

電子基準点データ等による水準点の標高変動補正の検証（第 6 年次）

実施期間	平成 28 年度～令和 3 年度
測地部測地基準課	山下 達也 田中 もも マービット 京湖 三木原 香乃
測地部宇宙測地課	

1. はじめに

国土地理院は、これまで国の高さの基準を専ら水準測量で維持・管理してきた。水準測量は最も高精度な観測方法である一方、大規模地震発生時にその影響域で集中的に水準測量を実施したとしても、変動の把握と標高の改定に数ヶ月以上の時間を要することが課題である。そこで測地基準課では、電子基準点と ALOS-2（だいち 2 号）による InSAR（干渉 SAR）のデータを活用することで、迅速かつ効率的に鉛直変位量の空間分布を把握し、水準測量実施域の制約などの判断材料として活用する手法について検証を行ってきた（例えば山下ほか、2021）。

山下ほか（2021）では、平成 30 年北海道胆振東部地震（以下「胆振東部地震」という。）の発生域における地震時変動及び地震間変動（地震と地震の間に継続的に進む地殻変動）を対象として、2 回の水準測量で得られた変位量（以下「水準変位量」という。）と、電子基準点又は InSAR から推定した変位量（以下「推定変位量」という。）を比較した。その結果、以下の 2 つのことが分かった。第一に、電子基準点はその配点間隔よりも長い波長の変動成分を把握するのに適していることが分かった。第二に、さまざまな波長の成分が存在する変動場の下で、地震時変動（特に内陸型地震）を検出する場合には電子基準点と 3 次元 InSAR の組み合わせが、地震間変動の場合には電子基準点と InSAR 時系列解析の組み合わせがそれぞれ有効であることが分かった。しかし、胆振東部地震の発生域の水準測量データには地震時変動と地震間変動の両方が含まれており、これらを分離することが難しい。そのため、電子基準点と InSAR 時系列解析の最適なデータ同化方法を検討していく上では、地震時変動を含まない水準測量のデータで検証することが望ましい。

そこで本年度は、利根川中流地区の 2014 年と 2020 年の水準測量データを用いて検証を実施した。同地区を検証対象に選定した理由は以下の通りである。

- (1) 同地区では ALOS-2 の運用開始以降に 2 回以上の観測が行われており、かつ、この期間内には顕著な地震時変動が発生していない。
- (2) 同地区の変動成分には電子基準点の配点間隔よりも長い波長成分だけでなく、短い波長成分も含まれている。同地区ではいずれの水準点においても沈下しており（図-1）、その平均値と標準偏差はそれぞれ -2.62cm、0.77cm となっている。さらに、平均値からのずれが標準偏差（ 1σ ）を超える点が複数点在し（図-1 の緑丸の楕円で囲んだ点）、有意な振幅を持つ短波長成分が存在していることを示唆している。

