

本邦高鹹泉の温泉地質学的意義

中村 久由* 前田 憲二郎**

Thermal Saline Waters in Japan

By

Hisayoshi Nakamura & Kenjirō Maéda

Abstract

Thermal saline waters in Japan are divided into three groups in the ratio of Cl^- to Br^- .

The 1st group is the ratio of 0.34 and is emitted from the seashore, the 2nd group is above 0.34 and is distributed in the Tertiary oil fields, and the 3rd group is 0.1 to 0.25 and is located in the Tertiary volcanic or hypabyssal rock and granite areas.

Judging from the similarity in the ratio between the 3rd group and hot springs in the younger volcanic areas, the saline waters of the 3rd group are regarded as the concentrated magmatic water formed at the moderate depth and related to the Tertiary volcanic activity.

要 旨

わが国の高鹹泉は、海岸地帯、油田地帯のほか、第三紀火山岩・半深成岩地帯および花崗岩地帯に分布する。その成分的特徴の一つとして、 $\text{Br}/\text{Cl}(\times 10^2)$ の比率をとつてみると、海岸地帯では0.34前後(海水の比率は0.34)、油田地帯では一般に0.34以上、火成岩地帯では0.1~0.25である。火成岩地帯の比率が、一般の火山地帯温泉の比率とほとんど類似の値をとる事実からみて、この比率こそ温泉プロパーの値であるとみなされる。

火成岩地帯の高鹹泉は、多く変質帯を伴う。火山地帯温泉と比較して、 Cl^- および HCO_3^- 含量がきわめて高いこと、そして変質帯を伴うこと等から推して、高鹹泉の生成は、まず岩漿から発散した揮発成分が気相の状態をとり、その後、この噴気ガスの温度が閉鎖的な環境で臨界温度以下に低下したため、揮発成分中の水蒸気が凝縮熱水のものであり、その多くは、第三紀の火山活動に関連ある残留熱水性鉱泉とみなされる。火成岩に伴う高鹹泉のうち、地域的に特徴的なものの例を2、3あげたが、最近行われている重水深度の測定結果を参考にすると、高鹹泉の多くは重水系に富み、いわゆる岩漿水に

より近い性質をもつことを暗示している。

最後に、火成源高鹹泉の生成過程は、浅熱水性鉱床のいわゆる熱水溶液の成因ときわめて類似することを述べ、高鹹泉と鉱床との関係について、なお、多くの問題が残されていることを指摘した。

ま え が き

改めていうまでもなく、わが国の温泉の大部分は新期の火山帯に沿って分布し、その湧出箇所は、およそ10,000にも及ぶといわれている。したがって、湧出母岩の岩質も場所により区々であるが、新期熔岩および火山性砕屑物で覆われた火山地帯を除き、比較的均一な岩層で特徴づけられる湧出地帯を、2、3あげてみると、第三紀火山岩および半深成岩地帯、油田地帯、花崗岩地帯等がある。

一方、温泉の化学成分を考慮に入れて、地域的な温泉の特徴を吟味してみると、わが国の温泉・鉱泉のなかには、きわめて鹹度の高いものの存在することに気がつく。これらの高鹹泉の分布が、海岸および油田地帯に多いことはいうまでもないが、上記の第三紀火山岩・半深成岩地帯あるいは花崗岩地帯から湧出する温泉・鉱泉のなかにも、このような高鹹泉が存在する場合がある。いわゆる火山帯からはずれた地域の温泉が、むしろ Cl^- 含

* 地質部

** 技術部

量に乏しいという傾向を思い併わせると、上記の火成岩地帯に、なぜこのような高鹹泉が存在するのかという問題が生れてくる。

この問題は、温泉の成因にも関連ある重要な内容を含んでおり、他の面についても、なお、今後検討を要する多くの課題を有すると思われるので、筆者らがこれまで収集した資料に基づいて、特に火成岩地帯に存在する高鹹泉の地質学的意義に触れてみることにする。

本文を述べるに先立ち、内容について種々御検討いただいた東京都立大学教授野口喜三雄博士に対して、深甚の謝意を表するものである。

1. 高鹹泉の分布と化学成分

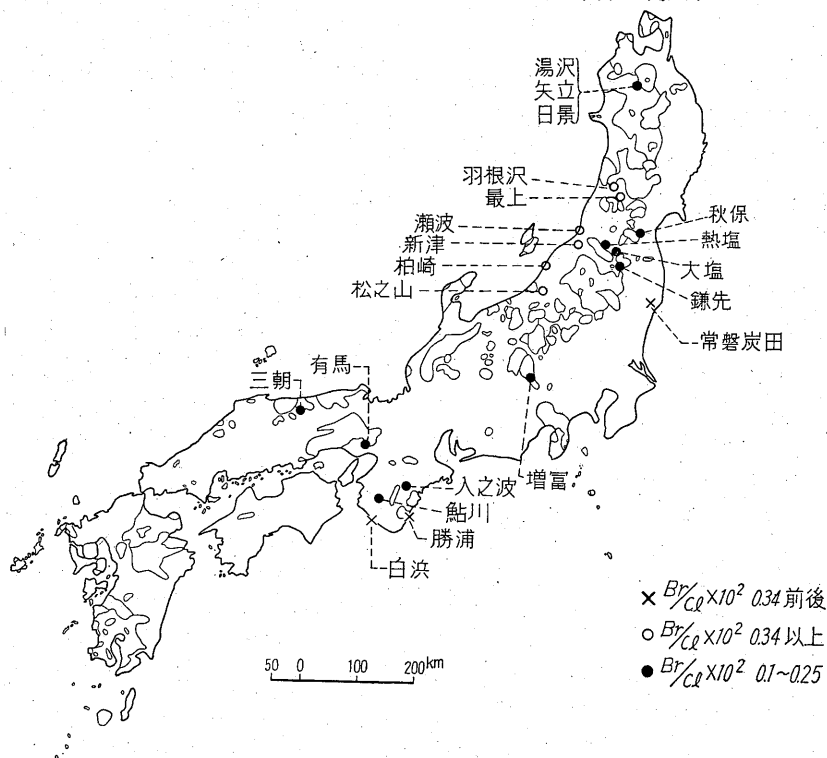
高鹹泉の分布をみると、次の各地域に大別できる。すなわち、(1)海岸地帯 (2)油田地帯 (3)第三紀火山岩ないし深成岩地帯 (4)花崗岩地帯等である(第1図)。

