

WIN システムに対応した リアルタイム Waterfall プロット描画ツール

大塚宏徳^{*†}・田中伸一^{**}・篠原雅尚^{**}

Real-Time Waterfall Visualization Tool for the WIN System

Hironori OTSUKA^{*†}, Shinichi S. TANAKA^{*} and Masanao SHINOHARA^{**}

はじめに

データの可視化は、地震観測を含む多くの研究分野で重要な役割を果たす。適切な可視化は新たな知見の獲得に寄与するだけでなく、観測施設の維持管理においても不具合の早期発見や原因究明に繋がる。自然地震観測の分野では、防災科学技術研究所による Hi-net の 100 トレース連続波形画像（防災科学技術研究所ウェブサイト）が好例であり、全国の地震活動を俯瞰できるなど多チャンネルトレース画像の有用性はすでに実証されている。

WIN システム（卜部・東田, 1992）においても、従来から shmx, shmck, shmz など複数の波形表示ツールが提供されており、複数観測点の同時監視が可能である（例えば 鶴岡, 2022）。しかし、これらは主に選択したチャンネルにデータが正しく送られているか確認するためのツールであり、通常のディスプレイでは数十チャンネル程度の表示が限界である。そのため、100 を超えるようなチャンネルを同時に監視するのに適した既存ツールはなかった。

近年では光ファイバーを用いた分散型音響センシング（DAS）による観測が進展し（例えば Shinohara et al., 2022）、1 観測あたり数百から数万チャンネルのリアルタイム監視が視野に入ってきている。このような新しい観測手法に対応するため、多チャンネル信号を効率的に監視できる技術が求められている。

開発背景

DAS 観測分野では、大規模な波形データをリアルタイムで監視するための標準的な手法として Waterfall プロットが用いられている（例えば Ho et al., 2026; 中道ほか 2024）。Waterfall プロットは、多チャンネル信号の値を時系列に沿ってカラー表示する方法であり、最新データが上端から流れるように表示されることからその名がある。もともと周波数解析分野で発展した表示技術であり（例えば Smith et al., 1989）、DAS 以外では、ソフトウェア無線（SDR）の周波数解析などに広く利用されている（例えば GNU Radio ウェブサイト）。

このような背景から、本報告では DAS 観測でのデータ伝送を想定し、本邦の地震観測網で標準的な伝送系である WIN システムに対応したリアルタイム Waterfall プロットの描画ツールを開発することを目的とした。本ツールは既存の WIN コマンド群（卜部・東田, 1992）の中でも特に shmdump との親和性を保ちつつ、Python で実装することで汎用性と可搬性を確保した。

実装方法

Waterfall プロットを実現するためには、最新のデータを常に描画領域の上端に保持できるリングバッファ構造が必要となる。本ツールでは、チャンネル数に対応した 2 次元のリングバッファを設け、リアルタイムに入力されるデータを numpy array へ格納する仕組みを採用した。また時刻情報については別のインデックスで管理し、リングバッファの正しい位置にデータが書き込まれる仕組みとした。そのためバケットの遅延に対しても頑強となっている。

入力は shmdump の -tq オプションによる「1 行 1 チャンネル形式」の標準出力を前提とし、必要に応じて波形ファイルなど既存の WIN ツール群を併用できるよう設計した。処理には scipy と numpy を使い、描画は matplotlib の

2025 年 10 月 1 日受付, 2025 年 12 月 10 日受理.

