

2005年8月16日宮城県沖の地震 (Mw7.2) の高周波震源過程解析

中原 恒, 澤崎 郁 (東北大学大学院理学研究科)

「要旨」

2005年8月16日11時46分, 宮城県沖を震源とするモーメント・マグニチュード (Mw) 7.2の地震が発生し, 宮城県川崎町で最大震度6弱を記録した. 震源メカニズム解, 余震分布などからこの地震はプレート境界型地震であると考えられている. (独) 防災科学技術研究所の強震観測網K-NET, Kik-netのうち, 震央距離130km以内にある26点の近地強震動記録を用いて, 記録の特徴を調べるとともに, 高周波エンベロープ・インバージョン解析を行い断層面上の地震波エネルギー輻射量分布を解明した. 仮定した断層面は, 長さ, 幅ともに64km, 走向 200° , 傾斜 20° であり, $8\text{km} \times 8\text{km}$ の小断層合計64個に分割された. 解析の結果, 破壊伝播速度は 2.4km/s , 小断層のエネルギー輻射継続時間は2 s が最適であった. また, 断層面上の高周波 (1-16Hz) 地震波エネルギー輻射量は, 破壊開始点, それを取り囲む半円の領域, 沖合側の北端の3箇所で大いことが明らかになった. 高周波エネルギーの輻射位置と低周波のアスペリティの位置の対応関係は相補的ではない. 1-16Hzの周波数帯で断層面から輻射された高周波地震波エネルギー量は, $8.4 \times 10^{15}\text{J}$ であった. この値は東北日本の沖合で発生する同じ規模の地震としては標準的であるが, 同じ規模の日本の内陸地震に比べると5倍から10倍程度も大きく, 高周波の地震波輻射特性には地域性が存在することを確認するものとなった.

「本文」

1. はじめに

2005年8月16日11時46分, 宮城県沖を震源とするモーメント・マグニチュード (Mw) 7.2の地震が発生し, 宮城県川崎町で最大震度6弱が観測された. この地震による死者はいなかったものの, 100名近い負傷者がでた. この地震の震源メカニズムは低角逆断層型であり, 余震分布を考慮すると太平洋プレートと陸側のプレートとの境界で発生した典型的な地震である. この地震の震源域は想定されている宮城県沖地震の震源域と重なり, この地震が想定地震であるのかどうか多くの人の関心を集めた. 政府の地震調査委員会によると, この地震は想定地震とは異なるものと判断されており, この地震が想定地震に与える影響が懸念される. このような観点からも, 今回の地震の震源過程の詳細を明らかにすることは重要な意味をもつ.

この地震の際には, 防災科学技術研究所のK-NET, Kik-netをはじめとする強震観測網により多くの良好な強震動記録が得られている. 本研究では震源距離が約130km以内にある26点における近地強震動記録を利用して, まず震源過程の観点からそれらの記録の特徴を述べる. 続いて, 高周波 (1-16Hz) エンベロープ・インバージョン解析[たとえば Nakahara et al. (1998)]を行い, 断層面上の高周波地震波エネルギー輻射量分布を明らかにする.

2. 近地強震動記録の特徴

図1は、震央距離が約130km以内にあるK-NET, Kik-net観測点 (▲印) の位置を震央 (★印) と共に示したものである。これらの点の加速度記録の主要動部分を見ると、震央よりも北側の観測点では少なくとも2個のピークを確認することができるが、震央より南側の観測点では2個のピークを見分けることが困難になる。なお、K-NET, Kik-netで捉えられた最大加速度は、震央の北西に位置するMYG004において、2つ目のピークで記録された564gal (特に南北動で514gal) であった。主要動の継続時間は観測点によって異なり、およそ15秒から25秒間である。

2つのピークの特定を容易にするため、加速度記録を数値積分して速度記録に変換し、0.1-1Hzのバンドパスフィルタをかけた記録を観測点の方位角の順に並べた結果が図2である。ここではEW成分の結果のみを示している。震央より北側、特に方位角が290°以上の観測点では、最初のピークと2つ目のピークが非常に明瞭に確認でき、その時間差は5sから7s程度である。一方、南の観測点になるほど2つのピークの間隔が小さくなるように見え、MYGH10以南の観測点ではピークの分離が難しい。相対震源決定の考え方に基くと、このピークの間隔より、2つ目のパルスの輻射位置は1つ目のパルスの輻射位置から南西の方向に位置することが示唆される。

