

# 断層変位に伴うフリングステップを考慮した 熊本地震の強震動シミュレーション

野津 厚<sup>1</sup>・長坂 陽介<sup>2</sup>・呉 双蘭<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)  
E-mail: nozu@pari.go.jp

<sup>2</sup>正会員 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)  
E-mail: nagasaka-y@pari.go.jp

<sup>3</sup>正会員 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)  
E-mail: u-shu@pari.go.jp

本研究では、熊本地震本震を対象に、アスペリティの破壊に伴う強震動とフリングステップの両者を考慮できる複合型の震源モデルを構築し、強震動シミュレーションを実施した。その際、できるだけ簡便で利用しやすい震源モデルとすることを念頭におき、測地学的データを説明するように設定された国土地理院の震源断層モデルに動的な情報を付与したものを背景領域とし、これにアスペリティの寄与を加えることで複合型の震源モデルを構築した。本研究で構築した震源モデルは、背景領域におけるすべり速度時間関数とライズタイムは一樣とするなど、比較的シンプルなものであるにも関わらず、フリングステップを含む変位波形と速度波形を精度良く再現できることが示された。

**Key Words:** *crustal deformation, fling step, composite fault model, the 2016 Kumamoto earthquakes, discrete wavenumber method*

## 1. はじめに

大地震の際、震源付近では永久変位を伴うような変位波形が生じる場合があり、台湾集集地震や熊本地震本震のように地表地震断層を伴う大地震では特にそれが著しい。こうした場合に観測されるステップ状の変位波形(図-1)はフリングステップ<sup>1)</sup>と呼ばれることが多い。フリングステップは断層運動に伴う地殻変動を観測したものに他ならないが、地殻変動という言葉は地震前後の差分という静的なニュアンスが強いので、ステップ状の波形を言い表すために、地殻変動とは別にフリングステップという言葉がある方が便利である。

フリングステップは、その振幅が大きい場合には、免震構造物などに多大な影響を及ぼす恐れのあることが懸念されるようになってきており、特に建築の分野において、構造物への影響が精力的に研究されている(例えば<sup>2)</sup>)。一方、ライフライン施設の多くを占める地中構造物に対して、断層変位の影響が大きいのは当然としても、フリングステップによる動的な効果がどの程度影響するかは不明な点が多い。しかしながら、近年では地中構造物を対象として動的解析を行う事例が増えてきており、設計

で断層変位を想定する場合には、それと整合する形で永久変位を含む地震動を動的解析に使用する必要があるものと考えられる。

ところで、現時点で一般に用いられている強震動シミュレーション手法は、フリングステップを考慮できないものが多い。例えば、港湾の分野で広く照査用地震動の評価に用いられている修正経験的グリーン関数法<sup>3)4)</sup>は、兵庫県南部地震の神戸市内の地震動など、永久変位成分が支配的でない場合の震源近傍地震動の計算において実績があるが、そのままではフリングステップを含む地震動を計算することができない。こうした状況は、フリングステップの構造物への影響を調べる必要性が増していることを考慮すると不都合であると考えられる。

そこで、本研究では、従来から設計において考慮されているアスペリティの破壊に伴う強震動に加え、フリングステップも考慮できる複合型の震源モデルを新たに提案し、熊本地震本震を対象に強震動シミュレーションを実施した。その際、できるだけ簡便で利用しやすい震源モデルとすることを念頭におき、測地学的データを説明するように設定された国土地理院の震源モデル<sup>5)</sup>を出発点とし、これに動的な情報を付与することで、フリング

