

## 台湾・大屯火山群の酸性温泉の地球化学的特徴と起源

大沢信二<sup>1)\*</sup>, 李曉芬<sup>2)</sup>, 梁碧清<sup>2)</sup>, 小森省吾<sup>2)</sup>, 陳中華<sup>2)</sup>, 鍵山恒臣<sup>3)</sup>

(平成 25 年 1 月 9 日受付, 平成 25 年 2 月 6 日受理)

## Geochemical Characteristics and Origins of Acid Hot Spring Waters in Tatun Volcanic Group, Taiwan

Shinji OHSAWA<sup>1)\*</sup>, Hsiao-Fen LEE<sup>2)</sup>, Biqing LIANG<sup>2)</sup>, Shogo KOMORI<sup>2)</sup>,  
Chang-Hwa CHEN<sup>2)</sup> and Tsuneomi KAGIYAMA<sup>3)</sup>

## Abstract

Isotopic and chemical analyses were performed on water samples collected from some hot springs in Tatun Volcanic Group, Taiwan. The isotopic compositions ( $\delta D$  and  $\delta^{18}O$ ) of the hot spring water samples show that they are practically of meteoric origin though some are influenced by evaporation of water, whereas it is recognized that volcanic gas from andesitic magma will contribute to the hot spring water of Beitou Thermal Valley. The acidic hot spring water samples can be divided into two groups judging from relationship between  $\delta^{34}S$  of  $SO_4$  and  $Cl/SO_4$  ratio. One group is characterized by high  $\delta^{34}S$ ,  $Cl$  concentration and  $Cl/SO_4$  ratio and the other group is distinguished by relatively low  $\delta^{34}S$ ,  $Cl$  concentration and  $Cl/SO_4$  ratio. The former is originated from magmatic hydrothermal fluid, and the latter is of secondary source from the steam-heated thermal water of acidic- $SO_4$  type derived from the magmatic hydrothermal fluid. The geographical distribution of  $Cl/SO_4$  ratio of acidic hot spring waters was derived from existing chemical data set and the map indicates that there will be more than one outflow areas of the magmatic hydrothermal fluid of acidic- $Cl-SO_4$  type around Beitou hot spring, on the east side of Mt. Cising, and also to the east of Mt. Shamao. This view is in agreement with a diagnosis from conductivity distribution of the surface layer in this region by VLF-MT survey.

Key words : Taiwan, Tatun Volcanic Group, Hot spring, Geochemistry, Sulfur isotope,  $Cl/SO_4$  ratio

<sup>1)</sup> 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設 〒874-0903 大分県別府市野口原. <sup>1)</sup> Beppu Geothermal Research Laboratory, Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, Noguchibaru, Beppu, Oita, 874-0903, Japan. \*Corresponding author : E-mail ohsawa@bep.vgs.kyoto-u.ac.jp, TEL 0977-22-0713, FAX 0977-22-0965.

<sup>2)</sup> 台湾中央研究院地球科学研究所 中華民國台北市南港區研究院路二段 128 號. <sup>2)</sup> Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, 128, Sec. 2, Academia Road, Nangang, Taipei 11529, Taiwan.

<sup>3)</sup> 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設・火山研究センター 〒869-1404 熊本県阿蘇郡南阿蘇村河陽 5280. <sup>3)</sup> Aso Volcanological Laboratory, Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, Kawayo 5280, Minami-Aso, Aso, Kumamoto 869-1404, Japan.

## 要 旨

台湾・大屯火山群の代表的な温泉から温泉水を採取し、化学・同位体分析を行った。水の安定同位体組成 ( $\delta D \cdot \delta^{18}O$ ) から、温泉水は、水の蒸発の効果を受けたものがあるものの、概ね天水起源であることが示されたが、北投地熱谷の温泉水には安山岩質マグマからの火山ガスの寄与が認められた。酸性の温泉には、 $SO_4$ の硫黄同位体比 ( $\delta^{34}S$ )、塩化物イオン濃度、 $Cl/SO_4$ 比がともに高いものと、逆に  $\delta^{34}S$ 、塩化物イオン濃度、 $Cl/SO_4$ 比がともに低いものの少なくとも 2 種類の温泉水が存在し、前者はマグマ性熱水流体に由来し、後者はそれから 2 次的に生じた acidic- $SO_4$ 型水質の蒸気加熱型熱水からもたらされていることが示された。既存の化学分析値を用いた大屯火山群の全酸性温泉の  $Cl/SO_4$ 比の地理的分布から、マグマ性熱水流体に由来する acidic- $Cl-SO_4$ 型熱水の流出が北投温泉、七星山周辺から東側のエリアならびに紗帽山の東方にあることが示唆された。この見解は、VLF-MT による表層の電気伝導度分布からの見立てと概ね一致している。

キーワード：台湾、大屯火山群、温泉、地球化学、硫黄同位体、 $Cl/SO_4$ 比

## 1. はじめに

九州とほぼ同じ面積である台湾には国土全域に普く温泉が分布するが、九州と異なり火山性の温泉はごく限られた地域にしか存在しない。本島北端部に位置する大屯火山群がその代表格であり、金山断層と呼ばれる東北-南西性の断層に沿った幅 3 km、延長 18 km の狭長な地帯内に北投、陽明山、竹子湖、馬槽、金山など 30 余ヶ所の温泉が密集し、台湾では単位面積当たりの温泉数が最大の地域でもある (岸本, 1989)。その中であって特に著名な温泉は、北投、陽明山、金山の 3 温泉地であり、北投温泉は北投石や放射能の関係で台湾外の研究者にとっても認知度が高く、科学的によく研究されていることは言わずと知れたことである。ところが、日本国内でそれらの温泉の自然科学的資料を入手しようとするとは意外に容易ではなく、実際に現地調査を行った邦人研究者からの情報 (例えば、佐藤, 2006) によってもたらされていることに気づかされる。しかし、近年のインターネットの普及によって、簡単には手に入れることができなかった文献が研究室からでも閲覧できるようになった (Ezoe *et al.*, 2002; Lin *et al.*, 2003; Chen *et al.*, 2005; Tomita *et al.*, 2006; Chen and Sung, 2009; Liu *et al.*, 2011)。

