

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	2 アンビギュイティを生じる合成開口レーダの観測記録から大変位を推定する時系列干渉解析法に関する研究
Title(English)	A study on multi-temporal interferometric stacking technique to estimate large displacement from SAR observation data with 2 ambiguity
著者(和文)	大串文誉
Author(English)	Fumitaka Ogushi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12068号, 授与年月日:2021年9月24日, 学位の種別:課程博士, 審査員:松岡 昌志,元結 正次郎,盛川 仁,佐藤 大樹,山中 浩明
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12068号, Conferred date:2021/9/24, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

学位論文

2 π アンビギュイティを生じる合成開口レーダの観測記録から
大変位を推定する時系列干渉解析法に関する研究

東京工業大学 大学院総合理工学研究科
人間環境システム専攻

大串 文誉

指導教員

松岡 昌志 教授

2 π アンビギュイティを生じる合成開口レーダの観測記録から 大変位を推定する時系列干渉解析法に関する研究

要 旨

本論文は、「2 π アンビギュイティを生じる合成開口レーダの観測記録から大変位を推定する時系列干渉解析法に関する研究」として、以下の5章から構成されている。

第1章「序論」では、広域の地表面変位を把握することが可能な、合成開口レーダ (SAR) の時系列干渉解析法の種類、特徴、既往研究および問題点を整理し、SAR 観測では変位推定が難しいと考えられている、地表面の起伏が大きく変化する都市域においてもミリメートルの精度で変位推定が可能である Persistent Scatterer Interferometry (PSI) に着目している。PSI は、複数の SAR の観測記録における同地点の位相差を利用し地表面変位を推定するため、その位相差が大きくなると $-\pi$ から π の範囲で繰り返す現象 (2 π アンビギュイティ) が発生し、正しく変位推定ができないという問題点を示している。また、PSI の変位推定は時間に対して線形的に変位することが前提となっており、非線形的な挙動をする変位には推定モデルの構築やパラメータ設定が容易でなく汎用性がない点も指摘している。これらの問題を解決するため、PSI における変位推定を改良し、2 π アンビギュイティを生じる観測記録から大変位を推定可能とする、Non-linear Non-parametric Persistent Scatterer Interferometry (NN-PSI) を提案することを、本研究の目的としている。

第2章「Non-Linear Non-Parametric Persistent Scatterer Interferometry (NN-PSI) の提案」では、PSI における計算手法の問題を示し、その改良方法について概説している。NN-PSI の主な改良点として、高さの決定方法と変位の推定方法を挙げている。PSI は干渉処理により求まる位相差から高さによる位相差を差し引いて変位による位相差を推定するが、その高さによる位相差は高さの決定方法により求まる。この決定方法の改良では、非線形的な挙動をする変位にも適用可能となる方法を示している。また、変位の推定方法の改良はマルチベースラインモデルのスペクトル解析法を拡張し、変位による位相差を観測範囲で考えられるすべての変位速度から求まる位相差を重ね合わせ、その位相差を変位として推定する方法を提案している。この推定方法を用いることで、変位による位相差は観測期間内では連続的となるため、2 π アンビギュイティにより不連続性を発生する位相差であっても、観測時期が隣接する位相差の差が2 π 以上となる箇所を検出し、連続的な位相差に補正できることを述べている。また、NN-PSI の計算手法を定式化し、計算パラメータの範囲や処理手順を示している。

第3章「数値シミュレーションによる NN-PSI の適用範囲の評価」では、数値シミュレーションにより、観測条件と変位タイプを変更し、NN-PSI の変位推定における機能を評価している。変位タイプは線形、ステップ、指数関数および周期的な変位を設定し、それぞれのタイプの変位量を変更しながら推定を行い、NN-PSI の推定変位の精度が PSI よりも大幅に改善することを確認している。また、観測条件を変更し繰り返し計算した結果、NN-PSI は PSI よりばらつきが少なく、安定した精度で推定できることを明らかにし、周期的な変位についても推定モデルを構築せず変位推定できることを把握している。PSI よりも計算範囲を広げて演算する NN-PSI の計算コストの削減を目的に、計算範囲を狭くして変位推定に与える影響を調べたが、推定精度が大幅に低下したことから計算範囲は観測条件により求まるものが適していることを明らかにしている。衛星の観測条件による推定精度への影響についても確認し、NN-PSI が推定可能となる観測条件を示唆している。

第4章「NN-PSI の実観測記録への適用」では、現在運用されている衛星 SAR の観測記録に NN-PSI を適用し、手法の妥当性について検証している。関東地域では電子基準点の観測記録から求まる変位と NN-PSI の推定結果を比較し、傾向が一致していることから推定精度は同程度であることを把握している。また、九十九里や三浦半島の一部では、PSI の推定結果において 2π アンビギュイティの影響により不連続性を生じる大変位が確認されたが、NN-PSI は問題なく推定できることを示している。気温と同期する大規模建物の周期的な変位についても NN-PSI により推定可能であり、非線形的な変位の推定における有効性も示している。地盤沈下が確認されている、調布市とブタペスト・ハンガリーにて NN-PSI を適用し、 2π アンビギュイティにより影響を受ける大変位を推定できることを示すとともに、地盤沈下が発生した時期と工事を施工した時期が一致することを示している。

第5章「結論」では、本研究で得られた成果を総括し、今後の課題について述べている。

A study on multi-temporal interferometric stacking technique to estimate large displacement from SAR observation data with 2π ambiguity

Abstract

One of the interferometric stacking techniques, called Persistent Scatterer Interferometry (PSI), is widely used to detect displacements on artificial objects such as buildings in millimetric order. However, PSI has some limitations because the range of the phase to convert the resulting displacement is limited from $-\pi$ to π (2π ambiguity). Since crustal movements are active in Japan, it is critical for the displacement monitoring to solve this limitation in PSI. Consequently, the purpose of this study is to propose Non-Linear Non-Parametric Persistent Scatterer Interferometry (NN-PSI) that is able to estimate large scale displacements influenced by 2π ambiguity.

Two components in the PSI procedure are improved in NN-PSI. The first is to detect the height for the estimation with displacements having non linearity in time (non-linear displacement). The second is to use the spectral analysis based on the multi-baseline model when estimating the phase difference by displacement. This estimation does not depend on any displacement models, and it might be possible for NN-PSI to estimate non-linear displacements without any empirical parameters.

After the method proposition, NN-PSI was evaluated by a numerical simulation to understand its ability of estimating several types of displacements. According to the simulation, the significant improvement of NN-PSI is confirmed in the estimation of the displacement influenced by 2π ambiguity. The validation with the real data was also conducted. The estimated displacement by NN-PSI was compared with GPS data over the Kanto region in Japan, and the results by NN-PSI show good agreement with the GPS data. It is also confirmed the capability of NN-PSI to estimate non-linear displacements on some buildings.

We conclude that NN-PSI enables to estimate large scale and non-linear displacements that limit PSI estimation due to 2π ambiguity, and this improved method leads to expand applications for displacement monitoring in urban areas.

目次

第 1 章 序論	1
1.1 本研究の背景	3
1.2 時系列干渉解析法の整理.....	5
1.2.1 SAR による観測と変位計測.....	5
1.2.2 PSI.....	8
1.2.3 SBAS.....	11
1.2.4 時系列干渉解析法の特徴.....	14
1.3 既往研究における問題点の抽出.....	16
1.4 本研究の目的	20
1.5 本論文の構成	21
第 2 章 Non-Linear Non-Parametric Persistent Scatterer Interferometry (NN-PSI) の提案	29
2.1 はじめに	31
2.2 既往の PSI における推定方法の問題点	32
2.2.1 推定変位量の制限.....	34
2.2.2 改良方法.....	35
2.3 NN-PSI の変位推定の計算手法	42
2.3.1 マルチベースラインモデル	42
2.3.2 後方散乱分布係数の算出.....	45
2.3.3 EV スペクトラムを用いた高さの決定.....	46
2.3.4 変位推定方法	47
2.3.5 推定における計算範囲.....	49
2.3.6 処理フロー	51
2.3.7 既往の PSI における変位推定の計算手法.....	52
2.4 まとめ	54
第 3 章 数値シミュレーションによる NN-PSI の適用範囲の評価	57
3.1 はじめに	59
3.2 数値シミュレーション	60
3.2.1 評価方法.....	60
3.2.2 観測条件の設定.....	60
3.2.3 変位の条件.....	62
3.3 異なる変位タイプへの適用	64
3.3.1 数値シミュレーションの設定.....	64
3.3.2 結果.....	65
3.4 EV スペクトラムの計算範囲による影響の評価.....	90

3.4.1	高さと変位速度の計算範囲	90
3.4.2	高さと変位速度の解像度の評価	93
3.5	観測条件による推定精度への影響	100
3.5.1	ベースライン距離	100
3.5.2	観測回数と間隔	106
3.6	まとめ	109
第 4 章	NN-PSI の実観測記録への適用	111
4.1	はじめに	113
4.2	変位推定精度と有効性	114
4.2.1	観測記録の解析手法	117
4.2.2	GPS との比較	118
4.2.3	既往の PSI との比較	122
4.3	地下工事にともなう地盤沈下への適用	138
4.3.1	東京都調布市での道路陥没	138
4.3.2	ハンガリー・ブタペストの地盤沈下	145
4.4	まとめ	153
第 5 章	結論	155
5.1	まとめ	157
5.2	今後の課題と展望	159
本研究に関連した論文及び口頭発表		161
謝辞		163
付録		A-1
1	線形的な変位	A-1
2	ステップ変位	A-23
3	指数関数的な変位	A-31
4	周期的な変位	A-53

図番リスト

Figure 1.1: Observation system of the spaceborne SAR.	6
Figure 1.2: Differential interferometry SAR (DInSAR) technique to measure the surface displacement.	7
Figure 1.3: Interferogram that indicates phase difference between the master and the slave image.	7
Figure 1.4: Examples of the point and distributed target.	8
Figure 1.5: General concept of the persistent scatterer interferometry (PSI).	10
Figure 1.6: General concept of the Small BAseline Subset (SBAS).	13
Figure 1.7: Order of the observed data over a building with SAR observations.	17
Figure 1.8: Issue of the phase unwrapping method around the layover area.	17
Figure 1.9: Dissertation outline.	22
Figure 2.1: Process flow of the displacement estimation by conventional PSI (ConvPSI).	33
Figure 2.2: Process flow to avoid the 2π ambiguity in the displacement for ConvPSI.	35
Figure 2.3: EV spectrum used in PSI approaches.	37
Figure 2.4: Process flow of the displacement estimation in NN-PSI.	39
Figure 2.5: Concept to solve the offset from 2π ambiguity in NN-PSI.	41
Figure 2.6: System geometry in the plane orthogonal to the orbit direction.	43
Figure 2.7: Relationship of the interferometric pairs between the observation time and baseline distance in Figure 2.6.	44
Figure 2.8: Example of the selection of height and velocity in the EV spectrum for NN-PSI.	47
Figure 2.9: Range of the height and velocity ambiguity.	50
Figure 2.10: Flowchart of NN-PSI and ConvPSI.	52
Figure 3.1: Process flow for the evaluation of NN-PSI with the simulation.	60
Figure 3.2: Relation between time and baseline distance for the interferometric pairs in the simulation.	61
Figure 3.3: Simulated displacements for the evaluation.	63
Figure 3.4: Correlation between D and RMSE by the simulation with the linear displacement.	65
Figure 3.5: Linear displacement results with D of 0.5λ in the simulation.	68
Figure 3.6: Linear displacement results with D of 10λ in the simulation.	70
Figure 3.7: Correlation between D and RMSE by the simulation with the step displacement.	71
Figure 3.8: Step displacement results with D of 0.25λ in the simulation.	74
Figure 3.9: Step displacement results with D of 0.3λ in the simulation.	76
Figure 3.10: Correlation between D and RMSE by the simulation with the exponential displacement.	77
Figure 3.11: Exponential displacement results with D of 0.5λ in the simulation.	79
Figure 3.12: Exponential displacement results with D of 1.5λ in the simulation.	81
Figure 3.13: Correlation between D and RMSE by the simulation with the sinusoidal displacement. ...	82
Figure 3.14: Sinusoidal displacement results with D of 1λ in the simulation.	85

Figure 3.15: Sinusoidal displacement results with D of 1.5λ in the simulation.	87
Figure 3.16: All of the estimated displacements in the simulation for the sinusoidal displacement.	89
Figure 3.17: Results of NN-PSI with the range defined by the half of the ambiguity values.	93
Figure 3.18: Results of NN-PSI with different velocity and height resolution, 0.5λ /year and 23 m for EV spectrum.	96
Figure 3.19: Results of NN-PSI with different velocity and height resolution, 0.25λ /year and 11 m for EV spectrum.	98
Figure 3.20: NN-PSI results with the linear distribution of the baseline distances.	103
Figure 3.21: NN-PSI results with the linear distribution of the baselines with 1% of the variance with the critical baseline distance.	106
Figure 3.22: Relationship between the average observation interval and the peak to peak value in the sinusoidal displacement.	108
Figure 4.1: Region of the interest for the NN-PSI evaluation in Kanto region, Japan.	114
Figure 4.2: Flowchart for the data process of NN-PSI and ConvPSI.	117
Figure 4.3: Combination of the interferometric pairs used in the PSI approaches.	118
Figure 4.4: Displacement comparison between NN-PSI and GEONET.	121
Figure 4.5: Estimated displacement of NN-PSI and ConvPSI around A1 and A2.	123
Figure 4.6: Resulting displacement phase of NN-PSI and ConvPSI around A1 and A2.	124
Figure 4.7: Displacement components of GEONET (93027) in time series.	126
Figure 4.8: Displacement components of GEONET (93067) in time series.	127
Figure 4.9: Mean velocity projected to the LOS of Sentinel-1 with GEONET of T1 and T2.	128
Figure 4.10: Estimation results at Pt5.	131
Figure 4.11: Estimation results at Pt6.	133
Figure 4.12: Repetition results of estimated sinusoidal displacements.	136
Figure 4.13: Intensity image of Sentinel-1 data over GSImap around the highway construction.	139
Figure 4.14: Combination of the interferometric pairs used in the PSI approaches.	142
Figure 4.15: Mean velocity map of ConvPSI around the highway construction.	143
Figure 4.16: Time evolution around Pt1, Pt2, and Pt3.	145
Figure 4.17: Intensity SAR image at the study area around Budapest.	148
Figure 4.18: Combination of the interferometric pairs used in the PSI approaches.	149
Figure 4.19: Distribution of the resulting points of PSI around Szent Gellért Station.	150
Figure 4.20: Estimated displacement at Pt1, Pt2, and Pt3.	151

表番号リスト

Table 1.1: Characteristics of PSI and SBAS.....	15
Table 1.2: Advantages of SBAS and PSI.	19
Table 2.1: Ranges of the height and velocity for EV spectrum.	51
Table 3.1: Observation conditions for the simulation.....	61
Table 3.2: Displacement conditions for the different displacement type.	64
Table 3.3: Comparison of the processing time for NN-PSI and ConvPSI.....	90
Table 3.4: Simulation parameters in the evaluation for the range of the EV spectrum.	91
Table 3.5: Simulation parameters in the evaluation for the resolution of EV spectrum.	94
Table 3.6: RMSE with the different height and velocity resolutions.	99
Table 3.7: Simulation parameters for the evaluation of the baseline distance.....	100
Table 3.8: Modified parameters in the evaluation for the observation interval.	107
Table 4.1: Observation conditions.	115
Table 4.2: Sentinel-1 observation dates.	116
Table 4.3: Description of GEONET data.	119
Table 4.4: RMSE between GEONET and NN-PSI.....	121
Table 4.5: Mean velocity estimated by the PSI approaches.	128
Table 4.6: Information of the weather observation points.....	129
Table 4.7: Average of the standard deviation on each observation date, based on the repeated displacement estimation.....	137
Table 4.8: Data description for Chofu area.....	140
Table 4.9: Sentinel-1 observation dates for the Chofu area.....	141
Table 4.10: Construction period around Pt1, Pt2 and Pt3.	143
Table 4.11: Data description for Budapest.	146
Table 4.12: TerraSAR-X observation dates.	147

用語リスト

この用語リストは、合成開口レーダを使用するリモートセンシングの学会や業界において定義されているものではなく、著者が本論文で使用する用語を明確にするために定義したものである。時系列干渉解析法に関する研究論文にて標準的に使用されている英単語を基準とし、それらに対応する日本語の用語を以下に示す。

2π Ambiguity: 2π アンビギュイティ
Differential Interferometry SAR: 干渉解析法
Displacement: 変位
Displacement Model: 推定モデル
Distributed Target: 分散ターゲット
EV Spectrum: EV スペクトラム
Layover: レイオーバ
Height: 高さ
Height Ambiguity: 高さアンビギュイティ
Mean Velocity: 年間平均変位量
Phase Unwrapping: 位相アンラップ処理
Point Target: ポイントターゲット
Surface Displacement: 地表面変位
Displacement Velocity: 変位速度
Velocity Ambiguity: 変位速度アンビギュイティ

第 1 章 序論

1.1 本研究の背景

近年、急激な人口増加にともなう自然環境の変化による災害の発生が増加しており、全球規模での海洋や陸地のモニタリングが欠かせない状況である。リモートセンシングは、人工衛星から地上の広い範囲を観測する技術であり、通信技術やセンサの発展により、地表面の様々な物理量を遠隔から計測できる。この技術は、地上で発生している現象を定性的かつ定量的に把握するため、様々な方面にて活発に利用されている。その中でも、合成開口レーダ (SAR: Synthetic Aperture Radar) は、その観測記録を解析し、変位量を算出することが可能であり、広域かつ面的に地表面変位を把握するための重要な情報源となっている。SAR は、能動的なセンサであり、地上に向けてマイクロ波を照射し、地上の構造物などに反射し、センサに戻ってきたマイクロ波を観測する。マイクロ波の発受信の時間やセンサの位置を記録しており、センサから地表面までの距離を正確に計測できる。また、SAR 観測にて使用するマイクロ波は、光学のセンサーに比べると長い波長を用いているため、大気中の水蒸気や雲の影響を受けづらく、天候に左右されずに観測できるという利点がある。雲に覆われる時間が長く、地殻変位や火山活動が活発であり、地震が多発する我が国では、安定的に地表面変位のモニタリングが実施できる SAR 観測は非常に重要である。

SAR センサにより、同一エリアを 2 回以上観測を行い、それらの観測データに Differential Interferometry SAR (干渉解析法) を適用することで、センチメートルの精度で地表面変位の推定が可能である。従来の水準点測量や電子基準点においても、地表面変位を把握することは可能であるが、これらの観測点は空間的に離れており、ポイント間の変位量は補間されている。しかし、SAR 観測は面的に行われるため、水準点測量や電子基準点では補間により推定値となるエリアの変位量の計測が可能となる。近年、SAR センサを搭載した人工衛星も多数打ち上げられており、観測頻度も向上し、多時期のデータにて干渉解析を行うことで、変位推定の精度はミリメートルまで向上している。SAR における観測センサ、観測頻度、および変位推定技術の向上に伴い、我が国においても、干渉解析法により地表面変位を精密に把握し、老朽化が進む大規模なインフラ施設のモニタリングや地震などによる建物被害の把握などへの利用が期待されている。

多時期の SAR 観測記録を用いる時系列干渉解析法に関する研究では、様々な解析手法が提案されているが、その中でも Persistent Scatterer Interferometry (PSI) は、現在でも地表面変位モニタリングの研究において数多く利用されている。PSI は、マイクロ波が常に安定して強く反射する箇所を選定し、時系列変位を推定する。PSI による変位推定の精度はミリメートルとなり、Global Positioning System (GPS) などによる地上観測点の変位モニタリングと同等の観測精度で推定可能とされている。この手法は独立したポイントで解析が行われるため、変位推定の空間解像度が高く、都市域のように人工構造物などで地表面が複雑な構造となる場所でも、変位推定が可能である。

GPS と同等の変位推定の性能を有するとされる PSI であるが、解析期間における変位量（変位速度）が比較的小さい変位を推定する設計となっており、変位速度が大きい場合の推定には適していない。これは、変位推定に使用する位相情報が $-\pi$ から π で繰り返す現象（ 2π アンビギュイティ）により、時系列の推定変位に不連続性が発生するためである。既往の PSI においては、 2π アンビギュイティが発生する位相情報から変位を推定する場合、周辺ピクセルの情報を用いて解決するなどの工夫が必要となっている。また、PSI における変位推定では、時間に対して線形に変位する（以降、「線形的な変位」という）と仮定し推定が実施される。そのため、対象が線形的な変位でない（以降、「非線形的な変位」という）場合は、経験的パラメータや事象に特化した推定モデルの構築が必要となり、パラメータの取得やモデル構築に膨大な時間を費やすことになる。したがって、PSI は 2π アンビギュイティにより不連続性を含む大変位や非線形的な変位についての推定には問題がある。そのため、地殻変位が活発で地震が多発するエリアでは変位量が大きくなるとともに、変位が非線形的な挙動となることが多く、PSI による変位推定が困難となる。PSI の 2π アンビギュイティの問題は周辺ピクセルを利用して解決する方法や、SBAS (Small Baseline Subset) という代替手法が提案されている。SBAS では、処理過程で位相アンラップ処理を適用し、 2π アンビギュイティの問題を回避している。しかし、これらの解決方法は、起伏の変化が大きい山岳地帯や都市域といったエリアでは、SAR 観測の特徴である倒れ込みの現象（レイオーバ）により、周辺情報を利用する手法や位相アンラップ処理では正しく変位を推定できない。したがって、このようなエリアでは PSI や SBAS による変位推定を実施することができない。日本では地震などにより、都市域において大規模な変位が多発するため、 2π アンビギュイティを生じる SAR の観測記録から大変位が推定可能となる PSI を検討し、変位モニタリングにおける範囲の拡大、間隔の短縮および精度改善を図ることは、非常に重要である。

1.2 時系列干渉解析法の整理

はじめに、時系列干渉解析法の特徴を把握するため、手法の基盤となる SAR の観測技術やデータ、代表的な手法およびこれまで取り組まれている研究や事例について整理する。

1.2.1 SAR による観測と変位計測

衛星搭載型の SAR は、地球を周回しながら進行方向に直交する斜め下方向にマイクロ波を照射し、地表面から反射したマイクロ波を受信する。一般的なレーダ観測では、分解能の向上が必要な場合には、アンテナを大きく設置する。しかし、地上から 700 km 以上離れている人工衛星から地表面を数メートルの解像度で観測する場合、現実的に衛星には搭載できない大きさのアンテナが必要となる。そこで、衛星から地上を観測するレーダは、合成開口 (Synthetic Aperture) の技術を用いる。SAR 観測は、連続的に繰り返し観測したマイクロ波を、あたかも大きな開口のアンテナで観測したように工夫し、分解能を高めるための技術を用いている(日本リモートセンシング学会, 2011)。Figure 1.1 は、SAR の観測方法を示しており、衛星の進行方向 (アジマス方向) に対し、垂直の方向 (レンジ方向) にレーダが照射される。はじめに、アジマス方向から複数回照射した観測記録を用い、擬似的に大きな開口とみなし、アジマス方向の空間解像度を向上を図る。また、レンジ方向は、パルス圧縮技術を用い、パルス幅を小さくすることでレンジ方向の空間解像度を向上する。合成開口とパルス圧縮技術により、衛星搭載可能な小さなアンテナでも高い空間解像度を実現することが可能となる。SAR の観測記録は、複数の位置から撮影された情報を合成し、パルス圧縮された信号である。そのため、視覚的に観測記録を認識するためには「再生処理」を実施し画像化する必要がある。この再生処理は、Curlander と McDonough(1991)や Shimada(1999)により詳細が述べられている。一般ユーザが入手する SAR の観測記録は、SLC (Single Look Complex) と呼ばれる複素画像である。SLC 画像はレーダの照射方向に沿って画像化されており、地表面からの反射強度を示す振幅情報とセンサーから地表面までの距離を示す位相情報を持ち合わせる。

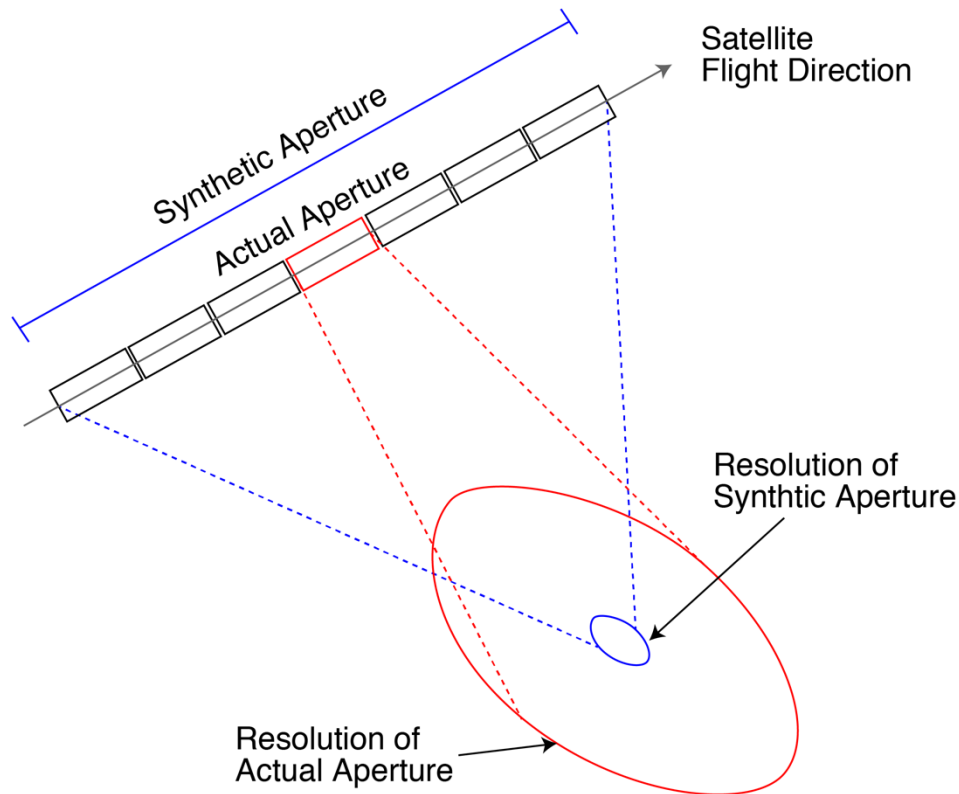


Figure 1.1: Observation system of the spaceborne SAR.

SAR 観測による地表面変位モニタリングは、Gabriel(1989)らにより提案された干渉解析法が使用される。Figure 1.2 に示す干渉解析法は、同一エリアを 2 回観測し、観測期間中に地表面に変位がある場合は、1 回目観測（マスタ）のセンサから地表面までの距離 $R1$ と 2 回目観測スレーブの距離 $R2$ の差分 ΔR となる。SAR 観測記録を用いて干渉処理することで求まる位相差により、この距離の差分 ΔR を把握することができる。Figure 1.3 は、マスタ画像とスレーブ画像（左図）を用いて干渉解析法を実施し、干渉画像（右図）を作成し位相差を求めている。この干渉画像は、地震発生前後の位相差を示しており、変位の規模が大きく、位相差の範囲である $-\pi$ から π を超えたため、不連続なパターンとなり縞模様となる。この 2 時期のマイクロ波における位相差を変位量に換算し、観測期間における地表面変位量を推定する。干渉解析法は広域に地表面変位を把握できる手法として確立するが(Bamler & Hartl, 1998; Bürgmann et al., 2000; Franceschetti & Lanari, 2018; Gabriel et al., 1989; Gens & VAN GENDEREN, 1996; Massonnet & Feigl, 1998; Rocca et al., 1997; Rosen et al., 2000)、マイクロ波の位相が大気中の水蒸気 (Figure 1.3) により遅延し(Tatarski, 1961)、その遅延の影響が干渉解析法の推定変位に大きな影響を与えることが、これまでの研究で明らかになっている(Hanssen, 2001)。

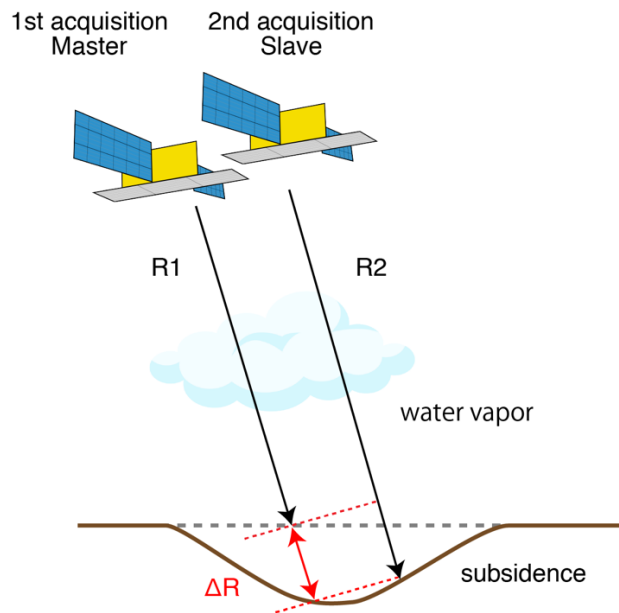


Figure 1.2: Differential interferometry SAR (DInSAR) technique to measure the surface displacement. The difference of the distance from the sensor to the ground surface between 1st and 2nd acquisition. R1 and R2 represents the distance of 1st and 2nd acquisition. The water vapor causes the noise in the interferogram.

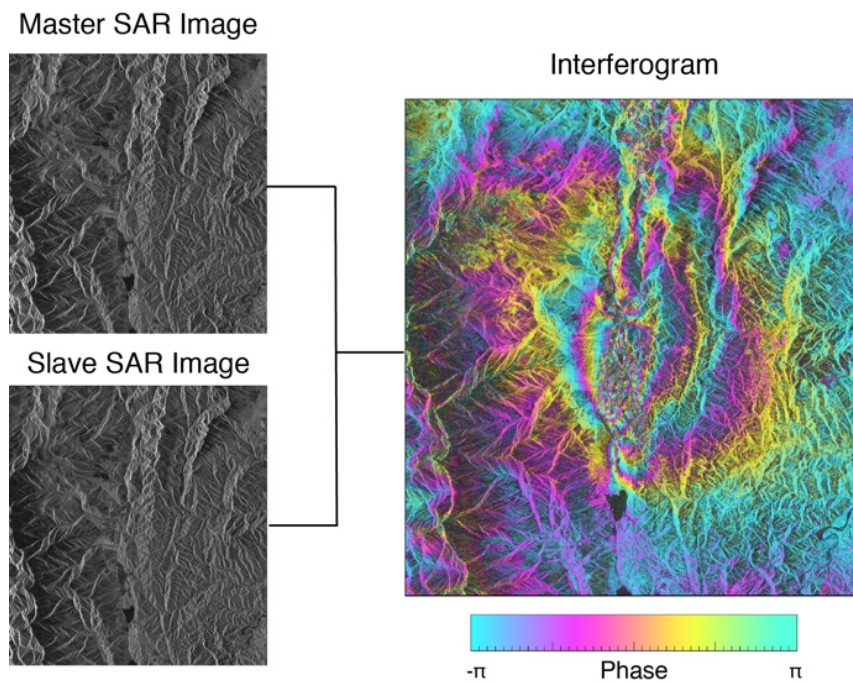


Figure 1.3: Interferogram that indicates phase difference between the master and the slave image. The amount of ΔR in Figure 1.2 corresponds to that of the phase in the interferogram.

時系列干渉解析法は、複数（時系列）の干渉画像を使用し、大気中の水蒸気による位相遅延ノイズを軽減するための拡張手法である (Lyons & Sandwell, 2003; Strozzi et al., 2000; Wright et al.,

2001)。この手法は、時系列における位相差を統計的に解析し、大気遅延による位相差の影響を取り除くことにより、干渉解析法の問題点を解決する。日本においても Deguchi ら(2009)により、大気ノイズや位相アンラップ処理エラーを軽減する時系列干渉解析手法が提案されている。これまでの様々な研究により、時系列干渉解析手法による変位推定の精度は、サブセンチメートルからミリメートルであることが確認されている(Ferretti, 2014; Pasquali et al., 2014)。

SAR 観測記録を用いた時系列干渉解析法は、変位推定の対象が Figure 1.4 に示すポイントターゲットもしくは分散ターゲットにより大別することができる。Figure 1.4a は、照射されたマイクロ波 (赤) のほとんどが建物に反射しセンサの方向に戻る (黒)、ポイントターゲットを示している。建物や人工構造物などが存在する都市域では、地表面からの後方散乱 (反射) が強いポイントターゲットが多く分布する。Figure 1.4b は、照射されたマイクロ波 (赤) が植生で乱反射してしまいセンサに戻らない (黒)、分散ターゲットを示している。植生などが分布するエリアでは、分散ターゲットとなり、地表面からの後方散乱が弱くなる。時系列干渉解析の特徴を把握するため、ポイントターゲットと分散ターゲットのそれぞれの代表的な手法である PSI と SBAS について概説する。

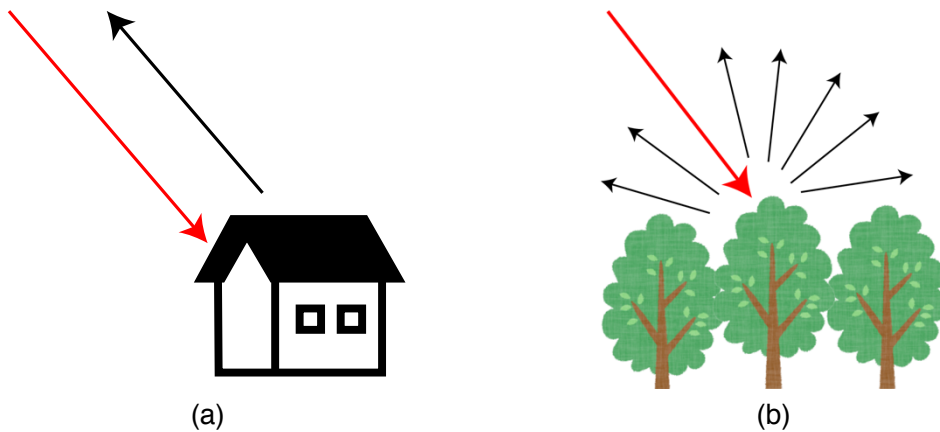


Figure 1.4: Examples of the point and distributed target. (a) shows the point target, and (b) shows distributed target. The red arrow is the emitted radar beam, and black arrows are the reflected ones.

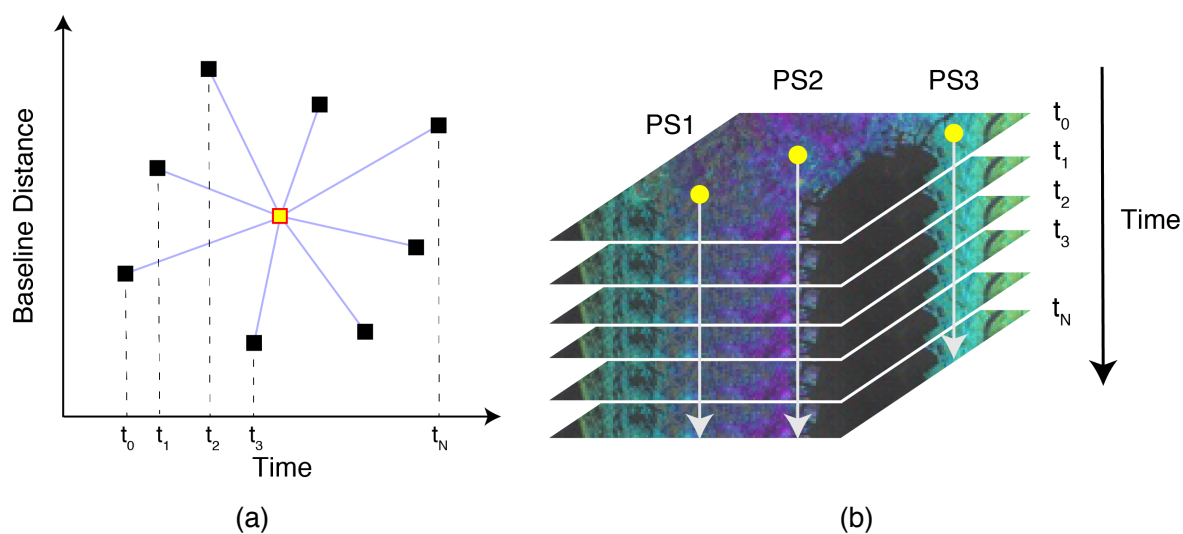
1.2.2 PSI

PSI は、恒久的な後方散乱 (PS: Persistent Scatterer) 点に着目して変位を推定する手法である。安定的に地表面から強く後方散乱する PS 点は、ノイズや変位推定に利用する位相差にばらつきが少なく、詳細な地表面変位を抽出できると考えられている。Figure 1.5 に PSI の解析方法の概念図を示す。PSI は、Figure 1.5a が示すように同じ地点を $N+1$ 回観測した画像の中から単一の参照画像 (シングルマスタ) を決め、その他の観測画像はマスタ画像と干渉処理をし、Figure 1.5b が示す通り、 t_0 から t_N の干渉画像を作成する。また、解析エリアの中から後方散乱の強い PS 点 (Figure 1.5b の PS1、PS2 および PS3) を選出し、その点について時系列の変位を推定する (Figure

1.5c)。PSIはポイントターゲットとなるため、Figure 1.5cが示す通り、人工構造物を対象とした変位推定となることが多い。また、PS1、PS2およびPS3は独立して変位推定が実施される。

PSIは、1990年代後半にFerrettiら(2000, 2001)により提案され、そのアルゴリズムの精度向上に関する研究は現在も続いている。この解析手法は、次の考え方に基づき変位推定精度の向上を図る。

- 変位推定の計算を単純化するため、シングルマスタにおける干渉ペアを選択し、すべての干渉画像は共通のマスタ画像を用いて作成される。
- 時系列の干渉画像の中から、後方散乱が安定しているポイント（PS点）を選択し、観測記録において時間経過によるノイズが最小となる位相差を用いて変位を推定する。
- 選択されたPS点の時系列の位相差を用いて、後方散乱の高さを決定する。高さの決定後、干渉処理による位相差から高さによる位相差を取り除き、地表面変位による位相差を求め、変位を推定する。
- 変位推定は観測記録に近い状態の複素数で実施され、PS点の周辺からのノイズを避けるため、独立したポイントにて計算処理が完結する。



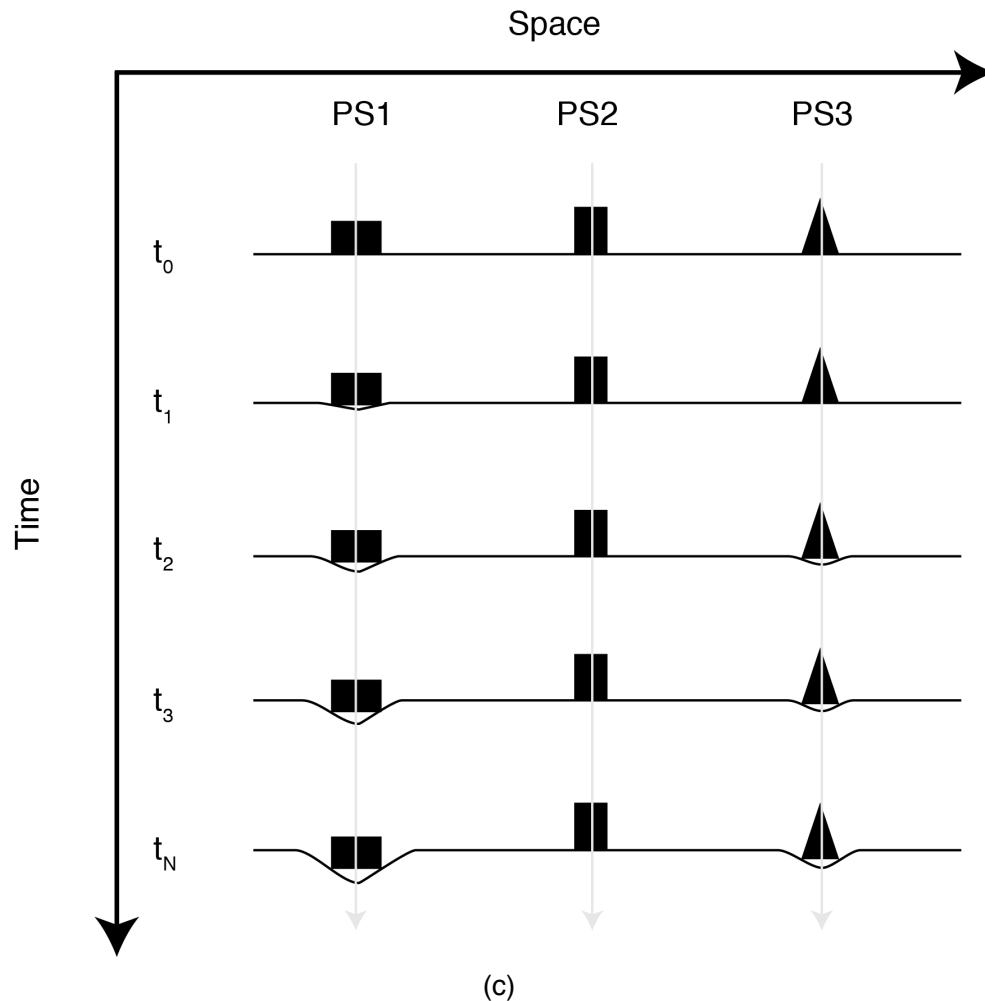


Figure 1.5: General concept of the persistent scatterer interferometry (PSI). (a) shows how to select the interferometry pairs for PSI, and the yellow point is the single master. (b) shows the wrapped phase images generated with the pairs and how to estimate the displacement in PSI. (c) shows the example of the resulting PS displacements at the point targets shown in (b).

PSI の特徴のひとつは、変位推定時に独立したピクセルにて計算するため、センサが持つ空間解像度を最大限に利用できることである。変位推定の空間解像度が高く、後方散乱が強いエリアが対象となるため、人工構造物の変位モニタリングに適用されることが多い。Sousa ら(2013)は、欧州宇宙機関の ERS にて観測した SAR データに PSI を適用し、2001 年に洪水により崩壊した橋梁が、洪水前に大きく変形していたことを明らかにしている。この研究は PSI のインフラストラクチャにおける構造ヘルスマニタリングへの有効性を示している。これ以降、PSI はダムや建物といった大型の人工構造物の変位モニタリングに適用されている (Lazecky et al., 2013; Othman et al., 2019; Pratesi et al., 2015)。人工構造物の変位モニタリング以外にも、鉱山、地熱エリア、および地滑りにおいても、PSI による変位モニタリングの有効性が示されている (Bayer et al., 2017; Dong et al., 2018; Mura et al., 2018)。日本でも、PSI を用いて地熱エリアや火山の地表面変位を推定している (Ishitsuka et al., 2016; Morishita & Kobayashi, 2018)。また、近年の先行研究では、

PSI とトモグラフィ解析を組み合わせることにより、高層ビル側面における熱膨張の変位モニタリングの可能性も示されている (Lombardini et al., 2014; Siddique et al., 2016)。

PSI が推定可能な変位量は、変位を示す位相差の範囲である $-\pi$ から π の 2π アンビギュイティにより制限される。地震のような大規模な変位の場合は、 2π アンビギュイティによる不連続性が発生する位相差となるため、PSI では正しく変位を推定することが難しくなる。また、大規模な変位に限らず、周期的な変位のように、ピークピーク値が大きくなり、一定期間で不連続性が発生する位相差となる非線形的な変位の推定にも適さない。この問題点は、いくつかの PSI のレビューにおいても指摘されている (Crosetto et al., 2016; Raucoules et al., 2009)。 2π アンビギュイティが生じる観測記録から大変位を推定する際の問題点の詳細は、1.3 節の「既往研究における問題点の抽出」にて述べる。

1.2.3 SBAS

PSI は後方散乱が強いとされている人工構造物が多数存在する、都市域の変位モニタリングに適しており、それらが少ない郊外のエリアでは変位推定が難しいと考えられている。そのため、PSI が提案された直後に Berardino ら (2002) により、裸地や植生といった分散ターゲットのエリアを中心に変位推定が適用可能となる SBAS が提案されている。

Figure 1.6 に SBAS の解析方法の概念図を示す。SBAS は、Figure 1.6a が示すように同じ地点を $N+1$ 回観測した画像の中から、複数の参照画像 (マルチマスタ) を決め、干渉画像を作成し、変位を推定する。Figure 1.6b が示す通り、 t_0 から t_N の干渉画像を作成するが、各観測時間に複数の干渉画像が作成される。また、これらの干渉画像は PSI とは異なり、処理過程で位相アンラップ処理が行われており、 2π アンビギュイティによる不連続性を解決した位相差に変換されている。これらの解析条件より、SBAS の変位推定計算においては、PSI と比較するとより強固な行列演算を利用することが可能となる。解析エリアの中から位相差が安定している分散ターゲット (Figure 1.6b の DS1、DS2 および DS3) を選出し、その点について時系列の変位を推定する (Figure 1.6c)。SBAS は変位推定をおこなう対象物が植生を含むエリアや裸地なども含まれるため、PSI よりも推定範囲が広がることが期待される。なお、この図では、DS1、DS2 および DS3 の各点において単独で変位推定しているように見受けられるが、実処理では周辺ピクセルを利用しながら変位解析されている。

分散ターゲットは、PSI が対象とするポイントターゲットよりもマイクロ波のノイズが増加し、観測記録のシグナルにおける干渉性 (コヒーレンス) が低下する。その結果、ノイズと本来の変位による位相差の識別が困難となる。そのため、SBAS では次の考え方にに基づき、推定精度の向上を図る。

- ベースライン距離と観測間隔が短い干渉ペアを選択し、空間的および時間的なノイズが少ない干渉画像を作成し、コヒーレンスが高いペア画像を使用して処理をする。
- マルチマスタの干渉ペアを選択し、多数の干渉画像を用いてノイズ除去の精度向上を図る。各観測日で重複する干渉画像を作成されるため、特異値分解（SVD: Singular Value Decomposition）により変位による位相差を推定する。
- 干渉処理に使用するペアのベースライン距離と時間間隔を短くし、 2π アンビギュイティの問題を回避するように設計されている。しかし、変位推定において参照する位相が、複数のマスタ画像により微小に変化するため、PSI と比較すると推定結果の位置精度が低下する。
- 各干渉画像のコヒーレンスを高めるため、周辺ピクセルを利用するノイズフィルタを適用する。そのため、変位推定の空間解像度が低下する。
- 変位推定を実施する前に 2π アンビギュイティの不連続性を解決する位相アンラップ処理を適用し、大変位の推定が可能となる。また、変位推定が複素数で行われる PSI と異なり、推定モデルの適用も容易となり、非線形的な変位の推定も可能となる。

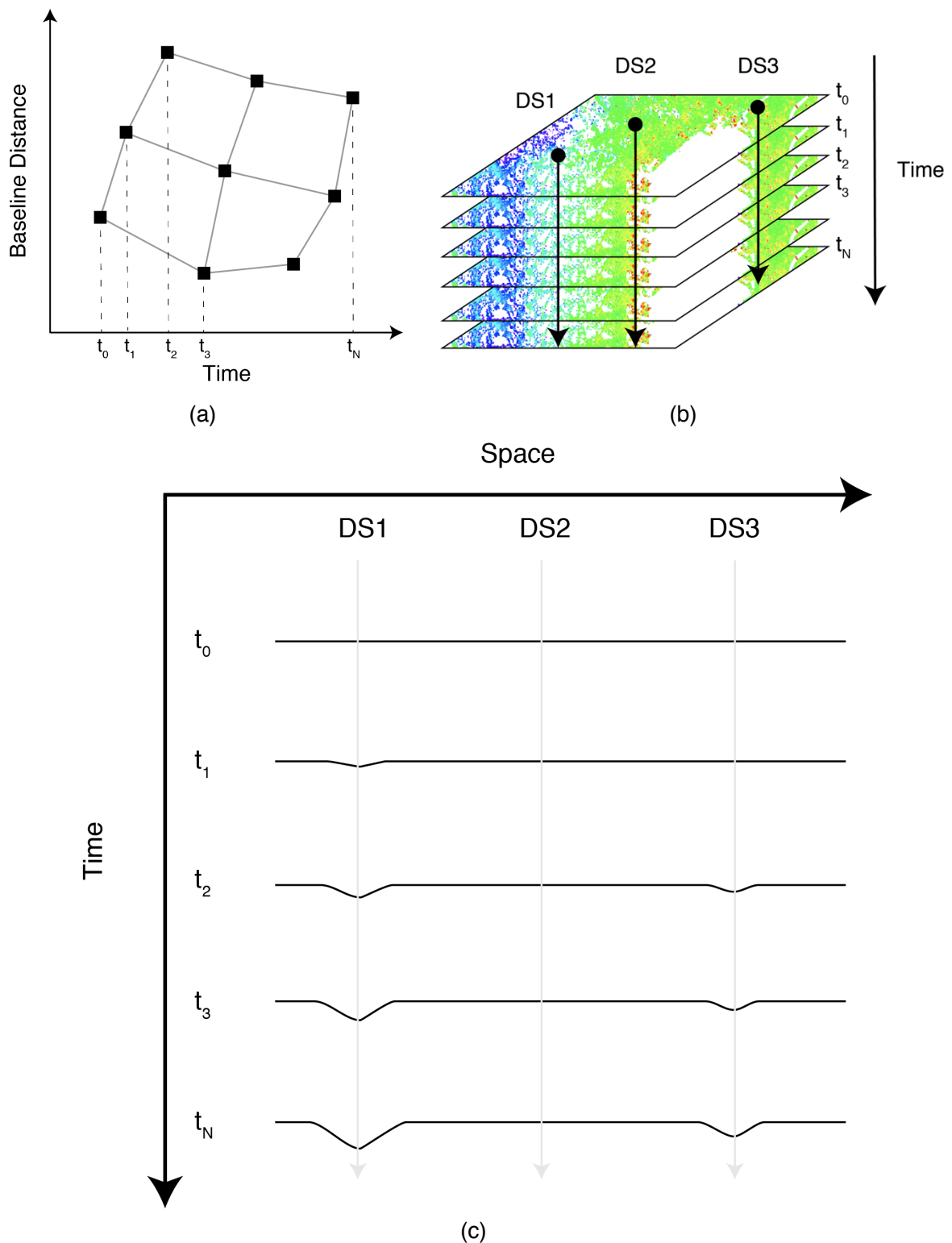


Figure 1.6: General concept of the Small Baseline Subset (SBAS). (a) shows how to select the interferometry pairs for SBAS, and the multiple pairs are selected in each observation. (b) shows the unwrapped phase images calculated by SVD. (c) shows the example of the resulting SBAS displacements at the distributed targets shown in (b).

SBAS は、ノイズフィルタや位相アンラップ処理を適用するため、 2π アンビギュイティを生じる観測記録から大変位を推定でき、モニタリングの対象は、地殻変位、地盤沈下、火山、地滑りなど多岐にわたる。Lanari ら(2004)は、欧州宇宙機関の ERS データを使用し、ロサンゼルス周辺に SBAS を適用し、GPS と推定変位の傾向が一致することを確認し、この手法の有効性を示している。この解析エリアは、地震断層と地下水の利用などによる 1 年周期の地表面変位が混在し、PSI では推定が難しい非線形的な変位を推定できることを示している。この研究以降、鉾山、大規模な橋梁、埋立地、断層などの変位モニタリングに適用され、その汎用性が確認されている (Chen et al., 2020; Hu et al., 2014; Karimzadeh et al., 2018; Murgia et al., 2019; Shi et al., 2019; Zhao et al., 2012)。日本でも箱根山や千葉県浦安市における埋立地における地表面変位について、SBAS にて解析されている (Aimaiti et al., 2018; Doke et al., 2020)。SBAS の有効性が示されるのに対し、Casu ら(2006)は、SBAS の計算過程における位相アンラップ処理のエラーが、変位推定の精度に大きな影響を与える問題点を指摘している。SBAS は分散ターゲットを対象としており、推定精度の向上には大気ノイズの除去や位相アンラップ処理の改良が不可欠であり、これらの問題に取り組む研究は、現在も多数行われている (Hussain et al., 2016; Morishita et al., 2020; Yunjun et al., 2019)。

1.2.4 時系列干渉解析法の特徴

これまで、PSI と SBAS についての概説を述べたが、これらを融合する手法も提案されている (Ho et al., 2020)。Ferretti ら (2011)は PSI を拡張し、分散ターゲットの推定が可能な、SqueeSAR という改良手法を提案している。また、Hooper (2008)は、PSI における PS 点の選定方法を改変し、変位推定の計算手法に SBAS で利用される SVD を適用している。これらの研究は、PSI と SBAS の計算過程を組み合わせることにより、時系列干渉解析法の問題点を改良しているが、PSI もしくは SBAS の拡張となり、中核となるアルゴリズムやその特徴は、PSI もしくは SBAS と同等と考えられる。このことより、本研究においては PSI と SBAS を融合した手法は、PSI と SBAS のいずれかに準ずるものとする。これまで述べた PSI と SBAS の特徴を Table 1.1 に整理する。

Table 1.1: Characteristics of PSI and SBAS.

Item	PSI	SBAS
Target feature	<ul style="list-style-type: none"> • Point target i.e. Artificial objects, Buildings, Bridge 	<ul style="list-style-type: none"> • Distributed target i.e. Bare ground, Vegetation
Spatial resolution	<ul style="list-style-type: none"> • Maximum spatial resolution with sensor • Pixel independent 	<ul style="list-style-type: none"> • Lower than PSI • Use surrounding pixels for filtering and phase unwrapping
Observation interval	<ul style="list-style-type: none"> • Short observation interval is preferred 	<ul style="list-style-type: none"> • Long observation interval can be accepted
Estimation accuracy	<ul style="list-style-type: none"> • High • Millimetric order 	<ul style="list-style-type: none"> • Lower than PSI • Sub-centimetric order
Spatial phase unwrap	<ul style="list-style-type: none"> • Not implemented 	<ul style="list-style-type: none"> • Implemented
Displacement model	<ul style="list-style-type: none"> • Linear 	<ul style="list-style-type: none"> • Linear and non-linear
Height estimation	<ul style="list-style-type: none"> • Robust 	<ul style="list-style-type: none"> • Weak (depends on the reference DEM)
Minimum number of the scenes to estimate	<ul style="list-style-type: none"> • More than 20 scenes 	<ul style="list-style-type: none"> • 10 to 20 scenes, but more than 20 is preferred

1.3 既往研究における問題点の抽出

時系列干渉解析法は、広域の地表面変位を把握することが可能である。しかし、高い建物が存在する都市域や起伏が大きい山岳エリアでは、 2π アンビギュイティの影響により不連続性が発生する大変位は、SBAS と PSI では正しく推定ができない。そこで、計算手法の観点から、各手法の変位推定における問題点を述べる。

SBAS の特徴は、変位推定における 2π アンビギュイティの制限を、空間的に隣接するデータを使用して位相アンラップ処理することにより、解決する点である (Costantini, 1998; Yu et al., 2019)。この処理により、空間的に不連続な位相差を連続的な位相差に変換する。しかしながら、Figure 1.7 が示すように、高さのある建物が存在する都市域において、斜め撮影している SAR 観測では、レイオーバ (倒れこみ) が発生し (Hein, 2003)、位相アンラップ処理が正しく機能しない。SAR の観測では、高い建物が存在するとセンサまでの距離が地上までの距離よりも短くなり、その建物で反射したマイクロ波は地上のものよりも先にセンサに戻る。そのため、観測した SAR 観測記録の並びが逆となる。例えば、都市域で大規模な変位が発生すると、レイオーバのため位相差の並びが変化する。そのため、位相アンラップ処理を実施しても本来の変位を推定できなくなる。Figure 1.8 は、この問題について具体的な数値を示しながら説明している。Figure 1.8a では大規模な変位を位相差にて観測しており、左図の青いエリアが 2π アンビギュイティの影響により不連続となっている。レイオーバが発生しないエリアでは、位相アンラップ処理を実施することにより、右図のように空間的に連続している変位を再現することが可能となる。しかし、Figure 1.8b のようにレイオーバとなるエリア (左図の黄枠) において大規模な変位を観測すると、位相差の並びが入れ替わる。そのため、本来使用する位相差と異なるデータを用いて演算することになり、右図のように位相アンラップ処理を実施しても、本来の位相差のパターン (Figure 1.8a の右図) を再現できなくなる。したがって、レイオーバとなるエリアにおいて、 2π アンビギュイティの影響を受け、変位推定に使用される位相差に不連続性が含まれる場合は、位相アンラップ処理を実施しても本来の変位を推定することができない。

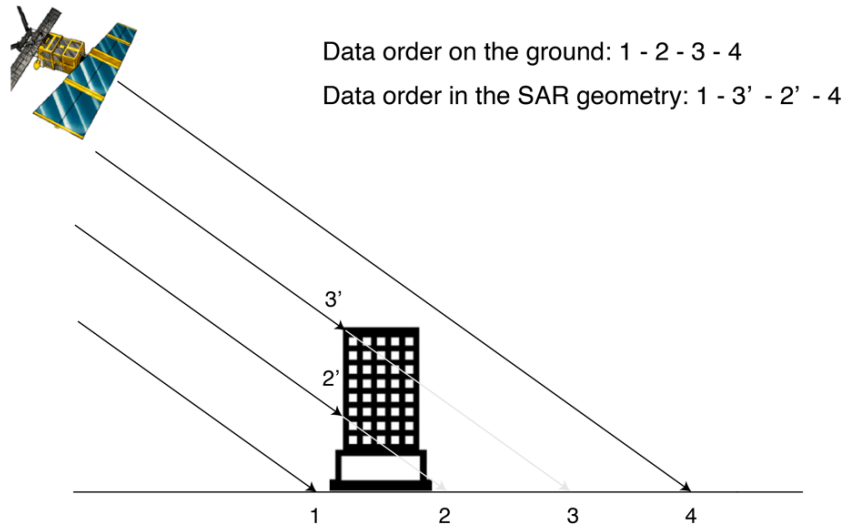
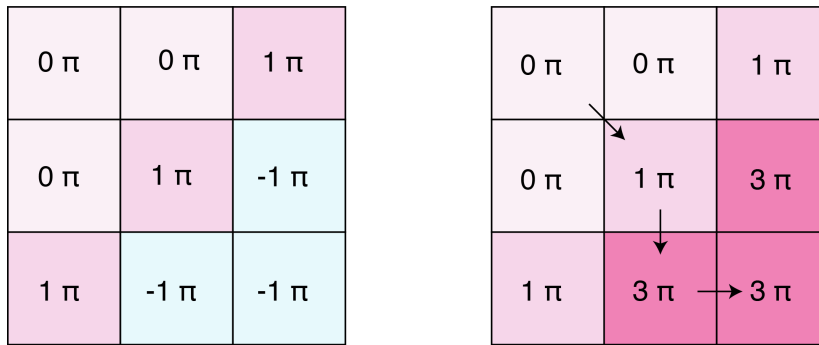


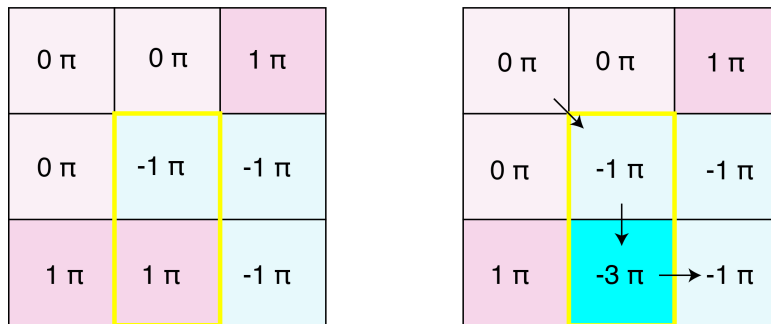
Figure 1.7: Order of the observed data over a building with SAR observations.



wrapped phase

unwrapped phase

(a)



wrapped phase with layover (yellow pixels)

unwrapped phase

(b)

Figure 1.8: Issue of the phase unwrapping method around the layover area. (a) shows the phase unwrapping result with normal condition. (b) shows the phase unwrapping result around the layover area. The pattern of the wrapped phase and unwrapped phase are supposed to be the same between (a) and (b), except for the layover pixels.

PSI は、ポイントターゲットであり、常に後方散乱が強い人工構造物の変位推定が可能となる。その計算過程において、周辺の情報のノイズを避けるため、位相アンラップ処理を使用しない。そのため、SBAS では変位推定が難しい、レイオーバのエリアでも変位推定が可能となる (Siddique et al., 2016; Zhu et al., 2019)。しかしながら、PSI は 2π アンビギュイティの影響を受けるため、推定可能な変位量が制限される。PSI における 2π アンビギュイティの制限は、先に述べた位相アンラップ処理と類似する手法が、Ferretti (2000)らにより提案されている。しかしながら、この手法は隣接するデータの統計値を使用するため、レイオーバのエリアの問題は解決できない。また、PSI における非線形的な変位の推定は、様々な条件や推定モデルを仮定し変位を推定する。Ishitsuka ら(2014)は、タイ、バンコクにおける、地下水による地表面変位を PSI の推定結果に指数関数やサイン関数を適用し、長期的な地盤変位を求めている。この問題点は、先行研究でも様々な検討が行われおり、解析エリア固有の推定モデルを構築し解決されている (Jiang et al., 2021; Monserrat et al., 2011; Shi et al., 2019)。推定モデルの構築は、解析エリアの先験的なパラメータが必要とされ、他のエリアの地表面変位の推定には適用が難しいと考えられる。このことより、PSI の非線形的な変位の推定は、汎用性に問題が残る。なお、SBAS では位相アンラップ処理により 2π アンビギュイティの影響による不連続性を解決した位相差を使用して変位を推定する。そのため、PSI よりも非線形的な変位の推定が簡易に実施できると考えられる。

時系列干渉解析法の利点と問題点を整理し、Table 1.2 に示す。SBAS は 2π アンビギュイティの影響により不連続性が生じる変位の推定は可能であるが、レイオーバのエリアの変位推定に適さない。また、既往の PSI (ConvPSI) はレイオーバのエリアの変位推定は可能だが、大規模な変位の推定には適さない。したがって、時系列干渉解析法は、SAR 観測にてレイオーバとなる都市域や山岳地帯にて、 2π アンビギュイティを生じる観測記録から大変位を正しく推定ができない問題がある。また、この問題を解決する時系列干渉解析法は、提案されていない。

Table 1.2: Advantages of SBAS and PSI.

Method	Urban areas/Buildings Layover	Large scale displacement (Limited by 2π ambiguity)	Non-linear Estimation
SBAS	×*	○	○
Conventional PSI (ConvPSI)	○	×	△
Proposed method (NN-PSI)	○	○	○

*: The symbol, ○, represents “good”, △ represents “partially good”, and × represents “not good”.

1.4 本研究の目的

SAR データを用いる時系列干渉解析法は、広域かつ面的にミリメートルの精度にて地表面変位を推定できる。しかしながら、これらの手法は SAR 観測ではレイオーバとなる高い建物が存在する都市域において、SBAS では位相アンラップ処理の問題、PSI では 2π アンビギュイティによる問題により大変位の推定が行えない。

本研究では、レイオーバエリアにて変位の推定が可能である PSI に着目し、 2π アンビギュイティにより不連続性が発生する大変位を推定可能とする、Non-Linear Non-Parametric PSI (NN-PSI) を提案する。PSI の変位推定の演算過程において、推定モデルを仮定しない方法を検討し、 2π アンビギュイティによる問題を解決する推定方法を構築する。提案した手法は、適用可能な地表面変位の種類や変位量の範囲が不明なため、数値シミュレーションを用いて NN-PSI の性能や適用範囲を明瞭にする。次に、NN-PSI を実観測記録に適用し、GPS データを用いて変位推定の精度を確認する。そして、 2π アンビギュイティにより不連続性が発生する大変位もしくは非線形的な変位が確認されているエリアに NN-PSI を適用し、提案手法の有効性を示す。

1.5 本論文の構成

本論文の構成を Figure 1.9 に示す。第 1 章「序論」では、本研究の背景を記述し、時系列干渉解析法に関する既往手法を分析し、それらの問題点を抽出し、本研究の目的を示す。

第 2 章「Non-Linear Non-Parametric Persistent Scatterer Interferometry (NN-PSI) の提案」では、時系列の変位をミリメートルの精度で推定が可能とされる Persistent Scatterer Interferometry (PSI) を改良した NN-PSI を提案する。PSI の時系列の変位推定では、 2π アンビギュイティにより推定可能な変位量に制限がかかるため、既往手法における高さの決定方法や変位の推定方法を改良し、不連続性が生じる大変位を推定可能とする手法を構築する。

第 3 章「数値シミュレーションによる NN-PSI の適用範囲の評価」では、数値シミュレーションを用いて、観測条件や変位条件を変更し、NN-PSI が適用可能な変位の種類や変位量について確認する。NN-PSI は、既往手法よりも高さや変位速度の計算範囲を広く設定するため、計算コストを削減することが望ましい。そこで、NN-PSI にて設定する計算範囲を変更し、変位推定結果に与える影響を分析する。また、ベースライン距離や観測頻度といった衛星の観測条件が変位推定に与える影響を確認し、実観測記録へ NN-PSI を適用するための観測条件を示す。

第 4 章「NN-PSI の実観測記録への適用」では、NN-PSI を合成開口レーダの実観測記録に適用する。GPS と NN-PSI による推定結果を比較し、提案手法の推定精度を把握する。また、 2π アンビギュイティの影響により不連続性が生じる大変位が発生しているエリアにて、NN-PSI を適用し、ConvPSI による推定結果と比較し、本手法の有効性を示す。

第 5 章「結論」では、本研究の成果を統括する。

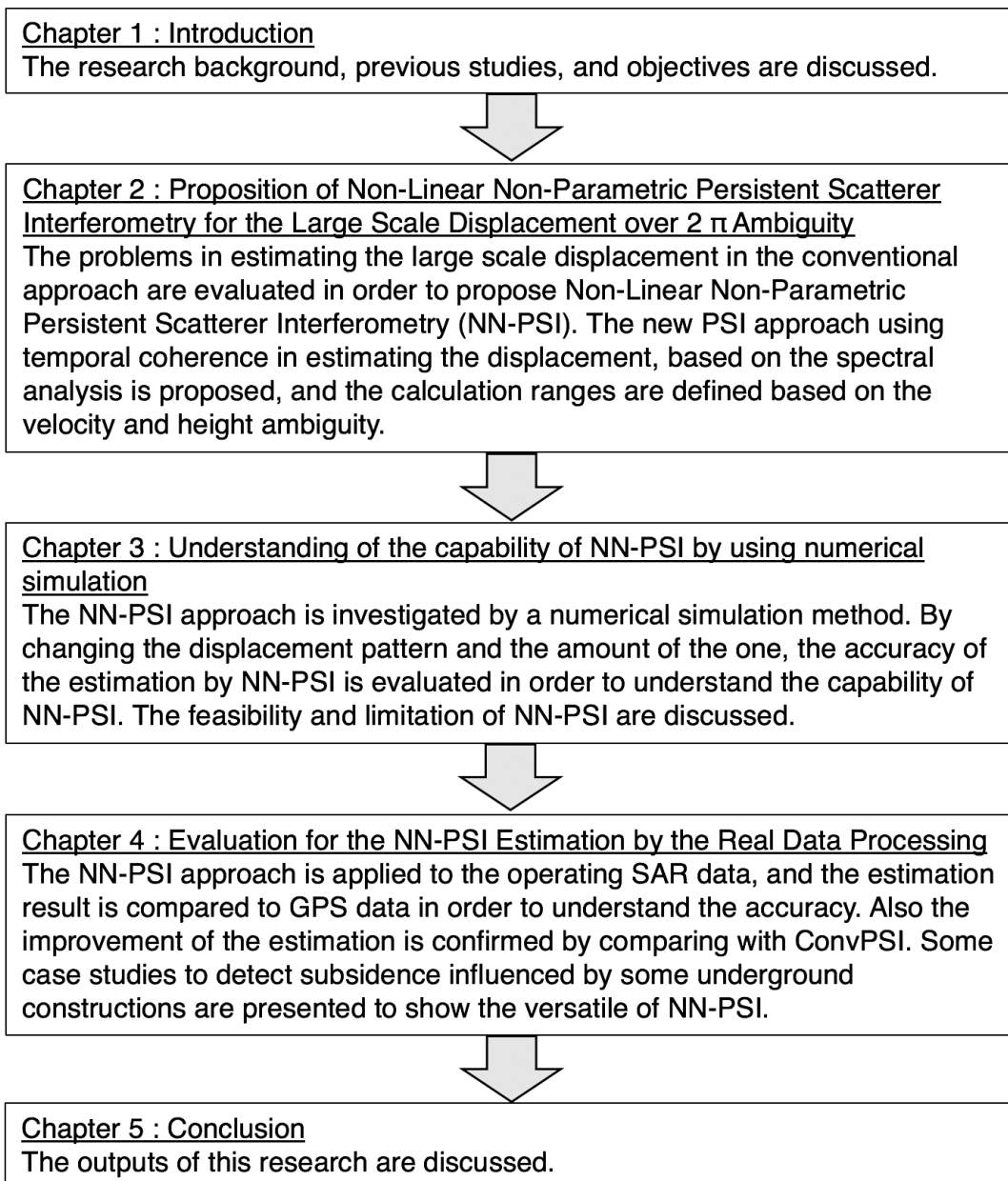


Figure 1.9: Dissertation outline.

1 章の参考文献

- Aimaiti, Y., Yamazaki, F., & Liu, W. (2018). Multi-sensor InSAR analysis of progressive land subsidence over the coastal city of Urayasu, Japan. *Remote Sensing*, *10*(8).
<https://doi.org/10.3390/RS10081304>
- Bamler, R., & Hartl, P. (1998). Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, *14*(4), 415–474. https://doi.org/10.1007/978-3-642-11741-1_11
- Bayer, B., Schmidt, D., & Simoni, A. (2017). The influence of external digital elevation models on PS-InSAR and SBAS results: Implications for the analysis of deformation signals caused by slow moving landslides in the northern apennines (Italy). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *55*(5), 2618–2631. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2648885>
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *40*(11), 2375–2383.
- Bürgmann, R., Rosen, P. A., & Fielding, E. J. (2000). Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, *28*(1), 169–209.
- Casu, F., Manzo, M., & Lanari, R. (2006). A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data. *Remote Sensing of Environment*, *102*(3–4), 195–210. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.023>
- Chen, Y., Tong, Y., & Tan, K. (2020). Coal Mining Deformation Monitoring Using SBAS-InSAR and Offset Tracking: A Case Study of Yu County, China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *13*, 6077–6087.
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3028083>
- Colesanti, C., Ferretti, A., Novali, F., Prati, C., & Rocca, F. (2003). SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *41*(7 PART I), 1685–1701.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.813278>
- Costantini, M. (1998). A novel phase unwrapping method based on network programming. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions On*, *36*(3), 813–821. <https://doi.org/10.1109/36.673674>
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-gonzález, M., Devanthéry, N., & Crippa, B. (2016). Persistent Scatterer Interferometry : A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *115*, 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011>
- Curlander, J. C., & McDonough, R. N. (1991). *Synthetic aperture radar* (Vol. 11). Wiley, New York.
- Deguchi, T., Rokugawa, S., & Matsushima, J. (2009). Long-term Ground Deformation Measurement by Time Series Analysis for SAR Interferometry. *RSSJ Journal of The Remote Sensing Society of Japan*, 418–428.
- Doke, R., Kikugawa, G., & Itadera, K. (2020). Very local subsidence near the hot spring region in

- hakone volcano, japan, inferred from insar time series analysis of alos/palsar data. *Remote Sensing*, 12(17), 1–17. <https://doi.org/10.3390/rs12172842>
- Dong, J., Zhang, L., Tang, M., Liao, M., Xu, Q., Gong, J., & Ao, M. (2018). Mapping landslide surface displacements with time series SAR interferometry by combining persistent and distributed scatterers: A case study of Jiaju landslide in Danba, China. *Remote Sensing of Environment*, 205(November 2017), 180–198. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.022>
- Ferretti, A. (2014). *Satellite InSAR data: reservoir monitoring from space*. EAGE publications.
- Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., & Rucci, A. (2011). A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(9), 3460–3470. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2124465>
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5), 2202–2212. <https://doi.org/10.1109/36.868878>
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8–20.
- Franceschetti, G., & Lanari, R. (2018). *Synthetic aperture radar processing*. CRC press.
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., & Zebker, H. A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*, 94(B7), 9183–9191. <https://doi.org/10.1029/JB094iB07p09183>
- Gens, R., & VAN GENDEREN, J. L. (1996). Review Article SAR interferometry—issues, techniques, applications. *International Journal of Remote Sensing*, 17(10), 1803–1835.
- Hanssen, R. F. (2001). *Radar interferometry: data interpretation and error analysis* (Vol. 2). Springer Science & Business Media.
- Hein, A. (2003). *Processing of SAR data*. Springer.
- Ho, D., Minh, T., & Hanssen, R. (2020). Radar Interferometry : 20 Years of Development in Time Series Techniques and Future Perspectives. *Remote Sensing*, 12(1364). <https://doi.org/10.3390/rs12091364>
- Hooper, A. J. (2008). A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35(16), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2008GL034654>
- Hu, B., Wang, H. S., Sun, Y. L., Hou, J. G., & Liang, J. (2014). Long-term land subsidence monitoring of Beijing (China) using the small baseline subset (SBAS) technique. *Remote Sensing*, 6(5), 3648–3661. <https://doi.org/10.3390/rs6053648>
- Hussain, E., Hooper, A., Wright, T. J., Walters, R. J., & Bekaert, D. P. S. (2016). Interseismic strain accumulation across the central North Anatolian Fault from iteratively unwrapped InSAR measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(12), 9000–9019. <https://doi.org/10.1002/2016JB013108>
- Ishitsuka, K., Fukushima, Y., Tsuji, T., Yamada, Y., Matsuoka, T., & Giao, P. H. (2014). Natural

- surface rebound of the Bangkok plain and aquifer characterization by persistent scatterer interferometry. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, *15*(4), 965–974.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2013GC005154>
- Ishitsuka, K., Tsuji, T., Matsuoka, T., & Nishijima, J. (2016). Heterogeneous surface displacement pattern at the Hatchobaru geothermal field inferred from SAR interferometry time-series. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, *44*, 95–103.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.07.006>
- Jiang, H., Balz, T., & Cigna, F. (2021). Land Subsidence in Wuhan Revealed Using a Non-Linear PSInSAR Approach with Long Time Series of COSMO-SkyMed SAR Data. *Remote Sensing*, 1–16.
- Karimzadeh, S., Matsuoka, M., & Ogushi, F. (2018). Spatiotemporal deformation patterns of the Lake Urmia Causeway as characterized by multisensor InSAR analysis. *Scientific Reports*, *8*(1), 1–10.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-23650-6>
- Lanari, R., Lundgren, P., Manzo, M., & Casu, F. (2004). Satellite radar interferometry time series analysis of surface deformation for Los Angeles, California. *Geophysical Research Letters*, *31*(23), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2004GL021294>
- Lazecky, M., Perissin, D., Lei, L., Qin, Y., & Scaioni, M. (2013). *Plover Cove Dam Monitoring with Spaceborne InSAR Technique in Hong Kong*.
- Lombardini, F., Paucillo, A., Fornaro, G., Reale, D., & Viviani, F. (2014). Tomographic Processing of Interferometric SAR Data. *IEEE Signal Processing Magazine*, *50*(July), 41–50.
- Lyons, S., & Sandwell, D. (2003). Fault creep along the southern San Andreas from interferometric synthetic aperture radar, permanent scatterers, and stacking. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *108*(B1), 1–24. <https://doi.org/10.1029/2002jb001831>
- Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics*, *36*(4), 441–500.
- Monserrat, O., Crosetto, M., Cuevas, M., & Crippa, B. (2011). The Thermal Expansion Component of Persistent Scatterer Interferometry Observations. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, *8*(5), 864–868. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2119463>
- Morishita, Y., & Kobayashi, T. (2018). Ground Surface Displacement of Kirishima Volcano Group Detected by ALOS-2 InSAR Time Series Analysis and Effect of Atmospheric Noise Reduction. *Journal of the Geodetic Society of Japan*, *64*, 28–38.
- Morishita, Y., Lazecky, M., Wright, T. J., Weiss, J. R., Elliott, J. R., & Hooper, A. (2020). LiCSBAS: An open-source insar time series analysis package integrated with the LiCSAR automated sentinel-1 InSAR processor. *Remote Sensing*, *12*(3), 5–8. <https://doi.org/10.3390/rs12030424>
- Mura, J. C., Gama, F. F., Paradella, W. R., Negrão, P., Carneiro, S., de Oliveira, C. G., & Brandão, W. S. (2018). Monitoring the vulnerability of the dam and dikes in Germano iron mining area after the collapse of the tailings dam of fundão (Mariana-MG, Brazil) using DInSAR techniques with terraSAR-X data. *Remote Sensing*, *10*(10), 1–21. <https://doi.org/10.3390/rs10101507>

- Murgia, F., Bignami, C., Brunori, C. A., Tolomei, C., & Pizzimenti, L. (2019). Ground deformations controlled by hidden faults: Multi-frequency and multitemporal insar techniques for urban hazard monitoring. *Remote Sensing*, *11*(19). <https://doi.org/10.3390/rs11192246>
- Othman, A. A., Al-Maamar, A. F., Al-Manmi, D. A. M., Liesenberg, V., Hasan, S. E., Al-Saady, Y. I., Shihab, A. T., & Khwedim, K. (2019). Application of DInSAR-PSI technology for deformation monitoring of the Mosul Dam, Iraq. *Remote Sensing*, *11*(22). <https://doi.org/10.3390/rs11222632>
- Pasquali, P., Cantone, A., Riccardi, P., Defilippi, M., Ogushi, F., Gagliano, S., & Tamura, M. (2014). Mapping of ground deformations with interferometric stacking techniques. *Land Appl. Radar Remote Sens*, 233–259.
- Pratesi, F., Tapete, D., Terenzi, G., Del, C., & Moretti, S. (2015). Rating health and stability of engineering structures via classification indexes of InSAR Persistent Scatterers. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, *40*, 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.04.012>
- Raucoules, D., Bourguine, B., de Michele, M., Le Cozannet, G., Closset, L., Bremmer, C., Veldkamp, H., Tragheim, D., Bateson, L., Crosetto, M., Agudo, M., & Engdahl, M. (2009). Validation and intercomparison of Persistent Scatterers Interferometry: PSIC4 project results. *Journal of Applied Geophysics*, *68*(3), 335–347. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.02.003>
- Rocca, F., Prati, C., & Ferretti, A. (1997). An overview of ERS-SAR interferometry. *ERS Symposium on Space at the Service of Our Environment, 3 Rd, Florence, Italy*.
- Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodriguez, E., & Goldstein, R. M. (2000). Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Proceedings of the IEEE*, *88*(3), 333–382.
- Shi, G., Lin, H., Bürgmann, R., Ma, P., Wang, J., & Liu, Y. (2019). Early soil consolidation from magnetic extensometers and full resolution SAR interferometry over highly decorrelated reclaimed lands. *Remote Sensing of Environment*, *231*(June), 111231. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111231>
- Shimada, M. (1999). Synthetic Aperture Radar processing. *Journal of the Geodetic Society of Japan*, *45*(4), 277–281. <https://doi.org/10.11366/sokuchi1954.45.277>
- Siddique, M. A., Wegmüller, U., Hajnsek, I., & Frey, O. (2016). Single-Look SAR Tomography as an Add-On to PSI for Improved Deformation Analysis in Urban Areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *54*(10), 6119–6137.
- Sousa, J. J., & Bastos, L. (2013). Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse. *Natural Hazards and Earth System Science*, *13*(3), 659–667. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-659-2013>
- Strozzi, T., Wegmüller, U., Werner, C., & Wiesmann, A. (2000). Measurement of slow uniform surface displacement with mm/year accuracy. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, *5*(1), 2239–2241. <https://doi.org/10.1109/igarss.2000.858368>
- Tatarski, V. I. (1961). *Wave propagation in a turbulent medium*. Courier Dover Publications.

- Wright, T., Parsons, B., & Fielding, E. (2001). Measurement of interseismic strain accumulation across the North Anatolian Fault by satellite radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, *28*(10), 2117–2120.
- Yu, H., Lan, Y., Yuan, Z., Xu, J., & Lee, H. (2019). Phase Unwrapping in InSAR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, *7*(march), 40–58. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2018.2873644>
- Yunjun, Z., Fattahi, H., & Amelung, F. (2019). Small baseline InSAR time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction. *Computers and Geosciences*, *133*(May), 104331. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.104331>
- Zhao, C., Lu, Z., Zhang, Q., & de la Fuente, J. (2012). Large-area landslide detection and monitoring with ALOS/PALSAR imagery data over Northern California and Southern Oregon, USA. *Remote Sensing of Environment*, *124*, 348–359. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.05.025>
- Zhu, X., Dong, Z., Yu, A., Wu, M., Li, D., & Zhang, Y. (2019). New Approaches for Robust and Efficient Detection of Persistent Scatterers in SAR Tomography. *Remote Sensing*, *11*(356). <https://doi.org/10.3390/rs11030356>
- 日本リモートセンシング学会. (2011). *基礎からわかるリモートセンシング*. 理工図書株式会社.

