

OKAYAMA University
Earth Science Reports,
Vol.27, No.1, 39–50 (2021)

メジアンフィルターを用いた 2016 年熊本地震の断層近傍における加速度記録の基線補正と変位波形の推定

Estimation of displacement waveforms by baseline correction of near-fault acceleration records of the 2016 Kumamoto earthquake with median filter

渡邊禎貢 (Tomotsugu WATANABE)*

小松正直 (Masanao KOMATSU)*

竹中博士 (Hiroshi TAKENAKA)*

Abstract

The 2016 Kumamoto earthquake sequence occurred on April 14 (M_{JMA} 6.5) and April 16 (M_{JMA} 7.3). Seismic intensity of 7 on the Japan Meteorological Agency (JMA) scale was observed in Mashiki Town, Kumamoto Prefecture for the both events and in Nishihara Village, Kumamoto Prefecture for the April-16 event. We estimate the displacement waveforms from these acceleration records. Since the acceleration seismograms include the long-period noise due to tilting of the ground and instrumental effects, the baseline corrections are required to derive the accurate velocity and displacement waveforms. We apply a median filter to the velocity waveforms to identify the linear trends on them due to the steplike noise on the acceleration records, and determine the time at which baseline shifts take place and the step value of each shift for the baseline correction through trial and error. Our baseline correction can successfully reconstruct the velocity and displacement waveforms from the acceleration records. The displacement waveforms show the static components consistent with the geodetic data.

Keywords: 2016 Kumamoto earthquake, baseline correction, median filter, displacement

1. はじめに

2016 年 4 月に発生した熊本地震により、14 日の前震 (M_{JMA} 6.5) では熊本県の益城町にある震度観測点が震度 7 を記録した。そして 16 日の本震 (M_{JMA} 7.3) では熊本県の益城町と西原村にある震度観測点が震度 7 を記録し、一連の地震活動で地表地震断層が現れた (Shirahama et al., 2016)。断層運動で生じた永久変位を含む変位波形は、原理的には加速度記録を 2 回時間積分することで得られるはずであるが、元の加速度記録に含まれる機械的、電気的な影響や強震時の地震計の傾きなどによるノイズのため、算出される速度波形及び変位波形に大きなトレンドや長周期のノイズが現れてしまう (例えば, Boore, 2001)。物理的には地震発生後にある程度時間が経過すれば速度波形はゼロに収束し、変位波形はある値 (永久変位) で落ち着く

はずである。そのような正確な変位波形を算出するには基線補正によりノイズを除去する必要がある。Boore (2001) は 1999 年台湾集集地震の速度波形に現れる直線状のトレンドを元の加速度記録から除去することで基線補正し、変位波形を推定した。

本研究では、熊本地震の前震、本震で震度 7 が観測された熊本県の益城町、西原村の自治体震度計で記録された 3 つの加速度記録に Boore (2001) と同様の基線補正を施し、変位波形を推定する。その際、加速度記録を積分して得られる速度波形にメジアンフィルター (例えば, 棟安・田口, 1999) を適用することでノイズにより生じたトレンドを明瞭にする。メジアンフィルターはインパルス状の波形を除去し、波形の長周期成分を目立たせることができる。メジアンフィルター適用後の波形に

* 岡山大学大学院自然科学研究科, 〒700-8530 岡山市北区津島中三丁目 1-1
Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, Okayama 700-8530, Japan.

は長周期のシグナルとノイズの両方が含まれるが、本研究ではノイズが加速度記録中でステップ関数(速度波形中では直線状のトレンド)であると仮定して、補正開始時刻と補正值を試行錯誤的に決定する。そして、それを用いて加速度記録の基線補正を行い、速度波形及び変位波形を推定する。

2. データとその処理方法

使用するデータは、2016年4月に発生した熊本地震で震度7が記録された熊本県の益城町(14日のM_{JMA}6.5の前震及び16日の本震)と西原村(16日の本震)の自治体震度計の加速度記録で、記録開始から2分間の波形である。データのサンプリング周波数は100 Hzである。前処理として、UD成分におけるP波の到着時刻を読みとり、成分ごとにそれと記録開始時刻との間の振幅の平均を元の加速度記録から引くことで零線補正を行った。Table 1は各イベントの記録開始時刻を示す。読み取ったP

