

## 11 - 3 機械学習を併用した自動震源決定による微小地震の検出

**Detection of micro-earthquakes by automatic hypocenter determination combined with machine learning**

溜瀧 功史・工藤 祥太\*・下條 賢梧\* (気象庁気象研究所) (\*気象庁)

TAMARIBUCHI Koji, KUDO Shota\*, and SHIMOJO Kengo\* (Meteorological Research Institute)

(\*Japan Meteorological Agency)

気象庁が文部科学省と協力して一元的に処理を行っている一元化震源では、平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震以降、膨大な地震が発生したため、余震域において海域  $M \geq 3$ 、陸域  $M \geq 2$  の処理  $M$  下限を設けた。そのため、それ未満の微小地震は未だ十分にカタログ化されていない。これらの未カタログ地震を検出するため、これまで同時多発地震に対応した自動震源決定手法 (PF 法)<sup>1)</sup>を開発し、2011 年 3 月以降の長期間の地震波形に適用を試みてきた<sup>2)</sup>。しかし、自動震源には数~10% 程度のノイズ等による誤検出が含まれるため、微小地震の検出数を維持したまま誤検出を効率的に低減することが課題だった。近年、深層学習手法の地震学への適用が進み、深層学習アプローチによる地震波検出等が数多く提案されている。そこで、それらの技術を PF 法の自動震源決定に取り入れ、自動震源決定の更なる精度向上を行った。

データは 2011 年 3 月から 2012 年 2 月までの 1 年間の地震波形、約 1400 地点を解析に用いた。自動震源決定は、(1) 地震波検出、(2) 相組合せ探索 (phase association)、(3) 震源計算、(4) 品質管理の主に 4 つのプロセスからなる。(1) 相読み取りは AR-AIC 等の従来の検出手法を用いて検出した後、検出時刻周辺 4 秒間の 3 成分地震波形を畳み込みニューラルネットワーク (CNN) に入力して、P/S/N 確率を得る。モデルは工藤・他 (2023)<sup>3)</sup> の約 90 万波形で学習したモデルを使用した。P/S/N 確率のいずれかが閾値以上の場合、それぞれ  $\pm 2$  秒間に検出されたそれ以外の相を削除した。閾値は 0.9 とした。例えば P 確率 0.9 以上の場合、 $\pm 2$  秒以内の S 相を削除した。以下、このプロセスを CNN デノイザという。(2) 重点サンプリングを用いて最適な相の組合せを探索し (PF 法)、(3) 震源決定は気象庁一元化震源と同じプログラム<sup>4),5)</sup>を用いた。(4) 品質管理では、震源検出値の各種特徴量 (震源誤差、P/S 検出値数等) を入力とし、教師あり学習の一つである LightGBM により品質ラベル分類を行った。教師データは溜瀧・中川 (2020)<sup>2)</sup> で作成した自動地震カタログ (3 月 1 日~16 日の約 2 万イベント) を目視で波形を確認し、4 つのラベルに分類した (A: 震源近傍で誤検出がない、B: 誤検出数が 1~2 つ、C: 誤検出数が 3 つ以上、D: ノイズ)。検出値だけからは、ラベル A, B, C の判別ができず全体の正答率は 81.9% だが、ラベル A, D に限って正答率を算出すると 97.8% であった。

CNN デノイザの効果を検証するため、地震多発時 (3 月 11 日 12-24 時) と平常時 (3 月 1 日 0-12 時) のそれぞれ 12 時間の自動震源を、震源時 5 秒以内かつ震央距離 50 km の条件で一元化震源と比較した (第 1 図)。その結果、相読み取りの総数は地震多発時も平常時もともに約 3 割削減されたにも関わらず、一元化震源と一致する自動震源の数はほぼ変わらなかった。これはノイズの誤検出を適切に除去できていることを示している。

2011 年 3 月の期間に得られた自動震源は、112,004 個であった。CNN デノイザ前後の震源分布を比較すると、島しょ部などで従来見られた誤検出が抑制されている (第 2 図)。品質管理処理による分類結果を第 1 表に示す。CNN デノイザ導入前後の個数比は A: -4% であるのに対して D: -78%

などとなり、誤検測がないラベル A もわずかに減少したものの、誤検測を含むラベル B, C, D を大きく減らすことができた。得られたラベル A, B の自動震源のうち、一元化震源カタログと一致しない（すなわちカタログ未掲載）の地震は 67,438 個であった。一元化震源は本期間で 55,112 個（低周波フラグ除く）だったので、両者をマージすることで従来の倍以上の地震数が得られた。同様に、2011 年 3 月から 2012 年 2 月までの長期間に適用した結果、一元化震源は 320,427 個（低周波フラグ除く）だったのに対して、マージ震源は 937,140 個となり、従来のカタログの約 2 倍に相当する 61 万個の微小地震活動を新たに検出した。

