

# 大分県温泉調査研究会報告

第 67 号

平成 28 年 8 月

---

## 目 次

日田市内の温泉の現況調査	大 上 和 敏 他 1 人	(1)
別府湾堆積物とその供給系	竹 村 恵 二 他 1 人	(9)
天満温泉（別府市）の泉質モニタリング	大 沢 信 二 他 2 人	(15)
大分市の温泉の分類とその分布	柴 田 智 郎 他 1 人	(23)
姫島火山群の第四紀溶岩中の地殻起源捕獲岩の地球化学的特徴 2	柴 田 知 之 他 3 人	(31)
大分県内の火山岩類の化学・Sr-Nd同位体組成（その 1）鶴見岳・由布岳	芳 川 雅 子 他 4 人	(35)
大分県万年山周辺の表層電気伝導度分布	鍵 山 恒 臣 他 2 人	(41)
地域資源としての共同浴場に関する研究	中 山 昭 則	(47)
温泉藻類RG92のメタボリックシンドロームに対する効果の検証	加世田 国与士 他 4 人	(59)
大分県内のメタンガス検出地域の分布	甲 斐 美 穂 他 4 人	(63)
温泉施設の転倒に関する調査報告	松 尾 広 暁 他 3 人	(73)
別府温泉の安定同位体比分析報告書	前 野 真実子	(79)
別府・由布地域における泉質の分布状況について	山 崎 信 之 他 3 人	(87)

---

# 序

「地球温暖化の進行」や「原子力施設の安全性に関する諸問題」はエネルギー源の見直しを強く迫り、再生可能エネルギー（自然エネルギー）に活路を求めようとする世界的な潮流は、温泉利用のあり方にも及んでいます。これに対応し、資源の保護と適正な利用を確保するため、大分県では、平成26年度、温泉井掘削の新たな基準が導入されました。そして平成27年度には、広い視野から大分県の温泉を総括し、それに基づいて、今後の温泉行政の指針となる「おおいた温泉基本計画」が策定・公表されました。

とくに後者では、温泉の定義などの一般的な基礎知識の紹介から始まり、大分県の温泉の地球科学的な特徴と生成機構および多方面にわたる温泉利用の現状がまとめられ、さらには浮かび上がった課題とそれへの対応策が記されていて、温泉に関する教科書的とも言える内容になっています。編集・策定作業は決して容易ではなかったと思われませんが、それが遂行できたのは、大分県には「温泉の諸科学」に関する研究成果が蓄積されていたからでしょう。その主要な蓄積の場が「大分県温泉調査研究会」であったと思います。

本調査研究会は、昭和23（1948）年7月10日の温泉法公布に応じて、昭和24年7月16日「大分県における温泉の科学的調査をして公共の福祉増進に寄与すること」を目的として発足しました。以来、調査研究が継続して実施され、毎年途切れることなく機関誌「大分県温泉調査研究会報告」が刊行されてきました。そして、本年もここに、平成27年度の活動を記した第67号を刊行する運びとなりました。本号には13編の報告が掲載されています。内容は、地質学・地球物理学・地球化学・医学・観光地理学と多岐にわたっており、斬新な観点と手法による研究成果に接することは大きな喜びです。これらの調査研究の成果は、将来わたって、温泉に対する理解を深め、温泉の保護と利用に貢献するに違いありません。

調査研究をご担当いただいた会員諸氏、ご支援いただいた関係行政機関並びに事務局の方々に深く感謝を申し上げますとともに、会員諸氏の研究のさらなる進展と本会の持続的発展を期待し、関係各位・諸機関の引き続いてのご協力をお願いいたします。

平成28（2016）年8月

大分県温泉調査研究会

会長 由 佐 悠 紀

毎年の「大分県温泉調査研究会報告」・平成26年度策定の温泉掘削新基準を記した「大分県環境審議会温泉部会内規（抜粋）」・平成27年度策定の「おおいた温泉基本計画」は、大分県のホームページで閲覧することができます。



# 日田市内の温泉の現況調査

大分大学教育福祉科学部

大 上 和 敏・工 藤 瑞 歩

## 要旨

日田市の日田温泉について、温泉水の泉温、主要溶存化学成分等の測定を行い、日田温泉の現況について調査を行った。その結果、日田温泉に湧出する塩類泉は全てナトリウム-塩化物・炭酸水素塩泉であり、単純泉についても、これら塩類泉に類似した化学組成であることが明らかとなった。泉温の経年変化については、平成 10 年頃より 4 源泉で温度低下、5 源泉で温度上昇の傾向がみられた。主要溶存化学成分濃度の総量値 (TDS) については、平成 10 年頃比べ、1 源泉で 650mg/L 程度の増加がみられ、1 源泉で逆に 650mg/L 程度の減少傾向がみられたものの、その他の源泉については比較的安定した濃度を保っていることが示された。

## 1. はじめに

日田市は大分県の西部に位置する人口約 7 万人の小都市で、周囲を阿蘇・九重山系や英彦岳系の山々に囲まれた風光明媚な地域である。日田市には約 160 井の温泉があり、源泉数では大分県内で 5 番目にあたる。その大多数は日田市北部にある天ヶ瀬町に存在しており、山下、由佐らにより、泉温並びに化学成分等の相互関係から、天ヶ瀬温泉の温泉水は一つの源熱水と冷地下水との混合湧出であることや、玖珠川沿いの温泉で低温化、低濃度化がみられることなどの研究報告がなされている (山下, 1971; 由佐ほか, 1985)。一方で、主に三隈川沿いに湧出している日田温泉については、源泉数が約 20 井と天ヶ瀬温泉に比べて少なく、これらを対象とした同時期の温泉調査もこれまでにほとんど行われていないが、日田温泉は、日田市の観光地の中心部に湧出しているものが多く、重要な観光資源のひとつでもある。

そこで本研究では、日田温泉の現況を把握することを目的とし、大分県温泉調査報告の温泉分析書による過去の調査結果もとに、現地での調査および温泉水に化学分析を行った。

## 2. 試料採取および測定方法

本研究において調査を行った温泉の位置を図 1 に示す。日田市には日田温泉、天ヶ瀬温泉の二つがあり、約 160 井の源泉が存在しており、そのうち約 20 井が日田市街地を中心に湧出している日田温泉である。本研究では、日田温泉の中でも三隈川沿いに存在している源泉を中心に HT-1~HT-10 の 10 井を調査対象とした。日田市内の温泉は HT-2 以外は全て動力揚湯であり、その掘削深度は最も深いもので 1500m の源泉もあるが、総じて 700m 前後の深度である源泉が多い。

現地で気温、水温 (AS ONE, ASF-250T)、pH (HORIBA COMPACT, B-212)、電気伝

導度（東亜 DKK, CM - 31P）を測定した後、500mL ポリエチレン製ボトルおよび、ガスバリア性に優れたニッコー製テクノボトルに温泉水試料を採取した。

温泉水の分析では、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ についてはイオンクロマトグラフィ（DIONEX 社製 ICS-1500）で、 $\text{SiO}_2$ はモリブデン酸黄色法による吸光度法でそれぞれ分析を行った。 $\text{HCO}_3^-$ は pH4.3 アルカリ度法により値を求めた。

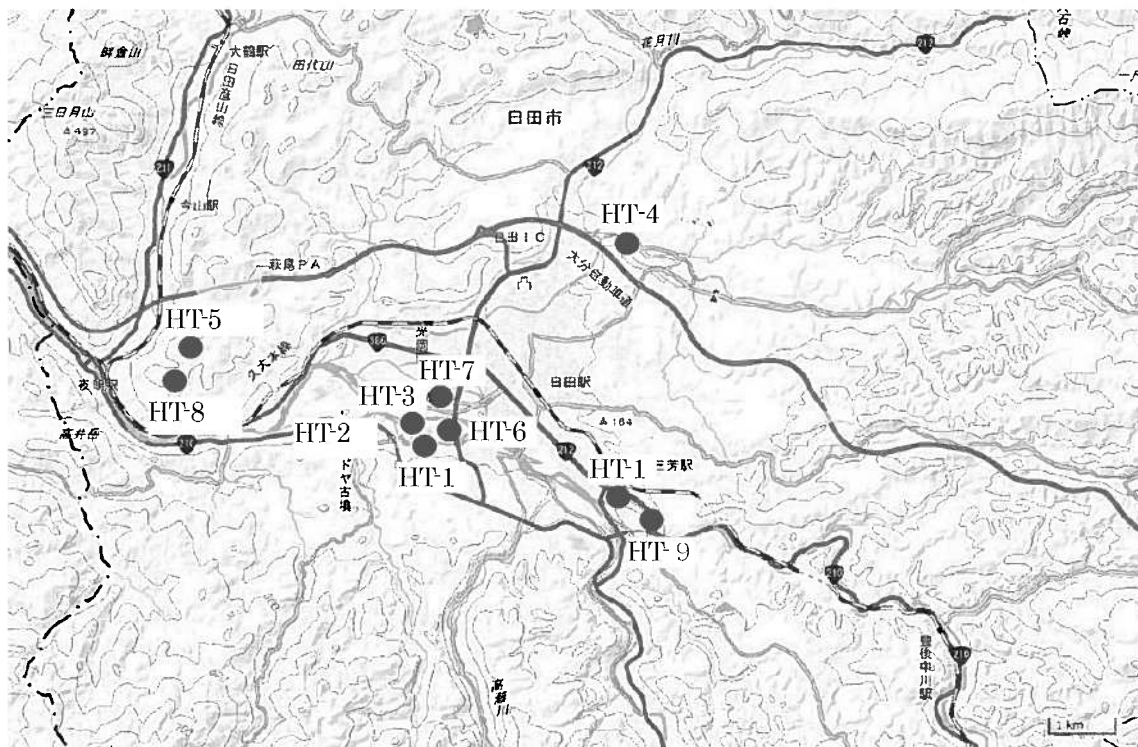


図1 調査地点の概略図（国土地理院2万5千分の1改変）

### 3. 結果

#### 3-1 泉温について

表1に今回調査を行った源泉の掘削深度と泉温を示す。日田温泉は、掘削深度 600～1500m 程度とかなり深く、泉温も大分市の温泉と同程度である。本調査において最も泉温が高かったのは HT-2 の源泉の 69.8℃で、最も低いものは HT-8 の源泉で 22.5℃であった。HT-1 の源泉は、病院敷地内に掘削されたもので、入院患者等の浴用に加温して温泉として使用されている。HT-8 は、2002 年に掘削された源泉で、当初浴用の源泉を目的に掘削されたが、泉温が低かったことと、亜鉛、ゲルマニウム等の微量元素を含んでいた為、現在ではミネラルウォーター用の原水として使用されている。今回調査を行った 10 源泉のうち、4 井が泉温 42℃以上の高温泉、4 井が 34℃以上 42℃未満の温泉、1 井が 25℃以上 34℃未満の低温泉で、残る 1 井が 25℃未満の低温泉であった（図2）。大分県の鉱泉分析書によると、日田温泉には 22 源泉が掘削されており、今回調査を行わなかった温泉を加えると、10 井近くが高温泉に分類される。

表 1 日田温泉の掘削深度と泉温

No.	掘削深度	泉温
	[m]	[°C]
HT-1	680	29.3
HT-2	1500	69.8
HT-3	1500	50.4
HT-4	800	61.2
HT-5	1250	37.1
HT-6	600	40.0
HT-7	643	51.2
HT-8	749	22.5
HT-9	585	41.4
HT-10	—	41.0

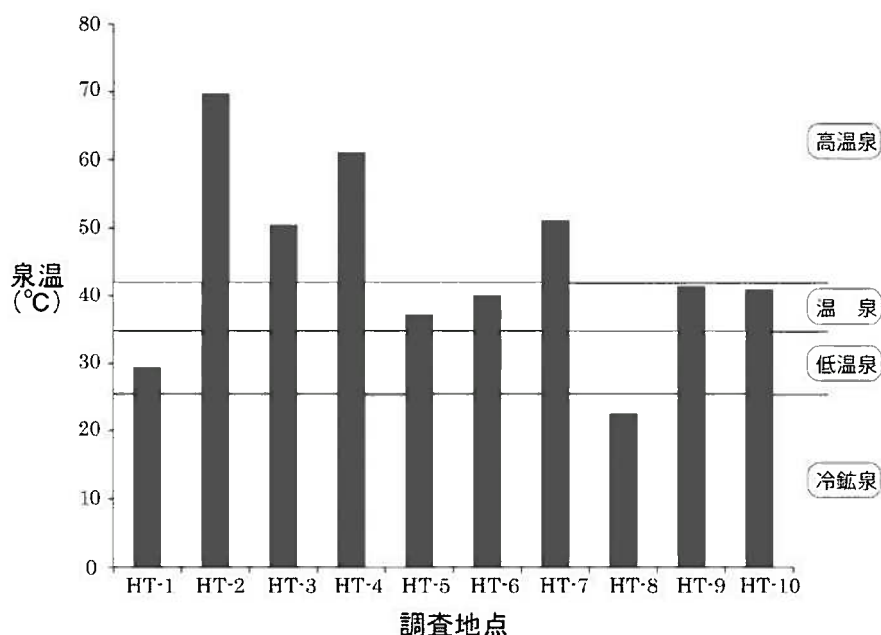


図 2 各源泉ごとの泉温

### 3-2 温泉水の化学成分について

温泉水の化学分析結果を pH の測定値とともに表 1 に示す。今回調査を行った日田温泉の温泉水は、pH7~8 程度の中性~弱アルカリ性温泉である。温泉水の主要溶存化学成分量の総量値 (TDS) でみると、この地域の温泉水は、TDS が 1000mg/L 以下の単純泉と、TDS が 1700~2500mg/L の塩類泉の 2 つに分類される (図 3)。温泉水の主要溶存化学成分についてみると、上述の単純泉、塩類泉ともに陽イオンとして卓越する成分はナトリウムイオン、陰イオンとしては炭酸水素イオンである (表 1)。温泉水の化学組成では、HT-2, HT-3, HT-4, HT-5, HT-9 の塩類泉は全てナトリウム-塩化物・炭酸水素型

温泉であった（図4）。

図5に今回調査を行った日田温泉の分析結果と、過去に分析された日田温泉と天ヶ瀬温泉の陰イオンの三角組成図を示す。天ヶ瀬温泉の温泉水は、源泉によって  $\text{Cl}^-$  と  $\text{HCO}_3^-$  の濃度が広く分布しているのに対し、日田温泉はほぼ全ての温泉について  $\text{Cl}^-$ - $\text{HCO}_3^-$  型の部分に集まっていることが分かる。この結果もからも日田温泉は、ほぼ全ての温泉水がナトリウム-塩化物・炭酸水素型の温泉泉水であるとみることができる。

表1 温泉水の分析結果

No.	pH	Na <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SiO <sub>2</sub>	総塩分量
		[mg/L]								
HT-1	8.1	28.3	10.2	1.2	8.4	14.9	3.3	82.3	71.7	220
HT-2	7.2	574	28.8	6.2	21.2	309	9.4	1110	78.4	2130
HT-3	7.1	633	21.8	5.6	14.0	298	4.4	1250	98.9	2330
HT-4	7.0	497	21.8	2.4	5.4	279	3.4	881	93.1	1780
HT-5	7.5	731	8.8	0.3	0.8	253	0.3	1490	28.9	2510
HT-6	8.1	22.9	8.7	2.9	10.0	10.0	5.0	91.4	107	258
HT-7	7.9	22.1	7.5	3.6	12.0	9.8	4.5	94.5	97.0	251
HT-8	8.1	16.6	4.3	3.8	9.9	10.7	1.7	73.1	58.8	179
HT-9	7.4	708	8.4	1.2	1.8	266	<0.05	1410	61.2	2460
HT-10	7.7	239	7.0	3.8	5.2	97.6	0.2	503	73.2	929

