

【カテゴリーII】

日本建築学会構造系論文集 第606号, 81-88, 2006年8月  
J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No. 606, 81-88, Aug., 2006

# 震源深さの影響を考慮した工学的基盤における応答スペクトルの距離減衰式 ATTENUATION RELATIONSHIP FOR RESPONSE SPECTRA ON ENGINEERING BEDROCK CONSIDERING EFFECTS OF FOCAL DEPTH

内山 泰生\*, 翠川 三郎\*\*

Yasuo UCHIYAMA and Saburoh MIDORIKA WA

The purpose of this study is to develop attenuation relationship for acceleration response spectra on engineering bedrock for predicting strong ground motion. For developing the attenuation relationship, 3198 strong motion data from 52 earthquakes, which occurred in and around Japan from 1978 to 2003, with moment magnitude 5.5 to 8.3 are compiled in a database. By performing regression analysis using maximum likelihood method, new attenuation relationship is developed. In this relationship, effects of focal depth on the ground motion intensity and the focal depth dependence of the geometrical spreading coefficient are considered. The results show that the earthquake with deeper focal depth generates stronger ground motion.

**Keywords :** Attenuation relationship, Response spectra, Engineering bedrock, Focal depth

距離減衰式, 応答スペクトル, 工学的基盤, 震源深さ

## 1. はじめに

将来発生するであろう大地震における地震動強さをあらかじめ予測することは、地震工学上重要な課題の一つである。過去に得られた強震記録の回帰分析によって求められる地震動強さの距離減衰式は、比較的少ないパラメータで安定した結果が得られることから構造物の設計用入力地震動の評価や地域の地震被害想定などに多く用いられている。

地震動強さの距離減衰式では、地震動強さに影響を与える震源特性をマグニチュード、伝播特性を震源からの距離、地盤特性を地盤種別などで簡単にモデル化をすることが多い。しかし、これらのパラメータのみでは発生しうる多様なタイプの地震による地震動強さを評価できない場合があることが指摘されている。すなわち、震源が深い地震は浅い地震に比べて短周期成分を多く励起する傾向があること<sup>1)~3)</sup>、地震のタイプによっても地震動強さが異なる傾向があること<sup>4)~6)</sup>、震源が深い地震は浅い地震に比べて距離減衰が大きくなる傾向があること<sup>7)~8)</sup>などが指摘されている。また、地域的な特性として、北海道・東北地域では減衰構造の影響により火山フロントを境に距離減衰が大きく異なることが指摘されている<sup>9)</sup>。

したがって、地震動強さをより精度良く予測するためには、これらの特性を距離減衰式に考慮する必要があると考えられる。

これまでに提案されている地震動強さの距離減衰式は、最大加速度値や最大速度値などの最大振幅値を評価するものが大部分である。

しかし、構造物の耐震安全性を検討するためには、地震動強さのスペクトル特性が重要であることから、これを考慮できる応答スペクトルの距離減衰式が必要となる。しかし、最大振幅値の距離減衰式に比べて、これまでに提案されている応答スペクトルの距離減衰式<sup>10)~13)</sup>は少なく、地震規模が大きい場合の近距離における地震記録が限られている。

また、既往の応答スペクトルの距離減衰式では、地盤特性を地質区分や地盤種別などで定性的に評価することが多いが<sup>10)~13)</sup>、地盤種別は同一種別内において地盤特性のばらつきが大きい地盤分類として不十分であることが指摘<sup>14)</sup>されている。また、文献11)では、解析に用いた観測点の平均的な地盤特性における地震動強さに対する距離減衰式を提案しており、工学的基盤における地震動強さを直接的に評価していない。すなわち、既往研究では地盤特性の評価が定性的であり十分には行われていないこと、工学的基盤の定義が不十分であるなどの問題点がある。したがって、より定量的かつ物理的な指標で地盤特性を評価することが必要であると考えられる。

しかし、距離減衰式を作成する際に対象となる全ての地震観測点において、S波速度が400~700m/s程度の工学的基盤に達するような地盤情報が得られているとは限らない。

そこで、限られた地盤データを用いて工学的基盤における応答スペクトルを求めることを目的として、筆者らはこれまでに、地表から深さ30mまでの平均S波速度を指標とする地盤分類ごとの地盤増

\* 大成建設技術センター 副主任研究員・博士(工学)  
\*\* 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

Research Engineer, Technology Center, Taisei Corp., Dr. Eng.  
Prof., Dept. of Built Environment, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

