

3.3.13.2 短周期強震動のスケーリングに関する研究

(1) 業務の内容

(a) 業務題目：短周期強震動のスケーリングに関する研究

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
京都大学防災研究所	教授	Mori, J. Jiro	mori@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp
信州大学工学部	教授	泉谷恭男	tdp0000@gipwc.shinshu-u.ac.jp
神戸大学理学部	助手	筧 楽磨	takehi@kobe-u.ac.jp
北海道大学大学院理学研究科	助教授	笹谷 努	sasatani@ares.sci.hokudai.ac.jp
北海道大学大学院理学研究科	特別研究員	前田宜浩	tmaeda@ares.sci.hokudai.ac.jp

(c) 業務の目的

運動学的震源インバージョンにおいては、主に周期1秒程度より長周期の地震動を使った分析がなされており、それより短周期側では理論的グリーン関数構築の困難さから統計的な手法による解析が行われている。この短周期地震動の生成と特性抽出に関しては、強震観測網データを用いた分析の蓄積が必要不可欠である。本研究項目では、広帯域の震源モデル作成を目的として、震源スペクトルレベル、特に短周期レベルのスケーリングに着目した分析を行う。この中には、強震観測データを用いた放射エネルギーのスケーリングに関する研究、地震発生環境の違いや地震規模の違いによる震源スペクトル特性の抽出、短周期レベルに着目した広帯域震源モデル構築に関する研究を行う。これらの分析結果をもとに、大地震の震源モデル構築方法についての検討を行うとともに、動力学的な研究成果とともにその高精度化を計る。高震度域が広がる比較的浅いスラブ内地震は、内陸地殻内地震の震源特性とは異なることが指摘されており、地殻内地震との比較において、これらの震源特性とモデル化も範疇としている。

(d) 5カ年の年次実施計画

- 1) 平成14年度：実記録に基づく短周期地震波特性の地震規模依存性の研究として、放射エネルギーのスケーリング則及び震源スペクトルの高精度スケーリング則に関する研究を行った。また、スラブ内地震の震源モデルに関する研究を1994年北海道東方沖地震や2001年芸予地震などを対象として行った。
- 2) 平成15年度：地震スペクトルモデル構築のための分析、短周期地震波レベルのスケーリング則、震源の短周期生成過程に関する研究及びそれに基づく広帯域強震動予測用震源モデルに関する研究を行った。
- 3) 平成16年度：地震発生環境による地震スペクトルモデルの構築に関する研究、短周期地震波レベルのスケーリング則の高精度化に関する研究、震源の短周

期生成過程に関する研究を行う。

4) 平成 17 年度:短周期地震動予測手法に関する研究及び広帯域震源モデルの構築に関する研究を行う。

5) 平成 18 年度:モデルの適用と改良を行う。

(e) 平成 16 年度業務目的

地震スペクトルモデル構築のための分析、短周期地震波レベルのスケーリング則、震源の短周期生成過程に関する研究及びそれに基づく広帯域強震動予測用震源モデルに関する研究を行う。

(2) 平成 16 年度の成果

(2-1) Complexity in Faulting of the 2004 Niigata Chuetsu Earthquake

Mori James Jiro (京都大学防災研究所)

mori@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp

(a) 業務の概要

We studied waveform data from the Niigata Chuetsu and Northern Miyagi mainshocks and some of the larger aftershocks to study the complexity of the earthquake source. The details of the rupture process is one of the main factors that controls the levels of high frequency radiation from the earthquake, and thus it is important for evaluations of the damaging strong-motions from earthquakes.

(b) 業務の実施方法

- We used a finite-fault multi-time-window waveform inversion (Hartzell and Heaton, 1983) of local strong motion data to obtain a slip distribution model of the 2004 Niigata Chuetsu mainshock (Mj6.8) and largest aftershock (Mj6.5). The data consisted of three-component ground displacements (filtered from 1.0 to 20 sec) recorded at 6 stations for hypocentral distances of about 10 to 25 km from source.

- We examined the complexity of the beginning of the ruptures for mainshocks and large aftershocks of the 2003 Northern Miyagi-ken and 2004 Niigata Chuetsu sequences. A method was developed to evaluate the complexity, which used the number of zero-crossings observed in the acceleration waveforms. Using this evaluation, the earthquake ruptures were classified as ‘simple’ and ‘complex’ events. We looked at 47 events in the Miyagi sequence (Mj 3.3 –6.4) and 147 events in the Niigata sequence (Mj3.1- 6.8).

(c) 業務の成果

1. The results of the waveform inversion of the 2004 Chuetsu earthquake showed a slip distribution with much of the moment release occurring in a an area about $10 \times 6 \text{ km}^2$ near the hypocenter. There is also another smaller area of slip shallower and about 10 km to the northeast. This model is rather similar to other models obtained from inversion of the strong-motion data (e.g. Sekiguchi 2005). These results suggest that the source of the strong-motion in the period range of a few seconds is mostly near the hypocenter, with a smaller source about 10 km to the northeast. The rupture velocity is still difficult to resolve, but examination of the waveform fit at the closest station (NIGH01), located above the northwest portion of the fault, suggests that the rupture velocity was about 2.6 km/sec.

2. The waveform inversion for the largest aftershock at 18:34 (Mj 6.5) also shows a model with most of the slip occurring in a $4 \times 4 \text{ km}^2$ area near the hypocenter, which probably represent the source of most of the strong-motion, in the range of a few seconds.

3. The analysis for classifying the complexity of ruptures for the Northern Miyagi-ken events showed that all of the larger ($M > 4.3$) earthquakes, the earthquakes had complex ruptures. For earthquake smaller than $M 4.3$ there were both simple and complex events.

4. The analysis of the complexity of ruptures for the Niigata Chuetsu earthquakes showed results similar to the Northern Miyagi-ken events. For earthquakes larger than $M4.6$, all of the earthquakes were classified as complex events and for smaller earthquakes there were both simple and complex events.

(d) 結論ならびに今後の課題

We studied the detailed rupture process for some recent small to moderate crustal earthquakes in Japan. We showed that for the small events, there are both simple and complex earthquakes (evaluated at frequencies of 1 to 10 Hz) while the larger earthquakes always have complex rupture processes. In regards to the source effects on the levels of strong-ground motion, the complexity of the larger earthquakes implies that such heterogeneity in the rupture plays an important role in the high-frequency generation.

For the mainshock and largest aftershock of the Niigata Chuetsu earthquake, the slip distribution obtained from the waveform inversions of the local strong-motion data, showed that the slip was concentrated in rather small regions close to the hypocenter. As is well known from many previous studies, the slip is not evenly distributed over the fault plane, and the sources of high-frequency radiation come from small local regions.

Future work is necessary to clarify the exact locations of the sources of radiation that dominate the strong-ground motion from moderate and large earthquakes, such as the Northern Miyagi and Niigata Chuetsu earthquakes. The locations of concentrated slip (asperities) and relation to the rupture process are necessary elements for the source modeling used in predictions of strong ground motions for earthquake in Japan.

(e) 引用文献

- 1) Hartzell, S. and Heaton T.: Inversion of strong motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California earthquake, Bull. Seismol. Soc. Am., 73, pp.1553-1583, 1983.
- 2) Sekiguchi, H.: Chap. 2.1 Geological Structure and Source Fault, Report by the Japan Society of Civil Engineering, <http://shake.iis.u-tokyo.ac.jp/chuetsu/2-1.pdf>, 2005 (in Japanese)

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Miyazawa, M., Mori, J., Iio, Y., Shibutani, T., Matsumoto, S., Katao H., Ohmi, S., And Nishigami, K.	Triggering sequence of large aftershocks of the Niigata-Chuetsu, Japan, earthquake by static stress changes	submitted to Earth, Planets and Space	
Mori, J., and Somerville, P.	2004 Niigata-ken Chuetsu earthquake – Seismology and strong ground motions	submitted to Earthquake Spectra	2005
Sato, K. and Mori, J.	Relationship between rupture process complexity and earthquake size	submitted to J. Geophys. Res.	2005

(g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(2-2)短周期震源スペクトルのスケージングに関する研究

泉谷恭男（信州大学工学部）

tdp0000@gipwc.shinshu-u.ac.jp

(a) 業務の要約

1998年2月から2004年11月までの間に新潟県中越地方で発生した地震群について、防災科学技術研究所のK-NETとKiK-netの強震記録を解析して、短周期震源スペクトル強度と地震モーメントの関係について調べた。その結果、地震の相似則が厳密には成立していないことが明らかになった。規模の大きい地震の方が、単位モーメント当り、応力降下量一定の²モデルから期待されるよりも多くの短周期波動エネルギーを放出している。この結果は昨年度までに解析した鹿児島県北西部地域、鳥取県西部地域、および宮城県北部地域で発生した地震群についての結果とほぼ同じである。将来の大地震に対する強震動予測の際には、地震の相似則からのずれを適切に補正する必要がある。その補正の目安について、提案を行った。

(b) 業務の実施方法

新潟県中越地方で発生した地震群について、昨年度までに鹿児島県北西部地域、鳥取県西部地域、および宮城県北部地域で発生した地震群について用いたものと同じ手法によって、短周期震源スペクトル強度と地震モーメントの関係について調べた。更に、昨年度までの3つの地震群についての結果と併せて、将来の大地震に伴う強震動予測のために、地震の相似則からのずれについてどのように補正すべきかについて考察した。

(c) 業務の成果

はじめに

昨年度までに著者は、鹿児島県北西部地域、鳥取県西部地域、および宮城県北部地域で発生した地震群について、防災科学技術研究所のK-NET¹⁾とKiK-net²⁾の強震記録を解析して、短周期震源スペクトル強度と地震モーメントの関係について調べた。その結果、これらの地震群については地震の相似則が厳密には成立していないことが明らかになった。規模の大きい地震の方が、単位モーメント当り、応力降下量一定の²モデル³⁾から期待されるよりも多くの短周期波動エネルギーを放出している。従って、将来の大地震に対する強震動予測の際には地震の相似則からのずれを適切に補正する必要があるという指摘⁴⁾の重要性が、最新の強震計ネットワークの記録の解析に基いて改めて確認された。

表1 新潟県中越地震本震の諸元

Date	Time	Latitude (N)	Longitude (E)	Depth (km)	M	M_0 (Nm)	M_w
2004/10/23	17:56	37.29	138.87	13	6.8	7.53×10^{18}	6.6

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震は多くの余震を伴った。それらの地震群

の震央は K-NET および KiK-net 観測網の内部に位置するため、震央域を取り囲んで分布する多くの観測点において加速度記録が得られている。この地震群は地震の相似則に従った震源スペクトルを有しているのか、それとも前論文と同じような相似則からのずれを示すのかについて、是非確認しておく必要がある。

今年度は、新潟県中越地方で発生した地震群について、昨年度までの解析において用いたものと同じ手法によって、短周期震源スペクトル強度と地震モーメントの関係について調べた。更に、昨年度までに扱った3つの地震群についての結果と併せて、将来の大地震に伴う強震動予測のために、地震の相似則からのずれについてどのように補正すべきかについて考察した。

データおよび解析

2004年新潟県中越地震の本震の震源情報(震源時、震源位置、およびマグニチュード M については気象庁、地震モーメント M_0 とモーメントマグニチュード M_w については防災科学技術研究所 F-net⁵⁾による)を表1に示す。また、本震の震央位置と F-net による発震機構解を図1の左図に示す。昨年度までに解析した2003年宮城県北部地震の本震と非常によく似た、逆断層型のメカニズム解を示している。

本研究で解析対象とした地震は、 $M_w=3.6\sim 6.6$ の33個である。図1の右図にはそれらの地震の震央(星印:本震、十字:その他の地震)が示されている。本震の震央を中心とした半径10kmの円内に震央を有し、かつ、記録の得られている観測点がうまく震央域を取り囲んでいる地震が選ばれている。2004年新潟県中越地震の本震以外の地震の内訳は、本震以前に発生したものが1個、余震が31個である。これらの地震はどれも震源深さが約10kmの浅い地震である。

震央域を取り囲んで、本震からの震央距離が15~60kmの範囲にある K-NET と KiK-net 観測点での加速度記録を用いる。用いた観測点の位置は、図1の右図に黒三角形で示されている。

加速度記録の解析手法は、昨年度に用いたものと同じである。S波に関する震源スペクトルに注目するために、まず水平動の加速度記録(NS成分、EW成分)を transverse 成分の記録に変換する。その後、同一観測点の記録についてスペクトル比(本震/他の地震)をとることによって、伝播経路での減衰の影響と観測点近傍での地盤の影響が除去されたものとみなす。この仮定の有効性を確保するために、震央域に非常に近い3つの観測点(NIG019、NIG020、NIGH12)の記録は使用しなかった。更に、各地震ペア毎に、全ての観測点におけるスペクトル比を、その対数値について算術平均する。各地震ペアの震源位置が少し異なることに起因する伝播経路での減衰の影響の違い、放射パターンや断層破壊進行の影響の違い等がこの平均操作によって除去されるものとみなす。

以上の操作の結果、得られたスペクトル比は震源スペクトルの比を表すことになる。本研究で注目するのは、短周期震源スペクトル比(数 Hz~10Hz でのスペクトル比)である。このあたりの周波数帯域は小さい地震の震源スペクトルのコーナー周波数 f_0 よりも高い周波数帯域と考えられる。したがって、もし2つの地震の間に応力降下量一定の²モデルで表現されるような相似則が成立しているとする、短周期震源スペクトル比は M_0 の比の $1/3$ 乗になることが期待される。実際に観測されたスペクトル比がこの関係を満足