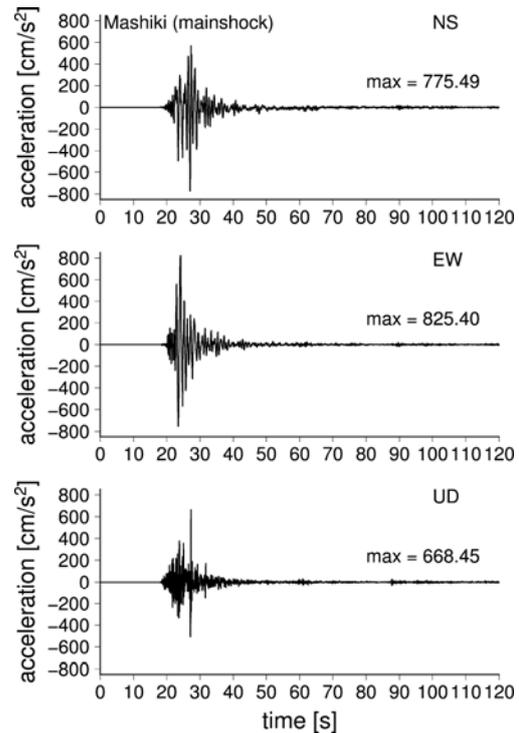


Fig. 2. 益城町で観測された本震の加速度波形。時間は記録開始時刻 (Table 1) をゼロとしている。

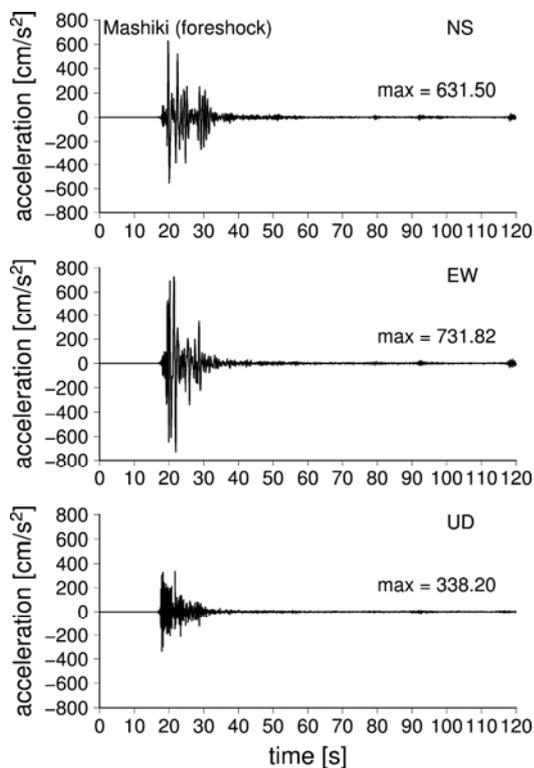


Fig. 1. 益城町で観測された前震の加速度波形。時間は記録開始時刻 (Table 1) をゼロとしている。

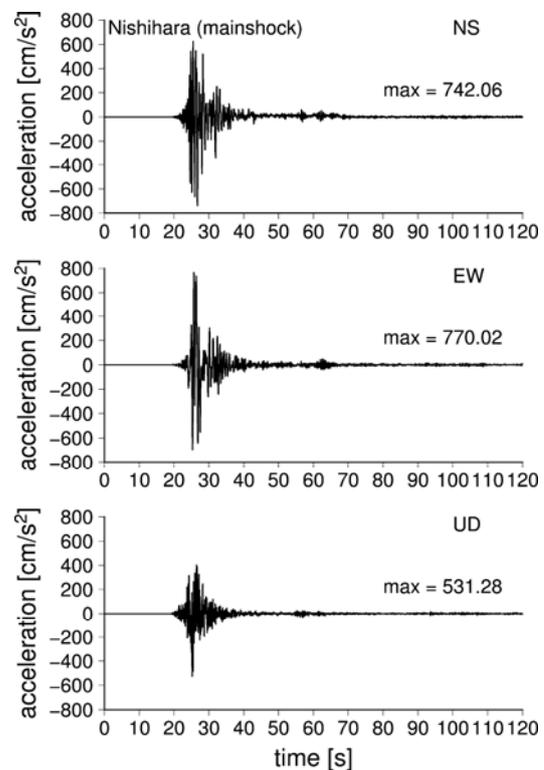


Fig. 3. 西原村で観測された本震の加速度波形。時間は記録開始時刻 (Table 1) をゼロとしている。

Table 1. イベントの記録開始時刻.

	Recording start time (JST)
foreshock	2016/04/14, 21:26:20
mainshock	2016/04/16, 01:24:50

益城町と西原村の本震の記録開始時刻は同じである.

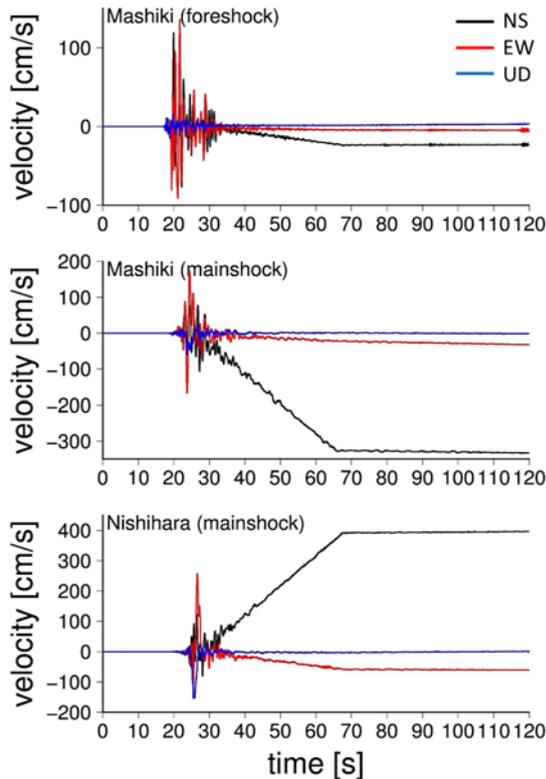


Fig. 4. 益城町における前震及び本震と西原村の本震の加速度波形を台形公式で積分して得た速度波形. 3成分をイベント毎に重ねている. 黒線は NS, 赤線は EW, 青線は UD 成分である. 時間は記録開始時刻 (Table 1) をゼロとしている.

波の到着時刻は, 益城町の前震で記録開始時刻から 16.70 秒, 本震で 18.05 秒, 西原村の本震で 19.15 秒である. 零線補正後の各加速度記録を Fig. 1~ Fig. 3 に示す. 加速度記録で基線補正が必要なノイズが含まれていることを目で確認することは困難である.

Fig. 4 は, 加速度記録から台形積分で得られた速度波形である. いずれの 3 成分も, 水平動成分でト

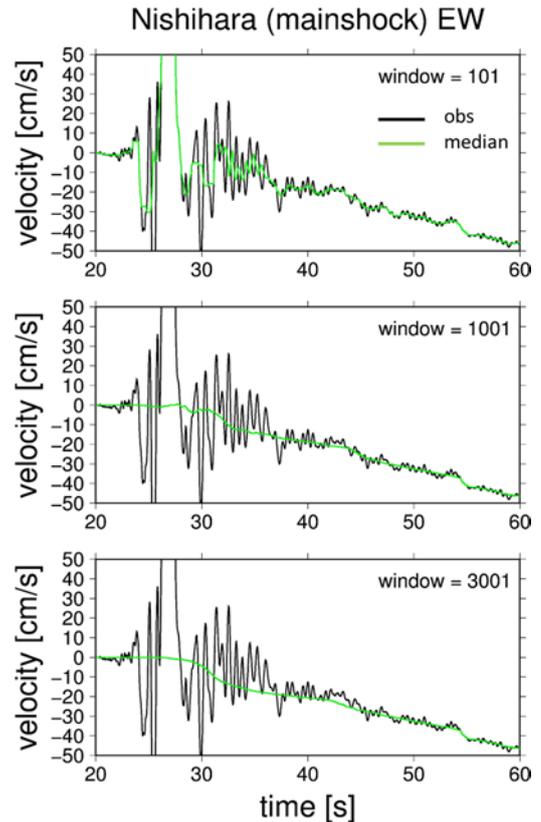


Fig. 5. メジアンフィルターの窓幅を上から 1 秒, 10 秒, 30 秒と変えた場合の速度波形. 黒線はメジアンフィルター適用前の速度波形, 緑線はメジアンフィルター適用後の速度波形を示す.

