

# 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

気象庁地震火山部\* 溜瀨 功史  
京都大学防災研究所\*\* 山田 真澄  
カリフォルニア工科大学\*\*\* Wu Stephen

A new approach to Identify Multiple Concurrent Events for Improvement of  
Earthquake Early Warning

Koji Tamaribuchi

Seismological and Volcanological Department, Japan Meteorological Agency,  
Otemachi 1-3-4, Chiyoda-ku, Tokyo, 100-8122, Japan

Masumi Yamada

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ.,  
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan

Wu Stephen

California Institute of Technology,  
1200 E. California Blvd., Pasadena, California, 91125, USA

---

\* 〒100-8122 東京都千代田区大手町 1-3-4

\*\* 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

\*\*\* 1200 E. California Blvd., Pasadena, California 91125, USA

1 **Abstract**

2 The extremely active seismicity after the 2011 off the Pacific  
3 Coast of Tohoku Earthquake (Tohoku Earthquake) caused  
4 serious issues for the Earthquake Early Warning (EEW)  
5 system in Japan. Multiple concurrent earthquakes generated  
6 many false alarms due to the failure of correctly determining  
7 the source location. In this study, we propose a method to  
8 distinguish multiple concurrent events for EEW. We used the  
9 outputs of a B-delta method and principal component analysis,  
10 together with P-wave arrival times and amplitudes of  
11 triggered stations. The information of non-triggered stations  
12 is also used to constrain the locations. We constructed a  
13 likelihood function using the source parameters and solved  
14 this optimization problem using the particle filter. The  
15 appropriate choice of a likelihood function improves the  
16 accuracy of the location determination, and the probabilistic  
17 framework evaluates the uncertainty of the hypocenters. We  
18 applied this method to 72 events for which warnings were  
19 issued after the Tohoku Earthquake. The performance of  
20 EEW was greatly improved, reducing the false alarms from  
21 22 to 0. The percentage of inaccurate warnings was also  
22 reduced from 66% to 6%.

23  
24 Key words: Earthquake Early Warning, Multiple earthquakes,  
25 Bayesian estimation, particle filter

1 §1. はじめに

2 緊急地震速報は、震源に近い観測点で P 波を検知して  
3 から直ちに揺れを予測し、強い揺れが来る前に住民に伝  
4 えるリアルタイム警報システムである。このような警報  
5 システムは、国や地域によって対象エリアや手法は異な  
6 るが、日本のほか、メキシコ、台湾、トルコ、イタリア、  
7 アメリカなどでも実用化や開発研究がなされている  
8 [ Allen *et al.* ( 2009 ) ]. 気象庁は日本全国を対象として、  
9 推定した気象庁マグニチュード ( $M$ ) 3.5 以上または予測  
10 した震度が 3 以上の場合に発表する高度利用者向けの緊  
11 急地震速報の運用を 2006 年 8 月から、予測震度 5 弱以上  
12 の場合に予測震度 4 以上の地域に対して発表する一般向  
13 けの緊急地震速報の運用を 2007 年 10 月からそれぞれ開  
14 始し、2007 年 12 月にはそれらを予報、警報と位置付け  
15 た [ Hoshiha *et al.* ( 2008 ) ]. 2011 年 ( 平成 23 年 ) 東北地  
16 方太平洋沖地震では、震源に最も近い宮城県石巻市に設  
17 置された地震計で P 波を検知してから 5.4 秒後に予報 ( 第  
18 1 報 ) を、8.6 秒後の予報 ( 第 4 報 ) の更新時に警報を発  
19 表した。この警報は、テレビ、ラジオ、携帯電話等を通  
20 じて広く一般に伝達された。このとき、警報を発表して  
21 から実際に震度 5 弱相当以上の揺れになるまでの時間は、  
22 震源に最も近い宮城県石巻市でも 15 秒程度であったと  
23 推定される [ Hoshiha *et al.* ( 2011 ) ].

24 この緊急地震速報処理は、地震波を検知した観測点数  
25 が 1 ~ 数地点という限られた状況から震源を時々刻々と  
26 推定するため、得られた観測点数の増加に応じて複数の  
27 手法を適用している。気象庁が用いている現行の震源決  
28 定手法には、Fig.1 ( a ) に示すように、大きく分けて 3  
29 つの処理がある。

30 1 つ目は、全国に整備された気象庁の多機能型地震計

1 約 200 地点を用いるもので、地震波を検知した観測点(ト  
2 リガ観測点)が地震発生直後の 1~2 地点しかない場合に  
3 は、B- $\Delta$  法 [ Odaka *et al.* ( 2003 ), 束田・他 ( 2004 )], 主  
4 成分分析法 [ 横田 ( 1985 )], 及びボロノイ分割を利用し  
5 たテリトリー法 [ Kamigaichi ( 2004 )] を用いて震源を早  
6 期に推定する。その後時間が経過し、トリガ観測点が 3  
7 ~5 地点になった場合はグリッドサーチ法 [ Kamigaichi  
8 ( 2004 )] に切り替え、震源の推定精度を向上させる。

9 2 つ目は、Hi-net [ Okada *et al.* ( 2004 )] 約 800 地点の  
10 データを用いた着未着法 [ Horiuchi *et al.* ( 2005 )] の処理  
11 である。この手法は、2 地点以上の Hi-net 観測点がトリ  
12 ガした場合に行うもので、トリガしていない観測点を P  
13 波がまだ到達していない地点と仮定して、トリガ観測点  
14 のトリガ時刻とトリガしていない観測点の理論走時の両  
15 方を満足させる震源を探索する。ただし、Hi-net 観測網  
16 が疎な海域や島嶼部においては、決定が困難な側面もあ  
17 る。

18 3 つ目は、緊急地震速報以前から行われている手法で、  
19 多機能型地震計と Hi-net 等のデータから P 相、S 相を  
20 AR-AIC 法 [ 横田・他 ( 1981 )] 等を用いて自動検出し、  
21 最小二乗法によって震源を決定する処理である。これは、  
22 少なくとも 5 地点以上の観測値を用いて計算を行うため、  
23 推定精度は高いものの、迅速性の観点からは前述の 2 手  
24 法には及ばない。

25 それぞれの手法の迅速性と震源推定精度の利点を相補  
26 的に利用するため、上記 3 つの震源決定処理は独立に行  
27 い、それぞれ計算結果が得られた場合は、後者の処理結  
28 果を優先して緊急地震速報に使用している。

29 また  $M$  の推定には、多機能型地震計を用いて、以下に  
30 示す P 波部分の 3 成分合成変位波形の最大振幅から推定

1 するP波 $M(M_p)$ とS波到達以降も含めた全相 $M(M_d)$ を、  
2 理論走時に基づいて使い分けている[ Kamigaichi( 2004 ),  
3 気象庁 ( 2010 ), 気象庁 ( 2012 )].

$$0.72M_p = \log(A_d) + 1.2 \log(R) + 5.0 \times 10^{-4}R - 5.0 \times 10^{-3}dep + 0.46, \quad (1)$$

$$0.87M_d = \log(A_d) + 1.0 \log(R) + 1.9 \times 10^{-3}R - 5.0 \times 10^{-3}dep + 0.98. \quad (2)$$

4  $A_d$ は最大変位振幅 (  $10\mu\text{m}$  ),  $R$  は震源距離 ( km ),  $dep$  は  
5 震源の深さ ( km ) である .  $M$  の算出には , 各観測点にお  
6 いて計算される  $M$  の平均値を用いる方法が一般的であ  
7 るが , 緊急地震速報処理においては他の値から大きく外  
8 れた値 ( 外れ値 ) の影響を軽減するため , 震源近傍の最  
9 大 5 地点の中央値 ( 1 地点の場合はその値 , 2 地点の場合  
10 はその平均値 ) を用いる . ただし , 最大変位振幅が小さ  
11 く , 基準値に満たない場合は , Hi-net による最大速度振  
12 幅を用いて  $M$  推定を行う [ Yamamoto *et al.* ( 2008 )].

13 この緊急地震速報処理では , 時間的に限られたデータ  
14 から震源を推定するため , 複数の地震がほぼ同時刻に発  
15 生すると , それらを 1 つの地震と認識して , 誤った緊急  
16 地震速報を公表してしまうことがある . 現行の処理では ,  
17 複数の観測点のデータが同一の地震によるものか , 異な  
18 る複数の地震によるものであるか判定 ( 以下 , 「同一地震  
19 判定」という ) を行う際 , 主に以下の 2 つの条件の論理  
20 和で判定を行っている . 一つ目は震源を利用するもので ,  
21 P 波理論走時と観測された検測時刻を比較し , その差が  
22 あらかじめ決められた閾値の範囲内であれば同一と判断  
23 する . 二つ目は震源に依存しないもので , 観測点間の見  
24 かけ速度 ( 観測点間距離を検測時間差で除したもの ) を  
25 計算し , P 波速度よりも同等か速ければ同一と判断する .

1 このように，現行の処理における同一地震判定は，トリ  
2 ガ観測点の検測時刻のみを用いているため，ほぼ同時刻  
3 にトリガした観測点は基本的に同一地震によるものと判  
4 断されてしまう問題点がある．一方，着未着法はトリガ  
5 していない観測点の情報も使用しており，トリガ観測点  
6 の検測時刻のみを用いる前述の手法に比べるとある程度  
7 分離できる利点はあるものの，前述の通り観測網が疎な  
8 領域では決定が困難となる課題が残る．

9 実際，2007年10月の一般向け緊急地震速報運用開始  
10 からの6年間(2013年9月まで)に発表した138回の警  
11 報のうち，警報を発表したにも関わらず対象地域の全域  
12 で震度3未満であった事例は32回に上り，その約8割(25  
13 回)を占める要因は，複数の地震を分離できなかったた  
14 めと報告されている[気象庁(2013a)，気象庁(2013b)]．  
15 特に，2013年8月8日には和歌山県北部で発生したM2.3  
16 の地震と東南海沖に設置された海底地震計からのノイズ  
17 を1つの地震と識別したために，地震の規模を過大に評  
18 価し，近畿地方を中心に関東地方から九州地方にかけて  
19 警報を発表した．このように，ほぼ同時に発生した複数  
20 の地震(同時多発地震)の分離やノイズとの識別の高精  
21 度化は，緊急地震速報の精度向上に必要不可欠で，急務  
22 の一つである．

23 このような問題の解決策の一つとして，Hoshi(2013)  
24 は波動場そのものを，データ同化を用いて把握し，境界  
25 積分方程式法を用いて伝播の予測することで，揺れを予  
26 測する時間発展型予測手法を提案した．この手法は，震  
27 源を推定する必要がなく，同時多発地震や震源断層の広  
28 がりにも対応できるメリットがある．一方で，波動場の  
29 把握には多数の観測点が必要で，観測網が疎な島嶼部に  
30 は適用が難しい．また，S波による揺れをとらえてから

1 予測するため現在の手法と比較して猶予時間が短くなる  
2 といったデメリットがある。

3 これとは別に，Liu and Yamada (2014) はベイズ推定  
4 を用いて，同時に発生した複数の地震をより適切に分離  
5 する震源決定手法を提案した．この手法は振幅分布のみ  
6 から尤度関数を作成することで，走時データに頼らない  
7 同時多発地震識別の可能性を示した．ただし，この手法  
8 は振幅分布しか利用しないので，海域における震源の安  
9 定性や深さの推定精度には課題がある。

10 そこで本研究では，ベイズ推定が異なる複数のデータ  
11 を容易に扱えることを利用し，Liu and Yamada (2014)  
12 の手法を発展させて震源推定をすることを試みた．尤度  
13 関数には最大振幅の他，検測時刻，トリガしていない観  
14 測点の情報，B- $\Delta$  法，主成分分析法の推定結果を使用す  
15 ることで，従来気象庁が独立に行っていた処理を統合す  
16 ることとした．また同一地震判定では，検測時刻だけで  
17 はなく振幅も利用し，さらに震源の不確実性も考慮する  
18 ことで，より厳密な識別を行う手法を開発した．これら  
19 を適用し，従来の緊急地震速報処理の迅速性を維持しつ  
20 つ，より適切に同時多発地震を識別できる震源推定手法  
21 を開発したので報告する。

