

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 Attempt to Estimate Model Parameters for Corrections of Co-seismic Deformation using SAR data

測地部 高木悠・石本正芳

Geodetic Department TAKAGI Yu, ISHIMOTO Masayoshi

地理地殻活動研究センター 小林知勝・宗包浩志

Geography and Crustal Dynamics Research Center

KOBAYASHI Tomokazu, MUNEKANE Hiroshi

要 旨

国土地理院では、地震発生時など、測量成果の改定が必要となった際に、改定量をパラメータ化した座標の補正パラメータと標高の補正パラメータを作成している。これらの補正パラメータの作成には、これまで電子基準点に加え、現地測量による三角点等の測量成果の改定量を用いてきた。しかしながら、地震発生後から現地の測量作業が完了するまでには、おおむね5か月程度を要するため、これらのパラメータの作成と提供にも同程度の時間を要することが課題であった。一方で、衛星 SAR の解析や電子基準点等によって観測された変動から推定される震源断層モデルを用いた計算によって、三角点等における GNSS の現地測量に比べて、より迅速に地震時の変動分布が得られている。そこで、本稿では、現地における GNSS 測量以外のデータである衛星 SAR の解析結果、もしくは震源断層モデルを用いて、令和6年能登半島地震の座標の補正パラメータと標高の補正パラメータを作成し、いち早くこれらのパラメータを提供することが可能であるかを検証した。その結果、上下成分に関しては、衛星 SAR から作成した補正パラメータが電子基準点や三角点の測量成果の改定量と良く整合していることが分かった。この結果は、平滑化に用いるフィルタを多少変更しても結果に大きな差が生じないことから、安定した結果が得られたと考えられる。一方で、水平成分に関しては、今回、衛星 SAR から作成した補正パラメータは、測量成果の改定量とは十分に整合しなかった。また、震源断層モデルから作成した補正パラメータについては、水平・上下成分ともに、電子基準点とは整合的であったものの、三角点とは大きくずれてしまう場合があった。これらのことから、令和6年能登半島地震に関しては、上下方向の補正パラメータ作成に衛星 SAR が有効であった可能性がある。

1. はじめに

国土地理院は、これまで地震に伴う地殻変動により測量成果の修正が必要となった際、現地での測量作業によって測量成果を改定すると同時に、必要に

応じてこれらの結果から水平方向の座標の改定量を表した座標の補正パラメータや高さ方向の改定量を表した標高の補正パラメータ（両者をあわせて以下「補正パラメータ」という。）を作成し、提供してきた（例えば、檜山ほか、2011；大滝ほか、2016）。

補正パラメータは、現地における測量作業の結果を踏まえて作成されるため、作成・提供には、地震発生後約5か月程度が必要である。しかし、本震後の地震活動に伴う地殻変動の進行の程度には依存するが、早期の復旧・復興には、地震後の改定成果をできるだけ素早く提供することが好ましい。令和6年（2024年）1月1日に発生した気象庁マグニチュード(M_j)7.6の令和6年能登半島地震（以下「能登半島地震」という。）では、上記の観点から、電子基準点の測量成果の改定から約1週間後には、測量成果の公表が停止された地域のうち、地震時の変動が比較的小さかった地域において補正パラメータが提供された（岩下ほか、2024）。しかしながら、変動の大きかった能登半島では、電子基準点の測量成果の改定のみでは、補正パラメータを構築するには不十分であり、現地における三角点等での GNSS 観測の結果を受けて、改めて補正パラメータが作成・提供された。これらの提供までには、これまでと同様、地震発生から6か月程度の期間を要した。

一方で、国土地理院では、地震前後における衛星 SAR のデータを解析し、地震に伴う地殻変動を面的に把握してきた（例えば、山中ほか、2011；上芝ほか、2016）。近年では、SAR の結果を測量に利用することも可能になっている（国土地理院、2024a）。平成28年（2016年）熊本地震（以下「熊本地震」という。）や2016年鳥取県中部の地震（以下「鳥取県中部地震」という。）では、衛星 SAR の3次元解析が GNSS 連続観測点と、東西もしくは上下成分で約1 cm、南北成分で約4 cmの標準偏差で整合するという結果が得られている（Morishita & Kobayashi, 2022）。このように、面的に地震時の変動を把握できるという特徴を持つ衛星 SAR の解析結果を用いることで、現地における GNSS 観測の結果を待たずに、いち早く補正パラメータを構築・提供できる可能性がある。

