

波形相関による自動震源分類の効率化

Improved Efficiency in Classification of Automatic Hypocenters by Cross-correlation

溜瀨功史¹

Koji TAMARIBUCHI¹

(Received April 11, 2017; Accepted June 28, 2017)

ABSTRACT: The Japan Meteorological Agency (JMA) has been generating the Unified Seismic Catalog using data on automatically detected earthquakes. The JMA classifies automatically detected hypocenters into reliable results and unreliable results by visual inspections. It was extremely difficult to classify all of them through visual inspection reviews due to the enormous number of seismic events that occurred in the case of the 2016 Kumamoto Earthquake. Given this, we are proposing a more efficient classification method by using cross-correlation to select reliable results from the large number of events that have not yet been reviewed. If an automatically processed event ("target event") is found to be close to a reviewed event ("template event") and their waveforms around the P and S phases are similar, the target event can be regarded as a hypocenter with high reliability without any need to perform a visual inspection review. Using 3,337 template events, we applied this method to 35,921 target events that were recorded between 21:00 on April 14 and 24:00 on April 28 around the seismically active area of the 2016 Kumamoto Earthquake. As a result, 20,970 events (58%) were classified as being closely related events. Since these events can be regarded as highly reliable and there is no longer any need to perform visual inspections, this method can contribute to greater work efficiency. Even for the events that could not be classified as being closely related events, we were able to extract other appropriate hypocenters by adding their waveforms to the templates after visually inspecting them. We also expect to be able to use this method to classify noise or blast events more efficiently by using the waveforms of noise or blast events as templates.

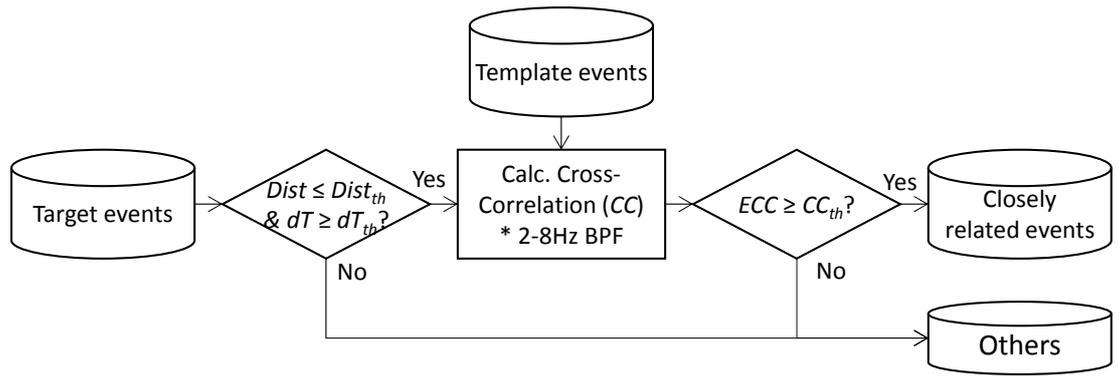
1 はじめに

気象庁は、文部科学省と協力して気象庁のほか、防災科学技術研究所、大学等関係機関からも地震波形データを一元的に収集し、全国の震源決定を行っている（以下、この震源を「一元化震源」という）。一元化震源の作成においては、従来、地震の検出は自動で行う（例えば、清本・他、2013）ものの、震源の分離精度の問題によって手作業による位相の検出や目視による処理結果の精査を行わざるを得ず、作業効率はなかなか向上してこなかった。この一連の処理は、溜瀨・他（2016）による自動震源決定手法（以下、「PF 法」という）を用いることによって大幅に自動処理の性能が改善し、2016 年 4 月 1 日から新たな一元化処理が始まった（高濱・他、2016 年

ど）。この処理手順では、PF 法で生産された自動震源は、一定規模未満の地震（内陸では概ね M1.7 未満）で相の読み取り等に大きな誤りがなければ、そのまま一元化震源として登録できるようになった。その結果、例えば「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震」以降、その余震域では作業時間の超過が原因となって処理を行う地震の規模の下限を一時的に引き上げて処理数を制限していたが、今回の処理手法の改善によってこの制限は撤廃された。なお、詳細は地震月報（気象庁）を参照されたい。これにより一元化震源の決定数は、2016 年 4 月以降、それ以前の 2 倍程度に増加したことが確認されている。

一方、PF 法による自動震源によって地震の処理数

¹ 気象研究所地震津波研究部, Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute



Parameters Maximum hypocentral distance: $Dist_{th} = 5.0\text{km}$
 Minimum difference time: $dT_{th} = 1.0\text{sec}$
 Wave length: $n = 300\text{sample} (= 3.0\text{sec})$
 Different phase time: $\tau = \pm 100\text{sample} (= 1.0\text{sec})$
 Minimum calculation station number = 5
 Maximum calculation station number = 10
 Cross-correlation threshold: $CC_{th} = 0.5$
 CC of 5th rank at all stations: ECC

Fig. 1 Flowchart of the cross-correlation program used in this study. The parameters are shown below.

