

2018年大阪府北部の地震および西日本豪雨に伴う 六甲高雄観測室における地殻変動について

向井 厚志 (福山市立大学都市経営学部)

大塚 成昭 (神戸学院大学人文学部)

福田 洋一 (京都大学大学院理学研究科)

1. はじめに

2018年、西日本はいくつもの自然災害に見舞われた。そのうちのひとつが、2018年6月18日に発生した大阪府北部の地震(M6.1)である。有馬-高槻断層帯近傍の高槻市直下を震源とするこの地震によって、最大震度6弱の揺れが大阪府北部を襲い、甚大な人的・物的被害が生じた。このとき、震源から約100km西方に位置する神戸市も震度4の大きな揺れを記録し、同市内に開設された六甲高雄観測室では、顕著な歪変化および地下水流動の変化が観測された。遠方の大地震に伴う歪変化は、過去、2000年鳥取県西部地震(M7.3)、2004年紀伊半島南東沖地震(M7.1)、2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)などでも観測されてきた(向井・大塚, 2013)。いずれの場合の歪変化も、地震動到達後、数分以上かけて緩やかに変化しており、その大きさは国土地理院等が発表した震源断層モデルから求められる歪ステップの計算値と比べて数倍以上大きい。この差異は、六甲高雄観測室が貫く万福寺断層の破碎帯の収縮および周辺岩盤中の間隙水圧の上昇によって生じたものと考えられている。また、向井他(2017)は、2016年鳥取県中部地震(M6.6)等の地震動に伴う地下水流動の変化を用いて断層破碎帯の透水性の変化を推定し、地震直後に透水係数が低下したことを示した。これらのことは、激しい地震動を受けるたびに断層破碎帯の力学的・水理学的構造が変化し、その影響が歪変化等の地殻変動観測値に現れることを示している。

西日本に甚大な被害を及ぼした2018年の自然災害としては、平成30年7月豪雨も挙げられる。2018年6月28日から始まった降雨は1週間以上断続的に続き、西日本を中心とした広い範囲に記録的な大雨をもたらした。このとき、神戸市においても7月5日・6日の2日間で372mmの積算降水量を記録した。この降水量は、神戸市の7月降水量平年値(157mm)の約2.4倍にあたる。こうした短期集中的な降水を受けて、六甲高雄観測室では数日以上の時定数をもつ緩やかな歪変化が観測された。

本稿では、上記の2018年大阪府北部の地震および平成30年7月豪雨時に観測された歪変化、湧水量変化および間隙水圧変化の特徴を示すとともに、そうした変化が生じた原因について考察する。

2. 2018年6月～7月に六甲高雄観測室で観測された歪変化、湧水量変化および間隙水圧変化

六甲高雄観測室では、埋設型石井式歪計(ST1, ST2, ST3)による歪変化の連続観測に加え、湧水量計(DIS)による湧水量変化、間隙水圧計(WP1, WP2, WP3)による間隙水圧変化の連続観測が実施されている。図1は、2018年6月1日以降の2か月間に観測された歪変化、湧水量変化および間隙水圧変化を示す。いずれも0.1秒間隔で測定された観測値に1時間のローパスフィルターを当てはめた結果である。また、神戸地方気象台で得られた地上気圧および降水量の観測値を同時に示す。なお、間隙水圧計WP1の観測値は、圧力センサー等の不調によって得られなかった。

2018年大阪府北部の地震の発生時には、歪変化、湧水量変化、間隙水圧変化のいずれにおいてもステップ状の変化が現れた。地震に伴う歪変化は 0.1μ strain オーダーであり、ほぼ東西方向の歪変化を