レンドが顕著であり, 上下動成分では基線からのずれはほんの僅かである. 益城町の NS 成分に注目すると, 前震の速度波形よりも本震の速度波形の方がトレンドの変化が大きい. また, いずれの記録も NS 成分で, 記録開始から 25 秒付近と 65 秒付近において大きなトレンドの変化が認められる. 前者のトレンドの変化は強震による影響であると考えられる. 一方, 後者の変化は記録に依らず地

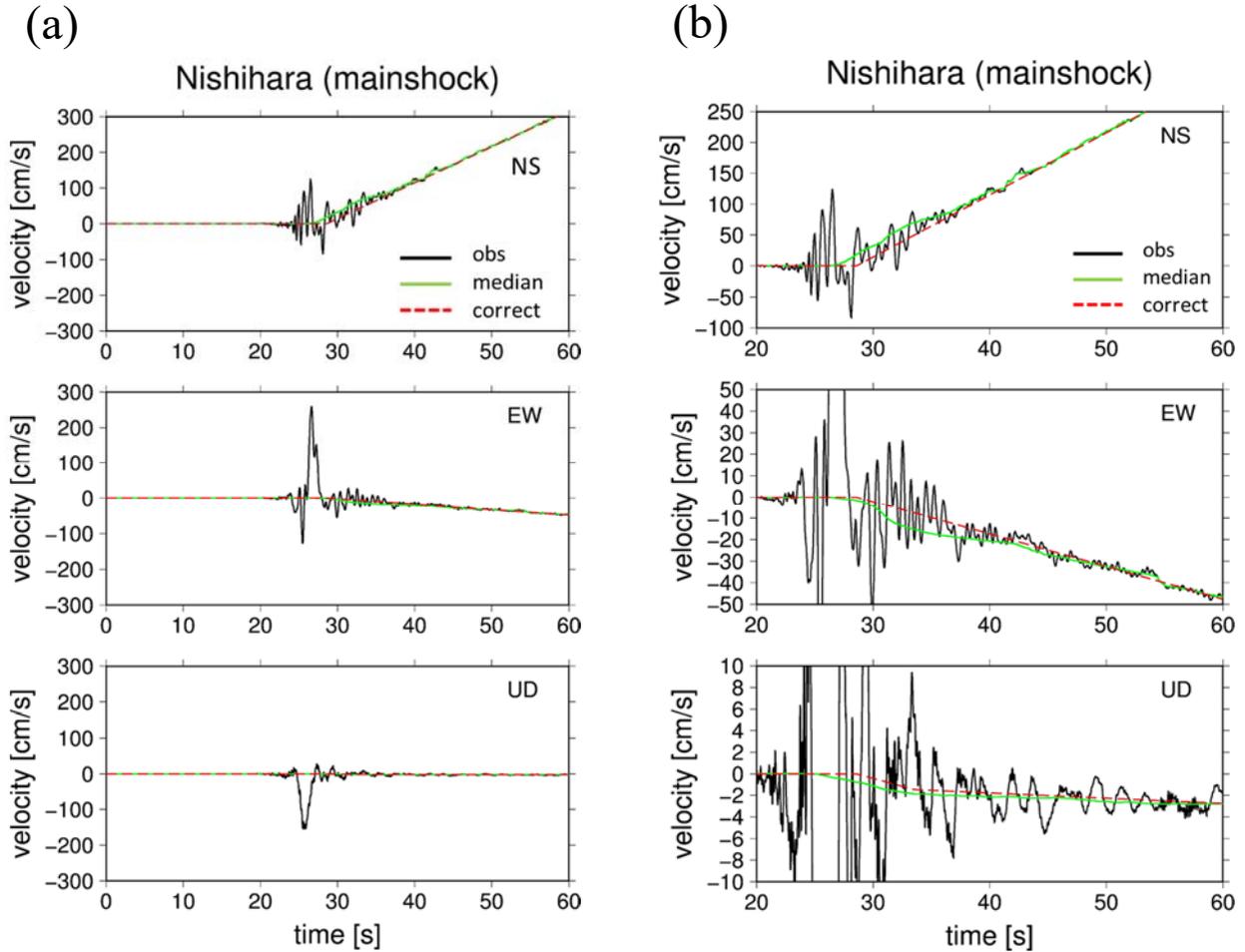


Fig. 6. 西原村の本震のメジアンフィルター適用前後の速度波形と基線. (b)は(a)の拡大図. 黒実線と緑実線は、それぞれメジアンフィルター適用前と適用後の速度波形、赤破線は補正値のカーブ(基線)を示す.

震動の収束後にみられるため、震度計のシステムに起因する現象かもしれない. そこで本研究では記録開始時刻から 60 秒間の記録を用いる.

本研究では、メジアンフィルターを適用した速度波形を用いて、基線補正に必要な補正開始時刻と補正値を試行錯誤的に決定する. メジアンフィルターは任意の窓の中央値を出力する非線形フィルターで、その適用によりインパルス状の波形を除去し、長周期の波形を残すことが可能である. 入力データ $x(i)$ ($i = 1, 2, \dots$) に対して窓幅 $W = 2M + 1$ のメジアンフィルターを考えると、その出

力 $y(i)$ は、

$$y(i) = \text{MED}\{x(i - M), \dots, x(i), \dots, x(i + M)\} = x_{M+1}(i), \quad (1)$$

となる. ここで、右辺の添え字は窓内のデータを大きい順 (または小さい順) に並べたときの順番を表しており、 $(M + 1)$ 番目は窓内のデータの中央値である. Fig. 5 は、それぞれ窓幅が 1 秒 ($W = 101$), 10 秒 ($W = 1001$), 30 秒 ($W = 3001$) のメジアンフィルターの適用前後の速度波形を示している.

Table 2. 補正開始時刻と補正值.

	t_1 (s)	t_2 (s)	a_1 (cm/s ²)	a_2 (cm/s ²)
Mashiki (foreshock) NS			-0.593	-0.593
Mashiki (foreshock) EW	27.70	31.20	-0.508	-0.076
Mashiki (foreshock) UD			+0.331	+0.006
Mashiki (mainshock) NS			-7.954	-8.400
Mashiki (mainshock) EW	25.90	39.20	-0.810	-0.385
Mashiki (mainshock) UD			+0.015	+0.015
Nishihara (mainshock) NS			+9.900	+9.900
Nishihara (mainshock) EW	28.06	33.50	-1.492	-1.492
Nishihara (mainshock) UD			-0.299	-0.048

全ての時刻は、記録開始時刻 (Table 1) からの時間.

