

Matched Filter 法を用いた西南日本の深部低周波地震の自動検出

Automatic Detection of Low-Frequency Earthquakes in Southwest Japan Using Matched-Filter Technique

森脇 健¹

Ken MORIWAKI¹

(Received January 6, 2016: Accepted March 15, 2017)

ABSTRACT: The Japan Meteorological Agency (JMA) has been distinguishing a class of events marked as low-frequency earthquakes (LFEs) in the JMA's seismic catalog since 1999. LFEs have isolated S phase with dominant frequencies lower than ordinary earthquakes. The JMA's seismic catalog has about 24,000 events of tectonic LFEs in the Nankai Trough under Southwest Japan from September 1999 to June 2014. Recent studies support that tremors in the Nankai Trough consist of a swarm of LFEs that occur as shear faulting on the plate interface. It is thought that monitoring LFE activity is important for surmising the state of the plate interface. However, it is difficult to detect LFEs by STA/LTA ratio, because of the lack of impulsive phase arrivals, used to detect and locate hypocenters of ordinary earthquakes. Hence, LFEs are not easily detected.

Therefore, a Matched-Filter technique (MFT) was used to detect events of tectonic LFEs in Southwest Japan automatically with the use of continuous three-component velocity seismograms at 75 stations. These stations belong to the integrated seismic network of Japan. The 1,455 events that are listed in the JMA's seismic catalog are used as template events. In the analysis, first 2–8 Hz bandpass filter was applied to templates and continuous seismograms, and these decimated to 20 samples per second. For the template there are 4 second time windows 1.5 seconds before the calculated S phase arrival. Next, the time window of the template is shifted around the calculated S phase arrival in an increment of 0.05 second through continuous seismograms. At each time point, correlation coefficient value between templates and a part of continuous seismograms are computed, and the sum of correlation coefficient values for all stations is calculated. A LFE can be detected when the sum of correlation coefficient values exceed a threshold. Finally, the grid search method is used to make a hypocenter of detected events more precise. As a result of MFT analysis, 5,188 events and 3,744 hypocenters of LFEs were obtained. Although the false detection rate is as low as 4%, the number of hypocenters determined by MFT is about twice that listed in the JMA's seismic catalog. Since the frequency distribution of events by MFT and that of manually detected events have almost the same change trend, the change of activity of LFEs can be monitored by MFT. In the spatial distribution of epicenter, a belt-like distribution of epicenters of LFEs and the migration of these along the strike of the subducting plate were also observed. Numerous hypocenters of small LFEs not listed in the JMA's seismic catalog were determined by MFT. Therefore, new fine-scale epicenter clusters were discovered in spatio-temporal distribution of hypocenters determined by MFT.

1 はじめに

気象庁では国立大学法人，防災科学技術研究所，地方自治体等の関係機関の地震波形データを収集し，文部科学省と協力して一元化震源カタログを作成している．カタログ作成の過程で一般地震より低周波の周波数成分 (2-8Hz) が卓越する孤立的な位相を S

相として検出・震源決定を行い，深部低周波地震 (LFEs) として一元化震源カタログに掲載している (西出・他，2000)．一元化震源カタログには，1999 年 9 月～2014 年 7 月の間に西南日本の南海トラフ沿いの LFEs の震源が約 24000 個掲載されている (Fig. 1)．

¹ 地震火山部地震予知情報課，Earthquake Prediction Information Division, Seismology and Volcanology Department

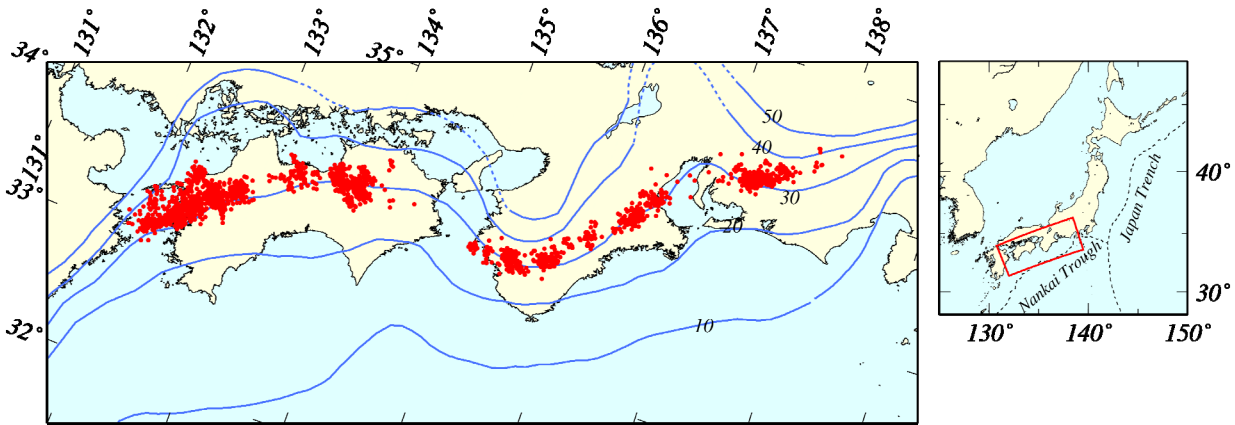


Fig. 1 Epicenter distribution of LFEs in Southwest Japan. Red dots indicate epicenters of tectonic LFEs listed in the JMA's seismic catalog from September 1, 1999 to June 30, 2014. The cyan contours denote the isodepth contours of the upper surface of Philippine Sea plate at 10 km intervals from a depth of 10 to 50 km.

近年、LFEs に関する様々な研究が行われ、LFEs がプレート境界でのすべりに起因するものであることがわかってきている。Ide et al. (2007) はスタックした LFEs のシグナルをデータとして P 波初動と経験的グリーン関数法により四国地方西部の LFEs のメカニズム解がフィリピン海プレートの沈み込みと調和的なスラスト型であることを示した。Wech and Creager (2007) は、カスケード地方で発生した深部低周波微動 (Obara, 2002) のパーティクルモーションの方位角の解析より、微動がプレート境界でのすべりに起因していることを示した。それゆえに深部低周波地震活動を監視することはプレート境界の応力状態を推定する上で非常に重要である。しかし、LFEs は相の立上りが一般地震ほど明瞭ではないため一般地震と同じ波形の短時間平均と長時間平均の比 (STA/LTA 比) による方法でイベント検出することが難しい。そのためイベントの検出漏れが発生する (Yabe and Ide, 2013)。

そこで最近、地震のイベント検出、震源決定法として注目されている Matched Filter 法 (Gibbons and Ringdal, 2006 ; 以下, MF 法) により、西南日本でフィリピン海プレートの沈み込みにより発生する LFEs のイベント検出、震源決定を試みた。MF 法は過去の震源、観測波形をテンプレートとして、震源近傍のイベントの波形が類似することを利用して、処理対象地震の相対的な震源位置を求める手法である。STA/LTA 比によらず波形間の相関を用いてイベント検出を行うため MF 法ではこれまで一元化震源カタログに掲載されていないような微小な LFEs のイベ

ント検出が可能となり、西南日本の LFEs 活動をこれまでより詳細に議論することが可能になると考えられる。また、一般地震や人工的ノイズによるイベントの誤検出を低減する効果があると考えられることから、効率よく手動処理によるものと同様の震源分布が得られるようになることが期待できる。

Peng and Zhao (2009) では、MF 法により 2004 年のパークフィールド地震 (M6.0) の余震の検出を行い、既知の余震の 11 倍の数の余震を検出し、余震域がサン・アンドレアス断層の走行、傾斜に沿って時空間的に拡大したことを明らかにした。海域については、Kato et al. (2012) では、MF 法により平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震 (以下、東北地方太平洋沖地震) の前震、余震活動の解析を行い、一元化震源カタログの 4 倍以上のイベントを検出し、2 月中旬からの移動速度が 2~5km/day と 3 月 9 日の M7.3 の地震発生後の 10km/day の 2 系列の本震の破壊開始点に向う震源移動が存在することを示した。MF 法は LFEs に対しても一般地震の場合と同じロジックで適用され、Shelly et al. (2007) では四国西部の LFEs に対して MF 法を適用し、LFEs が深部低周波微動活動の一部を断片的に検出しているものであることを示した。また、Aso et al. (2010), Aso et al. (2013) では、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う南海トラフ以外の火山直下、あるいは火山から離れた場所のモホ面付近の深さに孤立分布する低周波地震のイベント検出・震源決定を行っている。以上のように MF 法は、一般地震からプレートの沈み込みに伴う LFEs, モホ面付近の低周波地震のイベン

ト検出, 震源決定に効果を上げている. そこで本稿では, MF 法を西南日本の南海トラフ沿いで広範に発生する LFEs に適用し, MF 法のイベント検出, 震源決定能力について検討を行った.

