PS 干渉 SAR 解析を用いた近年の関東平野の地表変動の推定

石塚師也

深田地質研究所

Recent surface displacement in the Kanto plain using persistent scatterer SAR interferometry

ISHITSUKA Kazuya

Fukada Geological Institute

要旨：衛星データを用いた地表変動モニタリング手法である PS 干渉 SAR 解析は，広域の地表変動を空間的高解像度に推定できる手法として注目されている．本研究では，PS 干渉 SAR 解析を関東平野に適用し，近年の地表変動傾向と変動の空間分布を明らかにした．2006 年 7 月から 2011 年 2 月間に取得された衛星データの解析の結果，関東平野の複数の地域で年間 1~2 cm 程度の地盤沈下地域が推定された．また，2011 年東北地方太平洋沖地震後には日本列島全体が隆起していることが知られているが，2011 年 3 月から 2012 年 11 月間に取得された衛星データを解析した結果，東京南部の地域で局所的に隆起量が大きい地域が存在することが分かった．本研究の結果は，PS 干渉 SAR 解析の有効性を示すものであると言える．

キーワード：地盤沈下，地震後余効変動，PS 干渉 SAR 解析，関東平野，2011 年東北地方太平洋沖地震

Abstract: We revealed recent surface displacement in the Kanto plain using persistent scatterer SAR interferometry. Persistent scatterer SAR interferometry is a satellite-based remote sensing method to estimate surface displacement, and has advantages to estimate subtle displacements in a broad area with a fine spatial resolution. Application of persistent scatterer SAR interferometry revealed several subsidence area with 1~2 cm/year due to groundwater extraction from July 2006 to February 2011. Moreover, ground uplift map after the 2011 Tohoku earthquake was also estimated, and the estimated uplift velocity differs in each area. This study demonstrates the effectiveness of persistent scatterer SAR interferometry to monitor surface displacement.

Keywords: Ground subsidence, post-seismic ground uplift, Persistent scatterer SAR interferometry, The 2011 Tohoku earthquake

1. はじめに

地表変動は至るところで発生している．例えば，地震や火山，地すべり等の自然現象に伴う地表変動や地下水や石油ガス等の地下資源開発など人為的な原因で発生する地表変動もある．このような地表変動は，我々の生活に影響を与えるため，現在発生している地表変動の網羅的なモニタリングは重要である．しかし，地表変動は，広範囲にわたり様々なスケールで発生しているため，網羅的に地表変動を捉えることは難しい．

近年，地表変動のモニタリング技術として，衛星リモートセンシングの1つである干渉SAR解析やPS干渉SAR解析と呼ばれる手法が成果を挙げている．これらの手法は，人工衛星に搭載された合成開口レーダ（SAR）のデータを用いて，地表

変動の推定を行う．この手法は，広域（数十 km メートル）を空間的に高密度に（数 m～数十 m 間隔）地表変動データを取得できるため，地表変動の空間分布を推定できる点に大きな利点をもつ．干渉 SAR 解析は，1992 年カルフォルニア・ランダース地震に伴う地表変動に初めて適用され，解析結果はNature誌の表紙を華々しく飾った. 以降，地震や火山，地盤沈下に伴う地表変動の推定に用いられ，有効性を示してきた．しかし，干渉 SAR 技術は，大気や電離層中の伝播速度変化の影響等の誤差要因のため，検出できる変動量の精度は数 cm 程度であり, 捉えることのできない変動現象も多いことが課題とされてきた.

一方, 近年, 干渉 SAR 技術を元に, PS 干渉 SAR 技術と呼ばれる手法が開発され，発展している（Ferretti et al., 2000; Ferretti et al., 2001）．PS 干渉 SAR 技術とは，数十シーンほどの複数の SAR データを用いて，時系列の地表変動量を推定する技術である ．この技術は，(i) ノイズ量の少ないピクセルのみを用い，(ii) ピクセルの空間的解像度を保持したまま，(iii) 従来の 2 次元（空間方向）の位相変化情報に加えて，時間軸方向も加えた 3 次元の位相変化を用いて誤差要因の除去を行う，ことにより空間的に高解像度で 1 センチメートル/年程度の微小地表変動を推定することができる．1 センチメートルからミリメートル程度の微小変動の推定が可能になると，大規模な災害による変動のみならず，従来は捉えることのできなかった微小な地盤沈下や断層周辺の歪の蓄積等の恒常的な地表の変動現象が捉えられるようになる.

