

11 - 3 測地観測による 1923 年関東地震とその後の地殻変動 - 地震時すべり, プレート間固着及びスロースリップ -

Crustal deformation at and after the 1923 Kanto earthquake based on geodetic measurements - Coseismic slip, interplate coupling, and slow slip events -

西村卓也 (京都大学防災研究所)

Takuya NISHIMURA (Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ.)

1. はじめに

1923 年 9 月 1 日に発生した大正関東地震 ($M_{\text{JMA}}7.9$) は, 明治期に開始された日本列島の測地測量 (一等三角測量, 一等水準測量) が 1913 (大正 2) 年にほぼ終了した後に発生した. そのため, 震災復旧測量として地震後速やかに再測量が行われ, 地震前後の測量結果の差から地震に伴う地殻変動が詳細に明らかになった地震である. それゆえ, 沈み込みプレート境界で発生した地震としては, 関東地震は世界で初めて測地測量により地殻変動が明らかになった地震と言えるであろう. 地震後の測地測量や現在行われている GNSS 観測からは, 関東地震の震源域近傍である神奈川県から房総半島南部において, 地震時とは反対方向の地殻変動が観測されている. すなわち, 100 年前に取得された関東地震の詳細な測地データのおかげで, 相模トラフから沈み込むフィリピン海プレートと陸側プレートの境界断層における地震間のひずみの蓄積と地震時のひずみの解放を, 現在の我々が把握することができるのである. 本稿では, 大正関東地震の前後から近年までの測量データの一部を紹介するとともに, 地震時地殻変動から推定された断層モデル, 地震間地殻変動から推定されたプレート間固着分布, GNSS データなどから推定されたスロースリップ (SSE) の既往研究を簡単に紹介する.

2. 水準測量と菱形基線測量による地震時・地震後地殻変動

関東地震に関連する上下変動の時間変化は, 主に水準測量と潮位観測のデータから明らかにすることができる. 日本全国の水準測量は 1880 年代に開始された. 三浦半島の先端部には潮位を観測する油壺験潮所が作られ, 東京三宅坂の水準原点から油壺験潮場に向けた水準測量は, 1896 年より前に第 1 回の測量が行われている. 1923 年の関東地震以降は頻繁に再測量が行われ, 上下変動の時間変化が詳細に明らかにされている¹⁾. 第 1 図は, 横浜市付近の 2 水準点 (F25, J35-7) と油壺験潮場に近い水準点 5367-2 の間の上下変動を示したものである. F25 を基準とした 5367-2 の比高で見ると, 関東地震の前後で 126 cm の隆起が観測されており, その後の 100 年間では, 約 30 cm 沈降している. すなわち地震時変動の約 1/4 が地震後に回復したことになる. また, 油壺験潮所の潮位変化²⁾からは, 地震時に約 1.4m の海面低下, 地震後の 100 年間で約 50 cm の海面上昇が観測されている. 海面の変動量だけを見ると, 地震時変動の約 1/3 が地震後に回復したことになるが, 地震後の海面上昇には地球温暖化に伴う世界的な海面上昇が含まれていることを考慮すれば, 地震後の沈降量は 50cm より小さく, 水準測量と潮位観測の結果は整合的だと言える.

一方, 関東地震に関連する水平変動の時間変化を議論できるデータは限られている. GNSS などの宇宙測地技術の登場以前は, 三角測量や三辺測量などの水平位置を測る測量が, それほど頻繁に行われていないためである. その中で, 東京都三鷹市の国立天文台構内にある菱形基線では, 一辺 100 m の菱形の辺長と対角線長 (一部のみ) が, 数~十年ごとに計測され, 関東地震の地震時とそ