2 手法

Fig. 2 (a) に MF 法の処理のデータフローダイアグラム (DFD) を示す. MF 法では, 対象領域の観測網で捉えられた代表的な地震波形をテンプレートとして, テンプレートと連続波形データ間の相関係数の全観測点での総和 (NCC) を各時間ステップ毎に (1) 式の通り計算する.

$$NCC = \sum_n \frac{\sum_m u_m^i u_m^j}{\sqrt{\sum_m (u_m^i)^2 \sum_m (u_m^j)^2}} \quad (1)$$

u_m は波形データ (m はデータインデックス), i, j はテンプレート, 処理対象イベントのインデックス, n が観測点, 成分のインデックスである. 本稿においてテンプレートは各観測点の S 波理論到達時刻の 1.5 秒前 (前駆時間) から 4 秒間の波形データとした. なお, S 波理論到達時の計算には JMA2001 (上野・他, 2002) の走時表を使用した. 解析では, テンプレートと連続波形データに 2-8Hz のバンドパスフィルターを施し, 100Hz から 20Hz にリサンプリングし, 0.05 秒間隔で NCC を計算した. 各時間ステップで, テンプレート毎に NCC を計算し, NCC が閾値以上となった場合にテンプレートの地震と類

似したイベント (震源座標, メカニズムがほぼ同じイベント) が検出できたとする (Fig. 2 (b)). つまり, テンプレートの震源近傍でイベントを検出したとする. もし, 複数のテンプレートで NCC が閾値を超えた場合には, その中で NCC が最大となるテンプレートによりイベントを検出したものとする. テンプレートと検出対象イベントの震源位置に微妙な差異があった場合には, 両者の相対的な相の出現時刻の間に微妙なずれが生じ, NCC の値が低くなるためにイベントが検出できない可能性がある. そのため, ここでは Aso et al. (2013) の手法に基づき両者の震源位置の微妙なずれに応じた走時差を考慮して NCC の計算を行った. Aso et al. (2013) では, クラスタ内に数 100m 間隔で分布するテンプレート間で発生したイベント (テンプレートから数 100m 離れたイベント) を検知するために約 0.05 秒の走時差を考慮すべきであると主張している. そこで本稿でも Aso et al. (2013) と同じく NCC の計算で 0.05 秒の走時差を考慮するようにした. また, ほぼ同時刻 (2 秒以内) に地震を検出した場合には, イベントを検出したテンプレートの震央距離を考慮して地震の統合, 分離を行った (テンプレートの震央距離が 20km 以下であれば同一地震で, 20km を越えた場合には別地震と判定する). 上記の方法で検出したイベントを本稿では「MF イベント」と呼ぶ.

前述のように波形の類似性を考慮して検出したイベントの震源は, テンプレートの震源座標近傍にあると考えられることから (Geller and Muller, 1980), イベント検出後にイベント検出時刻 (t_0) とテンプ

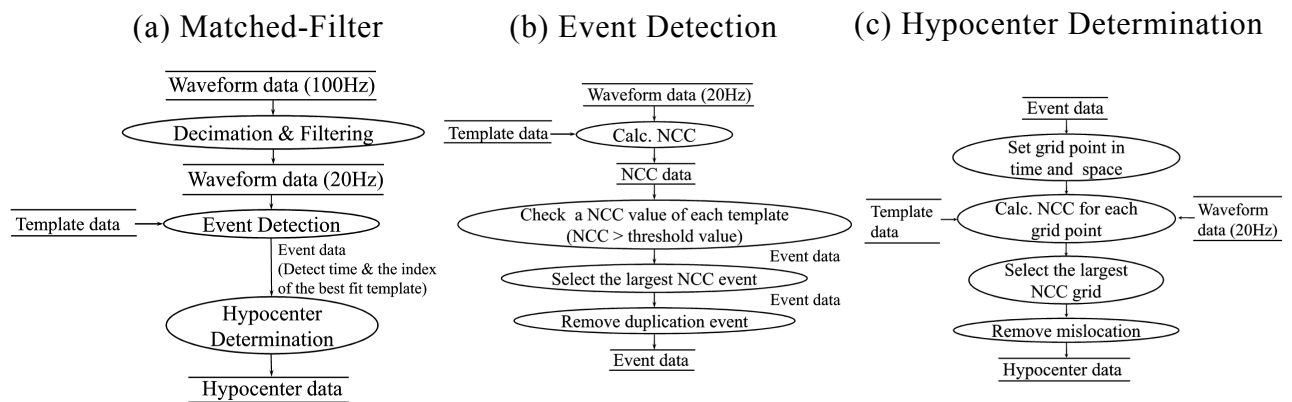


Fig. 2 The Data Flow Diagrams (DFD) of Matched-Filter technique (MFT). (a) is the DFD of the whole process of MFT. (b) and (c) are that of event detection and hypocenter determination process, which are part of the Matched-Filter technique, respectively.

Table 1 Specifications of the server.

	CPU	Memory
srv1	Xeon 2.5GHz	32Gbyte
srv2	Xeon 2.0GHz	16Gbyte
srv3,4	Xeon 3.1GHz	4Gbyte

レート震源座標を中心に 4 次元のグリッドサーチを行い、精度の高い震源を求めた。グリッドサーチでは、グリッド観測点間の理論走時と前駆時間よりタイムウィンドウの先頭時刻を決定して、(1) の通り NCC を計算し、最終的には、全てのグリッドの中で NCC が最大となるグリッドを震源とした (Fig. 2 (c))。震源がグリッド空間の端に決まった場合には、空間的に離れたイベントを検出している可能性があることから震源決定に失敗したとした。震源決定に成功したイベントについては、精度の高い震源を決定するために、細かなグリッド間隔で再度グリッドサーチを行った。求める震源とテンプレートの震源の近接性より、両震源と観測点間の波線がほぼ同一で、波線間での地震波速度構造や観測点直下のサイト特性の影響が相殺される。したがって、本手法ではテンプレート地震に対して精度の高い相対震源を求めることができる。本稿でのグリッド間隔は、時間では検出時刻を中心に ±2 秒の範囲に 0.08 秒間隔で、空間ではテンプレートの震源座標から緯度、経度、深さ方向に ±5km の範囲に 0.5km 間隔とした。一旦グリッドサーチで震源が決まったイベントについては、震源位置を中心として緯度、経度、

深さ方向に ±2km の範囲に 0.2km 間隔でグリッドを配置し、再度グリッドサーチを行い、精密な震源を決定した。その震源を本稿では「MF 震源」と呼ぶ。本稿で使用した MF 法のプログラムでは、ソースコードを並列化することにより実時間の約 10 倍の速度で処理を実行することが可能であり、本解析においては負荷分散のために処理を 4 台のサーバ (Table 1) に分散して実行した。

グリッドサーチにより決定した震源の誤差は、誤差伝播の法則より

$$\epsilon_{detected} = \sqrt{\epsilon_{template}^2 + \epsilon_{dd}^2} \quad (2)$$

で計算できる。 $\epsilon_{detected}$ 、 $\epsilon_{template}$ はグリッドサーチで決定した震源誤差、テンプレートの震源誤差であり、 ϵ_{dd} はテンプレートとグリッドサーチで決定した震源間の相対誤差である。 ϵ_{dd} は両震源に対する各観測点での観測走時差－理論走時差の値をデータベクトルとして計算した共分散行列の対角要素の値である。

検出したイベントのマグニチュードは、Aso et al. (2013) で提案されている波形の自己相似性を考慮した

$$M_{detected} = M_{template} + \frac{1}{0.85} \log_{10} \frac{v_{detected}}{v_{template}} \quad (3)$$

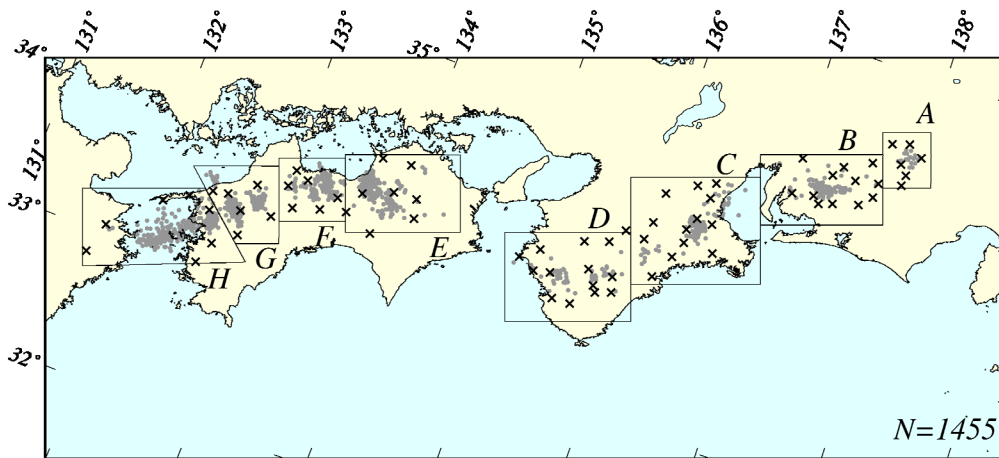


Fig. 3 Epicenter distribution of template events. Gray dots and black crosses denote epicenters of template and stations used in analysis, respectively. Gray quadrangles (from A to H) show subareas analyzed in this study.

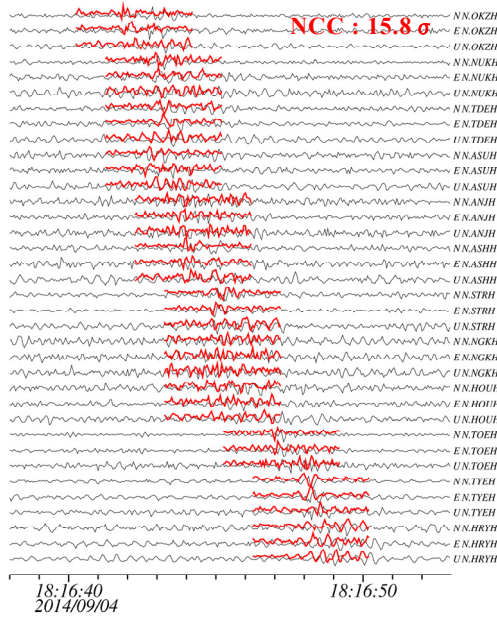


Fig. 4 Example of LFE event detection. Three-component continuous waveform of the LFE event that occurred in western Aichi prefecture on September 4, 2014. Waveforms were passband filtered between 2.0 to 8.0 Hz. Continuous waveforms are shown in black, and template event waveforms red lines for each component of 12 stations. The value of NCC is shown in the top right corner.