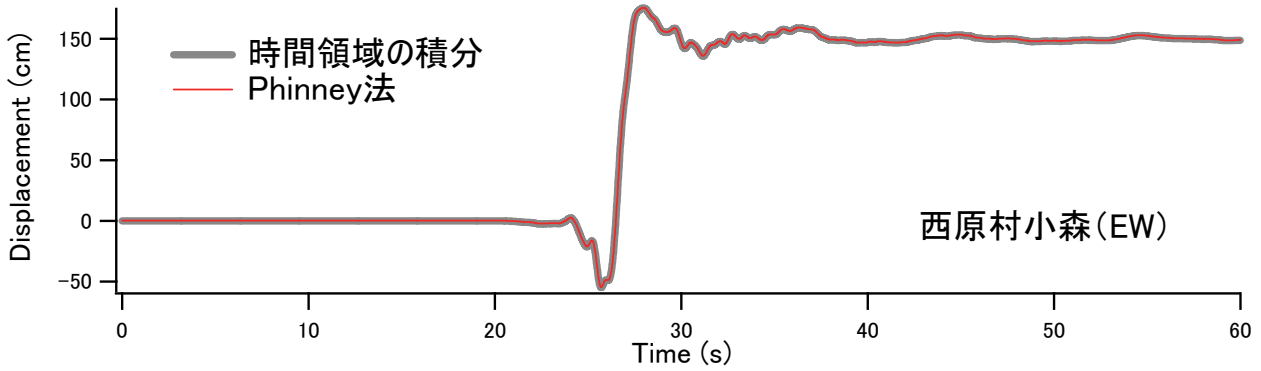


図-1 熊本地震本震の際に西原村小森で得られた強震記録を積分して得られた変位波形。積分の方法は文献<sup>7)</sup>参照。

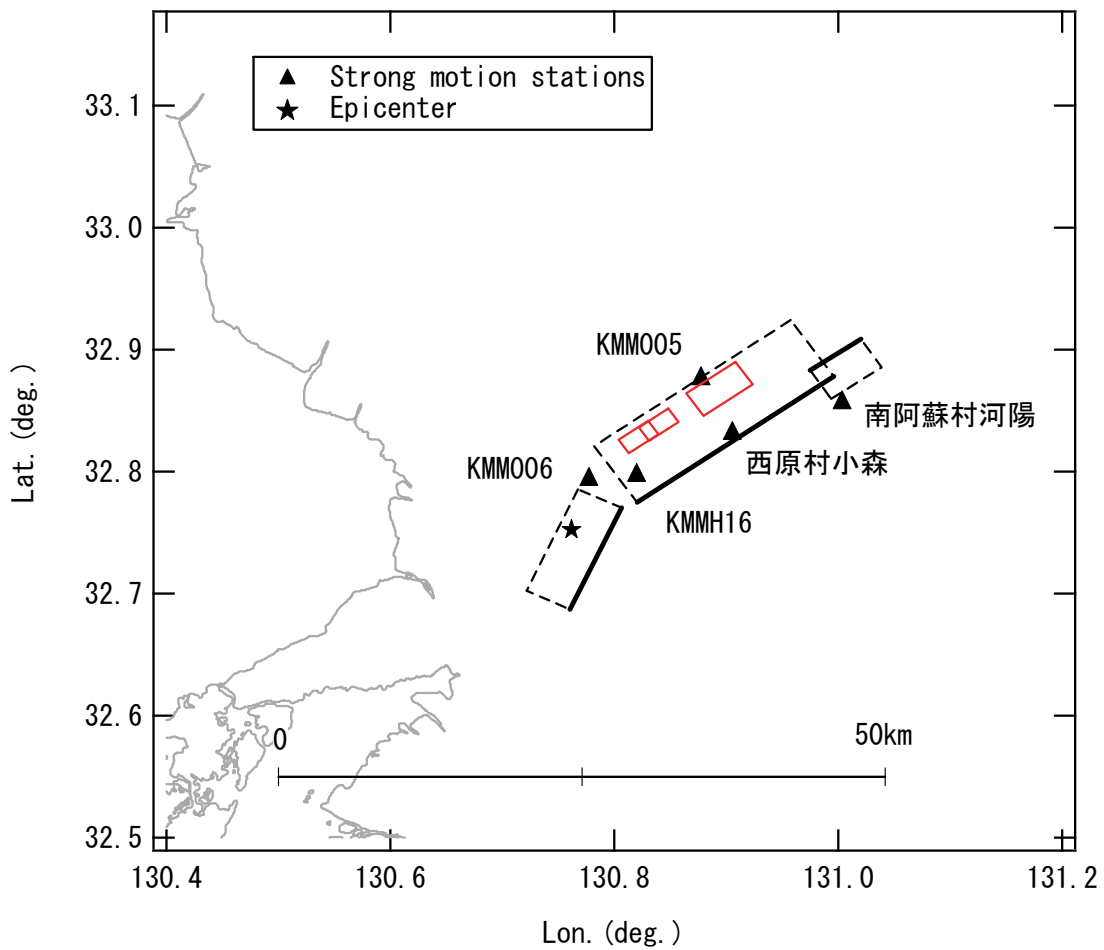


図-2 熊本地震本震を対象とした複合型の震源モデル。黒の長方形は国土地理院による震源断層モデル<sup>9)</sup>の平面的な位置を示す(西から順にB, A1, A2)。赤の長方形はアスペリティ位置を示す。

表-1 国土地理院による震源断層モデル<sup>9)</sup>のパラメータ(断層A1のみ0.3kmだけ上方に移動して用いた)

	経度 (°)	緯度 (°)	上端深さ (km)	長さ (km)	幅 (km)	走向 (°)	傾斜 (°)	滑り角 (°)	滑り量 (m)	$M_w$
断層B	130.807	32.770	0.8	10.2	13.0	205	72	176	2.7	6.65
断層A1	130.996	32.878	0.6	20.0	12.5	235	60	209	4.1	6.96
断層A2	130.975	32.883	0.2	5.1	6.6	56	62	178	3.8	6.36

ステップを計算するための断層モデルとした。そして、これにアスペリティの寄与を加えることで、複合型の震源モデルを構築した。

## 2. 国土地理院による震源断層モデルとその適用

### (1) 国土地理院による震源断層モデルの意義

断層運動による永久変位は、西原村小森(図-2)のように断層面距離のごく小さい地点では断層面全体のすべりではなく観測点直近でのすべりによって決まるが、大津(KMM005)(図-2)のように若干離れた場所では断層面全体の影響を受ける。したがって、震源周辺の各地でのフリングステップを適切に再現できるためには、断層面の浅部のみならず深部を含めたモデル化が必要である。

