

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05267

研究課題名(和文)兵庫県南部地震は六甲変動に寄与したか？

研究課題名(英文)Did the Kobe earthquake contribute to the Rokko movement?

研究代表者

橋本 学 (Hashimoto, Manabu)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：20293962

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：兵庫県南部地震の余効変動の地形形成への寄与を検討するため、地震後の測地観測データの再解析と六甲山系の三角点のGPS観測を行った。六甲山系の三角点は、約20年間に東南東に向かって約40cm移動、かつ0～4 cm沈降していた。六甲山系東部のGPS観測点は1995年3月末までに約1 cm程度隆起したが、その後は大きな変化はない。1997年までのJERS-1画像から、六甲山系の山頂部では、約10 mm/yrの視線距離短縮が検出されたが、水平変動の寄与が大きいと考えられる。

兵庫県南部地震の余効変動は1995年前半に終息し、六甲山系を隆起させるような変動はなく、地形形成に寄与しなかったと結論できる。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the contribution of postseismic deformation of the Kobe earthquake to the Rokko movement, we reanalyzed geodetic data after the earthquake and conducted GPS surveys on the top of the Rokko Mountains. We found that control points on the Rokko Mountains moved ESE-ward by ~40 cm and subsided by 0 - 4 cm during these 20 years. Continuous GPS sites slightly uplifted till March, 1995, but no significant movements were found. JERS-1 images revealed ~10 mm/yr decrease of distance to the satellite but it may be attributed to horizontal motion of the Rokko Mountains.

On the basis of the above results, we conclude that there is no contribution of the postseismic deformation to the orogeny of the Rokko Mountains.

研究分野：測地学

キーワード：六甲変動 兵庫県南部地震 余効変動 宇宙測地技術 GPS SAR 地形形成過程

1. 研究開始当初の背景

六甲山はその麓を走る六甲断層帯の運動により形成されたと考えられている [例えば, Huzita, 1962]. 現在の六甲山の地形は, 北東の芦屋側に最高峰 (931 m) があり, 南西に向かって低くなり, 明石海峡に没する. とろろが, 1995 年兵庫県南部地震による上下変動は, 明石海峡に面した垂水付近で最大 19 cm の隆起が観測されたが [Hashimoto et al., 1996], 六甲山最高峰は 12 cm の隆起にとどまっている [国土地理院, 平成 7 年度改算]. この地震時変位のパターンと現在の地形は相関しないので, 兵庫県南部地震タイプの地震だけでは六甲山は形作れない. 現在の姿にしたメカニズムがその他にあるとすると, それは余効変動のようなゆっくりとした変動, あるいは異なるタイプの地震であろう. 本研究は, 兵庫県南部地震以降の測地データを解析し, この間の余効変動が六甲山系の地形形成にどの程度寄与したかを明らかにすることを目的とする.

2. 研究の目的

本研究では, 余効変動の可能性を検討することを目的として, 兵庫県南部地震以降に実施された測地観測 (GPS, SAR) データを再解析する. さらに, 地震直後に緊急 GPS 観測が実施された六甲山系の三角点において, GPS 観測を実施し, 変動を検出する. これらを総合し, 六甲山系の兵庫県南部地震以降の変動を明らかにする.

3. 研究の方法

本研究では, 以下の 3 種類の測地観測データを用いて, 兵庫県南部地震以降の余効変動を検出する.

1) 六甲山系の三角点における GPS 観測

国土地理院は, 兵庫県南部地震発生直後に, 兵庫県～大阪府の三角点の緊急 GPS 観測を実施した. これらの観測には Trimble 4000SSE と Ground plane 型のアンテナが用いられた.

緊急改測は, 1995 年 2 月に三角点上に三脚を設置して行われた. 観測時間は約 12 時間, サンプルングは 30 秒である. 緊急改測が行われた三角点の内, 三脚での観測が容易な 3 三角点 (六甲山, 不動山, 甲山) を選び, 2015 年 11 月, 2016 年 11 月および 2017 年 11 月に, GNSS 観測を実施した (図 1). ただし, 甲山は 2015 年のみ実施). なお, 観測には Trimble 5700 と Trimble Choke Ring アンテナを用い, 1 秒サンプルングで約 6 時間の観測を行なった. 幸い緊急観測の原データが保管されていたので, これを再解析軌道・時計の情報を用いて GIPSY により PPP 解析を行った. 2015 年, 2016 年, 2017 年のデータも GIPSY による PPP 解析を行うことにより, 同じ IGB2008 系での比較が可能となった.