自動震源（品質管理ラベル A, B）を一元化震源にマージしたカタログの規模別頻度分布を第 3 図に示す。地域別にみると、多くの領域で Mc (completeness magnitude) が低下した。特に、秋田県などの東北地方の内陸では最大約 8 倍の震源数となった。DD 法<sup>6)</sup>でこれらの地域の相対震源決定を行うと、より詳細なクラスタ分布を見ることができる（第 4 図）。また、2011 年 3 月 12 日 3 時 59 分に長野県北部で発生した M6.7（最大震度 6 強）の地震が発生した領域では、M6.7 の地震に先行して 3 月 11 日 14 時 46 分以降に微小地震が 86 個決定された。このように、新たに検出された微小地震は、より詳細なクラスタ分布や微小な前震活動の把握などに貢献する。

（溜渕 功史）

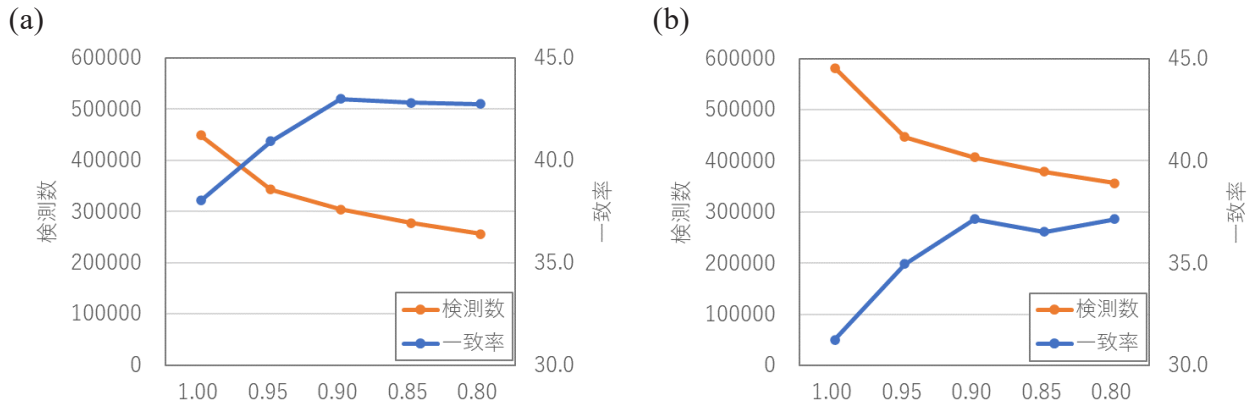
TAMARIBUCHI Koji

#### 謝辞

防災科学技術研究所，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，産業技術総合研究所，国土地理院，海洋研究開発機構，青森県，東京都，静岡県，横浜市，神奈川県温泉地学研究所，および気象庁の地震波形を使用しました。解析には東京大学地震研究所共同利用 (2022-F3-12) 大規模地震連続波形データ解析システムを利用しました。一元化震源を使用しました。

