2011年福島県浜通り付近の正断層の地震の短周期レベルと

伝播経路・地盤増幅特性

佐藤智美¹⁾、堤英明²⁾

1) 正会員 大崎総合研究所、主席研究員 博士(工学)

e-mail : toshimi.satoh@shimz.co.jp

2) 非会員 原子力安全基盤機構、グループ長 修士(工学)

e-mail : tsutsumi-hideaki@jnes.go.jp

要 約

2011年東北地方太平洋沖地震後に福島県浜通り付近で発生した正断層の地震群の強震記録を用いて、スペクトルインバージョンにより短周期レベルを推定した。その結果、4月11日の $M_j7.0$ の地震の短周期レベルは、地殻内地震の平均値とほぼ同じであることがわかった。また、 $M_j7.0$ の地震の最大加速度と最大速度は距離減衰式より大きい、これには地盤増幅の影響が含まれており、各観測点で得られている地盤増幅率で補正すると距離減衰式と同レベルとなることを示した。さらに、他の逆断層の地震と比較して、より遠方まで、断層平行方向に対する断層直交方向の応答スペクトル比が大きい傾向があり、Rayleigh波の卓越が寄与していることを指摘した。

キーワード： 正断層、短周期レベル、距離減衰式、Rayleigh波

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震後の2011年4月11日に、日本では九州や伊豆諸島の地震を除きほとんど発生していなかった規模の大きい($M_j7.0$)正断層の地殻内地震が福島県浜通りで発生した。この地震では、井戸沢断層^{1),2)}、湯ノ岳断層³⁾で地表地震断層の出現が確認されており、これらの活断層による地震と考えられている。この地震前後にも、規模の小さい正断層の地震が福島県浜通り付近で多数発生している。正断層の地震の強震動予測を行うためには、これらの地震の震源・伝播経路・地盤増幅特性を分析し、その特性を予測に取り入れていくことが必要となると考えられる。

震源断層を特定した地震の強震動予測レシピ^{4),5)}で用いられるパラメータである地殻内地震の短周期レベルについては、佐藤⁶⁾は、壇・他⁷⁾の地震モーメント M_0 と短周期レベル A の経験式より、逆断層では平均的に大きく、横ずれ断層では小さいことを指摘し、 $M_w5.7\sim6.9$ の範囲で断層タイプ別の M_0 と A の経験式を作成している。しかし、正断層の地殻内地震の短周期レベルに関しては、これまでほとんど検討されていない。佐藤⁸⁾、中村⁹⁾は、日本の地殻内地震の強震記録を用いて、 ω^2 モデルを仮定したBrune¹⁰⁾の応力降下量が、逆断層で一番大きく、正断層で一番小さく、横ずれ断層でその中間であることを報告している。しかし、規模の大きな正断層の地震は含まれていない。また、佐藤⁸⁾が用いた正断層の地殻内地震は種子島付近の地震と伊豆諸島の地震のみであり、この伊豆諸島の地震は三宅島の噴火と関連した地震であると考えられる。したがって、震源断層を特定した地震の強震動予測レシピの中の活断層に

よる地震の対象とは異なるため、区別して取り扱う必要があると考えられる。また、日本の地殻内地震では $M_w5.7$ 程度を境に A のスケールが変わり、規模が小さい地震の A は、規模の大きい地震の M_0 - A 関係より小さい傾向がある⁶⁾。このように、 $M_J7.0$ の正断層の地震の A を推定することは、活断層による規模の大きい正断層の地震の強震動予測に重要と考えられる。

また、地殻内地震に対する最大加速度、最大速度、応答スペクトルの距離減衰式では、逆断層と横ずれ断層と正断層の違いを考慮した式が提案されている^{11)~14)}が、破壊伝播効果や震源放射特性の補正係数^{15)~19)}は、逆断層と横ずれ断層の地震に対するものであり、正断層の地震については検討されていない。破壊伝播・震源放射特性の補正係数の算出に用いられている、断層平行方向FPに対する断層直交方向に対する比FN/FP^{15)~17),19)}は、傾斜角が同じで破壊伝播性状が同じであれば、横ずれ成分のない逆断層と正断層の放射特性が同一となるため、同じ特徴がみられると考えられる。しかし、観測のFN/FPには表面波の影響も含まれ、破壊伝播性状も異なる可能性があるため、実際に正断層の地震の観測記録から分析する必要がある。

そこで、本研究では、 $M_J7.0$ の地震を含む福島県浜通りの地震群の観測記録から、スペクトルインバージョン手法^{20),7)}により、震源・伝播経路・地盤増幅特性の分離を行い、震源スペクトルから短周期レベルを推定する。そして、逆断層や横ずれ断層の地震の M_0 - A 関係との比較から、正断層の地震の短周期レベルの特性を議論する。また、求められた伝播経路の Q 値と、逆断層や横ずれ断層の地震の観測記録から推定されている Q 値との比較を行うとともに、 Q 値が強震動に及ぼす影響を検討する。さらに、日本の地殻内地震に対する最大加速度と最大速度の距離減衰式^{21),22)}との比較から、推定された $M_J7.0$ の地震の短周期レベルについて考察する。この際、片岡・他²²⁾の距離減衰式における各強震観測点での地盤増幅率で観測値を補正することにより、地盤増幅特性の影響を除いた検討を行う。最後に、正断層の地震の観測記録から応答スペクトルのFN/FPを求めるとともに、比較のために、既往の逆断層の地震の観測記録からもFN/FPを求め、正断層の地震のFN/FPの特徴を分析する。

なお、最近の秦・他²³⁾の研究では、2011年長野県北部の地震($M_J6.7$)が正断層であったことが指摘されており、今後、この地震についても検討していく必要がある。

2. スペクトルインバージョンに用いるデータと手法

2.1 データ

スペクトルインバージョンに用いる9個の地震の諸元と、本研究で推定した短周期レベルを表1に示す。2011年3月19日～4月13日までに福島県浜通りで発生した、 $M_J4.7$ 以上の地震である。震源距離60km以内で、火山フロント前弧側のK-NET、KiK-net観測点(地表)で観測された水平2成分の記録を用いた。この際、地盤の非線形性の影響を避けるため、最大加速度200cm/s²以下の記録のみを用いた。 $M_J7.0$ の地震のみS波部20秒間、他の地震は10秒間を切り出した。

図1には、地震の震央位置(気象庁)、CMT解(F-net)、観測点位置を示す。CMT解が既知の地震のうち、C7のみ横ずれ成分が卓越する地震であり、他は正断層の地震である。IBRH14(十王)は、スペクトルイン

