

流体地球化学的にみた雲仙地溝の熱水系と温泉の生成過程

大沢信二*

(平成18年1月19日発表, 平成18年4月13日受理)

A Hydro-geochemical Study on Hydrothermal System and Formation Processes of Hot Springs in Unzen Graben of the Shimabara Peninsula, Kyushu, Japan

Shinji OHSAWA*

Abstract

In this study, a model for hydrothermal system and formation processes of hot springs (Obama, Unzen and Shimabara hot springs) in Unzen Graben of the Shimabara Peninsula was constructed on the basis of a detailed analysis of hydro-geochemical data obtained by Ohsawa et al. (2002) and NEDO (1988). Both Obama and Unzen hot springs at the western part of the graben, which are located at the southwest side of the volcanic center of Unzen Volcano, are generated by one active liquid-dominant hydrothermal fluid of Na-Cl type. Fumarolic area adjoining Unzen hot spring being on the uplands is developed by a steam separated from the hydrothermal fluid at some 300°C, and hot water of H-SO₄ type of Unzen hot spring is formed by mixing of the secondary steam into shallow groundwater at about 150°C. Heat and material source of the liquid-dominant hydrothermal fluid is a high-pressure magma-derived hydrothermal fluid in which chloride is contained in Na-form. The "residual" deep thermal water migrates laterally toward the western coast while conductively cooled, and finally the mixing of seawater into the thermal water results in the formation of boiling or hot water of Obama hot spring at approximately 200°C. Warm water of HCO₃ type of Shimabara hot spring at the eastern part of the graben, which is located at the east side of the volcanic center of Unzen Volcano, is formed at less than 100°C by mixing of a low-temperature magma-derived CO₂-dominant gas into shallow groundwater of meteoric origin. This low-temperature gas might be derived from a solidified magma relevant to a monogenetic volcano, Mt. Mayu-yama formed 3000 years before present, but the formation mechanism of such gas is still unaccounted for. This hydro-geochemical study cannot pinpoint the precise location of the primary magma chamber of Unzen Volcano which is still hotly argued, however the conclusion of this study for the aspect of geochemical formation mechanism of hot spring waters agrees to the previous model (Ohta, 1973; 1975) on the whole.

Keywords : hot spring, hydrothermal system, formation process, Unzen Graben, hydro-geochemistry

1. はじめに

筆者らは、科学技術庁振興調整費総合研究課題「雲仙火山：科学掘削による噴火機構とマグマ活動解明のための国際共同研究（第1期：平成11~13年度）」の一部として行った雲仙地溝を含む島原半島に分布する温泉・鉱泉および噴気の流体地

球化学的研究の成果をすでに公表しており（大沢ほか, 2002）、その内容を日本地熱学会平成17年度学術講演会オーガナイズドセッション「島原半島の火山・地熱・温泉」において発表する機会を得た。それを契機に、雲仙西部地域の地熱開発促進調査で得られている地熱坑井からの流体地化学

*京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設 〒874-0903 別府市野口原
Beppu Geothermal Research Laboratory, Graduate School of Science, Kyoto University
Noguchibaru, Beppu 874-0903, Japan
© The Geothermal Research Society of Japan, 2006

データ（新エネルギー総合開発機構，1988）を合わせたデータの再解析を行い，雲仙地溝内の温泉（小浜温泉，雲仙温泉，島原温泉）の泉質形成機構について温泉生成の背後に潜在する熱水系を視野に入れた考察を加え，その結果をオーガナイズドセッションにおいて発表した（大沢，2005）。本稿は，その発表内容を論文にしたものである。本稿執筆の背景には以上のような事情があるため，再解析に用いたデータ（大沢ほか，2002；新エネルギー総合開発機構，1988）の本論文への記載は行わなかった。また，オーガナイズドセッションでは，地熱・温泉については雲仙地溝内のものに焦点が当てられたので，地溝の外の温泉・鉱泉についての記述は割愛することにした。雲仙地溝外の温鉱泉の泉質形成機構については，大沢ほか（2002）で詳細に論じているので，そちらをご覧ください。

さて，雲仙地溝内の温泉の生成過程について研究する場合，いわゆる「雲仙火山の火山性温泉生成機構に関する太田モデル」（例えば，太田，1973；太田，1975）を抜きに進めることはできない（その紹介が，太田先生ご自身によって，本特集号でなされているのでご参照いただきたい）。太田モデルの公表から30年以上が経過しているが，その妥当性は，温泉の熱源とされるマグマ溜まりをどこに設定するかという点を除けば，多くの研究者が認めているところであり，筆者も泉質形成機構の側面についてはほとんど異議をとる点はない。その異例ともいえる太田モデルの息の長さは，モデルの構築に流体地化学のデータだけが用いられたのではなく，地質調査や地球物理観測の情報が加味されたからに他ならないと筆者は考えている。しかしながら，その一方で，太田モデル提出後の流体地球化学の進歩は著しく，例えば，温泉水の化学組成や溶存成分の同位体比から温泉水の地下での温度を知ることができるようになり（地化学温度計），温泉水に付随するガスや噴気ガスの化学・同位体分析のデータから温泉地や噴気地の地下深部に潜在する熱水系の性状に関する情報を読み取ることができるようになった。そのような“新しい方法”を用いて，雲仙地溝内の温泉（小浜温泉，雲仙温泉，島原温泉）を

調べ，新たな情報を抽出し，太田モデルを再検討する余地は残されているものと考ええる。このような考えに沿って進めた研究が大沢ほか（2002）であり，前にも述べたように，その研究をベースにして既存のデータを取り込んで再解析・再考察を加えた結果を本学会平成17年度学術講演会オーガナイズドセッションで口頭発表した（大沢，2005）。

