

## 海域地震観測網を含む様々な地震観測網に適用可能な緊急地震速報のための

### 上下動変位マグニチュード推定手法

A Technique for Estimating the UD-component Displacement Magnitude for Earthquake Early Warnings that can be Applied to Various Seismic Networks including Ocean Bottom Seismographs

林元直樹<sup>1</sup>, 中村武史<sup>2</sup>, 干場充之<sup>3</sup>

Naoki HAYASHIMOTO<sup>1</sup>, Takeshi NAKAMURA<sup>2</sup> and Mitsuyuki HOSHIBA<sup>3</sup>

(Received December 3, 2018: Accepted April 3, 2019)

**ABSTRACT:** The rapidness and accuracy of real-time estimation of magnitude when issuing an Earthquake Early Warning in the event of a suboceanic earthquake could be improved through use of ocean-bottom seismograph (OBS) data. Proposed here is a method using the maximum amplitude of the UD-component in the displacement waveform recorded in OBS data near the source. The following equation was developed for magnitude estimation:

$$0.90 \times M = \log A + 0.83 \times \log R + 1.7 \times 10^{-3} \times R - 2.6 \times 10^{-3} \times D + 1.68,$$

where A is the maximum amplitude of the UD-component in units of 10  $\mu\text{m}$ , R is the hypocentral distance in km, and D is the focal depth in km. There are two main advantages to using UD-component data in magnitude estimation: (1) the variance in estimates that is likely to depend on the spatial variation in site effects among stations is effectively less when using UD-component data than that when using 3-component data, and (2) the overestimation that is primarily caused by a change in the orientation of the OBS during strong motions is suppressed. Based on a comparison of estimated results of the proposed method and the conventional method for land and OBS network data during suboceanic earthquakes, this study quantitatively indicated that the proposed method had less variance and suppressed overestimation. This study also evaluated whether it would be effective at enhancing early warnings.

#### 1 はじめに

緊急地震速報は、地震の発生直後に、震源に近い観測点でその時点までに観測されたデータを元に各地での揺れの強さを予測し、可能な限り早く提供される情報である (Hoshiba et al., 2008; Kamigaichi et al., 2009)。2007年の一般提供開始から11年が経過した現在でも、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震において顕在化した震源域の広がりや連発する地震の分離に対する問題を踏まえ、2016年12月よりIPF法(Integrated Particle Filter Method, 溜瀧・他, 2014)、2018年3月よりPLUM法(Propagation of Local Undamped Motion, Kodera et al., 2018)を導入するなど、

緊急地震速報のさらなる精度向上のために改善が続けられている。

緊急地震速報において情報の精度と同様に重要であるのが、情報の迅速性である。近年、日本近海で整備された国立研究開発法人防災科学技術研究所の日本海溝海底地震津波観測網(S-net, Kanazawa et al., 2016; Uehira et al., 2016; Mochizuki et al., 2016)や、地震・津波観測監視システム(DONET, Kaneda et al., 2015; Kawaguchi et al., 2015)などの海底地震計(OBS)は、海域で発生する地震において強い揺れが陸で観測されるよりも前に震源直上でのリアルタイム観測が可能になることから、緊急地震速報の更なる迅速化へ

<sup>1</sup> 気象庁地震火山部地震津波監視課, Earthquake and Tsunami Observations Division, Seismology and Volcanology Department, Japan Meteorological Agency

<sup>2</sup> 国立研究開発法人防災科学技術研究所, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

<sup>3</sup> 気象研究所地震津波研究部, Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute

寄与すると期待される。その一方で、観測環境が陸上の観測点と大きく異なるため、海底での強震観測におけるいくつかの課題が明らかになってきている。その 1 つは、海底観測特有の地震波の増幅である。林元・干場 (2013) は、気象庁が整備・運用しているケーブル式常時海底地震観測システム (東南海 OBS) のデータについて、地点マグニチュード ( $M$ ) の残差から OBS における  $M$  補正值の検討を行い、地震波の増幅により当時の  $M$  式で 0.6 程度の  $M$  の過大評価が生じることを示した。また、DONET においては海底下の未固結堆積層や付加体により地震波が増幅されることが、3 次元速度構造を使った差分法シミュレーション (Nakamura et al., 2014) や、海底ポアホール観測点との波形比較 (Nakamura et al., 2018) などにより明らかとなっている。振幅に影響を及ぼすその他の問題としては、地震動中の OBS の姿勢角変化による影響がある。海洋研究開発機構が釧路・十勝沖に整備、運用している海底地震総合観測システム (釧路沖 OBS) においては、2003 年十勝沖地震 ( $M8.0$ ) の際にインライン式の OBS が約 5.2 度回転するなど、入力加速度に応じて地震動中の筐体の姿勢角変化が大きくなり、重力加速度の混入から、特にケーブル軸に直交する水平動方向に加速度オフセットを生じたことがわかっている (Hayashimoto et al., 2016)。また、インライン式 OBS で最も顕著な姿勢角変化としては、平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震の際に震源近傍に設置されていた三陸沖 OBS (Kanazawa and Hasegawa, 1997) において、57.7 度ものロール角変化が記録された例が報告されている (Nakamura and Hayashimoto, 2019)。なお、このような海底地震計の姿勢角変化は、インライン式 OBS のみならず、ノード式の OBS である DONET においても発生している可能性が指摘されている (Nakamura et al., 2018)。地震時の姿勢角変化による加速度オフセットの混入は、変位振幅へ積分する際に異常振幅の原因となる。

現在、緊急地震速報における  $M$  の推定には、加速度波形を機械式 1 倍強震計相当 (固有周期 6 秒、減衰定数 0.55) の特性を持つ変位波形に変換し、ベクトル的に合成した 3 成分合成変位波形振幅値を用いて推定されている (明田川・他, 2010; 清本・他, 2010)。この手法では、振幅値から  $M$  を推定する際、陸上に設置された観測点の多数のデータを基に構築した回帰式を適用している。海底に設置された OBS データは、海底

