

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：24201

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01974

研究課題名（和文）琵琶湖深部湖底湧水の地下構造との関係解明および湖底環境への影響評価

研究課題名（英文）Relationship between underground structure and the deep spring water at the bottom of Lake Biwa and evaluation of effects of the spring on the lake environment

研究代表者

小泉 尚嗣 (Koizumi, Naoji)

滋賀県立大学・環境科学部・教授

研究者番号：00215154

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：琵琶湖深部湖底湧水と湖底地下構造との関係を解明し、同湧水の湖底環境への影響を評価するために、水中音波探査、湖底熱調査、ROVによる湖底観察、湖水の水温・水質や水素・酸素同位体比測定、細菌調査等を行った。その結果、深部湖底湧水は、基盤と湖底堆積物との間の不整合面を経路として湧出していると想定された。その経路では、周囲より温度が高くなることが考えられる。その結果、メタン生成菌が活性化され、周囲の有機物を使ってメタンを生成し、湧水と一緒に湖底に出ているのかもしれない。湖底環境への影響は、通常は軽微だが、時期によってはある程度の影響を与えている可能性がある事がわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

琵琶湖の深部湖底湧水の湖底環境への影響は、通常は軽微だが、時期によってはある程度の影響を与えている可能性がある事がわかった

研究成果の概要（英文）：To elucidate the relationship between the deep lake bottom spring water in Lake Biwa and the subsurface structure of the lake bottom, and to evaluate the effects of the spring water on the lake bottom environment, we conducted underwater acoustic survey, lake bottom thermal survey, lake bottom observation by ROV, and surveys of lake water quality and bacteria. As a result, it was assumed that the spring water flows along the unconformity surface between the bedrock and the lake-bottom sediments. Therefore it is conceivable that the temperature in the path becomes higher than the surroundings. As a result, methanogens are activated, using the surrounding organic matter to produce methane, which may be released to the bottom of the lake with the spring water. Although the spring water usually has little effect on the lake bottom environment, it was found that the spring water occasionally may have some effect.

研究分野：地震地下水学

キーワード：琵琶湖 湖底湧水 湖底地下構造 湖底環境

1. 研究開始当初の背景

琵琶湖は日本最大の湖である。集水域も広大で、その水収支（年間流入量および年間流出量）は約 60 億 m^3 /年であり、年間流入量のうち十数%が、湖底からの地下水によるものと考えられている（滋賀県, 2018）。湖底湧水については、湖岸付近の湧水のみ調べられていて、琵琶湖西岸の湧水量が多いことがわかっている（滋賀県琵琶湖研究所, 1985）。しかし湖岸付近以外の湖底湧水は測定が難しく、その実態は未だ明らかになっていない。琵琶湖では、夏に湖水が成層構造を作るため、光が届かない湖底では、光合成は困難で、上層からの（酸素も含めた）物質供給も限られる。逆に言えば、深部の湖底湧水からの物質供給があれば、それが湖底の環境に強い影響を与えることになる。さらに暖冬であった 2018 年～2020 年には全層循環が観測されず（滋賀県, 2021）、深部湖底湧水による環境への寄与は、より大きくなったと考えられる。地球温暖化を考慮すると、今後も、琵琶湖の全層循環が起きないという現象が頻発する可能性がある。したがって、琵琶湖の湖底環境を考える上で、深部湖底湧水を研究することが重要である。

Kumagai et al. (2021) は、水中音波探査、AUV「淡探」による探査、湖底堆積物の温度勾配測定などによって、北湖西部（高島市沖）の琵琶湖最深部付近で、ガス（メタン 99%以上）を伴う深部湖底湧水を発見した。水中音波探査では、湧水とともに発生しているガスの泡を音響異常として観測していた。Kumagai et al. (2021) によれば、2009 年から 2012 年にかけて、湧出孔の数は増加傾向にあり、湖底環境への影響が危惧されているが、2013 年以降は深部湖底湧水の調査は十分には行われていなかった。

2. 研究の目的

琵琶湖深部湖底湧水の現状を把握して湖底地下構造との関係を明らかにする一方、同湧水の湖底環境への影響を評価すること。

3. 研究の方法

(1) 水中音波探査

深部湖底湧水はガス（泡）を伴うので、水中音波探査を行うと、ガスが鉛直方向の音響異常として検出できる。水中音波探査を用いることで湧出孔の分布を明らかにできる。得られた湧出孔分布と湖底地下構造とを比較検討する。

