富士山北麓・河口湖の湖底湧水と水の起源

山本 真也* 中村 高志** 芹澤 如比古***
中村 誠司**** 安田 泰輔* 内山 高*

Water Sources of Lake Bottom Springs in Lake Kawaguchi, Northern Foot of Mount Fuji, Japan

Shinya YAMAMOTO*, Takashi NAKAMURA**, Yukihiro SERISAWA***,
Seiji NAKAMURA****, Taisuke YASUDA* and Takashi UCHIYAMA*

[Received 23 October, 2018; Accepted 18 November, 2019]

Abstract

Lake bottom springs play an important role in maintaining water quality in the Fuji Five Lakes. However, the sources of these springs and the hydrological delivery mechanisms have yet to be identified. To determine the sources of spring water of Lake Kawaguchi, samples were collected directly from lake bottom springs, and oxygen and hydrogen stable isotope ratios were obtained, along with vanadium concentrations. Visual observations and water-quality analyses of the samples reveal that cold and oxygen-rich water is discharged from the lake floor, which is covered by gravel with diameters of 10–50 cm over an area of approximately 9 m (east–west) by about 13 m (north–south). The water temperature of the springs remained relatively constant at around 11.3°C during the stratified period in 2016; however, the temperature fluctuated significantly in 2017, even during the stratified period, suggesting a temporary decrease or stoppage of water being discharged from springs into the lake. Oxygen and hydrogen stable isotopic ratios of lake bottom springs were determined to be higher than those of groundwater in the southern part of Lake Kawaguchi; however, they displayed values close to those of groundwater in the northern part of Lake Kawaguchi, suggesting that spring water primarily originated from groundwater in the Misaka Mountains.

Key words : Lake Kawaguchi, lake bottom springs, stable isotopes, vanadium

キーワード : 河口湖, 湖底湧水, 安定同位体, バナジウム

* 山梨県富士山科学研究所

** 山梨大学国際流域環境研究センター

*** 山梨大学教育学部

**** 山梨大学大学院医工農学総合教育部博士課程

* Mount Fuji Research Institute, Yamanashi Prefectural Government, Fujiyoshida, 403-0005, Japan

** International Research Center for River Basin Environment, University of Yamanashi, Kofu, 400-8511, Japan

*** Faculty of Education, University of Yamanashi, Kofu, 400-8510, Japan

**** Integrated Graduate School of Medicine, Engineering, and Agricultural Sciences Doctoral Course, University of Yamanashi, Kofu, 400-8510, Japan

I. はじめに

富士山は、太平洋に面する標高 3776 m の独立峰であり、相模湾・駿河湾から供給される大量の水蒸気によってもたらされた降水は、透水性のよい火山噴出物で覆われた地表から速やかに浸透・透過して地下水となる（安原ほか, 2007）。また山麓下部では地下水の一部が地表に現れ、柿田川湧水や白糸の滝に代表される大規模湧水を形成している（安原ほか, 2007）。富士山北麓でも、富士五湖の湖底では古くから湧水が存在が指摘されており（田中, 1900, 1902; 石原, 1928; 神原, 1929）、近年では潜水カメラを使った調査により西湖の湖底に露出する富士山の溶岩流の末端から地下水が湧出する様子が確認されている（丸井ほか, 1995）。一般に流入河川に乏しい富士五湖では、湖底湧水は貴重な水源として水質の維持に重要な役割を果たしていると考えられているが（山梨県教育委員会, 1981; 西湖フジマリモ調査会, 1995）、これら湧水の 1 か所あたりの湧出量は総じて微量であり（富士北麓生態系調査会, 2007）、その涵養源や湧出機構については不明な点も多い。

一方、富士五湖の水質や周辺地下水の流動状況を考慮すれば、富士五湖に流入する地下水の大半は、富士山の北西-北東外縁をとり囲む御坂・丹沢山地に由来するものであり（宮崎, 1934; 濱野, 1976; 薄・田場, 1994; Koshimizu and Tomura, 2000）、地形的に富士山以外に起源をもつと考えられる湖底湧水も少なくない（山中湖村教育委員会, 1985; 西湖フジマリモ調査会, 1995; 三富, 2007）。富士五湖では従来、全面結氷時の不凍箇所分布から湧水箇所の推定がなされてきたが（宮崎, 1934; 山本, 1963; 有泉・吉澤, 2001）、結氷の有無は湧水以外の要因によっても左右されるため（例えば、強風や湖底からのガスの遊離; 田中, 1902）、不凍箇所の分布が湧水の実態をどの程度反映しているかについては推測の域を出ないのが現状である。

河口湖の湖底湧水は、古くからワカサギの産卵地として知られており（桐生ほか, 1978）、また

1979 年に同湖で生息が確認された天然記念物「フジマリモ」（阪井, 1980）が湧水に沿って分布するなど（山梨県教育委員会, 1981）、河口湖の貴重な生物の生息地となっている。最近では、山本ほか（2017a）が河口湖・鵜の島の東約 100 m の湖底（水深 8 m）で新たな湧水地を発見し（鵜の島東湧水地; 山本ほか, 2017a）、この場所で採取された湖底直上水の酸素・水素安定同位体比の分析から、湧水の起源が河口湖よりも標高の高い地域で涵養された地下水である可能性を指摘している。しかしながら、山本ほか（2017a）で報告された湖底直上水の同位体比は、湖水の混入により試料間で大きなばらつきがあり、また比較対象として示された周辺地下水の採取時期が異なることから、その詳細な涵養源についてはいまだ明らかにされていない。そこで本研究では、河口湖の湖底湧水の起源を明らかにするために、シーページメータ（小林, 1985）により湖底湧水の直接採取を行い、同時期に採取した湖周辺の地下水試料との比較を行った。また、鵜の島東湧水地の実態を明らかにするために、スキューバ潜水および水中カメラによる現地調査を行った。