表1 スペクトルインバージョンに用いた地震の諸元と本研究で推定した短周期レベル A

地震 番号	発震時*(日本時間)				深さ*	M_J^*	M_0^{**}	M_w^{**}	A^{***}	M_w^*
	年	月日	時:分	秒						
C1	2011	3月19日	18:56	48.1	5.4	6.1	6.35E+24	5.8	1.85E+25	5.9
C2	2011	3月23日	7:12	28.8	7.6	6.0	4.26E+24	5.7	1.10E+25	5.7
C3	2011	3月23日	7:13	52.8	0.9	5.8	7.01E+23	5.2	8.36E+24	-
C4	2011	3月23日	18:55	20.2	9.0	4.7	5.00E+22	4.4	2.89E+24	4.4
C5	2011	4月11日	17:16	12.0	6.4	7.0	9.58E+25	6.6	9.70E+25	6.7
C6	2011	4月11日	20:42	35.2	10.6	5.9	1.72E+24	5.4	1.90E+25	5.4
C7	2011	4月12日	14:07	42.3	15.1	6.4	7.05E+24	5.8	3.86E+25	5.9
C8	2011	4月12日	14:26	33.2	13.9	4.8	-	-	-	-
C9	2011	4月13日	10:07	58.0	4.5	5.7	1.36E+24	5.4	9.99E+24	5.4

*気象庁 **F-net ***本研究

図1 スペクトルインバージョンに用いた地震の震央位置(気象庁)と CMT 解(F-net) 及び観測点位置

バージョンの際の基準観測点である。IBRH14は、防災科学技術研究所による検層結果で、地中観測点のS波速度が3.2km/sと、地震基盤相当であることから、基準観測点として選択している。

2.2 手法

スペクトルインバージョン^{20),6)}は、以下に示す佐藤⁶⁾と同じ手法により行った。

加速度フーリエスペクトル $F_{ij}(f)$ は、震源特性 $S_i(f)$ 、伝播経路特性 $P(f)$ 、地盤増幅特性 $G_j(f)$ の3つのスペクトル成分により構成されるとする。

$$F_{ij}(f) = S_i(f)P(f)G_j(f) \quad (1)$$

ここで、 i は地震に対する添え字、 j は観測点に対する添え字である。 $P(f)$ は震源距離 X と Q 値を用いて次式でモデル化する。

$$P(f) = \frac{1}{X} \exp\left(\frac{-\pi f X}{Q V_s}\right) \quad (2)$$

ここで、 V_s は伝播経路のS波速度であり、3.5km/sと仮定した。(2)式を(1)式に代入し、両辺の対数をとると(1)式は、

$$\log_{10} F_{ij}(f) = \log_{10} S_i(f) - \log_{10} X - \frac{\pi f X}{Q V_s \ln 10} + \log_{10} G_j(f) \quad (3)$$

と書き換えられる。そして、この方程式を、基準観測点 IBRH14 での地震基盤相当から地表までの1次元理論地盤増幅率を拘束条件として、最小自乗法により、 $S_i(f)$ 、 Q 、及び IBRH14 以外の観測点の $G_j(f)$ を算出する。1次元理論地盤増幅率は、地中100mに対する地表の観測スペクトル比をターゲットとして、焼きなまし法²⁴⁾に基づく同定手法²⁵⁾により推定した地盤定数を用いて計算する。

そして、震源特性 $S_i(f)$ の水平2成分のベクトル合成値 $S(f)$ を ω^2 モデルにより次式でモデル化する。

$$S(f) = \frac{R_{\theta\phi} F_s P_{RTITN}}{4\pi\rho\beta^3} \sqrt{\frac{\rho\beta}{\rho_z\beta_z}} \frac{(2\pi f)^2 M_0}{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} \quad (4)$$

ここで、地震モーメント M_0 は、表 1 に示した F-net の値を用いた。 f_0 はコーナー周波数である。また、 F_s は自由地表面の効果を表す定数であり 2 とする²⁶⁾。 P_{RTTN} は、水平 2 成分のベクトル合成を用いるため 1 である²⁵⁾。 $R_{\theta\phi}$ は、Boore and Boatwright²⁷⁾ の S 波のラディエーションパターン係数の対数の平均値 0.55 を用いる。 β 、 ρ は震源域の S 波速度でありそれぞれ、3.5km/s、2.7g/cm³ とした⁶⁾。 β_z 、 ρ_z は、基準観測点の地震基盤相当の岩盤の S 波速度と密度である。S 波速度は防災科学技術研究所による検層結果の 3.2km/s、 ρ_z [g/cm³] は検層結果の P 波速度 V_P [m/s] を用いて、(5)式に基づく、Gardner et al.²⁸⁾ の式から算出した 2.65g/cm³ を用いた。

$$\rho_z = 0.31 V_P^{0.25} \quad (5)$$

(4)式において、観測加速度震源スペクトル $O(f)$ を

$$O(f) = \frac{S(f)}{\frac{R_{\theta\phi} F_s P_{RTTN}}{4\pi\rho\beta^3} \sqrt{\frac{\rho\beta}{\rho_z\beta_z}}} \quad (6)$$

とおき、また、 ω^2 モデル $M(f)$ を

$$M(f) = \frac{(2\pi f)^2 M_0}{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} \quad (7)$$

とする。そして、地震毎に f_0 を次式の $J(f_0)$ が最小になるように、改訂準ニュートン法²⁹⁾により推定する。

$$J(f_0) = \int_{f_s}^{f_e} (O(f) - M(f))^2 df \quad (8)$$

ここで、 f_s 、 f_e はフィッティングの対象とする最小周波数、最大周波数であり、0.5Hz と 4Hz とした。最大周波数 4Hz は、地殻内地震では f_{max} が 6Hz 程度であること^{例えば 30),31)}、後述するように、同定された地盤定数を用いた IBRH14 での地震基盤から地表までの 1 次元理論地盤増幅率が 4Hz 以下でほぼ 1 であること、 Q 値が 4Hz 以下で周波数による変動が少ないことから決めている。また、 M_0 を固定して短周期レベル A を推定するには、 f_0 より低周波数のスペクトルは必要ないため、 f_s は 0.5Hz と設定した。

短周期レベル A は、(7)式で f を無限大としたときの値であり、(9)式で算出される。

$$A = 4\pi^2 f_0^2 M_0 \quad (9)$$

なお、0.5～4Hz の範囲で(8)式を用いて f_0 が推定されるが、C4 の f_0 が 1.2Hz である以外は、 f_0 が 0.65Hz 以下であり、かつ、 $J(f_0)$ が周波数軸で等間隔で計算されることから、 A を直接推定しているのとはほぼ同じである。

3. 距離減衰式による震源・伝播経路・地盤増幅特性の検討に用いる手法とデータ

3.1 データ

検討に用いる最大加速度と最大速度の距離減衰式は、司・翠川²¹⁾の断層最短距離と M_w と断層中心深さをパラメータとした式と、片岡・他²²⁾の断層最短距離と M_w をパラメータとした式である。いずれも、日本の地殻内地震の記録を用いた式である。 $M_{J7.0}$ の地震(C5)に対しては、国土地理院³²⁾の断層モデル (M_w 6.6)を用いた。断層中心深さは、3.3km である。ただし、気象庁の CMT 解による M_w は 6.7(表 1)であることから、 M_w のみをこの値に置き換えたケースの検討も行った。

