



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	高密度観測網のデータを使ったスラブ内地震による強震動の解析：島弧の構造との関連
Author(s)	寛, 楽磨; 西條, 裕介; 染井, 一寛
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 73, 57-70
Issue Date	2010-03-19
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.73.57
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/44457
Type	departmental bulletin paper
File Information	73_07_p57-70.pdf



高密度観測網のデータを使ったスラブ内地震による 強震動の解析：島弧の構造との関連

笥 楽磨

神戸大学大学院理学研究科

西條 裕介

(株) 構造計画研究所

染井 一寛

京都大学防災研究所

(2009 年 12 月 25 日受理)

Analyses of Strong Ground Motions from Intralab Earthquakes Using High-Density Observation Network Data : Relation to the Island Arc Structure

Yasumaro KAKEHI

Graduate School of Science, Kobe University

Yusuke SAIJO

Kozo Keikaku Engineering Inc.

and

Kazuhiro SOMEI

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

(Received December 25, 2009)

Observed waveforms recorded by the high-density strong ground motion observation network from two intralab earthquakes are analyzed in detail. One is the 2001 Iwate-ken Nairiku Nanbu earthquake ($M_{JMA} = 6.4$, depth = 121.5 km), which occurred in the Pacific slab subducting beneath the Tohoku island arc. The other is the 2006 Oita-ken Seibu earthquake ($M_{JMA} = 6.2$, depth = 145.2 km), which occurred in the Philippine Sea slab subducting beneath the Kyushu island arc. In both cases, observed strong ground motions show singular spatial distribution, where high-frequency seismic waves at the stations located in backarc side of the volcanic front have much smaller amplitudes compared with those at the forearc side stations. This singular distribution of strong ground motions can be interpreted by considering attenuation of high-frequency seismic waves at the backarc side stations due to the wave propagation through the low-Q value zone beneath the volcanic front. In the case of the 2006 Oita-ken Seibu earthquake, effect of high-frequency seismic waves trapped in the high-Q slab is also important. It may cause the large amplitude of high-frequency waves observed at the stations in Chugoku and Shikoku, the shallower-slab side extent of forearc side.

I. は じ め に

近年我が国では，防災科学技術研究所の K-NET (Kinoshita, 1998)，KiK-net (青井・他, 2000) に代表されるような高密度の強震観測網が全国的に展開されるようになった．その利点の一つに，自然地震による波動の伝播を，連続的かつ面的に追跡することができ，しかもそれが島弧のスケールで可能であることが挙げられる．従って，全国規模の高密度強震観測網によって，島弧に特有の地下構造が地震波の伝播にどのような影響を与えるか，端的に言えば「島弧の揺れ方」を詳し

2001 Iwate-ken Nariku Nanbu earthquake

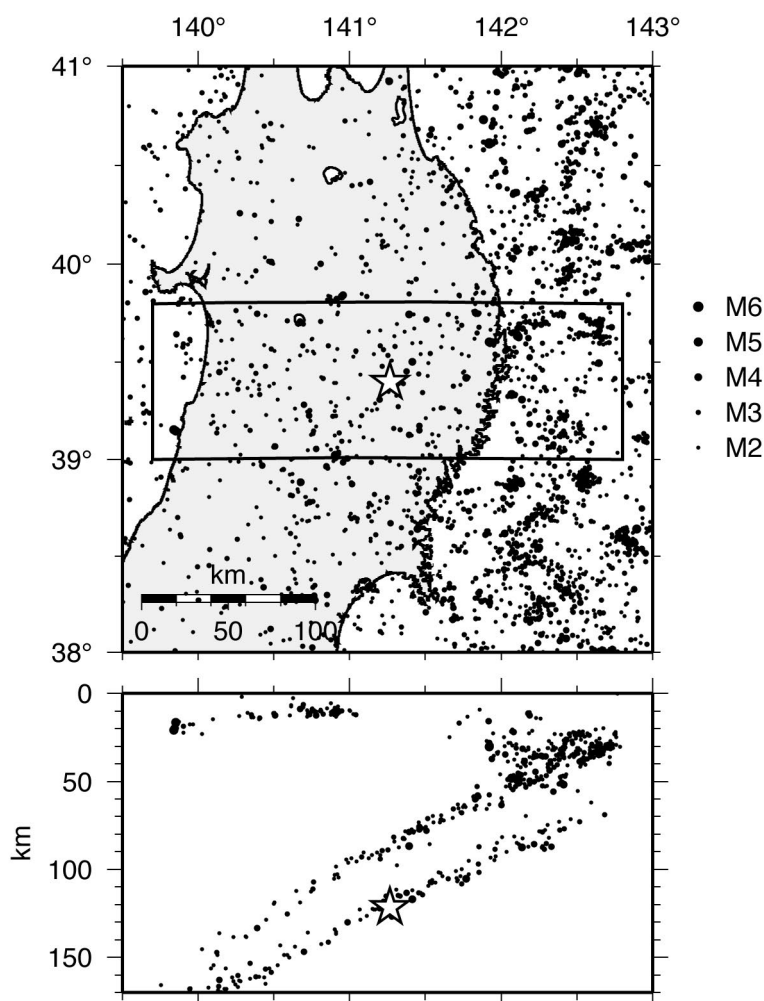


Fig. 1. The hypocenter of the 2001 Iwate-ken Nairiku Nanbu earthquake ($M_{JMA}=6.4$) and back-ground seismicity from January 1, 1999 to December 12, 2001 with M_{JMA} larger than 2.0.

