

有感記録ならびに震度の距離減衰式に基づく歴史時代の地震活動解析に 向けて—気象庁震度データベースを用いた予察的検討—

公益財団法人地震予知総合研究振興会* 石辺 岳男・松浦 律子・古村美津子・赤塚 真弓・岩佐 幸治・田力 正好

東京大学地震研究所 佐竹 健治

東京大学史料編纂所 榎原 雅治

Toward Seismicity Analyses in Historical Period Using Felt Reports and Attenuation Relation of Seismic Intensity

- Preliminary Analysis Using the Japan Meteorological Agency Seismic Intensity Database -

Takeo ISHIBE, Ritsuko S. MATSU'URA, Mitsuko FURUMURA, Mayumi AKATSUKA, Koji IWASA, Masayoshi TAJIKARA

Association for the Development of Earthquake Prediction,
Chiyoda Build. 8F 1-5-18, Kanda-Sarugakucho, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-0064, Japan

Kenji SATAKE

Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0032, Japan

Masaharu EBARA

Historiographical Institute, the University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033, Japan

Can felt reports of historical documents be used to estimate the source of large earthquakes? In this study, we show that the source region of large earthquakes can be imaged from the spatial distribution of felt reports for three recent large earthquakes (The Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004, The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008, and 2011 Fukushima Hama-dori Earthquake) from felt reports by using the seismic intensity database from the Japan Meteorological Agency (JMA). For the case of the 2004 and 2008 earthquakes, number of aftershocks with felt reports decreases with increasing distances at epicentral distance <100 km of the mainshock. For the case of the 2011 earthquake, the number of aftershocks with felt reports fluctuated even within 100 km from the mainshock, because of the aftershocks of the 2011 Tohoku-oki earthquake. The areas imaged from the number of felt reports were well concordant with aftershock area following these mainshocks as long as the station coverage was retained. Our results imply the possibility that the source region of large historical earthquakes can be constrained by compiling felt reports documented in historical literature and constructing a database.

Keywords: Felt Reports, Seismic Intensity Database, The Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004, The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008, The 2011 Fukushima Hama-dori Earthquake.

§ 1. はじめに

日本では過去 1000 年以上にわたる豊富な史料が残されており、主に史料に記述された被害から推定される震度分布に基づき、歴史地震の震源域が推定されてきた [例えば、宇佐美・他 (2013)]. また、これらに基づき、例えば南海トラフ沿いの海溝型大地震が繰り返し発生してきたことが明らかにされ [例えば、石橋・佐竹 (1998)], 震度インバージョン解析から過去

の南海トラフ沿い大地震の短周期地震波発生域の推定がなされてきた [神田・他 (2004)]. さらに、これらの情報は、活断層や海溝型地震の長期評価や強震動評価等の予測や防災・減災に活用されてきた [例えば、地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2017); 松浦・田力 (2018)].

一方で、史料に記述された被害に基づく歴史地震の震源域の推定には以下の問題点が挙げられる。ま

* 〒101-0064 東京都千代田区神田猿樂町 1-5-18 千代田ビル 8F
電子メール: ishibe@erc.adeq.or.jp

ず、副次的な津波や火災、地すべり等が被害の主要因であるため、地震動による被害を詳細に把握することが困難な歴史地震が少なくない。例えば弘化四年(1847年)に発生した善光寺地震は地震動による家屋の倒潰に加え、地震後に発生した火災や斜面の崩落、崩落により形成された堰止湖の決壊による水害という複合災害であった。また、被害は当時の人口分布に依存するため、被害に基づいて推定された震源域は人口密集域に偏って分布している可能性がある。さらに、被害は建築物の耐震性や経年劣化、表層地盤条件に強く支配される傾向がある。1830年文政京都地震では、重量のある葺瓦屋根が普及し耐震性が低下したことによって、被害が拡大した可能性が示されている[西山(2010)]。

史料には、被害記述の他に、有感であった記録が残されていることがある。これらは大半が発生日時とともに「地震」とだけ記述されたものだが、中には毎日の有感地震数やその震度等を詳細に記録したものが存在する。史料中の有感地震記述に基づき、南海トラフ沿いのプレート間巨大地震の前後に近畿中北部では地震活動期を迎えることが指摘されている[例えば尾池(1996)]。また、1861年文久宮城地震の発生前に、地震活動の静穏化があった可能性が示唆されたり[松浦・都司(2010)]、小田原地震と関東地方の有感地震の変化について論じられたりしている[都司・日野(1992)]。佐竹(2002)は、東北・関東の史料から江戸時代の千島海溝の地震活動の推定を試みている。松井・尾池(1997)は、有感余震数の分布を用いた歴史地震の震央決定を試みている。最近では、均質な地震活動解析に向けて、江戸時代の長期間にわたって地震を記録している藩日記と気象庁震度データから過去350年間程度の江戸・東京における有感地震数が纏められている[Satake and Ishibe(2020)]。しかしながら、これらの先行研究を除くと、史料中の有感記述は、歴史地震の震源域推定や歴史時代の地震活動解析に十分に活用されてきたとは必ずしも言い難い。

大地震が発生すると数多くの余震が発生し、その数は時間とともに徐々に減少する。有感地震数は、本震からの経過時間ならびに震源域からの距離に依存するため[Omori(1894); Utsu *et al.*(1995)]、史料中における有感地震数およびその時空間的な推移に基づき、歴史地震の震源域を制約することができる可能性がある。

2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0:以下、東北沖地震と略記する)の発生後には、震源域における非常に活発な余震活動に加えて、日本各地で顕著な地震活動変化が報告されている[例えば、Hirose *et al.*(2011); Ishibe *et al.*(2011, 2015, 2017); Matsu'ura *et al.*(2017)]。史料から抽出される有感地震数の増減から、歴史時代の地震活動変化や誘発地震・群

発的活動の発生を復元できる可能性がある。

近年、日記史料等から歴史時代の有感記録が抽出され、そのデータベース化が進められている[例えば、Nishiyama *et al.*(2017)]。また、既往の距離減衰式に比べ、より広範な距離に対して適用可能な震度の距離減衰式が構築されている[Matsu'ura *et al.*(2020)]。

そこで本研究では、史料中に記述された有感地震ならびにその時間的推移に基づき、歴史時代の地震活動を復元し、歴史地震の震源域を推定する新たな手法の構築を目的とする。その手始めとして、震度の距離減衰式ならびに気象庁震度データベースを用いて、近年に発生した3つの大地震(2004年新潟県中越地震(気象庁マグニチュード(M_{JMA})6.8)、2008年岩手・宮城内陸地震(M_{JMA} 7.2)、2011年福島県浜通りの地震(M_{JMA} 7.0))(図1)を対象に、有感地震数からどの程度、震源域を推定できるのかについて予察的検討を行った。また、既に報告されている近年の地震活動変化が有感記録にどのような変化を及ぼすのかについて検討し、歴史時代の地震活動復元の可能性について考察した。

§2. 気象庁震度データベースを用いた有感地震数の変化と地震活動変化との対応

気象庁は、1919年以降(2020年11月現在)の地震について報告された震度をデータベース化・公開しており[例えば、石垣・高木(2000)]、1996年4月以降は計測震度の導入によって0.1刻みで震度が記録されている。また、明治・大正期の計器観測時代初期の地震に対する震度に関しても整理されている[石垣(2007)]。本研究では、気象庁震度データベースを用い、既往研究によって報告されている様々な地震活動変化(大地震の発生、地震活動の活発化(群発的地震活動を含む)・静穏化等)が有感地震数の時空間的特徴に及ぼす影響について調査した。具体的には、それぞれの観測点において有感となった地震の震源情報を整理し、その累積頻度ならびに1か月あたりの有感地震数等を描画した。

有感地震数の時空間的な変化を定量的に議論するためには、ほぼ漏れなく観測されている震度を見積もる必要がある。計測震度が導入された以降の期間(2000~2010年)に発生した有感地震に対する計測震度の頻度分布(図2)からは、震度2以上では地震の規模別頻度分布と同様に冪乗則に概ね従っているが、震度1の範囲では冪乗則からの乖離が明瞭に認められる。これから、震度データベースは震度1を完全にカバーしていない可能性が示唆される。一方で、佐竹(2002)は、「江戸時代の年平均地震回数を、気象庁の震度毎の回数と比較すると、弘前と東京での