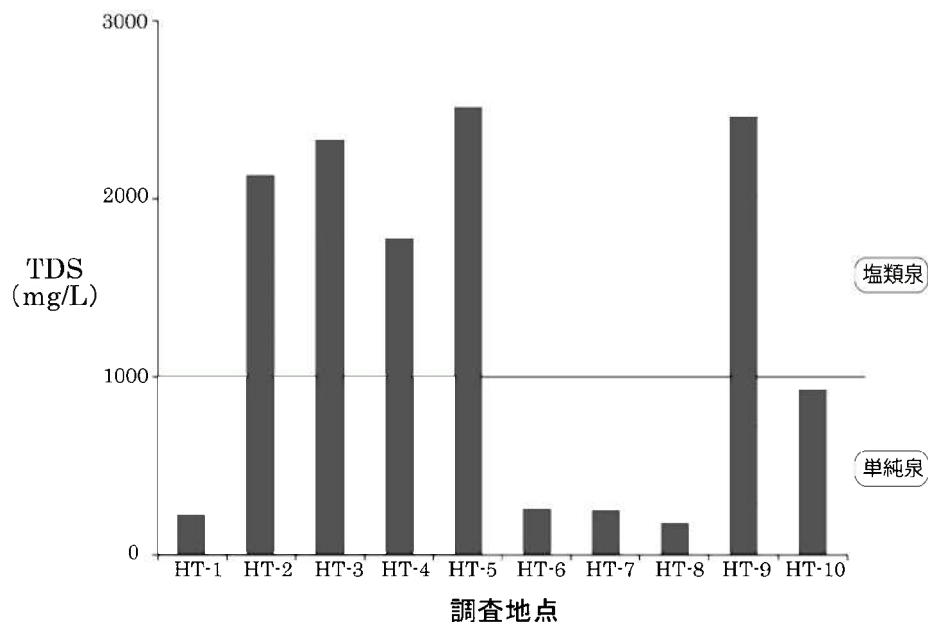


図3 各源泉ごとの総塩分の総量値（TDS）

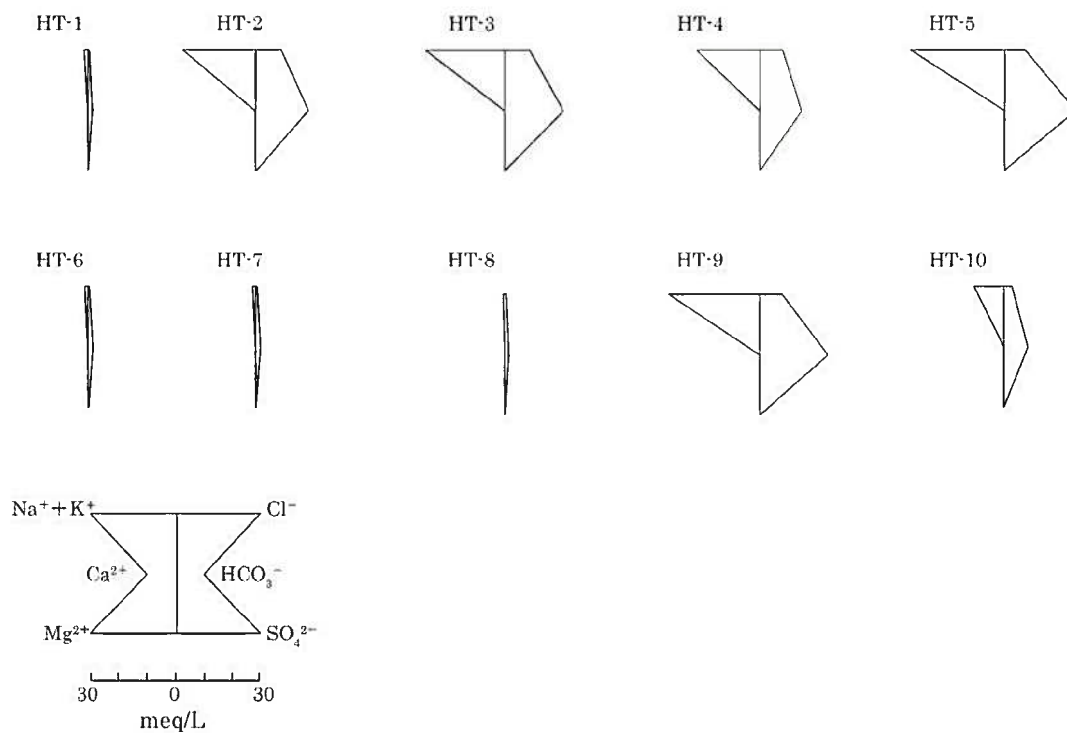


図4 各温泉水の化学組成

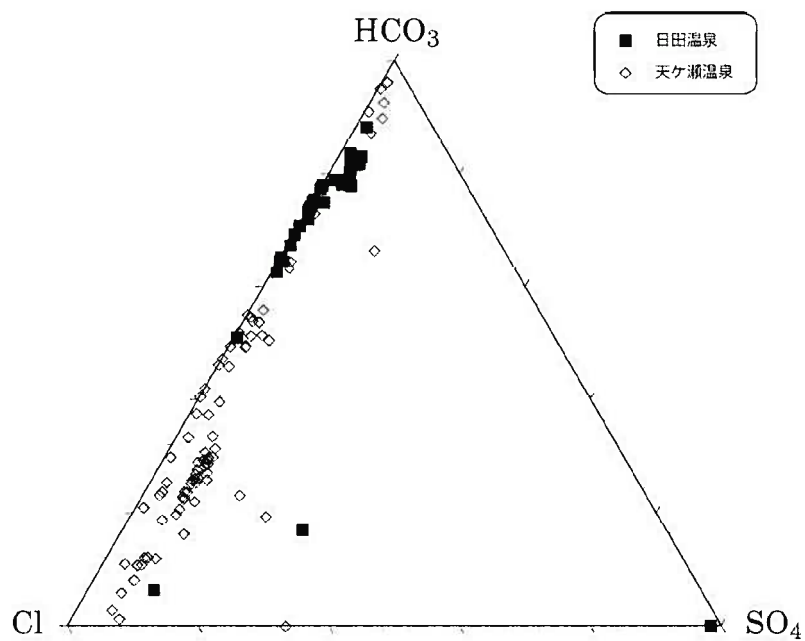


図5 日田温泉と天ヶ瀬温泉の陰イオン三角図



### 3-3 温泉水の泉温および化学成分濃度の変化について

図6および図7に温泉水の泉温およびTDSの経年変化をそれぞれ示す。泉温については、HT1-1, HT-5, HT-8, HT-9の温泉で、4~8℃程度の泉温が低下がみられ、HT-2, HT-3, HT-4, HT-6, HT-7の温泉で3~15℃ちかくの泉温が上昇がみられた（HT-6およびHT-7については、1980年から2004年には、それぞれ1.4℃、9.5℃泉温が低下している）。調査した源泉の数がそれほど多くはないが、温泉街中心部に近い地域の温泉に上昇傾向がみられ、市街地から離れた周辺部の温泉に泉温が低下傾向がみられた。

一方、TDSについては、HT-2で650mg/Lちかくの低下しており、HT-9では逆に650mg/L以上の増加がみられた。その他の温泉については、大きな変動はみられなかった。前述の泉温の変化とあわせてみると、泉温とTDSの変化に特に関係性はみられないように見えるが、検討した温泉が10試料と比較的少ないことと、測定した期間の幅がかなり大きいので、今後も継続的に調査する必要があると思われる。

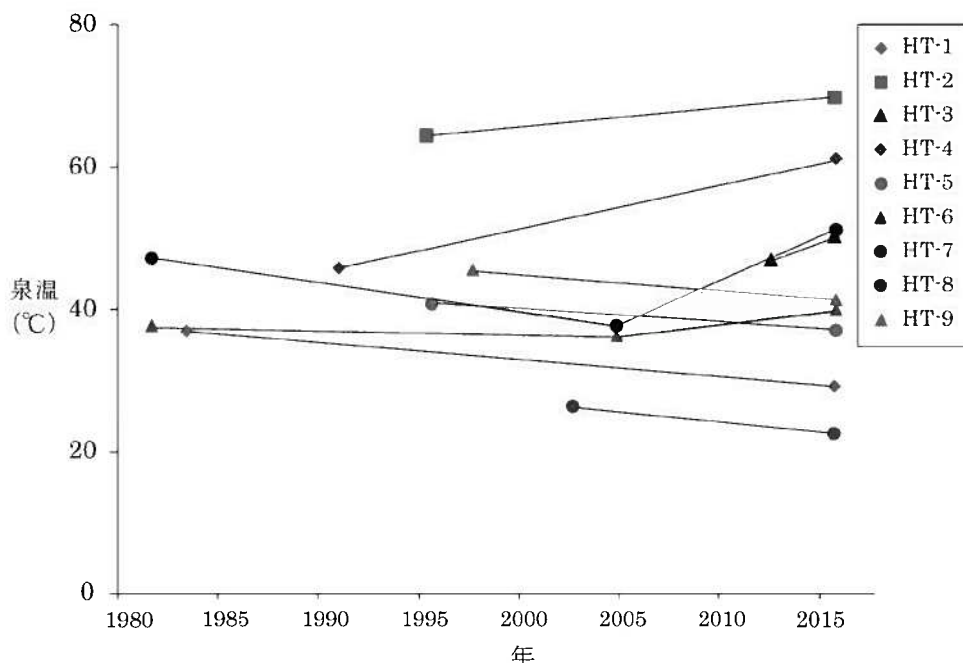


図6 各調査地点における泉温の変化

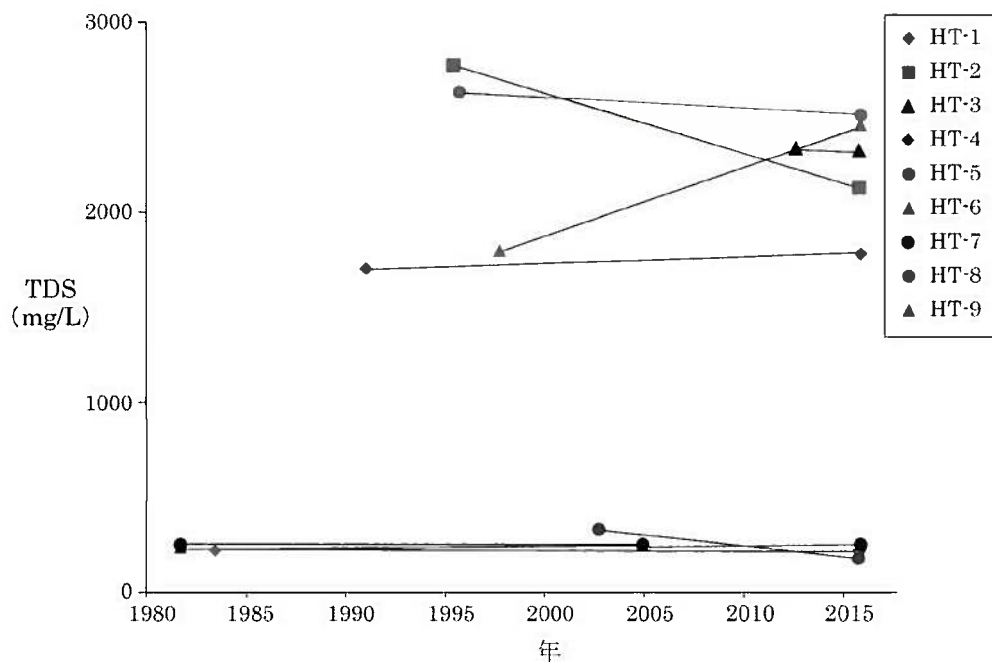


図7 各調査地点における主要溶存化学成分濃度の総量値（TDS）の変化

#### 4. まとめ

日田市の日田温泉について、大分県鉱泉誌の既存データをもとに現地調査を行い、温泉水の泉温、主要溶存化学成分等について検討をおこなった。その結果、次のことが明らかとなった。(1) 今回調査を行った10井の源泉のうち、4井が泉温42℃以上の高温泉であり、5井が塩分量1000mg/L以上の塩類泉であった。(2) 調査を行った塩類泉は全てナトリウム-塩化物・炭酸水素塩泉であり、単純泉については、日田温泉の塩類泉に近い化学組成であった。(3) 泉温は、平成10年頃より4源泉で温度低下、5源泉で温度上昇の傾向がみられた。(4) 主要溶存化学成分の総量値(TDS)については、平成10年頃に比べ、1源泉で650mg/L程度の増加がみられ、1源泉で逆に650mg/L程度の減少傾向がみられた。

#### 参考文献

- 大分県環境管理課，日田市保健所総務課（1979）天瀬町・日田市の温泉現況調査．大分県温泉調査研究会報告書，30，70-76.
- 山下幸三郎（1967）大分県天ヶ瀬，湯の釣温泉の水系．大分県温泉調査研究会報告書，18，15-18.
- 山下幸三郎，由佐悠紀，川野田実夫（1971）天ヶ瀬温泉に及ぼす河川水の影響．大分県温泉調査研究会報告書，22，13-18.
- 由佐悠紀，志賀史光，川野田実夫（1985）天ヶ瀬温泉の現況．大分県温泉調査研究会報告書，36，21-24.



# 別府湾堆積物とその供給系

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設

山田 圭太郎・竹村 恵二

## 要旨

本研究では別府湾に砕屑粒子を供給する河川のうち、特に別府湾西部に位置する朝見川及び境川に着目し、河川堆積物中の粒子組成を明らかにした。その結果、両河川の粒度分布や全粒子組成に大きな違いは認められないものの、重鉱物組成については明瞭な違いが認められた。朝見川及び境川のサンプルには主として鶴見岳などの輝石角閃石安山岩に由来すると考えられる Opx, Cpx, Am などが多く含まれる一方で、朝見川のサンプルの一部には観海寺安山岩や現在の地熱活動に由来する変質した鉱物が含まれている。これらの違いが両河川から供給された堆積物を区別する有力な手掛かりとなると考えられる。

## 1. はじめに

別府湾は中央構造線(MTL)活断層系の西端に位置する。Itoh et al. (1998)や Itoh et al. (2014)によると ca. 0.7 Ma 以降、別府湾では MTL の活動に伴う pull-apart stress が卓越し、湾奥付近は現在も沈降傾向にある。周辺には多くの活断層が分布すると共に、鶴見岳や伽藍岳などの活火山が多く分布する。そのため別府湾には厚く連続的な堆積物が保存されるとともに、周辺地域の火山活動や地震活動など(イベント)が堆積物として記録されている可能性がある。特に地震活動に着目すると、Kuwaie et al. (2013)や Yamada et al. (2016)は別府湾海底堆積物中に地震の揺れに伴って流下した堆積物(地震性タービダイト)が含まれる可能性を指摘した。地震性タービダイトの給源は地震活動の周期や関連断層の活動位置を推定する上で非常に重要な情報であるが、Yamada et al. (2016)は周辺流域の情報不足からこれらの堆積物の詳細な給源は不明とした。そこで本研究では別府湾及び周辺地域におけるイベント履歴やイベントに伴う堆積物(イベント堆積物)の供給プロセスを明らかにするために、別府湾に注ぐ周辺河川中の砕屑物構成を調査した。本稿では地震調査研究推進本部(2015)によって沿岸海底に重力崩壊地形が報告されている別府湾西部、特に別府市内の朝見川及び境川の砕屑物構成を報告する。

## 2. 調査地域及び方法

本稿で報告する朝見川及び境川は別府扇状地南部および中部を東に流下する河川で、扇状地内は三面がコンクリートで覆われており、地表水が存在する。朝見川は鶴見岳南部に端を發し、途中で乙原川や河内川などと合流しながら山地と扇状地との境界とほぼ並行して流下する。本境界は朝見川断層としても知られている。境川は鶴見岳北部に端を發し、

そのまま扇状地内を東に流下する。本研究では朝見川から 10 サンプル、境川から 6 サンプルを採取し、それぞれ河口から A1~A10, S1~S6 とした。サンプリング地点を図 1 に示す。

得られたサンプルは乾燥後、過酸化水素水(10%)と超音波洗浄機を用いて分散させ、水篩や使い捨ての篩であるメッシュクロスによる分画を行い、 $<4\phi$ ,  $3-4\phi$ ,  $1-3\phi$ ,  $1\phi$  に分離・秤量した。その後、 $3-4\phi$  のサンプルを用いて薄片を作成し、偏光顕微鏡を用いて薄片ごとに 200 粒子以上の粒子を鑑定・計数した。粒子は重鈹物(Hm)、石英(Qz)、長石(FI)、火山ガラス(Vg)、不透明鈹物(Opq)、岩片(Rf)、その他(Ot)に分類した。また重鈹物はさらに単斜輝石(Opx)、斜方輝石(Cpx)、角閃石(Am)、橄欖石(Ol)、ジルコン(Zr)、燐灰石(Ap)、雲母(Bi)、その他(HOt)に分類した。

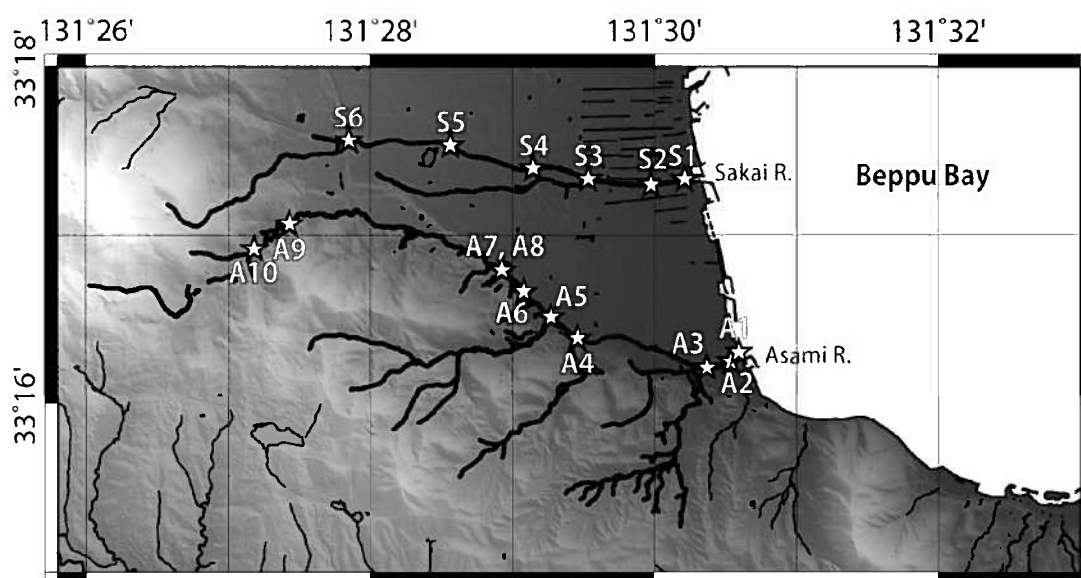


図 1. 別府の地形とサンプリング地点(☆)。陰影図は国土地理院の水涯線及び数値標高モデルデータ (5 m) を用いて作成した。

### 3. 結果

秤量及び計数結果を図 2(朝見川)及び図 3(境川)に示す。両河川から得られたサンプルは朝見川の A7 及び A8 地点を除き砂礫から構成される(図 2 左, 図 3 左)。シルト以下( $<4\phi$ )の粒子を多く含む A7 及び A8 地点は、河川内の植生の影響で細粒粒子がトラップされていたと考えられる。

極細砂サイズ( $3-4\phi$ )における全粒子組成をしてみると、両河川から得られたサンプルとも主としてマイクロライトを含む Vg, Qz, Hm を多く含む(図 2 中央, 図 3 中央)。今回得られたサンプルからは、両河川のサンプル間に明瞭な違いは認められず、また同一河川内でも源流から河口まで明瞭な違いは認められなかった。

重鉱物の組成については、両河川の間で明瞭な違いが認められた(図 2 右, 図 3 右)。境川から得られたサンプルは、主として Opx, Cpx, Am から構成され、少量の Bi, Zr, Ap を含む。朝見川の A1-A3, A9, A10 地点から得られたサンプルは概ね境川と同じ組成を示す一方で、A4-A8 地点から得られたサンプルについては、特徴的に変質作用を受けたと考えられる鉱物(本報告では HOt に分類)が多く含まれることが分かった。

