

猪苗代湖の湖底堆積物から抽出した地中水の水質の特徴 —2012年と2013年の結果を用いた考察—

藪崎志穂（福島大学・共生システム理工学類）・廣瀬孝太郎（福島大学・共生システム理工学類）・
長橋良隆（福島大学・共生システム理工学類）

要 旨

猪苗代湖において2012年と2013年に掘削した湖底堆積物中の水を抽出し、これらの水試料のEC, pH, 溶存成分, および安定同位体を分析した。深度約2 mまでの結果を用いて図を作成し検討した結果、以下の特徴が明らかになった。1) 地中水の水分量のプロファイルは堆積物中の土質の違いを反映している。2) ECの鉛直プロファイルから、いずれの地点においてもECは浅層部分で相対的に低く、深度が深くなると共に値が上昇する傾向が認められる。3) 湖底堆積物の表層付近のpHは湖水のpHに近い7前後の値を示しているが、これは湖水の浸透の影響ではなく、湖底堆積物中の表層付近で水質を中性に保つ何らかの働き（硫酸還元菌による働きなど）が生じていると考えられる。4) 地中水の溶存成分では SO_4^{2-} が非常に高濃度となっており、これは湖底堆積物中に含まれる硫化物が酸化されたことに因ると考えられる。5) $\delta^{18}\text{O}$ 値の鉛直プロファイルの結果においても、湖水が直接湖底堆積物中を浸透して地中水の同位体比に影響を与えている訳ではないことが示された。また、同位体プロファイルを完成させることにより、猪苗代湖の湖底堆積物中における磐梯山方面からの地下水涵養の有無について確認することができると期待される。今後は、同位体プロファイルを完成させ、地中水の溶存分量や堆積物の化学組成の結果などを総合的に判断して、地中水の水質形成の解明をさらに進める予定である。

I. はじめに

福島県のほぼ中央に位置する猪苗代湖は磐梯山の南麓に広がる湖で、四季を通じて人々が訪れる観光地として知られている。また、湖の東岸で安積疏水として取水され、郡山市とその周辺地域（須賀川市、本宮市、猪苗代町、大玉村）の3市1町1村の農業用水、工業用水、飲用水（水道水源）、発電用水として利用されており、周辺地域の住民にとってなくてはならないものである。

猪苗代湖には磐梯山や吾妻山を源流とする酸性の河川が流入しており、1980年ごろの湖のpHは5前後と酸性を示していた（千葉, 1987）。また、酸性湖沼のため植物プランクトンなどの有機物が少ないためCODは低く、高い透明度を誇り、2002年～2005年度まで4年連続で湖沼の中で水

質日本一を記録した（環境省環境管理局水環境部, 2003, 2004, 環境省 水・大気環境局, 2005, 2006）。

しかし、近年、湖水のpHの値は徐々に上昇していることが観測によって明らかになった。平成元年～平成7年までの湖水のpHは5.0～5.1の範囲にあったが、平成8年以降は年々上昇して中性化する傾向が認められ、ここ数年は7前後の値を示している（福島県環境センター, 2011）。猪苗代湖のpHが上昇した要因として、長瀬川などの流入河川の水質・水量の変化、猪苗代湖の周辺地域の土地利用変化、生活排水や産業・農業系排水の流入、地下水の影響などが考えられるが、湖水の水質形成要因については未だ明瞭にはされていない。

湖水のpHや水質に影響を与える要素の一つと

して、湖の湖底堆積物も挙げる事ができる。湖底には長年にわたって堆積した多量の堆積物があり、それらに湖の水質の変化の謎を解く鍵が隠されている可能性は大きい。猪苗代湖の湖底堆積物の採取はこれまでに数度実施されており、湖底表層から深度 40~100 cm 程度の比較的浅い部分の珪藻化石や花粉化石に注目して、猪苗代湖の古環境について明らかにしている(鈴木ほか, 1981, 1982; 藤田ほか, 2007)。しかしながら、湖底堆積物の表層から深部にかけて存在する地中水に着目し、pH や水質組成について調査した研究は、これまでに行われていない。湖水の水質変化の要因を明らかにすることは、今後の猪苗代湖の水質保全や環境対策を考える際に重要な役割を果たすと言える。そこで本研究では、猪苗代湖の湖底堆積物を 2012 年と 2013 年の 2 回採取し、堆積物中に含まれる水を抽出して、深度別の水質の特徴を示し、猪苗代湖の水質形成について明らかにすることを目的として、調査、分析を実施した。

昨年度のプロジェクト報告書(藪崎ほか, 2014)では、2012 年に掘削した湖底堆積物から抽出した地中水を対象とし、表層から深度約 21 m までの EC, pH, 溶存成分の鉛直プロファイルについて示し、その特徴について議論した。本稿では、2012 年と 2013 年に掘削した湖底堆積物の表層から深度約 2 m までの浅い部分を対象とし、抽出した地中水の EC, pH, 溶存成分、ならびに安定同位体の鉛直プロファイルを示し、それらの特徴を明らかにして、水質の形成要因について検討した結果を示す。

II. 研究対象地域の概要

1. 猪苗代湖の特徴

猪苗代湖は福島県のほぼ中央部に位置しており、東西約 12 km, 南北約 13.5 km, 周囲長は約 50 km で、福島県猪苗代町、会津若松市、郡山市の 2 市 1 町にわたり広がっている。面積は 103.3 km²であり、琵琶湖、霞ヶ浦、サロマ湖に次いで

日本で 4 番目に大きい淡水湖である。湖心付近で最大水深 (93.5 m) を示し、湖畔部で浅くなっている。水面の標高は 514 m で (国立天文台編, 2015)、湖の成因により構造湖 (断層湖) とされている。

猪苗代湖には複数の河川が流入しており、湖の南側から流入する河川 (舟津川や常夏川など) の pH は 6~7 前後の値を示している。一方、湖の北側から流入する長瀬川は pH3~4 と酸性の値を示している。これは、安達太良山の沼の平付近を源流とし、火山ガスや鉱山廃水の影響を受けて pH2 前後の強酸性を示す硫黄川や、同じく安達太良山を源流とする pH3~3.5 前後の値をもつ酸川が合流しているためである。この長瀬川の上流には電力会社のダムが設けられているため、水量調節が随時行われており、流量の日変化、年変化は大きくなっている。

一方、湖からの流出河川には、湖の北西部から流出する日橋川があり、会津盆地を流下し、複数の河川と合流して、最終的には阿賀野川と名を変えて、日本海に流入している。また、湖の東岸に安積疏水の取入口の山瀧水門があり、平水時で最大約 12.6 m³/sec (年間総量で約 126×10⁶ m³) の取水が可能となっている (安積疏水土地改良区, 2013)。