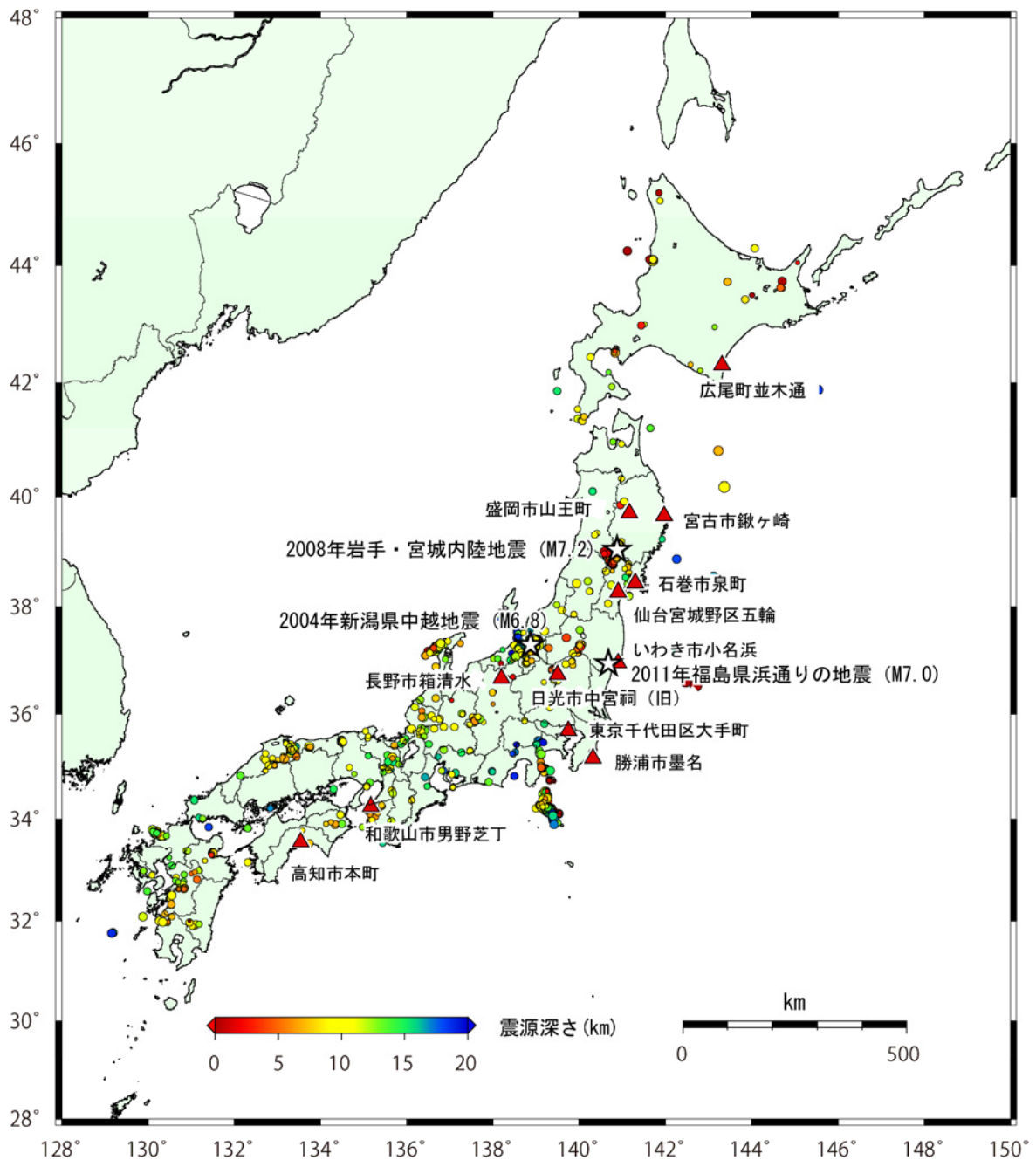


図 1. 本研究で対象とした 3 つの地殻内大地震(星印)ならびに有感地震数の再現性の検証に用いた最大震度 3 以上を観測した浅発地震の震源分布(丸印). 三角は図 3 において有感地震数のヒストグラムと累積頻度曲線を示した観測点の位置を表す.

Figure 1. Three target earthquakes (open stars) and shallow earthquakes with the maximum seismic intensity ≥ 3 (filled circles) that are used to validate the reproducibility of the felt report number in this study. Filled triangles indicate the observation stations that the histogram and cumulative frequency curve of felt reports are shown in Figure 3.

年平均地震回数はほぼ震度 2 以上に、盛岡と八戸では震度 3 程度に対応する。ただし、江戸時代のデータは地震の回数ではなく日数(1日に数回あるものも1つと数えた)であること、江戸時代については記録の

欠落による欠測期間があることを考慮すると、江戸時代の記録はほぼ震度 2 以上をもれなく記録していると判断される。」としている。これらに基づき、本研究では歴史地震研究への適用を鑑み、震度 2 以上の有

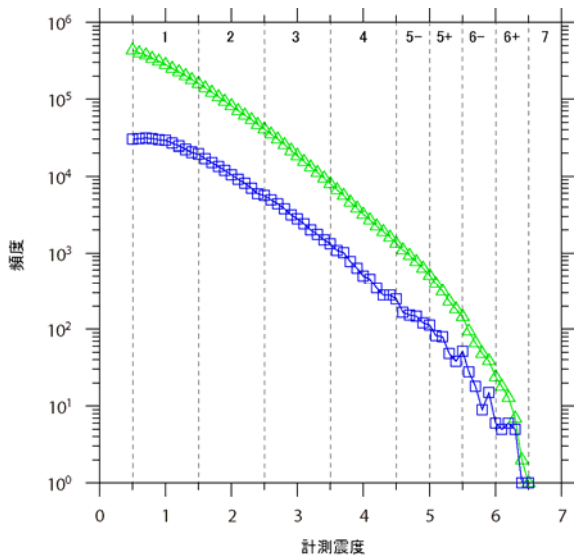


図 2. 気象庁震度データベース(2000 年~2010 年)における計測震度の頻度分布(三角:累積度数, 四角:離散度数).

Figure 2. Frequency distribution of instrumental seismic intensities in 2000-2010 from JMA seismic intensity database (triangles: cumulative, squares: discrete).

感記録を用いた。

図 3 に全国の 12 観測点における、1 ヶ月あたりの有感地震数(震度 2 以上)のヒストグラムと有感地震数の累積頻度曲線を示す。大地震の震源域近傍における観測点では、その余震活動に伴い、有感地震数に顕著な突出ならびに場合によっては緩やかな時間的減衰が見られる。例えば、いわき市小名浜(図 3f)では、1938 年福島県東方沖地震に伴う余震活動に対応すると考えられる突出が、日光市中宮祠(旧)(図 3g)では 1949 年今市地震の余震と対比される突出が見られる。また、盛岡市山王町(図 3b)、宮古市鉾ヶ崎(図 3c)、石巻市泉町(図 3d)、仙台宮城野区五輪(図 3e)など、東北地方太平洋沿岸域の観測点では、2011 年東北沖地震の発生に伴う活発な余震活動とその緩やかな時間的減衰が明瞭に見られる。

2011 年東北沖地震後に東北地方内陸で活発化した群発的活動では、近傍の観測点で有感地震数の増加が認められる一方で、その周辺の観測点では増加の程度が小さい傾向が見られた。また長野市箱清水(図 3h)では、1965 年 8 月に始まった松代群発地震に対応する顕著な突出が見られた。これらの局所的に突出した有感地震数は、群発的活動の発生を示唆するものであり、将来的に歴史時代の有感記録がデータベース化された際に、群発的活動等を検出できる可能性がある。

2011 年東北沖地震の発生前には、その震源域で地震活動が長期的に静穏化したことが報告されている[例えば、Katsumata (2011a)]. 宮古市鉾ヶ崎(図

3c)等の観測点では、1990 年代半ばから後半以降にかけて、有感地震数の顕著な減少が見出された(図 3). この減少は 1994 年三陸はるか沖地震に関連する可能性とともに、2011 年東北沖地震に先立つ地震活動の静穏化と対比される可能性がある。2003 年十勝沖地震に対しても、1999 年初頭から本震が発生するまでの 5 年間程度、震源域ならびにその近傍において地震活動が静穏化したことが報告されている[Katsumata (2011b)]. 1990 年代後半から十勝沖地震発生までの期間の、広尾町並木通(図 3a)等における有感地震数の低下は、この静穏化に対比される可能性がある。