まず、上記の各地域から湧出する高鹹泉の代表的なものについて、主化学成分および Br^- 含量を示すと第1~4表の通りである。主化学成分のうえからいつて、これらの高鹹泉は、特に Cl^- の濃度が高いということ以外に共通した成分的特徴がほとんどないといつても過言でない。また、各地域の高鹹泉についても、それが必ずしも海水ないし油田鹹水と同じ成分比率を示さないのが一般

である。例えば、海岸地帯における高鹹泉は、常識的に海水の混入によるとみなされるが、海水そのものとはかなり違った形で湧出するものがある(第1表)。また、油田地帯温泉も、必ずしも一般にいわれるように SO_4^{2-} に乏しく、 HCO_3^- が多いものばかりとは限らず、かなり SO_4^{2-} 含量が高く、 HCO_3^- の少ないものもある。

海岸地帯および油田地帯におけるこのような例は、この地帯の温泉が湧出するまでの間に、酸化、還元等の化学反応によつて、成分相互の量的関係が変化しやすいことを示している。この意味において、温泉水に含まれるハロゲンの比率が、地域ごとでおのおの定つた範囲内の値をとることは注目し値する。すなわち、 Cl^- 、 Br^- 、 I^- の最も大きな特徴は、自然界で不溶性の塩類を作ることがきわめて稀であること、したがつて、温泉の湧出過程で、これらの塩類が沈殿しないということである。このため、海水ないし油田鹹水が二次的に地下水として温泉水中に混入し、湧出するまでの間に、成分相互の間になんらかの変化が生じるような場合が起こつても、ハロゲン含量の比率は、著しく影響を受けることがないと予測される。いゝかえると、温泉水中のハロゲンの比率は、地域ごとの特徴をそのまま反映するとみなされるのである。

各地域から湧出する高鹹泉のハロゲンの比率は、附表



第1図 本邦高鹹泉の分布図

から明らかのように、次のいくつかの系列に分かたれる註1)。

	Br/Cl(×10 ²)
(1) 海岸地帯	0.34 前後
(2) 油田地帯	0.34 以上
(3) 火成岩地帯	0.1~0.25

海水そのものの比率は0.34であり、油田鹹水のそれは一般に0.34以上であるから^{註1)}、(1)(2)の温泉は海水ないし油田鹹水の混入を受けたグループとみなすことができる。一方、0.34以下の値をとる温泉は、上記の火成岩地帯の温泉だけでなく、いわゆる新期の火山地帯温泉もまた、同様の値をとることは注目値する註2)。すなわち、この比率こそ温泉水プロパーのそれであり、いわゆる温泉化作用の全系統を通じて、その値がほぼ一定のまゝ保たれることを、この数値からかなり明瞭に読みとることができる。

以上、ハロゲンの比率が、各地帯の温泉を区別するうえに、きわめて大きな役割を果すことを指摘したが、次に、各地帯の温泉水が主化学成分のうえでどのような特徴をもつかという点に簡単な説明を加えておく。

1.1 海岸地帯温泉

海岸あるいは海岸に接して位置する温泉のなかに、きわめてCl⁻含量の高い温泉がある。これらの大部分は海水の混入に由来するものであるが、温泉水の化学成分をみると、必ずしも海水のそれに一致しない場合がある。すなわち、第1表で示した紀伊半島白浜・勝浦温泉および福島県常磐地方の温泉は、ハロゲンの比率からいって、いずれも海水のそれと同じ値をとるものであるが、海水そのものと比較してみると、成分的に次のような相違がある。

(1) Cl⁻/SO₄²⁻の比率が海水のそれより大きく、特にSO₄²⁻含量の低いものほどがH₂Sが増大する傾向がある。

(2) 陽イオン相互の関係については、特に定まった規則性がみられない。これは、温泉が湧出するまでの間に、地域的にSO₄²⁻の還元、温泉成分の供給、他水系の混入、接触岩層とのイオン交換等の種々の要素が加えられるためと考えられる。

このように、深く浸透したと思われる海水は、海水そのものの成分比率とかなり違ったものとなり、より浅いものほど漸次海水の成分含量に近づく。特に、深く浸透したものは、H₂Sを伴ない、かつSO₄²⁻がきわめて少な

註1) 一般に温泉水中のI⁻含量はきわめて少ないのでBr⁻に対するCl⁻の比率の方が有効である。

註2) 中村久由・前田憲二郎、温泉中のハロゲンの量比とその地域性、昭和32年度地球化学討論会。

くなる傾向があり、これについては、なんらかの機構によつてSO₄²⁻の還元作用が行われたことを暗示するようにみえ、この点、きわめて興味ある問題を提起している。

1.2 油田地帯温泉

含油第三紀層の分布は、おもに北海道から東北地方の日本海側の地帯を経て、新潟・長野県にまで達している。この地帯の温泉は、もともと自然湧出していたものが少なく、その大部分は石油開発のため行つた試錐によつて湧出をみたものである。

第2表で示すように、この地帯の温泉水は、いずれも油田鹹水と深い繋りをもつものであるが、分析結果によると、必ずしも油田鹹水と共通した性質のものばかりとは限らず、次のような相違を示すものもある。

(1) 比較的SO₄²⁻含量の高いものがある。そしてこのSO₄²⁻含量の高いものは一般に高温である。

(2) SO₄²⁻の場合とは逆に、HCO₃⁻含量は、低温のものに多く、高温のものほどHCO₃⁻およびCO₃²⁻が乏しくなる傾向がある。

このような傾向からみて、油田地帯温泉といわれるものには、次の2つの型があるようにみえる。すなわち、成分的に油田鹹水にきわめて類似し、温度のみ異常なものと、温度の異常と併わせて、成分的にもかなり油田鹹水と違った形をとるものとである。

