報 告
 Technical Report

新潟地域における温泉水と付随ガスの地球化学

加藤 進^{*†}・岩野 裕継^{**}

(Received February 14, 2019 ; accepted April 21, 2019)

Geochemistry of waters and natural gases from hot springs in Niigata Prefecture, Japan

Susumu Kato and Hirotsugu Iwano

Abstract : Analytical results of waters and natural gases from seven hot spring wells in Niigata Prefecture are presented. Methane is the dominant hydrocarbon in these spring gases and the gases in the Nishiyama Formation contain about 15% CO₂. The hydrocarbon gases in the Shiya and Teradomari formations are of thermogenic origin and partly biodegraded. On the other hand, those in the Nishiyama Formation are of microbial origin or mixed origin of microbial and thermogenic similar to production gases from oil and gas fields around the wells.

The spring waters are derived from the fossil seawater. Although those in the Nishiyama Formation are the same as formation waters from oil and gas fields in Niigata, those in the Shiya and Teradomari formations are distinguished from the formation waters based on I⁻/Cl⁻ and Br⁻/Cl⁻ ratios.

Lithium contents of the spring waters and the formation waters range from 0.1 to 12.3 mg/l and their Li⁺/Cl⁻ ratios are less than 0.001. Temperatures calculated from the Mg-Li geothermometer are higher than water temperatures in spring waters, but those are similar to reservoir temperatures in the formation waters.

Keywords : spring gas, spring water, formation water, fossil seawater, thermogenic, microbial, lithium, Mg-Li geothermometer

1. はじめに

日本の温泉はその成因ならびに物質の起源という観点から、グリーンタフ型、海岸温泉型、火山性型、および有馬型の 4 つの型に分類され、水の起源として天水、海水、化石海水（地層中に残っている堆積時の海水）、あるいはマグマ水などが考えられている（例えば、松葉谷, 1981）。

石油探鉱を目的として掘削された坑井から、温泉水（地層水）が産出することはよくあることであり、新潟地域では瀬波温泉、月岡温泉、松之山温泉などがその例である（千谷, 1928 ; 島津, 2001 ; 白石, 2005）。これらのうち、松之山温泉はジオプレッシャー型の温泉と考えられており（渡部ほか, 2009）、地球化学的によく研究されている（阿部・酒井, 1983 など）。

新潟地域における温泉の掘削深度は昭和 50 年代には 500 ~ 600 m 程度であったものが、昭和 60 年代から平成のはじめには 1,000 m 程度になり、現在では 1,000 ~ 1,500

m になっており（白石, 2005）、これらの温泉水は化石海水起源あるいはこれと天水（地表水）の混合したものと推定される。

北海道では油田塩水と温泉水の化学組成の違いが明らかにされており（太秦・那須, 1960）、新潟地域でも油・ガス田の地層水と化石海水起源の温泉水の化学組成や水素・酸素同位体組成を比較・検討することは、堆積物中における海水の続成変質過程を知る上で有効であると考えられる。特に、油・ガス田地層水では寺泊層の分析データが不十分であり（加藤, 2018）、温泉水がこれを補填する可能性もある。また、温泉水に付随するガスは水溶性天然ガスであり、ガスの組成や起源のデータは石油探鉱にも役立つはずである。

本稿では、幾つかの温泉水と付随ガスの分析結果を報告するとともに、既存論文から分析データを引用して、油・ガス田地層水と温泉水を地球化学的に比較・検討する。また、資源として、あるいは深部流体の起源を推定する指標として注目されているリチウムについても報告する。

2. 温泉水と付随ガスの分析結果

2.1 試料および分析

平成 16 ~ 17 年に図 1 に示す 7 温泉 8 坑井から、温泉水と付随ガスを採取した。温泉水の化学組成と水素・酸素同

* 株式会社地球科学総合研究所 JGI, Inc.