[†] hotsuka@eri.u-tokyo.ac.jp

^{*} 東京大学地震研究所技術部総合観測室

^{**} 東京大学地震研究所観測開発研究センター

^{*} Technical Supporting Section for Observational Research, Technical Division, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

^{**} Research Center for Geophysical Observation and Instrumentation, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

animation 機能で実装した。多チャンネルの同時処理における遅延を抑えるため、入力処理には threading による並列処理を導入している。

複数のサンプリング周波数が混在する観測データに対応するため、入力データは 100 Hz にリサンプルして統一し、欠測については 0 によるパディング処理とした。描画チャンネルはチャンネルテーブルにより指定可能であり、recvf で受信する全伝送データから任意のチャンネルを選択できる。

さらに、本ツールはコマンドラインオプションによって描画方法を切り替える設計とした。オプションなしでは生波形の variable density plot を表示する。Variable Density は振幅と極性の両方を表現する用途で用いられ、反射法地震探査の断面表示で一般的な表現手法である。本ツールでは反射断面図と同様に多チャンネルトレースを並べて表示するため採用した。-e オプションでヒルベルト変換による瞬時振幅（エンベロープ）[0] または RMS 振幅 [1] によるカラープロットを生成する。-n オプションによりチャンネル単位での正規化も可能であり、Z-score [0] または robust Z-score [1] を選択できる。Z-score ではデータが正規分布に近い事を前提にしているため、 σ が安定した信号の長期変動をモニタするのに適している。表示が飽和しにくい利点があるため、実質的な auto scaling として機能する。一方で robust Z-score は中央値と MAD (median absolute deviation) に基づくため、外れ値や間欠的な高振幅ノイズの影響を受けにくく、地震波やスパイクノイズを含むデータの異常検出やエネルギー可視化に適している。そのほか、時間枠の指定 (-d)、値のスケーリング (-v)、無信号チャンネルの除外 (-i)、地理的ソート機能 (-s) などのオプションを備えている (表 1)。また現行の matplotlib の機能として、描画をキャプチャするボタンが利用できる。

使 用 例

地震研究所が所有する三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システムでは、2025 年 3 月から DAS 観測のデータをリアルタイム伝送する実験を行っている。実験に用いた光ファイバーは Shinohara et al. (2022) と同じである。ケーブルシステムの位置を図 1 に示す。また、イントロゲーターは OptaSense 社の QuantX を使用し、観測した 10,000 チャンネルの波形データは極めてデータサイズが大きいため 100 チャンネルまで間引き、時間方向のサンプリングはイントロゲーターで 500 Hz から 100 Hz にリサンプルしたうえで WIN フォーマット (ト部, 1994) に変換して、ブロードバンド回線を経由して東京まで伝送している。この観測では 1 チャンネルの間隔が約 10 m に相当し、チャンネル群の沖合の端点はおよそ 100 km 先となる設定を用いた。

ここからは、本ツールを用いて全 100 チャンネルを表示した例を示す。図 2a に示すのは、地震が発生していない時間帯のバックグラウンドノイズの表示例である。入力は DAS 特有の低周波ノイズや沿岸部の波浪ノイズを軽減し、以後の例で地震イベントの観察がし易い帯域を表示するために shmdump による 2 Hz のハイパスフィルタを適用し、表示方法は Variable Density を選択した。また規格化を行わず生の値を表している。本ツールは単位変換を実装せず入力値を直接表示するため、本実験については振幅値の単位はイントロゲーター出力である位相 ($2\pi \times 15/\pi$ [rad]) となる。沿岸部で相対的に大きな振幅が観測されているほか、90 km 以降に大きな振幅のノイズが見られる。極性を表現できるため、距離方向に位相の連続性を追うことができる。例えば図 2b の矢印で挟んだ波群は環境ノイズのひとつと思われるが、複数チャンネルを跨いで時空間的に連続しているように見える。同じデータをエンベロープで表示した例を図 3 に示す。Variable Density でも振幅の情報

表 1. オプション一覧

オプション	省略形	説明
--channel_table	-f	チャンネルテーブルのパス。省略不可。
--vminmax	-v	プロットのスケール(フォーマット: [vmin:vmax])。
--duration	-d	プロットの時間窓。単位は秒。
--normalize	-n	Z-score[0] / robust Z-score[1] によるトレース単位の規格化。
--envelope	-e	エンベロープ[0] / RMS 振幅[1]。
--ignore_zeros	-i	無信号チャンネルの除外。
--sort_channels	-s	チャンネルテーブルに記載された緯度経度を用いて、西から東へ経度順に地理的にソートする[0] / 参照点からの距離でソートする[1]。
--ref_point	-r	地理的ソートに用いる参照点を与える(フォーマット: [latitude/longitude])
--debug		初回フレームを PNG 保存