22

## 23 §2. 使用データ

24 本研究で対象とした事例は，Table 1 に示す 2011 年 3  
25 月 1 日から 4 月 30 日までの間に警報を発表した 71 事例，  
26 及び 2013 年 8 月 8 日に警報を発表した 1 事例の計 72 事  
27 例である．入力として使用したデータは，現在気象庁の  
28 緊急地震速報処理で利用されている現地観測点処理の結  
29 果（多機能型地震計約 200 地点 [原田 (2007)，気象庁  
30 (2013c)]）である．現地観測点処理とは，各観測点の現

1 地で個別に波形処理を行う仕組みのことで、以下の処理  
2 を行う。まず、STA( Short Term Average )/LTA( Long Term  
3 Average )を常時監視し、STA/LTA が一定の基準未満のと  
4 きは1分に1回生存情報を送信する。STA/LTA が一定の  
5 基準を超えると地震波を検知したと判断し、その時刻か  
6 ら振幅の絶対値がノイズレベルを越えた時点まで遡って  
7 P波の検測時刻とする。次に、P波検測時刻から最初の2  
8 秒までの間に、B- $\Delta$ 法による震央距離、主成分分析法に  
9 よる震源方位を算出し、3成分合成の最大変位振幅、上  
10 下成分の最大速度振幅等とともに、気象庁の中核処理シ  
11 ステムに処理結果を送信する[気象庁(2008)]。なお、  
12 最大振幅は逐次更新されるため、トリガオフになるまで  
13 毎秒送信を続ける。

14

### 15 §3. 手法

#### 16 3.1 アルゴリズムの概要

17 本手法は、前節で述べた現地観測点処理の結果を中核  
18 側で処理するものである。地震波を検知した地点数が1  
19 ~数地点と少ない状況下では、震源を精度よく求めるこ  
20 とは基本的には困難である。そこで、グリッドサーチの  
21 ように広範囲に仮想震源を配置して、最も確からしい震  
22 源を確率論的に探索することを考える。本研究では、震  
23 源パラメータ $\theta$ として緯度、経度、深さを仮定する(す  
24 なわち、 $\theta = \{lat, lon, dep\}$ )。発震時刻( $T_0$ )及びマグニ  
25 チュード( $M$ )は、3.3.2節と3.3.3節で詳しく述べるが、  
26  $\theta$ を仮定すれば観測値(検測時刻と最大振幅)から解析  
27 的に計算できるのでここでは仮定しない。震源パラメー  
28 タの推定には、異なる物理量のデータを容易に扱うこと  
29 ができるベイズ推定を用いた。ベイズの定理は、時刻 $t$   
30 までに得られている観測値を $D_t$ とすると、



$$P(\theta|\mathbf{D}_t) = \frac{L(\mathbf{D}_t|\theta)P(\theta)}{P(\mathbf{D}_t)}, \quad (3)$$

1 で表される．ここで， $P(\theta|\mathbf{D}_t)$ は事後確率分布， $L(\mathbf{D}_t|\theta)$ は  
 2 尤度関数， $P(\theta)$ は事前確率分布である．分母 $P(\mathbf{D}_t)$ は観  
 3 測値に関する確率密度分布であることから定数である．  
 4 つまりベイズ推定は，事前に得られる情報（事前確率分  
 5 布）と，観測値から定義される尤度関数を用いることで，  
 6 震源パラメータを事後確率分布として確率論的に求める  
 7 ことが可能である．

8 処理のフローを Fig. 1 (b) に示す．はじめに震源を 1  
 9 つと仮定して，ある時点までに得られた観測値の全てを  
 10 説明できる震源位置を探索する．観測値の中に推定した  
 11 震源では説明できないものがある場合には，震源の数を  
 12 1 つずつ増やして震源位置を推定する．得られた震源の  
 13 推定結果から，距離減衰式に基づいて M と予測震度を算  
 14 出し，その時点における推定値とする．これを 1 秒毎に  
 15 繰り返し行い，得られた観測値が増加するに従って，震  
 16 源の推定精度を向上させる．

### 17 3.2 事前確率分布の設定

18 事前確率分布 $P(\theta)$ は，情報が無い場合は一様分布によ  
 19 って定義するが，事前にある程度どのあたりに震源があ  
 20 るか分かっていたら，先見的な知見として与えることが  
 21 望ましい．本研究では，過去の震源分布とポロノイ分割  
 22 の考え方を基に事前確率分布を定義した．

23 まず，過去の震源データを基にした事前確率分布 $P_s(\theta)$   
 24 は，1997 年 10 月から 2012 年 12 月までの一元化震源カ  
 25 タログ（例えば，気象庁 [2013d]）を用いて，緯度，経  
 26 度方向にそれぞれ  $0.5^\circ$ ，鉛直方向に 50km のブロック内  
 27 で震源の数をカウントし，震源パラメータ $\theta$ が含まれる  
 28 ブロックに $n_s$ 個の震源が存在するとき，

$$P_s(\theta) \propto \begin{cases} 0.01 & \text{if } 0 = n_s \\ 0.01n_s & \text{if } 0 < n_s \leq 100. \\ 1 & \text{if } 100 < n_s \end{cases} \quad (4)$$

1 と定義した．Fig.2 ( a ) に宮城県周辺の例を示す．群発  
 2 地震や余震等の影響で局所的に確率が上昇することがあ  
 3 るので， $n_s$ が 100 以上の場合には 1 に固定した．なお，  
 4 本手法における仮想震源の最大探索範囲は，計算上の都  
 5 合から，東経 90 度～180 度，北緯 0 度～70 度，深さ 0km  
 6 ～900km とした．

7 次に，ボロノイ分割は，ある地点がどの観測点に最も  
 8 近いかによって領域分けされる分割方法である．具体的  
 9 には，最も早くトリガした地点と，他の観測点との垂直  
 10 2 等分線で囲まれた領域を指し，例を Fig. 2 ( b ) に破線  
 11 で示す．しかし，特に東北地方太平洋沖地震以降は，余  
 12 震活動によってノイズレベルが上昇したために，必ずし  
 13 も震源に最も近い観測点がトリガしないことがあったの  
 14 で，ボロノイ分割を拡張して事前確率 $P_v(\theta)$ を以下の方  
 15 様に定義した．

$$P_v(\theta) \propto \exp\left(-\frac{(k-1)^2}{2c_1^2}\right). \quad (5)$$

16 ここで， $c_1$  はボロノイ分割をどのくらい拡張するかを規  
 17 定するパラメータで，本研究では  $c_1 = 10$  とし，Fig.2 ( b )  
 18 に例を示す．

19 (4) 式と (5) 式の積により，事前確率分布 $P(\theta)$ は

$$P(\theta) = \frac{P_s(\theta)P_v(\theta)}{\int_{\theta} P_s(\theta)P_v(\theta)d\theta}. \quad (6)$$

20 で表わされる．(6) 式によって定義された事前確率分布  
 21 の例を Fig. 2 ( c ) に示す．

### 22 3.3 尤度関数の設定

23 本研究では，震源の推定に B- $\Delta$  法による震央距離，主  
 24 成分分析法による震源方位，検測時刻，最大振幅の各観

1 測値を尤度関数に用いた .

2 まず ,それぞれの観測値について尤度関数を定義する .

3 それぞれの観測値と震源パラメータ $\theta$ における期待値と

4 の差が正規分布で近似できると仮定して , 尤度関数を設

5 定した . 観測値を $x$  , 期待値を $\mu$  , モデルの推定誤差を $\sigma$ で

6 表すとき , 正規分布  $f(x|\mu, \sigma)$  は以下のように表わされる .

$$f(x|\mu, \sigma) = \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (7)$$

7 なお , (6) 式において総和が 1 になるように規格化する

8 ため , (7) 式以降では定数である規格化因子は省略して

9 いる . このとき , 他の地震やノイズによるデータが混入

10 すると , そのデータによって尤度が大きく影響されて ,

11 適切な震源パラメータの推定が困難となるため , 実用上

12 問題となる . この影響を軽減するために , モデルから大

13 きくかけ離れた観測値 (いわゆる「異常値」) に対して下

14 限值 ( $g_0$ ) を設定した . 遠方の観測点が尤度に与える影

15 響を小さくするため , 下限値は震源から遠くなるほど大

16 きくなるように定義し , 下限値 ( $g_0$ ) を設定した正規分

17 布を変形した確率密度関数  $g(x|\mu, \sigma, k_i)$  を以下の式で表す .

$$g(x|\mu, \sigma, k_i) = (1 - g_0(k_i))f(x|\mu, \sigma) + g_0(k_i). \quad (8)$$

18 ただし ,

$$g_0(k_i) = 1 - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{(k_i - 1)^2}{2c_2^2}\right). \quad (9)$$

19  $k_i$  は , 観測点  $i$  が震源から  $k_i$  番目に近い観測点であること

20 を表す .  $c_2$  はどの程度遠方の観測点まで確率密度関数に

21 影響を及ぼすかを規定するパラメータである . 正確な震

22 源決定には複数の観測値が必要であるが , 震源から遠く

23 離れた地点の観測値が震源推定に影響を与えないように

24 するため , 本研究では  $c_2=10$  とした . Fig. 3 に  $k_i$  を変えた

25 ときの下限値  $g_0$  と , 確率密度関数  $g$  の例を示す . ここで

1 定義した確率密度関数を用いて、各観測値に対する尤度  
 2 関数 $L_b$ 、 $L_t$ 、 $L_M$ を定義する。 $L_b$ 、 $L_t$ 、 $L_M$ はそれぞれ震央  
 3 距離と震源方位、検測時刻、及び最大振幅の尤度関数で  
 4 ある。

5 本研究では簡単のため、各観測値を独立とみなし、求  
 6 める尤度関数 $L(\mathbf{D}_t|\theta)$ を以下の式で表す。

$$L(\mathbf{D}_t|\theta) = L_b(\mathbf{D}_t|\theta) \cdot L_t(\mathbf{D}_t|\theta) \cdot L_M(\mathbf{D}_t|\theta). \quad (10)$$

7 Fig. 4 にそれぞれの尤度分布の例を示す。以降の節では、  
 8 それぞれの観測値の尤度関数について具体的に述べる。

### 9 3.3.1 震央距離及び震源方位

10 観測点  $i$  において B- $\Delta$  法及び主成分分析から得られる  
 11 震央距離及び震源方位の推定値を、それぞれ $\tilde{R}_\Delta^i$ 、 $\tilde{R}_a^i$ とす  
 12 る。また、震源パラメータ $\theta$ について、観測点  $i$  との震央  
 13 距離及び震源方位を $R_\Delta^i$ 、 $R_a^i$ とすると、震央距離及び震源  
 14 方位の尤度関数 $L_b$ は、

$$L_b(\mathbf{D}_t|\theta) = \prod_{i=1}^N g(\tilde{R}_\Delta^i|R_\Delta^i, \sigma_\Delta, k_i) \cdot g(\tilde{R}_a^i|R_a^i, \sigma_a, k_i), \quad (11)$$

15 で定義した。ここで $\sigma_\Delta$ 、 $\sigma_a$ はそれぞれ B- $\Delta$  法、主成分分  
 16 析法の推定誤差で、気象庁 (2011) を参考に $\sigma_\Delta=100\text{km}$ 、  
 17  $\sigma_a=20^\circ$ を与えた。 $N$  は全観測点の数で、データが得られ  
 18 ていない観測点については $g(x|\mu, \sigma, k_i) = g_0(k_i)$ を与えた。

### 19 3.3.2 検測時刻

20 検測時刻の尤度関数を定義するために、以下のように  
 21 して発震時刻 $T_0$ を求めた。まず、震源パラメータ $\theta$ を用い  
 22 て、1<sup>st</sup>トリガ観測点の P 波理論走時を求める。1<sup>st</sup>トリガ  
 23 観測点の検測時刻からこれを引くことで、発震時刻の初  
 24 期値を得る。得られた発震時刻の初期値と $\theta$ から各観測  
 25 点の P 波到達予想時刻を求め、各観測点で予想時刻の $\pm$   
 26 3 秒の範囲内にある検測時刻を選択した。選択した検測  
 27 時刻から P 波理論走時を引くことで、各観測点で発震時

- 1 刻の推定値が得られ，その平均値を発震時刻 $T_0$ とした．  
 2 次に検測時刻の尤度関数を定義する． $T_0$ と $\theta$ から観測点  
 3  $i$ におけるP波到達予想時刻 $T_{cal}^i$ を得られるので，検測時  
 4 刻 $T_{trg}^i$ の尤度関数 $L_t$ は，

$$L_t(\mathbf{D}_t|\theta) = \prod_{i=1}^N L_t(D_t^i|\theta). \quad (12)$$

- 5 ただし，

$$L_t(D_t^i|\theta) = \begin{cases} g(T_{trg}^i|T_{cal}^i, \sigma_t, k_i) & \text{if } T_{trg}^i \text{ exists,} \\ g(T_{now}|T_{cal}^i, \sigma_t, k_i) & (*) \\ g_0(k_i) & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (13)$$

(\*)  $T_{trg}^i$  does not exist,  $T_{now} - T_{cal}^i \geq 1$ , and  $k_i \leq 5$ .