3. エンベロープ・インバージョン解析

エンベロープ・インバージョン解析の手法は Nakahara et al. (1998)による。図3に示した概念図に基づきその概略を説明する。無限均質媒質中に等方散乱体がランダム一様に分布するものとする。ここでは、S波エネルギーのみを考慮し、さらにS波からS波への散乱のみを仮定する。そのような媒質中に震源断層を考え、それはいくつかの小断層から構成されるものとする。各小断層の中心にはダブルカップル型の輻射特性をもつ点震源が配置されている。開始点から一定速度で伝播した破壊フロントが小断層の中心を通過すると、Box-car型の時間関数に従って地震波エネルギーが輻射されるものとする。輻射された地震波エネルギーは、伝播過程で内部減衰や多重散乱の影響を受け、さらに観測点(サイト)直下の地盤の影響を受け、観測点に到達する。このように、観測点で観測されるエンベロープは、震源、伝播、サイト増幅の影響を受けている。そのうち、伝播による減衰と多重散乱過程は、Sato et al. (1997)の輻射伝達理論によるモデルに基づき考慮する。なお、輻射伝達理論とは、不均質媒質中の波動伝播を、等方散乱体がランダム一様に分布する媒質におけるエネルギーの輸送過程としてモデル化するものであり、このモデルによると媒質はS波の速度、散乱係数、内部減衰パラメタの3つで特徴づけられる。伝播過程の影響を考慮した後、震源での地震波エネルギー輻射量と観測点でのサイト増幅係数をインバージョンにより推定する。ただし、サイト増幅係数は基準点に対する値である。また、破壊伝播速度とBox-car時間関数の継続時間はグリッドサーチにより推定する。

インバージョン解析には、前述の26点における記録を使用した。基準観測点はKik-netによるMYGH12観測点のボアホール点(深度103m)とした。3成分加速度記録に対し次の手順で処理を行った。(1)加速度記録を数値積分により速度記録に変換する、(2)周波数1-2, 2-4, 4-8, 8-16Hzのバンドパスフィルタをかける、(3)2乗する、(4)3成分の和を取る、(5)3秒間の移動平均をと

り平滑化する、(6)媒質の密度 (2.5g/cm^3) をかけてエネルギー密度の次元をもつエンベロープとする。S波部分のみを解析に使用するため、解析区間はS波初動到達時から震源経過時間 64 秒までとする。

エンベロープグリーン関数の計算に用いたパラメタについては、平均S波速度を 3.85km/s とし、散乱係数と内部減衰パラメタは桜井(1995)による宮城県女川町での値(表1)を使用した。走時と射出角の補正には4層からなるS波速度構造(表2)を用いた。

余震分布と長周期波形インバージョンの結果[八木, (2005)]を参考に、断層面 (Strike= 200° , Dip= 20° , 長さ 64km , 幅 64km) を設定し、64個の小断層 (8km四方の正方形; 中心位置が図1の●印) に分割した後、各小断層からの地震波エネルギー輻射量を推定する。但し、各小断層には Strike= 200° , Dip= 20° , Rake= 87° の震源メカニズム解をもつ点震源を配置する。

グリッドサーチの結果、図4の★印で示すように、破壊伝播速度は 2.4km/s 、輻射継続時間は2秒と求められた。エンベロープの残差2乗和のコンター形状から判断すると、輻射継続時間は精度よく推定されている。しかし、破壊伝播速度に関しては 2.4km/s から 3.5km/s の範囲内でありあまりよく拘束されておらず、これは陸側の観測点のみを使用する解析の限界であると考えられる。推定された断層面におけるエネルギー輻射量分布を図5に示す。破壊開始点付近、それを半円形に取り囲む領域、ならびに断層北東端の3箇所エネルギー輻射量が大きく、この地震は多重震源であることが明らかになった。以降、それぞれを高周波輻射域1, 2, 3と呼ぶ(図7参照)。なお、高周波輻射域2は半円形に広がった領域となっているが、その中では破壊開始点の南西側の寄与が大きい。解析した周波数帯1-16Hzの地震波エネルギー量をすべて足し合わせると $8.4 \times 10^{15}\text{J}$ となる。図6に示すとおり、理論エンベロープ(青線)は観測エンベロープ(赤線)をよく再現できている。特に、北側に位置する観測点(図6右側)では、観測されたエンベロープには2つのピークが明瞭に観測されるが、1番目、2番目のピークに対応する震源がそれぞれ高周波輻射域1, 高周波輻射域2である。高周波輻射域3は、観測エンベロープのコーダ部分に対応し、記録の上からはあまり大きな寄与はないが、距離が遠いため大きなエネルギー量として断層面まで戻されるものと考えられる。

