

## 福山市北部の砂留における常時微動測定

向井厚志（福山市立大学都市経営学部）

### 1. はじめに

広島市北部では、2014年8月20日深夜に局地的な豪雨が数時間にわたって続き、場所によっては1時間降水量が120mm弱に達した(広島地方気象台, 2014)。この1時間降水量は同地域の月平均降水量に匹敵する値であり、このときの集中豪雨によって山間部で大規模な土砂災害が発生し、死者74名、全半壊家屋361戸の甚大な人的・物的被害を引き起こした(内閣府, 2014)。

広島県を含む中国地方において、もっとも広く分布する地質は花崗岩類であり、風化によって指でも壊れる土砂状の真砂土に変化する一方で、深くなるにつれ徐々に硬質となる特徴をもっている(低引, 1990)。そのため、2014年広島土砂災害では、真砂土と岩片を含む表層が平板状に崩壊した箇所が多く見られた(千木良他, 2015)。千木良他(2015)は、地形データから過去に起きた平板状の表層崩壊の痕跡を調べたところ、広島市安佐南区だけでも200か所近く発見したことを報告している。

真砂土は広島県東部の福山市にも分布しており、江戸時代初期に発生した土砂災害の記録が残されている。1673年5月14日の集中豪雨によって、福山市北部の堂々川流域で土石流が発生し、国分寺や民家・田畑を押し流した。これを受けて、現福山市を管轄していた福山藩は土砂留普請を積極的に進め、同地域に数多くの砂留が築造されることとなった(高梨他, 1997)。砂留とは砂防堰堤のことであり、福山市には大小合わせて100基以上の砂留が確認されている。大きな砂留としては、1700年代から築造が開始された堤高13.3mの「堂々川六番砂留」が存在する。

江戸時代に築造された福山市の砂留群は、その後、草木等に覆われて、その存在は一部の地元住民にのみ認識されている状況であった。草木によって一般道から視界がさえぎられていたこともあり、2000年頃から堂々川流域で家電やタイヤなどの不法投棄が目立つようになった。この不法投棄問題を解決するため、2006年に地元住民らが「堂々川ホテル同好会」を組織し、堂々川流域の清掃活動を開始するとともに、地域資源として堂々川砂留群の整備を推進していった。

堂々川砂留群を覆っていた土砂や草木は取り除かれ、築造当時の姿を鑑賞できるようになった。その一方で、砂留群が直接、風雨にさらされるようになり、表層を流れる河川流経路が変化したため、堆砂面の陥没や石組みの崩落などの問題が発生するようになった。そこで、「堂々川ホテル同好会」と連携し、砂留群の崩壊につながる地下構造の変化をモニターするため、定期的に常時微動測定を実施し、地盤の卓越周期の推定を行なっている。本稿では、予備的に堂々川六番砂留の堆砂面で実施した卓越周期の推定結果について報告する。

### 2. 福山市の堂々川砂留群

福山市北部の山間部には数多くの砂留(砂防堰堤)が存在している。図1は、福山市神辺町に存在する主な砂留の配置を示す。大部分の砂留は江戸時代後期に完成したものであり、小規模の河川流域や谷筋に密に分布している。そのうち、一級河川・高屋川の支流である堂々川流域には、下流側の堂々川一番砂留に始まり、上流側の堂々川六番砂留まで、計6つの砂留群が存在する。いずれも、江戸時代当時の築城技術を応用した石組みによって江戸時代に築造され、その後、明治時代から昭和時代にかけて増築または改修工事がなされてきた(写真1)。

堂々川砂留群で最大のものが上流側にある堂々川六番砂留であり、堤高が約13m、横幅が約56mの

大きさをほこる。なお、写真1(a)の堂々川一番砂留は、写真右上の崩壊した石組みが江戸時代に築造されたものであり、写真手前に見える石組みは昭和時代に建築された砂防堰堤である。写真に見られるように、現在、堂々川砂留群はいずれも石組みや堆砂面が露出しており、堆砂面に繁茂する草木は毎年刈り取られている。