第 2 章

Non-Linear Non-Parametric Persistent Scatterer Interferometry
(NN-PSI) の提案

2.1 はじめに

時系列干渉解析法は、都市域のように起伏の変化が大きいエリアでは 2π アンビギュイティにより変位推定に使用する位相差に不連続性が発生するような大変位を正しく推定できない。ただし、PSI は変位推定の空間解像度が高く、後方散乱が安定しているポイントが対象となるため、レイオーバとなるエリアでも変位を推定することが可能である。そこで、PSI の推定方法を改良し、 2π アンビギュイティにより不連続性が発生する大変位の推定を可能とする Non-Linear Non-Parametric Persistent Scatterer Interferometry (NN-PSI) を提案する。

NN-PSI の提案にあたり、既往の PSI (ConvPSI) における変位推定の問題点を分析する。そして、改良方法を提案し NN-PSI の推定方法について概説する。ConvPSI における変位推定に必要な高さの決定方法と変位推定の演算方法について改良し、提案手法が 2π アンビギュイティの問題を解決し、非線形的な変位も推定可能なことを示す。また、NN-PSI を定式化し、計算範囲を定義し、手法の処理フローについて示す。

2.2 既往の PSI における推定方法の問題点

ConvPSI の問題点を分析するにあたり、手法の処理フローを Figure 2.1 に示し、詳細を述べる。この図は、Figure 2.1a から Figure 2.1d の順に PSI の処理が実施されることを示している。Figure 2.1a は、同じエリアにおいて SAR 観測を $N+1$ 回 ($0, 1, 2, \dots, N$) 行い、その中の 1 枚を参照画像 (マスタ) に設定し、その他の画像はすべてこのマスタ画像を参照し、 N 回の干渉処理を実施している。最初の干渉画像 t_1 から N 回目 t_N までの干渉画像を作成し (t_0 はマスタ画像とする)、解析エリア全体における時系列の位相差を算出している。ConvPSI は、後方散乱が安定的に強く、マイクロ波のシグナルのノイズが少ない点を選定し変位を推定する。Figure 2.1a では、ConvPSI の変位推定を実施するため、後方散乱が強い点 PS1 が選定されたことを示している。なお、ConvPSI の変位推定では、PS1 における時系列の位相差が独立して処理される。

干渉処理により得られる位相差は、SAR センサと地表面までの距離の変化により発生する。各干渉画像の位相差には、主に二つの要因によりその距離が変化すると考えられる。一つ目は観測ごとにセンサ位置が変化するために発生する位相差である。Figure 2.1b は、PS1 の SAR センサと地表面までの距離の関係を示している。この図では、観測ごとのベースライン距離が示されているが、センサの撮影位置が変化するとベースライン距離も変化する。二つ目は地殻変位による地表面までの距離の変化による位相差となる。最初の観測位置 t_0 と 2 回目の観測位置 t_1 は異なる位置から撮影され、変位がない場合でも最初の観測における距離 r_0 と 2 回目観測 r_1 の距離が異なる。さらに地表面の変位がある場合は、 r_0 と r_1' の距離の差が、 t_1 の位相差となる。ConvPSI では、 N 回の干渉処理により得られた位相差をすべて使用する。 t_N の位相差は、 r_0 と r_N の距離の差で示され、総観測期間におけるセンサ位置の変化と地表面の変位による距離の変化が含まれることを示す。

干渉処理により求められる時系列の位相差には、ベースライン距離の変化と地表面変位による変化の 2 成分による位相差が含まれるため、ConvPSI では「EV スペクトラム」を使用して、これらの成分を分解する (Figure 2.1c)。ベースライン距離の変化による位相差は、「高さ」を決めるための位相差の成分とする。地表面変位による位相差は、時系列の解析では時間の要素が加わるため、変位量を観測間隔の時間で除算した「変位速度」の位相差の成分とする。EV スペクトラムでは、時系列コヒーレンスを用いて、高さと変位速度のそれぞれの位相差の組み合わせが、最適となる高さを決定することができる。EV スペクトラムについては、後述の「2.3.3 EV スペクトラム」にて詳細を述べる。

干渉処理による高さの変位速度が混合している位相差から、高さの位相差を決定することで、変位速度による位相差を抽出することが可能となる。Figure 2.1d は、抽出した変位速度の位相差 (ラジアン) に SAR センサの波長を 4π で除算した値を掛け合わせることで、変位量 (物理量) を算出していることを示している。ConvPSI は、観測した位相差から高さの位相差を取り除くことで、変位速度による位相差を抽出し、地表面の変位を推定する手法である。なお、衛星搭載型

SARの観測記録に、干渉解析法を適用して求められる位相差には、通常は大気ノイズが含まれる。しかし、ここでは ConvPSI の計算手法の説明を単純化するため、このノイズの影響は考慮しないこととする。

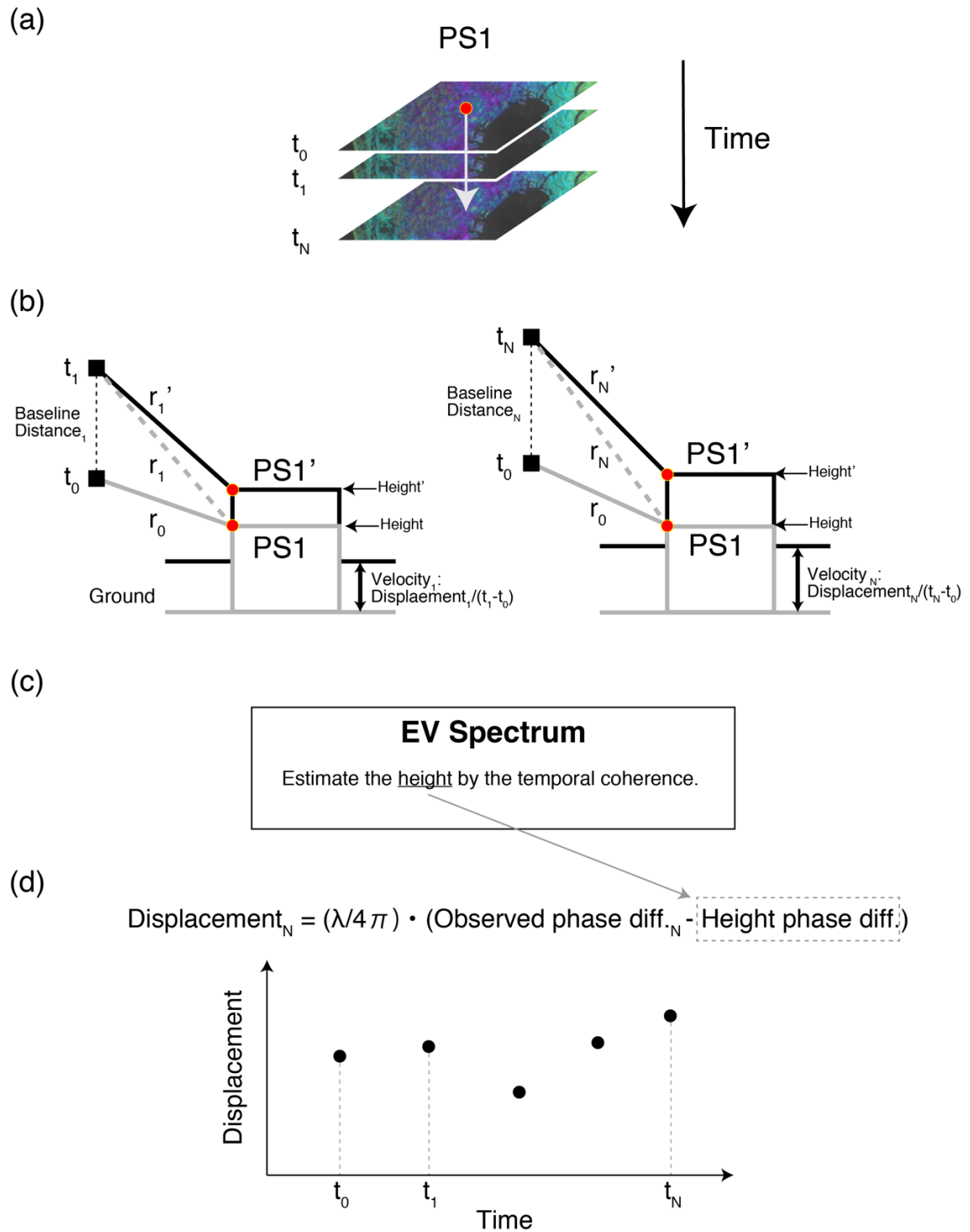


Figure 2.1: Process flow of the displacement estimation by conventional PSI (ConvPSI).

2.2.1 推定変位量の制限

ConvPSI は時系列の変位を精度よく推定することが可能であるが、推定計算は観測記録の複素数をそのまま使用するため、変位量は位相差の 2π の範囲に制限される。そのため、短期間で大きく変化する変位に対しては、位相差に不連続性が発生し、正しく推定が行えない。さらに、ConvPSI の変位推定に使用する位相差に不連続性が発生した場合、 2π アンビギュイティによる不連続性かノイズによるものかを判定することが困難となる。ConvPSI の変位を求める位相差は、観測した位相差から高さの位相差を取り除いたものであり、純粋な変位速度による位相差ではない。そのため、実観測記録においてはノイズによる位相差も含まれており、不連続性がノイズにより起因する可能性も高い。このことから、単一のポイントのみで変位推定をする ConvPSI では、 2π アンビギュイティによる不連続性を判定し、解決するのは困難と考えられている。

これまで、ConvPSI の 2π アンビギュイティの問題は周辺の位相差を利用したり、変位に推定モデルを適用することで解決している。汎用的な解決方法としては、周辺ピクセルの変位の傾向により、位相差の不連続性を解決している (Ferretti et al., 2000)。この方法の概念図を Figure 2.2 に示す。Figure 2.2a では、後方散乱が強く位相ノイズが少ない 3 点 (PS1、PS2 および PS3) が、空間的に相互の変位に影響がない程度に隣接して存在する。中央の PS2 では、 2π アンビギュイティによる不連続性が生じる位相差となる大変位 (地盤沈下) が発生し、ConvPSI により変位推定した場合、Figure 2.2b が示すように不連続性が含まれる変位となる。この場合、PS2 における不連続な変位を線形的なものと仮定し、PS1 と PS3 の変位を参照することで沈下傾向と判断し、PS2 の不連続性が発生している箇所を連続的になるように変位をシフトする (Figure 2.2c)。このように、ConvPSI では周辺情報を利用して、位相差の不連続性を補正する。

しかし、周辺情報を使用して補正する手法は、レイオーバとなるエリアでは利用できないため、根本的な解決方法とはならない。また、非線形的な変位パターンにより、位相差に不連続性が発生するケースでは、推定モデルを適用し解決する方法があるが、この方法は先験的な情報が必要となるため、汎用的に適用することができない。よって、ConvPSI において、起伏の変化が大きいエリアにおいて 2π アンビギュイティによる不連続性が発生する大変位を推定する場合、周辺情報を利用する方法はレイオーバのため適用が難しい。また、推定モデルを仮定もしくは構築する方法では、先験的なパラメータが必要となり汎用性を失う。そのため、変位推定において 2π アンビギュイティの問題を解決するには、単独のピクセルで変位推定時に推定モデルを使用しない手法が必要となる。

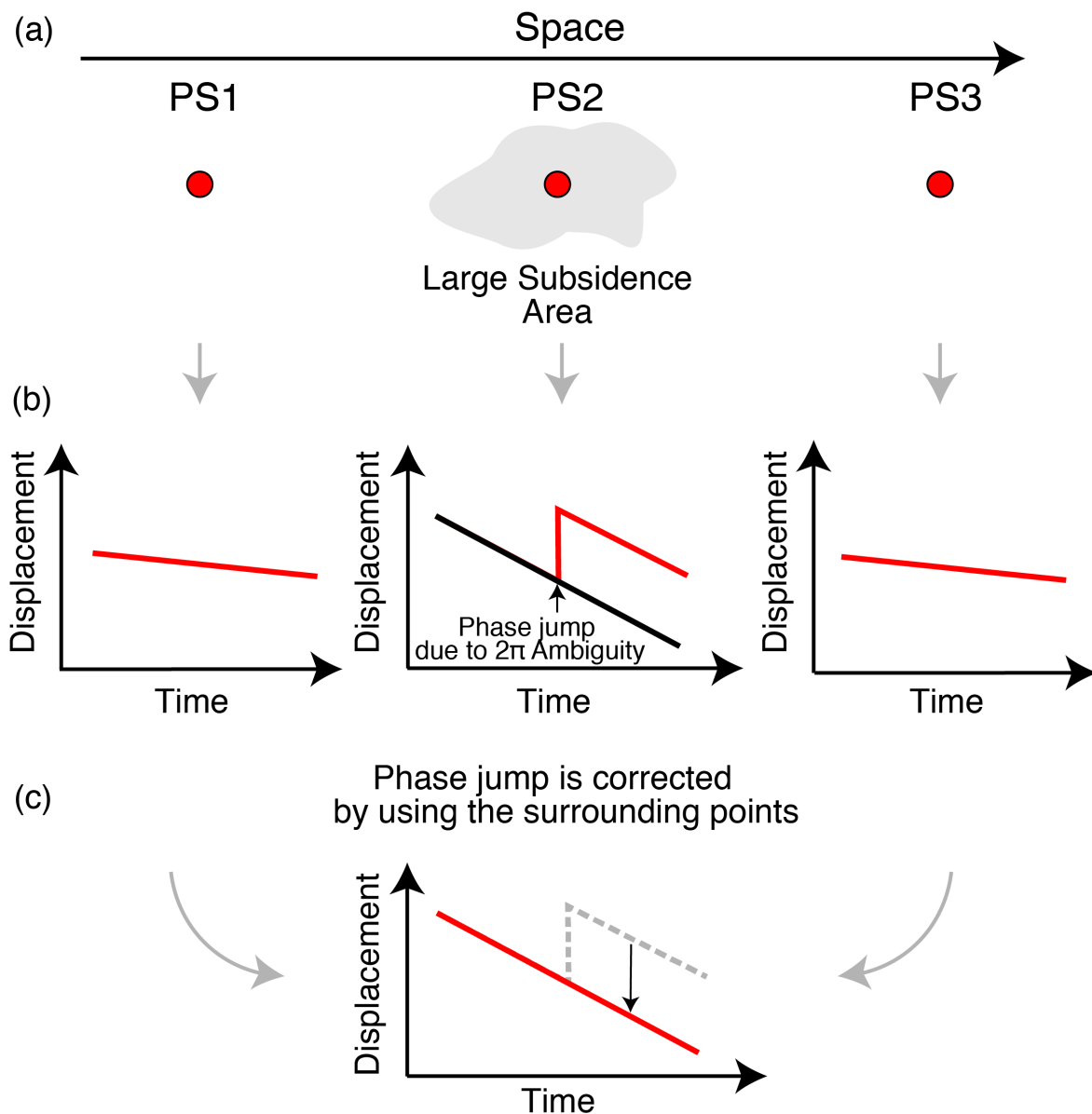


Figure 2.2: Process flow to avoid the 2π ambiguity in the displacement for ConvPSI. The black line in the middle of the plot indicates the actual displacement.

2.2.2 改良方法

ConvPSI では、変位推定における 2π アンビギュイティの問題について解決方法がいくつか試されているが、都市域を対象にした場合、有効的な解決方法はこれまでの研究にて示されていない。そこで、単独ピクセルかつ推定モデルを利用しない方法で、 2π アンビギュイティの問題を解決する、NN-PSI を提案する。本研究では、ConvPSI における「EV スペクトラムによる高さの決定方法」と「変位推定の方法」の二点について改良を行う。一つ目の EV スペクトラムの高さの決定方法は、ConvPSI は観測期間内においては常に一定の割合で変化する線形的な変位を想定し

ている。そのため、 2π アンビギュイティによる不連続性が発生する大変位や非線形的な変位を推定する際に、誤った高さを決定するケースが想定される。そこで、NN-PSIにおいては、EV スペクトラムにおいて線形的な変位でない場合でも、正しい高さを決定できる方法を提案する。二つ目の、変位推定の方法における改良は、マルチベースラインモデルのスペクトル解析法に着目する。Fornaro ら(2009)は、ConvPSI の変位推定にスペクトル解析法を応用することで、不連続性が発生する位相差から変位を正しく推定できる可能性を示唆しており、ConvPSI の 2π アンビギュイティの問題を解決できる可能性があると考えられる。

はじめに、それぞれの改良点で共通して使用する EV スペクトラムについて概説する。EV スペクトラムは、高さと変位速度の 2 成分が混同している位相差をそれぞれの成分に分解することを目的としている。Figure 2.3 は、EV スペクトラムの概念図を示しており、EV スペクトラムの横軸の $Vel_1, Vel_2, Vel_3, \dots, Vel_i$ は変位速度の値を示し、縦軸の $Elev_1, Elev_2, Elev_3, \dots, Elev_j$ は高さの値を示す。実処理の際は、衛星観測の条件により求まる高さや変位速度の範囲により、EV スペクトラムのサイズは変化する。EV スペクトラムの各セルの値 γ は、時系列コヒーレンスの値を用いる。時系列コヒーレンスは、各セルの高さ $Elev$ と変位速度 Vel の値により計算して求まるモデルとなる位相差と観測した位相差の相関を示す係数であり、時系列コヒーレンスの値が高い場合は、 $Elev$ と Vel の組み合わせによるモデルと観測の位相差の相関が高いことを示す。Figure 2.3 では、明るいセル（白）が時系列コヒーレンスが高く、暗いセル（黒）が低いことを示しており、図の中心の時系列コヒーレンス $\gamma(3,3)$ の値が最も高くなることを示している。これは、 Vel_3 と $Elev_3$ の組み合わせが観測した位相差に最も類似していることを表す。時系列コヒーレンスの説明や、EV スペクトラムの作成方法の詳細は、「2.3.3 EV スペクトラム」にて述べる。

	Vel_1	Vel_2	Vel_3	...	Vel_i
$Elev_1$	$\gamma(1,1)$		$\gamma(3,1)$		$\gamma(i, 1)$
$Elev_2$					
$Elev_3$	$\gamma(1,3)$		$\gamma(3,3)$		$\gamma(i,3)$
\vdots					
$Elev_j$	$\gamma(1, j)$		$\gamma(3, j)$		$\gamma(i, j)$

Figure 2.3: EV spectrum used in PSI approaches. *Elev*, *Vel*, and γ are the values of the elevation, velocity, and temporal coherence respectively. The bright cell shows the high value of γ , and dark one indicates the low value of γ .

NN-PSI および ConvPSI においては、EV スペクトラムを使用して高さの位相差を求め、変位速度の位相差を使用して変位推定が行われる。高さの位相差の決定において、ConvPSI は EV スペクトラム内の時系列コヒーレンスが最も高い値を示す高さ (Figure 2.3 では $\gamma(3,3)$ となり、 $Elev_3$ となる) を変位推定の計算プロセスに使用する。しかしながら、この方法は時系列の変位が時間に対し線形的に挙動することが前提となっており、非線形的な変位 (例えば周期的な変位) の場合は、ConvPSI の高さの決定方法では、変位速度の方向で時系列コヒーレンスのばらつきが大きくなるため、EV スペクトラム内の最大値が常に変位推定に適した高さを示さないことが類推される。EV スペクトラムでは Figure 2.3 が示すとおり、高さと変位速度のそれぞれの位相差が、観測した位相差と最も相関が高い場合 (図では $Elev_3$ と Vel_3 の場合)、その一致する高さの時系列コヒーレンスを変位速度方向に確認した場合、時系列コヒーレンスが最大 ($Elev_3$ の Vel_3) となる以外の値が極端に低くなる傾向がある。そのため、相関が高い高さの時系列コヒーレンスを累積した値は、他の高さの時系列コヒーレンスの累積した値よりも低くなる。したがって、NN-PSI における高さの決定方法は、EV スペクトラムの各高さの時系列コヒーレンスをすべて累積し、その値が最小となる高さにて決定する。

次に変位の推定方法における改良点について述べる。ConvPSI では、観測した位相差から高さの位相差を差し引くことで変位速度 (変位) による位相差を求めるが、NN-PSI の変位推定にお

いては、マルチベースラインにおけるスペクトル解析に基づいた手法を適用する。Figure 2.4 は NN-PSI の変位推定方法の処理フローの概念図を示す。このフローは、EV スペクトラムを作成し、高さを決定し、高さによる位相差を決定した後の変位推定の処理を示している。はじめに、Figure 2.4a では、決定した高さにおけるすべての時系列コヒーレンスを抽出する。この説明の便宜上、Figure 2.3 における $Elev_3$ を変位推定に使用する高さとし、その高さにおける Vel_1 、 Vel_2 、 Vel_1 の時系列コヒーレンスを $\gamma(1,3)$ 、 $\gamma(2,3)$ 、および $\gamma(i,3)$ と表す。Figure 2.4b では、時系列コヒーレンスにて重み付けした、変位速度の位相差を重ね合わせることにより、変位推定に必要となる変位速度による位相差を算出している。Figure 2.4c では、位相の重ね合わせ計算で得られた結果から位相を求め、Figure 2.4d ではセンサの波長情報を利用して、変位量に変換した推定結果を示している。

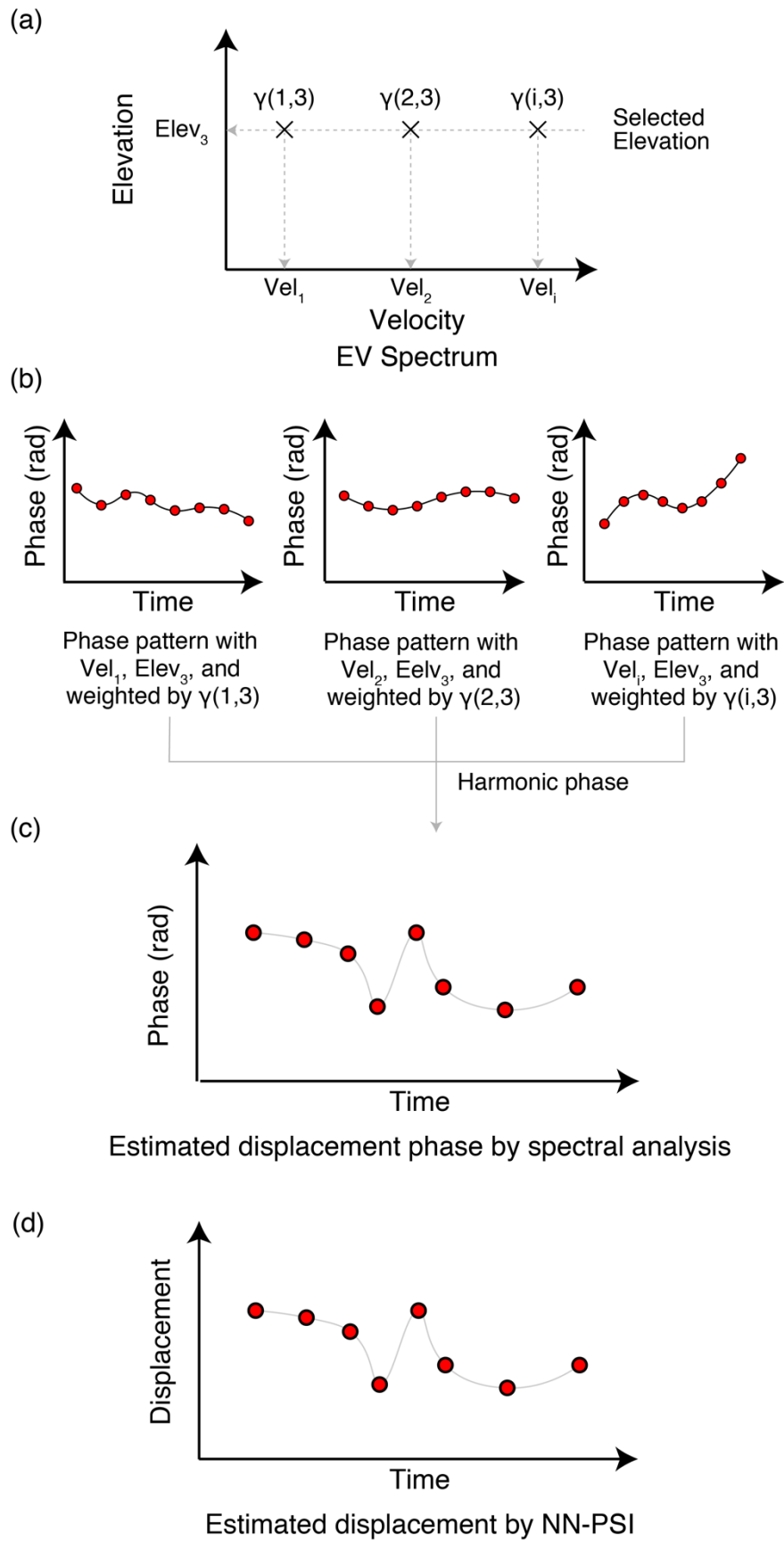


Figure 2.4: Process flow of the displacement estimation in NN-PSI.

NN-PSI は、マルチベースラインモデルのスペクトル解析法を応用し、EV スペクトラムで決定した高さにおけるすべての時系列コヒーレンスと変位速度の位相差を利用して変位推定する。NN-PSI の変位は、推定モデルを使用せずに算出されているため、非線形的な変位を含む、様々なタイプの変位に適用ができると考えられる。また、ConvPSI と異なり、NN-PSI は観測条件で考えられるすべての変位速度による位相差を計算しているため、この方法で求まる位相差は観測時間において連続的であると考えられる。そのため、ConvPSI では問題となる、 2π アンビギュイティによる不連続性を発生する大変位の推定においても、NN-PSI は不連続性を正確に再現し、その箇所を特定し補正を行うことができる。Figure 2.5 は、Figure 2.4c で示されている、変位量に変換する前の位相（ラジアン）を示している。Figure 2.5a が示すように、本来は黒線の傾向となる変位が、1 観測間の変位差の差が 2π 以上となる場合、不連続性が発生し位相がジャンプするような現象となる。Figure 2.5b では、不連続性の箇所を特定し、連続的な変位に補正している。この補正は単独ピクセルにおいて実施可能である。したがって、NN-PSI においては不連続性が発生する位相差となる変位を、単独のピクセルにて推定できることを示唆する。NN-PSI の変位推定の計算方法は、次節にて詳細を述べる。

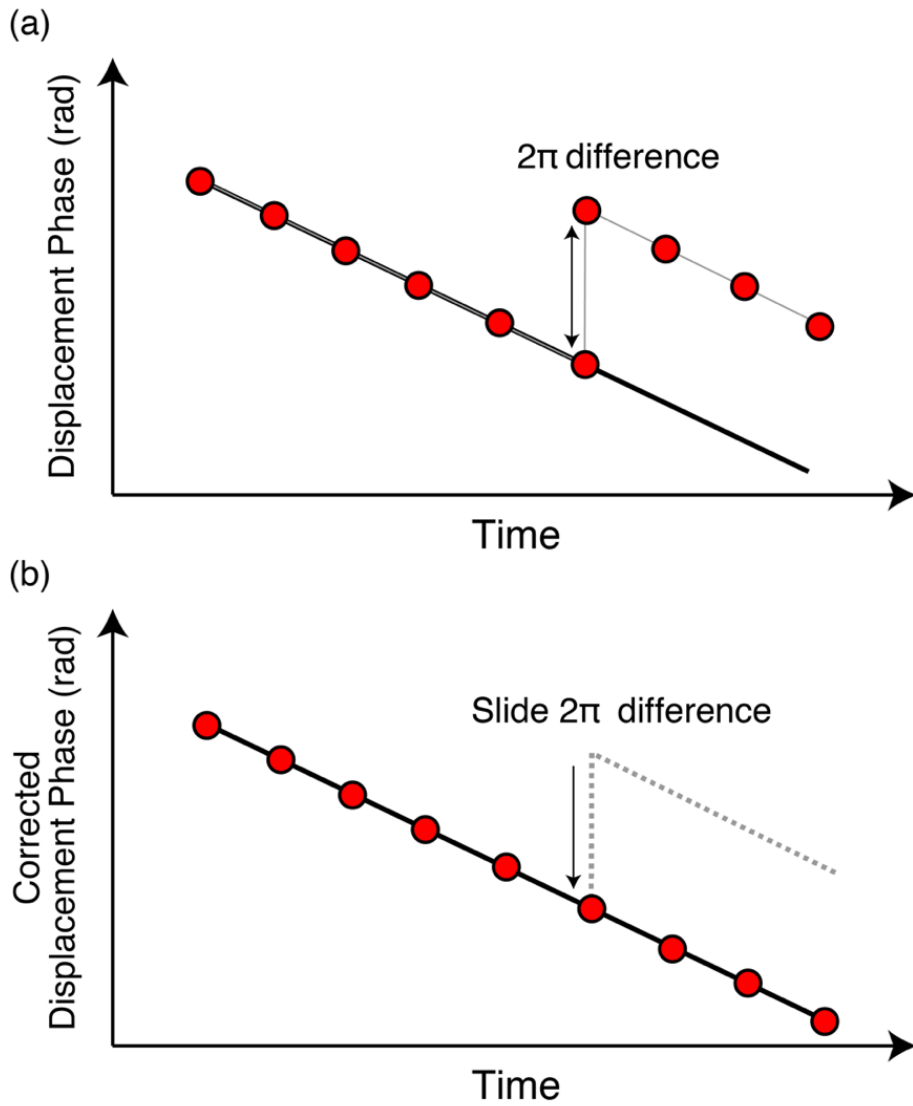


Figure 2.5: Concept to solve the offset from 2π ambiguity in NN-PSI. (a) shows the phase difference estimated by NN-PSI, and (b) shows the corrected phase. The black line in the plot is the actual displacement. The red points are the estimated displacement by NN-PSI.

2.3 NN-PSI の変位推定の計算手法

前節では、NN-PSI における改良点を概説したが、ここでは計算手法の詳細を述べる。改良点は、EV スペクトラムの高さの決定方法およびスペクトル解析を使用した変位推定法であるが、これらの改良点は、マルチベースラインモデル(Pasquali et al., 1995; Reigber et al., 2000)と深く関係するため、はじめにマルチベースラインモデルにおける係数やスペクトル解析法について解説する。その後、NN-PSI の EV スペクトラムにおける高さの決定方法と変位推定方法について述べる。

2.3.1 マルチベースラインモデル

SAR 観測においてセンサから地表面までの距離は、干渉ペアの処理により得られる位相差により計測可能である。マルチベースラインモデルでは、干渉ペアにより得られる位相差がどのような変化により発生しているのかをモデル化しており、このモデルの概念図を Figure 2.6 に示す。なお、衛星搭載型の SAR センサは面的に観測しているが、PSI においてはポイントターゲットで、ピクセル単位で変位解析するため、ここでのマルチベースラインモデルの説明は SAR 画像の中の 1 ピクセルにおける時系列の観測記録の説明とする。また、解析に使用する SAR 画像は、SLC と呼ばれる複素数の観測記録が提供されており、地表面からの後方散乱の強さを示す振幅情報と距離の変化を示す位相情報を持ち合わせる。複数の干渉処理により得られる位相差は、1 つのマスタ画像（参照画像）を決め、他の観測画像を空間的にすべてマスタ画像に位置合わせしているため、時系列（複数干渉ペア）における干渉画像の同一座標のピクセルを参照することにより、同じ地点における時系列の位相差を把握できる。また、PSI では干渉処理から変位推定まで、周辺ピクセルの情報を使用せずに解析を行うことができるため、これらの処理は複素数にて実施することが可能である。

Figure 2.6 では、センサ t_0 における地表面までのスラントレンジ距離 r を参照観測記録とし、 n 回目 ($n=0, 1, 2, \dots, N$) に観測したスラントレンジ距離を R_n とする。高さ s は、スラントレンジに対する高さとなり、マイクロ波のシグナルが反射する高さを表す。 R_n は、参照するスラントレンジ距離 r と地表面変位 d にて求まる。地表面変位 d は、ベースライン距離 b_n と比例関係である高さ s からの変位であり、 $d(s, t_n)$ と示される。 n 回目のスラントレンジ距離 R_n は、高さ s と地表面変位 d の総和となり、その関係を Eq 2.1 に示す(Lombardini et al., 2014)。

$$R_n = \frac{b_n}{r} s + d(s, t_n) \quad \text{Eq 2.1}$$

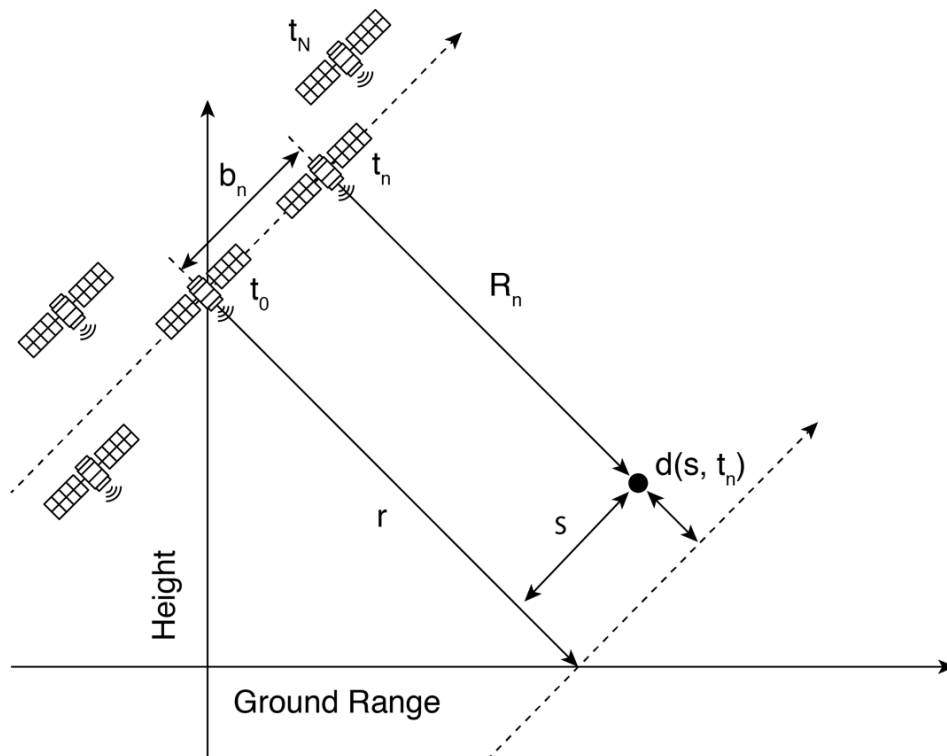


Figure 2.6: System geometry in the plane orthogonal to the orbit direction. Each satellite shows the positions of the acquisition antennas over repeated passes.

また、観測画像から干渉処理を行い、位相差を算出するための干渉ペアの決定方法について Figure 2.7 に示す。図は縦軸がベースライン距離 (Figure 2.6 の b_n に該当)、横軸が観測時間 (Figure 2.6 の t_n の観測日時) を示す。ここでの説明は、観測したセンサ t_0 をマスタ画像とし、それ以外の観測画像をすべてマスタ画像に位置合わせし、すべてのペアを干渉処理したこととする。そして、これらの干渉画像の同一座標の 1 ピクセルにおける時系列の位相差を使用することとする。

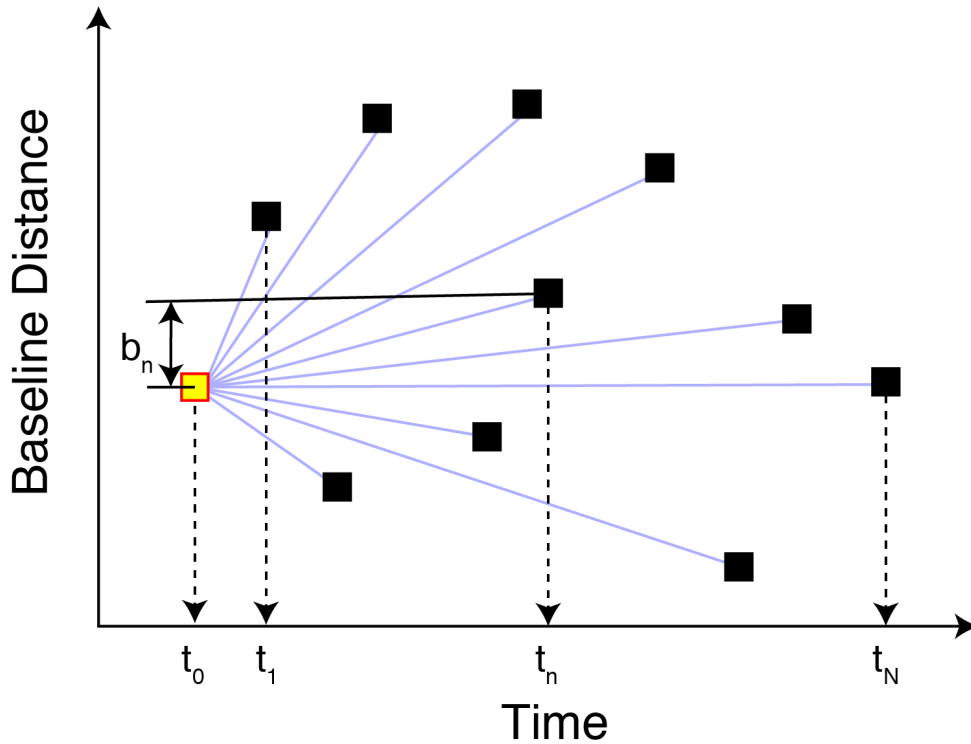


Figure 2.7: Relationship of the interferometric pairs between the observation time and baseline distance in Figure 2.6. The yellow and black point indicates master and slaves. The blue line shows the connection of the pair.

Eq 2.1 に示される R_n は、建物などの後方散乱により観測された高さ s 方向の距離と地表面変位 d における総和（アンサンブル）と考えられるため、センサの受信シグナル g_n は、高さ s と地表面変位 d で構成され、Eq 2.2 のように示される。マルチベースラインモデルにおける、Eq 2.2 以降の数式の説明は、Fornaro ら(2003, 2009)の研究を参考にする。

$$g_n = \int_{s_{\min}}^{s_{\max}} \gamma(s) \exp\left(j2\pi\xi_n s + j\frac{4\pi}{\lambda} d(s, t_n)\right) ds \quad \text{Eq 2.2}$$

ここで、 s_{\min} および s_{\max} は高さの最小値と最大値、 $\gamma(s)$ は高さに関連する後方散乱分布係数、 λ は SAR センサの波長、 ξ_n は $2b_n/(\lambda r)$ により定義される空間的なサンプリング周波数となり、衛星センサのベースライン距離、波長およびスラントレンジ距離より決定される。 n 回目のスラントレンジ距離には変位 $d(s, t_n)$ が含まれるため、変位量は位相差に変換される。次に、Eq 2.2 内の変位成分 $d(s, t_n)$ に注目する。 n 回目の変位量は Eq 2.3 にて示される。

$$\exp(j4\pi d(s, t_n)/\lambda) = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} a(s, v) \exp(j2\pi\eta_n v) dv \quad \text{Eq 2.3}$$

ここで、 v_{\min} および v_{\max} は、変位速度 v の最小値と最大値、 $a(s, v)$ は高さ s に関連する変位速度スペクトル分布係数、 η_n は $2t_n/\lambda$ により定義される時間的なサンプリング周波数となる。Eq 2.3 の右辺を Eq 2.2 の変位成分に代入すると、受信シグナルは高さと同変位の成分に構成され、Eq 2.4 のように示される。

$$g_n = \int_{s_{\min}}^{s_{\max}} \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} a_\gamma(s, v) \exp(j2\pi(\xi_n s + \eta_n v)) dv ds \quad \text{Eq 2.4}$$

ここで、Eq 2.2 の高さの後方散乱分布係数 $\gamma(s)$ と Eq 2.3 の変位速度スペクトル分布係数 $a(s, v)$ をかけ合わせた係数と同等となる $a_\gamma(s, v)$ は、高さ s と変位速度 v の領域 (EV スペクトラム) における後方散乱分布係数となる。Eq 2.4 より、観測期間におけるセンサの受信シグナル g_n は、高さと同変位速度のシグナルに後方散乱係数を適用し、それらをすべて総和することにより求めることができる。そして、後方散乱分布係数 $a_\gamma(s, v)$ を推定することにより、マイクロ波の受信シグナルから、反射地点における高さや変位速度が求まることを示す。

2.3.2 後方散乱分布係数の算出

マルチベースラインモデルにおける、後方散乱分布係数 $a_\gamma(s, v)$ の推定は、インバージョンを用いた、Beamforming、MUSIC および SVD といった手法が提案されている (Frey & Meier, 2010; Lombardini et al., 2013; Ma et al., 2015)。これらの手法は、後方散乱の高さを精密に推定する際に使用され、変位速度はないと仮定され計算している。しかし、インバージョンを使用する方法は計算コストが高く、面的な変位の把握が困難となるため、ここでは時系列コヒーレンスを後方散乱分布係数に割り当てる方法に着目する。Maio ら (2009) は、後方散乱分布係数 $a_\gamma(s, v)$ を時系列コヒーレンスにて代用し、高さの推定できることを示している。NN-PSI では、この手法を応用し、後方散乱分布係数 $a_\gamma(s, v)$ を時系列コヒーレンスにて代用し変位を推定する。

ここで、時系列コヒーレンスと SAR 干渉解析においてシグナルの干渉性を確認するコヒーレンスの相違について述べる。SAR 干渉解析で使用するコヒーレンスは、干渉処理による変位推定における信頼性を示す参考値として利用される。Eq 2.5 が示すように、このコヒーレンスは空間的に複数のシグナルを使用し干渉性を示すため、空間コヒーレンスと呼ばれる。

$$\gamma_{spatial} = \frac{|\sum z_1 z_2^*|}{\sqrt{\sum |z_1|^2 \sum |z_2|^2}} \quad \text{Eq 2.5}$$

ここで、 z_1 、 z_2 は観測シグナル（複素数）であり、 z_2^* は z_2 の複素共役を示す(Touzi et al., 1999; Zhao & Mallorqui, 2019)。一方、NN-PSI の計算過程で使用する時系列コヒーレンスは、複数の観測時間におけるシグナルを使用し、同じ位置の時系列の位相差における干渉性に注目する。Eq 2.6 は、Eq 2.5 の空間コヒーレンスを振幅と位相に分けて記述した式となり、 A_1 と A_2 、 ϕ_1 と ϕ_2 は、 z_1 と z_2 のそれぞれの振幅と位相を示している。時系列コヒーレンスは、Eq 2.6 の ϕ_1 に観測された時系列の位相差 ϕ_n を適用し、 ϕ_2 に観測条件（高さ s と変位速度 v ）から計算して求めた位相差（ $\xi_n s + \eta_n v$ ）を割り当て、振幅 A_1 、 A_2 の値は正規化して1となり、Eq 2.7 のように変形される。

$$\gamma_{spatial} = \left| \frac{\sum A_1 A_2 \exp(j\phi_1 - j\phi_2)}{\sum A_1 A_2} \right| \quad \text{Eq 2.6}$$

$$\gamma(s, v) = \left| \frac{\sum_{n=1}^N \exp(j\phi_n - j2\pi(\xi_n s + \eta_n v))}{N} \right| \quad \text{Eq 2.7}$$

ここで、 N は観測回数、 $\gamma(s, v)$ は高さと変位速度に関連する時系列コヒーレンスを示す。NN-PSI は、この時系列コヒーレンスをマルチベースラインモデルの後方散乱分布係数に代用する。

2.3.3 EV スペクトラムを用いた高さの決定

EV スペクトラムは時系列コヒーレンスを利用し、観測した位相差に含まれる、高さによる位相差を決定する。Figure 2.8 に示すとおり、EV スペクトラムは、高さの値を縦軸、変位速度の値を横軸に設定し、各セルはそれらの組み合わせの位相差と観測による位相差から求まる時系列コヒーレンスを表す。また、Figure 2.8 の右図では NN-PSI における高さの決定方法を示しており、縦軸の高さの範囲が s_{\min} から s_{\max} まで、横軸の変位速度の範囲が v_{\min} から v_{\max} を示し、EV スペクトラムの各高さ s における変位速度方向の時系列コヒーレンスを累積した値が最小値となる高さを s_0 とし、高さによる位相差を決定する。

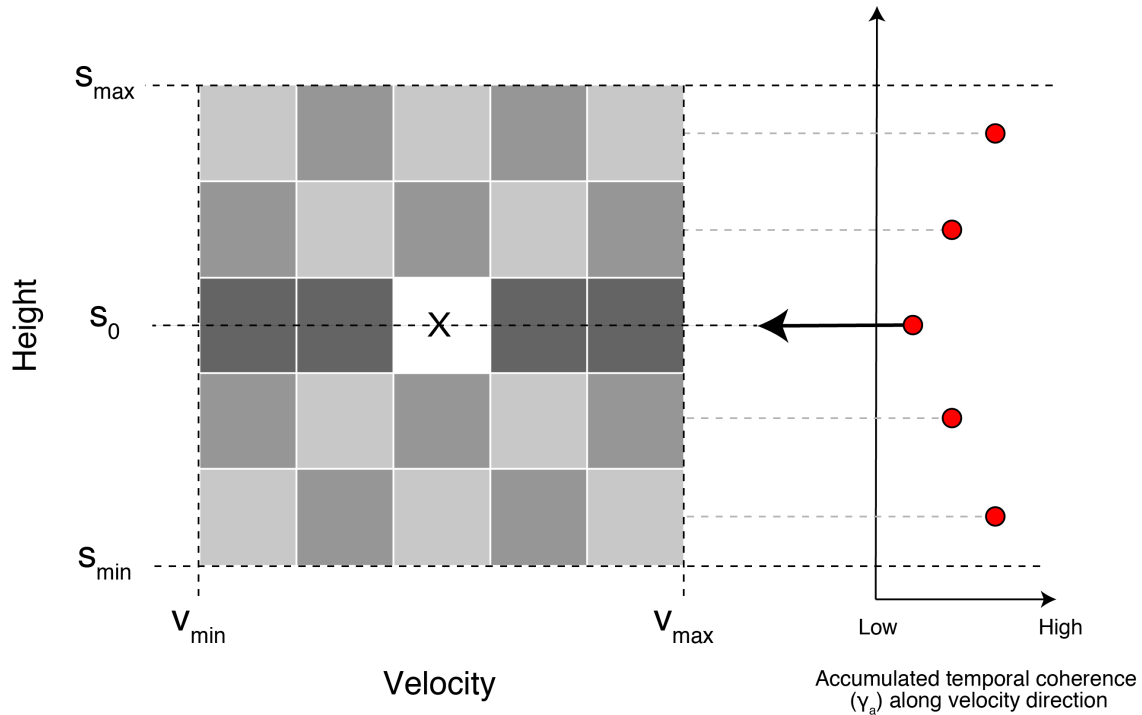


Figure 2.8: Example of the selection of height and velocity in the EV spectrum for NN-PSI. Each cell shows the temporal coherence. The right side of the figure shows the accumulated temporal coherence values along the height direction, and the height s_0 having the minimum value is decided to use the height in the displacement estimation.

また、NN-PSI の高さ s_0 を決定する計算方法を Eq 2.8 に示す。この式では、EV スペクトラムの各高さ s における v_{\min} から v_{\max} までの時系列コヒーレンス $\gamma(s, v)$ を総和し、 $\gamma_a(s)$ を求め、この値が最も低くなる高さを変位推定に使用する s_0 とする。

$$\gamma_a(s) = \sum_{v_{\min}}^{v_{\max}} \gamma(s, v) \quad \text{Eq 2.8}$$

$$s_0 = \underset{s_{\min} < s < s_{\max}}{\operatorname{argmin}} [\gamma_a(s)] \quad \text{Eq 2.9}$$

2.3.4 変位推定方法

EV スペクトラムを使用することにより、高さ s_0 が決定される。高さが確定すると変位速度方向の時系列コヒーレンスを求めることができ、Eq 2.4 は Eq 2.10 のように変形される。なお、「2.3.2 後方散乱分布係数の算出」で示したように、Eq 2.4 の後方散乱分布係数 $a_\gamma(s, v)$ は時系列コヒーレンス $\gamma(s_0, v)$ に置き変えている。

$$\exp(j4\pi d(s_0, t_n)/\lambda) = \int_{v_{min}}^{v_{max}} \gamma(s_0, v) \exp(j2\pi(\xi_n s_0 + \eta_n v)) dv \quad \text{Eq 2.10}$$

Eq 2.10 の右辺の変数は、 $\gamma(s_0, v)$ は EV スペクトラムで求まる時系列コヒーレンスの値、 $\xi_n s_0$ はベースライン距離とスラントレンジ距離の値、 $\eta_n v$ は観測間隔の値となり、すべて既知となるため、左辺の変位速度による位相差を含むシグナル $\exp(j4\pi d(s_0, t_n)/\lambda)$ を求めることが可能となる。Eq 2.10 により求めたシグナルは複素数であるため、Eq 2.11 により位相差を求める。

$$\varphi_n = 4\pi d(s_0, t_n)/\lambda \quad \text{Eq 2.11}$$

ここで、 φ_n は変位速度による位相差を示す。また、この位相差 φ は $-\pi$ から π の範囲にラップされている。

Eq 2.11 が示すように、NN-PSI において 2π アンビギュイティにより不連続性が発生する位相差となる大変位を推定する場合は、計算過程の位相差において不連続性が発生する。しかし、ConvPSI と異なり、ここで推定された位相差は、すべての変位速度の位相差によるシグナルを時系列コヒーレンスにより重み付けし、重ね合わせて求めているため、観測期間においては連続的な変位となる。したがって、隣接する観測時間の位相差の差分が 2π 以上となった場合、 2π アンビギュイティによる不連続性と判断し、Eq 2.12 と Eq 2.13 が示すように連続的な変位となるように補正する。位相差 φ_n は、NN-PSI により算出した補正前の変位速度による位相差 ($-\pi$ から π) であり、Eq 2.12 が示すように、時間軸で隣接する位相差を差し引いた値が 2π 以上の場合、不連続性が発生した回数 k としてカウントする。そして、時系列の位相差の補正をするために不連続性が発生した回数 k と 2π を掛け合わせた数値を、NN-PSI の推定から求めた位相差 φ_n に足し合わせ、観測期間において連続的な位相差 Φ_n を求める。

$$k_n = \sum_{n=1} \text{Round} \left[\frac{\varphi_n - \varphi_{n-1}}{2\pi} \right] \quad \text{Eq 2.12}$$

$$\Phi_n = \varphi_n + 2\pi k_n \quad \text{Eq 2.13}$$

NN-PSI の計算過程の最後に、不連続性を解決した位相差 Φ_n に観測センサの波長を用いて、Eq 2.14 により変位量 d_n を求める。

$$d_n = \frac{\Phi_n \lambda}{4\pi} \quad \text{Eq 2.14}$$

ここで、 λ は観測に用いた SAR センサの波長を示す。この式により、NN-PSI の変位推定における時系列の変位量が求まる。

2.3.5 推定における計算範囲

NN-PSI による計算では、Eq 2.10 が示すように、EV スペクトラムの s_{\min} から s_{\max} から s_0 を求め、 v_{\min} から v_{\max} を利用して時系列の変位量を求めるため、これらの変数の値を決める必要がある。Figure 2.9 に EV スペクトラムの概念図を示す。図が示すように、EV スペクトラムでは時系列コヒーレンスの分布のパターンが繰り返される。これは高さと変位速度のアンビギュイティによるものである。

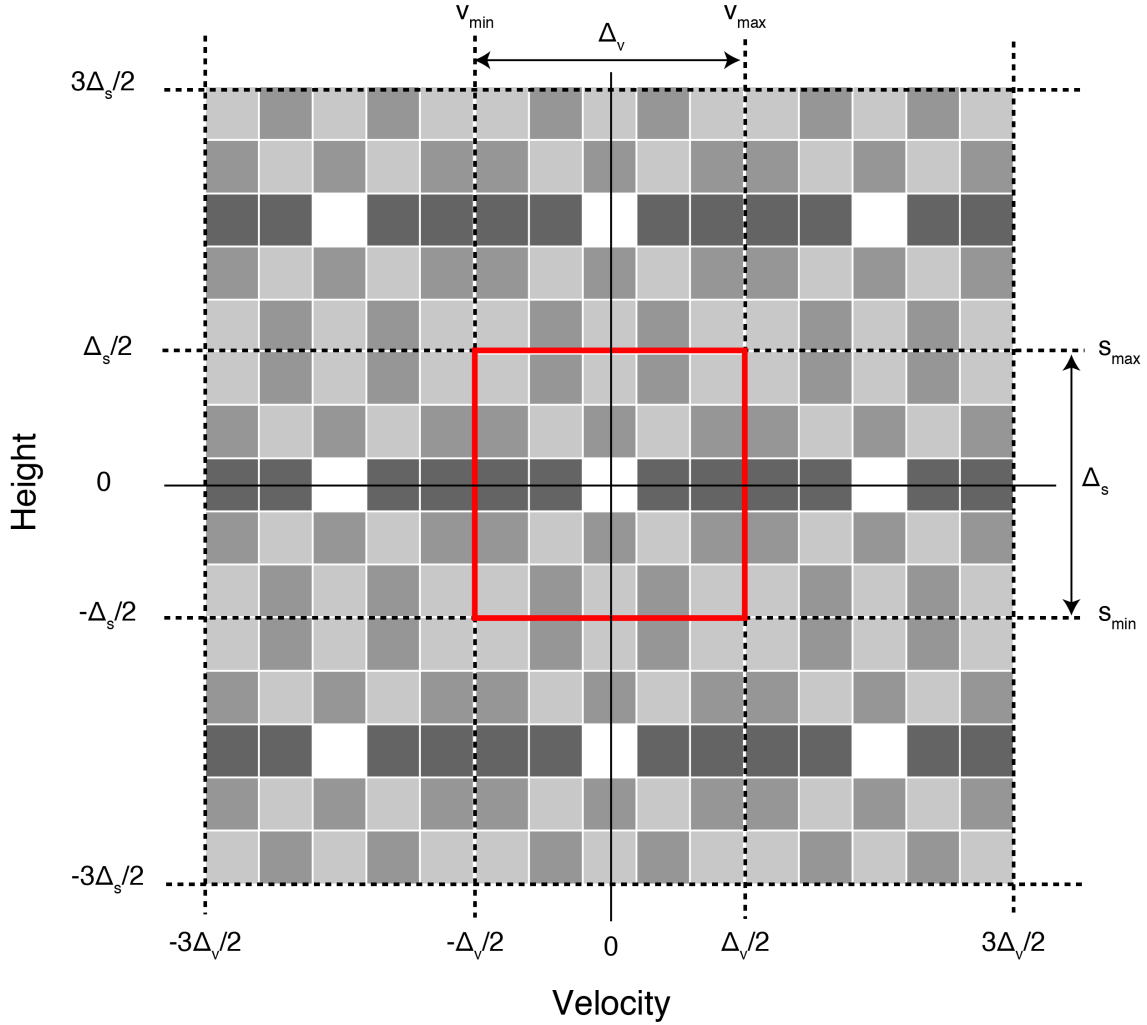


Figure 2.9: Range of the height and velocity ambiguity. The red rectangle shows the appropriate calculation range, corresponding to the EV spectrum used for NN-PSI. The grey colors indicate the value of the temporal coherence.

高さアンビギュイティ Δ_s と変位速度アンビギュイティ Δ_v は、Eq 2.15 と Eq 2.16 の計算式にて求まる (Lombardini, 2005)。

$$\Delta_s = \lambda r / 2\Delta_b \quad \text{Eq 2.15}$$

$$\Delta_v = \lambda / 2\Delta_t \quad \text{Eq 2.16}$$

ここで、 λ は観測センサの波長、 r はスラントレンジ距離（センサと地表面までの距離）、 Δ_b は観測期間におけるベースライン距離の平均、 Δ_t は観測間隔の平均となる。これらのアンビギュイティより広い範囲で EV スペクトラムを設定した場合は、時系列コヒーレンスの分布が繰り返される

ため、NN-PSI における EV スペクトラムの高さと変位速度の範囲は、 Δ_s と Δ_v でよい。なお、基準となる高さと変位速度は 0 m と 0 mm/year とし、高さの最小値を $-\Delta_s/2$ 、最大値を $\Delta_s/2$ 、変位速度の最小値を $-\Delta_v/2$ 、最大値 $\Delta_v/2$ とする。Table 2.1 に EV スペクトラムの計算範囲についてまとめる。

Table 2.1: Ranges of the height and velocity for EV spectrum.

Parameters	Value
Height range (s_{min}, s_{max})	$-\Delta_s/2$ to $\Delta_s/2$
Velocity range (v_{min}, v_{max})	$-\Delta_v/2$ to $\Delta_v/2$

2.3.6 処理フロー

NN-PSI における変位推定の詳細を踏まえ、その処理フローを Figure 2.10 に示す。図中には、ConvPSI の処理フローも追記し、NN-PSI の処理手順との相違を明確にする。

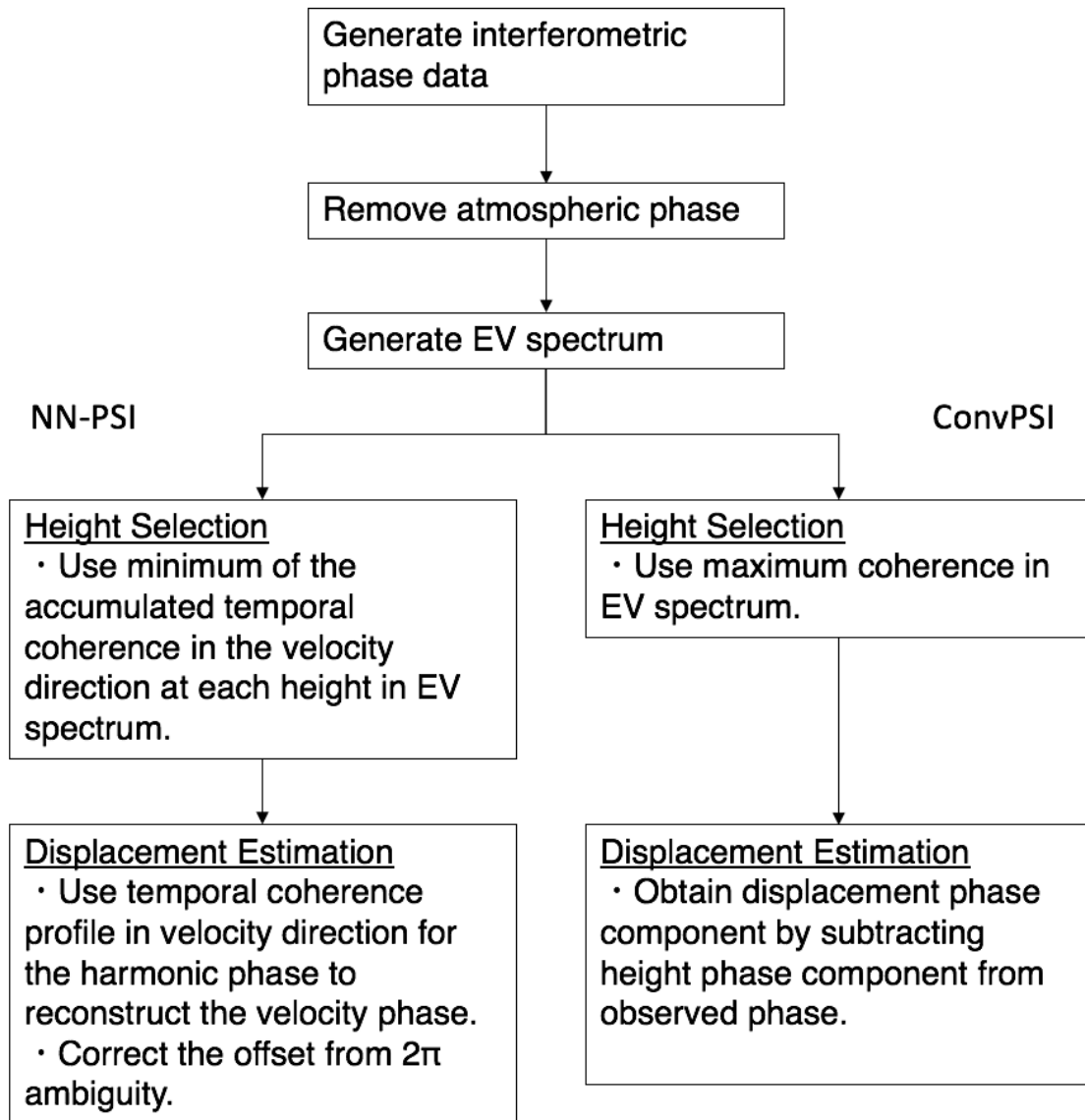


Figure 2.10: Flowchart of NN-PSI and ConvPSI.

2.3.7 既往の PSI における変位推定の計算手法

ここまで NN-PSI の計算手法について述べたが、後続の章において ConvPSI の結果を示すため、その計算手法について解説する。Figure 2.10 の処理フローで示されている通り、ConvPSI の変位推定の計算フローは、NN-PSI とほぼ同じであるが、EV スペクトラムでの高さの決定方法と変位推定の方法が異なる。ConvPSI の高さの決定方法は、Eq 2.17 が示すように高さ s_0 は、EV スペクトラム内のすべての時系列コヒーレンスの最大値を持つ高さにて決定される。

$$s_0 = \underset{s,v}{\operatorname{argmax}}[\gamma(s, v)] \quad \text{Eq 2.17}$$

ここで、 γ は時系列コヒーレンスを示す。Figure 2.8 の EV スペクトラムの中央の点が最も時系列コヒーレンスが高くなっているが、この時系列コヒーレンスが示す高さ s_0 が、ConvPSI の変位推定に使用される。

EV スペクトラムにて高さを決定し、観測したシグナルから高さの位相差によるシグナルを差し引くことにより、変位速度による位相差を含むシグナルを求める (Eq 2.18)。

$$\exp(j4\pi d(s_0, t_n)) = \exp(j\phi_n - j2\pi(\xi_n s_0)) \quad \text{Eq 2.18}$$

ここで、 ϕ_n は観測画像を干渉処理して求めた位相差、 $\xi_n s_0$ は EV スペクトラムにより決定した高さによる位相差である。Eq 2.18 により算出された地表面変位を含むシグナルは、Eq 2.11 により位相差 ϕ_n となり、Eq 2.19 により変位量 d_n が求まる。

$$d_n = \frac{\phi_n \lambda}{4\pi} \quad \text{Eq 2.19}$$

ここで、 λ は観測に用いた SAR センサの波長を示す。なお、これ以降の ConvPSI における変位推定の結果は、Eq 2.18 と Eq 2.19 により求めたものを使用する。

2.4 まとめ

第2章では、ConvPSIにおける変位推定の問題点を明確にした。ConvPSIは、位相差より変位推定するため、推定範囲は 2π アンビギュイティにより制限される。この問題は、周辺ピクセルを利用する手法により解決されるが、都市域のようにレイオーバとなるエリアでは適用できない。また、 2π アンビギュイティにより不連続性が発生する位相差を推定モデルにて解決する方法も提案されているが、先験的パラメータが必要なため汎用的に適用できない。これらのことより、都市域の 2π アンビギュイティによる変位推定の問題は、単独ピクセルで処理が完結し、推定モデルを使用しない推定方法が必要となることを示した。

ConvPSIの改良法としてNN-PSIを提案した。改良した点は、EVスペクトラムを使用した高さの決定方法と変位推定方法の二点である。ConvPSIの高さの決定方法では、非線形的な変位では変位速度が複雑なパターンとなり正しく高さが求まらないため、各高さの変位速度方向の時系列コヒーレンスをすべて累積し、その最小値を使用する手法を示した。変位の推定方法は、マルチベースラインのスペクトル解析法を拡張し、EVスペクトラムにおける変位速度方向における時系列コヒーレンスにて、変位速度の位相差を重み付けしながら重ね合わせることにより、変位推定する方法を提案した。この推定方法は観測条件で考えられる、すべての変位速度の位相差を使用して推定しているため、不連続性が発生した場合も変位の大きさにより補正することが可能となる。これらの改良により、ConvPSIの変位推定における 2π アンビギュイティの問題への解決方法を示した。そして、NN-PSIを適用することにより、起伏の変化が大きくレイオーバとなるエリアにおいて、 2π アンビギュイティによる不連続性が発生する大変位を推定できる可能性を示した。

NN-PSIは、EVスペクトラムの高さと変位速度の時系列コヒーレンスをすべて利用して、推定計算を行うため、その設定範囲に大きく影響を受ける。NN-PSIの計算範囲は、観測条件から求まる高さと変位速度アンビギュイティの値により決定することとした。また、NN-PSIの変位推定までの全体的な処理フローについても整理し、ConvPSIの計算方法との相違も示した。

2 章の参考文献

- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5), 2202–2212. <https://doi.org/10.1109/36.868878>
- Fornaro, G., Reale, D., & Serafino, F. (2009). Four-dimensional SAR imaging for height estimation and monitoring of single and double scatterers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(1), 224–237. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2000837>
- Fornaro, G., Serafino, F., & Soldovieri, F. (2003). Three-dimensional focusing with multipass SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(3), 507–517. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.809934>
- Frey, O., & Meier, E. (2010). 3D SAR imaging of a forest using airborne MB-SAR data at L- and P-band: Data processing and analysis. *Proceedings of the European Conference on Synthetic Aperture Radar, EUSAR*, 49(10), 166–169.
- Lombardini, F. (2005). Differential tomography: A new framework for SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(1), 37–44. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.838371>
- Lombardini, F., Cai, F., & Pasculli, D. (2013). Spaceborne 3-D SAR tomography for analyzing garbled urban scenarios: Single-look superresolution advances and experiments. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(2), 960–968. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2211339>
- Lombardini, F., Paucullo, A., Fornaro, G., Reale, D., & Viviani, F. (2014). Tomographic Processing of Interferometric SAR Data. *IEEE Signal Processing Magazine*, 50(July), 41–50.
- Ma, P., Lin, H., Lan, H., & Chen, F. (2015). Multi-dimensional SAR tomography for monitoring the deformation of newly built concrete buildings. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 106, 118–128. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.04.012>
- Maio, A. De, Member, S., Fornaro, G., Member, S., & Paucullo, A. (2009). Detection of Single Scatterers in Multidimensional SAR Imaging. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(2), 2284–2297. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2011632>
- Pasquali, P., Prati, C., Rocca, F., Seymour, M., Fortuny, J., Ohlmer, E., & Sieber, A. J. (1995). A 3-D SAR Experiment with EMSL Data. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 0(2), 784–786. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1995.520585>
- Reigber, A., Moreira, A., & Member, S. (2000). First Demonstration of Airborne SAR Tomography Using Multibaseline L-Band Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5), 2142–2152.
- Touzi, R., Lopes, A., Bruniquel, J., & Vachon, P. W. (1999). Coherence estimation for SAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(1 PART 1), 135–149. <https://doi.org/10.1109/36.739146>

Zhao, F., & Mallorqui, J. J. (2019). A Temporal Phase Coherence Estimation Algorithm and Its Application on DInSAR Pixel Selection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(11), 8350–8361. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2920536>

第 3 章

数値シミュレーションによる NN-PSI の適用範囲の評価

3.1 はじめに

第2章にて提案した NN-PSI について、三つの観点から評価する。一つ目は、NN-PSI が推定できる変位タイプの評価、二つ目は NN-PSI の変位推定における内部パラメータの評価、三つ目は観測条件が与える NN-PSI への影響の評価である。

NN-PSI の変位推定は、推定モデルを使用しないため、非線形的な変位を含め、様々なタイプの変位に適用可能と考えられる。そこで、数値シミュレーションにて任意の変位を作成し、NN-PSI の推定精度を把握し、適用可能な変位タイプについて評価する。また、ConvPSI の推定も実施し、NN-PSI による改善点を把握し非線形的な変位の推定における有効性を定量的に評価する。

NN-PSI は、EV スペクトラムの変位速度方向の範囲を既往手法よりも大きく設定するため、計算コストが大きい。そこで、NN-PSI の計算範囲やステップ数に関するパラメータを変更し、変位推定に与える影響を分析する。数値シミュレーションを使用し、EV スペクトラムの範囲や解像度を変更し、推定精度を把握し、計算コストの低減が可能かを把握する。

衛星 SAR の観測記録を用いる NN-PSI の推定精度は、観測期間、回数、および間隔により変化する。特に NN-PSI は、観測記録の複素数をなるべく加工せず計算しており、衛星の観測条件が変位推定に直接影響を与えられられるため、その影響について評価する。また、ConvPSI において、複数の干渉ペアにおけるベースライン距離の組み合わせにより、変位推定の精度に影響を与える研究事例があり、ベースライン距離の影響についても評価し、NN-PSI を適用するために必要な観測条件を示す。

3.2 数値シミュレーション

3.2.1 評価方法

NN-PSI の変位推定に関する評価のフローを Figure 3.1 に示す。はじめに、数値シミュレーションにおいて、センサーの高度や観測間隔などの SAR 衛星の観測条件を設定した。変位は数値計算により作成し、観測条件のパラメータを使用し、変位を位相差へ変換した。この位相差は、NN-PSI の変位推定の入力値とした。作成した変位と NN-PSI により推定した変位を定量的に比較するため、二乗平均平方根エラー (RMSE : Root Mean Square Error) を算出した。RMSE は、すべての観測期間における変位推定を使用した。

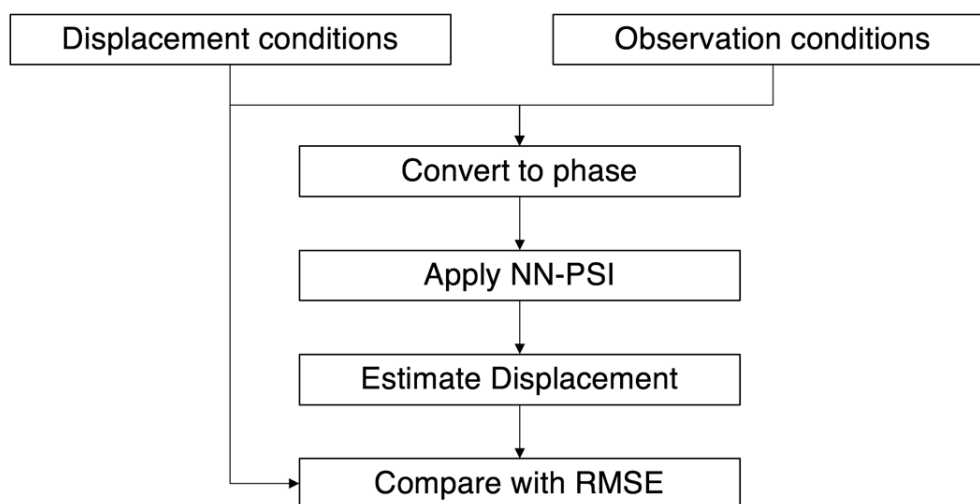


Figure 3.1: Process flow for the evaluation of NN-PSI with the simulation.

3.2.2 観測条件の設定

本評価での観測条件を Table 3.1 に示す。これらの観測条件は、数値計算で作成された変位から位相差を求める際に使用される。また、これらのパラメータの数値は、実際の SAR 衛星の運用に近いものを設定している。

Table 3.1: Observation conditions for the simulation.

Parameters	Values
Slant range distance	700 km
Wavelength	1 λ
Incidence angle	45 degrees
Baseline variance	$\pm 6\%$
Backscatter coefficient	5 dB
Number of observations	51
Observation interval	10 days
Total observation period (T)	500 days
Height of scattering point	0 m

数値シミュレーション内で設定している、干渉ペアの決定方法を Figure 3.2 に示す。観測期間の中心に観測された SAR 画像をマスタに設定した。残りの観測画像は、すべてマスタを参照し、干渉処理により位相差を計算する。この数値シミュレーションでは、干渉処理による位相差を数値計算により作成する。数値計算による位相差の作成方法は次項にて詳細を述べる。

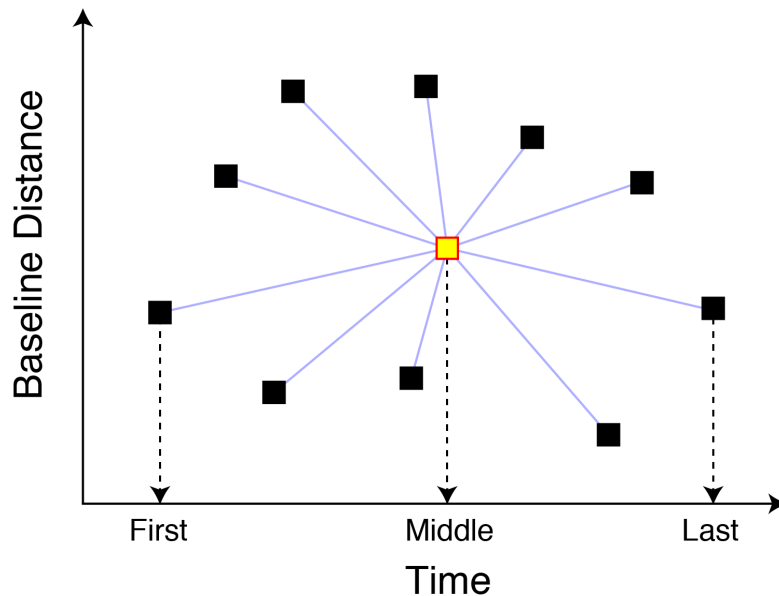


Figure 3.2: Relation between time and baseline distance for the interferometric pairs in the simulation. The yellow point, black points are the master image and slave images respectively. The blue lines show the connections of pairs. The master is decided at the middle of the observation period.

各干渉ペアのベースライン距離は、乱数を使用しばらつきが含まれるように設定した。Table 3.1 のベースライン距離の項目で示されているパーセンテージは、干渉処理における臨界ベースライン距離と干渉ペアのベースライン距離との割合である。臨界ベースライン距離 B_{cr} は、Eq 3.1 により求まり、

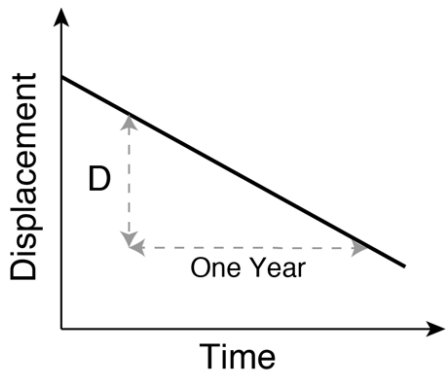
$$B_{cr} = \frac{\lambda R \tan \theta}{2R_r} \quad \text{Eq 3.1}$$

λ はセンサの波長、 R はスラントレンジ距離、 θ は入射角、 R_r はレンジ方向の 1 ピクセルあたりの空間的な解像度となる (Zebker & Villasenor, 1992)。

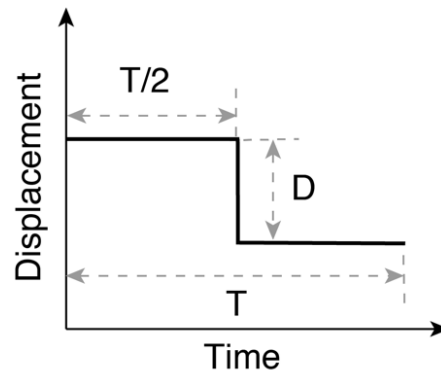
3.2.3 変位の条件

数値シミュレーションにおいて、NN-PSI にて推定する変位のタイプは、(1)線形的な変位、(2)ステップ変位、(3)指数関数的な変位、(4)周期的な変位の 4 種類を定義した。それぞれの定義した変位の概念図を Figure 3.3 に示す。

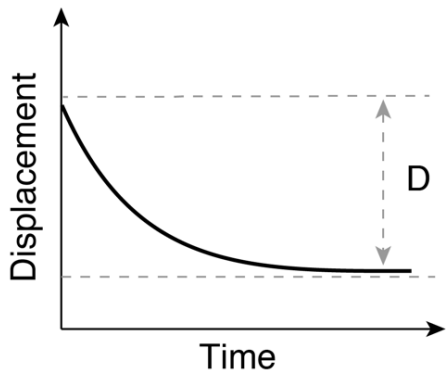
- (1) 線形的な変位は、ConvPSI で推定できる変位を想定した。Figure 3.3a が示すように、与えられた観測期間中は一定的な変位量で沈下もしくは隆起する。数値シミュレーションでは、年間の変位量 D を与え変位を作成する。
- (2) ステップ変位は、地震のような大規模で短期間に発生する変位を想定した。与えられた観測期間中に一度だけ沈下もしくは隆起する。この変位は、ステップ関数により変位を定義した。Figure 3.3b が示すように、この変位は全観測期間 T の中央にて変位量 D を与え、変位を設定した。
- (3) 指数関数的な変位は、地滑りのように初動の変位量が大きく、観測時間の経過とともに変位量が小さくなる変位を想定し、指数関数により変位を定義した。Figure 3.3c が示すように、指数関数を使用し 100 日間で変位量 D となるように変位を設定した。
- (4) 周期的な変位は、与えられた期間中に変位パターンが繰り返される変位を想定し、サイン関数により変位を定義した。Figure 3.3d が示すように、周期的な変位のピークピーク値を変位量 D と設定し、周期 Ft を与え変位を設定した。



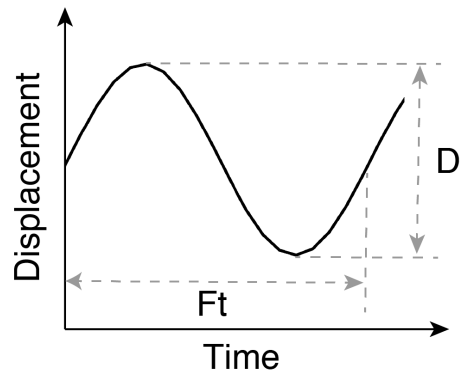
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3.3: Simulated displacements for the evaluation. (a-d) shows linear, step, exponential, and sinusoidal displacement respectively.

3.3 異なる変位タイプへの適用

NN-PSI が適用可能な変位タイプを把握するため、ConvPSI の推定方法で問題となる非線形的な変位に対して、NN-PSI を適用し改善点を把握する必要がある。この評価を行うにあたり、すべての条件における観測記録の入手は難しいため、数値シミュレーションにより任意の変位を作成し、NN-PSI にて変位推定する。NN-PSI の推定結果は、数値シミュレーションにて作成した変位と比較することで精度を把握することができる。様々な条件で数値シミュレーションを行い、各条件での推定精度を把握し、NN-PSI が適用可能な変位のタイプを評価する。

3.3.1 数値シミュレーションの設定

4つの変位タイプの変位量 D を変更し、数値シミュレーションにより作成した変位に NN-PSI を適用する。RMSE を算出し、変位タイプによる推定精度を把握する。観測条件で与えているベースライン距離は乱数にて定義されているため、NN-PSI の推定を各変位量 D で 50 回繰り返し、RMSE の平均値と標準偏差にて評価する。また、ConvPSI も適用し、NN-PSI と同様に RMSE を算出した。

各変位タイプに設定する変位量 D の範囲は、変位タイプにより異なる。時系列干渉解析法において、1 観測期間での最大変位量は $1/4$ 波長(λ) となり (Wasowski & Bovenga, 2014)、それぞれの変位タイプにおいて、1 観測期間の変位量が $1/4$ 波長(λ) 以上となる変位量 D の値を求める。これらの値に基づき、数値シミュレーションで与える変位量 D の範囲を決定した。計算ステップについては、変位量 D の範囲に合わせて決定した。数値シミュレーションにおける、1 観測期間の変位量、変位量 D の範囲および計算ステップを Table 3.2 に示す。なお周期的な変位の周期 Ft は半年とした。

Table 3.2: Displacement conditions for the different displacement type.

Displacement type	The maximum amount of D based on $1/4 \lambda$ in one observation interval.	Range of D	Calculation step of D
Linear	9λ	IDI: 0 to 10λ	0.5λ
Step	0.25λ	IDI: 0 to 0.3λ	0.05λ
Exponential	1.4λ	IDI: 0 to 2λ	0.1λ
Sinusoidal	1.5λ	IDI: 0 to 2λ	0.1λ

3.3.2 結果

「線形的な変位」、「ステップ変位」、「指数関数的な変位」および「周期的な変位」における、数値シミュレーションの結果を述べる。

i 線形的な変位

線形的な変位における、変位量 D と RMSE の関係を Figure 3.4 に示す。線形的な変位では、変位量 D が 9λ 以下の場合には、RMSE は 0λ となり、数値シミュレーションで作成した変位を再現した。線形的な変位については、繰り返し計算を行なったが、NN-PSI と ConvPSI とともに、RMSE にばらつきがなかった。これは、線形的な変位ではベースライン距離が観測ごとに多少変化しても、推定精度に影響がないことを示す。ConvPSI は、変位量 D が増加すると RMSE もそれに伴い増加した。変位量 D が 9λ を超えると、NN-PSI の RMSE が ConvPSI より大きくなった。このことより、NN-PSI は 1 観測期間における最大変位量の範囲内では、線形的な変位を推定可能であり、ConvPSI の推定結果より精度が向上した。

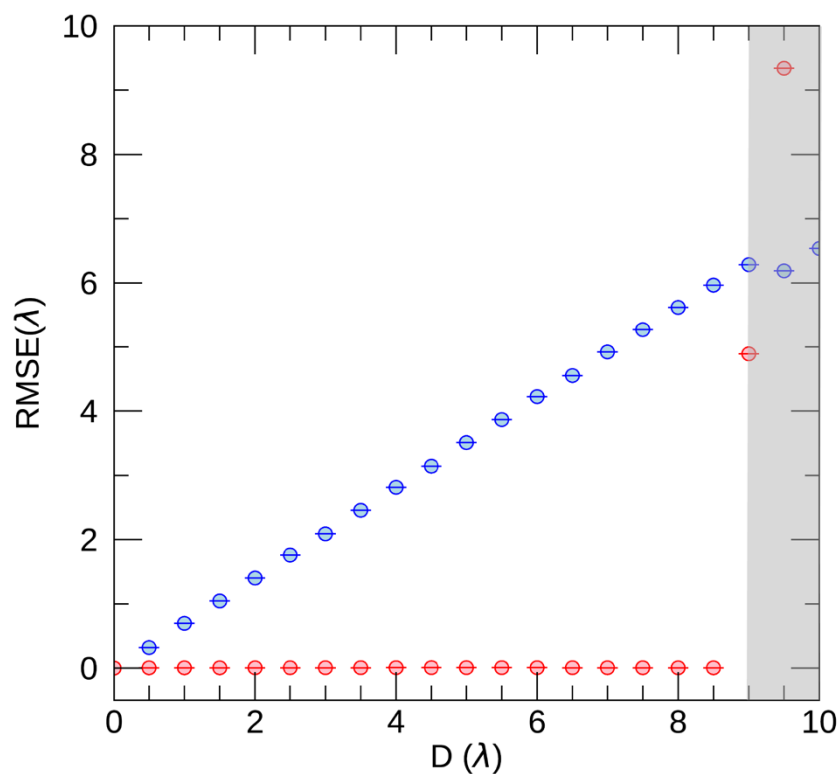
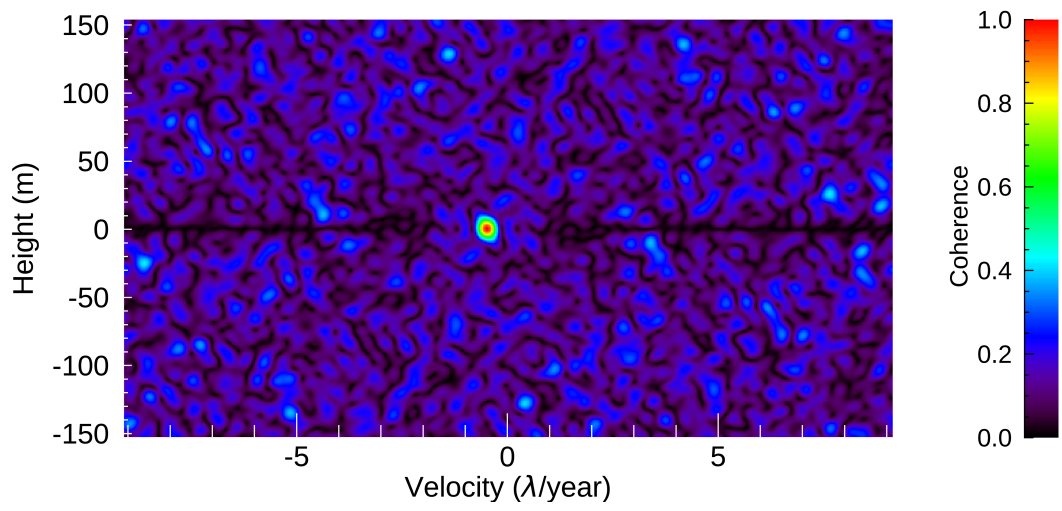


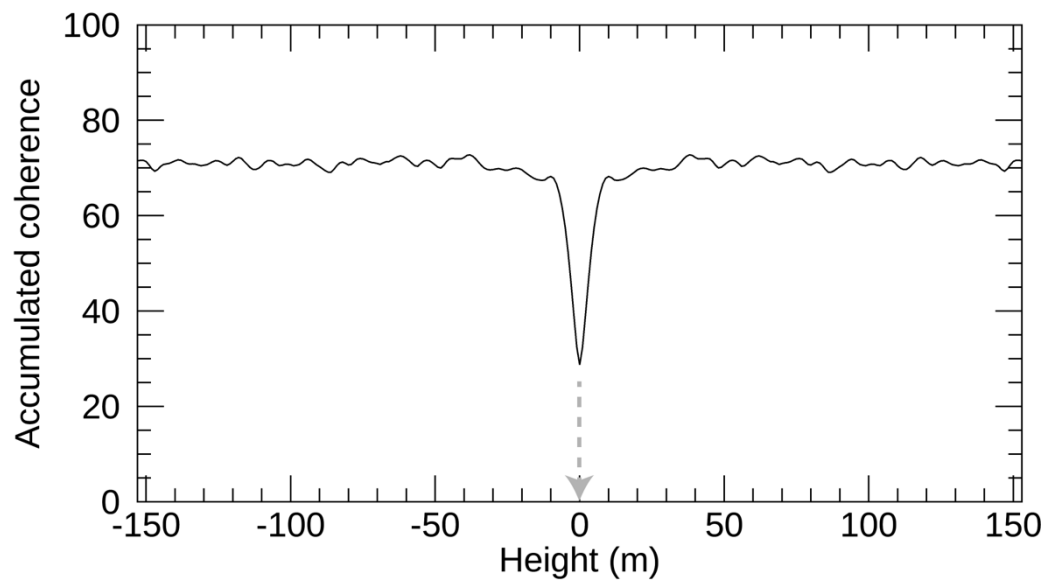
Figure 3.4: Correlation between D and RMSE by the simulation with the linear displacement. The red and blue point show NN-PSI and ConvPSI. The bar in the point shows the standard deviation. The gray area indicates to exceed the velocity ambiguity.

