

速度型地震計を用いた計測震度相当値の見積もり： 臨時地震観測データの活用

石瀬素子^{*†}・中村亮一^{**}・酒井慎一^{***}

Estimation of Instrumental Seismic Intensity Using Seismic Data Recorded by a Velocity Type Seismometer: Use of Temporary Seismic Observation Data

Motoko ISHISE^{*†}, Ryoichi NAKAMURA^{**} and Shin'ichi SAKAI^{***}

はじめに

震度は地震動の強さを表す指標であり、多くの人にとってなじみ深いものである。従来は観測者の体感でその計測が行われていたが、1996年4月以降は器械（計測震度計）による計測震度が報告されてきている。計測震度は、震度計委託検定実施要領（気象庁、1996、57-58ページ参照）に基づいて検定された一定の精度を有することが保証されている加速度計を用いて算出することと決められている。2020年11月30日時点において、全国で4375の震度観測点（気象庁671点、地方自治体2911点、防災科学技術研究所793点）が稼働しているが（気象庁ホームページ内「震度観測点」参照）、ひとつの自治体では多くても数点程度であり、地震時の実際の揺れの細かな分布を把握できているとはいえない。一方で、臨時観測では地域的に非常に密な観測が行われるので（たとえば、大地震発生直後の震源域周辺など）、この記録を使って計測震度相当値が算出できれば震度分布がより密になり、揺れの詳細な地域性の把握に繋がるのが期待できる。

本報告で使用した「速度型地震計」は、Lennartz electronic 社製の LE-3DliteMkIII（Lennartz electronic GmbH, 2020, 以降レナーツ地震計とする）である。レナーツ地震計は、固有周波数が1Hzの3成分速度型地震計で

あり、小型でかつ軽量（筐体の直径95mm、高さ65mm、重量1.6kg）であることと、省電力（消費電力0.072W）であることを主な特徴としている。小型で軽量であることは、機材の輸送や設置の際の持ち運びに便利だけでなく、設置場所の広さに限りがある場合の設置にも適応できる可能性が高くなる。また、低消費電力であることは、商用電源の有無にかかわらず、観測期間を長期化することにつながるため、レナーツ地震計は、臨時地震観測に非常に適した特徴を有しているといえる。

たとえば、北海道胆振東部地震（ $M_{JMA}6.7$, 最大震度7）の臨時観測では、震源地周辺の定常観測点は停電のため観測が途切れていたが、臨時観測点では、これに代わって余震が記録された。そして、その記録を用いた余震の震源再決定により、胆振地震の震源断層に関する有用な知見が得られている（Katsumata *et al.*, 2019）。また、2016年熊本地震（ $M_{JMA}7.3$, 最大震度7）の震源域の詳細な地震波速度構造においても、レナーツ地震計で記録されたデータが使用されている（Shito *et al.*, 2016）。

地震研究所では、全国の研究者たちへの共同利用の観測機器としてレナーツ地震計を準備している。低消費電力型ロガー（LS-8800）とセットで貸し出されることが多く、上述の機器の特長を活かして様々な場所で多様な目的のための観測が行われてきている。たとえば、昭和新山では、地下速度構造の解明を目的に、山中に観測点を点在させた約2か月間の地震観測が行われた（竹尾ほか, 2019）。成田国際空港では、空港ビル内の場所による揺れの違いや特徴を調査するために、2週間の地震観測が行われた（酒井, 2019）。また、成田空港を含む北総地域では、1855年安政江戸地震の際の被害や揺れの程度を検証する目的で、27台のレナーツ地震計を用いた約2か月間の地震観測が実施された（石瀬ほか, 2020）。

2020年10月8日受付, 2020年12月28日受理.

[†] ishise@eri.u-tokyo.ac.jp

^{*} 東京大学地震研究所地震予知センター

^{**} 東京大学地震研究所地震火山情報センター

^{***} 東京大学大学院情報学環・学際情報学府

^{*} Earthquake Prediction Research Center, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo.

^{**} Earthquake Information Center, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo.

^{***} Interfaculty Initiative in Information Studies, Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, the University of Tokyo.

臨時の地震観測は、調査対象を限定して実施されるのが一般的である。そのため、臨時観測の波形記録は、設定された問題の解明に特化した解析のみに使用され、それ以外の用途で使われることはほとんどない。これは、臨時地震観測で得られたデータ利用に関するひとつの課題ともいえる。そこで我われは、石瀬ほか（2020）の観測で得られたレナーツ地震計の波形記録（速度記録）の活用のひとつとして、計測震度相当値の推定を試みた。これまでに、レナーツ地震計を用いた地震観測は数多く実施されてきているが、その記録を用いた震度の検討は、ほとんど行われていない。震度は、その科学的な解釈は容易ではないが、これを系統的に分析することで地盤の揺れやすさの情報に繋がると期待される。したがって、地域の防災対策のありかたを議論する際に、その優先度の検討に有用な情報になると考えられる。加えて、社会一般には、地震動の強さや被害の程度を表わす指標として広く受け入れられているので、観測にご協力いただいた地権者をはじめ、地域住民の方々になじみ深い情報提供に繋がるものと期待される。

次章では、石瀬ほか（2020）の観測の概要を紹介する。そして、計測震度相当値を検討した14地震の震源要素を示す。続いて、計測震度相当値の説明とその見積もり手順を簡単に示し、14地震に対する27地点での揺れ（本報告で使用した最大の揺れは、気象庁による震度が3程度）に対する計測震度相当値を報告する。最後に、得られた震度相当値を用いて、揺れの地域性について簡単に検討する。

観測の概要

石瀬ほか（2020）の臨時地震観測で使用した地震計はLennartz electronic社製のLE-3DliteMkIIIである。レナーツ地震計は、フィードバック制御系（負帰還回路）が採用された速度型地震計であり、図1に示す特性を持つ。前章では、レナーツ地震計の特徴として小型で軽量であることを挙げたが、これらは、負帰還回路を採用することによって達成されている（例えば、木下1998）。データ収録装置は、白山工業製のLS-8800が使用されており、これらの電力は電池で賄われている。ロガー内に入れた単一乾電池8個に加え、補助電力として24個の乾電池が詰められた電源パックを増設したため、約2か月間の観測が可能であった。当該研究における計器の設置場所は、全て屋外であるため、ロガー、電池パックともに、防水された硬質ケースに収められている（図2a参照）。地震計の設置方法としては、可能な限り埋没設置（コンクリート板は不使用；図2b参照）が採られているが、埋設できない（穴が掘れない）環境の場合には、既存の石やコンクリートに接着剤を用いて固定する地表設置が行われている（図2c）。