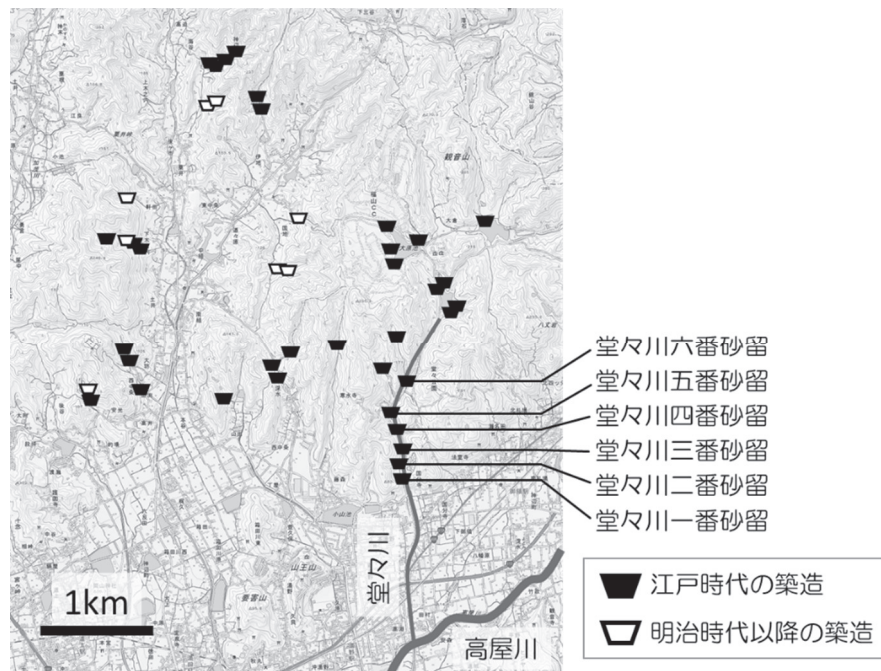


図1. 広島県福山市北部の主な砂留

国土地理院の地形図に砂留の配置等を加筆した。堂々川一番砂留～六番砂留は、江戸時代後期に築造された砂防堰堤であり、いずれも高屋川支流の堂々川流域に存在する。

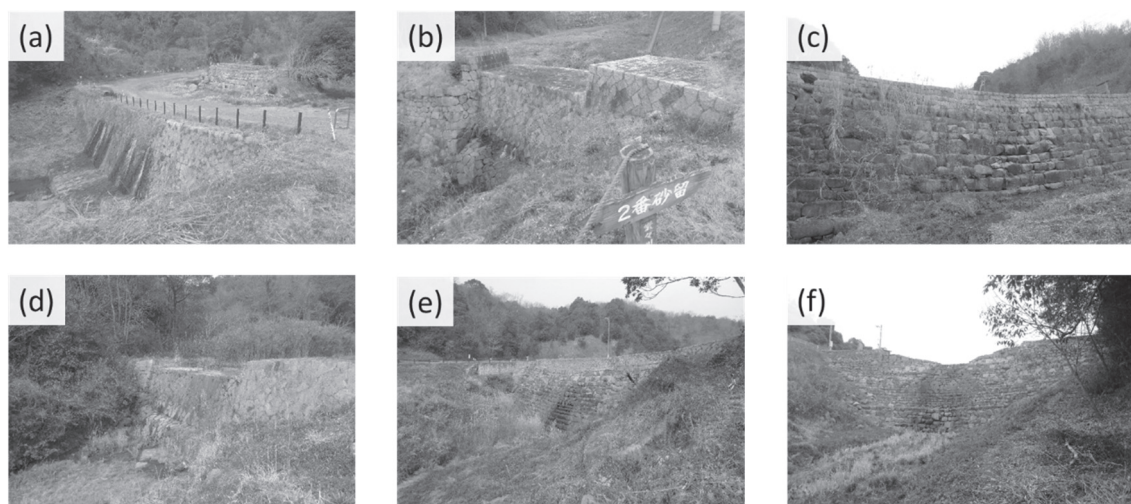


写真1. 堂々川砂留群

(a) 堂々川一番砂留(堤高 3.2m), (b) 堂々川二番砂留(堤高 3.9m), (c) 堂々川三番砂留(堤高 5.5m), (d) 堂々川四番砂留(堤高 3.3m), (e) 堂々川五番砂留(堤高 8.8m), (f) 堂々川六番砂留(堤高 13.3m)。いずれの写真も筆者が撮影した。

2006年に地域住民らが中心となって立ち上げた「堂々川ホタル同好会」は、堂々川流域の美化活動の一環として、堂々川砂留群を覆っていた土砂や草木を取り除いていった。そうした活動を始めてから6年後の2012年、堂々川六番砂留堆砂面で陥没が生じた(写真2(a))。また、翌年の2013年には、堂々川三番砂留の堆砂面が地盤沈下し、石組みの一部が崩落した(写真2(b))。

これらの砂留の崩壊は、砂留群が風雨によって浸食を受けたためと考えられる。また、流域の保水能力が低下し、降水時に砂留表層を流れる流水量が増加し、砂留内部が浸食されたことも考えられる。