- 6 と定義した． $\sigma_t$ は走時残差の標準偏差で経験的に $\sigma_t=1.5$   
 7 を与えた． $T_{now}$ は処理を行っている時点におけるシステ  
 8 ム上の時刻（現在時刻）である．(13)式の(\*)は，着  
 9 未着法の考え方を基に，震源近傍5地点以内で，かつ $T_{now}$   
 10 がP波到達予想時刻 $T_{cal}^i$ を1秒以上経過してもトリガし  
 11 ていない観測点については，その残差（ $T_{now} - T_{cal}^i$ ）を  
 12 ペナルティとして尤度関数に与えることを意味する．そ  
 13 れ以遠の観測点で検測時刻が得られていない場合は，下  
 14 限值 $g_0$ を与えた．

### 15 3.3.3 最大振幅

- 16 最大振幅の尤度関数は，各観測点において算出された  
 17  $M$ の中央値からの偏差を用いて定義する．震源パラメー  
 18 タ $\theta$ のとき，観測点 $i$ における速度マグニチュード $M_v^i$ は  
 19 最大速度振幅 $A_v^i$ を用いて以下のように求められる[舟  
 20 崎・地震予知情報課(2004)]．

$$M_v^i = \alpha \log(A_v^i) + \beta_v(R_\Delta^i, dep) + C_v. \quad (14)$$

- 21  $\alpha$ は定数， $\beta_v$ は距離減衰項， $C_v$ は観測点補正項である．

- 22 このとき，最大振幅の尤度関数 $L_M$ は，各観測点におけ  
 23 る $M$ のばらつきを示すように，以下の式で定義した．

$$L_M(\mathbf{D}_t|\theta) = \prod_{i=1}^N g(M_v^i|\hat{M}_v, \sigma_M, k_j). \quad (15)$$

1 ここで、 $\sigma_M$ は  $M$  の標準偏差で、経験的に $\sigma_M=0.7$  を与え  
 2 た。 $\hat{M}_v$ は近傍 5 地点における $M_v^i$ の中央値である。この尤  
 3 度関数の  $M$  計算では、各観測点における振幅の条件を揃  
 4 えるため、検測時刻から 5 秒以内に得られた最大振幅を  
 5 用いて、速度  $M$  を計算した。速度  $M$  を用いる理由は、  
 6 対象とする地震が  $M4$  未満であっても SN 比がよく、ま  
 7 た変位振幅に比べて時間的に減衰が早く、異なる地震の  
 8 後続波の影響を比較的受けにくい点である。速度センサ  
 9 は振り切れる可能性があるが、情報発表に用いる  $M$  とは  
 10 異なり、尤度計算では各観測点における  $M$  の偏差のみを  
 11 計算できればよく、さらに検測時刻から 5 秒以内に得ら  
 12 れた最大振幅を用いるので振り切れの問題はほぼ無視で  
 13 きる。ただし、速度センサが併設されていない観測点な  
 14 どで、最大速度振幅が得られなかった場合は、最大変位  
 15 振幅から (2) 式を用いて観測点  $M$  を推定した。

### 16 3.4 パーティクルフィルタ法

17 リアルタイムに震源の推定を行うためには、処理の効  
 18 率化も大きな課題の一つである。グリッドサーチを用い  
 19 ても前節まで述べた事後確率を推定することは可能で  
 20 あるが、本研究では処理をより効率的に行うことができ  
 21 るパーティクルフィルタ法 [例えば、Arulampalam *et al.*  
 22 (2002)]を用いた。パーティクルフィルタ法は、モンテ  
 23 カル口法の一つで、事前確率分布に従ってランダムに配  
 24 置した仮想震源について、観測値に基づいて尤度を算出  
 25 し、尤度の高い仮想震源の周辺に重点的に仮想震源を再  
 26 配置する手法である。具体的には、以下の 4 つのステッ  
 27 プの繰り返すことで、震源の推定を行う (ただし Step 1  
 28 は 1 回目の推定のみ)。

1 Step 1. 初期化：事前確率分布 $P(\theta)$ ((6)式)に従って  
2 仮想震源を配置する。本研究では、仮想震源の数は 1000  
3 とした。

4 Step 2. 尤度計算：それぞれの仮想震源において、現時  
5 点までに得られた観測値を用いて尤度 $L(\mathbf{D}_t|\theta)$ ((10)式)  
6 を計算する。

7 Step 3. 最尤値推定：最も尤度が高い仮想震源を時刻  $t$   
8 における震源の推定値 $\hat{\theta}$ とする。

9 Step 4. リサンプリング：Step 2 で得られた各仮想震源  
10 の尤度を規格化し重み  $w$  を求める。つまり、配置した震  
11 源分布を $\theta^{(j)}$  ( $j = 1, \dots, m; m = 1000$ ) とすると $w^{(j)}$ は、

$$w^{(j)} = \frac{L(\mathbf{D}_t|\theta^{(j)})}{\sum_{j=1}^m L(\mathbf{D}_t|\theta^{(j)})}, \quad (16)$$

12 である。得られた重み分布を基に仮想震源を復元抽出し  
13 た。ここで抽出された仮想震源は、次の時間ステップに  
14 おいて利用されるが、復元抽出であるため、ある特定の  
15 仮想震源に収束してしまう危険性がある。そのため、抽  
16 出された仮想震源に、わずかに摂動を与えた。具体的に  
17 は、水平方向に 0.1 度、深さ方向に 20km の標準偏差を  
18 持つ正規乱数を摂動として与えた。次の時間ステップに  
19 おいては、ここで求めた仮想震源を利用し、Step 2 以降  
20 を繰り返す。

21 このようにして、震源の推定値 $\hat{\theta}$ を、時間の経過とと  
22 もに繰り返し更新する。Step 3 での震源の推定値として、  
23 重み付き平均ではなく最も尤度が高い仮想震源を用いて  
24 いるのは、観測値が少ない初期の段階で、事前確率に大  
25 きく左右されることを防ぐためである。深さについては、  
26 トリガした観測点数が 3 地点以下の場合、または最も近  
27 いトリガ観測点からの震央距離が 150km 以上離れてい  
28 る場合は、深さの精度がないため、過去の震源分布を考

1 慮して 10km に固定した .

2 情報発表に利用する  $M$  は , 現行の緊急地震速報処理と  
3 同様にトリガ時刻以降の全ての観測値の最大変位振幅か  
4 らそれぞれ  $M$  を算出し , 近傍 5 地点の中央値を採用した .  
5 また ,  $M$  の算出においては , 他の地震やノイズの影響を  
6 軽減するため , 震央距離が「トリガした観測点と震源の  
7 最短距離 + 150km」よりも遠い地点の  $M$  は用いないこと  
8 とした .

### 9 3.5 複数地震の識別 (同一地震判定)

10 複数地震を識別するために , 時刻  $t$  , 観測点  $i$  における  
11 観測値  $D_t^i$  がパーティクルフィルタ処理によって得られ  
12 た重み分布によって説明できるか判定する . 震源パラメ  
13 ータ  $\theta$  の下で観測値が  $D_t^i$  である確率  $p(D_t^i|\theta)$  は ,

$$\begin{aligned} p(D_t^i|\theta) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_t^2}} \exp\left\{-\frac{(T_{trg}^i - T_{cal}^i)^2}{2\sigma_t^2}\right\} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_M^2}} \exp\left\{-\frac{(M_v^i - \hat{M}_v)^2}{2\sigma_M^2}\right\} \\ &= \frac{1}{2\pi\sigma_t\sigma_M} \exp\left[-\frac{1}{2}\left\{\frac{(T_{trg}^i - T_{cal}^i)^2}{\sigma_t^2} + \frac{(M_v^i - \hat{M}_v)^2}{\sigma_M^2}\right\}\right], \quad (17) \end{aligned}$$

14 で表わされる . ここで , 同一の地震と判断する条件を ,

$$p(D_t^i|\theta) \geq \frac{1}{2\pi\sigma_t\sigma_M} \exp\left(-\frac{A^2}{2}\right), \quad (18)$$

15 と設定する .  $A$  は閾値で , 本研究では  $A=3$  を与えた . つ  
16 まり , (17) 式 , (18) 式から , 震源パラメータ  $\theta$  と観測  
17 値  $D_t^i$  が同一の地震と判断する条件は ,

$$\frac{(T_{trg}^i - T_{cal}^i)^2}{\sigma_t^2} + \frac{(M_v^i - \hat{M}_v)^2}{\sigma_M^2} \leq A^2, \quad (19)$$

18 を満たせばよい . これは  $\pm 3\sigma$  程度の誤差楕円の範囲内で  
19 あれば , 同一地震による観測値とみなすことを意味する .  
20 このとき , 重み分布と観測値  $D_t^i$  との同一地震判定は , そ  
21 れぞれの震源パラメータの重み付き和によって表わされ ,



$$\sum_{j=1}^m w^{(j)} p(D_t^i | \theta^{(j)}) \geq \frac{1}{2\pi\sigma_t\sigma_M} \exp\left(-\frac{A^2}{2}\right), \quad (20)$$

1 である． $\theta^{(j)}$ はパーティクルフィルタ処理によって配置  
 2 した震源パラメータ， $w^{(j)}$ は $\theta^{(j)}$ における重みである．従  
 3 来手法における同一地震判定は，主に各観測点の検測時  
 4 刻のみに頼っていたが，本手法では振幅値（ $M$  残差）と  
 5 検測時刻（走時残差）が含まれるため，従来手法に比べ  
 6 て複数イベントをより適切に分離することが可能となる．  
 7 これに加え，重み分布を利用することで，震源の不確定  
 8 性も考慮できる．

9 複数の地震が発生した際に識別する方法について，以  
 10 下に示す．まず，ある観測点 $s_1$ が最初に地震波を検知し  
 11 たとき，観測点 $s_1$ を1<sup>st</sup>トリガ観測点とする．そこで観測  
 12 点 $s_1$ のデータを満たす1つ目の地震について3.4節で述  
 13 べたパーティクルフィルタ処理を行う．次に，他の観測  
 14 点が地震波を検知したとき，1つ目の地震の重み分布と  
 15 検測時刻及び最大振幅を比較し，1つ目の地震による揺  
 16 れとみなせるか判定を行う．この判定を時間ステップご  
 17 とに繰り返し，判定の結果同一とみなせない観測点 $s'$ が  
 18 存在すると，2つ目の地震が発生したと判断して，その  
 19 観測点を1<sup>st</sup>トリガ観測点 $s'_1$ として新たにパーティクルフ  
 20 イルタ処理を行う．以下同様にして，3つ目以降の地震  
 21 の識別を行う．新しい観測値が複数の地震のどちらでも  
 22 説明できる場合は，両方の尤度関数に観測値を利用する．

