

## 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 —

中村 久由\* 比留川 貴\*\*

## Geology and Hot springs in the Manza Thermal area, Gunma Prefecture

By

Hisayoshi Nakamura &amp; Takashi Hirukawa

## Abstract

The Manza thermal area, Gunma Prefecture, situated on the western mountain side of the Kusatsushirane volcano is one of the typical volcanic hot springs in Japan.

Fumaroles and hot springs are distributed along the Manza river. Fumaroles named as Karafuki spout wet vapour, and hot springs are characterized by strong acidity and high content of  $Cl'$  and  $SO_4''$  approaching high temperature zone. Judging from the similarity of chemical properties of condensed water of fumaroles and hot springs, it is clarified that fumaroles in this area are strongly affected by underground water; and they are regarded as secondary vapour emitted from the boiling acidified underground water.

The altered zones are divided into siliceous and argillaceous one. Siliceous zone is situated on the eastern top of argillaceous products. The dyke-formed argillaceous zones developed along the high way from Manza to Karuizawa are regarded as deeper facies of alteration in this area. These are composed of unaltered two-pyroxene andesite, weak altered part, dark blue clayey part, (iron sulphide zone) and white clayey part (Kaolinite zone). The analytical results of each part are shown as follows.

(1)  $SiO_2$  has an intimate relation with the balance of iron and iron sulphide. Concentration and migration of  $SiO_2$  are caused the compensation with the loss and gain of Fe content.

(2)  $TiO_2$  and  $Al_2O_3$  are unvariable through alteration process.

(3)  $MgO$  has a opposit relation to  $K_2O$  between the dark blue clayey part and the weak altered part.

(4)  $CaO$  and  $Na_2O$  are decreased approaching the centre of alteration. Altered zones are regarded as the products formed by fumarolic action in active time, while hot springs emitted from these altered zones are produced secondly by the underground water mixed with fumarolic gas. According to the distribution of  $Cl'$  content of thermal water there are two types of hot springs in altered zones. One is the type showing high  $Cl'$  content in the centre of thermal activity, the other is low in the centre. It may be probable that the above-mentioned distribution of  $Cl'$  content is under the control of diffusing speed of fumarolic gases through the country rocks.

## まえがき

上信越国境附近はわが国でも新期火山の密集する地域として知られている所である。なかんずく、北部信濃地方から上越国境の三国山系に至る地帯では、第三紀深成岩(石英閃緑岩)およびいわゆる緑色凝灰岩類を基盤とする地域に多くの火山が存在し、同時に温泉もこの地方一帯にわたって広く分布している。いわばフォツサマグナ東縁地帯にあたるこの地域の温泉については、これまで

その調査結果のいくつかを報告してきたが、ここで述べようとする群馬県万座温泉は草津白根火山の西側山腹に位置する温泉で、この東側にある草津温泉とならんで、わが国でも典型的な火山地帯温泉の1つに数えられるものである。

火山地帯温泉の性格が、温泉地質学の基礎をなすものであることは、いまさら強調するまでもない。特に、噴気と温泉とが共存する地域は、地下水と噴気ガスとの接触状態を考察するうえに、重要な意味を含む。この両者の関係については、これまで、変質帯上に分布する噴

\* 地質部  
\*\* 技術部



第1図 万座温泉附近地質図(熔岩の分布は5万分の1草津図幅による)

気・温泉の成分的特徴を手掛りとして1, 2の地域で概念的な説明を与えたが、変質帯の構成、形態等の点が充分明らかにされなかつたため、多くの問題が未解決のまま残されていた。

万座温泉における調査も変質帯の諸性質を検討し、地下水と噴気ガスとの接触状態についての解析に主眼をおいたものである。幸いこの地域では、道路の切割に沿い、比較的良好な変質帯の断面がみられるので、変質帯の性質を考察するうえに、まず条件に恵まれた調査地であるといえるところである。

以下、調査結果の概要を述べることにする。

## 1. 地質概説

万座温泉附近の構成地質はほとんど高井熔岩からなり、その東と南側に新期の白根熔岩および本白根熔岩が分布する(第1図)。この高井熔岩は「須坂」地質図幅の東端にある黒湯山から、万座山に連なるものの一部で、黒色緻密の複輝石安山岩からなり、この地方の新期火山活動のうち、初期の活動に関連あるといわれるものである。

万座温泉に分布する高井熔岩は相当広い範囲にわたって変質作用を蒙る。変質帯については、項を別に設けて説明するが、温泉・噴気とのつながりもあるので、一応こゝでその概略を述べておくことにする。

万座附近の変質帯は万座川上流の各支流に沿って発達し、次の地域に大別される。

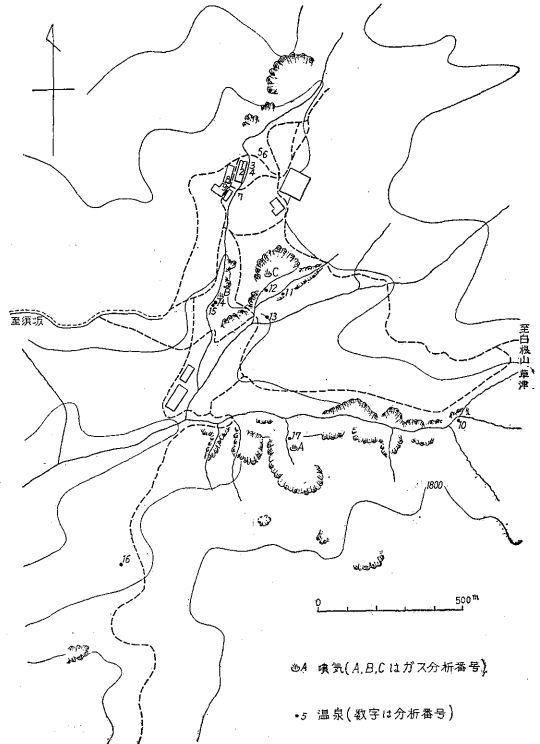
1. 万座沢に沿うもの(万座沢変質帯)
2. 大苦湯沢に沿うもの(大苦湯沢変質帯)
3. 法性沢に沿うもの(法性沢変質帯)

変質帯の分布範囲は一般に地形が緩く、局所的に地凹地形を呈するところもある。なお上記の各変質帯の東側に、著しく堅く珪化した部分があり、万座沢で特に著しい。また、この万座沢に沿い、いま述べた珪化物の岩片を含む褐鉄鈦質の礫層が分布し(第1図)、この附近を覆うローム層に移化している。そして、万座沢に沿うこの褐鉄鈦質の礫層はロームとともに変質しているので、この地域の變質作用は、礫層の堆積以前に始まり、引続き進行して現在みられるような範囲にまで及んだとみなされるのである。

## 2. 温泉および噴気

### 2.1 分布

万座温泉というのは、前述の変質地帯から湧出するいくつかの温泉と、この地域からいくぶん南にはづれて位置する卵茹および垂水湯等の温泉を含むものをいい、これらを大別すると上の区の湧泉群(万座沢変質帯)と下の



第2図 噴気および温泉分布図

区の湧泉群(大苦湯沢変質帯・法性沢変質帯)とに分かれる(第2図)。これらのなかには、通称「地熱」および「空噴」と呼ばれて、噴気状の露頭を示すものもあるが、その大部分はいわゆる温泉であり、後でも述べるように、この地域はすでに相当地下水の影響を受けているとみなされるところである。

