SAR データの解析手法の高度化に関する研究（第 3 年次）

実施期間　　令和元年度～令和 3 年度
地理地殻活動研究センター
宇宙測地研究室　森下　遊　　小林　知勝

1. はじめに

国土地理院では，災害対応や防災活動を主な目的として，人工衛星に搭載された SAR（合成開口レーダー）のデータを使用した SAR 干渉解析により，地震・火山活動・地盤沈下等に伴う地表変動を計測・監視する事業，またその事業に資するための研究開発を行っている．

近年では，多量の SAR データが利用可能になったことを背景に，干渉 SAR 時系列解析がよく用いられるようになっている．一方で，Ansari et al.（2021）は，マルチルック後の SAR 干渉画像にはこれまで知られていなかった系統誤差が含まれており，短期間ペアのみを使用した時系列解析結果には有意なバイアスが含まれ得ることを示した．そこで本研究では，ALOS-2 データにおけるバイアスの影響を詳細に調査し，低減手法の検討を行った．

2. 短期間ペアに含まれる系統誤差と時系列解析でのバイアス低減手法

Ansari et al.（2021）は，マルチルック後の SAR 干渉画像の位相には，大気誤差や干渉性低下に伴うランダムな誤差とは異なる，系統誤差が含まれていることを見い出した．この系統誤差は，干渉ペアの時間間隔が短いほど大きいという性質があり，fading signal とも呼ばれる．個々の干渉画像では，fading signal の大きさは，大気誤差等の他の誤差要因に比べて無視できるほど小さい．しかし，短期間ペアのみを使用する時系列解析では，この系統誤差が蓄積し，解析結果である変動時系列や変動速度に，本来達成可能な計測精度を大きく超えるバイアスをもたらす．使用データが短期間ペアに偏るほど，バイアスは大きくなる．大量のデータが利用可能な Sentinel-1 を利用した時系列解析では，解析処理を効率的に行うため，短期間ペアのみを利用する手法が世界的によく用いられており（例えば Lazecky et al., 2020），このバイアスは解決すべき重要な問題となっている．また，バイアスは原理的にレーダーの波長が長いほど大きくなるとみられているが，これまでの検証は C バンドのみで行われており，L バンドでの検証と解決策の検討が必要である．

バイアスの符号や大きさの空間分布は概ね土地条件に依存するとみられている．物理的なメカニズムは，土壌水分や植生によるものが考えられているが，複数の要因の寄与があり，外部データを用いた補正は現時点では困難である．バイアスを低減する方法として，短期間ペアの不使用，長期間ペアの使用，Phase Linking（Ferretti et al., 2011；小林ほか，2018）の適用があげられている．しかし，干渉性が一般的に高い短期間ペアを使用しないと，有意な解析結果を得られる領域が減少するという欠点がある．また，長期間ペアの使用や Phase Linking の適用は，短期間ペアのみを使用した場合に比べて計算コストが大きくなるという問題がある．

一方，De Luca et al.（2022）は，P-SBAS という時系列解析手法では，短期間ペアのみを使用しても，Ansari et al.（2021）が示したようなバイアスは生じないことを示した．P-SBAS では，冗長な干渉ペアネットワークに対し，位相の空間的安定性の指標（フィルタ後位相から推定するコヒーレンスに類似した指標）を重みとして用いて，各エポックの位相を最適化する手法（Pepe et al., 2015，以下「位相最適化」という.）を適用しており，それがバイアス低減の効果を持つと考えられる．この位相最適化

