

## 地殻変動補正パラメータの高度化の調査・検討（第6年次）

実施期間	令和元年度～令和6年度
測地部測地基準課	山田 直輝 岩下 知真子 多田 直洋 高築 晶 高木 悠
測地部宇宙測地課	市村 美沙 石本 正芳
地理地殻活動研究センター	小林 知勝
宇宙測地研究室	

### 1. はじめに

近年衛星測位の精度が向上し、測量分野に加え除雪支援等の自動運転の分野などにおいて地図と測位を整合させる地殻変動補正の重要性が大きくなっている（例えば、渥美ほか、2021）。こうした需要を踏まえ、国土地理院では測位向けの定常時地殻変動補正サイト POS2JGD を2020年3月31日から運用し、補正に使用するグリッドモデル（地殻変動補正パラメータ）及びweb上での補正計算機能の提供を行っている（国土地理院、2020）。また、国土地理院では令和7年度始めに衛星測位を基盤とする新しい標高体系への移行を予定しており、標高体系の移行とともに水準測量に導入されるGNSS標高測量には、高さ方向においても従来よりも高い精度での地殻変動補正が必要になる..

現在、地殻変動補正パラメータは電子基準点（配点間隔約20km）の今期座標と元期座標との差を基に作成されているが、近年の高精度測位技術の発展を踏まえると現状の空間分解能では不十分であると考えられる。そこで、これまで測地基準課では高さ方向の地殻変動補正パラメータ作成において電子基準点データに加え干渉SAR時系列解析データを用いることで、パラメータの空間分解能を向上させる手法の研究開発に取り組んできた。山下ほか（2023）では、局所的な地盤沈下が見られる千葉県房総半島地域において、電子基準点データと干渉SAR時系列解析データを組み合わせたモデリング手法を提案し、モデルの空間分解能向上への有効性を確認した。また、電子基準点データの誤差分散の空間依存性に着目し、電子基準点データと干渉SAR時系列解析データとの重み付けを行うことでモデルの精度を向上させた。さらに、深谷ほか（2024）では、干渉SAR時系列解析データの誤差の空間分布を用いて重み付けを行うことで、地盤沈下速度が1cm/年を超える地域においてモデルの精度が向上することを確認した。しかし、モデルの精度向上の観点では、深谷ほか（2024）では干渉SAR時系列解析データの誤差として変動速度の推定誤差を用いていたが、その妥当性については十分検討が進んでいない。また、地殻変動補正パラメータは等間隔のグリッドデータの形式で提供されているが、従来の検証ではグリッド化せずに検証対象となる水準点上の変動を直接推定していた。そこで本研究では、電子基準点データと干渉SAR時系列解析データの組み合わせたグリッドデータ（地殻変動補正パラメータ）を構築し、両者の重みを変え複数のパラメータを作成することで、モデルの精度について比較検証を行った。

### 2. 研究内容

#### 2.1 手法及び検証方法の概要

本研究では、地盤沈下地域として知られ、陸域観測技術衛星2号「だいち2号」（ALOS-2）の高頻度観測が行われている千葉県房総半島地域を対象として、電子基準点データと干渉SAR時系列解析

の結果を組み合わせた地殻変動補正パラメータを構築した。対象地域である千葉県房総半島地域は、液化天然ガスやヨウ素の採掘に伴う地下水のくみ上げの影響で、大きな沈降が電子基準点の GNSS 連続観測、水準測量及び干渉 SAR により検出されている (Shimada et al., 2021)。

検証には、千葉県が行っている水準測量から得られる 2015 年度の観測に対する 2021 年度の観測の標高変動量を用いた。そして、電子基準点データと干渉 SAR 時系列解析データの重みを変えて複数作成した地殻変動補正パラメータから得られる推定変動量と、水準測量による観測変動量との較差をそれぞれ調査した。

## 2.2 電子基準点データと干渉 SAR 時系列解析を組み合わせた地殻変動補正パラメータの構築

検証に当たっては、次の(1)~(4)の 4 通りの地殻変動補正パラメータを構築し、それぞれを比較した。

- (1)…電子基準点データのみを用いた地殻変動補正パラメータ
- (2)…電子基準点データと干渉 SAR 時系列解析データとを重み一定でデータ同化したパラメータ
- (3)…電子基準点の空間補間誤差を考慮し電子基準点データと干渉 SAR 時系列解析データとの重み付けをしたパラメータ
- (4)…(3)に加えて、干渉 SAR 時系列解析データの誤差の空間分布を考慮して重み付けしたパラメータ

