

原 著

## 長野県野沢温泉の泉質

江守建太<sup>1)</sup>, 塚原弘昭<sup>2)</sup>

(平成 22 年 4 月 26 日受付, 平成 22 年 5 月 27 日受理)

### Chemical Properties of Hot Spring Waters in Nozawa Onsen, Nagano Prefecture

Kenta EMORI<sup>1)</sup> and Hiroaki TSUKAHARA<sup>2)</sup>

#### Abstract

Chemical properties and isotopic composition of hot spring waters at the spa area in Nozawaonsen Village, Nagano Prefecture, were investigated. The origin of the hot spring waters is proved to be meteoric water on the basis of the oxygen and hydrogen isotope ratio. The hot spring waters were classified into two groups of geothermal systems according to ratios containing chloride ions in total dissolved anions, a relatively high concentration group, and a low concentration group. The variation in chemical composition of low concentration group does not generate with mixing the geothermal waters of high concentration group and surface water. Therefore, there is an own source in each group. Further, the variation in ion composition of the hot spring waters in the same group revealed that the ion composition was controlled by mixing two original hot waters, a high temperature and high ion concentration water, and a low temperature and low concentration one. The mixing ratio varies depending on hot spring site and time. Every group has their own two original hot waters. The spa area is in a valley on the boundary between the volcanic rocks from Mizuoyama volcano and Kenashiyama volcano. The group of relatively high concentrations of chloride ions, containing two hot springs “Shinyu” and “Takinoyu”, seems to be upwelling from the original waters under the Mizuoyama volcano because of their locations, and the others from Kenashiyama.

Key words : Nozawa Onsen, Origin of hot springs, Classification of hot springs, Water property and geology, Hydrogen and oxygen isotope ratio

<sup>1)</sup> 信州大学大学院工学系研究科 〒390-8621 長野県松本市旭 3-1-1. 現所属 : 栗田工業(株) 開発本部 〒329-0105 栃木県下都賀郡野木町川田五丁山 1-1. <sup>1)</sup> Graduate School of Science and Technology, Shinshu University, 3-1-1 Asahi, Matsumoto-shi, Nagano-ken 390-8621, Japan. Current Position : Research and Development Division, Kurita Water Industries Ltd, 1-1 Gochoyama, Kawada, Nogi-machi, Shimotsuga-gun, Tochigi-ken 329-0105, Japan

<sup>2)</sup> 信州大学理学部(名誉教授) 〒390-8621 長野県松本市旭 3-1-1. 連絡先 : 〒389-0812 長野県千曲市羽尾 1309. <sup>2)</sup> Faculty of Science, Shinshu University (Professor Emeritus), 3-1-1 Asahi, Matsumoto-shi, Nagano-ken 390-8621, Japan. Contact address : 1309 Haneo, Chikuma-shi, Nagano-ken 390-0812, Japan.

## 要 旨

長野県野沢温泉村の温泉地域内の温泉水の泉質と同位体組成を調査した。温泉水の起源は酸素、水素の同位対比の測定から天水であることが明らかにされた。温泉水は溶存陰イオンの中で塩化物イオンの占める割合が高い熱水系グループと、相対的に低いグループの2つに分けられた。低濃度の熱水系グループの温泉水の化学組成は高濃度のグループと地表水との混合によって説明できないことから、それぞれ独立した供給源があるものと推定された。さらに、同一の熱水系グループに含まれるイオン濃度組成の変動から、2つの源温泉水（高いイオン濃度高温水と低いイオン濃度低温水）の混合により化学組成が規制されていることが明らかになった。野沢温泉地域では、2つの熱水系グループがそれぞれ異なる2つの源温泉水を持っていると推定された。温泉地域は毛無山火山と水尾山火山からの噴出岩類が境する谷に位置する。相対的に塩化物イオン濃度が高い「真湯」、「滝の湯」を含む源泉群から湧出する温泉水は、水尾山側の熱水系から供給されており、他のグループは毛無山側からと推定された。

キーワード：野沢温泉，温泉水の起源，温泉の分類，水質と地質，酸素・水素同位体比

## 1. はじめに

長野県下高井郡野沢温泉村の野沢温泉は湯量の豊富な高温泉の湧出地として知られている。第四紀火山である毛無山、水尾山の麓に位置することから (Fig. 1)、これらの火山が熱源と考えられる。Fig. 1 には、第四紀火山の位置と共に、野沢温泉と周辺の高温泉として知られる山ノ内温泉や草津温泉の位置も示した。野沢温泉地域内には、源泉が数多く存在する。これらの源泉から湧出する温泉水の泉質および同位体組成の特徴を調べ、温泉水の起源および野沢温泉地域内での泉質の違いの原因について考察する。

## 2. 試料採取と分析データ

野沢温泉地域の泉質データは、野口 (1967) により長野県北部・東部の温泉の化学成分に関する研究報告の中で公表報告されているがデータ数は多くない。江守 (2008) は 2007 年 5 月～11 月にかけて多数の試料の分析を行っているので、ここでは江守 (2008) の分析データを使用した。試料採取と現場での測定が行なわれた源泉および源泉群の位置を Fig. 2 に示す。この図には 5 地点が図示されているが、その中に 8 グループの源泉が含まれている (グループ名および共同浴場名と図中の地点との関係は後述)。また、破線とケバの付いた実線は活断層である (宮内ら, 2000) が、野沢温泉からは地表で 2 km ほど離れている。

ナトリウムイオン、アンモニウムイオン、カリウムイオン、カルシウムイオン、マグネシウムイオン、塩化物イオン、硫酸イオンの濃度分析にはイオンクロマトグラフを用いた。

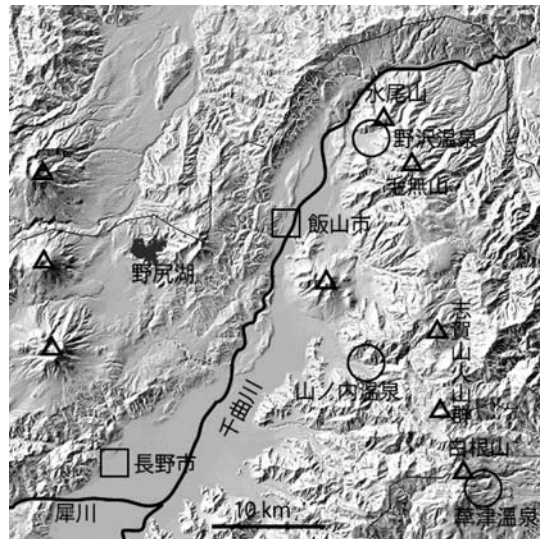


Fig. 1 Topographic map of study area (map from Sugimoto, 2004).