の後 100 年間の水平変動のデータとして利用できる^{3,4)}。第 2 図は、基線長の変化から、東西方向と南北方向の線ひずみ (e_{ee} , e_{nn}) と剪断ひずみ (e_{en}) を計算したものである。 e_{nn} 成分では、地震時に 3.6×10^{-5} の伸びと地震後に経年的な縮みが観測され、地震後約 90 年でほぼ地震時の変化を相殺している。相模トラフにおけるプレート収束方向や関東地震のすべり方向から考えて、上記のひずみの 3 成分のうち最も地震時の断層すべりや地震後の断層の固着に敏感な成分は e_{nn} になる。よって、 e_{nn} 成分の変化は関東地震の地震サイクルに伴う地殻変動であると考えられる。地震時と地震後の変化を水平変動と上下変動と比較すると、上下変動では地震後の変化は地震時の 1/3 程度であったものが、水平変動では地震時と地震後の変化がほぼ等しいことは注目される。これは菱形基線の位置が、地震時のすべり域や地震後の固着域の下端に近い場所にあるため、両者の下端のわずかな違いによって、このような差が生じるものと考えられる。一方、 e_{ee} 成分では、地震時にはわずかな縮みが観測されているが、その大きさは地震後約 10 年間のばらつきと同程度である。その後の約 50 年間はほとんど変化が見られなかったが、1980 年頃からは急激な縮みが観測されている。1990 年代半ば以降に整備された周辺の GNSS 観測点ではこのような大きな東西短縮は観測されておらず、菱形の西側の頂点に関係する辺だけに大きな変化が見られているため、西側の標石に関する局所的な変化である可能性が指摘されている。

3. 地震時すべり・プレート間固着・スロースリップ

大正関東地震の地震時の水平変動は、三角測量の結果を整理する際の仮定する固定点の違いなどによる複数の研究によってまとめられている。その 1 つである佐藤・市原 (1971)⁵⁾ の一等三角点の変位は、断層モデルの推定によく用いられている。地震後の再測量は三等三角点まで行われており、二等三角点までの変位は、Fujii and Nakane (1983)⁶⁾ にまとめられているが、三等三角点のデータについては地球科学的な解析はほとんど行われていない。測地データを用いて推定された地震時すべりの震源断層モデルは、Ando (1974)⁷⁾ の研究を筆頭に、最近 20 年間にも Sato et al. (2005)⁸⁾, Pollitz et al. (2005)⁹⁾, Matsu'ura et al. (2007)¹⁰⁾ など、精力的に行われおり、小田原付近と三浦半島付近にすべり量が大きい場所 (アスペリティ) があるという点で共通している。

地震間のプレート間固着分布の推定が本格的に行われるようになったのは、GNSS により地震間の変位速度が高精度に推定されるようになってからで、Sagiya et al. (2004)¹¹⁾ の研究を筆頭に多くの研究¹²⁻¹⁶⁾ が行われている。推定された固着分布に共通する特徴として、大正関東地震の震源域だけでなく、房総半島の南東沖まで固着の強い領域が広がっていることが挙げられる。しかし、2011 年東北地方太平洋沖地震 (M_w 9.0) の発生以降は、関東地方の地殻変動が東北地方太平洋沖地震の余効変動の影響が強く受けているため、プレート間固着を推定するためには余効変動を適切に補正する必要があり、プレート間固着の推定に関する研究はほとんど行われていない。

GNSS データを用いたプレート間固着の推定は、数年程度の期間における平均変位速度を用いて行われることが多いため、次の大地震までのプレート間すべりの収支を見積もる上では、地震間の地殻変動速度の時間変化に留意する必要がある。特に、房総半島南東沖では、2-6 年程度の間隔で M_w 6.5 を超える規模のスロースリップの発生が発生していることが知られており^{11, 17-19)}、蓄積されたひずみの一部を解放していることを考慮する必要がある。Nishimura (2021)²⁰⁾ は、約 25 年間の GNSS データの解析から相模トラフ沿いの継続時間が概ね 80 日より短い SSE の系統的な検出を行い、SSE の断層モデルを推定した。その結果、従来からよく知られている 2-6 年で発生する房総 SSE に加えて、さらに東の沖合にも M_w 7 程度の規模の大きな SSE が発生する領域があることがわ