次に温泉の分布について簡単な説明を加えておく。

**万座沢変質帯に伴う湧泉群** 上の区の湧泉群がこれに相当する。万座沢を挟んで、右岸と左岸から湧出し、右岸のものは直接湧出状況はみられないが、左岸では湯島をなして流出している。なお、変質帯の中心では万座沢から導いた川水を地熱で加温しているところもある。

**大苦湯沢変質帯に伴う湧泉群** 下の区の主体をなすもので、大苦湯沢の入口と奥との2地域から湧出する。入口附近のものなかには「地熱」といって噴気状の露頭を示すものであるが、その勢力はあまり活潑でない。

**法性沢変質帯に伴う湧泉群** 比較的広い変質区域でありながら、温泉の数は割合少ない。変質帯のほぼ中心に位置を占める「空噴」は、この地域内で見掛上最も強い噴出状態を示すが、そのすぐ傍から強酸性の温泉が湧出している。変質帯東端にある奥万座温泉は法性沢上流の河原から湧出し、多量の硫化水素を含む。なお、後でも

第1表 万座温泉噴気ガス

No.	試料採取地	Temp. (°C)	pH	Acidity (m. eq/l)	Total SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Free H <sub>2</sub> S	T.S.M.	Total SiO <sub>2</sub>	Cl <sup>-1</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+1</sup>
1	日進館ラジウム泉	93.2	2.8	5.74	783	6.3	1,571	141	245	0.5
2	〃 鉄湯	85.1	2.7	6.62	725	66.0	1,405	123	179	0.5
3	常盤屋 No. 1	55.8	2.8	9.37	659	47.9	1,070	112	104	0.8
4	〃 No. 2	88.0	2.8	7.13	672	37.9	1,255	127	236	0.5
5	松屋源泉	62.6	3.5	5.63	66	84.8	155	43	11.4	0.4
6	加熱前表流	16.2	3.8	0.68	72	0.0	200	46	14.2	0.4
7	乱麻の滝	14.5	3.3	1.26	122	0.0	265	51	11.3	0.6
8	日進館苦湯	81.1	2.9	7.29	743	58.0	1,310	126	184	0.6
9	常盤屋 No. 3	77.5	3.0	8.96	859	72.0	1,525	219	241	0.5
10	奥万座白根山荘	54.0	3.2	12.78	368	719	645	74	47	0.5
11	大和屋大苦湯 No.1	62.8	2.9	15.21	925	107.3	1,230	95	154	0.6
12	〃 No.2	59.5	2.9	11.97	835	57.4	1,172	86	164	0.6
13	豊国館源泉	70.0	2.8	13.68	712	55.4	1,085	125	161	0.6
14	地熱 No. 1	90.0	1.9	24.0	1,270	28.4	1,903	181	70	0.5
15	〃 No. 2	93.3	2.1	20.4	1,440	15.2	2,977	401	773	0.5
16	草津営林所	90.5	2.0	78.7	5,320	18.9	7,498	393	40	20
17	空噴際湧湯	95.0	1.7	63.2	4,650	11.7	10,556	393	3,414	1.6
18	空噴凝縮水	94.5	—	3.00	20	—	146	22	77	0.5

	No.	Temp.	Condensed H <sub>2</sub> O (vol.%)	H <sub>2</sub> S (vol.%)	CO <sub>2</sub> + (SO <sub>2</sub> ) (vol.%)	O <sub>2</sub> (vol.%)	残ガス (vol.%)
ガス成分中上段は無水物の組成, 下段は含水物の組成を示す	A. 空噴	94.8	99.4	{ 54.9 { 0.3294	{ 40.6 { 0.2436	{ 0.3 { 0.0018	{ 4.2 { 0.0252
	B. 地熱	94.3	99.3	{ 41.6 { 0.2912	{ 39.6 { 0.2772	{ 0.3 { 0.0021	{ 18.5 { 0.1295
	C. 大苦湯	93.5	99.2	{ 29.3 { 0.2344	{ 63.4 { 0.5072	{ 0.2 { 0.0016	{ 7.1 { 0.0568

分析: 比留川 貴

述べるが、この区域の変質範囲は地質図で示すよりもつと西側に延びているので、一見、いままで述べた温泉群よりかなり隔たつた場所に位置する卵茹および垂水湯等の温泉もこの変質帯の西端に伴なう湧泉とみなすことができる。このうち、卵茹は微弱な噴気露頭をもつといわれるが、その詳細は明らかでない。また垂水湯の源泉附近一帯も湿地(褐鉄鉱?)となつているためその状況は不明である。

2.2 温泉水および噴気ガスの化学成分

前項で述べたように、この地域の温泉および噴気は変質帯の分布と密接なつながりがある。

今回、これらの温泉・噴気のなかから代表的な試料を選び、主要化学成分の分析を行つたが、こゝではその分析結果を参考にして温泉水の化学性について簡単な説明を加えておく。

なお、変質帯と温泉成分との関連については、項を改めて述べることにする。

温泉水 第1表の分析結果から明らかのように、こ

の地域の温泉水はいずれもかなり高温で、しかも液性は強い酸性を呈する。

この地域の温泉が、成分含量のうえでどのような特徴をもつかという点を検討するため、各成分の分布および各成分間の相互関係を列記すると次の通りである。

(i) Cl<sup>-1</sup> の分布 第1表の分析表をみると、各変質帯に伴なう温泉は、水温、Cl<sup>-1</sup> 含量のうえからいくつかのグループに大別されるが、その配列をみるとほぼ中心にきわめて Cl<sup>-1</sup> 含量の高い湧泉を置き、その外側に移るほど、Cl<sup>-1</sup> 含量が遞減する傾向がある。次にいま述べたグループを示す。

(1) 万座沢変質帯に伴なうもの

Cl<sup>-1</sup> (mg/l)      水温 (°C)

上の区湧泉群    104~245      55.8~93.2

(2) 大苦湯沢変質帯に伴なうもの

Cl<sup>-1</sup> (mg/l)      水温 (°C)

地熱 No. 2      773      93.5

下の区湧泉群    154~161      59.5~70

および温泉水分析表

単位 mg/l

Al <sup>3+</sup>	Mn <sup>3+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca/Mg	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Na/K
6.3	3.4	0.1	0.0	36.9	91.2	0.40	178.2	22.0	8.1
9.4	5.0	0.2	0.0	34.0	80.4	0.42			
19.0	2.9	4.3	0.0	33.7	35.0	0.96	89.7	21.4	4.2
10.4	10.3	1.7	0.0	46.5	59.0	0.79			
5.8	0.2	0.1	0.0	11.2	3.7	3.03			
7.8	tr.	0.1	0.1	13.4	3.9	3.44			
7.9	0.2	0.3	1.2	17.7	5.5	3.22			
8.1	4.0	0.5	0.0	35.4	79.7	0.44	139.3	16.4	8.5
11.1	7.0	2.2	0.0	41.1	77.5	0.53			
9.3	0.6	0.3	0.0	83.2	15.3	5.44	29.9	6.4	4.7
12.7	1.3	1.4	0.0	52.5	32.3	1.62			
13.4	2.0	0.5	0.0	54.4	33.4	1.66			
13.1	2.9	0.9	0.0	55.4	34.7	1.60	100.3	26.6	3.7
21.7	1.0	68	0.0	28.0	17.2	1.65			
7.1	26.3	13.6	0.0	42.1	158.6	0.27	390.3	67.9	5.7
245	2.2	56.0	0.0	70.8	45.8	1.55			
71	113	11.0	0.0	37.6	484	0.08	1941.4	263.1	7.3
5.1	—	4.4	0.0	2.7	6.1	0.44			

