2004 年新潟県中越地震 (M_w 6.6): スペクトル比法を用いた余震系列の解析

広島大学大学院理学研究科* 田 島 礼 子・田 島 文 子

The 2004 Mid Niigata Prefecture Earthquake: Characterization of the Aftershock Area Using a Spectral Ratio Analysis

Reiko TAJIMA and Fumiko TAJIMA

Graduate School of Science, Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama,
Higashi-Hiroshima 739-8526, Japan

(Received June 29, 2005; Accepted February 28, 2006)

The Mid Niigata Prefecture Earthquake (October 23, 2004, 17 : 56 (JST), M_w 6.6) that was preceded by a couple of foreshocks, produced a number of aftershocks including six events with a moment magnitude (M_w) of 5.5 or greater. We evaluated the relationship between seismic moment (M_0) and corner frequency (f_c), and identified spectral characteristics in the aftershock area. A spectral ratio method was employed to determine f_c of 57 smaller events ($3.5 \leq M_w \leq 4.0$). These events with similar focal mechanisms are located within 20 km from the mainshock epicenter, and were recorded at four common stations. In the spectral ratio method, the mainshock spectrum is divided by the spectrum of a foreshock or an aftershock. By taking the averages of the spectral ratios calculated at four common stations, propagation path effects can be reduced. The obtained f_c - M_0 relation shows substantial scatter relative to a straight line of $M_0 \propto f_c^{-3}$. The scatter in the narrow range of M_w suggests the variation of radiated seismic energy E_R of small earthquakes, and deviation from an ω^{-2} model based on the assumption of constant rupture velocity. The moment-rate spectra become more complex in the vicinity of f_c than those expected from a typical ω^{-2} model. We also classified the aftershock area into five zones based on the estimated faults by a previous study, and investigated spectral ratio characteristics in the frequency band from 1 to 7 Hz. In particular, the slopes of spectral ratios vary in the high frequency band, which may reflect the difference in relative quantity of the radiated energy among the zones. Our results suggest clues that could be useful in evaluating the seismic energy release in a complex manner during the aftershock sequence.

Key words: 2004 Mid Niigata Prefecture Earthquake, Characterization of the aftershock area, Spectral ratio analysis

§ 1. はじめに

2004 年 10 月 23 日 17 : 56 (JST) に起こった新潟県中越地震 (モーメントマグニチュード $M_w=6.6$) は、発生直後から M_w 5.5 を超える中規模余震を含む多くの余震を引き起こした。これは伏在逆断層特有の応力再分配と、この地域の潜在的な中規模断層が多いことに関係すると考えられ [地質調査総合センター (2004)], 本震を

引き起こした断層以外に 2 つの断層が震源分布から推定されている [例えば, Aoki *et al.* (2005), Kato *et al.* (2005)] など地震発生メカニズムの複雑さが指摘されている。したがって、新潟県中越地震系列の狭い領域で発生した多数の地震について、震源分布の地域性を考慮した詳細な解析を行うことは重要であると考えられる。

地震パラメータに関しては、最近の良質なデータを使用した研究結果が多数発表されているが、震源スペクトル (モーメント速度関数のスペクトル) がコーナー周波

* 〒739-8526 東広島市鏡山 1-3-1

数 f_c 付近で複雑になり、典型的な ω^{-2} モデルではなく $\omega^{-\alpha}$ ($1 \leq \alpha \leq 3$) のように多様性があることが指摘されている [Mayeda and Walter (1996)]. また、地震のエネルギーについて地震の破壊速度を考慮する重要性も指摘されている [例えば, Venkataraman and Kanamori (2004)].

また、地震モーメント M_0 と f_c のスケーリングは、 f_c の3乗則 $M_0 \propto f_c^{-3}$ の直線 (応力降下一定) に対して大きな標準偏差を持つ結果も報告されている [Mayeda and Walter (1996)]. スペクトルの減衰が複雑に見えることの一因として、地震波伝播経路や観測点サイトの影響もあるが、 f_c 付近の周波数帯域のスペクトルは地震放射エネルギー全体の見積りに大きく影響するため、多くの研究で検討されてきた。したがって、地震の震源スペクトルについて、仮定を最小限に抑え、データ本来の形状の多様性を比較検討することは重要であると考えられる。