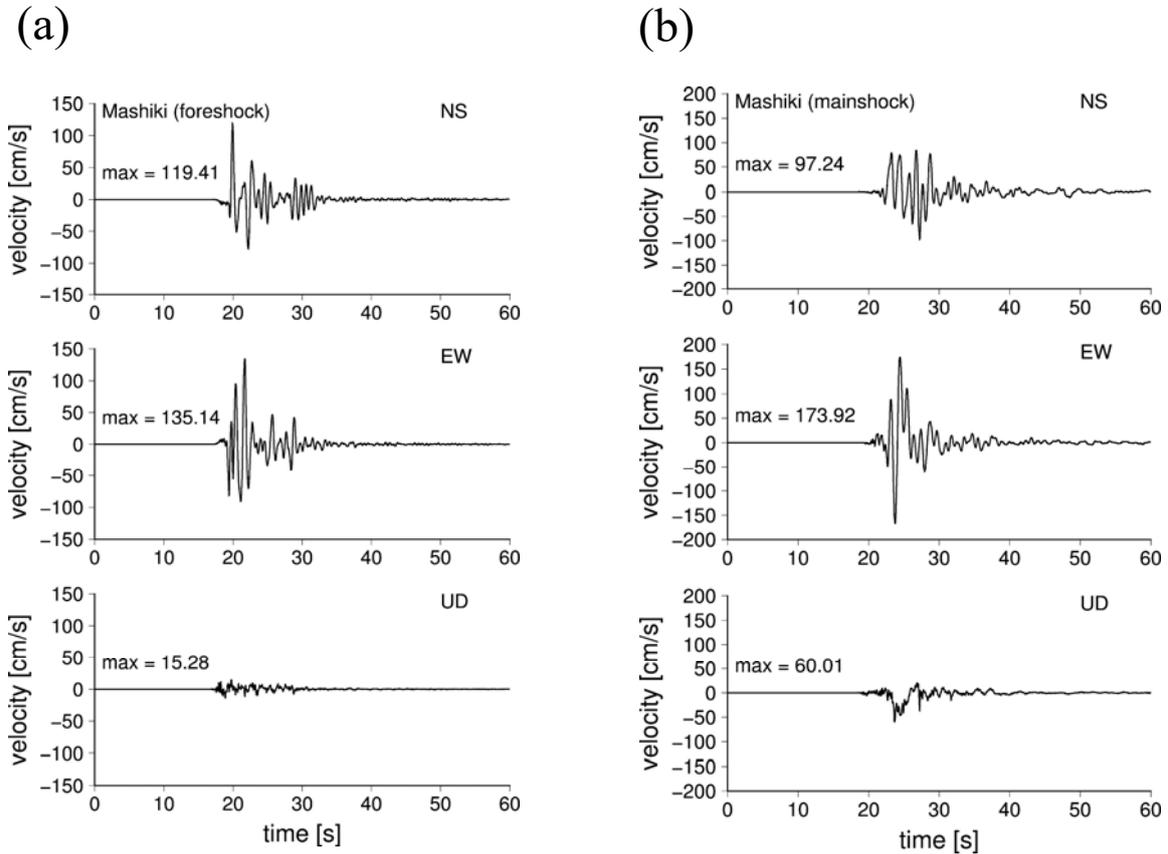


Fig. 7. 益城町における補正後の速度波形. (a) 前震, (b) 本震. 横軸は記録開始時刻 (Table 1) からの時間.

窓幅を長くするほど、より長周期の成分が明瞭になることがわかる.

本研究で行った処理について以下に詳しく述べる. 前述の初動前の零線補正の後、加速度記録を

台形積分して速度波形を求め、メジアンフィルターを施す. メジアンフィルターの窓幅 W は速度波形のトレンドが直線状になるまで長くする. ここでは全て 30 秒 ($W = 3001$) とした. ノイズは、加

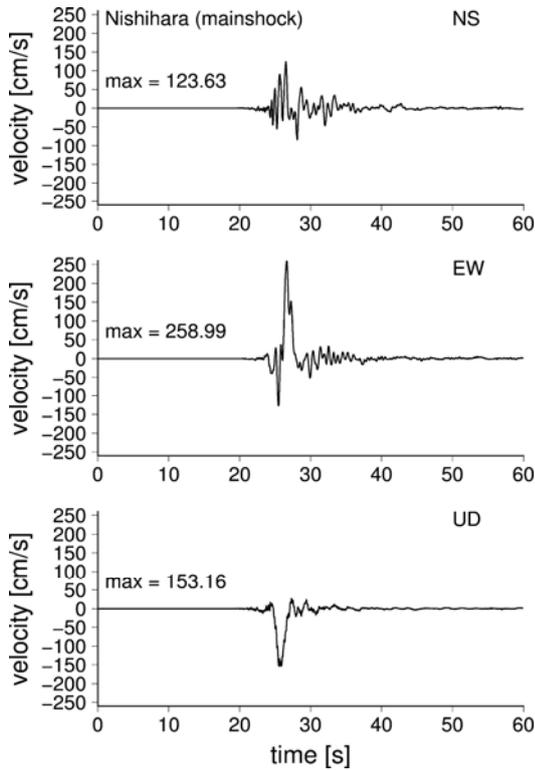


Fig. 8. 西原村における本震の補正後の速度波形. 横軸は記録開始時刻 (Table 1) からの時間.

速度記録中でステップ関数 (速度波形では直線) であると仮定し, 可能な限り少ない数のステップで基線補正を行う. 今回は二つのステップを用いた. このとき基線補正の式は

$$a_{cor}(t) = \begin{cases} a(t) & \text{if } 0 \leq t < t_1 \\ a(t) - a_1 & \text{if } t_1 \leq t < t_2 \\ a(t) - a_2 & \text{if } t_2 \leq t < 60 \text{ (s)}, \end{cases} \quad (2)$$

と表せる. ここで, $a_{cor}(t)$ は補正後の加速度記録, $a(t)$ は元の加速度記録, a_1, a_2 は補正值, t_1, t_2 は記録開始時刻からの補正開始時刻である. ただし, $a_1 = a_2$ のとき, 実際にはステップ関数は 1 つである. 補正開始時刻と補正值はメジアンフィルター適用後の速度波形を参考にしながら, 補正後の速度波形がゼロに収束し, 変位波形が安定するように試行錯誤的に決定した. 補正開始時刻は, 強震により 3 成分同時に加速度記録にステップ関数の

ノイズが乗ると仮定し, 全ての成分で統一した. また, 例えば $0.001 \text{ (cm/s}^2\text{)}$ ほどのごく僅かなステップ・ノイズが加速度記録に含まれる場合でも, 2 回時間積分して得られる変位波形にはノイズ発生から 40 秒後には, $0.001 \times 40 \times 40 = 1.6 \text{ (cm)}$ もの変動が現れることになる. このように加速度記録ではほとんど変化がなくとも, 変位波形は大きく変わるため, 補正值は小数第 3 位まで決定した.

3. 結果と議論

Fig. 6 に西原村における本震のメジアンフィルター適用前後の速度波形と決定した基線とその拡大図を示す. 益城町における前震及び本震の図は付録に示す. Table 2 には記録開始時刻 (Table 1) からの各補正の開始時間 t_1, t_2 とその値 a_1, a_2 を示す. 全てのイベントにおいて, 補正值の大きさは水平動成分の方が上下動成分よりも大きくなった.