下に広がる堆積層や強震時の筐体の姿勢角変化の影響により、加速度波形から変換された変位波形の振幅が大きく増幅するため、陸上観測点データを基に構築した回帰式から  $M$  を推定すると、気象庁震源カタログのマグニチュード ( $M_J$ ) よりも値が過大になることがある。OBS の振幅データを用いて精度よく  $M$  を推定するためには、過大評価を抑えるための新たな処理の導入が必要と考える。本稿では、緊急地震速報のために海底地震計にも適用可能な上下動変位振幅を用いた  $M$  推定式を提案する。

## 2 $M$ 推定式の導出に用いるデータおよび推定手法

$M$  推定式の導出にあたっては、ある観測網に特化した式を構築するのではなく、新たな観測網にも適用可能なように、地震の発生場所や観測網に依らず全国一律に適用可能な式の導出を目指すこととする。以下に示すデータと手法により、3 成分合成変位波形と上下動変位波形の最大振幅値を用いたそれぞれの  $M$  推定式を構築したうえで、OBS データへの適用可能性を検討した。なお、緊急地震速報においては、S 波到達前までのデータ区間に適用する P 波  $M$  と、波形全体に適用する全相  $M$  とが存在するが、林元・干場 (2013) により海底地震計の P 波  $M$  と全相  $M$  では全相  $M$  のほうが  $M_J$  との差が過大に生じやすいことが東南海 OBS において示されていることから、今回は、海底地震計と陸上観測点との違いが生じやすい全相  $M$  式に限定して推定を行うこととした。

### 2.1 データ

日本全域で観測網を問わず偏りのないデータセットを得るため、データの選定を行った。気象庁一元化震源において、2000 年 1 月から 2016 年 4 月の期間に深さ 200km 以浅で発生した  $M_J4.0$  以上のうち、国立研究開発法人防災科学技術研究所強震観測網の Web サイトに地震波形が公開されている地震について、余震によるデータの偏りや複数地震による影響を避けるためにデクラスタ処理 (明田川, 2010:  $dt=1day$ ,  $dr=500km$  で地震を関連付けし、最大地震で代表させる) を行い、対象地震の抽出を行った。波形データは、気象庁多機能型観測点 (2011 年以降) に加え、K-NET (2000 年以降)、KiK-net (2007 年以降の地表強震計) の陸上観測網、および釧路沖 OBS (2002 年以降) と DONET1 (2011 年 7 月以降) の海域観測網で記録され

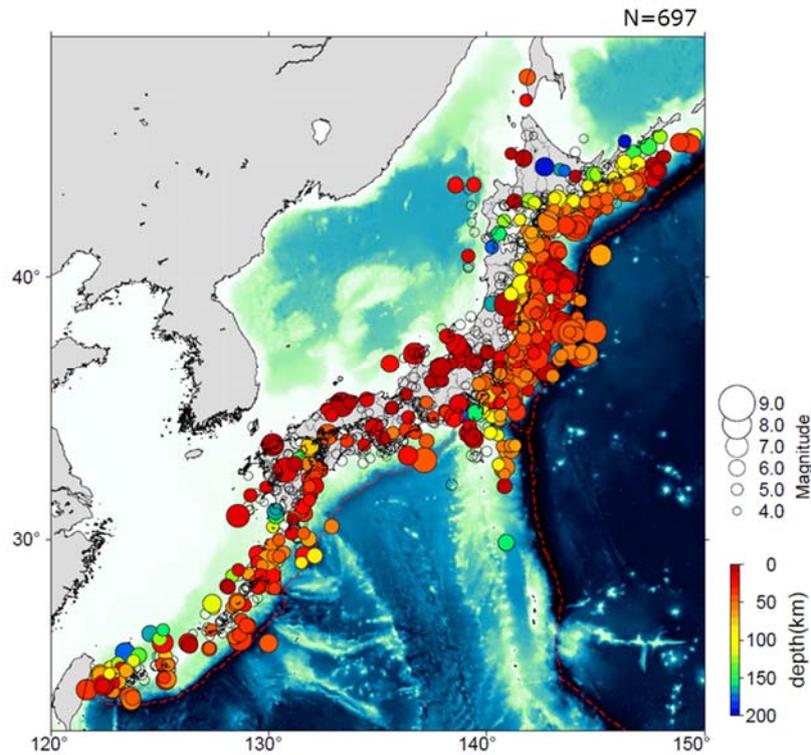


Fig. 1 Hypocentral distribution and magnitude of the earthquakes used in regression analysis. Symbol size and color indicate the magnitude and hypocentral depth, respectively. Open circles denote earthquakes smaller than  $M_j$  5.0.

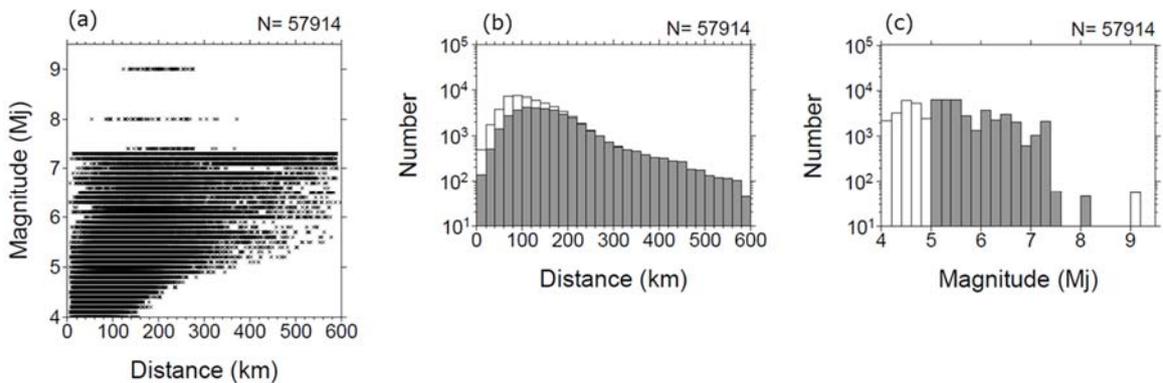


Fig. 2 Specifications for the data used in analysis. (a) Relationship between the magnitude and hypocentral distance. (b) Histogram of the hypocentral distance. (c) Histogram of the magnitude ( $M_j$ ). Gray bars on histograms indicate event data from  $M_j$  5.0 to  $M_j$  8.0.