房総半島沖のフィリピン海プレートの沈み込み境界では、モーメントマグニチュード(Mw)6.4~6.7 程度、継続期間が 10~30 日程度の群発地震活動を伴うスロースリップイベント(以下、SSE)が数年程度の間隔で繰り返し発生してきたことが、傾斜計や GNSS データ等から明らかにされてきた[例えば、Hirose *et al.* (2012)]. しかしながら、1970 年代以前の発生履歴については良く分かっていない。房総沖 SSE の発生域に近い勝浦市墨名(図 3j)では、上記の継続期間と調和的な有感地震数の突出が、1923 年以降 1980 年以前の期間についても 1929 年 3 月下旬、1933 年 11 月、1937 年 10 月、1939 年 3 月、1942 年 5 月、1951 年 12 月、1966 年 7 月、1971 年 6 月、1977 年 6 月などに見出され、これらの期間に房総沖 SSE とそれに伴う群発地震活動が発生した可能性が示唆された[石辺・他 (2018)]. 計測震度の導入などに伴い、有感地震数の時間変化が見かけ上生じた可能性について検討する必要があるが、既に報告されている地震活動の変化と対比される有感地震数の変化は、その時空間的の分布に基づいて地震活動を復元できる可能性を示唆する。

計器観測時代と歴史時代の地震活動には相違があるものの、ある観測点で有感となった地震の震源分布と震源距離(或いは震央距離)に対する累積頻度分布(或いは確率分布)の把握は、その付近で記述された日記史料に記述されている有感地震の範囲について、一つの判断材料となりうる。Satake and Ishibe (2020) では、東京千代田区大手町において震度 2 以上となった地震の震源分布ならびに震央距離に対する累積確率分布を示し、およそ 60%の地震が震央距離 100 km 以内の関東地方で発生した地震によるものであることを示した。図 4 には、上記の勝浦市墨名観測点において有感となった地震の震源分布ならびに震央距離に対する累積確率をそれぞれ示す。勝浦市墨名観測点において有感となった地震の多く(およそ 70%)は、震央距離 100 km 未満に分布し、先述の房総沖 SSE に伴う群発的地震活動に加え、銚子付近あるいは千葉県北西部の地震活動が活発な領域で発生した地震も含まれる。

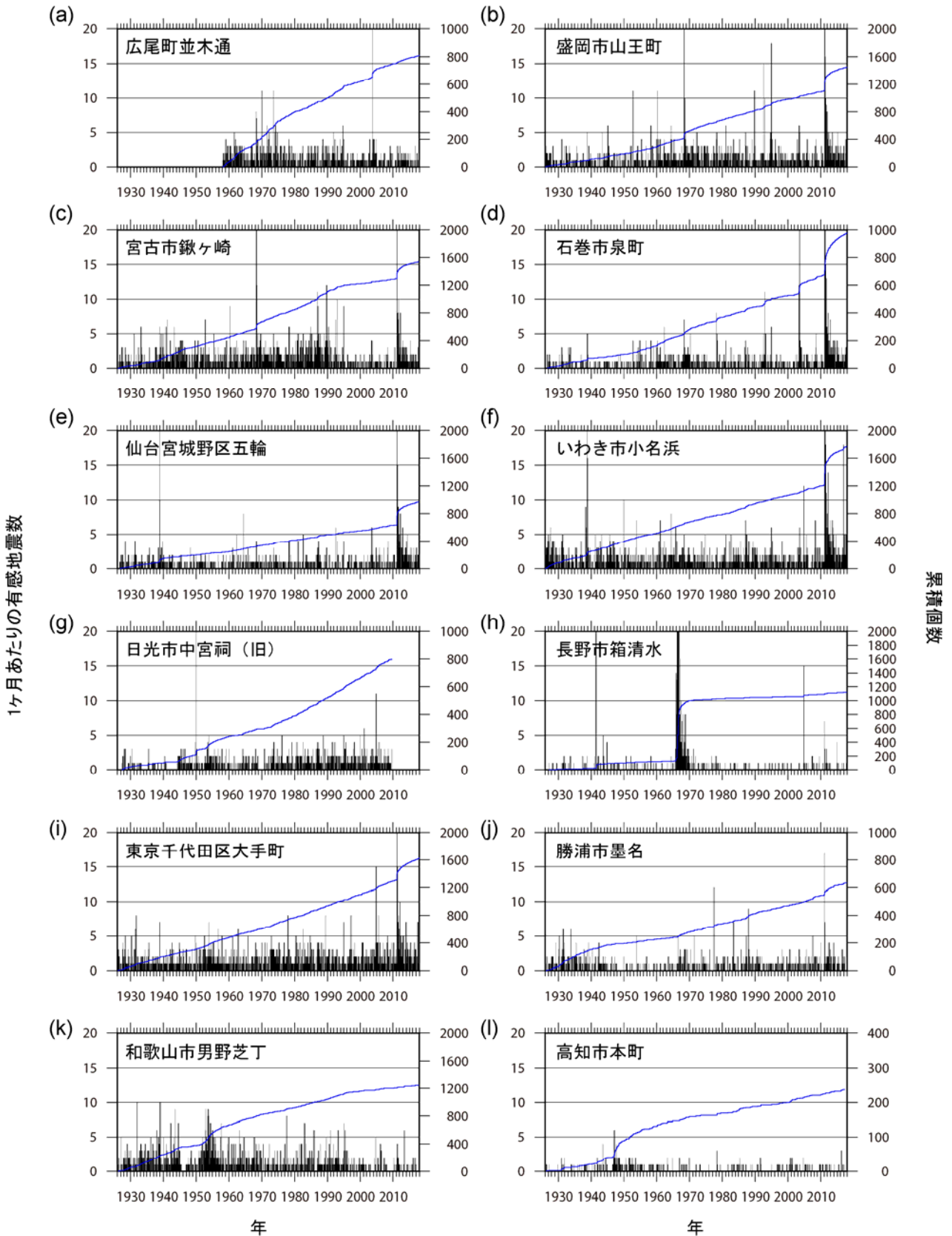


図 3. 1 ヶ月あたりの有感地震数(震度 2 以上)のヒストグラム(左縦軸)と有感地震数の累積頻度曲線(青線; 右縦軸)の例. 観測点の位置を図 1 に示す.

Figure 3. Histogram of felt reports with seismic intensity ≥ 2 in each month (left axes) and cumulative frequency curve (right axes) for the observation stations. The locations of observation stations are shown in Figure 1.