4. 議論

本研究の結果を長周期波形インバージョンの結果と比較する。まず本研究でもとめた周波数帯1-16Hzの地震波エネルギー輻射量分布を図7左図に白黒の濃淡で示す。黒い色ほど強いエネルギー輻射を意味する。一方、周波数0.05-0.5Hzの長周期帯において、八木(2005)は遠地実体波記録を用いた波形インバージョン解析を行い、断層面上のすべり量分布を明らかにした。その結果(図7右のカラーの図)によると、破壊開始点付近ですべり量が大きく、最大すべり量は約 0.7m である。両者を比較すると、破壊開始点付近の高周波輻射域1では短周期、長周期とも強く輻射されている。また高周波輻射域2では、高周波輻射域1の南西側で大すべり域と一部重なっている。しかし、高周波輻射域3に対応する大すべり域はない。以上より、今回の地震では、高周波と低周波の輻射域は相補的とは言えず、複雑であったものと考えられる。

次に今回の地震の高周波エネルギー輻射量について検討を行う。中原(2005)はこれまで解析し

てきた9つの中・大地震の解析結果をまとめて、高周波エネルギー輻射に関する統計的特徴を明らかにした。その中で、5つの内陸地震と4つの海の地震（うちプレート境界3つ、スラブ内1つ）にグループ分けした結果、海の地震は同じマグニチュードの内陸地震と比較して、5倍から10倍程度大きい高周波地震波エネルギーを輻射することを指摘した。この4つの海の地震とは、1994年三陸はるか沖地震（Mw7.7）、2003年十勝沖地震の本震（Mw8.3）、最大余震（Mw7.3）、2003年宮城県沖のスラブ内地震（Mw7.0）であり、いずれも北海道、東北日本で発生した地震である。そのため、海の地震の一般的な特徴というより地域性を反映したものかもしれない。これら4つの海の地震に対して、オクターブ幅の周波数帯域において断層面全体から輻射される高周波地震波エネルギー量とMwの関係を図8に示す。図中の色の違いが周波数帯の違いに対応する。図中の実線は、エネルギーの対数がマグニチュードによってスケールされる関係式であり、レベルはデータに概ね合致するように描かれている。これは、地震波エネルギーの対数がマグニチュードの1.5倍に比例するというグーテンベルグ・リヒターの関係式[Gutenberg and Richter (1956)]とは異なっており、インコヒーレントに輻射される高周波地震波エネルギーが示す特徴的なスケーリング則である。この図中に、今回の地震の結果を赤色のダイヤ印で示す。値が大きい順から、1-2, 2-4, 4-8, 8-16Hzの結果である。1-2, 2-4Hzの値はほぼ同じであるため、図中ではほぼ重なって見える。これらと実線の関係式とを比較すると、両者はほぼ一致している。そのため、今回の地震の高周波エネルギー輻射量は、これまでの4つの地震の傾向とほぼ同様であることが分かった。これは今回の地震が東北日本で発生する海の大・中地震としては標準的であることを示す。しかし、これは同規模の内陸地震に比べると5-10倍大きい高周波地震波エネルギーを輻射したことを意味しており、高周波の地震波輻射特性には明らかな地域性が存在することを確認するものである。

5. まとめ

2005年8月16日宮城県沖の地震に対して、近地強震動記録を用いて、それらの特徴を調べるとともに、高周波エンベロープ・インバージョン解析を行い断層面上の地震波エネルギー輻射量分布を明らかにした。その結果、破壊伝播速度は2.4km/s、小断層のエネルギー輻射継続時間は2sが最適であった。断層面上の高周波（1-16Hz）地震波エネルギー輻射量分布は、破壊開始点、それを取り囲む半円の領域、沖合側の北端の3箇所で大いことが明らかになった。高周波エネルギーの輻射位置と低周波の大すべり域の位置の対応関係は相補的ではない。また、高周波地震波エネルギー輻射量は、1-16Hzにおいて 8.4×10^{15} Jであった。これは、同じ規模の日本の内陸地震に比べて5-10倍程度大きく、大・中地震の高周波地震波輻射特性には地域性が存在することを確認する結果となった。