まず、2016 年 1 月 1 日から 2022 年 1 月 1 日の各電子基準点の変動量を、日々の座標値 (F5 解) から定常変動 (一次関数)、余効変動 (対数関数) 及び年周変動 (三角関数) を考慮した関数フィッティングにより算出した。次に、得られた入力変動量をクリギング法により空間補間しグリッド化した。なお、干渉 SAR 時系列解析データの空間分解能を生かすためグリッド間隔を現行の約 5 km から約 1 km 間隔に変更した。

干渉 SAR 時系列解析データとして、2014 年から 2022 年までの ALOS-2 の北行及び南行軌道からの観測データを用いた干渉 SAR 時系列解析 (小林ほか, 2018) を実施し、その後 2.5 次元解析 (Fujiwara et al., 2000) により算出した準上下方向の変動速度のグリッドデータ (約 50 m 間隔) を使用した。さらに水準測量データとの比較のため、変動速度に観測年数 (6 年) を乗じて変動量に換算している。干渉 SAR 時系列解析データをパラメータのグリッド間隔に変換するには、高木ほか (2024) と同様にメディアンフィルタによる平滑化を行った。ここで、緯度  $B_i$ 、経度  $L_i$  におけるパラメータのグリッド上の変動量  $p_H(B_i, L_i)$  は、干渉 SAR 時系列解析データの緯度  $B_j$ 、経度  $L_j$  における変動量  $dH(B_j, L_j)$  を用いて、

$$p_H(B_i, L_i) = \text{Median}(\{dH(B_j, L_j) \mid |B_i - B_j| < XB, |L_i - L_j| < XL\})$$

のように平滑化計算される。なお、 $XB$  と  $XL$  はフィルタをかける範囲 (今回はパラメータの格子点間隔である約 1 km) とした。

電子基準点データと干渉 SAR 時系列解析データを組み合わせたパラメータの作成には、最小分散推定法 (例えば、淡路ほか, 2020) による重み付き平均を用いる。電子基準点データから得られたパラメータのグリッド上の補正量とその分散を  $\Delta\hat{H}_{CORS}$ 、 $\sigma_{CORS}^2$  とし、干渉 SAR 時系列解析データから得られたパラメータのグリッド上の補正量とその分散を  $\Delta\hat{H}_{SAR}$ 、 $\sigma_{SAR}^2$  とすると、両者を組み合わせたパラメータの補正量  $\Delta\hat{H}$  は以下の式で表される。

$$\Delta\hat{H} = \frac{1}{(\sigma_{CORS}^2/\sigma_{SAR}^2) + 1} \Delta\hat{H}_{CORS} + \frac{(\sigma_{CORS}^2/\sigma_{SAR}^2)}{(\sigma_{CORS}^2/\sigma_{SAR}^2) + 1} \Delta\hat{H}_{SAR}$$

本研究では、電子基準点データの誤差分散を、山下ほか (2023) と同様、空間一様の (2) の場合  $\sigma_{CORS}^2 = 0.4 \text{ cm}^2$  を与えた。また、誤差の空間分布を考慮する (3), (4) の場合、電子基準点からの距離に依存する

空間補間誤差としてクリギング分散を与えた。干渉 SAR 時系列解析データの誤差分散は、(2)及び(3)においては空間分布を一様と考え、その大きさを山下ほか (2023) と同様  $\sigma_{SAR}^2 = 0.25 \text{ cm}^2$  で与えた。干渉 SAR データの誤差の空間分布を考慮する場合、時系列解析で推定された各エポックの出力画像の位相誤差を平均した値を用いた。これは位相の推定誤差を表すもので、干渉性が低い場所では誤差が大きくなるなど、入力画像の品質を反映した指標となっている。誤差分散は北行・南行の各方向で得られるため、それぞれ  $\sigma_A^2(x)$ ,  $\sigma_D^2(x)$  とすると、準上下方向の誤差分散  $\sigma_{SAR}^2(x)$  へは誤差伝播の法則を用いて以下のように変換できる。

$$\sigma_{SAR}^2(x) = K_A^2 \sigma_A^2(x) + K_D^2 \sigma_D^2(x)$$

このとき  $K_A$ ,  $K_D$  は、北行・南行の衛星視線方向の単位ベクトル  $\mathbf{a} = (a_e, a_n, a_u)$ ,  $\mathbf{d} = (d_e, d_n, d_u)$  と  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{d}$  から得られる上下方向と準上下方向及び東西方向と準東西方向のなす角  $\varphi$ ,  $\theta$  を用いて以下のように表される。

