

長距離基線を用いた GNSS 相対測位による地殻変動推定

Estimation of crustal movement by relative GNSS positioning with long baseline

16TM0308 中西 慶
Kei NAKANISHI

指導教員 山崎 文雄, 劉 ウェン

SYNOPSIS

In this study, an accurate estimation of the crustal movement in the 2016 Kumamoto earthquake and the 2011 Tohoku-oki earthquake was attempted based on the relative GNSS positioning method with reference to GEONET sites in Japan. Those GEONET sites were located from 50 km to 1,400 km away from the epicenters. Firstly, the efficiency of the relative GNSS positioning method with long baseline to estimate the crustal movement when an earthquake happens was verified. Furthermore, the consideration of the proper baseline distance for relative GNSS positioning with long baseline was conducted. In order to evaluate the variations of permanent displacements in terms of baseline distance, the different stations were set as the base station. The coordinate of the rover station is processed by relative GNSS positioning using these stations. The relationship between the performance of displacements and baseline distance was investigated. As a result, the range of 200-400 km baseline length achieved the most accurate measurement and the displacement distribution in this range was estimated as the rover stations.

1. はじめに

地殻変動の観測・分布推定は、過去の地震のメカニズム解明や評価、今後の地震の予測等に役立つ。さらに、リアルタイムでの地殻変動の分布推定により、津波伝播の迅速な推定・警告への応用が可能である¹⁾。今後も大地震が各地で発生すると疑念される我が国において、正確かつ迅速な地殻変動の分布推定は重要な課題である²⁾。

地殻変動の分布推定には、多種の技術が用いられる。その中でも、国土地理院の GNSS (全球衛星測位) 観測網である GEONET (The GNSS Earth Observation Network System) は、広域かつ定常的に GNSS 測位を行っているため、座標の動きを追うだけで地殻変動量が即座に推定でき、地震直後でも活用が可能という利点がある。さらに、測位方法によっては数 cm オーダーでの測位が可能とされており³⁾、正確な地殻変動量を把握するためにも活用される。

通常、GNSS 相対測位では測位精度を高めるために、基線長はおよそ 10 - 20 km 以内の短距離であることが理想とされている⁴⁾。しかし地震により広範囲で地殻変動が起こった場合を考えると、短距離基線長の相対測位では、地殻変動の影響を受けて精度良く測位を行うことができない。そこで地震時の地殻変動推定のためには、地殻変動の影響を無視できる長距離基線による相対測位が有効になる⁵⁾。

本研究では、長距離基線による GNSS 相対測位を用いて迅速かつ正確な地殻変動量の推定を試みることを目的とする。これにより、早急な避難警告や早期の地震メカニズム解明につながり、災害による被害が小さくなることを期待する。研究対象として、2011 年東北地方太平洋沖地震と 2016 年熊本地震を選定する。

まず、長距離基線による GNSS 相対測位が地殻変動検出に有効であることの確認を行う。次に、長距離基線相対測位を行う際の最適な基線長距離の設定に関する研究があまりされていないことから、基線長距離の長さや測位精度の関係を考察した上で最適な基線長距離の検討を試みる。この最適な基線長距離により、長距離基線による GNSS 相対測位で地殻変動量の推定を行う。

2. 使用データ・ソフトと研究対象

本研究では、GEONET による 30 秒間隔サンプリングデータと IGS の Ultra-rapid 衛星軌道補正データを使用する。また、測位解析のために高須が開発した RTKLIB ver2.4.2 を使用する。

対象とした 2011 年東北地方太平洋沖地震と 2016 年熊本地震では、それぞれにおいて基準局と移動局を選定して相対測位を行い、移動局の変位時間推移を取得し地殻変動量の推定を行う。前者では、移動局に今回の地震で最大地殻変動量を記録した GEONET 牡鹿を選定し、基準局には牡鹿を中心として 50 - 1,400 km の範囲に位置する 30 局の GEONET を無作為に選定した。図 1 には、移動局(青点)および基準局(赤点)の位置および移動局からの距離を示す。