謝辞 本研究では、独立行政法人防災科学技術研究所のK-NET、Kik-netの強震動記録を使用させていただきました。筑波大学の八木勇治博士には、解析結果の図を使用させていただきました。ここに記して感謝いたします。

表1 解析に使用した散乱・減衰パラメタ[桜井 (1995)]

周波数 (Hz)	散乱係数 (km^{-1})	内部減衰 Q 値
1-2	0.0033	352.1
2-4	0.0035	408.2
4-8	0.0032	735.3
8-16	0.0050	990.1

表2 解析に使用した S 波速度構造

層番号	S 波速度 (km/s)	層厚 (km)
1	3.18	7.0
2	3.46	11.0
3	3.93	17.0
4	4.44	半無限

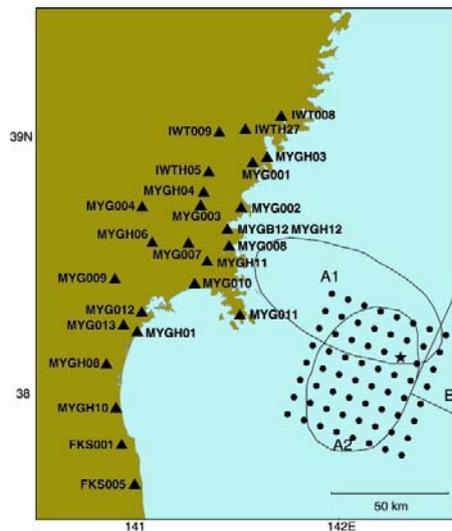


図1 強震観測点 (▲印) と仮定した断層モデル. ★印は破壊開始点, ●印は小断層の中心位置を示す. 領域 A1, A2, B は地震調査委員会による宮城県沖地震の想定震源域である.