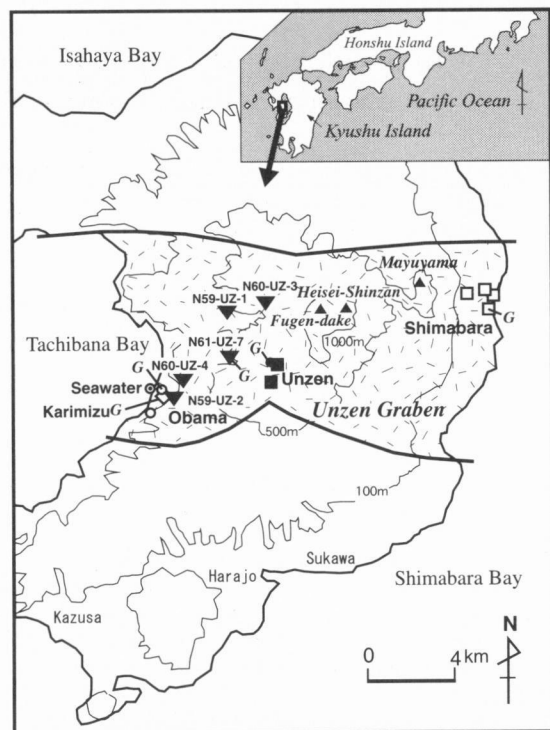


Fig. 1 Location map of hot springs (Obama, Unzen and Shimabara) and geothermal wells in Unzen Graben of the Shimabara Peninsula, Kyushu, Japan. Data sources of this study are from hot springs (○: Obama, ■: Unzen, □: Shimabara), mineral spring (◇: Karimizu) and geothermal wells (▼). G with symbols indicates that geochemical gas data used in this study are taken from these sites (■G: fumarolic gas from Unzen, ○G: steam of boiling spring from Obama, ▼G: separated-steam of thermal water from geothermal well, ◇G: bubble gas of mineral spring from Karimizu, □G: bubble gas of hot spring from Shimabara). Symbol ● indicates sampling site of reference seawater used in this study.

本論文の主旨は、その内容を文章にして、より多くの本学会員と関連分野の研究者に提示し、今後の議論のたたき台にすることである。そのことを前もってご理解いただければ幸いである。

2. 雲仙地溝内の温泉（鉱泉）・地熱坑井

雲仙地溝内には、Fig. 1 に示すように、橘湾に面した小浜温泉、普賢岳の南西 3km ほどの高地に自然湧出する雲仙温泉、眉山周辺の島原温泉がある。小浜の温泉のほとんどは、深さ数 10m～100m 余の掘削によって開発された、弱アルカリ性の食塩泉である。南部の一部を除き、大多数が沸騰泉である。小浜には自然湧出の鉱泉も存在し（刈水鉱泉：Fig. 1 の◇），硫化水素臭を放つ気泡を伴っている。雲仙の温泉は、雲仙地獄と呼ばれる自然噴気地の中あるいは隣接地に湧出するもので、温泉水は酸性硫酸塩泉である。島原の温泉も、小浜同様に、掘削によって開発されたものがほとんどで（深度：10m 以浅～800m 余），泉温は小浜や雲仙に比べて低く、鉱泉に分類されるものも多く、ほぼ中性の炭酸塩泉である。気泡を伴っているものもある。

雲仙地溝内では、地熱開発促進調査で、7 本の地熱坑井が掘削されており（内 5 本の掘削地点を Fig. 1 に示す：▼），3 本の坑井（N59-UZ-1, N60-UZ-3, N61-UZ-7）で流体地化学データが得られている（新エネルギー総合開発機構，1988）。

3. 温泉水（鉱泉水）・熱水の地化学データから得られる情報

雲仙地溝内の温泉地で採取した温泉水（これ以降は鉱泉水も含めて一括して温泉水と呼ぶことにする）と地熱坑井から得られた熱水の主要陰イオン組成を図示したのが、Fig. 2 である。島原の温泉水（□）は HCO_3 型，雲仙の温泉水（■）は SO_4 型，小浜の温泉水（○）は，刈水鉱泉（◇： HCO_3 型）を除き， Cl 型であり，3 者は明瞭に区別され，別府温泉で見られるような $\text{Cl}-\text{HCO}_3$ 型や $\text{Cl}-\text{SO}_4$ 型といった混合タイプの温泉水は存在しない。一方，地熱坑井熱水（▼）は，N59-UZ-1 が HCO_3 型である以外は， Cl 型であり，深部熱水の組成を示す。陰イオン組成だけからだと，

小浜の温泉水も深部熱水であると見られがちであるが，同図に示した海水の組成にも近いことから，そうであると即断できない。小浜温泉は海岸地帯の温泉であり（Fig. 1 参照），温泉水の生成に海水の関与は起こりえることであり，多くの研究者が指摘してきたことである（例えば，太田，1973；湯原ほか，1986）。この点については，この後に示す主要陽イオン組成と水の水素・酸素同

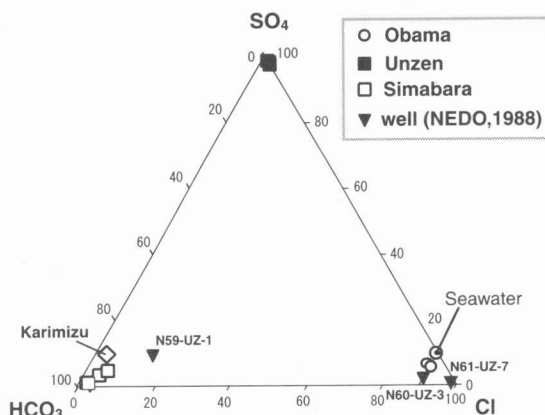


Fig. 2 Ternary plot on the relative proportions of Cl , SO_4 and HCO_3 ions for waters from hot springs, mineral spring, geothermal wells and seawater from Tachibana Bay. Symbols correspond to those in Fig. 1.

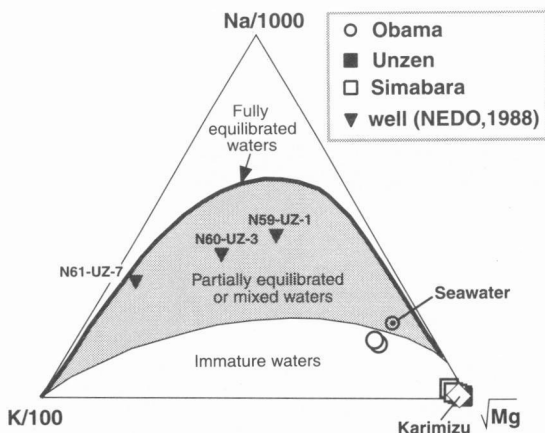


Fig. 3 Ternary plot used to recognize equilibrated waters for waters from hot springs, mineral spring, geothermal wells and seawater from Tachibana Bay. Symbols correspond to those in Fig. 1.

