

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：82113

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540460

研究課題名(和文) 津波警報に必要な地震情報の迅速な推定

研究課題名(英文) Estimation of earthquake information necessary for tsunami early warning

研究代表者

原 辰彦 (Hara, Tatsuhiko)

国立研究開発法人建築研究所・国際地震工学センター・上席研究員

研究者番号：40360466

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、津波警報に必要な地震情報の一つである地震のマグニチュードを、震央距離30度以内で観測された地震波形の高周波震動継続時間と最大変位振幅から迅速に推定する計算式を求めた。また津波地震は長い継続時間と小変位振幅で特徴づけられることを示した。遠地データを使う場合のマグニチュード計算式を改定した。強震動の継続時間と最大変位振幅を用いた地震規模推定の可能性を検討した。遠地で観測された地震波の高周波成分から断層運動の終端点を推定する手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：We derived a set of the coefficients of the magnitude formula using high frequency seismic signal durations and maximum displacement amplitudes measured from regional data by a grid search approach. We showed that tsunami earthquakes were characterized by small displacement amplitudes and long high frequency seismic signal durations measured from regional data. We revised a set of the magnitude formula coefficients for tele-seismic data. We measured strong motion durations and maximum displacement amplitudes. Their products with epicentral distances show a good correlation with moment magnitudes. We developed a method to determine the end point of rupture using high frequency seismic signal durations from tele-seismic data.

研究分野：固体地球惑星物理

キーワード：マグニチュード 津波警報

### 1. 研究開始当初の背景

海域で大地震が発生した場合、その大きさ等を迅速に把握することは津波警報にとって重要である。研究代表者は、遠地（震央距離 30～85 度）で観測された P 波の高周波震動継続時間と最大変位振幅を用いたマグニチュード計算手法を開発し、この手法がマグニチュード 9 級の巨大地震や津波地震に適用可能であることを示した（Hara, 2007a, 2007b）。より迅速にマグニチュードを推定するには、震央距離 30 度以下で観測されるデータを解析する手法の開発が必要であった。

また、研究代表者の研究結果は、高周波震動継続時間と最大変位振幅から津波地震を識別できる可能性及び高周波震動継続時間から断層運動を推定できる可能性を示唆した（Hara, 2007b, 2011）。

### 2. 研究の目的

本研究では、津波警報に必要な地震情報の一つである地震のマグニチュードを、遠地データの解析より迅速に推定するために、震央距離 30 度以下で観測されたデータからマグニチュードを推定する計算式を求めた。このためには、遠地データの解析結果と比較する必要があったので、遠地データを使ったマグニチュードの計算式を改定した。また、高周波震動継続時間と最大変位振幅を使って地震の大きさを推定するアプローチがローカルなデータにも適用できるかを検討するために、強震動記録を解析した。震央距離 30 度以下で観測されたデータから計測した高周波震動継続時間と変位振幅を用いて、迅速に津波地震を識別する可能性を検討した。また、遠地で観測された高周波震動継続時間を用いて、高周波エネルギーを放射した断層運動を推定する方法を開発し、その有効性を検討した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 高周波震動継続時間と変位振幅を用いたマグニチュード計算式の改定

Hara (2007a) は、遠地で観測された P 波の 2-4Hz の高周波成分の継続時間（高周波震動継続時間）と最大変位振幅から地震のマグニチュードを求める方法を開発した。本報告書では以降、この手法で計算されるマグニチュードを  $M_{hdd}$  と呼ぶ（原, 2013）。本研究では、手法を開発した 2007 年以降に複数の巨大地震が発生したことに鑑み、また震央距離 30 度以下のデータ（以下、リージョナルデータと呼ぶ）の解析結果との比較のために、震央距離 30～85 度のデータセットを拡充して、 $M_{hdd}$  の計算式の改定を行った。

$M_{hdd}$  は最大変位振幅、震央距離、高周波震動継続時間から計算され、それぞれに対する係数と定数項の 4 つの係数  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  をもつ。本研究では、これらの係数をパラメタとするグリッドサーチを行った。 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  の各組合せに対してマグニチュードの残差が最小にな