た加速度波形を利用した。これらの加速度波形について、緊急地震速報の単独観測点処理と同様に、STA/LTAでのトリガ検知とB- $\Delta$ 法 (Odaka et al., 2003 ; 東田・他, 2004) の係数 A,B や V/H 比での品質管理処理による自動検出処理 (気象庁地震火山部, 2016) を実施して P 波検出値を得たうえで、P 波検出時刻から 60 秒間の上動変位波形および 3 成分合成変位波形の最大振幅値を抽出し、3 成分合成変位波形の最大振幅が

50 $\mu$ m 以上の振幅値を記録したデータを利用した。加速度波形から変位波形への変換には、機械式 1 倍強震計相当の特性を持つ漸化式フィルタ (勝間田, 2008) を利用した。50 $\mu$ m の下限は、緊急地震速報の変位 M 推定に利用される振幅下限と同様としている。また、理論 S-P 時間が 60 秒を超過するデータはタイムウィンドウ内に S 波が到達しないことから除外した。この最大振幅のデータウィンドウの制限と下限の条件は、

清本・他 (2010) による現行全相  $M$  の導出と同様である。なお、振幅下限のみ制限を行った場合、 $M$  の小さな地震や震源遠方の観測点などでは、増幅の大きな観測点のみを統計処理に利用してしまうことが懸念される。そこで、 $M_J$  を基準としたとき、坪井 (1954) による変位  $M$  式、

$$M = 1.73 \times \log \Delta + \log A - 0.83 \quad (1)$$

において変位振幅が  $50\mu\text{m}$  の半分の  $25\mu\text{m}$  が期待される範囲の震央距離のデータのみを抽出した。最終的に、回帰分析に用いる地震は、Fig. 1 に示す  $M5.0$  から  $M8.0$  までの 697 個の地震に制限した。ここで、 $M9.0$  の地震は平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震

であるが、マグニチュードはモーメントマグニチュード ( $M_w$ ) による値であり、気象庁変位  $M$  (勝間田, 2004) と同様、機械式 1 倍強震計相当の特性 (固有周期 6 秒, 減衰定数 0.55) では変位振幅の飽和が発生する (例えば, Katsumata et al., 2013) であろうことから解析対象から除外している。Fig. 2 に解析に用いたデータの諸元を示す。デクラスタ処理などのデータ選定の結果、概ね  $M$  や震源距離に偏りの抑えられたデータセットが得られていることがわかる。

## 2.2 $M$ の推定手法

3 成分合成変位波形と上下動変位波形の振幅値を使ったそれぞれの  $M$  推定について、現行の緊急地震速報の  $M$  式と同様の以下に示す式を使用し、回帰分析から

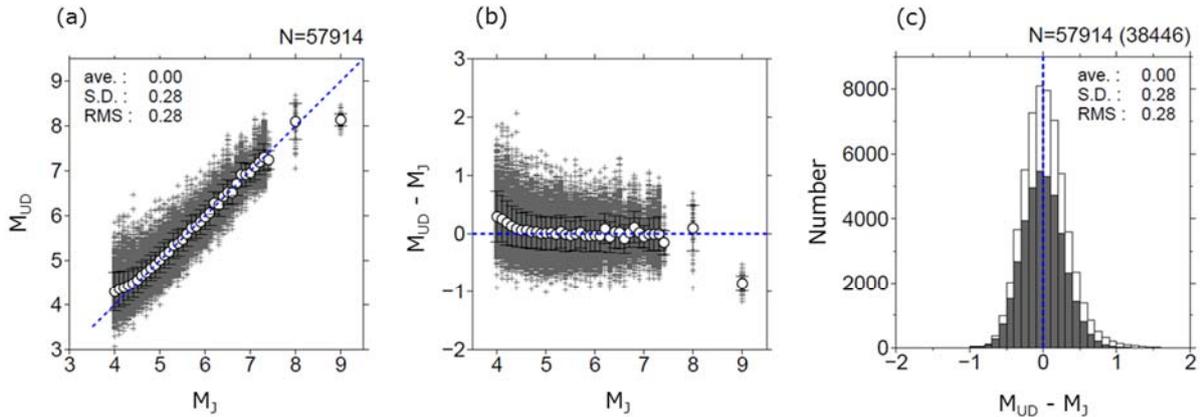


Fig. 3 (a) Comparison of the UD-component S-wave magnitude in this study ( $M_{UD}$ ) with  $M_J$ . (b) Relationship between the magnitude residual ( $M_{UD}-M_J$ ) and  $M_J$ . Open circles and error bars indicate the average and standard deviation for each magnitude range, respectively. (c) Histogram of the magnitude residual ( $M_{UD}-M_J$ ). Gray bars on histograms and statistical values indicate event data from  $M_J5.0$  to  $M_J8.0$ . The number of events is indicated in parentheses on the upper right (the same is true in Fig. 4(c), 6(c), and 7(c)).