そのような研究環境の向上に加えて、さらに幸運なことに、台湾 (中央研究院) と日本 (京都大学) が連携して行ったワークショップ (Taiwan-Japan Joint Workshop on Tatun-Kyushu Volcanic Activity, March 19-20, 2012, Jiengshan Nature Center, Yangmingshan National Park, Taipei, Taiwan) の機会に、短時間ではあったが、台湾の研究者と共同して大屯火山群の温泉の調査を行うことができ、我々 (日本人) の現地温泉についての理解が飛躍的に向上した。そこで、本研究では、現地調査研究の結果を提示するとともに、そこで得た新たな知見に基づいて行った既存化学分析データの解析結果を報告する。

## 2. 研究地域の概要と研究方法

### 2.1 大屯火山群の地球科学

台湾北部に位置する大屯火山群 (Fig. 1) は、台北市郊外の陽明山国家公園内にあり、現在は風景区・温泉として観光開発が進められている。この火山群は、北側の金山断層と南側の嵌脚断層 (いずれも南東傾斜、上盤上がりの逆断層) に挟まれた領域の内部および周辺に生成された 20 以上の火山からなる。火山周辺では活発な噴気孔活動が見られ、最も規模の大きなもの一つとして七星

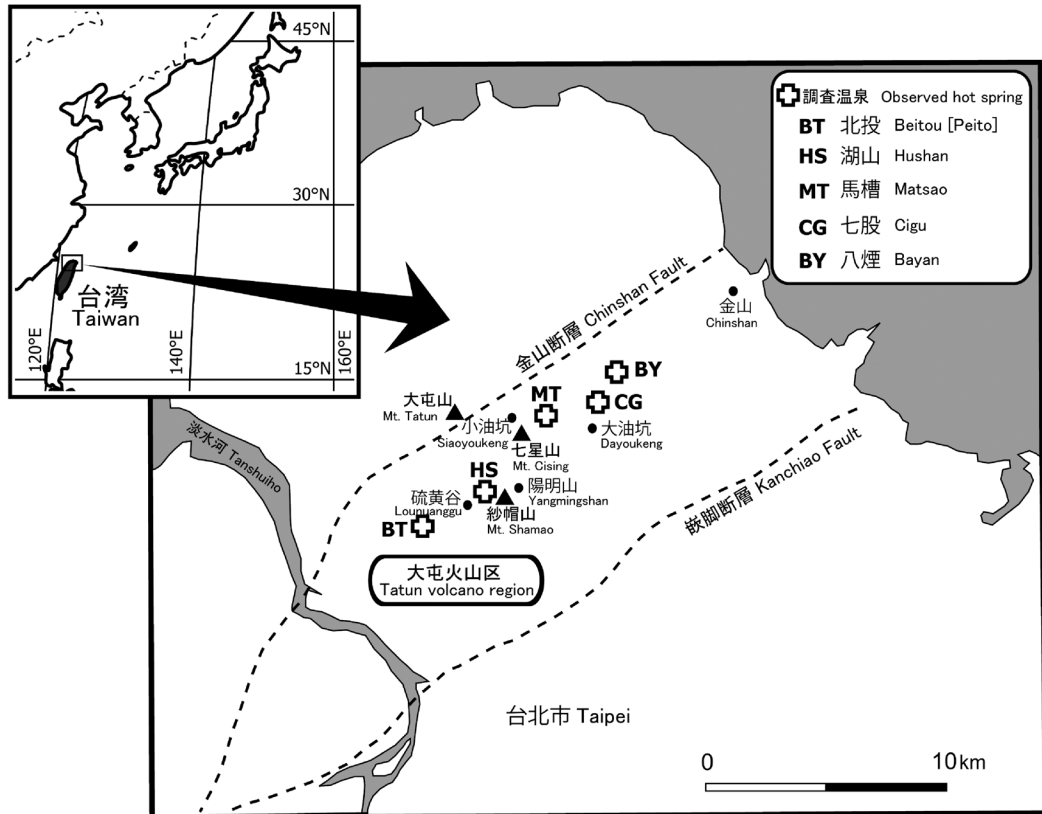


Fig. 1 Map showing study area, locations of the observed hot springs with some typical volcanoes and faults, and geothermal manifestations.

火山麓の小油坑が挙げられる。この火山群での活発な火山活動は30万年前頃まで続いたが、その後の活動度は低調な状態が続いている (Wang and Chen, 1990)。一方で、この地域には優勢な地熱活動があって噴気ガスにはマグマに由来する成分も含まれていることが報告されており (Lee *et al.*, 2008; Ohba *et al.*, 2010), 1万8千年前 (Chen and Lin, 2002) および6千年前 (Belousov *et al.*, 2010) の噴出物が見つかるなど、依然この地域のマグマ活動は衰えていないと考えられている。また、そのような情報を受けて、地震観測や電磁気観測の地球物理学的な観測研究が近年になって本格化しており (Konstantinou *et al.*, 2007), 大屯火山に対するモニタリングと研究の強化のために現地 (菁山自然センター内) に大屯火山観測ステーション (Taiwan Volcano Observatory at Tatum, <http://tec.earth.sinica.edu.tw/volcano/>) が設立されている。

次に, Weng (1985), 北見 (1990), 須藤 (2008) を参考にして, 当地域の地熱開発に関する情報を略記する。先述のように, 大屯火山群には活発な地熱兆候地があるため, 1965年に地熱資源探査が開始され, 合計81本の試錐が掘削された (最も深いものは1,510mであるとされている)。その結果, 地熱地帯は金山, 嵌脚の2つの断層に挟まれて分布し, 地熱地帯の中央部にはグラーベンのような構造があり, 基盤の深さは2,000mであることが知られた。そして, 火山岩の下の砂岩層内に地熱流体があり, その発電ポテンシャルは500MWにも上ることが判明した。坑井調査で得られた最高温度は293°Cであったが, 地熱流体のpHが2と強酸性であったため, 当時はそのよ