本研究では、新潟県中越地震の余震域で発生した多数の地震のうちモーメントマグニチュード M_w が3.5から4.0の範囲にある前震および余震に焦点を置いた解析を行う。伝播経路や観測点サイトの影響をできるだけ取り除いて f_c を推定し、 M_0 との関係を検討するためにスペクトル比法を用いる。スペクトル比法を用いる際、本震のスペクトルを分子に固定し、前震あるいは余震 ($3.5 \leq M_w \leq 4.0$) のスペクトルで割るので、相対的なエネルギー放射の評価として有用である。また、スペクトル比の形状と余震域における震源位置の関係を検討し、震源スペクトル比の地域的な特徴について考察する。最後に、 f_c の推定とスペクトル比の形状の両者の結果を合わせた検討を行う。

§2. データと解析方法

2.1 データ

解析には、2004年9月7日から2005年1月20日までの期間に、新潟県中越地震の余震域全体で発生した本震 (M_w 6.6) と前震 (9月7日20:19と9月8日19:12に発生した2つの地震) および余震 ($3.5 \leq M_w \leq 4.0$) を使用した (注: この M_w 範囲の地震を選んだ理由は2.3を参照)。これらの地震の震源メカニズム、地震モーメントおよびモーメントマグニチュードは、防災科学技術研究所の広帯域地震計観測網 F-net の自動決定システム (オペレータによるチェックを含む) によって得られたものである。波形データは、F-net の4つの観測点 (ADM, ASI, SBT, YMZ) すべてで記録が揃っている。使用した地震の震源分布と観測点の位置を Fig. 1 に示す。観測点は本震から約80~125 km 以内の距離に位置し、

Fig. 1. Distribution of the October 23, 2004 Mid Niigata Prefecture earthquake (star), aftershocks (small dots) and four stations (triangles) used in this study. The stations are located at distances of about 80 to 125 km from the main event epicenter. The enlarged study area is shown in Fig. 6.

広い方位角に分布している。震源は、気象庁の一元化震源と Shibutani *et al.* (2005) により再決定された震源を比較し、再決定された震源を採用する。

Fig. 2 では、対象とする期間に余震域で発生し、F-net によって震源メカニズムが決められた M_w 3.5 から4.0の地震および M_w 5.5以上の余震の震源解 (等積投影法による) を震源位置に対応させて示す。 M_w 3.5 から4.0のマグニチュード範囲で自動震源解のあるものは、全部で78個発生しているが、震源解が本震のメカニズム (走向: 212° , 傾斜: 47° , すべり角: 93°) と大幅に異なる地震 (灰色のシェード) は対象から外し、メカニズムが本震と類似している57個のイベント (黒色) について解析を行う。大きめの余震 ($M_w \geq 5.5$) も灰色で示している。

2.2 スペクトル比法

観測波形のスペクトルは、震源スペクトルに伝播経路や観測点近傍の影響が重なったものである。伝播経路や観測点近傍の影響をできるだけ取り除くために、Ide *et al.* (2004), Izutani and Kanamori (2001), 山下・他 (2004) などによって採用されたスペクトル比法を用いる。これらの方法では、震源スペクトルを検討するために、震源位置が近く、震源メカニズムが類似の大きめの地震と小さな地震のスペクトルの比をとることにより、伝播経路やサイトの影響を取り除くことを意図する。

Fig. 3 に1観測点における本震と余震の観測波形、スペクトル、スペクトル比の例を示す。Fig. 3(上) に示さ

Fig. 2. Focal mechanism distribution of the mainshock, two foreshocks and 76 aftershocks ($3.5 \leq M_w \leq 4.0$) and six large aftershocks ($M_w \geq 5.5$). The beach balls of mechanisms are plotted at the hypocenters provided by the Japan Meteorological Agency (JMA). The events with black beach balls (57 events) were used in this study.