は，本来は干渉性低下に伴う誤差の低減を目的としたもので，上述の Phase Linking と類似の効果がある．しかし，SqueeSAR（Ferretti et al., 2011）や GSITSA（小林ほか，2018）に実装されている Phase Linking では，1 ルック画像及び作成可能な全ペアを対象とする解析のため計算コストが非常に大きいのに対し，本位相最適化はマルチルック後及び短期間ペアのみの干渉画像を使うため，計算コストが相対的に小さいという利点がある．また，Phase Linking ではコヒーレンス行列の逆行列が必要で，安定した解を得るのに様々な工夫が必要であるが，本位相最適化では位相の空間的安定性指標をそのまま用いることができるため，安定した解が得られやすい．本研究では，ALOS-2 データを用いてバイアスの影響を定量的に評価するとともに，本位相最適化を実装し，その効果を検証した．位相最適化アルゴリズムの詳細は，Pepe et al.（2015）を参照されたい．

3. ALOS-2 データでの検証と結果

対象地域は千葉，新潟，大阪である．使用した ALOS-2 データは表-1 のとおりである．各干渉画像に対して，対流圏誤差低減処理（小林ほか，2014）及び電離層誤差低減処理（Wegmüller et al., 2018）を適用済みである．対流圏誤差低減処理では，各観測日における対流圏位相を数値気象モデルから推定し，各ペアの対流圏位相は当該 2 観測日の対流圏位相の差分として計算した．電離層誤差低減処理は，各ペアで独立して電離層位相を推定するのではなく，時間方向に隣接する最短期間ペアのみの電離層位相を推定し，それ以外のペアにおいては当該期間に含まれる最短期間ペアの電離層位相の積算により電離層位相を推定した．このアプローチにより，これらの補正量において異なるペア間での不整合は生じず，バイアスの検証には影響を及ぼさない．

バイアスの影響を定量的に検証するため，作成可能な全ペア（データ数を n とすると，ペア数 ${}_nC_2$）を使用した時系列解析結果の変動速度を基準（バイアスなし）とし，結合数（ペアを作る時間方向に隣接するデータの数，図-1）を 1～10 にした場合の各変動速度との差分をバイアスとみなした．また，位相最適化の効果を検証するため，各結合数の干渉画像データセットに対して位相最適化を適用した場合の変動速度も合わせて算出し，基準との差分を計算した．時系列解析には LiCSBAS（Morishita et al., 2020）を使用した．

表-1　使用した ALOS-2 データ

地域	千葉			新潟		大阪			
パス	018	124	125	019	125	020	021	127	128
フレーム	2900	0700	0700	2860	0740	2920 2930	2920	0680	0680
軌道方向	南行	北行	北行	南行	北行	南行	南行	北行	北行
ビーム番号	U7	U6	U8	U7	U7	U9	U6	U6	U9
期間	20150115 20210819	20140909 20211026	20150215 20210613	20141028 20210810	20150315 20211114	20141005 20210912	20150327 20210806	20140813 20211027	20150413 20211129
データ数	29	28	21	30	17	29	34	18	17

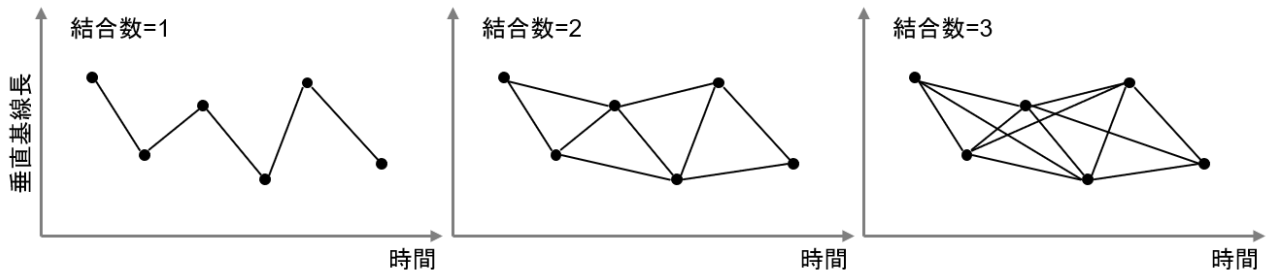

図-1　結合数の模式図

解析結果を比較したところ，全てのデータセットで，結合数が小さいほどバイアスが大きく，結合数が大きくなるにつれて徐々にバイアスが小さくなる傾向が見られた．また，同じ結合数では，位相最適化なしの結果よりも，位相最適化ありの結果の方がバイアスは有意に小さかった．結合数の違いによるバイアス低減の度合いは，結合数が小さいほど大きい．バイアスが十分に低減される結合数はデータセットによって異なるので一概には決められないが，位相最適化ありの場合には結合数 6 程度でほぼ収束する事例が多いようであった．以下では，比較のための代表例として，結合数 2 と 6 の場合を示す．