2016年6月には、梅雨前線の停滞によって中国地方各地で豪雨が発生し、福山市でも70mmを上回る日降水量が2日連続で記録された。その翌年、写真2(c)および(d)に見られるように、堂々川四番砂留と五番砂留で陥没や崩落が発生した。このことは、堂々川砂留群の多くで、砂留内部の土砂流出が進んでいる可能性を示唆している。

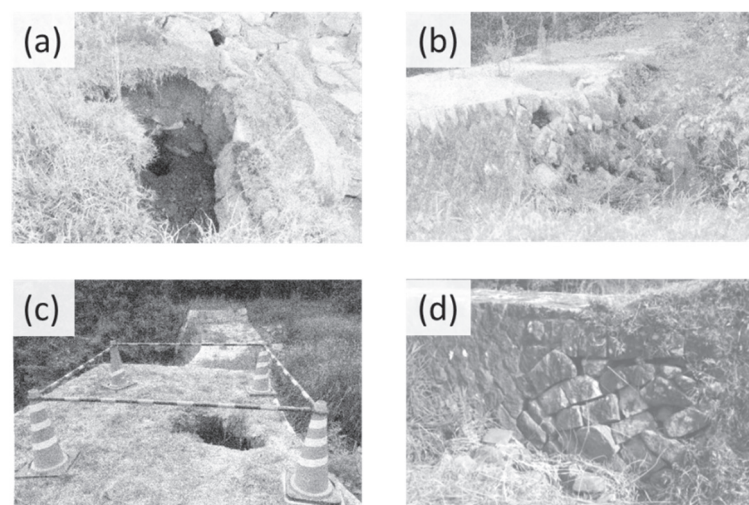


写真2. 堂々川砂留群の破損

(a) 堂々川六番砂留堆砂面の陥没(2012年)、(b) 堂々川三番砂留石組みの一部崩落(2013年)、(c) 堂々川四番砂留石組み袖部分の陥没(2017年)、(d) 堂々川五番砂留石組みの一部崩落(2017年)。いずれの写真も、堂々川ホタル同好会に所属する土肥氏が撮影したもの。

### 3. 堂々川六番砂留の卓越周期分布

堂々川砂留群の堆砂面直下で土砂が流出した場合、地盤強度が低下することから、地盤の卓越周期分布から土砂流出地点を特定できる可能性がある。堂々川砂留群のうち、堂々川六番砂留はその堆砂面が堂々公園として整備されており、比較的良好な常時微動測定環境を有している。そこで、本研究では予備的に2017年8月30日～9月1日の期間に堂々川六番砂留で常時微動測定を実施した。測定点は、堂々公園内に約15m間隔で配置した計55か所である(図2)。