しているのか否かについて調べた。

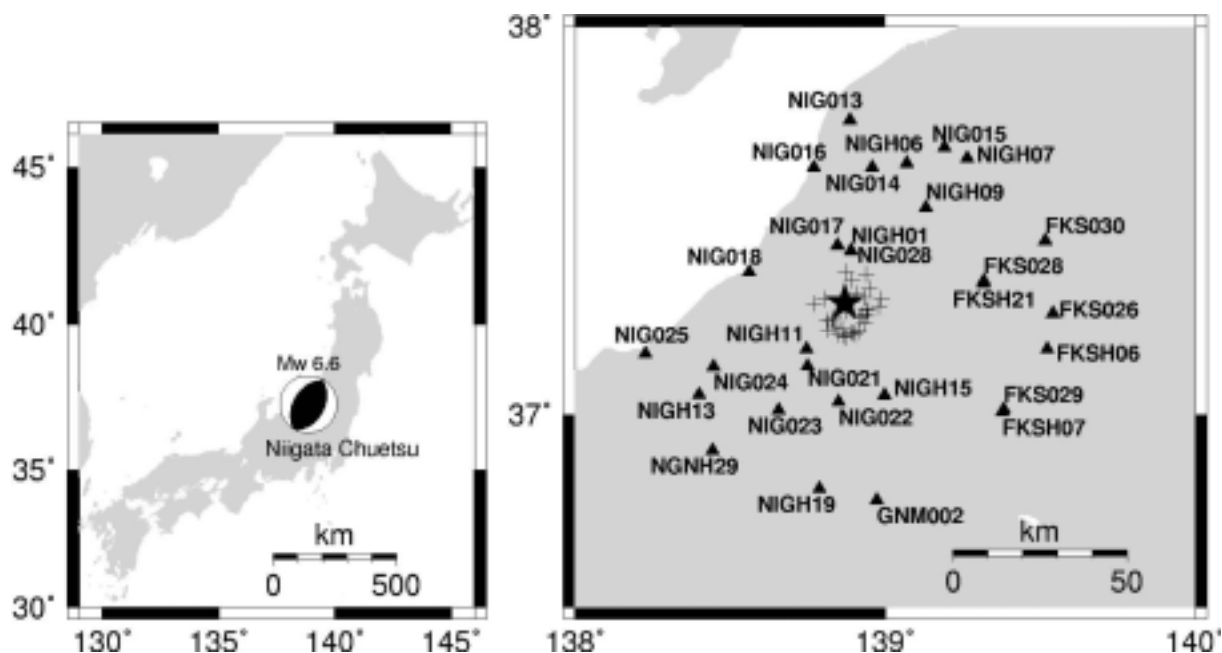


図 1 新潟中越地震本震の発震機構，解析した地震群の震央と強震観測点

結果

図 2 に、観測されたスペクトル比の一例を示す。実線は観測された震源スペクトル比、2本の点線は、この地震ペアについての「 M_0 の比」と「 M_0 の比の1/3乗」の値を示している。破線は応力降下量一定の²モデルから期待されるスペクトル比（コーナー周波数を5通りに変化させた場合）である。

震源スペクトル比は、大きい方の地震のコーナー周波数 f_0 よりも低い周波数帯で M_0 の比に漸近することが期待されるが、観測された震源スペクトル比は0.2Hz付近から周波数が低くなるとともに減少している。一般に、加速度記録には低周波ノイズが含まれ、記録の振幅が小さい場合にはノイズの影響が大きく現れる。図2に見られる低周波数帯域でのスペクトル比の減少は、小さい方の地震記録（スペクトル比をとる際の分母）に含まれる低周波ノイズのせいであると考えられる。

本研究で注目するのは、比較的高い周波数帯域（数Hzから10Hz）でのスペクトル比である。このあたりの周波数帯域は小さい地震の f_0 よりも高い周波数帯域と考えられる。し

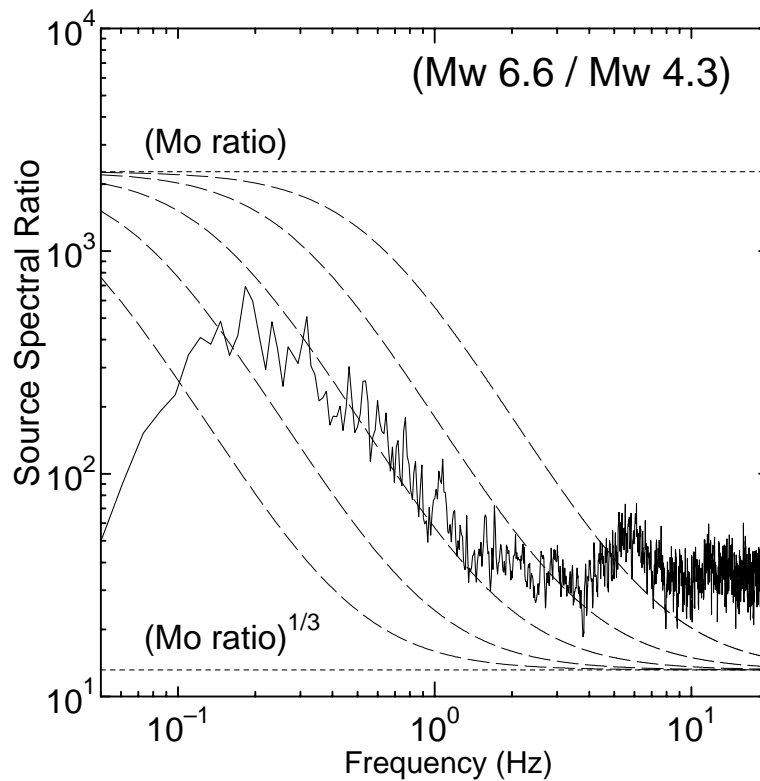


図 2 スペクトル比の一例

たがって、もし2つの地震の間に相似性が成立しているとする、震源スペクトル比は M_0 の比の $1/3$ 乗になることが期待される。しかしながら図2の震源スペクトル比はそれよりもかなり大きい。このことは、2つの地震間には相似性は成り立っておらず、大きい方の地震の短周期震源スペクトルが相似性から期待されるものよりも大きすぎる、又は、小さい方の地震の短周期震源スペクトルが小さすぎることを意味している。

図3に、短周期震源スペクトル強度の相対値を M_0 に対してプロットした。図中の白丸は本震に関するもので、その短周期震源スペクトル強度を1.0としている。黒丸は本震発生以降の地震（余震）のものであり、白三角は本震以前に発生した地震のものである。また破線は、この地震群中の地震間に応力降下量一定の²モデルに従うような相似則が成立している場合に期待される短周期震源スペクトル強度の相対値（この値は $M_0^{1/3}$ に比例する）を示している。

M_0 にして 10^{18}Nm よりも小さい地震に関するプロットが、例外なく破線よりも下方に位置している。このことは、本震の短周期震源スペクトル強度を基準とした場合、小さい地震の短周期震源スペクトル強度は地震の相似則から期待されるものよりも小さいことを意味する。即ち、規模の大きい地震の方が、単位モーメント当り、応力降下量一定の²モデルから期待されるよりも多くの短周期波動エネルギーを放出しており、地震の相似則は厳密には成立していない。

本震以前に発生した地震と本震以後に発生した地震（余震）に関する結果の間に、明確

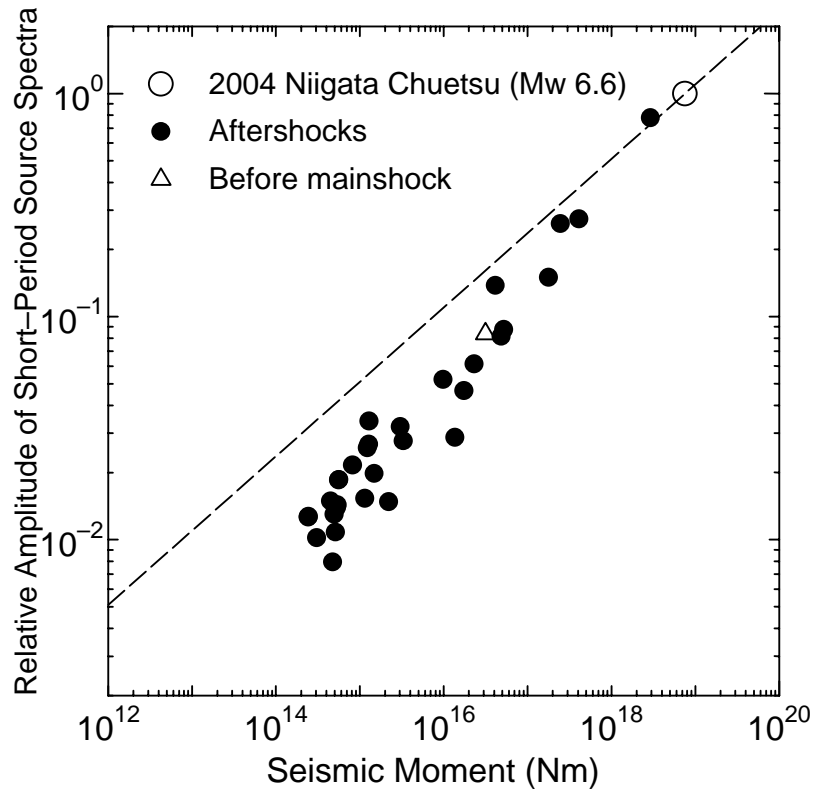


図 3 短周期震源スペクトル強度の相対値と地震モーメントの関係

な違いは認められない。またこの結果は、鹿児島県北西部、鳥取県西部、宮城県北部で発生した地震群について調べた昨年度までの結果と非常によく似ている。

考察

図 4 は、昨年度までに扱った 3 つの地震群についての結果と今年度の結果（図 3）とを纏めたものである。縦軸は各地震群中の最大地震の短周期震源スペクトル強度を 1.0 とした場合の各地震の短周期スペクトル強度の相対値（ \tilde{A} ）、横軸は地震モーメントの相対値（ \tilde{M}_0 ）を示している。白丸（ $\tilde{A}=1.0$ 、 $\tilde{M}_0=1.0$ ）は、各地震群中の最大地震についてのプロット、黒丸はその他の地震についてのプロットである。

各地震群中の地震間に相似則が成り立っているとすると、 \tilde{A} と \tilde{M}_0 の間には、図 3 と図 4 に破線で示された

$$\tilde{A} = \tilde{M}_0^{1/3} \quad (1)$$

の関係が期待される。しかし図中のプロットは明らかにこの破線から外れており、図 4 に実線で示されている

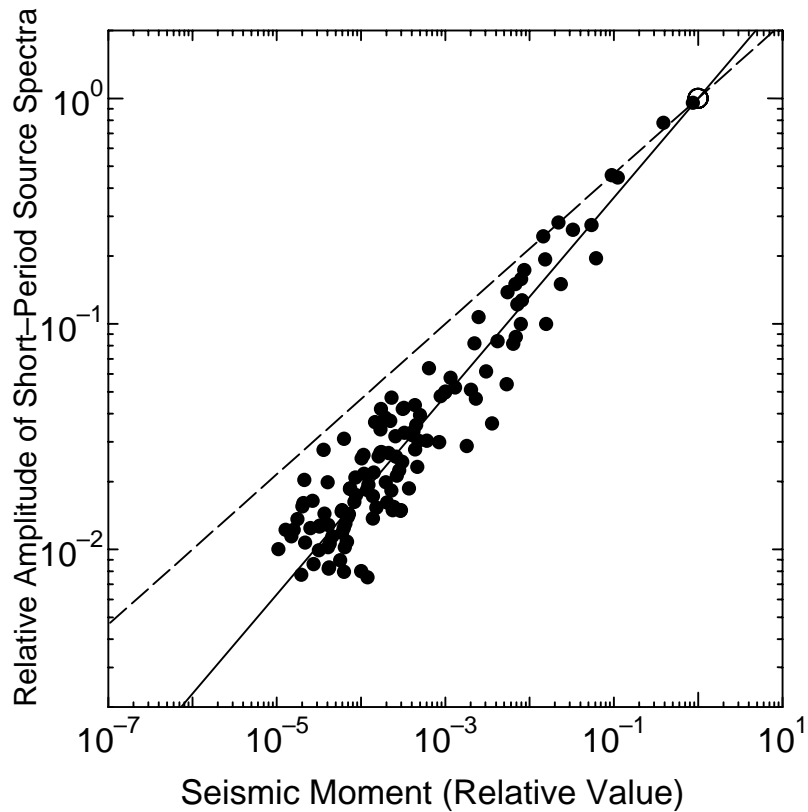


図 4 短周期震源スペクトル強度の相対値と地震モーメントの相対値の関係（4つの地震群についての結果をまとめたもの）

$$\tilde{A} = \tilde{M}_0^{0.44} \quad (2)$$

の方が観測された傾向をよく表している。 $\tilde{M}_0=10^3$ において、式(1)の \tilde{A} の値と式(2)の \tilde{A} の値とを比べてみると、約2倍の違いがある。このことは、想定した大地震の地震動を予測する際に、地震モーメントが 10^3 だけ小さい地震の観測記録を基にして予測を実行すると、式(1)を用いるか式(2)を用いるかで短周期地震動の予測結果に約2倍の違いが生じることを意味する。式(1)を用いた場合（地震の相似則を仮定した場合）、予測される地震動の大きさは約1/2に過小評価される。

Izutani⁶⁾は岩手県沖、能登半島沖、国後沖、および日向灘に発生した地震群について、短周期震源スペクトルと地震マグニチュードとの関係について調べている。その論文では、経験的グリーン関数法を用いて余震記録から本震記録を合成したいくつかの研究^{7)~11)}で仮定された応力降下量の比⁴⁾の値をも引用し、

$$\log \tilde{A} = 0.65M_D \quad (3)$$

を得ている。ここで M_D は、大小地震間のマグニチュードの差である。式(3)は、マグニチュードの小さい地震の記録を用いてマグニチュードの大きな地震の記録を合成する際の短

周期スペクトルレベル補正の目安となる。

ところで、地震モーメント M_0 (Nm) とモーメントマグニチュード M_w の関係は

$$\log M_0 = 1.5M_w + 9.1 \quad (4)$$

である¹²⁾。式(4)より

$$\log \tilde{M}_0 = 1.5M_D \quad (5)$$

が得られ、これを式(3)に代入すると

$$\tilde{A} = \tilde{M}_0^{0.43} \quad (6)$$

となる。これは本研究の結果である式(2)に極めて近い。

以上のことから、短周期震源スペクトル強度が地震の相似則から期待されるものから外れる傾向があること、および、式(2)で表されるような外れ方を示すことは、今回の地震群にのみ見られる特殊なものではなく、日本付近で発生する浅い地震のかなり一般的性質を表している可能性も示唆される。