位相最適化では各ピクセルにおいて非線形問題を解くため，長大な計算時間を要する．また，位相最適化はイタレーション（繰り返し計算）によって効果を高めることができるが，計算時間はイタレーション回数に比例する．16×16 ルックの 1 フレーム（有効ピクセル数 4,000,000 程度）のデータセットに対して位相最適化を適用したところ，16 並列計算で，1 イタレーション当たり約 10 時間を要した．イタレーション回数の違いの効果を検証したところ，結合数に依存し，結合数が 3 程度の小さい場合は 3 回，結合数が 6 程度の大きい場合は 1–2 回で十分なようであった．本検証でのイタレーション回数は 3 回を標準としたが，結合数を 6 程度にすればイタレーション回数を 1–2 回にし，計算時間を短縮することができる．

図-2 には，例として千葉のパス 018 の結果を図示している．基準となる全ペアを使用した場合の変動速度（図-2a）では，シーン中心東側に位置する九十九里平野で最大約 15mm/yr の LOS（Line-of-Sight：衛星の視線方向）伸長の変動が検出されており，既知の地盤沈下を明瞭に捉えている．また，房総半島南端では最大約 10mm/yr の LOS 伸長の変動が見られるが，同領域の相対的な北西向きの水平変動を反映しているものであり，GEONET の観測結果と量的にも整合している．一方，結合数 2（図-2bg）では，大局的な変動は全ペアのものと整合しているが，場所によっては 10mm/yr を超える細かい差異が見られる（図-2ch）．また，全体的に短波長な正負のバイアスが位相最適化なし（図-2c）では見られるが，位相最適化あり（図-2h）ではほぼ見られない．この短波長バイアスは，位相最適化により大きく低減されたと考えられる．土地利用（図-2f）と比較すると，利根川沿いの田では，位相最適化なしでは主に LOS 伸長，位相最適化ありでは LOS 短縮で，逆になっている．これも位相最適化によるものであると考えられるが，詳しいメカニズムは不明である．また，田でも全てにバイアスが生じているわけではなく，生じていない場所もあるようである．房総半島南部の森林では，共通して LOS 伸長のバイアスが見られ，細かい空間パターンが森林分布とよく一致している．建物用地では他の土地利用に比べてバイアスは小さく，バイアスの影響を受けにくいことがわかる．結合数 6（図-2di）では，結合数 2 に比べて全ペアの結果（図-2a）に近く，バイアスは位相最適化なし（図-2e）では 5mm/yr 以下，位相最適化あり（図-2j）では 3mm/yr 以下に概ね抑えられている．