次に基線補正後に求めた速度波形及び変位波形を Fig. 7~Fig. 10 に示す. Table 3 は, 求めた変位波形の最大振幅の値と Asano and Iwata (2016) 及び佐藤 (2018) による推定値との比較である. Table 4 には求めた永久変位と佐藤 (2018) による推定値の比較を示す. ここで永久変位は変位波形が最終的に安定するときの振幅とし, 記録の終わりの 10 秒間 (記録開始から 50 秒後以降の 10 秒間) における変位振幅の平均を採用したが, 佐藤 (2018) の値は直接文献に記載のあるものを基にしている. 変位波形の最大振幅値は, 他の研究での推定値と比較して約 15 cm の差を持つものもあるが, 差が 1 cm 未満のものがほとんどであった (Table 3). 西原村の本震の永久変位は佐藤 (2018) の求めた値と比べて, 全ての成分でその差が 10 cm 未満であった. 一方, 益城町の本震の永久変位における両者の差は, UD 成分で 3 cm 程度であるものの, 水平動成分では大きく, 特に EW 成分の差は約 35 cm ある (Table 4). これらの結果から, 基線補正の違いによって変位の振幅には最大で数十 cm 程度の差が生じるものと考えられる.

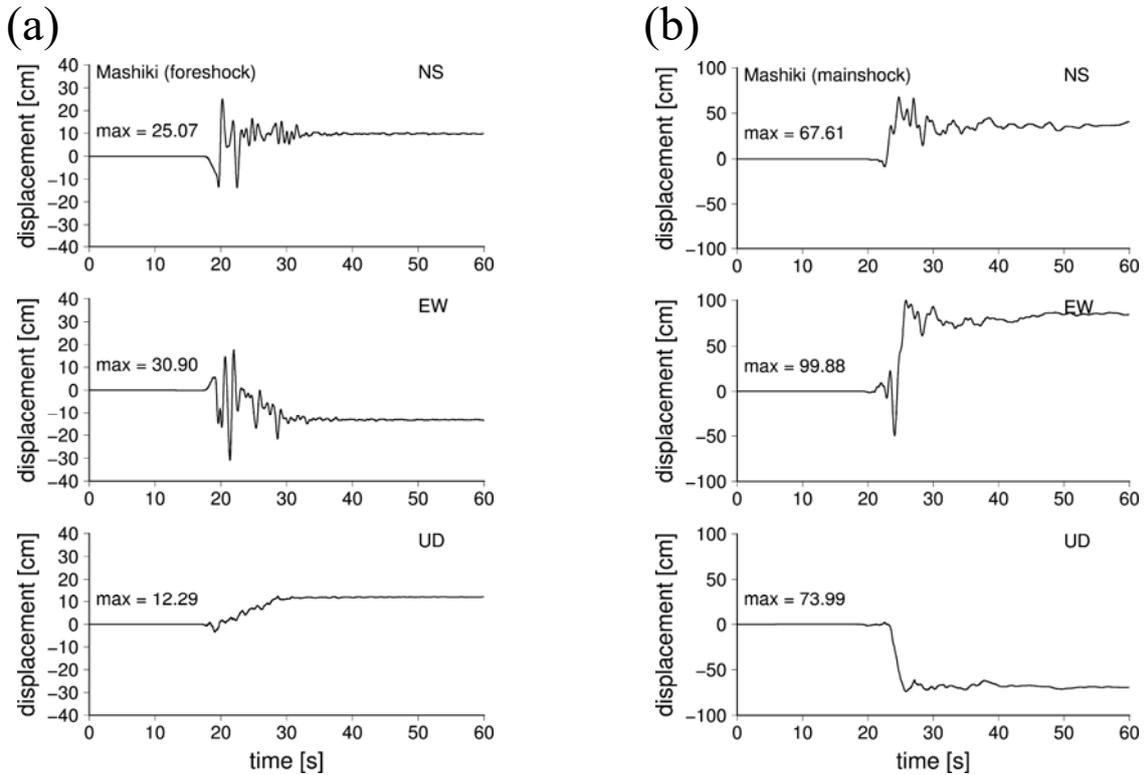


Fig. 9. 益城町における補正後の変位波形. (a) 前震, (b) 本震. 横軸は記録開始時刻 (Table 1) からの時間.

Fig. 11, Fig. 12 は記録開始時刻から 60 秒間の変位の粒子軌跡及び粒子速度の軌跡を示している. 益城町の前震における変位の粒子軌跡は記録開始から 18 秒後に大きく変動し始め, 約 5 秒間複雑に動いている (Fig. 11(a)). 粒子速度の軌跡から, そのほとんどが水平面内の運動であることが分かる (Fig. 12(a)). 永久変位は北西かつ上向きに生じている (Fig. 9(a), Table 4). 一方, 益城町の本震における変位の粒子軌跡は記録開始から 23 秒後に大きく変動し始め, 水平方向ではまず 0.5 秒間で北東に約 40 cm 動き, 次の 0.5 秒間で西へ約 70 cm 動いている. さらに続く 2 秒間で東へ約 150 cm 動いている. この 3 秒間において鉛直方向には下向きに約 70 cm 動いている (Fig. 11(b)). 粒子速度の軌跡は水平方向, 特に EW 方向の変動が顕著であり, 下向きの運動もみられる (Fig. 12(b)). 永久変位は北東かつ下向きに生じている (Fig. 9(b), Table 4). 西原村の本震における変位の粒子軌跡は記録開始から 25 秒後

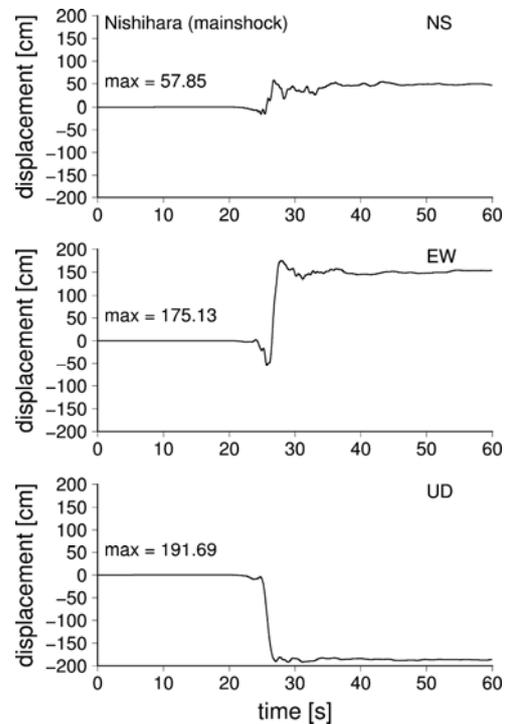


Fig. 10. 西原村における本震の補正後の変位波形. 横軸は記録開始時刻 (Table 1) からの時間.

Table 3. 変位波形の最大振幅の推定値.

