湧水の地球化学データの変遷から見た 秋田県六郷扇状地における地下水流動系

井川 怜欧^{*1}・利部 慎^{*2}

Groundwater flow system in Rokugo alluvial fan as revealed by transition of geochemical data for spring water

Reo IKAWA^{*1} and Makoto KAGABU^{*2}

Abstract

The Rokugo alluvial fan in Akita Prefecture has abundant groundwater that is discharged from a belt of springs situated at its toe. In order to examine the groundwater flow system in the fan, a monthly water sampling and chemical analyses program was conducted for the spring and river water around the fan covering the period between irrigation and non-irrigation.

A seasonal variability of isotopic ratios was not observed in either the river or spring water samples. However, a seasonal variability was seen in the chemistry of the river water. The results of present and previous studies show that the groundwater discharged in the belt of the springs at the toe of the fan is recharged by rainwater, irrigation water, and underflow water from the apex of fan. From observations of water chemistry and isotopic ratios in spring water samples, these studies also suggest that the multiple sources of recharge water are mixing within the fan. Additionally, it is suggested that this groundwater flow system is controlled by the differences in grain size in the fan deposit.

The groundwater flow system for three springs located at the edge of the fan is found to be different from that of others, which suggests that these specific springs might be affected by recharge from bedrock groundwater.

Key words: Hydrogen and oxygen stable isotopic ratio, alluvial fan,
groundwater flow system, spring water

キーワード：水素・酸素安定同位体比, 扇状地, 地下水流動系, 湧水

1. はじめに

日本には大小様々な扇状地が存在し, その多くが豊富な地下水を有しており扇端部ではこれらの地下水が湧水となって地表面に現れ, 昔から地域の人々の生活に欠かすことの出来ない貴重な水源として用いられてきた。したがって, 扇状地の地

下水にかかわる研究は, 水文学の世界においても重要視され, その流動(黒部川扇状地地域社会研究所, 1986), 涵養機構(水谷・小田, 1983; 水谷・佐竹, 1997; 水谷ほか, 2001; 涌井・山中, 2006), および滞留時間(水谷ほか, 1987)などについての研究がなされてきた。また近年では扇状地における涵養から流出までの水文レスポンス

* 1 産業技術総合研究所 地質調査総合センター Geological Survey of Japan, AIST

* 2 熊本大学大学院自然科学研究科 Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University

の早さという利点を活かし、気象などの水文環境が異なる北海道から九州における複数の代表的な扇状地において詳細な水文地質観測を行ない、その結果を比較することにより地球温暖化などの input 側の大規模な環境変化が、output 側の地下水や河川水にどのような影響を与えるのかを予測しようとする動きも出てきている (RHF, 2008)。

秋田県美郷町六郷地区に位置する六郷扇状地も古来より「百清水」と呼ばれる数多くの湧水を扇端部に有しており、現在の市街地はかつて湧水周辺に出来た集落の名残である。しかしながら近年の土地利用の変化、住民一人当たりの水使用量の増加、および冬期における融雪水としての地下水揚水量の増加に伴い、「百清水」を有した六郷扇状地においても秋から春にかけての非灌漑期における地下水位の低下が顕著となり、いくつかの湧水で非灌漑期における枯渇が確認されている。現在では地表面からの浸透が限りなく 0 に近くなる積雪期を中心に人工涵養池を用いた地下水の人工涵養が行なわれており、一定の成果を挙げている (肥田ほか, 1999; 肥田 2005; 肥田, 2007; Kagabu *et al.*, 2008)。

本扇状地における湧水や地下水に関する地球化学的データは、安原ほか (2002)、島野・肥田 (2006)、利部ほか (2008) および Kagabu *et al.* (2008) において一部報告されているが、これらの研究は主に扇状地内の湧水や地下水の涵養機構を対象としているため、地表面からの地下水の涵養に大きな役割を果たしていると考えられる一部の河川を除いて、扇状地周辺の河川を含めた包括的な水文的研究はなされていない。また湧水や一部の地下水の水質および水素・酸素同位体比は、灌漑期と非灌漑期でほとんど変化がないことが報告されており (利部ほか, 2008)、地表面の水文環境の変化に左右されない程度の滞留時間を有する大規模な地下水流動系が存在している可能性も示唆される。そこで本研究では、大規模な地下水流動系に関連していると考えられる周辺河川と湧水の両方で灌漑期から非灌漑期にかけて定期的な採水を行ない、それらの地球化学的データを用いて六郷

扇状地における地下水流動系と扇端部における湧水群の形成プロセスに関する考察を行なった。

Ⅱ. 六郷扇状地の水文地質環境

秋田県美郷町六郷扇状地 (39° 25' N, 140° 34' E) は、秋田市から南東約 50km の距離に位置し、秋田県の 3 大河川の 1 つである雄物川水系に属している。年間平均降水量および蒸発散量は、それぞれ 1653mm と 660mm であり、地表面の 70% は水田である (Hida, 2007)。本扇状地は、真昼岳から女神山および黒森山に水源をもつ善知鳥川と湯田沢川が平地の出口で合流した丸子川によって形成された沖積扇状地であり、標高は扇頂部で約 90m、扇央部で約 65m、扇端部で約 45m である。扇状地の大きさは南北方向に約 5.5km および東西方向に約 4km で面積は約 14km² である (肥田ほか, 1999)。