23 また逆に，1つの地震をノイズ等の影響で誤って複数  
 24 に分離してしまった場合でも，後から1つの地震に統合  
 25 できるように考慮しておく必要がある．そこで，まず分  
 26 離された2つの地震で観測値が(20)式の条件を満たす  
 27 かどうか確認する．それぞれの地震で(20)式の条件を  
 28 満たす観測値のうち，半数以上が両方の地震で(20)式

1 を満たした場合は、2つの地震を1つの地震に統合させ  
2 ることとした。例えば、1つ目の地震に対して(20)式  
3 の条件を満たす観測値 $D_t^1, D_t^2, D_t^3, D_t^4, D_t^5$ があり、2  
4 つ目の地震に対して条件を満たす観測値 $D_t^4, D_t^5, D_t^6$ があ  
5 ったとする。ここで、観測値 $D_t^4, D_t^5$ は両方の地震で(20)  
6 式の条件を満たしており、かつ2つ目の地震は3観測値  
7 ( $D_t^4, D_t^5, D_t^6$ )のうち2観測値が重複しているので統合  
8 する対象となる。なお、統合させる際には、それぞれの  
9 最適な仮想震源の尤度を比較し、大きい尤度を持つ地震  
10 (つまり(20)式を満たす観測値が多い方の地震)を採  
11 用する。小さい尤度を持つ地震については、パーティク  
12 ルフィルタ処理をこれ以上継続させないこととした。  
13

#### 14 §4. 結果と議論

##### 15 4.1 単独地震の事例(平成23年(2011年)東北地方 16 太平洋沖地震)

17 まず、地震が単独で発生した場合の事例(2011年3月  
18 11日14時46分に発生した平成23年(2011年)東北地  
19 方太平洋沖地震)を示す。従来処理では、震源に最も近  
20 い石巻大瓜(OURI)観測点で最初にトリガ検知してから  
21 8.6秒後に $M7.2$ (最大震度5弱)を予測し、警報を発表  
22 した。その後、時間の経過とともに徐々に $M$ の推定値が  
23 大きくなり、最終的にはトリガ検知から105.0秒後に  
24  $M8.1$ (最大震度6弱)を予測した。

25 本手法の処理では、震源に最も近い観測点で最初にト  
26 リガ検知してから2.1秒後に事前確率分布に従って仮想  
27 震源を配置した。Fig. 5(a)に、このときの仮想震源分  
28 布を示す。仮想震源の色は重みを示す。その後、石巻大  
29 瓜観測点でトリガ検知してから9.1秒後までに受信した  
30 データを用いて、 $M7.4$ (最大震度5弱)を推定した(Fig.

1 5 (b)). これは、従来处理と比較しても、警報発表時間  
2 の遅延はほとんどない。また、 $M$ 、震源の位置、及び深  
3 さいの比較を Fig. 5 (c), (d), (e) に示すが、従来の手法  
4 に比べて震源決定精度に大きな差は確認されなかった。

#### 5 4.2 複数地震の事例 (2011 年 3 月 19 日 6 時 18 分の 6 地震)

7 次に、複数の地震がほぼ同時刻に発生した場合の事例  
8 を示す。2011 年 3 月 19 日の事例では、6 時 18 分 48 秒に  
9 栃木県北部で  $M2.5$  (最大震度 1) の地震が発生し、5 秒  
10 後の 6 時 18 分 53 秒に茨城県沖で  $M4.8$  (最大震度 2) の  
11 地震が発生した。従来处理では、栃木県北部の地震の理  
12 論走時と、茨城県沖の地震による検測時刻が重なったた  
13 め、これらの地震を 1 つの地震と識別した。その結果、2  
14 つの地震の振幅を混在して  $M$  を過大に算出 ( $M5.8$ , 最大  
15 震度 5 弱) したために、警報を発表した [気象庁 (2012)]。

16 本手法では、最初の地震波を検知してから 2.1 秒後に  
17 1 つ目の地震の処理を開始した (Fig. 6 (a))。その後、  
18 最初のトリガ検知から 14.2 秒後に、銚子天王台  
19 (TENNOD) 観測点で地震波を検知した。ここで同一地  
20 震判定の結果、このデータが 1 つ目の地震によるもので  
21 はないと判断し、2 つの地震に適切に分離した (Fig. 6  
22 (b))。2 つ目の地震である茨城県沖の地震 ( $M4.8$ ) の推  
23 定結果の比較を Fig. 6 (c) ~ (e) に示す。本手法では初  
24 期の段階から震源を 2 つに分離できたため、茨城県沖の  
25 地震の  $M$  の推定値は  $M4.6 \sim M4.8$  程度と、誤差が 0.2 以  
26 下に減少した (Fig. 6 (c))。一元化震源の位置と比較す  
27 る。Fig. 6 (d) に示すように、従来の手法では 1 つ目の  
28 地震波を検知してから 30 秒後に、一元化震源と比べて水  
29 平距離で 150km 以上離れた位置に震源を決定した。しか  
30 し本手法ではその水平距離は 50km 程度と大きく改善さ

1 れた．深さについても，本手法では 30km 程度で，一元  
2 化震源の深さ 44km と概ね整合している (Fig. 6 (e))．

#### 3 4.3 地震とノイズが重なった事例 (2013 年 8 月 8 日 4 の地震)

5 2013 年 8 月 8 日 16 時 56 分に和歌山県北部で発生した  
6  $M2.3$  (震度 1 以上の観測はなし) の地震の事例では，ト  
7 リガ検知から 17.4 秒後に東南海 OBS のノイズを 1 つの  
8 地震と識別し，OBS のノイズを用いて  $M$  を計算した結  
9 果， $M7.8$  (最大震度 7) を予測し，警報を発表した．こ  
10 のノイズの直接的な原因は陸上中継局の不具合によるも  
11 のであったが，雷ノイズのように，地震計は誤ったトリ  
12 ガを送信する可能性を常に持っている．

13 本手法では，Fig. 7 (a) に示すように，和歌山県北部  
14 の地震によるトリガを検知した直後から震源の推定を開  
15 始した．その後，最初のトリガ検知から 17.4 秒後に東南  
16 海 OBS3 (TT3OBS) 観測点でトリガを検知した．このと  
17 き，東南海 OBS3 の観測値は検測時刻及び最大振幅から  
18 和歌山県北部の地震によるものではないと判断し，2 つ  
19 目の地震として処理を開始した (Fig. 7 (b))．この 2 つ  
20 目の地震は，それ以降しばらく時間が経過しても同一と  
21 判定される他観測点のデータが得られなかったため，約  
22 60 秒後に処理を終了した．2 つ目の地震について，仮に  
23 過大な振幅を用いて  $M$  を計算しても，警報を発表するに  
24 は 2 地点以上での検知が必要なので，警報発表には至ら  
25 ない．和歌山県北部の地震における  $M$  は，初期の段階か  
26 ら安定して  $M2$  程度 (ただし速度  $M$ ) を推定し，警報を  
27 発表することはない (Fig. 7 (c))．震源の位置及び深さ  
28 についても，ノイズを適切に分離したために一元化震源  
29 と比較して大きく誤って決定することはなかった (Fig. 7  
30 (d),(e))．このように，ノイズが混在した場合でも，

1 最大振幅値を活用することで適切に分離することが可能  
2 である。

#### 3 4.4 全事例のまとめ

4 本研究で対象とした 72 事例について、本処理で推定さ  
5 れた警報対象地域と実際に観測された震度 3 以上の地域  
6 を比較し、警報対象地域の全域で、震度 3 以上が観測さ  
7 れた場合を適切 (Accurate)、警報対象地域の 1 つでも震  
8 度 2 以下であった場合を不適切 (Inaccurate) と分類した。  
9 さらに、不適切な事例のうち、警報対象地域の全てで最  
10 大震度 2 以下であった事例を誤報 (False) と分類した。  
11 これらの分類結果を Fig. 8 に示す。従来の処理で誤報に  
12 分類された事例は 22 事例であったが、本手法では 0 事例  
13 であった。また、不適切な警報を発表する割合は、従来  
14 の処理では 66% (48/72 事例) であった一方、本手法で  
15 は 6% (4/72 事例) であった。従来の手法と本手法によ  
16 る最大予測震度と観測された最大震度の階級差を Fig. 9  
17 に示す。従来の手法において過大に予測した事例が軽減  
18 されたことが分かる。また、過少に予測した事例もわず  
19 かながら改善した。なお、震度階級差は、震度 5 弱と 5  
20 強、6 弱と 6 強でも 1 階級の差と定義しているため、震  
21 度 0 (無感) の地震を震度 7 と予測した場合は、9 階級異  
22 なることになる。

23 本手法において、警報対象地域の一部で震度 2 以下だ  
24 ったため不適切と分類された 4 事例のうち 2 事例 (2011  
25 年 4 月 14 日 20 時 24 分の福島県浜通りの地震と 2011 年  
26 4 月 19 日 4 時 14 分の秋田県南部の地震) は、震源直上  
27 の観測点で  $M$  を過大に推定し、 $M$  推定の誤差が大きくな  
28 った。震源近傍における距離減衰式や、震度推定の誤差  
29 の改善は今後の課題である。その他の 2 事例のうち、2011  
30 年 3 月 12 日 3 時 11 分の福島県沖の地震では、数秒前に

1 ほぼ同じ場所で別の小さな地震が発生し、地動レベルが  
2 上昇したため、震源近傍の観測点でトリガしなかった。  
3 本手法では、トリガしていない観測点を「まだ揺れてい  
4 ない」と仮定して処理を行っているため、このような場  
5 合は不適切な警報を発表する可能性がある。また、2011  
6 年3月19日18時56分の茨城県北部( $M4.0$ , 最大震度4)  
7 の事例では、約30秒後にほぼ同じ場所で $M6.1$ の地震が  
8 発生した。これらの震源は適切に分離できたものの、前  
9 者の地震の $M$ 推定において後者の地震による振幅が混  
10 入し、 $M$ を過大に推定した。このように、震源近傍の観  
11 測点であるにも関わらずトリガしない場合や、時空間的  
12 に非常に近接して地震が発生した場合には、震源や $M$ を  
13 適切に推定することは現時点では困難であり、引き続き  
14 改善に向けた検討を進めたい。

15 逆に、適用した事例のうち、震度5弱以上を観測した  
16 にも関わらず警報発表基準に満たなかった事例(見逃し  
17 事例)は4事例だった。そのうち震度2階級以上の差が  
18 あった2事例について、詳細を以下に述べる。1つ目の  
19 事例は2011年3月12日5時42分の新潟県の地震( $M5.3$ ,  
20 最大震度6弱)である。この事例では、震源直上の観測  
21 点で $M$ の割に比較的大きい震度(6弱)を観測した。本  
22 手法による推定 $M$ は $M5.1$ (予測最大震度4)で、マグニ  
23 チュードは適切に推定できていたが、震度予測式の誤差  
24 が大きく、適切な震度推定ができなかった。もう1つの  
25 事例は2011年3月23日7時36分の福島県の地震( $M5.8$ ,  
26 最大震度5強)である。この事例は、2分前の7時34分  
27 に福島県で発生した $M5.5$ (最大震度5強、現行処理では  
28 警報未発表)の地震が発生し、7時34分の地震について  
29 は本処理では適切に警報を発表したが、地動レベルが上  
30 昇したことによって、7時36分の地震では1地点しかト

1 リガデータが得られなかった．前述と同様に，大規模な  
2 地震発生直後に近傍の別地震でトリガ検知することは現  
3 行のシステムでは困難で，今後の課題である．ただし，  
4 このような見逃し事例は，Hoshiya ( 2013 ) のような時間  
5 発展型予測を併用することで，改善が期待できると考え  
6 られる．

7 本手法で特筆すべき点は，既存の緊急地震速報処理で  
8 使用している観測値と全く同じものを使用している点で  
9 ある．つまり，既存の枠組みの範囲内でも緊急地震速報  
10 の震源推定精度を大きく向上させることが可能である．  
11 また，本処理の処理にかかる時間は，簡易的な並列化処  
12 理である OpenMP を用いた 12 スレッド並列処理で，1 イ  
13 ベントあたり 0.3~0.5 秒程度である（動作環境は，CPU:  
14 Xeon 2.26GHz，OS: Linux 2.6.32，メモリ:32 GB，コンパ  
15 イラ:gcc ver.4.4.7)．すなわち，2 つ地震が発生した場合  
16 でも，約 1 秒ごとに震源情報を更新でき，緊急地震速報  
17 の用途として十分に実時間で処理を行うことが可能であ  
18 る．