** 石油資源開発株式会社技術研究所 JAPEX Research Center, Japan Petroleum Exploration, Co. Ltd.

† Corresponding author : E-Mail : susumukato9@gmail.com

位体組成、および付随ガスのガス組成と炭素同位体組成を石油資源開発株式会社技術研究所において分析した。ガスの分析結果の一部は加藤ほか（2009）と加藤ほか（2016）で報告

している。

2.2 ガス分析結果

表1に付随ガス（以下、温泉ガス）のガス組成と炭素同位体組成（ $\delta^{13}\text{C}$ ）の分析結果を示す。温泉ガスは主にメタン（以下、 C_1 ）からなる炭化水素がほとんどを占め、下位の椎谷層（下部鮮新統）・寺泊層（上部中新統）では94%以上、上位の西山層（上部鮮新統～更新統）では84%程度を占める。エタン（ C_2 ）は全試料で、プロパン（ C_3 ）以上の炭化水素は4試料で検出されているが、ウェットネスは小さく、芝峠温泉（以下、芝峠）2号井と松之山温泉（松之山）で2%以上である。二酸化炭素（ CO_2 ）は西山層では15%程度と非常に多く、椎谷層や寺泊層では1%を超えるのは寺泊温泉（寺泊）、松之山、兎口温泉（兎口）である。窒素（ N_2 ）は空気補正後で1%を超えるのは寺泊岬温泉（寺泊岬）、松之山、天神の湯（天神）の3試料である。

C_1 の炭素同位体組成（ $\delta^{13}\text{C}_1$ ）からみると、椎谷層・寺泊層の温泉ガスは熱分解起源ガス（以下、熱分解ガス）であり、西山層の温泉ガスは微生物起源ガス（微生物ガス）あるいは微生物ガスと熱分解ガスの混合からなる（図2）。

$\delta^{13}\text{C}_2$ や $\delta^{13}\text{C}_3$ の値を見ると（表1）、ケロジェンの $\delta^{13}\text{C}$ 値（例えば-20‰；重川，1985）よりも重いものや CO_2 の $\delta^{13}\text{C}$ 値がプラスのものがあ、これらは微生物分解（biodegradation）を受けていることを示唆している。

2.3 水分析結果

松之山を除く6温泉7坑井から採取した温泉水の化学組成および水素・酸素の同位体組成（ δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ ）の分析結果を表2に示す。この表には既存文献や温泉分析書から引用した温泉水および西山油田と頸城油・ガス田地層水の分

図1 新潟地域における油・ガス田の分布および温泉井の位置

表1 付随ガスのガス組成と炭素同位体組成

No.	温泉名	産出層	ガス分析値 (vol%)							ウェットネス (%)	$\text{C}_1/(\text{C}_2+\text{C}_3)$	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)			
			O_2	N_2	C_1	C_2	C_3	C_{4+}	CO_2			C_1	C_2	C_3	CO_2
1	観音の湯	西山層	1.09	3.93	80.20	0.05	0.01		14.71	0.07	1,337	-56.9	-37.5	-25.9	-3.8
					84.43	0.05	0.01		15.49						
2	天神の湯	西山層	1.78	8.13	76.93	0.02			13.14	0.03	3,847	-64.8	-39.0		-7.0
				1.64	83.99	0.02			14.35						
3	寺泊岬温泉	寺泊層	1.40	8.12	90.29	0.07	0.01		0.11	0.09	1,129	-37.4	-14.6	-28.3	-8.7
				3.11	96.69	0.08	0.01		0.11						
4	寺泊温泉	寺泊層	0.07	0.85	93.33	0.14			5.61	0.15	667	-39.9	-22.9		18.4
				0.59	96.64	0.14			5.63						
5	芝峠温泉 1号井	椎谷層	0.25	1.72	96.64	0.71			0.68	0.73	136	-36.4	-27.3		
				0.82	97.77	0.72			0.69						
6	2号井	椎谷層	2.00	7.64	87.96	1.94	0.06	0.09	0.30	2.32	44	-36.2	-25.1		
				0.35	97.01	2.14	0.07	0.10	0.33						
7	兎口温泉	寺泊層	1.33	4.63	92.29	0.05			1.69	0.05	1,846	-33.3			21.4
					98.15	0.05			1.80						
8	松之山温泉	寺泊層	0.99	5.29	83.58	4.65	0.76	0.98	3.76	7.10	15	-34.3	-22.9	-17.5	8.6
				1.75	87.61	4.87	0.80	1.03	3.94						