II. 調査地概要

河口湖は、富士五湖のうちもっとも北に位置する湖であり、湖水面積 5.48 km²、最大水深 14.6 m、湖岸線長は 20.94 km に及ぶ東西に長細い形をした内陸湖で、その湖面標高は海拔約 830.5 m と富士五湖のなかではもっとも低い（山梨県, 2019; 図 1）。河口湖の東・北および西側には標高 1400 m から 1700 m の御坂山地の山々が聳え、南岸の一部では標高 1200 m から 1300 m の足和田山地に接するものの、湖岸線の大半は標高 840 m ほどで湖畔沿いには船津溶岩流（富士宮期: BC 15000 ~ BC 6000 年頃; 高田ほか, 2016）・東剣溶岩流（須走-b 期: BC 3600 ~ BC 1500 年頃; 高田ほか, 2016）と呼ばれる富士山の溶岩が露出している。また、湖中央部と東部には、それぞれ鵜の島、藤木ノ鼻と呼ばれる湖嶺があり、湖盆を三分している（西湖盆, 東湖盆（中央湖盆）、船津湖盆; 田中, 1992）。流入する自然河川とし

図 1 河口湖における湖水および湧水試料の採取位置、湖周辺地下水の採水位置の分布。

Fig. 1 Sampling localities of lake and spring water samples from Lake Kawaguchi, and groundwater samples around the lake.

ては、御坂山系を源流とする寺川と奥川がある。そのほかの自然河川は降水時を除き涸れ沢となっており、湖水はおもに伏流水あるいは湧水により涵養されている（吉澤・望月, 2005; 山本ほか, 2017a）。また、西側に隣接する西湖からは人工排水路（西湖放水路）が設けられており、水位調整などのために西湖の湖水が流入している（吉澤・平林, 2002）。

鵜の島東湧水地は、湖中央部・鵜の島の東約 100 m の湖底（水深約 8 m）に位置する湧水地である。山本ほか（2017a）は、2015 年 2 月に水質調査を行い、この場所から水温および電気伝導度の成層構造の乱れを報告している。また、水中カメラによる予察的な観測の結果、湧水地周辺では湖底一面が円礫に覆われており、その表面にはフジマリモとみられる藻類が付着する様子が確認されている（山本ほか, 2017a）。

III. 方 法

1) 湖底湧水地の現地調査

本研究では河口湖の湖底湧水の実態を明らかにするため、2016 年 7 月 27 日に鵜の島東湧水地において現地調査並びに試料採取を行った。現地調査では、携帯型 CTD 計（YSI/Nanotech, Sontek CastAway）を船上から投下し湧水地の水温・電気伝導度（25°C 換算値）の鉛直分布を調べるとともに、溶存酸素計（HACH, ポータブルマルチメータ HQ30d および LDO プロープ）を用い、表層（水深 10 cm）および水深 1 m から 1 m ごとに湖底付近まで溶存酸素濃度を測定した。また、スキューバ潜水により湖底を被覆する礫を採取し、湧水の湧出状況を目視観察した。2016 年 10 月 24 日には再度潜水を行い、防水機能を有するデジタルカメラ（Nikon, Coolpix

AW130) で湧水地の撮影を行った。

水中カメラによる湖底の観察は、2018 年 9 月 19 日に、防水ハウジングに格納したミラーレスデジタル一眼カメラ (Sony, $\alpha 6300$) を船舶からロープで下ろし、湧水地周辺の写真撮影を行った。このカメラは、総画素数 2500 万画素で、ISO 感度を最大 25600 に設定できることから透明度の低い湖底でも追加の光源なしで高解像度画像を撮影することができる。なお撮影には焦点距離 16 mm の単焦点レンズを用い、1 秒間隔でインターバル撮影を行った。

2) 試料採取

湖底湧水の採取は、市販のポリプロピレン製洗面器 (上面内径 30 cm, 底面内径 20 cm, 高さ 10 cm) と樹脂ホースを組み合わせた自作のシーページメータを用いて行った。シーページメータは、スキューバ潜水により湖底の礫帯に埋設後、ポリ塩化ビニル製の採水パックをホース先端に結びつけ、約 25 分間かけ湧水を採取した。また比較のため、湖底の礫帯からポリエチレン容器を用い湧水を直接採取した。湧水地の湖底直上水は、バンドーン採水器 (離合社, 3 L アクリル製) で採取した。表層水は、湧水地から数十 m 離れた地点で船上よりポリビーカーを用い採取した。

河口湖周辺の地下水試料は、2016 年 7 月 19 日から同年 7 月 27 日にかけて、富士河口湖町の水道水源用井戸 (掘削深度約 50 ~ 300 m) から採取した (図 1)。採取した水は、あらかじめ超純水で洗浄したポリエチレン容器に移し、実験室にもち帰った。

3) 湖底湧水地の水温測定

鵜の島東湧水地における水温の季節変化を明らかにするため、湧水の豊富な礫帯内に建材ブロック 3 個をロープで固定した沈子に 15 m ロープで浮子 (ブイ) を固定し、この沈子と浮子に水温ロガー (Onset, ティドビット v2 UTBI-001) を設置した。水温の測定は、2016 年 7 月 27 日より 1 時間ごとに行い、同年 10 月 24 日および翌年 11 月 2 日にデータ回収を行った。

4) 酸素・水素安定同位体およびバナジウム含有量の測定

採取した水試料は、孔径 0.2 μm のメンブレンフィルターでろ過し、山梨大学国際流域環境研究センターの水同位体分析計 (PICARRO, L1102-i) で酸素・水素安定同位体比の測定を行った。なお得られた同位体比は、以下の式で標準平均海水 (V-SMOW) に対する千分率として示した。

$$\delta_{\text{sample}} (\text{‰}) = \left[\frac{(R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}})}{R_{\text{standard}}} \right] \times 1000 \quad (1)$$

