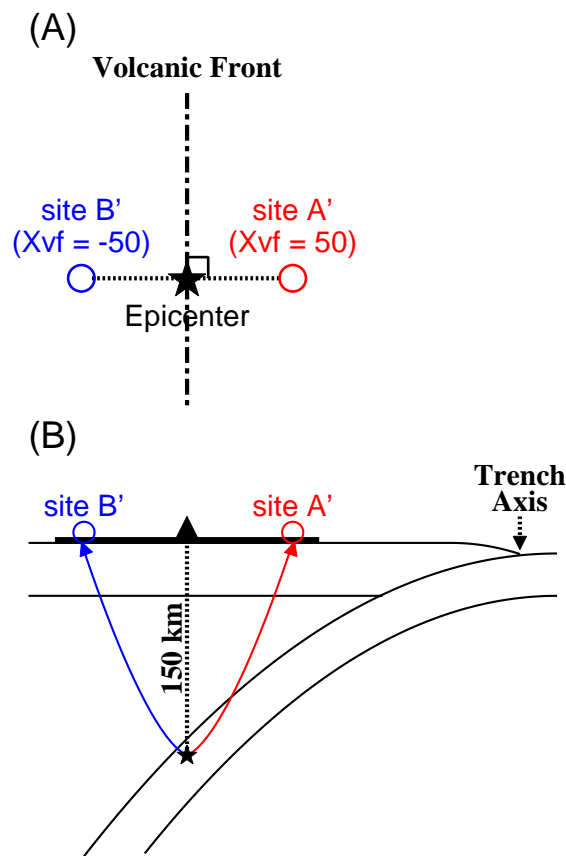


図 9 Q 値推定のために設定した震源 () と観測点 ()、(A)平面図、(B)断面図。

められる。同様にして、10Hz では約 249 という Q 値が求められる。火山フロントよりも背弧側の地域を対象として Q 値を求めた既往の研究結果^{22), 27)} では、ばらつきはあるものの 5Hz で 80~350、10Hz で 200~500 が得られており、本検討結果と概ね対応している。このことは、補正係数 A_{new} によって Q 値による減衰の違いが適切に表現できていることを示していると言える。

本検討で求められた震源特性係数から、スラブ内地震の予測値はプレート間地震と比べて最大加速度が約 2.1 倍、最大速度が約 2.3 倍大きくなる。また、応答スペクトルについては、長周期成分では約 1.7 倍で、短周期になるほど差が大きくなり、0.1 秒以下の短周期成分で約 2.4 倍スラブ内地震の予測値が大きくなる。地震種別を区別して距離減衰式を導出している司・翠川(1999)⁶⁾ や翠川・大竹(2002)¹¹⁾ では、最大加速度で約 1.6 倍、最大速度で約 1.4 倍となっており、本検討よりも地震種別間の差が小さい。ただし、上記の距離減衰式はともに震源の深さがパラメータとなっている。プレート間地震はせいぜい深さ 50km までであるのに対してスラブ内地震はそれよりも深いものも多く、100km を超える例もある。本検討で用いたデータにおいても、平均的な震源の深さはプレート間地震で 40~50km、スラブ内地震で 80~90km となっている。したがって、本検討の震源特性係数には上記の距離減衰式で震源の深さ依存性として評価されている分も含まれていると考えられる。一方、佐藤(2004)³⁵⁾ は、福島県沖および宮城県沖の地震について加速度震源スペクトルの短周期レベルの評価を行い、スラブ内地震の短周期レベルがプレート間地震よりも約 2.7 倍大きいことを示している。本検討の結果はこれと比べるとやや小さめである。佐藤(2004)³⁵⁾ の解析では対象地域が限定されており、地域性が現れているのかもしれない。ただし、本検討は \bar{X}_{vf} の位置において伝播経路特性の補正が不要であるとの仮定のもとで求められた震源特性であり、これ以上の厳密な議論はできないものと考えられる。