断層運動による各地の永久変位をある程度説明でき、かつシンプルで扱いやすい震源モデルとして、国土地理院が地震直後に発表した震源断層モデル<sup>9)</sup>がある。これは、西から順にB, A1, A2の3枚の断層面からなるモデルである。それらの平面的な位置を図-2に示す。また断層パラメータを表-1に示す。ここでは、この震源断層モデルを複合型震源モデル構築の出発点とした。

ここで、国土地理院による震源断層モデルを出発点とすることの利点はいくつか存在する。一つは、震源周辺の各地において、少なくとも永久変位をある程度適切に計算できることが保証されていることから、これに動的な情報(各断層面の相対的な破壊開始時刻、各断層面の破壊伝播様式、破壊伝播速度、ライズタイム)を付与することで、各地のフリングステップを適切に計算できる可能性があるという点である。このことは、断層モデル構築における労力を大幅に低減してくれる。もう一つの利点は、国土地理院のモデルが、各断層面におけるすべり量を一様とした比較的シンプルなモデルであることから、工学的に扱いやすいという点である。仮に断層面上のすべり量の不均質性を考慮した複雑なモデルにより各地の永久変位とフリングステップを高精度で再現できたとしても、同様のモデルを今後起こるであろう地震に対して構築することは困難であるから、工学的メリットは少ない。それに対して、比較的シンプルなモデルで各地の永久変位とフリングステップを一定の精度で再現できるならば、同様のモデルを将来の地震に対して適用できる可能性が出てくる。このような考えから、国土地理院による震源断層モデルをもとに、フリングステップを計算するための断層モデルを構築した。

ただし、後に見るように、すべりの一様な断層面を考えるだけでは速度波形や加速度波形は過小評価となるので、これにアスペリティの寄与を加えることで、広い周波数帯域での地震動を計算できる複合型の震源モデルを

構築した。このアスペリティ部分に対し、フリングステップ計算用の震源断層モデルは背景領域と位置づけた。

### (2) 動的な情報の付与

以下の強震動シミュレーションでは、震源付近の媒質のパラメータとして、密度 $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、S波速度 $3.5 \text{ km/s}$ 、P波速度 $6.1 \text{ km/s}$ を用いる。P波速度の $6.1 \text{ km/s}$ はポアソン固体を仮定してS波速度から求めた値である。これらの値からせん断弾性係数 $\mu$ を計算すると $3.31 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ となる。これと表-1に示す面積・すべり量から地震モーメントを計算しモーメントマグニチュードに換算するとほぼ表-1に示すモーメントマグニチュードに対応する。

背景領域による地震動は半無限媒質を対象とした離散化波数法<sup>8)</sup>で計算した。ここで離散化波数法を選択したのは、逆断層や正断層の場合に下盤側よりも上盤側で永久変位が大きい性質などを正しく考慮できるためである。また、計算精度を確保するため、断層面一観測点間の最短距離の半分以下のサイズの小断層を用いることとした。また、背景領域からは $0.5 \text{ Hz}$ 以下の周波数成分のみが生成されると仮定し、 $0.5 \text{ Hz}$ 以上の成分は計算の対象外としている。熊本地震におけるフリングステップの観測結果の分析から、 $0.5 \text{ Hz}$ 以下の成分を計算することでフリングステップは十分に再現されると判断した。

まず、国土地理院の断層モデルに対して、動的なパラメータを適当に与え、図-2の各地点における変位波形を計算したところ、最も断層に近い西原村小森では、EW成分の永久変位が過小評価となった。そこで、断層A1のみを上方に移動させることを検討し、試行錯誤の結果、断層A1を $0.3 \text{ km}$ だけ上方に移動させると、西原村小森でのEW成分の永久変位が観測と整合したので、この状態で断層面の位置を固定した。なお、この結果として、後に示すように、KMMH16のEW成分の永久変位が観測よりも大きくなったが、熊本地震の強震観測結果に占める西原村小森の記録の重要性を考慮し、上方に移動させた断層面をこれ以降では用いた。表-1に示す静的なパラメータのうちで変更を加えたのはこの点だけである。

次に動的なパラメータについて検討した。まず各断層面の破壊開始点について検討した。日奈久断層に相当する断層Bについては、気象庁発表の震源から(正確には気象庁発表の震源を通る鉛直線と断層Bの交点から)破壊を開始するものとした。断層A1については、既往の波形インバージョン結果<sup>例えぱり)</sup>を参考にすると深部から破壊を開始したと考えられるため、北西側の端部から破壊を開始するものとした。断層A2については、最も震央に近い北西側の端部から破壊を開始するものとした。各断層面では同心円状に破壊が進行するものとした。