は増加したが、その処理結果にはノイズ等による誤検知や発破イベントが数~10%程度含まれるため、全ての自動震源に対して波形の目視確認を行い、適切な震源か、修正あるいは削除が必要な震源か、に分類する作業は依然として残っている。これは作業の効率化の観点からすると大きな課題であった。2016年4月14日から始まった「平成28年(2016年)熊本地震」の一連の地震活動では、PF法による自動震源決定数は5月末までの2か月間に7万個ほどにも及んだ。これらの自動震源はリアルタイムでの地震活動把握には一定の役割を果たしたものの、一元化震源カタログを作成する観点から見ると、全ての地震を早期に目視確認することはできず、カタログ化に遅れが生じた。したがって、このような地震多発時においても、震源が適切に決定されているか否かを早期に分類することが、カタログ作成の効率化の観点から重要となる。

ノイズ等により誤検知された多くの震源は、普段の地震活動域から離れて孤立的に決定されたり、計算誤差が大きくなったりすることが多い。そのため、誤検知を排除する手段として、クラスタリングや計算誤差によるフィルタリングを行うことがある(溜瀧・他, 2016)。しかし、ノイズ等の場合でも偶然に計算誤差が小さく、かつ震源が普段の地震活動域内に決定されることも少なからずある。一方、そのよ

うな地震を極力排除しようと計算誤差の基準を厳しくすると本来正しく検出できた地震についても排除される恐れがある。また、発破イベントは特定の領域に集中して観測される。このようなノイズや発破等のイベントをクラスタリングや計算誤差によって全てを排除することはできない。

ところで、2つの震源の震源距離が近くであれば、地震波の伝播経路はほぼ同一と見なすことができ、同一の観測点での波形であれば観測点の影響も無視することができる。そのため、発震機構や震源過程が類似していれば、両者の波形はほぼ一致する。これを利用して、同じ観測点における波形相関から地震検出、震源決定する手法は、Matched Filter法と呼ばれ、近年では大規模地震前後の地震活動や深部低周波地震等の地震検出手法として多く取り入れられている(Gibbons and Ringdal, 2006; Peng and Zhao, 2009; Shelly et al., 2007; 森脇, 2017など)。また、Nakamura et al. (2016)では波形相関を用いて小さな地震の断層タイプの分類を行うなど、大量のデータを処理する上で波形相関は有効な手段と考えられる。地震波形を目視確認する場合の判断基準は、過去の震源から大きく外れないこと、P波、S波の読み取りが概ね正しいことなどを判断基準としている。したがって、すでに目視確認済みの震源が存在する場合、確認すべき地震との震源距離が近く、それらの