上記の要領により、北総地域を中心とする千葉県と茨城県の27観測点（表1と図3参照）において、約2か月間（2019

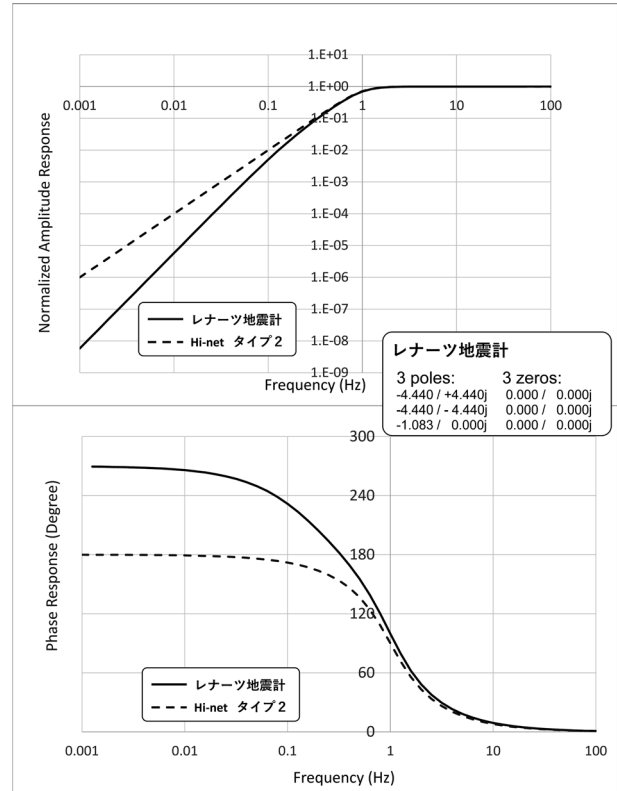


図1. Le-3DliteMkIIIの機器特性。(a)振幅特性、(b)位相特性。比較のため、Hi-netの機器特性を破線で示す。

年9月26日から同年12月5日まで）の連続地震観測が実施された。地震計設置場所は、教育・研究関連施設、役場、寺社、民家であり、これらは、1855年安政江戸地震の被害記述が残る地点（地域）とその周辺地域から選定されている。なお、観測場所の選定については、本報告と趣旨を異にするため、稿を改めて述べたい。

以降、成田山新勝寺周辺の9観測点と成田空港敷地内に設置した3観測点を合わせた12の観測点群を「成田アレイ」、佐倉市内の5つの観測点群を「佐倉アレイ」、取手市、利根町、我孫子市、印西市に設置した残りの10観測点から成る観測点群を「印西アレイ」と呼ぶことにする。

観測期間中に発生した有感地震

観測期間中、成田市内に設置されたいずれかの震度計で震度1以上が記録された地震が14個発生した。これらの分布を図4に示す。表2には、気象庁による震源要素と最大震度および成田市での最大震度を示す。14個の地震の震央地名（気象庁発表）は、千葉県北東部、千葉県北西部、千葉県南東沖、茨城県南部、茨城県北部、茨城県沖、栃木県北部であり、オホーツク（北米）プレート、太平洋スラブ、フィリピン海スラブにおける普段の活動と同じような地域で発生していた。また、地震数についても、普段の観測数と同程度である。



図 2. 石瀬ほか(2020)の臨時地震観測で使用された観測機器と地震計設置例. (a) ロガーと電池ケース. (b) 埋設設置の例 (E.SKRI). (c) 地表設置の例 (E.INZ4).

表 1. 本報告で使用した地震のリストと震源情報.

	年/月/日	時	分	秒	緯度 (度)	経度 (度)	深さ (km)	M_{JMA}	最大震度	最大震度 @成田市	震央地名 (気象庁)
EV_No1	2019/12/5	22	35	16.2	36.81	140.55	8	4.6	3	1	茨城県北部
EV_No2	2019/12/4	19	35	5.2	36.95	139.68	7	4.8	4	1	栃木県北部
EV_No3	2019/12/4	18	12	56	36.14	139.80	51	4.0	3	1	茨城県南部
EV_No4	2019/12/4	10	38	53.1	36.81	140.54	9	4.9	4	3	茨城県北部
EV_No5	2019/12/3	10	18	4.6	36.14	139.82	52	4.7	4	2	茨城県南部
EV_No6	2019/11/25	12	22	1.5	36.20	140.96	45	3.9	2	1	茨城県沖
EV_No7	2019/11/22	5	23	49.9	36.07	139.89	45	4.5	3	2	茨城県南部
EV_No8	2019/11/12	21	55	36.8	36.43	141.02	46	4.4	3	1	茨城県沖
EV_No9	2019/11/8	18	18	23.3	36.54	140.84	52	4.4	4	1	茨城県沖
EV_No10	2019/11/2	12	6	41.2	35.71	140.69	50	3.4	1	1	千葉県北東部
EV_No11	2019/10/31	11	6	33.8	35.80	140.11	62	3.8	1	1	千葉県北西部
EV_No12	2019/10/12	18	21	53.6	34.67	140.65	75	5.4	4	1	千葉県南東沖
EV_No13	2019/10/9	4	58	30.3	35.80	140.11	62	4.2	2	1	千葉県北西部
EV_No14	2019/9/30	1	2	31.4	36.46	140.61	56	4.3	3	1	茨城県北部

本報告で計測震度相当値の見積もりを試みた 14 地震の概要. 震源パラメータと気象庁による震央地名, および公表されている最大震度と成田市で観測された最大震度を記す.

