

強震加速度記録に基づく地動変位波形推定法の構築と断層近傍地震動の特性分析

名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻
博士課程前期課程 2年 福和研究室 森脇 美沙

1. 序論

地震時の地動変位を知ることは、建物や土木構造物の地震被害を把握するのに有用であるなど大変重要である。特に震源断層近傍で発生する大きな残留変位を伴う地震動は、免震建物や超高層建物に大きな変位応答をもたらす可能性があり、こうした地震動が近年しばしば観測されている。本研究は、強震観測記録を用いて、地動変位に注目した断層近傍地震動の特性を分析することを目的とする。まず、強震加速度記録を用いた残留変位を含む地動変位波形の推定手法を構築する。次に、強震加速度記録からフリリングステップ成分および指向性パルス成分をスペクトルフィッティングで抽出する手法を提示する。また、構築したこれらの手法を適用した結果に基づき断層近傍地震動の特性を分析する。

2. 強震加速度記録に基づく地動変位波形推定法の構築

地震による地動変位は、GNSS 測量データや強震加速度記録などから得られる。国内の強震観測網は GNSS 電子基準点設置網より非常に高密度であり、強震加速度記録から得る残留変位は GNSS 観測網の補完として利用できる。変位波形は、原理的には加速度記録を二階時間積分して算出できるが、実際には加速度記録にステップ関数状の基線変化が発生しており、変位波形を精度よく得るためには何らかの工夫が必要になる場合が多い。例えば本山・室野(2012)は、加速度基線変化をステップ関数で近似し、振動数領域で検出・除去する方法を提案した¹⁾。しかし、記録によってはこの方法で基線変化を検出することができない場合がある。よって本章では、既存手法より精度良く基線変化を検出・補正し、かつ既存手法では基線変化補正が不可能な記録にも適用できる変位波形推定手法を構築する。

2.1 振動数領域における加速度基線変化の補正

加速度基線変化は強震加速度記録中のある時刻に一度だけ起こると仮定し、ステップ関数として表す。時間因果性を考慮した FFT を行うため後続の 0 を付加すると、加速度記録の継続時間 t_d で基線が 0 に戻るため、加速度基線は次式のような矩形関数となる。

$$s(t) = \alpha \{U(t - t_r) - U(t - t_d)\} \quad (1)$$

ここで、 $U(t)$ は単位ステップ関数、 α は基線変化量、 t_r は加速度基線変化の発生時刻である。加速度記録 $a'(t)$ は、真の地動加速度 $a(t)$ と矩形関数 $s(t)$ の和として表せる。

$$a'(t) = a(t) + s(t) \quad (2)$$

式(2)をフーリエ変換すると、

$$A'(\omega) = \begin{cases} A(\omega) + \frac{2\alpha \sin \omega \left(\frac{t_d - t_r}{2} \right)}{\omega} e^{-i\omega \left(\frac{t_d + t_r}{2} \right)} & (\omega \neq 0) \\ A(0) + \alpha(t_d - t_r) & (\omega = 0) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 ω は角振動数である。式(3)の第 1 項は真の加速度フーリエスペクトルで、一般に低振動数で 0 に近い値になる。一方、

第 2 項は矩形関数のフーリエスペクトルで、振動数 0 のとき $\alpha(t_d - t_r)$ 、振動数 $1/(t_d - t_r)$ のとき 0 となる。さらに、真の加速度フーリエスペクトル $A(\omega)$ の振動数 0 での値を 0 と仮定すれば、 α は次のように表せる。

$$\alpha = \frac{A'(0)}{t_d - t_r} \quad (4)$$

すなわち、 t_r の値を仮定すれば自動的に α の値も定まる。 t_r の最適値の推定方法は 2.2 節で述べる。 t_r 、 α により決定された矩形関数のフーリエスペクトル $S(\omega)$ を加速度記録のフーリエスペクトル $A'(\omega)$ から除くと、基線変化補正された加速度フーリエスペクトル $A(\omega)$ が求められる。 $A(\omega)$ を IFFT すると基線変化補正された加速度波形が得られ、これを二階時間積分すると基線変化補正された変位波形が得られる。本山・室野(2012)は、式(3)のスペクトルの絶対値のグラフで最初に値が落ち込む振動数を図解的に読み取り、 t_r を求めている。しかし、スペクトルの値の落ち込みが明瞭でない記録の場合、 t_r が判読不能となる。本研究では、そのような記録でも矩形関数のパラメータ t_r 、 α の推定が可能となる手法を提案する。

