

## 六甲高雄観測室における断層破碎帯近傍の地下水変動観測

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

兵庫県南部の六甲高雄観測室は万福寺断層を貫いており、その断層破碎帯周辺からは定常的な湧水が生じている。この湧水は側溝に集められ、観測室外への排出されている。同観測室では、側溝を流れる湧水を三角堰でせき止めることによって湧水量を測定しており、1993年以降、湧水量変化の連続観測が実施されてきた(京都大学大学院理学研究科・東京大学地震研究所, 1995)。また、2009年には、観測室内の床面に穿たれた直径13cmの穴にパイプを挿入し、パイプ内の水位変化を圧力センサーで測定することによって間隙水圧変化の連続観測も開始した。こうした湧水量変化および間隙水圧変化の観測値を組み合わせることで、2011年東北地方太平洋沖地震の地震動によって断層破碎帯の透水性が変化したことを明らかにすることができた(向井他, 2016)。その後、2016年に同方式の間隙水圧計を2台追加し、万福寺断層からの距離を変えて間隙水圧変化が測定できるように観測体制を整備した(向井他, 2018)。さらに2018年8月には、万福寺断層近傍に密封型の間隙水圧計を設置し、間隙水圧変化の連続観測を開始した。従来のパイプ内の水位変化を測定する開放型の間隙水圧計とは異なる測定方法であり、本稿ではまず両方式で得られた間隙水圧変化の観測値を比較した結果について報告する。

長期的な湧水量変化は降水量に依存しており、同観測室では、降水から数か月遅れで湧水量が増加することが知られている。そのため、通常、秋季に湧水量の極大値が現れ、春季に向かって湧水量が減少していく傾向がみられる。同様な特徴は間隙水圧変化にも現れ、湧水量変化に対応して、秋季に極大となる年周変化が生じる。降水量に依存することから推察されるように、湧水量および間隙水圧の年周変化の大きさは必ずしも一定ではなく、年によって大きく変動する。近年では、2017年における両者の年周変化が極めて小さく、年間を通してほぼ一定の値で推移した。こうした湧水量および間隙水圧の年周変化の縮小が降水量のみで説明できるのかについても考察する。

### 2. 六甲高雄観測室における間隙水圧変化の連続観測

六甲高雄観測室では、埋設型石井式歪計(ST1, ST2, ST3)等による地殻変動の連続観測に加え、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も実施してきた(図1)。地下水流を空間的に稠密に観測し、不均質な透水性構造を考慮した地下水流モデルを構築することを目的として、これら3台の間隙水圧計は万福寺断層からの距離を変えて設置されている。断層からの距離は、断層に最も近いWP3で19.3m、最も遠いWP1で42.3mであり、互いに約10m離れている。

図1の写真にみられるように、間隙水圧計WP1~3は、床面に設置したパイプ内の水位変化を圧力センサーで測定する方式である。この測定方法の場合、パイプ内外への地下水の移動が必要となるため、短周期の間隙水圧変化を正確に測定することができない。そこで、間隙水圧計WP3の近傍に密封容器内の水圧を測定する方式の間隙水圧計WP4を新たに設置し、既存の開放型間隙水圧計との比較を行なうこととした。

間隙水圧計 WP4 による間隙水圧変化の連続観測は 2018 年 8 月 22 日に開始された。図2は、2018 年 8 月 23 日～12 月 15 日の 115 日間に観測された間隙水圧変化を示す。同期間における WP1, WP2, WP3 および WP4 の平均間隙水圧は、それぞれ 77.4, 42.9, 29.1 および 29.1hPa であり、断層に近い測定点ほど低い値となっている。これは、断層近傍で亀裂が発達していることが影響していると考えられ、主要な湧水地点に近く、間隙水圧がかかりにくい状況となっていると推察される。