下段は空気補正 ($\text{N}_2/\text{O}_2 = 3.66$)

析値も示す。

分析した温泉水の δD は $-17 \sim -7\text{‰}$ 、 $\delta^{18}O$ は $-3.7 \sim -1.0\text{‰}$ であり、 δD の変化は小さく、 $\delta^{18}O$ はかなり変化している。図3に $\delta D - \delta^{18}O$ プロットを示す。すべての試料が新潟地域の油・ガス田地層水（以下、新潟地層水：加藤，2018）の範囲に入っている。 δD のデータがない温泉水の

$\delta^{18}O$ は $-3.2 \sim -0.5\text{‰}$ であり、前述の範囲内に入る。一方、松之山の温泉水は δD が $-29 \sim -20\text{‰}$ と他の温泉水よりも明らかに小さく（軽く）、 $\delta^{18}O$ は $0.7 \sim 1.4\text{‰}$ とやや大きい（重い）。これらの温泉水は新潟地域の天水の δD と $\delta^{18}O$ （Mizota and Kusakabe, 1994；藪崎，2016）とは明らかに異なっており、海水（ $\delta D = 0\text{‰}$ 、 $\delta^{18}O = 0\text{‰}$ ）に比較的類似しており、新潟地層水と同様に海水を起源としていと考えられる。このことは、 $\delta^{18}O - Cl^-$ プロット（図4）

図2 メタンの起源 ($C_1/(C_2+C_3) - \delta^{13}C_1$ プロット)
数字は図1と同じ

図4 $\delta^{18}O - Cl^-$ プロット

図3 $\delta D - \delta^{18}O$ プロット

δD 値がないデータ（伊藤ほか，2004）を $\delta D = 0\text{‰}$ の直線より上に示す

からも支持される。兎口を含む松之山はやや離れた位置にプロットされるが、温泉水には Cl^- 濃度が減少すると $\delta^{18}\text{O}$ が大きくなる傾向が地層水と同様に認められる。

化学組成はかなり変化に富んでおり、 Cl^- 濃度は 4,440 ~ 18,500 mg/l である (表 2)。しかしながら、いずれも Na^+ と Cl^- から主になり、海水と比べて SO_4^{2-} と Mg^{2+} の濃度が著しく減少しており、新潟地層水の特徴 (加藤、

2018) に類似している。松之山はいずれの試料も類似した化学組成を示しており、 Ca^{2+} 濃度が非常に高く、 SO_4^{2-} 濃度も数 10 mg/l とやや高いが、前述の温泉水の特徴を有している。

