

報 告

津波実験水槽におけるミニチュア津波観測装置の設置

三反畑 修^{*†}・塩原 肇^{**}・楠本 聡^{*}・HyeJeong Kim^{**}・大峯充己^{***}・Qi Liu^{***}・
上田 拓^{****}・小川 諄^{***}・高野和俊^{***}・壽 一哲^{***}・Yuchen Wang^{*}

Equipment of Miniature Instruments to Measure Tsunami Waves in an Experimental Tank

Osamu SANDANBATA^{*†}, Hajime SHIOBARA^{**}, Satoshi KUSUMOTO^{*}, HyeJeong KIM^{**},
Atsuki OBA^{***}, Qi LIU^{***}, Taku UEDA^{****}, Makoto OGAWA^{***},
Kazutoshi TAKANO^{***}, Ittetsu KOTOBUKI^{***}, and Yuchen WANG^{*}

はじめに

東京大学地震研究所では、毎年8月初旬に東京大学のオープンキャンパスに合わせて、「一般公開」が開催される（東京大学地震研究所，参照 2018）。その一環として、地震研究所所属の博士・修士学生が主体となり、地球科学的知見や研究活動に関するアウトリーチを目的として、様々な実験装置を用いた「学生実験」を行っている。中でも「実験水槽を用いた津波実験」は、2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波災害以降、市民の認知度が高い津波について、その発生から伝播、浸水・遡上を含む物理現象を水槽内で観察しながら学ぶことができるため、毎年来所者からも好評である（図 1）。

近年、津波研究分野の進展として、津波観測網の発達が挙げられる。日本では、気象庁が管轄する検潮所や津波観測計（鶴岡ほか，2015），海上保安庁が管轄する験潮所（海上保安庁海洋情報部，参照 2018），国土地理院が管轄する験潮場（国土地理院，参照 2018）などの「潮位計」や、沖合に展開されている国土交通省による「GPS 波浪計」（加藤ほか，2003；国土交通省港湾局，参照 2018）に加え、沖

2018 年 9 月 28 日受付，2019 年 1 月 16 日受理。

[†] osm3@eri.u-tokyo.ac.jp

^{*} 東京大学地震研究所地震火山情報センター

^{**} 東京大学地震研究所海半球観測研究センター

^{***} 東京大学地震研究所災害科学系研究部門

^{****} 東京大学地震研究所地震予知研究センター

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

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

^{***} Division of Disaster Mitigation Science, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo.

