

---

 原 著
 

---

## 万代鉾温泉の湧出に伴う草津温泉源泉群の水質変化について

玉川大学学術研究所\*1, 上智大学理工学部\*2, 東京工業大学草津白根火山観測所\*3

小坂 丈 予\*1, 小坂 知 子\*2, 平林 順 一\*3

大井 隆 夫\*2, 大場 武\*3, 野上 健 治\*3

木川田 喜 一\*2, 飛田 典 子\*2

(平成9年9月3日受付, 平成9年11月27日受理)

## Water Quality Changes of Kusatsu Hot Springs Caused by the Emergence of Bandaiko Hot Spring

Joyo OSSAKA\*1, Tomoko OSSAKA\*2, Jun-ichi HIRABAYASHI\*3

Takao OI\*2, Takeshi OHBA\*3, Kenji NOGAMI\*3

Yoshikazu KIKAWADA\*2 and Noriko HIDA\*2

\*1Research Institute, Tamagawa University

\*2Faculty of Science and Technology, Sophia University

\*3Kusatsu-Shirane Volcano Observatory, Tokyo Institute of Technology

### Abstract

Kusatsu-yubatake hot spring, Kusatsu town, Gunma, has a long history of more than 1,000 years. The chemical composition of its water was found to have been changing since 1881 when the first reliable results of the chemical analysis were reported, which is mainly attributable to the decrease in iron and aluminium concentrations. In around 1984, however, the direction of the change in its chemical composition suddenly shifted; the concentrations of sodium and potassium started to increase. This new direction of the change seems to follow that of the water of Bandaiko hot spring with a time lag of about 3~4 years, which being horizontally about 2 km away from and about 150 m higher in altitude than Kusatsu-yubatake, anew started its operation in 1970. Similar changes in chemical compositions are observed in waters of other hot spring near Kusatsu-yubatake. These observations are best understood by assuming that a part of the Bandaiko water penetrates into the ground as underflow and flows into waters of Kusatsu-yubatake and the adjacent hot springs underground.

Key words : Bandaiko hot spring, Kusatsu hot spring, water quality change, underflow, penetration

キーワード : 万代鉾温泉, 草津温泉, 水質変化, 伏流水, 混入

### 1. まえがき

群馬県の北西部，長野県との県境の近くに位置する草津白根山は，現在も数年ないし三十数年ごとに噴火を繰り返している活発な火山である．しかし早川<sup>1)</sup>によれば，この火山の最後の溶岩（殺生溶岩など）が流出したのは11,000年よりは新しく，遅くとも3,000年前までにはその流出を終わっているとのことである<sup>2)</sup>．それ以降は，地下のマグマが地表に達することではなく，近年の噴火はもっぱらマグマからその揮発成分（火山ガス）のみが分離上昇するのに伴って発生する，いわゆる水蒸気爆発を繰り返す火山になってしまった．同火山の山頂付近には多数の爆裂火口，噴気孔，酸性湧水が存在する．そのため同火山を構成する岩石はいたるところで酸性変質作用を著しく受けて白色粘土やケイ化物に変化しており，山体が白く見えることから白根山の名称で呼ばれていると伝えられている．また，これらの変質層は，しばしば不透水層ともなり，火口には雨水がたえられている火口湖をつくるものもあり，概して地下水が豊富である．これに加えて，前述のように白根火山の地下のマグマを起源とする高温の噴気の上昇もいまだ盛んであるため，その温度とガス成分がこの地下水に影響を与え，この地域には多くの温泉が湧出している．すなわち，草津白根山の東麓には湯畑，白旗，西ノ河原等の草津温泉源泉群をはじめ，香草，常布，万代鉱等の諸源泉がある．またその西麓には，東麓の諸源泉とは湧出機構や溶存成分が異なる奥万座，万座湯畑，空噴の諸源泉など多数の源泉を擁している（図1）．

上智大学理工学部化学科では，1965年頃より当時御在職中であった南英一先生の御発意，御指導のもと，東京工業大学地学教室と合同で，この地域の火山，温泉，河川，湖沼，岩石等を対象とした総合的な地球化学的調査，研究を開始し，以来現在に至るまで，ほとんど毎年現地調査および諸測定，化学分析等を繰り返してきた．本報では，得られた諸成果の中から，草津白根山の東麓で最も古い源泉の一つと考えられている草津湯畑およびその付近にある源泉群より湧出する温泉水の長年月にわたる成分変化の傾向が，同地域で最も新しく湧出した万代鉱温泉によって，いかに影響を受けたかについて検討した結果について論じる．

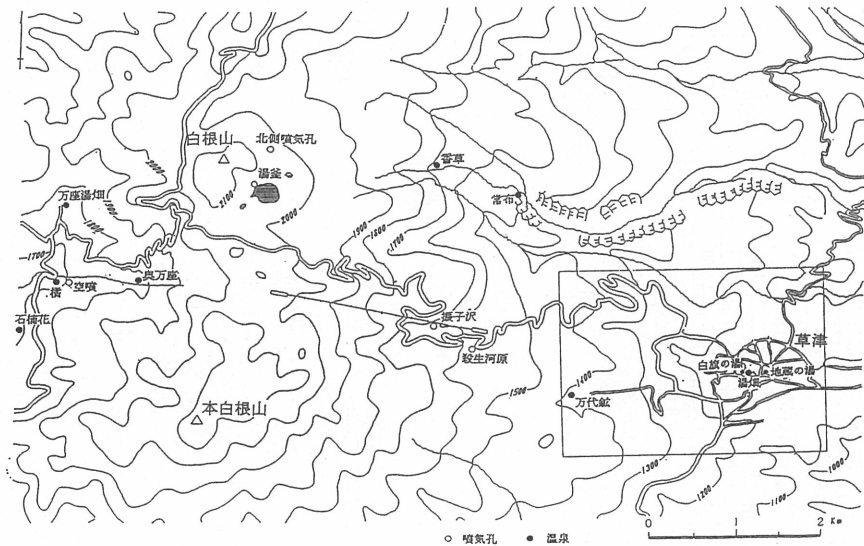


図1 草津白根山付近の温泉および噴気孔の分布

## 2. 今回対象とした各温泉の状況

### 2.1 草津(湯畑)温泉

草津温泉の歴史は古く、古文書によると1193(建久4)年には既にその存在が記述されている<sup>3)</sup>。当時の技術水準を考えると、おそらくその自然湧水は1,000年以上続いているものと考えられる。