○ : High temperature hot springs, △ : Quaternary volcanoes. □ : Main cities

図 1 調査地域の地形図 (図は杉本, 2004 に加筆)  
○は主な高温温泉地域, △は主要な第四紀火山,  
□は主要都市。

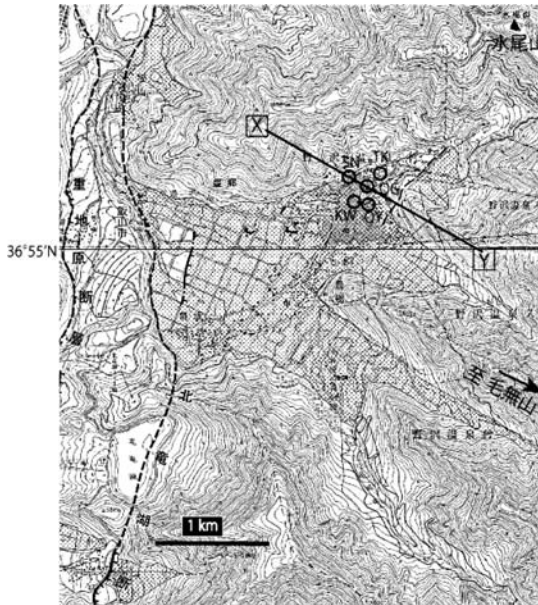


Fig. 2 Location map of hot springs.  
Modified map of Miyauchi *et al.* (2000)  
TK : Takinoyu, SN : Shinyu, KW : Kawarayu,  
OG : Ogama site (5 hot springs : Shimogama,  
Takenoshigama, Marugama, Yudegama, Oo-  
gama), OY : Ooyu, X-Y : Line for cross section  
for Fig. 11, and Dashed lines and hatched  
lines : Active faults.

## 図 2 源泉位置図

地図は宮内ら (2000) に加筆  
TK : 滝の湯, SN : 真湯, KW : 河原湯, OG :  
麻釜地域 (5 源泉名 : 下釜, 竹伸釜, 丸釜, 茹  
釜, 大釜), OY : 大湯, X-Y : Fig. 11 の断面  
図に対応するライン, 破線とケバの付いた線 :  
活断層.

トリウムイオンであり, 陰イオンでは硫酸イオンである.

(4) 酸化還元電位 (ORP) は, 全て還元的である.

これらのデータを, グループ毎に記号を統一し, トリリニアダイアグラムに示した (Fig. 4a). Fig. 4a の中心にあるキーダイアグラムでは, すべてのデータがほぼ一直線上に分布している. このことから, 化学組成の異なる 2 種類の源温泉水の混合か, あるいは 1 種類の源温泉水と地下水や地表水との混合によって泉質が変化している可能性が示唆される. しかし, 同図中右下の陰イオンの三角ダイアグラムでは, データが一直線上に分布していないことから, 温泉水の化学組成を変化させるメカニズムはそれほど単純でないことも伺われる.

野沢温泉と同じく高温の温泉として知られ, 比較的近距离にある山ノ内温泉, 草津温泉の泉質と比較してみる. Fig. 4b は, 本研究による野沢温泉のデータに, 山ノ内温泉と草津温泉の分析値を加えたトリリニアダイアグラムである. 山ノ内温泉のデータは, 野口 (1967) による 1967 年の 60°C 以上の源泉分析データであり, 草津温泉のデータは, 山本ら (1997) の草津湯畑における 1965-1994 年間の経時変動を含む分析データである. この図から, 温泉地による泉質の違いは大きいことが分

アルカリ度は pH 4.8 中和滴定法によった. また, アルカリ度は重炭酸イオンとした. なお, 水温, pH, 酸化還元電位, 電気伝導度は現場で測定した. Table 1 には泉質データを各源泉および源泉群毎に 8 つのグループに分けて示した. グループ名は, 配湯源になっている源泉名がつけてあり, その右欄の浴場名はそこから引湯されている浴場を示す. なお, OG のついている複数の配湯源は麻釜 (おがま) 地区にある. 隣接しているため, Fig. 2 では OG として 1 点で表現している. 比較のために, 麻釜地区に湧出している地下水の測定値 (中村, 2008) も加えた. ただし, 中村 (2008) にはアルカリ度の測定値はない. いずれも誤差は 1% 以下である.

Fig. 3 は, 源泉 (手前から竹伸 (たけのし) 釜, 丸釜, 大釜, 茹釜) の自然湧出状態を示す写真である.

## 3. 結果および考察

### 3.1 泉質の特徴

Table 1 に示した分析結果から次のことが分かる.

- (1) 水温はおおよそ 60°C から 90°C 程度と高温である.
- (2) pH はおおよそ 7.5 から 8.5 程度と弱アルカリ性である.
- (3) 陽イオンの中で最も濃度の高いのはナ

Table 1 The concentrations of major dissolved components of hot spring waters in the Nozawa Onsen area.