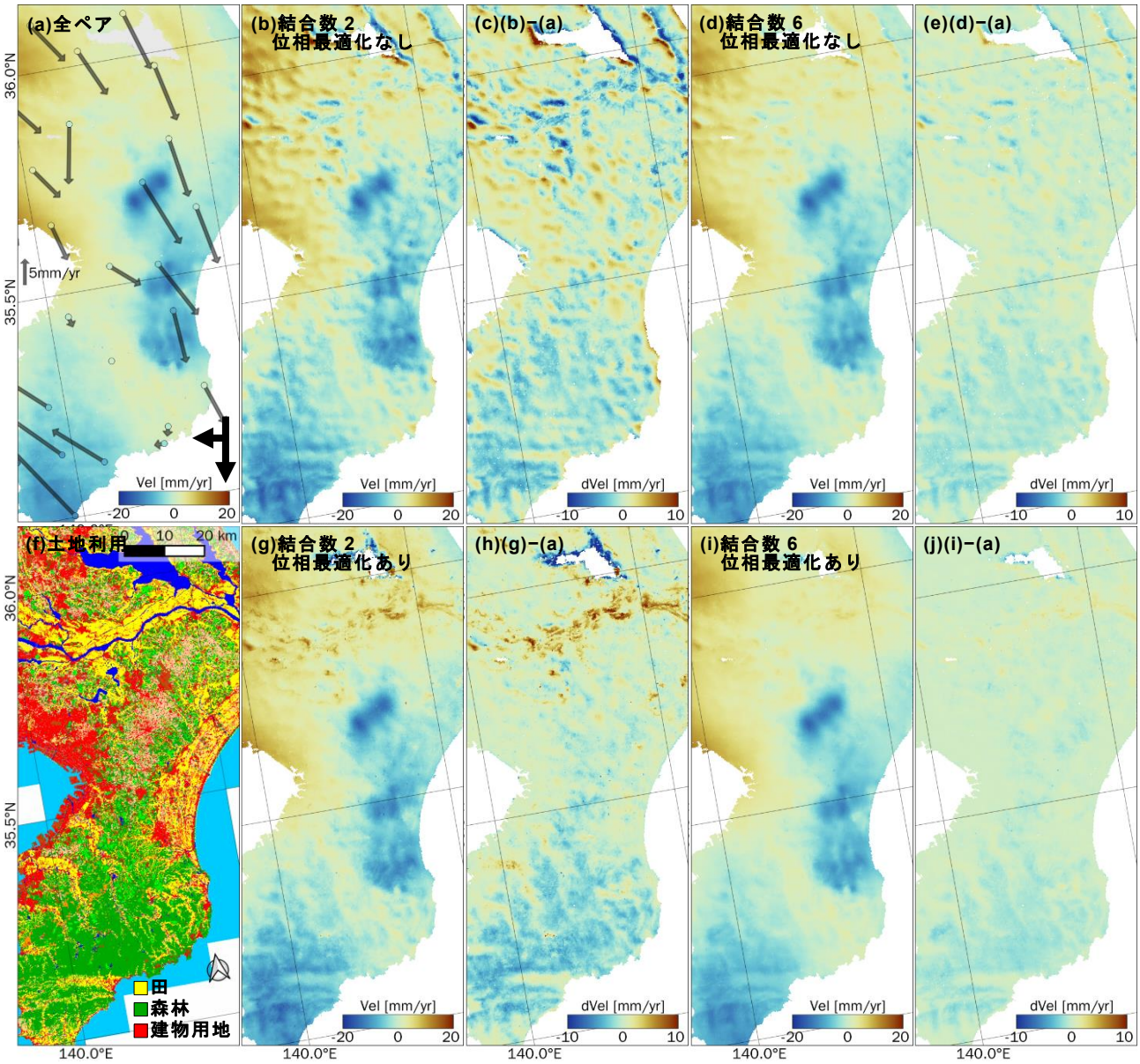

図-2　千葉パス 018（ルック数 64×64，ピクセルスペーシング約 170m）の解析結果．(a)全ペアを使用した場合の LOS 変動速度（基準）．丸印は GEONET 点を表し，丸印内の色は 2015 年 1 月 1 日から 2021 年 1 月 1 日までの LOS 変動速度，矢印はその変動速度の水平成分である．(b)結合数 2，位相最適化なしの場合の LOS 変動速度．(c)(b)の(a)に対する差分（バイアス）．(d)結合数 6，位相最適化なしの場合の LOS 変動速度．(e)(d)の(a)に対する差分．(f)土地利用（国土数値情報土地利用細分メッシュ）．(g)結合数 2，位相最適化ありの場合の LOS 変動速度．(h)(g)の(a)に対する差分．(i)結合数 6，位相最適化ありの場合の LOS 変動速度．(j)(i)の(a)に対する差分．

