

大分県温泉調査研究会報告

第 65 号

平成 26 年 7 月

目 次

人工炭酸入浴剤使用における糖尿病患者の血管内皮機能における影響小 柳 雅 孔 他 1 人.....	(1)
大分川源流域の水質について－温泉排水の流入による河川水への影響について－大 上 和 敏 他 3 人.....	(3)
別府湾の表層堆積物構造.....竹 村 恵 二 他 2 人.....	(11)
姫島拍子水温泉の地球化学的研究（その 2）温泉遊離ガス大 沢 信 二 他 3 人.....	(17)
青白色に色づく酸性硫酸泉の呈色因子の実証.....大 沢 信 二 他 2 人.....	(25)
姫島火山の溶岩に包有されるザクロ石含有岩の研究.....柴 田 知 之 他 2 人.....	(35)
大分県における地殻の地震波減衰構造.....志 藤 あずさ.....	(39)
大分県の水試料の S r 同位体組成.....芳 川 雅 子 他 3 人.....	(41)
A M T 法を用いた伽藍岳地下比抵抗構造調査.....宇津木 充.....	(45)
大分県九重町周辺の表層電気伝導度分布.....鍵 山 恒 臣 他 2 人.....	(51)
温泉観光地における新しい情報発信の構築に向けた研究.....中 山 昭 則.....	(57)
別府温泉における微生物の解析と考察.....マヒチ ファエゼ.....	(67)
遺伝子検査（L A M P 法）を用いた温浴施設の衛生管理.....西 平 博 美 他 2 人.....	(69)
別府血の池地獄の希土類元素.....島 田 雄 樹.....	(75)

序

昭和 23 (1948) 年 7 月 10 日に温泉法が公布されたことを契機に、翌 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、大分県温泉調査研究会が発足しました。以来、毎年途切れることなく調査研究が行われ、平成 25 (2013) 年度までに公表された報告数は 532 編にのぼります (温泉分析書や講演会等の記録は除く)。

上記の目的は会則第 3 条に述べられているのですが、当初の具体的目的が「大分県の温泉行政の指針となる科学的知見の収集」であったことは、初代会長・長谷川万吉教授 (京都大学理学部 ; 京大火山温泉研究所長) の筆になる機関誌「大分県温泉調査研究会報告」第 1 号 (昭和 25 年 7 月刊行) の序文や「大分県温泉調査研究会 30 年のあゆみ」 (昭和 54 年 3 月刊行) に記された山下幸三郎博士の文章からうかがわれます。

記念すべき最初の報告は「瀬野錦蔵・山下幸三郎：別府温泉に於ける湧出量の相互関係に就いて」、第 2 番目は「山下幸三郎：別府温泉の総調査の結果に就いて」でした。前者は温泉の新規掘削の影響の評価に関わっており、後者は別府温泉の変化の方向を把握しようとするもので、いずれも行政に対する基礎的資料を提供しています。大分県における温泉掘削の基準は、引き続いて実施された同様の調査結果などに基づいて定められました。

温泉法公布から 70 年近くが過ぎ、温泉をめぐる状況には大きな変化が生じました。この間に稼動が進んだ地熱発電は、温泉現象と同根の地球内部からの熱をエネルギー源としています。とくに、地球温暖化への対策として化石燃料依存から脱却するエネルギー源が模索されている中で起こった東日本大震災 (2011 年 3 月 11 日) は、日本だけでなく全世界のエネルギー政策のあり方に変革を迫ることになりました。日本においては、いわゆる再生エネルギーのひとつとして温泉の熱が注目され、温泉利用のあり方も、この状況と無縁ではありえなくなっています。

こうした動向に適切に対応するには、温泉の調査研究のさらなる展開と、温泉に関する知識や合理的な考え方の普及が必要であり、本会の活動はますます重要になるものと思われます。

さて、本年もここに、平成 25 年度の活動を記した機関誌第 65 号を出版する運びとなりました。本号には 14 編の報告が掲載されています。内容は、地球物理学・地球化学・医学・衛生学・微生物学・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。

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 26 (2014) 年 7 月

大分県温泉調査研究会

会長 由 佐 悠 紀

追記：大分県の温泉掘削基準や大分県温泉調査研究会報告は、大分県のホームページで閲覧することができます。

人工炭酸入浴剤使用における糖尿病患者の 血管内皮機能における影響

九州大学病院別府病院施設

小 柳 雅 孔・牧 野 直 樹

【背景】

炭酸泉は皮膚から吸収された炭酸ガスは一酸化窒素 (NO) を介して末梢血管拡張をもたらすことが知られている。また、皮下組織の血流増加に伴い降圧効果に加えて保温効果も報告されている。糖尿病に罹患した患者は種々の血管合併症を招き、中でも動脈硬化性疾患の発症頻度が非糖尿病患者と比べ高いことが知られている。本研究は人工炭酸入浴剤の1ヶ月間の入浴が血管内皮機能の改善と血管の脈派伝搬速度の改善が見られるか検討した。

【方法】

研究には10年以上の糖尿病罹病歴のある患者13名 (平均年齢 ; 65.7 ± 5.8歳、男11名、女2名) を対象とした。自宅での通常の入浴 (水道水) を2週間行った後、人工炭酸入浴剤 (花王社製 ; マイクロバブ) を混入し入浴した。入浴は10分間を週4日間、4週間連続して行った。なお期間中は高血圧および糖尿病などに関する治療内容は変更せずに継続した。血管内皮機能は血流依存性血管拡張反応 (%FMD) を市販の検査装置 (ユネクス社製) を用いて行った。動脈硬化の指標として脈派伝達速度 (PWV ; cm/sec) の検査 (オムロン社製) を行った。その他、糖尿病で行う一般的生化学検査を入浴剤使用の前後で測定した。治験終了時に自覚的所見として保温、保湿、睡眠、食欲などの生活習慣についてアンケート調査した。【結果】

本治験前後でのBMI, 血圧値, HbA1cの値には有意差は認めなかった。内皮機能の指標である%FMDは人工炭酸入浴剤使用後で使用前 (4.8%) に比べ増加 (5.1%) したが、PWV値と同様に有意差はなかった。但し、治験後にHbA1cの低下もしくは変化なしの症例では%FMDの有意な上昇とPWVの低下を認めた。一方、HbA1cの上昇例 (3例) では%FMDの低下とPWVの増加を認めた。なお、全例に保温効果を、患者の70%に睡眠の改善を認めた。

【結論】

糖尿病患者において人工炭酸入浴剤の利用は血糖コントロールが安定していれば血管内皮機能の改善が認められた。本入浴剤の利用では動脈硬化の進展抑制効果が期待できると思われる。

大分川源流域の水質について - 温泉排水の流入による河川水への影響について -

大分大学教育福祉科学部

大 上 和 敏・緒 方 ひかる
瀬 尾 千 明

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

要旨

大分県由布市湯布院町の河川水に及ぼす温泉排水の影響について評価を行う為に、湯布院町川上地区の河川水について流量および主要化学成分を中心とした水質調査を行った。その結果、当該地域を流れる河川水は温泉排水の影響を強く受けており、中でも湯坪川は日本の平均的な河川水に比べて主要溶存化学成分の濃度が著しく高いことが示された。また、揚湯式の温泉以外にも絶えず湧出している自然湧出泉からの温泉水も河川水にかなり影響を及ぼしていることが推測された。

1. はじめに

大分川は、その源を大分県由布市湯布院町の由布岳（標高 1,583m）に発し、由布院盆地、大分平野を流れ別府湾に注ぐ一級河川である。大分川の流域面積は 650 km²で、その流域内には約 25 万人の人々が暮らしており、大分市の重要な水資源のひとつである。大分川の流域には、湯布院温泉をはじめとする大小様々な温鉱泉が分布しており、これらの影響のため、大分川水系の河川水は通常の河川水に比べて溶存化学成分や溶存酸素量等においてかなり特異な性質を呈している（川野ほか，1979）。

温泉排水の河川への流出による影響については、秋田県の玉川温泉について古くから研究が行われており、玉川温泉の強酸性の温泉排水が周辺の玉川に流入することにより生じる河川水の酸性汚濁等が報告されている（後藤，1990）。大分県内の温泉地を対象とした研究としては、別府市を流れる二級河川（朝見川，境川，春木川，平田川，新川）の流域において、温泉排水の流入による河川水の溶存化学成分の変化や、珪藻類をはじめとした河川生態系の変化に関する研究などが行われている（大沢ほか，2007；山田ほか，2010；酒井ほか，2011）。

大分県由布市湯布院町は年間 400 万人程の観光客が訪れる日本を代表する温泉観光地である。この地域には大分県でも有数の温泉地のひとつである湯布院温泉があり、約 880 井の源泉が存在している。また、有名な観光地のひとつである金鱗湖から流出する河川沿いには旅館や飲食店等が立ち並んでいるため、平日でも多くの観光客でにぎわっている。このように観光地として発展を続ける一方で、近年、流域の旅館等からの廃水による河川の水質汚濁を懸念する声が聞かれるようになった。そこで、大分川の源流域にもあたる湯布院地域の温泉排水が河川水に及ぼす影響について、河川水中に含まれる主要溶存化学成分の測定を行うことにより検討を行った。

2. 調査地点の概要

本研究の調査は、大分県のほぼ中央に位置する由布市湯布院町川上地区で行った。湯布院町は大分川の源流である由布岳の麓に位置し、川上地区には観光名所のひとつである金鱗湖がある。また、大分川は由布院盆地を貫流し、中流域では阿蘇野川、芹川等と合流する。その後、賀来川、七瀬川と合流し、別府湾に注いでいる。調査地点は、金鱗湖の流出水が大分川に至るまでに合流する河川と、合流した後に合計8地点選択した(図1)。なお、⑥～⑧地点は2013年より調査を始めた。

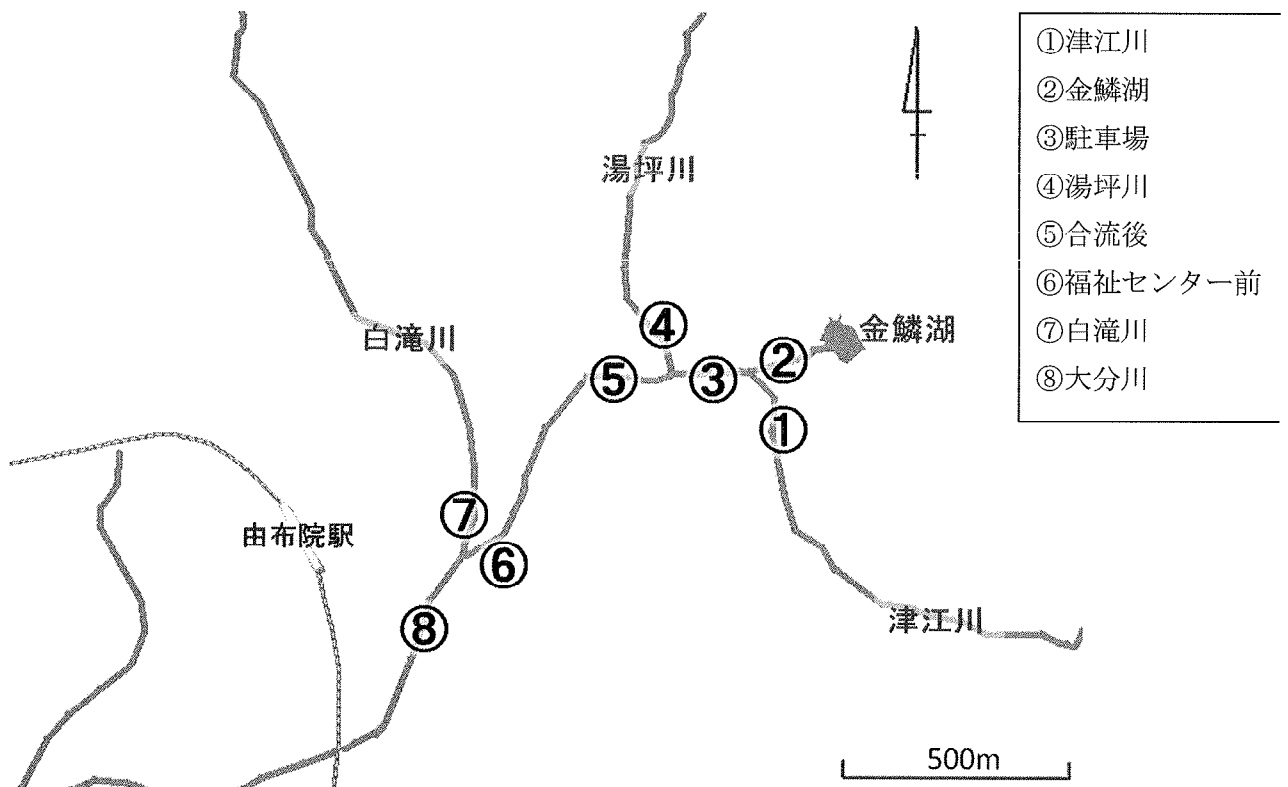


図1 調査地点の概略図

3. 試料採取および測定方法

現地では気温および水温、電気伝導度、pH、流速を測定し、500mlのポリエチレン製ボトルに河川水を採取し、実験室にて化学分析を行った。河川水の化学分析では、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} についてはイオンクロマトグラフィーで、 HCO_3^- はpH4.3アルカリ度法で、 SiO_2 については、モリブデン酸イエロー法により測定を行った。

4. 結果

4-1. 各測定地点における水温の変化

今回調査を行った中で、最も水温が低かった地点は①の津江川で平均水温は 16.1℃であった。一方、最も水温が高い地点は⑥の福祉センター前で平均水温が 21.6℃であった。図 2 に①の津江川、②の金鱗湖および、③の湯坪川の水温の変化を図 2 に示す。図 2 より、水温の変動が最も大きいのは④湯坪川であり、15.6～25.3℃と非常に大きく変化していた。一方で、②金鱗湖は年間を通じて水温の変動幅が小さく、18.2～23.3℃の範囲で変化していた。①津江川は、調査地点の中で最も水温が低く、11.8～22.1℃の範囲で変動をしていた。

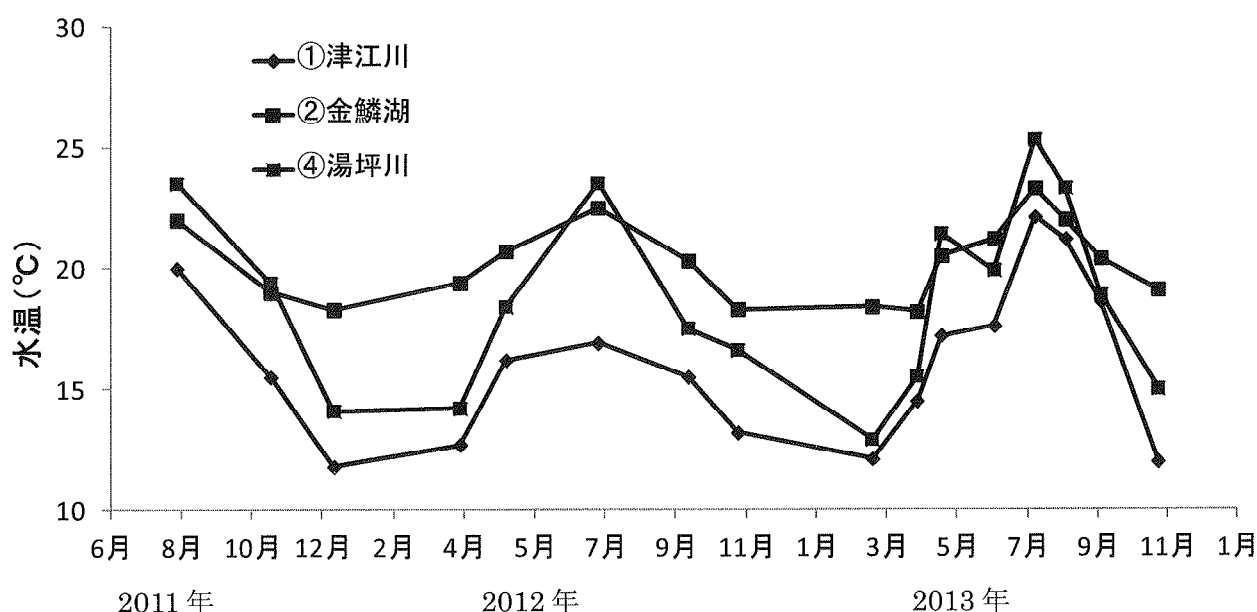


図 2 各調査地点における水温の変化

4-2. 河川水の溶存化学成分

各調査地点の主要化学成分濃度の平均値を、日本における河川水の平均値とともに図 3 に示す。今回調査を行った湯布院の河川水は、①津江川を除いて、日本の平均的な河川水に比べて全体的に高濃度であった。特に④湯坪川においては、総塩分量が日本の平均的な河川水に比べて約 5 倍の値となっており、 Na^+ 、 Cl^- が 15 倍以上となっていた。②金鱗湖、③駐車場、⑤合流後、および⑥福祉センター前においても、総塩分量の値が日本の平均に比べて 2 倍以上に高く、 Na^+ 、 Cl^- の値がそれぞれ 2～5 倍、2～6 倍となっていた。調査地点中で比較的低濃度であった津江川においても、平均的な日本の河川水に比べて、総塩分量については 1.3 倍、 K^+ 、 Mg^{2+} 以外の成分においては、1.3～2.3 倍の値となっていた。

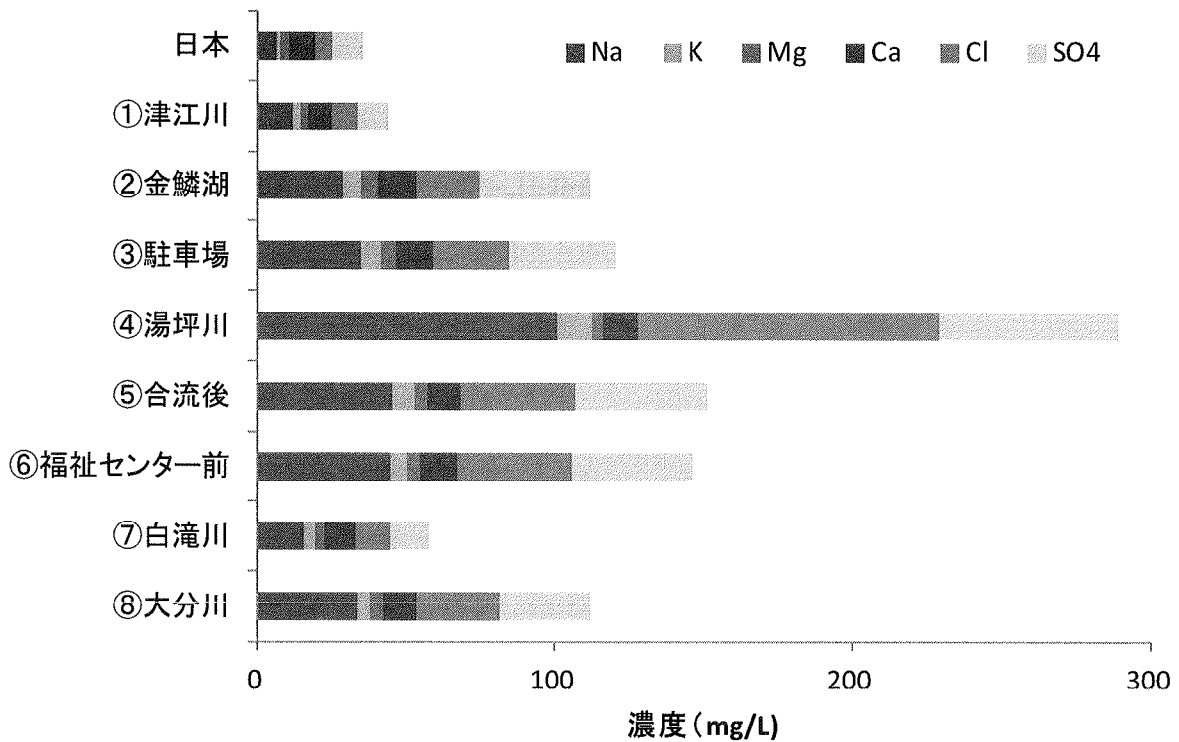


図3 各調査地点における河川水中の主要化学成分

図4に各調査地点の総塩分量の変化を示す。④の湯坪川の値が調査期間全体を通して高くなっており、さらに測定日ごとの変動も非常に大きいことがわかる。特に、2013年の3月と5月では、二か月間の間に250mg/Lから650mg/Lと2倍以上の変動をしていた。⑤合流後は、④湯坪川ほど大きな変動は見られなかったが、200~380mg/Lの範囲で総塩分量が変化していた。一方で、比較的变化が小さかった①津江川では、調査期間を通じて92~142mg/Lの範囲であった。

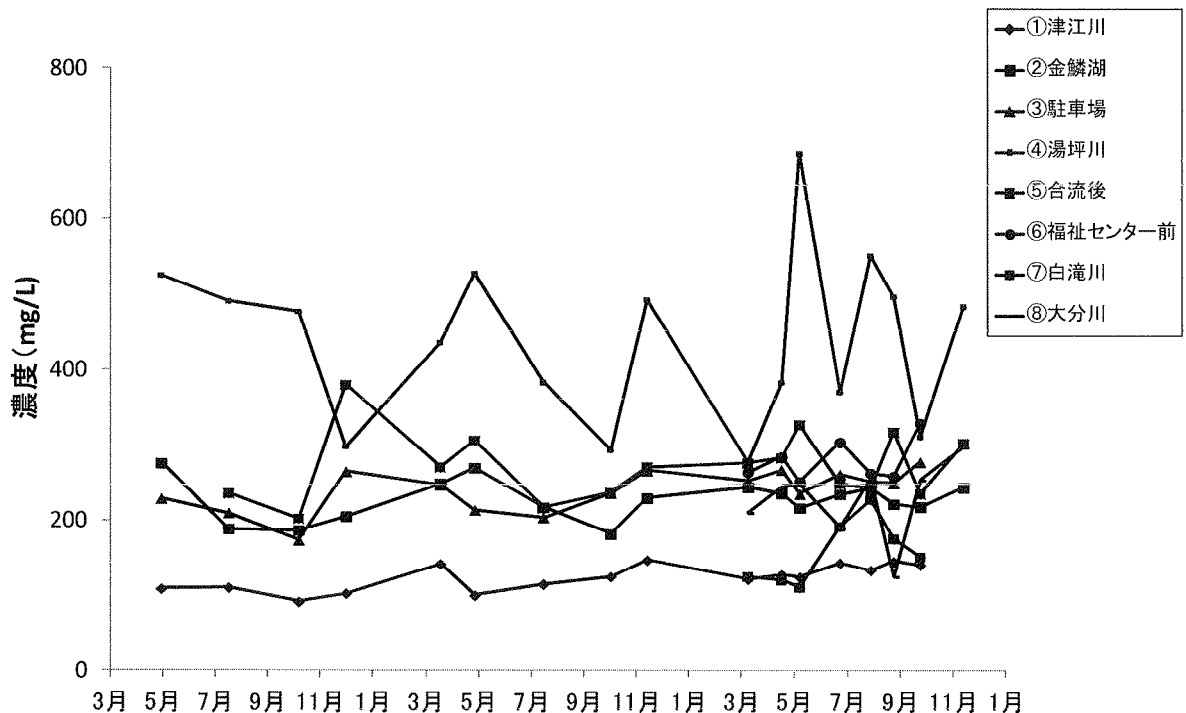


図4 各調査地点における主要化学成分濃度の変化

5. 考察

5-1. 化学成分濃度と流量の関係

湯布院地域を流れる河川水中の溶存化学成分を調べたところ、この地域の河川水は、①津江川、②白滝川を除く調査地点において、 Na^+ 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 濃度の値が他の一般的な河川に比べ非常に高濃度含まれていることが明らかになった（図3）。このことは、湯布院地域の河川水も別府市を流れる河川と同様に、温泉排水の影響を強く受けている可能性を予測させる結果であるといえる。さらに、本調査地域の河川には④湯坪川のように時期によって河川水の流量の増減が非常に激しい河川も含まれており（流量 $0.03\sim 0.3\text{m}^3/\text{s}$ ）、より定量的な検討を行うには河川の流量も重要な要素のひとつとなる。そこで、この予測の検証をさらに進めるために、河川流量と主要化学成分の総量値（TDS）との関係について検討を行った。

①津江川および④湯坪川の河川流量と TDS との関係を図5に示す。①津江川については、流量が変化しても TDS はほぼ一定であるのに対し、④湯坪川では河川水の流量と TDS との間に逆相関関係がみられる。これは、温泉排水の影響がほとんどないと考えられる①津江川については、流量が変化しても河川水中の TDS の大半は他の一般的な河川と同様に土壌起源の成分の溶け込みのみによる為、このような結果になったと考えられる。一方、④湯坪川のように温泉排水の影響を強く受けている河川においては、河川の流量が変化すると、そこに流れ込む温泉水が希釈されるために、図5にみられるような逆相関関係をとっていると思われる。②の金鱗湖以外のその他の調査地点についても、部分的ではあるが流量と TDS に逆相関関係がみられることより、湯坪川と同様に温泉排水の影響を受けていると考えられる。

5-2. 河川水に及ぼす温泉排水の影響

これまでの結果および検討により、④地点の湯坪川をはじめとする湯布院地域の河川水は、温泉排水の影響を強く受けていることが明らかとなった。そこで、それぞれの河川ごとに温泉由来の化学成分の見積もりを行い、温泉排水が及ぼす河川水への影響評価を行った。

温泉由来の溶存化学成分量の計算は、温泉排水の影響を受けていない河川水の濃度を基準として、その基準よりも多い分を温泉由来の成分とすることにより求めた。これまでの検討より、①津江川は水温が調査地点の中で最も低く、TDS の値も調査地点の中で最も低かったため、温泉排水の影響をほぼ受けていないと判断し、この地点の各溶存化学成分濃度を基準値として選択した。

④の湯坪川についての計算例を示すと、湯坪川の平均 Na^+ 濃度は 100.9mg/L 、平均流量は $0.1\text{m}^3/\text{s}$ 、一方で津江川の平均 Na^+ 濃度は 11.9mg/L であるので、一日当たりの Na^+ 量は、

$$(100.9 - 11.9) \times 0.1 \times 60 \times 60 \times 24 \div 1000 = 7.7 \times 10^2 \text{ (kg)}$$

となる。その他の溶存成分について計算した結果を表1に示す。表1より、④湯坪川では一日に約 2.5t もの溶存化学成分が流れ込んでいることがわかる。これは、TDS 値が約 300mg/L の温泉水が1日に約 9000t 流入していることに相当する。

この計算結果の妥当性を検証するために、同調査地域に存在する温泉源からの総排出量との比較を行った。

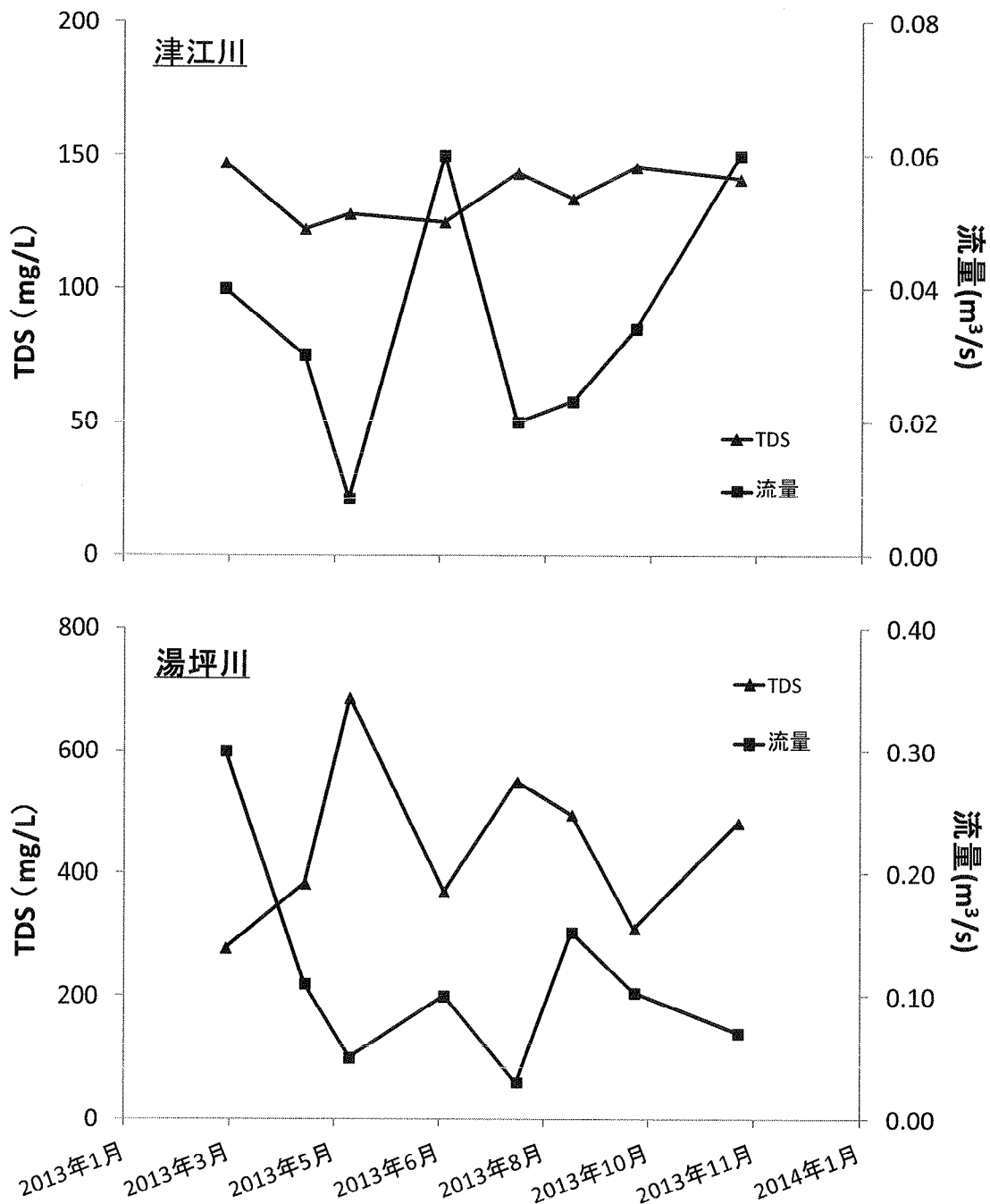


図5 流量とTDSの関係

本調査地域は下水道の整備がなされておらず、各家庭や合同での浄化槽処理を行い、河川へ処理水が流されている。大分県鉱泉誌に掲載されている湯布院町川上地区の源泉数は215井であり、そのうち同じ源泉について記載されているものを除くと、この地域には現在140井の源泉が掘削されていることになる。この源泉を住宅地図上にプロットし、各調査地点ごとに温泉排水からのもたらされる溶存化学分量を求めた。なお、見積りを行う上で各源泉から温泉水を揚湯時間を平均5時間として計算を行った。

以上の計算結果より、河川水の化学組成より求めた溶存化学成分量の方（表1）が、温泉水の化学組成より求めたもの（表2）よりも3～10倍程度多いことがわかる。本調査域には自然湧出の源泉も一部存在しており、そのような自然湧出の源泉からの流れ込みにより実際の河川水中の溶存化学成分が高くなっていると考えられる。さらに、湯布院町川上では下水道が整っていないため、浄化槽による排水処理を行い河川へ処理した水を流しているため、生活廃水の混入によるTDSの増加も考えらえる。

表1 河川水の化学組成より求めた温泉由来の溶存化学成分量

	Na ⁺ (Kg/日)	K ⁺ (Kg/日)	Mg ²⁺ (Kg/日)	Ca ²⁺ (Kg/日)	Cl ⁻ (Kg/日)	SO ₄ ²⁻ (Kg/日)	HCO ₃ ⁻ (Kg/日)
③駐車場	770	1500	91	140	570	850	860
④湯坪川	770	79	11	30	800	430	370
⑤合流後	1000	1400	61	100	890	1000	750
⑥福祉センター前	1600	1300	93	180	1400	1400	1400
⑦白滝川	92	29	22	51	87	61	470
⑧大分川	2100	1700	150	300	1900	1900	2400