後者では、震源地と隣接し前震と本震の両方で大きな地殻変動を記録した、GEONET 熊本を移動局に選定した。基準局には GEONET 熊本を中心として 50 - 1,200 km の範囲に位置する 113 局の GEONET を無作為に選定した。移動局(青点)および基準局(赤点)の位置および移動局からの距離を図 2 に示す。

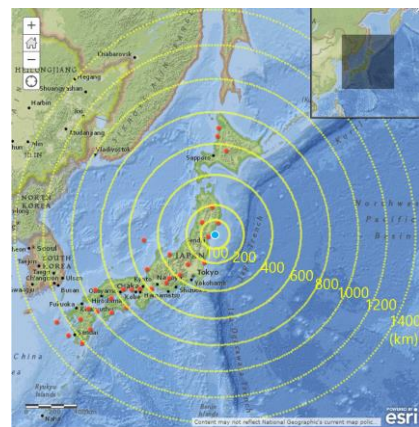


図 1 東北地方太平洋沖地震対象の基準局と移動局の位置

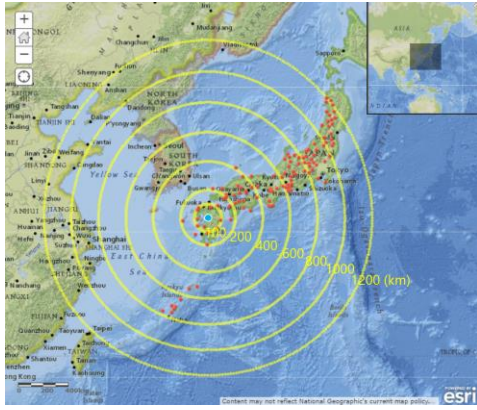


図2 2016年熊本地震対象の基準局と移動局の位置

3. 長距離基線による相対測位の有効性

まず、長距離基線向けの設定が長距離基線の相対測位に有効であることを確認する。長距離基線向けの設定は、表1に示す通り、大気圏補正データや衛星軌道補正データを用いている点で短距離基線向けの設定と異なる。

表1 短距離基線向けと長距離基線向けの設定

Option	Short BL	Long BL
Positioning mode	Kinematic	Kinematic
Frequencies	L1+L2	L1+L2
Receiver dynamics	OFF	OFF
Earth tides correction	OFF	ON
Elevation mask	10°	10°
Ionosphere correction	OFF	Estimate STEC
Troposphere correction	OFF	Estimate ZTD + Gradient
Satellite ephemeris	Broadcast	Precise
Min elevation to fix ambiguity	25°	25°
Min elevation to hold ambiguity	35°	35°
Satellite antenna model	IGS08.ATX	IGS08.ATX
Receiver antenna model	IGS08.ATX	IGS08.ATX
Process noise of vertical ionosphere. delay	10 ⁻³ m/sqrt (s)	10 ⁻³ m/sqrt (s)
Process noise of zenith troposphere delay	10 ⁻⁴ m/sqrt (s)	10 ⁻⁴ m/sqrt (s)

長距離と短距離基線両方の設定で測位解析を行い得られた、2011年東北地方太平洋沖地震における GEONET 牡鹿の EW, NS, UD 方向の変位時間推移を図3に示す。図中の緑線が長距離向け設定、黄色線が短距離向け設定による測位解析の結果を示す。

図に示すように、基線長が短いと、長距離向けと短距離向けの設定どちらも少ない誤差で測位結果が得られる。しかし、基線長が長くなるに従い、図中の黄色線で示した短距離向けの設定で誤差が大きくなるのがわかる。一方で、長距離基線向けの設定では長距離でも少ない誤差で測位結果が得られる。この結果より、本研究では長距離基線向けの設定を用いて測位解析を行うこととする。