れるように、P波の立ち上がりの1秒前から9秒間の上下動成分の速度波形データから、Fig. 3(中)に示されるスペクトルを計算する。この9秒のタイムウィンドウは、いずれの観測点においてもP波のみを含む最大の長さである。

しかしながら、Fig. 3(下)のスペクトル比からわかるように、“本震とのスペクトル比”をとっても、1観測点ではコーナー周波数 f_c の識別は必ずしも明瞭ではない。これは、本震とその他の地震の震源位置が多少($\Delta \leq 20$ km)異なるので、伝播経路の影響が完全に取り除かれてはいないことによると思われる。したがって、4観測点ADM, ASI, SBT, YMZで平均化を行う。Fig. 4の実線で示された2つのスペクトル比は、Fig. 3で示された本震と2つのイベント((a)および(b))について4観測点で(線形)平均したスペクトルの比に対応している。この平均化では、地震ペアに対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過程の違いの影響が平均化された後に比をとるため、伝播経路の影響を効果的に軽減することができる。したがって、 f_c の推定および余震域の区分の検討には、4観測点での平均スペクトル比を用いる。

2.3 f_c の推定

Fig. 4の実線で示される観測スペクトル比から、 f_c を読み取る。 f_c を明瞭に把握するために、余震域全体に分布し、本震との M_w の差が大きい M_w 3.5から4.0の地震記録(M_w 3.5: 10個, M_w 3.6: 11個, M_w 3.7: 11個, M_w 3.8: 14個, M_w 3.9: 4個, M_w 4.0: 7個)を用いる。これらの観測スペクトル比に理論スペクトル比をグリッドサーチによりフィッティングさせることで f_c を推定する。震源スペクトルは(1)式で示される ω^{-2} モデルを仮定した。

Fig. 3. (Top) Example of waveform data of the main event, and two aftershocks. The time window of 9 s used to calculate the spectra is shown with a bold straight line above each seismogram. (Middle) Amplitude spectra in logarithmic scale. The bold, thin and dotted lines represent the spectra of the main event, a smaller event and noise, respectively. (Bottom) Spectral ratios of the mainshock to the smaller event. (a) The main event (M_w 6.6) and an aftershock (M_w 3.5) observed at station ADM. (b) The main event and an aftershock (M_w 4.0) observed at station SBT.

$$\frac{\dot{M}_L(f)}{\dot{M}_S(f)} = \frac{M_{0L}}{[1 + (f/f_{cL})^2]} \bigg/ \frac{M_{0S}}{[1 + (f/f_{cS})^2]} \quad (1)$$

$\dot{M}(f)$, M_0 , および f_c はそれぞれ大きい (L) または小さい (S) ほうの地震の震源スペクトル, 地震モーメント, およびコーナー周波数を表す. この f_c 推定の方法は Izu-

tani and Kanamari (2001) および Hough and Kanamori (2002) と同様であり, 原理的には大きい方の地震のコーナー周波数 f_{cL} (低周波数側) と, 小さい方の地震のコーナー周波数 f_{cS} (高周波数側) の 2 つの f_c が推定される. しかしながら, Fig. 3(中) に示される M_w の

Fig. 4. Example of spectral ratio fitting. The solid lines show the averaged spectral ratios obtained from the observed data. The dashed lines represent the theoretical spectral ratios calculated using equation (1). (a) Spectral ratio of the mainshock (M_w 6.6) to an aftershock of M_w 3.5. (b) Same as (a) but ratio to an aftershock of M_w 4.0.

小さい地震のスペクトルと地震波が到達する前のノイズの比較からわかるように、低周波数側 ($f \leq 0.5$) ではノイズレベルが高くなるため、フィッティングは $0.8 \sim 7$ Hz の周波数範囲で行い、高周波数側の f_{cs} のみについて検討する。Fig. 4 に観測スペクトル比、最適理論スペクトル比、および理論スペクトル比から推定された f_{cs} の例を示す。

2.4 スペクトル比の形状の検討

先に述べたように、スペクトルの平均化によって得られた本震とのスペクトル比は、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過程の影響の違いなどが平均化され、震源スペクトルの比が強調されたものと考えられる。震源スペクトルが地震の規模によって規定され相似性が成り立つとすると、 M_w が同じ地震の f_c は類似の値となり、 ω^{-2} モデルを仮定した場合スペクトルの形状も同様であると考えられる。このことは、分子に共通のイベントを用いた際のスペクトル比についても成り立つはずである。しかしながら、実際の観測スペクトル比および理論スペクトル比は、分子に共通して本震を用いているが、同じ M_w の地震であってもスペクトル比の形状は異なる場合が多い。

