

## 秋田県八郎潟干拓地に湧出する高濃度リン湧出水の地球化学的特徴

川原谷 浩<sup>1</sup>、石山大三<sup>1</sup>、世良耕一郎<sup>2</sup>

<sup>1</sup>秋田大学工学資源学研究科

010-8502 秋田市手形学園町 1-

<sup>2</sup>岩手医科大学サイクロトンセンター

020-0173 岩手県岩手郡滝沢村字留が森 348-58

### 1 はじめに

秋田県男鹿半島東側に位置する八郎潟は、第二次世界大戦後、食糧増産を目的に干拓事業が行われた。1960年代後半までに17,000haの農地が造成され、農業活動が現在も行われている。1980年代以降、干拓地内の農業排水を残存湖へ排出する施設の1つである南部排水機場南東側の地域において、残存湖と隣接する干拓地のごく限られた区域で、リン濃度が数～十数ppmの湧出水が確認されるようになった。このリン濃度が高い湧出水について、COD、T-N、T-P、さらに主化学成分濃度の測定が定期的に行われ、経年変化のモニタリングが行われている。本研究では、ボーリング孔より揚水した地下水（高濃度リン湧出水）や周辺河川水の溶存成分である主化学成分や懸濁物成分の特徴を明らかにすること、さらに酸素・水素同位体比の結果から高濃度リン湧出水の起源の推定を行うことを目的とした。

## 2 試料採取および測定

試料の採取は2009年9月にボーリング孔から高濃度リン湧出水（以下リン湧出水）、2010年10月に八郎潟干拓地（以下干拓地）周辺の研究対象となる水試料の採水を実施した。各水試料は、リン湧出水が湧水する南部排水機場から南東方向約1キロ付近の異なるボーリング孔から揚水した地下水（G1～G5、5ヶ所、深度:2.5～8.2m）、干拓地から南部排水機場と北部排水機場を通じて八郎潟残存湖（以下残存湖）へ排水される農業用水（D1、D2、2ヶ所）、残存湖湖水（L1～L3、3ヶ所）、干拓地周辺河川水（R1～R7、7ヶ所）、残存湖西側の瀧の頭湧水（S1、1ヶ所）をそれぞれ採水した（Fig.1、Table 1）。

現地での試料採取時には、水温、pH、酸化還元電位の測定を行った。試料は0.45 $\mu\text{m}$ のフィルターでろ過し、アルカリ成分、硫酸、塩素などの主化学成分を測定するための試料の採水と微量成分をPIXE法で測定するための試料に分けて採水を行った。前者は無添加試料、後者は試料溶液が3%硝酸溶液になるように現地で調整した。PIXE法による懸濁物成分（0.45 $\mu\text{m}$ 以上）分析試料は、ろ過で使用したポリカーボネート・フィルターをそのまま自然乾燥させ使用した。0.45 $\mu\text{m}$ のフィルターを通過した試料は、主化学成分  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度をイオンクロマトグラフ法、その他の微量成分は、試料溶液と等量のIn（10ppm）溶液を加えた混合溶液10 $\mu\text{l}$ をホルダーに貼られたポリプロピレンフィルムに滴下し80 $^{\circ}\text{C}$ で乾燥させた後、PIXE法で分析した。

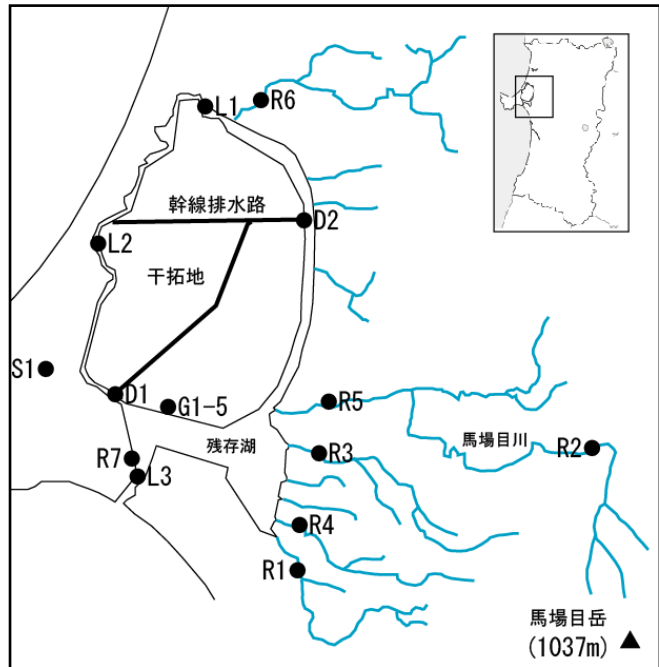


Fig.1 : Map showing sampling points around Hachirogata land reclamation area.