次に破壊伝播速度と各断層面の(震源での最初の破壊

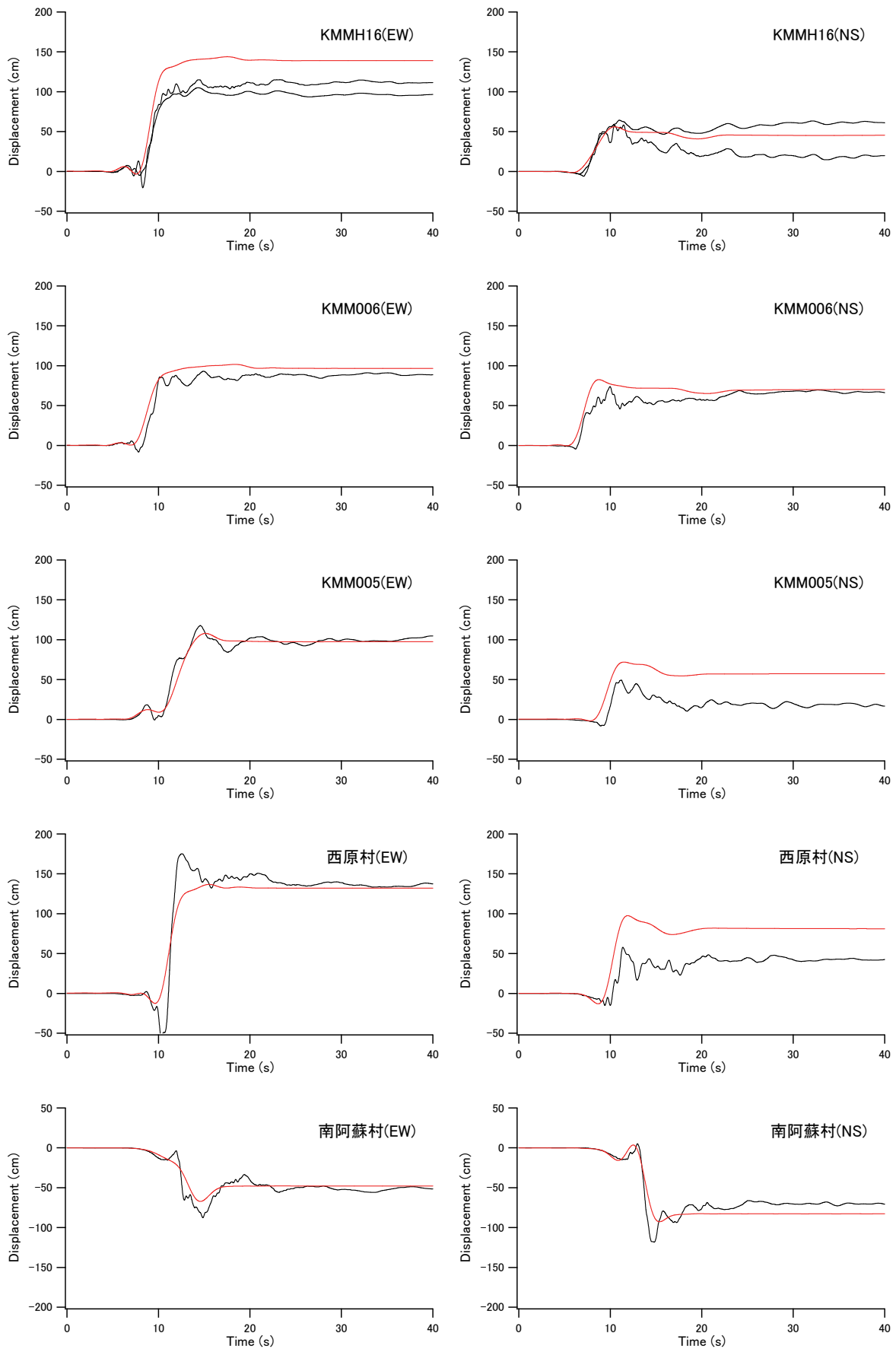


図-3 背景領域のみを考慮した変位波形の計算結果（黒が観測，赤が計算）（原点は気象庁の発震時刻）

に対する) 相対的な破壊開始時刻について検討した。断層 A1 と A2 の破壊開始時刻を、各々の破壊開始点と断層 B の破壊開始点を結ぶ最短距離を破壊伝播速度で除した値とし、破壊伝播速度に関して試行錯誤を行ったところ、破壊伝播速度を 2.4km/s としたときに、西原村小森および南阿蘇村河陽におけるFRINGステップの到来時刻が観測と比較的整合したので、破壊伝播速度を 2.4km/s に固定した。その結果、断層 A1 と A2 の破壊開始時刻はそれぞれ 3.3s, 11.0s となった。断層 B の破壊開始時刻については、当初は 0.0s としていたが、この条件では KMM006 の NS 成分のFRINGステップの到来が早すぎる結果となったので、2.5s とした。

すべり速度時間関数は次式のものに固定した。

$$V(t) = \frac{D_0}{(1-e^{-1})t_r} e^{-t/t_r} \quad (1)$$

ここに  $D_0$  は最終すべり量、 $t_r$  はライズタイムである。なお、式(1)に示す関数は、文献<sup>10)</sup>に基づいて波形合成を行う場合で、かつ、分割数を十分に大きな値とする場合にすべり速度時間関数が収束する関数である。この条件のもとでライズタイムについて試行錯誤を行った結果、ライズタイムを 2.0s とする場合に、観測波形を比較的再現する結果となったので、ライズタイムとしては 2.0s を採用した。