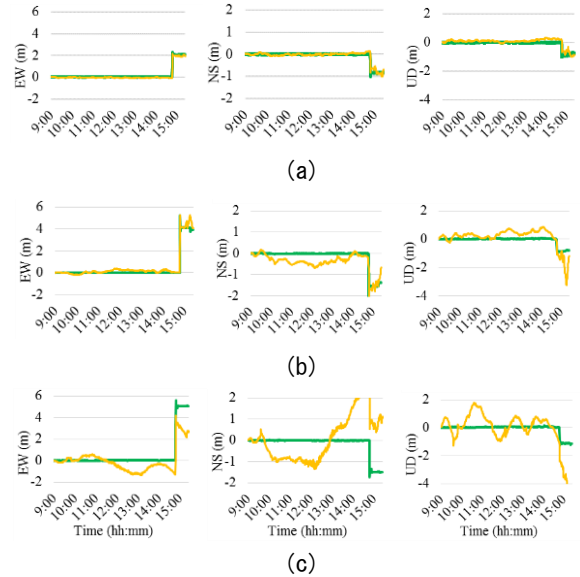


図3 2011年東北地方太平洋沖地震における GEONET 牡鹿の EW, NS, UD 方向の変位時間推移 (2011年3月11日 9:00 - 15:25)。基準局にはそれぞれ GEONET 名取 BL:50.7 km (a)、日立 BL:210.7 km (b)、熊本 BL:1,145.1 km (d)を用いた。

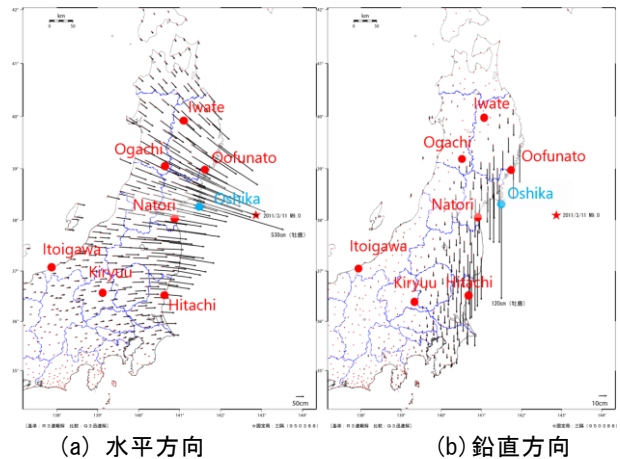


図4 2011年東北地方太平洋沖地震による水平 (a)、鉛直 (b) 方向の地殻変動分布 (国土地理院に加筆)

2011年東北地方太平洋沖地震では東北・北関東地方を中心に広範囲で大規模な地殻変動が発生した。基準局が震源の近くであると、両局とも地殻変動の影響を受けるため、移動局に設定した GEONET 牡鹿の地殻変動量を正確に把握することが難しくなる。図4は、同地震による水平と垂直方向の地殻変動量を矢印で示し、本研究で基準局に設定した GEONET を赤点で示す。

このことを踏まえた上で、移動局である GEONET 牡鹿の水平・垂直地殻変動量を求め、基線長距離の関係をまとめたものを図5に示す。図中の点 A - H で示す地殻変動量を表2にまとめる。点 H は国土地理院が公表した値である。GEONET 三隅 (BL: 942.4 km) を基準局としている。本研究ではこの値を正解値とする。