ここで R は、D/H (水素) および $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ (酸素) である。水の酸素・水素安定同位体比測定のスタンダードは国際標準物質の V-SMOW, SLAP, GISP から値付けされた 3 種の異なる同位体比値を有するワーキングスタンダードを用いた。標準試料の水素および酸素安定同位体比の測定精度は、それぞれ $\pm 1\text{‰}$, $\pm 0.1\text{‰}$ ($n = 4$) 程度であった。

バナジウム含有量の測定は、同じく孔径 0.2 μm のメンブレンフィルターでろ過した水試料を対象に、山梨県富士山科学研究所の誘導結合プラズマ質量分析計 (Agilent Technology, Agilent 7900 ICP-MS) を用い、絶対検量線法による定量を行った。

IV. 結果と考察

1) 湖底湧水地の状況

スキューバ潜水による湖底湧水地の目視観察の結果、湖底から水がゆらぐように湧出し、湖底一面が直径約 10 ~ 50 cm の礫に被覆される礫帯が確認された (図 2a, b)。また、その外縁部は徐々に泥に被覆され、やがて泥帯となった (図 2a, c, d)。礫帯の大きさは 2016 年 7 月、10 月の調査時に比べて翌年 11 月には縮小していたものの、11 月に巻尺を使って礫帯の広がりを選定したところ、東西約 9 m, 南北約 13 m の楕円状であることがわかった。また、11 月の調査時には礫帯の外縁部の泥帯において底泥が大小さまざまな大きさのすり鉢状となり、その底から泥の粒子

図 2 河口湖・鵜の島東湧水地の様子。(a) 湧水地縁辺部, (b) 湧水地中央部, (c) 底泥に覆われた湧水地縁辺部, (d) 湧水地縁辺部での湧水。撮影日：(a)–(c) 2016 年 10 月 24 日；(d) 2018 年 9 月 19 日。

Fig. 2 Images of Unoshima-higashi lake bottom springs in Lake Kawaguchi showing (a) edges of springs, (b) centers of springs, (c) edges of springs covered by sediment, (d) discharged water around edges of springs. Photo Date: (a)–(c) 24 October, 2016; (d) 19 September, 2018.

を巻き上げるように湧水が噴出している様子（図 2d）が多数確認された。泥帯のなかの湧水の噴出部では礫の一部が裸出しているものもみられたことから、泥帯の下にも礫帯が存在し、湧水量が少ないために泥に埋まっていることが示唆された。したがって、実際の湧水帯は礫帯だけでなくその外縁部の泥帯を含む広い範囲に及んでいると考えられた。

湖底を覆う礫には、気泡の発達した富士山由来の玄武岩質溶岩のほか、鵜の島に露出する新第三系（水野・片田, 1958）由来の泥岩が含まれていた。これら礫は、湧水地が鵜の島から続く斜面の延長上に位置していることを考えると、鵜の島南部に流入した溶岩（小田切ほか, 2015）や鵜の島

からの転石であると考えられる。また、礫帯ではいずれの礫片にもフジマリモが密生する様子が確認され、湖底より湧出する水流により被泥を免れているためにフジマリモが生存できていると考えられた（図 2a, b）。

2) 湧水地における水温および電気伝導度、溶存酸素濃度の鉛直分布

湧水の多い礫帯直上における 2016 年 7 月の水温の鉛直分布は、表層から水深約 5 m までの範囲でほぼ一定（23.9 ~ 24.4℃）であり、その後水深約 7 m にかけてやや低下傾向を示した。一方、水深 7 m 以深では水温は急激に低下し、湖底（水深 7.9 m）では 14.1℃ と表層に比べ 10℃ 以上低い値を示した（図 3）。また電気伝導度は水温同

図 3 河口湖・鵜の島東湧水地における 2016 年 7 月 27 日の水温、電気伝導度、溶存酸素の鉛直分布。

Fig. 3 Vertical distributions of water temperature, conductivity, and DO at Unoshima-higashi lake bottom springs in Lake Kawaguchi on 27 July, 2016.

様、水深約 5 m まではほぼ一定の値を示したが (117.4 ~ 118.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$)、その後水深約 7 m にかけて増加傾向を示し、さらに水深 7 m 以深では急速に低下し、湖底では 91.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ まで減少した (図 3)。山本ほか (2017a) は 2015 年 5 月の調査で底層水温および電気伝導度が湧水地付近で低くなることを報告しており (それぞれ 12.5°C, 113.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$)、こうした鉛直勾配は湧水の影響を反映したものと考えられた。

一方、溶存酸素濃度 (DO) の 2016 年 7 月の鉛直分布は、表層から水深 5 m までの範囲でほぼ一定の値を示したが (7.86 ~ 8.11 mg/L)、その後水深 7 m にかけて 0.67 mg/L まで減少傾向がみられた (図 3)。これは、夏季の水温躍層の発達により湖水の鉛直混合が阻害され、さらに有機物の分解により底層部で酸素が消費された還元層が形成されたためと考えられる。実際、潜水時には湖水が緑色から茶色の層を経て、黒色に変化する様子が認められ、その下に顕著に水温の低い湧水層が観察された。一方、湖底における溶存酸素濃度は 8.64 mg/L と表層に比べ高い値を示した。こうした特徴から、湧水地では湖底から溶存酸素

