

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06468

研究課題名(和文) 多周波合成開口レーダを用いたInSAR解析によるセンサ特性の評価

研究課題名(英文) Evaluation of the feature of the sensors by InSAR analysis using different frequency SAR data

研究代表者

野中 崇志 (NONAKA, Takashi)

日本大学・生産工学部・准教授

研究者番号：20556336

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、最新鋭の合成開口レーダの干渉SAR解析(InSAR)における位相誤差の評価手法の構築を目的とした。まずXバンドのTerraSAR-X、CバンドのSentinel-1、及びLバンドのPALSAR-2において、観測モードや撮影方向によらず基線長が長いほど、数値標高モデル(DEM)の誤差が小さいことを確認した上で、テストサイトを茨城県つくば市とし、道路、駐車場、公園等の不動点におけるDEMの誤差を用いて、位相誤差を示した。

次にTerraSAR-Xとその併用機であるTanDEM-Xを用いた干渉解析によるDEMの誤差を用いて、大気の影響や地表面の時間変化の影響を定量的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

合成開口レーダの干渉SAR解析により、地震等の自然災害時にその前後に取得した画像より地表面の微小変位が推定することができる。本研究では、その中でもSBAS(Small-Baseline Subset)法に着目し、電子基準点の参照データと比較することで、変位量誤差を評価した後に、本研究で得られた位相誤差より予測される誤差との整合性を確認している。すなわち本研究の成果である各センサの位相誤差を把握することで、応用分野として地表面変位量推定時に想定される誤差の評価に役立てることができる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to construct the method to evaluate the phase errors of interferometry using the latest synthetic aperture radar. First, we confirmed that the errors of DEM became smaller as the baseline was longer, and it was independent of the acquisition mode and direction. Then, we showed the phase errors using the errors of DEM at fixed ground points of roads, parking lots, and parks of the study sites of Tsukuba city, Ibaraki Prefecture. We also quantitatively revealed the atmospheric disturbances and temporal decorrelation of the grounds using errors of DEM derived by InSAR analysis of TerraSAR-X and its add-on of TanDEM-X.

研究分野：計測工学

キーワード：合成開口レーダ 干渉SAR 数値標高モデル

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2007年に打ち上げられたドイツ航空宇宙センター(DLR)が開発した TerraSAR-X 衛星は、Xバンドの周波数帯を有し、標準で 3m (StripMap モード、SM)、最高で 1m 分解能(高分解能 SpotLight モード、HS)を有する。打ち上げ当初から、高精度に軌道制御を行うことが可能であることから、干渉処理による地形解析に使用することが期待されていた。これまで研究代表者は、センサの幾何的特性の評価を行うとともに、東北太平洋沖地震等大災害時において被災状況の把握に関する研究を行ってきた。そして衛星データを用いた被災状況の把握において、コヒーレンスや位相情報を使用したアプローチをより高精度化するため、土地被覆、観測条件、センサ仕様によるパラメータの特性を把握する必要があるという結論に至った。ここで観測条件とは、入射角、観測時期、観測間隔、基線長であり、センサ仕様とは、周波数、画像解像度、位相ノイズとする。現状では、コヒーレンスと基線長の関係を定性的に記載したにとどまり、実データを用いた解析が行われておらず、実解析に有用な知見が得られていない。そのため、被災状況の把握において、閾値が観測条件や土地被覆によって変わる等、確立されない一因となっている。

日本でも JAXA により L バンドの周波数帯を有する PALSAR (ALOS に搭載)が開発され、2011 年まで運用された。現在では、観測周期の短縮や分解能の向上等、初号機よりも性能が向上している PALSAR-2 (ALOS-2 に搭載)の運用が開始された(表 1)。しかしこれまで詳細な被災状況の把握での利用事例は多くなく、解析手法の構築を念頭においたセンサの特性に関する知見が得られていない。