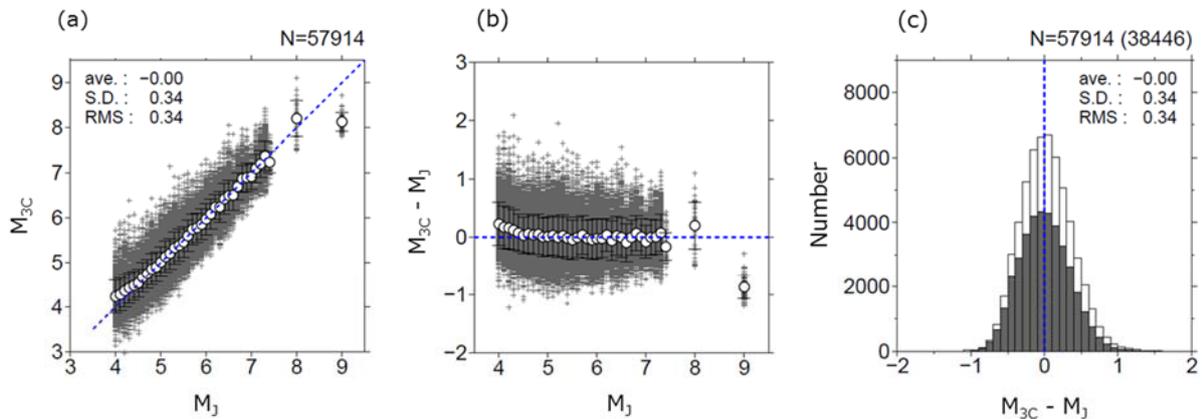


Fig. 4 (a) Comparison of the 3-component S-wave magnitude ( $M_{3C}$ ) and  $M_J$  in this study. (b) Relationship between the magnitude residual ( $M_{3C}-M_J$ ) and  $M_J$ . Open circles and error bars indicate the average and standard deviation for each magnitude range, respectively. (c) Histogram of the magnitude residual ( $M_{3C}-M_J$ ). Gray bars on histograms and statistical values indicate event data from  $M_J5.0$  to  $M_J8.0$ .

各係数を求める。

$$a \times M = \log A + b \times \log R + c \times R + d \times D + e \quad (2)$$

ここで、 $A$  は最大振幅 (10 $\mu$ m 単位),  $R$  は震源距離 (km),  $D$  は震源の深さ (km) である。右辺の第 2 項は幾何減衰項, 第 3 項は非弾性減衰項であり, 第 4 項はプレート内地震による影響を補正するための項となる。回帰分析には, 緊急地震速報の現行の P 波 M 式・全相 M 式を導出した際にも利用した Two Step Stratified 法 (Joyner and Boore, 1981) を用いた。この方法は, Fig. 2 のように最大振幅データが存在する観測点の距離範囲と  $M$  との間に相関が生じる ( $M$  が小さければ振幅を検出できる距離範囲が限定される) 場合, 距離減衰項を先に回帰することで, 一度に重回帰分析して震源距離と  $M$  の係数が独立に求められないことを避けて適切な距離減衰係数を得るための手法である (福島, 1993)。なお, 深さの項である第 4 項については, 明田川・他 (2010) の考察と同様, 深さ依存性に頭打ちの確認される深さを事前に確認した上で, 100km 以上においては  $D$  を 100km で固定することで回帰分析を行った。

### 3 結果

#### 3.1 推定した $M$ 式とその推定精度

上下動変位振幅値を使った  $M$  推定 (以後, 上下動  $M$ ) のための回帰式を以下に示す。

$$0.90 \times M = \log A + 0.83 \times \log R + 1.7 \times 10^{-3} \times R - 2.6 \times 10^{-3} \times D + 1.68 \quad (3)$$

また, 3 成分合成変位振幅値を使った  $M$  推定 (以後, 3 成分  $M$ ) のための回帰式を以下に示す。

$$0.88 \times M = \log A + 1.3 \times \log R + 1.1 \times 10^{-3} \times R - 4.9 \times 10^{-3} \times D + 0.37 \quad (4)$$

なお, 現在緊急地震速報に利用されている全相  $M$  式は,

$$0.87 \times M = \log A + 1.0 \times \log R + 1.9 \times 10^{-3} \times R - 5.0 \times 10^{-3} \times D + 0.98 \quad (5)$$

である (清本・他, 2010)。Fig. 3, Fig. 4 に, 推定した上下動  $M$  式および 3 成分  $M$  式による地点  $M$  と  $M_J$  との比較を示す。回帰分析で用いた M5.0~8.0 の地震における  $M$  推定残差は, 上下動  $M$  の標準偏差は 0.28, 3 成分  $M$  は 0.34 となり, 上下動  $M$  のほうが地点  $M$  のばらつきが小さい結果となった。なお, 3 成分  $M$  のばらつきは現行の全相  $M$  式でも同程度であった。Fig. 3, Fig. 4 には, M4.0 までの地点  $M$  と M0.1 ごとのその平均値および標準偏差を M0.1 ごとに示しており, 回帰分析に利用していない M5.0 未満を除いて,  $M$  ごとの標準偏差においても上下動  $M$  のばらつきが小さい。また, 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震の  $M$  は CMT 解析によるモーメントマグニチュード ( $M_w$ ) であるため,  $M_w 9.0$  と比較すると, 上下動変位  $M$  と 3 成分合成変位  $M$  いずれの種類の式を使って推定した  $M$  でも 0.8 程度の過小評価となっている。この地震の気象庁変位  $M$  (MD, 勝間田, 2004) も MD8.4 (Hoshiba et al., 2011 ; Hirose et al., 2011) と  $M_w$  と比較して 0.6 の過小評価であり, 機械式 1 倍強震計相当の特性を用いたことによる変位振幅の飽和による影響と考えられる。なお, いずれの  $M$  式でも M4.5 未満のデータについては,  $M$  のわずかな過大評価傾向が確認できた。同様の傾向は, 清本・他 (2010) による現行の全相  $M$  式を推定した結果においても認められる。特に, K-NET のデータでその傾向が顕著であり, K-NET はその他の観測網と比較すると人口の多い都市部に設置されていることから, ノイズの影響により, 変位  $M$  で評価可能な  $M$  の下限が大きくなっていることを示していると考えられる。