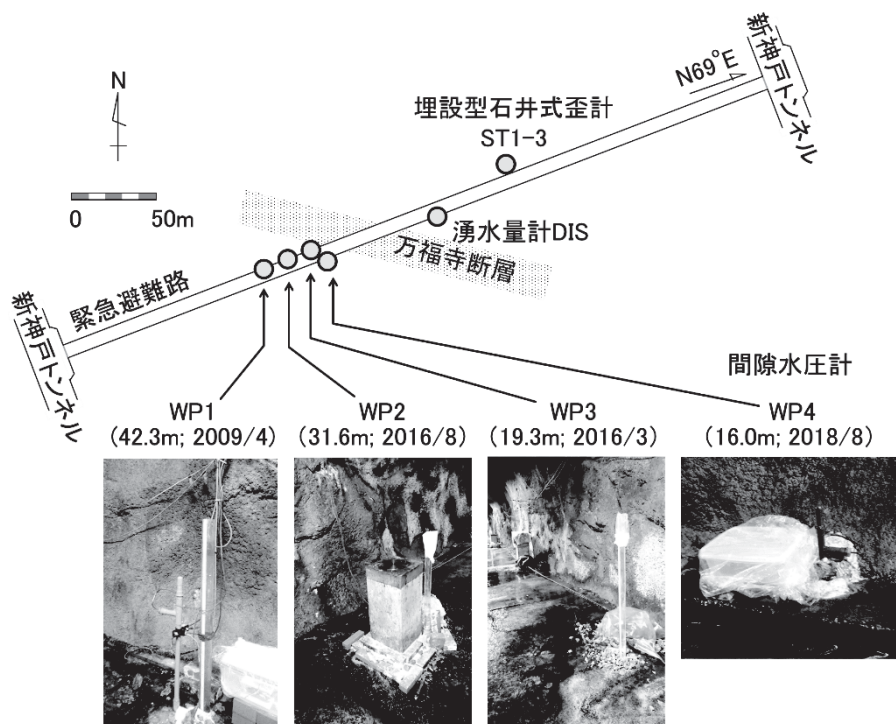


図1. 六甲高雄観測室における主な観測機器の配置

六甲高雄観測室に設置された埋設型石井式歪計(ST1-3)、湧水量計(DIS)および間隙水圧計(WP1-4)の配置を示す。写真は間隙水圧計の外観であり、写真上のカッコ内には、万福寺断層からの距離と設置年月が記されている。

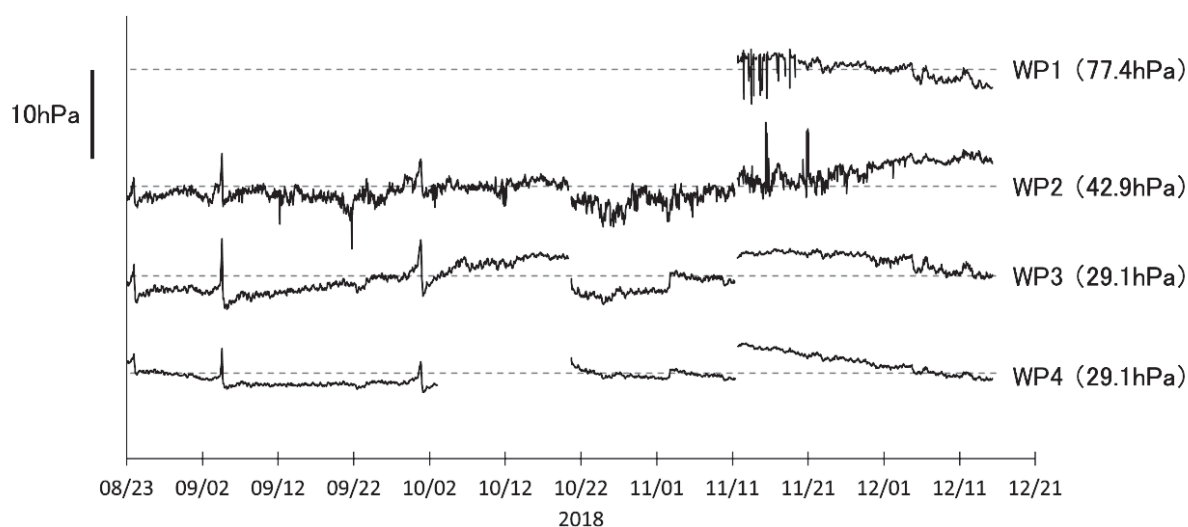


図2. 2018年8月23日～12月15日に六甲高雄観測室で観測された間隙水圧変化

2018年8月23日以降に間隙水圧計(WP1-4)で観測された間隙水圧変化を示す。波形を確認しやすいように、各観測値は縦軸方向にスライドさせてある。破線およびカッコ内の数値は各観測値の平均値を示す。