(2) 熱フラックス測定

琵琶湖北西部の活発な湧水活動が観察されている地域 Y1 (35°20'N, 135°06'E 付近, 水深 90～100m) の周辺で、多数の温度センサーを備えたプローブを湖底堆積物に突き刺して、堆積物中の温度分布を測定する。湖底水温の時間変動の影響を考慮した解析を行い熱流量を求める。また、複数の小型温度計をプローブに取り付けたものを堆積物に突き刺して設置し、長期間の連続測定を行う。得られた温度記録を解析することにより、湖底湧水の流量変化を推定する。

(3) 小型 ROV による湧水孔周辺の湖底観察

湧水孔周辺に小型 ROV を送り込み、取り付けたカメラで湧水孔周辺の湖底を観察する。

(4) Y1 での鉛直方向における湖水の水温・水質測定

深部湖底湧水の影響で湖水にどのような変化があらわれているのかを明らかにするため、Y1 と滋賀県立大学の琵琶湖定期観測点 T1 (35°22'N, 135°06'E 付近, 水深 90m, 深部湖底湧水のない地点) において鉛直方向における水温・水質等の測定 (CTD 調査=船上からセンサーを水中に下ろすことによって行う調査) を行う。また、同じ場所で、深度 5m, 深度 50m, 湖底直上 (深度 90m 程度) の 3 深度で採水を行い、その水質および水素・酸素同位体比を調べる。Y1 と T1 で得られた結果について比較検討する。

(5) ガスの採取と分析

Y1 周辺で、水面に上がってくるガスを水上置換で採集する。採集したガスサンプルのメタン濃度とメタンの水素・炭素同位体比を分析し、メタンの起源を推定することで深部湖底湧水の生成機構も推定する。

(6) 深部湖底湧水周辺の細菌調査

深部湖底湧水周辺で、湖面付近～湖底付近まで深さの異なる場所で採水し、フィルターで濾過して細菌を採取した後、DNA を抽出する等して解析を行う。

(7) 湖西地域の地下水・温泉水・河川水と湧水孔付近の湖水の酸素・水素同位体比の比較

湖西地域の地下水・温泉水と湧水孔付近の湖水を採水して、酸素・水素同位体比を測定し、湖西地域の地下水・温泉水と深部湖底湧水との関係を推定する。

4. 研究成果

(1) 水中音波探査

Kumagai et al. (2021) の報告では、湧出孔の分布は、琵琶湖の北西部に南北に 10km 程度の

長さで線上に分布しているが、今回の調査で得た現時点のガス音響異常（36カ所）の分布は、東西約2km、南北約4km以上の領域に概ね帯状に並んでいることがわかった。他方、この付近の湖底に断層構造は認められない。また、このガス音響異常は、Kumagai et al. (2021) が指摘するように、湖底堆積物の厚みが500m未満の所に概ね分布している。これは、基盤と湖底堆積物との間の不整合面が湖底下500m以浅の所に、ガス音響異常が多く存在する事を意味する。他方、特に活発な湧水活動が観察されている地域Y1は、基盤が露出していると思われる湖底の高まりと湖底堆積物との境界（不整合面）付近に位置する。以上を考慮すると、深部湖底湧水は、断層ではなく、基盤と湖底堆積物との間の不整合面に沿って湧出している可能性がある。

(2) 熱フラックス測定

Y1付近で通常の数倍異常の高熱流量が測定された。高熱流量が測定された点は半径100m程度の範囲に集中しており、堆積物中の顕著な流体上昇（湧水）は狭い地域に局在していると考えられる。長さ2mのプロープに自記式の小型温度計6台を取り付けたものを、2022年10月5日に堆積物に突き刺して設置し、2023年3月25日に回収した。良質の温度データが得られており、今後解析を進める。

(3) 小型ROVによる湧水孔周辺の湖底観察

湧水孔周辺と考えられる湖底に多数の変色域があることを確認した。このような変色域は比較的狭い範囲に集中して存在していた。この変色域周辺で、ヨコエビ類を確認した。また、凹地状の変色域を確認し、その変色域からガスが放出され上昇していく様子を観察した。変色域の実態は不明だが、深部湖底湧水によって生じたと考えられるので、深部湖底湧水の水質は湖底付近の湖水のそれとは異なると考えられる。他方、ROVを用いた湖底湧水の直接採取はできなかった。

(4) Y1での鉛直方向における湖水の水温・水質測定

2021年9月～2022年7月にY1において鉛直方向の水温・水質測定を7回行った。7回中の5回は、T1とY1で水温・水質に差異は認められなかったが、2回については湖底付近で水質に有意な差が認められた。また、その2回中の1回については、水素・酸素同位体比についても差が認められた。深部湖底湧水は、通常時は湖底環境に影響を与えていないが、時期によっては、影響を与えている可能性がある。