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

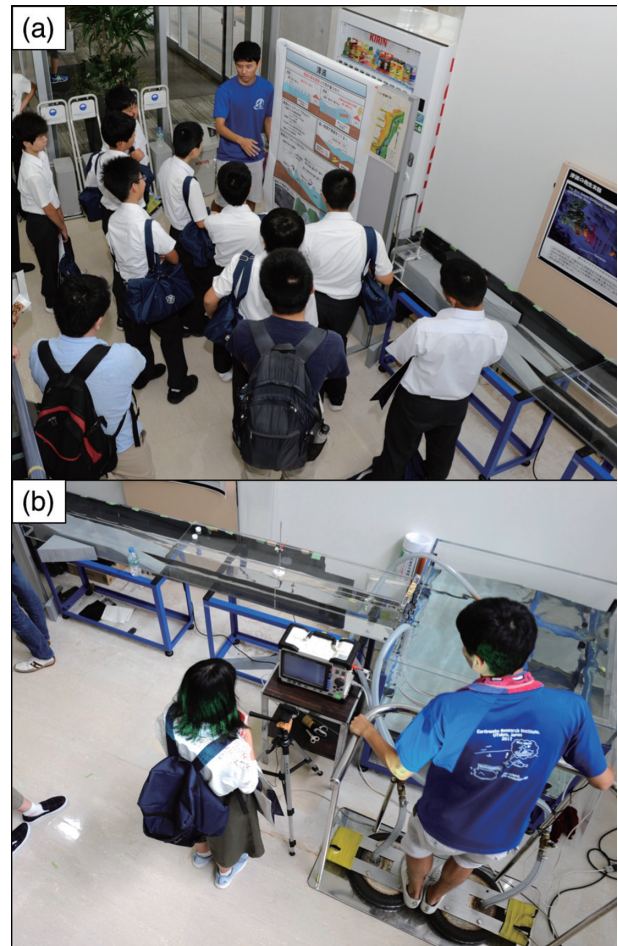


図 1. 2017 年度一般公開における「実験水槽を用いた津波実験」の様子。a はポスター解説の様子，b は実験水槽を用いた実験の様子。

合の海底に設置されている「海底水圧計」を用いた津波観測網などによって、観測体制が整備されている（気象庁、参照 2018）。これらの観測網は、津波現象や巨大地震の震源過程解析などの地球科学的な研究のみならず、津波の早期検知による津波警報・注意報などの即時予報技術の向上を通して、津波被害を受けやすい沿岸地域の防災・減災にも重要な役割を果たし、今後の更なる貢献が期待されている。

しかしながら、2015 年度・2016 年度の地震研究所一般公開において、津波観測網について口頭やポスターで説明を行ったところ、来所者の反応からその認知度の低さが見受けられた。また、地球物理観測に馴染みのない来所者に対して、津波観測の原理やその意義を十分に伝えるためには、口頭やポスターのみでの説明は効果的ではない印象を受けた。そこで我々は、「津波観測の原理および重要性のアウトリーチ」を目的として、実際の津波観測手法を参考にした「ミニチュア津波観測装置」を設計・製作し、既存の津波実験水槽に設置し、2017 年度、2018 年度の一般公開において実演・展示を行った。

実験水槽での津波現象の再現

まず今回作成するミニチュア津波観測装置の設置対象とした実験水槽の構造と、水槽内で再現できる津波現象について解説する。津波実験に用いる実験水槽は、アクリル水槽（株式会社ユーシンツール製）で、長さ 100 cm、奥行き 100 cm、高さ 60 cm の本体部分と長さ 261 cm、奥行き 9 cm、高さ 31 cm の水路部分から構成される（図 2）。また水路内には、海岸地形を模して加工された塩化ビニル製のブロックが配置されており、静水時に水路中での水深が 10 cm となるように注水すると、緩やかな斜面に挟まれた浅水域（水深 5 cm）と、静水時の海水面とほぼ同じ高さの陸域から成る海岸地形を形成できる。

以下で、本実験水槽で再現可能な津波の物理現象の概要をまとめる。

(1) 海底地形の変化による津波の発生

津波は海底の地下浅部で生じた断層運動（地震）や海底

斜面での土砂崩れなどにより、数秒から数百秒の時間スケールで数 km から数百 km の空間スケールにわたって海底地形が変形し、海水面が隆起あるいは沈降することによって発生する。

実験水槽内で海底地形の変形による津波発生を模するため、水槽の本体部分に津波発生装置が設置されている（図 2）。この津波発生装置は、水槽本体部分の底と水槽外に設置された鉄板を乗せた空気バネと、それらを密封して接続するチューブから構成される。水槽外の空気バネを人力で踏んで水槽内の空気バネに空気を送り込み、水槽内の鉄板を持ち上げることで底面を隆起させ、津波の発生を再現する。

(2) 津波の伝播

海底面の隆起あるいは沈降によって発生した津波は、重力を駆動力として伝播する。津波の伝播には以下の特徴が挙げられる。(a) 深水域で速く、浅水域で遅く伝播する。(b) 水深が小さい浅水域に近づくにつれて、波長が短くなり、振幅が大きくなる（津波の「浅水変形」という）。(c) 浅水域を進みながら、次第に津波は前傾し、最終的に碎波する。

実験水槽は透明なアクリル材で製作されているため、水路中を伝わる津波の速さ、波高および波形の変化を観察することができる。図 3 は、水路部分を伝播する津波を側面から 0.1 秒毎に撮影したスナップショット写真を並べて示しており、右側の接続部から侵入した津波が右から左方向へと伝播する過程で、(a)～(c) の津波伝播の特徴を観察できる。