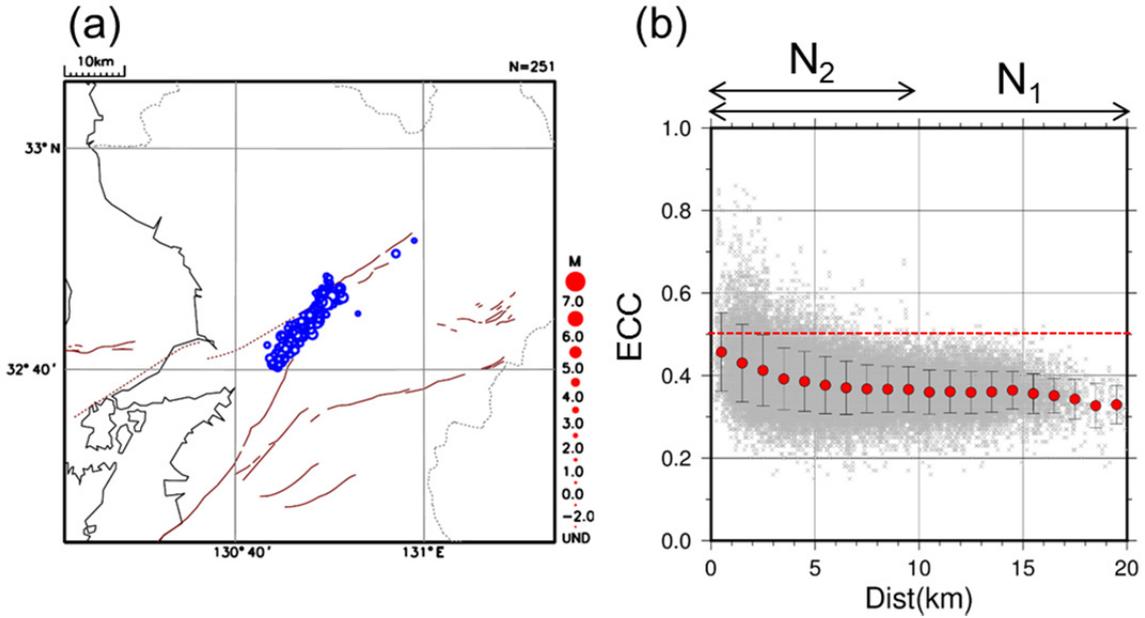


Fig. 2 (a) Epicenter distribution of template events recorded between 21:00 and 24:00 on April 14 used to determine the cross-correlation threshold. (b) Relationship between the hypocentral distance and the correlation coefficient. Red circles and error bars respectively indicate the average values and standard error every 1 km.

P 波、S 波の検測時刻付近の地震波形も十分に類似していれば、確認すべき地震はすでに目視確認したものと同等の信頼度の地震とみなすことができる。さらに、目視確認済みの発破イベントとの波形の類似性を利用することで、確認すべき地震から発破イベントを容易に排除することが可能となる。そこで今回は、PF 法による自動震源の中から、波形相関を用いて、目視によらず高い信頼度の自動震源の分類を行うことで、更なる作業の効率化を試みたので報告する。

2 手法及びパラメータの設定

手法の概要及びパラメータを Fig. 1 に示す。ここで、すでに目視確認済みの震源をテンプレート震源 (template event)、その波形をテンプレート波形といい、今回確認すべき (分類したい) 自動震源を被評価震源 (target event) という。

まず、テンプレート震源と被評価震源の震源距離が十分に近いかどうかを判定し、許容最大震源距離 ($Dist_{th}$) 以下であれば、波形の相互相関係数を計算する。ここで、許容最大震源距離 ($Dist_{th}$) は 5.0km とした。これは自動震源と一元化震源の残差が概ね水平方向に 3~4km 程度、鉛直方向に 6km 程度の残

差の二乗平均平方根 (RMS) を持つためである (溜瀨・他, 2016)。なお、テンプレート震源と被評価震源が同じイベントであった場合、当然ながら震源距離が近く、波形も似てしまうことから、このような同一のイベントを検出しないことを目的として、ここでは許容最小震源時間差 (dT_{th}) を 1.0 秒とし、両者の震源時間差が 1.0 秒以上のイベントのみを比較対象とした。

波形が似ているかどうかを判別する手段として、相互相関係数を用いた。相互相関係数 CC は以下の式で定義される。

$$CC(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_{i+\tau}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_{i+\tau}^2}} \quad (1)$$

ここで、 τ は検測時刻からのずれで、 $\tau = 0$ はテンプレート震源と被評価震源の両者の P 波同士または S 波同士の検測時刻で合わせたものを意味する。 x_i はテンプレート波形、 y_i は被評価震源の地震波形で、それぞれオフセット除去及び斎藤 (1978) による 2~8Hz のバンドパスフィルタ適用後の速度波形 (上下動成分) である。 i はデータインデックスで、 $i = 0$