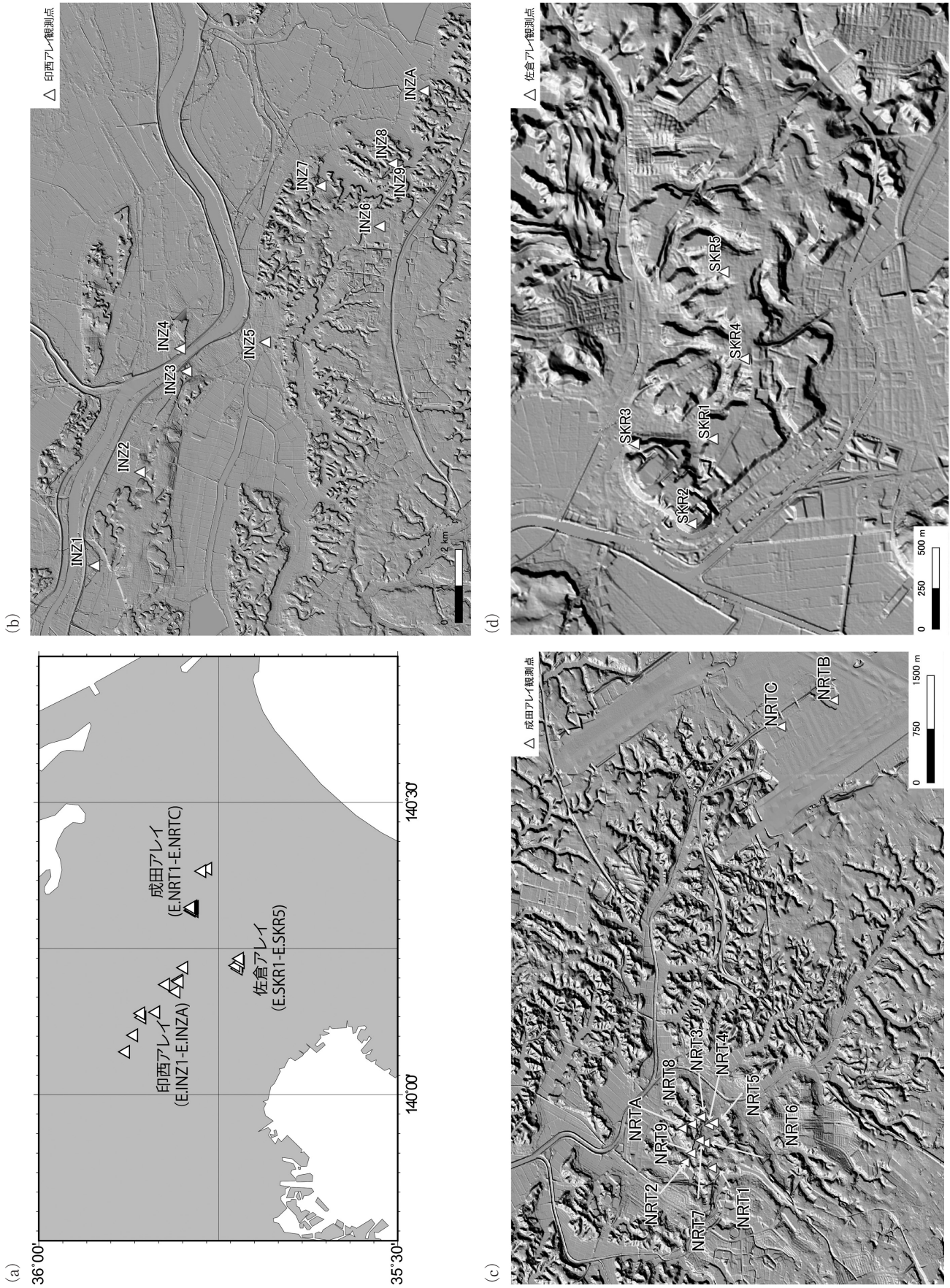


図 3. 観測点分布. (a) 広域図. (b) 印西アレイ (c) 成田アレイ (d) 佐倉アレイ. (b)-(d) の背景は陰影起伏図.

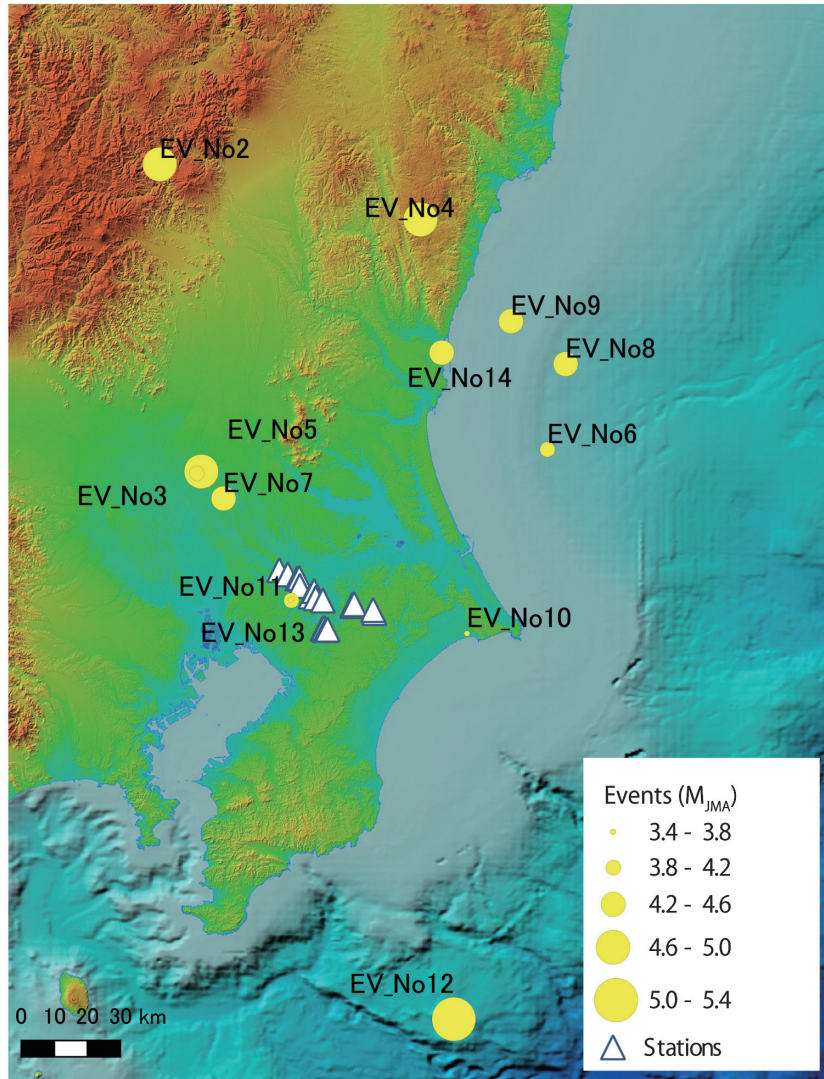


図 4. 本報告で注目した地震の分布図. 震央を黄色丸で示す. 丸の大きさは気象庁マグニチュード (M_{JMA}) に対応している. Δ は石瀬ほか (2020) の観測で設置された地震計の位置を示す.