六郷扇状地は、第四紀更新世から完新世にかけて形成され、沖積層の下位に位置する新第三紀中新世千屋層を基盤とする (小西, 1966)。千屋層の岩相は礫岩、砂岩、泥岩、および石英安山岩質凝灰岩から成り下部に亜炭を挟む。扇状地堆積物の厚さは扇状地の南端で 50m、扇端部で少なくとも 70m、扇状地の東端で 107m であり、主に砂礫層によって構成されている。また六郷扇状地は古期扇状地の上に新时期扇状地が重なり合ってきた複合扇状地であるが、一般的に新时期扇状地を六郷扇状地としている (肥田, 1990)。

前述したように六郷扇状地では非灌漑期における地下水位の低下と、それに伴う湧水の枯渇が深刻化している。そのため現在では非灌漑期において 4 つの涵養池を用いた地下水の人工涵養が行なわれている。

Ⅲ. 試料採取および実験方法

本研究では、六郷扇状地を含めた周辺地域の 25 箇所の湧水・河川・灌漑水路・人工涵養池 (Fig. 1) と灌漑用水である田沢疎水の源流である玉川

Fig. 1. Location sampling map of study area.

の2箇所、計27箇所では採水を行なった。採水期間は灌漑期にあたる2002年8月から非灌漑期にあたる11月である。状況により採水が不可能であったもの、あるいは採水を新たに追加したものが存在するため一部の試料に関しては、全ての月のデータが存在しないものもある。全ての水試料はポリエチレン製の試料用ボトル(250ml)に採取し、電気伝導度(EC)、pH、水素・酸素安定同位体比、および溶存イオン濃度(Cl^- および SO_4^{2-})の測定を行なった。ECおよびpHは、それぞれB-173(HORIBA)およびD-21pH(HORIBA)を用いて測定し、25℃で温度補正を行なった。また酸素・水素安定同位体比は、それぞれ $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 平衡法と亜鉛還元法で前処理を行った後、質量分

析計(Thermo electron 社製MAT250)を用いて測定し、SMOWに対する δ 値としてパーミル(‰)で表示した。

$$\delta = \left(\frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{SMOW}}}{R_{\text{SMOW}}} \right) \times 1000 \text{ (‰)}$$

ただし、 $R = \text{D}/\text{H}$ 、または $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ であり、測定値の精度は δD で $\pm 2\text{‰}$ 以内、 $\delta^{18}\text{O}$ で $\pm 0.1\text{‰}$ 以内である。

湧水および河川水中の Cl^- および SO_4^{2-} 濃度は、イオンクロマトグラフィー(DIONEX, DX-100)を用いて測定した。

本研究において得られた試料水における水質特性および水素・酸素同位体比はTable 1および2に示すとおりであり、表に示された試料番号は、

Table 1. Geochemical characteristics of sample water in study area.