司・翠川²¹⁾の式は、水平 2 成分のうち大きい方、片岡・他²²⁾は水平 2 成分の平均値に対する式である。観測記録の最大加速度、最大速度は、片岡・他²²⁾に合わせて、水平 2 成分の平均値とした。K-NET、KiK-net

地表の記録を用い、0.2~15Hz のバンドパスフィルターをかけた。また、これまで、海溝型地震の距離減衰式に対しては、火山フロントを通過すると地震動が減衰することが考慮された式が提案されている^{33),34)}。そこで、地殻内地震の地震動に対する火山フロントの影響をみるために、火山フロント前弧側と背弧側の観測点に区別して分析を行う。

比較のために、福島県浜通りの地震と同様に東北地方の火山フロント前弧側で発生した2003年宮城県北部の地震($M_w6.1$)³⁵⁾でも、距離減衰式による検討を行った。断層モデルは、Hikima and Koketsu³⁵⁾を用いた。断層中心深さは、9.75km である。

3.2 手法

片岡・他²²⁾の式では、工学的基盤と地盤種別毎の地盤増幅率の他、観測点毎の地盤増幅率も求められ

図2 片岡・他²²⁾の式的全観測点の地盤増幅率の平均値に対する各観測点の地盤増幅率の分布(△が観測点)

図3 周期0.5秒での減衰定数5%の加速度応答スペクトルに対する片岡・他と佐藤・他³⁸⁾の式的全観測点の地盤増幅率の平均値に対する各観測点の地盤増幅率の分布(△が観測点)

図4 周期0.5秒での片岡・他²²⁾と佐藤・他³⁸⁾の式的全観測点の地盤増幅率の平均値に対する各観測点の地盤増幅率の比較

ている。そこで、全観測点での地盤増幅率の平均値を求め、この平均値に対する各観測点での地盤増幅率の比を算出した。図2には、最大加速度と最大速度の距離減衰式の地盤増幅率を用いた、この比の分布を示す。なお、図2は、観測点での値を面的補間して表示しているため、観測点が少ない領域での値は意味がない。なお、本研究で示すコンターマップは、曲率最小化アルゴリズムをもとにした GMT³⁶⁾ のコマンド `surface` を用いて面的補間を行っている。この比で観測記録の最大加速度、最大速度を除すことにより、地盤増幅率の補正を行ない、距離減衰式との比較を行う。

図2に示したように、片岡・他²²⁾の式では、関東平野北部の観測点で地盤増幅率が得られていない。これは、主に、この周辺で規模の大きな地殻内地震が発生していなかったためである。そこで、片岡・他²²⁾と佐藤・他^{37),38)}の減衰定数5%の加速度応答スペクトルの距離減衰式の地盤増幅率の比較から、この地域での地盤増幅率の考察を行う。佐藤・他^{37),38)}の距離減衰式は、海溝型地震に対するものであるが、地盤増幅率のみ海溝型地震と地殻内地震の地震数の重み付け平均値から得られている。図3には、両距離減衰式における、周期0.5秒での全観測点での地盤増幅率の平均値に対する各観測点での地盤増幅率の比を示す。図2(a)、図2(b)、図3(a)に示した片岡・他²²⁾の地盤増幅率の倍率は、類似の分布をしている。図3の両距離減衰式で比較すると、観測点が多い地域では両者は類似している。片岡・他²²⁾の式で観測点がない関東平野北部では、佐藤・他³⁸⁾の地盤増幅率が大きいことがわかる。図4には、図3の地図の領域内において、両距離減衰式で共通に地盤増幅率が得られている観測点での、周期0.5秒での地盤増幅率の比較を示す。ほぼ、1:1の関係にあることが確認できる。

4. スペクトルインバージョンによる結果

4.1 基準観測点での地盤増幅率

図5(a)には、基準観測点 IBRH14 での地中100mに対する地表の観測スペクトル比と、これをターゲットに同定された地盤定数を用いた、S波の鉛直下方入射を仮定した1次元理論スペクトル比を示す。同定に用いる焼きなまし法²⁴⁾で必要となるパラメータ、誤差関数は、Sato²⁵⁾、佐藤⁶⁾と同じである。図5(b)には、同定された地盤定数を用いたS波速度3.2km/sの層上面から地表までの1次元理論地盤増幅率を示す。図5(c)には、同定された地盤定数を示す。減衰定数は、周波数 f 依存の $h_0 f^{-\alpha}$ でモデル化しており、全層で一律と仮定して同定された α は0.51であり、各層で同定された h_0 を図中に示している。 h_0 は表層部分で小さいが、短周期レベルの推定に用いる4Hz以下での1次元理論地盤増幅率はほぼ1に近い。減衰定数の同定値が短周期レベルの推定に与える影響はほとんどない。

4.2 伝播経路のQ値

図6(a)には、推定されたQ値と、東日本と西日本の平均的なQ値⁶⁾の比較を示す。東日本と西日本の平均的なQ値は、本研究と同様の手法で、地殻内地震の震源距離60km以内の観測記録からスペクトルインバージョンにより推定したQ値を、東日本と西日本、それぞれで平均した値である。東日本の地震は全

図5 基準観測点 IBRH14 での地中100mに対する地表の観測スペクトル比を用いた地盤同定結果と、同定地盤定数を用いたS波速度3.2km/sの層上面から地表までの1次元理論地盤増幅率

て逆断層、西日本の地震は全て横ずれ断層の地震である。本研究で推定した Q 値は、1~4Hzでほぼ $Q=70f^{0.9}$ でモデル化でき、0.5~1Hzでもこの外挿でほぼ説明できる。4Hz以上では急激に Q 値が大きくなるが、0.5~4Hzを用いている短周期レベルの推定結果には影響は及ぼさない。4Hz以下で本研究の Q 値と東日本と西日本の Q 値を比較すると、本研究の Q 値($Q=70f^{0.9}$)は、東日本の Q 値($Q=35f$)の約2倍と大きく、西日本の Q 値($Q=80f^{0.98}$)と近い。東日本で Q 値が求められている地殻内地震⁶⁾のうち、1998年岩手県北部の地震と2008年岩手・宮城内陸地震はほぼ火山フロント上にあり、2004年留萌支庁南部の地震、2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震は火山フロント背弧側であるため、減衰が大きくなっている可能性がある。ただし、前弧側にある2003年宮城県北部の地震の記録から推定された Q 値は $Q=29f^{1.6}$ であり、3.5Hz以下では福島県浜通りの地震の Q 値より小さい。このように、福島県浜通りの地震は東日本で発生しているが、東日本の逆断層の地震の震源域と比較して、伝播経路での減衰が小さい特徴があることがわかる。中村⁹⁾の三次元減衰構造・震源・地盤増幅の同時インバージョンによる深さ0~30kmでの Q 値にも、福島県浜通り周辺で大きい傾向がみられる。