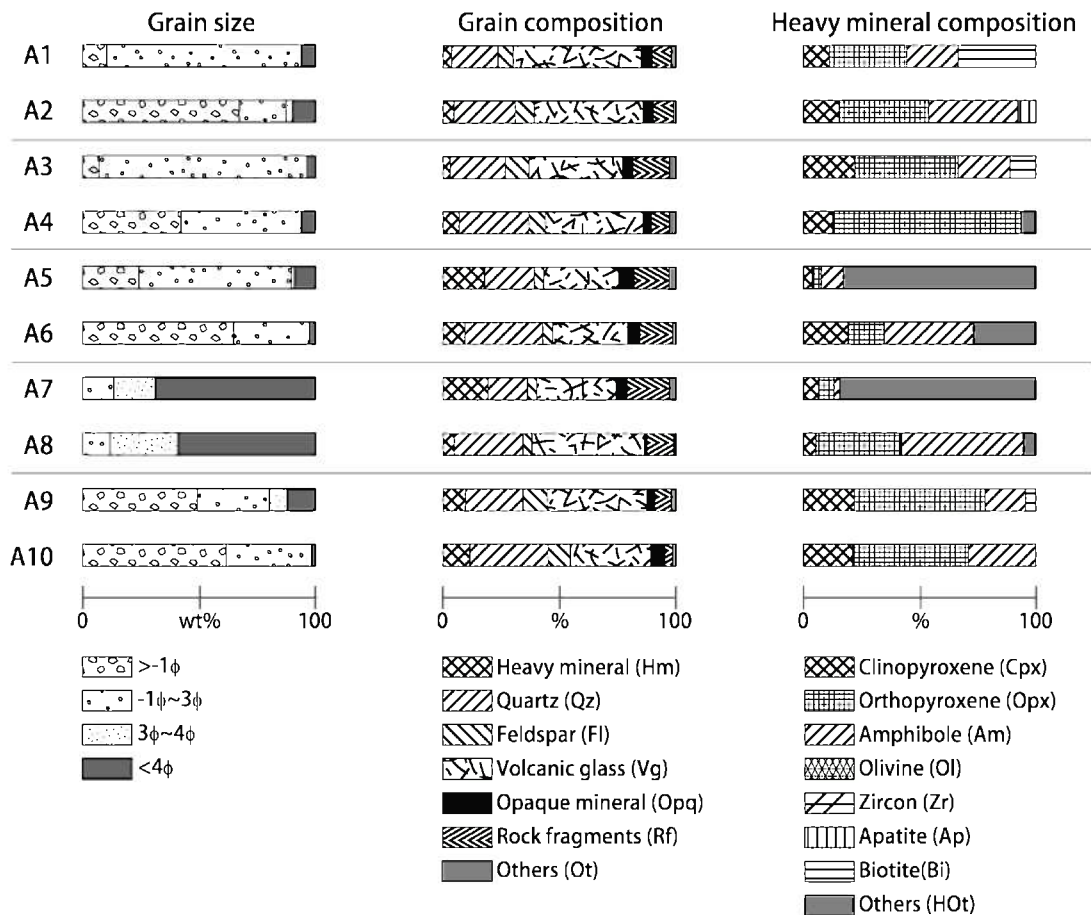


図 2. 朝見川から得られたサンプルの粒子構成(左：粒度分布, 中央：全粒子組成, 右：重鉱物組成)。

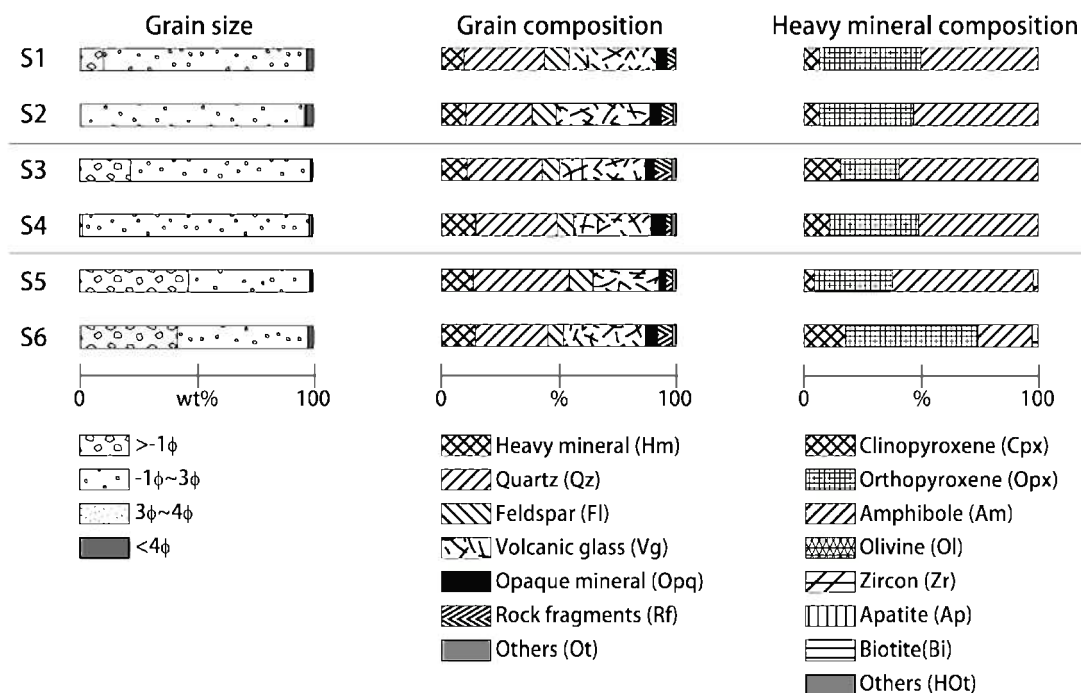


図 3. 境川から得られたサンプルの粒子構成(左：粒度分布, 中央：全粒子組成, 右：重鉱物組成)。

#### 4. 考察

重鉱物組成に着目すると、朝見川の A1-A3, A9, A10 地点及び境川の A1-A6 地点から得られたサンプルには Opx, Cpx, Am を特徴的に多く含まれる。これらの特徴は両河川の流域内では鶴見岳の溶岩及び火砕物を構成する輝石角閃石安山岩の特徴(星住ほか, 1988)と酷似する。このことから、これらの碎屑物は主として鶴見岳などの輝石角閃石安山岩類に由来すると考えられる。

一方で、変質鉱物を多く含むサンプルが得られた朝見川の A4-A8 地点の周辺には変質の進んだ輝石安山岩(観海寺安山岩)が分布する(星住ほか, 1988)ほか、観海寺地区などでは現在も活発な地熱活動が見受けられる。朝見川は A4-A8 地点にかけて、観海寺安山岩が分布する地域を流下する乙原川などの小規模河川が合流し、また本流も上記の地熱活動地域を流下することから、A4-A8 地点に含まれる変質した鉱物は観海寺安山岩や現在の地熱活動に由来すると考えられる。ただし、これらの変質した鉱物の供給量は相対的に少なく、そのため朝見川河口付近の A1-A3 地点で得られたサンプルには、変質した鉱物がほとんど含まれていないと考えられる。

以上の結果・考察を踏まえると、朝見川及び境川の碎屑物は粒度分布や全粒子組成からは区別が難しいものの、重鉱物組成に着目することで両者を分離できる可能性がある。

## 5. まとめと今後の課題

本研究では別府湾に碎屑粒子を供給する河川のうち、特に別府湾西部に位置する朝見川及び境川に着目し、河川堆積物中の粒子組成を明らかにした。その結果、両河川の粒度分布や全粒子組成に大きな違いは認められないものの、重鉱物組成については明瞭な違いが認められた。朝見川及び境川のサンプルには主として鶴見岳などの輝石角閃石安山岩に由来すると考えられる Opx, Cpx, Amなどを多く含まれる一方で、朝見川のサンプルの一部には観海寺安山岩や現在の地熱活動などに由来すると考えられる変質した鉱物が含まれている。これらの違いが両河川から供給された堆積物を区別する有力な手掛かりとなると考えられる。

本研究では極細砂サイズ(3-4  $\phi$ )の碎屑粒子に着目して調査を行ったため、粒径の影響を無視できない。今後、他の粒径における粒子組成や化学組成なども考慮する必要がある。

## 引用文献

- Itoh, Y., Kusumoto, S., Takemura, K., 2014. Evolutionary process of Beppu Bay in central Kyushu, Japan: a quantitative study of the basin-forming process controlled by plate convergence modes. *Earth, Planets and Space* 66, 1-14.
- Itoh, Y., Takemura, K., Kamata, H., 1998. History of basin formation and tectonic evolution at the termination of a large transcurrent fault system: deformation mode of central Kyushu, Japan. *Tectonophysics* 284, 135-150.
- Kuwae, M., Yamamoto, M., Ikehara, K., Irino, T., Takemura, K., Sagawa, T., Sakamoto, T., Ikehara, M., Takeoka, H., 2013. Stratigraphy and wiggle-matching-based age-depth model of late Holocene marine sediments in Beppu Bay, southwest Japan. *Journal of Asian earth sciences* 69, 133-148; 148.
- 星住 英夫, 小野 光司, 三村 弘二・野田 徹郎, 1988. 別府地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 131 p.
- 地震調査研究推進本部, 2015. 別府一万年山断層帯(大分平野一由布院断層帯東部)における重点的な調査観測 平成 26 年度 成果報告書, 235 p.
- Yamada, K., Takemura, K., Kuwae, M., Ikehara, K., Yamamoto, M., 2016. Basin filling related to the Philippine Sea Plate motion in Beppu Bay, southwest Japan. *Journal of Asian Earth Sciences* 117, 13-22.





# 天満温泉（別府市）の泉質モニタリング

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設

大 沢 信 二・三 島 壮 智  
竹 村 恵 二

## 要旨

1972年から京都大学地球熱学研究施設によって、一時中断の時期はあるものの、継続的に行われている天満温泉における泉質モニタリングのデータを、既存のものも含めて解析した。その結果、掘削後から1980年代に向けて急激に変化した塩化物イオン ( $\text{Cl}^-$ ) と炭酸水素イオン ( $\text{HCO}_3^-$ ) の濃度は、1980年代中頃以降に安定化に転じたが、おおむねその状態が2016年2月現在まで続いていることがわかった。しかしながら、それらの濃度比を取ると ( $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ )、おおむね安定と見た上記期間にも上昇傾向が認められた。 $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ 比が推定される地下の熱水温度と負の相関関係にあることから、濃度比の上昇は温泉の元となる地下熱水が温度低下を起こしてきたことに対応していると考えられ、この温度低下が天満温泉における温泉水の自噴停止の主要な原因であると推測した。

## 1. はじめに

別府温泉では、2011年3月11日東北日本大震災と東電福島第1原発の事故の翌年頃から既存温泉を活用した小規模地熱発電の計画がもちあがり、翌2013年1月には早くも最初の発電所が建設され、2015年現在ですでに少なくとも6基の10kW~100kW級の“温泉発電所”で電気が生み出されている。これに対し、著者のひとり（大沢）は、温泉発電がターゲットとする自噴する沸騰泉には流出量制限が設けられていないことから（大分県では動力による揚湯は、その上限を50L/分と定めている。）、湯や蒸気を取り出せるだけ採取する行為を危惧し、また、「未利用分の活用」の言葉のもとに始まった温泉発電の一部で温泉井の新規掘削が行われたことから、1960年代高度成長期の急速な温泉開発による既存温泉の衰退（自噴の停止や泉質の変化など）の再発を懸念した。私たち自然科学の研究者は、このような温泉発電を目的とした地熱開発に対して、その影響評価を客観的に行えるように、2013年1月より開発地周辺において温泉の水質分析や水位観測、重力測定といった自然科学的な温泉モニタリングを実施している。

本報告では、それらの内、天満温泉での泉質モニタリングのデータを若干の考察を付して提示する。なお、本泉質モニタリングは、京都大学名誉教授の山佐悠紀氏の取り組みを引き継いだものであることをここに明記し、まず最初に敬意を表しておきたい。

## 2. 天満温泉について

1965年（昭和40年）3月に掘削された、別府南部地域では低地部に存在する唯一の沸騰泉で（図1）、井戸の深さはおよそ230mである。温泉水は長らく自噴していたが、現在はエアリフトにより揚湯している。自噴停止の時期は正確には把握できていないが、大分県東部保健所によれば、2006年（平成18年）2月頃だとされる。図1の右側には別府南部地域の地下の熱水流動経路（大沢ほか，1994）と天満温泉の位置関係を示しており、天満温泉は別府温泉の本源熱水（Na-Cl型）に由来する地下の高温熱水流動層に向けて掘削された温泉井であるとされている（例えば、大沢ほか，1993）。

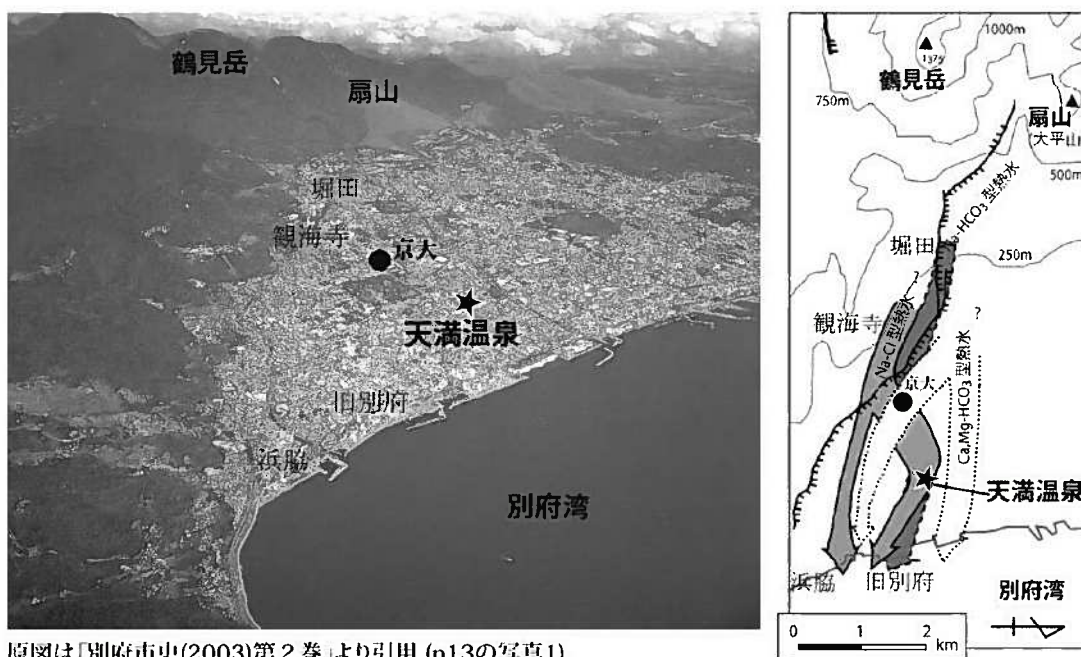


図1 天満温泉の地理的な所在地（左写真）と別府南部地域の地下の熱水流動経路との位置関係（右図）

大沢ほか（1993）は、天満温泉の温泉井から噴出する温泉水と蒸気の化学分析データを用い、高温条件下における溶液化学平衡計算に基づいて熱水と鉱物の溶解平衡温度を見積もり、天満温泉の地下を流動している熱水の温度を150℃ほどであると推定した。図2は、その報文の関係するページを抜き出したもので、下の図の添え字Sを付けた丸い囲みによって熱水と鉱物の溶解平衡温度を指し示したが、ここで改めてもう少し丹念に飽和温度を見ると150℃よりやや低く、140℃程度であると読み取れる。

表1 地熱水の溶液化学種組成計算に用いた分析データ

試料採取地点：天満温泉（別府），沸騰泉水	
pH...8.8	
Na...338	Cl...219
K...18.2	SO <sub>4</sub> ...95.1
Ca...1.12	HCO <sub>3</sub> ...468
Mg...0.18	SiO <sub>2</sub> ...227
Al...0.09	(単位；mg/l)
<b>蒸気</b>	
試料採取時の蒸気分離度...0.136 #1	
水蒸気を除くガスの体積分率...0.24 #2	
CO <sub>2</sub> ...12.0	
H <sub>2</sub> S...0.01 (単位；%)	

データの出典

- #1 由佐, 大石 (1986)
- #2 古賀, 野田 (1973)
- その他 NEDO (1989)

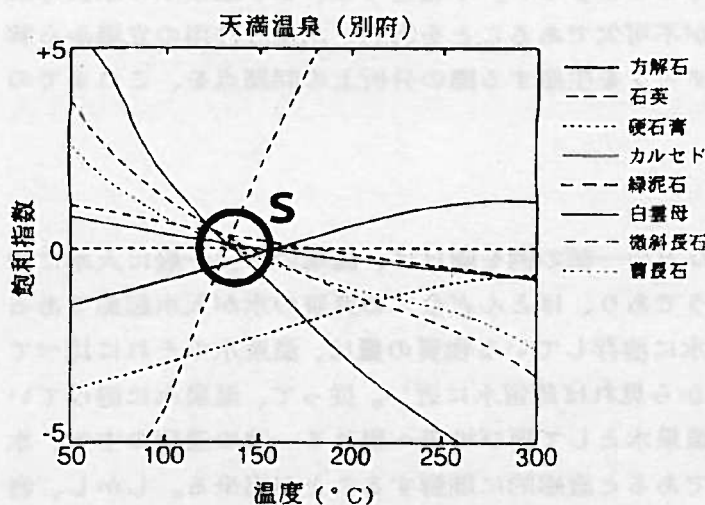


図1 天満温泉の鉱物飽和指数 - 温度図  
飽和指数 = 活動度積 - 溶解度数, 縦軸は対数スケール

なった(例えば、由佐, 1986)のような考え方は、由佐, 1986の化学平衡の物種と温泉の組成が一致していた。溶解化学種の組成が一致しているにもかかわらず天然の熱水が沸騰することから、ソナル・コングリガットの種の溶解平衡熱力学データは、この種の熱水に適用されていないと表されている(由佐, 1985)、ここで計算を実行

言  
ある  
に  
値と  
て本  
の  
ニ  
存在  
が、  
い  
こ  
る  
天  
が  
理

図2 高温条件下における溶液化学平衡計算に基づいて推定される天満温泉の地下における熱水と鉱物の溶解平衡温度 (大沢ほか, 1993より転載)