解析に使った地震は狭い領域で発生しているがスペクトル比の形状が異なることは、先に述べたように余震が異なる断層で引き起こされたことに関係して、震源スベ

クトルが異なる特徴を示すこと、すなわち相対的な放射エネルギーの違いを表していると考えられる。このことは重要な情報であるので、 f_{cs} を含む周波数帯域 ($1 \sim 7$ Hz) においてスペクトル比の形状も比較検討する。形状の比較では、最初に Shibutani *et al.* (2005) によって推定された複数の断層の位置 (どの断層付近か) に基づいて、前震および余震の震源をいくつかのゾーンに区別した後 (Fig. 6(b)), それぞれのゾーンでの観測スペクトル比の形状の特徴を検討する。

§ 3. 結 果

Fig. 5 に前震と余震 57 個について、グリッドサーチで得られた f_{cs} と M_0 の関係を示す。4 本の直線はいずれも $M_0 \propto f_c^{-3}$ の 3 乗則 (応力降下が一定) を表すものである。実線は本研究の $f_{cs}-M_0$ のプロットでの応力降下の上限と下限を示し、破線は Izutani and Kanamori (2001) によって類似の方法を用いて見積もられた M_w 3.6 から 6.6 のイベントの f_c-M_0 のプロットにおける上限と下限を示している。

スペクトル比法は、本震とそれに近いところで起こり、共通の観測点で観測された余震を対象としているので、伝播経路や観測点サイトの影響は取り除かれていると仮定する。解析に使用した余震は狭い範囲の M_w および同様の震源解を有するので、応力降下量や放射エネル

Fig. 5. Seismic moment (M_0) versus corner frequency (f_{cs}). Two solid lines show the relation of $M_0 \propto f_c^{-3}$ for the lower and upper limits of stress drop in this study. Two dotted lines refer to the result by Izutani and Kanamori (2001).

ギーが一定であれば、スペクトル比の形状も類似するはずである。しかしながら、実際には多少異なっていたため、スペクトル比の形状の地域的な特徴を検討する。

Shibutani *et al.* (2005) によって推定された複数の断層の分布 (Fig. 6(b) の断面図の Fault A, B, C, D のスケッチ参照) に基づいて、前震および余震の震源を 5 つのゾーン (Zone 1 から Zone 5) に分類した結果を Fig. 6 に、各ゾーンでのスペクトル比の形状を Fig. 7 に示す。スペクトル比の数の分布は Zone 1: 11 個, Zone 2: 4 個, Zone 3: 10 個, Zone 4: 16 個, Zone 5: 5 個となった。

Fig. 6(a) は気象庁の一元化震源, (b) は Shibutani *et al.* (2005) によって再決定された震源を用いた震源分布の平面図とその断面図で、震源はゾーンごとに色分けされている (塗りつぶされた丸印の震源は Fig. 7 でカラーで示されたスペクトル比の震源に対応する)。再決定された震源分布は、気象庁の震源に比べ全体的に北西方向に 2~3 km 移動しているが、相対的な分布はほとんど変わらない。しかし、断面図を比較すると、再決定された震源分布の相対的な分布は変化し、収束も良くなっている。

Shibutani *et al.* (2005) によって震源が再決定された期間は、本震発生 (10 月 23 日 17:56) から 12 月 31 日までであるため、その期間外の 2 個の前震と 12 月 31

日以降の余震 2 個の震源は、JMA の震源を白抜き黒印 (各々四角形および丸印) で示してある。また、どのゾーンの形状にも当てはまらない 11 個のイベントは灰色の丸印で示す。

各ゾーンの分類について、Zone 1 (橙色) は、本震の北西に位置し、本震の約 1 カ月前に起こった前震を含み、比較的浅い位置に分布し、どの断層の付近でもない。Zone 2 (紫色) は、10 月 23 日 18:03 ($M_w=5.9$) と 11 月 8 日 18:15 ($M_w=5.5$) の余震に挟まれた小さな領域で、本震の断層 (Fault A) と最大余震の断層 (Fault B) の間の比較的浅い位置に分布する。Zone 3 (緑色) は、本震と 10 月 23 日 18:34 に起こった最大余震 ($M_w=6.3$)、および 10 月 25 日 06:04 ($M_w=5.6$) の余震から東側に広がり、Fault B 付近の 10 km より深いところにまとまって分布する。Zone 4 (ピンク色) は、本震を囲むように広い範囲に分布し、イベント数も多く、イベント間距離も大きい。断面図では 5 km より浅い位置から 15 km に達する深さまで約 45° の傾きを示し、Fault A の付近に分布する。Zone 5 (水色) は、10 月 23 日 18:11 ($M_w=5.7$) の地震の南側に分布し、断面図では浅い位置で Fault D 付近に分布する地震である。