る  $\delta$  を求めた。係数の各組合せに対して計算された  $M_{hdd}$  と  $M_w$  の差に対して、 $M_w$ 、震央距離の対数、高周波震動継続時間の対数それぞれを変数として直線を当てはめ、その傾きと各変数の範囲の積によって、各変数に対する依存性を評価した。

データとしては、1994 年～2015 年 5 月に発生した  $M_w$  7.2 以上で深さ 50km 以浅の地震を選び、遠地の GSN (the Global Seismograph Network) 観測点で記録された広帯域地震波形データを IRIS (the Incorporated Research Institutions for Seismology) データセンターから取得した。Hara (2007a) に従い、高周波震動継続時間、最大変位振幅を計測し、解析に用いた。

グリッドサーチで  $M_{hdd}$  と比較する  $M_w$  の値としては、グローバル CMT カタログの値を用いた。ただし、2004 年 12 月 26 日に発生したスマトラ地震と 2011 年東北地方太平洋沖地震についてはそれぞれ Park et al. (2005), Duputel et al. (2011) を参考にして、9.15, 9.02 とした。

#### (2) 高周波震動継続時間と変位振幅を用いたマグニチュード計算手法のリージョナルデータへの適用

$M_{hdd}$  をより迅速に計算するために、 $M_{hdd}$  のリージョナルデータに対する適用可能性を調べた。まず、リージョナルデータから高周波震動継続時間を計測し、遠地データの値と比較した。データとしては、1994 年から 2015 年 5 月に発生した  $M_w$  7.2 以上で深さ 50km 以浅の地震を選び、震央距離 10-30 度にある FDSN (the International Federation of Digital Seismograph Networks) 観測点で記録された広帯域地震波形データを IRIS データセンターから取得した。P 波到着から S 波到着までの時系列に Hara (2007a) の手法を適用し、高周波震動継続時間を計測した。

次に、(1) と同様に、 $M_{hdd}$  の係数をパラメタとするグリッドサーチを行い、 $M_{hdd}$  と  $M_w$  の差と  $M_w$ 、震央距離、高周波震動継続時間に対する依存性を評価した。

#### (3) 強震動の継続時間と変位振幅を用いた地震規模決定の検討

強震動の継続時間と変位振幅を用いた地震規模決定の可能性を調べるために、2003 年以降に日本及びその周辺で発生した  $M_w$  7.2 以上の 9 地震（2003 年十勝沖地震、2011 年東北地方太平洋沖地震を含む）を解析した。波形データとしては、国立研究開発法人防災科学技術研究所の K-NET と KiK-net の加速度記録（震央距離 400km 以内）を用いた。

Hara (2007a) の高周波震動継続時間の計測方法を基に、強震動の継続時間を計測した。バンドパスフィルターの帯域はより高周波帯域（5-10 Hz）を用いた。P 波の到着時刻は、STA/LTA 法による自動検測値を用いた。平滑化した時系列の振幅が最大値の 10% 以下になった時刻から S 波の理論到達時刻を引いた値を強震動の継続時間とした。(1), (2)

では、P波部分を用いて継続時間を計測したが、震央距離が短い場合はS波が顕著になるので、S波部分から継続時間を計測した。S波の理論到達時刻の計算には、気象庁地震月報（カタログ編）の震源（一元化震源）とJMA2001走時表（上野・他，2002，駿震時報）を用いた。変位振幅はハイパスフィルター（コーナー周波数 0.01Hz）をかけた時系列から計測した。

(4) リージョナルデータを用いた津波地震の識別

1992年9月2日ニカラグア津波地震 ( $M_w$  7.6) 及び1994年から2013年7月に発生した  $M_w$  7.2以上で深さ50km以浅の地震に対して、震央距離30度以内で観測された広帯域地震波形記録から計測した最大変位振幅と震央距離の積の高周波震動継続時間に対する比を求め、津波地震を識別できるか検討した。

(5) 高周波震動継続時間を用いた断層運動の推定

遠地で観測されたP波の高周波震動継続時間をデータとして、断層運動の停止時刻及び終端点をグリッドサーチ法で求めることにより、地震波の高周波成分を励起した断層運動を推定した。