京都大学地球物理学研究施設（現在の地球熱学研究施設・本部）では、この温泉で 1972 年 10 月から月 1 回の頻度で塩化物イオン ( $\text{Cl}^-$ ) の濃度の繰り返し分析による温泉モニタリングを始めた。1974 年の 8 月からは炭酸水素イオン ( $\text{HCO}_3^-$ ) も分析項目に加え、1993 年の 12 月まで継続された。その結果はこれまでに様々なルートで公表されており（例えば、1993 年に刊行された京都大学地球物理学研究施設のパンフレットや、Yusa *et al.*, 2000 ; 由佐ほか, 2002）、本報告の図 3 にもデータの一部として再録した。掘削直後の 1966 年 5 月に実施された温泉分析の頃から 1980 年代に向けて  $\text{Cl}^-$  濃度は 1/4 にまで減少し、 $\text{HCO}_3^-$  濃度は 3 倍に増加したことが見出され、この変化は別府温泉の本源熱水 (Na-Cl 型) の圧力低下に起因し、1960 年代に進行した高地部での沸騰泉の開発の影響であると考えられている（例えば、Yusa *et al.*, 2000 ; 由佐ほか, 2002）。

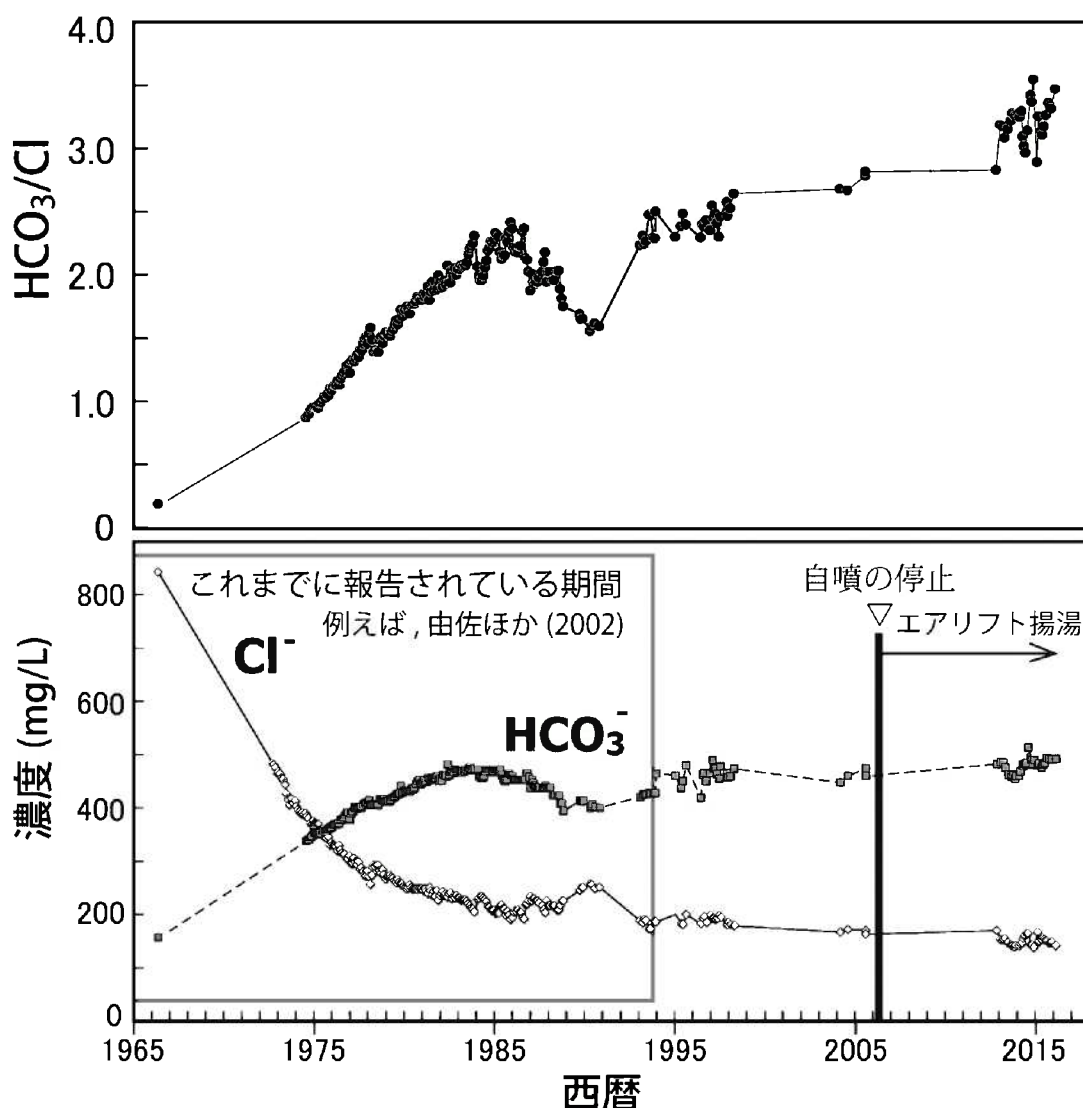


図 3 天満温泉における塩化物イオン ( $\text{Cl}^-$ ) と炭酸水素イオン ( $\text{HCO}_3^-$ ) および  $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$  比の経年変化。1993 年 12 月より後のデータは本研究による。

### 3. 調査研究の方法

1993年12月より後、2016年2月までに採取した、付表に示す試料を除く、温泉水試料について、塩化物イオン ( $\text{Cl}^-$ ) と炭酸水素イオン ( $\text{HCO}_3^-$ ) の濃度をそれぞれ、イオンクロマトグラフ法、滴定法 (4.3 アルカリ度) で求めた。付表に挙げた試料は長期間冷暗所に保管されていた試料で、イオンクロマトグラフ法によって、ナトリウムイオン ( $\text{Na}^+$ )、カリウムイオン ( $\text{K}^+$ )、マグネシウムイオン ( $\text{Mg}^{2+}$ )、カルシウムイオン ( $\text{Ca}^{2+}$ )、塩化物イオン ( $\text{Cl}^-$ ) および硫酸イオン ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) の濃度を測定し、イオンの電荷バランスを前提にして等量濃度の差引から  $\text{HCO}_3^-$  濃度を算出した。なお、数値の掲載されている水温と pH は、現地で測定したものである。

1993年12月以前の  $\text{Cl}^-$  の分析は滴定「モール法」によるものであるため、方法の違いによる分析値の差異が気になるところであるが、1993年12月中に採取された試料の分析データを比較でき、滴定法 187mg/L、イオンクロマトグラフ法 186mg/L とよい一致をみた。一方の  $\text{HCO}_3^-$  については、1993年12月以前もその後も同じ方法での分析であるが、滴定終点の pH は前者が 3.8、後者が 4.3 であるため、1993年12月より後の数値はそれ以前の数値より系統的に低く出されている可能性がある。この点は、データ解析や解釈の際に留意しておく必要がある。

### 4. 結果と考察

2016年2月現在までに得られている全ての  $\text{Cl}^-$  と  $\text{HCO}_3^-$  の濃度データの経時変化を、図3の下段に示す。2章でも述べたように、掘削直後の1966年5月に実施された温泉分析の頃から1980年代に向けて  $\text{Cl}^-$  濃度は 1/4 にまで減少し、 $\text{HCO}_3^-$  濃度は3倍に増加し、1980年代中頃から1990年代初めにかけて一時的に復調する動きが見られたが、1990年代中頃までには元のレベルにもどり、以後はほぼ安定した状態を続けている。温泉水が自噴を停止したのは、奇妙なことに、この濃度が安定した期間 (に入っておよそ10年後) に起ったことになる。一方、図3の上段には、 $\text{HCO}_3^-$  と  $\text{Cl}^-$  の濃度比に変換して経時変化を表したが、濃度そのものの表示でははっきりと変化が捉えられなかった1990年代中頃以降にも「単調上昇」という変化が見て取れ、自噴停止との関連性を暗示しているように見える。

図4は、地球化学の原理に基づいて温泉水の化学成分の濃度データから地下の熱水温度を推定する地化学温度計のうち、基礎となる化学反応\*が平衡に達するのが比較的速い K-Mg 温度計\*\* (Giggenbach, 1988) を使い、付表の化学分析データを用いて1990年代中頃以降の天満温泉の地下の熱水温度の経時変化を推しはかってみたものである。月単位の細かい変動が見られるものの、10年スケールでは明瞭な温度低下のあることが見て取れる。

#### 【脚注】

\*  $0.8 \text{ カリ雲母} + 0.2 \text{ 緑泥石} + 5.4 \text{ ケイ酸} + 2\text{K}^+ = 2.8 \text{ カリ長石} + 1.6\text{H}_2\text{O} + \text{Mg}^{2+}$

\*\* この地化学温度計で求まる熱水温度 (°C) は、 $4410 / (14 - \log[\text{K}]^2 / [\text{Mg}]) - 273.15$  で得られる。1987年9月25日の分析データを使って求めた温度 138°C は、2章で示した熱水と鉱物の溶解平衡温度 (約 140°C) と良い一致を見た。

図5は、付表のデータについて、K-Mg 温度計で求めた熱水温度と  $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$  比の関係を示したものであるが、文献から引用したデータ（1966年5月17日と1985年11月25日：前者は温泉分析書、後者は由佐ほか、1989）を除くと、両者の間には熱水温度が高いほど  $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$  比が低いという傾向が見られ、図3の下段図に表れている  $\text{Cl}^-$  濃度と  $\text{HCO}_3^-$  濃度の相補的な変化は、地下の熱水温度の変化を指し示していたと言える。これが確実であれば、天満温泉における自噴の停止は、地下熱水の温度低下によって起ったことである可能性があるが、以下で簡単にその検証を試みる。

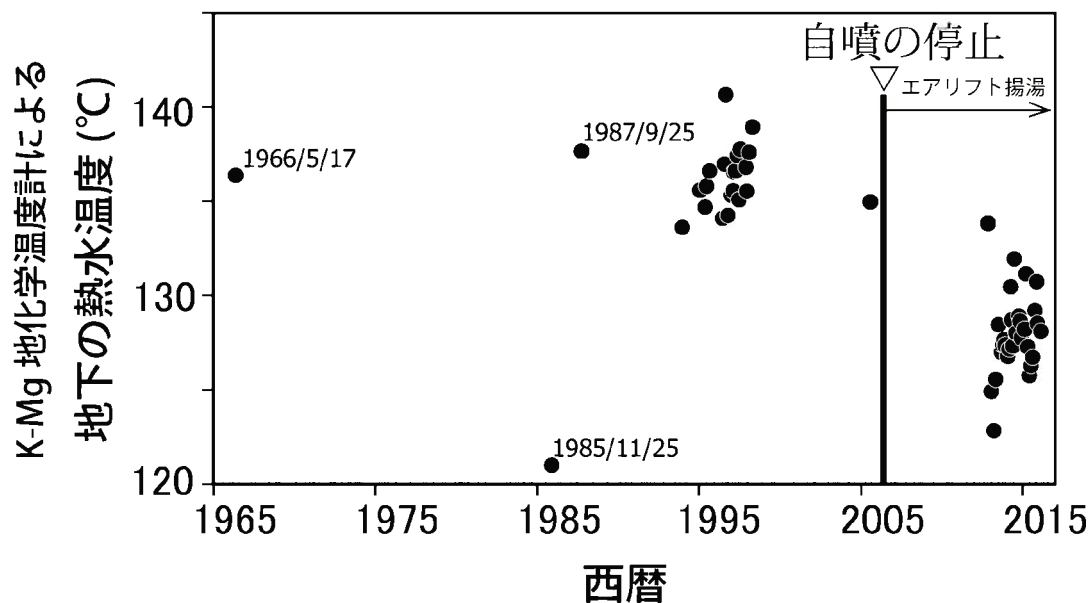


図4 K-Mg 地化学温度計によって推定した天満温泉の地下の熱水温度の経年変化

まず、温泉水の自噴は、地下の熱水が沸騰し、密度を低下させた水蒸気混じりの熱水が  $100^{\circ}\text{C}$  で地表に噴出する現象であると単純に考えることにする。自噴停止以前の地下の熱水温度を、1993年12月15日から1998年4月19日までの平均値  $136^{\circ}\text{C}$ （停止直前の2005年7月31日の熱水温度は  $135^{\circ}\text{C}$  であるため、この平均値の設定は妥当と思われる。）、自噴停止後の地下の熱水温度を、2013年1月24日から2016年2月9日までの平均値  $128^{\circ}\text{C}$  とする。自噴停止以前の地下の熱水が  $136^{\circ}\text{C}$  で沸騰している時の圧力は  $3.22\text{bar}$ 、これが  $100^{\circ}\text{C}$  で地表に噴出した場合、発生する水蒸気の割合は、断熱過程を仮定すると、全体の  $5.7\%$  となる。一方、自噴停止後の地下の熱水が  $128^{\circ}\text{C}$  で沸騰している時の圧力は  $2.54\text{bar}$ 、これが  $100^{\circ}\text{C}$  で地表に噴出した場合、水蒸気の割合は  $5.3\%$  となる。地下の熱水量は自噴停止前後で不変だとすると、沸騰により発生する水蒸気量の減少はわずか  $0.4\%$  にしかすぎないので、水蒸気量の減少による熱水の浮力の低下が自噴停止の主たる原因であるとは直感的には考えにくい。そうなると、二者択一的には、圧力の低下が自噴の停止の主な原因ということになるが、自噴停止前後の圧力差は  $-0.68\text{bar}$  であり、水柱に換算するとだいたい  $-7\text{m}$  と

なり、このくらいの地下水位の変化は自噴する・しないに十分関与できるのでないかと考えられるため、今後、物理学的に踏み込んで検証してみたい。

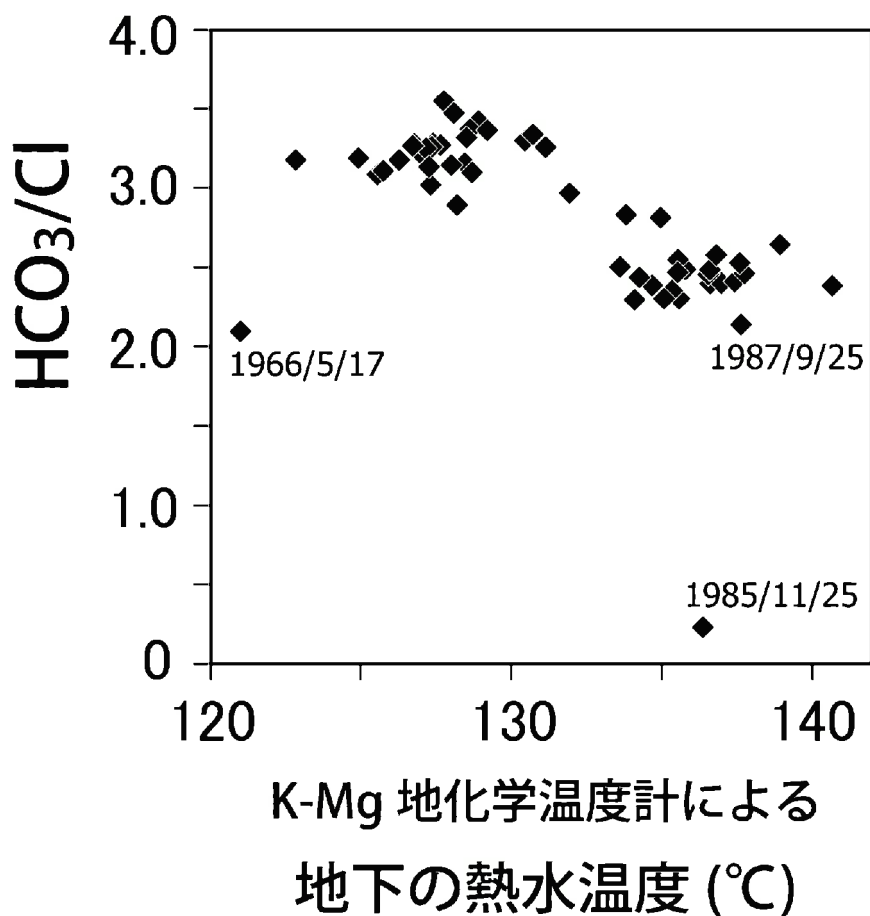


図5 天満温泉の地下の熱水温度 (K-Mg 温度) と温泉水の  $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$  比の関係

**引用文献**

Giggenbach, W.F. (1988) Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52, 2749-2765

大沢信二, 由佐悠紀, 北岡豪一 (1993) 県内温泉の微量成分 (2) アルミニウムの定量的意義と分析上の問題点. *大分県温泉調査研究会報告*, 44, 7-13

大沢信二, 由佐悠紀, 北岡豪一 (1994) 別府南部における温泉水の流動経路. *温泉科学*, 44, 199-208

Yusa, Y., Ohsawa, S., Kitaoka, K. (2000) Long-term changes associated with exploration of the Beppu Geothermal system, Japan. *Geothermics*, 29, 609-625