表 1. 衛星搭載 SAR の特性の違い

衛星/ センサ名	TerraSAR-X、TanDEM-X (2007～) (2011～)	Sentinel-1/ C-SAR (2014～)	ALOS/ PALSAR (2006～2011)	ALOS-2/ PALSAR-2 (2013～)
周波数	X バンド	C バンド	L バンド	L バンド
分解能	1m (HS)、3m (SM)	5 m (slant-range) ×20 m (azimuth)	10m	3m
観測幅	10km (HS)、30km (SM)	250 km	70km	55km
観測周期	11 日	12 日	46 日	16 日

2. 研究の目的

本研究では、衛星搭載合成開口レーダを用いて被災状況を把握する際に、センサ仕様や撮影条件によるパラメータの特性を把握することが不可欠であるという認識に立ち研究を行う。まず干渉処理により得られるインターフェログラムの位相誤差の大きさを評価する手法を確立し、表 1 に示すセンサに適用し、これらの位相誤差の大きさを定量的に示すことを研究の目的とした。次に、異なる時期に取得した SAR 画像による干渉処理(リピートパス・インターフェロメトリ)は、大気の影響や地表面の時間変化の影響が含まれているが、この影響の実データを用いた評価はほとんどなされていない状況であることを鑑み、同時期に取得した SAR 画像による干渉処理(シングルパス・インターフェロメトリ)との手法の違いに着目し、大気の影響や地表面の時間変化の影響を評価する手法の構築を目的とした。

3. 研究の方法

(1) DEM の作成と精度評価

解析方法を図 1 に示す。まずマスターとスレーブの Single-look Complex (SLC) データを準備する。撮影条件でマスターとスレーブは組み合わせを変えたペア画像を作成し、解析を行った。まず各ペア画像それぞれで垂直基線長を計算した後、干渉縞(インターフェログラム)を生成した。このとき、DEM の画素サイズを正方とするため、ルック数は撮影条件で異なる。次にノイズ軽減のために Goldstein フィルタを施し、コヒーレンス画像を生成した。そしてコヒーレンスの閾値を 0.2 とし、それ以上の画素について位相アンラップ処理を行い、座標が既知の GCP (各ペアについて約 40 点)を用いて軌道情報と位相オフセットの補正を行った。最後に位相を標高に変換し、DEM を生成した(作成した DEM の画素サイズは、TerraSAR-X、TanDEM-X の SM、及び ALOS-2 が 10m、ALOS (PALSAR)、及び Sentinel-1 が 20 m、TerraSAR-X の HS が 5m とした)。なお本解析は sarmap 社が開発した SARscape (ENVI のオプションモジュール)を用いて行った。

生成した DEM の精度評価の参照データとして、2006 年から 2011 年まで運用された ALOS に搭載された PRISM のアーカイブデータより作成した 30m 解像度の全球数値地表モデル (AW3D30)を用いた。参照データの選択の際は、拡張性を考慮し、全世界のデータが整備されていることと、DEM の精度が議論する精度より十分に高いことを考慮した。

また検証点の条件として、「空間的に一様である」、「時間的な変化が小さい」、「幾何的歪みが小さい」を念頭に、不動点である道路(17 点、●)、駐車場(23 点、▲)、公園(学校の校庭を含む)(21 点、□)を選択した(図 2)。また駐車場では立体駐車場は除外し、全ての検証点は周囲の建物等によるシャドウやレイオーバー等の幾何学的歪みの影響が少ない場所を選択した。