(d) 結論ならびに今後の課題

2004年新潟県中越地震が発生した地域における地震群について、K-NETとKiK-netの強震記録を解析して、短周期震源スペクトル強度と地震モーメントの関係について調べた。その結果、鹿児島県北西部、鳥取県西部、宮城県北部で発生した地震群について調べた昨年度までの結果と非常によく似た結果を得た。昨年度までに解析した地震群および本年度解析した地震群に含まれる $M_w=3.3 \sim 6.6$ の地震については、規模の大きい地震の方が、単位モーメント当り、地震の相似則に基づく応力降下量一定の²モデルから期待されるよりも、多くの短周期波動エネルギーを放出している。従って、経験的グリーン関数法などによって、観測された小地震記録を合成して大地震記録を予測する場合には、地震の相似則からのずれ分を、式(2)に基づいて補正する必要がある。また、式(2)で表される関係が一般的なものであるかどうか、今後更に多くの地震記録の解析を通じて、確認していく必要がある。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、防災科学技術研究所のK-NET、KiK-netおよびF-netのデータを使用させていただきました。

(e) 引用文献

- 1) 防災科学技術研究所：K-NETのホームページ(<http://www.k-net.bosai.go.jp/>)。)
- 2) 防災科学技術研究所：KiK-netのホームページ(<http://www.kik.bosai.go.jp/>)。)
- 3) Aki, K.: Scaling law of seismic spectrum, J. Geophys. Res., Vol.72, pp.1217-1231, 1967.
- 4) Irikura, K. and Kamae, K.: Estimation of strong ground motion in broad-frequency band based on a seismic source scaling model and an empirical Green's function technique, ANNALI DI GEOFISICA, Vol.37, pp.25-47, 1994.
- 5) 防災科学技術研究所：F-netのホームページ(<http://www.fnet.bosai.go.jp/>)。)

- 6) Izutani, Y. : High-frequency source spectral ratio between large and small earthquakes, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.1, pp.697-702, 1998.
- 7) 榊井健, 武村雅之, 釜田正毅 : 半経験的方法による 1993 年能登半島沖地震の強震動評価, 地震第 2 輯, Vol.47, pp.375-382, 1994.
- 8) Kamae, K. and Irikura K.: A fault rupture model of the 1995 Hyogoken Nanbu earthquake ($M_{JMA}=7.2$) estimated by the empirical Green's function method, Natural Disas. Sci., Vol.16, pp.31-40, 1995.
- 9) 今西和俊, 池田音岩, 佐藤魂夫 : 経験的グリーン関数法による 1993 年北海道南西沖地震の破壊過程, 地震第 2 輯, Vol.48, pp.365-373, 1995.
- 10) 鶴来雅人, 田居優, 入倉孝次郎, 岡崎敦 : 経験的グリーン関数重ね合わせ法の工学的適用に関する検討 --- 1993 年能登半島沖地震に対する適用性 ---, 土木学会第 23 回地震工学研究発表会講演概要, pp.153-156, 1995.
- 11) 原田隆典, 田中剛, 田村好文 : 震源特性を考慮した地震動のシミュレーション手法, 土木学会論文報告集, 第 507 号/I-30, pp.209-217, 1995.
- 12) Kanamori, H.: The energy release in great earthquakes, J. Geophys. Res., Vol. 82, pp.2981-2987, 1977.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
泉谷恭男	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 No.780/I-70	平成 17 年 1 月

(g) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(2-3)定量的な強震動予測のための震源のモデル化に関する研究

笥楽磨 (神戸大学理学部)

kakehi@kobe-u.ac.jp

(a) 業務の要約

2001年芸予地震 ($M_{JMA} = 6.7$) の震源断層に分岐断層が存在した可能性を検討した。主断層に分岐断層を付け加えた震源モデルを仮定し、強震記録の波形インバージョンを行った結果、分岐断層のない震源モデルと波形の合いは全く同程度であった。即ち、この研究で使ったデータセットでは、分岐断層の存在の可否は残念ながら判断できなかった。深い震源を持つスラブ内地震の破壊過程の不均質性が強震動に与える影響を評価するために、2001年芸予地震を意識した震源モデルを設定し、kinematicな数値シミュレーションを行った。破壊過程の不均質性は forward directivity 側に位置する観測点の地震波形には明瞭には反映されず、backward 観測点の地震波形に露わに反映されることが明らかになった。2003年5月26日の宮城県沖スラブ内地震による強震動データの解析から、東北日本弧の火山フロント下に存在する低 Q 値領域が、強震動の regional な空間分布に強い影響を与えたことを見出した。

(b) 業務の実施方法

高密度強震観測網で記録された地震波形データの様々な解析、数値シミュレーション等を計算機上でを行い、検討を行った。

(c) 業務の成果

平成16年度には 1) 2001年芸予地震の震源断層に分岐断層が存在した可能性の検討、2) 震源過程が地表の強震動に与える影響の数値シミュレーションによる検討、3) 島弧の減衰構造が強震動の regional な空間分布に与える影響の研究、を行った。以下、それぞれについて詳述する。

1) 2001年芸予地震の震源断層モデルの研究：分岐断層の可能性の検討

a) はじめに

前年度に、強震記録の波形インバージョンにより、フィリピン海スラブ内で発生したスラブ内地震である2001年芸予地震 ($M_{JMA} = 6.7$) の詳細な震源モデルを推定した¹⁾。今年度は、この地震の震源モデルの再検討を行った。震源域南部には、ほぼ鉛直かつシャープな平面状の分布を示す余震群が存在する。前年度の解析では、波形の解析に基づき、震源域南部ではこの鉛直な面とは異なる面を震源断層面とする震源モデルを提出した。しかし、この南部の鉛直面が(主断層ではなく)分岐断層として本震時に活動した可能性は残されているため、南部鉛直面を分岐断層として持つ震源モデルを仮定し、強震記録の波形インバージョンを行い、分岐断層を設定することで観測波形データをよりよく説明できるかどうかの検討を行った。

b) データと解析手法

震源モデルとして分岐断層部分を付け加えた点を除き、使用したデータ、Green 関

数の計算に使用した地下構造モデル、Green 関数の計算手法、波形インバージョン手法等、解析の詳細は前年度と全く同じである。インバージョンに使用する強震波形データは、防災科学技術研究所の K-NET²⁾、KiK-net³⁾、F-net⁴⁾の強震記録を使用した。ここでは、観測データについてのみ簡単に記す。図 1 に波形インバージョンに使った観測点 (14 点) を示す。インバージョンの対象は、観測波形の S 波部分 (S 波の 1 秒前から 16 秒間) である。波形は速度波形で、0.1 ~ 0.5 Hz のバンドパスフィルターを施している。

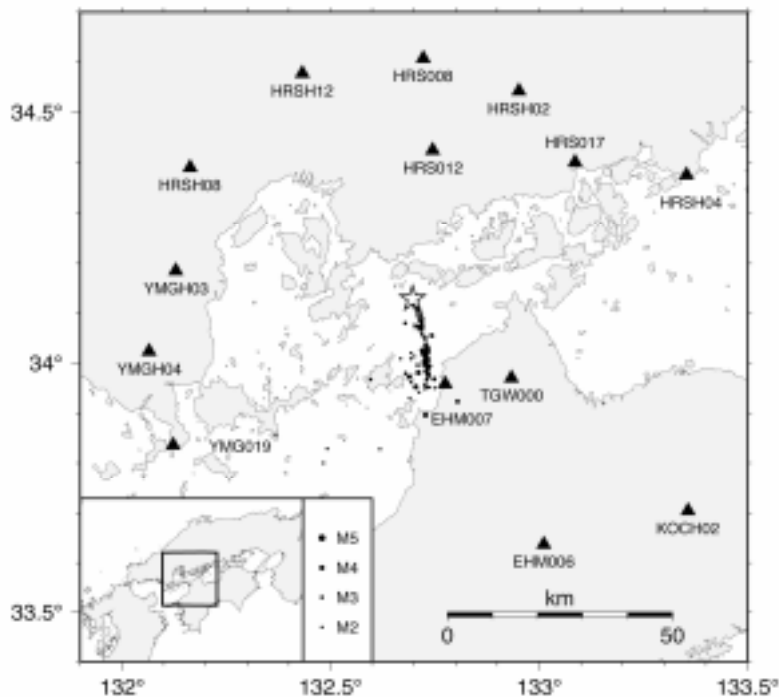


図 1. 波形インバージョンに使った観測点。

c) 分岐断層を持つ震源モデルの設定

前年度の解析では予備的な波形解析 (モーメントテンソルインバージョン) と余震分布に基づき、震源断層モデルを設定した。震源域北部ではモーメントテンソルインバージョン結果と余震分布は整合性を示した。震源域南部では余震分布は 3 次元的に散らばった分布を示し、1 枚の面で説明することは難しい。従って、震源域南部ではモーメントテンソルインバージョンの結果を重視し、余震分布の大まかな傾向を参考にしつつ断層面を設定した。その結果、北から南に向かうにつれて、strike と dip が徐々に変化する曲がった断層面モデル (4 枚の平面セグメントで曲面を近似的に表現) を採用した。

しかし、震源域南部には、ほぼ鉛直かつシャープな平面状の分布を示す余震群が存

在する。この鉛直な平面は、震源域南部のモーメントテンソルの節面とは一致しない。震源域南部でこの余震群に合わせた鉛直断層面モデルを仮定した波形インバージョンを行ってみたが、波形の合いは著しく悪く、この鉛直面が主たる震源断層を示すものではないことが確認された。しかし、主たる震源断層ではないとしても、この鉛直面が副次的な分岐断層である可能性はまだ残されている。

そこで、今回は図 2 に示すように、曲がった主断層に鉛直な分岐断層が付け加わった震源モデルを設定し、波形インバージョンを行った。鉛直な分岐断層は、(strike , dip) = (170° , 90°) の strike と dip を持ち、その大きさは余震群の広がりに合わせて、長さ × 幅 = 9 km × 6 km としている。

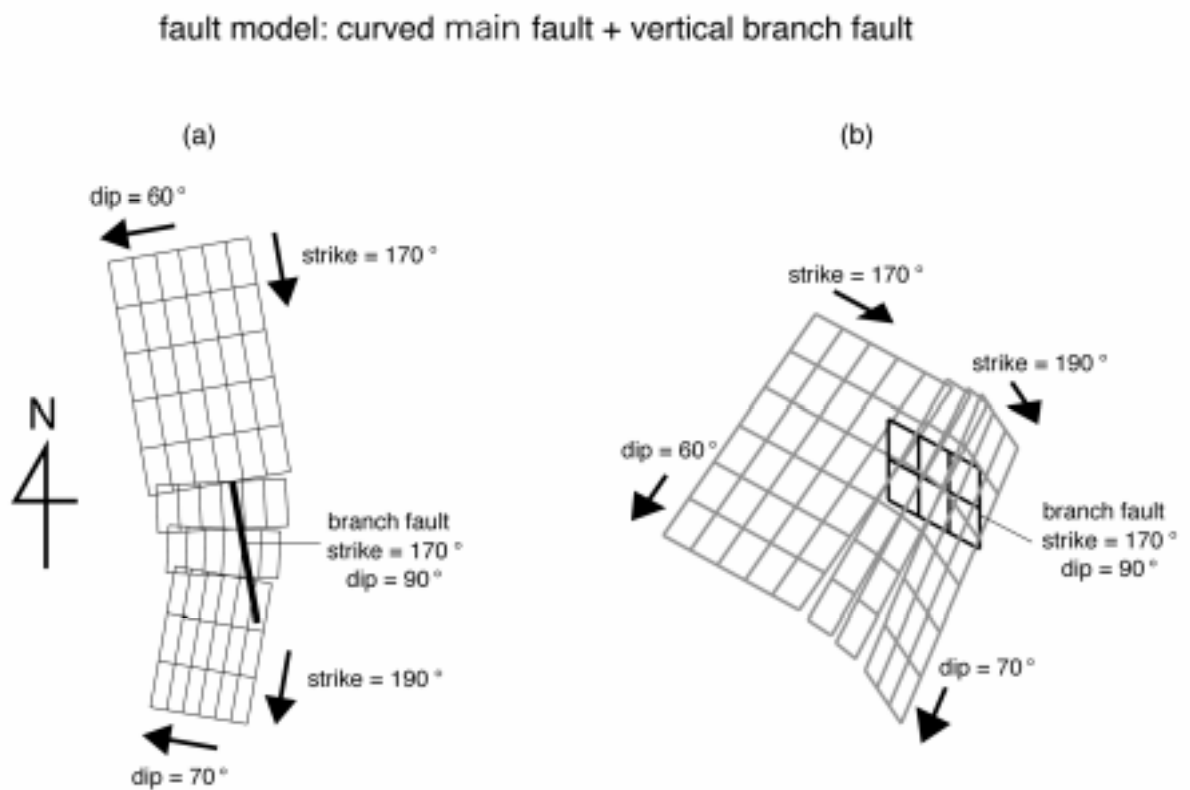


図 2. 曲がった主断層面 + 鉛直な分岐断層からなる断層モデル。(a) 平面図。
(b) 南西の方角から見た立体図。曲がった主断層面は灰色線で、鉛直分岐断層は黒線で示す。

d) 結果と議論

図3と図4に鉛直な分岐断層を持つ震源モデルに対する波形インバージョン結果を示す。図3は観測波形と合成波形の比較を示す。波形の合いは非常によいが、variance reductionは73%であり、これは分岐断層を持たない震源モデルの場合(72%)とほぼ同じである。即ち、震源モデルに分岐断層を導入しても、導入しない場合に比べ、波形の合いはほとんど改善されなかった。図4に断層面上のすべり分布とすべりベクトルの分布を示す。曲がった主断層面上のすべり分布は、分岐断層を導入しない場合とほとんど変わらない。若干違いがあるのは分岐断層と重なるセグメント2、3の浅部の部分であるが、その違いは非常に小さい。トータル地震モーメントと最大すべり量の値は、それぞれ $2.1 \times 10^{19} \text{ N}\cdot\text{m}$ と 2.4 m で、これは分岐断層を導入しない場合と同じ値である。分岐断層のモーメント解放量が全体に占める割合はわずか6%と非常に小さいが、分岐断層上の最大すべり量の絶対値は1.3 mと大きい。