地熱 No. 1      70                      90

(3) 法性沢変質帯に伴なうもの

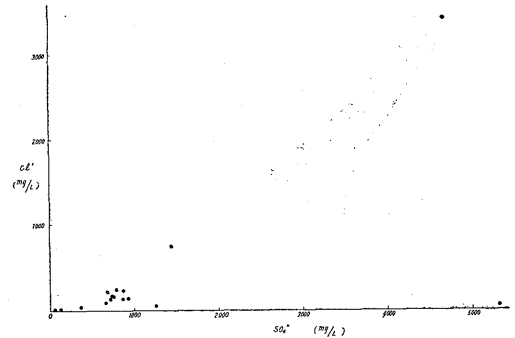
	Cl' (mg/l)	水温 (°C)
空噴傍湧泉	3417	95
奥万座温泉	47	54
垂水湯	40	90.5

(4) その他地表水の性質に近いもの

	Cl' (mg/l)	水温 (°C)
乱麻滝	11.3	14.5
松屋源泉	11.4	62.6
万座沢上流沢水	14.2	16.2

上記の各グループのうち、(4)はほとんど地表水に類するので、一応説明を省略することとし、他のグループについてその占める位置と Cl' 含量とを比較してみると、各変質帯は東西方向に Cl' 含量を変えるだけでなく、さらに空噴を中心として、法性沢→大苦湯沢→万座沢の方向に移るほど、Cl' の最高値が漸次遞減することがわかる。また変質帯の規模については上で挙げた順に従がい、南から北に移るほど漸次小さくなることを併せて考えると、いま述べた Cl' 含量の高低は変質作用の強さに関連あることを示しているともいうことができる。

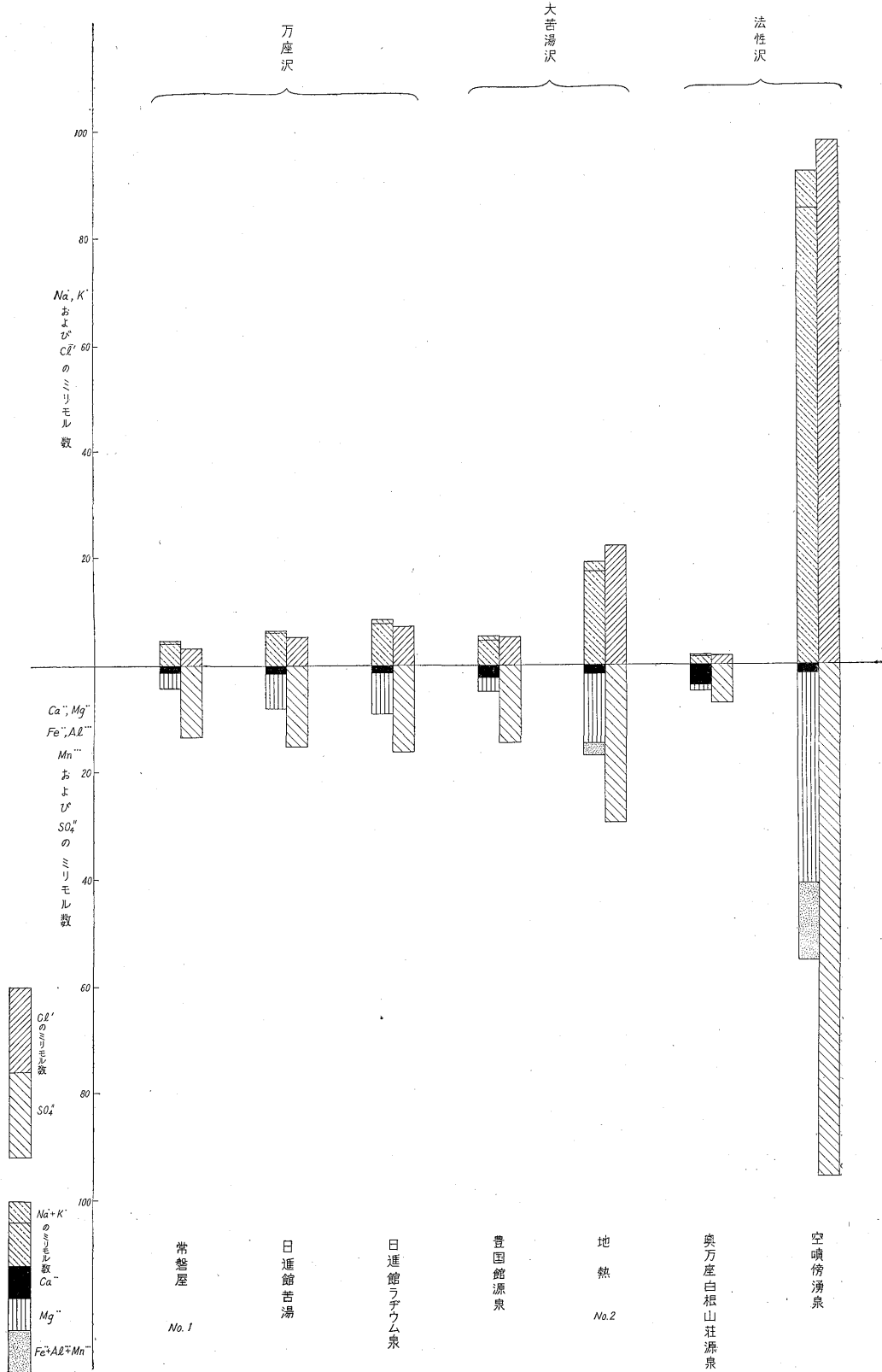
(ii) SO<sub>4</sub>' SO<sub>4</sub>' 含量の分布がどのような傾向を示すかということを知るために、まず Cl'~SO<sub>4</sub>' 相関図を作ってみると第3図の通りである。この図をみると、2,3の例外を除き、SO<sub>4</sub>' は Cl' と正の相関関係にある



第3図 Cl'~SO<sub>4</sub>' 相関図

ことがわかる。そして高温温泉では、Cl' 含量の最低の場合でも大体 500 mg/l 程度の SO<sub>4</sub>' を含むことになる。例外の1つである奥万座温泉は 719 mg/l という多量の硫化水素を含むにもかかわらず、SO<sub>4</sub>' としては僅か 368 mg/l 程度しか含有しないのは、低温のため H<sub>2</sub>S の酸化が充分行われないためであろうか。逆に、これも例外として挙げられる地熱 No. 1 および垂水湯はいずれも、むしろ遙かに高い SO<sub>4</sub>' 含量で特徴づけられる。これは、その産出状態からみて、地表近くで生成した SO<sub>4</sub>' が蓄積されたためであろう。

このように、SO<sub>4</sub>' のなかには、初生的に Cl' と平行して供給されるものと、地表部で、2次的に蓄積されるものがある。そして、一般に高温で Cl' 含量の多いも



第4図 温泉成分比較図

のほど  $H_2S$  が少なく、低温で  $Cl'$  含量の少ないものほど多量の  $H_2S$  を含むことから知られるように、 $SO_4''$  の生成は噴気ガス中に含まれる  $H_2S$  の酸化に関連があり、特に初生的な  $SO_4''$  の生成は亜硫酸ガスの発生量に直接的なつながりをもつと考えられる。