後者の例として、新潟県瀬波温泉について述べると、こゝも石油開発の目的で試錐を行つたところであるが、深度254mで石英粗面岩の貫入岩体に到達し、このなかから高温の温泉水が噴出した。温泉水の化学成分をみると、一般の油田鹹水に較べて成分含量が割合稀薄であり、炭酸塩も少ない。しかし、ハロゲンの比率は、やはり0.34以上の値をとり、油田鹹水が混入したことを暗示している。この瀬波温泉に類する他の例として、やはり新潟県の油田地帯に位置する松之山温泉がある。この温泉の周辺には火成岩の露出がなく、また、深度400mの試錐孔からもその存在が知られていない。しかし、水温が80°Cを越す高温である点を考えると、瀬波温泉の場合と同じように、あまり深くない地下に、火成岩が潜在する可能性も生れてくる訳である。

油田地帯の地質構造は、一般に脊斜構造で特徴づけられるが、温泉の存在もまた、この脊斜構造に伴う場合が少なくない。上で述べた瀬波温泉あるいは松之山温泉の脊斜構造が、貫入火成岩の影響によるものとすれば、温泉を伴う脊斜構造のなかには、褶曲構造に加えて、貫入火成岩の影響による場合も少なくないと考えられる。したがつて、油田地帯の増温率が、一般に小さい値

第1表 代表的な海岸地帯温泉の化学成分

	水温 (°C)	pH	Cl ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ^{-*} (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	H ₂ S (mg/l)	CO ₂ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	I ⁻ (mg/l)	Br/Cl×10 ²
那智勝浦温泉	54	8.7	1442.	64.7	14.4	15.2	640	13	243.5	7.4	30.8		4.6	tr.	0.32
	56.5	8.8	886.8	71.4	13.2	63.8	426	9	126.5	3.1	24.3				
	45	8.5	613.5	47.0	8.4	37.0	318	6	79.2	2.4	13.6				
	40.5	8.1	2838.	47.0	4.8	366.8	1365	9	357.6	111.4	1.8				
白浜温泉	42	8.2	1399.	39.1	4.8	178.1	650	14	141.4	93.3	1.1				
	65.5	8.2	673.7	1793.	18.0	3.3	976	61	17.9	5.7	1.7		2.0		0.30
	56	7.5	1390.	4209.	—	5.8	2135	67	103.6	65.1	1.0	15.4			
		7.2	7375.	1952.	—	901.1	4600	227	215.2	398.8	1.0	9.9	25.6		0.35
常磐炭田坑内温泉	73	7.6	9946.	1586.	—	1292.	4600	200	201.2	363.0	2.5		34.6		0.35
	47	8.5	928.9	68.9	6.0	525.2	598.	12.9	106.2	0.2	25.2		3.1	0.6	0.33
	61	8.4	2225.	30.5	6.0	2.7			292.3	tr.	2.7		7.7		0.34
	57	7.8	1351.	141.5	—	148.2			158.6	2.8	35.1		4.3		0.32
	61	7.3	2765.	46.4	—	17.3	1308.	1.9	357.7	tr.			9.3	1.7	0.34
	57	8.6	1680.	47.6	12.0	8.2	886.3	5.5	171.5	tr.	23.7		5.8	1.0	0.34
	58	8.1	4175.	48.8	3.0	8.4			324.5	6.6			14.1	2.7	0.34

* アルカリ度を便宜上 HCO₃⁻ として表わしてあるから、正しい意味の HCO₃⁻ とは若干異なる場合がある。

第2表 代表的な油田地帯温泉の化学成分

	水温 (°C)	pH	Cl ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	H ₂ S (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	I ⁻ (mg/l)	Br/Cl×10 ²
松之山温泉	80.	7.7	9131.	45.8	—	88.9	3756	98	1861.	26.2	0	35.9	<0.05	0.39
	80.	7.4	8563.	41.5	—	70.8	3750	114	1817.	3.7	0	33.6	0.85	0.39
羽根沢温泉	47.	8.3	900.	1525.0	90.0	2.5	1204	3	4.1	1.3	0	3.9	0.20	0.43
	72	7.6	1521.	58.0	—	614.0	888	80	279.0	3.1	1.4			
柏崎1号温泉	47.5	7.1	9343.	524.6	—	tr.	5263	90	278.1	83.2	0	47.2	6.7	0.51
	36.5	7.1	8935.	603.9	—	tr.	5069	100	266.8	97.8	0			
長岡温泉	41.	7.5	1631.	538.0	—	tr.	1087	148	40.7	7.0	0			
	48.5	7.7	5106.	2952.0	—	tr.	4291	45	21.4	8.3	0	22.2	6.3	0.63
新月岡温泉	48	7.5	1666.	149.5	—	564.6	1372	28	75.4	33.6	96.2			
	40.5	8.1	3386.	3464.0	6.0	tr.	3438	12	14.3	3.9	0	17.1	<0.05	0.51
最湯の浜温泉(新湯)	47	7.2	1943.	37.8	—	221.4	735	61	478.7	1.5	0	8.0	<0.05	0.41
	60.5	8.3	3290.	7.3	6.0	386.0	1369	26	814.8	1.5	0	14.6	0.1	0.44
瀬波温泉	104	8.6	1950.	46.4	22.5	240.8	1206	80	93.7	1.5	2.5	11.1	0.2	0.57

第3表 代表的な第三紀火山岩および半深成地帯温泉の化学成分

	水温 (°C)	pH	Cl ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Fe ²⁺ (mg/l)	CO ₂ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	I ⁻ (mg/l)	Br/Cl×10 ²
秋保温泉	50	6.8	4411.	61.0		307.8	1905	100	926.8	4.4					
	39	8.0	1521.	408.7		1357.	1506	58	132.4	12.2			4.4	0.25	0.28
	49.6	8.0	1542.	463.6		1362.	1534	60	165.0	12.0					