1994年三陸はるか沖地震，2003年十勝沖地震，2004年12月26日スマトラ地震 ( $M_w$  9.15)，2010年2月27日チリ地震 ( $M_w$  8.8)，2011年東北地方太平洋沖地震を選び、解析にはIRISデータセンターから取得したGSN観測点の広帯域地震波形記録を用いた。

#### 4. 研究成果

(1) 高周波震動継続時間と変位振幅を用いたマグニチュード計算式の改定

グリッドサーチ解析で得られた  $M_{hdd}$  の震央距離，高周波震動継続時間， $M_w$  に対する依存性を図1に示す。横軸は上述の方法で求めた依存性の値，縦軸は  $M_{hdd}$  と  $M_w$  の残差（差の二乗平均平方根値）である。 $M_{hdd}$  と  $M_w$  の残差が小さい係数の組合せの場合，震央距離依存性，高周波震動継続時間依存性は小さいが（図1a, b）， $M_w$  依存性は大きく，-0.3程度の系統的な差がある。これは残差が最小の組合せを用いると，巨大地震に対して  $M_{hdd}$  が過小評価となることを意味する。

図の緑の四角はHara (2007a) の係数を用いた場合の値を示している。震央距離，高周波震動継続時間， $M_w$  に対する依存性はそれぞれ約0.12, 0.05, -0.20であり，改定することが望ましいことが分かる。

$M_{hdd}$  と  $M_w$  の残差が最小値の110%以下で震央距離，高周波震動継続時間， $M_w$  に対する依存性が0.1以下の場合を黄色の丸で示した。残差は若干大きい，依存性が小さい係数の組合せが存在することが示している。それぞれの依存性に上限値を設定することで，係数の組合せを選ぶことが可能である。分布をみると，残差が小さく震央距離依存性も小

さい組合せが存在する一方，高周波震動継続時間あるいは  $M_w$  に対する依存性を小さくすると，残差が大きくなることが分かる。

以上の  $M_{hdd}$  の性質を考慮して，本研究では，震央距離依存性が0.01，高周波震動継続時間及び  $M_w$  依存性が0.1以下で残差最小の組合せ ( $\alpha=0.87$ ,  $\beta=0.63$ ,  $\gamma=0.68$ ,  $\delta=7.59$ ) を選び，計算式を改定した。この組合せを用いた場合の値は図1の赤い四角で示されている。 $M_{hdd}$  と  $M_w$  の残差は約0.16であり，震央距離，高周波震動継続時間， $M_w$  に対する依存性はそれぞれ約0.002, 0.09, -0.10である。