また、国土地理院では、震源断層モデルの推定も行ってきた(例えば、水藤ほか, 2011; 矢来ほか, 2016). 震源断層モデルもまた、一度推定することができれば、変位を面的に推定することができる。また、干渉 SAR は、他の成分に比べて南北成分の精度が落ちるのに対して (Morishita & Kobayashi, 2022), 震源断層モデルの推定には主に GNSS データが用いられるため、推定される変位の南北成分に関しては衛星 SAR よりも精度が良いことが期待される。実際、電子基準点の時系列の RMS は、東西成分、南北成分ともに 2.3 mm であり (Takamatsu et al., 2023), 東西成分と南北成分の間に差がない。

本稿では、より迅速な補正パラメータの作成・提供に向け、GNSS の現地測量を用いずに有効な補正パラメータを作成可能であることを検証するため、衛星 SAR 解析結果もしくは震源断層モデルを使用して、能登半島地震の補正パラメータの作成を試みたので、その結果について述べる。

2. SAR 及び震源断層モデルを用いた座標・標高補正パラメータの試作

補正パラメータは、能登半島地震による測量成果の公表停止地域のうち、2月15日時点で三角点の測量成果の改定及び補正パラメータの提供が行われなかった能登半島地域(岩下ほか(2024))における「範囲2」を対象とし、衛星 SAR の 3次元解析 (Tobita et al., 2001; Morishita et al., 2016) の結果を用いたもの及び震源断層モデルから計算された変位を用いたものを作成した。

衛星 SAR の解析には、表-1 に示すとおり、2024年1月1日から15日までに実施された8観測のうち、7観測を用いた(石本ほか, 2024)。衛星 SAR の解析結果から、補正パラメータを作成する際には、解析結果に誤差や非常に局所的な変動が含まれる可能性があることから、平滑化処理を行った。具体的には、緯度 B_i 、経度 L_i における緯度方向のパラメータ $p_B(B_i, L_i)$ を、

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

のように計算するメディアンフィルタと、

$$p_B(B_i, L_i) = \frac{\sum_j dB(B_j, L_j) w_{ij}}{\sum_j w_{ij}}, w_{ij} = \exp\left(-\frac{d_{ij}^2}{2\sigma^2}\right),$$

$$\text{for } \{dB(B_j, L_j) \mid |B_i - B_j| < XB, |L_i - L_j| < XL\}$$

と計算するガウシアンフィルタを使用し、結果を比較した。ここで、 $dB(B_j, L_j)$ は衛星 SAR 解析による、緯度 B_j 、経度 L_j における緯度変化を表し、 d_{ij} は、点 (B_i, L_i) と点 (B_j, L_j) との間の距離を表す。また、 XB と

XL はフィルタをかける範囲、 σ はガウシアンフィルタの減衰定数である。この減衰定数が大きいほど、より強い平滑化処理を行っていることを意味する。これらの選び方を表-2に示す。経度方向及び上下方向の補正パラメータの作成方法も同様である。以下

