



Title	観測記録に基づいたスラブ内地震の短周期レベル
Author(s)	池田, 孝
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 73, 71-85
Issue Date	2010-03-19
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.73.71
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/44458
Type	departmental bulletin paper
File Information	73_08_p71-85.pdf



観測記録に基づいたスラブ内地震の短周期レベル

池田 孝

鹿島建設小堀研究室

(2009 年 12 月 25 日受理)

Short-period Spectral Level of the Intra-slab Earthquakes from Strong Motion Records

Takashi IKEDA

Kobori Research Complex, Kajima Corporation

(Received December 25, 2009)

Acceleration source spectra of three intra-slab earthquakes which occurred recently were evaluated by eliminating the effects of propagation path and site characteristics from observation records. Short-period spectral level A were evaluated from the acceleration source spectra, and stress parameters $\Delta\sigma$ were calculated from A and seismic moment M_0 . The relationship between $\Delta\sigma$, focal mechanism, regionality, location, M_0 , and focal depth were examined. $\Delta\sigma$ of intra-slab earthquakes was not much affected by focal mechanism, regionality in the Pacific plate. The effect of location and focal depth to $\Delta\sigma$ is not clear, but $\Delta\sigma$ is not dependent on focal depth for medium and large earthquakes in the Pacific plate. Upper level of $\Delta\sigma$ is not affected by M_0 and is 40–80 MPa. But lower level of $\Delta\sigma$ is affected by M_0 , that is, lower than 5 MPa for small earthquakes ($M_0 < 5 \times 10^{17}$ Nm), 20–80 MPa for medium earthquakes (5×10^{17} Nm $< M_0 < 1 \times 10^{19}$ Nm), and 60–80 MPa for large earthquakes ($M_0 > 1 \times 10^{19}$ Nm).

I. は じ め に

国などによる地震防災計画では、1978 年宮城県沖地震に代表されるプレート境界地震や 1995 年兵庫県南部地震に代表される内陸地殻内地震に対し、まず断層モデルを用いて地震動が評価され、その結果に基づいて被害想定などが行われる場合が多くなってきている（例えば、中央防災会議、2005）。

一方、スラブ内地震については、1993 年釧路沖地震において以下のような特性が見られ（日本建築学会、1995）、その強震動評価に関する研究の重要性が認識され始めた。まず、1993 年釧路沖地震は震源深さが約 101 km のやや深発地震である。次に、震源直上付近にある釧路地方

気象台において、最大加速度 922 Gal という大加速度記録が観測された。1993 年釧路沖地震は震源が深いため全体として震源距離が長くなるが、プレート境界地震や内陸地殻内地震における同距離の加速度記録に比べて明らかに大きい。また、死者 1 名、全壊 19 棟、半壊 113 棟などの被害が生じたが、前述の大加速度記録に対し、これらの被害はそれまでの経験上推定される大きさよりも小さい傾向にある。同様の現象は 2001 年芸予地震など他のスラブ内地震でも見られ（例えば、日本建築学会，2001），それらの大加速度の原因として震源から放射される地震波の短周期成分の励起が強かったことが指摘されている（例えば、武村，1993；加藤・他，1998）。

以上より、スラブ内地震の強震動評価においては、その震源特性に対してプレート境界地震や内陸地殻内地震とは異なる配慮が必要であり、これを反映した建物の耐震性の検討も行われている（例えば、原子力安全委員会，2006）。しかし、スラブ内地震に対しては、壇・他（2006）や笹谷・他（2006）などによって断層パラメータの設定方法が提案されているものの、未だ検討の余地を多く残していると考えられる。

ここでは、スラブ内地震の加速度震源スペクトルの高振動数域における振幅、すなわち短周期レベル A に着目し、観測記録に基づいて評価される特性を整理する。観測記録に基づいたスラブ内地震の震源スペクトルに関する既往研究として、2000 年頃以前の Mahdavian and Sasatani (1996) による北海道周辺のやや深発地震や、加藤・他（1998）による関東地方周辺のやや深発地震に関する研究が挙げられる。この時期は K-NET、KiK-net 等の強震観測網が整備される以前であり、個々の研究の対象地域が限定されている、相互に検討条件が異なるなど、日本全国のスラブ内地震の特性を統一的に比較・検討することが困難であった。その後、強震観測網が整備されたことにより、日本全国の地震を同時に解析することが可能になり、スラブ内地震をデータセットに含む統一的な研究が行われた（例えば、川瀬・松尾，2004）。ただし、地震観測網整備からの期間がまだ短く、防災における強震動評価の対象となるようなマグニチュード 7 以上の大地震のデータが十分とはいえない。

これらに対し、筆者は強震観測網の整備後に発生したスラブ内地震に、整備前の比較的観測データの少ない大地震のデータを加え、それらの A とストレスパラメータ $\Delta\sigma$ を統一した手法によって評価している（池田・他，2002a, 2003, 2004）。ここでは、それらのデータに近年発生した比較的規模の大きい地震として 2006 年 6 月 12 日大分県西部の地震（ M_{JMA} 6.2）と 2008 年 7 月 24 日岩手県沿岸北部の地震（ M_{JMA} 6.8）を追加し、日本全国で発生したスラブ内地震の $\Delta\sigma$ の特徴を、メカニズム、発生地域、プレート、地震規模および震源深さの違いに着目して整理する。

II. 最大加速度、最大速度および震度の関係

I で述べたように、スラブ内地震では大加速度が観測されている一方、その加速度の大きさに対してプレート境界地震などと比較して建物被害や人的被害の小さいことが指摘されている（例えば、日本建築学会，1995）。ここでは、その関係について調べるため、スラブ内地震とプレー

ト境界地震における観測記録の最大加速度 PGA と最大速度 PGV の例を示し、それらと震度の関係について整理する。

1. データセット

例として地震規模が大きく、比較的多くの観測記録が得られている地震を示すこととし、スラブ内地震は2003年5月26日宮城県沖の地震 (M_{JMA} 7.1) を、プレート境界地震は2003年十勝沖地震 (M_{JMA} 8.0) を Fig. 1 に示す。用いたデータは、独立行政法人科学技術研究所による K-NET と KiK-net の地表における加速度記録である。 PGV については、加速度記録から Trifunac (1971) の積分方法により求めた速度波形の最大値とする。 PGA と PGV は、各記録の NS 成分と EW 成分の大きい方の値を示している。