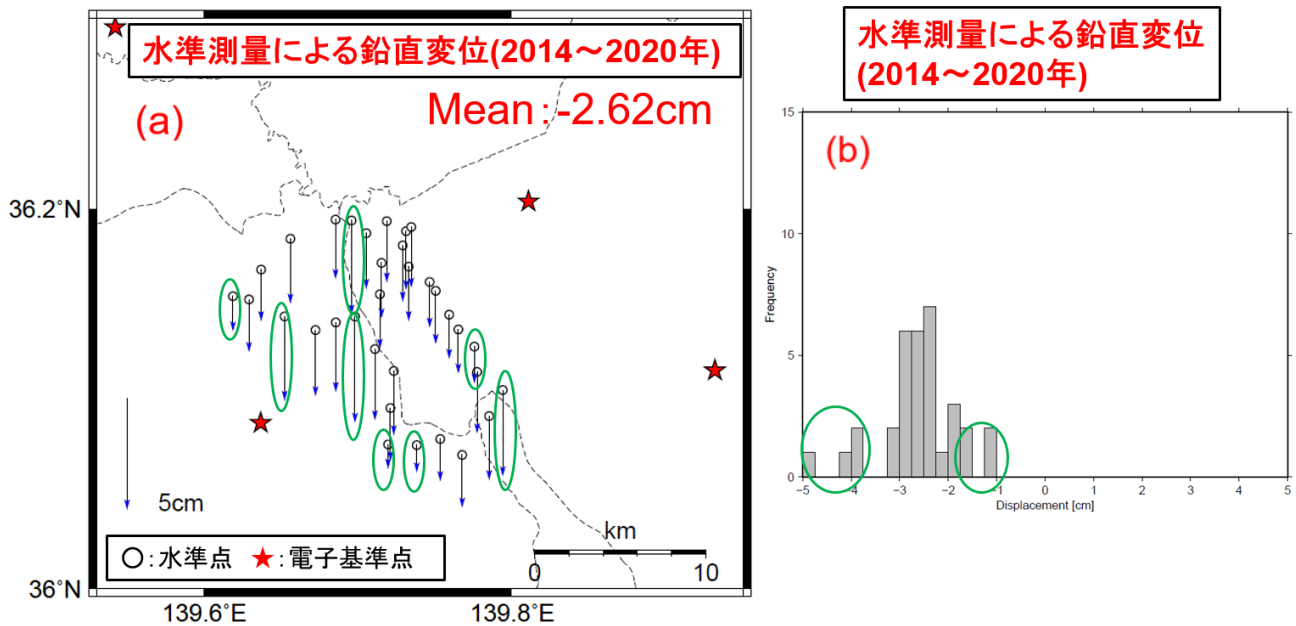


図-1 (a) 利根川中流地区において 2014 年と 2020 年に実施された水準測量で得られた変位量をベクトル（青矢印）で示したもの。青色の矢印が変位量を、白抜き丸印と赤色の星印はそれぞれ水準点と電子基準点を表す。図中の緑色の楕円で囲んだ点は、鉛直変位の平均値からの較差が 1σ 以上の点を示している。(b) 水準測量で得られた変位量をヒストグラムで示したもの。

2. 研究内容

2.1 手法

本研究では、電子基準点と InSAR 時系列解析のデータからそれぞれ以下の 3 種類の推定変位量のグリッドデータを生成した。

(1) 電子基準点から求めたグリッドデータ

電子基準点の日々の座標値 (F5 解) に対して定常変動（一次関数）、余効変動（対数）、年周変動（三角関数）を考慮した関数フィッティングを行い、各電子基準点において 2 回の水準測量の間に生じた推定変位量を求める。さらにクリギング法による空間補間を行い、5km 間隔のグリッドデータを作成する。

(2) SBAS 法で求めたグリッドデータ

2014 年～2020 年に ALOS-2 によって当該地域で撮影された北行右観測の 24 枚 89 ペアの画像に、InSAR 時系列解析の一手法である SBAS 法 (Berardino et al., 2002) を適用し、各ピクセルでの衛星視線方向の変動速度（以下「LOS 変動速度」という。）を推定する。水平変動の空間スケールが電子基準点の配点間隔よりも大きいと仮定し、LOS 変動速度から電子基準点から推定した水平変動を差し引き、鉛直変動速度を推定する。さらに鉛直変動速度に経過時間を乗じて、推定変位量のグリッドデータを作成する。グリッド間隔は 50m とした。

(3) SBAS 法と 2.5 次元解析 (Fujiwara et al., 2000) で求めたグリッドデータ

(2) で用いた ALOS-2 の北行右観測の画像と同様、南行右観測の 37 枚 216 ペアの画像に対しても SBAS 法を適用して LOS 変動速度を求める。南行右観測の LOS 変動速度と、(2) で求めた北行右観測の LOS 変動速度に対して 2.5 次元解析を適用して準上下方向の変動速度を導出する。準上下方向の変動速度に水平変動の寄与は含まれないと仮定して上下方向の変動速度に換算した後、経過時間を乗じ

て、推定変位量のグリッドデータを作成する。グリッド間隔は（2）と同様 50m とした。

各水準点における変位量の最適な推定値は、次の手順で算出した。

- (A) 上記 3 種類のグリッドデータを下記の Case 1～3 のように組み合わせ、それぞれの場合について変位量の暫定値を算出する。

Case 1：電子基準点データのみ

Case 2：電子基準点データと SBAS InSAR のデータ

Case 3：電子基準点データと SBAS InSAR の 2.5 次元解析データ

Case 2 と Case 3 では、最小分散推定法（例えば淡路ほか，2020）によりデータ同化を行った。

例えば Case 3 の場合、電子基準点から求めた変位量とその誤差分散をそれぞれ $\Delta\hat{H}_{CORS}$ 、 σ_{CORS}^2 とし、SBAS 法と 2.5 次元解析で求めた変位量とその誤差分散をそれぞれ $\Delta\hat{H}_{SBAS-2.5D}$ 、 $\sigma_{SBAS-2.5D}^2$ とすると、変位量の暫定値 $\Delta\hat{H}$ は以下のように表される。

$$\Delta\hat{H} = \frac{1}{(\sigma_{CORS}^2/\sigma_{SBAS-2.5D}^2) + 1} \Delta\hat{H}_{CORS} + \frac{(\sigma_{CORS}^2/\sigma_{SBAS-2.5D}^2)}{(\sigma_{CORS}^2/\sigma_{SBAS-2.5D}^2) + 1} \Delta\hat{H}_{SBAS-2.5D}$$