鎌	先	温	泉	7.9	1539.	356.8		1367.	1543	62	117.1	12.0						
	〃	〃	〃	8.0	1546.	512.4		1362.	1477	60	123.2	11.4						
熱	塩	温	泉	7.8	6613.	109.8		390.1	2990	156	1128.	20.5	1.8	15.3			0.23	
日	中	温	泉	6.4	1815.	1234.0		548.1			362.0	41.1	221.8					
大	塩	温	泉	6.9	10546.	475.1		707.4			460.0	364.5	74.8	26.0			0.24	
〃	〃	温	泉	12	3048.	604.2		865.0			210.0	85.0	61.7					
〃	〃	温	泉	31	9145.	1612.4							198	19.8	0.96	0.21		
矢	立	温	泉	46	6550.	780.8		379.4	2977.	394.9	1442.	218.5		13.1	0.87	0.20		
日	景	温	泉	46	5077.	575.8		70.0	2407.	259.0	483.4	159.9		10.1	0.70	0.20		
湯	沢	温	泉	29	680.8	2061.		0.8	870.	95	81.7	41.7	148.5					
鮎	川	温	泉	38	652.5	1976.		tr.			692.7	41.5	tr.	1.6	<0.05	0.24		
入	波	温	泉		39715.	24.4		tr.	19079.	3843.1	3752.	33.2	261.8	70.2	<0.05	0.18		
有	馬	温	泉															

第4表 代表的な花崗岩地帯温泉の化学成分

	水温 (°C)	pH	Cl ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Fe ²⁺ (mg/l)	CO ₂ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	I ⁻ (mg/l)	Br/Cl×10 ²
増	25		2380.	981.		357.9	1756.	225.9	157.2	12.7	8.5	217	5.5	0.20	0.23
〃	29	6.4	3517.	1403.0		689.7	2507.	328.8	269.5	23.2	42.7	256	7.6	0.35	0.22
〃	34	6.4	3787.	1616.		566.2	2773.	373.9	255.3	23.2	8.5	363	8.5	0.25	0.22
湯	44	8.2	978.	9.1	6.0	335.8	595.6	9.3	177.7	3.1			2.6	0.08	0.26
池	18	6.7	3688	1562		469			236	137		180	12.2	0.5	0.33
田	22.1	6.8	3660	1523		326			504	113		112	11.7	0.6	0.30
〃	41.4	6.4	1154	369		15			120	60		66	4.4	0.3	0.38
志	31.7	7.3	4623	2580		436			230	98		92	16.8	0.4	0.36
湯	34	7.1	3717	2184		383			232	45		94	11.9	1.1	0.32
千	50	6.4	631.2	218.0		126.7	444.5	27.3	44.9	7.9			1.6	<0.05	0.25
三															
鹿			15744.	122.0		tr.	9162.	37.0	1100.	67.3			28.2	tr.	0.18

45—(435)

第5表 山梨県甲府地方における湧泉の化学成分

	水温 (°C)	pH	Cl ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	CO ₂ (mg/l)	備	考
増	34	6.4	3787.	1616.		566.2	2773.0	373.9	255.3	23.2	363		前田 憲二郎
湯	44	8.2	978.7	9.1	6.0	355.8	595.6	9.3	177.7	3.1			〃 憲二郎
甲	39.6	7.6	1414.			13.3			139.1	1.3			秋山 梯四郎
斐	13	6.4	268	36		tr.	280		61	31			安藤 武
崎	45	7.0	240	42		518			104	tr.	7		
西	24	8.0	421			5			5	tr.			
西	17	7.3	3748			tr.			78	tr.	79		
塩	43	9.2	32.6	24.4		82.3			10.0	1.1			鈴木 孝
下	37	7.0	72.9	17.6		199.7	82.0	1.8	55.3	0.6	9		日本 鈹泉誌

をとるという理由も、単に地層内に閉じこめられた石油ガスが断熱圧縮等のため、熱を発生するという物理的な現象だけで説明されるものではなく、直接、間接にこの潜在火成岩が、かなり大きな影響を与えていると考えて、さして不都合でないと思われるものである。

1.3 第三紀火山岩および半深成岩地帯温泉

前述のように、第三紀火山岩および半深成岩の分布地帯から湧出する温泉・鉱泉のなかに、きわめて Cl⁻ 含量の高いものがある。その代表的なものについて化学成分を示すと第3表の通りである。

まず、ハロゲンの比率についてであるが、いずれも 0.34より低く、明らかに海水ないし油田鹹水のそれと異なつた値をとる。いゝかえると、この地帯の高鹹泉は、なんらかの機構によつて初生的な Cl⁻ 含量の濃集が行われたことを暗示している。湧出状況等については後で述べることにするが、主化学成分の分析表をみると、Cl⁻ と併わせて HCO₃⁻ も、かなり高い含量をとるのが特徴的である。

1.4 花崗岩地帯温泉

花崗岩地帯から湧出する温泉・鉱泉のなかにも、やはり Cl⁻ 濃度の高いものがある。そのなかから代表的ないくつかの温泉を選び、その主化学成分を示すと第4表の通りである。この表をみると、ハロゲンの比率だけでなく、主化学成分間における特徴も、第三紀火成岩地帯の高鹹泉ときわめて共通していることがわかる。

花崗岩地帯の高鹹泉が成因的に、花崗岩そのものと直接的な関連をもつかどうかあるいは単に花崗岩を湧出母岩とするだけのものかという問題は、化学成分のうえだけからでは速断できないので、この点については、高鹹泉の生成環境とその地域的な分布を検討したうえで、改めて触れてみることにする。