なお、猪苗代湖とその周辺地域の地形・地質の概要と猪苗代湖の形成に関する概要については、藪崎ほか (2014) にまとめているので、適宜ご参照いただきたい。

2. 猪苗代湖とその周辺地域の気候・気象

猪苗代湖周辺の気象観測地点である猪苗代 (北緯 37°33.3', 東経 140°07.3', 標高 522 m a.s.l.) と湖南 (北緯 37°23.3', 東経 140°05.4', 標高 536 m a.s.l.) の 1981~2010 年の平年値データを参照したところ (気象庁 HP, 2015)、年降水量は猪苗代で 1,293.9 mm, 湖南で 1,327.4 mm であり、日本の年降水量の平均値 (1971 年から 2000 年) にか

ての平均値で 1,718 mm : 国土交通省, 2013) と比べて 400 mm ほど少ない。月降水量は 7 月で最も多く, 2 月で最も少ない。季節的な変動として, 夏季～秋季にかけて相対的に多く, 冬季に少ないという特徴を有している。一方, 年平均気温は, 猪苗代で 9.6°C となっている。月平均気温は 1 月と 2 月で 0°C を下回り, 最も高い 8 月でも 22.5°C と比較的低い値を示している。猪苗代の気温と降水量データを用いて, ソーンズウェイト法によりおおかまではあるが可能蒸発散量を求めたところ約 560 mm となり, 降水量の半分ほどが蒸発していることになる。

3. 猪苗代湖周辺の土地利用

猪苗代湖周辺の土地利用では, 比較的なだらかな地形を呈する湖の北～北西側では民家や水田 (一部には畑地) が広がっている。この地域には夏に湖水浴場として賑わいをみせる天神浜や, 猪苗代湖の観光船乗り場 (長浜) があり, 観光客向けのホテルなどの宿泊施設や観光施設, 土産物なども立地している。

湖の南東～南西側にかけては, 湖畔のすぐそばまで山地斜面が迫っているため, 急な崖を作り上げ, 大部分が広葉樹林や針葉樹林の植生で覆われている。また, 山間部や河川沿いの比較的狭い平地部には民家や水田, 畑地が分布している。このような土地利用の違いにより, 猪苗代湖へ流入する河川水や地下水の水質は地域により異なることが予想され, 湖の水質も場所によって多少の違いが生じていると考えられる。

4. 猪苗代湖の水質の特徴

2012 年 9 月に苗代湖湖心部付近で調査を行ったところ, 湖水 (表層) の EC は 11.7 mS/m, pH は 8.36, 水温は 25.2°C であった (藪崎ほか, 2013)。継続的に測定されているデータによると, 近年の pH は 6.8 前後であり (福島県環境センター, 2011), この値と比べると 2012 年 9 月の pH は高めの値

となっている。

2013 年 6 月 12 日に採取した猪苗代湖の湖水および河川水の水質測定結果を利用して, 各地点の水質組成図を作成した (図 1)。河川水は長瀬川 (PJ-44, N-1, N-3), 酸川 (N-2), 舟津川 (PJ-46) の 3 河川を対象とした。

長瀬川および酸川の水質組成は Ca-SO₄ 型を示し, 特に酸川の溶存分量が多くなっている。これは II-1. (猪苗代湖の特徴) でも述べたように, 火山ガスなどの影響を受けているためである。PJ-46 の舟津川の水質組成は長瀬川・酸川とは異なり, 日本の河川で一般的にみられる Ca-HCO₃ 型を示しており, 火山ガス等の影響を受けていないことが明らかである。

猪苗代湖の水質組成は, 殆どの地点で Ca-SO₄ 型を示しており, 特に SO₄²⁻ が相対的に多く含まれている。これは酸性河川である長瀬川や酸川の水質組成と類似しており, 猪苗代湖の水質は火山活動の影響を受けていることが, 水質組成の結果においても示唆される。溶存分量は, 長瀬川の流入地点に近い PJ-43 で Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ 濃度が他の地点よりもやや高くなっており, 長瀬川の水質の影響を他の地点よりも強く受けていると考えられる。北部に位置する湖水 (PJ-52) のみ Na-Cl 型と Ca-SO₄ 型の混合タイプを示し, 他の地点とは異なった水質組成となっている。この地点の周囲には観光施設等が立地しているため, 人為的な影響が多少及んで, このような水質が形成されたと考えられる。

また, 水温の鉛直分布の結果から, 猪苗代湖は夏季に 8～16 m 深度で水温躍層が形成されることが明らかにされている (福島県環境センター, 2011)。

III. 研究方法

1. 猪苗代湖のボーリング地点と掘削の方法

2012 年と 2013 年に実施した湖底堆積物 (コア) の掘削地点を図 2 に示した。また, 掘削した各地

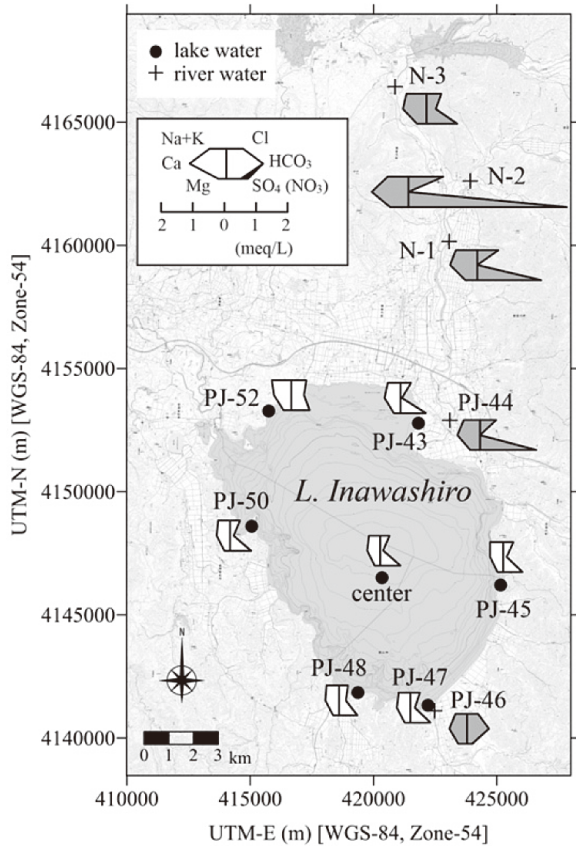


図1 猪苗代湖の湖水と河川水の水質組成
(河川水のダイアグラムは灰色に着色した)

点の水深を表1にまとめた。2012年は猪苗代湖の湖心部に近い水深約92mの地点で掘削し(図2の2012と記した地点)、厚さ約30mのコアを採取した。2013年は水深約45~70mの4地点で掘削を行った(図2のSt.1~St.4と記した地点)。掘削したコアの厚さは、St.1で約1.1m、St.4で約1.4mである。これらの地点のうち、地中水の抽出を行ったのは、2012とSt.1、St.4の3地点のコアである。掘削作業は、2012年は9月6日~11月8日、2013年は9月25日~9月30日にかけて実施した。これには、機材の搬入や台船の組み立て、それらの撤収も含まれている。コアの掘削法は、長橋・廣瀬(2013)および廣瀬ほか(2014)に詳細に記載されている。なお、湖底堆積物は、口径70mm、長さ1mのサンプリングチューブ内に詰められた状態で採取された。