Q 値の違いが地震動に及ぼす影響をみるため、 $Q=70f^{0.9}$ の場合と $Q=35f$ の場合について、 ω^2 モデルに基づき地震基盤での加速度フーリエスペクトルを算出した。表1に示した $M_j7.0$ の地震のF-netによる M_0 と推定した A を用いて、(1)式により計算を行った。ただし、水平1成分を対象とするため $1/2^{0.5}$ を乗じるとともに、 $G(f)=1.0$ としている。また、一般的な地震基盤を想定して、地震基盤のS波速度、密度はそれぞれ、3.0km/s、2.5g/cm³とした。 Q 値が震源距離60km以下の記録から算出されているため、震源距離10~60kmを10km刻みで計算を行った。この計算結果を図6の(b)と(c)に示す。震源距離が大きくなるほど Q 値の違いの影響が大きく、震源距離60kmでは、1Hz付近で、 $Q=70f^{0.9}$ の場合が $Q=35f$ の場合の約2倍となることがわかる。

図6 本研究と既往の研究の Q 値の比較と、本研究で推定した $Q=70f^{0.9}$ と佐藤⁶⁾による東日本の平均的 Q 値($Q=35f$)を用いた地震基盤での加速度フーリエスペクトル(震源距離 X が10~60kmの場合)

図7 3つの正断層の地震の観測加速度フーリエスペクトルと ω^2 モデルの比較

図8 本研究で推定した福島県浜通りの地震群の M_0 - A 関係と、既往の地殻内地震の M_0 - A 関係^{6),7)} の比較

4.3 短周期レベル

図7には、例として、規模の大きな3つの正断層の地震に対する観測加速度震源スペクトル(6式)と ω^2 モデル(7式)の比較を示す。加速度震源スペクトルがフラットとなるレベルが短周期レベル A である。観測とモデルはよく合っていることが確認できる。

図8には、福島県浜通りの地震の M_0 - A 関係を、既往の地殻内地震の M_0 - A 関係とともに示す。最も規模の大きい $M_w 7.0$ の地震(C5)は、壇・他⁷⁾の地殻内地震に対する式と同程度で、佐藤⁶⁾の横ずれ断層の式よりやや大きく、逆断層の式より明らかに小さい。また、佐藤⁶⁾の M_0 - A の経験式作成に用いられていない $M_w 5.7$ 以下の逆断層と横ずれ断層の地震の A は、 $M_w 5.7$ 以上に対する A の式の延長線上より小さいが、正断層の地震にも同様の特徴がある。なお、次節で距離減衰式による比較検討を行う、2003年宮城県北部の地震は逆断層の地震としては A が小さめであり、壇・他⁷⁾の式と同程度となっている。

染井・他³⁹⁾は、 $M_w 7.0$ の地震(C5)に対して、経験的グリーン関数法に基づき、2つの強震動生成領域から成る震源モデルを推定している。そこで、S波速度 β を 3.5 km/s として、(10)式により短周期レベルを算出した結果、 $1.13 \times 10^{26} \text{ dyne} \cdot \text{cm/s}^2$ という値が得られた。これは、本研究で推定した $9.7 \times 10^{25} \text{ dyne} \cdot \text{cm/s}^2$ とほぼ同じである。

$$A = 4\pi\beta^2 \left[\sum_{i=1}^N (\Delta\sigma_i r_i)^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

ここで、 i は i 番目のアスペリティを意味し、 N がアスペリティの数、 σ_i がアスペリティの応力降下量、 r_i がアスペリティの面積と等価な円形断層の半径である。ここでは、強震動生成領域をアスペリティとみなして計算を行った。

5. 距離減衰式による震源・伝播経路・地盤増幅特性の検討

図9には、 $M_w 7.0$ の地震(C5)の観測記録の最大加速度と最大速度の距離減衰特性と、司・翠川²¹⁾、片岡・他²²⁾の距離減衰式との比較を示す。観測の方は、(a)には観測された全観測点での値、(b)には片岡・他²²⁾の式で地盤増幅率が得られている観測点での値、(c)には片岡・他²²⁾の地盤増幅率で補正した値を示している。距離減衰式では、国土地理院及びF-netの $M_w 6.6$ を用いたが、比較のために(c)には気象庁の $M_w 6.7$

を用いた場合も追加した。司・翠川²¹⁾、片岡・他²²⁾の距離減衰式を比較すると、片岡・他²²⁾の方が司・翠川²¹⁾より大きく、特に最大速度ではその違いが顕著である。(a)の観測値と距離減衰式を比較すると、観測値が距離減衰式より大きい傾向がみられる。(a)と(b)を比較すると、片岡・他²²⁾で地盤増幅率が得られている観測点のみとすると、全観測点の場合と比べて、値が大きい観測点が除かれている傾向がみられる。これは、図2、図3で示したように、片岡・他²²⁾では、関東平野北部の観測点などで増幅率が得られていないが、佐藤・他³⁸⁾の増幅率でわかるように、これら観測点での地盤増幅率が大きいためである。(b)と(c)から、補正を行うと、片岡・他²²⁾の距離減衰式とほぼ同レベルとなることがわかる。また、火山フロント背弧側の方が前弧側よりやや小さい傾向がみられるが、これは、火山フロント直下近傍や背弧側に存在するLow-Qゾーン(例えば⁹⁾)の影響と考えられる。以上の結果は、この地震の短周期レベルは地殻内地震の平均あるいはやや小さめであったが、周囲に地盤増幅率の大きい観測点が多かったため、地盤増幅率の平均値を用いた既往の距離減衰式より最大加速度や最大速度が大きかったことを意味している。

比較のために、図10には2003年宮城県北部の地震について、同様に最大加速度と最大速度の距離減衰特性を検討した結果を示す。(a)には全観測点の観測値、(b)には片岡・他²²⁾の地盤増幅率で補正した観測値を示した。2003年宮城県北部の地震の記録は、片岡・他²²⁾の距離減衰式のデータに含まれているため、ほとんどの地点で地盤増幅率が得られている。司・翠川²¹⁾と片岡・他²²⁾の式の違いは小さい。また、補正前後とも、観測値は距離減衰式とほぼ同レベルとなっており、短周期レベルが壇・他⁷⁾の式とほぼ同

図9 $M_j 7.0$ の地震(C5)の最大加速度(上段)と最大速度(下段)を片岡・他²²⁾の地盤増幅率で補正した場合としない場合の観測距離減衰特性と距離減衰式^{21),22)} ((a)と(b)は $M_j 6.6$ 、(c)は $M_j 6.6$ と $M_j 6.7$)の比較

レベルであるという結果と整合する。図10の補正後の観測値のばらつきが小さいのは、2003年宮城県北部の地震の記録が片岡・他²²⁾の距離減衰式のデータに含まれているためと考えられる。この地震でも火山フロント背弧側の方が前弧側よりやや小さい傾向がみられる。これまで、西日本の地殻内地震に対しては火山フロントを通過しない観測点のみを用いた距離減衰式が作成されている⁴⁰⁾が、海溝型地震のみならず地殻内地震に対しても火山フロントの影響を考慮した距離減衰式の構築が必要と考えられる。