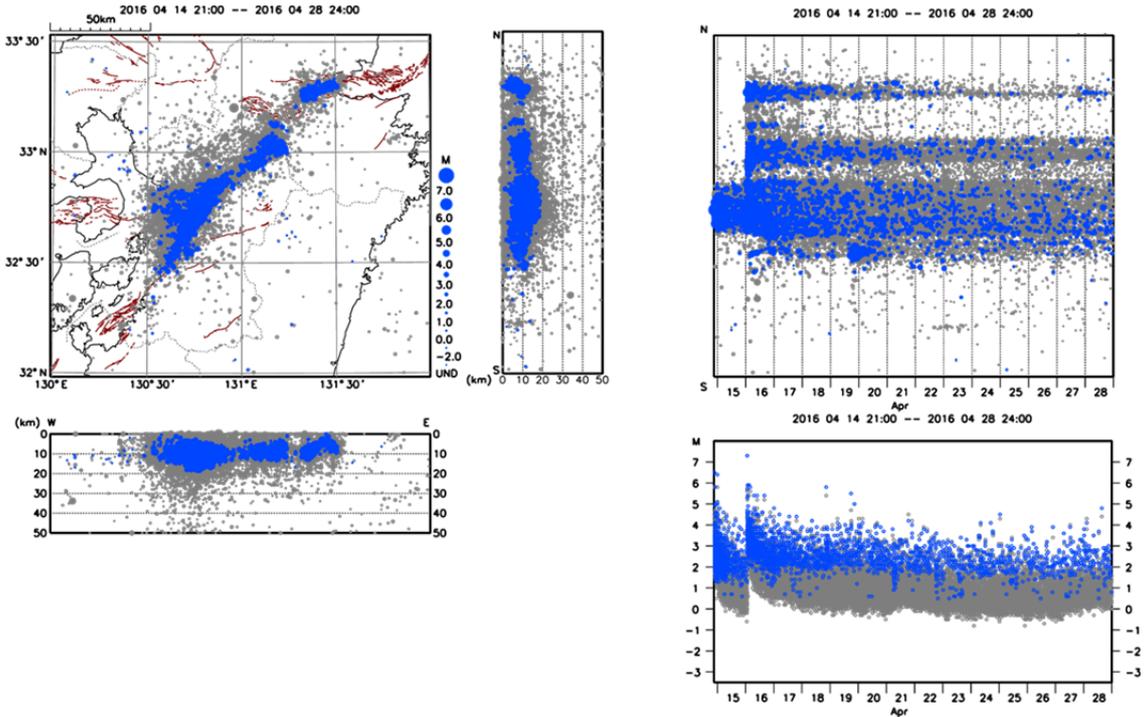


Fig. 3 Hypocentral distribution of template events recorded between 21:00 on April 14 and 24:00 on April 28. Blue dots indicate template events, and gray dots indicate target events. The panels on the right show the spatio-temporal distribution and a magnitude-time (M-T) diagram.

はそれぞれの波形における P 波または S 波の検測時刻である. n は使用波形区間 (サンプル数) で 300 サンプル (波形のサンプリングレートは 100Hz なので, 3.0 秒) とした. 検測時刻のずれ τ を ± 1 秒の範囲で 0.01 秒ずつずらして CC を算出し, そのうち最大の CC を観測点及び相における相関係数として採用した. テンプレート震源と被評価震源の両者で P 相が検測されている場合は P 相を基準に相関係数を計算 (CC_p とする) し, 両者で S 相が検測されている場合は S 相を基準に相関係数を計算 (CC_s とする) した. CC_p または CC_s のいずれかのみが決定できた場合は, それをそのまま観測点での相関係数とし, 両方も計算できた場合は, 各相の平均, すなわち $(CC_p + CC_s)/2$ を観測点での相関係数とした. テンプレート震源と被評価震源の両者に検測値があるものを対象に, テンプレート震源から近い順に最小 5 地点, 最大 10 地点の範囲でそれぞれの観測点で相関係数を算出し, そのうち 5 地点以上で相関係数が閾値以上となった場合, 「相関の高いイベント (Highly related event)」と判定した. なお, 計算においては, 相関係数が 5 番目に大きな観測点の相関係数をイベント間の相関係数 (ECC) とし, それが閾値以上で

あるか否かで「相関の高いイベント」であるかどうかの判定を行った. 相関係数の閾値は 0.5 としたが, その設定理由については後述する.