で計算する。ここで $M_{detected}$, $M_{template}$ と $v_{detected}$, $v_{template}$ はそれぞれ MF 法により検出したイベント、テンプレートのマグニチュードとそれぞれのフィルターを施した速度波形の上下動成分の最大振幅である。全ての観測点に対して観測点毎のマグニチュードを (3) 式で計算し、その平均を、検出したイベントのマグニチュードとした。

3 西南日本の深部低周波地震への適用

MF 法により西南日本でのフィリピン海プレートの沈み込みに伴う LFEs のイベント検出、震源決定を行った。データの期間は 2014/7/1 00:00 ~ 2014/12/31 23:59 で、過去の LFEs の震央分布を考慮して対象領域を 8 つ (Fig. 3) に分けて、それぞれ独立に解析を行った。解析に用いた観測点数は 75 点である。テンプレートについては、2011 年 3 月 11 日 ~ 2011 年 12 月 31 日、2013 年 1 月 1 日 ~ 2014 年 6 月 30 日の一元化震源カタログの中からシグナルの S/N 比の高い (少なくとも 7 観測点で S/N 比が 2.0 以上) LFEs の震源を選別した。テンプレートの総数

Table 2 The number of manually detected events, MF events and false detection in MF events from ordinary earthquakes and noise signals.

	The number of Event
Manually detected event	48039
MF event	5188
False detection by the ordinary earthquake	200
False detection by noise	27

は 1455 個である (Fig. 3)。イベント検出の閾値については、各解析領域で 2 時間毎にテンプレートごとの NCC の標準偏差 (σ) を計算し、NCC の値が σ の定数倍を超えたときにイベント検出とした。定数の値は MF 法で検出したイベントの時刻と波形を比較して、試行錯誤的に設定した。各領域の設定値は領域 A : 7.5σ , B : 7.0σ , C : 7.0σ , D : 7.0σ , E : 7.5σ , F : 7.5σ , G : 8.0σ , H : 7.5σ である。イベント検出時の連続波形とテンプレートの波形例を Fig. 4 に示す。

解析の結果、MF 法により西南日本で 7956 個のイベントを検出し、3744 個の震源を決定することに成功した。このイベント数と震源数は同期間の一元化震源カタログに掲載されている LFEs 震源数 1822 個のそれぞれ約 4 倍と約 2 倍である。前述の通り、気象庁では深部低周波微動の一部の孤立的な相を検測・震源決定している。そのため MF イベント数と一元化震源カタログの震源数を比較すると多くの場合において MF イベント数の方が大きくなってしまい、MF 法のイベント検出能力が正しく評価できない。そこで本稿では、毎正分から 1 分間の多チャンネルの波形データを目視で確認して、複数観測点で LFE のシグナルが含まれていた場合に規模の大小に関わらず 1 回とカウントし、その数を「手動イベント数」として定義した。手動イベント数という指標を設定することにより、恣意的になりがちな LFEs の 1 イベントの定義が明確になり、客観性が担保される。1 時間における手動イベント数の最大数は 60 個である。以下、イベント数の比較を行う場合には、同じ処理 (正分から 1 分間の中にイベント、震源が存在した場合に 1 カウントし、1 時間で最大 60 個) を行った上で比較を行う。Table 2 に各種イベント数

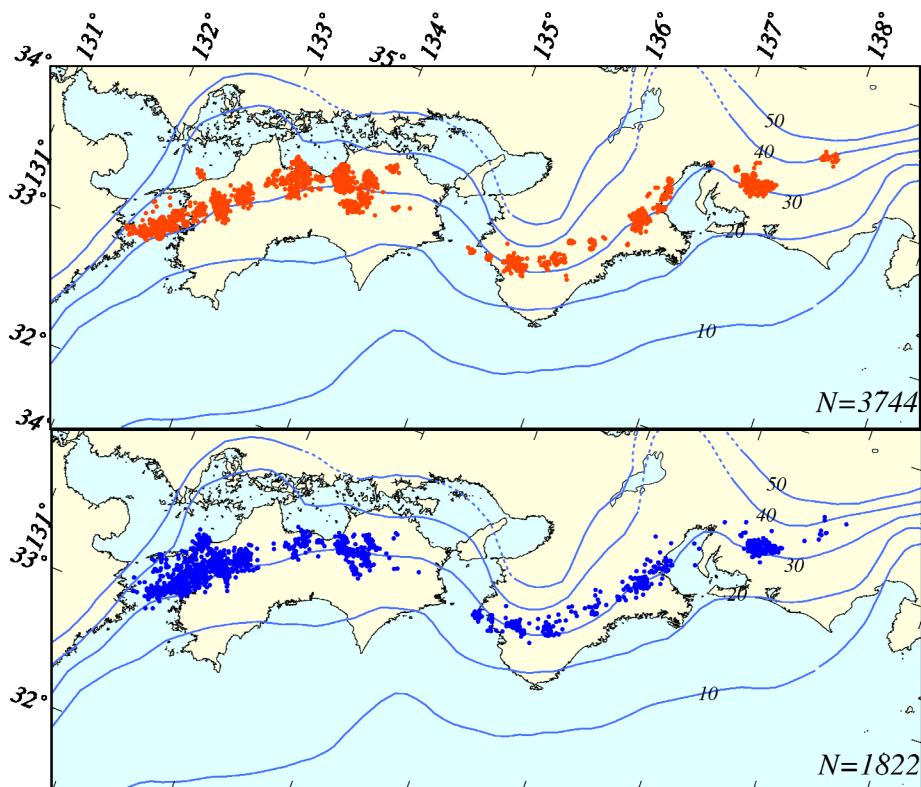


Fig. 5 Epicenter distribution of LFEs in Southwest Japan, (top) MFT locations, (bottom) the JMA's seismic catalog locations. Orange and blue dots indicate epicenters determined by MFT and of the JMA's seismic catalog, respectively.

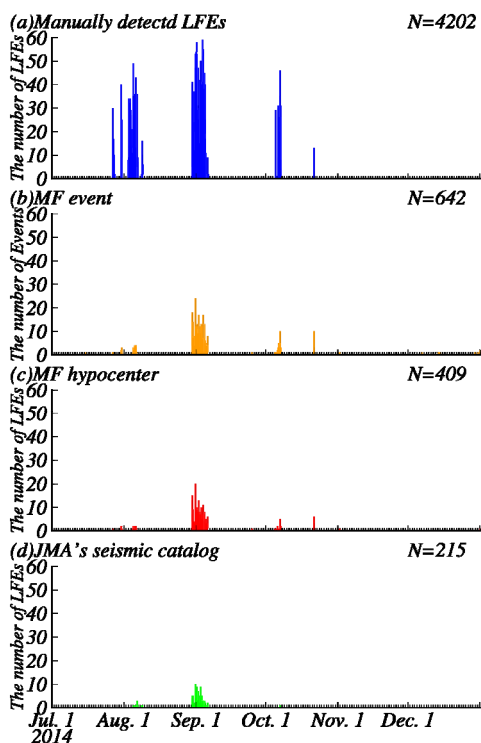


Fig. 6 Number of detected and located LFEs that occurred in the region from Southern Nagano to Aichi prefecture. The number is counted when a signal exists in one minute waveform data. (a) Number of manually detected LFEs is shown; (b) and (c) that of detected and located LFEs by MFT is shown, respectively; (d) that of LFEs listed in the JMA's seismic catalog.

と誤検出のイベント数（誤検出率）を示す。イベントの誤検出率は 4.0%程度で、MF 法がロバストな手法であることが分かる。MF 法による誤検出の要因のほとんどは一般地震である。Suda et al. (2009) では、イベント検出の際に波形の最大振幅と STA/LTA 比を考慮することにより一般地震起源のイベントの削除を行っている。このことから MF 法でも同様に誤検出率を下げる事が出来ると考えられる。

震源に関しては、MF 法で決定したものの中でマグニチュードが 0.0 以下のものは全体の約 66%(2468 個)であり、一元化震源カタログの割合（約 45%）と比較しても M0.0 以下の震源の割合が高い。MF 法

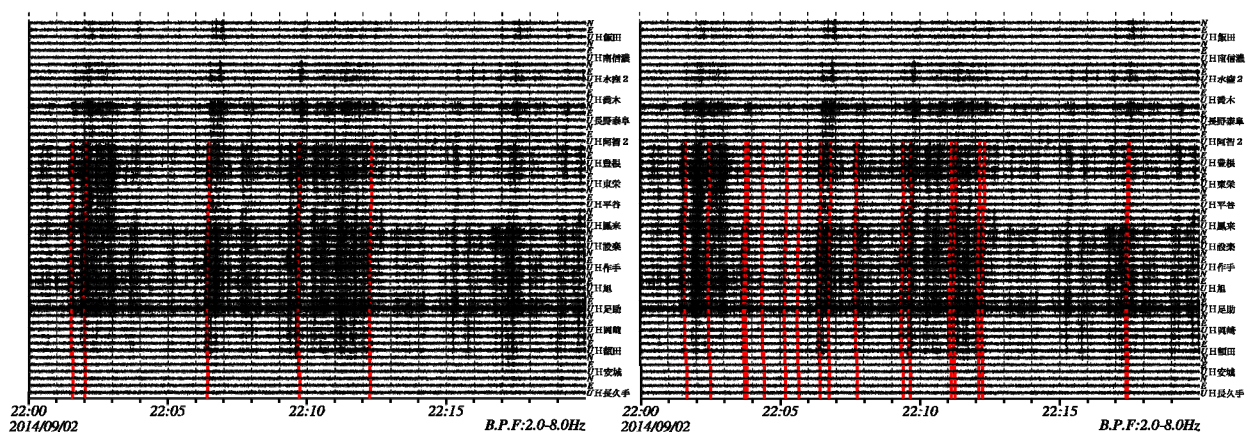


Fig. 7 Example of three-component continuous waveforms at the region from Southern Nagano to Aichi prefecture with a duration of 20 minutes from 22:00 on September 2, 2014 (JST). Waveforms were passband filtered between 2.0 to 8.0 Hz. Red waveforms indicate LFEs that are listed in the JMA's seismic catalog (left panel), and detected by MFT (right panel).