図-3 は大阪の解析結果の例である．結合数が小さく位相最適化なしの場合（図-3aceg）では，千葉と同様に，全域に短波長のバイアスが見られるが，結合数を大きくし位相最適化を適用すると，バイアスが低減した（図-3bdfh）．短波長バイアスの波長にはルック数に比例するような特徴が見られることから，干渉処理過程で適用しているフィルタに起因するものかもしれない．

解析対象地域内では，有馬－高槻断層帯（図-3j）沿いの複雑な変動や奈良県田原本町周辺の局所的な隆起（図-3e–h 破線円内）が Morishita（2021）により報告されている．バイアスを低減することで，

これらの微小変動が明瞭に捉えられた．特に，奈良県田原本町周辺の隆起については，本結果によって，変動域の境界が直線的であることが明らかになった．変動域に既知の断層や特徴的な地形は存在せず，本変動のメカニズムは不明であるが，地下構造の境界を反映している可能性がある．

結合数 6，位相最適化ありのバイアスが低減された変動速度（図-3bdfh）においても，大阪平野を囲む森林（山地）では共通して LOS 伸長が見られる．3 年以上の長期ペアのみを使用したスタッキングによる変動速度でもほぼ同じ LOS 伸長が見られたため，森林のバイアスによるものではないと考えられる．地形と相関する誤差のようにも見えるが，標高に比例するものではなく，また，南部の紀伊山地では LOS 伸長はあまり見られないことや，GNSS でもある程度整合した変動が計測されている（図-3kl）ことから，本物の変動が含まれている可能性も考えられる．