計測震度相当値の見積もり

気象庁の定義によると、計測震度相当値は、以下のようにして得られる。①加速度記録 3 成分（水平動 2 成分，上下動 1 成分）を，それぞれフーリエ変換する。②地震波の周期による効果を補正するようなフィルター（周期 1 秒から 2 秒の波が強調される）を適用する。③②を逆フーリエ変換して時刻歴波形に戻す。④得られた 3 成分の波形をベクトル的に合成する。⑤ベクトル波形の絶対値が，ある値 a (cm/s^2) 以上となる時間の合計がちょうど 0.3 秒となるような閾値 a を求める。⑥ a を $I=2\log(a)+0.94$ に代入して計算することで，計測震度 I が得られる（気象庁ホームページ内「計測震度の算出方法」参照）。

本報告では，観測された速度波形を SAC (Seismic Analysis Code, Goldstein and Snoke, 2005; Goldstein *et al.*, 2003) の transfer コマンドを用いて地震計の周波数特性

を補正し，dif コマンドで速度波形から加速度波形への変換を行って，計測震度の計算に用いる加速度波形とした。また，計測震度相当値の見積もり (①～⑥) には，工学院大学の久田嘉章博士による fortran プログラム (shindex.f) を活用させていただいた。また，解析に用いた波形の時間長は，作業の便宜上，気象庁発表による発震時から 1 分間とした。なお，解析で使用した地震波形に遠地で発生した地震の主要動や近地で発生した他の地震の波形が含まれていないことを，気象庁一元化カタログ等で確認するとともに，目視による再確認を行っている。波形処理の一例として，E.INZA 観測点で記録されたイベント番号 04 (2019 年 12 月 4 日 10 時 38 分，茨城県北部の地震， M_{JMA} 4.9，深さ 9km) の地震の観測速度波形，地震計の特性を補正した速度波形とその加速度波形，およびこれらのフーリエスペクトルを図 5 に示す。

本報告で見積もった 14 地震に対する 27 観測点での計測

表 2. 本報告で使用した臨時地震観測点情報.

	観測点名	観測点 コード	チャンネル ID	設置日時	撤収日時	北緯 (°)	東経 (°)	標高 (m)
1	取手市小堀	INZ1	FD01	9月26日	12月6日	35.87903	140.07329	9
2	我孫子市立新木小学校	INZ2	FD04	9月26日	12月5日	35.86784	140.10168	20
3	我孫子市立布佐小学校	INZ3	FD07	9月26日	12月5日	35.85641	140.13219	12
4	利根町役場	INZ4	FD0A	9月26日	12月6日	35.85797	140.13910	18
5	印西市立大森小学校	INZ5	FD0D	9月26日	12月6日	35.83709	140.14107	5
6	印西市立滝野小学校	INZ6	FD10	9月26日	12月5日	35.80896	140.17615	25
7	印西市立小林中学校	INZ7	FD13	9月26日	12月5日	35.82345	140.18840	10
8	印西市立本埜小学校	INZ8	FD16	9月26日	12月5日	35.80582	140.19516	29
9	竜腹寺延命地藏尊	INZ9	FD19	9月26日	12月5日	35.80448	140.19333	27
10	印西市萩原	INZA	FD1C	9月26日	12月5日	35.79810	140.21725	—
11	佐倉市立佐倉中学校	SKR1	FD1F	9月27日	12月5日	35.72111	140.22133	30
12	佐倉城址公園 天守閣跡	SKR2	FD22	9月27日	12月5日	35.72228	140.21557	34
13	民族博物館 愛宕神社跡	SKR3	FD25	9月27日	12月5日	35.72544	140.22100	26
14	麻賀多神社	SKR4	FD28	9月27日	12月5日	35.71938	140.22677	32
15	嶺南寺	SKR5	FD2B	9月27日	12月5日	35.72051	140.23268	34
16	成田市立成田小学校	NRT1	FD2E	9月26日	12月6日	35.78367	140.31419	35
17	成田市立成田中学校	NRT2	FD31	9月26日	12月5日	35.78790	140.31508	23
18	成田高等学校	NRT3	FD34	9月26日	12月5日	35.78536	140.32209	17
19	成田市田町1	NRT4	FD37	9月26日	12月5日	35.78413	140.32080	9
20	成田市田町2	NRT5	FD3A	9月26日	12月5日	35.78340	140.32120	—
21	成田山新勝寺 総門	NRT6	FD3D	9月27日	12月5日	35.78472	140.31806	12
22	成田山新勝寺 三重塔	NRT7	FD40	9月27日	12月5日	35.78560	140.31849	25
23	成田山新勝寺 明徳不動橋	NRT8	FD43	9月27日	12月5日	35.78680	140.32098	13
24	成田山新勝寺 奥山	NRT9	FD46	9月27日	12月5日	35.78688	140.31647	23
25	成田山新勝寺 霊光館	NRTA	FD49	9月26日	12月5日	35.78826	140.32031	36
26	成田空港 P1 駐車場事務所	NRTB	FD4C	9月27日	12月6日	35.76476	140.38658	35
27	成田空港 貨物立体駐車場	NRTC	FD4F	9月27日	12月6日	35.77294	140.38249	38

本報告で計測震度相当値の見積もりを試みた観測点の概要。観測点名と観測点コード、チャンネルID、観測点設置日と回収日を示す。

震度相当値を表3にまとめた。図6は、本報告で得た結果と気象庁発表の震度と併せて示した震度分布図の一例で、2019年12月4日10時38分に発生した茨城県北部の地震についてである。気象庁による震度分布からは、印西アレイ付近を境に北側で震度3、南側で震度2となっている。本報告の印西アレイ内を見ると、震度2の地点と震度3地点の両方が見られる。佐倉アレイと成田アレイは、気象庁の震度分布では震度2の領域に位置しているが、E.SK1、E.NRT5、E.NRT9の3地点では、周辺と比べて1階級大きな震度3が見積もられた。印西アレイの揺れの地域性は、震源に近い観測点での震度が大きい傾向が見られるため震源距離の影響が大きいと考えられる。一方、成田アレイと佐倉アレイについては、印西アレイと比べてアレイ領域が狭く震源距離の影響が小さいと考えられる。したがって、相対的な揺れの大小は、これらの地点の揺れやすさが反映されているものと思われる。

計測震度相当値の地域性

ここでは、同一アレイ内における各観測点間での揺れやすさについて簡単に検討したい。図7は図6で使用した地震について、計測震度相当値を3段階に分類してアレイ内での計測震度相当値の地域性を表現している。新勝寺周辺の成田アレイ（ただし、成田空港の2点を除く）は、500m四方と狭い領域であるにも関わらず、震度のばらつきが0.9を超える。観測点の設置環境や設置状況の違いの影響もあると考えられるが、この地域の震度には強い地域性があると考えられる。また、どのアレイにおいても、それらの近傍の気象庁から発表されている震度は、アレイ内の最も小さな震度に近い。石瀬ほか（2020）の観測点は気象庁の基準（ノイズ環境、設置場所の地下の状況：中空か否か、高層建築物からの距離、専用局舎の有無、コンクリート台上に設置されているか否か）を満たしていないため、

