

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K11618

研究課題名(和文)衛星レーダ干渉計を用いた地震による地表変位分布の完全3次元表示法の開発

研究課題名(英文) Fully 3-dimensional visualization of coseismic surface displacement by spaceborne SAR interferometry

研究代表者

木村 宏 (Kimura, Hiroshi)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：40262753

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：衛星合成開口レーダ(SAR)干渉法による地表変位3次元計測には、独立な3方向での変位計測が最低限必要となる。多くの観測データは「東から」あるいは「西から」の2視線方向に留まるため、さら視線方向に交差する方向の計測を追加することで、2視線方向のみからの3次元計測を目的とした。視線交差方向の計測法として多重開口干渉(MAI)法とサブピクセル・オフセット追跡(sPOT)法を検討した。2016年熊本地震を事例として、最終的にMAI法を採用し、PALSAR-2データの複数の組み合わせについて3次元地表変位量を算出した。国土地理院GSNN局における変位計測量との比較等より、目標達成を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

(学術的意義)2方向のみの衛星干渉SARから地表変位量を完全3次元計測する新技術を開発した。当該技術は、現在の衛星SARに広く利用可能であることからSARデータの利用拡大に寄与する。

(社会的意義)一般的に使われる干渉縞表現は解釈が難解で、結果の利用は一部の専門家のみに限られてきた。受け入れやすい3方向に分解した表現により、干渉SARに関する知識の有無に関わらず結果を利用できるようになり、地震や地盤等の分野で計測結果の利活用が進む。

研究成果の概要(英文)：To measure three-dimensional (3D) surface displacements by spaceborne synthetic aperture radars, observations from independent three directions or more are required. However, most available datasets are from only two directions (eastward and westward). This study adds a measurement of a cross line-of-sight (LOS) direction and aims to derive 3D displacements from only two LOS directions. For displacement measurements in cross LOS direction, multi aperture interferometry (MAI) and sub-pixel offset tracking (sPOT) are discussed. The decomposition of 3D displacement from several PALSAR-2 dataset combinations which observed the area where the 2016 Kumamoto earthquakes occurred was carried out employing MAI. Comparison with the measured displacements by the GSNN stations operated by Geospatial Information Authority of Japan and others show the achievement of the study goal.

研究分野：レーダリモートセンシング

キーワード：合成開口レーダ(SAR) 干渉SAR 多重開口干渉(MAI) 地表変位 3次元計測 2016年熊本地震 ピクセルオフセット

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

合成開口レーダ(SAR)を利用する衛星レーダ干渉計による地表変位計測は、米国加州の Landers 地震(1992)での地表変位をレーダ干渉計で図面化した論文が 1993 年の Nature に掲載されたのが最初に、世界中で多数の研究が行われてきた。日本では国土地理院が研究段階を終えて事業化に移り、兵庫県南部地震(1995)や東日本大地震(2011)、熊本地震(2016)等で地表変位計測結果を公表している。しかし、変位量が干渉縞模様で表現され、かつ計測方向が視線方向成分のみであるため、計測結果の解釈は難解である。このため、当該技術の利用は一部の専門家のみに限られ、地震や地盤等の関連分野での利用普及が進まず、その成果が十分に活用されていない。一方で、工学や医学の様々な分野では、高度な可視化技術を利用して各種現象や構造をより分かりやすく見せる工夫が図られており、技術利用の拡大に役立っている。

2. 研究の目的

本研究では、地震による地表変位分布を分かりやすく提示する衛星レーダ干渉計計測法を開発する。異なる 3 視線方向があれば完全 3 次元計測が可能であることは数学的に明らかであるが、3 視線以上で同じ地域を取得した衛星レーダ干渉計データは、実際には極めて稀である。これに対し、2 視線方向データは比較的豊富に存在する。従来研究には、2 方向からの 3 次元計測に向けた提案があるが、完全な 3 次元ではないために「2.5 次元」と称している (Fujiwara et al. 2000)。これに対して、異なる 2 視線方向があれば、現在までの関連する国内外での従来研究の成果を応用することにより完全 3 次元計測が可能であり、3 次元計測によって当該技術の関連分野での利用が格段に進展すると期待される。ここで応用する関連研究は、視線方向に交差する方向の変位を検出する方法 (多重開口干渉法, Jung et al. 2009) やサブピクセル精度でピクセルの変位を検出する方法 (サブピクセル・オフセット追跡法, A. Singleton, et al. 2014) である。これらの方法を応用することにより、2 視線方向でも 3 次元変位を得ることが可能となる。本研究では衛星レーダ干渉計による地表変位計測法について、2 視線方向からの完全 3 次元計測法を開発し、慣習的に受け入れられやすい東西、南北、上下の 3 方向、かつ絶対変位量での変位量図化の実現を目的とする。