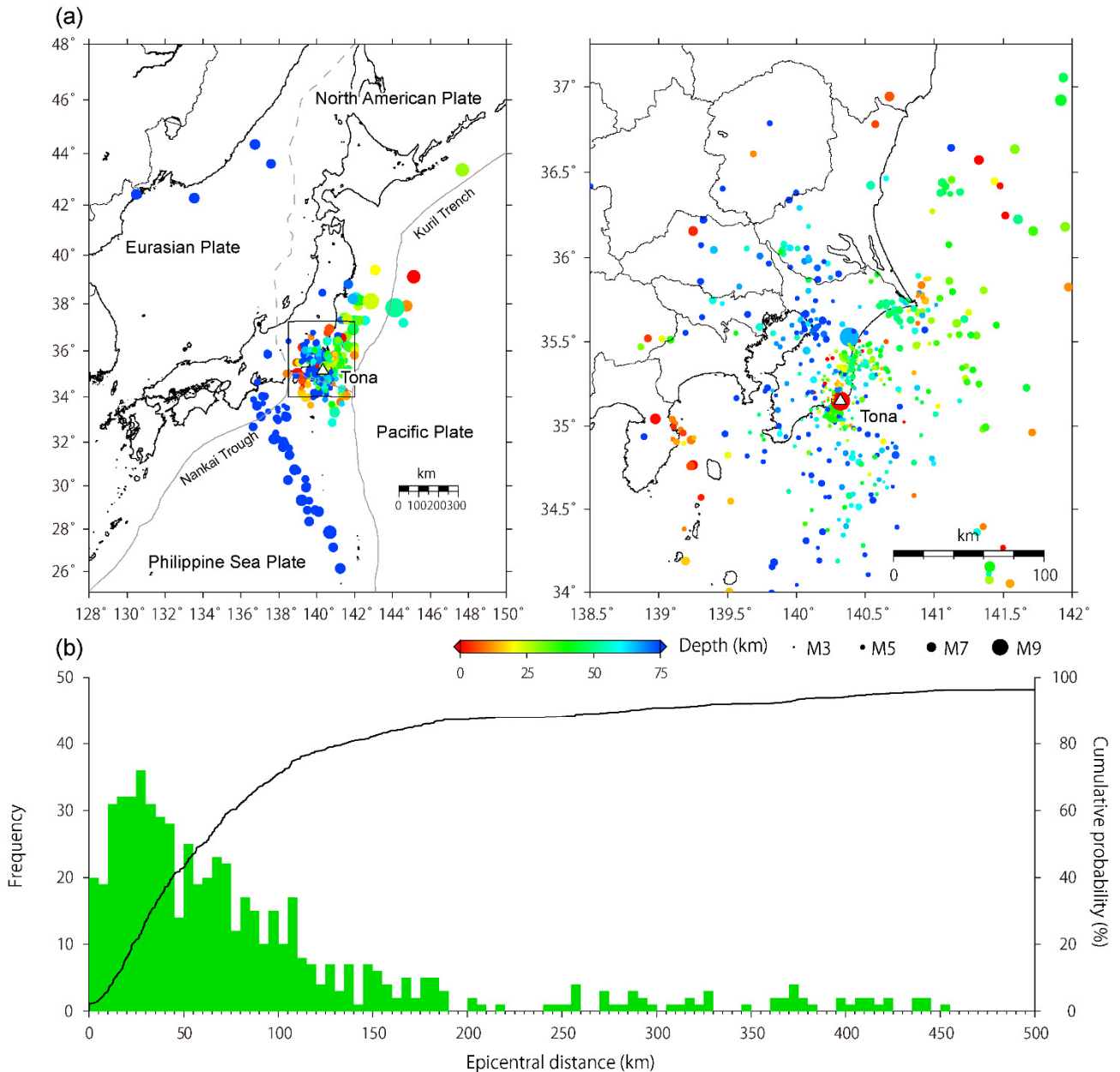


図 4. (a) 勝浦市墨名観測点において有感となった地震の震源分布 (気象庁震度データベースによる). (b) 勝浦市墨名観測点において有感となった地震の震央距離のヒストグラム (左縦軸) ならびに累積確率 (右縦軸).

Figure 4. (a) (Left) Epicenters, depths, and magnitudes of earthquakes that were felt at the Katsu'ura (Tona) station between 1926 and 2017 according to the Japan Meteorological Agency (JMA) seismic intensity database. (Right) The closed-up figure in the Kanto region shown by the rectangle in the left panel. (b) Frequency distribution (bars and left axis) and cumulative probability (curve and right axis) of felt reports at the Katsu'ura (Tona) station for different epicentral distances.

§ 3. 有感記録に基づく手法の構築と適用

3.1 震度の距離減衰式を用いた有感地震数の再現性の検証

史料に記述された有感記録に基づき地震活動を復元するためには、震度を再現する距離減衰式につ

いて検討し、観測された有感地震数を再現できることを確認する必要がある。そこで本研究ではまず、震源や規模が既知の地震について、Matsu'ura *et al.* (2020) による震度の距離減衰式を用いて、各震度観測点の震度を計算した。計算された震度に基づき、震度 2 以上の有感地震として記録される地震数の時空間分布を調べた。Matsu'ura *et al.* (2020) は、K-

NET ならびに KiK-net の観測記録を使用し、異常震域等による補正項として観測点下のプレート上面深度、地盤の影響として AVS30 を用い、以下の距離減衰式を構築した。なお、距離減衰式は震源タイプごとに Inter-Plate, Intra-Plate (フィリピン海プレート(2タイプ)・太平洋プレート), Very Shallow (VS) の5タイプに分類されているが、本研究では地殻内地震のみを対象とすることとし、Very Shallow (VS) に対する以下の式を用いた。

$$\begin{aligned} \text{INT} &= A_c + A_w M_w - b\Delta - \beta \log \Delta + D_{\text{AVS30}} \\ D_{\text{AVS30}} &= \{B_c + B_w(M_w \\ &\quad - 7.9)\} \log(\min[\text{AVS30}, 1000]) \end{aligned}$$

ここで、INT は計算震度、 M_w は地震のモーメントマグニチュード、 Δ は震源距離、AVS30 は表層 30 m の平均 S 波速度(m/s)、 A_c , A_w , b ならびに β は地震のタイプ毎に値が異なる係数、 B_c は 2015 年 5 月 30 日小笠原諸島西方沖の地震に対する結果で固定される係数、 B_w は全地震に対して共通の係数をそれぞれ表す(表 1)。気象庁の震度観測点における AVS30 については、防災科学技術研究所による地震ハザードステーション(J-SHIS)の 250 m メッシュにおける値を用いた。なお、この値は松岡・若松 (2008)による全国を対象として作成された地形・地盤分類 250mメッシュマップから推定されたものである。また、 M_{JMA} と M_w の変換式として、 $M_w = M_{\text{JMA}} - 0.3$ [内閣府 (2013)] を用いた。

2000 年から 2010 年までに深さ 20 km 以浅で発生し、最大震度 3 以上を観測した約 2300 の浅発地震を対象に、気象庁による震源位置ならびにマグニチュードを与え、各観測点における震度を上式によって計算した。そしてそれぞれの観測点において震度 2 以上となる回数を数え、実際に観測された有感地震数がどの程度、再現されるのか検証した(図 5)。また、それぞれの震度観測点において観測された震度と上式による計算震度の残差の平均値を算出した。

Matsu'ura *et al.* (2020) による距離減衰式は、既往の距離減衰式に比べ、震度の残差が小さくなることが示されているが [石辺・他 (2017)]、本研究からそれぞれの観測点において計算された残差の平均値は、多くの観測点において ± 0.5 以下となり、また観測された有感地震数の分布を概ね再現できることが示された(図 5)。ただし、2008 年岩手・宮城内陸地震や 2000 年伊豆諸島群発地震など、活発な地震活動が見られた地域において残差がやや大きくなり、有感地震数がやや過大に推定されている。これは主に小規模地震に対しても内閣府 (2013)による M_{JMA} と M_w の変換式を用いていることに起因すると考えられる。

3.2 有感記録に基づく大地震の震源域推定可能性の検討

有感記録ならびに震度の距離減衰式に基づく大地震の震源域推定の可能性を調べるため、近年に発生した 3 つの大地震(2004 年新潟県中越地震, 2008 年岩手・宮城内陸地震, 2011 年福島県浜通りの地震)を対象に予察的検討を行った。その手法の概要を図 6 に示す。まず、対象領域(北緯 $33^\circ \sim 42^\circ$, 東経 $136^\circ \sim 143^\circ$)にグリッド点を緯度・経度方向に 0.1° 刻みで配置し(図 6a), 各グリッド点において 1000 個の地震を発生させる。これらの地震の規模別頻度分布はグーテンベルク・リヒター則 [GR 則; Gutenberg and Richter (1944)] に従うと仮定する。これらの 1000 個の地震について、気象庁震度データベースに登録されている震度観測点での震度を計算し、有感(震度 2 以上)となる回数を算出した。なお、グーテンベルク・リヒター則の b 値として 1.0 を仮定した。各グリッド点について、上述のようにして算出した有感地震数と、上記の大地震発生後 1 か月間に観測された有感地震数との残差 R_j を以下の式により計算した。

$$R_j = \sum_i (\alpha_j n_{i,j}^{\text{syn}} - n_i^{\text{obs}})^2$$

ここで n_i^{obs} は、観測点 i で本震後 1 か月間に観測された有感地震数を、 $n_{i,j}^{\text{syn}}$ は、グリッド点 j において GR 則に従って 1000 地震を発生させた場合に、震度の距離減衰式から観測点 i で有感となる回数をそれぞれ表す。 α_j は各グリッド点で GR 則に従って生成した地震数と、実際に発生した地震数の相違を補正する係数であり、以下で表される。

$$\alpha_j = \frac{\sum_i n_{i,j}^{\text{syn}} n_i^{\text{obs}}}{\sum_i (n_{i,j}^{\text{syn}})^2}$$