表 1 野沢温泉地域の温泉水に溶けている主要成分濃度

グループ (地図記号)	源泉 (浴場)	調査日	Cation(mg/L)					Anion(mg/L)					水温 (°C)	ORP (mV)	pH	安定同位体比(‰)	
			Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	δD				δO <sup>18</sup>	
大釜 (OG)	大釜	2007/10/9	172.5	2.7	4.3	72.8	ND	91.3	518.1	26.2	85.2	-236.8	8.48	-	-	-	-
	大釜	2007/11/9	167.2	1.3	5.1	69.4	ND	89.4	494.4	34.8	80.5	-246.4	8.49	-12.36	-77.9	-	-
	大釜	2007/5/9	162.6	1.9	4.3	59.8	ND	90.7	471.1	34.8	70.9	-103.4	8.06	-	-	-	-
	大釜	2007/7/19	160.9	2.4	4.1	57.6	ND	92.6	480.6	20.7	72	-162.9	8.04	-	-	-	-
	大釜	2007/7/26	150.0	1.8	3.5	52.4	ND	90.2	466.0	34.8	72	-142.1	8.08	-	-	-	-
	大釜	2007/10/9	154.8	1.9	3.7	55.1	ND	83.0	420.8	30.5	66.4	-149.9	8.10	-	-	-	-
	大釜	2007/11/9	151.9	1.2	3.3	54.7	ND	82.3	410.7	41.5	72.2	-191.2	8.23	-12.43	-82.3	-	-
	大釜	2007/5/9	156.2	1.4	5.2	63.5	ND	91.8	499.6	51.9	70.3	-93.6	8.03	-	-	-	-
	大釜	2007/7/19	136.8	1.7	3.2	47.4	ND	73.8	406.6	21.4	58.5	-122.2	8.56	-	-	-	-
	大釜	2007/7/26	139.6	1.2	3.1	48.1	ND	79.0	434.7	28.7	62.8	-113.4	8.59	-	-	-	-
如釜・下釜 (OG)	如釜	2007/10/9	166.6	2.1	4.5	66.6	ND	87.9	464.6	30.5	60.9	-140.8	8.15	-	-	-	-
	如釜	2007/11/9	161.4	1.2	3.9	63.1	ND	87.1	456.4	28.7	71.2	-158.5	8.23	-	-	-	-
	如釜	2007/10/9	171.1	1.8	5.1	73.3	ND	92.9	525.2	25.6	86.5	-228.8	8.49	-	-	-	-
	如釜	2007/11/9	172.0	1.8	4.4	71.6	ND	87.6	492.6	35.4	82	-258.5	8.51	-12.52	-76.9	-	-
	下釜	2007/10/9	165.0	2.1	3.9	70.7	ND	90.3	496.2	25.6	79.8	-187.8	8.38	-	-	-	-
	下釜	2007/11/9	164.3	1.0	3.7	69.8	ND	96.9	535.3	33.6	81.5	-238.1	8.46	-12.21	-85.1	-	-
	下釜	2007/5/9	164.6	0.9	5.4	76.4	ND	99.1	553.6	15.3	76	-77.05	7.48	-	-	-	-
	下釜	2007/7/19	174.3	1.7	4.4	73.7	ND	101.2	564.4	22.6	71	-41.34	8.11	-	-	-	-
	下釜	2007/7/26	167.6	2.4	4.1	70.1	ND	103.1	577.4	23.8	70.9	-45.34	8.13	-	-	-	-
	下釜	2007/10/9	167.2	2.0	3.9	70.2	ND	88.6	493.2	17.7	70	25.434	7.76	-	-	-	-
丸釜 (OG)	丸釜	2007/11/9	166.8	1.5	4.3	68.9	ND	91.6	490.9	20.1	75.3	-91.5	7.90	-12.34	-82.3	-	-
	丸釜	2007/5/9	173.3	2.1	5.2	74.4	ND	100.5	560.3	27.5	75.3	-117.3	8.23	-	-	-	-
	丸釜	2007/7/19	180.2	2.0	4.7	75.5	ND	104.2	580.3	23.8	75.5	-172.3	8.38	-	-	-	-
	丸釜	2007/7/26	168.5	0.2	3.9	70.5	ND	99.1	551.3	28.7	75.3	-167.3	8.40	-	-	-	-
	丸釜	2007/10/9	173.3	2.3	4.7	72.7	ND	93.3	521.9	25.0	74.5	-177.9	8.36	-	-	-	-
	丸釜	2007/11/9	164.8	3.3	4.4	69.2	ND	88.0	480.5	29.3	72.5	-162.4	8.40	-	-	-	-
	丸釜	2007/5/9	166.9	1.4	4.1	78.7	ND	101.2	574.0	31.7	79	-119.3	8.30	-	-	-	-
	丸釜	2007/7/19	175.3	2.1	4.4	74.2	ND	97.2	544.3	13.4	79.8	-162.5	8.32	-	-	-	-
	丸釜	2007/7/26	166.8	2.0	2.5	44.9	ND	98.4	570.7	54.3	79	-155.5	8.35	-	-	-	-
	丸釜	2007/10/9	174.3	3.2	4.4	76.5	ND	92.7	510.5	20.7	77.5	-169.1	8.30	-	-	-	-
丸釜 (OG)	丸釜	2007/11/9	159.8	1.6	3.9	66.1	ND	89.4	505.2	30.5	74.4	-237.8	8.34	-12.60	-87.5	-	-
	丸釜	2007/10/9	173.7	2.9	4.5	73.1	ND	92.7	500.9	29.9	76	-192	8.41	-	-	-	-
	丸釜	2007/11/9	164.8	2.5	3.7	69.4	ND	90.0	483.2	36.6	81.6	-229.2	8.52	-12.08	-75.0	-	-
	丸釜	2007/5/9	123.1	1.1	3.2	57.8	ND	74.0	416.7	23.2	78.9	-150.5	8.31	-	-	-	-
	丸釜	2007/7/19	151.1	2.2	4.1	65.7	ND	84.9	480.3	12.8	78	-172	8.40	-	-	-	-
上寺湯	上寺湯	2007/7/26	124.7	2.3	2.9	54.4	ND	75.2	413.8	23.8	77.7	-113.4	8.37	-	-	-	-
	上寺湯	2007/10/9	174.7	2.7	4.4	75.1	ND	90.8	509.0	26.8	72.5	-135.4	8.35	-	-	-	-
	上寺湯	2007/11/9	165.6	1.5	4.3	69.1	ND	86.5	468.7	28.7	68.8	-224.7	8.30	-	-	-	-

Table 1 (Continue)  
表 1 (続き)