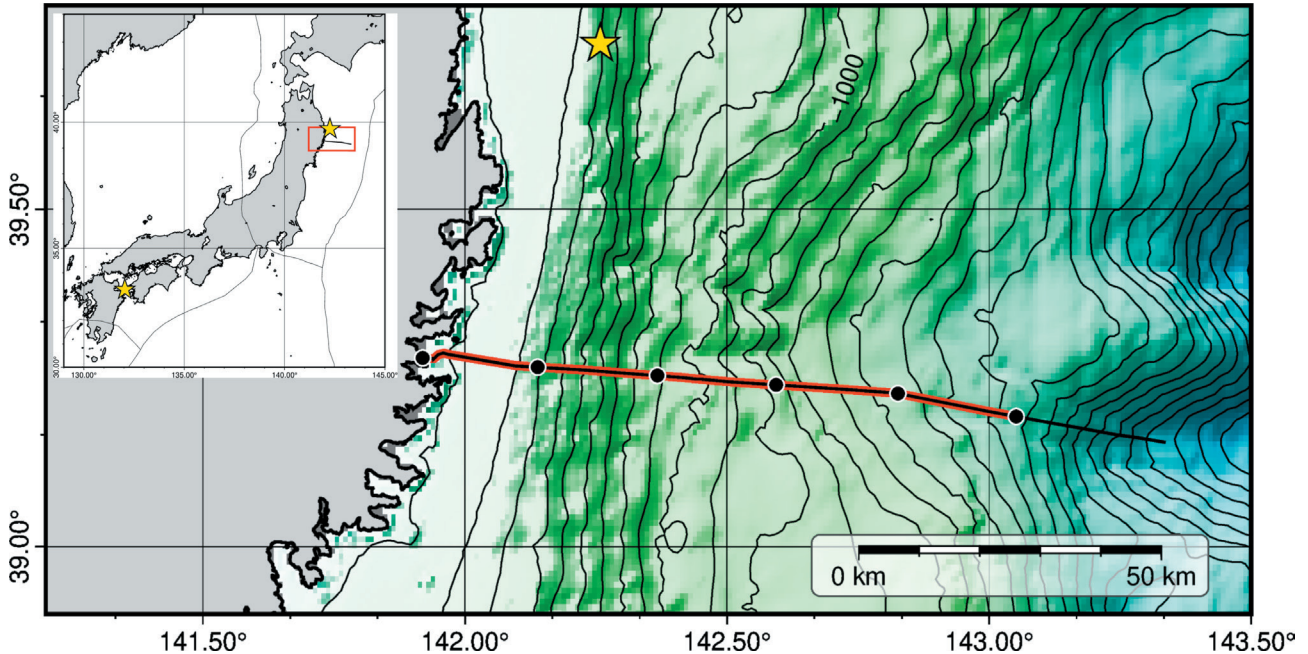


図 1. 三陸沖光ケーブルの位置. 黒実線で示す三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システム全体のうち、赤実線で示す範囲が DAS 観測で用いた観測点アレイに相当する。黒丸で示すのは間引き後の 20 チャンネル間隔の観測点位置である。左上図と拡大図中の星印は本文中で述べる地震の震央位置を示す。

が含まれているが、様々な波長が混在する場合などに情報量が多くなり振幅を読み取るのが難しくなる。エンベロープではより簡潔に振幅情報を確認できる。一方で図 2b に示したような波群の確認は難しい。