による震央分布 (Fig. 5) を見ると、西南日本の南海トラフ沿いの LFEs の帯状の分布が確認でき、その中には複数の直径 10~50km の震央のクラスターが確認できる。MF 法による震源誤差の平均は緯度、経度でそれぞれ 2.25km, 1.81km であり、解析に用いたテンプレートの震源誤差 (緯度: 0.81km, 経度: 0.85km) と比較すると大きい、震央のクラスターの分布域より十分小さい。マグニチュードについては、本手法で計算したものの方が一元化震源カタログより平均で約 0.1 小さい。これは、一元化震源カタログに掲載されている LFEs のマグニチュードは原波形から計算するのに対して、MF 法ではフィルターを施した限られた周波数成分の波形を用いて計算しているため、フィルター帯域外の周波数成分はマグニチュード計算に反映されず、そのためマグニチュードが過小評価となるからと考えられる。過小評価ではあるがその差は 0.1 と小さく、解析領域毎の MF 法と一元化震源カタログの MT 図を見ても同様の消長傾向が見られることから、MF 法のマグニチュード計算でも LFEs の活動を十分監視できると考えられる。以下、MF により検出したイベントの数、震源により、領域毎 (長野県南部~愛知県、伊勢湾~紀伊水道、四国地方~豊後水道) の LFEs の活動の特徴を述べる。

3.1 長野県南部~愛知県

Fig. 6 の (a) ~ (d) に、長野県南部~愛知県にお

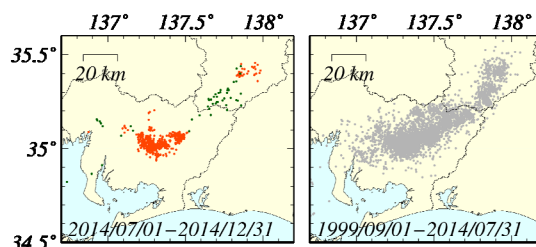


Fig. 8 Epicenter distribution of the region from Southern Nagano to Aichi prefecture. At the left panel, red and green circles show epicenters located and missed by MFT, respectively. At the right panel, gray circles show epicenters listed in the JMA's seismic catalog.

ける手動、MF 法により検出したイベント数及び MF 法で決定した震源数、一元化震源カタログ震源数の特別な頻度分布を示す。解析期間中の MF イベントの数 642 個は手動イベントの数 4202 個の 15%程度で、両者は同様の消長傾向を示す。MF 法によるイベントの検出率は、2014 年 10 月 21 日の活動では 81%と高いが、他の活動期間では 4~21%の値をとっている。一元化震源には、震源決定できたイベントのみがリストされており、震源決定できなかったイベントについてリストされない。そのため単純に MF イベントと一元化震源数を比較することはできないが、MF 法では一元化震源 215 個の約 3 倍のイベントを検出している。Fig. 7 に示した 2014 年 9 月 2 日 22:00~22:20 の時間帯においても一元化震源の 5 イベント (震源) に対し、MF 法では 18 イベントを検出して

いる。ただし、2014年7月27日～8月9日の数日の静穏期を挟む間欠的な活動では、イベント検出率がいずれの活動でも10%未満で、解析期間中の他の活動期と比較してイベント検出率が低い。

この期間のイベントの震源を一元化震源と同じ手順で決定すると、震源位置は長野県南部～愛知県北東部と愛知県中部、知多半島、愛知県西部に決まる (Fig. 8)。これらの領域では一元化处理開始以降に低周波

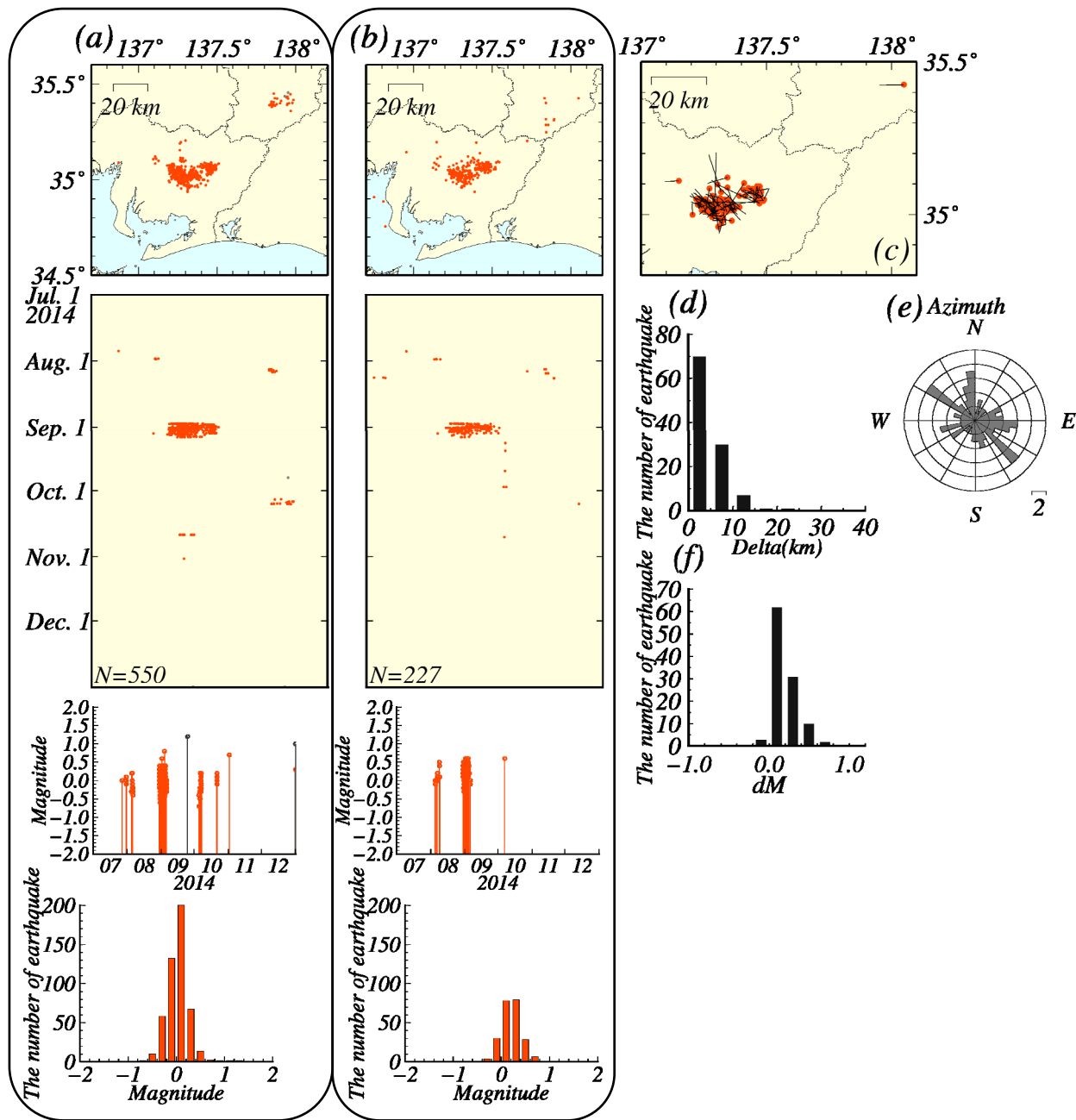


Fig. 9 Seismicity distribution of LFEs in the region from Southern Nagano to Aichi prefecture located by MFT (a) and that of the JMA's seismic catalog (b). The time span of these data is July to December 2014. (a) At the top, epicenter distribution, red and gray circles show epicenters of LFEs and ordinary earthquakes, respectively, at the second from top, spatio-temporal distribution, at the third from top, Magnitude-Time diagram of LFEs, at the bottom, frequency magnitude distribution of LFEs. (b) Those of the JMA's seismic catalog. (c) Comparison of the epicenter locations between epicenters of MFT and those of the JMA's seismic catalog. Red circles show the epicenters of MFT, the other end of the solid bars shows those of JMA's seismic catalog. (d), (e) and (f) are the histogram of LFE number versus horizontal distance, azimuth and the difference in magnitude between the hypocenter located by MFT and that of the JMA's seismic catalog, respectively.

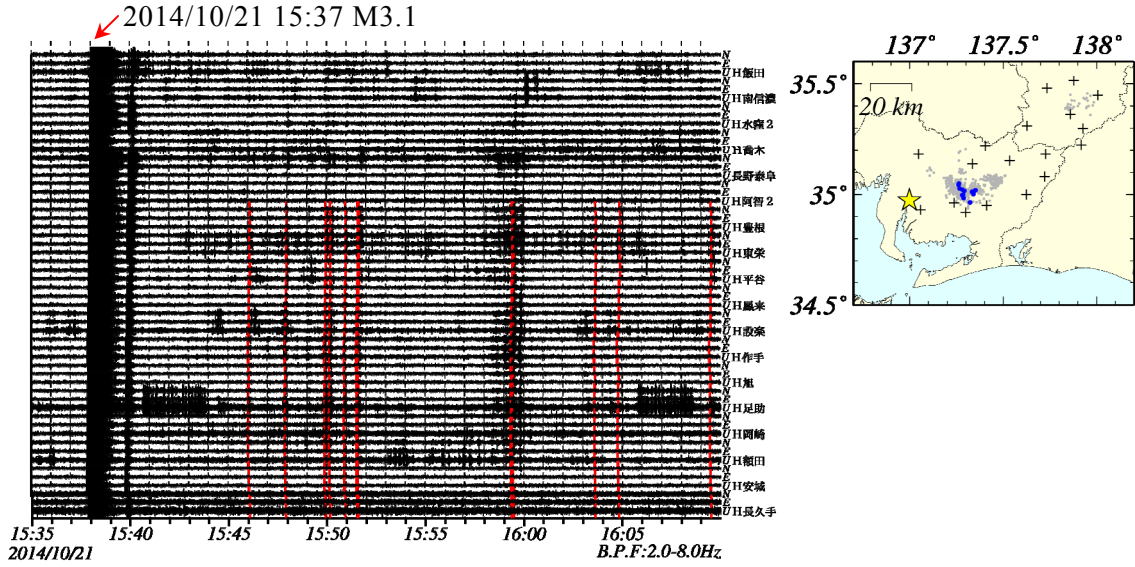


Fig. 10 Three-component continuous waveforms with a duration of 35 minutes from 15:35 on October 21, 2014. Continuous waveforms were passband filtered between 2.0 to 8.0 Hz. Red waveforms denote LFEs that were detected by MFT. The right map shows the distribution of seismic stations (black crosses) and a epicenter of the ordinary earthquake which occurred in western Aichi prefecture on October 21, 2014 (yellow star), LFEs that are detected by MFT (blue and gray circles). Blue circles indicate LFEs that occurred in the period of waveforms mentioned above.