2) 国土地理院による緊急 GPS 連続観測データの再解析

国土地理院は, 兵庫県南部地震直後 1995 年 1 月 27 日から, 翌年 1996 年 8 月 6 日までの間, 六甲山系を中心とする近畿地方中部において GPS 連続観測を実施した (図 1). これらのデータを, 再解析軌道・時計の情報を用いて, 1) と同じ手法により解析した.

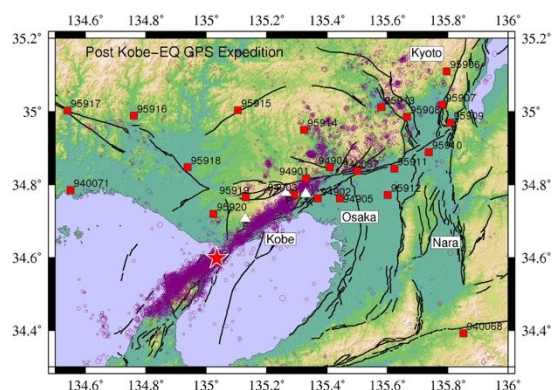


図 1. 本研究で使用した GPS 観測点の配置. 白 が 2015~2017 年に GPS 観測を実施した六甲山系の 3 三角点. 赤 が国土地理院の緊急 GPS 連続観測点を示す. 紫色の は, 兵庫県南部地震直後から 1996 年 8 月までの余震の震央 (気象庁一元化震源データ).

3) 人工衛星搭載合成開口レーダー画像の解析

地震直後 NASDA(現 JAXA)による JERS-1 と欧州宇宙機関の ERS-1 の観測も実施された。引き続き ERS-2, Envisat や ALOS-1/2 のデータも収集し、解析した。

JERS-1 は Gamma®による 2 パス干渉法で解析し、アンラップ後時系列解析を行った。ALOS-1 については 2 方向からの観測画像があるので、StaMPS を用いて PS-InSAR 解析を行い、2.5 次元解析して擬似東西及び上下成分を求めた。ALOS-2 については、2 方向からの干渉画像をそれぞれスタッキングし、さらに 2.5 次元解析した。ERS-1/2, Envisat については 1 方向(南行軌道)のみのため、干渉画像のスタッキングに留まる。

4. 研究成果

3 種の測地データから得られた変動の概要を、以下にまとめる。

1) 六甲山系の三角点の座標変化

六甲山系の 3 三角点について、緊急改測データの再計算結果と 2015~2017 年の 3 回の観測結果を、表 1 に示す。なお、座標系は IGb2008 から WGS84 に変換したもので、変位は 1995 年の観測座標に対する相対変位である。

約 20 年間に 3 三角点は東南東に向かって 40cm 程度移動している。これは、ITRF2008 系での近畿地方の平均的な変動と調和している。ただし、もっとも東側に位置する甲山の変位がやや小さい。兵庫県南部地震時、六甲山と甲山の距離は短縮しており、両三角点の間にある五助橋断層のすべりが推定された。この断層の余効すべりが生じたとすると、定性的には調和する。

一方、楕円体高は、3 三角点ともに 0~4 cm 減少している。三脚を用いた測定の誤差を考

慮しても、隆起が生じたとは言い難い。

表 1a. 緯度の変化

| 観測点 | 年 | 緯度 | NS 変位(m) |
|-----|------|---------------|----------|
| 六甲山 | 1995 | 34°46'40.816" | |
| | 2015 | 34°46'40.810 | -0.178 |
| | 2016 | 34°46'40.810" | -0.188 |
| | 2017 | 34°46'40.810" | -0.198 |
| 不動山 | 1995 | 34°42'27.200" | |
| | 2015 | 34°42'27.194" | -0.189 |
| | 2016 | 34°42'27.194" | -0.184 |
| | 2017 | 34°42'27.193" | -0.193 |
| 甲山 | 1995 | 34°46'29.769" | |
| | 2015 | 34°46'29.763" | -0.191 |

表 1b. 経度の変化

| 観測点 | 年 | 経度 | EW 変位(m) |
|-----|------|----------------|----------|
| 六甲山 | 1995 | 135°15'49.467" | |
| | 2015 | 135°15'49.482" | +0.400 |
| | 2016 | 135°15'49.482" | +0.400 |
| | 2017 | 135°15'49.483" | +0.421 |
| 不動山 | 1995 | 135°07'45.500" | |
| | 2015 | 135°07'45.065" | +0.390 |
| | 2016 | 135°07'45.066" | +0.406 |
| | 2017 | 135°07'45.066" | +0.416 |
| 甲山 | 1995 | 135°19'46.377" | |
| | 2015 | 135°19'46.391" | +0.350 |