3. 温泉水と地層水の化学組成の比較

地層水の化学組成は層準によってある傾向をもって変化

表 2 温泉水および油・ガス田地層水の化学組成および水素・酸素同位体組成

No.	温泉名	産出層	水温 (°C)	EC (mS/cm)	pH	TDS (mg/l)	イオン濃度 (mg/l)										同位体組成 (‰)		文献
							Li^+	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	I^-	Br^-	δD	$\delta^{18}\text{O}$	
1	観音の湯	西山層	46	47.4	7.47	31,200	4.2	11,000	136	394	90.1	17,700	ND	1,000	68	122	-9	-1.7	
2	天神の湯	西山層	45	48.9	7.48	33,000	1.4	10,900	470	584	290	18,500	ND	1,100	65	121	-10	-3.7	
3	寺泊温泉	寺泊層	46	30.9	7.14	21,400	0.5	5,090	31.4	2,190	17.9	11,400	1.3	28	3.7	38.4	-17	-1.6	
4	寺泊温泉	寺泊層		22.1	7.90	16,000	6.6	5,920	30.7	103	79.3	8,130	0.6	2,200	6.4	30.3	-17	-0.8	
5	芝峠温泉	1号井 椎谷層	23	13.8	7.72	8,030	0.1	2,930	12.0	107	9.3	4,440	0.0	490	4.4	20.1	-7	0.0	
6	2号井 椎谷層	27	14.5	7.83		9,410	0.2	2,830	12.8	433	1.8	4,900	23	73	8.0	22.8	-11	0.1	
7	兎口温泉	寺泊層		25.8	7.67	16,800	1.2	5,910	32.1	201	55.3	8,950	ND	700	4.6	33.3	-14	1.0	
8	松之山温泉																		
	翠の湯	寺泊層						3,505	146	1,983	5.0	8,877	73	87			-23	1.2	1)
	鷹の湯	寺泊層						3,674	140	2,070	1.8	9,317	75	61			-21	1.2	1)
	鏡の湯	寺泊層						3,662	105	1,933	19	9,062	69	58			-20	1.2	1)
	湯坂温泉	寺泊層						3,862	107	1,816	5.9	9,376	89	52			-22	1.2	1)
	高橋建設		52		7.2		1.79	4,050	83	1,733	34.7	8,924	52	52			-24	1.4	2)
	凌雲閣		75		7.5		1.94	3,815	109	1,845	34.2	8,982	93	25			-24	1.1	2)
	町営 1		86		7.6		2.69	3,182	167	1,887	3.0	8,720	83	54			-25	0.7	2)
	町営 2		95		7.8		2.13	3,850	141	1,973	13.4	9,227	94	47			-29	1.4	2)
	兎口		36		7.3		1.27	5,480	39	193	46.3	8,895	213	873			-24	1.6	2)
	松之山		75		7.3		1.72	3,580	116	1,870	0.2	8,828	41	145			-25	1.1	3)
	寺泊		34		8.0		7.34	6,610	41	126	90.0	9,149	0	3,004			-18	-0.4	3)
	中条町	西山層	84	36.1	8.2			9,275	106	235	88.0	14,202	0.0	179			-2.5	4)	
	新潟市	西山層	50	48.1	7.5			10,739	355	394	489	19,699	0.0	598			-3.2	4)	
	大潟町	椎谷層	19	23.7	7.6			5,120	21.8	147	42.7	8,001	0.0	313			-2.0	4)	
	吉川町	寺泊層	49	21.1	7.8			4,893	18.0	91.0	21.7	7,170	0.0	471			-0.5	4)	
	安塚町	寺泊層	58	19.0	7.4			3,262	15.5	837	3.8	6,289	79	47			-0.9	4)	
	塩の湯	N 20-4 西山層	74			34,410	5.7	12,760	163	316	92.9	19,400		836	85	134			5)
	温泉	N 22-2 西山層	76			33,210	6.0	11,620	156	315	61.0	19,400		882	77	120			5)
	糸魚川温泉	七谷層	96		7.5		3.5	5,200	280	1,800	7.8	7,700	240	21	9.5	28			5)
	西山油田																		
	別山 R52	寺泊層			8.2		1.1	4,700	47	37	14	6,618			15	62			6)
	伊毛 R47	寺泊層					2.7	6,450	65	24	80	11,154			26	109			6)
	伊毛 R19	寺泊層					4.2	6,730	44	36	134	11,422			28	112			6)
	鎌田 R77	椎谷層			7.4		12.3	8,540	125	343	866	17,661			49	170			6)
	後谷 C55	椎谷層					3.5	8,240	27	249	323	15,742			38	129			6)
	長嶺 R78	椎谷層			6.6		7.2	7,290	92	476	849	14,682			43	125			6)
	長嶺 R87	椎谷層			7.5		7.8	9,270	125	770	925	19,678			55	128			6)
	入和田 R6	椎谷層					2.0	7,350	85	432	115	14,179			37	136			6)
	滝谷 R13	椎谷層					3.4	7,540	98	717	238	15,675			37	136			6)
	刈羽 R103	寺泊層					1.9	4,830	58	38	44	9,709			20	89			6)
	湯入 R52	寺泊層					1.9	3,510	39	31	16	7,134			16	69			6)
	頸城油・ガス田																		
	黒井	寺泊層			7.80					72	31	8,795	0	1,366	23	48			7)
	海水				8.20		0.18	10,560	380	400	1,270	18,980	2,650	130	0.05	65	0	0.0	8), 9)