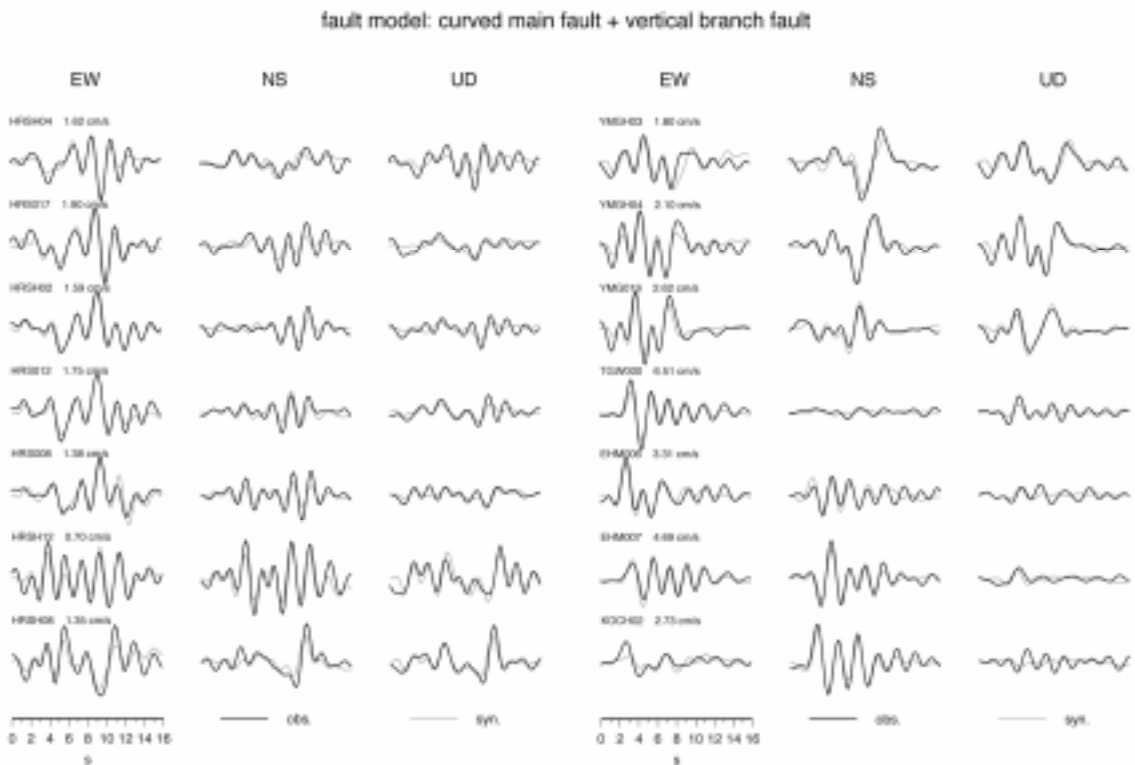


図3. 観測波形と強震波形のインバージョンにより得られた合成波形の比較。

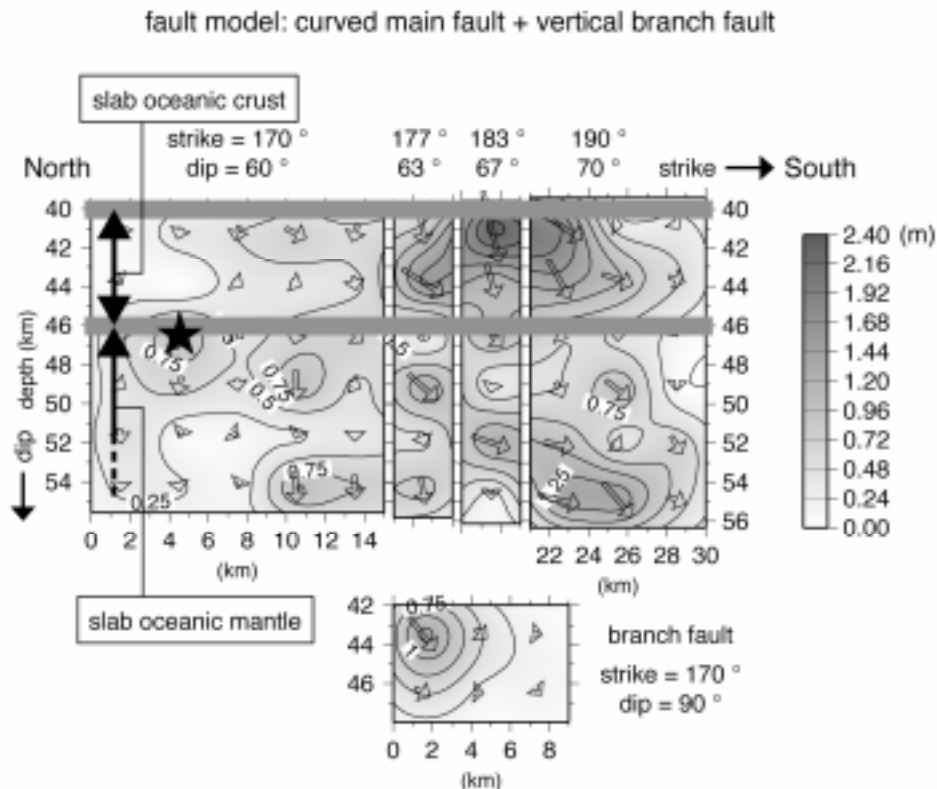


図 4. 波形インバージョンにより得られた震源断層面上のすべり量分布。縦軸は深さ (km)。あわせてスラブ上面とスラブの海洋性地殻と海洋性マンツルの境界 (海洋性 Moho) を太い灰色線で示す。

分岐断層を持たない震源モデルの場合、波形の合いが若干悪かったのは、震源域北側の広島県の観測点 (HRS***) の NS 成分で、観測波形に比べ合成波形の振幅がやや小さかった。分岐断層を新たに導入することにより、この点が改善されるかと期待したが、残念ながらそうはならなかった。図 5 は、合成波形のうち、分岐断層の寄与のみを示したものである。これを見ると、震源域北側の広島県の観測点 (HRS***) では、NS 成分より EW 成分の方が理論波形の振幅が大きい。従って、分岐断層を考慮しても NS 成分のパルス波の合いの改善は期待しがたいことがわかる。

以上より、この研究で使ったデータセットを説明するには曲がった主断層のみで充分であり、分岐断層は必要ではないということになる。注意を促したいのは、これは「分岐断層は存在しない」ということを意味するのではなく、このデータセットには、分岐断層の有無を判別するだけの分解能がない、ということである。ただ、震源域の南側で明瞭な垂直分布をなす余震群が存在することは事実である。この面に対応する破壊面が存在するか否か、また破壊面が存在するとしたら、その破壊は本震の一部として生じたのか、あるいは本震によって誘発された余震群がその面に沿って発生しているのか等の可能性は、残された重要な課題といってよいであろう。

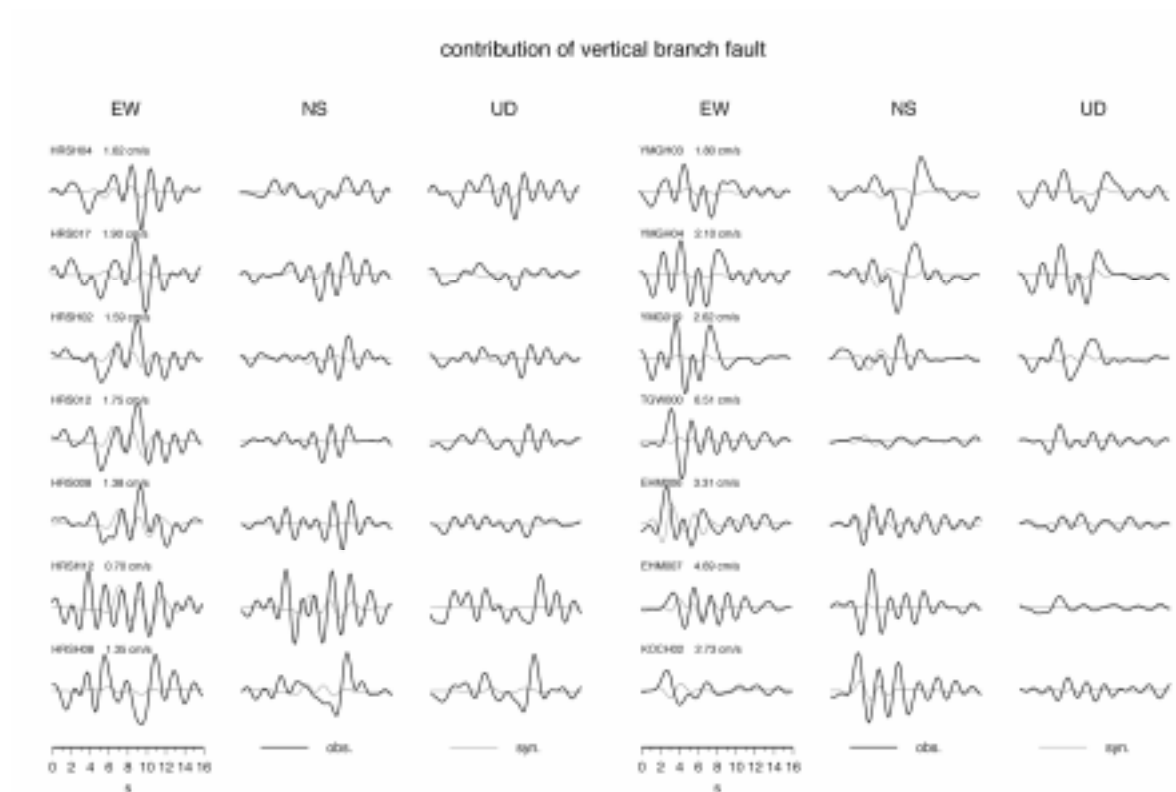


図 5. 合成波形のうち、鉛直な分岐断層の波形に対する寄与を灰色線で示す。
あわせて観測波形も実線で示す。

2) 震源過程のパラメータのゆらぎが地表の強震動に与える影響：2001年芸予地震を意識した kinematic な震源モデルを用いた数値シミュレーションによる検討

a) はじめに

沈み込んだスラブ内で発生する地震（スラブ内地震）は、一般に震源は深いとはいえ、規模の大きいものになれば被害地震となり得る。ここでは、スラブ内地震の破壊過程の不均質性が地表での強震動に与える影響を評価するために、フィリピン海スラブ内で発生した 2001 年芸予地震を意識した震源モデルを設定し、kinematic な数値シミュレーションを行った。

b) kinematic な数値シミュレーションのためのモデル設定

前年度の成果である、強震記録の波形インバージョンによって得られた 2001 年芸予地震の震源モデル¹⁾を意識しつつ、kinematic な数値シミュレーションのためのモデル設定を行う。観測点配置、震源断層面の設定、Green 関数計算のための地下構造モデルの設定は、前年度の成果によるものをそのまま使用する。震源断層面は 1 km × 1 km の subfault (subfault 数は 30 × 18 = 540 個) に分割されており、各 subfault に point source が置かれている(なお、前年度に行った波形インバージョンの際には、3 × 3 = 9 個の subfault をひとまとめにしてインバージョン用の subfault としている)。破壊過程に関するパラメータにゆらぎを与える場合、ゆらぎはこの 1 km × 1 km の

subfault ごとにと与えた

2001年芸予地震はスラブ内地震であるため、震源断層面は深さ40~56kmと深くに位置している。2001年芸予地震の破壊は北から南に向かって伝播したので、北側の観測点はbackward directivity側に、南側の観測点はforward directivity側に位置することになる。破壊伝播のdirectivity(指向性)が地表の強震動波形に与える影響をみることができるように、シミュレーション波形は、図6に示すように、backwardに位置するHRSH12観測点とforwardに位置するEHM006の波形を示すことにする。両観測点の震央距離はおよそ60kmであるから、震央距離と震源深さが同程度の観測点配置となる。

断層面上のすべり量、破壊時刻、rise time、rake angleといった、破壊過程を記述するパラメータについては、強震動波形に個々のパラメータが与える影響を明瞭に見るために、前年度得られた震源モデルを参照しつつ、簡略化した形でベースとなるモデルを設定した。その上で、個々のパラメータにランダムなゆらぎを与えて理論波形を計算し、破壊過程の不均質性がどのように強震波形に影響を与えるかを検討してゆく。以下の図では、理論波形はS波部分(S波到着の1秒前からの20秒間)を表示している。

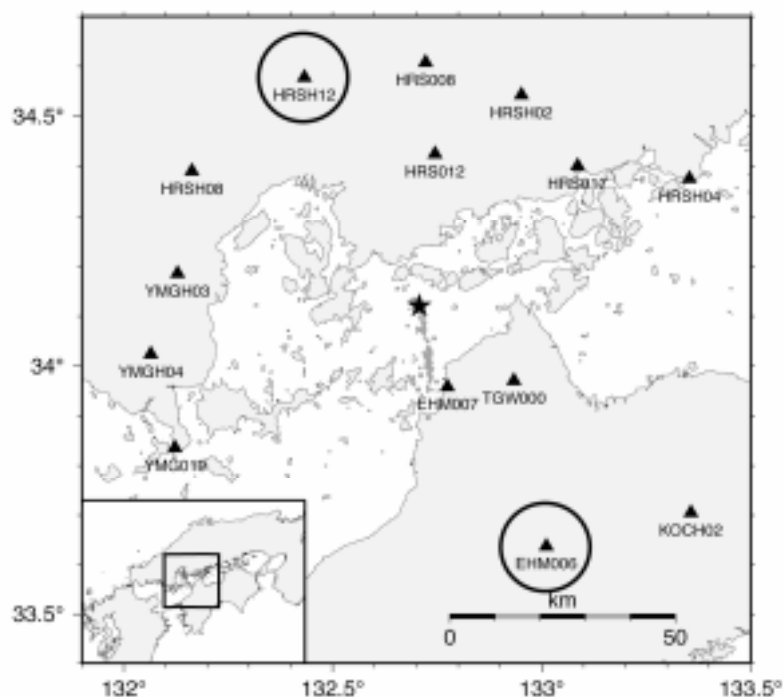


図6. 2001年芸予地震の波形インバージョンに使った観測点。 で囲んだ2点は、後述する数値シミュレーションの際、理論波形を図示する観測点。

c) ベースとなる震源モデル

図 7 にベースとなる震源モデルと、それに対応する HRS12 (backward 観測点) と EHM006 (forward 観測点) の理論速度波形を示す。北側の破壊開始点付近、南側の浅部 (海洋性地殻内)、南側の深部 (海洋性マントル内) に、すべり量の大きい矩形領域を置く。矩形内ですべり量は一様とする。すべり量はそれぞれ、0.8 m、1.7 m、1.6 m とする。それ以外の領域には、バックグラウンドのすべり量として、0.2 m のすべりを一様に与えている。破壊は破壊伝播速度 3.47 km/s で、破壊開始点から同心円上に伝播してゆくとする。rise time は断層面上で一様に 0.2 秒としている。