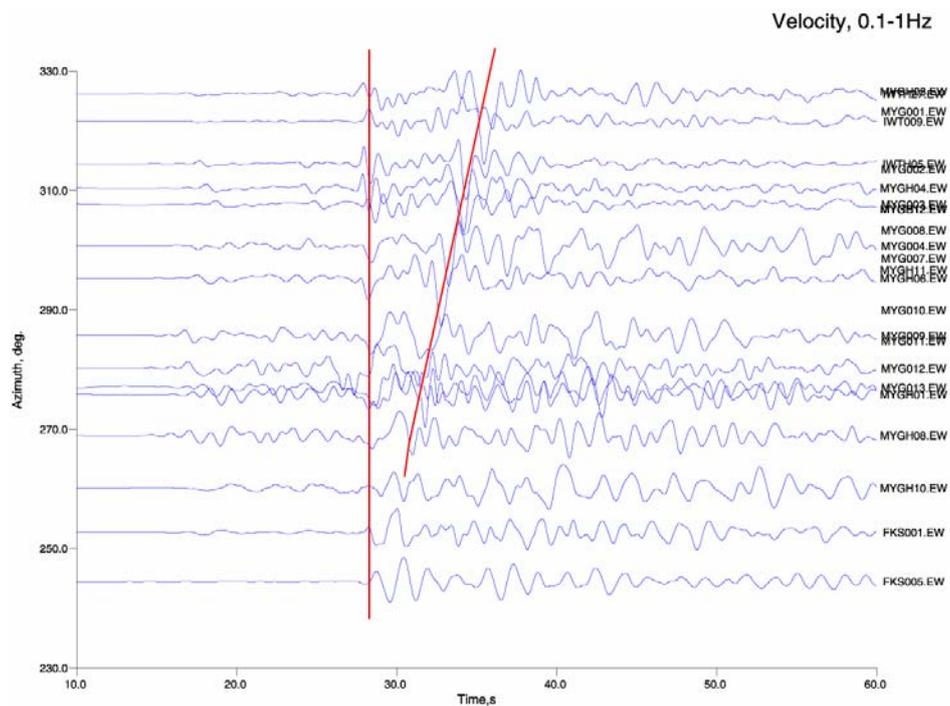


図 2 速度記録東西動成分の方位角に沿ったペーストアップ．最初のパルスが並ぶように時刻を揃えている．

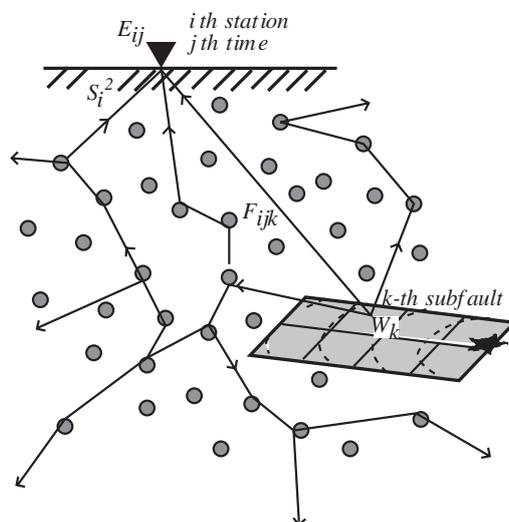


図 3 エンベロープ・インバージョン法の概念図．星印は破壊開始点，灰色の四角は断層面，灰色丸印は S 波の等方散乱体，黒逆三角印は観測点を表す．

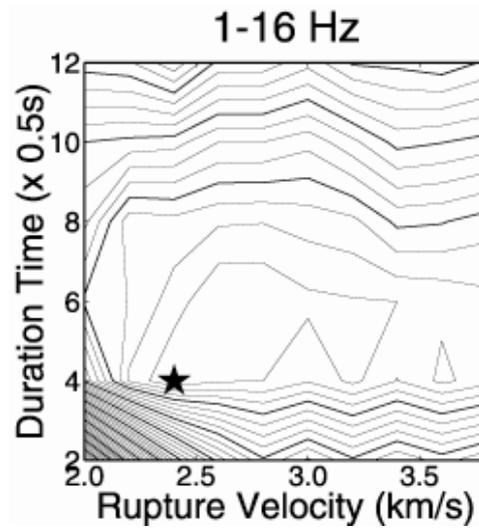


図 4 破壊伝播速度と輻射継続時間のコンター図. ★印は最小残差が得られた点である.

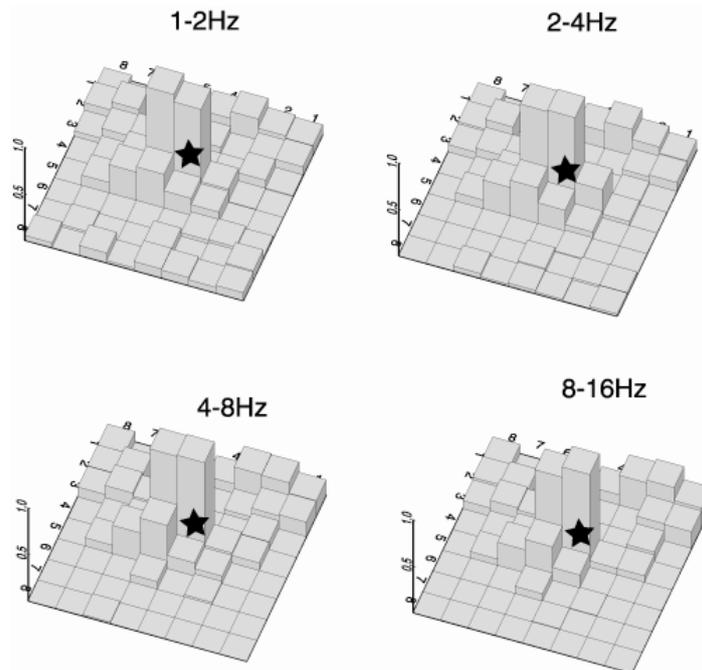


図 5 断層面上の高周波地震波エネルギー輻射量分布. 星印は破壊開始点を表す.