相関係数は, 波形のフィルタ帯域や使用波形長に依存し, また不均質構造での散乱の影響を受けて, 距離が離れるに従って指数関数的に減少することが理論的, 経験的に知られている (Menke, 1999 ; Nakahara, 2004 など). ただし, 散乱等の影響を考慮して相関係数の閾値を理論的に決定するのは難しいため, 本研究では Nakamura et al. (2016) などと同様に経験的に決定した. すなわち, 相関係数の閾値を設定するために, 事前調査としてテンプレート波形同士を比較し, 震源距離と相関係数の関係を調べた. ここで, テンプレート震源として, 2016 年 4 月 14 日 21 時~24 時までの 3 時間の一元化震源 (2016 年 6 月 29 日参照, 暫定震源) を用いた. 範囲は北緯 32.0 度~34.0 度, 東経 130.0 度~132.0 度, 深さは 0 ~20km, M0.5 以上で, 震源区分が精度の良い震源 (K, k, A フラグ), 251 個を用いた. テンプレート震源の分布を Fig. 2 (a) に示す. 被評価震源についてもテンプレート震源と同じデータセットを用意し, 両者で波形相関を計算した. なお, ここではイベン

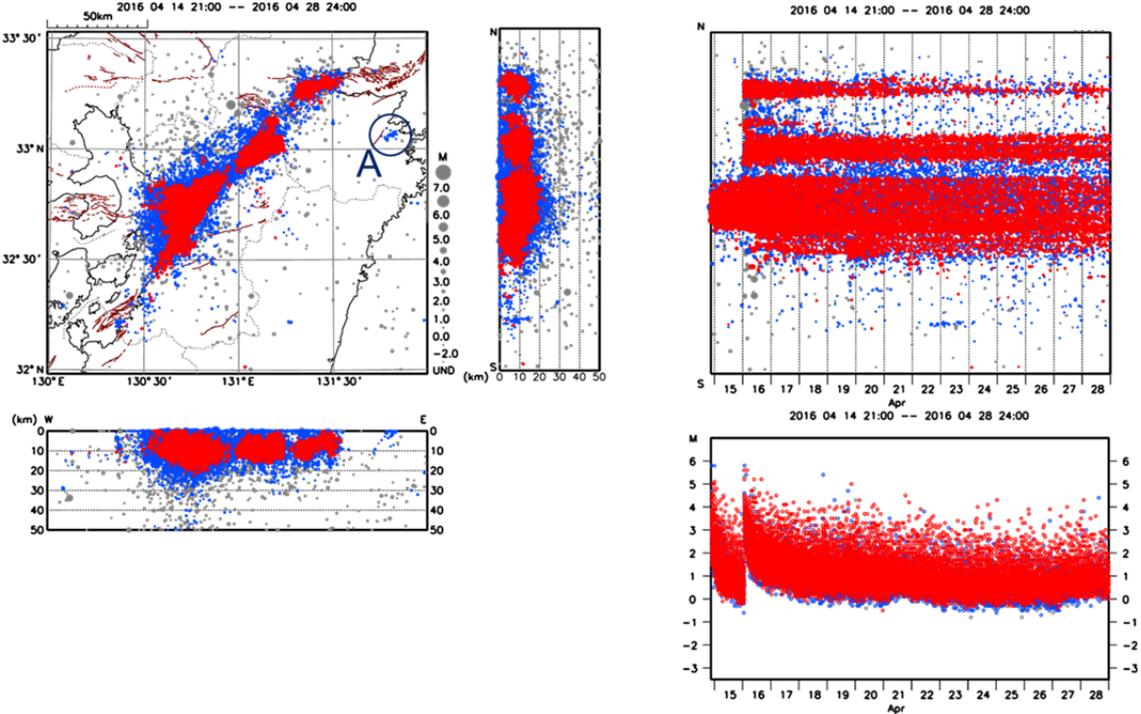


Fig. 4 Hypocentral distribution of target events recorded between 21:00 on April 14 and 24:00 on April 28. Red dots indicate events that are closely related to the template events, blue dots indicate events that are closely related to other target events, and gray dots indicate all other events. The panels on the right show the spatio-temporal distribution and an M-T diagram. Region A indicates a cluster of blasts.

ト間の震源距離と相関係数の関係を見積もるため、許容最大震源距離はテンプレート震源の空間的な広がりと同様の 20.0km として計算を行い、テンプレート震源全て同士の相関係数を算出した。計算した結果を Fig. 2 (b) に示す。Fig. 2 (b) から、震源距離が遠くなるにしたがって、イベント間の相関係数も小さくなるのが分かる。なお、震源距離がある程度近い場合でも、相関係数が大きくない事例も多数ある。これは発震機構や震源過程の違いなどが関係していると考えられるが、本研究では相関係数が大きい事例だけを対象としているので、それらの違いは考慮していないことになる。仮に発震機構が反転していれば相関係数が負の最小値となり、極性が逆転しているものの波形が似ているということがありうるが、発震機構が反転した地震については、少なくとも 1 つは震源の妥当性を目視確認してテンプレート震源への登録を判断すべきと考え、本研究では負の最小値を取るイベントについて「相関の高いイベント」と判定することはしなかった。また、震源過程の差が顕在化する場合は、波形相関は低くなり、テンプレート震源とほぼ同じ震源位置で発生してい