かった (第 3 図)。これらの領域では SSE の累積すべり量が、この間のプレート相対運動と同程度であり、一時的にひずみが蓄積しても SSE によって概ね蓄積されたひずみが解消するのに対して、大正関東地震の震源域とこれらの SSE のすべり域の間には、SSE の発生しない空白域 (第 3 図の Gap1 と Gap2) があることがわかった。西村 (2011) のプレート間固着の推定では、複数の房総 SSE を含む 14 年間 (1997 年 2 月 ~ 2011 年 2 月) の平均変位速度を用いても、大正関東地震の震源域の東側の領域では固着していることが推定されており、房総半島南東沖では SSE の発生だけでは解消されないひずみが蓄積されている可能性がある。現在のところ、SSE の空白域における地震発生ポテンシャルは不明であるが、津波堆積物の調査から従来知られてきた大正型・元禄型関東地震とは異なる大地震が房総半島南東沖に発生したことも指摘されており²⁾、相模トラフ沿いの地震発生ポテンシャルについて今後の研究が待たれる。

(京都大学防災研究所 西村卓也)

NISHIMURA Takuya

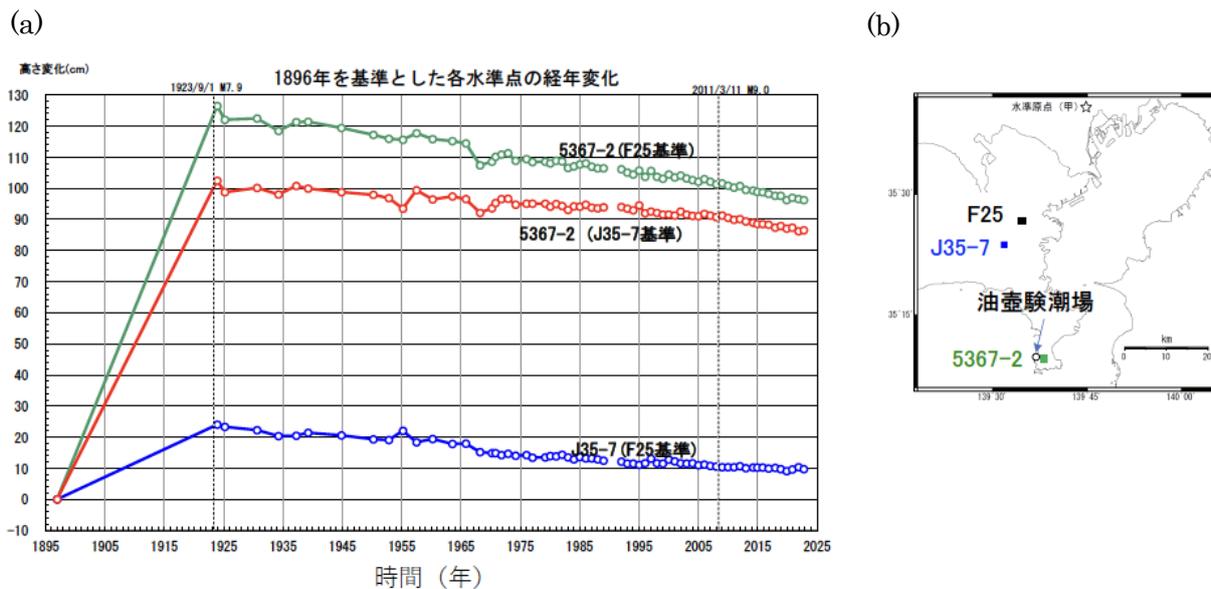
謝辞

宗包浩志博士をはじめとする国土地理院の方々には、水準測量の数値データを提供いただきました。ここに記して感謝いたします。

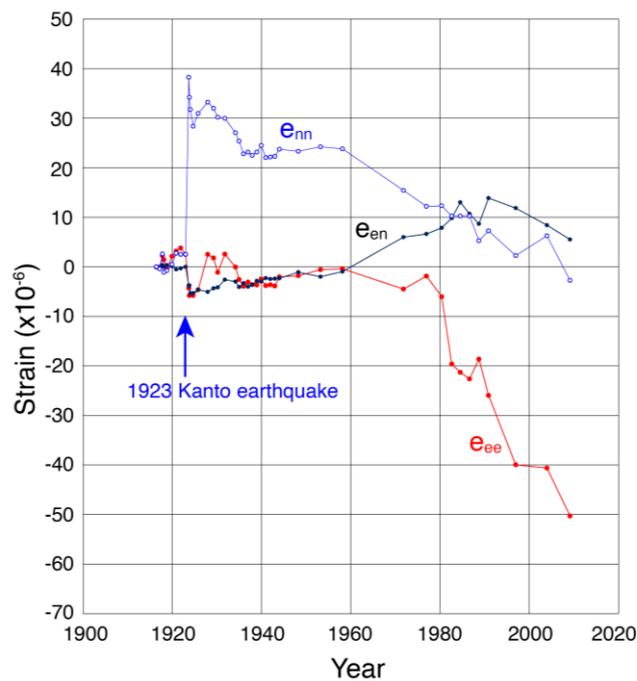
参考文献

- 1) 国土地理院 (2023), 関東甲信地方の地殻変動, *地震予知連絡会会報*, **109**, 177-182.
- 2) 海岸昇降検知センター (2023), 日本列島沿岸の年平均潮位 (1894 年 ~ 2021 年) グラフ, <https://cais.gsi.go.jp/cmdc/center/annualgra.html>
- 3) 国土地理院 (2009), 関東甲信地方の地殻変動, *地震予知連絡会会報*, **82**, 178-186.
- 4) Thatcher, W., and N. Fujita (1984), Deformation of the Mitaka Rhombus: Strain buildup following the 1923 Kanto earthquake, central Honshu, Japan, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, **89**(B5), 3102-3106, doi:10.1029/JB089iB05p03102.
- 5) 佐藤裕・市原満 (1971), 関東震災復旧三角測量について, *測地学会誌*, **17**, 178-186.