世界中の堆積平野に位置する多くの都市域では, 様々な地表変動現象 が発生している．日本の首都圏を有する堆積平野である関東平野においても，地下水の汲み上げに伴う地盤沈下が報告されてきた（遠藤，2009）．特に，明治期から昭和初期にかけて東京を含む関東平野南部の広域で地下水利用に伴う地盤沈下の発生が知られているものの, 近年では沈静化していることが報告されている（遠藤ほか，2001; 林ほか，2007; 遠藤，2009）．一方，関東平野北部で，新たな地盤沈下の発生が報告されており，関東平野は今でも日本有数の地盤沈下域として知られている．また，2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震は，関東平野にも大きな影響を与えた．GPS 観測により，約 10 cm の沈下および約 20 ~ 60 cm もの北東方向の水平変動が観測されており（Ozawa et al., 2011），地震後も複雑な地震後余効変動の発生が示唆されている（Nishimura, 2014）．上記のような地表変動傾向が報告されているものの，これらの地表変動傾向は，GPS や水準測量等の地点ごとに測定されたものであり，詳細な空間分布は明らかとなっていない. 本研究では, PS 干渉 SAR 解析を用いて, 2006 年から 2012 年間の関東平野の地表変動傾向を明らかにすることを試みた (Ishitsuka et al., 2015; 石塚・松岡，投稿中; 石塚ほか，投稿中).

2. 手法

2.1 干渉 SAR 解析

SAR は，地上約 700~800 km を秒速約 7~8 m の速度で地球上を周回している．周回しながら周波数帯 1~9 GHz（波長 3 ~25 cm）のマイクロ波を地表面上に照射し，反射波を受信する．このようにして得られた反射波に合成開口処理と呼ばれる信号処理を施すことで，地表面上のマイクロ波の反射強度と位相の情報を空間的高解像度で得ることができる. 現在運用されている SAR システムの空間解像度は, 衛星システムや観測モード等により, 約 1~50 m 程度である.

干渉 SAR 解析とは, 異なる時期に同一地域で取

得された 2 枚の SAR データの位相差から, 衛星視線方向の地表変動を推定する解析技術である（Bamler and Hartl, 1998）. 観測期間に地表変動が生じたとすると, 衛星と地表間の距離が変化する. 干渉 SAR では, この距離変化を位相変化として検出する. これまでにこの技術は, 特に地震や火山の噴火, 大規模な地盤沈下に伴う地表変動の特定に有効性を示している. 例えば, 地震や火山の噴火に伴う地表変動から発生メカニズムの推測や, 数cmから数十cmもの地盤沈下の発生箇所の推定等が行われている. しかし, 地表変動以外にも, 大気や電離層中の伝播速度変化の影響や地表面で乱雑な反射が生じる際のノイズ等が位相変化を生じることが知られている. これらの誤差要因のため, 捉えることのできない変動現象も多い.

2.2 PS 干渉 SAR 解析

干渉 SAR 解析結果から, 経験的に都市部や裸地では, 干渉性の高い（ノイズ量が少ない）ことが知られていた. その後の研究から, 上記の地域では, マイクロ波が反射しやすい対象物がある為, 観測間隔や衛星間の距離等の用いるデータの観測条件によらず, 安定してマイクロ波を反射することが分かった. このような任意の観測条件において干渉性の高いピクセルは Persistent scatterer (PS) と呼ばれている.

PS 干渉 SAR 解析は, 複数の SAR データから上記の干渉性の高いピクセルを用い, より精度良く地表変動の推定を行う解析手法である（図 1）. PS の位相情報はノイズ量が少ないため, 精度の高い位相情報を用いることができる. また, 干渉 SAR 解析では, 空間的にフィルタリングを行うことにより, 少数のノイズ量の少ない位相情報が多数のノイズ量の多い位相情報によって, 十分な精度が達成できない場合があるという問題点があったが,