図9、図10の結果を定量化するために、図11には、片岡・他²²⁾の距離減衰式に対する観測の最大加速度・最大速度の比の平均値の比較を示す。計算には、断層最短距離200km以下のデータを用いた。 $M_J7.0$ の地震(C5)は、 $M_w6.6$ と $M_w6.7$ を用いた場合を示している。地盤増幅率で補正した場合は、最大加速度、最大速度ともほぼ1.0となる。この結果は、上述の考察を定量的に支持する結果となっている。

世界の地殻内地震の強震記録に基づく、応答スペクトルの距離減衰式には、逆断層が一番大きく、正断層が一番小さく、横ずれ断層が中間の地震動レベルとなる特徴がある^{11)~14)}。しかし、 $M_J7.0$ の福島県

(a) 最大加速度：全観測点 (b) 最大加速度：補正あり (c) 最大速度：全観測点 (d) 最大速度：補正あり
図10 2003年宮城県北部の地震($M_w6.1$)の最大加速度と最大速度を片岡・他²²⁾の地盤増幅率で補正した場合としない場合の観測距離減衰特性と距離減衰式^{21),22)}の比較

(a) $M_J7.0$ の地震(C5)： $M_w6.6$ (b) $M_J7.0$ の地震(C5)： $M_w6.7$ (c) 2003年宮城県北部の地震： $M_w6.1$

図11 片岡・他²²⁾の距離減衰式に対する観測の最大加速度・最大速度の比の平均

浜通りの正断層の地震の地震動は、地盤増幅率の補正を行うと地殻内地震の平均値と同レベルであることがわかった。Spudich et al.⁴¹⁾は、正断層の地震の地震動が小さい原因として、McGarr⁴²⁾などで指摘されている応力状態の違いの他に、火山活動との関連性や、地殻熱流量が高いこと、地殻の厚さが薄いことなどのテクトニクス的な特徴が影響している可能性を指摘している。福島県浜通りの正断層の地震には、火山活動との関連性は指摘されておらず、地震前のデータに基づく地殻熱流量⁴³⁾も高くない。また、地殻の厚さ⁴⁴⁾も太平洋岸の海岸沿いの他の地域と同程度である。福島県浜通りの正断層の地震群は、元々、局所的に正断層場であったことと、2011年東北地方太平洋沖地震の発生により応力が変化したことにより発生したと考えられている⁴⁵⁾。一方、世界の地殻内地震に対する距離減衰式^{11)~14),41)}で使われている正断層の地震は、伸長テクトニクス場の地震のみ^{41),46),47)}であるため、テクトニクス的に異なる特徴があるものと考えられる。

6. 応答スペクトルのFN/FP分布の分析

前述のように、応答スペクトルの距離減衰式に対する破壊伝播・震源放射特性については、FN/FPを用いて逆断層、横ずれ断層に対する経験的補正係数が求められている^{15)~17),19)}。主に破壊伝播効果に着目した補正係数では、断層最短距離50km程度以下の震源近傍のみを対象としている^{15)~18)}。一方、佐藤¹⁹⁾は、破壊伝播と震源放射特性を考慮し、観測記録と理論震源放射特性の検討に基づき、横ずれ断層では200kmまで、逆断層では90kmまでの断層最短距離依存の補正係数を求めている。ここでは、正断層の地震と既往の逆断層の地震の観測記録の加速度応答スペクトルからFN/FPを計算し、その分布形状について考察を行った。検討には、K-NET、KiK-net地表の記録を用いた。

はじめに、Spudich et al.⁴⁸⁾に基づき、走向180°、傾斜角60°、すべり角-90°、震源深さ5kmの点震源に対する理論震源放射特性係数の絶対値からFN/FPを算出した。さらに、すべり角のみ-100°とした計算も行った。傾斜角60°は、引間⁴⁹⁾が $M_J7.0$ の地震(C5)の震源インバージョンに用いた2枚の断層の傾斜角が62°、60°であることと、他の正断層の地震のF-netの傾斜角も60°程度のものが多いことから設定した。すべり角-80°は、今回用いた正断層の地震のF-netのすべり角が-90°±10°程度の範囲にあることから、すべり角の違いによるFN/FPの違いをみるために設定した。なお、計算には、気象庁の地下構造モデルJMA2001⁵⁰⁾に基づく射出角を用いるとともに、震源放射特性係数には下限値0.1を設定した¹⁹⁾。図12には、方位角を5°刻みで変化させたときのFN/FPの絶対値を原点からの距離として表示した結果を示す。震源距離Xが、50、100、150、200kmの場合の例である。すべり角が-90°の場合は、FN方向である東西方向が大きくなる特徴がある。すべり角が-100°の場合には、X軸に対して対象とはならず、最大となる方向もFN方向からずれてくる。方位角によっては、FN/FPが節になる領域もある。

図12 Spudich et al.⁴⁸⁾の理論震源放射特性係数に基づくFN/FP(走向180°、傾斜角60°、震源深さ5kmの点震源の場合)

図13(a)、(b)には、 $M_j7.0$ の地震(C5)の周期5秒でのFN/FP分布を示す。(a)は走向をF-netのメカニズム解に基づき 132° 、(b)は気象庁のCMT解に基づき 150° とした場合である。 132° は湯ノ岳断層の走向に近く、 150° は井戸沢断層の走向に近い^{1),2),3)}。引間⁴⁹⁾の波形インバージョンによる震源過程解析では、井戸沢断層の地震モーメントが湯ノ岳断層の約2倍と推定されており、FN/FPには井戸沢断層からの強震動の影響が支配的であったものと考えられる。図13(c)には、走向を 150° とした場合の周期2秒におけるFN/FPを示す。周期2秒では、周期5秒でみられたような特徴はみられない。これは、逆断層の2004年新潟県中越地震と2007年新潟県中越沖地震から得られている補正係数の傾向と同じである¹⁹⁾。

図14には、 $M_j7.0$ の地震(C5)とは走向が異なる3つの正断層の地震について、周期5秒でのFN/FP分布を示す。走向はF-netのCMT解の値を用いた。FN/FPの大きい領域は、断層直交方向に伸びている。図14(c)のC6($M_w5.4$)の図中に丸印で示した観測点での、周期3~10秒の観測速度フィルター波のペーストアップを図15に示す。観測点は、北から南方向へ、上から下へ並べて表示した。いずれの波形も、振幅値を震源距離で除して表示している。したがって、同じ観測点でのFN方向とFP方向の振幅は直接比較できる。震央距離80km程度以下では、伝播速度3.5km/s前後の実体波と考えられる波が卓越している。遠方では、

図 13 $M_j7.0$ の正断層の地震 (C5) の震央位置 (気象庁)・CMT 解 ((a) は F-net、(b) と (c) は気象庁) と FN/FP 分布 (Δ は強震観測点)