本測定では、鉛直1成分および水平2成分の互いに直交する方向に配置された3台の高感度振動検出器2403(昭和測器株式会社製)を用いた。各測定点では、方位計を用いて水平2成分を南北方向および東西方向に設定した。この検出器からの出力シグナルは40Hzのローパス・フィルタに通した後、メモリハイロガーLR8431(HIOKI製)に10ms間隔で収録した。収録時間は各測定点で5分間とし、収録時の最小分解能は $1\mu\text{m/s}^2$ であった。

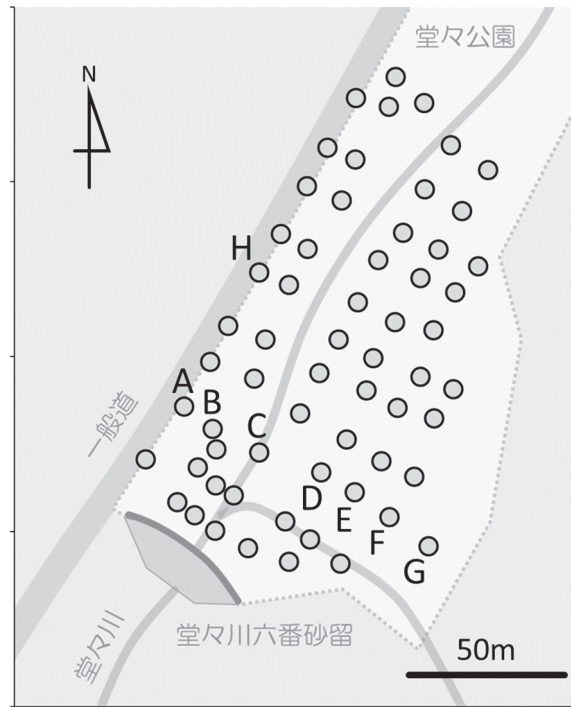


図2. 堂々川六番砂留における常時微動測定点(○印)の配置  
 図中の点 A~H は、図3または図5で取り上げた測定点を示す。

常時微動測定に基づく地盤の卓越周期の推定方法として、中村・上野(1986)が提唱した H/V スペクトル比を用いた手法が広く用いられている。この方法では、常時微動の鉛直成分に対する水平成分のスペクトル比を計算することによって、表層を伝わる Rayleigh 波の影響を除去しつつ、堆積層内を重複反射する地震動の増幅特性を抽出する。その結果、H/V スペクトル比のピーク位置から、地盤の卓越周期を推定することができる。

福山平野の卓越周期分布を推定した向井(2016)の方法と同様に、測定点近傍の車等の往来による大きな地盤震動を取り除いた後の測定データに FFT を当てはめて、鉛直成分および水平2成分の常時微動の振幅スペクトルを計算した。このとき、約 40 秒間(データ数 4096 個)のウィンドウを1秒(データ数 100 個)ずつ移動させながら、各ウィンドウの振幅スペクトルを計算した。欠測がない場合、5分間の測定データから最大 260 区間のウィンドウを取り出すことができる。しかし、標準偏差の5倍以上の振幅をもつ地盤震動を欠測としたことから、平均で約 90 区間のウィンドウの振幅スペクトルを計算することができた。