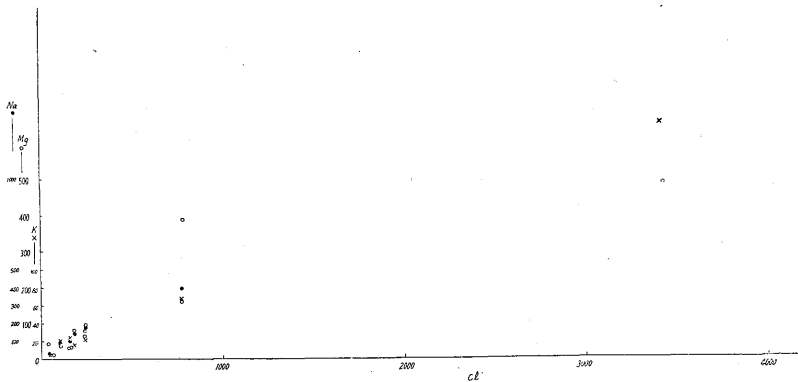
(iii)  $Na'$  と  $K'$  万座温泉群の各湧泉が陰陽イオンの結合関係のうえでどのような特徴をもつかという点を検討するため、別報文で試みたように、各成分含量をミリモル数に換算し、その値をおのおの比較してみると第4図の通りである。

第4図をみてまず注目をひくことは、空噴や地熱No. 2 傍の湧泉のように、 $Cl'$  含量高く、しかも酸性の強いものでも、 $Cl'$  に対するアルカリの含量がほとんど等量に近いということである。特に、いま挙げた空噴や地熱No. 2 を除く上の区、下の区湧泉群のほとんど全部が  $Cl'$  に対してアルカリの過剰という形を示している。いいかえるとこの地域の温泉は、相当量の陽イオンを含むことを示し、そのなかからアルカリの含量だけを取り出してみると、この成分は、 $Cl'$  だけでなく、 $SO_4''$  の生成に

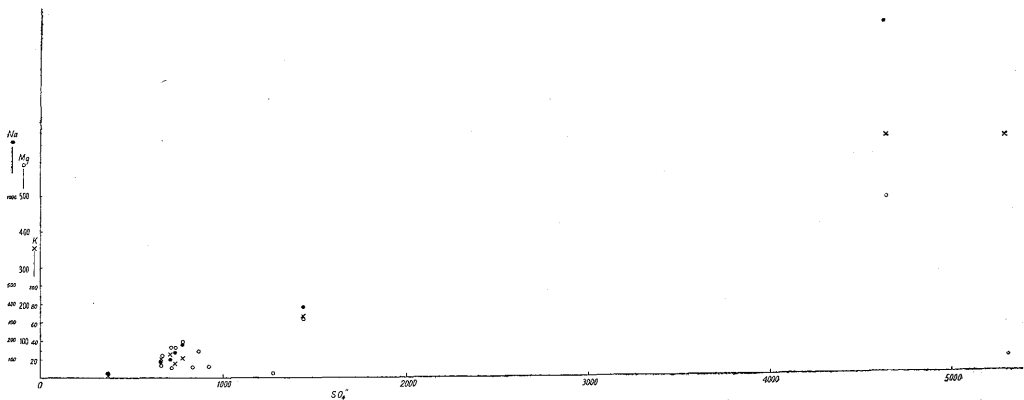
も関連して、温泉化作用の過程で接触する岩層から抽出されたとみなされるのである。

第5図および第6図は、 $Cl'$  および  $SO_4''$  と  $Na'$ ・ $K'$  および  $Mg''$  の相関図を示したものであるが、 $SO_4''$  における2,3の例外を除き、いずれもこの間に正の相関関係のあることを明瞭に認めることができる。

(iv)  $Ca''$  と  $Mg''$   $Ca''$  と  $Mg''$  のうち、 $Mg''$  含量については、第5図および第6図で示したように、ほぼ  $Cl'$  および  $SO_4''$  と正の相関関係にあることが知られる。特にこの関係は  $Cl'$  との間で明瞭である。これに対して、 $Ca''$  含量の方は、 $Cl'$  および  $SO_4''$  と明瞭な関係を示さず、たゞ僅かに、 $Cl'$  および  $SO_4''$  が逓減するものに、若干増加するような傾向がみられる。このように  $Ca''$  含量が、僅か  $30\sim 85\text{ mg/l}$  程度にすぎず、しかも  $Cl'$  および  $SO_4''$  とあまり明瞭な相関関係を示さないことは注目に値する。すなわち、この関係から推察すると、温泉水と接触する岩層の  $CaO$  が、 $Na_2O$ 、 $K_2O$  および  $MgO$  等に較べ異常に少ないためにこのような現象が生じたのではないかと思われるからである。



第 5 図



第 6 図

**噴気ガス** 万座附近における噴気露頭は僅かに空噴と地熱にすぎない。しかもこれらの噴気のすぐ傍に、酸性の熱水が湧出しているので、上記の露頭は高温の温泉から発散した2次的な蒸気とみられる疑いが強い。特に、後述のように空噴の噴気凝縮水の成分が多分に温泉水に近い性質を示すことからでもこのことがうかがわれる。このように大苦湯沢に沿う地熱および空噴等の噴気は高温温泉の沸騰によって生じたいわゆる2次的な湿り蒸気に相当するものとみなされる。

なお、空噴の凝縮水については第1表から明らかなように、その化学成分のうえでいくぶん異なつたところがある。すなわち、一般の噴気地帯のそれに較べてその液性は酸性であり、しかも比較的多量のCl<sup>-</sup>を含み、またCa<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Al<sup>3+</sup>等の陽イオンも存在する。一般の噴気ガスの凝縮水がほとんど中性ないし微酸性であり、しかもCl<sup>-</sup>含量はきわめて微量である。もちろんAl<sup>3+</sup>等はほとんど存在しない。存在地点からみて、この地域の噴気ガスはいわゆる火口性噴気ガス(註1)に相当するものでないことは明瞭であるから、空噴における凝縮水の化学成分の異常は、温泉水の混入に起因しているといふことができる。すなわち、空噴の噴気は純粋な乾き蒸気ではなく、高温温泉水の沸騰によって生じたいわゆる湯まじり蒸気に類するとみなされるのである。

### 3. 変質帯

万座附近の変質帯は前述のように、万座沢、大苦湯沢および法性沢に沿って発達するが、その主体は粘土化帯であり、東側の一部に、硬質の珪化帯を伴う。

#### 3.1 珪化帯と粘土化帯

ここでいう珪化帯とは、珪石帯と区別して用いたもので、変質帯の一部が珪酸の影響によって固く固化されたものをいう。したがって、その原岩(珪化作用を受けない以前の岩石)が珪石質の場合、粘土質の場合、あるいはほとんど変質を受けない熔岩の場合もある。この地域でも、各沢の変質帯ごとでその原岩を異にし、万座沢および大苦湯沢では粘土化帯とその上位にある珪石質の一部が珪化され、法性沢では粘土化帯の一部が固化している。万座沢および大苦湯沢における粘土化帯と珪石質の部分との関係は、明らかに一連の変質作用によって生じたものであり、珪石質の部分は最も浅い変質相とみなされるので、この地域の變質作用は大別して粘土化作用(その一部に珪石化作用)と珪化作用とに分けることができる。そして、このうち珪化作用は、変質作用の行われ

たある過程で、特に東側で強く行われた形跡を残し、珪化帯が褐鉄鉱質の礫層に覆われていることから判断して、その時期は變質作用の比較的初期であつたとみなすことができる。

#### 3.2 珪石帯と珪化帯

万座沢および大苦湯沢での観察によれば、粘土化帯の上位に珪石帯の存在が知られる。特に万座沢ではほとんど石英粒からなる珪石帯の一部が、まだ固化されることなく、割合脆い状態で存在する。しかし、同じこの万座沢でもいま述べた珪石帯の一部と下位の粘土化帯がはなはだ緻密に珪化され、この珪化帯がさらに大苦湯沢および法性沢にまで及んでいることは前述の通りである。