- 6) Fujii, Y., and K. Nakane (1983), Horizontal crustal movements in the Kanto-Tokai district, Japan, as deduced from geodetic data, *Tectonophysics*, **97**(1), 115-140, doi:10.1016/0040-1951(83)90134-8.
- 7) Ando, M. (1974), SEISMO-TECTONICS OF THE 1923 KANTO EARTHQUAKE, *J. Phys. Earth*, **22**(2), 263-277, doi:10.4294/jpe1952.22.263.
- 8) Sato, H., et al. (2005), Earthquake Source Fault Beneath Tokyo, *Science*, **309**(5733), 462-464, doi:10.1126/science.1110489.
- 9) Pollitz, F., M. Nyst, T. Nishimura, and W. Thatcher (2005), Coseismic slip distribution of the 1923 Kanto earthquake, Japan, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, **110**(B11), doi:10.1029/2005JB003638.
- 10) Matsu'ura, M., A. Noda, and Y. Fukahata (2007), Geodetic data inversion based on Bayesian formulation with direct and indirect prior information, *Geophys. J. Int.*, **171**(3), 1342-1351, doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03578.x.
- 11) Sagiya, T. (2004), Interplate Coupling in the Kanto District, Central Japan, and the Boso Peninsula Silent Earthquake in May 1996, *Pure Appl. Geophys.*, **161**(11-12), doi:10.1007/s00024-004-2566-6.