表 1c. 楕円体高の変化

| 観測点 | 年 | 楕円体高 | UD 変位(m) |
|-----|------|---------|----------|
| 六甲山 | 1995 | 968.536 | |
| | 2015 | 968.511 | -0.025 |
| | 2016 | 968.515 | -0.022 |
| | 2017 | 968.523 | -0.013 |
| 不動山 | 1995 | 440.217 | |
| | 2015 | 440.192 | -0.025 |
| | 2016 | 440.214 | -0.003 |
| | 2017 | 440.193 | -0.024 |
| 甲山 | 1995 | 346.378 | |
| | 2015 | 346.341 | -0.037 |

2) 緊急 GPS 連続観測点の座標変化

図 2~3 に緊急 GPS 連続観測局の座標の時間変化を示す。いずれも最初の観測に対する相対変化を表示している。1996 年 8 月までの短い観測期間であったため、年周変化の補正等を行っていない。

図 2 において 940067 (箕面) と 940071 (御津) の経度のデータに見られる 1995 年 1 月のステップが、地震時の変位である。その後からゆっくりとした余効変動が生じたことがわかる。東西方向の変化は 1995 年 3 月ころ、南北方向の変化は 1995 年 5 月ころには終息したように見える。南北成分は年周变化的な様相も呈しており、その補正が今後の課題である。なお、全体的に見られる東向きの変化は、この地域で観測されている定常的な変動と調和する。

緊急 GPS 連続観測で六甲山系の東に設置された観測点 (4901, 4902, 4903) が、1995 年 3 月末までに 1 cm 程度隆起した (図 3)。その後 1995 年末まで全観測点がゆっくりとした沈降し、さらに隆起に転じている。夏に隆起し冬に沈降する年周変化の可能性もある。

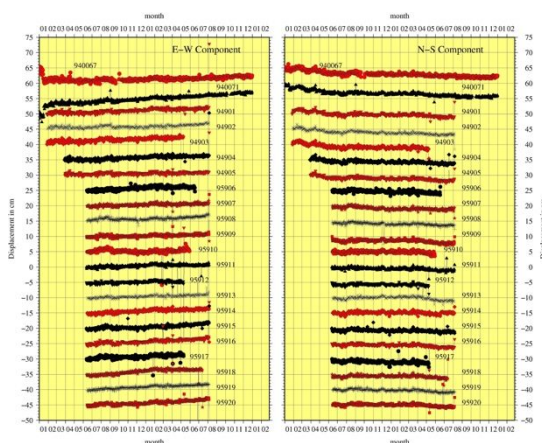


図 2. 緊急 GPS 連続観測局の 1995 年 1 月～1996 年 12 月までの座標変化 (左) 東西 (右) 南北成分。IG b2008 系での変化。一目盛は 5 cm。