図 14 3 つの正断層の地震の震央位置 (気象庁)・CMT 解 (F-net) と周期 5 秒での FN/FP 分布 (Δ は強震観測点、(c) の $\circ$ は図 15 で観測波形を示す観測点であり、MYGH10 は図 16 で対象とする観測点)

図15 C6(M_w 4)の周期3~10秒の観測速度フィルター波のペーストアップ(震源距離で振幅を補正)

伝播速度が遅い表面波と考えられる波が卓越しており、特にFN方向では、伝播速度2.9km/sの波群の卓越がみられる。南側の80km程度以遠の観測点は関東平野内に存在するため、深い堆積層の影響でより遅い波の卓越もみられる。また、実体波部分も表面波部分もFP方向よりFN方向が大きい観測点が多い。図15の観測点では、FN方向がほぼRadial成分、FP方向がほぼTransverse成分であることから、FN方向ではSV波のラディエーションパターンが大きく、遠方ではRayleigh波が卓越しているものと考えられる。

図16には、MYGH10(山元)での、FN成分とUD(上下動)成分の観測記録の周期3~10秒の速度フィルター波と非定常スペクトル、及び、表2の地下構造モデルに基づくRayleigh波基本モードの理論走時⁵¹⁾を示す。表2は、地震調査研究推進本部⁵²⁾の地下構造モデルに基づく、MYGH10直下の地震基盤(上部地殻第1層)、上部地殻第2層、下部地殻、マントルの構造である。FN成分、UD成分の理論走時は、周期4秒以上で観測とほぼ合っている。周期3秒付近では、FN成分の観測波にはより遅い波群の卓越もみられるが、これは、地下構造モデルでは考慮してない地震基盤より上の堆積層の影響によるものと考えられる。周期5秒でのRayleigh波基本モードの理論群速度は約2.9km/sであり、図15に示した震央の北側の観測点での伝播速度約2.9km/sの波群の卓越と整合する。

佐藤¹⁹⁾の逆断層に対する補正係数は、2004年新潟県中越地震と2007年新潟県中越沖地震のみを用いて作成されている。図17には、この2つの地震と2003年宮城県北部の地震の周期5秒でのFN/FP分布を示す。佐藤¹⁹⁾と同様に、2004年新潟県中越地震(M_j 6.8、 M_w 6.6⁵³⁾)の走向はF-net及びAsano and Iwata⁵³⁾の断層モデルの212°であり、2007年新潟県中越沖地震(M_j 6.8、 M_w 6.7⁵⁴⁾)の走向はMiyake et al.⁵⁴⁾の断層モデルの34°である。2003年宮城県北部の地震(M_j 6.4、 M_w 6.1)の走向は、F-net及びHikima and Koketsu⁵⁵⁾の186°である。正断層の地震のFN/FPは、これらの逆断層の地震と同様の傾向にあるが、逆断層に対する補正係数の範囲である90km以内より遠方までFN/FPの大きい領域が伸びており、FN方向でのRayleigh波の卓越が寄与

図 16 C6 ($M_5.4$) の MYGH10 での FN 成分と UD 成分の周期 3~10 秒の速度フィルター波と非定常スペクトル及び、表 2 の地下構造に基づく Rayleigh 波基本モードの理論走時(実線)

表 2 MYGH10 直下のマントルから上部地殻第 1 層までの地下構造⁵²⁾

層厚(km)	P波速度(km)	S波速度(km)	密度(g/cm^3)	層
5.51	5.50	3.20	2.65	上部地殻第1層
9.63	5.80	3.42	2.70	上部地殻第2層
13.67	6.40	3.82	2.80	下部地殻
	8.10	4.46	3.20	マントル

(a) 2004 年新潟県中越地震 ($M_6.6$) (b) 2007 年新潟県中越沖地震 ($M_6.7$) (c) 2003 年宮城県北部の地震 ($M_6.1$)
図 17 3 つの既往の逆断層の地震の震央位置(気象庁)・CMT 解(F-net)と周期 5 秒での FN/FP 分布(Δ は強震観測点、(b)の矩形は Miyake et al.⁵⁴⁾の震源モデル)

しているものと考えられる。

最後に、正断層の地震の M_J と M_w の差について考察する。表 1 に示したように、 $M_J - M_w$ は、F-net の M_w を用いた場合 0.3~0.6、気象庁の M_w を用いた場合 0.3~0.5 の範囲にある。横ずれ断層である $M_J 7.3$ の 2000 年鳥取県西部地震($M_w 6.7$)⁵⁵⁾では、震源での SH 波の放射が大きく、Love 波が卓越するとともに、Lg 波も卓越しており、これにより $M_J - M_w$ が 0.6 と大きかったと考えられている⁴⁶⁾。同様に、正断層の地震では、震源での SV 波の放射が大きく、表面波としては Rayleigh 波が卓越し、 $M_J - M_w$ が比較的大きくなったものと考えられる。

7. まとめ

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震後に発生した $M_J7.0$ の地震を含む福島県浜通りの正断層の地震群の短周期レベルと伝播経路・地盤増幅特性について検討した。その結果、以下のことがわかった。

- ・ スペクトルインバージョンにより推定した $M_J7.0$ の地震($M_w6.6$)の短周期レベルは、壇・他⁷⁾の地殻内地震の M_0 - A 関係よりやや小さいかほぼ同じで、佐藤⁹⁾の横ずれ断層の M_0 - A 関係より大きく、逆断層の M_0 - A 関係より明らかに小さいことがわかった。本研究で推定した短周期レベルは、染井・他³⁹⁾が推定している強震動生成領域から算出した短周期レベルともほぼ同じであった。
- ・ $M_J7.0$ の地震で観測された最大加速度と最大速度は、地盤増幅率の平均値を用いた既往の距離減衰式より大きかったが、これには地盤増幅の影響が含まれている。そこで、片岡・他²²⁾の距離減衰式で求められている各観測点での地盤増幅率で観測値を補正して比較した結果、片岡・他²²⁾の距離減衰式のほぼ同じレベルであることがわかった。この結果は、短周期レベルが地殻内地震として平均レベルであったという結果と整合する。
- ・ スペクトルインバージョンにより推定した震源距離60km以内の震源近傍における Q 値は、1~4Hzで $Q=70f$ ^{0.9}でモデル化された。これは、東日本の逆断層の地殻内地震の震源近傍における平均的 Q 値⁶⁾である $Q=35f$ の約2倍であり、減衰しにくい特徴があることがわかった。
- ・ $M_J7.0$ の正断層の地震($M_w6.6$)では、比較対象とした逆断層の $M_J6.4$ の2003年宮城県北部の地震($M_w6.1$)と同様に、最大加速度、最大速度とも、火山フロントを通過すると減衰が大きくなることを示した。
- ・ 減衰定数5%の加速度応答スペクトルの断層平行方向(FP方向)に対する断層直交方向(FN方向)の比FN/FPを求めた。その結果、周期5秒では、FN/FPが大きい領域が、逆断層の破壊伝播・震源放射特性補正係数の適用範囲である90km以内¹⁹⁾より遠方まで伸びていることを示した。また、 $M_w5.4$ の正断層の地震の観測記録の分析から、FN/FPが大きい領域のFN方向では、Rayleigh波の卓越が大きいことを示した。これが、FN/FPが遠方まで伸びる要因になったと考えられる。