3. 研究の方法

3.1 変位量の 3 次元分解

固定照射方向の衛星合成開口レーダでは、上昇軌道と下降軌道を用いて同一地表を 2 つの視線方向で観測することができる (図 1(a))。近年は ALOS-2 衛星 (2014 年 5 月～) 搭載の PALSAR-2 のように左右の照射が可変の衛星 SAR が増えていて、最大 4 視線方向での同一地表観測が可能である (図 1(b))。しかし、PALSAR-2 においても実際に 3 以上の視線方向で取得された場所は極めて少ない。さらに、3 以上の視線方向で地震前後の干渉ペアを得ることはさらに難しい。

3 次元地表変位量を得るには異なる 3 以上の方向での変位量が必要である。そこで、観測頻度が期待できる 2 視線方向に加えて多重開口干渉 (MAI) を利用すると、視線方向に交差する方向が加わって計 4 方向となる (図 1(c))。さらに、MAI の代替あるいは補助する方法としてサブピクセル・オフセット追跡 (sPOT) がある。本研究では 3 以上の複数方向の変位計測結果から 3 次元の地表変位を得る方法として特異値分解を用いる。当該手法は最小二乗推定とみなすことができる。

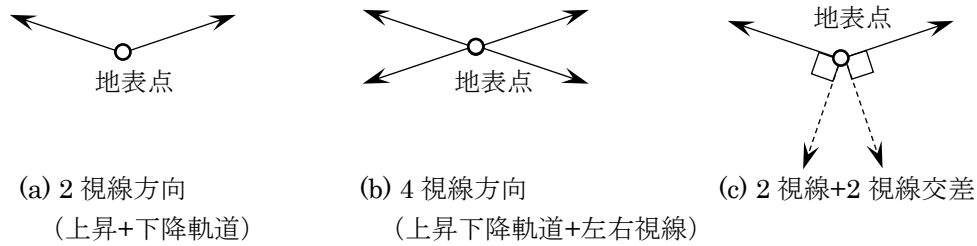


図1 SARによる変位計測方向構成(真上から見た描写)

3.2 対象事例と使用データ

3.2.1 対象事例

2016年に発生した熊本地震を対象事例とする。4月14日21時26分におけるモーメントマグニチュード(Mw)6.2の前震に続き、4月16日1時25分にMw7.0の本震が発生した。さらに前震と本震の間、および本震後も4月末までに多数の地震が発生した。

3.2.2 使用データ

JAXAのALOS-2衛星に搭載されたPALSAR-2レベル1.1のSLCデータを使用した。

3.3 多重開口干渉(MAI)法とサブピクセル・オフセット追跡(sPOT)法

3.3.1 多重開口干渉(MAI)法

SAR干渉を用いたトラック方向の変位計測法として、多重開口干渉(MAI)法がある(Jung et al. 2009)。文献に示された干渉位相と地表変位量の関係式は曖昧であるが、本研究では別途理論的に導いた関係を使用した。

3.3.2 サブピクセル・オフセット追跡(sPOT)法

干渉SAR以外で地表面変位を計測する技術にサブピクセル・オフセット追跡(sPOT)法がある(例えば、A. Singleton, et al. 2014)。当該手法では、クロストラック方向(視線方向)とトラック方向(視線交差方向)の地表変位を画素のずれとしてサブピクセル精度で検出する。

3.3.3 MAI法とsPOT法による変位検出について得た知見

同一の変位の検出能力を比較して次の知見を得た。

- (1) MAI法とsPOT法による検出変位量間の元々の相関は低い。
- (2) sPOT法を複素数SAR画像に適用するとき、振幅相関と複素数相関で検出量に差異が生じる。当該理由については、研究期間中に解明できなかった。

3.3 2016年熊本地震への適用

2016年熊本地震を事例に衛星レーダ干渉計を用いた地震による地表変位分布の完全3次元解析を行った。使用データは4月14日の前震と4月16日の本震をカバーする3干渉ペアで、構成できる5通りの組み合わせについて解析した。本研究開始前には、sPOT法をMAI法の補助と考えていたが、3.3.3に記したようにsPOT法について解明できなかった部分が残ったので、トラック方向の変位計測にはMAI法のみを使用した。解析領域は、緯度が 32.48° ~ 33.17° 、経度が 130.55° ~ 131.10° の範囲である。図3に各組合せから得られた3次元変位分布と計測数分布を計測方向構成とともに示す。計測数は、コヒーレンスが0.2以上の視線方向計測数と視線交差方向計測数の合計であり、これが3以上の個所のみが3次元分解計算と表示の対象となる。方向別