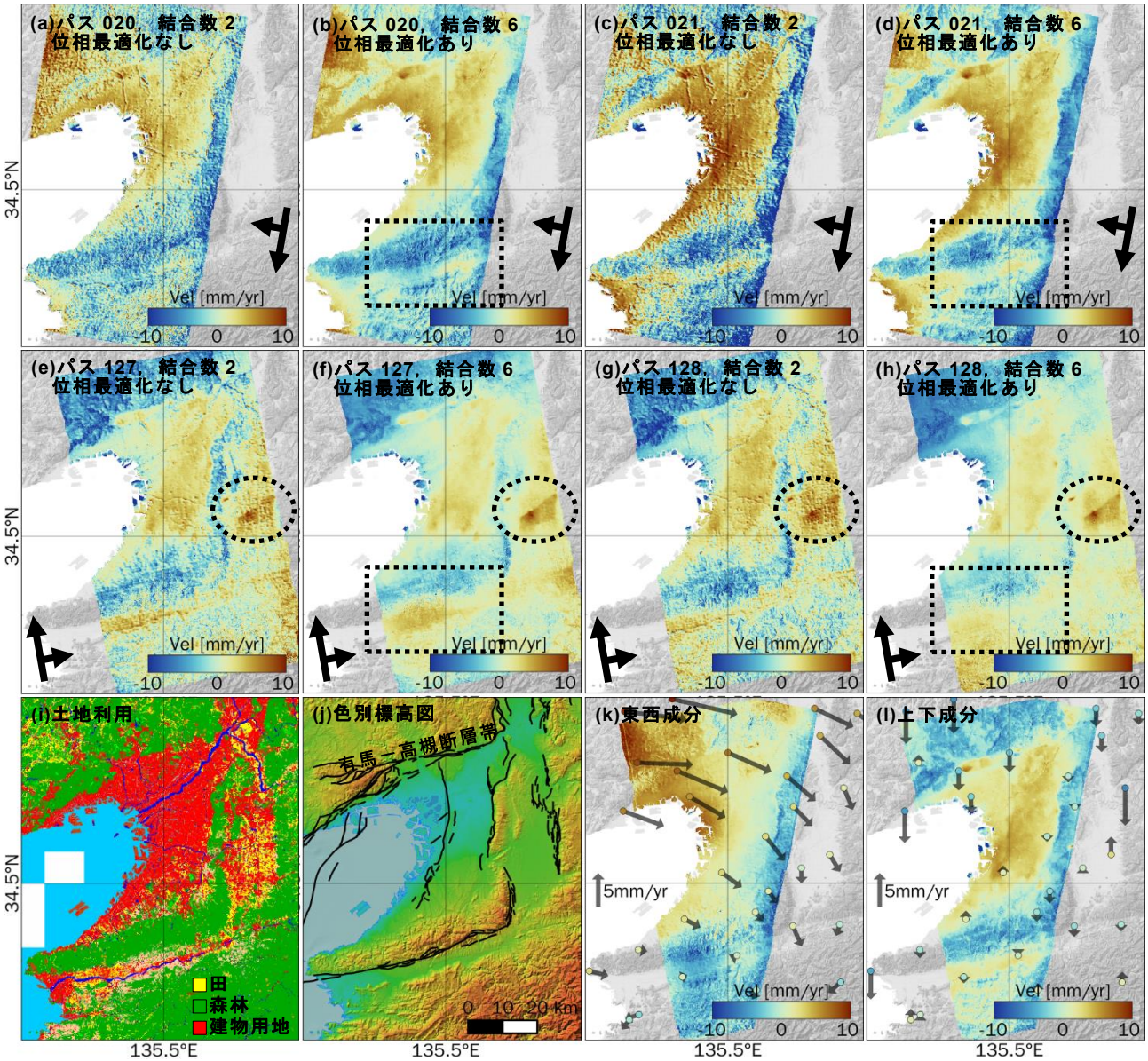

図-3　大阪（ルック数 16×16，ピクセルスペーシング約 45m）の解析結果．(a)パス 020 の結合数 2，位相最適化なしの場合の LOS 変動速度．(b)パス 020 の結合数 6，位相最適化ありの場合の LOS 変動速度．(c)パス 021 の結合数 2，位相最適化なしの場合の LOS 変動速度．(d)パス 021 の結合数 6，位相最適化ありの場合の LOS 変動速度．(e)パス 127 の結合数 2，位相最適化なしの場合の LOS 変動速度．(f)パス 127 の

結合数 6，位相最適化ありの場合の LOS 変動速度．(g)パス 128 の結合数 2，位相最適化なしの場合の LOS 変動速度．(h)パス 128 の結合数 6，位相最適化ありの場合の LOS 変動速度．(i)土地利用（国土数値情報土地利用細分メッシュ）．(j)色別標高図．黒線は主要活断層帯（地震調査研究推進本部）．(k)結合数 6，位相最適化ありの各パスの LOS 変動速度から計算した変動速度の東西成分．図中の丸印は GEONET 点を表し，丸印内の色は 2014 年 11 月 1 日から 2021 年 11 月 1 日までの変動速度の東西成分，矢印は変動速度の水平成分である．(l)結合数 6，位相最適化ありの各パスの LOS 変動速度から計算した変動速度の上下成分．図中の丸印は GEONET 点を表し，丸印内の色と矢印は GEONET の変動速度の上下成分である．

細かい地形との相関に着目すると，位相最適化によるバイアス低減後の結果においても，ほぼ全域にわたり，尾根を挟んで衛星から遠い側の斜面のみに多数の LOS 伸長が分布する傾向が見られた（図-4）．北行よりも南行で顕著に見られるが，データ数の違いによるものかもしれない．これだけ多くの斜面が共通して下方に変動しているとは考えにくく，何らかの誤差によるものであると考えられるが，原因は不明である．斜面変動の検出にとっては大きな問題であり，解釈においては注意が必要である．