No.	Location	Type	EC (μ S/cm)				pH				Cl ⁻ (mg/L)				SO ₄ ²⁻ (mg/L)			
			Aug-02		Oct-02		Aug-02		Oct-02		Aug-02		Oct-02		Aug-02		Oct-02	
			Aug-02	Sep-02	Oct-02	Nov-02	Aug-02	Sep-02	Oct-02	Nov-02	Aug-02	Sep-02	Oct-02	Nov-02	Aug-02	Sep-02	Oct-02	Nov-02
1	Umaarai	Spring	137	128	139	127	7.5	6.7	6.2	6.4	12.0	11.4	12.4	10.7	14.6	15.3	15.4	15.4
2	Kami	Spring	135	139	131	121	7.4	6.4	6.2	6.0	11.1	10.8	12.4	10.0	16.2	16.9	15.9	16.0
3	Taoka	Well	175	177	171	168	7.7	7.5	7.0	6.8	10.7	10.6	12.2	11.5	6.1	6.1	5.7	6.1
4	Zato	Spring	131	131	-	126	7.4	6.7	-	6.0	11.7	11.5	-	11.0	16.8	16.1	-	15.9
5	Kome	Spring	140	136	138	132	7.5	6.7	6.3	6.1	11.5	11.1	12.6	10.1	13.8	14.6	15.0	14.2
6	Takaramon	Spring	134	126	119	128	7.9	6.6	6.4	6.2	10.2	10.3	11.4	9.1	13.6	13.4	10.8	13.6
7	Suwa	Spring	141	136	140	132	8.1	6.7	6.4	6.3	12.7	10.9	12.3	10.4	13.5	14.1	13.7	13.6
8	Niteko	Spring	140	145	138	132	7.4	6.5	6.1	6.0	11.7	11.3	12.8	10.3	14.6	15.2	14.8	14.2
9	Fututachi-honmaru	Well	194	191	195	176	8.3	7.6	6.9	6.9	10.9	11.0	12.8	11.4	9.1	9.1	9.0	9.3
10	Gawa	Well	181	195	197	182	9.9	6.8	6.9	6.8	10.4	11.2	12.5	11.4	12.5	12.6	12.5	13.0
11	Jyukai	Spring	134	133	128	127	8.4	6.4	6.1	6.0	12.4	11.7	12.4	10.3	14.7	15.5	14.9	14.5
12	Kamisukiza	Spring	-	-	-	123	-	-	-	6.0	-	-	-	10.6	-	-	-	14.8
13	Choueidou	Spring	128	128	-	127	7.5	6.4	-	5.9	12.0	11.7	-	11.9	16.0	16.1	-	14.9
14	Maruko gawa (Up-stream)	River	72	111	109	78	7.8	7.1	7.0	7.0	4.8	7.6	9.3	7.7	10.2	13.6	13.1	8.7
15	Maruko gawa (Down-stream)	River	64	125	106	78	7.6	7.3	6.9	6.9	5.2	8.9	9.1	7.7	7.7	13.7	12.4	8.9
16	Uto gawa	River	58	116	106	76	9.0	7.3	7.1	6.8	4.1	6.9	8.5	7.0	7.5	18.3	15.4	9.2
17	Nanataki gawa	River	60	97	87	62	9.9	8.0	7.0	7.2	5.3	8.2	9.1	6.9	4.1	5.7	5.2	4.1
18	Yudasawa gawa	River	60	134	116	79	8.3	7.1	7.1	7.1	4.1	7.4	7.7	6.7	7.7	22.9	18.6	10.1
19	Shinokurasawa gawa	River	-	139	123	83	-	7.2	7.2	7.1	-	7.7	8.5	6.6	-	26.9	22.8	10.7
20	Yuda dam	River	-	-	-	74	-	-	-	7.0	-	-	-	6.4	-	-	-	9.6
21	Taoka irrigation canal	Irrigation canal	-	134	158	116	-	7.3	6.8	6.7	-	10.6	15.0	10.7	-	14.1	20.7	12.8
22	Ide gawa	River	73	126	138	-	9.7	7.2	6.5	-	7.5	10.7	11.6	-	8.7	15.3	18.6	-
23	Tazawa canal	Irrigation canal	70	99	82	63	9.3	7.1	6.9	6.8	7.1	8.0	10.1	10.2	5.7	11.7	8.0	4.5
24	Artificial recharge pond-1	Pond	-	-	-	74	-	-	-	7.1	-	-	-	7.2	-	-	-	8.5
25	Artificial recharge pond-2	Pond	-	-	-	78	-	-	-	7.2	-	-	-	7.0	-	-	-	8.8
26	Tama gawa (Kakunodate)	River	-	-	-	102	-	-	-	6.6	-	-	11.1	-	-	-	20.3	-
27	Tama gawa (Ohmagari)	River	-	104	95	-	-	6.8	6.6	-	-	12.2	9.5	-	-	16.2	16.1	-

Table 2. Isotopic ratios of sample water in study area.

No.	Location	Type	δ D (‰)				$\delta^{18}\text{O}$ (‰)				d-value*		
			Aug-02	Sep-02	Oct-02	Nov-02	Aug-02	Sep-02	Oct-02	Nov-02	Aug-02	Sep-02	Oct-02
1	Umaarai	Spring	-55	-57	-57	-57	-9.1	-9.2	-9.3	-9.0	18	17	17
2	Kami	Spring	-56	-58	-56	-57	-9.3	-9.3	-9.2	-9.1	18	16	18
3	Taoka	Well	-53	-55	-56	-55	-9.0	-9.2	-9.1	-9.3	19	19	17
4	Zato	Spring	-54	-58	-	-56	-9.3	-8.9	-	-9.1	20	13	-
5	Kome	Spring	-55	-56	-56	-55	-9.1	-9.1	-9.1	-8.9	18	17	17
6	Takaramon	Spring	-57	-55	-49	-56	-9.3	-9.2	-8.3	-9.0	17	19	17
7	Suwa	Spring	-57	-57	-54	-56	-9.3	-9.1	-9.1	-9.1	17	16	19
8	Niteko	Spring	-57	-57	-58	-58	-9.4	-9.3	-9.2	-9.0	18	17	16
9	Fututachi-honmaru	Well	-54	-54	-54	-54	-9.1	-9.0	-9.0	-9.0	19	18	18
10	Gawa	Well	-56	-53	-55	-55	-9.1	-9.0	9.0	-9.2	17	19	17
11	Jyukai	Spring	-58	-60	-58	-58	-9.1	-9.3	-9.1	-9.1	15	14	15
12	Kamisukiza	Spring	-	-	-	-57	-	-	-	-9.1	-	-	16
13	Choueidou	Spring	-60	-59	-	-57	-9.4	-9.3	-	-9.1	15	15	-
14	Maruko gawa (Up-stream)	River	-56	-56	-55	-56	-8.8	-9.5	-9.2	-9.6	14	20	19
15	Maruko gawa (Down-stream)	River	-55	-57	-54	-56	-8.7	-9.2	-9.0	-9.4	15	17	18
16	Utou gawa	River	-56	-57	-55	-56	-9.0	-9.7	-9.2	-9.7	16	21	19
17	Nanataki gawa	River	-55	-55	-55	-55	-9.3	-9.4	-9.3	-9.5	19	20	19
18	Yudasawa gawa	River	-59	-56	-55	-56	-9.2	-9.6	-9.1	-9.5	15	21	18
19	Shinokurasawa gawa	River	-	-55	-55	-56	-	-9.7	-9.3	-9.8	-	23	19
20	Yuda dam	River	-	-	-	-56	-	-	-	-9.5	-	-	20
21	Taoka irrigation canal	Irrigation canal	-	-56	-47	-57	-	-9.2	-7.9	-9.4	-	18	16
22	Ide gawa	River	-50	-54	-42	-	-7.9	-9.1	-7.7	-	13	19	20
23	Tazawa canal	Irrigation canal	-54	-55	-52	-56	-8.8	-9.3	-9.0	-9.1	16	19	20
24	Artificial recharge pond-1	Pond	-	-	-	-57	-	-	-	-9.6	-	-	20
25	Artificial recharge pond-2	Pond	-	-	-	-55	-	-	-	-9.9	-	-	22
26	Tama gawa (Kakunodate)	River	-	-	-63	-	-	-	-9.9	-	-	16	-
27	Tama gawa (Ohmagari)	River	-	-62	-60	-	-	-9.6	-9.5	-	15	16	-