異なる 2 点(東経:139.7 度, 北緯:37.5 度ならびに東経:140.5 度, 北緯:39.0 度)において GR 則に従って 1000 地震を発生させた場合の有感地震数の分布ならびに 2008 年岩手・宮城内陸地震による本震後 1 か月間の有感地震数との残差を図 6b に示す。東経:139.7 度, 北緯:37.5 度にグリッド点を配置した場合には、福島県・新潟県・山形県の観測点を中心に有感地震数が多くなるが、2008 年岩手・宮城内陸地震による有感地震数の分布とは顕著に異なり、その残差は 52687 となる。一方で、東経:140.5 度, 北緯:39.0 度にグリッド点を配置した場合には、秋田県南部, 山形県, 宮城県北部ならびに岩手県南部の観測点で有感地震数が多くなり、その残差も東経:139.7 度, 北緯:37.5 度によるものよりも小さい 34841 となる。

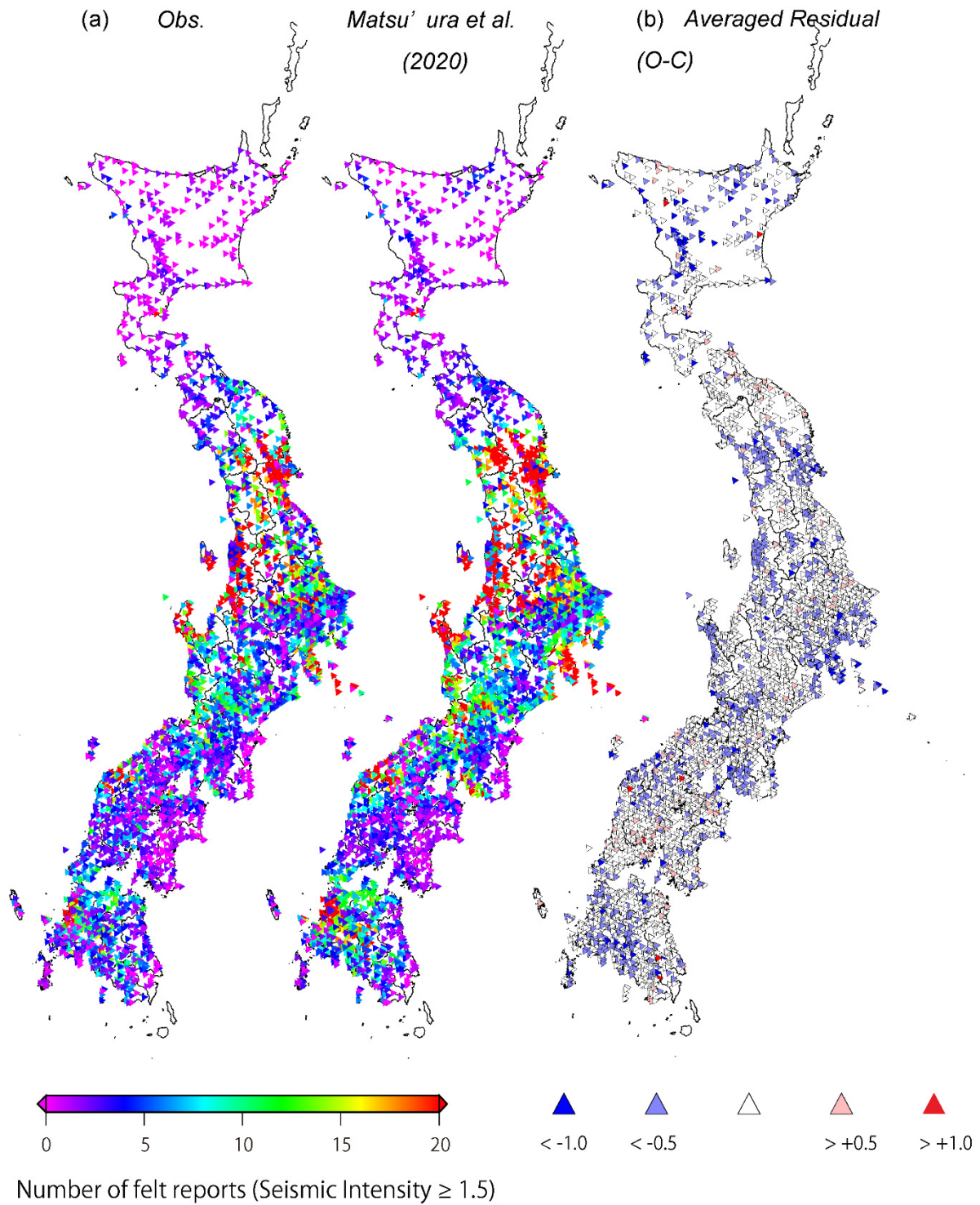


図 5. (a) (左) 2000 年～2010 年に発生した最大震度 3 以上を観測した浅発地震(図 1)による, それぞれの観測点における有感地震数の分布と, (右) 距離減衰式によって計算された有感地震数の分布の比較. (b) それぞれの観測点における震度残差(観測値 - 計算値)の平均値. 本図のカラー版は口絵 1 参照.

Figure 5. (a) Comparison of observed number of felt reports with synthetic number of felt reports obtained from ground motion prediction equation for very shallow earthquakes during 2000–2010 with the maximum seismic intensity ≥ 3 . (b) Averaged residual of seismic intensity (O-C) at each observation station. See Frontispiece 1 for the color version.

表 1. 地殻内地震に対する震度の距離減衰式の係数 [Matsu'ura et al. (2020)].

Table 1. Parameters of ground motion prediction equation for very shallow earthquakes [Matsu'ura et al. (2020)].

パラメータ	値
A_c	3.39
A_w	1.38
b	0.00230
β	2.46
B_c	-1.80
B_w	-0.159

このようにして各グリッド点における残差を計算し、残差が最小になったグリッド点における残差で規格化した規格化残差をマッピングした(図 6c).

図 7a ならびに 7b に各観測点において本震後 1 か月間に有感(震度 2 以上)となった回数(有感地震数)ならびにそれらの震源からの距離との関係をそれぞれ示す。2004 年新潟県中越地震ならびに 2008 年岩手・宮城内陸地震では、本震後 1 か月間の有感地震数は、震央距離 100 km 程度までは震央距離とともに減少する傾向が明瞭に見られる。一方で、100 km 以上離れた観測点における有感地震数は大きくばらつく傾向がみられ、これは減衰構造の不均質性や表層地盤の影響によるものと考えられる。このことは、今後の手法構築にあたり、これらの効果を適切に考慮する必要があることを示している。一方で、2011 年福島県浜通りの地震では、100 km より近い観測点でも有感地震数に大きなばらつきが見られ、これは東北沖地震後の非常に活発な余震の影響によるものと考えられる。

2004 年新潟県中越地震、2008 年岩手・宮城内陸地震、2011 年福島県浜通りの地震に対して計算された規格化残差の分布を図 7c に示す。図 7c には、本震後 1 か月間に発生した有感地震の分布をあわせて示している。2004 年新潟県中越地震ならびに 2008 年岩手・宮城内陸地震については、本震発生後 1 か月間の周辺域における地震活動が比較的低調であったために、規格化残差が小さい領域がそれらの震源域と良い一致を示し、規格化残差が最小(1)となるグリッド点も本震の震源にほぼ一致した。海域には観測点がないため、海域における制約が十分には効かないものの、規格化残差が小さい領域は概ね震源域に一致し、震源域がイメージングされている。一方で、2011 年福島県浜通りの地震の場合には、1 か月前に発生した東北沖地震による活発な余震の影響を受けており、実際に沖合で発生した地震によって各観測点で有感となった地震も多かったことから、沖合のグ

リッド点においても規格化残差が小さくなっている。

上記のように、震度観測点が稠密に展開されている現在では、本震後の有感地震数からその震源域をイメージングできる可能性が示された。一方で、歴史時代の有感記録への適用可能性を考えた場合、史料から有感を抽出できる地点(震度観測点)はより少ないことが想定される。そこで、観測点を無作為に 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 に間引いた場合に、その規格化残差の分布がどのように変化するか、調査した(図 8)。その結果、観測点密度が低くなるにつれて、規格化残差が小さい領域によってイメージングされる震源域は不明瞭になるものの、震源からみた観測点のカバレッジが保証され、また震源域近傍の有感地震数が突出している観測点がある場合には、観測点を間引いたとしても震源域がイメージングされることが確認された。これらの結果は、今後、史料から有感地震に対する記述が抽出、蓄積されていくことで、歴史地震の震源域を従来の本震による被害記述とは異なる視点から議論できる可能性を示唆する。

