

琵琶湖湖底深部湧水と湖底地下構造との関係解明および同湧水が環境に与える影響の把握

小泉尚嗣¹⁾・笠谷貴史²⁾・後藤直成¹⁾・丸尾雅啓¹⁾・山野誠³⁾

- 1) 滋賀県立大学環境科学部
- 2) 海洋研究開発機構海洋機能利用部門
- 3) 東京大学地震研究所

1. はじめに

活断層は、数千年～数万年に1回というようなごく低頻度で断層運動（大地震）を起こして環境を破壊する。一方、地震を起こさない通常時においては、断層面周辺の破壊によって生じた高透水性構造が地下水流動を促進し、地下水による（水も含めた）物質や熱の供給を通して環境を形成・維持している。環境破壊リスクとして前者の研究は進んでいるが、環境形成要因としての後者の研究は進んでいない。前者（活断層の負の側面）だけでなく後者（正の側面）も理解することで、地域や社会における活断層の認知度が高まり、地震防災に対するモチベーションも上がると考えられる。琵琶湖は、断層運動によって形成された構造湖である一方、物質収支や温度構造に関して研究の進んだ湖でもあり、活断層による環境形成・維持の研究をする上で適している。

琵琶湖の水収支において、湖底からの地下水の寄与は10%程度になると推定されているが（滋賀県, 2017）、沿岸域を除くとその実態は明らかになっていない。2008年に発見された琵琶湖北西部（高島市沖）にある深部湖底湧水は（熊谷・他, 2015）、湧出孔（ベント）の並びが南北10km程度になることが知られているが、湖底地下構造との関係はよくわかっていない。また、同湧水と陸水（河川水・地下水）との関係や、同湧水が湖水に与える影響も不明である。本研究では、音波探査を用いて深部湖底湧水周辺の湖底地形および地下構造を調べて湖底湧水との関係を調べた。また、深部湖底湧水付近の湖水の水質および湖西陸上の河川水・地下水の水質も調べて両者の関係を調査した。以上の結果を報告する。

2. 研究方法

2.1 音波探査

水中音波探査は、送受波器から音波を発振し、水中の物体・ガスや湖底および湖底下の地層等の境界面で反射した音波を受信する事で、それらの反射面の位置を同定するものである。用途に応じて様々な種類のものがあるが（小泉, 2018）、今回は、深部湖底湧水に伴うガス（図1）による水中音響異常の検出（ベント位置の推定）のために魚群探知機（魚探）を用い、湖底下の堆積層の2次元断面を可視化するために、サブボトムプロファイラー（SBP）を用いた。



図1 琵琶湖の深部湖底湧水の様子。湖底の湧出孔（ベント）からガスと共に水が湧出している。周辺には生物群集も認められる（熊谷, 2014）

SBPによる調査には滋賀県立大学の実習調査船「はっさか」を使用し、図2にあるように船体右舷側にSBPの送受波器を艀装して調査を実施した。調査は2019年9月20日に行った。使用したSBPはInnomar社製のパラメトリック式のSES2000型で、FMチャープ波を用いるSBPに比べて、狭ビームの音波を送信可能であるためフットプリントが小さく解像度の高いデータ取得が可能となっている。船舶位置は船橋上部に設置したGNSSによる測位を行い、船舶の動揺補正のために動揺センサを取り付けている（図2-bと図3-aのオレンジ色筐体）。調査時には「はっさか」装備の魚群探知機も湖底湧水の水中音響異常の確認のために使用した。図3は観測時の様子で、SBPの計測データはリアルタイムでモニターにプロットされる（図3-b）。操船者へは、図3-bの下方に見えるナビゲーション用のPCモニタの画面を用いて指示を行った。



図 2 (a)「はっさか」右舷中央部に SBP を艀装した。 (b) 艀装した SBP の様子。オレンジ色筐体は動揺センサー。送受波器は水中に没した状態となっている。