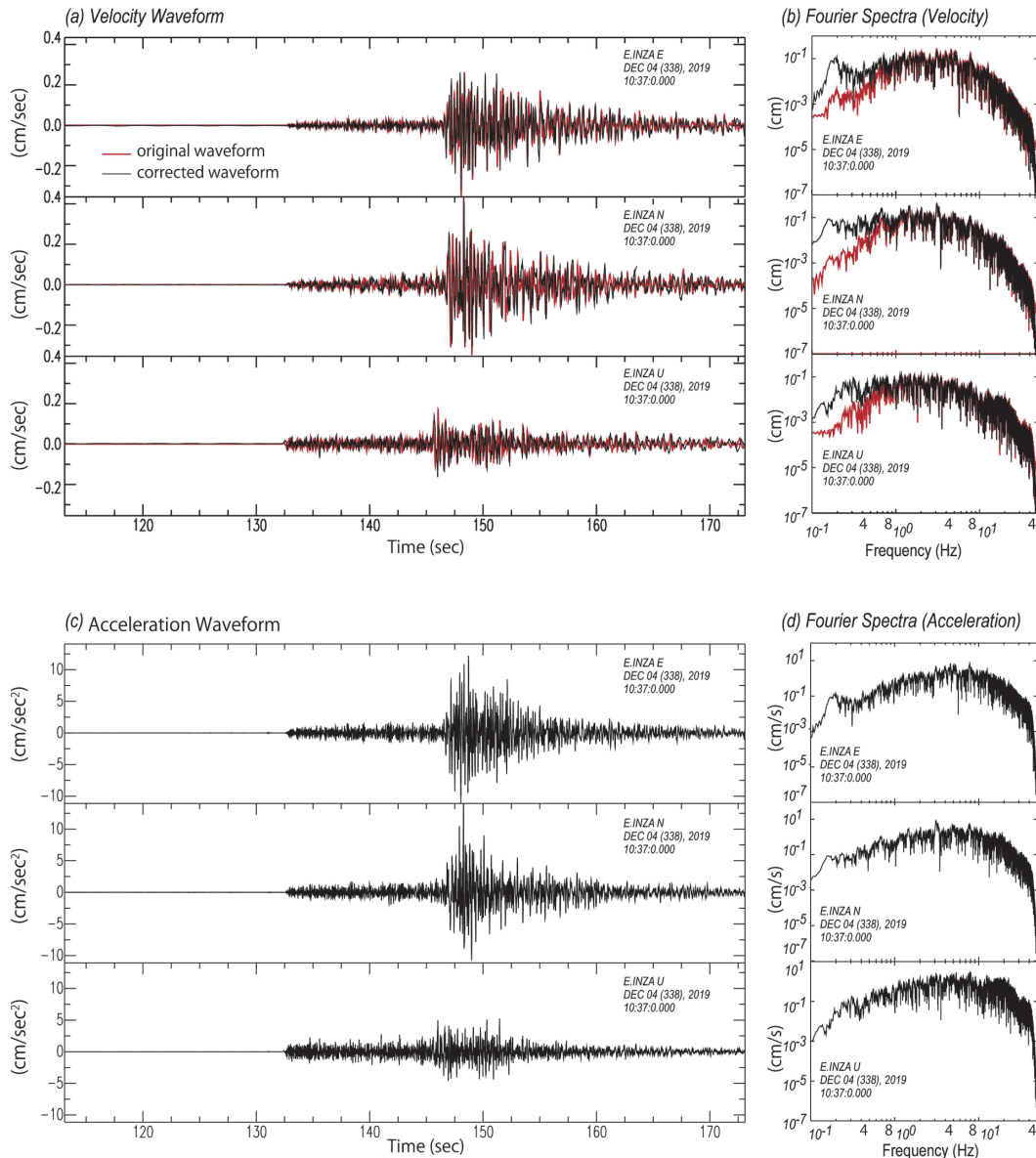


図 5. 計測震度相当値を求める過程における地震波形例 (a), (c) とこれらのフーリエスペクトル (b), (d) (E.INZA で観測された EV_No4 の地震の場合). (a) 観測速度波形 (赤) と計器特性を補正した速度波形 (黒). (b) 計器特性を補正した加速度波形. (c) 観測速度波形のフーリエスペクトル (赤) と計器の特性を補正した速度波形のスペクトル (黒) (d) 計器の特性を補正した加速度波形のスペクトル.

結果を見るに止めるが、ある一点だけの震度でその地域の震度とすることの危険性がよくわかる。

図 8 には、各観測点での地震ごとの計測震度相当値の相対値 (相対値を求める際の基準値は、本観測で設置した臨時観測点の計測震度相当値のみを使用。) をアレイごとに示す。この図から、地震によらずアレイ平均の震度より高い (低い) 地点が存在することがわかる。例えば、印西アレイの E.INZA、成田アレイの E.NRT2, E.NRT3 は、地震によらず相対的に小さな揺れが観測されており、佐倉アレイの E.SKR2、成田アレイの E.NRT4 と E.NRT5 は、常に相対的に大きな震度が観測されている。

このような震度の特徴が生じた原因として、地震計の設

置状態や設置環境の違いが考えられる。しかし、地域の方々によれば、常に相対的に計測震度相当値が大きかった E.NRT5 付近では、東北地方太平洋沖地震による被害が、周囲と比べて大きかったそうである。また、1855 年の安政江戸地震の際のこの地域の被害として、E.NRT5 付近で大きな被害 (土蔵が残らず破損、母屋が破損) が生じたことが史料の記述に残されている。このような過去の揺れに関する情報と今回の観測結果は整合的である。このことは、本試みが、揺れの地域性の検討にある程度は有用であることを意味していると考えられる。ただし、実際に被害が生じるような揺れに対しては、地震計の計測限界を超えると考えられる。よって、本稿内容には適用限界があることを留意

表 3. 本報告で得られた計測震度相当値.