位体組成によって明らかとなる。

Fig. 3 は、Giggenbach (1988) によって提案された Na-K-Mg ダイアグラム上に、主要陰イオン組成図に表したものと同一温泉水・熱水をプロットしたものである。小浜の温泉水 (○) (刈水鉦泉◇を除く) は、島原や雲仙の温泉水と同様に (それぞれ□, □), 未成熟の水 (immature waters) の領域にプロットされており、地熱坑井から得られた熱水 (▽) とは明らかに違い (N61-UZ-7 坑井熱水は典型的な地熱水であることが示されている), 海水の影響を強く受けた温泉水であると見るのが適当である。これが妥当であることは、後述する水の水素・酸素同位体組成から支持される。

Fig. 4 は、雲仙地溝内の温泉水・地熱坑井熱水の水素・酸素同位体比を、 δ ダイアグラム ($\delta^{18}\text{O}$ - δD 関係図) 上に示したものである。N61-UZ-7 坑井熱水 (▽) と小浜の温泉水 (○) (刈水鉦泉◇を除く) 以外は、島原半島全域の浅井戸・湧泉から採取された冷地下水の同位体組成 (風早ほか、未公表資料) の取る範囲内にプロットされ、それらの水の起源は天水であることを示している。一方、N61-UZ-7 坑井熱水は天水起源の地下水が地下深部にもたらされて酸素同位体シフト (Oxygen-isotope shift) を起こしたもので、小浜の温泉水はそのような天水起源の熱水と海水が混合したものとするのが、この段階ではもっとも妥当

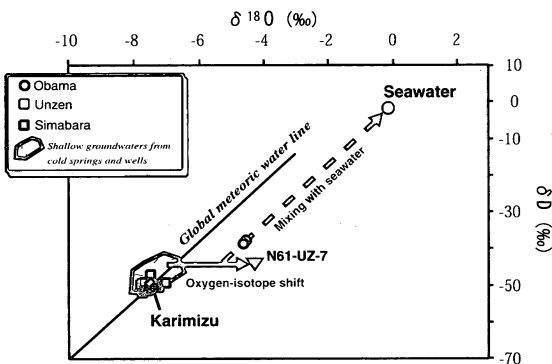


Fig. 4 δD vs. $\delta^{18}\text{O}$ plot for waters from hot springs, mineral spring, geothermal wells and seawater from Tachibana Bay. Shallow groundwater data from cold springs and wells are referred from Kazahaya et al. (unpublished data). Symbols correspond to those in Fig.1.

な見方であろう。小浜の温泉水に海水が混入しているとする解釈は、湯原ほか (1986) や松田ほか (2005) でも述べられている。なお、補足的なことであるが、小浜の温泉水が深部熱水と海水の混合物であることを泉質だけから判別できないのは、両者の水質がともに Na-Cl 型であるためである。

以上の温泉水の泉質や生成機構を考慮に入れて、最も適当と思われる地化学温度計を用いて、地下における温泉水の貯留温度を推定した結果を、Table 1 に示した。なお、表中には用いた地化学温度計の種類も示した。さらに、同表には、地熱坑井 N61-UZ-7 の熱水の地化学温度計算の結果もあわせて掲載した。温泉水の地下貯留温度は、小浜はおよそ 200℃、雲仙は 150℃ 程度、島原は高々 100℃ である。一方、雲仙温泉の西方約 2km で掘削された地熱坑井 N61-UZ-7 (掘削地点は、Fig.1 参照) の Na-Cl 型熱水の地化学温度は 250℃ ほどの値を示す。雲仙温泉の様に、地表に噴気・熱水変質帯を形成し、酸性硫酸塩型の温泉水の湧出が見られる地帯の地下深部には、地熱坑井 N61-UZ-7 熱水と同種の熱水が普通に存在することが知られていることから、地熱坑井 N61-UZ-7 に供給される Na-Cl 型熱水から沸騰分離した高温の水蒸気が熱と化学成分の一部 (H_2S がその典型) を雲仙温泉に供給しているものと予想されるが、この時点で断定はできない。

Table 1 Geochemically estimated temperatures of thermal groundwaters at hot spring areas and thermal water in geothermal well.

Area or location	Calc. Temp.(℃)	Geothermometer
Obama hot spring	202 (mean)	Mg-corr. Na-K-Ca
Unzen hot spring	151	$\delta^{18}\text{O} [\text{H}_2\text{O}-\text{SO}_4]$
Shimabara hot spring	113 (mean)	Na-K-Ca
	71 (mean)	Chalcedony
Geothermal well		
N61-UZ-7	240	Quartz (adiabatic)
	274	Na-K

ここまでの解析結果と考察内容を整理すると、小浜、雲仙、島原の温泉水の泉質生成機構等は、それぞれ以下のようにまとめられる。

小浜温泉：天水循環型の Na-Cl 型熱水に海水が混入して形成された温泉水 (Na-Cl 型水質；食塩泉)。温泉水の地下貯留温度はおよそ 200℃。なお、刈水鉱泉は、天水起源の地下水に CO₂ を主体とする低温のガスが混入して生成したもので、HCO₃ 型水質（炭酸塩泉）となっている。

雲仙温泉：温泉水は、天水起源の地下水が硫化水素を含む水蒸気（恐らく Na-Cl 型熱水からの沸騰分離蒸気）の混入を受けて加熱されたもの（H-SO₄ 型水質；酸性硫酸塩泉）。温泉水の貯留温度は 150℃ 程度。