Figure 3.4 において、NN-PSI の推定精度が ConvPSI より高い結果と低い結果の詳細を、それぞれ Figure 3.5 と Figure 3.6 に示す。Figure 3.5 は、変位量 D を 0.5λ に設定した結果を示す。Figure 3.5a の EV スペクトラムは、単独のメインローブがあり、その位置は高さと変位速度がそれぞれ 0 m と $-0.51\lambda/\text{year}$ となった。Figure 3.5b は、EV スペクトラム内の各高さの変位速度方向の時系列コヒーレンスを累積したプロファイルを示す。このプロファイルの最小値は 0 m となり、EV スペクトラムにより決定した高さは、観測条件で設定した高さを示した。Figure 3.5c は、決定した高さの時系列コヒーレンスのプロファイルを示し、そのピーク値が示す変位速度は変位量 D と同じ値を示した。Figure 3.5d は、NN-PSI と ConvPSI の推定結果を示し、NN-PSI は設定期間において線形的な変位を示し、ConvPSI は 360 日あたりで変位が大きく隆起し、不連続性が見られる変位となった。

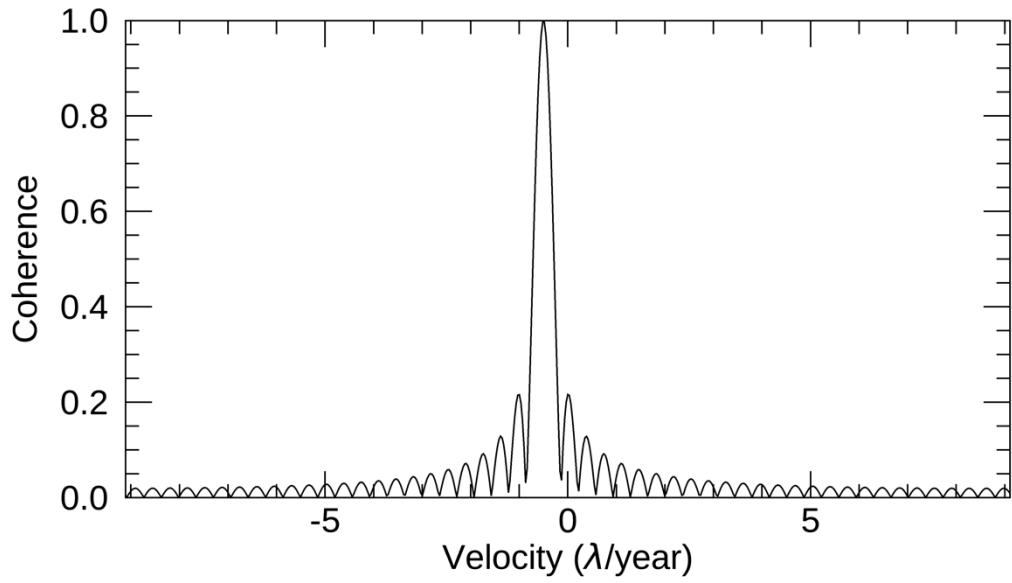
Figure 3.6 は、変位量 D を 10λ に設定した結果を示す。Figure 3.6a の EV スペクトラムは、単独のメインローブがあり、その位置は高さと変位速度がそれぞれ 0 m と $8.2\lambda/\text{year}$ となった。Figure 3.6b は、EV スペクトラム内の各高さの変位速度方向の時系列コヒーレンスを累積したプロファイルを示す。このプロファイルの最小値は 0 m となり、EV スペクトラムにより決定した高さは、観測条件で設定した高さを示した。Figure 3.6c は、決定した高さの時系列コヒーレンスのプロファイルを示し、そのピーク値が示す変位速度は、変位量 D と異なる値を示した。また、作成した変位は負の方向であるが、ピーク値が示す変位速度は正の方向であった。Figure 3.6d は、NN-PSI が数値シミュレーションと大きく異なる結果を示している。また、ConvPSI は 2π アンビギティの影響により、NN-PSI の推定結果と比較するとほぼ平坦な変位となった。



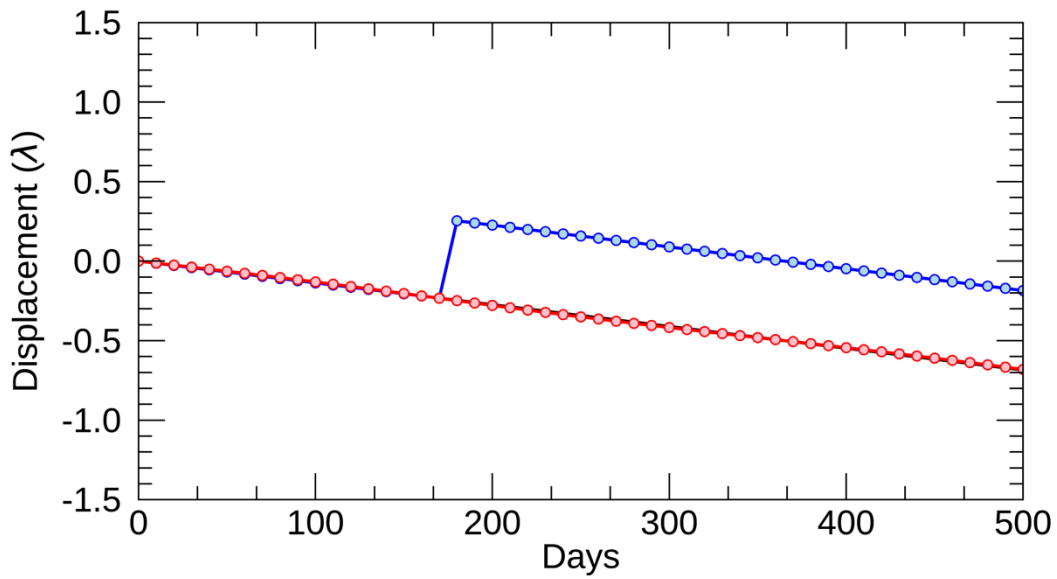
(a)



(b)

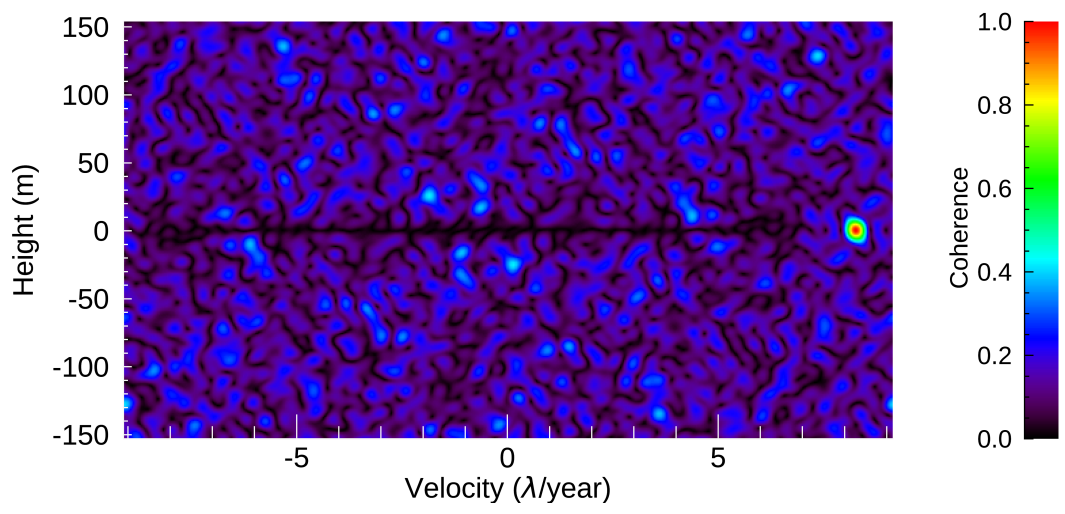


(c)

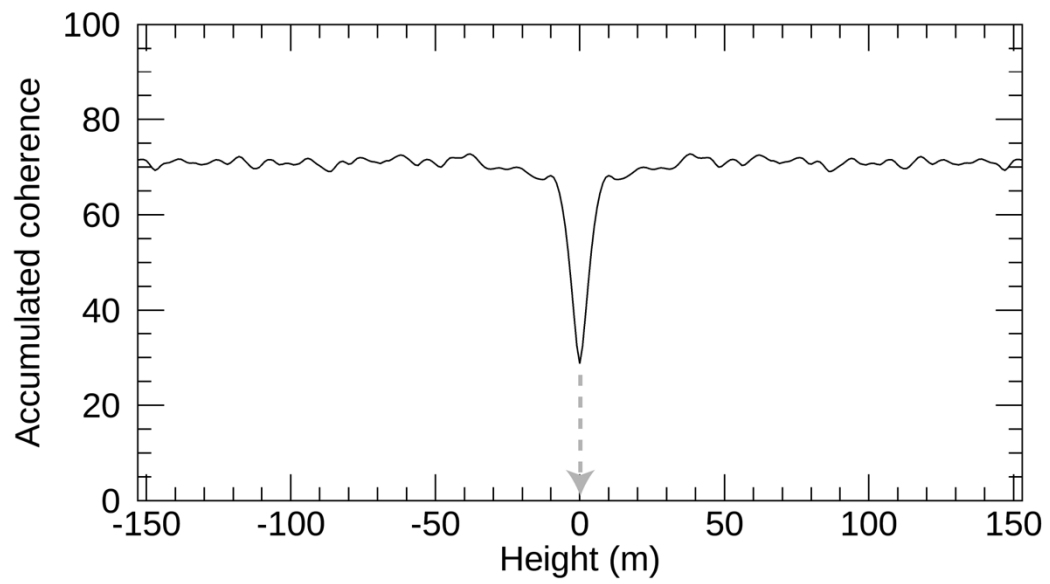


(d)

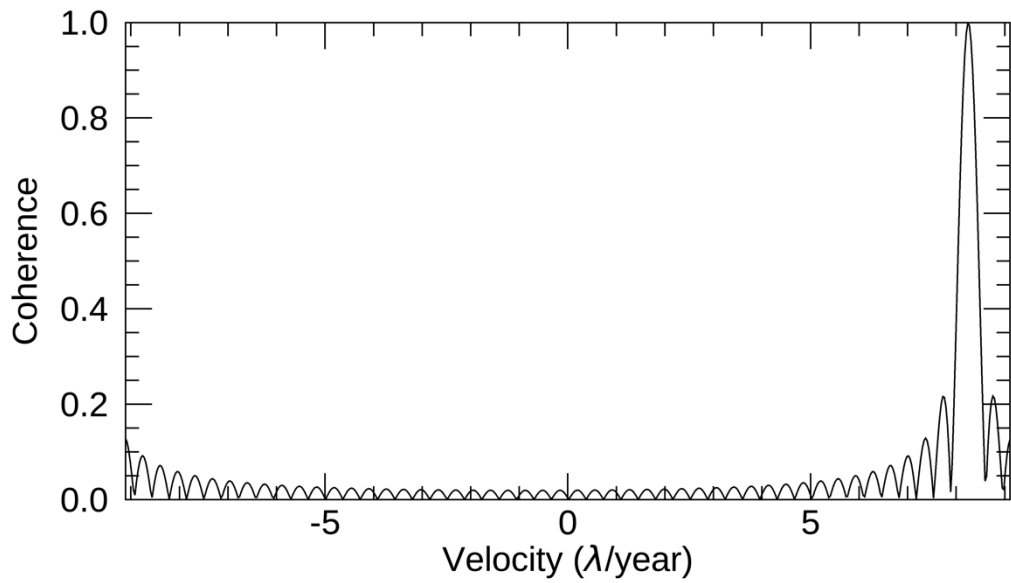
Figure 3.5: Linear displacement results with D of 0.5λ in the simulation. (a-d) The NN-PSI outputs: the EV spectrum defined by the range, the accumulated coherence profile along the height direction, the coherence profile in the velocity direction at the selected height, and the reconstructed displacement by NN-PSI in red and the generated displacement in black.



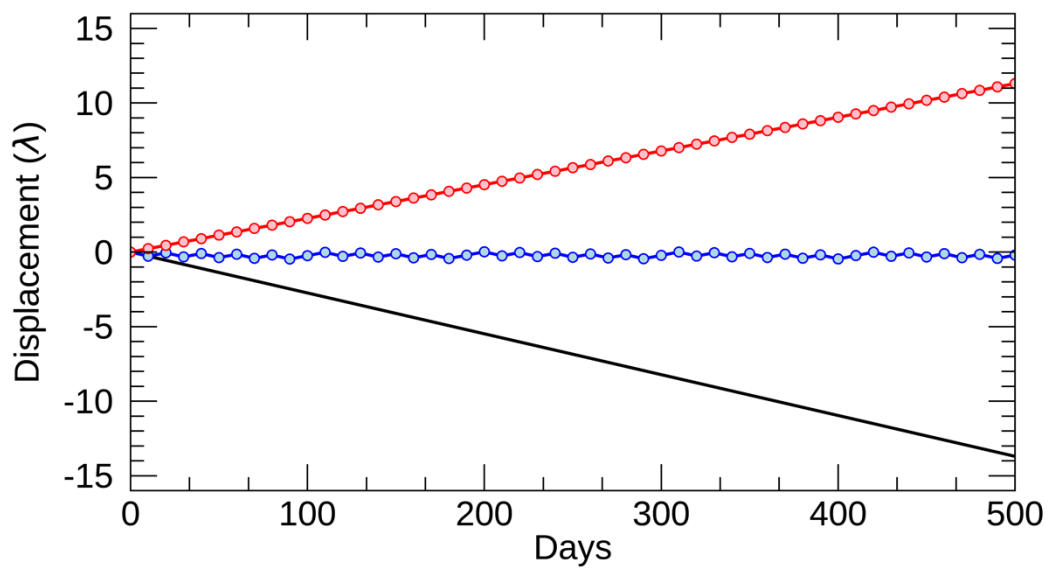
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3.6: Linear displacement results with D of 10λ in the simulation. (a-d) The NN-PSI outputs: the EV spectrum defined by the range, the accumulated coherence profile along the height direction, the coherence profile in the velocity direction at the selected height, and the reconstructed displacement by NN-PSI in red and the generated displacement in black.

ii ステップ変位

ステップ変位における、変位量 D と RMSE の関係を Figure 3.7 に示す。ステップ変位では、変位量 D が 0.25λ 以下の場合、NN-PSI と ConvPSI の RMSE はほぼ 0λ となった。ConvPSI の RMSE のばらつきが、NN-PSI よりも少し大きくなった。変位量 D が 0.25λ を超えると、NN-PSI の RMSE は、ConvPSI より大きくなり推定精度が低下した。この結果は線形的な変位と同様であり、NN-PSI は 1 観測期間における最大変位量の範囲内で推定する必要があることを示した。

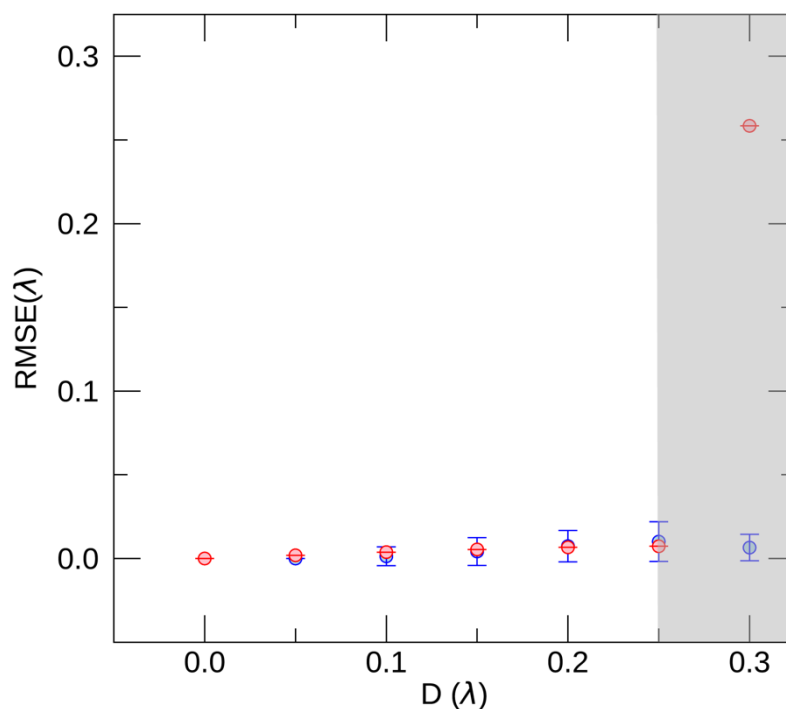
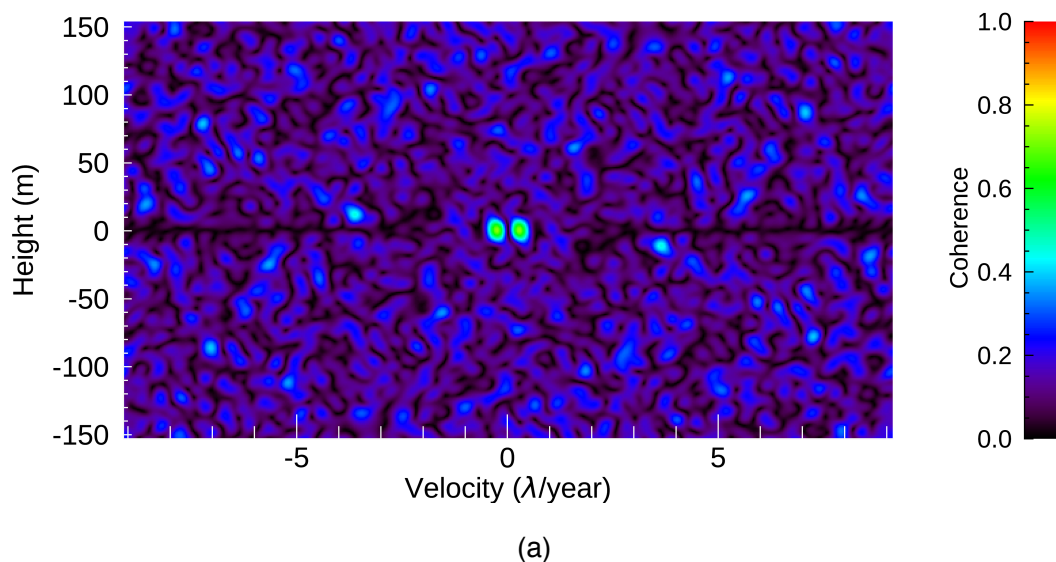


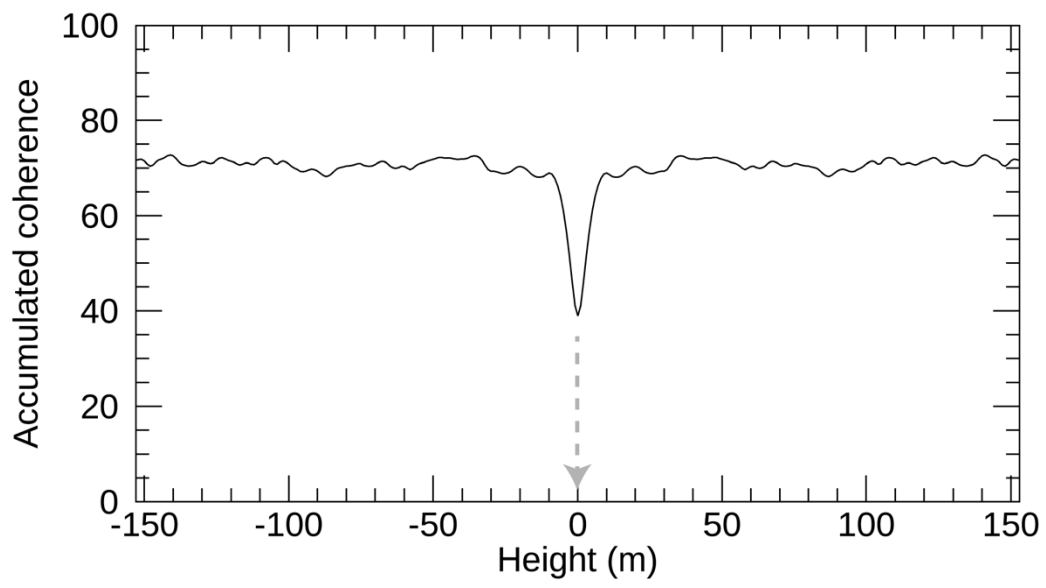
Figure 3.7: Correlation between D and RMSE by the simulation with the step displacement. The red and blue point show NN-PSI and ConvPSI. The bar in the point shows the standard deviation. The gray area indicates to exceed the velocity ambiguity.

Figure 3.7 において、NN-PSI の推定精度が ConvPSI より高い結果と低い結果の詳細を、それぞれ Figure 3.8 と Figure 3.9 に示す。Figure 3.8 は、変位量 D を 0.25λ に設定した推定結果を示す。Figure 3.8a の EV スペクトラムは、2つの強いローブを示している。Figure 3.8b は、EV スペクトラムにて決定した高さを示しており、プロファイルにおける最小値における高さは 0 m を示した。Figure 3.8c は、決定した高さの変位速度方向の時系列コヒーレンスプロファイルであり、2つの大きなピークが $0\lambda/\text{year}$ を中心に存在した。Figure 3.8d は、変位推定の結果を示し、ステップ変位における NN-PSI と ConvPSI の推定結果は同じであった。

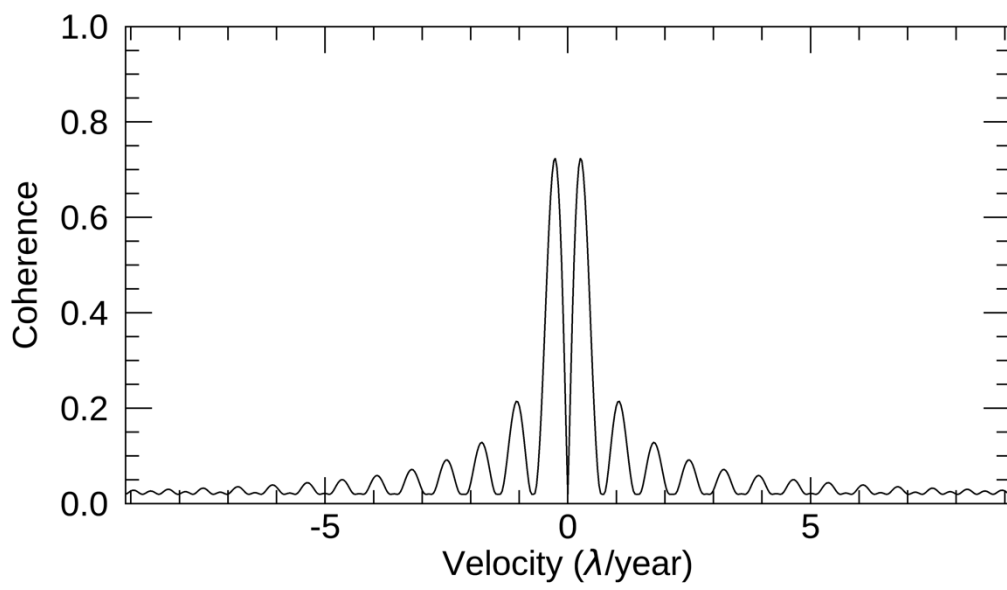
Figure 3.9 は、変位量 D を 0.3λ に設定した推定結果を示す。数値シミュレーションにて設定した変位は負の方向であるが、Figure 3.9a の EV スペクトラムは、変位速度が正の方向のピークが

強いことを示した。この現象は、Figure 3.9c のプロファイルにも示されている。Figure 3.9b は、EV スペクトラムにて決定した高さを示しており、プロファイルにおける最小値における高さは 0 m を示した。Figure 3.9d は、変位推定の結果を示し、NN-PSI は 1 観測期間の最大変位量を超えたため、推定結果は逆方向である隆起の傾向を示す推定変位となった。これは、 2π アンビギュイティの影響により位相差において不連続性が発生し、変位速度が正の方向となり、それとともに EV スペクトラムのメインローブが正の方向で発生したためである。NN-PSI では変位速度方向の時系列コヒーレンスをすべて使用して変位推定するため、メインローブが正の変位速度を示すと、推定変位は隆起傾向となる。ConvPSI は、 2π アンビギュイティの影響により、変位速度が正となり、本来は隆起傾向の変位となるが、不連続性が発生し逆方向の変位となったと考えられる。この ConvPSI の結果は、推定計算上は正確でなく、数値シミュレーションにて作成した変位と偶然一致する結果となった。

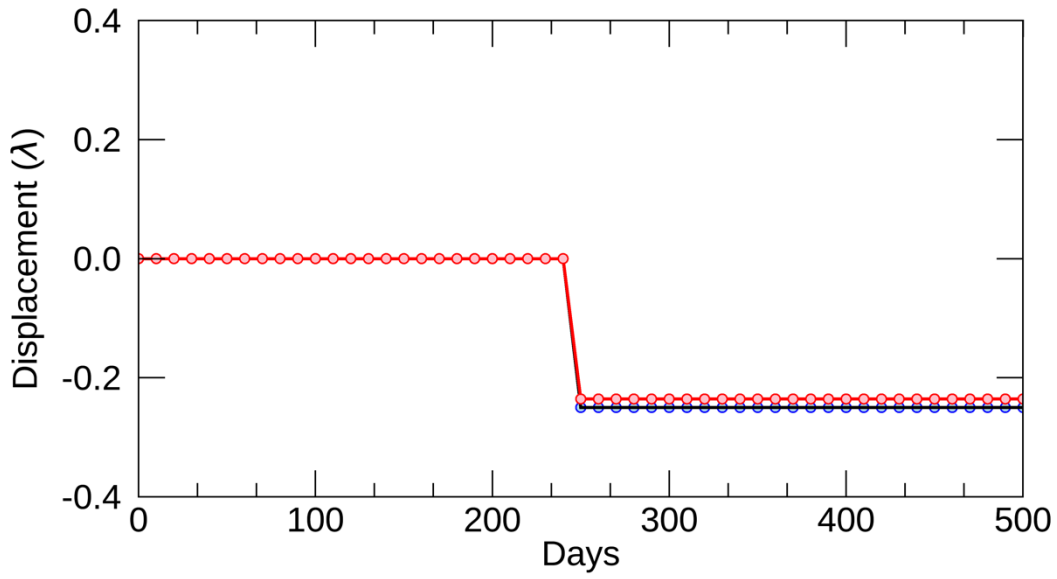




(b)

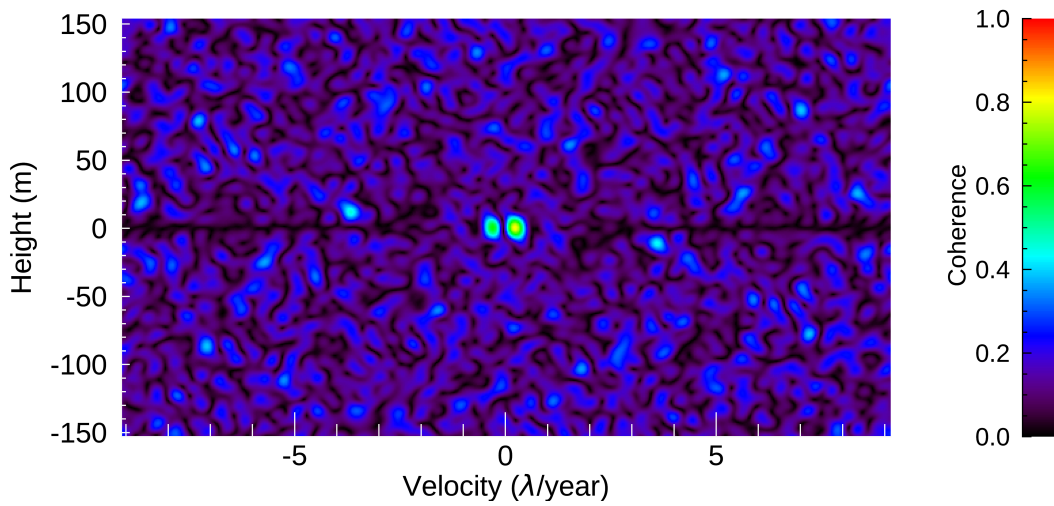


(c)

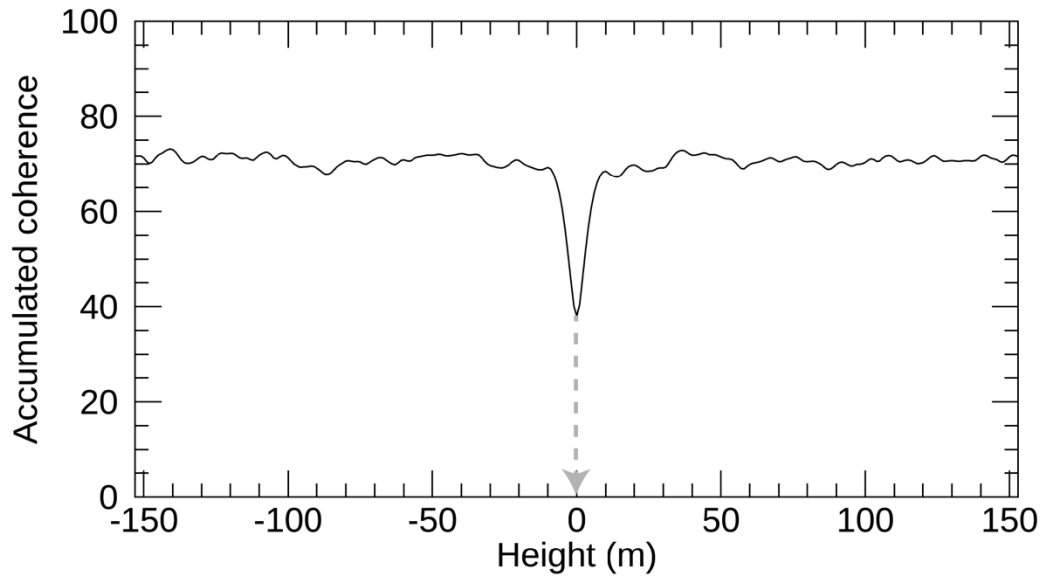


(d)

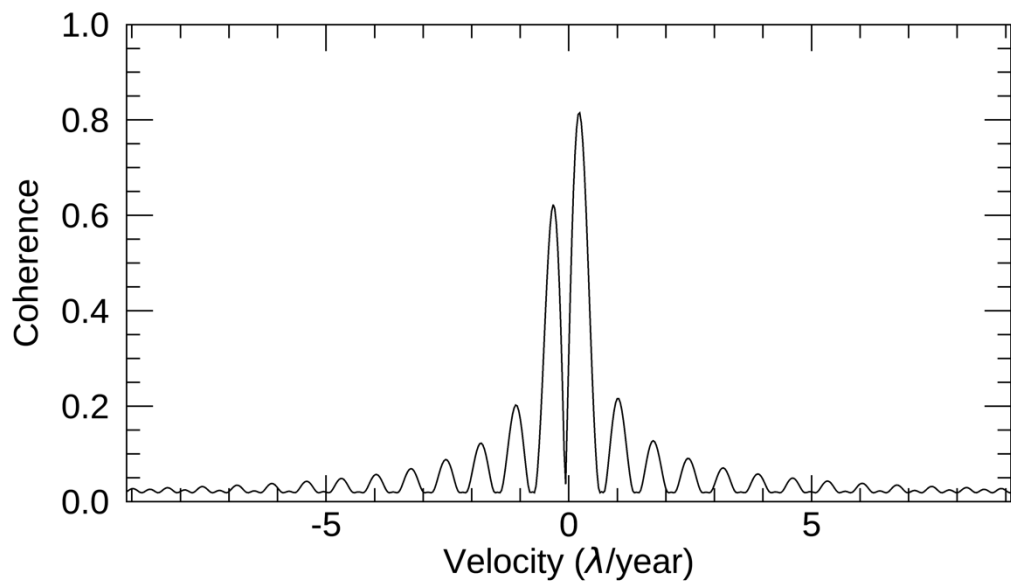
Figure 3.8: Step displacement results with D of 0.25λ in the simulation. (a-d) The NN-PSI outputs: the EV spectrum defined by the range, the accumulated coherence profile along the height direction, the coherence profile in the velocity direction at the selected height, and the reconstructed displacement by NN-PSI in red and the generated displacement in black.



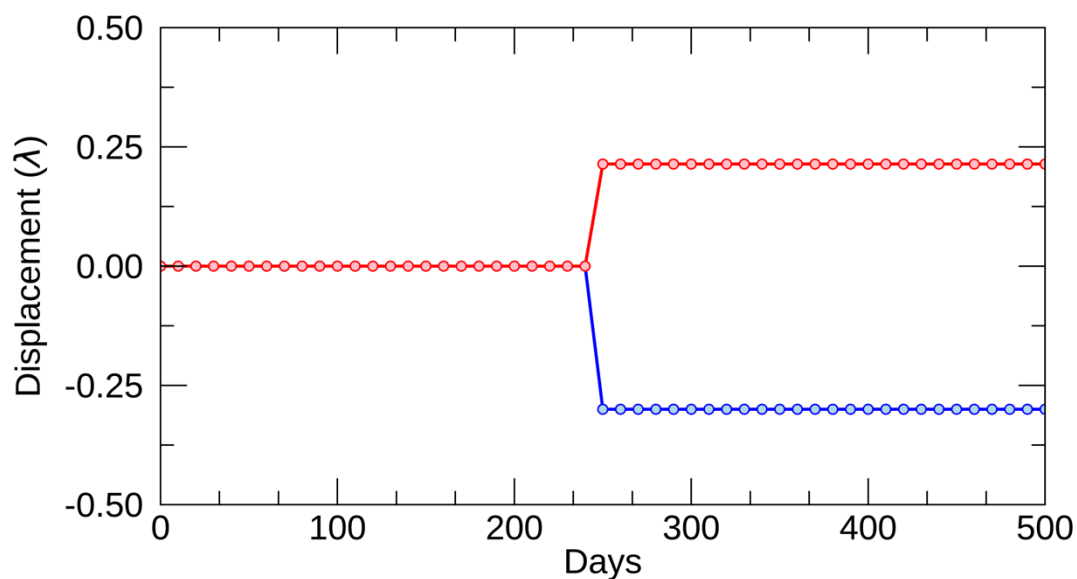
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3.9: Step displacement results with D of 0.3λ in the simulation. (a-d) The NN-PSI outputs: the EV spectrum defined by the range, the accumulated coherence profile along the height direction, the coherence profile in the velocity direction at the selected height, and the reconstructed displacement by NN-PSI in red and the generated displacement in black.

iii 指数関数的な変位

指数関数的な変位における、変位量 D と RMSE の関係を Figure 3.10 に示す。指数関数的な変位では変位量 D が 1.3λ 以下の場合、NN-PSI の RMSE が 0λ となった。ConvPSI の推定では、変位量 D が 0.25λ を超える場合、RMSE が 0.4λ 以上となった。また、このタイプの変位においても ConvPSI の RMSE にばらつきが見られた。NN-PSI は 1 観測期間における最大変位量の範囲内では、ConvPSI の推定精度を大幅に改善した。

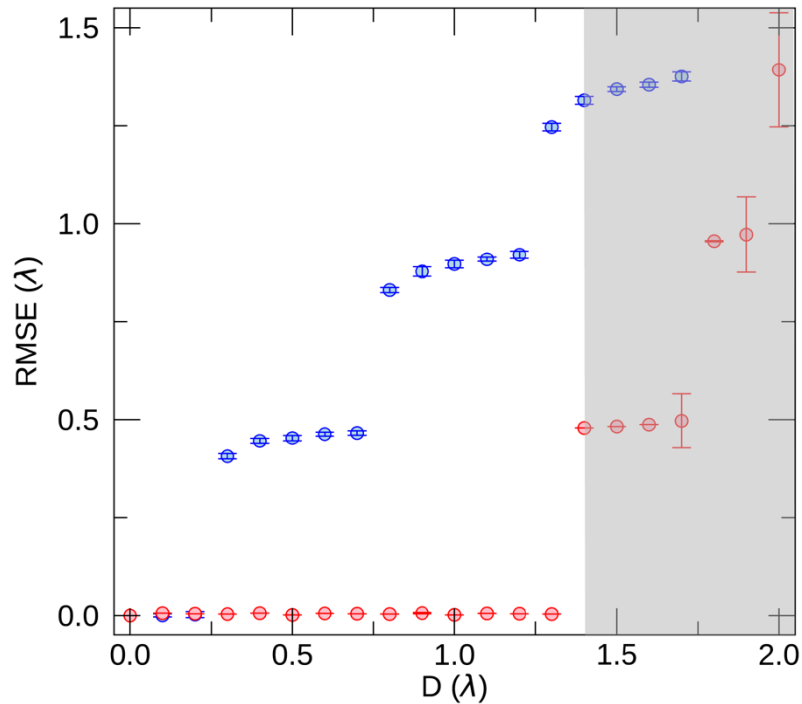
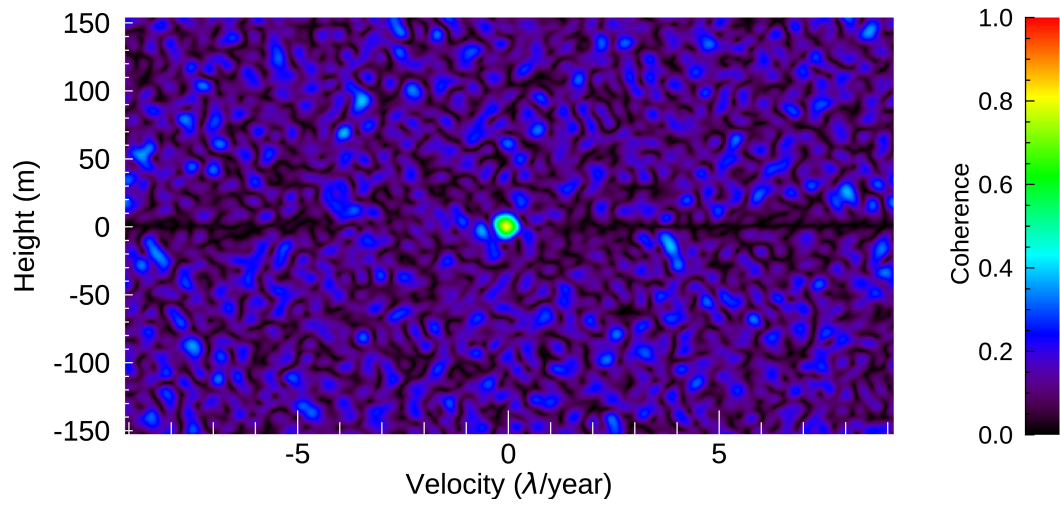


Figure 3.10: Correlation between D and RMSE by the simulation with the exponential displacement. The red and blue point show NN-PSI and ConvPSI. The bar in the point shows the standard deviation. The gray area indicates to exceed the velocity ambiguity.

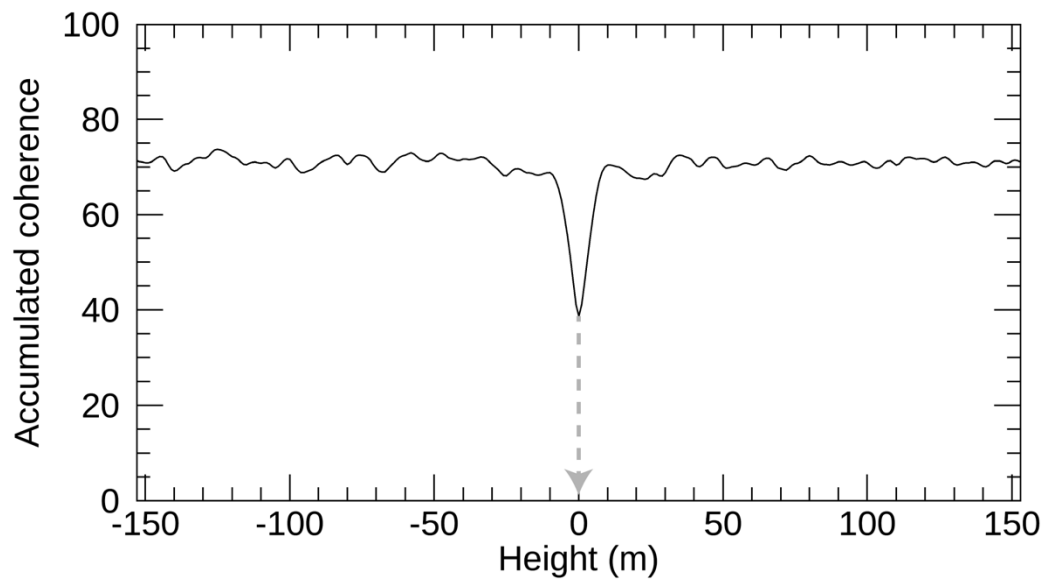
Figure 3.10 において、NN-PSI の推定精度が ConvPSI より高い結果と低い結果の詳細を、それぞれ Figure 3.11 と Figure 3.12 に示す。Figure 3.11 は、変位量 D を 0.5λ に設定した NN-PSI の推定結果の詳細を示す。Figure 3.11a に示す EV スペクトラムの中心付近に強いメインローブがあり、負の変位速度においてサイドローブを確認した。Figure 3.11b は、EV スペクトラムにて決定した高さを示しており、プロファイルにおける最小値における高さは 0 m を示した。Figure 3.11c は、決定した高さの変位速度方向の時系列コヒーレンスのプロファイルであり、負の変位速度にていくつかのサイドローブを確認したが、正の変位速度では顕著なサイドローブは見られなかった。Figure 3.11d は変位推定の結果を示し、NN-PSI の推定変位は数値シミュレーションにより作成した変位と同等の傾向を示した。そして、ConvPSI の推定変位には不連続性が含まれる結果となった。

Figure 3.12 は、変位量 D を 1.5λ に設定した NN-PSI の推定結果の詳細を示す。Figure 3.12a に示す EV スペクトラムの中心付近に強いメインローブがあり、EV スペクトラムの負の変位速度においてサイドローブを確認した。Figure 3.12b は、EV スペクトラムにて決定した高さを示しており、プロファイルにおける最小値における高さは 0 m を示した。Figure 3.11c は、負の変位速度にていくつかのサイドローブを確認した。変位量 D が 1 観測期間における最大変位量の範囲を超

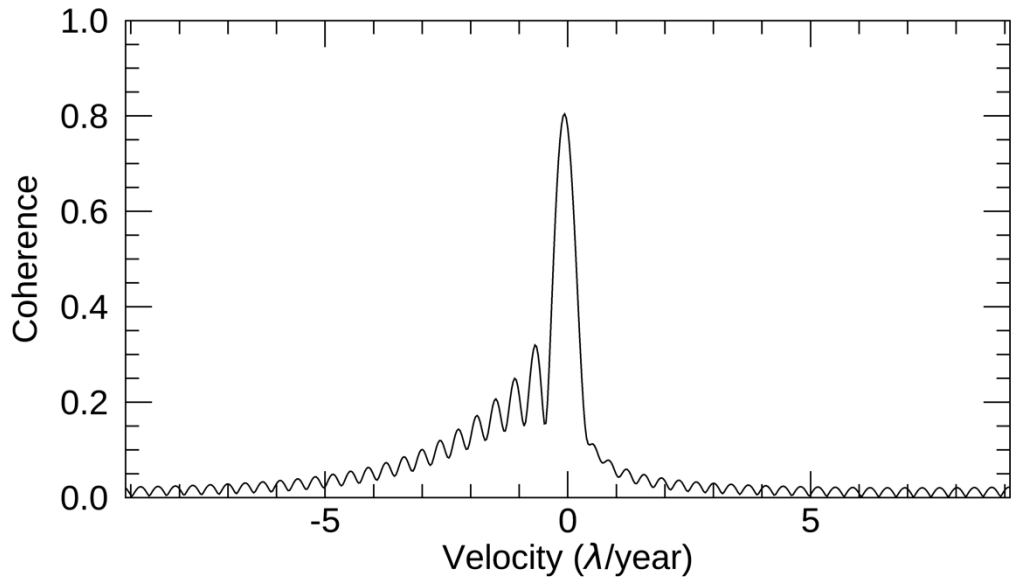
えると、正の変位速度にもわずかではあるが、サイドローブが見られた。Figure 3.12d は、NN-PSI と ConvPSI とともに、推定変位に不連続性が含まれる結果となった。



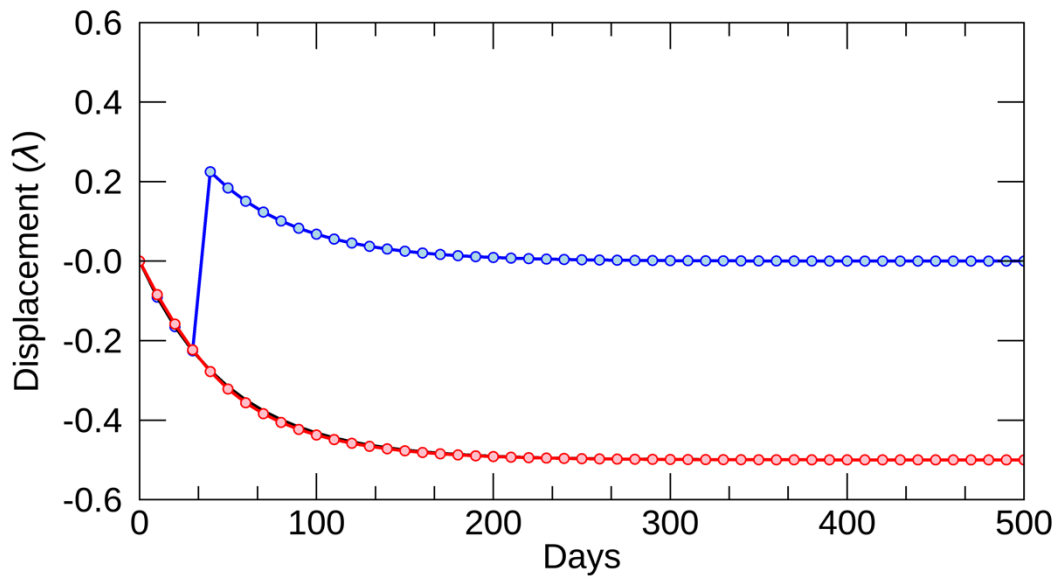
(a)



(b)

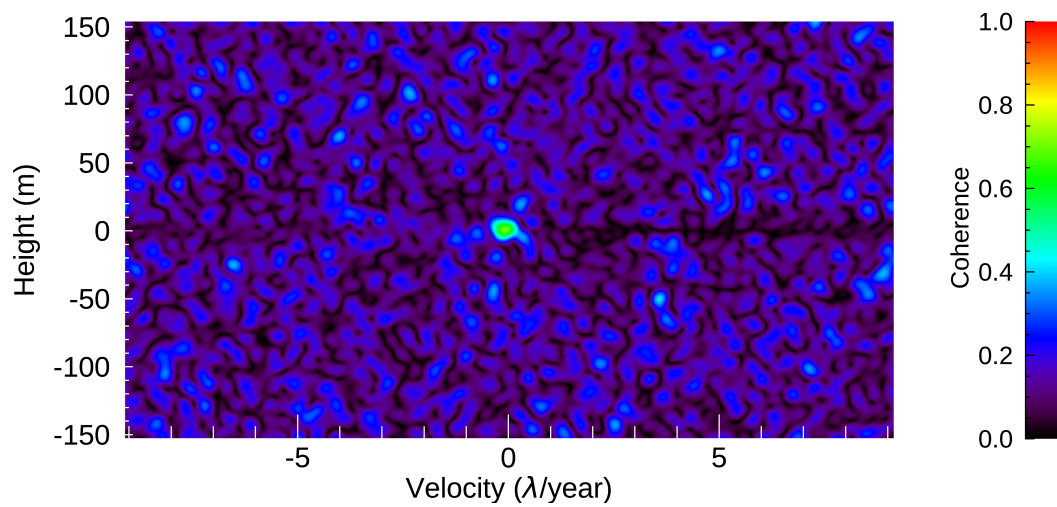


(c)

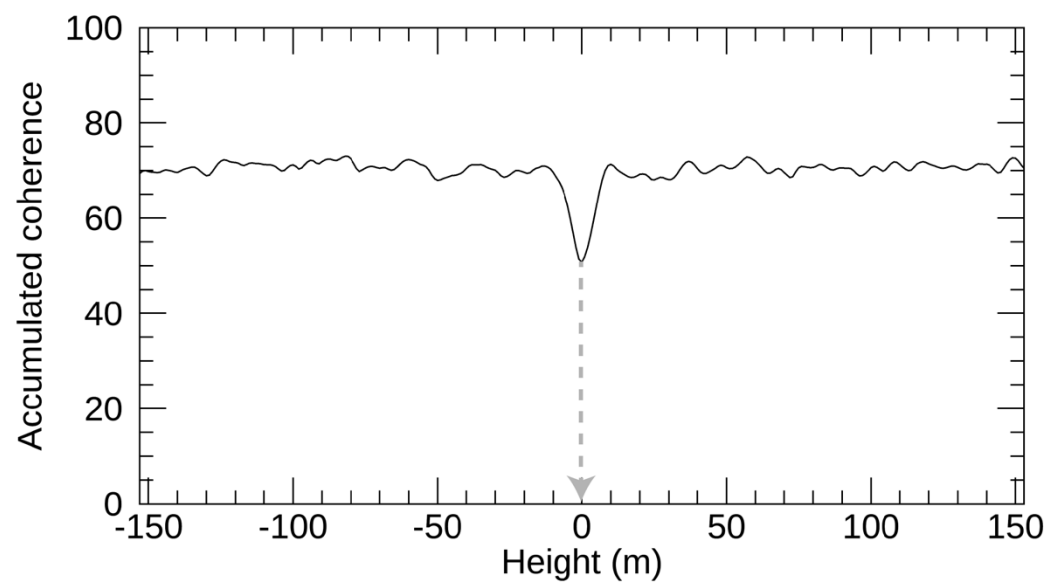


(d)

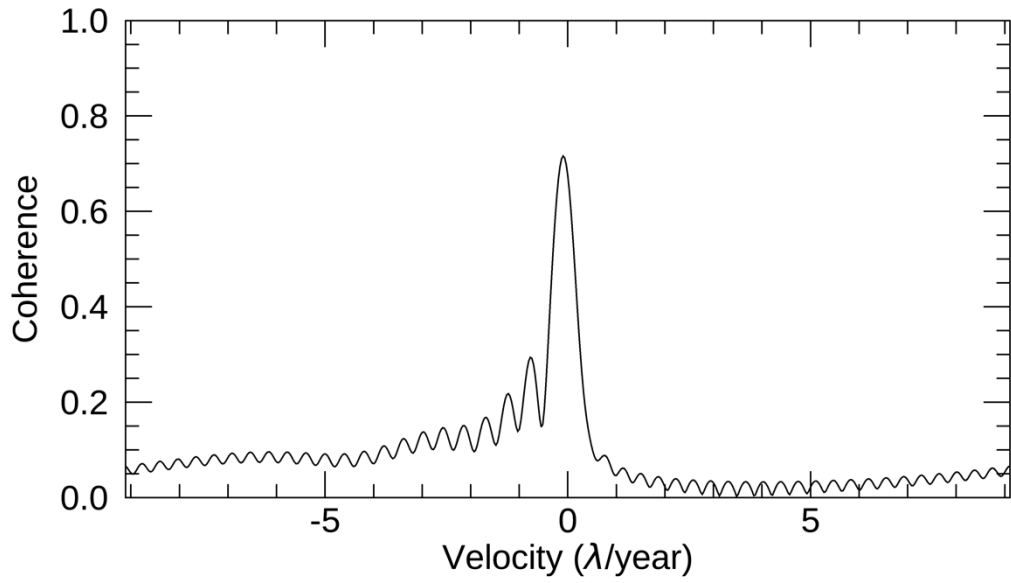
Figure 3.11: Exponential displacement results with D of 0.5λ in the simulation. (a-d) The NN-PSI outputs: the EV spectrum defined by the range, the accumulated coherence profile along the height direction, the coherence profile in the velocity direction at the selected height, and the reconstructed displacement by NN-PSI in red and the generated displacement in black.



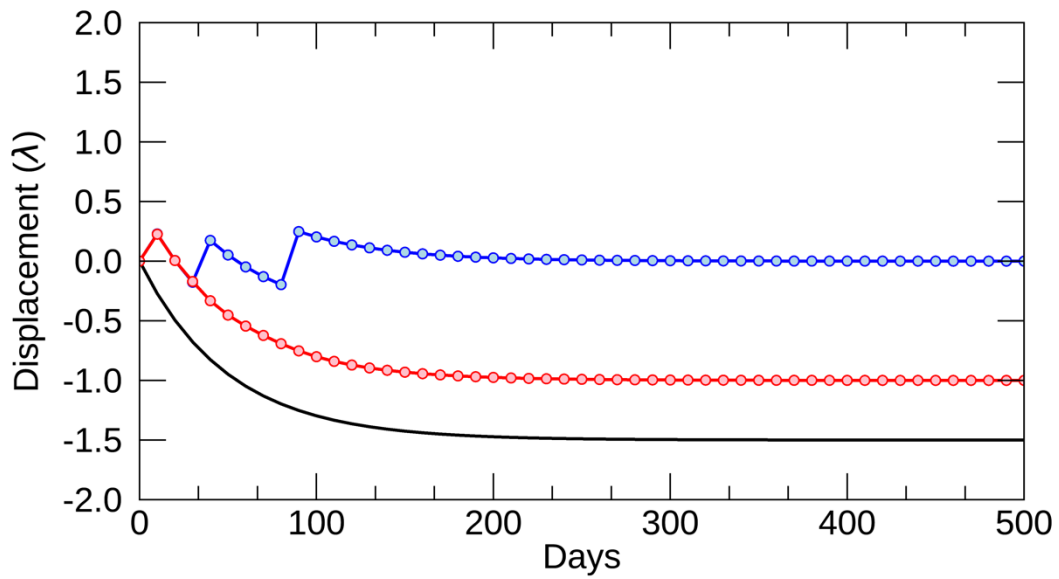
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3.12: Exponential displacement results with D of 1.5λ in the simulation. (a-d) The NN-PSI outputs: the EV spectrum defined by the range, the accumulated coherence profile along the height direction, the coherence profile in the velocity direction at the selected height, and the reconstructed displacement by NN-PSI in red and the generated displacement in black.

iv 周期的な変位

周期的な変位における、変位量 D と RMSE の関係を Figure 3.13 に示す。周期的な変位では、変位量 D が 1.4λ 以下の場合、NN-PSI の RMSE は 0λ となった。ConvPSI は変位量 D が 0.6λ を超えると、RMSE が 0.2λ 以上となり、変位推定の精度が低下した。周期的な変位では 1 観測期間における最大変位量の範囲を超える変位量 D となると、NN-PSI の RMSE が ConvPSI よりも大きくなり、NN-PSI の推定結果は、ConvPSI の推定精度よりも低下した。また、周期的な変位の場合、これまでの NN-PSI の結果と異なり、変位量 D が増加するとともに、RMSE のばらつきが大きくなった。

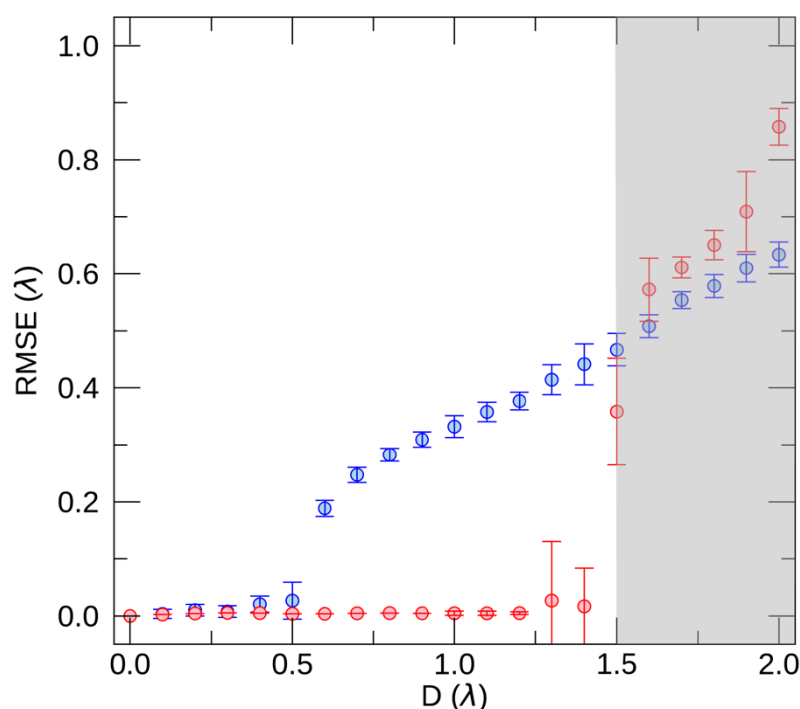


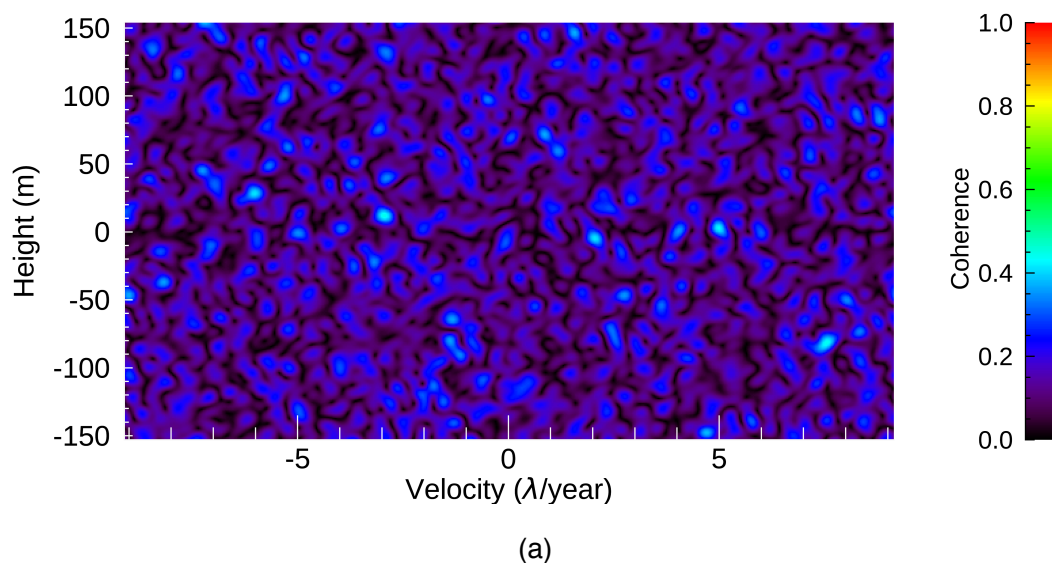
Figure 3.13: Correlation between D and RMSE by the simulation with the sinusoidal displacement. The red and blue point show NN-PSI and ConvPSI. The bar in the point shows the standard deviation. The gray area indicates to exceed the velocity ambiguity.

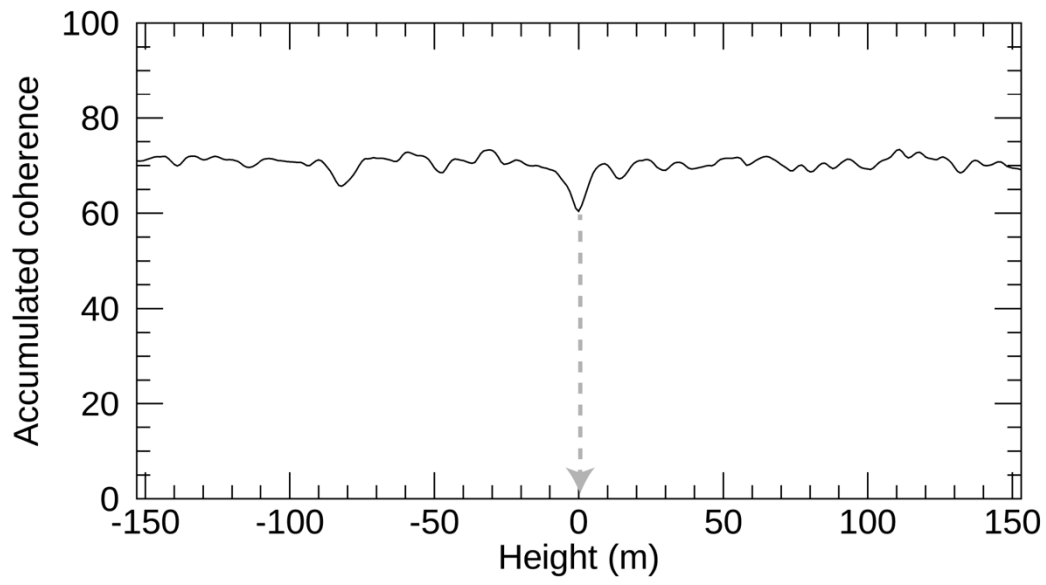
Figure 3.13 において、NN-PSI の推定変位の精度が高く、RMSE が 0λ に近い結果とそうでない場合の結果の詳細を、それぞれ Figure 3.14 と Figure 3.15 に示す。また、周期的な変位に限っては、1 観測期間内の最大変位量が $1/4$ 波長 (λ) の範囲内の NN-PSI の推定結果において、RMSE の標準偏差が大きくばらつく結果も確認したため、変位量 D が 0.8λ と 1.3λ の場合における、すべての NN-PSI と ConvPSI の推定結果を Figure 3.16 に示し、ばらつきの程度を確認する。

Figure 3.14 は、周期的な変位において変位量 D を 1λ に設定した、NN-PSI の推定結果の詳細を

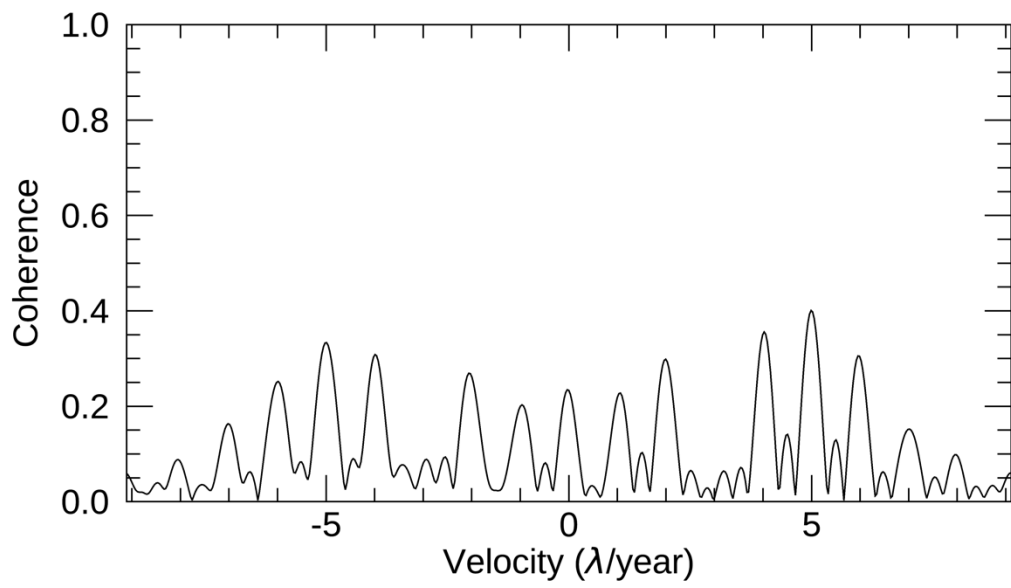
示す。Figure 3.14a に示す EV スペクトラムは、これまでの変位タイプと異なり、メインローブを確認できなかった。Figure 3.14b は、EV スペクトラムにて決定した高さを示しており、プロファイルにおける最小値は 0 m を示した。周期的な変位では、時系列コヒーレンスの数値も全体的に低下しており、プロファイルにおいては高さを決定するための底辺が鮮明でないことが分かる。Figure 3.14c は、決定した高さの変位速度方向の時系列コヒーレンスのプロファイルであり、サイドローブが変位速度方向全体に広がることを確認した。Figure 3.14d は、NN-PSI と ConvPSI による変位推定の結果であり、NN-PSI の推定結果は数値シミュレーションで作成した変位と一致したが、ConvPSI の推定結果はそれと乖離がある結果となった。

Figure 3.15 は、変位量 D を 1.5λ に設定した NN-PSI の推定結果を示す。Figure 3.15a に示す EV スペクトラムには、明瞭なメインローブは確認できなかった。Figure 3.15b は、EV スペクトラムにて決定した高さを示しており、プロファイルにおける最小値は -1 m を示したが、プロファイルの底辺が鮮明でないことが分かる。Figure 3.15c は、決定した高さの変位速度方向の時系列コヒーレンスのプロファイルであり、サイドローブが変位速度方向全体に広がるように分布していることを確認した。Figure 3.15d は、両手法ともに、数値シミュレーションで作成した変位と乖離があり、周期的な変位を推定できなかったことを示した。

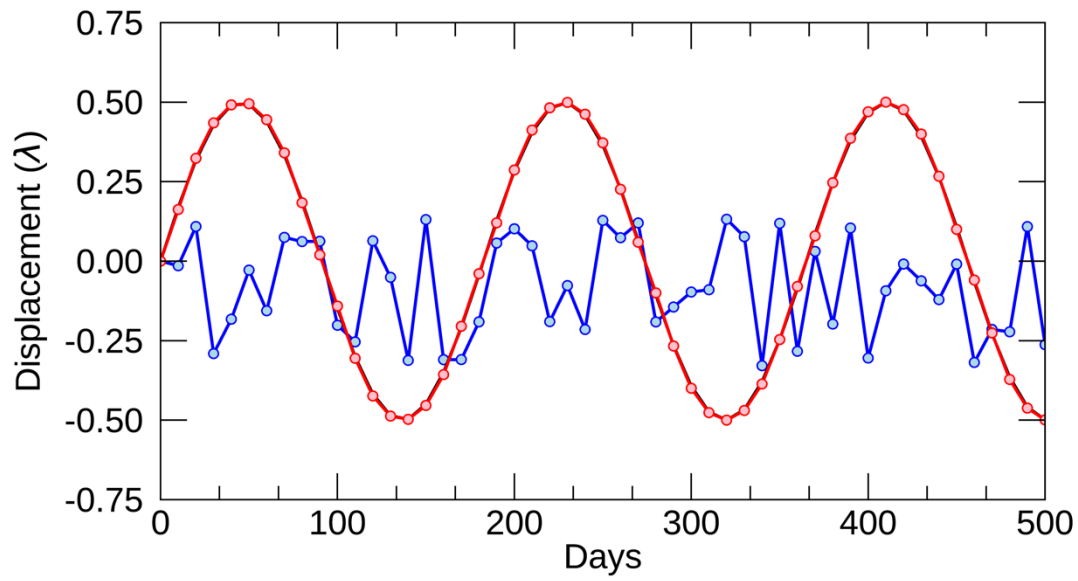




(b)

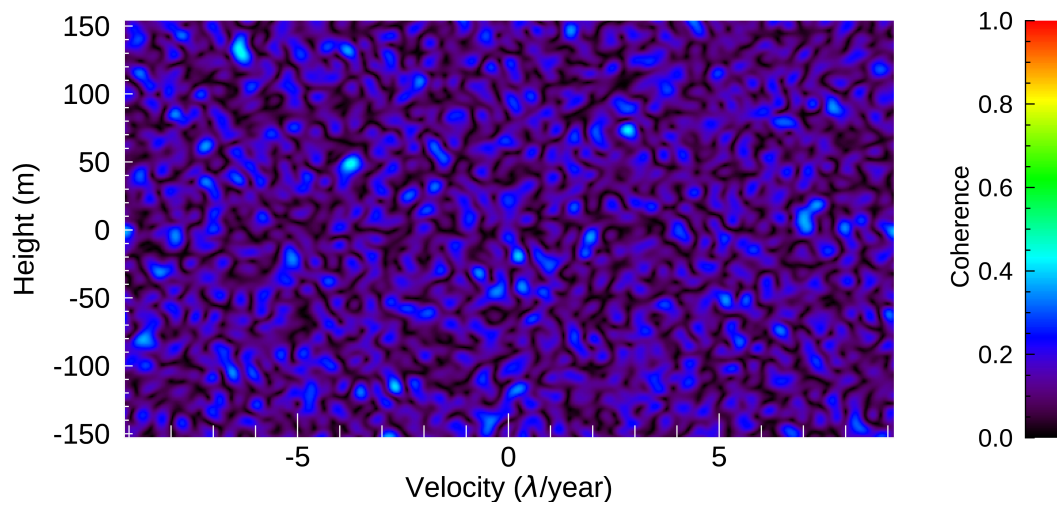


(c)

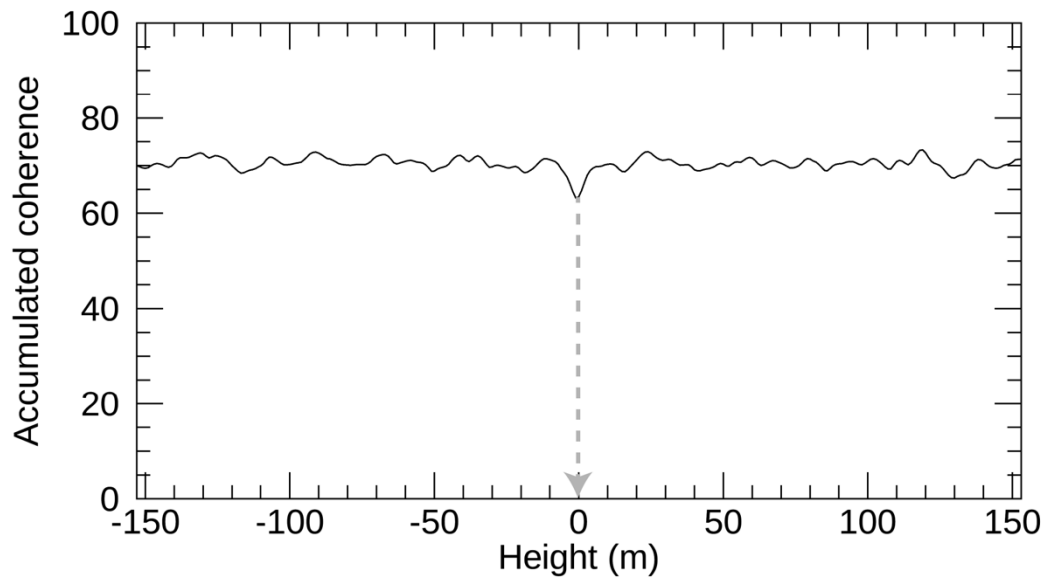


(d)

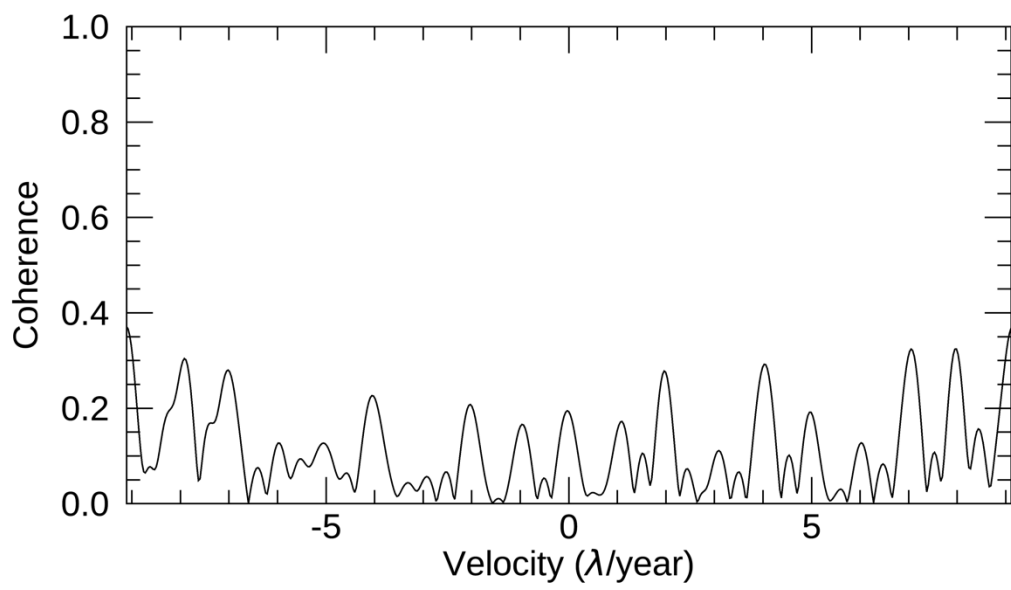
Figure 3.14: Sinusoidal displacement results with D of 1λ in the simulation. (a-d) The NN-PSI outputs: the EV spectrum defined by the range, the accumulated coherence profile along the height direction, the coherence profile in the velocity direction at the selected height, and the reconstructed displacement by NN-PSI in red and the generated displacement in black.



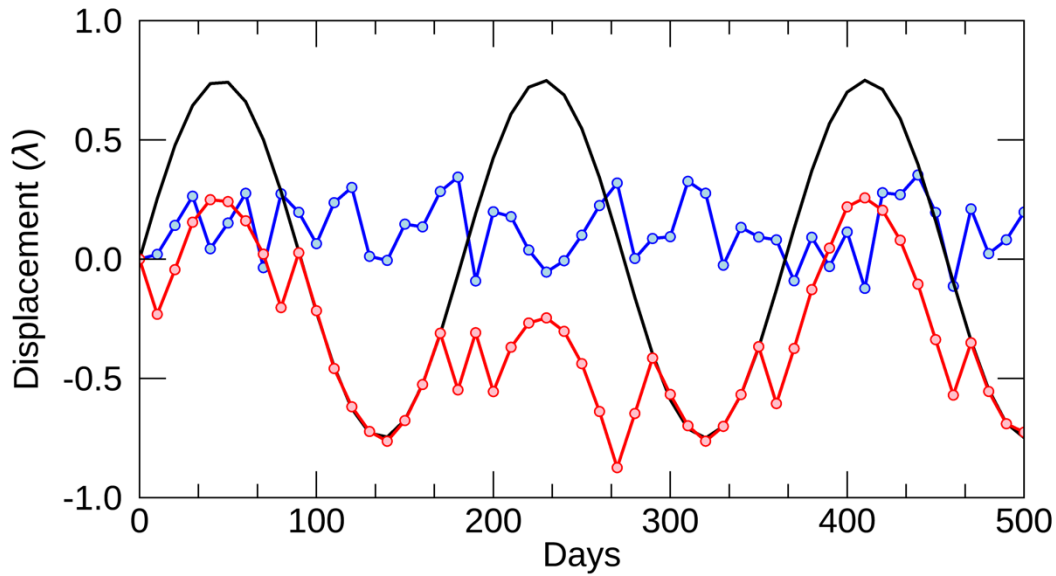
(a)



(b)



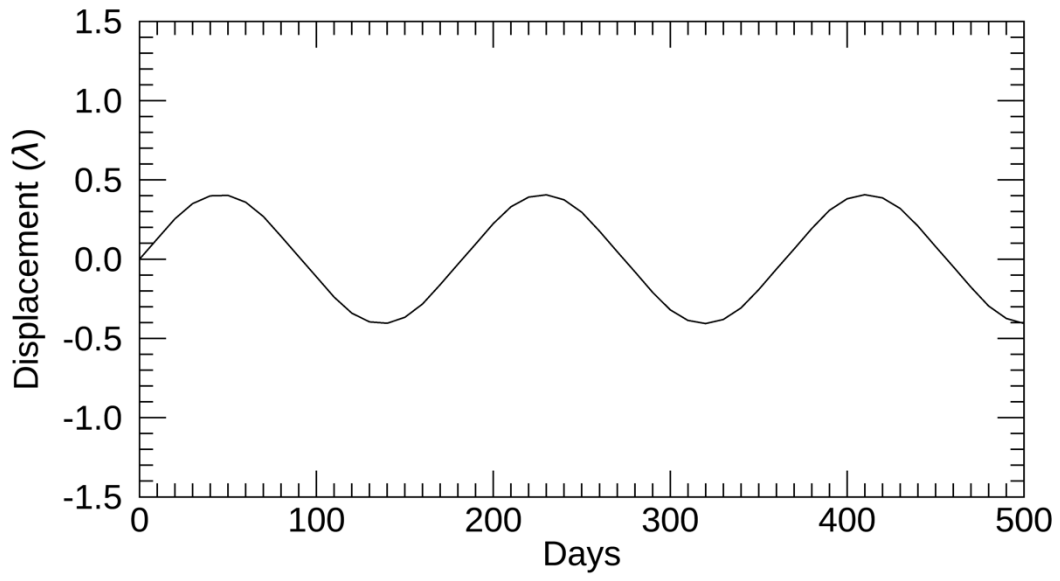
(c)



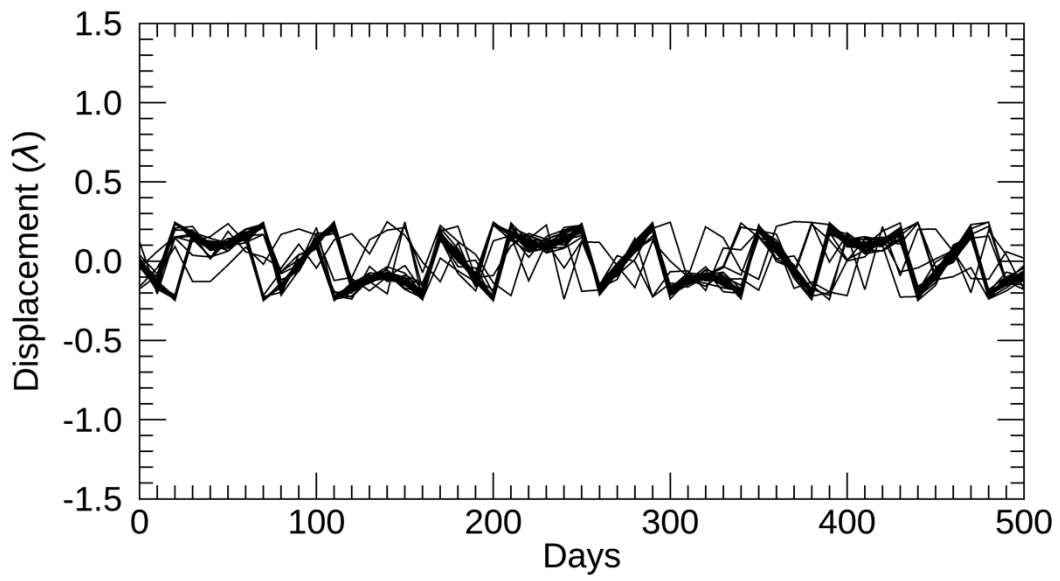
(d)

Figure 3.15: Sinusoidal displacement results with D of 1.5λ in the simulation. (a-d) The NN-PSI outputs: the EV spectrum defined by the range, the accumulated coherence profile along the height direction, the coherence profile in the velocity direction at the selected height, and the reconstructed displacement by NN-PSI in red and the generated displacement in black.

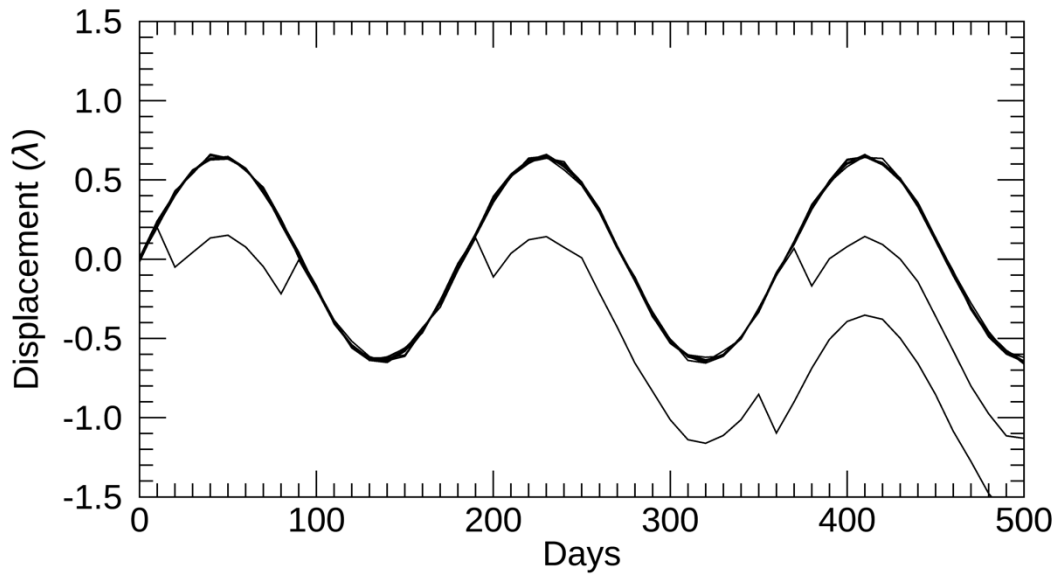
Figure 3.16にて、数値シミュレーションの変位量 D が 0.8λ と 1.3λ の場合のNN-PSIとConvPSIにおける、50回計算したすべての推定変位の結果を示す。Figure 3.16(a,b)は、変位量 D が 0.8λ における変位推定の結果を示しており、NN-PSIの推定変位はすべて同じであることを示している。一方、ConvPSIの推定変位は計算ごとに変化していることを示した。Figure 3.16(c,d)は、変位量 D が 1.3λ における変位推定の結果を示しており、NN-PSIにおいては 0.8λ の場合よりも推定変位のばらつきが大きくなり、ConvPSIでは計算ごとに推定変位が変化していることが分かる。周期的な変位を推定する場合は、1観測期間の変位量が $1/4$ 波長(λ)に近づくと、NN-PSIの推定結果においてもRMSEのばらつきが大きくなることを確認した。この結果は、ベースライン距離の組み合わせを変更し繰り返し計算することで、NN-PSIやConvPSIの推定変位のばらつきが変位量 D の数値により変化することを示しており、NN-PSIの推定結果の信頼性を把握できる可能性を示唆している。



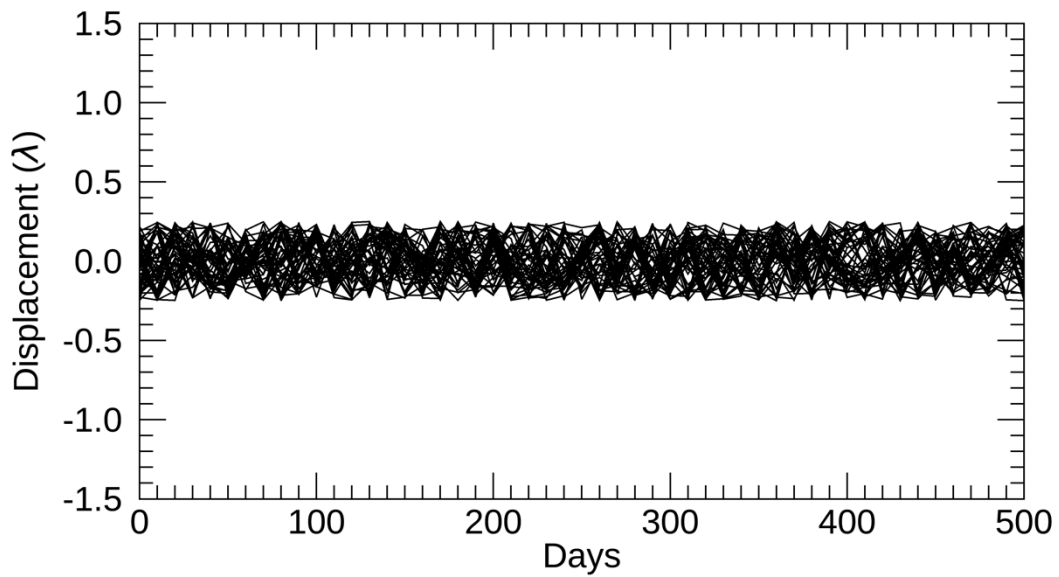
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3.16: All of the estimated displacements in the simulation for the sinusoidal displacement. (a,b) shows the resulting displacement with D of 0.8λ by NN-PSI and ConvPSI respectively. (c,d) shows the resulting displacement with D of 1.3λ by NN-PSI and ConvPSI.