9. まとめ

前論文で提案した、異常震域に対応するための距離減衰式の補正係数を改良ならびに拡張を行った。特異な Q 値構造をより精度良く表現するために、観測点から海溝軸までの距離に替えて観測点から火山フロントまでの距離を導入した。東経 138° 以东の関東甲信越地域に対する適用性を検討した結果、南関東を含む北緯 35° から 36° の地域については異常震域が明瞭には見られないことから、補正係数を適用する必要がないことを示した。

基準式では考慮されていない震源特性に関する検討を行った結果、震源の深さに対する依存性は確認できなかったが、プレート間地震とスラブ内地震との間では明らかな違いが見られた。そこで、両者を区別するための補正係数についても導出した。異常震域に対応するための補正係数と併せて用いることによって地震動の予測値の精度が大きく向上することを示した。

Kanno et al. (2005)⁷⁾ による距離減衰式を基準としたことから、最大加速度、最大速度のみではなく応答スペクトルについても異常震域を簡便な強震動予測手法によって表現することが可能となった。

謝辞

清水建設技術研究所の奥村俊彦氏、石川裕氏より貴重な御意見をいただきました。三名の査読者からの意見により内容が大幅に改善されました。解析には防災科学技術研究所の K-NET、KiK-net 強震動記録と F-net による解析結果、ならびに港湾空港技術研究所の港湾地域強震観測の強震動記録を使用しました。一部の図は GMT³⁶⁾ によって作成しました。本研究は、防災科学技術研究所の特定プロジェクト研究「地震動予測地図作成手法の研究」のもとで行われた。

参考文献

- 1) 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の最大加速度・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.
- 2) 西村利光、堀家正則：強震ネットワーク (K-NET) データから推定した水平・上下最大加速度の距

- 離減衰式、日本建築学会構造系論文集、No. 571、2003年、pp. 63-70.
- 3) 堀家正則、西村利光：強震ネットワーク（K-NET）データから推定した水平動と上下動の最大速度距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、No. 575、2004年、pp. 73-79.
 - 4) 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年秋季大会、2004年、B26.
 - 5) 森川信之、神野達夫、成田章、藤原広行、福島美光：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、日本地震工学会論文集、第3巻第4号、2003年、pp. 14-26.
 - 6) 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.
 - 7) Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H. and Fukushima, Y.: Determination of an empirical
attenuation relation reflecting average characteristics of strong ground motion, Proc. International Symposium on
Earthquake Engineering, Kobe, 2005 (submitted to Bull. Seism. Soc. Am.).
 - 8) 木下繁夫、上原正義、斗沢敏夫、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.
 - 9) 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
ースレター、Vol. 12、2000年、pp. 31-33.
 - 10) 野津厚、林公美、菅野高弘：港湾地域強震観測の概要、防災科学技術研究所研究資料、第264号、
2005年、pp. 29-32.
 - 11) Utsu, T.: Anomalies in seismic wave velocity and attenuation associated with a deep earthquake zone, J. Fac.
Sci., Hokkaido Univ., Ser. (Geophysics), Vol. 3, 1967, pp. 1-25.
 - 12) 伊神輝：日本の火山前線下における地震波の減衰、地震第2輯、第28巻、1975年、pp. 61-73.
 - 13) 海野徳仁、長谷川昭：東北日本弧の三次元 Q_s 構造、地震第2輯、第37巻、1984年、pp. 217-228.
 - 14) Tsumura, N., Hasegawa, A. and Horiuchi, S.: Simultaneous estimation of attenuation structure, source
parameters and site response spectra - application to the northeastern part of Honshu, Japan, Phys. Earth Planet.
Inter., Vol. 93, 1996, pp. 105-121.
 - 15) 中村亮一、島崎邦彦、橋田俊彦：震度データトモグラフィーによる日本列島下の三次元減衰構造お
よび広域震度予測、地震第2輯、第47巻、1994年、pp. 21-32.
 - 16) 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.
 - 17) 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、日本地震学会講演予稿集、2002年秋季大会、2002年、P174.
 - 18) 宇佐美龍夫、濱松音蔵、久本壮一、渡邊健、中村亮一、植竹富一：震度分布からみた東北日本の地
震の特性、地震第2輯、第45巻、1992年、pp. 339-351.
 - 19) 川瀬博：北海道内の各地気象台における強震動特性、日本建築学会構造系論文集、No. 459、1994年、
pp. 57-64.
 - 20) 笹谷努、前田宜浩、高井伸雄、清水学：2003年十勝沖地震による広域における広帯域強震動特性、
日本地震工学会大会 - 2004梗概集、2005年、pp. 28-29.
 - 21) 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.
 - 22) 前田宜浩、笹谷努：島弧における上部マンツルの Q_s 値構造とスラブ内地震による強震動、第11回
日本地震工学シンポジウム論文集、2002年、pp. 505-510.
 - 23) Brune, J. N.: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, J. Geophys. Res., Vol.
75, No. 26, 1970, pp. 4997-5009.
 - 24) Brune, J. N.: Correction, J. Geophys. Res., Vol. 76, No. 20, 1971, pp. 5002.
 - 25) 福山英一、石田瑞穂、Douglas, S. D., 川井啓廉：オンライン広帯域地震データを用いた完全自動メ