島原温泉：温泉水は、天水起源地下水が CO₂ を主体とする低温のガスの混入を受けて生成したもの（HCO₃ 型水質；炭酸塩泉）。温泉水の貯留温度は高々 100℃。

温泉水・熱水の地化学データの解析から得られる以上の結論は、太田モデルに示される泉質形成機構の側面の妥当性を支持するものであり、さらに本研究によって、温泉水の貯留温度に関する情報が書き加えられ、補強されることになったと言える。しかし、太田モデルには、温泉の生成過程、すなわち、どのような起源水がどのような過程を経て温泉となっているかという点も表現されており、その側面の妥当性については、厳密に言えば、温泉水・熱水の地化学データだけからの検証は難しい。つまり、雲仙温泉の地下深部に潜在すると推定される Na-Cl 型熱水と小浜温泉の起源水のひとつである Na-Cl 型深部熱水が同じ由来のものであるかどうか、それらと地熱坑井 N61-UZ-7 で得られた Na-Cl 型熱水がどのような関係にあるのか、島原や刈水（小浜）の温泉水に炭酸成分を与える低温ガスの実体は何か、といったことに対しての想像を交えない解答を与えるのは困難であるということである。そのような温泉生成の背後に存在する熱水系に関する情報を入手するに

は、温泉に付随するガスや噴気ガスから得られる流体地化学データが有用である（例えば、大沢、2000；大沢ほか、2000）。次章では、雲仙地溝内の温泉付随ガス・噴気ガスの化学・同位体データを用いた種々の解析結果を提示し、温泉の生成に関わる熱水系に関する考察を行う。

4. 温泉付随ガス・噴気ガスの地化学データから得られる情報

太田モデルでは、雲仙地溝内の温泉の熱源となる起源流体をマグマ発散物（マグマ性熱水流体）に求めているが、その考えが確実であるとするデータは、温泉付随ガスや噴気ガス中の希ガス（³He/⁴He や ⁴He/²⁰Ne）の同位体分析により得られている（Kita et al., 1993）。また、不活性ガスの化学組成（He-Ar-N₂ 相対組成）にもマグマ由来のガス成分の混入が示されており（Fig. 5）、雲仙地溝内の温泉生成過程の背景にはマグマが控えていることは間違いない。

このように、雲仙地溝内のどの温泉（小浜、雲仙、島原）でもその形成にマグマ性熱水流体が関与していること（少なくともマグマ起源 He が混入していること）は疑う余地のないところである。

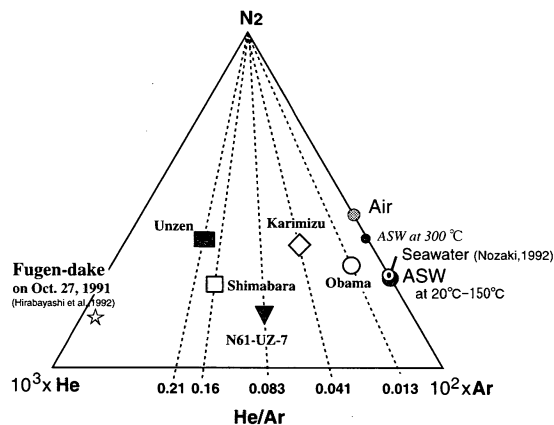


Fig. 5 Relative He, Ar and N₂ contents of gases from boiling spring, hot spring, mineral spring, fumaroles and geothermal well together with those of potential end-member components: air, air-saturated water (ASW), seawater-dissolved gas (Nozaki, 1992) and magmatic gas (volcanic gas from Fugen-dake; Hirabayashi et al., 1992). Symbols correspond to those in Fig.1.

マグマからの脱ガス過程で He とほぼ同じ挙動をする化学種は CO_2 であることが知られており (Giggenbach, 1997), マグマからの分離後に CO_2 は He とともに行動している可能性が高い。Fig. 6 に示したように, 小浜温泉の沸騰泉分離蒸気および刈水鉱泉の遊離ガス (それぞれ○, ◇) と雲仙地獄の噴気孔ガス (□) の CO_2 の $\delta^{13}\text{C}$ 値は, 雲仙火山の噴火活動期に山頂部から放出された噴気ガス中の CO_2 の $\delta^{13}\text{C}$ 値 (-4.1% ; Kita et al., 1993) にほぼ等しく, マグマ性 CO_2 であると見て差し支えない。また, 同図には示していないが, 島原の温泉付随ガス中の CO_2 も同様な関係を示し (Kita et al., 1993), マグマ起源と見なせる。

さて, そのような一定の $\delta^{13}\text{C}$ 値を持つマグマ

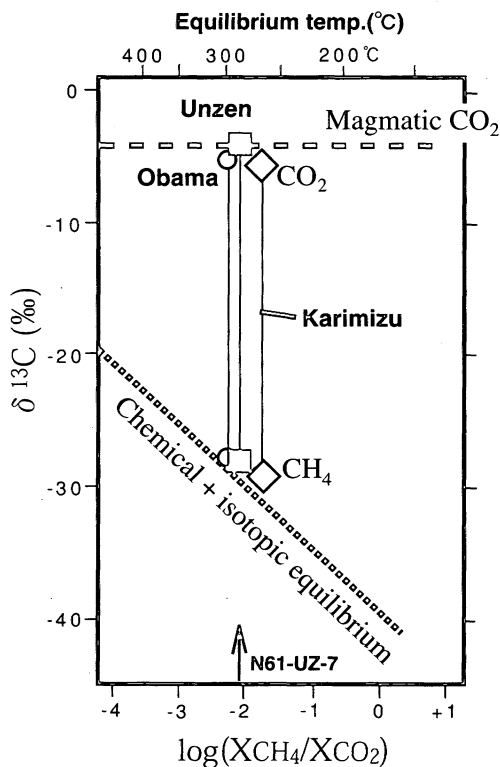
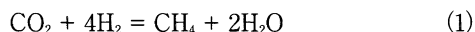


Fig. 6 $\delta^{13}\text{C}$ values for CO_2 and CH_4 , and CH_4/CO_2 ratios of gases from boiling spring, mineral spring and fumaroles. Symbols correspond to those in Fig.1. The trend for both chemical and isotopic equilibrium between CH_4 and magmatic CO_2 with a value of -4.1% is shown as short dashed line, and the equilibrated temperatures are plotted along the top (Ono et al., 1993).