謝辞

本研究では、防災科学技術研究所のK-NET、KiK-net強震記録、PS検層結果、F-netのCMT解、気象庁の震源情報、CMT解の情報を使用致しました。一部の図の作成には、GMT³⁰⁾を使用しました。また、本研究は、(独)原子力安全基盤機構の委託業務「平成22~23年度 強震動予測における震源断層モデルの特性化手法の高度化」の成果の一部である。

参考文献

- 1) 石山達也、佐藤比呂志、伊藤谷生、杉戸信彦、越後智雄、加藤直子、今泉俊文：2011年4月11日の福島県浜通りの地震に伴う地表地震断層について(第2報)(オンライン)、<http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103_tohoku/fukushimamahadoori/#FukushimaNo2>、(2012年7月27日閲覧)
- 2) 丸山正、斎藤英二、吾妻崇、谷口薫、吉見雅行、林田拓己：2011年4月11日福島県浜通りの地震に伴い井戸沢断層に沿って出現した地震断層の緊急現地調査報告(オンライン)、<<http://unit.aist.go.jp/actfault-eq/Tohoku/report/idosawa/idosawa.pdf>>、(2012年7月27日閲覧)
- 3) 栗田康夫、猪原京子、杉山雄一、吉岡敏和、吾妻崇、安藤良輔、丸山正、2011年4月11日福島県浜通りの地震に伴う湯ノ岳・藤原断層の地表変位ベクトル(速報)(オンライン)、<http://unit.aist.go.jp/actfault-eq/Tohoku/report/yunotake_v2.pdf>、(2012年7月27日閲覧)
- 4) 地震調査研究推進本部：全国地震動予測地図 付録3.震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)平成21年12月21日改訂(オンライン)、<http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/g_furoku3.pdf>、(2011年7月27日閲覧)
- 5) Irikura, K. and H. Miyake : Recipe for predicting strong ground motion from crustal earthquake scenarios, Pure Appl. Geophys., Vol.168, 2011, pp.85-104, doi:10.1007/s00024-010-0150-9.
- 6) 佐藤智美：逆断層と横ずれ断層の違いを考慮した日本の地殻内地震の短周期レベルのスケーリング

- 則、日本建築学会構造系論文集、第651号、2010年、pp.923-932.
- 7) 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、第545号、2001年、pp.51-62.
 - 8) 佐藤智美：中小地震の応力降下量の断層タイプ・震源深さ依存性及び地域性に関する研究、土木学会地震工学論文集、第27巻、2003年、p_048.pdf.
 - 9) 中村亮一：短周期地震動記録に基づく日本列島下の三次元減衰構造 Q_s ・震源スペクトル・地盤増幅の同時インバージョンとその応用、博士論文、東京大学大学院理学系研究科、2009年.
 - 10) Brune, J. N. : Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, J. Geophys. Res., Vol.75, 1970, pp.4997-5009.
 - 11) Abrahamson, N. and W. Silva : Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations, Earthquake Spectra, Vol.24, 2008, pp.67-97.
 - 12) Boore, D. M. and G. M. Atkinson : Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s, Earthquake Spectra, Vol.24, 2008, pp.99-138.
 - 13) Campbell, K. W. and Y. Bozorgnia : NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s, Earthquake Spectra, Vol.24, 2008, pp.139-171.
 - 14) Chiou B. S. J. and R. R. Youngs : An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra, Earthquake Spectra, Vol.24, 2008, pp.173-215.
 - 15) Somerville, P. G., N. F. Smith, R. W. Graves, and N. A. Abrahamson : Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity, Seism. Res. Lett., Vol.68, 1997, pp.199-222.
 - 16) Abrahamson, N. A. : Effects of rupture directivity on probabilistic seismic hazard analysis, Proc. the 6th International Conference on Seismic Zonation, 2000, Palm Springs, California.
 - 17) 大野 晋、武村雅之、小林義尚：観測記録から求めた震源近傍における強震動の方向性、第10回日本地震工学シンポジウム論文集、Vol.1、1998年、pp.133-138.
 - 18) Spudich, P. and B. S. J. Chiou : Directivity in NGA earthquake ground motions: analysis using isochrone theory, Earthquake Spectra, Vol.24, No. 1, 2008, pp.279-298.
 - 19) 佐藤智美：地殻内地震の地震動の距離減衰式に対する破壊伝播効果と震源放射特性の補正係数モデル、日本建築学会構造系論文集、第661号、2011年、pp.499-508.
 - 20) 岩田知孝、入倉孝次郎：観測された地震波から震源特性、伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み、地震 第2輯、第39号、1986年、pp.579-593.
 - 21) 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、第523号、1999年、pp.63-70.
 - 22) 片岡正次郎、佐藤智美、松本俊輔、日下部毅明：短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式、土木学会論文集A、Vol.62、No.4、2006年、pp.740-757.
 - 23) 秦吉弥、村田晶、野津厚、宮島昌克：サイト置換手法に基づく2011年長野・新潟県境地震における栄村横倉集落での地震動の評価、日本地震工学会論文集、第12巻、第2号、2012年、pp.60-77.
 - 24) Ingber, L. : Very fast simulated re-annealing, Mathl. Comput. Modelling, Vol.12, No.8, 1989, pp. 967-973.
 - 25) Satoh, T. : Inversion of Q_s value of deep sediments from surface-to-borehole spectral ratios considering obliquely incident SH and SV-waves, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.96, 2006, pp.943-956.
 - 26) Boore, D. M. : Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.73, 1983, pp.1865-1894.
 - 27) Boore, D. M. and J. Boatwright : Average body-wave radiation coefficient, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.74, 1984, pp.1615-1621.
 - 28) Gardner, G. H. F., L.W. Gardner, and A. R. Gregory : Formation velocity and density - the diagnostic basics for stratigraphic traps, Geophysics, Vol.39, 1974, pp.770-780.