次に示すのは岩手県沖で発生した気象庁マグニチュード 3.5 (気象庁一元化震源リストに基づく発震時刻: 2025 年 5 月 19 日 21 時 22 分 17.15 秒 JST; 震源位置: 39.744 N, 142.258 E; 深度: 21.1 km) の地震を捉えたデータの例である (図 4)。入力バックグラウンドノイズと同様に 2 Hz のハイパスフィルタを適用している。ここでは表示方法に Variable Density を選択し、チャンネル毎に Z-score による規格化を適用した。規格化したことにより距離方向のバックグラウンドノイズが平坦化され、地震波の信号が視認しやすくなった。P 波、S 波と思われる波群の到達をケーブル全体で確認する事ができる。同様にエンベロープ表示した例を図 5 に示す。表示方法や適用する処理はオプションの組み合わせで自在に選択できるため、目的に応じて変更するとよい。

従来手法との比較と応用可能性

DAS のように超稠密な観測データの場合、限られたチャンネルだけを選択してシステム全体を監視するのは容易ではない。図 4 と同じデータから 10 チャンネル分の波形を等間隔に抜き出して、shmck により表示した例を図 6 に示す。shmck では各波形を詳細に確認でき、一覧性も高い。しかし、P 波や S 波と思われる波群の伝搬の様子は、チャ

ネルを等間隔に抜き出しただけでは判読が難しい。これは、観測原理や設置環境に依存した距離方向のノイズ分布や、チャンネルごとのカップリング特性の違いによる振幅やノイズのばらつきに起因すると考えられる。従来の波形監視では、このような影響を低減する工夫や、監視に適したチャンネルを試行錯誤で選別する作業が必要となる。今回開発した Waterfall 表示はデータを選別することなく全て描画できるため、計算機的能力で可能な限りにおいて、任意の多チャンネル観測システムの監視が可能である。入力は通常の WIN システムを想定しているため、もちろん既存の観測システムの監視にも応用できる。防災科学技術研究所が公開している Hi-net の連続波形データ (防災科学技術研究所, 2019) を用いて Waterfall 表示での監視を再現した例を図 7 に示す。作図には 778 観測点を使用し、チャンネルテーブルのうち上下動のみを用いた。図の 0-300 ch には伊予灘で発生した気象庁マグニチュード 2.5 の自然地震 (気象庁一元化震源リストに基づく発震時刻: 2025 年 6 月 23 日 12 時 40 分 07 秒 JST; 震源位置: 33.301 N, 132.039 E; 深度: 55.3 km) が認められる。現状では観測点の地理的ソート機能は経度順および任意の地点からの距離に限られているが、任意の測線に対応させる事で様々な観測に応用できると考えられる。