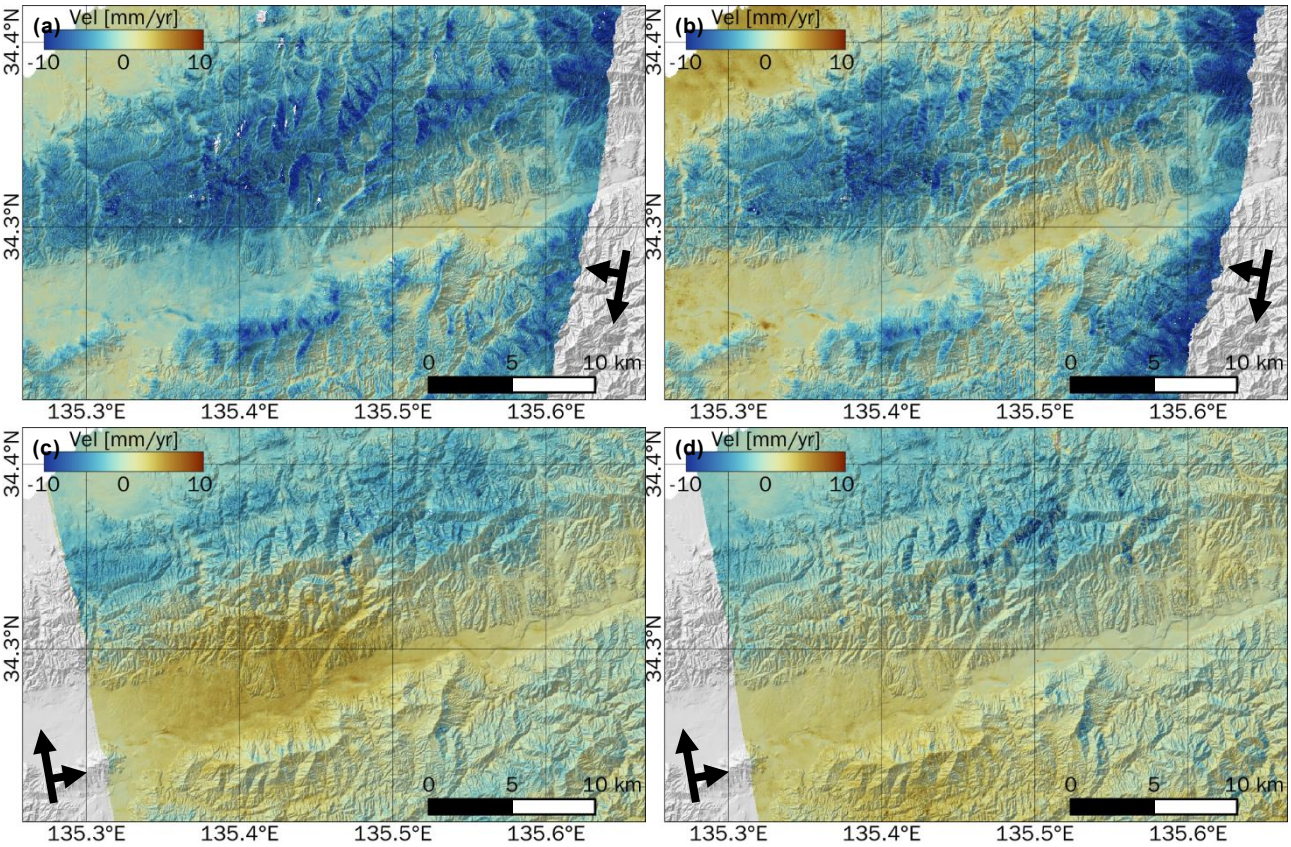

図-4　(a)図-3b 黒四角破線内の拡大図．(b)図-3d 黒四角破線内の拡大図．(c)図-3f 黒四角破線内の拡大図．(d)図-3h 黒四角破線内の拡大図．背景は陰影起伏図．

