
原 著

霧島火山丸尾地区の熱水系形成機構の 地球化学的解釈

鹿児島大学大学院理工学研究科

藤田 俊一, 坂元 隼雄

(平成12年11月7日受付, 平成13年2月2日受理)

Geochemical Interpretation on Hydrothermal Formation Mechanism of Maruo Region in the Kirishima Volcanic Area

Shun-ichi FUJITA and Hayao SAKAMOTO

Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University

Abstract

Kirishima volcanic area lying on the northern extension of Ryukyu arc is located in Kagoshima Prefecture, south Kyushu, Japan. There are many thermal manifestations related to volcanic activity in this area. We define chemical features of hydrothermal system of Maruo region in the Kirishima volcanic area on the basis of Giggenbach's chemical geothermometry, mineral equilibrium calculation, etc. Water samples for chemical analysis were collected from some drilled wells to the depths of about 100-200 m owned by Satsumaso and Kirishima rehabilitation center in Maruo region of the Kirishima volcanic area. Almost the collected waters are neutral-Cl type with high Li and B contents reaches to 3.76-10.2 mg/l and 45.2-142 mg/l, respectively. The Li/Na ratio of the Cl type hydrothermal waters show about 0.01, suggesting that these waters are originated from deep-seated volcanic fluid. The reservoir temperature of the fluid is roughly estimated to be 280-300°C and 250-300°C by Na/K geothermometer and K/Mg geothermometer, respectively. CO₂-fugacity of the hydrothermal system in this region is externally controlled, however a part of the system is kept at about 0.5-2.2 bar by internal equilibrium. The B/Cl ratios of the sample waters (ca. 0.08) suggest that the hydrothermal fluid is interacted with volcanic rocks.

Key words : Kirishima volcano, Hydrothermal system, Chemical geothermometry

キーワード : 霧島火山, 熱水系, 地化学温度計

1. 緒 言

霧島火山地域には酸性—弱アルカリ性の温泉及び噴気帯, 変質帯を伴う多数の温泉が湧出している

(露木ら, 1990; 藤田ら, 2000). これらの地域は, 加久藤カルデラ(有田, 1957)を含む, 鹿児島地溝(露木, 1969)内にある. 地質については沢村・松井(1957), 井村(1994)などの報告がある. また, 鍵山ら(1996)による比抵抗構造の研究があり, 霧島火山山体地下には, 深さ10km付近にマグマが滞留していることが明らかになった.

霧島火山大霧・銀湯地区では, 地熱開発のためのボーリング調査が精力的に行われ, 現在では大霧地区に30MW級の地熱発電所が運転されている(Sasada et al., 2000). この地区の地熱構造については, 児玉・中島(1988), Hedenquist and Aoki(1991), Yano and Ishido(1995), Sawaki et al.(1997)など多数の報告がある.

一方, 霧島火山丸尾地区では, 0.1MW級の地熱発電所が運転されている(Sasada et al., 2000). Ohba et al.(1997)は, 丸尾地区から得られる塩化物型の熱水の水素, 酸素同位体比を測定し, マグマから発せられた未分化な組成の流体と地下水が混合し生じた液相から, その熱水が形成していることを示した.

通常, 地熱生産井で採取されている熱水は深さ約1000mからのものがほとんどであるが, 丸尾地区の薩摩荘及び霧島リハビリテーションセンターで得られる水蒸気及びガスを伴った熱水は深さ100~200m付近から得られる(露木ら, 1990). このように, 高温の熱水が極めて浅いところから得られることは非常に興味深い. また, 薩摩荘及び霧島リハビリテーションセンターから得られる熱水は, 丸尾地区の中でも最も活発な噴気地帯で得られるので, 丸尾地区を代表する熱水系であると考えられる.

本研究では, 丸尾地区の薩摩荘及び霧島リハビリテーションセンターの熱水の採取及び化学分析を行い, 地化学温度計や化学平衡計算(Giggenbach, 1988)などを用い, 丸尾地区から得られる熱水の貯留温度, 貯留母岩などの熱水系形成機構の推定を行った.

2. 試料の採取と保存

熱水を採取した薩摩荘及び霧島リハビリテーションセンター(鹿児島大学医学部付属病院)の位置をFig. 1に示す. 薩摩荘からは4試料, 霧島リハビリテーションセンターからは6試料を同日に採取した. それぞれの採取地点はいずれも異なるボーリングによる泉源であるが相互にそれほど離れていない.