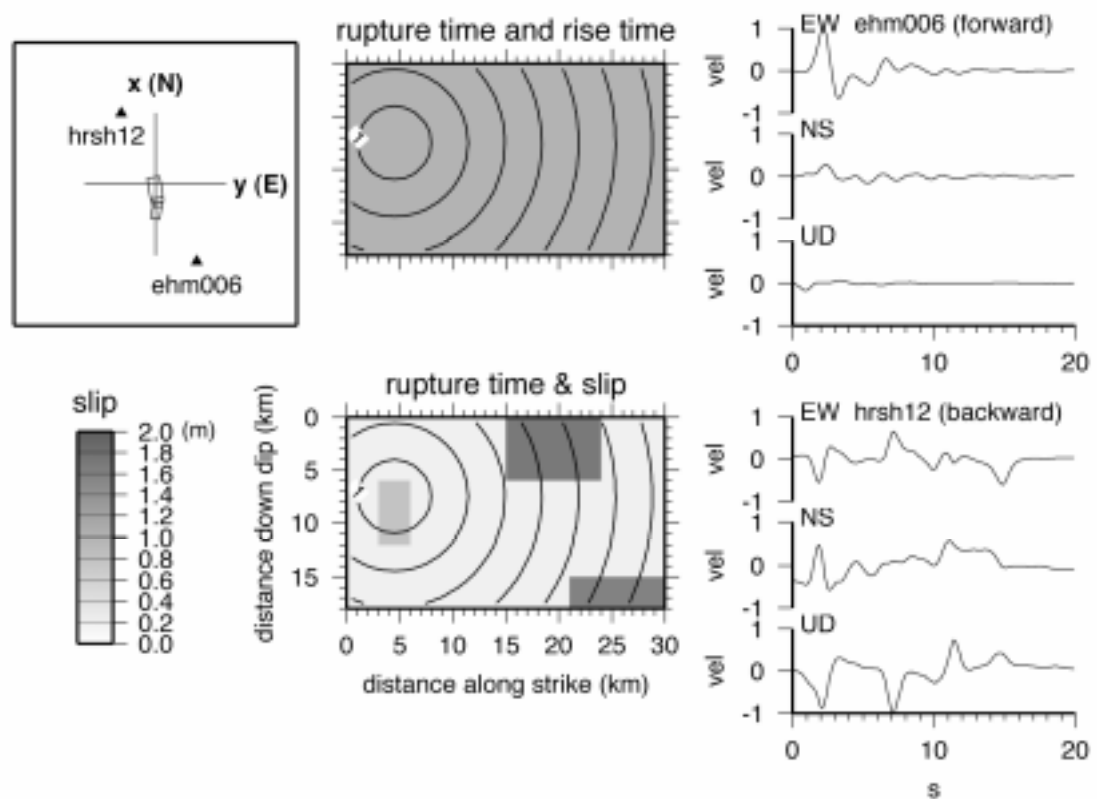


図 7. HRS12 (backward 観測点) と EHM006 (forward 観測点) の理論速度波形の比較。ベースモデルの場合。

d) 震源過程のパラメータのゆらぎが波形に与える影響

ベースモデルに対し、震源過程を記述するパラメータであるすべり量、破壊時刻、rise time、rake angle の各々にランダムなゆらぎを与え、それがシミュレーション波形に与える影響をみる。各パラメータは、

すべり量 : ベースモデルの値 \pm その 50 % 以内のランダムなゆらぎ

破壊時刻：ベースモデルの値 ± 0.2 秒以内のランダムなゆらぎ
 rise time：ベースモデルの値 ± 1 秒以内のランダムなゆらぎ
 rake angle：ベースモデルの値 $\pm 20^\circ$ 以内のランダムなゆらぎ
 としてゆらぎを与えた。

ここでは一例として、全てのパラメータに上記のゆらぎを与えた場合の結果を示す（図 8）。図を見ると明らかなように、backward に位置する HRSH12 では ripple に富む極めて複雑な波形となる。一方 forward 側に位置する EHM006 では、震源モデルがこれほどの不均質性を持つにもかかわらず、波形はベースモデルの場合とあまり変わらず単純なままである。これは、短い時間内で震源断層面の各所からの波が重なり合う forward 観測点では、波の重ね合わせによって周期の長い波は位相（波の山谷）の合いにより振幅が増幅されるのに対し、ランダムな重ね合わせに近い短周期の ripple の振幅の増幅は相対的に小さくなることによると理解される。

また、図には示していないが、上記の各パラメータのゆらぎの中では、すべり量や rake angle のゆらぎより、rise time や破壊時刻のゆらぎが、効果的に地震波形に ripple を載せ、波形を複雑にすることがわかった。

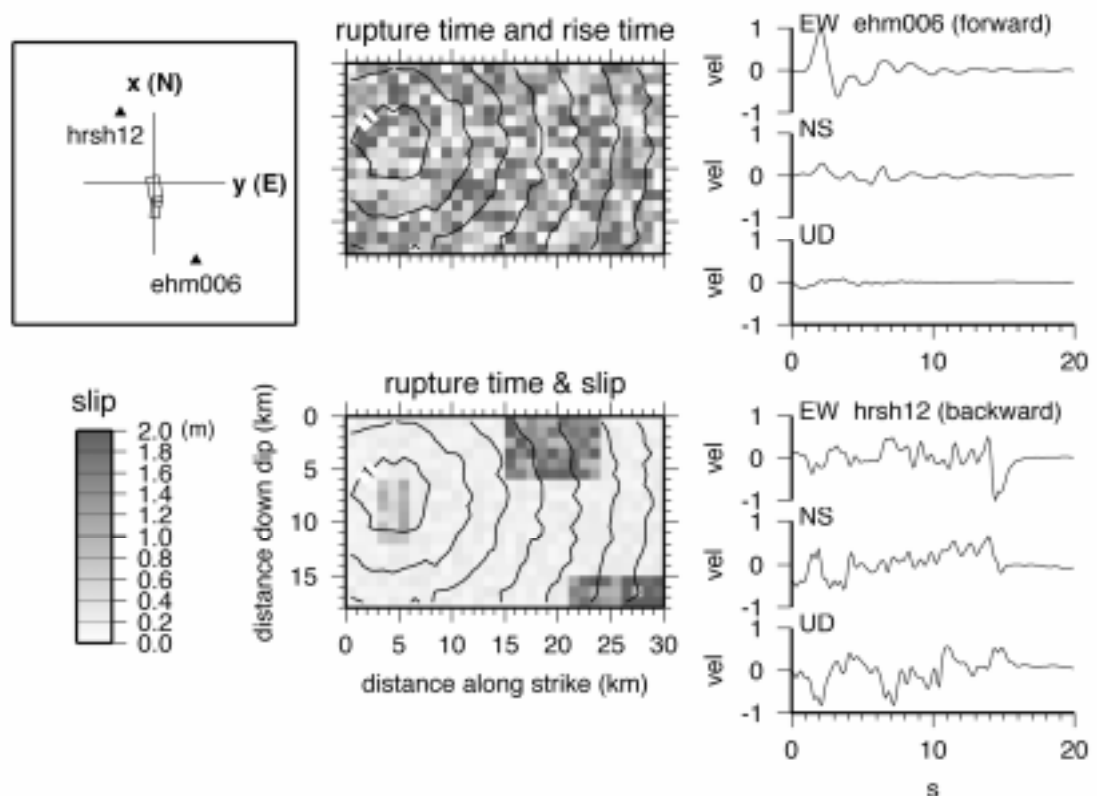


図 8. HRSH12 (backward 観測点) と EHM006 (forward 観測点) の理論速度波形の比較。すべり量、破壊時刻、rise time、rake angle の全てにランダムなゆらぎを与えた場合。

e) 結論と議論

スラブ内地震の場合、震源が深く地表観測点との距離が大きいため、内陸の浅部で発生する地震に比べ、破壊の directivity の影響が強震波形に与える影響は、それほど明瞭には現れないのではないかという予想も成り立つ。しかし、実際に数値シミュレーションを行った結果、今回検討したケースのように比較的深い震源断層の場合でも、破壊の directivity の影響は地表の強震動に明瞭に反映されることがわかった。その原因の1つとしては、地震波が震源を出る時の射出角の効果が考えられる。今回は地震波速度の遅い堆積層を含む現実的な速度構造モデルを使っているため、地震波線は下に凸に曲げられ、観測点に垂直近くに入ってくる波でも震源ではかなり水平に近い射出角を持つと考えられる。その場合、水平に近い射出角を持つ地震波線は、水平の破壊伝播の影響を大きく受けるため、震源が深くに位置していても、水平の破壊伝播の影響が地表の強震動に露わに反映されるのであろう。

3) 島弧の減衰構造が強震動の regional な空間分布に与える影響の研究：東北日本弧を対象として

a) はじめに

前田⁵⁾は、北海道において、火山フロントを境にした前弧側と背弧側マントルウェッジの Q 値の大きな相違が、スラブ内地震による強震動に大きな影響を与えることを指摘した。ここでは、北海道と同様に明瞭な火山フロントが見られる東北日本において、島弧下の地下構造、特に減衰構造がスラブ内地震による強震動に与える影響について、観測データに基づき検討を加える。データとしては、2003年5月26日に太平洋スラブ内で発生したスラブ内地震である宮城県沖地震 ($M_{JMA} = 7.1$, 震源深さ 72.03 km) の K-NET 強震記録を使用する。

b) 東北日本弧の減衰構造

Tsumura *et al.*⁶⁾ , 中村・植竹⁷⁾ は、地震波スペクトルのインバージョンにより、それぞれ東北日本弧の P 波と S 波の Q の 3 次元構造を求めている。それによると、下部地殻から上部マントルにいたる深さで、火山フロントに沿った帯状の低 Q 値領域 (地震波の減衰が大きい領域) が存在することを示した。また、火山と火山の間では、深さによって低 Q 値領域のギャップが存在することも両研究で共通している。

このような大スケールの顕著な不均質減衰構造は、東北日本の下に沈み込む太平洋スラブ内で発生するスラブ内地震による強震動に大きな影響を与えるであろうことは想像に難くない。その影響は、東北日本全体という regional な範囲を見渡して強震動の空間分布を見れば、より露わに見えるであろう。そのような regional な範囲での強震動の空間分布を見渡すことは、以前は不可能であったが、K-NET に代表される高密度強震観測網が整備されてからは、そのような見方が可能になった。この研究では、このような視点に基づき、2003年5月26日に発生した宮城県沖のスラブ内地震 ($M_{JMA} = 7.1$) の K-NET 強震データを解析する。

c) 2003年宮城県沖地震の強震動の面的な空間分布

図9に2003年5月26日の宮城県沖スラブ内地震の周波数別 (0.1~0.5 Hz, 0.5~2 Hz, 2~5 Hz, 5~10 Hz) の速度波形の最大振幅の分布を示す。図から明らか

うに、低周波では大振幅の領域が背弧側にも広がっているのに対し、高周波になるにつれ前弧側に限定されていく様子が見てとれる。即ち、地震動の高周波成分の振幅が火山フロントを越え背弧側に回ると急速に小さくなるのがわかる。これは、火山フロント下に地震波を大きく減衰させる低 Q 値領域が存在するとすれば説明できる現象であり、Tsumura *et al.*と中村・植竹の解析結果と符合する。これを逆に言えば、火山フロント下の低 Q 値領域の存在が、前弧側で振幅が大きく、弧に沿った楕円形状をなす、特異な高周波地震動の空間分布をもたらすことを示唆している。

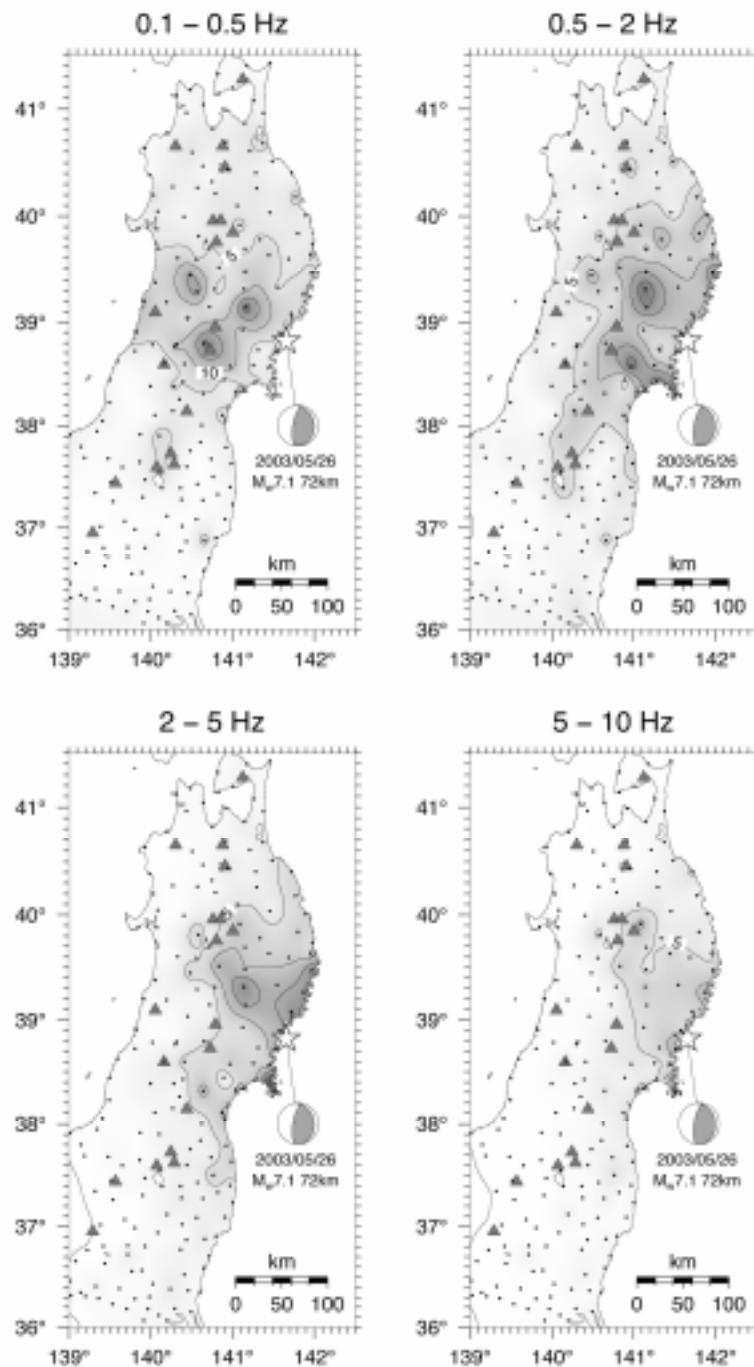


図 9. 2003 年 5 月 26 日の宮城県沖スラブ内地震の周波数別の速度波形最大振幅の空間分布。

d) 直線アレイで見る 2003 年宮城県沖地震の強震動波形

K-NET 観測点の分布の高密度性を生かし、観測点を選び出すことで、図 10 に示すような 4 本の測線 (line01 ~ 04) を作成した。この 4 本の測線は火山フロントを意識して選ばれている。line01 と line04 は火山フロントを横切ることなく、前弧側で島弧に沿って震央から北と南に伸びる測線である。それに対し、line02 と line03 は、いずれも震央から火山フロントを横切り背弧側に伸びる測線である。ただし、line02 は火山と火山の間 (岩手山と栗駒山の間) を通り抜けるようにとっているが、line03 は火山 (栗駒山) のあるところで火山フロントを横切るようにとっている。火山と火山の間に低 Q 値領域のギャップがあれば、そのギャップを通る測線については、たとえ背弧側の観測点であっても、高周波地震波があまり減衰せずに伝わると予想されるが、line02 はそのような意図で選んだ測線である。