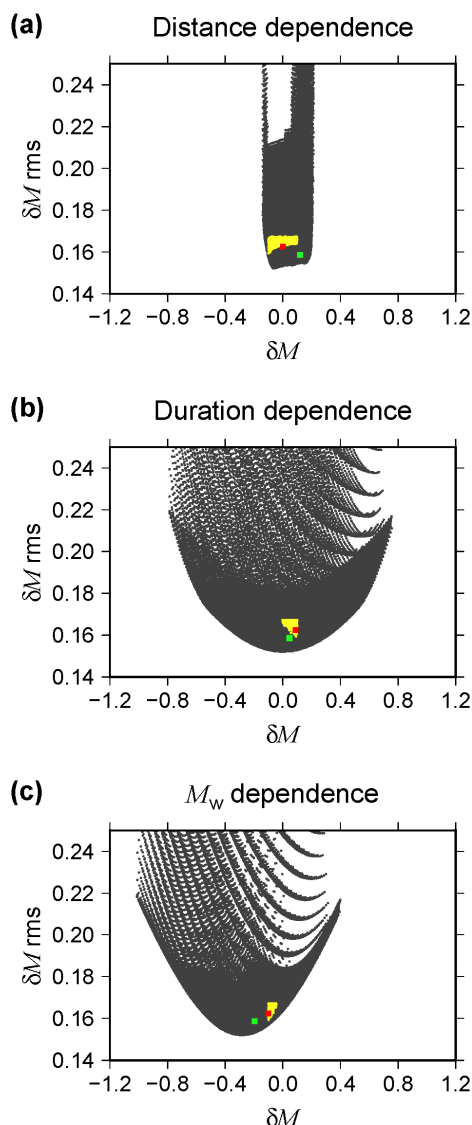


図1  $M_{hdd}$  の震央距離依存性 (a), 高周波震動継続時間依存性 (b), 及び  $M_w$  依存性 (c). 縦軸は  $M_{hdd}$  と  $M_w$  の残差. ■はHara (2007a) の係数を用いた場合の値. ●は残差が最小値の110%以下で震央距離，高周波震動継続時間， $M_w$  に対する依存性が0.1以下の場合. ■は本研究で選んだ係数を用いた場合の値.

(2) 高周波震動継続時間と変位振幅を用いたマグニチュード計算手法のリージョナルデータへの適用

リージョナルデータから計測した高周波震動継続時間と遠地データから計測した値に系統的な違いがあるかを調べるために、各地震の後者の中央値で正規化した値を図2に示す。横軸は震央距離である。5度ごとの中央値も示した。

震央距離 30~85度の範囲では、正規化された値は1の周辺にばらつき、顕著な震央距離依存性は認められない。一方、震央距離10~30度では、ばらつきはおおきいが、1より大きな傾向がある。この結果は、リージョナルデータに  $M_{hdd}$  の計算手法を適用する場合、遠地データに対する係数とは異なる係数を使う必要があることを示唆している。

そこで、 $M_{hdd}$  の係数をパラメタとするグリッドサーチを行った  $M_{hdd}$  の  $M_w$ 、震央距離、高周波震動継続時間に対する依存性を図3に示す。遠地データに見られたのと同じ傾向が認められる。 $M_{hdd}$  と  $M_w$  の残差が小さい係数の組合せの場合、 $M_w$  依存性は大きい(図3c)。 $M_{hdd}$  と  $M_w$  の残差のが最小値の115%以下で震央距離、高周波震動継続時間、 $M_w$  に対する依存性が0.1以下の場合を黄色の丸で示した。残差が比較的小さく震央距離依存性も小さい組合せが存在する一方、高周波震動継続時間あるいは  $M_w$  に対する依存性を小さくすると、残差が大きくなる。

遠地データと同じ条件(震央距離依存性が0.01、高周波震動継続時間及び  $M_w$  依存性が0.1以下で残差最小の組み合わせ)により、 $\alpha=0.85$ ,  $\beta=1.13$ ,  $\gamma=0.63$ ,  $\delta=5.64$  を選び、リージョナルデータに対する  $M_{hdd}$  の係数を得た。残差と各パラメタに対する依存性は図3の赤い四角で示されている。 $M_{hdd}$  と  $M_w$  の残差は約0.16であり、震央距離、高周波震動継続時間、 $M_w$  に対する依存性はそれぞれ約0.006, 0.08, -0.10である。

遠地データから得られた  $M_{hdd}$  とリージョナルデータから得られた値の比較を図4に示す。両者は整合的である。この結果は、適切な係数を用いることにより  $M_{hdd}$  がリージョナルデータに対して適用可能であり、遠地データの解析より迅速にマグニチュードの値が得られることを示している。