2. 震度の定義

河角 (1943) は、 PGA (cm/s^2) と震度 I_A の関係として、次式を示している。

$$\log PGA = I_A/2 - 0.6 \quad (1)$$

ここで PGA は、 I_A と I_{A-1} の境界に対応する値である。

一方、村松 (1967) は PGV (cm/s) と震度 I_V の関係として、次式を示している。

$$\log PGV = I_V/2 - 1.4 \quad (2)$$

ここで PGV は、 I_V と I_{V-1} の境界に対応する値である。

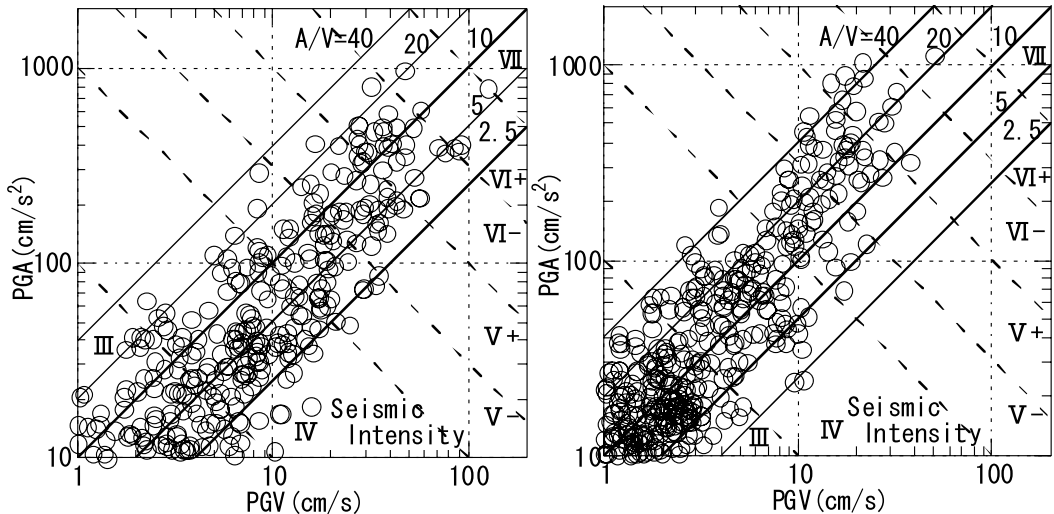


Fig. 1. Peak ground acceleration versus peak ground velocity for the 2003 Tokachi-oki earthquake (left) and the 2003 Miyagi-ken-oki earthquake (right). Solid lines indicate peak ground acceleration over peak ground velocity

本検討では、武村（1997）により提案された次式による震度 I を用いて、以後の検討を行う。

$$I = (I_A + I_V)/2 = \log(PGA \times PGV) + 2.0 \quad (3)$$

(3)式による I は、 PGA と PGV の発生時刻が一致すると仮定すると、計測震度とほぼ同等になる（村松，1995，1996）。(3)式による I の境界線を Fig. 1 に破線で併記する。 I は PGA と PGV の積の関数として表され、震度の境界線は両対数軸上で左肩上がりの直線となる。

3. 最大速度に対する最大加速度の比 A/V と震度の関係

Fig. 1 の実線は、 PGV に対する PGA の比 $A/V = 40, 20, 10, 5, 2.5$ を各々示す。プレート境界地震である 2003 年十勝沖地震の観測記録は、 $A/V = 5 \sim 10$ を中心として、 $A/V = 2.5 \sim 20$ の範囲に多く分布している。一方、スラブ内地震である 2003 年宮城県沖の地震の観測記録は、 $A/V = 10 \sim 20$ を中心として、 $A/V = 5 \sim 40$ の範囲に多く分布しており、2003 年十勝沖地震より約 2 倍大きい。特に、2003 年宮城県沖の地震における 100 cm/s^2 以上の観測記録では、ほとんどが $A/V = 10$ 以上となっている。これらのスラブ内地震の A/V の傾向は、1993 年釧路沖地震や 2001 年芸予地震においても見られる（池田・他，2002 b）。このような観測記録の PGA や PGV には、震源特性の他に伝播経路の特性、震源距離およびサイト特性などの影響が含まれているため厳密性には欠けるが、スラブ内地震とプレート境界地震の違いが、観測記録の A/V に影響を与えている可能性は高いと推察される。

Fig. 1 から明らかなように、例えば PGA が等しい場合、スラブ内地震の PGV はプレート境界地震と比較して小さく、併せて震度も小さくなる。震度により構造物の被害が十分に説明できるとは必ずしも言えないが（例えば、太田，1995；林，2001）、震度と被害の間に相関性があると考え、1993 年釧路沖地震の A/V が大きかったことが、 PGA の大きさに対して被害が比較的小さい原因の一つとなった可能性が考えられる。また、この特徴は 2001 年芸予地震などのスラブ内地震に共通している（池田・他，2002 b）。

III. 2006 年大分県西部の地震と 2008 年岩手県沿岸北部の地震の短周期レベル

ここでは、近年発生した比較的規模の大きいスラブ内地震として、九州地方のフィリピン海プレート内部で発生した 2006 年 6 月 12 日大分県西部の地震 ($M_{JA} 6.2$) と、東北地方の太平洋プレート内部で発生した 2008 年 7 月 24 日岩手県沿岸北部の地震 ($M_{JA} 6.8$) を対象とし、短周期レベル A とストレスパラメータ $\Delta\sigma$ を評価する。

1. 解析対象地震とデータセット

2006 年大分県西部の地震の諸元を Table 1 に、震央・震源メカニズムと観測点の位置を Fig. 2 に示す。ここでは 2006 年大分県西部の地震に加え、規模は若干小さいが同時期にその近傍で

Table. 1. Source parameters of events around Kyusyu district analyzed for A and $\Delta\sigma$ in this study.

Event date	Focal depth (km)	M_{JMA}	M_0 (Nm)	A (Nm/s ²)	$\Delta\sigma$ (MPa)
12 Jun. 2006	145	6.2	4.2×10^{18}	2.7×10^{19}	24.9
26 Sep. 2006	70	5.3	9.8×10^{16}	4.5×10^{18}	11.5

References: Focal depth and M_{JMA} (Japan Meteorological Agency, 2009),
 M_0 (Global CMT Catalog), A and $\Delta\sigma$ (this study).