- カニズム決定、地震第2輯、第51巻、1998年、pp. 149-156.
- 26) Asano, K., Iwata, T. and Irikura, K.: Source characteristics of shallow intraslab earthquakes derived from strong-motion simulations, *Earth Planets Space*, Vol. 55, 2003, pp. e5-e8.
- 27) 川瀬博、松尾秀典：K-NET, KiK-net, JMA 震度計観測網による強震動波形を用いた震源・パス・サイト各特性の分離解析、*日本地震工学会論文集*、第4巻第1号、2004年 pp. 33-52.
- 28) 森川信之、笹谷努、藤原広行：経験的グリーン関数法によるスラブ内地震の震源モデルの構築、第11回日本地震工学シンポジウム論文集、2002年、pp. 133-138.
- 29) 池田孝、武村雅之、加藤研一：強震記録に基づく東北地方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. 572、2003年、pp. 39-46.
- 30) 池田孝、武村雅之、加藤研一：強震記録に基づくフィリピン海プレート内で発生する地震のスラブ内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. 586、2004年、pp. 53-61.
- 31) 山本みどり、岩田知孝、入倉孝次郎：釧路地方気象台における強震動と弱震動に対するサイト特性評価、*地震第2輯*、第48巻、1995年、pp. 341-351.
- 32) Morikawa, N. and Sasatani, T.: The 1994 Hokkaido Toho-oki earthquake sequence: The complex activity of intra-slab and plate-boundary earthquakes, *Phys. Earth Planet. Inter.*, Vol. 121, 2000, pp. 39-58.
- 33) 佐藤智美、巽誉樹：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*、No. 556、2002年、pp. 15-24.
- 34) 上野寛、畠山信一、明田川保、舟崎淳、浜田信生：気象庁の震源決定方法の改善 - 浅部速度構造と重み関数の改良 - 、*検震時報*、65、2002年、pp. 123-134.
- 35) 佐藤智美：宮城県沖のスラブ内地震とプレート境界地震の短周期レベルの推定、*日本地震工学会論文集*、第4巻第1号、2004年、pp. 1-4.
- 36) Wessel, P. and Smith, W.: New version of the generic mapping tools, *EOS. Trans. Am. Geophys. Union*, Vol. 76, 1995.

