やや長周期地震動の距離減衰式と 全国の地点補正倍率

片岡 正次郎¹・松本 俊輔²・日下部 毅明³・遠山 信彦⁴

¹正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所地震防災研究室 主任研究官
(〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

E-mail: kataoka-s92rc@nilim.go.jp

²正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所道路研究室 研究官
(元 国土技術政策総合研究所地震防災研究室 研究官)
(〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

³正会員 国土交通省 北海道開発局建設部道路維持課 道路防災対策官
(元 国土技術政策総合研究所地震防災研究室 室長)
(〒060-8511 札幌市北区北8条西2丁目第1合同庁舎)

⁴非会員 応用地質株式会社 東京本社技術センター地震防災部
(〒305-0841 茨城県つくば市御幸が丘43)

既往の観測記録をもとに、周期2~20秒のやや長周期地震動の加速度応答スペクトル(減衰定数1, 5%)と加速度フーリエスペクトルを推定する距離減衰式を作成した。距離減衰式を作成する際の回帰分析で得られる観測点補正值をもとに、全国における地点補正倍率を算定した。三次元差分法で計算されたやや長周期地震動と比較することにより、距離減衰式と地点補正倍率の妥当性を検討した。さらに、東海・東南海・南海連動地震発生時のやや長周期地震動を試算した。これにより、日本全国の任意の点におけるやや長周期地震動の推定が、サイトスペシフィック、かつ簡便に可能であることを示した。

Key Words : attenuation relationship, ground motion, rather-long period, amplification map

1. はじめに

マグニチュード8程度以上の巨大地震では、震源域から数百km離れた地点でも、大きな振幅のやや長周期地震動(周期数秒~数十秒程度)が観測されている。減衰の小さい長周期構造物は、その固有周期と地震動の周期が一致すると共振し、使用性や安全性に影響を及ぼす可能性がある。このような構造物への影響を検討する上では、地点ごとにどの周期帯の地震動が、どの程度大きくなるかを予測することが必要とされる。

やや長周期地震動は、短周期の地震動ほど微細な震源過程や地下構造に影響されないため、差分法を中心とした理論的手法による高精度の予測が期待されている^{1), 2)}。とはいえ、現状では関東平野や大阪平野のように地下構造が比較的明らかになっている地域は少なく、モデル化や数値計算に多大な労力が必要なため、わが国のどこで、どの周期帯の地震動がどの程度増幅されるかは理論的手法では明らかに

されていない。

一方、距離減衰式による地震動強さの推定では、複雑な震源過程などを考慮することはできないが、実際に観測された地震動強さに直接基づいたものであることから、距離減衰式は依然信頼性の高い地震動推定手法の一つである。距離減衰式が観測記録の平均的な傾向を表現したものであることを利用し、そこからのずれに基づいて観測点ごとにやや長周期地震動の揺れやすさを推定することも行われている。例えば岡田・鏡味³⁾は気象庁一倍強震計等の記録をもとに震央距離を指標とする距離減衰式を求め、各観測点の最大変位の距離減衰式からのずれに基づいて、全国94観測点におけるやや長周期での地盤の揺れやすさを算出した。その結果から、やや長周期での揺れやすさが深い地盤条件に影響されること等を指摘している。Mamula *et al.*⁴⁾、井上ら⁵⁾、野田⁶⁾、佐藤ら⁷⁾は、気象庁一倍強震計や87型強震計の記録をもとに、フーリエスペクトル⁴⁾、速度応答スペクトル⁵⁾⁻⁷⁾を指標とした距離減衰式を求め、やや長周

表-1 距離減衰式の作成に用いた地震のリスト

No.	発生年月日	震源地または地震名	M_J	M_w	深さ[km]	タイプ	断層モデル
1	1964.6.16	新潟地震	7.5	7.6	34	海溝	9)
2	1968.4.1	日向灘地震	7.5	7.4	30	海溝	9)
3	1993.7.12	北海道南西沖地震	7.8	7.6	35	海溝	10)
4	1994.10.4	北海道東方沖地震	8.2	8.2	28	海溝	11)
5	1994.10.9	北海道東方沖 (余震)	7.3	7.2	0	海溝	-
6	1994.12.28	三陸はるか沖地震	7.6	7.7	0	海溝	12)
7	1995.1.7	岩手県北東沖	7.2	6.9	48	海溝	-
8	1995.1.17	兵庫県南部地震	7.3	6.9	16	内陸	13)
9	1995.12.4	択捉島南東沖	7.3	7.7	57	海溝	14)
10	1996.8.11	秋田県南部	6.1	5.9	9	内陸	-
11	1997.3.26	鹿児島県北西部	6.6	6.0	12	内陸	15)
12	1997.5.13	鹿児島県北西部	6.4	6.0	9	内陸	15)
13	1997.6.25	山口県北部	6.6	5.8	8	内陸	16)
14	1998.9.3	岩手県北部	6.2	5.9	8	内陸	17)
15	2000.1.28	根室半島沖	7.0	6.7	59	海溝	-
16	2000.10.6	鳥取県西部地震	7.3	6.7	9	内陸	18)
17	2003.7.26	宮城県北部	6.4	6.1	12	内陸	19)
18	2003.9.26	十勝沖地震	8.0	8.2	42	海溝	20)
19	2003.9.26	十勝沖 (余震)	7.1	7.3	21	海溝	-
20	2004.9.5	東海道沖	7.4	7.4	44	海溝	21)
21	2004.10.23	新潟県中越地震	6.8	6.6	13	内陸	22)
22	2004.10.23	新潟県中越 (余震)	6.5	6.3	14	内陸	22)
23	2004.11.29	釧路沖	7.1	7.0	48	海溝	23)
24	2005.3.20	福岡県西方沖	7.0	6.6	9	内陸	24)
25	2005.8.16	宮城県沖	7.2	7.2	42	海溝	25)

期地震動の揺れやすさを観測点ごと、周期ごとに評価している。また座間ら⁸⁾は観測記録から直接導いた距離減衰式ではなく、地震規模と立ち上がり時間、断層長さ等の経験式を理論加速度スペクトルに導入した標準スペクトルモデルを作成し、それと観測スペクトルとのずれから観測点の揺れやすさの周期特性を評価している。

上記の研究で揺れやすさが周期特性も含めて評価されているのは最大でも39地点⁴⁾であり、日本全国でやや長周期地震動の揺れやすさが周期ごとに明らかになっている状況ではない。そこで本研究では、島嶼部を除き全国をほぼ網羅する1775観測点で得られた既往の観測記録をもとに、周期2～20秒のやや長周期地震動を対象とした加速度応答スペクトル（減衰定数1%, 5%）および加速度フーリエスペクトルを推定するための距離減衰式を作成した。また、距離減衰式を作成する際の回帰分析で得られる観測

点補正値をもとに、全国における地点補正倍率を算定した。

この地点補正倍率を用いることにより、任意の地点における地震動増幅特性を考慮したやや長周期地震動の地震動強さを推定することができる。その事例として、南海地震および東海・東南海・南海連動地震のやや長周期地震動を試算し、妥当性と有効性を検討した。

2. データ

距離減衰式の作成には、日本及びその周辺で発生した1964年6月～2005年8月の地震により得られた観測記録を用いた。やや長周期地震動を励起しやすい地震を対象とするために、内陸地震は気象庁マグニチュード M_J 6.0以上、海溝性地震は M_J 7.0以上の地