図に示す通り、基線長距離が短く地殻変動の影響を大きく受けている地点の基準局を用いた場合には、その地点の地殻変動量の分だけおおよそ正解値からずれが生じている。

さらに、地震による地殻変動の影響がほぼなくなった 400 km 地点過ぎから、正解値に近い値を示すことがわかる。

以上の結果より、長距離基線による相対測位が地殻変動の推定に有効であり、特に広範囲で地殻変動が起こった地震時にはより有効に活用されることが確認された。

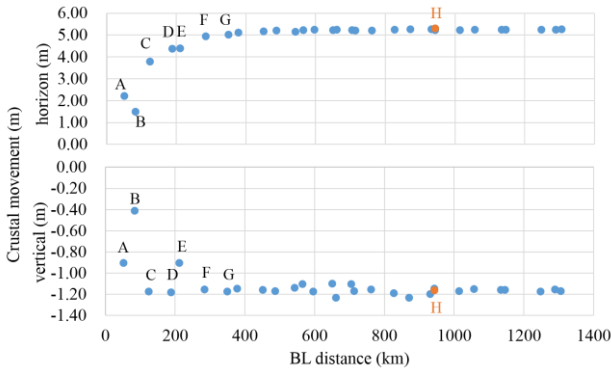


図5 2011年東北地方太平洋沖地震によるGEONET 牡鹿の水平・鉛直方向地殻変動量と基線長距離との関係

表2 GEONET 牡鹿の地殻変動量(Point A-H)

Point	Base station (GEONET)	BL (km)	Movement of GEONET Oshika	
			horizon (m)	vertical (m)
A	Natori	50.7	2.23	-0.90
B	Oofunato	82.9	1.50	-0.41
C	Ogachi	124.1	3.80	-1.17
D	Iwate	188.0	4.38	-1.18
E	Hitachi	210.7	4.40	-0.90
F	Kiryuu	283.7	4.94	-1.15
G	Itoigawa	349.0	5.02	-1.17
H	Misumi(GSI)	942.4	5.30	-1.16

4. 最適な長距離基線長の検討

2016年熊本地震を対象として、長距離基線による相対測位を行う際の最適な基線長距離の検討を行う。検討の指標として測位精度を表すFix率と標準偏差の2つの値を用いる。基線長距離に応じて測位精度がどのように変化するかを考察し、長距離基線による相対測位を行う際の最適な基線長距離を検討する。検討結果をもとに、地震による地殻変動量の推定を行う。また検討の結果、本地震では2011年東北地方太平洋沖地震で見られた地殻変動や地震の揺れが、基線長50 km以上である場合、地殻変動推定に影響を与えないと仮定した。

(1) 基線長距離とFix率の関係

Fix率とは搬送波数の整数アンビギュイティ(不一致)を特定できた測位解の割合を示し、Fix率が高いほど測位精度は向上していると考えられる。図6は、基線長とFix率の関係について全113局の基準局を用いて測位解析を行った結果をまとめたものである。図に示される通り、基線長が大きくなるに従いFix率の低下、すなわち精度の劣化が確認された。とくに、基線長距離が400 kmを超えると精度が一定の割合で劣化していく傾向が見られる。

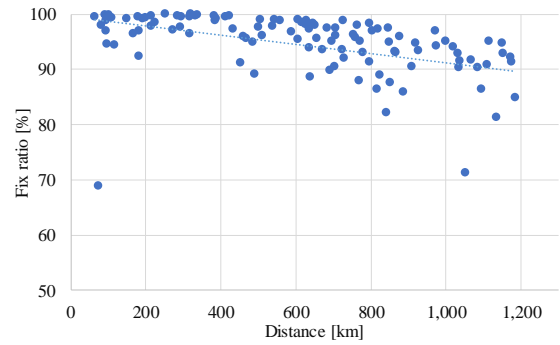


図6 基線長距離とFix率の関係

(2) 基線長距離と標準偏差の関係

標準偏差は、マルチパスやノイズの侵入など、外部からの影響による測位誤差の範囲を示す。先例の誤差モデルと測位設定から推測される測位解の推定標準偏差の値が用いられる。標準偏差の値が小さくなるほど、測位精度が向上したと考えられる。

図7は、基線長とEW, NS, UD方向の標準偏差の関係について113局の基準局を用いて測位解析を行った結果をまとめたものである。標準偏差は、Fix率の場合と等しく基線長が大きくなるに従い測位精度が劣化していることがわかる。とくに基線長が400 kmを超えると、基線長距離に比例した精度劣化の他に、大幅に精度が劣化するケースが複数みられる。

以上のFix率と標準偏差との比較結果を踏まえて、測位精度の観点から見ると、長距離基線の基線長は200 - 400 kmであることが望ましいと考えられる。以下、結果も踏まえて2016年熊本地震の前震・本震による地殻変動量の推測を行う。