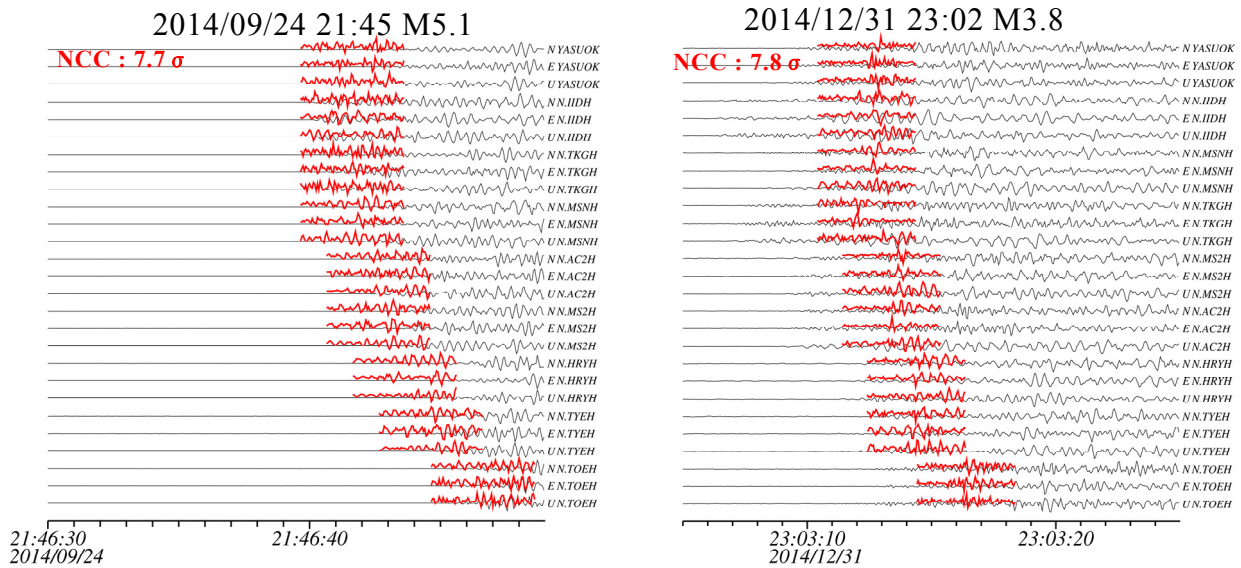


Fig. 11 Examples of false detection. At the left panel, three-component continuous waveforms of the event (M5.1) that occurred to the east of Fukushima prefecture on September 24, 2014. Waveforms were passband filtered between 2.0 to 8.0 Hz. At the right panel, these of the event (M3.8) that occurred to the east of Ibaraki prefecture on December 31, 2014. Continuous waveforms are shown in black, and template event waveforms red lines for each component of nine stations. The values of NCC are shown in top left corner for each panel.

地震の震源が決定されているものの、テンプレートの作成期間の一元化震源カタログの LFEs が少数でかつ S/N 比が低かった。そのためテンプレートを十分にそろえることが出来ず、結果としてイベント検出率が低くなっている。

MF 震源と一元化震源の分布 (Fig. 9) を比較すると、愛知県中部で南西と北東側に分離した直径が約 20km と 10km の震央のクラスターが見られる点については共通している。しかし、長野県南部については、前述の通り愛知県境北側で MF 法ではイベント

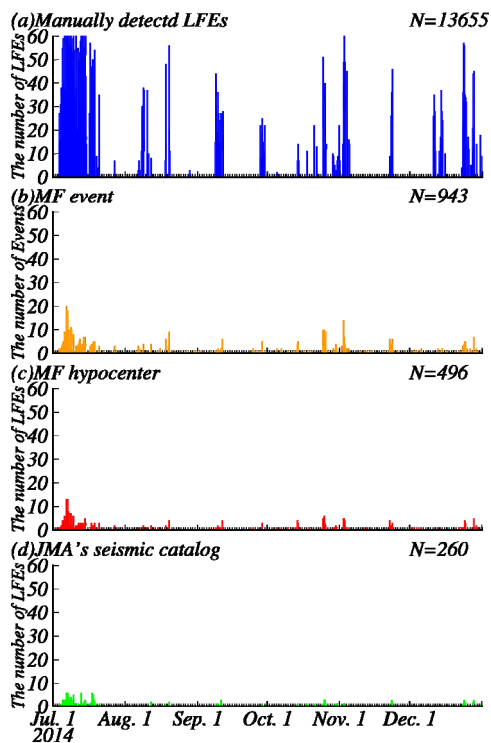


Fig. 12 Number of detected and located LFEs that occurred in the region from Ise Bay to Kii Channel. The number is counted when a signal exists in one minute waveform data. (a) Number of manually detected LFEs is shown; (b) and (c) that of detected and located LFEs by MFT is shown, respectively; (d) that of LFEs listed in the JMA's seismic catalog.

が検出できていないため震源が決まっていない。一方、MF 法ではそこから北側に約 10km 離れた領域で 31 個の震源を決定している。愛知県中部の南西側のクラスターでは、2014 年 10 月 21 日 15~16 時台に MF 法で 12 個の震源を決定しているが、一元化震源では同領域で同時間帯に 1 つも震源が決まっていない。同時間帯の連続波形記録 (Fig. 10) を見ると、15:37 に発生した M3.1 地震の後に複数の明瞭な LFEs のシグナルを確認することができ、MF 法による震源が誤検出による虚像ではないことが分かる。小原 (2003) は、M2, 3 クラスの地震により近傍で継続期間の短い LFEs が誘発される現象を報告しており、このケースもそれと同様であると考えられる。

Fig. 11 に示すように、MF 法では M1.0 以上のイベントの震源が 2 個 (2014 年 9 月 24 日 21:46, 2014 年 12 月 31 日 23:03) 決まっている。これらは、それぞれイベント検出時刻付近に発生した福島県沖の

M5.1, 茨城県沖の M3.8 の地震の波形の一部をイベントとして検出したものである。MF 震源と一元化震源の中で一致する (震源時の差が 60 秒以内で、震央間の距離が 0.5° 以内の震源のペアを一致する震源とした) 震源 (109 個) の位置を比較すると、震源位置の水平方向の差の平均は 4.7km, 鉛直方向の差の RMS (二乗平均平方根) は 4.2km で、震央位置の差に方位依存性はない。

3.2 伊勢湾～紀伊水道

Fig. 12 に伊勢湾～紀伊水道に至る領域の LFEs のイベント、震源数の時別の頻度分布を示す。この領域の手動イベント数は 13655 個であるのに対して、MF 法イベントの数は 943 個で、数時間～十数日の静穏期を挟みつつ断続的に活動期がある。手動、MF 法のイベント数の消長は同様の傾向を示し、MF イベントは手動イベントと比較すると数は少ないものの、ほとんど全ての活動期でイベント検出できている。MF イベント数は手動イベント数の約 7% と少数であるように見えるが、一元化震源数 260 個の 3 倍以上のイベントを検出している。本領域で深部低周波地震活動が活発であった 2014 年 7 月 3 日～20 日についても MF 法では一元化震源の数 191 個の約 1.7 倍の 330 個のイベントを検出し、7 月 6 日付近にシャープなピークを持つ。一元化震源の頻度分布でも同日付近にピークがあるが、MF イベントのそれと比較すると分布がブロードである。また、数は少ないものの 2014 年 7 月 27 日, 10 月 14 日, 11 月 22 日に三重県中部, 8 月 6 日, 11 月 22~23 日に和歌山県中部, 8 月 8 日, 10 日, 12 月 29 日に伊勢湾沿岸, 10 月 29 日と 11 月 12 日の奈良県南部に、MF 法では一元化震源にないイベントを検出している (Fig. 13 (a))。これらのイベントは、いずれもノイズにより生じたものではなく、LFEs のシグナルによるものであることを確認している。三重県中部では 11 月 22 日 22:08 に長野県北部で発生した M6.7 の地震の約 15 分後に、和歌山県中部では 1 時間 30 分後に LFEs のシグナルによるイベントを検出している。2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震の際には、本震で励起された表面波の到達後に四国地方において動的誘発作用により LFEs が発生したことが報告されている (Miyazawa, 2011)。これらの LFEs も長野県北部の地震の本震の表面波の到達後に発生している

ことから (Fig. 14), 東北地方太平洋沖地震の際と同様のメカニズムで誘発された可能性が高いと考えられる. 長野県北部の地震発生直後には, 本震の後続波に加えて, 多数の余震の発生により波形データに多数の相が入り乱れた状態となっている. そのため一元化処理では, 三重県中部の LFEs のイベント検出に失敗している. 一方, MF 法では三重県中部の