このように、珪石帯と珪化帯とは一応区別される性質のものであるが、このうち、珪石帯の生成については、すでにこれまで、しばしば報告したように、噴気地帯の表面が酸性の状態におかれることによつて、岩石中の陽イオンが溶脱し、残留した珪酸分からなる脆い珪石帯を生ずる現象とまつたく同じである。

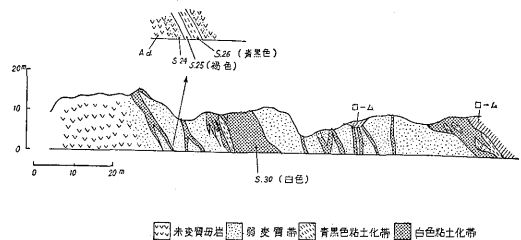
一方、珪化帯については前者ほど、その機構が単純ではなく、この地域の場合でも、変質帯の東側の部分だけ、なぜ珪化作用を受けたかという問題については充分明らかでない。たゞ、珪化作用の一般的な問題として、附加された珪酸が、未知の源から導かれたものか、あるいは変質作用の過程で1つの系内で相対的に珪酸分の濃集をきたしたためか、ということについては、1,2の資料が得られたので、これについてはまた後で改めて説明を加えることにする。

#### 3.3 粘土化帯の成分変化

この地域の変質帯はその大部分が、主として粘土質の産物からなる。もちろん、場所によつてその表面が軟質あるいは硬質の珪石質フィルムで薄く覆われているところもあるが、全般的にみると、その主体はほとんど粘土である。

この地域のなかで、法性沢変質帯の西側を通る万座一軽井沢自動車道路に沿い、脈状粘土化帯の新鮮な断面がみられるところがある。

第7図はこの道路に沿い約1kmにわたる変質範囲



第 7 図

註1) 爆裂火口等のように火山活動の中心から噴出する噴気ガスで、凝縮水には多量の遊離塩酸を含むものを指す。



第2表 変質帯の化学成分

No.	20	24	25	26	30	66	68	71
SiO <sub>2</sub>	56.57	56.36	57.30	52.53	68.61	63.44	82.60	58.72
TiO <sub>2</sub>	0.77	0.76	0.75	1.03	1.01	0.88	0.37	0.65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.55	17.61	15.12	19.13	17.76	17.32	11.62	16.72
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.15	5.18	13.24	0.63	1.41	7.71	0.99	3.45
FeO	3.80	3.52	0.21	0.15	0.14	0.22	0.07	3.55
Fe	—	—	—	7.13	—	—	—	—
MgO	3.61	4.15	1.08	0.40	0.74	0.44	1.27	3.16
CaO	6.38	2.53	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	7.03
Na <sub>2</sub> O	2.43	1.55	0.26	0.18	0.44	—	—	—
K <sub>2</sub> O	1.33	0.44	2.15	2.82	1.63	—	—	—
+H <sub>2</sub> O	2.30	5.00	5.74	4.79	3.61	—	—	—
-H <sub>2</sub> O	0.92	2.68	3.96	3.00	4.52	—	—	—
Ig. loss	—	—	—	—	—	8.00	2.76	2.44
CO <sub>2</sub>	1.05	—	—	—	—	—	—	1.41
S	—	—	—	8.20	—	—	—	—
Total	99.86	99.78	99.82	100.00	99.88	—	—	—
Sp. gr	2.76	2.75	2.82	2.92	2.65	—	—	—

分析：前田憲二郎

のなかで最も変質の著しい部分をスケッチしたものである。いうまでもなくこの変質部分は地表からある深さにおける変質状況の横断面であるから、原岩から変質の中心に向かい、各部分で、その成分を比較すれば、脈状変質帯における水平的な成分変化の状況がある程度理解できるはずである。

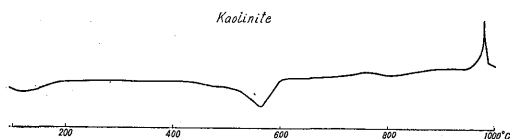
第2表はおのおの変質の程度に応じ、採取した試料の分析結果を示したものである。次にこの分析結果から、成分変化について2,3の点を検討してみることにする。

粘土化帯の構成

まず断面に沿ってみられる岩質の相違について簡単に述べておく。この変質帯は肉眼的に次の4帯に大別できる。

- 外側 非変質帯(母岩)
- 弱変質帯
- 青黒色粘土化帯
- 中心 白色粘土化帯

非変質帯はいうまでもなく未変質の母岩であつて、ここでは黒色複輝石安山岩の高井熔岩がこれに相当する。なお、この母岩の試料は変質帯に接近した部分から採取したため、2次的に生成した若干の方解石を含んでい



第8図 白色粘土化帯 No. 30 の示差熱分析 (分析：種村光郎)

る。弱変質帯はまだほとんど原岩の構造をそのまま残し、僅かに斑晶の斜長石が白色に変質し、スポット状を呈するものである。白色粘土化帯は黄鉄鉱をほとんど含まず、白色の柔軟な粘土で特徴づけられるが、このなかに赤褐色の鉄の縞を作ることがある。最後に、青黒色粘土化帯と呼んだのは、粘土化帯のなかで最も広い分布を占めるもので、その色調は微粒の硫化鉄によるものである。

なお、これらの試料について示差熱分析を行った結果によると、白色粘土化帯はカオリナイトからなり、青黒色粘土化帯の方は硫化鉄多量のため充分明らかでない(第8図)。

粘土化帯の成分変化

第2表で示した分析結果から、こゝでは脈状変質帯における成分変化を考察してみることにする。なお、各成分含量が原岩に対してどのような増減関係を示すかということを検討するため、各成分含量を単位容積内の重量に換算したのが第3表である。

以下第3表を図化した第9図を参考にして各成

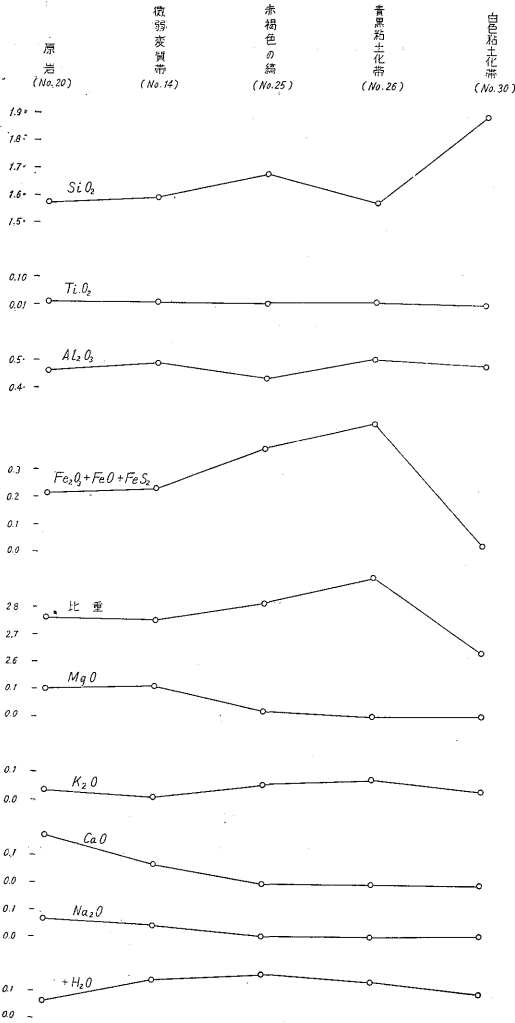
第3表 単位容積内における各成含量の比較

No.	20	24	25	26	30
SiO <sub>2</sub>	1.576	1.591	1.681	1.581	1.903
TiO <sub>2</sub>	0.021	0.021	0.021	0.030	0.027
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.461	0.497	0.443	0.517	0.492
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.115	0.146	0.388	0.018	0.038
FeO	0.105	0.099	0.006	0.004	0.003
Fe	—	—	—	0.214	—
MgO	0.100	0.117	0.031	0.011	0.020
CaO	0.177	0.071	0.000	0.000	0.000
Na <sub>2</sub> O	0.067	0.043	0.007	0.005	0.012
K <sub>2</sub> O	0.036	0.012	0.062	0.084	0.045
+H <sub>2</sub> O	0.064	0.141	0.168	0.143	0.100
CO <sub>2</sub>	0.029	—	—	—	—
S	—	—	—	0.246	—
比重	2.76	2.75	2.82	2.92	2.65