に富んだ水が供給されており、夏季停滞期においても貧酸素的にならず、フジマリモ等の生育が可能になっていると考えられた。

3) 湧水地水温の季節変化

水温ロガーによる観測の結果、鵜の島東湧水地の表層水温は 2016 年 8 月上旬がもっとも高く (最高水温: 2016 年 8 月 9 日 (29.1°C))、その後翌年の 1 月下旬にかけて減少傾向を示した (最低水温: 2017 年 1 月 26 日 (1.4°C)) (図 4)。一方、湖底水温は、2016 年 7 月下旬から 11 月下旬にかけてほぼ一定 (約 11.3°C) であったが、その後表層水温が 11°C を下回る 12 月から 2017 年 4 月までは表層水温と同様の变化傾向を示した (図 4)。このような湧水地における湖底水温と表層水温の同調的変動は、西湖でも報告されており (青柳ほか, 2015)、気温の低下により表層と底層の温度差が小さくなり水温躍層が消滅したためと考えられた。また 4 月中旬になると、表層-底層間に水温差が生じ夏季停滞期に入ったことが示唆されたが、湖底水温は約 11°C を超えても一定になることはなく、表層水温とともに 8 月下旬にかけて上昇傾向を示した。こうした水温変動の要因として、観測期間中の月降水量は 2017 年では 10 月を除くいずれの月も平年値を下回っており (図 4)、鵜の島東湧水地では周囲の降水量の低下により湧水量の一時的な減少や枯渇が生じている可能性が考えられた。

河口湖では従来、水位上昇量と降水量が類似した変動を示すことが知られている (山本・内山, 2018)。例えば、植野 (1949) は、1938 年から 1943 年の水位データの解析から、水位上昇期 (6 月下旬から 11 月上旬) における水位上昇量と降水量が約 15 日の位相差で一致することを報告している。また、吉澤ほか (2008) は、河口湖の表層水中のパナジウム濃度が 2 週間前の降水量と高い相関を示すことから、降水から地下水流入まで約 2 週間の時間差があることを指摘している。興味深いことに、本研究でも、台風 21 号 (2017 年 10 月 22 ~ 23 日) の影響でまとまった降水が観測された 10 月下旬以降、湖底水温は顕著に減少し、2017 年 11 月 2 日には 11.6°C (表層 15.6

図 4 月降水量と鵜の島東湧水地における表層・底層水温の経日変化。

Fig. 4 Monthly precipitation and temporal variations of surface and lake bottom temperatures at Unoshima-higashi lake bottom springs.

°C)まで低下した(図4)。このことから、湧水により一時的に減少ないし枯渇していた湧水が台風の影響により約10日間の時間差をもって再び湧出を開始したことが示唆される。

4) 酸素・水素安定同位体比から推定される湧水の起源

河口湖南部では、現在の国道139号線にほぼ沿う東西方向の地下谷構造が推定されており、これにより富士山側の地下水のほとんどは湖に流入せず、また河口湖の湖水は地下水となって南に流出し、富士山の地下水と合流して桂川方向に移動するものと考えられている(農林省関東農政局計画部, 1964; 山梨県, 1975; 濱野, 1976; 菅野ほか, 1986)。こうした地下水流動は、地下水の酸素・水素同位体比からも支持されており(薄・田場, 1994; 林・坪井, 2005; 山本ほか, 2017b), その安定同位体比は河口湖に近づくに従い湖水の値に近くなる傾向がみられる。そこで本研究では、河口湖の湧水と周辺地下水の酸素・水素安定同位体比から、湧水の起源の推定を試みた。一般に富士山周辺では、標高と各標高における降水の δD と $\delta^{18}O$ には負の相関がみられることが知られている(中井ほか, 1995; 安原ほか, 2007)。また、地下水の $\delta^{18}O$ から推定された富士山北麓の地下水の平均涵養標高(標高1400 mから2700 m; 安

原ほか, 2007)は、河口湖の北岸に位置する御坂山地や南岸の一部が接する足和田山地の標高の上限(約1700 m)に比べ最大で約1000 mも高くなっており、同位体比の特徴から湧水の起源を推定できる可能性がある。

図5には2016年7月に採取した河口湖の湖底湧水・表層水並びに河口湖周辺の地下水の酸素・水素安定同位体比の関係を示した。これらの試料のなかで、もっとも高い値を示したのは河口湖の表層水であり、これに対し、河口湖の湧水と周辺地下水は湖水に比べ概して低い値を示した(図5)。ただしバンドーン採水器で採取した湧水の δD と $\delta^{18}O$ は、シーページメータにより採取した試料に比べ、高い同位体比を示しており(図5)、採水の際、比較的高い同位体比値を示す湖水が混入したことが考えられた。また手採水による試料の δD と $\delta^{18}O$ は、シーページメータで採取された湧水試料とほぼ同じ領域にプロットされており、湖水に比べ水温の低い湧水が、湧出後水温成層により湧水地を覆うように滞留していたものと推察される。

一方、周辺地下水の同位体比の分布は、河口湖の南部と北部で明瞭に異なっており、もっとも低い同位体比を示したのは河口湖南部(富士山の北斜面)で採取された地下水であった(図5)。こ

図 5 2016 年 7 月に採取された河口湖周辺の湖水、湧水、地下水の酸素・水素安定同位体比の関係。

Fig. 5 Relationships between oxygen and hydrogen stable isotope ratios of lake water, spring water, and groundwater samples around Lake Kawaguchi in July 2016.

うした分布は、(1) 河口湖の湖水が一般に、蒸発の影響により周辺地下水に比べ相対的に高い同位体比を示すこと（林・坪井, 2005; 内山ほか, 2014）、(2) 富士山北麓の地下水の平均涵養標高（1400 m ～ 2700 m；安原ほか, 2007）が御坂山地の標高の上限（約 1700 m）に比べ高いことから調和的に説明することができる。なお、河口湖南部の地下水試料のなかで 1 か所だけ高い同位体比を示す井戸（FG09）が含まれていた（表 1）。この場所は、前述の河口湖南部の地下谷構造の北斜面（河口湖側）に位置しており、地下水面標高（828 m）が河口湖の湖面標高（約 833.5 m）より低いことから湖水の混入によるものと考えられる。このことは、FG09 のバナジウム濃度が 14.8 $\mu\text{g/L}$ と河口湖南部で採取された地下水中のバナジウム濃度（平均 $76.4 \pm 21 \mu\text{g/L}$ ）に比べ著しく低い値を示すことから支持される（表 1）。