表2 温泉水の化学組成より求めた温泉由来の溶存化学成分量

	Na ⁺ (Kg/日)	K ⁺ (Kg/日)	Mg ²⁺ (Kg/日)	Ca ²⁺ (Kg/日)	Cl ⁻ (Kg/日)	SO ₄ ²⁻ (Kg/日)	HCO ₃ ⁻ (Kg/日)
③駐車場	91	18	3.3	8.2	55	43	140
④湯坪川	220	22	4.7	19	200	96	190
⑤合流後	340	48	8.8	28	270	150	380
⑥福祉センター前	350	49	9.4	29	280	150	410
⑦白滝川	39	6.3	0.7	3.6	28	19	53
⑧大分川	410	62	11	34	310	180	500

6. おわりに

大分県由布市湯布院町川上地区において、金鱗湖の流出水が大分川に至るまでに合流する河川と、合流した後の合計8地点について調査を行った。その結果、以下の3点の知見が得られた。

- ① 各調査地点の河川水の分析結果より、津江川を除く全ての調査地点において温泉排水の流入により、水温が上昇し、主要化学成分濃度が高くなっていた。特に、Na⁺、Cl⁻、HCO₃⁻濃度が高くなっていることより、湯布院地域の河川水は強く温泉排水の影響を受けていることが明らかになった。
- ② 温泉水によりもたらされる化学成分の影響を評価する為に、河川水の主要化学成分濃度に基づ

いて計算した温泉水由来の化学分量と、河川周辺の源泉数から求めた化学分量を比較した。その結果、河川水中に含まれている温泉由来の化学分量は、周辺の温泉よりもたらされている量よりも3~10倍高いことが分かった。これは、湯布院地域の温泉には、金鱗湖に流入する温泉水のように自然湧出の温泉水の影響が相当量多いことを示唆する結果と考えられる。

今後は、河川水の水温や電気伝導度の連続的なモニタリング、調査地点ごとに流入する温泉の化学組成の分類を行い、それぞれの河川に流入する温泉排水の影響についてより詳細な検討をすすめる予定である。なお、本調査域の河川には一部生活排水の混入している場所も見受けられるので、これらの影響についての評価も行う必要がある。

参考文献

- 大分県温泉調査研究会：大分県温泉調査研究会報告，温泉分析書，大分県鉱泉誌，第2集，2006
- 大沢信二，山崎一，高松信樹，山田誠，網田和宏，加藤尚之：温泉から河川水への有用金属元素の流出—未利用温泉資源量に関する基礎調査と研究—，大分県温泉調査研究会報告，第58号，21-30，2007
- 大沢信二，渡邊康平，高松信樹，加藤尚之：未利用温泉資源量に関する基礎調査と研究（Ⅱ）—温泉から河川への有用金属元素の流出量—，大分県温泉調査研究会報告，第59号13-19，2008
- 川野田実夫，志賀史光，矢野哲郎：河川水の水質に及ぼす温泉の影響—大分川水系について—，大分県温泉調査研究会報告，第30号，43-48，1979
- 川野田実夫，倉原由香里，大上和敏：温泉水流入による河川水中の溶存酸素量の変化—大分川上流（湯布院）域について—，大分県温泉調査研究会報告，第60号，21-26，2009
- 後藤達夫：玉川温泉の化学組成と玉川の水質改善，温泉科学，41，1-35，1990
- 酒井拓哉，川野田実夫，大沢信二，馬渡秀夫，山田誠，三島壮智：別府地域の河川水質への温泉排水の影響評価，大分県温泉調査研究会報告，第62号，47-58，2011
- 志賀史光，川野田実夫，小石哲史：大分川流域の温鉱泉と河川水の水質，大分川流域—自然・社会・教育—，40-56，1986
- 山田誠，三島壮智，大沢信二，酒井拓哉，齋藤光代：河川生態系に対する温泉排水の影響に関する研究—別府地域における河川水質と珪藻流出量の関係—，大分県温泉調査研究会報告，第61号，15-24，2010

別府湾の表層堆積物構造

京都大学理学研究科附属地球熱学研究施設

山田 圭太郎・竹村 恵 二

大阪市立大学

原口 強

要旨

別府湾の表層堆積物中の構造と深部地下構造との関係を解明するために、高密度の音波探査を実施した。そのデータをもとに本稿では表層堆積物、特に K-Ah に対比される LayerII の三次元構造を示した。その結果、別府湾中央断層より西部の堆積速度分布及び、ガスに起因すると考えられる音波探査データの不鮮明領域の分布が明らかとなった。

1. はじめに

別府湾は九州中部の張力が発達する地域(松本, 1979)の東端に位置し、地震・火山活動の活発な地域である。Itoh et al.(1998)によると別府湾の形成プロセスは二つのステージに分けられ、特に 1.5 Ma 以降のステージ 2 ではプルアパート・ベーズンが卓越し、現在も別府湾は沈降傾向にあり、第四紀の堆積物が厚く堆積している。そのため別府湾では音波探査やピストンコアを用いた浅部の活断層分布やその活動度の調査(岡村ほか, 1992; 大分県, 2001 など)や、反射法地震探査や重力測定を用いた深部の構造やそのテクトニクスの議論(由佐ほか, 1992; Takemura et al., 1994 など)が活発になされてきた。しかしながら、これらの深部構造と浅部構造や海底地形との関係については解明が進んでいない。そこで竹村ほか(2013)では別府湾奥南北測線の音波探査及び反射法地震探査結果を比較することで、浅部構造と深部構造との関連について議論した。本稿では竹村ほか(2013)をさらに高度化し、音波探査から得られた別府湾の表層堆積物の三次元分布とその形状について報告する。

2. 調査方法

本研究では反射法地震探査と重力測定から得られた深部地下構造と浅部構造との関係を解明するために、由佐ほか(1992)で実施された反射法地震探査の測線を中心に音波探査を行った。調査測線を図 1 に示す。合計 468 km の音波探査データを得た。音波探査には SyQwest 社製のポータブル地層探査機である StrataBox を用いた。使用周波数は 3.5 kHz、音速は 1500 m/s とした。

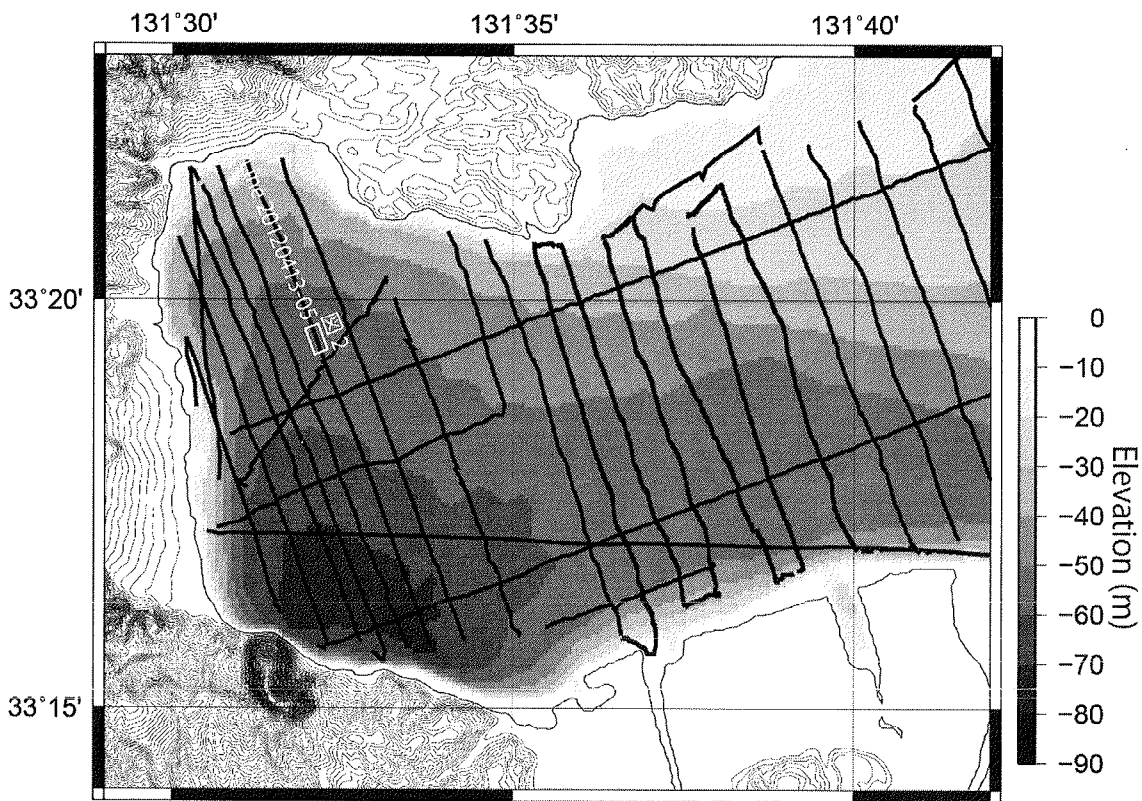


図 1 別府湾の標高分布と音波探査測線.

3. 反射面とその対比

得られた音波探査データの例(Line 20120413-05)を図 2 に示す。図 2 中に示した柱状図は岡村ほか(1992)によって付近で掘削・分析がなされた SiteO 及び SiteP のピストンコアで、掘削位置、鉛直スケールが一致するように配置した。図 2 に示した音波探査データを観察すると、複数の顕著な反射面が観察される。これらの反射面の内、湾内全域で広く観察される反射面を上位から海底面、LayerI、LayerII と呼ぶ。LayerI 及び LayerII はそれぞれ岡村ほか(1992)の反射面 I 及び反射面 II に相当し、特に LayerII は鬼界アカホヤ火山灰(K-Ah)に対比される(図 2)。LayerII は広域テフラ降灰層準であるために別府湾の比較的広い範囲で観察されること、形成年代が明らかなことから、表層堆積物の構造及びその変動を議論する上で非常に適している。本稿では特に LayerII に着目し、表層堆積物構造について議論する。

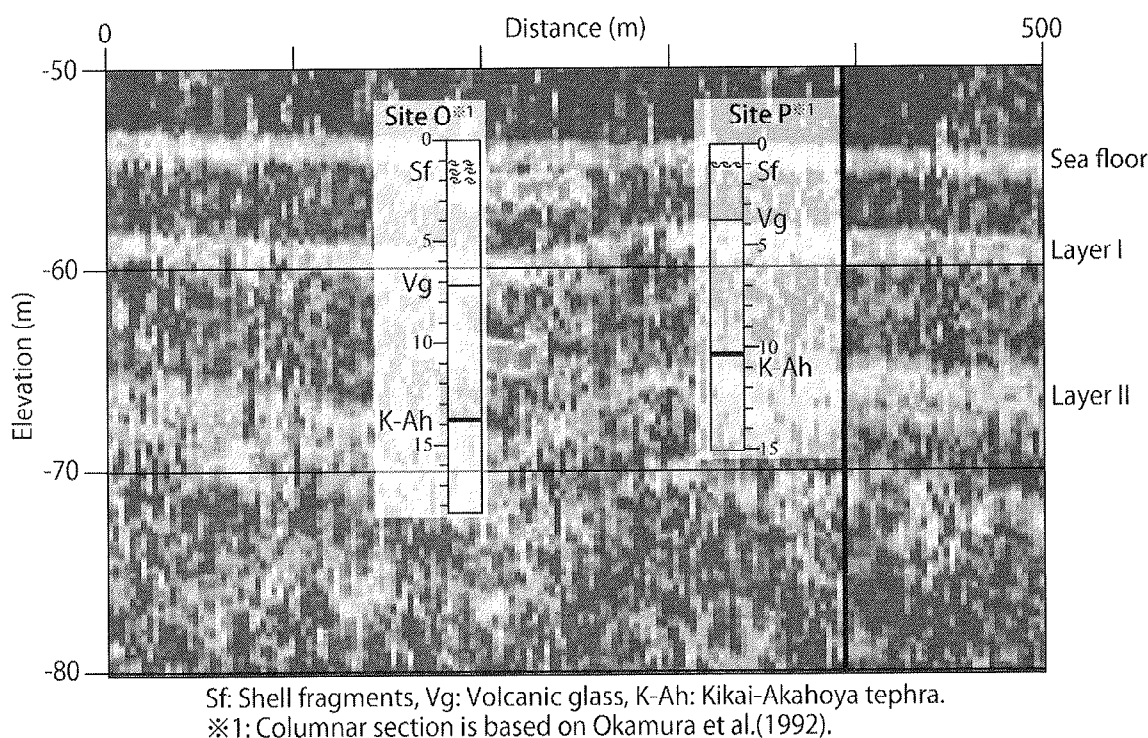


図 2 音波探査データの例とその対比。柱状図は岡村ほか(1992)に基づき、音波探査データと鉛直スケールが同じになるように配置した。

4. 反射面から見た別府湾の表層堆積物構造

Line 20120413-05 で認定した LayerII について、すべての音波探査データを用いて側方変化を検討し、別府湾内の LayerII の分布及びそれ K-Ah 降灰以降に堆積した表層堆積物の堆積速度を求めた。K-Ah の降灰年代は約 7300 年前(Smith et al., 2013)を用いた。別府湾における K-Ah 降灰以降の堆積速度分布を図 3 に示す。ただし、沿岸から数百 m の領域は調査船が侵入できなかったために堆積速度を見積もっていない。

まず図 3 の LayerII の分布について、別府湾奥南部の最深部付近ではデータの空白が見受けられる。これは竹村ほか(2013)が指摘した反射面が不鮮明な領域であり、LayerII を読み取ることができなかったためである。本研究から反射面の不鮮明な領域は湾奥南部に広く分布していることが明らかとなった。別府湾奥南部の音波探査データには音波の散乱が観察されることから、原因としては Allis et al.(1989)が指摘するように地層中に存在するガスによる影響の可能性が高い。実際に漁業関係者に聞き取りを行うと、海底から気泡が発生しているとの証言も存在する。

また別府湾全体の平均堆積速度は約 2.5 m/ky と高い堆積速度であった。ただし、別府湾中央断層より東部の堆積速度については、断層変位量が大きいため本研究で用いた手法では LayerII を追跡できなかったために算出できていない。堆積速度分布については、別府湾の西部では 1.5-2.0 m/ky と比較的堆積速度は低いものの、東部、特に日出沖から大野川河口にかけては 3.0-5.0 m/ky と堆積速度は非常に高かった。この弧状に存在する堆積速度の高い領域は別府湾中央断層に沿って分布しており、断層に近いほど高い堆積速度を示す。標高分布からも LayerII は別府湾中央断層に近いほど標高が低い傾向にある。このことから別府湾中央断層に沿って弧状に分布した堆積速度の高い領域は断層変位に伴い形成された堆積空間に堆積物が集中的に堆積(sediment focusing)したために生じたと考えられる。このように別府湾の表層堆積物構造は周辺の断層活動の影響を強く受けていることが明らかとなった。

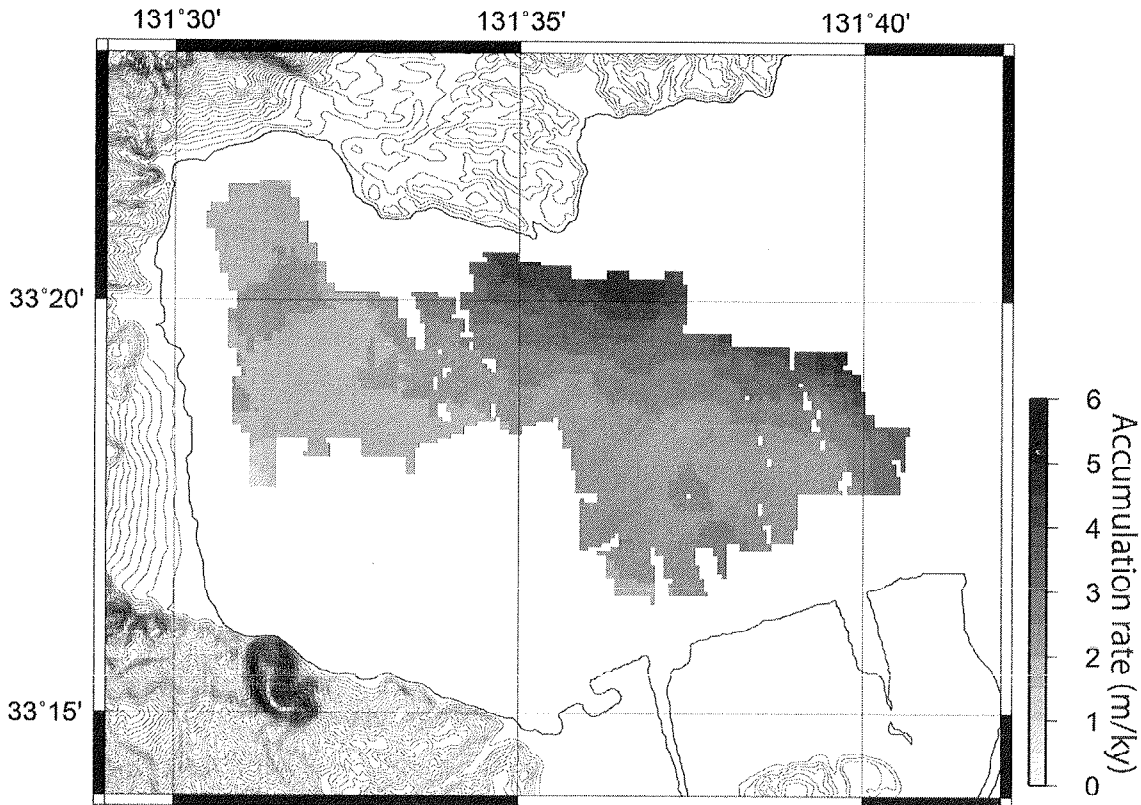


図 3 LayerII(K-Ah)に基づく別府湾の堆積速度分布.

5. まとめと今後の課題

本稿では別府湾における高密度な音波探査から、別府湾の表層堆積物、特に K-Ah に対比される LayerII の三次元構造を明らかにした。その結果、別府湾東部では別府湾中央断層の活動に伴い弧状に堆積速度が非常に高い領域が存在することが明らかとなった。一方で別府湾奥南部にはガスの影響とみられる音波探査データの不鮮明領域が存在しており、今回の調査からその詳細な分布域が明らかとなった。

今後、別府湾中央断層より東の領域における堆積速度分布を明らかにするとともに、深部構造と浅部構造の関係を三次元的に議論する必要がある。また、今回分布が明らかとなった音波探査データの不鮮明領域及び原因と考えられるガスについては別府湾周辺に分布する火山や温泉などに関連している可能性があり、ガスの化学分析などの調査が望まれる。

謝辞

音波探査の実施に当たっては京都大学の安田 大剛氏のご協力を頂いた。記して謝意を表する。

引用文献

- Allis, R. G., Yusa, Y. and Taishi, H. (1989) Gas in Beppu Bay inferred from acoustic reflection anomalies. *The Quaternary Research*, 28, 185-197.
- Itoh, Y., Takemura, K. and 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.

松本 隼夫(1978) 九州における火山活動と陥没構造に関する諸問題. *地質学論集*, 16, 127-139.

岡村 真・島崎 邦彦・中田 高・千田 昇・宮武 隆・前埜 英明・堤 浩之・中村 俊夫・山口 智香・小川 光明(1992) 別府湾北西部の海底活断層—浅海底活断層調査の新技术とその成果—. *地質学論集*, 40, 65-74.

大分県 (2000) 別府—万年山断層帯(海上調査編)に関する調査成果報告書.

Smith, V. C., Staff, R. A., Blockly, S. P. E., Ramsey, C. B., Nakagawa, T., Mark, D. F., Takemura, K., Danhara, T., Suigetsu 2006 Project Members(2013) Identification and correlation of visible tephras in the Lake Suigetsu SG06 sedimentary archive, Japan: chronostratigraphic markers for synchronizing of east Asian/west Pacific palaeoclimatic records across the last 150 ka. *Quaternary Science Reviews*, 67, 121-137.

Takemura, K., Yusa, Y. and Itoh, Y.(1994) Quaternary tectonic movements around Beppu Bay at the western end of the Median Tectonic Line, southwest Japan. *Spec. Pub. Jour. Geod. Soc. Japan (Proc. CRCM' 93, Kobe)*, 401-405.

竹村 恵二・山田 圭太郎・原口 強(2013) 別府湾の海底地形と表層堆積物構造. *大分県温泉調査研究会報告*, 64, 33-37.

由佐 悠紀・竹村 恵二・北岡 豪一・神山 孝吉・堀江 正治・中川 一郎・小林 芳正・久保寺 章・須藤 靖明・井川 猛・浅田 正陽(1992) 反射法地震探査と重力測定による別府湾の地下構造. *地震*, 45, 199-212.

姫島拍子水温泉の地球化学的研究（その2）温泉遊離ガス

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

日鉄鉱業(株)資源開発部地熱開発課

酒 井 拓 哉

大分県立大分舞鶴高校

橋 本 尚 英

要旨

姫島拍子水温泉の温泉遊離ガス(気泡)を採取し、ガス成分組成と成分のいくつかについて同位体比を測定した。遊離ガスはほとんど(98%以上)CO₂(二酸化炭素)からなることが確認され、副成分や微量成分としてN₂(窒素), Ar(アルゴン), CH₄(メタン)などが含まれていた。He(ヘリウム)やCO₂の同位体データは、それらのガスが現在活動中の火山から放出されるものとはほぼ同じ起源を有することを示し、火山活動開始から数十万年を経た現在でもマグマ起源のガスが放出されていることが明らかとなった。

1. はじめに

昨年度から本格的な拍子水温泉の調査を始め、昨年度は、温泉水と温泉沈殿物を採取し、種々の地球化学的分析を行って温泉水の起源や温泉成分(特に鉄イオン)の湧出後の挙動について考察した(大沢・他, 2013)。その結果、温泉水の水の同位体組成(δD と $\delta^{18}O$)から、水は天水に由来すること、温泉湧出後に温泉水から析出してくる黄褐色沈殿物は主として非晶質の水酸化第二鉄(Fe(OH)₃)からなることなどを明らかにし、溶存炭酸成分の炭素安定同位体比($\delta^{13}C$)が火山性CO₂の値の範囲内にあることを示した。

本年度は、その拍子水温泉で採取した温泉遊離ガス(気泡)試料について、ヘリウムの同位体比(³He/⁴He)と、ヘリウム4とネオン20の比(⁴He/²⁰Ne)の測定を行って、含まれるヘリウム(He)の起源を確定し、さらに温泉の炭酸成分(温泉水の溶存炭酸+遊離ガスのCO₂)について、³Heデータを併用した炭素同位体組成($\delta^{13}C$)の解析を行ったので、それらの結果について報告する。

2. 調査・研究の方法

姫島鉱泉とも呼ばれる拍子水温泉は、姫島火山を構成する単成火山のひとつである金火山の溶岩ドームを形成する明神山の麓に、25℃を少し下回る温度で気泡をともなってこんこんと湧出し、湧出口の脇に設けられた貯水プールを経由して反対側の排出口から流出している(図1)。今回は、湧出口で温泉水とともに噴出する泡状の温泉遊離ガスを、次の2通りの方法で採取した。

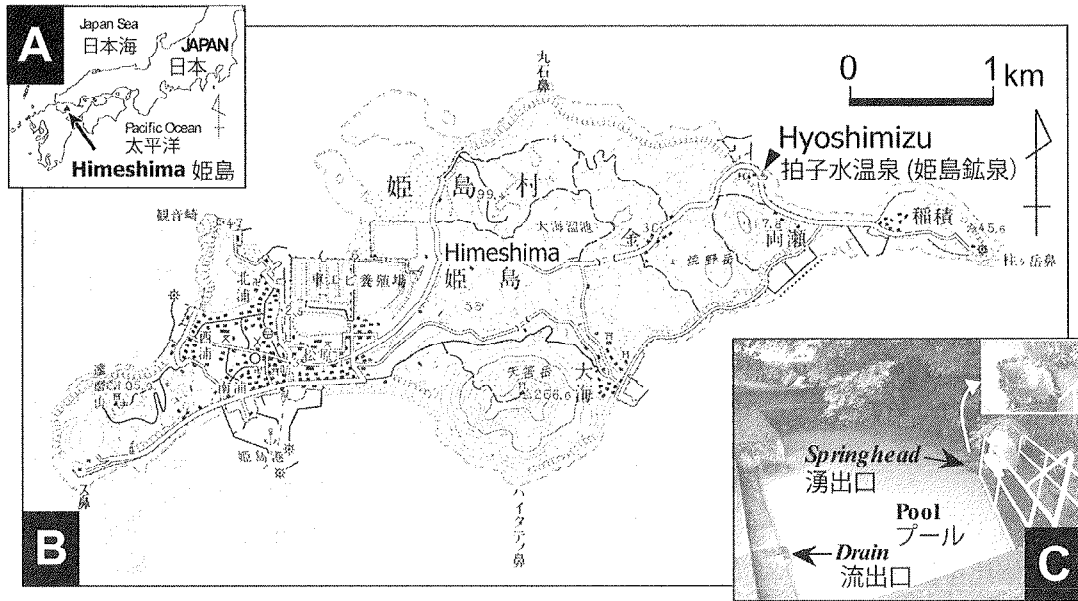


図1 姫島と拍子水温泉の位置 (A, B)と温泉の湧出状況 (C)

【ガス試料の1】 多数の泡となって温泉水とともに湧出するガスを、図2の上段に示すように、ロートを使ってコック付きのビニール袋に集めた後、現地で直ちにアルカリ溶液 (5M KOH) を含むガス採取容器 (大型ガラス浣腸器) に移した. この操作により容積の大半を占めると考えられる二酸化炭素ガス (CO_2) がアルカリ溶液に吸収されるため、ガスを繰り返し吸引することによりアルカリ溶液に吸収されないガス成分 (残留ガス: 以下 R ガスとする) が濃縮されるため、その容積を十分なものにして実験室に持ち帰ることができる.

【ガス試料の2】 同じく気泡状のガスを、図2の下段のように、ロートを用いて両端にストップコックの付いたパイレックスガラス製採気ビンに採取した.

ガス試料の1から、二酸化炭素 (CO_2)、窒素 (N_2)、アルゴン (Ar)、ヘリウム (He)、水素 (H_2)、メタン (CH_4) および酸素 (O_2) の化学組成データを得た. CO_2 はアルカリ吸収液から CO_2 電極法によって分析した. N_2 , Ar, He, H_2 , CH_4 は京大地球熱学研究施設設置の酸素ガスをキャリアーガスとしたガスクロマトグラフで分析し, O_2 はそれらの分析値, R ガスの容積, 実験室内の気温・気圧データを用いて気体の状態方程式から計算によって求めた. また, CO_2 の炭素安定同位体組成 ($\delta^{13}\text{C}$) を求めるため, アルカリ吸収液中の全炭酸の $\delta^{13}\text{C}$ を, Stable Isotope Laboratory, GNS Science Limited (ニュージーランド) 保有の安定同位体質量分析計を用いて測定した. その測定精度は $\pm 0.2\text{‰}$ である.

ガス試料の2について, 東京大学大学院理学系研究科附属地殻化学実験施設の磁場型質量分析計 (VG Isotope 製 VG5400) により, 同位体比 ($^3\text{He}/^4\text{He}$ 比と $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比) の測定を行った. 測定精度は $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比, $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比のそれぞれについて 1%, 10% である.

温泉湧出口における温泉水と遊離ガスの割合 (体積比) を知るために, 温泉水の湧出量と

ガスの噴出量をそれぞれ測定した。ガス噴出量は、気泡の全てを集められる程度の大きさのロートで遊離ガスを集め、接続した容積既知のビニール袋が膨らんで満杯になる時間をストップウォッチで計測して求めた。温泉水湧出量については、前報(大沢・他, 2012)に記載したように、併設プールの流出口でポリ袋とストップウォッチによって測定した。

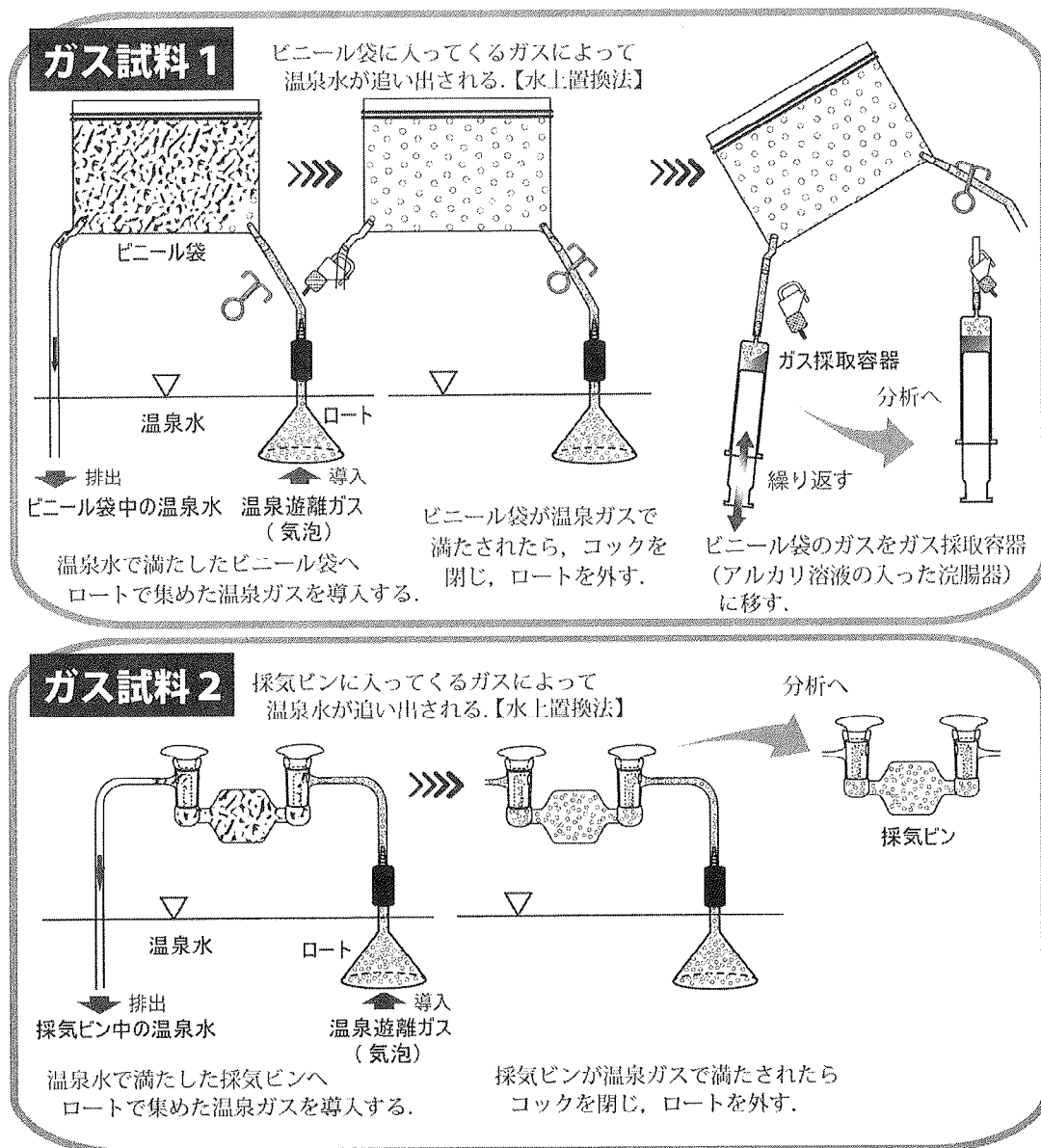


図2 温泉遊離ガスの採取方法。上段:ガス成分組成および CO₂の同位体組成用, 下段:希ガス同位体測定用

3. 結果と考察

分析, 計測の結果を, データ解析に使う前報掲載のデータ(大沢・他, 2013)とともに, 表1に

示す。表中にデータは表示しなかったが、試料採取時の空気汚染を示すと考えられる酸素 (O₂) は、水蒸気を除くガス組成の中で 0.008% を占めるに過ぎなかった。また、表には、比較のために、典型的な火山性温泉である別府温泉の噴気ガスの化学組成の一例 (大沢, 2000) を併記した。

拍子水温泉の湧出口で見られる遊離ガスは、言い伝え続けられてきたように、主として二酸化炭素 (CO₂) であることが確認できた。水蒸気 (H₂O) を除くガス成分について、別府温泉の噴気ガスのそれと見比べると、水素 (H₂) とメタン (CH₄) 以外はよく似た組成を示し、温泉水の溶存全炭酸の炭素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) から推察されたのと同じように (大沢・他, 2013), この遊離ガスが火山性であることを示唆するデータであると考え。以下では、今回得られたデータを使って、拍子水温泉の遊離付随ガスが、沈み込み帯の火山ガスと同様な化学・同位体的性質を有するマグマ起源ガスであることを明らかにする。

表1 拍子水温泉の付随遊離ガスの化学・同位体分析データ

試料	温度 (°C)	H ₂ O を除くガス成分							H ₂ O (%)
		CO ₂ (%)	H ₂ S (%)	N ₂ (%)	H ₂ (ppm)	Ar (ppm)	He (ppm)	CH ₄ (ppm)	
拍子水温泉	25.0	98.4	-	1.56	n.d.	230	14	42	2.97 ^(b)
別府<小倉>の噴気ガス ^(a)	98.7	94.3	2.40	2.83	758	303	21	3900	99.61

【注】 a: 大沢 (2000) より転載, b: 水温 (25.0°C) における水蒸気圧より計算, n.d.: 検出されず

試料	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ (‰)	³ He/ ⁴ He	⁴ He/ ²⁰ Ne	ガス / 水比	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (‰)	DIC (mg/L)
拍子水温泉	-9.1	7.44 x 10 ⁻⁶	105	0.84	-8.4 ^(c)	2260 ^(c)

【注】 c: 昨年度の報告 (大沢・他, 2012) より再録

3-1. 希ガス同位体データ

希ガスダイアグラム (³He/⁴He 比 vs. ⁴He/²⁰Ne 比) 上に拍子水温泉付随遊離ガスのデータを、別府の噴気ガスのデータ (大沢, 2000) ならびに西南日本のマグマ性ガス (北, 1995) とともに表した (図3)。ここで、³He は地球生成時に地球内部のマントルに取り込まれた始源的な He (ヘリウム) であり、⁴He は地殻岩石中のウランやトリウム放射壊変に伴う α 粒子起源の He である。そのため、ガス試料の ³He/⁴He 比はマントル He と地殻起源 He の混合率に応じて変動するとされる。

³He/⁴He vs. ⁴He/²⁰Ne ダイアグラム上のデータポイントは、温泉付随ガスへのマントル He に富んだマグマ性 He の混入があることを示しており、現在のマグマ活動の産物である別府温泉の噴気ガスとよく似た性質を有する。

ここではさらに、Shimizu et al. (2005) に準じ、下式を用いて温泉付随ガス中の起源 He (マン

トル, 地殻, 大気)の混合割合を推定してみる.

$$({}^3\text{He}/{}^4\text{He})_S = ({}^3\text{He}/{}^4\text{He})_M \cdot M + ({}^3\text{He}/{}^4\text{He})_C \cdot C + ({}^3\text{He}/{}^4\text{He})_A \cdot A \quad [1]$$

$$1/({}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne})_S = 1/({}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne})_M \cdot M + 1/({}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne})_C \cdot C + 1/({}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne})_A \cdot A \quad [2]$$

$$M+C+A=1 \quad [3]$$

ここに, S, M, C, A はそれぞれ試料, マントル, 地殻, 大気を, 大文字はそれらの混合率を表し, そして添字をもってそれぞれの ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比と ${}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne}$ 比を表わす.