§ 4. おわりに

本研究では、僅かな先行研究を除きこれまで十分に活用されてきたとは言い難い史料中の有感記述を用いることで、歴史地震の震源域に制約を与える可能性について検討した。近年に発生した 3 つの大地震について気象庁震度データベースに記録された本震後 1 か月間の有感地震数を用いることで、観測点分布が保証され、また有感地震数が突出した観測点が存在する場合には観測点数が限られていても、震源域をイメージングできることを示した。また大地震発生前の地震活動の静穏化や、群発的地震活動の発生など、既に報告されている地震活動変化と対比される有感地震数の変化が気象庁震度データベースから見出された。このことは、有感地震数の時空間的特徴に基づいて歴史時代に発生した大地震の震源域を推定し、また地震活動を復元できる可能性を示唆する。

一方で、歴史地震への具体的な適用にあたっては、様々な課題が存在する。まず、現状の歴史地震研究は、基本的に本震による被害記述の抽出に重きが置かれており、本震前後の期間の有感記録を抽出した事例は限られる。本研究において予察的検討を行ったような手法を歴史地震に適用するためには、日時ならびに記述地点等を取り纏めた有感地震データベースの構築 [例えば、尾池 (1996); 宇佐美・渡邊 (2005)] が必須である。今後、史料に記述された有感記録を抽出・蓄積していくことで、従来の被害記述に基づく手法とは異なった視点から歴史地震の震源域を制約できる可能性がある。

地震活動解析には、地震カタログ(史料)に記録されている有感地震記述の品質(均質性・完全性)に

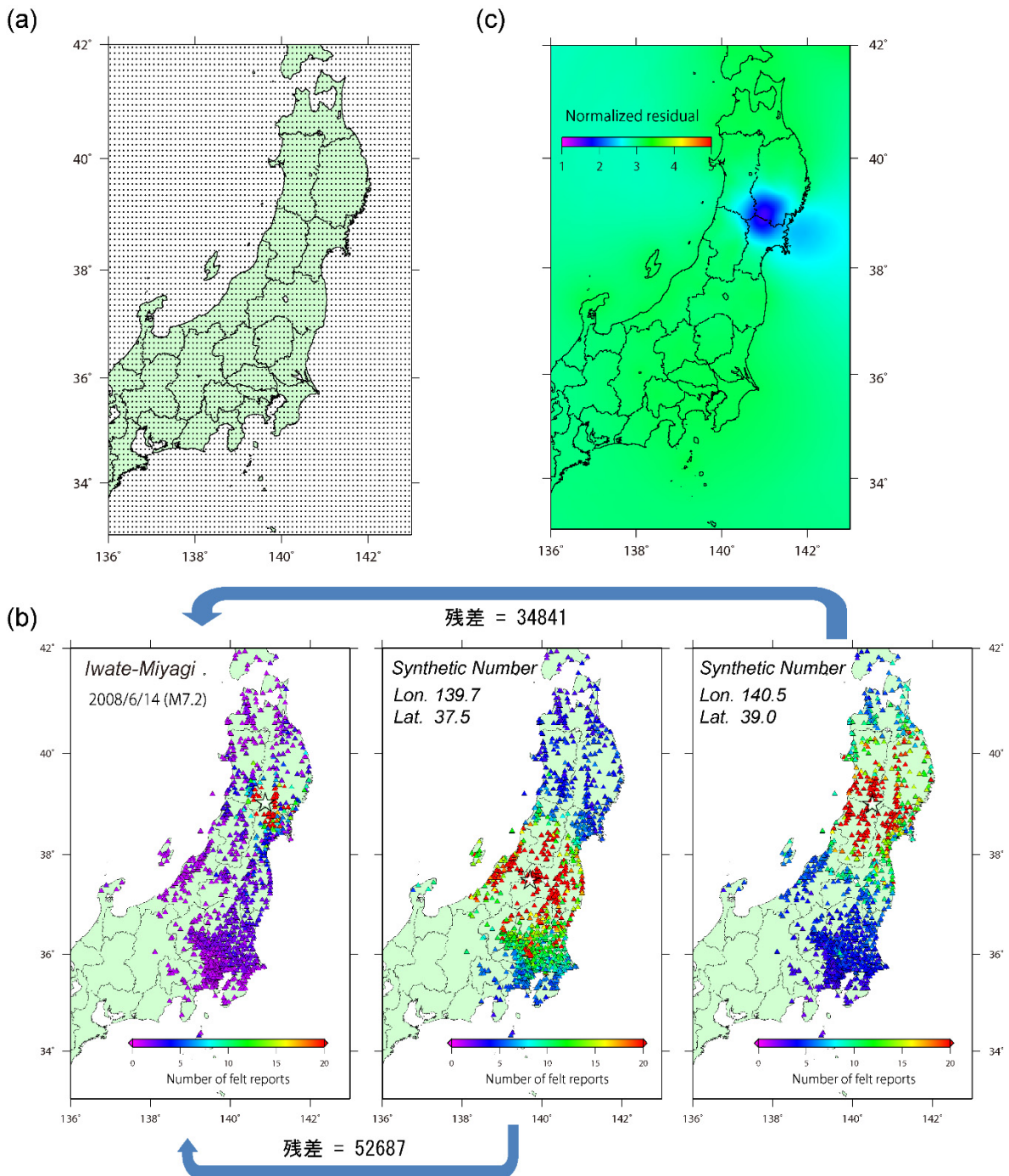


図 6. 予察的検討に用いた有感地震数に基づく震源域推定手法の概要. (a) 領域中に設定した一様間隔のグリッド点. (b) 星印で示す 2 つの異なるグリッド点(中央:東経 139.7°, 北緯 37.5°, 右:東経 140.5°, 北緯 39.0°)において, 地震の規模別頻度分布がグーテンベルク・リヒター則に従うものとして 1000 地震を発生させた場合の有感地震数(震度 2 以上)の分布ならびに 2008 年岩手・宮城内陸地震後 1 ヶ月間の有感地震数の分布(左)との残差. (c) 最小となる残差によって規格化した残差の分布.

Figure 6. Schematic illustration of the preliminary method to estimate the source region of a large earthquake based on the number of felt reports. (a) Distribution of grid points with 0.1 degree spacing. (b) The number of felt reports at the two different grid points shown by open stars (center: 139.7°E and 37.5°N, right 140.5°E and 39.0°N) from 1000 earthquakes randomly generated in accordance with the GR relationship. The distribution of felt reports number within one month following the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008 (left) and calculated residuals are also shown. (c) Distribution of residuals normalized by the minimum one.