く調べることが可能になったと言えよう。

この研究は、「島弧の揺れ方」を知るという大きなテーマの一環として、スラブ内地震を対象として、高密度強震観測網によって得られた強震観測データを詳細に解析する。例えば内陸地震の場合、波動場に影響を与えるのはもっぱら大陸地殻の構造であるが、震源の深いスラブ内地震の場合、地下の浅部の構造のみならず、マントルに至る深部構造を含む島弧の構造が全体的に影響することになる。この研究では、東北日本弧下に沈み込む太平洋スラブ内で発生した 2001 年岩手県内陸南部地震 ($M_{JMA} = 6.4$, 深さ 121.5 km) と、九州弧下に沈み込むフィリピン海スラブ内で発生した 2006 年大分県西部地震 ($M_{JMA} = 6.2$, 深さ 145.2 km) という 2 つのスラブ内地震を解析の対象とし、スラブ内地震による強震動の特徴を調べ、島弧の構造との関連を論じる。

II. 2001 年岩手県内陸南部地震の強震動データの特徴と島弧の構造

2001 年 12 月 2 日に東北日本弧下に沈み込む太平洋スラブ内で $M_{JMA} 6.4$ の地震が発生した。気象庁一元化震源による震源の深さは 121.5 km である。Fig. 1 にこの地震の震源とバックグラウンドの seismicity を示す。この図からわかるとおり、この地震は 2 重深発地震面の下面で発生した地震である。

Fig. 2 に K-NET と KiK-net (地表観測点) で観測された最大加速度の空間分布を示す。最大加速度は火山フロントより前弧側で大きく、背弧側で小さくなるという顕著かつ特異な分布を示している。加速度波形においては地震波の高周波成分が一般に卓越することから、これは島弧の前弧側観測点で高周波成分が大きく、背弧側ではそれに比べて小さくなっていることを示唆する。

周波数成分による違いを明確にみるために、異なる周波数帯域毎の最大振幅の空間分布をみる。Fig. 3 は K-NET と KiK-net (地表観測点) の速度波形の EW 成分にバンドパスフィルターを施し、各周波数帯域毎の最大値の空間分布を示したものである。0.1~0.5 Hz, 0.5~2.0 Hz という低周波数帯域では振幅の大きい領域が火山フロントの前弧側と背弧側の両側に分布するのに対し、2.0~5.0 Hz, 5.0~10.0 Hz という高周波数帯域では振幅の大きい領域が前弧側の狭い領域に偏在する様子がはっきりとみてとれる。このように強震動の空間分布をコンター表示して議論することができるのは、観測網の高密度さのゆえである。

高密度観測網の観測網の利点として、波動伝播の様子を連続的に追うことができるというのは、既に述べたとおりである。Fig. 4 に示すように、高密度に分布する観測網から適宜観測点を拾い出すことによって、直線アレイで地震波の伝播を追跡することができる。Fig. 4 に示す測線のうち、line 01 は前弧側において島弧に平行に延びる直線アレイで、line 02 は島弧を横切る直線アレイである。両測線に沿った加速度地震波形プロファイルを図 5 に示す。前弧側のみを通る line 01 の場合に比べ、島弧を横切る line 02 では、火山フロント付近を境に、背弧側では加速度波形の振幅が急激に小さくなっていることがはっきりとみてとれる。

Fig. 6 は、震央距離がほぼ等しい、前弧側観測点の Iwth 12 と背弧側観測点 AKth 15 の EW

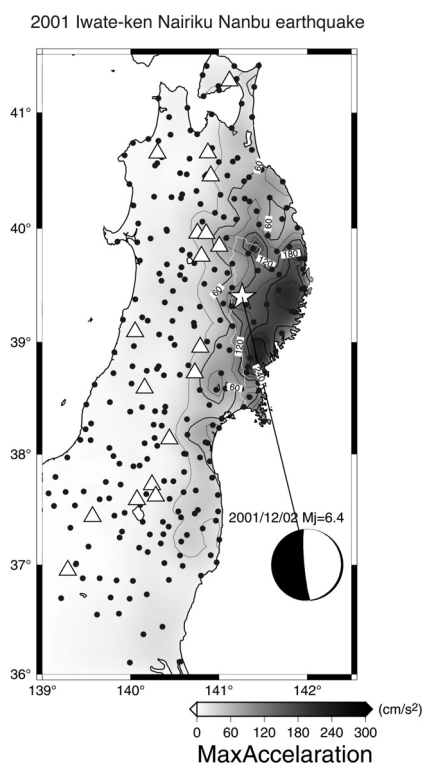


Fig. 2. Spatial distribution of peak ground accelerations (PGA) of the 2001 Iwate-ken Nairiku Nanbu earthquake. The observed strong ground motion records at K-NET and KiK-net (ground surface) stations are used.

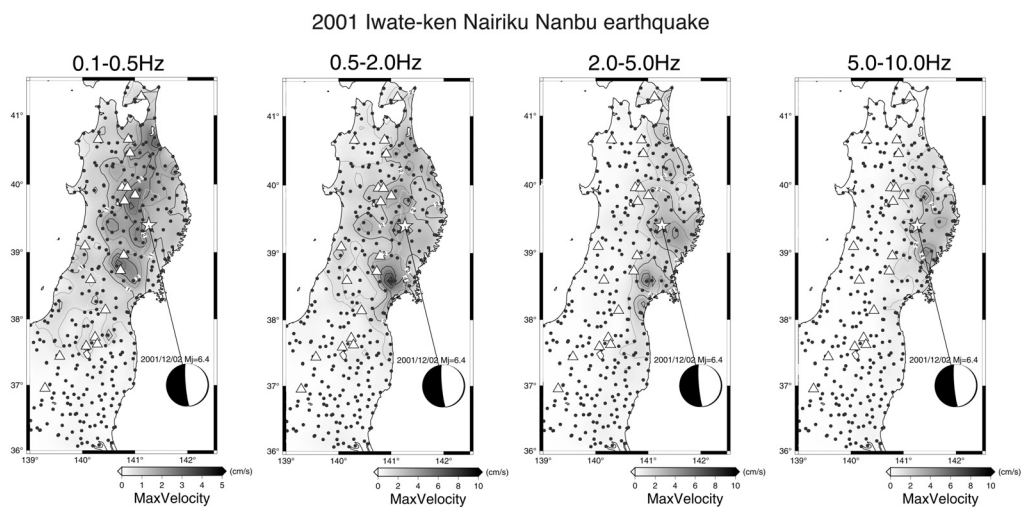


Fig. 3. Spatial distribution of the maximum velocities of the 2001 Iwate-ken Nairiku Nanbu earthquake for four different frequency bands (0.1–1.0 Hz, 1.0–2.0 Hz, 2.0–5.0 Hz, 5.0–10.0 Hz). The maximum amplitudes of bandpass-filtered EW-component velocity waveforms are shown.