それぞれのパラメータに, Shimizu et al. (2005) に表してある数値を代入して, 起源 He の混合率 M, C, A を計算した. その結果, マントル起源ヘリウムが 67%, 地殻起源ヘリウムが 33%, 大気起源ヘリウムが 0.3%と計算され, マントルの寄与が大きいことが示された.

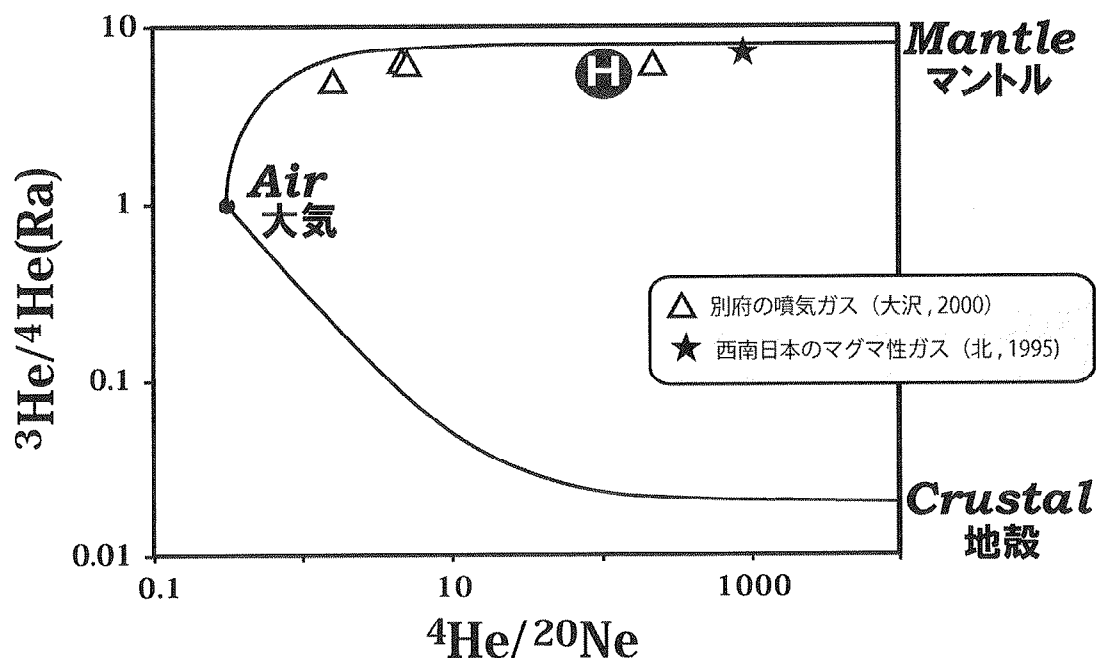


図3 温泉付随遊離ガスの希ガス同位体組成 (${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ - ${}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne}$ ダイアグラム).

縦軸の単位 Ra は, 大気の ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比 (1.39×10^{-6}) で規格化したもの. 上側の線は大気とマントル成分の混合線, 下側の線は大気と地殻成分の混合線を表す. 拍子水温泉のデータは, 中心にHと記した黒丸.

3-2. ヘリウム 3 (${}^3\text{He}$) データを合わせて見た炭素安定同位体組成 ($\delta^{13}\text{C}$)

温泉の炭酸成分の起源を探る場合, $\delta^{13}\text{C}$ は有用な情報源であるが, 起源炭素のひとつであるマントル CO_2 の $\delta^{13}\text{C}$ 値 ($-10\text{‰} \sim -4\text{‰}$) と同じ値が同じく起源炭素である海成炭酸塩起源の CO_2 ($\delta^{13}\text{C} = \text{約 } 0\text{‰}$) と堆積性有機物起源の CO_2 ($\delta^{13}\text{C} = \text{約 } -25\text{‰}$) の混合で作り出せ, 炭

素安定同位体組成 ($\delta^{13}\text{C}$) だけでは両者を区別できないという欠点がある(例えば, 酒井・他, 2011). そのため, 二酸化炭素の起源を議論する場合, $\delta^{13}\text{C}$ 以外の情報を合わせて見る必要があることが多く, その解決法として提案されたものが ^3He を併用した $\delta^{13}\text{C}$ と $\Sigma\text{C}/^3\text{He}$ 比の関係から起源炭素の混合関係・寄与率を推定する方法である(Sano and Marty, 1995). ここでは, その解析法を応用する.

気泡と温泉水の割合(ガス/水比)の測定値を使い, 下式を用いて気液2相に分かれた CO_2 を合わせた時の濃度 (ΣC) と $\delta^{13}\text{C}$ 値を求めた.

$$\delta^{13}\text{C}_{\Sigma\text{C}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} \cdot X_{\text{CO}_2} + \delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}} \cdot X_{\text{DIC}} \quad [4]$$

$$X_{\text{CO}_2} + X_{\text{DIC}} = 1 \quad [5]$$

ここで $\delta^{13}\text{C}_{\Sigma\text{C}}$ は分離前の $\delta^{13}\text{C}$ 値, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ はそれぞれガス相(温泉遊離ガス)の CO_2 および水相(温泉水)の溶存全炭酸(Dissolved Inorganic Carbon :DIC)の $\delta^{13}\text{C}$ 値, X_{CO_2} , X_{DIC} はそれぞれガス相の CO_2 および水相の DIC のモル分率を示し, このモル分率はガス/水比とガス相および水相の CO_2 濃度から求められる. その補正値を $\delta^{13}\text{C}_{\Sigma\text{C}} - \Sigma\text{C}/^3\text{He}$ 比図上(Sano and Marty, 1995)に別府の噴気ガスのデータ(大沢, 2000)とともに表した(図4). 結果は, プレートの沈み込み運動によりマントル内に持ち込まれた海成炭酸塩 (CaCO_3) が分解して CO_2 となって火山・地熱活動を通して再び地表に噴出しているとされている別府温泉の噴気ガスに近接する辺りにプロットされた.

この解析法は質量および同位体の保存則を前提とした混合関係の解析であるので, さらに下式を用いて起源炭素の混合率の推算を行うことができる(Sano and Marty, 1995).

$$\delta^{13}\text{C}_s = \delta^{13}\text{C}_M \cdot M + \delta^{13}\text{C}_C \cdot C + \delta^{13}\text{C}_O \cdot O \quad [6]$$

$$1/(\text{CO}_2/^3\text{He})_s = 1/(\text{CO}_2/^3\text{He})_M \cdot M + 1/(\text{CO}_2/^3\text{He})_C \cdot C + 1/(\text{CO}_2/^3\text{He})_O \cdot O \quad [7]$$

$$M+C+O=1 \quad [8]$$

ここに, S, M, C, O はそれぞれ試料, マントル, 沈み込み海成炭酸塩, 堆積性有機物を, 大文字はそれらの混合率を表し, 添字をもってそれぞれの $\delta^{13}\text{C}$ 値と $\Sigma\text{C}/^3\text{He}$ 比を表わす. それぞれのパラメータに, Sano and Marty(1995), Nishio et al.(1998), Deines(2002)にあるマントル起源炭素, 海成炭酸塩, 堆積性有機物の値を引用し, その平均値を代入して, 起源炭素の混合率 M, C, O を計算した. その結果, マントル CO_2 が4%, 海成炭酸塩が65%, 堆積性有機物が32%と計算され, 海成炭酸塩起源の CO_2 の寄与が大きく, 現在活動中の火山にともなうマグマ性 CO_2 と同様な起源を有する, 主として地球の表層と内部間を行き来するリサイクル炭素からなることが示された.

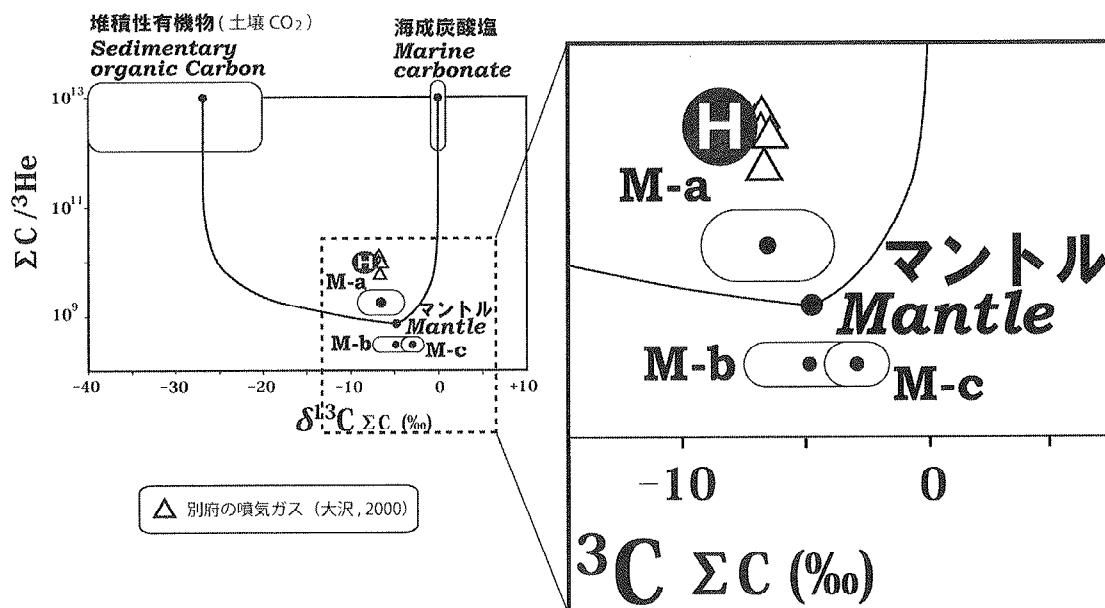


図4 $\delta^{13}\text{C}_{\Sigma\text{C}}$ 対 $\Sigma\text{C}/^3\text{He}$ の関係図上の気液分離以前の炭酸成分のデータ(補正值). 起源物質(端成分)として, マントル(M-a:Sano and Marty, 1995;M-b:Denis, 2002;M-c:Nishio et al., 1998), 海成炭酸塩(Sano and Marty, 1995), 堆積性有機物(Sano and Marty, 1995;Denis, 2002;Nishio et al., 1998)ならびに, それぞれの混合線を表した. 拍子水温泉のデータは, 中心にHと記した黒丸.

5. おわりに

姫島拍子水温泉の温泉遊離ガス(泡)を採取し, ガス成分組成とそれら成分のいくつかについて同位体組成を測定したところ, 遊離ガスはほとんど(98%以上)CO₂ からなることが確認され, 副成分あるいは微量成分として N₂(窒素), Ar(アルゴン), CH₄(メタン)などが含まれていることが判った. He(ヘリウム)や CO₂ の同位体組成データを使った地球化学的解析から, それらが現在活動中の火山から放出されるものとはほぼ同じ起源を有することが示され, 火山活動開始から数十万年を経て熱的な活動がほとんど途絶えた現在でもマグマ起源のガスを盛んに放出させていることが明らかとなった.

前報(大沢・他, 2013)の研究で得られた知見を含めて姫島拍子水温泉の起源を簡潔に述べると, 「水は天水, 遊離 CO₂ ガスはマグマ由来である」となる. ここ姫島でも「蒸発, 表面流出, 地下浸透がそれぞれ同じくらい」という温帯域の一般的な水収支が成り立つと仮定し, この天水由来の温泉水の湧出量 30.6L/分(大沢・他, 2013) = 16083m³/年をまかなう集水面積を, 姫島における平均年間降水量 1107mm を使って求めると, 推定される集水面積は 43585m²となり, およそ 200m四方の狭いエリアに対応することが示される. これは拍子水温泉の背後の小山「明神山」の平面的に見たサイズに相当し, そこに降った雨が地下に浸透し, それに対して地下からやってくるマグマ起源の CO₂ が溶け込み, 麓に冷たい炭酸泉として湧き出している

のが拍子水温泉であると言える。これは非常に単純な生成機構ではあるが、マグマ起源の CO_2 がどの深さからどのようにして浅所にやってきているのか現時点では見当がつかない。これは水理地質学的に非常に興味深い内容であり、将来のひとつの重要な研究課題である。また、最近1年の拍子水温泉の併設プール内の温泉水の色は、前報で報告した黄褐色でなく、緑色になっている。このような色の変化はめずらしいことではないようで、その現象の記載とメカニズムの解明もまた姫島における新たな研究課題になるであろう。

謝辞

現地調査と試料採取は、姫島村村長のご理解ならびに姫島村役場水産・観光商工課の方々のご協力のもとに円滑に行うことができた。炭素の安定同位体分析についてはニュージーランド地質核科学研究所の安定同位体研究室 (Stable Isotope Laboratory, GNS Science Limited) から、付随ガスの希ガス同位体測定については九電産業株式会社環境部から、それぞれ支援をいただいた。また、現地調査は、本温泉の研究をSSH(スーパーサイエンスハイスクール)の課題に取り上げた大分県立大分舞鶴高校の生徒諸君とともに行った。ここに記して感謝申し上げる。

引用文献

- Deines, P. (2002) The carbon isotope geochemistry of mantle xenoliths. *Earth-Science Reviews*, **58**, 247-278.
- 北逸郎 (1995) 別府-島原地溝下のプレートの沈み込み状態の怪 -そのマグマ性 N_2/Ar と $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の意味-. *地質ニュース*, **488**, 19-23.
- Nishio, T., Sasaki, S., Gamo, T., Hiyagon, H., Sano, Y. (1998) Carbon and helium isotope systematics of North Fiji Basin basalt glasses: carbon geochemical cycle in the subduction zone. *Earth and Planetary Science Letters*, **154**, 127-138.
- 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, 三島壮智, 酒井拓哉, 橋本尚英 (2013) 姫島拍子水温泉の地球化学的研究. *大分県温泉調査研究会報告*, **64**, 5-16.
- 酒井拓哉, 大沢信二, 山田誠, 三島壮智, 吉川慎, 鍵山恒臣, 大上和敏 (2011) 九州中央部の非火山地域に湧出する温泉の炭酸成分の起源. *温泉科学*, **60**, 418-433.
- Sano, Y. and Marty, B. (1995) Origin of carbon in fumarolic gas from island arcs. *Chemical Geology*, **119**, 265-274.
- Shimizu, A., Sumino, H., Nagao, K., Notsu, K., and Mitropoulos, P. (2005) Variation in noble gas isotopic composition of gas samples from the Aegean arc, Greece. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **140**, 321-339.

青白色に色づく酸性硫酸泉の呈色因子の実証

京都大学大学院理学研究科

細川 周一

京都大学理学部

最上 智也

京都大学大学院理学研究科

大沢 信二

要旨

本研究では、温泉水が青白色を呈する酸性硫酸塩泉を対象に、水質測定、色彩測定、浮遊物質（単体イオウ）の粒度ごとの濃度測定を行ない、それらに基づいて呈色因子および呈色機構を考察した。肉眼では青色や乳白色に見える温泉水は、色彩測定によるとそれぞれ彩度の低い青色、彩度の低い黄緑色に対応し、温泉水の色はその間で連続的に変化していることが判った。また、粒径が $1.2\mu\text{m}$ 以上のイオウ濃度が増加するほど黄緑化（肉眼的には白濁化）する相関関係が得られ、青色を呈色する状態の温泉水からはレイリー散乱（青色）に関与する粒径のイオウコロイドの存在を確認できた。

1. はじめに

自然界に存在する水は様々な呈色を見せる。その中でも、温泉水や火口湖といった、地熱活動により生成された水の色に関する研究が最近数多くなされてきている。例えば、大沢・由佐（1997）では、温泉水の呈色は、多くの場合、温泉水から析出した温泉沈殿物による間接的なものと報告されている。その一方で一部の青色を呈する温泉水では、コロイドによる光の散乱に伴う呈色だと報告されているものもあり（Ohsawa et al., 2002）、大沢（2011）では $0.03\sim 0.04\mu\text{m}$ の大きさのシリカコロイドに伴うレイリー散乱が、温泉水の青色の呈色要因となっていることが報告されている。さらに高松・他（2010）では、緑色の温泉の呈色機構の考察がなされており、多硫化物イオンによる黄色と、懸濁微粒子に伴うレイリー散乱による青色との混色によって、緑色の呈色をしていると報告されている。

また火口湖については、山頂火口に形成されている強酸性火口湖の水に関する呈色要因解明の研究が盛んである（最近の例では、Ohsawa et al., 2010; Ohsawa et al., 2014）。その先駆けとなった恩田 他（2003）では、肉眼でエメラルドグリーンの呈色を見せる強酸性塩化物硫酸塩型水質の火口湖（阿蘇火山の湯だまりと草津白根山の湯釜）を対象に湖水の呈色要因を探し出す現地調査と観測・試料分析が行なわれた。その結果、水質測定からは湖水中に鉄イオン(II)が確認でき、イオウの粒度分布分析からは、 $0.1\sim 0.45\mu\text{m}$ と $1.2\mu\text{m}$ 以上の粒径のイオウ濃度にピークが見られた。また、実験室内でイオウコロイド溶液を作成し、光散乱光度計を用いて、青色（480nm）付近の主波長を呈する合成イオウコロイド

溶液中のイオウの粒度分布を測定しており、 $0.15\mu\text{m}$ 付近と、 $3\mu\text{m}$ 付近の二ヶ所にイオウコロイドの濃度ピークが見られた。以上のことから、湖水のエメラルドグリーン色（青緑色）は、 $0.15\mu\text{m}$ 付近のイオウコロイドが引き起こすレイリー散乱の青色と、鉄イオン(II)による太陽光の吸収による緑色が混ざり合うことで呈色しているということ、さらには $3\mu\text{m}$ 付近の大きさのイオウに伴うミー散乱によって、湖水の白濁が引き起こされることが突き止められた。大沢・由佐（1997）は、強酸性火口湖と同様に、酸性硫酸塩泉についても、呈色にイオウコロイドが関与していることを示唆しており、本研究では青から乳白色に呈色している酸性硫酸塩泉に対して、大沢・由佐（1997）の仮説の実証を行なった。

2. 研究方法

2-1. 色彩測定について

色というものは、人それぞれによって見え方が異なるものである。それは温泉の色に関しても同様であり、肉眼だけでは正確な色の記述や色の違い・変化を評価することは困難である。しかしながら、後述のような色彩計を用いることで、対象とする物体の色を数値化し、色の違いや変化などを客観的に評価することができる。

現地の調査では、色彩測定は、野外にも持ち出し可能なコニカミノルタ製非接触型 CS-100 色彩色差計を用いて測定を行なった。色彩計は、使用前に、標準白色光源であるセリック製人工太陽照明灯 XC-100 を使用し、暗室にて校正用標準白色板を用いて校正を行なった。

色彩測定の結果は、国際照明委員会（Commission International de l'Éclairage: CIE）で 1931 年に定められた CIE1931XYZ 表色系の CIE1931 色度図上に表した。

CIE1931 色度図では色を、色相、彩度、明度の三要素で 3 次元的（ Y, x, y ）に表すことができる。 Y は明度に対応する反射率を表し、 xy 平面は色相（色合い）と彩度（色の鮮やかさの度合い）を表している。色相は $380\text{nm} \sim 700\text{nm}$ の単色光軌跡に沿って変化し、彩度は無彩色点 $(x, y) = (0.3101, 0.3162)$ から単色光軌跡に向かって大きくなる。無彩色点と測定値点を結んだ線の延長と単色光軌跡との交点から主波長を決定した。

2-2. 屋外測定・作業

2-2-1. 測定対象

乳白から青色を呈する酸性硫酸塩泉が見られる大分県別府市明礬地区の岡本屋旅館の露天風呂の温泉水である（図 1）。明礬地区で呈色した温泉水が見られる場所はここだけではないが、対象となる温泉水の測定・作業は露天風呂も含め湯船で行うことになるため、営業時間や入浴時を避けなければならないなど調査上の制限が多く、所有者の理解が不可欠である。本研究を岡本屋旅館で行なったのは、主としてこのような理由からである。

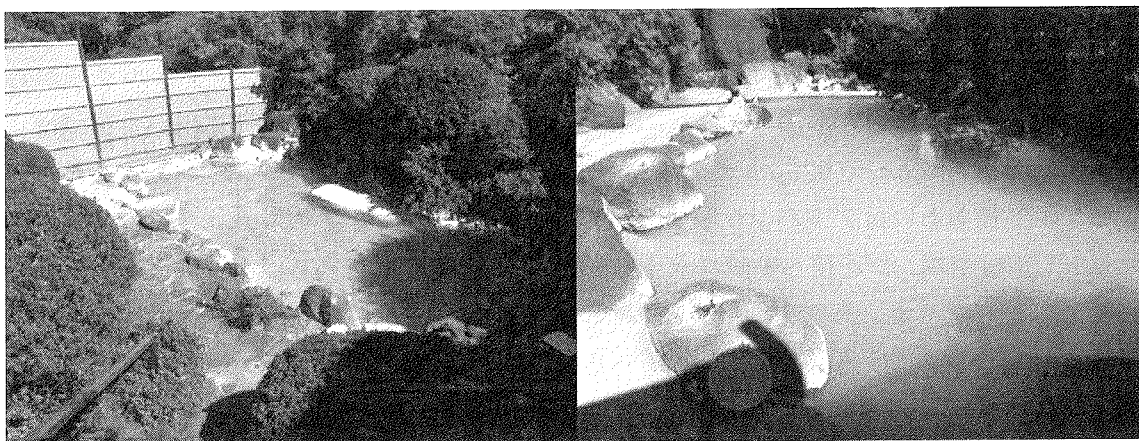


図1 大分県別府市明礬地区 岡本屋旅館の露天風呂 (左：男湯 右：女湯)

2-2-2. 測定方法

色彩計を用い、温泉水の水面に対しておよそ45度の角度で色彩測定を行なった。測定点は湯船のほぼ中央とし、5回ずつ測定し、平均値を求めた。

色彩測定とともに水質測定を行なった。測定項目は、水温、pH、EC(電気伝導度)、ORP(酸化還元電位)であり、それぞれTOA-DKK製HM-20P型pHメータ、TOA製CM-21P型電気伝導率計、TOA-DKK製HM-14P型ORPメータを用いて測定した。また、青から乳白色を呈した湯船(露天風呂)の温泉水をポリ瓶に採取し実験室に持ち帰り、室内分析に供した。

2-3. 試料水の分析

温泉水中に溶存・浮遊するイオウの粒度分布を求めるための方法は、恩田・他(2003)が用いた孔径の異なる複数の濾紙を使用する方法を踏襲した。その方法は、同じ温泉水試料から同容量(恩田・他2003では10mL)の試料水を孔径が $1.2\mu\text{m}$ 、 $0.45\mu\text{m}$ 、 $0.025\mu\text{m}$ の3種類のメンブレンフィルターそれぞれ個別に濾過し、それぞれのフィルターに載ったイオウを定量し、孔径が一つ下のサイズフィルターからの定量値を差し引くことで、 $1.2\mu\text{m}$ 以上(本論文では以後、 $>1.2\mu\text{m}$ と表記)、 $1.2\mu\text{m}$ 未満 $0.45\mu\text{m}$ 以上(以後、 $1.2\sim 0.45\mu\text{m}$)、 $0.45\mu\text{m}$ 未満 $0.025\mu\text{m}$ 以上(以後、 $0.45\sim 0.025\mu\text{m}$)という三段階に溶存・浮遊するイオウ粒子を分級した。しかしながら、今回対象とする温泉水は、恩田・他(2003)が対象とした火口湖水に比べイオウ濃度が一桁以上も低く、10mLの温泉水試料の濾過ではイオウの定量分析の下限に近く、定量値の差をとる時に負の値が出てしまうことが少なくなかった。そこで本章では、恩田・他、2003を改良した試料水中のイオウの濾過方法、イオウの分析方法の順に試料分析に関する方法について記述する。

2-3-1. 試料水中のイオウの濾過方法

本研究では、新たな試みとして同じ試料水を孔径の大きいメンブレンフィルターから順々に通していくという方法をとった（図2；以下、順々法と呼ぶ）。濾過に用いた濾紙は、孔径 $1.2\mu\text{m}$ 、 $0.45\mu\text{m}$ 、 $0.025\mu\text{m}$ のセルロース混合エステルタイプのメンブレンフィルター（ミリポア社あるいはアドバンテック社製）で、フィルターをプラスチック製の濾過器にセットし、吸引ポンプを使って試料水 100mL から 300mL を濾過し、十分に吸引した後、必要に応じて脱イオン水で洗浄した。フィルターを濾過器から取り外し、試料ごと十分に風乾した。この手法は差引法と違い、それぞれのフィルターごとに、 $1.2\mu\text{m}$ 孔径のフィルターから $>1.2\mu\text{m}$ のイオウを、 $0.45\mu\text{m}$ 孔径のフィルターから $1.2\sim 0.45\mu\text{m}$ サイズのイオウを、 $0.025\mu\text{m}$ 孔径のフィルターから $0.45\sim 0.025\mu\text{m}$ サイズのイオウというふうに、そのまま粒度ごとのイオウを定量した。なお、温泉水中のイオウ粒子が試料採取後も試料瓶の中で成長を続けていると考えられるため、試料採取から30分以内に試料の濾過を開始した。

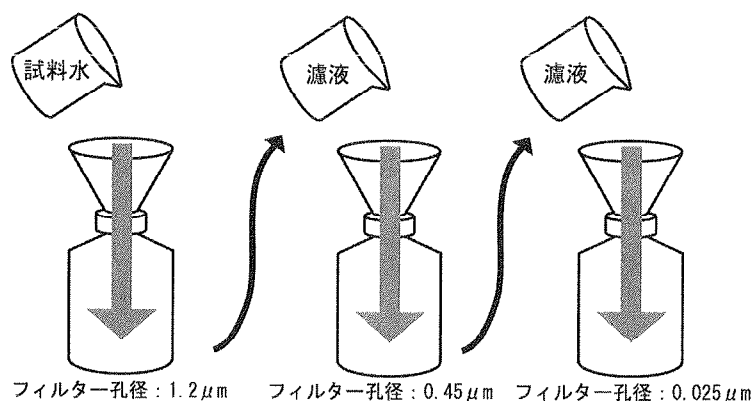


図2 順々法の説明

実際の使用に先立ち、呈色要因が明らかになっている青色呈色中性食塩泉水（別府平和園の露天浴槽で採取）を用いて順々法の検証を行なった。この温泉水は $0.03\sim 0.04\mu\text{m}$ のシリカ粒子によるレイリー散乱により青色に呈色していることが知られている（大沢 2011）。温泉水を順々法によって粒度分画し、各フィルターを蛍光 X 線分析で定性分析を行なった。分析結果が図3である。孔径が $0.025\mu\text{m}$ のフィルターにのみ明瞭なシリカのピークが見られた。この結果から、順々法により目詰まり等を起こすことなく粒径ごとに分別を行うことができていることが示された。なお、蛍光 X 線分析は以下の条件で行なった；日本電子製 JSX-3200 管球：ロジウム 雰囲気：真空 電圧、電流： $30.0[\text{kV}]$ 、 $0.3[\text{mA}]$ 測定時間： $100[\text{s}]$

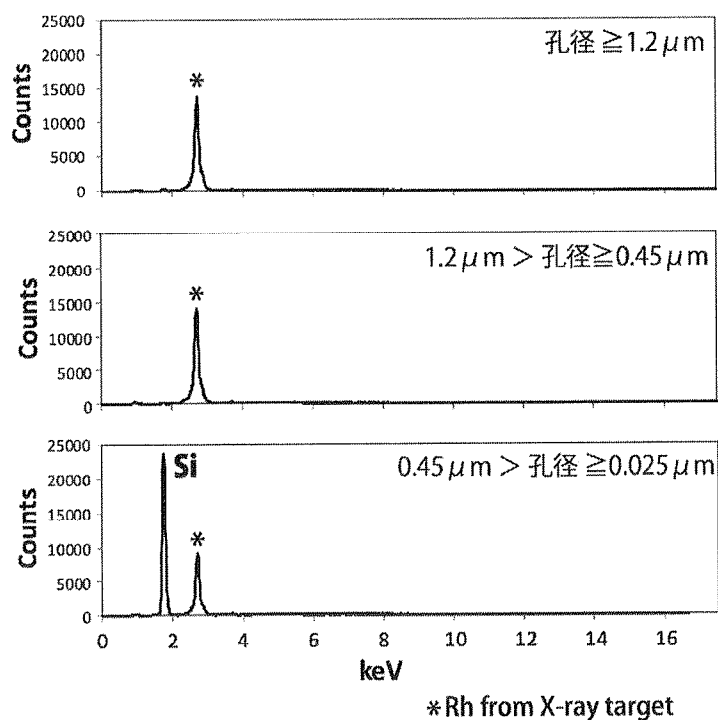


図3 順々法による平和園温泉水の各フィルターの蛍光 X 線分析結果

2-3-2. イオウの分析方法

上記の方法で調整されたメンブレンフィルターに付着したイオウを、恩田・他（2003）にならいシクロヘキサン（和光純薬特級）により抽出し、島津製作所製紫外可視分光光度計 UV-1240 を用いて 268nm で吸光度を測定した。定量は、標準試料のイオウ（和光純薬特級、コロイド硫黄）をシクロヘキサンに溶かし、試料溶液と同様にして測った吸光度から作成した検量線を使った絶対検量線法によって行なった。

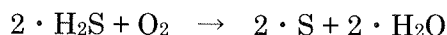
3. 結果と考察

3-1. 調査した温泉

青白色を呈する酸性硫酸塩型の温泉水を湛える、大分県別府市明礬地区の岡本屋旅館の露天風呂において、2013年の9月と10月の二回、色彩測定、水質測定、温泉水中の粒度別イオウ濃度測定を行なった。露天風呂は二つあり（男湯と女湯）、9月には、13日に男湯の、17日と18日の両日に男湯と女湯の調査を行なった。10月には、28日に男湯の、29日に男湯と女湯の調査を行なった。29日の女湯では、午前と午後で温泉水の呈色に違いが見られたため、午前9時頃と午後1時頃に調査した。