$$K_A = \frac{1}{1 - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{d})^2} [\sin \varphi \sin \theta \{a_e - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{d})d_e\} - \sin \varphi \cos \theta \{a_n - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{d})d_n\} + \cos \varphi \{a_u - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{d})d_u\}]$$

$$K_D = \frac{1}{1 - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{d})^2} [\sin \varphi \sin \theta \{d_e - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{d})a_e\} - \sin \varphi \cos \theta \{d_n - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{d})a_n\} + \cos \varphi \{d_u - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{d})a_u\}]$$

### 2.3 水準測量データによる地殻変動補正パラメータの検証

比較検証のため、2015 年度観測の水準測量データと 2021 年度観測の水準測量データについて、千葉県印西市の二等水準点 2987 を固定点とした網平均計算を行い、網平均結果の差を取り標高変動量を算出した。標高変動量を算出することができた水準点は 727 点あった。図-1 は、得られた変動量の分布とヒストグラムをそれぞれ示している。房総半島内陸の地盤沈下域では最大 10 cm を超える沈下量が観測されている。なお、地殻変動補正パラメータについても、水準測量データとの比較のため 2987 付近を固定点（変動量ゼロ）として換算している。

地殻変動補正パラメータによる水準点上の補正量は、最も近いパラメータのグリッドの点 4 点の補正量を用いてバイリニア補間で計算した。最終的に、水準測量で得られる変動量とパラメータで得られる変動量の較差を取り、(1)~(4)のパラメータでそれぞれ比較・検討した。

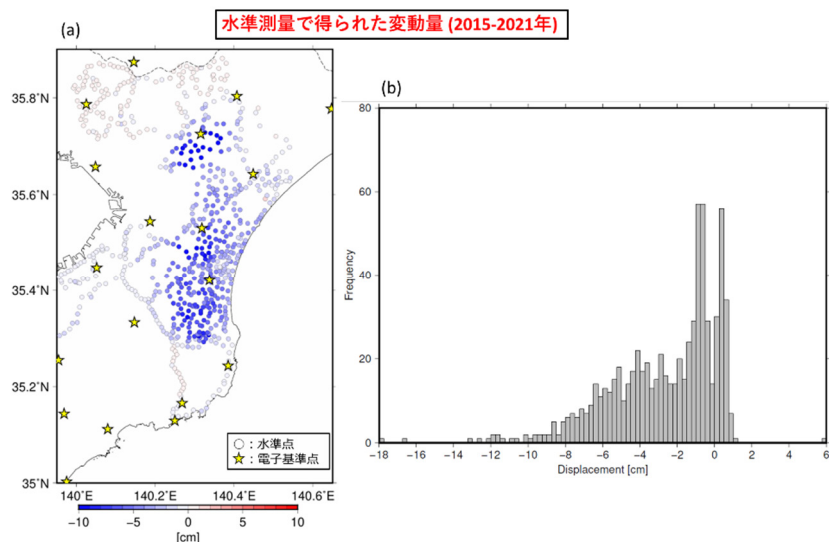


図-1 房総半島において 2015 年度と 2021 年度に実施された水準測量により得られた変動量の空間分布(a)とヒストグラム(b). 丸印と星印はそれぞれ水準点と電子基準点の位置を示している. 水準点の変動量は青色で沈降を, 赤色で隆起をそれぞれ表している.

### 3. 結果と考察

#### 3.1. 地殻変動補正パラメータによる補正量と水準測量による変動量の比較

(1)~(4)の手法で作成した地殻変動補正パラメータの補正量と水準測量による変動量を図-2(1)~(4)に示す. また, 各手法でのパラメータから求めた推定変動量と水準測量による変動量との較差のヒストグラムを図-3(1)~(4)に示し, RMS を図-4 に示す.

まず(1)電子基準点データのみを用いて構築したパラメータについて, 図-2(1)から水準測量により観測される地盤沈下量と比較してパラメータでは広域的な沈下傾向が再現される一方,  $-10\text{ cm}$  を超える局所的な地盤沈下量は再現できないことが分かる. 図-3(1)からは, 較差 $-5\text{ cm}$  以上でパラメータの推定変動量が過小評価となる地点が存在し, 特に沈下速度が $-1\text{ cm/年}$ を超える範囲では, RMS も  $4.76\text{ cm}$  と大きい.