密封型間隙水圧計 WP4 の平均間隙水圧は、隣接する開放型間隙水圧計 WP3 と同じであり、気圧変化に対する応答等の長期的な間隙水圧変化に関しても、両者は相関の高い時間的变化を示している。ただし、その変動幅は WP4 の方が小さく、約 0.6 倍に留まっている。長期的な間隙水圧変化に関しては、他の間隙水圧計 WP1 および WP2 とも共通する変動が多く、各間隙水圧計の周辺に広がる水路が互いに連結している可能性を示唆している。しかし、2018 年 11 月中旬以降の WP2 は、他の測定点と異なり、間隙水圧の上昇傾向を維持しているなど、他と異なる長期変動を示す期間もみられる。こうした間隙水圧変化が局所的な地下水流動を反映したものなのかについては、歪変化等の地殻変動観測値と比較しながら検証していく必要がある。

図3は、観測された間隙水圧変化に含まれる潮汐成分の振幅および位相を理論潮汐と比較した結果である。前者は、間隙水圧変化の観測値に潮汐解析プログラム BAYTAP-G (Tamura et al., 1991) を当てはめて推定した  $O_1$  分潮および  $M_2$  分潮の潮汐振幅および位相である。この計算では、間隙水圧変化の符号として、水圧低下方向を正とした。また、WP1, WP2, WP3 の潮汐解析では 2016 年以降の最大3年間の観測値を用いたのに対して、WP4 では図2に示す 115 日間の観測値のみを用いた。比較対象とする理論潮汐は、海洋荷重潮汐計算プログラム GOTIC2 (Matsumoto et al., 2001) を用いて計算した体積歪である。いずれも位相は遅れを正とした。

図3(a)にみられるように、観測された  $O_1$  分潮の潮汐振幅は推定誤差が大きく、その範囲内で互いに一致しているが、 $M_2$  分潮の潮汐振幅は互いに推定誤差を上回る差異を示しており、WP3, WP4, WP2, WP1 の順で大きな潮汐振幅が求められた。理論潮汐に対する振幅比は、WP1, WP2, WP3 および WP4 でそれぞれ 0.021, 0.011, 0.005, 0.007 である。このことは、万福寺断層の近傍において、全応力に対する間隙水圧の寄与が数%弱であることを示している。WP3 と WP4 の間で逆転しているが、おおむね万福寺断層に近づくほど、潮汐振幅が小さくなる。これは、断層に近いほど亀裂が発達し、湧水地点が近いため、間隙水圧がかかりにくい状況を反映していると考えられる。

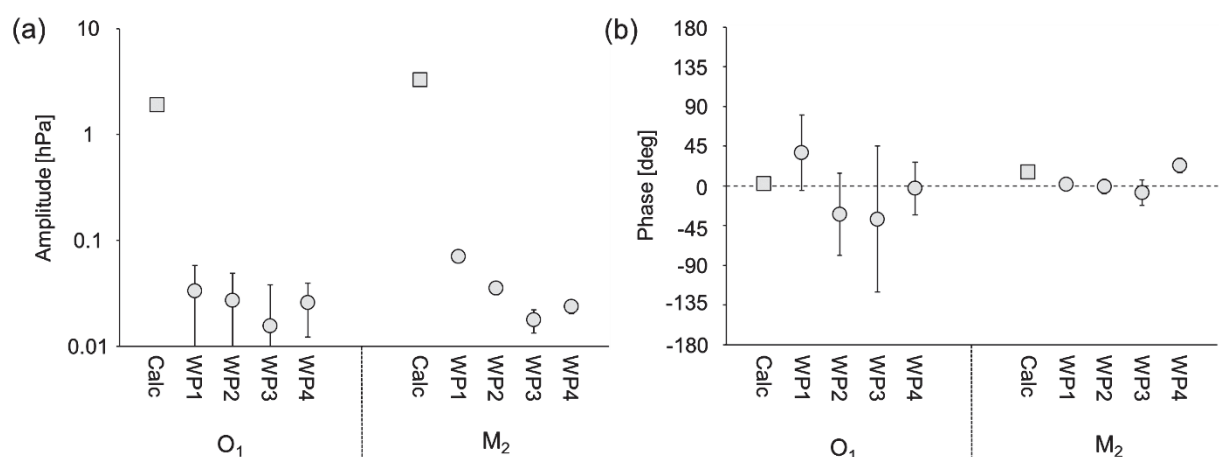


図3. 間隙水圧変化の潮汐成分の観測値と理論値の比較

(a)観測された間隙水圧変化の潮汐成分のうち、 $O_1$ 分潮および $M_2$ 分潮の潮汐振幅を○印で示す。縦軸のバーは推定誤差を表す。(b)各分潮の位相の観測結果を○印で示す。観測値から潮汐成分の位相を求める場合、間隙水圧が低下する方向を正とした。いずれのグラフにおいても、□印は体積歪の理論値を示しており、体積歪の伸長を正としている。なお、位相は遅れを正とする。

