

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14006

研究課題名（和文）GNSS観測と気象モデリングの融合による先進的InSAR大気補正手法の開発

研究課題名（英文）Development of a advanced InSAR atmospheric correction method by fusing GNSS observation and numerical atmospheric modeling

研究代表者

木下 陽平（Kinoshita, Yohei）

筑波大学・システム情報系・助教

研究者番号：90750703

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：地表面変位を面的に観測できる合成開口レーダー干渉法（InSAR）において地球大気によって生じる電波伝搬遅延効果は補正が困難なノイズ源として長年にわたりInSAR高精度化の障害となっていた。本研究ではGNSSによる大気観測情報を用いてInSAR大気ノイズに対する補正手法を開発し、従来手法を上回る補正効果が示された。またGNSS観測点が少ないあるいは存在しない地域においても補正を適用可能にするため、開発した補正手法に全球大気モデルERA5を併用するハイブリッド補正手法のプロトタイプを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発したInSAR大気ノイズ補正手法は従来の補正手法を上回る補正効果を示しており、これによりこれまで観測精度の制約により検出されなかった微小地表面変位シグナルの検出を実現できる可能性がある。具体例として、スロー地震現象の一つであるスロースリップイベント（SSE）、年間ミリメートル程度の変位量を持つ非地震性の活断層運動、変位分布が地形と相関することの多い山体での火山活動などにおいて、未発見の地表面変位シグナル検出に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：Synthetic aperture radar interferometry (InSAR), which can detect surface displacement distribution with centimeter to millimeter accuracy, often suffer from the existence of Earth's atmosphere through the microwave propagation delay effect, resulting in the limitation of InSAR observation accuracy. In this study I developed a new correction method for InSAR atmospheric delay noise using GNSS atmospheric observation information. The developed model showed higher effectiveness than traditional delay correction methods. Moreover, to improve the applicability of the developed model, I incorporated a global atmospheric model ERA5 into the developed model (I call it as the hybrid correction model). The hybrid correction model showed same noise reducibility as the GNSS-based developed model, although the hybrid correction model can be applied everywhere even if there are no GNSS stations.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：InSAR 大気伝搬遅延 GNSS 数値気象モデル 高精度化

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

人工衛星搭載の合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar; SAR)、特に二時期の SAR 位相情報を利用した SAR 干渉法 (InSAR) は地上観測点が不要でありながら高空間分解能な面的地表変動観測技術として (図 1)、地球物理学や工学の分野において数多くの成果を挙げてきた。

しかしながら、現実には InSAR では検出困難な地表変動現象も多い。例えば活動的火山における地殻変動や活断層での非地震性断層すべりといったミリメートルレベルの微小変動が挙げられる。これら現象のモニタリングは物理メカニズムの理解および防災の観点から重要である一方、地球大気による大気伝搬遅延効果が見かけの地表変動すなわちノイズとなるために実際の地表変動と区別し難いという問題がある。大気遅延ノイズにより、InSAR の実質的な検出精度は数センチメートル程度に制限されている。この大気伝搬遅延効果は 1)大気圏の中性大気、特に水蒸気による遅延ノイズ、2)電離層で生じるノイズに分けることができる。1)の大気圏ノイズに対してはこれまで様々な補正手法が提案されているもののいずれの方法も一長一短であり、現状では決定的な補正手法は存在していない。これは現状の補正モデルが良くても 10km 程度の空間分解能であり、InSAR が要求する分解能には不十分なためである。InSAR 大気圏ノイズのモデル化にはサブキロメートル分解能を実現できる補正手法が要求される。2)の電離層ノイズについては、Gomba *et al.* (2016, *IEEE*) により補正手法はほぼ確立された。すなわち、今 InSAR において解決すべき最大の課題は大気圏ノイズの補正手法確立である。豊富な SAR データが持つ情報を最大限引き出すためにも、高精度な大気遅延補正を自動解析システムに組み込むことが要請されており、大気遅延ノイズの補正手法の高度化は今解決すべき重要な研究課題である。