シーページメータおよび手採水によって採取された湧水試料の同位体比は、河口湖南部（富士山側）の地下水に比べ高く、河口湖北部（御坂山地）の地下水に近い同位体比を示すことから（図 5）、その起源がおもに御坂山地で涵養された地下水にあることが示唆される。このことは、湖底

湧水中のバナジウム濃度（5.2 ～ 5.7 $\mu\text{g/L}$ ）が、河口湖南部で採取された地下水（平均 $76.4 \pm 21 \mu\text{g/L}$ ）に比べ 1/10 以上低く、河口湖北部（御坂山地側）の地下水（平均 $7.0 \pm 7 \mu\text{g/L}$ ）に近い値を示すことから支持される（表 1）。

富士五湖では従来、湖水中のバナジウムは富士山の地下水に由来するものと考えられており、これに基づき湖水への富士山の地下水の寄与率が見積もられてきた（1.2 ～ 9.8%；Koshimizu and Tomura, 2000）。一方、本研究で得られた湖底湧水中のバナジウム含有量（5.2 ～ 5.7 $\mu\text{g/L}$ ）は、同時期の表層水（2.9 $\mu\text{g/L}$ ）の 2 倍以上であり、富士五湖の湖水中のバナジウムが富士山以外で涵養された地下水に由来する可能性もある。そのため今後、湧水の湧出量や湧泉分布などを明らかにすると同時に、湖水や湧水、さらには周辺地下水の水質・同位体データを蓄積することで、富士五湖と富士山の地下水との関係について再検討していく必要があるだろう。

V. ま と め

本研究では、河口湖の湖底湧水の起源を明らかにするため、鷺の島東湧水地においてスキューバ潜水と水中カメラによる現地調査を行うとともに、湖底から湧水を直接採取し、同時期に採取した湖周辺の地下水との比較を行った。

スキューバ潜水による目視観察と水質測定の結果、湖底湧水地では東西約 9 m、南北約 13 m の範囲にわたって直径 10 ～ 50 cm の礫に被覆されており、湖底からは湖水に比べ冷たく溶存酸素に富んだ水が湧出している様子が明らかとなった。一方、水温ロガーによる観測の結果、湧水地の湖底水温は成層期の 2016 年 7 月下旬から 11 月下旬にかけて約 11.3℃ とほぼ一定であったが、2017 年には成層期に入った 4 月中旬以降にも大きな変動を示し、湖底からの湧水量が降水量の低下に伴って一時的に減少または枯渇していることが示唆された。

河口湖の湖底湧水の酸素・水素安定同位体比は、河口湖南部（富士山側）の地下水に比べ高く、河口湖北部（御坂山地側）の地下水に近い同

表 1 河口湖およびその周辺で得られた水試料のバナジウム濃度と酸素・水素安定同位体比.

Table 1 Vanadium concentrations, and oxygen and hydrogen stable isotope ratios of water samples from Lake Kawaguchi and its surrounding area.

Sample	ID	Date	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	d-excess	^{51}V ($\mu\text{g/L}$)	Remarks
Ground water	FG01	2016/7/26	-11.1	-76	13.0	62.0	
	FG02	2016/7/26	-11.0	-75	13.2	64.3	
	FG03	2016/7/26	-11.1	-76	13.0	65.2	
	FG04	2016/7/26	-10.9	-75	12.8	81.1	
	FG05	2016/7/26	-11.2	-78	11.8	98.5	
	FG06	2016/7/26	-10.9	-75	12.9	90.7	
	FG07	2016/7/26	-11.9	-83	12.2	71.9	
	FG08	2016/7/26	-10.8	-74	12.2	55.3	
	FG09	2016/7/26	-10.4	-71	12.0	14.8	
	FG10	2016/7/19	-11.8	-82	12.4	115.1	
	FG11	2016/7/19	-10.7	-74	11.8	82.1	
	FG12	2016/7/19	-11.2	-77	12.4	73.9	
	FG13	2016/7/19	-11.7	-81	13.1	101.5	
	FG14	2016/7/19	-10.8	-75	11.5	65.2	
	FG15	2016/7/19	-11.3	-79	11.4	99.5	
	FG16	2016/7/25	-10.8	-74	12.5	76.2	
	FG17	2016/7/25	-11.0	-77	11.8	71.3	
	FG18	2016/7/25	-11.0	-77	11.2	78.6	
	FG19	2016/7/25	-11.6	-80	12.7	71.1	
	FG20	2016/7/27	-11.6	-79	14.1	88.7	
Ground water	MG01	2016/7/21	-10.4	-72	11.7	2.9	
	MG02	2016/7/21	-10.9	-73	14.1	4.1	
	MG03	2016/7/21	-10.8	-73	13.4	5.9	
	MG04	2016/7/21	-10.8	-74	12.9	0.4	
	MG05	2016/7/21	-10.6	-73	12.6	2.2	
	MG06	2016/7/21	-10.6	-73	12.1	3.4	
	MG07	2016/7/21	-10.6	-72	12.7	2.8	
	MG08	2016/7/21	-10.7	-73	13.0	8.5	
	MG09	2016/7/27	-9.8	-64	14.4	8.1	
	MG10	2016/7/20	-10.3	-70	12.0	26.2	
	MG11	2016/7/20	-10.3	-69	13.1	12.6	
Spring water	K-16-000	2016/7/27	-10.7	-71	14.4	5.7	Directly bottled
	K-16-001	2016/7/27	-9.7	-65	12.6	2.7	Van Dorn sampler
	K-16-003	2016/7/27	-9.7	-66	11.0	3.1	Van Dorn sampler
	K-16-004	2016/7/27	-10.6	-70	14.9	5.2	Seepage meter
Lake water	K-16-002	2016/7/27	-8.1	-59	5.3	2.9	