任意の WIN ファイルの描画

本ツールはリアルタイム表示を行うために作成したが、多チャンネルが記録された win 形式のファイルから

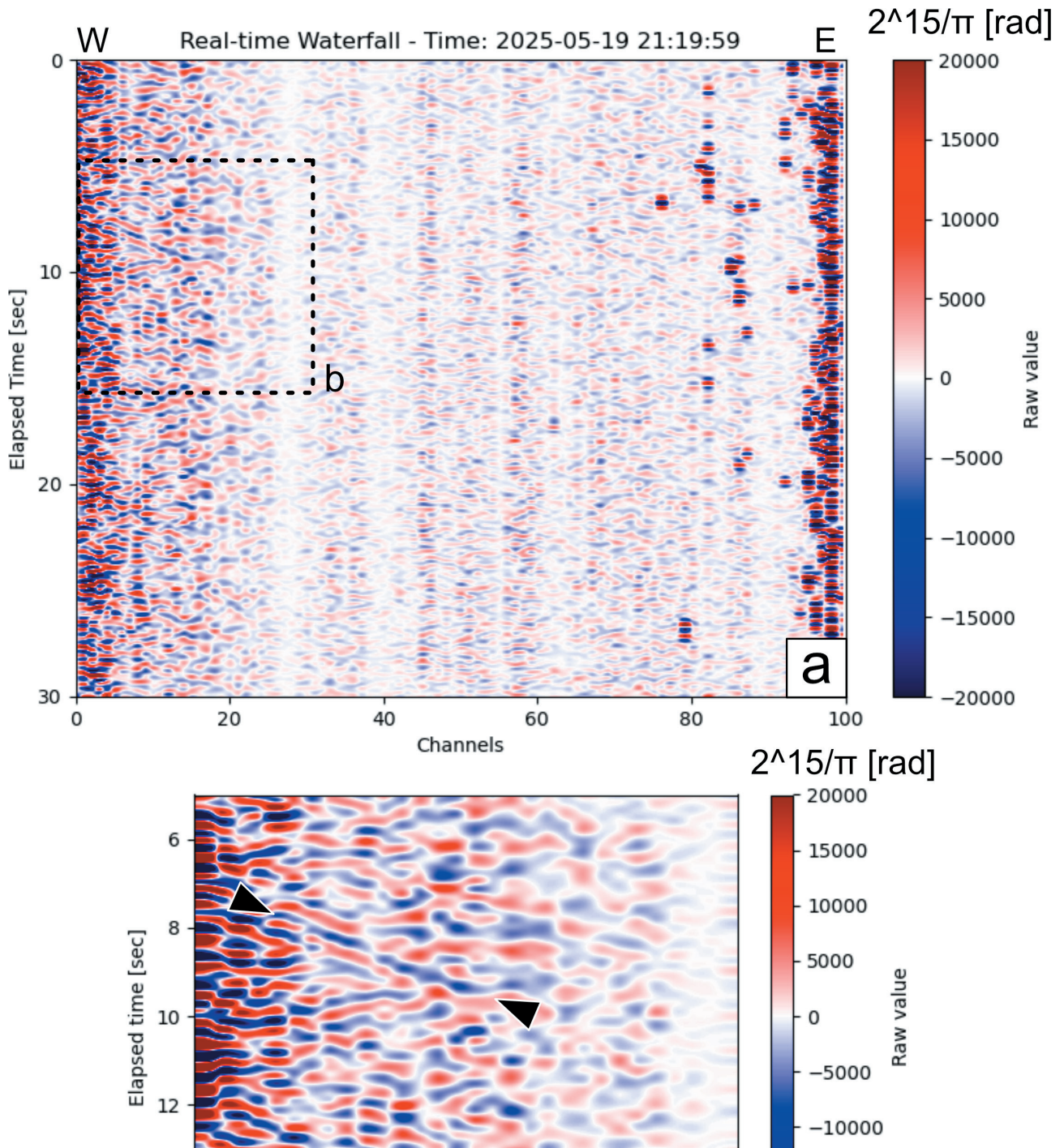


図 2. Variable Density 表示の例. [a] 赤は正の極性, 青は負の極性を表す. カラースケールの単位は本稿ではデジット値となる. 横軸は 0 から陸側 (西側) のチャンネル番号に対応し, 99 が最も沖合 (東側) のチャンネルに対応する. この図における 1 チャンネルの間隔はおおよそ 1 km に相当する. 縦軸は最上部の最新時刻を 0 秒としたときの時間を表す. この図の最下部は 30 秒前に相当する. [b] 上図の一部を拡大したもの ([a] の点線枠内). 黒矢印で挟んだ負極性の波群は時空間的に連続しているように見える.

```
cat 25031521.2218 | shmdump -tq -H 2.0:1.0:0.5:5.0 -f dastest_100ch.ch - |
python3 ./shmfall.py -n0 -s0 -i -f dastest_100ch.ch -v 0.2:0.2 -d230 -debug
```

Waterfall プロットを描画したい場合は下記のような処理で実現できる.

初回フレームを PNG 形式の画像として保存可能な

`-debug` オプションを用いる事で, 直接画像ファイルに変換できる. 本稿の図の多くはこの方法を用いて描画した.