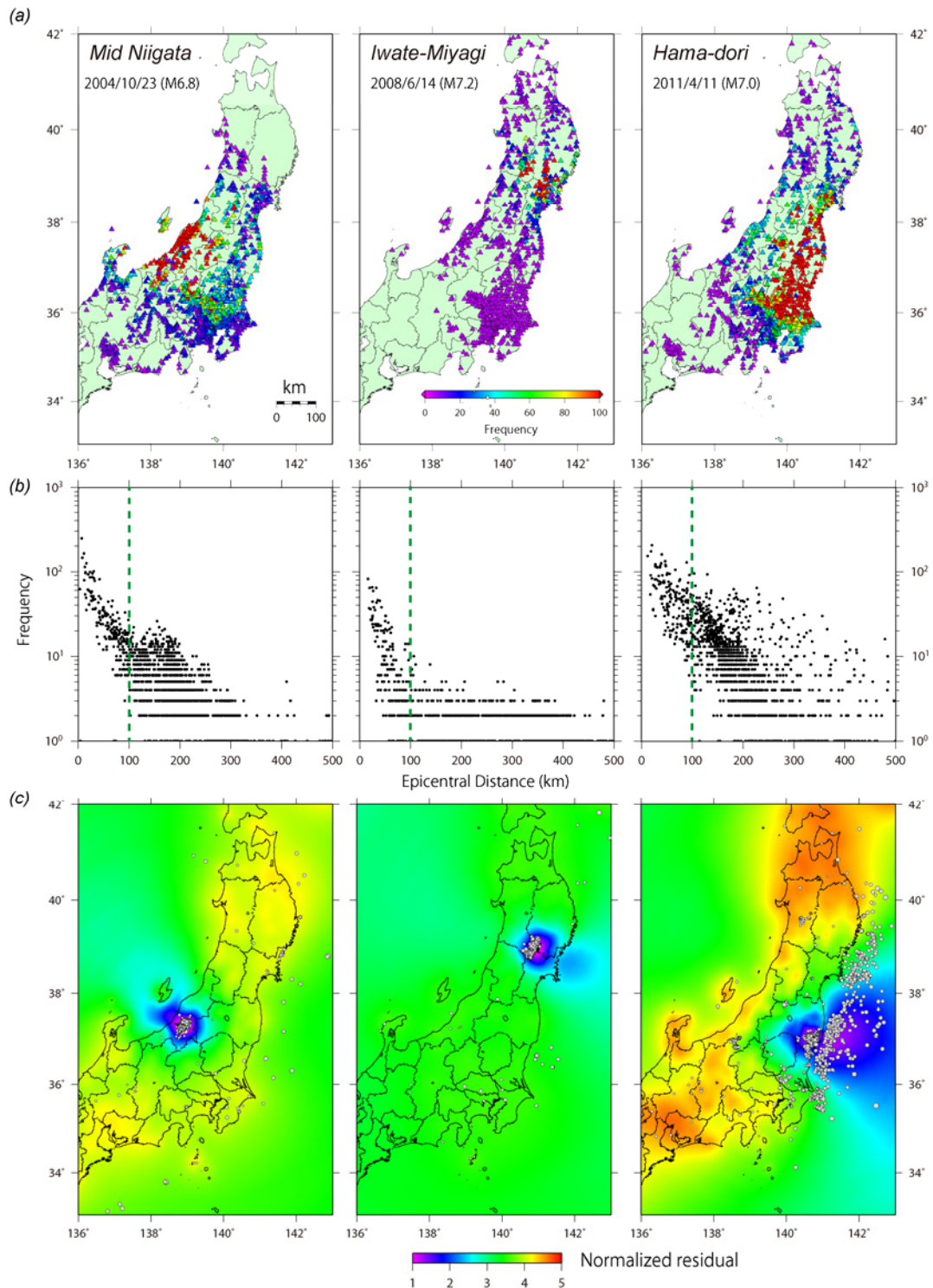


図 7. (a) (左)2004 年新潟県中越地震, (中央)2008 年岩手・宮城内陸地震, (右)2011 年福島県浜通りの地震に対する本震後 1 か月間の有感地震数の分布. (b) 有感地震数と震央距離との関係. (c) 規格化された残差の分布. 灰色の丸はそれぞれの本震後 1 か月間に発生した有感地震の震央分布を表す. 本図のカラー版は口絵 2 参照.

Figure 7. (a) Distribution of number of felt reports within one month following (left) the Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004, (center) the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008, and (right) the 2011 Fukushima Hama-dori Earthquake. (b) Relationship between the number of felt reports within one month following each mainshock and epicentral distances. (c) Normalized residuals between the observed number of felt reports and synthetic ones. Gray circles represent the epicenters of felt earthquakes within one month following each mainshock. See Frontispiece 2 for the color version.

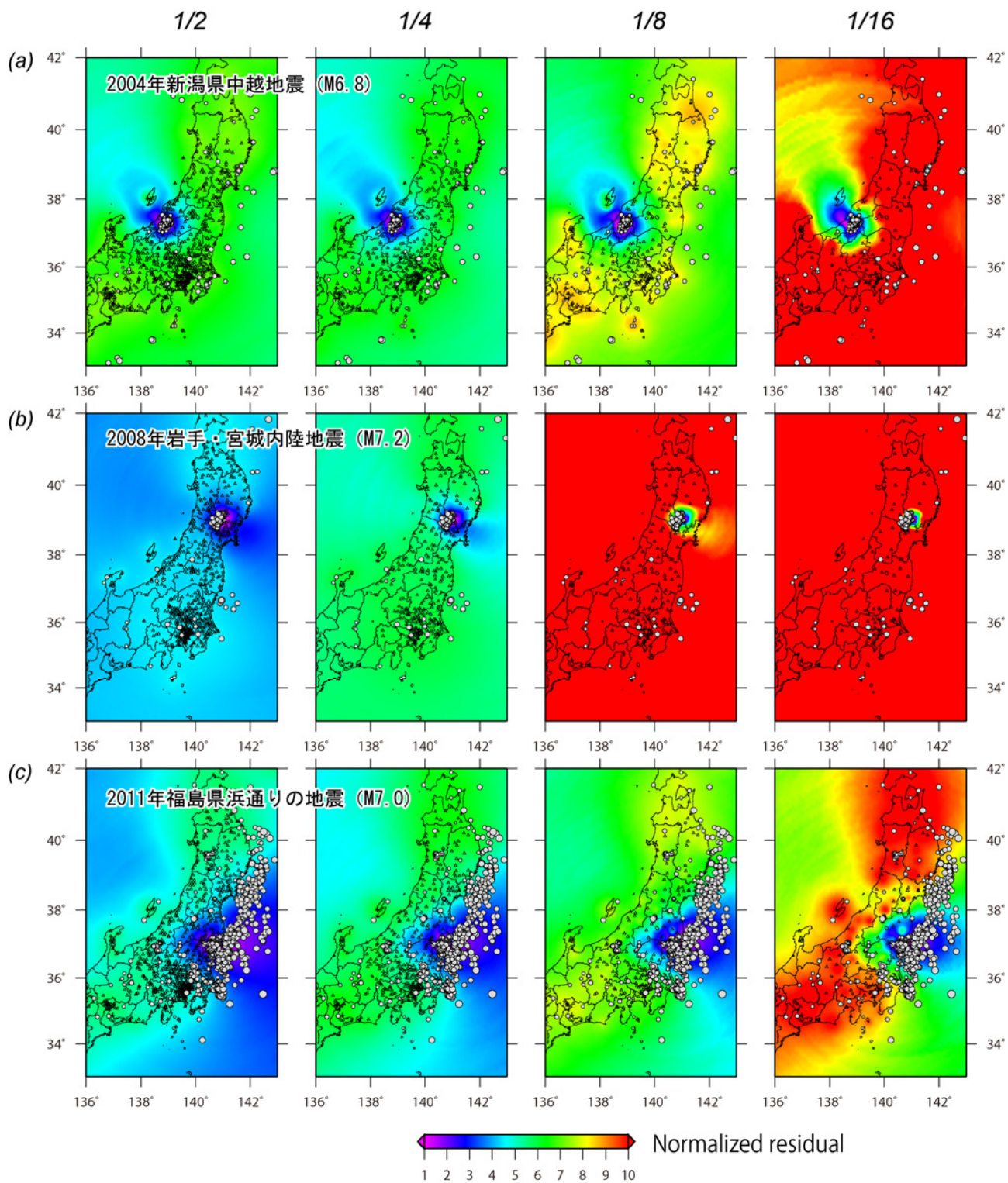


図 8. 観測点を 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 に間引いた場合の規格化残差の分布 ((a) 2004 年新潟県中越地震, (b) 2008 年岩手・宮城内陸地震, (c) 2011 年福島県浜通りの地震). 灰色丸は本震後 1 ヶ月間に発生した有感地震の震央分布を, 三角はそれぞれの解析において用いた観測点分布を表す. 本図のカラー版は口絵 3 参照.

Figure 8. Normalized residuals when the observation stations were thinned out to 1/2, 1/4, 1/8, and 1/16 for (a) the Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004, (b) the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008, and (c) the 2011 Fukushima Hama-dori earthquake. Gray circles and open triangles indicate the epicenters of felt earthquakes within one month following each mainshock and distribution of observation stations used for each analysis, respectively. See Frontispiece 3 for the color version.