表す ST1 (S81°E) が縮み, 他の2成分 ST2 (N39°E) および ST3 (S21°E) が伸びを示した。地震後の歪変化も成分によってやや異なる。ST1 では地震時のステップがそのまま長期間残ったが, ST2 および ST3 では7日～10日の時定数で元の値へと回復していった。湧水量変化および間隙水圧変化では, 地震発生直後に湧水量の増大および間隙水圧の上昇がみられた。側溝に三角堰を設けて計測している湧水量では, 地震直後に生じた大量の湧水のため, 側溝から水があふれ出し, 5日間にわたって頭打ちの測定値(約820ml/s)が続いている。その後, 約18日の時定数で湧水量が減少していったが, 地震発生から1か月以上経過した7月末の時点でも, 地震発生直前と比べて約20ml/s多い状態となっている。間隙水圧 WP2 は, 地震発生から10時間後に一気に圧力が抜けたような間隙水圧の低下がみられた。その後は, 間隙水圧 WP3 と同様に, 10日前後の時定数で元のレベルに戻りつつある。ただし, 7月末時点でも地震発生直前と比べて, 約40hPa高い間隙水圧を保っている。

図1の(b)は, 平成30年7月豪雨により西日本で降水が断続的に続いた2018年6月28日～7月8日の期間を示している。同期間のうち, 神戸市において集中的な豪雨がみられた同年7月6日頃に, 歪変化のトレンドの変化が認められる。このとき, いずれの歪成分においても, ティレンドが縮み方向に変化した。このトレンドの変化は指数関数的な変化を示し, 10日から1か月程度かけて元の傾きに戻っている。なお, 7月9日以降の ST1 および7月25日以降の ST2 は計測システムの不調のため, 乱れた観測値となっており, 図1のグラフからは外してある。