(3) 津波の浸水・遡上

海岸での波高が海浜や護岸などの海岸地形よりも高い場合、津波は陸上に浸水・遡上する。この時、海岸付近の地形によって津波の浸水高・遡上高は大きく変化する。例えば、沖積低地のような開けた海岸線を持つ平野地形に比べ、リアス式海岸のような谷間地形では、海岸付近で急激に津波の振幅が大きくなり、浸水高・遡上高も高くなる。

実験水槽の水路内に設置された陸域部分に、谷間地形の急峻な斜面を模して塩化ビニルブロックを V 字型に配置

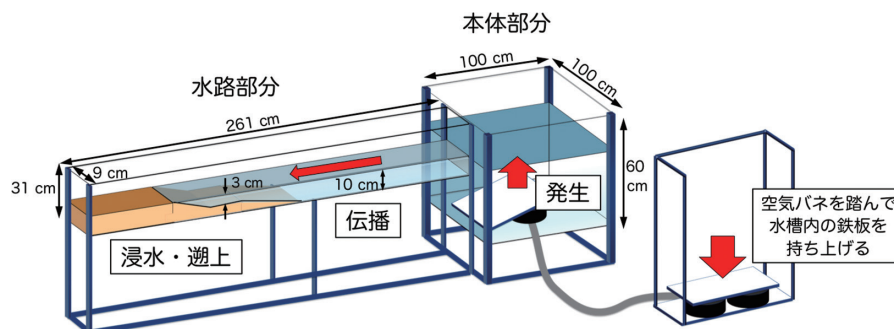


図 2. 実験水槽の模式図。

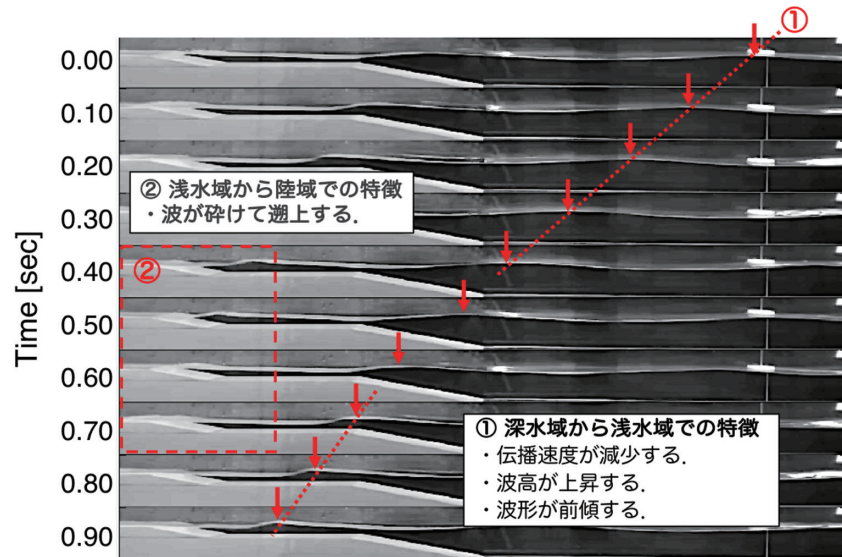


図 3. 水路中を伝わる津波を、水路側面から 0.1 秒間隔で撮影したスナップショット画像。水面が強調されるように画像を加工してある。赤色の矢印は、およその津波のピーク位置を示し、それらを結んだ赤色の点線によって、伝播速度の変化を強調している。また、赤色の破線内では津波の碎波の様子を示している。