表1 本研究で用いた地震の一覧

No.	地震名	発震日	Mw	Depth (km)	地震タイプ	記録数	No.	地震名	発震日	Mw	Depth (km)	地震タイプ	記録数
1	十勝沖地震	1968.05.16	8.2	15	Inter	8	27	千葉県北東部	2000.06.03	5.9	48	Inter	104
2	根室半島沖	1973.06.17	7.8	25	Inter	3	28	茨城県沖	2000.07.21	6.1	49	Inter	108
3	伊豆大島近海	1978.01.14	6.6	7	Crustal	6	29	鳥取県西部	2000.10.06	6.8	11	Crustal	179
4	宮城県沖	1978.06.12	7.6	37	Inter	7	30	三重県南部	2000.10.31	5.5	43	Intra	133
5	伊豆半島東方沖	1980.06.29	6.5	7	Crustal	10	31	芸予	2001.03.24	6.7	51	Intra	193
6	浦河沖	1982.03.21	6.9	25	Crustal	9	32	日向灘	2001.04.25	5.6	42	Intra	99
7	日本海中部	1983.05.26	7.8	6	Inter	13	33	根室半島南東沖	2001.04.27	6.0	83	Intra	32
8	日向灘	1984.08.07	6.9	30	Intra	3	34	青森県東方沖	2001.08.14	6.4	43	Inter	71
9	日高山脈北部	1987.01.14	6.8	120	Intra	4	35	岩手県内陸南部	2001.12.02	6.5	122	Intra	93
10	千葉県東方沖	1987.12.17	6.7	30	Intra	46	36	北海道東方沖	2002.01.19	5.7	32	Intra	10
11	釧路沖	1993.01.15	7.6	105	Intra	13	37	茨城県沖	2002.02.12	5.5	48	Inter	112
12	能登半島沖	1993.02.07	6.3	15	Crustal	5	38	福島県沖	2002.07.24	5.5	30	Inter	39
13	北海道南西沖	1993.07.12	7.7	10	Inter	14	39	北海道東方沖	2002.07.25	5.7	12	Inter	11
14	北海道東方沖	1994.10.04	8.3	35	Intra	15	40	根室半島南東沖	2002.08.25	6.1	44	Inter	30
15	三陸はるか沖	1994.12.28	7.7	35	Inter	13	41	福島県沖	2002.10.12	5.5	29	Inter	21
16	兵庫県南部	1995.01.17	6.9	10	Crustal	36	42	青森県東方沖	2002.10.14	6.0	53	Inter	71
17	日向灘	1996.10.19	6.7	25	Inter	103	43	宮城県沖	2002.11.03	6.4	46	Inter	57
18	鹿児島県北西部	1997.03.26	6.1	6	Crustal	101	44	日向灘	2002.11.04	5.7	35	Intra	90
19	鹿児島県北西部	1997.05.13	6.0	7	Crustal	100	45	福島県沖	2003.03.03	5.7	41	Inter	57
20	山口県北部	1997.06.25	5.8	10	Crustal	119	46	北海道東方沖	2003.04.29	5.9	18	Inter	5
21	伊豆半島東方沖	1998.05.03	5.5	3	Crustal	76	47	宮城県沖	2003.05.26	7.0	71	Intra	132
22	岩手県内陸北部	1998.09.03	5.8	10	Crustal	55	48	釧路沖	2003.07.03	5.8	33	Inter	41
23	日向灘	1998.12.16	5.8	32	Inter	43	49	宮城県北部	2003.07.26	5.5	12	Crustal	82
24	釧路支庁中南部	1999.05.13	6.4	104	Intra	70	50	宮城県北部	2003.07.26	6.1	12	Crustal	97
25	和歌山県北部	1999.08.21	5.8	70	Intra	114	51	千葉県東方沖	2003.09.20	5.7	70	Inter	115
26	根室半島南東沖	2000.01.28	6.7	56	Intra	30	52	十勝沖	2003.09.26	7.9	42	Inter	200

幅率の定量的な評価方法<sup>15)</sup>、これを用いて地盤特性の影響を除去し、地表で得られた強震記録から工学的基盤における応答スペクトルを概略的に評価する方法<sup>16)</sup>を提案している。

本研究ではこれらの結果を用いて、既往研究に比べてより定量的かつ物理的な指標を用いて定義された工学的基盤における応答スペクトルを評価する。さらに、この結果に基づき、地震動特性を支配する要因を考慮し、地震動強さをより精度よく予測することができる工学的基盤における応答スペクトルの距離減衰式を提案することを目的とする。ただし、本研究は強い地震動が予想される大地震時の比較的近距离における強震動予測のために、全国で適用可能な距離減衰式を作成することを目的としているため、文献9)で指摘されるような地域的な特性は考慮しない。

2. 地震記録のデータベース

表1に本研究で用いた地震の一覧を示す。整理した地震は、1968年十勝沖地震から2003年十勝沖地震までの52地震であり、日本およびその周辺で発生した Mw $\geq$ 5.5 の地震であることを条件に選択した。ここで、表1に示す52地震のうち、地震番号1~20は司・翠川(1999)<sup>6)</sup>、21~32は翠川・大竹(2002)<sup>7)</sup>が整理した地震であり、地震番号33以降が本研究で整理した地震である。

各地震の諸元のうち、Mwは防災科学技術研究所 F-net またはハーバード大学 CMT 解による値を用いた。震源位置、震源深さ、断層面の位置などは、佐藤(1989)<sup>17)</sup>や気象庁による値を参考にして定めた。ここで、震源深さは、断層面が定義できる場合には、文献6)や11)と同様に断層面の平均的な深さ、それ以外のものについては気象庁による震源深さとした。付録に断層面位置を設定する際に参照した文献の一覧を示す。また、震源深さ、震源メカニズム、プレート

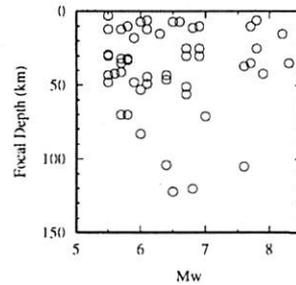


図1 Mwと震源深さの分布

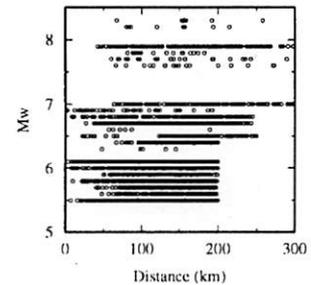


図3 断層面最短距離とMwの分布

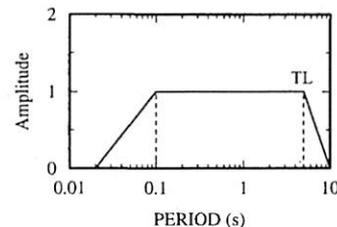


図2 強震記録に適用したバンドパスフィルター

境界位置から地殻内地震(Crustal)、プレート境界地震(Inter)、プレート内地震(Intra)の3種類に分類した。図1に本研究で用いた地震のMwと震源深さの分布を示す。大部分の地震は、深さ50km以内に分布しているが、深さ100km程度の地震も含まれている。

表1に示す52地震で得られた強震記録を収集した。収集した強震記録は、計器特性の補正を行った後、フーリエスペクトルから長周期領域におけるS/N比を確認することで長周期信頼周期TLを評価した。計器特性の補正を行った各強震記録は周期0.1秒以上での精

度が確保されていると考えられることから<sup>18)~20)</sup>、図2に示すような周期0.1秒からTLまで平坦なバンドパスフィルターを施した。ただし、TLが5秒以下の強震記録については、周期TLまでのデータを用いることにし、これよりも長周期成分はデータから除外した。

以上までの処理を行った後、周期5秒まで有効な強震記録が多く含まれるように、 $M_w \geq 7.0$ では距離300km以内、 $6.5 \leq M_w < 7.0$ では距離250km以内、 $M_w < 6.5$ では距離200km以内の観測点で得られた3198記録を距離減衰式を作成するためのデータとして整理した。ここでは距離の定義として断層面最短距離<sup>21)</sup>を用いた。ただし、 $M_w 6.0$ 以下の中小地震については、断層面に関する情報が得られない場合が多いことから、距離の定義として震源距離を用いた。図3に整理した強震記録の距離と $M_w$ の分布を示す。整理した強震記録には、近距離におけるデータも含まれていることが分かる。