LFEs の検出に成功している. 波形を目視で確認した限りにおいては, この時間帯に他の LFEs のイベントを確認することは出来なかった. 本領域での MF 震源数 (618 個) は一元化震源の数 (299 個) の約 2 倍である. 震央分布 (Fig. 13) を比較すると, ほぼ同じ位置に震央のクラスターが見られる. クラスタ毎の震央分布の広がりについては, テンプレート

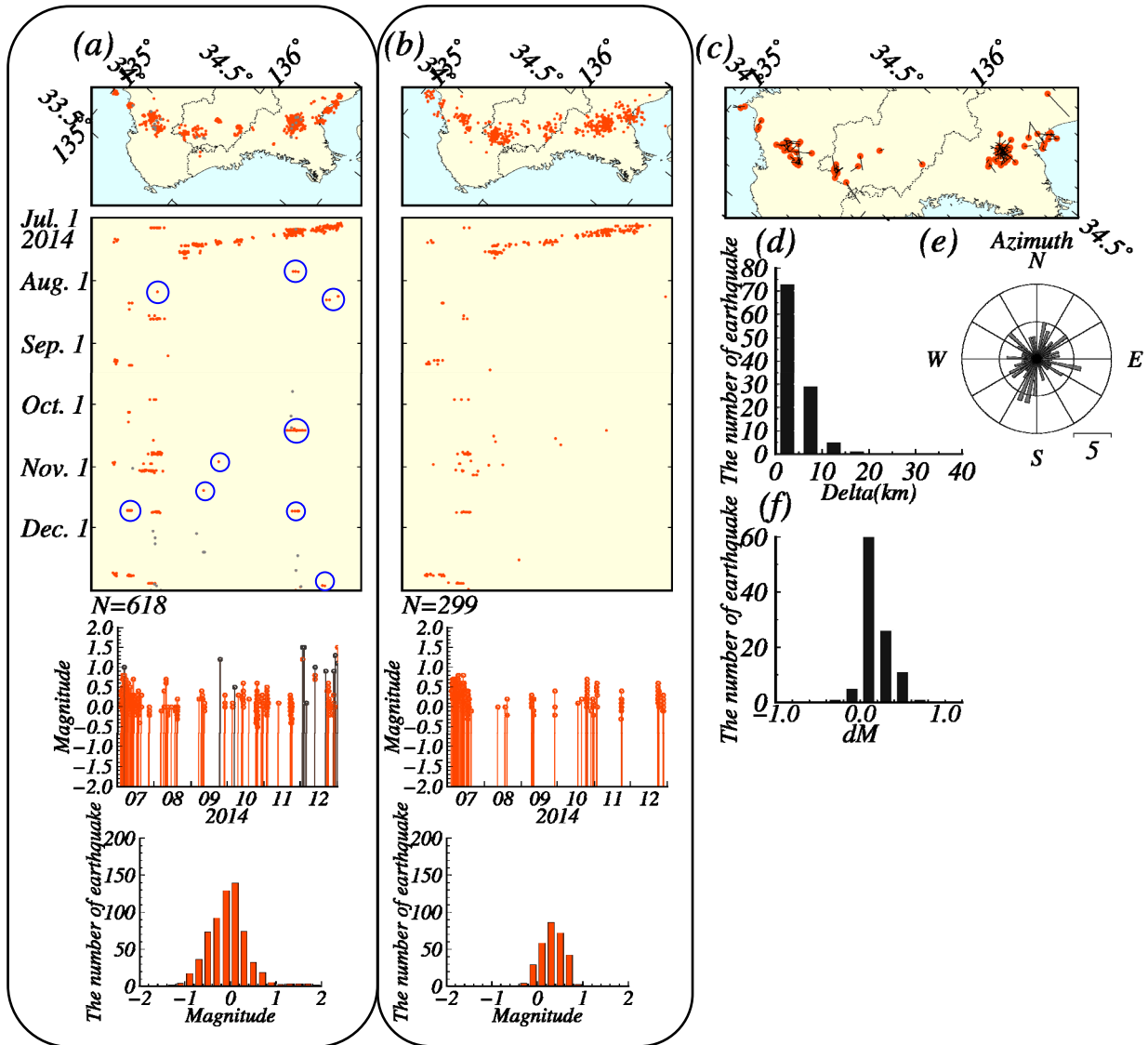


Fig. 13 Seismicity distribution of LFEs in the region from Ise Bay to Kii Channel located by MFT (a) and that of the JMA's seismic catalog (b). The time span of these data is July to December 2014. (a) At the top, epicenter distribution, red and gray circles show epicenters of LFEs and ordinary earthquakes, respectively, LFEs surrounded by blue lines are newly detected these by MFT, at the second from top, spatio-temporal distribution, at the third from top, Magnitude-Time diagram of LFEs, at the bottom, frequency magnitude distribution of LFEs. (b) those of the JMA's seismic catalog. (c) Comparison of the epicenter locations between epicenters of MFT and those of the JMA's seismic catalog. Red circles show the epicenters of MFT, the other end of the solid bars shows those of JMA's seismic catalog.(d), (e) and (f) are the histogram of LFE number versus horizontal distance, azimuth and the difference of magnitude between the hypocenter located by MFT and that in the JMA's seismic catalog, respectively.

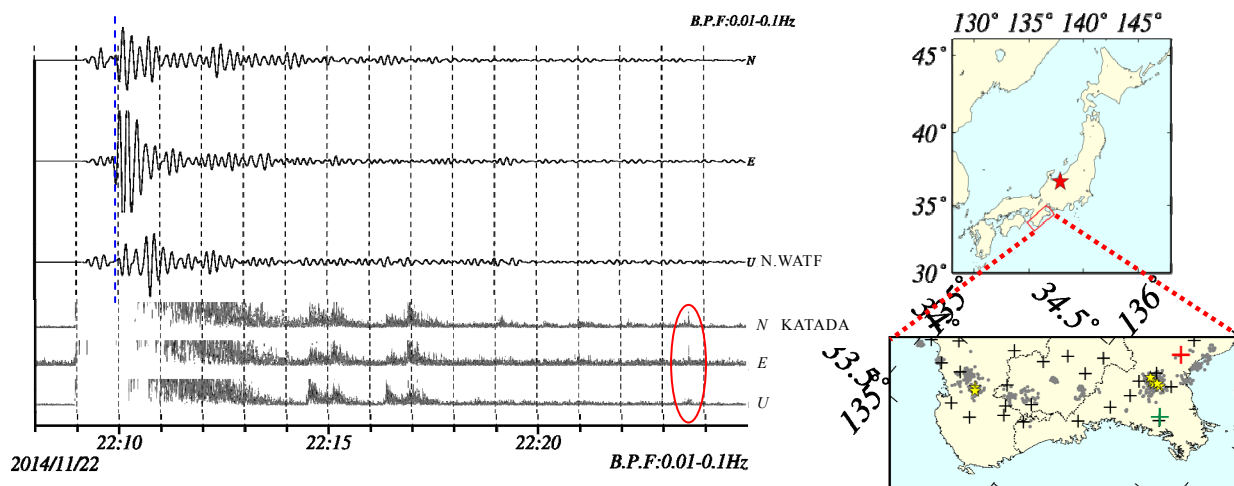


Fig. 14 Three-component broadband seismograms of the earthquake (M6.7) which occurred in Northern Nagano prefecture on November 22, 2014 at N.WATF station, and envelopes of it at KATADA station. Broadband seismograms and envelopes were passband filtered between 0.01 to 0.1 Hz and 2.0 to 8.0Hz, respectively. Blue dashed line on broadband seismograms indicates the theoretical arrival time of surface waves. There are signals of LFEs in a part of envelopes surrounded by red line. The right map shows a hypocenter location of Northern Nagano earthquake (red star at top) and distribution of seismic station (black crosses) and epicenters of LFEs (gray circle). Red and green cross denote locations of KATADA and N.WATF stations, respectively. Yellow stars indicate triggered LFEs.

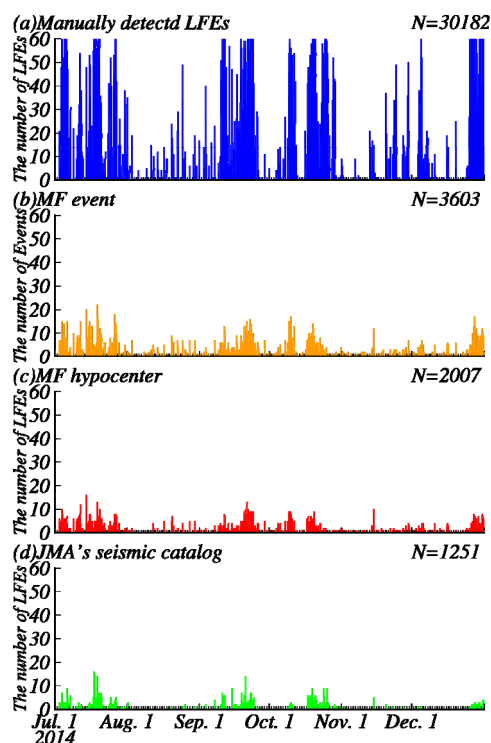


Fig. 15 Number of detected and located LFEs that occurred in the region from Shikoku to Bungo Channel. The number is counted when a signal exists in one minute waveform data. (a) Number of manually detected LFEs is shown; (b) and (c) that of detected and located LFEs by MFT is shown, respectively; (d) that of LFEs listed in the JMA's seismic catalog.