ND: 検出限界未満 1) 渡部ほか (1996), 2) 阿部・酒井 (1983),
3) Takamatsu *et al.* (1986)
4) 伊藤ほか (2004), 5) 温泉分析書
6) 野口・森崎 (1971), 7) 馬場 (1966)
8) 加藤 (2018), 9) 村上 (2010)

している（加藤，2018）ので，温泉水でも産出区間の層準を区別することにする（表2）。また，温泉水で通常分析が行われる成分は地層水の場合と少し異なっている（表2）。

北海道で油田塩水と温泉水で違いが明瞭であり（太秦・

那須，1960），水が生成した時の情報がある程度提供してくれる Br^-/Cl^- 比（上村，1988）について最初に検討する。 Br^- と Cl^- のプロットを図5に示す。西山層のものを除けば，温泉水は海水の Br^-/Cl^- 比（ 3.4×10^{-3} ）とほぼ同じであるのに対し，同層準の西山油田や頸城油・ガス田の地層水では Br^-/Cl^- 比が大きく（ $5 \sim 10 \times 10^{-3}$ ），海水起源と生物（有機物）起源の Br^- が混合していると考えられる（上村，1988）。西山層の温泉水は新潟地層水の範囲内にある。

有機物に由来する I^- についてみると，温泉水では濃度は $3.7 \sim 68 \text{ mg/l}$ であり，すべて海水の値（ 0.05 mg/l ）よりも高いが，西山層を除くと 10 mg/l 未満と比較的低い。 I^-/Cl^- 比も椎谷層・寺泊層の温泉水では 1×10^{-3} 前後であるが，西山油田や頸城油・ガス田の地層水では $2 \sim 3 \times 10^{-3}$ である（図6）。一方，西山層の温泉水ではこの比が 4×10^{-3} 前後であり，新潟地層水の範囲内にある。

西山層を除くと温泉水の I^-/Br^- 比は 0.5 未満であり， Br^- 濃度も海水の値（ 65 mg/l ）より低い（図7）。新潟地層水の I^-/Br^- 比は多くが $0.2 \sim 0.8$ の範囲にあり，西山層の温泉水の I^-/Br^- 比も 0.5 以上でその範囲内に入る。西山

図5 Br^- - Cl^- プロット

図6 I^- - Cl^- プロット

図8 HCO_3^- - Cl^- プロット

図7 I^- - Br^- プロット

図9 Mg^{2+} - Ca^{2+} プロット

が主体である。油・ガス田の生産ガス（以下生産ガス）の $\delta^{13}\text{C}_1$ 値は新潟・北蒲原地域と長岡・柏崎地域で異なっており（早稲田・重川, 1988; 図 2）、西山層の観音の湯（観音）と天神は新潟・北蒲原地域の範囲内にあり、生産ガスや水溶性ガスの $\delta^{13}\text{C}_1$ 値と調和している。一方、その他の温泉ガスは長岡・柏崎地域の生産ガスと同様かやや軽い $\delta^{13}\text{C}_1$ 値を示す。したがって、温泉ガスと生産ガスの C_1 の起源は同じであると考えられる。