各観測点およびその近傍で得られている地盤データを収集した。収集した地盤データに基づいて、(1)式を用いて地表から深さ30mまでの平均S波速度(以下、V30)を求め、内山・翠川(2003)<sup>13)</sup>に従って、表2に示す7種類の地盤に分類を行った。ただし、地盤データの調査深度が30m未満の場合には、司・翠川(1999)<sup>9)</sup>の判断基準に従って深さ30mまでのS波速度を推定しV30を求めた。

$$V30 = \frac{\sum_{i=1}^n di}{\sum_{i=1}^n (di/v_i)} \quad (1)$$

ここで、 $di$ は層厚(m)、 $v_i$ はS波速度(m/s)、 $n$ は層数を示す。

図4に本研究で対象とした全観測点(1013地点)におけるV30の頻度分布を示す。V30の平均値は、328m/s、最頻値は200~250m/sである。また、V30の最大値は750m/sであり、表2に示す地盤分類AおよびBに属する観測点はない。したがって、地盤分類AおよびBに属する観測点がないことから、V30が500m/s程度の地盤分類C1を本研究における工学的基盤とする。ここで、地盤分類C1に属する観測点でのV30の平均値は550m/s、最頻値は500~525m/sである。

### 3. 工学的基盤における応答スペクトルの距離減衰式の作成

表1に示す52地震で得られた強震記録に、内山・翠川(2004)<sup>14)</sup>による方法を適用し、V30が500m/s前後の工学的基盤における加速度応答スペクトルを求める。次に、この結果に基づいて工学的基盤における加速度応答スペクトルの距離減衰式を作成する。

#### 3.1 震源がやや深い地震の距離減衰特性

防災科学技術研究所のK-NETやKiK-netに代表される高密度の強震観測網が整備されたことにより、多数の地震において広範囲にわたって精度の良い強震記録が得られるようになった。これらの分析から、震源がやや深い地震が浅い地震に比べて距離減衰の傾きが大きくなることが指摘<sup>7,8)</sup>されている。これは、地殻・マンツルの層構造の影響により、モホ面より深い地震では地震波がモホ面で反射し、モホ面を透過して地表面に達する地震波の振幅が小さくなり、見かけ上距離減衰が大きくなるため<sup>7,22)</sup>や、伝播経路深部における大きな減衰<sup>9)</sup>が要因として指摘されている。後者では統計的グリーン関数法を用いた数値実験を行っているが、震源深さの2倍以上の距離では観測結果を説明しきれていない。一方、前者による地殻・マンツルの層構造の影響を考慮した数値実験結果では、やや深い地震の

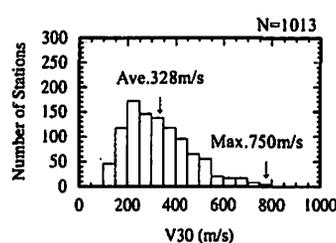


図4 V30の頻度分布

表2 V30に基づく地盤分類

地盤分類	V30 (m/s)
A	V30>1500
B	760<V30≤1500
C1	460<V30≤760
C2	360<V30≤460
D1	250<V30≤360
D2	180<V30≤250
E	V30≤180

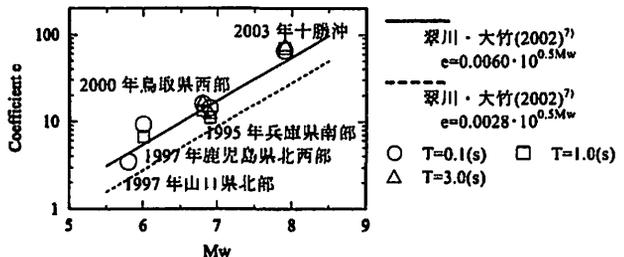


図5 係数eとMwの関係

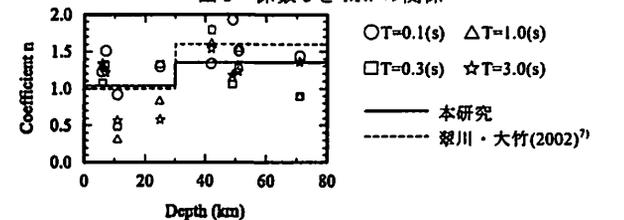


図6 係数nと震源深さの関係

距離減衰の特性を遠方まで評価できている。やや深い地震の距離減衰が浅い地震に比べて大きくなる要因については、より詳細な検討が必要であるが、本研究では、比較的遠方まで説明可能な文献<sup>7)</sup>の方法に従って以下の検討を行う。

表1に示す地震のうち、比較的遠方までの強震記録が含まれている8地震(地震番号17~19,28,29,31,47,52)について、(2)式に示す回帰モデルを用いて、それぞれの地震の幾何減衰を表す係数 $n$ を最小2乗法によって求めた。

$$\log SA(T) = S(T) - n(T) \cdot \log(X + e) + c(T)X \quad (2)$$

$$e = 0.006 \cdot 10^{0.5M_w} \quad (3)$$

$$c(T) = \pi \cdot \log e / [T \cdot \beta \cdot Q(T)] \quad (4)$$

ここで、 $SA(T)$ は水平2成分の幾何平均値で表した工学的基盤における加速度応答スペクトル( $h=5\%$ )、 $S(T)$ は地震動強さの絶対値を支配する項、 $n(T)$ は幾何減衰を表す係数、 $X$ は断層面最短距離(km)、 $T$ は周期をそれぞれ示す。近距離で振幅を頭打ちさせるための係数 $e$ は、文献<sup>7)</sup>と同様の方法で検討を行った結果、図5に示すように地震ごと、周期ごとにはばらつきがあるが、文献<sup>7)</sup>による(3)式と調和的な値が得られた。そこで、本研究では全周期帯において(3)式を用いた。また、 $c(T)$ は加藤他(2002)<sup>23)</sup>を参考に $Q=100f^{1.0}$ を仮定して、武村他(1987)<sup>24)</sup>による(4)式から求められる値を(2)式に与えた。なお、(4)式中で媒質のS波速度を表す $\beta$ には3.0km/sを用いた。