各ウィンドウで求めた振幅スペクトルを成分ごとに平均し、次式を用いて H/V スペクトル比を計算した。

$$HV = \sqrt{(NS^2 + EW^2)}/UD^2 \quad (1)$$

ここで、NS、EW および UD は、それぞれ南北方向、東西方向および鉛直方向の常時微動から求められた振幅スペクトルの平均値を表す。

図3は、図2の点 E および H で測定された常時微動に基づく H/V スペクトル比を示す。卓越周期は H/V スペクトル比が最大となる周期として推定することができる。図3(a)では、5.1Hz の振動数で明瞭なピークがみられることから、点 E における地盤の卓越周期は 0.20 秒と求められる。一方、図3(b)に示す点 H における H/V スペクトル比は 1~10Hz の範囲でやや大きな値となっているものの、明瞭なピークは認められず、地盤の卓越周期を推定することが困難である。そのため、本研究では、こうした H/V スペクトル比に明瞭なピークがみられない測定点は、以降の解析から外すこととした。

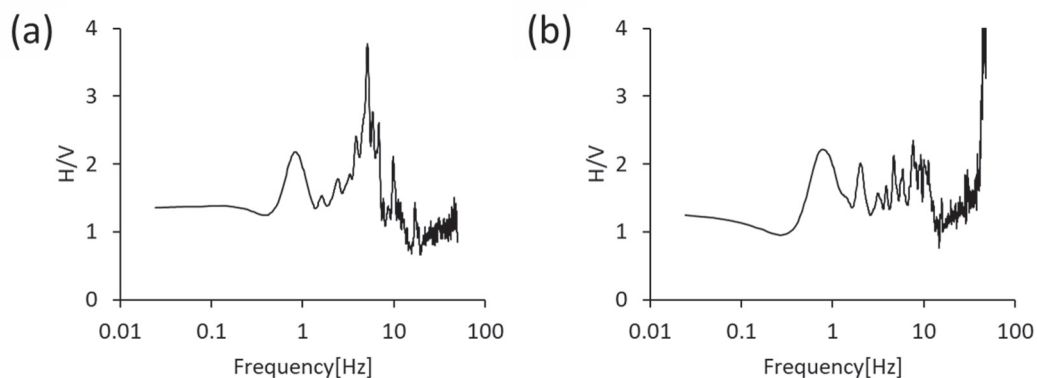


図3. 堂々川六番砂留で測定された常時微動に基づくH/V スペクトル比の例

(a) 図2の点Eにおける常時微動測定から得られたH/V スペクトル比。(b) 図2の点Hにおける常時微動測定から得られたH/V スペクトル比。

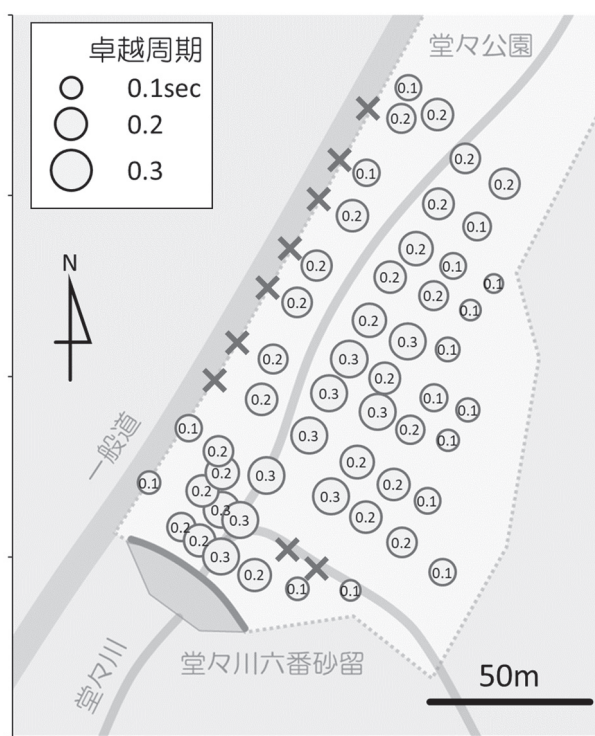


図4. 堂々川六番砂留における卓越周期分布

図中の○印の大きさは、各測定点のH/V スペクトル比から推定された卓越周期の大きさを反映している。○印内の数値は、小数点以下第2位を四捨五入した卓越周期の値を示す。×印は、H/V スペクトル比に明瞭なピークが見られず、卓越周期が推定できなかった測定点である。

