

大分県温泉調査研究会報告

第 69 号

平成 30 年 8 月

目 次

高い深部体温上昇効率を有する温泉鉱泥浴使用による人体の生理学的変化の網羅的検討堀内孝彦 他1人.....	(1)
宇佐市の温泉の現況調査	大上和敏 他1人..... (3)
別府湾周辺の沖積層の放射性炭素年代 (^{14}C 年代)	竹村恵二 他1人..... (11)
コンパクトなサーモグラフィ・カメラを用いる温泉調査について大沢信二 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4柴田知之 他3人.....	(31)
由布・鶴見岳第四紀マグマの同位体的研究	柴田知之 他2人..... (35)
別府市の温泉泉質モニタリング	三島壮智 他1人..... (39)
大分県内の火山岩類の化学組成・Sr-Nd同位体比 (3) 伽藍岳・鬼箕山芳川雅子 他4人.....	(47)
由布・鶴見火山群及びその周辺域における磁化構造推定宇津木 充.....	(55)
別府市内の温泉水に含まれる栄養塩類の地理的分布状況の把握山田 誠 他2人.....	(65)
地理座標変換ツールの位置決定精度に関する検討網田和宏 他2人.....	(71)
温泉酵母を用いた加水分解コラーゲンの抗アレルギー効果の検証加世田 国与士 他1人.....	(79)

序

2016（平成28）年11月と2017（平成29）年11月、別府市は「別府ONSENアカデミア」を開催し、2018（平成30）年5月には、大分県が国際会議「世界温泉地サミット」を別府市で開催しました。また、環境省は、2016（平成28）年5月から毎年、「全国温泉地サミット」を開催しています。これらのイベントの主な目的は、「温泉」を核として、地域の活性化を図ること、いわゆる「地域おこし」を推進することであり、このことは、下記の「世界温泉地サミットのテーマと3つの分科会」に明らかです。

『全体テーマ「世界の温泉地が拓く地域発展の可能性～温泉がつなぐ地域資源の多様な活用方法～」 分科会① 観光；分科会② 医療・健康・美容；分科会③ エネルギー』

一方、環境省の統計によれば、2018年3月末現在、大分県には4385の源泉（全国の約16%）があり、1分間に約28万リットル（自噴と動力の合計；全国の約10%）湧出しています。その際立った特徴は、水蒸気・ガスが噴出する高温の源泉数が392（全国の約36%）と多数なこと、即ち地熱・温泉資源に富んでいることです。この状況の下で、地熱・温泉発電の推進が企図されていることは、新聞等で報道されているとおりです。

地球温暖化対策としての化石燃料依存からの脱却、原子力が抱える問題などから、自然エネルギーの活用は世界的な趨勢であり、それへの貢献が温泉にも求められています。とくにわが国では、前記のように、大分県を中心とした中部九州地域が注目されています。

世界温泉地サミットでも取り上げられた「地熱・温泉エネルギーの活用」および「観光や健康などの分野」での温泉活用に当たって、その指針となるのは「温泉に関する科学的知見」、中でも「温泉資源の有限性」であることは明白です。この考えの形成には、大分県温泉調査研究会が長年にわたって進めてきた温泉研究が寄与しています。

大分県温泉調査研究会は、昭和24年の発足以来、温泉に関する科学的知識を蓄積・公開してきましたが、本年もここに、平成29年度における本研究会の活動を記した機関誌「大分県温泉調査研究会報告第69号」を出版することは大きな喜びです。本号には12編の報告が掲載されています。これらの成果は、将来わたって、温泉に対する理解を深め、温泉の活用と保護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30（2018）年8月

大分県温泉調査研究会

会長 由 佐 悠 紀

高い深部体温上昇効率を有する温泉鈹泥浴使用による 人体の生理学的変化の網羅的検討

九州大学別府病院

堀内孝彦・前田豊樹

背景

鈹泥浴は、温泉水の比熱の低さから深部体温上昇効果に優れる。ボランティア3人ずつで真水の温水浴と鈹泥温水浴で40°C10分の入浴による鼓膜温で比較したところ、真水では温度上昇は認められないが、鈹泥浴では0.4~0.8°C上昇した。鼓膜温は脳組織の温度を反映すると考えられ、鈹泥浴では深部体温が上昇することが確かめられた。

1. 目的

温熱による人体の変化を一定期間の鈹泥浴温泉治療時の臨床検査値の変化で追跡した。

方法：九州大学病院別府病院に3週間以上入院して鈹泥浴治療を受けた7人（男性3名、女性4名、平均年齢63.4±9.2歳）と温泉浴以外のリハビリテーションのみの入院患者9人（男性4名、女性5名、平均年齢68.0±23.2歳）で、入院直後と退院直前の血液検査および心電図結果の変化率を比較した。

2. 結果

t-test分析による有意の変化(p-value<0.05)は、血液検査でのみ認められた。その内訳は、鈹泥温泉浴治療患者では、血清LDLコレステロールは8%増、血清アルブミンでは6%増、赤血球数では5%増、CRPは27%減。非入浴者では血清クレアチンキナーゼが15%減(p=0.024)であった。

3. 結論

以上のことは、深部体温上昇効果が、栄養状態の改善、貧血の改善、筋肉量の保持に寄与することを示唆していると考えられる。

宇佐市の温泉の現況調査

大分大学教育学部

大 上 和 敏・豊 田 幸 歩

要旨

宇佐市の温泉について、温泉水の泉温、主要溶存化学成分等の測定を行い、温泉の現況について調査を行った。今回の調査時点で、23井存在している温泉井のうち5井は温泉の枯渇等の理由で使用されていない状態であった。今回調査を行った11井のうち7井戸が塩類泉で、4井が単純泉であった。塩類泉の泉質は、ナトリウム・マグネシウム-炭酸水素塩泉、ナトリウム-塩化物泉、ナトリウム-塩化物・炭酸水素塩泉といったように、Na-Clタイプ、Na-HCO₃タイプにアルカリ土類金属を含むタイプの温泉水が存在していた。泉温の変化については、10℃以上上昇していた温泉井が1井、10℃以上低下していたものが1井あり、その他はほぼ一定の泉温を保っていた。TDSの変化については、塩類泉を中心に顕著な変化がみられ単純泉については大きな変化はみられなかった。

1. はじめに

宇佐市は大分県の北部、国東半島の付け根に位置し、北側は周防灘に開け、南側は雲ヶ岳・妙見山等標高400~700mの山岳地帯に囲まれた小都市である。宇佐市の温泉は、昭和50年代よりすすめられ、大分県鉱泉誌および大分県温泉調査報告温泉分析書に記載されている源泉は、1989年には15井、2017年には23井とされている（北岡ほか、1989；大分県鉱泉誌；大分県温泉調査報告温泉分析書）。宇佐市の温泉については、1989年の北岡らによる研究が行われており、[1] 堆積層の発達した平地部では、大分市の地温勾配よりも約1割程度低めであること、[2] 高濃度のCl⁻成分を含むものや、それとは独立にHCO₃⁻濃度に高低がみられるなど種々の水質の温泉水が存在すること、[3] 温泉水の水質のタイプとして、Na-HCO₃タイプ、Na-Clタイプ、陽イオンとしてアルカリ土類金属に卓越するタイプの3種類があること等が報告されている（北岡ほか、1989）。北岡らによる調査以降は、本地域を対象とした全域的な温泉調査はほとんど行われていない。

そこで本研究では、宇佐市の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等による文献調査と、現地での調査及び温泉水の化学分析を行った。

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。宇佐市には23井の源泉が存在しており、現地調査を行ったところ、泉温の低下や温泉の枯渇等の理由で現在使用されていない源泉（閉止孔）が5井あった（図1）。本研究では、宇佐市内の温泉11井を調査対象とした（図2）。調査を行った温泉水には、深層熱水型温泉の特徴を示す黄褐色を呈してい

るものもみられた。

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、 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（DIONEX 社製 ICS-1500）で、 SiO_2 はモリブデン酸黄色法による吸光光度法でそれぞれ分析を行った。 HCO_3^- は pH4.3 アルカリ度法により値を求めた。

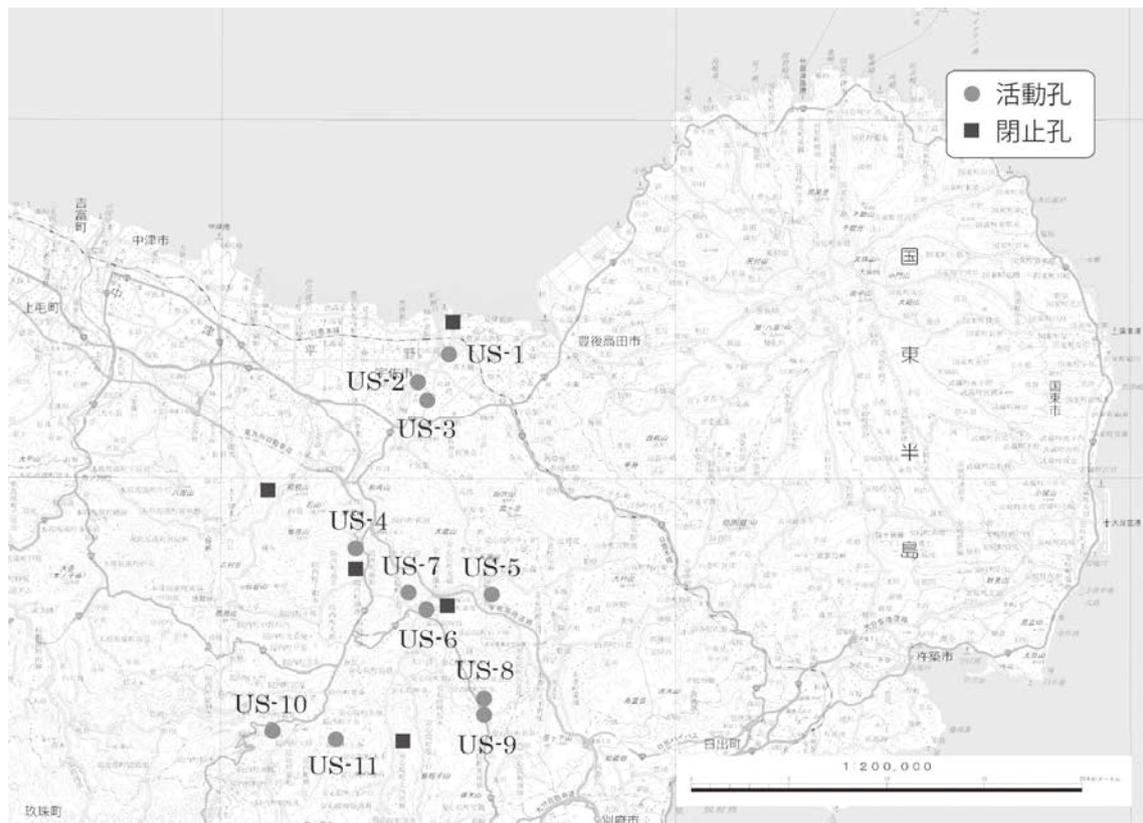


図1 調査地点の概略図（国土地理院20万分の1地形図を改変）

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。温泉の掘削深度は、最も浅いもので200m、最も深い井戸で700mであるが、多くの源泉が500~700mであった。泉温については、US-6のみ23.1℃の冷鉱泉、US-1、US-2およびUS-7が温泉（狭義）で他の源泉は全て泉温42℃以上の高温泉であった（図2）。2016年に調査を行った中津市では掘削深度が500mを越える井戸が少なかったが、宇佐市の温泉は掘削深度が500mを越える井戸が多く、平均泉温も43.6℃と中津市の温泉より4℃程度高めであった。また、宇佐市の地温勾配は大分市よりやや低い5.1℃であるとされており（北岡ほか，1989），この地温勾配の値と掘削深度からみると、US-6はかなり低く、US-11は高めの泉温となっていた。

表1 宇佐温泉の掘削深度と泉温

No.	掘削深度	泉温
	[m]	[℃]
US-1	500	39.3
US-2	700	36.2
US-3		44.9
US-4	600	44.3
US-5	700	47.4
US-6	600	23.1
US-7	750	41.0
US-8		44.4
US-9	600	51.0
US-10	200	47.1
US-11	600	60.9

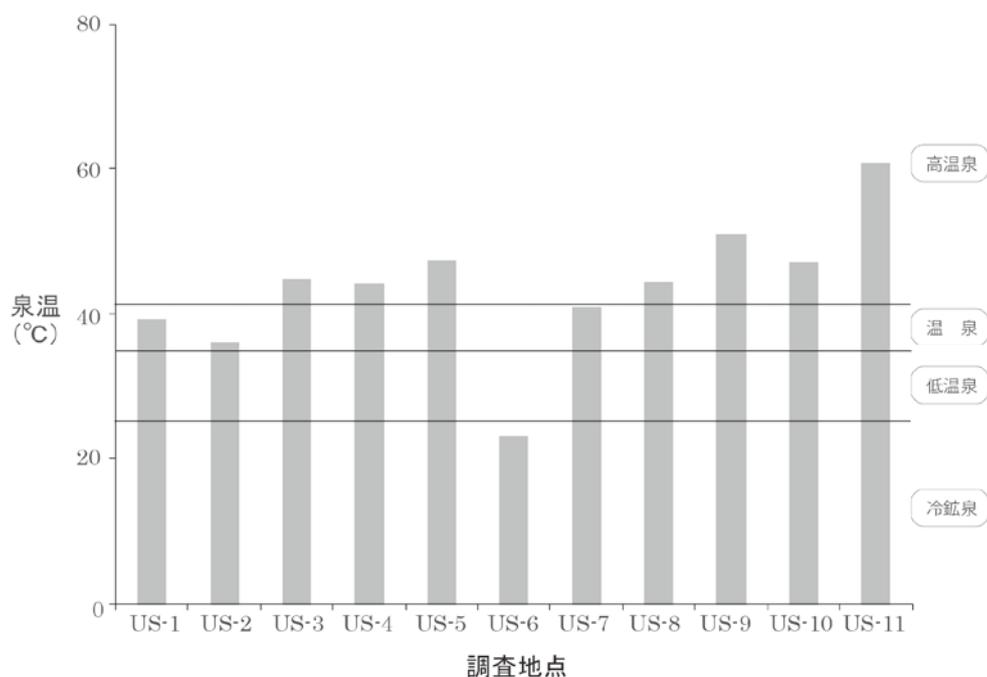


図2 各源泉ごとの泉温

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 2 に示す。液性については、US-5、US-6、US-8、US-9、US-10 が pH7.9~9.1 の弱アルカリ性泉で、その他は全て pH6.3~7.1 の中性温泉であった。温泉水の主要溶存化学成分量の総量値(TDS)についてみると、今回調査を行った温泉水は、US-5、US-8、US-9、US-10 の 4 源泉以外は、すべて TDS が 1000mg/L を越える塩類泉で、中でも US-6 は TDS の値が 10000mg/L 以上と溶存化学成分の濃度が非常に高い温泉水であった。US-5 については、2003 年は TDS の値が 1800mg/L 以上の塩類泉であったが、今回の調査時では、TDS の値が 827mg/L と大きく低下して単純泉になっていた。大分県北部地域の温泉は、範囲が広域かつ離散的で、水質に大きな違いがあるとされている（北岡ほか、1989）、今回調査行った 11 井についても、TDS の値にこの傾向がみてとれる。

温泉水の化学成分では、US-1~US-3 は、ナトリウム・マグネシウム-炭酸水素塩泉、US-4、US-6 および US-11 は、ナトリウム-塩化物泉（US-6 は、ナトリウム-塩化物強塩泉）、US-7 は、ナトリウム-塩化物・炭酸水素塩泉といったように、塩類泉の化学組成は様々な種類がみられた（図 3）。一方で単純泉については、US-5、US-8 および US-9 が、ナトリウム-塩化物・炭酸水素塩型、US-10 がナトリウム・マグネシウム-炭酸水素塩型であった。

県北地域の温泉水の全般的な特徴として、陰イオンで HCO_3^- に卓越し、 SO_4^{2-} をほとんど含まない温泉水が多いこと、陽イオンでは Na^+ 成分に卓越しているとされている（北岡ほか、1989）。2017 年に、筆者らが調査を行った中津市の温泉は、単純泉が多いものの全体的に Na-HCO_3 型の温泉が多かったが（大上・西田、2017）、今回調査を行った宇佐市の温泉水は、前述の傾向から外れ、高濃度の Cl^- を含むものや、 Mg^{2+} に富むものなど様々な水質がみられた。北部地域には、 Na-HCO_3 型、 Na-Cl 型、そして、陽イオンとしてアルカリ土類金属に富む 3 種類の水質の温泉水が存在するとされており（北岡ほか、1989）、今回採取した温泉水はこれら 3 種類の水質のタイプに全て当てはまる。

表 2 温泉水の分析結果

No.	pH	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	SiO_2	総塩分量
US-1	6.5	717	90.2	235	14.4	286	18.0	2820	83.2	4264
US-2	6.9	201	33	53.6	58.1	50.8	4.5	799	142	1342
US-3	6.9	422	44.1	93	27.9	98	3.8	1400	36.4	2125
US-4	6.3	280	34.3	27.1	40.8	421	101	122	33.8	1059
US-5	8.8	249	9.6	5.3	16.3	207	—	281	59	827
US-6	8.4	3900	47	42.1	77.1	5650	96.1	451	18.2	10280
US-7	6.5	305	41.6	12.1	30.5	525	20.7	250	67.2	1252
US-8	9.1	76.9	2.1	0.4	1.2	4.7	1.7	165	38.7	290
US-9	9.0	75.1	2.3	0.5	1.2	4.5	1.7	165	39.1	289
US-10	7.9	183	24.2	4.8	7.6	138	17.5	281	67.2	723
US-11	7.1	376	7.4	1.7	36.2	541	39.3	79.3	48.6	1129

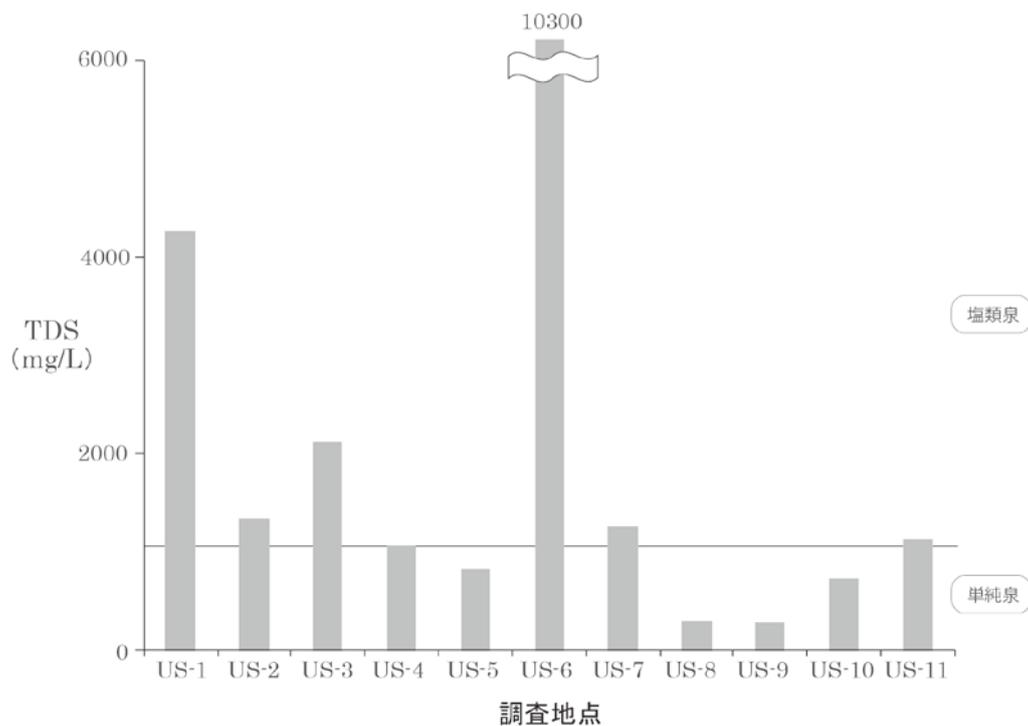


図3 各源泉ごとの総塩分の総量値 (TDS)

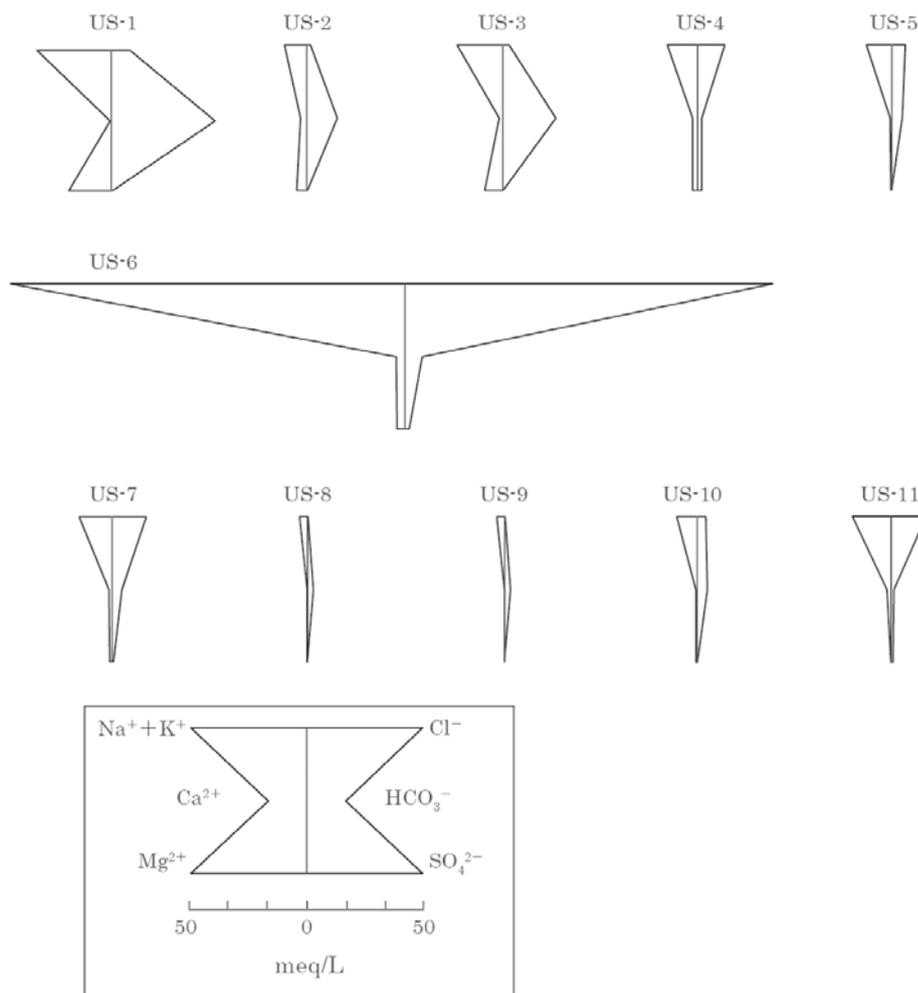


図4 各温泉水の化学組成

3-3 温泉水の泉温および化学成分濃度の変化について

今回の分析結果と大分県鉱泉誌に掲載されているデータをもとに、各源泉ごとの泉温およびTDSの経年変化を図5および図6にそれぞれ示す。

図5より、泉温の上昇がみられた温泉は、US-11で1983年に比べて10℃以上上昇していた。一方で泉温が低下していた温泉は、US-6で2004年から5℃以上低下していた。US-10については、1998年には50.0℃あった泉温が、2005年に37.5℃まで低下していたが、今回の調査時には47.1℃まで回復していた。その他の温泉については過去の測定値に比べ、ほぼ一定の泉温を保っていた。

図6より、TDSについては、塩類泉を中心に顕著な変化がみられた。TDSが増加していた温泉はUS-1, US-6, US-11の3源泉で、US-1は1996年に比べて1064mg/L, US-6は2004年に比べ916mg/L, US-11は1983年より400mg/L, それぞれ増加していた。TDSの低下がみられた温泉は、US-2, US-3, US-4, US-5, US-7の4源泉で、US-2は1991年から441mg/L, US-3は2005年から845mg/L, US-4は2004年から402mg/L, US-5は2003年から827mg/L, US-7は1996年から841mg/L, それぞれ低下していた。塩類泉で比較的安定な値であったのはUS-2のみで、単純泉については大きな変化はみられなかった。

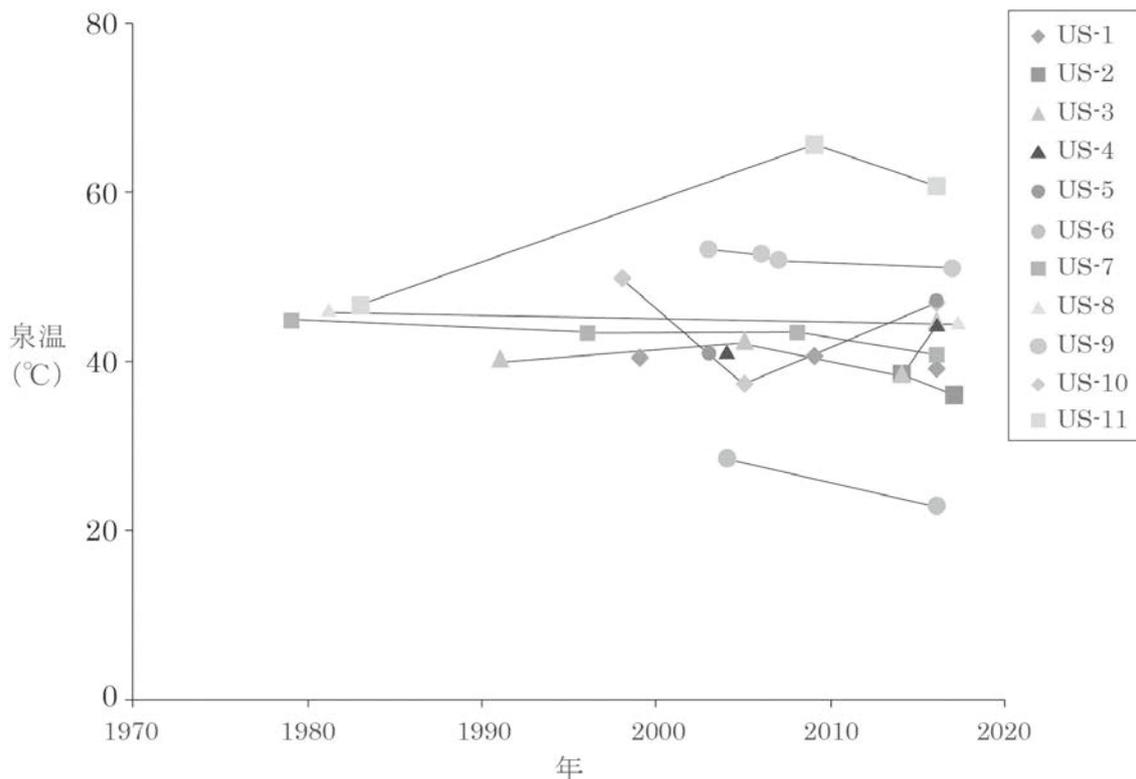


図5 各調査地点における泉温の変化

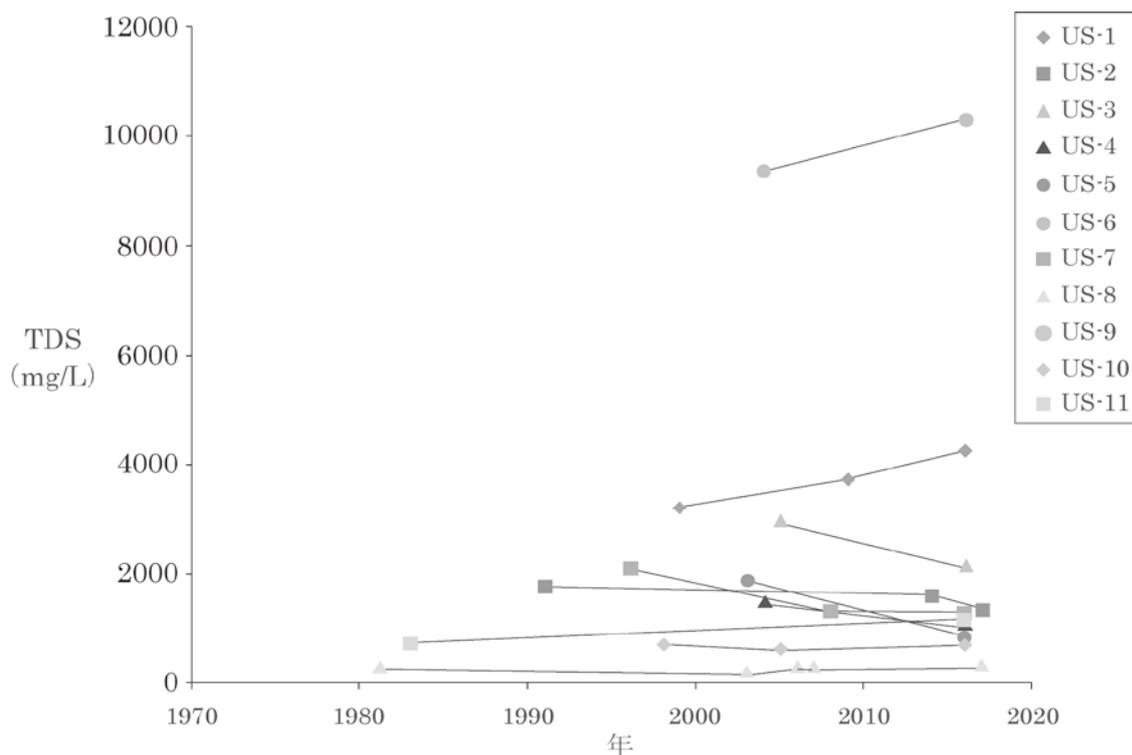


図6 各調査地点における主要溶存化学成分濃度の総量値（TDS）の変化

4. まとめ

宇佐市の温泉について、大分県鉱泉誌を中心とした文献調査および現地調査を行い、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）大分県鉱泉誌に記載されている泉源 23 か所のうち、5 井が現在使用されていない状況であった。（2）調査を行った 11 源泉の平均泉温は、43.6℃でありその内わけは、冷鉱泉が 1 井、温泉（狭義）が 3 井、高温泉が 7 井であった。（3）この地域の温泉水は、塩類井が 7 井、単純泉が 4 井であり、塩類泉の泉質は、ナトリウム・マグネシウム-炭酸水素塩泉，ナトリウム-塩化物泉，ナトリウム-塩化物・炭酸水素塩泉の 3 種類であった。（4）泉温については、一部の温泉井について温度変化がみられたが、全体としてはほぼ安定な状態を保っていた。TDS については、塩類泉を中心に顕著な変化がみられたが、単純泉については大きな変化はみられなかった。

参考文献

- 大分県鉱泉誌 第 2 集（2006）大分県温泉調査研究会。
 大分県温泉調査報告 温泉分析書（2017），大分県自然保護推進室
 北岡豪一，川野田實夫，葛城啓子，大石郁朗，由佐悠紀，県北地域（下毛郡，宇佐郡，宇佐市）の温泉調査，大分県温泉調査研究会報告，40，1-14。
 北岡豪一，由佐悠紀，川野田實夫，国東半島の温泉調査，大分県温泉調査研究会報告，41，

1-6.