草津温泉源泉群は、白根山頂から東方に約6 km, 現在の草津町市街地の西端、湯川最上流部にあたる西ノ河原源泉をはじめとして、ほぼ湯川に沿って、延長約450m, 幅約200m, 標高で1,150~1,200mの地域に分布している。源泉としては上流から、西ノ河原、泉水館、白旗、熱の湯、地蔵、千代の湯、煮川等の十数ヶ所が現在も湧出を続けている。

倉沢ら<sup>4)</sup>によれば、草津温泉は主として本白根山東方斜面に分布する多孔質の殺生溶岩を透水層とし、その下に伏在する緻密質な青葉溶岩を不透水層として、浸透した雨水が、浅い伏流水として東方へ流下する。その途中で中腹の殺生河原噴気地帯を通過する際に、ここで上昇する高温の噴気ガス群と遭遇し、それらのガスが保有する熱と化学成分を受けて、高温強酸性の水となる。これがその後の伏流過程で流路の岩石中から種々の陽イオン成分を溶出して、温泉水が形成される。この温泉水がさらに流下してその下流に分布する西ノ河原凝灰角礫岩層に胚胎したものと考えられている(図2)。このように、この温泉水源が浅い伏流水によって涵養されるため、その湧出量はこの地域の降水量によって著しく影響を受ける。すなわち、比較的湧出量の多い湯畑源泉で3,500~5,600 l/min, 白旗の湯で2,400~3,500 l/min, 西ノ河原で1,500~4,000 l/minの変動があり、降水の地表への流出の遅れや融雪の効果も加わって、例年おおむね10月に最大湧出量、4~5月に最小湧出量を示すことが知られている。その他の小規模な源泉の湧出量も加えれば、草津地域の温泉の湧出量は最大平均13,300 l/minとされている。

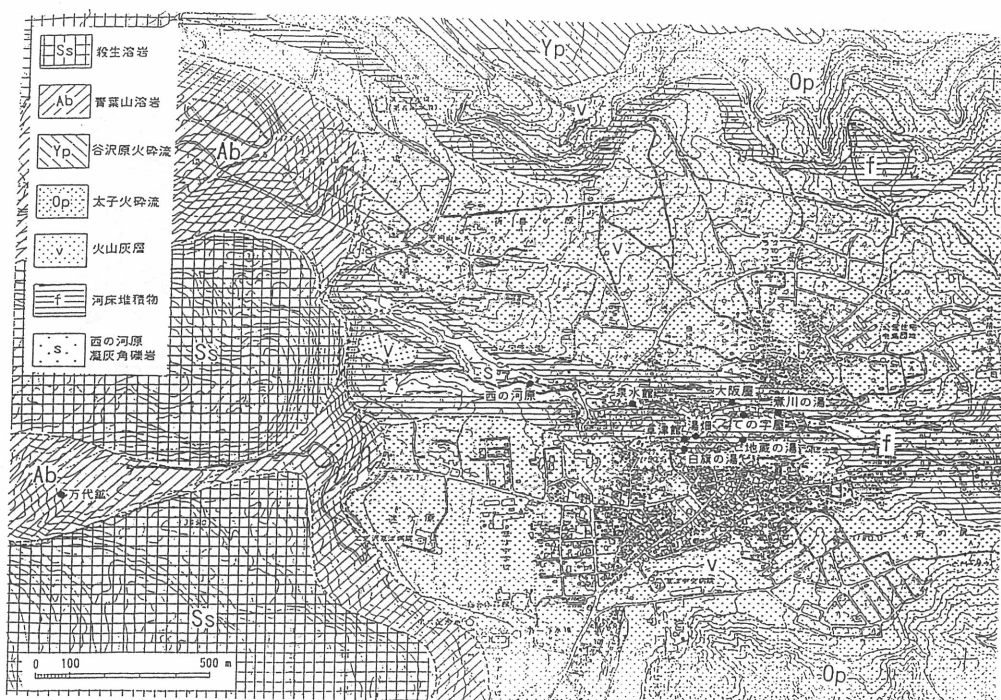


図2 草津温泉および万代鉱温泉付近の地質概略図<sup>1)</sup>

以上のように、この草津温泉は古くからその存在が知られている上に東京からも近いため、多くの研究者に関心を持たれてきた。そのため、早くからこの地の温泉の研究が進められ、多くの成果が報告されている。その中には1881年と1888年の東京衛生試験所の草津湯畑温泉水の分析値<sup>5)</sup>も示されているが、それらの値を種々検討したところ、今日の討議に十分耐えるものもあると判断された。従って、実に110年以上の長期にわたる温泉成分の変化傾向を論ずることができることとなった。

### 2.2 万代鉍温泉の概要

草津白根山山頂より東へ約3.5km、標高1,350mの小殺生地区の通称万代を坑口として、イオウ採掘のため青葉溶岩中を西方へ約400m掘削していた1970年、突然坑内から温度96℃、pH1.7の高温強酸性の温泉水が大量に(2,600l/min)噴出した。直ちに坑道の掘削を放棄し、坑道を埋め戻して、温泉水の湧出を閉じようとしたが、高温と強酸性の上、水圧も高く、この作業は困難な状況に陥った。しばらくは温泉は湧出するにまかせ、温泉水をそのまま窪地に放流したままにしていた。その後草津町当局はこの温泉を改修して熱利用に供することを決定し、周到な調査、企画、設計を進め、1973年着工、1975年12月には一部の運転を開始した。

この計画<sup>6)</sup>によると、高温、強酸性のため、このままでは浴用に供し得ない万代鉍温泉水を、まず沈砂地、抜気槽、溢流弁を経て、約2.5 km離れた草津町郊外の温泉基地に耐酸パイプを用いて流送する。ここでまだ95℃を保っている温泉水を熱交換器に導入し、これに8℃の真水(水道水)を用いて、温泉水を64℃まで冷却する。この温泉水の冷却のため63℃まで昇温した真水(温水)と先の温度を下げた万代鉍温泉水(これを浴用温泉水とする)をそれぞれ別のタンクに貯蔵する。後者を公共浴場や旅館の浴槽に配湯し、前者は生活用温水として各家庭や事業所等に配水したり、小・中学校の温水プールや冬季の融雪用ロードヒーティングに用いるようにした。しかし前述のように、当地の温泉湧出量は季節によって著しく変動する上に、温泉水等の需要も季節による変動が大きい。そこでその均衡をとることが肝要で、このため、先ず万代鉍温泉水の最小湧出量をおさえて、これをもとに浴用温泉水と温水の供給限度を設定した。その上で、この範囲内で浴用温泉水、温水をその時期(季節)による必要量だけ造成し、過剰になった万代鉍温泉水は、オーバーフロー方式で、主として湯川あるいはその上流のへび沢へ直接放流するように設計されている(図3)。