各試料は源泉において可能な限り湧出場所に近い位置, すなわちボーリング孔に近い場所から採取し, 250 mlのポリエチレン瓶に保存した. 陽イオンの沈殿もしくは容器への吸着を防ぐため, 試料1リットルに対して塩酸を10 ml加え分析用に保存した.

3. 分析法

分析項目及び分析方法は以下に示す通りである.

pH: ガラス電極法; Li, Na, K: 原子吸光分光分析法または蛍光光度法; Ca, Mg: 原子吸光分光分析法; Cl, SO₄: イオンクロマトグラフィー法; HCO₃: 硫酸による中和滴定法(pH 4.3アルカリ度); B: メチレンブルーフッ化ホウ素錯体の抽出に基づく吸光光度法(Isozaki and Utsumi, 1974)を用いた. なお, 泉温は現地で測定した.

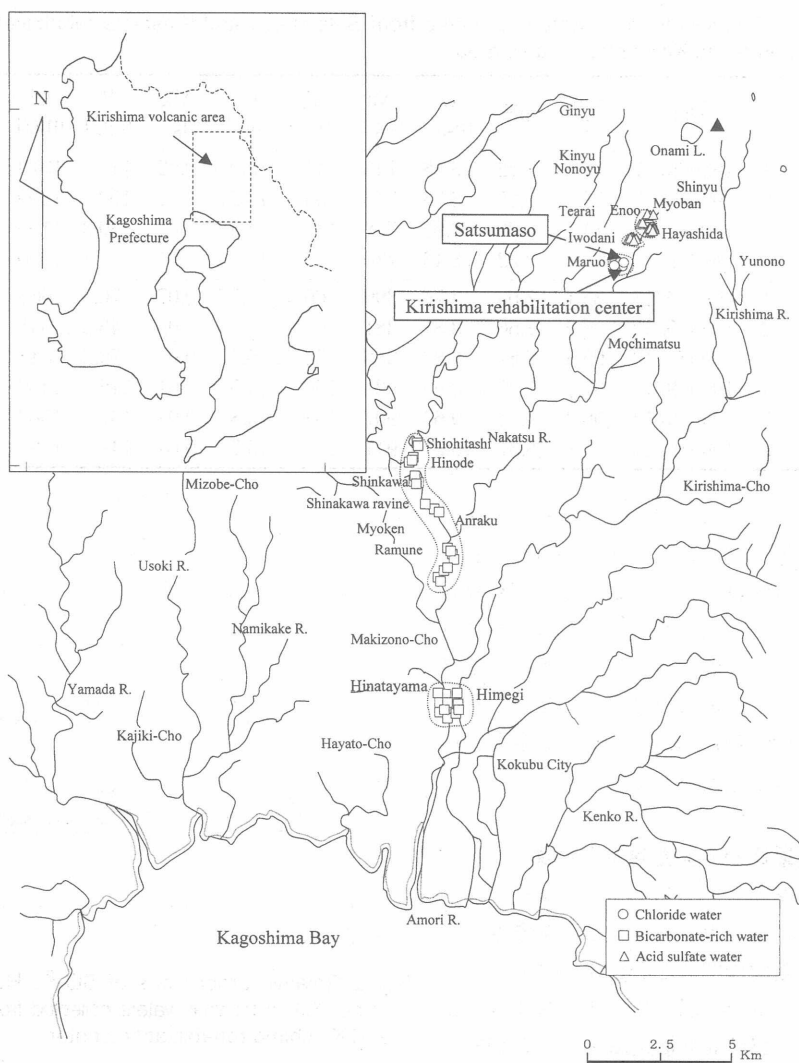


Fig. 1 Location of Satsumaso and Kirishima rehabilitation center in Maruo region of the Kirishima volcanic area

4. 結果と考察

4.1 陰イオン化学組成

温泉水試料の分析結果をTable 1に示す。また陰イオンの分析結果から、 $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$ 組成比(当量%)を三角図に表したものをFig. 2に示す。