Fig. 7 に各ゾーンのすべてのスペクトル比を重ねた図と M_w と f_{cs} の範囲を示す。特に各ゾーンでの特徴的な形状を示す地震はカラーで示す (Fig. 6 で塗りつぶされた丸印のイベント)。Zone 1 に含まれる 2 つの前震のスペクトル比は破線で示される。これらのスペクトル比には、見やすさのために約 0.04 Hz 間隔のデータに前後 3 つの平均をとる軽いスムージングをかけている。形状を判断するための観測スペクトル比の特徴はこのスムージングによって損なわれることはない。 M_w が異なる ($3.5 \leq M_w \leq 4.0$) ため、個々のスペクトル比は縦軸方向にずれるが、各ゾーンでの 1~7 Hz での形状 (特に、全体的な傾きと振幅の増減) は類似することがわかる。

Fig. 7 からわかる各ゾーンのスペクトル比の高周波数側の形状の特徴の比較を記す。Zone 1 は、1~7 Hz での全体的な傾きが比較的小さく、1~4 Hz 付近でいくつかの振幅の卓越を示している。Zone 2 は、Zone 1 と同様に傾きが比較的小さいが、特徴的な卓越周波数は見られない。Zone 3 は、1~7 Hz でのスペクトル比の振幅の増減が比較的小さく、傾きは大きくなる傾向がある。これは、小さいほうのイベントのスペクトル振幅が高周波数帯域で大きいことを意味し、したがって放射エネルギーが比較的大きいことに対応する。Zone 4 は、Zone 3 と同様に傾きが大きくなる傾向がある。 f_{cs} の範囲については、他のゾーンと比べ、Zone 3 と Zone 4 では上限が高くなっていることも、エネルギー放射が比較的大き

Fig. 6. Distribution of aftershocks classified into five characteristic zones on the basis of the estimated fault planes by Shibutani *et al.* (2005). Map view (top) and the vertical cross section along X-X' (bottom). Orange, purple, green, pink, light blue, and gray denote hypocenters in Zones 1, 2, 3, 4, 5 and three events outside the zones, respectively. (Solid circles correspond to events shown by color lines in Fig. 7.) Stars show hypocenters of the mainshock and large aftershocks ($M_w \geq 5.5$). (a) Hypocenters provided by JMA. (b) Relocated hypocenters by Shibutani *et al.* (2005). Four open black circles and squares in (b) are events that are not included in their catalog and are plotted at the location of JMA hypocenters. These events occurred before or after the period of relocation study (from 23 October to 31 December 2004).

いことに対応している。Zone 5 も、Zone 1 や Zone 2 のように傾きが小さく、3~5 Hz 付近に振幅の卓越が見られる。したがって、高周波数側でのスペクトル比の傾きは、Zone 3, 4 では大きく、Zone 1, 2, 5 では小さい傾向がある。

§ 4. 議 論

地震の放射エネルギー E_R は、P 波と S 波からの寄与

の合計であり、一般に震源スペクトル（モーメント速度関数のスペクトル）の 2 乗を積分することによって見積る [Mayeda and Walter (1996), Venkataraman and Kanamari (2004)]. 本研究では、震源スペクトルを検討するにあたり、スペクトル比法を用い、 f_{cs} を含む高周波数帯域での観測スペクトル比の形状を比較検討し、相対的なエネルギー放射の関係について考察する。 f_c を推定する際には、破壊速度を一定とした ω^{-2} モデルを仮定し

Fig. 7. Spectral ratios distinguished in five zones. The characteristic shapes of spectral ratio are shown by color lines. The similarities or differences are identified in the frequency band between 1 and 7 Hz as the variation of spectral ratios is large in this band. The colors correspond to the zones in Fig. 6. The ranges of M_w and f_{cs} are denoted in each diagram.

ているが、その場合以下の関係が成り立つ

$$E_R/M_0 \propto M_0 f_c^3 \quad (2)$$

[Izutani and Kanamori (2001)].