うな流体を利用する方法が見つからず、大屯地区での地熱開発は断念されたという経緯がある。また、この地域が国家公園に指定され、環境保護が問題にされたことも、地熱開発がそれ以上進まなかったことに関係していると言われている。

## 2.2 大屯火山群温泉の化学的特徴

大屯火山群は地熱活動が活発な火山地域であるため、冒頭でも述べたように、温泉が多数存在し、北投から金山にかけて北東-南西に多くの温泉が並んでいる (Fig. 1)。ここでは、詳細な調査結果が記載されている陳 (2005) の研究レポートのデータに基づき、大屯火山群温泉の化学的特徴を述べる。

Figure 2 は、温泉水の pH のヒストグラムである。pH 2 辺りと pH 6 辺りに 2 つのピークを持つバイモーダルな分布をしており、日本の温泉にも見られる分布特性 (浅森ら, 2002) と一見同じように思えるが、酸性の温泉が半数以上 (60%) を占めることがそれと大きく異なる。この点は非常に重要であると考えられ、酸性温泉が付随的に生成したものではないことを示唆していると思われる。

Figure 3A は、化学平衡状態や水質の成熟度を推測するダイアグラムである。酸性温泉水 (pH 4.0 未満とした) が未成熟な領域にプロットされることはしごく当然として、中性温泉水 (pH 5.0 以上とした) は完全平衡のみならず部分平衡状態にすらなく、未成熟で希薄な水であることは注目に値する。これは当地域の地下に高温の Na-Cl 型熱水の存在がないことを指し示していて、かつての坑井調査でもそのタイプの高温度熱水が見いだされなかったこと (Weng, 1985; 須藤, 2008) に対応するものと思われる。それが事実であるとすれば、酸性温泉が初生的なものであり、中性温泉水はそれの岩石による中和反応によって出来たという可能性も出てくるが、そのためには、なぜ中間的な pH の温泉水がないのか? といった細かな点にひとつひとつ答えていく必要がある。しかしながら、酸性温泉が研究の鍵となる重要な温泉であることにたぶん間違いはないと考える。

Figure 3B は主要陰イオン組成を表したものであり、言うまでもなく、pH 4.0 未満の酸性温泉水には  $\text{HCO}_3^-$  が存在しないので、 $\text{Cl-SO}_4$  辺に沿ってプロットされている。それ以上に、ここで目に

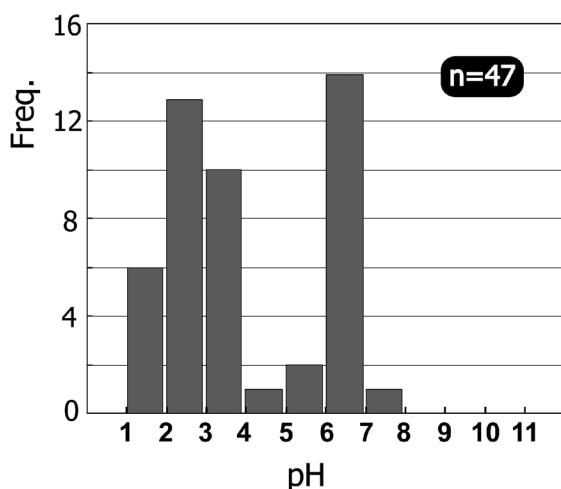


Fig. 2 Histogram of pH of the hot spring water samples in Tatum Volcanic Group, prepared by using data in Chen (2005).

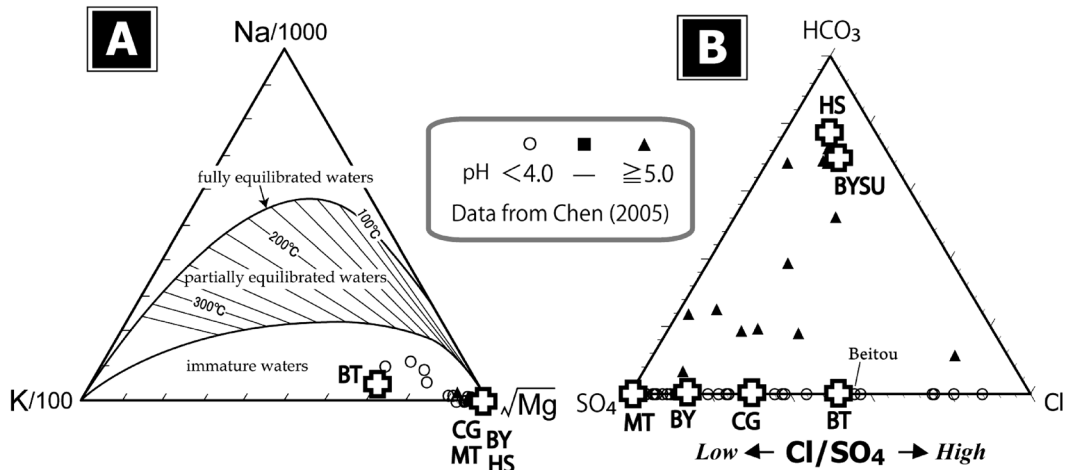


Fig. 3 Relative Na, K and Mg contents (A), and relative Cl,  $\text{SO}_4$  and  $\text{HCO}_3$  contents (B) of hot spring water samples in Tatun Volcanic Group, with the use of chemical data in Chen (2005). Thick crosses are data points of the observed hot springs in this study.