3.4 EV スペクトラムの計算範囲による影響の評価

前節において、NN-PSI の適用可能な変位タイプと変位量が明瞭となった。NN-PSI の計算過程で作成する EV スペクトラムは、高さと変位速度アンビギュイティの最大値を設定し演算を行なっているため、ConvPSI と比較すると推定精度は高まるが計算コストが大きくなる。Table 3.1 の条件にて、それぞれの手法において EV スペクトラムの作成から変位推定までの処理時間を Table 3.3 に示す。この結果、NN-PSI は ConvPSI の約 15 倍の処理時間がかかることが分かる。この処理は単一のポイントにおける処理時間であり、面的に観測する SAR 画像においては、関東エリアを欧州宇宙機構が運用する Sentinel-1 にてカバーする場合は、10 億点以上となる。広域エリアを NN-PSI にて解析する場合は、計算機のハードウェアのスペックを向上し、並列処理などで高速化を行った場合でも、月や年単位の膨大な処理時間となる。そこで、本節においては EV スペクトラムにおける計算範囲と解像度を変更し、変位推定の精度に与える影響について把握する。

Table 3.3: Comparison of the processing time for NN-PSI and ConvPSI.

Method	Time (Seconds)
NN-PSI	133
ConvPSI	9
<u>Calculation procedure:</u> The displacement estimation with 59 scenes on single point.	
<u>Processing Machine:</u> OS: Windows 10 (64-bit) CPU: Intel Core i9 2.4GHz (8 cores) RAM: 64 GB	

3.4.1 高さと変位速度の計算範囲

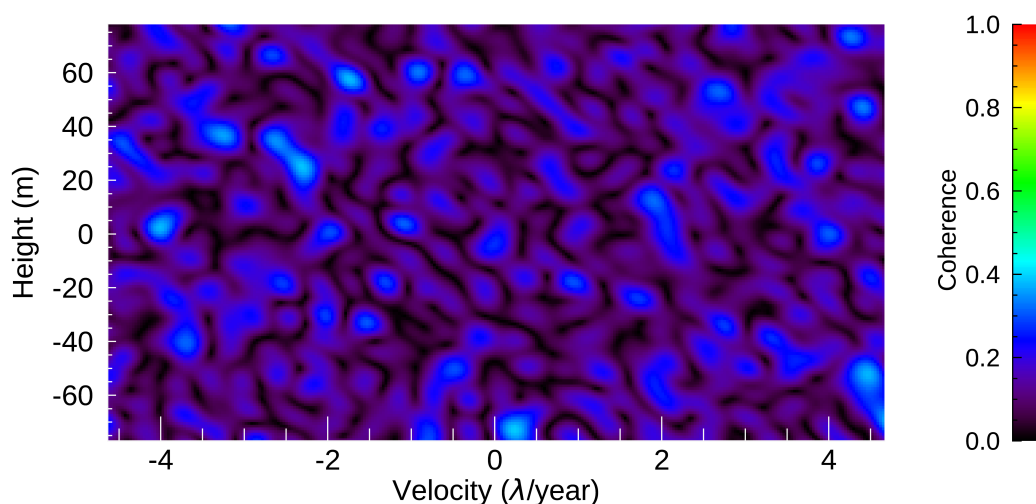
NN-PSI における、EV スペクトラムの計算範囲は、高さと変位速度アンビギュイティの値で定義される。この範囲を変更し、数値シミュレーションにて変位推定の影響を把握する。観測条件は Table 3.1 に示されるパラメータを使用した。変位タイプは周期的な変位とし、変位量 D は 1λ 、周期 F_t は半年とした。EV スペクトラムにおける高さと変位速度の範囲は、それぞれ $\pm 77\text{ m}$ 、 $\pm 4.6\lambda/\text{year}$ に設定し、これらの値は、それぞれのアンビギュイティの値の 2 分の 1 である。本評価における数値シミュレーションの主な設定値を Table 3.4 に示す。NN-PSI により変位推定した

結果を Figure 3.17 に示す。

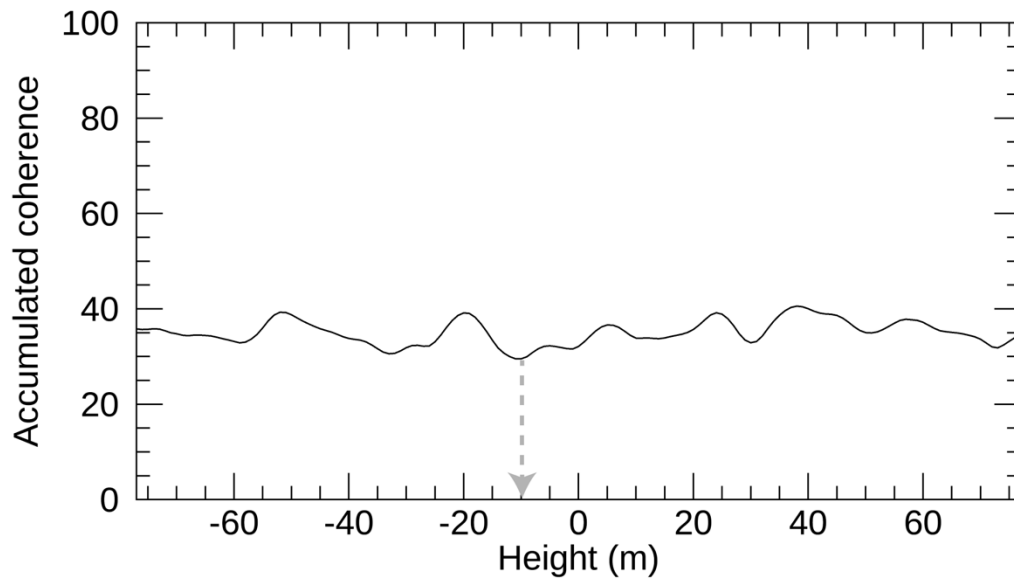
Table 3.4: Simulation parameters in the evaluation for the range of the EV spectrum.

Parameters	Values
Height and velocity range for EV spectrum	± 77 m, ± 4.6 λ /year
Displacement Type	Sinusoidal
Peak to peak displacement (D)	1 λ
Displacement frequency (F)	Half year

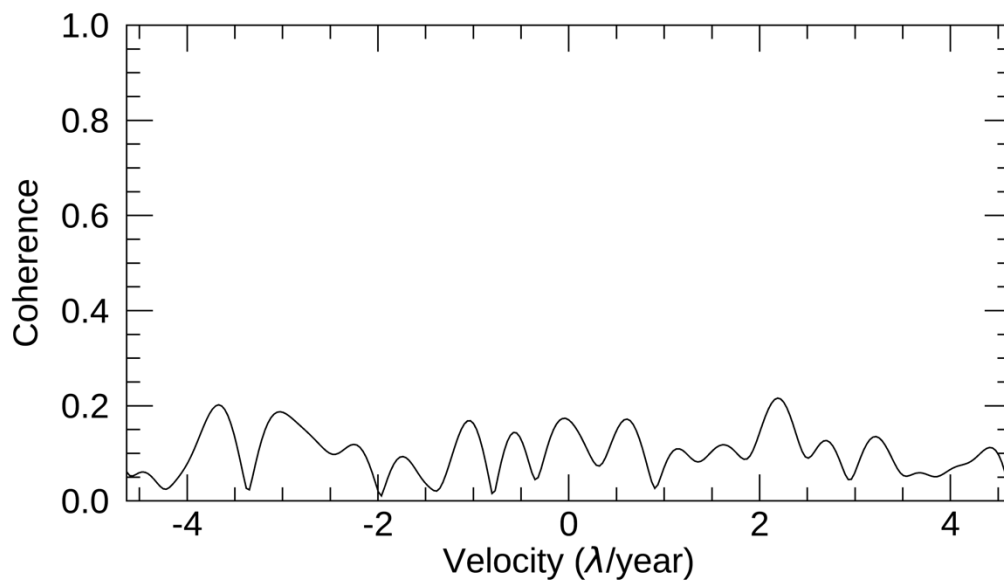
Figure 3.17a の EV スペクトラムは、Figure 3.14a と同様にメインローブは確認できなかった。Figure 3.17b は、変位速度方向の時系列コヒーレンスを累積したプロファイルを示す。このプロファイルの最小値が示す高さは -10 m となり、数値シミュレーションで設定している高さとは一致しなかった。Figure 3.17c は、決定した高さにおける時系列コヒーレンスのプロファイルを示す。決定したの高さが、本来の値と異なるため、Figure 3.14c のようなサイドローブはほとんど確認できなかった。Figure 3.17d が示す、NN-PSI による推定変位は、数値シミュレーションで作成した変位と一致しなかった。NN-PSI の変位結果の RMSE は 0.376 λ となり、高さを変位速度アンビギュイティにて設定した計算範囲の場合の RMSE、0.004 λ と比較すると、精度が大幅に低下した。NN-PSI で使用する EV スペクトラムの計算範囲を狭めた場合、高さを正しく求められず、変位推定の精度が低下する。このことより、NN-PSI で変位推定する際の EV スペクトラムの計算範囲は、高さを変位速度アンビギュイティの値にて設定する必要があることを示す。



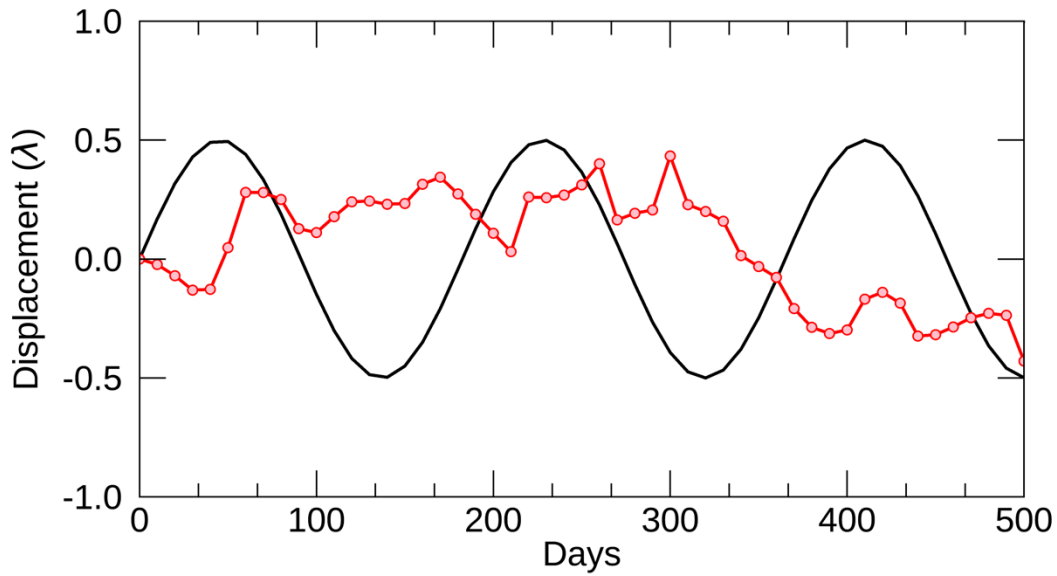
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3.17: Results of NN-PSI with the range defined by the half of the ambiguity values. (a-d) The NN-PSI outputs: the EV spectrum defined by the range, the accumulated coherence profile along the height direction, the coherence profile in the velocity direction at the selected height, and the reconstructed displacement by NN-PSI in red and the generated displacement in black.

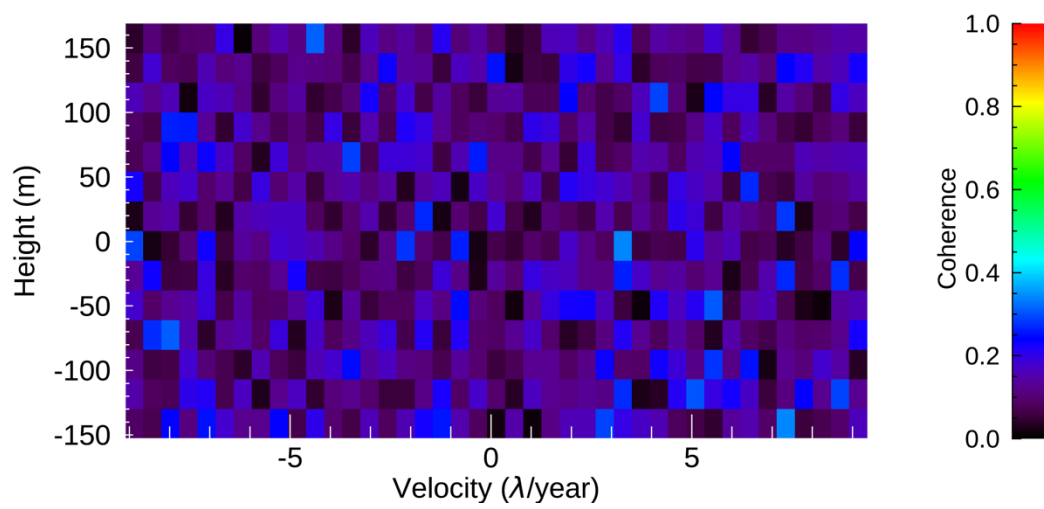
3.4.2 高さと変位速度の解像度の評価

EV スペクトラムの計算範囲に続き、計算解像度が NN-PSI の変位推定に与える影響を評価する。これまでは高さと変位速度の解像度をそれぞれ 1 m と 0.03 λ /year(Xバンドで約 1 mm/year)を使用した。一方、Table 3.1 に示す観測条件から求まる高さと変位速度の解像度は、23 m と 0.5 λ /year になる(Lombardini, 2005)。そこで、計算コストを削減する目的で、EV スペクトラムを作成する際の解像度を低く設定し、数値シミュレーションにおいて、その設定が変位推定に与える影響を把握する。本評価で使用する数値シミュレーションの主な設定値を Table 3.5 に示す。

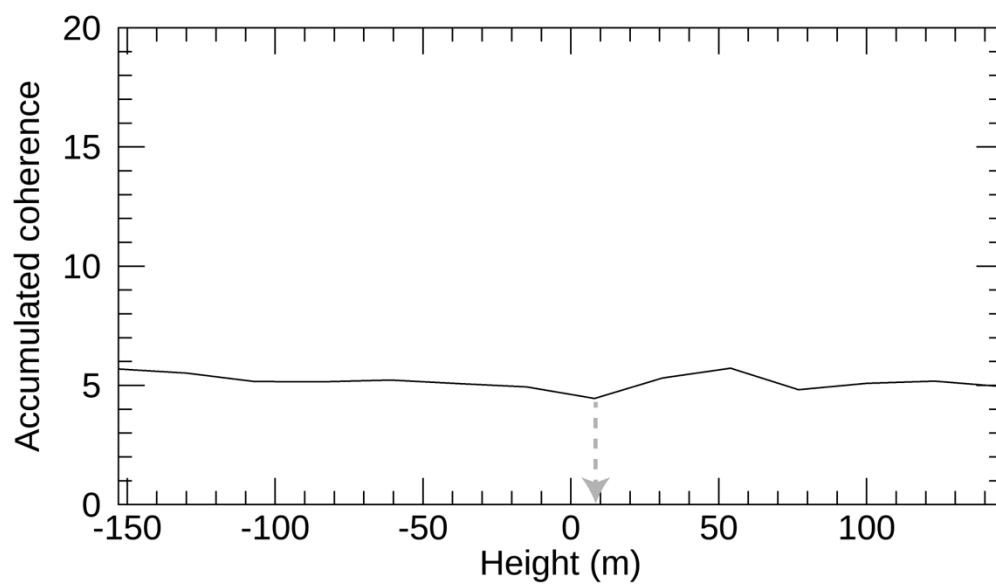
Table 3.5: Simulation parameters in the evaluation for the resolution of EV spectrum.

Parameters	Values
Height and velocity resolution for EV spectrum	1) 23 m, 0.5 λ /year 2) 11m, 0.25 λ /year
Displacement type	Sinusoidal
Peak to peak displacement (D)	1 λ
Displacement frequency (Ff)	Half year

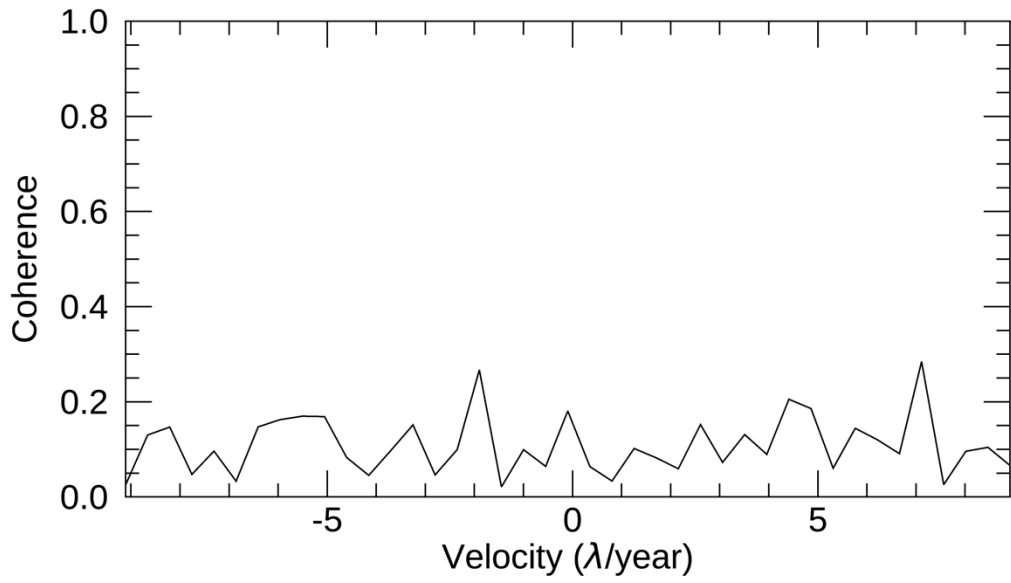
Figure 3.18 に EV スペクトラムの解像度 23 m と 0.5 λ /year、Figure 3.19 に解像度 11 m と 0.5 λ /year に設定して変位推定した結果を示す。Figure 3.18a と Figure 3.19a が示す、EV スペクトラムは 1 m と 0.03 λ /year で設定した結果と異なり、メインローブやサイドローブを視認することが困難であった。Figure 3.18b と Figure 3.19b が示す、変位速度方向に累積した時系列コヒーレンスのプロファイルも、解像度を低くすることにより、時系列コヒーレンスのばらつきが小さくなり、高さの決定が難しくなることが分かる。その結果、変位推定に使用する高さも正しく決定できない。Figure 3.18c のプロファイルは、解像度を 1 m と 0.03 λ /year に設定したもの (Figure 3.14c) と比べるとサイドローブがほとんどなかった。そのことが、変位推定の結果 (Figure 3.18d) に影響を与え、周期的な変位を推定できなかったことが分かる。Figure 3.19c においては、サイドローブがいくつか欠損することにより、Figure 3.19d が示すように数値シミュレーションで作成した変位と乖離することを確認した。Figure 3.18c、Figure 3.19c に示す時系列コヒーレンスのプロファイルと、Figure 3.18d と Figure 3.19d に示される変位推定結果より、EV スペクトラムで決定した高さの時系列コヒーレンスのプロファイルに関するサイドローブの有無が、変位推定に影響を与えることを把握した。



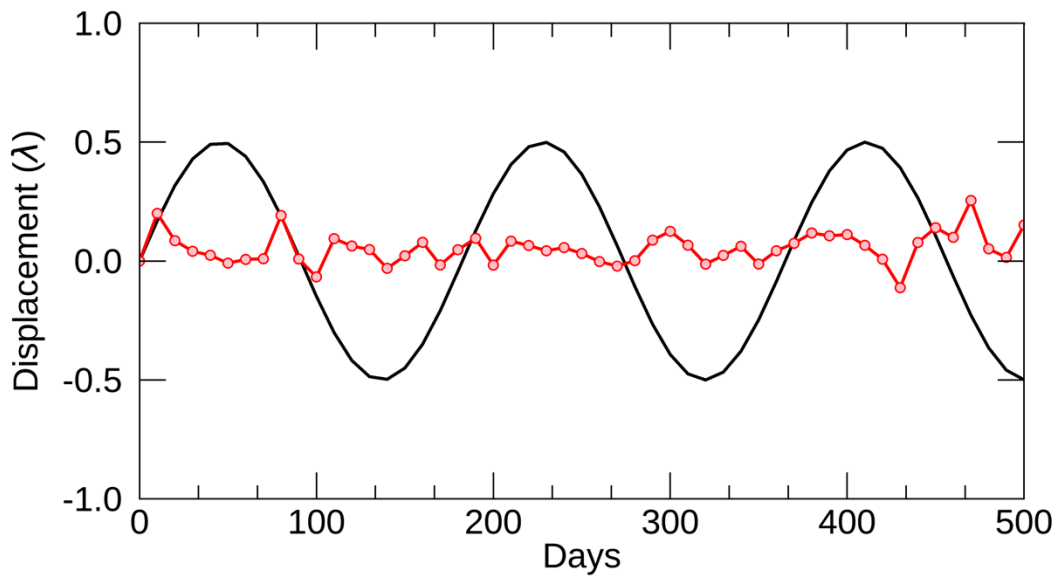
(a)



(b)

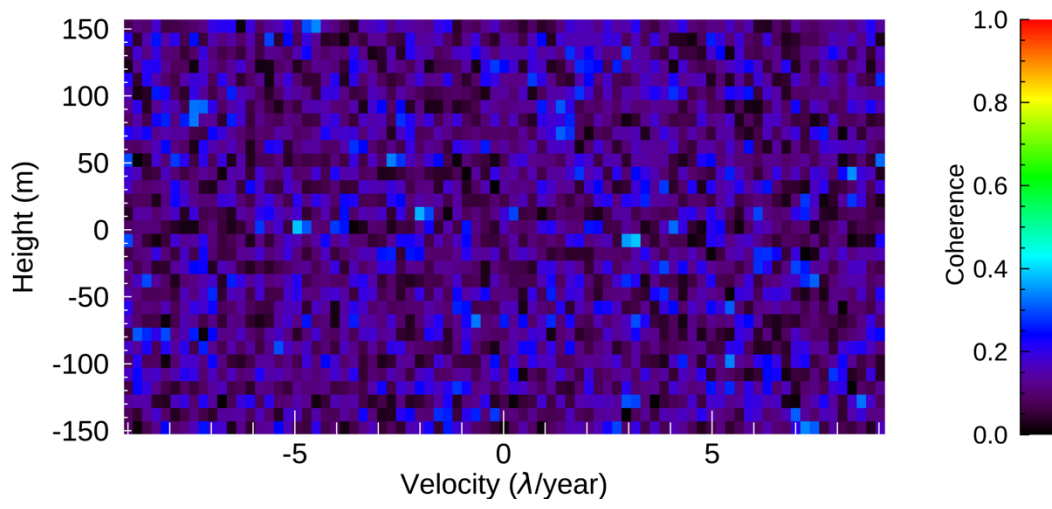


(c)

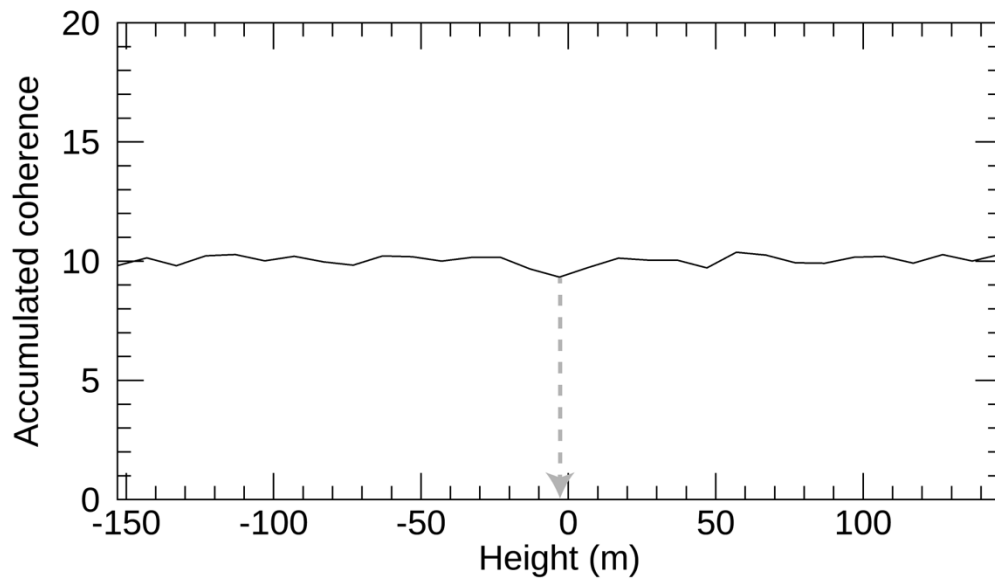


(d)

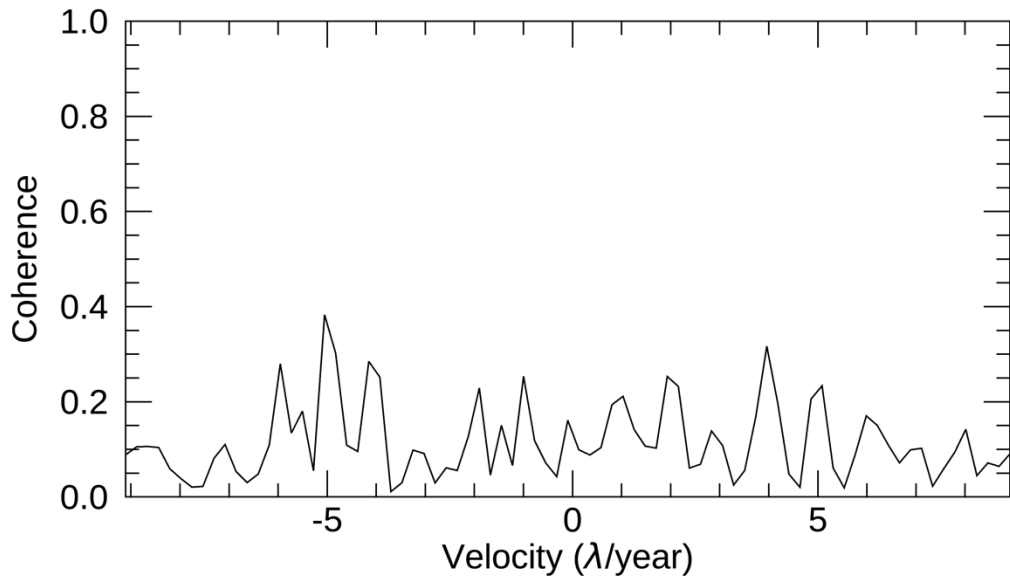
Figure 3.18: Results of NN-PSI with different velocity and height resolution, $0.5 \lambda/\text{year}$ and 23 m for EV spectrum. (a-d) The NN-PSI outputs: the EV spectrum defined by the range, the accumulated coherence profile along the height direction, the coherence profile in the velocity direction at the selected height, and the reconstructed displacement by NN-PSI in red and the generated displacement in black.



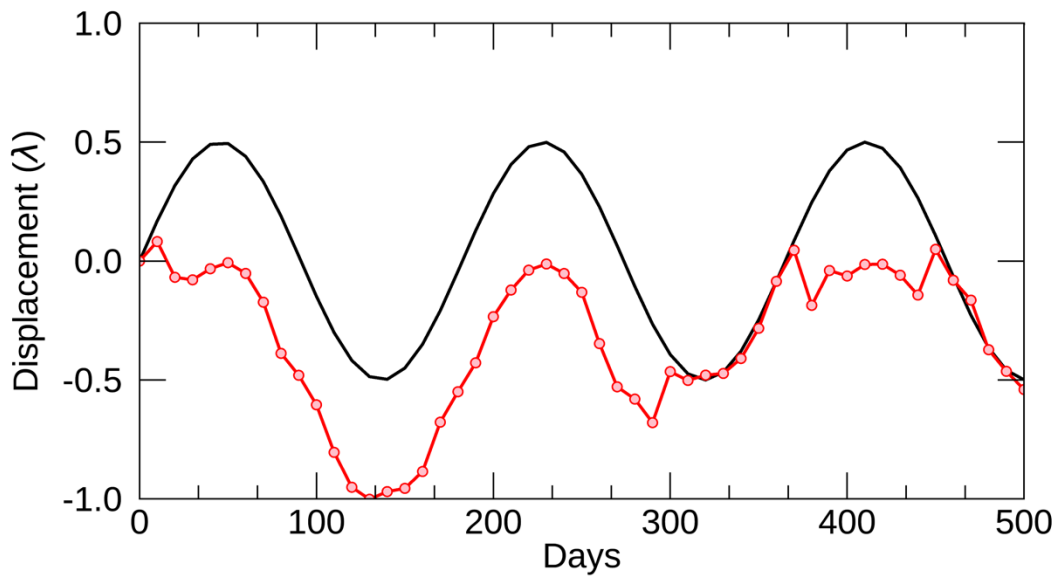
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3.19: Results of NN-PSI with different velocity and height resolution, $0.25 \lambda/\text{year}$ and 11 m for EV spectrum. (a-d) The NN-PSI outputs: the EV spectrum defined by the range, the accumulated coherence profile along the height direction, the coherence profile in the velocity direction at the selected height, and the reconstructed displacement by NN-PSI in red and the generated displacement in black.

Table 3.6 は、高さと変位速度の解像度が、23 m と 0.5 λ /year、11 m と 0.25 λ /year および 1 m と 0.03 λ /year に設定された場合の NN-PSI の推定変位と数値シミュレーションで作成した変位の RMSE を示す。RMSE は、それぞれ、0.031 λ 、0.035 λ および 0.001 λ となった。1 m と 0.03 λ /year の解像度の場合 (Figure 3.14d)、RMSE が最も低くなり、推定精度が最も高くなった。このことより、EV スペクトラムの解像度が低くなると、NN-PSI の推定精度が低下することを把握した。NN-PSI の変位推定にて使用する EV スペクトラムの高さと変位速度の解像度は、推定精度を向上させるためオーバーサンプルし、1 m と 0.03 λ /year を使用することとする。

Table 3.6: RMSE with the different height and velocity resolutions.

Velocity resolution (λ /year)	Height resolution (m)	RMSE (λ)
0.5	23	0.031
0.25	11	0.035
0.03	1	0.001

3.5 観測条件による推定精度への影響

時系列干渉解析法は、SAR 観測記録の観測回数と間隔により、変位速度アンビギュイティと解像度が変化するため、本節では衛星 SAR の観測条件に注目し、NN-PSI の評価を行う。観測回数と間隔は変位速度アンビギュイティに影響し、ベースライン距離の組み合わせは、高さアンビギュイティに影響するため、これらの条件を変更し、NN-PSI の推定精度への影響を評価する。

3.5.1 ベースライン距離

時系列干渉解析処理において、ベースライン距離と観測時間が線形の相関となった場合、高さの変位速度のそれぞれの位相差を識別することが困難となり、変位推定に問題が生じることが、Fattahi と Amelung (2013)の研究により指摘されている。NN-PSI においても、EV スペクトラムにて高さを決定し、その高さの位相差を使用して変位推定するため、数値シミュレーションにて変位を作成する際に、ベースライン距離と観測時間が線形の相関となるように設定し、NN-PSI への影響を確認する。作成する変位は、Figure 3.3d に示す周期的な変位とした。この変位の周期 Ft は半年、ピークピーク値 D は 1λ とした。Table 3.7 に、本項の数値シミュレーションの変位条件と観測条件で Table 3.1 から変更して使用するパラメータを示す。

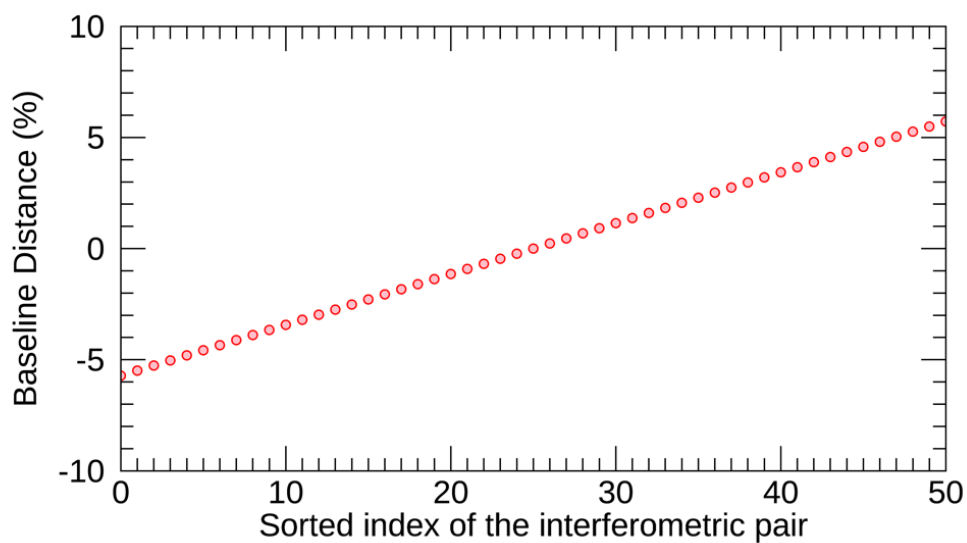
Table 3.7: Simulation parameters for the evaluation of the baseline distance.

Parameters	Values
Displacement Type	Sinusoidal
Peak to peak displacement (D)	1λ
Displacement frequency (Ft)	Half year
Baseline variance	1) $\pm 6\%$ (Linear Distribution) 2) $\pm 6\%$ (Linear Distribution) + 1% random distribution

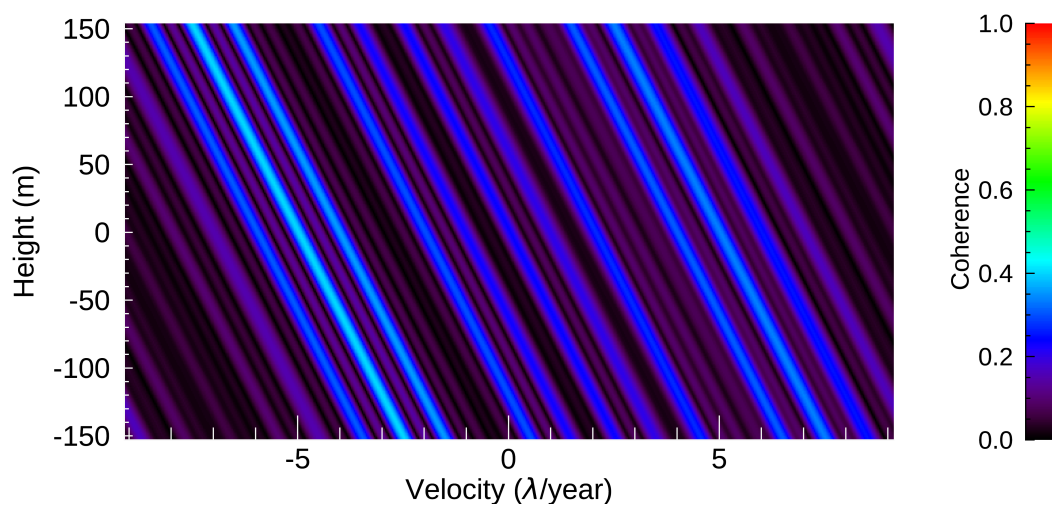
50 ペアのベースライン距離は、臨界ベースライン距離との割合いが、最小値と最大値が-3%と3%となる値とし、最大の分散が6%となるように設定した。ベースライン距離のばらつきが小さくなり、高さアンビギュイティの値が小さくなるため、EV スペクトラムの高さの計算範囲は $\pm 153\text{ m}$ とし、数値シミュレーションにより作成した周期的な変位を NN-PSI にて推定し、RMSE を算出した。

Figure 3.20 は、NN-PSI の推定結果を示す。Figure 3.20a は、線形の相関を持つベースライン

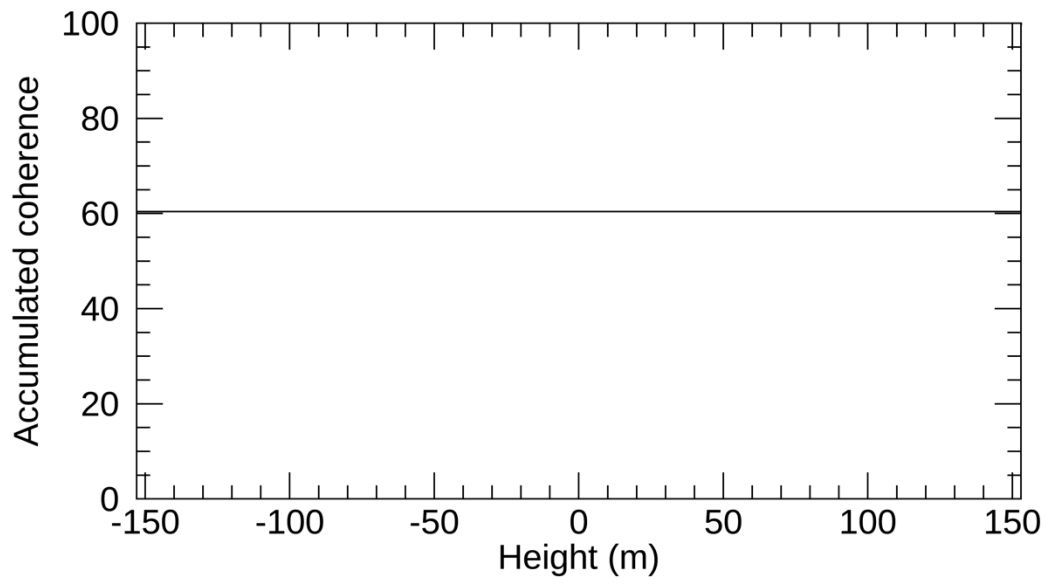
距離と観測時間の分布を示す。なお、この図の観測時間は等間隔であるため、横軸はインデックスの番号を使用して表示している。Figure 3.20b の EV スペクトラムは、時系列コヒーレンスの分布が変位速度方向ですべて同じ分布となり、高さを識別できない状態となった。Figure 3.20c は、各高さの変位速度方向における時系列コヒーレンスを累積したプロファイルを示し、全ての高さにおいて時系列コヒーレンスの累積した値が同じとなった。浮動小数点の誤差により計算上においては、推定に使用する高さは 37 m に決定され、その高さの時系列コヒーレンスプロファイル を Figure 3.20d に示す。Figure 3.20e が示すように、誤った高さにて推定しているため、本来の変位よりずれて推定されており、RMSE は 0.42λ となった。



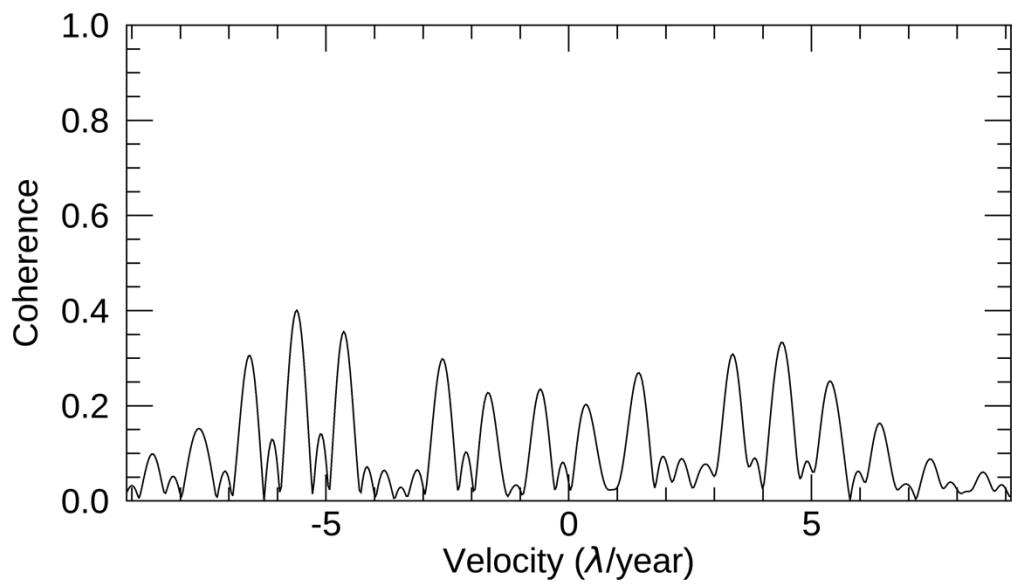
(a)



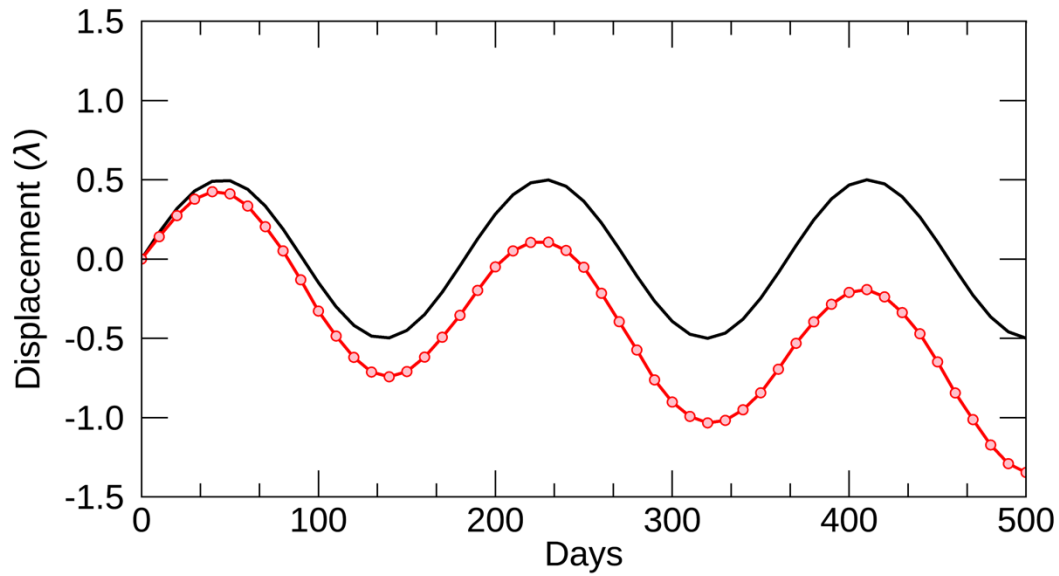
(b)



(c)



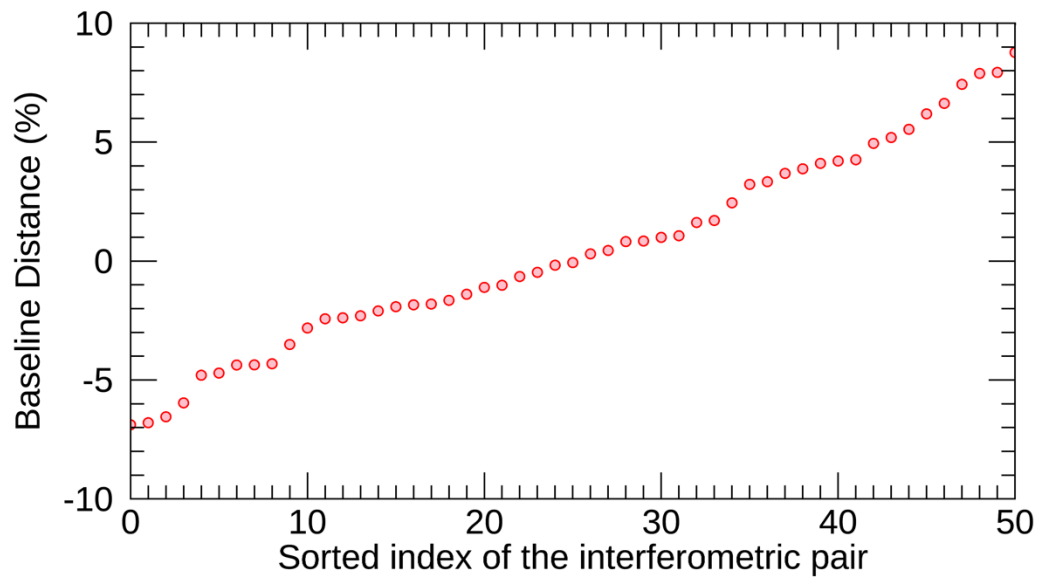
(d)



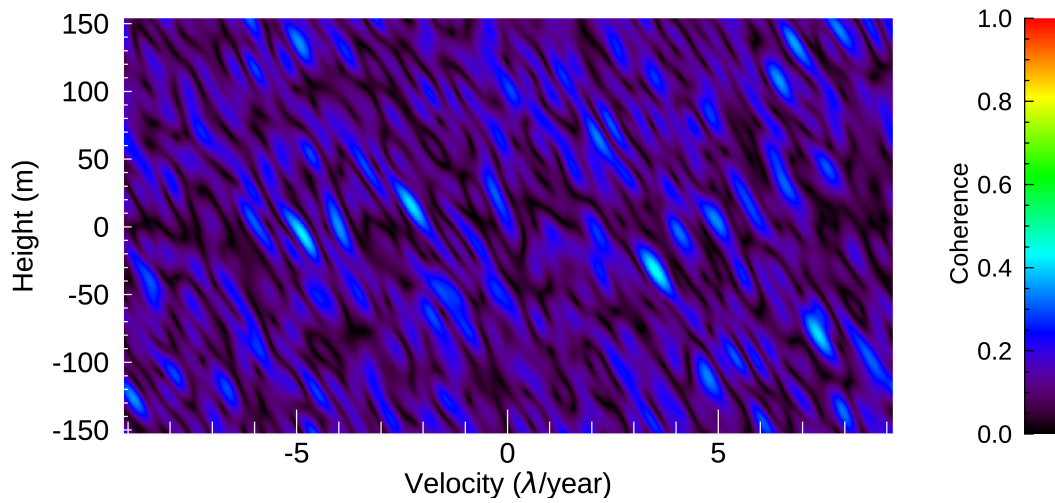
(e)

Figure 3.20: NN-PSI results with the linear distribution of the baseline distances. (a-e) the distribution of the baseline distance, the EV spectrum, the accumulated coherence profile along the height direction, the coherence profile in the velocity direction at the selected height, and the reconstructed displacement by NN-PSI in red and the generated displacement in black.

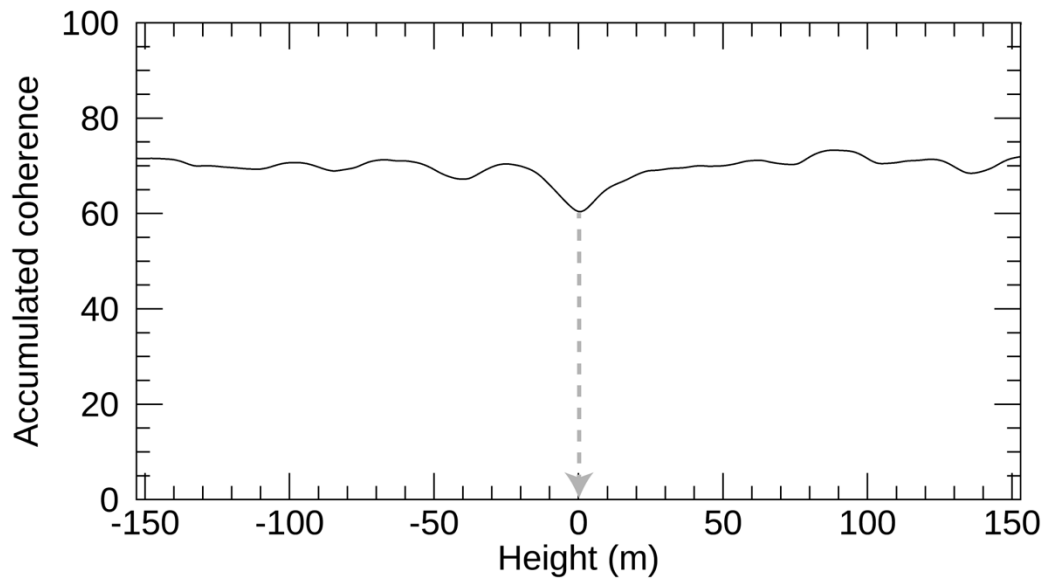
Figure 3.21 は、Figure 3.20a のベースライン距離に分散値を与え、同じ変位を NN-PSI により推定した結果である。分散値は臨界ベースラインの 1% に設定し、その分布は Figure 3.21a に示すとおりとなった。なお、この図の観測時間は等間隔であるため、横軸はインデックスの番号を使用して表示している。Figure 3.21b の EV スペクトラムは、ベースライン距離に分散値を与えることにより、高さ方向に時系列コヒーレンスが分散し、メインローブを識別できるようになっていることが分かる。Figure 3.21c は、高さ方向における時系列コヒーレンスのプロファイルであり、最小値の底辺が明確となり、その底辺は高さ 0 m を示した。高さ 0 m の時系列コヒーレンスプロファイルを図 3.21d に、NN-PSI による推定変位を図 3.21e に示す。推定した変位は、数値シミュレーションにより作成した変位とほぼ一致し、RMSE は 0.004λ となった。



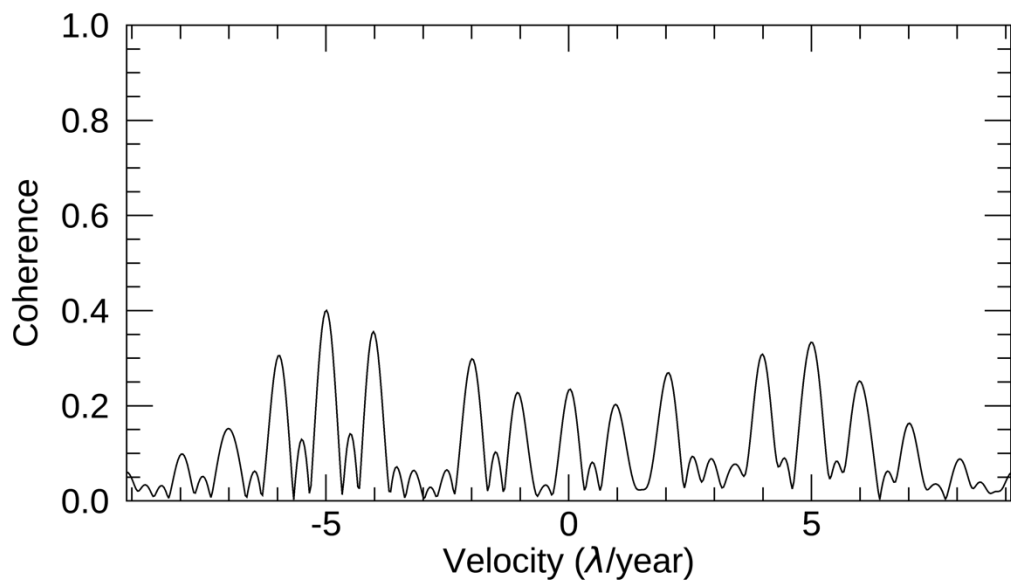
(a)



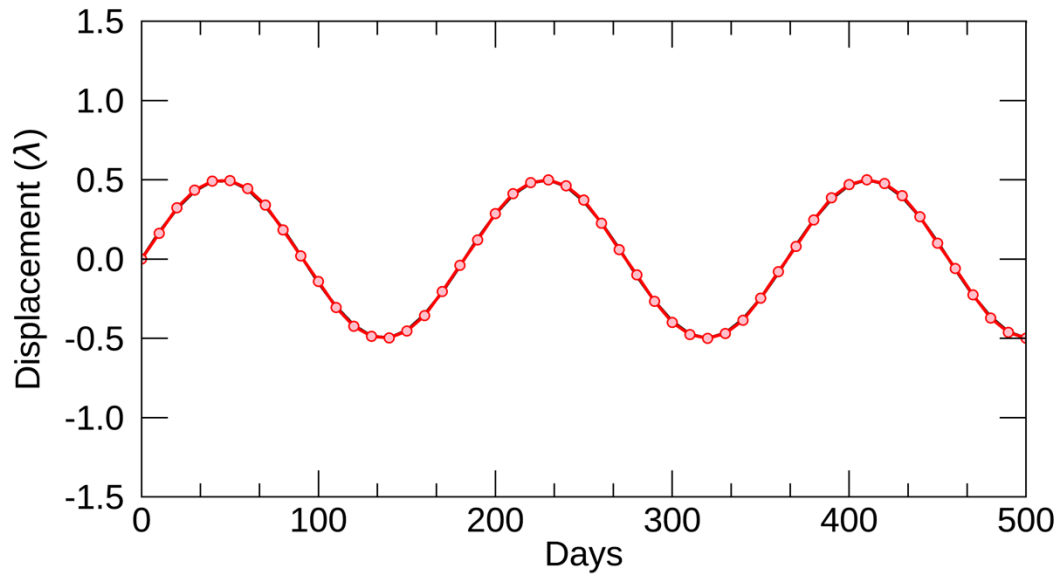
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure 3.21: NN-PSI results with the linear distribution of the baselines with 1% of the variance with the critical baseline distance. (a-e) the distribution of the baseline distance, the EV spectrum, the accumulated coherence profile along the height direction, the coherence profile in the velocity direction at the selected height, and the reconstructed displacement by NN-PSI in red and the generated displacement in black.

これらの結果より、ベースライン距離と観測時間が線形相関となる場合、高さ方向における時系列コヒーレンスの分散がなくなり、各高さで求めた変位速度方向の時系列コヒーレンスの累積値がすべて同じ値となる。このため、変位推定の際に考慮する高さを決定することができない。一方、線形相関に設定したベースライン距離の分布に分散値を与えると、各高さの時系列コヒーレンスの累積値が分散し、変位推定に必要な高さを決定することができる。NN-PSI において、観測回数や間隔が変位推定に適している条件でも、ベースライン距離の分布が観測時間と線形相関となる場合、推定精度は大きく低下する。よって、NN-PSI にて変位解析する際には、ベースライン距離の分布を確認し、EV スペクトラムにより高さの決定が可能かどうかを判断する必要がある。

3.5.2 観測回数と間隔

観測回数と間隔が NN-PSI に与える影響は、これまでと同様に時系列の変位を数値シミュレーションにて作成し、RMSE により評価する。本評価にて使用する変位は、もっとも広い範囲の変位速度アンビギティが必要となる周期的な変位とした。変位の周期 Ft は 1 年周期とし、観測期間を 750 日間、約 2 年間に固定した。観測回数を 76 回から 61 回まで変更し、観測間隔が 10 日か 20 日になるように観測日を設定した。本項の数値シミュレーションの条件で、Table 3.1 から

変更して使用する主なパラメータを Table 3.8 に示す。この分析では、観測回数の変更により観測間隔が変更され、変位速度アンビギュイティも変更される。つまり、観測回数を減らすことで、観測間隔の平均が大きくなるため、変位速度アンビギュイティも減少する。周期的な変位の変動量 D を 0λ から 1λ まで 0.1λ ずつ変更し、それぞれの設定条件にて RMSE を算出した。

Table 3.8: Modified parameters in the evaluation for the observation interval.

Parameters	Values
Total observation period (T)	750 days
Number of observations	61 to 76
Observation interval	10 or 20 days
Displacement Type	Sinusoidal
Peak to peak displacement (D)	0 to 1λ
Displacement frequency (F)	1 year

Figure 3.22 は、観測間隔と変位量 D の関係が RMSE の値により示されている。縦軸が変位量、横軸は平均の観測間隔日数となる。RMSE が 0.1λ より低く、プロット上で白く表示されている箇所が NN-PSI にて推定可能な変位量 D と観測間隔日数の組み合わせを示す。周期的な変位における変位量 D が 1λ の場合、必要な観測間隔は 10.4 日となり、750 日間で 72 回観測が必要となった。変位量が 0.3λ の場合、必要な観測間隔は 11.7 日となり、750 日間で 64 回の観測が必要となった。また、変位量 D が 0.3λ より低い場合は、60 回以下の観測でも変位推定が可能であることを把握した。

この結果は、NN-PSI で変位を推定するには、地表面変位量が増加するにつれ、変位速度アンビギュイティを大きくする必要があり、観測間隔の平均を短くする必要があることを示す。具体的には、2 年間の観測期間で、1 波長のピークピーク値を持つ周期的な変位を、NN-PSI にて推定する場合、11 日以下の観測周期が必要となる。本分析は周期的な変位を使用しており、他の変位タイプよりも変位速度アンビギュイティは大きく設定する必要がある。そのため、他の変位タイプの場合、同じ変位量を推定する場合は、観測周期の日数は 11 日より長く設定することが可能である。

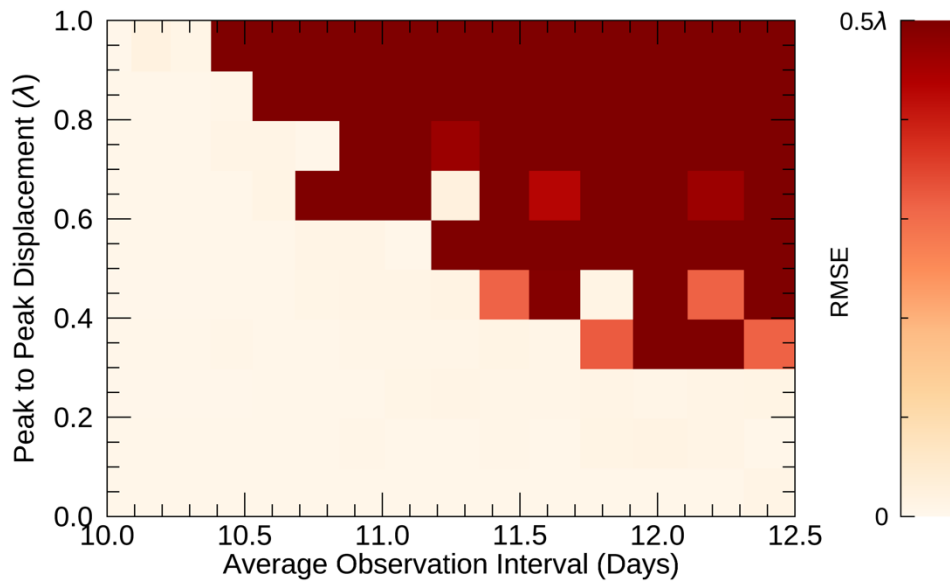


Figure 3.22: Relationship between the average observation interval and the peak to peak value in the sinusoidal displacement.

3.6 まとめ

数値シミュレーションにより、NN-PSI が推定可能な変位タイプや変位量について評価した。また、観測条件などに依存する変位推定への影響も数値シミュレーションにて確認し、本手法の適用範囲を確認した。

NN-PSI は、1 観測期間の変位量が $1/4$ 波長 (λ) の範囲内では、線形的な変位、ステップ変位、指数関数および周期的な変位の推定が可能であった。変位推定の精度を ConvPSI と比較すると、ステップ変位以外の変位タイプでは RMSE がほぼ 0λ となり、既往手法の推定精度を大幅に改善した。1 観測間隔の変位量が $1/4$ 波長 (λ) の範囲内では、NN-PSI の推定結果はほとんどばらつきがなく、NN-PSI の推定手法の安定性を確認した。

数値シミュレーションにおいて、NN-PSI にて非線形的な変位である周期的な変位についても問題なく推定できることを示した。周期的な変位は、1 観測間隔の変位量が $1/4$ 波長 (λ) に近くなると、変位推定の精度にばらつきが発生することを把握した。このばらつきを把握することにより、NN-PSI の推定結果における信頼性を確認できる可能性を示唆した。

NN-PSI の計算コストを削減するため、EV スペクトラムの高さと変位速度の計算範囲を変更し、数値シミュレーションを実施した。計算範囲を小さく設定した場合、変位の推定精度が大きく低下したことから、高い精度で変位を求める際には、計算範囲は観測条件から求まる高さの変位速度のアンビギュイティの値に従うことが望ましいことを把握した。なお、NN-PSI の変位推定の計算コストについては今後の課題となる。

NN-PSI に影響を与えると考えられる観測条件として、ベースライン距離、観測回数および間隔が変位推定に与える影響について分析した。ベースライン距離の分布が観測時間と線形相関となる場合、推定精度が大幅に低下し、NN-PSI にて変位推定する前にベースライン距離と観測時間の分布を確認する必要があることを示した。観測間隔も変位推定の精度に影響することを確認した。周期的な変位のピークピーク値が 1λ 、1 年周期の変位を推定する場合、2 年間で平均 11 日の観測間隔が必要となり、ピークピーク値を 0.3λ まで下げると、観測間隔を 13 日まで広げることができる。NN-PSI を適用するにあたり、観測記録の観測間隔日数により、推定できる変位量が増えることを明瞭にした。

3 章の参考文献

- Fattahi, H., & Amelung, F. (2013). DEM error correction in InSAR time series. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *51*(7), 4249–4259.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2227761>
- Lombardini, F. (2005). Differential tomography: A new framework for SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *43*(1), 37–44.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.838371>
- Wasowski, J., & Bovenga, F. (2014). Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi Temporal Interferometry: Current issues and future perspectives. *Engineering Geology*, *174*, 103–138. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.03.003>
- Zebker, H. a., & Villasenor, J. (1992). Decorrelation in Inteferometric Radar Echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *30*(5), 950–959.

第 4 章 NN-PSI の実観測記録への適用

4.1 はじめに

本章では、NN-PSI の変位推定における妥当性を確認するため、運用されている衛星 SAR の実観測記録を使用し NN-PSI の推定精度の確認と有効性について把握する。また、都市域における地盤沈下のモニタリングとして、NN-PSI を適用し手法の汎用性を確認する。

実観測記録を用いた NN-PSI の推定精度の確認では、日本の関東平野において GPS 観測ネットワークにて地表面変位のモニタリングが実施されているため、GPS 観測から求まる変位を使用し、NN-PSI の推定結果と比較する。また、既往手法からの改良点を把握するため、 2π アンビグイティにより不連続性を生じる位相差となる大変位や非線形的な変位を推定し、NN-PSI と ConvPSI の結果を比較する。関東エリアの九十九里地域や三浦半島においては、年間数センチの沈下が報告されており (Nonaka et al., 2020)、ConvPSI の変位推定における 2π アンビグイティの問題が、NN-PSI により改善されていることを確認する。また、東京湾のエリアには工業地域や商業施設の大規模建物が存在し、これらは気温による熱膨張により周期的に変位すると考えられる。このエリアの大規模建物の変位を推定し、NN-PSI が非線形的な変位に対しても有効であることを明瞭にする。

また、都市域の地表面モニタリングにおいて NN-PSI の有効性を確認するため、人為的な活動の影響により数センチ以上の地盤沈下が確認されている地域を選定し、その変位を推定する。東京都調布市では、2020 年 10 月に地下トンネル工事による道路陥没が確認されており、この周辺は地盤沈下している可能性がある。また、ヨーロッパのハンガリーのブタペストでは、地下鉄工事による地盤沈下が確認されている。この二つの関心領域において NN-PSI を適用し、地下工事や地盤沈下の発生時期などの関係性を把握する。また、調布市とブタペストの評価は、異なる衛星搭載型 SAR センサを使用し、NN-PSI の汎用性についても確認する。

4.2 変位推定精度と有効性

日本の関東平野には、GPS 観測点が 80 点以上あり、これらの観測点から求まる変位をグランドトゥースとする。実観測記録に NN-PSI を適用し、その推定変位とグランドトゥースの比較を行い、推定精度を確認する。関東平野は、フィリピン海プレート、太平洋プレート、およびユーラシアプレートが接触する地域であり、日本列島のなかでも地殻変位が活発な地域である(遠田, 2018)。年間数センチメートルの地殻変位による変位が確認されており、ConvPSI の変位推定では問題となる 2π アンビギュイティの影響を受ける大変位での NN-PSI の推定結果について評価する。また、大規模建物における熱膨張による非線形的な変位についても推定結果を評価する。今回の評価の対象エリアを Figure 4.1 に示す。

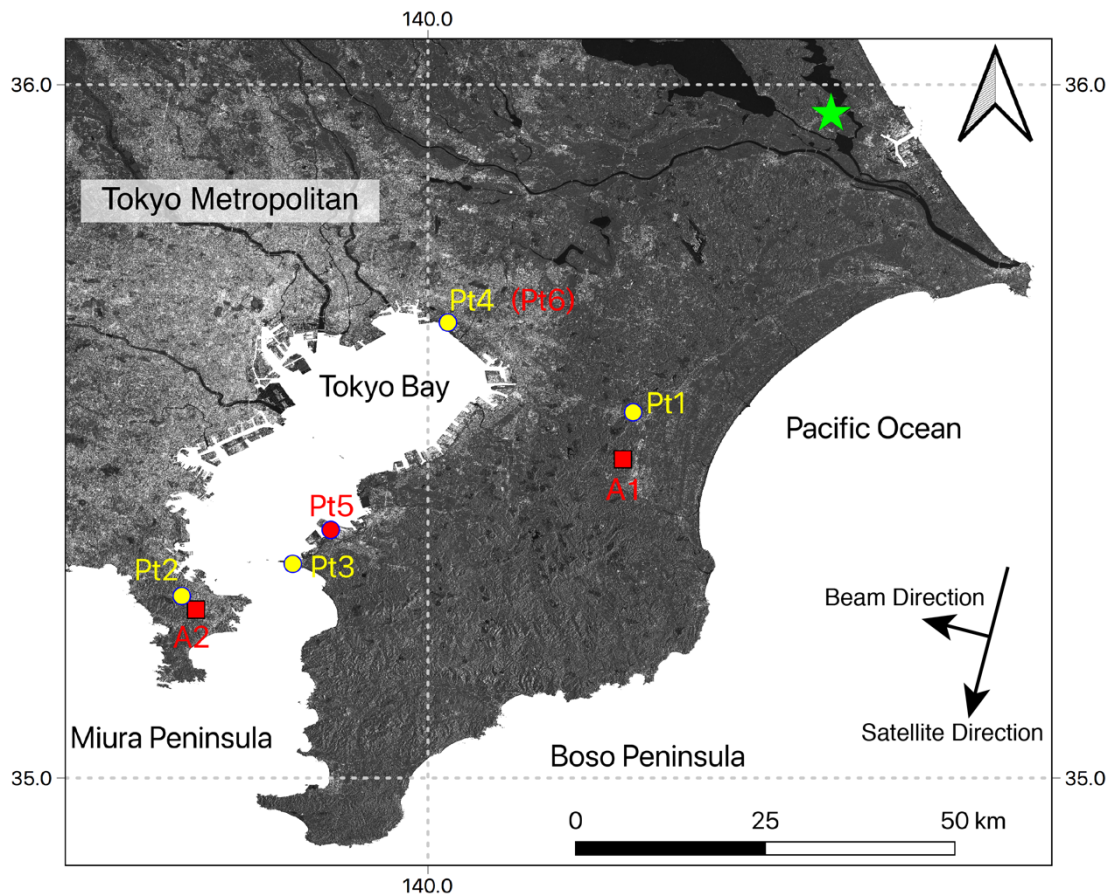


Figure 4.1: Region of the interest for the NN-PSI evaluation in Kanto region, Japan. The yellow points, Pt1, Pt2, Pt3, and Pt4, indicate the GPS stations, and red points, Pt5 and Pt6 are the measurement points by NN-PSI, and the red areas, A1 and A2, are the measurement areas by NN-PSI. The green star is the reference point of the displacement for GPS and NN-PSI in this area.

実観測記録における変位推定には、欧州宇宙機関 (European Space Agency: ESA) が運用している、Sentinel-1 の観測記録を使用した。Sentinel-1 は、2014 年に 1 号機 (Sentinel-1A) が打ち

上げられ、2015年の後半から世界中の陸域を定常的に12日間隔で観測し、観測記録を無償で提供している(ESA)。2016年には2号機(Sentinel-1B)が打ち上げられ、定常的にSAR観測が実施されている。今回の検証では、2号機が打ち上げられ定常観測がより安定している2017年1月から2018年12月末までの2年間の観測記録を使用した。観測条件をTable 4.1に、解析に使用する観測記録の観測日をTable 4.2に整理する。Sentinel-1は、同一シーンを撮影する際のベースライン距離は、すべての観測で50 m以内に収まるように運用されている。この運用方法では、NN-PSIのEVスペクトラムにおける高さの解像度の数値が大きくなり、100 m以上となる。この数値は、高層ビルなどで発生する複数の後方散乱点を検出するには適切な数値ではないが、今回の評価では1点の後方散乱点を検出するため、この高さの解像度は、NN-PSIの変位推定には大きな影響はないと考えられる。

Table 4.1: Observation conditions.

Parameters	Values
Sensor	Sentinel-1
Number of the acquisitions	59
Observation interval	12 days
Satellite direction	Descending
Beam direction	Right
Incidence angle	39.0°
Wavelength (λ)	55.5 mm
Average baseline distance	39.1 m
Average temporal baseline	12.6 days
Height resolution	113.8 m
Height ambiguity	585.6 m
Velocity resolution	14.1 mm/year (0.25 λ /year)
Velocity ambiguity	802.1 mm/year (14.5 λ /year)

Table 4.2: Sentinel-1 observation dates.

No.	Year 2017	Year 2018
1	2017/01/01	2018/01/08
2	2017/01/25	2018/01/20
3	2017/02/18	2018/02/01
4	2017/03/02	2018/02/13
5	2017/03/14	2018/02/25
6	2017/03/26	2018/03/09
7	2017/04/07	2018/03/21
8	2017/04/19	2018/04/02
9	2017/05/01	2018/04/14
10	2017/05/13	2018/04/26
11	2017/05/25	2018/05/08
12	2017/06/06	2018/05/20
13	2017/06/18	2018/06/01
14	2017/06/30	2018/06/13
15	2017/07/12	2018/06/25
16	2017/07/24	2018/07/07
17	2017/08/05	2018/07/19
18	2017/08/17	2018/07/31
19	2017/08/29	2018/08/12
20	2017/09/10	2018/08/24
21	2017/09/22	2018/09/05
22	2017/10/04	2018/09/17
23	2017/10/16	2018/09/29
24	2017/10/28	2018/10/11
25	2017/11/09	2018/10/23
26	2017/11/21	2018/11/04
27	2017/12/03	2018/11/16
28	2017/12/15	2018/11/28
29	2017/12/27	2018/12/10
30		2018/12/22

4.2.1 観測記録の解析手法

Sentinel-1 の観測記録に NN-PSI を適用し、変位推定をする処理手順を Figure 4.2 に示す。また、変位推定の相違を確認するため ConvPSI を同じ観測記録に適用した。変位推定の処理は、干渉処理、軌道や地形による位相除去、大気ノイズ除去、EV スペクトラムの作成、高さの決定および変位推定処理という手順になる。NN-PSI と ConvPSI は、高さの決定方法や変位推定の処理内容は異なるが、処理手順は同じであるため、この図内では同一のフローとしている。なお、干渉画像から地形による発生する位相差を取り除くために使用する参照 DEM は、国土地理院の基盤地図情報ダウンロードサービスより提供されている数値標高モデルの 10 m メッシュの DEM を使用した(国土交通省国土地理院, 2017)。

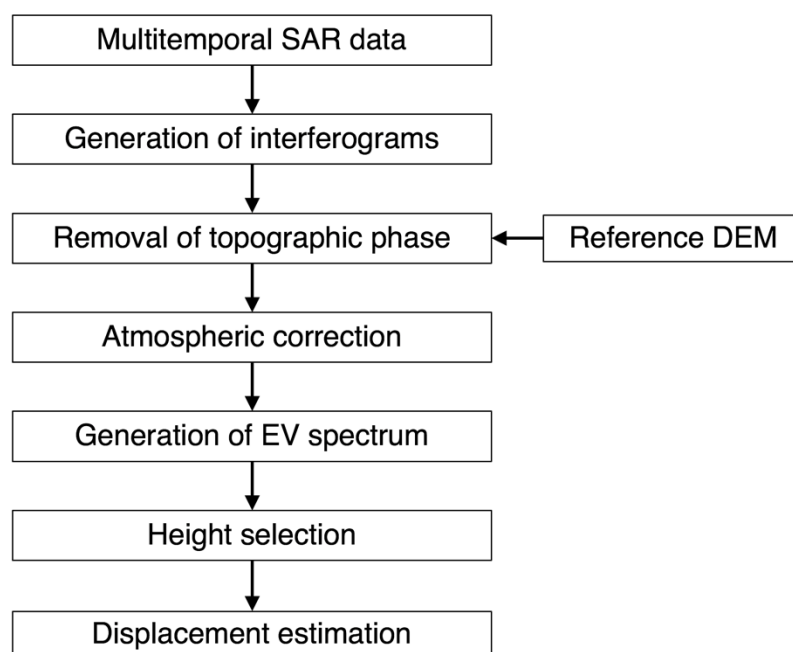


Figure 4.2: Flowchart for the data process of NN-PSI and ConvPSI.

フロー内の干渉処理においては、単一のマスタ画像を決定し、そのマスタ画像と他の画像のすべての組み合わせの干渉ペアを決定した。マスタ画像は、干渉ペアのベースライン距離と観測期間の中間値である、2017年10月16日の観測日の観測記録とした。各ペアのベースライン距離と観測時間の関係（コネクショングラフ）を Figure 4.3 に示す。コネクショングラフにおいて、ベースライン距離と観測時間については、線形の相関が見られないため、NN-PSI での変位推定が可能であると考えられる。

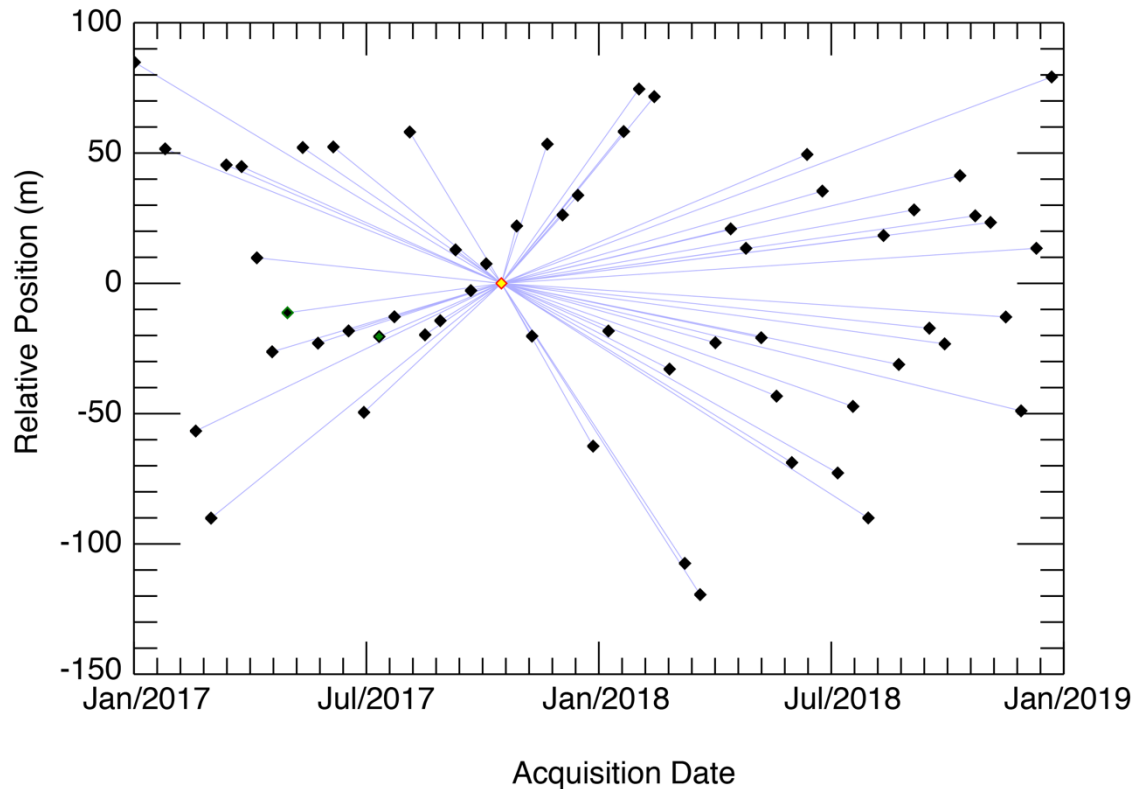


Figure 4.3: Combination of the interferometric pairs used in the PSI approaches. The yellow square shows the master acquisition, and the black squares are the slave acquisitions. The horizontal axis shows the date of the acquisition, the vertical axis shows the baseline length in meters, and the blue lines show the combination of the interferometric pairs.

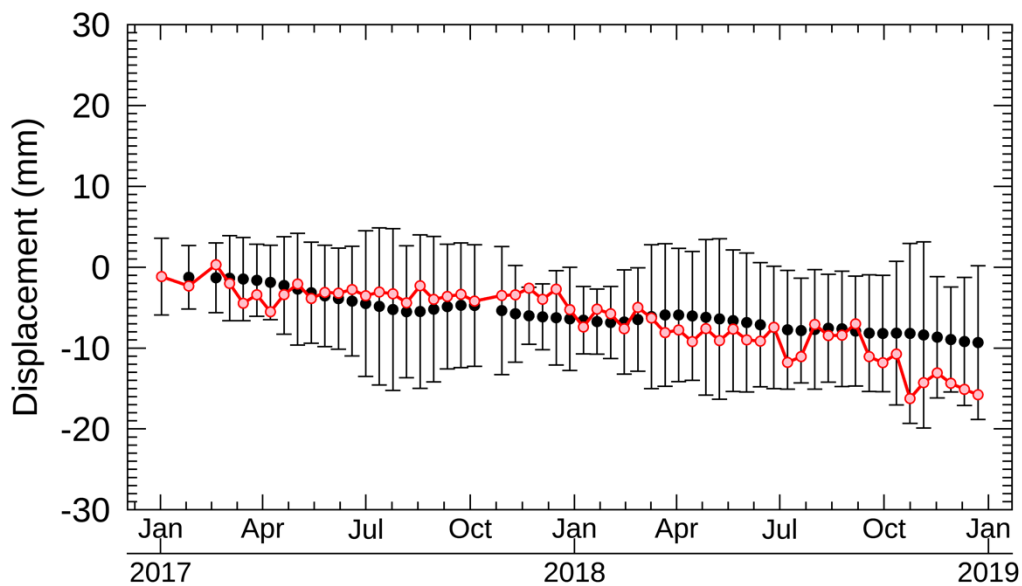
4.2.2 GPS との比較

NN-PSI により推定した変位を GPS から求まる変位と比較し、精度を確認した。グラントゥールスは、Figure 4.1 に示されている電子基準点 (GEONET: GNSS Earth Observation Network System)、Pt1 から Pt4 における観測記録を使用した(国土交通省国土地理院, 2021)。GEONET の観測記録には、毎日の基準点の X、Y、Z 方向の変位量の観測記録が提供されており、NN-PSI の推定結果と比較することが可能である。Sentinel-1 の観測期間に合わせ、2017 年 1 月 1 日から 2018 年 12 月 31 日までの GEONET の観測記録を使用した。解析における GEONET の ID と地名について Table 4.3 に記述する。

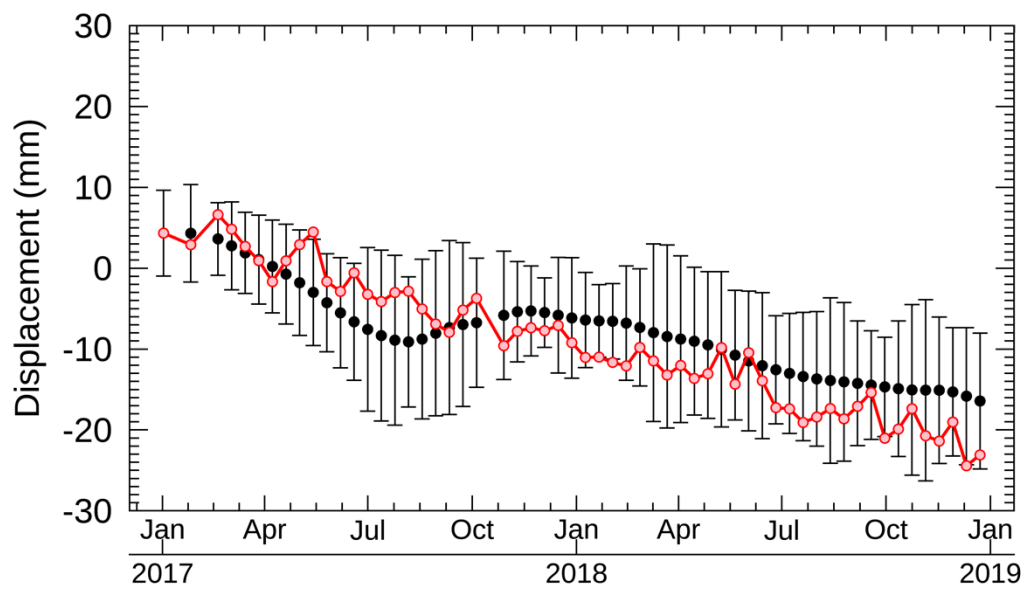
Table 4.3: Description of GEONET data.

Points	GEONET ID	Location name
Pt1	93027	OOAMISHIRASATO
Pt2	93067	YOKOSUKA
Pt3	93036	FUTTTSU
Pt4	950225	CHIBAHANAMIGAWA

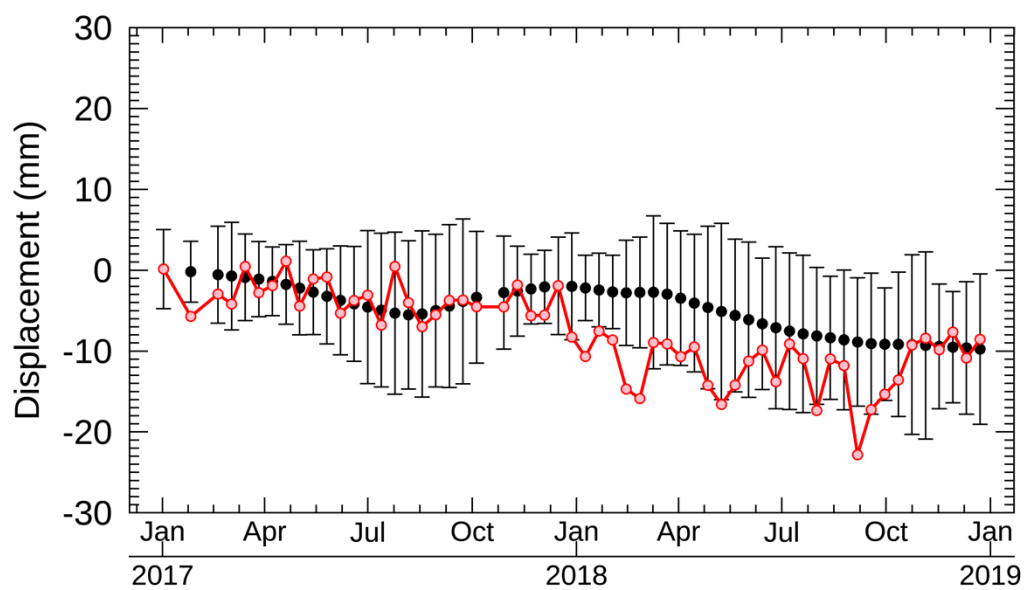
なお、Bawdenら(2003)の研究では、GPS観測は垂直方向に20mm、水平方向に5mm程度の観測誤差が含まれていることが示されており、GEONETについても同程度の誤差が含まれていると考えられる。そのため、SAR観測と同じ観測日のGEONETの観測記録においても、観測誤差が大きいため、NN-PSIの結果と直接比較することができない。そこで、GEONETの観測記録を30日のウィンドウ幅で移動平均を行い、その結果をスプラインフィットした変位を比較に使用した。このウィンドウ幅はSAR衛星の観測間隔に合わせて設定している。また、NN-PSIにより推定された変位は、Sentinel-1のLOS方向(Line Of Sight:視線)の変位となる。そのため、GEONETの変位をSentinel-1のLOS方向の変位に変換した。NN-PSIの推定変位とGEONETの観測記録をLOS方向に変換した変位によりRMSEを算出した。Pt1からPt4における、NN-PSIの推定結果とGEONETの変位量のプロットをFigure 4.4に示す。この図では、GEONETのLOS方向の変位に加え、観測日の前後15日の観測記録における標準偏差をエラーバーに示している。Pt1からPt4のRMSEをTable 4.4に整理する。



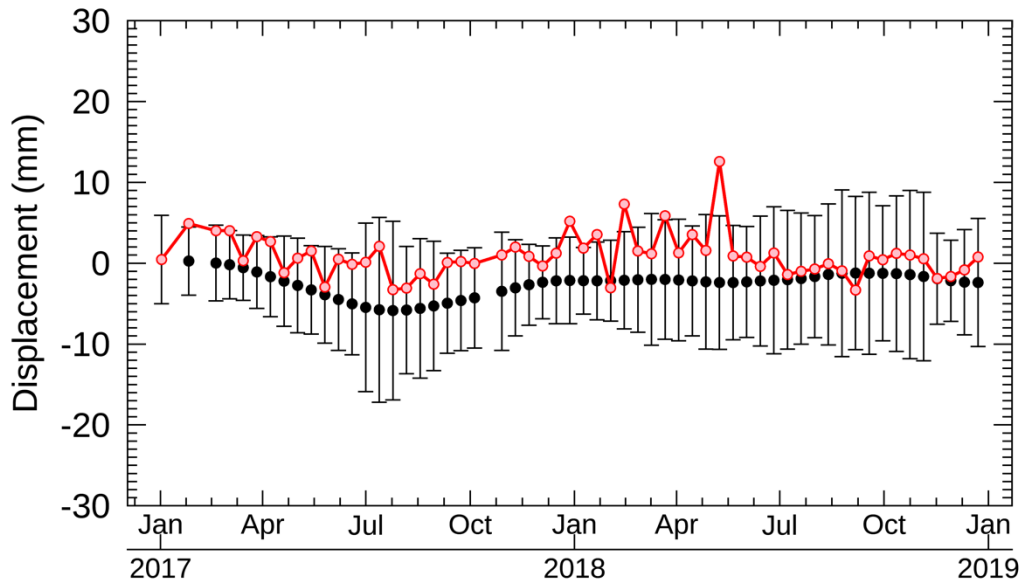
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 4.4: Displacement comparison between NN-PSI and GEONET. The black point shows the GEONET displacements converted to the line LOS (line of sight) direction, and the error bar shows the standard deviation from 15 days before of the observation time to that after 15 days (total 30 days). The red line shows the displacements estimated by NN-PSI. (a-d) the displacements at Pt1, Pt2, Pt3, and Pt4 respectively.