山下幸三郎（1954）大分縣山國村温泉調査報告．大分県温泉調査研究会報告，5，7-15.

志賀史光，川野田實夫，江口芳彦（1982）国東半島の温鉱泉の化学組成．大分県温泉調査研究会報告，33，77-80.

別府湾周辺の沖積層の放射性炭素年代 (^{14}C 年代) - 別府扇状地の南部扇端における完新世海水準変動の応答 -

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設
中西利典・竹村恵二

別府市浜脇および朝見地区において沖積層の堆積相解析を実施して、下位から順に、蛇行河川、浅海～塩性湿地、氾濫原の堆積環境を認定した。その結果、最上部の氾濫原堆積物は、他地域の弥生の小海退による堆積物よりも 200～1200 年若い年代値を示し、標高が 3 m 程度低いので、朝見川断層による地表変動の影響を反映していると考えられる。

1. はじめに

別府扇状地の南端にはA級の活動度を持つ正断層の朝見川断層が伏在している(千田, 1995; 千田ほか, 2001)。その扇端部には埋立地や砂丘が分布しており(図1)、浜脇地区において2本のボーリング(HBPおよびBHM)調査によって厚さ17 m以上の沖積層の堆積環境と形成年代が報告されている(中西ほか, 2007, 2008, 2009, 2015)。その結果、この地域の沖積層には、完新世の海水準変動と朝見川断層の活動による堆積環境の変化が地層の中に記録されていることが示された。そこで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では、浜脇および朝見地区で1本ずつのボーリング(BHPおよびYMP)調査を新たに実施すると共に(図1)、先述した2本の既存試料(HBPおよびBHM)を追加分析することによって、上位から人工盛土、現世河川～砂丘堆積物、塩性湿地～浅海底堆積物、網状河川堆積物を認定した(文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科, 2017)。そこで本論では、浜脇および朝見地区で新たに得た2本のボーリング(BHPおよびYMP)コアの層相、珪藻化石群集組成、堆積環境、 ^{14}C 年代値を記載した上で、既存の2本のコアの分析結果を含めて別府扇状地の南部扇端における堆積曲線と堆積環境の変遷について考察する。

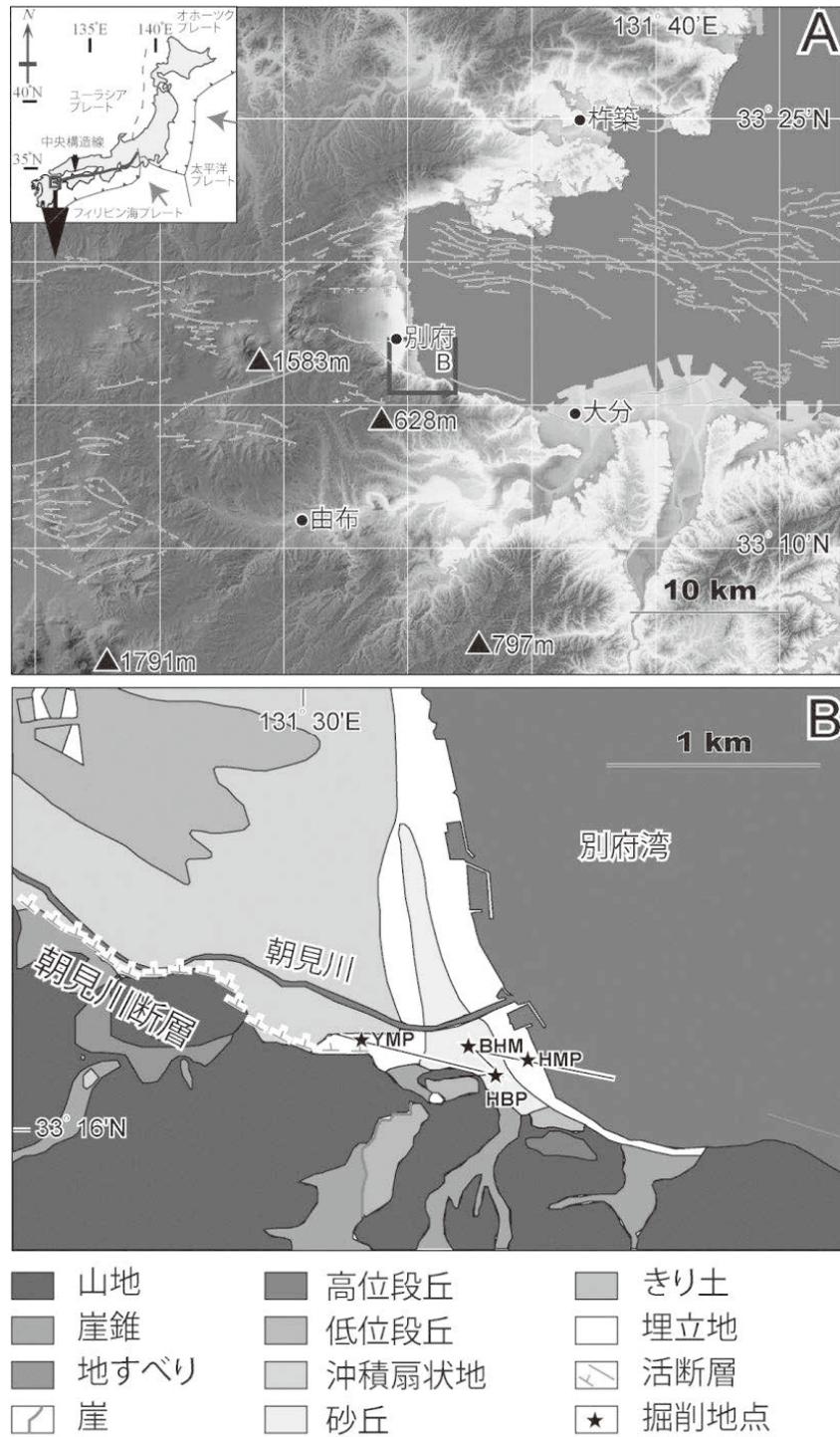


図 1 調査地域の地形と活断層（文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科，2017 を改変）。A：別府ー大分地域の標高段彩図（国土地理院の数値地図を基にしてカシミールで作成）と活断層（地震調査推進本部，2005）。B：別府扇状地の地形分類と活断層。地形分類は国土地理院（2011）、活断層の分布は千田ほか（2001）および岡田ほか（2001）による。

2. 分析方法

別府地域のYMP、BHM、HMPコアの各6層準から採取した細粒部においてパリノ・サーヴェイ株式会社に依頼して以下の手順で珪藻化石の群集組成を解析した。半裁面から採取した半乾燥試料約3 gをビーカーに採取して乾燥させた後、重量を測定した。その後、10% H_2O_2 と1規定HCl水溶液で洗浄した後、中性になるまで上澄み液を廃棄した。残渣をカバーガラスに滴下して乾燥させた後、プリュウラックス封入剤を用いてプレパラートを作成した。それらを油浸600~1000倍で検鏡して200個体以上の珪藻化石を同定・計数した。珪藻の同定と種の生態はHustedt (1930ab, 1959, 1961-1966)やKrammer and Lange-Bertalot (1986, 1988, 1991)などを参考にした。地層の形成年代を詳しく検討するために加速器質量分析 (AMS) 法による ^{14}C 年代測定を韓国地質資源研究院 (KIGAM) と地球科学研究所 (BETA) で実施した。

3. 結果

YMPとHMP両コアの解析結果を基にして下位から順に、網状河川流路、蛇行河川、エスチュアリー、塩性湿地、浅海底、盛土に覆われた氾濫原の堆積相を認定した(図2)。これらの堆積相の層相、珪藻化石群集組成、堆積環境、 ^{14}C 年代値を下に記述する。

3.1. 網状河川相 : YMPコアの深度 19.12-22.00 m

記載 : 層厚5-23 cmの砂質礫と層厚1-20 cmの礫質支持砂の互層で構成される。礫は直径2-256 mmの安山岩とデイサイトの亜角~亜円礫からなる。基質は主に中粒~粗粒砂からなる。 ^{14}C 年代を測定可能な植物片は確認できなかった。

解釈 : 上述したような砂質礫と礫質支持砂の互層は掃流運搬が卓越する網状河川でよく観察される構成される(Miall, 1977, 1992)。同様な砂礫層は大分平野の開析谷の基底においても千田 (1987) やNakanishi et al. (2017)で報告されており、最終氷期に形成された

と考えられる。

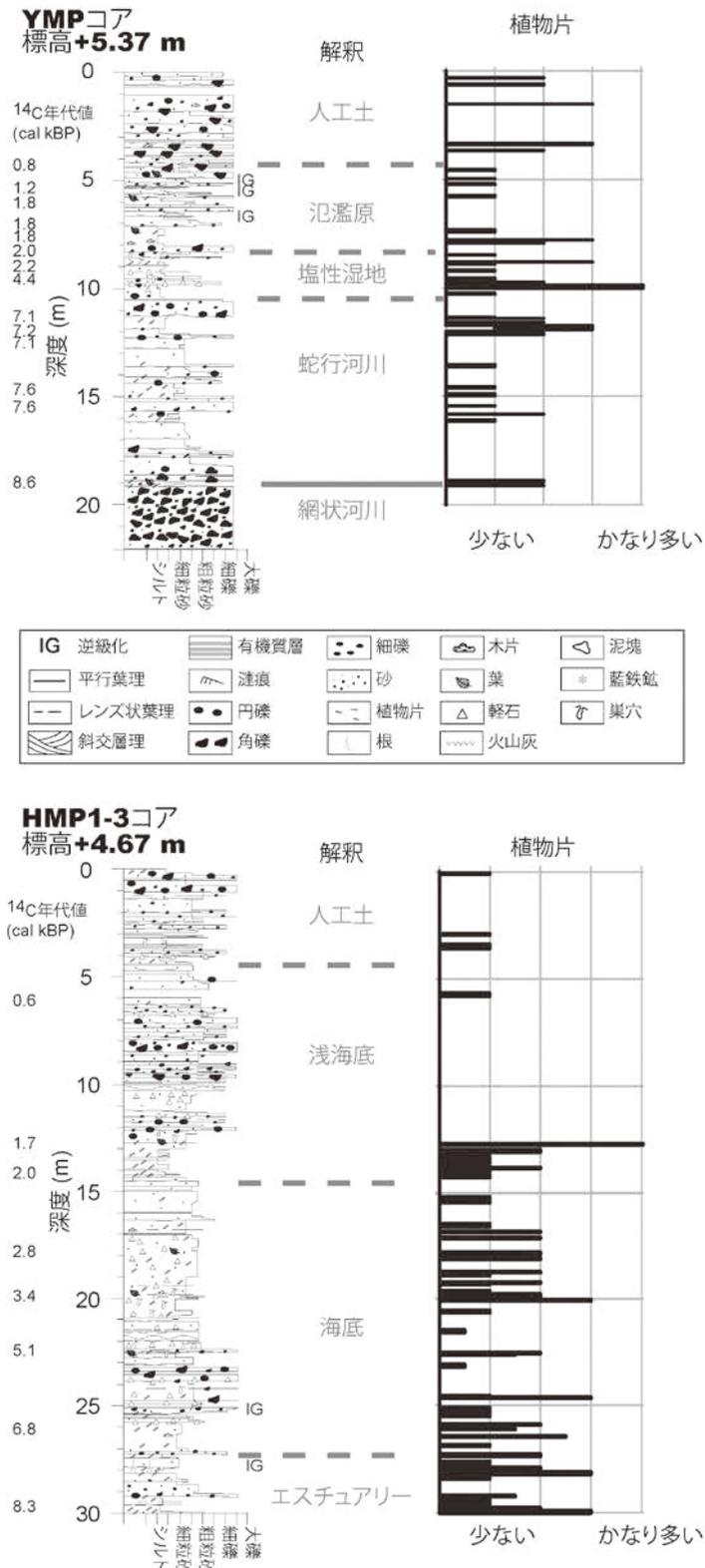


図2 YMPおよびHMPコアの堆積柱状図と¹⁴C年代値、堆積相の解釈、植物片の含有度。

3.2. 蛇行河川相 : YMP コアの深度10.51-19.12 m

記載 : 砂～礫と泥の互層で構成される。植物片や根、泥炭層が多く観察される。*Fragilaria* spp.、*Cocconeis placentula* var. *lineata* (Ehr.) Cleve、*Pinnularia borealis* Ehrenberg、*Planothidium lanceolatum* (Breb. ex Kuetz.) Lange-Bertalot、*Navicula confervacea* (Kuetz.) Grunowなどの淡水生珪藻が多く含まれる。同相から得た6試料の植物片の¹⁴C年代値は6,960-8,660 cal BPであった。

解釈 : 陸源の植物片や根、泥炭層、淡水生珪藻は、同相が淡水環境下で形成されたことを強く示唆する。上部における植物片の増加は、堆積物の運搬堆積が少ない氾濫原のような環境において形成されたと考えられる。

3.3. エスチュアリー相 : HMP コアの深度27.60-30.00 m

記載 : 泥と砂～礫の互層で構成される。植物片や根が多く観察される。*Fallacia tenera* (Hust.) D.G.Mann、*Bacillaria paradoxa* Gmelin、*Nitzschia levidensis* var. *victoriae* (Grun.) Cholnokyなどの淡水～汽水生珪藻が深度29.80-29.81 mに含まれる。深度29.95-29.97 mから得た小枝の¹⁴C年代値は8,190-8,370 cal BPであった。

解釈 : 陸源の植物片や根、泥炭層、淡水～汽水生珪藻は、同相が淡水と汽水が混合するエスチュアリーのような環境下で形成されたことを示唆する。淡水～汽水生珪藻と根が共存しているので、潮間帯よりも上位の環境下で堆積したと考えられる。

3.4. 浅海底相 : HMP コアの深度5.70-27.60 m

記載 : 上位の泥混じりの粗粒砂～礫の互層と、下位の砂質泥と砂～礫の互層に同相は二分できる。上位には、*Cymbella turgidula* Grunow、*Navicula confervacea* (Kuetz.) Grunow、*Cocconeis placentula* var. *lineata* (Ehr.) Cleve、*Fragilaria ulna* (Nitzsch) Lange-Bertalotなどの淡水生珪藻が多く含まれる。反対に下位では、*Paralia sulcata* (Ehr.) Cleve、*Grammatophora*

spp.、*Odontella aurita* (Lyngb.) C. Agargh、*Thalassionema nitzschioides* (Grun.) Grunowなどの海生珪藻が多く含まれる。生物擾乱痕や巣穴、コンクリションが多く認められる。同相から得た7試料の植物片の¹⁴C年代値は510-6,860 cal BPであった。

解釈：砂や礫などの粗粒な粒子と海生珪藻を含む泥層が共存するので、ファンデルタのような堆積環境が示唆される(Hori et al., 2017)。上位における淡水生珪藻の増加は、堆積物の急激な運搬堆積や海水準の低下に伴う水深の減少を反映していると考えられる。

3.5. 塩性湿地相：YMP コアの深度8.33-10.51 m

記載：泥層が主体で数枚の砂層の互層からなる。植物片や生物擾乱痕、巣穴が多く認められる。深度8.93-8.94 mには、*Paralia sulcata* (Ehr.) Cleve、*Odontella aurita*などの海生珪藻が含まれる。深度8.49 mから得た植物片は2,150-2,310 cal BPの¹⁴C年代値を示す。

解釈：植物片を多く含んだ細粒な粒子と海生珪藻、生物擾乱痕、巣穴が確認されるので、淡水と海水の影響を共有する堆積環境を示す。植物片の増加と珪藻化石の保存状態が悪いこと、少数の砂層は塩水湿地のような堆積環境を示唆する。

3.6. 氾濫原相：YMP コアの深度3.65-8.33 m

記載：上位の砂礫と泥の互層と下位の泥と砂礫の互層からなる。砂礫層の多くには逆級化構造が認められ、泥層には植物片や根が含まれる。全層を通して、*Achnanthes exigua* Grunow、*Pseudostaurosira brevistriata* (Grun.) Williams & Round、*Nitzschia frustulum*などの淡水生珪藻が優先する。同相から得た7試料の植物片の¹⁴C年代値は740-2,310 cal BPであった。

解釈：陸源の植物片や根、自然堤防帯の示相構造である逆級化(増田・伊勢屋, 1985)、淡水生珪藻が確認され、海生の貝化石や海域や汽水域にみられる生物擾乱痕や巣穴が確認されないため、氾濫原で形成されたと考えられる。

3.7. 人工盛土：YMP コアの深度0.00-3.65 m とHMP コアの深度0.00-5.70 m

記載：砂層や砂礫層からなり、陶器やレンガ、アスファルト、コンクリート、ビニールなどの断片が含まれる。

解釈：人工物を多く含み、土地の履歴（図1）から、人工盛土と考えられる。

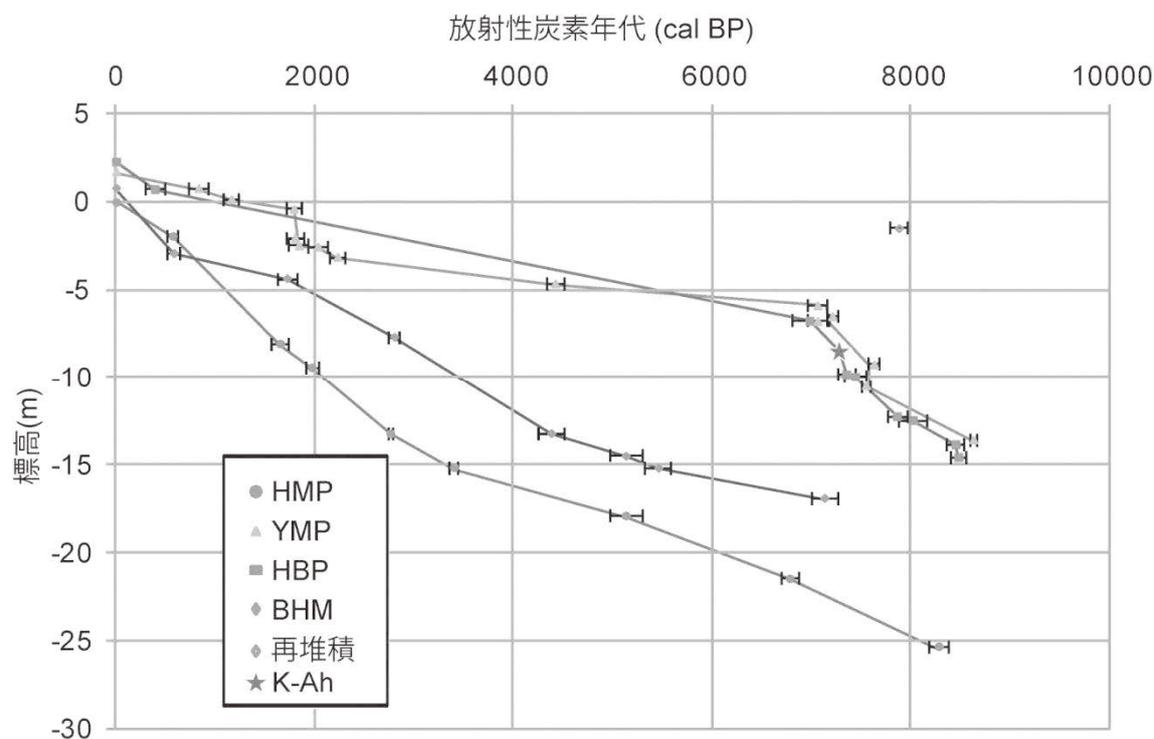


図3 朝見川断層の低下側の堆積曲線（文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科，2017 を改訂）。

4. 考察

上述したYMPとHMP両コアと既存のHBPとBHMの解析結果（中西ほか，2007，2008，2009，2015）を基にして全てのコアの堆積曲線（図3）と堆積環境（図4）の変化について考察する。

4.1. 堆積曲線

YMPとHMP、既存のHBPとBHMの各コアから得た植物片の¹⁴C年代値と採取標高の関係を図3にまとめた。BHMの標高-8 m付近の1試料以外の年代値は、上位の試料ほど若い値を示すので、植物が死滅してからそれらが堆積までの期間は小さいと考えられる。このことは、HBPコアの標高-8 m付近には7,300 cal BP頃の鬼界アカホヤ火山灰層（K-Ah；町田・新井，2003）が上下の層準から得られた年代値と整合することからも裏付けられる。

各コアの7,000 cal BP頃の標高を図3で比較すると、YMP>HBP>BHM>HMPコアの順で上位に位置する。この順は、朝見川の上流から並んでおり、同じ砂丘上のHBPコアとBHMコアは断層からの距離に規制されていると考えられる。また、朝見川断層に隣接した地点で掘削されたYMPコアとHBPコアの堆積曲線は、非常によく似た堆積様式を示しており、断層近傍の堆積空間の変化を記録してきたことが示唆される。特に、YMPコアの深度5.76~7.84 mの堆積速度は41.5 mm/yrであり、その上下の層準の0.8~1.2 mm/yrよりも40倍程度も大きい。この層準の堆積年代は1800 cal BP頃であり、朝見川断層の活動による沈降を反映している可能性がある。

4.2. 堆積環境

先述した YMPおよびHMPコアの堆積相の内、蛇行河川相、エスチュアリー相、浅海相、塩性湿地相、氾濫原相は、中西ほか（2015）で認定されたHMPおよびBHMコアの堆積相と対比した。その結果、下位から順に、蛇行河川、浅海~塩性湿地、氾濫原の堆積環境に分けられる（図4）。同様な堆積環境の変化は大分平野でも認定されており（Nakanishi et al., 2017）、それらの堆積環境の変化は最終氷期最盛期以降の海水準の上昇によって主に引き起こされたと考えられる。その中で別府地域の氾濫原堆積物は、日本のほかの地域で報告されている「弥生の小海退」を反映した堆積物（太田ほか，1990；海津，1994；田辺ほか，2016）よりも200~1200年若い年代値を示す。それにも関わらず，

それらと比べて標高が3 m程度低い位置に分布している原因は、掘削地点近傍に伏在している朝見川断層による地表変位によると考えられる。

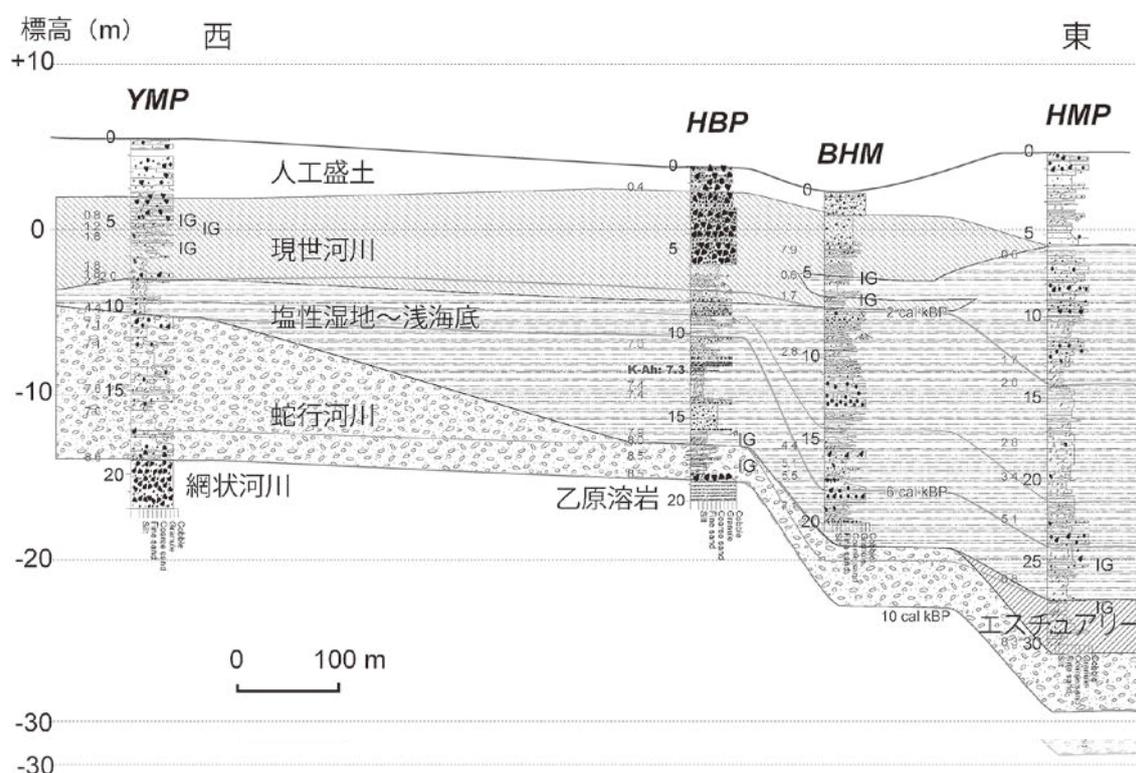


図4 朝見川断層の低下側の堆積システム (文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科, 2017 を改訂)。

謝辞

今回検討したコア試料と分析データの一部は、別府-万年山断層帯 (大分平野-由布院断層帯東部) における重点的な調査観測 (研究代表者: 竹村恵二) によって得られた。

参考文献

- 千田 昇 (1987) 大分平野西部の完新世における地形発達. 地理学評論, 60 (7), 466-480.
- 千田 昇 (1995) 別府扇状地の形成時期と堀田-朝見川断層群の活動. 地学雑誌, 104 (6), 895-898.
- 千田 昇・池田安隆・中田 高・岡田篤正・宇根 寛 (2001) 2万5千分の1都市圏活断層図「別府」. 国土地理院.

- 国土地理院 (2011) 土地条件調査解説書「大分地区」. 20p.
- Hori, K., Nagasawa, S., Sato, Y., Nakanishi, T., Hong, W. (2017) Response of a coarse-grained, fluvial to coastal depositional system to glacio-eustatic sea-level fluctuation since the last glacial maximum: an example from the Tenryu River, Japan. *Journal of Sedimentary Research*, 87, 1-19.
- Hustedt, F. (1930a) Bacillariophyta (Diatomeae), in Paccher, A., ed., Die Susswasser-Flora Mitteleuropas Heft 10: Jena, Verlag von Gustav Fischer, 466p.
- Hustedt, F. (1930b) Die Kieselalgen: Deutschlands, Osterreichs und der Schweiz unter Berucksichtigung der ubrigen Lander Europas sowie der angrenzenden Meeresgebiete., in Rabenhorst L., ed., Kryptogamen-Flora von Deutschland Osterreich und der Schweiz, VII Band, 1, Teil (reprinted 1977): Koenigstein, Otto Koeltz, 920p.
- Hustedt, F. (1959) Die Kieselalgen: Deutschlands, Osterreichs und der Schweiz unter Berucksichtigung der ubrigen Lander Europas sowie der angrenzenden Meeresgebiete, in Rabenhorst, L., ed., Kryptogamen-Flora von Deutschland, Osterreich und der Schweiz, VII Band, 2, Teil (reprinted 1977): Koenigstein, Otto Koeltz, 845p.
- Hustedt, F. (1961–1966) Die Kieselalgen: Deutschlands, Osterreichs und der Schweiz unter Berucksichtigung der ubrigen Lander Europas sowie der angrenzenden Meeresgebiete, in Rabenhorst, L., ed., Kryptogamen-Flora von Deutschland, Osterreich und der Schweiz, VII Band, 3, Teil (reprinted 1977): Koenigstein, Otto Koeltz, 816p.
- Krammer, K., Lange-Bertalot, H. (1986) Bacillariophyceae, 1. Teil: Naviculaceae, in Ettl, H., Gerloff, J., Heynig, H., Mollenhauer, D., eds., Susswasserflora von Mitteleuropa, Band 2/1: Stuttgart, Gustav Fischer Verlag, 876p.
- Krammer, K., Lange-Bertalot, H. (1988) Bacillariophyceae, 2. Teil: Bacillariophyceae, Epithemiaceae, Surirellaceae, in Ettl, H., Gerloff, J., Heynig, H., Mollenhauer, D., eds., Susswasserflora von Mitteleuropa, Band 2/2: Stuttgart, Gustav Fischer Verlag, 610p.
- Krammer, K., Lange-Bertalot, H. (1991) Bacillariophyceae, 4. Teil: Achnanthaceae, in Ettl, H., Gerloff, J., Heynig, H., Mollenhauer, D., eds., Susswasserflora von Mitteleuropa, Band 2/4: Stuttgart, Gustav Fischer Verlag, 437p.
- 地震調査推進本部 (2005) 別府一万山断層帯の長期評価 .
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/05mar_beppu/index.htm, 19.1MB.
- 増田富士雄・伊勢屋ふじこ (1985)“逆グレーディング構造”: 自然堤防帯における氾濫原洪水堆積物の示相堆積構造. 堆積学研究会報特集号, 22/23, 108-116.
- Miall, A.D. (1977) A review of the braided-river depositional environment. *Earth Science Reviews*, 13, 1-62.
- Miall, A.D. (1992) Alluvial deposit. In Walker, R.G., James, N.P. (Eds.), *Facies Models: Response to Sea Level Change*. Geol. Assoc., Canada, Ontario, 119–142.

- 文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科 (2017) 別府-万年山断層帯 (大分平野-由布院断層帯東部) における重点的な調査観測. 平成 26~28 年度成果報告書, 526p.
- 中西利典・竹村恵二・齋藤武士・松山尚典・柴田康行 (2007) 大分県別府市浜脇地区の沖積層ボーリング解析-堆積相と炭素 14 年代測定値-. 大分県温泉調査研究会報告, 58, 11-19.
- 中西利典・竹村恵二・齋藤武士・松山尚典・柴田康行 (2008) 朝見川断層付近のボーリングコアの堆積環境と堆積年代の対比. 大分県温泉調査研究会報告, 59, 3-11.
- 中西利典・竹村恵二・松山尚典 (2009) 2 本のボーリングコア試料から推定した朝見川断層の活動性. 大分県温泉調査研究会報告, 60, 51-55.
- 中西利典・竹村恵二・松山尚典・齋藤武士・柴田康行・香月興太 (2015) 別府市浜脇地区のボーリングコア試料から認定した朝見川断層の完新世における活動. 地形, 36(3), 159-171.
- Nakanishi, T., Takemura, K., Matsuyama, H., Shimoyama, S., Hong, W., Okuno, M. (2017) Activity of the Funai fault and radiocarbon age offsets between shell and plant pairs from the latest Pleistocene to Holocene sediments under the Oita Plain, western Japan. *Radiocarbon*, 59(6), 1737-1748.
- 岡田篤正・池田安隆・中田 高・千田 昇・宇根 寛 (2001) 2 万 5 千分の 1 都市圏活断層図「大分」. 国土地理院.
- 太田陽子・海津正倫・松島義章 (1990) 日本における完新世相対的海水準変化とそれに関する問題-1980~1988 における研究の展望-. 第四紀研究, 29, 31-48.
- 田辺 晋・堀 和明・百原 新・中島 礼 (2016) 利根川低地における「弥生の小海退」の検証. 地質学雑誌, 122 (4), 135-153.
- 海津正倫 (1994) 沖積低地の古環境. 古今書院, 270p.