分含量の変化について簡単な説明を加えておく。

(i) SiO<sub>2</sub> と鉄

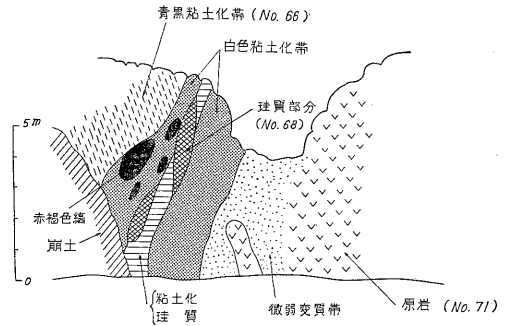
まず SiO<sub>2</sub> であるが、原岩に較べ微弱変質帯および青黒色変質帯はほとんど含量の変化がなく白色粘土化帯でいくぶん増加している。すなわち、No. 26 と No. 30 はおのおの同質の変質帯でありながら、一方ではほとんど鉄を含まず、一方では相当量の鉄を含む。いいかえると白色粘土化帯における SiO<sub>2</sub> の量的な変化は鉄含量と密接な関係にあり、鉄分の濃集と SiO<sub>2</sub> の濃集とが相互



第9図 単位容積内における含量の変化

補償的に行われたことを示している。

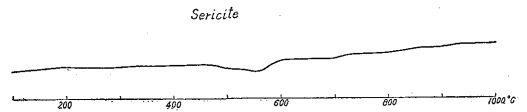
この類例として第10図に示したのは、松川上流(七味温泉-万座峠間)の沿岸でみられる局所的な変質帯の露出である。これも脈状変質帯とみなされるものであるが、そのなかから2,3の試料を採取し、その部分分析を行った結果を第2表の右に掲げたが、この表から明らかのように、白色粘土化帯におけるSiO<sub>2</sub>の濃集は、さらに強く行われ、約1mの幅にわたって珪化の傾向すらみられる。たゞこの場合白色粘土化帯は示差熱分析の結果によると、以上述べたことがらから明らかのように、この場合のSiO<sub>2</sub>の動きは変質作用に伴う原岩中の白色粘土化帯でいくぶん増加している。すなわち、No. 26とNo. 30はおおの同質の変質帯でありながら、一方ではほとんど鉄を含まず、一方では相当量の鉄を含む。いいかえると白色粘土化帯におけるSiO<sub>2</sub>の量的な変化



第10図 万座峠——七味温泉間変質部分見取図  
数字は分析番号

は、鉄含量と密接な関係にあり、鉄分の濃集と、SiO<sub>2</sub>の濃集とが相互補償的に行われたようにみえる。

この類例として第10図に掲げたのは松川上流の七味温泉と万座峠の間でみられる局所的な変質帯の露出である。これも脈状変質帯とみられるものであるが、この場合は中心に青黒色粘土化帯がありその外側に白色粘土化帯を置き、微弱変質帯を経て原岩に移行している。そのなかから2,3の試料を採取し、その部分分析を行った結果は第2表の右側に掲げたが、この表から明らかのように、白色粘土化帯の一部にSiO<sub>2</sub>の濃集がさらに強く行われ、約1mの幅にわたって珪化の傾向すらみられる。たゞこの場合、白色粘土化帯の粘土鉱物は、示差熱分析の結果によるとセリサイトからなる(第11図)。



第11図 白色粘土化帯 No. 68の示差熱分析  
(分析: 種村九郎)

以上述べたことがらから知られるように、この場合のSiO<sub>2</sub>の動きは変質作用に伴う原岩中のSiO<sub>2</sub>の移動であり、その濃集いかによつては珪化部分の生成すらみられることがある。このように、鉄とSiO<sub>2</sub>の間には成分の移動、濃集という点について密接な関連があるようにみえるので、さらに、もつと広い範囲にわたつて変質帯の周囲に発達する珪化帯の生成について検討してみる必要があると思われる。

(ii) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> および TiO<sub>2</sub>

単位容積内におけるAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> およびTiO<sub>2</sub>の重量を比較してみると各変質帯を通じてその値がほとんど変化していないことがわかる。すなわち、原岩から青黒色粘土化帯にわたる変質帯の生成範囲内で、その環境がAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> およびTiO<sub>2</sub>の動きにほとんど影響を与えなかつたことを示している。

(iii) MgO と K<sub>2</sub>O

こゝでこの両成分を併記したのは、SiO<sub>2</sub> と鉄の場合と同じように、両者の間に密接なつながりがあるように思われるからである。すなわち、第9図から明らかなように、微弱変質帯と青黒色粘土化帯の間ではこの両成分の含量のうえに負の相関関係があることが知られる。

## (iv) CaO

CaO は青黒色粘土化帯にはいつてから含量が急速に減じる。しかもその残留量は僅かに0.01%程度にすぎない。しかし、この成分は単に溶脱されるのではなく、変質帯の外側部分で炭酸ガスと結合し、炭酸石灰として固定される傾向があり、この点、次に述べる Na<sub>2</sub>O とその性質を異にする。

(v) Na<sub>2</sub>O

Na<sub>2</sub>O は変質の進むほど一方的に通減する。CaO と異なり、固定された形跡が認められないので、全成分を通じて完全に溶脱されるのはこの成分だけといえるようである。

## 4. 変質帯と温泉水との関係

以上で温泉水の化学性と変質帯の成分的特徴の概要を述べたが、こゝでは温泉水と変質帯との成分的な関連を検討してみることにする。

まず問題とするのは、前項で述べた脈状変質帯を始めとし、万座附近に発達する変質帯が、現在湧出する温泉水と成因的につながりをもつかどうかという点である。すなわち、この地域の変質帯が、現在湧出する温泉水の熱化学的な影響によつて生成されたものかあるいは直接の関係をもたず他の作用によるものかという問題である。この点を検討するため、これまでの記載から温泉水と変質帯の特徴を要約すると次の通りである。

(1) この地域の温泉水はすべて酸性であるから、湧出過程で温泉が中和の方向に進むことは、とりもなおさず接触する岩層から成分を溶脱することを意味する。第5図および第6図で示したように、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> が Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup> と正の相関関係にあることはこの関係を示すものである。

(2) 温泉水による溶脱が最も進行したのものとして、いわゆる珪石帯をあげることができる。すなわち、酸性温泉水によつて行われる変質作用の最も進行した形は珪石帯の生成であるともいえる。