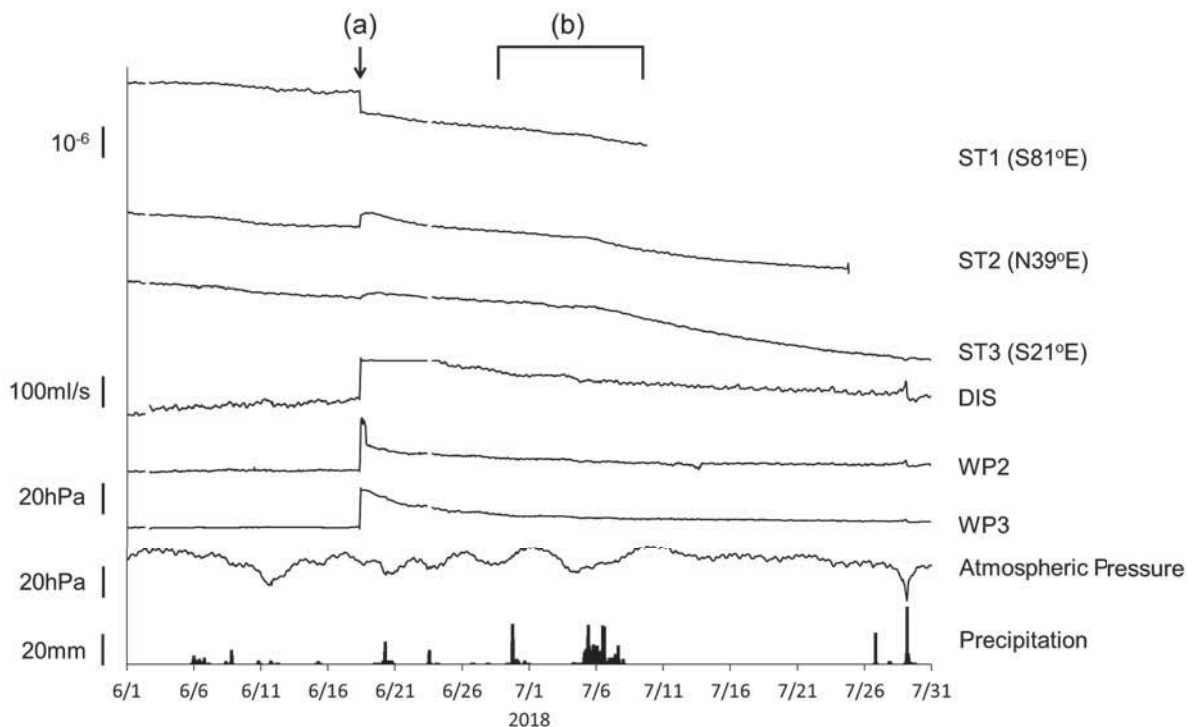


図1. 2018年6月～7月に六甲高雄観測室で観測された歪変化および地下水流動

六甲高雄観測室に設置されている埋設型石井式歪計(ST1, ST2, ST3), 湧水量計(DIS)および間隙水圧計(WP2, WP3)で観測された歪変化, 湧水量変化および間隙水圧変化のうち, 2018年6月～7月の観測値を示す。図中の(a)は2018年大阪府北部の地震の発生日時, (b)は平成30年7月豪雨で降水が断続的に続いた期間を示す。なお, 気圧および降水量は, 同観測室の約5km南南東に位置する神戸地方気象台で観測された地上気圧および1時間降水量である。

3. 2018年大阪府北部の地震に伴う歪変化、湧水量変化および間隙水圧変化

図2は、2018年6月18日07時58分に発生した大阪府北部の地震(M6.1)の地震動が六甲高雄観測室に到達する前後4分間に、0.1秒間隔で観測された歪変化、湧水量変化および間隙水圧変化を示す。地震動の到達とともに、 0.01μ strain オーダーのステップ状の歪変化が現れた。この歪ステップは、ST1 および ST2 が伸び、ST3 が縮みとなっている。その後、 0.1μ strain オーダーの歪地震動が観測されるとともに、ST1 では縮み、ST2 では伸びの指数関数的な変化が生じた。いずれも時定数は約1分であり、地震動到達直前と比べ、08:01時点でST1は -0.25μ strainの縮み、ST2は $+0.32\mu$ strainの伸びを示した。なお、ST3は歪地震動を記録しているものの、地震動到達後の緩やかな歪変化はみられない。

湧水量では、地震動に伴う増加が緩やかに進み、地震動到達から1分以上経過した後になって、ようやく明瞭な増加傾向が確認できた。一方、間隙水圧は地震動の到達直後から上昇を開始している。しかし、その上昇傾向は間隙水圧計の設置場所によって異なり、万福寺断層から離れたWP2では緩やかに上昇したのに対し、万福寺断層に近いWP3では、地震動到達後10秒弱の間にステップ状に間隙水圧が上昇した。この差異は、計器が設置されている周辺岩盤の破碎状況を反映していると考えられる。地震動によって断層破碎帯の亀裂が押しつぶされ、断層破碎帯の間隙水圧が上昇することが想定される。このとき、圧縮される断層破碎帯内部またはその近傍に位置するWP3では急激な間隙水圧の上昇が観測されるが、その周辺にあるWP2では間隙水圧上昇の伝播が遅れ、緩やかな変化を示すものと推察される。なお、図2のWP2にみられる短周期の振動は、気泡の放出に伴って生じた圧力変化と考えられる。