2.2 矩形関数のパラメータ推定方法

適切に基線変化を補正すれば主要動終了後の変位はある一定値に収束すると考えられる。よって評価関数 P を次のように定義し、これが最小となるパラメータ t_r 、 α を探索する。

$$P = \frac{1}{|D_m|} \sqrt{\frac{1}{t_d - t_m} \int_{t_m}^{t_d} \{d(t) - D_m\}^2 dt} \quad (5)$$

ここで、 t_m は主要動終了時刻で、加速度波形の二乗累積値が全体の 95% に達する時刻である。 $d(t)$ は評価関数値を算出する対象の変位波形で、 t_r の仮定値で定めた基線変化を除去して求めた変位波形を代入する。また、 D_m は主要動終了後の平均変位で、次のように定められる。

$$D_m = \frac{1}{t_d - t_m} \int_{t_m}^{t_d} d(t) dt \quad (6)$$

式(5)で表される評価関数 P は、値が小さいほど変位波形がある一定の値によく収束していることを表す。これ以降、評価関数 P の値を変位波形の「変動率」、平均変位 D_m の値を「残留変位」と呼ぶ。

2.3 提案手法の適用と分析

例として、2016 年熊本地震本震の西原村小森の地表東西方向の記録を取り上げる。収録開始から 60 s までの記録を抽出し、初動以前の区間の加速度平均値を記録全体から差し引いた上で 2.1 節の加速度基線変化補正を行った。図 1 に、補正前後の(a)加速度、(b)速度、(c)変位波形を示す。加速度波形では補正前後の違いがわからないが、速度波形では基線変化補正を行った結果直線状のトレンドが除去されたことがわかる。また、変位波形では負方向への放物線状の発散が生じなくなった。提案手法で求

めた変位波形は、本山・室野(2012)の方法で求めた変位波形と比較すると波形の後続部分の湾曲がより改善されている。また、ローカットフィルタを用いて算出した変位波形は歪みが生じており、残留変位が全く表現できていない。図2に、推定された矩形関数と補正前後の加速度フーリエスペクトルの絶対値をそれぞれ示す。補正前の加速度フーリエスペクトルの低振動数領域には基線変化による矩形関数成分の影響が現れている。一方、補正後の加速度フーリエスペクトルではその影響が除去されている。このとき変動率は $P = 0.0163$ で、各パラメータの最適値は $t_f = 26.96$ s, $\alpha = -1.40$ cm/s², 残留変位は $D_m = 161$ cmであった。なお、本山・室野(2012)の方法で矩形関数成分を推定したところ $t_f = 25.05$ s, $\alpha = -1.32$ cm/s²であった。得られた変位波形の変動率と残留変位は $P = 0.0463$, $D_m = 196$ cmであった。よって、提案手法は本山・室野(2012)の方法と比較して変位波形の収束の程度が向上したことがわかる。同観測点の南北成分と上下成分も同様に補正を行い、これら3方向の変位波形を用いて水平面、東西—上下面、南北—上下面の粒子軌跡を描いたものを図3に示す。粒子軌跡上の×印は1秒ごとの位置を示しており、数字は記録開始からの経過秒数である。この観測点の地盤の沈降と水平移動は同時に発生したのではなく、まず約1秒(25~26 s)かけて約150 cm沈降し、その後約2秒(26~28 s)かけて東へ約200 cm移動していたことが判明した。

同地震でのK-NETおよびKiK-netの強震記録にも提案手法を適用した。対象はK-NET 大津, K-NET 熊本, K-NET 低用, KiK-net 菊池, KiK-net 豊野, KiK-net 益城の東西・南北成分の記録である。なお、KiK-netの観測点は、すべて地表の記録を使用した。その結果、すべての観測点において提案手法の方が本山・室野(2012)の方法より変動率が小さく、精度の良い変位波形が得られた。なお、K-NET 大津の東西成分はスペクトルの谷が明瞭でないため本山・室野(2012)の方法では補正不可能であったが、提案手法により補正が可能になった。図4に、以上で求めた変位波形を用いて残留変位分布を算定した結果を示す。GNSS 連続観測網 GEONET の電子基準点の2016年4月15日12:00から2016年4月6日12:00までの1日間の変位²⁾も併せて描画した。強震観測点とGNSSの電子基準点は同一地点に存在していないので直接比較することはできないが、提案手法により算出された残留変位はGNSSの観測結果と整合している。ただし、一部の記録では提案手法で補正しても変位波形の後続部分で湾曲が残る場合があった。これは加速度波形上でステップ関数状の特