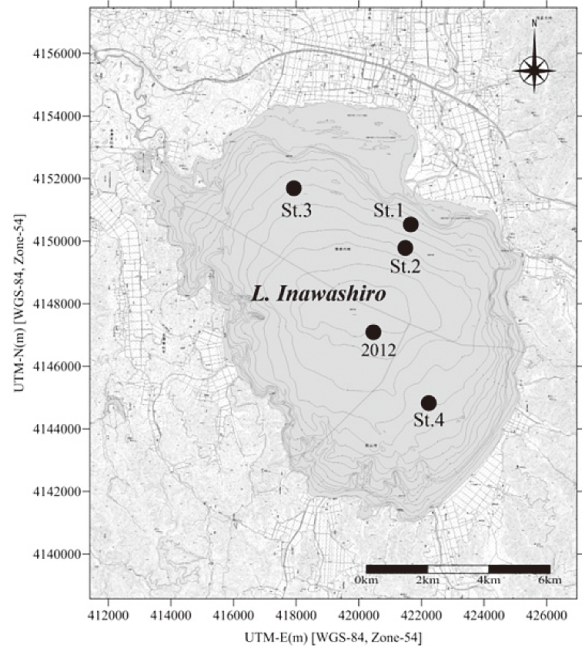


図2 湖底堆積物の掘削地点

表1 湖底堆積物の掘削地点の水深

year	coring point	depth (m)
2012	2012	92
2013	St.1	45
2013	St.2	70
2013	St.3	60
2013	St.4	70

2. 地中水の抽出方法

採取したコア試料の一部を水抽出用として、深度約10cm程度に小分けしてビニールバックに入れ、空気に触れないように密封して冷蔵庫内で保管した。その後、地中水を抽出するために、コア試料を深度約5cmに相当する分ずつ取り分けて、100ccの土壌円筒管に詰め、さらに遠心管に入れた(図3)。これを土壌脱水用ローター(R11D2, HITACHI社製)に4つセットし、高速冷却遠心分離機(CR20GIII, HITACHI社製)により地中水の抽出を行った。抽出では8,600rpmで90分間遠心分離を実施し、pF値で約4.0に相当する水分量を採取した。なお、遠心実施時の温度設定は5℃とした。

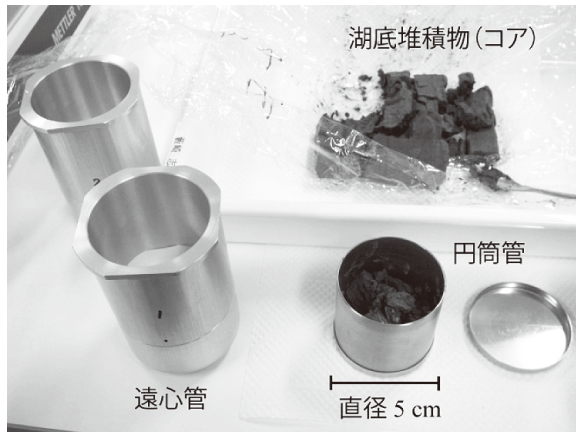


図3 湖底堆積物と遠心管

3. 抽出水の分析項目とその方法

遠心分離法で抽出した地中水は、抽出後速やかに 20 ml のスクリーバイアル瓶に保存し、同時に EC と pH の測定を行った。遠心分法にて抽出できた水分量は 10～30 ml でコアの地点や深度によって異なっており、水量としてあまり多くないため、少量の試料水でも測定することができる機器を選定した。EC の測定は LAQUA twin (B-711 COND, HORIBA 社製)、pH の測定は LAQUA twin (B-712 pH, HORIBA 社製) により測定を行った。抽出した水試料は冷蔵庫で保管し、できるだけ速やかに分析を実施した。溶存成分量の分析には、イオンクロマトグラフィーを利用し、陰イオンは ICS-2000、陽イオンは ICS-1000 (共に DIONEX 社製) を利用した。測定項目は、陰イオンでは F^- 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 Br^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} の 7 成分を、陽イオンでは Li^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} の 6 成分である。表層付近の一部の試料については、pH4.8 アルカリ度滴定法により HCO_3^- を定量した。また、酸素・水素安定同位体比は、近赤外線半導体レーザーを用いたキャビティリングダウン吸収分光法により分析を行った。安定同位体比は、標準物質である SMOW (Standard Mean Ocean Water : 標準平均海水) に対する千分率偏差 (δ 値) として示した。溶存成分は抽出した水試料の全てについて分析が完了しているが、安定同位体については分析途中であるため、本稿では

値が確定しているデータを用いて報告する。

IV. 結果・考察

1. 抽出水の割合

2012 年および 2013 年に掘削したコアに含まれる水分量の相対的な特徴を把握するために、遠心分離に用いた堆積物の重量 (湿土重量) に対する遠心分離によって抽出された水分量 (重量) の割合を鉛直プロファイルとして図 4 に示した。なお、2012 年のコアについては、表層部 (表層～深度約 0.9 m) と深度 0.55 m 以深でコアが別れているため、前者を「2012-IN2.5」、後者を「2012-IN02」として表示した。この表示方法については、以降の図でも同様である。

図 4 より、2012 (IN2.5+IN02) および St.4 は多少のばらつきはあるものの、傾向としてはほぼ同様の変化を示しており、表層付近で 50%前後の値を示し、深度と共に徐々に低下して深度約 2.0 m では 30%前後の値となっている。一方、St.1 は他の 2 地点とは異なり、表層部では 55%前後と同じくらいの値を示しているが、その後急激に減少し、深度 0.2 m 付近で 15～20%と相対的に低い値となっている。このことから、いずれのコアにおいても表層付近の堆積物中に含まれる水分量は多いが、深度共に水分量は低下してゆくという特徴が認められる。また、St.1 の堆積物は砂質土が多く含まれているため、堆積物中に保持されている水分量は 2012 や St.4 と比べて相対的に少なくなっていると考えられる。このように、堆積物に含まれる水分量から、堆積物の土質 (地質) の違いについて、大まかではあるが判断することが可能である。

2. EC の鉛直分布の特徴

2012 年および 2013 年に掘削したコアから抽出した地中水の表層～深度約 2.0 m までの EC の鉛直プロファイルを図 5 に示した。プロファイルを見ると、2012 (IN2.5+IN02)、St.1、St.4 のいずれ