図6に幾何減衰を表す係数 $n$ と震源深さの関係を示す。翠川・大竹(2002)<sup>7)</sup>と同様に、地殻の厚さにおおよそ対応する深さ30kmで区分した場合、ばらつきが大きいものの、震源深さ30km以内の地震

における  $n$  の平均値は 1.0, 30km 以深の地震における  $n$  の平均値は 1.4 となる。

以上から、やや震源が深い地震の距離減衰の傾きが浅い地震に比べて大きくなる特性を、震源深さによって幾何減衰を表す係数を変化させることで距離減衰式に考慮する必要があると考えられる。

3.2 距離減衰式の回帰モデル

これまでに提案されている距離減衰式の多くでは、震源特性を  $M_w$  などモデル化している。震源スペクトルが  $\omega^2$  モデルに従うとした場合、加速度震源スペクトルの短周期レベルは地震モーメントの 1/3 乗、応力降下量の 2/3 乗に比例<sup>2)</sup>し、応力降下量が震源スペクトルの短周期レベルを強く支配している。強震記録の分析から応力降下量や実効応力が、地震タイプや震源深さによって異なることが指摘<sup>20)21)22)</sup>されていることから、この影響を考慮することが重要であると考えられる。また、距離減衰式による予測値と観測値の残差から、地震タイプや断層タイプが地震動強さに影響を与えることも指摘<sup>9)~11)</sup>されている。

震源深さによる距離減衰の傾きの違いは、図 6 に示す結果に基づいて、深さ 30km 以浅の地震では幾何減衰を表す係数を  $n=1.0$ , 30km 以深の地震は  $n=1.4$  とし、(5)および(6)式でモデル化<sup>7)</sup>する。(6)式は震源深さの 1.7 倍に相当する震源距離より遠方において距離減衰の傾きが大きくなることを表しており、文献 7)と同様に地殻・マンツルの層構造を仮定した数値計算結果に基づいて設定した。

$$g = -\log(X + e) \quad D \leq 30\text{km} \quad (5)$$

$$g = 0.4\log(1.7D + e) - 1.4\log(X + e) \quad D > 30\text{km} \quad (6)$$

ここで、 $X$  は断層面最短距離 (km),  $D$  は震源深さ (km),  $e$  は(3)式に示す近距離で振幅を頭打ちさせるための係数<sup>7)</sup>をそれぞれ示す。

地震タイプは、地殻内地震、プレート境界地震、プレート内地震の 3 タイプを考慮し、ダミー変数を用いて(7)式でモデル化する。

$$\sum_{i=1}^2 f_i(F_i) = f_1(T) \cdot F_1 + f_2(T) \cdot F_2 \quad (7)$$

ここで、 $f_1(T)$ および $f_2(T)$ が回帰係数、 $F_1$ および $F_2$ が地震タイプを表すダミー変数である。つまり、 $F_1=1$  かつ  $F_2=0$  の場合はプレート境界地震、 $F_1=0$  かつ  $F_2=1$  の場合はプレート内地震、 $F_1=0$  かつ  $F_2=0$  の場合は地殻内地震であることを示す。

以上から、距離減衰式の回帰モデルとして、(8)および(9)式を設定する。つまり、(8)式は震源深さと震源深さによる距離減衰の傾きの違いを考慮したモデル、(9)式は震源深さ、地震タイプ、震源深さによる距離減衰の傾きの違いを考慮したモデルになる。また、これらの説明変数を回帰モデルに導入したことによる効果を確認するために、(10)式に示す回帰モデルも併せて設定した。(8)~(10)式に示す回帰モデルについて、最尤法<sup>26)27)</sup>を用いた一段階回帰分析によって各係数の評価を行う。

$$\log SA(T) = a(T)M_w + b(T)X + g + d(T)D + c(T) + \sigma(T) \quad (8)$$

$$\log SA(T) = a(T)M_w + b(T)X + g + d(T)D + \sum_{i=1}^2 f_i(T)F_i + c(T) + \sigma(T) \quad (9)$$

$$\log SA(T) = a(T)M_w + b(T)X - \log(X + e) + c(T) + \sigma(T) \quad (10)$$

ここで、 $SA(T)$ は水平 2 成分の幾何平均値とした工学的基礎における加速度応答スペクトル ( $h=5\%$ ),  $a(T) \sim d(T)$ は回帰係数、 $M_w$  はモーメントマグニチュード、 $X$  は断層面最短距離 (km),  $D$  は震源深さ (km),  $e$  は (3) 式に示す近距離で振幅を頭打ちさせるための係数を示す。また、 $\sigma(T)$ は対数標準偏差であり、地震間誤差と地震内誤差の 2 乗和平方根で表される<sup>26)</sup>。

3.3 回帰分析結果

図 7(a), (b), (c)に回帰係数、図 8 に回帰誤差  $\sigma(T)$ の比較を示す。なお、図 8 には地震間誤差および地震内誤差も併せて示している。

図 7(b)から、回帰モデルを(9)式とした場合に震源深さの項の回帰係数  $d(T)$ と地震タイプの項の回帰係数  $f_1(T)$ および $f_2(T)$ が不安定に求まる傾向が見られる。図 9 に対象とした 52 地震について、地震タイプごとの震源深さの分布を示す。図 9 に示すように、地震タイプと震源深さには相関が見られ、パラメータ間に多重共線が存在しているため、安定した係数が求まっていないと考えられる。

なお、3.1 で係数  $n$  を求める際に仮定した  $Q=100f^{1.0}$ を(4)式に代入し、粘性減衰を表す係数  $b(T)$ を求めると 0.0046 となる。図 7 に示す回帰係数  $b(T)$ は、短周期ではこの値におおよそ一致するが、長周期ではこれよりも小さな値となり、仮定と結果に不一致がみられる。これは、 $Q$  値と  $n$  がトレードオフの関係にあり、 $Q=100f^{1.0}$ を仮定して得られた  $n$  を 3.2 で用いていることが原因として考えられる。しかし、回帰分析に用いた強震記録の大部分は、距離 200km 以内のものであり、この範囲では粘性減衰の影響は小さいことが知られていること、 $Q$  値と  $n$  を合わせたトータルの減衰としては妥当と考えられることから、これが結果に与える影響は小さいものと考えられる。ただし、これが結果に与える影響の定量的な評価は今後の検討課題である。