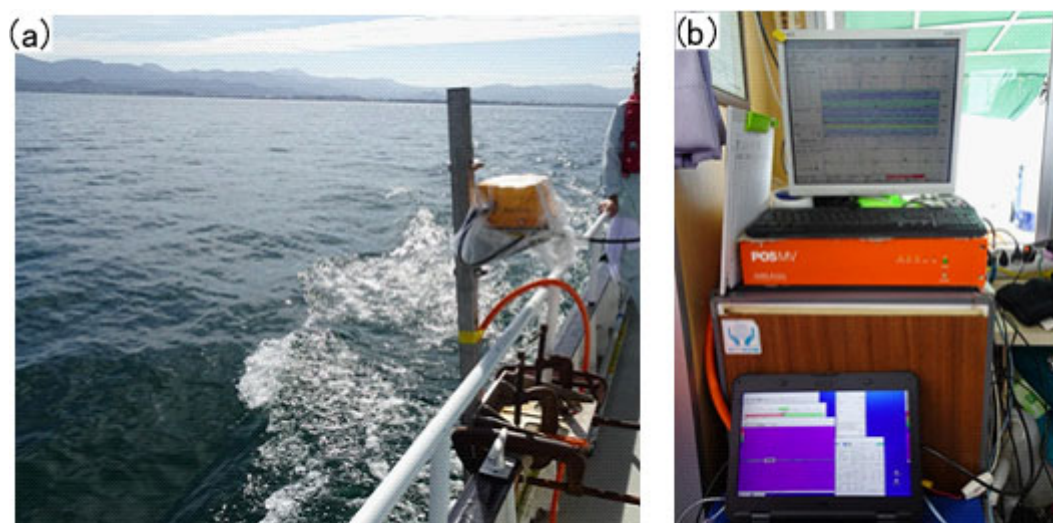


図 3 (a) 観測中の様子。 (b) 操舵室内に設置した SBP の制御部とナビゲーション用の PC。上部のモニタに SBP データがリアルタイムでプロットされる。

2.2 深部湖底湧水付近の湖水と湖西陸上の河川水・地下水の水質調査

過去に深部湖底湧水が認められた地点の近傍である 1 点 (図 4 の★: T_1) で、2018 年 4 月以降に月 1 回程度の頻度で、湖水の鉛直方向の水温・電気伝導度・クロロフィル (葉緑素) の分布を調べた。また、湖西地域の代表的な河川である安曇川下流および周辺の湧水 3 点で (図 4)、水温および電気伝導度を調べた。

3. 結果と考察

3.1 音波探査

過去に報告されている深部湖底湧水のベントの位置は、琵琶湖北西部の最深部付近に南北に 10km 程度伸びている (図 4 の×印)。このことを考慮して、SBP による測線は東西方向を基本とし、最初に図 4 の領域 A で観測を 3 測線で実施した。魚探を用いて、水中音響異常の監視 (ベント位置の推定) も行った。図 4 は最も長い南側の測線の結果を示しており、湖底面は極めてフラットで、湖底下の堆積構造に明確な断層などの変位構造が全く見られなかった。北側の 2 測線では、地形の深浅に伴う堆積物層の厚さの変化は見られるものの、地下構造に明瞭な変位構造は見られなかった。観測を行った 3 本の測線全てで、深度 10m 前後に 2 枚の強反射面が検出された (図 5 中の反射面 A および B)。井内 (1987) はこの

凹地内でのボーリング調査の結果から、湖底下 12-13m 付近に鬼界アカホヤ火山灰層を認定しており、今回検出された反射面 A が鬼界アカホヤ火山灰層と一致すると考えられる。この反射面より深い構造は全体を通してあまり明瞭では無かった。