表-2 距離減衰式の作成に用いた地震、観測点、記録の数

	海溝性地震	内陸地震
地震数	14	11
観測点数	1311	1086
記録数	2374	1880

震を選択し、データが少ない、あるいは観測点の特性などからデータに偏りがあると見られるものは除外した。最終的に解析対象とした地震のリストを表-1に示す。表中の深さは気象庁による震源深さ、タイプは海溝性地震（海溝）と内陸地震（内陸）に分類した場合の地震タイプ、断層モデルは後述の距離の算出に断層モデルを用いた場合の参考文献を示している。日本海東縁部で発生する地震は直接海溝と結びつけられないが、ここでは海域で発生した1964新潟地震と1993年北海道南西沖地震を海溝性地震に分類した。海溝性地震はモーメントマグニチュード M_w 6.7~8.2の14地震、内陸地震は M_w 5.8~6.9の11地震が対象となっている。

1995年兵庫県南部地震より前の観測記録は、全て気象庁の一倍強震計または87型強震計によるものである。一倍強震計の観測記録としては、建設省土木研究所が数値化し計器補正を施した波形データ^{26), 27)}を用いる。この波形データは、一倍強震計の記録精度がある程度保証されている、周期2~20秒の周期帯²⁸⁾のバンドパスフィルターを施したものであるため、気象庁87型、95型強震計やその他の機関の観測により得られた記録にも、同様のバンドパスフィルターを施した。したがって、ここでは周期2~20秒のやや長周期地震動が対象となる。この周期帯域の地震動に対する観測精度が確保されていると考えられる記録を収集し、目視で記録長が不十分とみられるものを除去した後、前処理として各波形データの平均値を除去するオフセット除去と波形の目視で判別したスパイクノイズの除去を実施した。

これらの条件により選択および処理されたデータを海溝性地震と内陸地震に分類したデータセットを作成し、それぞれについて距離減衰式を作成した。表-2に地震タイプ別の地震数と観測点数および記録数（水平2成分で1記録）を示す。海溝性地震と内陸地震で共通の観測点が622点あるため、観測点の総数は1775点である。これら観測点の位置を表-1の地震の震央とともに図-1に示す。地震の番号は表-1と図-1で共通である。

距離減衰式の作成に用いる観測記録を選択する際、強震計のトリガーレベルの影響を考慮して、震源域

図-1 回帰分析に用いた記録の観測点と地震の震央

からの距離が一定値を越えない観測記録のみを選択することが行われる²⁹⁾。本研究では、トリガーレベルを規定する短周期の地震動を対象としていないことに加えて、後述のように観測点ごとの地震動増幅特性を表す観測点補正值が算出される回帰分析を行うため、トリガーレベルの影響を考慮した観測記録の選択は行っていない。なお、2003年十勝沖地震の観測記録を用いて、断層面最短距離が300[km]（距離減衰式³⁰⁾で最大加速度が10[cm/s²]と推定される距離）を越える観測点で得られた観測記録を含めた場合と除いた場合で、得られる回帰係数（後述のbとd）に大きな差がないことを確認している。

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から加速度応答スペクトルおよび加速度フーリエスペクトルを計算し、それらを地震動強さの指標とした距離減衰式を作成した。

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（固有周期 T_n 、減衰定数1%および5%）の加速度応答波形を計算し、この応答波形の水平2成分合成の最大値をとったものを $S_A(T_n)$ [cm/s²]として固有周期 $T_n = 2 \sim 20$ [s]の範囲を1[s]刻みで計算した。気象庁一倍強震計の一部の記録については、明らかにNS成分とEW成分のS波初動時刻に差異が見られたため、S波初動時刻が同一になるように、一方の記録をシフトして2成分を合成した。なお、相対速度応答ス

図-2 断層中心投影線最短距離の定義

ペクトルを用いると、長周期帯域の値が入力波の最大速度に漸近するために、長周期帯域の地震動特性が十分に反映されない可能性があるが、加速度応答スペクトルの場合にはそのような問題は生じない⁷⁾。

加速度フーリエスペクトル $F_A(T)$ [$\text{cm/s}^2 \cdot \text{s}$] はバンド幅 0.02[Hz] の Parzen ウィンドウで平滑化した水平 2 成分の加速度フーリエスペクトルの算術平均とし、同様に周期 $T = 2 \sim 20[\text{s}]$ の範囲を 1[s] 刻みで計算した。

(2) 震源域からの距離の指標

ここで対象としている 2~20[s] の周期帯では、実体波よりも表面波が優勢と考え、表面波は水平方向に伝播することから、水平距離を距離の指標とする。ただし、東南海・南海地震など、震源域が大きく広がる地震も対象となることから、震央距離ではなく、図-2 に示す断層中心投影線最短距離を震源域からの距離の指標として用いることにした。図-3 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 と断層中心投影最短距離 X [km] との関係を示す。ここで、 X は表-1 に断層モデルの参考文献が示されている地震についてはその断層中心投影線からの最短距離、その他の地震は気象庁発表の震央からの距離である。

(3) 回帰モデル

同じ規模の地震でも震源が浅いほど表面波が励起されやすいため、震源深さをパラメータとすることにより推定精度が向上する可能性がある。そこで、(1) で述べた指標を式(1)と(2)でモデル化し、震源深さ（表-1 に断層モデルの参考文献が示されている地震についてはその断層中心深さ） D [km] をパラメータとしない場合とする場合について、ダミー係数を用いた二段階回帰分析手法^{29), 7), 30)}で回帰分析を行った。以下では地震動強さの指標を Y で代表させる。

図-3 記録の M_w と断層中心投影線最短距離との関係

$$\log_{10} Y_{ij} = a_1 M_w - b X_{ij} + c_0 \quad (1)$$

$$-d \log_{10} (X_{ij} + p \cdot 10^{q M_w}) + c_j \pm e$$

$$\log_{10} Y_{ij} = a_1 M_w + a_2 D - b X_{ij} + c_0 \quad (2)$$

$$-d \log_{10} (X_{ij} + p \cdot 10^{q M_w}) + c_j \pm e$$

ここで、 X は断層中心投影線最短距離[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 番目の観測点の観測点補正值、 e は誤差である。回帰係数 $a_1, a_2, b, c_0, c_j, d, p$ は、固有周期 T_n または周期 T ごとに求められる。係数 q は全固有周期または周期で同一とした。

幾何減衰項中の $p \cdot 10^{q M_w}$ は、震源近傍における地震動強さの頭打ちを表す量であり、ここでは飽和距離とよぶ。また観測点補正值 c_j は、距離減衰式の推定値を観測点ごとの地震動増幅特性に応じて補正するための係数である。

(4) 回帰分析の手順

回帰分析は以下の手順で、海溝性地震と内陸地震それぞれに対して、対象とする指標および周期ごとに実施した。震源深さをパラメータとしない場合の回帰係数が b) で、震源深さをパラメータとする場合の回帰係数が c) で求められる。

a) 飽和距離がないモデルを用いた回帰分析

まず、飽和距離を考慮しない式(3)のモデルを用いて二段階回帰分析により各係数を決定した。

$$\log_{10} Y_{ij} = a_1 M_w - b X_{ij} + c_0 - d \log_{10} X_{ij} + c_j \quad (3)$$

一段階目の回帰分析では、地震動強さの指標を式(4)でモデル化し、式(6)中の係数 S_i, b, c_{1j}, d を式(5)の地震内誤差 e_{INTRA} が最小となるように決定し

た. この際, 拘束条件が必要になるため, 周期 0.25[s]以上ではサイト特性がないと考えられている K-NET の IWT009 (大東) を基準観測点として, 地点補正值 $c_{1j} = 0$ とした^{31), 30)}. 係数 d は加速度フーリエスペクトルの場合は表面波の幾何減衰を表す 0.5, 加速度応答スペクトルの場合は表面波の分散性による見かけの減衰³²⁾を考慮するために 0.5 ~ 1.0 の範囲でグリッドサーチにより最適値を求めた.

$$\log_{10} Y_{ij} = a_1 M_w - b X_{ij} - d \log_{10} X_{ij} + c_{1j} \pm e_{INTRA} \quad (4)$$

$$e_{INTRA} = \sqrt{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \delta_{ij} R_{ij}^2 / \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \delta_{ij}} \quad (5)$$

$$R_{ij} = \log_{10} Y_{ij} - S_i + d \log_{10} X_{ij} + b X_{ij} - c_{1j} \quad (6)$$

ここで, δ_{ij} は i ($i=1, 2, \dots, I$) 番目の地震の強震記録が j ($j=1, 2, \dots, J$) 番目の観測点に存在する場合に 1, 存在しない場合は 0 である.