位体比を示すことから、湧水はおもに御坂山地で涵養された地下水起源であると推察された。

謝 辞

富士河口湖町水道課には、水道水源の原水を提供していただいた。また、山梨大学大学院教育学研究科修士課程の上嶋崇嗣氏、山梨県富士山科学研究所の野澤すみれ氏には、現地調査でお手伝いいただいた。2名の匿名査読者の方々からは大変有意義なコメントをいただいた。記して御礼申し上げます。

文 献

- 青柳敏裕・岡崎 巧・大浜秀規・三浦正之・谷沢広将・小澤 諒・長谷川裕弥・吉澤一家・坪井潤一・勘坂弘治・市田健介・Lee Seungki・吉崎悟朗・松石 隆 (2015): クニマスの生態解析及び増養殖に関する研究 (第3報)。山梨県総合理工学研究機構研究報告書, **10**, 43-65. [Aoyagi, T., Okazaki, T., Ohama, H., Miura, M., Tanizawa, K., Ozawa, R., Hasegawa, Y., Yoshizawa, K., Tsuboi, J., Kanzaka, K., Ichida, K., Lee, S., Yoshizaki, G. and Matsuishi, T. (2015): Studies on the ecology and aquaculture of Kuni-masu (*Oncorhynchus kawamurae*) in Lake Saiko. *Y-CROST Research Report*, **10**, 43-65. (in Japanese with English abstract)]
- 有泉和紀・吉澤一家 (2001): 河口湖及び精進湖の結氷状況について。山梨県衛生公害研究所年報, **45**, 45-48. [Ariizumi, K. and Yoshizawa, K. (2001): Observation of Lake Kawaguchi and Lake Shoji freezing allover in winter, 2001. *Annual Report of the Yamanashi Institute for Public Health*, **45**, 45-48. (in Japanese)]
- 富士北麓生態系調査会 (2007): 富士北麓水域の生態系の特徴と保全のための課題。富士北麓生態系調査会編: 富士北麓水域 (富士五湖) における生態系多様性に関する調査報告書。157-177. [Fuji-hokuroku Ecological Study Group (2007): Characteristics of the ecosystem in the northern area of Mt. Fuji and issues for conservation. in *Survey Report on Ecological Diversity of Fuji Five Lakes in the Northern Area of Mt. Fuji, Central Japan* edited by Fuji-hokuroku Ecological Study Group, 157-177. (in Japanese)*]
- 濱野一彦 (1976): 富士山北麓の地下水。山梨大学教養学部研究報告, **27**, 59-66. [Hamano, K. (1976): Groundwater in the northern foot of Mt. Fuji. *Memoirs of the Faculty of Education & Human Science Yamanashi University*, **27**, 59-66. (in Japanese)*]
- 林 武司・坪井哲也 (2005): 富士山北麓における山体地下水と山麓湖の交流。地下水技術, **47**(11), 3-14. [Hayashi, T. and Tsuboi, T. (2005): Groundwater in volcanic mountain, interaction of mountain groundwater and piedmont lake on northern foot of Mt. Fuji. *Journal of Ground Water Technology*, **47**(11), 3-14. (in Japanese)*]
- 石原初太郎 (1928): 富士の地理と地質。富士の研究 V。古今書院。[Ishihara, H. (1928): *Geography and Geology of Mt. Fuji. Research of Mt. Fuji V (Fuji No Kenkyu V)*. Kokon Shoin. (in Japanese)*]
- 神原信一郎 (1929): 富士山の地質と水理。博進館。[Kanbara, S. (1929): *Geology and Hydrology of Mt. Fuji (Fujisan No Chishitsu To Suiri)*. Hakushindo. (in Japanese)*]
- 菅野敏夫・石井武政・黒田和男 (1986): 水文地質構造から見た富士山北麓地域の地下水流動と河口湖の水位変動機構に関する一考察。日本地下水学会誌, **28**, 25-32. [Kanno, T., Ishii, T. and Kuroda, K. (1986): Study on groundwater flow in the northern foot area of Mt. Fuji and water level changes of Lake Kawaguchi, based on the hydrogeological structure. *Journal of the Japanese Association of Groundwater Hydrology*, **28**, 25-32. (in Japanese with English abstract)]
- 桐生 透・芳賀 稔・高橋一孝 (1978): 河口湖におけるワカサギの産卵に関する調査-I。山梨県魚苗センター事業報告書 (昭和51年度), 49-59. [Kiryu, T., Houga, M. and Takahashi, K. (1978): Researches on smelt spawning in Lake Kawaguchi-I. *Annual Reports of Yamanashi Fish Plant Center (FY 1976) (Yamanashiken Gyobyō Centa Jigyo Hokokusho (Showa 51 Nendo))*, 49-59. (in Japanese)*]
- 小林正雄 (1985): びわ湖の湖底から漏出する地下水について—志賀町松の浦浜の観測—。ハイドロロジー, **15**, 33-41. [Kobayashi, M. (1985): Some aspects on the groundwater seepage from the bottom of Lake Biwa observed at Matsunoura beach. *Hydrology*, **15**, 33-41. (in Japanese with English abstract)]
- Koshimizu, S. and Tomura, K. (2000): Geochemical behavior of trace vanadium in the spring, groundwater and lake water at the foot of Mt. Fuji, central Japan. in *Groundwater Updates* edited by Sato, K. and Iwasa, Y., Springer, 171-176.
- 丸井敦尚・安原正也・河野 忠・佐藤芳徳・垣内正久・檜山哲哉・鈴木裕一・北川光雄 (1995): 富士山北麓西湖の水質と湖底湧水。ハイドロロジー, **25**, 1-12. [Marui, A., Yasuhara, M., Kono, T., Sato, Y., Kakiuchi, M., Hiyama, T., Suzuki, Y. and Kitagawa, M. (1995): Water quality and lake bottom springs of Lake Sai on Mt. Fuji's northern slope. *Hydrology*, **25**, 1-12. (in Japanese with English abstract)]
- 三富龍一 (2007): 潜水による富士五湖の観察記録。富士北麓生態系調査会編: 富士北麓水域 (富士五湖) における生態系多様性に関する調査報告書。133-154. [Mitomi, R. (2007): Diving observation record of Fuji Five Lakes. in *Survey Report on Ecological Diversity of Fuji Five Lakes in the Northern Area of Mt. Fuji, Central Japan* edited by Fuji-hokuroku Ecological Study Group, 133-154. (in Japanese)*]
- 宮崎正義 (1934): 河口湖の湧水。天気と気候, **1**(1), 30-33. [Miyazaki, M. (1934): Springs in Lake