- 29) Fletcher, R. : FORTRAN subroutines for minimization by quasi-Newton methods, Report R7125 AERE, Harwell, England, 1972.
- 30) 佐藤智美 : Kik-net強震記録に基づく鳥取県西部地震とその余震のラディエーションパターン及びfmaxの評価、日本建築学会構造系論文集、第556号、2002年、pp.25-34.
- 31) 鶴来雅人、香川敬生、岡崎敦、羽田浩二、入倉孝次郎 : 強震動予測のための高域遮断フィルターに関する研究 - 1995 年兵庫県南部地震の観測記録に基づく検討 -、日本地震工学会論文集、第6巻、第4号、2006年、pp.94-112.
- 32) 国土地理院 : 2011年4月11日福島県浜通りの地震(M7.0)の震源断層モデル(暫定) (オンライン) <<http://www.gsi.go.jp/common/000060655.pdf>>、(2011年7月7日閲覧)
- 33) 高井伸雄、岡田成幸 : 火山フロントを考慮した地震動の距離減衰式改善の試み、第11回日本地震工学シンポジウム論文集、2002年、pp.605-608.
- 34) 森川信之、神野達夫、成田章、藤原広行、福島美光 : 東北日本の異常震域に対応するための最大振幅および応答スペクトルの新たな距離減衰式補正係数、日本地震工学会論文集、第6巻、第1号、2006年、pp.23-41.
- 35) Hikima, K. and K. Koketsu : Source processes of the foreshock, mainshock and largest aftershock in the 2003 Miyagi-ken Hokubu, Japan, earthquake sequence, Earth Planets Space, Vol.56, 2004, pp.87-93.
- 36) Wessel, P. and W. H. F. Smith : New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS, AGU, 1998.
- 37) 佐藤智美、大川出、西川孝夫、佐藤俊明、関松太郎 : 応答スペクトルと位相スペクトルの経験式に基づく想定地震に対する長周期時刻歴波形の作成、日本建築学会構造系論文集、第649号、2010年、pp.521-530.
- 38) 佐藤智美、大川出、西川孝夫、佐藤俊明、関松太郎、久田嘉章 : 経験式に基づく海溝型地震に対する長周期時刻歴波形の作成と検証、第13回日本地震工学シンポジウム、2010年、pp.2632-2639、OS6-Sat-PM(OS6)-5.
- 39) 染井一寛、宮腰研、入倉孝次郎 : 経験的グリーン関数法を用いた2011年4月11日福島県浜通りの地震(M_{JMA}7.0)の震源モデルの構築と強震動シミュレーション、日本地震学会2011年秋季大会講演予稿集、2011年、P2-29.
- 40) 佐藤智美 : 地殻内地震に対するP 波部・S 波部・全継続時間の水平・上下動の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、第632号、2008年、pp.1745-1754.
- 41) Spudich, P., J. B. Fletcher, M. Hellweg, J. Boatwright, C. Sullivan, W. B. Joyner, T. C. Hanks, D. M. Boore, A. McGarr, L. M. Baker, and A. G. Lindh : SEA96-A new predictive relation for earthquake ground motions in extensional tectonic regimes, Seism. Res. Letters, Vol.68, 1997, pp.190-198.
- 42) McGarr, A. : Scaling of ground motion parameters, state of stress and focal depth, J. Geophys. Res., Vol.89, 1984, pp.6969-6979.
- 43) 田中明子、山野誠、矢野雄策、笹田政克 : 日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース、Chishitsu News, no.603, 2004年、pp.42-45.
- 44) Zhao, D., A. Hasegawa, and S. Horiuchi : Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan, J. Geophys. Res., Vol.97, 1992, pp.19909-19928.
- 45) Imanishi, K., R. Ando, and Y. Kuwahara : Unusual shallow normal-faulting earthquake sequence in compressional northeast Japan activated after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, Geophys. Res. Lett., 2012, doi:10.1029/2012GL051491.
- 46) Spudich, P., J. B. Fletcher, M. Hellweg, J. Boatwright, C. Sullivan, W. B. Joyner, T. C. Hanks, D. M. Boore, A. McGarr, L. M. Baker, and A. G. Lindh : Earthquake ground motions in extensional tectonic regimes, Open File Report 96-292, U.S.G.S., 1996, pp.1-351.
- 47) Power, M., B. Chiou, N. Abrahamson, Y. Bozorgnia, T. Shantz, and C. Roblee : An overview of the NGA project, Earthquake Spectra, Vol.24, 2008, pp.3-21.
- 48) Spudich, P., B. S. J. Chiou, R. Graves, N. Collins, and P. Somerville : A formulation of directivity for earthquake sources using isochrone theory, Open-file Report 2004-1268, U.S.G.S., 2004, pp.1-54.

- 49) 引間和人：2011年4月11日福島県浜通りの地震($M_J7.0$)の震源過程、地震 第2輯、第64巻、2012年、pp.243-256.
- 50) 上野寛、畠山信一、明田川保、舟崎淳、浜田信生：気象庁の震源決定の改善-浅部速度構造と重み関数の改良-、験震時報、第52巻、2002年、pp.11-19.
- 51) Harkrider, D. G. : Surface waves in multilayered elastic media. II. Higher mode spectra and spectral ratios from point source in plane layered earth models, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.60, 1970, pp.1937-1987.
- 52) 地震調査研究推進本部：「長周期地震動予測地図」2009年試作版(オンライン)、<http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_choshuki/index.htm>、(2010年8月15日閲覧)
- 53) Asano, K. and T. Iwata : Source rupture process of the 2004 Chuetsu, Mid-Niigata prefecture, Japan, earthquake inferred from waveform inversion with dense strong-motion data, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.99, 2009, pp.123-140.
- 54) Miyake, H., K. Koketsu, K. Hikima, M. Shinohara, and T. Kanazawa : Source fault of the 2007 Chuetsu-oki, Japan, earthquake, derived from near-source strong-motion records, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.100, 2010, pp.384-391.
- 55) 岩田知孝、関口春子：2000年鳥取県西部地震の震源過程と震源域強震動、第11回日本地震工学シンポジウム、2002年、pp.125-128.
- 56) Furumura, T. and B. L. N. Kennett : Variation in regional phase propagation in the area around Japan, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 91, 2001, pp.667-682.

(受理：2012年5月16日)

(掲載決定：2012年8月6日)

Short-period Spectral Level, Path and Site-amplification Derived from Strong Motion Records during the Normal-faulting Earthquakes in Hamadori, Fukushima Prefecture in 2011

SATO H Toshimi¹⁾ and TSUTSUMI Hideaki²⁾

1) Member, Principal Researcher, Ohsaki Research Institute, Dr. Eng.

2) Non-Member, Director, Japan Nuclear Energy Safety Organization, Mr. Eng.

ABSTRACT

We estimate the short-period spectral level A of the normal-faulting earthquakes in Hamadori, Fukushima prefecture in 2011 using the spectral inversion method. The A of $M_J7.0(M_w6.6)$ earthquake is consistent with the average empirical relation between the seismic moment and A for crustal earthquakes. The PGA and PGV of this earthquake corrected by empirical site-amplification factor at each strong motion station agree with the average empirical attenuation relation for crustal earthquakes in Japan. The high area of the fault-normal to fault-parallel ratios of response spectra at 5 second of the normal-faulting earthquakes is longer than that of reverse-faulting earthquakes due to the domination of Rayleigh waves.

Key Words: Normal-faulting earthquakes, Short-period spectral level, Empirical attenuation relation, Rayleigh waves