$\delta^{13}\text{C}_1 - \delta^{13}\text{C}_2$ プロットを図 11 に示す。ガスの熟成度を示す Ro ライン（早稲田ほか, 2002）から $\delta^{13}\text{C}_2$ 値が大きく外れる寺泊岬は C_2 が微生物分解を受けていると考えられる。一方、 $\delta^{13}\text{C}_1$ 値が軽い方にシフトしている観音や天神は微生物起源の C_1 や C_2 が混入していると推定される。芝峠の熱分解ガスの熟成度は Ro 換算で 1% 程度であり、松之山のそれは微生物分解の影響を受けていることを考慮すると、これと同程度かやや高いと推定される。これらの近傍に分布する室野や蒲生の泥火山やその周辺から採取されたガスの熟成度も Ro 換算で 1.0 ~ 1.1% である（加藤ほか, 2009）。

今回報告した温泉水はいずれも化石海水起源と考えられる（図 3, 4）。しかしながら、その化学組成は西山層と椎谷層・寺泊層とで違いが認められる。椎谷層・寺泊層の温泉水は新潟地層水に比べ、有機物に由来する I^- に乏しく（10 mg/l 未満）、 I^-/Cl^- 比は 1×10^{-3} 程度である（図 6）。また、 Br^- 濃度は海水の値よりも低く、 Br^-/Cl^- 比は海水と同程度であり、新潟地層水よりも小さい（図 5）。一方、西山層の温泉水は新潟地層水と区別できない。寺泊層は油・熱分解ガスの根源岩層準であり（例えば、平井ほか, 1995）、温泉水での低い I^-/Cl^- 比や Br^-/Cl^- 比は根源岩の有機物量の違いを反映しているかも知れない。

Mg-Li 地化学温度計（Kharaka and Mariner, 1989）はメキシコ湾堆積盆ではいろいろな地化学温度計のうち最も

有用であり、貯留層温度と良く相関している（Land and Macpherson, 1992）。図 12 には、高橋ほか（2011）や石油資源開発㈱の社内データも加えて、Mg-Li 地化学温度計（以下、Mg-Li 温度計）から計算した温度（ $t = 2200 / (\log(\text{Mg}^{1/2}/\text{Li}) + 5.47) - 273$ ）と油・ガス層温度（温泉井では水温）との比較を示す。西山油田については、油層温度が不明であるが、採水深度は 370 ~ 1,573 m である（野口・森崎, 1971）。Mg-Li 温度計から計算した温度は 82 ~ 107°C であり（図 12）、新潟地域の油・ガス層の平均地温勾配（約 4°C/100 m）の温度（加藤, 2018）と比較するとより高く、その違いは浅い深度の油層ほど大きい傾向が認められる。油・ガス層では、両者の温度が比較的類似している（ほぼ $\pm 10^\circ\text{C}$ の範囲）のに対し、温泉井では Mg-Li 温度計の温度が明らかに高く、特に松之山（バラツキが大きい）や寺泊で高い。水温は地表での温度であり、地下の貯留層での温度よりもある程度は低くなるが、通常数 10°C も低くなることはない。

Takamatsu *et al.* (1986) のデータを用いて、温泉水について同様のプロットを作成した（図 13）。この図では、4 つのグループは基本的には Takamatsu *et al.* (1986) に従っているが、石仏と磯部を中央構造線周辺に加えている。海岸地域では、水温の方が Mg-Li 温度計よりも高い傾向があり、それ以外はいずれも Mg-Li 温度計の方が高く、その温度差はグリーンタフ地域、中央構造線周辺、有馬温泉の順に大きくなっている。また、松之山と寺泊はグリーンタフ地域で最も温度差が大きい。有馬温泉や石仏、鹿塩は有馬型温泉に分類され（例えば、松葉谷, 2009）、 Li^+/Cl^- 比が 0.001 より大きいことから、スラブ起源水（マグマ水も広義のスラブ起源水）が混入していると考えられている（風早, 2014）。一方、新潟地層水や温泉水は Li^+/Cl^- 比が 0.001 より小さく、スラブ起源水の混入はないと判断される。