るイベントであっても検出できないことになる。しかし、そのような規模の大きな地震の発生頻度は少なく、分類の効率化の観点からは問題にならないと考えられる。ここで、Nakamura et al. (2016) を参考に、ある閾値以上の相関係数を持つペアの数を N_1 とし、そのうち震源誤差の概ね 2 倍に相当する震源距離である 10km 以内のペアの数を N_2 とする。このとき、イベント間の相関係数を -1.0 から 0.05 ずつ上げて両者の比 (N_2/N_1) の計算を行い、初めて 0.99 以上となったときの相関係数を閾値 CC_{th} とした。これはすなわちイベント間の相関係数 CC_{th} 以上であるとき、震源距離が 10km 以上も離れている確率は 1% 未満であることを意味する。このデータセットでは初めて 0.99 以上となったのは 0.5 であった。さらに、Fig. 2 (b) に震源距離 1km ごとに相関係数の平均値と標準偏差 (σ_{CC}) を示しているが、 $2\sim 3\sigma_{CC}$ 程度の幅を考慮しても震源距離 10km 以上も離れたイベントが偶然にも ECC が 0.5 を超える可能性は極めて低く、 $CC_{th} = 0.5$ は妥当な設定であることが分かる。したがって、以降は $CC_{th} = 0.5$ として処理を行った。