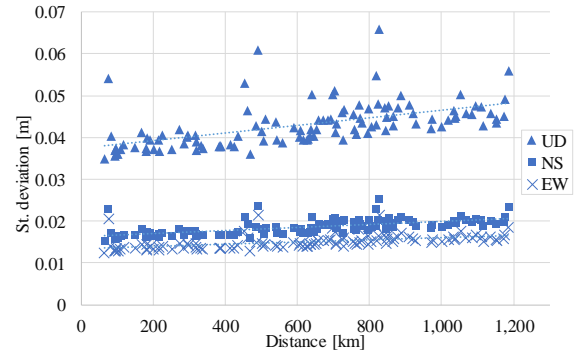
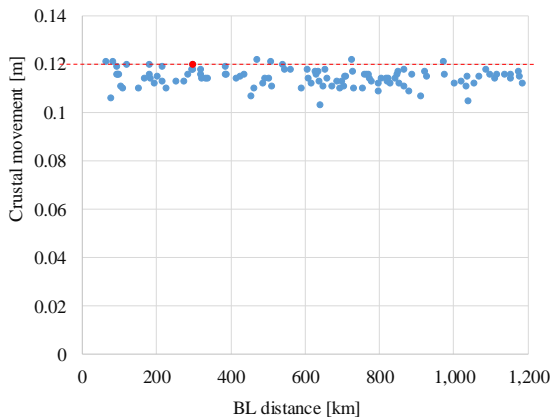


図7 基線長距離と標準偏差の関係

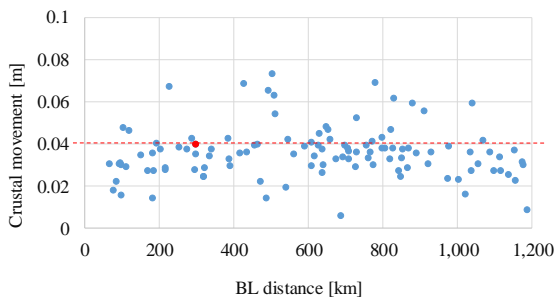
(3) 基線長距離と推定地殻変動量の関係

図8, 9にそれぞれ、2016年熊本地震における4月14日21:26(JST;以下同様)に発生したMw 6.2および15日0:03に発生したMw 6.0の前震と、4月16日01:25に発生したMw 7.3の本震により生じた水平(a), 鉛直(b)方向の地殻変動量と基線長の関係を示す。赤で示した点は、国土地理院が公表したGEONET 熊本の地殻変動量である。

2つの前震による地殻変動量は、基準期間を2016年4月14日9:00 - 21:25, 比較期間を15日0:08 - 16日01:24としている。本震による地殻変動量は、基準期間を2016年4月15日0:08 - 16日1:24, 比較期間を16日1:30 - 18日9:30としている。