Table. 2. Source parameters of events around Kyusyu district analyzed for Q_s in this study.

No.	Event date	Focal depth (km)	M_{JMA}	M_0 (Nm)
1	2 Apr. 2000	147	4.6	2.0×10^{16}
2	9 Jan. 2001	46	4.7	1.0×10^{16}
3	3 Apr. 2001	64	4.6	1.3×10^{16}
4	12 Jun. 2006	145	6.2	4.2×10^{18}
5	26 Sep. 2006	70	5.3	9.8×10^{16}

References: Focal depth and M_{JMA} (Japan Meteorological Agency, 2009),
 M_0 of event No.1-3 (F-net) and No. 4-5 (Global CMT Catalog)

Table. 3. Source parameter of the earthquake of 24 Jul. 2008 Iwate-ken-engan-hokubu.

Event date	Focal depth (km)	M_{JMA}	M_0 (Nm)	A (Nm/s ²)	$\Delta\sigma$ (MPa)
24 Jul. 2008	108	6.8	1.8×10^{19}	8.5×10^{19}	69.2

References: Focal depth and M_{JMA} (Japan Meteorological Agency, 2009),
 M_0 (Global CMT Catalog), A and $\Delta\sigma$ (this study).

発生した2006年9月26日伊予灘の地震 (M_{JMA} 5.3) の震源特性も評価し、Table 1 と Fig. 2 に併記する。また、後述するように、2006年大分県西部の地震では異常震域が見られることから、伝播経路特性についても評価する。その際には、上記の2地震に池田 (2004) のデータセットに含まれている3地震を加えた全5地震を用い、Fig. 2 にはそれら3地震の震央と用いた観測点を併記して、それらの地震の諸元をTable 2 に示す。観測点は、池田・他 (2004) がフィリピン海プレートのスラブ内地震の検討に用いた観測点のうち、 $V_S \geq 1$ km/s の岩盤が確認されている KiK-net 観測点を用いる。

2008年岩手県沿岸北部の地震の諸元をTable 3 に、震央・震源メカニズムと観測点の位置をFig. 3 に示す。観測点は、池田・他 (2003) が東北地方のスラブ内地震の検討に用いた観測点のうち、震源距離が140 km 以内にある港湾空港技術研究所の観測点と、 $V_S \geq 1$ km/s の岩盤が確認されている KiK-net 観測点を用いる。

2. 評価手法

震源スペクトル $M(f)$ の評価は、池田・他 (2002 a, 2003, 2004) と同様の考え方に従って行う。 $M(f)$ の評価手順を以下に示す。

$M(f)$ は、次式により観測記録のフーリエスペクトル $U_0(f)$ から評価する。

$$U_0(f) = H_I(f) \cdot H_g(f) \cdot R_{\theta\phi} M(f) / (4\pi\rho V_s^3) \cdot \exp(-\pi \cdot fX/Q_s V_s) \quad (4)$$

ここで、 f は振動数を、 $R_{\theta\phi}$ はラディエーションパターンを、 ρ は媒質の密度を、 V_s は媒質の S 波速度を、 X は震源距離を、 Q_s は S 波の Q 値を、 $H_I(f)$ は計器特性を、 $H_g(f)$ はサイト特性を各々示す。

(4)式に与えるパラメータは、2006 年大分県西部の地震と 2006 年伊予灘の地震について池田・他 (2004) を、2008 年岩手県沿岸北部の地震について池田・他 (2003) を参照し、 $V_s = 4.5$ km/s, $\rho = 3.2$ g/cm³, $R_{\theta\phi} = 0.44$, $H_I(f) = 1$ とする。 $H_g(f)$ については、観測点毎に池田・他 (2003) と池田・他 (2004) が考慮した値をそのまま用いることとして、詳細の説明は省略する。

観測記録のフーリエスペクトルの計算は、目視により判読した S 波立ち上がり以降を対象とする。断層での破壊時間の 2 倍程度を目安として、 $M_{MA} 6$ 以上である 2006 年大分県西部の地震と 2008 年岩手県沿岸北部の地震は $T = 20$ s, $M_{MA} 6$ 未満である 2006 年伊予灘の地震は $T = 7$ s

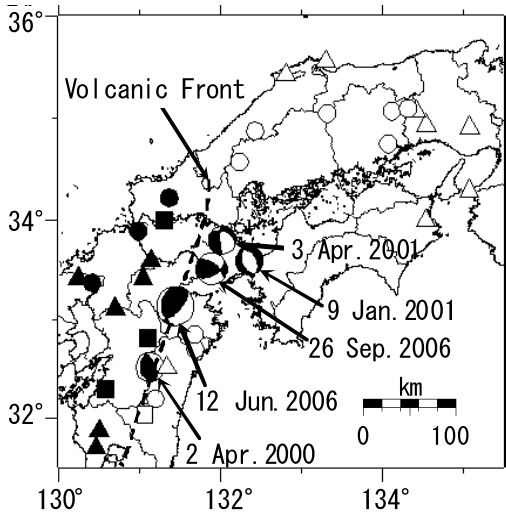


Fig. 2. Map showing source mechanism of events analyzed in this study and observation stations around Kyusyu district. Dashed line indicates volcanic front (Kinugasa et al., 1992). Solid and open triangles indicate the observation stations used for estimation of Q_s , solid and open circles indicate the observation stations used for estimation of A , solid and open squares indicate the observation stations used for estimation of either Q_s and A . (See Table 1 and Table 2.)

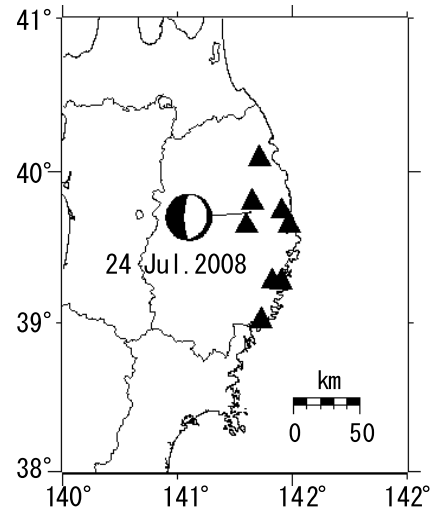


Fig. 3. Map showing source mechanism of the earthquake of 24 Jul. 2008. Solid triangles indicate the observation stations used for estimation of A . (See Table 3.)