グループ (地図記号)	源泉 浴場	調査日	Cation(mg/L)				Anion(mg/L)				水温 (°C)	ORP (mV)	pH	安定同位体比(‰)	
			Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>				δD	δO <sup>18</sup>
竹伸釜 (OG)	源泉	2007/10/9	149.1	2.0	3.4	48.5	ND	80.8	411.3	35.4	69.8	-175.4	8.32	-	-
		2007/11/9	144.1	1.5	3.5	45.6	ND	80.4	391.5	43.3	70.2	-222.7	8.38	-12.66	-86.8
		2007/5/9	136.9	2.9	2.9	46.5	ND	79.0	392.6	76.3	64.7	-120.6	8.11	-	-
大湯 (OY)	大湯	2007/7/19	138.9	2.9	3.1	43.5	ND	81.7	388.8	60.4	64.7	-171.6	8.07	-	-
		2007/7/26	138.2	1.5	3.4	42.3	ND	79.3	379.0	76.3	64.2	-153.6	8.19	-	-
		2007/10/9	132.1	1.5	2.8	39.4	ND	72.7	317.6	62.8	63	-148.4	8.18	-	-
滝の湯 (TK)	滝の湯	2007/11/9	128.2	1.7	3.3	35.2	ND	71.3	314.5	71.4	60	-173.1	8.26	-12.36	-80.5
		2007/5/9	170.6	2.6	3.0	47.3	ND	121.4	453.3	108.6	71.6	-130.3	7.86	-	-
		2007/7/19	154.0	1.5	2.1	39.7	ND	111.1	392.3	36.0	72.2	-173.3	7.85	-	-
河原湯 (KW)	河原湯	2007/7/26	147.9	1.6	2.7	38.0	ND	110.2	397.3	87.8	71.8	-159.1	7.89	-	-
		2007/10/9	147.4	1.6	2.8	36.1	ND	97.8	332.6	75.6	69.9	-171.5	7.78	-	-
		2007/11/9	170.6	1.5	2.9	40.4	ND	108.0	322.5	106.1	64.1	-196.2	7.75	-12.70	-87.7
真湯 (SN)	真湯	2007/5/9	128.4	2.4	4.1	56.8	ND	71.4	393.8	24.4	62.8	-101.7	8.15	-	-
		2007/7/19	162.1	1.5	2.7	33.5	ND	93.9	252.6	27.5	63	-173.1	8.12	-	-
		2007/7/26	148.2	1.9	3.0	41.1	ND	86.6	415.8	91.5	62.3	-170.2	8.16	-	-
麻釜湧水	麻釜湧水	2007/10/9	148.4	1.6	3.3	42.2	ND	78.7	328.4	81.7	61.9	-179.6	8.08	-	-
		2007/11/9	143.4	1.2	3.2	39.5	ND	79.9	347.4	89.1	58.1	-181.7	8.00	-12.27	-84.3
		2007/5/9	160.2	2.4	3.0	36.2	ND	108.7	384.4	87.8	59.5	-78.18	7.49	-	-
麻釜湧水	麻釜湧水	2007/7/19	141.3	1.7	2.5	28.3	ND	95.3	293.9	72.0	55.8	-122.7	7.59	-	-
		2007/7/26	139.2	1.6	2.4	29.6	ND	95.0	335.5	81.1	54.3	-126.2	7.57	-	-
		2007/10/9	139.9	2.0	2.5	26.8	ND	92.6	224.7	84.8	56.2	-147.3	7.62	-	-
麻釜湧水	麻釜湧水	2007/11/9	143.9	1.5	2.5	25.8	ND	95.7	230.8	89.1	54	-173.7	7.64	-12.49	-79.3
		2007/5/9	2.30	0.18	0.74	4.37	1.08	2.49	0.86	-	8.7	351.0	6.98	-	-
		2007/7/19	2.35	0.26	0.84	4.41	1.04	2.56	0.72	-	9.5	172.0	7.59	-	-
麻釜湧水	麻釜湧水	2007/10/9	2.12	0.09	0.65	3.62	0.96	2.12	0.60	-	7.6	441.7	7.19	-	-
		2007/11/9	2.07	0.04	0.67	3.50	0.96	1.98	0.71	-	6.9	207.2	7.71	-	-



Fig. 3. A view of upwelling of hot springs at Ogama site.  
From the front : Takenoshigama, Marugama, Yudegama and Oogama

図 3 麻釜地区の源泉の湧出状態

手前から竹伸釜, 丸釜, 茹釜, 大釜

mg/L, 山ノ内温泉は 702 mg/L, 草津温泉は 584 mg/L であり野沢温泉は濃度が低い。陽イオンを代表するナトリウムイオンは、野沢温泉 180 mg/L に対して、草津温泉はかなり低く 62 mg/L で、山ノ内温泉は少し高く 237 mg/L である。

### 3.2 泉質から推定される源温泉水について

野沢温泉に湧出する温泉水の起源を知るために温泉水の酸素、水素同位体比を測定した (Table 1)。酸素同位体比と水素同位体比の関係を Fig. 5 に示す。実線 B は Craig (1961) による天水線 ( $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ ) である。Craig (1961) は世界の降水の同位体比を調べ、ほとんどすべてが天水線 B 上に分布することを指摘した。点線 A ( $\delta D = 8\delta^{18}O + 26$ ) は、松葉谷・酒井 (1976) による直線であり、日本の降水は A と B の間にあるとした。Fig. 5 には野沢温泉における本研究のデータに加えて山ノ内温泉 (松葉谷ら, 1980)、草津温泉 (山本ら, 1997) のデータも示す。データは A と B の間にあり、温泉水は降水起源であることが示されている。

世界各地の火山噴気の同位体比の測定から、Giggenbach (1992) は、安山岩質マグマの固結時に放出されるマグマ水の同位体比が  $\delta^{18}O = 5 \sim 10\%$ 、 $\delta D = -10 \sim -30\%$  の範囲にあると指摘した。その範囲を Fig. 5 に示す。破線 C は、安山岩マグマ水と温泉地のデータを結ぶものであり、マグマ水が混入すれば温泉水のデータはこの破線 C 上に分布する。野沢温泉は第四紀火山の近傍にあり、マグマから放出された水が含まれている可能性があったが、データからは混入の証拠は認められなかった。なお、草津白根山頂にある湯釜の温水の同位体比はこの破線上にあることが知られている (山本ら, 1997)。