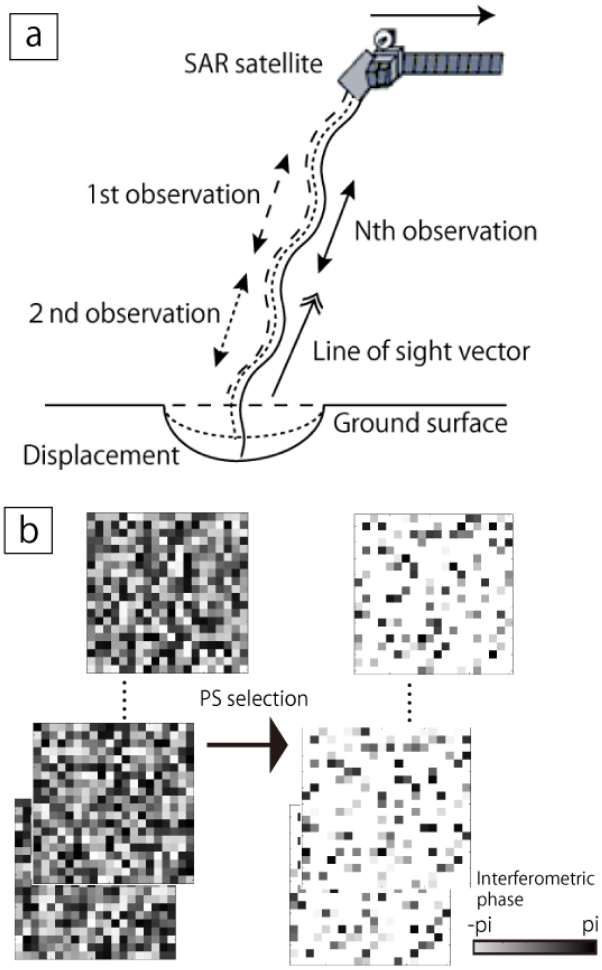

図 1　PS 干渉 SAR 解析の概念図

PS の位相情報のみを用いて解析を行うことで, 精度の良い地表変動の推定が期待できる. さらに, 複数のデータの位相情報を用いることで, 干渉 SAR 解析では取り除くことができなかった大気の影響等の誤差要因を取り除くことができる.

以下に PS 干渉 SAR 解析の手順を概説する. PS 干渉 SAR 解析の詳細は, Kampes（2006）もしくは Ferretti（2014）を参考にされたい. (1) ある観測時の画像を基準として, 干渉処理を行うデータペアを作成した. (2) 振幅の分散性を用いて, PS 候補のピクセルを選定した. (3) PS 候補のピクセルにおいて, 干渉処理を行った. (4) 干渉度を用いて位相に含まれるノイズ量を定量化した. 本解

析では, 干渉度が0.8以上のピクセルをPSとした. (5) 2π の任意性をもつ相対的な位相から絶対的な位相を推定する手法である位相アンラッピングを行い，絶対的な位相変化を推定した. (6) 空間的に低波数かつ時間的に高周波数の位相成分を取り出すことにより，大気の屈折率の変化に伴う位相を推定し，全体的な位相から差し引くことで大気の寄与を取り除いた. (7) 上記の解析ステップ後に残った位相は，主に地表変動に起因するものと考えられるため，最小二乗的に年間地表変動量および地表変動の時間変化を推定した.

本研究では, ALOS/PALSAR で 2006 年 9 月から 2011 年 2 月の間に取得された 26 シーンの SAR データを用いて，関東地方全域において当該期間に発生した地盤変動の空間分布を推定した. ただし, ALOS は 2011 年 5 月に運用停止となったため, 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う地表変動の推定では，ドイツの SAR 衛星である TerraSAR-X で 2011 年 3 月から 2012 年 11 月の間に取得された 33 シーンの SAR データを用いた. TerraSAR-X データは，観測領域が限られているおり，また入手可能なデータが限られていたため，東京から横浜にかけての約 20 km×50 km 四方の地域の地表変動を推定した. ALOS/PALSAR と TerraSAR-X データの大きな違いは，レーダの周波数である. ALOS/PALSAR は L-band 帯（約 1 GHz ; 波長約 24 cm）であり，TerraSAR-X は X-band 帯（約 9GHz ; 波長約 3 cm）のレーダを使用している. レーダの波長の違いが SAR データに及ぼす影響は次章で議論を行う.

3. シミュレーションデータを用いた地表変動推定精度の検証

PS 干渉 SAR 解析の理論的な精度を推定するために，シミュレーションデータによる検証を行った（Ishitsuka et al., 2015）. シミュレーションデータは，ALOS/PALSAR および TerraSAR-X のデータを模擬するため，波長と入射角，衛星高度，それぞれの衛星の観測条件に適した値を用いた. また，データ数および衛星観測ジオメトリは，実データ解析に従って，ALOS/PALSAR データは 26 シーン，TerraSAR-X データは 33 シーンとした.

シミュレーションデータの差分干渉位相は，2 章での議論に従い，地表変動，散乱高さ，大気中の伝播遅延および，干渉性の低下に伴う位相の和で表す（Kampes, 2006）. 地表変動は, 簡単のため, 最大 10 mm/年の一定変動速度をもつ沈下を仮定した. また，散乱高さは，人工構造物を仮定し，ピクセルごとに 0~10 m の一様分布に従う値とした. 干渉性の低下に伴うノイズは，平均 0 標準偏差 0.56 rad のガウス分布に従うとした. この標準偏差は，干渉度が 0.85 であった場合に対応する. 大気の影響は，2 次元のフラクタル面で近似した（Hanssen, 2001）. フラクタル面を記述する変数は, 解析地域の実データより推定を行った.