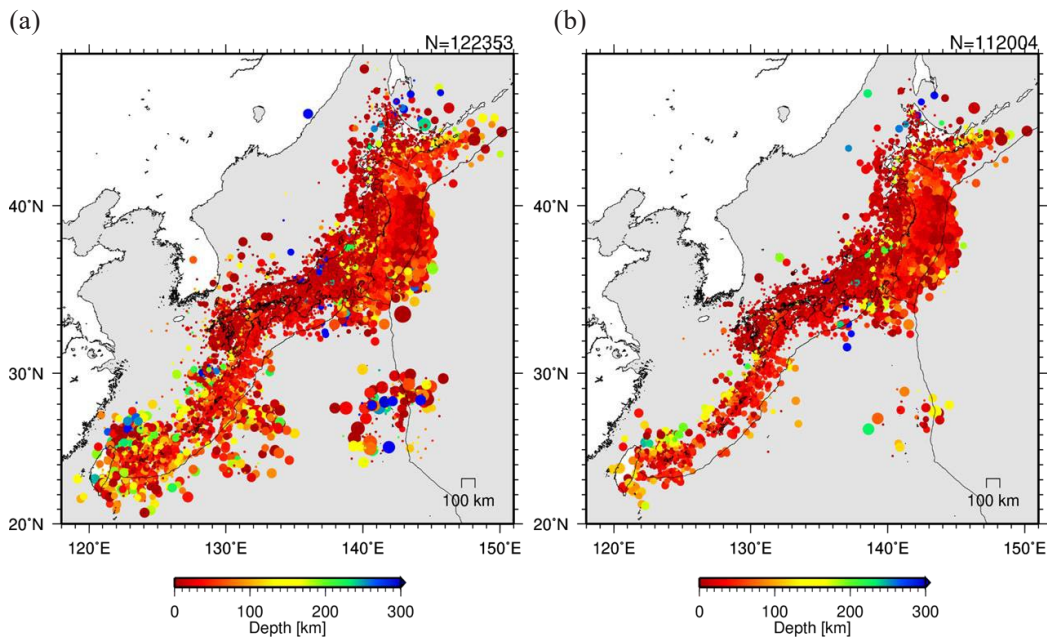
#### 参考文献

- 1) Tamaribuchi (2018), *Earth Planets Space*, **70**, 141.
- 2) 溜渕・中川 (2020), *験震時報*, **83**, 3.
- 3) 工藤・他 (2023), *験震時報*, **86**, 4.
- 4) 浜田・他 (1983), *験震時報*, **48**, 35-55.
- 5) 上野・他 (2002), *験震時報*, **65**, 123-134.
- 6) Waldhauser and Ellsworth (2000), *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **90**, 1353-1368.
- 7) Woessner and Wiemer (2005), *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **95**, 684-698.



第 1 図 CNN デノイザ閾値を変えたときの地震波検測数と自動震源の決定数うち一元化震源との一致した震源数の割合。(a) 2011 年 3 月 1 日 00 時～12 時, (b) 2011 年 3 月 11 日 12 時～24 時。一致とみなす基準は一元化震源と比較して、震源時 5 秒以内かつ震央距離 50km 以内の自動震源の個数。

Fig. 1 Number of phase picks and percentage of the number of automatically determined hypocenters coinciding with the JMA unified catalog when the CNN denoiser threshold is changed. (a) 00:00-12:00, March 1, 2011; (b) 12:00-24:00, March 11, 2011. The criterion for matching is the number of automatically determined epicenters within 5 seconds of the origin time and within 50 km of the epicentral distance compared with the JMA unified catalog.



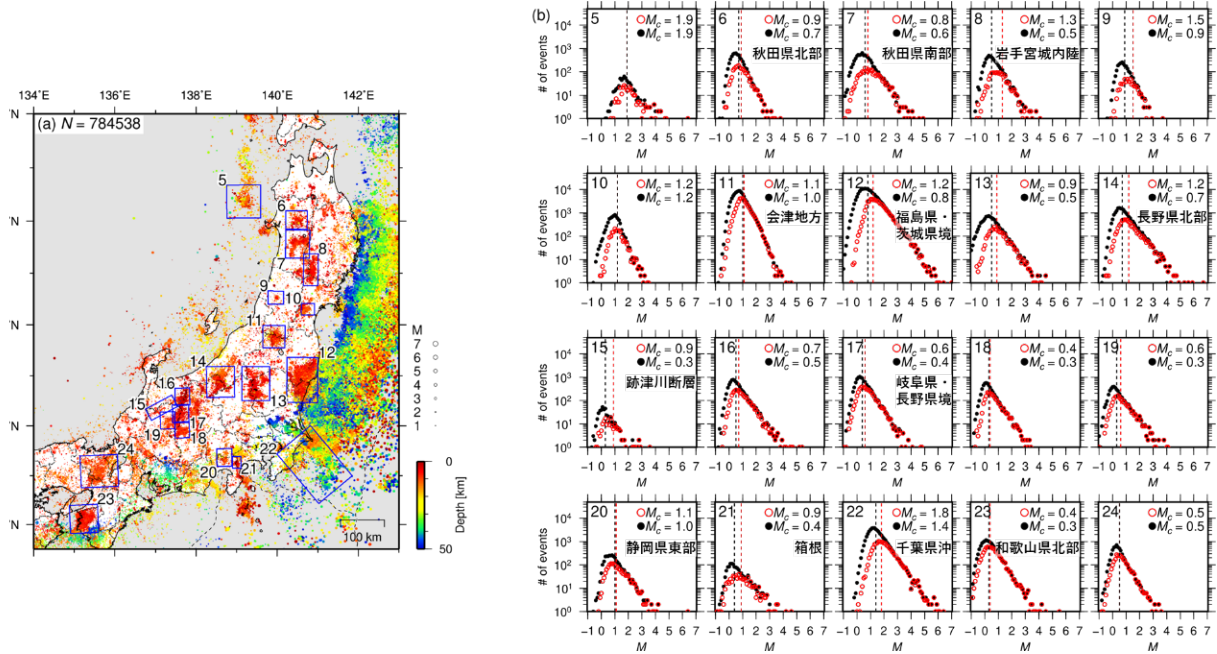
第 2 図 自動震源の比較。2011 年 3 月 1 日～3 月 31 日, M 全て, 誤決定を含む。(a) 従来手法 (溜淵・中川, 2020), (b) CNN デノイザ後の分布。

Fig. 2 Comparison of automatically determined hypocenters, March 1 - March 31, 2011, M all, including false detections. (a) conventional method (Tamaribuchi and Nakagawa, 2020), (b) distribution after CNN denoiser.