二段階目の回帰分析では, 一段階目で得られた b, d を用いて重相関解析により式(7)の係数 a_1, c_{2j} を決定した.

$$\log_{10} Y_{ij} + d \log_{10} X_{ij} + b X_{ij} = a_1 M_w + c_{2j} \pm e_{TOTAL} \quad (7)$$

ここで, e_{TOTAL} は全体誤差である. 式(7)の左辺としては, 一段階目の回帰分析で得られた S_i を用いることもできるが, b と d を与えた条件下でデータセットに最適な a_1 と観測点補正值を得るために, この式形を用いている.

以上の結果をもとに, 式(3)の係数 c_0 と観測点補正值 c_j を, 全観測点での c_j の平均が 0 となるように次式で定めた.

$$c_0 = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J c_{2j}, \quad c_j = c_{2j} - c_0 \quad (8)$$

b) 飽和距離があるモデルを用いた回帰分析

上記 a) で得られた係数 a_1, b, c_0, c_j, d を用いて, 飽和距離を考慮した式(1)の係数 p, q を求めた. ここでは震源近傍の記録が含まれる 2003 年十勝沖地震と全ての内陸地震のデータを使用した.

係数 p は周期ごとに 0~0.002 の範囲で, 係数 q は全周期同一として加速度応答スペクトルの場合 0.5~1.2, 加速度フーリエスペクトルの場合 0.5~1.4 の範囲で, グリッドサーチにより全体誤差 e_{TOTAL} が最小となる値を求めた. グリッドサーチの範囲は既存の距離減衰式を参考に定めた.

この結果を式(1)に代入し, 再度 a) と同様の手順

により係数 a_1, b, c_0, c_j, d を求めた. すなわち, 一段階目の回帰分析では, 地震動強さの指標を式(9)でモデル化し, 式(11)中の係数 S_i, b, c_{1j}, d を式(10)の地震内誤差 e_{INTRA} が最小となるように決定した.

$$\log_{10} Y_{ij} = a_1 M_w - b X_{ij} \quad (9)$$

$$-d \log_{10}(X_{ij} + p \cdot 10^{q M_w}) + c_{1j} \pm e_{INTRA}$$

$$e_{INTRA} = \sqrt{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \delta_{ij} R_{ij}^2 / \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \delta_{ij}} \quad (10)$$

$$R_{ij} = \log_{10} Y_{ij} - S_i \quad (11)$$

$$+ d \log_{10}(X_{ij} + p \cdot 10^{q M_w}) + b X_{ij} - c_{1j}$$

次に, 二段階目の回帰分析では, 一段階目で得られた b, d を用いて重相関解析により式(12)の係数 a_1, c_{2j} を決定した.

$$\log_{10} Y_{ij} + d \log_{10}(X_{ij} + p \cdot 10^{q M_w}) + b X_{ij} = a_1 M_w + c_{2j} \pm e_{TOTAL} \quad (12)$$

以上の結果をもとに, 式(1)の係数 c_0 と観測点補正值 c_j を, 全観測点での c_j の平均が 0 となるように式(8)で定めた.

この場合の地震間誤差 e_{INTER} は, 式(9)の e_{INTRA} と式(12)の e_{TOTAL} から次式で計算できる.

$$e_{TOTAL} = \sqrt{e_{INTRA}^2 + e_{INTER}^2} \quad (13)$$

c) 震源深さをパラメータとした場合の回帰分析

上記 b) の一段階目で得られた b, d を用い, 二段階目の回帰分析として, 式(14)の係数 a_1, a_2, c_{2j} を重相関解析により決定した.

$$\log_{10} Y_{ij} + d \log_{10}(X_{ij} + p \cdot 10^{q M_w}) + b X_{ij} = a_1 M_w + a_2 D + c_{2j} \pm e_{TOTAL} \quad (14)$$

$$= a_1 M_w + a_2 D + c_{2j} \pm e_{TOTAL}$$

この場合の地震間誤差 e_{INTER} は, 式(9)の e_{INTRA} と式(14)の e_{TOTAL} から式(13)で計算できる.

以上の結果をもとに, 式(2)の係数 c_0 と観測点補正值 c_j を, 全観測点での c_j の平均が 0 となるように式(8)で定めた.

4. 作成した距離減衰式の特徴

本研究では前述の通り, 3種類の地震動強さを指標としているが, 得られた結果はほぼ同じ傾向にあるため, 以下では減衰定数1%の加速度応答スペクトルを指標とした場合を中心に記述する.

図-4 加速度応答スペクトル（減衰定数 1%）の距離減衰式の回帰係数

(1) 回帰係数

減衰定数1%の加速度応答スペクトルの場合を例として、作成した距離減衰式の回帰係数のうち a_1 , a_2 , b , c_0 , d を図-4に示す。

マグニチュード依存性を表す係数 a_1 についてみると、内陸地震の方が海溝性地震よりも大きく、短周期の地震動が支配的な最大加速度、最大速度、計測震度といった指標の距離減衰式と同様の傾向を示している³⁰⁾が、長周期の方がその違いが顕著である。これは、地震規模が大きくなるにつれて断層面が大きくなり、内陸地震では震源深さにかかわらず地殻内のごく浅い領域でもずれが発生することで、表面波を励起しやすくなることが一因と考えられる。

海溝性地震の場合、震源深さをパラメータとすることが否かでは a_1 にあまり大きな違いはなく、そのことが a_2 の大きさにも表れている。一方、内陸地震の場合、 a_2 は固有周期2[s]の場合を除いて-0.03~-0.04程度となっており、震源が浅いほど表面波が強く励起され、やや長周期地震動の振幅が大きくなる傾向を表している。ただし上述の通り、この影響の一部は内陸地震の a_1 の大きさに現れていると考えられる。海溝性地震の場合にこのような傾向が現れない理由は不明であるが、海溝性地震の観測記録には震源域からの距離が遠いものが多く（図-3）、伝播経路が

複雑であることが関係している可能性がある。

二段階回帰分析の一段階目で計算される b と d は、震源深さをパラメータとするか否かでは変わらない。一方、 b と d は海溝性地震と内陸地震ではかなり異なり、どちらも全般に海溝性地震の方が大きい。距離減衰特性を表すこれらの係数は本来、地震のタイプの影響を受けない性質のものであるため、この違いは地震のタイプによる発生位置の偏りを反映したものと考えられる³⁰⁾。海溝性地震の d は幾何減衰と分散性による減衰の和の上限値として設定した $1.0^{32)}$ となる固有周期が多く、分散性による減衰の影響が大きいことが分かる。

(2) 距離減衰式のばらつき

3. (4) の回帰分析において得られた地震内誤差 e_{INTRA} と地震間誤差 e_{INTER} を図-5に示す。図-5(a)の地震内誤差 e_{INTRA} は、震源深さをパラメータとしない場合とした場合で同一であり、海溝性地震と内陸地震の場合でも同程度の大きさとなっている。

図-6に観測点ごとに用いた観測記録数の頻度分布を示すが、1つの地震の記録しか使用していない観測点が海溝性地震で822点、内陸地震で523点存在する。これらの観測点では、観測点補正值がそのデータのみで決定されるため、観測点補正

図-5 加速度応答スペクトル(減衰定数 1%) の距離減衰式の誤差

図-6 観測点ごとに用いた観測記録数の頻度分布

値を考慮した距離減衰式による予測値とデータが等しくなる³⁰⁾. そのため、図-5の地震内誤差は過小評価になっている可能性がある. 観測記録を2つ以上使用している観測点のデータのみ用いた場合、地震内誤差の分布は対数正規分布でよく近似され³⁰⁾、これが地震内誤差をより正確に評価したものと考えられることから、その標準偏差も図-5(a)に示してある. これらはもともとの地震内誤差よりも0.03程度大きい、観測点ごとの地震動増幅特性の違いによる誤差が含まれていない³⁰⁾ため、比較的小さい値となっている.