のウィンドウ長さについて行う（加藤・他，1998）．

震源スペクトルの短周期レベル A を， ω^{-2} モデル（Aki, 1967）を仮定した場合に加速度震源スペクトルが一定となるコーナー振動数より高振動数側におけるスペクトル振幅の包絡レベルと定義する．高振動数成分の励起特性を比較する際には，Brune（1970, 1971）に基づいて ω^{-2} モデルを仮定し，次式によって A ，地震モーメント M_0 と関係づけられる（加藤・他，1998）ストレスパラメータ $\Delta\sigma$ (Boore, 1983；池田・他，2003）を用いる．

$$A = (2.34 V_s)^2 (7/16)^{-2/3} \cdot M_0^{1/3} \cdot \Delta\sigma^{2/3} \quad (5)$$

3. 伝播経路の影響の補正

(4)式における Q_s は，2008 年岩手県沿岸北部の地震の観測記録に対して池田・他（2003）による評価結果を用いる．2006 年大分県西部の地震と 2006 年伊予灘の地震に対しては，後述の異常震域に配慮し，池田・他（2002 a, 2003, 2004）と同様の考え方によって Q_s を評価する． Q_s の評価の考え方を以下に述べる．

Q_s を評価する条件として，次の 2 つを仮定する．第一に加速度震源スペクトルの包絡形が高振動数域で一定の ω^{-2} モデル（Aki, 1967）であること，第二に観測記録の加速度フーリエスペクトル振幅に見られる高振動数域の低減が全て Q_s の影響によっており，その傾きが(4)式における Q_s を含む指数項に対応することを仮定する．これは，Anderson and Hough（1984）による κ の考え方と同様であり，次式の関係が成立する（Mahdavian and Sasatani, 1994）．

$$\exp(-\pi\kappa) = \exp(-\pi f X / Q_s V_s) \quad (6)$$

これらの仮定の下に，最小自乗法を用いた回帰計算により Q_s を評価する．観測記録の加速度フーリエスペクトルと，その高振動数域の傾きの例を Fig. 4 に示す．Fig. 4 中の右肩下がりの直線が，評価対象とした振動数範囲と傾きを示す．ただし，直線の絶対値は記録と重ならないよう

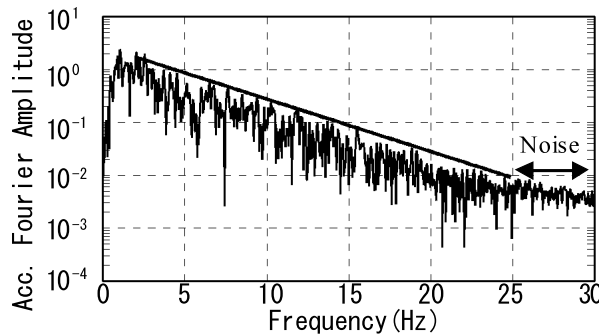


Fig. 4. Fourier amplitude spectrum of the NS component of ground acceleration recorded at SMNH 11, KiK-net during the earthquake of 12 Jun. 2006. Solid line was obtained by a least-squares fit to the data, and the level is adjusted to upper limit of the data.

に調整している。同図から見て取れるように、対象とした振動数範囲におけるスペクトル振幅の対数は振動数に対してほぼ直線的に低減しており、他の記録についても同様の傾向が見られる。従って、(4)式の Q_s に関する項の指数部分 $(-\pi \cdot fX/Q_s V_s)$ のうち、 $(-\pi X/Q_s V_s)$ を一定値とみなし、 Q_s は f に依存しないと仮定して Q_s の評価を行う。

池田・他(2002a, 2003, 2004)は、上記の条件の下に評価した Q_s が X に依存して大きくなる傾向が見られるとし、最小自乗法により回帰式を求めている。関数形は異なるが、同じ北海道で発生した地震に対するMahdavian and Sasatani(1994)による κ の X に対する回帰式を(6)式によって変換した Q_s と、池田・他(2002a)が評価した Q_s は同じ X に対して同程度の値となっている。

2008年岩手県沿岸北部の地震に対しては、池田・他(2003)が東北地方のスラブ内地震に対して評価した次式による Q_s を用いる。

$$\log Q_s = 0.581 \log X \text{ (km)} + 1.739 \quad (7)$$

2006年大分県西部の地震は震源深さ145 kmで発生した地震であるが、負傷者8名、住家一部破損5棟などの被害が生じ、それらが震源直上の大分県と遠方の広島県に集中する異常震域が見られた(消防庁, 2006)。九州西部では震度が小さい傾向が見られるが、火山フロントの下に減衰の大きい領域の存在が指摘されている(泉谷, 2000)。一方、震度の大きい記録は広島県・愛媛県付近に多く、震源からの地震波がプレート内にトラップされながら北東側に伝播し、減衰しにくいとの指摘もある(文部科学省, 2008)。同様の現象は $M7$ クラスの1909年宮崎県西部の地震でも見られるが(武村・他, 2009)、この一因として深部構造の影響が考えられ、距離減衰式の補正も提案されている(森川・他, 2006)。これらを踏まえ、異常震域に配慮した九州地方の Q_s を評価する。

対象地域は、伝播経路を限定するために九州東部から伊予灘付近のみとし、Table 2に示した5地震の観測記録を用いる。また、Fig. 2に示すように、観測点を火山フロントの西側と東側に分類して Q_s を検討する。

Q_s の評価結果をFig. 5に示す。西側より東側の Q_s が大きい傾向が見られ、震度分布の傾向と整合している。Fig. 5より、火山フロントの西側と東側について、各々 X に対する下記の回帰式が求められる。

$$\log Q_s = 0.556 \log X \text{ (km)} + 1.453 \quad (\text{火山フロント西側}) \quad (8)$$

$$\log Q_s = 0.475 \log X \text{ (km)} + 1.826 \quad (\text{火山フロント東側}) \quad (9)$$

