

昭和 38 年 10 月

原 著

玉川温泉の地球化学的研究

東京工業大学 岩 崎 岩 次

(昭和 38 年 10 月 8 日受理)

Geochemical Studies of the Tamagawa Hot Springs

Iwaji IWASAKI

(Tokyo Institute of Technology)

1. ま え が き

1.1 研究のはじまり 玉川温泉は古くからその強い酸性の水で、「毒水」としてその処理に苦心が払われ、善助堰がつくられていたが、天保 12 年 (1841) にさらに田口堰をつくつて毒水の害を少なくする方法をとつている。明治 31 年 (1898) 桜井広三郎が鉛を含む硫酸塩を発見し、これは 1907 年に台湾で発見された北投石との比較から 1912 年に北投石と決定され、その後多数の研究者によつて詳細に北投石が研究されてきた¹⁾。他方温泉については、このような状態になつたので大正元年 (1912) 11 月に衛生試験所で鹿湯の分析が行なわれ、 $Cl > SO_4$ のことが示され、昭和 6 年 4 月には各務沢の湯、五十川の湯で $Cl < SO_4$ の関係が示された²⁾。また昭和 4 年頃から三浦彦次郎³⁾は温泉水、ガスおよびそれらの岩石、土壌との反応など詳細な研究を行なつて、当時としては世界でも珍しい毒水処理を実行してきた。そして再び上記の関係を確認した。

その後玉川温泉研究会の中で地球化学の部門が昭和 26 年頃から活動を開始してから、北投石についての部門および温泉水やガス、または地質部門の研究が一段の進歩を示し、玉川温泉は現在世界において最もよく研究されている温泉の一つであり、その強酸性と熱水の湧出量の莫大なことおよび放射能などで、温泉の湧出機構の研究に最もよい また極めて困難な例を提供しているものである。

1.2 玉川温泉の特性 玉川温泉の水は第 1 表に示すように温度 $98^{\circ}C$, $pH \approx 1.2$ の強酸性で、湧出量は実に 9000 l/min 以上に達する莫大なもので、その放出熱量は 1 日間に $1.2 \times 10^9 \text{ kcal}$ ($4.2 \times 10^{11} \text{ kcal/yr}$) で、1 年間に約 $2 \times 10^{22} \text{ erg}$ の熱エネルギーが放出されることになる。この熱エネルギーは火山爆発や地震のエネルギーに比敵する強大なものである。またこれは火山エネルギーの取り出し方を暗示するものでもあろう。他方、熱水と同時に放出される物

第 1 表 玉川温泉の性質

温度 98°C, pH=1.2,
 温泉水の湧出量=9.3×10³ l/min=1.3×10⁷ l/day (1.3×10⁴ ton/day)
 放出熱量=1.2×10⁹ kcal/day=4.2×10¹¹ kcal/yr (≐1.7×10²² erg/yr)

	含 有 量 (g/l)	湧 出 量	
		(g/day)	(g/yr)
蒸発残留物	3	4 × 10 ⁷	1.5 × 10 ¹⁰
Cl	3	4 × 10 ⁷	1.5 × 10 ¹⁰
SO ₄	1.2	1.5 × 10 ⁷	5.6 × 10 ⁹
F	0.1	1.3 × 10 ⁶	4.7 × 10 ⁸
H ₂ S	0.02	2.6 × 10 ⁵	9.4 × 10 ⁷
H ₂ SiO ₃	0.3	4 × 10 ⁷	1.4 × 10 ⁹
Fe	0.1	1.3 × 10 ⁶	4.7 × 10 ⁸
Al	0.2	2.6 × 10 ⁶	9.4 × 10 ⁸
Pb	0.001	1.3 × 10 ⁴	4.7 × 10 ⁶
Na	0.06	7.8 × 10 ⁵	2.8 × 10 ⁸
Ra	20×10 ⁻¹²	2.6 × 10 ⁻⁴	0.09

質の量もまた莫大なものであり (第 1 表), これらの熱源, 水源およびその他の物質の供給源を何に求めるか, またそれらからどんな機構で玉川温泉に導入され, そして湧出してくるものであるかが温泉湧出現象の研究の焦点である。

1.3 研究の方針 温泉は地中から岩石, 鉱物, 生物質などの間を通って一般にガスを伴って湧出してきて, 地上では湧出した後, 温度, 圧力が変わり, 大気, 岩石, 鉱物, 生物質などと接触して反応し, 温泉ガスの放出, 温泉沈殿物の生成などにより, その性質を変化しながら, 毒水としていやがられ, また他方医療用や産業には喜んで使用されている。温泉湧出後の諸変化 (温泉の変質) や温泉沈殿物 (北投石, イオウ, 硫化鉄など) や毒水処理などの詳細な研究が多数にあるが, ここでは省略して, 主として玉川温泉の生成湧出機構の問題だけをとり上げて, 今までにわかったことを述べることにする。湧出してくる温泉水の性質は, 地下の各種の物質の反応の総計の結果であるという立場から, マグマ発散物, 火山ガス, 地下水, 岩石鉱物などの性質およびその反応の総合的研究から玉川温泉のなりたちの説明を試みる。