成分の加速度振幅スペクトルの比較である（両観測点の位置については、Fig. 4 を参照されたい）。2～8 Hz の高周波数帯域では、5 倍程度の大きな差で背弧側観測点の AKTH 15 の振幅レベルが小さいことがわかる。

以上のような各種の解析の全てを通じて、前弧側観測点に比べ背弧側の観測点では地震波の高周波成分が著しく小さいという特徴が明瞭にみてとれる。このような特徴に加え、震源が非常に深いことを合わせて考えると、これは local な地下構造の影響によるものではなく、深部構造を含む島弧の構造が反映された regional なスケールの構造の影響によるものであろうと解釈できる。ただし、個々の観測点の波形データには軟弱な堆積層による増幅等の local な影響が含まれているであろうから、その点に留意する必要があることは言うまでもない。

その点を踏まえた上で、次に観測された強震動データの距離減衰の特性をみてみよう。司・翠川（1999）は地震の震源のタイプを地殻内地震、プレート間地震、プレート内地震（スラブ内地震）の 3 つに区分した上で、それぞれの震源タイプに対する距離減衰式を提案している。Fig. 7 に、司・翠川（1999）のスラブ内地震に対する距離減衰式による最大加速度の予測値と、2001 年岩手県内陸南部地震の際に実際に観測された最大加速度（前弧側観測点：白丸，背弧側観測点：

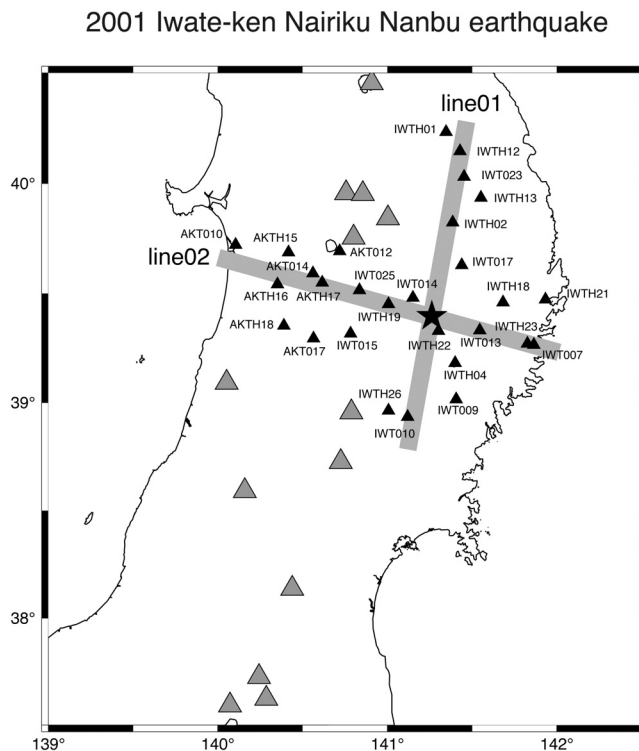


Fig. 4. Linear arrays of strong ground motion observation stations (line01 and line02) to trace the seismic wave propagation for the 2001 Iwate-ken Nairiku Nanbu earthquake. Line 01 runs only on the forearc side of the island arc. Line 02 runs across the volcanic front from the forearc side to the backarc side.

黒丸) との比較を示す. 点線は予測式の標準偏差を表す. 一見して明らかな通り, 前弧側の観測データの大部分は予測式の標準偏差内に収まっているが, 背弧側の観測データの大部分は, 予測値の標準偏差を超えて系統的に振幅が小さい. 個々の観測データには, 前述した通り軟弱な堆積

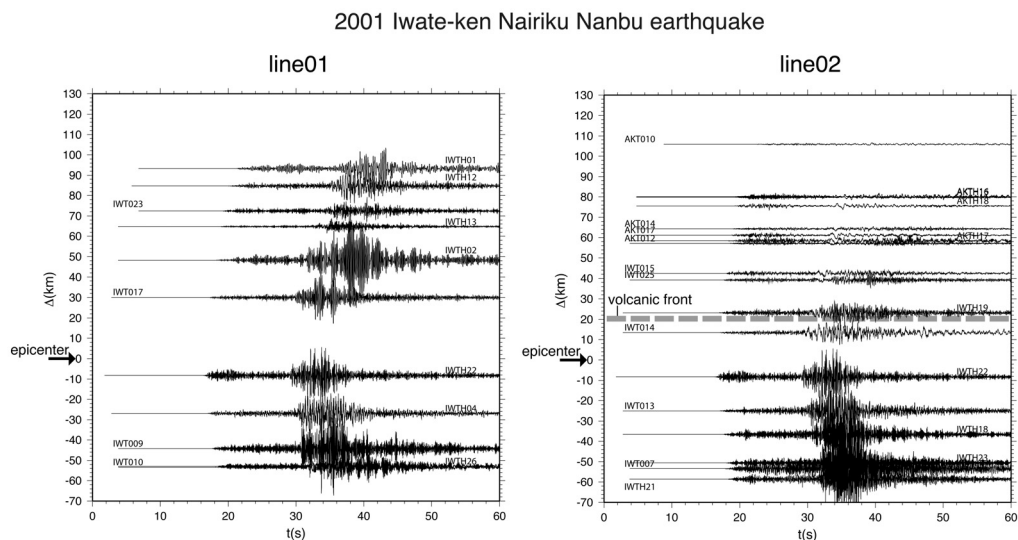


Fig. 5. Acceleration waveform profiles on the two linear arrays (line 01 and line 02) for the 2001 Iwate-ken Nairiku Nanbu earthquake.