1 つの高温の源温泉水に、低温の地表水が種々の割合で混じることによって、各源泉での化学組成の変化が生じていると仮定すれば、水温とイオン濃度とは直線関係になることが予想される。また、各源泉では季節を変えて複数回の測定データを得ているが、これらの変動が混合割合の違いだけに依存しているとすれば、直線関係を示すはずである。Fig. 6 に水温と陰イオンの中で最も濃度の高い硫酸イオンとの関係を示す。

データは概ね一直線上に分布しており、濃度の低い低温の地下水 M と、濃度の高い高温の源温泉

かる。一方で野沢温泉地域内の源泉毎の泉質の違いは、それと比べて小さいことも分かる。Fig. 4b に示されるように、野沢温泉は、陰イオンのなかで硫酸イオンの占める割合が高いこと、陽イオンではマグネシウムイオンがほとんどゼロであることが特徴である。なお、草津温泉は硫酸イオンの割合が高く、陽イオンのなかでマグネシウムイオンの占める割合も高い。山ノ内温泉は他の温泉地と比べて、塩化物イオンの割合が高い特徴を示している。

濃度の絶対値は源泉によってかなり大きな違いがあるが、それぞれの温泉地の最大値と比較してみると、野沢温泉の硫酸イオン濃度 (577 mg/L) は、山ノ内温泉 (332 mg/L) よりやや高めで、草津温泉 (1,470 mg/L) の 1/3 程度である。塩化物イオンは野沢温泉が 121

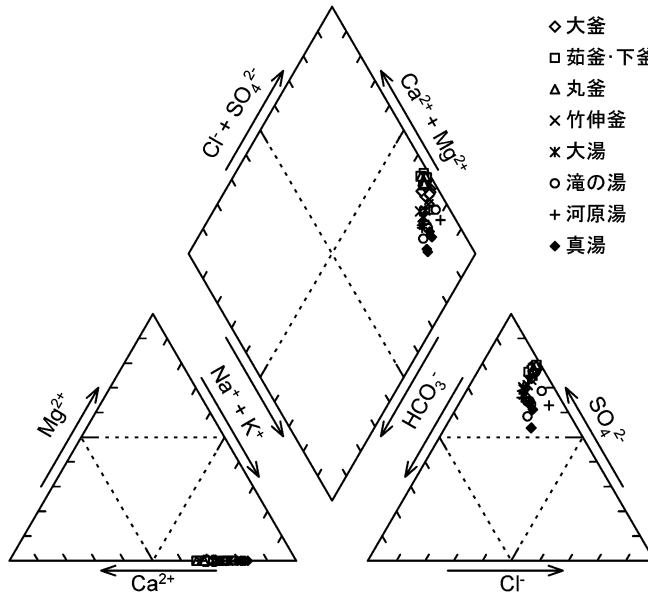


Fig. 4a Trilinear diagram for Nozawa Onsen hot spring water samples.  
 図 4a 野沢温泉の温泉水のトリリニアダイアグラム

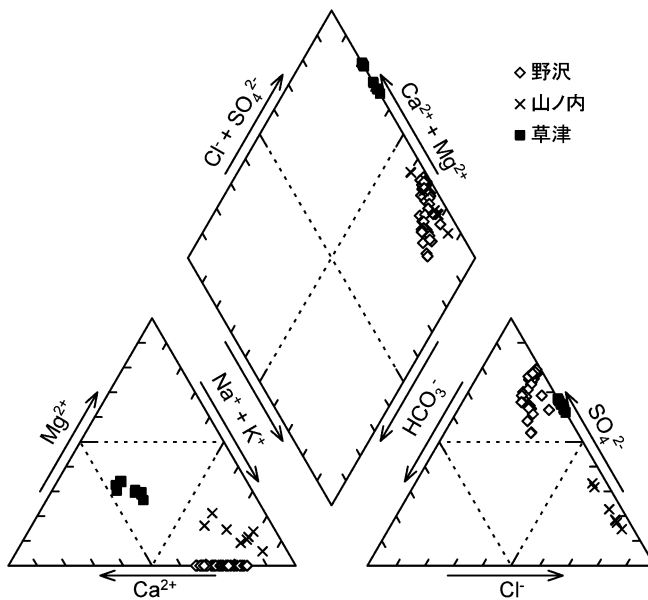


Fig. 4b Trilinear diagram for Nozawa Onsen, Kusatsu Onsen and Yamanouchi Onsen hot spring water samples.  
 図 4b 野沢温泉, 草津温泉, 山ノ内温泉の温泉水のトリリニアダイアグラム

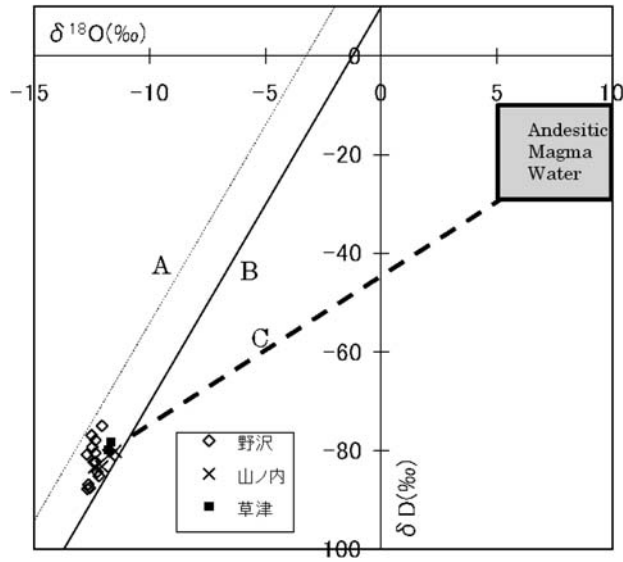


Fig. 5 Relation between  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  for Nozawa Onsen, Kusatsu Onsen and Yamanouchi Onsen hot spring water samples.

Dotted line A : Upper limit line for Japan meteoric water (Matsubaya and Sakai, 1976), Solid line B : Global meteoric water line (Craig, 1961), Dashed line C : Mixing line of meteoric water and andesitic magma water.