Kanno et al. (2005)⁷⁾ では、震源が 30km 以浅とそれよりも深い地震の二種類の距離減衰式が提案されている。ここでは、本論文で用いた震源が 30km よりも深い地震に対する式について説明する。深い地震において、距離減衰特性が浅い地震と異なっているという既往の研究結果^{1)~3)} や震源に近いところで振幅の頭打ちが見られないことから、以下の形の式を提案している。

$$\log A = a_2 M_w + b_2 X - \log(X) + c_2 \quad (A1)$$

ただし、A は地震動指標 (最大加速度 [PGA; cm/s/s]、最大速度 [PGV; cm/s]、または減衰 5% の加速度応答スペクトル [cm/s/s])、 M_w は地震のモーメントマグニチュード、X は断層最短距離 [km]、 a_2 、 b_2 および c_2 は回帰係数である。ここでの地震動強さは、水平動二成分のベクトル合成値である。対数は、以後も含めて常用対数である。

式の導出に用いたデータは、K-NET⁸⁾、KiK-net⁹⁾ によるものは平成 17 年 (2003 年) 十勝沖地震まで、その他に関しては 2002 年末までに観測された強震動記録のうち、以下の条件を満たすものである。

- 1) M_w が 5.5 以上の地震である。
- 2) 地表で観測されている。
- 3) 水平動二成分の記録が得られている。
- 4) 5 点以上の観測点で記録が得られている地震である。
- 5) 福島・田中 (1992)^{A1)} による距離減衰式より予測される最大加速度が 2cm/s/s 以上となる断層最短距離以内に観測点がある。ただし、機械式の地震計による記録および最大速度のためのデータについては、予測される最大加速度が 10cm/s/s 以上となる観測点である。

M_w は以下の優先順位にしたがって設定している。1) 断層パラメータハンドブック^{A2)} に記載されている値、2) 防災科学技術研究所の F-net²⁵⁾ によって推定された値、3) Harvard 大学のグループによって推定された値、4) Fukushima (1996)^{A3)} による気象庁マグニチュードとの経験的關係式より求められる値。断層最短距離は、 M_w が 6.0 以上で震源インバージョン解析等の既往の研究において設定された断層面がある地震はそれらに基づいて断層面を設定し、それ以外の地震は点震源として計算している。加速度記録より最大速度を求める際には、0.1Hz のハイパスフィルターを通して積分している。ただし、スペクトル形状よりノイズレベルが高いと判断した記録については、それよりも高周波数側にカット周波数を設定している。震源および観測点の分布を図 A1 に、断層最短距離と地震のマグニチュードの分布を図 A2 に、データの数を表 A1 にそれぞれ示す。また、求められた距離減衰式を図 A3 に示す。

地盤増幅率 (G) は、Midorikawa et al. (1994)^{A4)} の考え方にしたがって、以下の式で表される。

$$\log G = p \log AVS30 + q \quad (A2)$$

$$AVS30 = 30 / \sum_{i=1}^n (H_i / V_{s_i}) \quad (A3)$$

ただし、n は地表から深さ 30m までの層の数、 H_i は i 番目の層の層厚 [m]、 V_{s_i} は i 番目の層の S 波速度 [m/s]、p および q は回帰係数である。AVS30 を求めるためには深さ 30m までの S 波速度構造が既知である必要があるが、深さが 20m までの S 波速度構造しか得られていない K-NET 観測点にも (A2) 式を拡張して適用できるようにするため、深さ 30m 以深まで S 波速度構造が既知である観測点 (例えば、KiK-net) の情報をもとに以下の経験的關係式が求められている。

$$AVS30 = 1.13AVS20 + 19.5 \quad (A4)$$

(A1)、(A2) 式の各回帰係数の値を表 A2 に示す。

参考文献

- A1) 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、1992 年、116。
 A2) 佐藤良輔：日本の断層パラメータハンドブック、鹿島出版会、1989 年。
 A3) Fukushima, Y.: Scaling relations for strong ground motion prediction models with M2 terms, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 86, 1996, pp. 329-336.
 A4) Midorikawa, S., Matsuoka, M. and Sakugawa, K.; Site effects on strong-motion records observed during the 1987 Chiba-ken-toho-oki, Japan earthquake, Proc. 9th JEEES, 1994, pp. E-086-E-090.