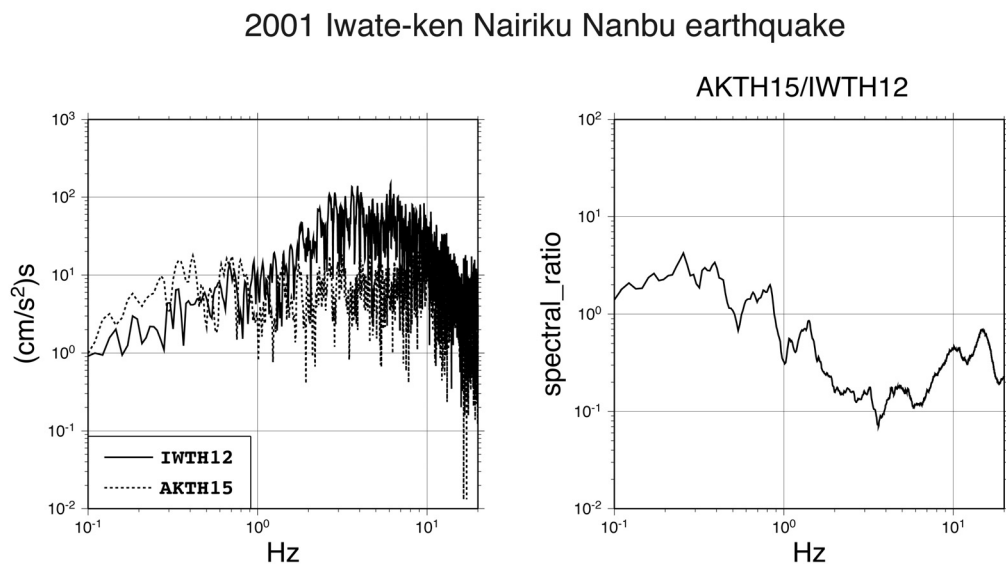


Fig. 6. Comparison between the acceleration amplitude spectra at the forearc side station (IWTH 12) and at the backarc side station (AKTH 15) for the 2001 Iwate-ken Nairiku Nanbu earthquake.

層による増幅等の local な影響が含まれるであろうが、このように多数の観測点のデータを処理した上で明瞭に現れる系統的な傾向は、local な構造の影響によるものではなく、regional な構造を反映したものであると考えて差しつかえないであろう。すなわち、背弧側の観測点での高周波地震波の減衰は局地的な現象ではなく、東北日本弧という regional なスケールで系統的に見られる現象であると捉えられる。

東北日本の 3 次元的な減衰構造は、既に複数の研究者によってかなり詳しく調べられている (Tsumura et al., 2000 ; 中村・植竹, 2004 ; 関根・他, 2004)。研究者によって減衰構造の細部は異なるが、火山フロント下のやや背弧側寄りに、低 Q 値領域が存在することは共通してみられる特徴である。例えば関根・他 (2004) の結果によると、東北日本弧の火山フロント直下のやや背弧側寄りに、50 km 程度の幅を持ち、深さ方向には地殻浅部から深さ 60 km 程度の上部マントルまで低 Q 値領域が広がっている。

このように火山フロント下に低 Q 値領域が存在する場合、前弧側観測点に到達する地震波は低 Q 値領域を通過しないため、地震波の高周波成分は減衰しないが、背弧側観測点に到達する地震波は低 Q 値領域を通過するために高周波成分が減衰することになる。2001 年岩手県内陸南部地震の際に観測された、背弧側で高周波数成分の振幅が小さいという強震動の特異な空間分布

2001 Iwate-ken Nairiku Nanbu earthquake

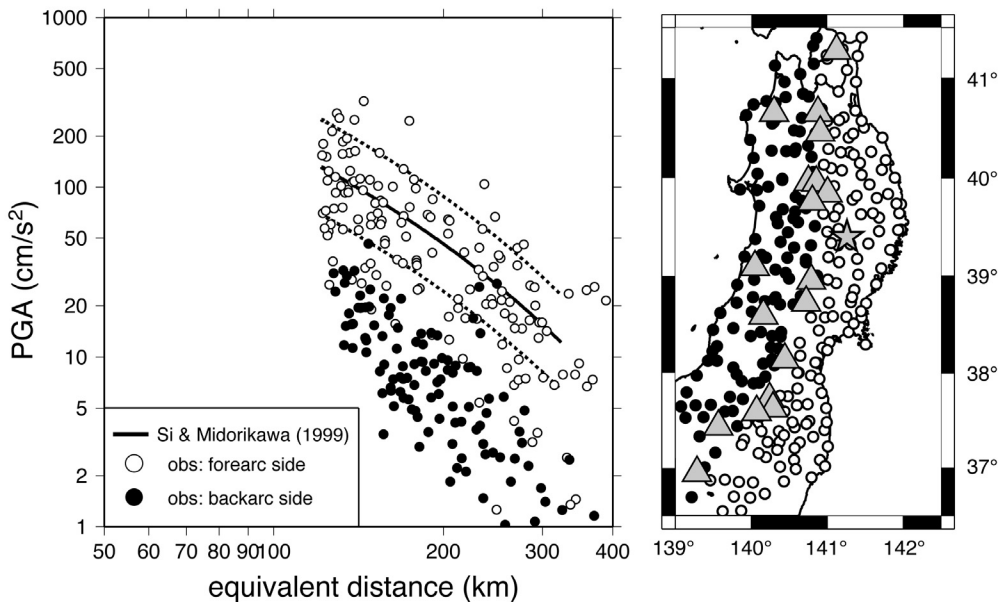


Fig. 7. PGA attenuation relation for the 2001 Iwate-ken Nairiku Nanbu earthquake. The observed strong ground motion records at K-NET and KiK-net (ground surface) stations are used. The white and black circles shows the forearc side and backarc side stations, respectively. The attenuation relation curve by Si and Midorikawa (1999) with $\pm$ one standard error is also shown.