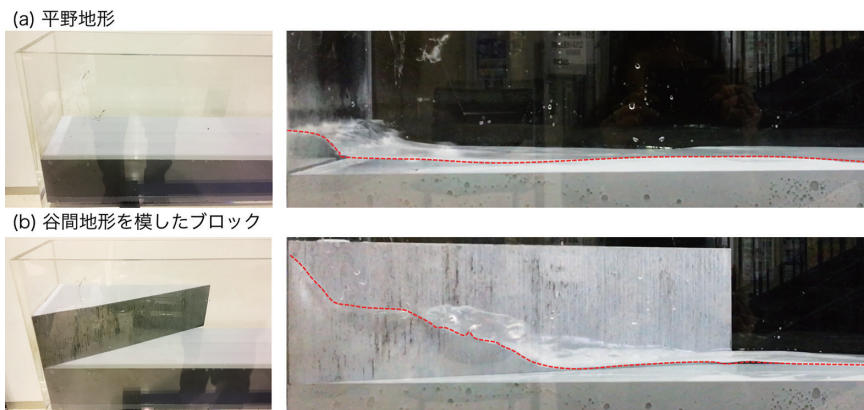


図 4. 実験水槽での津波の遡上・浸水の様子。a は平野地形を模したブロック配置、b は谷間地形を模したブロックを配置した時の様子。赤色の破線は津波のおおよその水面を示している。

し、水路を狭めることで、上述のような海岸部の谷間地形が津波の浸水高・遡上高に与える影響を再現することができる（図 4）。同規模の津波を与えても、ブロックがない場合（平野地形）と比較して、ブロックがある場合（谷間地形）には、海岸付近で急激に水位が高くなり、浸水高・遡上高が倍増する様子が見られ、海岸地形によって津波による被害の大きさに違いがあることを、視覚的に理解することができる。

主な津波観測手法

本節では、津波実験水槽に設置したミニチュア津波観測装置のモデルとなった二種類の観測機器、すなわち「フロート式潮位計」および「海底水圧計」について、それぞれの原理と特徴を解説する（図 5）。

(1) フロート式潮位計

沿岸部の験潮所に設置され、海水と繋がった験潮井戸の水面にフロートを浮かべて水位を測定し、潮汐や津波の観測を行う（図 5a）。沿岸部に設置されるため、電力線や電話線を引き込みやすく、観測点の設置・維持を比較的に安価に実施できる。一方で、沿岸部での設置に限られるため、津波の沿岸部到達前の津波即時予測には不向きであるほか、津波で被災しやすいという難点がある。

(2) 海底水圧計

水晶式圧力センサー等を組み込んだ水圧計を海底に設置し、津波による海水面の上下変動に伴う海底での水圧変動を計測することで、間接的に津波の波高を観測する（図 5b）。人工衛星や海底ケーブルを経由し、陸上の観測所にデータをリアルタイムで送信することができるため、沿岸

部到達前に沖合での津波観測が可能となり、沿岸部での津波波高・到達時間などの即時予測に有用である。一方で、観測機器は高価であることに加え、沖合での設置および維持も困難という難点がある。

例えば国内では、東京大学地震研究所が1996年に釜石沖に設置したケーブル式海底水圧計のほか、防災科学技術研究所が運用する、東南海・南海地震の想定震源域の

DONET¹ (Kawaguchi et al, 2008 ; Kawaguchi et al, 2013 ; 海洋研究開発機構, 参照 2018 ; 高橋, 2017) や日本海溝沿いの S-net (防災科学技術研究所, 参照 2018 ; 高橋, 2017) がある。国外ではアメリカ海洋大気庁運用の DART システム (NOAA Center for Tsunami Research, 参照 2018) などが太平洋沿岸国の津波防災や研究に広く用いられている。

ミニチュア津波観測装置の製作・設置

今回我々が設計・製作したミニチュア津波観測装置は、沿岸のフロート型潮位計を模した「フロート型波高計」と、沖合の海底水圧計を模した「水中圧力計」の二種類である。実験水槽で発生させる極めて小規模な津波（振幅約 2 cm）への影響をできるだけ与えないこと、安価に観測を実現できることを念頭に、以下二点の観測装置を製作し、実験水槽に設置した（図 6c）。

(1) フロート型波高計

水中に鉛直に立てた金属棒をガイドとして、穴の空いた発泡スチロールのフロートを水面に浮かべ、シャープ株式会社製の反射型赤外線測距モジュール（GP2Y0E03）を水槽の天井に設置した（図 6a）。この測距モジュール（アナログ出力を使用）によって、水槽の天井とフロートの間の距離を非接触で測定し、津波による振幅約 2 cm の水面の上下変動を電気信号の変動として観測する（センサー感度