図 2 は ALOS/PALSAR および TerraSAR-X のシミュレーションデータを表す. ALOS/PALSAR と TerraSAR-X のシミュレーションデータを比較すると, TerraSAR-X のデータの方がより位相変化が大きいことが分かる（図 2）. この違いは，主にレーダの周波数帯が異なることによって，大気の伝播遅延の影響の表れ方が異なるためである. 大気の伝播遅延はレーダの周波数帯に依存することなく，同じ長さで表れる. そのため，位相変化として見た場合，高周波数（X-band）のデータでは低周波数（L-band）のデータよりも位相変化が大きくなる. そのため，TerraSAR-X のデータに PS 干渉 SAR 解析を適用する際には, 大気の影響の除去をより適切に行う必要があることが分かる.

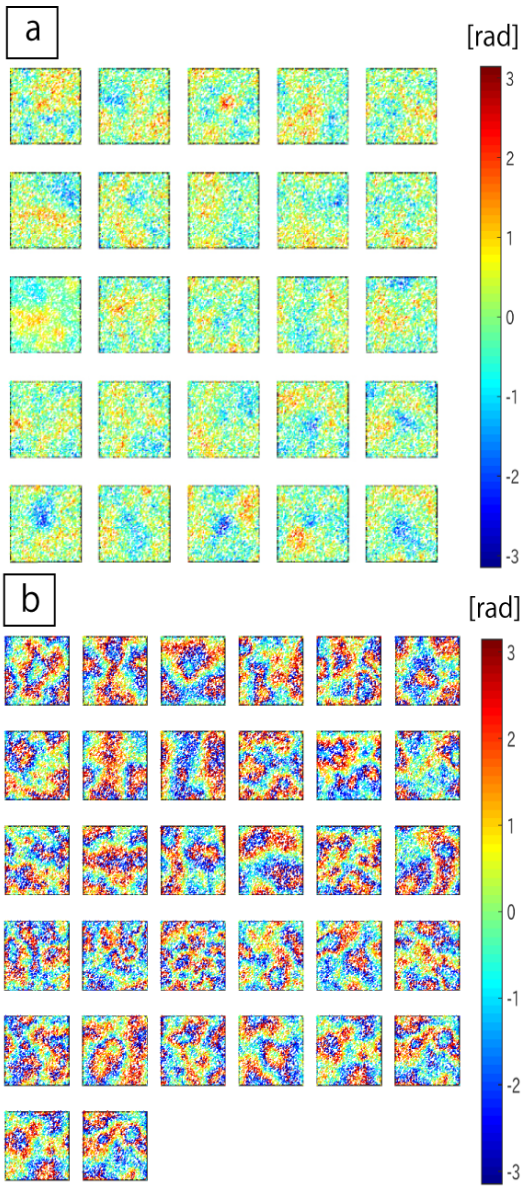

図 2　シミュレーションデータ．(a)ALOS/PALSAR，(b)TerraSAR-X

作成したシミュレーション画像に PS 干渉 SAR 解析を適用した．ALOS/PALSAR データを仮定したシミュレーションデータの解析結果と真値（シミュレーション値）の差の標準偏差は 10.6 mm であった．一方，TerraSAR-X データを仮定したシミュレーションデータの解析結果と真値の差の標準偏差は，4.2 mm であった．シミュレーションデータを用いた精度の検証結果，PS 干渉 SAR 解析により 1 センチメートルからミリメートル精度で変動推定が可能になることが分かった．また，TerraSAR-X データを用いた方がより精度良く変動を捉えられると言えるが，これは TerraSAR-X データはより高周波数のレーダを用い観測を行っており，高周波数のレーダはより地表変動の感度が高いためと考えられる．

4.　実データへの PS 干渉 SAR 解析の適用

4.1　2006 年 9 月から 2011 年 2 月間の関東平野一帯の地表変動

図 3 には，推定された年間地表変動量を表す．解析から関東平野の複数の地域で，年間 10 mm~20 mm 程度の地盤沈下が発生していることが明らかとなった（図 3 の a-c）．本研究で推定された地盤沈下地域の多くは，これまでに水準測量等により報告されている沈下地域と整合的である．解析地域東部に位置する千葉県九十九里地域（図 3 の a）では，これまでも天然ガス開発に伴う地盤沈下が報告されてきた（出口ほか，2009）．また，関東平野北部（図 3 の b）では，地下水利用に伴う地盤沈下が報告されているほか，東京湾臨海域（図 3 の c）でも沈下が報告されている．本研究では，これまで報告されていた地盤沈下地域において，地盤沈下の詳細な空間分布が明らかになったことが本研究の成果と言える．