2. 玉川温泉の性質

2.1 温泉水の性質およびその変化

a) 温泉水の性質 第 1 表にもその大体が示されているが, 第 2 表の (a) には玉川温泉大沸の温泉, (b) にはその附近の温泉の性質を示す。玉川温泉大沸の流れに沿った部分に湧出する温泉とそれ以外の部分の温泉水とが明らかに異なる性質をもっていることがわかる。他の部分の (第 2 表 (b)) ものは大沸と異つて Cl が極めて少ない。それで大沸泉では Cl>SO₄, 他のものでは Cl<SO₄ となる。第 3 表には日本の温泉の平均値⁴⁾を示してあるが, 酸性泉では Cl<SO₄ となり, 大沸泉とは異なるものである。このように日本の一般の酸性泉は Cl<SO₄ の型であり, 第 2 表 (b) の群はそれに属す。もちろん第 4 表に示すように酸性温泉でも玉川温泉と同様に Cl>SO₄ のものがあり, 台湾の北投温泉⁵⁾, 別府竜巻地獄, 秋田県の川原毛温泉など数多くあ

第2表 a) 玉川温泉大沸泉の化学組成

採取年月日	1955年10月8日	1956年10月6日	採取年月日	1955年10月8日	1956年10月6日
蒸発残留物	2614	3398	H ₂ SiO ₃	412	421
K	56.0	64.8	HBO ₂	76.0	93.2
Na	99.4	114	Pb	1.0	—
Ca	164	210	Zn	2.8	4.0
Mg	59.1	83.1	As	2.3	3.0
Fe	80.8	105	H ₂ SiO ₃ (重量法)	356	365
Al	116	158	Cu	0.015	—
Mn	3.0	4.2	Ni	0.0005(?)	—
Cl	2670	3240	Hg	0.01	—
SO ₄	1142	1330	Ag	0.003	—
HPO ₄	2.5	2.8			

第2表 b) 大沸泉附近の温泉

	pH	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	H ₂ S (mg/l)*
焼山温泉 No. 2	1.5	1	7281*	60.3
焼山温泉 No. 1	1.7	54	3178*	75.5
さけび沢温泉	2.3	10	1041*	13.2
毒ガス沢	2.4	4	470*	11.9
"	2.4	3	474*	26.1
殺生くぼ温泉	1.8	3	1044**	—
"	1.9	2	552***	—
務沢温泉	1.5	28.4	3502**	—
"	5.0	15	156**	—

* 野口 et al. ** 南, 綿抜 *** 岩崎 et al.

第3表 日本の温泉の主成分の含有量の平均値

	試料数	含塩量 (g/kg)	Na (g/kg)	Ca (g/kg)	Mg (g/kg)	Cl (g/kg)	SO ₄ (g/kg)	HCO ₃ (g/kg)
酸性泉	63	2.21	0.305	0.915	0.057	0.787	1.51	0.257
酸性鉱泉	162	6.09	0.692	0.210	0.0833	1.07	4.51	0.547
中性泉	25	2.76	0.631	0.247	0.0199	1.01	0.472	0.321
中性鉱泉	23	4.08	0.873	0.438	0.0829	1.98	0.471	0.532
アルカリ性泉	331	2.19	0.534	0.192	0.0198	0.847	0.349	0.246
アルカリ性鉱泉	108	6.78	2.06	0.300	0.107	3.20	0.337	1.34
全温泉	712	3.86	0.768	0.221	0.0557	1.25	1.70	0.491

る。それで玉川温泉だけが特別のものではないことがわかる。

b) 温泉水の性質の変化 温泉の性質は常に変化しているものであつて⁶⁾、長年月一定に保たれているものはむしろまれである、ことに短い時間の間の規則的变化は間歇泉で知られ⁷⁾⁸⁾、また降雨の後の温泉の性質の変化など多くの研究がある⁹⁾。玉川温泉については綿抜¹⁰⁾が1956

第14表 酸性温泉の化学組成

	北投温泉	一切経	川原毛温泉	竜巻地獄		北投温泉	一切経	川原毛温泉	竜巻地獄
温度(°C)	93	—	92	100	Mg ²⁺	0.02686	3.220	0.13	0.0278
pH	1.18	—	1.2	3	Fe ²⁺	0.13791	11.050	0.070	0.0116
	(g/kg)	(g/l)	(g/l)	(g/l)	Al ³⁺	0.15670	11.940	0.115	0.0012
H ⁺	0.06575	0.906	0.0566	0.0021	Mn ²⁺	—	0.866	—	0.0063
K ⁺	0.41636	3.800	0.0498	0.1318	Cl ⁻	3.76525	79.100	2.380	1.2553
Na ⁺	1.12728	4.700	0.0505	0.8287	SO ₄ ²⁻	2.91844	8.000	1.120	0.6261
NH ₄ ⁺	0.20827	—	—	—	H ₂ SiO ₃	0.17904	0.540	0.9572	0.2659
Ca ²⁺	0.12665	2.670	0.108	0.0779					

年7月16日午後ClもSO₄も幾分多くなるような傾向を認めているので、詳細に研究すると第5表のように一般には1日の間にはならぬ著しい変化はなく、ほとんど一定である。

他方、季節的の変化も第1図のようにほとんど認められないが、第2図のように年を経るにしたがつて大きな変化を繰り返していることがわかった。これは雨量の変化、または火山活動の消長を物語るものかも知れないが、現在のところまだ説明ができない。