[*d-value= δ D- $\delta^{18}\text{O}$]

[*d-value= δ D- $\delta^{18}\text{O}$]

Table 3. Isotopic ratios of groundwater in center and toe of fan (Kagabu *et al.*, 2008).

Site	Aug-07		Jan-08	
	δD (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)
Nonaka (20m)	-55	-9.6	-52	-9.6
Nonaka (50m)	-55	-9.5	-56	-9.6
Nonaka (100m)	-53	-9.2	-54	-9.4
Yunaka (20m)	-55	-9.3	-56	-9.4
Yunaka (50m)	-54	-9.1	-54	-9.3
Yunaka (100m)	-58	-9.9	-60	-10.1

Fig. 1 に示した番号と対応している。また Table 3 には利部ほか (2008) により行なわれた 2007 年 8 月と 2008 年 1 月の扇中央部と扇端部の 2 つのピエゾメータにおける深度別地下水の同位体比の分析結果 (分析精度; δD : $\pm 1\text{‰}$, $\delta^{18}O$: $\pm 0.1\text{‰}$) を示した。2 つのピエゾメータの位置もまた Fig. 1 の N と Y にそれぞれ対応している。

Ⅳ. 結果および考察

1. 周辺河川水における地球化学特性の季節変化

各月の六郷扇状地周辺河川水および灌漑用水における水素と酸素の安定同位体比の関係を Fig. 2 に示した。また 11 月の δ ダイアグラムには、2 箇所の人工涵養池の水の値も一緒にプロットした。本図においては、8 月と 10 月の一部の試料 (No.21 & No.22) に明らかな違いが見られたが、相対的には、各河川における同位体比に有意な差は見られず、11 月の涵養池の水も同月の丸子川河川水と同様の同位体比を示した。一方で、EC に関しては河川ごとに特徴的な値を示した (Fig. 3)。 δ ダイアグラムにおいても顕著な違いが確認された田岡清水近傍で採取した灌漑用水 (No.21) と出川 (No.22) を除いて、試料水の EC 値は 9 月に最も大きな値を示した。8 月の河川水の EC 値が相対的に小さく、また各試料間における差も小さかった原因として、降水による河川への直接流出の影響が考えられる。8 月の採水日の前日から当日の朝にかけて本扇状地から最も近い大仙市の大曲気象台で、最大で 8mmh^{-1} の断続的な降水

Fig. 2. δD - $\delta^{18}O$ relationship for river water and irrigation canal water around Rokugo alluvial fan.

Fig. 3. Temporal variation of EC value in river and irrigation canal water around Rokugo alluvial fan.

が確認されていることから8月の各試料水のECおよび同位体比の値は、周辺河川における基底流本来の値を反映していない可能性が示唆される。このことは8月の河川水の δ 値が、いずれの河川においても他の月と異なる値を示したことからも支持される (Table 2)。

9月から11月にかけてのEC値の低下の原因は本研究の結果からは言及できないが、出川 (No. 22) や扇端部の田岡清水近傍で採取した灌漑用水 (No. 21) などの明確な水源の特定が困難である小規模河川を除く、全ての河川で同様の傾向が確認され、また9月から11月にかけて主要な河川における同位体比に大きな変化が無いことから、異なる降水起源を持つ地下水や地表水の混入は考え難い。さらに相対的に流域面積が小さく採水地点より上流部に農作地などが存在しない七滝川 (No. 17) や信倉沢川 (No. 20) と、相対的に流域面積が大きく上流部にやや農作地が存在する善知鳥川 (No. 16) の両方で同様の傾向が見られることから、今回確認されたECの季節変化は施肥などの人為的な影響ではなく植生や地質環境に起因する個々の流域が持つ水文特性に起因していると考えられる。

本研究では、夏期における扇状地の地下水涵養に寄与していると考えられている田沢疎水に関しても採水を行なったが、観測期間を通して丸子川水系の河川水と同位体比には大きな違いは見られず、EC値は七滝川 (No. 17) と同じく相対的に低い値を示した。しかしながら、安原ほか (2002) では丸子川河川水とは明らかに異なる軽い同位体比を持つことが報告されている。また本研究においても9月と10月に玉川の田沢疎水用頭首工近傍で採水した玉川河川水 (No. 26) の同位体比を測定した結果、同日に採水した田沢疎水とは明らかに異なる軽い値を示した (Table 2)。これらの結果が生じた理由として、従来の田沢疎水は灌漑期に100日程度玉川から取水されるため、灌漑期の末期である8月から採水を開始した本研究の結果には、田沢疎水の従来の値が反映されていなかった可能性が示唆される。本研究で採取した田