薩摩荘及び霧島リハビリテーションセンターから得られる熱水の大部分は泉温が高く、塩化物イオンが主要陰イオン成分となっている中性もしくは弱アルカリ性の塩化物泉である。霧島リハビリテーションセンターから得られる熱水の一部には、硫酸イオン含量の多いものがあり、pHもわずかに低い。今回の調査に先立って、藤田ら(1999)は、薩摩荘及び霧島リハビリテーションセンターと酸性硫酸塩泉である林田温泉において1996年7月から1997年11月にかけて1ヶ月ごとに $\text{Cl-SO}_4\text{-$

Table 1 Chemical data of thermal waters collected from Satsumaso and Kirishima rehabilitation center in Maruo region of the Kirishima volcanic area

Description	Date	Temp. °C	pH	Li mg/l	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	B mg/l	Cl mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	
Satsumaso	1	1999/9/13	97.5	8.22	8.48	743	147	12.0	0.02	112	1370	53.7	145
	2	1999/9/13	96.7	8.25	8.78	746	139	13.2	0.02	108	1290	54.2	148
	3	1999/9/13	74.5	8.26	8.85	758	145	13.3	0.01	80.3	1150	55.0	156
	4	1999/9/13	91.4	8.22	8.43	730	149	11.5	0.01	87.3	1090	51.4	150
Kirishima rehabilitation center	1	1999/9/13	85.1	7.68	3.76	390	60.3	6.77	0.07	76.9	665	150	65.7
	2	1999/9/13	96.9	7.56	3.81	381	63.9	5.89	0.05	45.2	651	145	65.1
	3	1999/9/13	95.8	7.67	3.82	386	64.7	5.37	0.03	70.2	645	145	67.2
	4	1999/9/13	97.9	8.35	9.90	926	166	14.5	0.01	116	1450	16.5	138
	5	1999/9/13	96.3	8.34	9.63	907	158	13.8	0.08	137	1560	22.3	159
	6	1999/9/13	85.8	8.37	10.2	941	172	13.7	0.04	142	1780	17.7	167

HCO₃組成のモニタリングを行った。その結果、霧島リハビリテーションセンターから得られる熱水のCl-SO₄-HCO₃組成には季節的な変動が見られた。この結果を含めて、霧島リハビリテーションセンターから得られる熱水の一部で見られる硫酸イオン多寡の原因としては、季節的にCl/SO₄比が変動する酸性硫酸塩泉などの混入があるためと考えられる。

4.2 Li/Na重量比から見た熱水の特徴

薩摩荘及び霧島リハビリテーションセンターから得られる熱水のナトリウムイオン濃度とリチウムイオン濃度の関係をFig. 3に示す。

リチウムは高温の深部流体に多く含まれ火山性の塩化物泉のLi/Na重量比は高いことが知られている(White, 1957, 1971)。薩摩荘及び霧島リハビリテーションセンターから得られる熱水のリチウムイオン濃度は3.76~10.2 mg/lと高く、Li/Na重量比は0.01程度で、White(1957)によって報告されている火山性の塩化物泉のLi/Na重量比と一致する。よって、これらの熱水は、火山性の深部熱水の性格を持つものと考えられる。

4.3 Na/K及びK/Mg地化学温度計による熱水の貯留温度の推定

Giggenbach(1988)は、熱水中のNa/K及びK/Mg組成比が、岩石-水相互作用を仮定した化学平衡により説明可能であることを示し、Na-K-Mgの3成分の分析値から地下に潜在する熱水系の貯留温度を推定する方

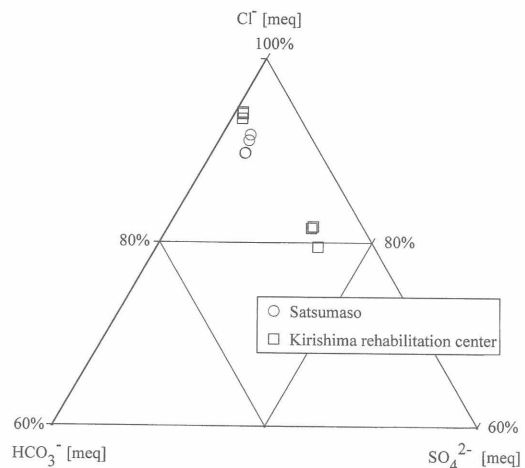


Fig. 2 Relative proportions of SO₄²⁻, HCO₃⁻ and Cl⁻ (meq. %) of thermal waters collected from Satsumaso and Kirishima rehabilitation center