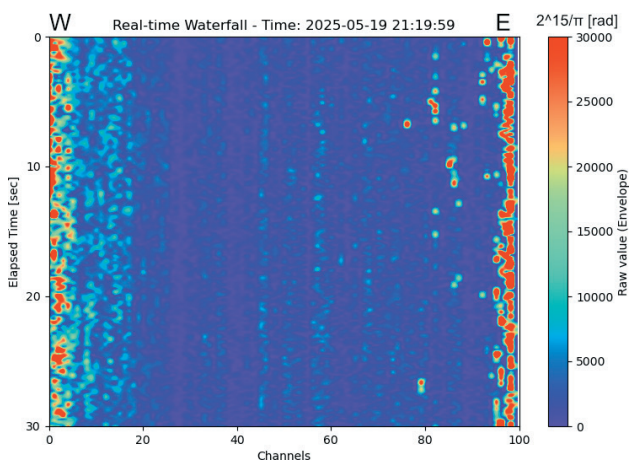


図 3. エンベロープ表示の例. 暖色系は高い値を表し, 寒色系が低い値を表す. 縦軸・横軸の表示は図 2a と共通である.

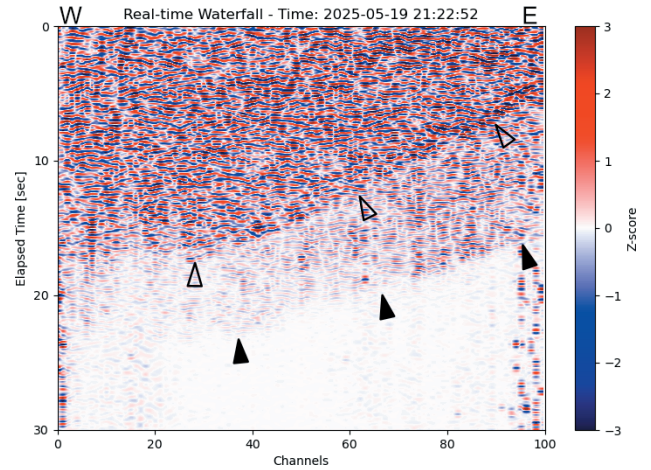


図 4. 岩手沖のマグニチュード 3.5 の地震の Variable Density 表示. 縦軸・横軸の表示は図 2a と共通である. 黒抜きの矢印は P 波と思われる波群, 白抜きの矢印は S 波と思われる波群を示す.

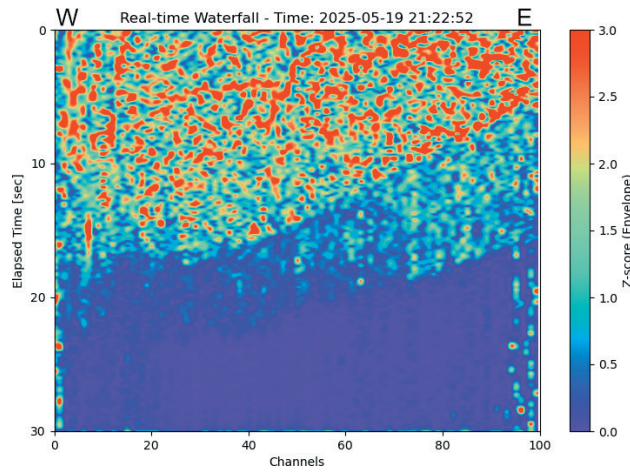


図 5. 岩手沖のマグニチュード 3.5 の地震のエンベロープ表示. 表示する時間枠は図 4 と共通. 縦軸・横軸の表示は図 2a と共通である.