(8)式に対する(9)式の比は X によって異なるが、約1.5～3倍程度である。川瀬・松尾(2004)は日本全域を減衰の地域性を考慮して分割し、スペクトルインバージョンにより Q_s を評価している。検討条件が異なることから直接的な比較は必ずしもできないが、川瀬・松尾(2004)に

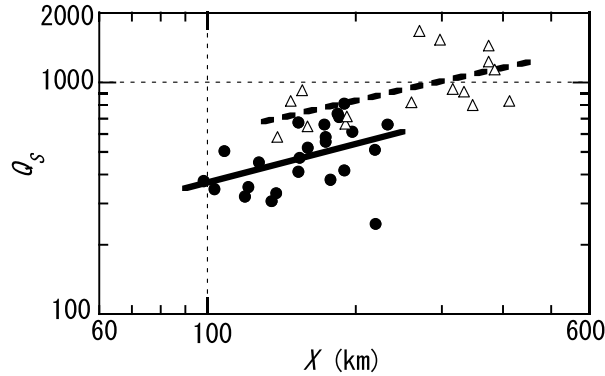


Fig. 5. Quality factor Q_s versus hypocentral distance X for the events in Kyusyu district (see Fig. 2). Solid circles: the observation stations in west side of volcanic front and open triangles: the observation stations in east side of volcanic front. Solid line is obtained by a least-squares fit to the solid circle data. Dashed line is obtained by a least-squares fit to the open triangle data.

よる Q_s の火山フロント以西に対する以東の比は 1.6 ～ 2 倍程度となり、本検討結果と整合している。

4. 短周期レベルとストレスパラメータ

1. から 3. に述べた条件に基づいて、2006 年大分県西部の地震、2006 年伊予灘の地震および 2008 年岩手県沿岸北部の地震の加速度震源スペクトルを評価する。評価した加速度震源スペクトルの例を Fig. 6 に示す。 A が加速度震源スペクトルにおける振幅一定部分を包絡するレベルになっていることが確認される。評価した 3 地震の A と、(5)式を用いて A と M_0 から求めた $\Delta\sigma$ を Table 1 と Table 3 に各々併記する。 M_0 は、池田・他 (2002 a, 2003, 2004) と同様に Global CMT Catalog による。

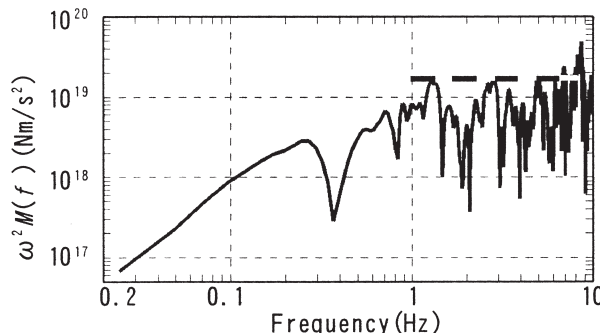


Fig. 6. Acceleration source spectra of the NS component at YMGH 12, KiK-net of the earthquake of 12 Jun. 2006. Dashed line indicates the constant level of the spectra higher than corner frequency (short-period spectral level A).

IV. 議 論

Ⅲで求めた3地震の震源特性を池田・他(2002a, 2003, 2004)によるスラブ内地震のデータセットに加え, それらの傾向を整理する. 検討対象地震の震央位置をFig. 7に示す. Fig. 7に示した地震の M_0 と A をFig. 8に示す. Fig. 8の右肩上がりの直線は(5)式から求められる $\Delta\sigma$ を表す.

(a)は東北地方におけるスラブ内地震であり, 二重深発地震面の上面で発生したDown dip Compression型の地震と, 同様に下面で発生したDown dip extension型の地震により分類している. M_0 が同程度の2つのタイプの地震を比較すると, メカニズムの違いによる $\Delta\sigma$ に有意な差は見られない.

(b)は太平洋プレートの内部で発生したスラブ内地震を示し, メカニズムによる分類をせず, 北海道と東北地方の地域の違いによって分類している. M_0 が同程度の地震間で比較すると, 北海道と東北地方のスラブ内地震の $\Delta\sigma$ に明瞭な違いは見られない. これを踏まえ, 北海道と東北地方を区別せずに(b)を見ると, M_0 によって $\Delta\sigma$ の異なる傾向が認められる. M_0 による $\Delta\sigma$ の違いを踏まえ, $M_0 > 10^{19}$ Nmを大地震(Large events), 5×10^{17} Nm $< M_0 < 10^{19}$ Nmを中地震(Medium events), $M_0 < 5 \times 10^{17}$ Nmを小地震(Small events)に分類する. 小地震の $\Delta\sigma$ は3グループの中で地震によるばらつきが最も大きく, 約5~80 MPaの範囲にある. 中地震の $\Delta\sigma$

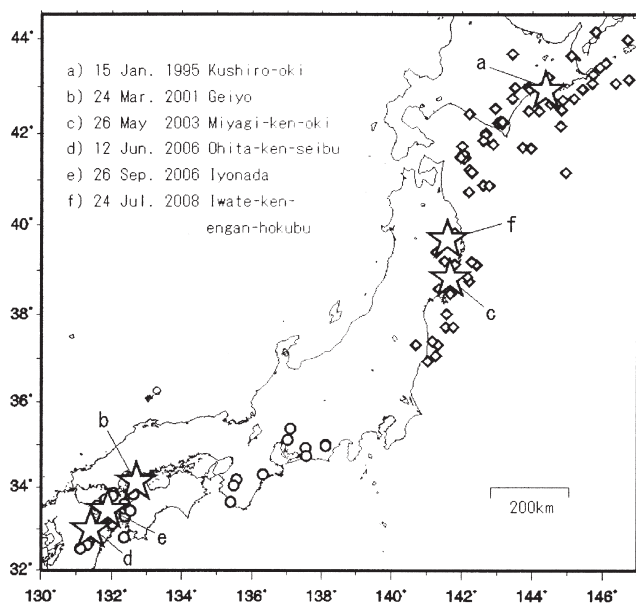


Fig. 7. Map showing epicenters of intra-slab earthquakes analyzed in this study and Ikeda et al. (2002a, 2003, 2004). Open star: damaging earthquakes and events analyzed in this study, open squares: events in the Pacific plate and open circle: events in the Philippine sea plate.