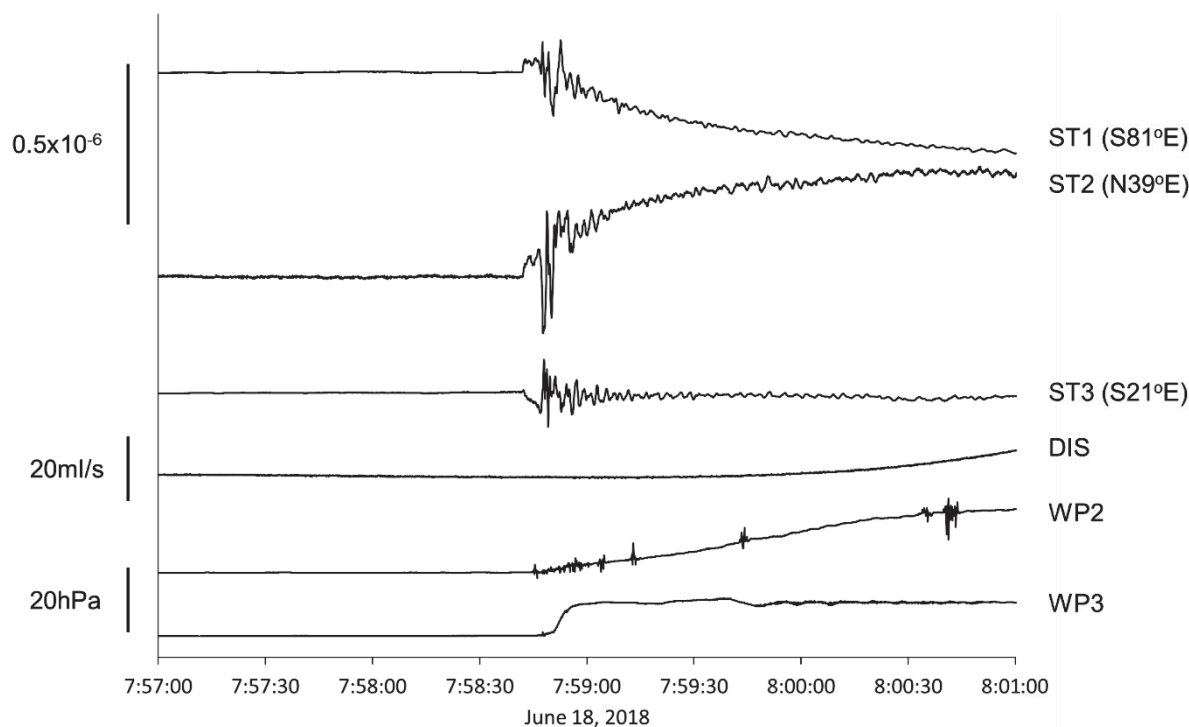


図2. 2018年大阪府北部の地震発生前後で観測された歪変化、湧水量変化および間隙水圧変化
2018年6月18日07:57:00~08:01:00の4分間に六甲高雄観測室の埋設型石井式歪計(ST1, ST2, ST3)、湧水量計(DIS)および間隙水圧計(WP2, WP3)で観測された歪変化、湧水量変化および間隙水圧変化を示す。

京都大学防災研究所(2018)は、気象庁震度計、関西地震観測研究協議会および京都大学防災研究所の18観測点における速度波形3成分を用いて2018年大阪府北部の地震の震源過程を調べ、そ

の断層モデルとして、走向 351° 、傾斜 50° の断層面における右横すべりと走向 52° 、傾斜 77° の断層面における逆断層すべりを推定した。この断層モデルに気象研究所の地殻変動解析支援プログラム MICAP-G (内藤・吉川, 1999) を当てはめて、六甲高雄観測室における歪ステップを計算したところ、 $N55^\circ E$ 方向に伸びの最大主歪 $+0.030 \mu \text{ strain}$ 、その直交方向に縮みの最小主歪 $-0.017 \mu \text{ strain}$ が現れることがわかった。

図3は、図2の歪観測値を用いて主歪を計算した結果を示す。この計算では、07:57:00 時点の値を基準とし、同時点からの相対的な歪変化を用いた。最大主歪および最小主歪は地震動到達直後に $0.01 \mu \text{ strain}$ オーダーでステップ状に変化し、最大主歪の方向は、地震動到達直後の 5 秒間にわたって約 $N64^\circ E$ 方向を示した。これらの値は、京都大学防災研究所 (2018) の断層モデルから求められる歪ステップとほぼ一致しており、六甲高雄観測室においても断層変位に伴う弾性的な歪変化をとらえていたことがわかる。しかし、その後は約1分の時定数で主歪が変化し、最大主歪の方向は $N27^\circ E$ 方向で安定した。