(8)~(10)式に示す回帰モデルの統計的有意性を(11)式に示す AIC を用いて検討する。

$$AIC = -2\log L(\theta) + 2p \quad (11)$$

ここで、 $\log L(\theta)$ が回帰分析の際に得られる最大対数尤度、 $p$  は回帰モデルで用いた説明変数の個数を示す。つまり、AIC が小さな値であるほど、統計的に有意なモデルであることを示す。

図 10 に(10)式の AIC で正規化した(8), (9)式の AIC の比較を示す。図 10 から、震源深さと震源深さによる距離減衰の傾きの違いを考慮した(8)式に示す回帰モデルが最も小さな AIC を示すことが分かる。

以上から、地震タイプと震源深さには相関があるため、震源深さのみを説明変数として導入することで地震タイプの影響を考慮できると考えられること、AIC の比較から震源深さによる距離減衰の傾きの違いを考慮した場合が最も統計的に有意なモデルであることから、本研究では(8)式を提案する工学的基礎における応答スペクトルの距離減衰式とする。

(8)式の各回帰係数は、図 7(a)に示すように山谷のある形状をしている。本研究では、対象周期帯(0.02~5.0 秒)を対数軸上で 80 分割した周期で各回帰係数を求めているが、分割数を変えた場合には、各係数の山谷が若干変化すること、さらに本研究では近似的な方法で

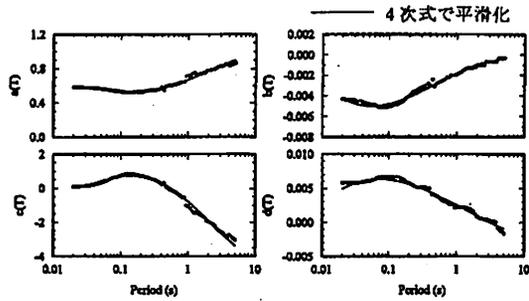


図 7(a) 回帰係数：(8)式

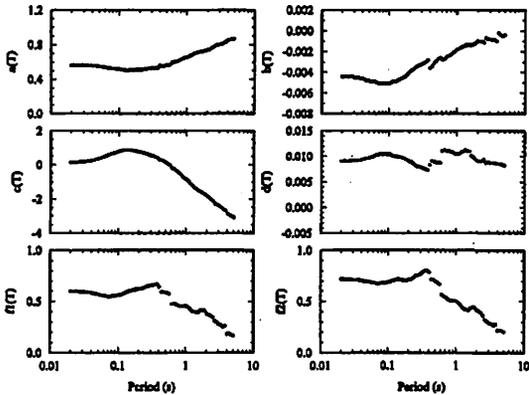


図 7(b) 回帰係数：(9)式

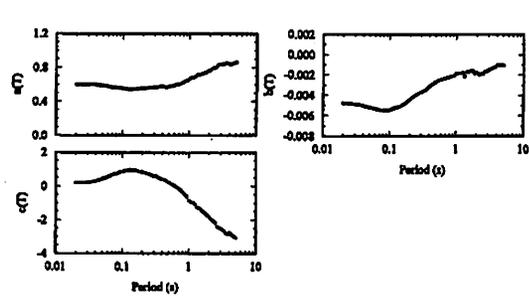


図 7(c) 回帰係数：(10)式

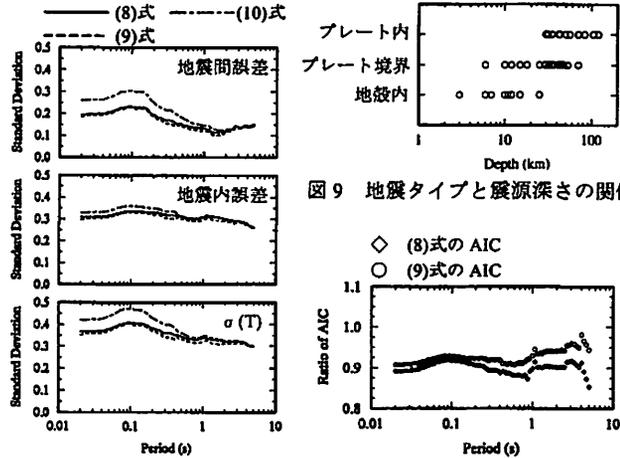


図 8 回帰誤差の比較

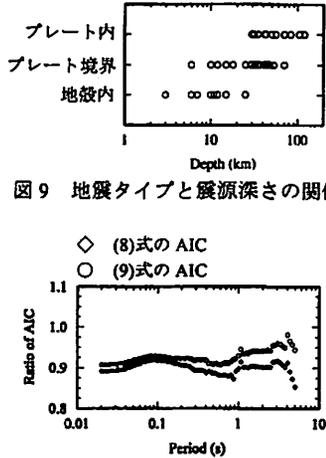


図 9 地震タイプと震源深さの関係

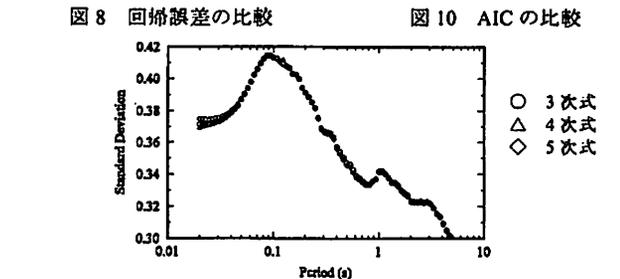


図 10 AIC の比較

工学的基礎での応答スペクトルを評価していることを考えあわせると、各回帰係数の細かな山谷には統計的に大きな意味がないと考えられる。また、設計用入力地震動を評価する場合や確率論的地震動評価を行う場合には、任意の周期における地震動強さを予測できる方が利便性が高いと考えられる。そこで、より平均的な特性を抽出するために回帰係数の平滑化<sup>51,28)</sup>を行う。各回帰係数の平滑化は、木下他(1987)<sup>28)</sup>と同様に(12)式に示す多項式を用いて平滑化を行う。

$$X(T) = X_0 + \sum_{i=1}^m X_i \cdot (\log T)^i \quad (12)$$

ここで、 $X_0$  および  $X_i$  は回帰係数、 $T$  は周期を示す。

平滑化は3~5次式とした場合について行った。図11に回帰分析に用いた元データとの誤差を示す。いずれの場合も同程度の誤差を示すが、周期0.2~1.0秒では4次および5次式とした場合が3次式とした場合よりも若干小さな誤差を示す。そこで、元データとの誤差が小さく、次数の低い4次式とした場合を(8)式に示す距離減衰式で用いる。図7(a)に4次式で平滑化した係数、図12に平滑化前後の係数を用いて求められる擬似速度応答スペクトルの比較を示す。また、表3に(12)式で用いる係数の一覧を示す。