コンパクトなサーモグラフィ・カメラを用いる 温泉調査について

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

要旨

ポケットサイズのサーモグラフィ・カメラが市販されたので、それを入手して温泉調査に携行し、様々なシーンで使ってみたところ、測定対象の温度分布を知るというサーモグラフィ・カメラ本来の特徴を生かした目的のみならず、肉眼的に検知困難である温泉水の湧出箇所の特特定や流出の様子の子の可視化といった用途のあることを実例によって示すことができ、有用な温泉調査ツールになりうるということが分かった。

1. はじめに

温泉や噴気の熱的観測では、温度計による直接測定を基本とし、近年は、赤外放射温度計による非接触測定も行われるようになり、温度分布を空間的にとらえる熱赤外線映像法（サーモグラフィ）に発展している。

サーモグラフィとは、物体が放射する熱（赤外線）を走査検出し、その物体の表面付近の温度分布を映像として表示する方法のことである。開発当初、熱赤外面像は、インスタントフィルムに記録したり、映像としてブラウン管上に表示されていたが、コンピュータ技術が発達・成熟するとともに、今では、観測装置と一体化した液晶ディスプレイ上に画像が表示され、画像は内蔵メモリにデジタルデータとして記録できるようになっている。

熱赤外線映像装置は、「サーモグラフィ」や「サーモビュー」とも呼ばれ、最初は、三脚に載せて使用しなければならないほどの大きさだったが、今では片手で持って計測できる程度のものが普通に市販されている。このようなダウンサイジングの動きは化学分析機器の世界でも見られる現象で、最終的にはコンパクトなものが市場に出回っており（例えば、蛍光 X 線分析計やラマン分光分析計）、サーモグラフィ（熱赤外線映像装置）も例外ではなく、デジカメのようにポケットに入れて携行できる大きさの熱赤外線カメラ（サーモグラフィ・カメラ）が市販された*1。

そこで、私たちは、それを入手して温泉調査に携行し、様々なシーンで使ってみたところ、便利なツールであることを実感するとともに、肉眼観察や従来の温度計測（赤外放射温度計測定を含む）ではとらえることができなかつたと思われる現象に遭遇したので、ここに報告する。

注*1：本研究で使用したサーモグラフィ・カメラの日本での発売は、2015年の5月。

2. 研究方法

用いたサーモグラフィ・カメラは、フリーシステム社製 FLIR C2 で、その大きさ（幅

×高さ×奥行)は125mm×80mm×24mmと手のひらサイズであり(図1),重さもわずか130gと軽量でポケットに入れて携行できる。

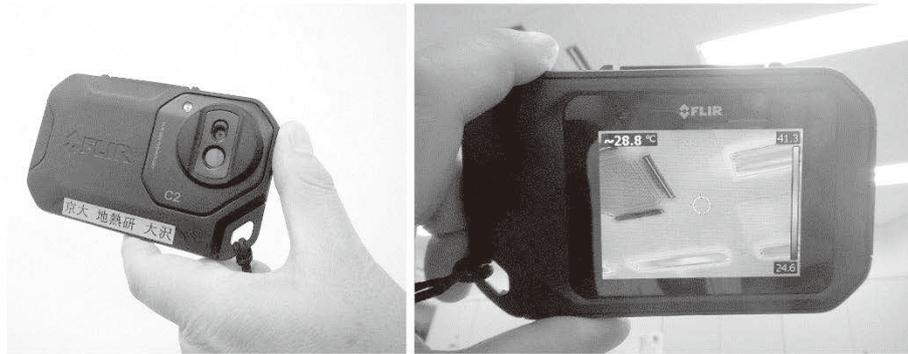


図1 研究に用いたサーモグラフィ・カメラの外観

サーモグラフィ・カメラ FLIR C2 の仕様を表1に示す。また、主だった特長は次の通りである。

- (1) 可視カメラを内蔵しており、熱赤外面像と同時に撮影することができるので、測定対象の温度分布をイメージしやすい。
- (2) 安価な装置(約10万円*2)であるが、熱赤外面像80×60の画素ひとつひとつの温度データ(4800点)を一画像ごとに記録でき(jpgファイル形式),付属のソフトウェアを使ってどの画素からでも温度データを抽出でき,様々な解析に用いることもできる。

なお,この FLIR C2 は,温度レンジ設定がオートであるため,測定対象が全体的に低温でしかも温度分布のコントラストが低い場合は,熱赤外面像全体が高温部の表示色でベタに表示され,温度分解能が0.1°Cであるにもかかわらず温度異常個所の検出が難しく,実際の使用に当たって不自由さを感じた。また,150°Cを超える噴気のような対象の観測には対応しないが,大概の温泉調査には利用可能であろう。

注*2:サーモグラフィ・カメラの価格は,通常,100万円前後から数百万円で,高価なものは500万円を超える。

表1 研究に用いたサーモグラフィ・カメラの仕様

【全般】	【サーモカメラ部】
<ul style="list-style-type: none">● 形状等<ul style="list-style-type: none">・ 大きさ: 125mm×80mm×24mm・ 重さ: 130g・ ディスプレー: 3inch, カラー, 320×240ピクセル・ バッテリー: リチウムイオンポリマー電池 (3.7V再充電可能)● 機能<ul style="list-style-type: none">・ 画面の自動回転, タッチスクリーン・ USBコネクタタイプ USB Micro-B (通信と充電)● 性能<ul style="list-style-type: none">・ 充電時間: 1.5時間・ 稼働時間: 2時間・ 動作温度範囲: -10°C~+50°C	<ul style="list-style-type: none">● 性能<ul style="list-style-type: none">・ 解像度: 80×60 (4,800測定ピクセル)・ 視野角: 41°×31°・ 最短焦点距離: 熱画像: 0.15m・ 対象温度範囲: -10°C~+150°C・ 精度: ±2°Cまたは2%(環境温度)・ 温度分解能: <0.10°C・ スペクトル波長: 7.5~14μm● 機能<ul style="list-style-type: none">・ フォーカス: フォーカスフリー
	【デジタルカメラ部 (パンフォーカスデジタルカメラ)】
	<ul style="list-style-type: none">● 性能<ul style="list-style-type: none">・ 解像度: 640×480ピクセルフォーカス・ 視野角: 55°×42°

3. 結果

今回報告するデータは、(i) 伽藍岳塚原鉦山跡の噴気地帯、(ii) 別府、明礬温泉の薬師寺裏の沢、(iii) 別府、明礬温泉・湯の里の小池、(iv) 亀川南港、(v) 長湯温泉付近の芹川、(vi) 阿蘇カルデラ、阿蘇谷の本塚火山の湧水における野外調査で得られたものであり、この順に考察等を交えて列挙する。なお、画像は、モノクロ印刷を意識して、ディスプレイのカラー表示をモノクロ表示にして観測したものを掲載したが、測定対象の状況と温度分布を対比できるように、可視画像と熱赤外面像を並べて表示した。熱赤外面像の右端の温度スケールと左上の温度数値はオリジナルのもので、温度数値は画像の真ん中に表示される丸い囲みの中心の温度である。

(i) 伽藍岳塚原鉦山跡の噴気地帯

図2のAは鉦山跡地に出現した泥火山(大沢ほか, 1996)をおよそ30m離れた遊歩道上の高所からサーモグラフィ・カメラで観測したものである(観測日: 2017年8月31日)。泥火山の火口の縁、特に噴気を上げている辺りが全体的に高温になっている様子が示されている。また、火口内に溜まった雨水は、熱水化していないことが見て取れる。使用したサーモグラフィ・カメラの視野角は40度程度であり、比較的近くにあるものの計測を想定した設計となっているが、30m以上離れた辺りでも(可視画像内に示した地点Bまでの距離は約60m)温度分布のコントラストをしっかりとらえている。

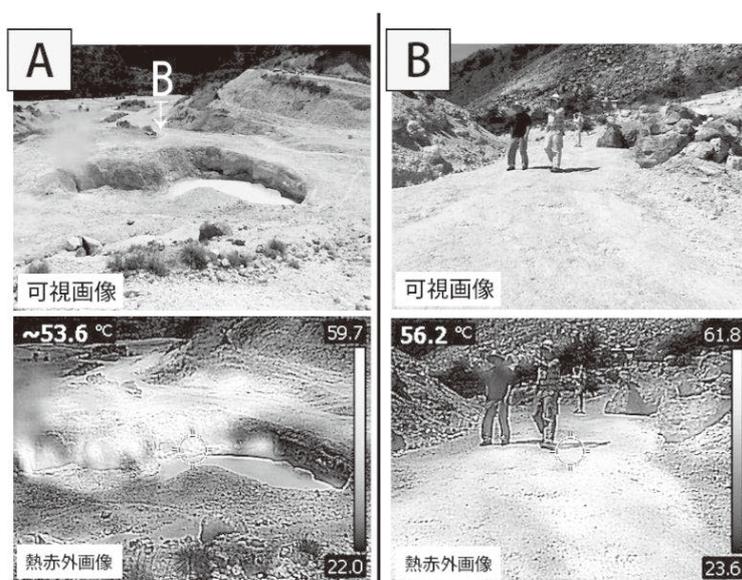


図2 伽藍岳塚原鉦山跡の噴気地帯

図2のBは、周辺に比べて高温を示したエリア(図2A可視画像内のB点辺り)に近寄って地面の温度分布を計測したものである。そこでは、固く締まった地面の部分が周辺に比べて高温になっているという興味深い現象をとらえた。スコップで掘り返すのも容易でない、その固い地面は、肉眼的には、脱水した粘土がクラスト(固い外皮)となって地表を固く覆っているように見えた。図2Aの熱赤外面像からこのB地点を含むエリア全体が高温であることを見て取れるので、地下からの熱の流れがこのクラストで遮られ、放熱が

滞り、クラスト自身の温度が上昇しているのではないかと推測される。この噴気変質地帯における熱放出の主な形態は放射過程であると考えられているが（由佐ほか，1996），検討の余地があるとされており，今後，今回得たような熱赤外面像データが活用されることを期待したい。

（ii）別府，明礬温泉の薬師寺裏の沢

図3は，明礬温泉の薬師寺の裏手にある小川の水文化学調査を行った際に，遊歩道脇の沢沿いに設置されたパイプとそれから漏れ出ている水をサーモグラフィ・カメラで撮影したものである（観測日：2017年8月30日）。

熱赤外面像には周辺より温度の高いパイプが写し出されており，漏出水は温泉水であることが分かった。この一帯の Google earth 衛星写真や Yahoo 地図の航空写真を参照すると，沢の上流に裸地と見られる土地が存在し，小規模な地熱地帯の可能性があり，今後機会をみて現地調査をしてみたい。



図3 明礬温泉の薬師寺裏の沢

（iii）別府，明礬温泉・湯の里の小池

図4は，明礬温泉・湯の里内にある青緑白色の水を湛えた小さな池を撮影したものである（観測日：2017年8月31日）。池水の特徴的な色合いから（細川ほか，2014），池には酸性硫酸塩タイプの温泉水が流入しているものと推測された。

池に太陽光が射し込んでいるのが可視画像に写り込んでいるが，熱赤外面像の高温部（40℃ほど）とそれは一致せず，この高温部が入射太陽光により生じたものではないことが分かる。熱赤外面像に写り込んでいる高温部の形状（池の縁から池の中央部へ向けて張り出しているように見える）とその温度分布（縁部の方が中央

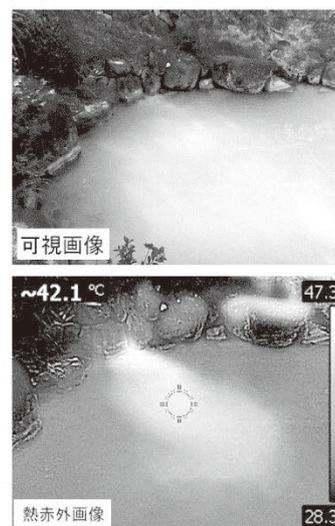


図4 明礬温泉・湯の里の小池

部より相対的に温度が高い) から、熱赤外面像の高温部は流入温泉水により生じているものと考えられる。

(iv) 亀川南港

「亀川南港」とは、図5の左の地形図に示された亀川漁港の南方に位置する小さな漁港に付けた仮の名称である。この港の中に温泉の湧出があるとの情報を入手したので、2017年6月27日(午後1時から2時までの間)に、サーモグラフィ・カメラによる調査を行った。この一帯には現在でも自噴する温泉が存在し、さらに、この港の東側、国道10号線との間の土地に自噴の温泉井が存在するので、港内の海底に温泉の湧出があっても不思議ではない。

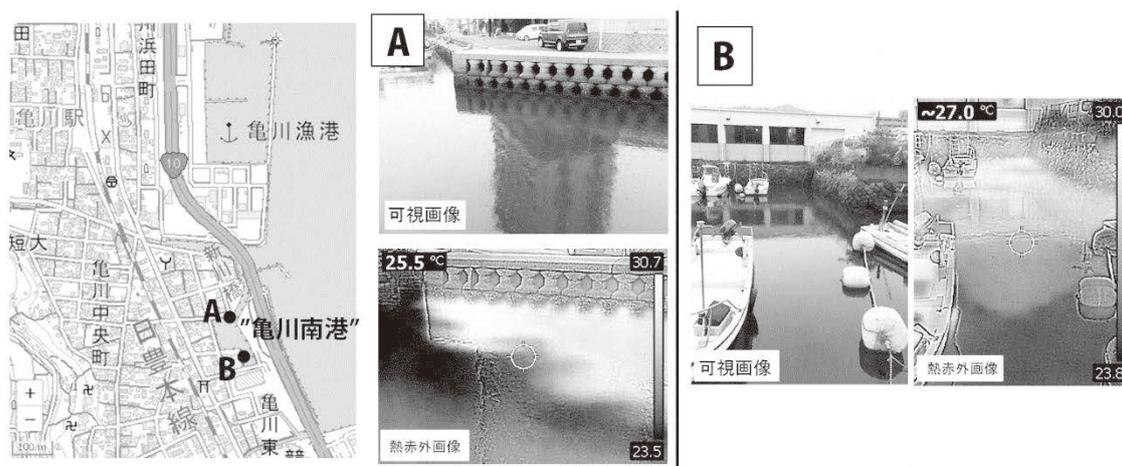


図5 ”南亀川港“の海底温泉湧出

図5に掲載した地点AおよびBの他にも数点において調査時の港内の平均的水温約25°Cより水温の高い(およそ30°C)場所を確認した。水温の高い地点では、小指大以下の小魚の群れが多数認められ、地点B付近の小さな干潟には多数のカニが群れて生息していた。また、港内には、小魚の群れを追う10~20cmの中型魚がかなりの数生息しており(魚影はアジ)、30cm以上の大型魚も散見され、その中にはテラピアに特徴的な形状の尾ビレを持つ固体が認められた。温泉水は栄養塩となるケイ酸(SiO_2)を豊富に含むため、別府温泉の河川に排出された温泉水が多量の珪藻を繁殖させ、これが、本来は熱帯域に生息するテラピアが在来魚種を数の上で圧倒する特異な生態系を生み出す原因となっている可能性が報告されている(例えば、山田ほか, 2010; 山田ほか, 2017)。この“亀川南港”にもこれと同様な生態系ができている可能性があり、別府湾沿岸域を含めた海底温泉湧出の詳細な調査が望まれる。

(v) 長湯温泉付近の芹川

長湯温泉には、二酸化炭素(CO_2)ガスをともなう温め(およそ40°C~50°C)の温泉水が自噴している(例えば、岩倉ほか, 2000)。山下(1952)の報告に、「・・・現在でも川中到る所で自然湧出がある・・・」との記述があり、現状はどうであるかを確認するため

に、2017年11月30日に「湯乃原天満社」前から「豊泉荘」近くの橋付近まで芹川河床のサーモグラフィ調査を行った。

「かじか庵」近くの橋と「温泉交流館みつばちの湯」付近の橋の区間の河床、北緯 30.068 度、東経 131.378 度の地点で温度異常を発見した。図 6 はその画像データで、A は河床温泉湧出地点の遠景、B は近影である。調査時の河川水温はおよそ 11°C であったが、温度異常地点は 24.6°C であった（いずれもサーモグラフィ・カメラによる遠隔計測）。その温度は長湯温泉の一般的な温泉水温より低いが、湧出点周りが黄褐色になっていて気泡の湧出をともなっていることから、自然湧出温泉と考えられる。

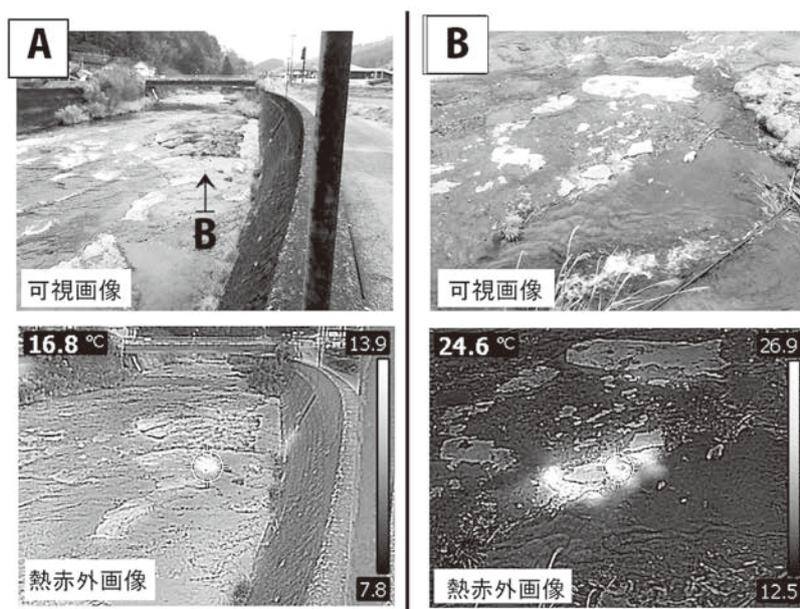


図 6 長湯温泉付近の芹川の河床温泉湧出（視点の方向に温泉街）

B は A の近影で、B の位置を A 内に矢印で示した。

(vi) 阿蘇カルデラ，阿蘇谷の本塚火山の湧水

大分県内の調査ではないが、本研究に使用したサーモグラフィ・カメラを購入した直後の 2017 年 1 月 27 日に、阿蘇カルデラ内の本塚火山の地下水調査に使用し、サーモグラフィ・カメラの温泉調査への有効性を最初に実感した事例となったので、ここに掲載する。

本塚火山は、阿蘇カルデラの阿蘇谷に位置する、最後のカルデラ噴火である阿蘇 4（およそ 7 万年前）の後の噴火活動で生成した古い火山体である（渡辺，2001）。本塚火山を含む阿蘇谷の中央部から南西部にかけては鉄を高濃度に含む地下水が広範囲に分布しており、「赤水型地下水」と呼ばれている。Ca-SO₄型水質で阿蘇火山の他のエリアの地下水に比べ、相対的に酸性度と水温が高く（例えば、田中，2000），小川ほか（2006）は同位体的手法によって水質形成メカニズムの解明に当たったが明確な説明を得るには至らなかった。私たちは、2016 年度より同位体水文学・地球流体化学的手法による成因の究明に乗り出し、所在不明の自然湧出地下水を見つけ出すためにサーモグラフィ・カメラを活用した。

地下水から析出し、小川や水路の底に付着したと考えられる黄褐色沈殿物を手がかりにして、水の出所を上流へとたどり、湧出地点とおぼしき地点をサーモグラフィ・カメラで

撮影したのが、図7である。地下水は、図7A内の矢印Bで示した箇所の小水路の底の継ぎ目から湧出しており、上流からの流水と一緒に混ざって肉眼では区別できないが、近影の図7Bの熱赤外面像に示されているように、水路の継ぎ目より下流側の温度が全体に

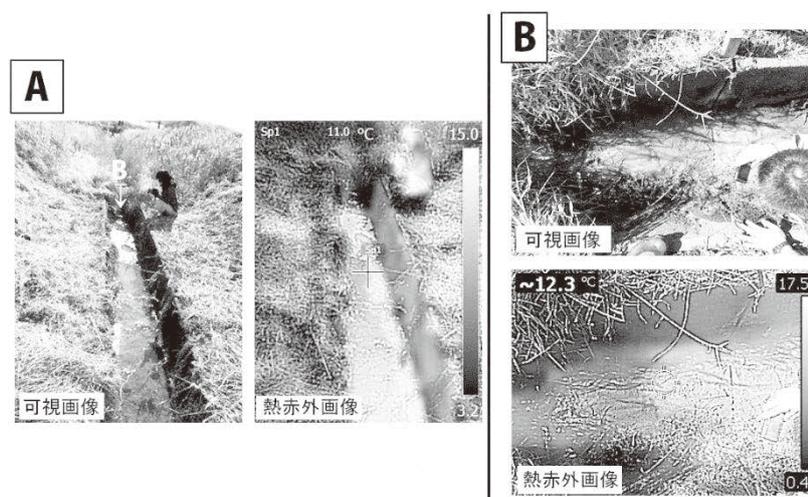


図7 阿蘇火山・阿蘇谷の本塚火山の湧水

BはAの近影で、Bの位置をA内に矢印で示した。

数℃高くなっており、地下水の湧出点を発見することができた。

4. おわりに

デジカメのようにポケットに入れて携行できる大きさのサーモグラフィ・カメラ（熱赤外線映像装置）が市販されたため、これを入手して温泉調査に携行し、様々なシーンで使ってみたところ、低価格であるにも関わらず便利なツールであることを実感することができ、今後はpH計や電気伝導度計と同様に常時携行の調査道具にしたいと考えている。

サーモグラフィ・カメラの最大の特徴は、測定対象の表面温度分布を、色の分布あるいはモノクロ画像の濃淡分布に置き換えて、視覚的に瞬時にとらえることができることである。したがって、温泉調査においても、対象のもつ温度分布を現地で知ることが基本的な利用目的になるだろうが、一般に温泉は周辺環境よりも相対的に高温であることから、温泉水の湧出箇所の特定制や流出状況の把握といったニーズにも対応することを事例をもって示すことができた。

サーモグラフィ・カメラはいろいろな分野で利用されており、私たち自身も温泉調査以外の調査にもすでに活用している。例えば、原尻の滝の撮影では、滝の中段に相対的に高温の箇所が存在することを発見し、地下水湧出ではないかとみている。また、稲積鍾乳洞の入り口では、洞天井に沿って洞外へ流出しているとされる外気より温かい洞内空気（大沢，2009）を、それによって暖められた洞壁の熱赤外面像を通して視ることができた。

謝辞

広島大学大学院生物圏科学研究科附属瀬戸内圏フィールド科学教育研究センター准教授の小路淳氏からは“亀川南港“内海底に温泉の湧出があるという情報をいただき、さらに著者らの魚種（テラピア）判定の確認をしていただいた。阿蘇の現地調査では、秋田大学

大学院理工学研究科附属理工学研究センターの網田和宏氏（現在，理工学部システムデザイン工学科土木環境工学コース）と京都大学地球熱学研究施設の堀口桂香氏（現在，気象庁気象研究所）の協力を得た．ここに記して謝意を示します．

参考文献

- 細川周一，最上智也，大沢信二（2014）青白色に色づく酸性硫酸泉の呈色因子の実証．大分県温泉調査研究会報告，65，17-27.
- 岩倉一敏，大沢信二，高松信樹，大上和敏，野津憲治，由佐悠紀，今橋正征（2000）長湯温泉（大分県）から放出される二酸化炭素の起源．温泉科学，49，86-93.
- 大沢信二，大上和敏，由佐悠紀（1996）1995年伽藍岳塚原鉦山跡に出現した泥火山．火山，41，103-106.
- 大沢信二（2009）鍾乳洞の気象と鍾乳石の成長．大分地質学会誌，15，1-10
- 小川啓太，河谷千華，石橋純一郎，千葉仁（2006）阿蘇カルデラにおける赤水の硫黄同位体比．日本地球化学会第53回年会講演要旨集 1P06.
- 田中伸廣（2000）「阿蘇山と水」一の宮町史 自然と文化 阿蘇選書⑧，216p.
- 渡辺一徳（2001）「阿蘇火山の生い立ち」一の宮町史 自然と文化 阿蘇選書⑦，241p.
- 山田誠，三島壮智，大沢信二，酒井拓哉，齋藤光代（2010）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，61，15-24.
- 山田誠，大沢信二，小路淳（2017）別府における温泉利用と河川生態系．「地下水・湧水を介した陸-海のつながりと人間社会（日本水産学会監修，小路淳・杉本亮・富永修編）」，p. 115- p. 126.
- 山下幸三郎（1952）大分県長湯温泉調査報告．大分県温泉調査研究会報告，3，12-30.
- 由佐悠紀，大沢信二，北岡豪一，福田洋一（1996）伽藍岳の地熱調査（2）伽藍岳を中心とする地熱構造モデル．大分県温泉調査研究会報告，47，7-11.

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 4

広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻

柴田知之・平山剛大

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・竹村恵二

1. はじめに

姫島火山は九州国東半島の沖合、瀬戸内海の西端に位置する第四紀の小規模な火山で、大海、矢筈岳、金、稻積、城山、達磨山及び浮洲火山の7つの単成火山から構成されている。姫島火山群の火山岩類はデイサイト質マグマと流紋岩質マグマの混合マグマから形成されたと考えられている（伊藤，1990）。また高Sr/Y比（約100），低Y濃度（< 14.3 ppm），低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比（0.7037）といった地球化学的特徴から，デイサイト質な端成分マグマは，沈み込むスラブの部分熔融液（Defant and Drummond, 1990）を起源とすると考えられている（Shibata et al., 2014）。しかしながら，流紋岩質な端成分マグマに関しては，岩石学的・地球化学的データが不足しており，その起源は未だ明らかになっていない。そこで本研究では，流紋岩中に観察されるザクロ石の主成分元素組成を分析し，ザクロ石の晶出圧力の推定や火成岩～変成岩中で晶出したとされるザクロ石が示す組成との比較などを行い，その起源について解析した。さらに，流紋岩マグマ中の非平衡な角閃石についても，その起源をより明確にすることを目的に，主成分元素組成を分析した。

2. 試料及び分析法

本研究で流紋岩溶岩試料として用いたのは，ザクロ石を含む達磨山溶岩と城山溶岩である。達磨山溶岩は斑晶状の角閃石，斜長石，ザクロ石を含む。石基は無色ガラスと0.1 mm程度の少量の斜長石・黒雲母や石英からなり，流理が顕著である。斑晶状角閃石は褐色-淡褐色で，粒径は2.5 mm程度，しばしば外周に黒雲母の反応縁が発達する。ザク

ロ石は薄片数枚に1粒程度存在し、半自形から他形、粒径0.05 mm程度で、淡褐色～淡桃色を呈する。斜長石は累帯構造を示し、1mm程度の大きさで丸い外形を呈する。城山溶岩は多くが発泡した乳白色、無斑晶質な流紋岩で、極少量の斑晶状のザクロ石や珪線石、黒雲母、斜長石、ジルコンを含む。薄片1枚につき、複数個のザクロ石が認められる。ザクロ石の粒径は0.05 ~ 0.08 mm程度であるが、まれに0.21 ~ 0.25 mmの粒径を示すものも存在する。鏡下では淡褐色～淡桃色を呈し、他形で反応縁は発達しない。珪線石は0.2 ~ 0.3 mmで、自形性が強いものは板状。無色で、結晶の伸長方向は正でへき開が顕著にみられる。斜長石は自形・板状で、粒径は約3 mmである。ジルコンは自形性が強く、粒径は0.2 mmほどである。石基はガラス質で、斜長石、黒雲母、石英を含む。黒雲母は0.02 mm程度、褐色で他形を針状の外形を呈しているものが多い。珪線石は火山岩中に確認されることがあるが、泥質変成岩からの外来鉱物である可能性が高いことが報告されている。ザクロ石と角閃石の主成分元素組成は、広島大学の電子プローブマイクロアナライザーを用いて分析した。測定条件は、加速電圧15 kV、ビーム径5 μ m、ビーム電流値は10 nA、測定時間は各元素の強度が20秒、バックグラウンド強度が10秒である。

3. 結果と考察

達磨山溶岩中の角閃石は、測定結果を用い経験式 (Putirka, 2016) による地質温度計を用いて晶出時の温度を計算すると、924から949 $^{\circ}$ Cとなった。また、角閃石の地質圧力計 (Ridolfi and Renzulli, 2012) から、190から250 MPaの値が得られた。さらに、角閃石と平衡共存したメルトのSiO₂含有量 (SiO₂melt) を、経験式 (Putirka, 2016) から計算すると、62 - 64 wt%となった。これらの温度条件やSiO₂meltはデイサイト質マグマの条件と整合的であり、伊藤 (1990) が主張した流紋岩中の角閃石はマグマ混合の過程で流紋岩中に取り込まれたことという考えを定量的に支持する。城山溶岩の薄片を詳細に観察した結果、ザクロ石が濃集している部分に、斜長石、珪線石、ジル

コンが共存していることが分かった。ザクロ石，斜長石，珪線石，ジルコンは全て自形性に乏しく半自形から他形を示す。姫島火山群では同様の鉱物組成を持った捕獲岩が報告されている（柴田ほか，2014）。ザクロ石のCaOとMnO含有量の関係に着目すると，姫島流紋岩中のザクロ石の組成は，CaO < 2.0 wt%，MnO > 5.5 wt%の特徴を示す。M-type及びI-typeの花崗岩質マグマ中で晶出したザクロ石の組成（Harangi et al., 2001）は CaO含有量に富む傾向（> 4.0 wt%）を示し，姫島流紋岩中のザクロ石組成と明らかに異なる。一方，S-type花崗岩マグマ中のザクロ石はCaO < 4.0 wt%，MnO < 3.1 wt%であり，姫島流紋岩中のザクロ石の示すMn含有量の組成範囲（5.6 - 7.0 wt%）と比較すると明らかに低い。泥質変成岩中で再結晶したザクロ石は，CaO含有量に乏しく（< 3.2 wt%），広いMnO組成幅（0.3 - 8.0 wt%）を持ち，姫島流紋岩中のザクロ石はこの組成範囲にプロットされる。これらのことから，ザクロ石は泥質変成岩を起源とする外来結晶である可能性が高い。これらの結果は、姫島火山群の流紋岩質マグマ形成過程に，地殻物質が強く影響していたことを示唆している。

引用文献

伊藤順一，1990，岩鉱，85，541-558.

Defant, M. J. & Drummond, M. S., 1990, *Nature*, 347, 662-665.

Shibata, T., Yoshikawa, M., Itoh, J., Ujike, O., Miyoshi, M. and Takemura, K., 2014, Geological Society, London, Special Publications, 385, 15-29.