次に(2)電子基準点データと干渉 SAR 時系列解析データを重み一定でデータ同化したパラメータについて, 図-2(2)から最大 $-10\text{ cm}$  を超える局所的な地盤沈下量がよく再現されることが分かる. 図-3(2)からは, 較差 $-5\text{ cm}$  を超える水準測量との較差が解消され, 平均値は(1) $-1.46\text{ cm}$  から(2) $-0.27\text{ cm}$  に, 標準偏差は(1) $2.19\text{ cm}$  から(2) $1.28\text{ cm}$  にそれぞれ改善している. RMS は, 図-4 から全域で(1) $2.38\text{ cm}$  から(2) $1.03\text{ cm}$  と大きく改善しており, 特に沈下速度が大きい地域で(1) $4.76\text{ cm}$  から(2) $1.86\text{ cm}$  へと大幅に改善している.

(3)電子基準点データと干渉 SAR 時系列解析データを電子基準点との距離に依存する空間補間誤差を考慮して重み付けしたパラメータについては, 図-2(3)から, (2)と同様に局所的な地盤沈下がよく再現されることが分かる. 図-3(3)からは, 平均値及び標準偏差が, それぞれ $-0.02\text{ cm}$ ,  $1.24\text{ cm}$  と, (2)と比較して僅かに改善している. RMS は特に沈下速度が大きい地域で  $1.45\text{ cm}$  と大きく改善している.

(4)で更に干渉 SAR 時系列解析の誤差の空間分布を考慮した場合, こちらも図-2(4)から局所的な地盤変化量がよく再現されていることが分かる. 一方で, 平均値と標準偏差はそれぞれ  $0.37\text{ cm}$  及び  $1.27\text{ cm}$  と, (3)と比較して僅かに悪化している. RMS は, 全域では  $1.17\text{ cm}$  と僅かに悪化する一方, 沈下速度が大きい地域で  $1.20\text{ cm}$  と僅かに改善している.

### 3.2. 電子基準点データと干渉 SAR 時系列解析データの誤差分散の比の空間分布

重み付けに用いた誤差分散の比 $\sigma_{CORS}^2/\sigma_{SAR}^2$ の空間分布を図-5 に示す。(2)のパラメータにおいては、両者の重みは一定で $\sigma_{CORS}^2/\sigma_{SAR}^2 = 0.4/0.25 = 1.6$ と全体的に僅かに干渉 SAR 時系列解析データの重みの方が大きくなっている。

(3)のパラメータにおいては、電子基準点との距離に依存する空間補間誤差を考慮して重み付けを行っており、電子基準点のごく近傍では電子基準点データの重みの方が大きく、それ以外では干渉 SAR 時系列解析データの重みの方が大きくなっている。これは、電子基準点データの観測点上では精度良く変動量を得られるが空間分解能は観測点分布に依存する性質や、干渉 SAR の面的に空間分解能の高い変動量を得ることができる性質をよく反映できていると言える。

(4)のパラメータにおいては、(3)に加えて干渉 SAR 時系列解析データの誤差の空間分布を取り込んで電子基準点データとの重み付けを行った。図-5(4)より誤差分布は全体的に干渉 SAR の重みが $\sigma_{CORS}^2/\sigma_{SAR}^2 > 10$ とかなり大きく推定されている地域も多いことが分かる。これは、電子基準点データが空間補間誤差を評価しているのに対して、干渉 SAR 時系列解析データが観測誤差を評価していることから両者の物理的性質が異なっていると考えられる。そのため、(3)と比較して全体的に水準測量とパラメータによる推定変動量の整合性が悪化した可能性がある。また、沈下速度が大きい地域については、干渉 SAR の重みが大きくなることで、水準測量による局所的な沈下量の再現性が高くなったと考えられる。