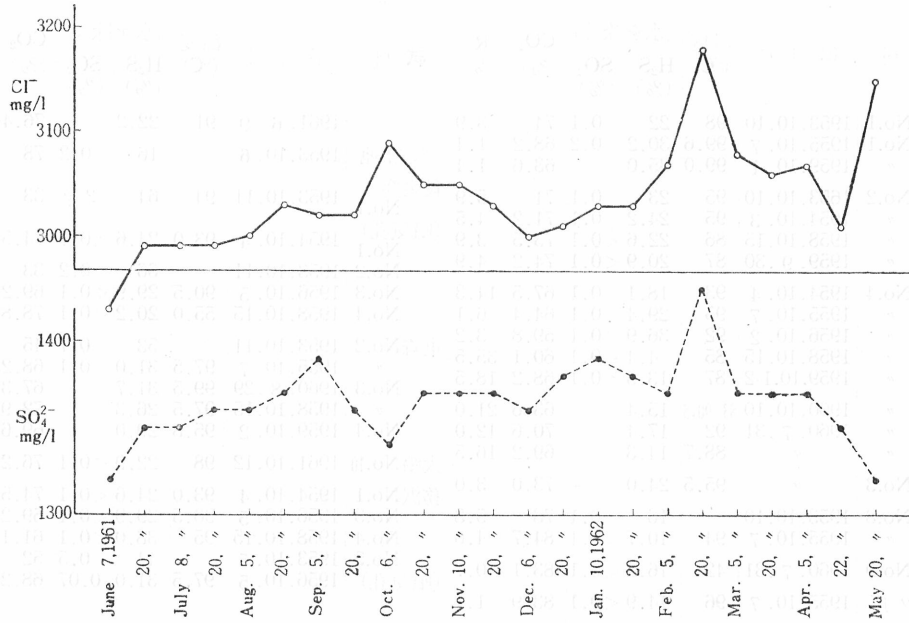
玉川大沸附近の温泉の性質の変化については佐原良太郎¹¹⁾の研究があり、大沸泉と異り、降雨によつて著しい影響を示している。

c) 火山ガスおよび温泉ガス 玉川温泉地方の温泉と一緒に噴出するものおよび噴気孔からの火山ガスについて三浦彦次郎⁹⁾の研究があり、小穴進也ら¹²⁾の報告もある。著者らは火山性温泉の生成機構の説明のため、詳細に噴出ガスの性質を研究した¹³⁾。第6表にはその例を示す。いずれも温度が低いので塩化水素のないCO₂とH₂Sとが主で、極めて少量のSO₂を含んでいるものである。これは玉川大沸泉と他のものとの間にはあまり著しい差異は認められな

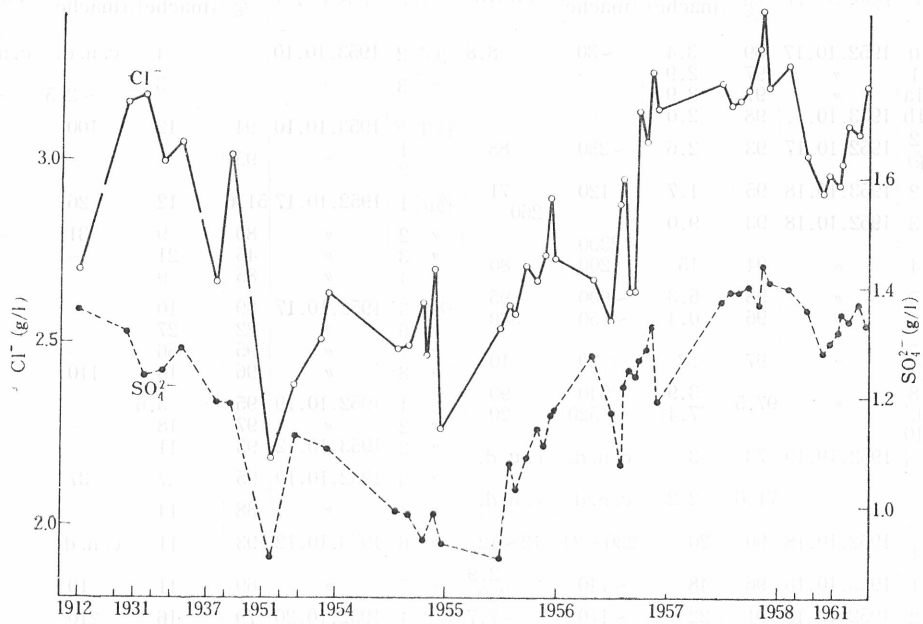
第5表 玉川温泉の化学成分の変化

i) 大 噴

No.	年月日	時間	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	No.	年月日	時間	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	No.	年月日	時間	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	
1	1961 6.6	17	2930	1320	21	6.8	12	2960	1340	41	"	9	2930	1340	
2	"	20	2920	1320	22	"	13	2960	1350	42	"	10	2940	1340	
3	"	18	2940	1330	23	"	14	2940	1340	43	"	11	2940	1360	
4	"	19	2960	1340	24	"	15	2950	1320	44	"	12	2930	1340	
5	"	20	2950	1330	25	"	16	2920	1340	45	"	13	2960	1350	
6	"	21	2960	1340	26	"	17	2930	1340	46	"	14	2940	1330	
7	"	22	2950	1350	27	"	18	2930	1330	47	"	15	2930	1340	
8	"	23	2960	1350	28	"	19	2930	1330	48	"	16	2930	1340	
9	"	24	2950	1350	29	"	20	2940	1330	49	"	17	2940	1340	
10	6.8	1	2950	1350	30	"	21	2930	1340	50	"	18	2930	1330	
11	"	2	2950	1360	31	"	22	2900	1330	51	"	19	2920	1340	
12	"	3	2950	1360	32	"	23	2930	1350	52	"	20	2920	1340	
13	"	4	2960	1340	33	"	24	2920	1340	53	6.10	6	2950	1350	
14	"	5	2950	1350	34	6.9	1	2930	1340						
15	"	6	2960	1360	35	"	2	2940	1340						
16	"	7	2960	1360	36	"	3	2940	1350						
17	"	8	2970	1370	37	"	5	2930	1330						
18	"	9	2970	1370	38	"	6	2950	1350						
19	"	10	2970	1350	39	"	7	2940	1350						
20	"	11	2970	1350	40	"	8	2940	1350						
													平均値	2945	1340
													標準偏差	17	12