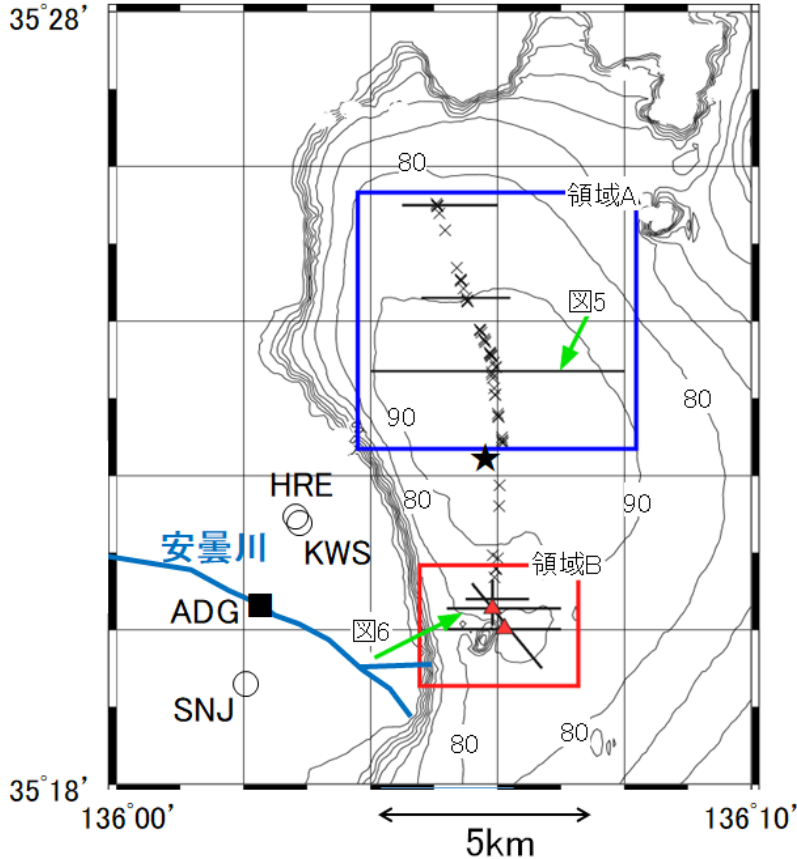


図 4 琵琶湖北西部の湖底地形図と SBP による音波探査を行った測線（黒実線）及び過去の調査による深部湖底湧水のベントの位置（X 印）。等高線は 10m 間隔で水深を示し、数字の単位は m。今回の調査で、魚群探知機によって水中音響異常が検知された場所を赤い▲で示す。★は、湖水の水温・電気伝導度等の鉛直分布調査を定期的に行っている所 (T₁)。■は安曇川の水質観測点で○は陸上の湧水観測点。湖底地形データおよびベントの位置データは、熊谷道夫博士（元・滋賀県琵琶湖研究所）に提供していただいた。

図 4 の領域 A で示す湖盆での明瞭な断層構造が見られなかったことから、領域 A での観測を断念し、魚探を用いて、過去に湧水が確認されたとされる位置をもとに、水中音響異常の観測をしながら、領域 A の北端から領域 B に向けて観測を行った。しかしながら、まったく水中音響異常が観測されなかった。領域 B にある高島市沖の比高約 40-50m のマウンド（東経 136 度 6 分、北緯 35 度 20 分付近の湖底地形が盛り上がっている部分）の周辺において、2 箇所（図 4 の三角印）のみで明瞭な水中音響異常が認められた。そこで、領域 B で検出された水中音響異常の位置を中心に、東西 3 本、北西-南東方向の測線 1 本で SBP 観測を行った（図 4）。図 6 は東西測線のうちの 1 本の計測結果を示しており、領域 A と同じく深度 10m 前後に 2 枚の強い反射面が認められる。得られた堆積構造の特徴は領域 A とほぼ変わらないので、同じような堆積の履歴を持っていると考えられる。図 6 の中央部付近では湖底に凹みがあり、その下部では堆積層が盛り上がった形状をしている。湖底から深度 5m 程度で堆積層が認識されなくなっているため、測線南側にあるマウンドの深部延長部が見えている物と考えられる。湖底地形やマウンドの存在に伴う堆積構造の変化が見て取れるが、明瞭な断層構造は認識されなかった。