図-5(b)の地震間誤差 e_{INTER} は、震源深さをパラメータとしない場合とした場合で異なり、震源深さをパラメータとした方が小さいが、海溝性地震ではその違いはごくわずかである. 一方、内陸地震では0.04程度小さくなっている周期が多く、震源深さによる地震動強さの違いを考慮することで、推定精度

が改善されていることを示している. これらは海溝性地震と内陸地震で a_2 の大きさが異なる(図-4)ことに対応している.

なお、本研究で作成した距離減衰式の回帰係数と回帰誤差は付録の表に示す. 海溝性地震では震源深さの影響が小さいこと、また内陸地震ではやや長周期地震動が問題になる規模の地震では断層中心深さに差が生じないと考えられるため、震源深さをパラメータとしない場合の回帰係数を示す.

(3) 推定される地震動強さと既往の研究との比較

作成した距離減衰式から推定される加速度応答スペクトルを、佐々木らの周期2~20[s]の地震動を対象とした距離減衰式³³⁾から推定したものと比較する. 佐々木らの距離減衰式は、5つの海溝性地震(M_w 7.4~8.2)から得られた気象庁一倍強震計の記録に基づくものであり、次式のモデルが用いられている.

$$S_A(T_n, h) = a(T_n, h) \cdot 10^{b(T_n, h) \cdot M_J} \cdot (\Delta + 30)^{c(T_n, h)} \quad (15)$$

ここで、 h は減衰定数、 Δ は震央距離[km]である. また、 a , b , c は回帰係数であり、重回帰分析により求められている. 回帰係数は、データを観測点の揺れやすさから3グループに分けた場合と全データを用いた場合を合わせた4ケースそれぞれについて、減衰定数2%と5%の加速度応答スペクトル(水平2成分のうち大きい方)を指標とした、計8ケースについて求められている.

ここでは本研究と比較できるケースとして、全データ97成分を用い減衰定数を5%とした距離減衰式で推定した加速度応答スペクトルを図-7に示す. ただし、 $M_w = M_J$, $X = \Delta$ とし、比較のため本研究の距離減衰式は震源深さをパラメータとしない場合の式とする. 内陸地震については、記録を用いた地震の

 (a) $M_w = M_J = 7.5, X = \Delta = 100[\text{km}]$

 (b) $M_w = M_J = 8.0, X = \Delta = 100[\text{km}]$

図-7 距離減衰式により推定した加速度応答スペクトル (減衰定数 5%) の比較

 図-8 加速度応答スペクトル値 ($T_n=7[\text{s}]$, 減衰定数 1%) の観測点補正値の比較

規模の範囲外であり、また規模の大きい地震では M_w と M_J が異なる場合が多いが、参考を示している。この図によると、海溝性地震の記録に基づく佐々木らの距離減衰式は、記録数を考慮すれば、本研究の同じく海溝性地震の記録に基づく式に近い推定結果を与えるものとなっている。

また外挿による推定結果ではあるが、本研究の距離減衰式では、 M_w 7.5の内陸地震と M_w 8.0の海溝性地震では $X=100[\text{km}]$ で同程度の加速度応答スペクトルが推定されている。したがって、規模が非常に大きい内陸地震が発生した場合には、震源域近傍における短周期の地震動には当然注意が必要であるが、やや長周期地震動についても海溝性巨大地震と同様、影響が広い範囲に及ぶ可能性がある。

(4) 観測点補正倍率

海溝性地震と内陸地震の両方で記録が得られてい

る観測点622点については、海溝性地震と内陸地震それぞれの距離減衰式に対する観測点補正値が得られている。これらを比較した例が図-8であるが、ある程度の違いが見られる。ここでは次式のように記録数に応じた重みを付けた上で、その観測点の観測点補正値 c_j を求めた。

$$c_j = \frac{n^{(s)} c_j^{(s)} + n^{(l)} c_j^{(l)}}{n^{(s)} + n^{(l)}} \quad (16)$$

ここで、 $n^{(s)}$ と $n^{(l)}$ はそれぞれ海溝性地震と内陸地震の回帰分析で使用した j 番目の観測点の記録数、 $c_j^{(s)}$ と $c_j^{(l)}$ はそれぞれ海溝性地震と内陸地震の回帰分析で得られた j 番目の観測点の観測点補正値である。

次に、観測点補正倍率 s_j を次式で定義した。

$$s_j = 10^{c_j} \quad (17)$$

したがって、 $c_j = 0$ とした距離減衰式から推定される加速度応答スペクトル $S_A(T_n)$ あるいは加速度フーリエスペクトル $F_A(T)$ に観測点補正倍率 s_j を乗じることにより、その地点周辺の地盤による地震動増幅特性を考慮した地震動強さが推定できる。観測点補正値 $c_j = 0$ とした距離減衰式から推定される地震動強さは、全観測点の平均的な地震動増幅特性を考慮したものであるから、観測点補正倍率 s_j は、その観測点が平均的な地盤条件と比較して、着目する周期の地震動を何倍に増幅させるかを表したものと言い換えてもよい。

減衰定数1%の加速度応答スペクトル ($T_n=3, 7, 10, 15 [\text{s}]$) の場合を例として、距離減衰式に対する観測点補正倍率の分布を示したのが図-9である。この図に示した全1775観測点の観測点補正倍率の分布を

図-9 加速度応答スペクトル（減衰定数 1%）の観測点補正倍率の分布（凡例の括弧内は該当する観測点数）

基盤岩類上面深度の分布³⁴⁾と比較すると、基盤岩類が深い、すなわち堆積層が厚い主要な平野部（石狩・勇払平野、新潟平野、関東平野、濃尾平野、大阪平野など）で観測点補正倍率が大きい傾向が明らかである。ただし、平野部であっても周期によって違いがあり、例えば関東平野では $T_n=7[s]$ 、濃尾平野では $T_n=3[s]$ の方が、観測点補正倍率が2以上の観測点数が多く、平野ごとにその規模や堆積層厚に応じて卓越しやすい地震動の周期が異なることが読み取れる。観測点補正倍率は観測点直下の地盤構造のみ

で決定されるわけではなく、盆地内では盆地全体の構造、伝播経路特性にも影響されるものであるが、その地点で観測されるやや長周期地震動の増幅特性を簡便に表現したものとして有用と考えられる。

(5) 全国の地点補正倍率

図-9に示したように、やや長周期地震動が地盤によって増幅される度合いは地域によって大きく異なっている。そのため、距離減衰式で平均的な地震動強さを推定するだけでは十分ではなく、対象地点に

図-10 加速度応答スペクトル（減衰定数 1%）の距離減衰式の地点補正倍率の分布

おける地震動増幅特性を考慮しておく必要がある。

記録を使用した観測点については、上述の観測点補正倍率を用いることができるが、任意の地点で地震動増幅特性を考慮した地震動強さの推定を行うためには、全国における補正值が必要となる。そこで、加重平均法の一つであるkriging法³⁵⁾により観測点補正倍率の空間補間を行い、緯度30秒×経度45秒（約1[km]×1[km]）の基準地域メッシュごとの補正值（地点補正倍率とよぶ）を算出した。基準地域メッシュ内に観測点がある場合には、観測点補正倍率を

