

フィリピン・マニラ首都圏南東部の断層モニタリング

Monitoring of Active Fault in South-East Part of Metro Manila, Philippines

栗田 勝実¹⁾，衣笠 善博²⁾，出口 知敬³⁾，Rolly E. Rimando⁴⁾

Katsumi Kurita¹⁾, Yoshihiro Kinugasa²⁾, Tomonori Deguchi³⁾, Rolly E. Rimando⁴⁾

Abstract : Buildings and pavements are damaged by vertical ground displacement along the creeping segment of the Marikina Valley fault system (MVFS) on the south-east part of Metro Manila, Philippines. To clarify fault creep trigger, ground deformation is monitored through repeated leveling surveys. And short term link between fault displacement and rainfall is also monitored through a continuous creep measurement device installed across one of the sites used for leveling survey. From repeated leveling surveys, the average slip rates ranges 1.66cm/y at VOS, 1.57cm/y at JUA-A, 1.05cm/y at JUA-B. Fault creeping at the other site was stopped. Continuous creep measurement at VOS identified drastically change.

Keywords : Fault creep, Leveling survey, Continuous creep measurement, Slip rate, Vertical ground displacement

1. はじめに

東南アジアを形成する国の一つであるフィリピンは2014年に人口が1億人に達し、2013年の実質GDP成長率は7.2%とアジアの中でも非常に高い経済成長を示している国である。一方、人口の1割弱は首都のマニラ首都圏とその周辺に集中している問題を抱えており、高層ビル、高速道路やLRT (Light Rail Transit) などのインフラストラクチャーの構築が現在も盛んに行われている。

一方、この地域には活断層として分類されるマリキナ断層 (MVFS) が南北を縦断していることから、地震に対する防災対策の必要性が指摘されている¹⁾。その基礎資料の一つとして当該断層のトレンチ調査が実施されており、断層の西側セグメントではマグニチュードM6~7クラスの地震を引き起こすだけのポテンシャルが蓄積されているとの評価がなされている^{2), 3)}。そのため、マニラ首都圏を対象とした地震防災に関する研究は、重要で、かつ急務な課題となっており、その一環として著者らは、1999年からマリキナ断層を対象とした繰り返し水準測量によるモニタリングを開始し、その活動性状を把握に努めてきた^{4), 5)}。

その結果、マニラ首都圏南東部 Muntinlupa 市と Laguna 州 San Pedro 市周辺の同断層周辺において、大きな地震が起きていないにもかかわらず、時間の経過と共に ①道路に段差が生じる ②ブロック塀や構造物にクラックが見れる ③家屋の柱が破壊し使用出来なくな

る など (写真1)，断層クリープが原因と考えられる地盤変動 (写真2) が生じていることを指摘し、そのスリップレートが約1~2cm/y程度であること示した。また、この運動が2000年中旬頃から Muntinlupa 市では停止したように見えるが、San Pedro 市では現在でもモニタリング開始当初とほぼ同じスリップレートで運動を続けている⁵⁾。

そこで、本研究では地盤変動が現在も続いている San Pedro 市の測線近傍に連続観測点を設置すると共に、従前から実施している繰り返し水準測量の結果を基に断層クリープの性状を探る。



写真1 断層クリープによる変位で生じたブロック塀のクラック

1) 東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科 機械システム工学コース 2) (公財) 地震予知総合研究振興会
3) 日鉄鉦コンサルタント (株) 4) Philippine Institute of Volcanology and Seismology

2. 対象地域

研究対象地域を図1に示す。マニラ首都圏はルソン島中部に位置しており、フィリピン断層から分岐した西マリキナ断層が縦断している。この断層は主に右横ずれ断層と推測されており³⁾、トレンチ調査の結果から、過去1300年間に4回の地震を起こし、再来周期は400–600年と推測されている²⁾。また、マニラ首都圏東部にあるマリキナ平野は、西マリキナ断層とこれと平行な東マリキナ断層によって形成されたプル・アパート盆地構造となっている³⁾。繰り返し水準測量の測線はマニラ首都圏南部の西マリキナ断層がある NPC, GRV, ADL, VOS および JUA であり、VOS には連続観測を設けて観測を実施している。