松之山では、温泉水は地下 3,000 ~ 4,000 m にある根源的貯留層から断層や亀裂を通して上昇してきたと考えられている（渡部ほか, 2009）。また、寺泊周辺では、七谷層中に厚いドレライトが確認されている（加藤ほか, 2016）ことから、寺泊の温泉水にはマグマが関連している可能性がある。

油・ガス層において、Mg-Li 温度計から計算した温度と油・ガス層温度が近似していることは地層水がほぼその場所で形成された（ほとんど移動していない）ことを示唆しており、油・ガスがより深部から移動してきたのとは明らかに異なっている。

6. ま と め

7 温泉 8 坑井から採取した温泉水と付随ガスの分析結果を報告した。温泉ガスは C_1 から主になり、西山層のものは CO_2 を 15% 程度含んでいる。椎谷層・寺泊層の温泉ガスは熱分解ガスからなり、一部は微生物分解を受けている。一方、西山層の温泉ガスは周辺の生産ガスと同様に微生物ガスが主である。

温泉水はいずれも化石海水起源であり、椎谷層・寺泊層

図 13 温泉水における水温と Mg-Li 地化学温度計から求めた温度の比較

の化学組成は I^-/Cl^- 比や Br^-/Cl^- 比から新潟地層水と区別可能であるが、西山層のそれは新潟地層水に類似している。

温泉水と新潟地層水の Li^+ 濃度は $0.1 \sim 12.3 \text{ mg/l}$ であり、 Li^+/Cl^- 比はすべて 0.001 未満である。Mg-Li 温度計から計算した温度は、温泉水では水温よりも高く、 100°C 程度異なることもあるが、新潟地層水では油・ガス層温度に近似している。