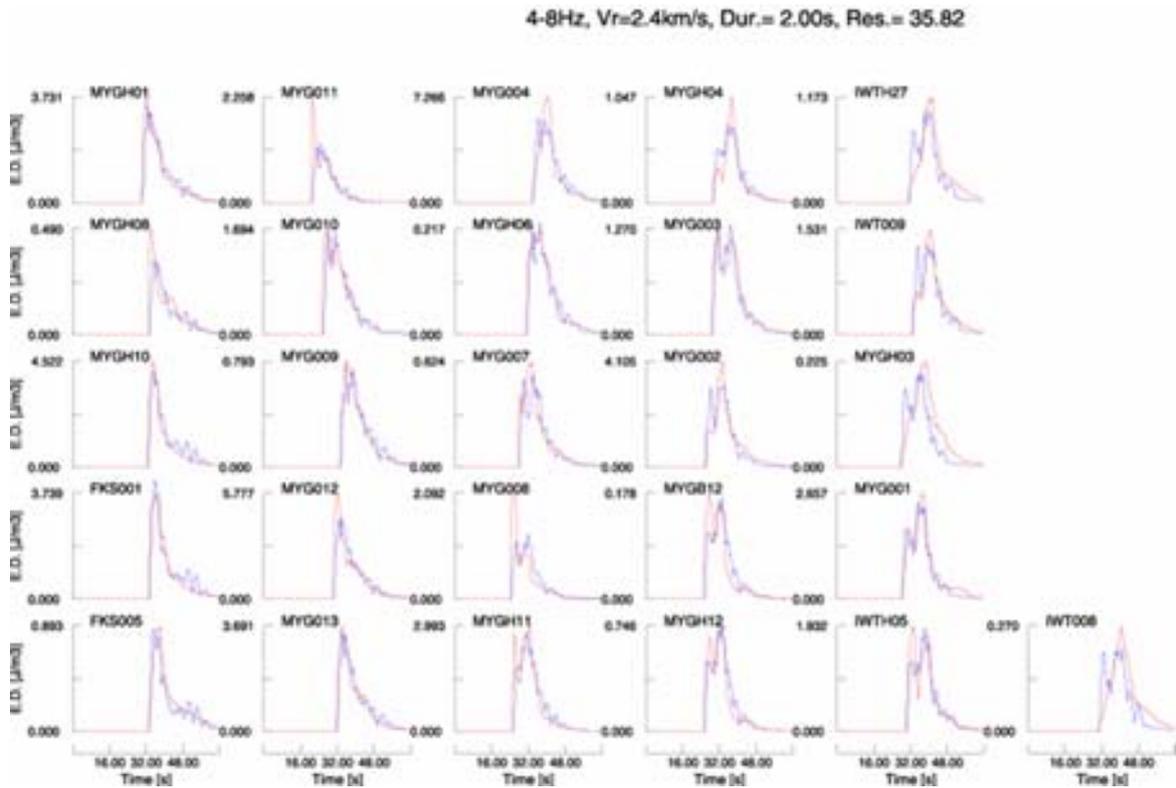


図6 観測エンベロープ（赤線）と理論エンベロープ（青線）との比較（4-8Hzの例）。

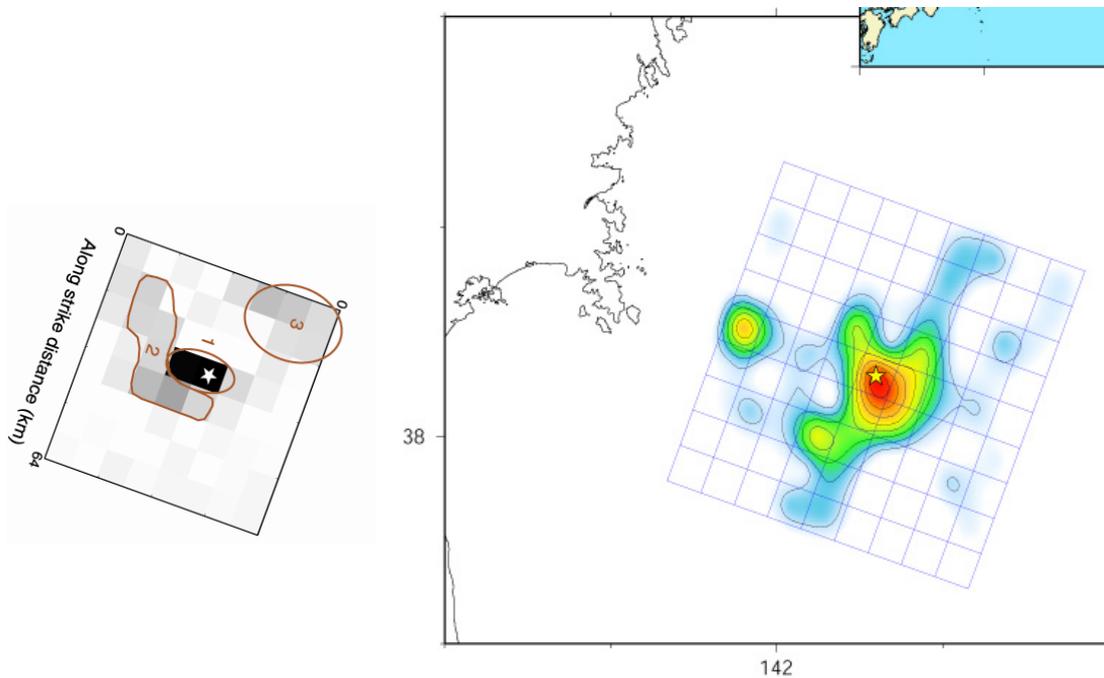


図7 高周波（1-16Hz）地震波エネルギー輻射量分布（左図；白黒濃淡）と長周期波形インバージョンによるすべり量分布（右図；カラーの図）[八木(2005)]。星印は破壊開始点を表す。それぞれ黒い色，赤に近い色ほど値が大きいことを意味する。

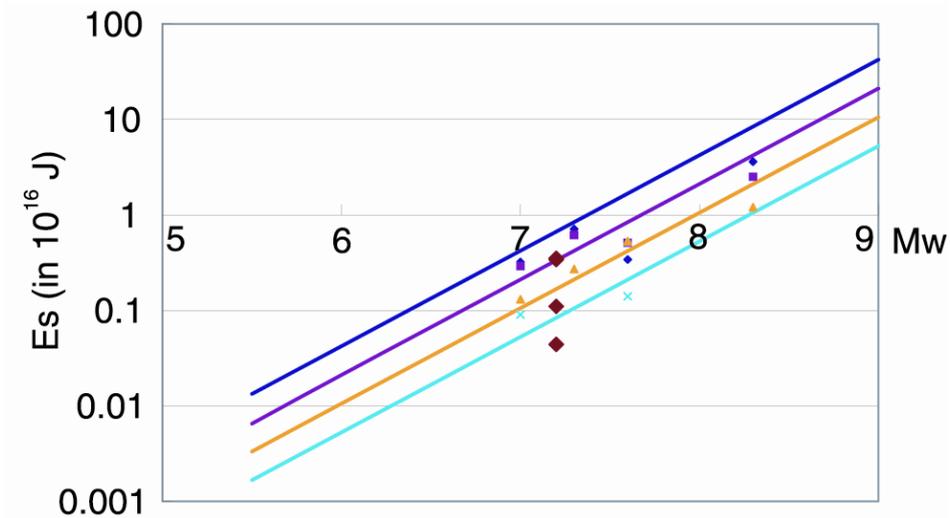


図8 高周波エネルギー輻射量のスケーリング関係。縦軸は対数で 10^{16} J単位，横軸はMwである。青色，桃色，黄色，水色は 1-2, 2-4, 4-8, 8-16Hzを意味する。シンボルは，中原(2005)による東北日本の4つの海の地震に対する解析結果，実線はそれらを説明するスケーリング則で，エネルギーの対数がMwに比例する。赤色のシンボルは今回の地震の結果である。

参考文献

- Gutenberg, B., and C. F. Richter, 1956, Magnitude and energy of earthquakes, *Ann. Geophys.*, **9**, 1-15.
- 中原 恒, 2005, エンベロープ・インバージョン解析により明らかになった高周波地震波エネルギー輻射の統計的特徴, 日本地震学会秋季大会講演予稿集, B101.
- Nakahara, H., T. Nishimura, H. Sato, and M. Ohtake, 1998, Seismogram envelope inversion for the spatial distribution of high-frequency energy radiation from the earthquake fault: Application to the 1994 far east off Sanriku earthquake, Japan, *J. Geophys. Res.*, **103**, 855-867.
- 桜井健, 1995, 多重非等方散乱にもとづく地震波の散乱減衰と内部減衰の分離, 東北大学修士論文.
- Sato, H., H. Nakahara, and M. Ohtake, 1997, Synthesis of scattered energy density for the non-spherical radiation from a point shear dislocation source based on the radiative transfer theory, *Phys. Earth Planet. Int.*, **104**, 1-13.
- 八木勇治, 2005, 2005年8月16日宮城県沖で発生した地震の断層ずれ破壊の様子, http://geo.tsukuba.ac.jp/press_HP/yagi/EQ/20050816NorthJapan/.