つくのは、塩化物イオンを相当に含む  $\text{Cl}/\text{SO}_4$  比の高い acidic- $\text{Cl}-\text{SO}_4$  型水質のものが無視できない数存在することであり、これは北投石を産出する温泉の特徴として認識されている性質に当る（大沢ら, 1988; 佐藤, 2006）。そして、このことは、前出の酸性温泉が多いことに引けを取らない大屯火山群の温泉の特質であると考ええる。

### 2.3 試料の採取と化学・同位体分析

2012年3月20日に、Fig. 1に示す5つの源泉、北投地熱谷（BT）、湖山（HS）、馬槽（MT）、七股（CG）、八煙（BY）の現地調査を行った。その際、流出温泉水の温度とpHを現地で測定し、化学・同位体分析用の温泉水を採取した。また、参照水試料として、八煙（BY）上流の小川の清水（BYSU）を採取した。

試料水の化学分析では、主要成分（Na, K, Mg, Ca, Cl,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ）の他、酸性温泉水については $\Sigma\text{Fe}$ とAlの定量値を得た。Na, K, Mg, Ca,  $\Sigma\text{Fe}$ , Al,  $\text{SiO}_2$ はICP発光分光分析法で、Clと $\text{SO}_4$ はイオンクロマトグラフィーで行った（いずれも、ニュージーランドGNS Science LimitedのWairakei Analytical LaboratoryにおいてThe American Public Health Administration (APHA) Volume on standard methods of water analysis 22nd Edition (2012)に準拠して実施）。 $\text{HCO}_3$ は4.3アルカリ度法で分析した。

試料水の水の酸素同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ）をAquaprep deviceを用いた25°Cにおける二酸化炭素平衡法により、水の水素同位体比（ $\delta\text{D}$ ）はEurovector Chrome HD elemental analyserを用いた1100°Cにおける還元法により、ニュージーランドGNS Science LimitedのStable Isotope Laboratoryに設置のIsoprime社製の安定同位体質量分析計によって行った。また、 $\text{BaSO}_4$ とした試料水の $\text{SO}_4$ をすずカプセル中で $\text{V}_2\text{O}_5$ によって加熱・還元し、生成した $\text{SO}_2$ を同じくStable Isotope Laboratory保有のGVI IsoPrime社製の質量分析計に導入して硫黄同位体比（ $\delta^{34}\text{S}$ ）を測定した。測定精度は、 $\delta\text{D}$ と $\delta^{18}\text{O}$ のそれぞれについて $\pm 2.0\%$ 、 $\pm 0.2\%$ 、 $\delta^{34}\text{S}$ は $\pm 0.5\%$ である。

### 3. 結果と議論

現地調査において採取した温泉水の化学・同位体分析の結果を Table 1 に示し、陳 (2005) のデータ [試料数:47] を使って作成した Fig. 3A, Fig. 3B にそれらのデータを重ね書きした。試料数は少ないが [温泉水:5, 地表水:1], 大屯火山群の温泉全体をうかがえる代表的な試料採取であったことが示されていると考える。

#### 3.1 水の同位体組成

温泉水の水の同位体組成 ( $\delta D$  vs.  $\delta^{18}O$ ) を地表水のそれとともに Fig. 4 に示す。同図には Liu *et al.* (2011) に掲載されている当地域の天水線を表したが、今回採取した八煙 (BY) 付近の地表水はほぼこの線の上に乗っており、湖山 (HS), 七股 (CG), 八煙 (BY) の各温泉水も概ねこの天水線に沿って分布し、降水を起源としていることがわかる。

これとは対照的に、北投地熱谷 (BT) の温泉水は天水線から大きく外れ、安山岩質マグマからの火山ガス (Volcanic gas from andesitic magma) へ向けてシフトし、マグマ性熱水流体の混入を受けていることを示唆している。天水起源地下水の領域から右上へ大きく外れる馬槽 (MT) は、湧出量の少ないホットプールから採取した温泉水であり、蒸気加熱型の酸性温泉水で普通に見られる水の蒸発の効果で説明できる。

#### 3.2 硫酸イオンの硫黄同位体比と $Cl/SO_4$ 比の関係

酸性温泉の  $SO_4$  について得た硫黄同位体比 ( $\delta^{34}S$ ) の測定値は、+2.1% から +25.7% までの間の広い範囲にわたった値を示したが (Table 1), Fig. 5 に表されるように、 $Cl/SO_4$  比の大きい温泉水が高い  $\delta^{34}S$  値を持つ傾向にある。また、同様な関係は  $\delta^{34}S$  値と  $Cl$  濃度の間にも成立している。データ数が少ないので、両者に線型的な関係があるのか無いのかまでは言及できないが、少なくとも  $\delta^{34}S$  値の +10% 前後を境にして酸性温泉水の分類はできそうである。

Rye (2005) などを参考にすれば、 $\delta^{34}S$  値の高い  $SO_4$  はマグマ性の熱水流体を特徴づけ、熱水に溶けた  $SO_2$  ( $H_2SO_3$ ) の自己酸化還元反応によって生じ ( $3H_2SO_3 \rightarrow 2H_2SO_4 + S + H_2O$  あるいは  $4H_2SO_3 \rightarrow 3H_2SO_4 + H_2S$ )、その一方で、 $\delta^{34}S$  値の低い  $SO_4$  は蒸気加熱型の熱水に表れ、 $H_2S$  の酸化によって生じるとされている (Fig. 5 内に併記)。この考えを今回のデータ関係に適用すれば、 $\delta^{34}S$  値が高い温泉水はマグマ性熱水流体からもたらされ、 $\delta^{34}S$  値が低い温泉水は蒸気加熱型熱水に由来すると言うことができる。後者は  $H_2S$  を含むものの  $SO_2$  や  $HCl$  を欠くため、 $Cl/SO_4$  比は小さくなり、 $Cl$  濃度も低く、水質は acidic- $SO_4$  型となるが、前者は  $SO_2$  や  $HCl$  を含む火山ガスが関与するため、 $Cl/SO_4$  比は大きくなり、 $Cl$  濃度も高く、水質は acidic- $Cl-SO_4$  になると言うように化学的な特徴もシンプルに説明ができて好都合である。なお、Liu *et al.* (2011) は、+0.8% から +7.8% の間の値を取る  $SO_4$  をもってマグマ起源硫黄の供給が支持されるとしているが、