由佐悠紀, 神山孝吉, 川野田実夫 (1989) 別府温泉南部域の化学成分長期変化について (2). *大分県温泉調査研究会報告*, 40, 21-29



由佐悠紀, 大沢信二, 北岡豪一 (2002) 別府温泉における温泉水系の変動. 大分県温泉調査研究会報告, 53, 1-11

付表 長期間冷暗所に保管されていた試料水の化学分析データ

採取日	水温(°C)	pH	Na(mg/L)	K(mg/L)	Mg(mg/L)	Ca(mg/L)	Cl(mg/L)	SO <sub>4</sub> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> /Cl	地化学温度 K-Mg (°C)	備考
1966/5/17	99	8.5	616	64.5	2.4	31.2	849	105	195	0.23	136	温泉分析書
1985/11/25	100.0	9.0	365	22.9	0.8	1.7	235	100	492	2.09	121	由佐悠紀(1989)
1987/9/25	99.3	8.8	338	18.2	0.2	1.1	219	95.1	468	2.14	138	NEBO(1989)
1993/12/15	100.0		307	14.8	0.2	0.7	186	67.1	465*	2.50	134	
1995/1/18	100.0		314	15.1	0.1	0.5	200	67.9	460*	2.30	136	
1995/5/17	99.2		293	14.2	0.1	0.6	183	64.2	436*	2.38	135	
1995/6/20	99.2		298	14.2	0.1	0.7	181	65.7	450*	2.48	136	
1995/8/24	98.8		323	15.5	0.1	0.3	200	70.5	479*	2.40	137	
1996/6/14	97.7		298	14.1	0.1	0.2	182	62.3	418	2.29	134	
1996/7/26	99.2		310	14.8	0.1	0.2	192	67.2	461*	2.40	137	
1996/8/23	98.9		314	14.9	0.1	0.2	195	67.8	465*	2.38	141	
1996/10/11			301	14.2	0.1	0.2	185	65.5	449*	2.43	134	
1996/12/21			314	14.9	0.1	0.6	198	66.8	465*	2.35	135	
1997/2/5			319	15.1	0.1	0.3	192	65.8	489*	2.55	136	
1997/3/2			314	14.9	0.1	0.4	193	65.5	473*	2.45	137	
1997/4/5			312	14.8	0.1	0.2	190	65.4	473*	2.48	137	
1997/5/11			309	14.6	0.1	0.2	192	65.0	463*	2.41	137	
1997/6/21			310	14.9	0.1	0.3	197	67.3	454*	2.30	135	
1997/7/20			316	15.2	0.1	0.4	194	67.4	477*	2.46	138	
1997/11/24			303	14.3	0.1	0.2	180	64.2	465*	2.57	137	
1997/12/14			302	14.2	0.1	0.4	185	64.5	456*	2.47	136	
1998/2/1			301	14.0	0.1	0.2	181	63.7	458*	2.53	138	
1998/4/19			305	14.4	0.1	0.3	179	65.0	472*	2.64	139	
2005/1/31			302	13.3	0.1	0.5	163	58.0	459	2.81	135	
2012/1/5	96.7	8.9	348	17.5	0.2	0.8	170	60	481	2.83	134	
2013/1/24	92.5	8.9	311	13.2	0.2	1.0	152	58.8	485	3.19	125	
2013/3/18	95.4	8.8	311	13.2	0.2	3.5	152	58.4	483	3.17	123	
2013/4/24	95.7	8.8	312	13.4	0.2	1.8	154	58.6	475	3.08	126	
2013/6/26	96.4	8.7	298	13.8	0.2	0.7	146	58.5	461	3.15	128	
2013/8/27	95.4	8.8	290	13.5	0.2	0.7	142	57.6	458	3.22	127	
2013/10/1	96.9	8.8	290	13.7	0.2	0.6	141	57.8	461	3.28	127	
2013/11/6	96.8	8.9	284	13.7	0.2	0.7	139	57.3	454	3.27	128	
2013/12/3	95.8	8.9	292	13.6	0.2	0.7	141	57.0	459	3.26	127	
2014/1/28	96.7	8.8	293	13.6	0.2	0.8	140	57.9	460	3.28	127	
2014/2/26	96	8.9	288	12.7	0.2	0.6	144	55.1	467	3.25	127	
2014/4/2	96.7	8.7	291	12.8	0.1	0.6	146	55.3	480	3.30	130	
2014/4/24	97.2	8.7	299	12.4	0.1	0.7	154	55.1	477	3.09	129	
2014/5/19	97.1	8.7	303	12.3	0.2	0.7	159	54.5	481	3.02	127	
2014/6/23	96.0	8.7	298	13.0	0.1	0.9	163	61.8	483	2.97	132	
2014/7/29	96.9	8.7	297	12.9	0.2	0.9	163	60.9	512	3.14	128	
2014/9/29	96.8	8.6	294	13.6	0.2	0.8	143	57.1	488	3.42	129	
2014/10/27	96.6	8.7	293	13.4	0.2	0.8	142	56.9	480	3.37	129	
2014/11/26	95.7	8.7	287	13.3	0.2	0.9	138	56.8	488	3.55	128	
2015/2/9	95.7	8.7	304	13.5	0.2	0.6	166	58.3	479	2.89	128	
2015/3/10	96.7	8.7	291	13.5	0.1	0.7	148	57.4	482	3.25	131	
2015/4/23	96.1	8.7	291	13.5	0.2	0.4	152	60.0	475	3.13	127	
2015/5/26	96.8	8.6	292	13.1	0.2	0.8	154	60.6	480	3.11	126	
2015/6/30	96.8	8.7	298	13.5	0.2	0.9	152	60.3	483	3.17	126	
2015/8/6	97.4	8.7	294	13.4	0.2	1.0	151	59.9	492	3.26	127	
2015/9/29	97.4	8.7	294	13.6	0.2	0.7	146	57.6	491	3.36	129	
2015/11/4	97.4	8.7	296	13.5	0.2	0.6	147	54.5	490	3.34	131	
2015/11/25	95.6	8.6	297	13.2	0.2	0.9	148	55.2	490	3.32	129	
2016/2/9	95.7	8.7	285	13.1	0.2	0.8	141	57.1	491	3.47	128	

\*HCO<sub>3</sub>分析値のうち太字で示したものは、溶存イオンの電荷バランスを前提に他の成分の分析値から計算で求めた。

# 大分市の温泉の分類とその分布

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設

黒木 龍介・柴田 智郎

## 要旨

多変量解析の主成分分析法を用いて、大分市内の温泉の化学組成データを解析し、温泉を分類した。その結果、5つのグループに分類することができた。分類した温泉の化学組成と分布状況から、堆積層に貯留する層状温泉と成因の異なる岩盤の割れ目に貯留する裂か状温泉が少なくとも2種類ある。

## 1. はじめに

大分市は九州東部の別府湾南側に位置し、主として標高200m以下の丘陵地帯と沖積平野の大分平野からなる。丘陵は大分川と大野川によって大きく3つに分かれ、西から永興台地、鶴崎台地、丹生台地である。永興台地は大分川左岸に位置し、西に向かって標高が高くなり、高崎山に続く。鶴崎台地は大分川と大野川に挟まれ、標高165.3mの古城山を最高点とする台地上の丘陵である。丹生台地は大野川と丹生川との間にあり、標高は100m以下の丘陵である。それぞれの丘陵は比較的緩やかであるが、丘陵を構成する地層の大分層群が侵食に弱いため、谷は深く、谷壁は切り立っている（吉岡ほか, 1997）。

大分平野は、大分川及び大野川の河口付近を中心に分布し、三角州及び後背湿地として形成されている。大分市の中心街は大分川の河口付近の沖積低地上に発達している。

大分市内では、1960年代後半から温泉開発が進み、平野部や丘陵地帯で数多くの温泉井戸が掘削されている（図1）。温泉水は平野部の700m前後の深層に胚胎しており、温度が比較的高い（吉川・北岡, 1984）。地温は深さ100mあたり、5～7℃の割合で上昇し、ほぼ水平方向に一樣である。しかし、局部的に高温帯が存在し、鉛直方向に流動する構造が指摘されている（北岡, 1987、北岡・川野田, 1991）。温泉水の塩化物イオンとホウ素イオンの関係から、温泉水は海水由来の温泉水・海性堆積岩由来の温泉水・火山岩類由来の温泉水の3つに分類される（大沢, 1996）。本報告では、このような研究成果を踏まえ、その後も開発が続けられている温泉についてまとめる。

## 2. 主成分分析法を用いた温泉の分類

多変量解析の1つの手法である主成分分析法を用いて、大分市内の温泉の化学組成データを解析し、温泉を分類した。なお、本報告では大分県がまとめた大分県温泉情報データベース（大分県, 2014）にある化学組成データを使用した。

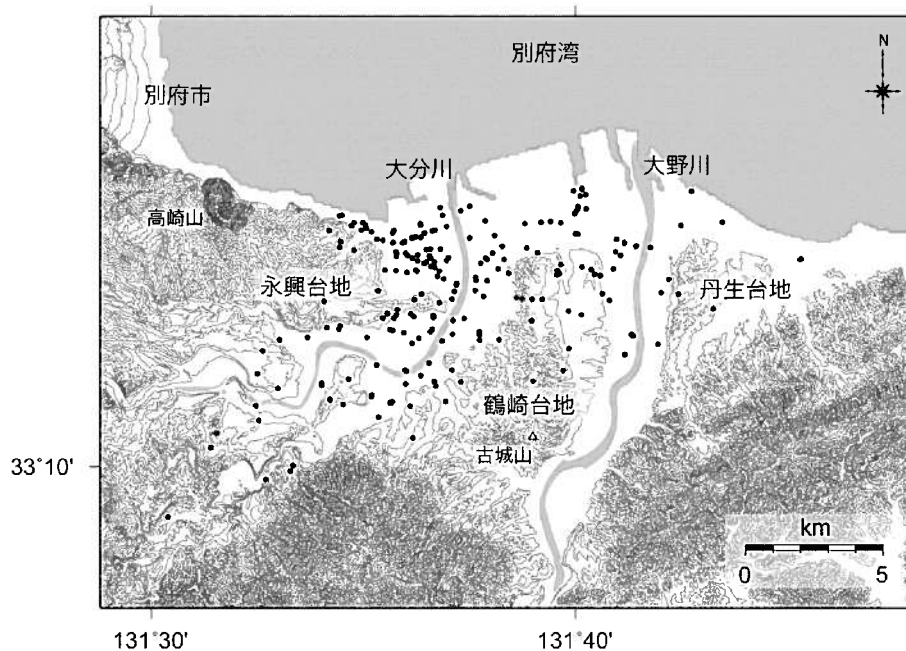


図1 大分市の地形概要と温泉分布。●印は源泉を示す

大分県温泉情報データベースには、大分市内にある 299 の化学組成データがある。しかし、13 データは陽イオンと陰イオンの当量濃度の差が比較的大きいことから解析には使用せず、残りの 286 データを用いた。この 286 データについて、温泉台帳に記載されている地図と照合し、源泉位置の緯度経度を決定した。なお、この 286 データの中には、同じ源泉の分析年月日が異なるデータを含んでいるため、源泉数は 224 である。

温泉水の主要成分であるナトリウムイオン ( $\text{Na}^+$ )・カリウムイオン ( $\text{K}^+$ )・マグネシウムイオン ( $\text{Mg}^{2+}$ )・カルシウムイオン ( $\text{Ca}^{2+}$ )・塩化物イオン ( $\text{Cl}^-$ )・硫酸イオン ( $\text{SO}_4^{2-}$ )・炭酸水素イオン ( $\text{HCO}_3^-$ ) の 7 成分を変数として主成分分析を行い、温泉水の化学組成を数個の特定の化学組成 (ベクトル) で表現した。この主成分分析法を簡単に説明する。

特定のベクトル  $\omega$  に対する各温泉の化学組成 (主成分スコアベクトル)  $f$  は、

$$f = A\omega \quad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{np} \end{bmatrix} \quad (2)$$

で表される。ここで、 $A$  はデータ数  $n$ 、化学成分数 (変数)  $p$  で、各変数について平均偏差をとった  $n$  行  $p$  列の行列、 $\omega$  は各変数にかかる重みベクトル (主成分係数) である。主成分係数  $\omega$  はその内積  $(\omega, \omega)$  が 1 という制約条件の下で主成分スコアの分散  $(f, f)/n$  が最大になるように定める。実際には、 $\omega$  は  $A$  の分散共分散行列の固有ベクトルとして計算することができ、 $f$  が求まる。なお、 $A$  の分散共分散行列  $C_{\omega}$  は  $A$  と  $A$  の転置行列  $A'$  の積を

表 1 第 1 主成分 (PC1) 係数, 第 2 主成分 (PC2) 係数と平均値

	PC1	PC2	Mean (mg/L)
Cl <sup>-</sup>	0.963	-0.266	1900
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.266	0.963	1076
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.00011	-0.00049	0.3
Na <sup>+</sup>	0.029	0.0039	59.6
K <sup>+</sup>	0.00056	-0.00023	2.6
Mg <sup>2+</sup>	0.0018	0.0045	4.9
Ca <sup>2+</sup>	0.0015	-0.0023	4.3
寄与率 (%)	93.4	6.5	

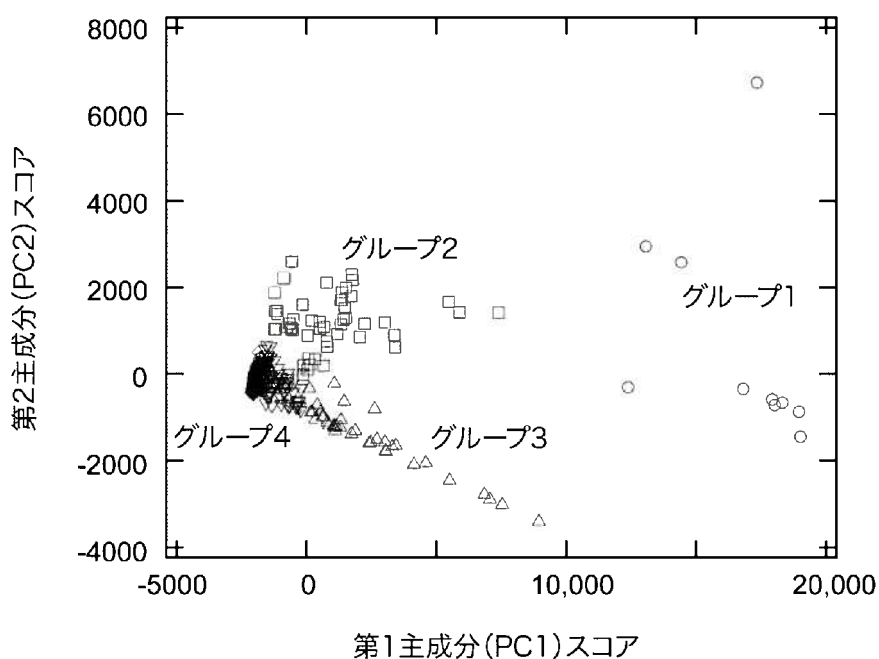


図 2 第 1 主成分 (PC1) スコアと第 2 主成分 (PC1) スコアの関係

$n$  で割ったものである。つまり、分散共分散行列  $C_{ii}$  は

$$C_{ii} = 1/n A' A \tag{3}$$

と表せる。

そこで、286 データ ( $n$ ) と主要 7 成分 ( $p$ ) を行列  $A$  とし、主成分分析法を用いて解析した。得られた第 1 および第 2 主成分係数を表 1 に示す。第 1 主成分 (PC1) 係数は塩化物イオン、第 2 主成分 (PC2) 係数は炭酸水素イオンの変量が高い。第 1 主成分係数の寄与率が 93.4% と高く、第 1 主成分係数の影響が大きい。

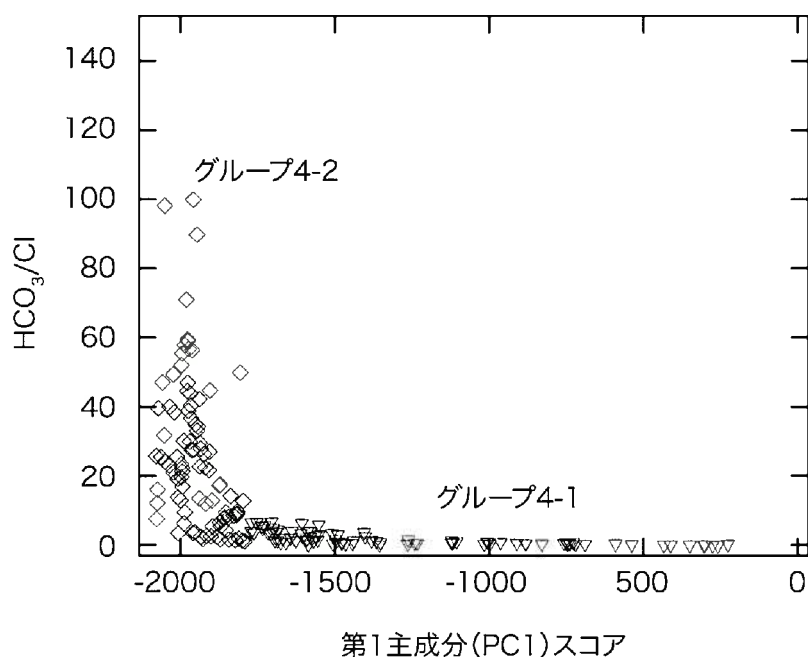


図3 グループ4の第1主成分(PC1)スコアと $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ 比の関係

第1主成分(PC1)スコアと第2主成分(PC2)スコアの関係を図2に示す。主成分スコアは各データの主成分係数に対する大きさ(内積)を示すもので、その値は主成分係数の影響の相対的な割合を意味する。また、原点は解析したデータの平均値を示しているため、たとえ主成分スコアが負であるデータについても、その主成分の影響があることを示している。その結果、温泉水は次のグループに分ける。グループ1は第1主成分スコアが他のグループよりも高いもの、グループ2は第1主成分スコアと第2主成分スコアが比較的高いもの、グループ3は第1主成分スコアが比較的高く第2主成分スコアが低いもの、グループ4はそれ以外のものとする。しかし、グループ4には186データが含まれているので、図3に示すような第1主成分スコアと $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ 比の関係から、第1主成分スコアが大きく、 $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ 比が低いグループ4-1と第1主成分スコアが小さく、 $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ 比が高い4-2とに分け、全体を5つのグループに分類した。

### 3. 温泉の分布

温泉には、堆積層などの地層に貯留する層状温泉と岩盤の中の構造や割れ目に貯留する裂か状温泉がある。層状温泉の分布は、貯留層となる地層の形状によって異なるが、一般的に水平方向に広がっているため、水平面内では等方的になる。一方、裂か状温泉の分布は、貯留している岩盤の構造や割れ目に支配されているため、割れ目に沿った方向性をもつ。つまり、層状温泉と裂か状温泉の分布は異なり、層状温泉は等方的に分布するが、裂か状温泉は異方性を示す。そこで、2源泉間の水平面内の角度を調べ、温泉の分布の異方

性の有無から、温泉の貯留機構を推定する。

2 源泉間の角度分布は、源泉間距離が短い場合には局所的な影響を、長い場合には広域的な影響を反映する。源泉間距離の影響を小さくするために、すべての源泉間の角度分布を調べ、分布の歪みが小さくなる源泉間距離を調べた。一般に、分布特性を示すものとして、1次モーメントの平均値、2次モーメントの分散がよく用いられるが、さらに分布型の違いを示すものとして3次モーメントの歪度、4次モーメントの尖度がある。歪度は分布の対称・非対称性を示す指標であり、対称的な分布では0となる（稲垣，2003）。源泉間の距離を変化させ、角度分布の歪度を調べた（図4）。その結果、源泉間距離が5km以内の時に、歪度がほぼゼロになり、分布が対称的になることから、各グループについて5km以内にある源泉間の角度分布を調べた。