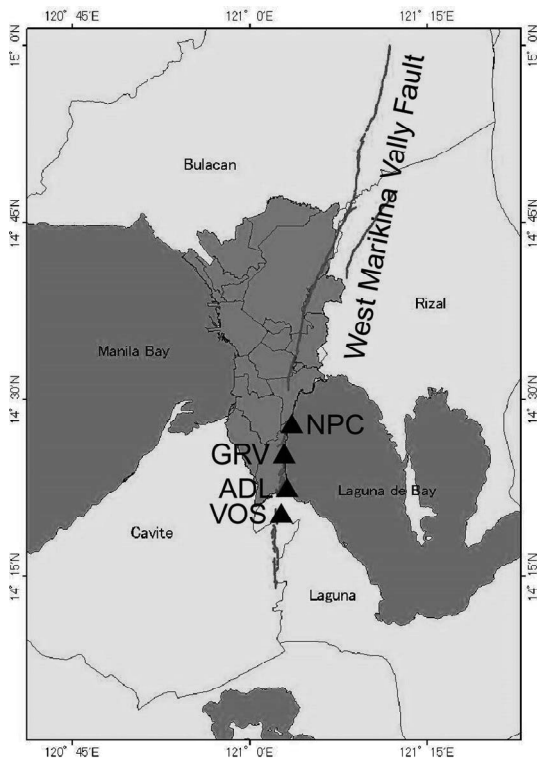


図1 研究対象地域

3. 繰り返し水準測量

前報で述べたように、断層クリープによるすべり速度を測定するため、クリープが見られる断層セグメントにおいて短距離繰り返し水準測量を1999年9月から実施している。この断層に沿っては有意な水平変動が認められないことから、測量はデジタルレベル (TOPCON DL-103) とバーコードレベルスタッフを用いた水準測量法で行われている。2012年2月までは4地点6測線で測量を実施していたが、2012年9月にVOSより西南西約1kmに位置するBinānのJuana 3B Complexに新たに2

測線を設け(写真2)、現在5地点8測線にて約6ヶ月毎に実施している。

結果を図2に示す。8測線の中で、明瞭なクリープ性変位が現在でも観測される地点は、VOS, JUA-A および JUA-B であり、VOS では平均1.66cm/yの鉛直変位速度であり、2014年3月から9月の結果を用いると3.47cm/yと平均の2倍弱の値を示している。この傾向はJUA-A および JUA-B でも同じであり、JUA-A では平均1.57cm/yであるのに対し直近では2.15cm/yであり、JUA-B では平均1.02cm/yであるのに対し直近では1.89cm/yである。一方、それ以外の観測点ではNPC-BとNPC-Cが2007年11月まで、GRV-A, GRV-B, GRV-C および ADL では2010年まで連続的にクリープ性変位による変動が現れていたが、一部では、非常に低い速度で運動方向が反転しはじめていた以外、ほぼ停止している。



写真2 新設測線地点 (JUA-A)

4. 連続観測

NPC-B において断層クリープの変化性状を詳細に調査している³⁾のと同様、VOS 測線に連続観測装置を2012年9月に取り付けました。観測システムを写真3に示す。VOS は断層クリープによる変形の幅が広いことから、接触型変位計を直に断層直上に設置したNPC-Bの方式とは異なり、地すべり監視で用いられるワイヤーを用いた伸縮計観測を導入した。センサ部は、ひずみゲージ式変位変換器 (共和電業 DTP-D-500S) を用い、これにインバー線を接続し、もう一端を地面に固定することで上下変動を記録する。これ以外に温度センサー (TPT-100) と雨量を計測するために雨量計 (Davis 7852M-L10) を近傍に併設した。これらから送られてくる信号をデータロガー (CAMPELL CR-510) へ入力し、2時間または3時間のサンプリング間隔で収録している。なお、観測地点では商用電源の利用が困難なことから、ソーラーパネ