19 なお，今後の展望として，緊急地震速報の迅速性を更  
20 に向上させるため，今回利用した気象庁の観測網だけで  
21 はなく，海底地震観測網や Hi-net，KiK-net のような地中  
22 に設置された高密度観測網を統合した処理の検討を進め  
23 たい．その際，今回経験的に与えた尤度関数等のパラメ  
24 ータを観測点，観測網ごとに評価することや，観測点の  
25 増加に伴う処理の更なる効率化に向けた検討が今後必要  
26 になるであろう．

27

## 28 §5. まとめ

29 本研究では，先験的な情報と物理量が異なる複数の観  
30 測値を統合的に扱うことのできるベイズ推定を用いて，

1 震源をリアルタイムで推定する手法を開発した。また、  
2 振幅値やトリガしていない観測点の情報を利用すること  
3 で、ほぼ同時刻に発生した複数の地震を適切に分離する  
4 ことが可能となった。開発した手法を 2011 年 3 月 1 日か  
5 ら 4 月 30 日に緊急地震速報を発表した 71 事例、及び 2013  
6 年 8 月 8 日に発表した 1 事例に対して適用した。その結  
7 果、従来处理で 22 回あった誤報回数は、本手法では 0  
8 回となった。また、不適切な警報を発表する割合も、66%  
9 (48/72 事例)から 6%(4/72 事例)に大幅に改善された。  
10 本手法は、従来の緊急地震速報処理と同じ観測値を入力  
11 として用いているため、既存の枠組みの範囲内でも、緊  
12 急地震速報の精度を改善できることが示された。

13

#### 14 謝辞

15 本論文をまとめるにあたり、気象庁の土井恵治氏、東  
16 田進也氏、中村雅基氏、平野和幸氏、山田安之氏には有  
17 益な議論をしていただきました。また、東京大学地震研  
18 究所の長尾大道氏と 1 名の匿名の査読者及び担当編集委  
19 員の独立行政法人海洋研究開発機構の有吉慶介氏からの  
20 ご意見は、本論文の改善に大変役立ちました。本研究で  
21 は、公益財団法人鉄道総合技術研究所と気象庁による共  
22 同技術開発の成果である現地観測点処理結果を利用しま  
23 した。過去の震源分布及び処理結果の比較には、北海道  
24 大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京  
25 都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、独立行政法  
26 人防災科学技術研究所、独立行政法人産業技術総合研究  
27 所、国土地理院、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温  
28 泉地学研究所、横浜市、独立行政法人海洋研究開発機構  
29 及び気象庁の地震波形を気象庁と文部科学省が協力して  
30 データを処理した一元化震源を使用しました。図の作成



1 には Wessel and Smith ( 1998 ) の Generic Mapping Tool を  
2 使用しました . 本研究は , 最先端・次世代研究開発支援  
3 プログラムの助成を受けています . 記して感謝いたしま  
4 す .

5

6

## 文献

7 Allen, M. R., P. Gasparini, O. Kamigaichi and M. Böse, 2009,  
8 The status of Earthquake Early Warning around the  
9 world: An introductory overview, *Seismol. Res. Let.*, **80**,  
10 682-693.

11 Arulampalam, M. S., S. Maskell, N. Gordon and T. Clapp,  
12 2002, A tutorial on particle filters for online  
13 nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking. *IEEE Trans.*  
14 *Signal Proc.*, **50**, 174-188.

15 原田智史, 2007, 多機能型地震観測装置の概要, *験震時*  
16 *報*, **70**, 73-81.

17 舟崎淳・地震予知情報課, 2004, 気象庁速度マグニチュー  
18 ドの改訂について, *験震時報*, **67**, 11-20.

19 Horiuchi, S., H. Negishi, K. Abe, A. Kaminuma and Y.  
20 Fujinawa, 2005, An automatic processing system for  
21 broadcasting earthquake alarms, *Bull. Seism. Soc. Am.*,  
22 **95**, 708-718.

23 Hoshiaba, M., O. Kamigaichi, M. Saito, S. Tsukada and N.  
24 Hamada, 2008, Earthquake Early Warning starts  
25 nationwide in Japan, *EOS Trans. AGU*, **89**, 73-74.

26 Hoshiaba, M., K. Iwakiri, N. Hayashimoto, T. Shimoyama, K.  
27 Hirano, Y. Yamada, Y. Ishigaki and H. Kikuta, 2011,  
28 Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku  
29 Earthquake (Mw 9.0) – Earthquake Early Warning and  
30 observed seismic intensity –, *Earth Planets Space*, **63**,

1 547-551.

2 Hoshiya, M., 2013, Real-time prediction of ground motion by  
3 Kirchhoff-Fresnel boundary integral equation method:  
4 Extended front detection method for Earthquake Early  
5 Warning, J. Geophys. Res. Solid Earth, **118**, 1-13.

6 Kamigaichi, O., 2004, JMA Earthquake Early Warning,  
7 Journal of Japan Association for Earthquake Engineering,  
8 **4**, 134-137.

9 気象庁, 2008, 緊急地震速報の概要や処理手法に関する  
10 技術的参考資料, <[http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/  
11 EEW/kaisetsu/Whats\\_EEW/reference.pdf](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/Whats_EEW/reference.pdf)> (参照 2013-  
12 8-30) .

13 気象庁, 2010, 緊急地震速報評価・改善検討会 技術部会  
14 (第2回), <[http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/  
15 Meeting\\_HYOUKA/t02/index.html](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/Meeting_HYOUKA/t02/index.html)>(参照 2013-9-17).

16 気象庁, 2011, 緊急地震速報評価・改善検討会 技術部会  
17 (第3回), <[http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/  
18 Meeting\\_HYOUKA/t03/index.html](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/Meeting_HYOUKA/t03/index.html)>(参照 2013-9-17).

19 気象庁, 2012, 緊急地震速報評価・改善検討会 技術部会  
20 (第4回), <[http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/  
21 Meeting\\_HYOUKA/t04/index.html](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/Meeting_HYOUKA/t04/index.html)>(参照 2013-9-17).

22 気象庁, 2013a, 緊急地震速報評価・改善検討会(第4回)  
23 資料, <[http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/Meetin  
24 g\\_HYOUKA/04/index.html](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/Meeting_HYOUKA/04/index.html)> (参照 2013-8-30) .

25 気象庁, 2013b, 緊急地震速報の発表状況, <[http://www.se  
26 isvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/joho/joho.html](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/joho/joho.html)>(参  
27 照 2013-10-16) .

28 気象庁, 2013c, 緊急地震速報のしくみ, <[http://www.seis  
30 vol.kishou.go.jp/eq/EEW/portal/shikumi/ew\\_shikumi.ht  
ml](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/portal/shikumi/ew_shikumi.ht<br/>29 ml)> (参照 2013-10-17) .

- 1 気象庁, 2013d,地震火山月報(カタログ編)平成25年3  
2 月.
- 3 Odaka, T., K. Ashiya, S. Tsukada, S. Sato, K. Ohtake and D.  
4 Nozaka, 2003, A new method of quickly estimating  
5 epicentral distance and magnitude from a single seismic  
6 record, Bull. Seism. Soc. Am., **93**, 526-532.
- 7 Okada, Y., K. Kasahara, S. Hori, K. Obara, S. Sekiguchi, H.  
8 Fujiwara and A. Yamamoto, 2004, Recent progress of  
9 seismic observation networks in Japan –Hi-net, F-net,  
10 K-NET and KiK-net–, Earth Planets Space, **56**,  
11 xv-xxviii.
- 12 東田進也・小高俊一・芦谷公稔・大竹和生・野坂大輔, 2004,  
13 P波エンベロープ形状を用いた早期地震諸元推定法,  
14 地震2, **56**, 351-361.
- 15 Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1998, New, improved version  
16 of Generic Mapping Tools released. EOS Trans. AGU,  
17 **79**, 579.
- 18 Liu, A. and M. Yamada, 2014, Bayesian Approach for  
19 Identification of Multiple Events in an Early Warning  
20 System, Bull. Seism. Soc. Am., **104-3**, (accepted).
- 21 Yamamoto, S., P. Rydelek, S. Horiuchi, C. Wu and H.  
22 Nakamura, 2008, On the estimation of seismic intensity  
23 in earthquake early warning systems, Geophys. Res.  
24 Lett., **35**, L07302.
- 25 横田崇, 1985, 自動検測手法の研究, 気象研究所技術報  
26 告, No. **16**, 56-100.
- 27 横田崇・周勝奎・溝上恵・中村功, 1981, 地震波データの  
28 自動検測方式とオンライン処理システムにおける  
29 稼働実験, 東京大学地震研究所彙報, **56**, 449-484.
- 30

1

## 2 Figure Captions

3

4 Fig. 1. Flow charts of (a) the current JMA EEW system and  
5 (b) this study.

6

7 Fig. 2. Example of prior probability density at the depth of  
8 10km. (a) Past seismicity, (b) Voronoi cell, and (c)  
9 product of (a) and (b). Open triangles show location of  
10 stations. A filled triangle shows the first triggered station.  
11 Bottom figures show the section at the triggered station.  
12 Black dots show the seismicity between 1997 and 2012.  
13 Note that each plot is normalized. Dashed line in (b)  
14 shows the Voronoi cell of the first triggered station.

15

16 Fig. 3. (a) A function of lower bound  $g_0$  in Eq. 9. (b)  
17 Probability density function  $f$  with  $\mu=0$  and  $\sigma=1$  in Eq.  
18 10. It is normal distribution with the lower bound of  $g_0$ .

19

20 Fig. 4. Examples of likelihood for (a)  $B-\Delta$ , (b) travel time,  
21 and (c) amplitude. Filled and open triangles show  
22 triggered and non-triggered station, respectively. A star  
23 shows the epicenter location. Note that each plot is  
24 normalized.

25

26 Fig. 5. Example of the Tohoku Earthquake. Distribution of  
27 samples at (a)  $t=2.1s$  and (b)  $t=9.1s$ . Color indicates the  
28 weight of each sample. A cross shows an optimal  
29 parameter  $\hat{\theta}$  at the time. Open star shows the  
30 hypocenter location in the JMA catalog. Time series of

1 (c) estimated magnitude, (d) distance error of estimated  
2 location, (e) estimated depth. Dashed line shows the  
3 value in the catalog. Horizontal axis shows the elapsed  
4 time from the pick time of the first triggered station.

5  
6 Fig. 6. Example of two small earthquakes on Mar. 19, 2011.

7 See Fig. 5 for the caption.

8  
9 Fig. 7. Example of a small earthquake and noise on Aug. 8,  
10 2013. See Fig. 5 for the caption.

11  
12 Fig. 8. Performance of EEW issued by current JMA system  
13 and this study.