Putirka, K., 2016, *American Mineralogist*, 101(4), 841-858.

Ridolfi, F. & Renzulli, A., 2012, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 163(5), 877-895.

Harangi, SZ., Downes, H., Kósa, L., Szabó, GS., Thirlwall, M., Mason, P. and Matthey, D., 2001, *Journal of Petrology*, 42, 1813-1843.

由布・鶴見岳第四紀マグマの同位体的研究

広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻

柴田知之・中野佳佑

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

1. はじめに

由布・鶴見火山は日本の九州北東部に位置する第四紀の火山である。これは姫島、両子山、九重、阿蘇、桜島とともに九州の火山フロントを形成している (Shibata et al. 2014)。由布・鶴見火山のマグマ進化は、火山岩の鉱物組み合わせや主要元素組成、微量元素組成、そして同位体組成を用いて議論されている。先行研究において由布・鶴見火山のマグマ進化は、珪長質マグマと苦鉄質マグマの単純混合 (太田・青木, 1991) やフィリピン海プレート上の堆積物と四国海盆玄武岩の混合 (Sugimoto et al. 2006, Shibata et al. 2014) が主要なメカニズムであるとしている。また、由布・鶴見火山を含む九州フロントに沿った火山の全岩化学組成によるマグマ進化について報告している Shibata et al. (2014) では、Sr, Nd, Pb 同位体組成から、それら火山のマグマはフィリピン海プレート上の堆積物と四国海盆玄武岩の混合に加え、地殻物質の影響がある可能性を提案した。ここで、由布・鶴見火山についての先行研究では、Pb 同位体組成の測定における同位体分別効果の補正計算の方法として外標準法が用いられた。この方法は、測定試料と Pb 同位体比が既知である標準試料の Pb 同位体組成を測定し、その標準試料の既知の Pb 同位体比と測定により出たデータを用いて同位体分別効果の補正計算を行うものである。しかし、外標準法は異なる環境で測定されたデータを用いるため、その測定をできる限り同じ条件にしなくてはならず、さらに測定環境が異なるデータを用いるために補正計算がうまくできないことがある。そのため本研究では、由布・鶴見火山の Pb 同

位体組成をより良い精度で測定するための方法として、ダブルスパイク法の確立を試みた。また、その測定データから由布・鶴見火山のマグマ進化の再検討を行った。

2. 試料および分析方法

由布・鶴見火山群の地質については、太田ら(1990)、太田・青木(1991)により詳細に報告されている。本火山群は大きく 高平グループ、鶴見グループ、由布グループに分けられ、さらに鶴見グループと由布グループは噴出年代から前期・中期・後期に分けられる。由布・鶴見火山群の噴出は 60000yBP 以前に開始し、7300calBP まで続いたとされている(太田ら, 1990; 藤沢ら, 2002; Sugimoto et al. 2007)。また、由布・鶴見火山の火山岩は微量元素パターンにおいて、Sr や Pb に正異常、Nb に負異常が顕著に現れていることから、典型的な島弧型の火山であるとされている(Sugimoto et al. 2007, Shibata et al. 2014)。本研究では、Sugimoto et al.(2007)で採取された由布・鶴見火山群の火山岩試料を用いて Pb 同位体組成を測定した。測定した試料は、鶴見火山 4 個、由布火山 3 個の計 7 個である。測定法は Abbou-Kebir et al (2017)に従った。

3. 結果と考察

由布・鶴見岳の試料のダブルスパイクによる測定値を、外標準法による測定値 (Sugimoto et al., 2017) と比較した。また、標準試料溶液である NIST SRM981 のダブルスパイク法及び外標準法による測定値も図に示した。多くのデータは誤差の範囲で一致したが、一試料だけ外標準法による $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比がダブルスパイク法によるものと比較して有意に高い値を示した。ダブルスパイク法によって測定した Pb 同位体比を用いて、Sugimoto et al., (2017)を再検討すると、彼らが主張した四国海盆玄武岩とフィリピン海プレートに堆積した陸源性堆積物の混合直線上に由布・鶴見岳の試料の Pb 同位体組成はプロットされるという傾向が、より直線性の良い傾向として観察されることが明らかになった。ダブルスパイク法による Pb 同位体組成の測定値を用いることで、Sugimoto et al., (2017)の

議論を修正する必要は生じなかったが、より信頼性の高い分析を行うことができたと考えられる。今後、由布・鶴見の火山岩に対するダブルスパイク法による Pb 同位体組成の分析を継続し、より精度の高い議論を行うことをめざす。

参考文献

- 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.
- Abbou-Kebir, K. Shibata, T., Yoshikawa, M. (2016) Optimized single-stage protocol for the simultaneous separation of lead and strontium from silicate rocks for isotopic measurements using thermal ionization mass spectrometry (TIMS), Annual Report FY 2016, IGS, Kyoto University.

別府市の温泉泉質モニタリング

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設
三島 壮智・大沢 信二

要旨

別府市での近年の小規模地熱発電の開発がもたらす既存温泉への影響を危惧し、著者らは泉質の繰り返し測定による温泉モニタリングを2013年より始めた。モニタリング開始よりわずか5年であるが、一部の泉源では成分濃度に地下の熱水の多量採取による影響と思われる有意な変化が認められた。温泉泉質モニタリングでは、経験上10年以上の長期観測が望ましいので、今後もモニタリングを継続する計画である。

1. はじめに

2011年の東日本大震災と原発事故以降、再生可能エネルギーとして小規模な地熱発電(温泉発電)の導入が活発に検討され、別府温泉では2013年1月より試験的に発電が始まり、2014年1月から本格的な発電が開始された。別府における小規模地熱発電所では、高地部の自噴沸騰泉を用いて行われており、図1に示すNa-Cl型水質を示す地下温泉水の流動経路の上流部で温泉水を多量に利用する形となっている(例えば、三島・他、2017)。

しかし、著者のひとり大沢が繰り返し述べてきたように、自噴沸騰泉には流出量制限が無く、湯や蒸気を取り出せるだけ採取できることから、新たな地熱開発によって1960年代の温泉開発時に例えば天満温泉に起こった泉質変化と同様のことが別府市内の温泉で起こる可能性があるとして危惧された。そこで、著者らは2013年1月より別府市内の温泉源のいくつかを観測点として泉質のモニタリングを行うことにした。

本報告書では、現在までの主要な結果を報告する。

2. モニタリングについて

泉質モニタリングの観測点の選定には、高地部における温泉開発の影響が見られている天満温泉を参考にした。現在の天満温泉の泉質はNa-Cl型とNa-HCO₃型の混合型であるが、温泉開発にともなって典型的なNa-Cl型泉質からNa-HCO₃型との混合型泉質へと変化したことがよく知られている(例えば、由佐・他、2002;大沢・他、2016)。そこで、特に当時地熱発電所の建設計画の多かった小倉地域を念頭におき、地下温泉水の推定流動経路図(図1、大沢・他、1994;大沢・他、1996)などを参照し、2種類の熱水の混合によって生成していると考えられる沸騰泉(Na-Cl型熱水とHCO₃型熱水の混合によるNa-Cl-HCO₃型ないしNa-Cl型熱水と酸性SO₄型熱水の混合によるH-Na-Cl-SO₄型)に着目し選定した(B地点、E地点ならびにA地点(天満温泉))。さらに、高地部に存在する噴気造成泉(D地点)と地下温泉水の流動経路の末端部に位置し、かつて酸性-Na-Cl型泉

質 (Na-Cl 型熱水と H-SO₄ 型熱水の混合タイプ) であった低地部の温泉 (C 地点) もモニタリング対象に加えた。

選定した観測点を図 1 に示す。観測点は随時増やしていき, A 点 (天満温泉) では 2013 年 1 月より, B 点と C 点は 2013 年 2 月より, D 点は 2014 年 4 月より, E 点は 2016 年 3 月よりモニタリングを開始して現在まで継続している。

湧出する温泉水は高温のものが多いため, 化学分析用にポリプロピレン製の容器 (本モニタリングでは 250mL 容量のものを用いた.) に試料水を採取した。このほか, 現地では, 水温, 電気伝導度 (EC), pH および酸化還元電位 (ORP) の測定を行った。実験室における化学成分 (リチウムイオン: Li⁺, ナトリウムイオン: Na⁺, カリウムイオン: K⁺, マグネシウムイオン: Mg²⁺, カルシウムイオン: Ca²⁺, 塩化物イオン: Cl⁻, 硫酸イオン: SO₄²⁻, 硝酸イオン: NO₃⁻) の分析はイオンクロマトグラフィ (陽イオンと陰イオン; Thermo Fisher Scientific 社製 ICS-1100) を用いて行った。炭酸水素イオン (HCO₃⁻) 濃度は, 0.1mol/L

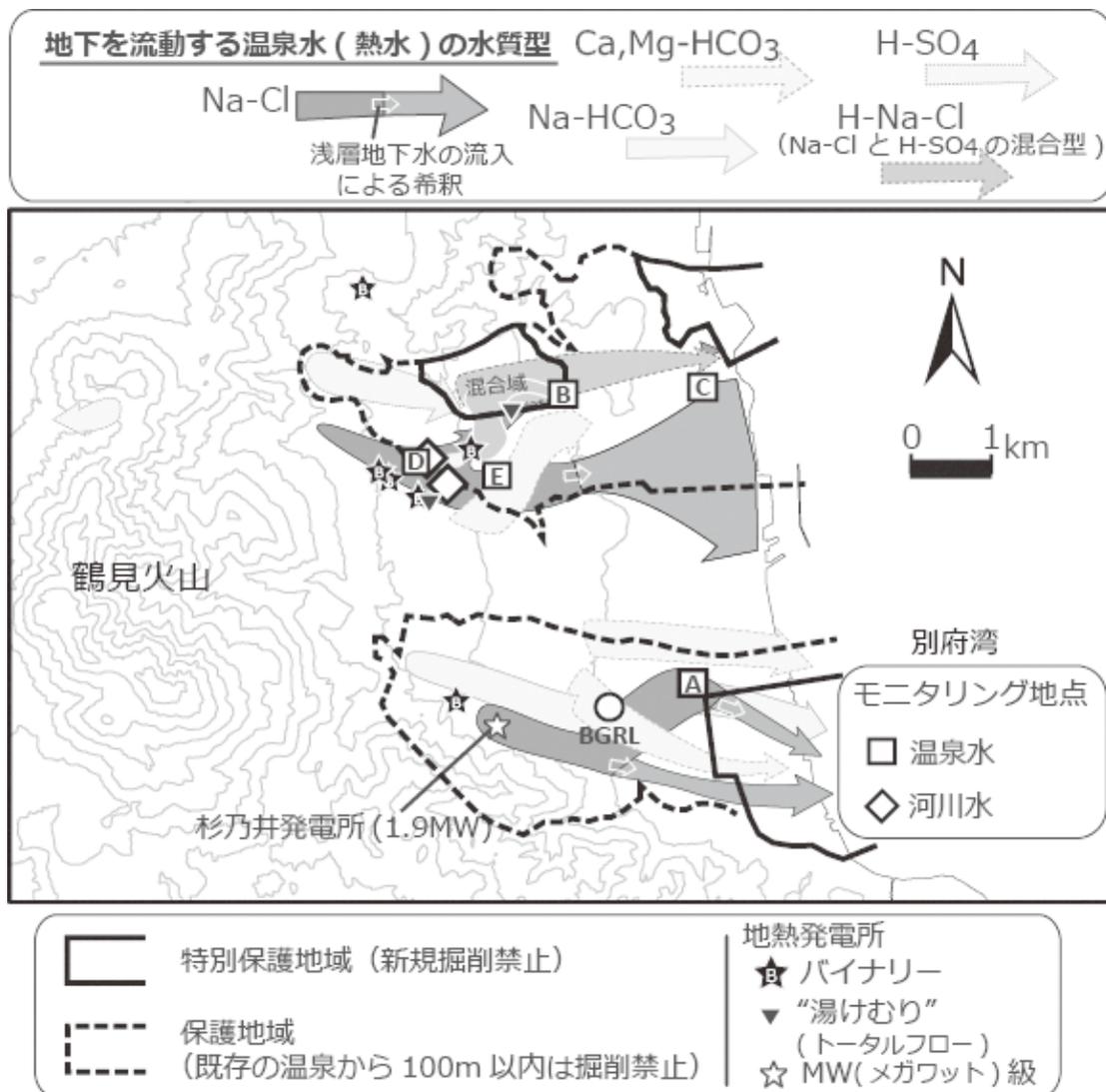


図 1. 地下熱水流動経路と温泉発電場所とモニタリング観測点

塩酸滴定 (pH4.3 アルカリ度) で求めた。

3. 結果

本研究で取得した分析値のほか、大分県鉱泉誌や大分県温泉調査報告温泉分析書などの既存データを参照して泉質変化の有無を検討したところ、モニタリング地点 A と E は泉質に変化が見られたが、地点 B, C および D では有意な変化を認めることができず、今回はそれらのデータの記載を見送ることにした。以下では、地点 A と地点 E での泉質モニタリング結果を記述し、考察を加える。

地点 A の天満温泉は、1972 年から途中欠測があるものの、京都大学で継続的に泉質モニタリングが行われてきた別府温泉南部地域の沸騰泉で、図 2 の上半部に示すように泉質が変化した。また、図の下半部に示すように、2013 年以降に天満温泉地下の熱水温度は 1960 年代と比べると約 20°C ほど低下していたことが示された (大沢・他, 2016)。

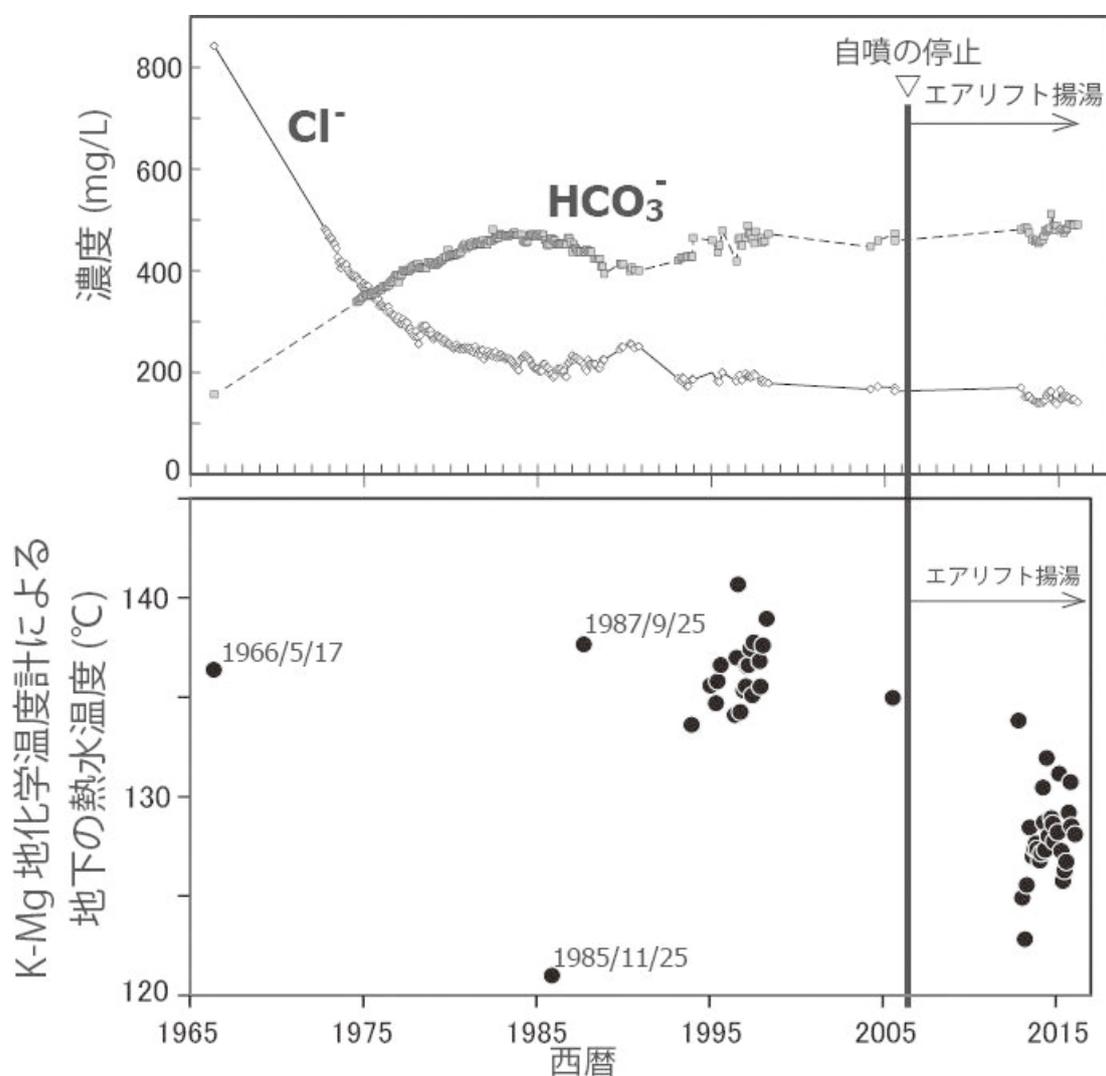


図 2. 地点 A の Cl^- , HCO_3^- 濃度と地下熱水温度変化 (大沢・他 2016 の図 3)

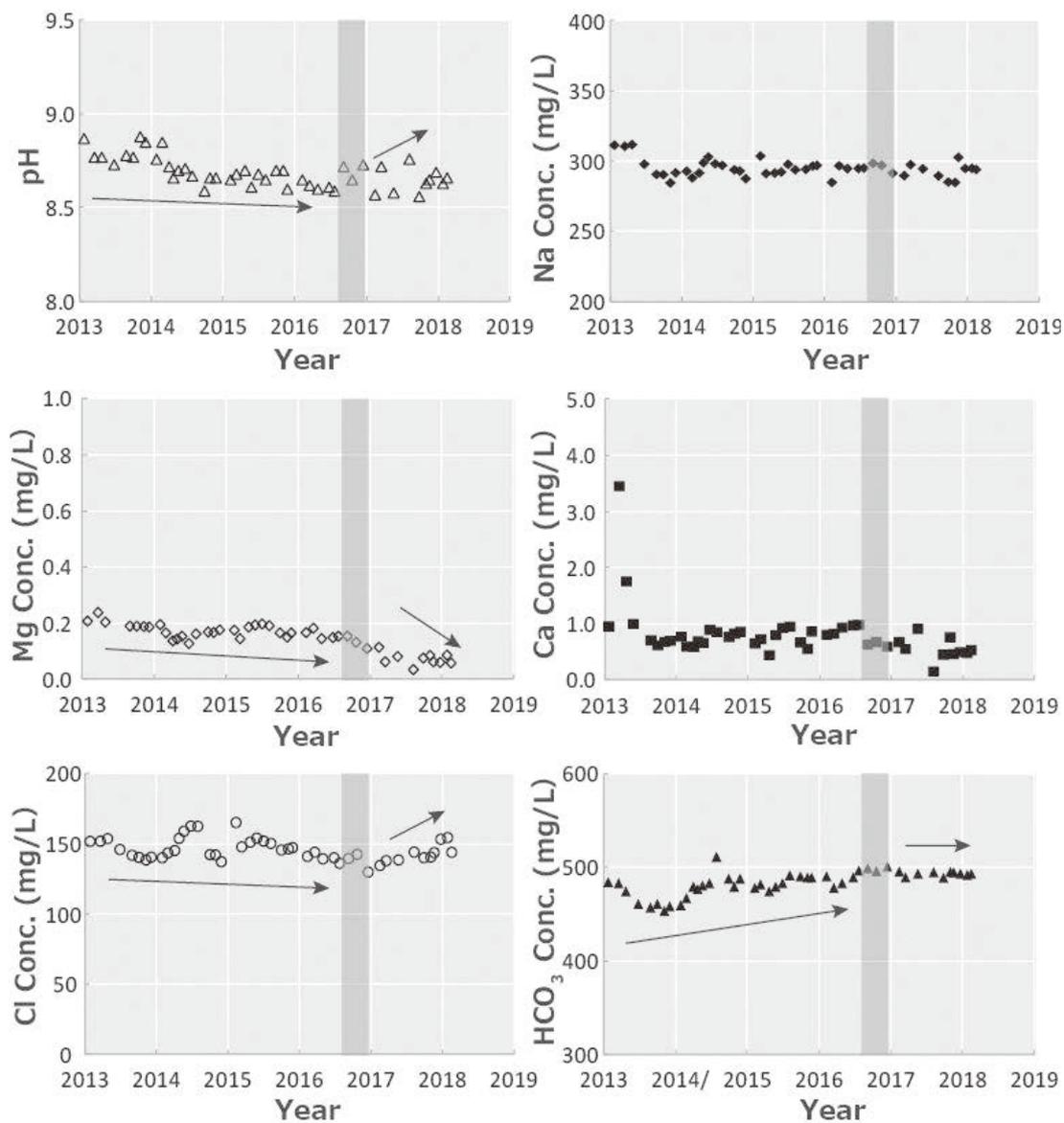


図3. 地点Aモニタリング結果

本研究ではデータがさらに2年分ほど追加されたが、図3に示したように、2013年以後2018年2月現在までで、ナトリウム (Na) やカルシウム (Ca) の主要陽イオンの濃度には、2013年の前半の一時的な増加現象を除くと、明瞭な変化は見られなかったが。2016年末頃までわずかつ漸減していたマグネシウム (Mg) 濃度が2017年に入る頃から急低下し、その変化に呼応するかのように、緩やかに減少していた塩化物イオン (Cl) 濃度とpHが増加していることが分かった。天満温泉ではClと相補的に変化することが分かっている炭酸水素イオン (HCO₃) の濃度はこの頃から緩やかな増加を止めているように見える。

地点EはNa-Cl型泉質の自噴沸騰泉が分布するエリアで、このエリアには熱水の圧力低下が原因で溶存成分濃度に変化が見られた温泉井(図4, 由佐・他, 2002)が存在したが、水位低下や所有者の変更といった理由により使用されなくなっていた。本研究でモニタリ

ング対象とした温泉井は、2015年にその付近で代替掘削されたものであり、掘削完了後の2016年3月よりモニタリングを開始した。

E地点における泉質モニタリング結果を、図5に示す。まず、最初に目につくのは、単調な主要陽イオンのNaとKを除くと、およそ2年という短い期間であるにもかかわらず成分濃度に顕著な変化がみられているということである。

2017年終盤の10月頃まで濃度を漸増させていたMgの挙動に変化が認められ、同じ時期にClの増加（それまでは減少傾向）とCaの増加（それまでは減少）が認められる。過去に顕著な濃度増加を見せたSO₄（図4）は徐々に増加しており、pHとHCO₃がこれと同調するような変化をし、pHは0.5pHも低下（酸性になっている）、HCO₃は徐々に減少している。

4. 考察

地点Aと地点Eの温泉はどちらも元々Na-Cl型泉質の自噴沸騰泉で、その後の温泉開発にともなってCl濃度の減少と蒸気性の温泉成分（HCO₃やSO₄）の濃度が相補的に増加するという共通の変化を過去に経験している。現在、別府では、多数の小規模地熱発電所の稼働（図1参照）により熱水型の温泉水が地下から多量に排出され、過去の経験から（例えば、古賀・野田，1979；吉川，1982）、地下では熱水の圧力低下に伴って沸騰が起こり、蒸気化が進んでいることが危惧され、地点Aにおける2016年末頃までのCl濃度の減少な

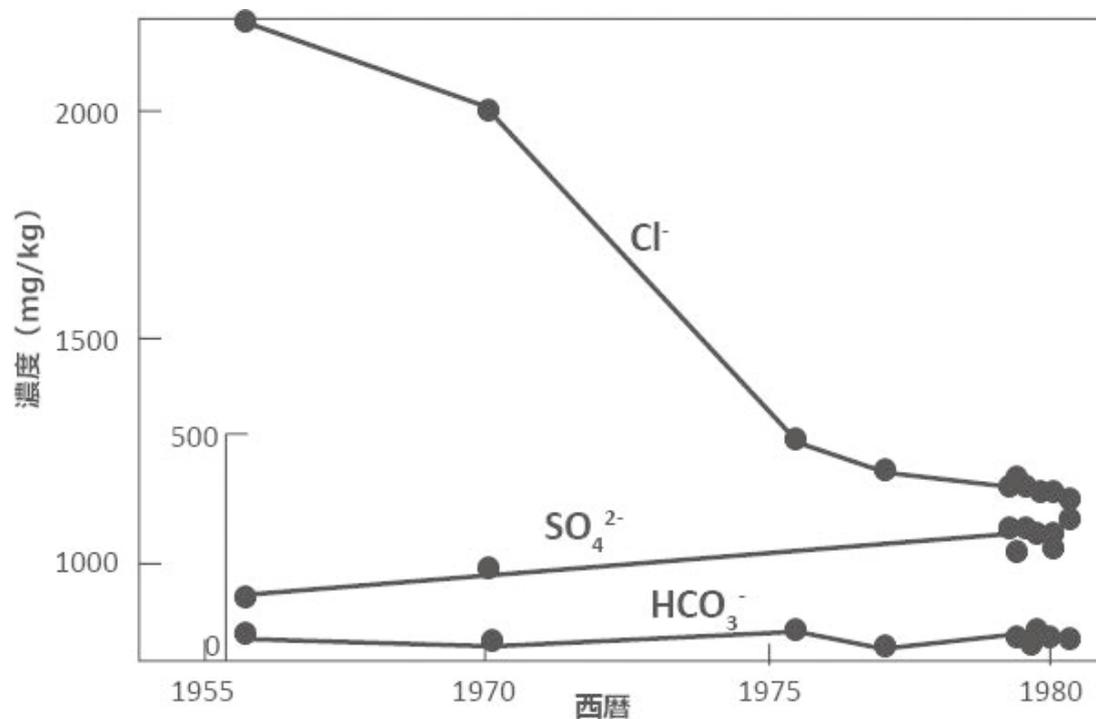


図4. 別府温泉北部域の沸騰泉における主要陰イオン濃度の経年変化
(由佐・他 2002 の図 13)

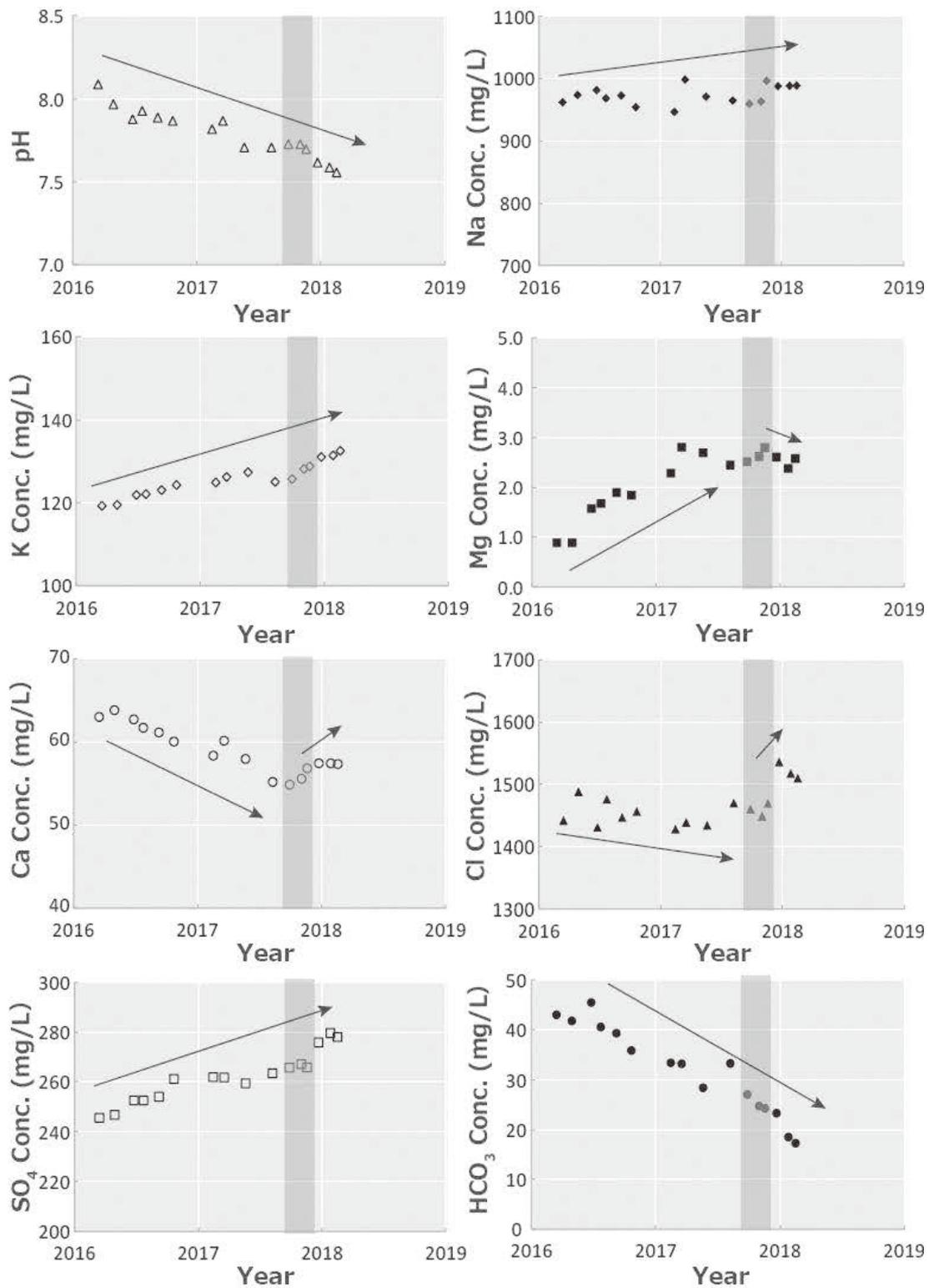


図5. 地点Eモニタリング結果

らびに pH の低下にともなう HCO₃ 濃度の増加 (=CO₂ の付加), 地点 E における 2017 年 末頃までの Cl 濃度の減少ならびに pH の低下にともなう SO₄ 濃度の増加 (=H₂S の付加と

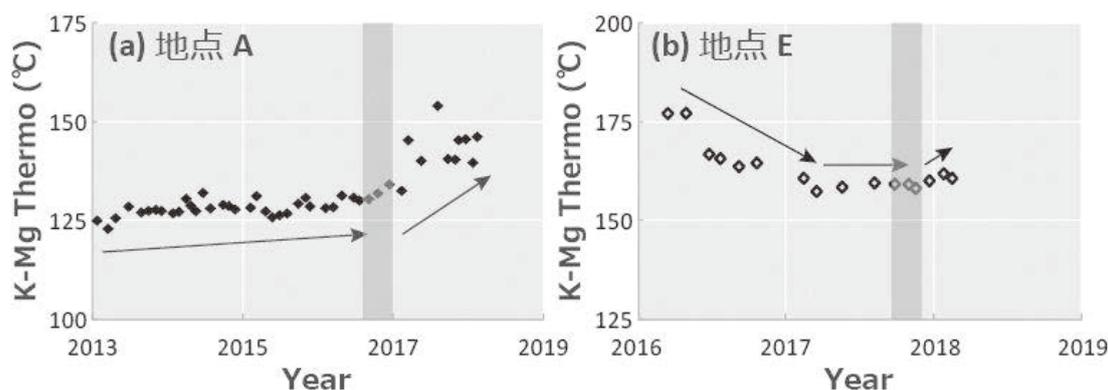


図 6. 地下熱水温度推定結果 (a:地点 A, b:地点 E)