EV_No	計測震度相当値																											
	E/NZ1 小畑	E/NZ2 新水小	E/NZ3 布佐小	E/NZ4 利根町	E/NZ5 大森小	E/NZ6 滝野小	E/NZ7 小林中	E/NZ8 本成小	E/NZ9 福原寺	E/NZA 萩原	E/NRT1 成田小	E/NRT2 成田中	E/NRT3 成田高	E/NRT4 田町1	E/NRT5 田町2	E/NRT6 松門	E/NRT7 三重橋	E/NRT8 明徳不動	E/NRT9 奥山	E/NRTA 黒光里	E/NRTC 空浦1	E/NRTB 笠笠社	E/NRTC 笠笠社	E/SKR1 佐直中	E/SKR2 天守閣跡	E/SKR3 愛宕神社	E/SKR4 新寶多	E/SKR5 福徳寺
EV_No1	1.2	1.0	0.8	1.1	1.1	1.3	1.5	1.3	1.6	0.9	0.8	0.7	0.7	1.1	1.8	1.1	1.1	0.9	0.9	1.2	0.9	0.9	1.2	1.2	1.7	1.3	1.2	1.2
EV_No2	1.4	1.4	1.3	1.1	1.1	1.3	1.5	1.3	1.6	0.9	1.0	0.7	0.7	1.1	1.8	1.1	1.1	0.9	0.9	1.2	1.0	1.0	1.2	1.2	1.7	1.3	1.2	1.2
EV_No3	1.4	1.6	1.9	1.6	1.2	1.0	0.5	0.6	1.2	0.3	1.1	0.7	0.5	1.1	1.0	0.9	0.9	1.0	1.1	0.9	0.4	0.4	0.8	1.0	1.2	0.8	1.0	0.7
EV_No4	2.7	2.8	2.7	2.2	2.1	2.5	2.4	2.1	2.3	2.0	2.2	1.6	1.9	2.4	2.6	2.2	1.8	2.4	1.9	2.5	2.3	2.3	2.4	2.1	2.1	2.3	2.3	2.3
EV_No5	2.2	2.0	2.3	2.0	1.8	1.7	1.5	1.5	2.1	1.2	1.7	1.2	1.2	1.8	1.8	1.5	1.4	1.5	1.7	1.6	1.3	1.3	1.7	1.7	2.2	1.7	1.6	1.6
EV_No6	0.3	0.5	0.6	0.2	0.2	0.2	0.1	0.7	0.9	0.3	1.0	0.2	0.6	1.3	0.7	0.7	0.6	1.2	0.7	1.1	0.1	0.1	0.4	0.4	0.8	0.5	0.8	0.7
EV_No7	2.1	1.9	1.9	2.2	1.7	1.4	1.1	1.2	1.7	1.0	1.6	1.3	1.3	1.7	1.6	1.3	1.3	1.7	1.6	1.5	1.1	1.1	1.8	2.0	1.8	1.7	1.5	
EV_No8	0.8	1.2	0.9	0.7	0.6	0.5	0.6	0.6	0.9	0.4	0.7	0.2	0.1	0.8	0.9	0.5	0.4	0.8	0.5	0.8	0.4	0.4	0.5	0.9	0.6	0.6	0.8	
EV_No9	0.6	0.8	0.7	0.6	0.4	0.3	0.5	0.5	0.7	0.4	0.6	0.0	0.1	0.6	0.7	0.4	0.2	0.6	0.4	0.6	0.3	0.3	0.5	1.1	1.1	0.6	0.5	0.6
EV_No10	0.0	0.0	0.3	0.3	-0.2	0.3	0.3	0.0	0.5	-0.2	1.0	0.3	0.5	1.2	1.4	1.1	0.9	0.9	0.6	1.1	0.2	0.2	0.7	1.0	1.0	0.8	0.6	0.5
EV_No11	0.9	1.4	1.1	0.9	0.6	0.7	0.5	0.8	1.5	0.4	1.2	0.4	0.5	1.0	1.2	1.1	0.8	0.9	1.0	1.0	0.3	1.2	1.1	1.3	1.2	1.1	1.1	1.2
EV_No12	1.4	1.4	1.3	1.3	1.2	1.3	1.6	1.4	1.8	1.0	1.5	1.1	1.2	1.7	2.1	1.6	1.4	1.5	1.3	1.7	1.3	1.2	1.7	2.1	1.7	2.1	1.6	1.5
EV_No13	1.6	1.9	1.5	1.4	1.2	1.4	1.1	1.4	1.9	0.9	1.6	0.9	0.9	1.6	1.6	1.5	1.3	1.5	1.4	1.4	0.9	1.0	1.5	1.7	1.6	1.4	1.5	
EV_No14	1.4	1.5	1.4	1.1	0.9	0.8	1.1	0.9	1.2	0.9	1.4	1.0	0.8	1.4	1.5	1.2	0.9	1.5	1.1	1.4	0.9	1.1	1.1	1.8	1.2	1.2	0.9	1.0

本報告で見積もった計測震度相当値の一覧。橙色のセル内の値は、各地震の最大の計測震度相当値である。下線付きの計測震度相当値は、各アレイでの最大計測震度相当値であることを示す。