起源 CO_2 と以下の式 (1) に示した化学反応によって化学・同位体平衡にある CH_4 が存在した場合, CH_4 の $\delta^{13}\text{C}$ 値と CH_4/CO_2 比の関係は Fig. 6 中に示した点線で表され, その関係は温度の関数となる。



小浜温泉の沸騰泉分離蒸気 (○) と雲仙地獄の噴気孔ガス (□) は, いずれも $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ 系について平衡状態にあり, その温度はいずれもおよそ 300°C を示す。また, 刈水鉱泉 (◇) の場合もほぼ化学・同位体平衡にあることを示しており, 250°C を越す温度を記録している。「刈水鉱泉のガスは, 水蒸気圧の急激な低下によって地表への流動途中で上昇能力を失した熱水から遊離したガスである」とする太田モデルの見解 (太田, 1977) がここでも妥当であることを示している。同位体の測定データがないので平衡関係の判定ができないが, 地熱坑井 N61-UZ-7 の熱水分離蒸気の CO_2 と CH_4 も平衡状態にあるとすれば, CH_4/CO_2 比の示す温度は小浜温泉の沸騰泉分離蒸気や雲仙地獄の噴気孔ガスと同じ 300°C 程度である (Fig. 6)。低温での化学反応 (1) の平衡移動速度は極めて遅く, 再平衡に達しにくいと言われているので (Giggenbach and Goguel, 1989), 小浜・雲仙の温泉および地熱坑井熱水の起源深部流体の温度はどれも最低でも 300°C はあることを表している。なお, 島原温泉の遊離ガスは, $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ 系について平衡状態にあるとすれば, その CH_4/CO_2 比 (2.7×10^{-4} ; 大沢, 未公表データ) はおよそ 400°C を示すが, 高温の流体に必ず伴われる H_2 を欠くことから, CO_2 と CH_4 は非平衡の関係にあると見るのが妥当で, 見かけの温度とするのが適当であろう。

地下に潜在する熱水系の物理・化学的状态を予測する場合には, CO_2/Ar 比と H_2/Ar 比を用いた解析が有用であるとされている (Giggenbach and Goguel, 1989)。解析に用いられるダイアグラムに, 小浜温泉の沸騰泉分離蒸気, 刈水鉱泉の遊離ガス, 雲仙地獄の噴気ガスと地熱坑井 N61-UZ-7 の熱水分離蒸気のデータならびに島原温泉の遊離ガスのデータ (大沢, 未公表データ) をプロットしたものを Fig. 7 に示す。このダイアグラ

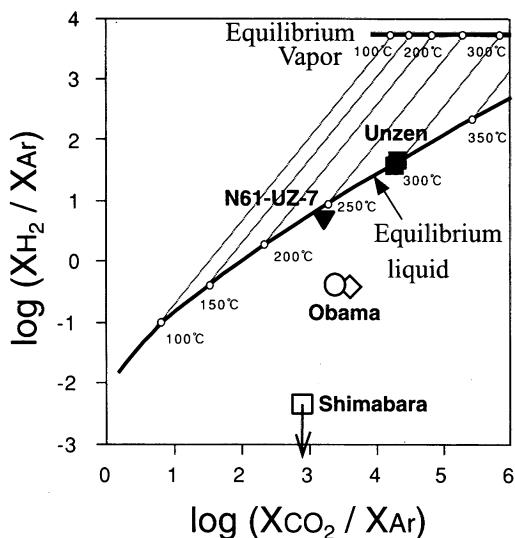
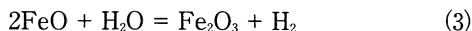
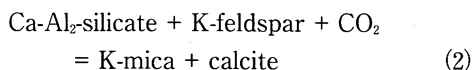


Fig. 7 Evaluation of H_2 -Ar and CO_2 -Ar equilibration conditions for gases from hot springs, mineral spring, geothermal well and fumaroles. Symbols correspond to those in Fig.1.

ムは、岩石と熱水流体の相互作用による化学反応に基づいて作成されたもので、流体貯留層内で下に示すような化学反応の(2)と(3)が起きていることが前提にあるが(少なくとも反応(2)は日本の地熱系では成立しているという報告がある(Chiba, 1991)), 天水性の熱水系の実状をよく表現する実用的な解析図である(大沢ほか, 1998; 大沢, 2000; 大沢ほか, 2000)。



雲仙地獄の噴気ガス(■)は液相平衡(Equilibrium liquid)線上にプロットされており、噴気ガスをもたらし深部流体が熱水卓越状態にあり、その温度は 300℃であることを示している。したがって、この深部流体は、3章で予想されたように、地熱坑井 N61-UZ-7 に現れた Na-Cl 型熱水と同種のものであることは間違いない。地熱坑井 N61-UZ-7 の熱水分離蒸気(▼)も、250℃で(熱水の地化学温度と一致; 3章参照)液相平衡にあることを示しており、熱水から分離しているという現実とも矛盾しない。小浜温泉の沸騰泉分離蒸気

(○)と刈水鉱泉の遊離ガス(◇)はグラフ上のほぼ同じところにプロットされており、ここでも、刈水鉱泉の遊離ガスは沸騰泉分離蒸気の急冷相であるとする太田モデルの見解の妥当性が示されている。しかし、ここでは特に、両者がいずれも液相平衡(Equilibrium liquid)線から CO_2/Ar 軸の方へ外れた領域にプロットされていることに注目したい。このような状況を、Giggenbach and Goguel (1989)は、高温のガスが冷却された場合、 CO_2 -Ar 系の化学平衡(2)に比べて H_2 -Ar 系の化学平衡(3)が低温側へシフトしやすいためであると説明し(平衡移動速度の違い)、その場合でも CO_2 -Ar 系の化学平衡は高温条件下の状態を保持しやすいとしている。その考えに従えば、小浜温泉の起源深部熱水は 250℃程度の温度で、その温度は沸騰泉分離蒸気や温泉遊離ガスの CO_2/Ar 比に記録されているが、実際は海水の混入によって温度が低下しており、その温度が H_2/Ar 比に表れていると見ることができる。ここで若干問題となるのは、 H_2 -Ar 温度は 150℃であり、温泉水の地化学温度約 200℃(3章を参照)より 50℃も低いことであるが、これは H_2/Ar 比の低い海水の混入後に H_2 -Ar 系の化学反応が十分に再平衡化していないためであると考えられる。島原温泉の遊離ガス(□)も非平衡の関係を示すが、同様な泉質・水温を示す刈水鉱泉の遊離ガスよりもさらに非平衡の度合いが強いため、理由は明確に示せないが、得られる CO_2 -Ar 温度(200~250℃)も見かけの温度である可能性が高いと考える。