沢疎水は、従来の灌漑用玉川河川水ではなく、七滝川と似た流域特性を持つ本扇状地周辺の山地によって涵養された河川水である可能性が示唆される。

2. 湧水における地球化学特性の季節変化と涵養起源

Fig. 4に各月の湧水の水素と酸素の安定同位体比の関係を示した。利部ほか (2008) で報告されている扇状地内の夏期 (2007年8月) および冬期 (2008年1月) の湧水や地下水と同様に、本研究の湧水の同位体比も10月の宝門清水 (No. 6) を除いて δD で-55‰, $\delta^{18}O$ で-9.5‰前後の値を示し、分析誤差を考慮すると季節ごとの湧水間の同位体比に有意な差は見られなかった。一方で、これらの湧水の水質は、湧水の位置する場所ごとに特徴的な値を示した。Fig. 5は、本研究で得られた全ての試料についてのEC値と SO_4^{2-} 濃度の関係を示したものである。本図において湧水は河川水と異なる特徴を示し、特に、湧水群の中で最も扇端部に位置する田岡清水 (No. 3)・古館本丸柳清水 (No. 9)・側清水 (No. 10) は他の湧水と比較して高いEC値と低い SO_4^{2-} 濃度を示し、他の湧水とは明らかに異なる地下水起源を有してい

Fig. 4. δD - $\delta^{18}O$ relationship for spring water on the Rokugo alluvial fan.

Fig. 5. The relationship between EC value and SO_4^{2-} concentration in spring water and river water.

Fig. 6. Temporal variation of EC value in spring water on the Rokugo alluvial fan.

ることを示した。島野・肥田 (2006) により行われた本扇状地における夏期 (2001 年 7 月) の湧水の水質分布においても、扇状地の北と南側に位置する座頭清水 (No.4)・浄海清水 (No.11)・紙漉座清水 (No.12)・長栄堂清水 (No.13) の Ca-Cl 型、最も扇端部に位置する田岡清水 (No.3)・古館本丸柳清水 (No.9)・側清水 (No.10) の Ca- HCO_3 型、そして、その他の清水で観測された (Na+Ca)- HCO_3 型の 3 つの水質の異なる地下水の存在が報告されており、最も先端部に位置する 3 つの湧水は他の湧水とは明らかに異なる水質特性を有している。しかしながら、島野・肥田 (2006) による湧水の観測は豊水期に 1 度行なわれたのみであり、豊水期から渇水期にかけての湧水の水質変遷は明らかでない。そこで本研究では、得られた湧水試料について EC の経時変化をプロットしたものを Fig. 6 に示した。最も扇央部寄りに位置

Fig. 7. δD - $\delta^{18}\text{O}$ relationship for spring water, river water, and rainwater.

する宝門清水 (No.6) では 10 月に EC 値の低下が見られたが、その他の湧水の EC 値は河川水とは異なり豊水期から渇水期にかけて安定した値を示した。また本扇状地の南北に位置し、扇央部に近い座頭清水 (No.4) および長栄堂清水 (No.13) では、10 月と 11 月にそれぞれ湧水の枯渇と回復が確認された (Photo 1-1・1-2)。

湧水や河川水の起源となる降水の同位体比は、降水の起源となる大気中の水蒸気を形成する気団によって季節的に大きく変化することが知られている (早稲田・中井, 1983)。秋田市においても降水の同位体比は季節によって大きく変動し、特に降水の起源となる水蒸気団の海面からの蒸発スピードと密接な関係を持つ δ 値は、夏に小さく冬に大きな値をとることが川原谷ほか (2000) によって報告されている。そこで本研究では、六郷扇状地における湧水および河川水と降水の同位体比の季節変動との関係を把握するため、灌漑用水と降水による影響が示唆される 8 月の値を除く河川水と全ての月の湧水の同位体比を、川原谷ほか (2000) により報告されている秋田市降水の 1982-1991 年までの月ごとの加重平均値と共に δ ダイアグラム上にプロットした (Fig. 7)。降水の同位体比は、灌漑が始まる 5 月からの半年間を夏期、降雪が始まる 11 月以降を冬期としてプロッ

Photo 1-1 Sp. Zato (No.4) in October 27, 2002

Photo 1-2 Sp. Zato (No.4) in November 27, 2002

トした。本図において、湧水の同位体比は10月の宝門清水（No.6）を除いてほとんど変化を示さなかった。また夏期と冬期の降水の中間付近にプロットされ、周辺河川水の同位体比とほとんど同じ値を示した。これらの結果より、本扇状地の湧水群を構成する地下水は夏期と冬期の両方の降水によって涵養されており、さらに降水の同位体比の季節変化を打ち消す程度の滞留時間を持った地下水流動系によって支持されていることが示唆される。