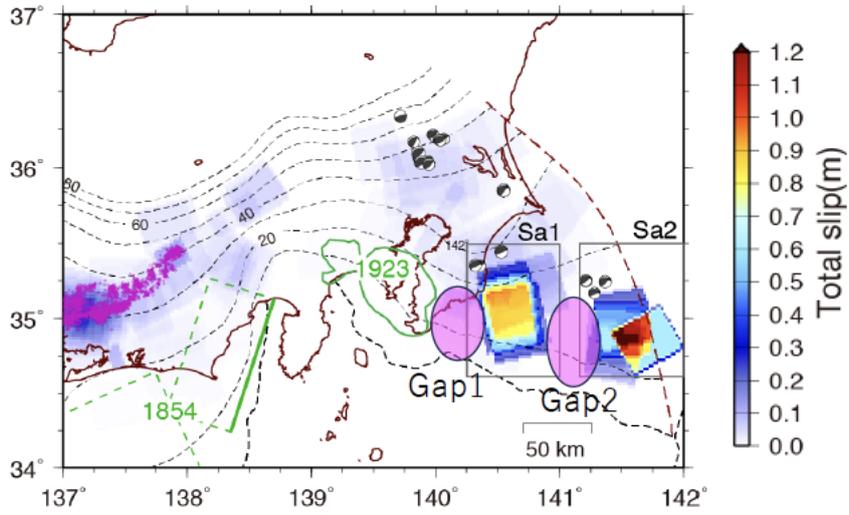
- 12) Loveless, J. P., and B. J. Meade (2014), Kinematic Barrier Constraints on the Magnitudes of Additional Great Earthquakes Off the East Coast of Japan, *Seismol. Res. Lett.*, **86**(1), 202-209, doi:10.1785/0220140083.
- 13) 西村卓也 (2011) , 関東南部の地震間地殻変動とプレート間カップリング , 地震予知連絡会会報 , **88**, 521-525
- 14) Nishimura, T., T. Sagiya, and R. S. Stein (2007), Crustal block kinematics and seismic potential of the northernmost Philippine Sea plate and Izu microplate, central Japan, inferred from GPS and leveling data, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, **112**(B5), doi:10.1029/2005JB004102.
- 15) Nishimura, T., Y. Yokota, K. Tadokoro, and T. Ochi (2018), Strain partitioning and interplate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from Global Navigation Satellite System and Global Positioning System-Acoustic data, *Geosphere*, **14**(2), 535-551, doi:10.1130/ges01529.1.
- 16) Noda, A., C. Hashimoto, Y. Fukahata, and M. Matsu'ura (2013), Interseismic GPS strain data inversion to estimate slip-deficit rates at plate interfaces: application to the Kanto region, central Japan, *Geophys. J. Int.*, **193**(1), 61-77, doi:10.1093/gji/ggs129.
- 17) Hirose, H., H. Kimura, B. Enescu, and S. Aoi (2012), Recurrent slow slip event likely hastened by the 2011 Tohoku earthquake, *Proc Natl Acad Sci USA*, **109**(38), 15157-15161, doi:10.1073/pnas.1202709109.
- 18) Fukuda, J. (2018), Variability of the Space-Time Evolution of Slow Slip Events Off the Boso Peninsula, Central Japan, From 1996 to 2014, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, **123**(1), 732-760, doi:10.1002/2017jb014709.
- 19) Ozawa, S., H. Yarai, and T. Kobayashi (2019), Recovery of the recurrence interval of Boso slow slip events in Japan, *Earth Planets Space*, **71**(1), doi:10.1186/s40623-019-1058-y.
- 20) Nishimura, T. (2021), Slow Slip Events in the Kanto and Tokai Regions of Central Japan Detected Using Global Navigation Satellite System Data During 1994–2020, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **22**(2), doi:10.1029/2020gc009329.
- 21) Pilarczyk, J. E., et al. (2021), A further source of Tokyo earthquakes and Pacific Ocean tsunamis, *Nature Geoscience*, **14**(10), 796-800, doi:10.1038/s41561-021-00812-2.



第 1 図 水準測量による三浦半島の上下変動. (a) 時系列グラフ. (b) 水準点の位置図.
 Fig. 1 Vertical deformation of the Miura Peninsula observed by leveling. (a) Time-series. (b) Location of leveling benchmarks.



第 2 図 三鷹菱形基線で測定されたひずみ 3 成分の時系列グラフ.
 Fig. 2 Time-series of 3 strain components measured at the Mitaka rhombus.



第 3 図 GNSS データから検出・推定された短期的 SSE の累積すべり量 (1994 年 7 月～2019 年 11 月) (Nishimura, 2021 の Fig 7a に加筆).

Fig. 3 Cumulative slip of short-term slow slip events (SSEs) detected using GNSS data from July 1994 to November 2019 (Modified from Fig. 7a of Nishimura, 2021).