	This study	Asano and Iwata (2016)	Satoh (2018)
Mashiki (foreshock) NS	25.07 cm	-	-
Mashiki (foreshock) EW	-30.90 cm	-	-
Mashiki (foreshock) UD	12.29 cm	-	-
Mashiki (mainshock) NS	67.61 cm	67.89 cm	-
Mashiki (mainshock) EW	99.88 cm	115.69 cm	-
Mashiki (mainshock) UD	-73.99 cm	-73.94 cm	-
Nishihara (mainshock) NS	57.85 cm	57.59 cm	57 cm
Nishihara (mainshock) EW	175.13 cm	175.29 cm	175 cm
Nishihara (mainshock) UD	-191.69 cm	-199.52 cm	-184 cm

「-」は数値の記載なし.

Table 4. 永久変位の推定値.

	This study	Satoh (2018)
Mashiki (foreshock) NS	9.85 cm	-
Mashiki (foreshock) EW	-13.31 cm	-
Mashiki (foreshock) UD	11.99 cm	-
Mashiki (mainshock) NS	36.17 cm	16 cm
Mashiki (mainshock) EW	84.88 cm	50 cm
Mashiki (mainshock) UD	-69.27 cm	-72 cm
Nishihara (mainshock) NS	48.73 cm	46 cm
Nishihara (mainshock) EW	151.70 cm	147 cm
Nishihara (mainshock) UD	-186.73 cm	-179 cm

「-」は数値の記載なし. 佐藤 (2018) の益城町の本震の水平動成分は文献に記載されている値を直接回転して NS, EW に変換した値である.

に大きく変動し始め, 1 秒間で下向きに約 130 cm 動き, その後 1.5 秒間で東向きに約 200 cm 動いている (Fig. 11(c)). 粒子速度の軌跡でも水平方向だけでなく, 下向きにも大きな変動がみられる (Fig. 12(c)). また, 益城町における本震と同様に北東かつ下向きに永久変位が生じている (Fig. 10, Table 4).

益城町と西原村の自治体震度計は布田川断層の

北側に位置する. 国土地理院による 2014 年 11 月 14 日と 2016 年 4 月 15 日の InSAR を用いた地殻変動の解析 (国土地理院, 2016) では, 14 日 ($M_{JMA}6.5$) と 15 日 ($M_{JMA}6.4$) の 2 つの前震に伴って, 布田川断層の北側が西向きまたは上向きに (1次元解析のため両者の区別がつかない) 約 9 cm 変動したことが示されている. これは求めた益城町の前震の永

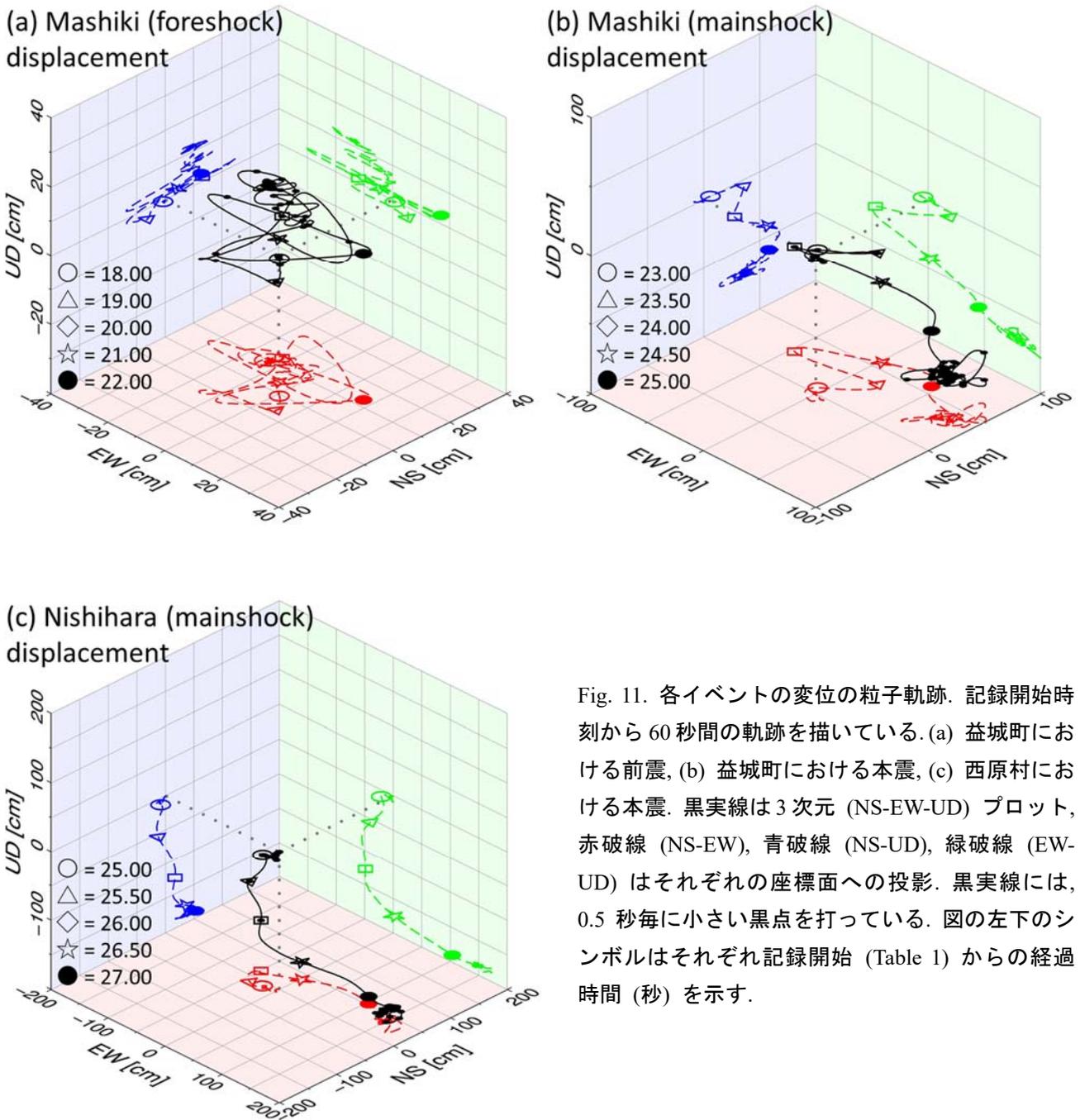


Fig. 11. 各イベントの変位の粒子軌跡. 記録開始時刻から 60 秒間の軌跡を描いている. (a) 益城町における前震, (b) 益城町における本震, (c) 西原村における本震. 黒実線は 3 次元 (NS-EW-UD) プロット, 赤破線 (NS-EW), 青破線 (NS-UD), 緑破線 (EW-UD) はそれぞれの座標面への投影. 黒実線には, 0.5 秒毎に小さい黒点を打っている. 図の左下のシンボルはそれぞれ記録開始 (Table 1) からの経過時間 (秒) を示す.