酸化)は、そのような地熱開発の影響と見れなくもなく、最近の Cl 濃度増加への転化は、開発ペースの減少にともなう熱水量の回復を示唆している可能性がある。そこで、大沢・他 (2016) が天満温泉で行ったのと同じ様に、K-Mg 地化学温度計 (Giggenbach, 1988) を利用して地下における温泉水の温度の推定を行い、当該期間の変化を追跡してみた。

図 6 の(a)と(b)はそれぞれ地点 A と地点 E の地下熱水温度の経時変化を表したものである。予想したように、地点 A では 2016 年末頃から、地点 E では 2017 年末頃から地下の熱水温度は増加に転じており、楽観的かもしれないが、地熱の乱開発に歯止めがきいていることの表れでないかと考える。

5. おわりに

モニタリング開始より最長でもわずか 5 年であるが、一部の泉源では成分濃度に地下の熱水の多量採取による影響と思われる有意な変化が認められた。その一方で、ごく最近、同じ泉源において、熱水採取が抑制されたことによると思われるような濃度変化も見られたが、地熱活動の自然の揺らぎの範囲内の変動である可能性も否定できないので、継続して泉質モニタリングを行い、間違いのない解釈へ至るヒントとなる現象を捉える機会をうかがいたい。

温泉の泉質に開発の影響が見られるのは、開発の規模にもよると思うが、先行の研究 (例えば、由佐・他, 2002 や大沢・他, 2016) などから考えて、最低でも 10 年間はかかるようである。このような観点からも、今回有意な濃度変化を認めた泉源を重要なモニタリングポイントとして大切に、できれば 20 年以上継続して泉質モニタリングを行いたい。

謝辞

本研究は、温泉モニタリングを快く受け入れて下さった泉源所有者の皆様のご理解なしにはなしえなかった。その多くは匿名とさせていただいたが、ここに深く謝意を表します。

引用文献

- 古賀昭人, 野田徹郎 (1979) 別府市火男火売神社の地熱異常現象. 大分県温泉調査研究会報告, 30, 28-31
- 吉川恭三 (1982) 雉間熱水の蒸気化による地熱減少への影響. 大分県温泉調査研究会報告, 33, 11-20
- Giggenbach, W.F. (1988) Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52, 2749-2765
- 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. *温泉化学*, 44, 199-208
- 大沢信二, 由佐悠紀 (1996) 温泉水の化学組成から推定される別府温泉北部域の地下温泉水の流動経路. 『地熱流体流動過程と地下構造に関する研究』科学研究費補助金報告書
- 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
- 大沢信二, 三島壮智, 竹村恵二 (2016) 天満温泉 (別府市) の泉質モニタリング. 大分県温泉調査研究会報告, 67, 15-22
- 三島壮智, 大沢信二, 竹村恵二 (2017) 別府における小規模地熱発電開発にともなう河川水質の変化. 大分県温泉調査研究会報告, 68, 41-54

大分県内の火山岩類の化学組成・Sr-Nd同位体比（3）

伽藍岳・鬼箕山

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
杉本健*・公門駿
竹村恵二

(*現：地熱エンジニアリング株式会社)

1. はじめに

昨年度までの研究で、鶴見岳と由布岳のSr-Nd同位体比領域が異なる可能性が観察された。本年度は鶴見岳・由布岳とほぼ同時期に活動したと考えられ、由布―鶴見火山群に含まれる、伽藍岳火山と鬼箕山火山の試料についてSr-Nd同位体比分析を行った。

2. 試料および分析方法

伽藍岳火山・鬼箕山火山ともに鶴見火山群を構成し、由布―鶴見地溝帯に位置する（星住ほか, 1988）。伽藍岳火山は鶴見岳火山の北に接する溶岩円頂丘、鬼箕山火山は伽藍岳西麓にある小型の単成火山である（星住ほか, 1988）。

本研究では、竹村ほか（1994）、杉本ほか（2006）で主要元素・微量元素組成が報告されている伽藍岳試料（D-17）の主要元素組成とSr-Nd同位体比を新たに測定した。さらに、鬼箕山の2試料（O-03, O-04）の主要元素組成も測定し、さらにO-03については微量元素組成およびSr-Nd同位体比の分析も行った（図1）。主成分元素組成はRigaku®蛍光X線分析装置を、微量元素組成分析は誘導結合プラズマ質量分析計（Thermo Scientific X series）を用い、それぞれ、Sugimoto et al.（2006a）とChan et al.（2003）に従い測定した。Sr-Ndの化学分離法は芳川ほか（2015）に従い、Sr-Nd同位体比は表面電離型質量分析計（ThermoFinnigan MAT262）を用いて測定した。

3. 結果

鬼箕山 O-03, O-04 の主要元素組成は、先行研究によって報告された鬼箕山火山

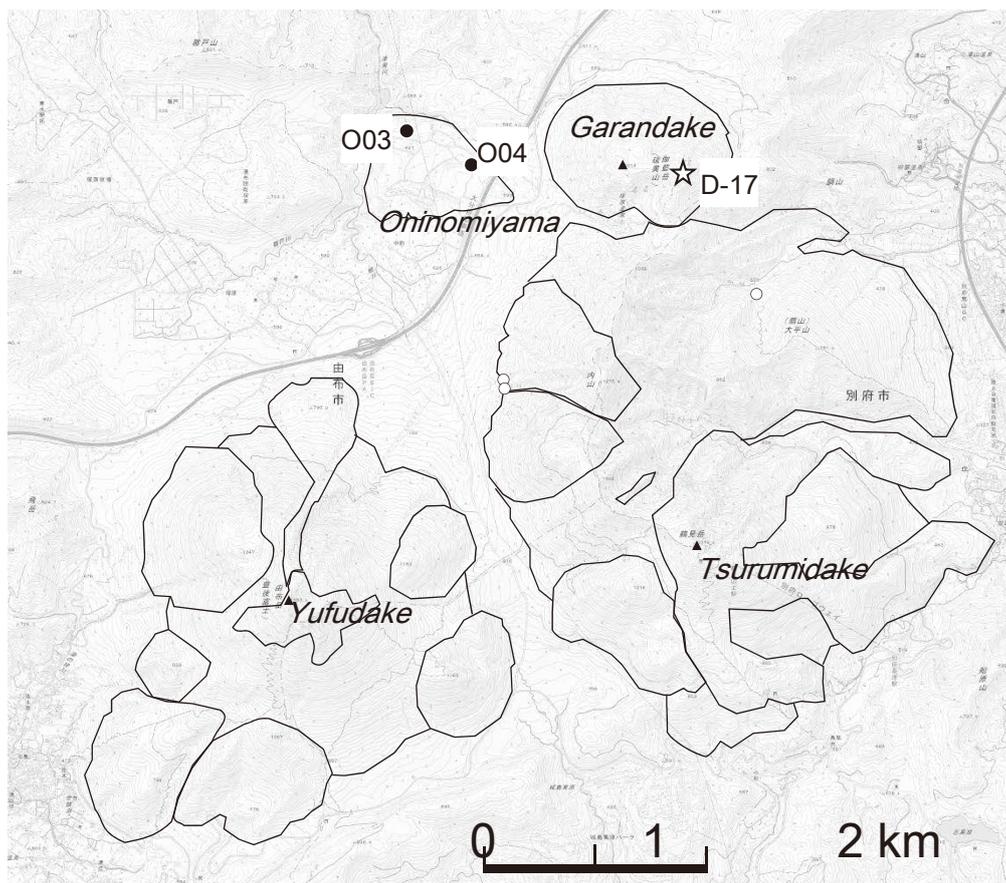


図 1. 分析試料採取地点。国土地理院電子地形図 25000 の 1 を使用。火山岩の分布は太田ほか（1990）に従った。

岩の組成領域内にプロットされる（図 2）。微量元素濃度は一部について報告があるものの（太田ほか，1992），希土類元素濃度の報告は本報告が初である。図 3 には試料 O-03 の多元素濃度を始源マントル（McDonough & Sun, 1995）で規格化したパターンを示した。基本的に O-03 は，よりインコンパティブルな元素に富んだ左上がりのパターン，明瞭な Pb の正異常と弱い Sr 正異常を示すが，明瞭な Nb 負異常は示さない。試料 O-03 の Sr-Nd 同位体比はそれぞれ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70395 \pm 0.000009$ ($2\sigma_m$) と $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512783 \pm 0.000015$ ($2\sigma_m$) であった。これら Sr-Nd 同位体比は由布岳の火山岩の組成領域で Sr 同位体比が最も低く，Nd 同位体比が高いものに近い値を示す。

伽藍岳の主要・微量元素組成は、鶴見岳・由布岳火山岩の組成領域内である（図 2, 図 3）。Sr-Nd 同位体比は、それぞれ、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.704441 \pm 0.000011$ ($2\sigma_m$) と $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512735 \pm 0.000016$ ($2\sigma_m$) であった。Sr 同位体比は鶴見岳の火山岩の組成領域内だが、Nd 同位体比は鶴見岳の火山岩より若干高い値を示す。

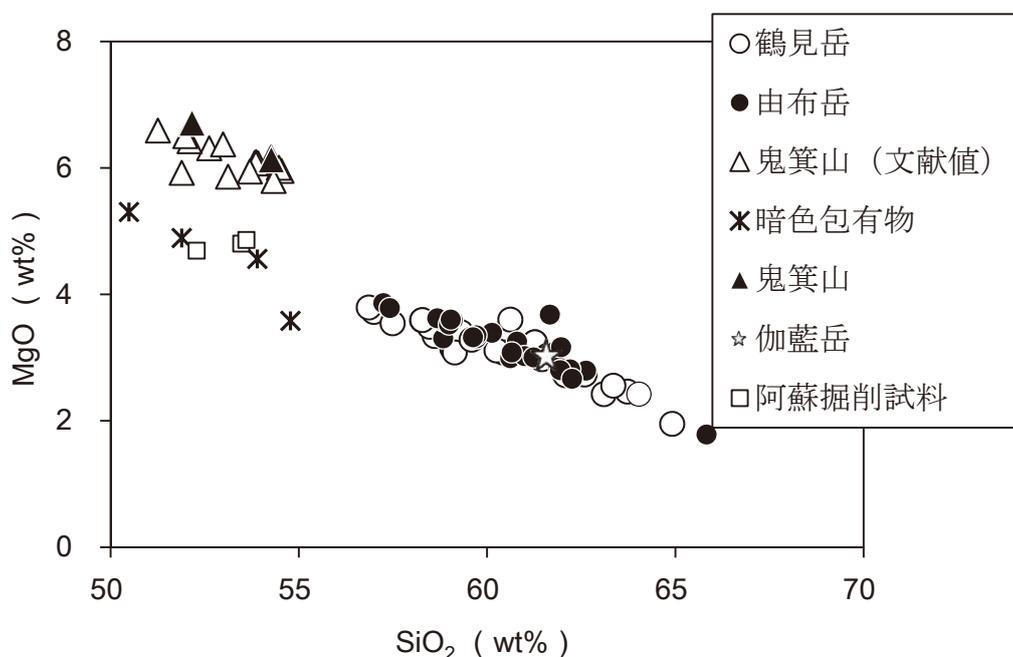


図 2. 全岩の SiO_2 – MgO 量。鶴見岳・由布岳・それらに含まれる暗色包有物および阿蘇の掘削試料のデータは、太田ほか (1990), Sugimoto et al. (2006b) 杉本ほか (2006), 竹村・由佐 (1993), 竹村ほか (1994), 芳川ほか (2015) による。また、鬼箕山の文献値 (太田ほか, 1992 ; Kita et al., 2001) も比較のため示した。

考察

鬼箕山火山岩は、竹村ほか (1994) では阿蘇山中央火口丘で掘削された火山岩との類似性が指摘されているが、鬼箕山火山岩の P_2O_5 や MgO 量は阿蘇中央火口丘の試料より明らかに高い (図 2)。さらに、主要元素組成のトレンドが阿蘇も含めた鶴見岳・由布岳の火山岩やそれらの中に含まれる暗色包有物が形成するトレンドとは異なっており、太田ほか (1992) で指摘されているように、同一マグマの分別結晶作用では説明できない。

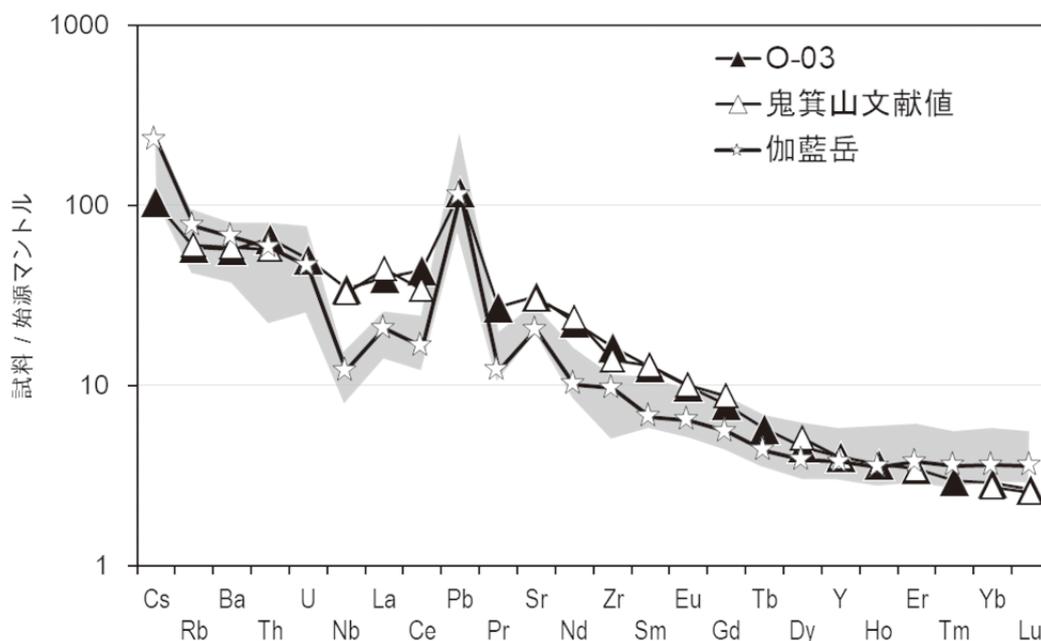


図 3. 伽藍岳火山岩・鬼箕山火山岩の始源マントル規格化多元素パターン図。規格化は McDonough & Sun (1995) の値を用いた。灰色の領域は由布岳と鶴見岳の火山岩の報告値の領域 (Sugimoto et al., 2006b ; 杉本ほか 2006)。

鬼箕山火山岩は、顕著な Nb の枯渇が認められない事、各種の区分図において島弧火山岩 (IA) の領域ではなくプレート内玄武岩 (WPB) や海洋島アルカリ玄武岩 (OIB) の領域にプロットされる事から、OIB 的な化学的特徴を示すとされてきた (Kita et al., 2001, 2012; 太田ほか, 1992)。Kita et al. (2001) では鬼箕山を含む別府—島原地溝帯内の OIB 型火山岩の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は 0.7048-0.7049 と島弧型 (IA) の火山岩の値 (およそ 0.7040) より高いと報告した (図 4a)。しかし本研究で得られた鬼箕山火山岩 O-03 の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は明らかに低い値 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70395$) を示した。この低い Sr 同位体比と高い Nb/Y 比は Kita et al. (2012) の典型的な OIB 型の火山岩の領域に含まれる (図 4a)。Yamamoto & Takemura (2004) は鬼箕山火山岩の He 同位体比が MORB と類似した値を

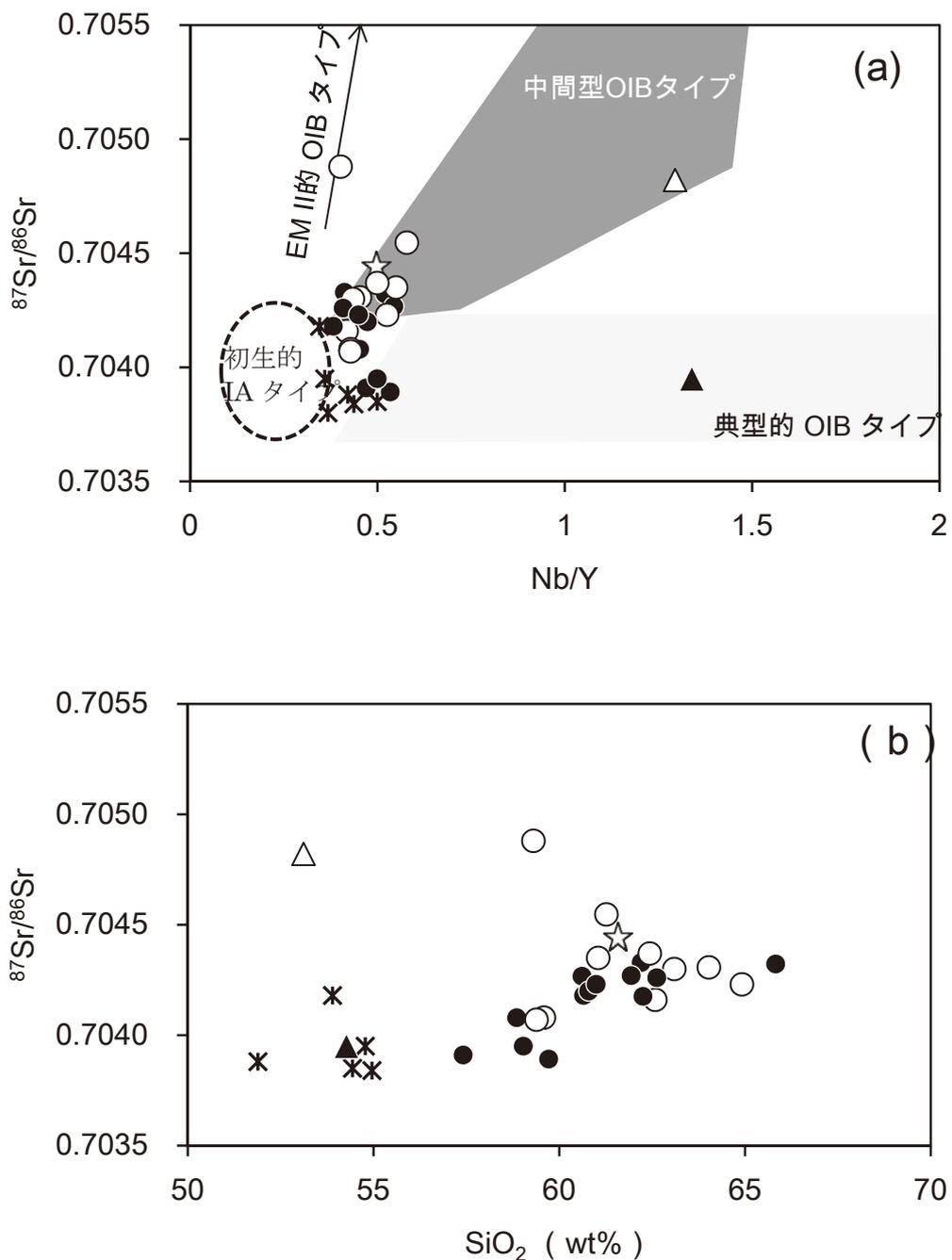


図 4 (a) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Nb/Y 図 (b) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - SiO_2 図。シンボルは図 2 と同じ。(a) の領域は Kita et al. (2012) による。

示したことから、鬼箕山の火山岩は OIB とは異なり始源マントル由来成分の影響は認められず、MORB の起源マントルから生じたとしている。鬼箕火山岩は IA 型火山岩の特徴とされる Pb や Sr の正異常（例えば Elliott et al., 1997）を示すが、IA 型火山岩に典型的な Nb の負異常は示さない。これらのような特徴を持つ玄武岩質から安山岩質の火山岩として、アダカイトと共存もしくは近隣の火山で観察される、高 Nb 玄武岩～安山岩（NEBA; Kepenzinskas et al., 1996）が知られている。鬼箕山火山岩の化学的特徴は Kepenzinskas et al. (1996) が示した NEBA の特徴、すなわち、 $Nb/La > 0.5$ でその多くが $Na_2O + K_2O > 4.5 \text{ wt\%}$, $Na_2O > 3 \text{ wt\%}$ である、といった特徴に合致する。さらに、近隣の由布岳火山岩には典型的なアダカイトの組成領域に含まれる角閃石デイサイトが観察されている（Sugimoto et al. 2006b）。以上のことから鬼箕山火山岩は始源マントルの影響を受けた OIB 型の火山岩ではなく、高 Nb 玄武岩～安山岩であると考察される。その成因について議論を行うためには今後のデータの蓄積が必要である。

伽藍岳火山岩は $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}-\text{SiO}_2$ 図（図 4b）において、鶴見岳の高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比を持つ試料、すなわち古鶴見岳火山岩類（太田ほか, 1990）や鶴見岳基底火山岩（小林, 1984；藤沢ほか, 2002）が示すトレンド上に位置する。このトレンドが生じる原因についてもデータを蓄積して今後検討していきたい。

4. まとめ

伽藍岳の Sr 同位体比と Sr/Y および SiO_2 量の関係は、鶴見岳基底火山岩の示す傾向と類似する事がわかった。鬼箕山火山岩は 高 Nb 玄武岩質マグマである可能性が観察された。

参考文献

Elliott, T., T. Plank, A. Zindler, W. White, and B. Bourdon (1997) Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc, *Journal of Geophysical Research*, 102, 14991–15019.

- 藤沢康弘・奥野充・中村俊夫・小林哲夫 (2002) 九州北東部, 鶴見火山の最近 3 万年間の噴火活動, 地質学雑誌, 108, 48-58.
- 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.
- Kepezhinskas, P., Defant, M. J., Drummond, M. S. (1996) Progressive enrichment of island arc mantle by melt-peridotite interaction inferred from Kamchatka xenoliths, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 1217- 1229.
- Kita I, Yamamoto M, Asakawa Y, Nakagawa M, Taguchi S, Hasegawa, H. (2001) Contemporaneous ascent of within-plate type and island-arc type magmas in the Beppu-Shimabara graben system, Kyushu island, Japan. *J. Volcanol Geotherm Res* 111, 99-109.
- Kita I, Asakawa Y, Yuri, T., Yasui, M., Shimoike, Y., Yamamoto M, Hasegawa, Taguchi, S., Sumino, H. (2012) Rifting of Kyushu, Japan, based on the fault-controlled concurrent eruption of oceanic island basalt-type and island arc-type lavas, *Bull Volcanol.*, 74, 1121-1139.
- 小林哲夫 (1984) 由布・鶴見火山の地質と最新の噴火活動. 地質学論集, 24, 93-107.
- McDonough, W F., Sun, S-S. (1995) The compositions of the Earth *Chemical Geology*, 120, 223-253.
- 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・長谷中利明・伴雅雄・佐々木実 (1992) 由布一鶴見地溝帯内, 鬼箕単成火山の非島弧的な地質学的, 岩石学的特徴, 火山, 37, 117-131
- Shibata, T., Yoshikawa, M., Itoh, J., Ujike O., Miyoshi, M., Takemura, K. (2014) Along-Arc Geochemical Variations in Quaternary Magmas of Northern Kyushu Island, Japan. In Gómez-Tuena, A., Straub, S.M., Zellmer, G.F. (Eds.) , *Orogenic Andesite and Crustal Growth*. Geological Society of London, Special Publication. Geological Society, Special Publications, London, 385, pp. 15-29.
- Sugimoto, T., Shibata, T., and Yoshikawa, M. (2006a) Procedure of melting a fused glass bead for whole rock major elements analyses by X-ray fluorescence spectrometer RIGAKU SYSTEM 3270, Annual report for Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, 44-47.
- 杉本健・柴田知之・芳川雅子・竹村恵二 全岩微量元素組成を用いた由布岳・鶴見岳におけるマグマ生成の解明, 大分県温泉調査研究会報告, 57, 33-39.
- Sugimoto, T., Shibata, T., Yoshikawa, M. and Takemura, K. (2006b) 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（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.
- Yamamoto, J. and Takemura, K. (2004) Noble gas isotope constraints on the origin of Oninomi basalt: Implications for subduction-related components in arc magma, Annual report for Institute for Geothermal Sciences, Kyoto University, FY2004, 13-21.
- 芳川雅子・柴田知之・公門駿・杉本健・竹村恵二（2015）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，大分県温泉調査研究会報告，67，35-39.

由布・鶴見火山群及びその周辺域における磁化構造推定

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

由布岳、鶴見岳、伽藍岳及びその周辺域において、地下の地熱流体の分布、地下の温度状態についての情報を得るため磁気インバージョンを行い、地下の3次元磁化を推定することを試みた。

1. はじめに

別府、湯布院地方の火山群は由布・鶴見火山群と呼ばれる。由布岳は湯布院の北東部に位置し、主火山体と数個の溶岩ドーム及び山頂溶岩からなる。鶴見火山は、別府温泉の西方に位置する火山群で東西、南北約6 km四方の範囲に最高峰の鶴見岳をはじめ、内山、大平山、鍋山、伽藍岳など複数の火山体から構成されている。伽藍岳は、大分県東部、別府湾西に位置する活火山群の一部をなす火山であり、東西に伸びる別府地溝内に南北5 kmにわたり連なる溶岩円頂丘群の最北端に位置する。また伽藍岳山頂南側の円弧状の火口地形内には強い硫気孔活動が見られる。これら火山群の一部は別府温泉への地熱流体の供給域にあたりと考えられており、別府温泉の成り立ちを考える上でも非常に重要な火山である。一般に地下の岩石は微弱な磁化を持ち、周囲にローカルな磁場（磁気異常）を作る。これを地上で観測し、そのデータを逆解析することで地下岩石の磁化強度の分布を求めることが出来る。こうして得られる磁化強度の分布から、地下岩石の変質の度合いや地下の温度状態などについての情報を得ることが出来る。本研究では、別府・鶴見火山群の磁化構造推定のための予備的な研究として、この地域の広域的な磁化構造を3次元磁気インバージョンにより求める事を試みた。

2. データ解析

2.1 入力データ

図 1 に研究対象地域の地形図を示す。これは東西、南北 28km の範囲で、由布岳、鶴見岳、伽藍岳及び別府市街を含む。図 1 の地形データは、国土地理院の 10m 数値標高モデルデータを用いた。また別府湾の海底地形は JODC (日本海洋データセンター) で公開されている水深データを用いた。ここで 10m

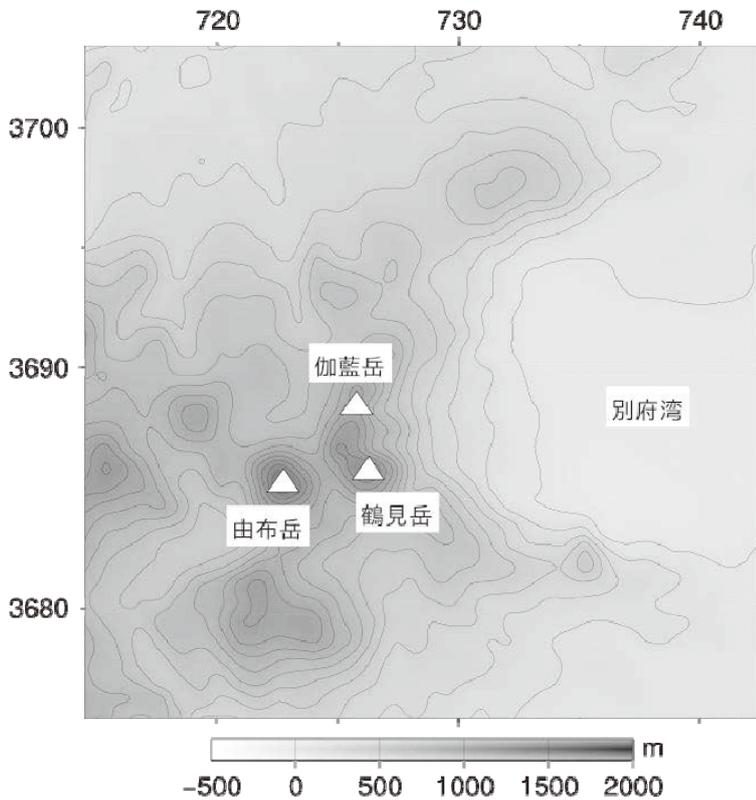


図 1. 由布・鶴見火山群及びその周辺域の地形図

水深データは J-DOSS (JODC オンラインデータ提供システム : <http://www.jodc.go.jp/jodcweb/JDOSS>) からダウンロードして使用させて頂いた。図 1 では、これらのデータから、400m x 400m メッシュの表層地形データを作成したものを表示している。また図 1 の座標は UTM (Universal Transverse Mercator) 座標系における座標 (単位は km) を表す。入力データとするこの地域の磁気異常分布については、国立研究開発法人産業技術総合研究所地質調査総合センターから発行されている「日本空中磁気データベース」(Nakatsuka and Okuma, 2005) の

磁気異常データを用いた。産業総合研究所 (旧地質調査所) や新エネルギー開発機構 (NEDO) では、地下資源調査、キュリー点深度調査などを目的に 1980 年台以降日本全国で空中磁気観測、即ち航空機に磁力計を搭載し上空から広範囲で磁場を測定する観測を行ってきた。このデータベースは、これらの観測から得られたデータをコンパイルし、IGRF (国際標準地球磁) との残差を求めることで磁場全磁力の磁気異常分布を求めたものである。この際、各測定で観測高度がまちまちであるので上方接続 (Nakatsuka and Okuma, 2006) を施し観測高度より上空における磁気異常を推定している。本研究では、上記データベースの内、本研究の研究対象地域に該当するエリアの地磁気全磁力の磁気異常データを用いた。図 2a に測定高度、図 2b に磁気異常分布を示す。図 2a にみるように、本研究の該当地域では、空中磁気 DB の観測点高度は由布、鶴見岳付近で地形に沿って対地 200~300m 上空の滑らかな曲面、それ以外では海拔高度 1.3km のほぼ一定高度の平面上のデータとなっている。なお図 2 の x, y 座標も UTM 座標 (単位は km) で示している。元々のデータベースの高度、磁気異常データは 200m x 200m メッシュ

のデータであるが、これを Nearest Neighbor 法を用い 400m x 400m のメッシュにリサンプリングした。なおこの操作には GMT (Generic Mapping Tools : <https://www.soest.hawaii.edu/gmt>) のコマンドの一つである nearneighbor を用いた。この結果から、由布、鶴見、伽藍岳周辺で北で全磁力減少、南で増加のアノマリーが見られる。これは火山体が現在の地球磁場方向に帯磁している場合の典型的なパターンであり、こうしたことから由布、鶴見、伽藍の火山群の山体が正帯磁していることが示唆される。