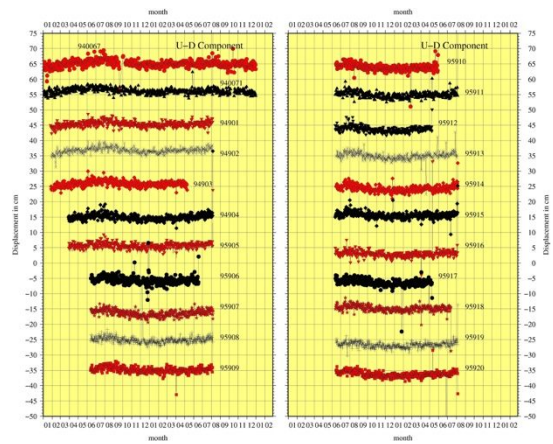


図 3. 緊急 GPS 連続観測局の 1995 年 1 月～1996 年 12 月までの座標上下成分の変化。一目盛は 5 cm。

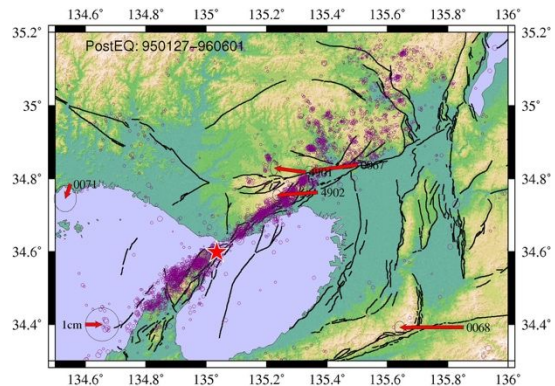


図 4. 1995 年 1 月 27 日から 1996 年 6 月 1 日間の緊急 GPS 連続観測局の水平変動。アムール・プレート準拠に変換したもの。

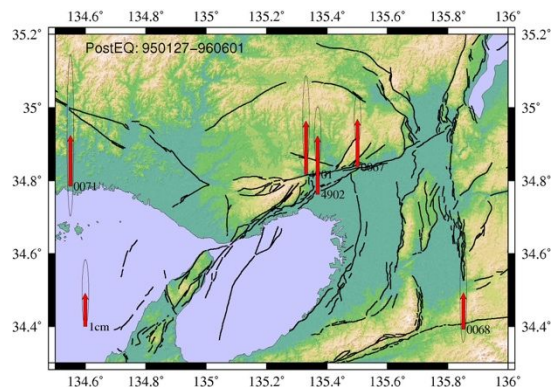


図 5. 1995 年 1 月 27 日から 1996 年 6 月 1 日間の緊急 GPS 連続観測局の上下変動。

得られた座標変化をアムール・プレート準拠に変換すると、本震震央の東側の観測局が西へ移動していることがわかった (図 4)。これは、震源断層あるいはその周辺での右横ず

れ運動を示唆する．ただし，4901（宝塚）と4902（西宮瓦木）の変位の方向と大きさが少し異なる．上下変位は，すべて隆起となっているが，誤差が大きい（図5）．

3) 人工衛星搭載合成開口レーダー画像から得られた地盤変動

1997年までの JERS-1 画像の干渉処理の結果，六甲山系の山頂部（図6のA点）では，約11 mm/yrの視線距離短縮が検出された（図7）．GPS 観測結果を考慮すると，JERS-1の視線距離短縮は，水平変動の寄与が大きいと考えられる．ERS-1/2とEnvisatのCバンドレーダーでは六甲山系の山頂部で，十分なコヒーレンスが得られない．ALOS-1では山頂部に5 mm/yrを超える顕著な隆起は検出されなかった．ALOS-2は，観測回数が少なく，大気の影響による不規則な見かけの変動が山間部に広く分布し，有意な変動を認めづらい．

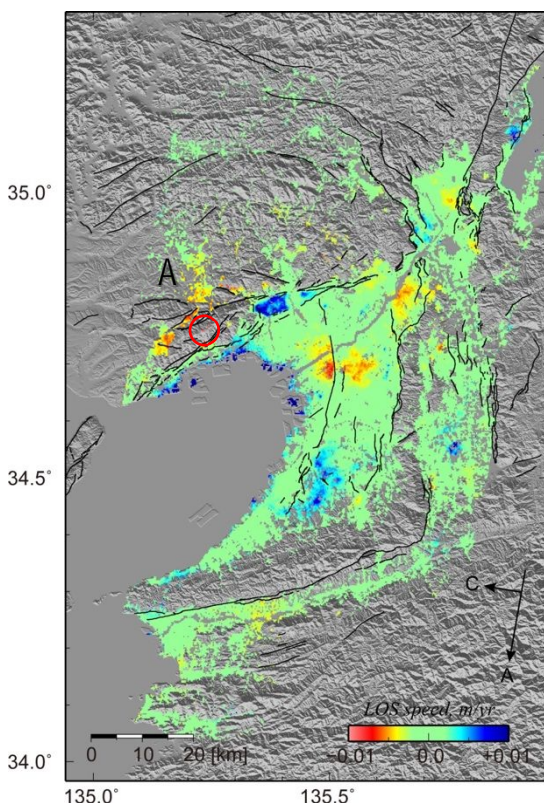


図6．JERS-1 データの時系列解析で得られた平均視線距離変化速度．青が視線距離伸長を示す．

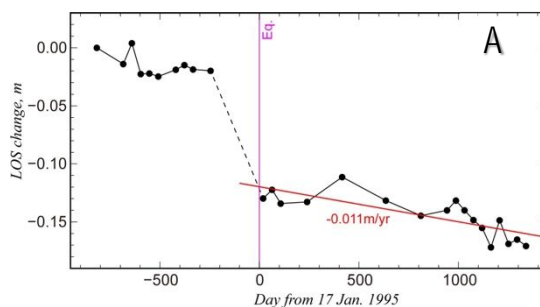


図7．図6中A点の視線距離の時間変化

以上まとめると，

- 1) GPS 測量の結果，六甲山系の三角点は，隆起していない．
- 2) 緊急 GPS 連続観測データの解析から，地震直後に余効変動は見られたが，1年を超える変動は見られない．
- 3) SAR の再解析結果では，六甲山系の頂部に地震後少なくとも2年程度は視線距離短縮が認められるが，GPS 測量を総合すると，六甲山系は東への移動が卓越していたと考えられる．