推定した地盤沈下量の妥当性を検証するため，GPS データとの比較を行った．千葉県九十九里地域の沈下地域（図 3 の a）には，3 点の GPS 観測点（図 3 の A，B，R）が存在している．そのため，図 3 の R の地点の GPS 観測点を基準として，残り 2 つの GPS 観測点（図 3 の A および B）の地表変動量の比較を行った．PS 干渉 SAR 解析と GPS 観測から推定された時系列変動の比較の結果を図

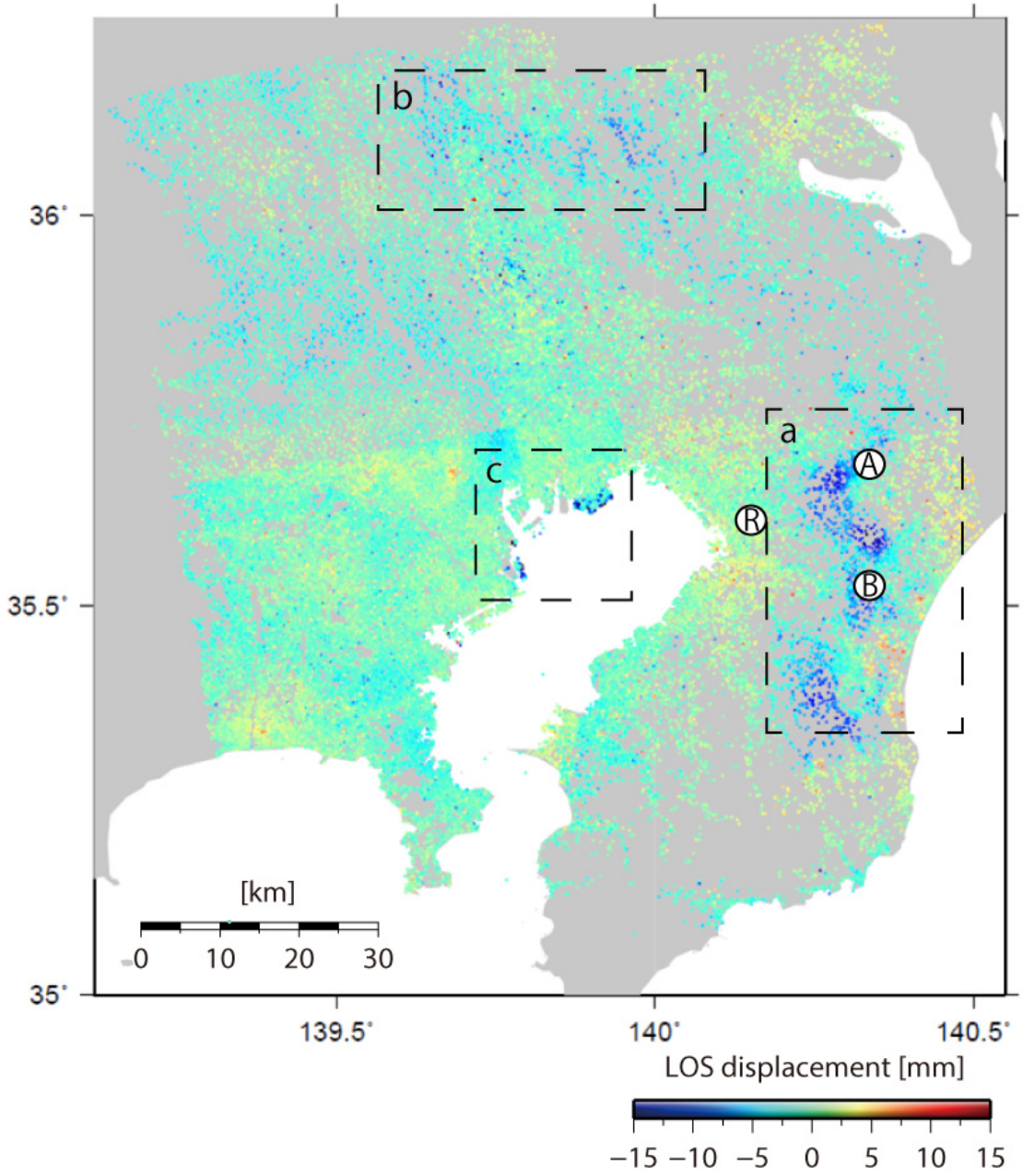

図 3　PS 干渉 SAR 解析によって推定された 2006 年 7 月から 2011 年 2 月間の関東平野の年間地表変動量. a–c は推定された地盤沈下域を表し，A，B，R は GPS 観測点を表す.