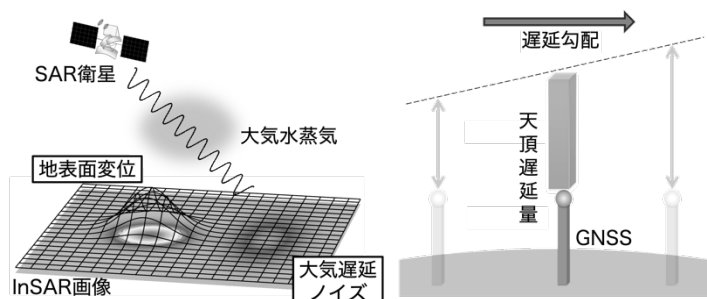


図 1: InSAR と GNSS 観測の模式図。

### 2. 研究の目的

本研究は InSAR においてミリメートルレベルの地表面変位検出精度を実現すべく、GNSS 大気観測情報を用いた

InSAR 大気遅延補正手法の開発を目的とする。InSAR 地表面変位観測における最大の誤差要因である大気伝搬遅延効果に対し、InSAR と同じく大気遅延効果を受ける GNSS 観測情報を用いることで、高精度の大気遅延補正が実現できると考えられる。本研究で開発する大気遅延補正手法は類似の先行研究と異なり、GNSS 天頂遅延量情報 (ZTD) に加えて ZTD の水平勾配情報も用いる点にある。また GNSS のみを用いた補正手法の場合、補正モデルの空間分解能は対象地域に存在する GNSS 観測点の空間密度に強く依存する。この短所を補うため、上記補正手法の改良版として GNSS に加え全球大気モデルを併用した補正手法の開発を行う。これら開発した補正手法について、より多くの InSAR 解析者に大気ノイズ補正を利用しやすい環境を構築することも目的とする。

### 3. 研究の方法

GNSS のみを用いた InSAR 大気ノイズ補正手法において、GNSS データには University of Nevada, Nevada Geodetic Laboratory が解析・公開している GEONET 大気遅延データを利用した。このデータセットは PPP により 5 分間隔で解析されたもので、公開データには天頂遅延量 (ZTD) に加えて遅延勾配、天頂湿潤遅延量 (ZWD) や可降水量も含まれている。本研究では ZTD と遅延勾配を用いた。InSAR での中性大気遅延には標高に相関した大気遅延がしばしば現れ、Stratified delay と呼ばれている。一方、標高に相関しない大気遅延は Turbulent delay と呼ばれており、観測される InSAR 大気遅延はこれらの和で表現される。GNSS から推定する大気遅延モデルにおいても ZTD の標高依存性を考慮するため、本研究では観測される GNSS ZTD を  $ZTD_{obs} = ZTD_0 + a \cdot \text{Height}$  として標高 0 m での ZTD と標高の 1 次関数の和として表現する。また遅延勾配については Arief and Heki (2020) に従ってモデル化した。復元する ZTD 分布の格子間隔は 5 km とし、Smoothing の拘束条件を加えて残差 2 乗和最小のインバージョンにより推定した。復元した ZTD 分布は InSAR の各 pixel に線形内挿し、InSAR に合わせて 2 時期の ZTD モデルの差分を計算、三角関数で InSAR 視線方向に投影している。補正効果の検証に用いた InSAR データについては、広域の大気遅延の影響も評価するために ALOS-2 の ScanSAR モードのデータを使用した。対象地域は平野部が大部分を占め、高い干渉性が期待できる関東地方とした。InSAR 解析には RINC ver.0.41 を使用、電離層遅延については Split-spectrum 法で補正をした。ALOS-2/ScanSAR の SLC データ 16 シーンを基に、36 シーンの InSAR データを作成した。補正効果の比較として、気象庁メソスケールモデル客観解析値 (MSM) を用いた大気ノイズ補正および公開プロダクトとして提供されている全球大気ノイズ補正モデ

ル GACOS を用いた。

GNSS に加え全球大気モデルを用いた補正手法（以後、ハイブリッド補正法と呼ぶ）開発においては、GNSS データは上記と同じ Nevada 大学公開の PPP 解析プロダクト、全球大気モデルには ECMWF が公開する大気再解析プロダクト ERA5 を用いた。GNSS ベースの補正手法に ERA5 を組み込む方法として、ERA5 より計算した ZTD ( $ZTD_{ERA5}$ ) を、 $ZTD_{GNSS}$  と同様の補正モデル入力情報として用い、以後は上記と同様のプロセスで面的 ZTD 分布を推定するというアルゴリズムにしている。これにより、GNSS 観測点が少ない地域においても ERA5 の情報を基にして、面的 ZTD 分布の推定精度劣化を抑制できることが期待できる。考慮すべき要素として GNSS データと ERA5 の間の相対重みおよび ZTD 分布推定時のスムージング強度の推定方法が挙げられ、データ間の相対重みについては GNSS データが実際に観測されたものかつ精度も高いことから GNSS と ERA5 の重みの比を 10:1 とし、スムージング強度については ABIC 法を用いて客観的に推定した。ハイブリッド補正法の補正効果の検証には、Sentinel-1 SAR データを使用し、GNSS 観測点密度が高い米国の Reno 周辺を対象地域として約 650 シーンの InSAR データを作成、使用した。Sentinel-1 は ALOS-2 と異なり中心周波数の高い C-band SAR であることから電離層の擾乱に対する感度は低い。そのため Sentinel-1 の InSAR データに対しては電離層ノイズ補正手法は適用していない。