そのままそのメッシュの地点補正倍率とした。

図-9と同様、減衰定数1%の加速度応答スペクトル（ $T_n=3, 7, 10, 15$ [s]）の場合を例として、地点補正倍率の分布を図-10に示す。このような分布は、減衰定数5%の加速度応答スペクトル、また加速度フーリエスペクトルについても周期ごとに得られている。これらは全国を対象に、どこでどの程度、どの周期のやや長周期地震動が増幅しやすいかを表現したマップとなっている。ただし、特に山地などの観測点が疎に分布している地域や地下構造が急変す

図-11 地点補正倍率から評価した地盤の卓越周期

る地域では、空間補間によって算出した補正倍率の精度が低くなっていることに注意しなければならない。

上述のように、ある地点の地点補正倍率は、着目する地震動の周期によって異なる。地点ごとに地点補正倍率が最大となる周期をその地点における地震動の卓越周期と考え、分布図にしたものが図-11である。ここでは地点補正倍率が2～10[s]の周期帯で最大、かつ2以上となる周期を卓越周期とした。図中NAは、2～10[s]の周期帯では地点補正倍率が2以上にならない地点を示している。

この図により、平野ごとに特に地震動が増幅されやすい周期帯を特定することができ、例えば勇払平野は8[s]、関東平野は6～7[s]、濃尾平野や大阪平野は3～4[s]である。また、九州地方や東北地方の一部、諏訪盆地、境港周辺では、火山性の地形・地質や沖積平野等の影響で周期数秒の地震動が増幅されることが指摘されており³⁶⁾、既往の研究とも整合する結果となっている。これら以外にも長い卓越周期を有する地域が点在しているが、その理由や妥当性は今後検討していく必要がある。

(6) 妥当性の検討

土木学会・日本建築学会巨大地震災害対応共同研究連絡会地震動部会の提供波³⁷⁾のうち、ここでの対象周期帯域をほぼカバーしている釜江・川辺による想定南海地震 (M_w 8.55) の大阪における予測波^{38), 39)}

図-12 三次元差分法による地震動の計算に用いた地下構造モデルの堆積盆地構造設定領域における基盤岩上面深度と予測地点の位置³⁸⁾

と比較することにより、本研究で得られた距離減衰式と地点補正倍率の妥当性を検討する。

この提供波は、大阪平野やフィリピン海プレートの構造に関する最新の知見を反映した9層からなる地下構造モデルと、地震調査研究推進本部地震調査委員会によるモデルを参考に設定した南海地震の震源モデルをもとに、三次元差分法により計算されたものである。差分格子間隔と地下構造から周期2.5[s]以上が有効な計算結果とされており、2.5～20[s]のバンドパスフィルターを施した9地点の時刻歴波形が提供されている。図-12にその位置を示すが、これらはいずれも強震観測点の位置となっている。図-12には、地下構造モデルの基盤岩上面深度も示されており、この領域では詳細な堆積盆地構造がモデル化されている。

提供波の加速度応答スペクトル（減衰定数1%、水平2成分合成）を計算し、本研究の距離減衰式による推定結果および地点補正倍率を考慮した推定結果と比較したものを図-13に示す。これらのうち、OSKH002、ROKKO-GおよびWOSについては、本研究では観測記録を用いていない観測点であり、空間補間して得られた地点補正倍率を用いている。基盤岩上面深度が2[km]から0[km]に急激に変化する、地下構造の急変部に位置しているROKKO-Gのように、提供波が大幅に大きい点もあるが、ほとんどの地点では、地点補正倍率を考慮することにより、提供波とよく一致する加速度応答スペクトルが推定できていることが分かる。

提供波のうち、鶴来らによる大阪府内23地点を対象とした想定南海地震、東南海地震、南海・東南海

図-13 提供波と距離減衰式および地点補正倍率から推定される加速度応答スペクトル（減衰定数 1%）の比較

地震（それぞれ M_w 8.55, 8.18, 8.61）の予測波^{40), 39)}とも同様の比較を行った。その結果、提供波が有効な周期10[s]までは、距離減衰式と地点補正倍率により予測波とある程度一致する結果が得られた。ここで対象とした想定南海地震等の M_w は距離減衰式に用いた記録の範囲外であるが、上記の結果から M_w については、ある程度外挿して距離減衰式を利用することは可能と考えられる。

想定南海地震の大阪における地震動を予測した提

供波としては、この他に関口らによる予測波⁴¹⁾があり、これら3者による提供波は同じ地点でもそれぞれ卓越周期や振幅レベルが異なっている。その原因は主に震源モデルの違いによるものと考察されている⁴²⁾ことから、震源モデルの設定によっては、理論的手法で推定された地震動と本研究の距離減衰式と地点補正倍率による推定結果があまり一致しないような場合もあり得るものと考えられる。

図-14 東海・東南海・南海連動地震のやや長周期地震動の試算結果（疑似速度応答スペクトル，減衰定数 1%）

5. 想定地震のやや長周期地震動の試算

ここまでに提案した距離減衰式と地点補正倍率の適用例として，発生が切迫していると言われる駿河・南海トラフの地震のうち，発生すればわが国周辺で最大規模となる東海・東南海・南海連動地震を対象としてやや長周期地震動を試算した．この地震のモーメントマグニチュードは $M_w 8.5$ とし⁴³⁾，震源域データ⁴³⁾に基づいて断層中心投影線を設定した．

図-14 に例として，加速度応答スペクトル値から換算した疑似速度応答スペクトル値 pS_V [cm/s] ($h=0.01$, $T_n=3, 7[s]$) の分布を示す．太い実線は震源域，震源域内の細い実線は断層中心投影線を示している．距離減衰式の作成に用いた記録は最大でも $M_w 8.2$ の地震で得られたものであり，また震源域からの距離についても，使用した観測記録の範囲外への外挿部分があることに注意が必要であるが，広域にわたってやや振幅の大きい地震動が観測される可能性が指摘できる．

このような広域の地震動推定を数値計算により実施することは，現在でも計算機的能力や地盤データの整備，モデル化の面で困難がともなうことから，本研究で提示したサイトスペシフィック，かつ簡便な予測を可能とする経験式は有用と考えられる．ただし，個別地点の地震動は，局所的な地盤構造にも影響されるため，ここで試算したやや長周期地震動

は，距離減衰式を作成した際の統計解析や観測点補正倍率の空間補間により平均化されたものであることに注意する必要がある．

6. 結 論

本研究では，既往の観測記録をもとに，周期2～20秒のやや長周期地震動の加速度応答スペクトル（減衰定数1%, 5%）と加速度フーリエスペクトルを推定する距離減衰式を作成した．また，各周期の観測点補正倍率を全国1775観測点で算出し，平野部でやや長周期地震動の振幅が大きくなること，平野ごとに大きく増幅される地震動の周期帯があり，地下構造と関連づけられることを示した．この観測点補正倍率を空間補間することにより，全国における地点補正倍率を算定し，どこでどの程度，どの周期のやや長周期地震動が増幅しやすいかを表現したマップを作成した．

この距離減衰式と地点補正倍率の妥当性を，三次元差分法で計算されたやや長周期地震動と比較することにより確認した．さらに，東海・東南海・南海連動地震発生時のやや長周期地震動を試算した．