4 に示す．図 4 より，両データの時系列変動は，同様の傾向を示していることが分かる．両データの差の標準偏差は，図 3 と図 4 の A では 0.42 cm，図 3 と図 4 の B では 0.63 cm であった．また，GPS の変動値の標準偏差が，A 地点で 0.50 cm，B 地点で 0.47 cm であった．よって，PS 干渉 SAR 解析と GPS 観測結果は，良い一致を示していると言える．また，PS 干渉 SAR 解析と GPS の年間地表変動量の差は，A 地点では 0.07 cm/年（PS 干渉 SAR 解析：-0.33 cm/年，GPS：-0.40 cm/年），B 地点では 0.08 cm/年（PS 干渉 SAR 解析：-1.05 cm/年，GPS：-1.13 cm/年）であり，良い一致を示した．

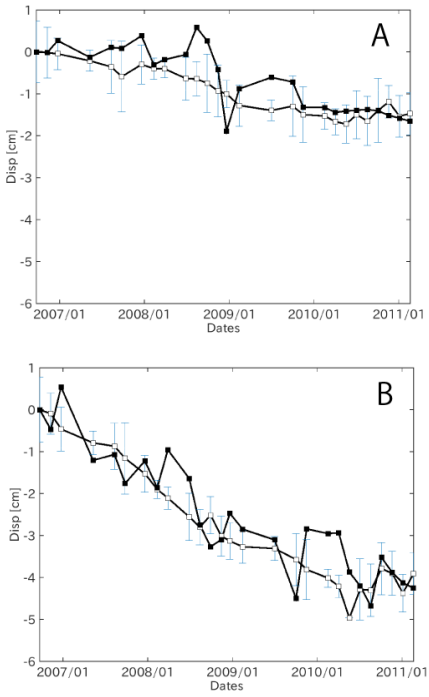

図 4　A および B 地点（図 3 を参照）における時系列地表変動量．黒点は PS 干渉 SAR 解析，白点は GPS データを表す．

4.2　2011 年 4 月から 2012 年 11 月間の東京周辺の地表変動

TerraSAR-X データを用いた PS 干渉 SAR 解析により，2011 年東北地方太平洋沖地震直後の東京周辺の地表変動の推定を行った．前述したように，TerraSAR-X は ALOS/PALSAR よりも高周波数のレーダを用いて観測を行っており，3 章のシミュレーションデータ解析の結果から，より高精度に地表変動推定を行えることが期待できる．しかし，TerraSAR-X のデータは約 20 km×50 km であり，また入手可能なデータ数も限られているため，関東平野の一部の地域の解析しか行うことができない．そのため，PS 干渉 SAR 解析に先だって，GEONET の GPS データを用いて関東平野一帯の地表変動傾向の把握を試みた．