地震発生から数分経過した時点での最大主歪の方向が北北東-南南西方向になることは、2000 年鳥取県西部地震や 2011 年東北地方太平洋沖地震など、六甲高雄観測室に顕著な地震動をもたらした地震発生時に観測されてきた (向井・大塚, 2013)。その原因として、地震動によって断層破碎帯が収縮し、歪計の周辺岩盤が伸張したことが考えられている。2018 年大阪府北部の地震時にも、同様な地震動による断層破碎帯の収縮が生じたことが示唆される。

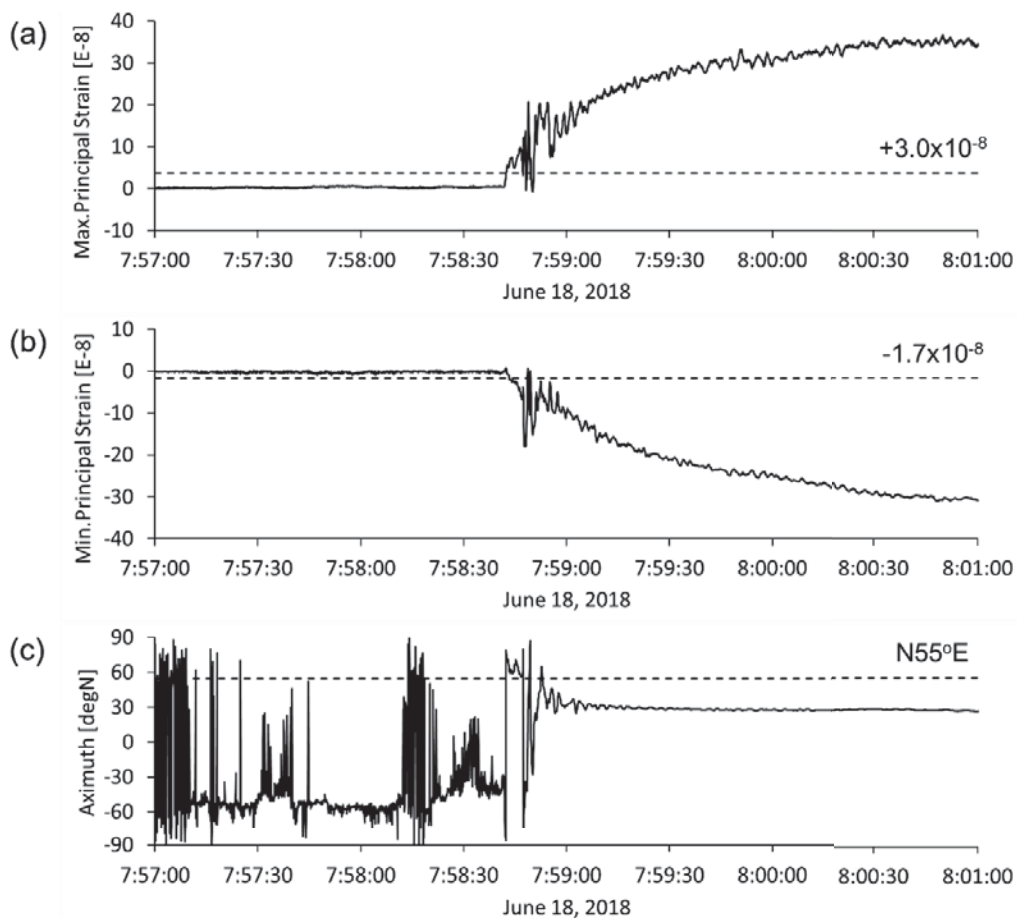


図3. 2018 年大阪府北部の地震発生前後で観測された主歪変化

図2に示した歪変化の観測値 (ST1, ST2, ST3) を用いて、(a)最大主歪、(b)最小主歪、(c)最大主歪の方向を計算した結果を示す。同時に、京都大学防災研究所 (2018) の震源断層モデルに基づいて計算した値を破線および数値で示す。