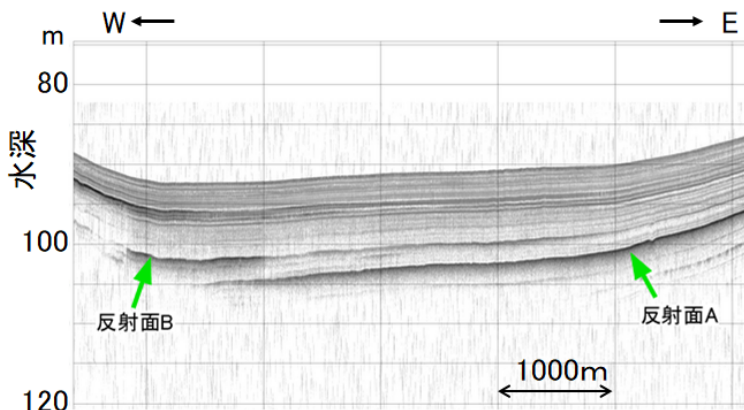


図 5 領域 A を東西に横切る測線での SBP 断面。縦軸は音速を 1500m/sec と仮定した水深。

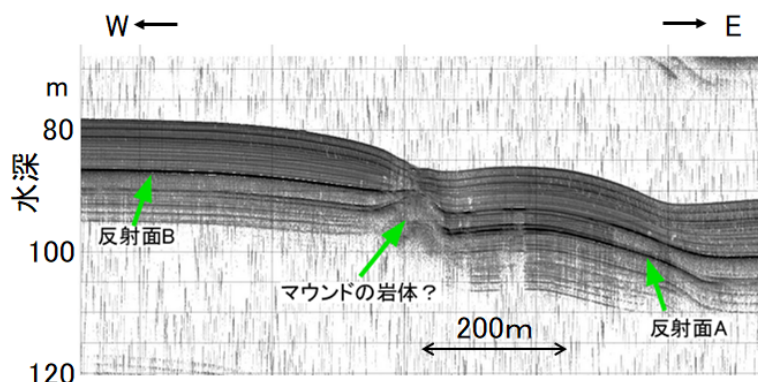


図 6 領域Bを東西に横切る測線での SBP 断面。縦軸は音速を 1500m/sec と仮定した深度。マウンドから続く基盤岩を見えやすくするために、コントラストを強調している。

3.2 深部湖底湧水付近の湖水と湖西陸上の河川水・地下水の水質

図7～図9に、T₁地点の鉛直方向における水温・電気伝導度(導電率)・クロロフィル濃度の時間変化を示した。冬期に(T₁地点を含む)琵琶湖北湖第一湖盆(図4)の底層溶存酸素量が10mg/Lに達していないことから、2018年から2020年にかけて琵琶湖では全層循環はおきていないとされるが(滋賀県, 2020)、水温で見える限り、T₁地点において、2019年2月～3月に表層から90mまで水が混合しているように見える(図7)。表層～80mまでの電気伝導度は、2018年と2019年で10 μ S/cm程度増加しているが、これは、2018年と2019年で電気伝導度センサーが変わっている事による見かけ上の変化の可能性はある(図8)。2018年6月～8月に、表層付近において電気伝導度が増加しているが2019年9月中旬以降減少した。これは、2018年9月4～5日に滋賀県に大雨をもたらした台風21号の影響と考えられる。2019年以降、深さ90m(ほぼ湖底)において、電気伝導度が急増・急減する現象が認められる。この現象の原因については不明だが、深部湖底湧水から電気伝導度の高い水が断続的に供給された可能性がある。クロロフィルは、2018年9月中旬以降に大きく増加した。これについては、上述の台風21号の通過後に、琵琶湖で大型緑藻が急激に増加したことが知られている。台風の大雨・風に伴う陸と湖水深層からの栄養塩等の供給が原因と考えられる。