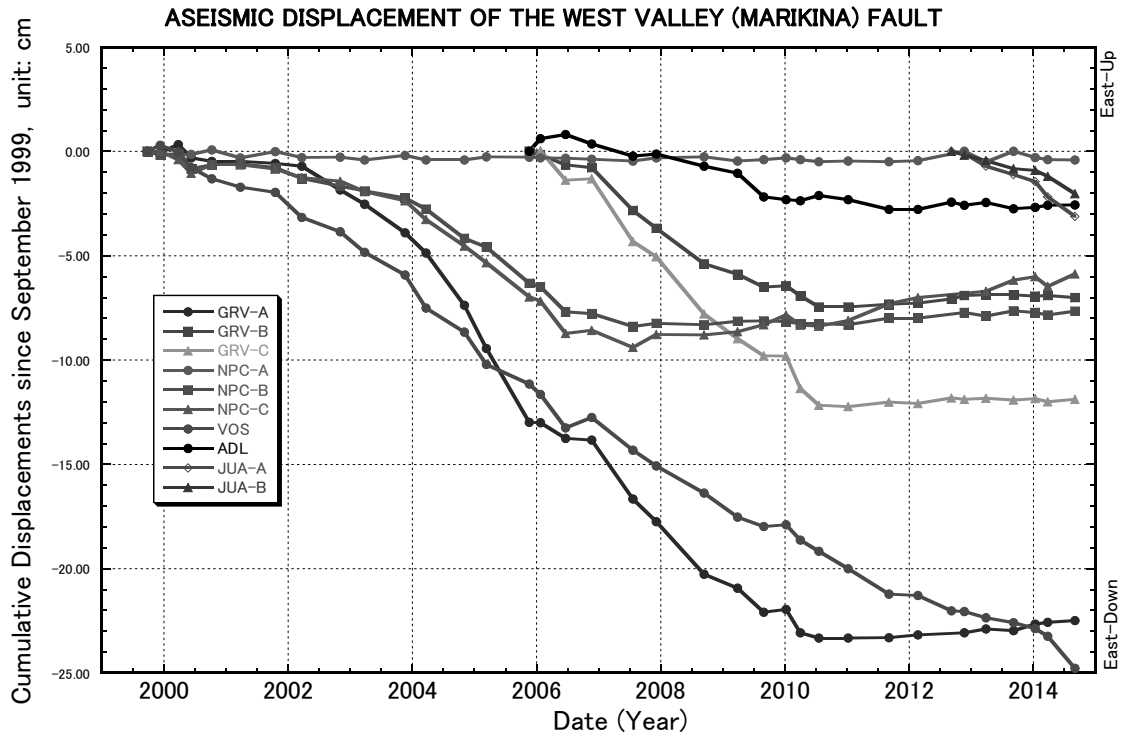


図2 繰り返し水準測量によるマニラ首都圏の地盤変動の時間変化

ルで発電した電力を鉛蓄電池に充電しながら観測システムへ供給・運用する形態を採用した。

2012年9月中旬から観測を開始したが、インバー線の向きを水平方向から上下方向に変更する部分に問題が生じたため、2014年1月に修繕を実施している。以降は順調に推移しており2014年9月現在も継続している。

2014年1月14日から2014年9月3日までのデータを図3に示す。この期間で1.8mm 東側に沈降（または西側が隆起）しており、7月17日に1.4mm程、7月28日～31日にかけて徐々に0.34mmの変動が現れた。それ以降の期間では最大で0.05mmの変動が見られるが長期的に見ると変動の戻りが見られることから有為なものではない。