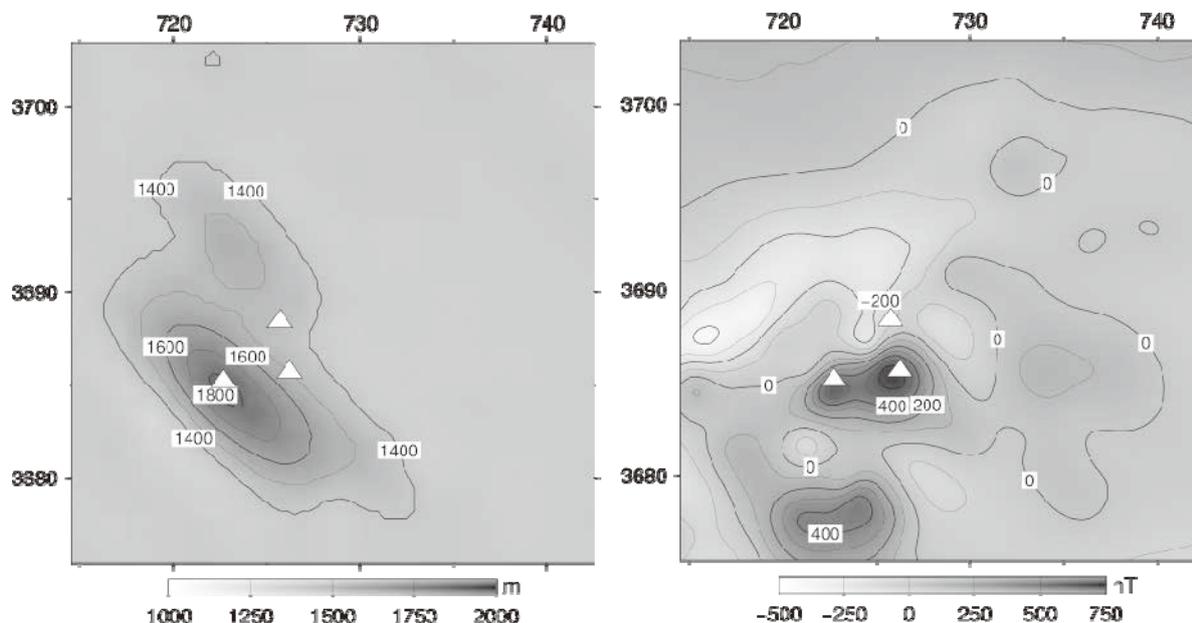


図 2. (a) 観測点高度及び(b)磁気異常分布 (日本空中磁気データベースより)

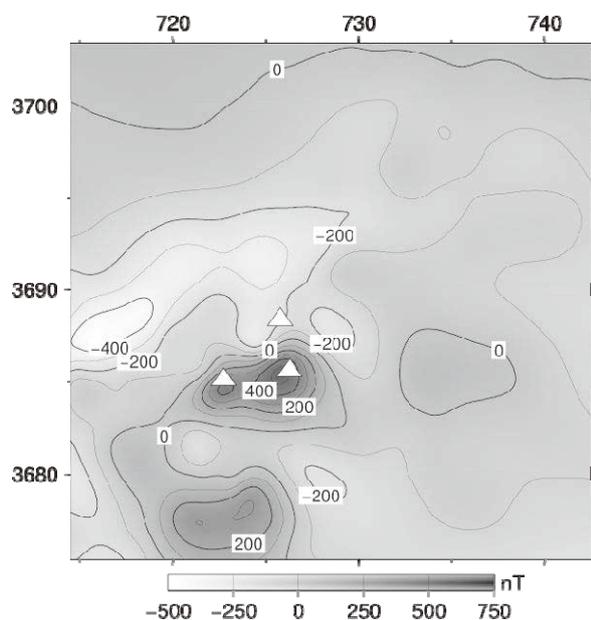


図 3. 平均磁化からの偏差による磁気異常

2.2 前処理

上記地形データ及び磁気異常データから 3 次元磁気インバージョンを行い地下の磁化分布を推定することを試みる。これに先立ち、地殻モデルと入力とする全磁力データを以下のように用意した。大地のモデルとしては、図 1 の 400m メッシュの表層地形数値データを元に、大地を 400m x 400m x 200m のブロックで東西、南北及び深さ方向に分割したものを用意した。ブロックの高さは均一なので深さ方向には表層地形に沿って分割される。ブロックの数は東西、南北、深さ方向に 70 x 70 x 35 個で、深さ方向については地表から地下 7 km までを解析範囲とした。ここで大

地を分割した各ブロック内では磁化は一定と仮定した。また図 2b に見るように、磁気異常分布から由布、鶴見、伽藍の火山群が大局的に正帯磁している事が示唆されるので、各ブロックの磁化方向は現在の地球磁場方向(別府地域では偏角 -7.3° 、伏角 $=48.2^\circ$)と等しく、磁化強度のみが異なると仮定した。従ってインバージョンで求めるべき変数としては各ブロックの磁化強度のみとなる。

空中磁気 DB の磁気異常分布には、地下浅部の岩石磁気を作る波長の短い成分の他に、より深部に起因する波長の長い磁気異常成分も含まれる。しかし本研究で解析の対象とする領域は $28\text{km} \times 28\text{km}$ の範囲に限っているため、これより波長の長い磁気異常成分は解析対象とすることが出来ない(無理やり磁気異常の波長より狭い範囲に原因を押し付ける事になり、見かけ上の構造が結果に現れてしまう可能性が有る)。従って長波長成分を除去することを目的として 1 次の傾向面解析(Borcard et al., 1992)を空中磁気 DB のデータに施した。これは、長波長磁気異常が

$$\mathbf{t} = a \cdot \mathbf{x} + b \cdot \mathbf{y} + c \quad (1)$$

という線形な式で表されると仮定するものである。ここに式(1)の \mathbf{x} , \mathbf{y} は各データポイントにおける UTM の南北、東西座標、 a , b , c は元のデータから求められる係数(傾向面のパラメータ)である。これは波長が非常に長い磁気異常分布が、限られた解析範囲で見ると線形な勾配をもつように見える、即ち 1 次の傾向面で表されると仮定するものである。式(1)から該当地域における空中磁気 DB のデータより係数 a , b , c を最小二乗的に求めた上で、式(1)で再計算される \mathbf{t} を元のデータから除く。

また上述のようにインバージョンにより大地を分割した各々のブロックの磁化強度を求めるが、次節で述べるように実際のインバージョンでは、この地域における平均的な磁化強度からの偏差を求めることとする。その上で、インバージョンにより得られた磁化偏差に平均磁化を足すことで、各ブロックの実際の磁化強度分布が得られる。このために傾向面解析を施したデータに対し、さらに以下の処理を施す。1. 傾向面解析適用済みのデータから Grauch(1987)の方法により地殻平均磁化を求める。2. この地域で大地が 1. で求められた平均磁化で一様帯磁しているとした場合に計算される磁気異常分布を求める。3. 元のデータ(傾向面解析適用済みの磁気異常)から 2. で求められた磁気異常を除いたものを計算する。実際に上記の方法を適用した本研究対象地域におけるデータを図 3 に示す。ここで 2. の処理で求められた平均磁化は 0.5A/m であった。図 3 のデータは、地下の各場所における磁化の、平均磁化からの偏差が作る磁気異常となる。

2.3 スパース正則化を用いた磁化構造インバージョン

前節で説明したように、本研究では図 3 のデータを元に磁気インバージョンにより平均磁化からの偏差を求める。このために基礎となる観測方程式は以下の線形連立方程式となる。

$$\mathbf{f} - \mathbf{t} = \mathbf{X} \cdot (\boldsymbol{\beta}_0 + \Delta\boldsymbol{\beta}) \quad (2)$$

ここに \mathbf{f} は、各データポイントにおける磁気異常(元々の空中磁気 DB のデータ)を格納したベクトル、 \mathbf{t} は式(1)から求められる 1 次傾向面、 \mathbf{X} は行列で、その i 行 j 列成分は、地下の j 番目のブロックが単位磁化(1A/m)で帯磁している場合に、 i 番目のデータポイントに作る磁気異常を表す。また β_0 は平均磁化を表す定ベクトル、 $\Delta\beta$ は各ブロックの磁化偏差を表す。 β_0 は定ベクトルなので式(2)を

$$\mathbf{f} - \mathbf{t} - \mathbf{X} \cdot \beta_0 = \mathbf{X} \cdot \Delta\beta \quad (3)$$

と変形する。ここで式(3)の左辺が図 3 に示すデータとなる。この線形方程式を解いて $\Delta\beta$ を求め、最終的に各ブロックの磁化強度 $\beta_0 + \Delta\beta$ を求める。但し磁気インバージョンの場合、ただ単に式(3)を解くだけでは正しい結果が得られないことが知られている。その原因として、磁場(及びポテンシャル量)の以下の特性が挙げられる。

1. 深さ方向の解像度の欠如
2. 行列 \mathbf{X} の悪条件

磁場(及び重力などのポテンシャル量)は距離減衰の効果が大きいので、これが上記の特性 1 の原因となる。深部のブロックはデータポイントとの間の距離が大きくなるので、深部ブロックの寄与は浅部ブロックに比べ小さくなってしまふ。従って式(3)をそのまま解くと、浅部ブロックに対応する(効きの良い) $\Delta\beta$ の成分のみで式(3)左辺が説明され、たとえ実際の磁化構造が深部にソースを持つものだとしても、浅部のみに磁化が集中したモデルが得られてしまふ。こうしたことを補正するため、深部ブロックにより大きな重みを加えた

$$\mathbf{f} - \mathbf{t} - \mathbf{X} \cdot \beta_0 = \mathbf{X} \cdot \mathbf{W} \cdot (\mathbf{W}^{-1} \Delta\beta) \quad (4)$$

を解く事が一般的に行われる(Li and Oldenburg, 1996)。ここに \mathbf{W} は重みを表す対角行列で、各対角成分が各ブロックの作る磁気異常に対する重みとなる。Li and Oldenburg(2000)では \mathbf{W} として

$$W_{ii} = (\mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_i)^{-n/4}$$

(ここに \mathbf{x}_i は \mathbf{X} の i 列ベクトル) を用いたが、本研究でもこれに倣い上の式の $n=2$ としたものをを用いた。

次に 2. についてだが、磁気インバージョンに限らず、一般に 3 次元インバージョンの場合、入力データ(式(3)の $\mathbf{f} - \mathbf{t} - \mathbf{X} \cdot \beta_0$)の次元に対し未知パラメータ(式(3)の $\Delta\beta$)の次元が大きくなってしまひ、行列 \mathbf{X} は行数より列数が多い横長の行列になってしまう。こうした場合、一般に解の一意性は無くなり、データを同じ精度で表現しうるモデルが無数に存在することとなる。こうした問題を克服するため、一般に「正則化」という方法が用いられる。その典型的な方法として Tikhonov 正則化(または L2 正則化、Ridge 回路など)と呼ばれるものが挙げられる。この手法により、式(3)の式の解の非一意性は除かれ唯一解を持つようになる。しかし同時に、この方法はモデルを平滑化する働きを持つ(Hansen,

1993)。この為、従来の Tikhonov 正則化法を磁気インバージョンに適用すると、実際より平滑化されぼやけた(特に深さ方向に尾を引いたような)モデルが得られ、地質学的に解釈を加える事が困難なケースが生じる事が指摘されてきた(例えば Portniaguine and Zhdanov, 1999)。こうした事に対処するため、本研究では従来の L2 正則化法に加え、解ベクトル $\Delta\beta$ の L1 ノルムをペナルティに加えた L1 正則化法を併用した以下の式(Utsugi, 2018)を解く。

$$\mathbf{f} - \mathbf{t} - \mathbf{X} \cdot \beta_0 = \mathbf{X} \cdot \mathbf{W} \cdot (\mathbf{W}^{-1} \cdot \Delta\beta) + (1 - \alpha)\lambda \|\Delta\beta\|^2 + \alpha\lambda |\Delta\beta| \quad (4)$$

ここに λ は正則化パラメータを表す。また α は L1 と L2 正則化の強度の分配率を表すハイパーパラメータである。式(4)右辺最終項の L1 ノルムペナルティを加えることで、解にスパース(疎)な性質が附加される(Tibshirani, 1996)。L1、L2 正則化を併用すると、L2 正則により解の一意性が保証されると共に、L1 正則により解にスパース性が要請され解がぼやける効果が抑えられる。一例として図 4 にシンセティックデータによるモデル計算の結果を示す。この図 4a は計算に用いた磁化モデルで、地下に 70m x 70m x 70m の 2 つのブロックと 100m x 100m x 100m のブロックの計 3 個の帯磁ブロックを置いている。図 4b はこのモデルの $x=0$ km における断面図を示している。このブロックにより地表から 50m 上空で計算される磁気異常を入力として式(4)に基づくインバージョンを行い、地下構造を求めた。図 4c、図 4d は得られたモデルの $x=0$ km における断面を表している。ここで図 4c は $\alpha=0$ の場合、即ち従来の Tikhonov (L2) 正則の結果、図 4d は $\alpha=0.85$ の場合の L1-L2 正則の結果である。図 4c では、浅部の 2 つの帯磁ブロックに対応するような高磁化域が見られるが、実際のモデルとは異なり深部に向

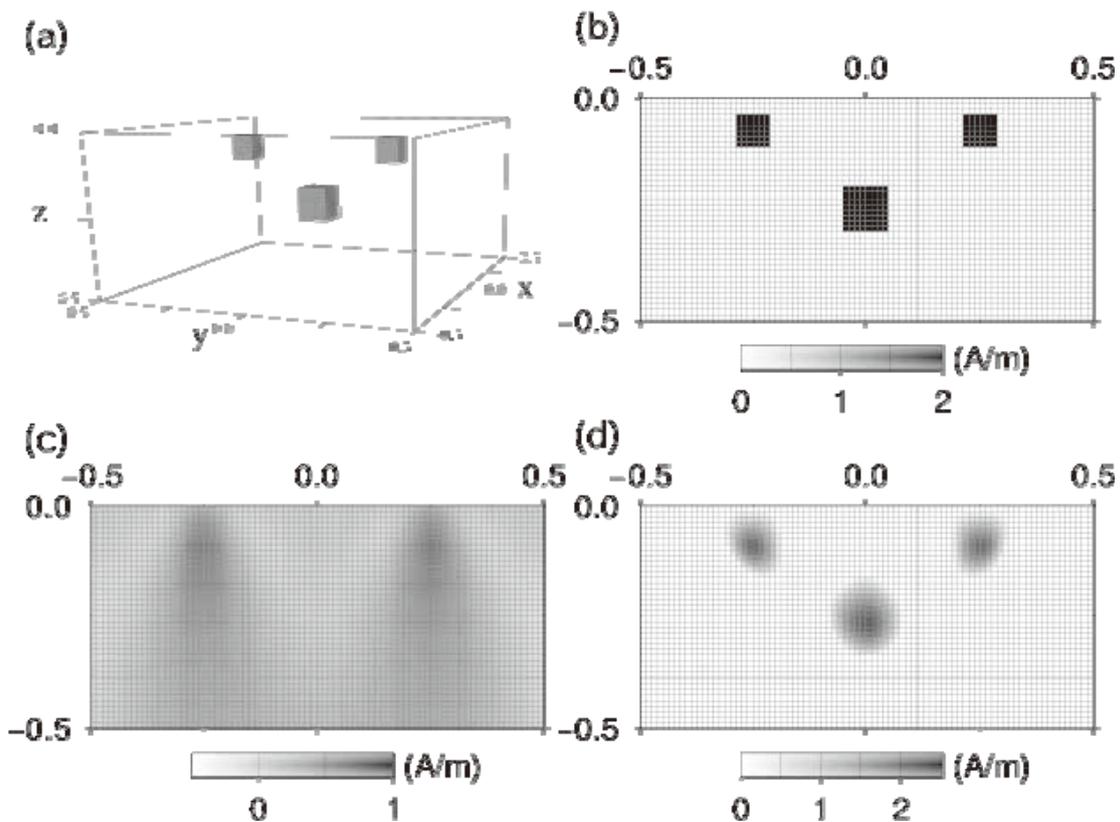


図 4. モデル計算

真のモデルの(a) perspective view、(b) $x=0$ km における断面、(c) L2 正則化インバージョンより求められたモデル及び(d)L1 正則化インバージョンにより求められたモデル。

けて尾を引くような構造となっている。さらに真のモデルの深部ブロックに対応する高磁化域は見られない。これに対し図 4d のモデルでは、3 個の帯磁ブロックに対応する高磁化域が見られる。この様に、式(4)の L1-L2 正則化を用いる事で、真のモデルに近い構造が得られ得ることが分かる。

3. インバージョン結果とその解釈

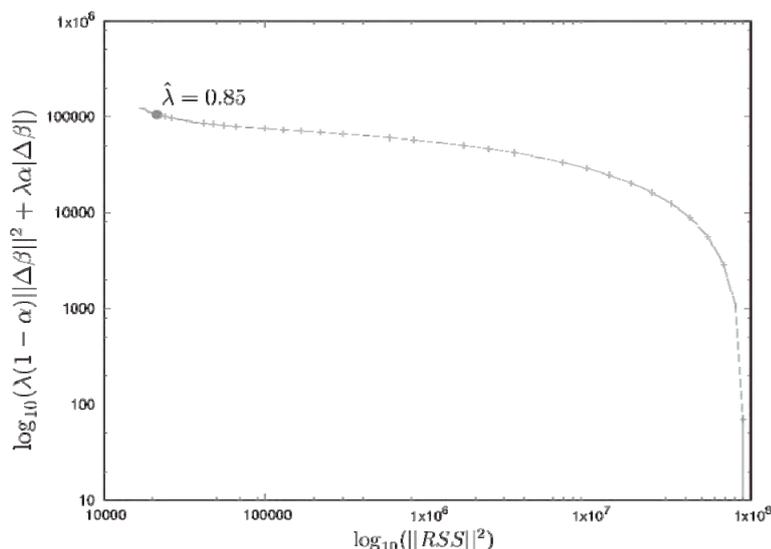


図 5. L-curve

$\lambda_{max} = 10^3$ から $\lambda_{min} = 10^{-1}$ まで $\log_{10}(\Delta\lambda) = 0.125$ 刻みで繰り返し解き L-curve を求めた。図 5 に上記手順で得られた L-curve を示す。この結果から最適な λ として 0.85 が得られた。またハイパーパラメータについては $\alpha = 0.85$ を与えた。図 6 にインバージョンの結果得られた磁化構造モデルについて、いくつかの深さにおける水平方向のスライスを示す。

図 6 から、由布岳、鶴見岳及び伽藍岳では周囲に比べ磁化が高くかつこの高磁化域が地下に向かって連続しているのが分かる。磁化の大きさは、表層付近で最大 2A/m 程度、地下 2~4 km で 5A/m 程度の値を示している。さらに 4km より深くなると磁化は減少し深さ 6km 付近で対応する高磁化域がほぼ消失している。但し地下 6km では多くの領域で磁化が 0A/m を示していることから、深さ方向の感度が 6km 程度までしか無い事が考えられる。また各深さのスライスを見ると、全体的に表層で磁化が小さく、深くなるに従い磁化が強くなる傾向が見られる。先述のとおり空中磁気 DB では空中磁気観測から得られたデータに上方接続を施しているが、一般にこの操作により元のデータに含まれる短波長成分が除去される。ここで磁気異常の短波長成分は地下浅部の磁化構造に起因するので、上方接続により浅部構造の寄与が除かれ、その為図 6 の結果では浅部ほど磁化が小さく見積もられていることが考えられる。また深さ 6km の水平断面の南西端に大きな磁化を示す領域が存在するが、これは傾向面解析により取り除くことが出来なかった長波長成分の影響による虚像である可能性が考えられる。図 6 の深さ 0m、

解を求めるにあたり式(4)の正則化パラメータ λ とハイパーパラメータ α を決めなければならない。本研究では最適な λ を L-curve 法 (Hansen, 2001) に基づいて求めた。この方法では、式(4)の方程式を様々な λ について解き、残差とモデルノルム(式(4)右辺の第二項及び第三項)の両対数プロットを作成する。このプロット(L-curve)について、作成される曲線の曲率が最大となる λ を最適値として採用する。本研究では λ について

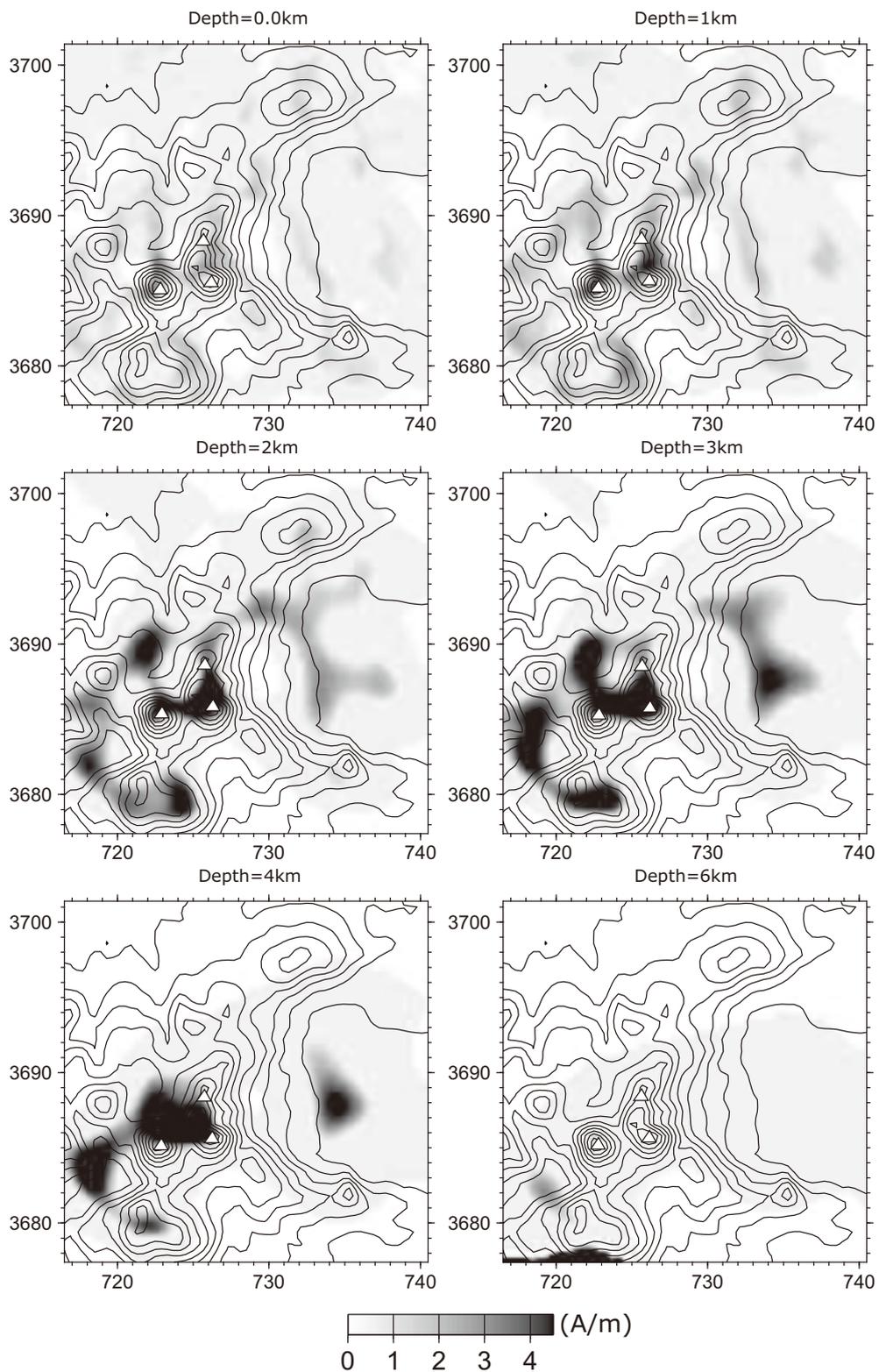


図 6. 磁気インバージョンにより得られた磁化構造モデル

1kmのスライスからは、由布岳の北西、由布・鶴見岳の北側及び鶴見・伽藍岳の東側に、周囲より磁化が低い領域が存在しているのが見て取れる。これらは地表からおおよそ地下2km~4km程度の深さまで連続しているように見える。特に深さ1km~3kmのスライスではこの低磁化域が磁化の高い領域に囲まれているのが分かる。一般に岩石の磁化は、酸性の熱水などに晒され岩石に含まれる磁性鉱物の変質を受けることで小さくなる。また温度が高くなることでも岩石の磁化は小さくなることが知られている。従ってこれらの低磁化域は、高磁化を示す緻密な岩体内部の熱水の経路、温泉の供給源となる高温岩体の存在を示すものである可能性が考えられる。

4. まとめ

本研究では、由布・鶴見火山群及びその周辺域における広域的な地下磁化構造の推定を、予備的な研究として行った。これにより、由布・鶴見火山群の直下で、深部まで続く高磁化域が存在することが分かった。またその高磁化域に取り囲まれるように、低磁化を示す領域も深部まで伸びていることが分かった。今後、当該地域における既存の研究成果のコンパイルを行い、今回の結果のより詳細な検討を行うと共に、地上での地磁気観測、電磁観測を追加する事で、由布・鶴見火山群の詳細な3次元磁化構造、電磁気学的構造推定を行いたいと考えている。

参考文献

- Borcard, D., Legendre, P., and Drapeau, P., 1992, Partialling out the spatial component of ecological variation: *Ecology*, 73, 1045-1055.
- Grauch, V. J. S., 1987, A new variable - magnetization terrain correction method for aeromagnetic data, *Geophysics*, 52, 94-107.
- Hansen, P. C., and O'leary, D. P., 1993, The use of the L-curve in the regularization of discrete ill-posed problems: *J. Sci. Comput.*, 6, 1487-1503.
- Hansen, P. C., 2001, The L-curve and its use in the numerical treatment of inverse problems, invited chapter in *Computational Inverse Problems in Electrocardiology*, P. Johnstion, ed., WIT Press, Southampton, 119-142.
- Li, Y., and Oldenburg, D. W., 1996, 3-D inversion of magnetic data: *Geophysics*, 61, 394-408.
- Li, Y., and Oldenburg, D. W., 2000, Joint inversion of surface and three-component borehole magnetic data: *Geophysics*, 65, 540-552.
- Nakatsuka, T., and Okuma, S., 2005, Aeromagnetic Anomalies Database of Japan: Digital Geoscience Map P-6, Geological Survey of Japan.

- Nakatsuka, T., and Okuma, S., 2006, Reduction of magnetic anomaly observations from helicopter surveys at varying elevations, *Exploration Geophysics*, 37, 121-128.
- Portniaguine, O., and Zhdanov, M. S., 1999, Focusing geophysical inversion images: *Geophysics*, 64, 874-887.
- Tibshirani, R. J., 1996, Regression shrinkage and selection via the lasso: *J. R. Statist. Soc. B*, 58, 267-288.
- Utsugi, M., 2018, 3-D inversion of magnetic data based on the L1-L2 norm regularization, *Geophysics*(submitted).