水谷・佐竹（1997）や中村ほか（2008）などの国内事例研究において、扇状地の地下水涵養に寄与すると考えられる周辺河川の同位体比は、高度効果の影響により扇状地面の降水の年降水量加重平均値よりも軽くなることが指摘されており、さらに両者によって地下水が涵養されている場合、地下水の同位体比は両者の同位体比の間の値を取ることが確認されている。しかしながら、本扇状地は土地利用の70%を占める水田からの灌漑用水や扇状地における降水など複数の地下水涵養源が存在するにもかかわらず、湧水の同位体比は河川水とほとんど同じ値を示している。さらに水谷・佐竹（1997）や中村ほか（2008）と異なり扇状地上に地下水を涵養する天井川が存在しないことから、扇状地地下水の大部分が扇頂部からの伏没河川水によって涵養されている可能性が示唆される。

3. 六郷扇状地における地下水流動系

今回得られた水質・同位体データより、最も扇端部に位置する3つの湧水は、その他の湧水とは異なる地下水起源を持っている可能性が示唆され、また湧水を涵養する地下水は降水の同位体比の季節変動を打ち消す程度の滞留時間を有しており、その大部分が扇端部における伏没河川水によって涵養されている可能性が示された。さらに灌漑期である2007年8月と非灌漑期である2008年1月に野中（N）と湯川（Y）で採水された複数深度における地下水の同位体比に関しても、湯川の100m深度の地下水が他の深度の地下水よりもやや小さな値を示した以外は、有意な差は見られなかった（Table 3）。

これらの研究結果から推察される本扇状地における地下水流動の概念図をFig. 8に示した。本扇状地では主流河川である丸子川は扇頂部で大きく北側に蛇行しているが、斎藤ほか（2001）により扇頂から扇端に向かう地下水の流動が確認されていることから、扇端部に形成された大部分の湧水群を構成する地下水は、同位体データからも推察されるように、主に扇頂部で伏没した河川水、扇状地面への降水、および水田からの灌漑用水によって涵養されていることが示唆される。また湧水群を形成する地下水流動系は扇頂部と扇端部における扇状地堆積物の粒径の違いによって生じていると考えられる。すなわち相対的に最も粒径が大きいと考えられる扇頂部において地下水は

Fig. 8. The conceptual diagram for groundwater flow system in alluvial fan.

伏没河川水によって涵養され、さらに水田が分布する扇頂部や扇央部において地表面からの浸透水と混合しながら扇端部に向かって流動する。粒径の減少に伴い扇端部では扇頂部や扇央部と比べ透水係数が小さくなるため、扇端部へ向かって流動してきた地下水は上向きの流動フラックスを形成し、地下水面を地表面付近まで上昇させ湧水群を形成したと考えられる。この扇端部における地下水の上向きフラックスは、Kagabu *et al.* (2008) で報告されている地下水の恒温層の位置が扇央部の野中よりも扇端部の湯川の方がより浅部であることや、扇端部の湯川における 100m 深度の地下水が、他の浅層の地下水より小さな同位体比を示したことから推察される。すなわち地下水の上向きフラックスが生じている扇端部では季節的な外気温の変化が打ち消される恒温層は、より浅部に形成され重い同位体比を持つ地表面からの浸透水の影響が 100m 深度にまで至っていないと考えられる。一方で、最も扇端部に位置する 3 つの湧水は、他の湧水群とは異なった地下水流動系を持っている可能性が示唆される。本研究では、嶋田 (1998) において指摘されている基盤岩地下水からの寄与を示す明瞭な証拠は得られなかった。しかしながらこれら 3 つの湧水は、他の湧水とは異なる自噴井型の湧水であり、島野・肥田 (2006) で報告されているとおり他の湧水と比較して明らかに高い Ca^{2+} および HCO_3^- 濃度をもっている。さらに本研究でも確認されたように七滝川と同程

Fig. 9. Conceptual hydrogeological cross sectional view of alluvial fan (Tolman, C. F., 1937 & modified by Yamamoto, 1983).

度の低い SO_4^{2-} 濃度を示すことからこれらの湧水には山地流域で涵養された基盤岩地下水が寄与している可能性が示唆される。

既存の扇状地地下水に関する研究では、Fig. 9 に示したような扇央部から扇端部にかけての明瞭な不圧帯水層と被圧帯水層の存在を仮定し、扇端部の湧水は主に不圧帯水層を流れる浅層地下水によって形成されたと考えられてきた。しかしながら本扇状地は、前述したとおり基盤岩までの深度が南北で異なるため、現在、扇状地北部を流れる丸子川は複数回、河道を変えながら現在の地形を形成したと考えられる。したがって海成の堆積層のように明確な帯水層や加圧層の連続性のある面的広がりを仮定することは難しく、難透水層であるシルト層や粘土層は複数の深度に断続的に存在していると仮定される。この仮定は肥田 (1990) による本扇状地の複数のボーリング柱状図の比較や、扇央部と扇端部に設置されたピエゾメーター (野中および湯川) のボーリング柱状図 (Fig. 10) の間に連続性がないことなどにより支持される。

このような堆積構造および地下水流動系は、本研究および他の研究において確認された湧水や地下水の同位体比の測定結果からも支持される。前述したように、本研究では灌漑期から非灌漑期にかけての湧水の同位体比に明瞭な差は見られず、利部ほか (2008) においても夏期に人工涵養池近傍の観測井で蒸発によって同位体的に重くなった水の影響が見られた以外は、夏期と冬期で湧水や

Fig. 10. Geological columnar section at the site of piezometers Nonaka and Yukawa.
[Legend] a: Soil, b: Sand, c: Gravel, d: Clay, e: Humic soil, f: Screen