がカバーしている領域が十分ではないために一元化震源と比較すると MF 震源の分布域の方が狭い. その一方で, 一元化震源にある伊勢湾沿岸の直径 20km のクラスターについては, イベント検出, 震源決定の過程でテンプレートとの波形相関を考慮した結果, MF 震源では伊勢湾沿岸部で南北方向に配列した 4 つのクラスターに分離しており, 精密な震央分布が見えるようになった領域もある. 深部低周波微動は固有の活動周期を有する活動セグメント内を移動する性質があることが知られている (小原, 2009). 本解析期間に MF 震源, 一元化震源の両方で 7 月 3~20 日にかけて三重県の伊勢湾沿岸部から奈良・和歌山県境に至る北東-南西走行の LFEs のほぼ連続的な伝播が確認できた.

MF 震源と一元化震源の中で一致する震源位置の水平方向の差の平均は 4.4km, 鉛直方向の差の RMS は 3.8km で, 震央位置の差に方位依存性はない. Fig.13 の M-T 図では M1.0 以上の震源が時折ある. これらは, 一般地震の波形の一部を LFEs として検出し, 震源決定したものである.

3.3 四国地方～豊後水道

Fig. 15に四国地方から豊後水道に至る領域のイベント, 震源数の時別の頻度分布, Fig. 16にMF震源, 一元化震源の震源分布, 時系列分布と両者の震源位置, マグニチュード差の頻度分布を示す. 手動イベント, MFイベントの数は, それぞれ 30182個,

3603個であり, 活動期間によって多少の揺らぎはあるもののMF法での数値上のイベントの検出率は10%前後である. 同期間の一元化震源の数は1251個であり, MF法ではその約3倍のイベントを検出している. 頻度分布の消長傾向は, 手動イベント, MFイベント, 一元化震源ともほぼ同じである. しかし,

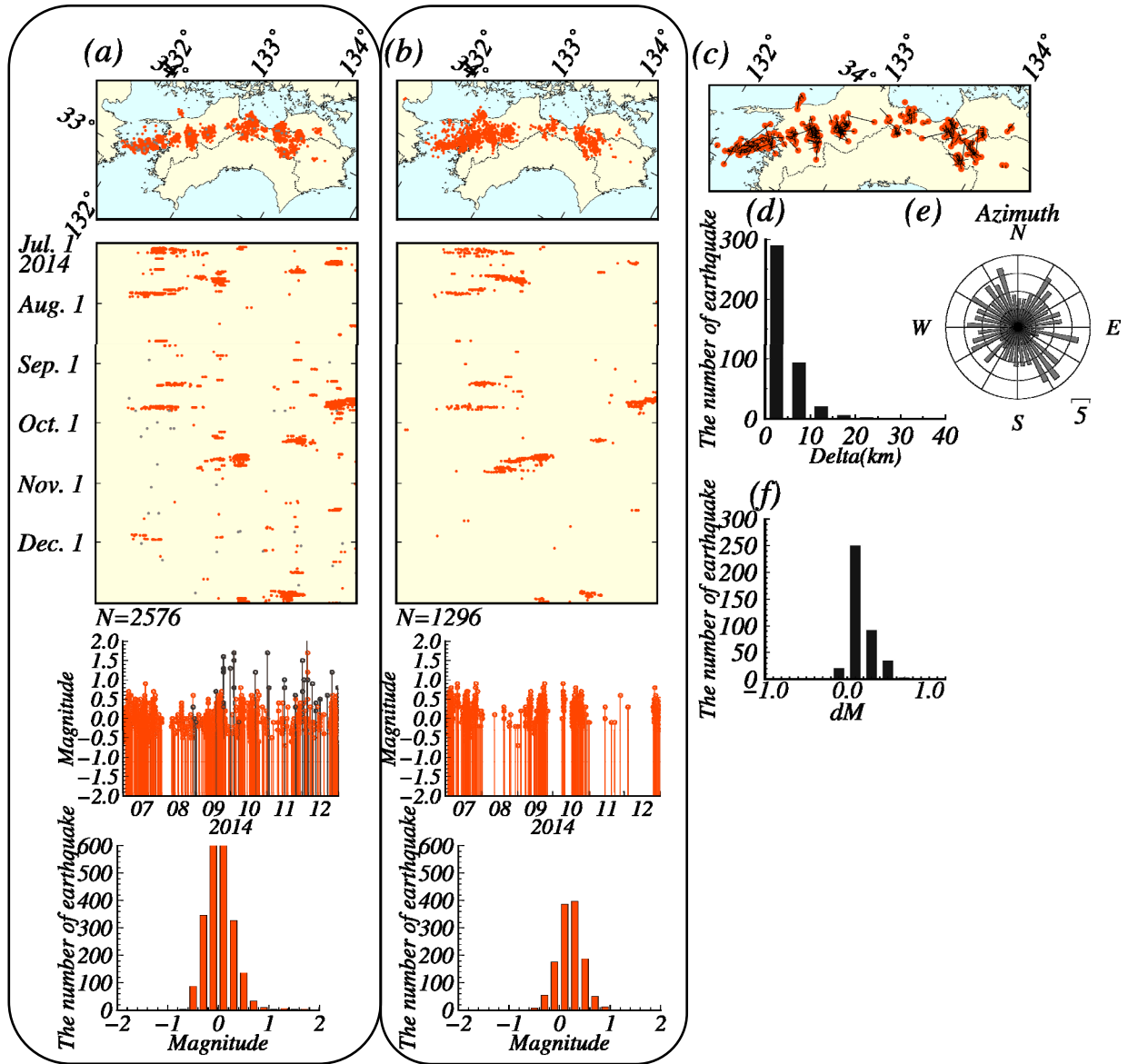


Fig. 16 Seismicity distribution of LFEs in the region from Shikoku to Bungo Channel located by MFT (a) and that of the JMA's seismic catalog (b). The time span of these data is July to December 2014. (a) At the top, epicenter distribution, red and gray circles show epicenters of LFEs and ordinary earthquakes, respectively, at the second from top, spatio-temporal distribution, at the third from top, Magnitude-Time diagram of LFEs, at the bottom, frequency magnitude distribution of LFEs. (b) those of the JMA's seismic catalog. (c) Comparison of the epicenter locations between epicenters of MFT and those of the JMA's seismic catalog. Red circles show the epicenters of MFT, the other end of the solid bars shows those of JMA's seismic catalog. (d), (e) and (f) are the histogram of LFE number versus horizontal distance, azimuth and the difference in magnitude between the hypocenter located by MFT and that of the JMA's seismic catalog, respectively.

8月2日～9月3日と11月21日から12月24日の期間については、手動イベント及びMFイベントでは頻度の消長が確認できる程度のイベントがあるにも関わらず、一元化震源はほとんど存在しない。Fig. 16 (a) の MF 震源の時系列分布より、それらの期間には活動期が数時間～数日程度の空間的に小さなクラスターが LFEs の活動域で散発的に分布していることがわかる。それらのクラスターを構成する LFEs のほとんどがマグニチュード 0.0 以下と小規模で、振幅が小さい。そのため、波形の STA/LTA 比によりイベント検出を行う一元化処理では、それらのイベントは検出できていない。MF 法ではイベント波形とテンプレートとの相関係数を計算し、相関係数の全観測点での総和を取ることによりシグナルを強調した上でイベント検出を行うことから、M0.0 以下の微弱なシグナルであっても検出可能である。また、それとは逆に本解析領域でも一般地震の波形の一部を LFEs として誤検出したものもある。

MF 法と一元化震源の分布を比較すると (Fig. 16)、四国東部については MF 震源の分布域が広範で、四国西部では分布域が狭い。四国西部については宇和海北部から愛媛県北西部、伊予灘に至る領域において解析に使用したテンプレートが空間的に疎らで、イベント検出に失敗したため MF 震源の数が少ない。Fig. 16 の震源の時系列分布において MF 法では 2014 年 10 月 23～26 日の愛媛県南西部の活動の震源をほとんど決定できていない。当該期間の一元化震源の分布を見ると、テンプレートの分布が疎な愛媛県西部～北西部に震源が決まっている。

MF 震源と一元化震源の中で一致する震源位置の水平方向の差の平均は 4.5km、鉛直方向の差の RMS は 4.0km で、震央位置の差違に方位依存性はない。

4 まとめ

2014 年 7 月 1 日～2014 年 12 月 31 日までの連続地震波形を用いて、西南日本の南海トラフ沿いの LFEs 活動に Matched Filter 法を適用した結果、5188 個のイベントを検出し、3744 個の震源を決定した。イベント検出の際の誤検出率は約 4.0%と低い値であるにも関わらず、MF 法で決定した震源数は一元化震源カタログに掲載されている同期間、同領域の LFEs 震源数の約 2 倍である。イベント数、震源数の頻度分布は、人手により検出したイベントのものと同様

の消長傾向を示している。このことは MF 法により LFEs の活動推移を監視することが可能であることを示唆している。

MF 法で決定した震央分布では、既知である LFEs の帯状分布や沈み込むプレートの走向に沿う震央の移動を確認することができた。さらに、一元化震源カタログに掲載されていない多数の小規模な LFEs の震源を決定した。MF 法で震源決定した LFEs の約 66%が M0.0 以下の LFEs である。それにより時空間で新たな小規模な震源のクラスターが確認できるようになった。

謝辞

本解析には一元化震源及び国立研究開発法人防災科学技術研究所、東京大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所の地震波形データを使用させていただきました。論文の作成には、GMT (Wessel and Smith, 1998) を使用しました。匿名の査読者及び気象大学の吉田康宏教授、編集委員の地震予知情報課の露木貴裕氏には本稿を改善するために有益な助言を頂きました。記して感謝致します。

文献

- 上野 寛・畠山信一・明田川 保・舟崎 淳・浜田信生 (2002): 気象庁の震源決定方法の改善—浅部速度構造と重み関数の改良—, 験震時報, **65**, 1507-1520.
- 小原一成 (2003): 深部低周波微動の時系列的特長—トリガー現象と周期性—, 地学雑誌, **112**, 837-849.
- 小原一成 (2009): フィリピン海プレートの沈み込みに伴う西南日本のスロー地震群の発見, 地震 2, **61**, S315-S327.
- 西出則武・橋本徹夫・舟崎 淳・中澤博志・岡 正善・上野 寛・山田尚幸・笹川 巖・前田憲二・杉本和信・高嶋鉄也 (2000): 地震データの一次的処理により把握された地殻下部の低周波地震活動, 地球惑星科学関連合同大会予稿集, Sk-P002.
- Aso, N., K. Ohta, and S. Ide (2010): Volcanic like low frequency earthquakes beneath Osaka Bay in the absence of a volcano, Geophys. Res. Lett., **38**, L08303, doi:10.1029/2011GL046935.
- Aso, N., K. Ohta, and S. Ide (2013): Tectonic, volcanic, and semi-volcanic deep low-frequency earthquakes in western Japan, Tectonophysics, **600**, 27-40.