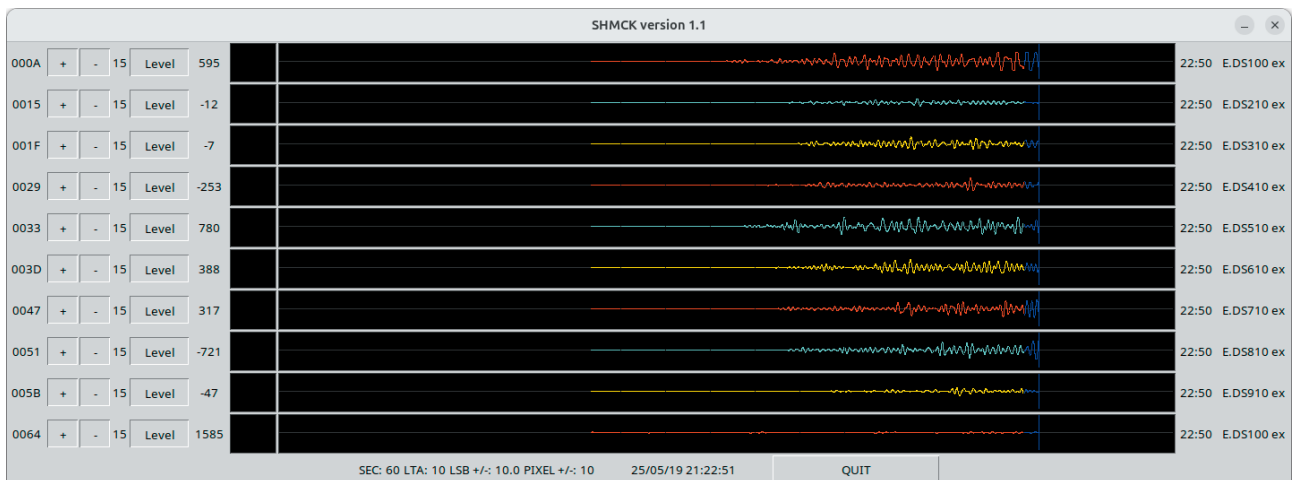


図 6. 岩手沖のマグニチュード 3.5 の地震の shmck による 10ch 分の波形の表示例. 横軸は全体が 1 分幅で, データの開始時間と描画範囲は図 4 と共通である.

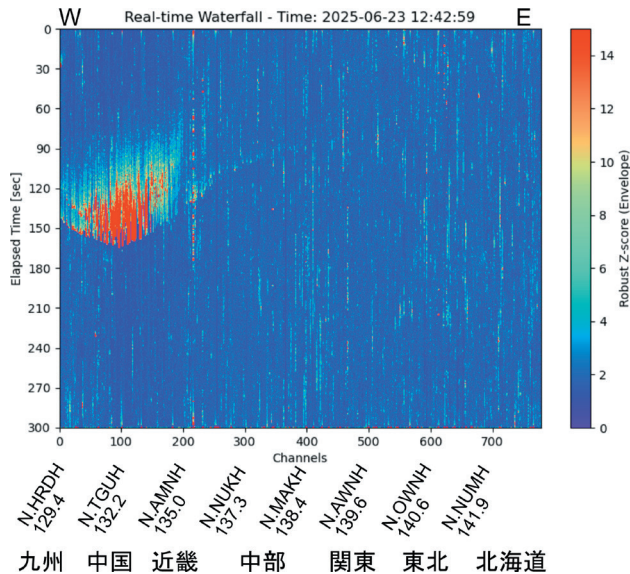


図 7. Hi-net の観測点の Envelope 表示例。経度順に整理して Robust Z-score を適用した。横軸の 100 チャンネル毎に対応する Hi-net 観測点名と経度、おおよその地域を下部に示す。
表の説明

ま と め

本報告では、WIN システムに対応したリアルタイム Waterfall 描画ツールを開発した。本ツールは既存の WIN コマンド群と親和性を保ちつつ Python で実装されており、100 チャンネルを超える多チャンネルデータの可視化を容易に実現する。