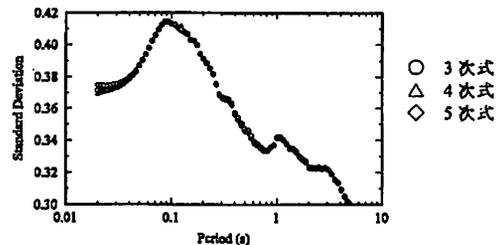


図 11 平滑化した係数を用いた場合の元データとの残差

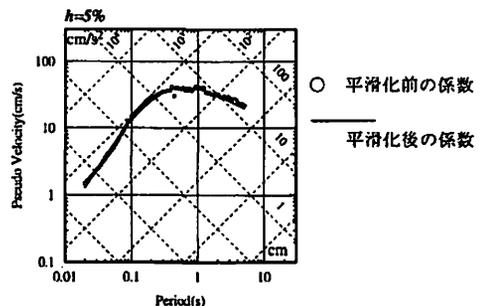


図 12 擬似速度応答スペクトルの比較

表 3 (12)式で用いる係数の一覧

	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
$a(T)$	0.6692	0.3140	0.1199	-0.1135	-0.0541
$b(T)$	-0.0018	0.0029	-0.0010	-0.0006	0.0003
$c(T)$	-0.8028	-3.4501	-1.3750	1.0960	0.5136
$d(T)$	0.0025	-0.0054	-0.0004	0.0012	0.0001

本研究による予測値は、文献29)と調和的であり、周期0.3秒以上では、文献5)とも同程度の地震動強さを示す。一方、文献11)は、周期0.3秒以下で本研究よりも小さく、周期0.3秒以上で大きな値

となる。これは、基準とする地盤の地盤特性の違いと考えられる。

図14(a)および(b)に、本研究の距離減衰式から予測される周期0.02秒での加速度応答スペクトル値 ( $h=5\%$ ) と既往の最大加速度値の距離減衰式<sup>4)~7),29)~31)</sup>との比較を示す。ここで、文献4)は岩盤、文献6)および7)は距離減衰式による予測値を1.4で除した岩盤相当、文献30)はsoft rock、文献31)は  $V_{30}=760\sim 1500\text{m/s}$  での値に対応する。

図14(a)は、地殻内地震を対象とした既往研究<sup>5),6),30),31)</sup>との比較であり、 $M_w7.0$ ,  $D=10\text{km}$  とした場合の予測値を示している。本研究による予測値は、距離10km以下では文献29)や30)と同程度であり、文献30)とは遠方においても良く一致する。

図14(b)はプレート内地震を対象とした既往研究<sup>4),6),7),31)</sup>との比較であり、 $M_w7.5$ ,  $D=50\text{km}$  とした場合の予測値を示している。本研究による予測値は、距離100km以下では中間的な値を示すが、距離100km以上においては、文献4)や6)との違いが大きくなる。これは、文献4)や6)では幾何減衰を表す係数が一定値であるのに対して、本研究を含む他の研究では震源深さに依存した係数を用いているためと考えられる。

5. 距離減衰式から予測される地震動強さ

図15(a)に  $M_w8.0$ ,  $X=50\text{km}$ ,  $D=10, 50\text{km}$  とした場合の擬似速度応答スペクトルを示す。震源が深いほど大きな地震動強さを示し、この傾向は周期1秒程度以下の短周期領域で顕著である。例えば、周期0.1秒では、震源深さ50kmの場合は10kmとした場合に比べて約2倍となる。これは、震源深さの影響を考慮している最大振幅値の距離減衰式<sup>6)</sup>による傾向と調和的である。

図15(b)に  $M_w7.5$ ,  $D=10, 50\text{km}$  とした場合の周期0.5秒における加速度応答スペクトルの距離減衰を示す。図から震源に近い距離では、震源が深い地震の方が大きな地震動強さを示すが、震源から遠くなるにつれて震源深さによる影響は小さくなり、両者は同程度の地震動強さを示す。

次に、具体的な事例として関東地方を対象として距離減衰式から予測される地震動強さの特性を確認する。ここでは、大手町を検討対象地点として、南関東地震と関東直下で発生する地震を想定した地震動強さの比較を行う。南関東地震はWald and Somerville(1995)<sup>32)</sup>の断層モデル、直下地震は中央防災会議<sup>33)</sup>による断層モデルを用いる。図16に断層面位置、表4に断層パラメータを示す。

表4から南関東地震を想定した場合が、地震規模が大きくかつ距離も近い。したがって、地震規模と距離のみを考慮した最も単純な距離減衰式では、南関東地震を想定した場合が大きな地震動強さになると予測される。図17に擬似速度応答スペクトルの比較を示す。周期0.5秒以上では南関東地震を想定した場合が直下地震を想定した場合を上回る。しかし、周期0.5秒以下では、直下地震を想定した場合が南関東地震を想定した場合を若干上回る。

6. まとめ

本研究では、日本およびその周辺で発生した  $M_w5.5$  以上の52地震で得られた3198地震記録を用いて、 $V_{30}$ が500m/s程度の工学的基盤における応答スペクトルの距離減衰式を提案した。提案した距離減衰式は、1)用いた工学的基盤における応答スペクトルが従来提案されているものに比べてより物理的かつ定量的な指