- Kawaguchi. *Tenki To Kiko*, **1**(1), 30-33. (in Japanese)*]
- 水野篤行・片田正人 (1958): 西八代層群 (中新統) について. 地球科学, **39**, 1-14. [Mizuno, A. and Katada, M. (1958): On the Miocene Nishiyatsushiro Group in the Southern Fossa Magna. *Earth Science (Chikyū Kagaku)*, **39**, 1-14. (in Japanese with English abstract)]
- 中井信之・菊田直子・土 隆一 (1995): 富士山及び周辺の地下水・河川水の安定同位体組成とその水文学への応用. ハイドロロジー, **25**, 71-81. [Nakai, N., Kikuta, N. and Tsuchi, R. (1995): Isotopic composition of natural waters distributing around Mt. Fuji and its applications to hydrological study. *Hydrology*, **25**, 71-81. (in Japanese with English abstract).]
- 農林省関東農政局計画部 (1964): 昭和 37 年度農業用大規模地下水賦存調査富士北麓地区調査報告書. [Kanto Regional Agricultural Administration Office Planning Department (1964): *Research Reports on the Abundance of Large-scale Agricultural Groundwater in the Northern Area of Mt. Fuji in FY 1962 (Showa 37 Nendo Nogyo Daikibo Chikasui Fuzon Chosa Fuji Hokuroku Chiku Chosa Hokokusho)*. (in Japanese)*]
- 小田切幸次・佐野哲也・村中康秀・神谷貴文・内山 高・山本真也・長谷川達也・中村高志・渡辺雅之・吉澤一家・内山美恵子・赤塚 慎・古屋洋一 (2015): 富士北麓水資源の保全と活用のための水文科学的研究. 山梨県総合理工学研究機構研究報告書, **10**, 77-90. [Odagiri, K., Sano, T., Muranaka, Y., Kamitani, T., Uchiyama, T., Yamamoto, S., Hasegawa, T., Nakamura, T., Watanabe, M., Yoshizawa, K., Uchiyama, M., Akatsuka, S. and Furuya, Y. (2015): Hydrologic science research for the management and utilization of ground water resources in the northern piedmont area of Mount Fuji. *Y-CROST Research Report*, **10**, 77-90. (in Japanese with English abstract)]
- 西湖フジマリモ調査会 (1995): 山梨県指定天然記念物「フジマリモ及び生育地」調査事業報告書 西湖のフジマリモ—生育状況と環境. 山梨県足和田村. [Saiko Fuji Marimo Research Group (1995): *Research Reports on Yamanashi Prefectural Natural Monument "Fuji Marimo Moss Ball and its habitat" Fuji Marimo in Lake Sai—Growing Condition and Environment (Saiko No Fuji Marimo—Seikū Jyokyo To Kankyo)*. Ashiwada Village, Yamanashi Prefecture. (in Japanese)*]
- 阪井與志雄 (1980): 河口湖産フジマリモについて. 藻類, **28**, 47-50. [Sakai, Y. (1980): Note on *Cladophora sauteri* f. *kurilensis* collected from Lake Kawaguchi, Japan. *Japanese Journal of Phycology*, **28**, 47-50. (in Japanese with English abstract).]
- 薄 栄幸・田場 穰 (1994): 富士五湖とその周辺地下水の関係について. 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, **29**, 43-60. [Susuki, H. and Taba, Y. (1994): A study on the mechanism of exchange between lake waters of FUJI-GOKO (five lakes) and the groundwater around the lakes. *Proceedings of the Institute of Natural Sciences, Nihon University*, **29**, 43-60. (in Japanese)]
- 高田 亮・山本孝宏・石塚吉浩・中野 俊 (2016): 富士火山地質図 (第 2 版). 特殊地質図 12, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 56p. [Takada, A., Yamamoto, T., Ishizuka, Y. and Nakano, S. (2016): *Geological Map of Fuji Volcano (Second Edition) with Explanatory Text. Miscellaneous Map Series 12*. Geological Survey of Japan, AIST, 56p. (in Japanese with English abstract)]
- 田中阿歌麻呂 (1900): 富士山麓山中湖の湖底湧泉に就いて. 地学雑誌, **12**, 608-614. [Tanaka, A. (1900): Note on lake bottom springs in Lake Yamanaka at the foot of Mt. Fuji, Japan. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **12**, 608-614. (in Japanese)*]
- 田中阿歌麻呂 (1902): 富士山麓山中湖冬季に於ける結氷状態並水温成層の異常を述べ彼の湖底湧泉存在の確實に及ぶ. 地学雑誌, **14**, 154-165. [Tanaka, A. (1902): Winter lake ice distribution and anomalies in water temperature stratification in Lake Yamanaka at the foot of Mt. Fuji as the evidence for the existence of lake bottom springs. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **14**, 154-165. (in Japanese)*]
- 田中正明 (1992): 日本湖沼誌. 名古屋大学出版. [Tanaka, M. (1992): *Japanese Lakes and Marshes Magazine (Nihon Kosho Shi)*. Nagoya University Press. (in Japanese)*]
- 内山 高・小田切幸次・佐野哲也・小林 浩・中村高志・長谷川達也・山本真也・村中康秀・神谷貴文・渡辺雅之・古屋洋一・吉澤一家・赤塚 慎・内山美恵子 (2014): 富士北麓水資源の保全と活用のための水文科学的研究. 山梨県総合理工学研究機構研究報告書, **9**, 67-85. [Uchiyama, T., Odagiri, K., Sano, T., Kobayashi, H., Nakamura, T., Hasegawa, T., Yamamoto, S., Muranaka, Y., Kamitani, T., Watanabe, M., Furuya, Y., Yoshizawa, K., Akatsuka, S. and Uchiyama, M. (2014): Hydrologic science research for the management and utilization of ground water resources in the northern piedmont area of Mount Fuji. *Y-CROST Research Report*, **9**, 67-85. (in Japanese with English abstract)]
- 植野隆壽 (1949): 富士五湖の水位に就いて. 海と空, **27**, 17-22. [Ueno, T. (1949): Note on the lake level of Fuji Five Lakes. *Sea and Sky (Umi to Sora)*, **27**, 17-22. (in Japanese)*]
- 山中湖村教育委員会 (1985): マリモ分布調査報告書. [Yamanakako Village Board of Education (1985): *Research Reports on the Distribution of Marimo Moss Balls (Marimo Bunpu Chosa Hokokusho)*. (in Japanese)*]
- 山本真也・内山 高 (2018): 河口湖における過去約 100 年間の降水量と湖水位変動. 都留文科大学研究紀要, **88**, 131-141. [Yamamoto, S. and Uchiyama, T. (2018): Precipitation and water level fluctua-