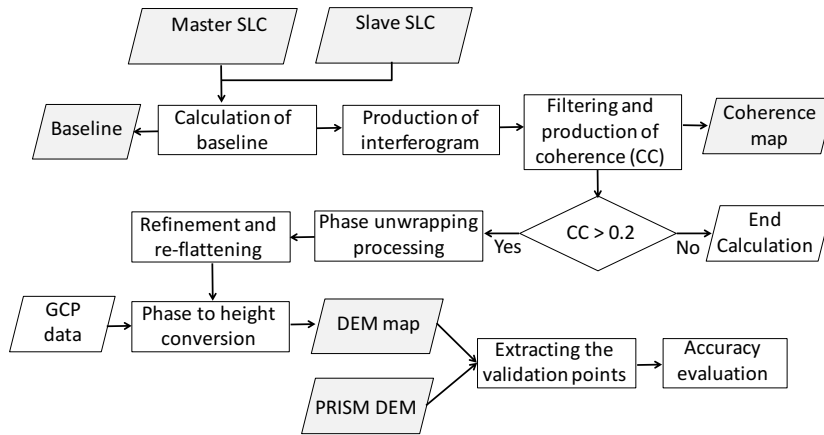


図 1. DEM の作成と精度評価手法

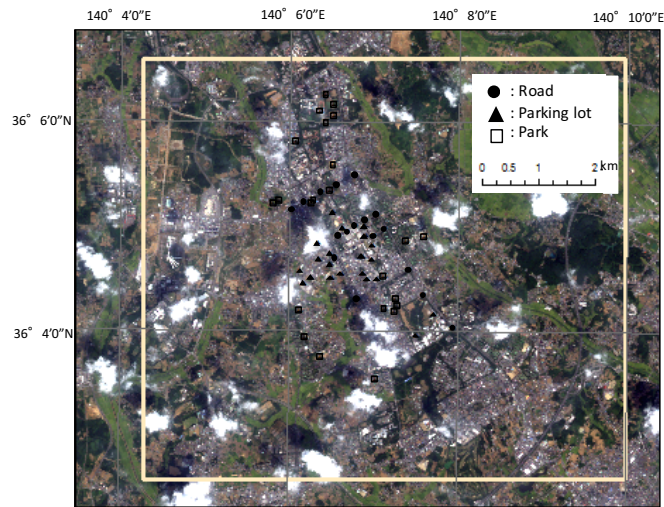


図 2. DEM の検証点の位置

(2) 位相誤差の推定手法

(1) で得た DEM の誤差を用いて、インターフェログラムの位相誤差を評価する。まず位相 2π あたりの高度を式 (1) より推定する。

$$\frac{dh}{d\phi} = \frac{\lambda R \sin\theta}{2Bp} \tag{1}$$

ここで λ 、 R 、 θ 、 Bp はそれぞれを波長、スラントレンジ長、入射角、垂直基線長を示す。なお式 (1) はリピートパスの場合で、シングルパスの場合は分母は Bp となる。位相 2π あたりの高度 ($dh/d\phi$) は、基線長に反比例し、基線長が長い程、値は小さくなる。次に式 (2) のように位相 2π あたりの高度に対する DEM の誤差 (DEM_{ERR}) の割合 (α) をインターフェログラムのノイズに近似できるとして、ノイズを評価する。

$$DEM_{ERR} = \alpha \frac{dh}{d\phi} + \beta \tag{2}$$

4. 研究成果

(1) 異なる撮影条件による DEM の特性解析とセンサのラジオメトリック特性の評価

まずリピートパス・インターフェロメトリにより DEM を求め、対象としたセンサの位相ノイズを推定する。図 3 に (a) TerraSAR-X、(b) ALOS-2 の位相 2π あたりの高度と DEM の誤差の関係を示す。両者の関係はいずれも 1%水準で有意な正の相関であった。また式 2 を用いて、最小二乗法より推定したインターフェログラムのノイズは、TerraSAR-X は観測モードによらず 10%であった。このことより TerraSAR-X のノイズは観測モードや DEM の画素サイズによらないと言える。一方で、ALOS-2 は軌道方向により異なり、Descending (DS) では 3%であるのに対し、Ascending (AS) では 5%であった。次に不動点の種類による位相ノイズの差異は、TerraSAR-X では 3-4 ポイント程度、ALOS-2 では 2 ポイント程度であることが示された。TerraSAR-X と ALOS-2 とともに Ascending では、駐車場のノイズが最も小さいことから、軌道 (照射) 方向との関連性について更なる検討が必要である。なお本報告の説明では割愛したが、同様の解析を Sentinel-1、及び