使用例として、DAS 実験データのバックグラウンドノイズおよび地震波形に対する適用を示し、Variable Density 表示とエンベロープ表示により信号の有無や時間変化を直感的に把握できることを確認した。また、既存の観測網に対しても地理的ソート機能を活用した可視化が可能であり、DAS 観測に限らず広範な WIN データに応用できることを示した。さらに、リアルタイム観測のみならず、記録済みの WIN ファイルからの Waterfall 表示にも対応している。

以上のことから、本ツールは従来の波形表示ツールでは困難であった多チャンネルの俯瞰的監視を可能とし、今後の大規模観測や既存ネットワークのモニタリングにおいて有用な可視化手段となることが期待される。

なお、開発した表示ツールのソースコードは下記にて公開する。また、図の作成に使用したチャンネルテーブルは責任著者への合理的な依頼に応じて提供する。

<https://github.com/hotsuka2025/shmfall>

謝 辞：文中に示した震源は気象庁一元化震源リストを利用しました。一部の図は Generic Mapping Tools (Wessel et al., 2019) を使用しました。技術研究報告編集委員会と 2 名の匿名査読者の方々に頂いた御指摘は、本稿を改善するうえで大変有益でした。ここに記して感謝申し上げます。

文 献

- 防災科学技術研究所, 2019, NIED Hi-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, <https://doi.org/10.17598/NIED.0003>.
- 防災科学技術研究所ウェブサイト, <https://www.hinet.bosai.go.jp/strace/> (参照: 2025-9-30).
- GNU radio ウェブサイト, GNU Radio Wiki / QT GUI Waterfall Sink, https://wiki.gnuradio.org/index.php?title=QT_GUI_Waterfall_Sink (参照: 2025-9-30).
- Ho, A., G. P. Garbini, Kabalan, M. Ruffel, A. Hamadi, K. A. Yahia, I. Benamara, T. Ayad, W. Talaboulma, P.-A. Lacaze and T. Hammi, 2026, Rail Defect Detection Using Distributed Acoustic Sensing Technology. In: McNally, C., Carroll, P., Martinez-Pastor, B., Ghosh, B., Efthymiou, M., Valantasis-Kanellos, N. (eds) Transport Transitions: Advancing Sustainable and Inclusive Mobility. TRAconference 2024. *Lecture Notes in Mobility*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-06763-0_27.
- 中道治久, 江本賢太郎, 米盛航平, 田口貴美子, 廣瀬 郁, 西村太志, 2024, 桜島の有村川と野尻川における 2024 年 DAS 観測と土石流検知, 日本火山学会講演予稿集, 2024 巻, A3-07, p.36, https://doi.org/10.18940/vsj.2024.0_36.
- Shinohara, M., T. Yamada, T. Akuhara, K. Mochizuki and S. Sakai, 2022, Performance of Seismic Observation by Distributed Acoustic Sensing Technology Using a Seafloor Cable Off Sanriku, Japan. *Front. Mar. Sci.*, 9: 844506, <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.844506>.
- Smith, M. D., S. H. Rowan, R. S. Vistica and S. R. Morton, 1989, Markers for readout and delta-parameter measurements on a quasi-3-dimensional display of a spectrum, *U.S. patent* 4,870,348A.
- 鶴岡 弘, 2022, WIN システムにおける波形表示および追加プログラムの紹介, 震研技報, 28, 25-28, <https://doi.org/10.15083/0002006069>.
- ト部 卓・東田進也, 1992, win—微小地震観測網波形実験測支援のためのワークステーション・プログラム (強化版), 日本地震学会講演予稿集 1992 年度秋季大会, P41.
- ト部 卓, 1994, 多チャンネル地震波形データのための共通フォーマットの提案, 日本地震学会講演予稿集, No. 2, P24.
- Wessel, P., J. F. Luis, L. Uieda, R. Scharroo, F. Wobbe, W. H. F. Smith and D. Tian, 2019, The Generic Mapping Tools Version 6. *Geochem., Geophys., Geosyst.*, vol. 20, 11, 5556-5564, <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>.