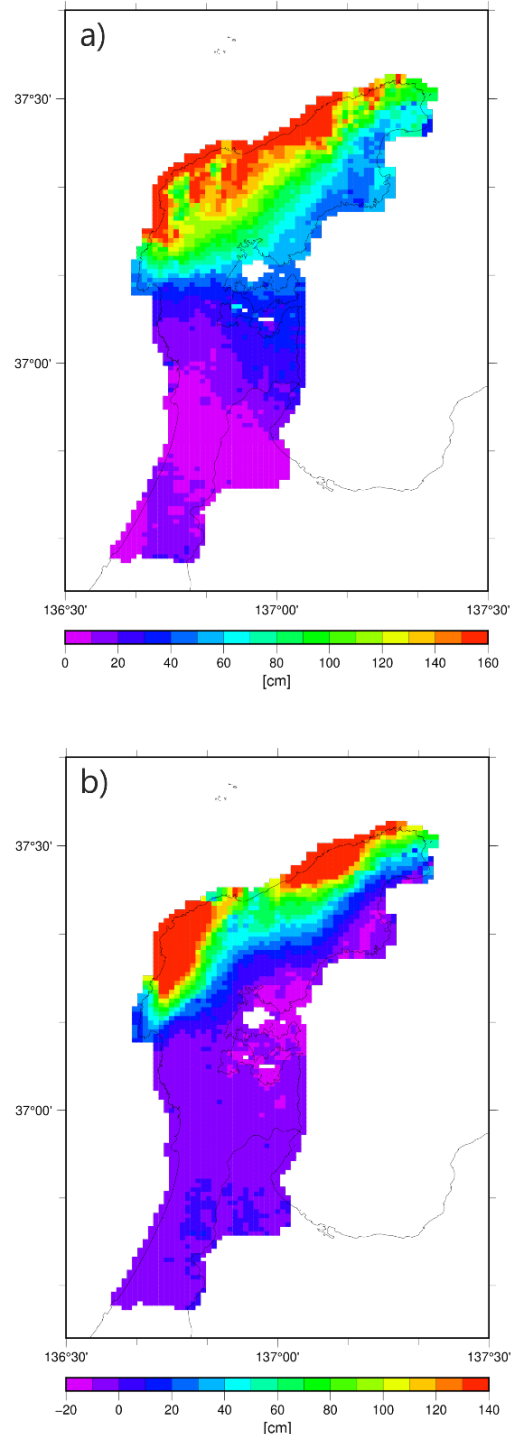


図-1 衛星 SAR の 3次元解析結果を用いて構築した座標の補正パラメータ (S_M) の大きさ (a) と標高の補正パラメータ (b)。

では、メディアンフィルタを用いたパラメータを「パラメータ S_M 」といい、ガウシアンフィルタを用いたパラメータは、例えば $\sigma = 100$ m としたパラメータを「パラメータ S_{100} 」のように「パラメータ S_σ 」と表す。作成したパラメータのうち、パラメータ S_M を図-1 に示す。

震源断層モデルは、電子基準点及び衛星 SAR のデータから得られた地殻変動を元に決定された断層面（国土地理院，2024b）を元に、地震直後に測量が実施された三角点と公共基準点 7 点の変位を加えて、すべり分布を再推定したものをを用いた。震源断層モデルから補正パラメータを作成する際には、平滑化処理は行わず、震源断層モデルから推定される変位をそのまま補正パラメータとした。震源断層モデルから構築した補正パラメータを以下「パラメータ F」という。

表-1 衛星 SAR の 3 次元解析に用いたデータ。

1 回目観測 (年-月-日)	2 回目観測 (年-月-日)	衛星 進行 方向	電波 照射 方向	入射角 (中心)
2022-09-26	2024-01-01	北行	左	32.4°
2023-06-06	2024-01-02	南行	左	40.1°
2023-12-06	2024-01-03	北行	右	43.0°
2021-10-19	2024-01-09	南行	右	45.8°
2023-11-03	2024-01-12	北行	右	36.2°
2023-12-31	2024-01-14	南行	右	38.5°
2022-06-06	2024-01-15	北行	左	36.3°

表-2 衛星 SAR から作成したパラメータの名称と、用いたパラメータの値。

パラメータ名	フィルタの 種類	$DX,$ DB^*	σ
パラメータ S_M	メディアン	0.5	—
パラメータ S_{50}	ガウシアン	0.5	50 m
パラメータ S_{200}	ガウシアン	0.5	200 m
パラメータ S_{500}	ガウシアン	1.0	500 m

*格子点間隔の倍数で表す。

3. 試作した補正パラメータの精度検証

三角点の精度に照らし、水平成分 10 cm，上下成分 20 cm を基準として、補正パラメータによる計算値と測量成果の改定量を比較することにより、補正パラメータの精度を検証した。