2. 火山地帯温泉との比較

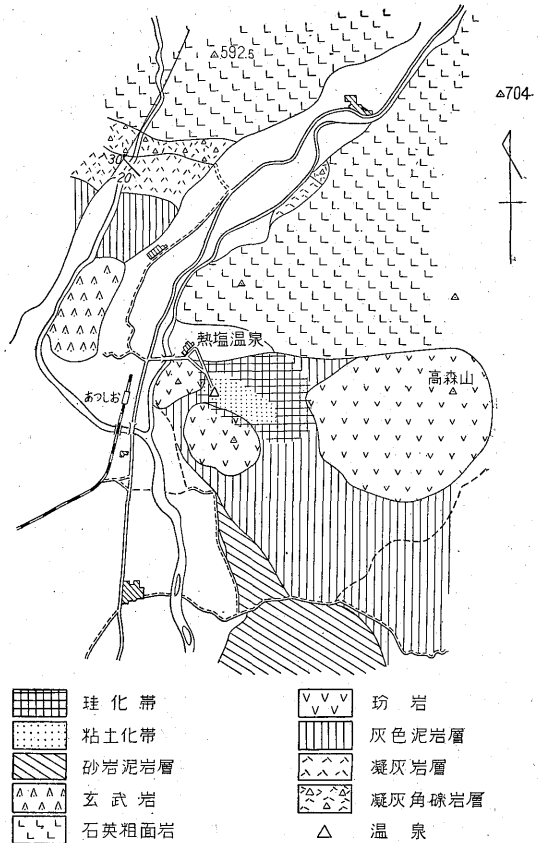
高鹹泉のうち、海岸および油田地帯に位置するものの大部分は、海水ないし油田鹹水の混入に由来するものであるから、これらの資料に基づいて、これらの地帯における温泉化作用の機構を解析することはきわめて困難である。こゝでは、火成岩地帯の高鹹泉が、どのような環境で生成されたかという問題を考察するための基礎として、いわゆる火山地帯温泉を対象にとり、いくつかの事項につき、それぞれの諸性質を検討してみることにする。

2.1 高鹹泉の分布とその湧出状況

まず、火成岩に伴う高鹹泉の分布についてであるが、第1図で示したように、その多くは第三紀火山岩お

よび半深成岩類と密接な関係がある。そのおもなものあげてみると、青森・秋田県境に位置する矢立・日景・湯沢等の温泉・鉱泉は第三紀石英粗面岩に伴つて分布し、福島県熱塩、日中温泉は第三紀玢岩に、また紀州の鮎川・入之波等の鉱泉は第三紀石英斑岩に、兵庫県有馬温泉・宝塚鉱泉は第三紀石英粗面岩に、おのおの密接な繋りをもつて存在する。

このなかから福島県熱塩温泉を例にとり、その湧出状況を示すと第2図の通りである。すなわち、この地域は



第2図 福島県熱塩温泉附近地質図

第三紀緑色凝灰岩および灰色泥岩層からなり、これを覆つて石英粗面岩が広く分布する。熱塩温泉を囲む三方の山は灰色泥岩を貫ぬく玢岩の貫入岩体からなり、地形的にも明瞭にその特徴が現われている。次に、この灰色泥岩層は湧出地域を中心として、相当著しく変質作用を受けている。変質帯の構成は粘土化帯と珪化帯からなり、前者は湧出地域を中心としてほぼ北西の方向に延びる。一方、珪化帯は粘土化帯の北側を占め、岩質はきわめて堅い。温泉の湧出箇所は狭く、湧出量も少なく、深度

1.5m における地温分布調査の結果によると、17°C 以上の地温異常帯は 70m×60m 程度の範囲にすぎない。

いま述べた変質帯の発達は、熱塩温泉だけに限らず、前記の日影・湯沢・有馬等に加えて、山梨県増富等の温泉・鉱泉においても認められ、温泉ないし鉱泉の成因と密接な関係があることを示している。高鹹泉を伴う火成岩が石英粗面岩等の火山岩類だけでなく、玢岩ないし石英斑岩等の半深成岩を主体とし、しかも変質帯と高鹹泉との間に密接な関係があることは、高鹹泉の成因およびその生成環境を考察するうえにきわめて注目すべきことからである。

2.2 水温

高鹹泉を特徴づけることからの一つは、一般的に水温が低いということである。もちろんなかには有馬温泉、(89°C)、熱塩温泉 (66°C) のように高温のものもあるが、その例は少なく、大部分は 30~40°C の間にあり、また、宝塚・池田鉱泉のように普通の地下水程度の水温しかないものもある。

このように幅広い水温の変化がなかに帰因するかという問題に関連して、ある地域内の高鹹泉をとりあげて水温の分布をみると、例えば、熱塩・日中地域、有馬・宝塚地域、日景・矢立地域のように、かなりはつきりした温度差がみだされる。このように、ある地域内でかなり明瞭な温度差がみられるにもかかわらず、全般的にはむしろ高温のものが数少ないことを併せ考えると、高鹹泉の水温は、低温であるのが本来の形であり、高温のものは、温度に関する限り、異常であると考えられる。いかえると、この水温の異常は、もともと温泉の温度ではなく、むしろ、低温の高鹹泉に、より新しい温泉化作用による熱が供給されたことに帰因するという疑いも生じるのである。

2.3 化学成分

高鹹泉相互の化学成分については、前項で述べたが、ここでは火山地帯温泉との比較という意味で取り上げてみる。

高鹹泉を特徴づける Cl^- 含量は、最高有馬温泉の 43.79 g/l である³⁾。一方、火山地帯温泉における Cl^- 含量の最高は群馬県万座温泉の 3.41 g/l であり、これに次いで秋田県玉川温泉の 3.115 g/l である⁷⁾。火山地帯温泉における Cl^- 含量の分布をみると、いま述べた高含量の温泉は、いずれも噴気地帯に伴うもので、いわば火山活動の浅い場に位置する温泉である。これに対して、火山地帯から遠ざかった準火山地帯および非火山地帯^{註3)}における温泉の特徴をみると、一般に Cl^- に乏しく SO_2^- あるいは HCO_3^- を主成分とする。したがって、火山地

帯が中心を占め、その外側に、準火山地帯および非火山地帯が配列するという巨視的な見方からすれば、火山作用によって供給された Cl^- 含量の分布は、中心ほど含量が高く、外側ほど含量が通減することになる。この傾向は、火山地帯温泉のなかの 1 地域を取り上げた場合も同様であつて、火山作用の旺盛な中心ほど Cl^- 含量が高く、その外側ほど Cl^- 含量が通減し、 HCO_3^- が増大する例とほとんど一致する。