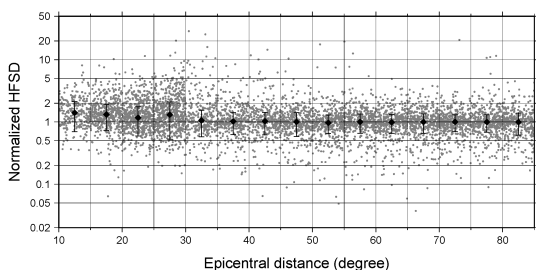


図2 正規化した高周波震動継続時間。横軸は震央距離。は5度ごとの中央値。

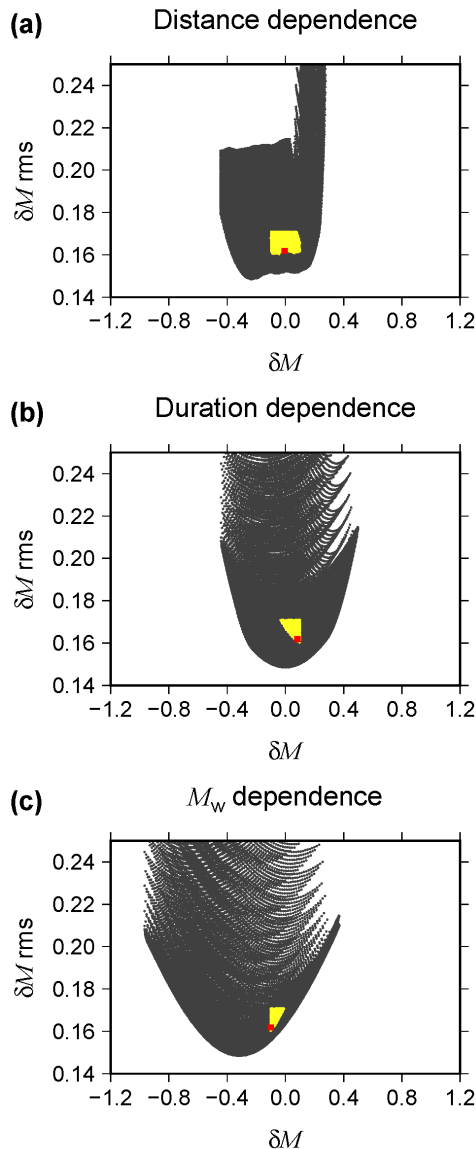


図3 リージョナルデータを用いた場合の  $M_{hdd}$  の震央距離依存性 (a), 高周波震動継続時間依存性 (b), 及び  $M_w$  依存性 (c). ●は残差が最小値の115%以下で震央距離、高周波震動継続時間、 $M_w$  に対する依存性が0.1以下の場合。■は本研究で選んだ係数を用いた場合の値。

(3) 強震動の継続時間と変位振幅を用いた地震規模決定の検討

計測した強震動の継続時間と遠地P波の高周波震動継続時間を比較したところ、ばらつきは大きいですが、概ね相関することが分かった。継続時間の中央値については、地表観測点、地中観測点、成分による差はあまり大きくなかった。

KiK-netの地中観測点の加速度記録から計測した強震動の継続時間及び最大変位振幅と震央距離の積を  $M_w$  と比較したところ、両者は概ね相関することが分かった。この結果は、これらの計測量からマグニチュードを推定できることを示唆する。

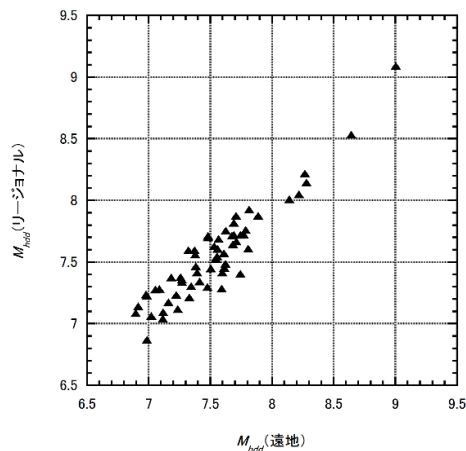


図4 遠地データから得られた  $M_{hdd}$  とリージョナルデータから得られた値の比較。

#### (4) リージョナルデータを用いた津波地震の識別

津波地震は通常の地震より相対的に小さな変位振幅と長い高周波震動継続時間で特徴づけられることが示された。これは遠地データの解析結果 (Hara, 2007b) と整合的である。また、リージョナルデータから求めた最大変位振幅と震央距離の積の高周波震動継続時間に対する比は遠地データから求めた値と概ね相関することも示された。津波地震は地震波エネルギーと地震モーメントの比で特徴づけられるが (Newman and Okal, 1998), 本研究の結果は、リージョナルデータの比較的簡単なデータ処理で得られる高周波震動継続時間と最大変位振幅を用いることにより、津波地震を識別できることを示唆する。