写真3 観測システムの全景

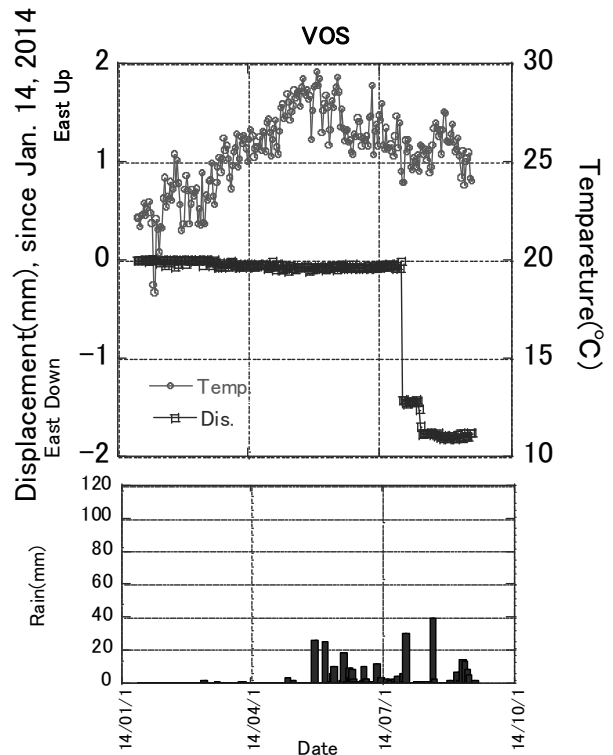


図3 上図：毎6:00の気温と変位
下図：日降水量

5. 議論

連続観測記録が示す様に、VOSでは急激な地盤変動があったことを示している。これが意味するところは ①

観測システムで採用した機構に存在する（例えば滑車）摩擦の影響 ②現実の変動 以上2通りが推測できる。

まず、7月17日に現れた急激な変動の理由について考えてみる。観測装置で使用したインバー線は、その一端をコンクリートアンカで地面に固定して上下方向に張った後、滑車を利用して水平方向へ変換しひずみゲージ式変位変換器のワイヤーと固定した。その全長は約6mであることから、風雨などの外力に因る変動を防止するため外径φ6 inchのPVCパイプ内部に張った。また、滑車やインバー線には潤滑剤を塗布し、摩擦による影響を極力少なくするような構造とした。7月17日に現れた変化の時の天候は日雨量30mm程度を伴う雨が降ったことから、雨水が滑車またはワイヤーに流れてトリガーとなり摩擦が減少したことによりインバー線が急激に動作した可能性が高い。その理由として、連続観測と繰り返し水準測量から求められた変位に差が生じていることである。連続観測装置を設置する際に、両者の比較が可能になるようインバー線の固定点とセンサ設置地点に基準点を設け測量を実施している。2014年3月25日～9月3日の間、連続観測からは1.69mm東側沈降の変位が求められたのに対して、繰り返し水準測量からは14mm東側沈降と求められ、両者に10倍の差が現れた。機器を支える支柱は一方をφ1 inchの鋼鉄パイプ2本、もう一方をφ2 inchの鋼鉄パイプを用いており、ワイヤーは質量3.5kgの錘で牽引している。理論上、この程度の力で支柱に10mm以上の曲げが発生することは考え難く、いずれかの機構に働く摩擦力がワイヤー線の引っ張り運動が妨げられていると考えたほうが理解しやすい。実際、2時間毎の変動記録をみると図4に示す様に雨量がある時に変位が生じている。このことから、7月17日の変動は観測システムで採用した機構に存在する（例えば滑車）摩擦の影響と考えるべきである。

次に7月28日～31日の変動について考える（図5）。Roseloffsは⁶⁾、アメリカ・サンアンドレアス断層に沿う地盤変動が雨量や季節変動による土の力学的変化で影響を受けることを指摘している。台湾のChinshang断層で起きているクリープの調査では、例えば、すべり速度が雨期による降水量の増加と共に増加するように、季節依存性を示すことを報告している^{7),8)}。2008年9月から2014年1月までNPC-Bで実施してきた連続観測記録の結果は、地盤変動による変位が非常にゆっくり現れる場合、および数日かけて急激な変位が現れる場合の2パターンが見られており、必ずしも雨量との間に相関は見られない⁹⁾。確かに、変動を示した時期は雨期であることからRoseloffsの指摘通り⁶⁾季節変動による土の力学的変化と考えることも可能であるが、変動を示している時期が雨期に入り2ヶ月以上経ち土の力学的変化が安定し始めていることや、本変動後が止まった後に日雨量40mmの降

雨が降ったことを考慮すれば、降雨に関係した変動とは理解しがたい。故に7月28日～31日の変動はVOSでの地盤変動と捉えることが可能である。

現状では、得られた記録が摩擦による影響により急激な地盤変動を示したものの、現実を正確に示した変動なのか性急に決定するのは危険である。VOSの南南西500mにあるJUA-Aに直接変位計を地盤に設置した観測方式の連続観測点を2014年9月に設置したことから、今後のVOSおよびJUA-Aでの観測記録の比較を通じて判断すべきであろう。

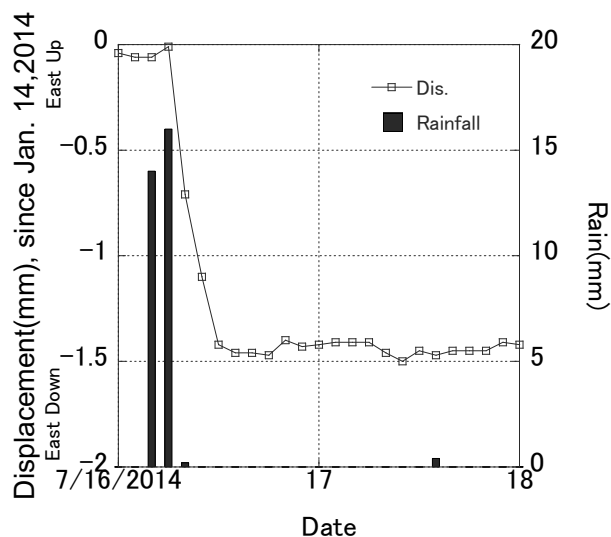


図4 VOSの連続観測から求めた地盤変動 (2014/7/16～18)