ここで 2 つのグリッドデータの誤差分散の比 $\sigma_{CORS}^2/\sigma_{SBAS-2.5D}^2$ を与える必要がある。今回はいくつかの値を試行的に与え、水準測量で得られた変位量と推定変位量の較差の RMS が最小となる値を選択した。Case 2 については $\sigma_{CORS}^2/\sigma_{SBAS}^2 = 0.4/0.5 = 0.8$ (σ_{SBAS}^2 は SBAS 法で推定した変位量の誤差分散)、Case 3 については $\sigma_{CORS}^2/\sigma_{SBAS-2.5D}^2 = 0.4/0.25 = 1.6$ とした。

- (B) 1 回目の水準測量で得られた観測比高と各点の変位量の暫定値から、2 回目の水準測量を実施した時点での水準点間における推定観測比高を算出する。
- (C) 推定観測比高に対して網平均計算を適用し、各水準点の最尤推定変位量を算出する。

3. 結果

3.1 電子基準点データを用いた場合（Case 1）

図-2 に Case1 における水準変位量と推定変位量の差の空間分布とヒストグラムを示す。各水準点における両者の差の絶対値は、水準変位量（図-1）よりもおおむね小さくなっている。一方、黄色の楕円で囲んだ 6 点では較差が 1cm 以上となっており、較差の最大値は 2.26cm に及ぶ。これらの 6 点は、図-1 に示した短波長の変動が見られる点（緑色の楕円で囲んだ点）とほぼ一致している。統計量を見ると、全水準点の差の RMS は 0.83cm、黄色の楕円で示した 6 点の RMS は 1.80cm となっている。

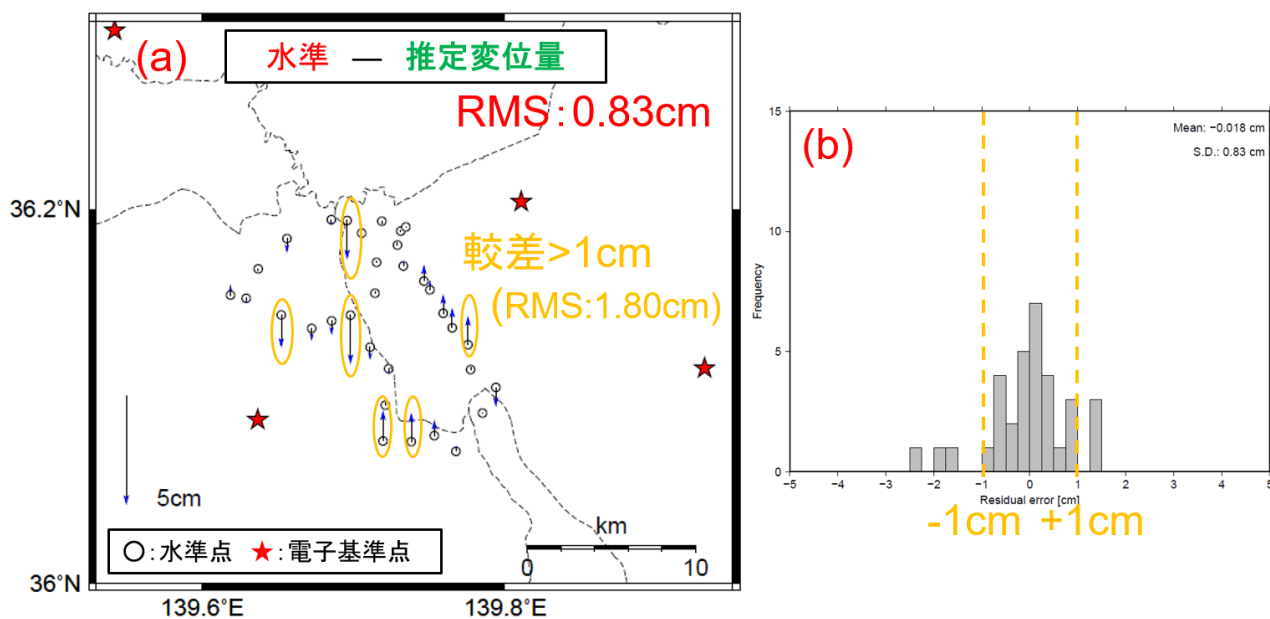


図-2 (a) Case 1 における水準変位量と推定変位量の差をベクトル（青矢印）で示したもの。図中の黄色の楕円で囲んだ点は、水準変位量と推定変位量の差が 1cm 以上の点を示している。(b) 水準変位量と推定変位量の差をヒストグラムで示したもの。