ここまでの解析と考察から、小浜温泉(刈水鉱泉を含む)、雲仙温泉(・地獄)および地熱坑井 N61-UZ-7 の起源深部流体は、いずれもマグマ由来の高温熱水であることが示された。一方、島原の温泉水に炭酸成分を与える低温ガスは、マグマに由来するものであることは確実であるが、現在活動中の熱水流体から直接もたらされているものではないとするのが適当であろう。

さて、解析のプロセスで得られた小浜温泉と雲仙温泉(・地獄)の起源熱水ならびに地熱坑井 N61-UZ-7 の熱水の気体地化学温度をまとめてみると(Table 2), そこに興味深い関係を見るこ

とができる。雲仙温泉（・地獄）は、 $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ 温度、 $\text{CO}_2\text{-Ar}$ 温度、 $\text{H}_2\text{-Ar}$ 温度ともに 300°C を示すが、地熱坑井 N61-UZ-7 は $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ 温度のみが 300°C で、 $\text{CO}_2\text{-Ar}$ 温度と $\text{H}_2\text{-Ar}$ 温度ともにそれより 50°C 低い 250°C を示す。そして、小浜温泉の $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ 温度、 $\text{CO}_2\text{-Ar}$ 温度、 $\text{H}_2\text{-Ar}$ 温度はそれぞれ 300°C 、 250°C 、 150°C （前述のように温泉水の地化学温度に等しいとしても 200°C ）を示し、 $\text{H}_2\text{-Ar}$ 温度だけが地熱坑井 N61-UZ-7 のそれよりさらに低くなっている。前にも述べたように、 $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ 温度計、 $\text{CO}_2\text{-Ar}$ 温度計、 $\text{H}_2\text{-Ar}$ 温度計のそれぞれの基礎となる化学反応の平衡移動速度はこの順に速くなることから、上記の関係には、小浜温泉と雲仙温泉（・地獄）の生成にともに関わり、地熱坑井 N61-UZ-7 にも現れた高温の深部

熱水（Na-Cl 型）が、その給源から各温泉や地熱坑井の位置まで移動してくる間に冷却される過程が投影されていると考えることでうまく説明がつく。すなわち、雲仙温泉（・地獄）は深部熱水の給源に最も近く、冷却がほとんど起こっておらず、地熱坑井 N61-UZ-7 はそれより遠く、やや冷却を受け、小浜温泉は給源から最も遠く、相当に冷却を受けていることを表していると言える。この解釈が正しく、さらに、雲仙温泉（・地獄）、地熱坑井 N61-UZ-7、小浜温泉の起源熱水が一つの流動系を形成しているものとすれば、各温泉、地熱坑井 N61-UZ-7 の地理的配置（Fig. 1）から、熱水は雲仙温泉側から小浜温泉の方向（山岳部から海岸低地部）へ側方流動しているというシンプルな熱水系が雲仙地溝西部には存在するという考えにたどり着く。

その考えが妥当であることは、雲仙温泉と小浜温泉の間で掘削された地熱坑井 N61-UZ-7、N60-UZ-4、N59-UZ-2（掘削位置は、Fig. 1 を参照）の坑内温度検層結果（新エネルギー総合開発機構、1988）から支持される。Fig. 8 は、各坑井内温度の深度プロファイルを絶対標高に変換し、東西方向に並べて表したものである。まず最も重要な点は、どの坑井の温度プロファイルにも深度中途に温度の極大が現れていることであり、これはその深さに熱水の側方流動が存在することを示している。次に重要な点は、温度極大部が西に向かうほ

Table 2 Estimated temperatures of source deep thermal waters of hot springs and geothermal well fluid using various geochemical gas-thermometers.

Area or location	$\text{CH}_4\text{-CO}_2$ temp. ($^\circ\text{C}$)	$\text{CO}_2\text{-Ar}$ temp. ($^\circ\text{C}$)	$\text{H}_2\text{-Ar}$ temp. ($^\circ\text{C}$)
Unzen fumarolic area	300	300	300
Geothermal well N61-UZ-7	300	250	250
Obama hot spring (with Karimizu)	300	250	150

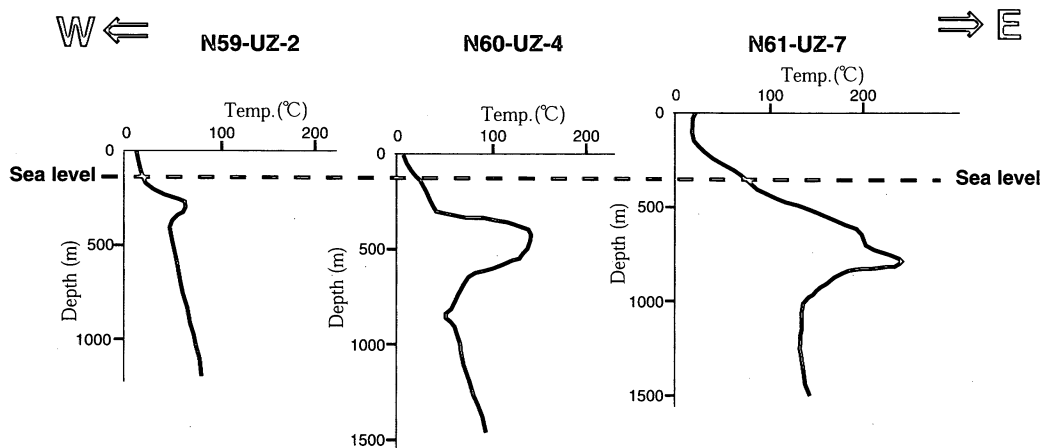


Fig. 8 Depth profiles of temperature in geothermal wells located between Unzen and Obama hot springs. Drilling sites of the geothermal wells are shown in Fig.1.