Table 1 Geochemical data of observed hot springs

Sample No.	Location name	WT (°C)	pH	Na (mg/L)	K (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)	Al (mg/L)	$\Sigma$ Fe (mg/L)	Cl (mg/L)	SO <sub>4</sub> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> (mg/L)	SiO <sub>2</sub> (mg/L)	$\delta D$ (‰) of water	$\delta^{18}O$ (‰) of water	$\delta^{34}S$ (‰) of sulfate
BT	北投温泉地熱谷	68.2	1.43	631	284	64	198	107	74	2480	2350	-	194	-24.1	-2.35	25.7
MT	馬槽	64.3	2.30	7.2	1.6	24	20	131	9.6	4.7	1400	-	176	-10.8	0.23	2.1
CG	七股	nm	2.05	31	12	34	82	93	31	406	954	-	166	-20.7	-4.81	20.9
BY	八煙	70.1	2.40	18	2.8	12	27	11	9.1	69	424	-	102	-15.3	-3.83	15.5
HS	湖山	35.9	6.55	62	19	83	58	na	na	88	100	651	167	-27.6	-5.78	na
BYSU	Stream at Bayan 八煙沢水	nm	nm	5.9	<0.9	1.7	7.8	na	na	7.7	6.5	33	na	-18.1	-5.13	na

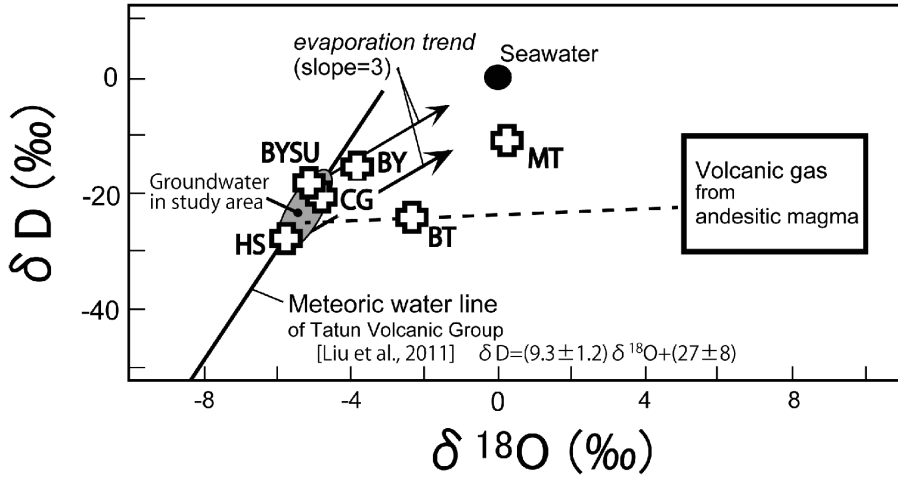


Fig. 4 Plot of  $\delta D$  vs.  $\delta^{18}O$  of the collected hot spring and stream water samples in this study area. Meteoric water line of Tatum Volcanic Group is cited from Liu *et al.* (2011). A range shown as "Groundwater in study area" is estimated from data points BYSU, HS and CG.

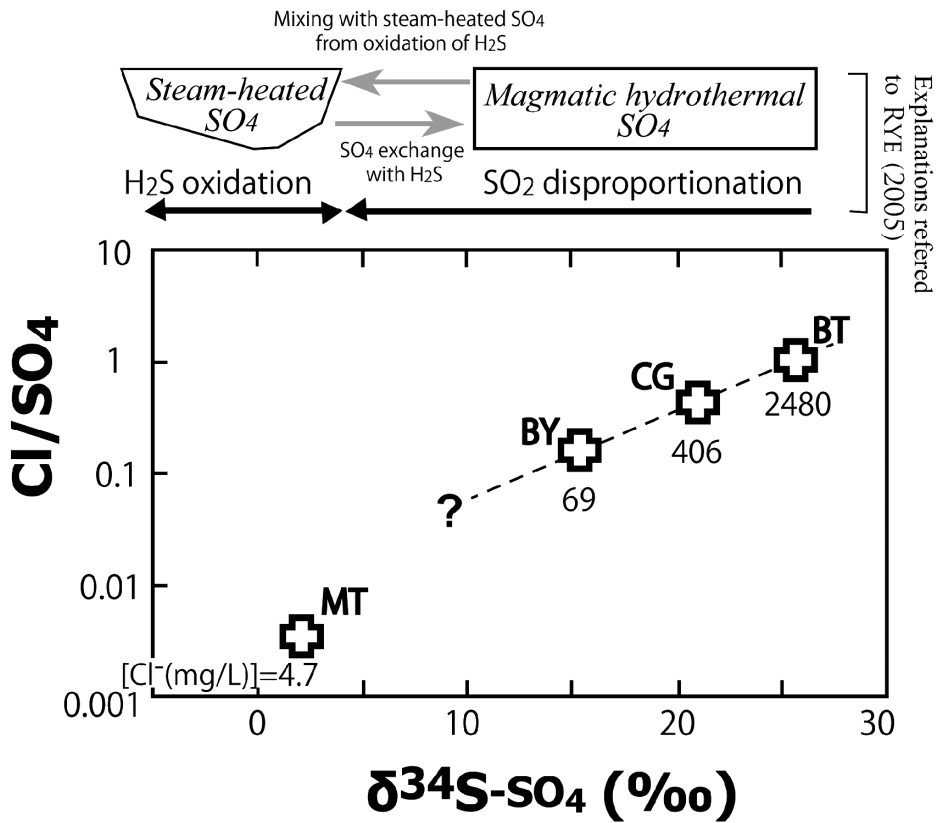


Fig. 5 Relation between  $\delta^{34}S$  of  $SO_4$  and  $Cl/SO_4$  ratio with data of  $Cl^-$  concentration of the acidic hot spring waters sampled in this study. Explanations in the margin for  $\delta^{34}S$  value ranges of  $SO_4$  in a typical volcanic hydrothermal environment are referred to Rye (2005).