- tions in Lake Kawaguchi over the past 100 years. *Tsuru University Review*, **88**, 131-141. (in Japanese)]
- 山本真也・中村高志・内山 高 (2017a): 富士山北麓・河口湖で新たに見つかった湖底湧水. 日本水文科学会 誌, **47**, 49-59. [Yamamoto, S., Nakamura, T. and Uchiyama, T. (2017): Newly discovered lake bottom springs from Lake Kawaguchi, the northern foot of Mount Fuji, Japan. *Journal of Japanese Association of Hydrological Sciences*, **47**, 49-59. (in Japanese with English abstract)]
- 山本真也・中村高志・小石川 浩・内山 高 (2017b): 富士山北麓・河口湖南岸の浅層地下水とその水質特性. 富士山研究, **11**, 1-9. [Yamamoto, S., Nakamura, T., Koishikawa, H. and Uchiyama, T. (2017b): Water quality of shallow groundwater in the southern coast area of Lake Kawaguchi at the northern foot of Mt. Fuji, Yamanashi, Japan. *Mount Fuji Research*, **11**, 1-9. (in Japanese)]
- 山本寿々雄 (1963): 河口湖における湧水地の予察について. 富士国立公園博物館研究報告, **9**, 13-14. [Yamamoto, S. (1963): Preliminary studies on springs in Lake Kawaguchi. *Science Report of the Fuji National Park Museum*, **9**, 13-14. (in Japanese)*]
- 山梨県 (1975): 山梨県の地下水資源 富士山北麓区域. [Yamanashi Prefecture (1975): *Groundwater Resources in Yamanashi Prefecture—The Northern Area of Mt. Fuji (Yamanashiken No Chikasui Shigen Fujisan Hokuroku Kuiki)*. (in Japanese)*]
- 山梨県 (2019): やまなし県のあらまし 2019. 山梨県広報広聴課. [Yamanashi Prefecture (2019): *Overview of Yamanashi Prefecture 2019 (Yamanashiken No Aramashi 2019)*. Public Relations Division, Yamanashi Prefecture. (in Japanese)*]
- 山梨県教育委員会 (1981): マリモ学術調査報告書. [Yamanashi Prefecture Board of Education (1981): *Academic Research Reports of Marimo Moss Balls (Marimo Gakujutsu Chosa Hokokusho)*. (in Japanese)*]
- 安原正也・風早康平・丸井敦尚 (2007): 富士山の地下水とその涵養プロセスについて. 荒牧重雄・藤井敏嗣・中田節也・宮地直道編: 富士火山. 山梨県環境科学研究所, 389-405. [Yasuhara, M., Kazahaya, K. and Marui, A. (2007): An isotopic study on where, when and how groundwater is recharged in Fuji Volcano, central Japan. in *Fuji Volcano* edited by Aramaki, S., Fujii, T., Nakada, S. and Miyaji, N., Yamanashi Institute of Environmental Sciences, 389-405. (in Japanese with English abstract)]
- 吉澤一家・平林公男 (2002): 河口湖湖底表層堆積物中の珪藻の水平分布. 山梨県衛生公害研究所年報, **46**, 42-45. [Yoshizawa, K. and Hirabayashi, K. (2005): Horizontal distribution of Diatom assemblages from the surface sediments in Lake Kawaguchi. *Annual Report of the Yamanashi Institute for Public Health*, **46**, 42-45. (in Japanese)]
- 吉澤一家・望月映希 (2005): 夏季の河口湖湖底直上水の水質. 山梨県衛生公害研究所年報, **49**, 54-59. [Yoshizawa, K. and Mochizuki, E. (2005): Water quality of bottom layer water in Lake Kawaguchi during the summer time. *Annual Report of the Yamanashi Institute for Public Health*, **49**, 54-59. (in Japanese)]
- 吉澤一家・有泉和紀・望月映希 (2008): 富士五湖湖水中のバナジウム濃度の季節変化. 山梨県衛生公害研究所年報, **52**, 85-88. [Yoshizawa, K., Ariizumi, K. and Mochizuki, E. (2008): Seasonal changes of vanadium concentration in Fuji Five Lakes. *Annual Report of the Yamanashi Institute for Public Health*, **52**, 85-88. (in Japanese)]

* Title etc. translated by S.Y.