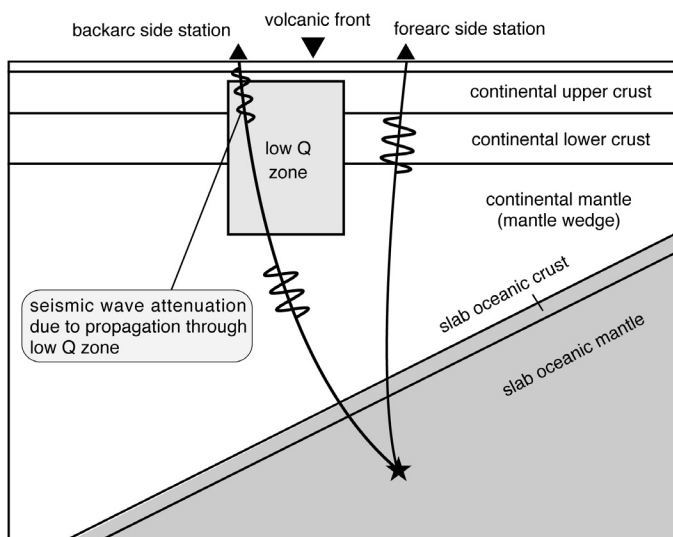


Fig. 8. Schematic illustration of the high-frequency seismic wave attenuation at the backarc side stations due to the wave propagation through the low-Q zone beneath the volcanic front.

は、このように火山フロント下の低 Q 値領域の存在を考慮することによって合理的に解釈できる (Fig. 8).

III. 2006 年大分県西部地震の強震動データの特徴と島弧の構造

2006 年 6 月 12 日に九州下に沈み込むフィリピンスラブ内で M_{JMA} 6.2 の地震が発生した。気象庁一元化震源による震源の深さは 145.2 km である。Fig. 9 にこの地震の震源とバックグラウンドの seismicity を示す。東北日本弧と異なり、九州弧下においてはスラブが高角に沈み込んでおり、2006 年大分県西部地震は九州弧下のスラブ内地震としては、最深部で発生していることがわかる。

Fig. 2 に K-NET と KiK-net (地表観測点) で観測された最大加速度の空間分布を示す。九州においては、2001 年岩手県内陸南部地震の場合の東北日本弧の場合と同じく、最大加速度は火山フロントより前弧側で大きく、背弧側で小さくなるという特異な分布を示している。中国地方では、九州弧を北北東に延長してみた場合の背弧側に相当する山口県で加速度振幅が小さく、前弧側に相当する広島県で加速度振幅が大きい。また、九州弧の前弧側スラブ浅部延長に相当する四国 (愛媛県、高知県西部) においては、加速度振幅が大きい。

震央距離がほぼ 150 km である 5 観測点での加速度振幅スペクトルの比較を Fig. 11 に示す。前弧側の観測点 (KOCH 03, HRSH 08, MYZH 14) に比べ、背弧側の観測点 (KMMH 15, NGS 03) の振幅レベルは、1 Hz より高周波数の帯域において明らかに小さいことがわかる。

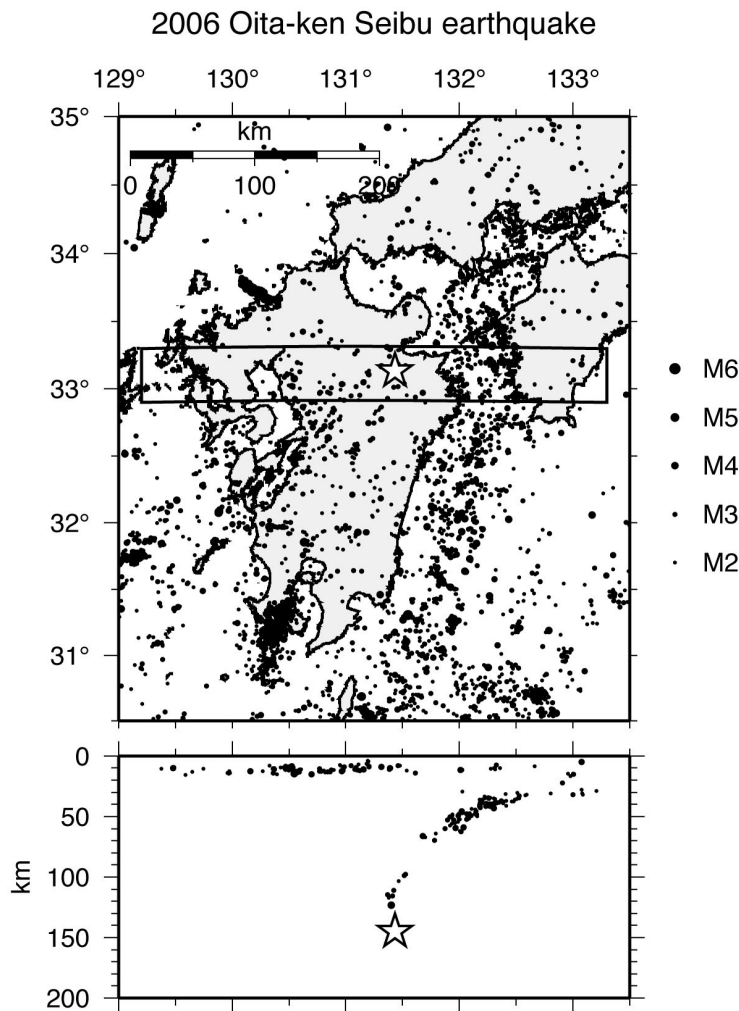


Fig. 9. The hypocenter of the 2006 Oita-ken Seibu earthquake ($M_{JMA} = 6.2$) and background seismicity from July 1, 2003 to June 12, 2006 with M_{JMA} larger than 2.0.