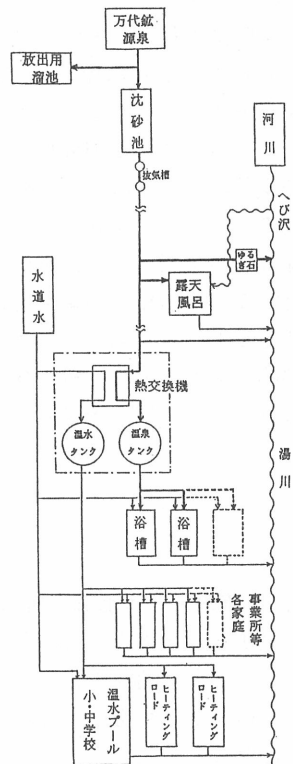


図3 万代鉍温泉熱利用計画概念図

### 2.3 草津町内源泉

草津温泉の温泉街地域には、以前は単独の小規模な源泉が数十もあったと伝えられている。しかしその後、湯畑、白旗、西ノ河原等のように大量の湧出量をもつ源泉を草津町役場が集中管理を行うことになり、各家庭や旅館に十分な配湯が行われるようになった。その後はこれら各源泉の利用度も少なくなり、そのまま枯渇したものや閉止したものもあり、現在も湧出が続いており、利用されているものは、わずかに十数源泉にすぎない(図2)。

### 3. 試料の採取・分析法とこれまでの分析値の検討

#### 3.1 現地での観察と試料の採取・保存

試料採取にあたっては、まずその湧出状況を詳しく観察し、周囲の環境条件を測定する。水温、pHの測定、Fe(II)の発色固定等、採取後変化のおそれのあるものは現地で行った。試料はポリエチレンびんに入れて持ち帰り、化学分析に供した。分析終了後の残った試料は必ず密封し、暗所に保存するようにした。

#### 3.2 試料の分析法と分析データの検討

1965年から1995年までの30年間におよぶ本研究のように、研究が長期にわたる場合などは、その間に分析法の進歩・改良もあり、また分析担当者も交替するため、この期間のデータを共通の視点で評価することはなかなか困難である。

実際調査初期の段階では、試料水の分析は主として厚生省編集の鉱泉分析法指針<sup>7)</sup>に基づいて行われた。これに比べ近年は、大部分の陽イオンはICP発光分光分析法により、またNaとKは炎光分光分析法によっている。さらに陰イオンは主としてイオンクロマトグラフ法を用いて分析している。この新旧分析法を通じて分析手法によるデータのかたよりをなくし、また分析担当者の交替による年次ごとの個人差を少なくして、できる限り調査資料の継続性を求めるために、次のような対策を講じた。すなわち、本調査開始以来これまで上智大学に保管されてきた毎年の採取試料を用いて、以下に示す検定を行った。まず同一の試料を用いて新旧両方法による分析を行って、その相互の結果を比較検討し、それらの差を算出した。また後日、数年にわたる保存試料をまとめて、同一人により、同一手法を用いて分析しなおすようにした。さらに何年かの重複期間をもうけては分析を繰り返し、信頼できる測定期間の延長をはかることなどを試みた。このようにして、同一源泉の泉質の長期にわたる経年変化を、できるだけ正確に把握するように努めた。

## 4. 草津温泉、万代鉱温泉の水質変化

#### 4.1 草津・万代鉱両温泉の水質の比較

表1には著者らがこの草津白根山一帯で調査研究を始めた1965年以降の草津湯畑源泉の水質分析データと、前述のように近年新たに湧出を開始した万代鉱温泉の1975年以来のデータのそれぞれ特徴を示したものである。また同表には著者らの調査以前の、草津湯畑の文献による分析値もあわせて示した。

草津湯畑と万代鉱の両源泉水は、いずれも高温強酸性である。温度においては万代鉱の方が高く、pH値は湯畑の方が若干高く万代鉱の方が酸性が強い。溶存成分についてみると、全鉄( $\Sigma\text{Fe}$ )は万代鉱が著しく少なく、Alもそのほとんどが若干少ない値を示す。それに引き換え、 $\text{H}_2\text{SiO}_3$ は万代鉱が湯畑の約2倍近い濃度を示している。湯畑の過去のデータと較べると、より一層その差異が顕著である。

この両源泉の成分特徴をより詳しくみるために、両源泉の何年かの測定データを選び、図4にSi-Al-Fe<sub>3</sub>成分図にプロットした。図からわかるように、万代鉱の1975、1984、1995年のデータ(表3、図4-B)、湯畑の1965、1975、1984および1995年のデータ(表2、図4-K-1)、同じく湯畑の1881、1888、1913および1941年のデータ(表4、図4-K-2)がそれぞれ別々の領域にグループわけされる。これらの成分特徴は、それぞれの温泉が湧出する際に溶存成分を供給した溶出母体の岩石(母岩)

表1 草津湯畑と万代鉱の温泉水成分の比較<sup>a)</sup>

源 泉 調査期間	万 代 鉱 1975~1995	湯 畑 1965~1995	湯 畑 1881~1958
水温/℃	87.6~95.5 (93.7)	55.3~67.6 (62.4)	63.0~66.0 (64.)
pH	1.43~1.81 (1.63)	1.48~2.12 (1.92)	1.33~1.5 (1.4)
Na <sup>+</sup> /ppm	44.8~143. (96.9)	33.0~61.9 (41.9)	35.7~47.2 (40.)
K <sup>+</sup>	16.2~76.1 (38.0)	10.4~24.3 (14.7)	15.~24.7 (18.)
Ca <sup>2+</sup>	75.8~106. (87.7)	63.8~91.2 (76.5)	75.5~105. (92.)
Mg <sup>2+</sup>	41.6~54.9 (47.5)	27.8~39.9 (34.1)	8.~36.0 (27.)
Σ Fe	2.03~12.8 (3.96)	14.8~28.4 (20.1)	24.5~145. (97.)
Al <sup>3+</sup>	48.3~78.2 (55.0)	46.1~84.2 (61.4)	102.~257. (189.)
Cl <sup>-</sup>	569.~907. (735.)	287.~584. (401.)	635.~850. (760.)
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1140.~1490. (1270)	830.~1450. (1020)	1681.~4207. (3030)
H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	489.~542. (518.)	246.~334. (289.)	250.~478. (315.)