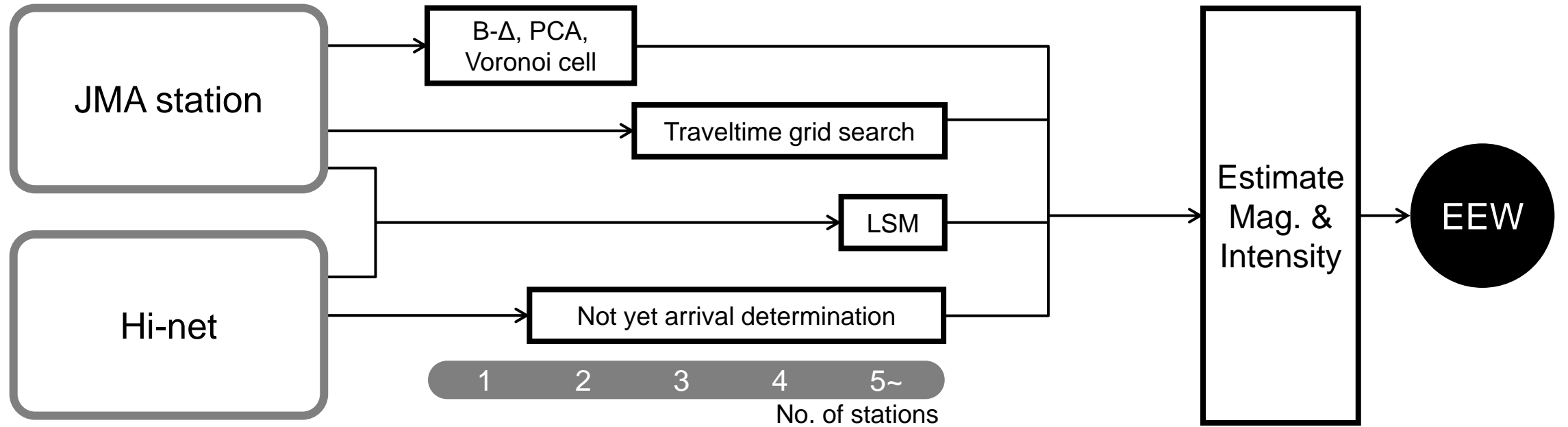
14  
15 Fig. 9. Histogram of the residual between the expected and  
16 observed maximum seismic intensity scale. (a) Current  
17 JMA system and (b) this study.

## 18 19 Table Captions

20  
21 Table 1. List of EEW from Mar. 1, 2011 to Apr. 30, 2011, and  
22 Aug. 8, 2013. Magnitude ( $M$ ) and maximum observed  
23 seismic intensity (Obs. I.) in the JMA catalog, and  
24 maximum expected seismic intensity (Exp. I.) of current  
25 JMA system and this study are listed.

# Fig. 1

## (a) JMA EEW



## (b) This study

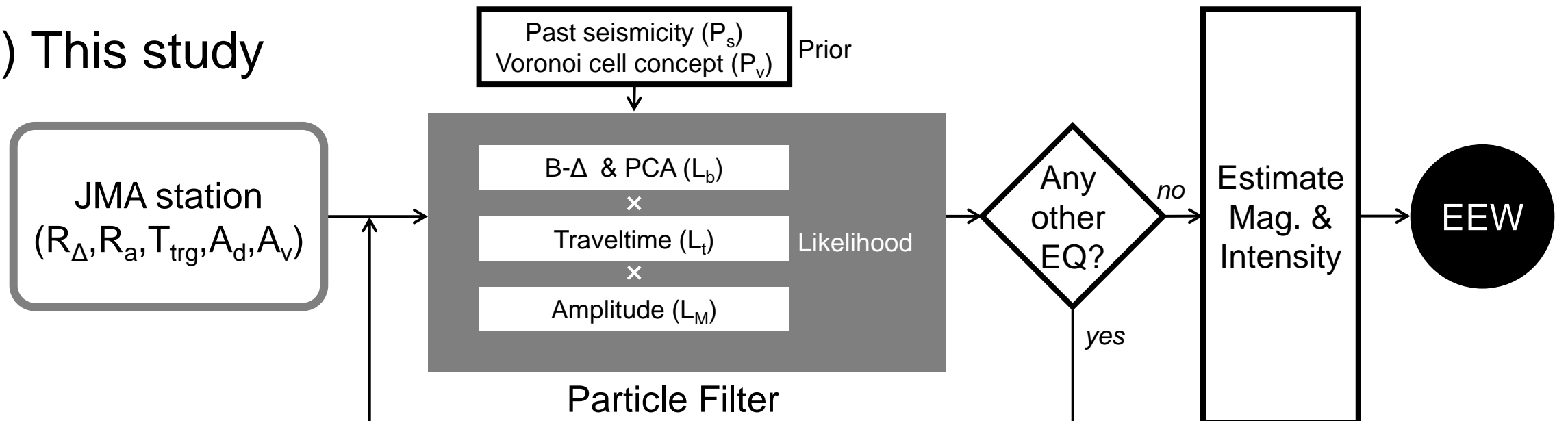


Fig. 2

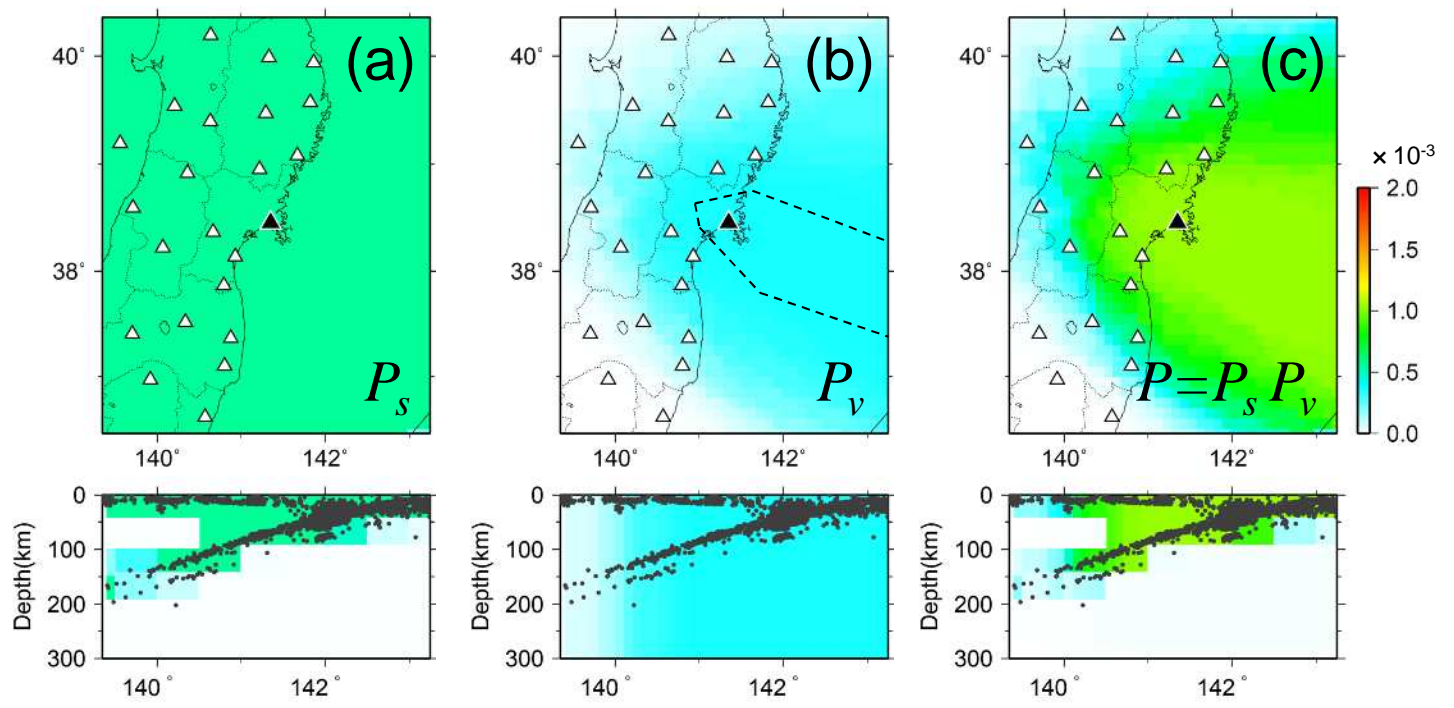


Fig. 3

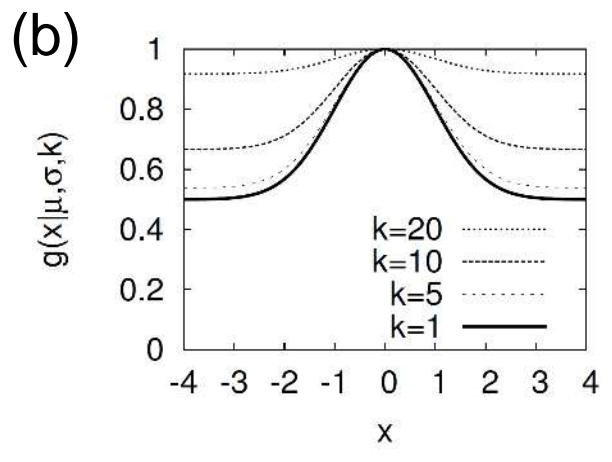
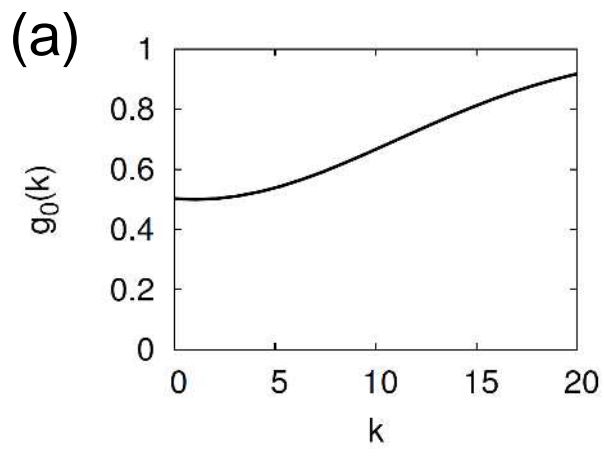