#### 3.2 観測網ごとの $M$ 平均値と RMS 値の違い

Table 1 に, 推定した上下動  $M$  式および 3 成分  $M$  式での, 全データおよび観測網ごとの地点  $M$  残差の平均値およびその標準偏差と RMS 値を示す。また, 比較のため現行全相  $M$  式における標準偏差と RMS 値も併せて示す。RMS 値に着目すると, データ全体のみでなく, 気象庁多機能型観測点, K-NET, KiK-net, OBS とすべての観測網において上下動  $M$  式の RMS 値が小さく,  $M$  推定精度が高い結果となった。また, 観測網ごとの平均値をみると, 気象庁多機能型観測点および KiK-net で負の値, K-NET および OBS で正の値を示す傾向が見られるが, その偏差は 3 成分  $M$  と比較して上下動  $M$  で小さい。気象庁多機能型観測点や KiK-net

と比べて、OBS は海底の未固結堆積層の上に設置されていること、K-NET は都市部に展開されている観測点が多いことから、この傾向は観測網のサイトの地盤特性を反映したものと考えられる。そして、上下動変位  $M$  の全体の RMS 値および、観測網ごとの偏差が小さ

い理由についても、水平動成分と比較して上下動成分のほうが  $M$  推定に利用する周期帯でのサイトの地盤特性の違いの影響を受けにくいことが原因であると考えられる。

Table 1 The average, standard deviation, and root mean square of magnitude residuals in each observation network.

		ALL	JMA*	K-NET	KiK-net	OBS
<b>UD-component Magnitude</b>	average	0.00	-0.11	0.06	-0.03	0.18
	S.D.	0.28	0.27	0.27	0.26	0.32
	RMS	0.28	0.29	0.28	0.27	0.36
<b>3-component Magnitude</b>	average	0.00	-0.16	0.10	-0.06	0.45
	S.D.	0.34	0.30	0.33	0.32	0.30
	RMS	0.34	0.34	0.34	0.32	0.54
<b>3-component Magnitude (current)</b>	average	0.16	-0.01	0.26	0.10	0.63
	S.D.	0.35	0.31	0.33	0.33	0.31
	RMS	0.38	0.31	0.42	0.34	0.70

\*Here "JMA" indicates the seismometer network of JMA.

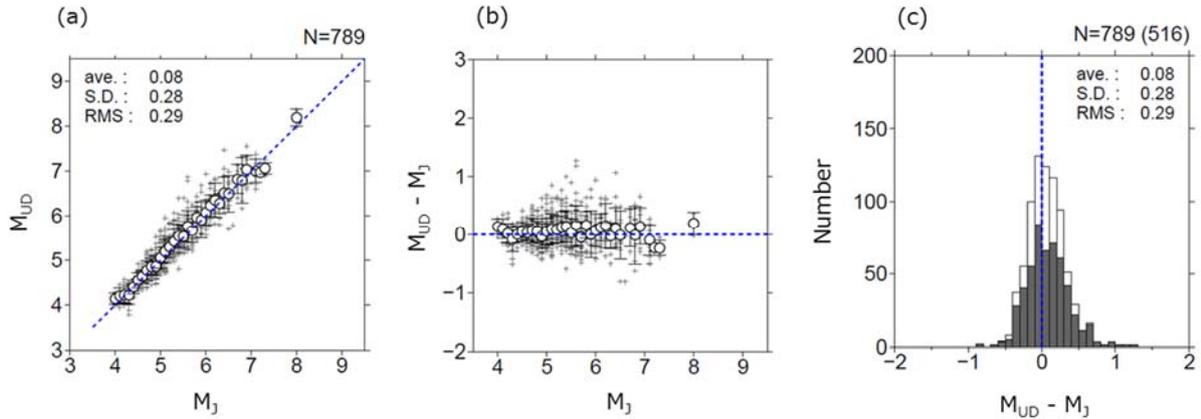


Fig. 5 Same as in Fig. 3, but for the Off-Kushiro OBS data.

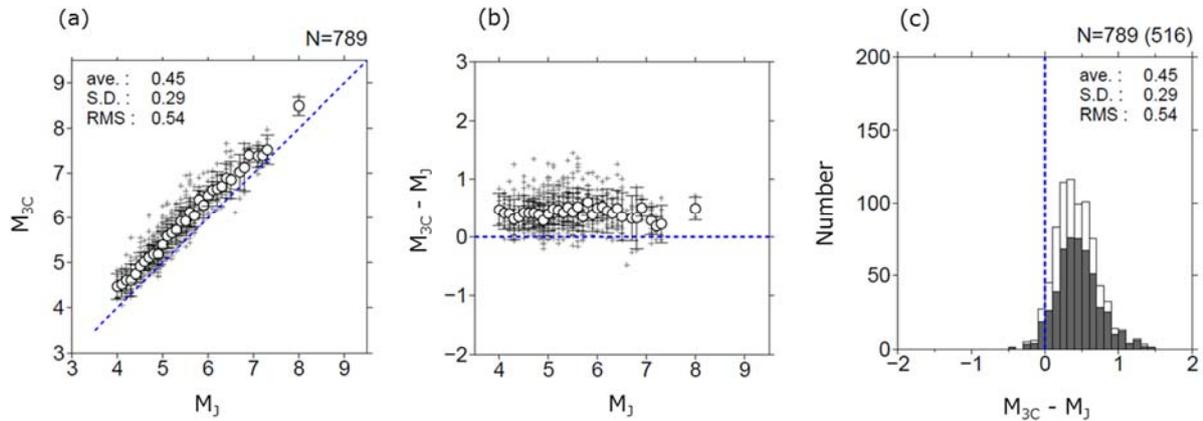


Fig. 6 Same as in Fig. 4, but for the Off-Kushiro OBS data.