Table 4.4: RMSE between GEONET and NN-PSI.

Observation Point	RMSE (mm)
Pt1	2.1
Pt2	3.5
Pt3	3.9
Pt4	3.5

Figure 4.4 が示す GEONET の LOS 方向の変位量は、2 年間で、Pt1 は 10 mm、Pt2 は 20 mm、および Pt3 は 10 mm 程度、センサから離れる沈下傾向であり、Pt4 では他のポイントのような沈下傾向の変位は確認できなかった。RMSE は、Pt1 から Pt4 でそれぞれ 2.1 mm、3.5 mm、3.9 mm および 3.5 mm となり、すべてのポイントで 2 年間で 4 mm 以下の RMSE となった。これらの検証点においては、ConvPSI による変位推定も実施した。しかし、関心領域は地殻変位が活発であり、ConvPSI による推定変位は 2π アンビギュイティの影響を受けるため、GEONET の変位と比較することができなかった。NN-PSI の推定変位量は、GEONET の変位量の標準偏差の範囲に収

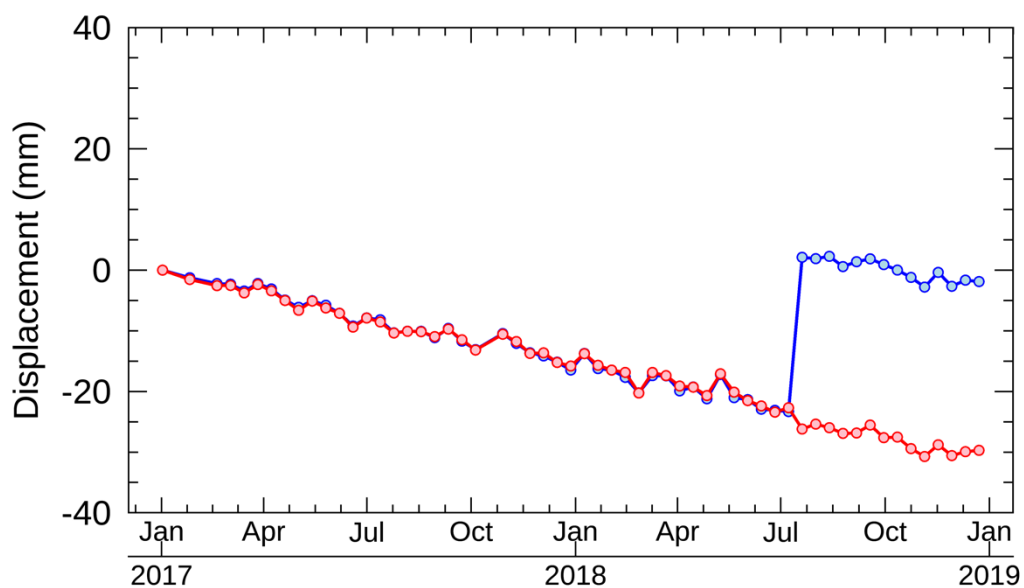
まっており、2年間の変位の傾向は概ね一致している。NN-PSIの推定変位がGEONETに比べて多少ばらつく傾向にあるが、面的にミリメートルの精度で変位推定できることを考慮すると、GEONETや一般的なGPSの空間解像度の不足を十分に補える手法と考えられる。

4.2.3 既往のPSIとの比較

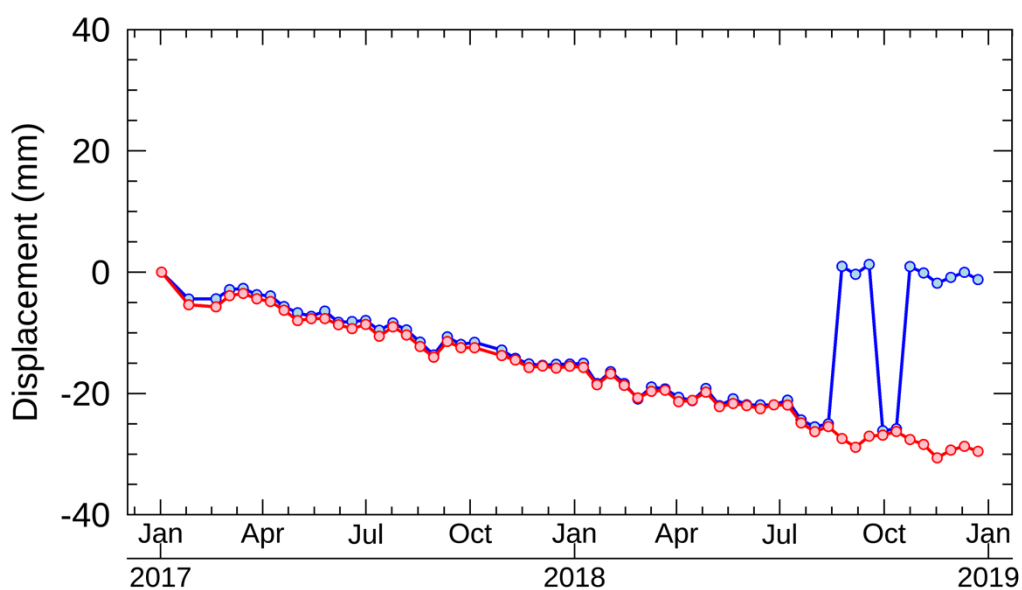
NN-PSIの変位推定の精度の把握に加えて、既往手法において問題となっている、 2π アンビギュイティにより不連続性が発生する位相差となる大変位や非線形的な変位における推定が、NN-PSIにより改善されているかを把握する。

i 2π アンビギュイティを含む変位

NN-PSIの推定方法は、 2π アンビギュイティにより不連続性が発生する位相差となる大変位についても問題なく推定が可能であるため、ConvPSIと比較しその有効性について評価する。今回の関心領域に含まれる千葉県のパ洋洋側の九十九里や、神奈川県のパ浦半島は、地殻変位により年間数センチ変位しているため、Figure 4.1内に示されているA1とA2のエリアにおいて、NN-PSIとConvPSIにて変位推定を行った。A1とA2の時系列の推定変位の一列をFigure 4.5に示す。Figure 4.5(a,b)ともに、NN-PSIの推定結果は観測期間を通して沈下傾向を示し、ConvPSIの推定結果において2018年の7月から8月にかけて、 2π アンビギュイティによる不連続性が見られた。A1とA2は空間的に距離が離れており、不連続性がほぼタイミングで発生しているため、広範囲の変位量が大きい地殻変位による影響と考えたが、Figure 4.5のNN-PSIの結果からは急激に沈下する傾向は確認できない。



(a)



(b)

Figure 4.5: Estimated displacement of NN-PSI and ConvPSI around A1 and A2. (a,b) show the time evolutions of A1 and A2. The red and blue lines show the resulting displacement of NN-PSI and ConvPSI, respectively.

Figure 4.5 に示している変位推定に使用した、NN-PSI と ConvPSI の変位による位相差を Figure 4.6 に示し、ConvPSI の結果における不連続性の詳細について把握する。Figure 4.6(a,b) は、A1 における変位の位相差を示しているが、NN-PSI および ConvPSI により推定された位相差は、異なる手法で算出されているが、ほぼ同じ位相差となっていることが分かる。また、Figure 4.6(c,d) の

A2 における位相差に関しても、NN-PSI と ConvPSI でほぼ同じ位相差となっている。ConvPSI は、算出した位相差がそのまま変位となるため、不連続性を含んだ変位となる。NN-PSI の位相差は、連続した変位を示すため、1 観測期間で位相差の差が 2π 以上となる場合は補正を行うことができる。その結果、NN-PSI の時系列の変位は観測期間を通して、沈下傾向の変位となる。A1 と A2 は、観測開始から継続的に 20 mm/year 程度の地盤沈下が発生しており、これらはプレート活動による地殻変位による影響である。Figure 4.6(a,b)の位相を確認すると、累積する変位が 2π 以上となる観測日にて、ConvPSI の変位に不連続性が発生している。Figure 4.6d の ConvPSI の結果については累積して 2π 以上となった変位が隆起し、また沈下する傾向が繰り返されたため、不連続性が複数回発生する結果となっている。これらの不連続性は、解析期間を短くして対応することも可能である（マルチマスタの手法）。しかし、一般的な PSI においては観測期間を短くすると、大気ノイズが十分に除去できず、EV スペクトラムによる高さの決定も正しく求まらず、変位推定の精度が低下する。PSI はシングルマスタでの解析が前提となるため、マルチマスタにおける解決方法は、1 章で概説した SBAS などの他の時系列干渉解析手法に委ねる。

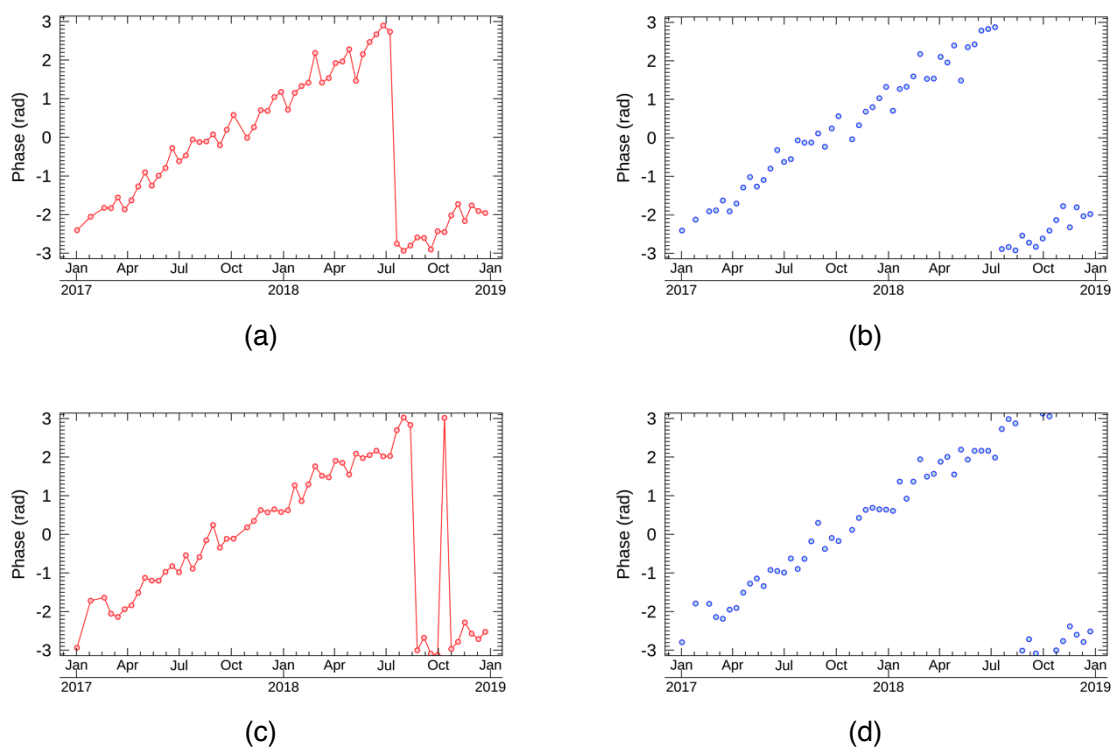


Figure 4.6: Resulting displacement phase of NN-PSI and ConvPSI around A1 and A2. (a,b) show time evolutions of A1, and (c,d) show those of A2. The red and blue lines show the result of NN-PSI and ConvPSI, respectively.

A1 と A2 のエリア近辺では、2018 年 6 月の地殻変位の概況にて、房総半島沖のフィリピン海プレートと陸側のプレートの境界面で発生している「ゆっくりすべり（スロースリップ）現象」

が、国土地理院により報告されており(国土交通省国土地理院, 2018)、この変位が加わることにより、ConvPSI により推定された変位には不連続性が示されている可能性がある。Figure 4.7 と Figure 4.8 に、A1 と A2 から最も近傍にある、Pt1 と Pt2 の GEONET の観測記録の東西成分、南北成分、垂直成分、そして SAR センサの LOS 方向の変位量に変換した時系列変位、そして Figure 4.4 で示したように、LOS 方向の GEONET の変位を Sentinel-1 の観測日前後の 15 日(合計 30 日) で平均化した変位と標準偏差を示す。Figure 4.7(a,b)では、2018 年の 6 月から 7 月にかけてスロースリップ現象と考えられる変位(約 20 mm 程度)が確認できるが、Figure 4.7(c,d)の垂直方向の変位、LOS 方向の変位では、これらの影響による変位がほとんど確認できないのが分かる。また、Figure 4.8 (b)も同様に、スロースリップと考えられる変位が見られるが、Figure 4.8 (d)の LOS 方向の変位では、この現象は確認できない。Figure 4.7 と Figure 4.8 (e)に示された、Sentinel-1 の観測日における GEONET における変位の傾向においても、東西や南北成分の変位にて確認できるスロースリップによる変位が確認できないことが分かる。これは、スロースリップが発生している期間に対し、衛星の観測間隔が長いためと考えられる。さらに、SAR の観測記録における干渉解析の性質上、衛星の軌道方向(南北)の変位を推定することが難しい。したがって、Figure 4.5 の NN-PSI の推定結果においてスロースリップによる変位を明確に確認できないのは、SAR 干渉解析法の特性により、変位を検出できなかった可能性が大きい。

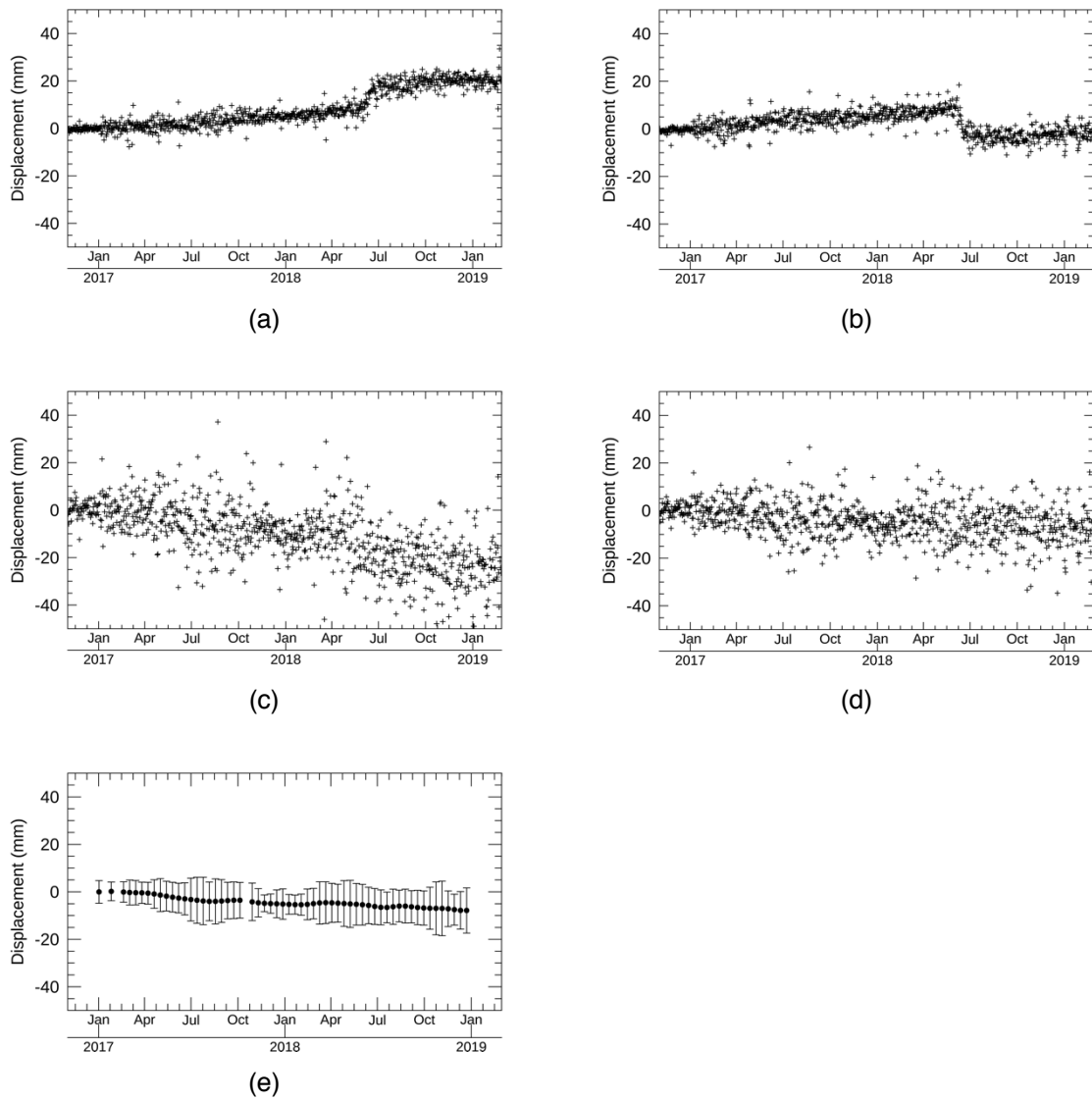


Figure 4.7: Displacement components of GEONET (93027) in time series. (a-c) show west-east, north-south, and vertical displacement component of GEONET data from the beginning of 2017 to the end of the 2018 at Pt2, respectively. (d) shows the GEONET displacement projected on to the Sentinel-1 LOS direction, and (e) does the averaged LOS displacement of GEONET with 30 days window on the Sentinel-1 observation dates.

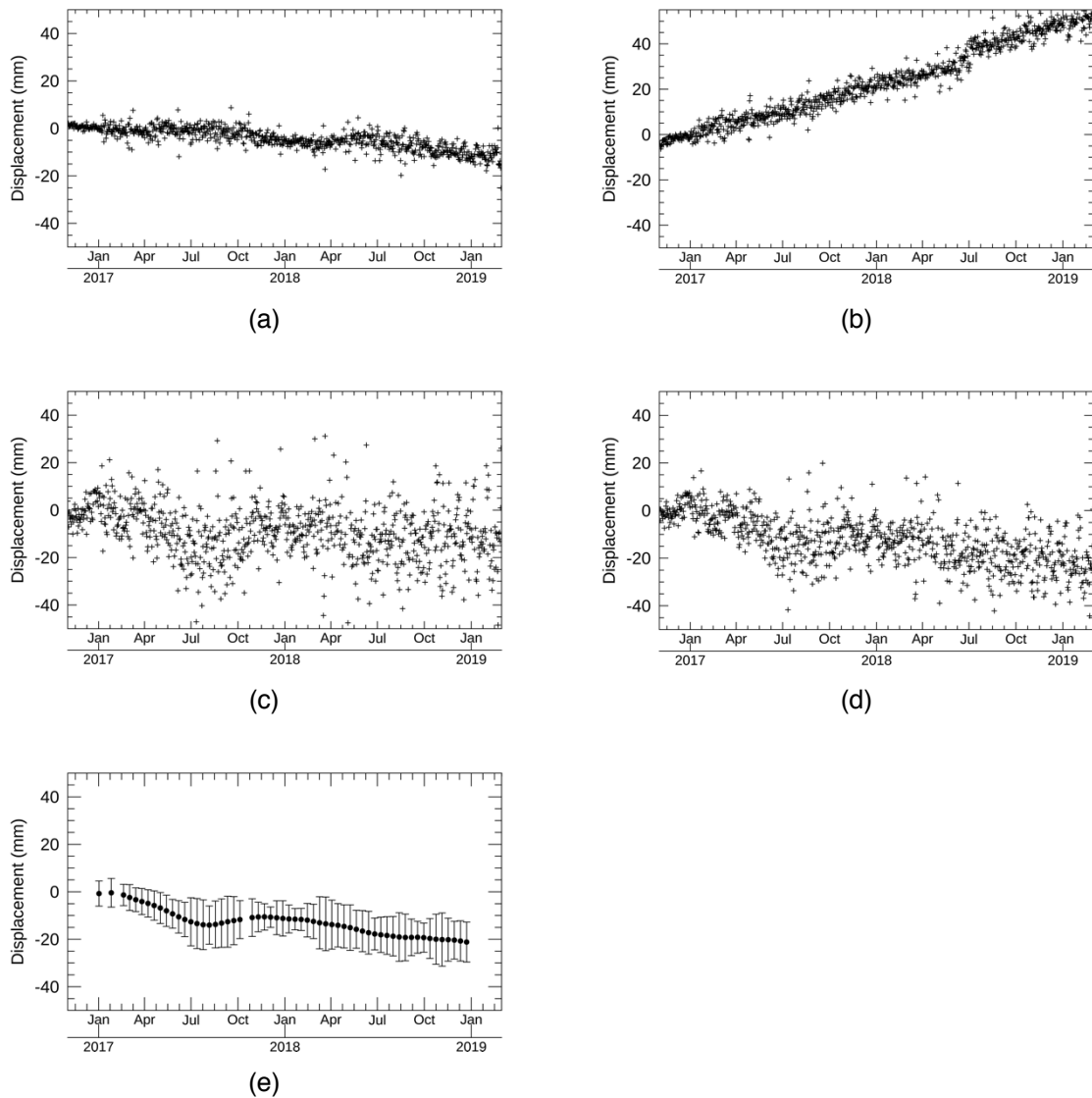


Figure 4.8: Displacement components of GEONET (93067) in time series. (a-c) shows west-east, north-south, vertical displacement component of GEONET data from the beginning of 2017 to the end of the 2018 at Pt2, respectively. (d) shows the GEONET displacement projected on to the Sentinel-1 LOS direction, and (e) does the averaged LOS displacement of GEONET with 30 days window on the Sentinel-1 observation dates.

解析エリア全体の地表面変位を面的に把握するため、GEONET の観測記録を使用し変位の傾向を確認した。Figure 4.5 のプロットでは、ConvPSI では 2018 年後半に変位に不連続性がみられたため、2018 年 1 月から 6 月まで (T1) と 2018 年 7 月から 12 月まで (T2) の 2 つの期間を設定し、T1 と T2 の年間平均変位量を求めた。この変位量は、LOS 方向の変位量に変換したものである。GEONET 観測点は離散的に分布するため、空間補完をおこなうクリギング法により解析エリア全体の年間平均変位量を算出した。T1 と T2 における、年間平均変位量を Figure 4.9 に示す。

T1 から T2 において、房総半島と三浦半島の南端においては平均変位量が大きくなる傾向が強いが、それ以外の箇所は、あまり大きな変化は確認できなかった。これらの傾向は、Figure 4.5 で示されている時系列の変位プロットと同じであり、A1 と A2 のエリアでは、スロースリップの影響は少なく、地殻変位が大きいため 2π アンビギュイティによる不連続性の影響を受ける変位となっていることを支持する結果となった。

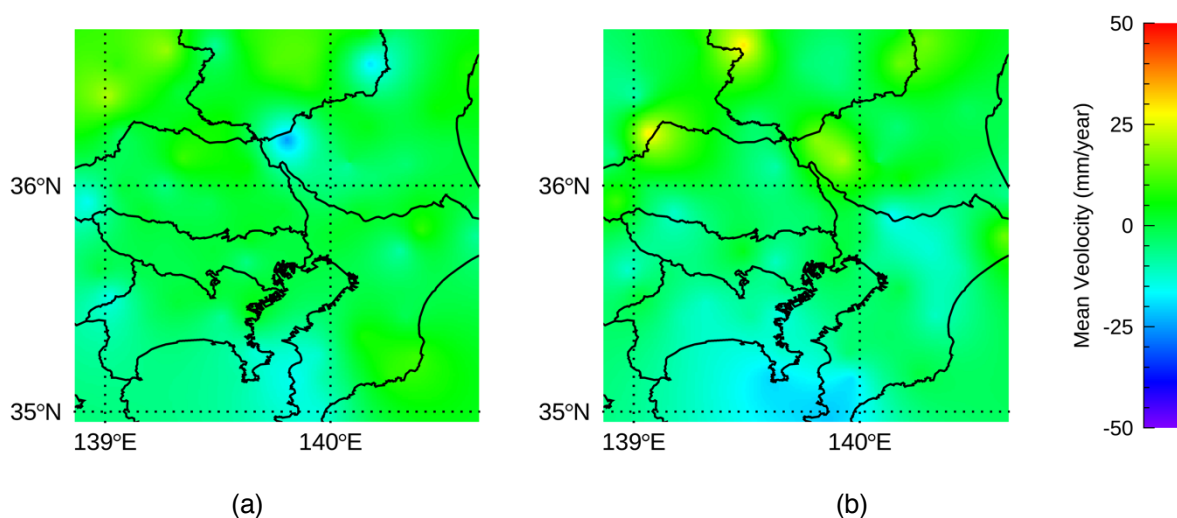


Figure 4.9: Mean velocity projected to the LOS of Sentinel-1 with GEONET of T1 and T2. (a,b) show that of T1 and T2 respectively. The white lines show the boundaries of the prefectures in Japan.

NN-PSI と ConvPSI の結果について、GEONET の観測記録と同様に年間平均変位量を分析した。A1 と A2 にて、マイクロ波の後方散乱係数の変動係数 (μ/σ) が 10 以上の 100 ポイントを選出し、そのポイントにおける T1 と T2 の年間平均変位量の平均を求め、それらの結果を Table 4.5 に示す。

Table 4.5: Mean velocity estimated by the PSI approaches.

Method	T1 (mm/year)	T2 (mm/year)
A1		
NN-PSI	-17.1	-19.0
ConvPSI	-10.0	28.8
A2		
NN-PSI	-14.1	-17.9
ConvPSI	-12.8	49.4

A1 は、NN-PSI による T1 と T2 の年間平均変位量は、それぞれ-17.1、-19.0 mm/year となった。ConvPSI では、T1 と T2 はそれぞれ、-10.0、28.8 mm/year であった。NN-PSI では T1 と T2 で沈下傾向を示すのに対し、ConvPSI では T1 は沈下傾向を示し、T2 では隆起の傾向を示した。A2 についても、NN-PSI による T1 と T2 の年間平均変位はともに沈下傾向を示しているが、ConvPSI は T1 は沈下傾向、T2 は隆起傾向となった。A1 と A2 の両エリアにおいて、NN-PSI は年間を通して沈下傾向を示し、ConvPSI は T1 は沈下傾向、T2 は隆起傾向を示した。

ConvPSI の場合は、 2π アンビギュイティによる不連続性が発生し、T2 では年間平均変位量が増加する傾向となり、NN-PSI は不連続性を解決し減少する傾向を示している。A1 と A2 は、Pt1 と Pt2 から 10 km 以内の距離であり、変位は Figure 4.4 に示されている GEONET の傾向に近いものとなる。Pt1 と Pt2 においては、T2 の期間は NN-PSI の結果と同じく沈下傾向を示している。これらのことより、NN-PSI は 2π アンビギュイティにより影響を受けている ConvPSI の推定結果を改善したことを示す。また、観測期間中に発生したスロースリップについては、SAR センサの照射方向からは変位を感知できず、NN-PSI と ConvPSI による変位推定において直接的な影響は少ないと考えられる。

ii 周期的な変位

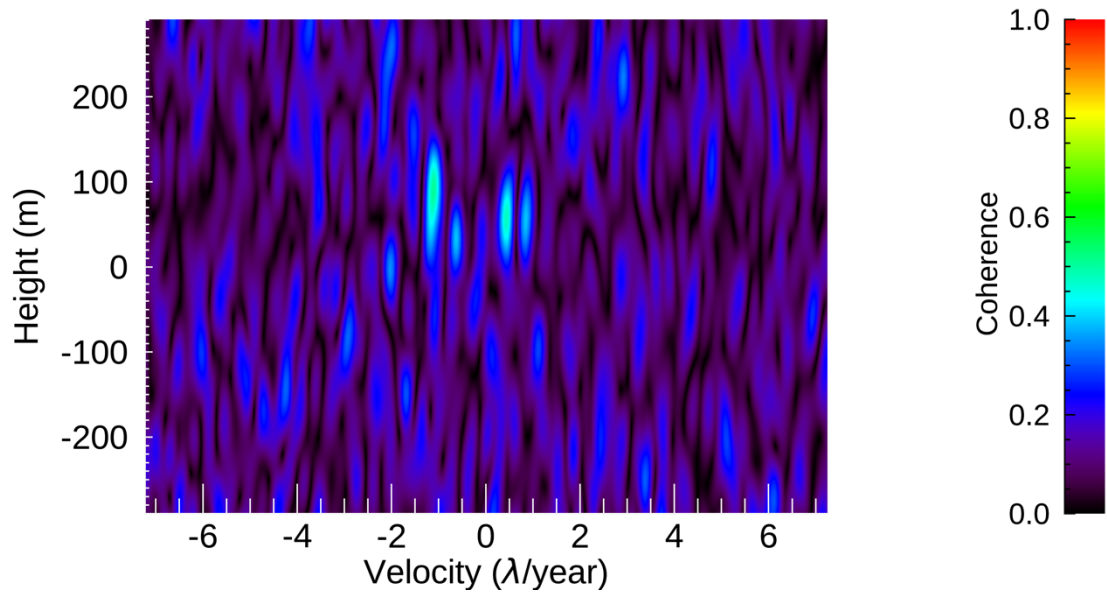
関東平野の東京湾に沿って、商用施設や工業地帯があり、そのエリアには大規模な人工構造物が存在する。これらの建物は気温による熱膨張にて、NN-PSI で推定した場合、1 年周期の変位となると考えられる。Figure 4.1 の Pt5 は製鉄所における熱風炉、Pt6 はビジネス街の大規模なビルであり、これらの建物における変位を NN-PSI と ConvPSI により推定した。Pt5 と Pt6 周辺の衛星画像、EV スペクトラム、変位推定結果、近傍の気象観測点の日平均温度の観測記録、GEONET により求まる変位を、それぞれ Figure 4.10 と Figure 4.11 に示す。なお、日平均気温の観測記録は気象庁ホームページより入手し、詳細を Table 4.6 に示す(気象庁, 2021)。

Table 4.6: Information of the weather observation points.

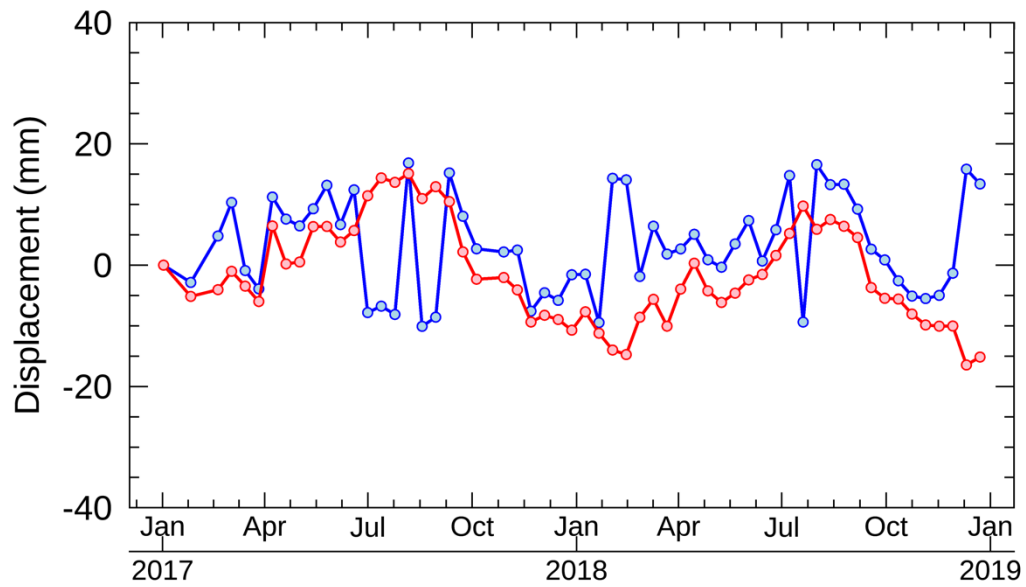
Point	Weather observation point name
Pt5	Kisarazu, Chiba
Pt6	Funabashi, Chiba



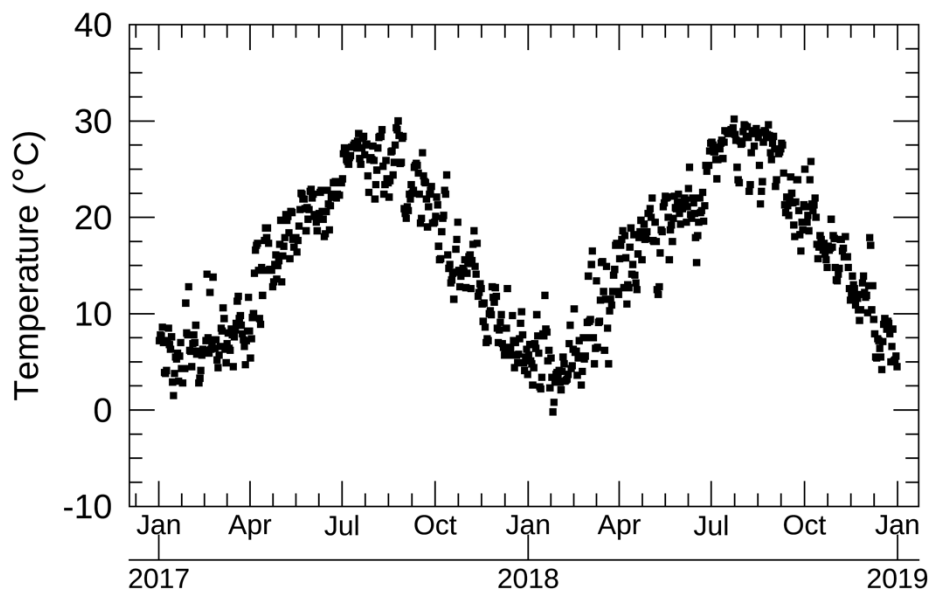
(a)



(b)

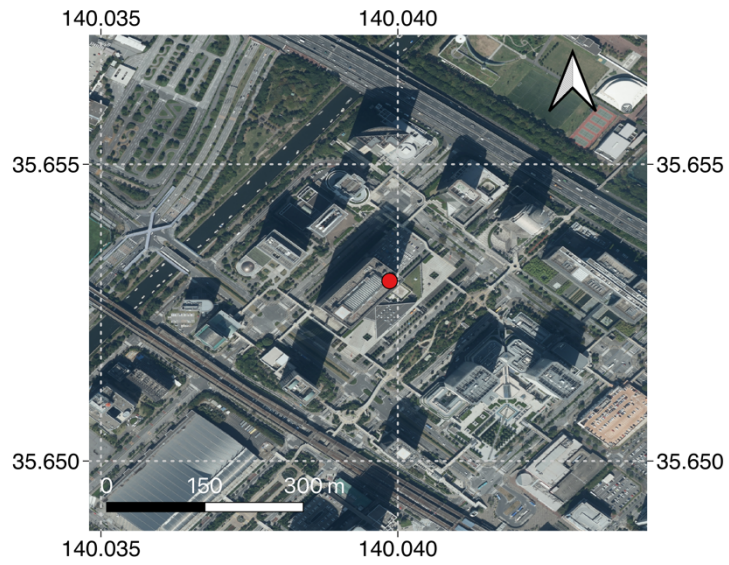


(c)

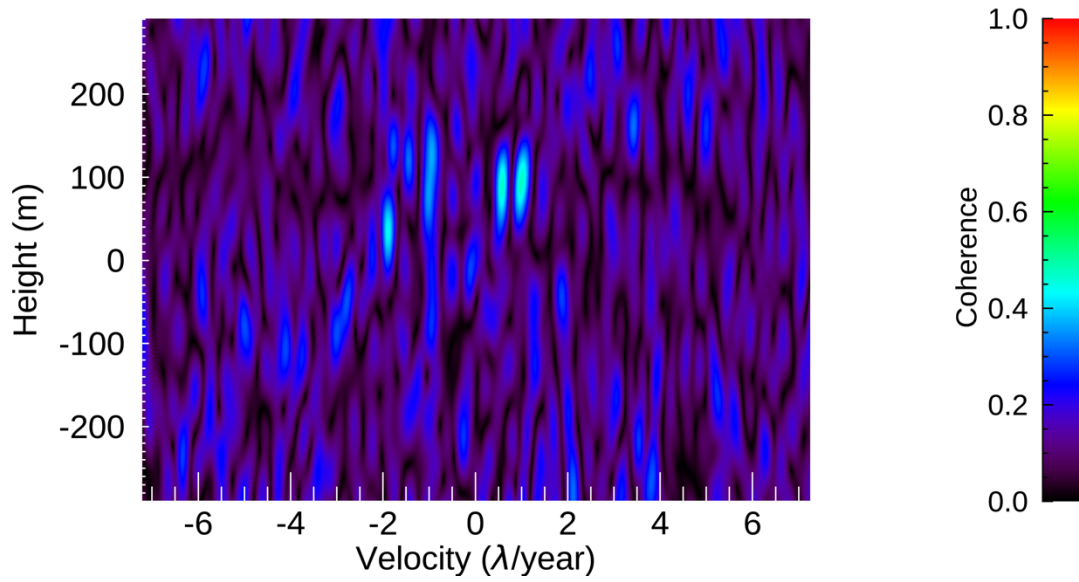


(d)

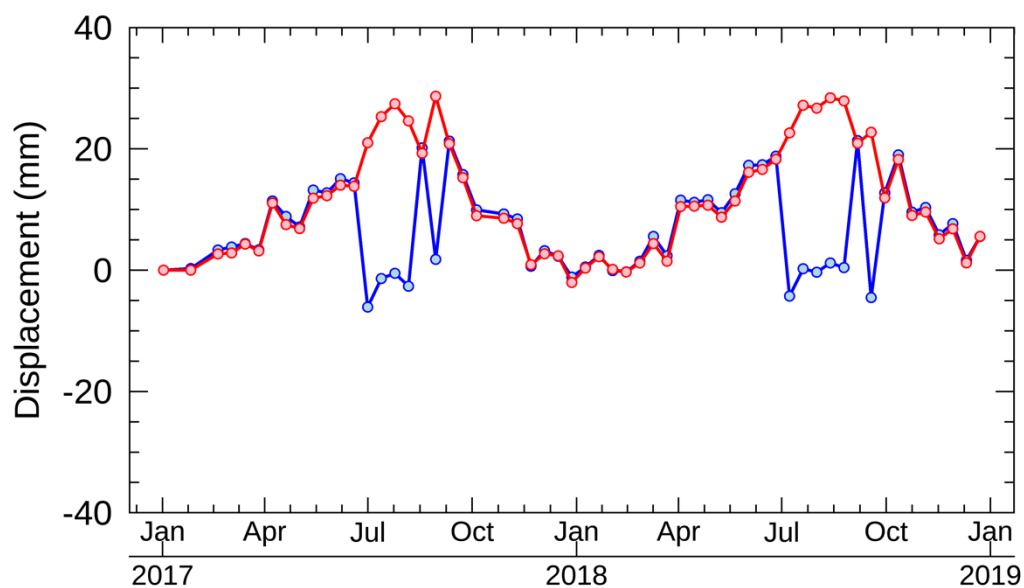
Figure 4.10: Estimation results at Pt5. (a,b,c) The location of the displacement, EV spectrum, and NN-PSI in red and ConvPSI in blue at Pt5. (d) The daily average temperature measured by the Japan Metrological Agency at the closest stations from Pt5. The satellite imagery in (a) is distributed in the GSImap.



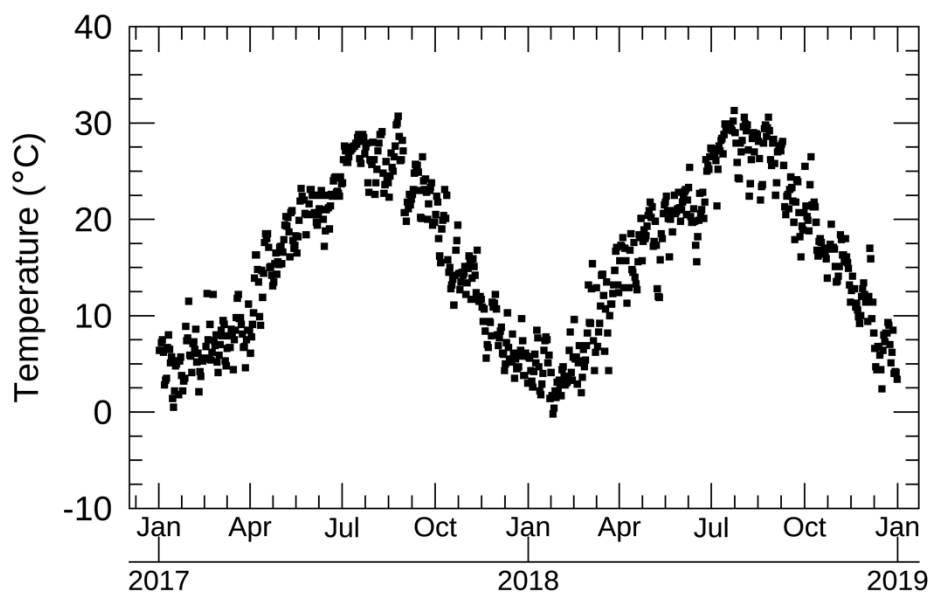
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 4.11: Estimation results at Pt6. (a,b,c) The location of the displacement, EV spectrum, and NN-PSI in red and ConvPSI in blue at Pt6. (d) The daily average temperature measured by the Japan Metrological Agency at the closest stations from Pt6. The satellite imagery in (a) is distributed in the GSImap.

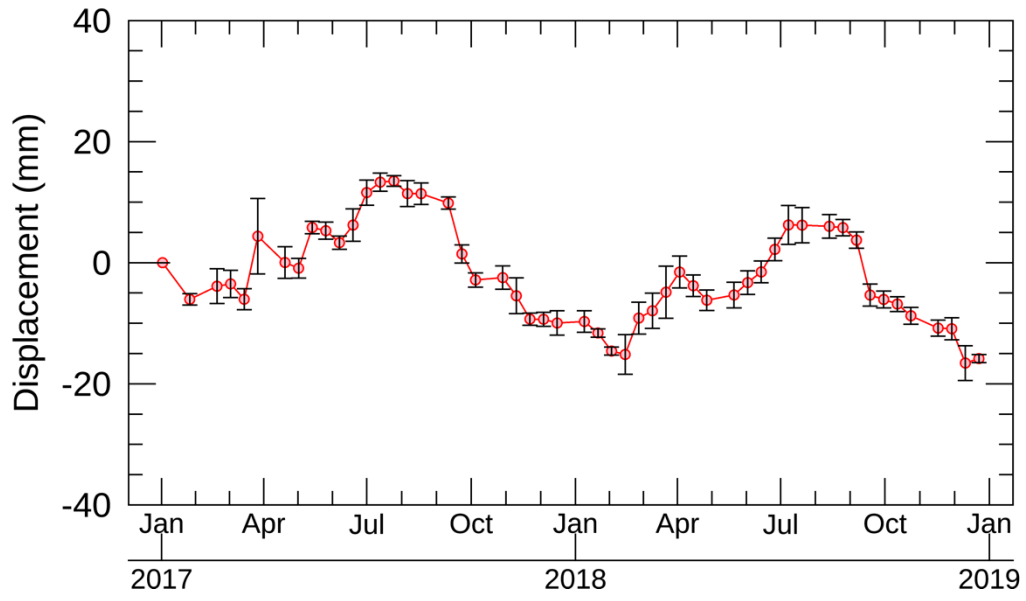
Figure 4.10b と Figure 4.11b が示す EV スペクトラムは、周期変位のシミュレーションで見られたとおり、複数のローブが同じ高さに出現することを確認した。Pt5 と Pt6 において、EV スペ

クトラムで抽出された高さは、それぞれ 58 m と 91 m であり、これらは大規模な構造物の高さに相当する。

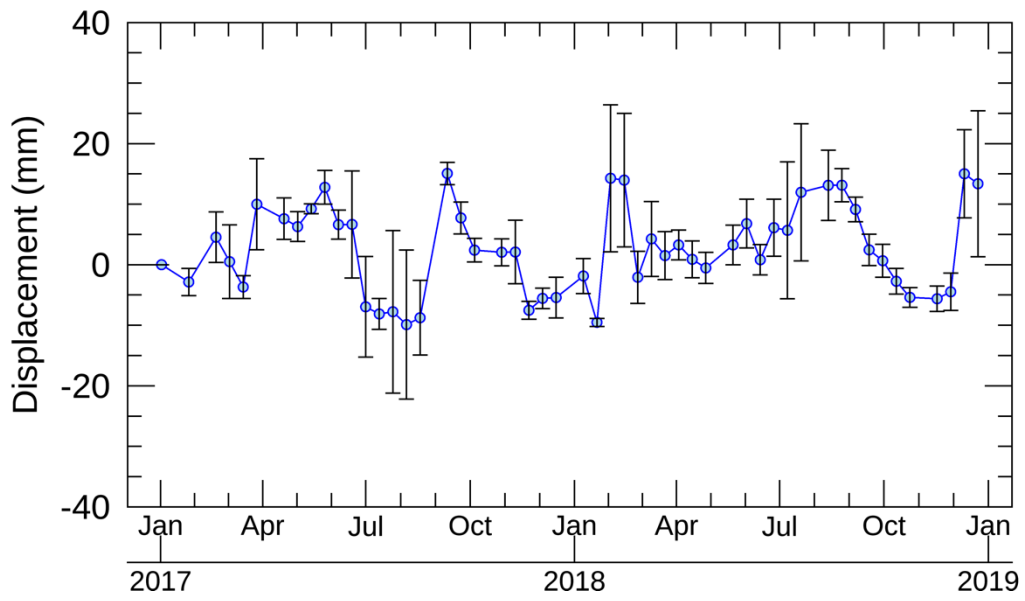
Figure 4.10c と Figure 4.11c が示す時系列プロットでは、NN-PSI の推定結果は、夏にセンサーに近づき、冬にセンサーから離れる変位となった。Pt5 と Pt6 とともに 1 年周期であり、ピークピーク値は約 20 mm であった。このピークピーク値は、今回の観測回数と頻度にて、3 章の観測頻度のシミュレーション結果より得られる周期的な変位のピークピーク値の最大値と一致する。ConvPSI の推定結果には、いくつかの不連続性がみられた。周期的な変位が 2π アンビギュイティの影響により、正しく推定できなかつたと考えられる。

Figure 4.10d と Figure 4.11d が示す日平均の気温は、Pt5 と Pt6 とともに、気温の推移と NN-PSI により求めた変位の傾向が一致した。また、Figure 4.4c と Figure 4.4d は、Pt5 と Pt6 から最近傍の Pt3 と Pt4 における GEONET の変位と NN-PSI の推定結果を示す。Pt3 や Pt4 では、GEONET の観測記録と NN-PSI の推定結果からは、Pt5 と Pt6 のような周期的な変位は確認できなかった。近傍点において、周期的な変位が確認できないため、Pt5 や Pt6 の変位は地盤変位による可能性は低く、気温や建物の規模も考慮すると熱膨張によるものと考えられる。

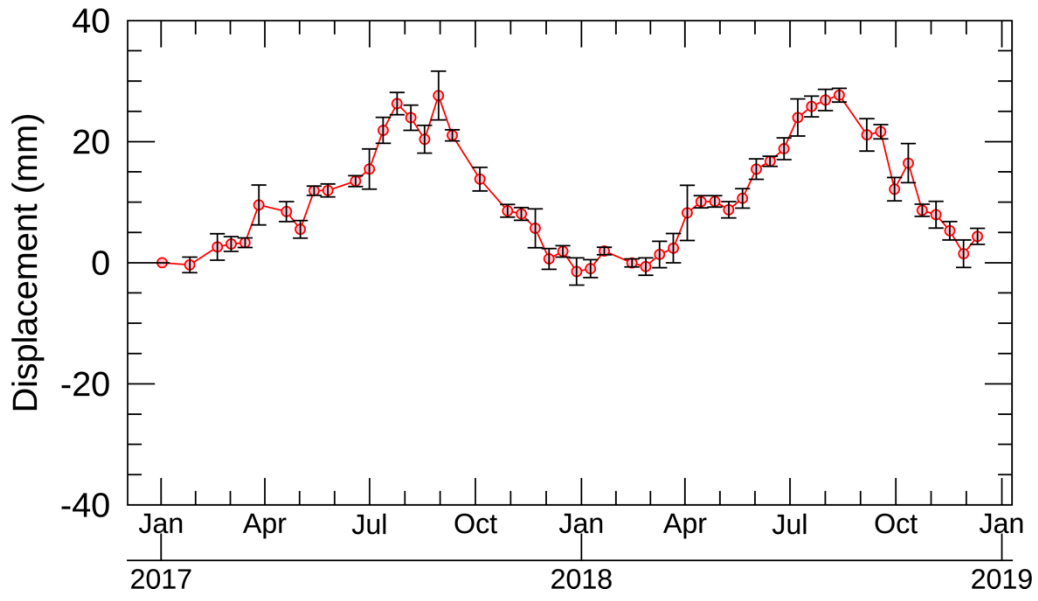
Pt5 および Pt6 において、NN-PSI の結果が周期的な変位を示している。3 章の周期的な変位のシミュレーション結果では、NN-PSI の推定結果は、ベースライン距離の組み合わせが変化した場合でも、ほとんどばらつきが見られないことを確認している。Pt5 と Pt6 における NN-PSI が推定した結果（周期的な変位）における信頼性を確認するため、実観測記録において干渉ペアの組み合わせを変更し、繰り返し変位推定を行い、その結果のばらつきについて把握する。これまでの解析では 59 シーンを用いたが、この中からランダムに 5 シーンを除き、変位推定を 50 回繰り返し計算し、NN-PSI と ConvPSI の変位結果のばらつきについて確認した。なお、推定に使用するシーン数を減らすことで、NN-PSI が推定可能な周期的な変位のピークピーク値は小さくなり、NN-PSI の推定変位量の範囲を超えることが予想される。そのため、 2π アンビギュイティの補正を行わない ConvPSI の変位推定のばらつきよりも、必然的に NN-PSI のばらつきが大きくなると考えられる。そこで、50 回計算した NN-PSI の推定変位の中間値を計算し、繰り返し計算の各回における変位と中間値との RMSE が $1/4$ 波長（約 14 mm）以上となった結果は、NN-PSI と ConvPSI の推定結果から除外しばらつきを計算した。RMSE を計算した結果、Pt5 では 43 回、Pt1 では 49 回の計算における、推定結果のばらつきを計算した。ばらつきについては、各観測日における標準偏差を用いた。なお、Pt5 における周期的な変位のピークピーク値は 20 mm に近く、推定するためには 60 シーン程度が必要となる変位である。そのため、このばらつきの評価では、観測間隔の日数が大きくなり、推定可能な変位量が小さくなるため、NN-PSI の推定結果が中間値より大きくずれる回数が増加したと考えられる。Figure 4.12 に Pt5 と Pt6 の繰り返し計算の中間値と各観測日での標準偏差をプロットし、Table 4.7 に平均標準偏差を示す。



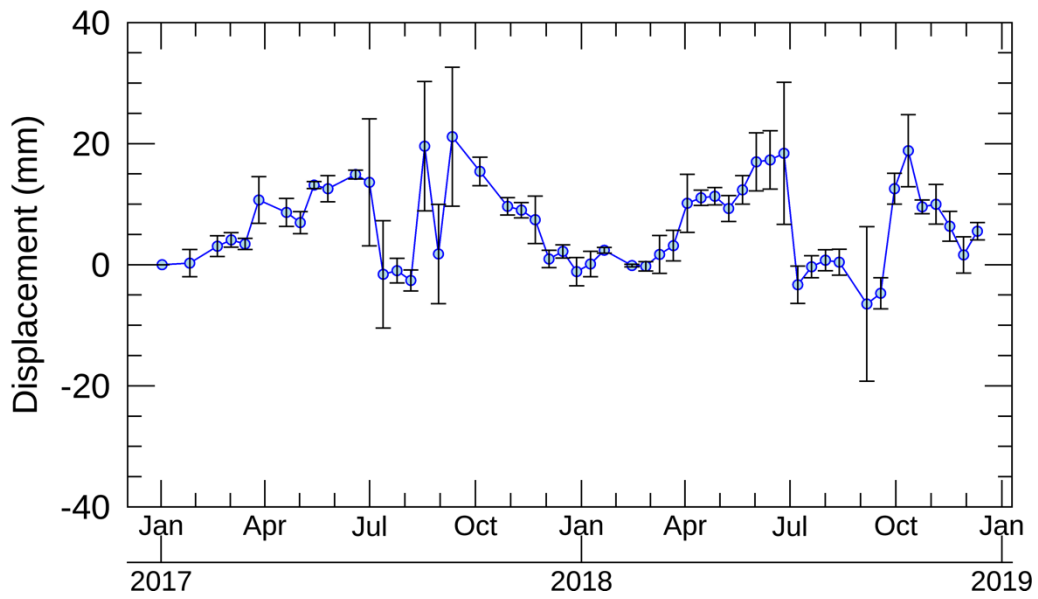
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 4.12: Repetition results of estimated sinusoidal displacements. (a,b) show NN-PSI and ConvPSI results at Pt5 respectively. (c,d) show those at Pt6. The error bar shows the standard deviation in each observation date of the repeated estimations.

Table 4.7: Average of the standard deviation on each observation date, based on the repeated displacement estimation.

Method	Pt5 (mm)	Pt6 (mm)
NN-PSI	1.9	1.7
ConvPSI	4.5	3.3

Figure 4.12 では、Pt5 と Pt6 において NN-PSI の変位推定のばらつきが小さく安定しているのに対し、ConvPSI ではばらつきが大きいことを確認した。これは、3 章の周期的な変位のシミュレーション結果の傾向と一致する。59 シーン中、5 シーンの観測記録をランダムに取り除き、繰り返し変位推定し、ConvPSI の推定結果が大きくばらつき、NN-PSI の変位推定はばらつきが小さく安定しているため、NN-PSI による推定変位の信頼性が高いことが分かる。このことより、NN-PSI は大規模建物の熱膨張による、ピークピーク値が 20 mm 程度の周期的な変位を推定している可能性が高く、ConvPSI の推定方法を改善したことを示す。

4.3 地下工事にともなう地盤沈下への適用

本節では、地盤沈下が確認されている東京都調布市とハンガリーのブタペストを対象エリアとし、NN-PSIによりこれらの変位推定が可能であるかを把握する。

4.3.1 東京都調布市での道路陥没

2020年10月に報告された道路陥没エリア周辺にNN-PSIを適用し、そのエリアの変位を推定する。国土交通省東京外かく環状国道事務所では、首都圏の渋滞緩和のため関越道から東名高速までの約16kmについて地下に高速道路を施工するため、平成21年5月に整備計画が策定され事業化された(国土交通省東京外かく環状国道事務所)。東京外環トンネル施工等検討委員会の報告によると、東名高速道路から関越道に向けての工事は、2019年1月から工事が開始された(東京外環トンネル施工等検討委員会)。この工事は住宅街などがあるため、地下40m以深を通しており、地表面には影響がないように工夫されていた。しかしながら、2020年10月に京王線東つつじヶ丘駅周辺の住宅街において、道路の陥没が報告された。2020年9月頃に周辺地下を東京外環トンネル工事が実施されており、現在(2021年3月の時点)では、この陥没したエリア周辺の詳細な調査が行われ、トンネル工事との因果関係について確認を行っている(東日本高速道路株式会社, 2021)。

Figure 4.13 は、東京外環トンネルの東名高速から関越道に向けての工事ルートを示している。トンネル工事はPt1からPt3の順に進められ、Pt1は2019年1月、Pt2は2020年4月、Pt3は2020年9月頃に掘進されたと報告されている(東京外環トンネル施工等検討委員会)。2020年10月以降、Pt3にて複数箇所において道路の陥没が報告されている。そこで、NN-PSIを適用し、Figure 4.13が示す工事実施ルート周辺の地表面変位を推定する。

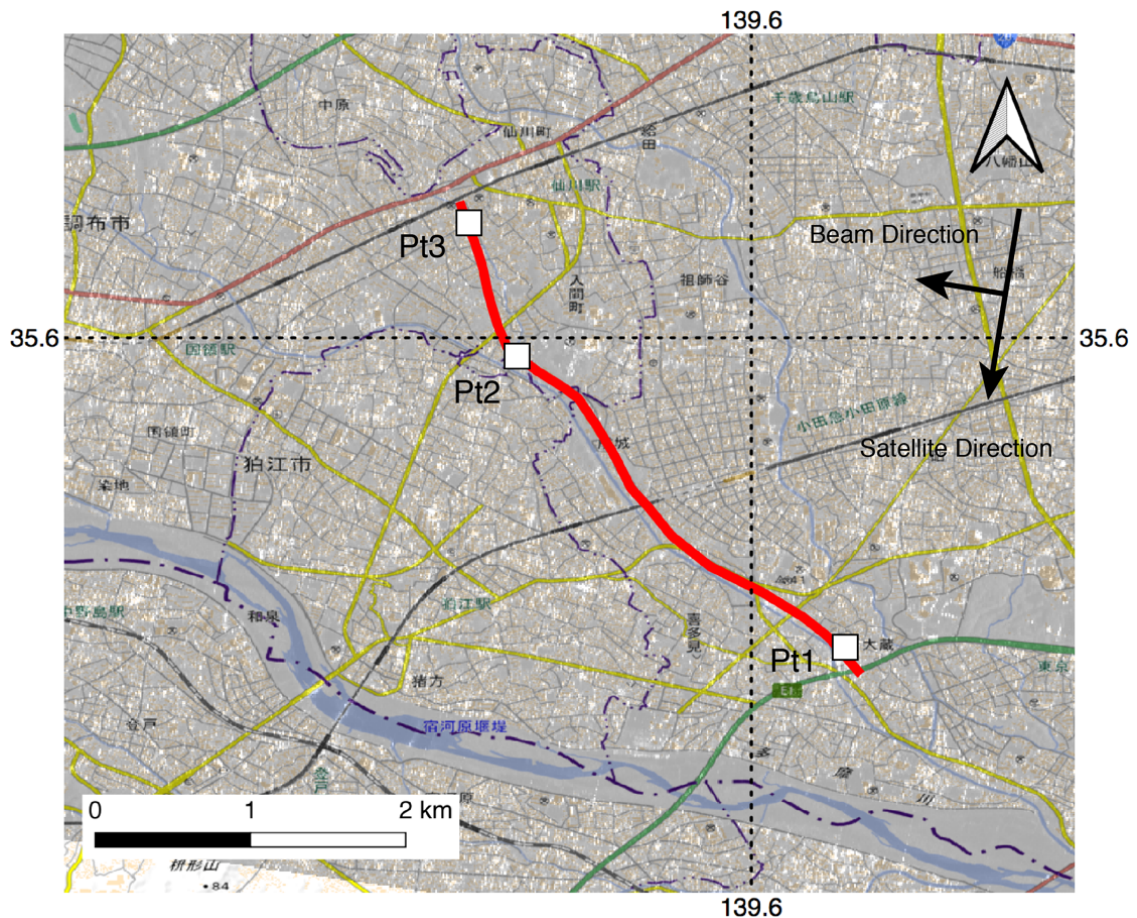


Figure 4.13: Intensity image of Sentinel-1 data over GSImap around the highway construction. The red line shows the construction of the underground highway.

i 観測記録の解析方法

解析エリアは、Sentinel-1 にて 12 日周期で SAR 観測されており、工事が開始された 2019 年 1 月から 2021 年 3 月までの観測記録を使用して NN-PSI により変位を推定した。解析に使用する観測記録の詳細は Table 4.8、観測記録の観測日を Table 4.9、観測記録における NN-PSI のコネクショングラフを Figure 4.14 に示す。観測記録の解析は、Figure 4.2 に示されている手順にて NN-PSI を適用し、これまでの評価と同様に ConvPSI の変位推定も実施した。

Table 4.8: Data description for Chofu area.

Parameters	Values
Satellite sensor	Sentinel-1
Number of acquisitions	68
Time interval of the acquisitions	12 days
Satellite Direction	Descending
Beam Direction	Right
Incidence angle	39.0°
Wavelength (λ)	55.5 mm
Average baseline distance	44.9 m
Average observation interval	12 days
Height resolution	102.6 m
Height ambiguity	510.1 m
Velocity resolution	12.8 mm/year (0.23 λ /year)
Velocity ambiguity	843.5 mm/year (15.2 λ /year)

Table 4.9: Sentinel-1 observation dates for the Chofu area.

No.	Year 2019	Year 2020	Year 2021
1	2019/01/03	2020/01/10	2021/01/04
2	2019/01/15	2020/01/22	2021/01/16
3	2019/01/27	2020/02/03	2021/01/28
4	2019/02/08	2020/02/15	2021/02/09
5	2019/02/20	2020/02/27	2021/02/21
6	2019/03/04	2020/03/10	2021/03/05
7	2019/03/16	2020/03/22	
8	2019/03/28	2020/04/03	
9	2019/04/09	2020/04/15	
10	2019/04/21	2020/04/27	
11	2019/05/03	2020/05/09	
12	2019/05/15	2020/05/21	
13	2019/05/27	2020/06/02	
14	2019/06/08	2020/06/14	
15	2019/06/20	2020/06/26	
16	2019/07/02	2020/07/08	
17	2019/07/14	2020/07/20	
18	2019/07/26	2020/08/01	
19	2019/08/07	2020/08/13	
20	2019/08/19	2020/08/25	
21	2019/08/31	2020/09/06	
22	2019/09/12	2020/09/18	
23	2019/09/24	2020/09/30	
24	2019/10/06	2020/10/12	
25	2019/10/12	2020/10/24	
26	2019/10/18	2020/11/05	
27	2019/10/30	2020/11/17	
28	2019/11/11	2020/11/29	
29	2019/11/23	2020/12/11	
30	2019/12/05	2020/12/23	
31	2019/12/17		
32	2019/12/29		

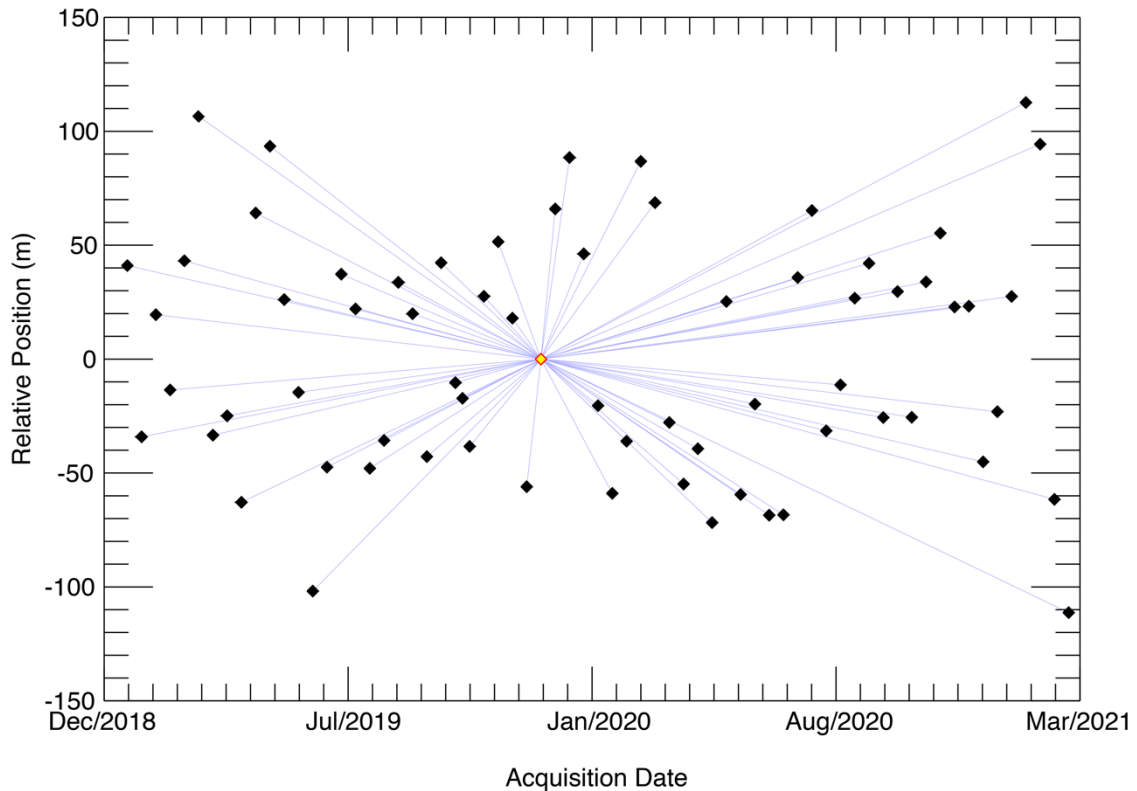


Figure 4.14: Combination of the interferometric pairs used in the PSI approaches. The yellow square shows the master acquisition, and the black squares are the slave acquisitions. The horizontal axis shows the date of the acquisition, the vertical axis shows the baseline length in meters, and the blue lines show the combination of the interferometric pairs.

ii 結果と考察

空間的な変位の分布について把握するため、ConvPSIにより算出された年間平均変位量を Figure 4.15 に示す。年間平均変位量の分布から、東京外環トンネル工事が実施された経路に沿って、沈下する傾向の変位が確認された。Pt3 の沈下傾向にあるエリアの西側には、変位が隆起する傾向も見られた。Pt1、Pt2 および Pt3 周辺においては年間平均変位量が、2019 年から 2021 年 3 月までに、6 から 10 mm/year 程度、センサから離れる方向に地表面が変位したことを示した。

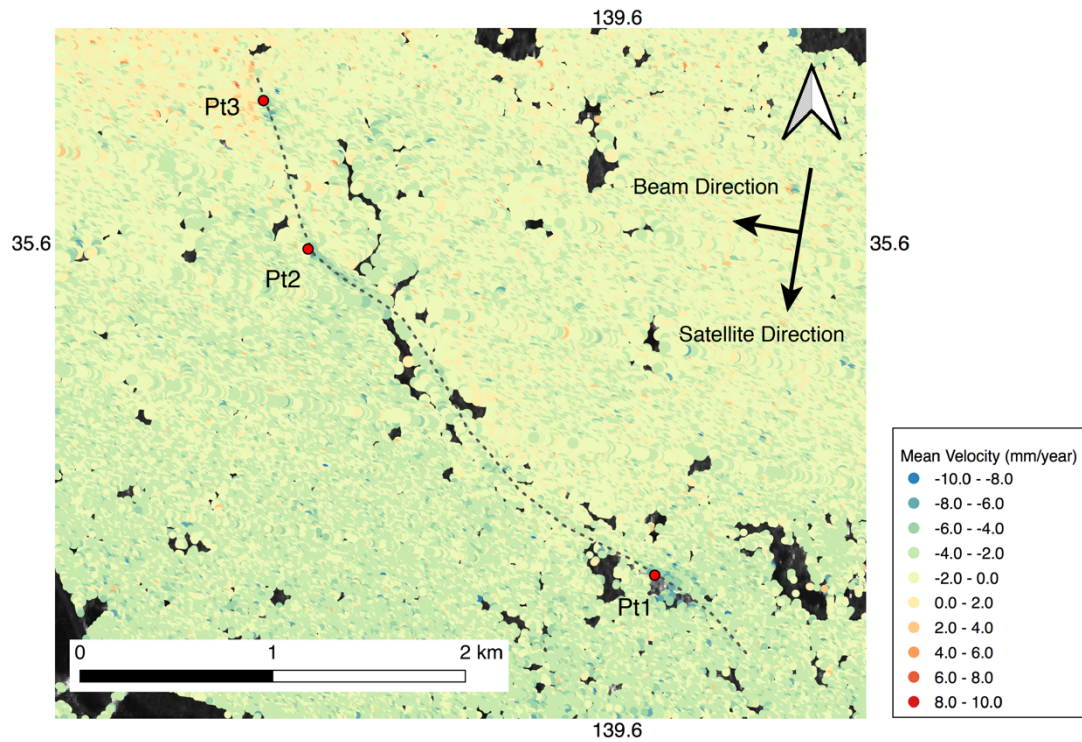


Figure 4.15: Mean velocity map of ConvPSI around the highway construction.

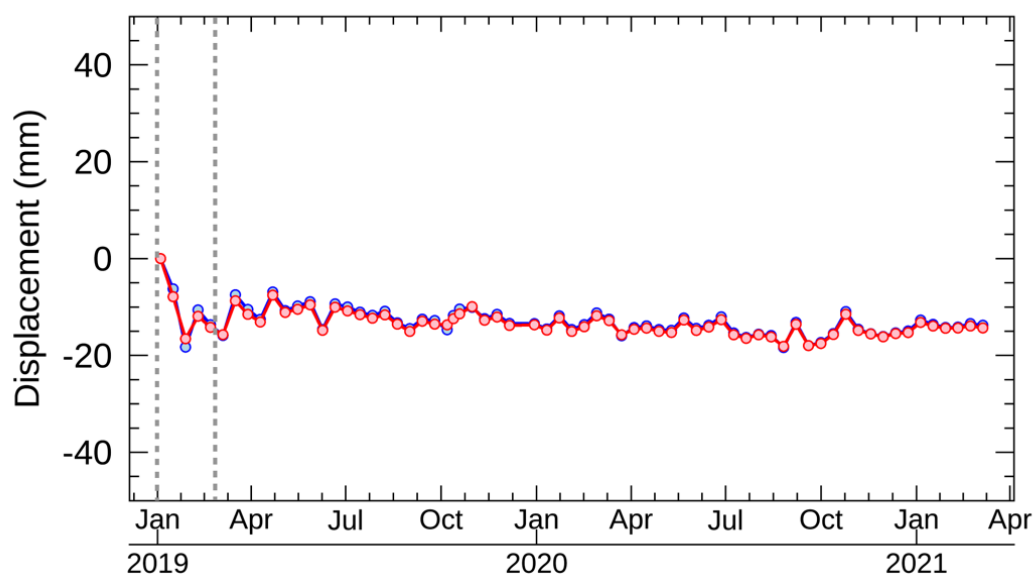
Pt1、Pt2 および Pt3 の時系列の変位を Figure 4.16 に示す。また、推定した変位の傾向と工事期間の関係性を把握するため、それぞれのポイント付近の工事施工期間を Table 4.10 に示す。工事の期間については、東京外環トンネル施工等検討委員会の第 19 回および第 22 回委員会資料を参考にした(東京外環トンネル施工等検討委員会)。

Table 4.10: Construction period around Pt1, Pt2 and Pt3.

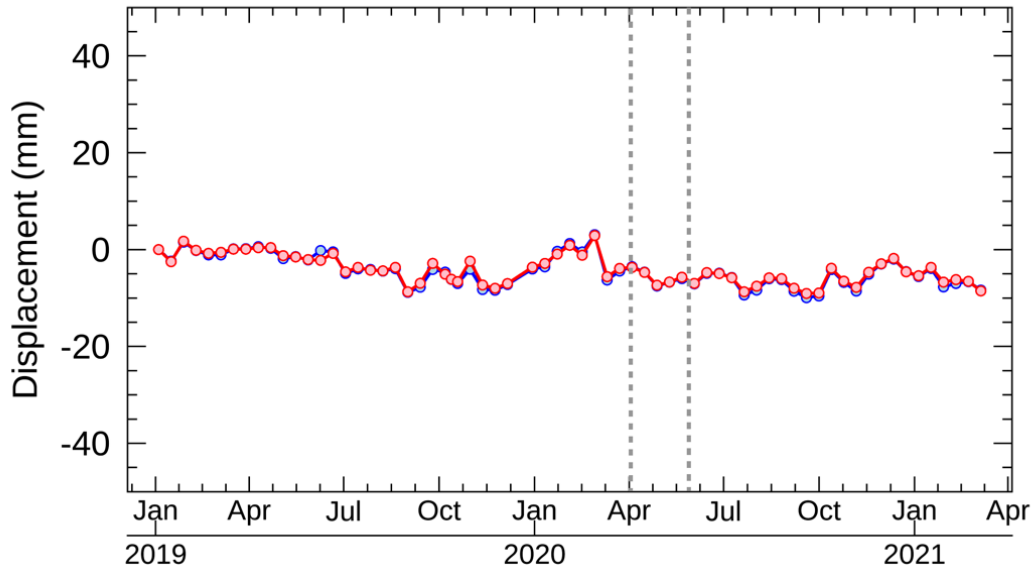
Point	Construction period
Pt1	Jan/2019 to Mar/2019
Pt2	Apr/2020 to Jun/2020
Pt3	Sep/2020 to Oct/2020

Pt1 と Pt2 では、NN-PSI と ConvPSI とともに同じ傾向を示した。Pt1 は、工事が開始された 2019 年 1 月付近でセンサから 20 mm 程度、沈下する傾向を確認した。Pt2 は、工事は 2020 年 4 月頃に実施されているが、1 ヶ月ほど前に 10 mm ほどの沈下を確認されている。Pt3 では、NN-PSI と ConvPSI で異なる傾向の変位が示された。NN-PSI の推定では、2020 年 9 月から 12 月にかけて、20 から 30 mm 程度、地表面がセンサから遠ざかる方向に動いたことを示した。ConvPSI は

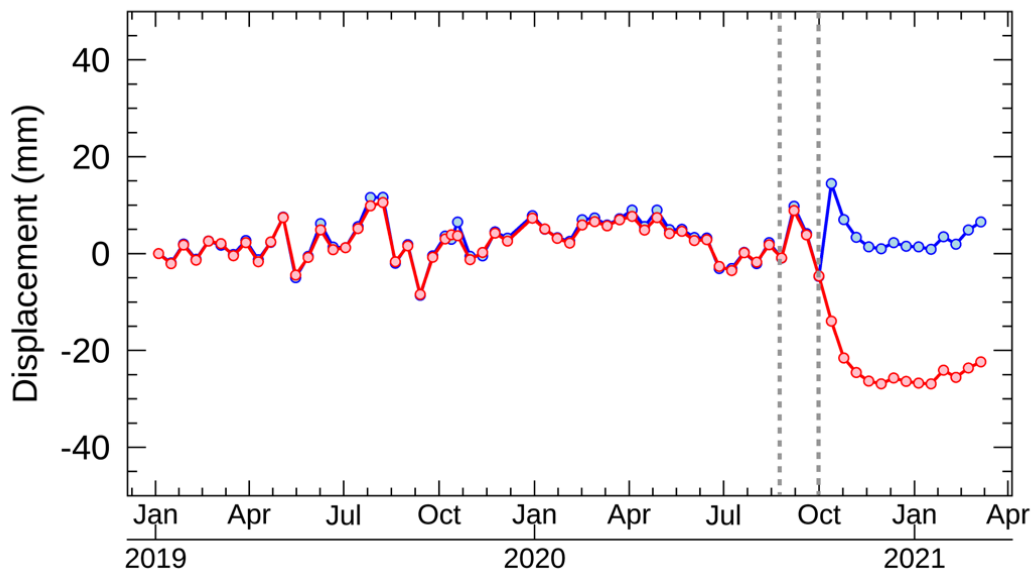
同時期にセンサに近づく変位と遠ざかる変位を繰り返す結果となった。東日本高速道路株式会社(2021)が公表している報告書は、2021年3月時点の陥没箇所の地表面計測結果を示しており、最大の変位量は-20 mmであった。現地調査の変位量から、ConvPSIの推定結果の変位量は過小となり、変位が示す不連続性は 2π アンビギニティによるものと考えられる。また、現地調査の変位量は、Pt3におけるNN-PSIの工事後の変位傾向を支持する。これらのことより、Pt3では工事後に20から30 mmの地盤沈下が発生したと考えられ、地下トンネル工事との因果関係を否定できない。



(a)



(b)



(c)

Figure 4.16: Time evolution around Pt1, Pt2, and Pt3. (a-c) show Pt1, Pt2, and Pt3 respectively. The red and blue line show NN-PSI and ConvPSI result.

4.3.2 ハンガリー・ブタペストの地盤沈下

ハンガリーのブタペストの地盤沈下が確認されているエリアにて、NN-PSI を適用する。ブタペストの北西部では、2006年から2013年にかけて、全長 12.7 km、16 駅の地下鉄工事が行われ

たが、2009 年の後半、現在の Szent Gellért tér 駅周辺の地下工事を実施している際に、その真上にある道路や建物が地盤沈下していることが確認され、年間平均変位量は約-10 mm/year であったことが報告されている(Oliver et al., 2012)。この地下鉄工事に伴う地盤沈下による変位を NN-PSI により推定する。

i 観測記録の解析方法

変位を推定するにあたり、ドイツ宇宙機関が運用している TerraSAR-X 衛星の観測記録を利用した。TerraSAR-X は、X バンドの SAR センサを搭載しており、地上空間解像度は約 2 m で、都市域など詳細な地物などを観測することができる。地盤沈下は、2009 年の 11 月頃に確認されており、2008 年 10 月から 2010 年 4 月の期間に撮影された観測記録を使用し、NN-PSI にて変位を推定した。使用した観測記録の詳細を Table 4.11、観測日を Table 4.12、解析エリアと TerraSAR-X の強度画像を Figure 4.17 に示す。比較のため ConvPSI での変位推定も行った。観測記録の解析方法は、Figure 4.2 に示されている手順で実施した。また、PSI の干渉ペアを決める、コネクショングラフを Figure 4.18 に示す。

Table 4.11: Data description for Budapest.

Parameters	Values
Satellite sensor	TerraSAR-X
Number of acquisitions	42
Time interval of the acquisitions	11 days
Satellite direction	Descending
Beam direction	Right
Incidence angle	44.5°
Wavelength (λ)	31.1 mm
Average baseline distance	74.3 m
Average observation interval	13.1 days
Height resolution	37.0 m
Height ambiguity	145.9 m
Velocity resolution	10.5 mm/year (0.34 λ /year)
Velocity ambiguity	433.0 mm/year (13.9 λ /year)

Table 4.12: TerraSAR-X observation dates.

No.	Year 2008	Year 2009	Year 2010
1	2008/10/24	2009/01/20	2010/01/07
2	2008/11/15	2009/01/31	2010/01/18
3	2008/12/07	2009/02/11	2010/01/29
4		2009/02/22	2010/02/20
5		2009/03/05	2010/03/03
6		2009/03/16	2010/03/14
7		2009/03/27	2010/03/25
8		2009/04/07	2010/04/05
9		2009/04/29	2010/04/16
10		2009/05/10	
11		2009/05/21	
12		2009/06/01	
13		2009/06/12	
14		2009/06/23	
15		2009/07/04	
16		2009/07/15	
17		2009/07/26	
18		2009/08/06	
19		2009/08/17	
20		2009/08/28	
21		2009/09/19	
22		2009/09/30	
23		2009/10/11	
24		2009/10/22	
25		2009/11/02	
26		2009/11/13	
27		2009/11/24	
28		2009/12/05	
29		2009/12/16	
30		2009/12/27	

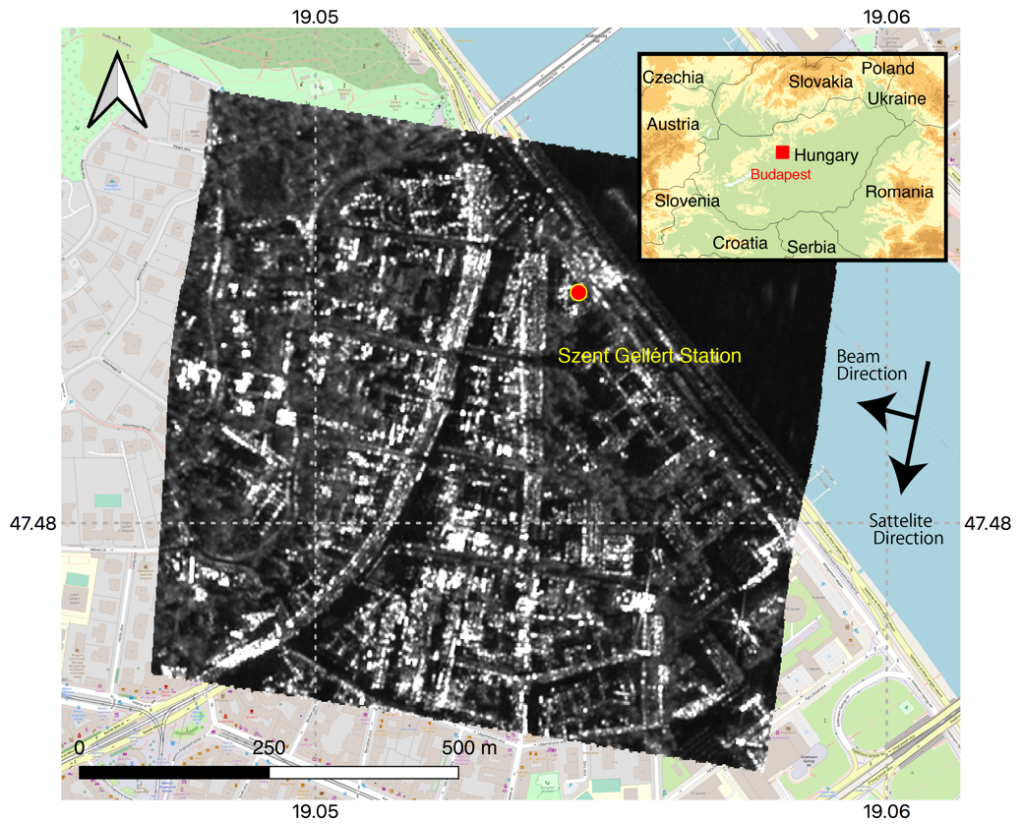


Figure 4.17: Intensity SAR image at the study area around Budapest. The base map is OpenStreetMap (OpenStreetMap Foundation).