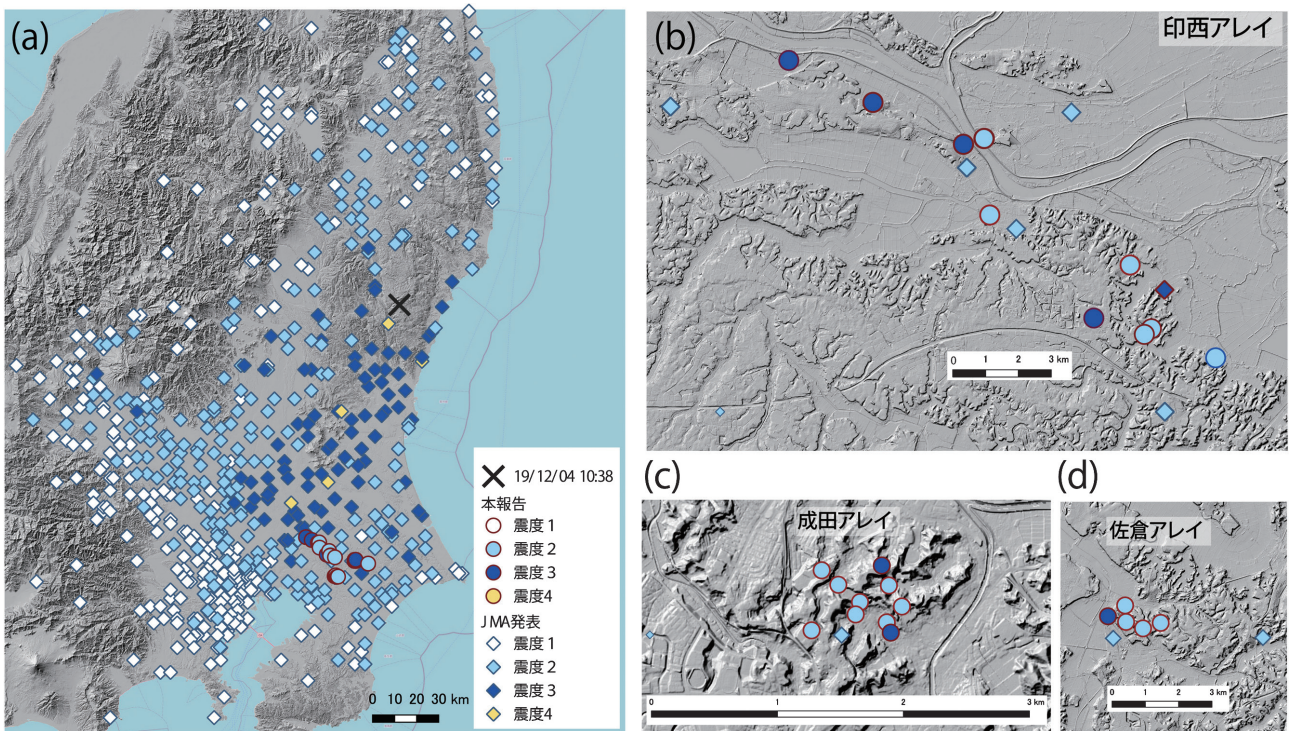


図 6. 2019 年 12 月 4 日 10 時 38 分の震度分布図. 気象庁による震度階 (ダイヤ) と本報告で見積もった計測震度相当値に基づく震度階 (丸) を併せて示す. シンボルの色は震度階に対応している. (a) 広域震度分布図. (b) 印西アレイ周辺の震度分布図. (c) 成田アレイ周辺の震度分布図. (d) 佐倉アレイ周辺の震度分布図.

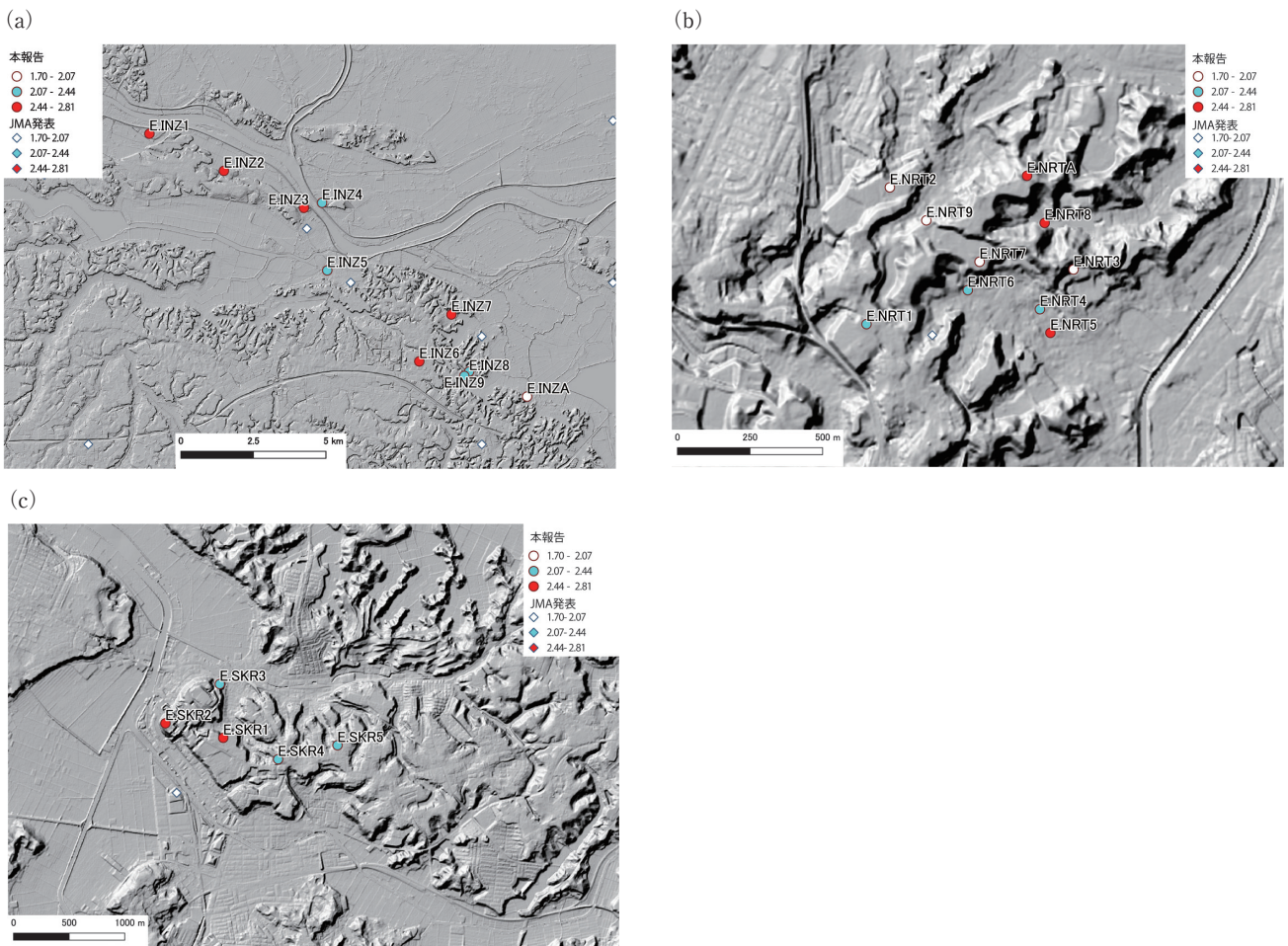


図 7. アレイごとの計測震度相当値の分布. (a) 印西アレイ. (b) 成田アレイ. (c) 佐倉アレイ. シンボルの色が図 6 とは異なることに注意.



図 8. 14 地震に対するアレイごとの計測震度相当値の大きさの比較. 横軸に地震番号を示す. 縦軸は, 地震毎の各アレイ (臨時観測点のみを対象) での計測震度相当値の平均と各観測点の計測震度相当値との差. (a) 印西アレイの結果. E.INZA の計測震度相当値が, 地震によらず, 他の印西アレイの観測点と比べて相対的に小さくなる. 逆に, E.INZ9 では, 地震によらず, 印西アレイの他の観測点と比べて計測震度相当値が大きくなっていることが分かる. (b) 成田アレイの結果. E.NRT2 および E.NRT3 の計測震度相当値が, 地震によらず, 他の成田アレイの観測点と比べて相対的に小さくなる. 逆に, E.NRT4 および E.NRT5 では, 地震によらず, 他の成田アレイの観測点と比べて計測震度相当値が大きくなっていることが分かる. (c) 佐倉アレイの結果. E.SKR2 の震度が, 佐倉アレイの他の観測点と比べて相対的に大きくなる様子が見られる.