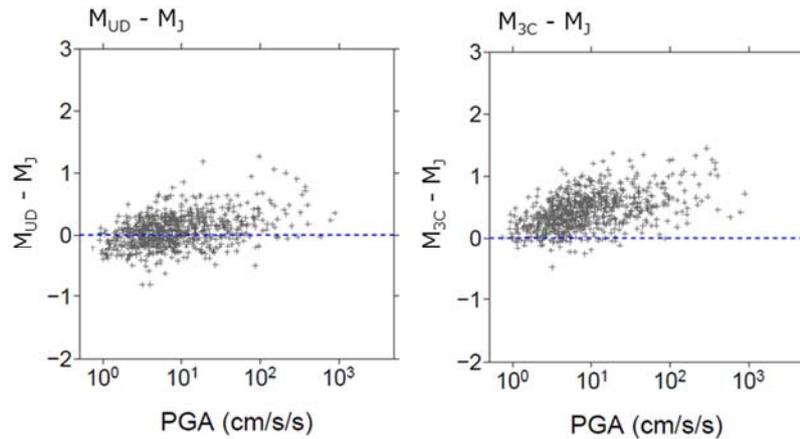


Fig. 7 Magnitude residual ( $M_{UD}-M_J$  (left) and  $M_{3C}-M_J$  (right)) with respect to PGA.

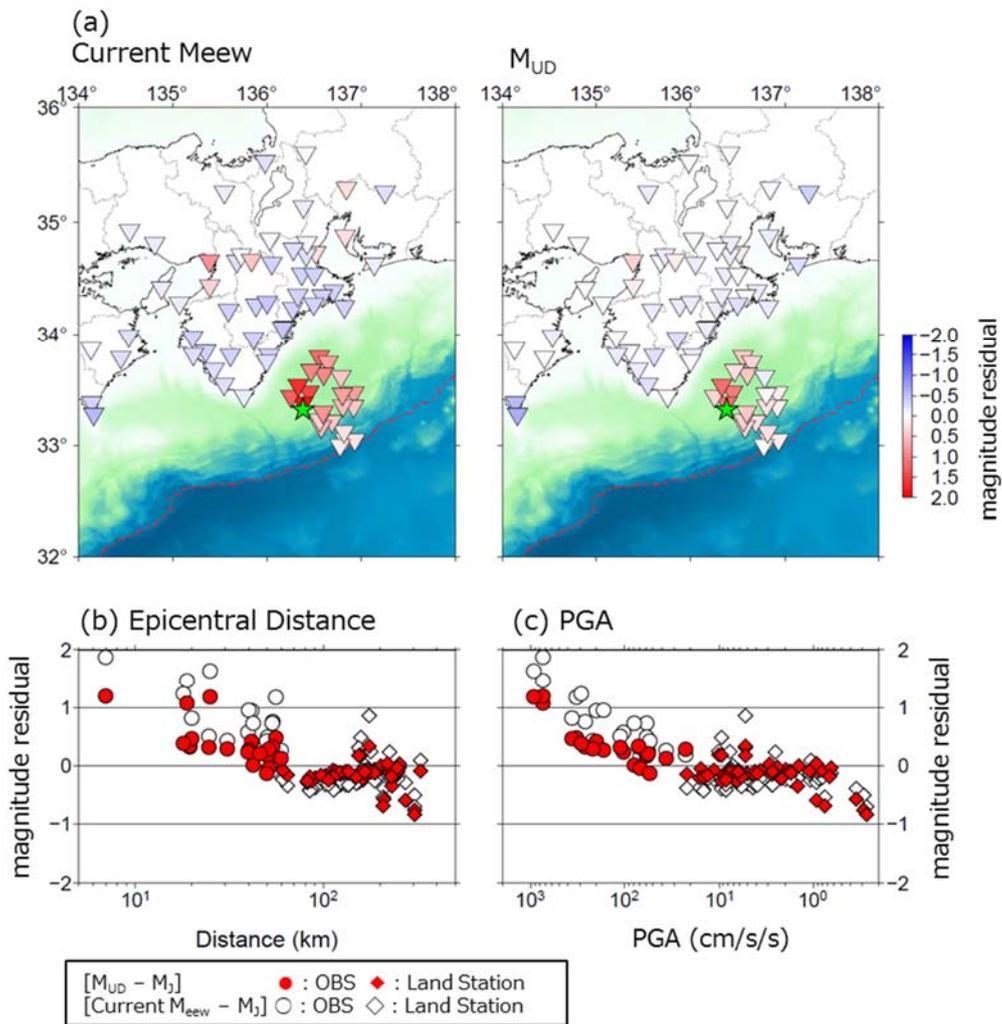


Fig. 8 Magnitude residuals at each station for an event at 11:39 on April 1, 2016. (a) Distribution maps of magnitude residuals of the current 3-component S-wave magnitude (Meew) (left) and  $M_{UD}$  (right) at each station. A green star indicates the epicenter of the earthquake. (b) Magnitude residual with respect to the epicentral distance. (c) Magnitude residual with respect to PGA. Circles and diamonds indicate OBS and land stations, respectively. Red and white symbols indicate the  $M_{UD}$  residual and current Meew residual, respectively.

#### 4 考察

上下動 M 式と 3 成分 M 式をそれぞれ推定した結果、上下動 M 式を用いるほうが、観測点および観測網ごとの M のばらつきを抑える効果があることがわかった。これは、観測点ごとのサイト増幅特性の違いが水平動よりも上下動に出にくいことによるものと考えられる。以下では、海底地震計のデータにおける上下動 M の特長について考察する。