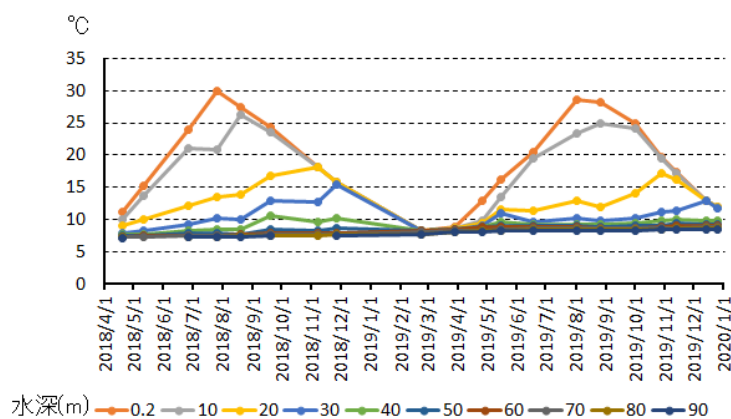


図 7 T₁地点の湖水の鉛直水温の時間変化

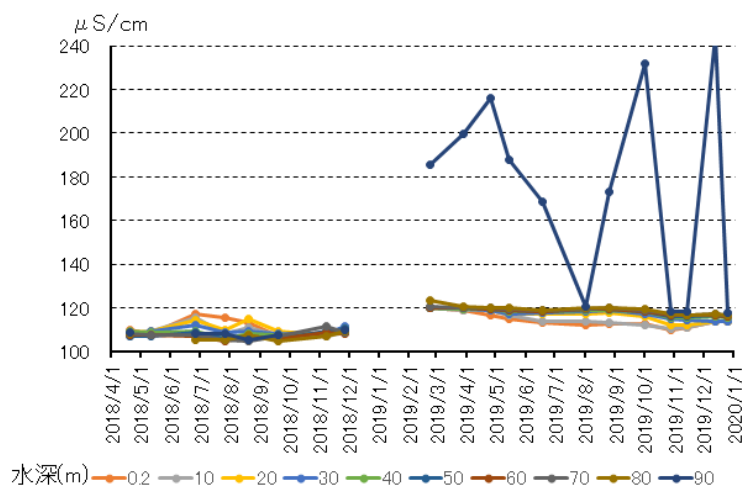


図 8 T₁地点の湖水の鉛直電気伝導度(25°C換算値)の時間変化。2018年11月までのデータと、2019年2月以降のデータでは、電気伝導度のセンサーが異なっている。

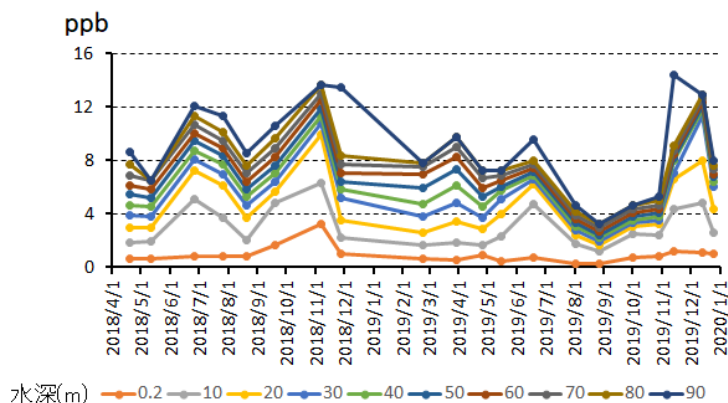


図 9 T₁ 地点の湖水の鉛直クロロフィル濃度の時間変化。

図 10～11 に安曇川（図 4 の ADG）の水温と電気伝導度を、図 12～13 に 3 か所の湧水（図 4 の HRE・KWS・SNJ）の水温と電気伝導度を示す。安曇川の水温は、河口付近ということもあって気温に対応した変化を示す。安曇川の電気伝導度は、2018 年 7 月～8 月にかけて急増し、8 月から 9 月にかけて急減している。これは、2018 年 7 月～8 月は降雨が極端にすくなかったためであり、8 月～9 月については、上述の台風 21 号により大雨が降ったためと考えられる。湧水の水温については、SNJ が気温に対応していると思われる大きな変化を示す以外の特徴的な変化はない。湧水の電気伝導度については、3 つの湧水とも 2018 年～2019 年にかけて 10% 程度上昇しており、これは、上述の琵琶湖湖水の電気伝導度変化と似ている。こちらのデータについては、センサーは変えておらず、実際の変化と考えられる。興味深い変化なので、今後注視する必要がある。