### (3) 背景領域のみの計算結果

以上の条件の下で、背景領域のみを考慮して計算される各地の変位波形を観測結果と比較して図-3に示す。各地点におけるFRINGステップの到来時刻は概ね適切に再現されている。したがって、破壊伝播速度の設定は概ね妥当であると考えられる。また、各地点において変位波形が立ち上がりに要している時間についても概ね再現されている。したがって、ライズタイムとして一様な値 (2.0s) を用いたことは妥当であったと言える。これは、今後の地震におけるFRINGステップを予測する上で好材料であると言える。なぜなら、各地の波形の立ち上がり時間を適切に再現するために場所毎に異なるライズタイムを用いなければならないとすれば、FRINGステップの予測は困難を極めると考えられるからである。

図-4には南阿蘇村河陽における変位軌跡の計算結果を観測結果と比較して示している。河陽ではまず西向きの変位が生じ、つづいて南向きの変位が生じているが、その状況が、A1, A2 の 2 枚の断層面の動きにより再現できている。このように、測地学的データをもとに得られたシンプルな震源断層モデルに動的な情報を付与することで、ハンドリングの難しい不均質断層モデルを用いなくても、観測されたFRINGステップをある程度再現で

きる事がわかった。

ところで、計算結果の速度波形を観測結果と比較して図-5に示すが、変位波形は概ね適切に再現できているにも関わらず、速度波形は大幅な過小評価となっている。これは、ここでの計算ではアスペリティの寄与を考慮していないためであると考えられる。そこで、次章においては、背景領域にアスペリティを加えた複合型の震源モデルを構築し、強震動シミュレーションを行う。

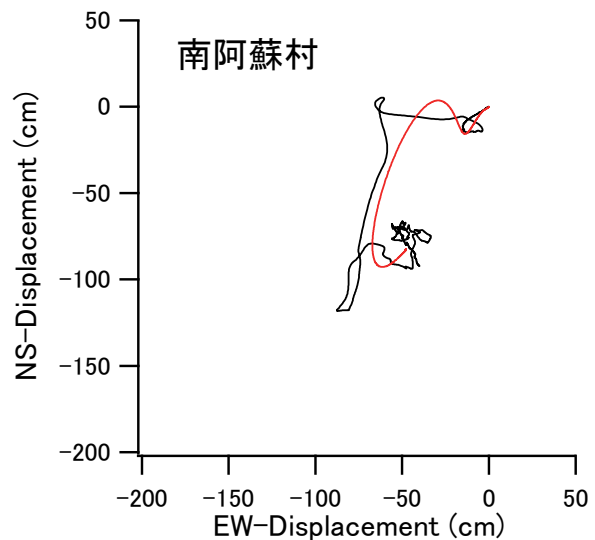


図4 背景領域のみを考慮した変位軌跡の計算結果 (黒が観測, 赤が計算)

## 3. 複合型の震源モデル

### (1) アスペリティの設定

著者らはすでに熊本地震の本震を対象としたアスペリティモデルの作成を行っている<sup>11)</sup>。ただし、その際、アスペリティは布田川断層沿いの傾斜角  $84^\circ$  の断層面上に配置していた。それに対して、ここで背景領域として設定している布田川断層沿いの断層 A1 の傾斜角は  $60^\circ$  である (表-1)。そこで、ここでは傾斜角  $60^\circ$  の断層 A1 上にアスペリティの再配置を行った。その結果設定されたのが図-2に赤枠で示すアスペリティである。設定したアスペリティのパラメタを表-2に示す。

### (2) 背景領域とアスペリティを考慮した計算結果

アスペリティからの地震動は修正経験的グリーン関数法<sup>3)6)</sup>により計算し背景領域からの地震動に加算した。アスペリティからの地震動の計算手順の詳細については文献<sup>11)</sup>を参照されたい。ここでは各地点において経験的に得られているサイト増幅特性を用いている。また中小地震記録の位相特性をグリーン関数の位相特性として用いている。西原村小森では2016年4月14日22:07に発生した地震の位相特性を用いており、南阿蘇村河陽では