次に、最大加速度の距離減衰をみることにしよう。ここでは、地表近くの堆積層の影響を小さくすべく、KiK-netのborehole観測点の記録を解析対象とした。地表観測点しか持たないK-NET観測点が使えないことがこのアプローチの短所であるが、KiK-netのみでも観測点数は多数確保できるため、系統的な傾向を抽出することは可能である。また、2次元構造で近似でき、単純に前弧側と背弧側に二分できる東北日本弧と比べ、島弧の構造がやや複雑である九州、中国、四国地方（九州弧下と中国・四国下のスラブの沈み込み角度の顕著な違い、周防灘～伊予灘下のスラブの屈曲）を対象とする場合、このようなsite effectの影響をできるだけ排除できるような慎重なアプローチの方が望ましいと考えられる。Fig.12にKiK-netのborehole観測点で観測された最大加速度の距離減衰を示す。なお、図には比較のために司・翠川（1999）のスラブ内地震に対す

る距離減衰式による予測値も示しているが、これは地表での観測を前提としたものなので、観測値と予測値の比較に意味はなく、予測値はあくまでも参考のために示しているにすぎないことに留意されたい。

この距離減衰の傾向から、プロットした観測点を、(1)最大加速度が著しく小さい、(2)小さい、(3)中程度、(4)大きい の4グループに分けた (Fig. 12)。これを島弧の構造との関連でみると、九州の背弧側では最大加速度が著しく小さく、中国地方西部のスラブ屈曲部のマントルウェッジのところでは小さく、九州の前弧側では中程度で、前弧側の延長の中国地方・四国では大きいという傾向を示した (Fig. 13)。

九州弧では、火山フロント下と背弧側に低 Q 値領域が存在することが知られている (関根・他, 2004)。また、周防灘～伊予灘下のスラブの屈曲部のマントルウェッジ部分にも低 Q 値領域

2006 Oita-ken Seibu earthquake

PGA K-NET & KiK-net (surface) stations

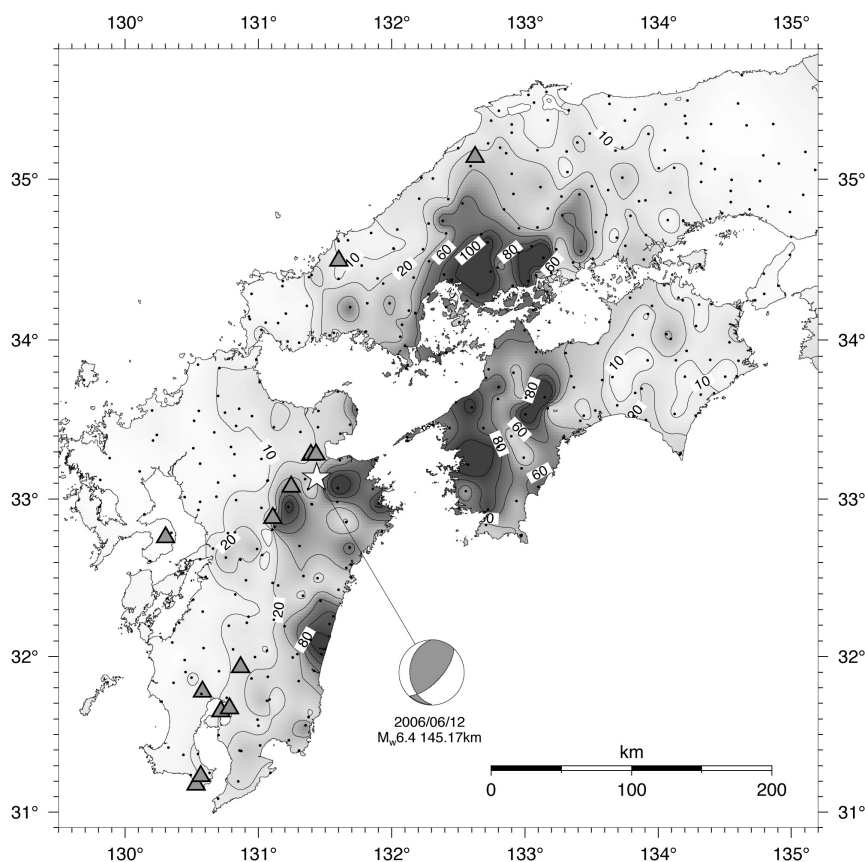


Fig. 10. Spatial distribution of PGA of the 2006 Oita-ken Seibu earthquake. The observed strong ground motion records at K-NET and KiK-net (ground surface) stations are used.

2006 Oita-ken Seibu earthquake

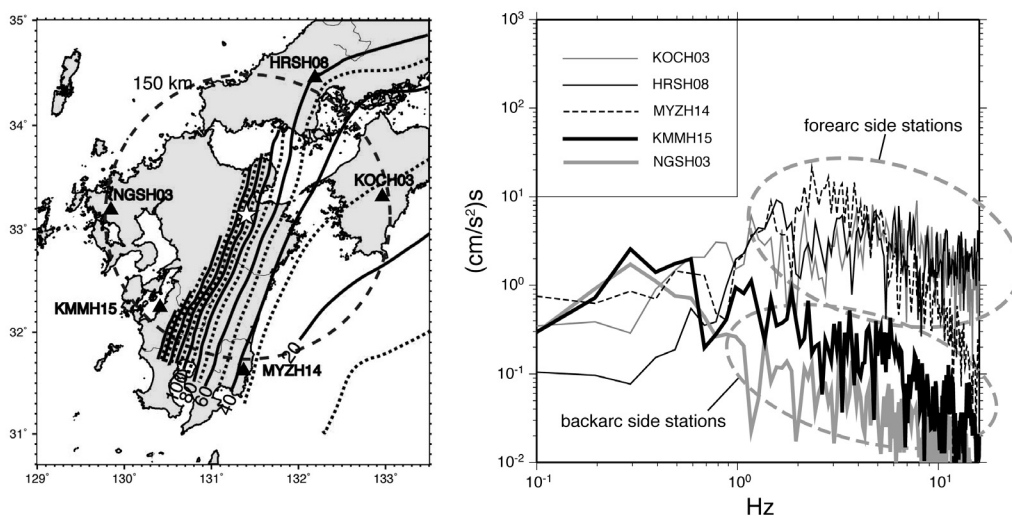


Fig. 11. Comparison between the acceleration amplitude spectra at the forearc side stations (KOCH 03, HRSH 08, MYZH 14) and at the backarc side stations (KMMH 15, NGSH 03) for the 2006 Oita-ken Seibu earthquake.