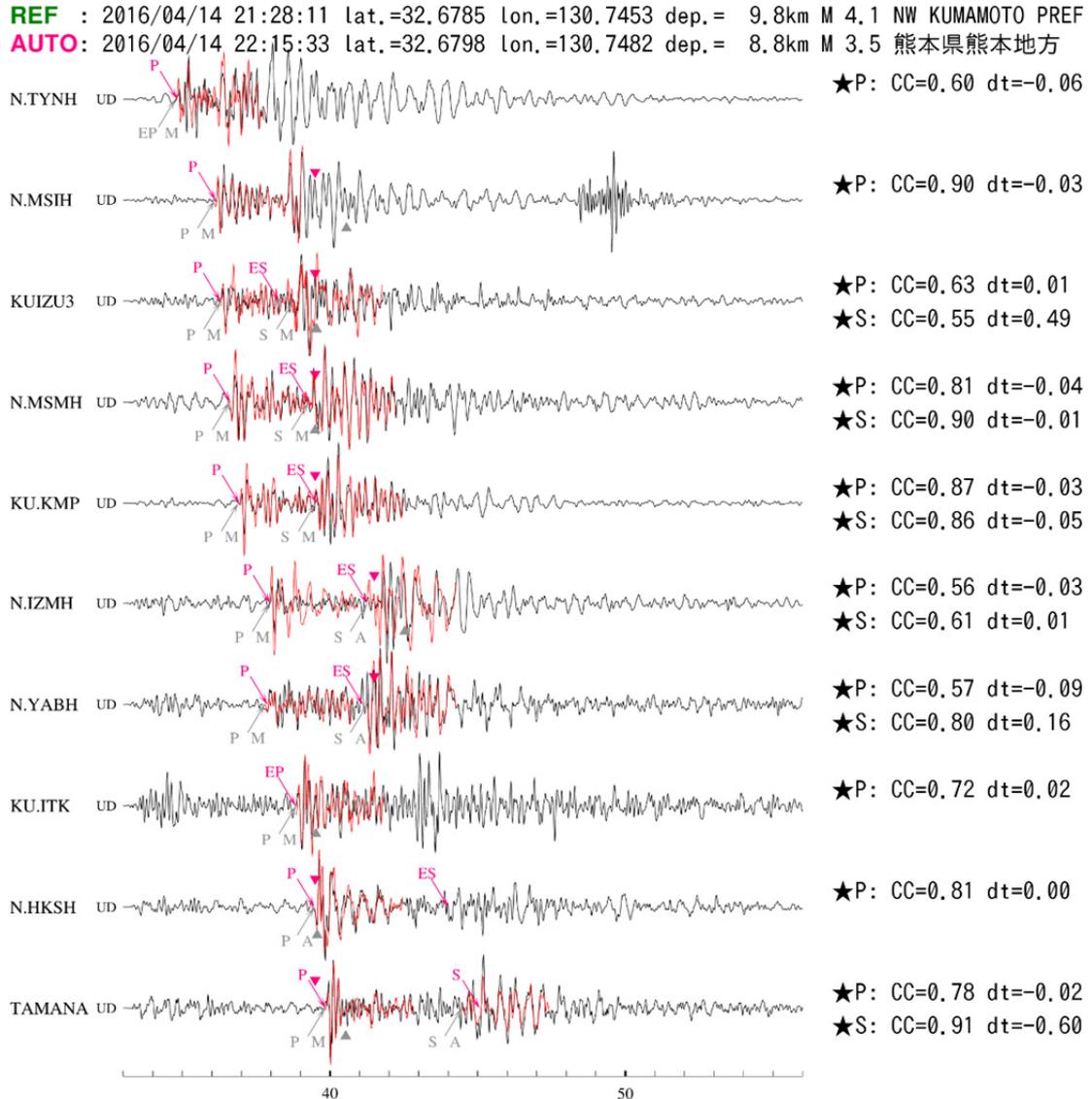


Fig. 5 Example of a closely related event waveform. A black waveform indicates a target event, and a red waveform indicates a template event. All waveforms are up-down (UD) components and they have been filtered at 2 to 8 Hz. CC and τ (dt) are shown to the right of the waveform. A star indicates that $CC \geq 0.5$. A black triangle on the waveform indicates the time at which the maximum amplitude occurred for the target event, and a red inverse triangle on the waveform indicates the time at which it occurred for the template event.

3 自動震源への適用

次に、実際の自動震源に適用するために、テンプレート震源として 2016 年 4 月 14 日 21 時から 4 月 28 日 24 時までの一元化震源 (2016 年 7 月 13 日参照, 暫定震源) を用いた。範囲は北緯 32.0 度~34.0 度, 東経 130.0 度~132.0 度, 深さは 0~20km, M0.5 以上で, 震源区分が精度の良い震源 (K, k, A フラグ), 3337 個を用いた。被評価震源は, 同期間, 同範囲で検出した PF 法による自動震源とした。ただし, 深さは 0~50km, M 全ての震源で 35,921 個である。テ

ンプレート震源及び被評価震源の分布を Fig. 3 に示す。

2 節で示した手法を適用した結果, 被評価震源 35,921 個のうち, 20,970 個をテンプレート震源と相関の高い震源として抽出することができた。相関の高かった震源の分布を Fig. 4 に赤色で示す。また, 相関が高いとして分類された地震波形の例を Fig. 5 に示す。自動震源のうちの約 58%が, テンプレート震源の近くに位置し, P 波, S 波付近の波形も類似していることから, 目視確認した震源と同等の信頼

度の高い震源と見なすことができる。このように短期間に数万個もの地震が多発している時においては、本手法により自動震源の中からプレート震源と相関の高い震源を抽出することは、目視での確認を効率化するために特に有効な手段と考えられる。なお、本手法の処理にかかる時間は、35,921個の震源の分類を行った今回の場合、約5時間40分であった（動作環境は、CPU: Xeon 2.80GHz, OS: Linux 3.10.0, メモリ: 64GB, コンパイラ: gcc ver. 4.8.5）。これは1個あたり0.5秒程度の処理時間に相当し、実用上十分な処理速度である。1つの震源の目視確認に1分を要すると仮定すると、相関の高い震源20,970個は目視確認を行う必要がないため、単純計算で14日以上もの作業の効率化に寄与することができる。

一方で、約42%に相当する残った14,951個の震源の目視確認は行わなければならない。ここで、試みに、残った自動震源同士と同様に相関係数の算出を行った。その結果、相関が高いイベントとして分類された震源を Fig. 4 に青色で示す。13,771個（被評価震源全体の約38%）は他の被評価震源と相関が高いイベントとして分類された。すなわち、どのイベントとも相関が高くないイベントは1,180個にとどまり、これは被評価震源全体のわずか3%である。つまり、一元化震源との比較で相関が高くなかった震源でも、その一部を目視確認してプレート震源として加えていくことで、さらにその確認数を減らすことができる可能性がある。また、Fig. 4の図中に領域Aとして示した大分県付近のクラスターは、発破によるものであることが知られている。これらの発破イベントも、自動震源同士の比較によって相関の高いイベントとして検出できることが確認できた。つまり、プレート震源として発破イベントを登録しておくことによって、発破イベントの自動除去を行うことも可能である。