地震の発生場所によって地震動の増幅率が異なる場合もあること^{8), 44)}，また地下構造が急変する地域を対象とした場合など，今後改善の必要はあるもの

の、本研究により、日本全国の任意の点におけるやや長周期地震動が、経験的手法によりサイトスペシフィック、かつ簡便に推定できることが示された。

謝辞：本研究では、関西地震観測研究協議会、気象庁、防災科学技術研究所（以上五十音順）並びに国土交通省と北海道開発局が観測・収集した強震記録を使用した。本研究はこれら強震観測の継続的な発展と記録の蓄積に負うところが大きい。土木学会・日本建築学会巨大地震災害対応共同研究連絡会地震動部会（主査：入倉孝次郎愛知工業大学客員教授）では有益な御助言をいただいた。本研究で提供した提供波は同部会により収集、整理されたものである。京都大学釜江克宏教授には提供波および地下構造の図を、地域地盤環境研究所の鶴来雅人博士には提供波を使用させていただいた。東海・東南海・南海地震の震源域データは地震調査研究推進本部地震調査委員会「全国を概観した地震動予測地図数値データ」を利用した。また、査読者各位の御意見は内容の改善に大きく役立った。記して謝意を表する次第である。

付録

表-A1～A3にそれぞれ、加速度応答スペクトル（減衰定数1%, 5%）および加速度フーリエスペクトルの距離減衰式（震源深さをパラメータとしない場合）について、固有周期ごとの回帰係数と回帰誤差を示す。地震内誤差 e_{INTRA} は観測記録を2つ以上使用している観測点のデータのみ用いた場合のばらつきとし、 e_{TOTAL} はこの e_{INTRA} を用いて式(13)で計算した値を示す。また、基準観測点IWT009の観測点補正值 c_j を考慮することにより、サイト特性がない、すなわち地震基盤相当の距離減衰式が得られることから、これもあわせて示す。

参考文献

- 土木学会・日本建築学会巨大地震災害対応共同研究連絡会地震動部会：海溝型巨大地震を考えるー広帯域強震動の予測ーシンポジウム論文集, 2005.
- 土木学会・日本建築学会巨大地震災害対応共同研究連絡会地震動部会：海溝型巨大地震を考えるー広帯域強震動の予測2ーシンポジウム論文集, 2006.
- 岡田成幸, 鏡味洋史：日本各地におけるやや長周期の地盤特性の定量評価の試み, 日本建築学会論文報告集, Vol. 267, pp. 29-38, 1978.
- Mamula, L., Kudo, K. and Shima, E.: Distribution of ground-motion amplification factors as a function of period (3-15 sec) in Japan, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Vol. 59, pp. 467-500, 1984.
- 井上涼介, 篠原哲也, 熊谷高, 小林浩二：気象庁強震計記録の統計解析によるやや長周期揺れやすさの抽出, 第21回地震工学研究発表会講演概要, pp. 137-140, 1991.
- 野田茂：気象庁1倍強震計記録を用いた長周期地盤震動の地域特性について, 第21回地震工学研究発表会講演概要, pp. 141-144, 1991.
- 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.
- 座間信作, 細川直史, 畑山健, 遠藤真：やや長周期地震動の早期予測システムの構築, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 2307-2312, 2002.
- 佐藤良輔編著：日本の地震断層パラメーター・ハンドブック, 鹿島出版会, 1989.
- Mendoza, C. and Fukuyama, E.: The July 12, 1993, Hokkaido-Nansei-Oki, Japan, earthquake: Coseismic slip pattern from strong-motion and teleseismic recordings, *J. Geophys. Res.*, Vol. 101, No. B1, pp. 791-801, 1996.
- 菊地正幸, 金森博雄：広帯域地震記録による1994年北海道東方沖地震の震源メカニズム, 月刊地球, Vol. 17, No. 5, pp. 322-328, 1995.
- Nakamura, W. and Takeo, M.: Slip history of the 1994 Sanriku-Haruka-Oki, Japan, earthquake deduced from strong-motion data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 87, pp. 918-931, 1997.
- Sekiguchi, H., Irikura, K. and Iwata, T.: Source inversion for estimating the continuous slip distribution on a fault-introduction of Green's functions convolved with a correction function to give moving dislocation effects in subfaults, *Geophys. J. Int.*, Vol. 150, pp. 377-391, 2002.
- 菊地正幸：YCU地震学レポート, No.50, 1996.
- Horikawa, H.: Earthquake doublet in Kagoshima, Japan: Rupture of asperities in a stress shadow, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 91, pp. 112-127, 2001.
- Ide, S.: Source process of the 1997 Yamaguchi, Japan, earthquake analyzed in different frequency bands, *Geophys. Res. Letters*, Vol. 26, 1999.
- Nakahara, H., Nishimura, T., Sato, H., Ohtake, M., Kinoshita, S. and Hamaguchi, H.: Broadband source process of the 1998 Iwate Prefecture, Japan, earthquake as revealed from inversion analyses of seismic waveforms and envelopes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 92, pp. 1708-1720,

表-A1 加速度応答スペクトル（減衰定数 1%）の距離減衰式の回帰係数と回帰誤差

(a) 海溝性地震

T_n [s]	a_1	b	c_0	d	p	q	e_{INTRA}	e_{INTER}	e_{TOTAL}	c_j (IWT009)
2	0.367	0.00094	1.21	1.00	0.000023		0.171	0.091	0.194	-0.59
3	0.448	0.00110	0.33	0.96	0.000021		0.144	0.076	0.163	-0.46
4	0.472	0.00121	0.05	0.98	0.000027		0.133	0.079	0.155	-0.44
5	0.531	0.00116	-0.45	1.00	0.000033		0.135	0.074	0.154	-0.41
6	0.564	0.00107	-1.08	0.88	0.000038		0.140	0.071	0.157	-0.44
7	0.590	0.00090	-1.21	1.00	0.000036		0.135	0.071	0.152	-0.43
8	0.606	0.00096	-1.47	0.99	0.000040		0.132	0.100	0.166	-0.48
9	0.630	0.00094	-1.85	0.94	0.000032		0.132	0.120	0.178	-0.45
10	0.668	0.00089	-2.12	1.00	0.000034		0.127	0.135	0.185	-0.42
11	0.699	0.00076	-2.46	1.00	0.000032	0.66	0.130	0.147	0.196	-0.36
12	0.745	0.00064	-2.91	1.00	0.000034		0.137	0.139	0.195	-0.32
13	0.783	0.00061	-3.24	1.00	0.000038		0.137	0.130	0.189	-0.37
14	0.793	0.00058	-3.36	1.00	0.000038		0.141	0.121	0.186	-0.39
15	0.810	0.00052	-3.55	1.00	0.000039		0.149	0.112	0.186	-0.37
16	0.832	0.00046	-3.76	1.00	0.000041		0.146	0.107	0.181	-0.38
17	0.857	0.00036	-4.00	1.00	0.000042		0.144	0.100	0.175	-0.34
18	0.878	0.00028	-4.21	1.00	0.000046		0.145	0.098	0.175	-0.33
19	0.894	0.00022	-4.37	1.00	0.000052		0.146	0.101	0.177	-0.35
20	0.906	0.00017	-4.52	1.00	0.000051		0.146	0.104	0.179	-0.35