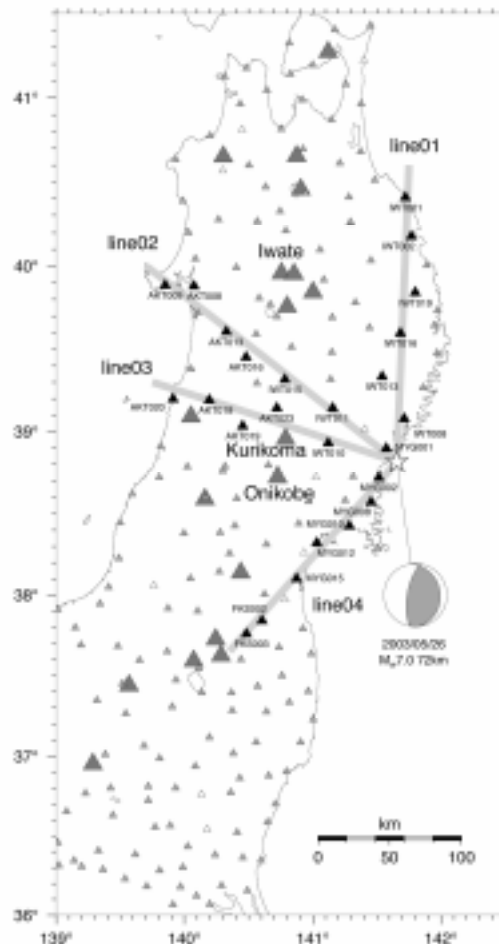


図 10. 震央距離による波形プロファイルを見るために選んだ 4 本の直線アレイ (line01 ~ 04)。

図 11 に line01 ~ 04 に沿った加速度波形の震央距離プロファイルを示す。これらの図では各観測点の波形の振幅を各観測点の最大振幅で normalize することはしていないので、振幅の絶対値こそ示していないものの、各観測点間での振幅の違いをそのまま見ることができる。加速度波形を一見して明らかなのは、前弧側を通る line01 と line03 に比べ、火山フロントを横切る line02 と line03 では、火山フロントの辺りを境に背弧側では振幅が劇的に小さくなっていることである。これは、火山フロント下の低 Q 値領域により高周波成分の振幅が著しく減衰したことを示唆している。line02 は岩手山と栗駒山の間を通るように選ばれた測線であるが、栗駒山を通る line03 と同様に、背弧側では高周波成分が減衰している。つまり、この地震の line03 のデータで見ると、火山間の低 Q 値領域のギャップにより背弧側でも高周波成分が減衰しないといった現象は、少なくとも明瞭には見られなかった。

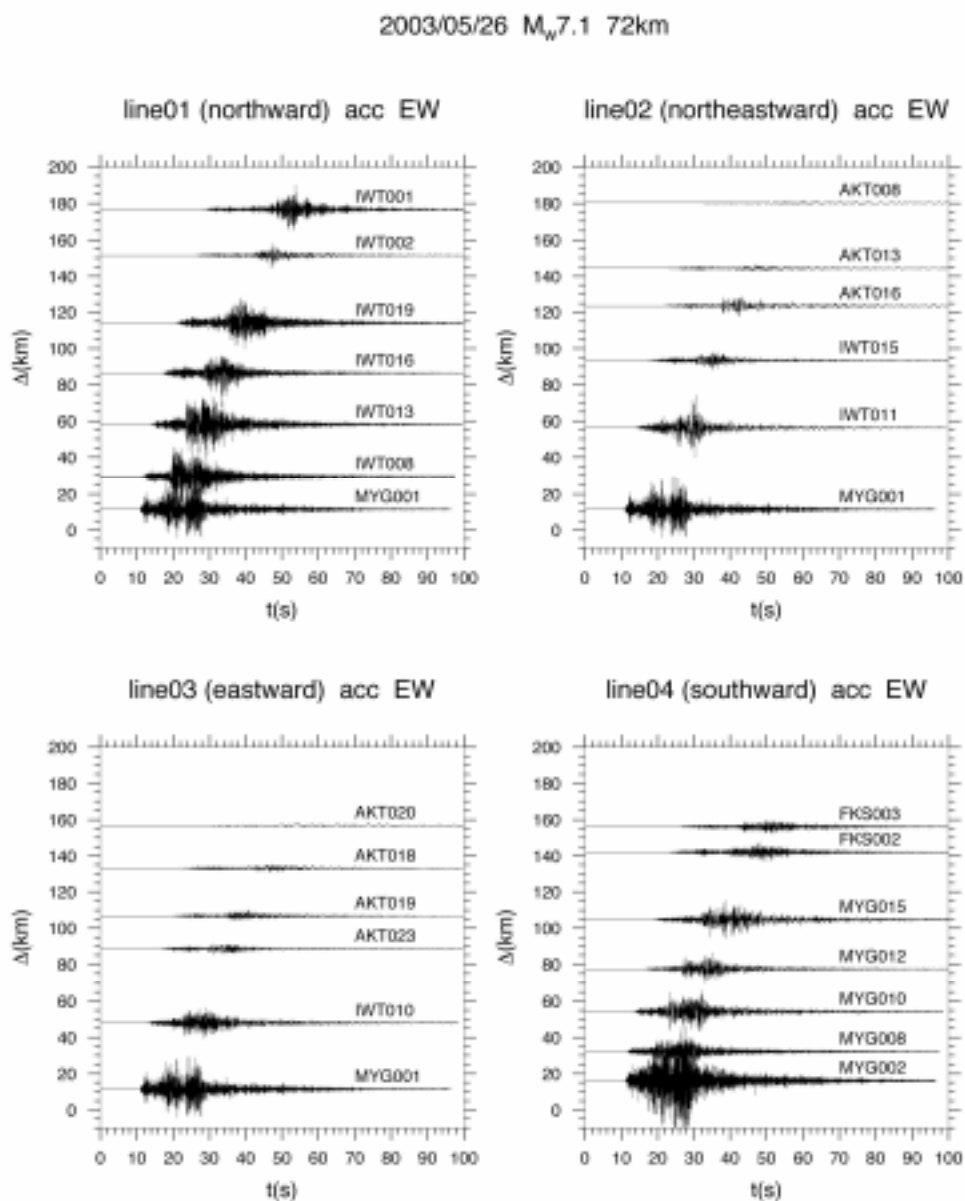


図 11. 2003 年 5 月 26 日の宮城県沖スラブ内地震の震央距離による加速度波形プロファイル (line01 ~ 04)。EW 成分を示す。

e) 2003 年宮城県沖地震の強震動データと距離減衰式との比較

司・翠川⁸⁾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。ここでは、司・翠川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、2003年5月26日の宮城県沖スラブ内地震の際に実際に観測された最大加速度との比較を行う。なお、司・翠川では、断層最短距離と等価震源距離の2種類の震源距離に対する式を提案しているが、ここでは等価震源距離を使用する。等価震源の位置は、青井他⁹⁾の断層面上のすべり分布を参照して(141.631° , 38.868° , 77.9 km)とした。また、距離減衰式に代入する M_w の値は、青井他による $M_w = 7.1$ を使っている。

図12に距離減衰式による最大加速度の予測値（実線）と観測データ（前弧側観測点：白丸、背弧側観測点：黒丸）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。このような系統的かつ明瞭な差は、火山フロントを境に背弧側で高周波地震動が減衰していることを示している。この結果は、火山フロント下の低 Q 値領域が強震動の regional な空間分布に系統的影響を与えていることを端的に表していると考えられる。

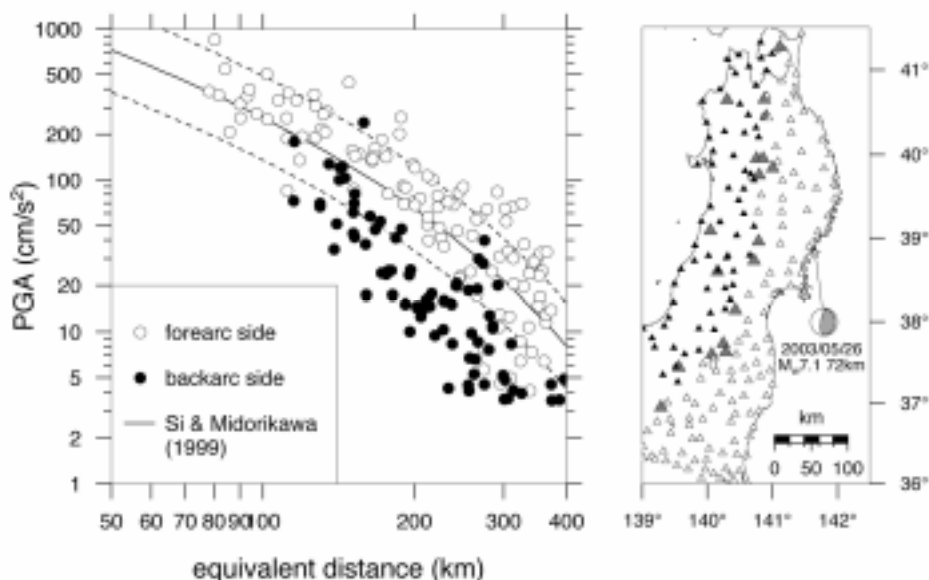


図 12. 司・翠川の距離減衰式による最大加速度の予測値（実線）と 2003 年 5 月 26 日の宮城県沖スラブ内地震の観測データ（前弧側観測点：白丸、背弧側観測点：黒丸）の比較。点線は予測式の標準偏差を表す。横軸は等価震源距離。

f) まとめ

2003年5月26日の宮城県沖スラブ内地震による強震動データについて、種々の解析を施した結果、いずれの解析結果も、火山フロントを境に背弧側で高周波地震動が減衰している傾向が系統的に見られることを示した。このことから、東北日本弧の火山フロント下に存在する低Q値領域が、このスラブ内地震による強震動の regional な空間分布に強く影響を与えたと考えられる。

4) 謝辞

解析には防災科学技術研究所の K-NET、KiK-net の強震記録、F-net の強震記録とメカニズム解、気象庁一元化震源の震源データを使わせていただきました。記して感謝いたします。

(d) 結論ならびに今後の課題

フィリピン海スラブ内で発生したスラブ内地震である 2001 年芸予地震 ($M_{JMA} = 6.7$) の震源モデルの再検討を行った。この地震の震源域南部には、ほぼ鉛直かつシャープな平面状の分布を示す余震群が存在するが、この鉛直面は主断層面とは異なる。この鉛直面が分岐断層として本震時に活動した可能性を検討するため、鉛直な分岐断層を付け加えた震源モデルを仮定し、強震記録の波形インバージョンを行った。その結果、観測波形と理論波形の合いは良好であったが、分岐断層を仮定しない震源モデル(前年度提出したモデル)と波形の合いは全く同程度であり、分岐断層を追加することによって、波形の合いが有意に改善されることはなかった。即ち、この研究で使ったデータセットでは、分岐断層の存在の可否は残念ながら判断できなかった。

深い震源を持つスラブ内地震の破壊過程の不均質性(各パラメータのゆらぎ)が地表での強震動に与える影響を評価するために、2001年芸予地震を意識した震源モデルを設定し、kinematic な数値シミュレーションを行った。破壊の不均質性は forward directivity 側に位置する観測点の地震波形には明瞭には反映されず、backward 観測点の地震波形に露わに反映されることが明らかになった。また、ここで比較検討したケースでは、すべり量や rake angle のゆらぎより、rise time や破壊時刻のゆらぎが、効果的に地震波形に ripple を載せ、波形を複雑にすることがわかった。

東北日本弧では、下部地殻から上部マントルに至る深さにおいて、火山フロントに沿って帯状の低Q値領域が存在することが指摘されている。このような島弧下の減衰構造がスラブ内地震による強震動に与える影響を見るために、2003年5月26日の宮城県沖スラブ内地震による強震動データを解析した。強震動の面的な空間分布の検討、直線状アレイでの波形の検討、距離減衰式との比較を行った結果、いずれの解析結果も、火山フロントを境に背弧側で高周波地震動が減衰している傾向が系統的に見られることを示した。このことから、火山フロント下に存在する低Q値領域が、2003年5月26日の宮城県沖スラブ内地震による強震動の regional な空間分布に強く影響を与えたと考えられる。

当初予定していた 2001 年芸予地震の 1 Hz 以上の高周波数帯域での震源モデルの構築に代わって、上述の分岐断層の可能性の検討を行った。kinematic な数値シミュレーションによる震源過程の不均質性が強震動に与える影響の評価は予定通りに達成することができ

た。計画に挙げていた dynamic な数値シミュレーションによる検討はできなかったが、代わりに島弧の減衰構造が regional な強震動分布に与える影響の大きさを、観測データの解析から示すことができた。