各グループの角度の頻度分布をローズダイアグラムにして図5に、その分布を図6に示す。グループ4-1は、すべての源泉で得られた分布と同じようにすべての方向に一様に広がっていることから、層状温泉である。しかし、グループ1～3は佐賀関断層に平行の東北東-西南西方向に、グループ4-2は府内断層に平行の東南東-西北西方向が卓越していることから、裂か状温泉である。

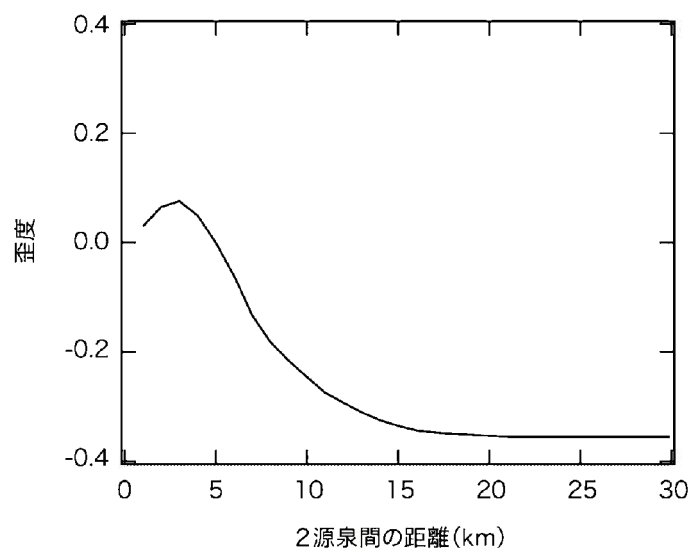


図4 2 源泉間の距離とその角度について分布の特性

#### 4. 考察

上記のように5つに分類した温泉について、塩化物イオンと炭酸水素イオンの関係を図7に示す。図7には、海水（日本海洋学会，1991）と網田ほか（2005）が示した大分平野で見られるプレート脱水流体を併せて示す。グループ1は、プレート脱水流体が示す組成に近傍に分布し、グループ2の延長上にある。一方、グループ3は炭酸水素イオン濃度が低く、塩化物イオン濃度の延長上に海水組成がある。また、グループ4-2は濃度が低いと

ころに分布する。

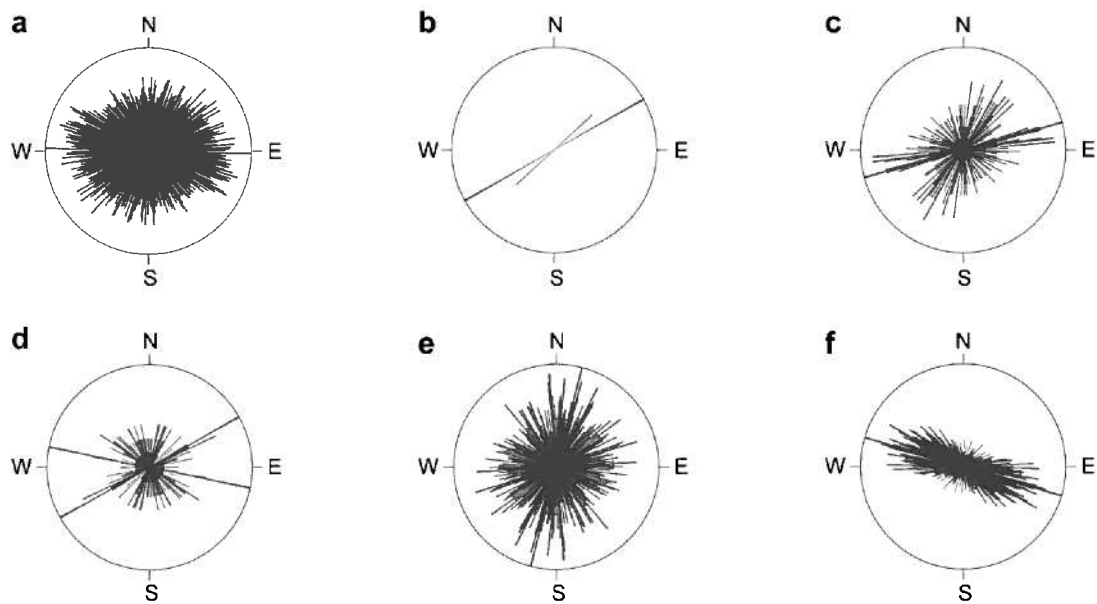


図5 源泉間角度の頻度分布を示したローズダイアグラム。(a) すべての源泉, (b) グループ1, (c) グループ2, (d) グループ3, (e) グループ4-1, (f) グループ4-2

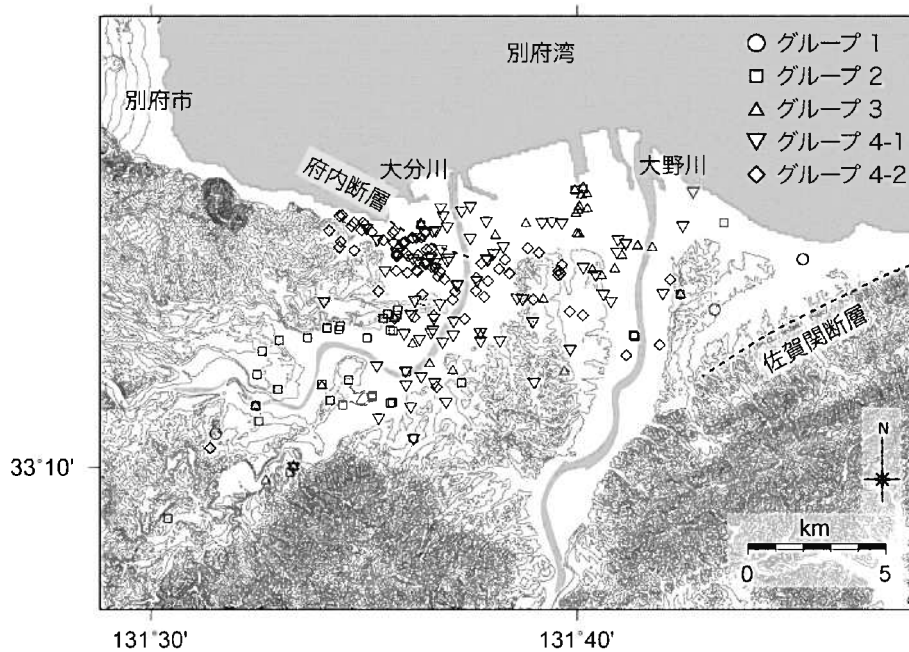


図6 各グループの温泉分布

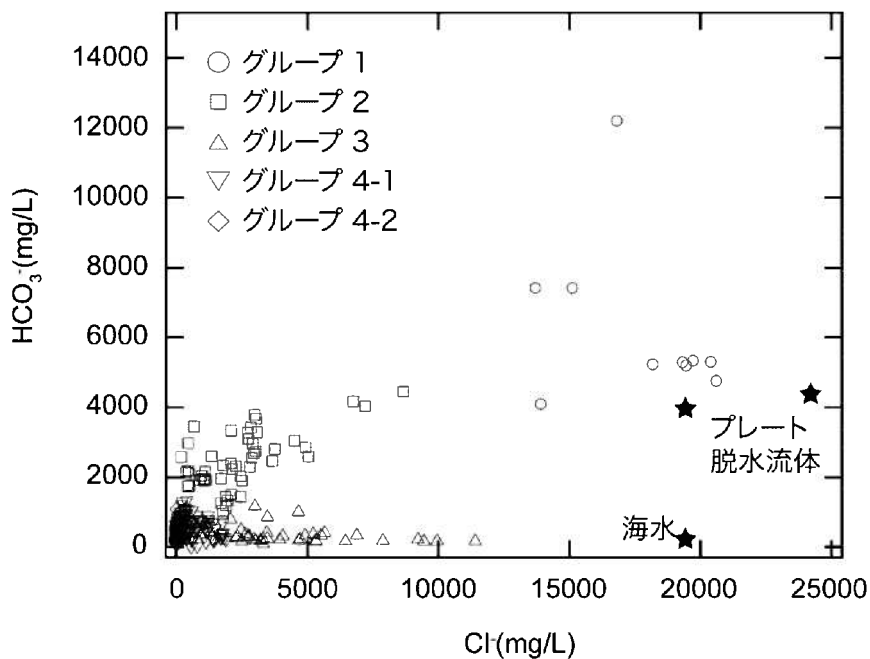


図7 各グループの塩化物イオン (Cl<sup>-</sup>) 濃度と炭酸水素イオン (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) 濃度の関係。★印は、海水 (日本海洋学会, 1991) と大分市の温泉で得られたプレート脱水流体 (網田ほか, 2005) を示す。

温泉の分布と塩化物イオンと炭酸水素イオンの関係から、グループ1と2の温泉は佐賀関断層に平行に分布、化学組成がプレート脱水流体に近いことから、この流体が含まれている可能性がある。また、グループ3は海水との混合が示唆され、大沢 (1996) で報告された海水由来の温泉水もしくは海性堆積岩由来の温泉水と思われる。グループ4-2は成分濃度が低く、府内断層に平行しているので、この断層に関連した構造性の温泉である可能性が高い。一方、グループ4-1は等方的に分布し、化学組成もすべてのグループの中間的な濃度に位置していることから、地層内で混合して生成した層状温泉であると考えられる。

### 5. おわりに

大分市内の温泉について、大分県温泉情報データベース (大分県, 2014) にもとづき、多変量解析の1つの手法である主成分分析を用いて温泉を分類した。大分市内の温泉は5つのグループに分類することができ、化学組成と温泉分布から温泉の貯留機構や成因を推定した。

### 謝辞

本研究を実施するにあたり、大分県から温泉情報データベース・温泉台帳など貴重な情報を提供していただいた。記して謝意を示す。



### 引用文献

- 網田和宏・大沢信二・杜 建国・山田 誠 (2005) : 大分平野の深部に賦存される有馬型熱水の起源. 温泉科学, 55, 64-77.
- 稲垣宣生 (2003) : 数理統計学 (改訂版). 裳華房, 328p.
- 大分県 (2014) : 大分県温泉情報データベース (CD-ROM).
- 大沢信二 (1996) : 大分平野の温泉水の起源について. 大分県温泉調査研究報告, 47, 34-42.
- 北岡豪一 (1987) : 大分市における地温勾配と深層温泉源の分布. 大分県温泉調査研究報告, 38, 7-22.
- 北岡豪一・川野田実夫 (1991) : 大分市温泉の化学成分の分布とその変化. 大分県温泉調査研究報告, 42, 1-10.
- 吉川恭三・北岡豪一 (1984) : いわゆる深層熱水型温泉について. 大分県温泉調査研究報告, 36, 1-12.
- 日本海洋学会 (1991) : 海と地球環境. 東京大学出版会, 409p.
- 吉岡敏和・星住英夫・宮崎一博 (1997) : 大分地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 65p.

# 姫島火山群の第四紀溶岩中の地殻起源捕獲岩の地球化学的特徴 2

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設

柴田知之・Khadidja Abbou-kebir  
芳川雅子・竹村恵二

## 要旨

国東半島北東に位置する姫島火山群の焼野岳に陥入する金溶岩中の捕獲岩の地球化学的特徴を明らかにするため、同地域から採取した捕獲岩について、偏光顕微鏡観察を行った。その結果、柴田ほか(2014)で報告された片麻岩に加え、閃緑岩と角閃岩が新たに観察された。柴田ほか(2014)は片麻岩が領家変成岩帯起源である可能性を指摘している。このことを、より詳細な解明に向け、本報告ではまず、捕獲岩の詳細な岩石記載を報告する。

## 1. はじめに

姫島には九州の火山フロント上に位置する火山群があり(図1)、角閃石ダイサイト、黒雲母含有角閃石流紋岩、及び、ザクロ石流紋岩の溶岩および火砕岩からなる姫島火山岩で構成される(伊藤, 1990; 伊藤ほか, 1997)。姫島火山岩中には、地殻起源捕獲岩が観察されることがある。捕獲岩は金溶岩の中に多く観察される。姫島火山岩を形成したマグマの起源に、地殻物質が関与していることが指摘されているが(氏家・伊藤, 1991; Shibata et al., 2013)、この地殻物質がどのようなものであったかはよくわかっていない。そこで、地殻物質の断片であると考えられる捕獲岩から、マグマ起源への地殻物質の寄与に関する情報を得ることをめざす。

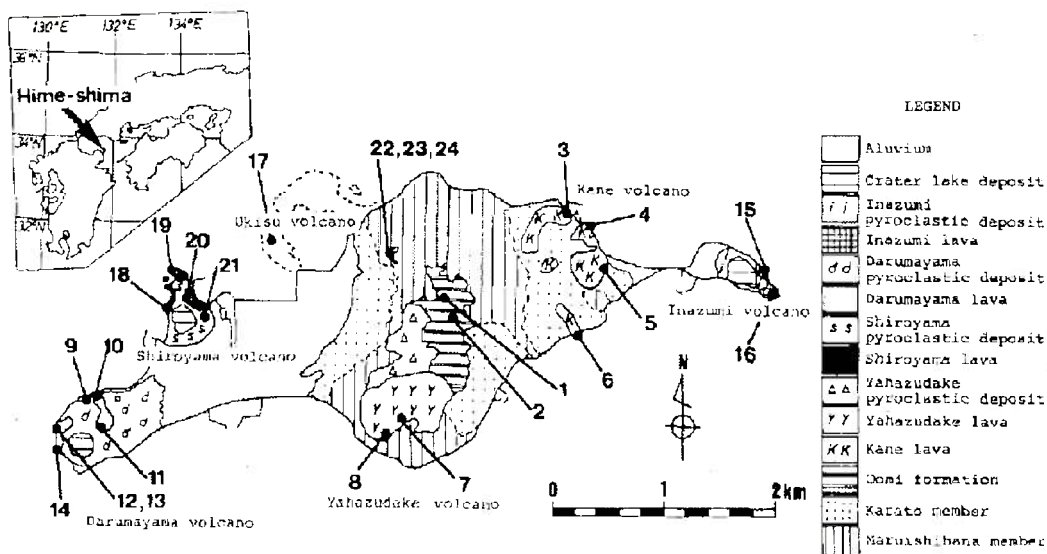


Fig. 1. 姫島の地質図と試料採取地点。伊藤(1990)に加筆。

## 2. 試料

金溶岩中から採取した 10 試料、大海溶岩から採取した 1 試料、計 11 試料の捕獲岩について、岩石薄片を作成し偏光顕微鏡で観察した。その結果、これらの捕獲岩のうち 9 試料が閃緑岩で、残り 2 試料は片麻岩と角閃岩であった。また、閃緑岩の一部と片麻岩、片麻岩にはジルコンが観察され、1 試料の閃緑岩と片麻岩にはザクロ石が観察される。

## 3. 岩石記載

### 3. 1 閃緑岩類

#### HX12-03/03

顕晶質で等粒状から斑状の組織を示す。鉱物は様々な方向に配列し、有色鉱物と無色鉱物の間に漸移的に片麻状組織を形成する。集積状の斜長石、アルカリ長石、黒雲母、石英からなり、少量のザクロ石と角閃石が含まれる。オーバーグロース、波動消光、キンクバンド、不連続な双晶、焼きなまし双晶、不規則又は葉状の鉱物表面構造、ネオブラストなど、固体状態で変形を受けた特徴が観察される。

#### HX12-11/11'

等粒状である。石英のみは粒径が小さく割れ目を埋めている。集斑状の無色鉱物の間の割れ目に沿って、寄木状組織が発達している。HX12-03/03 と比べが片麻構造がより発達し、ネオブラストと初生的な黒雲母の斑状変晶が多く、固体状態での変形がより進んでいる。また、ザクロ石は観察されず、石英は少ない。少量の平板状ないしプリズム状の珪線石が認められ、その多くは黒雲母が分解した長石類と石英の集合体に伴われる。

#### HX12-02/02'

非等粒状で、HX12-03/03 と HX12-11/11 と比べ粒径が大きい。集斑状の斜長石、アルカリ長石、黒雲母からなる。少量の角閃石と珪線石が観察される。捕獲岩と母岩の境界に、細粒の無色鉱物（長石類）と酸化物を含む破碎された黒雲母が形成されている。石英は観察されず、角閃石が HX12-03/03 と HX12-11/11 と比べ多い。また、黒雲母はより少ないがより粗粒であり、網状の多色性と 60-120°の劈開が観察される。黒雲母と角閃石の連晶が観察されるときがある。鉱物組合せとその組織は HX12-11/11 に類似する。

#### HX12-01, HX12-04, HX12-06, HX12-08a, HX12-08b, HX12-08c

これらの試料は、溶岩中に小球状に捕獲されていて、その組織は深成岩と火山岩の中間的特徴を示す。鉱物組合せは、HX12-11/11' と HX12-02/02' に類似する。

### 3. 2 片麻岩

#### HX12-12/12

典型的な斑状変晶質で、ザクロ石のスノーボール組織が認められ、片麻の方向がそこで変化している。片麻には優白部（主に斜長石からなり少量の石英を伴う）と優黒部（主に黒雲母からなり珪線石とヘルシナイトを伴う）からなる流理構造と帯状構造が見られる。カタクラスティックな角ばった粒子、波打ったり破壊された粒子、縮緬皺層理、引き伸ば

されたり平滑化されたり短くなったりした他形結晶などの、ブリットルな変形と塑性変形両者の特徴を示す。繊維状の珪線石が認められる。破碎されたプリズム状の珪線石は、片理構造を切っていて、多段階の変形履歴を意味する。珪線石の多くは黒雲母の分解物であり、両者は密に接している。ザクロ石の周りではまれに、黒雲母と鉄酸化物の反応縁が認められる。稀に、珪線石とヘルシナイトのザクロ石の偽晶が認められる。

### 3. 3 角閃岩

著しく片理が発達し、粗粒で、構成鉱物の約半分を角閃石と黒雲母の有色鉱物がしめる。鉱物の定向配列、キンクバンド、多角形の斜長石ネオブラストが認められる。角閃石と黒雲母は密に接し連晶を形成する。少量のスピネル、ごく微量の斜方輝石、ジルコンが認められる。

伊藤順一(1990)J. Miner. Petrol..Econ. Geol. 85, 541-558.