ついて調査する必要がある。近年の計器観測時代における地震カタログにおいても、マグニチュードの決定方法や観測網の移設・廃止等により均質性が必ずしも保持されている訳ではない。史料中の有感記録が地震活動変化を議論するのに十分な均質性を保持しているのか、検討する必要がある。また、カタログ(史料)には欠測期間が含まれている可能性がある。どの期間の有感地震が漏れなく記録されているのか、有感記録がない期間が単に欠測期間であったのかどうか、検討する必要がある。これらを考慮せずに抽出された有感記録には、人為的な影響によるみかけの地震活動変化が含まれている可能性がある。

稠密地震観測網が展開された近年の地震学データの活用も重要である。記述地点が明らかな有感を記録する史料が見出されたとしても、一般にその有感記録がどこで発生した地震によるものであったのかについて、単一の日記史料から議論することは困難である。本研究で実施した勝浦市墨名観測点における検討などは、日記史料等に記述されている有感地震の範囲について、一助となり得る。近年のデータとの類似性から議論することも [例えば, 石辺・他(2015)], 史料中の有感記録を用いた歴史時代の地震活動復元には、今後必要になってくるものと思われる。

謝辞

本研究では、気象庁による震度データベース [石垣・高木 (2000)] ならびに地震ハザードステーション (J-SHIS) の AVS30 データを使用した。図の作成には Generic Mapping Tools [Wessel and Smith (1998)] を、地震の抽出には地震活動解析システム [鶴岡 (1998)] をそれぞれ使用した。本稿は植竹富一会員にらびに小松原琢編集委員による貴重なご意見により、大幅に改善された。ここに記して感謝申し上げます。なお、本研究は平成 31 年度(令和元年度)ならびに令和 2 年度東京大学地震研究所共同利用(研究課題名: 史料中の有感地震記録を用いた歴史地震研究の新展開, 研究代表者: 石辺岳男)の経費を用いて実施された。

対象地震: 2004 年新潟県中越地震, 2008 年岩手・宮城内陸地震, 2011 年福島県浜通りの地震

文献

Gutenberg, B. and C.F. Richter, 1944, Frequency of earthquakes in California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **34**, 185-188.

- 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, doi:10.5047/eps.2011.05.019.
- Hirose, H., H. Kimura, B. Enescu and S. Aoi, 2012, Recurrent slow slip event likely hastened by the 2011 Tohoku earthquake, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **109**, 15157-15161.
- 石橋克彦・佐竹健治, 1998, 古地震研究によるプレート境界巨大地震の長期予測の問題-日本付近のプレート沈み込み帯を中心として-, 地震第 2 輯, **50**, 別冊, 1-21.
- Ishibe, T., K. Shimazaki, K. Satake and H. Tsuruoka, 2011, Change in seismicity beneath the Tokyo metropolitan area due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, **63**, 731-735, doi:10.5047/eps.2011.06.001.
- Ishibe, T., K. Satake, S. Sakai, K. Shimazaki, H. Tsuruoka, Y. Yokota, S. Nakagawa and N. Hirata, 2015, Correlation between Coulomb stress imparted by the 2011 Tohoku-Oki earthquake and seismicity rate change in Kanto, Japan, *Geophys. J. Int.*, **201**, 112-134, doi:10.1093/gji/ggv001.
- Ishibe, T., Y. Ogata, H. Tsuruoka and K. Satake, 2017, Testing the Coulomb stress triggering hypothesis for three recent megathrust earthquakes, *Geoscience Letters*, **4:5**, doi:10.1186/s40562-017-0070-y.
- 石辺岳男・佐竹健治・村岸純・鶴岡弘・中川茂樹・酒井慎一・平田直, 2015, 関東地方において計器観測初期に発生した地震の調査のための近年の地震データの収集・整理と 1922 年浦賀水道付近の地震への予察的適用, 歴史地震, **30**, 109-127.
- 石辺岳男・岩佐幸治・古村美津子・松浦律子・田中裕人・高浜勉, 2017, 多次元距離減衰式の検証—気象庁震度データベースを用いて—, 日本地震学会 2017 年度秋季大会, S15-13.
- 石辺岳男・松浦律子・津村建四朗・岩佐幸治・古村美津子, 2018, 地震活動から探る房総スロースリッ

- イベントの発生履歴, 日本地震学会 2018 年度秋季大会, S23-24.
- 石垣祐三・高木朗充, 2000, 気象庁震度データベースの整備及び活用例について, 験震時報, **63**, 75-92.
- 石垣祐三, 2007, 明治・大正時代の震度観測について—震度データベースの遡及—, 験震時報, **70**, 29-49.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2017, 四国地域の活断層の長期評価(第一版), 57pp.
- 神田克久・武村雅之・宇佐美龍夫, 2004, 震度インバージョン解析による南海トラフ巨大地震の短周期地震波発生域, 地震第 2 輯, **57**, 153-170.
- Katsumata, K., 2011a, A long-term seismic quiescence started 23 years before the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M = 9.0), *Earth Planets Space*, **63**, 709-712, doi:10.5047/eps.2011.06.033.
- Katsumata, K., 2011b, Precursory seismic quiescence before the Mw= 8.3 Tokachi-oki, Japan, earthquake on 26 September 2003 revealed by a re-examined earthquake catalog. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **116**, B10307, doi:10.1029/2010JB007964.
- 松井渉・尾池和夫, 1997, 有感余震数を用いた歴史地震の震央決定, 歴史地震, **13**, 13-22.
- 松岡昌志・若松加寿江, 2008, 地形・地盤分類 250m メッシュマップ全国版に基づく地盤のゆれやすさデータ, 産業技術総合研究所, 知的財産管理番号 H20PRO-936.
- 松浦律子・都司嘉宣, 2010, 文久宮城の地震前の地震活動度の静穏化—相馬吉田屋覚書日記のデータから, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会予稿集(SSS013-05).
- 松浦律子・田力正好, 2018, 1916 年 8 月 6 日の中央構造線断層帯の地震について, 地震第 2 輯, **71**, 103-116.
- Matsu'ura, R.S., T. Ishibe and K. Tsumura, 2017, Significant Decrease of Seismicity in the Northeastern Margin of the Japan Sea after the Mega Thrust Event on Mar. 11, 2011, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, SSS05-10.
- Matsu'ura, R.S., H. Tanaka, M. Furumura, T. Takahama and A. Noda, 2020, A New Ground-Motion Prediction Equation of Japanese Instrumental Seismic Intensities Reflecting Source Type Characteristics in Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **110**, 2661-2692, doi: 10.1785/0120180337.
- 内閣府, 2013, 「首都直下の M7 クラスの地震及び相模トラフ沿いの M8 クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書」(内閣府首都直下地震モデル検討会 平成 25 年 12 月)
<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutochokkajishinmodel/index.html>.
- 西山昭仁, 2010, 文政京都地震(1830 年)における京都盆地での被害要因の検討—棧瓦葺屋根の普及による被害の拡大—, 地震研究所彙報, **85**, 33-47.
- Nishiyama, A., M. Ebara, A. Katagiri, Y. Oishi and K. Satake, 2017, Development of historical earthquake and volcanic activity database using historical diaries, IAG-IASPEI 2017 joint assembly, S04-P-01.
- 尾池和夫, 1996, 京都とその周辺地域の有感地震データベース(416 年~1995 年)について, 歴史地震, **12**, 61-70.
- Omori, F., 1894, On the after-shocks of earthquakes, J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo, **7**, 111-120.
- 佐竹健治, 2002, 江戸時代の千島海溝の地震活動を東北・関東の史料から推定する, 歴史地震, **18**, 18-33.
- Satake, K. and T. Ishibe, 2020, Toward homogeneous estimation of long-term seismicity from historical materials: number of felt earthquakes in Tokyo since 1668, *Seismological Research Letters*, **91**, 2601-2610 doi:10.1785/0220200060.
- 都司嘉宣・日野貴之, 1992, 小田原地震と関東地方の有感地震の変化, 歴史地震, **8**, 47-97.
- 鶴岡弘, 1998, WWW を用いた地震情報検索・解析システムの開発. 情報処理学会研究報告;データベースシステム 115-9, 情報学基礎, **49-9**, 65-70.
- 宇佐美龍夫・渡邊健, 2005, 江戸(東京)における毎年の有感地震回数の変遷, 歴史地震, **20**, 274.
- 宇佐美龍夫・石井寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子, 2013, 日本被害地震総覧 599-2012, 東京大学出版会, 724pp.
- Utsu, T., Y. Ogata and R.S. Matsu'ura, 1995, The

centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity, *J. Phys. Earth*, **43**, 1-33.

Wessel, P. and W.H.F. Smith, 1998, New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS Trans., *AGU*, **79**, 579.