4. まとめと課題

マルチルック後の SAR 干渉画像に含まれる系統誤差により，短期間ペアを利用した時系列解析結果には本来の計測精度を超えるようなバイアスが含まれ得る．ALOS-2 データを使用した検証により，結合数が小さい場合，10mm/yr を超えるバイアスが含まれ得ることがわかった．バイアスは土地利用に依存し，都市域では影響は小さいが，森林や田で顕著である．全域で短波長なバイアスも見られる．

このバイアスは，結合数を大きくし，位相最適化を適用することで大きく低減できることが確認できた．

一方で，結合数を増加させることは，作成する干渉ペア数を増やすことを意味し，計算時間とデータ容量の増大につながる．また，位相最適化も長大な計算時間を要し，イタレーションによって効果を高められるが，計算時間はイタレーション回数に比例する．今後打ち上げが予定されている ALOS-4 では，ALOS-2 よりも観測頻度が約 5 倍になる予定であり，効率的に処理しなければ，大量のデータをフルに活用することは困難である．本研究の結果から，バイアスが十分に低減された結果を効率的に得るには，現時点では，結合数を 6 程度にし，イタレーションを 1–2 回行う位相最適化を適用するのが適切と考えられる．

このバイアスは世界でも最近認識された問題であり，研究が進むことでより効果的な補正手法が開発されると期待されるため,今後も補正手法については情報収集を継続し,改良を試みるべきである．また，衛星から遠い側の斜面に共通して見られる LOS 伸長など，計測精度の向上に伴い，原因不明のシグナルも顕在化するようになっており，継続的な調査研究及び技術開発が必要である．

謝辞

ALOS-2 の原初データは，国土地理院と JAXA の間の協定に基づき提供されました．ALOS-2 の原初データの所有権は JAXA にあります．数値気象モデルは,「国土地理院と気象庁とのオンラインによる防災情報の相互交換に関する協定」に基づき，気象庁から提供されました．

参考文献

Ansari, H., De Zan, F., and Parizzi, A. (2021): Study of systematic bias in measuring surface deformation with SAR interferometry, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 59(2), 1285-1301.

De Luca, C., Casu, F., Manunta, M., Onorato, G., and Lanari, R. (2022): Comments on “Study of Systematic Bias in Measuring Surface Deformation With SAR Interferometry”, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 60, 1–5.

Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., and Rucci, A. (2011): A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 49(9), 3460-3470.

小林知勝，石本正芳，飛田幹男，矢来博司（2014）: SAR 干渉解析のための数値気象モデルを用いた大気遅延誤差の低減処理ツールの開発，国土地理院時報，125，31-38.

小林知勝，森下遊，山田晋也（2018）: 干渉 SAR 時系列解析プロトタイプシステムの開発，国土地理院時報，130，123-133.

Lazecky, M., Spaans, K., González, P. J., Maghsoudi, Y., Morishita, Y., et al. (2020): LiCSAR: An automatic InSAR tool for measuring and monitoring tectonic and volcanic activity, Remote Sens., 12(15), 2430.

Morishita, Y. (2021): Nationwide urban ground deformation monitoring in Japan using Sentinel-1 LiCSAR products and LiCSBAS, Prog. Earth Planet. Sci., 8, 6.

Morishita, Y., Lazecky, M., Wright, T.J., Weiss, J.R., Elliott, J.R., and Hooper, A. (2020): LiCSBAS: An Open-Source InSAR Time Series Analysis Package Integrated with the LiCSAR Automated Sentinel-1 InSAR Processor, Remote Sens., 12, 424.

Pepe, A., Yang, Y., Manzo, M., and Lanari, R. (2015): Improved EMCF-SBAS processing chain based on advanced techniques for the noise-filtering and selection of small baseline multi-look DInSAR interferograms, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 53(8), 4394-4417.

Wegmüller, U., Werner, C., Frey, O., Magnard, C., and Strozzi, T. (2018): Reformulating the split-spectrum method to facilitate the estimation and compensation of the ionospheric phase in SAR interferograms. Procedia Computer Science, 138, 318-325.