#### 4. 研究成果

GNSS のみを用いた補正手法の開発検証においては、得られた ALOS-2 の InSAR データに GNSS による遅延補正を適用することで、特に長周期の位相擾乱および地形相関遅延 (stratified delay) について効果的に補正することができた。例として示した InSAR データの例 (図 2) においても、電離層補正および GNSS ベースの大気補正を適用することで、シーン全体の位相変化が小さくなっており、大気ノイズを効果的に補正できていることがわかる。図 3 に示す位相の標準偏差においても、36 シーンのうち 32 シーンにおいて標準偏差が補正前の InSAR データと比較して低減できていることが分かる。図 3 からは補正前の InSAR データの標準偏差が大きい干渉画像ほど GNSS 補正の効果が大きい傾向が定性的に見て取れ、このことは中性大気遅延成分を効率的に補正できていることを示唆する。また図 3 には GACOS による補正と MSM による補正の結果も示しており、MSM による補正は本研究提案の GNSS 補正に近い補正効果を示したものの、GNSS 補正の方がより標準偏差を低減できている。GACOS による補正は本研究の対象データに対しては一部シーンを除いて統計的に有効な補正ができているとは言い難く、日本のような時空間的に気象変化の大きい地域へ全球気象モデルベースの大気ノイズ補正を適用することの困難さを示唆している。図 4 には距離毎での位相の標準偏差を表すセミバリオグラフが示されており、この図より GNSS ベースの補正手法は大気ノイズ成分のうち長波長成分 (100 km 以上) を特に効率的に補正できていることがわかる。

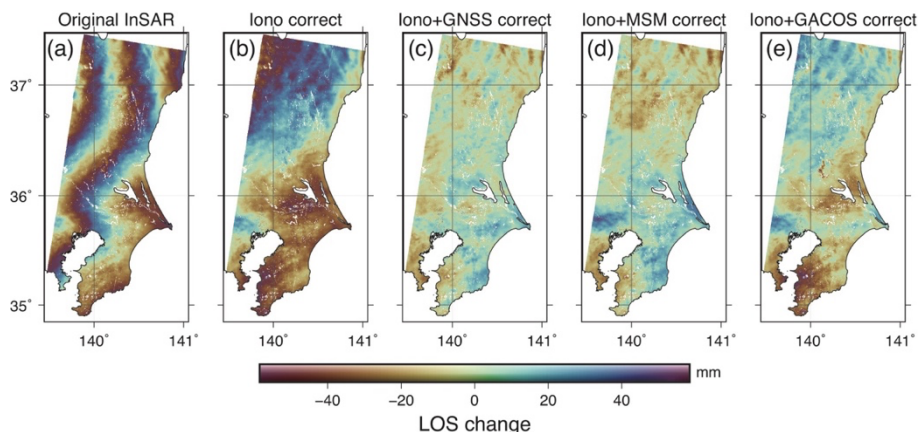


図 2: GNSS のみの補正手法による InSAR データの補正結果の例。InSAR 画像は 2016 年 3 月 19 日と 2016 年 4 月 30 日に観測された ALOS-2 ScanSAR SLC を用いた。左から順に補正前の InSAR 画像、電離層補正を適用した InSAR 画像、電離層補正に加えて GNSS ベースの補正を適用した InSAR 画像、電離層補正に加えて MSM による補正を適用した InSAR 画像、電離層補正に加えて GACOS による補正を適用した InSAR 画像。

また、本研究では GNSS ZTD に加え遅延量の水平勾配データを補正手法に組み込んでいることから、その効果を検証するための感度実験を実施した。感度実験では対象領域内の GNSS 観測点を人為的に減少させ、InSAR への補正効果がどのように変化するかを確認した。図 5 にその結果を示す。図 5 より、使用する GNSS 観測点が減少するほど InSAR 大気ノイズへの補正効果も減少していく様子が見て取れる。この感度実験により、本研究で開発した補正手法では ZTD データに加えて水平勾配データを用いたことで、GNSS 観測点の空間密度が低い場合において InSAR 大気ノイズの補正効果を向上させる効果があることが示唆された。