3.1 電子基準点における成果の改定量との比較

まずは、補正パラメータにより電子基準点及び可搬型 GNSS 連続観測装置 (REGMOS) 設置箇所にお

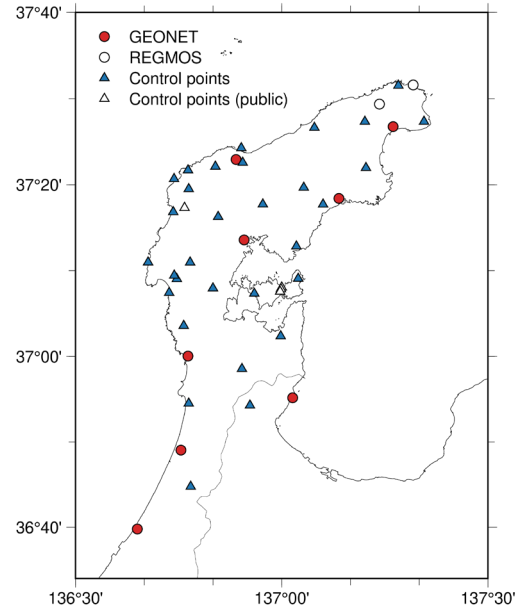


図-2 補正パラメータの精度検証に用いた電子基準点等の配置。赤丸，青丸，緑三角，灰色三角がそれぞれ電子基準点，REGMOS，三角点，公共基準点を表す。

ける測量成果の改定量を計算し、実際の改定量と比較した。用いた電子基準点と REGMOS 点の分布を図-2 に示す。電子基準点の新しい測量成果は、令和 6 年 1 月 4 日から 6 日の F5 解から計算した基線ベクトルを用いて、成果停止範囲の外側の点を固定した網平均計算によって算出されたものである（岩下ほか，2024）。REGMOS 点に関しては、測量成果は算出されていないことから、地震時に観測された変位と比較した。成果改定量と地震時の変位は、計算方法により厳密には異なるが、ここでは地震時の変位をそのまま用いた。補正パラメータによる計算値と、改測結果との差を図-3 に示す。ただし、後に述べるように衛星 SAR から作成した補正パラメータについては、フィルタの種類を変更しても、ほとんど差が生じなかったことから、図-3 ではパラメータ S_M とパラメータ F の結果を示す。この差が小さいほど、補正パラメータが与える改定量が実際の改定量に整合していることを意味している。また、表-3 に差の RMS を示す。

水平成分に関しては、震源断層モデルから作成したパラメータ F は、測量成果の改定量とよく整合していることが分かる（図-3(a)及び(b)）。いずれの点においても差は 10 cm 以内であり、RMS も 4.3 cm であった。ところが、パラメータ S_M は、差が最大で 30 cm を超えており、測量成果とは整合していないことが分かる。RMS も 18.6 cm であり、目標精度の

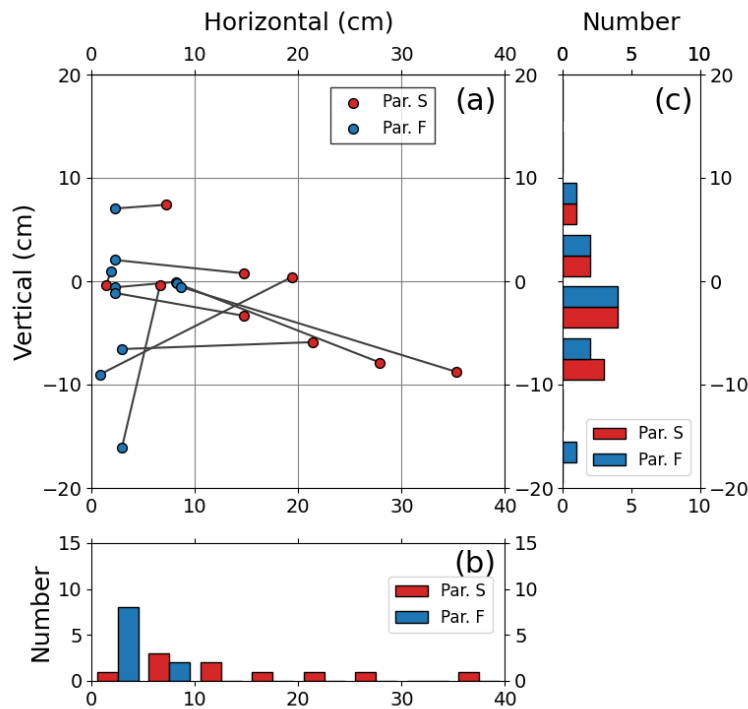


図-3 補正パラメータから計算した電子基準点及び REGMOS における成果改定量と、実際の成果改定量（REGMOS の場合は地震時の変動）との比較。赤色が SAR の解析成分から作成したパラメータ、青色が断層モデルから作成したパラメータの結果を表す。(a)差の散布図。線分で結ばれた点は同一点であることを表す。(b)水平成分の差のヒストグラム。(c)上下成分の差のヒストグラム。