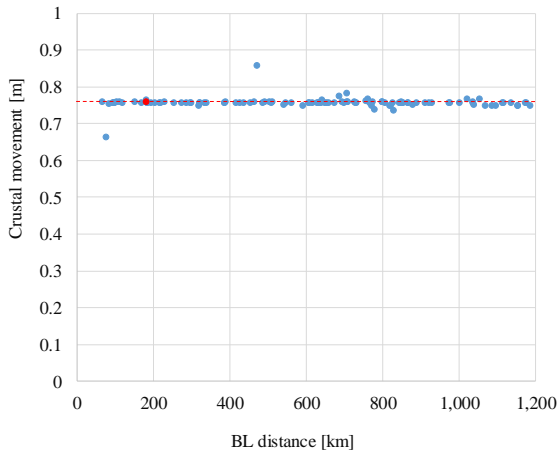


(a) 水平方向

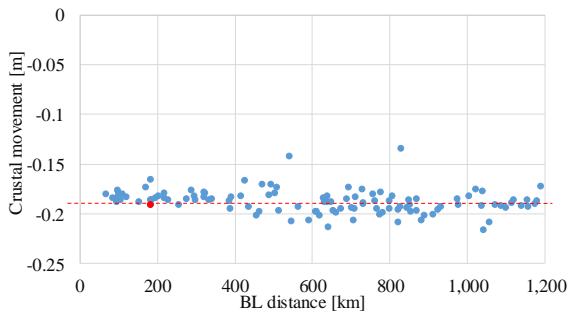


(b) 鉛直方向

図-8 2016年熊本地震における前震により生じた2方向の地殻変動量と基線長の関係



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

図-9 2016年熊本地震における本震により生じた2方向の地殻変動量と基線長の関係

基線長が 50 - 1,200 km の長距離基線で相対測位を行った場合、水平・鉛直方向ともに国土地理院の結果と比較して数 cm 以内の誤差で地殻変動を検出できていることがわかる。しかしより厳密に考察を行うと、前震の場合、水平方向では基線長が 200 km 以内や 400 km 以上で誤差が大きくなるケースが若干増える。鉛直方向では、基線長が 400 km を超えると誤差が大きくなるケースが若干増える。本震の場合、水平方向では基線長が 600 km を超えると、誤差が大きくなる。鉛直方向では、基線長が 400 km を超えた辺りから誤差数 cm 程度ではあるが推定地殻変動量にばらつきが生じていることがわかる。

総じて 50 - 1,200 km の長距離基線相対測位は、数 cm 程度の誤差で地殻変動量を検出することが可能であるが、基線長が 200 - 400 km の範囲であればより高い確率で地殻変動量の検出が行えるのではないかと考えられる。

5. まとめ

本研究では、長距離基線による GNSS 相対測位を用いて迅速かつ正確な地殻変動量の推定を試みた。2011 年東北地方太平洋沖地震を対象として、50 - 1,400 km の長距離基線による GNSS 相対測位を用いた地殻変動検出を行った。本地震では東北地方を中心に広範囲で大きな地殻変動が発生した。長距離基線による GNSS 相対測位は、地殻変動の推定に有効であり、とくに広範囲で地殻変動が起こった地震時にはより有効に活用されることが確認された。

次に 2016 年熊本地震を対象として、長距離基線による相対測位を行う際の最適な基線長距離の検討を行った。Fix 率と標準偏差の 2 つの測位精度の観点から見ると、長距離基線の基線長は 200 - 400 km であることが望ましいと考えられる。そのことを踏まえて、基線長距離と推定地殻変動量の関係を考察した。結果として、50 - 1,200 km の長距離基線を用いた相対測位では、数 cm 程度の誤差で地殻変動量を検出することが可能であった。さらに、基線長が 200 - 400 km の範囲であれば、より高い確率で地殻変動量の検出が行えるのではないかと結論が得られた。

参考文献

- 1) Ohta, Y., Kobayashi, T., Tsushima, H., Miura, S., Hino, R., Takasu, T., Fujimoto, H., Inuma, T., Tachibana, K., Demachi, T., Sato, T., Ohzono, M., Umino, N., 2012. Quasi real-time fault model estimation for near-field tsunami forecasting based on RTK-GPS analysis: Application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0). *Journal of Geophysical Research*, 117, B02311, 16p.
- 2) 国土地理院, 2009, 国土地理院の地殻変動の観測・監視と地震に関する調査・研究; http://www.jishin.go.jp/resource/column/2009_0903_02/ (2018年1月閲覧)
- 3) 土屋淳・辻宏道, 2002, 新・GPS 測量の基礎, 社団法人日本測量協会, pp.20
- 4) Takasu, T., Yasuda, A., 2010. Kalman-filter-based integer ambiguity resolution strategy for long-baseline RTK with Ionosphere and Troposphere estimation, 23rd International Technical Meeting of the Satellite, Division Inst. of Nav., Portland, Oregon, 21-24 Sept.
- 5) Moya, L., Yamazaki, F., Liu, W., 2017. Baseline effect on the estimation of crustal displacement using GPS kinematic relative positioning, 16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, 11p.