E_R/M_0 が地震の規模に依存する場合、一般に f_c の 3 乗則 $M_0 \propto f_c^{-3}$ が考えられる。

本研究では、最初に新潟中越地震系列の地震の波形データとスペクトル比法を用いて ω^{-2} モデルを仮定したグリッドサーチによる f_c の推定を行い、 f_{cs} と M_0 の関係を検討した。 M_0 は狭い範囲に限ったが ($1.87 \times 10^{14} \leq M_0 \leq 1.32 \times 10^{15}$ Nm), $f_{cs}-M_0$ のプロットは、Fig. 5 で示したように、より広い M_0 範囲のイベントについて解析を行った他の研究者の結果 [例えば、Ide *et al.* (2004), Izutani and Kanamori (2001), 山下・他 (2004)] とほぼ同様であることがわかる。しかしながら、本研究の結果は、他の研究に比べ、狭いモーメント範囲で多くのイベントを使ったことに意義がある。

最近の研究では、地震の破壊速度 V は、破壊過程をコントロールする破壊エネルギーと直接関係し、破壊速度

の変化は震源過程の理解において重要な意味をもつことが指摘されている [Kanamori and Rivera (2004), Venkataraman and Kanamori (2004)]. 式 (2) に示されるように、 E_R/M_0 は f_c の見積りに大きく影響される。したがって、本研究のように、狭い M_0 範囲での多数のイベントに対して f_c の推定を行った場合に見られたばらつきは、伏在断層での応力再分配過程に対応していることが推察される。

ω^{-2} を仮定した f_c の推定とは独立に、断層分布から地震の震源を 5 つのゾーン (Zone 1 から 5) に分類し、スペクトル比の高周波数帯域 (1~7 Hz) での形状の特徴を比較検討した。本研究で使ったイベントは狭い震源域で起こっているの、伝播経路や観測点サイトの影響はかなり取り除かれ、スペクトル比の形状は類似するはずであるが、実際には 1~7 Hz での全体的な傾きがイベントによって変化しており、各ゾーンごとに特徴づけられることがわかった (Fig. 7). つまり、この傾きが大きいことは、小さいほう (スペクトル比の分母) のイベントの高

Fig. 8. Comparison of events that have similar focal mechanisms and are located close to each other but belong to different zones. The spectral characteristics of these events are different from each other. The map view (top) is same as Fig. 6(b). The locations of events are marked by (a), (b) and (c). The corresponding spectral ratios are shown below the map. The solid lines show the averaged observed spectral ratios and the dashed lines the theoretical spectral ratios calculated using equation (1).

周波数側でのエネルギー放射が大きいことに対応する。(また, f_{cs} は高周波数帯域側に移動する。) 具体的には, Zone 3・Zone 4 では Zone 1・Zone 2・Zone 5 に比べて, エネルギー放射が比較的大きいと考えられる。さらに, 9月に起こった2つの前震が, 傾きの小さい Zone 1 に分類されることは, 余震に比べて地震における破壊エネルギーが大きくなり, 放射エネルギーが小さくなったことを示唆しているかもしれない。Fig. 6 に示した断面図の震源の深さ分布と比較すると, 全体的に Zone 1・Zone 2・Zone 5 は浅く, Zone 3・Zone 4 は深い位置に分布しており, 深部で発生した地震の放射エネ

ギーが大きくなる傾向があるという指摘 [Mori *et al.* (2003)] とも対応している。

また, 5つのゾーンでスペクトル比の振幅の増減(卓越周波数)の特徴が異なることから, 伝播する構造の影響が完全には取り除かれていないことも考えられ, 先に述べた形状の傾きとは独立して検討する必要がある。

各ゾーンでのスペクトル比の特徴は, 複数の断層に応力が再分配され地震エネルギーが解放された特徴を示すと思われるが, 個々の断層の詳細についてはここでは議論しない。いくつかの地震の本震の断層域での放射エネルギーのマッピングを行った McGarr and Fletcher