3.2 電子基準点データと SBAS InSAR データを用いた場合（Case 2）

図-3 に Case 2 における水準変位量と推定変位量の差の空間分布とヒストグラムを示す。Case 1 で水準変位量と推定変位量の差が 1cm を超えた 6 点のうち 4 点で較差が改善した。較差は全ての点で 2cm 未満となり、その最大値は 1.52cm となった。統計量を見ると、全水準点の差の RMS は 0.63cm、黄色の楕円で示した 6 点の RMS は 1.27cm となっている。

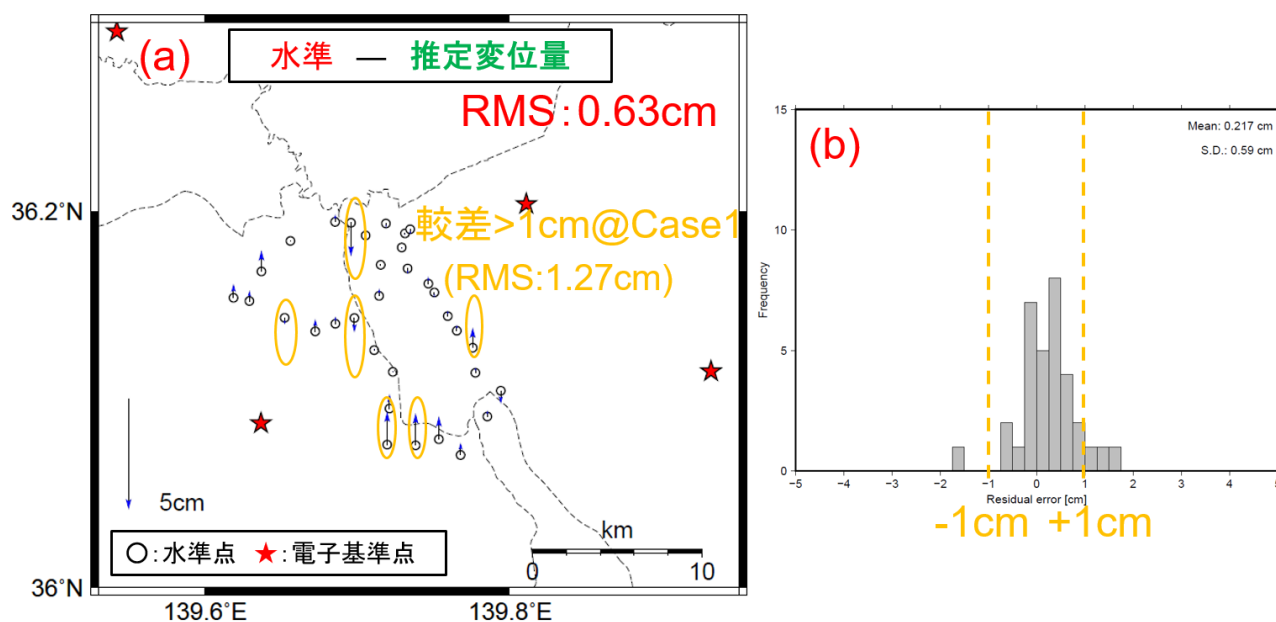


図-3 (a) Case 2 における水準変位量と推定変位量の差をベクトル（青矢印）で示したもの。図中の黄色の楕円で囲んだ点は、Case 1 において水準変位量と推定変位量の差が 1cm 以上の点を示している。(b) 水準変位量と推定変位量の差をヒストグラムで示したもの。

3.3 電子基準点データと SBAS InSAR の 2.5 次元解析データを用いた場合（Case 3）

図-4 に Case 3 における水準変位量と推定変位量の差の空間分布とヒストグラムを示す。Case 1 で水準変位量と推定変位量の差が 1cm を超えた全ての点で較差が改善し、較差の最大値は 1.29cm となった。統計量を見ると、全水準点の差の RMS は 0.53cm、黄色の楕円で示した 6 点の RMS は 0.99cm となり、いずれも 3 つの Case の中で最も小さい値となった。