10 cm を大きく超えている。衛星 SAR の解析結果からガウシアンフィルタを用いて作成した他のパラメータも、パラメータ S_M とほぼ同様の結果を与えた。実際に、RMS の間にも大きな差は見られない（表-3）。

上下成分に関しては、パラメータ S_M 、パラメータ F とともに差がおおむね 10 cm 以内であった（図-3(a)及び(c)）。差の RMS を比較すると、パラメータ S_M が 4.9 cm、パラメータ F が 6.6 cm であり、パラメータ S_M の方がパラメータ F に比べ、やや改測結果に整合的であった。上下成分に関しても、衛星 SAR から作成した補正パラメータの間に大きな差は見られなかった（表-3）。

表-3 電子基準点における測量成果の改定量と補正パラメータによる計算値との差の RMS。

パラメータ名	東西 (cm)	南北 (cm)	水平 (cm)	上下 (cm)
パラメータ S_M	15.5	10.3	18.6	4.9
パラメータ S_{50}	15.8	11.1	19.3	4.9
パラメータ S_{200}	15.5	10.2	18.6	5.0
パラメータ S_{500}	15.6	8.7	17.9	5.0
パラメータ F	3.6	2.3	4.3	6.6

3.2 三角点における成果の改定量との比較

次に、現地での GNSS 観測によって測量成果の改定が行われた三角点において、3.1 節と同様に補正パラメータによる計算値を実際の測量成果の改定量と比較した。この時、検証のために取得した公共基準点における結果も含めた。検証に用いた三角点及び公共基準点の分布を図-2 に、パラメータ S_M とパラメータ F の比較結果を図-4 に示す。

三角点での比較においても、衛星 SAR から作成した補正パラメータは、異なるフィルタから作成した補正パラメータの間に顕著な差は見られなかった。RMS でも、パラメータ S_M が若干小さい傾向はあるものの、ほとんど差は見られない（表-4）。一方で、震源断層モデルを用いたパラメータとは差が見られた。

水平成分に関しては、パラメータ S_M 、パラメータ F とともに成果改定量との差が大きい結果となった（図-4(a)及び(b)）。差の RMS もパラメータ S_M が 25.5 cm、パラメータ F が 34.7 cm であり、目標精度の 10 cm を大きく上回る結果となった。ただし、差の分布には異なる傾向が見られる。パラメータ F の RMS は、パラメータ S_M のそれよりも大きい、パラメータ F の方が成果の改定量に整合する点が多い。

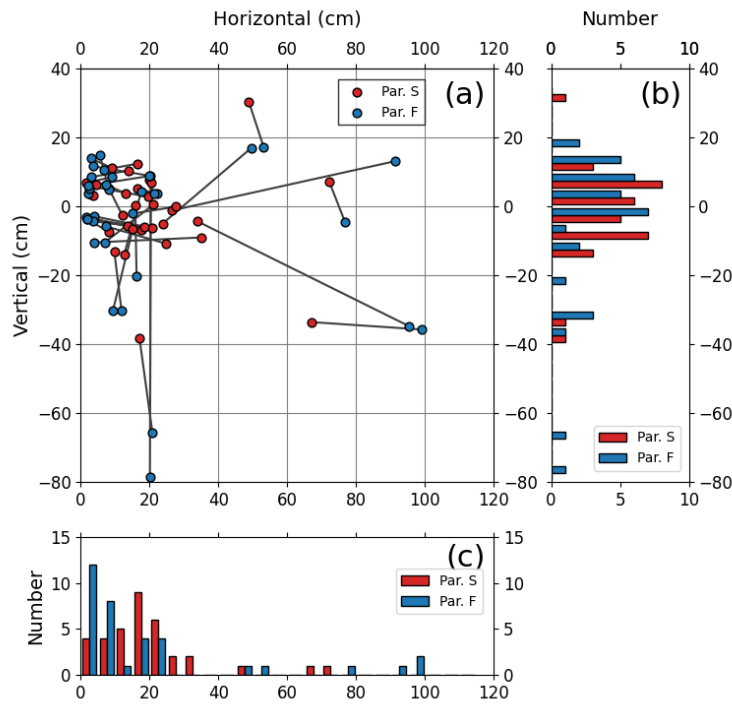


図-4 図-3と同様. ただし, 三角点における測量成果の改定量との比較結果を示している.