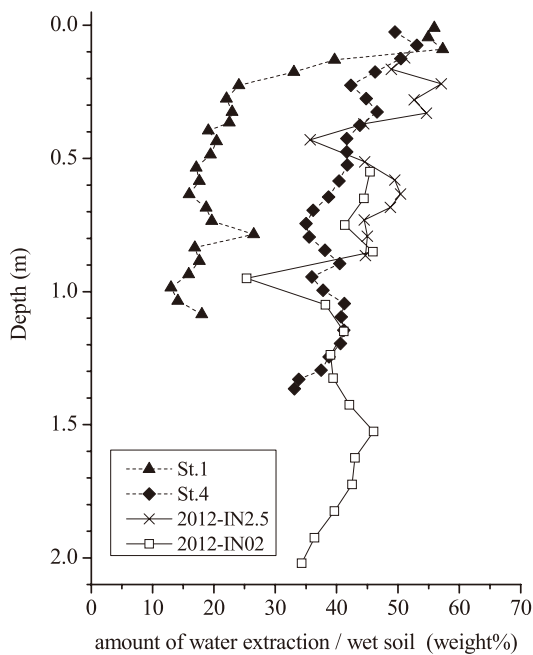


図4 抽出水の割合

のコアにおいても、浅層部分で相対的に低く (30 ~ 50 mS/m), 深度が深くなると共に値が上昇する傾向が認められる. 地点ごとのプロファイルの特徴を以下に記述する. 2012 (IN2.5+IN02) の地点では深度 0.1 m で 31 mS/m となっており, その後 30~60 mS/m で変動しているが, 深度 1.4 m 付近では 85 mS/m 前後の値を示し, 深度約 1.8 m から急激に上昇して, 深度 2.0 m で 260 mS/m と 3 地点の中で最も高い値を示している. St.1 は 0.01 m で 44 mS/m で, 深度 0.8 m までは 10~30 mS/m で変動し, 深度 0.8 m 以深では EC は急上昇し, 深度 1.1 m で 129 mS/m となっている. St.4 の変動は他の 2 地点と少々特徴が異なっている. EC の上昇は僅かであり, 他の地点のような急激な上昇は認められないが, 深度 1.1 m を超える地点から上昇する傾向があり, 堆積物の採取は行っていないが, 更に深い部分では EC が上昇していると予想される. 3 地点のコアを比較すると, 深度 0.8 m 付近までは 2012 (IN2.5+IN02) が相対的に高い値を示しており, 場所の違い (湖底での堆積状況の違い) が及んでいる可能性が考えられる. ま

た, 各地点の EC のピークが現れる深度は比較的一致しており (たとえば, 深度約 0.4 m, 0.8 m, 1.3 m など), 堆積の速度 (堆積物の年代) はほぼ同様であると言える.

表層付近の地中水の EC は前述したように 30 ~ 50 mS/m となっているが, 猪苗代湖の湖水の EC は 11.7 mS/m であり (藪崎ほか, 2013), この値に比べると堆積物表層の地中水の方が高くなっている. このことから, 湖水が直接触れている最上部を除いて湖水の影響は及んでおらず, 堆積物中への湖水の浸透は殆ど生じていないと考えられる.

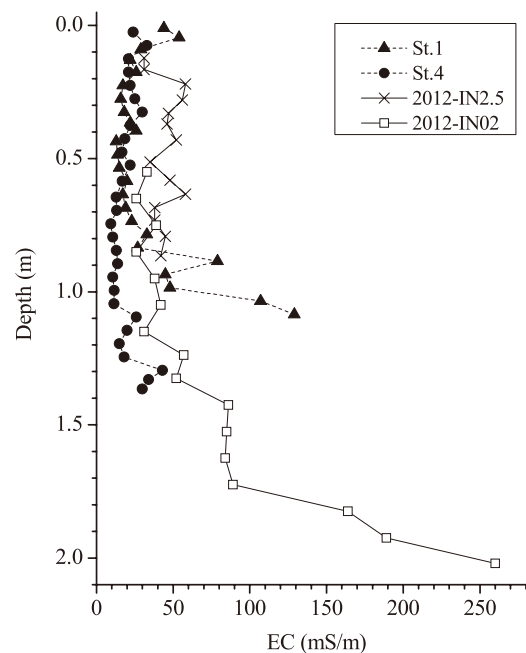


図5 地中水の EC 鉛直プロファイル

3. pH の鉛直分布の特徴

2012 年および 2013 年に掘削したコアから抽出した地中水の表層~深度約 2.0 m までの pH の鉛直プロファイルを図 6 に示した. pH の鉛直プロファイルの全体的な特徴として, 表層では 7 前後の中性に近い値を示しているが, 深度と共に値は低下し, 酸性の値を示している. 地点ごとにみる

と、2012 (IN2.5+IN02) は、深度 0.1 m で pH は 7.1 であり、その後徐々に低下して、深度約 0.6 m までは 6.5 前後の値を示している。深度 0.7 m 以深では急激に低下し、3~4 の値で変動して、深度 1.2 m を超えると 2.8 前後の値で一定するが、深度 1.8 m から再び上昇し、深度 2.0 m では 3.6 となっている。St.1 は深度 0.01 m で pH は 7.5 で 3 地点の中で最も高い。その後、急激に低下し、深度 0.2 m で 5.2 前後の値を示し、深度 0.7 m までは 3.6~6.6 の間で変動し、深度 0.7 m 以深では更に低下して 3.3~5.3 の間で変動している。また、St.1 は他の 2 地点と比較して、pH の変化が大きいという特徴を示している。St.4 は深度 0.03 m で pH は 6.6 であり、その後、6.1~6.9 の間で比較的一定した値を示しているが、深度 1.2 m から急低下して深度 1.3 m で 4.7 となっている。St.4 は EC と同様に pH の変化幅は小さく、pH が低下する深度と EC が上昇する深度は一致している。2012 (IN2.5+IN02) や St.1 についても、pH が低い地点では EC は高い値を示しており、地中水の EC と pH には負の相関が存在している。EC が高い地点では溶存成分量も多くなるため、地中水に溶存している物質が pH の変動に寄与していると想定される。

湖水と地中水の pH を比較すると、湖水(表層)は 6.8 で(福島県環境センター, 2011)、地中水の最上部では 7 前後となっており、両者は比較的似た値を示しているが、表層から少し下方に位置する深度 0.17 m (St.1) では 5.6 を示し、湖水とは明らかに異なった pH となっている。従って、堆積物中への湖水の浸透は殆ど生じていないことが、pH の結果においても示された。

4. 溶存成分の鉛直プロファイルの特徴

2012 年および 2013 年に掘削したコアから抽出した地中水の表層~深度約 2.0 m までの溶存成分量(陰イオン 7 成分、陽イオン 6 成分)の数値データを付表に示した。付表をみると、3 地点の全