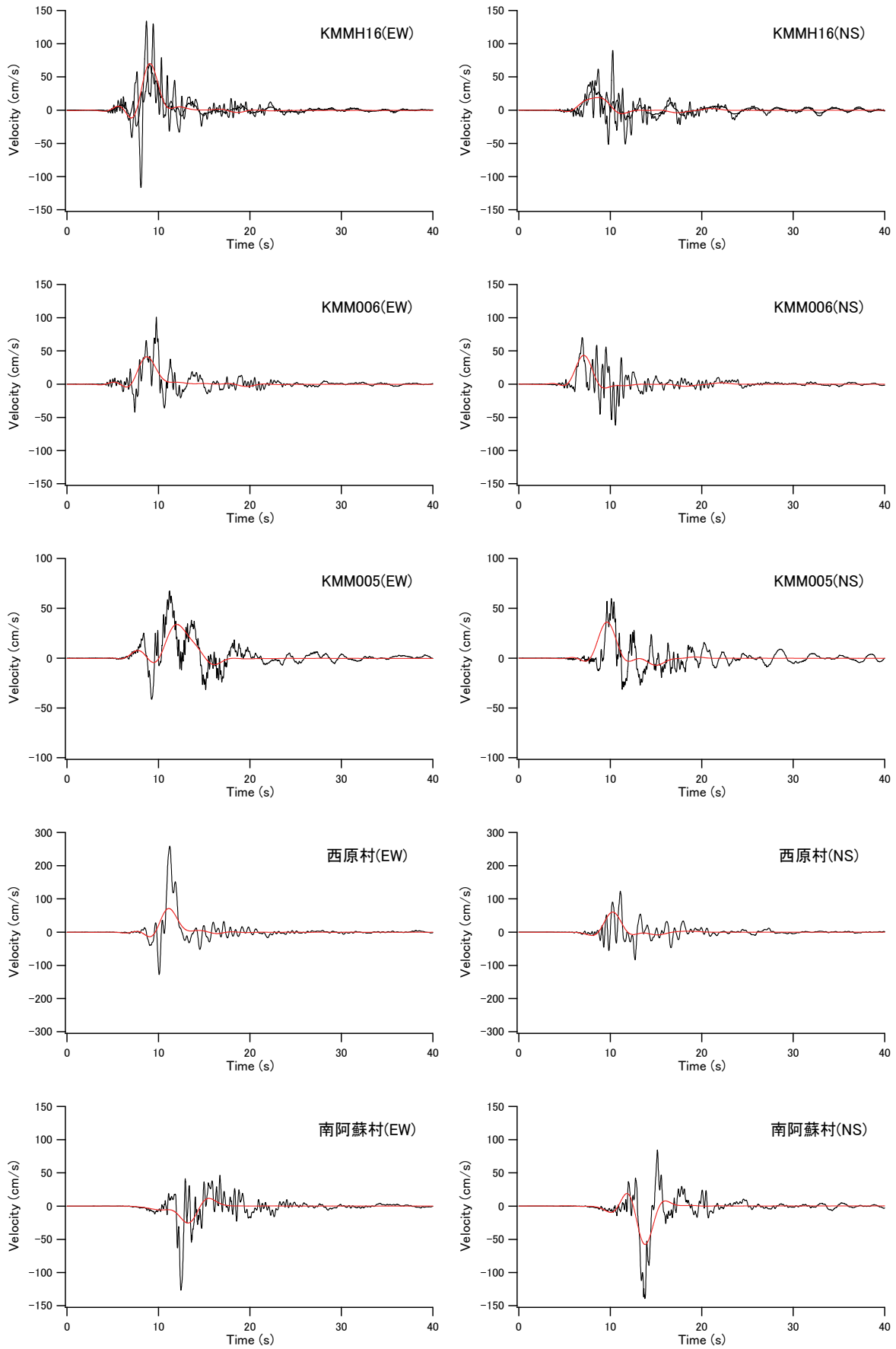


図-5 背景領域のみを考慮した速度波形の計算結果（黒が観測，赤が計算）（原点は気象庁の発震時刻）

表-2 アスペリティのパラメーター

	アスペリティ 1	アスペリティ 2	アスペリティ 3
破壊開始点東経 (deg)	130.817	130.835	130.872
破壊開始点北緯 (deg)	32.834	32.844	32.855
破壊開始点深さ (km)	9.8	9.8	8.1
長さ (km) ×幅 (km)	3.0×3.0	3.0×3.0	5.0×5.0
M <sub>0</sub> (Nm)	0.20E+18	0.10E+18	2.0E+18
相対破壊開始時刻 (s)	5.1	5.7	6.7
破壊伝播速度 (km/s)	2.8	2.8	2.8
ライズタイム (s)	0.27	0.27	1.00

2016年4月16日1:45に発生した地震の位相特性を用いている。

背景領域とアスペリティを考慮して計算される各地の変位波形を観測結果と比較して図-6に示す。変位波形の計算結果は背景領域のみを考慮した場合に比べ永久変位の値に変化はないが少し短周期成分が乗っており観測波形の特徴に近づいている。背景領域とアスペリティを考慮して計算される各地の速度波形を観測結果と比較して図-7に示す。速度波形の計算結果は背景領域のみを考慮した場合に比べ観測結果に大きく近づいている。

#### 4. おわりに

本研究では、熊本地震本震を対象に、アスペリティの破壊に伴う強震動とFRINGINGステップの両者を考慮できる複合型の震源モデルを構築し、強震動シミュレーションを実施した。その際、できるだけ簡便で利用しやすい震源モデルとすることを念頭におき、測地学的データを説明するように設定された国土地理院の震源断層モデルに動的な情報を付与したものを背景領域とし、これにアスペリティの寄与を加えることで複合型の震源モデルを構築した。構築した震源モデルは、比較的シンプルなものであるにも関わらず、FRINGINGステップを含む変位波形と速度波形を精度良く再現できることが示された。

**謝辞：**防災科学技術研究所，気象庁，熊本県による強震波形データを使用しました。記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) Hisada, Y. and Bielak, J.: A theoretical method for computing near-fault ground motions in layered half-spaces