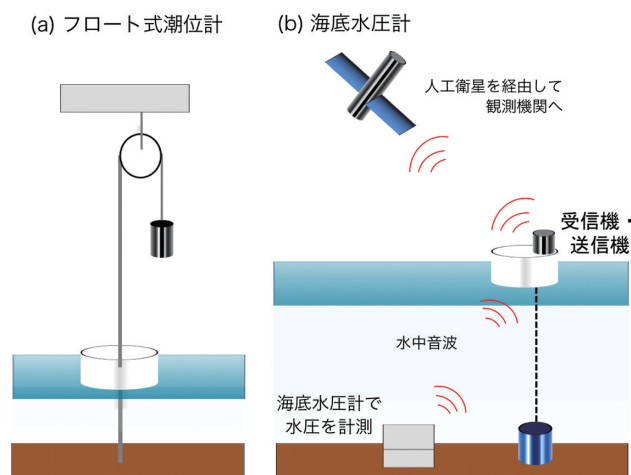


図 5. 津波観測の仕組みの模式図。a は沿岸部の潮位計，b は沖合での海底水圧計をそれぞれ表す。

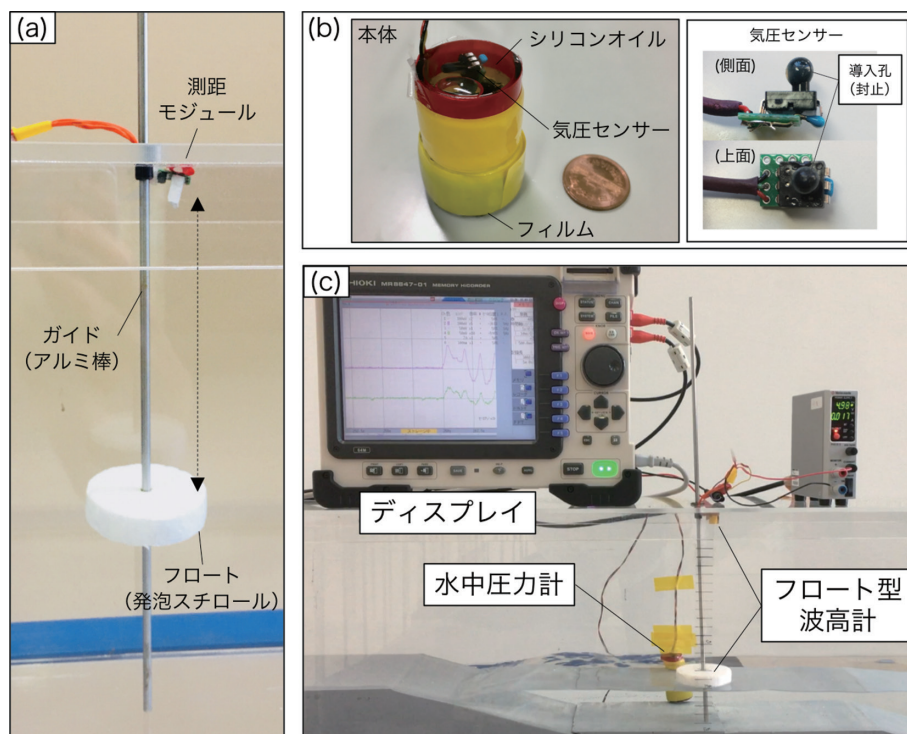


図 6. ミニチュア津波観測装置と観測の様子。a はフロート型波高計，b は水中圧力計，c はミニチュア津波観測装置を用いた津波観測の様子。

¹ 海洋研究開発機構により開発・設置された。2016 年 4 月 1 日をもって、海洋研究開発機構から防災科学技術研究所へ移管された。
(http://www.bosai.go.jp/press/2016/pdf/20160401_01_press.pdf).

26.6 mV/cm；精度 ± 19.0 mV；分解能 1.0 mV).