Fig. 4

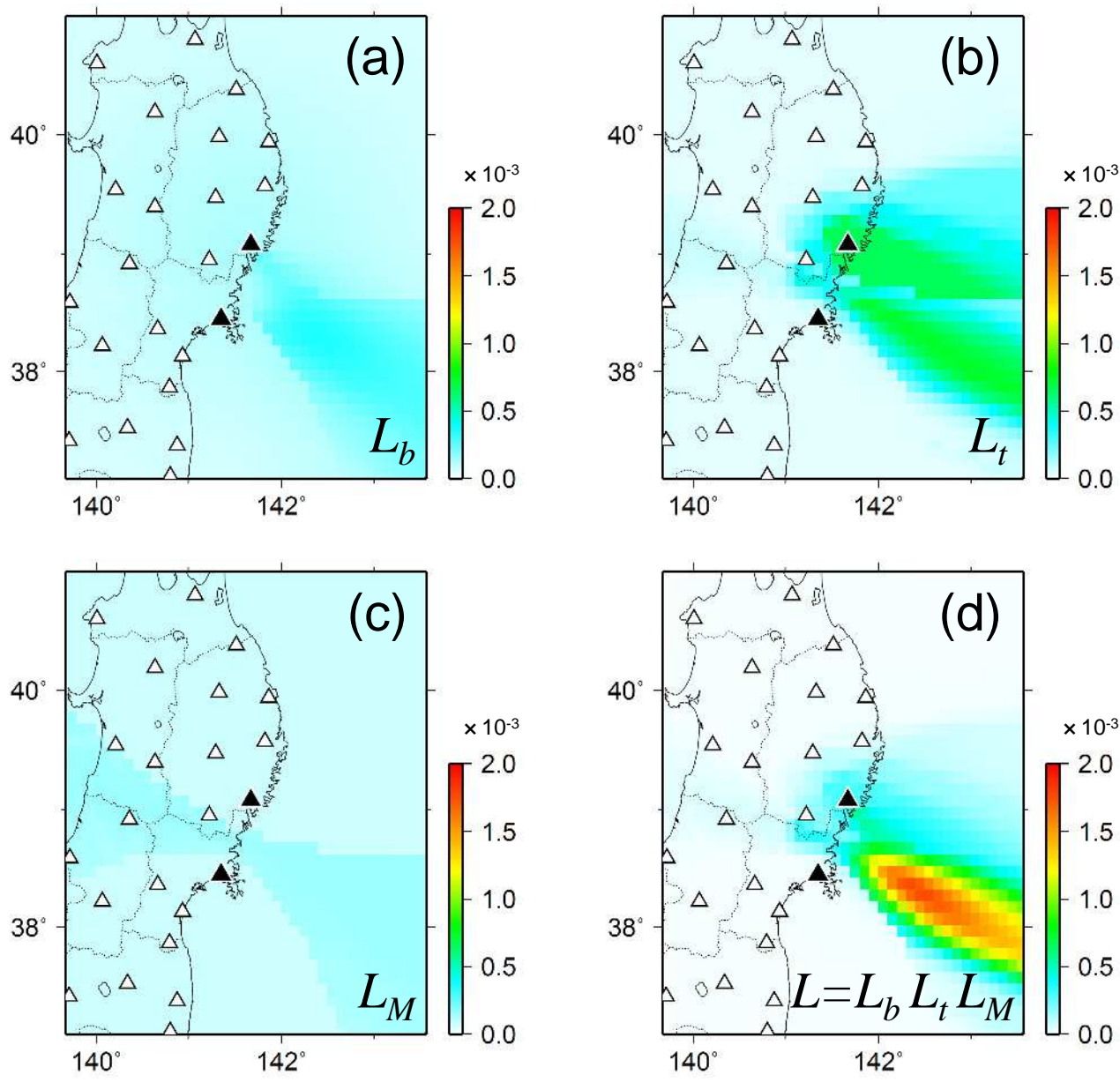


Fig. 5

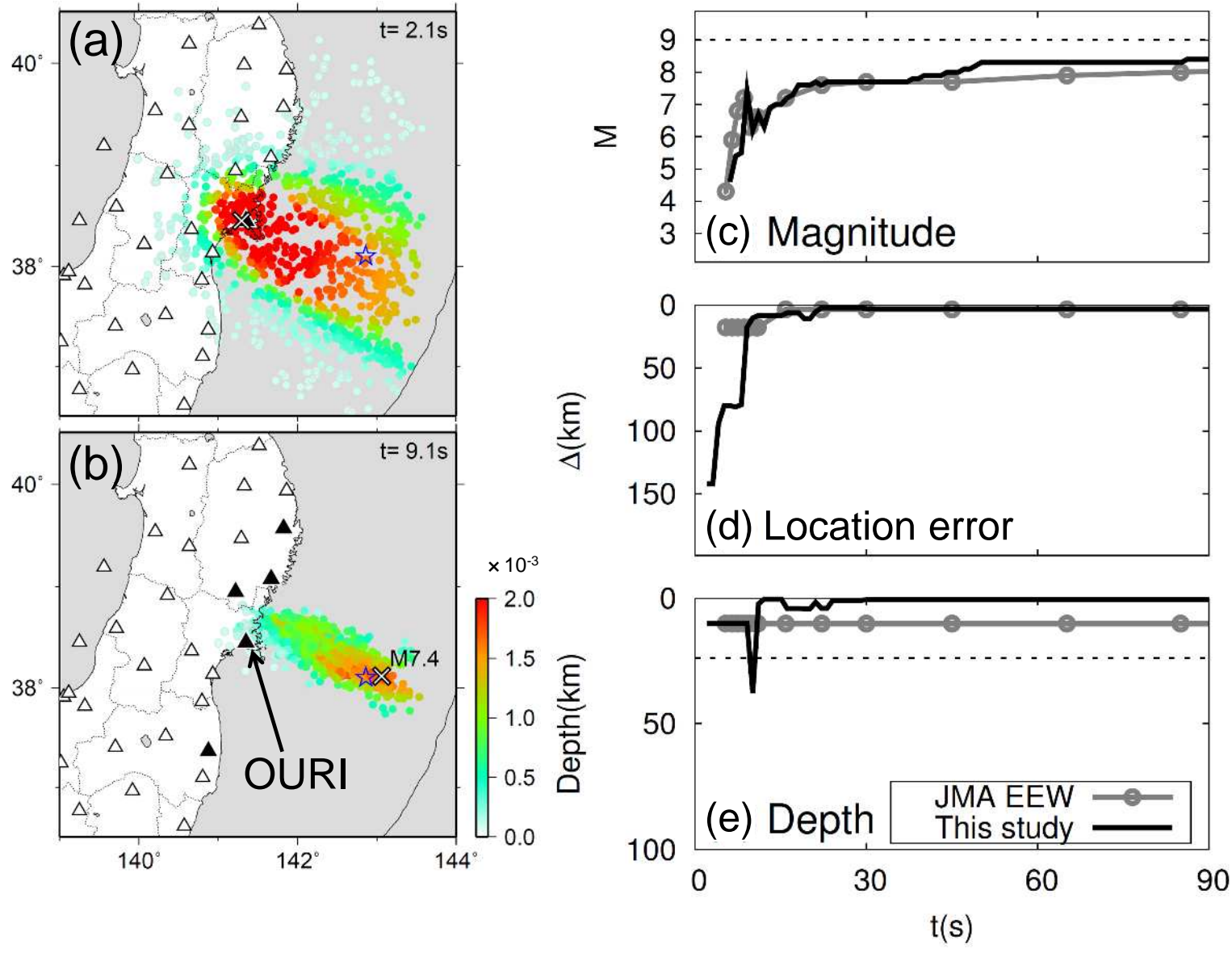


Fig. 6

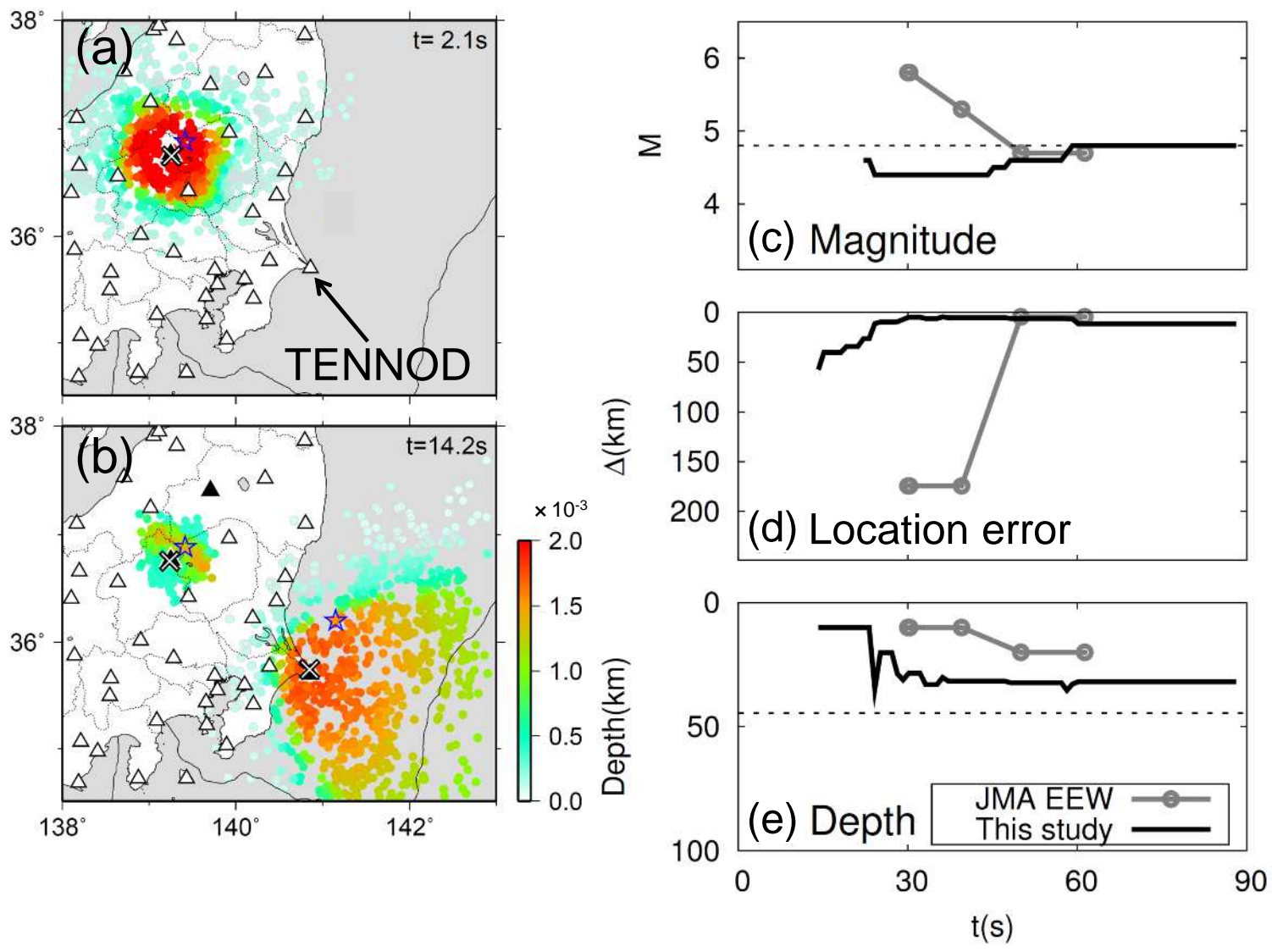


Fig. 7

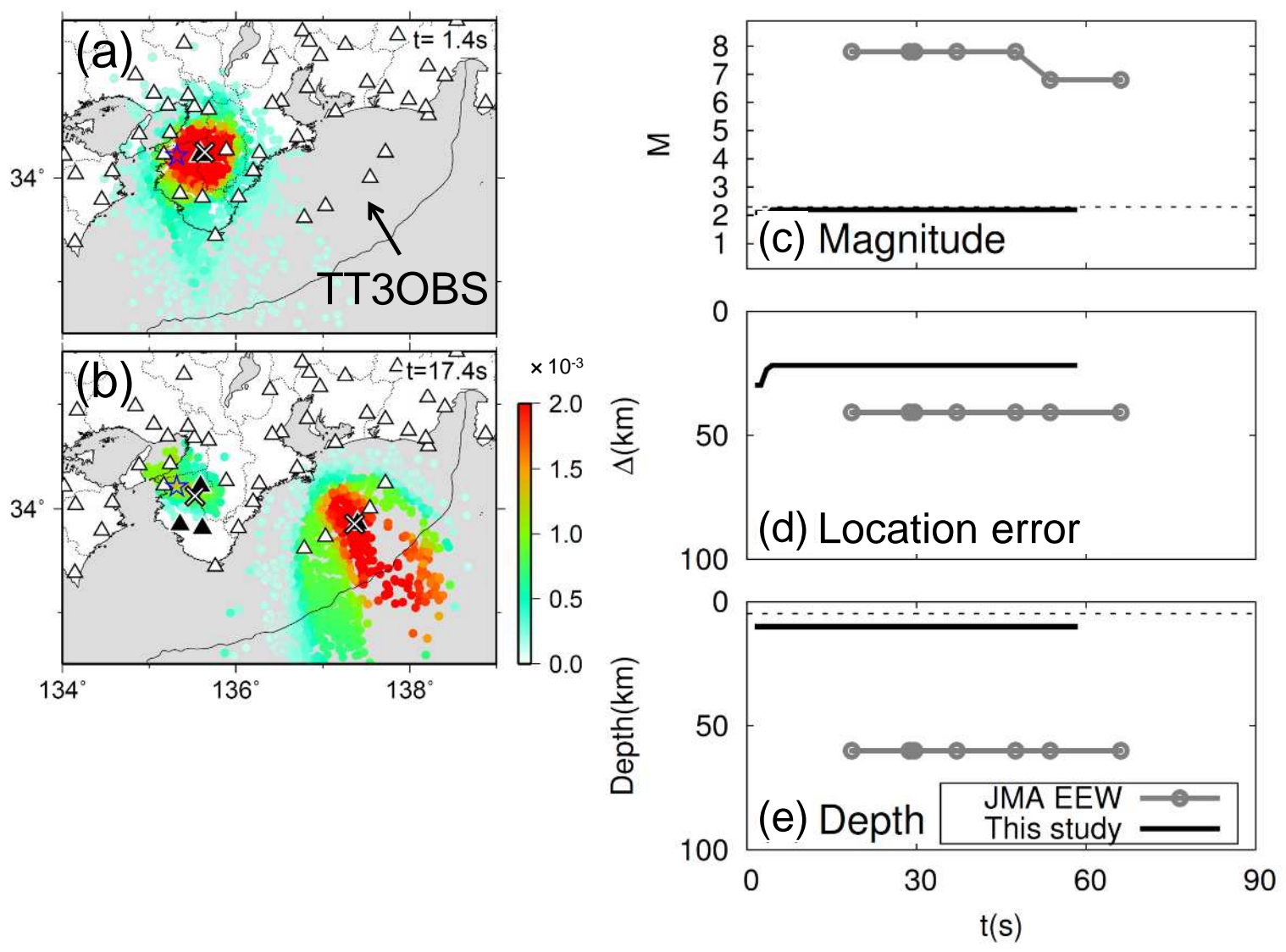


Fig. 8

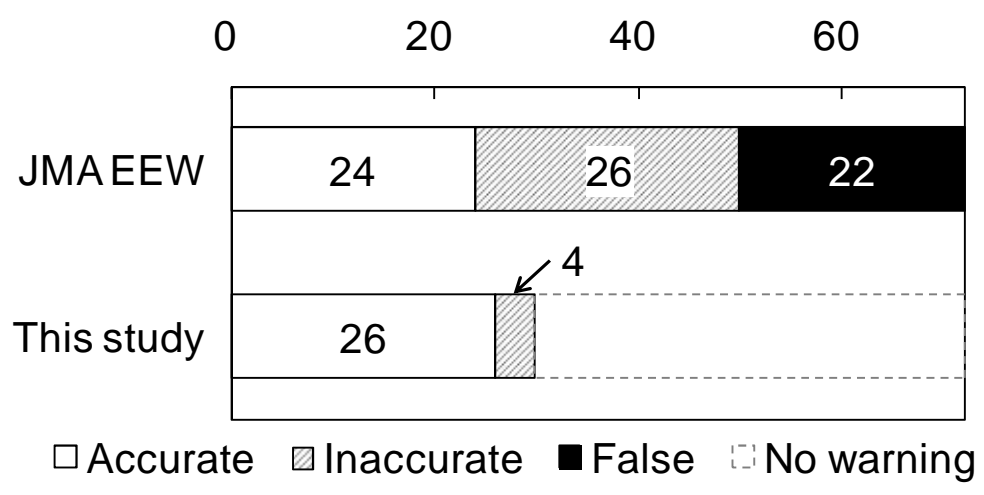


Fig. 9

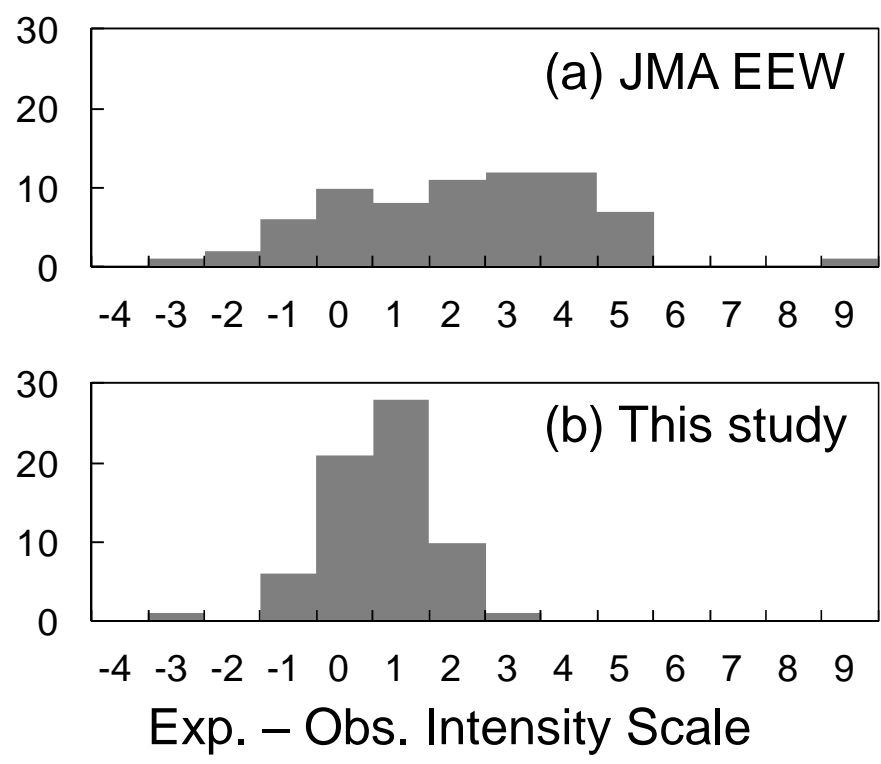


Table 1

	Catalog				Issued warning		This study	
	Date	Region	M	Obs. I.	Exp. I.	Evaluation	Exp. I.	Evaluation
1	2011/3/11	14:46 Off Miyagi Pref.	9.0	7	6-	Accurate	7	Accurate
2		17:40 Fukushima Pref.	6.0	5+	5+	Accurate	5-	Accurate
3		19:35 Off Fukushima Pref.	5.1	4	5+	Inaccurate*1	4	(No warning)
4	2011/3/12	3:11 Off Fukushima Pref.	6.0	3	5-	Accurate	5-	Inaccurate*3
5		3:59 Niigata Pref.	6.7	6+	6-	Accurate	6+	Accurate
6		4:08 Off Ibaraki Pref.	5.2	4	5-	Accurate	5-	Accurate
7		4:16 Off Fukushima Pref.	4.0	3	5+	Inaccurate*2	4	(No warning)
8		4:31 Niigata Pref.	5.9	6-	5+	Inaccurate*2	6-	Accurate
9		5:11 Off Miyagi Pref.	6.4	3	5+	False*2	4	(No warning)
10		5:42 Niigata Pref.	5.3	6-	5-	Accurate	4	(No warning)*5
11		6:19 Nagano Pref.	3.7	3	6-	False*2	4	(No warning)
12		6:34 Off Fukushima Pref.	4.8	3	6+	Inaccurate*2	4	(No warning)
13		6:48 E off Chiba Pref.	4.6	3	5-	Inaccurate*3	4	(No warning)
14		22:15 Off Fukushima Pref.	6.2	5-	5-	Inaccurate*1	5+	Accurate
15		22:24 Off Iwate Pref.	5.0	3	5-	Inaccurate*3	-	(No warning)
16		22:26 Off Iwate Pref.	5.4	2	5-	False*2	4	(No warning)
17		23:34 Niigata Pref.	3.7	5-	6+	Inaccurate*2	4	(No warning)
18		23:43 Off Iwate Pref.	5.9	4	5-	Accurate	5-	Accurate
19	2011/3/13	8:25 Off Miyagi Pref.	6.2	5-	5-	Inaccurate*1	5-	Accurate
20		10:26 Off Ibaraki Pref.	6.6	4	5-	Inaccurate*1	5-	(No warning)*6
21	2011/3/14	10:02 Off Ibaraki Pref.	6.2	5-	5-	Accurate	5+	Accurate
22		15:12 Off Fukushima Pref.	5.2	4	6-	False*2	4	(No warning)
23		16:25 Off Ibaraki Pref.	5.0	3	6-	False*2	3	(No warning)
24	2011/3/15	1:36 Tokyo Bay	3.3	2	5-	False*2	3	(No warning)
25		5:33 E off Chiba Pref.	3.6	1	5+	False*2	3	(No warning)
26		7:29 Fukushima Pref.	4.3	3	6+	Inaccurate*2	4	(No warning)
27		22:31 Yamanashi Pref.	6.4	6+	5-	Accurate	6-	Accurate
28	2011/3/16	2:40 Chiba Pref.	4.0	2	5+	False*2	4	(No warning)
29		12:23 Off Fukushima Pref.	4.7	2	5-	False*2	3	(No warning)
30		12:52 E off Chiba Pref.	6.1	5-	6-	Accurate	6-	Accurate
31	2011/3/17	21:32 E off Chiba Pref.	5.7	4	5-	Inaccurate*3	5-	Accurate
32	2011/3/19	6:18 Off Ibaraki Pref.	4.8	2	5-	False*2	3	(No warning)
33		8:32 Off Iwate Pref.	5.7	4	5-	Inaccurate*2	4	(No warning)
34		18:56 Ibaraki Pref.	4.0	4	5+	Accurate	6-	Inaccurate*3