<sup>a)</sup> 調査期間中の最低値~最高値. 括弧内は平均値.

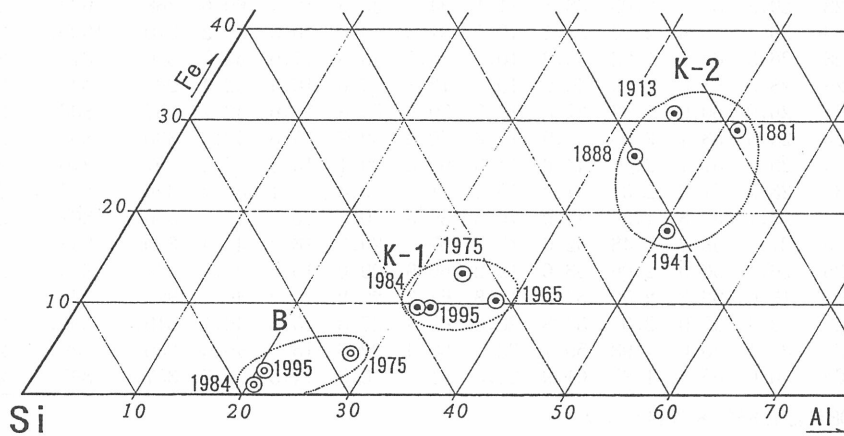


図4 草津湯畑と万代鉱の両温泉水の成分特徴の比較  
 K-1: 近年の草津湯畑源泉水, K-2: 以前の草津湯畑温泉水,  
 B: 万代鉱温泉水

が図4のK-2よりもK-1が、さらにK-1よりもBの方がより酸性変質を受けたものであったことを示しているものと考えられる。一般に岩石の酸性変質が進むにつれて、その岩石中のAlやFeが早期に溶脱され、それと相対的にSiが残留濃縮されることがこれまでも報告されている<sup>8,9)</sup>。それらを母岩として湧出する強酸性泉の成分も、母岩の変質度と対応して変化すると考えられている<sup>9)</sup>。それゆえ、万代鉱温泉の湧出母体となる岩石は、湯畑温泉のそれより、地下において一層酸性変質の進行したものであろうと想像される。

#### 4.2 草津湯畑・万代鉱両温泉の水質の経年変化

草津湯畑温泉水の1965年から1995年までの毎年の分析値を表2に、また万代鉱温泉水の1975年から1995年までの毎年の化学分析値を表3にそれぞれかかげ、それらの経年変化を図5に示した。それによると草津湯畑源泉では1965年以来、Al<sup>3+</sup>とΣ Feの濃度は徐々に減少を続けているが、一方Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>は1984年頃より増加の傾向が認められる。またCl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>は1965年から1984年頃まで徐々に減少していたが、それ以降はCl<sup>-</sup>は増加に転じたがSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>には特に大きな変動は認め

表2 草津湯畑温泉の各成分濃度(ppm)の1965年～1995年における経年変化

採取年月日 <sup>a)</sup>	気温 ℃	水温 ℃	pH <sup>b)</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	ΣFe	Al <sup>3+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>
'650811	24.8	66.9	1.68	33.4	16.4	73.3	31.2	21.6	84.2	584.	1450.	306.
'660703	14.7	65.5	1.64	33.4	15.8	74.5	32.1	20.6	81.7	575.	1410.	323.
'670707	26.8	66.0	1.86	33.0	15.0	69.7	30.9	20.4	73.4	530.	1310.	314.
'680729	20.8	67.3	1.88	35.7	15.7	79.5	35.0	25.3	79.6	538.	1320.	334.
'690930	11.3	67.6	1.80	37.0	15.4	83.0	38.0	26.9	81.6	520.	1280.	334.
'700613	19.3	66.5	1.8	36.5	14.6	76.8	35.9	22.6	75.0	513.	1240.	306.
'710724	19.0	66.5	1.82	37.5	14.9	79.7	38.4	22.8	77.5	523.	1270.	320.
'720804	24.6	67.6	1.8-	37.1	13.9	80.2	38.7	22.8	73.0	469.	1150.	314.
'730725	27.6	67.6	1.87	38.0	13.7	82.5	39.7	26.3	70.2	454.	1110.	314.
'740804	27.2	66.0	1.86	38.9	13.6	84.6	39.9	27.5	74.9	450.	1100.	314.
'750622	16.5	64.8	2.0	38.0	13.2	80.1	37.9	27.5	72.0	437.	1070.	303.
'760710	16.2	65.2	2.0-	37.5	12.3	83.3	37.1	28.4	64.4	407.	1020.	300.
'770724	29.0	64.9	2.12	38.4	11.8	88.0	38.0	28.1	61.4	399.	991.	303.
'780726	23.5	64.7	1.98	40.5	11.6	90.2	38.3	24.4	58.7	398.	985.	292.
'790724	28.9	64.0	2.01	41.2	11.4	91.2	38.9	22.5	59.7	391.	968.	295.
'800725	24.2	63.6	1.98	40.1	11.3	84.8	36.2	17.7	59.2	387.	956.	284.
'810728	29.2	63.6	2.05	38.1	11.1	84.4	36.5	16.4	60.6	368.	922.	292.
'820823	26.5	63.3	2.10	37.1	10.9	81.8	36.0	16.5	59.2	370.	1000.	289.
'830728	26.3	62.7	1.98	35.2	10.4	74.5	33.8	17.0	53.7	310.	875.	284.
'840729	28.5	61.3	1.89	36.0	10.5	73.1	34.0	16.4	52.4	294.	838.	286.
'850725	28.0	60.0	1.97	37.5	10.9	70.8	32.8	15.6	49.7	287.	836.	276.
'860723	25.8	58.7	2.05	39.9	11.6	70.5	32.7	15.6	48.8	300.	867.	278.
'870724	29.1	57.7	2.06	44.0	14.0	69.3	29.1	15.0	48.2	307.	876.	265.
'880730	23.2	57.2	2.0	47.2	15.4	71.4	29.8	15.1	50.7	316.	873.	254.
'890727	23.7	57.8	1.94	49.9	16.3	69.3	30.3	16.7	49.4	320.	867.	268.
'900726	21.5	56.2	1.48	52.0	17.5	67.8	29.1	16.3	48.4	320.	843.	263.
'910725	26.4	56.3	2.06	53.6	19.2	66.9	29.0	15.5	47.2	329.	854.	253.
'920804	16.6	56.7	2.00	54.4	19.8	67.3	29.2	16.2	46.1	321.	848.	259.
'930727	22.4	55.9	2.05	54.8	20.3	63.8	27.8	15.6	46.1	319.	830.	250.
'940725	31.1	55.6	1.98	59.7	23.1	68.4	29.6	15.4	46.5	336.	839.	247.
'950805	30.0	55.3	1.87	61.9	24.3	71.7	30.0	14.8	50.7	357.	847.	246.