以上の結果から，兵庫県南部地震の余効変動は1995年前半に終息し，その後六甲山系を隆起させるような変動はなかった．すなわち，六甲山系の形成に寄与しなかったと結論できる．

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 2 件)

西村卓也，GNSS データから見出される日本列島のひずみ集中帯と活断層及び内陸地震，活断層研究，査読有，46，2017，33-39．

Nishimura, T., Yokota Y., Tadokoro K., Ochi T., 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, 査読有，14巻，2018，535-551，10.1130/GES01529.1

〔学会発表〕(計 10 件)

①橋本学・西村卓也・小澤拓・宗包浩志・飛

田幹男, 兵庫県南部地震以降, 六甲山は高くなったのか?, 平成 29 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, 2018 年

② Hashimoto, M., T. Ozawa, T. Nishimura, H. Muneane, M. Tobita, Ground Deformation in the Kobe-Osaka Areas during 22 Years after the Kobe Earthquake, Joint PI Meeting of Global Environment Observation Mission FY2017(国際学会), 2018 年

③ 西村卓也, GNSS 観測による地表変位から推定した内陸断層におけるクーロン応力変化 (ΔCFS), 日本測地学会第 126 回講演会, 2017 年

④ 西村卓也, GNSS 観測による地表変位から推定した内陸断層におけるクーロン応力変化 (ΔCFS), 日本地震学会 2017 年度秋季大会, 2017 年

⑤ 小澤拓・橋本学・宗包浩志・西村卓也・飛田幹男, JERS-1/InSAR 再解析: 1995 年兵庫県南部地震後の地殻変動の検出, 日本測地学会第 126 回講演会, 2017 年

⑥ 橋本学・西村卓也・小澤拓・宗包浩志・飛田幹男, 兵庫県南部地震以降, 六甲山は高くなったのか?, 日本測地学会第 126 回講演会, 2017 年

⑦ Hashimoto, M. T. Ozawa, T. Nishimura, H. Muneane, M. Tobita, Postseismic deformation following the 1995 Kobe earthquake detected by space geodesy, IAG-IASPEI 2017 (国際学会), 2017 年

⑧ Nishimura, T., Interplate coupling and slow slip events along the northern margin of the Philippine Sea plate estimated from GNSS data, 日本地球惑星科学連合・米国地球物理学連合 2017 年合同大会(招待講演)(国際学会), 2017 年

⑨ 橋本学・小澤拓・西村卓也・宗包浩志・飛田幹男, 宇宙測地技術により検出された 1995 年兵庫県南部地震の余効変動, 日本地球惑星科学連合・米国地球物理学連合 2017 年合同大会(国際学会), 2017 年

⑩ Hashimoto, M., T. Ozawa, T. Nishimura, H. Muneane, M. Tobita, Postseismic deformation following the 1995 Kobe, Japan, earthquake detected by space geodesy Postseismic deformation following the 1995 Kobe, Japan, earthquake detected by space geodesy, EGU General Assembly 2017 (国際学会), 2017 年

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 学 (HASHIMOTO, Manabu)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号: 20293962

(2) 研究分担者

小澤 拓 (OZAWA, Taku)

国立研究開発法人防災科学技術研究所・観測・予測研究領域・主任研究員

研究者番号: 70455252

西村 卓也 (NISHIMURA, Takuya)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号: 90370808

(3) 連携研究者

宗包 浩志 (MUNEKANE, Hiroshi)

国土地理院・地理地殻活動研究センター・

研究室長

研究者番号: 50370812

飛田 幹男 (TOBITA, Mikio)

国土地理院・測地部・部長

研究者番号: 40370811

(4) 研究協力者

長岡愛理 (NAGAOKA, Airi)

京都大学防災研究所・技術室・技術職員

高橋温志 (TAKAHASHI, Atsushi)

京都大学大学院・理学研究科・博士課程 3

回

生

坂上 啓 (SAKAUE Hiromu)

京都大学大学院・理学研究科・博士課程 3

回

生

伊東優治 (ITO YUJI)

京都大学大学院・理学研究科・博士課程 2

回生

国土交通省国土地理院測地部・測地観測セ

ンター・近畿地方測量部