##### 4.1 釧路沖 OBS における上下動変位 M と 3 成分合成変位 M との比較

Fig. 5,6 は、釧路沖 OBS のデータについて、Fig. 3,4 と同様に地点 M と  $M_J$  との差を比較したものである。上下動 M においては、M5.0~M8.0 での  $M_J$  との差が +0.08 であるのに対し、3 成分 M では、+0.45 と過大に推定されており、上下動 M の利用により、海底でのサイト増幅特性の違いが低減できることがわかる。なお、3 成分 M においても経験的な地点 M の残差を観測点補正值として考慮することで同様の精度となることが期待されるが、地点ごとの観測点補正值を推定するには観測記録を蓄積する必要が生じることから、補正值なしにサイト増幅特性の影響が低減できる効果は大きい。Fig. 7 には、 $M_J$ 4.0 以上のすべてのデータにおける両 M 式の地点 M と  $M_J$  との残差と最大加速度 (PGA) の関係を示す。3 成分 M では入力加速度が大きくなるほど  $M_J$  からのずれが大きくなる傾向が確認されるのに対して、上下動 M ではその PGA 依存性が緩和されていることがわかる。Hayashimoto et al. (2016) により、釧路沖 OBS においては入力加速度が大きくなるほど姿勢角の変化が顕著になり、回転による加速度オフセットの影響は水平動よりも上下動成分で小さくなることが指摘されており、今回の結果は、上下動 M の利用によって、サイト特性による影響に加えて姿勢角の変化などによる PGA 依存性も軽減できることを示している。

##### 4.2 2016 年 4 月 1 日の三重県南東沖の地震における DONET の地点 M

2016 年 4 月 1 日 11 時 39 分に発生した三重県南東沖の地震 (M6.5, 最大震度 4) は、DONET の観測網直下で発生し、DONET では最大で  $900\text{cm/s}^2$  を超える 3 成分合成加速度を観測したほか、震央近傍の観測点では地震計の姿勢角変化が発生した可能性が指摘さ

れている (Nakamura et al., 2018)。Fig. 8 に、この地震における現行全相 M 式と上下動 M 式による地点 M の  $M_J$  との差を示す。現行全相 M 式では多くの DONET 観測点で M を過大評価しており、Hayashimoto et al. (2016) によって釧路沖 OBS で示された特徴と同様に、震央距離よりも特に入力加速度に応じて地点 M が過大となる傾向が明瞭に確認できる。一方、上下動 M 式による地点 M では、入力加速度に応じた M の過大評価傾向が緩和されており、より安定した M 推定が可能であることがわかる。OBS のみではなく陸上の観測点においても、地点 M のばらつきが改善している。ただし、入力加速度が  $500\text{cm/s}^2$  を超える震源直近の 3 観測点については上下動 M でも M の過大評価が残っている。現行全相 M と比較すると上下動 M により過大評価は小さく抑えられているものの、これらの観測点では地震時の加速度振幅値の大きな変化が上下動成分にも生じており (Nakamura et al., 2018)、数  $100\text{cm/s}^2$  を超えるような強震時の OBS データについては、精度の良い M 推定のために、リアルタイム解析から除外するなどの処理が必要となるかもしれない。

#### 5 まとめ

緊急地震速報に海底地震計のデータを活用するため、海底地震計にも適切な M 推定手法として、上下動変位振幅を用いた M 推定手法を提案する。上下動変位振幅と 3 成分合成変位振幅それぞれについて M 式を推定した結果、上下動変位 M 式では観測点の増幅特性の違いによる影響が小さく、観測網間の地点 M 残差の平均値の差が小さく抑えられることがわかった。海底地震計では海底下の未固結堆積層や付加体に起因する増幅特性の影響が地震波の増幅の原因となるが、上下動変位振幅を用いることで、観測点の増幅特性の影響を軽減することが可能となる。また、海底地震計では強震時の地震計の姿勢角変化による M の過大評価が生じる場合があるが、3 成分合成ではなく上下動成分を用いることで、ケーブルに直交する水平動方向に生じやすい加速度オフセットなどの影響を抑えることが可能となる。S-net や DONET などの海底地震観測網を緊急地震速報に活用し、情報の迅速化を図る上では、振幅情報の活用が必要である。本稿で導出した上下動 M を利用することにより、海底地震計のデータでも適切なマグニチュード推定が可能になると期待される。

## 謝辞

査読者である気象庁地震火山部の岩切一宏氏には、本稿を改善する上で大変有益なご助言をいただきました。本稿における解析には、気象庁多機能型観測点のほか、国立研究開発法人海洋研究開発機構の海底地震総合観測システム、国立研究開発法人防災科学技術研究所の K-NET・KiK-net・DONET のデータを用いました。M 推定式について、緊急地震速報の現行マグニチュード式の導出のために用いた、上垣内修氏（気象大学校）と中村浩二氏（静岡地方気象台（現地震予知情報課長））による計算プログラムを参考にさせていただきました。作図には、GMT (Wessel and Smith, 1998) を利用しました。背景の海底地形図の描画には、日本海洋データセンターの J-EGG500 および、アメリカ国立地球物理データセンターの ETOPO2v2 を使用しました。記して感謝いたします。

## 文献

明田川保 (2010): 地震クラスター抽出手法の改良 – 改良リンク法について – 温地研報告, **42**, 33-48.

明田川保・清本真司・下山利浩・森脇健・横田崇 (2010): 緊急地震速報における P 波マグニチュードの推定方法の改善, 験震時報, **73**, 123-134.

勝間田明男 (2004): 気象庁変位マグニチュードの改訂, 験震時報, **67**, 1-10.

勝間田明男 (2008): 機械式地震計の周波数特性を持つ再帰型デジタルフィルター, 験震時報, **71**, 89-91.

気象庁地震火山部 (2016): 緊急地震速報の概要や処理手法に関する技術的参考資料, <https://www.data.jma.go.jp/svd/eww/data/nc/katsuyou/reference.pdf>, (参照日: 2018 年 12 月 3 日).

清本真司・明田川保・大竹和生・新原俊樹・下山利浩・森脇健・土井恵治・横田崇 (2010): 緊急地震速報における技術的検討事項について, 験震時報, **73**, 135-150.

溜瀧功史・山田真澄・Stephen Wu (2014): 緊急地震速報のための同時多発地震を識別する震源推定手法, 地震 2, **67**, 41-55.

東田進也, 小高俊一, 芦谷公稔, 大竹和生, 野坂大輔 (2004): P 波エンベロープ形状を用いた早期地震諸元推定法, 地震 2, **56**, 351-361.