このように今年度は計画していた震源モデルに関する研究のみならず、波動の伝播過程についての研究も行うことができたが、残念ながら前者は西南日本の芸予地震、後者は東北日本弧を対象としたもので、地域が異なるものであった。より理想的には、同一地域を対象として、震源と伝播経路をひっくるめて詳しく検討することが望ましく、そのような研究事例を蓄積していくことが今後の課題の1つである。また、dynamic な数値シミュレーションによる、破壊過程と強震動の関連の研究が課題として残されている。

(e) 引用文献

- 1) Kakehi, Y.: Analysis of the 2001 Geiyo, Japan, earthquake using high-density strong ground motion data: Detailed rupture process of a slab earthquake in a medium with a large velocity contrast, *J. Geophys. Res.*, 109, B08306, doi:10.1029/2004JB002980, 2004.
- 2) Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-NET), *Seism. Res. Lett.* vol. 69, pp. 309-332, 1998.
- 3) 青井真, 小原一成, 堀貞喜, 笠原敬司, 岡田義光: 基盤強震観測網 (KiK-net), *日本地震学会ニュースレター*, vol. 12, pp.31-34, 2000.
- 4) Fukuyama, E., Ishida, M., Hori, S., Sekiguchi, S., and Watada, S.: Broadband seismic observation conducted under the FREESIA project, *Rep. Nat'l. Res. Inst. Earth Sci. Disas. Prev.*, vol. 57, pp. 23-31, 1996.
- 5) 前田宜浩: サブダクションゾーンにおける地震波減衰特性と震源特性に関する研究, 北海道大学大学院理学研究科博士論文, pp.1-135, 2003.
- 6) Tsumura, N., Matsumoto, S., Horiuchi, S., and Hasegawa, A.: Three-dimensional attenuation structure beneath the northeastern Japan arc estimated from spectra of small earthquakes, *Tectonophysics*, 319, pp.241-260, 2000.
- 7) 中村亮一, 植竹富一: 強震記録データによる東北地方の三次元減衰構造, *地震*, 56, pp.447-455, 2004.
- 8) 司宏俊, 翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, *日本建築学会構造系論文集*, 523, pp.63-70, 1999.
- 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沖の地震 (2003/05/26, 18:24) の震源インバージョン, <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/news/miyagi/>, 2003a.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
寛 楽磨	震源過程が地震波形に与える影響 (2)	地球惑星科学関連学会合同大会	平成 16 年 5 月 10 日
西條裕介・ 寛 楽磨	スラブ内地震による強震動と島弧の構造: 2003 年宮城県沖地震	日本地震学会秋季大会	平成 16 年 10 月 10 日

	の強震データの解析		
Yasumaro Takehi	Analysis of the 2001 Geiyo, Japan, earthquake using high-density strong ground motion data: Detailed rupture process of a slab earthquake in a medium with a large velocity contrast	Journal of Geophysical Research	平成 16 年 8 月
Kimura Takeshi and Yasumaro Takehi	Source process of the 2001 Hyogo-ken Hokubu, Japan, earthquake (Mw 5.2) and comparison between the aftershock activity and the static stress change	Bulletin of Seismological Society of America	平成 17 年 3 月

(g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウェア開発

名称	機能
応答スペクトル入力による建物被害個別推定システム	地震力を応答スペクトルで入力し、建物の階高から固有周期を求め、建物の被災程度を個別評価する。

3) 仕様・標準等の策定

なし

(2-4)サブダクションゾーンにおける地震の S 波震源スペクトル

笹谷努（北海道大学大学院理学研究科）

sasatani@ares.sci.hokudai.ac.jp

前田宜浩（北海道大学大学院理学研究科）

tmaeda@ares.sci.hokudai.ac.jp

(a) 業務の要約

本研究では、サブダクションゾーンである北海道東部地域を対象に、まず、スペクトルインバージョン法によって S 波の減衰特性 (Q_s 値) 及びサイト特性を評価した。次に、この結果を用いて、76 個の地震に対して S 波加速度震源スペクトルを評価した。その結果、震源スペクトルの短周期レベル (2~8Hz のスペクトル振幅の平均値) と地震モーメントが自己相似な関係を有することがわかった。ただし、スラブ内地震の短周期レベルは、内陸地殻内地震及びプレート間地震のそれよりも約 4 倍大きい。最後に、スラブ内地震について、短周期レベルとアスペリティモデルの微視的断層パラメータとの関係について検討し、両者が理論式を満足することを確認した。

(b) 業務の実施方法

観測された地震動は、震源特性、伝播経路特性及びサイト特性の影響を含んでいる。S 波震源スペクトルを推定するために、まず、スペクトルインバージョン法によって、伝播経路特性及びサイト特性を評価する。続いて、この結果を基にして、多くの地震に対して S 波加速度震源スペクトルを評価する。そして、プレート間地震とスラブ内地震に対してその短周期レベルと地震モーメントの関係 (スケーリング則) を調べる。最後に、スラブ内地震の短周期レベルと微視的断層パラメータとの関係について検討する。

(c) 業務の成果

サブダクションゾーンである北海道東部地域を研究対象領域とする。この領域で発生した 11 地震 (深さ 90~150km, M_j 3.9~6.4) による 17 観測点 (図 1) のデータにスペクトルインバージョン法 (Iwata and Irikura, 1988¹⁾) を適用し、経路平均の S 波の減衰特性 (Q_s 特性) と各地のサイト特性を評価した。得られた Q_s 値を図 2 に示す。地震の震源と観測点の位置 (図 1) から考えて、これは火山フロント前弧側のマントルウエッジの減衰特性を主に表していると考えられる。1~20Hz の周波数帯でほぼ直線的に変化する値が得られている。これをべき乗則の周波数依存性でモデル化すると、 $Q_s(f) = 62.5f^{1.16}$ となる。

この結果は、ほぼ同一地域を対象とした山本・他 (1995²⁾; 図 2 の実線) や Morikawa and Sasatani (2000³⁾; 図 2 の破線) による結果とほぼ同じ値である。また、得られた各地のサイト特性を図 3 に示す。北海道東部の地質構造を反映して、さまざまな増幅特性が得られている。この中で、HKD072 観測点の増幅特性は、当地の PS 検層結果による理論的増幅特性と良い一致を示している (前田・笹谷, 2001⁴⁾)。これは、インバージョン結果の妥当

性を示す一つの根拠である。

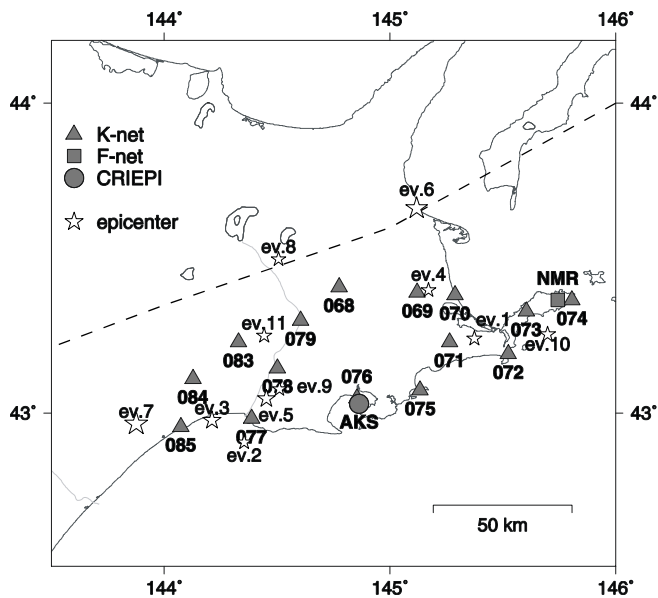


図 1. 解析に用いられた観測点 (, ,) と地震の震央 (). 波線は火山フロントを示す。

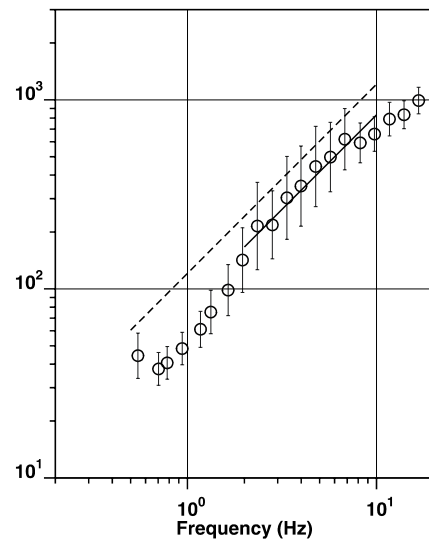


図 2. 推定された Q_s 値 () とその標準偏差。波線と実線は他の研究者による結果を示す (本文参)。

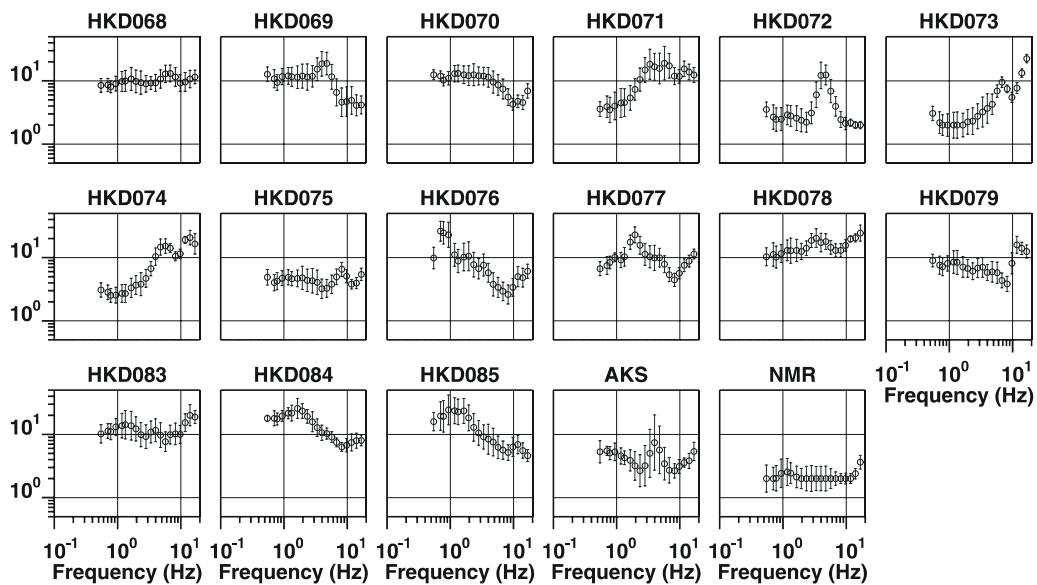


図 3. スペクトルインバージョン法から推定された各地のサイト増幅特性。

また、F-net の NMR 観測点の増幅特性は、全周波数帯でほぼ 2 であり、これは、得られた各地のサイト特性がこの NMR を基準とした結果になっていることを意味している。

震源スペクトル $M(f)$ は、以下の式を用いて評価した。

$$M(f) = \frac{4\pi\rho_s\beta_s^3}{R_{\theta\phi}} \frac{R^\gamma O(f)}{G(f)} \exp\left(\frac{\pi f T_s}{Q_s(f)}\right) \sqrt{\frac{\rho_g\beta_g}{\rho_s\beta_s}} \quad (1)$$

ここで、 $O(f)$ は観測スペクトル、 $G(f)$ はサイト特性、 R は震源距離、 T_s は S 波走時、 $Q_s(f)$ は S 波の Q 値である。また、 ρ は密度、 β は S 波速度で、下付き添字の s と g はそれぞれ震源と観測点近傍での値であることを表している。右辺の最後の項は、震源と観測点での音響インピーダンスの違いを補正するためである。スペクトルインバージョン法で推定されたサイト特性は、上述のように F-net の NMR を基準としたものと考えて良い。ただし、この観測点における S 波速度の情報がないため、ここでは、NMR と同じ基盤上にあると考えられる KiK-net の KSRH10 における地中の S 波速度と密度を用い、 $\beta_g = 1.7 \text{ km/s}$ 、 $\rho_g = 2.3 \text{ g/cm}^3$ とした。また、 β_s と ρ_s は深さに応じて適切な値を与えた。最後に、S 波の放射特性 $R_{\theta\phi}$ は 0.63 (Boore and Boatwright, 1984⁵⁾)、 γ は 1 とした。

(1) 式に基づき、スペクトルインバージョン法によってサイト特性が推定されている観測点 (図 1) における S 波スペクトルに対して伝播経路特性とサイト特性の補正を行い、加速度震源スペクトルを推定した。対象とした地震は、1997 年以降に北海道東部で発生した 76 地震である (ただし、1993 年釧路沖地震を含む)。震源メカニズムと震源の深さから判断して、これらの地震をスラブ内地震 (30 地震) とプレート間地震 (46 地震) に分類した。

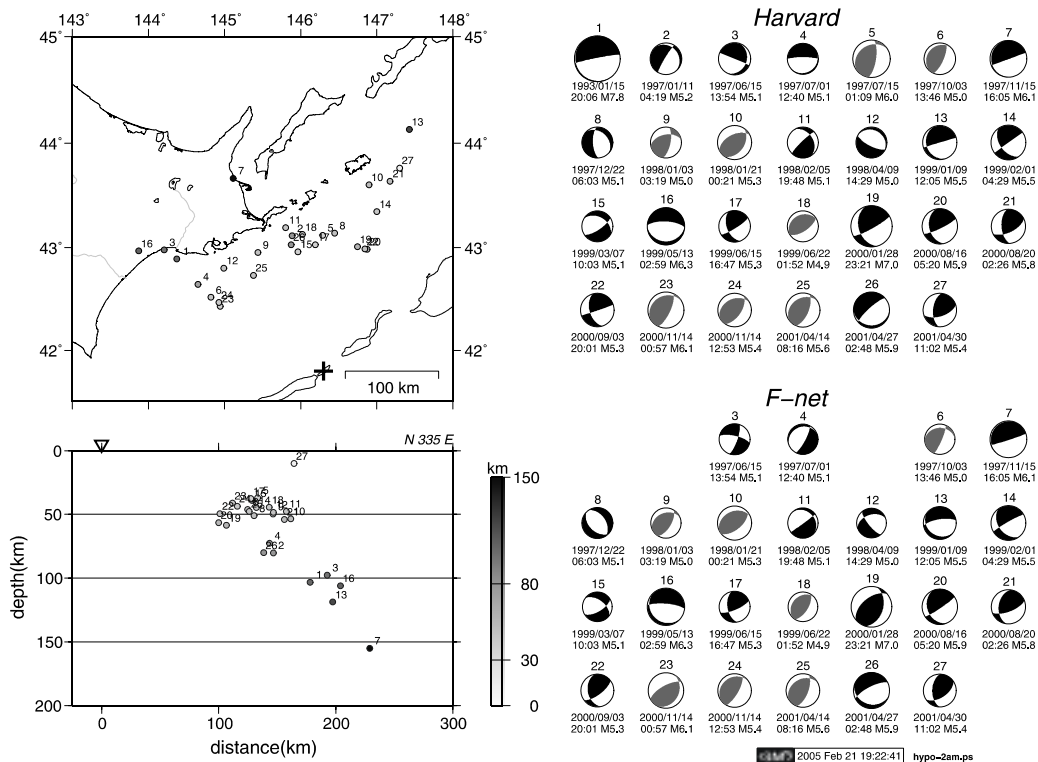


図 4. 解析に用いた地震とメカニズム解の例。メカニズム解は Harvard と F-net よるものが、また、スラブ内地震のメカニズム解は濃い色で示されている。