地下水に明瞭な同位体比における差は確認されなかった。一方で、六郷扇状地よりも大きく、同じく水田灌漑が行なわれている滋賀県の愛知川扇状地や福岡県の筑後川扇状地では、灌漑期と非灌漑期における地下水の同位体比に明瞭な差が存在することが報告されており (Hamada *et al.*, 2008 ; Hasegawa *et al.*, 2008), 特に筑後川扇状地では小石原川右岸の第一帯水層中の地下水においてその変化は顕著である。したがって、主に礫径が大きな砂礫層によって構成され連続的な不透水層を持たない本扇状地では、一部の地域において局所的な滞留時間の短い浅層の地下水流が存在するものの、地表面から入った水の大部分は、断続的なシルト層や粘土層の隙間から深部に向かって鉛直方向に浸透し、地下で扇頂部からの地下水流動系と混合しながら扇端に向かって流動していると考えられる。

本研究では前述したとおり観測期間中に扇央部

に最も近い2つの湧水 (座頭清水 (No.4) および長栄堂清水 (No.13)) において湧水の枯渇と回復が見られた。11月の急速な湧水の回復の要因として一時的な気温の上昇による融雪水の扇状地面からの浸透が考えられるが、枯渇前と後で同位体比に差が生じていないことから、融雪水が短い流動系を持つ流動経路を通して直接的に地下水面の上昇に寄与したわけではなく、地表面から浸透した融雪水が不飽和帯下部の水を押し出したことにより地下水面が上昇したと考えられる。このような透水性の高い地層における地表面からの水圧伝播による地下水位のすばやい応答は、榎根ほか (1980) において報告されている。湧水の同位体比が変化しない要因として、地表面からの浸透水が榎根ほか (1980) と同様にピストン流的な浸透機構を有している場合は、扇頂からの地下水流動が同位体比の異なる水の混合を打ち消す程度の大規模な地下水貯留量を有していることが推察され

るが、一方で、藪崎（2007）によって報告されている地中水の土壤中での鉛直浸透過程における移流と分散による同位体比の均質化が生じている可能性も示唆される。これらの内どちらか一方、あるいは両方のプロセスが扇状地内において生じているため、灌漑期の同位体比の重い田面水や同位体比の軽い田沢疎水の影響が湧水群において顕著に確認されなかったと考えられる。

水質・同位体比ともに10月の低水期に大きな変化を示した宝門清水（No.6）は、田沢疎水の開削後に不断泉から一時泉へ変わったことが肥田（1990）によって報告されている。前述したように10月には南北方向に並ぶ座頭清水（No.4）や長栄堂清水（No.13）においても枯渇が確認されており、これら扇状部付近の湧水の10月における水質・同位体比変動や枯渇は、非灌漑期の扇状地内の地下水位低下に起因していると考えられる。10月の宝門清水（No.6）では同位体比が重くなるだけでなくEC値も低下していることから、地下水面の低下により扇状地内に降った重い同位体比と小さなEC値を持つ降水を起源にもつ小規模な地下水流動系からの流入の影響が本湧水の水質と同位体比に現れたと考えられる。

VI. まとめ

秋田県美郷町六郷扇状地における湧水の起源となる地下水の流動を明らかにするため、灌漑期から非灌漑期にかけて扇端部に点在する複数の湧水と扇状地周辺河川水の水質および水素・酸素安定同位体比を測定した結果、以下のことが考察された。

- (1) 扇状地周辺の河川水の水素・酸素安定同位体比は用水路系を除いて安定した値を示した。一方、ECは河川や季節によって大きな変化を示し、これらの変化は、人為的影響ではなく流域のもつ水文特性に起因する可能性がある。
- (2) 扇端部の湧水は、灌漑期から非灌漑期にかけて安定した同位体比を示し、湧水間に有意な

差はない。また夏期と冬期の両方の降水を起源としており、顕著な季節変動を有する降水の同位体比や灌漑用水および融雪水などの異なる同位体比を有する地表面からの浸透水の影響を打ち消す程度の滞留時間を持っている。

- (3) 扇端部の湧水群を形成する地下水は、主に扇頂部における伏没河川水、扇状地面への降水、および水田からの灌漑用水によって涵養されており、この地下水の流動は主に扇状地堆積物の粒径の違いによって制御されている。また最も扇端に位置する3つの湧水は、その他の湧水とは異なる地下水流動系を持っており、基盤岩地下水からの涵養の可能性が示唆される。

本研究では、これまで行なわれていなかった灌漑期から非灌漑期にかけての連続的な扇状地周辺河川および湧水の採水を行ない、これらの化学分析結果にこれまでの研究結果を加えることにより、明らかにされていなかった六郷扇状地の地下水流動系に関して一つの方向付けを行なうことができた。一方で、今回明らかにできなかった本扇状地の降水・田面水・河川水、それぞれからの地下水涵養評価や人工涵養池から涵養された地下水の面的な広がり、さらには扇状地における浅層地下水と深層地下水の相互作用や扇端部の3つの湧水の起源などの諸問題も複数存在する。今後は今回用いた水質や同位体比などの地球化学データのみならず、新たな化学トレーサーや温度・地下水ポテンシャルなどの物理的パラメータを加えた更なる地下水研究の発展が期待される。