湯船の温泉水は、日ごとに異なる色を呈しており、しかも頻繁に変化する。湯船の温泉水は、一週間に一度、湯船の底に溜まった温泉沈殿物（単体イオウ）を除くために清掃されており、清掃後、お湯（酸性硫酸塩型温泉水に硫化水素を含む噴気を吹き込ませている）

を張った直後の色は無色透明であり、時間とともに色が付いていく。これらの状況から、この呈色は、下記の化学反応によって温泉水中で硫化水素 (H_2S) が空気酸化を受けて単体イオウ (S) に変化する過程で生じているものであると考えられる。



3-2. 屋外測定

湯船（露天風呂）の温泉水の水質測定と色彩測定の結果を、それぞれ表 1 と表 2 に示した。数値（色度データ）は、いずれも 5 回の測定の平均値である。これら色度データを CIE1931 色度図上にプロットしたものを、図 4 に示す。色度図上のデータポイントから変色する温泉水の主波長を求めると、490nm から 557nm の間の値を示す。この波長は、色相的には青色から黄緑色に対応しているが、彩度は非常に低く、肉眼的には青から乳白色に見える岡本屋旅館の露天風呂の温泉水は、色彩学的には彩度の低い青色から彩度の低い黄緑色を呈していると言える。

呈色や色の変化に対応した特に目立った水質変化は認められなかった。

表 1 露天風呂の温泉水の水質測定結果（2013 年 9 月および 10 月）

試料	pH	EC (mS/m)	ORP (mV)	水温 (°C)
9/13 男湯	3.19	60.4	237	40.5
9/17 女湯	2.91	83.2	256	40.8
9/17 女湯	3.28	51.9	229	39.3
9/18 女湯	2.89	59.7	254	39.8
9/18 男湯	3.13	61.3	238	37.9
10/28 男湯	2.72	119.9	261	40.2
10/29 男湯	2.77	104.3	257	40.6
10/29 女湯午前	2.81	99.5	254	40.6
10/29 女湯午後	5.18	29.9	112	41.0

表 2 露天風呂の温泉水の色彩測定結果（2013 年 9 月および 10 月）

試料	Y	x	y
9/13 男湯	402	0.286	0.341
9/17 女湯	97.6	0.278	0.329
9/17 女湯	82.3	0.300	0.349
9/18 女湯	5.4	0.263	0.313
9/18 男湯	126.2	0.306	0.351
10/28 男湯	88.5	0.303	0.358
10/29 男湯	78.2	0.314	0.361
10/29 女湯午前	15.6	0.277	0.324
10/29 女湯午後	26.8	0.281	0.332

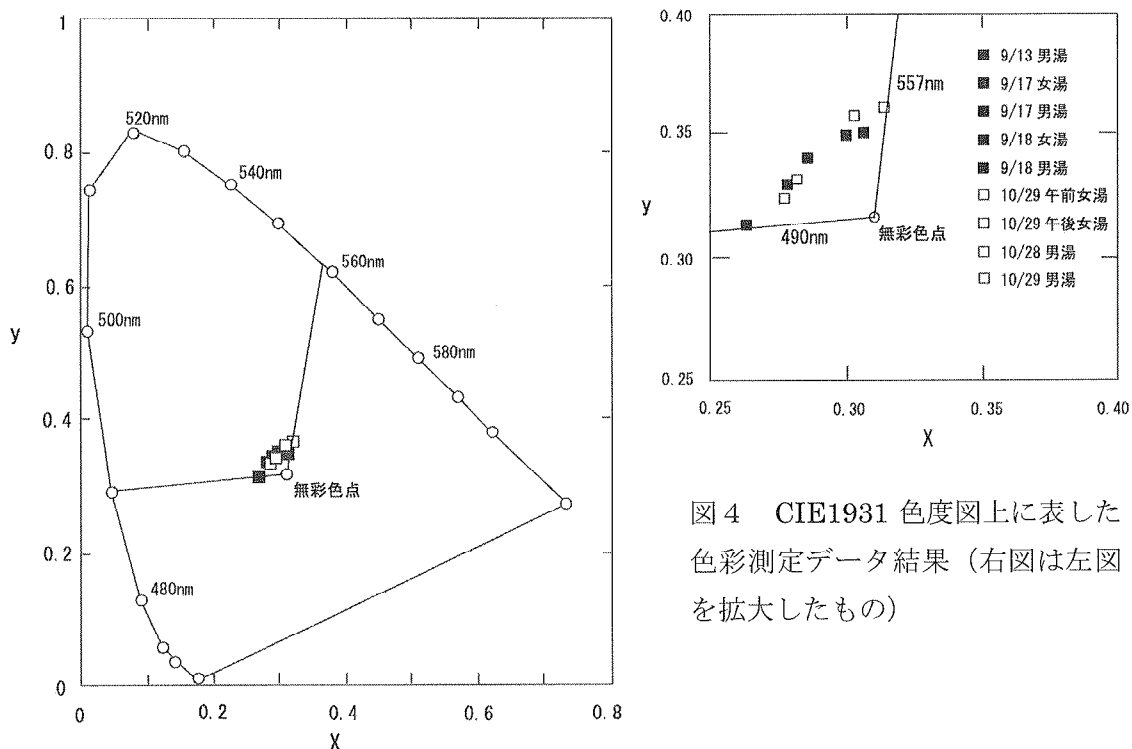


図4 CIE1931 色度図上に表した
色彩測定データ結果（右図は左図
を拡大したもの）

3-3. 屋内測定

前項で求めた主波長とともに、濾過を順々法によって行って求めた粒度ごと (>1.2 μm , 1.2~0.45 μm , 0.45~0.025 μm の三段階) のイオウ濃度測定データを表3に示した。なお、表中のデータは、時系列ではなく主波長の長さ順に並べてある。

>1.2 μm の粒径のイオウ濃度と、呈色の主波長との関係を図5に示した。1.2 μm 以上の粒径のイオウが増えると温泉水の呈色の主波長も大きくなる（黄緑色を呈する）という傾向のあることが見てとれる。この色合い（色相）の微かな変化（黄緑色化）は、肉眼的には乳白色化に対応しており、温泉水の白濁は 1.2 μm 以上の粒径のイオウによるものであると結論できる。また、温泉水の乳白色化に付随する微かな黄緑色化は、巨大化したイオウ粒子の色 - 黄色の付加によるものと考えられる。

一方、0.45~0.025 μm サイズのイオウの濃度は、予想した値に比べると低い値であった。大沢・他（2003）、大沢（2011）を参照すると、0.45~0.025 μm サイズのコロイド粒子の濃度が 0.1mg/L 未満ではレイリー散乱による青い呈色は肉眼的には検知（認知）できないことになり、今回提示されたデータでは温泉水の青色を説明できていない。その原因として、濾過の際に漏斗やフィルター上の濾過物を水洗しなかったことが考えられたため、温泉水試料の濾過後に脱イオン水による洗浄操作を行うことにし、改めて青色を呈している温泉水の観測と分析を行なった。なお、9月、10月の調査で濾過後に脱イオン水による洗浄を行わなかったのは、洗浄液の増加分だけ余分に濾過時間がかかると判断したからである。

表3 試料の主波長とイオウ濃度測定結果 (9月、10月)

	9/18女湯	9/17女湯	9/13男湯	9/17男湯	9/18男湯
呈色主波長(nm)	490	496	504	531	544
> 1.2	0.301	0.382	2.62	8.61	15.8
粒径(μm) 0.45~1.2	0.012	0.041	0.038	0.006	0.05
0.025~0.45	0.099	0.011	0.061	0.009	0.054
	10/29女湯午前	10/29女湯午後	10/28男湯	10/29男湯	
呈色主波長(nm)	494	498	541	557	
> 1.2	3.69	2.49	13.9	15.8	
粒径(μm) 0.45~1.2	0.12	0.066	0.32	0.097	
0.025~0.45	0.012	0.004	0.011	0.009	

3-4. 青色呈色時の温泉水中の粒度別硫黄濃度

9月、10月と同様に、大分県別府市明礬地区の岡本屋旅館の露天風呂で、12月10日と12月11日の両日に色彩測定、水質測定、採取温泉水中の粒度別イオウ濃度を測定した。色彩測定の結果(表4)から主波長を求めると、12月10日の温泉水が496nmで、12月11日は500nmとほぼ同じ値で、9月、10月の調査で同様に青色を呈していた時の値(490nm, 494nm, 496nm, 498nm, 504nm)ともほぼ一致した。また、水質測定の結果(表3-5)にも前回と今回で大きな違いは認められなかった。主波長とともに、粒度ごと(>1.2μm, 1.2~0.45μm, 0.45~0.025μmの3段階)のイオウ濃度測定の結果データを表5に示す。

濾過後に漏斗内やフィルターにのった濾過物を脱イオン水で洗浄することで、0.45~0.025μm 粒径のイオウ濃度として予想される程度の値が得られた(0.1mg/L程度から1mg/L程度)。また、青色を呈する合成イオウコロイド溶液に存在する0.45μm未満の粒径のイオウが示す濃度(1.29mg/L; 恩田・他、2003)と同レベルであることから、岡本屋旅館の露天風呂の酸性硫酸塩型温泉水の青色が0.025~0.45μmサイズのイオウ粒子(コロイド)によるレイリー散乱にともなう呈色であることを指し示していると考えられる。なお、ポンプの吸引力を増すことで、濾過時間を短縮することができ、危惧していた作業時間が余計にかかることは避けられた。

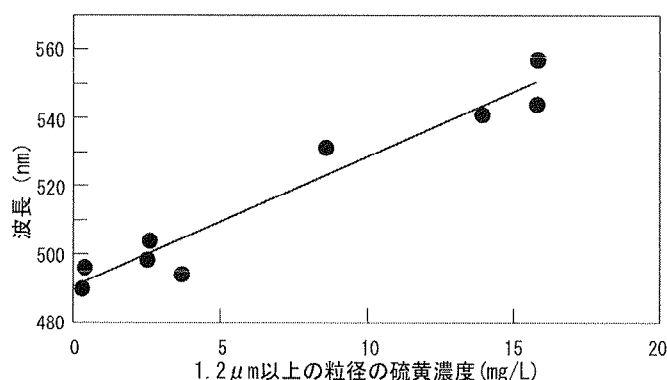


図5 1.2 μm 以上の粒径のイオウの濃度と呈色の主波長との関係

表4 追加調査による色彩および水質測定結果（2013年12月）

試料	12/10 男湯	12/11 男湯
色彩データ		
Y	9.183	9.608
x	0.278	0.287
y	0.329	0.334
pH	2.86	3.39
EC (mS/m)	92.5	50.4
ORP (mV)	248	219
水温 (°C)	35.2	39.6

表5 追加調査による温泉水試料の主波長とイオウ濃度測定結果（12月）

	12/10 男湯	12/11 男湯
イオウ濃度 (mg/L)		
> 1.2 (μm)	13.4	10.4
0.45~1.2 (μm)	0.34	1.15
0.025~0.45 (μm)	0.16	1.17
呈色主波長 (nm)	496	500

4. おわりに

本研究によって得られた結果をまとめると、以下のことが明らかになった。

1. 1.2 μm 以上のより粒径の大きな浮遊イオウによって生じている湯船（露天風呂）内の温泉水の乳白色は、色彩学的には彩度の低い黄緑色であることを示した。この微かな黄緑色化は、巨大化したイオウ粒子そのものの色（黄色）が青色に加わった（混色）ことによるものと考えられる。
2. 大分県別府市明礬地区の岡本屋旅館の青色から乳白色を呈する温泉水について、その青色の呈色は、0.025~0.45 μm サイズのイオウコロイドに伴って生じるレイリー散乱によるものであり、乳白色は1.2 μm 以上のより粒径の大きな浮遊イオウによって生じていると考えられる。

試行錯誤によって、青~乳白色を呈する酸性硫酸塩型温泉水中の各種サイズのイオウ粒子を精度よく分析する方法を提供することができ、実際の温泉水に応用したが、大沢・由佐（1997）が提示した呈色因子・発色機構を確実に保証できるほどの数のデータを得ることはできていない。また、温泉水の青色から乳白色（白濁）化と1.2 μm 以上の粒径のイオウ粒子濃度との関係を直接示すまでには至っていない。今後、本研究で構築した手法によってデータを増やし、引き続き検証を行なっていく必要がある。

5. 謝辞

酸性硫酸塩泉の呈色因子の実証のための実験として、温泉水の試料採取、水質測定を快く受け入れて下さいました岡本屋旅館の岩瀬公男会長と岩瀬智昭社長、平和園の関係者の

方々、試料採取や化学分析でご協力いただいた京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設技術職員の三島壮智氏に心より感謝申し上げます。

6. 参考文献

- Ohsawa, S., Sugimori, K., Yamauchi, H., Koeda, T., Inaba, H., Kataoka, Y., Kagiya, T. (2014) Brownish discoloration of the summit crater lake of Mt. Shinmoe-dake, Kirishima Volcano, Japan: volcanic-microbial coupled origin. *Bull. Volcanol.*, **76**:809 DOI 10.1007/s00445-014-0809-7.
- 大沢信二 (2011) 水文科学が解き明かす不思議な天然水 3 : 様々な色を呈する別府の地獄. *日本水文科学会誌*, **41**, 103-110
- Ohsawa, S., Saito, T., Yoshikawa, S., Mawatari, H., Yamada, M., Amita, K., Takamatsu, N., Sudo, Y., Kagiya, T. (2010) Color change of lake water at the active crater lake of Aso volcano, Yudamari, Japan: is it in response to change in water quality induced by volcanic activity? *Limnology*, **11**, 207-215.
- 大沢信二, 恩田裕二, 高松信樹 (2003) 海地獄の呈色に関する色彩学的・地球化学的研究. *大分県温泉調査研究会報告*, **54**, 15-24.
- Ohsawa, S., Kawamura, T., Takamatsu, N., Yusa, Y. (2002) Rayleigh scattering on aqueous colloidal silica as cause for the blue color of hydrothermal waters. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **113**, 49-60.
- 大沢信二, 由佐悠紀 (1997) : 温泉の色について (青色温泉水の成因に関する一考察). *大分県温泉調査研究会報告*, **48**, 41-49.
- 恩田裕二, 大沢信二, 高松信樹 (2003) : 活動的強酸性火口湖の呈色因子に関する色彩学的・地球化学的研究, *陸水会雑誌*, **64**, 1-10.
- 高松信樹, 西岡光雄, 福島菜月, 桑原直子 (2012) 緑色温泉の呈色機構. *温泉科学*, **60**, 119-133.

姫島火山の溶岩に包有されるザクロ石含有岩の研究

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・芳川雅子

九州大学大学院比較社会文化研究院・環境変動部門

小山内 康人

要旨

国東半島北東に位置する姫島火山群の焼野岳に貫入する金溶岩中に、ザクロ石含有岩を捕獲岩として包有していることを発見した。この捕獲岩を偏光顕微鏡で観察したところ、ザクロ石 - 珪線石 - 黒雲母片麻岩であった。

1. はじめに

姫島は九州国東半島北方沖合約 4km の、九州の火山フロント上に位置し、そこに 7 つの第四紀単成火山による火山群が存在する (図 1)。姫島火山群は角閃石デイサイト、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)。これら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。火山岩は地殻物質を捕獲岩として包有することがあり、これらを用いればマグマ起源への地殻物質の寄与に関する情報が得られる可能性がある。姫島火山岩には花崗岩や斑レイ岩質などの地殻起源の捕獲岩が報告されている (伊藤ほか, 1997)。今回、姫島火山群の焼野岳に貫入する金溶岩からザクロ石を含有する捕獲岩が発見されたので、この捕獲岩の偏光顕微鏡による観察を行い、その結果を報告する。

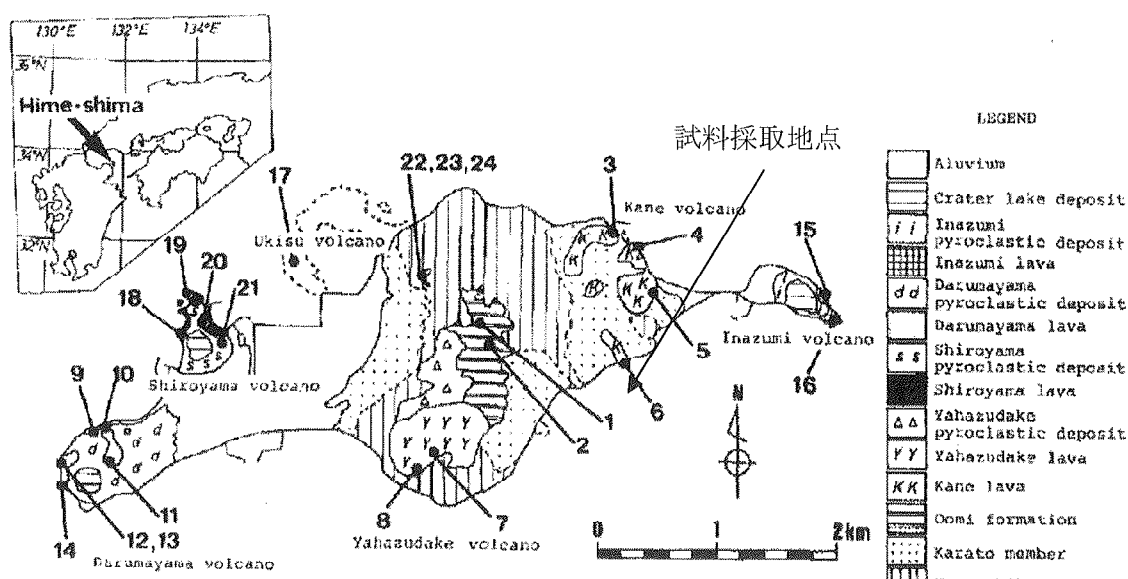


Fig. 1. 姫島の地質図と試料採取地点。伊藤(1990)に加筆。数字は伊藤(1990)での試料番号。

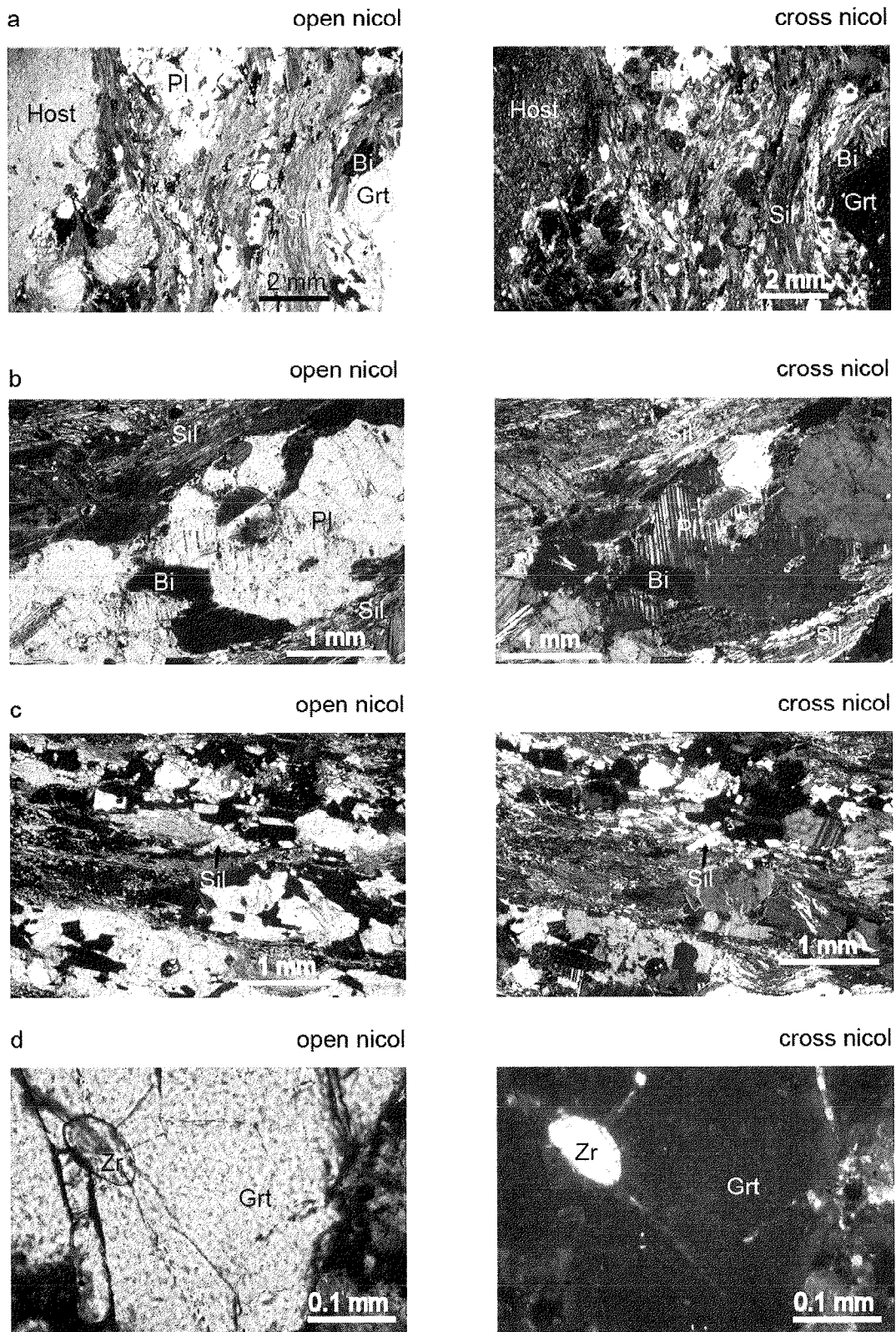


Fig.2. ザクロ石含有岩の偏光顕微鏡写真。左列がオープンニコル、右列がクロスニコルで撮影。略号は、Grt, Sil, Bi, Pl, Zr が、それぞれ、ザクロ石、珪線石、黒雲母、斜長石、ジルコンを表す。

2. 試料採取地点と母岩

試料は、姫島港から直線距離約 3 km西の島南側海岸焼野岳南麓の貫入岩体直下に見られる転石から採取した。この貫入岩は金溶岩に分類されている (伊藤, 1990)。ザクロ石含有捕獲岩の母岩は数センチ幅の流理構造を示す流紋岩状の組織を持ち、貫入岩体と同じ特徴を示す。この溶岩は、角閃石を斑晶として含有し、微量の他形石英が認められる (Fig. 1a)。石基は主に針状の斜長石とガラスからなる。伊藤(1990)が報告した化学組成は、 $\text{SiO}_2 = 69.16 \text{ wt\%}$, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 7.36 \text{ wt\%}$ でデイサイトと流紋岩の境界の特徴を示すが、分類としてはデイサイトである (Le Maitre et al., 1989)。

3. 岩石記載

ザクロ石含有捕獲岩の偏光顕微鏡写真を図 2 に示した。この岩石は、ザクロ石、珪線石、黒雲母、斜長石を主な構成鉱物とし少量のジルコンを伴う、また、弱い片理構造を示す、ザクロ石 - 珪線石 - 黒雲母片麻岩である (図 2a)。ザクロ石は 2~3mm で自形性が強く、ピンク色を呈する。珪線石は、繊維状の結晶が集まり脈状に存在するもの (フィブロライト) と、1mm 以下の長柱状の自形結晶として存在するものの二種類があるが、前者の割合が多い。黒雲母は 1mm 程度で自形~半自形結晶として存在する。斜長石は多くが 1mm 以上の粗粒の他形結晶として黒雲母とともに脈状に存在するが、珪線石と黒雲母の粒間に 0.2mm 程の自形結晶として存在するものもある。ジルコンは 0.1mm 程度の粒状結晶として存在する。

4. 考察

中部九州の地質構造は、北から領家帯・肥後帯・三波川帯が配列していて、大分・熊本構造線を境に領家帯と肥後帯が分布していると考えられている (例えば Taira, 2001)。したがって、姫島の位置する国東半島周辺では領家帯が分布していると考えられているが、新規火山岩類に広く覆われていて実態はよくわかっていない。本研究で報告したザクロ石 - 珪線石 - 黒雲母片麻岩のような珪線石が安定に存在する変成岩は、高温低圧型の広域変成帯である領家帯を構成する変成岩として広く観察される。従って、本研究で記載したザクロ石 - 珪線石 - 黒雲母片麻岩は中部九州に分布する領家帯の高温型変成岩を姫島の第四紀マグマが上昇中に捕獲したものである可能性が高い。今後、領家帯を構成する岩石の地球化学的特徴を姫島の第四紀マグマが影響を受けた地殻物質の一つとして検討することで、マグマの起源と進化過程についてより詳細な議論が可能になる。

Le Maitre, et al. (1989) A classification of igneous rocks & glossary of terms, Blackwell, Oxford.

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

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

Shibata et al. (2013) In Orogenic Andesites and Crustal Growth. Geol. Soc., London, Spec. Public., 385, 15-29.

大分県における地殻の地震波減衰構造

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設

志 藤 あずさ

要旨

本研究では、大分県を対象として地殻の地震波内部減衰を推定した。その結果、別府市、由布市、九重町、日田市において地殻の内部減衰が大きいことが明らかになった。

はじめに

地震波の減衰は地球内部の温度や流体の分布を推定するうえで重要な情報となる。本研究では、大分県を対象として、地殻における地震波内部減衰を推定した。

手法

地震波の減衰を推定する手法はいくつかあるが、本研究では、P波とS波を使ったスペクトル比法(Shito et al., 2003)により地震と観測点間の波線平均の減衰 (Q_s 値) を推定した。図1に解析に用いた地震と観測点の分布を示す。また、図2には、解析に用いたP波とS波の波形とそのスペクトル比の例を示す。解析に用いたデータはHi-netの速度波形の鉛直成分である。P波およびS波のそれぞれ手動で読み取った立ち上がりから-0.25 s から 2.0 s の波形をフーリエ変換してスペクトルを計算し、その比をとったものがスペクトル比である。このスペクトル比の高周波減衰率すなわち傾きから $Q_p/Q_s=2.25$ を仮定して Q_s 値を推定する。スペクトル比の傾きが大きいほど減衰が大きい (Q_s 値が小さい) ことを示している。

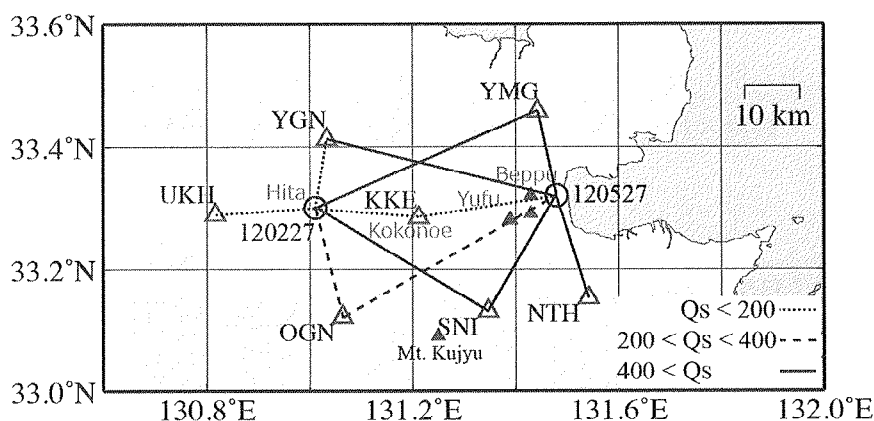


図1：解析に用いた地震 (○) と観測点 (△) の分布図。推定された地震と観測点間の平均 Q_s 値を線で示している。また、▲は活火山を示している。

結果

図1において、地震と観測点間の平均の Q_s 値を線で示している。 Q_s 波が低いほど減衰が大きい。以下に大きな減衰が観測された波線を記す。地震#120527から観測点KKEに至る波線で $Q_s=140$ 、地震#120227から観測点KKEに至る波線で $Q_s=125$ 、地震#120227から観測点UKHに至る波線で $Q_s=60$ 、地震#120227からYGNに至る波線で $Q_s=59$ という値が得られた。また、地震#120527から観測点OGNに至る波線で $Q_s=318$ 、地震#120227からOGNに至る波線では $Q_s=213$ という中間的な大きさの減衰が得られた。残りの波線では減衰が小さい。以上の結果から、別府市、由布市、九重町、日田市では、地殻における地震波の内部減衰が大きいことが明らかになった。

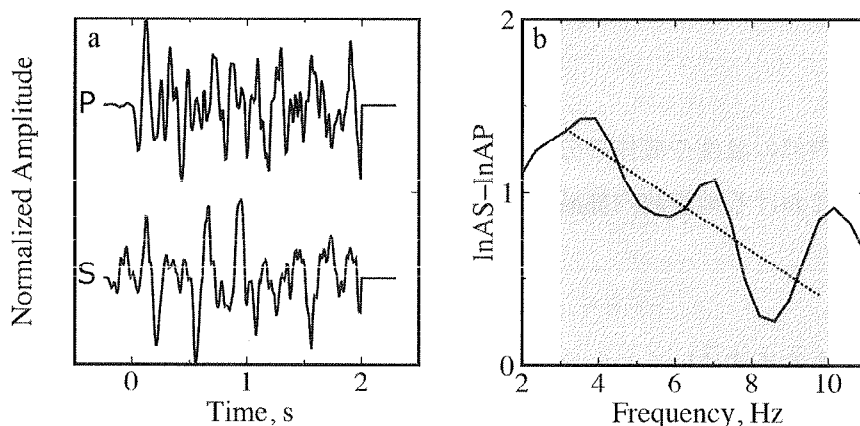


図2: P波およびS波の波形(a)とスペクトル比(b)の例。波形は速度波形の鉛直成分で、手動で読み取った立ち上がりから-0.25 sから2.0 sまでの波形を解析に使用した。スペクトル比は、周波数依存性の影響の少ない3.0-10.0 Hzを解析に使用した。

考察

別府市、由布市、九重町で観測された大きな地震波の内部減衰は、当該地域の地殻の温度が周辺よりも高いことを示唆している。このことは、当該地域に活火山や温泉などの活発な地熱活動が存在していることと調和的である。また、日田市周辺においても大きな減衰が観測された。当該地域には、対応する火山活動は存在しないが万年山地溝群をはじめとする多くの断層の存在が指摘されている。このことから、日田市周辺において観測された大きな減衰は、断層流体の分布に関係する可能性がある。

謝辞

本研究の解析には、防災科学技術研究所のHi-net連続波形データおよび気象庁の一元化震源情報を使用しました。記して感謝いたします。

参考文献

Shito A., and Shibutani T., Anelastic structure of the upper mantle beneath the northern Philippine Sea, *Phys. Earth Planet. Int.*, 140, 319-329, 2003.