別府市内の温泉水に含まれる栄養塩類の地理的分布状況の把握

龍谷大学 経済学部

山田 誠

福井県立大学海洋生物資源臨海研究センター

杉本 亮

総合地球環境学研究所

本田 尚美

要旨

別府市内の温泉水に含まれる溶存無機窒素とリン酸態リンの地理的分布状況を明らかにする目的で、市内 53 ヶ所の温泉水を採取し、そこに含まれるアンモニア態窒素・亜硝酸態窒素・硝酸態窒素およびリン酸態リンの分析を行った。その結果、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ と $\text{NO}_3^-\text{-N}$ および $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ の高濃度を示す温泉の分布にそれぞれ位置的な違いが見られ、それらの違いは、温泉水の流動や水質形成プロセスに起因する可能性が示唆された。

1. はじめに

別府市内では、利用された後、または未利用の温泉水が排水として河川へ流入しており、それらが河川へ熱や溶存物質を供給することで河川環境の変化を引き起こしていることが明らかとなってきている（大沢ほか，2007；山田ほか，2010；酒井ほか，2011；三島ほか，2017）。また、温泉排水による河川水温の上昇は、河川生態系にも影響を与えており、温泉排水由来の熱が、熱帯性の外来魚が生息するのに非常に適した温度環境を形成していることも明らかになってきた（Yamada et al, 2017；山田ほか，2017）。一方で、別府市内の温泉水には、食物連鎖を支える栄養塩の一つである窒素がアンモニア態窒素（ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ）として含まれていることが我々の調査の中で明らかになりつつあり、栄養塩循環の観点からも温泉排水が河川生態系に影響を与えている可能性が考えられるようになってきた。しかしながら、温泉水に含まれる栄養塩類、特に溶存している窒素（アンモニア態窒素・亜硝酸態窒素・硝酸態窒素）やリンに関する情報はかなり乏しく、それらが温泉水にどの程度含まれているのか、またどのような条件の温泉水がそれらを多く含むのかなど、温泉水に関わる窒素やリンの動態については、別府地域にかかわらず不明な点が多い。そこで、本研究では、温泉水に関わる窒素やリンの動態及びそれらが周辺の生態系に与える影響を明らかにすることを念頭に、別府市内の温泉水に含まれる窒素とリンの地理的分布を把握することで、温泉水に関わる栄養塩類に関する基礎資料を得ることを目的として調査を行なった。

2. 調査方法

別府市内 53 ヶ所の温泉水の採取を行った。試料水の採取日は 2017 年 11 月 18 日である。できるだけ別府市内の温泉を温度や地理的に偏り無く採取するよう試みたが、全ての地域で採取できたわけではなく、別府市南西部の堀田や観海寺周辺の地域については試料水を採取できていない。

採取した試料について、採取後すぐに保存用の処理を行い、実験室に持ち帰ってアンモニア態窒素 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)・亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_2^-\text{-N}$)・硝酸態窒素 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)・リン酸態リン ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) の分析を行った。なお、分析方法は、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$: OPA 法 (Holmes et al., 1999), $\text{NO}_2^-\text{-N}$: ナフチルエチレンジアミン法, $\text{NO}_3^-\text{-N}$: ナフチルエチレンジアミン法 (カドミウムによる還元処理), $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$: モリブデンブルー法、をそれぞれ用いた。

3. 結果と考察

3-1. 溶存無機窒素とリン酸態リンの含有量の概況

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ ・ $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ・ $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ・総溶存無機窒素 (DIN) ・ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ の濃度の頻度分布を図 1 に示した。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ は、半数を超える源泉で、 $10 \mu\text{mol/l}$ 以下を示したが、 $100 \mu\text{mol/l}$ 以上の値を示すもの (最大値: $270 \mu\text{mol/l}$) も見られ、源泉によって濃度に非常に大きな違いがあった。 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ は全ての源泉で検出されたが、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ と比べると全体的に濃度は非常に低く、7 割以上が $2 \mu\text{mol/l}$ 以下で、最大でも $11.7 \mu\text{mol/l}$ であった。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ は、9 割を超える源泉で検出限界以下の濃度であったが、 $80 \mu\text{mol/l}$ を超える濃度の源泉が 4 ヶ所存在し (最大値: 186.9)、検出するものとししないものとの間で、非常に大きな濃度差が見られた。DIN は、全体的に $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の頻度分布パターンと類似しており、半数程度が $15 \mu\text{mol/l}$ 以下の濃度であった。しかし、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ は低いが、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ の濃度が非常に高い源泉もあり、DIN の頻度分布パターンは $\text{NH}_4^+\text{-N}$ より高濃度側の源泉数が多くなっている。 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ は、6 割程度の源泉で $2 \mu\text{mol/l}$ 以下を示し、検出限界以下のものがいくつか見られた。また、最大でも $25.5 \mu\text{mol/l}$ と、濃度幅は全体的に小さかった。

以上の様に、今回採取した源泉に含まれる溶存無機窒素は、概ね $\text{NH}_4^+\text{-N}$ で占められていることが頻度分布から明らかとなった。しかし、いくつかの源泉では $\text{NO}_3^-\text{-N}$ の濃度が非常に高いものがあり、これらの源泉は $\text{NH}_4^+\text{-N}$ をあまり含まないため、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ が溶存無機窒素の大半を占めている。これらのことから、別府地域の温泉中の溶存無機窒素は、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ が非常に多いもの、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ が非常に多いもの、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ を含むがその濃度は比較的低いもの、に概ね区分することができると考えられる。一方、リン酸態リンは、全体的に濃度が小さく、

いくつかの源泉で高めの濃度が見受けられるが、溶存無機窒素と比べると、明確に区分ができるほど複数の濃度のバリエーションが見られなかった。

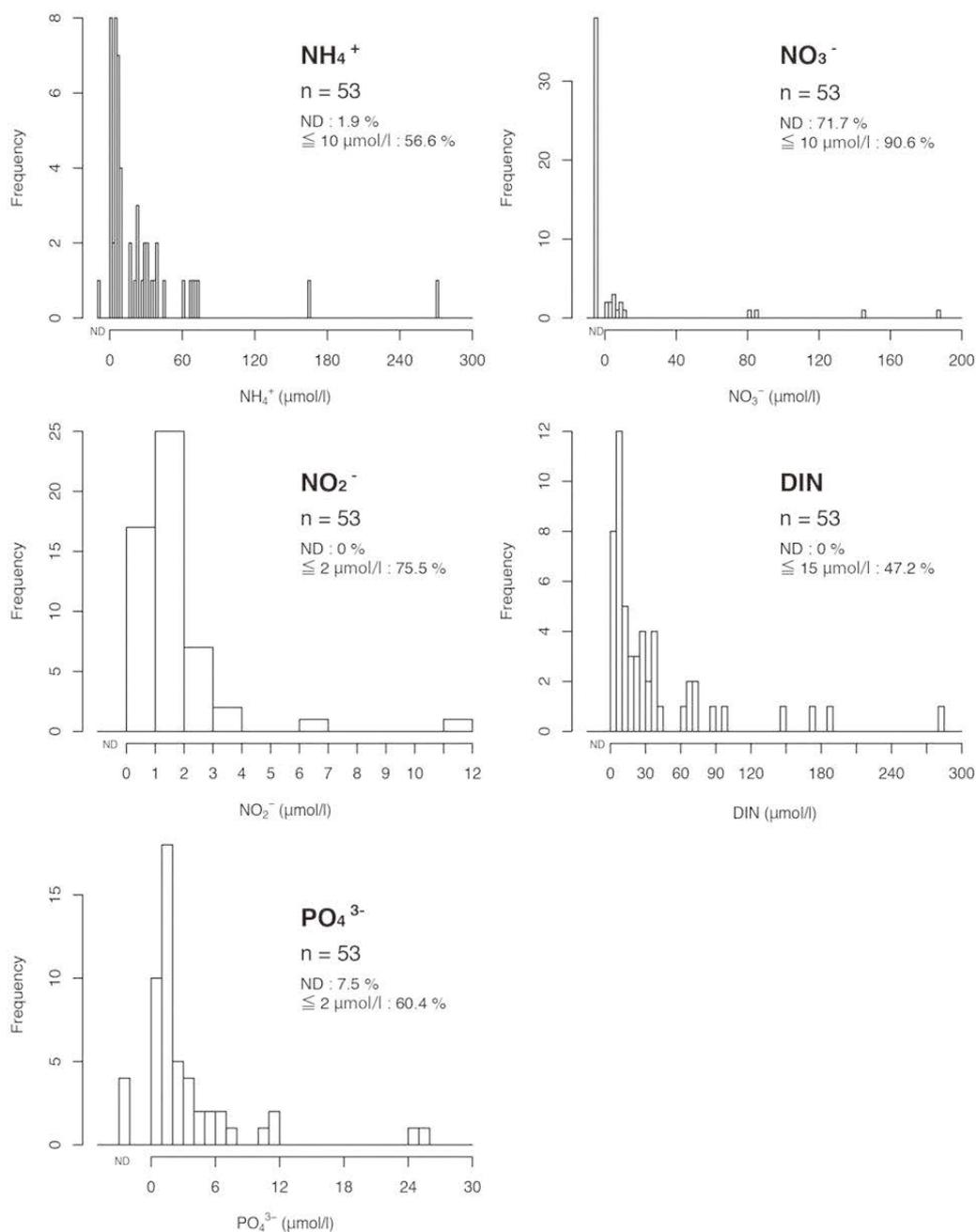


図1 温泉に含まれる溶存無機窒素濃度とリン酸態リン濃度の頻度分布。nはサンプル数、NDは検出せず(検出限界以下)を示している。

3-2. 溶存無機窒素とリン酸態リンの地理的分布状況

$\text{NH}_4^+\text{-N} \cdot \text{NO}_2^-\text{-N} \cdot \text{NO}_3^-\text{-N} \cdot \text{DIN} \cdot \text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ の濃度の地理的分布図を図2に示した。なお、いくつかの源泉はほぼ同じ場所で採取しており、図中のプロット数は実際の観測数(53ヶ所)

より少ない。NH₄⁺-Nは主に鉄輪地域や明礬地域で高くなっており、沿岸部や南部でもいくつか高い値を示す源泉が存在する。標高10~20m付近から100m付近までの源泉は概ね濃度は低くなっている。NO₂⁻-NもNH₄⁺-Nと類似した分布傾向を示すが、南東部沿岸付近の標高0~20mの間の源泉は、NH₄⁺-Nほどはっきりとした分布傾向は見られない。NO₃⁻-Nは北部と南部の標高20m付近に高濃度の源泉が存在するが、標高の高い場所では検出限界以下のものがほとんどであった。また、南東部沿岸付近の標高0~20mの間の源泉もそのほとんどが検出限界以下の値であった。DINの分布を見ると、これらの結果を反映して、NH₄⁺-N濃度の高かった場所とNO₃⁻-Nの濃度が高かった場所でそれぞれ高くなっているが、それに加えて、平均的に南東部沿岸域の海に近い場所でも高めの傾向を示している。一方、PO₄³⁻-Pは溶存無機窒素が示した分布傾向とは異なり、南東部沿岸付近の標高0~20mの間の源泉で高めの値を示す傾向が見られた。

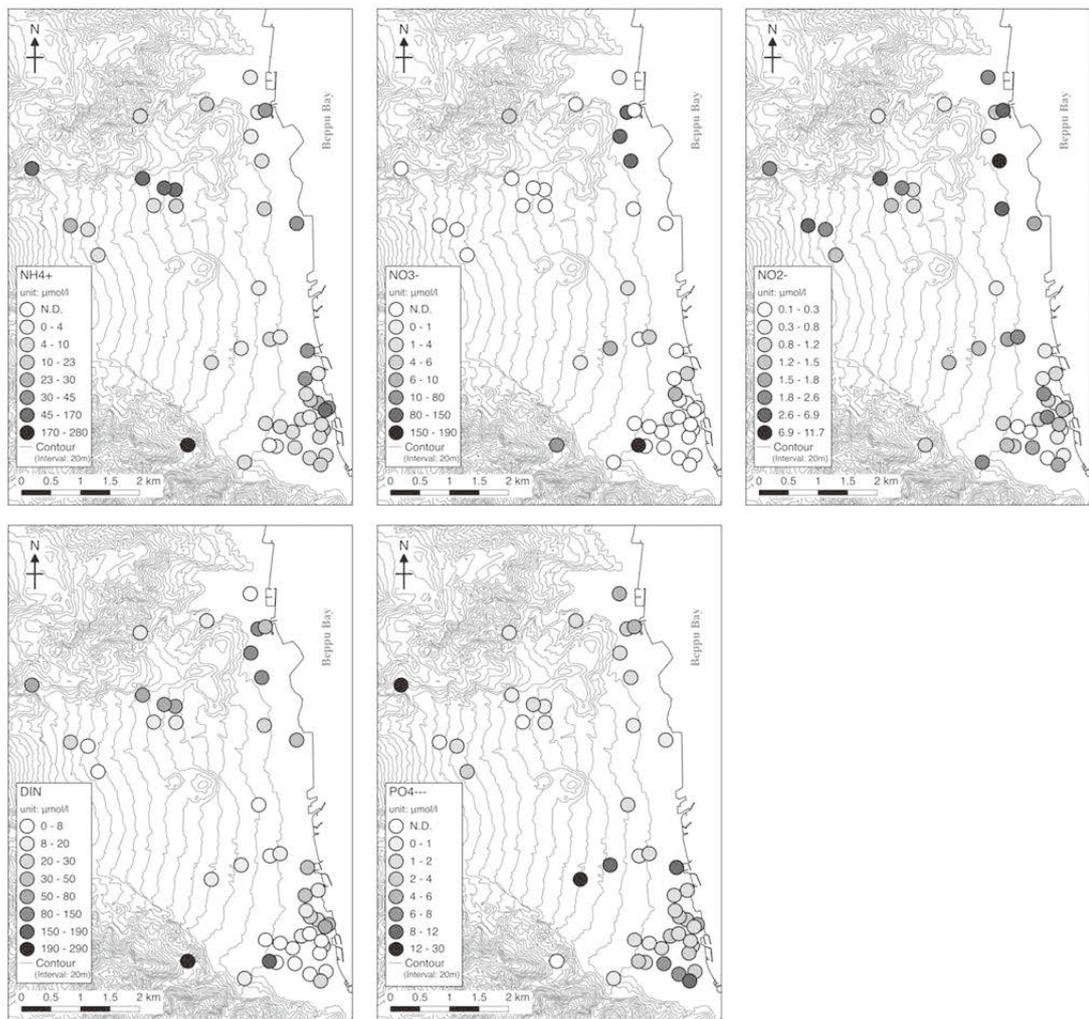


図2 温泉に含まれる溶存無機窒素濃度とリン酸態リン濃度の地理的分布。

このような各成分の分布傾向の違いは、源泉に含まれる溶存無機窒素やリン酸態リンの濃度が、湧出地域毎に異なるということを示している。特に、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ・ $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ・ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ は、高濃度を示す地域が概ね重ならないことから、それらの成分の起源となるもの、もしくはそれらの成分の温泉水への混入プロセスが異なっていることを示していると考えられる。別府の温泉は流動経路や泉質の形成プロセスが地域によって異なるため（大沢ほか，1994；大沢・由佐，1996）、それらが栄養塩類の成分毎の分布傾向の違いに影響を与えている可能性がある。有機物を含む堆積岩に接触した地下深部由来の熱水には $\text{NH}_4^+\text{-N}$ が含まれることがあり（Takai et al, 2002）、今回の調査結果も高温の温泉が湧出している場所（鉄輪地域や明礬地域）で $\text{NH}_4^+\text{-N}$ が高濃度であった。また、温泉水の流動経路の末端付近の沿岸域近くで、人為起源の指標にもなる $\text{NO}_3^-\text{-N}$ や $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ が多かった。これらは、温泉流動プロセスと含まれる栄養塩類の種類や濃度の違いとの間に関係があることを示す結果であると推察される。

4. まとめ

別府市内の温泉に含まれる溶存無機窒素とリン酸態リンの分布状況を調査した結果、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ と $\text{NO}_3^-\text{-N}$ で濃度の高い温泉の分布の違いが見られた。また、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ についても、溶存無機窒素とは異なる分布が見られた。このような別府市内の温泉に含まれる栄養塩類の分布の偏りは、温泉の流動プロセスに起因している可能性があると考えられる。今回、栄養塩類の分布状況が明らかになったことで、温泉水に関わる栄養塩類の基礎的資料を得ることができた。今後、これらの分布状況と温泉の水質形成および流動プロセスとの関係がより詳細に検証されることで、温泉に含まれる栄養塩類の動態が明らかになることが期待される。

謝辞

本研究に用いた試料水は、2017年11月18日に行われたイベント、「せーので測ろう！別府温泉一斉調査」の際に、イベント内での温泉採取に合わせて一緒に採取していただいた。イベントに参加し、試料水採取にご協力いただいた方々に感謝申し上げます。

参考文献

- Holmes R.M, R. Aminot, R. K eroul, B.A Hooker, B.J Peterson (1999) A simple and precise method for measuring ammonium in marine and freshwater ecosystems, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 56, 1801-1808.
- 三島壯智・大沢信二・竹村恵二(2017)別府における小規模地熱発電開発にともなう河川の水質変化, 大分県温泉調査研究会報告, 68, 41-49.

- 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.
- 大沢信二・由佐悠紀(1996)温泉水の化学組成から推定される別府温泉北部地域の地下温泉水の流動経路, 「地熱流体流動過程と地下構造に関する研究」, 科学研究費補助金報告書.
- 大沢信二・山崎一・高松信樹・山田誠・網田和宏・加藤尚之(2007)温泉から河川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, 58, 21-30.
- 酒井拓哉・川野田実夫・大沢信二・馬渡秀夫・山田誠・三島壮智(2011)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, 62, 47-58.
- Takai K., Hirayama H., Sakihama Y., Inagaki F., Yamato Y. and Horikoshi K. (2002) Isolation and metabolic characteristics of previously uncultured members of the order Aquificales in a subsurface gold mine, Applied and Environmental Microbiology, 68, 3046-3054.
- 山田誠・三島壮智・大沢信二・酒井拓哉・齋藤光代(2010)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, 61, 11-20.
- 山田誠・大沢信二・小路淳(2017)別府における温泉利用と河川生態系, 水産学シリーズ No.185 「地下水・湧水を介した陸－海のつながりと人間社会」(小路淳・杉本亮・富永修編), 恒星社厚生閣, 115-126.
- Yamada M., Shoji J., Ohsawa S., Mishima T., Hata M., Honda H., Fujii M. and Taniguchi M. (2017) Hot spring drainage impact on fish communities around temperate estuaries in southwestern Japan, Journal of Hydrology: Regional Studies, vol. 11, 69-83.

地理座標変換ツールの位置決定精度に関する検討 ～温泉データをGISで活用するために～

秋田大学大学院理工学研究科

網 田 和 宏

日鉄鉱コンサルタント株式会社

酒 井 拓 哉

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

温泉分析書のデータを用いて GIS による空間解析を行うことを想定し、住所情報を位置情報へと変換するジオコーディングの位置決定精度に関する検討を行った。座標変換プログラムとしては、インターネット上で公開されている2種類のジオコーダーを使用することにした。結果の検証に使用したデータは別府温泉の483源泉の住所情報であり、これらについては温泉台帳の記載などを活用し一つの正確な住所から地理座標（緯度・経度）を求めた。

温泉分析書の記載住所を単純にデジタル化しただけの状態の入力ファイルを用いてアドレスマッチングを行った結果、483地点の全点について座標変換を行うことが出来た。得られた変換結果より、全地点数のおよそ半数は実際の座標に対して500m以内の精度を有している一方で、全体の約10%については、実際の座標から2km以上離れた地点で位置決定が行われており、地理座標への変換が精度良く行われた地点と、誤差の大きい地点との両者が共存する結果が得られていることが分かった。

1. はじめに

近年、GIS（Geographic Information System：地理情報システム）を用いた空間解析が多くの分野で行われ、応用の幅を拓げている。それらの要因として、GISを使用するための環境整備が進められてきたことなどが挙げられる。例えば、GISのプログラムを使用する環境としては、フリーのGISソフトが登場したことで、一般のユーザーが高額の予算を投じなくともGISに接することが容易となった。その上、特定の解析を行う際の複雑で専門的な知識を要する処理や計算に対しても、それを補助してくれる追加機能プログラム（プラグイン）が次々に開発、公開されている状況である。また、GISの空間解析に使用するための基礎データに関しても、国土交通省や国土地理院、環境省、経済産業省などに代表される国の機関をはじめ、地方自治体や各種法人、民間企業など、国内外の多くの組織・グループによって、様々なデータベースの整備が進められてきた。そして、それらデータベースの多くは、インターネットを通じてアクセスでき、さらには（商用目的での使用の禁止など、利用に関する

幾つかの規約はあるものの) オープンデータとして使用することが可能となっている。

このように、今後もソフトウェアの進展とデータベースの整備が進んでいくことが見込まれる状況の中で、温泉データについても GIS を活用した空間解析の有効性・有用性に関する検討を行っておくことは重要である、との判断の元、我々は九重町の温泉データに対して GIS を用いた解析を行った(網田ほか, 2017)。解析では、質・量ともに豊富な既存の情報源として温泉分析書に着目し、分析書に記載されている情報のデータベース化を行った。そして幾つかの解析例を提示した上で、温泉分析書のデータを用いて空間解析を行うことは温泉の評価や環境解析を行う上で有効な手法であることを示すことができた。しかし、その一方で、温泉分析書に記載されている住所のジオコーディングが十分に行えない、という問題も発生し、今後の課題の一つであることが明らかになった。

GIS を用いて空間解析を行うにあたり、最初に処理する作業の一つにジオコーディングがある。ジオコーディングは、住所(例: 大分県別府市上野口町〇〇-△)や地名、施設などの情報を元に、地球上の一地点を検索し、緯度・経度(例: 北緯 33.31XX 度, 東経 131.47XX 度)や投影座標系に変換する処理のことで、住所情報から緯度・経度の情報への関連付け(変換)を行う場合にはアドレスマッチングと呼ばれることもある。ジオコーディングによる関連付けが行われることにより、解析対象としている地点の情報は地図上で正確に扱えるようになる。

解析対象となる地点数が少ない場合などは、各地点の座標(緯度・経度)を地図上で読みとった上で手入力するなどの直接的な処理で対応することも可能であるが、対象となる点が多量(数 100 ヶ所以上)となった場合には、位置情報と地理座標との関係を一ヶ所ずつ調べて入力していくやり方では、かなりの時間と労力を要することになり、現実的な解析手法であるとは言い難い。その様な場合には、住所情報と緯度・経度とが関連付けられたデータベース(住所辞書と呼ばれる)を検索して、緯度・経度を自動的に判別・決定するプログラム(ジオコーダー)を用いてジオコーディングする方法が一般的である(図 1)。

アドレスマッチングのためのジオコーダーに関しては、商用で販売されているものから、Web 上でのやり取りを通じて有料で行われているサービスまで様々に提供されてはいるが、オープンソースで公開されているジオコーダーも幾つか存在している。そこで本調査研究では、現時点(2018 年現在)において利用が可能となっているジオコーダーを用いてアドレス

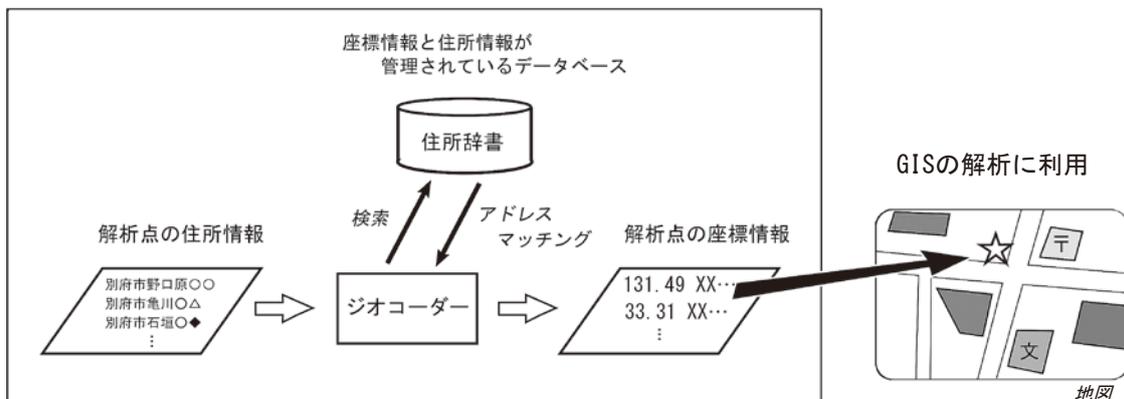


図 1 ジオコーディングの概念図

データベース(住所辞書)の充実とジオコーダーの性能の発展によって、アドレスマッチングの精度は向上していくことになる。

マッチングを実施し、結果として得られる地理空間情報の位置決定の精度や特徴を把握することで、温泉分析書のデータを扱う際の留意点や現状に関する検討を行うことを主な目的とした。

2. データの概要および調査方法

ジオコーディングの位置決定精度に関する検討を行うために使用するデータとして、大分県別府市に位置する 483 ヶ所の温泉の源泉の所在地および緯度・経度情報を用いた。これら 483 ヶ所の井戸に関しては、あらかじめ次のような方法で位置決定を行った。まず、大分県鉱泉誌や大分県温泉調査報告、温泉分析書などに記載されている、別府市内の温泉の源泉情報（住所）をデジタル化（データベース化）した。次に、大分県東部保健所で管理されている温泉台帳にて湧出地の詳細な位置を特定した後に、これらの位置を住宅地図上に書き込んだ。最後に源泉位置の記された住宅地図と国土地理院の地図との対比を行いながら、一つ一つの井戸の位置について緯度・経度を決定した。なお測地系は世界測地系 1984 (WGS84) を用いた。

以上のようにして決定した別府温泉 483 ヶ所の源泉の位置を、本調査研究では以後、井戸が存在している「真の座標」と呼び、地理座標変換プログラムを用いて決定された位置情報と比較するための検証用データとして扱うことにする。

アドレスマッチングに使用するジオコーダーについては、インターネットを介して公開されている 2 つのサービスを利用した。一つは東京大学空間情報科学研究センターが提供している CSV アドレスマッチングサービスである。主には学術目的や教育目的での利用を主眼としたライセンスで使用が認められており、web ブラウザ上の操作によりアドレスマッチングを行うことが可能である（ただし防災システムなど、サービスの停止が人命に関わるような目的での利用は控えるように、との注意喚起がなされている）。公開されている CSV 形式（1 行に 1 つのレコードがあり、レコード内の各フィールドがカンマで区切られたテキストファイルの形式）のサンプルファイルの書式に従って、住所情報ファイルを作成しておき、そのファイルを指定して web ブラウザ上でプログラムを起動することでアドレスマッチングが実施される。また、アドレスマッチング後に求められた緯度・経度に対して、変換の信頼度（入力された文字列と一致する地名が複数存在していないかどうか、などの点を基に評価）、および変換可能であった住所階層レベル（1：都道府県，2：郡・支庁，3：市町村・23 区，4：政令市の区，5：大字，6：丁目・小字，7：街区・地番，8：号・枝番）に関する情報が出力ファイルに書き込まれる仕様となっているため、変換結果の信頼性について、ユーザーが評価しやすくなっている点も特徴の一つである。

もう一つのジオコーダーは、IT DART (IT Disaster Assistance Response Team；情報支援レスキュー隊) が公開している ExcelGeo と呼ばれるプログラムを使用した。このプログラムは地名情報処理に必要なデータ、ソフトウェア、サービスをオープンに構築することを目的としている GeoNLP プロジェクトによってオープンされているジオコーダーを利用してアドレスマッチングを行っているプログラムである。マイクロソフト社製ソフトである Excel ファイルに地名と住所を書き込んで作成した入力ファイルを、web ブラウザの画面上にそのままドラッグ&ドロップすれば自動でジオコーディングしてくれるという点が特徴の一つであり、コンピュータ関連の知識を持たないユーザーでも気軽に使えることに主眼が置かれている。

IT DART が災害対応に主軸をおいて活動を行っている団体であることから、ExcelGeo は住所の「号・枝番」にいたる様な完全なアドレスマッチングを目指しているのではなく、街区レベルでも病院などの位置が把握できることが重要であるとの認識から、基本的には「番」までを検索することになっている。

これら2つのジオコーダーを利用して、別府市の483源泉の住所情報のジオコーディングを実施した。なお、それぞれのプログラムを使用するにあたり、入力ファイルの書式などには違いがあったが、住所の項目欄に入力する情報については双方とも同じ内容となるようにした。

3. 結果および検討

CSV アドレスマッチングサービス、ExcelGeo でそれぞれにジオコーディングを実施した結果、両者ともに別府市の483源泉の全ての地点について、住所情報から座標情報への変換を行うことができた。入力ファイルの住所欄には、温泉分析書に記載されている住所をそのままデータ化して使用したが、分析書の記載では、場所によっては「別府市北浜〇丁目〇〇〇-〇」といったハイフンで区切られた形式のものから「別府市北浜〇丁目〇〇〇番地の〇」の様な漢字とかなの組み合わせで区切られた形式のものまで様々であった。そこで入力ファイルの住所欄の記載方法について、ハイフン区切りや、漢字・かな区切りを混在させたまま（分析書の記載通り）にして変換させたものと、住所の一部を書き換えて、書式を統一（例えば、ハイフン区切りに統一する、など）して変換させたものとで出力ファイルの中身を比較してみたが、ほとんどの地点で変換結果に違いはみられなかった。

また、前述した様に CSV アドレスマッチングサービスでは、出力ファイルにジオコーダーがどの住所階層レベルまでの変換を行えたか、という点に関する情報が記載されている。そこで今回、変換を行った483地点の内訳を調べてみた結果、7: 街区・地番までの階層で変換できた地点が59地点、6: 丁目・小字が31地点、5: 大字が390地点、3: 市町村が3地点となった。市町村のレベルの階層でしか変換ができなかった3地点については、いわゆるジオコーディングとしては満足の行く変換ができていないと判じて良いものと思われるが、約80%については「大字」の階層レベルで、また約19%についてはより詳しい階層レベルでジオコーディングが行われていることが分かった。

2つのサービスで行われたジオコーディングの結果について決定精度に関する検討を行うために、真の座標の緯度（あるいは経度）とジオコーディングで求められた緯度（あるいは経度）を軸に取ったグラフを作成した。CSV アドレスマッチングサービスで得られた緯度・経度との比較結果を図2-1に、ExcelGeo で得られた結果との比較を図2-2に示す。またグラフ内には傾き1の関係を点線で示しており、真の座標とジオコーディングの結果が一致した場合には、この線上にプロットされることになる。

それぞれの図から分かるように、真の座標とジオコーディング結果の関係は、全体の半数近くの点が傾き1の線に沿ってプロットされており、概ね良好なアドレスマッチングが実施されたことが示されている。その一方で、縦軸に沿って細長く分布する幾つかの点群がみられるが、これらは本来であれば、様々な緯度・経度に分布しているはずの源泉位置に対してジオコーダーが全て同じ緯度・経度を検索結果として返したものである。80%近い地点が「大字」の住所階層でアドレスマッチングされたことについてはすでに述べたが、例えば大字で

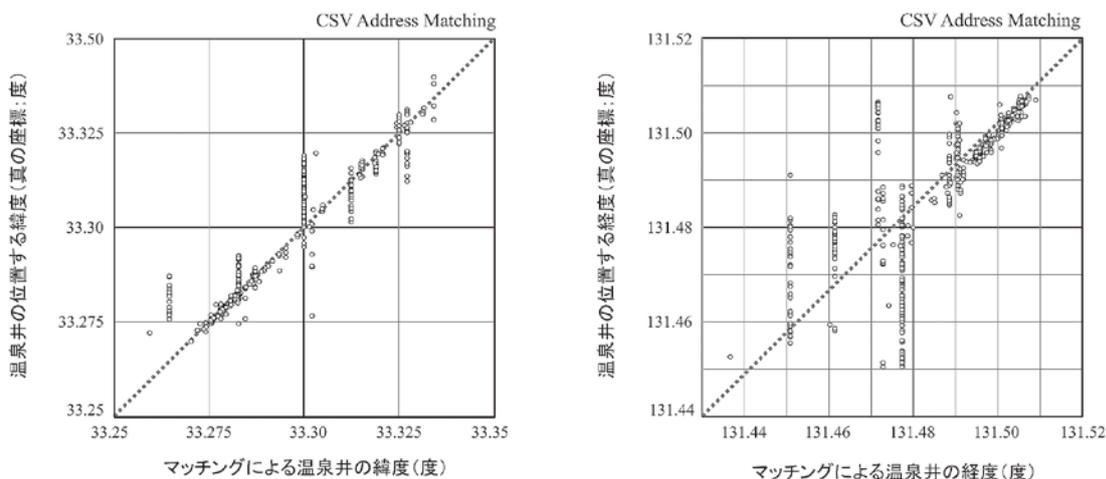


図 2-1 CSV アドレスマッチングによって求められた緯度（左）経度（右）と実際の座標の緯度・経度との比較

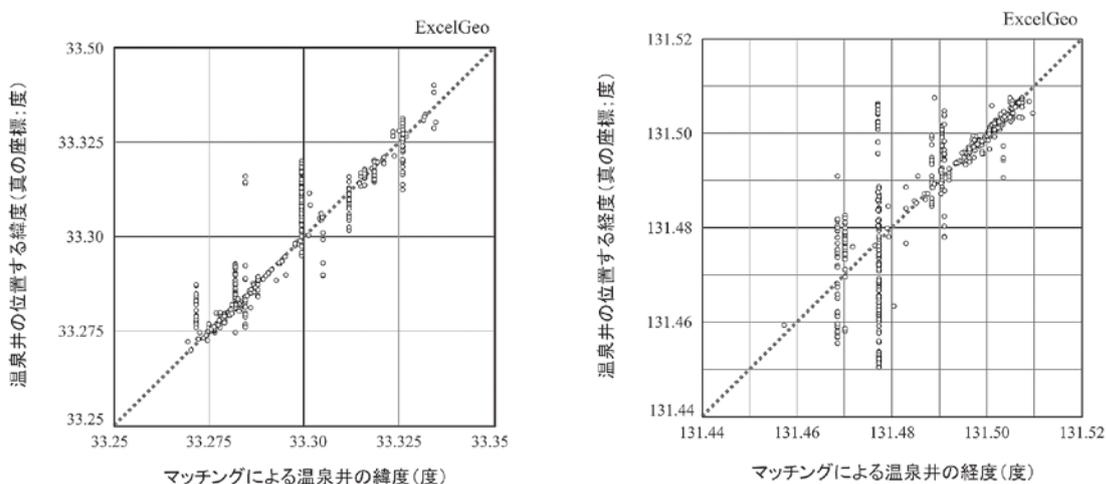


図 2-2 ExcelGeo によって求められた緯度（左）経度（右）と実際の座標の緯度・経度との比較

指定されているエリアが広い地域などの場合は、そのエリア内にある全ての井戸に対して同じ緯度・経度が割り振られてしまうため、縦軸に対して幅の広い分布が得られることになる。

このように位置参照情報を用いてアドレスマッチングを行う場合、対象地域に対してどの住所階層までマッチングが行えたか、によって真の座標との間の一致率（この場合では傾き 1 の線からのずれ）が不連続に変化することになる。したがって、必ずしも座標変換の成功率のみを用いてジオコーディングの結果を評価すれば良いといった類のものではない事が分かる。その一方で、変換できた住所階層が一段上がるだけで、位置決定精度が大きく低下してしまう可能性も有している、といった点についても一定の注意が必要であろう。

ここで、2つのジオコーダーで求められた変換後の緯度・経度と真の座標値（緯度・経度）との間の差を求め、その値から2地点間の直線距離を算出した。その結果、CSV アドレスマッチングを用いて得られた各地点における地理座標と真の座標間での直線距離は、最大で約

表 1 ジオコーディングで得られる座標と実際の座標間における距離と地点数との関係

2点間距離	GSV アドレスマッチング		ExcelGeo	
	地点数	(%)	地点数	(%)
3km 以上	23	4.8	12	2.5
2km 以上, 3km 未満,	40	8.3	32	6.6
1km 以上, 2km 未満,	153	31.7	125	25.9
500m 以上, 1km 未満,	38	7.9	93	19.3
100 以上, 500m 未満,	139	28.8	131	27.1
100m 未満,	90	18.6	90	18.6

3,800 m, 最小で約 4 m となり平均値は約 940 m となった. 同様に, ExcelGeo の場合は, 最大値が約 3,700 m, 最小値が約 4 m, 平均値は 840 m となった. また, 両者のアドレスマッチングの結果に関する度数分布表を表 1 に示す. 表からも分かるように, 2 つのジオコーダーで得られた結果に若干の違いは認められたが, 分布の傾向は一致しており, ほぼ同質の結果が得られたといえる.