久変位と整合する. 一方, 16 日の本震 ($M_{JMA}7.3$) に伴う地殻変動は, InSAR の詳細な解析から, 本震と 2 つの前震に伴う地殻変動により布田川断層帯の北側で東向きと下向きそれぞれに最大 1m 以上, 北向きに最大 1 m 程度の永久変位が生じたことが報告されている. また, InSAR だけでは明瞭な干渉が得ら

れなかった西原村西部も含めて行われた緊急 GNSS 観測によって, 布田川断層の北西側では最大 2 m 程度の沈降が生じたことが明らかにされている (国土地理院, 2016). これらの結果は求めた益城町と西原村の本震の永久変位と調和している.

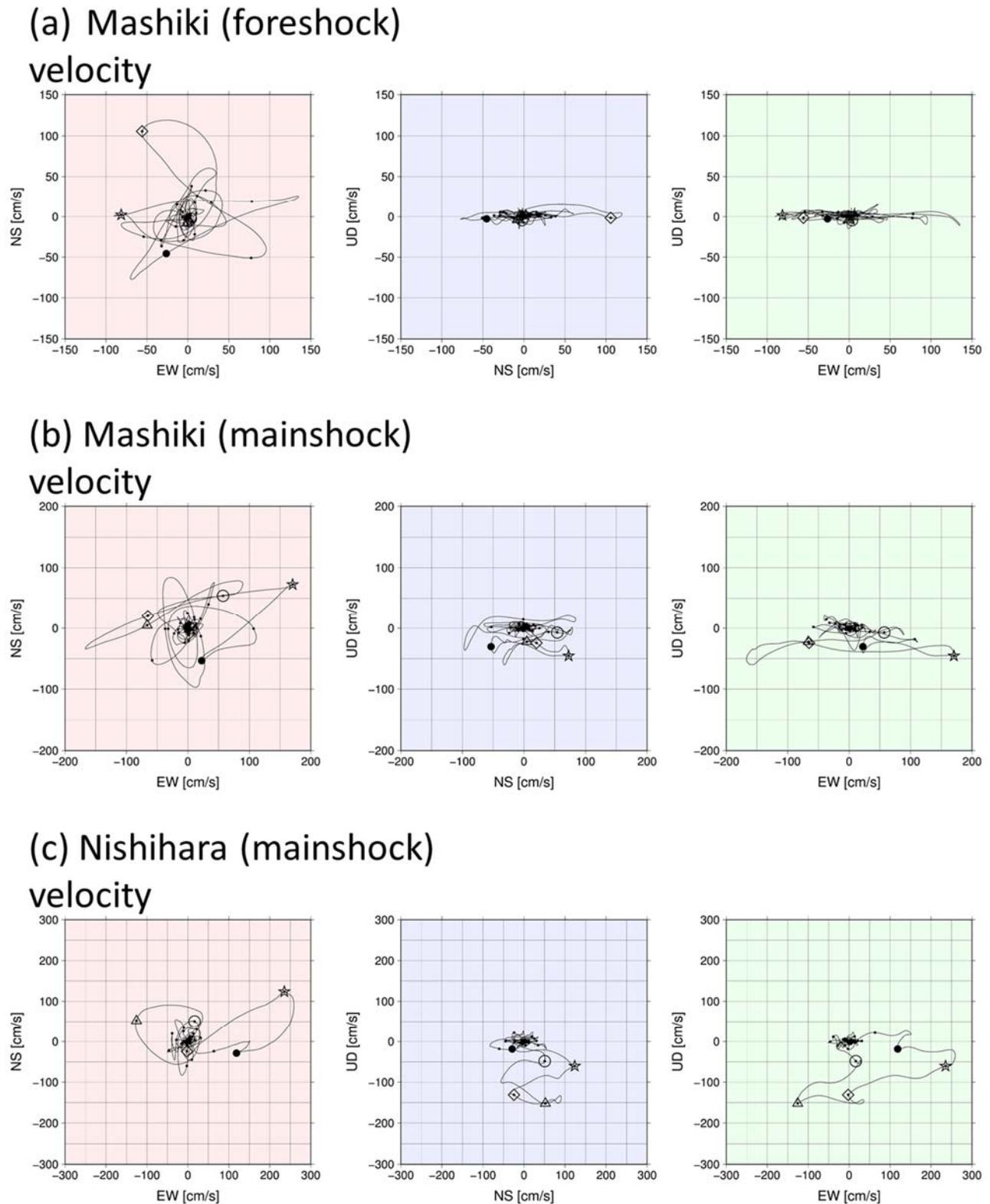


Fig. 12. 推定した粒子速度の軌跡. 記録開始時刻から 60 秒間を描いている. (a) 益城町における前震, (b) 益城町における本震, (c) 西原村における本震. 左から NS-EW, NS-UD, EW-UD 面における 2 次元のプロットである. 軌跡線には, 0.5 秒毎に小さい黒点を打っている. シンボルは Fig. 11 と対応している.

4. 結論

2016 年熊本地震で震度 7 が観測された益城町における前震と本震の加速度記録並びに西原村における本震の加速度記録に基線補正を施し、速度波形及び変位波形を推定した。その際、メジアンフィルターを適用した速度波形を用いて、加速度記録におけるステップ・ノイズの補正開始時刻と補正值を決定した。フィルター適用後の速度波形はインパルス状の波形が取り除かれ、直線状のトレンドが明瞭になるため、基線補正に必要な精度の高い補正開始時刻と補正值の決定に役立った。本研究で得られた変位は国土地理院による地殻変動の解析結果と整合的であった。

謝辞

小割啓史氏には原稿を読んで頂き、本論文の改善に役立つ有益なコメントを頂きました。本研究では気象庁により公開された熊本県の自治体震度計の強震波形記録を使用しました。作図には Generic Mapping Tools (Wessel and Smith, 1998) を使用しました。記して感謝申し上げます。

引用文献

- Asano, K. and T. Iwata, 2016, Source rupture processes of the foreshock and mainshock in the 2016 Kumamoto earthquake sequence estimated from the kinematic waveform inversion of strong motion data, *Earth, Planets and Space*, **68** : 147.
- Boore, D. M., 2001, Effect of Baseline Corrections on Displacements and Response Spectra for Several Recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **91**, 1199–1211.
- 国土地理院, 2016, 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震, 地震予知連絡会会報, **96**, 557–589.
- 棟安実治・田口亮, 1999, 非線形デジタル信号処理, 朝倉書店, pp. 193.
- 佐藤智美, 2018, 既往の予測式との比較に基づく

2016 年熊本地震の長周期パルスと永久変位に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, **83**, 1117–1127.

- Shirahama, Y., M. Yoshimi, Y. Awata, T. Maruyama, T. Azuma, Y. Miyashita, H. Mori, K. Imanishi, N. Takeda, T. Ochi, M. Otsubo, D. Asahina and A. Miyakawa, 2016, Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan, *Earth, Planets and Space*, **68** : 191.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1998, New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Transaction American Geophysical Union*, **79**, 579.