2006 Oita-ken Seibu earthquake

KiK-net borehole stations

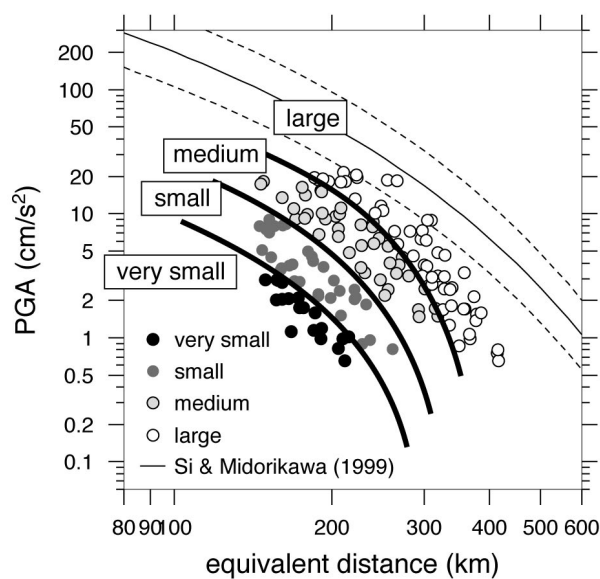


Fig. 12. PGA attenuation relation for the 2006 Oita-ken Seibu earthquake. The observed strong ground motion records at KiK-net borehole stations are used. The station plots are categorized into four groups according to the degree of attenuation.

2006 Oita-ken Seibu earthquake KiK-net borehole stations

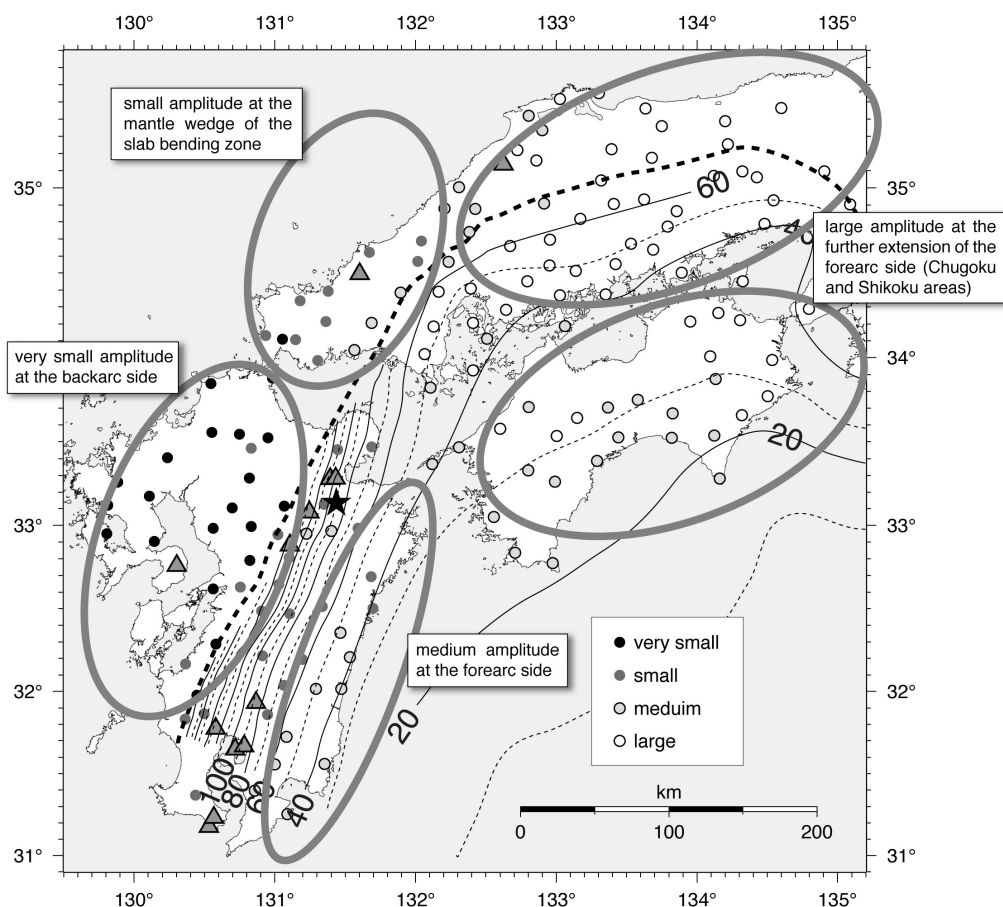


Fig. 13. Correspondence between the four groups defined in Fig. 12 and the island arc structure.

が存在すると考えられている (瀬戸・古村, 2002). 従って, この傾向は, (a) 九州の背弧側では, 火山フロント下と背弧側に存在する低 Q 値領域により高周波成分が著しく減衰する, (b) 中国地方西部では, スラブ屈曲部の低 Q 値マントルウェッジにより高周波成分が減衰する, (c) 前弧側の延長の中国地方・四国では, 地震波が高 Q 値のスラブを通過し高周波成分が減衰しない, と島弧の構造と関連づけて解釈することができる. この場合の島弧の構造と地震波の減衰の模式図を Fig. 14 に示す.