図4は、上記の手順で推定した堂々川六番砂留における卓越周期分布を示す。55か所で常時微動測定を実施したが、H/V スペクトル比に明瞭なピークが見られたのは計46か所のみであった。卓越周期が推定できなかった9か所は、小川近傍や一般道と公園の境界付近であり、こうした地点の地下構造の複雑さが卓越周期の推定を困難にしたと考えられる。

図4は、堂々川近傍の測定点で卓越周期が長く、堂々川から離れるほど、卓越周期が短くなる傾向を

示している。河川水の浸透によって堂々川近傍の土壌が軟弱化している可能性も考えられるが、堆砂面中央付近では、川から離れた地点においても長い卓越周期が得られたことから、図4に見られる卓越周期分布の大部分は、堆砂の厚さを反映していると推察される。

堂々川中流域は山間部の谷筋を流れており、堂々川六番砂留はそうした谷間に石組みの壁を設置し、土砂を埋め立てて造られている。そのため、堂々川直下の堆砂厚は厚く、東西へ離れるにしたがって堆砂厚が薄くなると考えられる。一般に、十分にしまっていない堆積層が厚いほど、地盤の卓越周期が長くなる。本研究で得られた堂々川六番砂留の卓越周期分布は、砂留築造時に谷を埋め立てた堆砂層の厚さを反映しているとの推察と矛盾しない。実際、堆砂面を横断する基準線で卓越周期分布を描いてみると、堆砂面中央で卓越周期が長く、そこから離れるにつれて卓越周期が短くなる傾向が認められる(図5)。

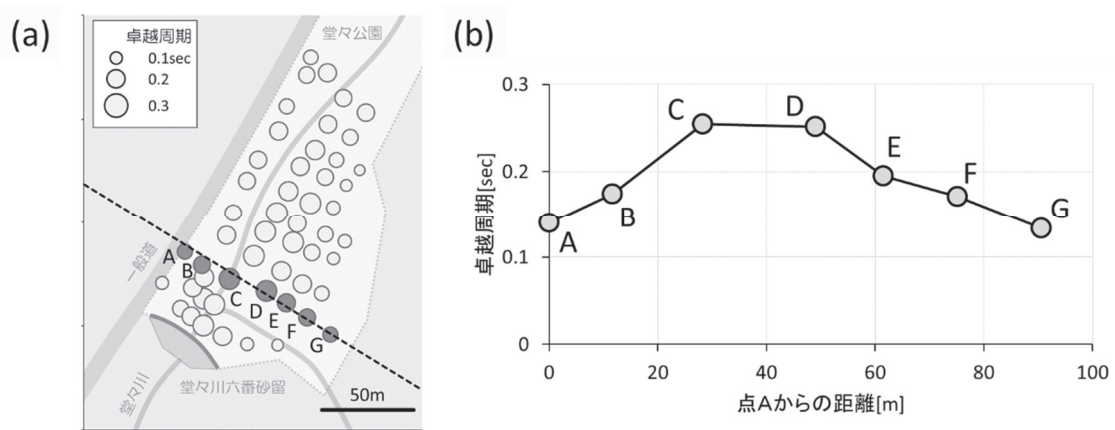


図5. 堂々川六番砂留横断面上の卓越周期分布

(a) 堂々川六番砂留を横断する点 A~G の配置。図中の点線は、卓越周期分布の横断面を求める際の基準線を示す。(b) 点 A~G の卓越周期分布。横軸は、各点から基準線に下した垂線の足の位置を用いて求めた点 A の垂線の足の位置からの距離を示す。