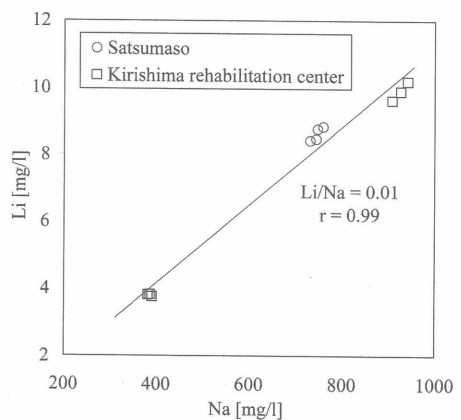


Fig.3 Relationships between Na and Li concentrations of thermal waters from Satsumaso and Kirishima rehabilitation center

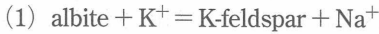
法として、Na/K及びK/Mg地化学温度計を提案した。これらの地化学温度に關与する鉱物は、地熱系に普遍的に存在する曹長石、カリ長石、緑泥石、カリ雲母、シリカ(石英よりもカルセドニーが多い)が含まれる。

Giggenbach(1988)は、次の地化学温度計により、貯留温度を求めた。

$$\text{Na/K地化学温度計; } T_{\text{Na-K}}(^{\circ}\text{C}) = 1390 / [1.75 - \log(\text{K/Na})] - 237$$

$$\text{K/Mg地化学温度計; } T_{\text{K-Mg}}(^{\circ}\text{C}) = 4410 / [14.0 - \log(\text{K}^2/\text{Mg})] - 237$$

これらの地化学温度計は、次の反応の平衡關係に基づく。



また、想定される鉱物と熱水の間で(1),(2)式の平衡關係が成り立てば、Fig. 4の完全平衡(Full equilibrium)を示す線上にプロットされる。薩摩荘及び霧島リハビリテーションセンターから得られる熱水をプロットしたものをFig. 4に示す。

薩摩荘及び霧島リハビリテーションセンターから得られる熱水のうち塩化物イオン濃度の高いものは、ほぼ完全平衡を示す線上にプロットされることから、岩石を構成する曹長石、カリ長石、緑泥石、カリ雲母、シリカなどの鉱物と熱水との間ではほぼ平衡關係が成り立っていることが示唆された。また、その貯留温度はNa/K地化学温度計からは280~300℃程度、K/Mg地化学温度計からは250~300℃程度であると推定された。この結果は、これらの熱水が各地の地熱生産井から得られる熱水と同様に、深部熱水の特徴を持つことを示している。