表 A1 震源が 30km よりも深い地震に対する距離減衰式の導出に用いられたデータ数。カッコ内は地震の数 (Kanno et al., 2005 より)

Period	Number of data	Period	Number of data
PGA	8150 (111)	PGV	6490 (110)
5% damped acceleration response spectra		1.70 ~ 2.00	8137 (111)
0.05 ~ 1.00	8150 (111)	2.20	8100 (111)
1.10 ~ 1.20	8145 (111)	2.50 ~ 3.00	8039 (110)
1.30	8144 (111)	3.50 ~ 4.50	7963 (110)
1.50	8140 (111)	5.00	7721 (101)

表 A2 式 (A1)、(A2) 式の各回帰係数の値 (Kanno et al., 2005 より)

Period	a ₂	b ₂	c ₂	p	q	Period	a ₂	b ₂	c ₂	p	q
PGA	0.41	-0.0039	1.56	-0.55	1.35	PGV	0.55	-0.0032	-0.57	-0.71	1.77
5% damped acceleration response spectra						0.50	0.47	-0.0030	1.19	-0.91	2.25
0.05	0.39	-0.0040	1.76	-0.32	0.80	0.60	0.49	-0.0028	0.95	-0.92	2.30
0.06	0.39	-0.0041	1.86	-0.26	0.65	0.70	0.51	-0.0026	0.72	-0.96	2.41
0.07	0.38	-0.0042	1.96	-0.24	0.60	0.80	0.53	-0.0025	0.49	-0.98	2.46
0.08	0.38	-0.0042	2.03	-0.26	0.64	0.90	0.56	-0.0023	0.27	-0.97	2.44
0.09	0.38	-0.0043	2.08	-0.29	0.72	1.00	0.57	-0.0022	0.08	-0.93	2.32
0.10	0.38	-0.0043	2.12	-0.32	0.78	1.10	0.59	-0.0022	-0.08	-0.92	2.30
0.11	0.38	-0.0044	2.14	-0.35	0.84	1.20	0.60	-0.0021	-0.24	-0.91	2.26
0.12	0.38	-0.0044	2.14	-0.39	0.94	1.30	0.62	-0.0020	-0.40	-0.88	2.20
0.13	0.38	-0.0044	2.13	-0.43	1.04	1.50	0.64	-0.0020	-0.63	-0.85	2.12
0.15	0.39	-0.0044	2.12	-0.53	1.28	1.70	0.66	-0.0018	-0.83	-0.83	2.06
0.17	0.40	-0.0043	2.08	-0.61	1.47	2.00	0.68	-0.0017	-1.12	-0.78	1.92
0.20	0.40	-0.0042	2.02	-0.68	1.65	2.20	0.69	-0.0017	-1.27	-0.76	1.88
0.22	0.40	-0.0041	1.99	-0.72	1.74	2.50	0.71	-0.0017	-1.48	-0.72	1.80
0.25	0.41	-0.0040	1.88	-0.75	1.82	3.00	0.73	-0.0017	-1.72	-0.68	1.70
0.30	0.43	-0.0038	1.75	-0.80	1.96	3.50	0.75	-0.0017	-1.97	-0.66	1.64
0.35	0.43	-0.0036	1.62	-0.85	2.09	4.00	0.77	-0.0016	-2.22	-0.62	1.54
0.40	0.45	-0.0034	1.49	-0.87	2.13	4.50	0.79	-0.0016	-2.45	-0.60	1.50
0.45	0.46	-0.0032	1.33	-0.89	2.18	5.00	0.82	-0.0017	-2.70	-0.59	1.46