伊藤順一ほか(1997) 地域地質研究報告 5万分の1地質図幅, 姫島, 地質調査所

柴田ほか(2014) 大分県温泉調査会報告

氏家修・伊藤順一(1991) J. Miner. Petrol..Econ. Geol. 85, 65-71.



# 大分県内の火山岩類の化学・Sr-Nd同位体組成 (その1) 鶴見岳・由布岳

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設

芳川 雅子・柴田 知之  
公門 駿・杉本 健\*  
竹村 恵二

(\*現：地熱エンジニアリング株式会社)

## 1. はじめに

温泉が湧出している地域の火山岩の化学分析値は、天水の涵養から温泉水湧出までの経路を議論する際の基礎データとなる。大分県内の活火山の中でも化学分析値が比較的報告されている由布岳・鶴見岳について、全岩の主要・微量元素組成および Sr-Nd 同位体比について文献値をまとめた。また不足するデータについては、新たにデータを得たので報告する。

## 2. 文献値のまとめ

火山岩類の全岩主要元素組成 (SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 全鉄を FeO に換算した FeO\* (もしくは Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO), MnO, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) は、星住ほか(1988)・太田ほか(1990)・竹村・由佐(1993)・竹村ほか(1994)・Sugimoto et al.(2006)によって報告されている。太田・青木(1991)は、蛍光 X 線分析装置を用いた全岩微量元素組成 (V, Cr, Ni, Co, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, Ce) と Sr 同位体比を報告している。Sugimoto et al.(2006)は蛍光 X 線分析装置で得られる微量元素 (Cr, Co, Ni, Rb, Sr, Zr, Nb, Ba) に加えて誘導結合プラズマ質量分析法によって得られた Sc, Y, Cs, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Pb, Th, U 濃度と Sr-Nd-Pb 同位体比を示している。

## 3. 試料および分析方法

竹村・由佐(1993)で主要元素組成の報告された試料については微量元素組成を、Sugimoto et al. (2006)で主要・微量元素組成のみが報告された試料については Sr-Nd 同位体比分析を新たに行った。

実験に用いた試薬は、ミリポア製 Milli-Q SP (電気伝導度 18.3M Ω) で精製した Milli-Q 水を蒸留した水、フッ化水素酸・過酸化水素水・硝酸・過塩素酸は多摩化学工業超高純度試薬、Eichrom Sr 樹脂、Eichrom Ln 樹脂である。

粉碎岩石試料は洗浄済みのテフロンピーカーに分取し、濃フッ化水素酸・過塩素酸を加えた後ホットプレートで加熱分解後に蒸発乾固した。乾固後の試料を塩酸と過塩素酸の混酸で溶かして蒸発乾固した。微量元素組成測定用試料は、測定する元素に応じて硝酸や塩酸を加えて乾固後に標準添加溶液を適量加えた後、5% HNO<sub>3</sub> もしくは 5% HNO<sub>3</sub> + 0.1% HF

の混酸で希釈した。同位体分析用試料は、塩酸を加えて蒸発乾固後に 1ml の 2.5M HCl を加え、試料溶液を Biorad AG50W-X12 を用いたオープンカラムで Sr に富むフラクションと Nd に富むフラクションに分離した。その後、それぞれのフラクションを蒸発乾固後、Sr に富むフラクションは 3M HNO<sub>3</sub> に溶かし Eichrom Sr 樹脂を用いたイオン交換法で、Nd に富むフラクションは 0.25M HCl で溶かした後 Eichrom Ln 樹脂を用いたオープンカラムによって Sr と Nd をそれぞれ単離した (Shibata et al., 2007)。

微量元素組成・Sr-Nd 同位体比は、京都大学理学研究科附属地球熱学研究施設に設置されている誘導結合プラズマ質量分析計 (ThermoFinnigan XSeries 2) と表面電離型質量分析計 (ThermoFinnigan MAT262) を用いて測定した。

#### 4. 結果と考察

文献値および新たに得た主要元素組成を全アルカリ - シリカダイアグラムにプロットした (図 1)。鶴見岳・由布岳双方の試料とも、玄武岩質安山岩からデイサイトの領域に位置する。由布岳の試料でデイサイトに位置するものは一試料のみである。文献値に加えて新たに分析した鶴見岳・由布岳の全岩微量元素組成を始源マントルで規格化した図を示した (図 2)。両者のパターンは良く似ており、重希土類元素 (Gd~Lu) に対して軽希土類元素 (La~Eu) やイオン半径の大きな親石元素 (例えば Rb, Cs, Ba, Sr) に富んだ左上がりのパターンを示す。島弧火山岩の特徴とされる Nb の負異常と Pb・Sr の正異常が確認される。また原因は不明だが、多数の鶴見岳試料から Y の正異常が観察される。図 3 には、文献値と新たに得た Sr-Nd 同位体比を示す。鶴見岳・由布岳ともに中央海嶺玄武岩 (MORB) と比べるとやや高い Sr 同位体比、低い Nd 同位体比を示す。この特徴は、Sugimoto et al. (2006) で考察された、沈み込んだ堆積物由来成分の付加によるものと推測される。鶴見岳は Nd 同位体比の変化が乏しく、Sr 同位体比の変化が大きいものに対し、由布岳は Sr 同位体比の変化が乏しく Nd 同位体比の変化が大きいという傾向が新たに観察された。さらなるデータの蓄積によって、両火山の形成に関わった起源物質の違い等について検討できる可能性がある。

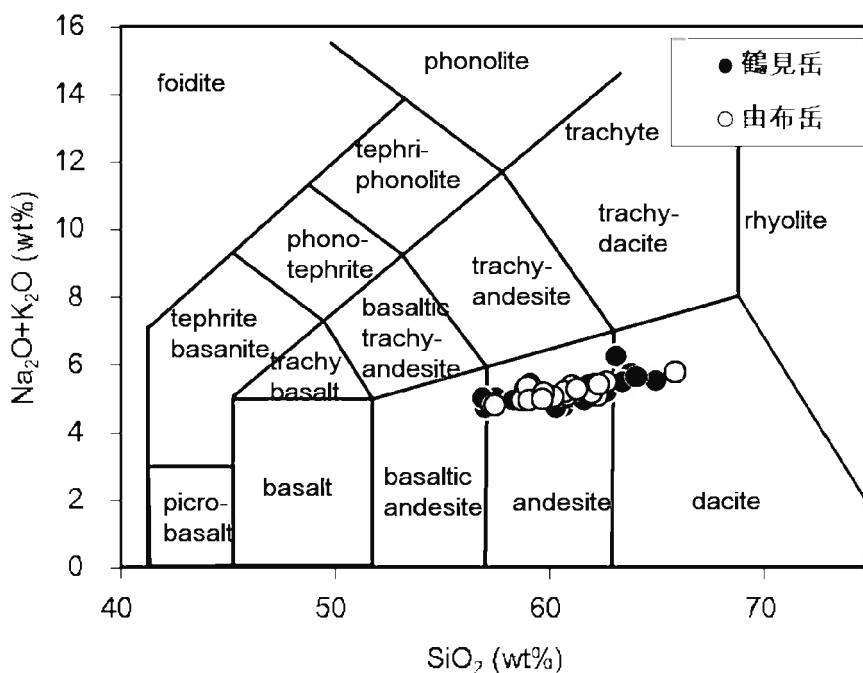


図1. 全アルカリ-シリカダイアグラム (Le Bas et al., 1992)

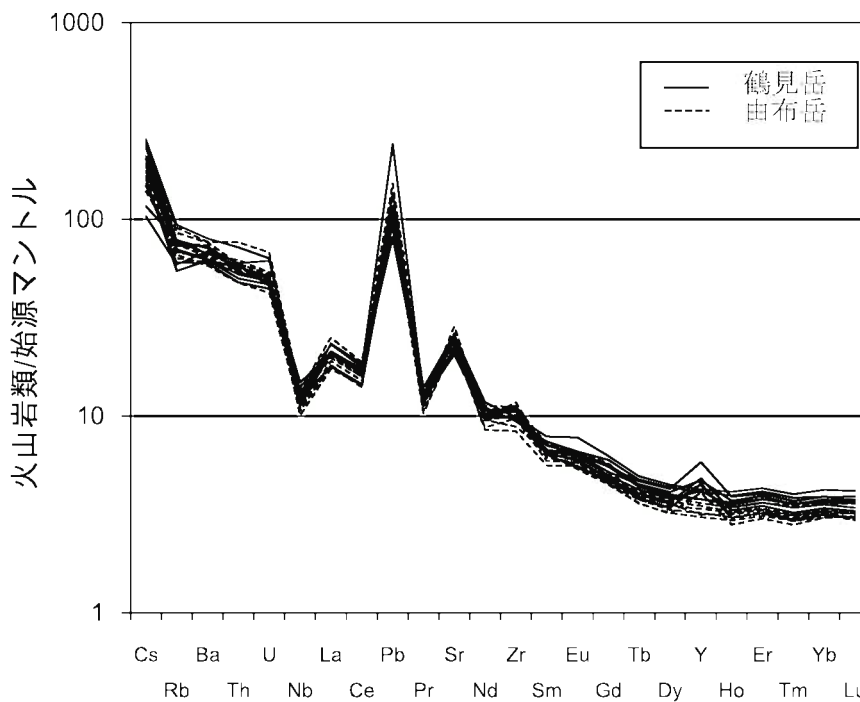


図2. 始源マントル (Sun & McDonough, 1989) で規格化した鶴見岳・由布岳火山岩類の微量元素組成 Sugimoto et al. (2007) のデータを含む。



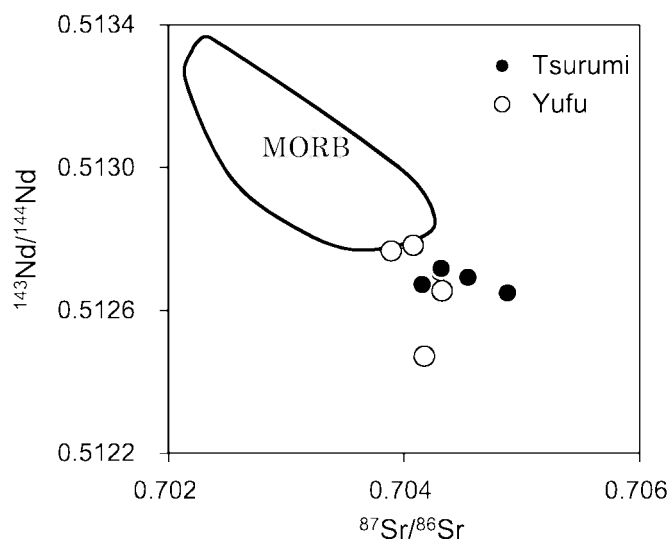


図3. 鶴見岳・由布岳のSr-Nd同位体比  
Sugimoto et al. (2006)のデータを含む  
中央海嶺玄武岩 (MORB) の領域はPetDBによる。

## 5. まとめ

鶴見岳・由布岳の全岩試料の主要・微量元素組成および Sr-Nd 同位体比を新たに求め、文献値とともに検討した。主要・微量元素組成では、両者の組成幅や特徴に明瞭な違いは観察されないが、Sr-Nd 同位体比では異なっている可能性が指摘できた。今後の火山岩の Sr-Nd 同位体比の蓄積によって温泉水や湧水の経路の明確化が期待できる。

## 参考文献

- 星住英夫・小野晃司・三村弘二・野田徹郎 (1988) 別府地域の地質. 地域地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅). 地質調査所, 131pp.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., and Woolley, A.R. (1992) The construction of the total alkali-silica chemical classification of volcanic rocks, *Mineralogy and Petrology*, 46, 1-22.
- 太田岳洋・長谷中利明・藤巻宏和 (1990)大分県中部,由布・鶴見火山群の地質と岩石, *岩鉱*, 85, 113-129.
- 太田岳洋・青木謙一郎 (1991) 由布・鶴見火山群における安山岩マグマの成因-二端成分マグマ混合モデル-*岩鉱*, 86, 1-15.
- PetDB Petrological Database of the Ocean Floor, <http://www.earthchem.org/petdb>
- Shibata, T., Yoshikawa, M. and Sugimoto, T. (2007) Semi-automatic Chemical Separation System for Sr and Nd isotope analyses. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 102, 298-301.

- Sugimoto, T., Shibata, T., Yoshikawa, M. and Takemura, K. (2006) Sr-Nd-Pb isotopic and major and trace element compositions of the Yufu-Tsurumi volcanic rocks: implications for the magma genesis of the Yufu-Tsurumi volcanoes, northeast Kyushu, Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 101, 270-275.
- Sun, S.-S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A.D., Norry, M.J. (Eds.), *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society Special Publication, vol. 42, pp. 313-345.
- 竹村恵二・由佐悠紀 (1993) 別府地域の火山岩調査, 大分県温泉調査研究会報告, 44, 15-24.
- 竹村恵二・由佐悠紀・馬渡秀夫 (1994) 別府地域の火山岩調査 (2) 北部地域, 大分県温泉調査研究会報告, 45, 11-20.



# 大分県万年山周辺の表層電気伝導度分布

京都大学理学研究科地球熱学研究施設火山研究センター

鍵山恒臣・宇津木 充  
吉川 慎

## 要旨

万年山周辺において表層の電気伝導度分布を調査した。その結果、伐株山周辺を除いては地熱流体の深部からの供給を示唆するような高電気伝導度域は見いだされなかった。万年山の東側では、小倉岳から玖珠川流域を経て硫黄山にいたる線と小倉岳から町田川流域を経て麻生鶴温泉に至る線に挟まれた三角地帯において高電気伝導度が計測されている。この三角地帯内では、西北西-東南東方向に高電気伝導域が配列しているが、万年山の山体部にまでは延びていない。こうした結果を考慮すると、九重火山群硫黄山付近から三角地帯に延びるなんらかの構造線が存在し、深部から地熱流体が浅部に供給され、既存の西北西-東南東方向の断層に沿って地熱流体が地表にまで上昇していることが考えられる。

## 1. はじめに

万年山は、九重火山群の北西方に位置し、九重火山群およびその北側に位置する壁湯、宝泉寺などの温泉群の西側延長に位置している。また、別府万年山断層系の西部を構成している場所でもある。九重火山群および宝泉寺などの温泉群が西側の延長でどのようなになっているか？万年山断層系とどのような関係がみられるか？といった観点からたいへん興味を持たれる。鍵山・他（2014）は、九重火山群の周辺において表層電気伝導度分布を調査し、九重火山群を構成する個々の火山の山麓において高電気伝導度領域を認めている。これらについては、九重火山群のマグマ起源の揮発性成分が地下水とともに流下して形成されている可能性を指摘している。また、町田川流域周辺において高電気伝導度域が延びていることを指摘し、この領域に存在する地熱活動がどのように維持されているのか、猪牟田カルデラとの関係はないのかなどの疑問を示している。こうした背景から、万年山周辺において VLF-MT による表層電気伝導度調査を実施して同地域の電気伝導度分布を明らかにするとともに、周辺における調査結果も合わせてより広域の表層電気伝導度分布についても検討をおこなった。以下に調査および検討結果を報告する。

## 2. VLF-MT による別府から万年山にいたる広域の表層電気伝導度分布

調査は、万年山周辺において 2015 年 4 月から 2016 年 2 月にかけて順次実施した。図 1 には、以前に行った調査結果も加えて別府から万年山にいたる広域の電気伝導度分布を示す。なお、緯度、経度 1 分ごとにメッシュを切り、複数の測定点がメッシュ内に存在する場合は、平均値をそのメッシュ上の値としている。全体的な傾向として、以下に示す特徴があげられる。万年山およびその近傍の地域は、 $50 \mu \text{S/cm}$  以下の低電気伝導度を示しており、九重町に見られた温泉活動に対応した高電気伝導度域は顕著には見られない。また、別府から万年山にいたる広域の分布に注目すると、鶴見・伽藍・由布岳等の

火山群、九重山および鹿伏牧場から野稲岳、崩平山にいたる猪牟田カルデラを埋積している領域、万年山およびその南側の亀石山・吉武山を含む地域において、 $50 \mu\text{S/cm}$  以下の低電気伝導度を示し、それぞれの境界部に高電気伝導度領域が分布している。こうした火山体の領域は、溶結した噴火堆積物に覆われているために表層付近に地下水が存在せず、硫黄山など限定された地熱活動域を除けば熱変質も進んでいないことを反映していると思われる。一方、高い電気伝導度を示す領域は、火山体の山麓部に位置し、マグマから供給される揮発性成分が地下水に溶けて周辺に広がっていると思われるが、この地域のテクトニクスを反映した分布を示すものも見られる。たとえば、由布院盆地南縁に位置する由布院断層から鹿伏岳の北側に位置する野上川流域などがあげられる。また、玖珠川以西の領域（町田牧場、小倉岳、壁湯温泉、宝泉寺温泉、川底温泉など）では、 $100 \mu\text{S/cm}$  以上の高電気伝導度を示している。

由布院から野上川流域に延びる高電気伝導度域については、別府-万年山断層帯の図（たとえば九州活構造研究会, 1989）と比較すると、由布院断層以西では直接に対応する断層は示されていないが、鍵山・他(2010, 2014)は、なんらかの断層が続いている可能性を指摘していた。本調査により、周辺の測定点を増やした結果、より明瞭に高電気伝導度域が続いていることが明らかとなった。