大分県の水試料のSr同位体組成

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
鍵山 恒臣・宇津木 充

1. はじめに

水試料中の Sr およびその同位体比 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) や希土類元素組成は、溶存成分の起源や異種の水の混合を解析するための優れたトレーサーとして、その他の地球化学的データと組み合わせて幅広く用いられている (例えば、Shand et al., 2009)。しかしながら、温泉水の Sr 同位体比の報告は、軽元素の同位体比や化学組成の報告と比べると、非常に限られている。本研究では伽藍岳、塚原地熱地域で採取した温泉水・冷泉水・湧水の Sr 同位体比の分析結果について報告する。

2. 試料および分析方法

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、フッ化水素酸・過酸化水素水・硝酸は多摩化学工業超高純度試薬 (TAMAPURE AA-10)、Eichrom[®] Sr 樹脂である。

水試料は洗浄したポリプロピレンボトルに採取し、採取地点は図 1 に示した。クリーンラボ内でメンブランフィルター (孔径 0.2 μm) を用いて濾過後の水試料をテフロンビーカーに分取し、濃フッ化水素酸数滴を加えた後ホットプレートで蒸発乾固した。乾固後の試料を塩酸と過酸化水素酸の混酸で溶かして乾固した後 3M 硝酸に溶かし、Eichrom[®] Sr 樹脂を用いたイオン交換法でオープンカラムによって Sr を単離した (Shibata et al., 2007)。

Sr 同位体比測定は、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表面電離型質量分析計 (ThermoFinnigan MAT262) を用い測定した。なお、測定中の同位体分別効

果の補正係数には $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ を用いた。標準物質 (NIST987) の繰り返し測定結果は、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710264 \pm 0.000030$ (2σ ; $n = 104$) である。

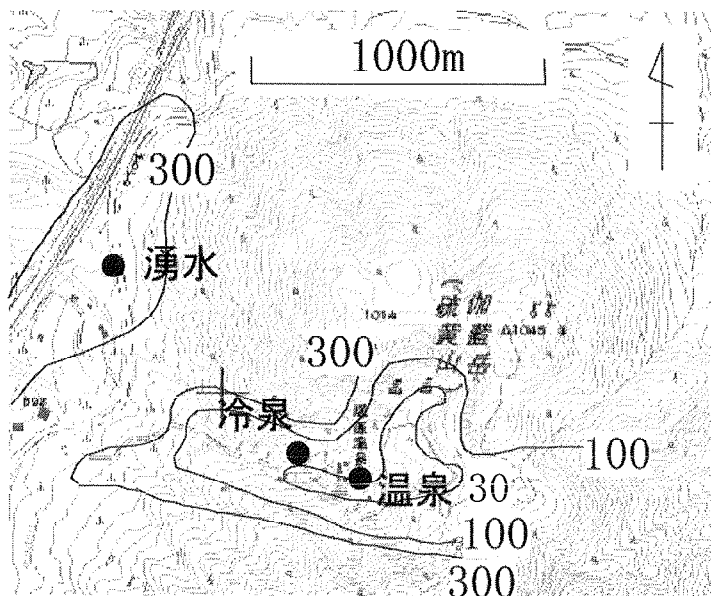


図1 伽藍岳、塚原地熱地帯での採水点 (●) VLF-MT による伽藍岳周辺の広域比抵抗分布 (2008年4月: 単位 $\Omega \cdot \text{m}$; 鍵山ら, 2008) を加筆

3. 結果と考察

分析結果を表1に示す。温泉水と冷泉水の Sr 同位体比 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.704402 \sim 0.704429$) は再現性の範囲内で一致している。温泉水・冷泉水と比べ標高の低い地点で採取した湧水の Sr 同位体比 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.704501$) は有意に高い。この違いが生じた可能性としては、(1) 湧水のみ採水地点が異なっているため、水を通った経路が異なる、(2) 温泉・冷泉水への火山ガス成分の溶解による影響、が考えられる。以下でそれぞれの可能性について検討する。

表1. 水試料の Sr 同位体比

試料	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$2\sigma_m$
塚原 温泉水	0.704429 ± 0.000013	
塚原 冷泉水	0.704402 ± 0.000012	
塚原下 湧水	0.704501 ± 0.000021	

火山体の湧水は降水が火山体内に取り込まれ溶岩や火山砂礫層などからなる帯水層を流動し湧出したものである（例えば、井上ら、2003）。降水中の Sr 濃度は低く、低温での同位体比分別はほとんど起こらないとされているため、火山体の湧水の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は火山岩のものと同じであることが知られている（例えば、Notsu et al., 1991）。伽藍岳火山岩の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は報告されていないが、同時期に噴出し主成分元素組成が類似する（竹村ら、1994）、由布・鶴見岳の火山岩の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は 0.70389~0.70488（太田・青木、1990；Sugimoto et al., 2006）である。本研究で採取された水試料の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比はいずれも由布・鶴見火山岩の組成幅に含まれている。より低い標高で湧出する地下水は、一般的に、滞留時間が長いと考えられている。Singleton et al. (2006) は地下水涵養域から距離の増加に伴い地下水の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が帯水層を構成する堆積岩の値に近づく事を観察し、地下水に堆積岩中の Sr がより多く溶けだした事によると解釈している。同様の事が伽藍岳でも起きたとすれば、より低い標高で採取された湧水は伽藍岳火山岩の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比により近づくことが推測される。しかし、一般に降水の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は火山岩のものより高いため、より低標高で採取された水はより低い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比を示すはずであり、本研究で得られた結果と事なる。従って、湧水が温泉・冷泉水より高い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比を示すのは火山帯下部層により高い Sr 同位体比を持つ層序が存在するためかもしれない。

一方、伽藍岳の温泉水は雨水が噴気ガスと混合され形成されたもので、噴出蒸気中の水を除く非凝縮性ガス（地熱ガス）の化学組成から、地熱ガス中にマグマ性のガスが含まれている可能性が示唆されている（由佐ら、1995）。塚原地熱地域では比抵抗分布調査が行われ、中心部近郊には $30\ \Omega\cdot\text{m}$ から $100\ \Omega\cdot\text{m}$ 程度の極めて抵抗の低い領域が、伽藍岳西麓では $100\ \Omega\cdot\text{m}$ から $300\ \Omega\cdot\text{m}$ 程度のやや抵抗の低い領域が存在することが確認され、前者は地熱流体がかなり混入しており後者は通常の天水が大部分を占めるとされている（鍵山ら、2008）。本研究の結果はその結果と調和的であるため、湧水と温泉・冷泉水の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比の違いは地熱ガスによるものと推測され、地熱ガスの $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は湧水より低いと思われる。

今後は伽藍岳の火山岩や雨水の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比や希土類元素組成を蓄積し、さらなる検討を行いたい。

謝辞

調査に際して、塚原温泉関係者にご協力をいただいた。ここに記して、感謝申し上げます。

参考文献

- 井上睦夫・小林俊則・中村 昇・大谷 恵子;・中島 剛・小村和久 (2003) 鳥取県大山火山中腹に湧出する地下水の流動系 : 同位体地球化学的情報からみた地下水の履歴 日本水文科学会誌, 33, 255-267.
- 鍵山恒臣・宇津木充・吉川慎・寺田暁彦 (2008) 伽藍岳・塚原の地熱活動の周辺域への広がりに関する調査, 大分県温泉調査研究会報告, 59, 35 - 39.
- Notsu, K., Wakita, H. and Nakamura, Y. (1991) Strontium isotopic composition of hot spring and mineral spring waters, Japan. *Applied Geochemistry*, 6, 543-551.
- 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船員一二端成分マグマ混合モデル— 岩鉱, 86, 1-15.
- Shand, P., Darbyshire D.P.F., Love, A.J., Edmunds, W.M. (2009) Sr isotopes in natural waters: Applications to source characterization and water-rock interaction in contrasting landscapes. *Applied Geochemistry*, 24, 574-586.
- Shibata, T., Yoshikawa, M., Sugimoto, T. (2007) Semi-automatic chemical separation system for Sr and Nd isotope analyses. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 102, 298-301.
- Singletona, M.J., Maher, K., DePaolo, D.J. Conrad, M.E., Dresel, P.E. (2006) Dissolution rates and vadose zone drainage from strontium isotope measurements of groundwater in the Pasco Basin, WA unconfined aquifer. *Journal of Hydrology*, 321, 39-58.
- 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.
- 竹村恵二・由佐悠紀・馬渡秀夫 (1994) : 別府地域の火山岩調査 (2) 大分県温泉調査研究会報告, 45, 11-14.
- 由佐悠紀・大沢信二・北岡豪一・竹村恵二・福田洋一 (1995) 伽藍岳の地熱調査 大分県温泉調査研究会報告, 46, 5-13.

AMT法を用いた伽藍岳地下比抵抗構造調査

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
宇津木 充

要 旨

我々はこれまで、伽藍岳及びその周辺域において地下の地熱流体の分布、規模などについての情報を得るため地下比抵抗構造調査を実施してきた。今年度においても伽藍岳西側山麓及び山頂部で AMT 観測を行った。今回の観測データとこれまで行われた AMT 観測データを用いて 2 次元解析を行い伽藍岳山体内部の詳細な比抵抗構造を求めた。

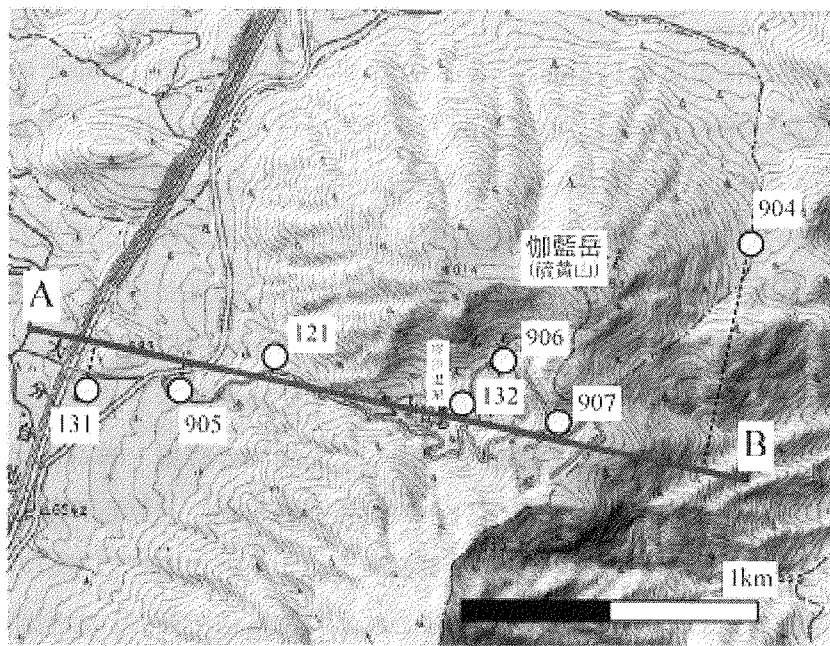
1. はじめに

火山ガスの溶存成分を多量に含む熱水は電気抵抗が極端に低くなる事が知られており、地下の比抵抗構造を詳細に求める事で地下熱水系の存在域・規模に関する情報が得られる。比抵抗探査の効率的な手法の一つに MT (Magneto-Telluric) 法と呼ばれる電磁探査法がある。この手法では、太陽活動など地球外起因の自然磁場擾乱により、導体である地中に電磁誘導で誘導される電場の振幅・位相を測る事で地下の比抵抗分布に関する情報を得る。このため地表に磁気センサーと電極を設置し、磁場擾乱と誘導電場を同時計測する。また比抵抗分布の深さ方向の解像度を得るために電磁波到達深度の深さ依存性を用いる。即ち高周波の磁場擾乱は地中に浸透すると急速に減衰してしまうが低周波は減衰の効果がより少ない。この特性を利用して高周波の磁場・誘導電場シグナルから浅部の、低周波シグナルから深部までの比抵抗分布の情報が得られ、それらの解析から深さ方向の比抵抗分布が得られる。このためターゲットとする深さによりどこまでの帯域の電磁場を計測するかが異なり観測期間も変わってくる。今回及びこれまで伽藍岳で行われた観測では、火山体内部の比抵抗構造をターゲットとするため地下 1~2km 程度までの探査深度を持つ AMT (Audio-frequency MT) 法を用いた。この観測手法で観測するのは 10k~1Hz 程度の帯域の電磁場で、半日~1 日程度の観測が必要になる。このため人工擾乱の影響が比較的少ない夜間 (21:00~9:00) でタイマー起動により観測を行った。いずれの観測点も人工ノイズ源から遠いこともあり、ノイズレベルは比較的強く良好なデータが得られた。観測機器はカナダ Phenix 社製 MT-AMT 観測装置 MTU-5A を用いた。測定機器はすべて GPS により時刻同期を行い、電場 2 成分と磁場 3 成

分の時系列データを同時取得した。得られた磁場・電場の時系列データを等間隔のセグメントに分割し、それぞれについて周波数解析を行い 10.4k~0.35Hz の範囲の 60 周波数についてパワースペクトルを求め見かけ比抵抗、位相のサウンディングカーブを得た。また、同日に異なる 2 点以上で同時観測を行い同時刻で相関の高い (=空間波長が長く局所的な人工擾乱でない) シグナルのみを取り出すリモートリファレンス処理を行い、より良好なデータのみを解析に使用した。

2. 伽藍岳における AMT 観測

我々はこれまで、数回にわたり伽藍岳において AMT 観測を実施してきた。宇津木・他(2008)では伽藍岳北側の林道沿い及び西側の登山道路沿いで AMT 観測を行った。その結果、地下の火山性流体の関与を受け低比抵抗を示す帯水層と思われる低比抵抗層が地下 400~500m の位置に見られた。今回の研究では山体内部のより詳細な比抵抗構造を得る事を目的に、伽藍岳西側道路沿いの 2 点(図 1 の 131、132)で AMT 観測を行った。解析には、これらに加え 2008 年の AMT 観測点 0904-0907



及び 2012 年に行われた AMT 観測点 121 での観測データも加えた。解析に用いた観測点分布を図 1 に示す。上記データを用い図 1 の A-B ライン地下の比抵抗構造を 2 次元解析で求めた。この解析には Uchida and Ogawa (1993) の、構造の平滑化を拘束条件にした ABIC 最小化インバージョンコードを用いた。なお、本解析では TM モードのみを用いている。

図 1 伽藍岳における AMT 観測点分布

904-907: 2008 年, 121: 2012 年, 131-132: 2013 年 AMT 観測点。図中の測線 A-B の地下比抵抗断面を 2 次元解析で求めた。

3. 伽藍岳内部の比抵抗構造

2 次元解析の結果を図 2 に示す。またサウンディングカーブの実測値及び図 2 のモデルによる理論値の一部を図 3 に示した。図 2 のカラースケールは白色が低比抵抗、黒色になるほど高比抵抗

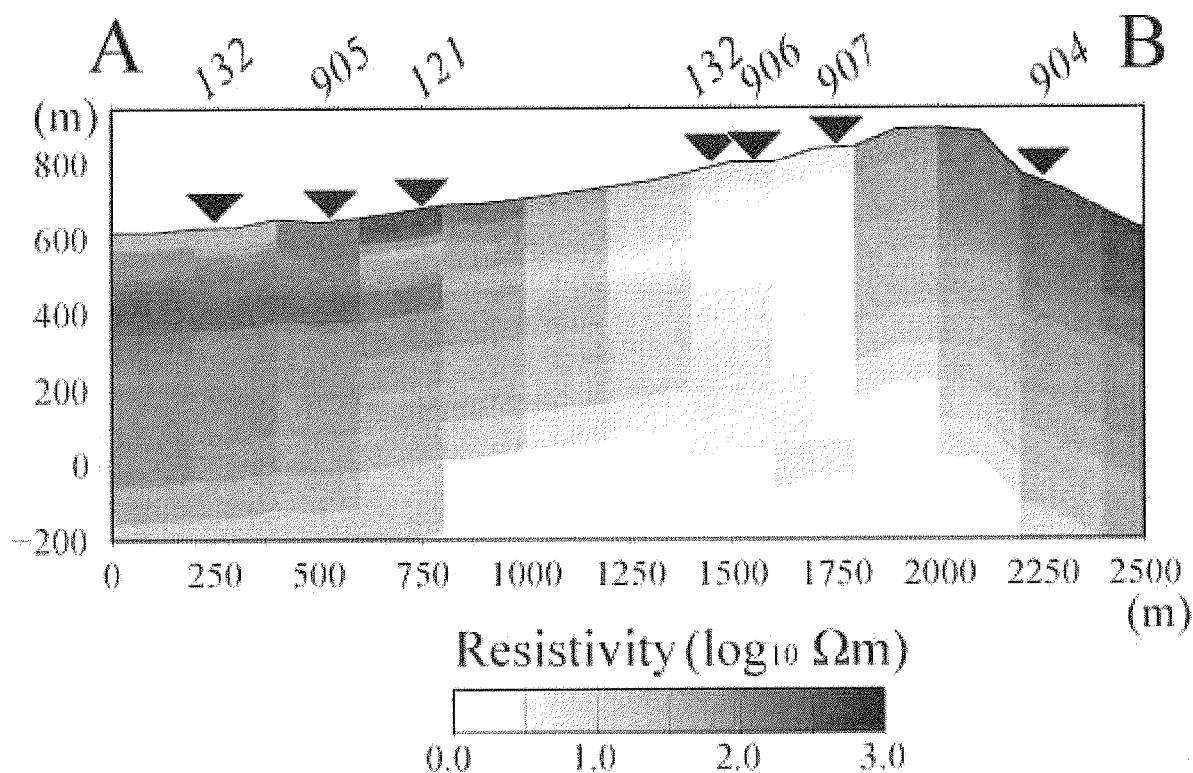


図 2. 2次元解析で求められた伽藍岳を東西に横断する測線（図 1 の A-B）の地下比抵抗断面
白色に近い程低比抵抗($1\Omega\text{m}$ ～)、黒色ほど高比抵抗($\sim 1000\Omega\text{m}$)で有る事を示す。

である事を示す。伽藍岳ではこれまで、AMT 観測の他にも自然電位観測、電気探査、磁気観測といった電磁気観測が行われている。大羽・他(1997)及び橋本・他(2003)による自然電位観測では、山頂付近の爆裂火口原中心部に自然電位異常が見出された。また鍵山・他(2008)による VLF-MT 調査の結果火口原内に低比抵抗域が見出された。さらに田中・宇津木(2003)による地磁気観測の結果から、地下からの熱水供給により地中の岩石の岩石磁化強度が変わり磁場が変化した事が報告されている。これらの事から火口原地下に熱水の上昇流の存在が示唆されている。図 2 を見ると、山体地下、海拔深度付近に低抵抗域(数 Ωm)が存在し、それが火口源直下(観測点 132、906、907 の直下)まで連続している。この深部～浅部に連続する低抵抗域が火口源地下の熱水上昇に対応するものであると考えられる。また浅部ではこの低抵抗域が、地表から 200m 程度で斜面に沿って連続するようにも見える。但しその層厚は急激に薄くなり山麓部の 905、121 観測点地下では不明瞭になっている。この事は或いは、熱水が地下水と混合して希釈され抵抗値が急激に高まっていると解釈する事も可能であるが、観測点 121 と 131 の間には観測点が無く、この領域の構造の精度は極端に低くなっている可能性がある。この領域については今後観測点を補強しモデル精度を高

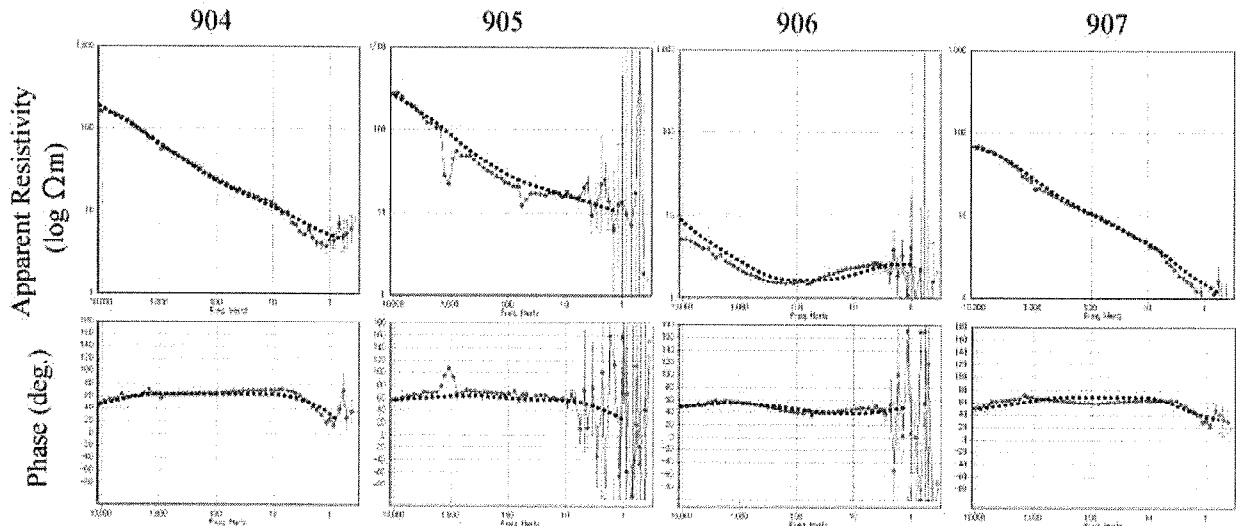


図 3.見かけ比抵抗・位相のサウンディングカーブの実測値(●)と図 2 のモデルによる理論値 (破線)

める必要がある。観測点 131 の地下浅部では、抵抗値が周辺よりやや低くなっている。鍵山・他(2008)による VLF-MT 調査の結果からこの付近での表層比抵抗はやや低い事が見出されているが今回のモデルの結果はこれに調和的である。また図 2 の結果から鍵山・他(2008)に見られる低比抵抗域はごく浅部に限られている事が示唆される。

4. 終わりに

今回の研究で伽藍岳を東西に横切る測線で比抵抗構造解析を行った。深部から浅部まで続く低比抵抗域が地下から上昇する熱水の経路であるとする、浅部まで上昇してきた熱水がこのあとの様な経路を通るのが興味深い点である。この点を明らかにするには観測点 121~132 の間に観測点をさらに追加する必要があるが、今回の観測では塚原温泉への登山道路沿いで観測を行っていた事もあり、この区間が谷筋の狭隘な場所で観測機器を展開できる広い場所が見出せなかった。また温泉施設への電力線がこの道沿いにはほぼ平行しておりノイズ環境も芳しくない。今後この周辺で 121~132 間に対応する観測点を追加しより精度の高いモデル構築を目指したいと考えている。

参考文献

橋本武志・網田和宏・長谷英彰・田中良和(2003): 自然電位調査による鶴見岳周辺域の地下熱水系の推定、大分県温泉調査研究会報告、54、91-96.

鍵山恒臣・宇津木充・吉川慎・寺田暁彦(2008)：伽藍岳・塚原の地熱活動の周辺域への広がりに関する調査、大分県温泉調査研究会報告、59、35-39.

大羽成征・田中良和・由佐悠紀(1997)：伽藍岳の地熱調査（3）－自然電位測定による熱水流動系解析の試み－、大分県温泉調査研究会報告、48、13-20.

田中良和・宇津木充(2003)：地磁気変化を利用した地熱の推移に関する研究（3）、大分県温泉調査研究会報告、54、85-89.

Uchida, T. and Ogawa, Y. (1993) : Development of Fortran code for two-dimensional magnetotelluric inversion with smoothness constraint, Geological Survey of Japan Open-File Report, 205, 1-115.

宇津木充・鍵山恒臣・井上寛之他(2008)：伽藍岳及びその周辺域における比抵抗構造調査、60、43-48.

大分県九重町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

九重火山群の北方に位置する大分県九重町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、九重町中央部の猪牟田カルデラ東部では低電気伝導度を示し、その周辺部にあたる九重町西部の玖珠川以西の領域、東部の山下池から滝上地熱発電所にいたる領域、北部の野上川流域において高電気伝導度が見られた。これらの高電気伝導度領域は、西北西－東南東方向、あるいは東北東－西南西方向に延びる傾向を示し、別府－万年山断層帯などの当該地域構造線によく対応している。一方、南部では、九重火山群を構成する火山から山麓にむけての高電気伝導度領域が認められ、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た可能性がある。

1. はじめに

大分県九重町は、九重火山群の北方に位置し、西部の町田川沿いには壁湯、宝泉寺などの温泉が点在している。また、東部には滝上地熱発電所が稼働するなど地熱活動が活発である。このような地熱活動の熱源が九重火山群の活動と関係しているのか？あるいはその他の理由で供給されているのか？といった観点からたいへん興味を持たれる。鍵山・他(2011)は、九重火山群の南東部に位置する長湯温泉周辺の表層電気伝導度分布を調査し、九重火山群・大船山付近から七里田温泉を経て長湯温泉に延びる領域が比較的高い電気伝導度となることを示し、山田・他(2005)の「九重火山群のマグマから供給された二酸化炭素が九重火山群南東山腹で涵養された地下水に付加されて南東方向に流下している」という主張と整合的であることを示している。また、鍵山・他(2012, 2013)は、九重火山群の東側および北側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。たとえば、九重火山群北東側の阿蘇野に延びる領域、硫黄山から長者原を経て北麓に延びる領域、牧ノ戸峠から八丁原、筋湯に延びる領域などである。これらは、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がある。一方で、鍵山・他(2013)は、長者原から飯田高原、町田牧場を経て小倉岳周辺にいたる北西方向の領域にも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。また、鍵山・他(2012)は、由布岳、由布院盆地周辺の高電気伝導度領域が由布院川西地区から大分川に沿って南南東方向に延びた後、下湯平から湯平温泉に延びていることを指摘しており、九重火山群地域が周辺域の地熱活動とどのように関係しているかも重要であることを示している。こうした背景から、九重町周辺において 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九重火山群とその周辺部の広域表層電気伝導度分布について検討をおこなった。以下に調査および検討結果を報告する。

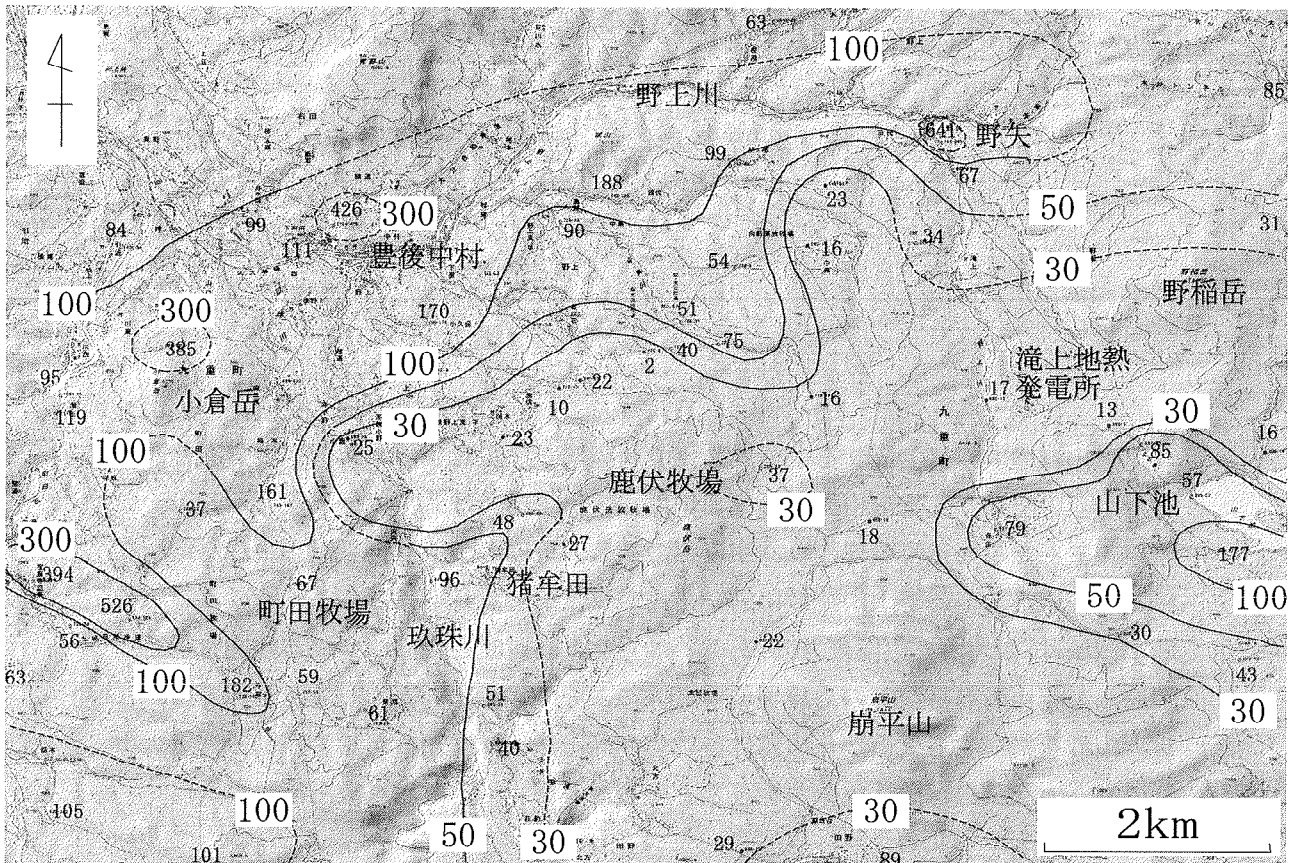


図1 VLF-MTによる九重火山群北麓周辺の表層電気伝導度分布 (単位は μ S/cm).
(地図は、国土地理院のウォッチーズおよびカシミールによる)

2. VLF-MTによる九重町周辺の表層電気伝導度分布

調査は、図1に示す全域において2013年4月から2014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電気伝導度分布を示す。なお、緯度、経度10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、以下に示す特徴があげられる。猪牟田カルデラ東部に対応する鹿伏牧場から野稻岳、崩平山にいたる広い範囲において、 30μ S/cm以下の低電気伝導度を示している。この領域の北側にあたる野上川流域(久大本線に沿う領域)、西側にあたる玖珠川以西の領域(町田牧場、小倉岳、壁湯温泉、宝泉寺温泉、川底温泉など)、東側にあたる山下池から滝上地熱発電所にいたる領域では、 50μ S/cm以上、多くの場合は 100μ S/cm以上の高電気伝導度を示している。前者の領域は、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、熱変質も進んでいないと思われる。一方、後者の領域ではなんらかの地熱活動によって高電気伝導度を示していると思われる。

3. 九重町周辺の広域表層電気伝導度分布

上記の調査結果に加えて、過去に実施した周辺域での調査結果および熊本県小国町、南小国町において実施した調査調査も加えて、広域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10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、九重火山群を形成する溶岩ドームおよび溶岩流などの山体部では 30μ S/cm以下の低電気伝導度を示している。また、これよりやや古い

火山体においても $30 \mu\text{S/cm}$ 以下の低電気伝導度を示している。これらの領域では、表層付近に地下水が存在せず、熱変質も進んでいないことを反映したものと思われる。それ以外の地域では $30 \mu\text{S/cm}$ 以上の電気伝導度を示しており、特に、 $50 \mu\text{S/cm}$ 以上の電気伝導度を示す領域には、高い電気伝導度を示すなんらかの理由があると思われる。以下にそれぞれの地域ごとにその特徴を検討する。

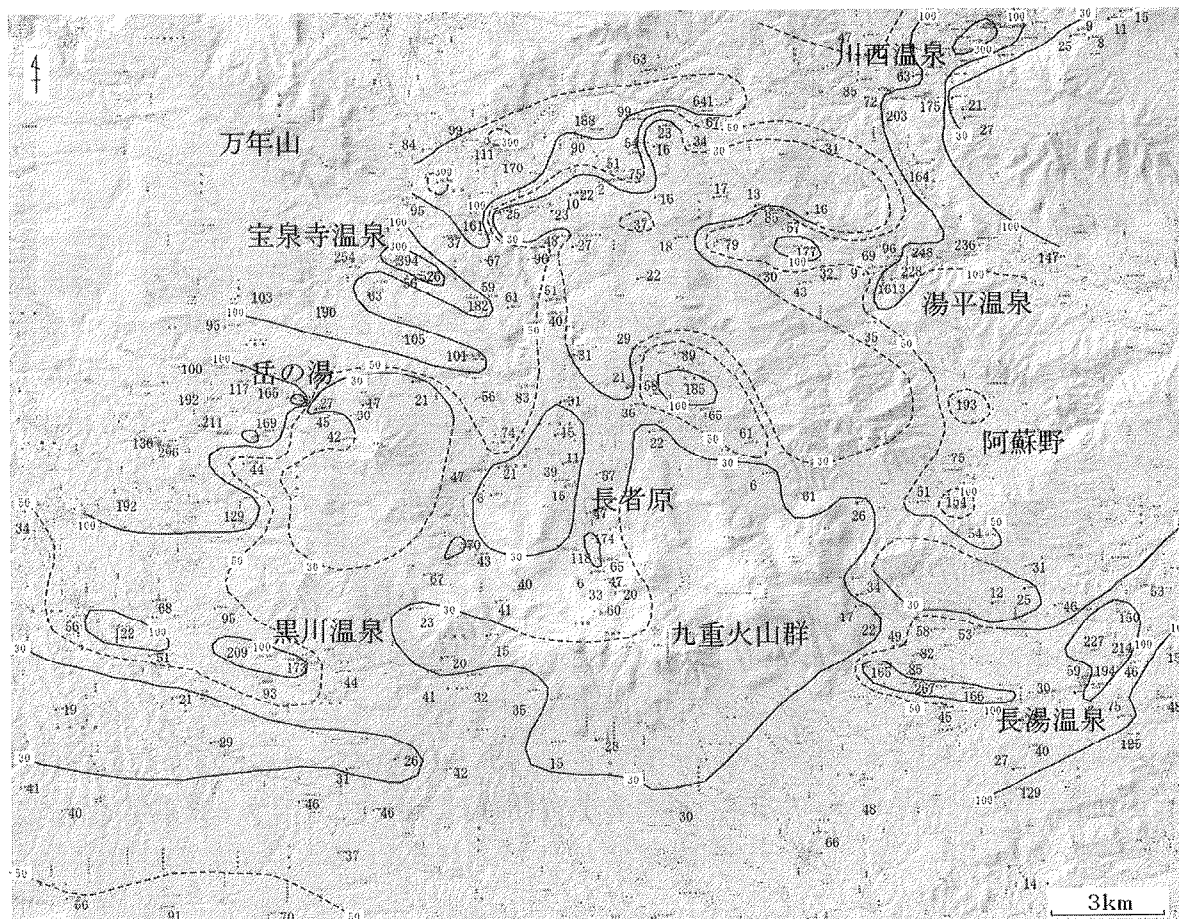


図2 VLF-MTによる大分県九重町周辺の広域表層電気伝導度分布(単位は $\mu\text{S/cm}$)。

(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)