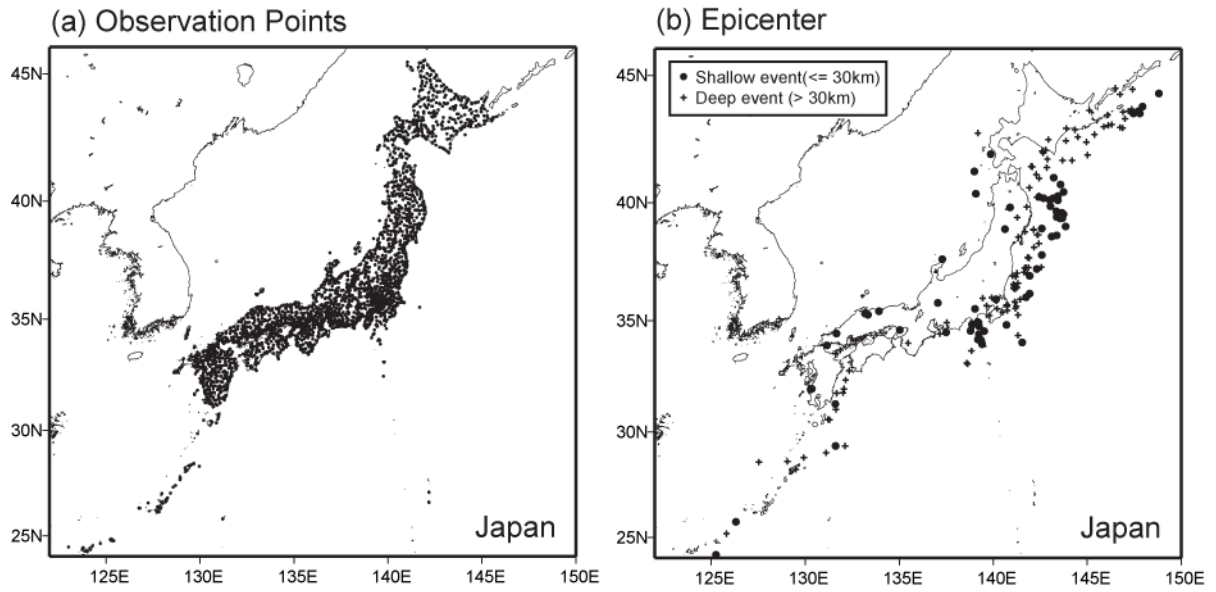


図 A1 距離減衰式の導出に用いた観測点 (左) と震央位置 (右) の分布 (Kanno et al., 2005 より)。

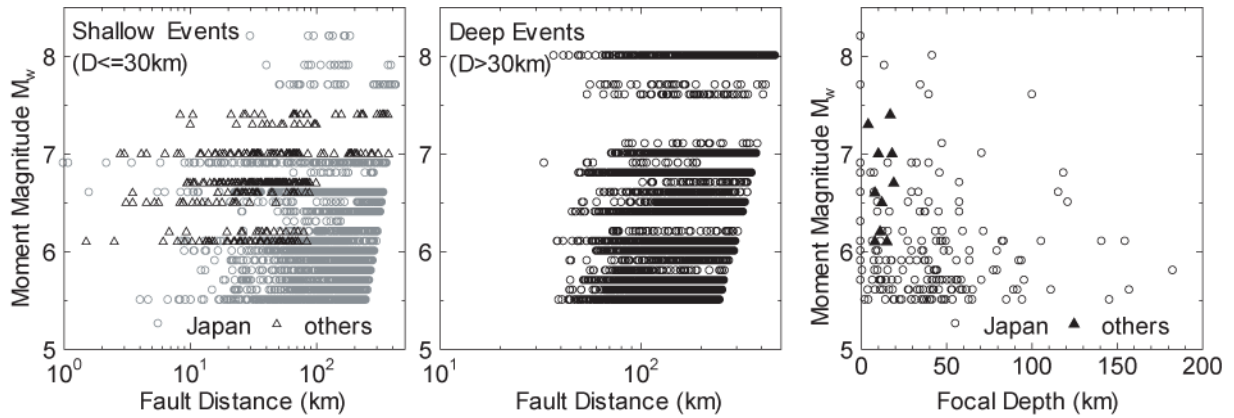


図 A2 震源距離と地震のマグニチュードおよび震源の深さの分布 (Kanno et al., 2005 より)。

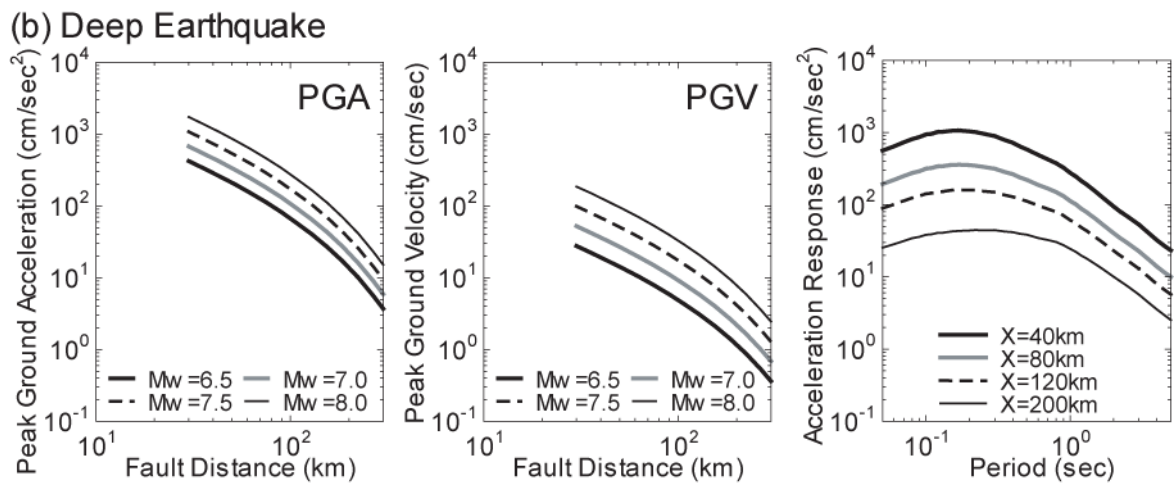


図 A3 求められた距離減衰式 (Kanno et al., 2005 より)。加速度応答スペクトル (右; 減衰 5%) は $M_w=7.0$ のときのものである。

(受理 : 2005 年 7 月 5 日)
(掲載決定 : 2005 年 12 月 27 日)

New Additional Correction Terms for Attenuation Relations of Peak Amplitudes and Response Spectra Corresponding to the Anomalous Seismic Intensity in Northeastern 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, Graduate School of Engineering, Hiroshima University, Dr. Eng.
- 3) Mitsubishi Space Software Co., Ltd.
- 4) Member, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Sci.
- 5) Institute of Technology, Shimizu Corp., Dr. Eng.

ABSTRACT

We improved additional correction terms for empirical attenuation relations to represent anomalous seismic intensity of subduction zone. New additional terms for the empirical attenuation relations by Kanno et al. (2005) were determined not only for peak values but also for response spectra. We introduced distance from the volcanic front, instead of the trench axis, to observation site as a new parameter of the correction term, which is reflecting anomalous Q structure beneath northeast Japan, and the distance from volcanic front was a better explanation than the distance from trench. The coverage of the correction terms extended up to longitude 138 degree east. We also inspected dependence on source characteristics between interplate and intraslab events. The dependence of ground motion amplitude on the event category was considerable, even without the focal depth identification.

Key Words: Strong Motion Prediction, Empirical Attenuation Relation, Anomalous Seismic Intensity, Response Spectra