これは誤解であると考える。

### 3.3 Cl/SO<sub>4</sub>比の地理的分布

前項 (3.2) の議論のまとめの図解を Fig. 6 に著した。温泉水の Cl/SO<sub>4</sub>比の大小が付近の地下に潜む起源熱水の種類を示す指標のひとつであることが結論づけられたので、ここではその地理的分布を検討してみることにする。Fig. 7A は、大屯火山観測センター (大屯火山観測站) のパンフレットから転載した地形図上に、pH 4.0 未満の温泉水の Cl/SO<sub>4</sub>比の値を円の大きさと表してプロットしたものである。Cl/SO<sub>4</sub>比が 1 に近い酸性温泉がまとまって分布するエリアが複数存在することが見て取れる。また、それらよりさらに大きな Cl/SO<sub>4</sub>比を持つ酸性温泉が図の右上、金山付近に存在するが、Liu *et al.* (2011) によれば水素・酸素安定同位体比から見て海水の混入が認められることから、acidic-SO<sub>4</sub>型熱水と海水が混合することによってその様な高い Cl/SO<sub>4</sub>比が生じていると考えられる。

Figure 7B は、Fig. 7A の Cl/SO<sub>4</sub>比の分布図を等値線表示したものである (作図には日本ポラデジタル(株)の DeltaGraph を使用)。化学成分に関するコンター図 (等値線図) は、地下水溶存成分濃度や土壌水銀濃度などに対して用いられ、データ取得地点の地下における水やガス (土壌空隙) が水平方向に連続している、あるいは、それらの諸性質が連続的に変化していくことが作成の前提条件となる。本地域では地下の温泉水が側方流動している確固たる証拠がないので、このコンター図 (Fig. 7B) は結果的に適切な表現方法ではないかもしれないが、少なくともどの辺りに Cl/SO<sub>4</sub>比の高い酸性温泉が存在するかを視覚的にとらえやすくするという目的には使えるであろう。Fig. 7B 中の黒丸が温泉の位置を表すが、(1) 北投温泉と (2) 七星山周辺から東側、それらに加えて (3) 紗帽山の東方に Cl/SO<sub>4</sub>比の高いエリアが見え (高いエリアが赤く、低いエリアが青くなるように

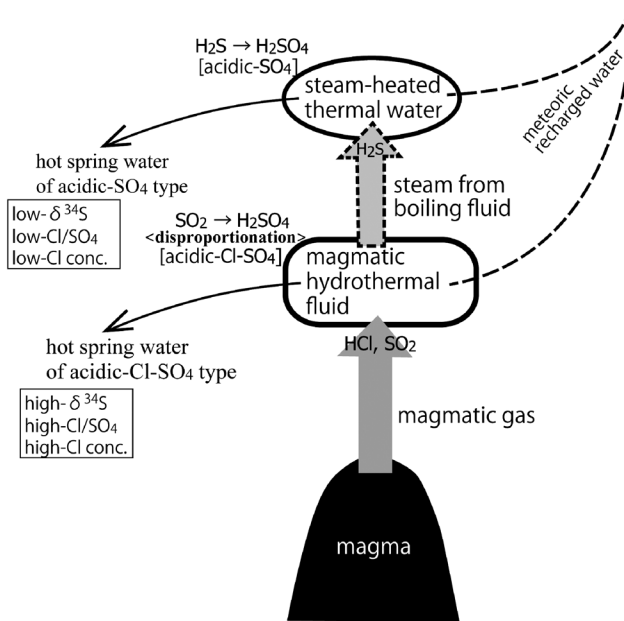


Fig. 6 A conceptual model of formation mechanism of acidic hot spring waters in Tatun Volcanic Group from an examination of the relation between  $\delta^{34}\text{S}$  of SO<sub>4</sub> and Cl/SO<sub>4</sub> ratio.