(3) 温泉水の成分のなかで、Ca<sup>2+</sup> の含量が、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> の量にあまり関係なくほとんど一定しており、しかも割合その量が少ないことは注目値する。すなわちこのような特徴は温泉水と接触する岩層がきわめてCa<sup>2+</sup> に乏しいことを暗示するようにみえるからである。

(4) 変質帯における特徴を一口にいえば、成分の再配列であり、まったく系外に溶脱された成分としては僅かに Na<sub>2</sub>O だけにすぎない。また完全に系外に搬出されたわけではないが、変質の中心附近における CaO の溶脱もまた著しい。

(5) 変質帯に伴なう温泉は、噴気ガスと地下水との接触によつて生成されたものとみなされるから、この地域も、ある未知の深さで噴気ガスと地下水とが接触する状態にあるといえることができる。

(6) 万座—軽井沢間自動車道路に沿う脈状変質帯は、変質帯の形成像特に温泉ないし地下水によつて2次的に影響を受けた形跡が認められない。したがつて、少なくともこの脈状変質帯は成因的に湧出している温泉とは無関係であるといえる。

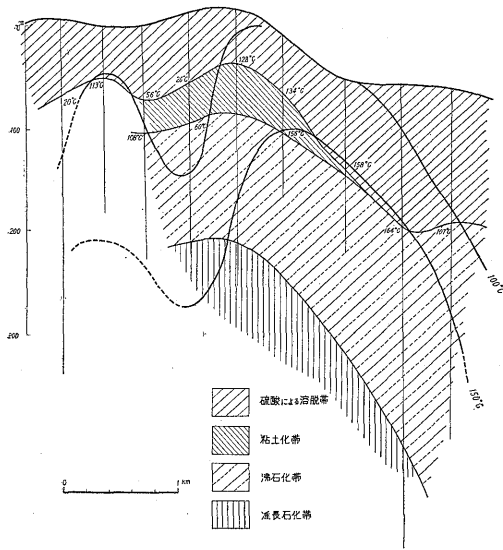
以上、温泉水と変質帯の成分的特徴を簡単に述べたが、その内容を総括すると次のように要約される。すなわち、万座附近における変質帯の主体は過去の噴気作用によつたものであり、現在湧出する温泉はこの噴気ガスと地下水とがある深さで接触することによつて生成されたものである。この場合、地下水に供給された塩化水素ガスおよび亜硫酸ガスによつて温泉は酸性化し、地表へ湧出するまでの過程で接触する岩層から陽イオンを取り込む。そしてこの地域の温泉水の Ca<sup>2+</sup> が異常に小さいのは温泉と接触する岩層がすでに変質した粘土化帯であるため、その CaO がきわめて少ないことによると思われる。このように現在湧出する温泉は変質帯の生成と直接のつながりをもたず、変質帯は、温泉の生成が始まる以前、より活潑な時期にあつた噴気的作用によつたものとみなされるのである。

5. Cl<sup>-</sup> の分布と噴気の流動速度

この地域から湧出する温泉の Cl<sup>-</sup> 含量の分布をみると、各変質帯を中心として側方に移るほどその含量は通減し、また変質帯ごとで比較すると、空噴傍湧泉が最も高く、北に移るほど減少する傾向がみられる。

これに対して他の調査地における例によると、むしろ中心では Cl<sup>-</sup> 含量が少なく、側方から湧出する温泉ほど高い値を示す場合がある<sup>1)</sup>。Cl<sup>-</sup> 含量の分布の上に表示されたこのような地域的な変化が、地下水と噴気ガスとの接触状態によつて左右されるであろうことは想像に難くない。またこれまでの調査によつてもこの関係を示す例がいくつか知られている。

たゞこの場合、上で挙げた Cl<sup>-</sup> 含量分布上の相違は、地下水の滲透深度につながりをもつだけでなく、初生的な噴気がこの流動速度の差に大きな関連をもつようにみえる。



第 12 図

(Steiner, A.: Hydrothermal Rock Althertation at Wairakei, New Zealand. Econ., Geology Vol. 46, No. 1 から引用)

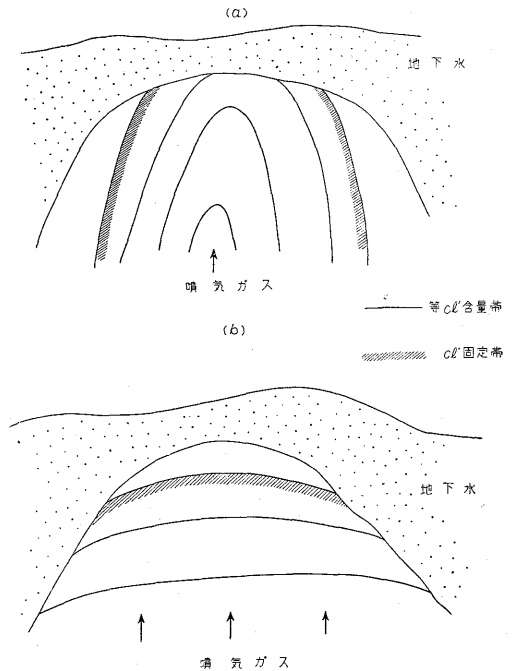
噴気ガスの流動速度が変質帯の帯状分布と直接的な関係があるようにみえる例として、第12図にニュージーランドのワイラケイ地方における変質帯の断面を示した。この地域は鮮新世の砂岩・頁岩層とそれを覆う石英粗面岩質の凝灰岩からなり、10数本の試錐によって変質帯の垂直的な帯状分布が知られたところである<sup>4)</sup>。なお、垂直温度分布はこの報文に掲載された資料から筆者が書き入れたものであるが、この温度分布をみると、変質帯の帯状分布とはなはだしく近似していることがわかる。したがって、この温度分布は噴気ガスの流動速度につながりがあるとみなされるので、結局、変質帯の帯状分布は噴気ガスの流動速度によって支配されているという見方が可能になる。この地域で行った試錐の結果によると、相当量の蒸気が噴出したといわれており、一方、この北側から湧出する温泉には相当量の Cl' が含まれていることも報じられているので<sup>2)</sup>、結局、この地域は中心ほど Cl' が少なく、側方に移るほど Cl' 含量の増加する型に属する地域とみなされる。

わが国では、これまで1つの地域で数多くの試錐を行った例がないので、遺憾ながら噴気地帯における変質状況の実態について十分な資料が得られていない。特に万座温泉のように中心ほど Cl' 含量の高い地域における変質帯の垂直的な状況について、その資料がはなはだ不足である。ただ、噴気の流動速度が変質帯の帯状分布につながりをもつとすれば、地表においてもその傾向が表われるはずであり、中心ほど変質の程度とその規模が外側

地域より卓越しているはずである。事実、調査結果がほぼこの傾向を示すことはすでに述べた通りである。

このように考えると、噴気ガスの流動速度がはなはだ大きな意味をもつわけであるが、この流動速度を間接に指示するのが、Cl' の地域的な分布と考えられる。すなわち噴気ガスに含まれる塩化水素ガスは、他のガス成分に較べ、最も直接的に噴気ガスの動きを示す役割を果し、しかもその状態が、温泉水の Cl' 含量の分布に反映するとみなされるからである。

第13図はまったく模式的に Cl' 含量の分布のうえにあらわれた2つの型を、噴気ガスと地下水とのつながりのうえで示したものである。噴気ガスの流動速度の遅速は Cl' 等含量線の傾きで表わされるが、この Cl' 含量はより上方に移るほど減速し、遂に Cl' 固定線(帯)に近づくものである。