ボーリングコア鑑定資料によると、丸尾地区の岩石や土壤は、地下100~150mで白色粘土化し、

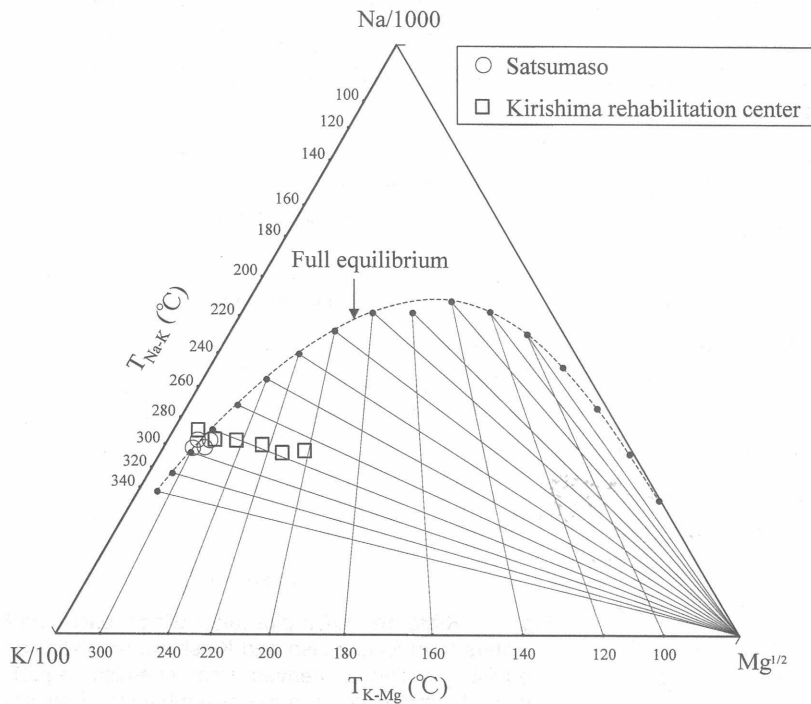


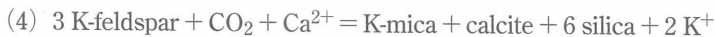
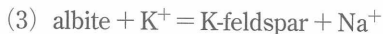
Fig. 4 Na-K-Mg diagram (after Giggenbach, 1988) of thermal waters from Satumaso and Kirishima rehabilitation center. Full equilibrium line is derived from chemical equilibria between hydrothermal water and the assemblage of minerals; albite, K-feldspar, K-mica, chlorite, silica

モンモリロナイト, α -クリストバル石のほか黄鉄鉱, 緑泥石, 方解石が見られ, 地下150m以下では珪化作用が進み, 割れ目を充填して方解石や石英脈が見られ, 地下200~250m以下ではワイラカイト, ローモンタイトなどの熱水鉱物が見られると報告されている(露木ら, 1990). 熱水鉱物に関しては250℃以上の貯留層では熱水鉱物のワイラカイトと熱水が平衡関係にあり, 250℃以下の熱水貯留層では熱水鉱物のローモンタイトと熱水が平衡関係にあることが知られている(Giggenbach, 1988). このことは, 薩摩荘及び霧島リハビリテーションセンターから得られる熱水が地化学温度計によって高貯留温度を示すこととうまく一致する. また, 丸尾地区では, 100~200m程度というごく浅い所から高温の熱水が得られることから, 今後, この地区の熱水が有効に利用されることが期待できる.

4.4 K/Ca組成比による貯留層のCO₂分圧の推定

Giggenbach(1988)は, 岩石-水相互作用を仮定した化学平衡により, 熱水のK/Ca比から貯留層のCO₂分圧を求めることが可能であるとし, K-Ca-Mgの3成分の分析値から地下に潜在する熱水系の物理, 化学的な状態を推測する方法として, K/Ca-CO₂分圧図を提案した. K/Ca-CO₂分圧図に關与する鉱物は, 地熱系に普遍的に存在する, 曹長石, カリ長石, カリ雲母, 方解石, シリカ(石英よりもカルセドニーが多い)である.

Giggenbach(1988)は次式を用い, 鉱物と熱水間の平衡関係を導いた.



これらの鉱物と熱水の間で(3), (4)式の平衡関係が成り立っていれば, K/Ca-CO₂分圧図とで完全平衡(Full equilibrium)を示す線上にプロットされ, そのような熱水のカリウムイオンとカルシウムイオンの濃度から次式により, 地下に存在する流体のCO₂分圧を知ることができる.

$$\text{Log } f_{\text{CO}_2} = \text{Log} (C^2_{\text{K}} / C_{\text{Ca}}) - 3.0$$

薩摩荘及び霧島リハビリテーションセンターから得られる熱水のK/Ca-CO₂分圧図をFig. 5に示す.

霧島リハビリテーションセンターから得られる熱水の多くが, 完全平衡を示す線上もしくはその近辺にプロットされるので, これらの熱水は岩石を構成するカリ長石, カリ雲母, 方解石, シリカなどの鉱物との間で平衡関係にあることが推定された. また, 霧島リハビリテーションセンターから得られる熱水の貯留層のCO₂分圧は0.5~2.2 bar程度であると推定された. 一方, 霧島リハビリテーションセンターから得られる一部の熱

水と薩摩荘の熱水は完全平衡から期待されるCO₂分圧より低い圧力を示した. 同様の結果が各地の地熱生産井から得られる典型的な塩化物型の地熱水でも見られる. Giggenbach(1988)は, K-Ca組