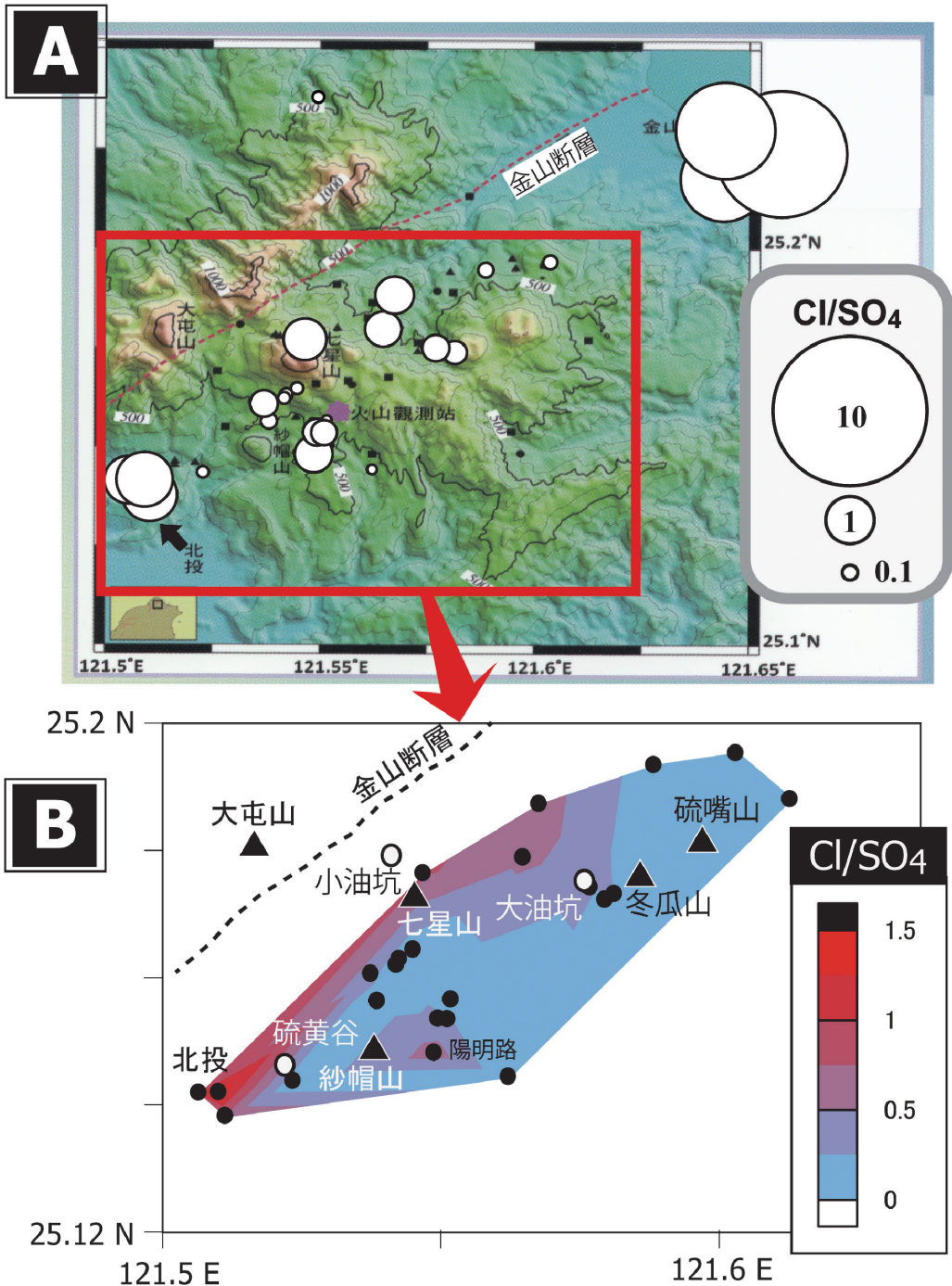


Fig. 7 Geographical distribution (A) and a contour map (B) of Cl/SO<sub>4</sub> ratio of acidic hot spring waters in Tatun Volcanic Group through the use of data reported by Chen (2005). The original map of (A) is cited from the leaflet of Taiwan Volcano Observatory at Tatun. Hot springs showing relatively large Cl/SO<sub>4</sub> ratios distributed near the coast in the northeast of Tatun Volcanic Group, shown at the upper right of (A), may be influenced by seawater. For detail, see text.

作図条件を設定した), この辺りに acidic-Cl-SO<sub>4</sub> 型水質のマグマ性熱水流体が流出してきていると見ることができよう。

VLF-MT による表層の電気伝導度分布調査によれば, 大屯火山群の中でも特に七星山の深部から火山性の流体が上昇し, 構造に支配されつつ南西側の硫黄谷・北投温泉, および北東側の大油坑に広がっているように見えているとされている(鍵山ら, 2010)。Figure 7B に表れている七星山から南西と北東の両方向へ伸びる高 Cl/SO<sub>4</sub> のスジは, マグマ性熱水流体に由来する acidic-Cl-SO<sub>4</sub> 型温泉水の側方流動に対応するものかもしれない。

#### 4. おわりに

短期間ではあったが, 台湾・大屯火山群を訪れ, 代表的な温泉を調査し, 採取した温泉水の化学・同位体分析を行った。得られたデータを用いた地球化学的解析から以下のことを明らかにした。(1) 水の安定同位体組成 ( $\delta D \cdot \delta^{18}O$ ) から, 温泉水は, 水の蒸発の効果を受けたものがあるものの, 概ね天水起源であることが示されたが, 北投地熱谷の温泉水には安山岩質マグマからの火山ガスの寄与が認められた。(2) 酸性の温泉には, SO<sub>4</sub> の硫黄同位体比 ( $\delta^{34}S$ ), 塩化物イオン濃度, Cl/SO<sub>4</sub> 比がともに高いものと, 逆に  $\delta^{34}S$ , 塩化物イオン濃度, Cl/SO<sub>4</sub> 比がともに低いものの少なくとも 2 種類の温泉水が存在し, 前者はマグマ性熱水流体に由来し, 後者はそれから 2 次的に生じた acidic-SO<sub>4</sub> 型水質の蒸気加熱型熱水からもたらされていることが示された。さらに, 化学分析の文献値(陳, 2005)を用いた酸性温泉の Cl/SO<sub>4</sub> 比の地理的分布から, マグマ性熱水流体に由来する acidic-Cl-SO<sub>4</sub> 型熱水の流出が北投温泉, 七星山周辺から東側のエリアならびに紗帽山の東方にあることが示唆された。そして, この知見は VLF-MT による表層の電気伝導度分布調査から得られる解釈(鍵山ら, 2010)と整合的であることが分かった。

最後に現時点で考え得る今後の研究課題を記しておくことにしたい。一つ目は, 当地域の温泉全てについて SO<sub>4</sub> の硫黄同位体比 ( $\delta^{34}S$ ) のデータを入手し, Cl/SO<sub>4</sub> 比と同様な地理的分布を検討してみることである。Cl/SO<sub>4</sub> 比と  $\delta^{34}S$  値の間に線形関係が存在するののかという疑問の解決とともに, より直接的な熱水種の指標である  $\delta^{34}S$  の分布はどのように地図上に表れ, Cl/SO<sub>4</sub> 比のものとは一致するのか, あるいは異なるのかを知りたい。二つ目は, 熱水の温度に関する情報を同位体比から得ることである。強い酸性の温泉水に適用可能で信頼性のある地化学温度計は, 硫酸イオン (SO<sub>4</sub>) と水 (H<sub>2</sub>O) の間の酸素同位体交換平衡を原理としたものしかなく (Cortecci, 1974), それを使って熱水の地下における温度を算出し, 地理的な分布を求め, Cl/SO<sub>4</sub> 比や  $\delta^{34}S$  値のものとのように対比されるかを見てみたい。以上の研究が進めば, 微小地震の震源分布や地下の比抵抗分布 (Konstantinou *et al.*, 2007; 宇津木ら, 2011) との対比が十分可能となり, 大屯火山群の地下における流体の分布や挙動を詳しく把握し, かつ, それらの様子をより詳細に描写することができるようになるであろう。