坪井忠二 (1954): 地震動の最大振幅から地震の規模 M を定めることについて, 地震 2, **7**, 185-193.

林元直樹・干場充之 (2013): 緊急地震速報における東南海

海底地震計活用のための走時補正・マグニチュード補正の検討, 験震時報, **76**, 69-81.

福島美光 (1993): 地震動強さの距離減衰式 (経験式) に関する最近の研究動向, 地震 2, **46**, 315-328.

防災科学技術研究所: 強震観測網 (K-NET, KiK-net), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/>, (参照日: 2018 年 12 月 3 日).

Hayashimoto, N., T. Nakamura, and M. Hoshiba (2016): Stability of Ocean Bottom Seismograph data exposed to strong shaking: Efforts for utilizing OBS for Earthquake Early Warning, In ECGS & ESC/EAAE Joint Workshop, pp. 41-9. Luxembourg: EGCS.

Hirose, F., K. Miyaoka, N. Hayashimoto, T. Yamazaki, and M. Nakamura (2011): Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0) --Seismicity: foreshocks, mainshock, aftershocks, and induced activity--, Earth Planets Space, **63**, 513-518.

Hoshiba, M., O. Kamigaichi, M. Saito, S. Tsukada and N. Hamada (2008): Earthquake Early Warning starts nationwide in Japan, EOS Trans. AGU, **89**, 73-74.

Hoshiba, M., K. Iwakiri, N. Hayashimoto, T. Shimoyama, K. Hirano, Y. Yamada, Y. Ishigaki, and H. Kikuta (2011): Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0) -Earthquake Early Warning and observed seismic intensity-. Earth Planets Space, **63**, 547-551.

Joyner, W. B. and D. M. Boore (1981): Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, Bull. Seism. Soc. Am. **71**, 2011-2.

Kamigaichi, O., M. Saito, K. Doi, T. Matsumori, S. Tsukada, K. Takeda, T. Shimoyama, K. Nakamura, M. Kiyomoto and Y. Watanabe (2009): Earthquake Early Warning in Japan - Warning the general public and future prospects -, Seis. Res. Lett., **80**, 717-726.

Kanazawa, T. and A. Hasegawa (1997): Ocean-bottom observatory for earthquakes and tsunami off Sanriku, northeastern Japan using submarine cable, Proc. of International Workshop on Scientific Use of Submarine Cables, 208-209, Okinawa.

Kanazawa T., K. Uehira, M. Mochizuki, T. Shinbo, H. Fujimoto, S. Noguchi, T. Kunugi, K. Shiomi, S. Aoi, T. Matsumoto, S. Sekiguchi, and Y. Okada (2016): S-NET PROJECT, CABLED OBSERVATION NETWORK FOR

- EARTHQUAKES AND TSUNAMIS, SubOptic 2016, WE2B3.
- Kaneda, Y., K. Kawaguchi, E. Araki, H. Matsumoto, T. Nakamura, S. Kamiya, K. Ariyoshi, T. Hori, T. baba and N. Takahashi (2015): Development and application of an advanced ocean floor network system for megathrust earthquakes and tsunamis, Seafloor observatories, In: Favali, P. et al. (eds.), Springer Praxis Books, pp. 643-663.
- Katsumata, A., H. Ueno, S. Aoki, Y. Yoshida, and S. Barrientos (2013): Rapid magnitude determination from peak amplitudes at local stations, Earth Planets Space, **65**, 843-853.
- Kawaguchi, K., S. Kaneko, T. Nishida and T. Komine (2015): Construction of the DONET real-time seafloor observatory for earthquakes and tsunami monitoring, Seafloor Observatories, In: Favali, P. et al. (eds.), Springer Praxis Books, pp. 211-228.
- Kodera, Y., Y. Yamada, K. Hirano, K. Tamaribuchi, S. Adachi, N. Hayashimoto, M. Morimoto, M. Nakamura and M. Hoshiba (2018): The Propagation of Local Undamped Motion (PLUM) Method: A Simple and Robust Seismic Wavefield Estimation Approach for Earthquake Early Warning, Bull. Seis. Soc. Am., **108**, 983-1003.
- Mochizuki, M., T. Kanazawa, K. Uehira, T. Shimbo, K. Shiomi, T. Kunugi, S. Aoi, T. Matsumoto, S. Sekiguchi, N. Yamamoto, N. Takahashi, M. Shinohara, T. Yamada (2016): S-net project: Construction of large scale seafloor observatory network for tsunamis and earthquakes in Japan, AGU Fall Meeting, NH43B-1840.
- Nakamura, T., M. Nakano, N. Hayashimoto, N. Takahashi, H. Takenaka, T. Okamoto, E. Araki, Y. Kaneda (2014): Anomalously large seismic amplifications in the seafloor area off the Kii peninsula, Mar Geophys Res, **35**, 255-270.
- Nakamura, T., N. Takahashi, K. Suzuki (2018): Ocean-Bottom Strong-Motion Observations in the Nankai Trough by the DONET Real-Time Monitoring System, Marine Technology Society Journal, **52**, 100-108.
- Nakamura, T., and N. Hayashimoto (2019): Rotation motions of cabled ocean-bottom seismic stations during the 2011 Tohoku earthquake and their effects on magnitude estimation for early warnings, Geophys. J. Int, **216**, 1413-1427.
- Odaka, T., K. Ashiya, S. Tsukada, S. Sato, K. Ohtake and D. Nozaka (2003): A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record, Bull. Seism. Soc. Am., **93**, 526-532.
- Uehira, K., T. Kanazawa, M. Mochizuki, H. Fujimoto, S. Noguchi, T. Shinbo, K. Shiomi, T. Kunugi, S. Aoi, T. Matsumoto, S. Sekiguchi, Y. Okada, M. Shinohara, and T. Yamada (2016): Outline of Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis along the Japan Trench (S-net), European Geosciences Union General Assembly 2016, EGU2016-13832.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1998, New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS Trans AGU. **79**, pp579.

(編集担当 原田智史)