4. 平成30年7月豪雨に伴う歪変化, 湧水量変化および間隙水圧変化

平成30年7月豪雨時には、神戸市においても7月5日・6日の2日間で372mmの積算降水量を記録した。この集中豪雨に伴って、六甲高雄観測室の歪変化にはトレンドの変化が現れた(図4)。2018年7月5日以前のST1, ST2およびST3は、それぞれ1日あたり-0.03, -0.04および-0.03 μ strainの縮みを示していたが、7月6日には1日あたり-0.09, -0.23および-0.09 μ strainの縮みへと増大した。ただし、これら傾きの変化は数日程度の時定数で指数関数的に収束してゆき、7月末頃にはほぼ元のトレンドに回復した。

一方、湧水量変化および間隙水圧変化には、集中豪雨に伴う顕著なトレンドの変化はみられない。図4の湧水量変化および間隙水圧変化には、時定数10~30日の指数関数的な変化が含まれているが、これらは2018年6月18日に発生した大阪府北部の地震に伴う地下水流動を反映していると考えられる。

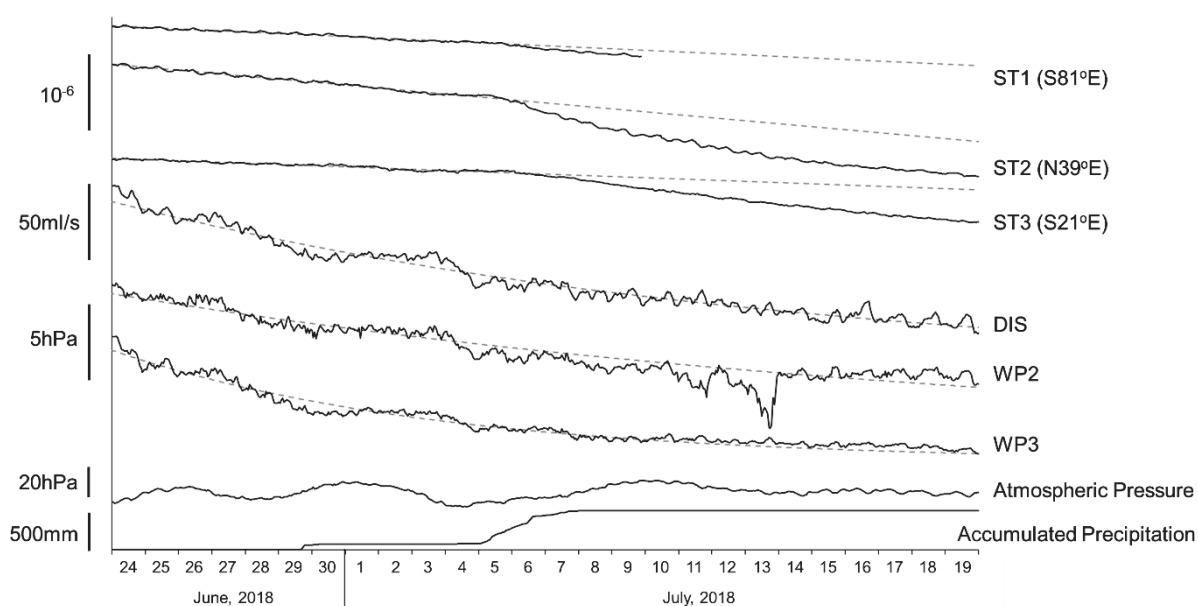


図4. 平成30年7月豪雨前後で観測された歪変化および地下水流動

2018年6月24日~7月19日に六甲高雄観測室の埋設型石井式歪計(ST1, ST2, ST3), 湧水量計(DIS)および間隙水圧計(WP2, WP3)で観測された歪変化, 湧水量変化および間隙水圧変化を示す。破線は2018年6月24日~7月4日の観測値に当てはめたトレンドであり、歪変化のトレンドは直線、湧水量変化および間隙水圧変化のトレンドは指数関数とした。なお、気圧および降水量は神戸地方気象台の観測値であり、降水量として2018年6月24日以降の積算降水量を示している。