- considering static offset due to surface faulting, with a physical interpretation of fling step and rupture directivity, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.93, No.3, pp.1154-1168, 2003.
- 2) 林康裕，杉野未奈：パルス性地震動に対する建物の応答と地震対策，第15回日本地震工学シンポジウム，pp.1025-1034，2018.
- 3) 古和田明，田居優，岩崎好規，入倉孝次郎：経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価，日本建築学会構造系論文集，No.514，pp.97-104，1998.
- 4) 野津厚，菅野高弘：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法—因果性と多重非線形効果に着目した改良—，港湾空港技術研究所資料，No.1173，2008.
- 5) 野津厚，長尾毅，山田雅行：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良—因果性を満足する地震波の生成—，土木学会論文集 A，Vol.65，pp.808-813，2009.
- 6) 国土地理院：平成28年熊本地震の震源断層モデル（暫定），2016，<http://www.gsi.go.jp/common/000140781.pdf>
- 7) 野津厚：Phinney法，2018，[https://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/tutorial\\_jpn/tutorial\\_014.pdf](https://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/tutorial_jpn/tutorial_014.pdf)
- 8) Bouchon, M.: A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.71, No.4, pp.959-971, 1981.
- 9) Nozu, A. and Nagasaka, Y.: Rupture process of the main shock of the 2016 Kumamoto earthquake with special reference to damaging ground motions: waveform inversion with empirical Green's functions, *Earth Planets Space*, 69:22, DOI 10.1186/s40623-017-0609-3.
- 10) 入倉孝次郎，香川敬生，関口春子：経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良，日本地震学会講演予稿集，No.2，B25，1997.
- 11) 野津厚，長坂陽介：2016年熊本地震の前震と本震の震源過程の推定と特性化震源モデル，港湾空港技術研究所報告，Vol.57，No.1，pp.3-35，2018.

(2018. 12. 10 受付)