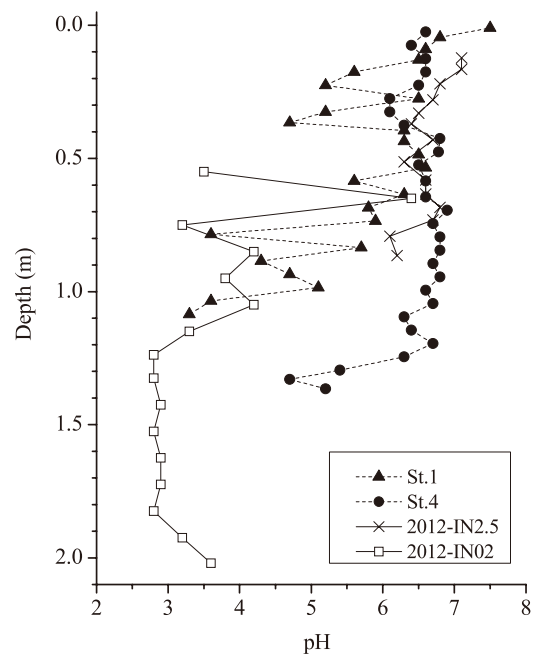


図 6 地中水の pH 鉛直プロファイル

ての深度において、 NO_2^- と Li^+ は検出されていない。また、2012 (IN2.5+IN02) では Br^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , St.1 では NO_3^- , PO_4^{3-} , St.4 では NO_3^- も殆ど含まれていない。いずれの地点においても、相対的に多く含まれているイオンは、陰イオンでは Cl^- , SO_4^{2-} , 陽イオンでは Na^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} であり、特に SO_4^{2-} は非常に高濃度となっている。また、 NH_4^+ は一般的な河川や地下水、湖沼水にはあまり含まれていないが(自然状態の場合は 10 mg/L を超えることは少ない)、湖底堆積物の地中水では 3 地点共に 10 mg/L 以上を示す深度が多い。特に 2012 (IN2.5+IN02) では相対的に高く、深度 2 m 付近では 100 mg/L 近く含まれており、 SO_4^{2-} の含有量と共に、猪苗代湖の湖底堆積物中の水に特有の特徴である。3 地点を比較すると、ほとんどのイオン濃度について、2012 (IN2.5+IN02) の地点で最も高い値を示している。また、一部試料の分析結果から、地中水には鉄イオンも高濃度含まれていることが把握できた。

猪苗代湖の湖底には、磐梯山や安達太良山など、周辺に位置する火山から噴出した火山灰や溶岩

などの火山由来の堆積物や、長瀬川が運搬した（火山起源の土砂を多く含む）河川堆積物が堆積しており、これらの堆積物を構成する鉱物中には硫化物が多く含まれている。硫化物は大気中や水中に含まれる酸素に触れることにより酸化されて、 SO_4^{2-} が溶出する。従って、火山地域を流れる河川水や湖沼水の SO_4^{2-} 濃度は高くなる。こうした特徴は、図1に示した猪苗代湖や河川水（長瀬川、酸川）の水質組成の結果においても認められる。猪苗代湖の湖底堆積物中にも硫化物が多く含まれていると考えられ、この硫化物が水中の溶存酸素によって酸化され、 SO_4^{2-} が堆積物に含まれる水（地中水）に溶出することにより、地中水の SO_4^{2-} 濃度が高くなると想定される。

湖底堆積物中の水質組成は、深度約1.3 mまではNa- SO_4 型を示し、それよりも深い深度ではCa- SO_4 型が卓越している。水質組成が変化する深度は、ECやpHが急な変動を示す深度とほぼ一致している。

地中水の溶存物質の中でも特に多く含まれている SO_4^{2-} について、鉛直プロファイルを作成した（図7）。 SO_4^{2-} 濃度は、表層付近では10 mg/L以下であるが、深度と共に濃度は上昇し、St.1は深度1.1 mで約580 mg/L、St.4は深度1.4 mで約100 mg/Lを示し、地点2012（IN2.5+IN02）は深度2 mで4,200 mg/Lを超える高濃度となっている。猪苗代湖の湖水の SO_4^{2-} 濃度は約30 mg/Lであり、図1で示した酸川（N-2）でも240 mg/Lで、2012（IN2.5+IN02）の深度2 mの濃度のほうが遥かに高い値を示している。しかしながら、 SO_4^{2-} 濃度の深度方向の変動は地点によって異なっており、St.1とSt.4は2012（IN2.5+IN02）に比べると相対的に低い値を示している。また、3地点共に、 SO_4^{2-} 濃度は深度0.2 m付近で値が変化する傾向が認められる。0.2 mよりも深い深度に関しては、2012（IN2.5+IN02）は深度約0.7 mから上昇し、St.1も同じく深度0.7 mから、St.4は深度1.2 m付近から上昇しており、これはECの上昇やpH

の低下する深度とほぼ一致している。よって、ECやpHの変動は、地中水に含まれる SO_4^{2-} 濃度の影響を特に強く受けていると考えられる。 SO_4^{2-} 濃度は、上述したように深度と共に値が上昇している。この理由として、湖底堆積物と接触している時間が長いと地中水中に溶脱する SO_4^{2-} 濃度が上昇し、深い部分ほど SO_4^{2-} 濃度が増すことが可能性として考えられる。しかし、2012のコアの深度21 mまでの SO_4^{2-} 鉛直プロファイルでは深度約6 mで最大値（約7,900 mg/L）を示し、その後、徐々に低下する傾向が認められており（藪崎ほか、2014）、一概に滞留時間の長さだけが SO_4^{2-} 濃度の上昇の原因であるとは言えない。 SO_4^{2-} が高濃度になる要因についてはまだ特定できていないが、堆積物の地質と地中水との間に何らかの現象が生じているものと思われる。この要因の解明については、引き続き検討を行ってゆく予定である。

以上、EC、pH、溶存成分量（主に SO_4^{2-} ）の鉛直プロファイルの特徴について述べてきた。これらをまとめると、深度0.2 m付近でECは上昇し、pHは中性から酸性へと急激に変化し、 SO_4^{2-} 濃度は上昇している。言い換えると、深度0.2 mよりも浅い部分で地中水のpHが7前後の中性の値を示しているのは、地中水の SO_4^{2-} 濃度が低いためであると考えられる。この浅層部分で SO_4^{2-} 濃度がなぜ低いのか（何が生じているのか）を明らかにすることができれば、地中水のpHが中性を示す原因の解明に繋げることができる。この要因として、硫酸還元菌による硫酸塩（硫酸イオン）の還元（生物的な要因）や、地質の影響、湖水の影響（湖水に含まれる溶存酸素などによる水質変化）等が可能性として考えられる。今後、地中水の水質や堆積物の化学分析の結果などを総合的に判断して、この要因の解明に努めてゆきたい。

5 安定同位体の鉛直プロファイル

2012年および2013年に掘削したコアから抽出した地中水の表層～深度約2.0 mまでの安定同位

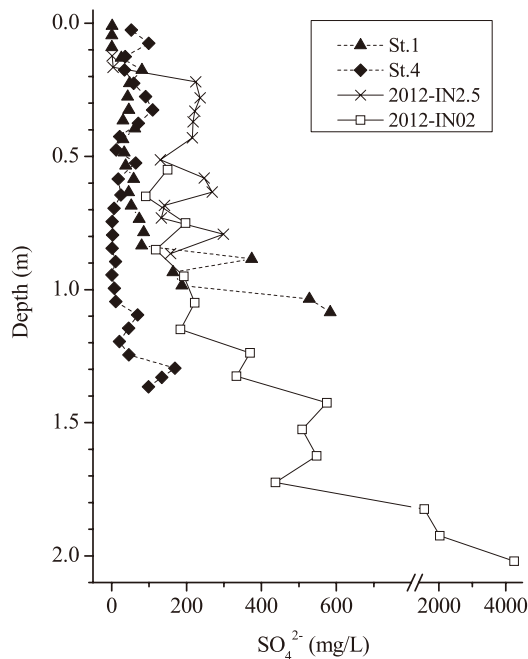


図7 地中水の SO_4^{2-} 鉛直プロファイル

体比の鉛直プロファイルを作成した。一部の水試料の同位体分析は完了していないため、値が確定した部分のみを用いている。また、 δD 値については $\delta^{18}\text{O}$ 値とほぼ同じ変動を示しているため、本稿では $\delta^{18}\text{O}$ のみ図として示す (図8)。