3-1 大分-熊本構造線に沿う高電気伝導度域

図2の右下の部分に東北東-西南西方向に $50 \mu\text{S/cm}$ 以上の高電気伝導度領域(部分的には $100 \mu\text{S/cm}$ 以上)が延びている。この領域の電気伝導度分布は、鍵山・他(2011)においても報告されているが、大分-熊本構造線に沿うように分布している。長湯温泉は、この構造線と九重火山群から南東にのびる高電気伝導度域との交点に位置している。この図の東側延長には塚野鉱泉なども位置しており、広い範囲にわたって構造線を通して地下深部の流体が上昇してきていると推測される。このことを明らかにするためには、同地域の調査を拡大していく必要がある。また、阿蘇カルデラの東方における調査でも同じような高電気伝導度が計測されており、その間を埋める調査も必要である。

3-2 由布院断層-野上川に沿う高電気伝導度域

図2の左上から西側に東北東-西南西方向に $50 \mu\text{S/cm}$ 以上の高電気伝導度領域(部分的には $100 \mu\text{S/cm}$ 以上)が延びている。この領域の東側の領域は由布院盆地に対応しており、鍵山・他(2010)は、由

布院断層に沿うように高電気伝導度域が延びているとしている。この高電気伝導度領域は、一部は3-3節に示す川西温泉地区から大分川に沿う高電気伝導度域に続いているが、一部は西に延び、野矢から野上川に沿って豊後中村にいたる高電気伝導度域を形成しているように見える。この領域は、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、野稻岳の北側から西南西方向に延びる断層群（崩平山-万年山地溝北縁断層帯の一部）に近いので、なんらかの構造線が存在する可能性がある。ただ、この領域の北側には測定点がないため、この領域の特徴を明らかにするためには、野上川（久大線）以北の調査を行う必要がある。

3-3 由布院川西温泉-湯平温泉-山下池の高電気伝導度域

上記（3-2節）にも指摘しているが、図2に示すように、由布院盆地の高電気伝導度域は由布院川西地区から南南東に折れて大分川に沿うように延びている。その延長がどのように続くか現段階では測定点が不足しているが、一部は下湯平から湯平温泉を経て、山下池付近に $50\mu\text{S/cm}$ 以上の高電気伝導度領域が延びている。この領域には、滝上地熱発電所の生産井が含まれており、なんらかの亀裂を通して熱水が上昇し、周辺の岩盤を熱変質させているものと思われる。山下池付近には同じ走向で断層が記載されている（たとえば九州活構造研究会, 1989）。

3-4 九重火山群山麓部の高電気伝導度域

九重火山群を構成する山体部では、 $30\mu\text{S/cm}$ 以下の低電気伝導度を示している。例外的に、硫黄山の噴気地帯から長者原方向に下る沢に沿って $50\mu\text{S/cm}$ 以上を示す地点が点在している。長者原以北には湿原や火山砕屑物が埋積した平坦地が広がっており（吉部、田野地区）、その付近の電気伝導度は $50\mu\text{S/cm}$ 以上を示している。また、九重火山群北東方の阿蘇野や南東方の七里田・長湯温泉などにも高電気伝導度域が見られる。これらは、九重火山群のマグマから発散される火山ガスが地下水に溶け込み流下してきたものと推測される。

3-5 玖珠川以西の高電気伝導度域

第2節に示したように、猪牟田集落と町田牧場の間を流れる玖珠川の東側では $30\mu\text{S/cm}$ 以下の低電気伝導度を示し、以西の町田牧場、小倉岳、壁湯温泉、宝泉寺温泉などの広い領域で $50\mu\text{S/cm}$ 以上を示している。この高電気伝導度領域は、北部では少なくとも町田川流域まで広がっており、南部では、熊本県の小国町から南小国町までの広い範囲に及んでいる。町田川流域以西にこの高電気伝導度域が広がっているかどうかは興味があるが、未調査であるため不明である。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。本研究者らも、その可能性は否定しないが、当該高電気伝導度域は、町田川流域よりも東側の地域を含んでおり、この亀裂によってのみ熱水が供給されているとは考えにくいと推測する。むしろ、当該高電気伝導度領域の東の境界（玖珠川）が、九重硫黄山から長者原に延びる高電気伝導度域の方向とほぼ一致しており、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。また、この高電気伝導度領域の多くは、西北西-東南東方向に延びる傾向を示している。たとえば、北から、宝泉寺温泉の溪流方向、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、満願寺温泉から黒川温泉にいたる領域などである。これらの方向は、当該地域の西に隣接する地域で崩平山－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。特に、宝泉寺温泉から万年山にかけては断層が推定されており、猪牟田カルデラの西縁を貫く構造が存在すると思われる（たとえば大分県・九重町, 1989）。この高電気伝導度領域がさらに西に延びているかどうかは大変興味があり、今後、調査域を拡大させる必要がある。

4. まとめ

九重火山群の北方に位置する大分県九重町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、九重町中央部に位置する鹿伏牧場から野稻岳、崩平山にいたる広い地域で $30 \mu \text{ S/cm}$ 以下の低電気伝導度を示すことが明らかになった。この領域は、猪牟田カルデラなどから噴出し、溶結した噴火堆積物や溶岩によって覆われているために表層付近に地下水が存在せず、熱変質も進んでいないと思われる。この領域の周辺にあたる領域（西側の玖珠川以西の領域、東側の山下池から滝上地熱発電所にいたる領域、北側の野上川流域）において、 $50 \mu \text{ S/cm}$ 以上の高電気伝導度領域が認められた。

九重町周辺における測定値も加えて、より広域の電気伝導度分布を検討した結果、九重町および九重火山群周辺では、以下の領域で高電気伝導度を示すことが明らかとなった。第1に、大分－熊本構造線に沿う領域、第2に、由布院断層から野上川流域にいたる領域、第3に、由布院川西地区から大分川流域を経て下湯平、湯平温泉、山下池にいたる領域。これらの領域は、九重火山群より東側の活構造を反映した領域と思われる。第4に、九重火山群から山麓にむけて広がる高電気伝導度領域、硫黄山から長者原を経て北麓に延びる領域、大船山から北東麓の阿蘇野にいたる領域、大船山から南東麓の七里田、長湯温泉にいたる領域などで、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た可能性がある。第5に、玖珠川以西の領域で、特に電気伝導度の高い領域が西北西－東南東方向に延びる傾向を示している。この領域は、崩平山－万年山地溝北縁断層帯とほぼ一致する方向性を持っており、断層の亀裂を通して熱水が上昇し、周辺の岩盤を熱変質させていると思われる。これらの領域が中部九州の活構造を反映したものであるならば、より広域においても同様の関係が見出されると期待され、より広域の調査を行う必要がある。

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・吉川 慎 (2011) : 長湯温泉周辺の表層電気伝導度分布, 大分県温泉調査研究会報告, 62, 9-12, 2011.
- 鍵山恒臣・宇津木 充・吉川 慎 (2012) : 九重火山群北東麓・阿蘇野周辺の表層電気伝導度分布, 大分県温泉調査研究会報告, 63, 19-22.
- 鍵山恒臣・宇津木 充・吉川 慎 (2013) : 九重火山群北麓周辺の表層電気伝導度分布, 大分県温泉調査

研究会報告, 64, 53-56.

九州活構造研究会 (1989) : 九州の活構造. 東京大学出版会, 553p.

山田 誠・網田和弘・大沢信二 (2005) : 同位体水文学的手法による九重火山南東麓に湧出する炭酸泉の湧出機構の解明, 温泉科学, 54, 163-172.

温泉観光地における新しい情報発信の構築に向けた研究

別府大学 中山 昭 則

要 旨

観光地における情報発信の重要性は各方面から指摘されている。今日スマートフォンの普及を受けてこれらを活用した音声ガイドや地図案内といった試みは各地でなされている。他方では、地域の歴史遺産が観光資源として有益であることを提示している。中でも鳥瞰図は往時をリアルに描写していることから、地域の歴史を知るツールとして見直され、観光ガイドマップとしても有用性が認識されつつある。

こうした背景を踏まえて、本報告では別府市を事例として、鳥瞰図を用いた新しい情報発信の構築を検討した。その結果、細かでリアルある描写は往時(鳥瞰図作成期)と今日を比較しながら観光する、いわゆる「街歩き」のツールとしての可能性を見出すことができた。反面、鳥瞰図は作者あるいは依頼者の主観が大きく入り込んだものも多く、リアルではあるがその正確性を検討する必要性および、技法による描写の偏りも観光マップとして活用する上で課題となることも検証できた。

I はじめに

昨今の観光地において情報発信の重要性が唱えられて久しい。多くの観光地において新しい情報発信の構築に向けた方策が練られている。わが国を代表する温泉観光地別府温泉郷(以下、当地)においても例外ではない。当地の情報発信の方法として今世紀から本格化したものとして「ボランティアガイド」が挙げられよう。当地のボランティアガイドの実態と特性に関して筆者は本報告書等にて報告している(中山 2006、2010、2011、2012)¹⁾。当地のボランティアガイド最大の特色は、地域ごとに分化し独自の組織で活動をしている点にある。現在 15 組織が 17 コースを設定して活動している。これだけの団体が同じ市内をいわば“棲み分け”して活動している例は全国的にも稀といえよう。その一方で、例えば観光協会が統括し、300 人規模のガイドを抱えて市内数十コースを設定している長崎市と比べると、組織間の統一性が取れておらずガイドの方法やスキルといった面に課題を抱え、加えて財政と人材育成の面からも安定的な持続性といった面で課題を残す。

こうしたボランティアガイドという人を介した情報発信という手段とともに、近年ではスマートフォンやタブレット端末機を活用した新たな取り組みも一般化しつつある。当地においてもその試みは始まっている²⁾。しかし、スマートフォン等の機器が普及したといえども、高齢者層や団体旅行においては一般的とはいえず、こうした旅行者層に普及させるには改善すべき点が多い。

また、最近の歴史ブームにあやかった情報発信も盛んになっている。例えば、中高年層は近年の「江戸ブーム」に端を発した「歴史散歩」に関心を高め、東京都区内では『江戸の町歩き』が人気を呼んでいる。さらに大河ドラマの主人公ゆかりの地は毎年観光客で賑わっている。その他全国各地の旧街道を歩くガイド本も多く出版されている。加えてテレビ番組「ブラタモリ」の人気や³⁾、外国の都市を対象としたカフェ巡りのガイドブックが出版されるなど“一味違った観光”に対するニーズも高まっているといえよう。

こうした“歴史ブーム”と“散策ブーム”を背景とした新しい観光動向の中で、地域の歴史を知る重要なツールとして「鳥瞰図」が見直されつつある。鳥瞰図は大正時代末から昭和初期に活躍した吉田初三郎がブームを巻き起こし、初三郎は観光 PR 用の鳥瞰図を全国各地で残している⁴⁾。鳥瞰図の魅力は驚くほどリアルで洒落気ある描写と、空を飛べた筈もない時代にあって驚くべき正確な描写といえよう。

さて、当地においても鳥瞰図は初三郎の手によるものをはじめ数多く残されている。そこで、本報告では当地において鳥瞰図を活用した、新しい情報発信の構築を検討していきたい。今回はいわゆる「鳥瞰図ブーム」といわれる昭和初期よりさらにさかのぼり、明治末に作成された作品を取り上げ、これを基にした新しい視点からの情報発信の方策を試みる。

II. 鳥瞰図の特性と今回取り上げる『豊後有名温泉之圖』の特徴

最近、美作国津山藩松平家のお抱え絵師鋏形蕙斎(カガクイイ)の手による『江戸一目図』という鳥瞰図が大変な話題となっている⁵⁾。その理由は、この江戸の町を描いた鳥瞰図が東京スカイツリーからの眺望とほぼ同じ目線から描かれているためである(図1)。空を飛べたはずもなかった時代にあつて、その正確な描写は人々を驚かせるとともに、往時を忍ぶ(知る)ツールとしての有用性を予感させる。

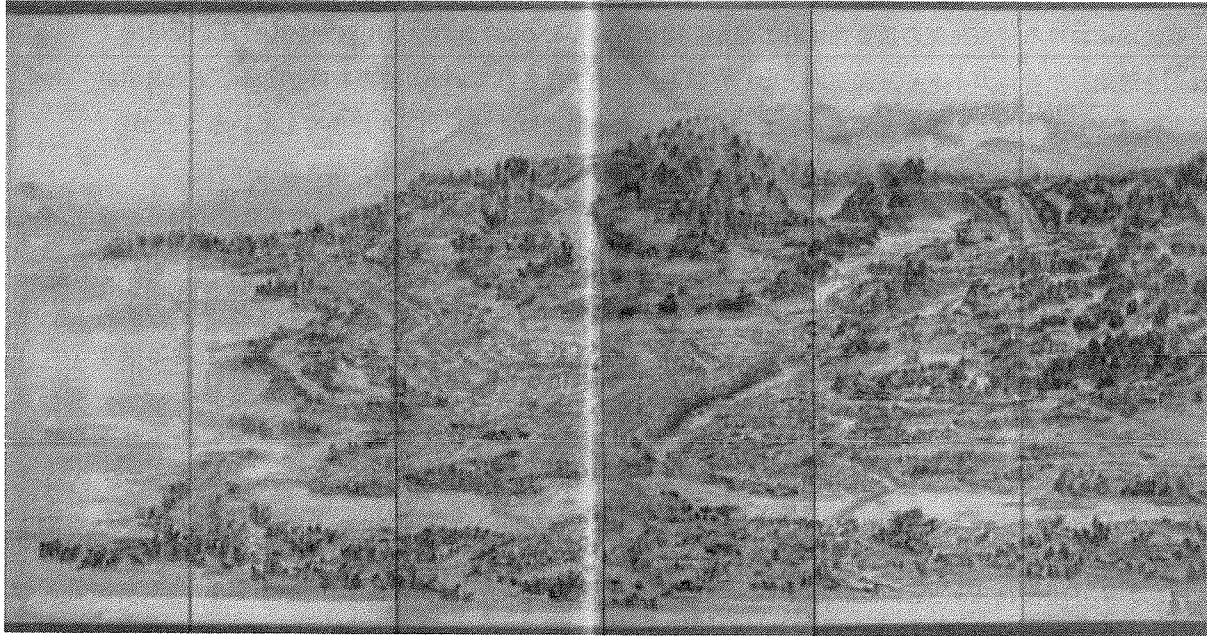


図1 江戸一目図

(注) 『江戸一目図を歩く—鋏形蕙斎の江戸名所めぐり—』津山郷土博物館刊行、P126-127

鳥瞰図は文字通り『鳥の目線』から見た構図で描かれており、我々の感覚からすれば、離陸直後の飛行機から眺めた“斜め上”目線に該当しようか。したがって、立体感と奥行きのある構図となり、時として見えるはずもない彼方の景色までも想像することができる。実際に鳥瞰図には、朝鮮半島や遙か太平洋の向こう岸まで描かれていることも多い。こうした演出は、眺めているだけで遠い彼方の地に対する羨望と、彼の地との繋がりさえも感じさせる。その一方で、鳥瞰図は、距離・縮尺・方位は皮肉にも正確とはいえない。

反面、鳥瞰図が描くリアル感他は他の地図には到底まねできない。一般的な地図は地図記号で表わされるので、それを理解することが前提となるが、鳥瞰図はあるがままに描かれているので誰にでも判りやすい。例えば、地図記号では「針葉樹」と「広葉樹」の区別できない樹木も、ここでは樹種まで描くことができ、よりリアル感が増す。

さて、今回はおよそ100年前の明治43(1910)年に夏目書店から発行された『豊後有名温泉之圖』を取り上げる(図2)。この作品を取り上げた理由は、鉄道開業前年に発行されていることから、「鉄道開業」という別府観光において一つの節目となる時期の様子を描写している点を重視したからである。

当時の別府温泉郷は、この鳥瞰図の発行前年には現在の都市計画といえる市区改正条例が議決され、発行翌年の鉄道開業と同時期に油屋熊八によって亀の井旅館が開業し、瀬戸内航路に1,000トン級の船「紅丸」が就航した。このように別府の近代史を語るうえで一つの節目の時期ともいえよう。

さらに、別府市は観光PRとして昭和期については取り上げているが、明治末はこれまでほとんど取り上げられてこなかった。しかし、この時期は後に油屋熊八が活躍し大発展を遂げた別府観光の社会基盤が整えられつつも、近世の名残も多分に残している。残念ながら今日に至っては往時を忍ぶ物件や景観はほとんど姿を消してしまっている。したがって、この鳥瞰図は「別府観光の成り立ち」をPRするとともに、歴史史料としても有用性が高いと判断した。

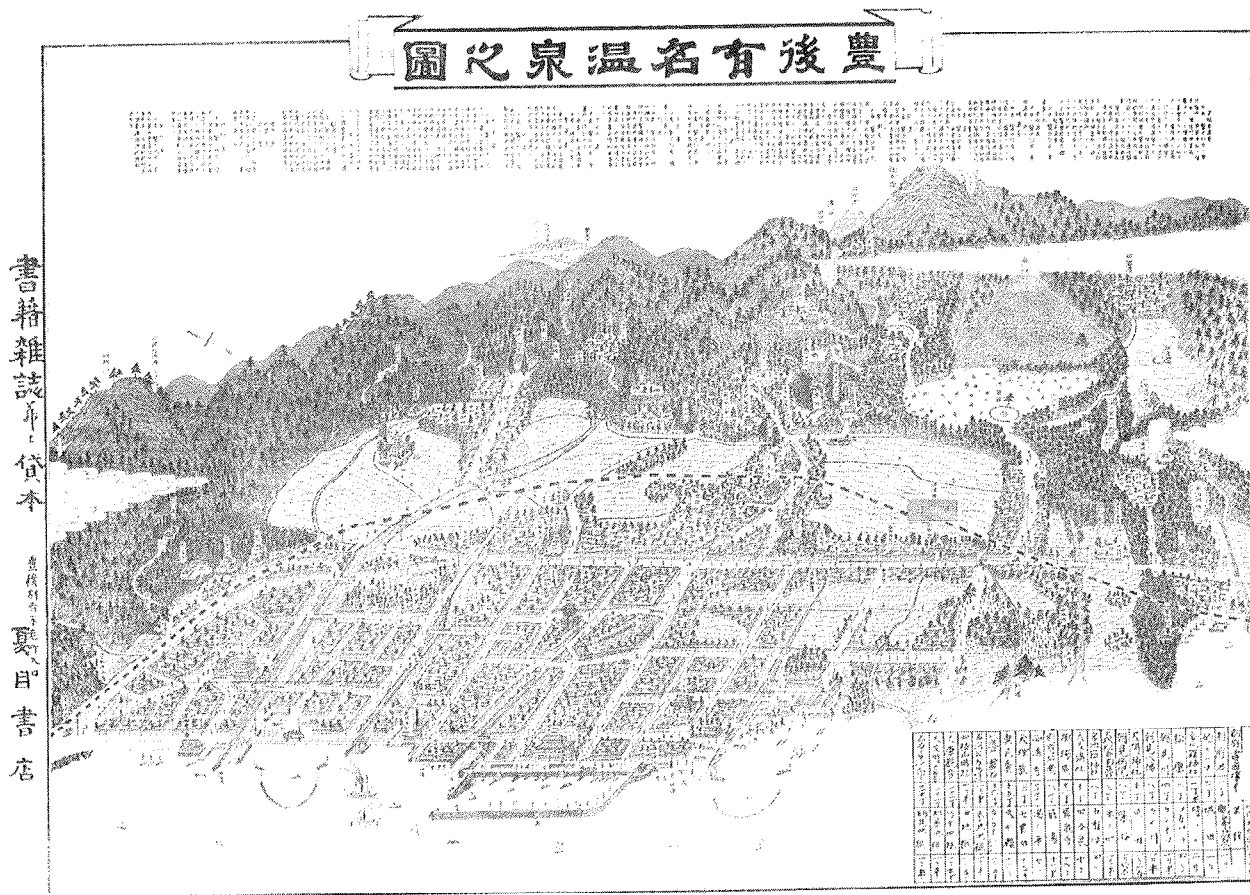


図2 『豊後有名温泉之圖』 1910(明治43)年夏目書店発行版

この鳥瞰図は、印刷技術や描写手法の関係上であろうか銅版画を用いて描かれている。したがって、初三郎の時代と異なり細かな線を多用し繊細な描写が持ち味といえる。さらに、後の作品と異なり往来する人々や街路の様子がリアルに描写されている。これは先に挙げた「江戸一目図」に近い手法といえようか。詳細な説明は後述するが、その一例を見てみる。

図3はこの鳥瞰図で描かれてた当時走っていた路面電車である。実際の写真と比べて判るように、誰にでも判るようなリアルな描写である。当時の状況を記した歴史資料としての有効性を示唆している。

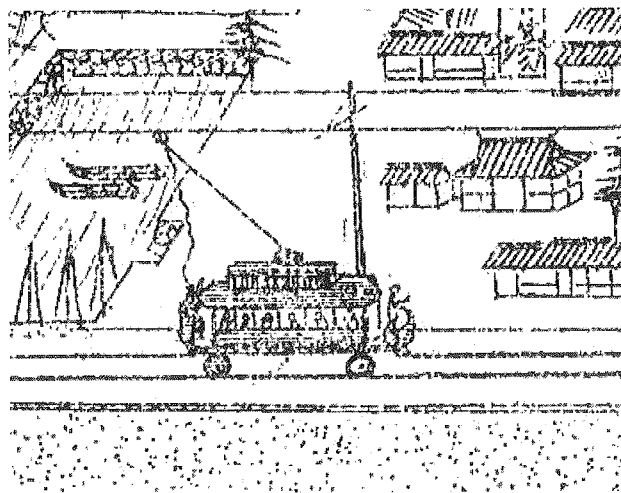
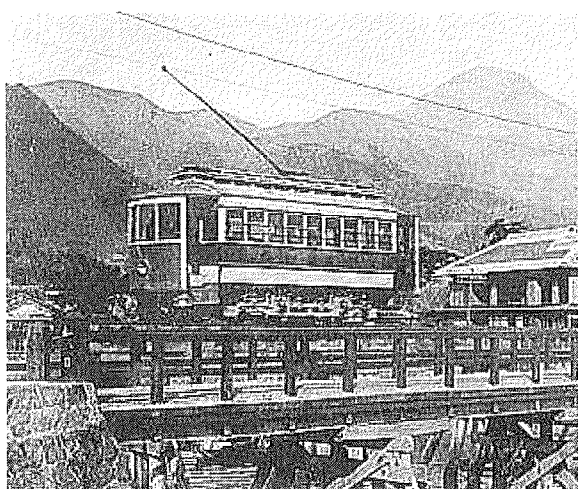


図3 描かれた路面電車と当時の実際の写真

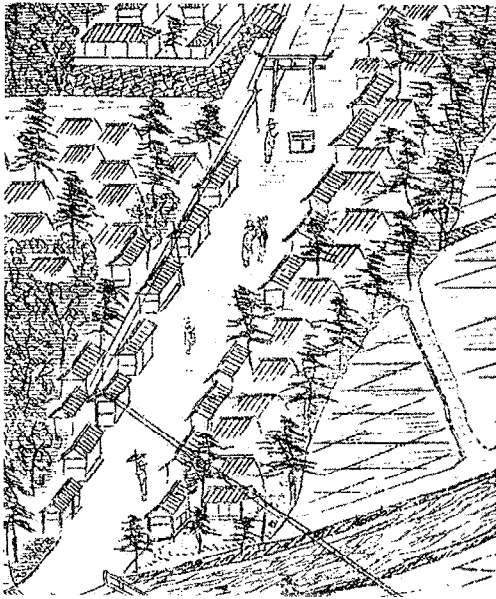


図4 朝見神社参道の描写

もう一点見ていく。図4は当時の朝見神社の参道の様子である。上部の鳥居は現在もあるが、現在ある二の鳥居は図の下方にある筈だが当時はなかった。さらに人々の様子も垣間見ることができる。例えば、当時郵便ポストは道路の真ん中にあっただのであろうか。図上の鳥居の下に描かれている。帽子をかぶった男性が郵便物を投函しようとしている姿も確認できる。

このように、この鳥瞰図は100年前の別府の様子を克明に記している。当時の風物の観察にとどまらず、建物の描かれ方からは、これら建物(施設)の当時の地域的価値(意味)を考察する上でも重要な判断材料となろう。さらには、当時の観光施設や観光形態を分析する上でも重要な判断材料となり得る。

Ⅲ. 鳥瞰図に絵かがれた別府八湯

鳥瞰図が作成された頃は、別府町と浜脇町が合併して間もなく、石垣村、朝日村、亀川町は未だ「別府」という領域に入ってはいなかった。つまり八湯のうち六湯は域外の温泉地ということで、この頃は「八湯」という概念はまだ薄かったと思われる。このことは、大正時代にはこの八湯に由布院・塚原両温泉を加えて「別府十湯」と呼ばれていたことから伺える。さらに、北浜と浜脇の両温泉以外は別府近郊の独立した温泉地と見なされていたようである。これらの温泉地の描写を浜脇と北浜の詳細な描写と比べると、その存在を示す程度に建物を簡素に描いているに過ぎない(図5)。実際にはこの時期には鉄輪温泉や亀川温泉には木造三階建の立派な旅館が存在していたはずである。反面、鉄輪温泉や柴石温泉付近の地獄は名称付で紹介されており、当時既に地域の重要な観光資源であったことを示唆している。

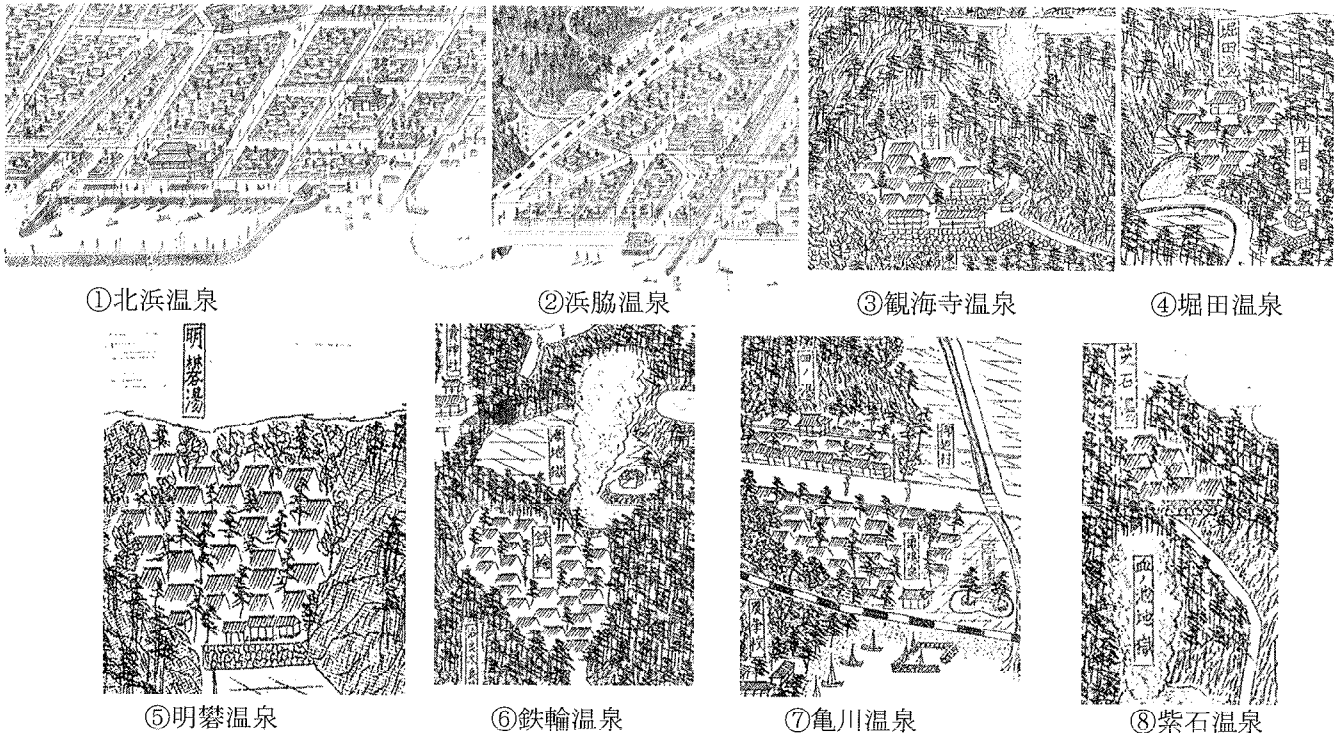


図5 別府八湯の描写

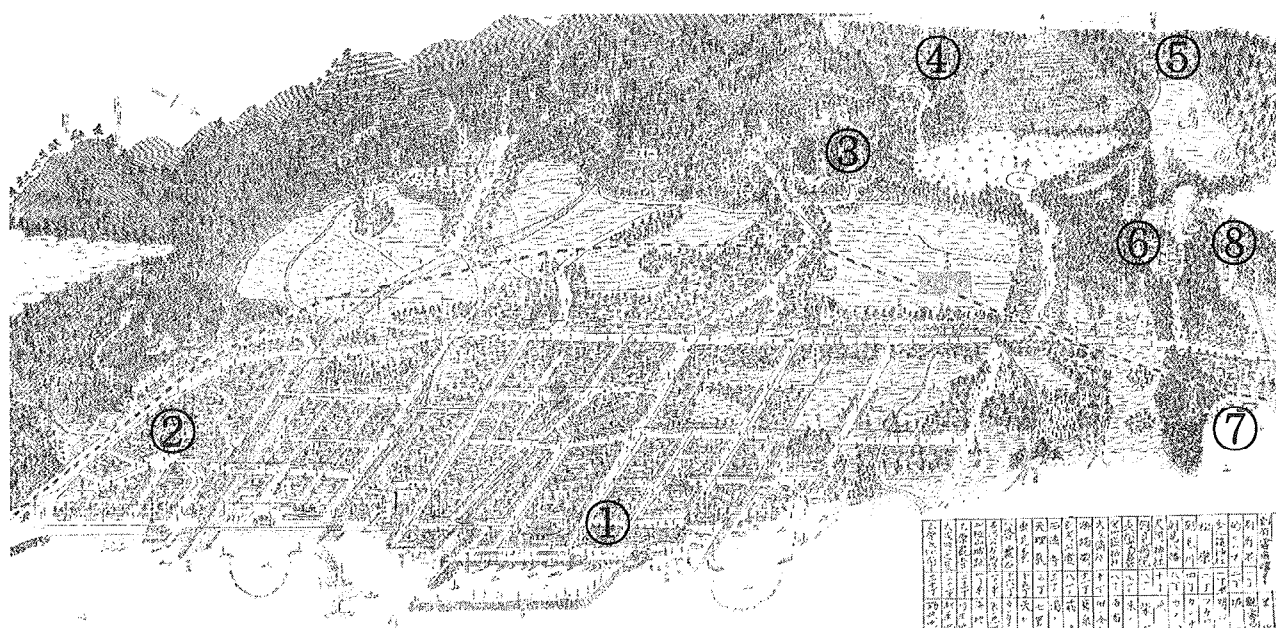


図6 鳥瞰図の全体像と別府八湯の描写位置

①北浜温泉 ②浜脇温泉 ③観海寺温泉 ④堀田温泉 ⑤明礬温泉 ⑥鉄輪温泉 ⑦亀川温泉 ⑧紫石温泉

図6は鳥瞰図で描かれている別府八湯の相対的な位置関係を示したものである。前述の通り鳥瞰図は方位、距離、縮尺についてはほぼ不完全である。書き手が空中から眺めた様子を想像しながらも、主観的な視点から描いている。ここでも、北浜と浜脇両温泉の中心部はリアルに描かれているが、その他の六湯は周縁部に簡素に絵かがれている様子が鮮明に読み取れる。縮尺的にも北浜と浜脇両温泉エリアをリアルに描く都合上、実際よりもかなり広く距離(空間)を取って(占めて)いる。

IV. 地域の描写

1. 北浜温泉界隈の描写

別府は鉄道が開業する37年前の1873(明治7)年には、大阪と結ぶ瀬戸内航路が開かれた。港のある北浜地区には温泉街が形成され、この鳥瞰図からもその華やかな時代を読み取ることができる(図7)。新しい市街地は江戸時代から温泉地として栄えていた浜脇の温泉街と繋がっていった。