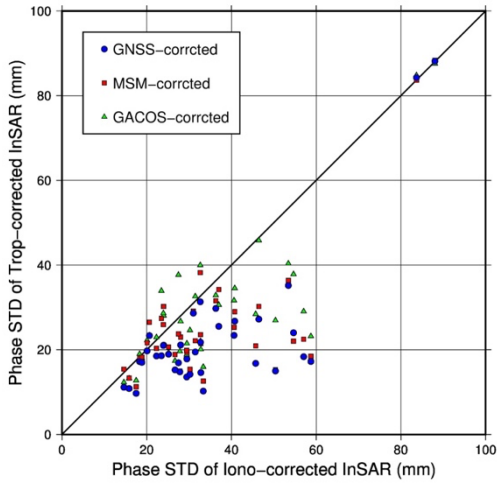


図 3: 大気遅延補正の適用前後での InSAR 位相の標準偏差を散布図に表示したもの。青の円は GNSS ベースの補正手法を適用した場合、赤の四角は MSM による大気補正を適用した場合、緑の三角は GACOS による補正を適用した場合。対角上に表示された黒斜線より右下に点が位置する InSAR データについては、大気補正により位相の標準偏差すなわち大気ノイズが低減したことを示す。

次に GNSS に加えて全球大気モデル ERA5 を組み込んだハイブリッド大気遅延補正手法においては、ERA5 を組み込んだ場合と用いない場合で補正効果を比較したところ、補正効果に優位な差は見られなかった (図 6)。これは対象地域とした Reno 周辺は GNSS 観測点密度が高いことから、気象モデルデータの有無によらず十分な数の観測データ (GNSS データ) を使用できたためと考えられる。

また InSAR 大気ノイズ補正の公開プロダクトである GACOS との比較では、先に示した GNSS ベースの補正手法と同様に、ハイブリッド補正法は統計的により高い補正効果を示した。具体的な例として図 7 に示した補正前後の InSAR 画像の例では、ハイブリッド補正法が GACOS と比較して InSAR 位相擾乱をより効果的に低減している様子が見て取れる。