第 1 表 CNN デノイザ導入前後の自動品質管理結果の比較

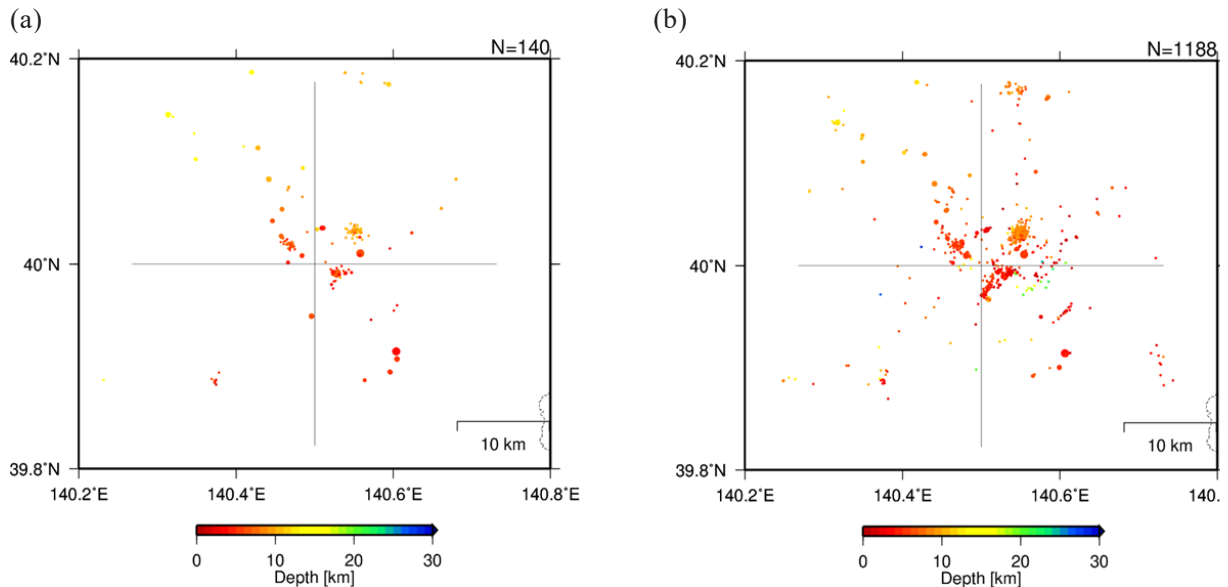
Table 1 Comparison of automatic quality control results before and after the CNN denoiser.

	A	B	C	D
CNN デノイザ導入前	104253	7545	6848	3707
CNN デノイザ導入後	100265	5882	5055	802
差	-3988	-1663	-1793	-2905
割合 (%)	-3.8	-22.0	-26.2	-78.4



第 3 図 (a) 自動震源と一元化震源をマージしたマージ震源の震央分布図。2011 年 3 月 1 日から 2012 年 2 月 29 日，深さ 0–50 km，M 全て。(b) (a) の各領域の規模別頻度分布図。赤色は一元化震源，黒色はマージ震源。 $M_c$  は MAXC+0.2<sup>7)</sup> による。

Fig. 3 (a) Epicentral distribution of the merged catalog, March 1, 2011–February 29, 2012, depth 0–50 km, M all. (b) Frequency magnitude distribution for each region in (a). Red indicates the JMA unified catalog, black indicates the merged catalog.



第 4 図 秋田県北部 (第 3 図の領域 6) の震源分布図 (拡大図)。2011 年 3 月 1 日から 4 月 30 日，深さ 0–30 km，M 全て。(a) 一元化震源 (K フラグ)，(b) マージ震源 (K フラグ及び品質管理ラベル A) の DD 法再決定分布。

Fig. 4 Enlarged epicentral distribution in northern Akita Prefecture (area 6 in Fig. 3), March 1–April 30, 2011, depth 0–30 km, M all. (a) The JMA unified catalog (K flag), (b) the merged catalog (K flag and QC label A) redetermined by the DD method.