徴を示さない、不規則な長周期ノイズの影響である。このような場合、基線変化補正を施した後に長周期ノイズの影響を低減することが可能な積分方法を適用し補正することが考えられる。

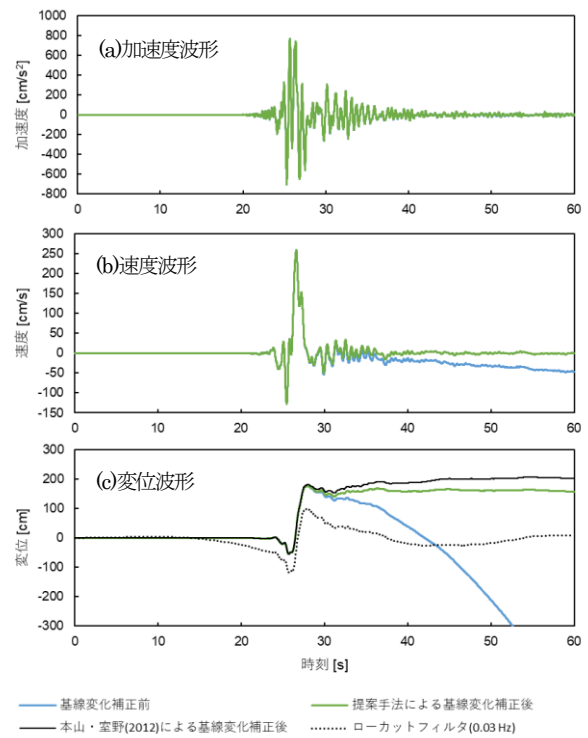


図1 基線変化補正前後の (a)加速度波形, (b)速度波形, (c)変位波形

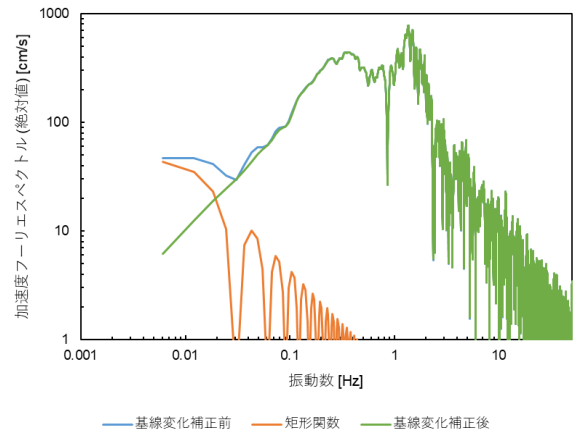


図2 基線変化補正前後の加速度フーリエスペクトル

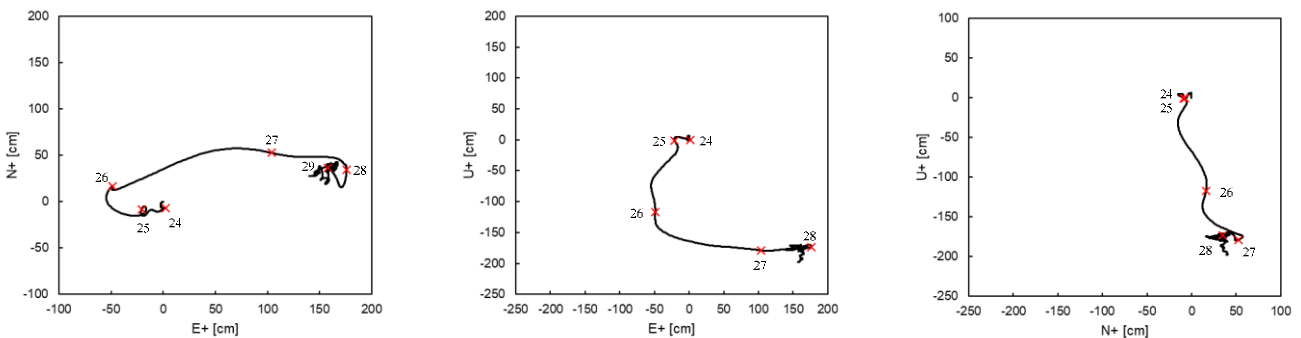


図3 2016年熊本地震本震における西原村小森観測点の粒子軌跡

平井 (2018)は、変位波形に含まれる台形関数成分をスペクトルフィッティングで抽出し、記録の低振動数成分を抽出した台形関数のそれで置換した上でフーリエスペクトルの実部を用いた積分を行う方法を提案した³⁾。ただし、断層近傍地震動の変位波形は台形関数状のフリグステップ成分と三角形パルス状の指向性パルス成分を足し合わせたような特有の形状を持つ。そのため、この方法を併用すると最終的に得られる残留変位量の算出精度の向上が期待できる一方、変位波形としては三角形パルスの特徴が失われ真の地盤挙動から乖離する可能性がある。