変位分布は組合せ 1 ~ 5 のすべてで同じ傾向を示したが、組合せ 5 はコヒーレンス条件を満足し

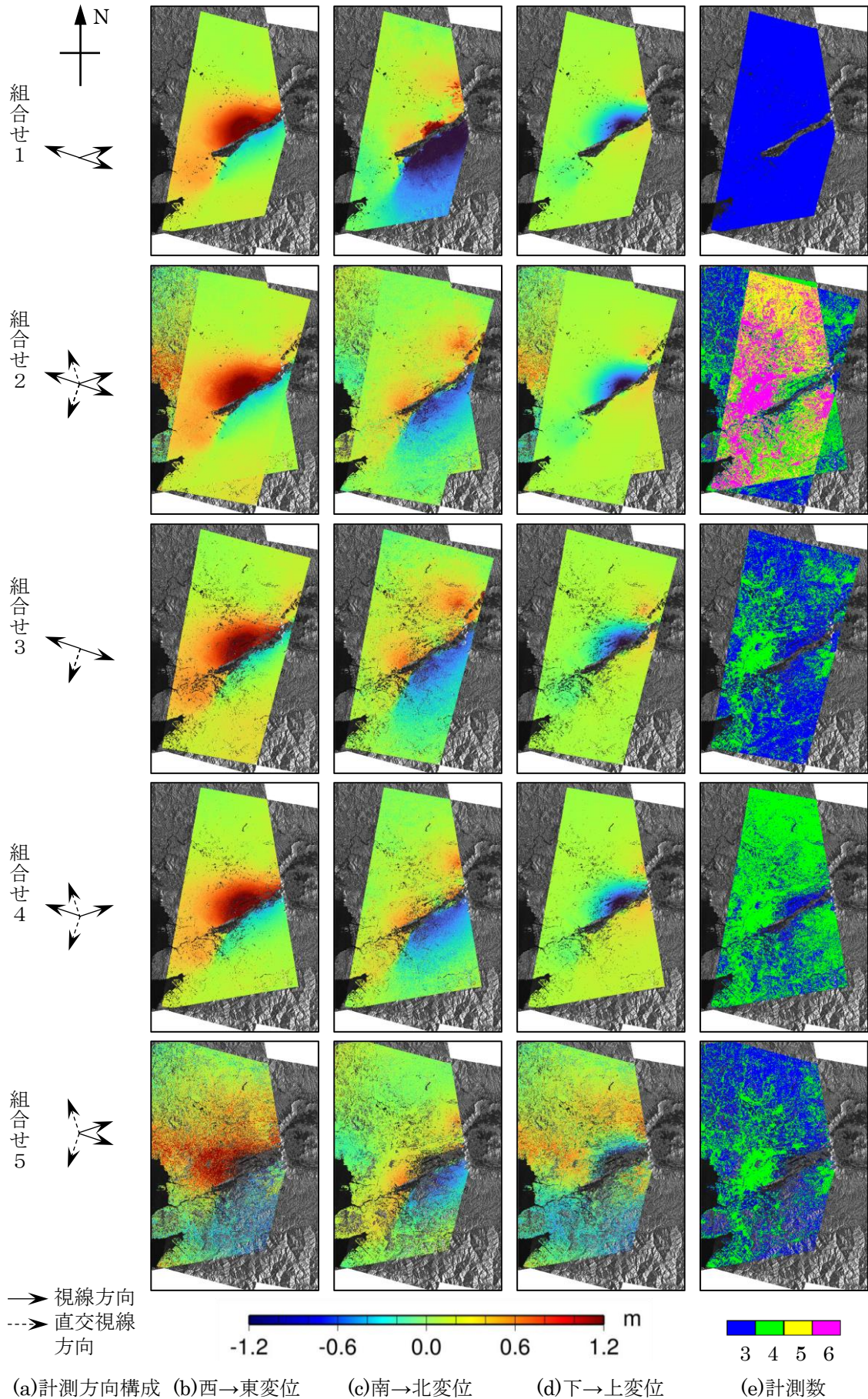


図 2 各組合せからの 3 次元変位分布と計測数分布

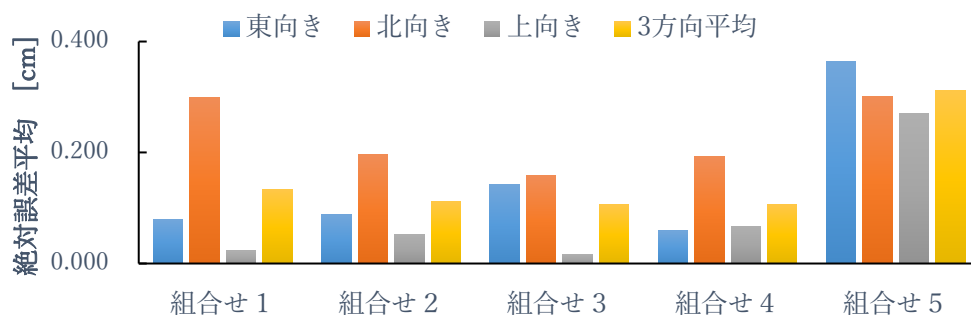


図3 各組合せのGSNN局変位計測量との絶対差平均

ない個所が多く、方向別変位分布はその他の組合せと若干異なる。その理由としては、視線方向の2つが同じ西から東なので最大計測数時においても方向バランスが低い上、さらに1つの干渉ペアの時間間隔が長いことによる低コヒーレンスで大部分の個所で計測数が3となり方向バランスがさらに低下したためと考えられる。視線方向のみの組合せ1も方向バランスが低く、断層南側で北向きの変位量が組合せ2, 3, 4よりも大きく検出された。

さらに、解析領域内で国土地理院が管理する電子基準点 (GSNN 受信局) 6局での変位量 (国土地理院 2016) と各組合せでの検出変位量との絶対差平均を図4に示す。3方向平均は組合せ5以外がほぼ同じで、視線方向が西からと東からの2方向とその視線交差方向からなる組合せ3と4が 10.6 cm、視線方向が西から2つと東から1つの3方向とその視線交差方向からなる組合せ2が 11.2 cm、視線方向のみの組合せ1は 13.4 cm である。方向バランスは西からと東からの視線方向とその視線交差方向からなる組合せ2から4で高く、視線方向のみの組合せ1と同じ西からの視線方向とその視線交差方向からなる組合せ5は低い。さらに組合せ5以外の組み合わせでは、いずれも北向きの変位量差が3方向の中で一番大きい。この理由は、組合せ1では観測の3方向がすべて東西方向に近いため、組合せ2から4は南北方向に近い視線交差方向 (トラック方向) の計測精度が視線方向 (クロストラック方向) よりも低いためと考えられる。

4. 研究成果

図2と図3に示した結果から得られた研究成果を列挙する。

- ・2視線方向干渉SARペアにMAIによる視線交差方向の変位計測を加えることにより、完全3次元変位計測を実現する目的を達成できた。