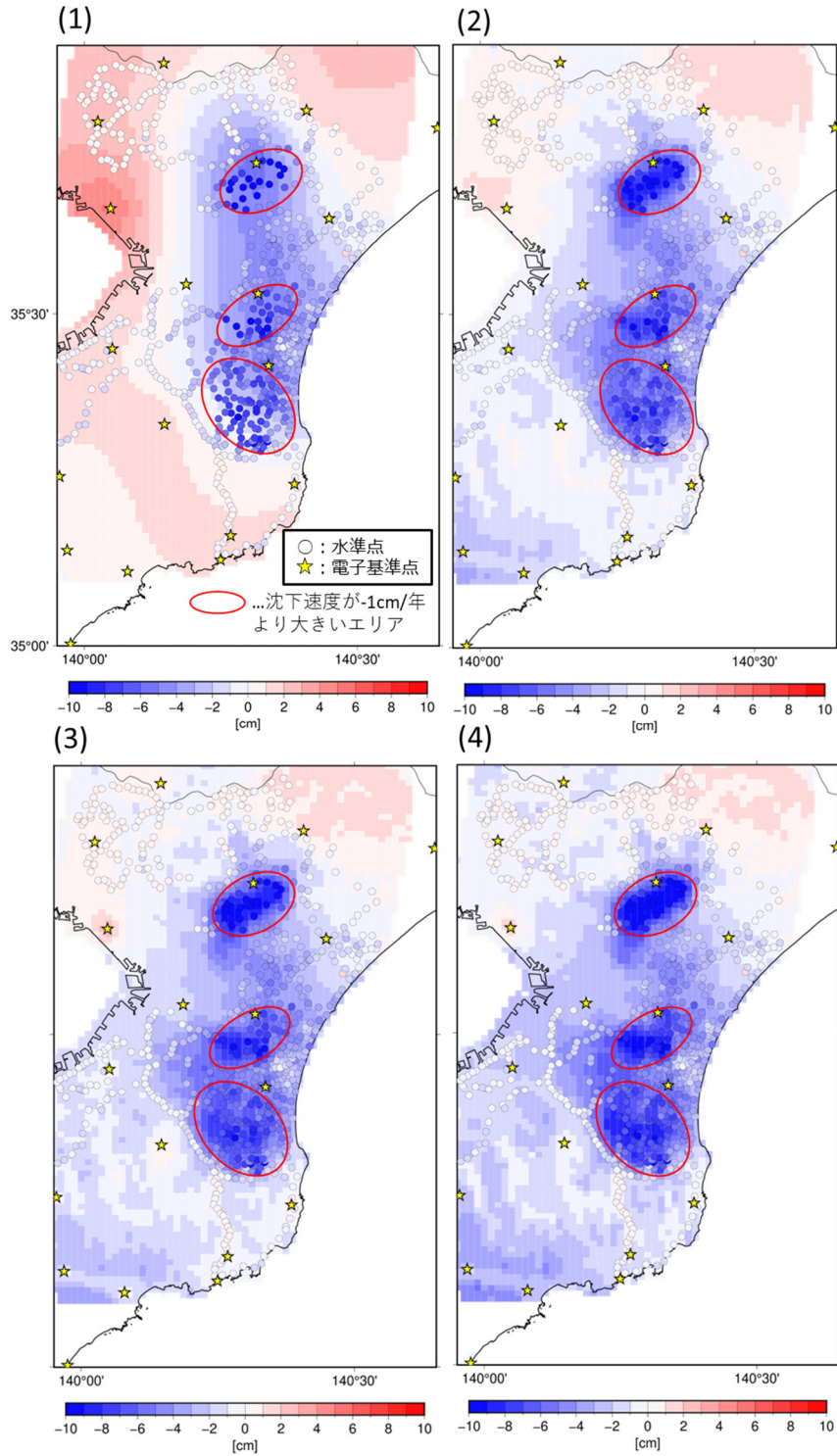


図-2 (1)~(4)の各手法で作成した地殻変動補正パラメータの変動量分布と水準点の変動量分布。丸印と星印はそれぞれ水準点と電子基準点の位置を示している。変動量は青色で沈降を、赤色で隆起をそれぞれ示している。赤の楕円で囲まれた地域は干渉 SAR 時系列解析による沈下速度が 1 cm/年よりも大きい地域を示す。