は約 20 ～ 60 MPa にあり，ばらつきが小地震より小さく，かつ小地震のばらつきの大きい側に集中している．大地震の $\Delta\sigma$ は 60～80 MPa であり，地震によるばらつきがほとんど見られず，小地震と中地震のばらつきの上限付近と同程度となっている．

Mahdavian and Sasatani (1996) は，北海道周辺で発生した M_{JMA} 4 ～ 7.8 の海溝型地震を対象に，観測記録から震源スペクトルのコーナー振動数を求めている．その結果，ほぼ全ての地震の震源スペクトルが ω^{-2} モデルと対応してスケーリング則に従うものの，1993 年釧路沖地震には 2 つのコーナーが認められ，第 1 コーナーがスケーリング則に従う一方，第 2 コーナーより高振動数域では ω^{-2} モデルより振幅レベルが大きくなると指摘しており，大地震の $\Delta\sigma$ が大きいことと整合する．

(c) は日本全国で発生したスラブ内地震を示し，太平洋プレートとフィリピン海プレートの違いによって分類している．フィリピン海プレートの地震のみに着目すると，太平洋プレートの地震と同様に， M_0 の小さい地震は $\Delta\sigma$ のばらつきが比較的大きく，その範囲は $\Delta\sigma$ の小さい方に広がっている．以上より，メカニズム，地域，プレートの違いに関わらず，スラブ内地震の $\Delta\sigma$ は地震規模によって変動する傾向があると考えられる．

プレートの違いに着目すると，中地震についてはプレートによる $\Delta\sigma$ の傾向の違いが見られ

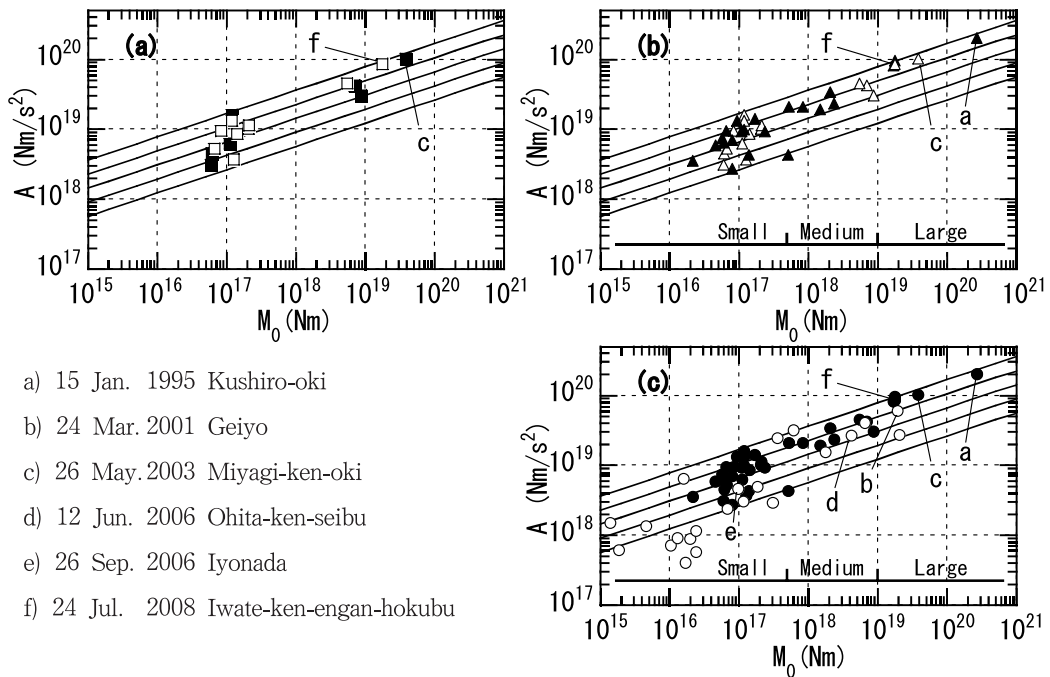


Fig. 8. Short-period spectral level A versus seismic moment M_0 . (a) shows events in Tohoku district. Solid squares: down dip compression type and open squares: down dip extension. (b) shows events in the Pacific plate. Solid triangles: Hokkaido district and open triangles: Tohoku district. (c) shows events in the Pacific and the Philippine sea plates. Solid circles: the Pacific plate and open circles: the Philippine sea plate. Solid lines indicate stress parameters $\Delta\sigma$ (80, 40, 20, 10, 5 MPa).

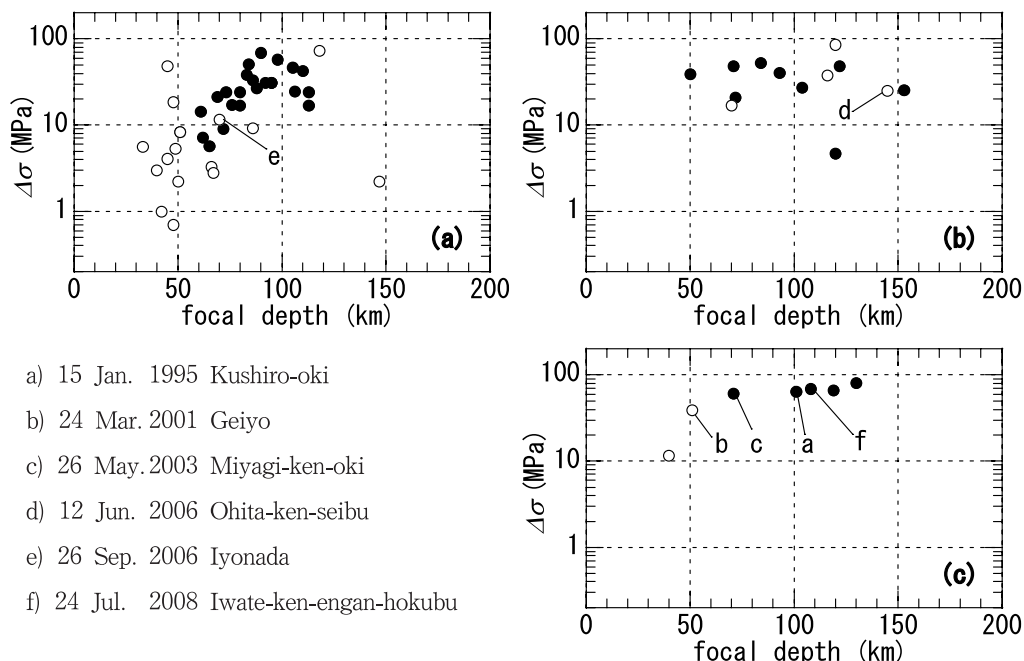


Fig. 9. Stress parameter $\Delta\sigma$ versus focal depth for each size event (see Fig. 8). (a) shows small size events. (b) shows medium size events. (c) shows large size events. Solid circles: Pacific plate and open circles: the Philippine sea plate.