港周辺は路面電車の始発駅(現在のゆめタウン付近)があり(図中A)、昭和初期には別府観光の目玉となる地獄巡りの遊覧バスの発着地もこの付近にできた。明治44年に鉄道が開業したとはいえ、昭和初期までのおよそ20年間はこの北浜界隈が観光の中心地であったといえよう。

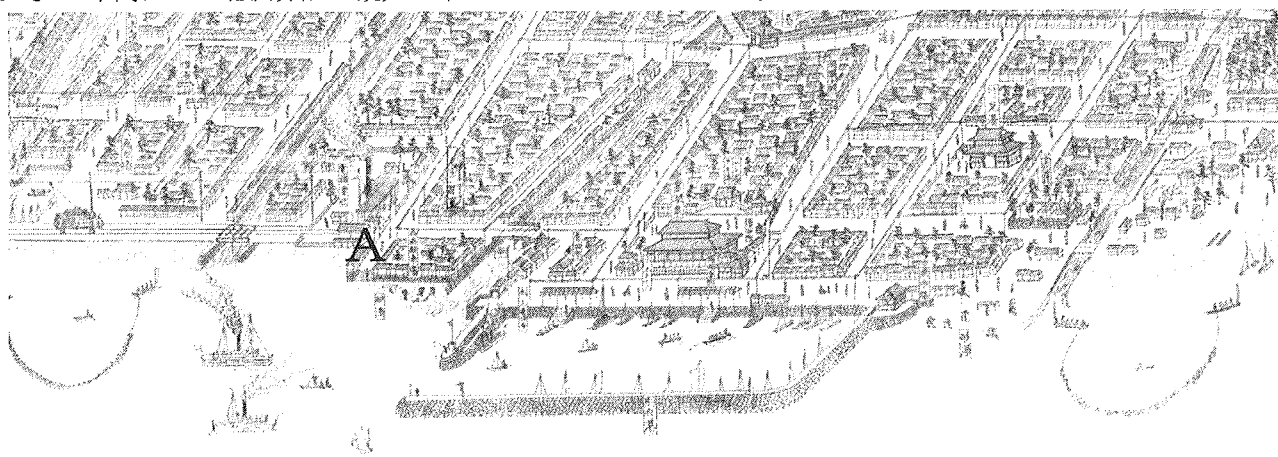


図7 北浜界隈の描写

前述の通り、この鳥瞰図が刊行された翌年の1911(明治44)年、大阪と結ぶ瀬戸内航路に1,400トンの「紅丸」が就航しているので、描かれているのは当時の主力船600トン級の「香川丸」あるいは「愛媛丸」であろうか(図8)。岸壁のすぐ前に砂湯があり、また突堤で釣り糸を垂らしている太公望の姿も確認できる。すぐ近くには「馬車駐車場」と別大電車の始発駅があり(図中A)、船の到着時の賑わいが連想できる。そのすぐ上には「宇和島汽船」の旗が立っている(図中B)。右上の大きな建物は霊潮泉だが「水上ケイサツ」(図中C)や「商船会社」の看板もあるので(図中D)、この建物の中に入っていたのであろうか。霊潮泉の前の「待合所」の看板は(図中E)、入浴客用かあるいは乗船客用なのか。

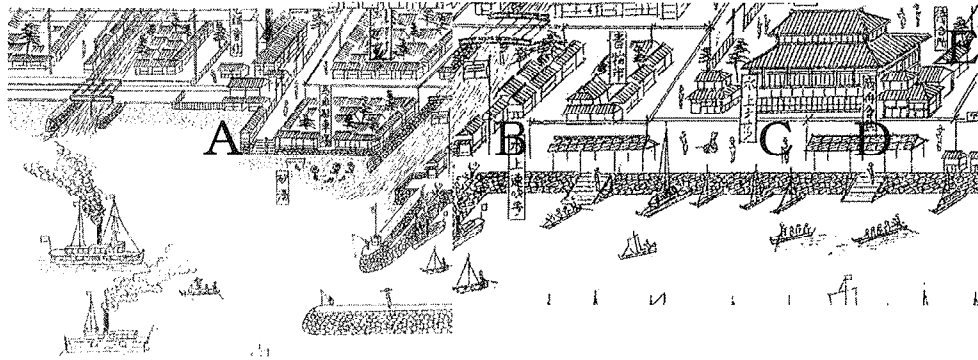


図8 別府港の描写

別府港と北浜界限の繁栄とともに、流川通りも旅館や土産物店が立ち並ぶ繁華街になりつつあった(図9)。中央部の新湯の背後に流れるのが流川だが、現在は暗渠で塞がれている。当時すでに新湯から上部の部分は暗渠が施されている様子も判る。

一方、竹瓦温泉も古い建物のままである。その周辺は旅館街として発展していたようだ(図9)。資料等によると当時既に木造三階建ての旅館が出現しはじめていたようだが、鳥瞰図にはそれらしい大きな建物は描かれていない。

海岸は実にのどかな情景を描き出しており、砂湯で遊ぶ観光客の傍らで漁の様子も描かれている(図10)。自転車に乗っている人の姿や日傘を差して砂湯を楽しむ人の姿、海岸で散策をしている人々などのんびりとした雰囲気が伝わってくる。中央の「金比羅神社」は現在の波止場神社にあたり、今日では、この一帯は国道10号線が走り、たくさんの車が行きかう場所となっている。

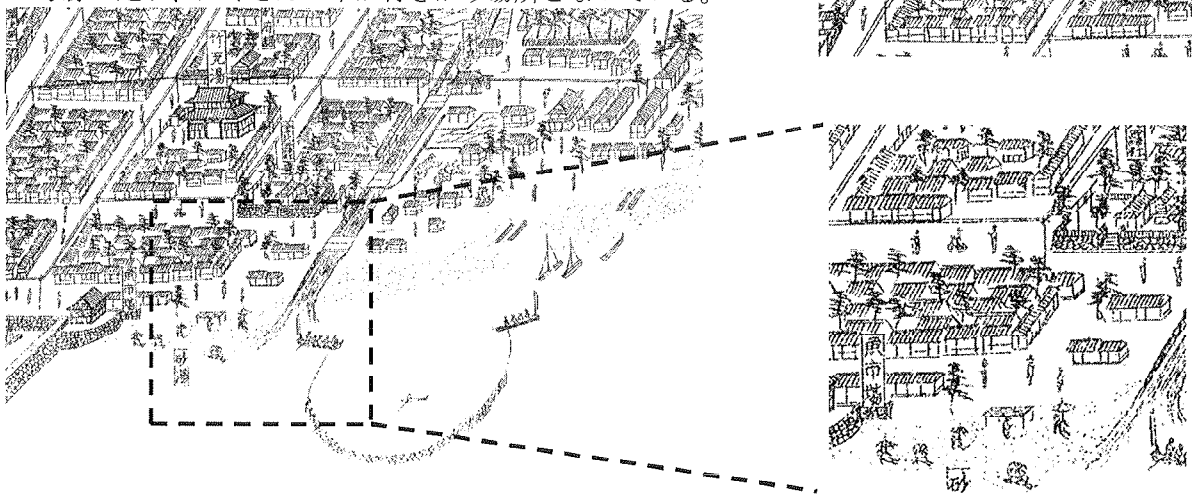


図10 竹瓦温泉界限の描写と拡大図

2. 浜脇温泉界隈の描写

浜脇温泉も東西共同温泉を中心に賑わっていた様子が描かれている(図11)。この浜脇温泉は大友氏ゆかりの温泉地でその歴史は古い。泉源が自然湧出に限られていた時代には、日向街道沿いに泉源を持っていた浜脇は貴重な存在であったようで、古くから歓楽色の強い温泉地として賑わった。浜脇温泉は、江戸時代から人気を博していた「温泉番付」において、明治期に至るまで“前頭2枚目”を守り、別府温泉よりも3枚程度上位に位置付けられ、当地を代表する温泉地であったといえよう。この浜脇温泉は、明治7年に県費で整備された西温泉と東温泉を中心に発展し賑わってきた(図中A)。その中心部には当時としてはモダンな3階建ての旅館が建っており、西洋風の屋根の展望台を持つ旅館もあったという。

中心部を拡大してみると、共同温泉は別大電車の浜脇停車場(図中B)と開業を目前に控えた浜脇駅(図中C)とほぼ同じ距離にある。その鉄道は既に整っていた温泉街を山沿いに巻くように敷設している。当時は別大電車浜脇停車場から東西共同温泉に至る道筋が人々の動線であったようで、現在の浜脇記念病院あたりだろうか。

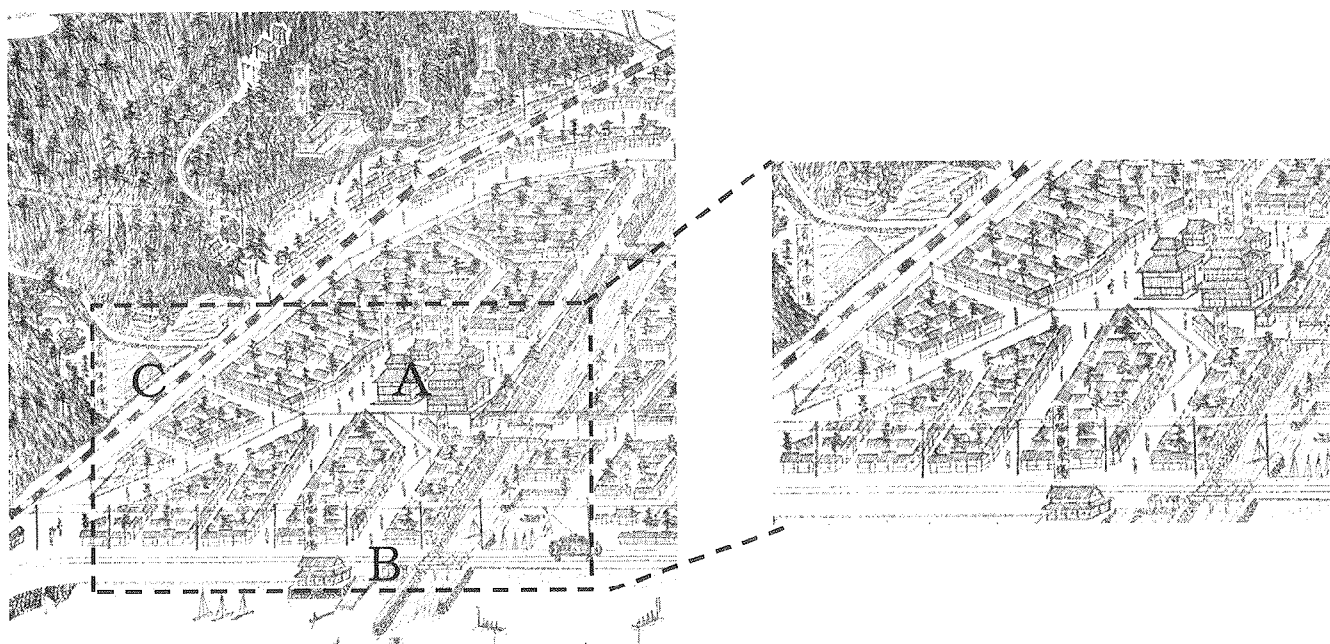


図11 浜脇温泉の描写と中心地の拡大図

このエリアの発展に欠かせないのが1900(明治33)年に開業した別大電車である。この路線は全国6番目西日本では初めての路面電車なので、恐らく珍しい乗り物として描写されたのであろう(図12)。船でやってきた観光客は、当時珍しかった路面電を目の当たりにして心躍らせたに違いあるまい。描写されている電車はパンタグラフの傾きから大分方面からやってきたと思われる。

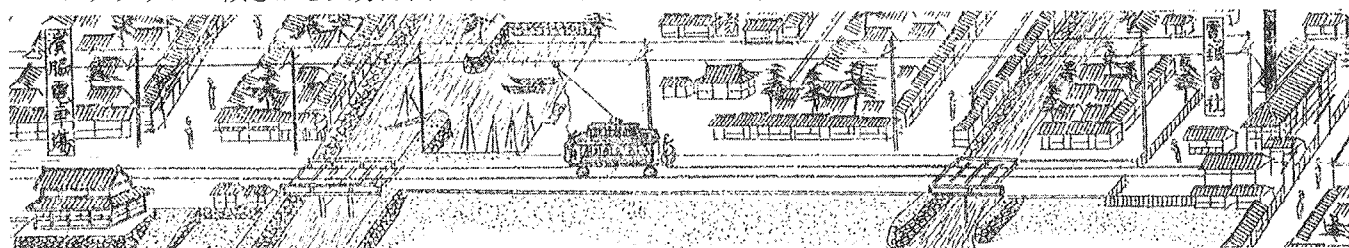


図12 当時珍しかった路面電車の描写

3. 地獄の描写

別府観光の代名詞といえる「地獄めぐり」は、昭和3年の“地獄めぐりバス”の運行で一つのピークを迎えたといえよう。しかし、鳥瞰図が描かれた明治末の頃の地獄は、観光施設としてまだ整備されてはいないようで、誠に素気ない描写でこれら地獄も“域外”と捉えられていたのであろうか。

ここに描かれている地獄は「海地獄」「血ノ池地獄」「坊主地獄」「紺屋地獄」の4か所で、これに観海寺温泉と堀田温泉の中間に噴気が描かれているが名称は記載されていない(図13)。場所的に「八幡地獄」であろうか。



図13 地獄の描写

「海地獄」と「坊主地獄」の傍らには小屋のようなものが確認できる(図14)。売店か休憩所などの観光施設と思われる。見物客らしき人の姿も確認できる。「海地獄」はこの頃既に千寿吉彦氏の所有となっており、描かれた直後に千寿氏はこの海地獄を泉源として、新別府地区に温泉付別荘地の開発に着手している。



図14 海地獄と坊主地獄

4. 歴史的資料として価値のある描写

先に述べたように、鳥瞰図のリアリティーな描写は時として地域の歴史を伝える史料としての価値を見出すこともある。取り上げた鳥瞰図からも、ラクテンチの前身である鉾山の描写が史料的に価値あるものと言えまいか(図15)。

明治36(1903)年、東京の木村商事会社が現在のラクテンチ付近で鉾山開発に乗り出した。市街地のすぐ近くに鉾山が立地すること自体珍しいことであろう。鳥瞰図上では「金山」と表記されている。この金山は台湾の金山採掘で財を成した木村久太郎によって開発されたもので、彼は“温泉脈のあるところには良質の金鉾脈がある”とこの地に狙いをつけたと云われている。

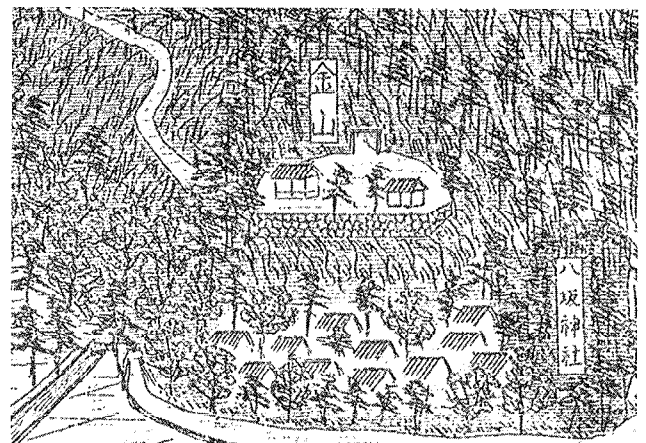


図15 金鉾山の描写

予想通り金鉾脈を当てましたが、採掘を進めるうちに想定外の温泉湧出と熱い水蒸気に行く手を阻まれたと言われている。さらに、関東大地震によって東京の本社が甚大な被害を受けたこともあり、採掘を断念せざるを得なかった。その後昭和に入り当時モダンな乗り物であったケーブルカーを利用した遊園地が開園する。

実はこの金山は当時発行されている陸軍測地部の地形図上には記されていないのである。さらに昭和2年に発行された地形図にも鉱山記号は見いだせないため、この金山は地図上では「幻の金山」となっている可能性がある。昭和に入って描かれた初三郎の絵図には既にラクテンチが描かれている。したがって、この鳥瞰図は、簡素ではあるが往時の金山の様子を今に伝える貴重な史料となる可能性もある。

V. まとめ

今回、観光地域の新しい情報発信手法としての鳥瞰図の有用性について検討してきた。その結果以下の知見を得ることができた。

まず、鳥瞰図の特性が情報発信ツールとして有効かどうかについて、今回取り上げた作品は、終始客観的な描写が成されているので、今日人気の高い「歴史散歩的な街歩き」の志向を持った観光客を対象としたツールとして有効であるとことを改めて検証できた。加えて、「金山の描写」の歴史史料としての価値の可能性も指摘できたことは、鳥瞰図の可能性について提示出来たといえよう。客観的な描写はめまぐるしく変貌する町の景観の往時の姿を今に残す貴重なツールとなる一方、歴史的な建造物を次々と建て替えてきた別府の近代史の流れに対して強烈なインパクトを与え得るといえまいか。

さらに、鳥瞰図あるいは近世期の絵図を用いたガイドマップは、東京(江戸)や京都といった歴史のある地域や、歴史的事象の舞台となった地域を対象としたものが大半を占めている。こうした意味から、今回温泉観光地を対象として、鳥瞰図を用いたガイドマップの可能性に言及できたことは大きな成果と考えている。

さて、鳥瞰図を用いた場合に想定できる課題も見出すことができた。第一には、今回取り上げた手法と同様の鳥瞰図は概してすぐれた『街歩きマップ』のツールとなり得るが、今後はこのような鳥瞰図の発掘に目を向けなければなるまい。さらに最大の課題として、その書き手もしくは依頼主の主観(テーマ)が大きく反映されている作品は、情報発信手段として有効に活用できない点を挙げねばならない。大正期以降になると、宣伝を目的としたいいわゆる「商業用鳥瞰図」が幅を利かせることになる。客観性と正確性という意味ではガイドマップとして活用できる範囲が限定される可能性が高い。その反面、観光地においてはその時代ごとに「何を売りにしていたか」ということが判明でき、活用と視点の発想次第では有益な情報ツールともなり得る。

今後は、課題として取り上げたより商業的要素の強い大正期から昭和初期にかけて作成された鳥瞰図を対象とした研究が欠かせない。

【補記】

本研究を進めるにあたって平成25年度強化事業費助成金「別府大学GP(研究支援 大RS5)」の一部を利用している。

【文献】

中山昭則(2006):「観光・地域づくりと住民参画-別府温泉郷における市民による地域ガイドの事例-」、『観光からの地域づくり戦略』総合観光学会編、159-172ページ。

別府大学地理学研究室(2010):「地域ボランティアガイドの現状とその意義~別府市朝見ウォークを事例として~」

『研究年報第8号』別府大学地理学研究室編著、PP9-13。

中山昭則(2012):「別府市におけるボランティアガイドの動向」、『大分県温泉調査研究会報告』第63号、大分県温泉調査研究会、27-34ページ。

中山昭則(2013):「別府市におけるボランティアガイドの特性と課題」、『大分県温泉調査研究会報告』第64号、大分県温泉調査研究会、57-63ページ。

津山市郷土博物館(2012):『江戸一目図を歩く-鉄形蕙斎の江戸名所めぐり-』、津山市郷土博物館、全127ページ。

【注】

¹⁾ 中山昭則(2006):「観光・地域づくりと住民参画-別府温泉郷における市民による地域ガイドの事例-」、『観光からの地域づくり戦略』総合観光学会編、159-172ページ。

別府大学地理学研究室(2010):「地域ボランティアガイドの現状とその意義~別府市朝見ウォークを事例として~」

『研究年報第 8 号』別府大学地理学研究室編著、PP9-13.

中山昭則(2012):「別府市におけるボランティアガイドの動向」、『大分県温泉調査研究会報告』第 63 号、大分県温泉調査研究会、27-34 ページ。

中山昭則(2013):「別府市におけるボランティアガイドの特性と課題」、『大分県温泉調査研究会報告』第 64 号、大分県温泉調査研究会、57-63 ページ。

- 2) 別府市では携帯型端末(PDA)を用いた情報提供を行っている。これは駅構内の観光案内所で端末機を貸し出しており、街中 13 か所に設置している発信装置(RFID)からの発信信号を受け取り情報を入手するという方法である。また、携帯電話からもアクセスできる仕組みとなっている。
- 3) NHK 総合テレビにて 2008~2012 年にかけて放映された紀行番組。江戸・明治時代の古い地図を片手に東京近辺の町を歩く内容であった。
- 4) 吉田初三郎(1884-1955 年)、大正から昭和にかけて活躍した鳥瞰図絵師で「大正広重」と呼ばれた。彼は創作の際に必ず精査な現地調査を行った。その結果、彼の現地調査によって見出された観光地も少なくない。大分県では飯田高原を朝日長者伝説にちなんで「長者が原」と命名したのは初三郎である。
- 5) 鋸形蕙斎が文化 6(1809)年に江戸の全景を隅田川上空から西方の様子を詳細に描いた鳥瞰図。構図が東京スカイツリーからの眺望と酷似しているため人気を博している。現在東京スカイツリーの展望台にレプリカが展示されている。

別府温泉における微生物の解析と考察

立命館アジア太平洋大学

Faezeh Mahichi マヒチ ファエゼ

研究の目的と経過

4年前までは東京在住であった研究者にとって、多種多様な温泉を有する別府市は、思いがけない研究の対象地となった。それぞれの温泉がもつ効能や、その源泉に生息する細菌を調査することで、源泉が保有する優性細菌門を明らかにし人間活動に有効な側面を見出すことは有益であると考え。これまでの調査・研究を通して、ひとつひとつの源泉が持つ細菌の性質、そこに含まれる化学物質や pH が大きく異なっていることがわかってきている。採取したサンプルから細菌性ゲノム DNA を抽出した後、これを、細菌の 16sRNA 遺伝子解析方法のための 16sRNA 遺伝子増幅・配列分析に活用する。各源泉のサンプルに見られる熱性細菌株の性質をさらに解明し、市民生活および観光都市別府のユニークな温泉活用への貢献の一助になることを期待する。

研究成果

数か所の源泉にてサンプルを採取し、遠心分離器 CR7 を用いて解析したものをマイナス 20° で保存。提供していただいた補助制度を利用し、DNA 抽出キットである ISOFEAL を購入した。高い精度の DNA の抽出に成功すれば、その後は、16sRNA 遺伝子分析を実施して、優性細菌門の詳細を明らかにしたいと考える。2014 年度の目標は、抽出した DNA を 454 パイロシーケンス法に適用するためのさらなる研究を進め、別府温泉に含まれる細菌の多様性を追究する予定である。

遺伝子検査（LAMP法）を用いた温浴施設の衛生管理

松尾機器産業株式会社営業部

西平博美

環境工研株式会社

松尾広暁・秋月香菜子

要旨

温浴施設等のレジオネラ属菌分析は、これまで培養法で行われてきた。近年、レジオネラ属菌の遺伝子を検査することで、好感度、敏速(1時間程度)に結果が出ることから、LAMP法の補助的活用が期待されている。

しかし、LAMP法の普及や活用方法は浸透していないのが現状である。そこで、全国の温浴施設にアンケート調査を実施し、解析を行った。また、温浴施設2カ所において、培養法とLAMP法による分析を実施し、結果に基づき、両分析を組み合わせた衛生管理スキームの構築に関する報告を行った。

キーワード：レジオネラ分析、培養法、LAMP法、普及、衛生管理、課題、意識調査

1. はじめに

近年、全国でレジオネラ症の集団感染が報告されている(1、2)。特に7名の死亡者を出した2002年7月のレジオネラ症集団感染事例は記憶に新しい(3)。この事例では、7月18日に医療機関から管轄保健所へ同一の入浴施設を利用した入浴客がレジオネラ症様の症状を呈した旨の連絡があり、19日に施設への立入調査や発症者および施設の浴槽水の分析が行われ、25日に発症者と浴槽水から同一血清型のレジオネラ属菌が検出されたことが明らかとなった。さらに、30日に発症者と浴槽水のレジオネラ属菌の遺伝子型が一致し、保健所は本施設を営業停止にした(3)。発症は、6月24日から8月15日まで確認され、7月7日から31日までに全体の90%が集中していた(3)。

従来より、浴槽水のレジオネラ属菌分析は、培養法で行われており、結果が分かるまでに7~10日程度を要している。上記の事例においても保健所が営業停止命令を出すまでに12日を要している。レジオネラ属菌は、眼に見える生物ではないため、発生初期を素早く感知することができず、重篤なレジオネラ症罹患者が大規模に出てから初めて気付く事例が多い。また、培養法による分析の場合、採水から結果が分かるまでに7~10日程度の空白期間ができる。さらには、年数回の定期分析の間の空白期間も被害拡大の要因となり得る。したがって、この期間におけるレジオネラ属菌の早期発見は、レジオネラ症リスクを最小化するためのポイントとなる。

近年、レジオネラ属菌の遺伝子を分析する手法が注目されている。その1つであるLAMP法(Loop-mediated Isothermal Amplification)は、遺伝子を分析するため、これまで7~10日程度かかっていた培養法と比べ、数時間程度でレジオネラ属菌の有無を判断することができる利点がある。井上らは、100箇所の浴槽から採取した検体を対象に、LAMP法および培養法の成績を比較・検討し、有効性を評価している。その結果によると、LAMP法は、培養法でレジオネラ属菌が10 CFU/100 mL以上検出された49検体をすべて陽性と判定し、LAMP法の検出下限は10 CFU/100 mL程度と培養法と同等であることが報告されている(4)。一方、妨害物質等の影響により、一部検体において偽陰性を示す場合も報告されている(5、6)。

この手法は、レジオネラ症防止指針第3版(2009年3月発行)に記載されており(7)、今後、LAMP法の補助的活用が期待されるが、普及や活用方法は浸透していないのが現状である。そこで、現場の施設管理担当者へのアンケート調査等により、両分析を組み合わせた衛生管理スキームの構築のための基礎的知見を得ることを目的とした。

2. 方法

2.1 アンケート調査

2014年1月~4月にかけて全国の温浴施設を持つ銭湯、旅館、ホテル、病院、福祉介護施設の施設管理担当者を対象にアンケート調査を実施した。

回答は無記名で行い、6つの質問項目について40施設より回答を得た(表1)。

表1：質問項目

質問1：	即日レジオネラ属菌の有無が分かる分析法(LAMP法)を知っていますか？
質問2：	1検体当たりいくら位であれば、LAMP法の測定を依頼しますか？
質問3：	価格が安ければ、毎月1回測定し、高い衛生管理をしたいと思いませんか？
質問4：	レジオネラ属菌の有無が即日わかれば、殺菌・洗浄作業等の対策が立てやすいと思いませんか？
質問5：	今のレジオネラ属菌分析(培養法)で十分だと思いますか？
質問6：	レジオネラ属菌が検出されることを不安に思いませんか？

2.2 培養法とLAMP法による分析

2カ所の温浴施設(かけ流し風呂および循環式浴槽)にて、培養法とLAMP法の分析を行い、解析を行った。

3. 結果及び考察

3.1 アンケート調査

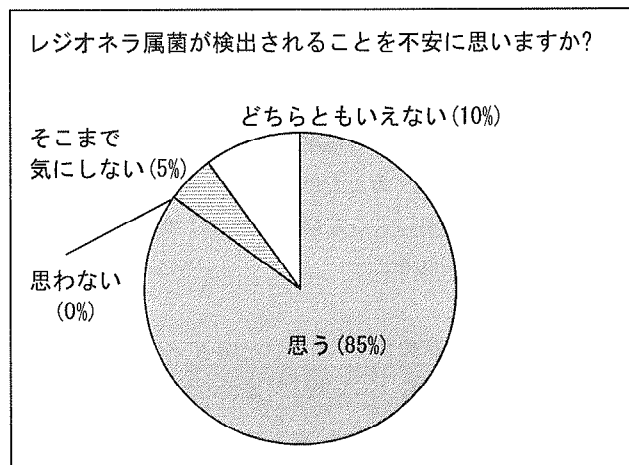
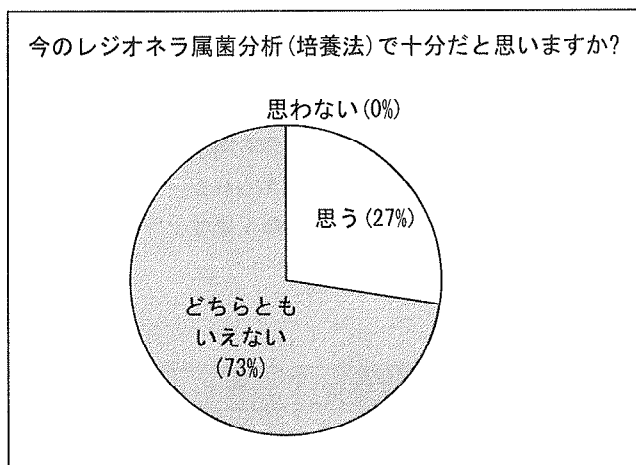
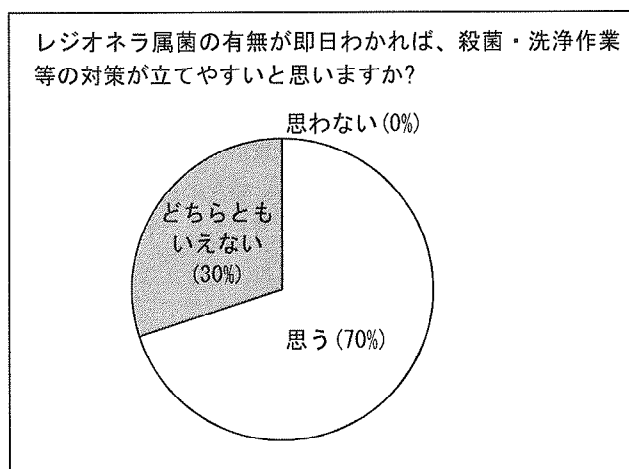
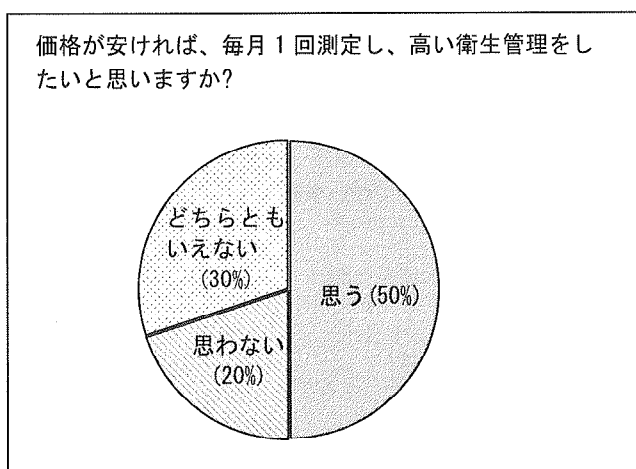
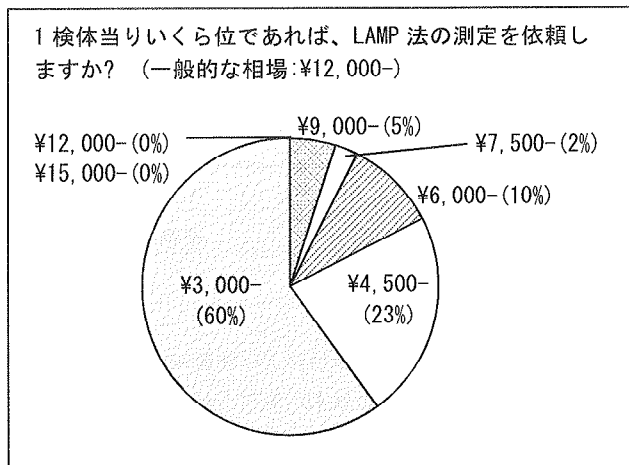
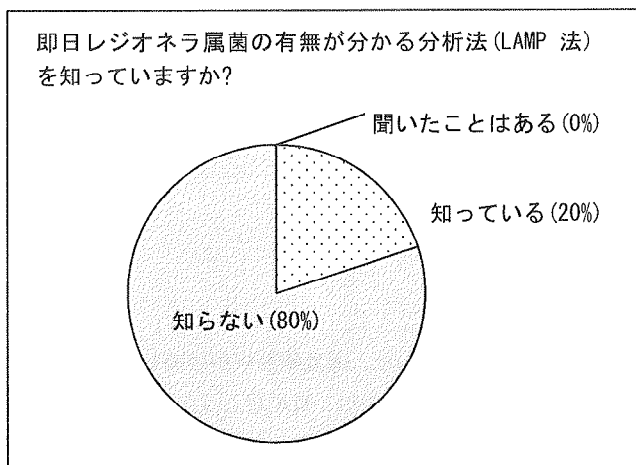
即日レジオネラ属菌の有無が分かる分析法(LAMP法)を知っていますかについて、「知らない」80%、「知っている」20%の回答を得た。現場の施設管理担当者レベルにLAMP法が十分に認知されていないことが明らかとなった。