(b) 内陸地震

T_n [s]	a_1	b	c_0	d	p	q	e_{INTRA}	e_{INTER}	e_{TOTAL}	c_j (IWT009)
2	0.666	0.00074	-1.39	0.79	0.000023		0.139	0.057	0.150	-0.59
3	0.741	0.00049	-2.12	0.80	0.000021		0.134	0.108	0.172	-0.46
4	0.796	0.00083	-2.93	0.64	0.000027		0.127	0.120	0.174	-0.44
5	0.897	0.00071	-3.81	0.59	0.000033		0.132	0.115	0.175	-0.41
6	0.926	0.00060	-4.18	0.56	0.000038		0.134	0.099	0.167	-0.44
7	0.964	0.00071	-4.64	0.50	0.000036		0.132	0.093	0.161	-0.43
8	0.998	0.00065	-4.98	0.51	0.000040		0.133	0.089	0.160	-0.48
9	0.993	0.00034	-5.04	0.55	0.000032		0.139	0.082	0.162	-0.45
10	1.024	0.00033	-5.34	0.56	0.000034		0.138	0.082	0.160	-0.42
11	1.064	0.00039	-5.71	0.55	0.000032	0.66	0.139	0.081	0.161	-0.36
12	1.081	0.00036	-5.90	0.56	0.000034		0.132	0.078	0.153	-0.32
13	1.080	0.00033	-5.95	0.58	0.000038		0.130	0.079	0.152	-0.37
14	1.087	0.00031	-6.04	0.60	0.000038		0.128	0.079	0.150	-0.39
15	1.089	0.00031	-6.10	0.61	0.000039		0.128	0.079	0.150	-0.37
16	1.086	0.00027	-6.15	0.62	0.000041		0.130	0.077	0.151	-0.38
17	1.088	0.00031	-6.22	0.62	0.000042		0.131	0.078	0.152	-0.34
18	1.084	0.00032	-6.24	0.63	0.000046		0.132	0.078	0.153	-0.33
19	1.076	0.00032	-6.23	0.64	0.000052		0.134	0.078	0.155	-0.35
20	1.065	0.00034	-6.22	0.64	0.000051		0.136	0.078	0.157	-0.35

2002.

- 18) 岩田知孝, 関口春子: 2000年鳥取県西部地震の震源過程と震源域強震動, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 125-128, 2002.
- 19) 青井真, 関口春子, 功刀卓, 本多亮, 藤原広行: 近地強震動記録による宮城県北部(2003/07/26, 7:13)の地震の震源インバージョン (暫定), http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/news/miyagi_200307260713/, 2003.

- 20) Koketsu, K., Hikima, K., Miyazaki, S. and Ide, S.: Joint inversion of strong motion and geodetic data for the source process of the 2003 Tokachi-oki, Hokkaido, earthquake, *Earth, Planets and Space*, Vol. 56, pp. 329-334, 2004.
- 21) 東京大学地震研究所地震予知情報センター: EIC地震学ノート, No.153, 2004.
- 22) Hikima, K. and Koketsu, K.: Rupture processes of the 2004 Chuetsu (mid-Niigata prefecture) earthquake, Japan: A

表-A2 加速度応答スペクトル（減衰定数 5%）の距離減衰式の回帰係数と回帰誤差

(a) 海溝性地震

T_n [s]	a_1	b	c_0	d	p	q	e_{INTRA}	e_{INTER}	e_{TOTAL}	c_j (IWT009)
2	0.355	0.00107	1.08	1.00	0.000014		0.175	0.097	0.200	-0.55
3	0.420	0.00117	0.44	1.00	0.000014		0.150	0.084	0.172	-0.44
4	0.458	0.00126	0.02	1.00	0.000017		0.139	0.087	0.164	-0.44
5	0.512	0.00124	-0.48	1.00	0.000021		0.138	0.078	0.158	-0.40
6	0.543	0.00108	-0.83	1.00	0.000022		0.138	0.070	0.155	-0.43
7	0.564	0.00106	-1.14	1.00	0.000023		0.135	0.073	0.154	-0.42
8	0.593	0.00105	-1.47	1.00	0.000023		0.133	0.096	0.164	-0.45
9	0.611	0.00099	-1.71	1.00	0.000022		0.131	0.112	0.173	-0.44
10	0.645	0.00097	-2.05	1.00	0.000022		0.128	0.125	0.179	-0.41
11	0.673	0.00089	-2.35	1.00	0.000023	0.68	0.129	0.131	0.184	-0.37
12	0.700	0.00082	-2.64	1.00	0.000024		0.131	0.128	0.183	-0.36
13	0.734	0.00076	-2.95	1.00	0.000025		0.136	0.124	0.184	-0.37
14	0.756	0.00072	-3.17	1.00	0.000026		0.141	0.116	0.182	-0.39
15	0.774	0.00066	-3.35	1.00	0.000027		0.144	0.108	0.180	-0.39
16	0.796	0.00058	-3.57	1.00	0.000027		0.144	0.104	0.178	-0.38
17	0.822	0.00051	-3.81	1.00	0.000029		0.144	0.100	0.175	-0.35
18	0.842	0.00043	-4.01	1.00	0.000032		0.145	0.098	0.175	-0.35
19	0.857	0.00037	-4.17	1.00	0.000035		0.145	0.098	0.175	-0.35
20	0.867	0.00032	-4.30	1.00	0.000035		0.144	0.099	0.175	-0.34

(b) 内陸地震

T_n [s]	a_1	b	c_0	d	p	q	e_{INTRA}	e_{INTER}	e_{TOTAL}	c_j (IWT009)
2	0.663	0.00073	-1.52	0.82	0.000014		0.138	0.058	0.150	-0.55
3	0.721	0.00047	-2.04	0.86	0.000014		0.137	0.105	0.173	-0.44
4	0.770	0.00077	-2.74	0.73	0.000017		0.126	0.119	0.173	-0.44
5	0.858	0.00071	-3.54	0.67	0.000021		0.130	0.117	0.175	-0.40
6	0.905	0.00074	-4.07	0.60	0.000022		0.133	0.107	0.171	-0.43
7	0.938	0.00073	-4.48	0.56	0.000023		0.135	0.101	0.169	-0.42
8	0.968	0.00061	-4.78	0.57	0.000023		0.137	0.096	0.167	-0.45
9	0.979	0.00047	-4.96	0.58	0.000022		0.142	0.090	0.168	-0.44
10	1.005	0.00041	-5.21	0.59	0.000022		0.142	0.088	0.167	-0.41
11	1.031	0.00037	-5.47	0.60	0.000023	0.68	0.143	0.086	0.167	-0.37
12	1.046	0.00035	-5.63	0.61	0.000024		0.139	0.083	0.162	-0.36
13	1.050	0.00034	-5.72	0.62	0.000025		0.137	0.082	0.160	-0.37
14	1.050	0.00032	-5.78	0.63	0.000026		0.133	0.082	0.156	-0.39
15	1.048	0.00029	-5.80	0.65	0.000027		0.133	0.081	0.156	-0.39
16	1.045	0.00029	-5.85	0.65	0.000027		0.133	0.081	0.156	-0.38
17	1.048	0.00028	-5.91	0.66	0.000029		0.134	0.081	0.157	-0.35
18	1.049	0.00029	-5.96	0.67	0.000032		0.134	0.081	0.157	-0.35
19	1.044	0.00029	-5.97	0.68	0.000035		0.135	0.081	0.157	-0.35
20	1.039	0.00028	-5.97	0.69	0.000035		0.136	0.081	0.158	-0.34

series of events in a complex fault system, *Geophys. Res. Letters*, Vol. 32, 2005.

23) 東京大学地震研究所地震予知情報センター：EIC地震学ノート，No. 158+, 2004.

24) Kobayashi, R., Miyazaki, S. and Koketsu, K.: Source processes of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture earthquake and its largest aftershock inferred from strong motion and 1-Hz GPS data, *Earth, Planets and Space*, Vol.

58, pp. 57-62, 2006.

25) 東京大学地震研究所地震予知情報センター：EIC地震学ノート，No. 168+, 2005.

26) 佐々木康，田村敬一，相沢興，高橋和之：気象庁一倍強震計記録に基づく長周期地震動特性の解析－（その2）1968年日向灘地震記録の解析－，土木研究所資料，第2245号，1985.