3. スペクトルフィッティングによるフリグステップ成分および指向性パルス成分の抽出

フリグステップによる残留変位量や指向性パルスの最大変位振幅は、断層近傍地震動を受ける長周期建物の最大変位応答と関係する。フリグステップによる残留変位量は GNSS 測量や強震加速度記録から変位波形を算出することで得られるが、指向性パルスは残留変位を生じないため、その最大変位振幅の大きさを GNSS 測量で得ることはできない。また、断層近傍地震動の変位波形はフリグステップと指向性パルスを足し合わせたような波形を示すため、変位波形から指向性パルスの最大変位振幅の大きさを得ることも困難である。また、変位波形中のフリグステップ成分および指向性パルス成分を抽出できれば、長周期ノイズの影響を低減可能な積分手法を開発できる可能性がある。よって本章では、速度フーリエスペクトルへのスペクトルフィッティングにより、強震記録からフリグステップ成分や指向性パルス成分を抽出する方法を考案する。

3.1 フリグステップ成分および指向性パルス成分の抽出方法の提案

断層近傍地震動の速度波形は、次のように表せる。

$$v(t) = \alpha_v v_f(t) + \beta_v v_p(t) \quad (7)$$

ただし、 α_v はフリグステップの速度波形の最大振幅、 β_v は指向性パルスの速度波形の最大変位振幅で、フリグステップによる残留変位量 α_d や指向性パルスの最大変位振幅 β_d との関係は次の式で表される。

$$\alpha_v = \frac{2\alpha_d}{t_2 - t_1} \quad (8) \quad \beta_v = \frac{\beta_d \omega_0}{2} \quad (9)$$

また、 $v_f(t)$ はフリグステップの速度の基底関数、 $v_p(t)$ は指向性パルスの速度の基底関数であり、次式で表す。

$$v_f(t; t_1, t_2) = \frac{1 - \cos \omega_0(t - t_1)}{2} \{U(t - t_1) - U(t - t_2)\} \quad (10)$$

$$v_p(t; t_1, t_2) = \sin \omega_0(t - t_1) \{U(t - t_1) - U(t - t_2)\} \quad (11)$$

ここで、 t_1 は立ち上がり開始時刻、 t_2 は立ち上がり終了時刻、 $U(t)$ は単位ステップ関数で、 $\omega_0 = 2\pi/(t_2 - t_1)$ である。式(10)、(11)の FFT によりフリグステップと指向性パルスの速度フーリエスペクトル $V_f(\omega)$ と $V_p(\omega)$ が求められる。なお、 ω は角振動数である。

ここで、速度フーリエスペクトルへのフィッティングにより断層近傍地震動の速度波形のパラメータ t_1 、 t_2 、 α_v 、 β_v を最適化することを考える。ある振動数範囲に対応する角振動数 $\omega_1 \sim \omega_2$ について、次式で定義される評価関数の値が最小となるパ

ラメータ t_1 、 t_2 、 α_v 、 β_v を探索する。

$$P = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} |V(\omega) - \{\alpha_v V_f(\omega) + \beta_v V_p(\omega)\}|^2 d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{|V(\omega)|^2}{\omega} d\omega} \quad (12)$$