図 5 野沢温泉, 草津温泉, 山ノ内温泉の温泉水の  $\delta^{18}\text{O}$  と  $\delta\text{D}$  の関係

実線 A : 日本の天水の上限線 (松葉谷・酒井, 1976), 点線 B : 世界の天水線 (Craig, 1961), 破線 C : 天水と安山岩マグマ水との混合線.

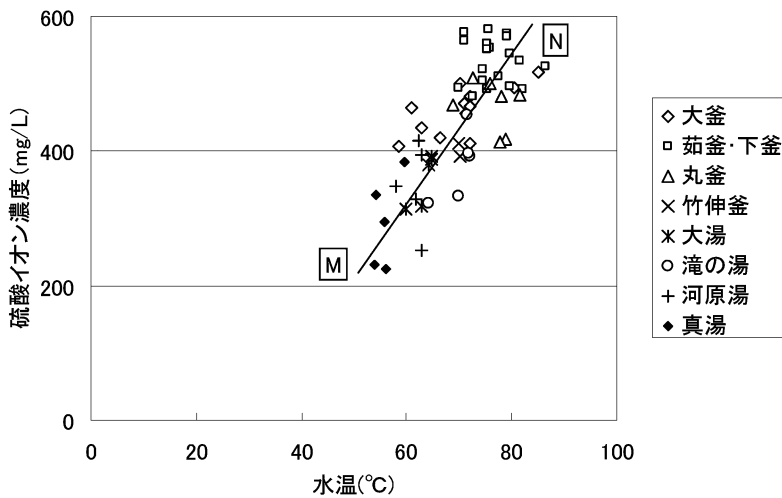


Fig. 6 Relation between water temperature and concentrations of sulfate ion.

図 6 水温と硫酸イオン濃度との関係.

水 N との混合と見る事ができる. しかし M と N の位置は, Fig. 6 の直線上あるいはその延長線上のどこにあるかは確定できない. 麻釜付近に湧出している冷湧水は Table 1 に示すように 10°C 以下で, 硫酸イオン濃度は 0.6~0.9 mg/L 程度である. この冷湧水を M とするには温度が低い. つ



まり、この直線上では硫酸イオン濃度が0になっても温度は30℃前後となる。したがって、硫酸イオン濃度がこの冷湧水と同程度で、温度が30℃前後の低温の源温泉水Mと、深部から供給された高温の源温泉水Nとが混合して各源泉から湧出していると考えたと分析データが説明できる。

先に述べたように、陰イオンの三角ダイアグラム (Fig. 4a の右下) では、測定データが直線状に分布しないことから、まず、陰イオンの中で、最も濃度の高い硫酸イオンと塩化物イオンとの関係を調べる。Fig. 7では、「滝の湯」と「真湯」は他と異なった傾向を示し、塩化物イオンと硫酸イオンとの関係が1つの近似直線ではなく、2つに分かれる。即ち、塩化物イオンの濃度変化も説明しようとする、イオン組成比の異なった2種類の高温の源温泉水 (BとD) と、2種類の低温の源温泉水 (AとC) の4種類のエンドメンバーが存在しなければならない。ここで、注目すべきことは、この2本の近似直線がほぼ平行であることである。つまり、もし低濃度側で直線が交わるとすればAとCが同じ源温泉水と考えても良く、それとは逆に、高温側で交わるとすればBとDが同一と考えても良いことになるが、交わらないとすれば、低濃度2種類、高濃度2種類、合わせて4種類の源温泉水が必要となる。ここで、河原湯のデータの内1つがC-D直線側にあるがその理由は現在のところ不明である。

次に、Fig. 8に陽イオンの中で最も濃度の高いナトリウムイオンと陰イオンで最も濃度の高い硫酸イオンとの関連を示した。Fig. 7で相対的に高い塩化物イオン濃度を示した「真湯」と「滝の湯」に注目すると若干ナトリウムイオンが高い側にシフトしているように見えるが、Fig. 7で示されたような明瞭な違いは認められなかった。

次に塩化物イオンとナトリウムイオンとの関係をFig. 9に示す。「真湯」と「滝の湯」が他の源泉のデータと異なった範囲に分布しているのが分かる。このことは、低濃度の2種類の源温泉水と高濃度の2種類の源温泉水が存在することを支持している。しかし、Fig. 9の2本の直線は、低濃度側の塩化物イオン濃度にしておよそ60 mg/L、ナトリウムイオン濃度にしておよそ100 mg/L付近で交わるように見える。もし交わるのであれば、高濃度側の源温泉水は2種類であるが、低濃度側の源温泉水は1種類でもよいということになる。これはFig. 7で推定された低濃度側、高濃度側それぞれ少なくとも2種類の源温泉水が必要とされることとは一見矛盾するが、Fig. 9では、2つの

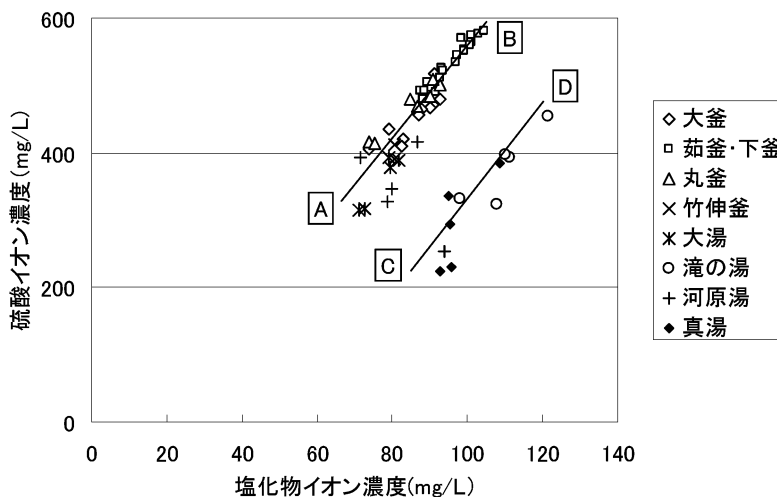


Fig. 7 Relation between concentrations of chloride ion and sulfate ion.