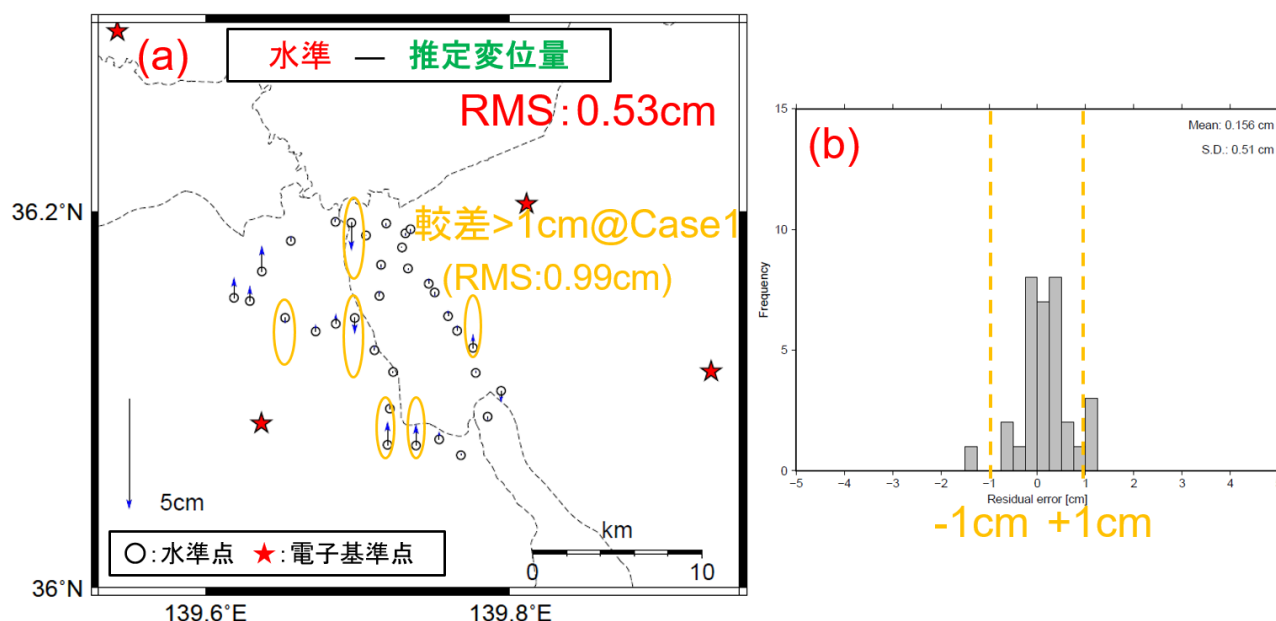


図-4 (a) Case 3 における水準変位量と推定変位量の差をベクトル（青矢印）で示したものの、図中の黄色の楕円で囲んだ点は、Case 1 において水準変位量と推定変位量の差が 1cm 以上の点を示している。(b) 水準変位量と推定変位量の差をヒストグラムで示したものの。

4. 結論

本稿では、利根川中流の地盤沈下を対象として、電子基準点と InSAR 時系列解析を用いた鉛直変位把握の手法の有効性を検証した。検証では電子基準点データのみ (Case 1)、電子基準点データと SBAS InSAR (Case 2)、電子基準点データと SBAS InSAR の 2.5 次元解析データ (Case 3) の 3 通りについて、推定変位量と水準変位量を比較した。その結果、Case 3 において水準変位量と推定変位量の間の差の RMS と最大値が最小となった。このことは、電子基準点の配点間隔よりも短波長の変動成分が存在する場合、電子基準点データだけでなく、InSAR 時系列解析データに 2.5 次元解析を適用したものを組み合わせるのが最も有効であることを示している。

今回の検証では、電子基準点データと InSAR 時系列解析データの同化手法として、最小分散推定法と呼ばれる最も単純な手法を採用した。この手法は計算上の取り扱いが容易である一方、淡路ほか (2020) が指摘するように、各データが持つ誤差分散の評価に細心の注意を払う必要がある。今回採用した誤差分散の値を他の地域や時期に適用しても同等のパフォーマンスを発揮するか、あるいは他の地域や時期でも適用できるようにするために全国に拡張する場合には誤差分散の時空間変化を考慮できるより高度なデータ同化方法を考慮すべきかについては、今後の検討課題としたい。

謝辞

「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

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 pp.

- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. and 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, 2375-2283.
- 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.
- 山下達也, 塩谷俊治, 高木悠, 三木原香乃 (2021) : 電子基準点データによる水準点の標高変動補正の検証 (第 5 年次), 令和 2 年度調査研究年報, 22-28.