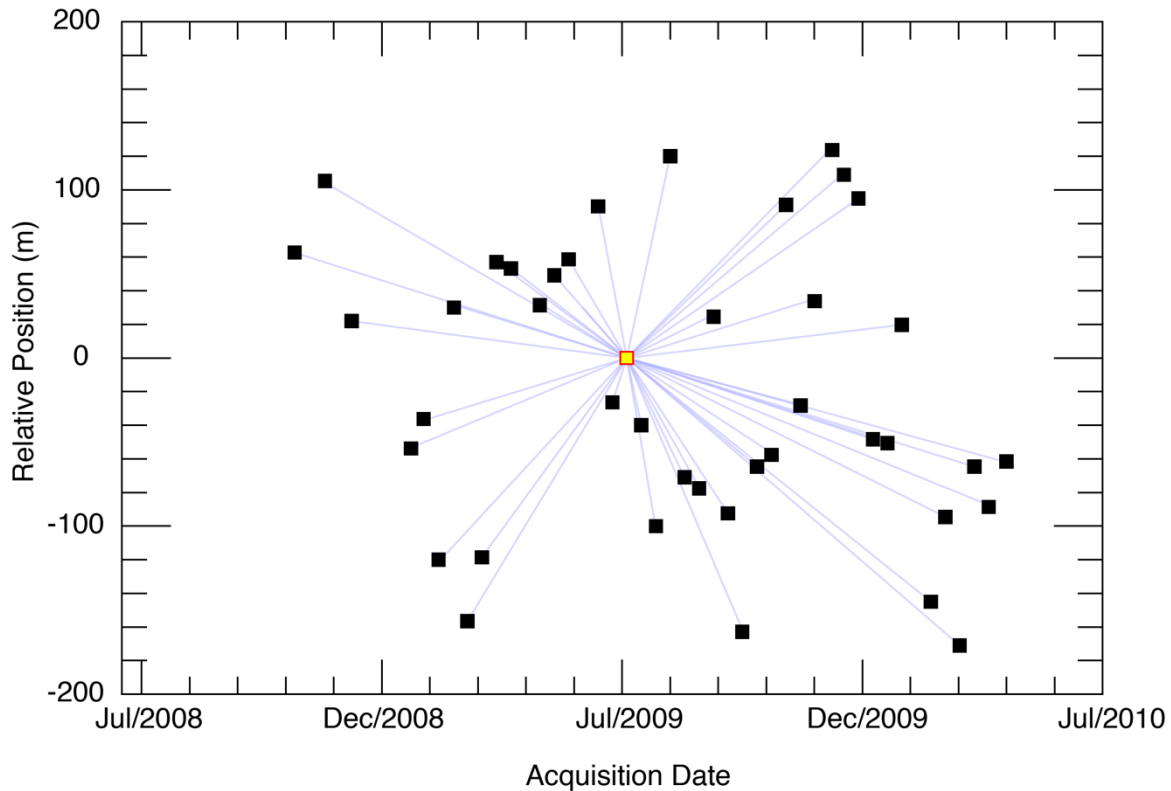


Figure 4.18: Combination of the interferometric pairs used in the PSI approaches. The yellow square shows the master acquisition, and the black squares are the slave acquisitions. The horizontal axis shows the date of the acquisition, the vertical axis shows the baseline length in meters, and the blue lines show the combination of the interferometric pairs.

ii 結果と考察

解析エリアでの空間的な変位の分布を把握するため、ConvPSIにより求めた年間平均変位量を Figure 4.19 に示す。図の中央の Pt2 付近は、沈下傾向（センサーから離れる）と隆起傾向（センサーに近づく）の変位が混在している。Pt1 から Pt2 にかけて沈下傾向を示しており、Pt2 から Pt3 にかけては隆起傾向を示した。Pt2 から Pt3 の地下にはトンネルが通っており、ConvPSI の変位推定では、地盤沈下により 2π アンビギュイティによる不連続性の影響を受けている変位となっている可能性を示している。Figure 4.20 に、Pt1、Pt2 および Pt3 の NN-PSI と ConvPSI の変位推定の結果を示す。

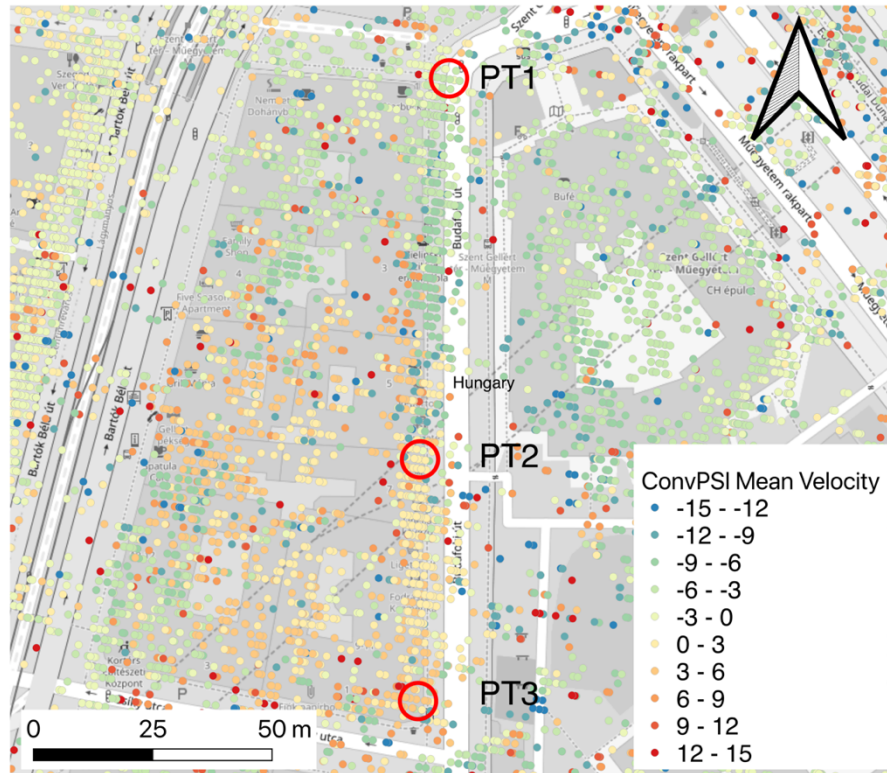
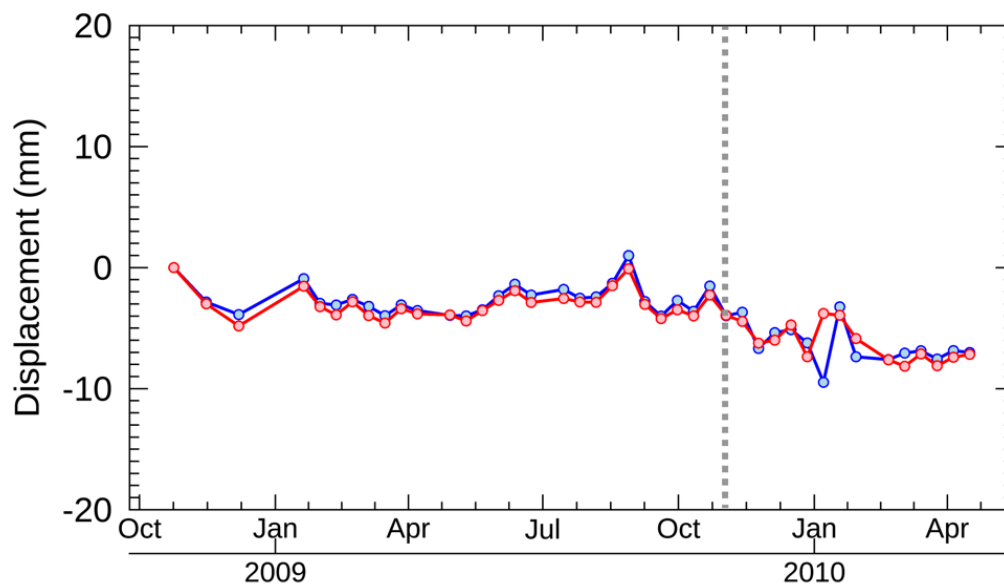
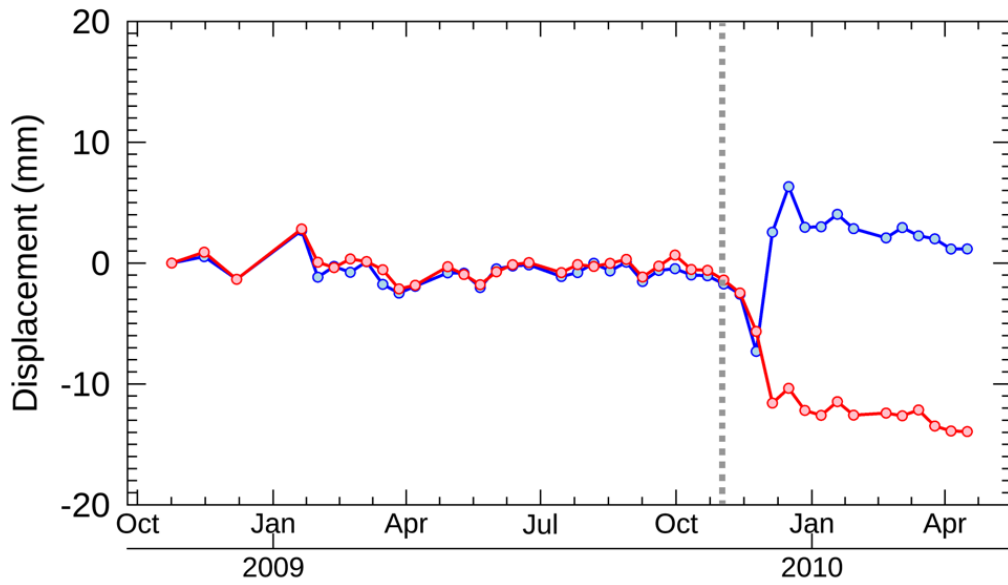


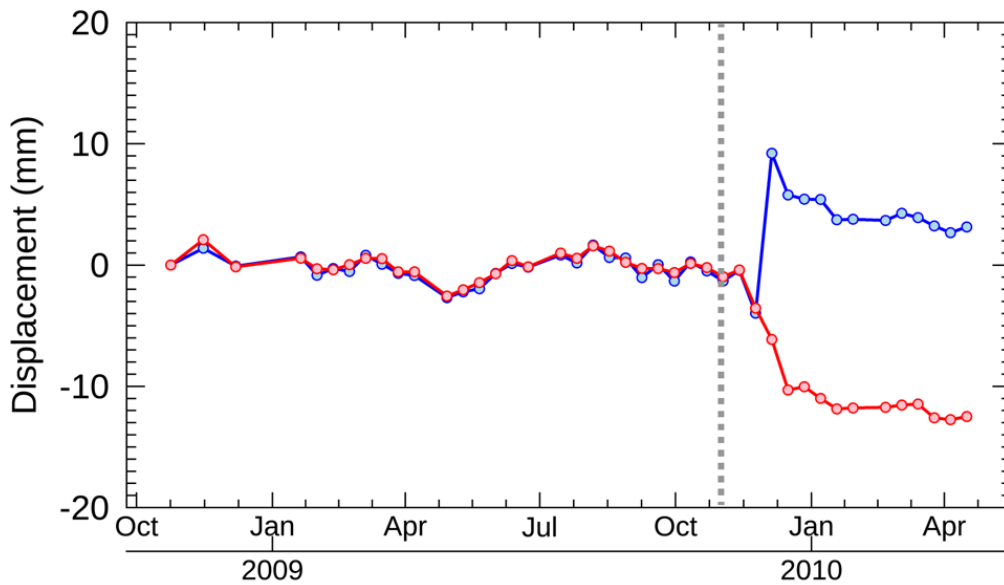
Figure 4.19: Distribution of the resulting points of PSI around Szent Gellért Station. The color of the points represents the mean velocity of ConvPSI. Pt1, Pt2, and Pt3 are the selected points, and the time evolutions were investigated. The background map was obtained from OpenStreetMap (OpenStreetMap).



(a)



(b)



(c)

Figure 4.20: Estimated displacement at Pt1, Pt2, and Pt3. (a-c) show the time evolutions at Pt1, Pt2, and Pt3 respectively. In the time plots, the red, blue, and purple lines show NN-PSI and ConvPSI displacements, respectively. The gray dash line indicates the date when the subsidence was reported.

Pt1、Pt2 および Pt3 のすべてのポイントにおいて、2009 年の後半にセンサから離れる変位を確認した。Pt1 では-6 mm、Pt2 と Pt3 では、-15 mm の変位量となった。現地において、2006 年から 2012 年に水準測量が実施されており、Pt1、Pt2、及び Pt3 周辺の垂直方向の変位量が約-20

mm となっており、センサ方向の変位量は-15 mm であることが確認されている。また、Oliver (2012)らの発表資料においても、LOS 方向の変位量が-15 mm となっていることが示されている。これらの現地情報は、TerraSAR-X の観測記録から推定した Pt2 と Pt3 の変位量と一致する。Pt2 と Pt3 においては、沈下量が急激に大きくなる時期と工事の時期が一致しており、地下鉄工事が地表面に影響を与えた可能性が大きいと考えられる。

手法による推定結果を比較すると、Pt1 は NN-PSI と ConvPSI はほぼ同じ傾向を示しており、Pt2 と Pt3 は、NN-PSI は 2009 年後半に急激に沈下しており、ConvPSI は隆起する傾向となった。Pt1 の位置は、Pt2 と Pt3 と比較すると地下鉄の導線よりも遠いため、工事の影響が小さく、変位量も小さくなったと考えられる。この結果は、Figure 4.19 に示している ConvPSI の年間平均変位量と同じ傾向であり、ConvPSI の年間平均変位量が正の値になっている箇所は、実際の変位が 2π アンビギュイティによる影響を受けたため、正しく変位推定ができていなかったと考えられる。NN-PSI では、約 3 ヶ月の間に 15 mm 沈下した地表面変位を正しく推定しており、ConvPSI の推定方法を改善したことが明瞭となった。

4.4 まとめ

実観測記録に NN-PSI を適用し、変位の推定精度と有効性における把握を行なった。また、地盤沈下が発生したエリアにて NN-PSI を適用し、都市域における変位モニタリングが可能であることを確認した。

変位の推定精度における把握では、欧州宇宙機構が運用する、Sentinel-1 の観測記録を用いて、NN-PSI により関東平野全域の 2017 年 1 月から 2018 年 12 月までの 2 年間の地表面変位を推定した。NN-PSI の推定結果と GPS から求まる変位を比較し、RMSE が 4 mm の誤差で変位推定が可能であることを確認し、NN-PSI は GPS と同等の性能で変位を推定していることを把握した。

NN-PSI の有効性の把握では、千葉県の上総九十九里エリアや三浦半島の一部で 2π アンビギュイティにより不連続性を発生する位相差となる大変位を確認し、NN-PSI と ConvPSI との推定結果と比較した。ConvPSI の推定結果には不連続性が見られたが、NN-PSI では問題なく推定でき、ConvPSI の問題点を解決していることを示した。

また、関東平野での解析において、NN-PSI は大規模建物の熱膨張によるピークピーク値が約 20 mm の 1 年周期の変位を推定できることを確認した。また、観測記録の組み合わせを変更し、繰り返し計算した場合、NN-PSI における変位推定のばらつきが小さく、推定結果の信頼性が高いことを示した。周期的な変位のような非線形的な変位は、これまで複雑な推定モデルの構築や経験的なパラメータを使用して変位推定されていたが、NN-PSI はこれらのモデルやパラメータを使用せず変位推定が可能であることを示した。

東京都調布市とハンガリー・ブタペストにおいては、地盤沈下を確認されているエリアにて NN-PSI を適用した。東京都調布市での道路陥没エリア周辺においては、C-band の観測記録にて 2 ヶ月間で 20 mm 以上の地盤沈下による地表面変位を確認した。また、他の工事ルートの上においても、工事後に微細な地表面の変位を確認した。ブタペストにおいては、X-band の観測記録にて約 3 ヶ月間で 15 mm の地盤沈下による地表面変位を確認した。この変位量は現地の水準測量の変位量と一致した。これらのことより、都市域にて急激に地面が変位するエリアにおいても、NN-PSI にて変位推定が可能であることを示した。

4 章の参考文献

- Bawden, G. W., Sneed, M., Stork, S. V., & Galloway, D. L. (2003). Measuring Human-Induced Land Subsidence from Space. In *USGS* (Issue December). Retrieved July 18, 2021, from <https://pubs.usgs.gov/fs/fs06903/pdf/fs06903.pdf>
- ESA. *Sentinel-1 Overview*. Retrieved May 31, 2021, from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/overview>
- Nonaka, T., Asaka, T., Iwashita, K., & Ogushi, F. (2020). Evaluation of the Trend of Deformation around the Kanto Region Estimated Using the Time Series of PALSAR-2 Data. *Sensors (Switzerland)*.
- Oliver, L., Jan, A., & Diana, W. (2012). *Operational Monitoring & SAR Applications with TerraSAR-X*. Retrieved April 18, 2021, from EUSAR. http://conference.vde.com/eusar/2016/Exclusive/Documents/ASV-GEO_TSX-Services_EUSAR_230412.pdf
- OpenStreetMap Foundation. (n.d.). *OpenStreetMap*. Retrieved April 18, 2021, from <https://www.openstreetmap.org/copyright>
- 遠田晋次. (2018). 首都圏直下に潜むプレートの断片と地震発生. Retrieved April 18, 2021, from https://www.aist.go.jp/aist_j/new_research/2008/nr20081010/nr20081010.html
- 気象庁. (2021). 過去の気象データ検索. Retrieved April 18, 2021, from <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 国土交通省国土地理院. (2017). 基盤地図情報数値標高モデルについて. Retrieved April 18, 2021, from https://fgd.gsi.go.jp/download/ref_dem.html
- 国土交通省国土地理院. (2018). 平成30年6月の地殻変動. <https://www.gsi.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2018-goudou0709.html>
- 国土交通省国土地理院. (2021). *GEONET (GNSS連続観測システム) とは*. Retrieved April 18, 2021, from https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi_38136.html
- 国土交通省東京外かく環状国道事務所. 計画概要 (外環とは) . Retrieved April 18, 2021, from <https://www.ktr.mlit.go.jp/gaikan/gaiyo/index.html>
- 東京外環トンネル施工等検討委員会. 東京外環トンネル施工等検討委員会の記録. Retrieved April 18, 2021, from https://www.ktr.mlit.go.jp/gaikan/pi_kouhou/tu2_kiroku.html
- 東日本高速道路株式会社. (2021). 東京外かく環状道路工事現場付近での地表面陥没事象等について. Retrieved April 18, 2021, from https://www.e-nexco.co.jp/news/important_info/2020/1018/00008711.html

第 5 章 結論

5.1 まとめ

本研究において、 2π アンビギュイティを生じる合成開口レーダの観測記録から大変位を推定する時系列干渉解析法として、NN-PSI を提案した。提案手法における適用範囲を数値シミュレーションにより分析し、実観測記録へ適用し手法の有効性を評価した。本研究での検討を通じて得た結論は、次の通りである。

1) 既往手法を改良し、NN-PSI を提案した。改良した点は、変位推定に使用する高さの決定方法と変位の推定方法である。高さの決定方法の改良については、EV スペクトラム内の時系列コヒーレンスを変位速度方向に累積し、最小値となる高さを変位推定に使用する高さを選択する方法を提案した。推定方法の改良については、マルチベースラインモデルのスペクトル解析法を拡張し、EV スペクトラムにおける変位速度方向の時系列コヒーレンスを利用し、変位速度の位相差を積み付けしながら重ね合わせ、変位による位相差を算出し、変位を推定する手法を提案した。これらの改良により、 2π アンビギュイティにより不連続性が発生する位相差となる大変位や非線形的な変位が推定可能となる時系列干渉解析法を提案した。また、NN-PSI の計算範囲や処理手順についても整理し、既往手法との処理内容の相違を明確に示した。

2) 数値シミュレーションにより NN-PSI が適用可能な変位タイプと変位量を評価した。NN-PSI は、1 観測期間の変位量が $1/4$ 波長の範囲内では、線形的な変位、ステップ変位、指数関数的な変位、および周期的な変位を推定でき、さらに既往手法では 2π アンビギュイティにより不連続となる変位も正しく推定できることを示した。これらの変位タイプでは、推定精度が既往手法よりも大幅に改善し、本手法の有効性を示した。

3) 周期的な変位を使用した数値シミュレーションにおいて、NN-PSI の高さの決定方法と変位推定方法が効果的であることを示した。周期的な変位は、時系列コヒーレンスの分布が線形的な変位の場合と異なり、EV スペクトラムの中で明確なメインローブを示さないが、改良した手法により正しく高さを決定し、変位推定することが可能であることを確認した。NN-PSI の推定方法は推定モデルに依存しないため、非線形的な変位を問題なく推定できることを示した。また、周期的な変位は、1 観測期間の変位量が観測に使用した SAR センサの $1/4$ 波長の範囲における最大値に近づくと、推定のばらつきが大きくなることを示した。このことより、周期的な変位においては、推定時の観測記録の組み合わせを変更し、繰り返し計算した場合の推定変位のばらつきを確認することで、推定結果の信頼性を判断できる可能性を示した。

4) NN-PSI の計算範囲や観測条件が変位推定に与える影響について分析した。EV スペクトラム

の計算範囲は、NN-PSI の変位推定に大きく影響し、高さや変位速度アンビギュイティの値を使用することが重要であることを示した。観測条件については、推定精度を高めるために必要な観測間隔やベースライン距離の分布について把握し、NN-PSI の適用範囲を明らかにした。

5) NN-PSI の推定精度を把握するため、現在運用されている SAR の観測記録を用いて、NN-PSI を適用した。関心領域は電子基準点が多数存在し、推定結果を検証できる関東エリアとした。NN-PSI の推定変位とグランドトゥルスである電子基準点の観測記録から求まる変位との傾向が一致することを把握した。このことより、NN-PSI は電子基準点と同等の精度にて、広域の変位モニタリングが可能であることを示した。

6) 関東平野の解析では、NN-PSI による大規模建物の変位モニタリングについて評価した。NN-PSI で推定した結果、周期的な変位となっており、これらの変位は現地の気温との傾向が一致した。NN-PSI の推定結果の信頼度を確認するため、変位推定する際の観測データの組み合わせを変更し、繰り返し計算することで、推定変位のばらつきについて確認を行った。その結果、NN-PSI の推定変位のばらつきが小さく、推定している変位の信頼度が高いことを示した。これらの周期的な変位は、既往手法では位相差の不連続性が発生し、正しく推定できなかった。また、NN-PSI は、先験的なパラメータやモデルを使用せず非線形的な変位を推定可能であり、その推定手法の有効性を示した。

7) 調布市とブタペストにおいて、NN-PSI の地下工事に伴う変位について評価した。両解析エリアともに、既往手法の推定では 2π アンビギュイティにより不連続性が発生し正しく推定できない変位について、NN-PSI では問題なく推定できることを、現地の水準点の記録と比較することで把握した。工事の期間と沈下している期間も概ね一致し、対象とする地盤沈下による変位を時系列にて確認できることを示した。

5.2 今後の課題と展望

本研究の今後の課題と展望について述べる。

第3章において、NN-PSIは1観測期間中の変位量が、観測センサの1/4波長以上となると、既往手法よりも精度が低下することを示した。実観測記録に適用した場合に、NN-PSIの推定結果がこの最大変位量を超えたかどうかの判断ができない。NN-PSIが算出した推定変位の信頼度を示す指標などの検討が必要である。

第2章の手法提案で述べたEVスペクトラムは、NN-PSIにおいては高さと変位速度アンビギュイティの最大幅にて計算する必要がある、既往手法よりも計算コストが大きい。第4章の関東平野における2年間の変位推定では、EVスペクトラムの計算範囲が広がることにより、数ヶ月という単位の計算時間を要する。近年はSAR衛星もコンステレーションを組み、観測頻度も向上しており、観測直後に最新の時系列干渉解析による推定変位を確認するというニーズも増加傾向にある。そのため、NN-PSIの変位推定の高速化は重要であり、今後の取り組む課題としてあげられる。

本研究に関連した論文及び口頭発表

本研究に関連して発表した論文

1. Ogushi, F.; Matsuoka, M.; Defilippi, M.; Pasquali, P. Implementation of Non-Linear Non-Parametric Persistent Scatterer Interferometry and Its Robustness for Displacement Monitoring. *Sensors* **2021**, *21*, 1004.
2. Ogushi, F.; Matsuoka, M.; Defilippi, M.; Pasquali, P. Improvement of Persistent Scatterer Interferometry to Detect Large Non-Linear Displacements with the 2π Ambiguity by a Non-Parametric Approach. *Remote Sens.* **2019**, *11*, 2467.

本研究に関連して発表した口頭発表

1. Ogushi, F.; Matsuoka M.; Defilippi, M.; Pasquali, P. Monitoring Complex Surface Structure By Several Interferometric Stacking Techniques with PALSAR-1 data, IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Waikoloa, HI, USA, 2020, pp. 814-817
2. Ogushi, F.; Matsuoka, M. Monitoring Displacement on National Route and Railway with PALSAR-1 Data by using Multi-Temporal Displacement Decomposition in Chiba Prefecture, Japan, IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan, 2019, pp. 7510-7513
3. Ogushi F.; Shinohara T.; Matsuoka, M. Surface displacement due to the 2014 North Nagano, Japan earthquake estimated from differential interferometry technique with ALOS-2 PALSAR-2 data, 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Milan, 2015, pp. 3532-3535

その他の論文

1. Nonaka, T.; Asaka, T.; Iwashita, K.; Ogushi, F. Evaluation of the Trend of Deformation around the Kanto Region Estimated Using the Time Series of PALSAR-2 Data. *Sensors*, **2020**, *20*, 339.
2. Karimzadeh, S.; Matsuoka, M.; Ogushi, F. Spatiotemporal deformation patterns of the Lake Urmia Causeway as characterized by multisensor InSAR analysis. *Sci. Rep.* **2018**, *8*, 5357.

謝辞

本研究を進めるにあたり、東京工業大学教授 松岡昌志先生には大変お世話になりました。研究に対する姿勢、考え方、専門知識などを的確に指摘いただき、よりよい方向へ導いていただきました。時間調整ができない私の研究ペースを最後まで尊重いただき、多大なるご配慮をいただいたことに感謝します。また、研究に限らず体調面をいつもお気遣いいただき大変ありがとうございました。

東京工業大学 元結正次郎教授、山中浩明教授、盛川仁教授、佐藤大樹准教授には、本論文を丁寧に審査していただき、ありがとうございました。短い期間にもかかわらず、論文の核心となる部分に適切なコメントやアドバイスをいただき、改めて研究の深さを知ることができました。このような貴重な機会をいただき、厚くお礼申し上げます。

sarmap 社の CTO Paolo Pasquali 博士と Marco Defilippi 氏には、時系列干渉解析法の処理に関して、多大なる助言や支援をいただき、本当にありがとうございました。また、研究内容に限らず、世界中の合成開口レーダ技術に関する情報を共有いただいた、Francesco Holecz 博士、Achille Peternier 博士、Giulia Tessari 博士、Alessio Cantone 氏、Paolo Riccardi 氏にも感謝いたします。

会社に籍を置きながら、大学院へ進学する機会を与えていただきました Harris Geospatial 株式会社感謝いたします。代表取締役 大川満二郎氏、少ない社員のなかで業務の配分などを検討いただき、ありがとうございました。元代表取締役 阿部伸氏には、博士課程への進学を応援していただき感謝いたします。また、社員の皆様には業務について多分にご配慮いただき、大変感謝いたします。特に、私が担当すべき仕事を代わりにこなしていただいた、セールスエンジニアの根岸正浩氏、生駒舞子氏、亀高遼平氏には大変感謝いたします。今後、この研究の経験をビジネスに生かしていく所存です。

松岡研究室の押尾晴樹助教、Sadra Karimzadeh 特別研究員、Raveerat Jaturapitpornchai 博士、Min-Lung Cheng 博士、博士課程の串山傳氏、Patcharavadee Tahmarux 氏、篠原崇之氏、修浩毅氏、また在学期間中に修士課程で共に研究した皆様、年齢に関係なくゼミなどで議論しアドバイスをいただき大変お世話になりました。萬田久美子氏には事務手続き等で大変お世話になりました。ご在席の際はいつも声をかけていただき、研究室では明るく過ごせました。色々とお気遣いいただき大変ありがとうございました。

東工大元教授 翠川三郎先生には、研究を進めるにあたり日々の取り組みの大切さを教えていただきました。元翠川研究室の他谷周一博士には、社会人博士課程における相談に乗っていただき、多大なるアドバイスをいただきました。神前芳美氏は、お会いするたびに体調などを気にかけていただきました。大変感謝いたします。

東北大 越村俊一教授、岡嶋雅夫氏、竹田宏之氏、土田雅代氏、宮澤浩平氏には、研究と業務の両立に対しいつも応援いただき、私のみならず家族のストレスもケアいただき、大変ありがとうございました。

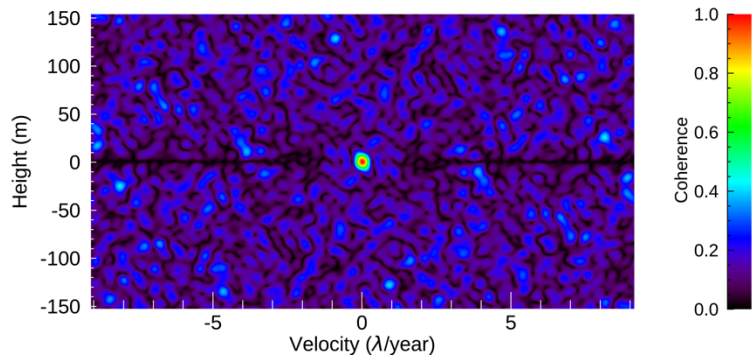
最後に、博士課程の挑戦を惜しみなく支援してくれた、妻 里美、長男 碧躍、次男 實躍、修士課程まで卒業させてくれた両親、いつも励ましてくれた親戚一同に感謝いたします。

付録

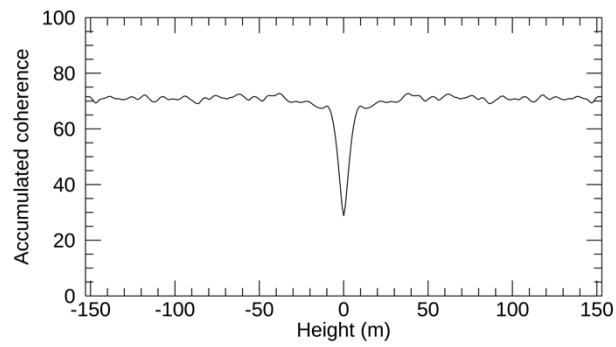
第3章3節の「異なる変位タイプへの適用」にて、(1)線形的な変位、(2)ステップ変位、(3)指数関数的な変位、(4)周期的な変位の変位量 D を変更し、NN-PSIにおける変位推定の影響を確認した。本付録では、数値シミュレーションのすべての計算結果を示す。

1 線形的な変位

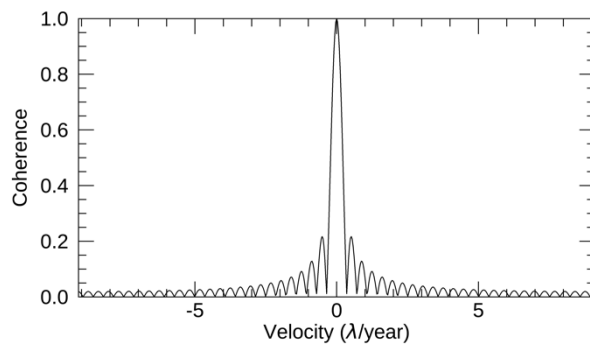
線形的な変位の数値シミュレーションの結果を示す。変位量 D を0から 10λ まで、 0.5λ ずつ変更し、NN-PSIを適用した。図は3章と同様の構成とし、(a)はEVスペクトラム、(b)は変位速度方向に時系列コヒーレンスを累積した高さ方向のプロファイル、(c)は決定した高さの時系列コヒーレンスのプロファイルを示す。(d)は変位推定結果を示し、赤線がNN-PSI、青線がConvPSI、そして黒線が数値シミュレーションで作成した変位を示す。



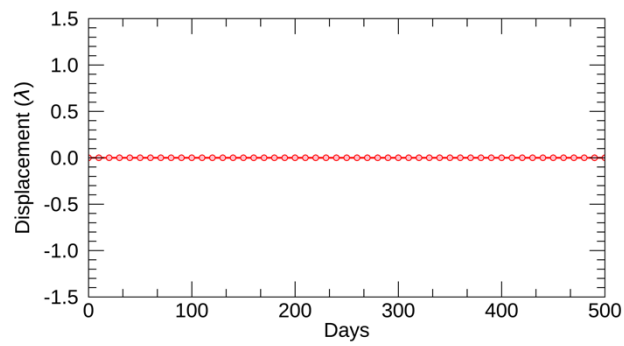
(a)



(b)

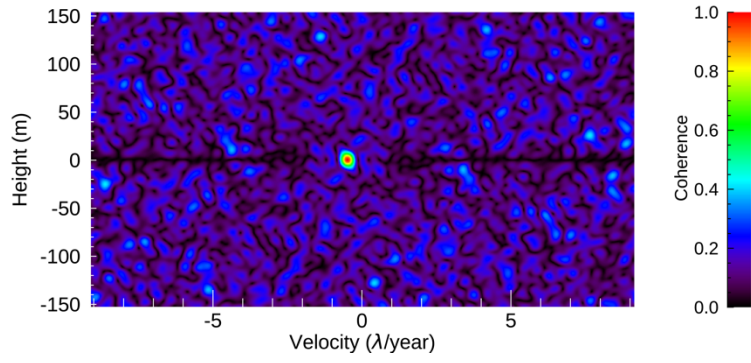


(c)

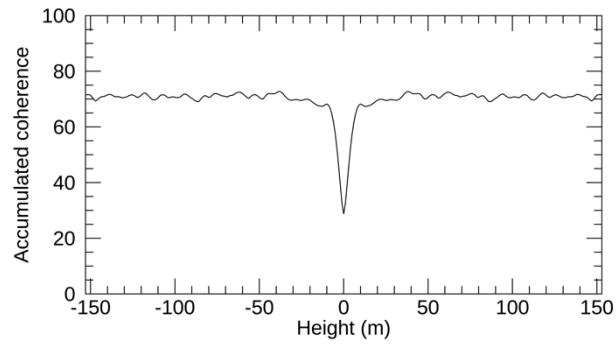


(d)

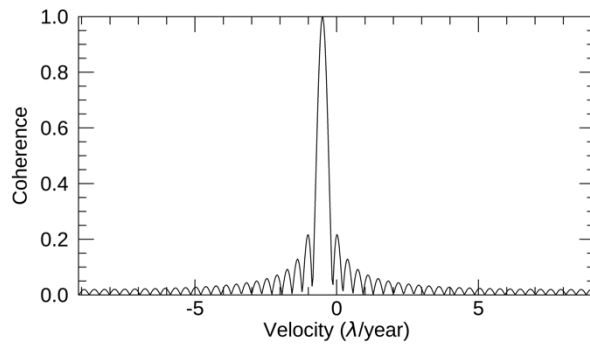
Figure A. 1: The results of the linear displacement with Dof of 0.0λ .



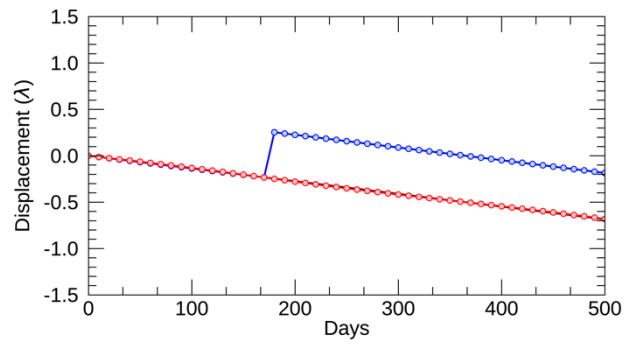
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure A. 2: The results of the linear displacement with D of 0.5λ .

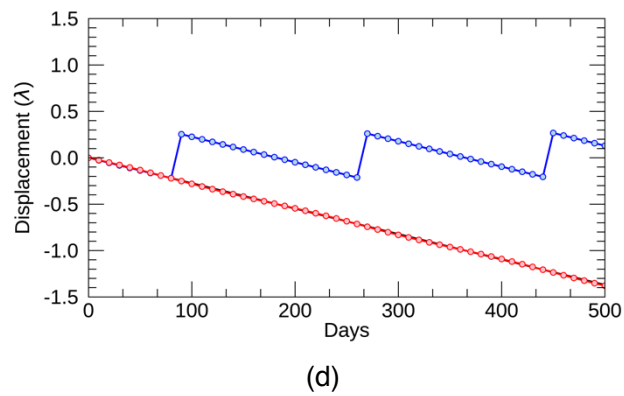
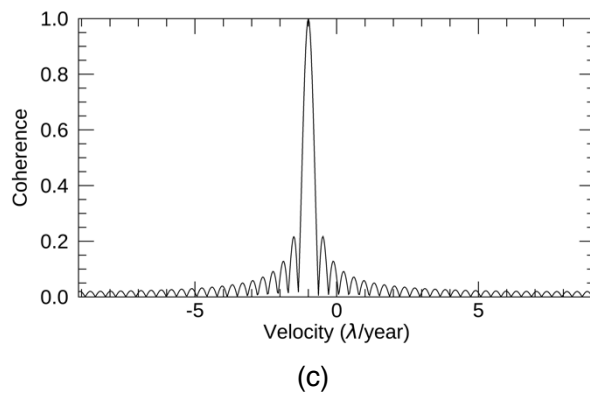
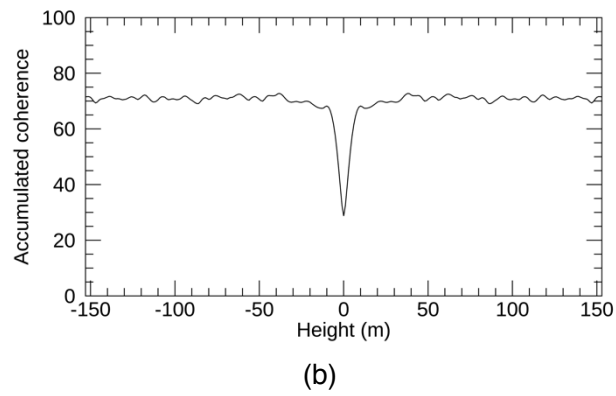
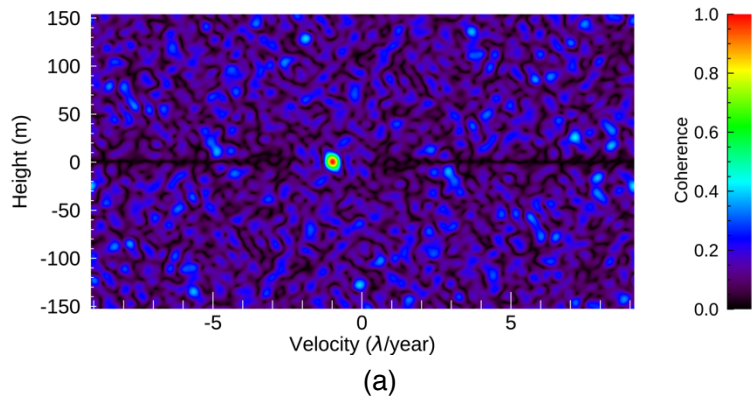


Figure A. 3: The results of the linear displacement with Dof of 1.0λ .

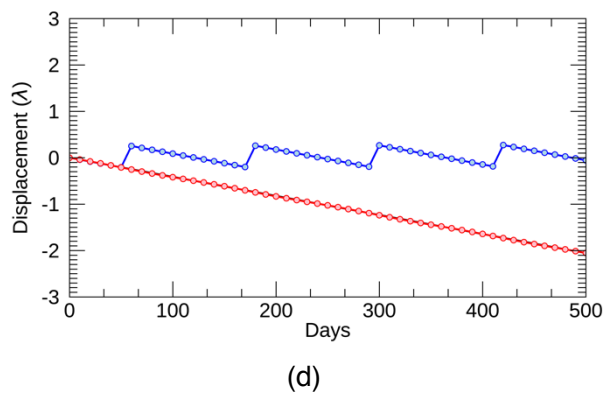
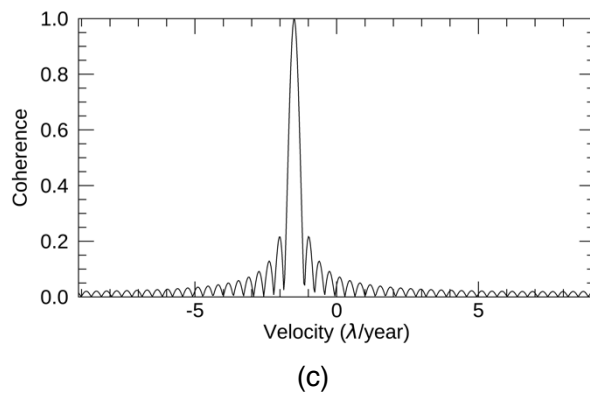
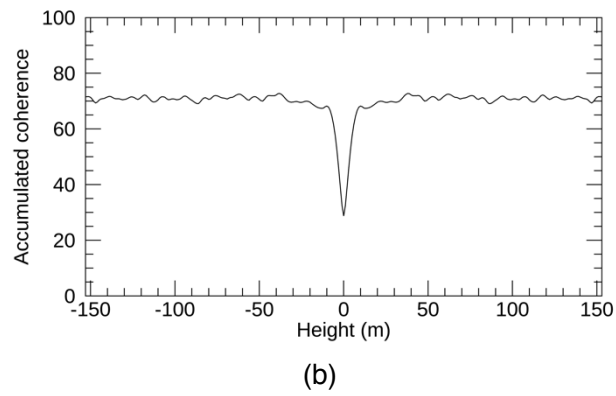
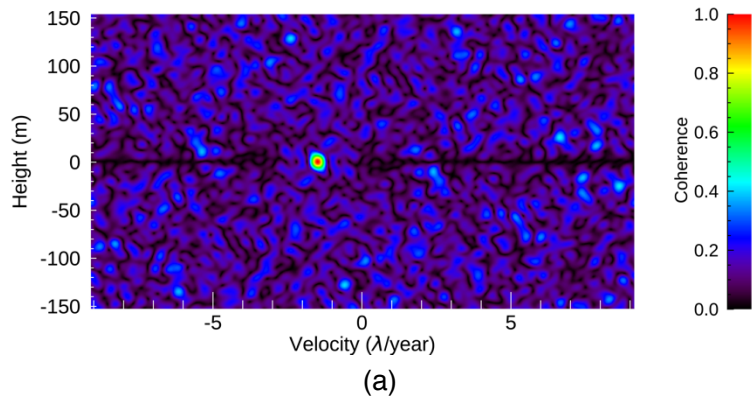
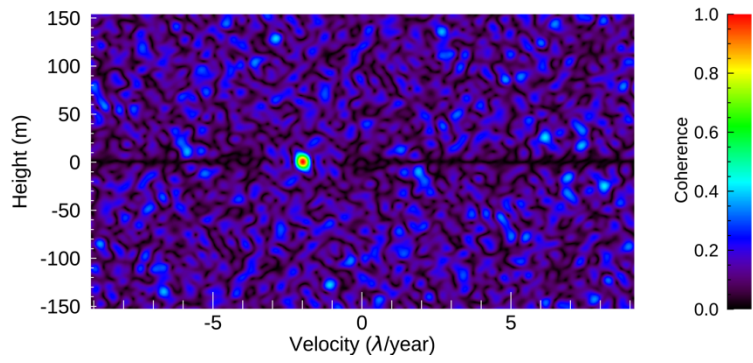
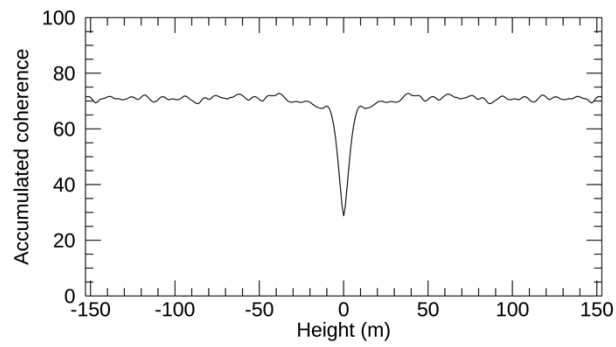


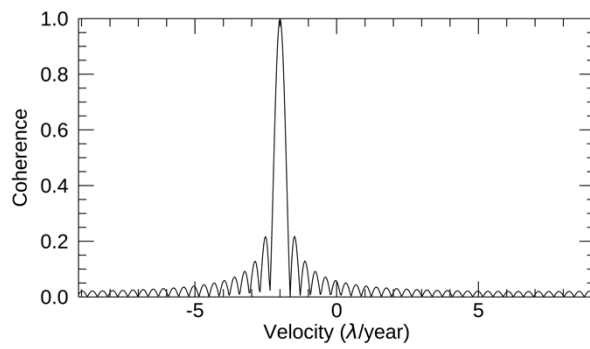
Figure A. 4: The results of the linear displacement with Dof of 1.5λ .



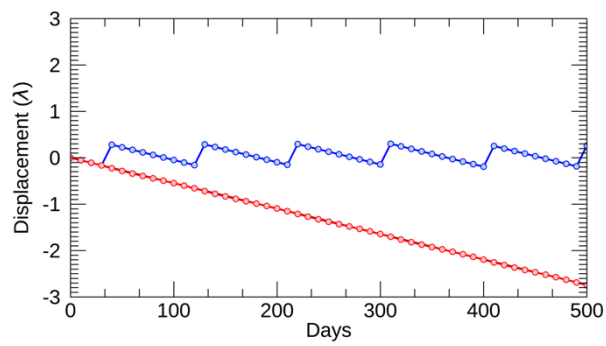
(a)



(b)

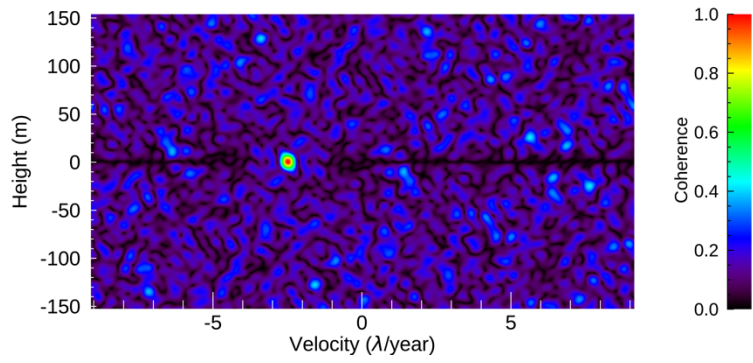


(c)

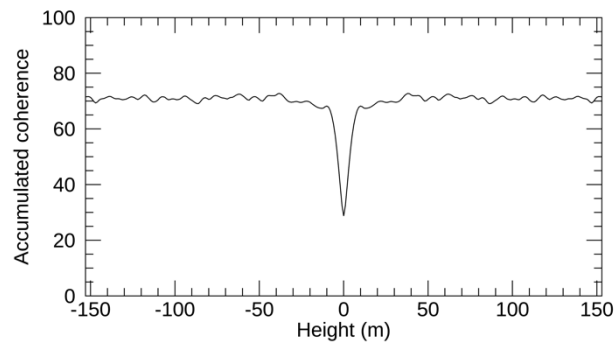


(d)

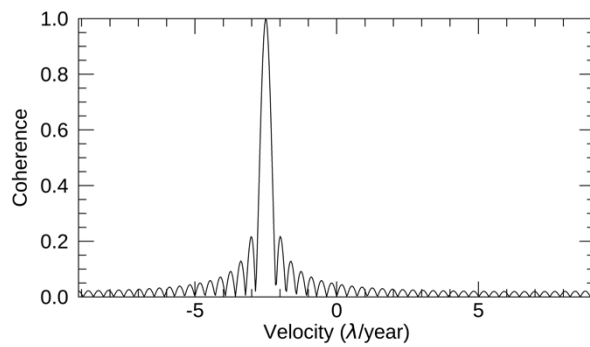
Figure A. 5: The results of the linear displacement with Dof of 2.0λ .



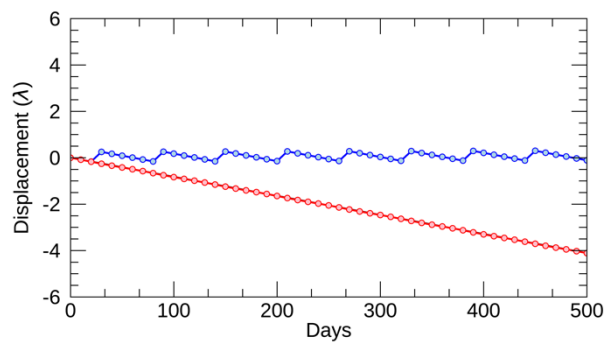
(a)



(b)

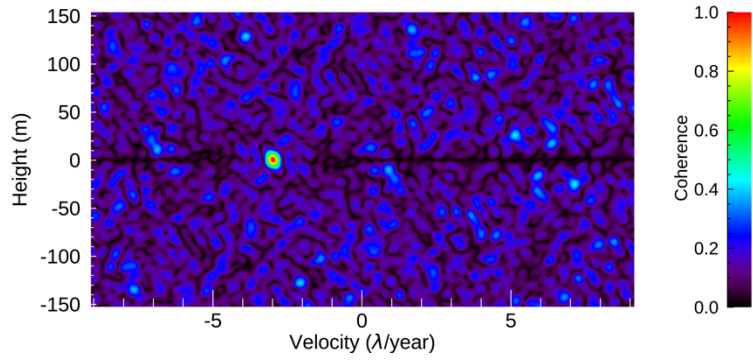


(c)

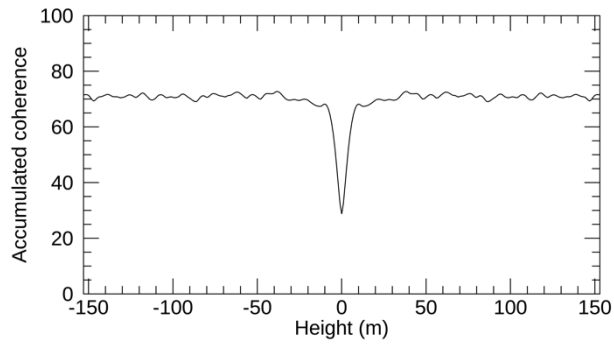


(d)

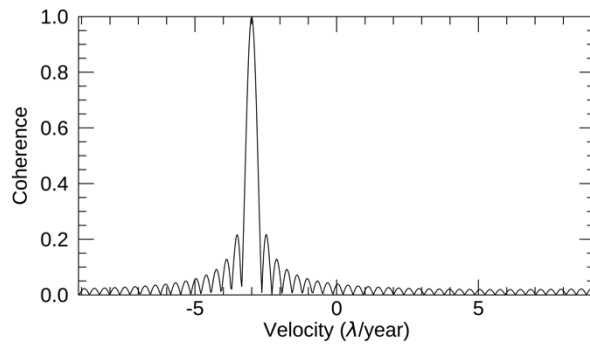
Figure A. 6: The results of the linear displacement with Dof of 2.5λ .



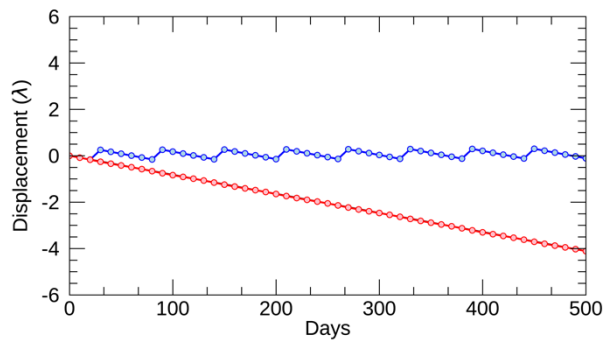
(a)



(b)

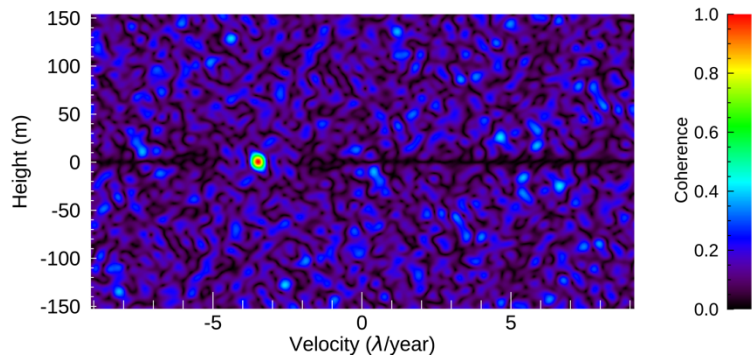


(c)

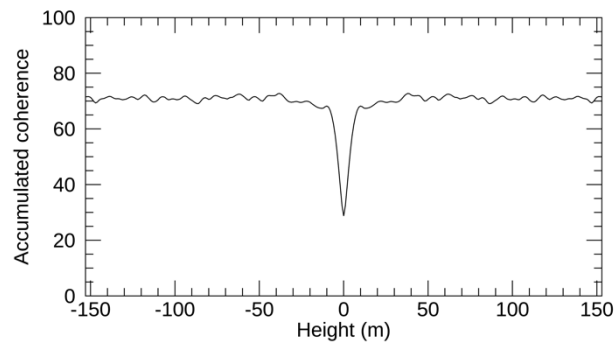


(d)

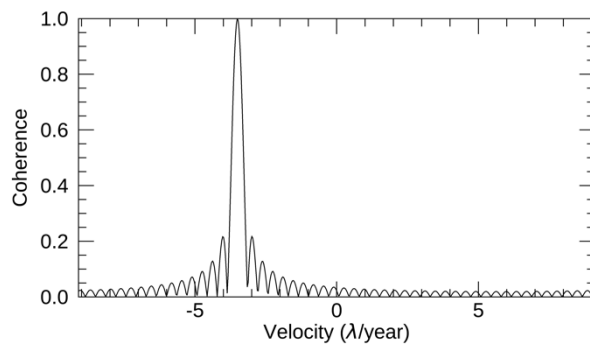
Figure A. 7: The results of the linear displacement with Dof of 3.0λ .



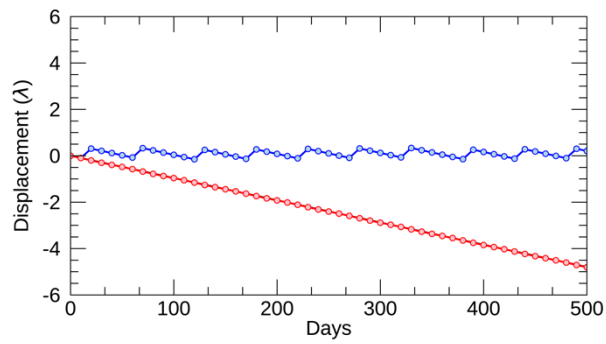
(a)



(b)

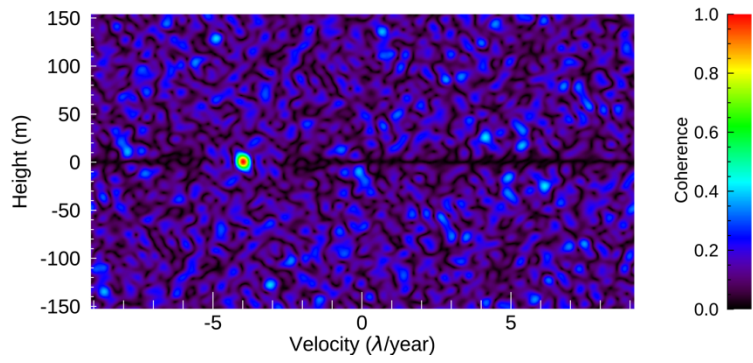


(c)

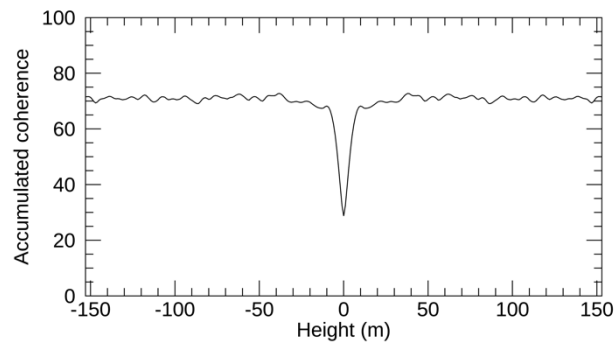


(d)

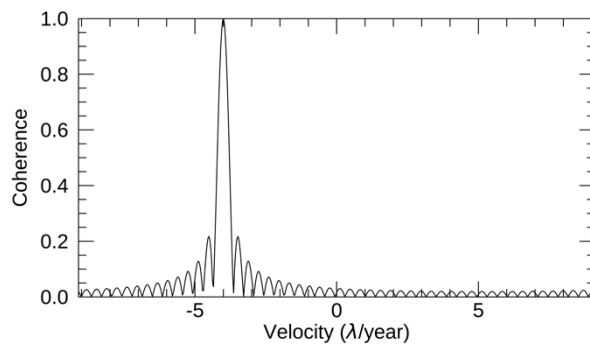
Figure A. 8: The results of the linear displacement with Dof of 3.5λ .



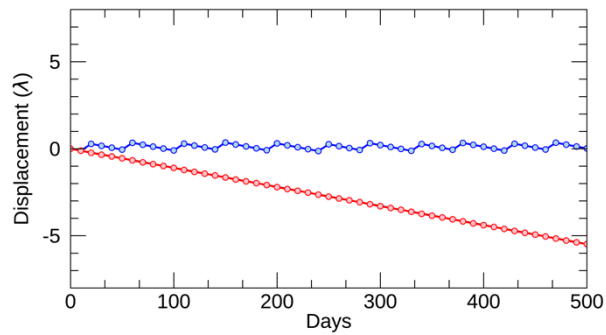
(a)



(b)

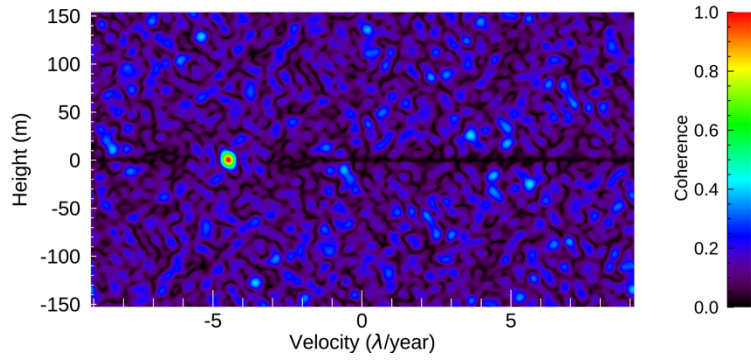


(c)

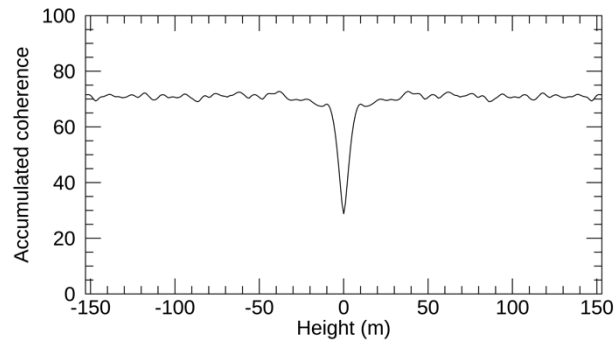


(d)

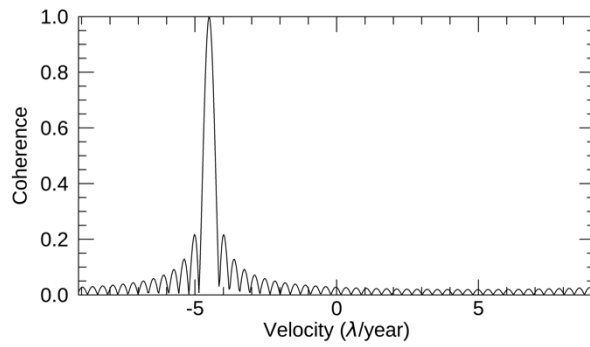
Figure A. 9: The results of the linear displacement with Dof of 4.0λ .



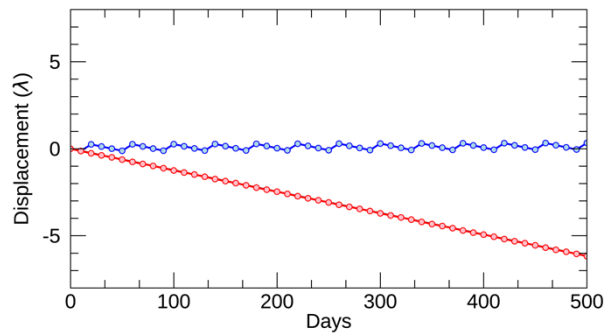
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure A. 10: The results of the linear displacement with $Dof\ 4.5\ \lambda$.

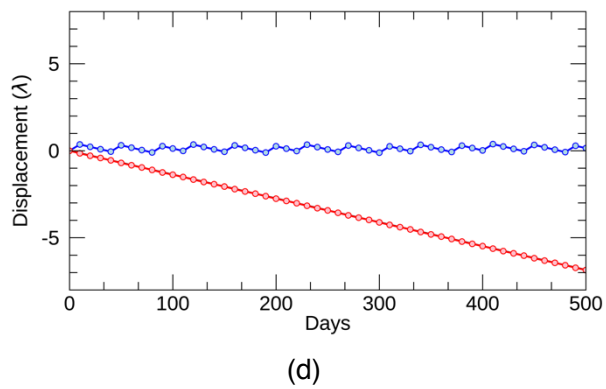
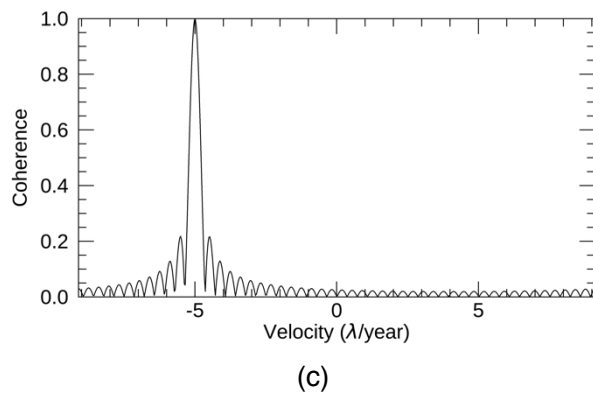
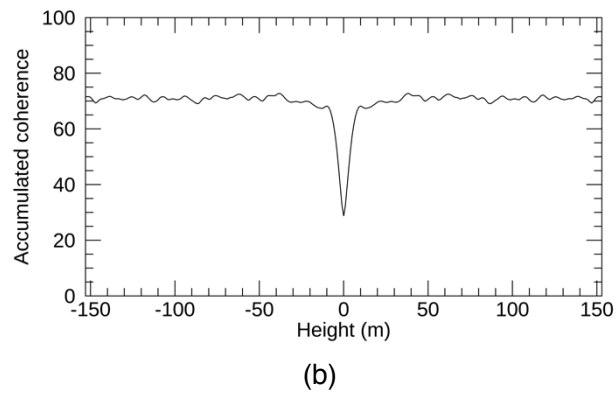
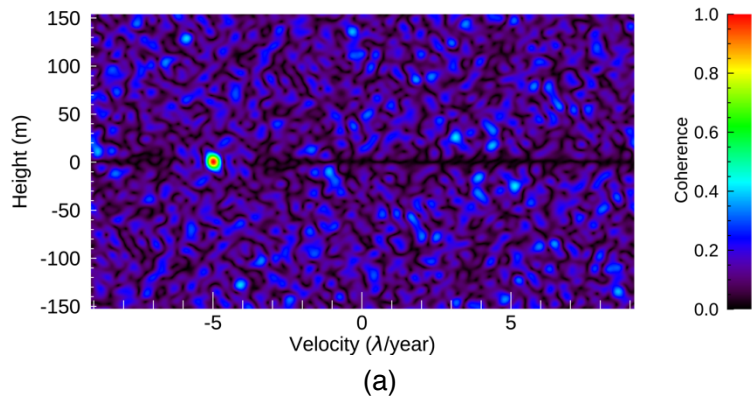
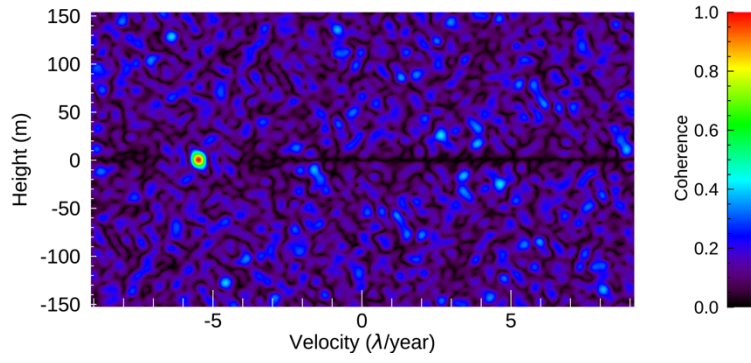
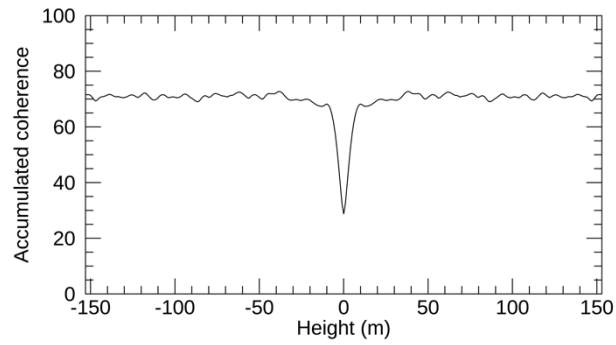


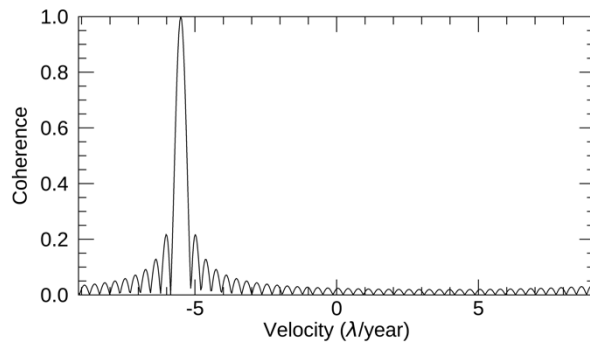
Figure A. 11: The results of the linear displacement with $Dof\ 5.0\ \lambda$.



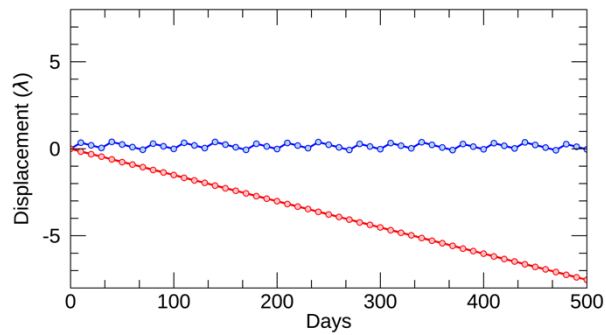
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure A. 12: The results of the linear displacement with $Dof\ 5.5\ \lambda$.

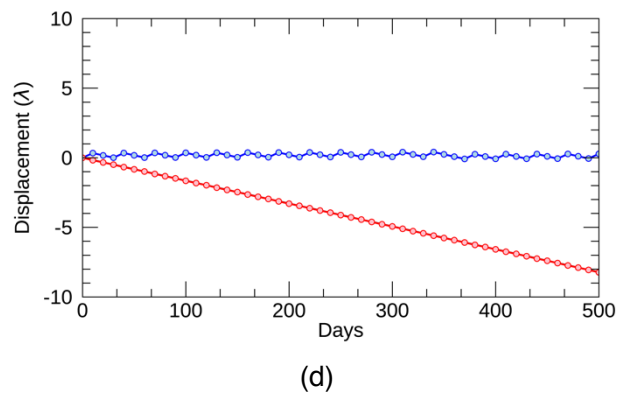
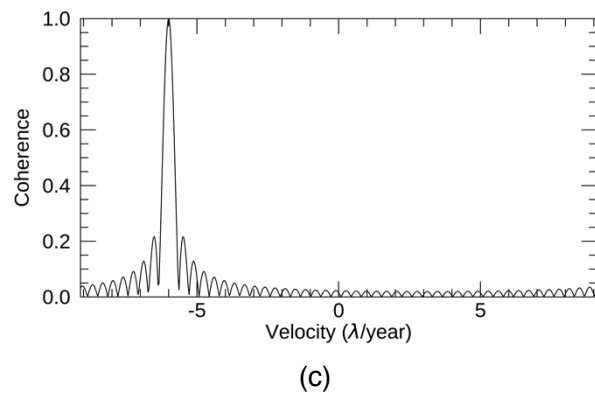
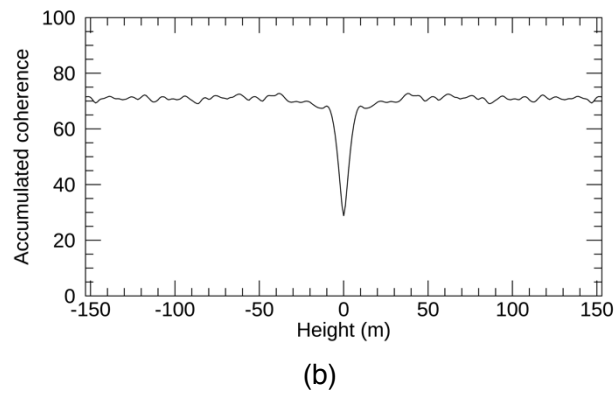
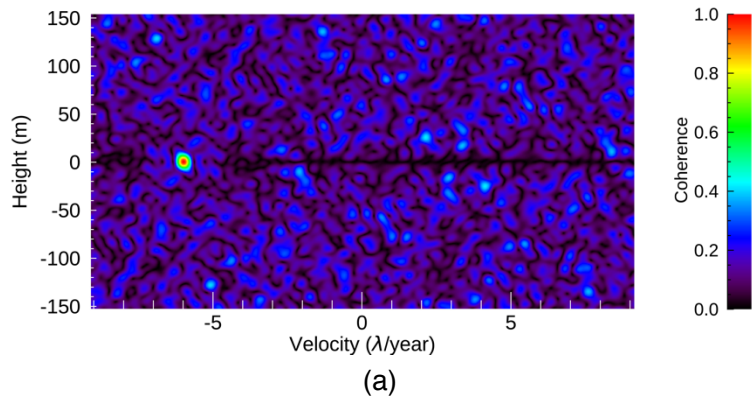


Figure A. 13: The results of the linear displacement with $Dof\ 6.0\ \lambda$.

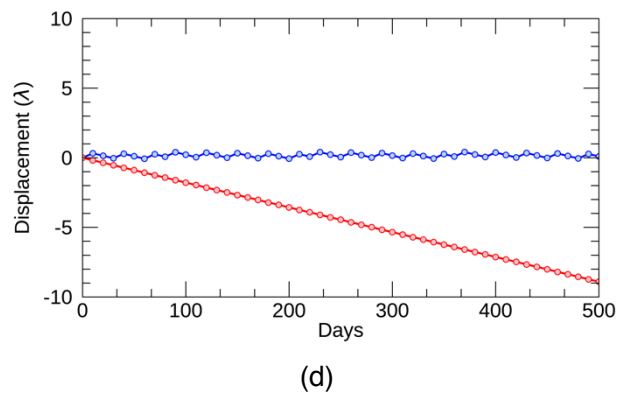
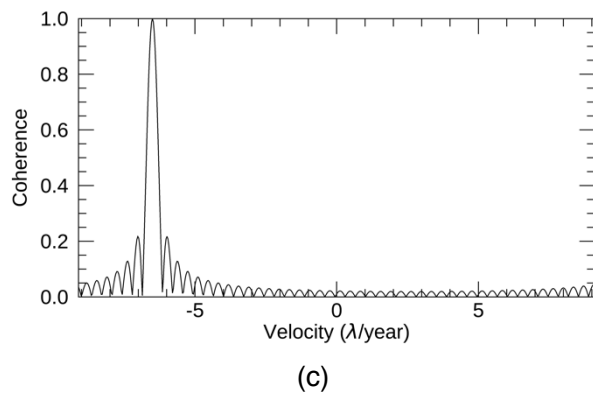
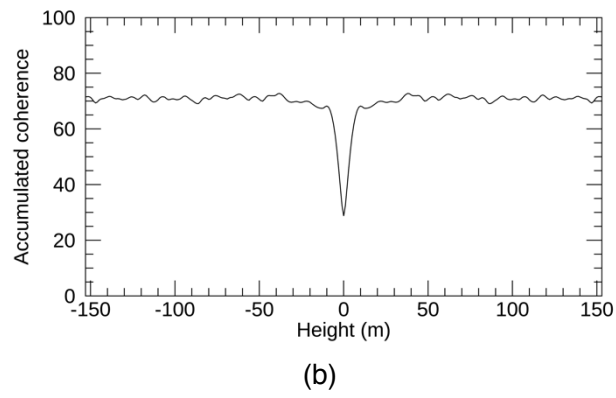
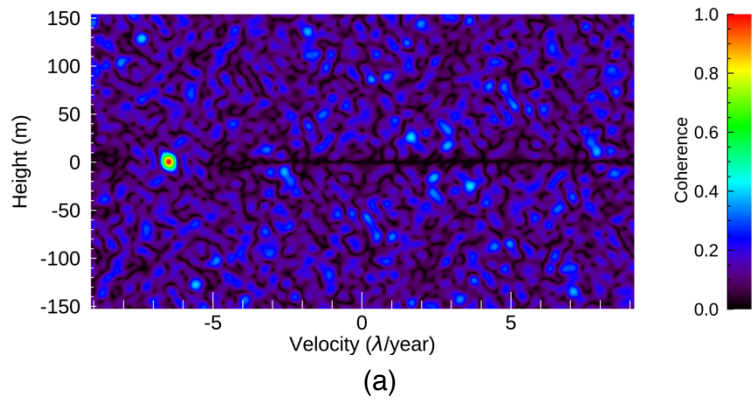


Figure A. 14: The results of the linear displacement with $Dof\ 6.5\ \lambda$.

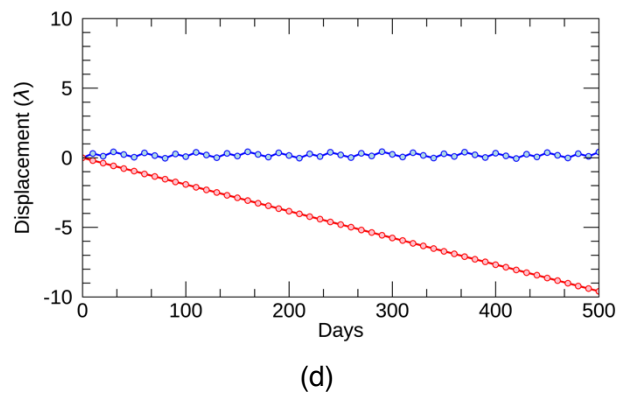
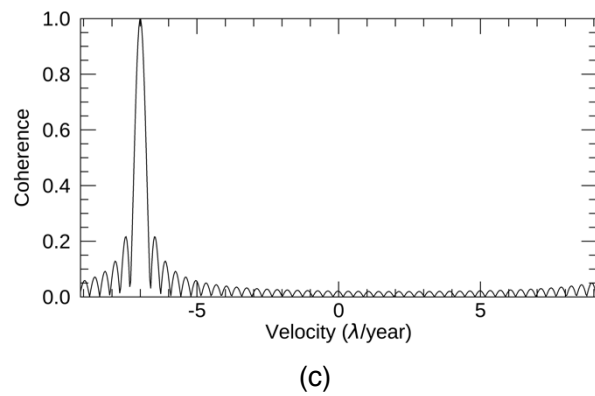
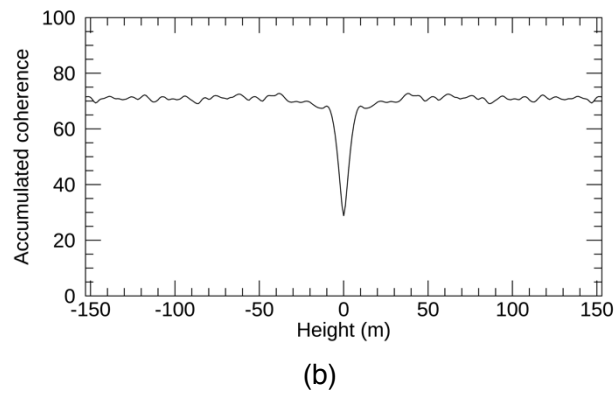
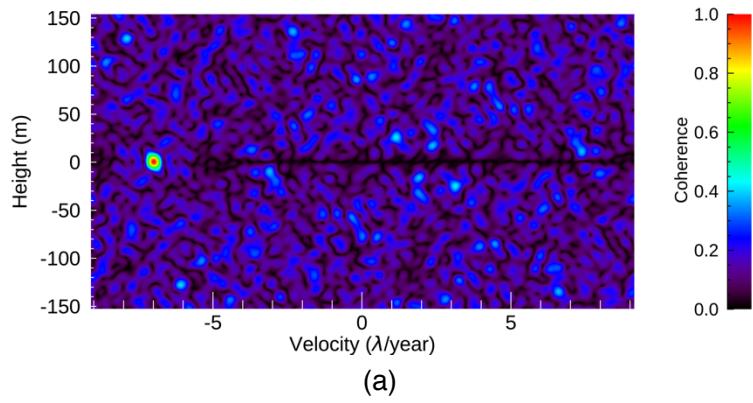
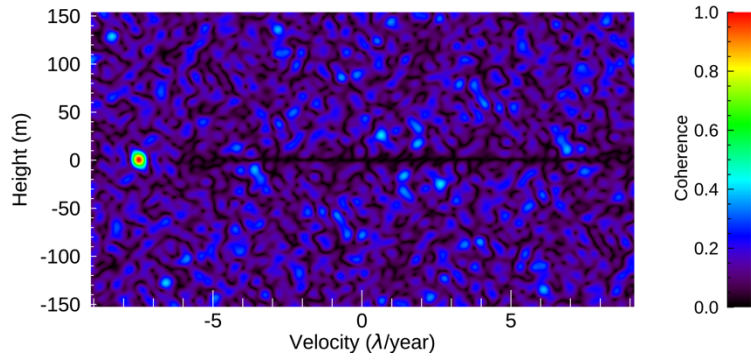
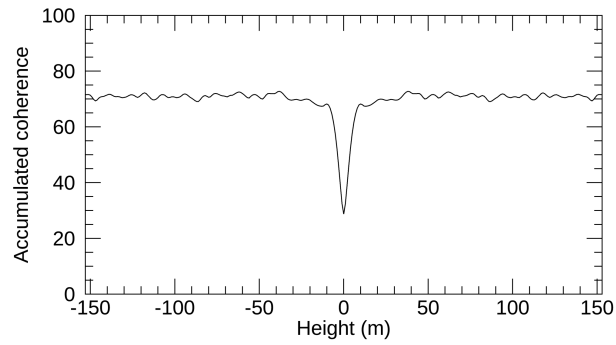


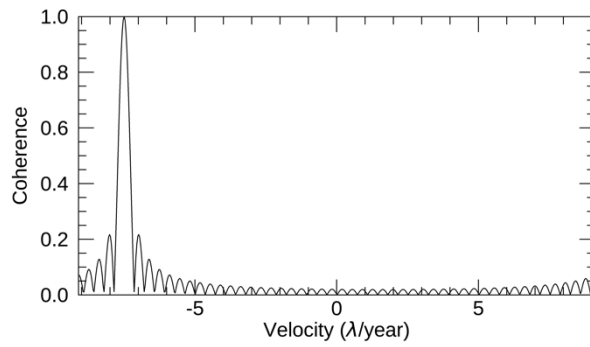
Figure A. 15: The results of the linear displacement with $Dof\ 7.0\ \lambda$.



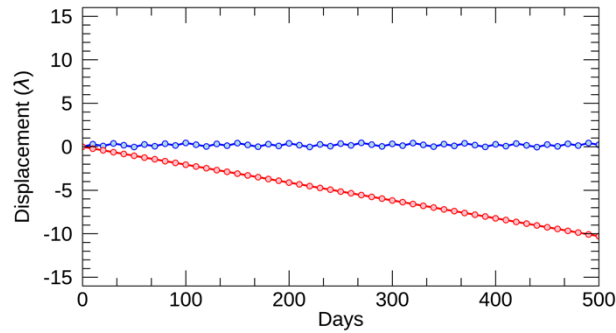
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure A. 16: The results of the linear displacement with $Dof\ 7.5\ \lambda$.

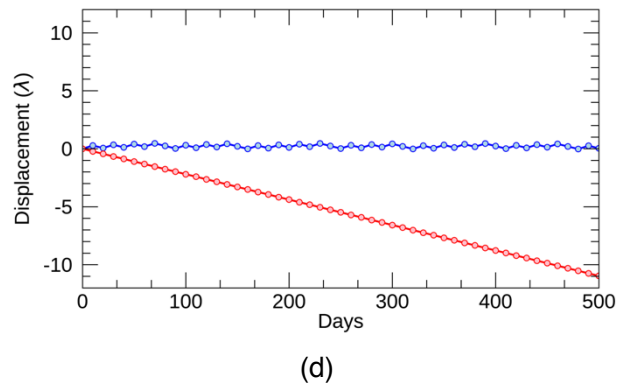
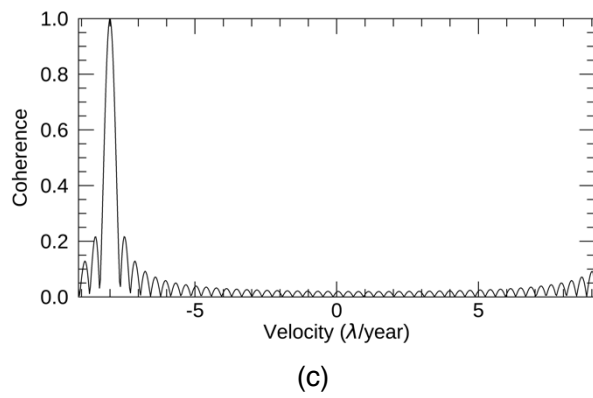
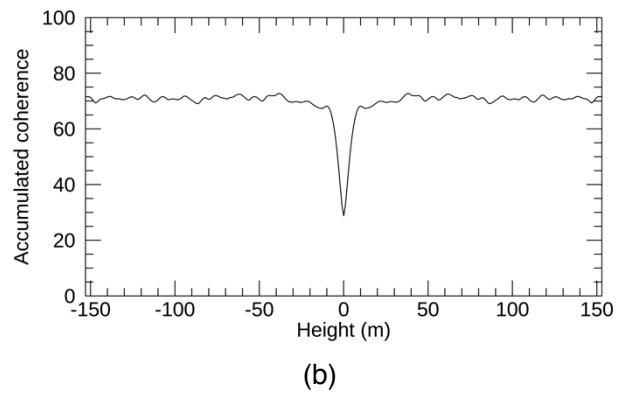
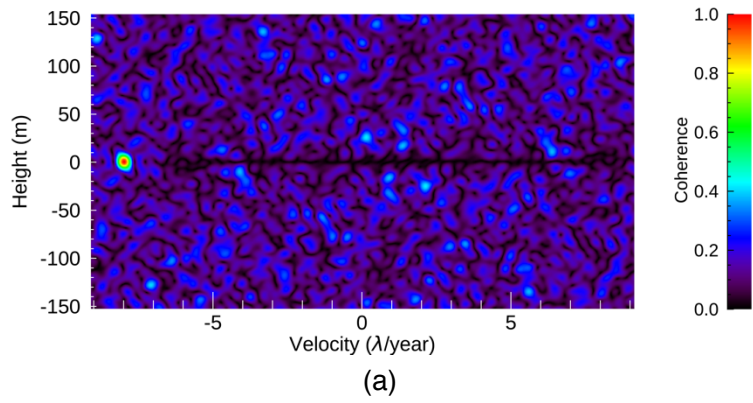


Figure A. 17: The results of the linear displacement with $Dof\ 8.0\ \lambda$.