- ・2視線方向の場合、西からと東からの干渉ペア組合せでより高い計測精度を期待できる。また、干渉ペア数が2からさらに増えるほど変位計測値は安定する。2視線方向が同じ西からあるいは東からの干渉ペア組合せでも3次元変位計測は可能だが、3方向のバランスが悪く変位計測精度は低下傾向となる。
- ・本研究前に、西からと東からの両方の視線方向が混じる5干渉ペアの視線方向変位のみから3次元変位分布を得たが、視線方向のみでは3方向のバランスが悪く、特に北向き方向変位量分布で使用干渉ペア数が変化する領域境界で計測変位量の不連続が顕著だった (Kimura 2017)。これに対して、本研究の西からと東からの2視線方向の3干渉ペアより得られた変位量分布は、先の結果とほぼ同じであり、かつ干渉ペア数が変わる領域境界での不連続も小さかった。つまり、より少数の干渉ペアから安定した精度の3次元変位計測が可能といえる。
- ・本研究で実証できた少数の干渉ペアからの3次元変位計測により、衛星SAR干渉を用いた地震等による地表面変位計測の機会と利活用の増進が期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Hiroshi Kimura
2. 発表標題 MEASUREMENT OF ALONG-TRACK SURFACE DISPLACEMENTS BY SAR: MULTI- APERTURE INTERFEROMETRY VS. AMPLITUDE PIXEL OFFSET
3. 学会等名 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Kimura
2. 発表標題 IMPROVEMENT OF SUBPIXEL OFFSET MEASUREMENT ACCURACY AND COMPARISON WITH MULTIPLE-APERTURE SAR INTERFEROMETRY
3. 学会等名 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------