(5) ガスの採取と分析

2022年9月12日に、Y1付近の湖面上で採集したガス中のメタン濃度は30～60%であった。メタンの水素・酸素同位体比から、採集したガスは、有機起源（湖底堆積物内の有機物にメタン生成菌が作用したもの）であると考えられた。

(6) 深部湖底湧水周辺の細菌調査

2022年7月26日に採取した水について、細菌群集構造解析を行なった。その結果、深底のみに生息する細菌群集が一部みられた。しかしながら、これらの細菌群集が湧水からの物質供給に関連するものであるかの判断は困難であった。また、深部湖底湧水周辺で、メタン生成菌が存在することを確認した。

(7) 湖西地域の地下水・温泉水・河川水と湧水孔付近の湖水の酸素・水素同位体比の比較

湖西地域の地下水・温泉水・河川水と湧水孔付近の湖水の酸素・水素同位体比は、降水の回帰直線付近に分布することから、主に降水起源であると考えられた。

5. 深部湖底湧水の湖底地下構造との関係と湖底環境への影響

深部湖底湧水は、基盤と湖底堆積物との間の不整合面を経路として湧出していると考えられる。その経路では、周囲より温度が高くなることが想定され、その結果、メタン生成菌が活性化され、周囲の有機物を使ってメタンを生成し、湧水と一緒に湖底に出ているのかもしれない。湖底環境への影響は通常は軽微だが、時期によってはある程度の影響を与えている可能性はある。

< 引用文献 >

Kumagai, M., R.D.Robarts, and Y.Aota (2021), Increasing benthic vent formation: a threat to Japan's ancient lake, Scientific Reports, doi.org/10.1038/s41598-021-83649-4.

滋賀県 (2018), 琵琶湖ハンドブック三訂版, <https://www.pref.shiga.lg.jp/ippan/kankyoshizen/biwako/11346.html>, (参照2022-06-21).

滋賀県立大学 (2021) 実習調査船「はっさか」のお披露目を開催しました, <http://www.usp.ac.jp/topics2/p567/>, (参照2022-06-21).

滋賀県琵琶湖研究所 (1985), 湖底の湧水を探る, 琵琶湖研究所ニュース, 14, <https://www.lberi.jp/app/webroot/files/03yomu/03-01kankoubutsu/03-01-02biwakomirai/files/files/14.pdf>, (参照2022-06-21).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小泉尚嗣, 忍田奈津子, 谷口和真, 丸尾雅啓
2. 発表標題 滋賀県の安曇川の水質に及ぼす活断層の影響
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小泉尚嗣, 谷口和真, 山野誠, 笠谷貴史, 岸和央, 後藤慎平, 後藤直成
2. 発表標題 琵琶湖の深部湖底湧水について
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山野誠, 小泉尚嗣, 濱元栄起, 熊谷道夫
2. 発表標題 琵琶湖湖底における流体湧出に伴う高熱流量異常
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 笠谷貴史, 小泉尚嗣, 後藤慎平
2. 発表標題 琵琶湖湖底湧水域で取得された潜航映像
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小泉尚嗣, 谷口和真, 山野誠, 笠谷貴史, 岸和央, 後藤慎平, 後藤直成
2. 発表標題 琵琶湖の深部湖底湧水の現状とその湖底環境への影響
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小泉尚嗣, 田代秋華
2. 発表標題 滋賀県の安曇川と周辺の湧水の2018-2022年における水質変化と活断層 の影響
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	岸 和央 (Kishi Kazuhiro) (40802468)	立正大学・環境科学研究所・客員研究員 (32687)	
研究分担者	山野 誠 (Yamano Makoto) (60191368)	東京大学・大気海洋研究所・特任研究員 (12601)	
研究分担者	丸尾 雅啓 (Maruo Masahiro) (80275156)	滋賀県立大学・環境科学部・教授 (24201)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	細井 祥子 (田辺祥子) (Hosoi Shoko) (80423226)	滋賀県立大学・環境科学部・准教授 (24201)	
研究分担者	後藤 忠徳 (Goto Tadanori) (90303685)	兵庫県立大学・理学研究科・教授 (24506)	
研究分担者	笠谷 貴史 (Kasaya Takafumi) (90373456)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海洋機能利用部門(海底資源センター)・グループリーダー (82706)	
研究分担者	後藤 慎平 (Gotoh Shinpei) (90772939)	東京海洋大学・学術研究院・助教 (12614)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関