引用文献

- 阿部修治・酒井 均, 1983: 中部日本内陸地帯の諸温泉・鉱泉水の安定同位体組成. 温泉工学会誌, **18**(1), 37-50.
- 馬場維男, 1966: 八橋油田Ⅷ層および頸城油田Ⅰ層の水圧入テストの問題点. 石技誌, **31**(6), 280-288.
- 千谷好之助, 1928: 本邦油田に於ける温泉 (一). 地学雑誌, **40**(477), 626-636.
- Craig, H., 1961: Isotopic variation in meteoric waters. *Science*, **133**, 1702-1703.
- 平井明夫・岡田静子・若松屋伸一・宮本泰行・八戸和巳, 1995: 有機地球化学的にみた新潟地域における原油とその根源岩の関係. 石技誌, **60**(1), 87-97.
- 伊藤俊方・小松原岳史・佐藤 修, 2004: 北部フォッサマグナ地域における深層地下水の水質特性. 応用地質, **45**(1), 22-30.
- 上村京子・高松信樹・今橋正征, 1988: 食塩泉の Br/Cl 比について. 温泉科学, **38**, 111-119.
- 金子信行・前川竜男・猪狩俊一郎, 2002: アーケアによるメタンの生成と間隙水への濃集機構. 石技誌, **67**(1), 97-110.
- 加藤 進, 2018: 新潟地域における油・ガス田地層水の地球化学. 石技誌, **83**(4), 257-266.
- 加藤 進・岩野裕継・西田英毅・本多孝安, 2016: 新潟県西山油帯における油・ガスの移動・集積. 石技誌, **81**(2), 159-168.
- 加藤 進・早稲田周・西田英毅・岩野裕継, 2009: 新潟県東頸城地域における泥火山および周辺の原油・ガスの地球化学. 地学雑誌, **118**(3), 455-471.
- 風早康平, 2014: 西南日本における温泉水の成因について: スラブ起源深部流体の特徴と分布. 温泉科学, **64**, 282-288.
- 工藤修治, 1983: 1.2 地層流体. 石油鉱業便覧, 23-26.
- Kharaka, Y. K. and Mariner, R. H., 1989: Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins. *Thermal History of Sedimentary Basins. Method and Case Histories* (eds. Naeser, N. D. and McCulloh, T. H.), Springer-Verlag, 99-117.
- Land, L. S. and Macpherson, G. L., 1992: Geothermometry from brine analyses: lessons from the Gulf Coast, U.S.A. *Applied Geochem.*, **7**, 333-340.
- 松葉谷治, 1981: 水素および酸素同位体比からみた温泉水の起源. 温泉科学, **31**(3), 47-56.
- 松葉谷治, 2009: 有馬型温泉とはいかなる定義のものか. 温泉科学, **59**, 24-35.
- Maekawa, T., Igari, S. and Kaneko, N., 2006: Chemical and isotopic compositions of brines from dissolved-in-water type natural gas fields in Chiba, Japan. *Geochem. Jour*, **40**, 475-484.
- 村上浩康, 2010: リチウム資源. 地質ニュース, 670 号, 22-26.
- Mizota, C and Kusakabe, M., 1994: Spatial distribution of $\delta D - \delta^{18}O$ values of surface and shallow groundwater from Japan, with southern Korea and east China. *Geochem. Jour*, **28**, 387-410.
- 西尾嘉朗, 2013: リチウム同位体による地殻流体研究の新展開—地殻活動の全貌解明に向けて—. 日本水文科学会誌, **43**(4), 119-135.
- 野口喜三雄・森崎重喜, 1971: 油田およびガス田かん水のリチウムおよびヒ素含量とその地球化学的意義. 日本化学雑誌, **92**(2), 145-149.
- 重川 守, 1985: 炭素同位体組成による原油と根源岩の対比—新潟平野油・ガス田地域におけるケーススタディー—. 石技誌, **50**(1), 9-16.
- 島津光夫, 2001: 新潟温泉風土記. 野島出版, 140p.
- 白石秀一, 2005: 新潟県における温泉開発の歴史. 新潟応用地質研究会誌, **63**, 39-53.
- 高橋正明・風早康平・安原正也・塚本 斉・佐藤 努・高橋 浩・森川徳敏・大和田道子・尾山洋一・芝原曉彦・稲村明彦・鈴木秀和・半田宙子・仲間純子・松尾京子・竹内久子・切田 司・大丸 純, 2011: 深層地下水データベース. 地質調査総合センター研究資料集, no. 532, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- Takamatsu, N., Imahashi, M., Kamimura, K. and Tsutsumi, M., 1986: Geochemical implication of the lithium content of saline spring waters in Japan. *Geochem. Jour*, **20**, 143-151.
- 太秦康光・那須義和, 1960: (第 52 報) 油田塩水と温泉水の化学成分の比較. 日本化学雑誌, **81**(3), 401-404.
- 早稲田周・岩野裕継・武田信従, 2002: 地球化学からみた天然ガスの成因と熟成度. 石技誌, **67**(1), 3-15.
- 早稲田周・重川 守, 1988: 本邦油・ガス田地帯における天然ガスの起源に関する地球化学的考察. 石技誌, **53**(3), 213-222.
- 渡部直喜・大木靖衛・佐藤 修・日下部実, 1996: 新潟県松之山地すべり地の Na-Cl 型地下水の起源. 新潟大災害研年報, **18**, 81-92.
- 渡部直喜・佐藤壽則・古谷 元, 2009: 新潟地域の大規模地すべりと異常高圧熱水系. 地学雑誌, **118**(3), 543-563.
- 藪崎志穂, 2016: 名水を訪ねて (115) 新潟県下越地域の名水. 地下水学会誌, **58**(4), 443-459.