St.1 と St.4 は一部深度のデータが確定していないため、詳細な変動については把握できないが、両地点はほぼ同様の値を示し、深度 0.5 m 以深では、 $\delta^{18}\text{O}$ 値は -9.6‰ 前後で一定する傾向が認められる。一方、2012 (IN2.5+IN02) は他の2地点よりも相対的に高い値 (-9.4~-8.7‰) を示し、深度 2.0 m 付近では -8.0‰ となっている。表層付近の同位体比に着目すると、St.1 の深度 0.01 m の $\delta^{18}\text{O}$ 値は -9.0‰ であり、猪苗代湖の湖水の $\delta^{18}\text{O}$ 値 (表層: -9.2‰, コア直上: -9.1‰) とほぼ等しいが、深度 0.045 m では -9.4‰ で湖水よりも低い値を示している。St.4 の深度 0.025 m で -9.4‰, 2012 (IN2.5+IN02) の深度 0.123 m で -9.3‰ であり、湖水の $\delta^{18}\text{O}$ 値とはやや異なっている。こうした特徴においても、湖水が直接湖底堆積物中を浸透して地中水の同位体比に影響を与えている

訳ではないことが示唆される。また、磐梯山周辺で涵養された地下水が猪苗代湖の湖底堆積物中に流入 (涵養) している可能性も考えられる。磐梯山周辺の地下水の $\delta^{18}\text{O}$ 値は -11‰ 前後を示しており (藪崎ほか, 2013), 猪苗代湖の湖水や湖底堆積物中の水の $\delta^{18}\text{O}$ 値よりも 1‰ ほど低いため、仮に湖底堆積物中のいずれかの深度で地下水流入が生じている場合には、同位体比のプロファイルに負のピークが生じることが予想される。今度、同位体比の鉛直プロファイルを完成させ、その変動を検討することにより、湖底堆積物中への地下水涵養の有無についても判断することができる。さらに、各地点の同位体比鉛直プロファイルの特徴を把握して、地点間の比較をおこない、地中水の水質形成の要因の解明にも活用する予定である。

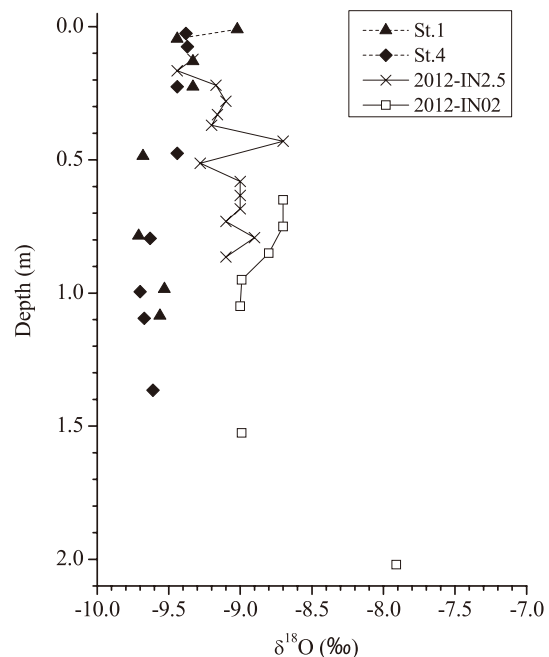


図8 地中水の $\delta^{18}\text{O}$ 鉛直プロファイル

V. まとめ・今後の課題

2012年と2013年に掘削した猪苗代湖の湖底堆積物中の水を抽出し、表層～深度約2mまでの水質等を測定したところ、以下のことが明らかとな

った。

- 1) 地中水の水分量のプロファイルは、2012 (IN2.5 と IN02) および St.4 はほぼ同様の変化を示しているが (30~50%), St.1 は深度 0.2 m 付近で 15~20%と相対的に低い値となっている。こうした水分量の違いは堆積物中の土質の違いを反映していると考えられる。
- 2) EC の鉛直プロファイルは、いずれの地点浅層部分で相対的に低く (30~50 mS/m), 深度が深くなると共に値が上昇する傾向が認められる。2012 のコアは深度 2 m で 260 mS/m で、3 地点の中で最も高い値を示している。
- 3) 湖底堆積物の表層付近の pH は湖水の pH に近い 7 前後の値を示しているが、先行研究や本研究の結果から、湖水の浸透の影響ではなく、湖底堆積物中の表層付近で水質を中性に保つ何らかの働きが生じていると考えられる。浅層部分において、硫酸還元菌の働きにより硫酸イオン濃度が減少することで pH が高くなり、中性付近の値を示すことが、可能性の一つとして考えられる。
- 4) $\delta^{18}\text{O}$ 値の鉛直プロファイルの結果においても、湖水が直接湖底堆積物中を浸透して地中水の同位体比に影響を与えている訳ではないことが示された。また、同位体プロファイルを完成させることにより、猪苗代湖の湖底堆積物中における磐梯山方面からの地下水涵養の有無について確認することができると期待される。
 今後は、地中水の水質や堆積物の化学分析の結果などを総合的に判断して、地中水の水質形成の解明に努めてゆく予定である。

引用文献

- 安積疏水土地改良区 (2013) URL : <http://www.asakasui.jp/> (2015 年 1 月 30 日閲覧)
- 千葉 茂 (1987) 猪苗代湖をめぐって②湖水と流入河川の水質, アーバンクボタ, 26, 41-45.

- 藤田 豊・中村玄正・長林久夫・高橋迪夫・田野久貴・平山和雄・佐藤洋一 (2007) 猪苗代湖における湖底堆積層調査—堆積物から捉えた物質輸送と水環境の変遷—, 日本大学工学部紀要, 49, 41-48.
- 福島県環境センター (2011) 平成 22 年度猪苗代湖調査研究事業等報告書, 39p. URL : http://www.pref.fukushima.jp/kance/inawashiro/H22report_inawashiroko.pdf
- 廣瀬孝太郎・長橋良隆・中澤なおみ (2014) 福島県猪苗代湖の湖底堆積物コア (INW2012) の岩相層序と年代, 第四紀研究, 53(3), 157-173.
- 環境省環境管理局水環境部 (2003) 平成 14 年度公共用水域水質測定結果, URL : <http://www.env.go.jp/water/suiiki/h14/index.html> (2015 年 1 月 30 日閲覧)
- 環境省環境管理局水環境部 (2004) 平成 15 年度公共用水域水質測定結果, URL : <http://www.env.go.jp/water/suiiki/h15/index.html> (2015 年 1 月 30 日閲覧)
- 環境省 水・大気環境局 (2005) 平成 16 年度公共用水域水質測定結果, URL : <http://www.env.go.jp/water/suiiki/h16/index.html> (2015 年 1 月 30 日閲覧)
- 環境省 水・大気環境局 (2006) 平成 17 年度公共用水域水質測定結果, URL : <http://www.env.go.jp/water/suiiki/h17/index.html> (2015 年 1 月 30 日閲覧)
- 気象庁 HP (2015) : 気象観測データ, URL : <http://www.jma.go.jp/jma/index.html> (2015 年 1 月 30 日閲覧)
- 国土交通省 (2013) 水管理・国土保全, URL : http://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/bousai/saigai/kiroku/suigai/suigai_3-1-1.html
- 国立天文台編 (2015) 理科年表プレミアム, URL : <http://www.rikanenpyo.jp/> (2015 年 1 月 30 日閲覧)
- 長橋良隆・廣瀬孝太郎 (2013) 猪苗代湖湖底堆積