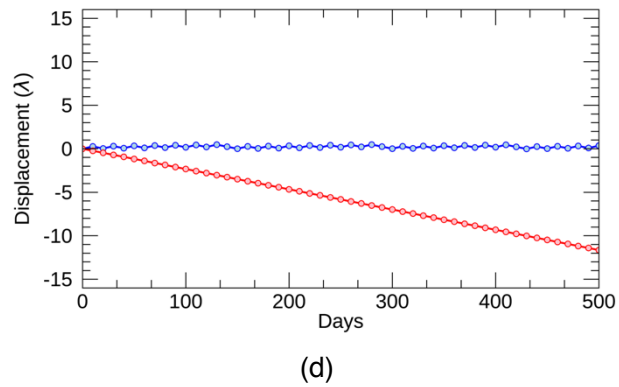
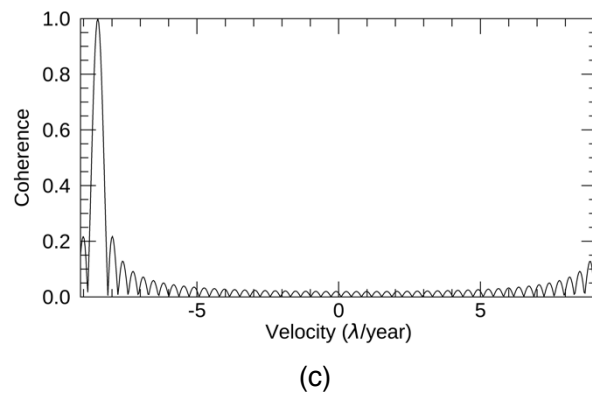
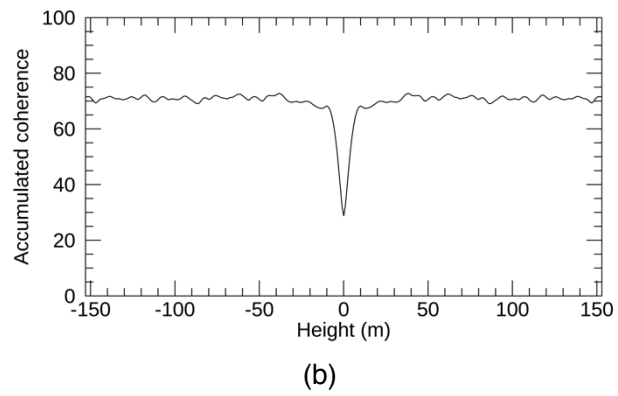
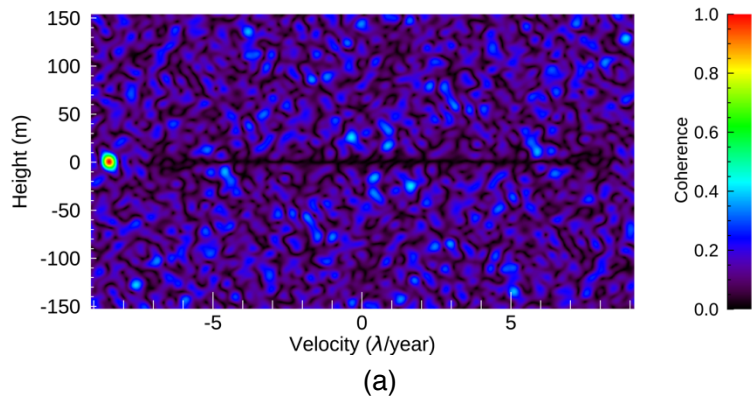


Figure A. 18: The results of the linear displacement with $Dof\ 8.5\ \lambda$.

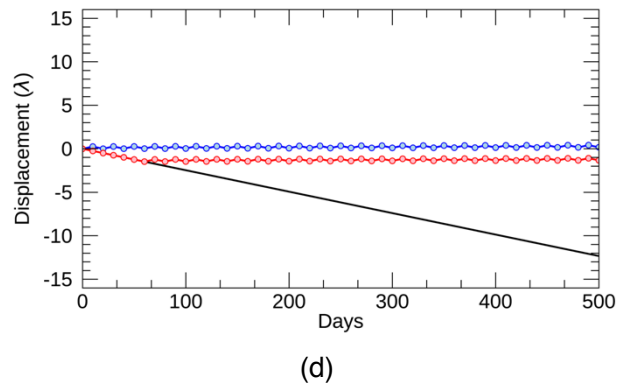
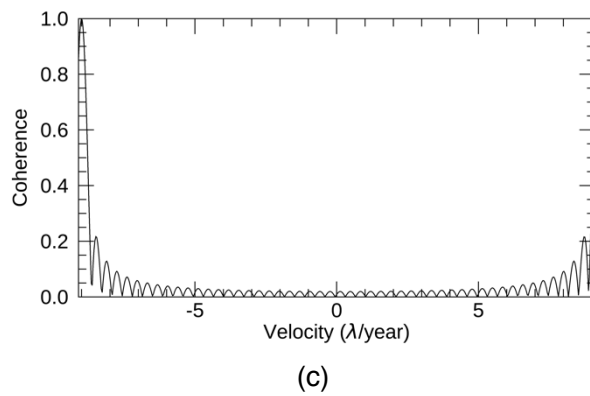
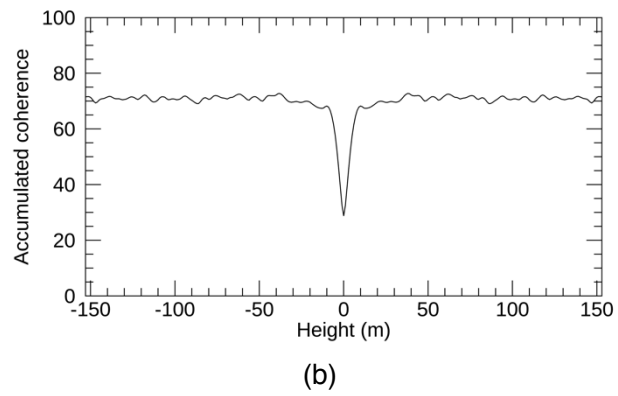
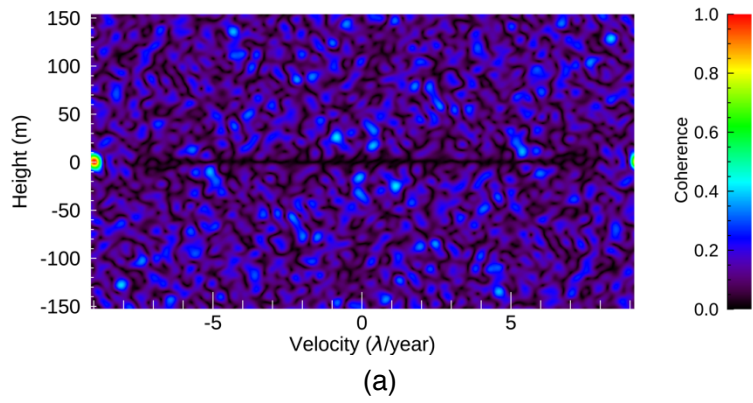


Figure A. 19: The results of the linear displacement with $Dof\ 9.0\ \lambda$.

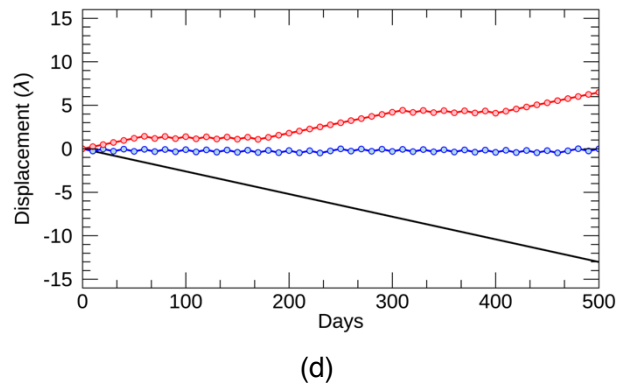
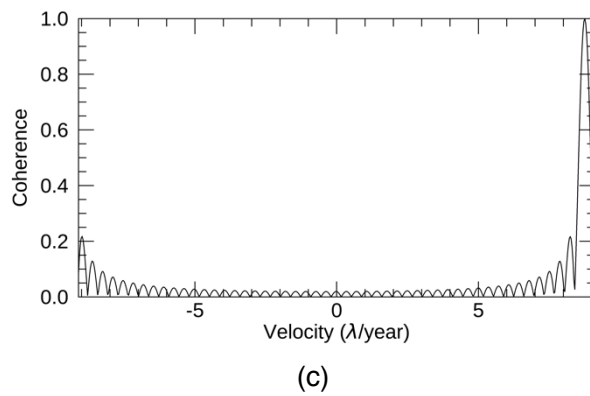
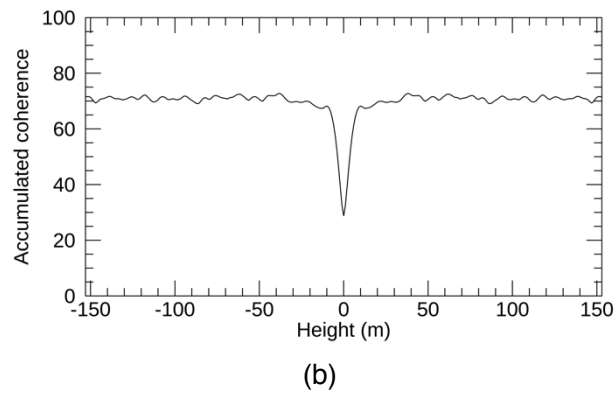
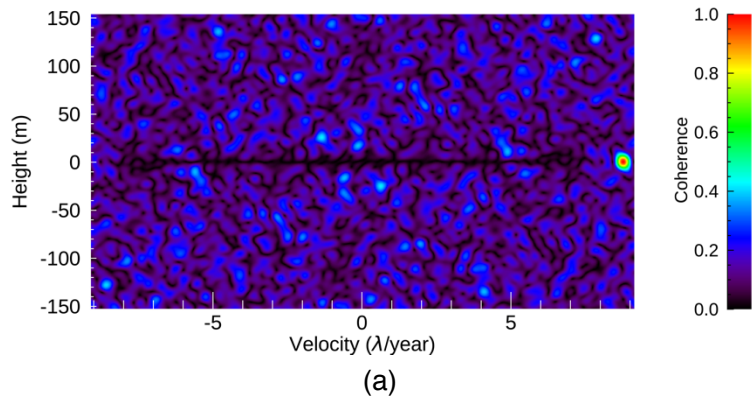
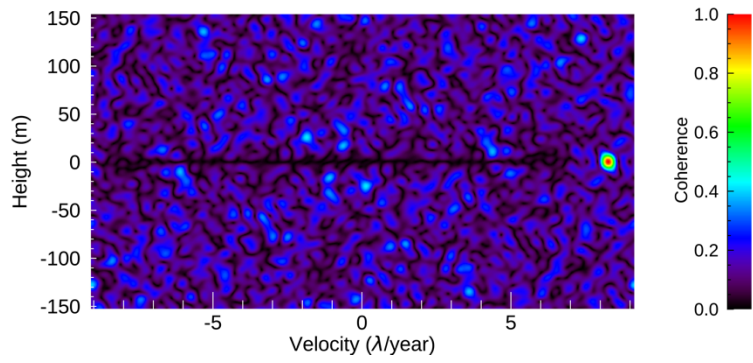
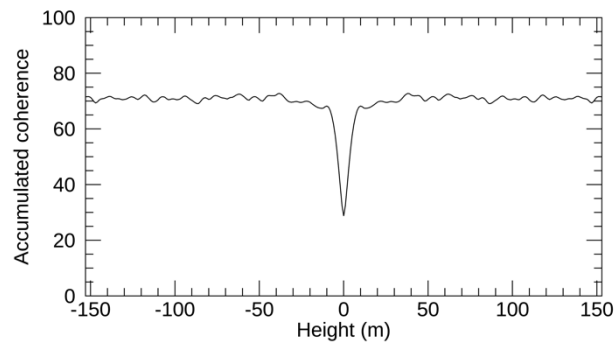


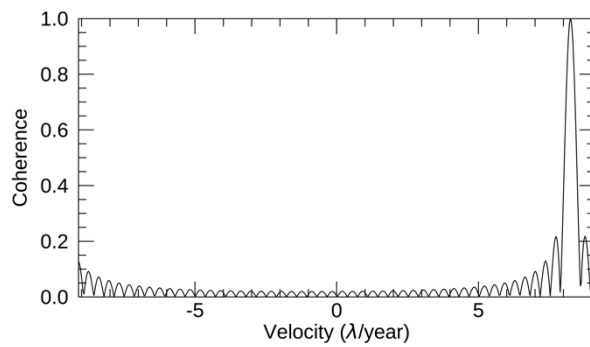
Figure A. 20: The results of the linear displacement with $Dof\ 9.5\ \lambda$.



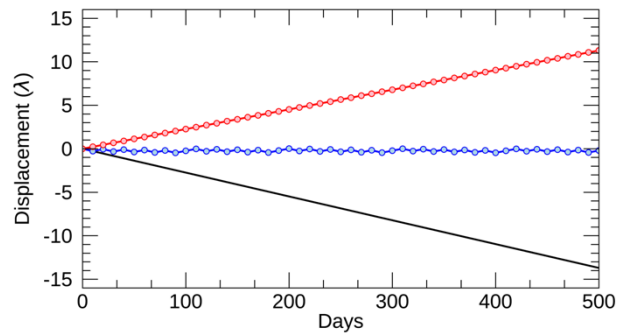
(a)



(b)



(c)

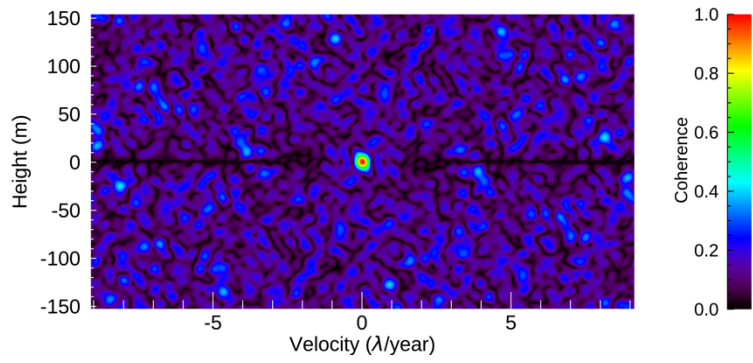


(d)

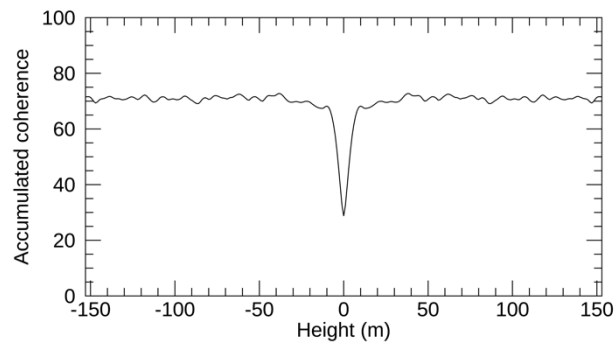
Figure A. 21: The results of the linear displacement with Dof of 10.0λ .

2 ステップ変位

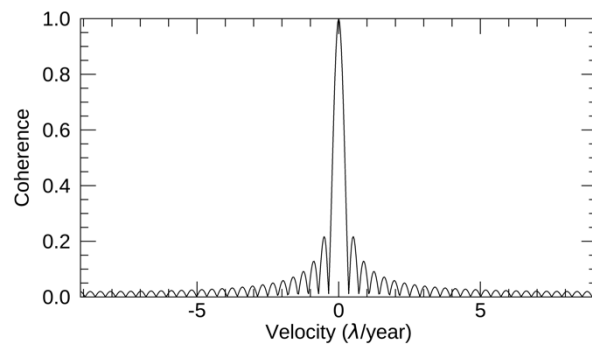
ステップ変位の数値シミュレーションの結果を示す。変位量 D を0から 0.3λ まで、 0.05λ ずつ変更し、NN-PSIを適用した。図は3章と同様の構成とし、(a)はEVスペクトラム、(b)は変位速度方向に時系列コヒーレンスを累積した高さ方向のプロファイル、(c)は決定した高さの時系列コヒーレンスのプロファイルを示す。(d)は変位推定結果を示し、赤線がNN-PSI、青線がConvPSI、そして黒線が数値シミュレーションで作成した変位を示す。



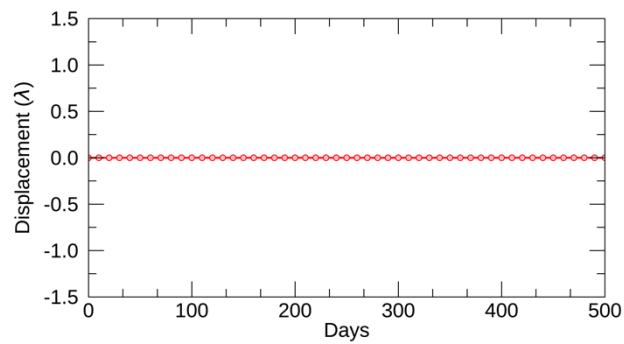
(a)



(b)

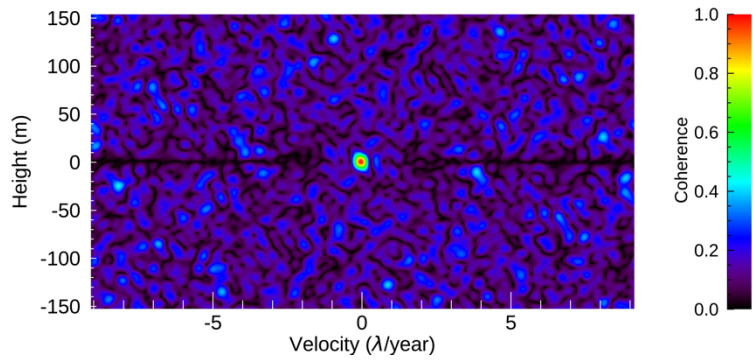


(c)

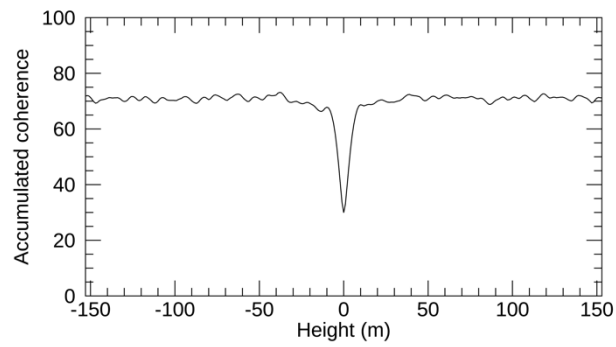


(d)

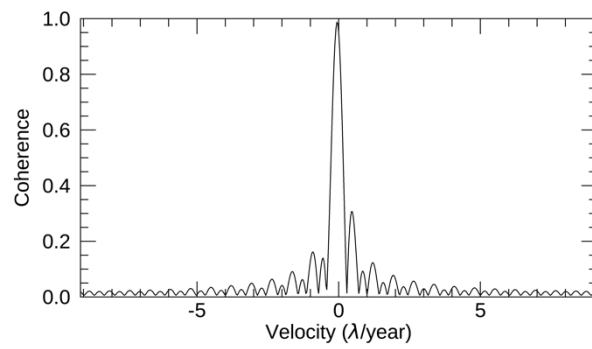
Figure A. 22: The results of the step displacement with $Dof\ 0\ \lambda$



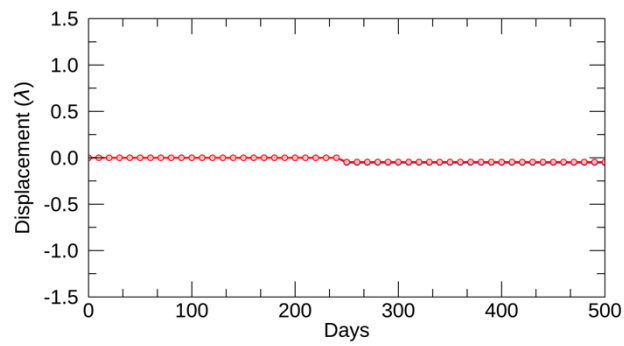
(a)



(b)

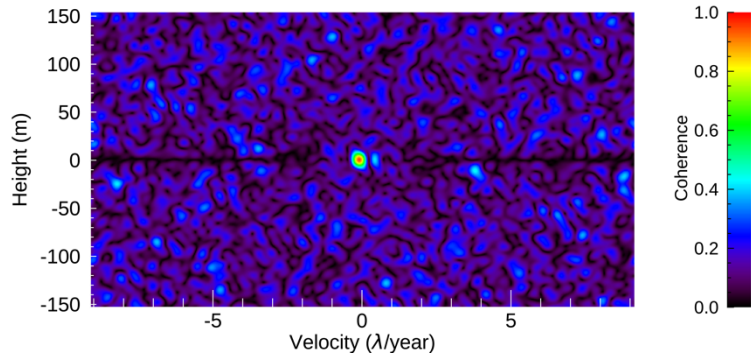


(c)

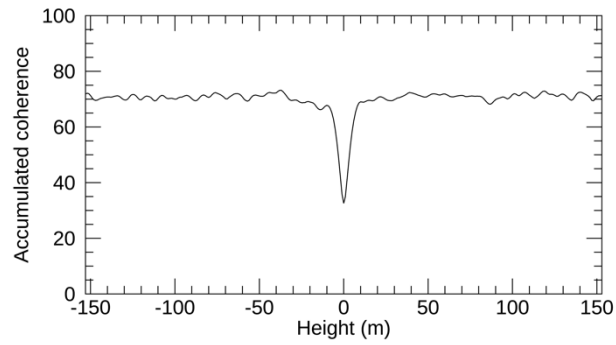


(d)

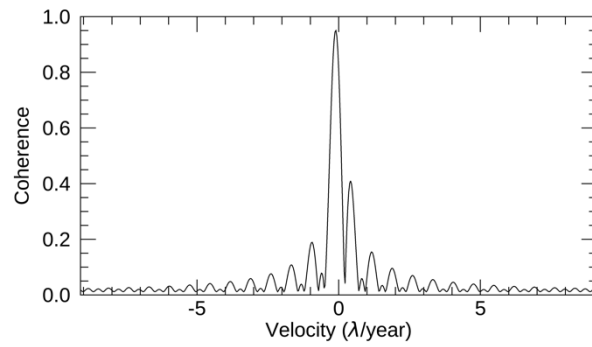
Figure A. 23: The results of the step displacement with D of 0.05λ



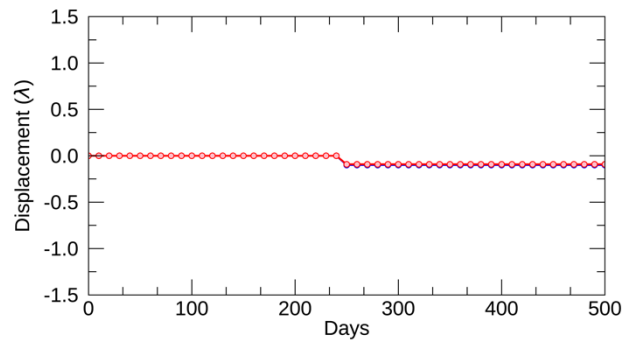
(a)



(b)

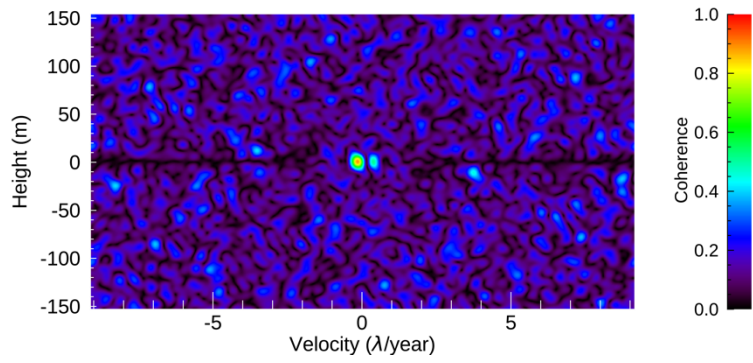


(c)

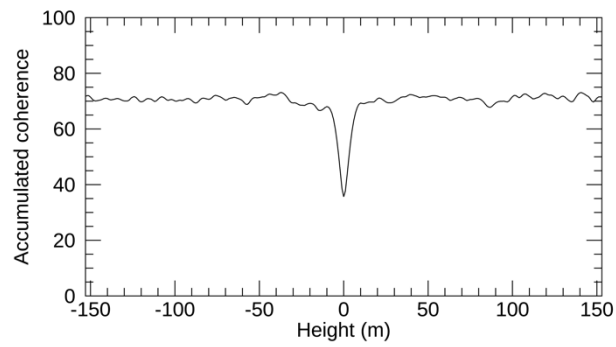


(d)

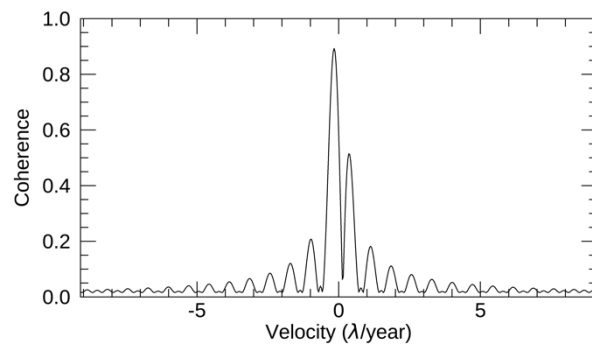
Figure A. 24: The results of the step displacement with Dof of 0.1λ



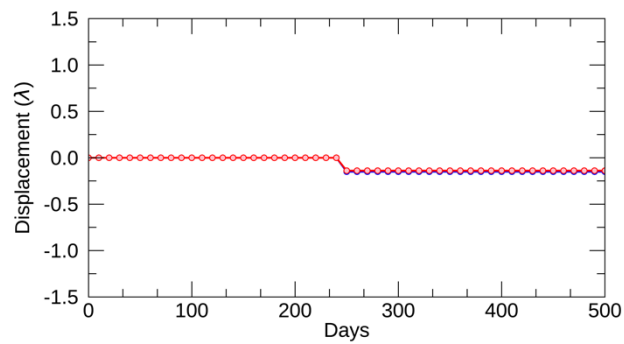
(a)



(b)

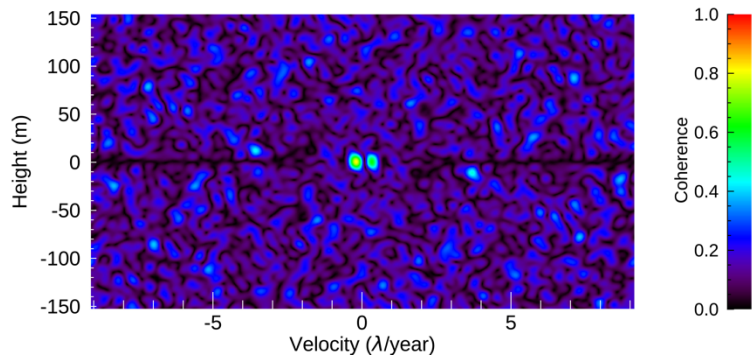


(c)

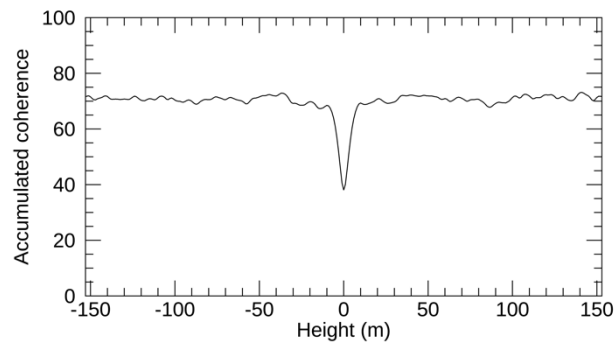


(d)

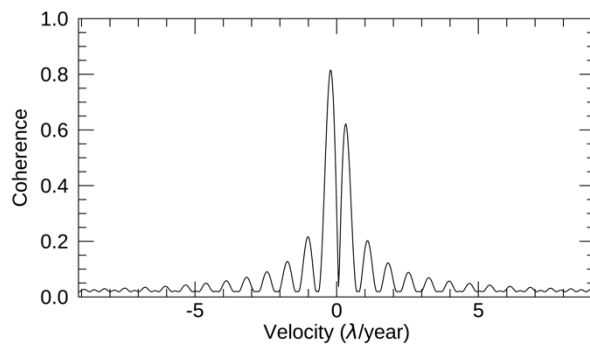
Figure A. 25: The results of the step displacement with D of 0.15λ



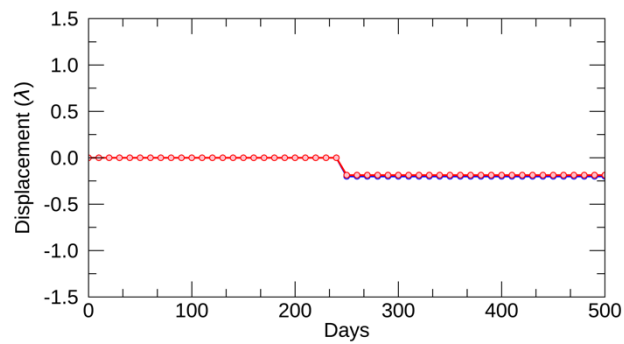
(a)



(b)

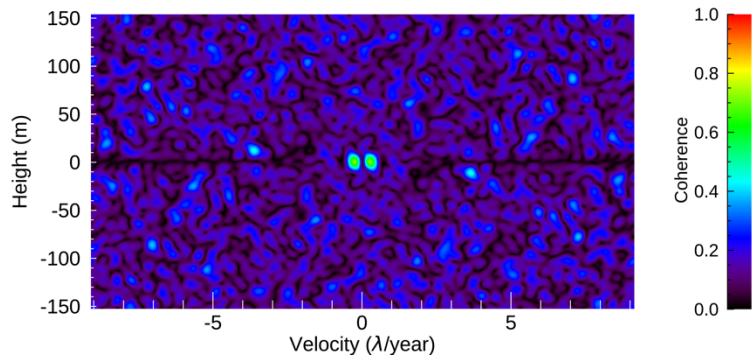


(c)

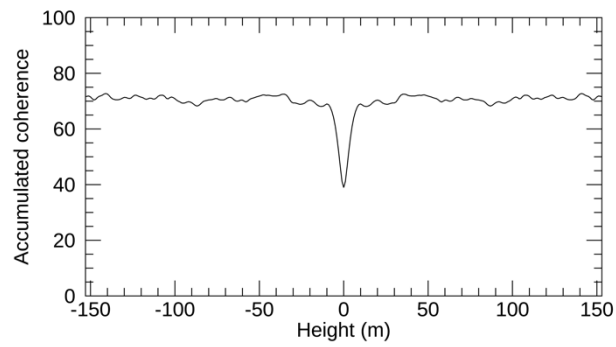


(d)

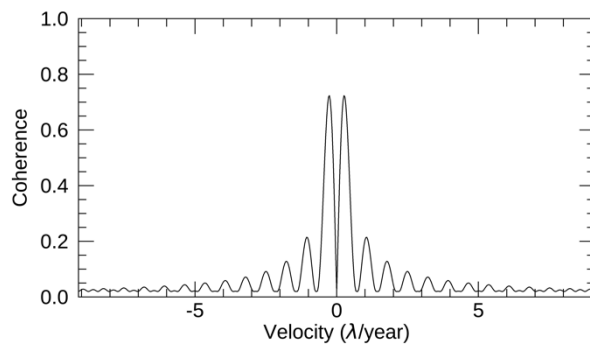
Figure A. 26: The results of the step displacement with Dof of 0.2λ



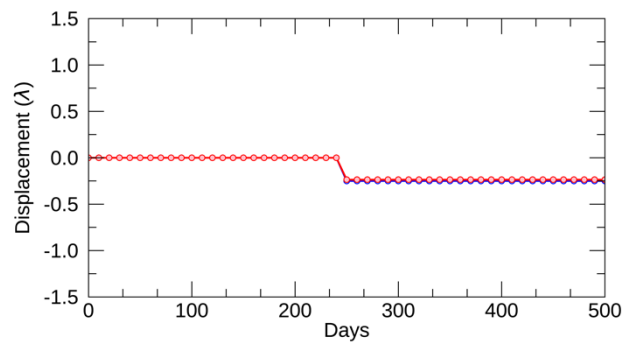
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure A. 27: The results of the step displacement with D of 0.25λ

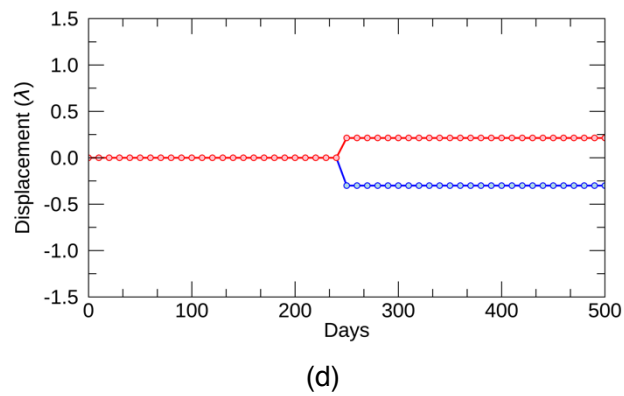
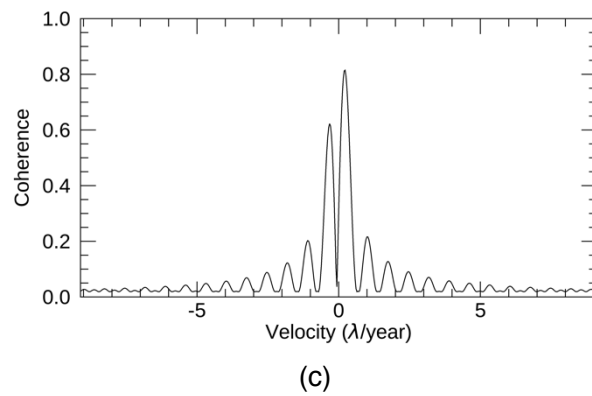
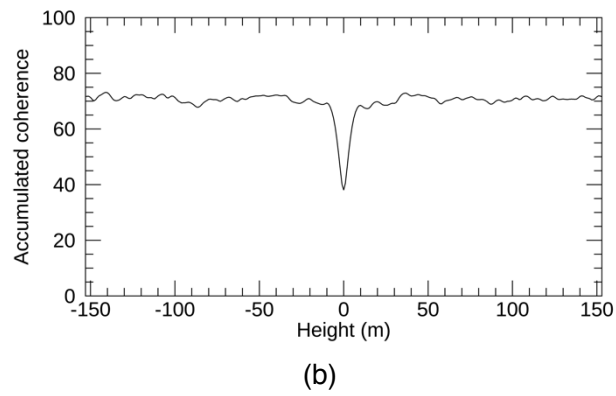
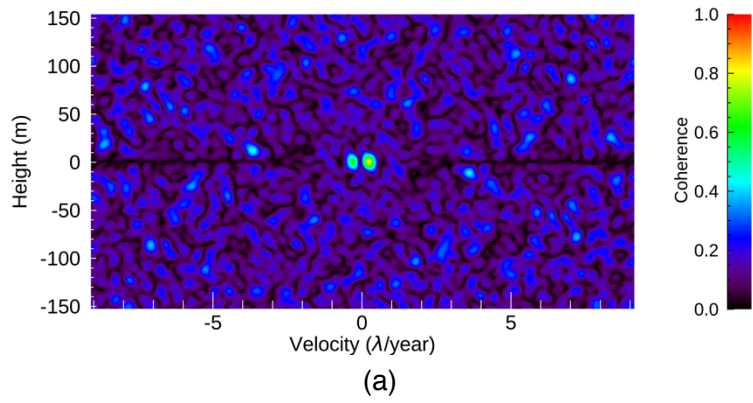
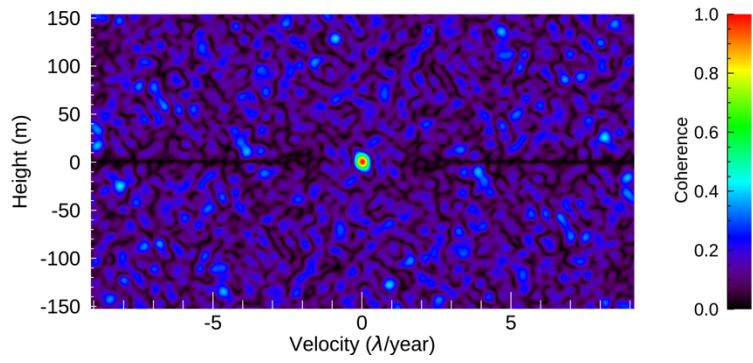


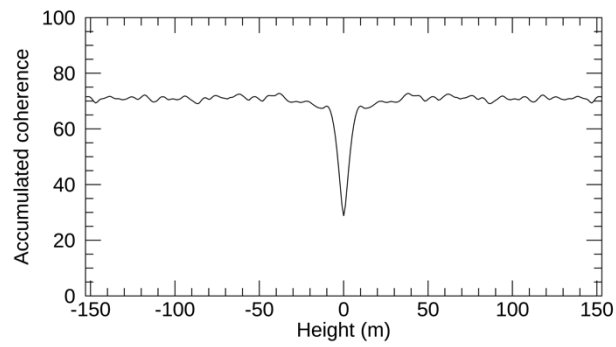
Figure A. 28: The results of the step displacement with Dof of 0.3λ

3 指数関数的な変位

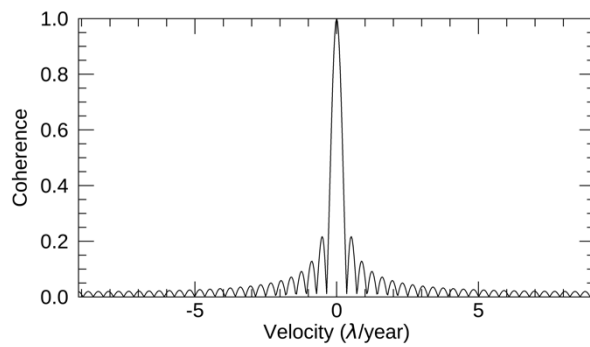
指数関数的な変位の数値シミュレーションの結果を示す。変位量 D を0から 2λ まで、 0.1λ ずつ変更し、NN-PSIを適用した。図は3章と同様の構成とし、(a)はEVスペクトラム、(b)は変位速度方向に時系列コヒーレンスを累積した高さ方向のプロファイル、(c)は決定した高さの時系列コヒーレンスのプロファイルを示す。(d)は変位推定結果を示し、赤線がNN-PSI、青線がConvPSI、そして黒線が数値シミュレーションで作成した変位を示す。



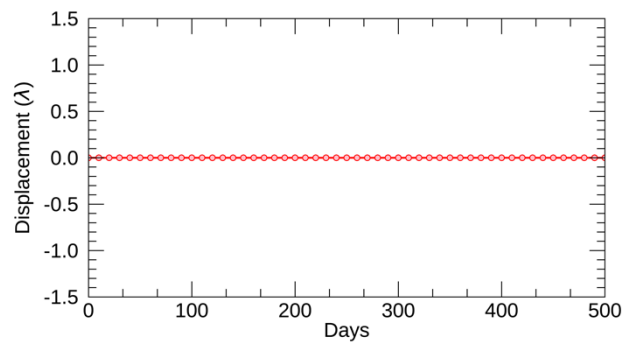
(a)



(b)

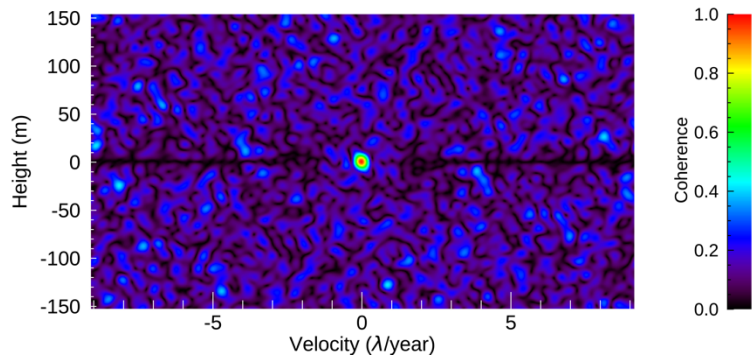


(c)

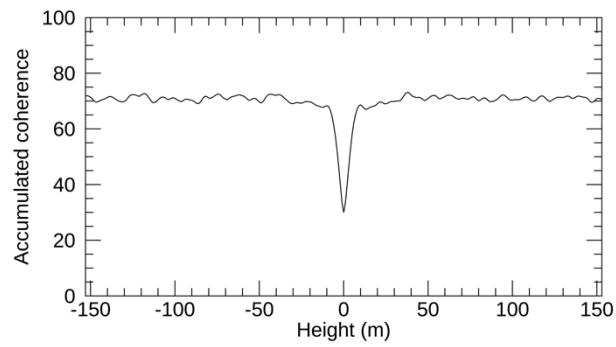


(d)

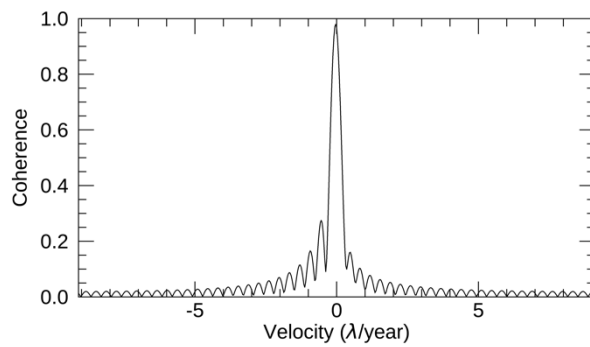
Figure A. 29: The results of the exponential displacement with Dof of 0.0λ .



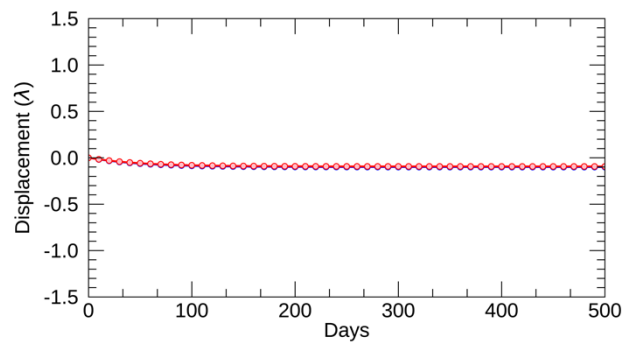
(a)



(b)

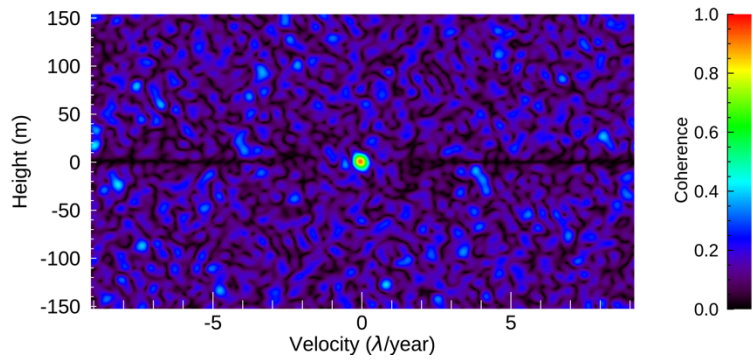


(c)

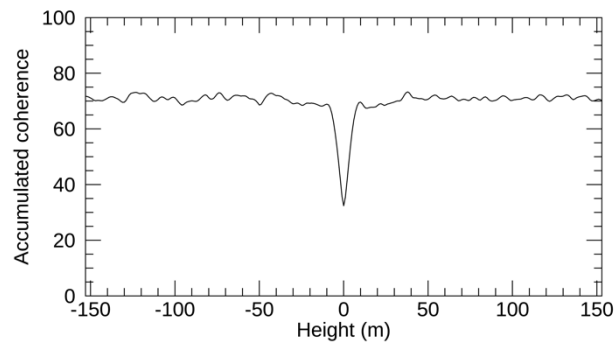


(d)

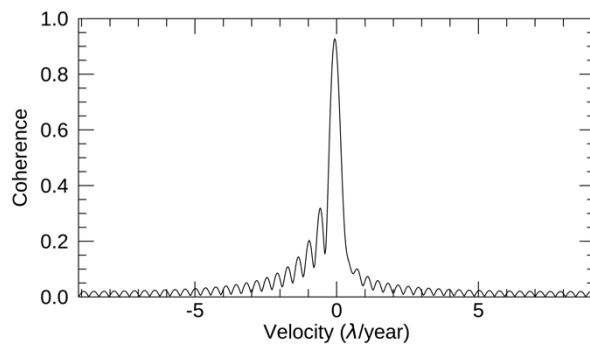
Figure A. 30: The results of the exponential displacement with D of 0.1λ .



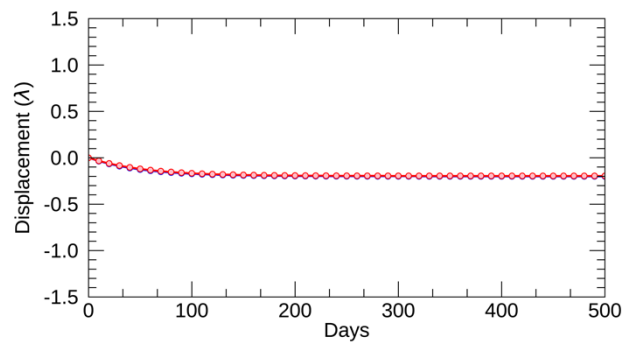
(a)



(b)

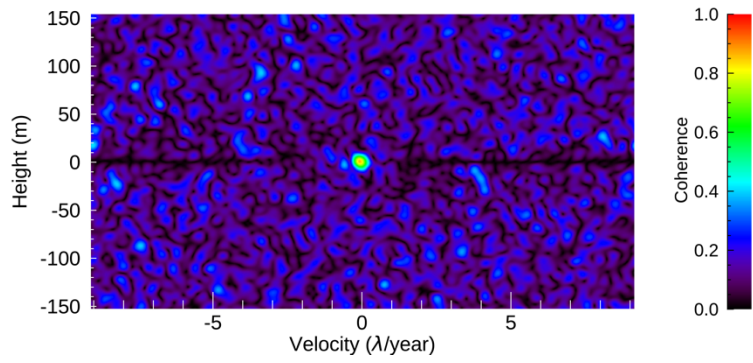


(c)

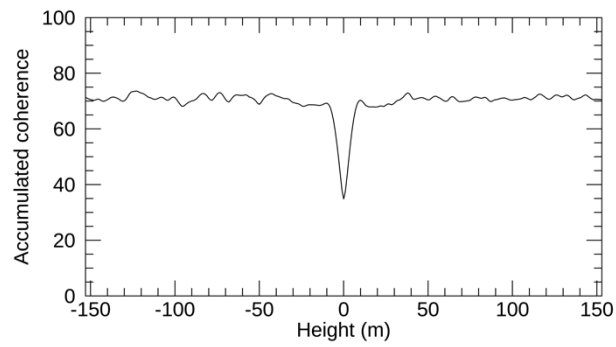


(d)

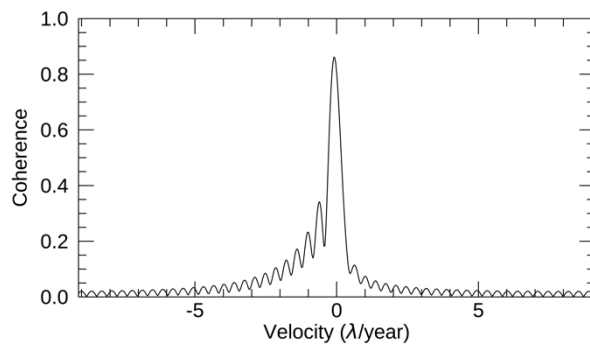
Figure A. 31: The results of the exponential displacement with $Dof\ 0.2\ \lambda$.



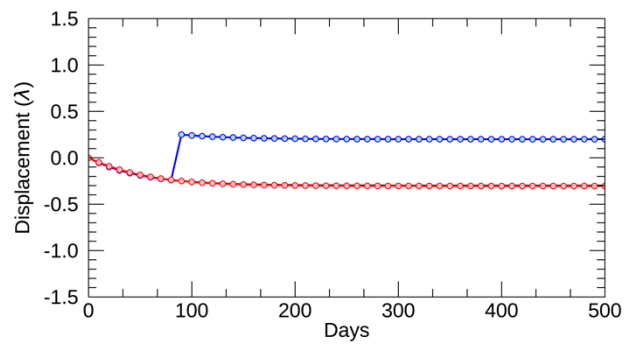
(a)



(b)

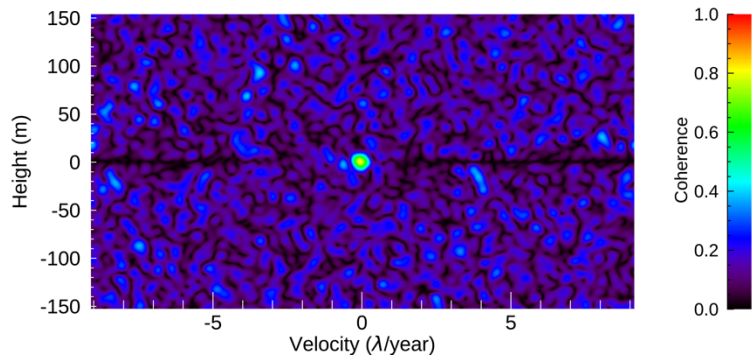


(c)

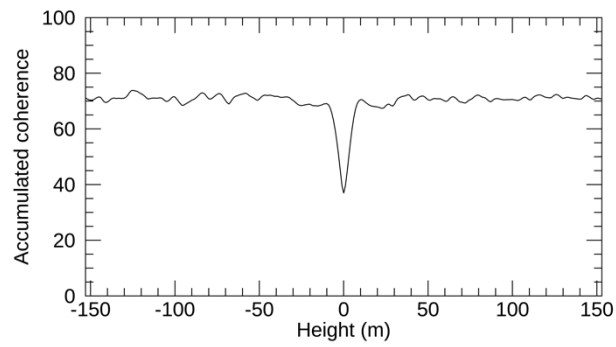


(d)

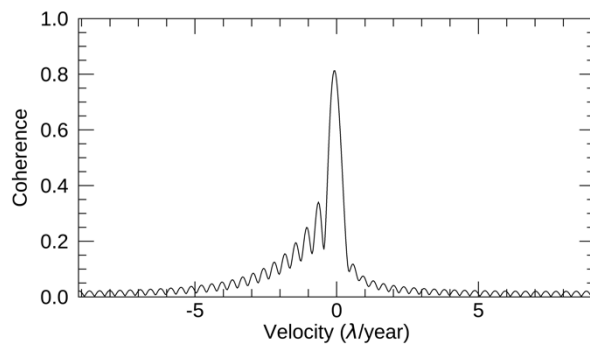
Figure A. 32: The results of the exponential displacement with $Dof\ 0.3\ \lambda$.



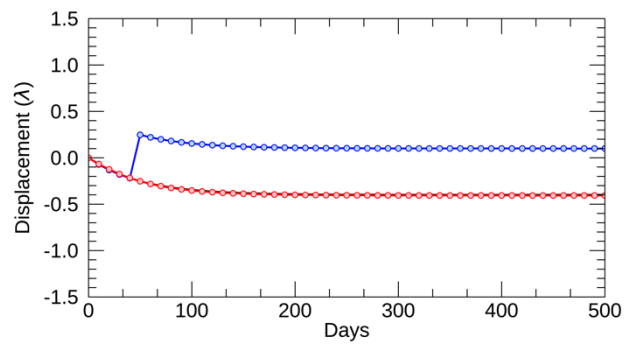
(a)



(b)

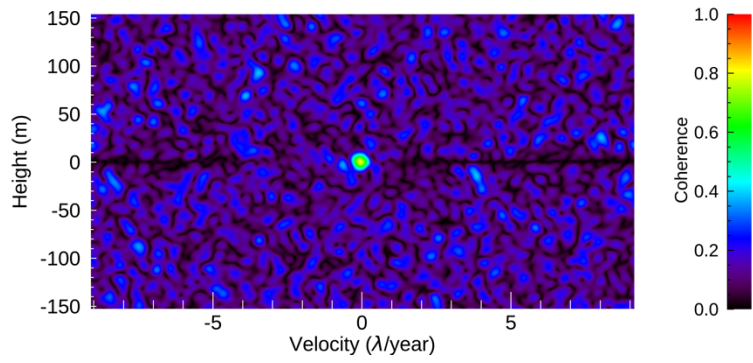


(c)

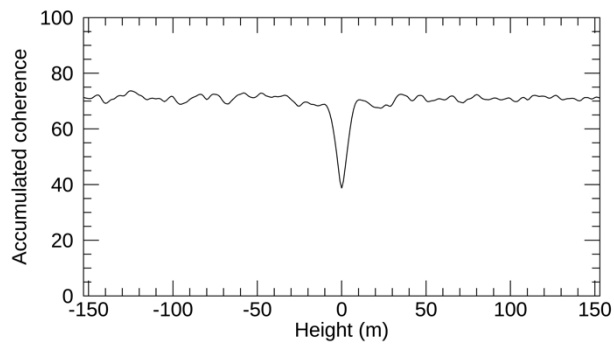


(d)

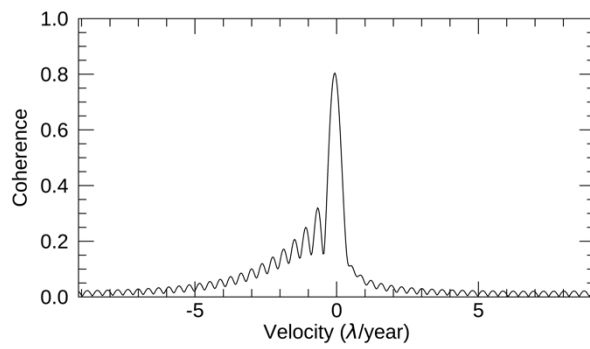
Figure A. 33: The results of the exponential displacement with $Dof\ 0.4\ \lambda$.



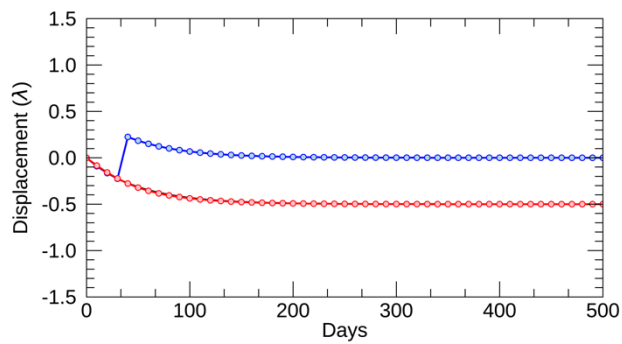
(a)



(b)

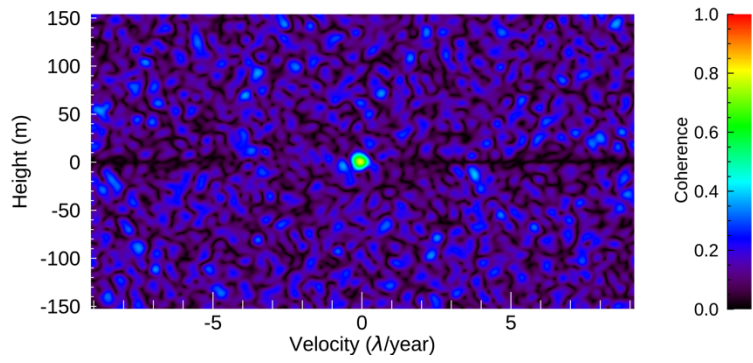


(c)

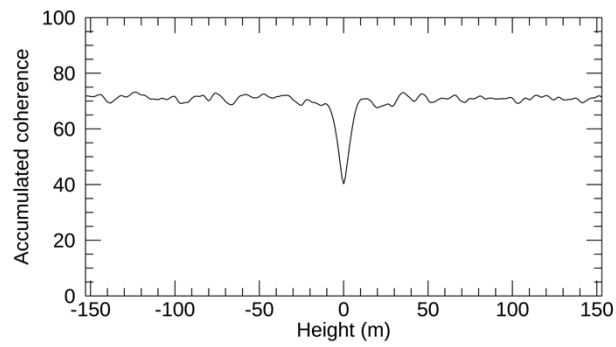


(d)

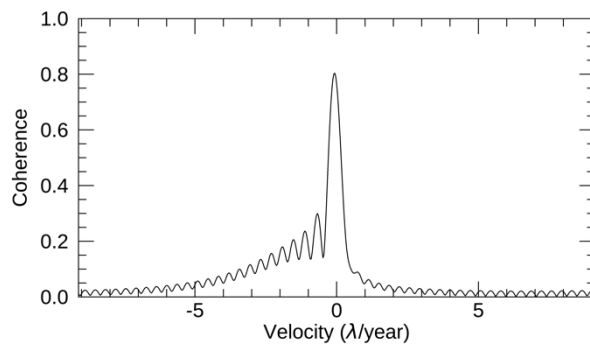
Figure A. 34: The results of the exponential displacement with $Dof\ 0.5\ \lambda$.



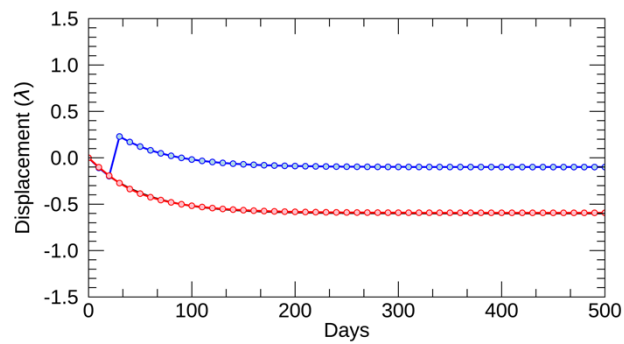
(a)



(b)

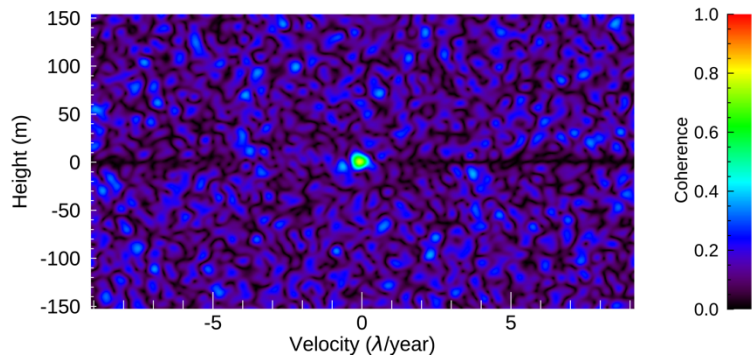


(c)

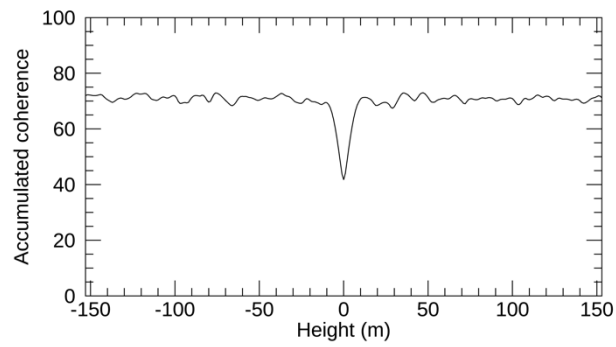


(d)

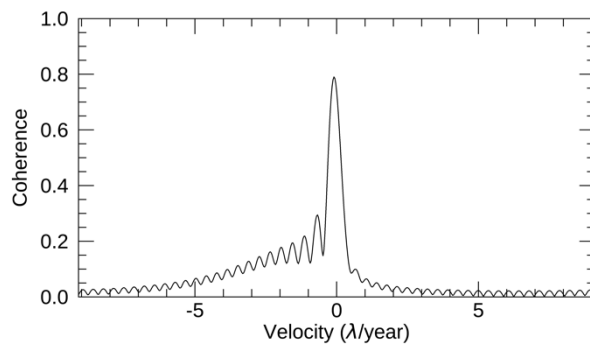
Figure A. 35: The results of the exponential displacement with $Dof\ 0.6\ \lambda$.



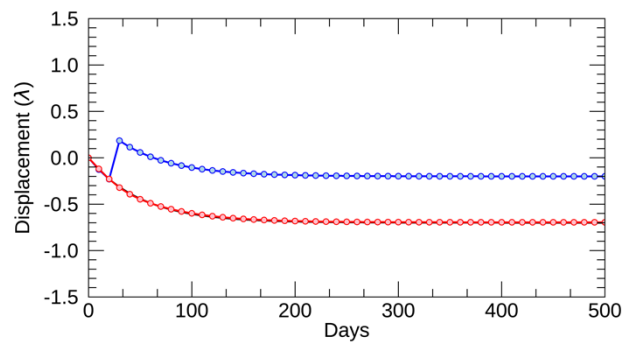
(a)



(b)

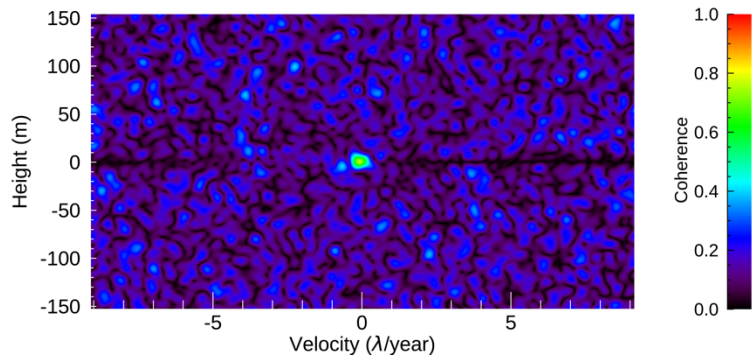


(c)

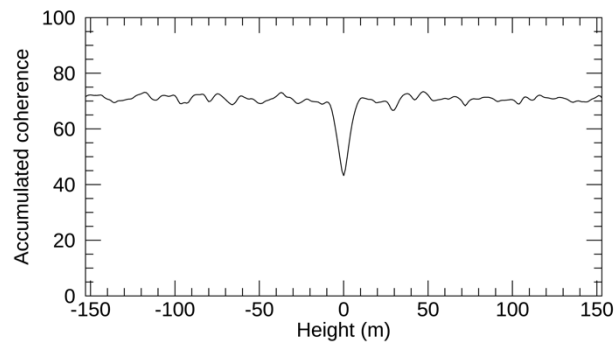


(d)

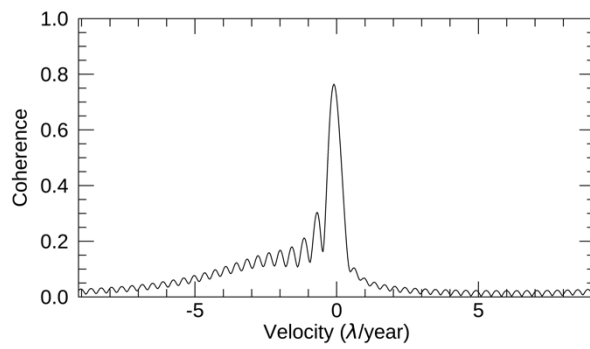
Figure A. 36: The results of the exponential displacement with $Dof\ 0.7\ \lambda$.



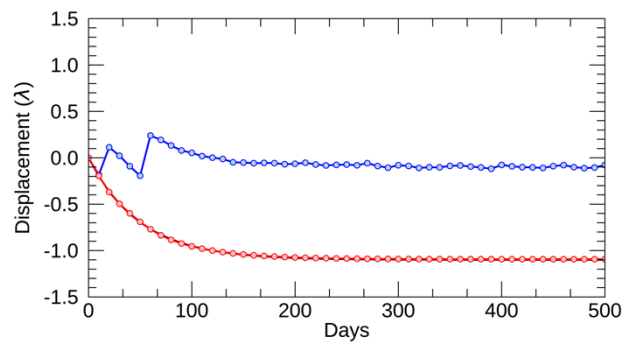
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure A. 37: The results of the exponential displacement with Dof 0.8λ .

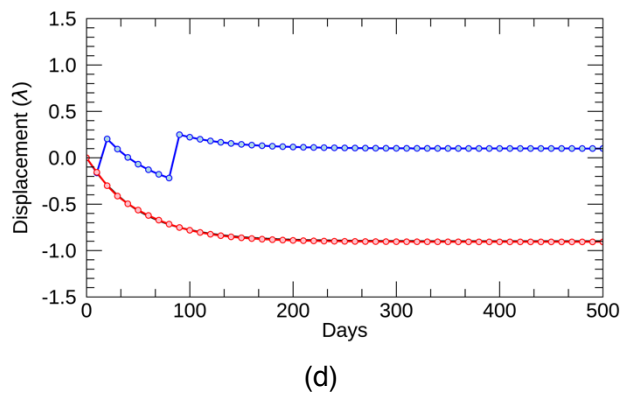
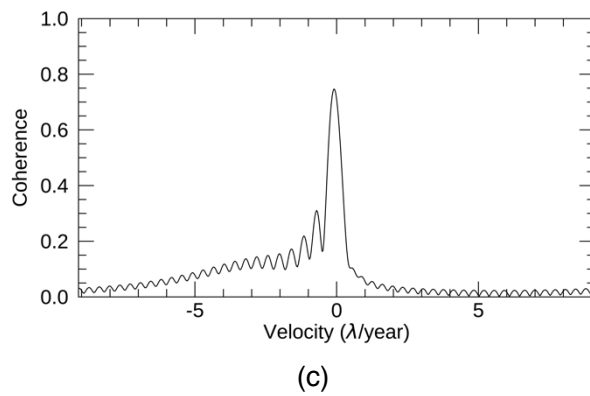
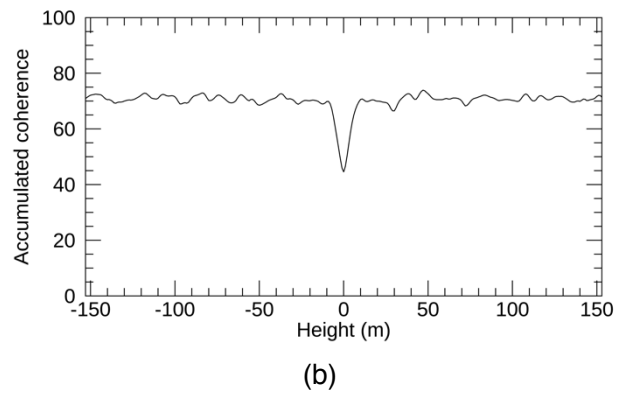
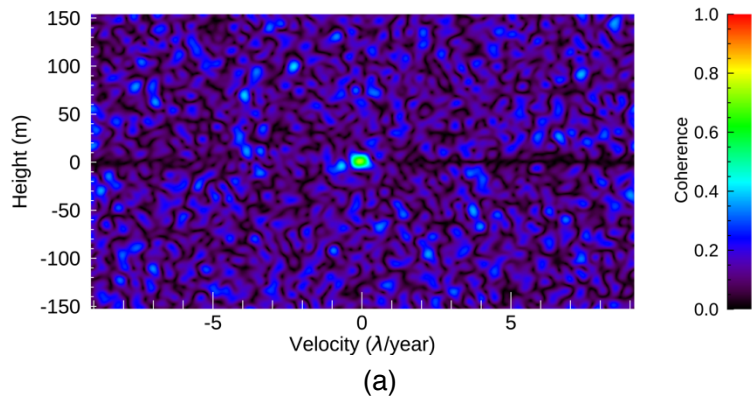


Figure A. 38: The results of the exponential displacement with $Dof\ 0.9\ \lambda$.

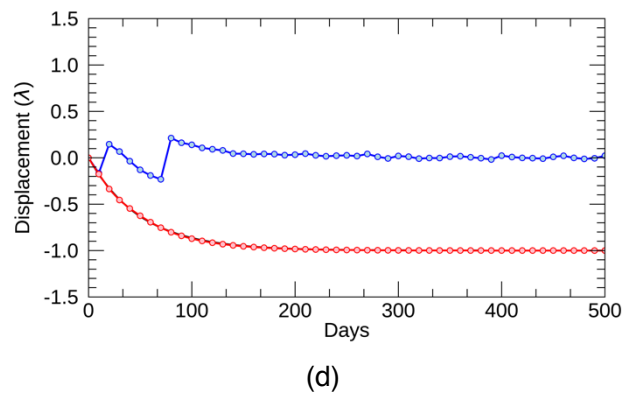
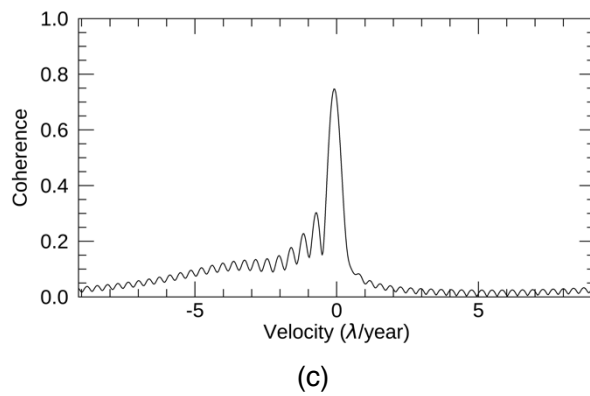
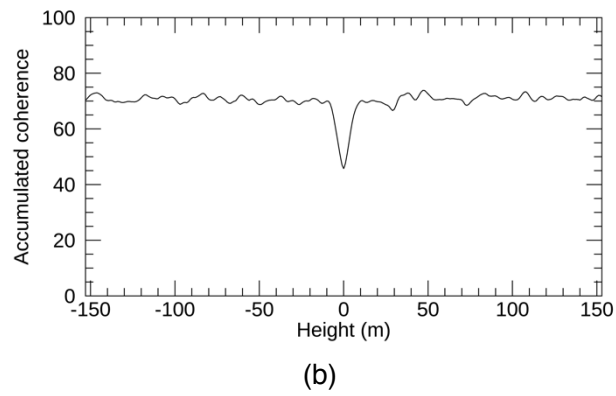
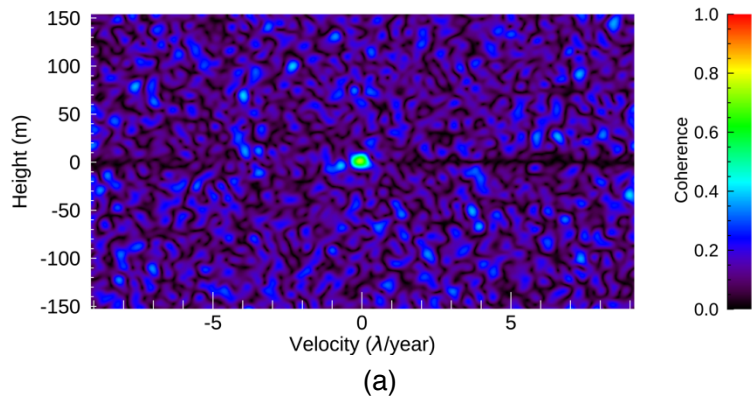
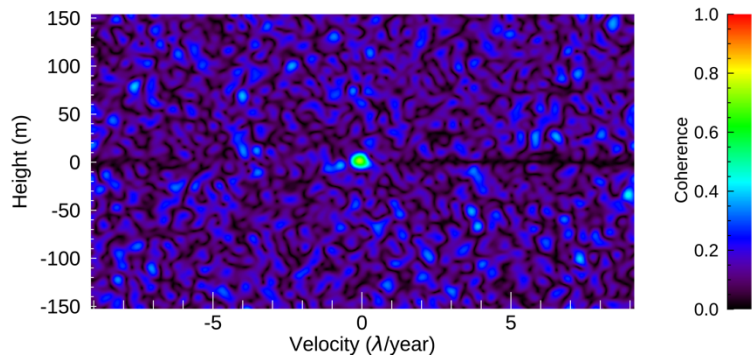
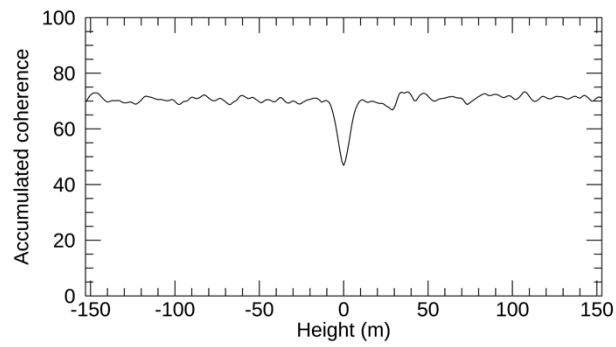


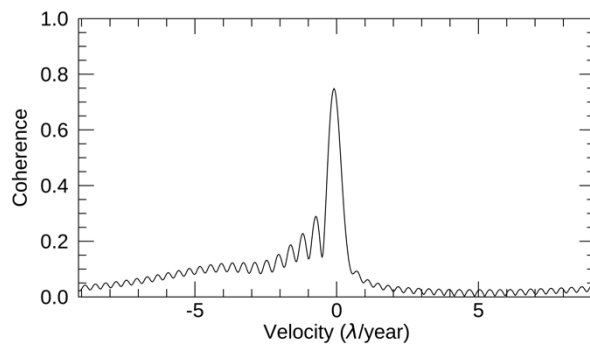
Figure A. 39: The results of the exponential displacement with Dof 1.0λ .



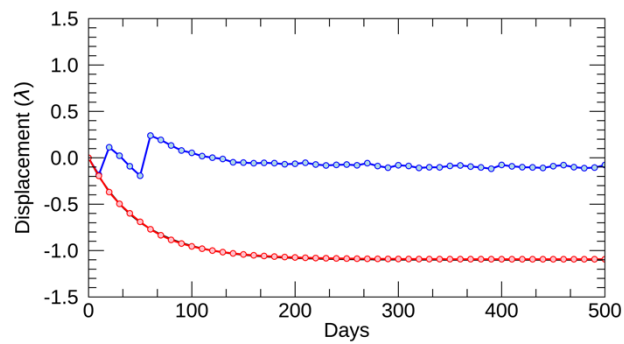
(a)



(b)

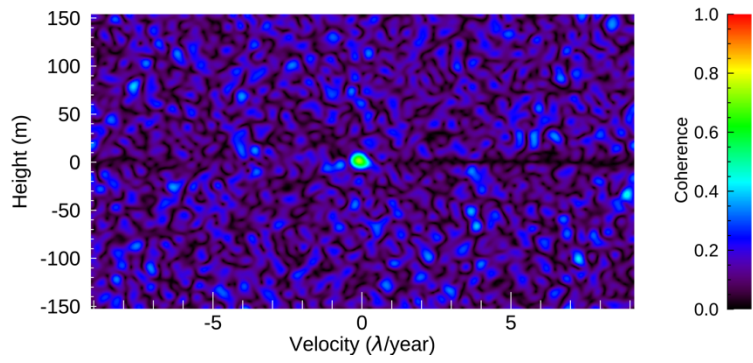


(c)

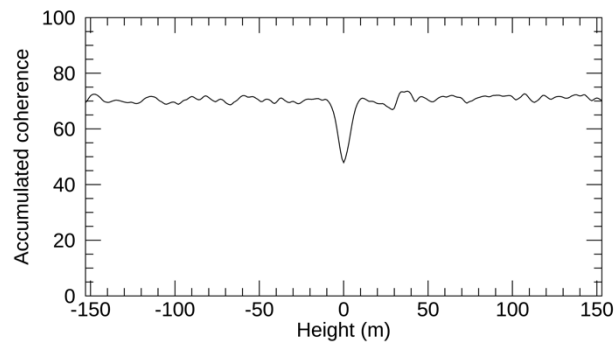


(d)

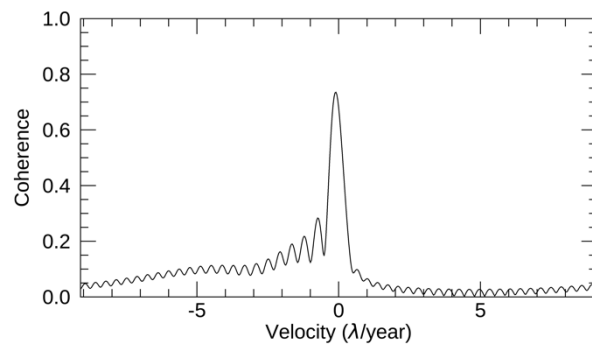
Figure A. 40: The results of the exponential displacement with Dof of 1.1λ .



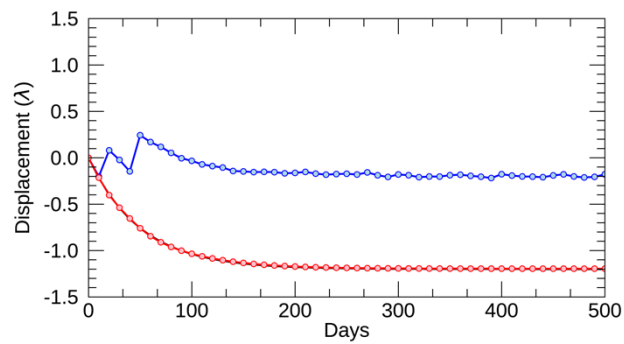
(a)



(b)

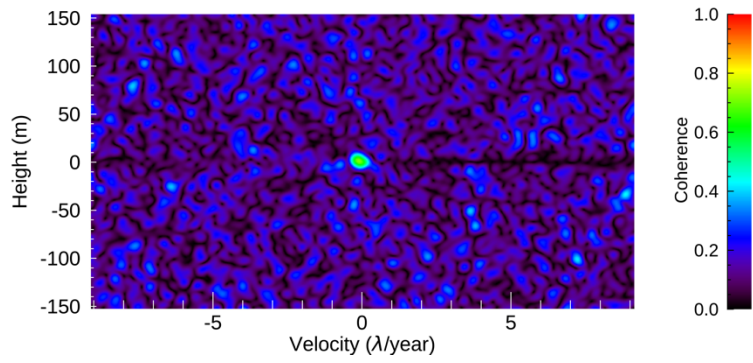


(c)

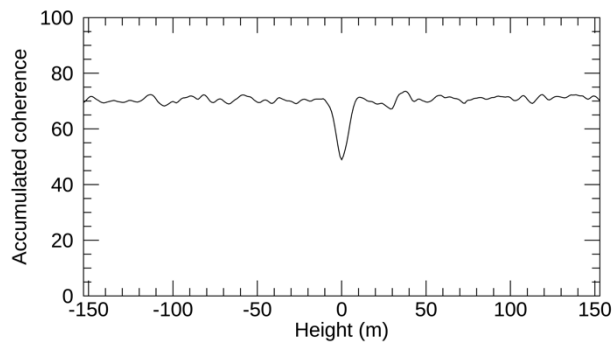


(d)

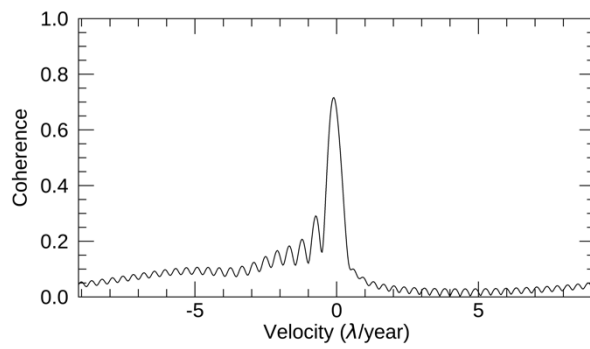
Figure A. 41: The results of the exponential displacement with $Dof\ 1.2\ \lambda$.



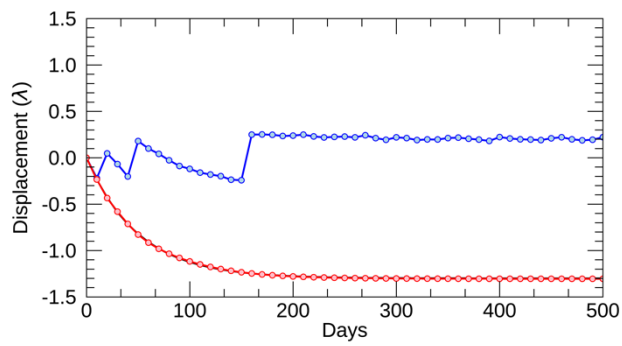
(a)



(b)

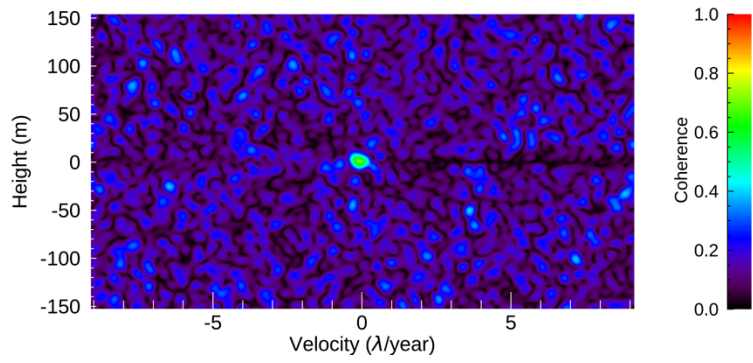


(c)

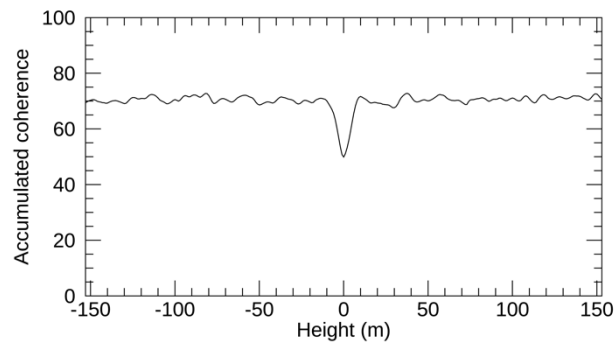


(d)

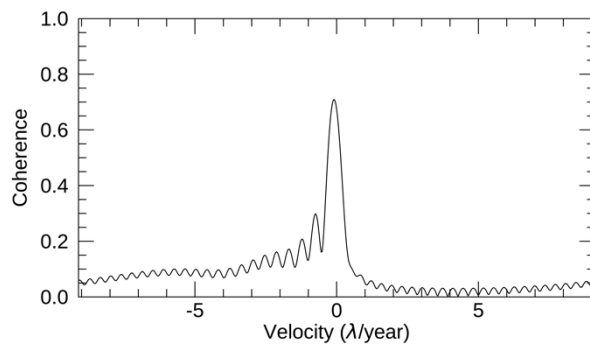
Figure A. 42: The results of the exponential displacement with Dof 1.3λ .



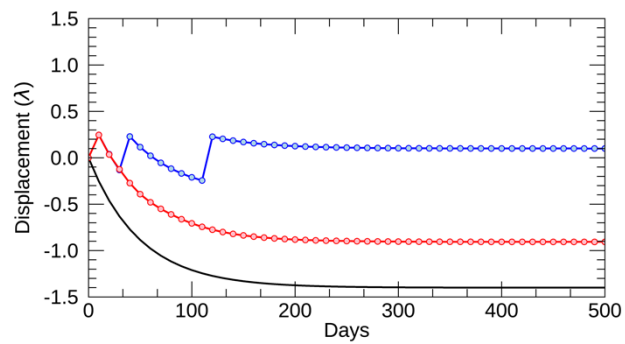
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure A. 43: The results of the exponential displacement with *Dof* 1.4λ .

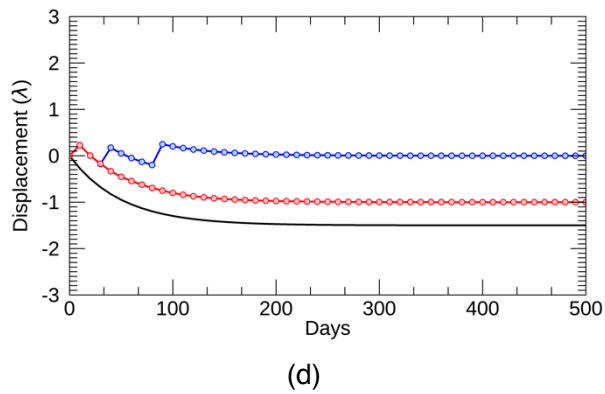
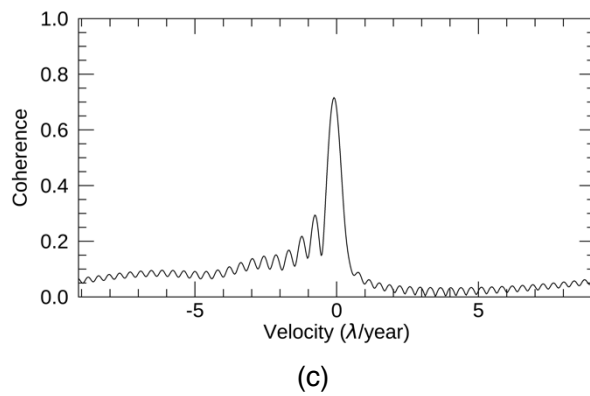
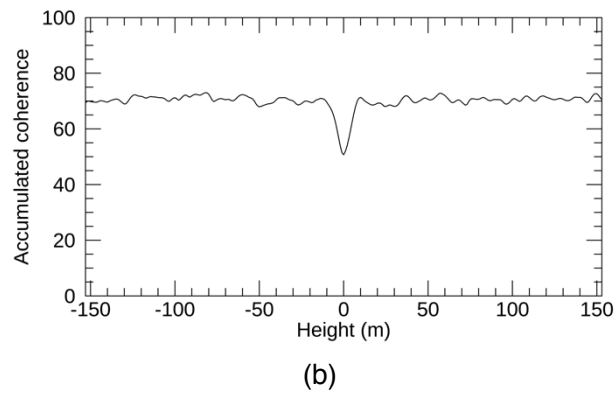
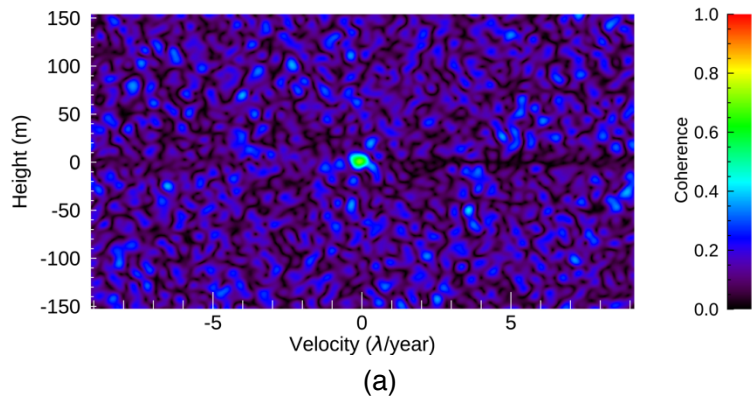


Figure A. 44: The results of the exponential displacement with Dof 1.5λ .