ただし、 $V(\omega)$ は 2 章で示した手法で基線変化補正した地震動加速度記録から求めた速度フーリエスペクトルである。

3.2 提案する抽出方法の適用と分析

適用例として、2016 年熊本地震本震における西原村小森の地表東西成分を取り上げる。収録開始から 60 s までの記録を抽出し、2 章で示した提案手法で基線変化補正を施した上で求めた速度フーリエスペクトルを用いて、3.1 節で示した抽出方法を適用した。図 5 に、抽出したフリグステップ成分およびフリグステップ成分を、強震記録と併せて(a)速度波形と(b)変位波形で示す。ただし、20-40 s の区間を取り出し拡大して表示した。フリグステップ成分と指向性パルス成分を足し合わせた波形と強震記録の波形を比較すると、両者は一致している。よって、提案手法により抽出されたフリグステップ成分と指向性パルスを足し合わせた波形は、断層近傍地震動の波形を精度よく近似していると言える。図 6 に、抽出したフリグステップ成分と指向性パルス成分の速度フーリエスペクトルを、強震記録の速度フーリエスペクトルと併せて示す。評価関数値を計算する際のフィッティング範囲の上限振動数は、目視により 0.8 Hz とした。このときの各パラメータの最適値は、 $t_1 = 24.95$ s、 $t_2 = 27.61$ s、 $\alpha_v = 124$ cm/s、 $\beta_v = -129$ cm/s である。また、式(8)、(9)により換算したフリグステップによる残留変位量および指向性パルスの最大変位振幅は、 $\alpha_d = 165$ cm、 $\beta_d = -109$ cm である。さらに K-NET および KiK-net の観測点についても、同じ地震で得られた強震記録に対し提案する抽出方法を適用した。なお、対象とする記録は 2.3 節と同じ 6 観測点における地表東西・南北成分の記録とした。抽出して得られた各記録のフリグステップによる残留変位量 α_d および指向性パルスの最大変位振幅 β_d の空間的分布を求め、図 7 に示す。2.3 節で算出した残留変位分布(図 4)と比較すると、フリグステップ成分による残留変位の分布は、強震記録から得られた変位波形に基づく残留変位分布とほぼ一致している。また、指向性パルスの最大変位振幅は、断層極近傍では断層直交方向に生じているが、少し離れた観測点では必ずしもその方向に生じていない。これは、震源断層のすべり分布や断層破壊過程を反映しているものと考えられる。

4. 結論

本論文ではまず、変位波形の後続部分の変動率が小さくなるよう、振動数領域において加速度記録から基線変化によるステップ関数成分を検出・除去することで、残留変位も含めた変位波形を精度良く算出する手法を構築した。本手法を 2016 年熊本地震本震の記録に適用して算出した変位波形は、既存方法を適用した場合と比較して算出精度が向上した。加えて、既存方法では基線変化補正が不可能であった記録であっても補正が可能

となった。ただし、加速度波形上でステップ関数状の特徴を示さない長周期ノイズの影響で、提案手法で補正しても変位波形の後続部分で湾曲が残る場合があった。しかし、強震記録からのフリングステップ成分と長周期成分の抽出が実現すれば、長周期ノイズの影響を低減する積分方法を構築できる可能性が示唆された。そのため、次に速度フーリエスペクトルへのスペクトルフィッティングによりそれらを強震記録から抽出する方法を提示した。この方法を2016年熊本地震本震の記録に適用して抽出されたフリングステップ成分と指向性パルス成分を足し合わせた波形は、強震記録の波形を良く近似することができた。

本研究で構築した変位波形推定法を利用すれば、地震直後に構造物の損傷可能性や被害程度を把握することができ、迅速かつ効率的な応急復旧対応を行うのに役立つことが期待できる。