謝 辞

本論分を執筆するにあたり、2名の匿名査読者および秋田大学名誉教授の肥田登氏には有益なコメントを頂いた。また秋田大学の松葉谷治氏および川原谷浩氏には同位体比ならびに水質分析について便宜を図っていただいた。さらに2002年当時、秋田大学の学生であった新田大介氏ならびに

影山勇雄氏には現地採水を手伝っていただいた。
以上の方々にこの場を借りて厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 利部 慎・肥田 登・林 武司・網田和宏・嶋田 純 (2008)：六郷扇状地における地下水質の季節変動特性. 日本地下水学会 2008 年春季講演要旨集, 68-71.
- 榎根 勇・田中 正・嶋田 純 (1980)：環境とリチウムで追跡した関東ローム層中の土壤水の移動. 地理学評論, **53**, 225-237.
- 川原谷浩・松田英裕・松葉谷治 (2000)：酸素・水素同位体比を地用した秋田県谷地地すべり地の地下水混合と起源について. 地すべり, **36**, 48-55.
- 黒部川扇状地地域社会研究所 (1986)：黒部川扇状地研究. 古今書院, 27-28.
- 小西泰次郎 (1966)：秋田県横手盆地の水理・地質学研究. 地質調査所報告, 216, 37.
- 斎藤 庸・三宅紀治・肥田 登 (2001)：六郷扇状地の地下水流動と今後の地下水管理. 日本地下水学会 2001 年度秋季講演会講演要旨集, 146-151.
- 嶋田 純 (1998)：「地下水涵養と流出」I. 扇状地における地下水涵養と流出. 日本水文科学会誌, **28**, 61-67.
- 島野安雄・肥田 登 (2006)：六郷扇状地における地下水の水質特性. 秋田大学教育文化学部研究紀要 (人文・社会), **61**, 1-11.
- 中村高志・長田淑美・風間ふたば (2008)：水素・酸素および窒素安定同位体組成からみた甲府盆地東部地下水の涵養源と硝酸イオン濃度分布特性. 水環境学会誌, **31**, 87-92.
- 肥田 登 (1990)：扇状地の地下水管理. 古今書院, 69-71, 104.
- 肥田 登・石川悦郎・太田由紀子 (1999)：六郷扇状地における池を用いた地下水涵養の実験. 地下水学会誌, **41**, 23-33.
- 肥田 登 (2005)：地下水人工涵養 (池法) の実施と成果. 水循環 貯留と浸透, **58**, 21-25.
- 肥田 登 (2007)：六郷扇状地における地下水人工涵養の実施と成果. 地学雑誌, **116**, 23-30.
- 水谷義彦・小田松尚 (1983)：安定同位体比による富山庄川扇状地地下水のかん養源および流動状況の研究. 地球化学, **17**, 1-9.
- 水谷義彦・佐竹 洋・高島秀樹 (1987)：富山県庄川扇状地地下水の滞留時間. 地球化学, **21**, 49-54.
- 水谷義彦・佐竹 洋 (1997)：地下水かん養源の指標としての河川水の水素および酸素同位体組成. 地下水学会誌, **39**, 287-297.
- 水谷義彦・佐竹 洋・山邊綾子・宮地ひろみ・間瀬暢彦・山村嘉代子 (2001)：扇状地浅層地下水の水素および酸素同位体比. 地下水学会誌, **43**, 3-11.
- 安原正也・稲村明彦・島野安雄・肥田 登 (2002)：秋田県六郷扇状地の地下水の起源－炭素ならびに酸素・水素同位体に基づく考察－. 2002 年度日本水文科学会学術大会発表要旨集, **16**, 75-76.
- 涌井久司・山中 勉 (2006)：安定同位体組成からみた那須扇状地扇央部における地下水涵養源とその地域性. 地下水学会誌, **48**, 263-277.
- 早稲田 周・中井信之 (1983)：中部日本・東北日本における天然水の同位体組成. 地球化学, **17**, 83-91.
- Hamada, T., Yamada, M., Ao, L., Horiuchi, K., Yan, H., Kobayashi M., and Nonomura, O., (2008): Groundwater flow system in alluvial fan of Echigawa traced by groundwater potential, water quality, and isotopic compositions. *Hydro-environments of Alluvial Fans in Japan*, 211-222.
- Hasegawa S・Fukami, D., Miyazaki, S., Takada, K., Shimada, J. (2008): The groundwater flow system of the Chikugo-gawa alluvial fan. *Hydro-environments of Alluvial Fans in Japan*, 357-372.
- Hida, N. (2007): An overview of experiences of basin artificial recharge of ground water in Japan.

日本水文科学会誌, **37**, 295-302.
Kagabu, M., Amita, K., Hida, N., Hayashi, T., Shimada, J. (2008): Effect of the artificial recharge of groundwater using a pond: case study of the Rokugo alluvial fan. Akita prefecture, northern Japan, *Proceedings of 36th IAH congress*, 588-594.
RHF (2008): Hydro-environments of Alluvial Fans in Japan, *Secretariat of RHF*.

Tolman, C, F. (1937): *Groundwater*. McGraw-Hill.

(受付：2009年 6 月24日)

(受理：2009年 9 月29日)

この論文に対する「討論」を2010年 3 月31日まで受け付けます。