- Geller, R. J. and C. S. Muller (1980): Four similar earthquakes in central California, *Geophys Res. Lett.*, **7**, 10, 821-824.
- Gibbons, S., J. and Ringdal, F (2006): The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation. *Geophys. J. Int.* **165**, 149–166.
- Ide, S., Shelly, D. R., Beroza, G. C (2007): Mechanism of deep low frequency earthquakes: further evidence that deep non-volcanic tremor is generated by shear slip on the plate interface. *Geophys. Res. Lett.* **34**, L03308, doi:10.1029/2006GL028890.
- Kato, A., Obara, T, Igarashi, H, Tsuruoka, S, Nakagawa, and N. Hirata (2012): Propagation of Slow Slip Leading Up to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake, *Science*, **335**, 705, doi:10.1126/science.1215141.
- Miyazawa M (2011): Propagation of an earthquake triggering front from the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L23307, doi:10.1029/2011GL049795.
- Obara, K (2002): Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, **296**, 1679-1681.
- Peng, Z., and P. Zhao (2009): Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake, *Nat. Geosci.*, **2**, 877–881, doi:10.1038/ngeo697.
- Shelly, D. R., G. C. Beroza, and Satoshi Ide (2007): Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms, *Nature*, **446**, doi:10.1038/nature05666.
- Suda, N., R. Nakata, and T. Kusumi (2009): An automatic monitoring system for nonvolcanic tremors in southwest Japan, *J. Geophys. Res.*, **114**, B00A10, doi:10.1029/2008JB006060.
- Wech, A. G., and K. C. Creager (2007): Cascadia tremor polarization evidence for plate interface slip, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L22306, doi:10.1029/2007GL031167.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith (1998): New, Improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS trans. AGU*, **79**, 579.
- Yabe, S. and S. Ide (2013): Repeating deep tremors on the plate interface beneath Kyushu, southwest Japan, *Earth Planets Space*, **65**, 17-23.

(編集担当 露木貴裕)

Appendix 長野県北部の地震活動

2014 年 11 月 22 日 22:08 に長野県北部で発生した M6.7 の地震の余震域周辺の地震活動に MF 法を適用した。期間は 2014 年 11 月 18 日 00:00～11 月 30 日 23:59 で、MF 法の解析には余震域周辺の 7 観測点 (21 チャンネル) のデータを使用し、テンプレートには 2014 年 11 月 18 日～11 月 25 日までに余震域及びその周辺で発生した 366 個の M1.5 以上の地震の一元化震源の震源要素及び波形データを使用した。各チャンネルで S 相の理論到達時から 1.5 秒前から 4 秒間の波形データを切り出し、テンプレートとした。解析の際にはテンプレート、連続波形データに 2-8Hz のバンドパスフィルターを施し、サンプリングレートを 20Hz にリサンプリングし、0.05 秒間隔で各テンプレートと連続波形間で NCC を計算した。イベント検出の際には、2 時間毎に NCC の標準偏差 (σ) を計算し、NCC が 7.5σ を越えた場合にイベント検出とした。イベント検出後にテンプレートの震源を初期値としてグリッドサーチを行い精度の高い震源を決定した。マグニチュードについては、テンプレートと対象イベントの最大振幅の比により相対的な値を求めた。

解析の結果、MF 法では一元化震源の約 4 倍の震源を決定することに成功した (Fig.A1)。余震域の北側で多数の地震が発生しており活動度が高く、南側では北側に比べると地震数が少ない。ほとんどの震源は余震域の北側に決まっており、南側に決まっている震源は 4 分の 1 程度である。本震後 1 日経過すると震源数が少なくなり、11 月 25 日から 26 日にかけて一時的に余震域の南側の一部で多くの震源が決まっているが、26 日以降は余震域での 1 日の震源数が 500 個以下である。余震域北側と南側に分けて日別の震源数を比較すると、北側では 23～30 日まで 100 個を越える状態を継続しているが、南側では 26 日以降は 100 個を下回っている。一元化震源でも同じ傾向を見ることができるが、規模の小さな地震の震源を決定していないので、MF 法によるものと比較すると地震活動の消長のコントラストが明瞭ではない。震源分布についても一元化震源と同じく、MF 法による分布の方がややブロードであるが、走行が北北東-南南西で東傾斜の分布が見える。マグニチュードについては MF 法では、本震を M5.9、同日 22:37 に発生した最大余震を M3.9 に決定しており、

Fig.A1 の M-T 図を見ても全体的に MF 法の方が全体的にマグニチュードを過小に評価していることわかる。

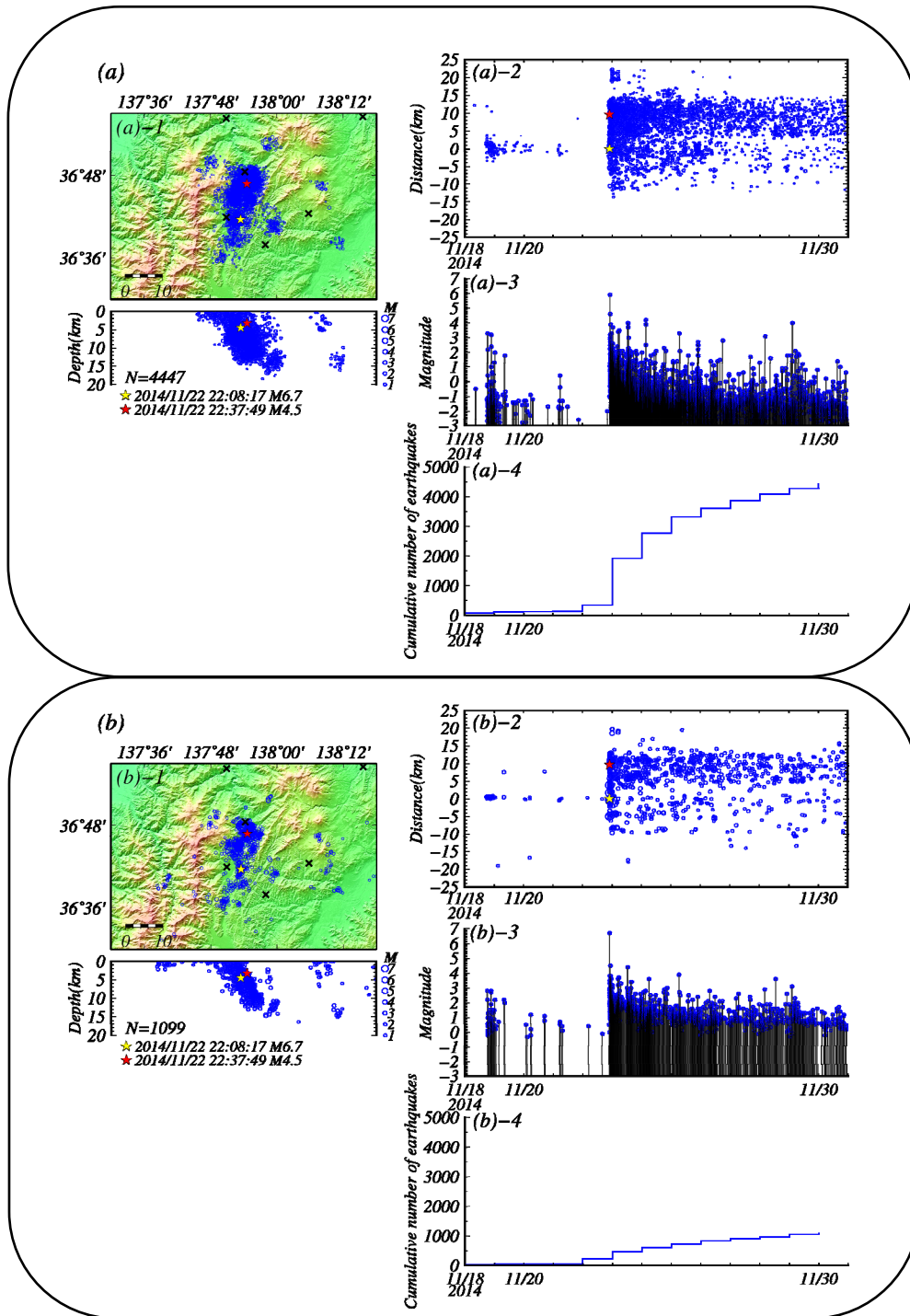


Fig. A1 Comparison between the hypocenter distribution of MFT and that of the JMA's seismic catalog.(a) Hypocenter distribution of MFT between November 18 and 30, 2014. (a)-1 Hypocenter distribution, blue circles denote hypocenters, black crosses denotes stations. Yellow and red stars indicate hypocenters of the mainshock (11/22/2014 22:08 M6.7) and the largest aftershock (11/22/2014 22:37 M4.5), respectively. (a)-2, (a)-3 and (a)-4 are spatio-temporal distribution, Magnitude-Time diagram and cumulative number of earthquakes. (b) Those of the JMA's seismic catalog.