潮汐成分の位相に関しても、観測された  $O_1$  分潮の位相は推定誤差が大きく、互いに明瞭な差異は認められないが、少なくとも推定誤差の範囲内で理論値と一致している。 $M_2$  分潮の位相は、開放型間隙水圧計 WP1, WP2, WP3 がそれぞれ  $2 \pm 4$ ,  $-1 \pm 8$ ,  $-8 \pm 14$  と、ほぼ  $0^\circ$  付近の値で求められたのに対して、密封型間隙水圧計 WP4 の位相は  $23 \pm 8^\circ$  と推定誤差を上回る差異がみられた。 $M_2$  分潮の位相の理論値は  $16^\circ$  であり、後者の WP4 と推定誤差の範囲内で一致する。このことは、地下水の移動を必要としない密封型間隙水圧計の方が、より正確な間隙水圧変動を検出できている可能性を示唆している。

### 3. 六甲高雄観測室における湧水量および間隙水圧の年周変化

図4は、2005 年以降に六甲高雄観測室で観測された歪変化 (ST1, ST2, ST3), 湧水量変化 (DIS), 間隙水圧変化 (WP1) を、神戸地方気象台で得られた地上気圧および日降水量の観測値とともに示す。いずれの観測値にも明瞭な年周変化成分が含まれている。湧水量変化 DIS の場合、秋季ごろに極大となる年周変化がみられ、春季から夏季にかけての降水が数か月遅れで影響していることが伺える。間隙水圧変化 WP1 についても、観測期間が短いものの、同様に秋季ごろに極大となる年周変化が現れている。歪変化はいずれの成分においても、秋季ごろに縮み、春季ごろに伸びとなる年周変化を含んでいる。なお、2013～2014 年は収録システムの不調によって観測値が得られなかった。

歪変化、湧水量変化、間隙水圧変化のいずれも顕著な年周変化を有するが、その振幅は年によって異なる。例えば、2015 年から 2016 年にかけては、いずれの観測値においても明瞭な年周変化が現れている一方、2017 年の湧水量変化および間隙水圧変化は一年を通してほぼ一定の値で推移しており、明瞭な年周変化が確認できない。