実際, 差の中央値と比較すると, パラメータ S が 17.1 cm, パラメータ F が 8.3 cm であった. このことは, 全体的な傾向としては, パラメータ F の方が改測結果と整合しているが, 改定量とずれたときにその差が大きくなり得ること, パラメータ S はパラメータ F に比べて全体的な整合性は低い, 逆に大きくずれてしまうこともないということを示している. これは, 震源断層モデルが, 衛星 SAR で捉えられているような, 水平スケールの小さな変動を再現しきれていないことを示していると考えられる.

上下成分に関しては, パラメータ F の RMS は 22.3 cm であり, 改定量とずれたときにその差が大きくなるという傾向は, 水平成分と同様であった. 一方で, パラメータ S_M では, 3 点を除いて差が 20 cm 以内であり (図-4(c)), 測量成果の改定量とよく整合していた. RMS も 12.2 cm であり, 目標精度に比べて小さい. 上下成分の方が, 水平成分に比べて整合性が良い点は, 電子基準点における比較結果と同様である.

今回の地震では, 衛星 SAR のデータの干渉性が低く, 特に半島北部では, ピクセルオフセット法の結果のみが利用可能であった. Morishita & Kobayashi (2022) では, 衛星 SAR の 3 次元解析で得られた地震時の変位を, GNSS 連続観測点で得られた値と比較しているが, ピクセルオフセット法を用いた場合, 差の標準偏差は, 熊本地震で東西, 南北, 上下それ

ぞれ 6.2 cm, 8.9 cm, 4.1 cm であり, 鳥取県中部地震でそれぞれ 4.2 cm, 3.9 cm, 1.9 cm であった. ピクセルオフセット法を用いた時に, 上下成分の方が, 水平成分に比べて差が小さくなる点は, これらの結果と整合的であった. これは, 衛星 SAR の入射角がやや鉛直方向であり, 水平方向に比べて上下方向に感度が高いためであると考えられる.

一方で, 値に関しては今回の地震のほうが大きい. これは, 今回の地震では, 比較対象点が干渉を得ることができなかった地域にも位置しているのに対して, これらの地震では, 全ての比較対象点で干渉が得られていた (Morishita & Kobayashi, 2022) ことから推測されるように, 今回の地震で得られた衛星 SAR の解析結果は, これらの地震に比べて精度が良くないことを反映していると考えられる.

表-4 三角点及び公共基準点における測量成果の改定量と補正パラメータによる計算値との差の RMS.

パラメータ名	東西 (cm)	南北 (cm)	水平 (cm)	上下 (cm)
パラメータ S _M	17.8	18.3	25.5	12.2
パラメータ S ₅₀	18.0	18.3	25.7	12.7
パラメータ S ₂₀₀	17.9	18.5	25.7	12.5
パラメータ S ₅₀₀	18.8	18.5	26.3	12.6
パラメータ F	23.2	25.8	34.7	22.3

4. 議論

衛星 SAR から作成した補正パラメータの間に顕著な差は見られなかったことは、フィルタやそのパラメータの多少の変更に対して、安定な補正パラメータが得られたことを示している。実際には、沿岸部すなわちデータの境界部において、補正パラメータの値に若干の差が見られたため、これらの領域で現地における観測結果が得られれば、フィルタの優劣を議論できる可能性がある。ただし、今回用いた点の中にも比較的沿岸に近い点は含まれているため、補正パラメータの大勢には影響がないと考えられる。

GNSS 観測による測量成果の改定量との比較からは、水平成分に関しては、RMS で判断した場合、衛星 SAR、震源断層モデルから作成したいずれの補正パラメータも、基準とした 10 cm の精度には達しなかった。一方で、上下成分に関しては、震源断層モデルから作成した補正パラメータが目標精度に達しなかったのに対し、衛星 SAR から作成した補正パラメータは目標とする精度に達していた。このことから、能登半島地震のケースでは、衛星 SAR の解析結果から水平成分、すなわち座標の補正パラメータを構築・提供することは難しいが、標高の補正パラメータであれば、提供できる可能性がある。