ALOS PALSAR でも実施している。各センサの位相ノイズを表 2 にまとめる。本研究の知見より、差分干渉処理を利用した変位量推定における誤差を見積もることが可能であり、本テストサイトでは TerraSAR-X では 0.15cm (1 fringe の 10%)、ALOS-2 では 0.6cm (5%) 程度であると考えられる。

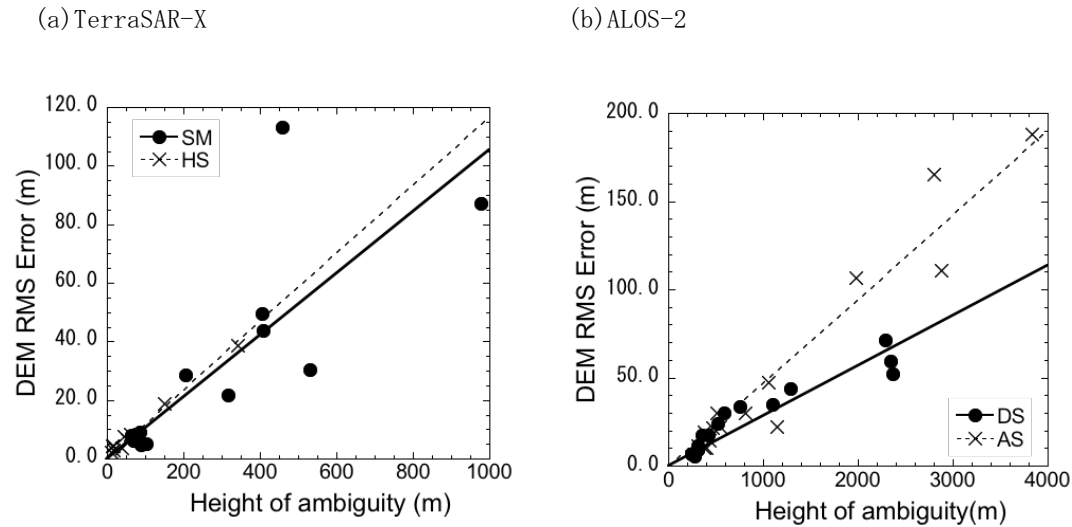


図 3. DEM の誤差と位相 2π あたりの高度の関係 (a) TerraSAR-X、(b) ALOS-2

表 2. 対象とした衛星搭載 SAR の位相ノイズの比較

衛星/センサ	TerraSAR-X	Sentinel-1 C-SAR	ALOS/ PALSAR	ALOS-2/ PALSAR-2
位相ノイズ	10%	11%	4%	3-5%

(2) 干渉解析方法の違いに着目した大気の影響や地表面の時間変化の影響の評価

(1) ではインターフェログラムの位相ノイズ推定手法を開発し、対象とした衛星搭載 SAR に手法を適用し、各センサの位相ノイズを推定した。リピートパス・インターフェロメトリは 2 時期のデータを使用して DEM を作成するので、そのデータを取得した 2 時期の大気の影響や地表面の時間変化等の情報を受ける。一方で、シングルパス・インターフェロメトリは同時に取得したペア画像により DEM を作成するので、これらの影響を含まない。本節では、リピートパスとシングルパスにより生成した DEM を比較することで、大気の影響と地表面の時間変化の影響の評価を試みる。図 4 は TerraSAR-X、及び TanDEM-X (いずれも SM) のシングルパスとリピートパスより生成した DEM の誤差と位相 2π あたりの高度の関係である。シングルパスによる DEM の誤差は、位相 2π あたりの高度 30-50m において 1.1-1.2 m であった。この値は同じ位相 2π あたりの高度におけるリピートパスの誤差の 20-25%程度であった。つまり、位相誤差の 75-80%程度が大気の影響ということが明らかとなった。