1検体当たりいくら位であれば、LAMP法の測定を依頼しますかについて、¥3,000-(60%)、¥4,500-(23%)、¥6,000-(10%)、¥7,500-(2%)、¥9,000-(5%)、¥12,000-(0%)、¥15,000-(0%)の回答を得た。検体数によって価格は大幅に変動するが、一般的な市場価格は、¥12,000～¥20,000程度であり、施設管理担当者と分析会社との間で価格的なミスマッチが生じている。また、価格が安ければ、毎月1回測定し、高い衛生管理をしたいと思うかについて、「思う」50%、「思わない」20%、「どちらともいえない」30%の回答を得た。価格が安ければ、高い衛生管理をしたい施設は、半数存在するが、市場価格との3～4倍の価格的なギャップがLAMP法の普及の障害となっていると考えられた。

レジオネラ属菌の有無が即日わかれば、殺菌・洗浄作業等の対策が立てやすいと思いませんかについて、「思う」70%、「思わない」0%、「どちらともいえない」30%の回答を得た。レジオネラ属菌が検出されることを不安に思いませんかについて、「思う」85%、「思わない」0%、「そこまで気にしていない」5%、「どちらともいえない」10%の回答を得た。ほとんどの施設がレジオネラ属菌の検出を不安に思っており、LAMP法により、レジオネラ属菌の有無が即日わかれば、殺菌・洗浄作業等の対策が立てやすいことを好感していると考えられた。

しかし、今のレジオネラ属菌分析(培養法)で十分だと思いますかについて、「思う」27%、「思わない」0%、「どちらともいえない」73%であり、明確な回答を出せない施設が多く存在した。培養法にかけている以上のコストをかけてまで積極的に採用を検討するまで、LAMP法の有効性が認知されていないことが要因と考えられた。レジオネラ症が発生すると、入浴客サイドでは、死亡や障害といった重大な被害を被る可能性があるが、施設サイドについても、損害賠償や休業・廃業、風評被害による入浴客の減少等の経営リスクを招く事態となる。

したがって、LAMP法の有用性を十分に施設管理担当者へ説明することおよび、分析会社の分析コスト削減努力によって、リスクマネジメントの観点から、LAMP法を採用する施設が今後増えることが期待される。



3.2 培養法とLAMP法による分析

表 2: 温浴施設 A(かけ流し風呂: 塩素消毒あり)

採水場所	培養法	LAMP法
系統1(井水タンク)	不検出	陰性
内風呂浴槽	不検出	陰性
系統2(温泉貯湯槽)	不検出	陽性
露天風呂浴槽	不検出	陽性

表 3: 温浴施設 B(循環式浴槽：塩素消毒あり)

採水場所	培養法	LAMP 法
系統 1(温泉貯湯槽)	不検出	陰性
ろ過機	不検出	陰性
内風呂	不検出	陰性
露天風呂	不検出	陰性

3.2 培養法と LAMP 法による分析

2カ所の温浴施設(かけ流し風呂および循環式浴槽)にて、培養法とLAMP法の分析を行った。温泉施設A(かけ流し風呂)では、系統2の温泉貯湯槽とその温泉水が使用されている露天風呂浴槽で培養法(-)とLAMP法(+)の不一致が起こった。本系統には塩素剤が常時添加されていた。桶らは、培養法で検出限界値(1 CFU/100 mL)未満であった347件中、122件がLAMP法では陽性であったことを報告している(8)。レジオネラ属菌はアメーバ類に寄生することが知られている。レジオネラ属菌に感染したアメーバ類は高濃度塩素条件下でシスト(嚢子)化し、レジオネラ属菌はアメーバの体内で休止状態となることが知られている(9)。このシストは、乾燥や熱、薬剤に耐性を持つ(9)。LAMP法は生菌に加え、培養不能菌、死菌や核酸のみでも検出されるため、温泉貯湯槽および露天風呂浴槽で培養法では不検出であったが、LAMP法にて陽性反応が出たと考えられる。

このことは、塩素剤にてレジオネラ属菌の増殖が抑制されているが、温泉貯湯槽に既にレジオネラ属菌が存在し、汚染源となり得る危険性を示唆しており、塩素自動注入装置の不具合等により塩素濃度が一定に保てない事態が生じた場合、レジオネラ属菌が急激に増殖する可能性が考えられる。

一方、温浴施設Bについては、塩素殺菌をした直後の検体を測定したが、全ての採水場所においてレジオネラ属菌は検出されなかった。

3.3 LAMP 法の補助的活用

LAMP 法の最大の利点は、レジオネラ属菌の有無を即日に行うことができる点である。アンケート調査において、レジオネラ属菌が検出されることを不安に思う施設は 85%に上った。また、レジオネラ属菌の有無がわかれば、殺菌・洗浄作業等の対策を立てやすいと思う施設は、70%に上った。

このことから、表 3 に記したような衛生管理スキームをご提案することによって、レジオネラ属菌の増殖および汚染源を早期に発見できると考えられる。早期にレジオネラ属菌の増殖を発見し、保健所への届け出や二酸化塩素、高濃度塩素等による殺菌作業および過酸化水素や各種配管生物膜除去剤での配管洗浄作業を早期に実施し、汚染源等の調査を踏まえ、適切な衛生管理対策を速やかに実施することは、レジオネラ症リスクを最小化するために極めて有効であると考えられる。

このことから、培養法による定期的な検査に加え、LAMP 法による自主検査を行うことは、より高い衛生管理を行っていることを表す 1 つと考えられる。

表 3: 培養法と LAMP 法の分析スケジュールイメージ

分析月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
培養法	○					○						
LAMP 法	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

4. まとめ

- LAMP 法の補助的活用を推進するため、LAMP 法に関するアンケート調査を実施した。
- 施設管理担当者の LAMP 法認知度は 20%程度と低かった。
- 施設管理担当者の LAMP 法にかけても良いコストは、市場価格の 1/3~1/4 程度であった。
- レジオネラ属菌の検出に不安を感じており、安ければ、毎月 1 回測定しても良いと思う施設が 50%存在した。
- 培養法のみで十分だと思うかについて 73%が明確な回答を避けた。
- 塩素消毒により、培養法にて不検出となった検体において LAMP 法では陽性反応が確認された。
- 生菌に加え、培養不能菌、死菌や核酸のみでも検出される LAMP 法は、塩素剤にてレジオネラ属菌の増殖が抑制されている現場において、その存在を明らかにし、汚染源を把握することができることを示唆した。

5. 引用文献

1. 杉山ら：生活環境水のレジオネラ汚染およびレジオネラ症患者調査—循環濾過式浴槽水を感染源とするレジオネラ症集団感染事例と検査— 静岡県環境衛生科学研究所報告 2000 ; 43 : 1-4
2. Nakamura *et al.* : A large outbreak of legionnaires' disease due to an inadequate circulating and filtration system for bath water epidemiologic manifestations. Intern Med 2003;42 : 806-11
3. 岡田ら：循環式入浴施設における本邦最大のレジオネラ症集団感染事例 I. 発症状況と環境調査 感染症学雑誌 2005;79:365-374
4. 井上ら：LAMP 法、PCR 法を用いた浴槽水レジオネラ属菌の迅速検査に関する調査研究 防菌防黴 2004 ; 32 : 481-487
5. 緒方ら：大分県における浴用水中のレジオネラ属菌の検出状況(2010-2012) 大分県衛生環境研究センター年報 2012 40 46-52
6. 枝川ら：LAMP 法を用いた浴槽水からのレジオネラ属菌検出時における反応阻害確認の必要性 防菌防黴 2009 ; 37 : 3-8
7. 厚生省生活衛生局企画課監修：新版レジオネラ症防止指針，財団法人ビル管理教育センター，平成21年
8. 楠ら：多摩地域における浴槽水及びプール水からのレジオネラ属菌検出状況（平成19～20年度）と Loop-mediated isothermal amplification(LAMP)法の応用 東京都健康安全研究センター研究年報 2009 60 265-272
9. Kilvington S *et al.* Survival of Legionella pneumophilla within cysts of Acanthamoeba polyphaga following chlorine exposure. J Appl Bacterio 1990;68:519-525

別府血の池地獄の希土類元素

九電産業株式会社環境部

島田雄樹

要旨

別府市野田の血の池地獄で採取した熱泥および温泉水について、希土類元素の定量分析を行い、その希土類パターンと生成機構の関係について検討した。その結果、熱泥の希土類パターンは鶴見岳火山岩の報告値と類似のパターンを示していた。熱泥試料を塩酸で煮沸して鉄鉱物（主にジャロサイト）を分別溶解した溶液の希土類パターンは熱泥試料の希土類パターンとは異なる形状を示し、熱泥試料の希土類パターンにはジャロサイトの希土類パターンがほとんど反映されていないことがわかった。また、血の池地獄の温泉水の希土類パターンは、熱泥の酸浸出液の希土類パターンと形状が類似しており、血の池地獄の池底に堆積した熱泥中のジャロサイトが酸性の温泉水によって溶解した希土類パターンを反映していることが示唆された。

1. はじめに

希土類元素は La から Lu までのランタニドを指す (Y, Sc を含める場合もある)。希土類元素は地球化学試料（岩石や熱水、海水など）の生成環境とりわけ酸化還元環境についての情報を保存したトレーサーとして広く研究に用いられている。いわゆる希土類パターン (REE パターン) とは対数軸の縦軸に、試料の希土類濃度を標準試料の希土類濃度で規格化した値をとり、横軸に希土類元素を La から Lu まで順にとった折れ線グラフである。C1 コンドライトで規格化した希土類パターンは多くの場合、直線や「への字」「逆への字」型のパターンを示す。これは、希土類元素が互いに類似の地球化学的性質を持つことに由来すると考えられている。ただし、Eu と Ce についてはしばしば「異常値」を示すことが知られている。これらは正の異常、負の異常と呼ばれ、Eu が高温かつ還元的環境で 2 価、Ce は酸化的環境で 4 価の酸化数をとるようになる。

大分県別府の「地獄めぐり」では、さまざまな種類の地獄を間近に見ることができる。これらのひとつ、「血の池地獄」は赤色の沈殿物（熱泥）を伴うことで知られる。血の池地獄の生成機構を明らかにするための研究が多くなされており（古賀 1972, 吉田ら 1978, 大沢ら 1996, Oue et al. 2002 など）その生成機構についてはすでに十分に議論されていると考えられるが、希土類元素についての研究はほとんどなされていない。

本研究は、血の池地獄の温泉水および熱泥についての希土類元素の定量分析を行い、血の池地獄の熱泥の生成環境と希土類パターンの関係についての検討を行うことを目的とする。

2. 実験

2- (1) 熱泥試料および温泉水試料の採取

試料は大分県別府市野田の血の池地獄で採取した。血の池地獄の熱泥は南側の浅瀬に堆積している状態のものを柄杓で採取した。温泉水も南側浅瀬の岸边から柄杓を用いて、上澄みを汲み取りポリタンクに採取した。採取時に現地で泉温を測定した結果 59 °Cであった。

熱泥試料は 0.5 mm メッシュのザルで漉して落ち葉や小石などを取り除いた後、超純水で洗浄し、遠心分離で沈降した固体を集め 105 °Cで乾燥し実験に用いた。

温泉水は実験室に持ち帰ったのち、0.45 μm のメンブランフィルターでろ過した。ろ過した温泉水はほとんど無色透明であった。温泉水の pH を測定した結果、pH = 2.6 であった。

2- (2) 熱泥試料の希土類分析

熱泥試料の希土類元素分析は、島田ら (2010) の方法をもとに試料の性状にあわせて改良を加えておこなった。試薬は塩酸、硫酸、硝酸は精密分析用を、その他の試薬は特級を使用した。熱泥試料約 1 g を 300 cm³ のテフロン製ビーカーに秤取し、硫酸、フッ化水素酸、塩酸、硝酸、過酸化水素水を適宜加えてホットプレート上で加熱して溶解、蒸発乾固した。次に試料溶液中の鉄を取り除く目的で、乾固物を 8 moldm⁻³ 塩酸溶液とし、陰イオン交換樹脂カラム (Bio-Rad AG1W-X8) に通した。希土類成分は 8 moldm⁻³ 塩酸で溶出させたのち、再びホットプレート上で蒸発乾固した。次に NaCl などのマトリクスを除くため陽イオン交換樹脂カラム (Bio-Rad AG50W-X8) を用いて希土類元素のグループ分離を行った。乾固物を 1 moldm⁻³ 硝酸 100 cm³ で溶解してカラムに通した後、2 moldm⁻³ 硝酸、6 moldm⁻³ 硝酸、8 moldm⁻³ 硝酸の順にカラムを通して 6 moldm⁻³ 硝酸と 8 moldm⁻³ 硝酸のフラクションをビーカーに採り蒸発乾固した。乾固物を 0.1 moldm⁻³ 硝酸で 25 cm³ に定容し ICP 発光分析法で定量した。

2- (3) 希土類分析法の妥当性の検討

希土類分析法の妥当性の検討のため、2- (2) の手順で地質調査所の標準岩石 JB-2 (玄武岩) を用いた分析を行った。表 1 に JB-2 についての分析結果と推奨値を示す。本方法での分析値と推奨値の差は Pr では約 20% とやや大きい、Pr 以外はおおむね ±10% 以内の値が得られた。この方法によって希土類元素濃度が精確に測定できると判断した。

表 1 標準岩石 JB-2 (玄武岩) の推奨値と、本研究の分析方法による分析値の比較

/ppm	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
JB-2 本研究	2.44	6.88	1.23	5.93	2.28	0.74	3.09	0.63	3.80	0.82	2.51	0.36	2.37	0.36
JB-2 推奨値	2.35	6.76	1.01	6.63	2.31	0.86	3.28	0.6	3.73	0.75	2.6	0.41	2.62	0.4

2- (4) 温泉水試料の希土類分析

温泉水試料を 500 cm³ のメシリンダーを用いて 500 cm³ のテフロンビーカーに量りとり、ホットプレート上で加熱濃縮した。汚染を避けるためビーカーには定性濾紙でふたをし、注ぎ足しながら計 3 リットルを蒸発乾固した。乾固物は鮮やかな黄色を呈していた。得られた乾固物を 2- (2) と同じ方法で前処理をし、ICP 発光法で希土類元素分析を行った。

2- (5) 熱泥試料の酸浸出試験

熱泥試料中の酸によって容易に溶ける成分（主に鉄鉱物）を選択的に溶解し、その希土類元素濃度を分析することを試みた。

熱泥試料約 15 g をビーカーに入れ、1 moldm⁻³ 塩酸を 50 cm³ 加えたのち時計皿で蓋をし、ホットプレート上で約 10 分間煮沸した。反応物を 5C 濾紙を用いてろ過した。ろ液を蒸発乾固したのち 2- (2) の方法で前処理をして ICP 発光法による希土類元素分析を行った。

熱泥試料と酸浸出後の熱泥試料の硫酸イオン含有量を、硫酸バリウムの生成を利用した重量法で測定した。粉末試料 1 g をビーカーに秤り採り、水 100 cm³ と濃塩酸 5 cm³、過酸化水素水 2.5 cm³ を加えホットプレート上で 2 時間煮沸した。GS-25 濾紙でろ過して固体を除去した後、ろ液をアンモニア水で中和して、生成した鉄やアルミニウムの水酸化物を 5A 濾紙で除去した。ろ液を 250 cm³ のメスフラスコに定容したのち、溶液の 25 cm³ をホールピペットで採り、濃塩酸 0.5 cm³ と 10 % 塩化バリウム溶液を 10 cm³ 加えて一晩放置した。生成した硫酸バリウムを 5 C 濾紙で集め、磁性ろつぼに入れて 900 °C で焼いた。残渣物を硫酸バリウムとみなし、残渣物の重量から硫酸イオン含有量を算出した。

3. 結果

3- (1) 血の池地獄の熱泥および温泉水中の希土類元素濃度

血の池地獄の熱泥および温泉水中の希土類元素濃度を表 2 に示す。

表 2 血の池地獄の熱泥および温泉水中の希土類元素濃度

/ppm	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
血の池地獄 熱泥	14.9	290.	3.24	10.7	2.35	0.57	1.76	0.20	2.08	0.44	1.25	0.18	1.21	0.24
血の池地獄 温泉水	0.26	0.65	1.52	0.33	0.27	0.13	1.13	0.23	1.21	0.24	0.68	0.16	0.78	0.07

3- (2) 熱泥試料の酸浸出試験の結果

熱泥試料の酸浸出試験の結果得られた溶出成分の組成比は $\text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3 = 12.3 : 1.0 : 1.2$ であった。古賀(1972)で報告されている血の池地獄熱泥の分析値は $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 7.86\%$, $\text{SiO}_2 = 51.91\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 19.55\%$ であるから、鉄の鉱物がある程度選択的に溶解されている

と考えられる。この浸出液中の希土類元素濃度比を表 3 に示す。

図 1 に、血の池地獄熱泥試料と、熱泥試料を 1 mol dm^{-3} 塩酸で 8 時間煮沸した試料の XRD パターンを示す。熱泥試料では α -クリストバライト (SiO_2)、カオリナイト ($\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$)、ジャロサイト ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$)、ヘマタイト (Fe_2O_3) のピークが検出された。一方、酸浸出試験後はジャロサイトのピークがほとんど消失した。よって、酸浸出試験で溶解した鉄鉱物はほとんどジャロサイトであることがわかった。ヘマタイトはほとんどピーク強度が変化しなかった。

血の池地獄熱泥試料に含まれる硫酸イオン (SO_4^{2-}) の含有量は 6.4 wt.% だった。酸浸出試験後の熱泥試料では 0.1 wt.% 未満であったことから、ジャロサイトはほとんど溶解していると考えられる。熱泥試料に含まれる硫酸がすべてジャロサイト由来と仮定すると、熱泥中のジャロサイトの含有量は 16.7 wt% (Fe_2O_3 換算で 8.0 wt.%) と見積もられる。

なお酸浸出試験の前後で、熱泥の色は肉眼で観察した限りでは変化が見られなかった。

表3 血の池地獄熱泥試料の酸浸出試験によって溶解した希土類元素濃度比 (Laを1としたときの濃度比)

/La (ppm)	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
血の池地獄熱泥 酸浸出液	1.00	1.31	4.37	1.18	1.76	1.14	1.26	9.42	1.53	0.83	1.43	1.28	2.16	1.70

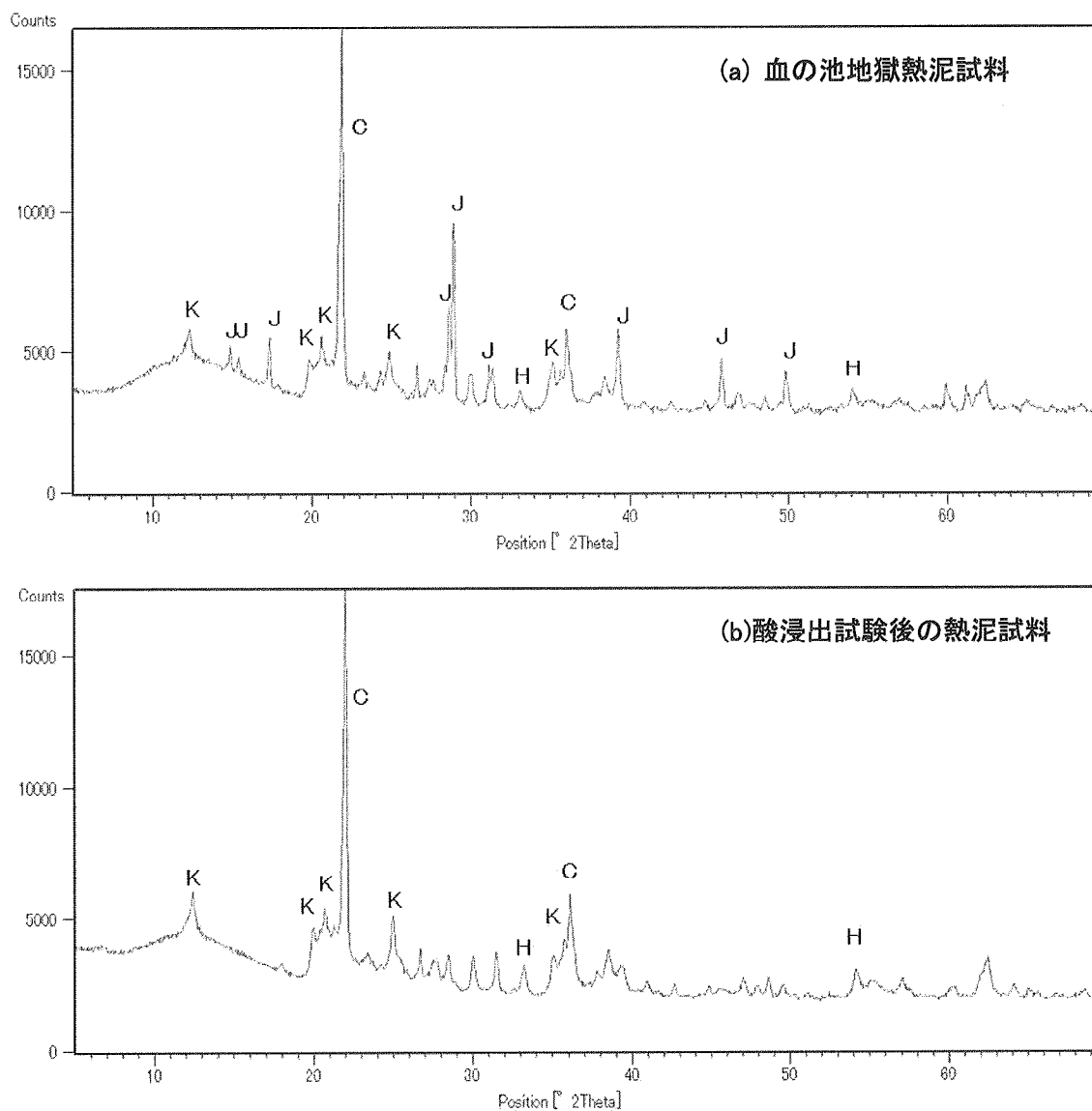


図1. 血の池地獄熱泥試料のXRDパターン。(a)は血の池地獄熱泥試料、(b)は酸浸出後の試料のXRDパターンを示す。図中の記号はそれぞれC: α -クリストバライト(SiO_2), H: ヘマタイト(Fe_2O_3), J: ジャロサイト($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$), K: カオリナイト($\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$)を示す。

4. 考察

4- (1) 血の池地獄の希土類パターン

図2に、実験によって得られた血の池地獄の熱泥、温泉水、酸浸出液試料の希土類元素濃度（ただし酸浸出液試料は希土類元素濃度比）を、C1 コンドライト中の希土類元素濃度で規格化した希土類パターンを示す。

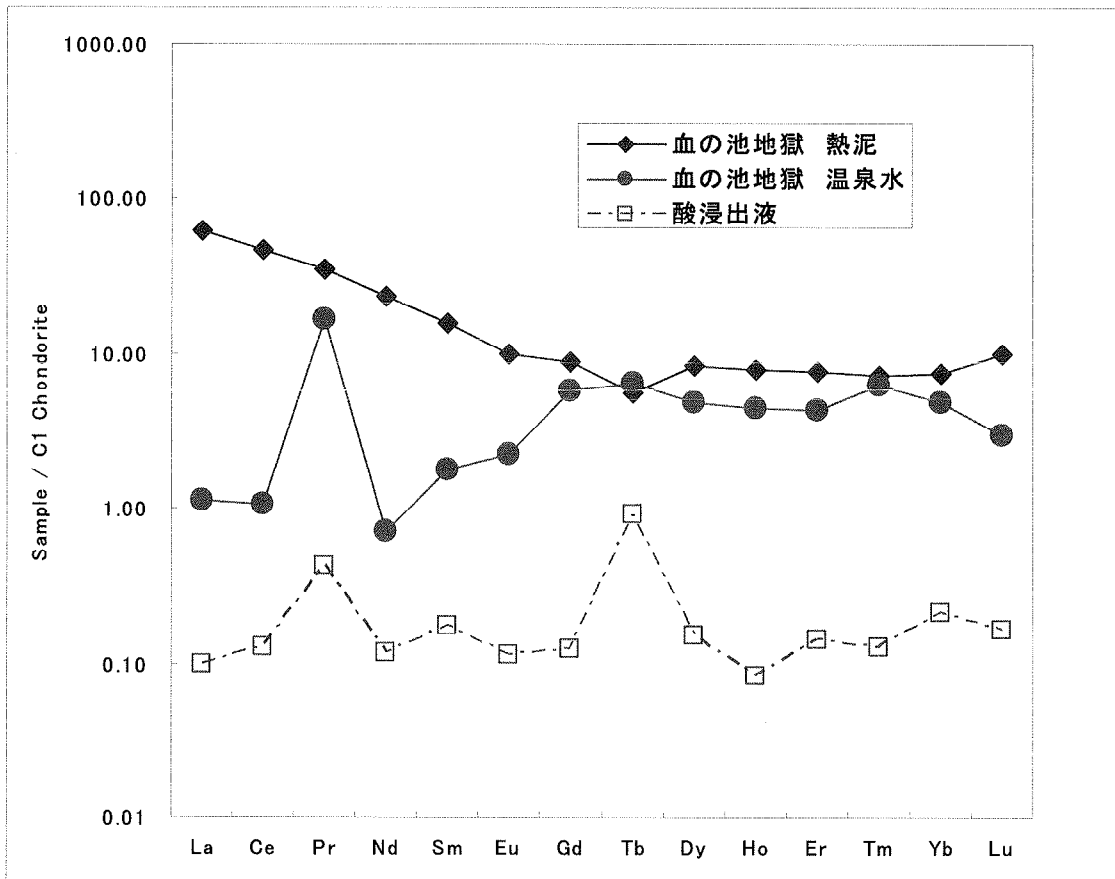


図2 血の池地獄の熱泥と温泉水と酸浸出液の希土類パターン。グラフを見やすくするため酸浸出液はLa=0.1 ppmとして濃度比を換算した。

熱泥試料の希土類パターンはほぼ平坦で、軽希土類に富むパターンを示した。Eu と Ce のいずれも正あるいは負の異常は観察されなかった。一方、温泉水試料は重希土類に富むパターンでなおかつ Pr が非常に高いというパターンが得られた。Eu と Ce いずれも顕著な異常は観察されなかった。

なお、熱泥の希土類パターンは真田ら（2003）によって報告された鶴見岳火山岩のパターンと類似している。

4 - (2) 血の池地獄の生成機構

血の池地獄の生成機構に関する文献の内容を読み解き、要点を簡単にまとめると次のようになると思われる。

- ① 血の池地獄は深さが 26 m で、最深部付近から熱泥が湧出している（吉田ら 1978）。
- ② 血の池地獄の熱泥は、湧出前に地下深部の高温高圧下で生成したものである（古賀 1972）。
- ③ 血の池地獄付近の地下で、中性で高温の熱水と、雨水が地中で温められた鉄と硫酸イオンを含む低温の熱水が混合して反応後、池底から湧出する。（Oue et al.2002）
- ④ 血の池地獄の熱泥は、(i)温泉水により微細な結晶状態で運ばれてきた粘土鉱物、(ii)温泉水から生成して非晶質鉱物として堆積後、結晶化するクリストバライト、ヘマタイトなどの鉱物、(iii)大気や地表水の影響下で生成するジャロサイトなどの鉱物。の 3つの異なる環境で生成した鉱物を含む。（吉田ら 1978）
- ⑤ 近年、血の池地獄の色が黄色味を帯びており、ヘマタイトではなくジャロサイトの割合が増えている（大沢ら 1996）。

これらを踏まえて、血の池地獄で得られた各試料の希土類パターンについて解釈を試みる。

4 - (3) 血の池地獄の希土類パターンと生成機構との関係

血の池地獄の熱泥試料の希土類パターンは同じ別府市の鶴見岳火山岩のものと同様であったことから、血の池地獄の地下深部の母岩（おそらく火山岩）の希土類パターンを反映していると考えられる。熱泥に含まれる鉱物のうち、地下深部で生成したと考えられるのはカオリナイトと予想される。

熱泥試料の鉄鉱物に含まれる希土類パターンを知る目的で 2 - (5) の酸浸出試験を行った。そこで得られた希土類パターンを図 2 に示す。その結果、Pr と Tb が特に多いというパターンが得られた。XRD 測定の結果、酸によって溶解した成分のほとんどはジャロサイトであると考えられる。なお、酸浸出試験前後の熱泥試料について、硫酸これらジャロサイトに含まれている希土類元素は、熱泥全体のうちに占める割合が少ないためか、熱泥全体の希土類パターンにはほとんど反映されていないことがわかった。熱泥全体の希土類パターンはこの地方の火山岩のものに近いことから、地下深部から運ばれるカオリナイトに取り込まれていた希土類元素の希土類パターンが反映されているものと考えられる。

血の池地獄温泉水の希土類パターンは、Pr が特に多いという点で酸浸出液のパターンと同様である。このことから、血の池地獄温泉水の希土類パターンは、熱泥のうち酸性の温泉水(pH=2.6)によって溶解した鉄鉱物（ジャロサイトやヘマタイト）に取り込まれていた希土類元素の希土類パターンを反映しているものと解釈できる。

酸浸出試験において、熱泥に含まれているヘマタイトは塩酸に対してほとんど溶解しなかった。このことは、熱泥に含まれているヘマタイト粒子がシリカ鉱物（ α -クリストバライト）の結晶中に取り込まれているなど、酸に溶解しにくい産状である可能性が考えられ

る。酸に溶けやすい産状の鉄鉱物は硫酸イオンを含む水と反応し、ジャロサイトを生成したと考えられ、酸に溶けなかった鉄鉱物が熱泥中に残ると解釈される。今回、 α -クリストバライトとヘマタイトに取り込まれた希土類元素に関する情報は得られなかった。

分別定量の結果、構成鉱物それぞれの希土類パターンは全岩の希土類パターンと必ずしも一致せず、構成鉱物それぞれの生成環境を保存している可能性が示された。今後、熱泥試料のヘマタイトやカオリナイトを分別定量することで、地下深部の酸化還元環境などの情報が得られる可能性がある。今後の課題としたい。

5. まとめ

血の池地獄から採取した熱泥の希土類パターンは鶴見岳火山岩と類似の、平坦で軽希土類に富むパターンを示した。このパターンには鉄鉱物の希土類パターンはほとんど反映されていないことがわかった。血の池地獄の温泉水の希土類パターンは、酸性である温泉水に溶解した鉄鉱物の希土類パターンを反映していることが示唆された。

6. 謝辞

本研究を行うにあたり、試料採取を快く許可して下さった血の池地獄の皆様に深く感謝いたします。また、個人的にご指導を賜りました九州大学理学部化学科の横山拓史教授に深く感謝いたします。

7. 引用文献

K. Oue, S. Ohsawa and Y. Yusa (2002) Change in color of the hot spring deposits at the Chinoike-Jigoku hot pool, Beppu geothermal field. *Geothermics*, **31**, 361-380.

大沢信二,大上和敏,由佐悠紀 (1996)別府血の池地獄の温泉沈殿物の色彩変化. *温泉科学*, **46**, 13-19.

古賀昭人 (1972) 別府血の池地獄について. *大分県温泉調査研究会報告*, **23**, 72-74.

真田哲也,山崎一,恩田裕二,高松信樹,大沢信二,(2003) 希土類元素による別府北部地域温泉水の流動経路の解明. *大分県温泉調査研究会報告*, **54**, 25-31

島田雄樹,米津幸太郎,岡上吉広,渡邊公一郎,岩永達人,横山拓史 (2010) 地熱熱水から生成したシリカスケール中の希土類元素. *日本地熱学会誌*, **32**, 77-86.

吉田哲雄,湯原浩三,中江保男,野田徹郎 (1978) 別府 {血の池地獄} の温泉水および沈殿物について. *温泉科学*, **29**, 10-18

大分県温泉調査研究会報告 第65号

平成26年7月 印刷

平成26年7月 発行

発行 大分県温泉調査研究会

〒870-8501 大分市大手町3丁目1-1

大分県生活環境部

生活環境企画課内(事務局)

TEL 097-506-3022

FAX 097-506-1741

印刷 〒870-0901 大分市西新地2丁目3番34号

有限会社 秀栄社

TEL 097-551-8780