第13図 噴気ガスと地下水との接触状態を示す模式図  
(a) Cl' 含量の分布が中心ほど高い場合  
(b) Cl' 含量の分布が側面ほど高い場合

以上で噴気ガスと地下水との接触状態について調査資料を参考にし、2, 3の解釈を試みた。各地域における Cl' 含量の分布をみると、その傾向—噴気ガスの流動速度—は地域的な地質条件によって支配され、上で述べたいずれかの状態を、初生的に保持しているのが一般のようである。

地熱開発地域の基礎的な条件を検討するにあたって、地域的な構造が、温泉水の化学成分、変質帯の性質、噴

気ガスの存在状態とどのようなつながりをもつかということがらも大きな課題の1つである。今後、一般の温泉地帯についてもいま述べた観点からこの問題を検討し、さらに発展させる必要があるように思われる。

### むすび

1) 万座温泉は草津白根火山西腹に位置する典型的な火山地帯温泉である。この附近の構成地質は黒色の複輝石安山岩(高弁熔岩)と、それを覆う白根熔岩とからなり、万座川に沿って褐鉄鉱質の礫層が分布する。

2) 万座川上流の各支流に沿って変質帯が発達し、万座沢変質帯・大苦湯沢変質帯・法性沢変質帯に大別できる。この変質帯の東側に著しく珪化した部分がある。しかもこの珪質物を含む前記礫層と、この礫層から移化したローム層とがともに変質しているため、この地域の変質作用は礫層の堆積以前に始まり、引続き進行して現在みられるような範囲にまで及んだとみなされる。

3) 噴気および温泉は上記各変質帯に伴なって分布するが、このなかに「地熱」・「噴気」と呼ばれて噴気状の露頭を示すものがある。しかしその大部分はいわゆる温泉であつて、すでに相当地下水の影響を受けた地域とみられる。そして噴気ガスの凝縮水の性質もまたこれを裏書きしている。

4) 温泉水はいずれもかなり高温で、しかも液性は強い酸性を呈する。温泉は水温・Cl<sup>-</sup>含量のうえから、いくつかのグループに分かれるが、その配列をみると、ほぼ中心にCl<sup>-</sup>の高い湧泉を置き、外側に移るほど含量が遞減する傾向がある。そしてCl<sup>-</sup>含量の変化は各変質帯を単元とするだけでなく、地域全般についても空噴を中心として法性沢—大苦湯沢—万座沢変質帯の方向に移るほどより小さくなることを併せ考えると、Cl<sup>-</sup>含量の高低は変質作用の強さに関連あるように思われる。

5) 温泉のSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>は2, 3の例外を除き、Cl<sup>-</sup>と正の相関関係にあり、初生的にはSO<sub>2</sub>ガスの形で供給されたとみられる。その例外は719 mg/l という著量のH<sub>2</sub>Sを含む奥万座温泉、あるいはSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量の異常値で特徴づけられる地熱No. 1および垂水湯などであるが、前者は低温のため酸化が充分でなかつたことに帰因すると考えられるのに対して、後者は逆に地表および地表近くで生成したSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>が貯積された結果によるものとみられる。

6) 温泉水の各成分をミリモル数に換算して、陰・陽各イオンの量的な関係を検討してみると、いずれの温泉もCl<sup>-</sup>に対してアルカリの含量がほぼ等量に近いことを

示し、外側の温泉に移るほど、むしろアルカリが過剰となる傾向がみられる。いいかえると、この地域の温泉は湧出するまでの過程で、接触する岩層から相当量の陽イオン特にアルカリを取り込んだことを示している。

7) Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>およびMg<sup>2+</sup>はCl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>と正の相関関係を示すが、Ca<sup>2+</sup>はあまり明瞭な関係を示さず、しかもその含量は僅か30~85 mg/l程度にすぎない。この結果から推察するとCa<sup>2+</sup>の不足は温泉化した地下水と接触する岩層のCaOが、Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>OおよびMgO等に較べ、異常に少ないことによるという疑いが生じる。

8) 変質帯は粘土化帯と珪化帯とからなる。なお粘土化帯の上部に一部珪石帯を伴うが、これは粘土化帯と一連の変質作用で生じたものとみられ、最も浅い変質相に相当する。

9) 万座—軽井沢自動車道路に露出する脈状変質帯は、地表よりある深さにおける変質帯の断面を示すが、その構成は外側から母岩(高弁熔岩)・弱変質帯・青黒色粘土化帯および白色粘土化帯からなる。このうち、青黒色粘土化帯は微粒の硫化鉄で特徴づけられ、白色粘土化帯はカオリナイトからなる。

10) 脈状変質帯の代表的な試料について、その分析結果から単位容積内における成分含量の変化を比較してみると、次のような傾向がある。

(1) SiO<sub>2</sub>と鉄含量とは密接な関係にあり、両者の移動濃集は相互補償的に行われたことを示す。そして場所によつてSiO<sub>2</sub>の濃集がさらに強く行われた所では、珪化の傾向すらみられる所がある。

(2) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>とTiO<sub>2</sub>とは変質帯を通じて、ほとんど変化しない。

(3) MgOとK<sub>2</sub>Oとは微弱変質帯と青黒色粘土化帯との間で負の相関関係にある。

(4) CaOは変質帯の中心で含量が急減し、僅かに0.01%程度にすぎない。しかしこの成分は外側部分で炭酸石灰として固定される形跡がある。

(5) Na<sub>2</sub>Oは変質の進むほど一方的に遞減する。CaOと異なり、固定された形跡が認められないので、結局、変質帯の全成分を通じて完全に溶脱されるのは、この成分だけといえる。

11) 変質帯と温泉水との関連について、その成分的特徴を参考までに纏めると、次のように要約される。すなわち、前者は往時の噴気作用によつてもたらされた産物であるのに対して、後者はこの噴気ガスと地下水との接触によつて生成されたものである。したがつて現在湧出する温泉と変質帯とは直接のつながりをもたず、変質帯は温泉の生成以前、より旺盛な時期にあつた噴気作用によつたものとみられる。

12) この地域から湧出する温泉の Cl' 分布は、中心ほどより高い含量を示し、側方に移るほど遞減する。一方、他の地域の例では、変質帯の側方から湧出する温泉ほど高い Cl' 含量を示す場合がある。このように変質帯に伴う温泉水の Cl' 含量が地域的に異なる点について、ニュージーランド ワイラケイ地方における変質帯の帯状分布と垂直温度分布との関係等を参考にすると、この現象は初生的な噴気ガスの流動速度に深いつながりがあるようにみえる。すなわち噴気ガスに含まれる塩化水素ガスが、他のガス成分に較べ最も直接的に噴気ガスの動きを示す役割を果し、しかもその状態が温泉水の Cl' 含量の分布に反映するとみなされるからである。この噴気ガスの流動速度はまた、地域的な地質構造と関連があると思われるので、今後一般の温泉地帯についても、温泉水の性質と構造とのつながりを検討してみる必要があ

ると思われる。

(昭和30年7月調査)

#### 文 献

- 1) 地質調査所: 鹿児島県霧島地熱調査報告, 地質調査所月報, Vol. 6, No. 10, 1955
- 2) Grange, L. I.: The Geology of the Rotorua-Taupo Subdivision, Bulletin, New Zealand Geological Survey, No. 37, 1937
- 3) 中村久由・安藤 武: 大分県大岳地熱地帯調査報告, 地質調査所月報, Vol. 5, No. 8, 1954
- 4) Steiner, A.: Hydrothermal Rock Alteration at Wairakei, New Zealand, Econ. Geol., Vol. 48, No. 1, 1953