(2) 水中圧力計

小型円筒プラスチック容器内に、メトロダイン社製のピエゾ式気圧センサー (MIS-2500-015G) をシリコンオイルで満たし、容器の開口部を薄いフィルムで密閉した (図 6b). この際、差圧測定型の本気圧センサー (動作範囲: 15 psi [約 1034 hPa]) の導入孔を封止し、容器内で圧力変動を測定できるように加工した. センサーの端子 (電源と出力) を水から絶縁し、津波の波高による水压変動に対する感度を上げるため、容器内をシリコンオイルで満たした. 本装置を水槽の底に沈め、水面の上下変動を水压の変動として検知し、振幅約 2 cm の津波を電気信号として観測する (センサー感度 3.10 mV/cm；精度 ± 1.38 mV；分解能 0.50 mV).

ミニチュア津波観測装置の実演・展示

2017 年度、2018 年度の一般公開において、上述のように実験水槽に設置した二点のミニチュア津波観測装置の実演・展示を行った.

津波波形に対応する電気信号を分かりやすい形で示すために、津波を繰り返し発生させ、津波が観測装置設置点を通過する際の水面の変動を観測した (図 6c). 両観測装置で測定した電気信号を、日置電機株式会社製のカラー液晶表示器付データロガー (MR8847-01) によって、5 Hz のローパスフィルターで高周波ノイズを除去し、液晶ディスプレイにリアルタイムで表示した. また、必要に応じて紙面に印刷して来所者に配布した.

図 7 で示した波形は、繰り返し発生させた津波を、フ

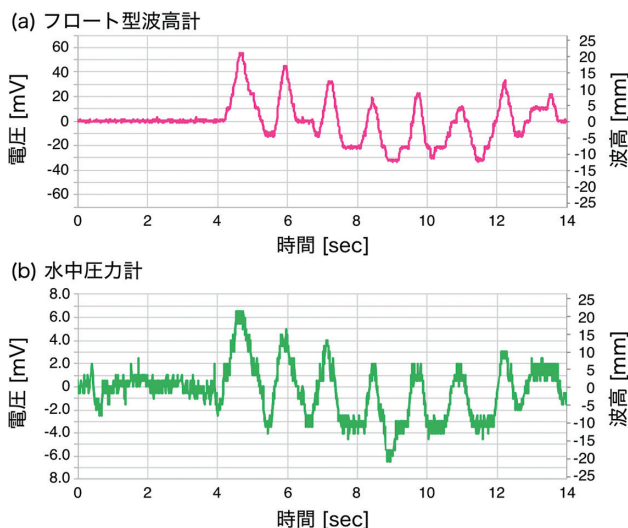


図 7. ミニチュア津波観測装置で記録した津波波形に対応する電圧変動および対応する津波波高. a はフロート型波高計, b は水中圧力計によって記録した電圧変動および波高をそれぞれ表す. 波高は各観測装置のセンサー感度を用いて、電圧変動値から計算した. 4 秒付近から津波波形が観測されている. 波形には 5 Hz のローパスフィルターをかけ、高周波ノイズを除去している.

ロート型波高計と水中圧力計によって記録した電圧変動波形の一例である. 水路内を伝播する津波に伴う振幅約 2 cm の水面の上下変動を、フロート型波高計によって最大約 55 mV, 水中圧力計によって最大約 6.5 mV の電圧変動として、それぞれ検知することに成功した.

ミニチュア観測装置を用いた本展示では、目前の実験水槽内を伝播する津波に伴う水面の上下変動と同時に、それに対応して変動する電気信号の波形を観察することが可能となった. このことによって、口頭やポスターのみで津波観測手法を解説していた例年の一般公開での展示の際に比べて、来所者の反応も非常に良好であった. 実際の物理現象と観測記録を同時に可視化することは、津波の波形記録に見慣れない市民にとって、潮位計や海底水压計を用いた津波観測の原理を理解し、その意義を実感するために、非常に効果的であったと言える.