第 1 図 玉川温泉大沸泉の季節的变化



第 2 図 玉川温泉大沸泉の Cl⁻ および SO₄²⁻ の変化

第 6 表 玉川温泉地域の火山ガスの化学組成

試料	年月日	温度 (°C)	(水を除く)		CO ₂ (%)	R (%)	試料	年月日	温度 (°C)	(水を除く)		CO ₂ (%)	R (%)		
			H ₂ S (%)	SO ₂ (%)						H ₂ S (%)	SO ₂ (%)				
大沸No.1	1953.10.10	98	22	0.1	74	3.9	赤増池	1961.6.9	91	22.2	—	76.4	1.4		
No.1'	1955.10.7	99.6	30.2	0.2	68.2	1.4		1953.10.6	—	16	0.2	78	5.8		
"	1959.10.1	99.0	35.0	—	63.6	1.4		殺生窪 No.1 (噴気孔)	1953.10.11	94	64	2 ?	33	1.0	
No.2	1953.10.10	95	23	0.1	71	5.9			No.1	1954.10.4	93.0	24.6	<0.1	74.5	0.8
"	1954.10.3	95	24.2	0.1	71.2	4.5			No.2	1953.10.11	—	66	0.2	33	0.8
"	1958.10.15	86	22.6	<0.1	73.5	3.9			No.3	1956.10.5	90.5	29.9	<0.1	69.2	0.85
"	1959.9.30	87	20.9	<0.1	74.2	4.9		No.4	1958.10.15	55.0	20.2	<0.1	78.8	1.0	
No.4	1954.10.4	93	18.1	0.1	67.5	14.3		東森No.2	1953.10.11	—	53	0.7	45	1.3	
"	1955.10.7	95	29.4	0.1	64.4	6.1			"	1955.10.7	97.5	31.0	0.1	68.2	0.75
"	1956.10.2	92	36.9	<0.1	59.8	3.2			No.3	1960.8.29	99.5	31.7	—	67.3	1.0
"	1958.10.15	85	4.4	<0.1	60.1	35.5	"		1958.10.15	97.5	26.3	—	72.9	0.8	
"	1959.10.1-2	87	13.3	<0.1	68.2	18.5	No.4		1959.10.2	95.8	29.0	—	69.6	1.4	
"	1960.10.10	83-90.5	15.4	—	63.6	21.0	大噴No.10	1961.10.12	98	22.9	<0.1	76.2	0.9		
"	1960.7.31	92	17.4	—	70.6	12.0		務沢No.1	1954.10.4	93.0	24.6	<0.1	74.5	0.8	
"	"	88.7	14.3	—	69.2	16.5	No.3	1956.10.5	90.5	29.9	<0.1	69.2	0.85		
No.3	"	95.5	24.0	—	73.0	3.0	No.4	1958.10.15	95	38.0	<0.1	61.1	0.9		
No.8	1953.10.10	—	16	0.1	78	5.8	No.5	1953.10.5	44	0.5	52	3.5			
"	1955.10.7	94	10.7	<0.1	84.7	4.6	(噴気孔)	1956.10.5	97.5	31.0	0.07	68.2	0.75		
No.9	1960.7.31	42	16.2	<0.1	83.1	0.7									
ヒソ川	1955.10.7	96	14.9	<0.1	83.9	1.2									

第 7 表 玉川温泉およびその附近の火山ガスの Rn および Tn 含有量

試料	採取年月日	温度	Rn (mache)	Tn (mache)	Tn/Rn	試料	採取年月日	温度	Rn (mache)	Tn (mache)	Tn/Rn
大沸0	1952.10.17	89	3.4	~30	8.8	東森2	1953.10.10	—	4	c. n. d.	c. n. d.
" 1	"	97	2.9	—	—	" 3	"	—	3	~2.5	~8
" 1a	"	97	2.9	—	—	殺生窪	1953.10.10	94	12	100	8.3
" 1b	1953.10.1.	98	2.0	—	—		1	"	95	—	—
" 2 (王様)	1952.10.17	93	2.6	~230	88	2	"	—	—	—	—
" 2	1953.10.18	95	1.7	120	71	務沢1	1952.10.17	51.6	12	26	2.1
" 3	1952.10.18	93	9.0	~2300	260	" 2	"	80	9	31	~3.4
" 4	"	94	15	1200	80	" 3	"	45	21	—	—
" 5	"	98	6.3	~600	95	" 4	"	85	9	—	—
" 6	"	96	0.4	~150	380	務沢5	1952.10.17	89	10	—	—
" 7	"	97	<2	<20	10	" 6	"	82	27	—	—
ヒソ川	"	97.5	3.9	540	90	" 7	"	95	66	—	—
" 8	"	97.5	(7.4)	(~520)	20	" 8	"	96	10	110	11
ヒソ川	"	97.5	3.9	540	90	焼山1	1952.10.19	95	5.6	—	—
" 10	"	97.5	(7.4)	(~520)	20	" 2	"	97	18	—	—
ヒソ川	1952.19.19	73	3	c. n. d.	c. u. d.	" 2	1953.10.12	93	11	—	—
下流	"	71.6	2.2	c. n. d.	c. n. d.	" 3	1952.10.19	95	7	37	5.4
"	"	71.6	2.2	c. n. d.	c. n. d.	" 4	"	88	14	—	—
毒ガス	1952.10.18	90	20	230~24	12~12	" 6	1953.10.12	93	11	c. n. d.	—
1	1953.10.18	96	48	~140	2.9 (~3.0)	" 7	"	69	11	10	0.9
" 2	1952.10.18	91	22	~170	~7.7	叫沢1	1952.10.20	79	16	210	13
" 3	"	93	11	330	30	" 2	"	95	13	—	—
" 4	"	47	24	—	—	" 3	"	98	16	—	—