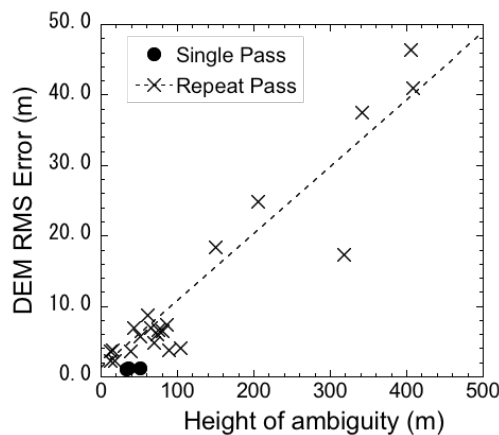


図 4. シングルパスとリピートパスにより生成した DEM の誤差と位相 2π あたりの高度の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 T. Nonaka, T. Asaka, K. Iwashita, F. Ogushi	4. 巻 20
2. 論文標題 Evaluation of the Trend of Deformation around the Kanto Region Estimated Using the Time Series of PALSAR-2 Data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 339 ~ 339
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s20020339	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 野中崇志, 朝香智仁, 岩下圭之	4. 巻 74
2. 論文標題 複数の撮影条件による多周波合成開口レーダを用いたInSAR によるDEM の誤差解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集F3（土木情報学）	6. 最初と最後の頁 49-55
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.2208/jscejcei.74.49	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takashi Nonaka, Tomohito Asaka, Keishi Iwashita	4. 巻 18
2. 論文標題 Evaluation of atmospheric effects on interferograms using DEM errors of fixed ground points	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 12p
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s18072336	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 T. Nonaka, T. Asaka, K. Iwashita, F. Ogushi
2. 発表標題 The relationships between errors of DEM and the height of ambiguity of Sentinel-1
3. 学会等名 IGARSS2019 International Geoscience and Remote Sensing Symposium（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Nonaka, T. Asaka, K. Iwashita, F. Ogushi
2. 発表標題 Analysis of the trend of the deformation around Kanto region estimated by time series of PALSAR-2 data
3. 学会等名 Geoinformation for Disaster Management (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Nonaka, T. Asaka, K. Iwashita
2. 発表標題 Comparison of the interferometric phase noise for TerraSAR-X, TanDEM-X, Sentinel-1, and PALSAR-2
3. 学会等名 TerraSAR-X & TanDEM-X Science Team Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Nonaka, Tomohito Asaka, Keishi Iwashita
2. 発表標題 Analysis of interferogram phase noise by bi-static data sets of TerraSAR-X
3. 学会等名 Proc. PIERS 2018 Progress In Electromagnetics Research Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野中崇志, 朝香智仁, 岩下圭之
2. 発表標題 地上不動点を用いたTerraSAR-Xの誤差とルック数の関係の評価
3. 学会等名 日本リモートセンシング学会第65回学術講演会論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Nonaka, Tomohito Asaka, Keishi Iwashita
2. 発表標題 The coherence characteristic analysis for high-resolution TerraSAR-X data -man-made objects and natural objects-
3. 学会等名 COSPAR2018, 42nd Scientific Assembly of the Committee on Space Research (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Nonaka, T. Asaka, K. Iwashita, and F. Ogushi
2. 発表標題 Estimation of phase noise by time series analysis of ALOS-2 PALSAR-2 data
3. 学会等名 IGARSS2017 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野中崇志, 朝香智仁, 岩下圭之
2. 発表標題 地上不動産を用いたTerraSAR-Xによるコヒーレンスの特徴解析
3. 学会等名 日本リモートセンシング学会第62回学術講演会
4. 発表年 2017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
研究分担者	朝香 智仁 (ASAKA Tomohito) (60514164)	日本大学・生産工学部・准教授 (32665)	