ど浅くなる傾向があることと、極大点の温度もまた西に向かうほど低下していることである。これらをまとめると、熱水はやや上昇のセンスを持ちつつ温度を低下させながら東から西へ向かって側方に流動してきているということになり、熱水の給源は雲仙温泉（・地獄）の辺りの山岳部にあると結論される。側方流動熱水は、地熱坑井 N61-UZ-7 付近までは熱伝導的な冷却を受け、その後は浅い地下水の混入を受けつつさらに冷却されて小浜地域へ達し、海岸部で海水の混入を受けて 200℃ ほどの温泉水になっているものと考えられる。他方、深部熱水の給源域と予想される山岳部の地下深所では、熱水の沸騰による水蒸気の分離が起こり、H₂S 等を含むその二次的な蒸気が雲仙地域の浅層地下水に流入して 150℃ ほどの H-SO₄ 型温泉水（酸性硫酸塩泉）が生成しており、一部の二次蒸気は直接地表に噴出して噴気地帯（地獄）を形成しているものと考えられる。前述のように、雲仙地溝の温泉水の起源水となっている Na-Cl 型熱水はマグマ由来の He や CO₂ を伴っているので、その元はマグマから分離した高压の超臨界熱水流体であると考えられる。

以上のことがらをもとに、雲仙地溝の熱水系・温泉形成過程のモデル図を作成し、Fig. 9 に示した。同図には、参考のために、地表に噴出するマグマとともに放出される火山ガスも記入した。こ

れもまたマグマから分離したものであるが、低圧の超臨界熱水流体であり、雲仙温泉（・地獄）や小浜温泉を生成させている深部熱水流体とは性質の異なるものである。なお、重複になるが、島原の温泉水に炭酸成分を与える低温ガスは、上記のような活動的なマグマ起源熱水流体から直接もたらされているものではなく、何らかの強い冷却過程を経ることで、CO₂ 卓越型の流体となったものであると考える。

5. おわりに

本研究によって、いわゆる「雲仙火山の火山性温泉生成機構に関する太田モデル」の妥当性や問題点が明らかとなり、深部熱水系の有様を含めた雲仙地溝の温泉生成過程の理解がまた一歩深まったと考える。しかしながら、最重要研究課題とされる雲仙地溝の温泉・熱水系の形成の根幹にあるマグマ溜まりの位置については（太田，2005）、本研究からの強い束縛条件を提示することはできなかった。つまり、本研究で提示した温泉・熱水系モデル（Fig. 9）では、太田モデルのようにマグマ溜まりの位置を橘湾に設定しても不都合ではなく、他方、太田モデルの対極にある「マグマ溜まりを雲仙火山直下に存在するとした熱水系モデル」（茂野・阿部，1986）にも投影することは十分可能であるからである。筆者は、本研究を通じ

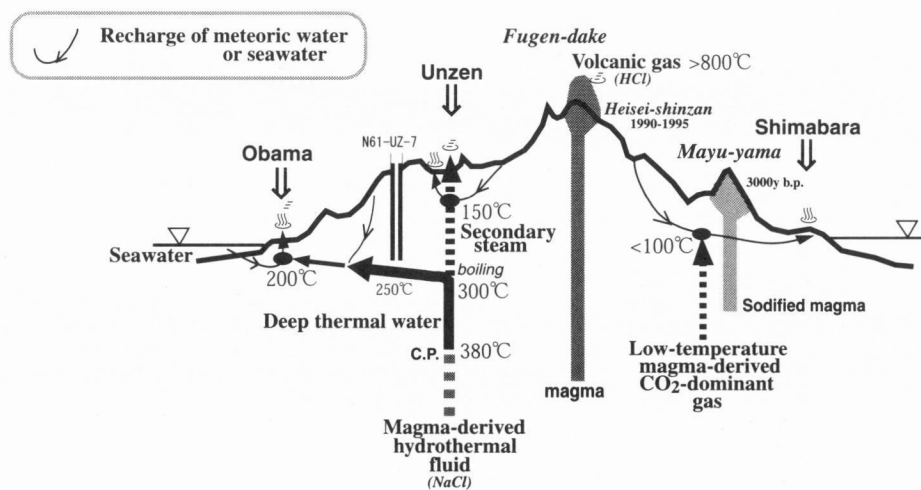


Fig. 9 A hydro-geochemical model for hydrothermal system and formation processes of hot springs in Unzen Graben.

て、雲仙地溝内における温泉・熱水系とマグマ溜まりの位置の関係解明が難問中の難問であるということのを再認識し、やはり一つ分野からのアプローチには限界があるのでないかの考えも持つに至っている。日本地熱学会平成17年度学術講演会オーガナイズドセッション「島原半島の火山・地熱・温泉」が企画されたのは、そのような限界を打開しようとする強い思いに発しているものと考えられる。異なる分野の研究者がそれぞれの研究成果を持ち寄って議論を行い、協力して問題解明に当たるのは極めて有力な方法であろう。しかし、一方では、ある分野の観測データを多角的に分析するという方法も有効であると信じたい。本研究では、温泉地ごとに He/Ar 比や N_2/Ar 比に違いがあることが判り (Fig. 5), これらの違いにはマグマから分離した熱水流体が温泉となるまでにたどる過程の情報が記録されている可能性があり、差異が生じる原因の解明からマグマ溜まりや火道の位置に関する情報が得られ、問題解決に向けた突破口となるかもしれない。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比にも見られる同種の差異に対する解釈 (Notsu et al., 2001) とともに詳細に検討を加える価値があり、今後の重要な研究課題のひとつとして位置づけたい。