2 点間の距離が 500m 未満となったものは, 地点数にして約 220~230 点, 割合にして全体の約 46~47%となった. この結果は, 特に事前の処理なども行わず, 温泉分析書の電子化データのみからほぼ完全に自動認識に任せてアドレスマッチングを行うという, 今回のような手法で得られたものとしては, 比較的, 良好な結果であると考えられなくもない. ただし, 2 点間の距離が 2km 以上, 離れてしまうものも 10%前後は含まれていることも分かった. 別府市の市街区域の南北長が約 15km 程度であることを考えれば, これらの点については, ほとんどジオコーディングが出来ていなかったものとみなして良いといえる.

調査対象を温泉の源泉に限定して述べるならば, 温泉井は比較的狭いエリア内で複数の井戸が掘削される様な状況が珍しくないため, せめて 100m 程度の制度はほしいというのが実際であろう. 今回の結果のように, 住所の階層で「大字」のレベルよりも更に詳細な「丁目・小字」, あるいは「街区, 地番」のレベルまでのマッチングが実現できていない状況や, 10%程度は精度の低い位置決定が行われている状況等を考慮すれば, 温泉分析書のデータを単にジオコーディングするだけでは不十分な部分を含んでおり, アドレスマッチングの結果の運用については慎重を期して行う必要のあることが示されたといえる.

ジオコーディングした結果の正確性について別途, チェックする必要があるのであれば, これはデータ数が増えていった場合の作業の煩雑さの問題が解決されていないのと同義である. これらの問題を回避するためには, 今後のデータベースのさらなる充実やジオコーダーの精度の向上など, 環境面の整備の進捗を待つことも一案であろうが, 温泉分析書の住所を基に, 住所辞書(住所と緯度・経度の関連付けが行われたデータベース)を作成していくなど, GIS で運用することを前提としたデータベースの構築を独自に行っていくことも検討に値する課題であると考えられる. 特に温泉分析書の場合, 古い温泉井については住所記載が, 市町村合併の行われる以前の表記で記載されているものも見受けられる. 本調査では, 解析作業を煩雑化させないことを重視したため, あえて最も単純な入力ファイル(温泉分析書の記載をそのまま用いる)を作成してアドレスマッチングを行ったが, 今後は現状の表記法に則

った住所を使用して入力ファイルを作成するなど、幾つかの前処理を施した上でアドレスマッチングを行うなど、位置決定精度を向上させるための手法について、さらなる検討を行っていく必要があるものと考える。

4. まとめ

温泉分析書のデータを用いて GIS による空間解析を行うことを想定し、住所情報から位置情報に変換するジオコーディングの位置決定精度に関する検討を行った。検討のためにインターネット上でオープンされている 2 種類のジオコーダーを用いて、別府温泉の 483 源泉の住所情報のアドレスマッチングを行った。その結果、どちらのジオコーダーを用いた場合でも全ての地点について緯度・経度情報を獲得することが出来た。

ジオコーダーにより求められた座標と実際の座標との比較より、全地点数のおよそ 20% については 100m 以内の位置精度を有しており、さらに良く位置が決定された地点では 10m 以内の精度で位置決定がなされている点もあった。その一方で、全体の約 10% については、真の座標から 2km 以上離れた地点で位置決定が行われており、そのままの状況では空間解析に利用することが難しい点を含んでいることも分かった。

プログラムの完成度の向上やデータベースの充実など、GIS を取り巻く環境については日進月歩で進展を遂げている状況にあるため、本調査の結果のみを持って安易な評価を下すことは出来ないが、本調査によって、大量の温泉分析書のデータを一度に扱って、精度の高い解析を行うためには解決すべき課題が残されている状況にあることが示唆された。今後、さらなる検討を加えていくことで、温泉に関連する様々なデータを用いて空間解析を行うための課題や問題点が解消されていくことが期待される。

参考文献・参照 web ページ

朝日考輔・大友翔一・水谷貴行・山手規裕 (2014) : オープンデータ+QGIS 統計・防災・環境情報がひと目でわかる地図の作り方, 技術評論社, 239p.

網田和宏・松田健斗・大沢伸二 (2017) : 九重町の温泉の地化学特性と分布, 大分県温泉調査研究会報告, 68, 23-29.

今木洋大・岡安利治 編著 (2015) : QGIS 入門【第 2 版】, 古今書院, 270p.

橋本雄一 編 (2011) : GIS と地理空間情報 -ArcGIS10 とダウンロードデータの活用-, 古今書院, 154p.

Geocoding Tools & Utilities 位置参照技術を用いたツールとユーティリティ

<<http://newspat.csis.u-tokyo.ac.jp/geocode/>>

【東京大学空間情報科学研究センター公開のジオコーディングサイト, 2017 年, 2018 年, 閲覧および使用】

ExcelGeo エクセルファイルにある住所から一括で緯度経度を取得します

<<http://excelgeo.itdart.org/>>

【ITDART によって公開されているジオコーディングのサイト, 2017 年, 2018 年, 閲覧および使用】

温泉酵母を用いた加水分解コラーゲンの 抗アレルギー効果の検証

株式会社サラヴィオ化粧品 サラヴィオ中央研究所
宮田 光 義・加世田 国与士

要旨

私たちは、温泉酵母の発酵技術を用いてコラーゲンを加水分解した独自の機能性原料(加水分解コラーゲン)を開発しており、この原料にはミトコンドリアの活性化を介して皮膚のバリア機能を正常化させる可能性を見出した。本研究では、バリア機能が深く関連するアレルギー性皮膚疾患に着目し、加水分解コラーゲンを中心とした有用温泉微生物(温泉善玉菌)由来機能性原料の効果を検証した。

加水分解コラーゲンはアレルギー性疾患の発症・悪化に関与するプロテアーゼ活性を濃度依存的に阻害した。また、温泉藻RG92は皮膚のバリア機能を高めるタイトジャンクションタンパク(クローディン1やオクルディン)の遺伝子発現を促進し、一方で、アレルギー増強因子である胸腺間質性リンパ球新生因子の発現は両原料により抑制された。

以上より、これらの温泉微生物由来機能性原料はプロテアーゼによる皮膚バリア機能の低下を予防し、タイトジャンクションタンパクやアレルギー増強因子の発現を正常化することで、アレルギーの発症・悪化を防ぐことが期待される。

1 はじめに

私たちは、別府温泉由来の酵母を用いてコラーゲンを加水分解した独自の機能性原料(加水分解コラーゲン、HC)を開発した。これまでに、温泉酵母HCはミトコンドリアを活性化させて、細胞のエネルギー源となるATPの産生を増加させることで、皮膚細胞の増殖機能や遊走機能を高めることを確認した¹⁾。これらの効果により、HCは皮膚のバリア機能やターンオーバーを正常化させることが示唆された。

アレルギーは、外来の異物(抗原)を認識・排除するための免疫反応が特定の抗原に対して過剰に反応する現象である。代表的なアレルギー疾患として、アトピー性皮膚炎やアレルギー性鼻炎があり、その発症原因の1つにバリア機能の異常が考えられている。皮膚や粘膜のバリア機能が低下すると、抗原が体内へ侵入しやすくなり、アレルギー反応が惹起される。抗原自体にプロテアーゼ活性をもつものもあり²⁾、その活性によりクローディン1やオクルディン等のタイトジャンクションタンパクが分解され、バリア機能が低下する³⁾。さらに、これがトリガーとなって、アレルギー増強因子である胸腺間質性リンパ球新生因子(TSLP)の遺伝子発現が亢進されることも知られている⁴⁾。

本研究ではバリア機能に着目し、HCを中心とした温泉微生物由来機能性原料の抗アレルギー効果を *in vitro* で検証した。

2 調査方法

①プロテアーゼ活性阻害作用の評価

HCあるいは温泉藻RG92エキス(RG92)の存在下・非存在下で培養したヒト皮膚細胞をプロテアーゼ溶液(0.025%トリプシン)で37℃、5分間処理した。培養容器から脱離した細胞を除去し、500μg/mLのMTT試薬で37℃、4時間インキュベートした。ジメチルスルホキシドを加えて、反応生成物であるホルマザンの吸光度(570 nm)を吸光プレートリーダーで測定した。この値から容器に残存する細胞の割合、すなわち、トリプシン活性を評価した。

②アレルギー関連因子の遺伝子発現解析

HCあるいはRG92で24時間処理したヒト皮膚細胞を用いたDNAマイクロアレイ解析を行い、バリア因子とアレルギー増強因子の遺伝子発現量を検討した。

③統計学的解析

データは3回の独立した実験の平均値±標準偏差で示し、Student's *t*-testを用いて統計解析を行った。

3 結果及び考察

①プロテアーゼ活性の阻害作用

培養容器の底面に接着したヒト皮膚細胞をトリプシンで処理すると、タイトジャンクションタンパク等の細胞接着因子が分解され、細胞が底面から脱離し浮遊する。そのため、トリプシンを作用させると、容器底面に残存する細胞が減少する。まず、トリプシン阻害剤存在下では、このプロテアーゼ活性が抑制されることを確認した(図1)。これは、細胞残存率の解析がプロテアーゼ活性の指標となることを示している。この実験系で温泉微生物

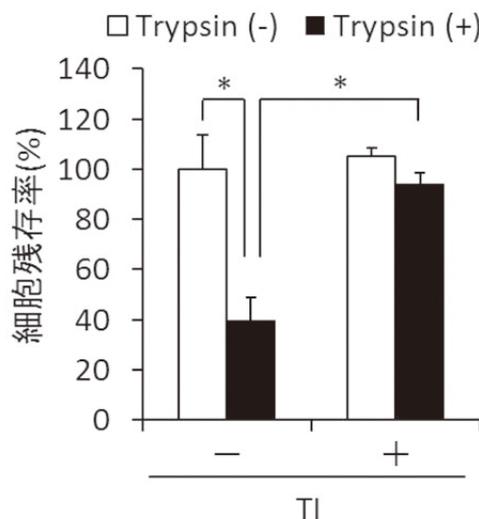


図1 プロテアーゼ活性阻害の評価

トリプシン阻害剤(TI)の存在下、非存在下で、皮膚細胞をトリプシンで処理した。トリプシン活性阻害率はMTTアッセイで容器底面に残存する細胞の割合から算出した。各値は平均値±標準偏差で示した(n=3)。
*, p<0.005

由来機能性原料を評価したところ、HCはトリプシンによる細胞残存率の低下を濃度依存的に抑制した(図2)。つまり、HCはプロテアーゼ活性を阻害することにより、タイトジャンクションタンパクの分解を防ぎ、バリア機能の改善・維持に寄与するものと考えられた。RG92においては、有意な抑制効果はみられなかった(図3)。

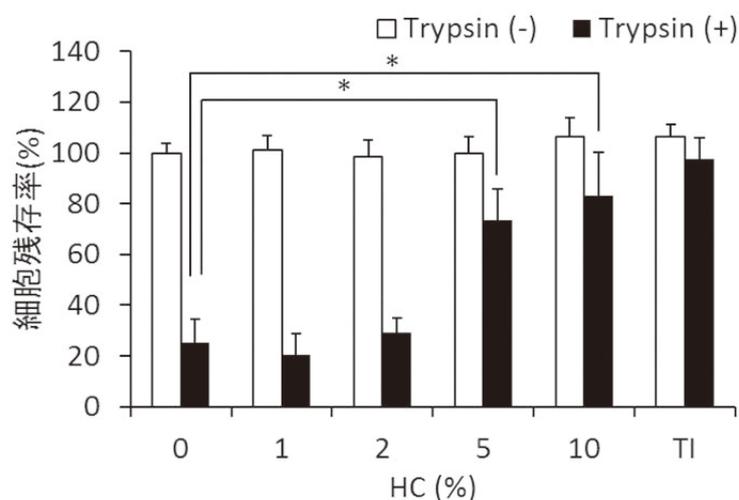


図2 加水分解コラーゲンのプロテアーゼ活性阻害

加水分解コラーゲン(HC)存在下・非存在下で、細胞をトリプシンで処理した。トリプシン活性阻害率はMTTアッセイで容器底面に残存する細胞の割合から算出した。各値は平均値±標準偏差で示した(n=3)。

TI, トリプシン阻害剤; *, p<0.01

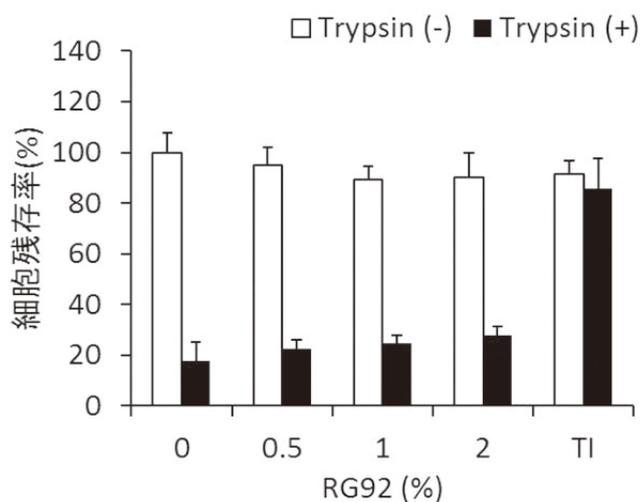


図3 温泉藻RG92のプロテアーゼ活性阻害

温泉藻RG92エキス(RG92)の存在下・非存在下で、細胞をトリプシンで処理した。トリプシン活性阻害率はMTTアッセイで容器底面に残存する細胞の割合から算出した。各値は平均値±標準偏差で示した(n=3)。

TI, トリプシン阻害剤

②バリア因子の発現増強作用

DNAマイクロアレイの解析から、温泉藻RG92はクローディン1(1.7倍)やオクルディン(1.5倍)といったタイトジャンクションタンパクの遺伝子発現を増加させることが判明した。クローディン1は、転写因子Sp1やWNT/ β カテニン/リンパ系エンハンサー因子(LEF)シグナルを介して発現が誘導されることが知られており^{5,6)}、これらに関する各種因子の遺伝子発現もRG92により増加していた。また、以前私たちはRG92がオクルディンの発現を抑制するTNF- α のmRNAレベルを減少させることも見出しており^{7,8)}、今回の結果が支持された。

したがって、RG92は転写因子(Sp1, LEF-1)やWNTシグナルの増加、TNF- α のオートクリン・パラクリンの低下などの様々な分子機構を介してタイトジャンクションタンパクの発現を増加することが示唆された。

③アレルギー増強因子の発現抑制作用

HCとRG92はアレルギー増強因子であるTSLPの遺伝子発現をそれぞれ93%、94%抑制することが判明した。TSLPは、転写因子レチノイドX受容体(RXR)によって発現が抑制されることが知られており⁹⁾、RXR γ の遺伝子発現はHCにより2.3倍に増加していることも見出された。また、私たちは、これまでにRG92がROS-NF- κ Bを介して炎症性サイトカインを抑制することを明らかにしている^{7,10)}。NF- κ Bの活性化に伴いTSLPの発現も増加することが知られていることから¹¹⁾、今回の結果との関係性が示唆された。

これらの結果から、HCとRG92はそれぞれRXR γ 発現亢進、NF- κ Bの活性抑制という異なるメカニズムによってTSLPの発現を減少させるものと考えられる。

4 まとめ

温泉酵母HCはプロテアーゼ活性を阻害し、温泉藻RG92はタイトジャンクションタンパクの遺伝子発現を促すことから、皮膚バリア機能を改善することが示唆された。加えて、HCとRG92はそれぞれRXR γ の遺伝子発現とNF- κ B活性を制御しTSLPの発現を抑制することで、アレルギーの惹起・悪化を防ぐと考えられる。私たちはヒトモニター試験でHCとRG92を配合したローションがアトピー性皮膚炎や敏感肌の症状を改善することを示しており¹⁾、今回示した作用メカニズムが関与しているものと考えられる。

総じて、温泉善玉菌HCとRG92はアレルギー性皮膚炎に代表されるアレルギー疾患の予防・改善に有用であることが示唆された。

(参考文献)

- 1) 御筆千絵ら、温泉酵母を用いた加水分解コラーゲン-エネルギー再生機構の促進による肌の再生、*FRAGRANCE JOURNAL*, 44(12):38-43 (2016).
- 2) Gunawan H et al., Protease activity of allergenic pollen of cedar, cypress, juniper, birch and ragweed. *Allergol Int.* 57(1):83-91 (2008).
- 3) Kale SL et al., Cockroach protease allergen induces allergic airway inflammation via epithelial cell activation. *Sci Rep.* 7:42341 (2017).

- 4) Kouzaki H et al., Proteases induce production of thymic stromal lymphopoietin by airway epithelial cells through protease-activated receptor-2. *J Immunol.* 183(2):1427-34 (2009).
- 5) Khan N et al., Transcriptional regulators of claudins in epithelial tight junctions. *Mediators Inflamm.* 2015:219843 (2015).
- 6) Miwa N et al., Involvement of claudin-1 in the beta-catenin/Tcf signaling pathway and its frequent upregulation in human colorectal cancers. *Oncol Res.* 12(11-12):469-76 (2001).
- 7) Miyata M *et al.*, A novel *Mucidosphaerium* sp. from Beppu hot spring down-regulates inflammatory gene expression in skin and articular cells. *Altern Ther Health Med.* (in press)
- 8) Mankertz J et al., Expression from the human occludin promoter is affected by tumor necrosis factor α and interferon γ . *J Cell Sci.* 113(Pt 11):2085-90 (2000).
- 9) Takai T. TSLP expression: cellular sources, triggers, and regulatory mechanisms. *Allergol Int.* 61(1):3-17 (2012).
- 10) Miyata M *et al.*, Advanced glycation end-products inhibit mesenchymal-epidermal interaction by up-regulating proinflammatory cytokines in hair follicles. *Eur J Dermatol.* 25(4):359-61 (2015).
- 11) Lee HC et al., Inducible expression of the proallergic cytokine thymic stromal lymphopoietin in airway epithelial cells is controlled by NFkappaB. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 104(3):914-9 (2007).
- 12) 宮田光義ら、温泉藻類RG92による健康と美容の促進効果、*FRAGRANCE JOURNAL*, 44(5): 36-43 (2016).

大分県温泉調査研究会会則

第1条 この会則は、大分県温泉調査研究会（以下「研究会」という。）の組織及び運営に関し必要な事項を定めるものとする。

第2条 研究会の事務局を大分県生活環境部自然保護推進室内に置く。

第3条 研究会は大分県内における温泉の科学的調査研究をして公共の福祉の増進に寄与することを目的とする。

第4条 研究会は前条の目的を達成するために下記の事業を行う。

- (1) 温泉脈及び温泉孔の分布状況調査
- (2) 噴気に関する研究調査
- (3) 温泉に対する影響圏の調査
- (4) 化学分析による温泉調査
- (5) 療養的価値よりみたる温泉の調査
- (6) 温泉に関する図書及び機関紙の発行
- (7) その他研究会の目的達成に必要な事業

第5条 研究会は下記の構成員をもって組織する。

- (1) 学識経験者
- (2) 県及び温泉所在地市町村の代表
- (3) 関係行政庁の吏員
- (4) 本研究会の趣旨に賛同する団体及び個人

第6条 研究会の役員は下記のとおりとし、総会によって選任する。

- (1) 会 長 1名
- (2) 副 会 長 2名
- (3) 常務理事 1名
- (4) 理 事 若干名
- (5) 監 事 2名

2 役員任期は2年とする。ただし、役員に欠員を生じた場合の補欠役員の任期は前任者の残任期間とする。

第7条 会長は会務を総理し、会議の議長となる。

- 2 会長に事故のあるときは副会長が、会長及び副会長に事故があるときは常務理事がその職務を代理する。
- 3 常務理事は会長を補佐して研究会の庶務に従事する。ただし、研究会の会計事務は常務理事が処理するものとする。
- 4 理事は会務に従事する。
- 5 監事は会計を監査する。

第8条 研究会に顧問を置くことができる。

- (1) 顧問は役員会の承認を得て会長が委嘱する。この場合、総会に報告しなければならない。
- (2) 顧問は研究会の事業について会長の諮問に応ずるものとする。

第9条 研究会に下記の職員を置く。

- (1) 書記若干名
- (2) 書記は会長が任命又は委嘱する。
- (3) 書記は上司の指示を受け庶務に従事する。

第10条 会議は総会及び役員会とする。

第11条 総会は会長が招集する。

- 2 総会は通常総会及び臨時総会とし、臨時総会は会長が必要と認めたとき、又は会員の5分の1の請求があったときに招集する。
- 3 総会の招集は開会の5日前までに会員に届くように会議に付議する事項、日時及び場所を通知しなければならない。

第12条 総会において下記の事項を議決する。

- (1) 会則の変更
- (2) 役員を選出
- (3) 予算及び事業計画
- (4) 解散
- (5) その他重要事項

第13条 総会は会員の過半数が出席しなければ議事を開き議決することはできない。

- 2 議事は出席会員の過半数で決し、可否同数のときは議長の決するところによる。
- 3 議事に関しては議事録を調整し、会長の指名した2名以上の者がこれに署名しなければならない。

第14条 下記の事項について会長は専決することができる。

- (1) 総会の議決事項であっても軽易な事項
 - (2) 緊急を要する事項
 - (3) 会員の入会・退会
- 2 下記の事項については総会に報告し、承認を得なければならない。
- (1) 前項の専決事項
 - (2) 前年度の事業及び決算

第15条 役員会は会長が招集する。

- 2 役員会は総会に付議する事項、顧問の推薦、その他会長が必要と認める事項を審議する。

第16条 第14条第1項及び第2項の規定は役員会に準用する。

第17条 研究会は議事遂行上必要がある場合は、専門委員会を設けることができる。

- 2 前項の委員会に関する事項は総会で決定する。

第18条 研究会の経費は負担金及び補助金、委託料、寄附金等その他の収入をもってこれにあてる。

第19条 研究会の会計年度は毎年4月1日から始まり翌年3月31日に終わる。

- 2 年度における余剰金は翌年度に繰越すことができる。
- 3 会計証拠書類は5年間保存する。

附 則

前条の規定にかかわらず、昭和24年度の会計年度は6月1日から始めるものとする。

附 則

この会則の改正は、昭和46年4月1日から適用する。

この会則の改正は、昭和48年4月1日から適用する。

この会則の改正は、平成2年4月1日から適用する。

この会則の改正は、平成7年5月1日から適用する。

この会則の改正は、平成9年4月1日から適用する。

この会則の改正は、平成16年4月1日から適用する。

この会則の改正は、平成18年4月1日から適用する。

この会則の改正は、平成21年8月3日から適用する。

この会則の改正は、平成26年8月27日から適用する。

この会則の改正は、平成28年8月26日から適用する。

大分県温泉調査研究会会員名簿（順不同）

（平成30年7月1日現在）

所 属 ・ 職 名	氏 名	備考
京都大学 名誉教授	由 佐 悠 紀	会 長
大分大学 名誉教授	川 野 田 實 夫	副 会 長
大分県生活環境部自然保護推進室 室長	橋 本 昌 樹	副 会 長
大分県生活環境部自然保護推進室 室長補佐（総括）	河 野 淳 一	常務理事
九州大学 名誉教授	矢 永 尚 士	
仁泉会畑病院 介護老人保健施設メディケア別府 施設長	安 田 正 之	
九州大学 名誉教授	牧 野 直 樹	理 事
九州大学病院別府病院内科 教授	堀 内 孝 彦	
九州大学病院別府病院内科 准教授	前 田 豊 樹	
元岡山理科大学理学部基礎理学科 教授	北 岡 豪 一	
立正大学地球環境科学部 教授	河 野 忠	
大分大学教育学部 准教授	大 上 和 敏	理 事
京都大学名誉教授	竹 村 恵 二	
京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設 教授	大 沢 信 二	理 事
京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設 准教授	柴 田 智 郎	
北海道大学総合博物館 准教授	山 本 順 司	
広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻地球惑星化学グループ 教授	柴 田 知 之	
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	三 島 壯 智	
広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻 研究員	芳 川 雅 子	
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 助教	宇 津 木 充	
京都大学名誉教授・阿蘇ジオパーク推進協議会地球科学専門員	鍵 山 恒 臣	
龍谷大学経済学部 専任講師	山 田 誠	
日鉄鉱業株式会社	酒 井 拓 哉	
秋田大学大学院理工学研究科システムデザイン工学専攻 土木環境工学コース	網 田 和 宏	
GERD 地熱技術開発株式会社 技術部	長 谷 英 彰	
別府ONSEN地療法研究会（畑病院）	畑 洋 一	
別府ONSEN地療法研究会（畑病院）	畑 知 二	
大分大学医学部 精神神経医学 教授	寺 尾 岳	
大分大学医学部 講師	塩 月 一 平	
元大分大学医学部	青 野 裕 士	
別府大学国際経営学部国際経営学科 教授	中 山 昭 則	
立命館アジア太平洋大学 アジア太平洋学部 准教授	マヒチ・ファエゼ	
東海大学海洋学部 教授	齊 藤 雅 樹	
(株)サラヴィオ化粧品専務取締役兼サラヴィオ中央研究所 所長	加世田 国与士	
公益社団法人大分県薬剤師会 会長	安 東 哲 也	
公益社団法人大分県薬剤師会検査センター 施設環境課 課長	古 庄 敏 昭	
タナベ環境工学(株) 代表取締役	藤 澤 剛	
タナベ環境工学(株) 環境部 部長	後 藤 弘 樹	
タナベ環境工学(株) 環境調査課 課長代理	相 垣 明 子	
松尾機器産業(株) 代表取締役	松 尾 隆	
松尾機器産業(株) 技術営業部 部長	吉 田 篤 史	
松尾機器産業(株) 技術営業部	西 平 博 美	
環境工研(株) 代表取締役	松 尾 広 暁	
環境工研(株) 技術営業部	秋 月 香 菜 子	

所 属 ・ 職 名	氏 名	備考
環境工研(株) 技術営業部	深 見 友 貴	
九電産業(株) 環境部 取締役環境部長	佐 藤 信 治	
九電産業(株) 環境部 地熱グループマネージャー	西 村 眞 吾	
九電産業(株) 環境部 課長	能 登 征 美	
九電産業(株) 環境部	小 野 光 一	
(株)住化分析センター 大分ラボラトリー環境科学グループ サブリーダー	深 浦 友 美	
(株)住化分析センター 大分ラボラトリー環境科学グループ	長 屋 敦	
一般財団法人 九州環境管理協会 技術部長	川 村 秀 久	
一般財団法人 九州環境管理協会 先進領域課長	芦 川 信 雄	
一般財団法人 九州環境管理協会 品質管理課長	天 日 美 薫	
一般財団法人 九州環境管理協会 分析試験課長	右 田 義 臣	
一般財団法人 九州環境管理協会 環境調査課長	小 野 孝	
大 分 市 長	佐 藤 樹 一 郎	理 事
別 府 市 長	長 野 恭 紘	理 事
中 津 市 長	奥 塚 正 典	
日 田 市 長	原 田 啓 介	理 事
臼 杵 市 長	中 野 五 郎	
竹 田 市 長	首 藤 勝 次	理 事
杵 築 市 長	永 松 悟	
宇 佐 市 長	是 永 修 治	
由 布 市 長	相 馬 尊 重	理 事
国 東 市 長	三 河 明 史	
九 重 町 長	日 野 康 志	理 事
玖 珠 町 長	宿 利 政 和	
別府市観光戦略部温泉課 課長	若 杉 圭 介	監 事
別府市観光戦略部温泉課 参事	中 村 賢 一 郎	
大分県東部保健所 所長	内 田 勝 彦	監 事
大分県東部保健所 次長	今 仁 淳 一	
大分県衛生環境研究センター 所長	森 下 昌 勅	理 事
大分県衛生環境研究センター微生物担当 専門研究員 (総括)	成 松 浩 志	
大分県衛生環境研究センター微生物担当 主幹研究員	後 藤 高 志	
大分県衛生環境研究センター微生物担当 主幹研究員	神 田 由 子	
大分県衛生環境研究センター微生物担当 主任研究員	佐々木 麻 里	
大分県衛生環境研究センター水質担当 主幹研究員 (総括)	後 藤 郁 夫	
大分県衛生環境研究センター水質担当 主幹研究員	柳 明 洋	
大分県衛生環境研究センター水質担当 主任研究員	山 崎 信 之	
大分県衛生環境研究センター水質担当 主任研究員	秋 吉 貴 太	
大分県衛生環境研究センター水質担当 研究員	久保田 桃 子	

(会員数 82名)

書 記

所 属 ・ 職 名	氏 名	備考
大分県生活環境部自然保護推進室 主幹	大久保 博 子	
大分県生活環境部自然保護推進室 主事	水 嶋 孝 介	
大分県生活環境部自然保護推進室 非常勤職員	安 部 弘	

(書記 3名)

大分県温泉調査研究会報告 第69号

平成30年8月 印刷
平成30年8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
自然保護推進室内(事務局)
T E L 097-506-3025
F A X 097-506-1749

印 刷 有限会社 秀 栄 社
〒870-0901 大分市西新地2丁目3番34号
T E L 097-551-8780

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。