Table 1 : List of concentrations of major element, suspended materials, and oxygen and hydrogen isotopic ratios obtained from the area studied.

|    |                       | 主化学成分(mg/l) |        |     |      |     |     |     |     |     | 懸濁物成分(μg/l) |        |       | 酸素・水素同位体比              |                                       |
|----|-----------------------|-------------|--------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-------------|--------|-------|------------------------|---------------------------------------|
|    |                       | pH          | Eh(mV) | Na  | K    | Mg  | Ca  | Cl  | SO4 | T-P | Al          | Si     | Fe    | δ <sub>Dsmow</sub> (‰) | δ <sup>18</sup> O <sub>smow</sub> (‰) |
| G1 | 91B-1-3(深度4.2m)       | 7.9         | 78     | 87  | 5.4  | 2.1 | 4.7 | 54  | 31  | 3.2 | 129         | 300    | 101   | -47                    | -8.0                                  |
| G2 | 91B-5(深度3.1m)         | 8.9         | -71    | 140 | 4.1  | 0.2 | 0.1 | 39  | 23  | 4.3 | 74          | 196    | 74    | -49                    | -8.1                                  |
| G3 | リン湧出水 93B-1-1(深度2.5m) | 8.3         | 15     | 100 | 10.0 | 0.5 | 0.4 | 34  | 23  | 7.6 | 128         | 271    | 58    | -50                    | -8.1                                  |
| G4 | 93B-1-2(深度6.0m)       | 9.0         | -46    | 250 | 7.9  | 0.4 | 0.2 | 64  | 22  | 17  | 48          | 108    | 10    | -47                    | -8.3                                  |
| G5 | H16B-1(深度8.2m)        | 9.0         | -35    | 160 | 4.5  | 0.1 | 0.2 | 69  | 26  | 8.1 | 65          | 180    | 444   | -47                    | -7.8                                  |
| D1 | 農業用水 南部排水機場           | 7.9         | 224    | 61  | 6.7  | 11  | 20  | 85  | 31  |     | 1,333       | 4,556  | 878   | -45                    | -7.2                                  |
| D2 | 北部排水機場                | 7.1         | 341    | 63  | 8.6  | 13  | 26  | 79  | 40  |     | 5,886       | 18,542 | 3,459 | -37                    | -6.6                                  |
| L1 | 残存湖水 浜口機場             | 7.2         | 427    | 17  | 3.3  | 5.1 | 7.7 | 27  | 14  |     | 1,318       | 4,751  | 944   | -47                    | -7.6                                  |
| L2 | 野石橋                   | 8.0         | 336    | 21  | 3.4  | 5.5 | 8.3 | 25  | 12  |     | 1,316       | 4,985  | 775   | -43                    | -6.8                                  |
| L3 | 防潮水門                  | 8.0         | 259    | 45  | 4.1  | 7.3 | 11  | 66  | 20  |     | 1,304       | 4,993  | 719   | -48                    | -7.7                                  |
| R1 | 馬踏川橋                  | 7.3         | 305    | 20  | 3.3  | 4.8 | 9.6 | 26  | 20  |     | 333         | 770    | 711   | -49                    | -7.6                                  |
| R2 | 杉沢発電所                 | 7.9         | 359    | 7.8 | 0.6  | 2.3 | 5.7 | 6.9 | 6.3 |     | 20          | 61     | 14    | -53                    | -8.7                                  |
| R3 | 井川橋                   | 7.6         | 295    | 14  | 2.2  | 3.3 | 6.6 | 16  | 10  |     | 303         | 781    | 324   | -49                    | -8.2                                  |
| R4 | 河川水 豊川橋               | 7.5         | 286    | 19  | 3.2  | 4.0 | 7.3 | 25  | 17  |     | 599         | 1,369  | 445   | -48                    | -7.9                                  |
| R5 | 竜馬橋                   | 7.6         | 317    | 12  | 1.2  | 3.1 | 7.2 | 11  | 10  |     | 196         | 521    | 121   | -52                    | -8.4                                  |
| R6 | 川尻橋                   | 7.2         | 393    | 18  | 3.3  | 3.1 | 6.4 | 27  | 14  |     | 426         | 1,156  | 284   | -47                    | -7.8                                  |
| R7 | あけぼの橋                 | 7.0         | 206    | 26  | 5.1  | 7.1 | 18  | 34  | 25  |     | 91          | 214    | 1,014 | -43                    | -7.3                                  |
| S1 | 湧水 灘の頭                | 7.3         | 335    | 19  | 2.3  | 4.8 | 13  | 22  | 13  |     | 3           | 12     | 1     | -50                    | -8.6                                  |