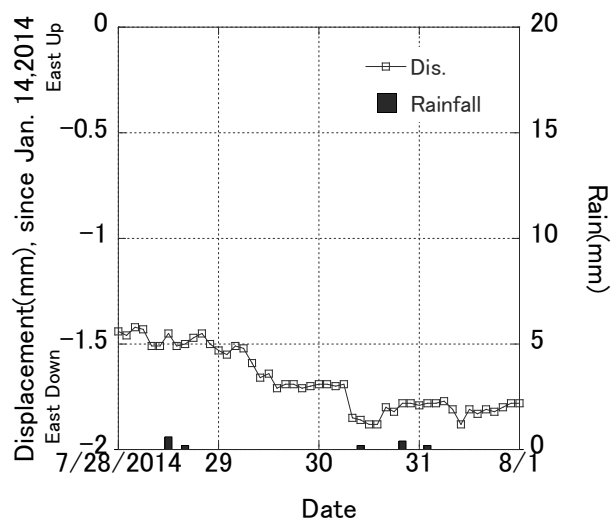


図5 VOSの連続観測から求めた地盤変動 (2014/7/28～8/1)

6. まとめ

フィリピン・マニラ首都圏南部のマリキナ断層を対象として、断層クリープと推測される変位が観測された断

層セグメント地点で繰り返し水準測量の実施からスリッププレートの推定と新たな測線の設営を行うと共に、断層クリープ性状を探ることを目的として Laguna 州 San Pedero 市の断層直上に変位計を設置して連続観測を実施した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 繰り返し水準測量の結果、現在もクリープ性変位が現れている地点は VOS, JUA-A および JUA-B で、VOS では平均 1.66cm/y, JUA-A では平均 1.57cm/y, JUA-B では平均 1.02cm/y の鉛直変位速度で東側沈降（または西側隆起）の変動が現れている。
- (2) NPC-B と NPC-C が 2007 年 11 月まで、GRV-A, GRV-B, GRV-C および ADL では 2010 年まで連続的にクリープ性変位による変動が現れていたが、一部では、非常に低い速度で運動方向が反転しはじめている以外は、ほぼ停止している。
- (3) VOS に設置した連続観測の結果、2014 年 1 月 14 日から 2014 年 9 月 3 日までの期間で 1.8mm 東側沈降（または西側隆起）の変動が現れ、7 月 17 日の急激な変動は観測システム内の機構に存在する摩擦の影響、7 月 28 日～31 日の変動は VOS での地盤変動と捉えることが可能であるが、2014 年 9 月に設置した JUA-A の連続観測記録の結果と比較をしながら今後判断すべきである。

本断層の性状を解明するためには、今後も観測を続ける必要があると共に、変位速度の大きい地域に観測点を増設し記録の蓄積および解析をする必要がある。

7. 参考文献

- [1] 国際協力機構, フィリピン国マニラ首都圏地震防災対策計画調査:最終報告書, vol.7 (要約), 2004.
- [2] Nelson, R. A., S. F. Personius, R. E. Rimando, R. S. Punongbayan, N. Tungol, H. Mirabueno and A. Rasdas, Multiple Large Earthquakes in the Past 1500 Years on a Fault in Metropolitan Manila, the Philippines, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**, 1, 73-85, 2000.
- [3] Rimando, R. E., and P. L. K. Knuepfer, Neotectonics of the Marikina Valley fault system (MVFS) and tectonic framework of structures in northern and central Luzon, Philippines, *Tectonophysics*, **415**, 17-38, 2006.
- [4] 栗田勝実, 衣笠善博, R. Rimando and K. Papiona, 連続変位観測記録から見たフィリピン・マニラ首都圏にあるマリキナ断層のクリープ性状, 東京都立産業技術高等専門学校研究紀要, 第 5 号, 6-9, 2011.
- [5] 栗田勝実, 衣笠善博, 出口知敬, R. Rimando, 笹川 正, 野中崇志, 地上測量から見たフィリピン・マニラ首都圏南東部の地盤変動, 東京都立産業技術高等専門学校研究紀要, 第 7 号, 68-71, 2013.
- [6] Roeloffs, E. A., Creep rate change at Parkfield, California, 1966-1999: seasonal, precipitation induced, and tectonic, *J. Geophys. Res.*, **106**, 16, 525-16,547, 2001.
- [7] Lee, J.C., J. Angelier, H. T. Chu, J. C. Hu, and F. S. Jeng, Continuous monitoring of an active fault in a plate suture zone: a creepmeter study of the Chihshang Fault, eastern Taiwan, *Tectonophysics*, **333**, 219-240, 2001.
- [8] Lee, J. C., J. Angelier, H. T. Chu, J. C. Hu, and F. S. Jeng, Monitoring active fault creep as a tool in seismic hazard mitigation. Insights from creepmeter study at Chihshang, Taiwan, *Tectonophysics*, **337**, 1200-1207, 2005.
- [9] Kurita, K., Y. Kinugasa, T. Deguchi, and R. E. Rimando, Continuous Measurements of Fault Creeping at Metro Manila, the Philippines, *ASC The 10th General Assembly*, 129, 2014.