図 7 塩化物イオンと硫酸イオンの関係。

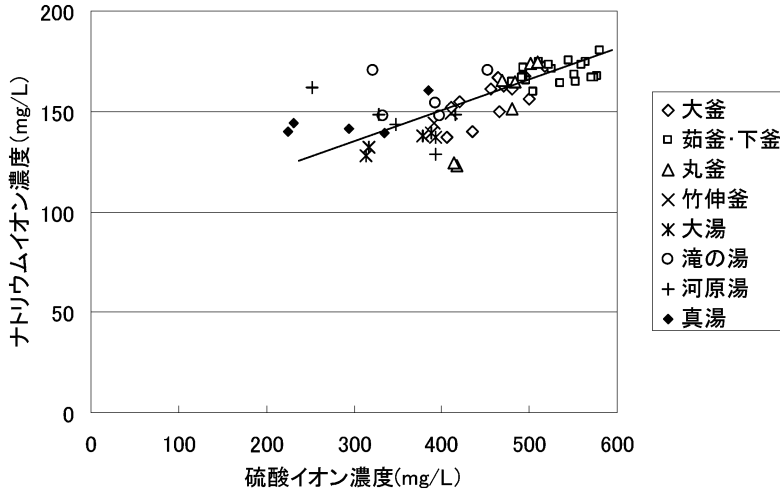


Fig. 8 Relation between concentrations of sulfate ion and sodium ion.

図 8 硫酸イオンとナトリウムイオンとの関係.

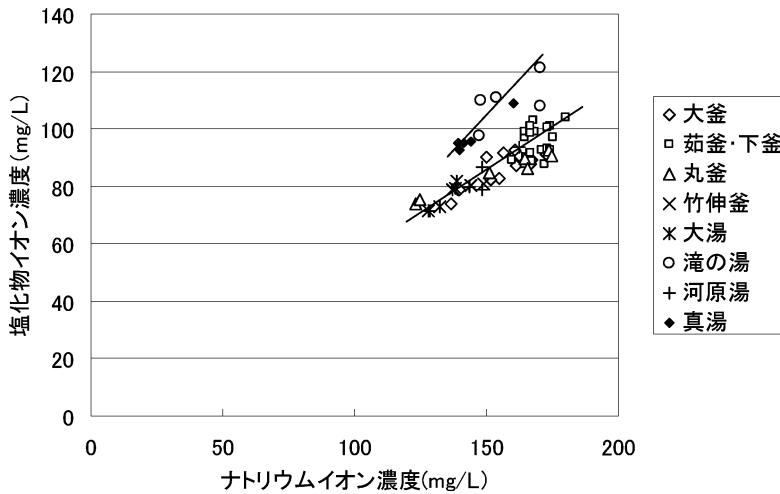


Fig. 9 Relation between concentrations of chloride ion and sodium ion.

図 9 塩化物イオンとナトリウムイオンとの関係.

グループの混合ラインが塩化物イオン濃度 60 mg/L 付近でクロスしていると考えたと説明がつく。以上より、野沢温泉地域の源温泉水は少なくとも 4 種類あると推定される。

### 3.3 泉質と地質から推定される熱水流動モデル

野沢温泉は Fig. 1, および Fig. 2 に示すように 2 つの第四紀火山 (毛無山, 水尾山) から噴出した噴出岩類の境界部で谷地形の地域に位置する。金子・土屋 (2001) はこの 2 種類の火山噴出物を、毛無山火山噴出物, 水尾・大入山火山噴出物と命名している。以下では毛無山火山噴出物, 水尾山火山噴出物と記す。金子・土屋 (2001) による地質図を Fig. 10 に示す。この地質図の新期の火

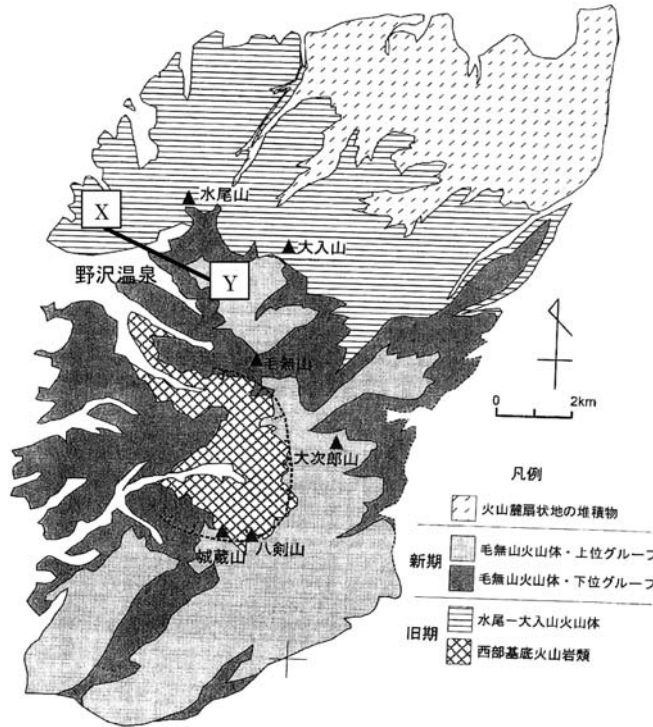


Fig. 10 Distribution of rocks erupted from Kenashiyama volcano and Mizuo-Ooiriyama volcano (Kaneko and Tsuchiya, 2001).

Black and gray areas : Rocks from Kenashiyama, Horizontal line area : Rocks from Mizuo-Ooiriyama, X-Y : Line for cross section for Fig. 11

図 10 毛無山火山と水尾-大入山火山から噴出した岩石分布図 (金子・土屋, 2001)  
 黒と灰色域:毛無山からの岩石, 横線の領域:水尾-大入山からの岩石, X-Y:  
 Fig. 11 の断面図に対応するライン

山噴出物が毛無山火山噴出物(噴出時期, 1.3-1.0 Ma, 金子ら, 1991)に当たり, 旧期の上部が水尾山火山噴出物(1.7-1.6 Ma, 金子ら, 1991)に当たる. 各源泉の温泉水は, これらの火山噴出物内を流動して湧出している. 先に述べたように各源泉から湧出する温泉水は, 酸素・水素同位体比から, 天水起源である. また, 本地域で湧出する温泉水の酸化還元電位は, 著しく還元的であり, 地表水の混入はないものと推定される. したがって, 毛無山と水尾山の二つの山体下に貯留・流動する温泉水の化学組成は, 周囲の岩石の違いと深部から供給される高温の源温泉水の組成の違いに規制されるものと推定される.