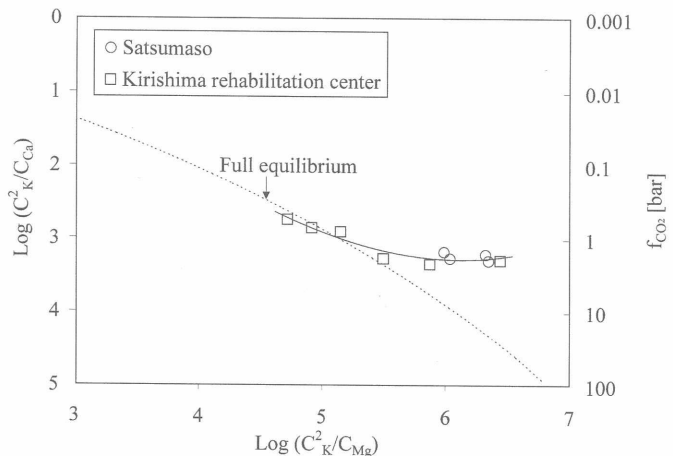


Fig. 5 K/Mg and K/Ca plot (after Giggenbach, 1988) of thermal waters from Satsumaso and Kirishima rehabilitation center. Full equilibrium line is derived from chemical equilibria between hydrothermal water and the assemblages of minerals; albite, K-feldspar, K-mica, calcite, silica

成比から推定されるCO₂分圧が完全平衡から期待されるものより低い圧力を示すのは、CO₂分圧が内部よりも外部に制御されているためであると説明している。恐らく、丸尾地区の熱水系でも同様のことが起こっており、ごく浅い所から得られる熱水であることと関係があるものと考えられる。また、丸尾地区の各試料はFig. 5において一本の曲線上に位置するが、この原因とその意味の詳細な解釈については今後の研究課題としたい。

4.5 B/Cl重量比から得られる貯留母岩の推定

薩摩荘及び霧島リハビリテーションセンターから得られる熱水のB/Cl重量比の関係をFig. 6に示す。

深部熱水中のB/Cl重量比は、貯留層を構成する貯留母岩の化学的性質を反映し、加えて蒸気卓越型貯留層や海水の混入した地熱貯留層など熱水系の形成機構によっても変化することが知られている(茂野・阿部, 1981)。それによると、(1)安山岩一流紋岩などの火山岩類あるいは火山砕屑岩類が貯留層となっている熱水ではB/Cl重量比は0.03~0.1程度、(2)砂岩などの海成の堆積岩類あるいはこれを起源とする変成岩類が貯留層となっている熱水、蒸気卓越系ではB/Cl重量比は0.1~10程度、(3)海水あるいは変質が進んでない化石海水が起源となっている熱水のB/Cl重量比は0.03以下である。

B/Cl重量比は大方0.08程度であり、薩摩荘及び霧島リハビリテーションセンターから得られる熱水は上記の分類によれば(1)に当てはまり、安山岩などの火山岩類が貯留母岩となっている熱水系からもたらされたものであることが示唆される。

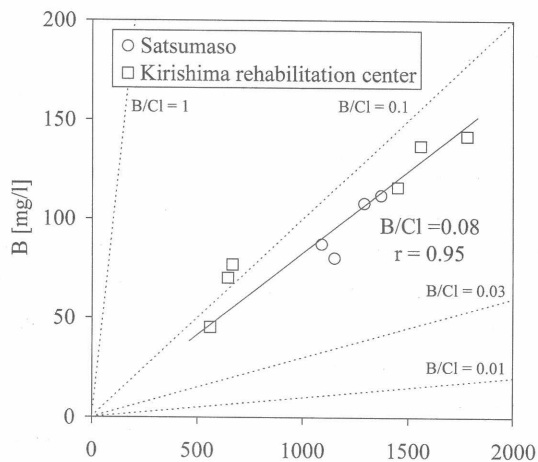


Fig. 6 Relationships between B and Cl contents of thermal waters sampled from Satsumaso and Kirishima rehabilitation center

5. ま と め

霧島火山地域丸尾地区の薩摩荘及び霧島リハビリテーションセンターから得られる熱水を採取し、化学分析を行った。得られた分析データの地球化学的解析から、以下の事柄が示された。

- (1) リチウムイオン濃度は3.76~10.2 mg/lと高く、Li/Na重量比は0.01程度で、火山性の深部熱水の特徴を持つものと考えられた。
- (2) 塩化物イオン濃度の高い熱水では、熱水のNa/K及びK/Mg比から、岩石を構成する曹長石、カリ長石、緑泥石、カリ雲母、シリカなどの鉱物と熱水との間ではほぼ平衡関係にあることが推定された。また、その貯留層温度はNa/K地化学温度計からは280~300℃程度、K/Mg地化学温度計からは250~300℃程度と推定された。以上により、各地の地熱生産井から得られる熱水と同様に、深部熱水の特徴を持つことが示唆された。
- (3) 熱水のK/Ca、K/Mg比から、岩石を構成するカリ長石、カリ雲母、方解石、シリカなどの鉱物と熱水との間ではほぼ平衡関係にあることが推定され、貯留層のCO₂分圧は0.5~2.2 bar程度と推定された。
- (4) B/Cl重量比は0.08程度であり、安山岩などの火山岩類が貯留母岩となっている熱水系からもた