現在の処理手法では、自動処理によって生産された震源は全て目視確認したうえで分類しなければならない。しかし、一元化震源のみならず、例えば発破イベントや典型的なノイズイベントもプレート震源として登録しておくことによって、それらと相互相関が高いイベントは目視に寄らず自動的に登録、または排除することが可能となる。これは特に、通常地震との識別が困難な発破イベントに対して有効な手段であると考えられる。このほか、波形相関

を用いて相の検測時間差 τ が詳細に得られることから、更なる検測精度の向上への貢献も期待できる。

4 まとめ

波形の相互相関を用いることで、目視に寄らない自動的な震源分類手法を開発した。本手法を「平成28年（2016年）熊本地震」の地震活動域に適用したところ、約58%の地震は精度の良い震源であることが目視確認されたものとの相関が高く、それまでの地震活動域付近の震源の近傍で発生した、信頼度の高い震源であるという識別を、目視によらず行うことができた。これにより、目視確認すべき地震数が大幅に削減でき、作業の効率化に大きく貢献すると考えられる。さらに、識別から漏れた地震、あるいはノイズ、発破についても順次目視確認の上で、それぞれの分類結果に対応したプレート震源に追加していくことで、ノイズや発破の分類等においてさらなる効率化に寄与することが期待できる。

謝辞

本論文を作成するにあたって、気象研究所の勝間田明男室長と小林昭夫室長からのコメントは大変参考になりました。本論文の改善には、東田進也博士と森脇健氏の2名の査読者と、編集長の鎌谷紀子博士、編集委員の上野寛氏のご意見が大変参考となりました。本研究では、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、国立研究開発法人防災科学技術研究所、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国土地理院、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、国立研究開発法人海洋研究開発機構及び気象庁の地震波形と、その波形を気象庁と文部科学省が協力してデータを処理した一元化震源を使用しました。図の作成には横山(1997)の震源表示プログラム(hypdsp)とWessel and Smith(1998)のGeneric Mapping Toolsを使用しました。

文献

気象庁: 地震月報(カタログ編)利用の手引き,
http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/catalog/notes_j.html, (参照2017-04-03).
 清本真司・溜渕功史・足達晋平・上野寛・森脇健・塩津安政・横田崇(2013): 地域地震センターデータ処理シ

- システム (REDC) における自動震源処理とその結果について, 験震時報, **77**, 15-29.
- 斎藤正徳 (1978): 漸化式デジタルフィルターの自動設計, 物理探鉱, **31**, 240-263.
- 高濱聡・廣田伸之・山田尚幸・鎌谷紀子・橋本徹夫 (2016): 気象庁地震カタログの改善—改善後の処理状況など—, 日本地震学会講演予稿集, 2016 年度秋季大会, S09-P18.
- 溜瀧功史・森脇健・上野寛・束田進也 (2016): ベイズ推定を用いた一元化震源のための自動震源推定手法, 験震時報, **79**, 1-13.
- 森脇健 (2017): Matched Filter 法を用いた西南日本の深部低周波地震の自動検出, 験震時報, **81**, 3.
- 横山博文 (1997): X ウィンドウシステムを用いた地震活動解析プログラム, 験震時報, **60**, 37-51.
- Gibbons, S. J., and F. Ringdal (2006): The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation, *Geophys. J. Int.*, **165**, 149-166.
- Menke, W. (1999): Using waveform similarity to constrain earthquake locations, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **89**, 1143-1146.
- Nakahara, H. (2004): Correlation distance of waveforms for closely located events: 1. Implication of the heterogeneous structure around the source region of the 1995 Hyogo-Ken Nanbu, Japan, earthquake ($M_w = 6.9$), *Geophys. J. Int.*, **157**, 1255-1268, doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02278.x.
- Nakamura, W., N. Uchida, and T. Matsuzawa (2016): Spatial distribution of the faulting types of small earthquakes around the 2011 Tohoku-oki earthquake: A comprehensive search using template events, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **121**, 2591-2607.
- 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 S. Ide (2007): Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms, *Nature*, **446**, 305-307.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith (1998): New, improved version of Generic Mapping Tools released. *EOS Trans. AGU*, **79**, 579.

(編集担当 上野寛)