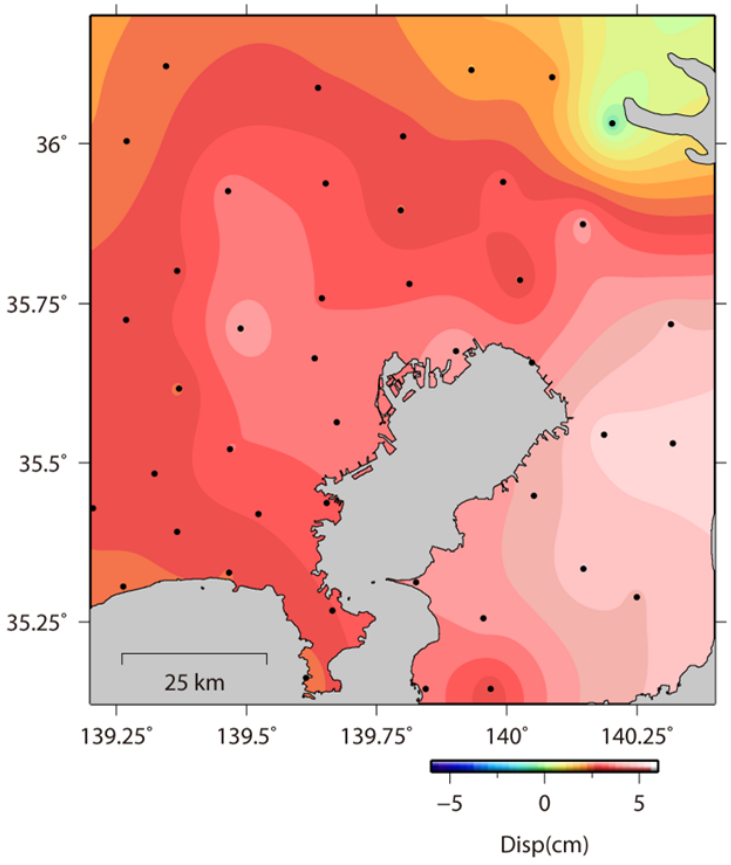

図 5　GPS データによって推定された 2011 年 4 月から 2012 年 11 月間の年間地表変動量

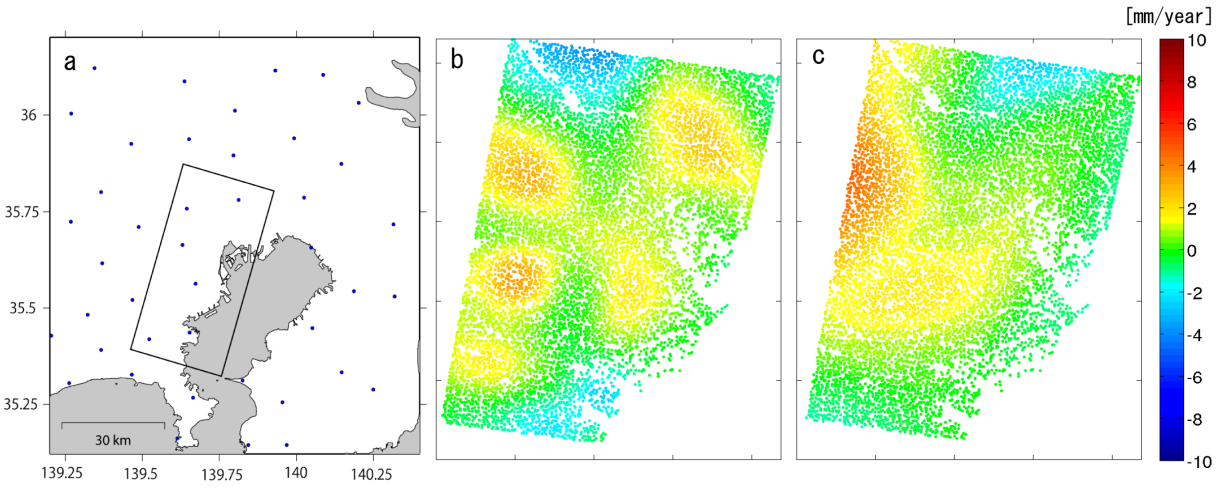

図 6　(a) GPS 観測点および SAR データの範囲，(b) PS 干渉 SAR 解析によって推定された年間地表変動量（2011 年 4 月～2012 年 11 月）．(c) GPS データの補間によって推定された年間地表変動量.

GPS データの解析により，関東平野全域が数 cm 程度，隆起していることが分かった（図 5）．隆起量は，震源に近いほど大きい傾向を示しており，この地震後の隆起は，下部地殻もしくは上部マントルの粘弾性変形によるものと解釈されている（Nishimura，2014）．このような日本列島全体の広域的な変動傾向があるものの，東京の南部の地域に局所的に隆起量が大きい地域が存在することが示唆された．そのため，PS 干渉 SAR 解析を用いて，この局所的に隆起量が大きい地域の詳細な空間分布を明らかにすることを試みた．

PS 干渉 SAR 解析を適用した結果，GPS と同様に，東京の南部の地域で発生している局所的に隆起量が大きいことが分かった（図 6）．また，GPS データと PS 干渉 SAR 解析結果を比較したところ，誤差の平均は約 2.4 mm であり，GPS データと整合的であることが分かった．

地表変動の空間分布を比較するため，用いた SAR データと同地域において GPS データの補間を行った．SAR データの観測範囲内に GPS 観測点は 6 点あるが，補間には周辺の観測点も含めた計 36 点の GPS データを用いた．GPS データの補間から得られた隆起の空間分布と PS 干渉 SAR 解析結果を比較すると，PS 干渉 SAR 解析で得られた地表変動は，より複雑な空間分布を持っていることが分かる（図 6）．この結果より，GEONET の GPS データの配置では捉えることのできないほど局所的に隆起量が大きい地域が存在していることが示唆された．