(2002) では、1つの断層上でも放射エネルギーの分布はばらついていることが指摘されており、今後、さらに詳細な検討が必要な課題であると思われる。

次に、ゾーンと f_c の関係を議論する。ゾーンの区分は異なるが、再決定した震源位値が近く震源メカニズムも類似であるイベントに関し、スペクトル比の形状が異なる場合の比較例をFig. 8に示す。これらは、各ゾーンの境界付近に分布している。Fig. 8(a)の上図は $M_w=3.6$ で下図は $M_w=4.0$ なので、3乗則 $M_0 \propto f_c^{-3}$ によると、上図の f_{cs} のほうが下図よりも大きくなるはずであるが、実際にはZone 4のイベントの f_{cs} が大きくなっている。同様に、Fig. 8(b)の上図は $M_w=3.6$ で下図は $M_w=3.9$ なので、上図の f_{cs} のほうが下図よりも大きくなるはずであるが、逆になっている。Fig. 8(c)の上図と下図は共に $M_w=3.7$ なので両者の f_{cs} はほぼ等しくなるはずであるが、実際にはZone 4のイベントのほうが大きくなっている。先にも述べたように、Fig. 8で示した例は震源位値が近く、メカニズムもよく似たイベントの比較であるため、メカニズムの違いや本震との震源位置の違いが顕著に影響したとは考えにくい。 ω^{-2} モデルを仮定することは破壊速度が一定であることを前提としているため[Boatwright (1980), Brune (1970)], このように f_{cs} がばらつくことは、Ide *et al.* (2004)で指摘されているように、 ω^{-2} モデル(破壊速度一定)が必ずしも成り立たないことを示唆しているとも思われる。

また、Zone 1, 2, 5では f_{cs} が小さく、Zone 3, 4では大きくなる傾向は、式(2)で表されるように、Fig. 7のスペクトル比から示唆された相対的なエネルギー放射の関係(Zone 1, 2, 5ではエネルギー放射が小さく、Zone 3, 4では大きい)とも対応している。

f_c とゾーンの関係を考えるために $f_{cs}-M_0$ のプロット(Fig. 5)に、エネルギー放射が高いと考えられるゾーン(Zone 3, 4)と低いと考えられるゾーン(Zone 1, 2, 5)を区別した図をFig. 9に示す。この図で、 M_0 が 7×10^{14} Nm以上のイベントの f_{cs} は、Zone 1, 2, 5では小さく、Zone 3, 4では大きくなることが明瞭に見られる。

f_{cs} がばらつく原因としては、先に述べたように破壊速度一定の ω^{-2} モデルを仮定していること、および小さいイベントのメカニズムが本震と完全には一致しないことが反映されている可能性も除外できない。しかしながら、本研究で行った f_c の推定は、狭い地域で起こり類似の震源メカニズムをもつイベントに適用したスペクトル比法に基づいているので、震源の特徴を表していると思われる。

Fig. 9. M_0 versus f_{cs} distinguished with open and solid symbols that refer to the five zones in the aftershock area. The dotted line indicates the relation $M_0 \propto f_c^{-3}$.

8.5. 結 論

2004年10月23日17:56(JST)に発生した新潟県中越地震(本震)の余震域で、2004年9月7日から2005年1月20日までの期間に発生した M_w 3.5から4.0の地震と本震とのスペクトル比について解析を行った。まず、 ω^{-2} モデルを仮定してコーナー周波数 f_c を推定し、 f_{cs} と地震モーメント M_0 の関係を調べた。次に、 f_c の推定とは独立に、余震域における観測スペクトル比の形状の地域の特徴を検討した。

f_{cs} と M_0 の関係は、 $M_0 \propto f_c^{-3}$ の3乗則の直線に対してばらつきをもった分布を示した。このようなばらつきを示すことは、中小規模の地震放射エネルギーの多様性、および破壊速度一定という仮定に基づく ω^{-2} モデルからのずれの可能性も示唆している。

スペクトル比の形状は、 f_{cs} を決める高周波数帯域で多様である。この余震系列のように、非常に狭い地域で発生した地震のスペクトル比であっても形状が異なることは、 f_c の推定に用いる理論スペクトルモデルに関する示唆としても興味深い。

推定された複合断層分布に基づいて分類した5つのゾーンでのスペクトル比の高周波数帯域側(1~7 Hz)での形状(全体的な傾き)の違いは、そのゾーンでの地震エネルギー放射の相対的な量の違いを反映していると思われる。断層破壊の特徴を示していると考えられる。

このように、狭い地域で非常に多くの余震を引き起こした2004年新潟県中越地震系列の地震を対象に、良質

なデータを用い、詳細な解析を行った場合でも、 f_c の推定やスペクトル比の形状に各ゾーンで異なる特徴が見られたことは、震源域やそこでのエネルギー放射の特徴を考える上で、重要な意味をもつと考えられる。