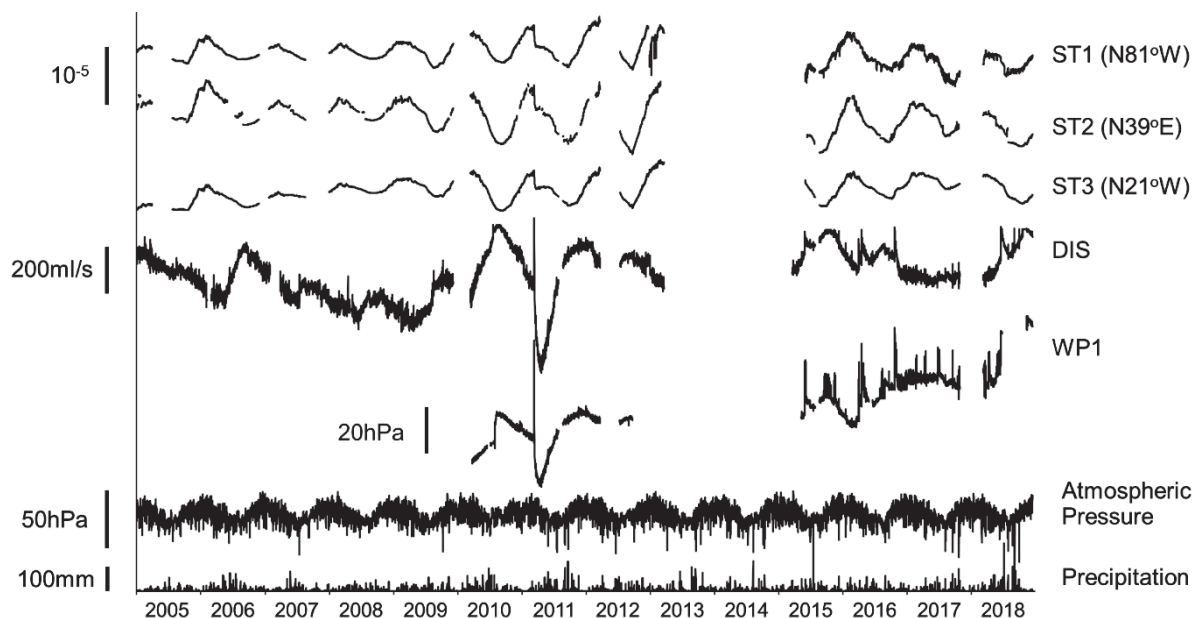


図4. 2005～2018 年に観測された歪変化、湧水量変化および間隙水圧変化

2005 年以降、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 (WP1) 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。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日降水量である。



図5は、各年の面積歪変化、湧水量変化、間隙水圧変化の観測値に次式(1)を当てはめて、年周変化の振幅 $\sqrt{a^2 + b^2}$ を推定した結果である。

$$a \sin(\omega t) + b \cos(\omega t) + ct + d \quad (1)$$

ここで、 $\omega$ は周期1年の角振動数、 $t$ は経過日数を表し、係数  $a, b, c, d$  を未知数として決定した。図5には、1年間のうち、50%以上の期間で観測値が得られている年の計算結果のみを示している。

図5(b)にみられるように、湧水量の年周変化は、2017年に加え、2005年、2008年、2018年にも比較的小さくなっている。間隙水圧の年周変化に関しては、振幅が求められている年が多くないが、2017年には湧水量変化と同様に年周変化が小さくなっている。逆に2006年、2010年、2011年の湧水量変化は、比較的大きな年周変化を示す。このうち、2011年の年周変化は、2011年東北地方太平洋沖地震の影響によるものである。

湧水量等の年周変化が年によって大きく異なる原因としては、①観測室周辺の地殻変動の影響、②降水の影響、③地震動の影響が考えられる。

観測室周辺の地殻変動は、国土地理院 GEONET の地表変位観測値から推定することができる。図6(a)は、GEONET 電子基準点「三田」「西宮」「神戸中央」の1日ごとの座標値を用いて面積歪変化を計算した結果である。図6(b)は、図5を求める際に用いた方法を GEONET の面積歪変化に適用して推定した年周変化の振幅を示す。

観測室周辺の面積歪の年周変化は、湧水量変化と同様に2008年に小さいものの、2005年、2017年、2018年はほぼ例年通りの振幅となっている。このことから、観測室周辺の地殻変動が湧水量変化や間隙水圧変化の年周変化を制御している重要な要因とは考えにくい。一方、六甲高雄観測室で観測された面積歪の年周変化に関しては、GEONET の面積歪の年周変化とやや相関があり(相関係数 0.6)、同観測室の長期的な歪変化が広域の地殻変動を反映していることが伺える。ただし、年周変化の振幅は、同観測室で得られた面積歪の方が10倍以上大きく、地下水流動等、広域の地殻変動以外の影響を強く受けている可能性が示唆される。

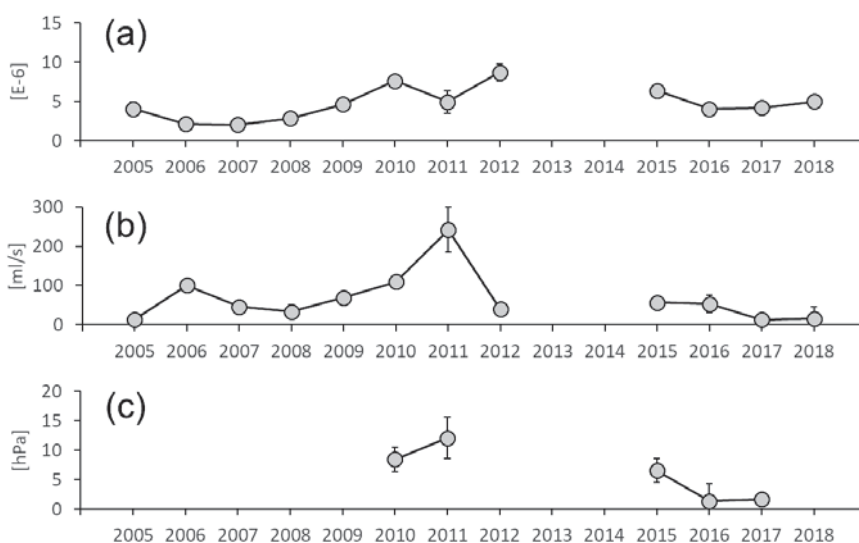


図5. 2005～2018年に観測された歪変化、湧水量変化および間隙水圧変化の年周変化の振幅  
図4の(a)歪観測値(ST1-3)から求めた面積歪、(b)湧水量変化(DIS)、(c)間隙水圧変化(WP1)を用いて推定された年周変化の振幅の推移を示す。