以下では，このような局所的に隆起量が大きい地域が存在する原因を定性的に推測することを試みる．まず，先行研究と同様に，関東平野の隆起が下部地殻と上部マントルの粘弾性変形によるものと仮定する（Nishimura，2014）．この場合，下部地殻や上部マントルから空間的同程度の力がかかるとすると，上部に位置する地殻の質量の違いによって隆起速度が変化することが考えられる．すなわち，地殻の質量が軽いところで隆起量が大きくなると予想される．実際に，隆起速度が大きかった地域は，関東平野の他の地域よりも第三紀の基盤が深く，負のブーゲー重力が観測されている地域と大まかに一致する（多田，1976）．上記の議論は，観測から定性的に推測されるものであり，今後，定量的に検証される必要がある．

5. まとめ

本研究では，衛星リモートセンシングの 1 つである PS 干渉 SAR 解析を用いて, 2006 年から 2012 年間の関東平野の地表変動の推定を行った．2006 年から 2011 年 2 月までの地表変動は, 日本の衛星 ALOS/PALSAR データを用いて解析を行い，2011 年 3 月から 2012 年 11 月までの地表変動は，ドイツの衛星である TerraSAR-X のデータを用いて解析を行った．まずシミュレーションデータを作成し，精度の検証を行った結果，1cm ~ mm の精度で地表変動推定が可能になることが分かった．続いて，実データに適用を行った結果，ALOS/PALSAR データの解析では，複数の地域で発生している年間 1~2 cm 程度の地盤沈下域が推定された．また，推定された地表変動は GPS データと整合的であった．一方，TerraSAR-X データの解析では，東京南部に局所的に隆起量が大きい地域が存在していることが分かった．これらの結果は, PS 干渉 SAR 解析の有効性を示すものである．

謝辞

本研究で用いた ALOS/PALSAR データは J-space systems より提供頂きました．また，TerraSAR-X データはドイツ宇宙センターより提供頂きました．ここに記して，感謝致します．

参考文献

Bamler, R., and P. Hartl (1998): Synthetic aperture radar interferometry, *Inverse Problems*, 14, R1-R54.

出口知敬・六川修一・松島潤(2009)：干渉 SAR の時系列解析による長期地盤変動計測，日本リモートセンシング学会誌， 29，2，418-428.

遠藤毅・川島真一・川合将文(2001)：東京下町低地における“ゼロメートル地帯“展開と鎮静化の歴史，応用地質，42, 74-87.

遠藤毅(2009)：東京低地を中心とした地盤沈下および高潮・洪水の発生と対策等の年譜，応用地質，49，6，338-349.

Ferretti, A., C. Prati, and F. Rocca (2000): Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 38(5), 2202-2212.

Ferretti, A., C. Prati, and F. Rocca (2001): Permanent scatterers in SAR interferometry, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 39(1), 8-20.

Ferretti, A. (2014): Satellite InSAR data: Reservoir monitoring from space, European Association of Geoscientists and Engineers, EAGE Publications bv.

Hanssen, R. F. (2001): Radar interferometry: data interpretation and error analysis, Kluwer Academic Publishers.

林武司・宮越昭暢・安原正也（2007），大都市圏の発達に伴う地下水環境の変化と課題，日本水文学会誌，37，4，271-285.

Ishitsuka, K., P. Prats-Iraola, M. Nannini (2015): ALOS/PALSAR and TerraSAR-X persistent scatterer interferometry around Tokyo: interferometric phase evaluation and validation, Proc. IGARSS'15.

石塚師也・松岡俊文：PS 干渉 SAR 解析の精度評価―千葉県九十九里地域の地表変動を例として，土木学会論文集 C，投稿中.

石塚師也・松岡俊文・高橋亨・相澤隆生：PS 干渉 SAR 解析を用いた関東平野北部の地盤沈下域の推定，材料，投稿中.

Kampes, B. (2006): Radar Interferometry: Persistent scatterer Technique. Dordrecht, Springer-Verlag.

Nishimura, T. (2014): Pre-, Co-, and Post-seismic deformation of the 2011 Tohoku earthquake and its

implication to a paradox in short-term and long-term deformation, Journal of disaster research, 9(3), 294-302.

Ozawa, S., T. Nishimura, H. Suito, T. Kobayashi, M. Tobita, and T. Imakiire (2011): Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake, Nature, 475, 373-376.

多田堯（1976）：関東平野の地下構造について，地震，29, 47-53.