物の掘削の概要とコア試料の岩相層序, 福島大学地域創造, 24(2), 55-61.
 鈴木敬治・真鍋健一・阿久津 純・竹内貞子(1981)
 猪苗代湖の自然環 1 . 底質, 猪苗代湖の自然に関する総合研究グループ編, 福島大学特定研究 猪苗代湖の自然, 研究報告 No.2, 109-120.
 鈴木敬治・真鍋健一・阿久津 純・竹内貞子(1982)
 猪苗代湖の自然環境 1. 猪苗代湖の底質, 猪苗代湖の自然に関する総合研究グループ編, 福島大学特定研究 猪苗代湖の自然, 研究報告 No.3, 185-193.

藪崎志穂・安原正也・浅井和由・鈴木裕一・高橋浩・稲村明彦(2013)磐梯山とその周辺の水質, 同位体特性について, 福島大学理工学群共生システム理工学類 共生のシステム, 13, 58-75.
 藪崎志穂・廣瀬孝太郎・長橋良隆・高瀬つぎ子(2014)猪苗代湖の湖底堆積物から抽出した地中水の EC, pH 鉛直プロファイル特性－2012年の掘削したコアの分析結果－, (福島大学理工学群共生システム理工学類) 共生のシステム, 14, 7-17.

付表 地中水の溶存成分量 (2012, St.1, St.4)

2012		F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Li ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
depth	m	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
IN2.5	0.123	0.3	11.7	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	16.6	11.5	6.0	5.1	17.5
	0.165	0.1	11.6	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	16.5	11.5	5.7	4.7	16.0
	0.220	0.2	10.3	0.0	0.0	224.8	0.1	0.0	0.0	16.1	11.7	5.9	5.9	25.1
	0.280	0.3	10.1	0.0	0.0	236.0	0.0	0.0	0.0	16.3	11.4	6.1	5.7	25.7
	0.330	0.1	9.0	0.0	0.0	222.2	0.0	0.0	0.0	17.0	9.7	4.8	4.6	21.1
	0.370	0.1	8.9	0.0	0.0	217.9	0.0	0.0	0.0	17.9	10.0	5.3	5.0	24.9
	0.430	0.0	9.4	0.0	0.0	215.3	0.0	0.0	0.0	19.6	11.2	5.0	4.3	19.3
	0.513	0.1	8.9	0.0	0.0	130.3	0.0	0.0	0.0	16.3	9.8	3.7	2.6	12.7
	0.581	0.1	8.2	0.0	0.0	247.5	0.0	0.0	0.0	17.9	13.1	4.3	4.0	19.5
	0.634	0.1	8.4	0.0	0.0	268.6	0.0	0.0	0.0	18.1	13.3	4.4	4.2	20.1
	0.684	0.2	8.8	0.0	0.0	141.3	0.0	0.0	0.0	17.5	12.9	3.6	2.4	10.5
	0.731	0.2	8.9	0.0	0.0	132.8	0.0	0.0	0.0	17.5	12.9	3.6	2.4	10.3
	0.793	0.1	7.6	0.0	0.0	298.3	0.0	0.0	0.0	24.0	18.5	4.8	5.3	26.0
	0.865	0.1	8.1	0.0	0.0	157.5	0.0	0.0	0.0	19.7	14.7	3.7	2.6	12.3
	IN02	0.550	0.1	10.8	0.0	0.0	149.6	0.0	0.0	0.0	21.7	12.4	3.6	3.1
0.650		0.2	10.5	0.0	0.0	91.3	0.0	0.0	0.0	20.2	13.2	3.4	2.5	10.1
0.750		0.1	10.0	0.0	0.0	197.8	0.0	0.0	0.0	21.6	18.3	3.8	3.2	12.6
0.850		0.1	14.6	0.0	0.0	117.9	0.0	0.0	0.0	19.3	14.1	3.3	2.2	9.4
0.950		0.1	10.1	0.0	0.2	193.0	0.0	0.0	0.0	20.6	19.0	3.4	2.5	9.0
1.050		0.2	13.4	0.0	0.2	221.8	0.0	0.0	0.0	22.3	21.0	3.8	3.2	10.7
1.150		0.2	9.0	0.0	0.0	184.2	0.0	0.0	0.0	21.9	20.6	3.5	2.6	9.0
1.238		0.2	8.6	0.0	0.0	369.8	0.0	0.0	0.0	28.2	27.3	4.5	4.9	15.8
1.325		0.1	7.7	0.0	0.0	333.4	0.0	0.0	0.0	30.0	28.4	4.8	4.8	18.6
1.425		0.1	7.3	0.0	0.0	574.7	0.0	0.0	0.0	34.6	36.4	5.5	8.3	29.3
1.525	0.1	6.1	0.0	0.0	508.5	0.0	0.0	0.0	37.3	37.3	6.0	9.3	39.3	
1.625	0.7	6.1	0.0	0.0	547.3	0.1	0.0	0.0	39.3	39.5	6.7	11.5	48.5	
1.725	0.3	6.9	0.0	0.0	437.2	0.1	0.0	0.0	37.3	37.9	5.9	8.3	31.6	
1.825	4.9	5.9	0.0	0.0	1565.0	1.5	0.0	0.0	63.6	74.2	13.8	41.8	177.9	
1.925	6.1	4.8	0.0	0.0	2029.7	5.0	0.0	0.0	69.3	83.3	15.2	48.5	183.7	
2.020	19.6	10.6	0.0	0.0	4258.9	0.0	0.0	0.0	66.1	92.3	21.0	76.7	392.0	