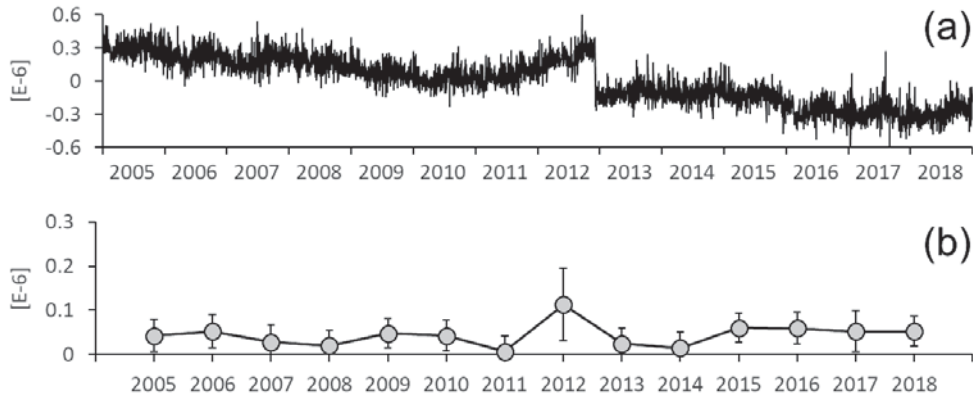


図6. 国土地理院 GEONET の観測値から求めた面積歪変化

(a)国土地理院 GEONET 電子基準点「三田」「西宮」「神戸中央」の座標値から求めた六甲高雄観測点周辺の面積歪変化を示す。(b)その年周変化の振幅の推移を示す。

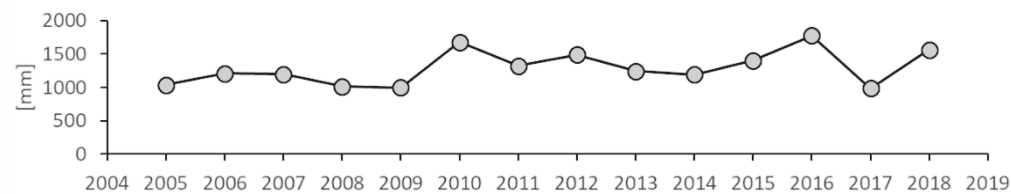


図7. 「年間降水量」の推移

図4の日降水量観測値を用いて、前年8月から当年7月までの積算降水量を計算した結果を示す。

降水量が増大すると、数か月後には地下水量が増加し、湧水量の増加や間隙水圧の増大を引き起こす。図7は、神戸市における「年間降水量」の推移を示す。この「年間降水量」は、神戸地方気象台の日降水量観測値を用いて、前年8月から当年7月までの1年間の積算降水量を求めた結果である。

図7によると、2017年の「年間降水量」はその前後の年の6割程度と少なく、夏季から秋季にかけて地下水源に涵養される地下水量が少なかったと考えられる。こうした地下水量の減少は、湧水量変化の年周変化の縮小を引き起こしうる。実際、図4にみられるように、2017年の湧水量は低い値のまま推移している。一方、2010年の「年間降水量」は例年の5割ほど多く、地下水源への地下水流入が増加し、湧水量や間隙水圧の年周変化が大きく現れたと考えられる。

地下水源の地下水量が減少した場合、湧水量の減少とともに間隙水圧の低下も生ずると考えられるが、2017年の間隙水圧は高い値を維持したまま推移している(図4)。また、2005年の「年間降水量」は平年並みであるにも関わらず、湧水量変化には年周変化がほとんどみられなかった。これらのことから、降水量が湧水量や間隙水圧の年周変化の大きさを制御する要因であると考えられるものの、それ以外にも重大な要因の存在が示唆される。