### 水準測量 - 推定変動量

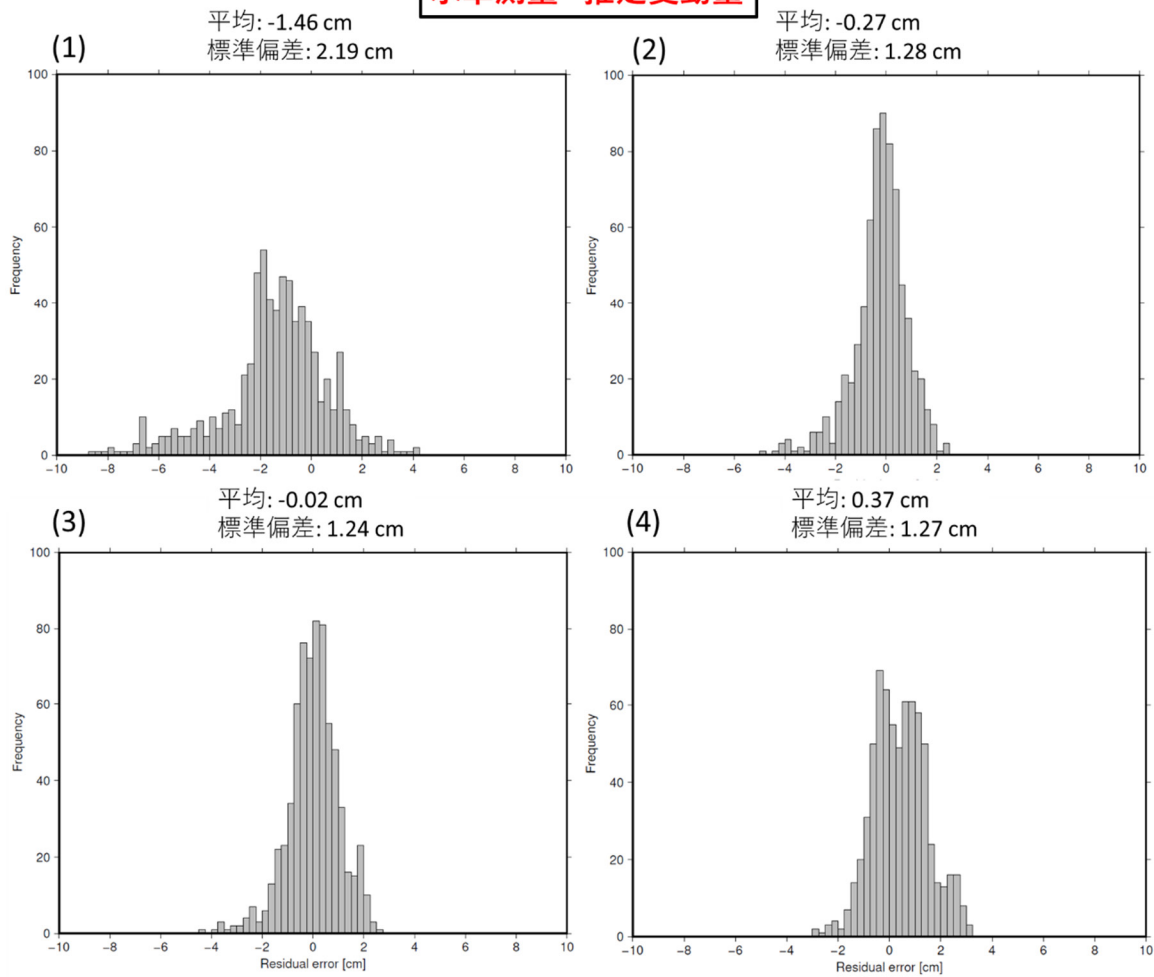


図-3 (1)~(4)の各手法で作成した地殻変動補正パラメータにより推定された変動量と水準測量による変動量の較差のヒストグラム。

### 水準測量と各推定変動量の差のRMS (cm)

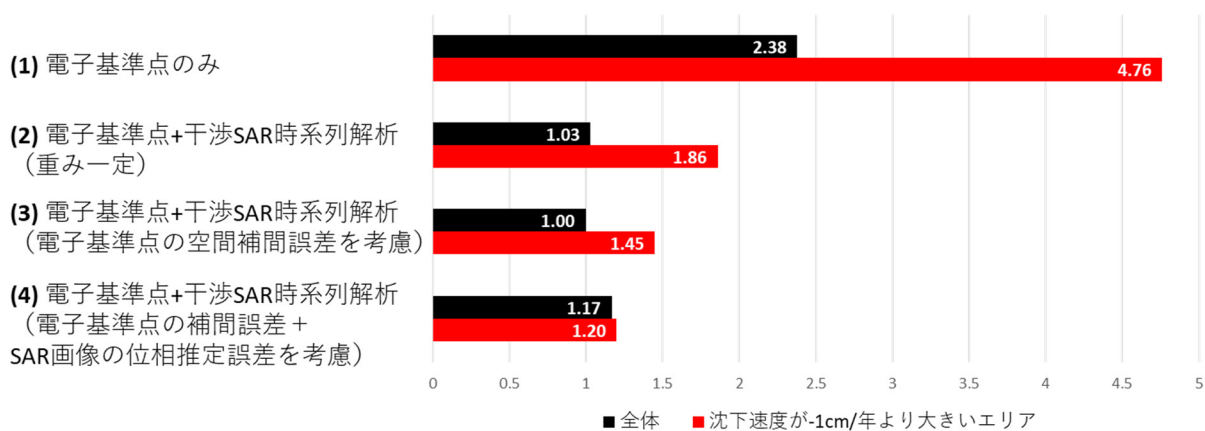


図-4 (1)~(4)の各手法で作成した地殻変動補正パラメータにより推定された変動量と水準測量による変動量の較差のRMS. 黒色のバーは検証エリア全体でのRMSを示し、赤いバーは沈降速度が1 cm/年よりも大きい地域でのRMSを示す。

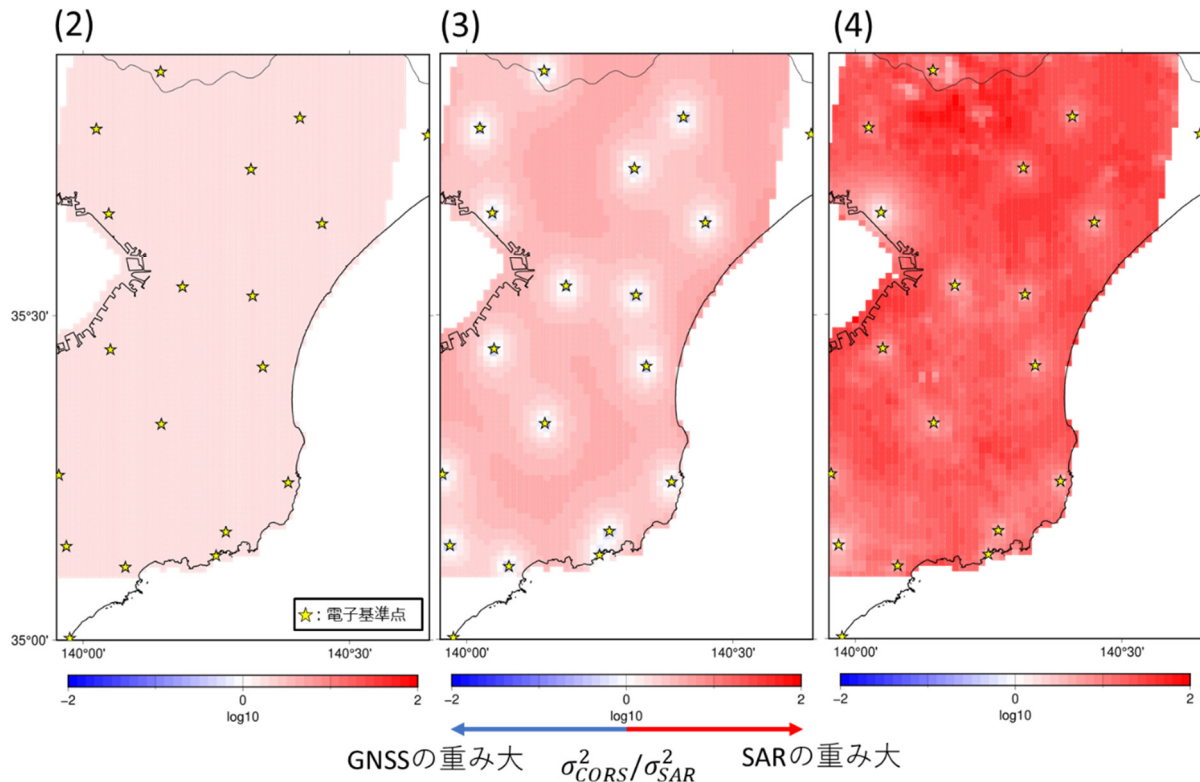


図-5 電子基準点データと干渉 SAR 時系列解析データの誤差分散の比の空間分布．スケールは常用対数で換算しており，赤色は干渉 SAR 時系列解析データの重みの方が大きく，青色は電子基準点データの重みの方が大きいことを示している．

#### 4. 結論

本研究では，千葉県房総半島の地盤沈下地域を対象として電子基準点データと干渉 SAR 時系列解析を組み合わせた地殻変動補正パラメータを構築し，水準測量データから得られる変動量との比較を行った．検証に当たっては，(1)電子基準点データのみで構築したパラメータ，(2)電子基準点データと干渉 SAR 時系列解析データを重み一定でデータ同化したパラメータ，(3)電子基準点の空間補間誤差を考慮し電子基準点データと干渉 SAR 時系列解析データとの重み付けをしたパラメータ及び(4)(3)に加えて干渉 SAR 時系列解析データの誤差の空間分布を考慮して重み付けしたパラメータの四つを作成し比較検討した．