ま と め

今回我々は、「津波観測の原理とその重要性のアウトリーチ」を目的として、潮位計を模した「フロート型波高計」と海底水压計を模した「水中圧力計」を製作し、2017 年度、2018 年度の地震研究所一般公開において設置・展示・解説を行った. 水槽を用いて津波現象を再現することに加えて、実際の観測装置を模した装置を目に見える形で取り付け、津波の観測記録を明示することは、観測データをもとに研究をしている地球科学者の研究活動を、市民が身近に感じるきっかけになると期待される. 特に、ミニチュア水压計による津波観測を再現する本展示は、津波を沿岸到達前に捉え、沿岸での津波波高・到達時間を予測するのに用いられている海底水压計を用いた津波観測網のアウトリーチ活動としても有用である.

また、本展示で製作したミニチュア津波観測装置に用いたセンサーや部品は、安価で入手容易なものを用いているため、比較的容易に製作・設置することが可能である. そのため、同様の津波実験水槽を所蔵する研究機関や高等学校・大学などの教育機関などにおいて、実習授業や課題研究の一環として教育活動への応用も期待される.

謝 辞：東京大学地震研究所の市原美恵准教授、菅野洋博士学生に、津波波形のスナップショット撮影に際して、同研究所の新谷昌人教授、宮本成悟助教、大橋正俊博士学生、山河和也博士学生には、一般公開の展示全般について、多大なるご協力を頂きました. 弘前大学の前田拓人准教授より、観測装置設置に関して有益なご助言を頂きました. 同研究所庶務チームの中尾倫子氏より、一般公開当日の様子の写真をご提供頂きました. また査読者の岩崎貴哉教授と酒井慎一教授には本稿を改善するうえで有益なご指摘を頂きました. 以上、記して感謝申し上げます.

文 献

- 海上保安庁海洋情報部, リアルタイム験潮データ, http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/TIDE/real_time_tide/sel/index.htm, (参照 2018-09-28).
- 海洋研究開発機構, 地震・津波観測監視システム, <https://www.jamstec.go.jp/donet/j/donet/>, (参照 2018-09-25).
- 加藤照之・寺田幸博・松岡幸文・高田美津雄, 実海域における GPS 波浪計・津波計の性能確認実験, 2003, 海洋開発論文集, **19**, 839-844.
- 気象庁, 津波観測点 (全国), <https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/tsunamimap/index.html>, (参照 2018-09-25).
- 国土交通省港湾局, ナウファス (全国港湾海洋波浪情報網), <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>, (参照 2018-09-25).
- 国土地理院, 潮位を測る (験潮), http://www.gsi.go.jp/kanshi/tide_index.html, (参照 2018-09-28).
- 高橋成実, 2017, 防災科学技術研究所が運用する地震津波海域観測網—DONET & S-net, 地震予知連絡会会報, 第 98 巻, 12-8.
- 鶴岡 睦・鈴木博樹・九谷昌治・中館 明, 2015, 潮位・津波観測システムについて, 測候時報 (海洋気象特集), **83**, S105-S123.
- 東京大学地震研究所, 2018, 一般公開 2018, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/panko/>, (参照 2018-09-25).
- NOAA Center for Tsunami Research, DART® (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis), <https://nctr.pmel.noaa.gov/Dart/>, (参照 2018-09-27).
- Kawaguchi, K., Y. Kaneda, and E. Araki, 2008, The DONET : A real-time seafloor research infrastructure for the precise earthquake and tsunami monitoring, *Proceedings of OCEANS'08 MTS/IEEE KOBE /TECHNO-OCEAN '08 (OTO'08) 2008*, April 8-11, Kobe, JAPAN, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4530918>.
- Kawaguchi, K., E. Araki, Y. Kogure, N. Takahashi, T. Katayama, K. Hishiki, N. Fujiwara, N. Iida, and Y.I Kaneda, Development of DONET2—Off Kii Chanel Observatory Network, *Proceedings of International Symposium on Underwater Technology 2013*, March 2013, <https://ieeexplore.ieee.org/document/6519844>.
- 防災科学技術研究所, 日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) 整備事業, <http://www.bosai.go.jp/inline/>, (参照 2018-09-25).