ない。小地震については、フィリピン海プレートの $\Delta\sigma$ が太平洋プレートと比較してばらつきが大きく、比較的 $\Delta\sigma$ の小さい側に範囲が広がっている。大地震については、フィリピン海プレートが2地震のみであり、それらの $\Delta\sigma$ は中地震と同程度の範囲にある。ただし、小地震と大地震のいずれについても、フィリピン海プレートのデータセットの M_0 が太平洋プレートと比較して小さい範囲にあることから、 $\Delta\sigma$ の傾向の違いが地震規模とプレートのいずれと関連しているかは明瞭ではない。

小地震の $\Delta\sigma$ が大地震よりばらつきが大きく、かつ $\Delta\sigma$ が小さい範囲に広がる傾向は、地域が限定されているが、宮城県沖におけるプレート境界地震（加藤・池浦，2006）や宮城県北部などの内陸地殻内地震（泉谷，2005）でも指摘されている。一方、日本全域で発生した地震を対象とした川瀬・松尾（2004）は、 M_0 が 5×10^{16} Nm 以上の海溝型地震の $\Delta\sigma$ の規模依存性は明瞭ではないとしている。ただし、川瀬・松尾（2004）のデータセットに含まれる最大規模のスラブ内地震は2001年芸予地震であり、ほとんどが本検討における中地震と小地震の範囲にあることから、本検討の結果と必ずしも矛盾していない。

スラブ内地震の $\Delta\sigma$ と震源深さの関係を Fig. 9 に示す。上述の傾向を踏まえ、 M_0 による3つのグループ毎に図を示す。太平洋プレートの地震については、Fig. 8 においてメカニズムと地域による $\Delta\sigma$ の違いが見られないことを確認していることから、それらによって分類していない。既に述べたように中地震はプレートによる $\Delta\sigma$ の違いが見られず、震源深さに対しても $\Delta\sigma$ が

変動する傾向はほとんど認められない。

小地震については、太平洋プレートでは震源深さ 60 km 付近よりも、震源深さ 100 km 付近の $\Delta\sigma$ の方が大きい傾向が見られる。フィリピン海プレートについては、震源深さ 30~50 km の比較的浅い範囲に多く分布しており、それらの $\Delta\sigma$ は太平洋プレートよりも小さい傾向にある。ただし、 $\Delta\sigma$ と M_0 の関係と同様に、太平洋プレートとフィリピン海プレートの震源深さの分布は相補的であり、両者の $\Delta\sigma$ の違いがプレート、地震規模および震源深さのいずれと関係しているかは明らかでない。

太平洋プレートの大地震は震源深さ約 70~130 km の範囲にあるが、震源深さに関わらず $\Delta\sigma$ がほぼ一定で、中地震や小地震のばらつきの上限付近にある。フィリピン海プレートについては震源深さ約 40~50 km 付近にあり、それらの $\Delta\sigma$ は太平洋プレートと同程度か小さめの傾向にある。ただし、小地震の場合と同様に、これらの傾向の違いがプレート、地震規模および震源深さのいずれと関係しているかは明らかでない。

スラブ内地震の震源特性に関する他の研究として、経験的グリーン関数法を用いた強震動生成領域の面積 S_a の評価が行われている。森川・他 (2002) は、1993 年釧路沖地震を含む 4 地震を対象とし、スラブ内地震の S_a が経験的に期待されるプレート境界地震の S_a より小さいことと、1993 年釧路沖地震の地震規模に対する S_a が他のスラブ内地震と比べて小さく、スケーリング則が成立していない可能性を指摘している。ここで面積比が小さいことは $\Delta\sigma$ が相対的に大きいことと対応し、本検討と整合する。また、森川・他 (2002) は $\Delta\sigma$ の違いを震源深さのみで説明するのは難しいとも述べている。Asano et al. (2003) は深さ 70 km 以浅で発生したフィリピン海プレートの 5 地震と太平洋プレートの 1 地震を、浅野・他 (2004) は 2003 年宮城県沖の地震を対象として各々 S_a を評価し、震源が深くなるほど面積比が小さくなることを指摘しているが、地震規模と S_a との関係については触れていない。ただし、Asano et al. (2003) による S_a と M_0 の関係に着目すると、大地震の面積比は小地震と比較して小さい傾向が見られる。これは大地震の $\Delta\sigma$ が小地震より大きいことを示し、本検討結果と対応する。

V. ま と め

近年発生した比較的規模の大きいスラブ内地震である 2006 年大分県西部の地震と 2008 年岩手県沿岸北部の地震を対象とし、観測記録に基づいてそれらの A と $\Delta\sigma$ を求めた。その際、2006 年大分県西部の地震については異常震域の特徴を踏まえ、火山フロント以西と以東に対して各々 Q_s を評価し、その結果を震源スペクトルの評価に用いた。

ここで評価した 3 地震を過去に発生したスラブ内地震のデータセットに加え、それらの地震の A と $\Delta\sigma$ について、メカニズム、発生地域、プレート、地震規模および震源深さとの関係を整理した。プレートと震源深さの違いについては、太平洋プレートとフィリピン海プレートの各地震のデータセットが相補的であることから、 $\Delta\sigma$ との関係が明瞭ではなかった。しかし、 M_0 が 10^{19}

Nm を超えるような大地震については、プレートや震源深さの違いに関わらず、 $\Delta\sigma$ が大きい傾向が見られた。従って、断層モデルのパラメータ設定や距離減衰式の作成においては、その元となるデータセットの条件に関して注意が必要と考えられる。また、異なるプレートのデータが相補的であるなど、未だデータセットが十分とは言えないことから、今後もデータセットの蓄積が必要である。