今回の地震に関しては、衛星 SAR のデータが十分得られず、また干渉性も良くなかったため、特に半島の北部では、ピクセルオフセットの手法で解析された結果を使わざるを得なかった。その意味で、今回の結果は、たとえ衛星 SAR の結果が芳しくなかった場合であっても、感度の高い上下成分であれば、十分な精度の補正パラメータが得られる可能性があることを示している。十分なデータが得られれば、衛星 SAR のデータを用いて、地震時の変動が水平成分を含めて精度良く求まることが示されている（小林ほか、2022；Morishita & Kobayashi, 2022）ことから、今後だいち 2 号の後継機であるだいち 4 号（ALOS-4）が本格的に運用されるようになると、一度により広範囲のデータ取得が可能になるため、十分なデータを得られる可能性は高まっており、今後も他の地震において同様の検証を引き続き実施することが望まれる。

震源断層モデルについては、推定に用いた電子基準点においては RMS が小さいが、推定に用いていない三角点では、RMS が大きい結果となった。これは、電子基準点を誤差低減のみに用いている衛星 SAR から作成した補正パラメータでは、電子基準点と三角点での差の RMS が同程度であったことと対照的である。このことから、三角点の改測結果も踏まえて震源断層モデルを推定することにより、より改測結果と整合するモデルを構築することは可能であると考えられる。しかしながら、現地の観測結果

を待たなければならないとすると、迅速性の観点からは従来と変わらないため、本稿ではこれ以上考慮しないことにする。ただし、従来の方法によるパラメータの正確性を更に上げるという観点からは、今後も議論の可能性があるかもしれない。

今回、衛星 SAR による水平成分の補正パラメータは、十分な精度に達しなかったが、三角点ほどの精度を必要としない場合、例えば、電子国土基本図の改定や水準点の水平位置の修正などには、利活用の可能性が残っている。また、この補正パラメータを迅速に作成することができれば、現地における測量作業の地域選定にも役に立つ可能性がある。これは、より効率的にリソースを投入することにつながる。

5. まとめ

本稿では、迅速かつ効率的に補正パラメータを作成するという観点から、現地における GNSS 測量に頼ることなく、補正パラメータの作成を試みた。その結果、水平成分に関しては、目標とする精度のパラメータを得ることができなかったが、上下成分に関しては、衛星 SAR の解析結果を用いて目標とする精度に達する補正パラメータが得られた。今回用いた衛星 SAR の結果は、ピクセルオフセット法という計測精度の低い手法による結果であったことから、衛星 SAR に関してより精度の高い解析結果を得ることができれば、水平成分に関しても十分な精度を有する補正パラメータを構築できる可能性はあると考えられる。今後、他の地震について衛星 SAR を用いた補正パラメータが有効であることを検証する必要がある。また、実際に、現地での GNSS 測量成果を用いずに補正パラメータを提供する場合には、事前に現地における測量の結果と比較することはできないため、作成した補正パラメータの精度を示す指標があることが好ましく、今後の検討課題である。

能登半島地震の場合、電子基準点の測量成果の改定は、地震発生から約 1 か月後であったが、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ストラテジが確立すれば、衛星 SAR の解析にはそれほど多くの時間を要しないことから、電子基準点の測量成果の改定に要する期間とほぼ同時期にこれらのパラメータを構築・提供できることが期待される。

謝辞

解析に使用しただいち 2 号のデータは、だいち 2 号に関する国土地理院と JAXA の間の協定及び地震 SAR 解析 WG の活動に基づき提供されました。ここで使用しただいち 2 号の原初データの所有権は、JAXA にあります。