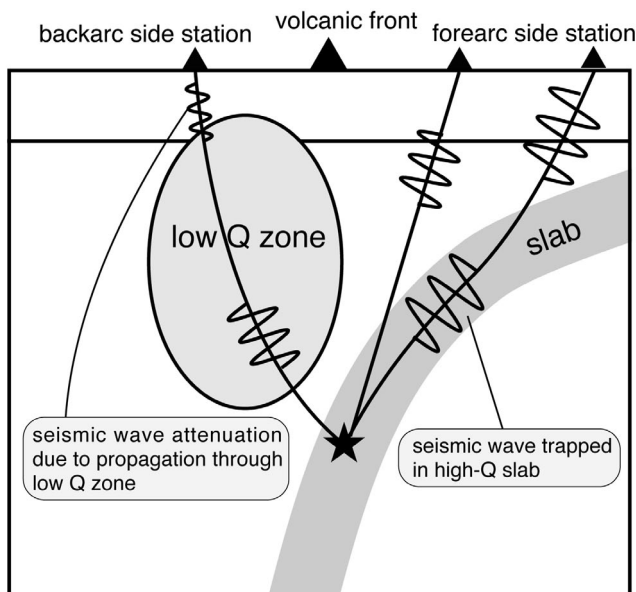


Fig. 14. Schematic illustration of the high-frequency seismic wave attenuation at the backarc side stations due to the wave propagation through the low- Q zone beneath the volcanic front and the high-frequency seismic waves propagating without attenuation trapped in high- Q slab.

IV. 東北日本弧と九州・中国・四国の比較

この研究では、東北日本弧下で発生した 2001 年岩手県内陸南部地震、九州弧下で発生した 2006 年大分県西部地震という 2 つのスラブ内地震の強震動データの特徴と島弧の構造の関連を議論した。東北日本弧が大まかには 2 次元構造で近似でき、単純に前弧側と背弧側に二分して考えることができるのに対し、九州・中国・四国においては、スラブの沈み込み角が九州弧下（高角）と中国・四国下（低角）で異なり、さらに周防灘～伊予灘下でスラブが屈曲しているために、東北日本弧の場合ほど簡単な見方は成り立たないという違いがある。ただし、そのような違いはあるにせよ、島弧の前弧側に比べ背弧側では地震波の高周波数成分の振幅が小さいという系統的な特徴がみられ、それは火山フロント下ないし背弧側の低 Q 値領域の存在によって説明ができるという基本的な図式は共通している。

その一方で、東北日本弧の場合、前弧側のスラブ浅部延長は大平洋となって観測点が存在しないのに対し、九州弧の場合はスラブ浅部延長に中国・四国があり、スラブ浅部延長方向に地震波の伝播を長く追跡できるという根本的な違いがある。この違いは、スラブ内の長い距離を伝播する波線を考える必要があるか否かという違いにつながる。九州弧で発生したスラブ内地震を、中国地方や四国で観測する場合、地震波は高 Q 値のスラブ内を長く通ると考えられる。実際に観測波形の特徴のところで触れたように、中国地方の広島県や四国の愛媛県、高知県西部では、

高周波成分の振幅が大きい．すなわち，九州弧下で発生するスラブ内地震の強震動の空間分布を考える場合，火山フロント下ないし背弧側の低 Q 値領域による地震波の減衰のみならず，高 Q 値のスラブにトラップされ，減衰せずに伝播する高周波地震波というものが重要な役割を果たすことを強調しなければならない．

なお，一般にスラブは高 Q 値だけでなく周囲に比べ高速度だと考えられている．地震波線が高速度な媒質から低速度な媒質に曲がることを考えると，高速度なスラブは地震波をトラップしづらく，むしろ逆に地震波が外に漏れやすい媒質であるといえる．従って，高 Q 値かつ高速度のスラブ内を地震波がトラップされて伝播するという図式を考えるためには，例えば Furumura and Kennett (2005) が提唱している薄い層状の構造を持つスラブのような，地震波がトラップされるような特別な仕組みを考える必要があることを付言しておく．

紙幅の都合で触れることはできなかったが，観測波形を比べると，東北日本弧下で発生した 2001 年岩手県内陸南部地震の背弧側での高周波数成分の減衰に比べ，九州弧下で発生した 2006 年大分県西部地震の九州の背弧側での高周波数成分の減衰は強烈である．また，後者の減衰は P 波に比べ S 波においてより顕著で，九州弧下では Q_p 値に比べ Q_s 値が小さい（減衰が大きい）ことが示唆される．このような地域による違いを定量的に検討していくことが，今後の重要な課題になるであろう．

謝辞 解析には防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net の強震波形データ，気象庁一元化震源データを使わせていただきました．図は，GMT (Generic Mapping Tools) (Wessel and Smith, 1995) 3.3.5 により作成しました．記して謝意を表します．

文 献

- 青井真・小原一成・堀貞喜・笠原敬司・岡田義光，2000，基盤強震観測網 (KiK-net)，日本地震学会ニュースレター，**12**，31-34.
- Furumura, T. and B. L. N. Kennett, 2005. Subduction zone guided waves and the heterogeneity structure of the subducted plate: Intensity anomalies in northern Japan, *J. Geophys. Res.*, **110**, B10302, doi:10.1029/2004JB003486.
- Kinoshita, S., 1998. Kyoshin Net (K-NET), *Seismol. Res. Lett.*, **69**, 309-332.
- 額満一・古村孝，2002. 2001 年芸予地震の強震動分布と深部地下構造，地震Ⅱ，**55**，97-105.
- 中村亮一・植竹富一，2004. 強震記録データによる東北地方の三次元減衰構造，地震Ⅱ，**56**，447-455.
- 関根秀太郎・松原誠・小原一成・笠原敬司，2004. 防災科研 Hi-net の最大振幅に基づく日本列島下の三次元減衰構造，日本地震学会講演予稿集，P 128.
- 司宏俊・翠川三郎，1999. 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，**523**，63-70.
- Tsumura, N., S. Matsumoto, S. Horiuchi and A. Hasegawa, 2000. Three-dimensional attenuation structure beneath the northeastern Japan arc estimated from spectra of small earthquakes, *Tectonophysics*, **319**, 241-260.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1995, New version of the Generic Mapping Tools released, *Eos Trans. AGU*, **76**, 329.