a) '650811は1965年8月11日を表す。

b) 小数点以下2桁表示してあるものはpHメーターによる測定値。  
それ以外は比色法により求めた値。

られない。

これに比べ万代鉱温泉では、1975年の測定開始時は、同温泉の湧出(1970年頃)が始まって間もなくのことであり、その湧出量並びに湧出経路等が安定していないと考えられるため、やや不規則な変動がみられる。1977年頃からNa<sup>+</sup>やK<sup>+</sup>が少しずつ増加を始め、1981年頃からは急速な増加に転じたが、1987年にはそれも再び鈍化し、現在までその傾向は続いている。またCl<sup>-</sup>濃度も、はじめはやや減少傾向にあったものが、1982年頃より増加に転じ、1987年頃まで急激な濃度増加が続いていたが、その後は若干の増減を繰り返している。このCl<sup>-</sup>濃度の変化傾向は上述のNa<sup>+</sup>の濃度変化とはほぼ一致している。一方、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度には両源泉とも特に顕著な変化傾向はみられない。

以上のうち、万代鉱のCl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>の増加については、特にその理由や原因を特定しかねているが、Ohba et al.<sup>11)</sup> および平林<sup>12)</sup> がこの地域の火山活動の活性化かと指摘している山頂火口湖湯釜のCl<sup>-</sup>濃度の増加現象と、少なくとも時期的にはある程度の一致を見ている。

著者らの直接調査にたざさった1965年以降の草津湯畑と万代鉱の水質は上述の変化を示したが、草津温泉には1881年以来、100年を越える分析値がある。その中から種々検討の上、今日で

表3 万代鉱温泉水の各成分濃度(ppm)の1975年~1995年における経年変化

採取年月日 <sup>a)</sup>	気温 ℃	水温 ℃	pH <sup>b)</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	ΣFe	Al <sup>3+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>
'750731	22.2	91.2	1.69	54.3	19.1	106.	48.9	12.8	78.2	713.	1440.	520.
'760731	29.6	93.9	1.69	47.6	18.3	82.9	42.7	2.77	69.4	771.	1490.	534.
'770802	22.8	93.4	1.75	44.8	17.3	78.4	48.7	2.75	69.7	685.	1290.	517.
'780731	23.9	95.5	1.72	46.1	16.2	76.4	43.8	2.73	59.4	664.	1220.	509.
'790724	23.3	95.4	1.70	47.5	16.7	75.8	41.6	2.42	57.9	648.	1210.	517.
'800725	26.3	95.1	1.67	48.0	16.6	78.0	46.1	2.33	56.7	625.	1220.	520.
'810728	26.9	95.8	1.72	51.0	17.1	76.8	46.7	2.51	53.8	591.	1180.	523.
'821223	1.7	92.9	1.81	64.0	19.6	82.1	54.9	2.21	48.9	569.	1140.	506.
'830728	23.8	93.9	1.46	77.0	22.8	84.6	52.7	2.03	50.3	603.	1140.	509.
'840801	22.8	92.9	1.57	94.0	27.3	86.7	51.4	2.08	49.9	659.	1140.	517.
'850725	26.4	87.6	1.60	112.	33.0	87.1	48.7	2.61	50.3	698.	1160.	531.
'860802	22.2	94.6	1.70	122.	37.0	88.7	49.9	2.59	50.0	746.	1170.	517.
'870727	24.7	93.4	1.66	132.	44.7	88.7	42.5	3.40	51.6	824.	1260.	498.
'880730	23.4	93.2	1.5+	128.	46.5	89.2	46.3	4.27	49.8	782.	1267.	489.
'890727	19.0	92.8	1.54	134.	50.5	90.0	47.6	3.91	51.2	808.	1301.	506.
'900726	22.8	93.7	1.43	135.	54.6	90.6	45.8	4.04	50.4	808.	1299.	503.
'910725	26.5	95.2	1.68	137.	59.4	91.9	46.7	4.52	49.1	804.	1321.	528.
'920804	13.2	95.9	1.63	137.	62.6	92.2	47.9	4.12	48.3	797.	1317.	531.
'930727	24.8	92.6	1.56	138.	68.1	94.3	46.2	5.18	51.2	852.	1342.	534.
'940725	29.6	95.2	1.54	143.	74.9	99.5	48.8	7.19	55.4	907.	1443.	542.
'950802	22.4	94.2	1.54	142.	76.1	102.	50.3	6.77	54.5	874.	1384.	537.