高鹹泉の分布が、 Cl^- 含量に乏しい準火山地帯あるいは非火山地帯に位置するということは、火山作用と関連ある温泉の地域性という立場からみると、成分含量のうえで相反的な現象である。いかえると、成因的に、この Cl^- 含量の少ない一般の準火山地帯温泉あるいは非火山地帯温泉と、高鹹泉とが、かなり違った機構によるものであろうことは察するに難くない。さらに、高鹹泉を伴う火成岩がおもに第三紀火山岩あるいは半深成岩類であることも、火山地帯温泉と区別するうえの大きな特質の一つであるが、同時に、これらの高鹹泉が一般に低温であり、しかも湧出量がさほど多くないという点もまた、特徴的なことからして充分留意する必要があると思われるのである。

3. 火成岩に伴う高鹹泉の生成環境

火山地帯温泉の成因が、噴気ガスと地下水との接触によるという考え方は、火山地方における種々の現象からみてほとんど疑いの余地がないようにみえる。すなわち、火山地帯温泉は、岩漿から発散される揮発成分が、直接、間接外界に逸出することに繋りを持ち、揮発成分の発散状態からいえば、いわば開放系の温泉化作用によるということが出来る。したがって、噴気ガスとして地表から発散するか、あるいは温泉として湧出するかということの違いは、地下水圧とそれに対する噴気ガスの蒸気圧との相対的な圧力関係に置き換えられる。すなわち、原則として噴気ガスの温度が充分高く、その蒸気圧が地下水圧より大なる場合は噴気地帯を形成し、小なる場合は温泉地帯を形成するという表現が可能である。

一方、火山地方の変質地に伴って温泉が存在する場合が少なくない。火山地方における変質帯の存在は、いわゆる開放系温泉化作用によって周囲の岩層に加えられた具体的な熱化学的変化の形跡であるが、変質帯に伴う温泉水の化学成分を検討してみると、噴気地帯から温泉地帯へ移行する動機は、地下水の浸透深度の増加に関

註 3) いわゆる火山帯上にあつて、しかも周辺に新期火山の存在しない地域、および火山帯からはずれた地域を指す。

係があり、同時に、地下水に供給される Cl^- の含量は、浸透深度の増加に伴って増大する傾向がある。

このように、開放系温泉化作用に関連ある温泉水の Cl^- 含量が、地下水の浸透深度あるいは熱源の深さによって増減するという現象は、噴気ガス自体の行動を反映する意味で注目に値する。準火山地帯温泉あるいは非火山地帯の温泉水が、 Cl^- に乏しく、 HCO_3^- あるいは SO_4^{2-} で特徴づけられるということも、いま述べた意味からいえば、より深部に位置する熱源から発散した噴気（あるいは熱気）ガスと、地下水との接触状態を暗示するものであり、成分的特徴を重視するなら、これらの温泉は、なお揮発成分を発散する岩漿から熱と成分の供給を受けているか、あるいは熱伝導によって熱の供給のみを受けているかのいずれかであると考えられる。いゝかえると、たとえ地表に変質帯が存在しない地域であっても、この地帯の温泉は開放系の温泉化作用^{註4)}に関連があるということがらに、明瞭な根拠を与えているとみなされるのである。

いま述べたように、噴気地帯あるいは温泉地帯もしくは火山地帯あるいは準(非)火山地帯のいずれの場合であっても、開放系の温泉化作用は、直接、間接に、噴気（あるいは熱気）ガスの熱と成分とが系外に搬出される過程で行われるものであるから、この作用の行われる深さの限度は、少なくとも地下水の浸透深度以内に限られるといつて過言でない。

一方、 Br^- に対する Cl^- の比率をみると、火成岩地帯の高鹹泉が新期火山地帯の温泉と同一の値をとることは、温泉地質的にきわめて大きな意義をもつ。すなわち、温泉化作用の過程において、それに関与する成分の比率が、火山地帯温泉の場合と同じ関係にあることを示しているからである。したがって、 Cl^- を指示成分とみなすと、火山地帯温泉において、最高 3.41g/l という溶存量が、一方において 43.79g/l というきわめて高い含量を有するに至る過程が、どのような機構で行われたかという点に問題の焦点がしばられることになる。

前述のように、高鹹泉を伴う火成岩地帯はしばしば変質作用を受け、粘土化帯および珪化帯を形成する。このような変質帯の存在から推察すると、高鹹泉の生成に関連ある温泉化作用は、まず気相の状態から始まり、次で成分の濃集が行われたと考えることができる。すなわち、岩漿から発散した揮発成分がまず気相の状態で分離し、変質帯を形成した後、なんらかの原因により、この

揮発成分が系外に放散されることなく濃集し、時間の経過とともに、臨界温度 (374°C) 以下に温度が低下すると、揮発成分のなかの水蒸気が凝縮熱水化する。このため同じ揮発成分から導かれた Cl^- 、 HCO_3^- およびその他の成分の濃集が行われ、こゝに高鹹泉の母体が生成されたと解されるのである。高鹹泉を伴う火成岩が、おもに第三紀の火山岩あるいは半深成岩であることからわかるように、おそらくその温泉化作用は、現在火山地方で見られる温泉化作用の場より、いく分深いところで行われたものと推察される。あるいは、火山地方の場合であっても、噴気ガスの逸散がなんらかの原因によつて妨げられ、閉ぢこめられた水蒸気が凝縮熱水化する条件が満されるなら、火山地方においても、この種のいわば熱水性温泉の生成が可能であろう。いずれにしても、岩漿から発散される揮発成分が気相から液相に移行することにより、成分の濃集が行われるという点に、一般の火山地帯温泉と異なる特質があり、この意味において、前者の開放系温泉化作用に対して、この高鹹泉の生成に関連ある温泉化作用を閉鎖系温泉化作用といふことができる。したがって、現在みられる高鹹泉は、第三紀の火山活動によるものが大部分を占め、生成以来、岩層の裂罅を充填していたものが、その後、上部岩層の剝削により、初めて湧出の機会が与えられたものであり、むしろ低温であることも、第三紀以降の長い時間の経過により、漸次冷却したと考えれば、充分解釈できることがらである。このように考えると、高鹹泉もまた岩層の裂罅を満たした鉱泉質地下水であり、さらに新期の火山作用によつて、その一部に熱と成分が供給されたと考えれば、高鹹泉のなかに異常水温をもつことの理由も、ある程度首肯できると思われるのである。