### 3 溶存成分と懸濁物成分の特徴

リン湧出水の pH は、7.9 から 9.0 の弱アルカリ性であるのに対して、それ以外の農業用水、残存湖湖水、周辺河川水の pH は、7.0 から 8.0 で中性～弱アルカリ性を示す。溶存成分の主化学成分濃度は、農業用水では Na<sup>+</sup>=61～63mg/l、K<sup>+</sup>=6.7～8.6mg/l、Mg<sup>2+</sup>=11～13mg/l、Ca<sup>2+</sup>=20～26mg/l、Cl<sup>-</sup>=79～85mg/l、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>=31～40mg/l、残存湖水では Na<sup>+</sup>=17～45mg/l、K<sup>+</sup>=3.3～4.1mg/l、Mg<sup>2+</sup>=5.1～7.3mg/l、Ca<sup>2+</sup>=7.7～11mg/l、Cl<sup>-</sup>=25～66mg/l、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>=12～20mg/l、周辺河川水では Na<sup>+</sup>=7.8～26mg/l、K<sup>+</sup>=0.6～5.1mg/l、Mg<sup>2+</sup>=2.3～7.1mg/l、Ca<sup>2+</sup>=5.7～18mg/l、Cl<sup>-</sup>=6.9～34mg/l、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>=6.3～25mg/l、湧水では Na<sup>+</sup>=19mg/l、K<sup>+</sup>=2.3mg/l、Mg<sup>2+</sup>=4.8mg/l、Ca<sup>2+</sup>=13mg/l、Cl<sup>-</sup>=22mg/l、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>=13mg/l をそれぞれ示す。リン湧出水以外の各主化学成分濃度は、Cl 濃度を除けば北部排水機場からの農業用水(D2)が最も高く、馬場目川上流域杉沢発電所(R2)の河川水が最も低い (Table 1)。Fig.2 に Cl 濃度に対する各主化学成分の濃度変化を示した。Fig.2(a)の実線は、真水と海水に含まれる各主化学成分の混合線を示す。リン湧出水を除く他の試料の Na<sup>+</sup>濃度は、真水と農業用水のデータをむすんだ直線(点線)近くに分布し、しかも真水と海水の混合線に近いところにもデータが分布するため、Na の起源は海塩と農業用水と推定される。K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>は直線的に分布するものの、混合線より 2～4 倍程度濃度が高いところにデータが分布し、Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>は混合線より大きく外れるところにデータが分布するため、非海塩起源の割合が高いと推定される。リ

ン湧出水の主化学成分濃度は、 $\text{Na}^+=60\sim 250\text{mg/l}$ 、 $\text{K}^+=4.1\sim 10\text{mg/l}$ 、 $\text{Mg}^{2+}=0.2\sim 2.1\text{mg/l}$ 、 $\text{Ca}^{2+}=0.1\sim 4.7\text{mg/l}$ 、 $\text{Cl}^-=34\sim 69\text{mg/l}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}=22\sim 31\text{mg/l}$ を示す (Table 1)。リン湧出水は、先述したほかの水試料と比較して、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度が高く、 $\text{Mg}^{2+}$ と $\text{Ca}^{2+}$ 濃度が低い特徴を示す。また、リン湧出水の $\text{Cl}^-$ 濃度は、深度が増すにつれ増加傾向を示し、濃度範囲は残存湖水と類似する (Fig.2(a)、(b))。

Fig.2(b)は、リン湧出水の $\text{Cl}^-$ 濃度と $\text{Na}^+$ 濃度の関係を示す。図中の実線は、真水と海水の混合線を示している。リン湧出水の $\text{Na}^+$ 濃度と $\text{Cl}^-$ 濃度との間に直線性はなく、混合線より2~4倍程 $\text{Na}^+$ 濃度が高いところにデータが分散する。

懸濁物成分は、Al、Si、Feを主成分とする(Table 1)。懸濁物成分のAl、Si、Fe濃度は、北部排水機場から排水する農業用水が最も高い。南部排水機場からの農業用水(D1)は、Al、Si、Fe濃度ともにL1からL3の3か所の残存湖水と同様な値を示す(Table 1)。農業用水と農業用水が排水される残存湖が非常に高い値を示すことから、懸濁物成分は、農業活動が主要な要因と推定される。一方、リン湧出水のこれらの懸濁物成分の濃度は、馬場目川上流域杉沢発電所(R2)を除くと、今回検討した試料水の中では低い。