する必要がある。

ま と め

本稿では、臨時地震観測で得られたレナーツ地震計の速度波形を用いて計測震度相当値を推定する取り組みを紹介した。本取り組みで得られた計測震度相当値は、その近傍で記録された気象庁による公表震度値から大きく外れることはなかった (± 1 以内)。また、その地域性が過去の地震による被害分布とよく対応していることも示された。これらのことから、臨時地震観測データを用いた計測震度相当値の推定が、公表される震度分布からは把握できないような地域的な揺れの特徴の議論に有用と考えられる。以上のような結果と示唆を受け、既存の臨時地震観測のデータに対して本試みと同様の解析を行うことで詳しい揺れの地域性の把握につながり、これが地域の防災対策検討に有用な情報になるものと考えている。このような取り組みは、利用が限定的であった臨時観測データの有効活用にもつながるため、積極的に進めていきたいと考えている。ただし、本文中でも述べたように、臨時観測の観測点の設置状況や設置環境は、気象庁の震度計の設置基準を満たしているわけではない。また、同一の臨時観測内においても、これらが同じである保証はないため、臨時観測データに基づく計測震度相当値の扱いには注意が必要である。さらに、本報告で扱った揺れは最大で震度3程度であるため、被害をもたらすような大震動の場合には、地震計の飽和による異常波形が生じ(汐見ほか, 2005)、計測震度相当値が正しく見積もられないことが想像される。つまり、本評価方法の適用限界にも十分に注意が必要である。

そこで、これらの課題解決に向け、地震計の設置方法によって生じる観測データの違いや、速度計と加速度計の同時並行観測を開始した。これらの調査については、観測結果がまとめ次第、改めて報告予定である。

謝 辞：本報告使用した地震データは、地震研究所共同利用特定機器を利用して得られました(共同利用コード 2019-M-01, 2019-M-02)。計測震度を算出する際には、工学院大学の久田嘉章博士のフォートランプログラム(shindex.f)を一部改造して使用させていただきました。本報告の図の一部は、GMT (Wessel *et al.*, 2013) および QGIS を使用して作成しました。本報告は、三宅弘恵博士と上嶋誠博士に査読していただきました。おふたりからは非常に有意義なコメントをいただき、著者一同、心より感謝しております。大変ありがとうございました。

なお、地震観測の際には、成田山新勝寺、成田空港株式会社、成田市立成田小学校、成田市立成田中学校、成田市教育委員会、私立成田高校、成田市徳田様、成田市山野様、佐倉市立佐倉中学校、佐倉市教育委員会、国立民俗博物館、佐倉市麻賀多神社、佐倉市嶺南寺、佐倉城址公園、取手市倉持様、我孫子市立新木小学校、我孫子市立布佐小学校、

我孫子市教育委員会、利根町役場、印西市立大森小学校、印西市立滝野小学校、印西市立本埜小学校、印西市立小林中学校、印西市教育委員会、印西市竜腹寺、印西市中村様、およびその関係者の皆様には大変お世話になりました。記して感謝いたします。

文 献

- Goldstein, P. and A. Snoke, 2005, SAC availability for the IRIS community, *Data Services Newsletter*, 7.
- Goldstein, P., D. Dodge, M. Firpo and L. Minner, 2003, SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers, in *International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology, Part B*, edited by W.H.K. Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings and C. Kisslinger, Academic Press, London, pp. 1613-1620.
- 石瀬素子・中村亮一・原田智也・飯高隆・中川茂樹・佐伯綾香・引間和人・酒井慎一, 2020, 現代の地震観測の歴史地震研究への応用(その1) 1855年安政江戸地震の江戸郊外における震度の地域性検証のためのパイロット観測, *JpGU-AGU 2020, MIS28-P06*.
- Katsumata, K., M. Ichianagi, M. Ohzono, H. Aoyama, R. Tanaka, M. Takada, T. Yamaguchi, K. Okada, H. Takahashi, S. Sakai, S. Matsumoto, T. Okada, T. Matsuzawa, S. Hirano, T. Terakawa, S. Horikawa, M. Kosuga, H. Katao, Y. Iio, A. Nagaoka, N. Tsumura, T. Ueno and the Group of the Aftershock Observations of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake, 2019, The 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake ($M_{\text{JMA}}=6.7$) was triggered by a strike-slip faulting in a stepover segment: insights from the aftershock distribution and the focal mechanism solution of the main shock, *Earth Planets Space*, 71, doi:10.1186/s40623-019-1032-8.
- 気象庁(監修), 1996, 震度を知る—基礎知識とその活用—, 株式会社ぎょうせい, 238頁.
- 気象庁ホームページ(計測震度の算出方法), https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/calc_sindo.htm (参照 2020-09-26).
- 気象庁ホームページ(震度観測点), <https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/intens-st> (参照 2021-1-6).
- 木下繁夫, 1998, サーボ型地震計, *地震* 2, 50, 471-483.
- Leennartz electronic Web top page, <http://www.leennartz-electronic.de>, (参照 2020-11-08)
- 酒井慎一, 2019, サブプロ(b)データ利活用分科会の試み「集客施設で地震観測する理由〜成田国際空港との連携」, 首都圏を中心としたレジリエンス総合向上プロジェクト平成30年度成果報告会.
- Shito A., S. Matsumoto, H. Shimizu, T. Ohkura, H. Takahashi, S. Sakai, T. Okada, H. Miyamachi, M. Kosuga, Y. Maeda, M. Yoshimi, Y. Asano and M. Okubo, 2017, Seismic velocity structure in the source region of the 2016 Kumamoto earthquake sequence, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 7766-7772, doi:10.1002/2017GL074593.
- 汐見勝彦・小原一成・笠原敬一, 2005, 防災科研 Hi-net 地震計の飽和とその簡易判定, *地震* 2, 57, 451-461.
- 竹尾明子, 西田 究, 青木陽介, 青山 裕, 石瀬素子, 前田拓人, 水谷雄太, 甲斐 建, 中島悠貴, 長原翔伍, 栗原 亮, Y. Lingling, W. Xiaowen, 悪原 岳, 2019, 昭和新山地下構造推定のための稠密地震観測と初期解析結果, 日本地震学会 2019年度秋季大会, S06P-04.
- Wessel, P., W.H.F. Smith, R. Scharroo, J. Luis and F. Wobbe, 2013, Generic mapping tools: Improved version released, *EOS Trans.*, 94, 409-410.