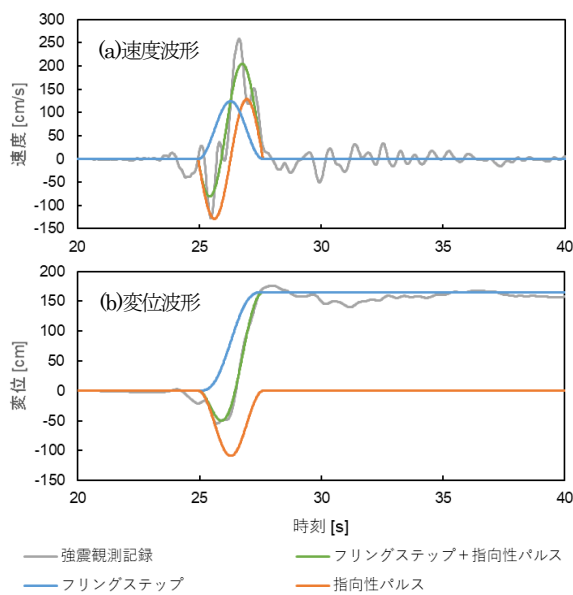


図5 抽出したフリングステップ成分および指向性パルス成分の(a)速度波形、(b)変位波形

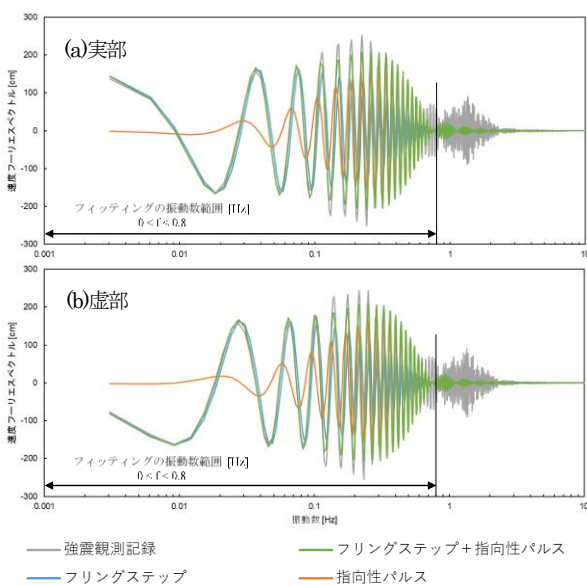


図6 抽出したフリングステップ成分および指向性パルス成分の速度フーリエスペクトル

また、フリングステップ成分と指向性パルス成分の抽出結果を用いた断層近傍地震動の波形の近似により、長周期ノイズの影響を低減する積分方法を構築し、本論文の基線変化補正手法と併用することで、強震加速度記録から残留変位を含む変位波形を高精度に算出することが可能になると期待できる。

参考文献

- 1) 本山紘希・室野剛隆: 地震加速度記録の積分による変位波形の計算手法, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.68, No.4, pp.1_202-I_208, 2012.7
- 2) 国土地理院: 電子基準点データ提供サービス, <http://terras.gsi.go.jp/> (2018.10.15 参照)
- 3) 平井敬: 台形関数へのスペクトルフィッティングによる地震動加速度記録に基づく変位波形の推定, 日本建築学会構造系論文集, Vol.83, No.751, pp.1229-1238, 2018.9

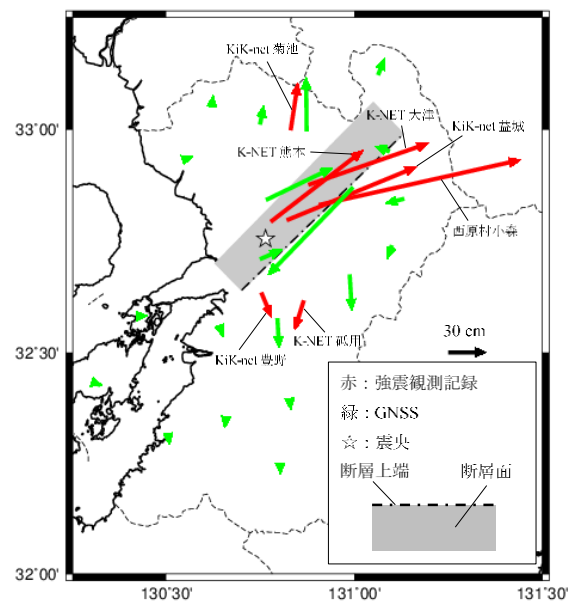


図4 2016年熊本地震本震の残留変位分布

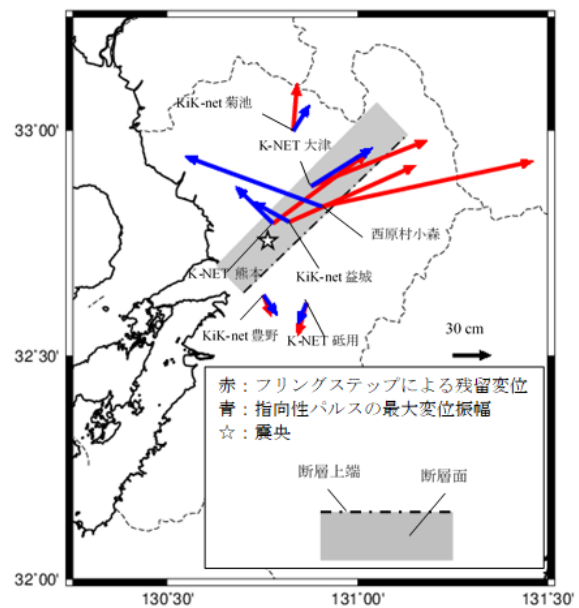


図7 抽出したフリングステップ成分による残留変位と指向性パルス成分の最大変位振幅の空間的分布