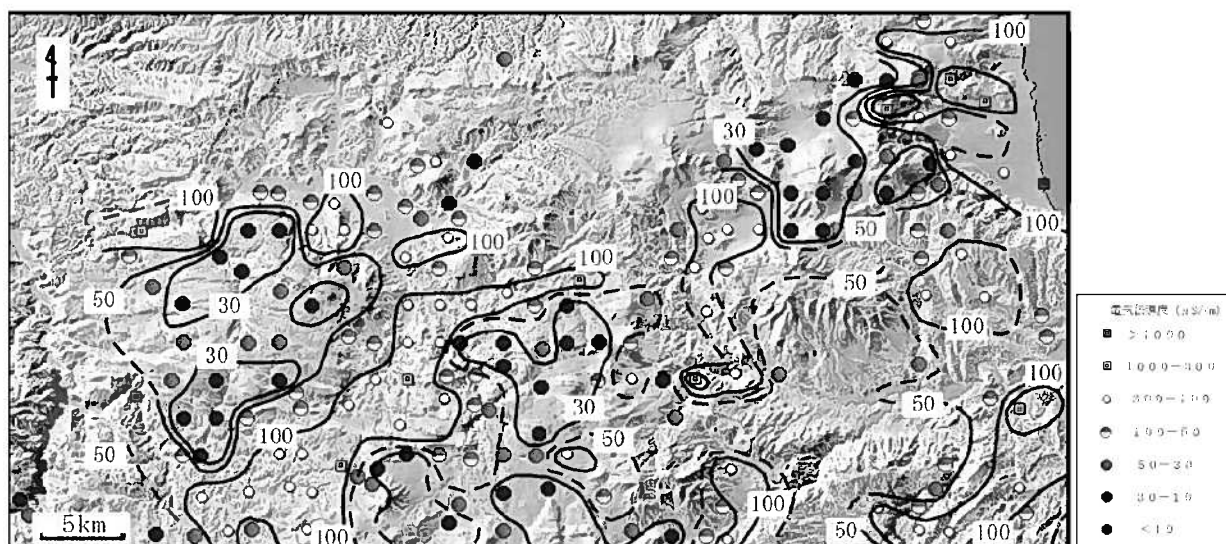


図1 VLF-MTによる別府から万年山にいたる広域の表層電気伝導度分布（単位は $\mu\text{S/cm}$ ）。  
（地図は、国土地理院のウォッチーズおよびカシミールによる）

### 3. 万年山周辺の表層電気伝導度分布

前節の広域電気伝導度分布の検討結果をふまえて、万年山周辺の表層電気伝導度分布について検討を行った。図2にその結果を示す。図1と同様、緯度、経度30秒ごとにメッシュを切り、複数の測定点がメッシュ内に存在する場合は、平均値をそのメッシュ上の値としている。全体的な傾向として、万年山の山体部では $50 \mu\text{S/cm}$  以下の低電気伝導度を示している。また、北東側に位置する青野山や東側に位置する鹿伏山・崩平山などの領域も $50 \mu\text{S/cm}$  以下の低電気伝導度を示している。一方、万年山の北側には、天ヶ瀬温泉や玖珠盆地において $50 \mu\text{S/cm}$  以上、ところによっては $100 \mu\text{S/cm}$  以上の高い電気伝導度を示す領域が東北東-西南西方向に延びている。また、万年山と青野山の間には、北北西-南南東方向に高電気伝導度域が延びている。この高電気伝導度域は、小倉岳付近で2方向に分かれ、一方は野上川に沿って東北東-西南西方向の高電気伝導度域となっている。この領域は由布院断層に続くもの

である。また残りの一方は、ほぼ南方向に幅を広げながら伸びており、鹿伏山・崩平山の低電気伝導度の西縁にそって硫黄山方向に延びる線と町田川（万年山東縁）に沿って麻生鶴温泉まで南下する線に挟まれた三角地帯に高電気伝導度域が広がっている。また万年山の南側では、杖立温泉から麻生鶴温泉を経て町田牧場にいたる西北西－東南東方向に高電気伝導度域があり、上述の三角地帯の南縁となっている。さらにその南にも、岳温泉および奴留湯温泉を通り西北西－東南東方向に延びる高電気伝導度域を認めることができる。

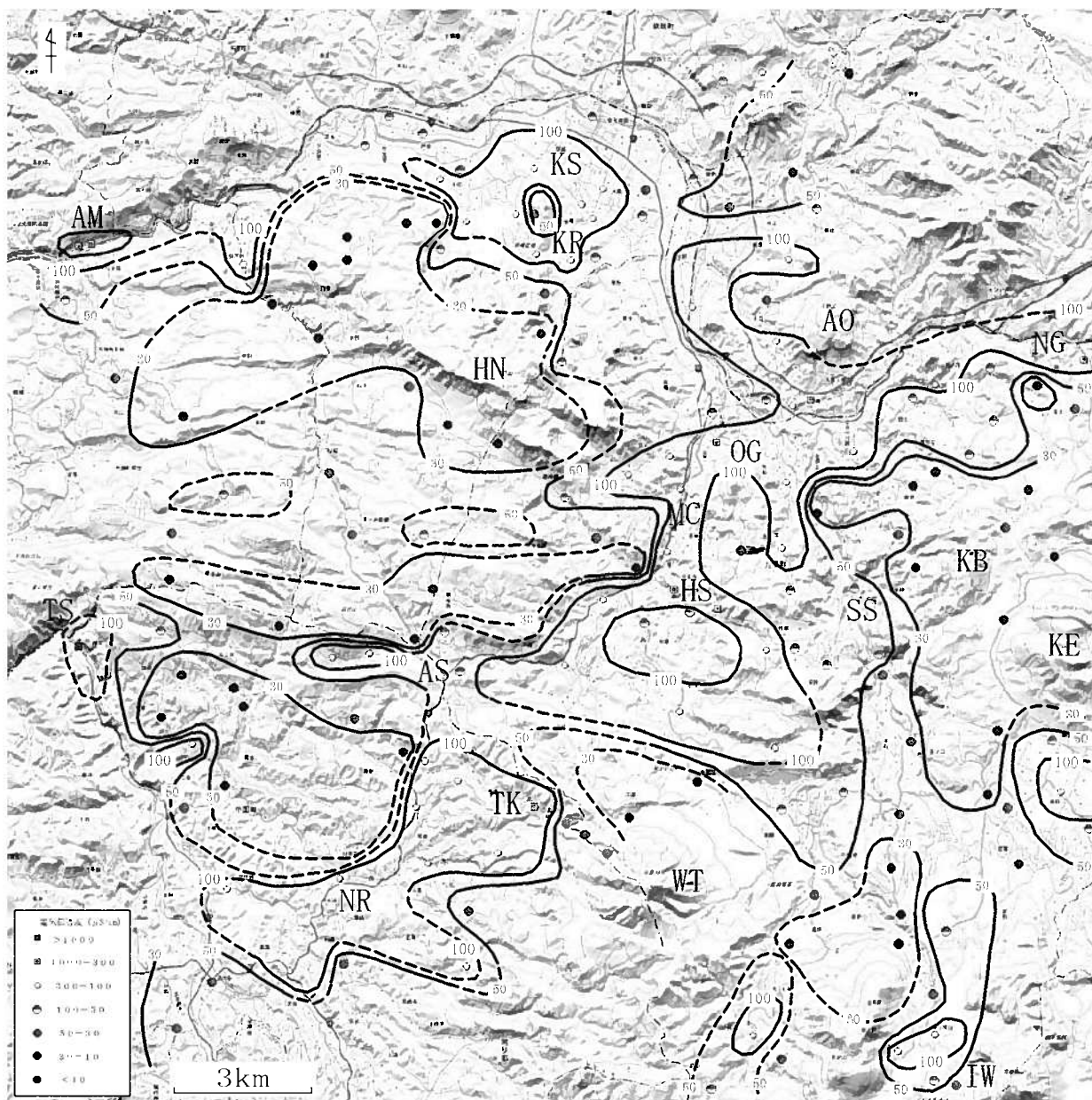


図2 VLF-MTによる万年山周辺の表層電気伝導度分布（単位は $\mu\text{S}/\text{cm}$ ）。

HS：万年山，AM：天ヶ瀬温泉，KS：玖珠町，KR：伐株山，AO：青野山，NG：野上川，KB：鹿伏山，  
 KE：崩平山，SS：猪牟田，OG：小倉岳，MC：町田川，HS：宝泉寺温泉，AS：麻生鶴温泉，  
 TS：杖立温泉，TK：岳温泉，WT：涌蓋山，NR：奴留湯温泉，IW：硫黄山  
 （地図は、国土地理院のウォッチーズおよびカシミールによる）

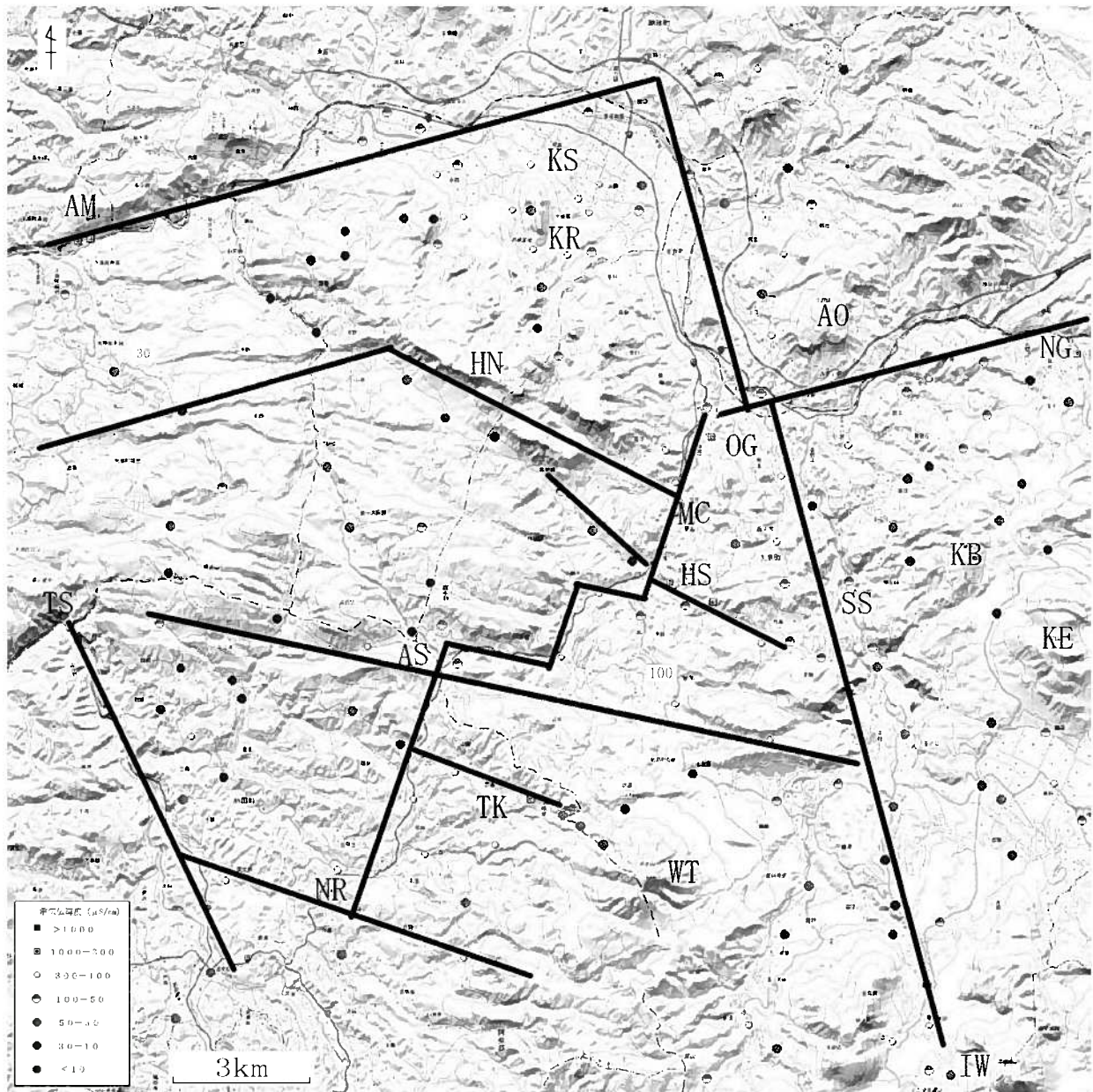


図3 万年山周辺の表層電気伝導度分布（単位は $\mu\text{S}/\text{cm}$ ）と構造の概念図。

HS : 万年山, AM : 天ヶ瀬温泉, KS : 玖珠町, KR : 伐株山, AO 青野山, NG : 野上川, KB : 鹿伏山,  
KE : 崩平山, SS : 猪牟田, OG : 小倉岳, MC : 町田川, HS : 宝泉寺温泉, AS : 麻生鶴温泉,  
TS : 杖立温泉, TK : 岳温泉, WT : 涌蓋山, NR : 奴留湯温泉, IW : 硫黄山  
(地図は、国土地理院のウォッチずおよびカシミールによる)

これらの結果をふまえて、万年山周辺の高電気伝導度域と構造線との関係を検討し、あわせてこの地域の地熱活動の熱源について検討した（図3）。第1の特徴として、万年山の北側は、由布院断層から野上川流域を経て小倉岳にいたる東北東-西南西の構造線と、小倉岳から青野山と万年山の境界部を北北西に延びる線、天ヶ瀬温泉を通る東北東-西南西方向の構造線を示唆する比抵抗分布の線状配列によって区切られている。この東北東-西南西方向の線は、南の大分-熊本構造線とほぼ平行であることか

ら中部九州のテクトニクスを反映した構造と考えられる。しかし、第2の特徴として、南北2本の構造線の間に位置する万年山や鹿伏山・崩平山等の猪牟田カルデラを埋積している火山体を横切る構造線の間は、この方向とは一致していない。万年山の断層地形は、西側においては中部九州を代表する東北東-西南西方向であるが、東側においては、西北西-東南東方向である。また、万年山と鹿伏山・崩平山等の火山群との間に広がっている高電気伝導度域（上述の三角地帯）における分布の延びる方向は、西北西-東南東方向を示している。たとえば、北から宝泉寺温泉の並び、麻生鶴温泉から川底温泉を経て町田牧場にいたる領域、岳湯からハゲノ湯を経て涌蓋山西側の山体崩壊部にいたる領域、奴留湯から山川温泉にいたる領域などがあげられる。この方向の食い違いがどのような理由で生じているかは不明であるが、崩平山-万年山地溝帯北縁断層帯と記載される断層群の方向と一致しており、当該地域の地下にも構造線が伏在している可能性がある。なお、万年山の西部では、断層地形の方向が東北東-西南西方向にもどっていることも大変興味深い。この理由についても将来検討する必要がある。

鍵山・他(2014)は、上記の西北西-東南東方向の断層にそって温泉が分布していることから、断層に規定されて地熱流体が供給されている可能性を指摘している。しかしながら、本調査の結果では、宝泉寺温泉から万年山にかけては断層が推定されているにもかかわらず（たとえば大分県・九重町, 1989）、表層電気伝導度分布を見る限り、万年山の山体地下にまでは地熱流体の上昇を示唆する高電気伝導度領域は延びておらず、地熱流体の供給は起きていないと考えられる。上記の西北西-東南東方向の高電気伝導度域のうち万年山の山体領域にまで高電気伝導度域がつながっていることが確認されたのは、麻生鶴温泉を通る並びだけである。しかし、この線も、万年山山体の南縁にあたっており、万年山山体部地下にまで地熱流体が供給されていることを示すものではない。また、奴留湯温泉を通る並びについては杖立温泉につながる別の方向の可能性もあり、明瞭ではない。こうした事実は、宝泉寺温泉などの地熱活動域が万年山山体の地下にまで延びていることは考えにくいことを示している。

むしろ、これらの温泉は、小倉岳から南に延びる高電気伝導度の三角地帯の深部から地熱流体が浅部に供給され、既存の西北西-東南東報告の構造線に沿って地表に地熱流体が上昇していると考えた方がよい。この供給が、どのようなメカニズムで維持されているのかは、今後の課題である。大分県・九重町(1998)は、町田川流域に温泉が多数点在しており、この流域が猪牟田カルデラの西縁にあることから、この亀裂を通して熱水が供給されていると考えている。一方、本研究者らは、高電気伝導度領域は三角地帯を形成しており、西側の境界は町田川流域であるが、東側の境界は猪牟田を通る玖珠川流域であり、小倉岳から九重硫黄山に延びる線上にあることから、なんらかの構造が北北西-南南東方向に当該地域を貫いている可能性があると考えている。

上記の議論では、万年山山体の地下には地熱流体が供給されていることに否定的であったが、万年山北部の伐株山の南に電気伝導度の高い地点が見いだされている。伐株山そのものは、低電気伝導度の溶岩ドームであるが、伐株山南部から玖珠盆地内に高電気伝導度を示す領域が広がっており、地熱流体の供給が起きている可能性がある。

#### 4. まとめ

万年山周辺において表層の電気伝導度分布を調査した。その結果、万年山の山体自体には、伐株山周辺を除いては地熱流体の供給を示唆するような高電気伝導度域は見いだされなかった。万年山の山体部は、鶴見・伽藍・由布岳火山群、九重火山群および鹿伏山・崩平山等の火山群などと同じように低電気伝導度を示しており、山体が緻密で地下水をあまり含まない岩石からなっていることを示唆している。



一方、万年山周辺部を見ると、北側には、由布院断層から天ヶ瀬温泉にいたる東北東—西南西方向の断層に沿う高電気伝導度域が確認され、南側には、これと平行な大分—熊本構造線が走っている。万年山は、この2本の構造線に挟まれた領域にあるが、万年山周辺では西北西—東南東方向の断層や地形、電気伝導度分布の配列が卓越している。万年山の東側では、小倉岳から玖珠川流域を経て硫黄山にいたる線と小倉岳から町田川流域を経て麻生鶴温泉に至る線に挟まれた三角地帯において高電気伝導度が計測されている。この三角地帯には、宝泉寺温泉などのように西北西—東南東方向に高電気伝導域が延びている。しかしながらこの三角地帯の高電気伝導度域は、断層の地形としては万年山の山体部にまで走行が延びているが、電気伝導度分布としては万年山山体部にまで延びていない。こうした結果を考慮すると、九重火山群硫黄山付近から小倉岳を経て北北西方向に延びるなんらかの構造線が存在し、深部から地熱流体が浅部に供給され、既存の西北西—東南東方向の断層に沿って地熱流体が地表にまで上昇していることが考えられる。

### 謝辞

測定結果の解釈において、京都大学地球熱学研究施設竹村恵二教授、大沢信二教授との討議が有益であった。この誌面を借り謝意を表します。

### 参考文献

- 大分県・九重町 (1998) : 平成9年度九重町南山田地区温泉賦存量調査報告書, 108p.
- 鍵山恒臣・吉川 慎・宇津木 充・井上寛之 (2010) : 由布岳・由布院盆地周辺の表層電気伝導度分布, 大分県温泉調査研究会報告, 61, 3-6, 2010.
- 鍵山恒臣・宇津木 充・吉川 慎 (2014) : 大分県九重町周辺の表層電気伝導度分布, 大分県温泉調査研究会報告, 65, 51-56.
- 九州活構造研究会 (1989) : 九州の活構造. 東京大学出版会, 553p.