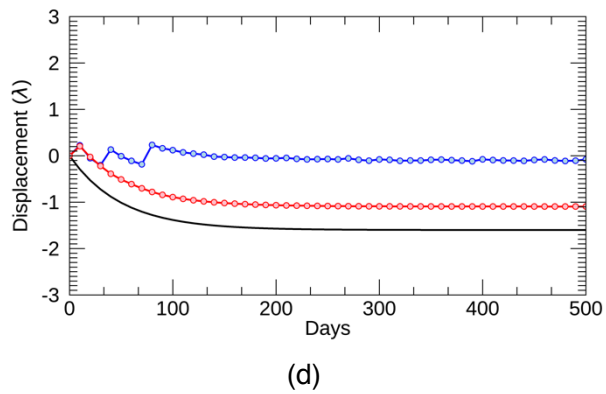
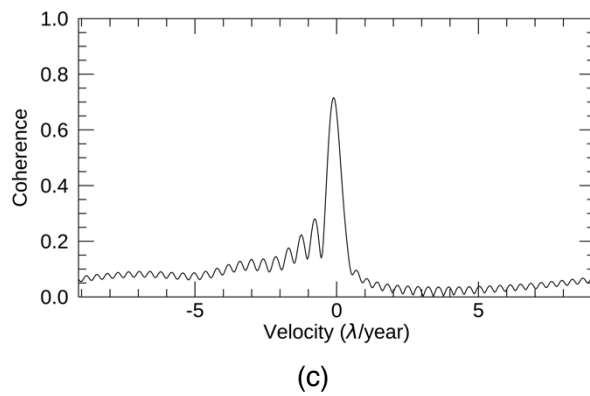
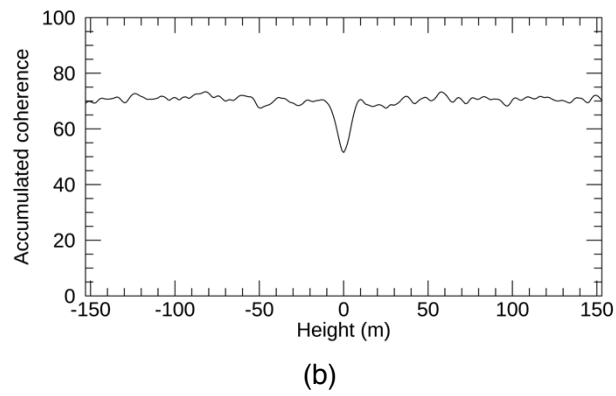
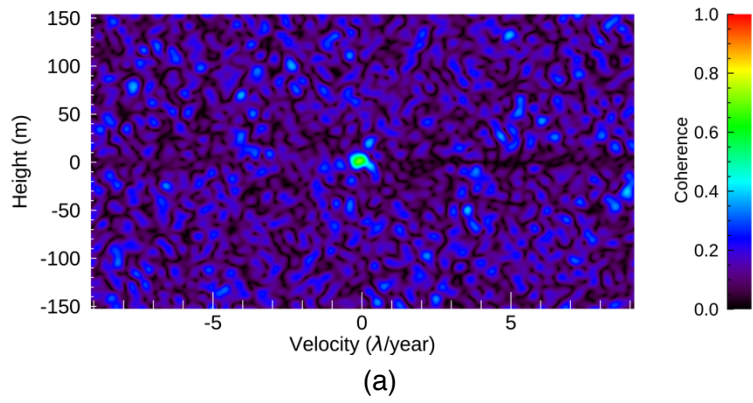
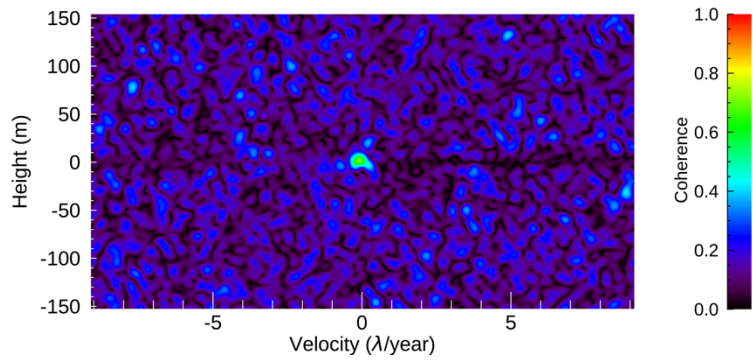
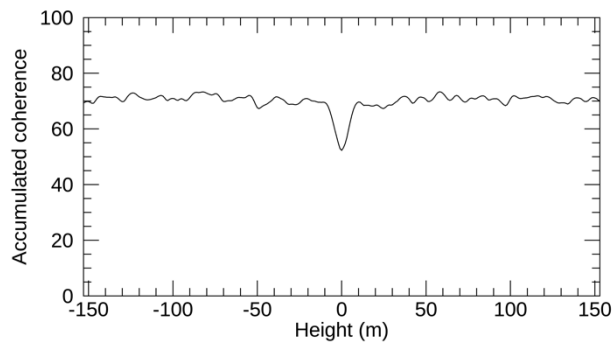


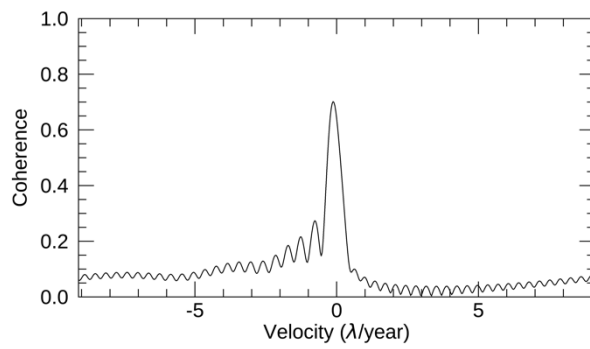
Figure A. 45: The results of the exponential displacement with $Dof\ 1.6\ \lambda$.



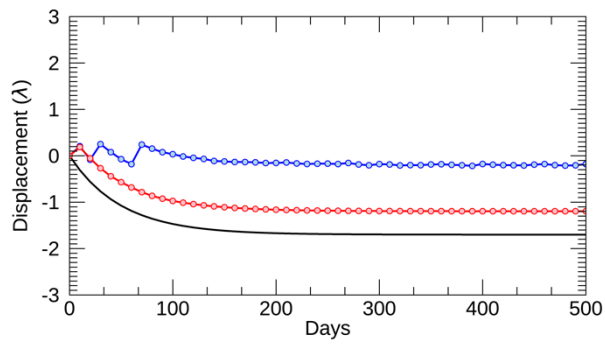
(a)



(b)

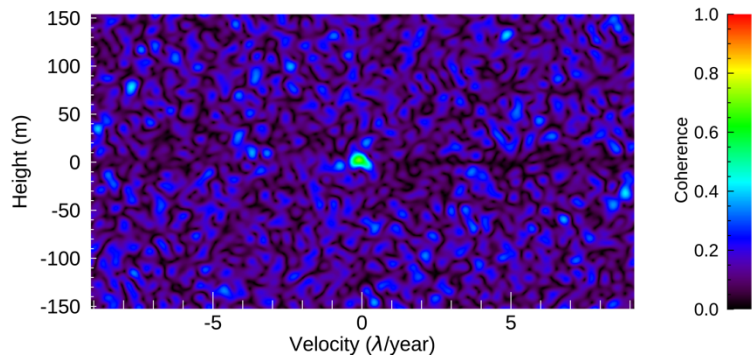


(c)

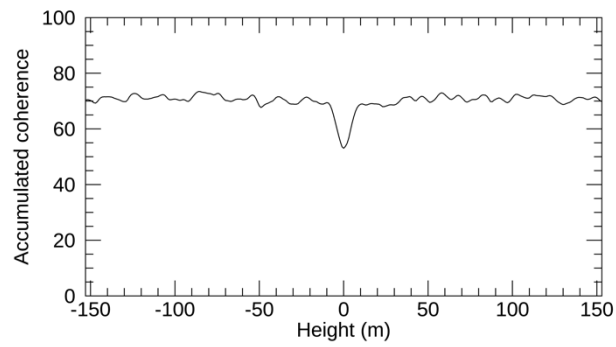


(d)

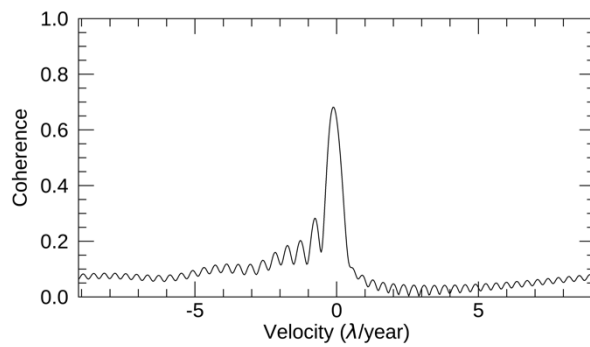
Figure A. 46: The results of the exponential displacement with Dof 1.7λ .



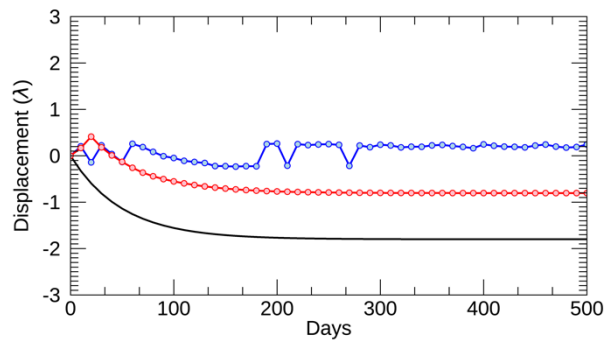
(a)



(b)

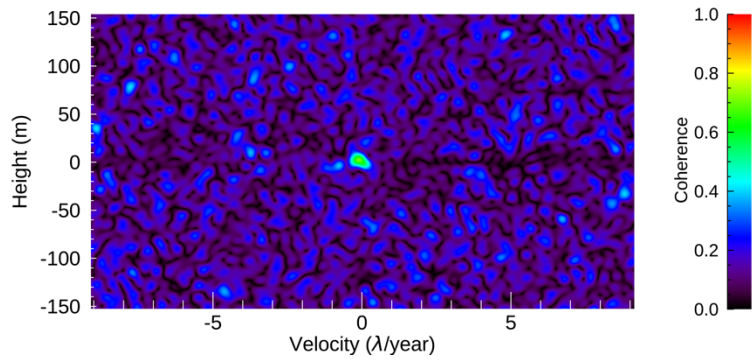


(c)

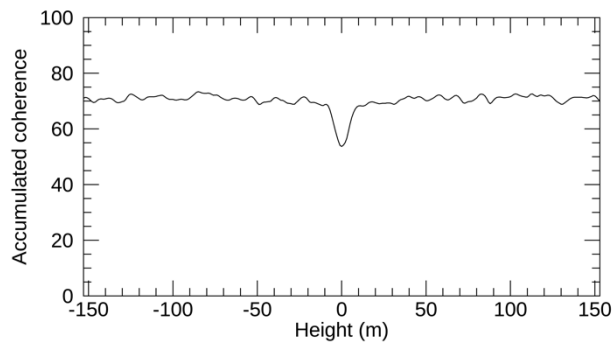


(d)

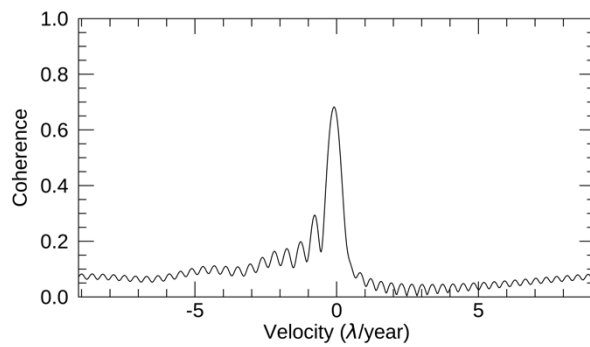
Figure A. 47: The results of the exponential displacement with $Dof\ 1.8\ \lambda$.



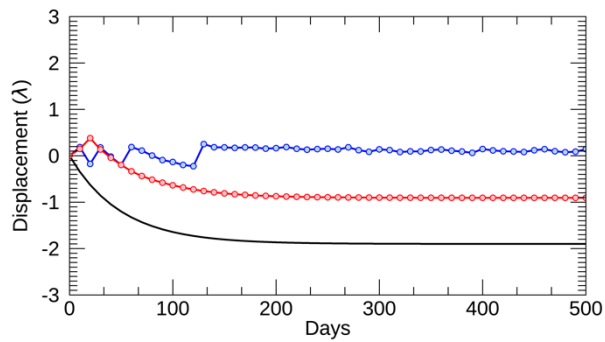
(a)



(b)

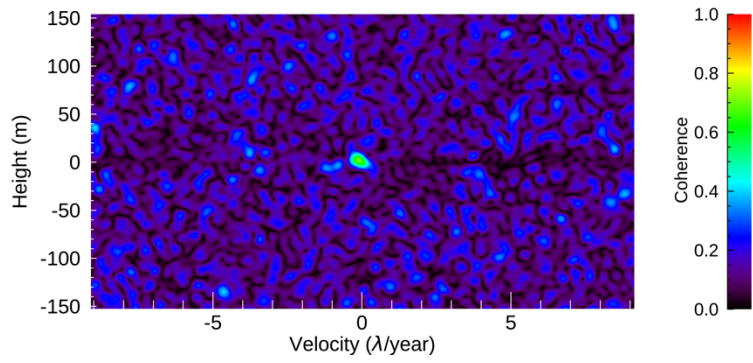


(c)

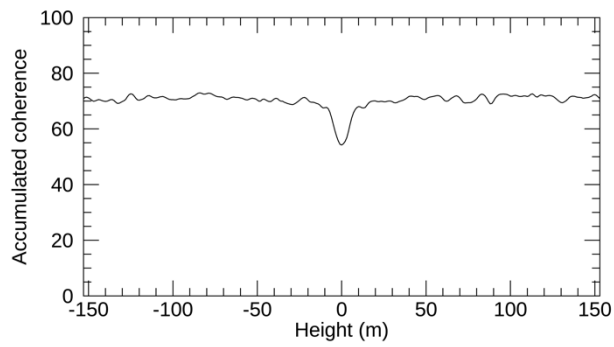


(d)

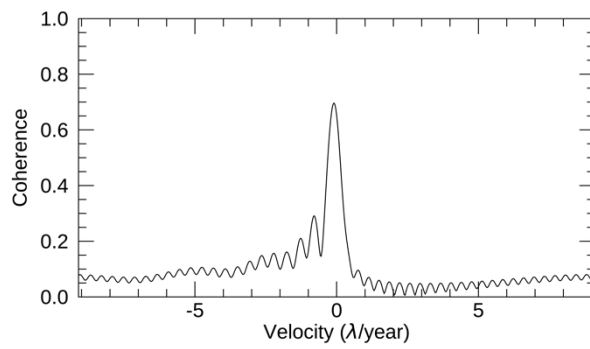
Figure A. 48: The results of the exponential displacement with Dof 1.9λ .



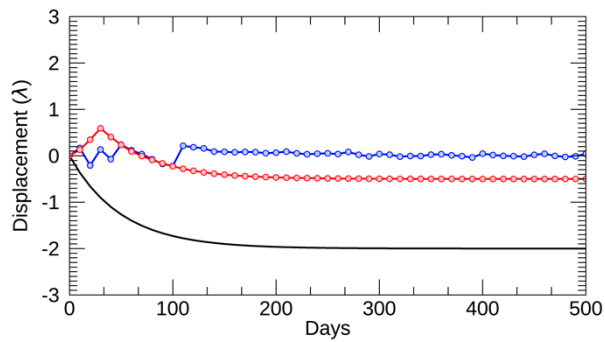
(a)



(b)



(c)

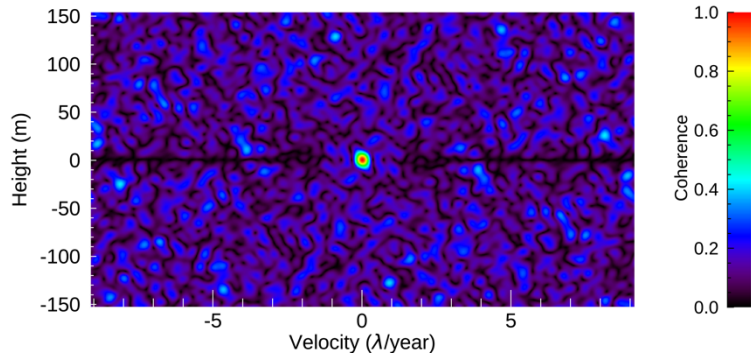


(d)

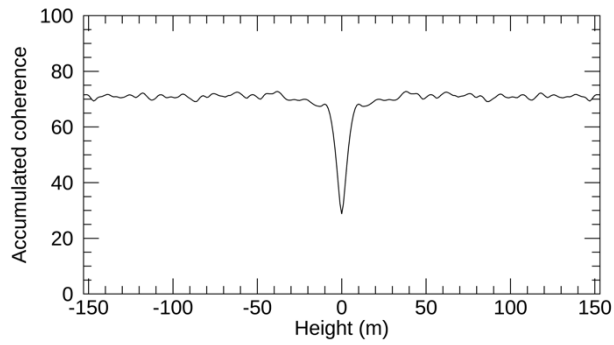
Figure A. 49: The results of the exponential displacement with $Dof\ 2.0\ \lambda$.

4 周期的な変位

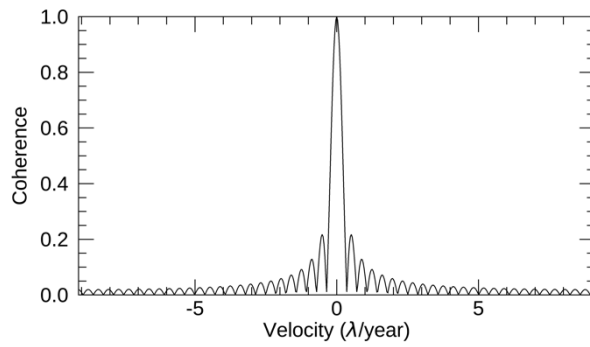
周期的な変位の数値シミュレーションの結果を示す。変位量 D を0から 2λ まで、 0.1λ ずつ変更し、NN-PSIを適用した。図は3章と同様の構成とし、(a)はEVスペクトラム、(b)は変位速度方向に時系列コヒーレンスを累積した高さ方向のプロファイル、(c)は決定した高さの時系列コヒーレンスのプロファイルを示す。(d)は変位推定結果を示し、赤線がNN-PSI、青線がConvPSI、そして黒線が数値シミュレーションで作成した変位を示す。



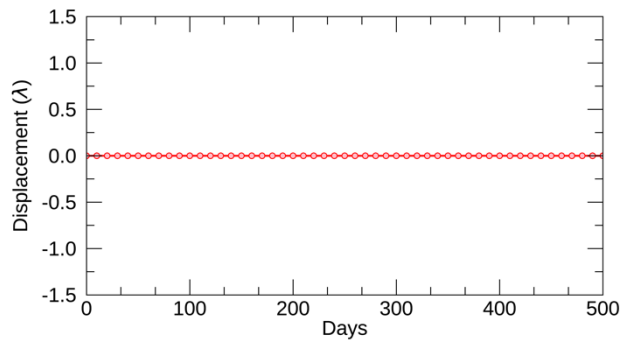
(a)



(b)

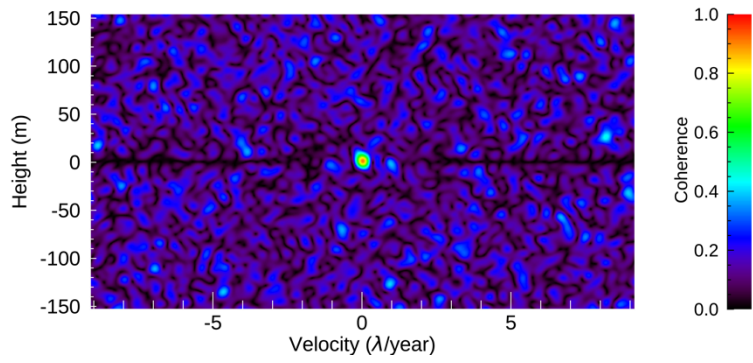


(c)

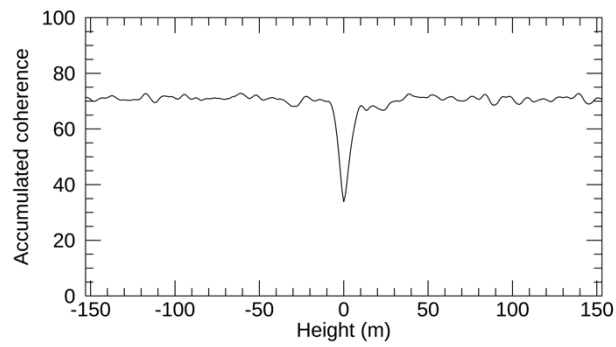


(d)

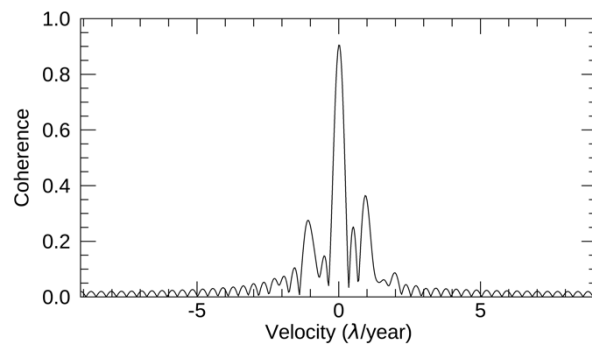
Figure A. 50: The results of the sinusoidal displacement with $Dof\ 0\ \lambda$.



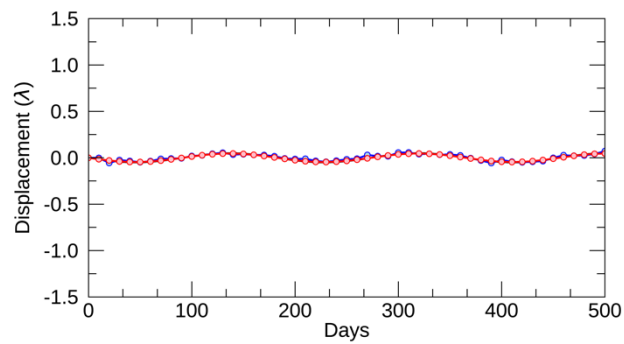
(a)



(b)

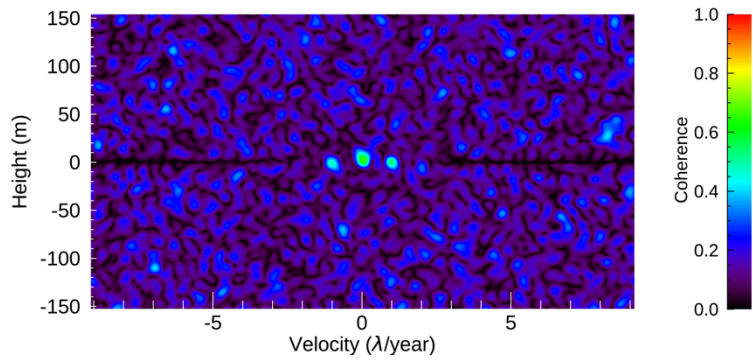


(c)

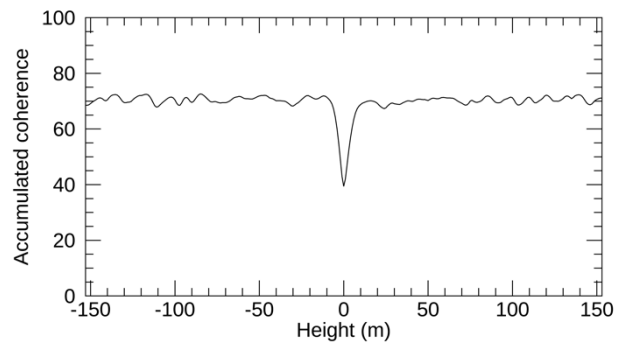


(d)

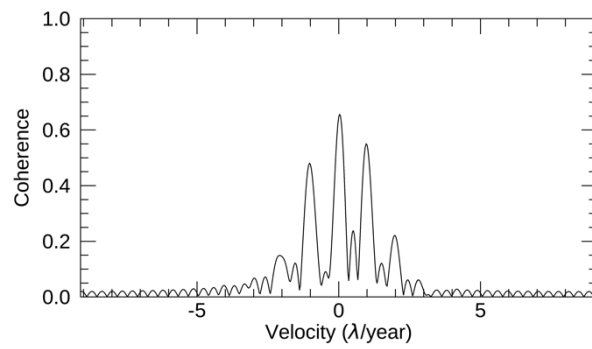
Figure A. 51: The results of the sinusoidal displacement with D of 0.1λ .



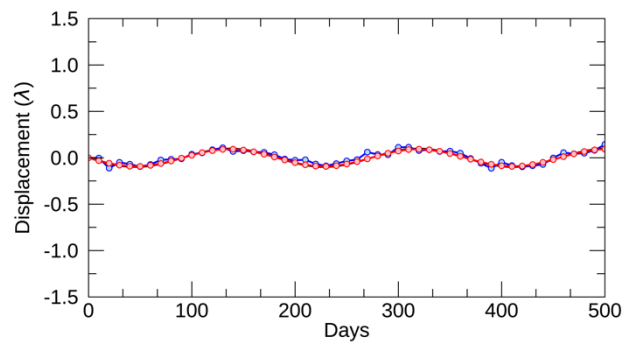
(a)



(b)

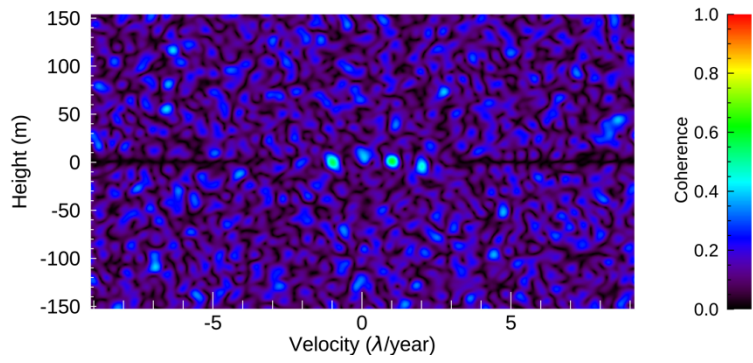


(c)

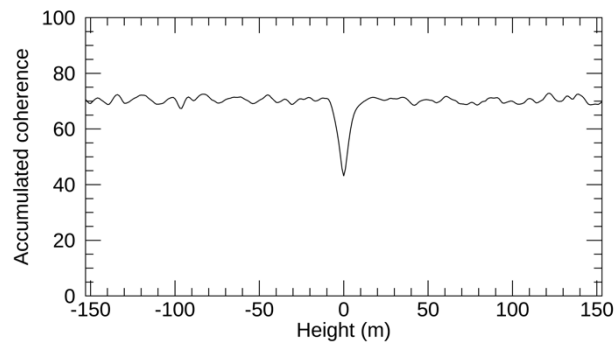


(d)

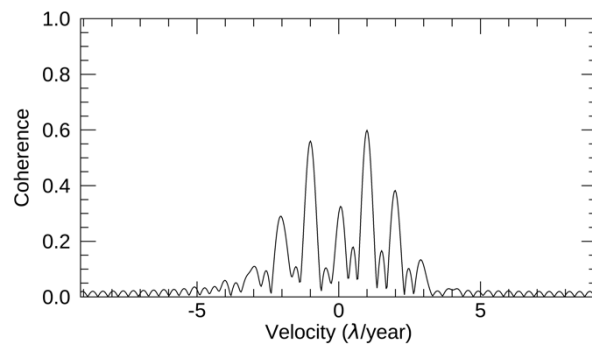
Figure A. 52: The results of the sinusoidal displacement with D of 0.2λ .



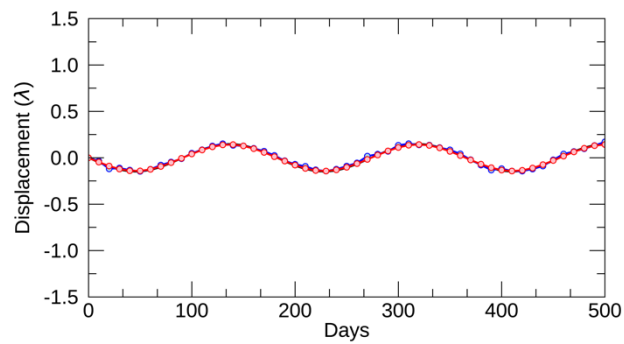
(a)



(b)

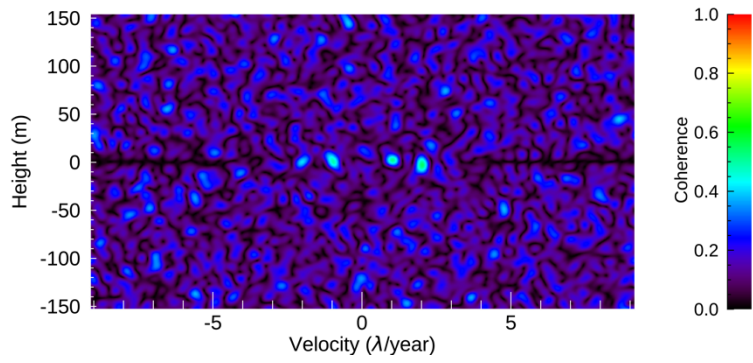


(c)

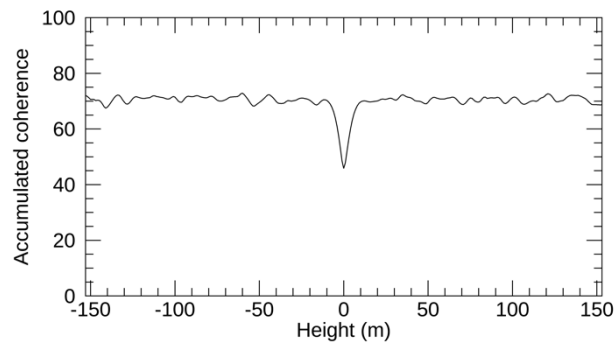


(d)

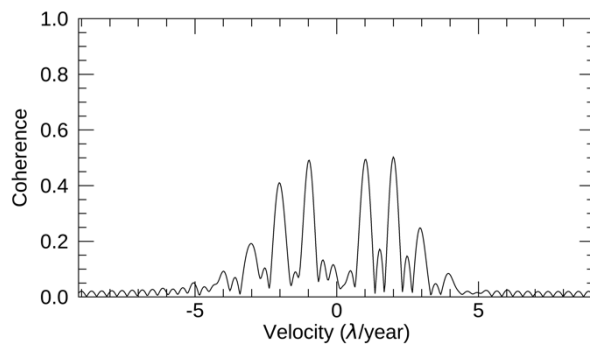
Figure A. 53: The results of the sinusoidal displacement with D of 0.3λ .



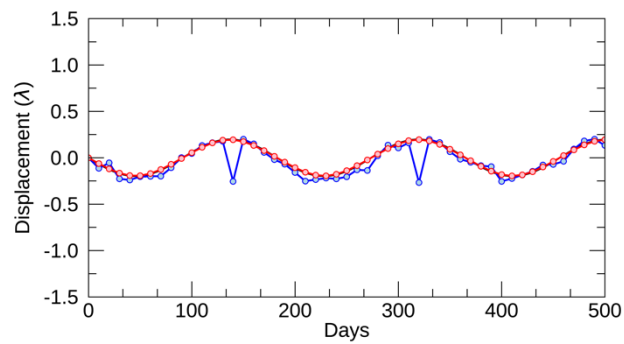
(a)



(b)

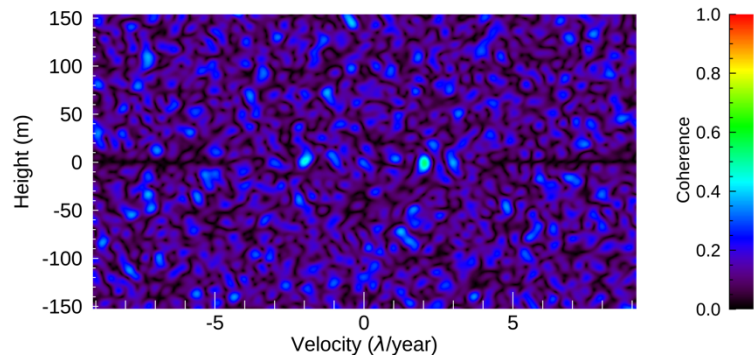


(c)

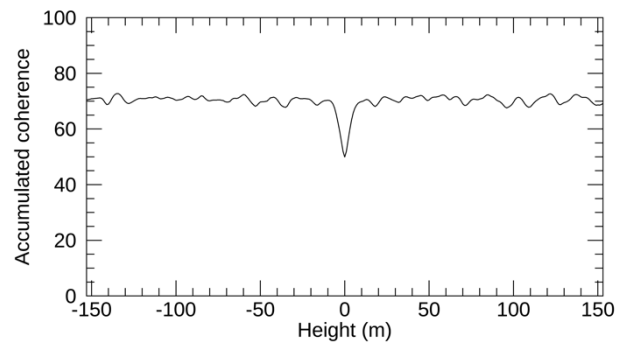


(d)

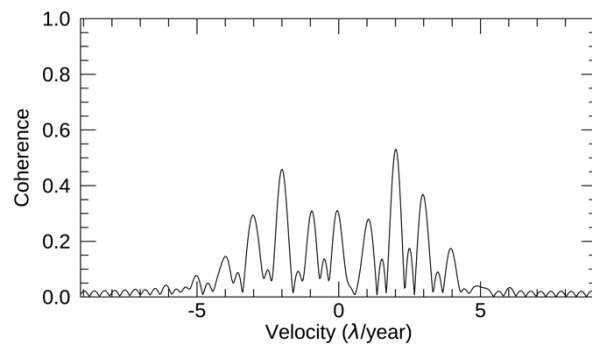
Figure A. 54: The results of the sinusoidal displacement with D of 0.4λ .



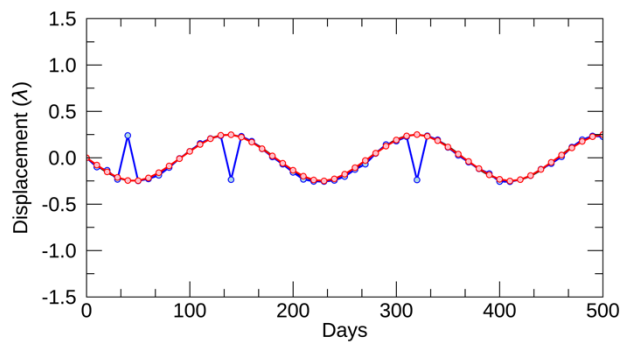
(a)



(b)

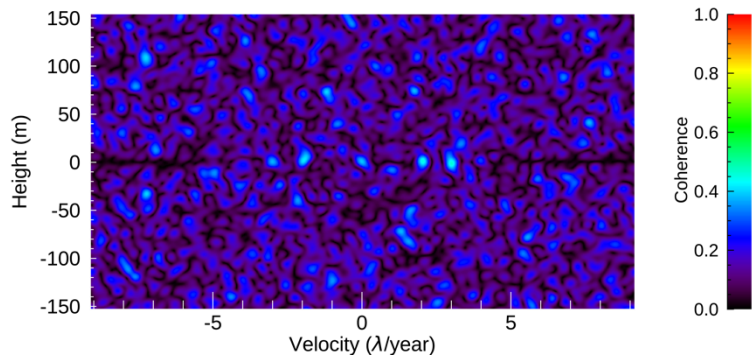


(c)

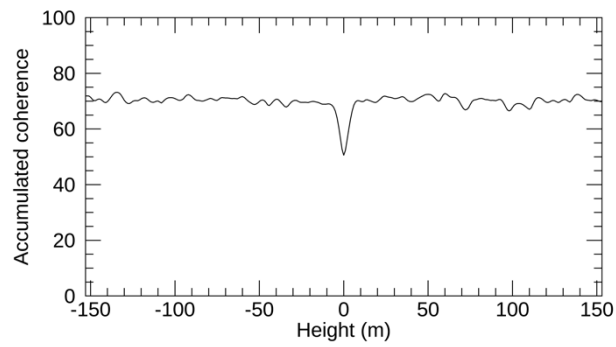


(d)

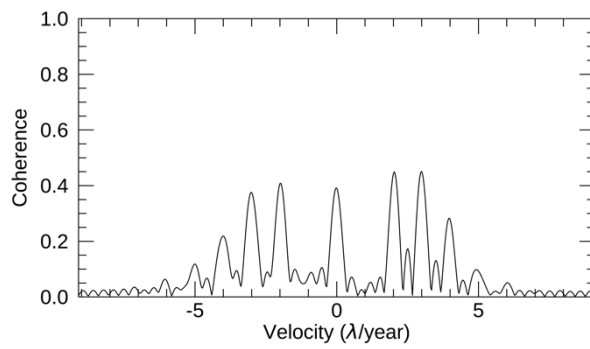
Figure A. 55: The results of the sinusoidal displacement with D of 0.5λ .



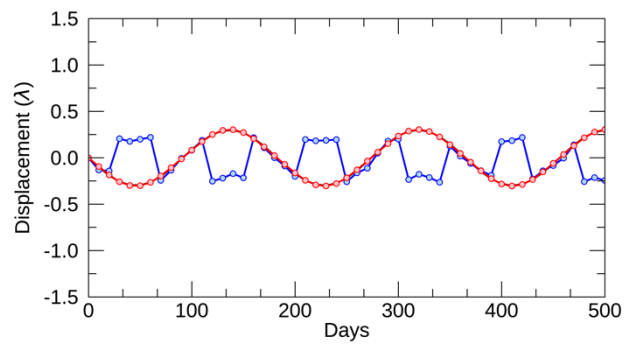
(a)



(b)

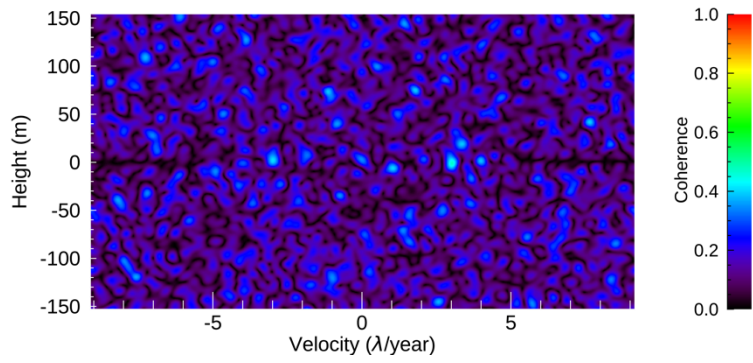


(c)

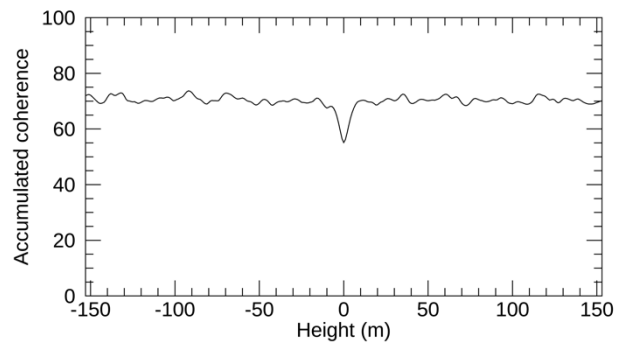


(d)

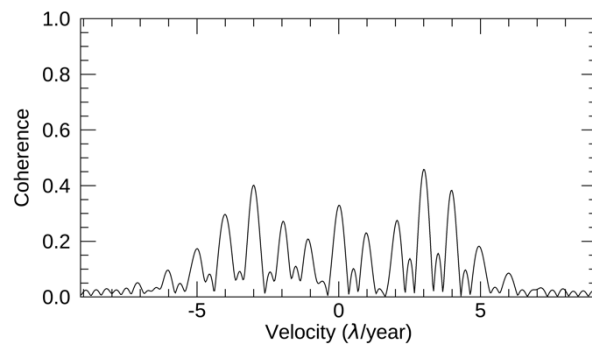
Figure A. 56: The results of the sinusoidal displacement with D of 0.6λ .



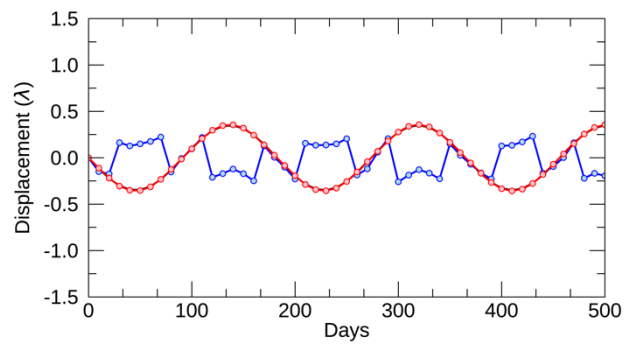
(a)



(b)

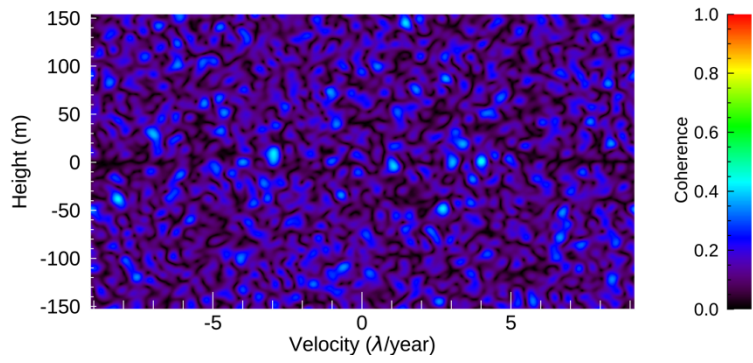


(c)

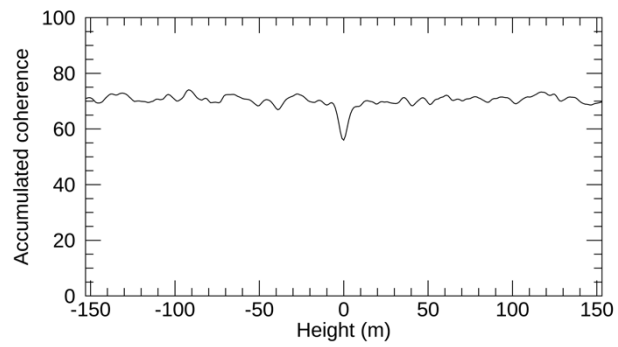


(d)

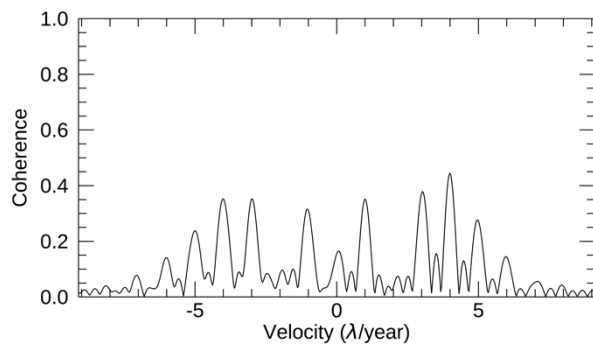
Figure A. 57: The results of the sinusoidal displacement with D of 0.7λ .



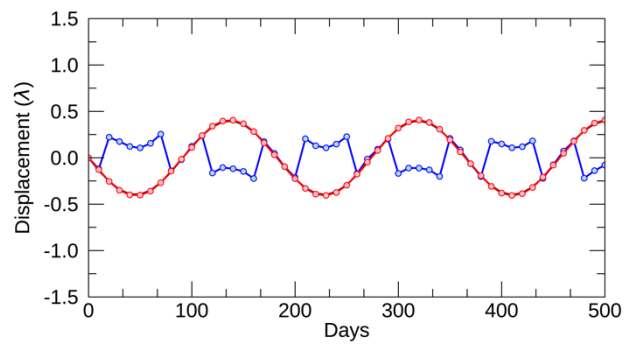
(a)



(b)

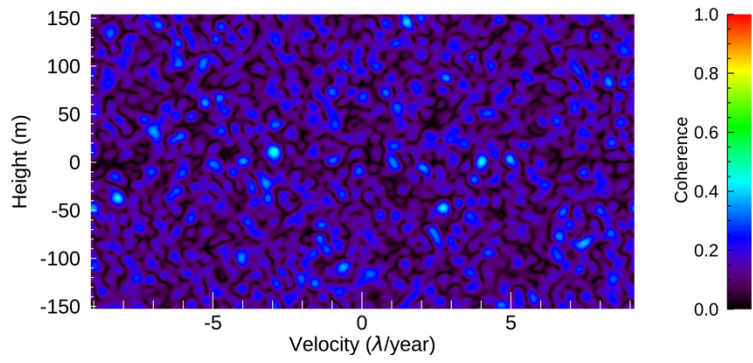


(c)

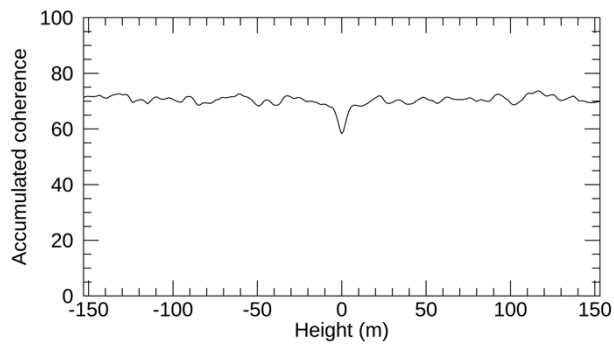


(d)

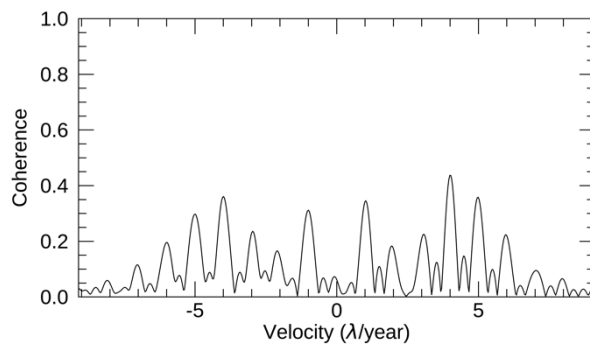
Figure A. 58: The results of the sinusoidal displacement with D of 0.8λ .



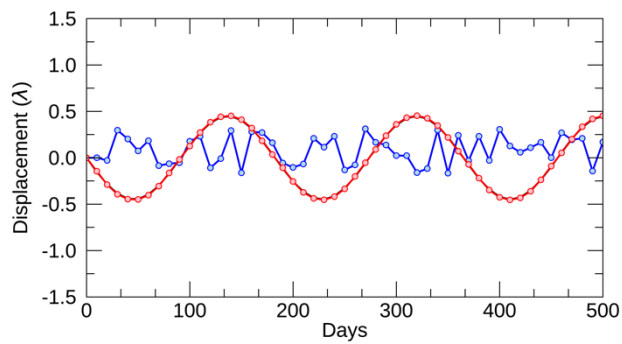
(a)



(b)

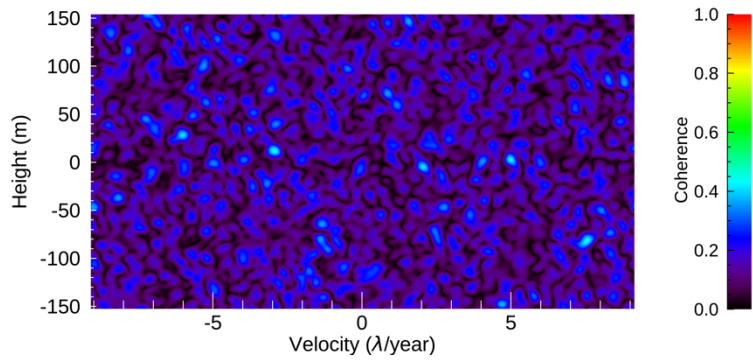


(c)

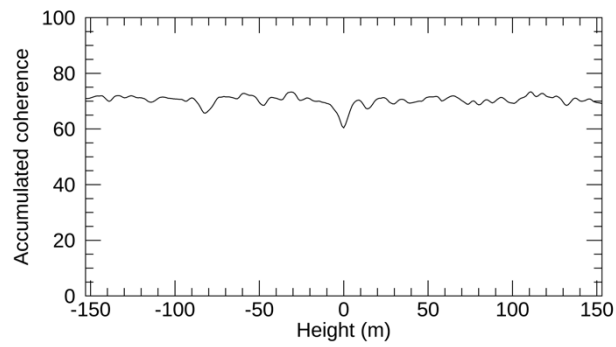


(d)

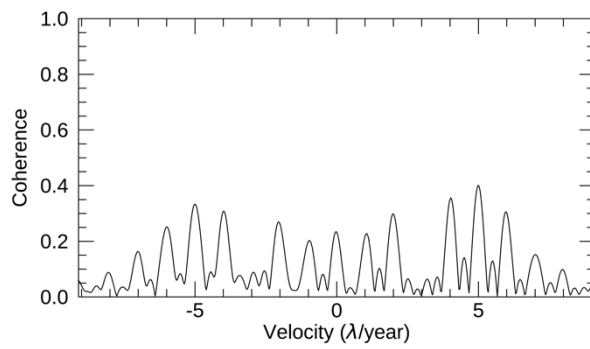
Figure A. 59: The results of the sinusoidal displacement with D of 0.9λ .



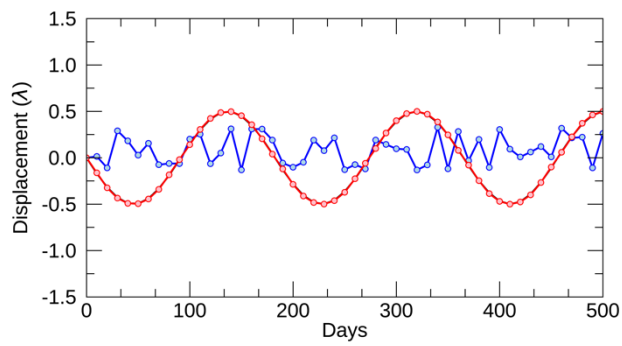
(a)



(b)

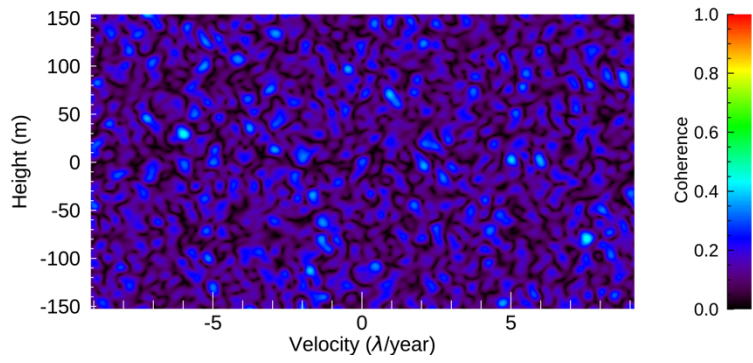


(c)

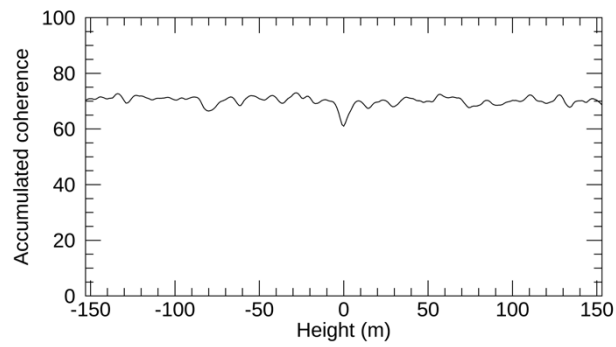


(d)

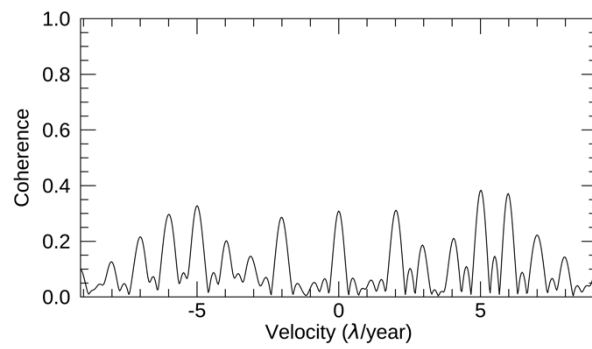
Figure A. 60: The results of the sinusoidal displacement with D of 1.0λ .



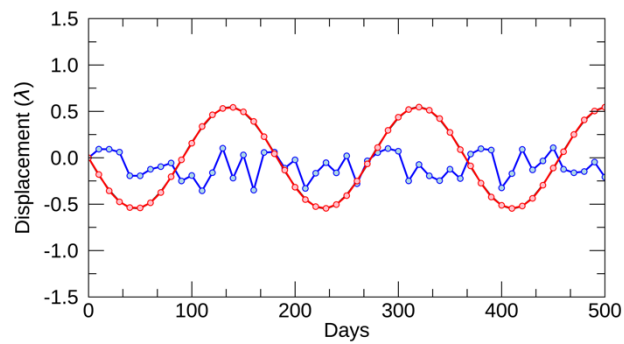
(a)



(b)

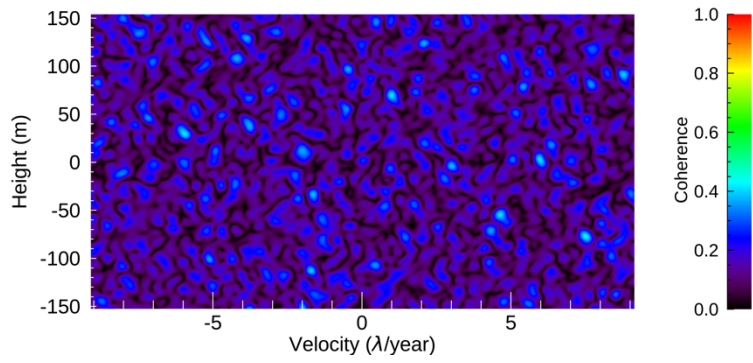


(c)

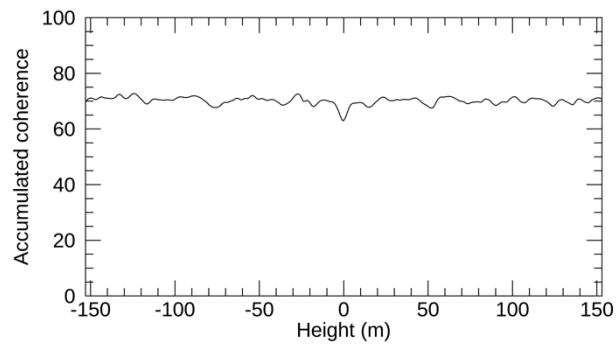


(d)

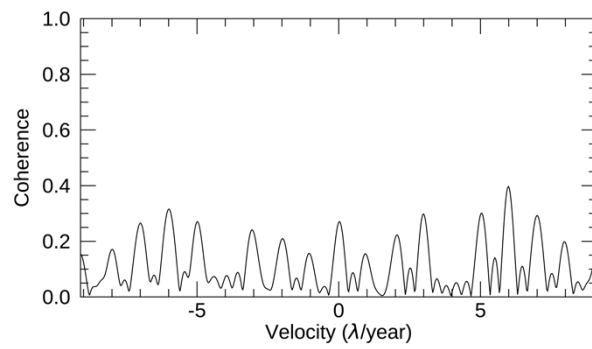
Figure A. 61: The results of the sinusoidal displacement with Dof of 1.1λ .



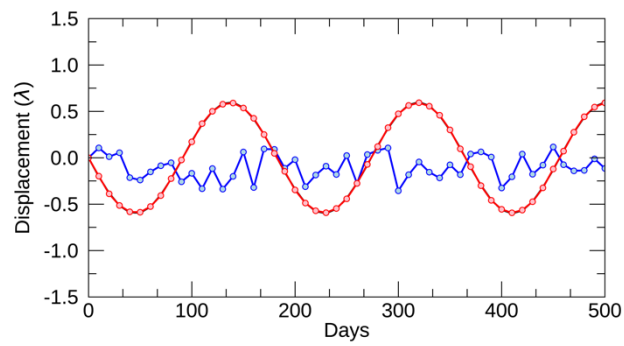
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure A. 62: The results of the sinusoidal displacement with D of 1.2λ .

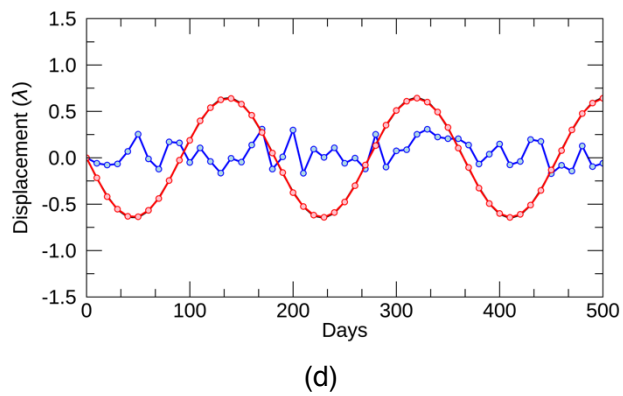
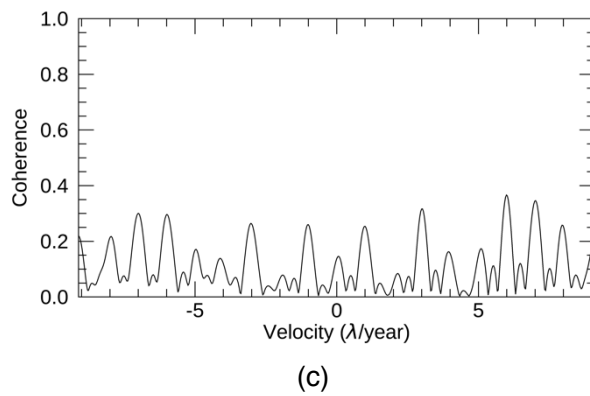
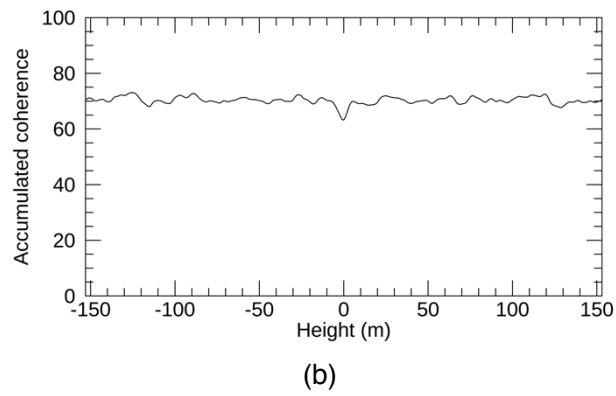
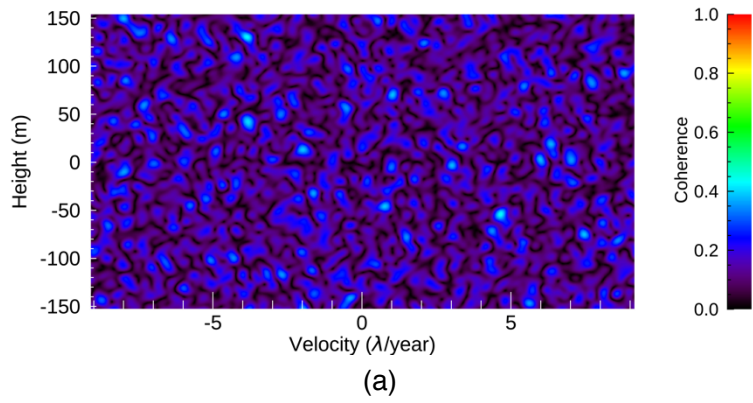
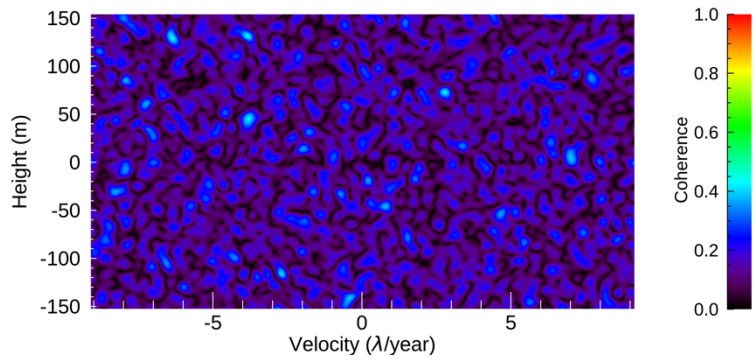
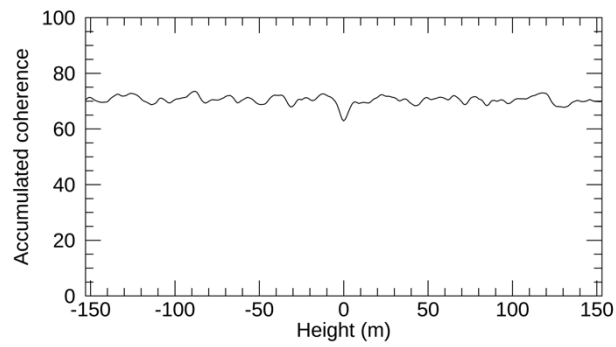


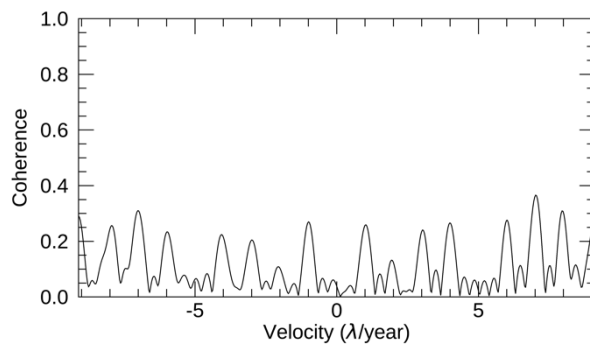
Figure A. 63: The results of the sinusoidal displacement with D of 1.3λ .



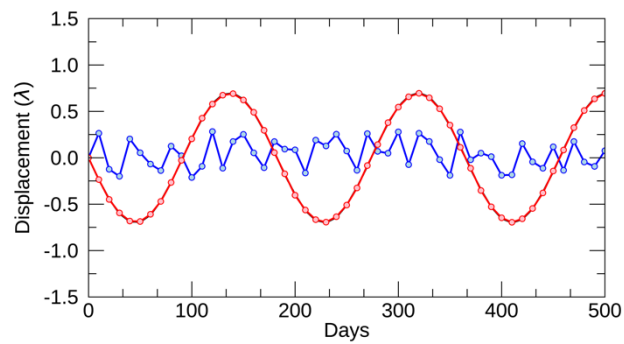
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure A. 64: The results of the sinusoidal displacement with D of 1.4λ .

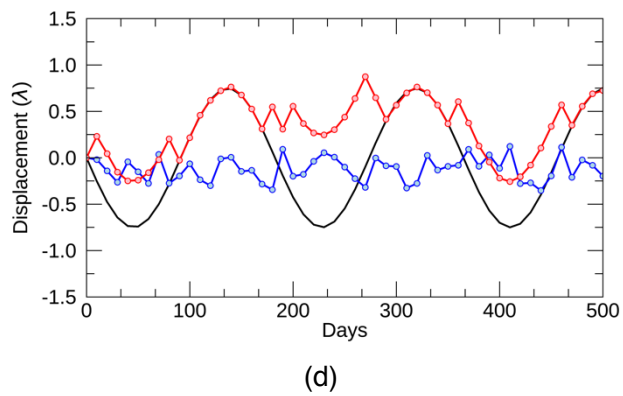
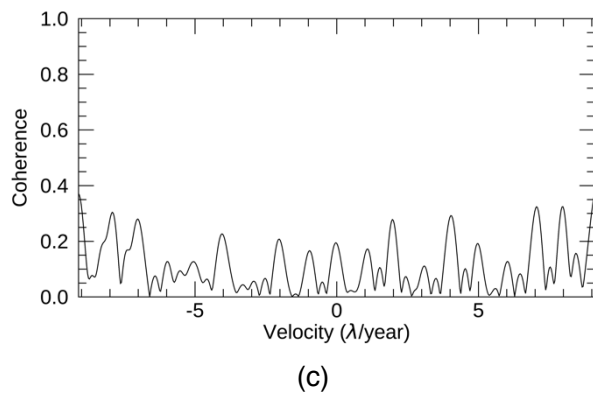
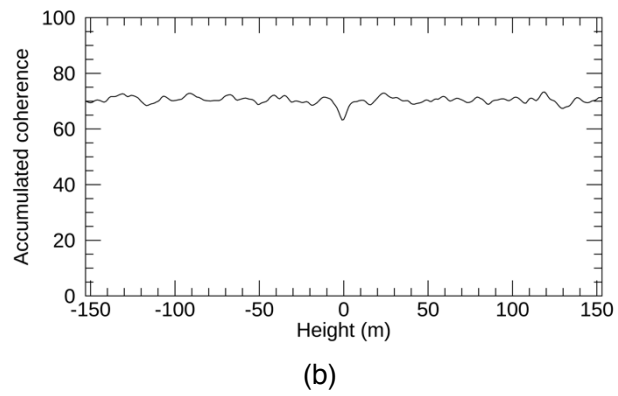
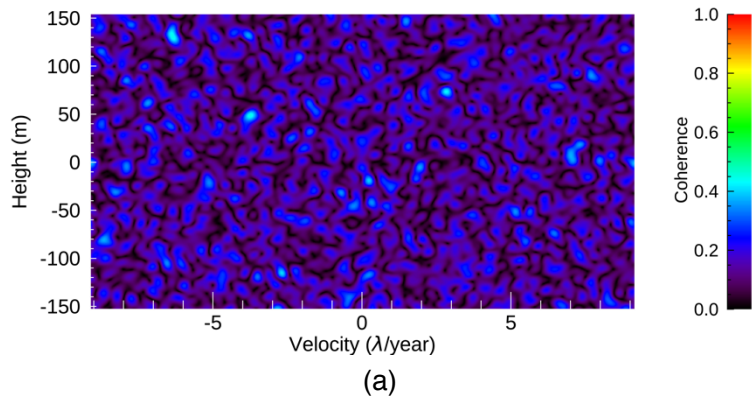
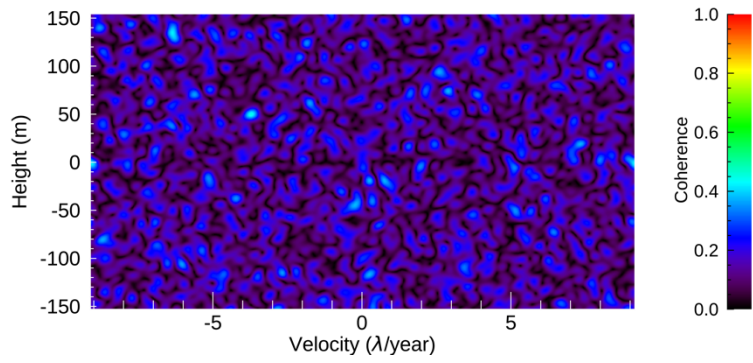
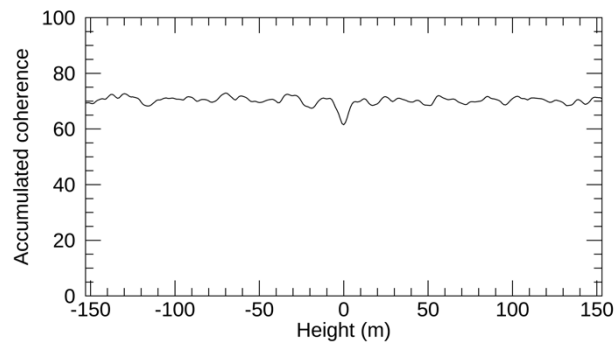


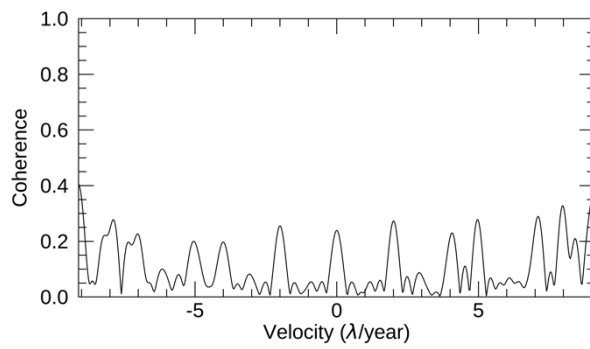
Figure A. 65: The results of the sinusoidal displacement with D of 1.5λ .



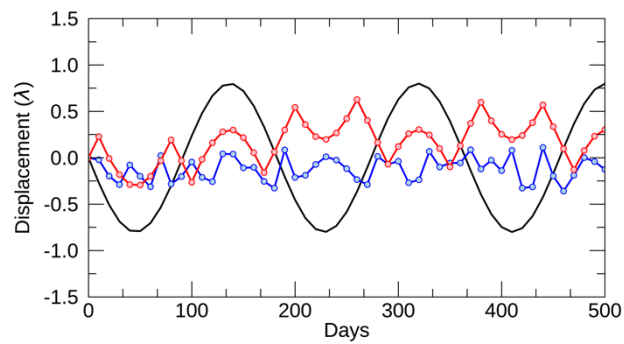
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure A. 66: The results of the sinusoidal displacement with D of 1.6λ .

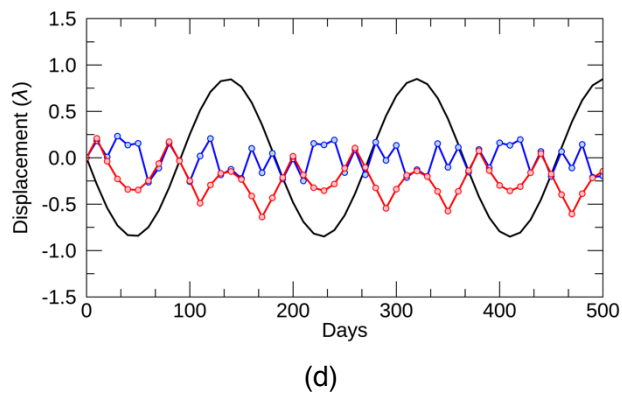
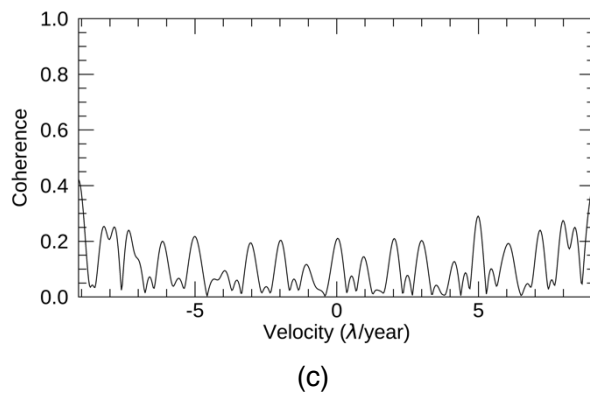
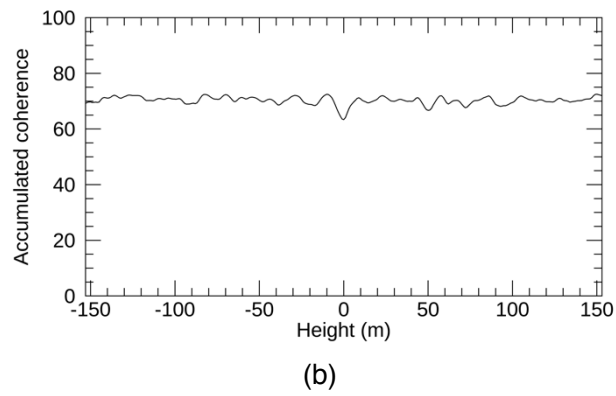
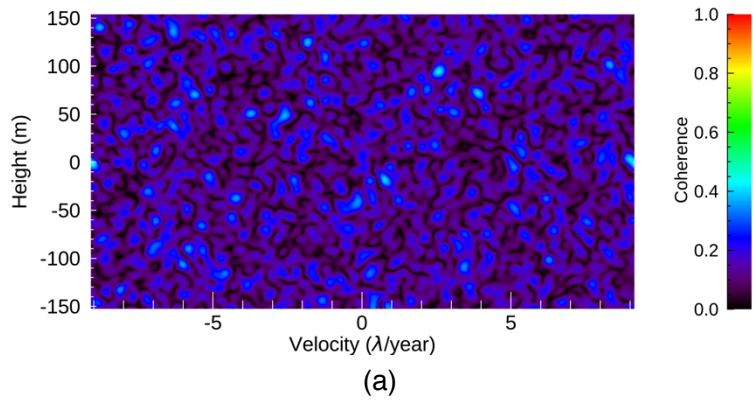


Figure A. 67: The results of the sinusoidal displacement with D of 1.7λ .

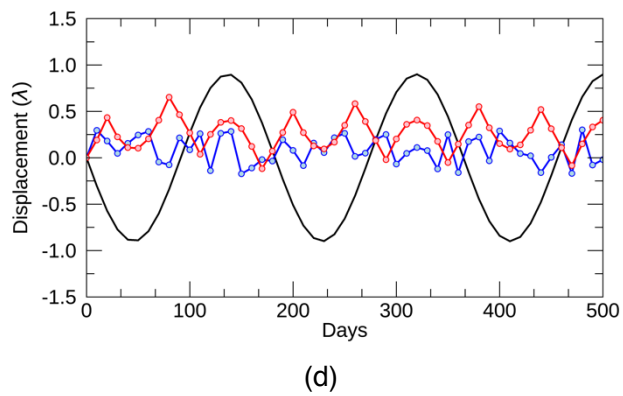
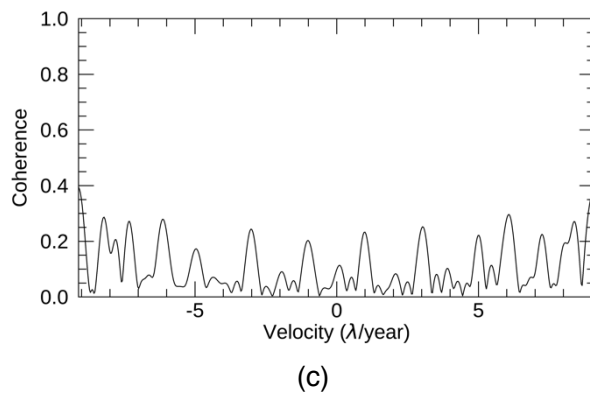
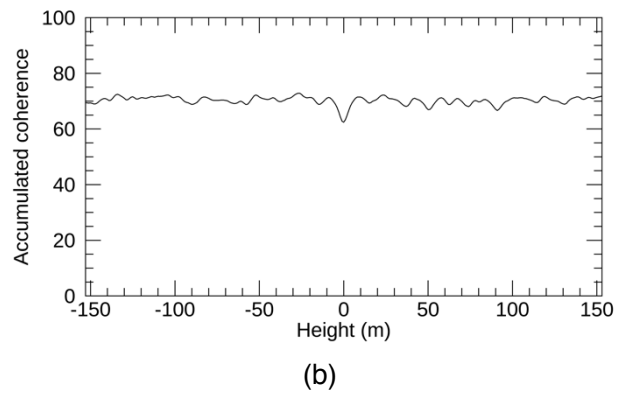
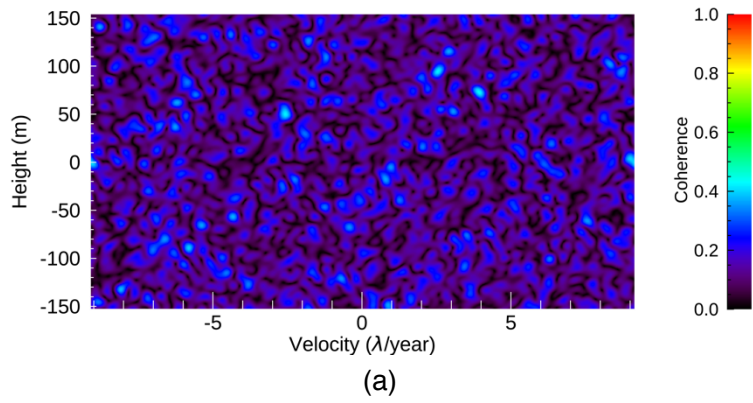
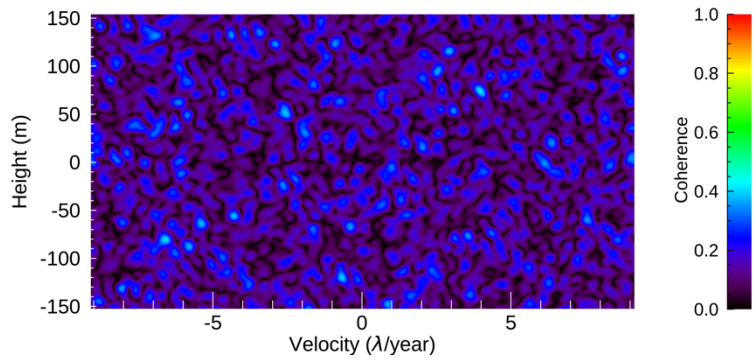
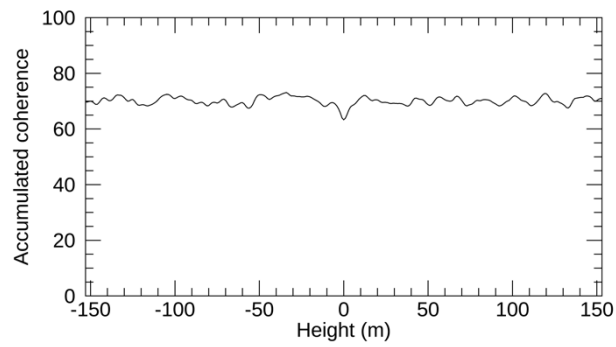


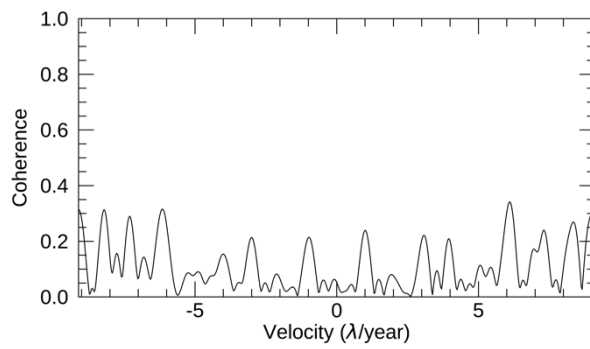
Figure A. 68: The results of the sinusoidal displacement with D of 1.8λ .



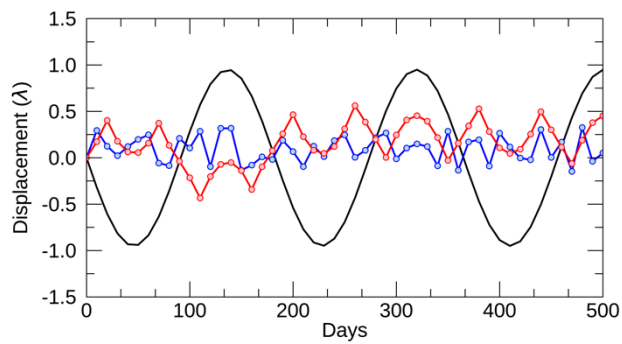
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure A. 69: The results of the sinusoidal displacement with D of 1.9λ .

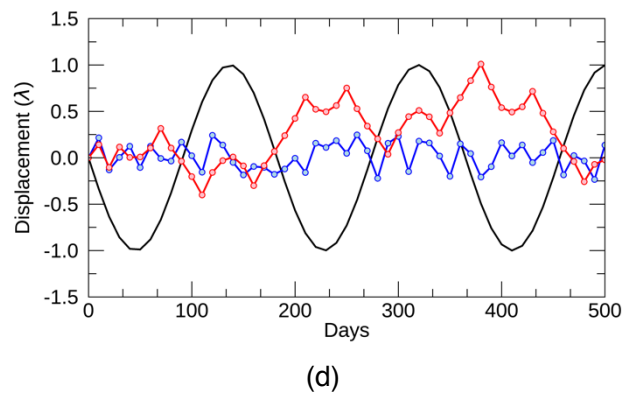
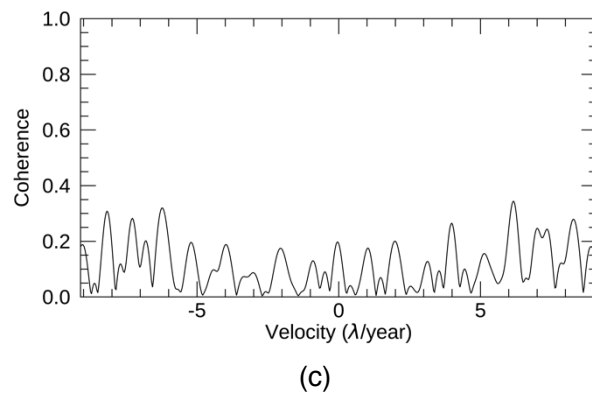
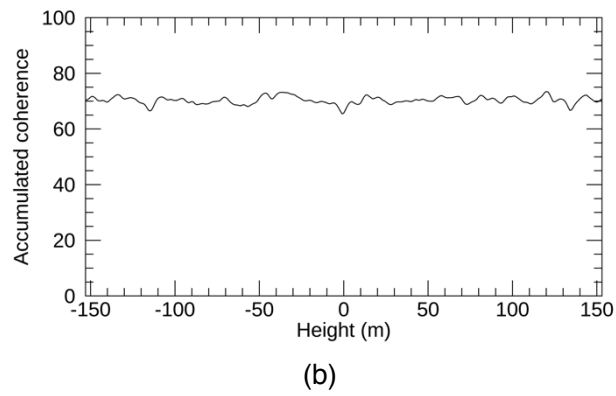
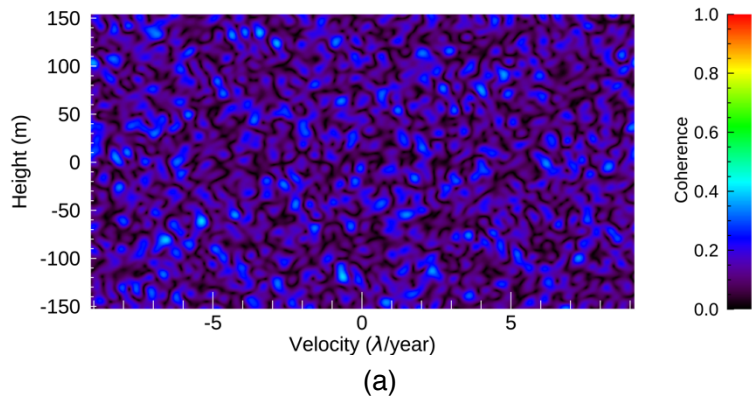


Figure A. 70: The results of the sinusoidal displacement with D of 2.0λ .