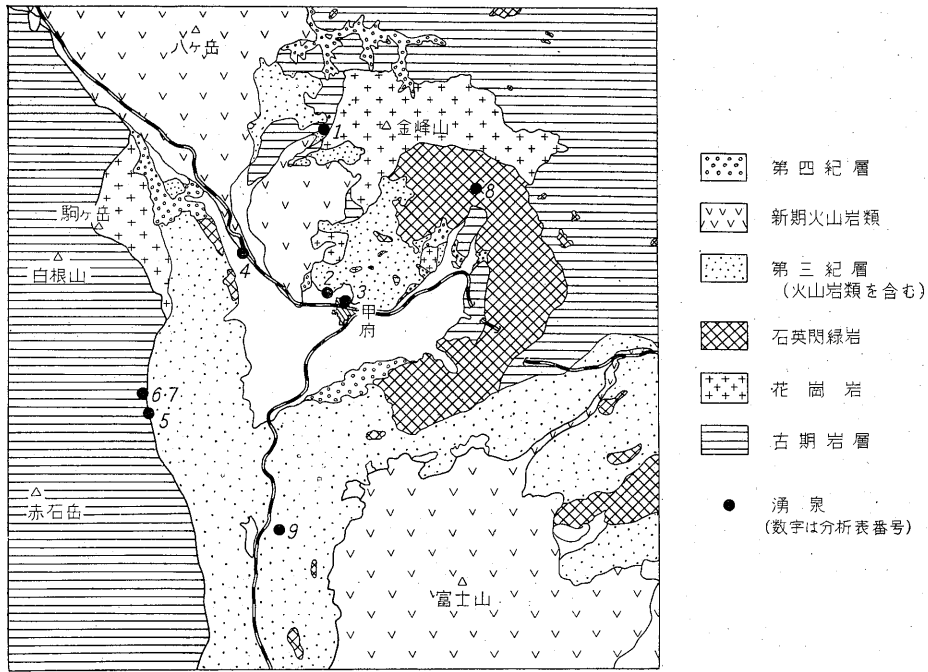
いま述べたように、その生成の場が、ある程度閉された環境にあり、気相の状態で岩漿から発散した揮発成分が臨界温度以下で、遂に凝縮熱水化するという特徴に注目すれば、この高鹹泉は、いわば残留熱水性温泉(鉱泉)^{註5)}といふことができよう。

4. 特徴的な2,3の高鹹泉について

前項では火成岩に伴う高鹹泉について、その性格の要点を述べた。これらの高鹹泉は、その多くは前記の火成岩に伴うのが普通であるが、場所によつては種々の岩層を湧出母岩とし、ある地域内に散点的に分布する場合がある。この例として、山梨県甲府地方の温泉・鉱泉

註4) 噴気(熱気)ガス成分が地下水に吸収され、熱と成分が外界に運び出される意味において、開放系の温泉化作用と考えられる。

註5) これに対して、開放系温泉化作用に関連ある温泉は、噴気性ないし熱気性温泉といふことができる。



第3図 甲府地方湧泉分布図

の分布とその化学成分を示すと第3図および第5表の通りである。この地方には、増富・湯村・甲府等のCl⁻含量の高い温泉に加えて、西山元湯・西山塩の池鉱泉等のかなりCl⁻含量の多い湧泉があり、韮崎市の地下水のなかにもCl⁻含量に異常を示す湧水が知られている。

これらの温泉・鉱泉は、全く散点的に存在するように見えるが、この地方に広く分布する第三紀石英閃緑岩との関係を見ると、この両者の間にかかなり密接な関連が存在することに気がつく。いゝかえると、この地域のCl⁻異常泉は、この石英閃緑岩の火成活動に関連ある残留熱水性鉱泉を母体とする見方も生れてくる。このような観点からすれば、第三紀以前の古期花崗岩を湧出母岩とする増富温泉は、少なくともCl⁻成分に関する限り、花崗岩そのものとは直接の繋りがないと考えられる。

一方、この甲府地方には、全く性質の異なる他の温泉群がある。すなわち、下部・川浦等の温泉であつて、これらは、Cl⁻に乏しく、SO₄²⁻、Na⁺、Ca²⁺等の成分で特徴づけられる。これらの温泉は、上述の成分的特徴からいって、準火山地帯温泉の基本的な型に相当することについては、すでに指摘した通りである。したがって、この地方の温泉・鉱泉は、Cl⁻で特徴づけられるものと、SO₄²⁻で特徴づけられるものとの両極の型に分けられるが、さらに、このなかには、両極の混合型もまた存在する。その1つの例として、前述の増富温泉において、最近行われ

た深度別による成分分析結果によると¹⁾、各深度ごとでCl⁻、SO₄²⁻、Rnの含量がおのおの別個の動きを示し、結局、増富温泉は、これらの成分を含むおのおのの水系の混合からなるといわれている。増富温泉の放射能が、地表浅部に潜在する放射性沈殿物に由来することについては、すでに黒田により指摘されている通りであるが²⁾、この深度別調査の結果によつて、さらにCl⁻およびSO₄²⁻もまた、おのおの独自の水系として混合していることが明らかとなり、結局、Rnは古期花崗岩中の放射性沈殿物から導かれ、Cl⁻は第三紀石英閃緑岩の残留熱水性鉱泉の成分であり、SO₄²⁻は新期火山活動の温泉化作用によつて供給されたという解釈も可能であると思われるのである。