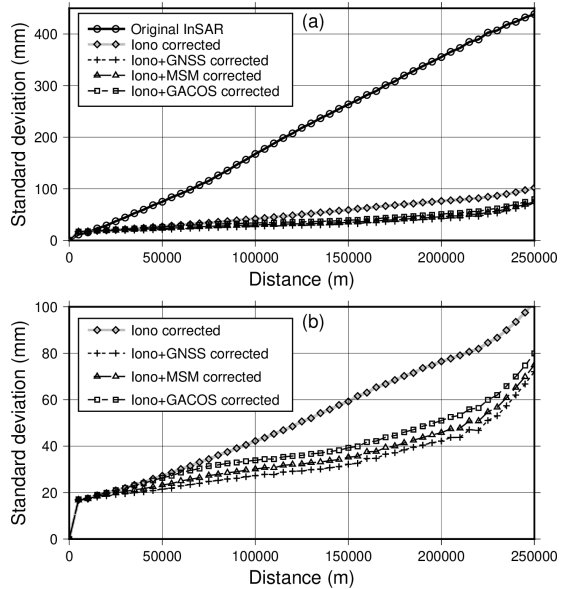


図 4: 距離毎の位相の標準偏差を示すセミバリオグラム。

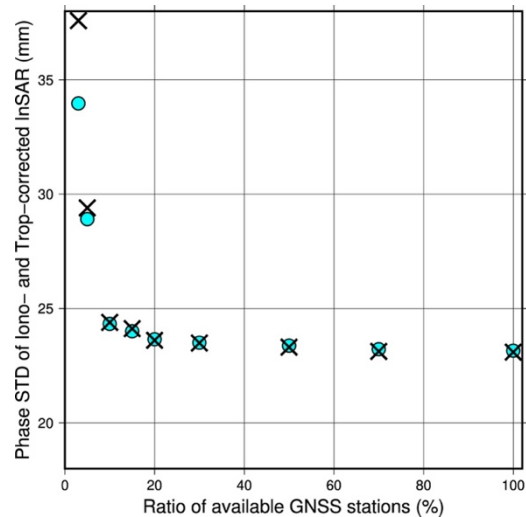


図 5: 感度実験の結果。水色の円は遅延量の水平勾配を補正モデルに組み込んだ場合の補正結果。黒の×は水平勾配を用いない場合の補正結果。

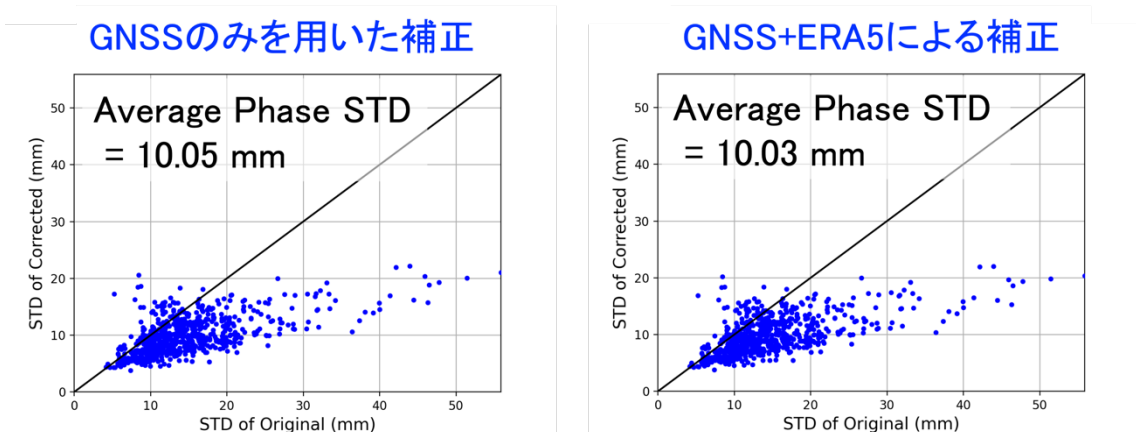


図 6: GNSS ベースの補正法(左)とハイブリッド補正法(右)のそれぞれでの、Reno 周辺での Sentinel-1 InSAR データに対する補正効果を散布図にまとめたもの。



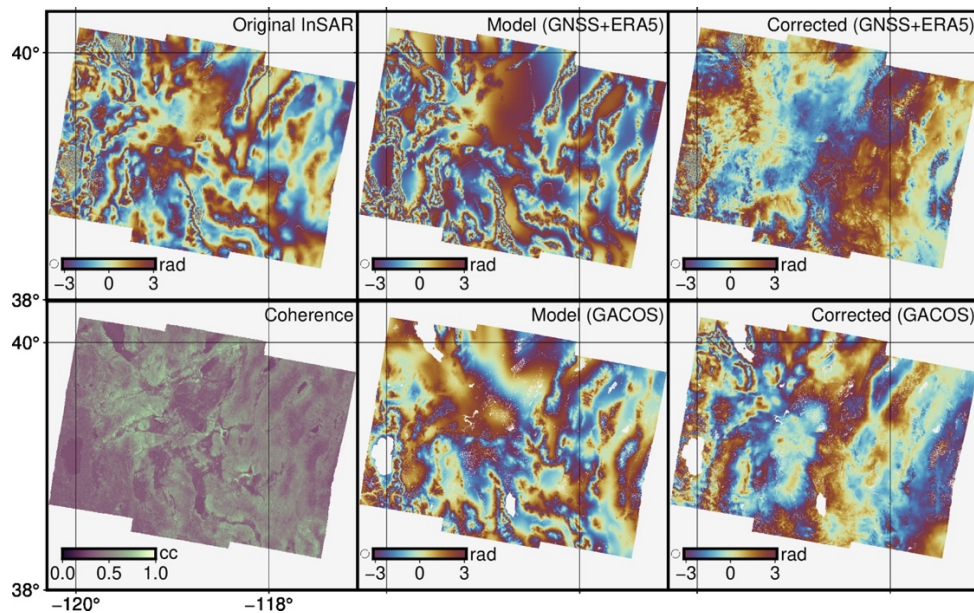


図 7: ハイブリッド補正法による補正結果の例。左上に補正前の InSAR 画像、左下は干渉性を示すコヒーレンスを示す。図の上段はハイブリッド補正法により推定されたモデル遅延量と補正後の InSAR 画像、下段は GACOS により推定されたモデル遅延量と補正後の InSAR 画像を示している。