本地域の地下の地質構造の詳細については不明であるが, 地質図から推定すると, 両火山噴出物の境界部では相対的に時代の古い水尾山側の何枚かの火山噴出物の上に, 毛無山の火山噴出物が堆積している. Fig. 7 で, 相対的に塩化物イオン濃度が高いC-D線上にある源泉の「真湯」, 「滝の湯」は, 水尾山側に位置する. このことから, C-D線上にある温泉水グループは水尾山体に, A-B線上にあるグループは毛無山体にその起源が推定される.

以上のことから, Fig. 10 の X-Y, および Fig. 2 の X-Y の断面に沿う熱水流動モデルを模式的に描くと Fig. 11 のようになる. 水尾山および毛無山, それぞれの火山噴出物中に独立した熱水系が形成されていて, 熱水系間相互の混合は生じてないものと推定される.

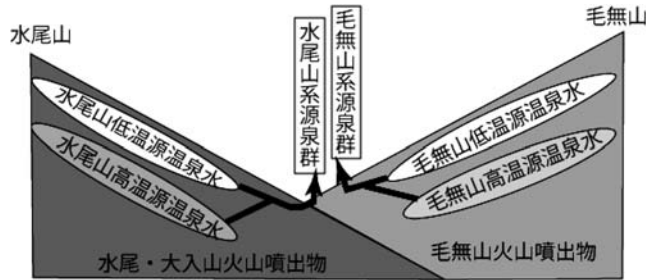


Fig. 11 Conceptual model of geothermal water system in Nozawa Onsen

図 11 野沢温泉の熱水系概念モデル

湧出量は A-B 線上にある源泉によるものが大きな比率を占めるように見える。しかし、その違いを定量的に把握することは困難である。

金子・土屋 (2001) によると、毛無山および水尾山火山噴出物は、どちらもソレイト質の普通輝石、紫蘇輝石を斑晶に持つ安山岩質溶岩であり、化学組成としてはほとんど違いがない。したがって、源温泉水の泉質の違いは、帯水層を構成する主要岩石種の違いよりも、地層中の揮発成分、あるいは深部から上昇しているガス成分のわずかな違いに起因している可能性が高い。しかし、源温泉水の組成の違いは大きなものではないのでその原因を特定することはむずかしい。

## 6. ま と め

長野県野沢温泉村の温泉地域内には、高温の源泉が数多く存在する。これら源泉の泉質を調査し考察した。結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 源泉水の酸素、水素の同位対比から、温泉水の起源は天水であった。
- (2) 溶存イオンの中で塩化物イオンの占める割合が高い源泉群と、低い源泉群の 2 系列に分けられる。
- (3) 同一の源泉群に含まれる各源泉は、2つの源温泉水（高イオン濃度高温温泉水と低イオン濃度低温温泉水）の混合率の変化により化学組成が変わる。混合率は源泉毎に異なるだけでなく経時変化も示す。
- (4) 野沢温泉は毛無山体側と水尾山体側にそれぞれ独立した熱水系を形成していて、それぞれの熱水系間での混合は生じてないものと推定された。相対的に塩化物イオン濃度が高い源泉の「真湯」、「滝の湯」は、水尾山系列、他の源泉グループは毛無山系列と推定される。

## 謝 辞

分析データを得るにあたり、次の方々にお世話になった。ここに記して謝意を表します。富山大学理学部 (故) 佐竹洋教授には酸素・水素同位体の測定に IR-MS を使用させていただきだけでなく、前処理法、使用法、分析データの解釈など懇切なご指導をいただいた。試料採取にあたり、野沢温泉の管理にかかわる管理会社、運営会社、旅館、地縁団体の方々にお世話になった。本論文で使用したデータは、著者の 1 人江守建太の信州大学大学院工学系研究科修士学位論文として発表したものである。当時在学学生の中村沙絵氏には試料採取、溶存成分分析に協力いただいた。査読者による指摘と修正により本論文が大きく改善されました。感謝いたします。

## 引用文献

Craig, H. (1961) : Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, **133**, 1702-1703.

江守建太 (2008) : 長野・新潟県境東部の温泉の特徴. 信州大学大学院工学系研究科地球生物圏科学専攻修士論文.

Giggenbach, W.F. (1992) : Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **113**, 495-510.

金子隆之, 清水 智, 板谷徹丸 (1991) : 信越高原地域に分布する第四紀火山の K-Ar 年代. 地震研究所彙報, **66**, 299-332.

金子隆之, 土屋信之 (2001) : 毛無火山噴出物. 柳沢幸夫, 金子隆之, 赤羽貞幸, 栗田泰夫, 釜井俊孝, 土屋信之の編著「5 万分の 1 地質図幅」, 56-80, 地質調査所.

松葉谷治, 酒井 均 (1976) : 地表水の水素および酸素同位体の挙動 (要旨). 日本地球化学会年会要旨集 1976. 121-122.

松葉谷治, 酒井 均, 日下部実, 佐々木昭 (1980) : 長野県の温泉についての同位体化学的調査報告. 岡山大学温泉研報告, **50**, 17-24.

宮内崇裕, 東郷正美, 堤 浩之, 金幸 隆, 武田大典, 宇根 寛, 小田切聡子 (2000) : 1 : 25,000 都市圏活断層図, 飯山, 国土地理院.

中村沙絵 (2008) : 野沢温泉地域の温泉水溶存イオン組成, 遊離ガス組成と火山および新潟県中越沖地震との関連. 信州大学理学部物質循環学科卒業論文.

野口喜三雄 (1967) : 長野県の温泉の化学分析. *温泉科学*, **18**, 47-64.

杉本智彦 (2004) : カシミール 3D 図解実例集 1 (初級編). 実業之日本社, DVD-ROM.

山本雅弘, 小池孝治, 榎井文人, 塩田敦士, 釣田英利, 大塚晃弘, 野上健治, 小坂丈予 (1997) : 草津白根山東麓の温泉の同位体地球化学. *温泉科学*, **47**, 68-75.