なお、山陰地方の花崗岩に伴う高鹹泉のうち、三瓶火山周辺に分布する志学・湯抱・池田等の放射能性の温泉・鉱泉も、高いCl⁻含量とHCO₃⁻含量で特徴づけられ、見掛上、火成岩地帯の高鹹泉ときわめて類似した化学成分をもつ。しかし、Br/Clの比率をとつてみると、むしろ海水のそれに近い値をとることは注目値する。高鹹泉の放射能は、甲府地方と同じように、花崗岩から導かれたとみて疑問はないように思われるがCl⁻の根源が、花崗岩の火成活動に関連ある初生的な残留熱水であるか、あるいは海水の影響によるものであるかについては、今後なお、検討を要する問題を残している。

このほか火成岩地帯の高鹹泉のなかで、特に注目を引くものとして、中央構造線東側の鹿塩片麻岩のなかから湧出する鹿塩鉱泉がある。第4表に示した化学成分から明らかなように、この鉱泉は古期変成岩のなかに位置するにもかかわらず、そのCl⁻含量は15g/l以上というきわめて高い含量を示す。その場所からいつて海水の影響を受けたと考えられず、また、その近くに、新期の火成岩類も存在しない。しかし、Br/Clの比率をみると、0.18という低い値を示し、明らかに、Cl⁻は火成活動によつて供給されたことを暗示している。これらのことから推察すると、鹿塩片麻岩に伴う高鹹泉は、変成岩の生成時に供給された揮発成分が長く岩層内に閉ぢこめられ、残留熱水性鉱泉の形をとつたものが、その後上部岩層の剝削により湧出するに至つたという解釈も可能である。もちろん、この考え方も一つの解釈にすぎないが、いずれにしても、このような地域に火成源の高鹹泉が存在することは、温泉地質学的に、きわめて興味ある問題を提起している。

最後に、これまで述べた火成岩地帯の高鹹泉は、成因的に岩漿の揮発成分が凝縮濃集した残留熱水に相当するという見方からすれば、いわゆる岩漿水により近い性質をもつことになる筈である。初生的な岩漿水の成分濃度を規定することは不可能であるから、高鹹泉のうち、どの地域のもので、どの程度に初生的な濃度を保持しているかを決定することはできないが、この岩漿水の問題に関連して、最近行われている重水濃度の測定結果を参考にすると、高鹹泉と重水濃度との間に、次のような傾向がうかがわれる。この参考資料は、東京都立大学千谷利三教授および堀部・小早川氏等によるものであるが²⁾、わが国各地の温泉について、東京都水道水に対する重水素(Denterium)偏差を測定したもののなかから、特に重水素に富むものを挙げると、北海道貝取潤(炭酸湯)、青森県上の湯、岩手県夏油、秋田県日景、福島県西山(五疊敷)、山形県上の山、兵庫県有馬、鳥取県三朝等がある。このうち、青森県上の湯は、油田地帯温泉の可能性が強いが、ほかは、ほとんど第三紀火成岩および花崗岩地帯から湧出し、主化学成分のうえでは、いずれもCl⁻およびHCO₃⁻で特徴づけられるものである。このなかには、なお未調査の地域もあり、その全部を火成岩地帯の高鹹泉と断定する訳にはいかないが、本文で取り扱つた高鹹泉のいくつかの例をとつてみても、その重水素の濃度が、かなり高い傾向を示すことはきわめて注目に値する。この結果からみても、火成岩地帯の高鹹泉は、温泉のなかでも、より岩漿水に近い性質をもつことの一端を暗示しているように思われるのである。

むすび

以上いくつかの項目にわたり、わが国の温泉のなかから特に高鹹泉をとりあげ、その要点を説明したが、このうち、火成岩地帯に伴う高鹹泉について、その成因的な経過を組立ててみると、鉱床の生成に関連ある熱水溶液の生過過程を髣髴たらしめるものがある。すなわち、浅熱水性鉱床の場合、その多くが変質帯の形成に引続き、鉱物成分の濃集と充填が行われたことを考えると、最近 H. Schmitt によつて指摘されたように、その生成の場は噴気性温泉の影響を受けるだけでなく、鉱物成分の濃集をもたらし因子として変質帯の形成にあつた噴気ガスが、さらに閉鎖的な環境で凝縮熱水化する条件を満足することが必要であり、この過程を経て、初めて鉱床形成のために必要な熱水溶液の母体が作り出されると推定されるからである。

このように、火成岩に伴う高鹹泉の諸性質は、熱水性鉱床の成因にも繋る重要な内容を含んでおり、今後、高鹹泉を研究することにより、鉱床との関連においてもさらに多くの手掛りが得られるものと期待され、この方面においても高鹹泉は、きわめて大きな地質学的意義を有するとみなされるのである。(昭和32年10月稿)

文献

- 1) 秋山梯四郎・伏見弘：増富温泉及び同地域における試掘井の地球化学的研究，日本化学会誌，Vol. 76, No. 6, 1955
- 2) 地質調査所：日本鉱産誌，B VI-a 地熱および地熱・温泉，1957
- 3) 池田 長生：有馬温泉の化学的研究(第3～4報，天満宮湯の化学組成その1；その2，日本化学会誌，Vol. 76, No. 7, 1955
- 4) Kuroda, K. : Strongly Radioactive Springs Discovered in Masutomi, Bull. Chem. Soc. Japan, Vol. 19, No. 3, 1944
- 5) 中村久由・比留川貴：群馬県万座温泉調査報告—特に変質帯と噴気・温泉との関係 2—，地質調査所月報，Vol. 8, No. 1, 1957
- 6) 中村久由・鈴木孝：長野県浅間温泉調査報告—特に中部信濃地方温泉群の地域性に関連して—，地質調査所月報，Vol. 8, No. 2, 1957
- 7) 野口喜三雄・上野精一：玉川温泉調査報告，玉川温泉研究10週年誌，1954
- 8) Noguchi, K. & Ueno, S. : Geochemical Investigation of Brine Waters of Oil Fields in Japan, Publication no. 37 de l' Associationale d'Hydrologie (Assemblee générale de Rome, tome II), 1956
- 9) Schmitt, H. : Origin of the "Epithermal" Mineral Deposits, Econ. Geol., Vol. 45, No. 3, 1950