a) '750731は1975年7月31日を表す。

b) 小数点以下2桁表示してあるものはpHメーターによる測定値。それ以外は比色法により求めた値。

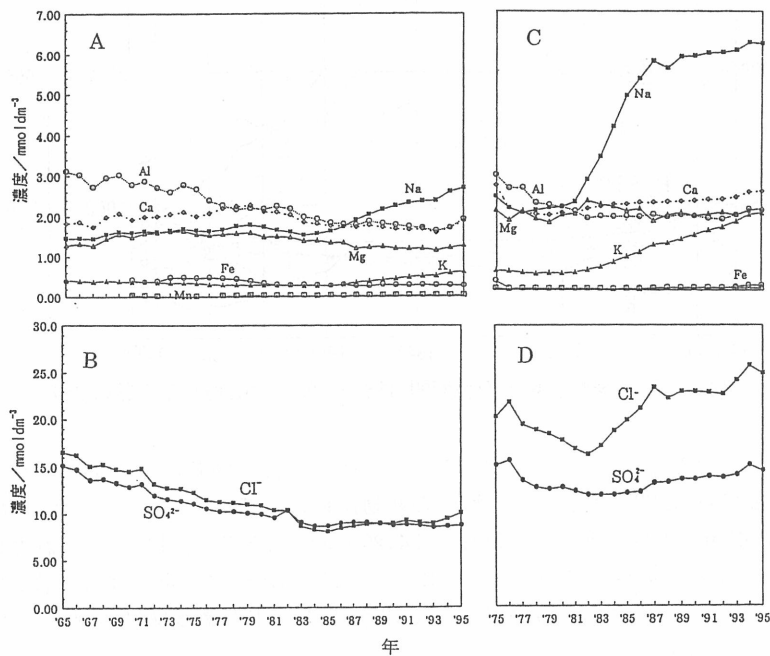


図5 草津湯畑および万代鉱温泉の近年(1965~1995年)における水質の経年変化  
A, B: 草津湯畑, C, D: 万代鉱



表4 草津湯畑温泉の1965年以前における化学分析値

採取年	1881年 <sup>5)</sup>	1888年 <sup>5)</sup>	1913年 <sup>10)</sup>	1941年 <sup>10)</sup>	1958年 <sup>14)</sup>
水温/℃	64.4	—	64.	63.0	66.0
pH	1.33	—	—	—	1.5
Na <sup>+</sup> /ppm	47.2	42.	36.7	—	35.7
K <sup>+</sup>	24.7	15.	17.	—	16.4
Ca <sup>2+</sup>	105.	93.	99.7	89.2	75.5
Mg <sup>2+</sup>	36.0	8.	32.7	29.2	30.5
ΣFe	145.	144.	114.	56.8	24.5
Al <sup>3+</sup>	257.	249.	170.	166.	102.
Cl <sup>-</sup>	850.	831.	645.	840.	635.
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	4207.	3390.	3220.	2667.	1681.
H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	258.	478.	250.	274.	—

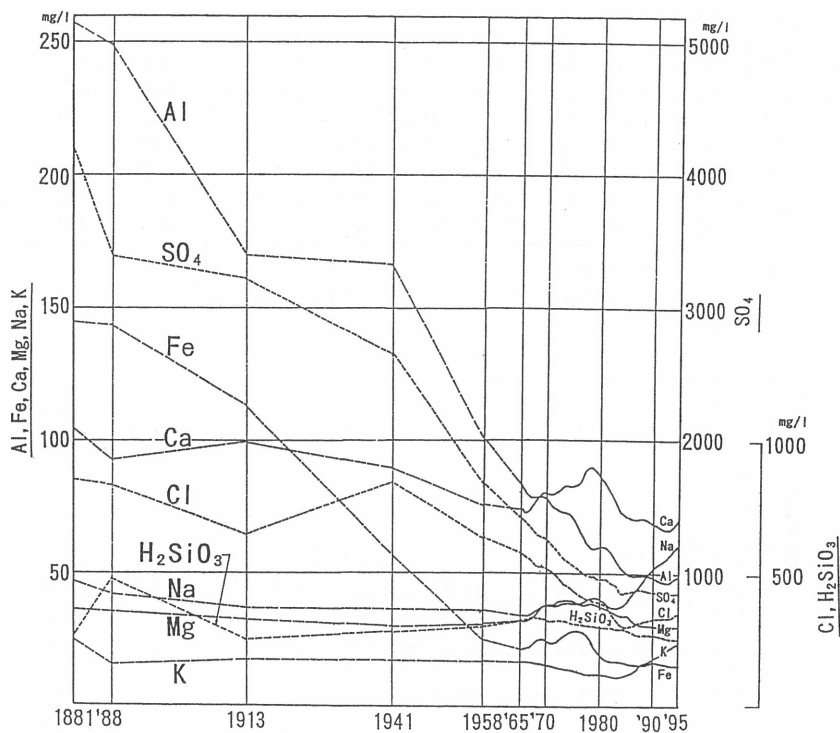


図6 草津湯畑温泉の長期間(1881~1995年)にわたる水質の変化

も評価しうるデータを選んで表4<sup>5, 10, 14)</sup>に示し、その変化を図6に示した。これをみると、湯畑源泉では過去114年の間に著しい成分濃度の変動が起こっている。特にAl<sup>3+</sup>は257 mg/lが102 mg/l、ΣFeは145 mg/lが24.5 mg/l、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>は4,200 mg/lが1,681 mg/lにそれぞれ変化し、この間に1/5から1/10に濃度が減少している。これに対しCa<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>は特に著しい増減は認められない。また、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>は逆に1982年~1985年頃から若干の濃度増加が認められ、最近では1.5~2倍に達している(表2、表4)。

上述したように、草津湯畑・万代鉱両源泉の経年変化は、草津湯畑においてはΣFeとAl<sup>3+</sup>の著しい減少、万代鉱ではNa<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>の著しい増加で特徴づけられた。そこでこれら両温泉の水質の経年変化を関連づけて理解するため、(Fe+Al)-(Ca+Mg)-(Na+K)の3成分図に、各