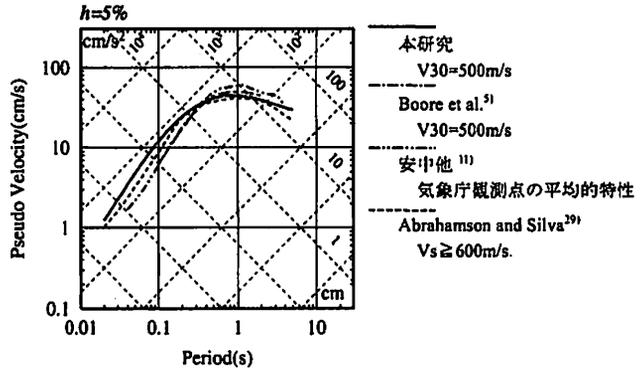
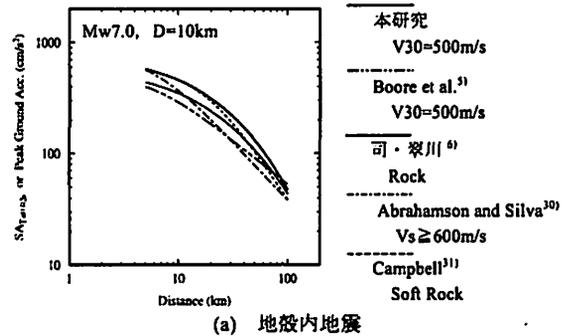
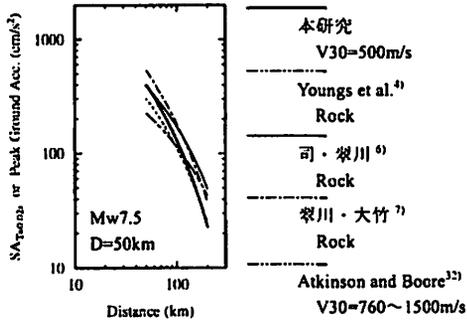


図13 既往の応答スペクトルの距離減衰式との比較

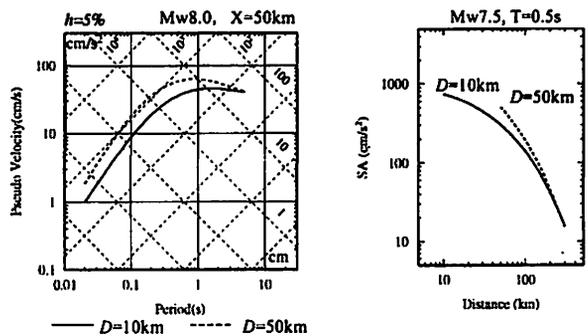


(a) 地殻内地震



(b) プレート内地震

図14 既往の最大加速度値の距離減衰式との比較



(a) 応答スペクトルの比較 (b) 距離減衰の比較

図15 震源深さが予測値に与える影響

標で定義されていること、2)震源特性としてマグニチュードだけではなく震源深さの影響も考慮することで震源が深い地震ほど短周期成分の地震動強さが大きくなる特性が評価できること、3)強震記録の分析から指摘されている、震源がやや深い地震の距離減衰が震源が浅い地震に比べて大きくなる傾向を、震源深さによって幾何減衰を表す係数を変えることで考慮した、の特徴を持つことを示した。



図16 断層面位置

表4 断層パラメータ

	南関東地震	直下地震
地震規模	7.9	7.3
断層長さ	130 (km)	55 (km)
断層幅	70 (km)	26 (km)
断層上端深さ	2 (km)	45 (km)
走向	290 (deg)	300 (deg)
傾斜角	25 (deg)	90 (deg)
断層最短距離	34 (km)	45 (km)

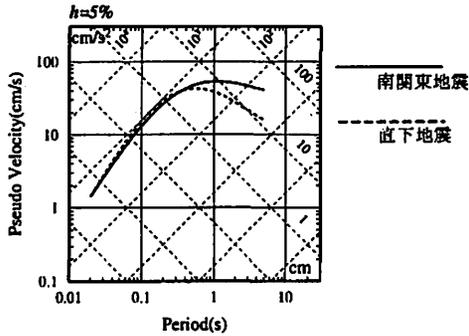


図17 南関東地震, 直下地震を想定した予測値の比較

謝辞

本研究では, 防災科学技術研究所, 気象庁などの多数の機関で得られた強震記録, 地盤データを利用して頂きました。また, 強震記録・地盤データの整理には, 千葉科学大学・藤本 雄博士と(株)構造計画研究所・司宏俊博士にご協力頂きました。本研究は, (独)原子力安全基盤機構による「平成16年度原子力安全基盤調査研究」の一部として実施しました。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 武村雅之: 1993年釧路沖地震の発生メカニズムと地震動ーやや深発地震による強震動の特徴ー, 第21回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会, pp.3-14, 1993.11
- 2) 加藤研一・武村雅之・八代和彦: 強震記録から評価した短周期震源スペクトルの地域性, 地震, 第2輯, pp.123-138, 1998
- 3) 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, 第560号, pp.67-73, 2002.10
- 4) 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, pp.58-73, 1997
- 5) Boore, D.M., W.B. Joyner and T.E. Fumal: Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Ground Acceleration from Western North American Earthquakes: A Summary of Recent Work, Seism. Res. Lett., Vol.68, pp.154-179, 1997
- 6) 司宏俊・翠川三郎: 断層タイプ及び地盤特性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, 第523号, pp.63-70, 1999.9
- 7) 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, pp.609-614, 2002
- 8) 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, 第571号, pp.63-70, 2003.9
- 9) 武村雅之・太田外気晴・池浦友則: 大地震により励起された短周期地震波の減衰過程, 鹿島建設技術研究所年報, 第32号, pp.135-140, 1984
- 10) 川島一彦・相沢興・高橋和之: 最大地動及び地震応答スペクトル