いようである。どれもマグマ発散物から HCl, SO₂ などがほとんど取り去られたものと考えてよく、日本の他の火山ガスの性質と矛盾しない¹³⁾。

d) 放射能 中井敏夫は日本の温泉水の Ra 含有量を測定したとき玉川温泉の Ra は 0.6×10^{-12} g/l で、一般の酸性泉と同様に一般に少ないことをみた。北投石を産出する玉川温泉は他の酸性泉と異つて Ra などを多く含んでいてもよいと思われる。斎藤信房¹⁵⁾ らは Ra = $(21 \pm 1) \times 10^{-12}$ g/l, ThX = $(134 \pm 2) \times 10^{-12}$ c/l, ThX/Ra = 6.4 ± 0.3 なる数値¹⁶⁾ を (1951 年 8 月) 得ている。最近著者らの測定値は中井の数値に近いものが得られている。Ra 含有量が 1951~1962 の間に著しく変動しているようである。横山祐之¹⁶⁾ によれば噴気孔からの水の Ra は極めて少なく、 $0.5 \pm 0.5 \sim 3 \pm 0.5 \times 10^{-12}$ g/l である。

Rn は佐藤ら¹⁷⁾ によつて 0.42 (1957 年 8 月)~0.67 マツヘ (1958 年 9 月 17 日) が与えられている。

温泉水に伴なう噴出ガス中の Rn や Tn の含有量については著者ら^{13) 18) 19)} が詳細に調査した。第 7 表にはそれを示す。日本の他の火山ガス¹⁸⁾ と同様にあまり放射能は強くない。Rn は 3~30 マツヘで、Tn は 10~100 マツヘの程度である。大沸泉のものも Rn は 1~10 マツヘ、Tn は 30 マツヘ程度であるが、その下流の部分には Rn=9.0 マツヘ、Tn=2300 マツヘのものがある。これは日本で最も大きな含有量の一つである。これらのガスの放射能は極めて変化しやすいのであり (第 7 および 10 表)、温泉中の主成分のほとんど一定の性質と極めて著しい対照を示す。

e) 岩石の性質 玉川温泉の湧出する附近の岩石についての研究も多数にある。焼山には非常に SiO₂ の多いガラス質の安山岩や石英山岩が発見されているようであるが、この付近では複輝石安山岩が一番採集しやすい。第 10 表にはそれらの化学組成を示す。第 10 表中の No. 7, No. 8 はこれらに似た火山岩でそれぞれ日本の火山岩 113 個の平均値および北日本中央火山帯のもの 23 個の平均化学組成を示す。これらは互によく似ていて、玉川温泉附近

第 8 表 玉川温泉附近の火山岩の化学組成

	1) トンネル入口	2) 鹿湯川岸の採石場	3) 旅館うらの川岸	4) 東 森	5) 玉 川 泉	6) 毒水用トンネル入口	7) 日本の火山岩 (113個)	8) 北東日本中央火山の火山岩 (23個)
SiO ₂	57.93	57.62	58.50	59.13	58.07	58.71	57.95	58.12
TiO ₂	—	0.34	0.75	0.64	0.72	0.64	0.56	0.66
Al ₂ O ₃	14.93	17.22	15.59	16.04	16.28	17.42	17.65	17.68
Fe ₂ O ₃	3.90	3.37	2.01	4.28	2.51	1.66	3.18	3.12
FeO	5.00	4.73	6.11	3.45	5.87	5.18	4.90	4.87
MnO	—	0.13	0.17	0.226	0.11	0.13	0.20	0.19
MgO	2.46	4.44	3.98	4.12	3.95	4.15	3.23	3.19
CaO	9.60	7.92	7.99	7.27	7.62	7.52	7.03	7.69
Na ₂ O	2.70	2.43	2.14	2.48	2.48	2.72	2.81	2.51
K ₂ O	1.43	1.12	1.07	1.31	1.06	0.98	1.18	0.85
H ₂ O	0.86	(-)0.28 (+)0.78	1.36	H ₂ O(-)0.58 Ig.loss 0.87	0.58 0.94	(-)1.39 (+)0.43	1.26	1.02
P ₂ O ₅	—	0.13	0.13	0.10	0.10	0.14	0.21	0.15
S	0.23	— 100.51	—	— 100.50	— 100.27	— 101.07	—	—