謝 辞

本研究では、独立行政法人防災科学技術研究所のF-netで観測・収集された波形記録、気象庁による震源データ、および京都大学防災研究所地震予知研究センターの澁谷拓郎助教授に提供して頂いた再決定震源データ[Shibutani *et al.* (2005)]を用いました。解析および図の作成には、GMT[Wessel and Smith (1995)], SAC 2000[Goldstein *et al.* (1999)]を使用しました。広島大学大学院・中川剛史氏、林田拓己氏には解析での有用な助言を頂きました。この研究の遂行にあたり、日本学術振興会科学技術研究費補助金基礎研究(B)課題番号16340130および特定領域研究(公募研究)課題番号17037004の一部を使用しました。以上の関係者・関係機関に記して感謝いたします。

文 献

- Aoki, S., M. Nishi, K. Nakamura, T. Hashimoto, S. Yoshikawa and H. M. Ito, 2005, Multi-planar structures in the aftershock distribution of the Mid Niigata prefecture Earthquake in 2004, *Earth Planets Space*, **57**, 411–416.
- Boatwright, J., 1980, A spectral theory for circular seismic sources, simple estimates of source dimension, dynamic stress drop, and radiated seismic energy, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **70**, 1–28.
- Brune, J. N., 1970, Tectonic stress and the seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **75**, 4997–5009.
- 地質調査総合センター, 2004, 新潟県中越地震のメカニズム解明に挑む, *AIST Today*, **4**, 16–17.
- Goldstein, P., D. Dodge and M. Firpo, 1999, SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers UCRL-JC-135963, Invited contribution to the IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology.
- Hough, S. E. and H. Kanamori, 2002, Source properties of earthquakes near the Salton Sea triggered by the 16 October 1999 M 7.1 Hector Mine, California, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 1281–1289.
- Ide, S., M. Matsubara and K. Obara, 2004, Exploitation of high-sampling Hi-net data to study seismic energy scaling: The aftershocks of the 2000 Western Tottori, Japan, earthquake, *Earth Planets Space*, **56**, 859–871.
- Izutani, Y. and H. Kanamori, 2001, Scale-dependence of seismic energy-to-moment ratio for strike-slip earthquakes in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 4007–4010.
- Kanamori, H. and L. Rivera, 2004, Static and dynamic scaling relations for earthquakes and their implications for rupture speed and stress drop, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **94**, 314–319.
- Kato, A., S. Sakai, N. Hirata, E. Kurashimo, S. Nagai, T. Iidaka, T. Igarashi, Y. Yamanaka, S. Murotani, T. Kawamura, T. Iwasaki and T. Kanazawa, 2005, Short-term spatiotemporal variations in the aftershock sequence of the 2004 mid-Niigata prefecture earthquake, *Earth Planets Space*, **57**, 551–556.
- Mayeda, K. and W. R. Walter, 1996, Moment, energy, stress drop, and source spectra of western United States earthquakes from regional coda envelopes, *J. Geophys. Res.*, **101**, 11195–11208.
- McGarr, A. and J. B. Fletcher, 2002, Mapping apparent stress and energy radiation over fault zones of major earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 1633–1646.
- Mori, J., R. E. Abercrombie and H. Kanamori, 2003, Stress drops and radiated energies of the 1994 Northridge, California, earthquake, *J. Geophys. Res.*, **108**, 2545–2558.
- Shibutani, T., Y. Iio, S. Matsumoto, H. Katao, T. Matsushima, S. Ohmi, F. Takeuchi, K. Uehira, K. Nishigami, B. Enescu, I. Hirose, Y. Kano, Y. Kohn, M. Korenaga, Y. Mamada, M. Miyazawa, K. Tatsumi, T. Ueno, H. Wada and Y. Yukutake, 2005, Aftershock distribution of the 2004 Mid Niigata Prefecture Earthquake derived from a combined analysis of temporary online observations and permanent observations, *Earth Planets Space*, **57**, 545–549.
- Venkataraman, A. and H. Kanamori, 2004, Observational constraints on the fracture energy of subduction zone earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **109**, B05302, doi:10.1029/2003JB002549.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1995, New version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, **76**, 329.
- 山下哲央・岡田知己・松澤 暢・長谷川 昭, 2004, 東北日本太平洋下のプレート境界近傍で発生する地震のスケールリング則, *地震*, **2**, 56, 457–469.