謝辞 本研究については、研究開始当初より北海道大学大学院工学研究科の笹谷努博士より多数の御助言を頂きました。また、本研究をまとめるにあたっては、鹿島建設株式会社小堀研究室の武村雅之博士、諸井孝文博士および加藤研一博士に多くの議論をして頂きました。本研究に関連する一連の検討では、気象庁、港湾空港技術研究所、K-NET、KiK-net、電力中央研究所および電力共通研究の地震観測記録を使用させて頂きました。記して感謝します。

文 献

- Aki, K., 1967. Scaling law of seismic spectrum, *J. Geophys. Res.*, **72**, 1217-1231.
- Anderson, J. G. and S. E. Hough, 1984. A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **74**, 1969-1993.
- Asano, K., T. Iwata and K. Irikura, 2003. Source characteristics of shallow intraslab earthquakes derived from strong-motion simulations, *Earth Planets Space*, **55**, e5-e8.
- 浅野公之・岩田知孝・入倉孝次郎, 2004. 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, *地震工*, **57**, 171-185.
- Boore, D. M., 1983. Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **73**, 1865-1894.
- Brune, J. N., 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **75**, 4997-5009.
- Brune, J. N., 1971. Correction, *J. Geophys. Res.*, **76**, 5002.
- 中央防災会議, 2005. 日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会 (第 10 回), <http://www.bousai.go.jp/jishin/nihonkaikou/10/index.html> (参照 2009-12-21).
- 壇一男・武藤尊彦・宮腰淳一・渡辺基史, 2006. スラブ内地震による強震動を予測するための特性化震源モデルの設定方法, *日本建築学会構造系論文集*, **600**, 35-42.
- 原子力安全委員会, 2006. 発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針, <http://www.nsc.go.jp/shinsashishin/pdf/1/si004.pdf> (参照 2009-12-21).
- 林康裕, 2001. 建築構造物の被害に直結する地震動の特徴, 第一回日本地震工学研究発表・討論会梗概集, **24**.
- 池田孝・武村雅之・加藤研一, 2002 a. 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*, **560**, 67-73.
- 池田孝・武村雅之・加藤研一, 2002 b. 2001 年芸予地震の高振動数成分の励起特性, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, CD-ROM, **24**, 119-124.
- 池田孝・武村雅之・加藤研一, 2003. 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*, **572**, 39-46.
- 池田孝・武村雅之・加藤研一, 2004. 強震記録に基づくフィリピン海プレート内で発生するスラブ内地震の高振動数成分の励起特性 —北海道・東北地方のスラブ内地震との比較—, *日本建築学会構造系論文集*, **586**, 53-61.
- 泉谷恭男, 2000. 強震動の二重スペクトル比から推定した九州南部における Q_s 値, *土木学会論文集*, **640**, 225-230.

- 泉谷恭男, 2005. 日本内陸で発生する浅い地震に関する震源スペクトルの相似性についての考察, 土木学会論文集, **780**, 241-246.
- 加藤研一・池浦友則, 2006. 東北地方南部で発生したプレート境界地震の震源・伝播経路・地盤増幅特性, 第12回日本地震工学シンポジウム, CD-ROM, **32**, 234-237.
- 加藤研一・武村雅之・八代和彦, 1998. 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Ⅱ, **51**, 123-138.
- 川瀬博・松尾秀典, 2004. 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, **4**, 1-20.
- 河角広, 1943. 震度と震度階, 地震Ⅱ, **15**, 6-12.
- 衣笠善博・佃栄吉・山崎晴雄, 1992. 机上版 日本地質アトラス (第2版), 通商産業省工業技術院地質調査所 編集, 朝倉書店, **5**.
- 気象庁, 2009. 地震年報 2007 年.
- Mahdavian, A. and T. Sasatani, 1994. Spectral shape of acceleration at high frequencies: Attenuation and site effect, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII*, **9**, 415-427.
- Mahdavian, A. and T. Sasatani, 1996. S-Wave spectra from strong motion seismograms, Source parameters and site response, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII*, **10**, No.1, 1-19.
- 森川信之・神野達夫・成田章・藤原広行・福島美光, 2006. 西南日本の異常震域に対応するための距離減衰式補正係数, 日本地震学会講演予稿集, D 031.
- 森川信之・笹谷努・藤原広行, 2002. 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, CD-ROM, **27**, 133-138.
- 文部科学省, 2008. 文部科学省第四期科学技術・学術審議会測地学科会, http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu/6/sonota/08012224/013/008.htm (参照 2009-12-21).
- 村松郁栄, 1967. 地震工学, 地震Ⅱ, **20**, 281-290.
- 村松郁栄, 1995. 震度について, 地震工学振興会ニュース, **145**, 57-63.
- 村松郁栄, 1996. 気象庁の計測震度について, 地震工学振興会ニュース, **150**, 27-35.
- 日本建築学会, 1995. 1993 年釧路沖地震災害調査報告 1993 年北海道南西沖地震災害調査報告, 63-64.
- 日本建築学会, 2001. 2000 年鳥取県西部地震災害調査報告 2001 年芸予地震災害調査報告, 261-266.
- 太田裕, 1995. 「震度」研究のさらなる進展をー1995 年兵庫県南部地震を顧みてー, 地震工学振興会ニュース, **143**, 3-4.
- 笹谷努・森川信之・前田宜浩, 2006. スラブ内地震の震源特性, 北海道大学地球物理学研究報告, **69**, 123-134.
- 消防庁, 2006. 大分県中部を震源とする地震 (確定報), <http://www.fdma.go.jp/detail/673.html>.
- 武村雅之, 1993. 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, 3-14.
- 武村雅之, 1997. 強震動の性質と被害, 日本地震学会一般公開セミナー資料.
- 武村雅之・神田克久・阿比留哲生・原弘明, 2009. 20 世紀初頭に九州・南西諸島のサブダクション帯で発生した2つの地震の震度分布と地震規模, 歴史地震, **24**, 7-31.
- Trifunac, M. D., 1971. Zero Baseline Correction of Strong -motion Accelerograms, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **61**, 1201-1211.