の距離減衰式, 土木研究所報告, 第166号, 1985

- 11) 安中正・山崎文雄・片平冬樹: 気象庁87型強震記録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, pp.161-164, 1997
- 12) 高橋克也・武村雅之・藤堂正吾・渡辺孝英・野田静男: 様々な岩盤上での強震動応答スペクトルの予測式, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp.547-552, 1998
- 13) 大野晋・高橋克也・源栄正人: カリフォルニア強震記録に基づく水平動・上下動の距離減衰式と日本の内陸地震への適用, 日本建築学会構造系論文集, 第544号, pp.39-46, 2001.6
- 14) 翠川三郎・松岡昌志・作川孝一: 1987年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性, 日本建築学会構造系論文報告集, 第442号, pp.71-78, 1992.12
- 15) 内山泰生・翠川三郎: 地震記録および非線形応答解析を用いた地盤分類別の地盤増幅率の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第571号, pp.87-93, 2003.9
- 16) 内山泰生・翠川三郎: 地盤分類別の地盤増幅率を用いた基礎地震動スペクトルの簡便な評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第582号, pp.39-46, 2004.8
- 17) 佐藤良輔: 日本の地震断層パラメータ・ハンドブック, 鹿島出版会, 1989
- 18) 井合進・倉田栄一・上田肇: 強震記録のデジタル化と補正, 港湾技研資料, No.286, 1978
- 19) Kinoshita, S.: Kyoshin Net(K-NET), Seism. Res. Lett., Vol.69, pp.309-322, 1998
- 20) 若山品彦・藤沢格・遠山忠昭・神定健二: 気象庁における電磁式強震計観測の現状, 日本地震学会講演予稿集, B35, 1989
- 21) 田中貞二・福島美光: 地震動強さの距離減衰式, 第15回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会, pp.7-16, 1987
- 22) 翠川三郎: 強震ネットワークによる最新の強震記録を利用した地震動強さの距離減衰特性の検討, 強震観測ネットワークに関するシンポジウム 21世紀の強震ネットワークとそのデータ流通をデザインする, 日本地震学会, pp.1-4, 2001
- 23) 加藤研一・武村雅之・池田孝: 伝播経路のQs値の振動数依存性ー既往研究のレビューと問題提起ー, 日本地震学会講演予稿集, B87, 2002
- 24) 武村雅之・太田外気晴・神田成人: 地震動の平均応答スペクトルを評価する経験式の物理的基礎, 日本建築学会構造系論文報告集, 第375号, pp.1-9, 1987
- 25) 壇一男・渡辺基史・宮腰研一: 既存のスペクトルインバージョン結果と震源インバージョン結果から推定されるアスペリティーの実効応力と断層タイプおよび震源深さとの経験的関係, 日本建築学会構造系論文集, 第565号, pp.55-62, 2003.3
- 26) Abrahamson, N.A. and R.R. Youngs: A Stable Algorithm for Regression Analysis Using The Random Effects Model, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.82, pp.505-510, 1992
- 27) Searle, S.R.: Linear Model, Willy, New York, 1971
- 28) 木下繁夫・御子栄正・星野努: 堆積層における短周期S波の平均的増幅特性の推定, 地震, 第2輯, 第39巻, pp.67-80, 1986
- 29) Abrahamson, N.A. and W.J. Silva: Empirical Response Spectra Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes, Seism. Res. Lett., Vol.68, pp.94-127, 1997
- 30) 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, pp.154-179, 1997
- 31) Atkinson, G.M. and D.M. Boore: Empirical Ground-Motion Relations for Subduction-Zone Earthquakes and Their Application to Cascadia and Other Regions, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.93, pp.1703-1729, 2003
- 32) Wald, D.J. and P.G. Somerville: Variable-Slip Rupture Model of the Great 1923 Kanto, Japan, Earthquake: Geodetic and Body-Waveform Analysis, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.85, pp.159-177, 1995

- 33) 中央防災会議「首都圏直下地震対策専門調査会」：第12回 地震ワーキンググループ報告書，2004

付録 断層面位置，地震タイプを設定する際に参考とした文献

地震番号1~20は，司・翠川(1999)<sup>6)</sup>の文献リストを参照

- 1) 気象庁：地震・火山月報（防災編），気象庁ホームページ，<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/gaikyo/index.html>
- 2) 関口春子・岩田知孝・松元康弘・三宅弘恵・入倉孝次郎：2000年鳥取県西部地震の震源課程と震源近傍地震動，日本地震学会講演予稿集，2000
- 3) 堀川晴央・関口春子・岩田知孝・杉山雄一：2000年鳥取県西部地震の断層モデル，活断層・古地震研究報告，No.1，pp.27-40，2001
- 4) Yagi, Y. and M. Kikuchi：The Source Process of Geiyo Earthquake of March 24,2001 Obtained by Joint Inversion of Teleseismic Data and Near-Field data, Seism. Soc. Am. 2002 Annual Meeting, 2002
- 5) 浅野公之・岩田知孝・入倉孝次郎：2003年5月26日に宮城県沖で発生したスラブ内地震の震源モデルと強震動シミュレーション，地震，第2集，第57巻，pp.171-185，2004
- 6) 八木勇治：2003年5月26日宮城県沖で発生した地震(Mjma7.0)の震源課程，[http://iisee.kenken.go.jp/staff/yagi/eq/east\\_honshu20030526/east\\_honshu20030526-j.html](http://iisee.kenken.go.jp/staff/yagi/eq/east_honshu20030526/east_honshu20030526-j.html)
- 7) 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の地震(2003/05/26,18:24)の震源インバージョン，<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/topics/miyagi/>
- 8) 山中佳子：EIC地震学ノート，No.135，[http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/san chu/Seismo\\_Note/EIC\\_News/030526n.html](http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/san chu/Seismo_Note/EIC_News/030526n.html)
- 9) 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の地震(2003/07/26,7:13)の震源インバージョン，[http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/topics/miyagi\\_200307260713/](http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/topics/miyagi_200307260713/)
- 10) 山中佳子：EIC地震学ノート，No.137，[http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/san chu/Seismo\\_Note/EIC\\_News/030725M.html](http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/san chu/Seismo_Note/EIC_News/030725M.html)
- 11) 本多亮・青井真・森川信之・関口春子・功刀卓・藤原広行：近地強震動記録による北海道十勝沖地震(2003/09/26,4:50)の震源インバージョン，<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/topics/tokachi-oki/inv/>
- 12) 山中佳子：EIC地震学ノート，No.139，[http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/san chu/Seismo\\_Note/EIC\\_News/030926.html](http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/san chu/Seismo_Note/EIC_News/030926.html)
- 13) 堀貞喜：関東地方下のフィリピン海プレート内地震の発生機構，地震，第2輯，第50巻，pp.203-213，1997
- 14) 岡田義光：総合報告 南関東地域のサイスモテクトニクス，地震，第2輯，第43巻，pp.153-175，1990
- 15) 海野徳仁・長谷川昭：東北日本弧における二重深発地震面と発震機構，地震，第2輯，第35巻，pp.237-257，1982
- 16) 岩瀬良一・溝上恵：千葉県東方沖周辺の地震のメカニズムについて，日本地震学会講演予稿集，1988

(2005年6月9日原稿受理，2006年4月17日採用決定)