St.1

depth m	F ⁻ mg/L	Cl ⁻ mg/L	NO ₂ ⁻ mg/L	Br ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	PO ₄ ³⁻ mg/L	Li ⁺ mg/L	Na ⁺ mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Ca ²⁺ mg/L
0.010	5.6	15.0	0.0	1.6	1.4	0.2	0.2	0.0	16.2	18.6	13.1	7.1	23.2
0.045	0.5	11.0	0.0	0.8	0.8	0.2	0.0	0.0	17.3	18.7	12.6	11.3	36.3
0.090	0.3	10.2	0.0	0.5	0.6	0.1	0.1	0.0	10.5	12.2	5.1	3.2	11.0
0.130	0.3	11.1	0.0	0.5	26.1	0.1	0.0	0.0	10.0	8.8	4.5	1.7	7.3
0.175	0.1	10.9	0.0	0.5	81.3	0.0	0.0	0.0	12.1	7.5	5.9	2.1	10.2
0.225	0.1	11.3	0.0	0.5	48.3	0.1	0.0	0.0	10.3	5.2	5.5	1.3	6.1
0.275	0.1	10.3	0.0	0.5	43.0	0.0	0.0	0.0	12.8	3.5	6.0	1.0	4.7
0.325	0.1	13.1	0.0	0.5	46.0	0.0	0.0	0.0	13.0	2.4	5.6	1.6	6.5
0.365	0.1	35.2	0.0	0.6	30.8	0.0	0.0	0.0	21.1	2.3	6.0	1.4	5.7
0.395	0.3	38.5	0.0	0.6	62.3	0.0	0.0	0.0	36.8	2.0	6.2	1.9	6.9
0.435	0.0	13.1	0.0	0.8	30.8	0.0	0.0	0.0	14.0	1.7	4.5	0.9	3.7
0.485	0.0	12.3	0.0	0.9	33.6	0.0	0.0	0.0	14.5	1.9	5.0	1.0	4.0
0.535	0.0	11.9	0.0	1.0	37.3	0.0	0.2	0.0	15.6	2.9	5.3	0.9	3.7
0.585	0.2	10.4	0.0	1.0	59.3	0.0	0.0	0.0	13.9	5.0	7.3	1.4	5.6
0.635	0.0	10.6	0.0	1.0	45.3	0.0	0.0	0.0	12.6	5.2	6.4	1.0	3.8
0.685	0.0	10.4	0.0	1.1	52.6	0.2	0.0	0.0	11.8	6.0	6.6	1.2	4.5
0.735	0.2	9.6	0.0	1.1	73.6	0.0	0.0	0.0	14.3	7.5	6.6	2.1	7.0
0.785	0.1	10.7	0.0	1.2	85.7	0.0	0.0	0.0	10.3	7.5	5.2	2.7	7.9
0.835	0.1	10.3	0.0	1.2	80.4	0.0	0.0	0.0	14.6	9.8	7.3	1.9	6.2
0.885	2.9	7.4	0.0	1.2	374.3	0.0	0.0	0.0	26.0	20.9	17.7	14.0	46.6
0.935	0.4	9.6	0.0	1.3	163.9	0.0	0.0	0.0	20.0	15.0	12.6	4.6	15.6
0.985	0.2	9.9	0.0	1.3	187.5	0.0	0.0	0.0	24.7	19.7	16.1	4.6	15.3
1.035	0.9	8.7	0.0	1.2	527.8	0.5	0.0	0.0	32.1	35.4	27.5	16.1	53.3
1.085	1.0	28.6	0.0	1.3	583.9	0.3	0.0	0.0	51.0	37.8	29.6	16.8	61.6

St.4

depth m	F ⁻ mg/L	Cl ⁻ mg/L	NO ₂ ⁻ mg/L	Br ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	PO ₄ ³⁻ mg/L	Li ⁺ mg/L	Na ⁺ mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Ca ²⁺ mg/L
0.025	0.1	10.1	0.0	0.0	52.8	0.0	0.0	0.0	11.5	1.7	3.4	2.9	12.2
0.075	0.1	9.5	0.0	0.1	98.9	0.1	0.0	0.0	11.2	3.5	3.4	2.9	13.7
0.125	0.1	9.4	0.0	0.0	36.7	0.1	1.0	0.0	9.9	3.8	2.8	1.7	7.9
0.175	0.1	9.5	0.0	0.0	34.3	0.1	0.0	0.0	10.0	4.6	2.8	1.9	8.1
0.225	0.1	9.1	0.0	0.1	59.1	0.1	1.4	0.0	10.3	5.3	3.0	1.8	7.9
0.275	0.0	8.7	0.0	0.1	90.9	0.0	0.0	0.0	10.5	5.6	2.9	2.0	9.3
0.325	0.1	8.8	0.0	0.1	109.4	0.1	0.0	0.0	11.3	6.8	3.2	2.5	12.5
0.375	0.1	8.8	0.0	0.1	71.3	0.0	0.0	0.0	10.7	6.5	3.0	1.8	8.0
0.425	0.2	9.2	0.0	0.0	21.3	0.1	0.4	0.0	10.1	6.3	2.6	1.4	5.9
0.475	0.2	9.4	0.0	0.0	12.3	0.1	0.7	0.0	10.1	6.6	2.6	1.3	5.5
0.525	0.1	8.8	0.0	0.1	64.4	0.2	0.2	0.0	10.5	7.1	2.7	1.6	6.9
0.585	0.2	8.7	0.0	0.1	17.6	0.1	0.5	0.0	10.0	6.9	2.4	1.1	4.5
0.645	0.3	9.9	0.0	0.2	24.7	0.1	0.0	0.0	9.8	6.0	2.1	0.7	3.2
0.695	0.5	9.5	0.0	0.1	6.9	0.1	0.1	0.0	9.5	5.9	2.0	0.6	2.6
0.745	0.9	9.0	0.0	0.0	1.1	0.0	0.2	0.0	7.6	4.4	1.5	0.3	1.5
0.795	0.5	8.3	0.0	0.1	2.5	0.0	0.0	0.0	8.7	5.3	1.7	0.4	1.9
0.845	0.8	8.2	0.0	0.1	1.6	0.0	0.2	0.0	10.5	7.6	2.2	0.8	3.3
0.895	0.9	8.2	0.0	0.1	10.6	0.1	0.4	0.0	10.0	7.0	2.0	0.6	2.9
0.945	1.0	8.7	0.0	0.2	0.7	0.1	0.3	0.0	9.2	6.1	1.7	0.4	1.7
0.995	0.8	8.2	0.0	0.2	7.2	0.0	0.1	0.0	9.6	6.1	1.7	0.4	1.7
1.045	0.6	7.4	0.0	0.1	11.4	0.1	0.0	0.0	8.5	6.1	1.7	0.3	1.5
1.095	0.3	5.7	0.0	0.1	69.6	0.0	10.9	0.0	13.3	11.9	3.0	1.3	7.3
1.145	0.6	6.2	0.0	0.1	45.7	0.1	7.9	0.0	10.8	9.6	2.4	0.9	5.6
1.195	0.6	6.9	0.0	0.2	20.7	0.1	2.0	0.0	10.2	7.6	1.9	0.5	2.6
1.245	0.5	6.8	0.0	0.1	46.3	0.1	4.1	0.0	10.9	9.0	2.3	0.8	4.2
1.295	0.2	5.0	0.0	0.2	168.8	0.1	0.0	0.0	16.3	16.4	3.7	3.1	15.1
1.330	0.2	5.9	0.0	0.1	134.1	0.1	2.3	0.0	15.6	15.2	3.6	2.6	11.7
1.365	0.2	6.3	0.0	0.2	98.7	0.1	0.0	0.0	13.2	12.6	3.1	1.5	6.2