また GNSS ベースの補正法開発の時と同様に GNSS 観測点数を人為的に減少させた場合の補正効果を調べる感度実験をハイブリッド補正法に対しても行ったところ図 8 の結果が得られた。図 8 より、GNSS のみを用いた補正法では GNSS 観測点が 50%未満になったところで現実的な遅延量の推定が困難となり、補正モデルとして機能しなくなる様子が見て取れる。一方で全球大気モデル ERA5 を併用したハイブリッド補正法においては、GNSS 観測点が少なくなっても ERA5 からのインプットが存在することで、補正効果の急激な減少を引き起こすことはなく、仮に GNSS 観測データが存在しない場合でも一定程度の補正効果を持つことが明らかとなった。このことは当初よりハイブリッド法開発の研究目的として設定していた「補正手法の適用可能

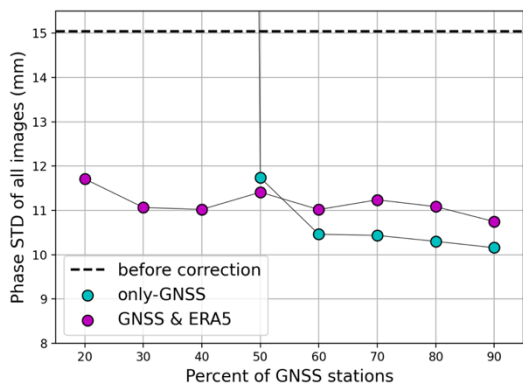


図 8: GNSS ベースの補正法とハイブリッド補正法それぞれでの、GNSS 観測点数を減少させた場合の補正効果を調べた感度実験の結果。マゼンタの点はハイブリッド法、シアン色の点は GNSS ベースの補正法の結果である。

地域の拡大」をリーズナブルに実現できたものとする。

ハイブリッド法において良好な結果を得られた一方で、ハイブリッド法では GNSS 観測データに稀に含まれる異常値に対して鋭敏に反応してしまい、明瞭な誤推定を生じさせるケースがいくつか見られた。GNSS ベースの補正法開発の時点ではスムージング強度を手動で強く設定しておりこのような事象は見られなかったが、ハイブリッド法で採用した ABIC によるスムージング強度の客観的推定により、事例によってはスムージング強度が低く設定され、結果として異常値に対し鋭敏に反応するようになったものと考えられる。本研究課題の期間内ではこの問題を解決できていないものの、異常値除去の手法検討は進めており、この問題を解決できればハイブリッド法を全世界で適用可能な InSAR 大気ノイズ補正手法として公開する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kinoshita Yohei	4. 巻 60
2. 論文標題 Development of InSAR Neutral Atmospheric Delay Correction Model by Use of GNSS ZTD and Its Horizontal Gradient	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 1~14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TGRS.2022.3188988	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 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 木下陽平
2. 発表標題 全球大気再解析ERA5とGNSSを用いたハイブリッドInSAR大気遅延補正モデル開発の試み
3. 学会等名 日本測地学会第138回講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yohei Kinoshita
2. 発表標題 Incorporating global atmospheric model products into the InSAR atmospheric delay model based on GNSS observations
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木下陽平
2. 発表標題 GNSSと全球大気モデルを融合したInSAR大気遅延補正モデルの開発についての進捗
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yohei Kinoshita
2. 発表標題 Developing InSAR atmospheric delay correction model based on GEONET ZTD and its gradient
3. 学会等名 EGU General Assembly 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木下陽平
2. 発表標題 GNSSを用いたInSAR大気遅延補正モデル開発の進捗
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yohei Kinoshita
2. 発表標題 Developing InSAR Atmospheric Delay Correction Model Based on GEONET ZTD and Its Gradient
3. 学会等名 Fringe 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yohei Kinoshita
2. 発表標題 Atmospheric noise mitigation in SAR interferometry: current state of progress
3. 学会等名 SEGJ 14th symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yohei Kinoshita
2. 発表標題 Developing InSAR atmospheric delay model by combining GNSS ZTD with ZTD gradient and numerical weather model
3. 学会等名 The Joint PI Meeting of JAXA Earth Observation Missions FY2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木下陽平
2. 発表標題 GNSS と数値気象モデルの水平風データを融合した InSAR 大気遅延モデルの開発
3. 学会等名 日本測地学会第136回講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yohei Kinoshita
2. 発表標題 Progress of developing InSAR atmospheric delay correction model based on GNSS ZTD and Its gradient
3. 学会等名 AGU fall meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021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
---------	---------