（公開日：令和 6 年 12 月 27 日）

参考文献

- 檜山洋平, 山際敦史, 川原敏雄, 岩田昭雄, 福崎順洋, 東海林靖, 佐藤雄大, 湯通堂亨, 佐々木利行, 重松宏実, 山尾裕美, 犬飼孝明, 大滝三夫, 小門研亮, 栗原忍, 木村勲, 堤隆司, 矢萩智裕, 古屋有希子, 影山勇雄, 川元智司, 山口和典, 辻宏道, 松村正一 (2011): 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に伴う基準点測量成果の改定, 国土地理院時報, 122, 55–78.
- 石本正芳, 服部晃久, 三木原香乃, 小門研亮, 小林知勝 (2024): だいち 2 号で捉えた令和 6 年能登半島地震に伴う地殻変動, 国土地理院時報, 138, 17–24. doi: 10.57499/JOURNAL_138_03
- 岩下知真子, 多田直洋, 高築晶, 山田直輝, 中久喜智一, 井上武久, 田上節雄, 高木悠, 植田勲, 若杉貴浩, 森克浩, 宗包晃子, 高松直史, 齋田宏明, 宮崎隆幸 (2024): 令和 6 年能登半島地震に伴う基準点測量成果の改定, 国土地理院時報, 138, 63–74. doi: 10.57499/JOURNAL_138_10
- 小林知勝, 中川弘之, 古屋智秋, 森下遊, 松尾功二 (2021): 災害に強い位置情報の基盤 (国家座標) 構築のための宇宙測地技術の高度化に関する研究 (第 2 年次), 令和 3 年度調査研究年報, 168–174.
- 国土地理院 (2024a): 衛星 SAR による上下変動測量マニュアル, <https://www.gsi.go.jp/common/000259158.pdf> (Accessed 27 Aug 2024).
- 国土地理院 (2024b): 2024 年 1 月 1 日令和 6 年能登半島地震の震源断層モデル (暫定), <https://www.gsi.go.jp/cais/topic20240101Noto.html> (Accessed 9 Sep. 2024).
- Morishita, Y. Kobayashi, T., and Yarai, H. (2016): Three-dimensional deformation mapping of a dike intrusion event in Sakurajima in 2015 by exploiting the right- and left-looking ALOS-2 InSAR, *Geophys. Res. Lett.*, 43(9), 4197–4204. doi: 10.1002/2016GL068293
- Morishita, Y. and Kobayashi, T. (2022): Three-dimensional deformation and its uncertainty derived by integrating multiple SAR data analysis methods, *Earth Planets Space*, 74, 16. doi: 10.1186/s40623-022-01571-z
- 大滝修, 井上武久, 植田勲, 山下達也, 山口和典, 白井宏樹, 鈴木啓, 三木原香乃 (2016): 熊本地震に伴う基準点成果の改定, 国土地理院時報, 128, 177–187. doi: 10.57499/JOURNAL_128_29
- 水藤尚, 西村卓也, 小沢慎三郎, 小林知勝, 飛田幹男, 今給黎哲郎, 原慎一郎, 矢来博司, 矢萩智裕, 木村久夫, 川元智司 (2011): GEONET による平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に伴う地震時の地殻変動と震源断層モデル, 国土地理院時報, 122, 29–37.
- Takamatsu, N., Muramatsu, H., Abe, S., Hatanaka, Y., Furuya, T., Kakiage, Y., Ohashi, K., Kato, C., Ohno, K. and Kawamoto, S. (2023): New GEONET analysis strategy at GSI: daily coordinates of over 1300 GNSS CORS in Japan throughout the last quarter century, *Earth Planets Space*, 75(1), 49. doi: 10.1186/s40623-023-01787-7
- Tobita, M., Murakami, M., Nakagawa, H., Yarai, H., Fujiwara, S., and Rosen, P. A. (2001): 3-D surface deformation of the 2000 Usu Eruption measured by matching of SAR images, *Geophys. Res. Lett.*, 28(22), 4291–4294. doi: 10.1029/2001GL013329
- 上芝晴香, 三浦優司, 宮原伐折羅, 仲井博之, 本田昌樹, 攪上泰亮, 山下達也, 矢来博司, 小林知勝, 森下遊 (2016): だいち 2 号 SAR 干渉解析による熊本地震に伴う地殻変動の検出, 国土地理院時報, 128, 139–146. doi: 10.57499/JOURNAL_128_25
- 矢来博司, 小林知勝, 森下遊, 藤原智, 檜山洋平, 川元智司, 上芝晴香, 三浦優司, 宮原伐折羅 (2016): 熊本地震に伴う地殻変動から推定された震源断層モデル, 国土地理院時報, 128, 169–176. doi: 10.57499/JOURNAL_128_28
- 山中雅之, 野口優子, 鈴木啓, 宮原伐折羅, 石原操, 小林知勝, 飛田幹男 (2011): 衛星合成開口レーダーを用いた平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動の検出, 国土地理院時報, 122, 47–54.