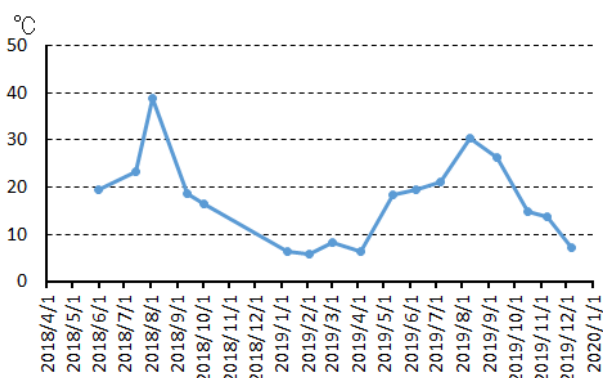


図 10 ADG における安曇川の水温。

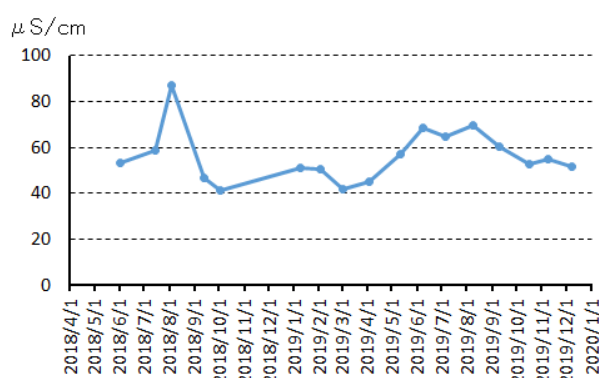


図 11 ADG における安曇川の電気伝導度 (25°C 換算値)。

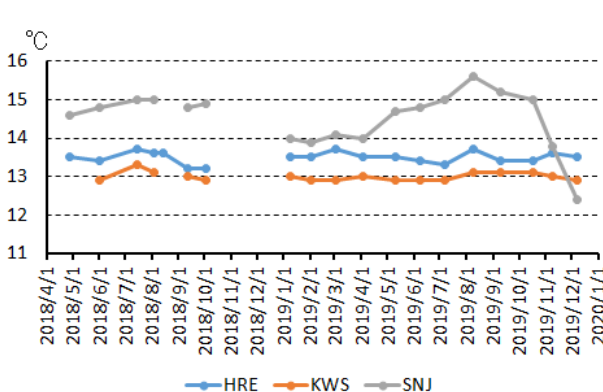


図 12 3 か所の湧水 (HRE・KWS・SNJ) の水温。

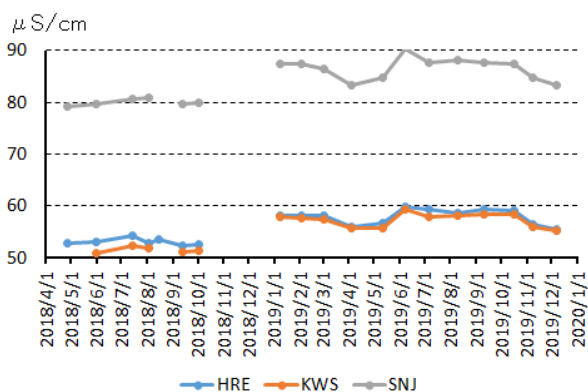


図 13 3 か所の湧水の電気伝導度 (25°C 換算値)。

4. まとめ

音波探査の結果では、過去に報告されている南北約 10km に伸びる帯状の部分（領域 A）では、深部湖底湧水のベントを示唆する音響異常は検出されなかった。高島市沖の比高約 40-50m のマウンド（東経 136 度 6 分、北緯 35 度 20 分付近）付近（領域 B）でのみ、2 か所の音響異常を検出できた。領域 A でも

領域 B でも、明瞭な断層構造は検出されず、深部湖底湧水と湖底地下構造との関係を示すことはできなかった。

深部湖底湧水付近の湖水の水質および安曇川河口付近の湧水の水質については、2018年～2019年にかけて同期するような電気伝導度の上昇が認められたが、これについては、実際に因果関係があるかどうかは不明でもう少し注視する必要がある。

5. 謝辞

熊谷道夫立命館大学教授（元・滋賀県琵琶湖研究所上席総括研究員）には、湖底地形データや深部湖底湧水のベントの位置データを提供していただいた。滋賀県の高島市の住民の方々には観測に協力いただいた。以上の方々に感謝の意を表します。

参考文献

井内美郎(1987), 音探堆積速度算定法—音波探査で求めた琵琶湖の堆積速度—, 地球科学, 41, 231-241.

熊谷道夫(2014), 知られざる琵琶湖の湖底、<http://www.biwako-trust.com/www2015/labo/>, 2020年6月21日確認.

熊谷道夫・浜端悦治・奥田昇 (2015), 琵琶湖は呼吸する, 海鳴社, 180pp.

小泉尚嗣(2018), 湖底断層研究会キックオフワークショップ報告書, <http://usprepo.office.usp.ac.jp/dspace/handle/11355/376>, 2020年6月21日確認

滋賀県 (2017), 琵琶湖ハンドブック三訂版, <https://www.pref.shiga.lg.jp/ippan/kankyoshizen/biwako/11346.html#handbook3>, 2020年6月20日確認。

滋賀県(2020), 琵琶湖北湖第一湖盆における底層溶存酸素量（底層DO）の回復状況について, <https://www.pref.shiga.lg.jp/file/attachment/5171132.pdf>, 2020年6月23日確認。