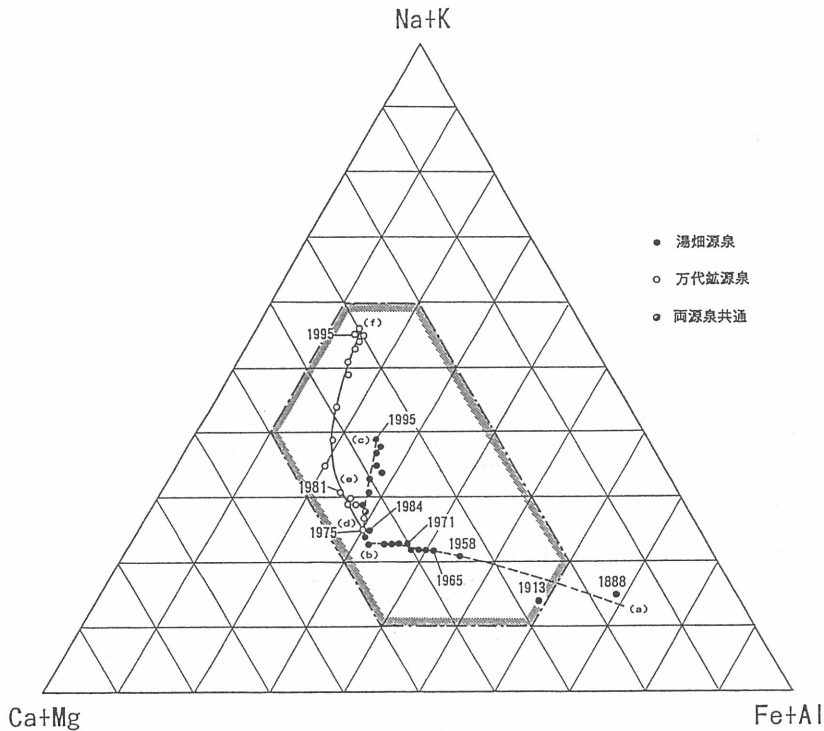


図7 草津湯畑と万代鉱温泉の水質変化  
(Na+K)-(Ca+Mg)-(Al+Fe) 3成分図

源泉の各年のモル濃度比をプロットした(図7). これによると, 草津湯畑温泉では1888年から1984年までの96年間は $\Sigma Fe$ と $Al^{3+}$ の急速な減少に伴い図7ではやや左上がりの変化(図7の(a)→(b)の方向)を続けてきたが, 1985年頃から突如変化の方向が上方, すなわち $Na^+$ ,  $K^+$ の増加の方向(図7の(b)→(c)の方向)に転じた. これに対し万代鉱温泉では1975年から1981年頃まではほぼ草津湯畑温泉と同様の方向(図7の(d)→(e)の方向)に成分が変化したが, その後は上方, すなわち $Na^+$ ,  $K^+$ の増加の方向(図7の(e)→(f)の方向)に変化している. この両温泉の変化を関連づけてみると, 1981年から始まった万代鉱源泉の成分変化傾向が, 草津温泉ではやや遅れ1985年頃から前者に追隨して変化を始めたようにみられる. すなわち, 後に新しく湧出した万代鉱温泉水が伏流水等の形で流下し草津温泉の湧出経路に達し, この温泉水が混入することによって, 草津温泉の成分が変えられたものと解釈される. 両温泉間の距離は約2 kmであり, 万代鉱の成分変化が湯畑に伝わるのに3~4年を要すると考えられる. 一般に地下水の移動速度は80cm~100cm/日と言われており, これに較べると万代鉱温泉水の影響が草津温泉に現れる時間は若干短い. 万代鉱が草津湯畑の上流にあり, また両者の標高差が約150mあることから, その傾斜が地下水の流下速度を速めたものと解釈される.

### 4.3 草津町内各源泉への万代鉱温泉の影響

万代鉱温泉の草津湯畑源泉への影響については以上に述べた通りであるが, 草津町市街地に分布している他の源泉群に対する影響の波及状況を検討するため, 1995年8月1日~5日にこれら諸源泉の一斉調査を行った. すなわち, 草津湯畑源泉を含む西ノ河原, 泉水館, 草津館, 白旗, 地蔵, 大阪屋, ての字屋, 煮川の9源泉に関し, これまでと同じ項目について, 同じ手法を用い

表5 草津町内源泉の1995年における測定結果

採水地点 図8中の番号 採水年月日 <sup>a)</sup>	西ノ河原 1	泉水館 2	草津館 3	白旗の湯 4	湯畑 5	地蔵の湯 6	大阪屋 7	ての字屋 8	煮川の湯 9
'950801	'950801	'950801	'950801	'950805	'950805	'950804	'950801	'950801	'950804
気温/℃	28.5	30.7	27.2	28.8	30.0	27.2	29.7	28.4	27.7
水温/℃	79.0	48.7	54.7	54.8	55.3	53.3	42.9	47.3	51.0
pH	1.58	1.96	1.93	1.87	1.87	1.91	2.03	2.07	1.97
Na <sup>+</sup> /ppm	99.4	50.4	62.7	62.8	61.9	58.3	46.0	35.0	54.4
K <sup>+</sup>	50.4	18.1	24.5	24.3	24.3	23.3	18.1	16.2	21.8
Ca <sup>2+</sup>	90.8	63.4	74.9	75.1	71.7	72.3	58.6	51.9	67.9
Mg <sup>2+</sup>	39.5	25.2	31.2	31.2	30.0	30.4	23.5	20.4	28.4
ΣFe	9.08	12.1	14.8	14.6	14.8	16.0	13.2	10.3	15.4
Al <sup>3+</sup>	58.3	48.1	52.0	51.4	50.7	50.3	39.6	50.3	46.8
Cl <sup>-</sup>	644.	323.	361.	364.	357.	345.	291.	265.	331.
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1005.	763.	956.	958.	847.	939.	681.	564.	863.
H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	345.	220.	246.	242.	246.	238.	201.	209.	230.

a) '950801は1995年8月1日を表す。

表6 草津町内源泉の1971年における測定結果

採水地点 図8中の番号 採水年月日 <sup>a)</sup>	西ノ河原 1	泉水館 2	草津館 3	白旗の湯 4	湯畑 5	地蔵の湯 6	大阪屋 7	ての字屋 8	煮川の湯 9
'710724	'710727	'710727	'710727	'710724	'710724	'710724	'710727	'710727	'710727
気温/℃	18.6	21.0	19.7	18.7	19.0	20.8	22.5	22.5	22.5
水温/℃	55.6	58.2	65.0	67.0	66.5	64.5	54.6	60.0	61.2
pH	1.88	1.83	1.81	1.81	1.82	1.83	1.99	1.86	1.84
Na <sup>+</sup> /ppm	33.5	27.6	34.2	33.4	37.5	31.9	29.2	31.2	32.8
K <sup>+</sup>	14.0	14.6	15.5	15.4	14.9	15.2	13.8	15.1	15.9
Ca <sup>2+</sup>	72.1	68.1	74.9	75.2	79.7	76.6	71.1	74.0	74.4
Mg <sup>2+</sup>	35.6	31.0	36.5	33.9	38.4	34.5	30.8	34.0	33.3
ΣFe	19.7	21.8	22.4	20.3	22.8	21.8	23.0	22.5	23.5
Al <sup>3+</sup>	79.4	75.6	79.9	73.3	77.5	85.0	74.5	81.5	81.5
Cl <sup>-</sup>	346.	418.	412.	400.	523.	414.	284.	400.	368.
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1054.	1133.	1188.	1182.	1270.	1190.	1019.	1083.	1138.
H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	250.	254.	298.	291.	320.	290.	257.	269.	275.