35					5-	False*4		
36		18:57 Ibaraki Pref.	6.1	5+	5+	False*4	6-	Accurate
37	2011/3/20	14:19 Fukushima Pref.	4.7	3	6-	Inaccurate*2	4	(No warning)
38	2011/3/22	12:38 E off Chiba Pref.	5.9	4	6+	Inaccurate*2	4	(No warning)
39	2011/3/23	1:12 Off Ibaraki Pref.	5.4	3	6+	Inaccurate*2	3	(No warning)
40		7:12 Fukushima Pref.	6.0	5+	5+	Accurate	6-	Accurate
41		7:36 Fukushima Pref.	5.8	5+	5+	Accurate	5+	(No warning)*6
42		8:46 E off Chiba Pref.	5.0	2	5-	False*3	3	(No warning)
43	2011/3/25	20:36 Off Miyagi Pref.	6.3	4	6-	Inaccurate*3	5-	Accurate
44	2011/3/27	19:23 E off Chiba Pref.	5.0	2	5+	False*2	3	(No warning)
45	2011/3/28	7:23 Off Miyagi Pref.	6.5	5-	6-	Inaccurate*2	5-	Accurate
46	2011/4/1	19:49 Akita Pref.	5.0	5+	5-	Accurate	5-	Accurate
47	2011/4/3	16:38 Off Fukushima Pref.	5.4	4	5+	Inaccurate*2	4	(No warning)
48	2011/4/4	18:29 Off Fukushima Pref.	4.0	2	5+	False*2	3	(No warning)
49	2011/4/7	23:33 Off Miyagi Pref.	7.2	6+	6-	Accurate	6-	Accurate
50	2011/4/11	17:16 Fukushima Pref.	7.0	6-	6+	Accurate	7	Accurate
51		17:26 Fukushima Pref.	5.4	5-	5-	Accurate	5+	Accurate
52		18:05 Fukushima Pref.	5.1	4	5-	Accurate	5-	Accurate
53		20:42 Off Fukushima Pref.	5.9	5-	6-	Accurate	4	(No warning)
54	2011/4/12				7	Inaccurate*2		
55		8:08 E off Chiba Pref.	6.4	5-	5-	Inaccurate*2	5-	Accurate
56		10:23 Chiba Pref.	4.2	2	5+	False*2	2	(No warning)
57		12:20 E off Chiba Pref.	3.8	2	5-	False*2	-	(No warning)
58		14:07 Fukushima Pref.	6.4	6-	6-	Accurate	6+	Accurate
59		16:14 Nagano Pref.	3.1	2	6-	False*3	4	(No warning)
60	2011/4/13	10:07 Fukushima Pref.	5.7	5-	6+	Inaccurate*2	5-	Accurate
61	2011/4/14	6:43 Fukushima Pref.	4.1	3	6-	False*2	3	(No warning)
62		12:08 Fukushima Pref.	5.4	4	5-	Accurate	4	(No warning)
63		20:24 Fukushima Pref.	4.4	3	6-	Inaccurate*2	5-	Inaccurate*3
64		21:24 Fukushima Pref.	3.9	3	5-	Accurate	4	(No warning)
65	2011/4/15	23:34 Off Iwate Pref.	5.0	3	6+	False*2	3	(No warning)
66	2011/4/16	11:19 Ibaraki Pref.	5.9	5+	5-	Accurate	6+	Accurate
67	2011/4/19	4:14 Akita Pref.	4.9	5-	5-	Inaccurate*3	6-	Inaccurate*3
68		6:33 Ibaraki Pref.	4.8	3	5-	Inaccurate*3	3	(No warning)
69	2011/4/21	22:37 Chiba Pref.	6.0	5-	5-	Accurate	5-	Accurate
70	2011/4/24	20:50 Fukushima Pref.	3.1	3	6-	Inaccurate*2	4	(No warning)
71	2011/4/30	2:04 E off Chiba Pref.	4.7	3	6+	False*2	4	(No warning)
72	2013/8/8	16:56 Wakayama Pref.	2.3	0	7	False*3	-	(No warning)

\*1 Observation Blackout

\*2 Simultaneous Occurrence

\*3 The other

\*4 Two events make three warnings

\*5 Underestimate

\*6 Only single station