27) 佐々木康，田村敬一，相沢興：気象庁一倍強震計記録

表-A3 加速度フーリエスペクトルの距離減衰式の回帰係数と回帰誤差

(a) 海溝性地震

T [s]	a_1	b	c_0	d	p	q	e_{INTRA}	e_{INTER}	e_{TOTAL}	c_j (IWT009)
2	0.383	0.00148	-0.43		0.000037		0.161	0.080	0.180	-0.63
3	0.476	0.00161	-1.16		0.000027		0.138	0.077	0.158	-0.42
4	0.499	0.00179	-1.36		0.000051		0.134	0.080	0.156	-0.47
5	0.567	0.00175	-1.90		0.000072		0.133	0.087	0.159	-0.46
6	0.600	0.00146	-2.21		0.000080		0.132	0.079	0.153	-0.41
7	0.639	0.00143	-2.64		0.000075		0.130	0.081	0.153	-0.42
8	0.644	0.00149	-2.74		0.000088		0.124	0.110	0.166	-0.47
9	0.658	0.00145	-2.91		0.000068		0.125	0.132	0.182	-0.42
10	0.703	0.00139	-3.34		0.000060		0.124	0.152	0.196	-0.42
11	0.778	0.00121	-4.00	0.5	0.000051	0.64	0.129	0.163	0.208	-0.40
12	0.835	0.00108	-4.49		0.000050		0.137	0.154	0.206	-0.35
13	0.859	0.00102	-4.70		0.000054		0.139	0.141	0.198	-0.33
14	0.867	0.00098	-4.78		0.000058		0.141	0.129	0.191	-0.32
15	0.877	0.00092	-4.87		0.000060		0.143	0.120	0.186	-0.30
16	0.892	0.00084	-5.02		0.000061		0.141	0.112	0.180	-0.30
17	0.909	0.00077	-5.17		0.000061		0.138	0.109	0.176	-0.30
18	0.923	0.00072	-5.31		0.000059		0.137	0.108	0.174	-0.31
19	0.934	0.00069	-5.42		0.000056		0.137	0.108	0.174	-0.29
20	0.941	0.00066	-5.51		0.000053		0.137	0.108	0.175	-0.27

(b) 内陸地震

T [s]	a_1	b	c_0	d	p	q	e_{INTRA}	e_{INTER}	e_{TOTAL}	c_j (IWT009)
2	0.658	0.00148	-2.35		0.000037		0.140	0.061	0.152	-0.63
3	0.741	0.00114	-3.01		0.000027		0.132	0.097	0.164	-0.42
4	0.819	0.00105	-3.61		0.000051		0.124	0.101	0.161	-0.47
5	0.958	0.00070	-4.58		0.000072		0.126	0.084	0.151	-0.46
6	0.975	0.00051	-4.75		0.000080		0.128	0.056	0.140	-0.41
7	1.019	0.00041	-5.12		0.000075		0.121	0.043	0.129	-0.42
8	1.047	0.00041	-5.39		0.000088		0.125	0.045	0.133	-0.47
9	1.052	0.00023	-5.55		0.000068		0.130	0.050	0.139	-0.42
10	1.072	0.00019	-5.77		0.000060		0.131	0.054	0.142	-0.42
11	1.111	0.00021	-6.10	0.5	0.000051	0.64	0.129	0.057	0.141	-0.40
12	1.143	0.00021	-6.37		0.000050		0.124	0.061	0.138	-0.35
13	1.162	0.00021	-6.56		0.000054		0.121	0.065	0.138	-0.33
14	1.177	0.00025	-6.73		0.000058		0.122	0.067	0.139	-0.32
15	1.188	0.00029	-6.85		0.000060		0.124	0.067	0.141	-0.30
16	1.192	0.00033	-6.92		0.000061		0.126	0.068	0.143	-0.30
17	1.192	0.00037	-6.97		0.000061		0.128	0.069	0.146	-0.30
18	1.191	0.00040	-7.01		0.000059		0.131	0.070	0.149	-0.31
19	1.188	0.00043	-7.05		0.000056		0.133	0.071	0.151	-0.29
20	1.184	0.00045	-7.07		0.000053		0.135	0.072	0.153	-0.27

に基づく長周期地震動特性の解析ー（その4）1964年新潟地震記録の解析ー，土木研究所資料，第2493号，1987.

28) 佐々木康，田村敬一，相沢興，高橋和之：気象庁一倍強震計の記録精度に関する実験的検討，土木研究所資料，第2386号，1986.

29) Fukushima, Y. and Tanaka, T.: A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake

ground motion in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 80, pp. 757-783, 1990.

30) 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.

31) 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，Vol. 556, pp. 15-24, 2002.

- 32) 佐藤俊明, 佐藤智美, 宮腰淳一, 渡辺孝英, 植竹富一, 田中英朗: 表面波が卓越する周期2~20秒のやや長周期地震動の距離減衰特性に関する基礎的研究—距離減衰式の整理と理論地震動を用いた検討—, 日本建築学会構造系論文集, 第463号, pp. 39-49, 1994.
- 33) 佐々木康, 田村敬一, 相沢興: 気象庁一倍強震計記録に基づく長周期地震動特性の解析—(その5) 1978年宮城県沖地震記録の解析—, 土木研究所資料, 第2664号, 1988.
- 34) 藤原広行, 河合伸一, 青井真, 先名重樹, 大井昌弘, 松山尚典, 岩本鋼司, 鈴木晴彦, 早川謙: 強震動評価のための深部地盤構造全国初期モデル, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 1466-1469, 2006.
- 35) Golden Software, Inc.: Surfer user's guide, 2002.
- 36) 野津厚, 長尾毅: スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所資料, No. 1112, 2005.
- 37) (社) 土木学会: 第1章地震動部会, 巨大地震災害への対応検討特別委員会報告書, pp. 2-13, 2006.
- 38) 釜江克宏, 川辺秀憲: 想定南海地震の強震動予測, 巨大地震災害への対応検討特別委員会地震動部会第11回資料, 2005.
- 39) (社) 土木学会: 付録 地震動提供波概説文, 巨大地震災害への対応検討特別委員会報告書, 2006.
- 40) 鶴来雅人, 趙伯明, Petukhin Anatoly, 香川敬生: 南海・東南海地震の大阪府域における強震動予測, 土木学会構造工学論文集, Vol.51A, pp. 501-512, 2005.
- 41) 関口春子, 吉見雅行, 堀川晴央, 吉田邦一: 海溝型巨大地震の広帯域地震動予測のためのマルチスケール不均質モデルと南海地震への適用, 海溝型巨大地震を考える—広帯域強震動の予測2—シンポジウム論文集, pp. 61-73, 2006.
- 42) 岩田知孝, 岩城麻子, 関口春子, 吉見雅行: 地域特性を反映した長周期地震動, 日本建築学会構造委員会高機能社会耐震工学ワーキンググループ, 長周期地震動対策に関する公開研究集会, pp. 1-52, 2008.
- 43) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 「全国を概観した地震動予測地図」報告書(分冊1)—確率論的地震動予測地図の説明—, 2005.
- 44) 片岡正次郎, 日下部毅明, 松本俊輔: やや長周期地震動の距離減衰式と増幅率の地域性, 海溝型巨大地震を考える—広帯域強震動の予測2—シンポジウム論文集, pp. 13-18, 2006.

(2007. 7. 5 受付)

ATTENUATION RELATIONSHIPS AND AMPLIFICATION MAP FOR GROUND MOTION IN RATHER-LONG PERIOD RANGE

Shojiro KATAOKA, Shunsuke MATSUMOTO,
Takaaki KUSAKABE and Nobuhiko TOYAMA

Attenuation relationships are proposed for acceleration response spectrum and Fourier spectrum of ground motion in rather-long period range using strong motion records observed in Japan. Amplification maps are also developed to compensate the attenuation relationships for site amplification characteristics. Comparisons with the ground motion calculated by a three-dimensional finite difference method validate the attenuation relationships and amplification maps. Ground motion during hypothetical great earthquakes is estimated by the present method, showing the method enables site-specific ground motion prediction at arbitrary sites all over Japan.