#### (5) 高周波震動継続時間を用いた断層運動の推定

1994年三陸はるか沖地震, 2003年十勝沖地震, 2004年スマトラ地震, 2011年東北地方太平洋沖地震に対して求められた断層運動の終端点の位置はこれらの地震の高周波エネルギー放射に関する既往研究 (例えば, Nakahara et al., 1998; Ishii et al., 2005; Gusev et al., 2007; Kurahashi and Irikura, 2011; Wang, 2010) と整合的であり, 解析手法の有効性が示唆された。2010年チリ地震の結果は既往研究 (例えば, Kiser and Ishii, 2011; Wang and Mori, 2011) と整合的ではなかった。

謝辞 本研究で使用した広帯域地震波形データの収集には IRIS データセンターを利用させていただきました。グローバル CMT プロジェクトのセントロイド・モーメント・テンソル解を利用させていただきました。国立研究開発法人防災科学技術研究所の K-NET と KiK-net のデータ, 気象庁の一元化震源カタログを利用させていただきました。

#### 参考文献

- Duputel et al., *Earth Planets Space* 63, 535-539, 2011.  
 Gusev et al., *Geophys. J. Int.*, 170, 1119-1128, 2007.  
 Hara, T., *Earth Planets Space*, 59, 227-231, 2007a.  
 Hara, T., *Earth Planets Space*, 59, 561-565, 2007b.  
 Hara, T., *Earth Planets Space*, 63, 525-528, 2011.  
 Ishii et al., *Nature* 435, 933-936, 2005.  
 Kiser and Ishii, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L07301, 2011.  
 Kurahashi and Irikura, *Earth Planets Space*, 63, 571-576, 2011.  
 Nakahara et al., *J. Geophys. Res.*, 103, 855-867, 1998.  
 Newman and Okal, *J. Geophys. Res.*, 103, 26885-26898, 1998.  
 Park et al., *Science*, 308, 1139-1144, 2005.  
 上野・他, *駿震時報*, 65, 123 ~ 134, 2002.  
 Wang, *Bulletin of IISEE*, 44, 7-12, 2010.  
 Wang and Mori, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L22308, 2011.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計9件)

Hara, T., Magnitude determination using duration of high frequency energy radiation and displacement amplitude: application to waveform data recorded in regional distance range, NH33A-1653, AGU Fall Meeting, San Francisco, California, USA, 2012年12月5日

原辰彦, 高周波震動継続時間と変位振幅を用いたマグニチュード: 改定とリージョナルデータへの適用, P2-44, 日本地震学会講演予稿集 2013年度秋季大会, 神奈川県民ホール・産業貿易センター (横浜市), 2013年10月8日

Hara, T., Determination of rupture propagation by measurements of durations of high frequency energy radiation, S43A-2493, AGU Fall Meeting, San Francisco, California, USA, 2013年12月12日

原辰彦, グリッドサーチ法による  $M_{hdd}$  の係数決定, SSS29-P01, 日本地球惑星科学連合 2014年大会, パシフィコ横浜 (横浜市), 2014年4月28日

原辰彦, 強震動の継続時間の計測と遠地 P 波の高周波震動継続時間との比較, S15-P07, 日本地震学会講演予稿集 2014年度秋季大会, 朱鷺メッセ: 新潟コンベンションセンター (新潟市), 2014年11月24日

Hara, T., HFER duration and displacement amplitudes from regional P waves as a possible tsunami earthquake discriminant, S21A-4410, AGU Fall Meeting, San Francisco, California, USA, 2014年12月16日

原辰彦, 強震動の継続時間と変位振幅を用いた地震規模決定の可能性, SSS25-P06, 日本地球惑星科学連合2015年大会, 幕張メッセ国際会議場(千葉市), 2015年5月25日

原辰彦, 高周波震動継続時間と変位振幅を用いたマグニチュードの性質, S19-P02, 日本地震学会講演予稿集2015年度秋季大会, 神戸国際会議場(神戸市), 2015年10月28日

原辰彦, リージョナルデータに対する  $M_{hdd}$  の係数の決定, SSS29-P02, 日本地球惑星科学連合2016年大会, 幕張メッセ国際会議場(千葉市), 2016年5月22日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

原 辰彦 (Tatsuhiko Hara)  
建築研究所・国際地震工学センター・上席  
研究員  
研究者番号：40360466