第 9 表 日本の噴気孔の火山ガス凝縮水の化学的性質

試料	採取年月日	温度	pH	Cl (g/l)	全イオン (SO ₄ ²⁻ として) (g/l)	F (mg/l)
大島三原山(溶岩湖)	1951.4.1	>1000	(1.4N)	67.6	0.48	—
噴気孔1	1959.7	377	1.4	2.780	0.634	64
" 2	—	92	4.4	0.032	0.0074	—
那須茶臼山(無限)	1959.5	540	2.1	0.582	0.058	76
(大穴)	"	116	1.2	2.470	14.40	54
昭和新山カメ岩	1959.7	約700	(1.8~2.0)	0.524	0.255	186
硫黄島(鹿児島)						
(御前平)	1958.5	120	(約1N)	34.2	25.7	2450
(カマノクチ)	"	200	(約1N)	42.2	11.9	2720
玉川温泉 東 森	1959.9	100	4	—	0.347	—
" 大噴附近	"	99	4	—	0.494	—

にだけ特別の性質の火山岩の存在を示さない。また岩石のラジウム含有量も 0.5×10^{-12} g/g程度で普通の岩石と同じである。

以上のように火山ガスおよび火山岩も日本に普通に多くある性質のもので、これらと一緒に出てくる玉川温泉の特別の性質を説明する特別の性質を与えてはくれない。それで玉川温泉の特性を説明するためには、これらの普通の性質の岩石、火山ガスおよび水から適当な一般的機構を考えて行かなければならない。

3. 玉川温泉の湧出機構

a) 玉川温泉の起源 玉川温泉は前述のように、高温の温泉水が多量に、しかも極めて長い年月相当安定した湧出状態で湧出しつづけているのである。それでその起源としては Day および Allen²⁰⁾、または White²¹⁾ の推定の基礎と同様の根拠から玉川温泉の熱源としてはマグマを考えないわけには行かない。その熱を運ぶ物質としては伝導だけでなく、主体は火山ガスの移動を考える。岩石中の塩化物の流水による溶解によつては温泉中の塩化物量は説明できない²²⁾。ことに酸性の、塩酸の多い温泉としては塩化物(海水塩水など)と硫酸との反応を考えると、ある天然の高温の熱源のない限り、塩化水素は発生しないし、塩化物やフッ化物は火山ガス中には入ってこないの、天然の高温の熱源、すなわち火山性熱源と考えてよいと思う。したがって玉川温泉の生成機構として火山性温泉の生成機構を考えて行けばよいことになる。火山性酸性温泉の生成機構によつて玉川温泉の特性が説明できればよいわけで、その説明を試みる。

b) 玉川温泉の特性の説明

i) 玉川温泉の強酸性と多量の湧出量 火山性酸性泉の生成の一機構として著者は火山ガスの凝縮水の性質を考えてきた²³⁾。第 9 表には火山ガスの凝縮水の性質の一部を示す。このように極めて酸性の強い (1.4 N)、しかも Cl=67.6 g/l²²⁾、また F=2 g/l 以上という濃度の大きなものまでも知れている。これらの火山ガスの凝縮水の性質と火山ガスの性質から考えて、火山性温泉として普通に見られるものは、これらの火山ガスが凝縮したものが大体 10~20 倍に希釈されたものであることがわかる。それで熱源としてはマグマで、水の大部分が地下水ということになれば、玉川温泉の強酸性で多量の塩酸、硫酸、フッ素を含んでしかも長期間にわ

たつて多量に湧出していることは説明がつく。ただその地下水も、玉川温泉の性質の変化のあまり著しくないことから、降雨が直接に大きく影響するような性質の地下水ではなく、もつと多量の安定した供給源が主要なものと考えられる。この点には三浦彦次郎²⁴⁾の研究であるが、まだ完全には説明できていない。

ii) $Cl > SO_4$ の関係 一般に酸性泉における SO_4^{2-} の生成について普通硫化水素または硫化物の空気による酸化による考え方が広く行なわれている^{20) 25)}が、火山性温泉では火山ガス中の SO_2 , H_2S の中で SO_2 が酸化された方が多く SO_4^{2-} ができるはずであり、一般の火山性温泉中の SO_4^{2-} の量は地下水の量から考えて H_2S や硫化物が地下水で酸化されただけではできないほど多量の SO_4^{2-} を含むものが多いので、著者らは火山性酸性温泉中の SO_4^{2-} の生成の説明に SO_2 の水中の自己酸化還元反応による SO_4^{2-} 生成の機構を考えた模型実験²⁶⁾で証明したところである。玉川温泉大沸泉も SO_4^{2-} が多い例である。いずれにしても温泉中の SO_4^{2-} は塩化物とことなり、火山性温泉生成の遅い時期に2次的に生成されるものが多いことを支持するものである。すなわち火山性温泉が火山ガスの分別溶解によつて生成するときには火山ガス中の塩化物は溶液中に入るが、 SO_4^{2-} はまだあまり多くなく、三原山のマグマ水(第9表)のように Cl^- が圧倒的に多い型の酸性火山性温泉ができるはずである。実際に凝縮水として九州大岳^{26a)}および米国 California^{26b)}でこれらの例が知れており、実際の温泉では吾妻山一切経(第4表)で見られる。 SO_2 の溶液(SO_3^{2-})が高温で自己酸化還元反応で SO_4^{2-} を生成し、また地表で空気酸化を受けると SO_4^{2-} が次第に多くなり、 $Cl \geq SO_4$ が $Cl > SO_4$, $Cl = SO_4$ となり、さらに SO_4^{2-} が増加すれば $Cl < SO_4$ となり、一般の酸性泉と同様になるものであろう。すなわち玉川温泉は火山性酸性泉の初期の $Cl > SO_4$ 型をとっているものであろう。一切経温泉は $Cl \geq SO_4$ で玉川温泉よりさらに早い時期を代表するものと考えられる。また玉川温泉では $Na \ll Cl$ であり、White²¹⁾の考えている塩化物などの塩類の過熱水蒸気に溶解して運ばれてきてできる火山性温泉とはことなるものと思う。