図5は、図4の歪観測値を用いて主歪を計算した結果を示す。この計算では、図4の破線で示したトレンドを取り除いた後の歪観測値を用いた。なお、潮汐成分および気圧応答成分は歪観測値から除去せずに残したままとなっているため、主歪およびその方向には1日周期の変動がみられる。

平成30年7月豪雨による集中豪雨が生じた7月5日・6日およびそれ以降においても、最大主歪は0.01 μ strain オーダーで揺らぐ程度であり、ほぼ変化がみられない。一方、最小主歪には、7月6日09時頃から約3日の時定数をもつ指数関数的な縮みの変化が現れた。最大主歪の方向はN55°Wであり、集中豪雨に伴ってほぼ北東-南西方向に縮んでいったことを示している。

六甲高雄観測室は六甲山地南西部のかぶり240m地点にあり、降水直後に同観測室周辺の地下水

量が変化することはないが、地面表層に一時的に蓄えられた雨水によって荷重変形を引き起こすことは考えられる。六甲山地は北東-南西方向に稜線が続いており、谷間に雨水が流入した場合、同方向に伸びた帯状の荷重領域が現れることになる。このとき、荷重領域の周辺では北東-南西方向の縮みが生じることが予想され、図5に示す観測結果と定性的に矛盾しない。しかし、こうした荷重変形の場合、荷重領域に直交する北西-南東方向には伸びの歪変化が生じることとなり、図5の最大主歪に変化がみられないという観測結果を説明することができない。こうした矛盾は、詳細な地形を考慮したより現実的な荷重領域を設定することで解決する可能性がある。今後、降水量と数値地図を組み合わせ、地面表層における雨水の移動に伴う荷重変形を数値計算し、観測された歪変化を定量的に説明できるのかについて研究を進めていく必要がある。