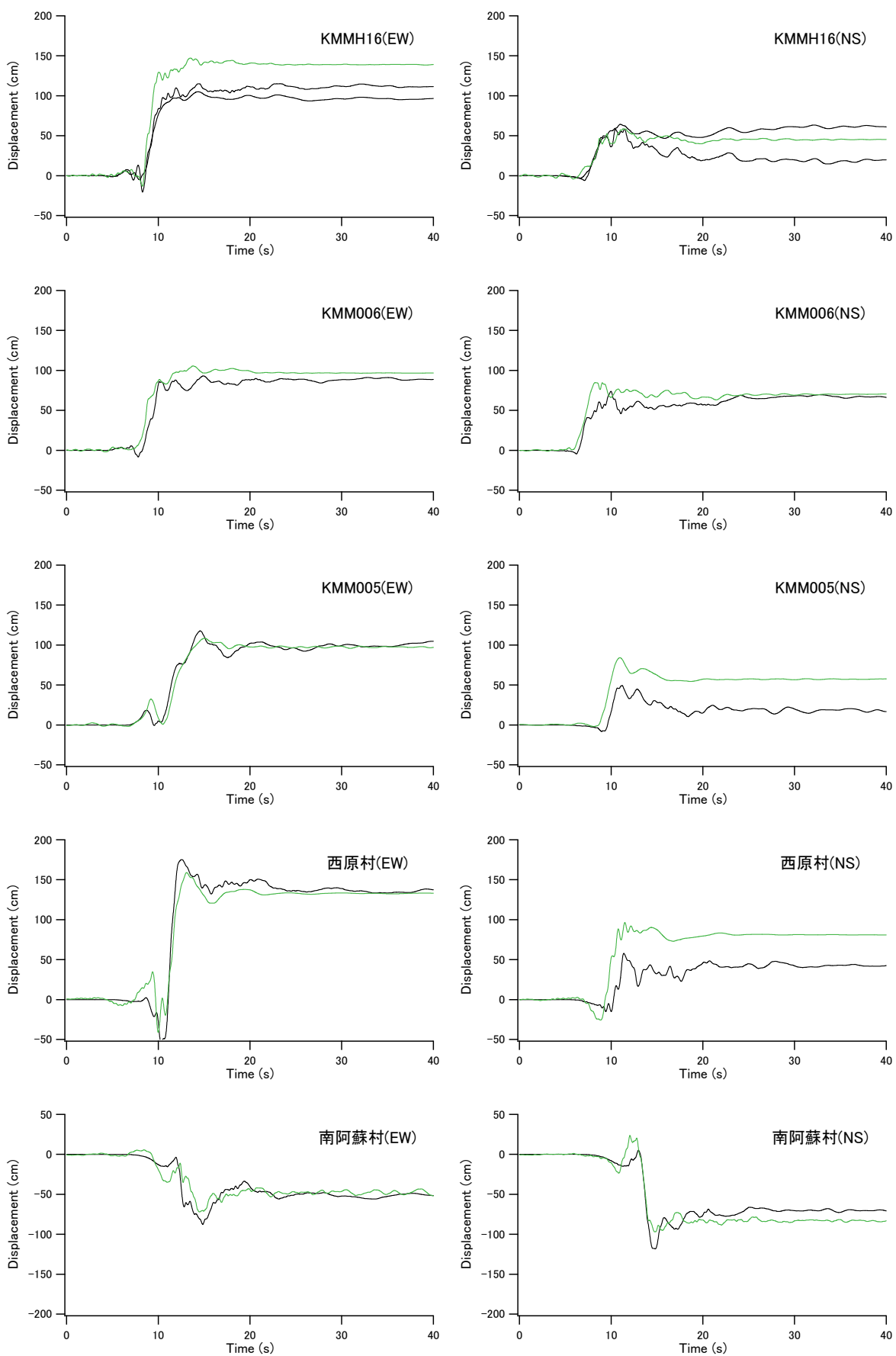


図-6 背景領域+アスペリティを考慮した変位波形の計算結果（黒が観測，緑が計算）（原点は気象庁の発震時刻）



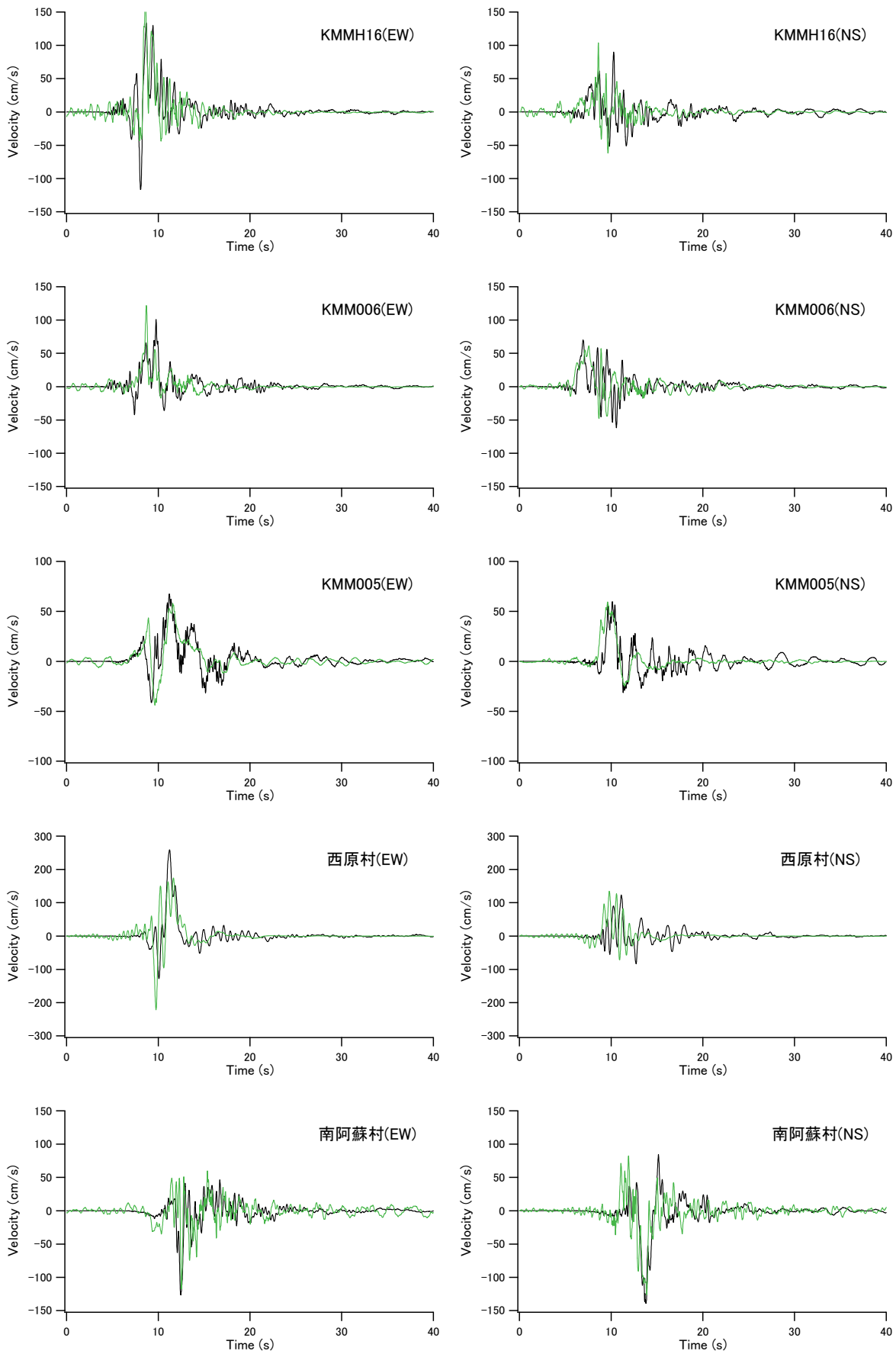


図-7 背景領域+アスペリティを考慮した速度波形の計算結果（黒が観測，緑が計算）（原点は気象庁の発震時刻）

# STRONG MOTION SIMULATION FOR THE MAIN SHOCK OF THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKES WITH CONSIDERATIONS OF FLING STEPS

Atsushi NOZU, Yosuke NAGASAKA and Shuanglan WU

A composite source model was developed to simulate ground motions during the main shock of the 2016 Kumamoto earthquakes which can consider both fling steps and strong motions associated with the rupture of asperities. The authors' intention was to develop a simple model which can be easily handled by engineers. For this reason, the geodetic fault model by the GSI was used as a starting point and parameters related to the temporal evolution of the slip were added. The resultant model was used as a background region, which was combined with asperities to form a composite source model. The simulation results showed that the composite model can well reproduce near-source displacement and velocity waveforms including fling steps, although the model was a relatively simple one in a sense that the slip-velocity function and the rise time were uniform throughout the background region.