付録

Fig. A1, Fig. A2 に益城町における前震と本震のメジアンフィルター適用前後の速度波形と推定した基線を示す。

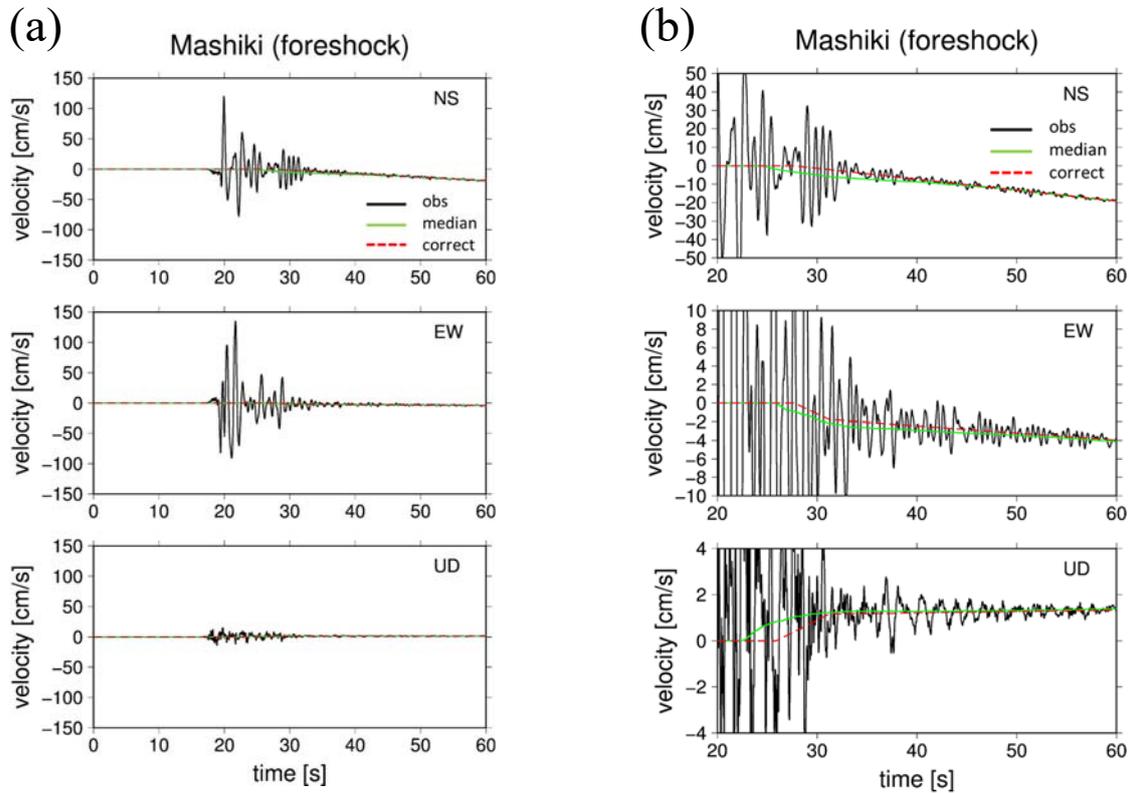


Fig. A1. 益城町の前震のメジアンフィルター適用前後の速度波形と基線. (b)は(a)の拡大図. 黒実線と緑実線は、それぞれメジアンフィルター適用前と適用後の速度波形、赤破線は補正值のカーブ（基線）を示す.

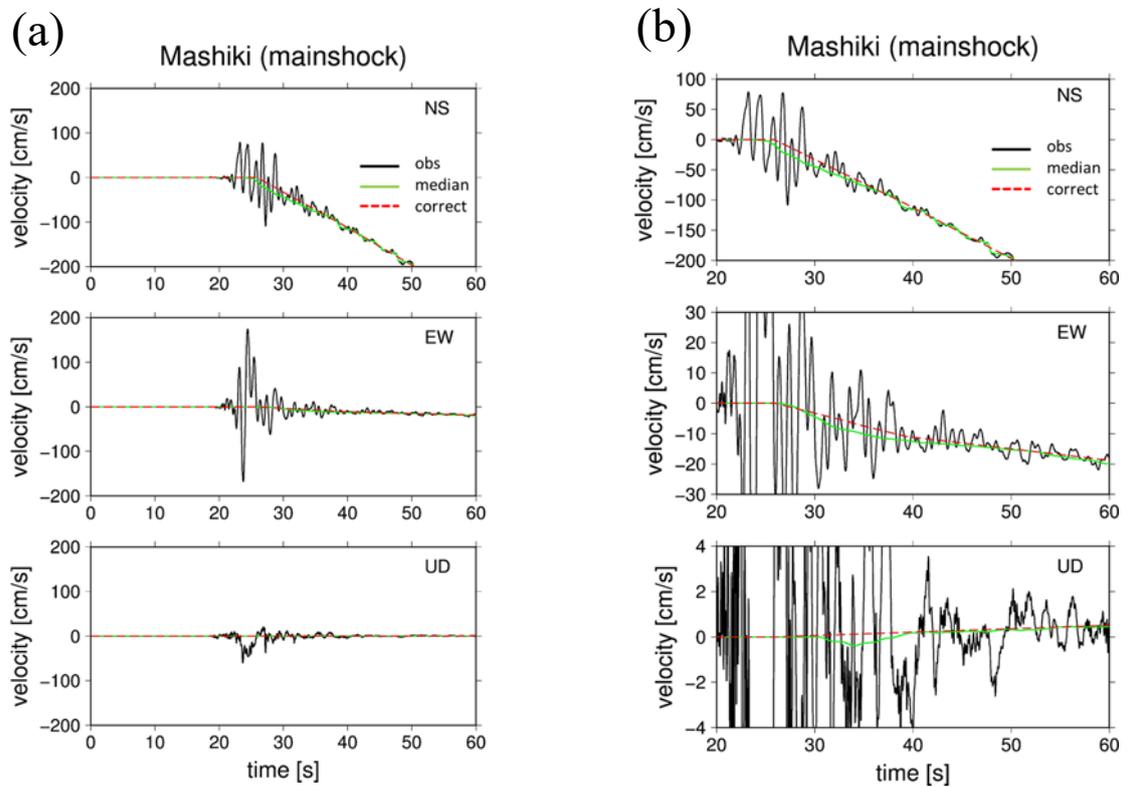


Fig. A2. 益城町の本震のメジアンフィルター適用前後の速度波形と基線. (b)は(a)の拡大図. 黒実線と緑実線は、それぞれメジアンフィルター適用前と適用後の速度波形、赤破線は補正值のカーブ（基線）を示す.