a) '710724は1971年7月24日を表す。

て採水と測定を行って分析した。その結果を表5に示した。また幸いにも、いまだ万代鉱温泉の影響がほとんど及んでいないと考えられる1971年7月24日～27日にもこれらの諸源泉に対し、ほぼ同様な方法をもって一斉調査を実施しているの、その結果の中から今回の調査と同一の源泉を選んで、そのデータを比較のために表6に示した。また、それぞれの分析値から前回同様に $(Fe+Al)-(Ca+Mg)-(Na+K)$ のモル比を求め、これを3成分図に拡大してプロットし、図8に示した。これによると、1971年の草津町内各源泉水の成分の占める位置は、その大部分の点が草津湯畑の1881年から1980年の点を結ぶ成分移動線上か、あるいはそのごく近くに位置しており、1971年の草津町内各源泉は、明らかに万代鉱温泉の影響をほとんど受けていないことがわかる。また、この時の町内各源泉の成分を示す各点が、かなり狭い範囲に集中して分布していることは、これらの各源泉相互の成分割合がほとんど類似していることを意味している。これは大橋<sup>13)</sup>やWatanuki<sup>14)</sup>がかつて指摘したように、これら町内各源泉の溶存物質の起源が同一の系統のものであることを示すものである。

これに引きかえ1995年の草津町内の各源泉の成分を、同じ図8の上にプロットすると、それら

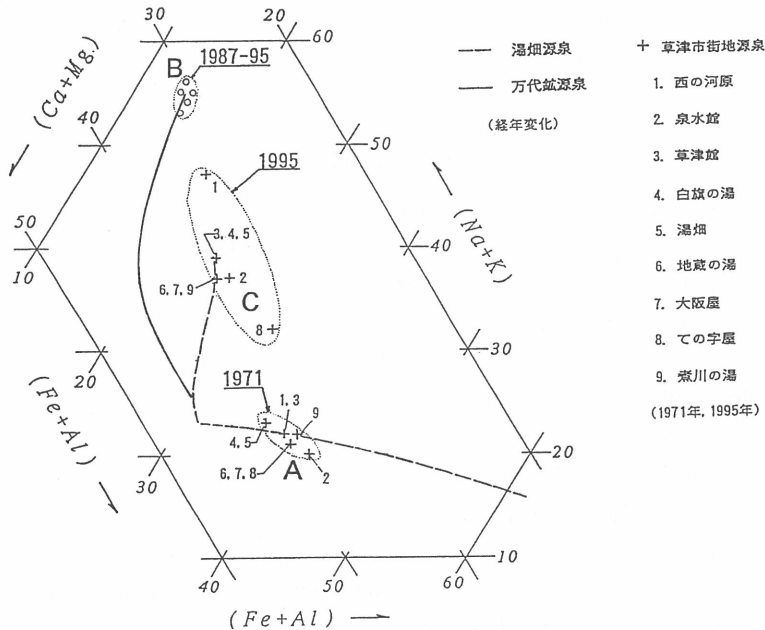


図8 草津湯畑と万代鉱温泉の成分変化並びに草津町内源泉の成分変化

の各成分を示す点は、先の草津湯畑の1881年～1980年の成分移動線上から大きくはずれる。湯畑は前述の変針した1984年～1995年の成分移動線に沿って変化するが、その他の各源泉の分布範囲は、先の1971年の町内源泉成分の分布域(図8-A)と、近年(1987年～1995年)の万代鉱温泉水の組成が占める領域(図8-B)とを結ぶ中間の位置に広がりをもって分布している(図8-C)。このことは、それまで同一の起源であった草津町内の各源泉に、万代鉱温泉の成分が加わり、かつその関与の程度の相違により、成分の差違に広がりが生じていることを示しているものと考えられる。特に1995年の西ノ河原源泉は、これら源泉群の中では距離的に最も万代鉱に近く、そのため、最もその影響を大きく受けていると考えられる。さらに同図において、1995年のての字屋の源泉水は逆に万代鉱から遠い位置にある。ての字屋の源泉は他の町内源泉とは異なり、湯川沿いよりもわずか高い地点にあることなどから、万代鉱伏流水の影響が少ないものと解釈される。

### 5. あとがき

万代鉱温泉は湧出直後からしばらくの間はそのまま放流されていた。それらが伏流して草津各源泉への影響が懸念されるようになった。このため、それらの防止の意味も含めて、町当局による熱交換事業が企画されたものとする。

このため、新温泉の利用、改修工事はかなり注意深く進められ、温泉水は耐酸の導流管を用いて独自に引湯され、オーバーフローした温泉水などは護岸改修された湯川に放流するなど、水質汚染防止のための種々の工夫がなされている。それにもかかわらず、万代鉱の影響が古くからの草津町内源泉に出現していることが判明した。今後更にこの万代鉱温泉の起源、経路、維持状況などを綿密に調査して、その影響の拡大防止に資したいと考える。

本研究を遂行するにあたり種々の御協力と御援助をおしまれなかった草津町当局、また、長年

月にわたる本研究の維持，継続に尽くされた上智大学，東京工業大学の歴代の教職員，学部並びに大学院生の各位に深い感謝の意を捧げたい。

### 引用文献

- 1) 早川由紀夫：地質学雑誌，**89**，511-525，1983.
- 2) 草津町：草津白根山火山噴火災害危険区域予測図説明書，1995.
- 3) 川合勇太郎：草津温泉史話，15-26，太平出版，1966.
- 4) 倉沢辰巳，角田安則：地熱，**22**，1-8，1985.
- 5) 益子安：草津温泉誌 自然・科学編 I，281-350，草津町，1985.
- 6) 加藤泰章：地熱，**27**，34-45，1992.
- 7) 厚生省(編)：鉱泉分析法指針，1-121，1952.
- 8) 小坂丈予：施工技術，**6**，45-51，1973.
- 9) 小坂丈予：温泉科学，**45**，159-167，1995.
- 10) 小坂丈予：草津温泉誌 自然・科学編 I，99-172，草津町，1985.
- 11) Ohba, T., Hirabayashi, J., Nogami, K.: *Geochem. J.*, **28**, 217-231, 1994.
- 12) 平林順一：月刊地球 号外，**18**，70-75，1997.
- 13) 大橋良一：地学研究，**17**，57-64，1966.
- 14) Watanuki, K.: *Sci. Pap. Coll. Gen. Educ. Univ. Tokyo*, **11**, 205-223, 1961.