らされたものであることが示唆された。

(日本温泉科学会第52回大会で発表, 平成11年8月31日)

謝 辞

鹿児島大学理学部の富田克利教授, 富安卓滋助教授, 穴澤活郎助手及び鹿児島大学教育学部の桐山哲也教授には有益な助言をいただいた。二人の匿名査読者の方には適切な助言をいただいた。記して感謝の意を表します。

文 献

- Giggenbach, W. F. (1984) Mass transfer in hydrothermal alteration system—A conceptual approach. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**, 2693-2711.
- Giggenbach, W. F. (1988) Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **52**, 2749-2765.
- Hedenquist, J. W. and Aoki, M. (1991) Meteoric interaction with magmatic discharges in Japan and the significance for mineralization. *Geology*, **19**, 1041-1044.
- Isozaki, A. and Utsumi, S. (1974) The Spectrophotometric Determination of Boron in Condensed Water from Fumaroles. *Bull. Chem. Soc. Japan*, **47**, 2891.
- Ohba, T., Nogami, K. and Hirabayashi, J. (1997) Hydrothermal System of the Kirishima Volcanic Area Inferred from the Chemical and Isotopic Composition of Spring Waters and Fumarolic Gases. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **42**(1), 1-15.
- Sasada, M., Taguchi, S. and Hedenquist, J. W. (2000) Preface. *Geothermics*, **29**, 123-126.
- Sawaki, T., Sasada, M., Sasaki, M. and Goko, K. (1997) Fluid Inclusion Study of The Kirishima Geothermal System, Japan. *Geothermics*, **26**(3), 305-327.
- White, D. E. (1957) Thermal water of Volcanic origin. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **68**, 1637-1658.
- White, D. E., Muffler, L. J. P. and Truesdell, A. H. (1971) Vapor-dominated hydrothermal systems compared with hot-water systems. *Econ. Geol.*, **66**, 75-97.
- Yano, Y. and Ishido, T. (1995) Numerical Modeling of The Evolution of Two-phase Zone under a Fractured Caprock. *Geothermics*, **24**(4), 507-521.
- 有田忠雄 (1957) 加久籐カルデラの提唱. *地質学雑誌*, **53**, 433-444.
- 井村隆介 (1994) 霧島火山の地質. *地震研究所彙報*, **69**, 189-209.
- 鍵山恒臣, 歌田久司, 上嶋 誠, 増谷文雄, 神田 径, 田中良和, 増田秀晴, 村上英記, 塩崎一郎, 市来雅啓, 行武 毅, 茂木 透, 網田和宏, 大志万直人, 三品正明 (1996) 霧島火山群中南東部の比抵抗構造, *火山*, **41**, 215-225.
- 児玉牧夫, 中島 完 (1988) 霧島地域の地熱開発調査. *地熱*, **25**(3), 1-29.
- 沢村孝之助, 松井和典 (1957) 5万分の1地質図幅「霧島山」. *地質調査所*.
- 茂野 博, 阿部喜久男 (1981) B/Cl比による地熱貯留岩の推定. *日本地球化学年会講演要旨集*, 195-196.
- 露木貞利 (1969) 九州地方における温泉の地質学的研究(第5報) —特に温泉貯留体について. *鹿児島大学理学部紀要(地学・生物学)*, **2**, 85-101.
- 露木貞利, 黒川達爾雄, 坂元隼雄 (1990) 鹿児島県の温泉, 霧島火山地域の温泉(その1). *鹿児島県*, 1-89.
- 藤田俊一, 坂元隼雄, 桐山哲也, 富安卓滋 (1999) 霧島火山地域および新川溪谷地区の温泉の分布

と化学成分の経時変化. 鹿児島大学理学部紀要, **32**, 55-65.

藤田俊一, 坂元隼雄, 桐山哲也(2000) 霧島火山地域及びその南西部地域の温泉の生成機構. 温泉科学, **50**, 1-11.