結果としては，まず電子基準点データのみを用いた(1)と電子基準点データと干渉 SAR 時系列解析データを組み合わせた(2)，(3)及び(4)を比較すると，干渉 SAR 時系列解析データを組み合わせた場合は水準測量データから得られる変動量との較差が小さくなり，電子基準点のみの場合と比して半分以下となっている．本研究では，約 1km 間隔のグリッドデータを作成しそのグリッドデータから水準点上の変動量を推定した．グリッド化せずに水準点上での変動を直接推定した従来の検証と同様に，干渉 SAR 時系列解析データを用いることで精度が向上することが分かった．また，対象地域全域では(3)が水準測量との較差の RMS が 1.00 cm と最も小さく，地盤沈下速度が 1 cm/年を超える地域では(4)が RMS 1.20 cm と較差の最も小さいパラメータとなった．(4)では干渉 SAR 時系列解析の誤差の空間分布を考慮しているが，地域全域では水準測量との較差が逆に大きくなる．これは，電子基準点データと干渉 SAR 時系列解析データの誤差分散が異なる性質を持っており，適切に両者を重み付けできていないためと考えられる．電子基準点データについては，各電子基準点間での観測誤差の違いは特に考

慮しておらず、観測値の誤差情報を重みとして取り込む重み付きクリギングによる空間内挿手法の実装が有効と考えられる。

干渉 SAR 時系列解析データを取り込んだ地殻変動補正パラメータの実装に向けては、干渉 SAR 時系列解析データを取り込むべき地域の検討や、取り込まない地域との境界部に生じるパラメータの補正量の段差の処理などを検討する必要がある。また、精度検証には 2025 年度に導入予定である GNSS 標高測量を用いた観測により、標高体系との整合性についてより効果的な評価が可能になると考えられる。

## 謝辞

水準測量データは、千葉県環境生活部水質保全課に提供いただきました。また、「だいち 2 号」の原初データは、国土地理院と宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の間の協定に基づき提供されました。「だいち 2 号」の原初データの所有権は、JAXA にあります。

## 参考文献

- 渥美尚大, 臼井和絵, 栗原啓伍, 河村祐 (2021) : 除雪車運転支援システムの開発～準天頂衛星システムを活用した作業ガイダンスモニター～, 北海道の雪氷, 40, 49–52.
- 淡路敏之, 蒲地政文, 池田元美, 石川洋一 (2020) : データ同化 観測・実験とモデルを融合するイノベーション, 京都大学学術出版会, 284 p.
- Fujiwara, S., Nishimura, T., Murakami, M., Nakagawa, H., Tobita, M., and Rosen, P. A. (2000): 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry, *Geophysical Research Letters*, 27, 2049–2052. doi: 10.1029/1999gl011291
- 深谷俊太郎, 高木悠, 吉川忠男, 中久喜智一, マービット京湖, 三木原香乃, 古屋智秋, 小林知勝 (2024) : 地殻変動補正パラメータの高度化の調査・検討 (第 5 年次), 令和 5 年度調査研究年報, 16–21.
- 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. doi: 10.57499/JOURNAL\_130\_12
- 国土地理院 (2020) : 定常時地殻変動補正サイト POS2JGD, <https://positions.gsi.go.jp/cdcs/> (accessed 16 Jun. 2025).
- Shimada, S., Aichi, M., Harada, T., and Tokunaga, T. (2021): Time Variations of the Vertical Component in Some of Japanese GEONET GNSS Sites, *International Association of Geodesy Symposia*, 152, 181–188. doi: 10.1007/1345\_2021\_135
- 高木悠, 石本正芳, 小林知勝, 宗包浩志 (2024) : 衛星 SAR 解析結果を用いた座標・標高補正パラメータ作成の試み, 国土地理院時報, 138, 75–81. doi: 10.57499/JOURNAL\_138\_11
- 山下達也, 深谷俊太郎, 上芝晴香, 中村見奈子, マービット京湖, 三木原香乃, 古屋智秋, 小林知勝 (2023) : 地殻変動補正パラメータの高度化の調査・検討 (第 4 年次), 令和 4 年度調査研究年報, 12–19.