これらの酸性泉も岩石その他と反応を重ねると次第に酸性を失い、中性、アルカリ性に変化する。浜田や伊万里の残留マグマ水²²⁾はこれに相当するものと考えられる。

他方第2表(b)の玉川温泉附近の温泉では塩化物は極めて少ない火山性酸性泉がある。これは火山ガスの分化によつて火山ガス中の塩化物が大部分凝縮水などによつて除去された残りの火山ガス(主として H_2S , SO_2 を含む)がさらに地下水など反応して酸化されて SO_4^{2-} を生成してできた火山性酸性泉と考えればよく説明できる。ことに玉川温泉は一般にこれらの温泉より地理的に低い部にあり、火山ガスがさらに上部に逃げたと考えて矛盾はない。そしてこれらの $Cl < SO_4$ 型の温泉は地表近くで生成されているため、降雨によつてその性質が著しく変化するが¹¹⁾、大沸泉はあまり変化しないもの¹¹⁾これらを支持する事実であらう。

iii) 金属成分 玉川温泉の主要な陰イオンは大体マグマ発散物から導入されるとして説明されるが、金属成分はそんなにかんたではないようである。もちろんマグマ発散物として多数の化合物(ことに塩化物)が相当高い蒸気圧をもつことはよく知られているが、温泉中の濃度や量から考えて、これだけで全部説明できるとは考えられない。水の大部分が地下水から供給されると同様に金属成分の相当の部分は附近の岩石、鉱物、地下水などから反応によつて導入されると考えてよいようである。

iv) 放射能 著者らは放射性鉱物の産出の知られてない地方の放射能泉、島根県の池田鉱泉や山梨県の増富鉱泉などの成因を説明するため、普通の岩石、鉱物からのラジウムの溶解お

第 10 表 玉川温泉 No. 4 号泉の Rn, Tn 含有量の時間変化

採取年月日	時間	温度 ℃	Rn 含有量 (mache)	Tn 含有量 (mache)	Tn/Rn	採取年月日	時間	温度 ℃	Rn 含有量 (mache)	Tn 含有量 (mache)	Tn/Rn
1952.10.18	—	94	15	1200	80	1955.10.10	13.35	98	6.5	1170	180
1953.10.10	—	96	4.4	180	40	"	14.39	98	5.3	1170	220
1954.10.3	14.22	95	3.9	470	120	"	15.47	98	5.3	1110	210
"	14.39	—	4.2	530	125	"	17.01	—	7.9	1110	140
1954.10.4	12.10	93	11	1800	160	1956.10.2	—	92	4.7	—	—
"	13.10	—	9.1	1700	190	1956.10.11	10.25	—	4.6	1400	300
"	14.10	—	7.0	1300	190	"	10.52	—	4.7	940	200
"	15.10	—	4.6	2500	540	"	11.02	—	4.6	—	—
"	16.10	—	8.4	2500	300	1957.7.22	8.52	92	11.4	900	79
1954.10.5	10.49	—	18	3600	200	"	9.50	91.8	8.8	640	73
"	11.51	—	9.8	2450	250	"	10.50	91-	10	950	95
"	12.22	—	11	4200	380	"	10.50	93	10	950	95
"	13.54	94.5	4.5	1400	310	1957.7.23	14.49	92.8	9	870	97
"	22.17	—	3.9	1050	270	"	15.19	92.5	11.6	1400	120
1954.10.6	10.06	95.5	11	5300	480	1958.10.15	14.30	85	20.9	—	35.5
"	11.05	—	11	4500	410	"	20.30	88	28.0	—	37.0
"	11.15	—	8.4	4600	550	1959.10.1	23.30	87	8.3	—	18.5
"	16.50	90	10.5	5800	550	1959.10.2	14.17	87	9.5	650-68	—
1955.10.9	10.09	—	7.2	—	—	"	14.35	—	5.9	350-60	18.5
"	12.46	—	13	—	—	1960.7.31	8.55	—	11	1100-100	—
"	14.56	—	12	—	—	"	9.05	92	12	—	—
"	16.04	—	4.9	1200	240	"	9.20	—	12	—	—
"	16.33	—	5.2	1150	220	"	16.10	88.7	12	1200-100	—
"	16.47	—	12	—	—	"	16.25	88.7	13	—	—