#### 謝 辞

安定同位体分析は Stable Isotope Laboratory, GNS Science Limited (ニュージーランド) で, また温泉水の化学分析の一部は Wairakei Analytical Laboratory, GNS Science Limited (ニュージーランド) で行われた。アルカリ度測定 (HCO<sub>3</sub> の分析) では三島壮智氏に, 現地調査では詹喬瑜 (Qiao Yu Zhan) 氏に協力いただいた。匿名の査読者には原稿を改善する上で有益な助言をいただいた。本研究の費用の一部には, 独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金・海外学術調査 (B), 研究課題番号: 21403003 (研究代表者: 鍵山恒臣) を用いた。ここで関係各位に感謝申し上げ

げる。

## 引用文献

- 浅森浩一, 石丸恒存, 岩月輝希 (2002) : 日本列島における火山周辺の酸性地下水分布. サイクル機構技報, **15**, 103-111.
- American Public Health Administration (2012) APHA Volume on standard methods of water analysis, 22nd Edition.
- Belousov, A., Belousova, M., Chen, C-H. and Zellmer, G.F. (2010) : Deposits, character and timing of recent eruptions and gravitational collapses in Tatun Volcanic Group, Northern Taiwan : Hazard-related issues. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **191**, 205-221.
- Chen, C.H. and Lin, S.B. (2002) : Eruptions younger than 20 ka of the Tatun Volcano Group as viewed from the sediments of the Sungshan Formation in Taipei Basin. *West Pacific Earth Science*, **2**, 191-204.
- 陳 柏淳 (2005) : 臺北地區溫泉露頭調查與水質分析. 經濟部中央地質調查所 94 年度研究發展 專題, 報告書編號 : 94013, 70 p. (中文)
- Chen, C-T., Zeng, Z., Kuo, F-W., Yang, T-F., Wang, B-J. and Tu, Y-Y. (2005) : Tide-influenced acidic hydrothermal system offshore NE Taiwan. *Chemical Geology*, **224**, 69-81.
- Chen, W-F. and Sung, M. (2009) : The Redox Potential of Hot Springs in Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **20**, 465-479.
- Cortecchi, G. (1974) : Oxygen Isotope Ratios of Sulfate Ions-Water Pairs as a possible Geothermometer. *Geothermics*, **3**, 60-64.
- Ezoe, Y., Lin, C-H., Noto, M., Watanabe, Y. and Yoshimura, K. (2002) : Evolution of water chemistry in natural acidic environments in Yangmingshan, Taiwan. *J. Environ. Monit.*, **4**, 533-540.
- 鍵山恒臣, 宇津木充, 陳 中華, 宮縁育夫 (2010) : 台湾・大屯火山群周辺の表層電気伝導度分布. 日本地球惑星科学連合大会予稿集, SVC061-05.
- 岸本文男 (1989) : 温泉の水滑らかにして (2). *地質ニュース*, **421**, 23-34.
- 北見 尹 (1990) : 台湾のエネルギー事情 地熱等再生可能エネルギーの開発と利用. *地熱エネルギー*, **15**, 68-80.
- Konstantinou, K., Lin, C-H. and Liang, W-T. (2007) : Seismicity characteristics of a potentially active Quaternary volcano : The Tatun Volcano Group, northern Taiwan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **160**, 300-318.
- Lee, H-F., Yang, T-F., Lan, T-F., Chen, C-H., Song, S-R. and Tsao, S. (2008) : Temporal variations of gas compositions of fumaroles in the Tatun Volcano Group, northern Taiwan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **178**, 624-635.
- Lin, C-C., Chu, T-C. and Husng, Y-F. (2003) : Variations of U/Th-series nuclides with associated chemical factors in the hot spring area of northern Taiwan. *J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **258**, 281-286.
- Liu C-M., Song, S-R., Chen, Y-L. and Tsao, S. (2011) : Characteristics and origins of hot springs in the Tatun volcanic group in northern Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **22**, 475-489.
- Ohba, T., Sawa, T., Taira, N., Yang, T.F., Lee, H-F., Lan, T-F., Ohwada, M., Morikawa, N. and Kazahaya, K. (2010) : Magmatic fluids of Tatun volcanic group, Taiwan. *Applied Geochemistry*, **25**, 513-523.

- 大沢信二, 綿拔邦彦, 高野穆一郎 (1988) : コンピュータ・シミュレーションによる北投石生成機構. 温泉科学, **38**, 154-162.
- Rye, R.O. (2005) : A review of the stable-isotope geochemistry of sulfate minerals in selected igneous environments and related hydrothermal system. *Chem. Geol.*, **215**, 5-36.
- 佐藤幸二 (2006) : 台湾および日本における高温酸性泉. 温泉科学, **55**, 188-194.
- 須藤 茂 (2008) : 野柳, 大屯火山群, 北投温泉など, 台湾のジオパークめぐり. 地質ニュース, **648**, 6-19.
- Tomita, J., Sakaguchi, A. and Yamamoto, M. (2006) : Hokutolite collected from riverbed at Peitou Hot Spring in Taiwan : With emphasis on radiochemical studies. *J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **270**, 567-574.
- 宇津木充, 鍵山恒臣, Chen C-H., 神田 径, 吉村令慧, 小森省吾, 浅野 剛 (2011) : 台湾・大屯火山群における AMT 観測. 日本地球惑星科学連合大会予稿集, SVC049-P05.
- Wang, W-H. and Chen, C-H. (1990) : The volcanology and fission track age dating of pyroclastic deposits in Tatun Volcano Group. *Acta Geologica Taiwanica*, **28**, 1-30.
- Weng, T.C. (1985) : 台湾における地熱エネルギー (三浦昭二訳). 地熱エネルギー, **10**, 63-69.