ここではさらにもうひとつ、重要と考える研究課題を提示したい。本研究では、島原の温泉水に炭酸成分を与える低温ガスの起源については、「マグマに由来するものであることは確実であるが、現在活動中の熱水流体から直接もたらされているものではないとするのが適当である」という程度の結論しか導き出せなかった。島原温泉のように、現在の火山活動の中心から離れたところに低温の炭酸塩泉が存在する例は、大分県の九重火山でも見られ (山田ほか, 2005), 両者の共通点は、最も新しい単成火山 (島原の場合は3000年前に形成された眉山, 九重の場合は1700~5000年前に形成された黒岳・大船山) の周辺に存在するという点である。マグマ起源 He を含む CO_2 主体の低温ガスは、山体を作ったマグマが冷却固化する過程で地下にトラップされた「残留熱水流体」とでも呼ぶべき流体であるという見方もできよう。そのような作業仮説のもとに研究を進めてい

くことも、雲仙地溝の温泉の生成過程・マグマ・熱水系の全容を明らかにするために必要ではないかと考えている。

謝辞

日本地熱学会平成17年度学術講演会オーガナイズドセッション「島原半島の火山・地熱・温泉」における講演とその際の発表内容を本論文としてまとめる機会を与えて下さったコンビーナーの江原幸雄教授 (九州大学工学研究院) と学生時代から長年にわたって島原半島の温泉についてご教示いただいた太田一也先生 (九州大学名誉教授) に深く感謝申し上げます。また、島原の炭酸泉の生成機構について、ご議論いただいた田口幸洋教授 (福岡大学理学部) に感謝します。最後に、本研究内容を公表するまでに、現地調査や試料分析等でご協力いただいた多くの方々に深謝いたします。

引用文献

- Chiba, H. (1991) Attainment of solution and gas equilibrium in Japanese geothermal system. *Geochemical J.*, **25**, 335-355.
- Giggenbach, W.F. (1988) Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **52**, 2749-2765.
- Giggenbach, W.F. (1997) The origin and evolution of fluids in magmatic-hydrothermal systems. In: Barnes, H.L. ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, third edition, John, Wiley and Sons, Inc., 737-796.
- Giggenbach, W.F. and Goguel, R.L. (1989) Collection and analysis of geothermal and volcanic water and gas discharges. Fourth Edition. Report CD2401, Chemistry Division, DSIR, New Zealand, 81p.
- 平林順一・大場武・吉田稔・野上健治・内川啓・小坂文予・野津憲治・鍵山恒臣 (1992) 雲仙岳火山活動と地球化学的観測. 大田一也編平成3年度科学研究費補助金・総合研究 (A) 研究成果報告書「雲仙岳溶岩流出の予知に関する観測研究」, 99-111.
- Kita, I., Nagao, K., Taguchi, S., Nitta, K. and Hasegawa, H. (1993) Emission of magmatic He with different $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios from the Unzen volcanic area, Japan. *Geochemical J.*, **27**, 251-259.

- 松田鉦二・内山明紀・赤坂千寿 (2005) 小浜温泉の地球化学とその生成機構. 日本地熱学会平成17年度学術講演会講演要旨, A23.
- Notsu, K., Nakai, S., Igarashi, G., Ishibashi, J., Mori, T., Suzuki, M. and Wakita, H. (2001) Spatial distribution and temporal variation of $^3\text{He}/^4\text{He}$ in hot spring gas released from Unzen volcanic area, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 111, 89-98.
- 野崎義行 (1992) 海水中の微量元素. 地球化学, **26**, 25-39.
- 大沢信二 (2000) 噴気ガスの化学・同位体組成からみた別府温泉の地熱流体の起源及び性状. 大分県温泉調査研究会報告, **51**, 19-28.
- 大沢信二 (2005) 島原半島の流体地球化学. 日本地熱学会平成17年度学術講演会オーガナイズドセッション「島原半島の火山・地熱・温泉」講演要旨, OS2-4.
- 大沢信二・由佐悠紀・大上和敏 (1998) 岳湯地熱地域 (熊本県小国町) の噴気・蒸気井から放出されるガスの化学組成. 日本地熱学会誌, **20**, 289-292.
- 大沢信二・由佐悠紀・大山正雄 (2000) 噴気ガスの化学組成から得られる箱根火山の地熱情報. 温泉科学, **49**, 151-161.
- 大沢信二・風早康平・安原正也 (2002) 島原半島の温泉・鉱泉の流体地球化学. 温泉科学, **52**, 51-68.
- 太田一也 (1973) 島原半島における温泉の地質学的研究. 九州大学理学部島原火山観測所研究報告, **8**, 1-33.
- 太田一也 (1975) 雲仙火山における温泉観測 1. 九州大学理学部島原火山観測所研究報告, **10**, 21-33.
- 太田一也 (1977) 雲仙火山における温泉観測 [II] - 1974年4月~1975年7月. 九州大学理学部島原火山観測所研究報告, **11**, 13-25.
- 太田一也 (2005) 雲仙火山のマグマ溜まり再考. 長崎県地学会誌, **69**, 1-14.
- Ono, A., Sano, Y., Wakita, H. and Giggenbach, W.F. (1993) Carbon isotopes of methane and carbon dioxide in hydrothermal gases of Japan. *Geochemical J.*, **27**, 287-295.
- 新エネルギー総合開発機構 (1988) 地熱開発促進調査総合解析報告書, No.15雲仙西部地域 (第3次), 117-118, 142-143.
- 茂野博・阿部喜久男 (1986) 別府・九重・阿蘇・熊本・雲仙地域の熱水系 (I) 火山性温泉, 噴気地分布の規則性から推論される熱水系モデル. 地質調査所月報, **37**, 159-181.
- 山田誠・網田和宏・大沢信二 (2005) 同位体水文的手法による九重火山南東麓に湧出する炭酸泉の形成機構の解明. 温泉科学, **54**, 163-172.
- 湯原浩三, 江原幸雄, 二子石正雄, 藤光康宏 (1986) 長崎県小浜温泉の放熱量と湧出機構. 温泉科学, **37**, 20-31.