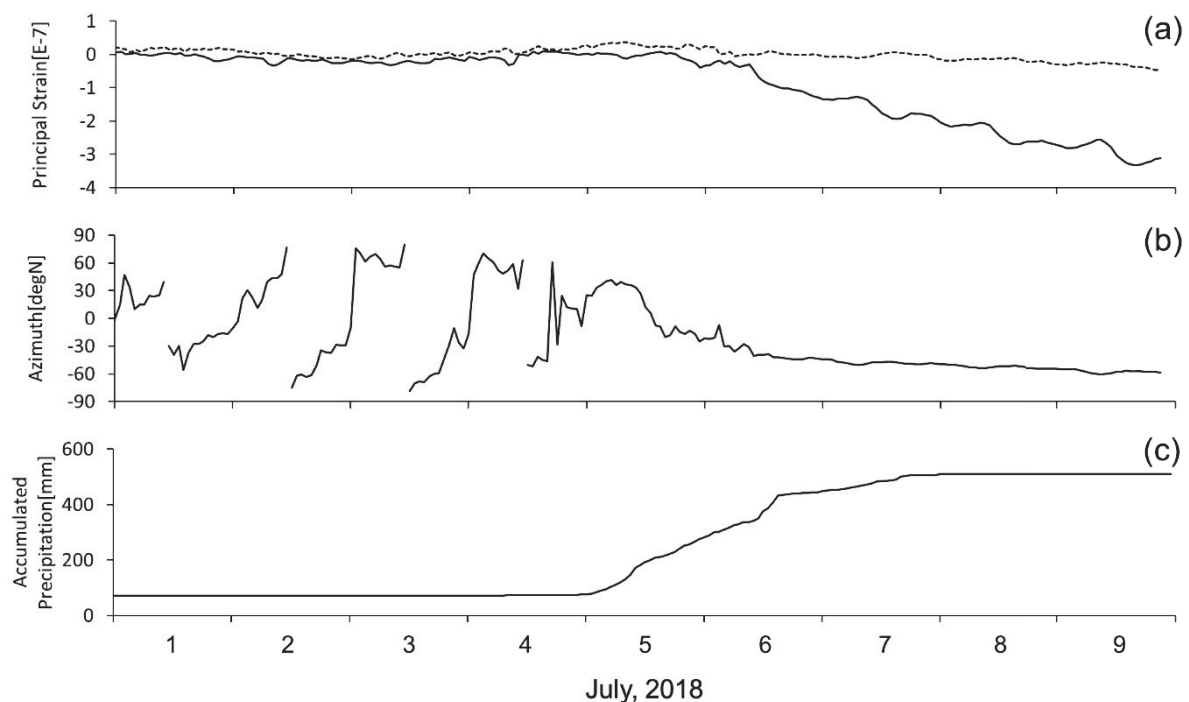


図5. 平成 30 年 7 月豪雨期間中および期間後に観測された主歪変化

図4に示した歪観測値(ST1, ST2, ST3)を用いて計算された 2018 年 7 月 1 日～7 月 9 日の(a)最大主歪(点線)および最小主歪(実線), (b)最大主歪の方向の変化を示す。下段(c)は、神戸地方気象台の降水量観測値を用いて計算した 2018 年 6 月 24 日以降の積算降水量を表す。

5. まとめ

2018 年大阪府北部の地震に伴って、兵庫県南部の六甲高雄観測室では、ステップ状の顕著な歪変化、湧水量変化および間隙水圧変化が観測された。歪観測値には、地震動到達直後の数秒間、同地震の断層モデルから求められる歪ステップと同程度の歪変化が記録されており、同観測室においても断層変位に伴う弾性的な歪変化をとらえていたと考えられる。ただし、その後の歪観測値は、約1分の時定数をもつ指数関数的な歪変化を示した。これは、2011 年東北地方太平洋沖地震など、過去の大地震の際にもみられたように、地震動によって万福寺断層の断層破碎帯が収縮し、歪計周辺の間隙水圧が上昇したために生じたものと考えられる。この地震動に伴う間隙水圧の上昇は、同観測室に設置された複数の間隙水圧計による観測値からも確認することができる。

神戸市では、平成30年7月豪雨時の2日間で372mmの積算降水量を記録した。この集中豪雨に伴って、六甲高雄観測室では歪変化のトレンドに変化が生じた。このトレンドの変化には伸びの歪変化が含まれず、約3日の時定数で北東-南西方向に指数関数的に縮む傾向がみられた。こうした歪変化は、集中豪雨による雨水が地面表層を流れ、谷間に蓄積することによって生じた荷重変形を反映していると考えられる。同観測室が位置する六甲山地は北東-南西方向に稜線をもち、同方向に谷筋が伸びていることから、雨水の蓄積による同方向への縮みは説明できる。しかし、単純な帯状の荷重を考えた場合、荷重領域に直交する方向に伸びの歪変化が現れることになり、観測結果と矛盾する。こうした矛盾は、詳細な地形を考慮した現実的な荷重領域を設定することで解決する可能性があり、今後、降水量と数値地図を組み合わせた定量的な評価が必要となる。

謝 辞

六甲高雄観測室の整備と観測継続に関しては、神戸市道路公社および阪神高速道路株式会社のご理解とご援助の賜である。ここに謝意を表す。また、本研究を進めるにあたり、その一部として神戸学院大学人文学部研究推進費が使用された。ここに謝意を表す。

参考文献

- 向井厚志・大塚成昭(2013)：六甲高雄観測室で観測された地震後の地下水流動に伴う歪変化，地球惑星科学連合大会 2013, SSS34-P13, 2013/5/23.
- 向井厚志・大塚成昭・福田洋一(2017)：熊本地震・鳥取県中部地震時の地下水の挙動，地殻活動研究委員会報告書, 38, 57-64.
- 京都大学防災研究所(2018)：2018年6月18日7時58分大阪府北部の地震の震源過程, 2018/7/10, <http://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/activity/220/image220/030.pdf>
- 内藤宏人・吉川澄夫(1999)：地殻変動解析支援プログラムの開発，地震2, 52, 101-103.