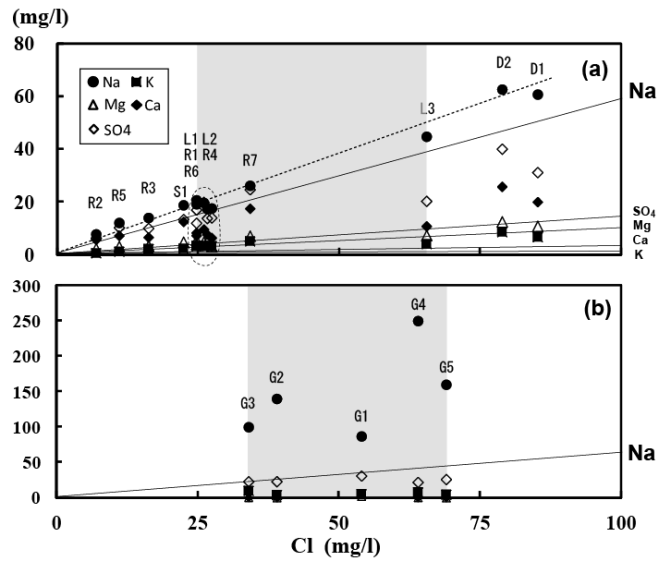


Fig.2 : Relationship between the  $\text{Cl}^-$  concentration and major element concentrations. (a) : river water, spring water, residual lake water and agricultural water (b) : high-phosphorus spring water

#### 4 リン湧出水の起源と混合

リン湧出水の起源と混合を推定するため、各試料水の酸素・水素同位体比を測定した。測定した試料は、先に述べたボーリング孔からのリン湧出水のほか、農業用水、残存湖水、周辺河川水、湧水である

(Table1、Fig.3)。各水試料の酸素・水素同位体比は、天水ライン ( $\delta D = 8\delta^{18}O + 17$ ) に沿ってデータが分布する。農業用水は  $\delta D = -37 \sim -45\%$ 、 $\delta^{18}O = -6.6 \sim -7.2\%$  で、測定した試料中最も酸素・水素同位体比が高い。残存湖水は  $\delta D = -43 \sim -48\%$ 、 $\delta^{18}O = -6.8 \sim -7.7\%$ 、周辺河川水は  $\delta D = -43 \sim -53\%$ 、 $\delta^{18}O = -7.3 \sim -8.7\%$ 、湧水は  $\delta D = -50\%$ 、 $\delta^{18}O = -8.6\%$  をそれぞれ示す。リン湧出水の酸素・水素同位体比は  $\delta D = -47 \sim -50\%$ 、 $\delta^{18}O = -7.8 \sim -8.3\%$

で、残存湖西側の野石橋(L2)を除く残存湖水と馬場目川河川水の杉沢発電所(R2)と竜馬橋(R5)、あけぼの橋(R7)を除く残存湖東側から南東側で比較的集水域の小さな河口付近の河川水と類似した同位体比を示す。

Fig.4 に水素同位体比と  $Cl^-$  濃度の関係図を示した。図中 A 線は、秋田大学で毎月採水されている降水の 10 年間の平均値 ( $\delta D = -54\%$ 、 $Cl^- = 7mg/l$ 、以下降水) と南部排水機場から排水する農業用水の混合線、B 線は降水と残存湖東側から南東側の河川水や残存湖水との混合線を示す。馬場目川上流域杉沢発電所(R2)の試料は、降水と同様な水素同位体比と  $Cl^-$  濃度を示す。リン湧出水は A 線上で直線的に分布し、採取深度の深い GD ( $\delta D = -47\%$ 、 $Cl^- = 54 \sim 69mg/l$ 、深度 4.2~8.2m) と採取深度の浅い GS ( $\delta D = -49 \sim -50\%$ 、 $Cl^- = 35 \sim 40mg/l$ 、深度 2.5~3.1m) に区別される。採取深度の深い GD は、残存湖南側の防潮水門の値(L3)とほぼ一致する。防潮水門は南部排水機場から残存

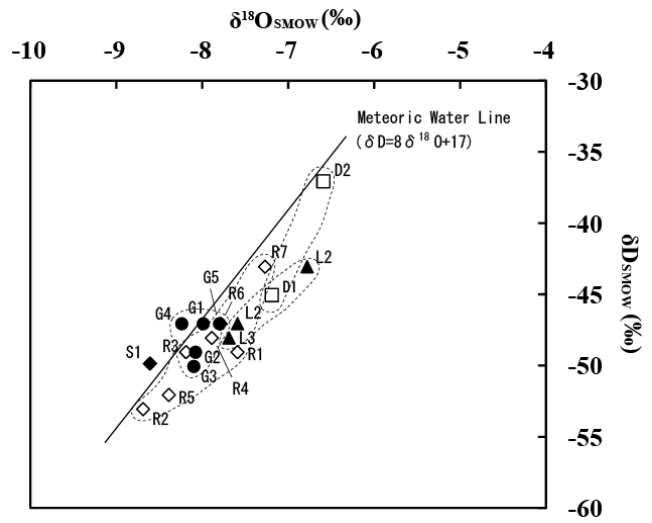


Fig.3 : Relationship between  $\delta^{18}O$  and  $\delta D$  values of water obtained from the area studied.