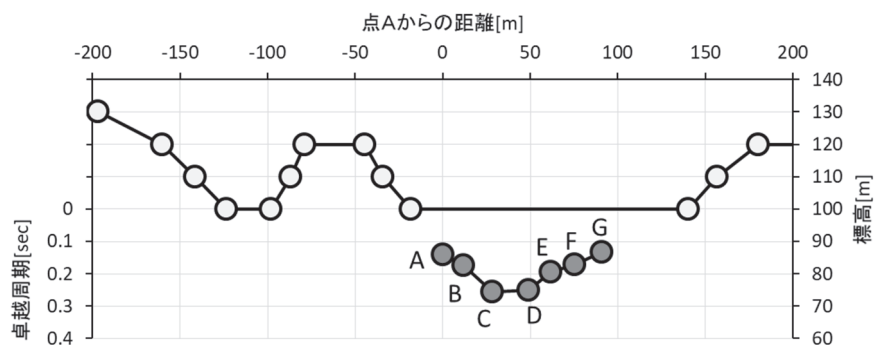


図6. 堂々川六番砂留横断面上の卓越周期分布と周辺の高さ分布の比較

黒塗りの○印は、図4で示した卓越周期分布を示す。白抜きの○印は、国土地理院の地形図から読み取った標高を示す。

水平一様な堆積層の場合、堆積層の厚さを  $D$ 、S 波速度を  $V_s$  とすると、地盤の卓越周期は  $4D/V_s$  と表される。堂々川六番砂留の堆砂部分は水平一様な堆積層とは言えないが、近似的にこの関係式が成

り立つと仮定して、卓越周期を堆積層の厚さに換算した。図6は、S波速度を0.4km/sとしたときに卓越周期分布から得られた堆積層の厚さを、図5(a)の点線に沿った標高分布とともに描いている。砂留西側にある山は傾斜角40°弱の急斜面となっており、東側は約25°のやや緩やかな傾斜面である。これらの地形的な勾配と対応するように、砂留における堆積層下の基盤岩は東側で急傾斜、西側でやや緩やかな傾斜を示している。このことから、本研究で得られた卓越周期分布は、砂留建設時に谷筋を埋め立てた堆砂層の厚さを反映していると言える。

本研究では、一部崩落などの被害が生じている福山市の堂々川砂留群の維持管理の一環として、堂々川六番砂留において地盤の卓越周期分布の推定を行なった。図4に見られるように、砂留の堆砂厚に対応した卓越周期分布は認められた。今後、同様な測定を定期的に繰り返すことによって、砂留の地下構造の変化をモニターし、土砂流出などの兆候をとらえることができるのか、検証を続けていく必要がある。

## 参考文献

- 広島地方気象台, 2014, 【気象速報】平成26年8月19日から20日にかけての広島県の大雨について,  
[http://www.jma-net.go.jp/hiroshima/saigai\\_index.html](http://www.jma-net.go.jp/hiroshima/saigai_index.html) (2018年3月1日閲覧)
- 内閣府, 2014, 資料2 平成26年8月20日に発生した広島市土砂災害の概要, 総合的な土砂災害対策検討ワーキンググループ(第1回), 2014年12月4日,  
<http://www.bousai.go.jp/fusuigai/dosyaworking/> (2018年3月1日閲覧)
- 低引洋隆, 1990, 中国地方の地形・地質, 土と基礎, 第38巻, 第3号, pp.9-14.
- 千木良雅弘・松四雄騎・鄒青穎・渡壁卓磨, 2015, 2014年広島豪雨による土砂災害の地質規制, 自然災害研究協議会 中国地区部会 研究論文集, 第1号, pp.39-42.
- 中村豊・上野真, 1986, 地表面震動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤特性推定の試み, 第7回日本地震工学シンポジウム講演集, pp.265-270.
- 向井厚志, 2016, 福山市内における卓越周期分布の調査, 地殻活動研究委員会報告書, 第38巻, pp.151-158.