六甲高雄観測室が激しい地震動を受けた場合、万福寺断層の断層破碎帯の透水性構造が一時的に変化することが報告されてきた(例えば、向井・大塚, 2014; 向井他, 2017)。2011年東北地方太平洋沖地震では、地震発生直後の約1か月間、透水性の向上がみられたものの、その後は数か月以上にわたって透水係数が1割程度小さな状況が続いた。地震発生に伴う透水係数の低下は、2016年鳥取県中部地震でも観測され、地震発生から5か月以上にわたって透水性が2割程度低下した。こうした透水性の低

下は、地震動によって断層破碎帯の亀裂が押しつぶされた結果と考えられる。

表1は、2004年以降に神戸で震度3以上の揺れを観測した地震をまとめたものである。湧水量や間隙水圧の年周変化が縮小した2017年の前年には、2016年鳥取県中部地震が発生している。こうした地震に伴う地震動によって断層破碎帯の透水性が低下した場合、地下水源からの地下水の流れが滞り、湧水量が減少するとともに間隙水圧が高止まりすることになりうる。このことは、図4の間隙水圧変化 WP1 が2017年に高い値のまま推移している観測結果と矛盾しない。湧水量等の年周変化の縮小は2005年にもみられるが、その前年の2004年にはM7クラスの三重県南東沖の地震が発生している。この地震に伴う透水性の低下によって湧水量変化が抑えられていた可能性があり、今後、透水係数の推定等、より詳細な解析が必要と考える。

表1 2004年以降に神戸で震度3以上の揺れを観測した地震

Date	M	震度	発生場所
2004/ 09/05	7.1	3	三重県南東沖
09/05	7.4	3	三重県南東沖
2013/ 04/13	6.3	3	淡路島附近
2016/ 10/21	6.6	3	鳥取県中部地震
2018/ 06/18	6.1	4	大阪府北部の地震

#### 4. まとめ

2018年8月、六甲高雄観測室に密封型間隙水圧計を新設し、計4台の間隙水圧計で空間的な間隙水圧分布の変動を観測できる体制を整えた。これらの間隙水圧観測値を潮汐解析したところ、潮汐振幅は断層に近いほど、小さくなる傾向がみられた。これは周辺岩盤の亀裂の発達程度を反映していると考えられる。また、観測された潮汐成分の位相を理論潮汐と比較したところ、既存の開放型間隙水圧計よりも新設の密封型間隙水圧計の方が理論値に近い値を示した。開放型間隙水圧計ではパイプ内の水位変化を測定するため、地下水の移動が必要となり、位相のずれが生じたものと考えられる。

湧水量変化や間隙水圧変化には年周変化が含まれているが、その振幅は年によって異なる。こうした年周変化を制御する要因のひとつとして、降水量が挙げられる。例えば、2017年の湧水量変化および間隙水圧変化には年周変化がほとんどみられないが、この時期の地下水源を涵養させる降水は例年の6割程度と少なく、地下水量の減少が影響していたと考えられる。しかし、同時期の間隙水圧は高止まりのまま推移しており、地下水量の減少と矛盾する。このことは、前年の2016年鳥取県中部地震に伴う地震動によって観測室近傍の透水性が低下した結果、地下水源からの地下水流が滞ったためと推察される。

#### 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

京都大学大学院理学研究科・東京大学地震研究所(1995): 六甲高雄観測室における観測結果, 地震

- 予知連絡会会報, 54, 695-707.
- 向井厚志・大塚成昭・福田洋一(2016): 地震に伴う湧水量および間隙水圧変化から推定された破碎帯の水理学的特徴, 測地学会誌, 62, 2, 63-78.
- 向井厚志・大塚成昭・福田洋一(2018): 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.
- Tamura, Y., T. Sato, M. Ooe and M. Ishiguro (1991): A procedure for tidal analysis with a bayesian information criterion. *Geophys. J. Int.*, 104, 507-516.
- Matsumoto, K., T. Sato, T. Takanezawa, and M. Ooe (2001): GOTIC2: A Program for Computation of Oceanic Tidal Loading Effect, *J. Geod. Soc. Japan*, 47, 243-248.
- 向井厚志・大塚成昭(2014): 湧水量変化を用いて推定された透水係数の経年変化, 地球惑星科学連合大会, SSS33-P03, 2014/4/30.
- 向井厚志・大塚成昭・福田洋一(2017): 地下水流動の観測に基づいて推定された断層破碎帯近傍の非一様な透水性構造, 地球惑星科学連合大会, SSS10-16, 2017/5/22.