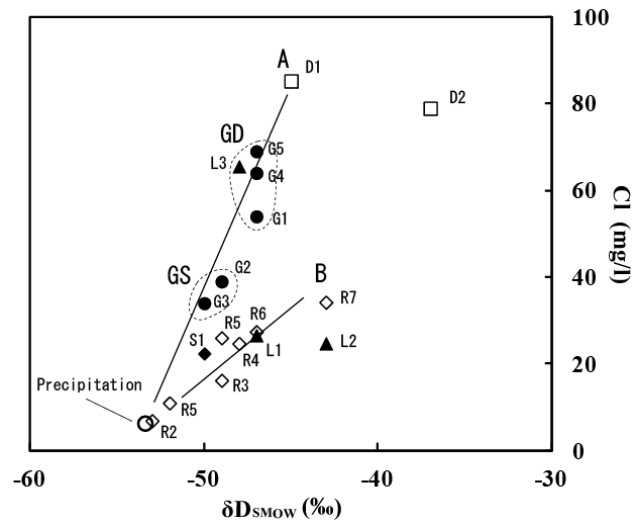


Fig.4 : Relationship between the  $\delta D$  values and  $Cl^-$  concentrations of water obtained from the area studied.

湖へ排水する農業用水を水位調整し、残存湖から日本海へ排水する施設である。採取深度の深い GD のリン湧出水は、農業用水が降水により希釈され形成した防潮水門周辺の湖水と同質のものと推定される。採取深度の浅い GS のリン湧出水は、採取深度の深い GD や農業用水が降水によりさらに希釈されたものと推定される。したがって、リン湧出水に関与する水は、南部排水機場から排出する農業用水が降水により希釈されたものが起源と考えられる。

## 5 まとめ

八郎潟干拓地内南部排水機場南東部約 1 km 付近で、局所的に確認されるリン湧出水の地球化学的特徴と関与する水を検討した結果、以下の結論を得た。

1. リン湧出水の Cl<sup>-</sup>濃度範囲は、Cl<sup>-</sup>=34~69mg/l を示し、残存湖水の Cl<sup>-</sup>=25~66mg/l と類似する。また、他の試料水と比較して、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度が高く、Mg<sup>2+</sup>と Ca<sup>2+</sup>濃度が低い傾向を示し、特に Na<sup>+</sup>濃度は高く、Na<sup>+</sup>=87~250mg/l を示す。
2. リン湧出水は、南部排水機場から排出する農業用水が降水により希釈されたものが起源と考えられる。農業用水の降水による希釈の程度は、浅部では高く、深部では低い。

## **Geochemical characteristics of high-phosphorus spring water in Hachirogata land reclamation area, Akita prefecture**

Hiroshi Kawaraya<sup>1</sup>, Daizo Ishiyama<sup>1</sup> and Koichiro Sera<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University  
1-1 Gakuen-Machi, Tegata, Akita 010-8502, Japan

<sup>2</sup>Cyclotron Research Center, Iwate Medical University  
348-58 Tomegamori Takizawa 020-0173, Japan

### **Abstract**

The purpose of this study was to clarify the geochemical characteristics of high-phosphorus spring water in Hachirogata land reclamation area, Akita Prefecture. Concentrations of major elements in the spring water and suspended materials over 0.45  $\mu\text{m}$  in the water were measured using ion chromatography and the PIXE method. Cl<sup>-</sup> concentrations of the high-phosphorus spring water were 34-69 mg/l, similar to the concentration range (25-66 mg/l) in Hachirogata residual lake water. Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> concentrations in the spring water were high and Mg<sup>2+</sup> and Ca<sup>2+</sup> concentrations were low compared with concentrations in other water samples. The high-phosphorus spring water is thought to be derived from mixing of precipitation and agricultural water from a drainage pumping station in the southern part. The mixing ratio of precipitation to agricultural water (precipitation/agricultural water) is thought to be high for high-phosphorus spring water derived from shallow part and low for high-phosphorus spring water derived from deeper part.