よび微量の放射性元素の2次的濃縮の模型実験を多数行なつてそれを証明してきた²⁷⁾。黒田和夫も計算によつてこれを支持している。玉川温泉の地下に放射性物質が多量に存在するならば説明は容易である²⁸⁾、玉川温泉では酸性であるため、池田鉱泉や増富鉱泉のように $\text{Fe}(\text{OH})_3$ と CaCO_3 の沈殿はできないので、これらによるラジウムの濃縮は考えられない。それでこれらを統一的に説明するために、玉川温泉では硫酸バリウムおよび硫酸鉛など(北投石など)による濃縮を考えた。実際の模型実験で、塩酸酸性の溶液では普通の花コウ岩などからラジウムの 10^{-12}g/l 程度の溶液ができ、これらの溶液から 10^{-8}g/g 程度のラジウムの BaSO_4 は容易にできることがわかるのである。それで玉川温泉の地下にこれらの硫酸塩による放射性物質の2次的濃縮物があると考え、これから温泉水中に Ra, Rn, Tn その他の放射性物質が導入されるものと考え、実際に大沸泉水中に北投石の結晶が発見されている¹⁾²⁹⁾。なお大沸泉は北投石を溶解することができるという南英一らの実験もこの考え方を支持するものである。地下からの温泉水中の放射性物質は地表近くの温泉沈殿物生成のときに集濃縮され、その濃縮されたものから再び溶解して放射能を形成するものであろう。このような放射性物質が地表近くに存在することは、温泉ガスの放射能が降雨その他で著しく変化することによつても支持される(第10表)。この玉川温泉も普通の火山性酸性泉であるが、バリウムや鉛の硫酸塩が適当量沈殿するため、放射性物質が2次的に沈殿濃縮され、それから放射能泉としての性質が与えられる2次性の放射能泉とすれば説明できるのである。

その他の詳細は玉川温泉研究班から発行される南英一先生の御退官記念出版“Geochemistry of the Tamagawa Hot Springs”(1963)を参照されたい。

文 献

- 1) 南英一: 鉱物学雑誌, **2**, 第1号, 1~23 (1954).
- 2) 衛生試験所集報, 第34号, 10~11 (1929); 第54号, 7~8 (1940).
- 3) 三浦彦次郎: 日化, **59**, 179, 375, 597 (1938); **60**, 257, 526 (1939); **77**, 417 (1956).
- 4) 岩崎岩次: 温泉科学, 第2卷, 2~3号, 1~14 (1942).
- 5) R. ISHIZU: "The Mineral Springs of Japan" (1915).
- 6) 岩崎岩次: "温泉" (1949).
- 7) 野口喜三雄: 温泉科学, 第1卷, 17 (1941); 第3卷, 13 (1943).
- 8) I. IWASAKI: Bull. Tokyo Inst. Technol., No. 46, 1~60 (1962).
- 9) 岩崎岩次: "火山の化学", (1948).
- 10) 綿抜邦彦: 玉川温泉研究会報告, **5**, 44 (1957); **6**, 18 (1959).
- 11) 佐原良太郎: 秋田大学天然資源研究所報告, **20**, 15 (1959).
- 12) 小穴進也, 松尾禎士, 安藤直行: 玉川温泉研究会報告, **5**, 34 (1957).
- 13) I. IWASAKI, T. OZAWA, M. YOSHIDA, T. KATSURA, B. IWASAKI and M. KAMADA: Bull. Volcanologique **24**, 23 (1962); I. IWASAKI, T. OZAWA, M. YOSHIDA, T. KATSURA, B. IWASAKI, M. KAMADA and M. HIRAYAMA: Bull. Tokyo, Inst. Technol. No. 47, 1~54 (1962).
- 14) T. NAKAI: Bull. Chem. Soc. Japan, **15**, 342 (1940).
- 15) 斎藤信房: 玉川温泉研究会十周年記念号, p. 14 (1954).
- 16) 横山祐之: 玉川温泉研究会十周年記念号. p. 147 (1954).
- 17) 佐藤彰, その他: 玉川温泉研究会, **6**, 51, 54 (1959).
- 18) I. IWASAKI, T. KATSURA, H. SHIMOJIMA, M. KAMADA: Bull. Volcanologique, II, **18**, 103 (1956).
- 19) 鎌田政明: 日化, **82**, 1000, 1143, 1346 (1961).
- 20) E. T. ALLEN, A. L. DAY: "Hot Springs of the Yellowstone National Park," (1935).
- 21) D. E. WHITE: Bull. Geol. Soc. Am., **68**, 1637 (1957).
- 22) I. IWASAKI, N. KOKUBU, T. KATSURA: Bull. Chem. Soc. Japan, **29**, 379 (1956).
- 23) 岩崎岩次, 桂敬, 坂戸直行, 平山光衛. 日化., **78**, 164 (1957).
- 24) 三浦彦次郎: 日化, **79**, 535 (1958).
- 25) 野口喜三雄: 地球化学討論会 (1952); M. ICHIKUNI: Geochim. et Cosmochim. Acta, **17**, 6 (1959).
- 26) I. IWASAKI, T. OZAWA: Bull. Chem. Soc. Japan, **33**, 1019 (1960).
- 26a) 古賀昭人: 温泉, 第29卷7号, 32 (1961).
- 26b) D. E. White, E. T. Anderson, D. K. Grubbs: Science, **139** (No. 3558) 919 (1963).
- 27) 岩崎岩次, 浮本勇: 日化, **64**, 1272 (1943); **72**, 94 (1951); 岩崎岩次, 村上富男: 日化, **67**, 106 (1946); 岩崎岩次, 松田文男: 日化., **72**, 97 (1951).
- 28) Y. YOKOYAMA: Bull. Chem. Soc. Japan, **29**, 727 (1956).
- 29) 南英一, 佐藤弦: 玉川温泉研究報告, **5**, 32 (1957).