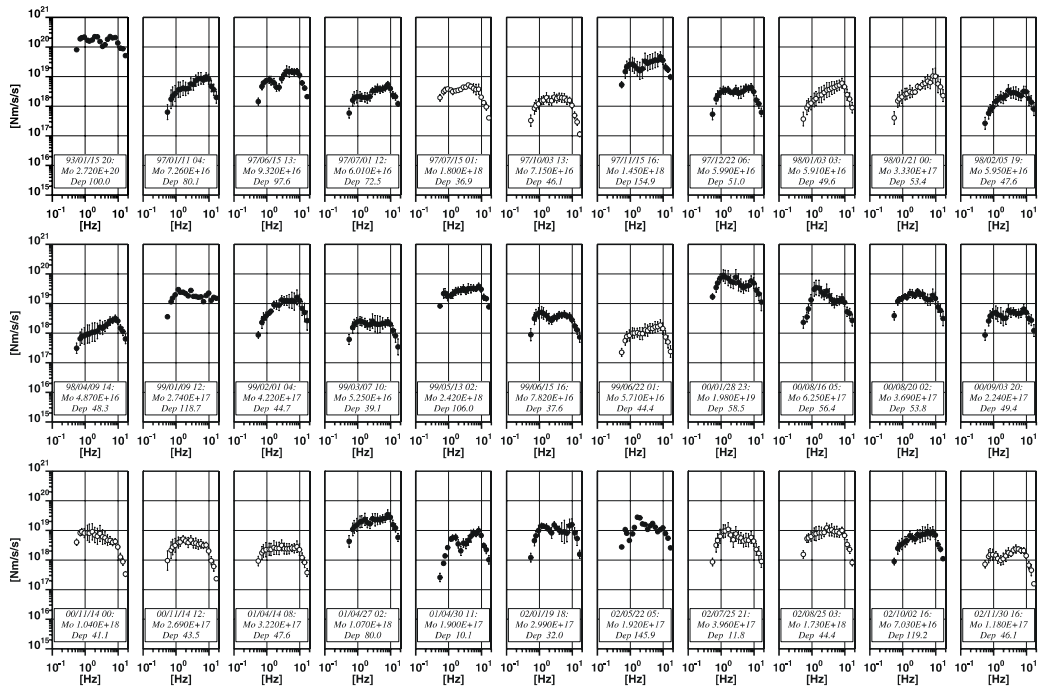


図 5 . 推定された S 波加速度震源スペクトルの例。黒丸：スラブ内地震，白丸：プレート間地震。縦棒は推定値の標準偏差。

図 4 に解析に用いた地震の一部を、図 5 に推定された S 波加速度震源スペクトルの例を示す。震源スペクトルは、推定された Q_s 値 (図 2) の周波数範囲に関係して、0.5~20Hz の限られた周波数範囲で求められている。よって、これからスペクトル形状全体を評価することやコーナー周波数などの震源パラメータを直接推定することは困難である。しかし、震源スペクトルのほとんどは、1~10Hz の周波数帯でほぼ平坦な形状を有している。そこで、ここでは、震源スペクトルの高周波数帯 (2~8Hz) の平均振幅を短周期レベル (A_0) と定義し、この特性について検討する。

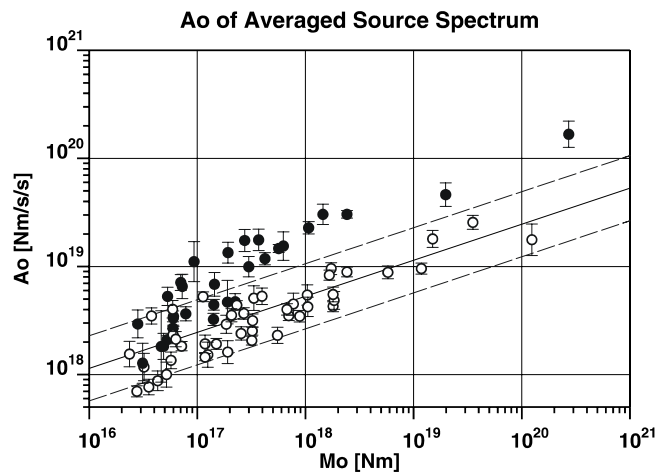


図 6 . 加速度震源スペクトルの短周期レベル (A_0) と地震モーメント (M_0) の関係。黒丸：スラブ内地震，白丸：プレート間地震。縦棒は標準偏差。実線は内陸地殻内地震に対する A_0 と M_0 の関係 ($A_0(\text{dyne-cm/s}^2) = 2.46 \times 10^{17} \times M_0^{1/3}(\text{dyne-cm})$) である。

図 6 に短周期レベル (A_0) と地震モーメント (M_0) の関係を示す。図中の実線は壇・他 (2001)⁶⁾ による内陸地殻内地震に対する A_0 と M_0 の関係である。プレート間地震の A_0 は内陸地殻内地震とほぼ同じスケール則を示している。一方、スラブ内地震の A_0 はそれらよりも約 4 倍大きなレベルで同様なスケール則を示している (ただし、 $M_0=2 \times 10^{17}$ Nm 以下では、この傾向からはずれている)。同様な結果は、池田・他 (2002)⁷⁾ によっても得られている。

通常、図 6 に示されたスケール則は、震源スペクトルを ω^{-2} モデルと仮定し、Brune (1970、1971)^{8),9)} の断層モデルに基づく次式を用いて解釈されている (例えば、池田・他、2002⁷⁾)。

$$A_0 = (2.34\beta)^2 M_0^{1/3} \Delta\sigma^{2/3} \left(\frac{16}{7}\right)^{2/3} \quad (2)$$

この式によると、 A_0 は M_0 の $1/3$ 乗に比例し、そのレベルは M_0 と応力降下量 () によって決まる。よって、図 6 から、スラブ内地震の応力降下量は、他のカテゴリーの地震に比べて大きいと結論される。一方、Morikawa and Sasatani (2003)¹⁰⁾ は、スラブ内地震である 1993 年釧路沖地震による S 波加速度スペクトルについて広い周波数範囲で検討し、そのスペクトルは単純な ω^{-2} モデルでは表されないことを示した。特に、観測されたスペクトルは、1 Hz よりも高周波数領域では ω^{-2} モデルによる予測値よりも約 10 倍も大きなレベルとなっている。この事実は、短周期レベル A_0 を単純に (2) 式で解釈することが不適切であることを示している。ここでは、アスペリティ震源モデルを基にして、短周期レベルの物理的な意味について検討する。

アスペリティモデルにおける短周期レベル A_0 は、以下に示すように微視的断層パラメータのみによって表される (入倉・他、2003¹¹⁾; 壇・他、2002¹²⁾)。

$$A_0 = 4\pi\beta^2 \sqrt{\sum (r_n \Delta\sigma_n)^2} \quad (3)$$

ここで、 r_n と $\Delta\sigma_n$ は各アスペリティの半径と応力降下量、 β は S 波速度を表す。上の式では、簡単のために、アスペリティを円形、背景領域での応力降下量をゼロと仮定している。笹谷・他 (2005)¹³⁾ は、経験的グリーン関数法 (EGF 法) によって震源モデルが得られている 11 個のスラブ内地震に対して、上記関係式が成り立つかどうかについて検討した。図 7 は、観測された A_0 と EGF 法によって得られた微視的断層パラメータを上式に代入して予測された値との比較を示したものである。一つの地震を除いて両者はファクター 2 の範囲で同じ値を示していることが分かる。 A_0 の観測値と予測値は、それぞれ独立に評価されたものであり、両者が良い一致を示すことは、スラブ内地震がアスペリティモデルで表されることを明確に示している。つまり、スラブ内地震の S 波加速度震源スペクトルの短周期レベルは、アスペリティモデルの微視的断層パラメータ (アスペリティの面積と応力降下量) によって決められることを意味している。

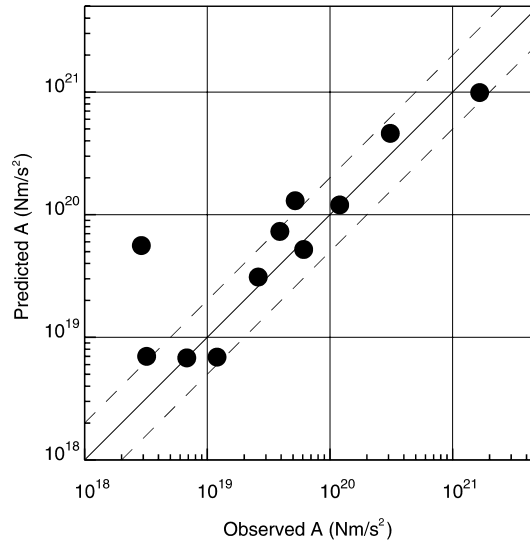


図 7 . 観測された短周期レベルと (3) 式から予測されたそれとの比較。データは 11 個の
スラブ内地震から得られたものである (笹谷・他、2005¹³⁾)。

(d) 結論ならびに今後の課題

本研究では、サブダクションゾーンである北海道東部地域を対象に、まず、スペクトルインバージョン法によって S 波の減衰特性 (Q_s 値) 及びサイト特性を評価した。次に、この結果を用いて、76 個の地震に対して S 波加速度震源スペクトルを評価した。その結果、震源スペクトルの短周期レベル (2~8Hz のスペクトル振幅の平均値) と地震モーメントが自己相似な関係を有することがわかった。ただし、スラブ内地震の短周期レベルは、内陸地殻内地震及びプレート間地震のそれよりも約 4 倍大きい。最後に、スラブ内地震について、短周期レベルとアスペリティモデルの微視的断層パラメータとの関係について検討し、両者が理論式を満足することを確認した。

今後の課題を以下に挙げる。

- ・ より広い周波数範囲における震源スペクトルを評価し、その形状が ω^{-2} モデルで表されるかどうかをチェックする必要がある。
- ・ S 波加速度震源スペクトルの短周期レベルとアスペリティモデルの微視的断層パラメータとの関係 (図 7) をより多くの地震に対してチェックする必要がある。特に、プレート間地震に対してその関係が成立するかどうかの検証が必要である。そのためには、EGF 法によってより多くの地震の震源モデルを構築することが必要である。

(e) 引用文献

- 1) Iwata, T. and Irikura, K.: Source parameters of the 1983 Japan Sea earthquake sequence, J. Phys. Earth, 36, pp.155-184, 1988.
- 2) 山本みどり, 岩田知孝, 入倉孝次郎: 釧路地方気象台における強震動と弱震動に対するサイト特性評価, 地震 2, 48, pp.341-351, 1995.
- 3) Morikawa, N. and Sasatani, T.: The 1994 Hokkaido Toho-oki earthquake sequence: the complex activity of intra-slab and plate-boundary earthquakes, Phys. Earth Planet. Inter., 121, pp.39-58, 2000.
- 4) 前田宜浩, 笹谷努: 上部マントルの異常構造が強震動に与える影響, 北海道大学地球物理学研究報告, No. 64, pp.91-113, 2001.
- 5) Boore, D. M. and Boatwright, J. : Average body-wave radiation coefficient , Bull. Seism. Soc. Am., 74, pp.1615-1621, 1984.
- 6) 壇一男, 渡辺基史, 佐藤俊明, 石井透: 断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 545, pp.51-62, 2001.
- 7) 池田孝, 武村雅之, 加藤研一: 強震動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, pp.67-73, 2002.
- 8) Brune, J. N.: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes , J. Geophys. Res., 75, pp.4997-5009, 1970.
- 9) Brune, J. N.: Correction. J. Geophys. Res., 76, 5002, 1971.
- 10) Morikawa, N. and Sasatani, T.: Source spectral characteristics of two large intra-slab earthquakes along the southern Kurile-Hokkaido arc, Phys. Earth Planet. Interiors., 137, pp.67-80, 2003.
- 11) 入倉孝次郎, 三宅弘恵, 岩田知孝, 釜江克宏, 川辺秀憲, Luis Angel Dalguer, : 強震動予測地図における強震動評価について - 内陸地震と海溝型地震に対する強震動予測レシピとその問題点 - , 地震動予測地図ワークショップ - 地震調査研究と地震防災工学・社会科学との連携 - , 予稿集, 35-52, 2003.
- 12) 壇一男, 石井透, 渡辺基史, 佐藤俊明: 巨視的震源情報と不均質震源特性との関係の分析, 地震災害軽減のための強震動予測マスターモデルに関する研究, 第 1 回シンポジウム論文集, 29-36, 2002.
- 13) 笹谷努, 前田宜浩, 森川信之: スラブ内自身への適用性検証, 地震災害軽減のための強震動予測マスターモデルに関する研究, 第 3 回シンポジウム論文集, 119-124, 2005.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Maeda, T. and Sasatani T.	Upper mantle attenuation structure beneath the eastern Hokkaido, Japan and its effects on strong ground motions	Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM, 914,	August 1-6, 2004

(g) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 17 年度業務計画案

これまでに分析してきた、地震スペクトルモデルの構築、特に短周期域の特徴を地震のタイプ（地殻内地震、プレート境界地震、スラブ内地震）などによって区別を行い、それぞれの短周期レベルの特徴を抽出する。それによって、おのこのタイプの地震に対して、適切な広帯域の震源モデルの構築方法を提案する基礎データを集約する。

このため、最近起きている様々なタイプの地震の強震記録の分析をさらにすすめる必要がある。また、それに従って、強震動予測に用いる際の震源モデルパラメータの高度化に直接結びつけることができる。